令和２年度二酸化炭素貯留適地調査事業委託業務

報告書

令和４年１月

日本ＣＣＳ調査株式会社

令和２年度二酸化炭素貯留適地調査事業委託業務　報告書

目　　次

英語サマリー

第１章　事業の背景と目的 ……1-1

第２章　事業の概要 ……2-1

2.1　二酸化炭素貯留適地調査に係る弾性波探査の実施 ……2-1

2.2　二酸化炭素貯留適地調査に係る調査・解析・検討の実施 ……2-1

2.3　2021 年度以降の調査候補地点の選定および調査計画（案）の作成 ……2-2

2.4　社会的受容性の醸成活動 ……2-2

2.5　有識者委員会の開催、報告書の作成等 ……2-2

第３章　二酸化炭素貯留適地調査に係る弾性波探査の実施 ……3-1

3.1　概要 ……3-1

3.2　酒田沖 ……3-2

3.2.1　基礎物理探査の 2D 探査データの再処理 ……3-2

(1)　対象データの概要 ……3-2

(2)　データ再処理の概要 ……3-2

(3)　データ再処理の詳細（基礎物理探査「秋田・山形・新潟・陸棚エアガン」） ……3-5

(4)　データ再処理の詳細（基礎物理探査「北海道西部～新潟海域」） ……3-11

(5)　データ再処理の詳細（基礎物理探査「西津軽～新潟沖」） ……3-17

(6)　デジタイズ処理＋マイグレーション処理の詳細 ……3-23

(7)　考察 ……3-25

3.2.2　民間の 2D 探査データの再処理 ……3-28

(1)　対象データの概要 ……3-28

(2)　データ再処理の概要 ……3-28

(3)　データ再処理の詳細 ……3-29

(4)　考察 ……3-35

3.2.3　公的機関の 2D 探査データの再処理 ……3-37

(1)　対象データの概要 ……3-37

(2)　データ再処理の概要 ……3-37

(3)　データ再処理の詳細 ……3-38

(4)　考察……3-45
3.3　京都－福井沖 ……3-47
3.3.1　2D 探査の実施……3-47
(1)　探査位置……3-47
(2)　探査期間……3-49
(3)　探査工程……3-50
(4)　探査詳細……3-52
(5)　データ取得結果……3-57
3.3.2　2D 探査データの処理……3-76
(1)　データ処理の概要……3-76
(2)　データ処理の基本仕様……3-76
(3)　データ処理のフローチャート……3-77
(4)　データ処理の詳細……3-78
(5)　考察……3-124
3.3.3　既存 2D 探査データの再処理……3-126
(1)　基礎物理探査の 2D 探査データの再処理……3-126
(2)　公的機関の 2D 探査データの再処理……3-130
3.4　弾性波探査データの整理状況と再処理成果の移管状況……3-140
3.4.1　貯留適地調査事業の 2D/3D 探査データ ……3-140
3.4.2　基礎物理探査の 2D/3D 探査データ（再処理） ……3-142
第 4 章　二酸化炭素貯留適地調査に係る調査・解析・検討の実施……4-1
4.1　概要……4-1
4.1.1　地質解析と貯留適地評価 ……4-1
4.1.2　その他の業務 ……4-2
4.2　地表地質調査試料分析（日高沖）……4-3
4.2.1　概要……4-3
4.2.2　調査・分析試験内容 ……4-3
(1)　地表地質調査および分析試料採取……4-3
(2)　試料分析項目および手法……4-4
4.2.3　地表調査および分析試料採取結果……4-12
(1)　平取軽舞層……4-14
(2)　荷菜層……4-24
(3)　地表調査まとめ……4-29
4.2.4　試料分析結果 ……4-30

(1)　岩石鉱物分析 ……4-31
(2)　貯留岩分析 ……4-51
(3)　遮蔽岩分析 ……4-56
(4)　岩石物性分析 ……4-60
4.2.5　考察 ……4-62
(1)　後背地の検討 ……4-62
(2)　最大埋没深度の推定 ……4-65
(3)　炭酸塩セメントの成因 ……4-67
4.2.6　評価 ……4-68
(1)　貯留岩能力評価 ……4-68
(2)　遮蔽岩能力評価 ……4-71
4.3　地表地質調査試料分析（京都－福井沖） ……4-78
4.3.1　概要 ……4-78
4.3.2　調査・分析試験内容 ……4-79
(1)　地表地質調査および分析試料採取 ……4-79
(2)　試料分析項目および手法 ……4-79
4.3.3　地表調査および分析試料採取結果 ……4-87
(1)　糸生層 ……4-90
(2)　国見層 ……4-92
(3)　河南層 ……4-99
(4)　荒谷層 ……4-102
(5)　地表調査まとめ ……4-105
4.3.4　試料分析結果 ……4-106
(1)　岩石鉱物分析 ……4-107
(2)　貯留岩分析 ……4-126
(3)　遮蔽岩分析 ……4-130
(4)　岩石物性分析 ……4-134
4.3.5　考察 ……4-137
(1)　砂岩組成の変化と後背地の検討 ……4-137
(2)　最大埋没深度の推定 ……4-140
(3)　玄武岩貫入による続成作用の逆転 ……4-142
(4)　岩石鉱物分析結果を用いた貯留岩試料の分類 ……4-144
4.3.6　評価 ……4-146
(1)　貯留岩能力評価 ……4-146
(2)　遮蔽岩能力評価 ……4-149
4.4　海底地形判読および海底地質情報コンパイル（日高沖） ……4-157

4.4.1　概要 ……4-157
4.4.2　海底地形および海底地質情報に係るデータの収集 ……4-158
4.4.3　海底地形モデルの作成 ……4-160
4.4.4　海底地形判読 ……4-160
(1)　海底地形の特徴 ……4-160
(2)　海底地形の特徴と浅部地下構造の関係の把握 ……4-162
4.4.5　海底地形情報と海底地質情報のコンパイル ……4-162
4.5　海底地形判読および海底地質情報コンパイル（本荘沖） ……4-165
4.5.1　作業概要 ……4-165
4.5.2　海底地形および海底地質情報に係るデータの収集 ……4-167
4.5.3　海底地形モデルの作成 ……4-169
4.5.4　海底地形判読 ……4-170
(1)　海底地形の特徴 ……4-170
(2)　海底地形の特徴と浅部地下構造の関係の把握 ……4-171
4.5.5　海底地形情報と海底地質情報のコンパイル ……4-171
4.6　海底地形判読および海底地質情報コンパイル（佐渡西方沖） ……4-173
4.6.1　作業概要 ……4-173
4.6.2　海底地形および海底地質情報に係るデータの収集 ……4-174
4.6.3　海底地形モデルの作成 ……4-176
4.6.4　海底地形判読 ……4-177
(1)　海底地形の特徴 ……4-177
(2)　海底地形の特徴と浅部地下構造の関係の把握 ……4-179
4.6.5　海底地形情報と海底地質情報のコンパイル ……4-179
4.7　地質解析と貯留適地評価（日高沖） ……4-182
4.7.1　概要 ……4-182
(1)　調査範囲 ……4-182
(2)　使用データ ……4-183
4.7.2　一般地質 ……4-184
(1)　地質概要 ……4-184
(2)　地質層序 ……4-185
(3)　地質構造および構造発達史 ……4-187
(4)　活断層および地震活動 ……4-187
4.7.3　地質構造解析 ……4-188
(1)　解析ホライズンの設定 ……4-188
(2)　解析ホライズンの特徴 ……4-190

(3)　断層の解析 ……4-192
(4)　深度変換手法 ……4-192
(5)　時間構造図および深度構造図 ……4-193
(6)　層厚分布および構造発達史 ……4-195
4.7.4　堆積相解析 ……4-196
(1)　堆積相解析手法 ……4-196
(2)　サイスミックファシス区分 ……4-197
(3)　堆積システムおよび供給系の解釈結果 ……4-199
4.7.5　貯留層層準と遮蔽層層準の設定 ……4-205
4.7.6　貯留可能量の算定 ……4-205
(1)　CO_2 超臨界深度 ……4-205
(2)　CO_2 貯留可能量の算定式 ……4-205
(3)　貯留可能域の検討および貯留可能量評価 ……4-206
4.7.7　調査井の検討 ……4-209
4.8　地質解析と貯留適地評価（本荘沖） ……4-211
4.8.1　調査地点概要と使用データ ……4-211
(1)　調査地点概要 ……4-211
(2)　使用データおよび使用ソフトウェア ……4-213
4.8.2　一般地質 ……4-214
(1)　地質概要 ……4-214
(2)　地質層序 ……4-215
(3)　地質構造および構造発達史 ……4-217
(4)　活断層および地震活動 ……4-218
4.8.3　地質構造解析 ……4-220
(1)　解析ホライズンの設定 ……4-220
(2)　解析ホライズンの特徴 ……4-222
(3)　断層の解析 ……4-224
(4)　深度変換手法 ……4-224
(5)　時間構造図および深度構造図 ……4-225
(6)　層厚分布および構造発達史 ……4-226
4.8.4　堆積相解析 ……4-228
(1)　堆積相解析手法 ……4-228
(2)　サイスミックファシス区分 ……4-229
(3)　堆積システムおよび供給系の解釈結果 ……4-234
4.8.5　貯留層層準と遮蔽層層準の設定 ……4-236
4.8.6　貯留可能量の算定 ……4-237

(1) CO_2超臨界深度 ……4-237
(2) CO_2貯留可能量の算定式 ……4-237
(3) 貯留可能域の検討および貯留可能量評価 ……4-238
(4) 本荘沖地点および秋田沖地点における貯留可能域および貯留可能量 ……4-240
4.8.7 調査井の検討 ……4-240
4.9 地質解析と貯留適地調査（佐渡西方沖） ……4-243
4.9.1 概要 ……4-243
(1) 調査範囲 ……4-243
(2) 使用データ ……4-244
4.9.2 一般地質 ……4-244
(1) 地質概要 ……4-244
(2) 地質層序 ……4-245
(3) 地質構造および構造発達史 ……4-245
(4) 活断層および地震活動 ……4-250
4.9.3 地質構造解析 ……4-251
(1) 解析ホライズンの設定 ……4-251
(2) 解析ホライズンの特徴 ……4-251
(3) 断層の解析 ……4-253
(4) 深度変換手法 ……4-256
(5) 時間構造図および深度構造図 ……4-256
(6) 層厚分布および構造発達史 ……4-260
4.9.4 堆積相解析 ……4-261
(1) 堆積相解析手法 ……4-261
(2) サイスミックファシス区分 ……4-262
(3) 堆積システムおよび供給系の解釈結果 ……4-264
4.9.5 貯留層層準と遮蔽層層準の設定 ……4-265
4.9.6 貯留可能量の算定 ……4-265
(1) CO_2超臨界深度 ……4-265
(2) CO_2貯留可能量の算定式 ……4-266
(3) 貯留可能域の検討および貯留可能量評価 ……4-267
4.9.7 調査井の検討 ……4-270
4.10 地質解析と貯留適地調査（鳥取沖） ……4-273
4.10.1 概要 ……4-273
(1) 調査範囲 ……4-273
(2) 使用データ ……4-274
4.10.2 地質 ……4-274

(1) 地質概要 …… 4-274
(2) 地質構造発達史 …… 4-274
(3) 断層分布 …… 4-276
4.10.3 地質構造解析 …… 4-278
(1) 坑井地質層序 …… 4-278
(2) 坑井における貯留層層準および遮蔽層層準 …… 4-278
(3) 解析ホライズンの設定 …… 4-279
(4) ホライズン追跡 …… 4-280
(5) 断層の分布 …… 4-281
(6) 地質構造発達史 …… 4-281
4.10.4 堆積相解析 …… 4-282
(1) ファシスマップ …… 4-282
(2) 解釈結果 …… 4-285
4.10.5 貯留層層準と遮蔽層層準の評価 …… 4-288
(1) 貯留層層準の評価 …… 4-288
(2) 遮蔽層層準の評価 …… 4-289
4.10.6 貯留可能量評価 …… 4-289
4.10.7 評価 …… 4-290
4.11 地質解析と貯留適地評価（茨城沖北部） …… 4-292
4.11.1 概要 …… 4-292
(1) 調査範囲 …… 4-292
(2) 使用データ …… 4-293
4.11.2 解析ホライズンの設定と地質構造解析 …… 4-293
(1) 貯留層層準および遮蔽層層準の設定 …… 4-293
(2) 解析ホライズンの設定 …… 4-294
(3) 地質構造解析 …… 4-295
(4) 深度変換 …… 4-296
(5) 等層厚線図 …… 4-296
(6) 地質構造発達史 …… 4-297
4.11.3 堆積相解析 …… 4-299
(1) RMS 振幅分布 …… 4-301
(2) ファシスインデックス …… 4-301
(3) サイスミックファシス …… 4-301
(4) 解析結果 …… 4-304
4.11.4 貯留可能量評価 …… 4-305
(1) 貯留層評価 …… 4-305

(2)　貯留可能域の抽出 ……4-306
(3)　貯留可能量の計算 ……4-306
4.11.5　調査井の検討 ……4-308
4.11.6　評価 ……4-308
4.12 貯留槽シミュレーションによる貯留可能性検討（本荘沖の南部） ……4-310
4.12.1　概要 ……4-310
(1)　調査範囲 ……4-311
(2)　使用データ ……4-312
4.12.2　地質モデルの作成 ……4-313
(1)　構造モデルの作成 ……4-313
(2)　グリッドモデルの作成 ……4-315
(3)　ファシス設定 ……4-315
(4)　貯留層・遮蔽層にかかる物性値 ……4-317
(5)　地層破壊圧力 ……4-329
4.12.3　CO_2 挙動予測シミュレーションモデルの作成 ……4-333
(1)　貯留エリアの設定および坑井の設定 ……4-333
(2)　圧入制限条件 ……4-333
(3)　境界条件 ……4-334
4.12.4　最大貯留可能量の事前検討 ……4-335
(1)　圧入条件 ……4-335
(2)　遮蔽層下端の圧力挙動（事前検討１） ……4-336
(3)　遮蔽層下端の圧力挙動（事前検討２） ……4-337
(4)　坑底圧力および圧入レート推移 ……4-338
(5)　CO_2 飽和率の分布 ……4-340
(6)　溶存 CO_2 量の分布 ……4-341
(7)　貯留形態の割合推移 ……4-341
(8)　仕上げ区間、圧入レートを変更した場合の溶存 CO_2 量分布の検討 ……4-341
(9)　最大貯留可能量の事前検討まとめ ……4-342
4.12.5　最大貯留可能量（5 坑井ケース）の検討 ……4-342
(1)　圧入条件 ……4-342
(2)　制限条件 ……4-343
(3)　圧入レート、圧入量および坑底圧力推移 ……4-343
(4)　貯留層の圧力挙動 ……4-345
(5)　CO_2 飽和率の分布 ……4-346
(6)　溶存 CO_2 量の分布 ……4-347
(7)　貯留形態の割合推移 ……4-347

(8)　最大貯留可能量（5 坑井ケース）の検討まとめ ……4-348
4.12.6　最大貯留可能量（10 坑井ケース）の検討 ……4-348
(1)　圧入条件 ……4-348
(2)　制限条件 ……4-349
(3)　圧入レート、圧入量および坑底圧力推移 ……4-350
(4)　貯留層の圧力挙動 ……4-351
(5)　CO_2 飽和率の分布 ……4-352
(6)　溶存 CO_2 量の分布 ……4-353
(7)　貯留形態の割合推移 ……4-353
(8)　最大貯留可能量（10 坑井ケース）の検討まとめ ……4-354
4.12.7　まとめと今後の課題 ……4-354
(1)　まとめ ……4-354
(2)　今後の課題 ……4-355
4.13 貯留層シミュレーションによる貯留可能性検討（佐渡西方沖） ……4-358
4.13.1　概要 ……4-359
(1)　調査範囲 ……4-359
(2)　使用データ ……4-360
4.13.2　地質モデルの作成 ……4-360
(1)　構造モデルの作成 ……4-360
(2)　ファシス設定 ……4-362
(3)　貯留層・遮蔽層にかかる物性値 ……4-363
4.13.3　CO_2 挙動予測シミュレーションモデルの設定 ……4-372
(1)　貯留エリアと圧入井の設定 ……4-372
(2)　圧入制限条件 ……4-373
(3)　圧入条件の検討 ……4-374
(4)　エリア A 選定の検討 ……4-376
(5)　エリア B 選定の検討 ……4-376
(6)　ベースケースの計算結果 ……4-383
4.13.4　最小坑井数、最大圧入レートおよび最大圧入量の検討 ……4-386
4.13.5　リスク感度分析 ……4-387
(1)　地層圧を変化させたケース ……4-387
(2)　浸透率を変化させたケース ……4-392
(3)　Kv/Kh を変化させたケース ……4-396
(4)　塩分濃度を変化させたケース ……4-399
(5)　ワーストケース ……4-401
(6)　感度分析のまとめ ……4-404

4.13.6 まとめと課題 ……4-406

第5章 2021年度以降の調査候補地点の選定および調査計画（案）の作成……5-1

5.1 貯留適地調査の経緯と調査候補地点の見直し……5-1

5.2 調査候補地点の選定（総合評価）……5-3
5.2.1 調査地点の評価方法（技術要素）……5-3
5.2.2 調査地点の評価方法（外的要素と総合評価）……5-5
(1) 総合評価SAの調査地点……5-6
(2) 総合評価ADの調査地点……5-6
(3) 総合評価Sの調査地点……5-7
(4) 総合評価Aの調査地点……5-9
(5) その他の調査地点……5-10
5.2.3 総合評価結果（2020年度末）……5-10

5.3 2021年度以降の調査計画（案）の作成……5-16
5.3.1 基本方針……5-16
5.3.2 貯留適地調査の進め方……5-18
5.3.3 2021年度以降の調査計画（案）……5-20

5.4 適地調査地点のデータ管理方法の検討……5-22

第6章 社会的受容性の醸成活動……6-1

6.1 概要……6-1

6.2 いしかわ環境展……6-2
6.2.1 実施目的……6-2
6.2.2 実施戦略……6-2
6.2.3 開催実績……6-3
6.2.4 考察……6-5

6.3 総括……6-5

第7章 有識者委員会の運営……7-1

7.1 有識者委員会の目的と設置……7-1

7.2 委員構成および基本的な運営方針……7-1

7.3 開催実績……7-2
7.3.1 第1回有識者委員会……7-2
7.3.2 第2回有識者委員会……7-3

7.3.3　第 3 回有識者委員会 ……7-4
7.4　検討内容の概要 ……7-4
7.4.1　第 1 回有識者委員会 ……7-4
(1)　平成３０年度二酸化炭素貯留適地調査事業委託業務 ……7-4
(2)　平成３１年度二酸化炭素貯留適地調査事業委託業務（繰越含）報告 ……7-4
(3)　令和２年度二酸化炭素貯留適地調査事業委託業務報告 ……7-12
7.4.2　第 2 回有識者委員会 ……7-15
(1)　二酸化炭素貯留適地調査事業委託業務進捗報告 ……7-15
(2)　平成３１年度二酸化炭素貯留適地調査事業委託業務（繰越）報告 ……7-15
(3)　令和２年度二酸化炭素貯留適地調査事業委託業務報告 ……7-17
(4)　2021 年度以降の貯留適地調査計画（案） ……7-24
7.4.3　第 3 回有識者委員会 ……7-26
(1)　令和２年度二酸化炭素貯留適地調査事業委託業務（繰越）報告 ……7-26

第８章　まとめと課題 ……8-1
8.1　本業務の成果 ……8-1
8.1.1　2D/3D 探査の実施 ……8-1
8.1.2　二酸化炭素貯留適地調査に係る調査・解析・検討の実施 ……8-1
(1)　地表地質調査と試料分析（日高沖および京都―福井沖） ……8-1
(2)　海底地形判読および海底地質情報コンパイル ……8-2
(3)　地質解析と貯留適地評価 ……8-2
(4)　調査井掘削前 CO_2 挙動予測シミュレーションによる貯留可能性検討 ……8-3
(5)　報告書 ……8-3
8.1.3　2021 年度以降の調査候補地点の選定および調査計画（案）の作成 ……8-3
(1)　貯留適地調査地点の総合評価 ……8-3
(2)　貯留適地調査の 2021 年度の予定 ……8-4
8.1.4　その他 ……8-4
(1)　社会的受容性の醸成活動 ……8-4
(2)　有識者委員会の運営 ……8-4
8.2　課題 ……8-5
8.2.1　事業の進捗状況 ……8-5
8.2.2　社会的受容性の醸成 ……8-5

附属書１　用語集

英語サマリー

Summary of Fiscal 2020 Works

The project of “Investigation of Potential Sites for CO_2 Storage in Japan” has been commissioned by the Ministry of the Environment (MOE) and the Ministry of Economy, Trade and Industry (METI). The fiscal 2020 works comprised a new seismic survey at a location which had been selected as a high priority area based on the results of the fiscal 2019 works, and the investigation of 5 potential CO_2 storage sites offshore Japan using existing exploration data.

The new 2D seismic survey was conducted in the waters off Kyoto-Fukui. The purpose of the survey was to obtain seismic data for further geological analysis and evaluation of potential CO_2 storage capacity in the "Kyoto-Fukui-oki" study area, where the existence of thick sedimentary layers was expected based on the geological analysis previously conducted by MOE in 2013. The number of 2D seismic lines was 19 and total length of the lines was 1460km.

2D seismic data previously acquired off Kyoto-Fukui and Sakata by Japan Oil, Gas and Metals National Corporation (JOGMEC) or Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology (JAMSTEC) were reprocessed in 2020 for further geological evaluation of the "Akita-oki", "Honjo-oki" and "Kyoto-Fukui-oki" study areas, respectively.

Geological analyses were conducted in the "Tottori-oki", "Sado-seihou-oki", "Hidaka-oki" and "Honjo-oki-nanbu" areas based on 3D seismic data previously acquired by JCCS, JOGMEC or private oil companies. The geological analysis consists of geological structure analysis, evaluation of the distributions of reservoirs and seals, and estimation of CO_2 storage capacity.

In the prospective areas of "Sado-seihou-oki" and "Honjo-oki-nanbu", simulation studies were conducted for predicting the behavior of injected CO_2 prior to drilling an exploratory well (pre-drilling simulation), as thier CO_2 storage capacities were estimated to be over 100 million tonnes of CO_2 based on previous geological analysis results. Reservoir models were constructed with homogeneous reservoir properties and 5 tentative CO_2 injection wells were assumed.

Geological surveys of comparable outcrops on land adjacent to the offshore "Kyoto-Fukui-oki" and "Hidaka-oki" areas were conducted. The reservoir and seal rock samples obtained from the surveys were analyzed in the laboratory for evaluation of their physical properties. The results of the analyses will be used as additional input datasets for pre-drilling simulation, as well as future reference data.

第１章

事業の背景と目的

第１章　事業の背景と目的

二酸化炭素回収・貯留（Carbon dioxide Capture and Storage、以下、「CCS」と称する。）は大量の CO_2 を大気中に排出せずに地下に隔離する技術として世界的に広く注目され、2014 年 11 月に公表された IPCC（Intergovernmental Panel on Climate Change：国連気候変動に関する政府間パネル）第 5 次評価報告書統合報告書においても、産業革命前と比較して世界の平均気温上昇を 2℃未満に抑えるための有効な手段として CCS があげられている。

地球温暖化問題は、世界各国が速やかに取り組む必要のある重要課題としての認識がますます高まり、2015 年 12 月にフランスのパリで開催された国連気候変動枠組条約第 21 回締約国会議（COP21）では 196 箇国が一堂に会して「パリ協定」が採択され、わが国も 2016 年 11 月 8 日に批准した。今後、2030 年度には 2013 年度比 26%削減するという約束草案の達成に向けて、温室効果ガスの大幅削減に向けた国をあげての取り組みが求められている。

このような環境の中で、日本ＣＣＳ調査(株)（以下、「当社」または「JCCS」と称する。）は、2012 年度に経済産業省委託事業「平成２４年度二酸化炭素削減技術実証試験事業」を受託し、2016 年 3 月までの 4 年間において、苫小牧での年間 10 万 t 規模の CO_2 の大規模貯留に向けた実証試験設備を完成させた。2016 年 4 月 6 日に萌別層への CO_2 圧入を開始し、2019 年 11 月 22 日に累計圧入量 30 万 t を達成し CO_2 圧入を停止した。

一方で、火力発電所の新設やリプレースに関わる環境アセスメント手続きの過程では、環境大臣の意見書において、講じるべき措置として将来の CCS の導入に向けて所要の検討を行うことが示されている。この方針については、2018 年 7 月に閣議決定された「第 5 次エネルギー基本計画」に継承され、「温室効果ガスの大気中への排出をさらに抑えるため、IGCC･IGFC 等の次世代高効率石炭火力発電技術等の開発・実用化を推進するとともに、2020 年ころの CO_2 回収・有効利用・貯留（CCUS）技術の実用化を目指した研究開発、国際機関との連携、CCS の商用化の目途等も考慮しつつできるだけ早期の CCS Ready 導入に向けた検討や、国内における回収・輸送・圧入・貯留の一連の CCS のプロセスの実証と貯留適地調査等を着実に進める」と述べられている。

このような一連の流れの中で、CCS 導入の前提となる二酸化炭素貯留適地調査（以下、「貯留適地調査」と称する。）についても早期に取り組むこととなり、経済産業省は 2013 年度に「平成２５年度中小企業等環境問題対策調査等委託費（全国二酸化炭素貯留層基礎調査）」（以下、「平成２５年度経済産業省委託事業」と称する。）を実施した。この事業では、既存の調査・検討結果に基づいた調査候補地点の抽出と、各地点の技術評価によ

る優先調査地点の選定と調査計画（案）の作成が行われた。優先調査地点および調査計画（案）は、経済産業省「平成２５年度中小企業等環境問題対策調査等委託費（全国二酸化炭素貯留層基礎調査）に係る委員会」（以下、「Ｈ２５経済産業省委員会」と称する。）において確認された。

環境省は、同じ 2013 年度に「平成２５年度シャトルシップによる CCS を活用した二国間クレジット制度実現可能性調査委託業務」（以下、「平成２５年度環境省委託事業」と称する。）を実施し、水深 200 m 以深の海域において、既存調査と検討結果に基づいた技術評価により優先調査地点を選定し、その結果は「平成２５年度我が国周辺水域二酸化炭素貯留適地検討会」（以下、「Ｈ２５環境省検討会」と称する。）で確認された。

経済産業省と環境省は、翌 2014 年度に、共同事業「平成２６年度二酸化炭素貯留適地調査事業」（以下、「平成２６年度委託事業」と称する。）を開始した。貯留適地とは CO_2 を長期にわたって地中貯留できる場所のことであり、貯留層とそれを覆う遮蔽層が広く分布すること、貯留層が 1,000～3,000 m 程度の深度に位置していること、活断層に近接せず安定した地質構造形態が形成され、貯留した CO_2 が漏洩する明らかな経路がないこと等の地質的条件を備えていることが求められる。共同事業の目的は、2020 年ころの CCS 技術の実用化に向け、1 億 t 以上の CO_2 を貯留可能な複数の大規模貯留適地を選定することである。平成２６年度委託事業では、前述のＨ２５経済産業省委員会およびＨ２５環境省検討会において確認された優先調査地点から 3 地点を調査対象候補地点として選定し、既存の探査データを活用しながら、二次元弾性波探査（以下、「2D 探査」と称する。）を新たに実施し、候補地点の貯留適地調査を実施した。

両省による共同事業は翌 2015 年度以降も継続され、「平成２７年度二酸化炭素貯留適地調査事業」（以下、「平成２７年度委託事業」と称する。）、「平成２８年度二酸化炭素貯留適地調査事業」（以下、「平成２８年度委託事業」と称する。）、「平成２９年度二酸化炭素貯留適地調査事業委託業務」（以下、「平成２９年度委託事業」と称する。）、「平成３０年度二酸化炭素貯留適地調査事業委託業務」（以下、「平成３０年度委託事業」と称する。）、「平成３１年度二酸化炭素貯留適地調査事業委託業務」（以下、「平成３１年度委託事業」と称する。）、「令和２年度二酸化炭素貯留適地調査事業委託業務」（以下、「本業務」と称する。）が実施された。これらの業務では、下記の既存探査データおよび既存坑井データを活用するとともに、新たに弾性波探査を実施した。

1）基礎物理探査および基礎試錐

経済産業省（旧通商産業省）の委託事業である国内石油天然ガス基礎調査事業（以下、「基礎調査事業」と称する。）において、(独)石油天然ガス・金属鉱物資源機

構（旧石油開発公団および旧石油公団、Japan Oil, Gas and Metals National Corporation、以下、「JOGMEC」と称する。）が実施した基礎物理探査の 2D 探査および三次元弾性波探査（以下、「3D 探査」と称する。）のデータならびに基礎試錐の坑井データ

2) 公的機関が実施した調査

大学、(国研)海洋研究開発機構（旧海洋科学技術センター、Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology、以下「JAMSTEC」と称する。）等の公的機関が実施した 2D/3D 探査データおよび坑井データ

3) 民間会社が実施した探査データ

石油会社等の民間会社が実施した 2D/3D 探査データおよび坑井データ

2019 年度までは調査井を掘削して貯留層総合評価を行う計画であったが、当初の計画年限であった 2021 年度末までに調査井掘削を期間および予算の両面で終了できないことから、2020 年度からは、全国に広がるより多くの候補地点の調査を進める方針に変更した。

本業務では、1 地点にて新規 2D 探査を実施するとともに、複数地点において、地表地質調査、海底地形・地質情報調査、地質解析と貯留適地評価、調査井掘削前 CO_2 挙動予測シミュレーション等の貯留適地調査を行い、貯留可能量を評価した。なお、本業務に引き続き、「令和３年度二酸化炭素貯留適地調査事業委託業務」（以下、「令和３年度委託事業」と称する。）の実施が計画されており、2021 年度以降の貯留適地調査事業を円滑に進めるための準備業務として、調査候補地点の選定および調査計画（案）の作成を行うとともに、貯留適地調査事業に対する自治体等の考え方や調査計画地点一帯の漁業活動状況の情報収集と、2D 探査実施時期の調整を行った。

第２章

事業の概要

第２章　事業の概要

2.1　二酸化炭素貯留適地調査に係る弾性波探査の実施

本業務では、平成３１年度委託事業に係る有識者委員会において検討された調査候補地点をベースに委託者と協議して、調査対象地点として酒田沖および京都－福井沖の 2 地点を選定した。酒田沖および京都－福井沖で民間等既存探査データの再処理を実施するとともに、京都－福井沖では新規 2D 探査の実施を計画し、2D 探査を 2020 年 7 月～8 月に実施し、2021 年 1 月にデータ処理作業を完了した。

貯留適地調査事業で取得した 2D/3D 探査データについては、将来的に公的機関に移管することを想定してすべてのデータを一元的に管理する体制を構築しており、当 2D 探査データも同様に保管した。

既存探査データを借用して再処理した成果のうち、JOGMEC が取得した基礎物理探査データの再処理成果については、借用元である JOGMEC に移管した。

2.2　二酸化炭素貯留適地調査に係る調査・解析・検討の実施

本業務では、平成３１年度委託事業および本業務に係る有識者委員会において確認された地点にて以下の業務を実施した。

1) 地表地質調査試料の分析

日高沖周辺および京都－福井沖周辺で地表地質調査を実施した。陸上で採取した貯留層および遮蔽層に相当する岩石試料について、岩石鉱物分析、貯留岩分析、遮蔽岩分析、岩石物性分析を実施し、分析結果の評価を実施した。

2) 海底地形判読および海底地質情報コンパイル

日高沖、本荘沖の南部および佐渡西方沖の 3 地点において、海底地形および海底地質に関する資料ならびに公開された基礎物理探査の 3D 探査データを用い、地質解析の前段として海底地形および海底地質に関する情報を整理した。

3) 地質解析と貯留適地評価

日高沖、本荘沖、佐渡西方沖、鳥取沖および茨城沖北部の 5 地点において実施した。

日高沖では、基礎物理探査の 3D 探査データおよび基礎試錐の坑井データを用い、地質解析と貯留可能量評価を実施した。

本荘沖では、基礎物理探査の 3D 探査データ、既存 2D 探査の再処理データ、基礎試錐および民間坑井のデータを用い、地質解析と貯留可能量評価を実施した。

佐渡西方沖では、基礎物理探査の 3D 探査データおよび基礎試錐の坑井データを

用い、地質解析と貯留可能量評価を実施した。

鳥取沖では、既存 2D 探査データを用い、地質解析および堆積相解析を行うとともに、平成３１年度業務にて実施した 3D 探査データを用いた地質解析範囲と統合した地質構造解析および貯留可能量の算定を実施した。

茨城沖北部では、平成３１年度委託事業の 2020 年度繰越業務にて実施した 3D 探査データを用いた物性解析結果を活用した地質解析と貯留可能量評価を本業務の 2021 年度繰越業務で実施した。

4) 調査井掘削前 CO_2 挙動予測シミュレーション

本荘沖および佐渡西方沖の 2 地点において、調査井掘削前 CO_2 挙動予測シミュレーションによる CO_2 貯留可能性検討を本業務の 2021 年度繰越業務として実施した。

2.3 2021 年度以降の調査候補地点の選定および調査計画（案）の作成

平成３１年度委託事業および本業務に係る有識者委員会において確認された地点にて以下の業務を実施し、2021 年度以降の貯留適地調査を実施する調査地点を選定し、調査計画（案）を作成した。

1) 調査候補地点の見直し

平成３１年度委託事業までの調査候補区域地点の見直しを実施した。

2) 調査候補地点の選定（総合評価）

調査候補地点の選定（総合評価）を再検討し、評価を見直した。

3) 2021 年度以降の調査計画（案）の作成

上記総合評価に基づき、2021 年度以降の調査計画（案）を作成した。2021 年度に実施予定の 2D 探査計画の策定準備を実施した。

2.4 社会的受容性の醸成活動

貯留適地調査事業に関連して、更なる CCS への理解促進と信頼獲得のため、毎年度の事業において複数箇所の展示会に出展し、社会的受容性の醸成活動を実施してきた。本業務では、新型コロナウイルス感染症の影響により 1 箇所の展示会への出展となった。

2.5 有識者委員会の開催、報告書の作成等

本事業を的確に推進するために、第三者の有識者により構成される委員会を設置し、当社は委員会事務局として円滑な委員会の運営に努めるとともに、委員から指導および助言を受けて本事業に反映した。

第３章

二酸化炭素貯留適地調査に係る
弾性波探査の実施

第３章　二酸化炭素貯留適地調査に係る弾性波探査の実施

3.1　概要

本業務では、平成３１年度委託業務に係る有識者委員会において検討された調査候補地点をベースとして、既存探査データの有無を確認したうえで、地元との調整および経済的な観点から妥当と考える地点について委託者と協議し、調査対象地点として酒田沖、京都－福井沖の 2 地点を選定した。酒田沖では基礎物理探査の 2D 探査データ、民間の 2D 探査データ、公的機関の 2D 探査データの再処理を、京都－福井沖では新規 2D 探査ならびに基礎物理探査の 2D 探査データおよび公的機関の 2D 探査データの再処理を実施した。

貯留適地調査事業で取得した 2D/3D 探査データの一元管理体制を構築するとともに、基礎物理探査データの再処理成果については借用元の JOGMEC への移管を実施した。（3.4 節）

調査対象とした 2 地点の調査実施結果を以下に示す。

1）酒田沖

本地点の沖合において、基礎物理探査の 2D 探査データ、民間の 2D 探査データ、公的機関の 2D 探査データの再処理を実施し、本地点における地質解析と貯留適地評価に資するデータを得た。（3.2 節）

2）京都－福井沖

平成３１年度委託業務において実施した基礎物理探査の 2D 探査データおよび公的機関の 2D 探査データの再処理結果から本地点に厚い堆積層が存在する可能性が示唆され、貯留可能域を抽出できる可能性が指摘された。本地点における地質解析と貯留適地評価に資するデータを得ることを目的として、新規 2D 探査を計画した。地元漁業関係者等と調整を行い、2020 年 7 月～8 月に 2D 探査を実施し、取得したデータを用いてデータ処理を実施した。さらに、本地点における地質解析と貯留適地評価の精度向上に資するデータを得ることを目的として、平成３１年度委託事業において実施した既存 2D 探査データの再処理範囲の周囲を対象として基礎物理探査の 2D 探査データおよび公的機関の 2D 探査データの再処理を実施した。新規 2D 探査および既存 2D 探査データの再処理を実施した結果、本地点における地質解析と貯留適地評価に資するデータを得た。（3.3 節）

3.2 酒田沖

本地点内の既存弾性波探査データのうち、本事業で利用可能な 2D 探査データを借用し、再処理を実施した。

3.2.1 基礎物理探査の 2D 探査データの再処理

本地点内の基礎物理探査の 2D 探査データのうち、本事業で利用可能なものを借用し、再処理を実施した。

(1) 対象データの概要

以下に対象データ一覧を示す。

1) 1969 年度 天然ガス基礎調査 基礎物理探鉱「秋田・山形・新潟・陸棚エアガン」[1)] の一部
2) 1976 年度 大陸棚石油・天然ガス基礎調査 基礎物理探査「北海道西部～新潟海域」[2)] の一部
3) 1987 年度 国内石油・天然ガス基礎調査 海上基礎物理探査「西津軽～新潟沖」[3)] の一部

対象データは、振源にエアガン、受振に曳航型受振ケーブル（以下、「ストリーマーケーブル」と称する。）を用いた海域の調査である。

(2) データ再処理の概要

対象データのうち、フィールドデータのデジタルデータが保存されている測線については、既存データ処理結果に残存していた貯留層、遮蔽層を抽出するうえで問題となるノイズ、多重反射波を抑制して記録の品質の改善を図ることを目的として、各種ノイズ抑制処理、多重反射波抑制処理および重合前時間マイグレーション（Pre-Stack Time Migration、以下、「PSTM」と称する。）を適用する再処理を実施した。相対振幅を保存する処理を適用した反射記録に加え、反射波の追跡に適するよう重合前に自動振幅補償（Automatic Gain Control、以下、「AGC」と称する。）を適用した反射波記録を作成した。

対象データのうち、フィールドデータのデジタルデータが保存されているがデータ欠損の多い測線については、大判印刷の最終重合断面図のデジタイズ処理を実施し、重合後時間マイグレーション処理を実施した。

本データ再処理に使用した主要ソフトウェアを表 3.2-1 に示す。

表 3.2-1　主要ソフトウェア一覧

処理ソフトウェア	実施した処理
『SuperX』JGI 社[注1)]	データ処理全般
『iVAS』JGI 社	予備速度解析、重合速度解析
『VELANAL』Techco Geophysical Services 社	PSTM 速度解析
『SUMMIG』Techco Geophysical Services 社	PSTM 処理
『SSV』Lynx Information Systems 社	トレースのデジタイズ処理
『TRACEPREP』Lynx Information Systems 社	復元データの振幅補正等

注）JGI 社：(株)地球科学総合研究所（以下、「JGI 社」と称する。）の略称

①　測線の接続

複数に分割してデータ取得が行われた測線については、データ再処理の中で接続し、1本の測線とした。本データ再処理では、基礎物理探査「秋田・山形・新潟・陸棚エアガン」の MITI69-B-4 測線と MOTI69-B-5 測線、基礎物理探査「西津軽～新潟海域」の N87-F-5 測線と N87-F-6 測線および N87-F-7 測線を以降で説明するフォーマット変換後の発振記録の段階で接続した。基礎物理探査「西津軽～新潟海域」の N87-G-5 測線と N87-G-6 測線を以降で説明するフォーマット変換後の発振記録の段階で接続し、この接続後の測線と N87-G-3 測線を以降で説明する共通反射点（Common Mid Point、以下、「CMP」と称する。）編集後の CMP 記録で測線の接続を行った。

② データ再処理の基本仕様

データ再処理の基本仕様を表 3.2-2 に、測地諸元を表 3.2-3 に示す。

表 3.2-2　データ再処理の基本仕様

調査名	測線名	CMP 間隔 (m)	サンプリング間隔 (msec)	再処理データ長 (sec)	データ再処理項目
昭和 44 年度 基礎物理探査「秋田・山形・新潟・陸棚エアガン」	MITI69-6	50.0	4	5.0	フィールドデータの再処理
	MITI69-7	50.0	4	5.0	フィールドデータの再処理
	MITI69-B-4+B-5	50.0	4	5.0	フィールドデータの再処理
昭和 51 年度 基礎物理探査「北海道西部～新潟海域」	H76-9-2	25.0	4	5.0	フィールドデータの再処理
昭和 62 年度 基礎物理探査「西津軽～新潟沖」	N87-12	12.5	4	8.0	フィールドデータの再処理
	N87-12	12.5	4	8.0	デジタイズ処理＋マイグレーション処理
	N87-13	12.5	4	8.0	フィールドデータの再処理
	N87-E-3	12.5	4	8.0	フィールドデータの再処理
	N87-F-5+F-6+F-7	12.5	4	8.0	フィールドデータの再処理
	N87-F-5+F-6+F-7	12.5	4	8.0	デジタイズ処理＋マイグレーション処理
	N87-G-3+G-5+G-6	12.5	4	8.0	フィールドデータの再処理
	N87-G-3+G-5+G-6	12.5	4	8.0	デジタイズ処理＋マイグレーション処理
	N87-H-3	12.5	4	8.0	フィールドデータの再処理

注）MITI69-B-4+B-5 測線は、MITI69-B-4 測線と MITI69-B-5 測線を接続した測線である。
N87-F-5+F-6+F-7 測線は、N87-F-5 測線と N87-F-6 測線および N87-F-7 測線を接続した測線である。
N87-G-3+G-5+G-6 測線は、N87-G-3 測線と N87-G-5 測線および N87-G-6 測線を接続した測線である。

注）N87-12 測線、N87-F-5+F-6+F-7 測線、N87-G-3+G-5+G-6 測線は、フィールドデータのデジタルデータが保存されていたがデータ欠損が多かったため、フィールドデータの再処理とデジタイズ処理＋マイグレーション処理の両方を実施した。

表 3.2-3　データ再処理で使用した測地諸元

準拠楕円体	WGS84
長半径	6,378,137.00000000 m
短半径	6,356,752.31424500 m
投影法	Universal Transverse Mercator（UTM 図法）
系番号	54
座標原点 緯度	00° 00′ 00.000" N
座標原点 経度	141° 00′ 00.000" E
縮尺係数	0.999600
北方加数	0.000 m
東方加数	500,000.000 m

(3)　データ再処理の詳細（基礎物理探査「秋田・山形・新潟・陸棚エアガン」）

データ再処理（基礎物理探査「秋田・山形・新潟・陸棚エアガン」）のフローチャートを図 3.2-1 に示す。

データ再処理の詳細について、処理ステップごとに内容を記述する。

1）フォーマット変換

磁気テープに保存されたフィールドデータをデータ処理ソフトウェアの内部フォーマットへ変換した。

MITI69-B-4 測線と MITI69-B-5 測線は、データ取得時の調査船の航行方向が同じであり、接続域で発振点位置が一致するため、フォーマット変換後の発振点記録において測線の接続を行った。

2）ジオメトリ情報の設定

以降に続く処理のために発振点・受振点・CMP に関する情報やその他の諸情報をトレースヘッダーにセットした。

3）プレフィルター

極低周波数の波浪ノイズを除去するため、4 Hz のローカットフィルターを適用した。

4）予備速度解析

予備速度解析は、JGI 社の速度解析システム“iVAS”を使用し、定速度の NMO 補正と重合を用いて重合速度を走査する定速度重合法による速度解析を 1 km 間隔で実施した。ここで得られた速度は、ノイズ抑制処理における一時的な速度のほか、各処理の適用前後の結果を重合記録上で比較・確認するために用いた。

5) 重合前ノイズ抑制処理

突発的かつ強振幅のノイズ､波浪ノイズやその他のランダムノイズを抑制するため、各種ノイズ特性を考慮して以下のノイズ抑制を実施した。

ⅰ）F-X エディット

発振記録上に混入する突発的かつ強振幅のノイズの抑制を目的として、共通発振点領域において F-X エディットを適用した。

ⅱ）F-X 予測フィルター

発振記録上に混入する波浪ノイズやその他のランダムノイズの抑制を目的として、共通受振点領域において F-X 予測フィルターを適用した。

6) 多重反射波抑制処理

海水面を介在する短周期および長周期の多重反射波､層間多重反射波等の短周期の多重反射波の抑制を目的として、各種多重反射波の特性を考慮して、Shallow Water Demultiple（以下、「SWD」と称する。）、Surface Related Multiple Elimination（以下、「SRME」と称する。）およびラディアル・トレース・デコンボリューションを適用した。

ⅰ）SWD

浅海域における海水面を介在する短周期の多重反射波の抑制を目的として、SWD を適用した。SWD は、波動方程式に準拠する多重反射波抑制手法であり､海水面反射波をモデリングし､これを用いて多重反射波を抑制する。SWD により予測された多重反射波モデルを原記録とマッチングさせ、原記録から減ずることにより多重反射波を抑制した。

ⅱ）SRME

海水面を介在する長周期の多重反射波の抑制を目的として､SRME を適用した。SRME は、波動方程式に準拠する多重反射波抑制手法であり、原記録の共通発振点記録と共通受振点記録のクロスコンボリューションを計算することにより、多重反射波を予測する。SRME により予測された多重反射波モデルを原記録とマッチングさせ、原記録から減ずることにより多重反射波を抑制した。

ⅲ）ラディアル・トレース・デコンボリューション

層間多重反射波等の短周期の多重反射波の抑制を目的として、ラディアル・トレース領域においてデコンボリューションを適用した。

ラディアル・トレース記録は、空間－時間領域のデータを振源からの見か

け速度が一定な直線に沿ってリサンプリングし、見かけ速度－時間領域に変換したものである。振源からある射出角で出た反射波およびそれに起因する多重反射波は、同じ見かけ速度を持つ。通常の空間－時間領域の記録上では、同一トレースに出現する反射波と多重反射波は、対応する射出角が異なり、出現間隔も一定ではない。一方、ラディアル・トレース記録上では、理論上、同一トレースにおいて時間方向に等間隔で出現する。これらの性質を利用し、ラディアル・トレース領域においてデコンボリューションを適用することで、多重反射波を抑制した。

7) サーフェス・コンシステント・デコンボリューション

地層の非弾性および観測系の諸特性の影響を取り除き、短周期の多重反射波を抑制することを目的として、サーフェス・コンシステント・デコンボリューションを適用した。

本データ再処理では、各発振点における差分応答を用いて波形の均等化を行うとともに基本波形のパルス化を行った。周波数領域における各トレースの平均スペクトルからのずれを発振点・受振点・CMP・オフセットの 4 成分に分解し、各トレースにおいて平均スペクトル・発振点成分を用いてデコンボリューションオペレータを設計し、適用した。

8) 振幅補償

振源から放出される弾性波は、三次元的に伝播することによる幾何学的発散効果、多層構造内を透過および反射することによる伝播損失、そして非弾性減衰による振幅の減衰を被っている。本データ処理では、地中を伝播する弾性波の幾何学的発散効果による振幅の減衰を補償した。手法として、水平成層構造を仮定したゼロオフセット距離において成立する以下の式（Newman,1973[4)] による）を用いた。この式に必要な RMS 速度として、「4) 予備速度解析」で求めた速度関数を用いた。

$$G(x,t) = T \times Vrms(T_0)^2 / V_1$$

$$T = SQRT(T_0^2 + (X / Vrms(T_0))^2)$$

G(x,t)　：振幅補償値

T　：往復垂直走時

T_0　：ゼロオフセット距離における往復垂直走時

X　：オフセット距離

Vrms　：往復垂直走時（T_0）における RMS 速度

V_1　　：最上層における RMS 速度

9) サーフェス・コンシステント振幅補正

各発振点において、振幅のばらつきを取り除くことを目的として、サーフェス・コンシステント振幅補正を適用した。反射波の振幅を発振点・受振点・CMP・オフセットの 4 成分に分解し、発振点の成分について振幅補正を適用した。

10)CMP 編集

「2) ジオメトリ情報の設定」において定義した重合測線に従い共通反射点編集を実施した。

11)重合速度解析

重合速度解析は、JGI 社の速度解析システム“iVAS”を使用し、定速度の NMO 補正と重合を用いて重合速度を走査する定速度重合法による速度解析を 500 m 間隔で実施した。

12)多重反射波抑制処理（高分解能放物線ラドン変換法）

長周期の多重反射波とムーブアウトの大きなノイズの抑制を目的として、共通反射点領域において高分解能放物線ラドン変換法を適用した。高分解能放物線ラドン変換法は、一次反射波と多重反射波との間の走時差を利用し、多重反射波を抑制する手法であり、特に長周期の多重反射波を効果的に抑制する手法である。

ここまでのデータ再処理が実施された結果を「CMP 記録」として SEG-Y ファイルに出力した。

13)振幅調整（AGC）

振幅バランスを整えるため、AGC を適用した。相対振幅を保存する処理では本処理を実施しなかった。

14)PSTM 速度解析

PSTM 速度解析は、TECHCO 社の速度解析ソフトウェア“VELANAL”を使用し、速度スケーリング重合法による速度解析を 500 m 間隔で実施した。

ここで得られた速度を「PSTM 速度データ」としてテキストファイルおよび SEG-Y ファイルに出力した。

15)PSTM

重合前データの見かけの反射点位置を真の反射点位置に移動させるとともに、回析波を回析点に収斂させるため、「14) PSTM 速度解析」にて求めた速度を用いて、PSTM を適用した。本データ再処理では、共通オフセット領域におけるキルヒホッフ積分法マイグレーションを採用した。

16)PSTM 後ノイズ抑制

PSTM 後の共通イメージ点（CIP）記録に対して、以下のノイズ抑制処理を適用した。

ⅰ）高分解能放物線ラドン変換法

PSTM 後に残存するムーブアウトの大きなノイズの抑制を目的として、高分解能放物線ラドン変換法を適用した。

ⅱ）ファンフィルター

PSTM 後に残存する線形ノイズの抑制を目的として、ファンフィルターを適用した。

17)アウトサイドミュート

重合効果や分解能を低下させるデータの除去を目的として、アウトサイドミュートを適用した。

ここまでのデータ再処理が適用された結果を「CIP 記録」として SEG-Y ファイルに出力した。出力したデータにはアウトサイドミュートは適用せず、ミュート位置をトレースヘッダーに保存した。

18)CIP 重合

CIP ごとにトレースの重合を行った。重合トレース数にて除算を行い、振幅の正規化を行った。

19)振幅調整（指数関数型）

重合記録における振幅バランスを整えるため、指数関数型の振幅調整を適用した。AGC を適用した処理では本処理を実施しなかった。

20)F-X 予測フィルター

ランダムノイズを抑制し、反射波の連続性を向上させるため、F-X 予測フィルターを適用した。

21)帯域通過フィルター

反射波の周波数帯域外のノイズを抑制するため、帯域通過フィルターを適用した。

22)基準面補正

浮動基準面から基準面への補正を行った。基準面は平均海水面とした。

ここまでのデータ再処理が適用された結果を「PSTM 記録」として SEG-Y ファイルに出力した。

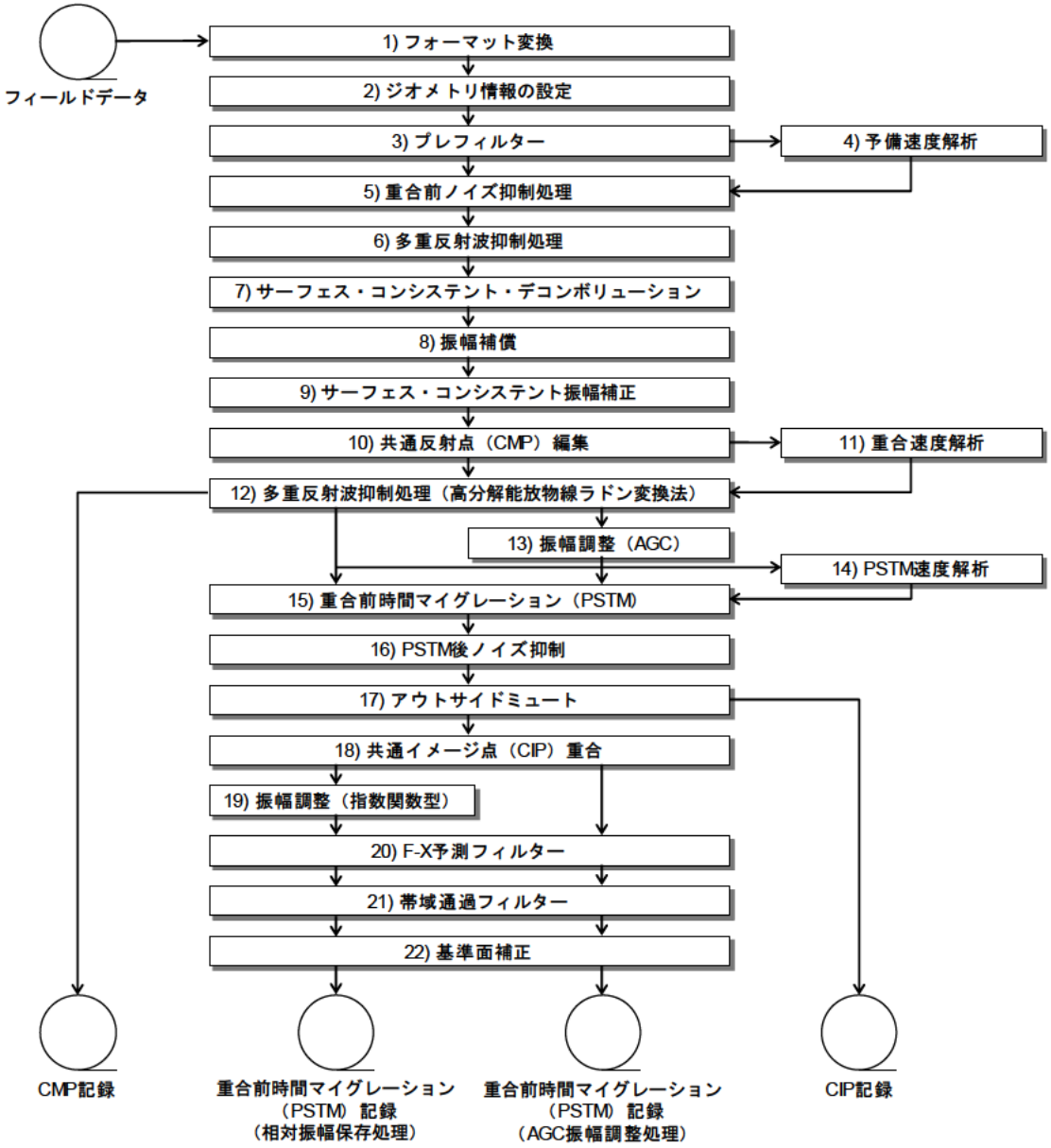


図 3.2-1　データ再処理フローチャート（基礎物理探査
「秋田・山形・新潟・陸棚エアガン」）

(4)　データ再処理の詳細（基礎物理探査「北海道西部～新潟海域」）

データ再処理（基礎物理探査「北海道西部～新潟海域」）のフローチャートを図 3.2-2 に示す。

データ再処理の詳細について、処理ステップごとに内容を記述する。

1) フォーマット変換

磁気テープに保存されたフィールドデータをデータ処理ソフトウェアの内部フォーマットへ変換した。

2) ジオメトリ情報の設定

以降に続く処理のために発振点・受振点・CMP に関する情報やその他の諸情報をトレースヘッダーにセットした。

3) プレフィルター

極低周波数の波浪ノイズを除去するため、4 Hz のローカットフィルターを適用した。

4) 波形変換およびバブル抑制処理

ニアトレース記録の海底面反射波形から抽出した波形を用いて、最小位相への変換およびバブル抑制を行った。

対象調査では、エアガン振源波形記録が存在しなかった。また、エアガンの容量および配置に関する詳細情報が記載された資料がなかったことからエアガン波形シミュレーションを使用した合成エアガン波形の作成ができなかった。そのため、ニアトレース記録において海底面反射波形の走時を読み取り、これを同一時間に揃えて重合することで波形を抽出した。

5) 予備速度解析

予備速度解析は、JGI 社の速度解析システム “iVAS” を使用し、定速度の NMO 補正と重合を用いて重合速度を走査する定速度重合法による速度解析を 1 km 間隔で実施した。ここで得られた速度は、ノイズ抑制処理における一時的な速度のほか、各処理の適用前後の結果を重合記録上で比較・確認するために用いた。

6) 重合前ノイズ抑制処理

突発的かつ強振幅のノイズ、波浪ノイズやその他のランダムノイズ、線形ノイズを抑制するため、各種ノイズ特性を考慮して以下のノイズ抑制を実施した。

ｉ）F-X エディット

発振記録上に混入する突発的かつ強振幅のノイズの抑制を目的として、共通発振点領域において F-X エディットを適用した。

ⅱ）F-X 予測フィルター

発振記録上に混入する波浪ノイズやその他のランダムノイズの抑制を目的として、共通発振点領域および共通受振点領域において F-X 予測フィルターを適用した。

ⅲ）F-X 速度フィルター

発振記録上に混入する線形ノイズの抑制を目的として、共通発振点領域において F-X 速度フィルターを適用した。

7）多重反射波抑制処理

海水面を介在する短周期および長周期の多重反射波､層間多重反射波等の短周期の多重反射波の抑制を目的として、各種多重反射波の特性を考慮して、SWD、SRME およびラディアル・トレース・デコンボリューションを適用した。

ⅰ）SWD

浅海域における海水面を介在する短周期の多重反射波の抑制を目的として、水深が 250 msec よりも浅い範囲に SWD を適用した。SWD は、波動方程式に準拠する多重反射波抑制手法であり、海水面反射波をモデリングし、これを用いて多重反射波を抑制する。SWD により予測された多重反射波モデルを原記録とマッチングさせ、原記録から減ずることにより多重反射波を抑制した。

ⅱ）SRME

海水面を介在する長周期の多重反射波の抑制を目的として､SRME を適用した。SRME は、波動方程式に準拠する多重反射波抑制手法であり、原記録の共通発振点記録と共通受振点記録のクロスコンボリューションを計算することにより、多重反射波を予測する。SRME により予測された多重反射波モデルを原記録とマッチングさせ、原記録から減ずることにより多重反射波を抑制した。

ⅲ）ラディアル・トレース・デコンボリューション

層間多重反射波等の短周期の多重反射波の抑制を目的として、ラディアル・トレース領域においてデコンボリューションを適用した。

ラディアル・トレース記録は、空間－時間領域のデータを振源からの見かけ速度が一定な直線に沿ってリサンプリングし、見かけ速度－時間領域に変換したものである。振源からある射出角で出た反射波およびそれに起因する多重反射波は、同じ見かけ速度を持つ。通常の空間－時間領域の記録

上では、同一トレースに出現する反射波と多重反射波は、対応する射出角が異なり、出現間隔も一定ではない。一方、ラディアル・トレース記録上では、理論上、同一トレースにおいて時間方向に等間隔で出現する。これらの性質を利用し、ラディアル・トレース領域においてデコンボリューションを適用することで、多重反射波を抑制した。

8) サーフェス・コンシステント・デコンボリューション

地層の非弾性および観測系の諸特性の影響を取り除き、短周期の多重反射波を抑制することを目的として、サーフェス・コンシステント・デコンボリューションを適用した。

本データ再処理では、各発振点における差分応答を用いて波形の均等化を行うとともに基本波形のパルス化を行った。周波数領域における各トレースの平均スペクトルからのずれを発振点・受振点・CMP・オフセットの 4 成分に分解し、各トレースにおいて平均スペクトル・発振点成分を用いてデコンボリューションオペレータを設計し、適用した。

9) 振幅補償

振源から放出される弾性波は、三次元的に伝播することによる幾何学的発散効果、多層構造内を透過および反射することによる伝播損失、そして非弾性減衰による振幅の減衰を被っている。本データ処理では、地中を伝播する弾性波の幾何学的発散効果による振幅の減衰を補償した。手法として、水平成層構造を仮定したゼロオフセット距離において成立する以下の式（Newman,1973[4)] による）を用いた。この式に必要な RMS 速度として、「5) 予備速度解析」で求めた速度関数を用いた。

$G(x,t) = T \times Vrms(T_0)^2 / V_1$

$T = SQRT(T_0^2 + (X / Vrms(T_0))^2)$

G(x,t)	: 振幅補償値
T	: 往復垂直走時
T_0	: ゼロオフセット距離における往復垂直走時
X	: オフセット距離
Vrms	: 往復垂直走時（T_0）における RMS 速度
V_1	: 最上層における RMS 速度

10)サーフェス・コンシステント振幅補正

各発振点において、振幅のばらつきを取り除くことを目的として、サーフェス・

コンシステント振幅補正を適用した。反射波の振幅を発振点・受振点・CMP・オフセットの 4 成分に分解し、発振点の成分について振幅補正を適用した。

11)CMP 編集

「2) ジオメトリ情報の設定」において定義した重合測線に従い共通反射点編集を実施した。

12)重合速度解析

重合速度解析は、JGI 社の速度解析システム“iVAS”を使用し、定速度の NMO 補正と重合を用いて重合速度を走査する定速度重合法による速度解析を 500 m 間隔で実施した。

13)多重反射波抑制処理（高分解能放物線ラドン変換法）

長周期の多重反射波とムーブアウトの大きなノイズの抑制を目的として、共通反射点領域において高分解能放物線ラドン変換法を適用した。高分解能放物線ラドン変換法は、一次反射波と多重反射波との間の走時差を利用し、多重反射波を抑制する手法であり、特に長周期の多重反射波を効果的に抑制する手法である。

ここまでのデータ再処理が実施された結果を「CMP 記録」として SEG-Y ファイルに出力した。

14)振幅調整（AGC）

振幅バランスを整えるため、AGC を適用した。相対振幅を保存する処理では本処理を実施しなかった。

15)PSTM 速度解析

PSTM 速度解析は、TECHCO 社の速度解析ソフトウェア“VELANAL”を使用し、速度スケーリング重合法による速度解析を 500 m 間隔で実施した。

ここで得られた速度を「PSTM 速度データ」としてテキストファイルおよび SEG-Y ファイルに出力した。

16)PSTM

重合前データの見かけの反射点位置を真の反射点位置に移動させるとともに、回析波を回析点に収斂させるため、「15) PSTM 速度解析」にて求めた速度を用いて、PSTM を適用した。本データ処理では、共通オフセット領域におけるキルヒホッフ積分法マイグレーションを採用した。

17)PSTM 後ノイズ抑制処理

PSTM 後の共通イメージ点（CIP）記録に対して、以下のノイズ抑制処理を適用した。

ⅰ）高分解能放物線ラドン変換法

PSTM 後に残存するムーブアウトの大きなノイズの抑制を目的として、高分解能放物線ラドン変換法を適用した。

ⅱ）ファンフィルター

PSTM 後に残存する線形ノイズの抑制を目的として、ファンフィルターを適用した。

18)アウトサイドミュート

重合効果や分解能を低下させるデータの除去を目的として､アウトサイドミュートを適用した。

ここまでのデータ再処理が適用された結果を「CIP 記録」として SEG-Y ファイルに出力した。出力したデータにはアウトサイドミュートは適用せず、ミュート位置をトレースヘッダーに保存した。

19)CIP 重合

CIP ごとにトレースの重合を行った。重合トレース数にて除算を行い、振幅の正規化を行った。

20)振幅調整（指数関数型）

重合記録における振幅バランスを整えるため､指数関数型の振幅調整を適用した。AGC を適用した処理では本処理を実施しなかった。

21)F-X 予測フィルター

ランダムノイズを抑制し、反射波の連続性を向上させるため、F-X 予測フィルターを適用した。

22)帯域通過フィルター

反射波の周波数帯域外のノイズを抑制するため､帯域通過フィルターを適用した。

23)基準面補正

浮動基準面から基準面への補正を行った。基準面は平均海水面とした。

ここまでのデータ再処理が適用された結果を「PSTM 記録」として SEG-Y ファイルに出力した。

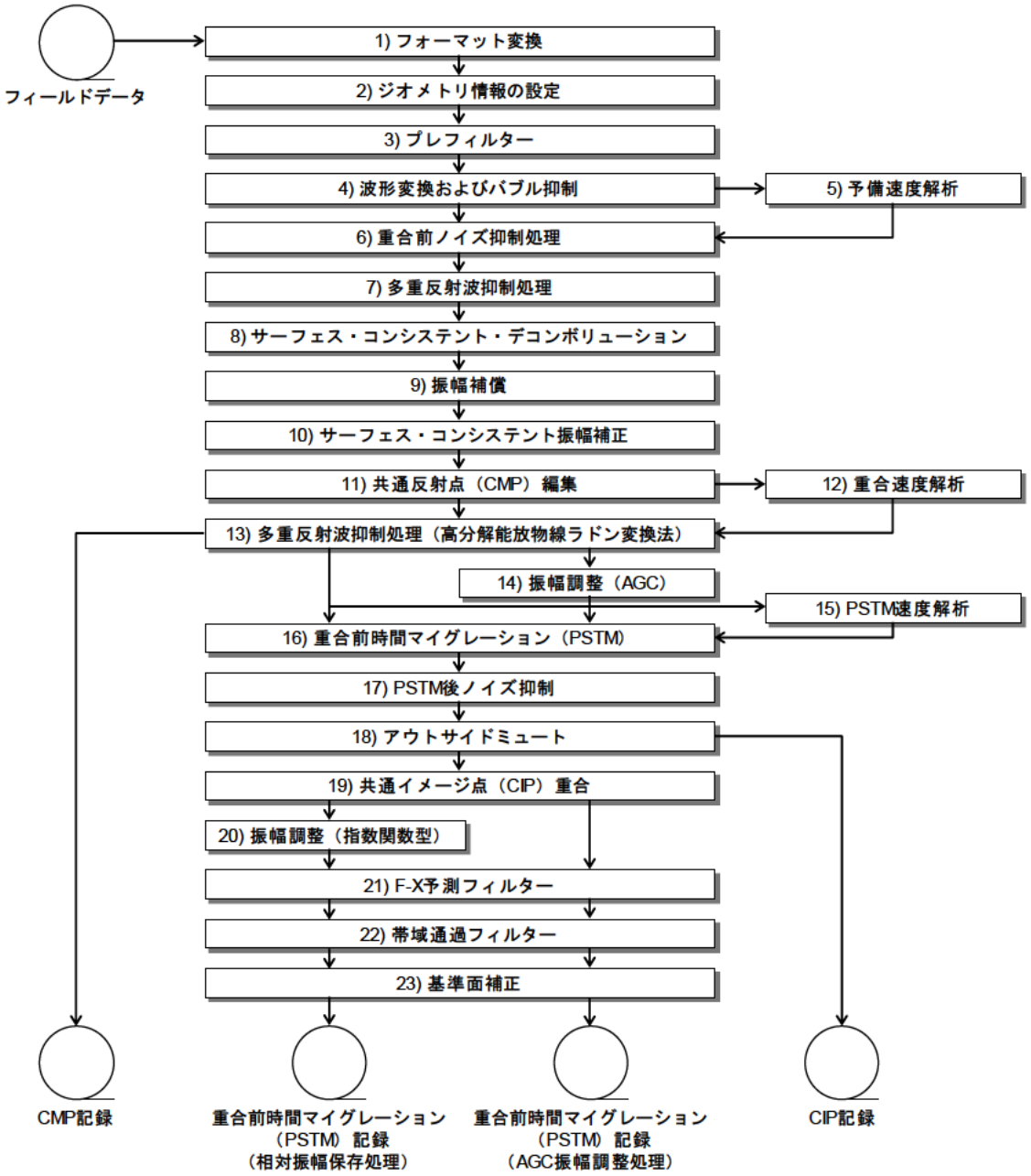


図 3.2-2　データ再処理フローチャート（基礎物理探査「北海道西部～新潟海域」）

(5) データ再処理の詳細（基礎物理探査「西津軽～新潟沖」）

データ再処理（基礎物理探査「西津軽～新潟沖」）のフローチャートを図 3.2-3 に示す。

データ再処理の詳細について、処理ステップごとに内容を記述する。

1) フォーマット変換

磁気テープに保存されたフィールドデータをデータ処理ソフトウェアの内部フォーマットへ変換した。

N87-F-5 測線と N87-F-6 測線および N87-F-7 測線、N87-G-5 測線と N87-G-6 測線は、データ取得時の調査船の航行方向が同じであり、接続域で発振点位置が一致するため、フォーマット変換後の発振点記録において測線の接続を行った。

2) ジオメトリ情報の設定

以降に続く処理のために発振点・受振点・CMP に関する情報やその他の諸情報をトレースヘッダーにセットした。

3) プレフィルター

極低周波数の波浪ノイズを除去するため、4 Hz のローカットフィルターを適用した。

4) 波形変換およびバブル抑制処理

データ取得時に取得されたファーフィールド振源波形を用いて、最小位相への変換およびバブル抑制を行った。

5) 予備速度解析

予備速度解析は、JGI 社の速度解析システム“iVAS”を使用し、定速度の NMO 補正と重合を用いて重合速度を走査する定速度重合法による速度解析を 1 km 間隔で実施した。ここで得られた速度は、ノイズ抑制処理における一時的な速度のほか、各処理の適用前後の結果を重合記録上で比較・確認するために用いた。

6) 重合前ノイズ抑制処理

突発的かつ強振幅のノイズ、波浪ノイズやその他のランダムノイズ、線形ノイズを抑制するため、各種ノイズ特性を考慮して以下のノイズ抑制を実施した。

ⅰ）F-X エディット

発振記録上に混入する突発的かつ強振幅のノイズの抑制を目的として、共通発振点領域において F-X エディットを適用した。

ⅱ）F-X 予測フィルター

発振記録上に混入する波浪ノイズやその他のランダムノイズの抑制を目的として、共通発振点領域および共通受振点領域において F-X 予測フィル

ターを適用した。

iii）F-X 速度フィルター

発振記録上に混入する線形ノイズの抑制を目的として、共通発振点領域において F-X 速度フィルターを適用した。

7）多重反射波抑制処理

海水面を介在する短周期および長周期の多重反射波､層間多重反射波等の短周期の多重反射波の抑制を目的として、各種多重反射波の特性を考慮して、SWD、SRME およびラディアル・トレース・デコンボリューションを適用した。

ｉ）SWD

浅海域における海水面を介在する短周期の多重反射波の抑制を目的として、水深が 260 msec よりも浅い範囲に SWD を適用した。SWD は、波動方程式に準拠する多重反射波抑制手法であり、海水面反射波をモデリングし、これを用いて多重反射波を抑制する。SWD により予測された多重反射波モデルを原記録とマッチングさせ、原記録から減ずることにより多重反射波を抑制した。

ii）SRME

海水面を介在する長周期の多重反射波の抑制を目的として､SRME を適用した。SRME は、波動方程式に準拠する多重反射波抑制手法であり、原記録の共通発振点記録と共通受振点記録のクロスコンボリューションを計算することにより、多重反射波を予測する。SRME により予測された多重反射波モデルを原記録とマッチングさせ、原記録から減ずることにより多重反射波を抑制した。

iii）ラディアル・トレース・デコンボリューション

層間多重反射波等の短周期の多重反射波の抑制を目的として、ラディアル・トレース領域においてデコンボリューションを適用した。

ラディアル・トレース記録は、空間－時間領域のデータを振源からの見かけ速度が一定な直線に沿ってリサンプリングし、見かけ速度－時間領域に変換したものである。振源からある射出角で出た反射波およびそれに起因する多重反射波は、同じ見かけ速度を持つ。通常の空間－時間領域の記録上では、同一トレースに出現する反射波と多重反射波は、対応する射出角が異なり、出現間隔も一定ではない。一方、ラディアル・トレース記録上では、理論上、同一トレースにおいて時間方向に等間隔で出現する。これ

らの性質を利用し、ラディアル・トレース領域においてデコンボリューションを適用することで、多重反射波を抑制した。

8) サーフェス・コンシステント・デコンボリューション

地層の非弾性および観測系の諸特性の影響を取り除き、短周期の多重反射波を抑制することを目的として、サーフェス・コンシステント・デコンボリューションを適用した。

本データ再処理では、各発振点における差分応答を用いて波形の均等化を行うとともに基本波形のパルス化を行った。周波数領域における各トレースの平均スペクトルからのずれを発振点・受振点・CMP・オフセットの 4 成分に分解し、各トレースにおいて平均スペクトル・発振点成分を用いてデコンボリューションオペレータを設計し、適用した。

9) 振幅補償

振源から放出される弾性波は、三次元的に伝播することによる幾何学的発散効果、多層構造内を透過および反射することによる伝播損失、そして非弾性減衰による振幅の減衰を被っている。本データ処理では、地中を伝播する弾性波の幾何学的発散効果による振幅の減衰を補償した。手法として、水平成層構造を仮定したゼロオフセット距離において成立する以下の式（Newman,1973[4)] による）を用いた。この式に必要な RMS 速度として、「5) 予備速度解析」で求めた速度関数を用いた。

$$G(x,t) = T \times Vrms(T_0)^2 / V_1$$

$$T = SQRT(T_0^2 + (X / Vrms(T_0))^2)$$

G(x,t)　：振幅補償値

T　：往復垂直走時

T_0　：ゼロオフセット距離における往復垂直走時

X　：オフセット距離

Vrms　：往復垂直走時（T_0）における RMS 速度

V_1　：最上層における RMS 速度

10)サーフェス・コンシステント振幅補正

各発振点において、振幅のばらつきを取り除くことを目的として、サーフェス・コンシステント振幅補正を適用した。反射波の振幅を発振点・受振点・CMP・オフセットの 4 成分に分解し、発振点の成分について振幅補正を適用した。

11)CMP 編集

「2) ジオメトリ情報の設定」において定義した重合測線に従い共通反射点編集を実施した。

N87-G-3 測線と N87-G-5+G-6 測線は、データ取得時の調査船の航行方向が異なるため、CMP 記録において最近接する CMP 位置で測線の接続を行った。

12)重合速度解析

重合速度解析は、JGI 社の速度解析システム“iVAS”を使用し、定速度の NMO 補正と重合を用いて重合速度を走査する定速度重合法による速度解析を 500 m 間隔で実施した。

13)多重反射波抑制処理（高分解能放物線ラドン変換法）

長周期の多重反射波とムーブアウトの大きなノイズの抑制を目的として、共通反射点領域において高分解能放物線ラドン変換法を適用した。高分解能放物線ラドン変換法は、一次反射波と多重反射波との間の走時差を利用し、多重反射波を抑制する手法であり、特に長周期の多重反射波を効果的に抑制する手法である。

ここまでのデータ再処理が実施された結果を「CMP 記録」として SEG-Y ファイルに出力した。

14)振幅調整（AGC）

振幅バランスを整えるため、AGC を適用した。相対振幅を保存する処理では本処理を実施しなかった。

15)PSTM 速度解析

PSTM 速度解析は、TECHCO 社の速度解析ソフトウェア“VELANAL”を使用し、速度スケーリング重合法による速度解析を 500 m 間隔で実施した。

ここで得られた速度を「PSTM 速度データ」としてテキストファイルおよび SEG-Y ファイルに出力した。

16)PSTM

重合前データの見かけの反射点位置を真の反射点位置に移動させるとともに、回析波を回析点に収斂させるため、「15) PSTM 速度解析」にて求めた速度を用いて、PSTM を適用した。本データ処理では、共通オフセット領域におけるキルヒホッフ積分法マイグレーションを採用した。

17)PSTM 後ノイズ抑制

PSTM 後の共通イメージ点（CIP）記録に対して、以下のノイズ抑制処理を適用した。

ｉ）高分解能放物線ラドン変換法

PSTM 後に残存するムーブアウトの大きなノイズの抑制を目的として、高分解能放物線ラドン変換法を適用した。

ⅱ）ファンフィルター

PSTM 後に残存する線形ノイズの抑制を目的として、ファンフィルターを適用した。

18)アウトサイドミュート

重合効果や分解能を低下させるデータの除去を目的として、アウトサイドミュートを適用した。

ここまでのデータ再処理が適用された結果を「CIP 記録」として SEG-Y ファイルに出力した。出力したデータにはアウトサイドミュートは適用せず、ミュート位置をトレースヘッダーに保存した。

19)CIP 重合

CIP ごとにトレースの重合を行った。重合トレース数にて除算を行い、振幅の正規化を行った。

20)振幅調整（指数関数型）

重合記録における振幅バランスを整えるため、指数関数型の振幅調整を適用した。AGC を適用した処理では本処理を実施しなかった。

21)F-X 予測フィルター

ランダムノイズを抑制し、反射波の連続性を向上させるため、F-X 予測フィルターを適用した。

22)帯域通過フィルター

反射波の周波数帯域外のノイズを抑制するため、帯域通過フィルターを適用した。

23)基準面補正

浮動基準面から基準面への補正を行った。基準面は平均海水面とした。

ここまでのデータ再処理が適用された結果を「PSTM 記録」として SEG-Y ファイルに出力した。

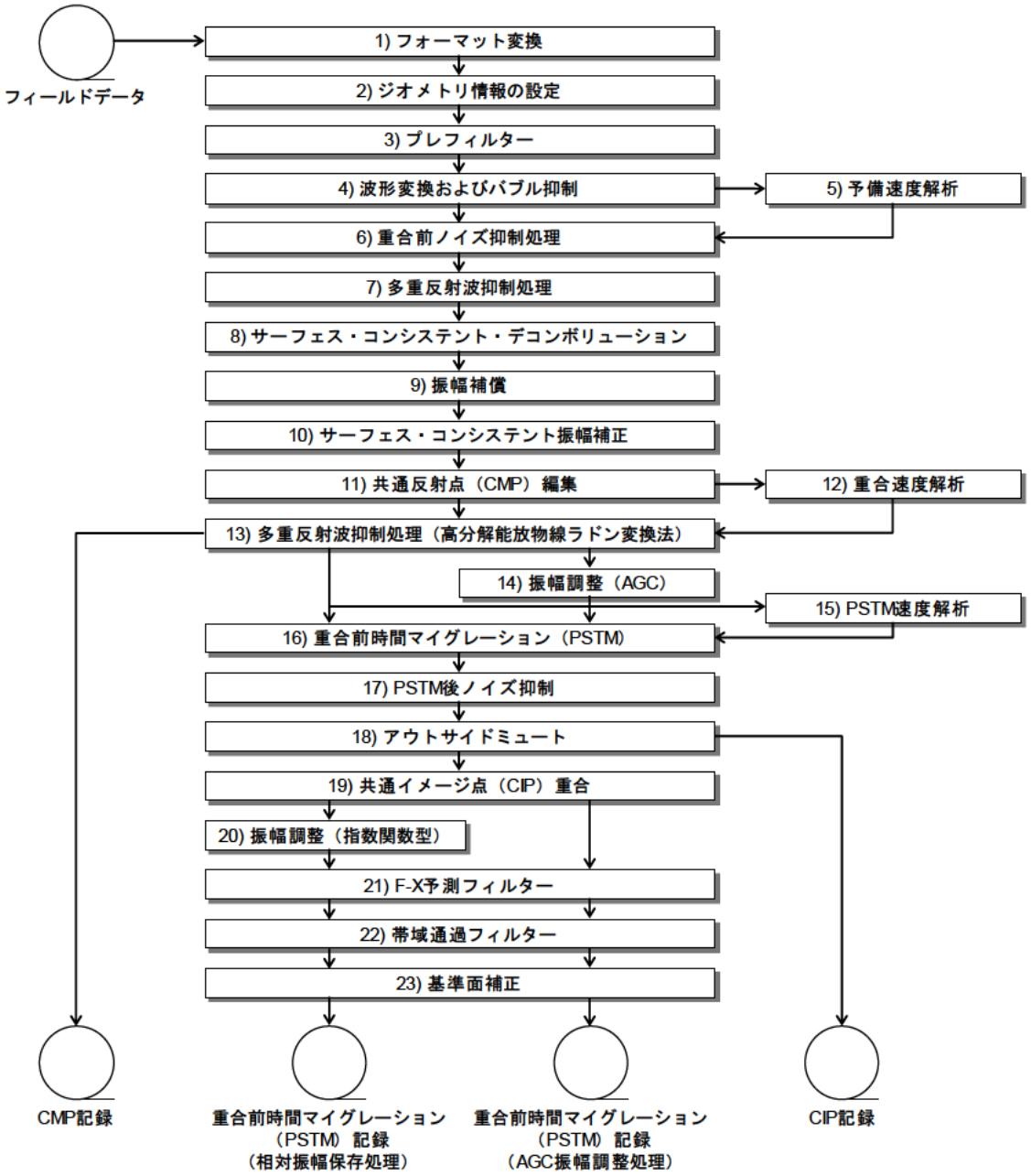


図 3.2-3　データ再処理フローチャート（基礎物理探査「西津軽～新潟沖」）

(6)　デジタイズ処理＋マイグレーション処理の詳細

デジタイズ処理＋マイグレーション処理のデータ再処理フローチャートを図 3.2-4 に示す。

データ再処理の詳細について、処理ステップごとに内容を記述する。

1) 大判印刷原図のスキャン

大判印刷原図（重合断面図）を大型スキャナーで読み込み、画像データを作成した。スキャン時の読み取り解像度は 400 dpi とした。

2) トレースのデジタイズ処理

「1) 大判印刷原図のスキャン」にて得られた画像データに対して、トレースデータの復元処理（デジタイズ処理）と振幅補正等の処理を実施した。

トレースデータの復元処理は、Lynx Information System 社の“SSV”を使用した。振幅補正等の処理は、Lynx Information System 社の“TRACEPREP”を使用した。

3) F-X 予測フィルター

ランダムノイズを抑制し、反射波の連続性を向上させるため、F-X 予測フィルターを適用した。

4) 位相補償

デジタイズ処理した重合記録の海底面反射波形から抽出した波形を用いて、位相補償を行った。デジタイズ処理した重合記録から海底面反射波形の走時を読み取り、これを同一時間に揃えて重合することで波形を抽出した。

5) ジオメトリ情報の設定

以降に続く処理のために CMP に関する情報をトレースヘッダーにセットした。

6) 時間マイグレーション

重合断面記録上における見かけの反射点位置を真の反射点位置に移動させるとともに、回析波を回析点に収斂させるため、時間マイグレーションを適用した。本データ再処理では、時間－空間領域における差分法マイグレーションを採用した。

時間マイグレーション速度は、「(5)　データ再処理の詳細（基礎物理探査「西津軽～新潟沖」）」の「15) PSTM 速度解析」で得た速度を用いた。

7) 帯域通過フィルター

反射波の周波数帯域外のノイズを抑制するため、帯域通過フィルターを適用した。通過帯域は、大判印刷原図（重合断面図）に記載されている帯域通過フィルター

のパラメータを用いた。

ここまでのデータ再処理が適用された結果を「デジタイズ処理＋マイグレーション処理記録」として SEG-Y ファイルに出力した。

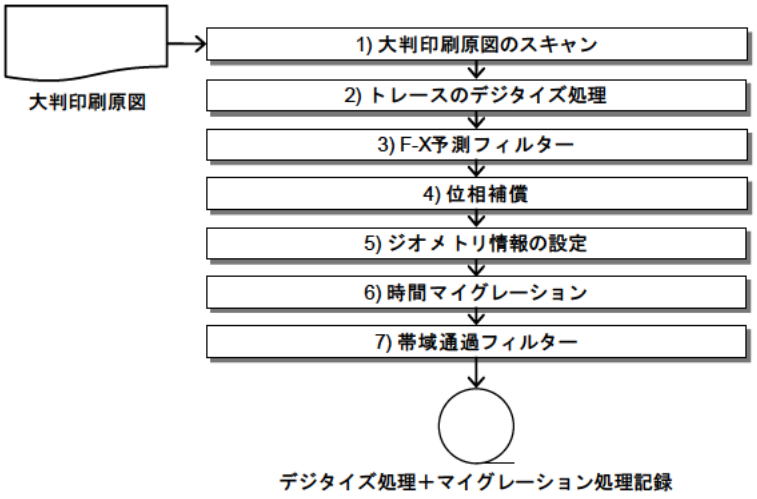


図 3.2-4　データ再処理フローチャート（デジタイズ処理＋マイグレーション処理）

(7)　考察

今回のデータ再処理の着目点について以下に示す。

①　既存データ処理結果の品質の改善

既存データ処理の一部のデータ処理仕様またはデータ処理項目において、処理結果の品質を改善する必要があると考えられたため、本データ再処理では以下の改善を図った。

a.　ノイズ抑制

フィールドデータには、突発的かつ強振幅のノイズ、波浪ノイズやその他のランダムノイズ、線形ノイズ等のさまざまな種類のノイズが混入していた。既存データ処理結果では、これらのノイズ成分が残存しており、品質を改善する必要があった。本データ再処理では、各種ノイズ特性に応じたノイズ抑制処理手法を複合的に組み合わせたノイズ抑制処理を適用することで品質の改善を図った。

b.　多重反射波抑制

フィールドデータには、海水面を介在する短周期および長周期の多重反射波、層間多重反射波等の短周期の多重反射波等のさまざまな種類の多重反射波が混入していた。既存データ処理結果では、これらの多重反射波が残存しており、品質を改善する必要があった。本データ再処理では、多重反射波の特性に応じた多重反射波抑制処理手法を適用することで品質の改善を図った。

②　ノイズ抑制処理

本データ再処理では、相対振幅の保存に留意しつつ、ノイズ特性に応じた各種ノイズ抑制処理を適用した。重合前ノイズ抑制処理では、主に突発的かつ強振幅のノイズ、波浪ノイズやその他のランダムノイズ、線形ノイズを対象としてノイズ抑制処理を適用した。重合前ノイズ抑制処理を適用することで、これらのノイズを効果的に抑制できた。

また、上記の重合前ノイズ抑制処理に加え、PSTM 後の CIP 記録におけるノイズ抑制も実施した。これらノイズ特性に応じた複合型のノイズ抑制処理が最終的な重合記録の品質向上に貢献している。

③　多重反射波抑制処理

対象データは、海底面および強反射面に起因する各種多重反射波が顕著であったことから、多重反射波の抑制が重要である。

SRME 法は、海底地形が複雑な場合でも海底面に起因する長周期の多重反射波を効果的

に抑制することができるため、海水面－海底面間の多重反射波の抑制や海水面－強反射面の多重反射波の抑制を目的として適用した。一方で、SRME 法は海底面反射波が取得されていないような浅海域では効果が得られにくい手法であるため、浅海域における海水面－海底面間の多重反射波の抑制を目的として、SWD を適用した。層間多重反射波等の短周期の多重反射波の抑制を目的として、ラディアル・トレース・デコンボリューションを適用した。さらに、高分解能放物線ラドン変換法による多重反射波抑制処理も適用することで、残存する海水面－海底面間の多重反射波や海水面－強反射面の多重反射波等の各種多重反射波を効果的に抑制した。

多重反射波の特性に応じた複合型の多重反射波抑制処理を適用することで、重複的に生じる多重反射波を適切に抑制した。複合型の多重反射波抑制処理は、重合記録の品質向上に寄与しただけでなく、速度解析の精度向上にも貢献している。

④　振源位相の補償

本データ再処理の対象調査のうち、基礎物理探査「西津軽～新潟沖」についてはデータ取得時に取得されたファーフィールド振源波形を用いて最小位相に変換した。基礎物理探査「北海道西部～新潟海域」については対象調査における振源波形記録が存在しなかったため､ニアトレース記録の海底面反射波形から抽出した波形を用いて最小位相に変換した。

基礎物理探査「秋田・山形・新潟・陸棚エアガン」についてはファーフィールド振源波形記録が存在せず、エアガンの型式、容量、配列、および深度の詳細情報が記載された資料も存在しない状況であった。通常このような場合には、基礎物理探査「北海道西部～新潟海域」において用いた手法と同様に、ニアトレース記録の海底面反射波形から抽出した波形を用いて最小位相へと変換する手法を検討するが、対象調査のデータ取得仕様ではニアオフセット距離が水深と比較して十分に大きいため､海底面反射波が取得されておらず、海底面反射波形の抽出が困難な状況であった。これらの理由のため、基礎物理探査「秋田・山形・新潟・陸棚エアガン」については、波形変換およびバブル抑制処理は適用せず、上記の調査と波形の極性を合わせる目的から極性の反転を適用した。なお、エアガンにより取得された記録は、一般的に最小位相波形とみなせるため、最終的な再処理結果には大きな悪影響を及ぼさないと考える。

本データ再処理のすべての対象測線に対して、サーフェス・コンシステント・デコンボリューションを実施し、各発振点における差分応答を用いて波形の均等化を行うとともに基本波形のパルス化を行った。これにより最終的な位相はゼロ位相となり、極性は正の反射波がピークとなっている。

⑤　デジタイズ処理＋マイグレーション処理の位相補償

デジタイズ処理は、既存の大判印刷原図（重合断面図）からデジタルデータを復元する処理であるため､既存データ処理結果の位相がそのまま反映される｡既存データ処理では、エアガン振源波形に基づく波形変換処理が適用されていなかったため、位相はゼロ位相とはならず、フィールドデータの再処理結果の位相との間に位相差が存在する。本データ再処理では、この位相差を補正するため、位相補償を適用した。

【参考文献】

1) 石油公団、“昭和 44 年度 天然ガス基礎調査 基礎物理探鉱「秋田・山形・新潟・陸棚エアガン」調査報告書”（1969）
2) 石油公団、“昭和 51 年度 大陸棚石油・天然ガス基礎調査 基礎物理探査「北海道西部～新潟海域」調査報告書”（1976）
3) 石油公団、“昭和 62 年度 国内石油・天然ガス基礎調査 海上基礎物理探査「西津軽～新潟沖」調査報告書”（1987）
4) Newman, P., “Divergence effects in a layered earth”, Geophysics, 38, 481-488(1973)

3.2.2　民間の 2D 探査データの再処理

本地点内の民間会社が実施した 2D 探査のうち、本事業で利用可能なものを借用し、再処理を実施した。

(1)　対象データの概要

対象データは、昭和 43 年度「秋田沖」にて取得された 2D 探査データの一部である。対象データは、振源にエアガン、受振にストリーマーケーブルを用いた海域の調査である。

(2)　データ再処理の概要

既存データ処理結果に残存していた貯留層､遮蔽層を抽出するうえで問題となるノイズ、多重反射波を抑制して記録の品質の改善を図ることを目的として、各種ノイズ抑制処理、多重反射波抑制処理および PSTM を適用する再処理を実施した｡相対振幅を保存する処理を適用した反射記録に加え、反射波の追跡に適するよう重合前に AGC を適用した反射波記録を作成した。

本データ再処理に使用した主要ソフトウェアを表 3.2-4 に、データ再処理の基本仕様を表 3.2-5 に、測地諸元を表 3.2-6 に示す。

表 3.2-4　主要ソフトウェア一覧

処理ソフトウェア	実施した処理
『SuperX』 JGI 社	データ処理全般
『iVAS』 JGI 社	予備速度解析、重合速度解析
『VELANAL』 Techco Geophysical Services 社	PSTM 速度解析
『SUMMIG』 Techco Geophysical Services 社	PSTM 処理

表 3.2-5　データ再処理の基本仕様

調査名	測線名	CMP 間隔 (m)	サンプリング間隔 (msec)	再処理データ長 (sec)
昭和 43 年度「秋田沖」	68-29	50.0	4	4.0
	68-30	50.0	4	4.0
	68-31	50.0	4	4.0
	68-32	50.0	4	4.0
	68-D-7	50.0	4	4.0
	68-F-3	50.0	4	4.0
	68-F-4	50.0	4	4.0

表 3.2-6　データ再処理で使用した測地諸元

準拠楕円体	WGS84
長半径	6,378,137.00000000 m
短半径	6,356,752.31424500 m
投影法	Universal Transverse Mercator（UTM 図法）
系番号	54
座標原点 緯度	00° 00′ 00.000" N
座標原点 経度	141° 00′ 00.000" E
縮尺係数	0.999600
北方加数	0.000 m
東方加数	500,000.000 m

(3)　データ再処理の詳細

データ再処理フローチャートを図 3.2-5 に示す。

データ再処理の詳細について、処理ステップごとに内容を記述する。

1）フォーマット変換

磁気テープに保存されたフィールドデータをデータ処理ソフトウェアの内部フォーマットへ変換した。

2）ジオメトリ情報の設定

以降に続く処理のために発振点・受振点・CMP に関する情報やその他の諸情報をトレースヘッダーにセットした。

3）プレフィルター

極低周波数の波浪ノイズを除去するため、6 Hz のローカットフィルターを適用した。

4）予備速度解析

予備速度解析は、JGI 社の速度解析システム“iVAS”を使用し、定速度の NMO 補正と重合を用いて重合速度を走査する定速度重合法による速度解析を 1 km 間隔で実施した。ここで得られた速度は、ノイズ抑制処理における一時的な速度のほか、各処理の適用前後の結果を重合記録上で比較・確認するために用いた。

5）重合前ノイズ抑制処理

突発的かつ強振幅のノイズ､波浪ノイズやその他のランダムノイズを抑制するため、各種ノイズ特性を考慮して以下のノイズ抑制を実施した。

ｉ）F-X エディット

発振記録上に混入する突発的かつ強振幅のノイズの抑制を目的として、共通発振点領域においてF-Xエディットを適用した。

ii）F-X予測フィルター

発振記録上に混入する波浪ノイズやその他のランダムノイズの抑制を目的として、共通受振点領域においてF-X予測フィルターを適用した。

6) 多重反射波抑制処理

海水面を介在する短周期および長周期の多重反射波､層間多重反射波等の短周期の多重反射波の抑制を目的として、各種多重反射波の特性を考慮して、SRMEおよびラディアル・トレース・デコンボリューションを適用した。

i）SRME

海水面を介在する長周期の多重反射波の抑制を目的として､SRMEを適用した。SRMEは、波動方程式に準拠する多重反射波抑制手法であり、原記録の共通発振点記録と共通受振点記録のクロスコンボリューションを計算することにより、多重反射波を予測する。SRMEにより予測された多重反射波モデルを原記録とマッチングさせ、原記録から減ずることにより多重反射波を抑制した。

ii）ラディアル・トレース・デコンボリューション

層間多重反射波等の短周期の多重反射波の抑制を目的として、ラディアル・トレース領域においてデコンボリューションを適用した。

ラディアル・トレース記録は、空間－時間領域のデータを振源からの見かけ速度が一定な直線に沿ってリサンプリングし、見かけ速度－時間領域に変換したものである。振源からある射出角で出た反射波およびそれに起因する多重反射波は、同じ見かけ速度を持つ。通常の空間－時間領域の記録上では、同一トレースに出現する反射波と多重反射波は、対応する射出角が異なり、出現間隔も一定ではない。一方、ラディアル・トレース記録上では、理論上、同一トレースにおいて時間方向に等間隔で出現する。これらの性質を利用し､ラディアル･トレース領域においてデコンボリューションを適用することで、多重反射波を抑制した。

7) サーフェス・コンシステント・デコンボリューション

地層の非弾性および観測系の諸特性の影響を取り除き､短周期の多重反射波を抑制することを目的として、サーフェス・コンシステント・デコンボリューションを適用した。

本データ再処理では、各発振点における差分応答を用いて波形の均等化を行うとともに基本波形のパルス化を行った。周波数領域における各トレースの平均スペクトルからのずれを発振点・受振点・CMP・オフセットの 4 成分に分解し、各トレースにおいて平均スペクトル・発振点成分を用いてデコンボリューションオペレータを設計し、適用した。

8) 振幅補償

振源から放出される弾性波は、三次元的に伝播することによる幾何学的発散効果、多層構造内を透過および反射することによる伝播損失、そして非弾性減衰による振幅の減衰を被っている。本データ処理では、地中を伝播する弾性波の幾何学的発散効果による振幅の減衰を補償した。手法として、水平成層構造を仮定したゼロオフセット距離において成立する以下の式（Newman,1973[1)] による）を用いた。この式に必要な RMS 速度として、「4) 予備速度解析」で求めた速度関数を用いた。

$G(x,t) = T \times Vrms(T_0)^2 / V_1$

$T = SQRT(T_0^2 + (X / Vrms(T_0))^2)$

G(x,t)	: 振幅補償値
T	: 往復垂直走時
T_0	: ゼロオフセット距離における往復垂直走時
X	: オフセット距離
Vrms	: 往復垂直走時（T_0）における RMS 速度
V_1	: 最上層における RMS 速度

9) サーフェス・コンシステント振幅補正

各発振点において、振幅のばらつきを取り除くことを目的として、サーフェス・コンシステント振幅補正を適用した。反射波の振幅を発振点・受振点・CMP・オフセットの 4 成分に分解し、発振点の成分について振幅補正を適用した。

10) CMP 編集

「2) ジオメトリ情報の設定」において定義した重合測線に従い共通反射点編集を実施した。

11) 重合速度解析

重合速度解析は、JGI 社の速度解析システム “iVAS” を使用し、定速度の NMO 補正と重合を用いて重合速度を走査する定速度重合法による速度解析を 500 m 間隔で実施した。

12)多重反射波抑制処理（高分解能放物線ラドン変換法）

長周期の多重反射波とムーブアウトの大きなノイズの抑制を目的として、共通反射点領域において高分解能放物線ラドン変換法を適用した。高分解能放物線ラドン変換法は、一次反射波と多重反射波との間の走時差を利用し、多重反射波を抑制する手法であり、特に長周期の多重反射波を効果的に抑制する手法である。

ここまでのデータ再処理が実施された結果を「CMP 記録」として SEG-Y ファイルに出力した。

13)振幅調整（AGC）

振幅バランスを整えるため、AGC を適用した。相対振幅を保存する処理では本処理を実施しなかった。

14)PSTM 速度解析

PSTM 速度解析は、TECHCO 社の速度解析ソフトウェア“VELANAL”を使用し、速度スケーリング重合法による速度解析を 500 m 間隔で実施した。

ここで得られた速度を「PSTM 速度データ」としてテキストファイルおよび SEG-Y ファイルに出力した。

15)PSTM

重合前データの見かけの反射点位置を真の反射点位置に移動させるとともに、回析波を回析点に収斂させるため、「14) PSTM 速度解析」にて求めた速度を用いて、PSTM を適用した。本データ再処理では、共通オフセット領域におけるキルヒホッフ積分法マイグレーションを採用した。

16)PSTM 後ノイズ抑制

PSTM 後の共通イメージ点（CIP）記録に対して、以下のノイズ抑制処理を適用した。

ⅰ）高分解能放物線ラドン変換法

PSTM 後に残存するムーブアウトの大きなノイズの抑制を目的として、高分解能放物線ラドン変換法を適用した。

ⅱ）ファンフィルター

PSTM 後に残存する線形ノイズの抑制を目的として、ファンフィルターを適用した。

17)アウトサイドミュート

重合効果や分解能を低下させるデータの除去を目的として、アウトサイドミュートを適用した。

ここまでのデータ再処理が適用された結果を「CIP 記録」として SEG-Y ファイルに出力した。出力したデータにはアウトサイドミュートは適用せず、ミュート位置をトレースヘッダーに保存した。

18)CIP 重合

CIP ごとにトレースの重合を行った。重合トレース数にて除算を行い、振幅の正規化を行った。

19)振幅調整（指数関数型）

重合記録における振幅バランスを整えるため、指数関数型の振幅調整を適用した。AGC を適用した処理では本処理を実施しなかった。

20)F-X 予測フィルター

ランダムノイズを抑制し、反射波の連続性を向上させるため、F-X 予測フィルターを適用した。

21)帯域通過フィルター

反射波の周波数帯域外のノイズを抑制するため、帯域通過フィルターを適用した。

22)基準面補正

浮動基準面から基準面への補正を行った。基準面は平均海水面とした。

ここまでのデータ再処理が適用された結果を「PSTM 記録」として SEG-Y ファイルに出力した。

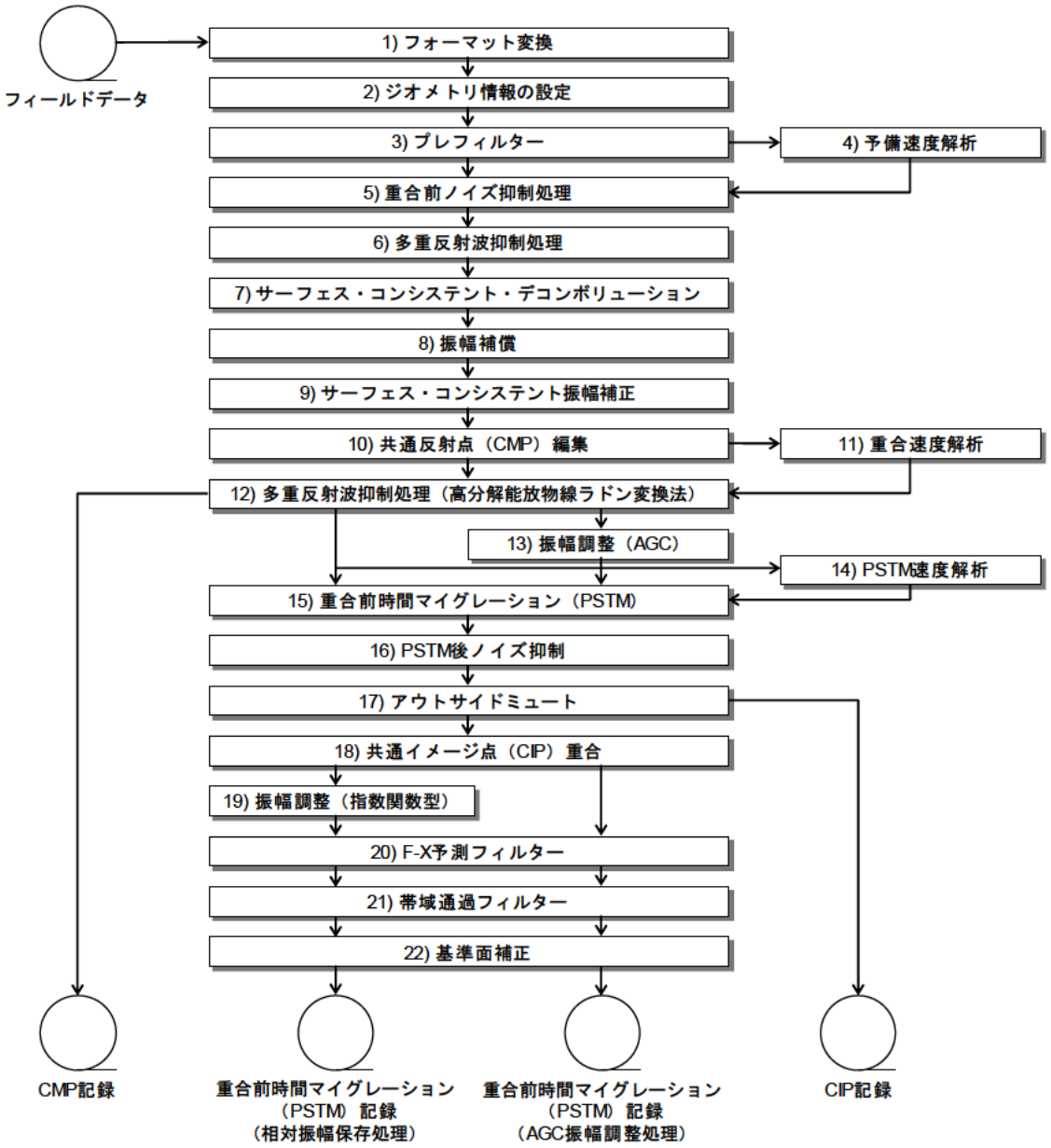


図 3.2-5　データ再処理フローチャート

(4) 考察

今回のデータ再処理の着目点について以下に示す。

① 既存データ処理結果の品質の改善

既存データ処理の一部のデータ処理仕様またはデータ処理項目において、処理結果の品質を改善する必要があると考えられたため、本データ再処理では以下の改善を図った。

a. ノイズ抑制

フィールドデータには、突発的かつ強振幅のノイズ、波浪ノイズやその他のランダムノイズ等のさまざまな種類のノイズが混入していた。既存データ処理結果では、これらのノイズ成分が残存しており、品質を改善する必要があった。本データ再処理では、各種ノイズ特性に応じたノイズ抑制処理手法を複合的に組み合わせたノイズ抑制処理を適用することで品質の改善を図った。

b. 多重反射波抑制

フィールドデータには、海水面を介在する短周期および長周期の多重反射波、層間多重反射波等の短周期の多重反射波等のさまざまな種類の多重反射波が混入していた。既存データ処理結果では、これらの多重反射波が残存しており、品質を改善する必要があった。本データ再処理では、多重反射波の特性に応じた多重反射波抑制処理手法を適用することで品質の改善を図った。

② ノイズ抑制処理

本データ再処理では、相対振幅の保存に留意しつつ、ノイズ特性に応じた各種ノイズ抑制処理を適用した。重合前ノイズ抑制処理では、主に突発的かつ強振幅のノイズ、波浪ノイズやその他のランダムノイズを対象としてノイズ抑制処理を適用した。重合前ノイズ抑制処理を適用することで、これらのノイズを効果的に抑制できた。

また、上記の重合前ノイズ抑制処理に加え、PSTM 後の CIP 記録におけるノイズ抑制も実施した。これらノイズ特性に応じた複合型のノイズ抑制処理が最終的な重合記録の品質向上に貢献している。

③ 多重反射波抑制処理

対象データは、海底面および強反射面に起因する各種多重反射波が顕著であったことから、多重反射波の抑制が重要である。

SRME 法は、海底地形が複雑な場合でも海底面に起因する長周期の多重反射波を効果的

に抑制することができるため、海水面－海底面間の多重反射波の抑制や海水面－強反射面の多重反射波の抑制を目的として適用した。層間多重反射波等の短周期の多重反射波の抑制を目的として、ラディアル・トレース・デコンボリューションを適用した。さらに、高分解能放物線ラドン変換法による多重反射波抑制処理も適用することで、残存する海水面－海底面間の多重反射波や海水面－強反射面の多重反射波等の各種多重反射波を効果的に抑制した。

多重反射波の特性に応じた複合型の多重反射波抑制処理を適用することで、重複的に生じる多重反射波を適切に抑制した。複合型の多重反射波抑制処理は、重合記録の品質向上に寄与しただけでなく、速度解析の精度向上にも貢献している。

④　振源位相の補償

本データ再処理では、対象調査におけるファーフィールド振源波形記録が存在せず、エアガンの型式、容量、配列、および深度の詳細情報が記載された資料も存在しない状況であった。通常このような場合には、ニアトレース記録の海底面反射波形から抽出した波形を用いて最小位相へと変換する手法を検討するが、対象調査のデータ取得仕様ではニアオフセット距離が水深と比較して十分に大きいため、海底面反射波が取得されておらず、海底面反射波形の抽出が困難な状況であった。これらの理由のため、本データ再処理では、波形変換およびバブル抑制処理は適用せず、本地点の他の再処理結果と波形の極性を合わせる目的から極性の反転を適用した。なお、エアガンにより取得された記録は、一般的に最小位相波形とみなせるため、最終的な再処理結果には大きな悪影響を及ぼさないと考える。その後、サーフェス・コンシステント・デコンボリューションを実施し、各発振点における差分応答を用いて波形の均等化を行うとともに基本波形のパルス化を行った。これにより最終的な位相はゼロ位相となり、極性は正の反射波がピークとなっている。

【参考文献】

1）Newman, P., “Divergence effects in a layered earth”, Geophysics, 38, 481-488(1973)

3.2.3　公的機関の 2D 探査データの再処理

本地点内の公的機関が実施した 2D 探査のうち、本事業で利用可能なものを借用し、再処理を実施した。

(1)　対象データの概要

対象データは、「平成 22 年度 日本海東縁ひずみ集中帯における地震探査調査研究」[1)]にて取得された 2D 探査データの一部である。対象データは、振源にエアガン、受振にストリーマーケーブルを用いた海域の調査である。

(2)　データ再処理の概要

既存データ処理結果に残存していた貯留層､遮蔽層を抽出するうえで問題となるノイズ、多重反射波を抑制して記録の品質の改善を図ることを目的として、各種ノイズ抑制処理、多重反射波抑制処理および PSTM を適用する再処理を実施した｡相対振幅を保存する処理を適用した反射記録に加え、反射波の追跡に適するよう重合前に AGC を適用した反射波記録を作成した。

本データ再処理に使用した主要ソフトウェアを表 3.2-7 に、データ再処理の基本仕様を表 3.2-8 に、測地諸元を表 3.2-9 に示す。

表 3.2-7　主要ソフトウェア一覧

処理ソフトウェア	実施した処理
『SuperX』 JGI 社	データ処理全般
『iVAS』 JGI 社	予備速度解析、重合速度解析
『VELANAL』 Techco Geophysical Services 社	PSTM 速度解析
『SUMMIG』 Techco Geophysical Services 社	PSTM 処理

表 3.2-8　データ再処理の基本仕様

調査名	測線名	CMP 間隔 (m)	サンプリング間隔 (msec)	再処理データ長 (sec)
平成 22 年度 日本海東縁ひずみ集中帯における地震探査調査研究	EMJS1005_0	6.25	2	8.00
	EMJS1006_1	6.25	2	8.00
	EMJS1007_1	6.25	2	8.00
	EMJS1008_2	6.25	2	8.00

表 3.2-9　データ再処理で使用した測地諸元

準拠楕円体	WGS84
長半径	6,378,137.00000000 m
短半径	6,356,752.31424500 m
投影法	Universal Transverse Mercator（UTM 図法）
系番号	54
座標原点 緯度	00° 00′ 00.000" N
座標原点 経度	141° 00′ 00.000" E
縮尺係数	0.999600
北方加数	0.000 m
東方加数	500,000.000 m

(3)　データ再処理の詳細

データ再処理フローチャートを図 3.2-6 に示す。

データ再処理の詳細について、処理ステップごとに内容を記述する。

1) フォーマット変換

磁気テープまたは磁気ディスクに保存されたフィールドデータをデータ処理ソフトウェアの内部フォーマットへ変換した。

2) 遅延時間補正

探鉱器では、発振時刻より 200 msec 遡って記録を開始しているため、これを補正した。

3) ジオメトリ情報の設定

以降に続く処理のために発振点・受振点・CMP に関する情報やその他の諸情報をトレースヘッダーにセットした。

4) プレフィルター

極低周波数の波浪ノイズを除去するため、4 Hz のローカットフィルターを適用した。

5) 波形変換およびバブル抑制処理

エアガンの型式、容量、配列、および深度の情報を基に作成した合成エアガン波形を用いて、最小位相への変換およびバブル抑制を行った。合成エアガン波形の作成には、Oakwood Computing Associates 社のエアガン波形シミュレーションソフトである Gundalf™ を使用した。

6) 予備速度解析

予備速度解析は、JGI 社の速度解析システム “iVAS” を使用し、定速度の NMO 補正と重合を用いて重合速度を走査する定速度重合法による速度解析を 1 km 間隔で実施した。ここで得られた速度は、ノイズ抑制処理における一時的な速度のほか、各処理の適用前後の結果を重合記録上で比較・確認するために用いた。

7) 潮位補正

潮汐による海水面の変位の補正を目的として、潮位補正を実施した。

8) 重合前ノイズ抑制処理

突発的かつ強振幅のノイズ、波浪ノイズやその他のランダムノイズ、線形ノイズを抑制するため、各種ノイズ特性を考慮して以下のノイズ抑制を実施した。

ⅰ）F-X エディット

発振記録上に混入する突発的かつ強振幅のノイズの抑制を目的として、共通発振点領域において F-X エディットを適用した。

ⅱ）F-X 予測フィルター

発振記録上に混入する波浪ノイズやその他のランダムノイズの抑制を目的として、共通発振点領域および共通受振点領域において F-X 予測フィルターを適用した。

ⅲ）F-X 速度フィルター

発振記録上に混入する線形ノイズの抑制を目的として、共通発振点領域において F-X 速度フィルターを適用した。

9) ゴースト抑制

ストリーマーケーブルを用いた海上調査では、受振器は海底面または海底面下で反射した上方進行波を記録した後、この反射波が受振器を超えて海水面で再度反射した下方進行波を記録する。この下方進行波はゴーストと呼ばれ、海水面の反射係数がほぼ-1 であるために反射波とは逆の極性を持つ。これにより、受振器深度と海水中の平均速度（海水速度）により決まるノッチ周波数周辺の振幅が顕著に減衰してしまう。この現象は、発振点においても同様に発生する。これらの影響を取り除くため、発振ゴーストと受振器ゴーストの両方のゴースト抑制を実施した。

10)多重反射波抑制処理

海水面を介在する短周期および長周期の多重反射波、層間多重反射波等の短周期の多重反射波の抑制を目的として、各種多重反射波の特性を考慮して、SRME およびラディアル・トレース・デコンボリューションを適用した。

ｉ）SRME

海水面を介在する長周期の多重反射波の抑制を目的として、SRME を適用した。SRME は、波動方程式に準拠する多重反射波抑制手法であり、原記録の共通発振点記録と共通受振点記録のクロスコンボリューションを計算することにより、多重反射波を予測する。SRME により予測された多重反射波モデルを原記録とマッチングさせ、原記録から減ずることにより多重反射波を抑制した。

ⅱ）ラディアル・トレース・デコンボリューション

層間多重反射波等の短周期の多重反射波の抑制を目的として、ラディアル・トレース領域においてデコンボリューションを適用した。

ラディアル・トレース記録は、空間－時間領域のデータを振源からの見かけ速度が一定な直線に沿ってリサンプリングし、見かけ速度－時間領域に変換したものである。振源からある射出角で出た反射波およびそれに起因する多重反射波は、同じ見かけ速度を持つ。通常の空間－時間領域の記録上では、同一トレースに出現する反射波と多重反射波は、対応する射出角が異なり、出現間隔も一定ではない。一方、ラディアル・トレース記録上では、理論上、同一トレースにおいて時間方向に等間隔で出現する。これらの性質を利用し、ラディアル・トレース領域においてデコンボリューションを適用することで、多重反射波を抑制した。

11)サーフェス・コンシステント・デコンボリューション

地層の非弾性および観測系の諸特性の影響を取り除き、短周期の多重反射波を抑制することを目的として、サーフェス・コンシステント・デコンボリューションを適用した。

本データ再処理では、各発振点における差分応答を用いて波形の均等化を行うとともに基本波形のパルス化を行った。周波数領域における各トレースの平均スペクトルからのずれを発振点・受振点・CMP・オフセットの 4 成分に分解し、各トレースにおいて平均スペクトル・発振点成分を用いてデコンボリューションオペレータを設計し、適用した。

12)振幅補償

振源から放出される弾性波は、三次元的に伝播することによる幾何学的発散効果、多層構造内を透過および反射することによる伝播損失、そして非弾性減衰による振幅の減衰を被っている。本データ処理では、地中を伝播する弾性波の幾何学的

発散効果による振幅の減衰を補償した。手法として、水平成層構造を仮定したゼロオフセット距離において成立する以下の式（Newman,1973[2)]による）を用いた。この式に必要なRMS速度として、「6) 予備速度解析」で求めた速度関数を用いた。

$G(x,t) = T \times Vrms(T_0)^2 / V_1$

$T = SQRT(T_0^2 + (X / Vrms(T_0))^2)$

$G(x,t)$	：振幅補償値
T	：往復垂直走時
T_0	：ゼロオフセット距離における往復垂直走時
X	：オフセット距離
$Vrms$	：往復垂直走時（T_0）におけるRMS速度
V_1	：最上層におけるRMS速度

13)サーフェス・コンシステント振幅補正

各発振点において、振幅のばらつきを取り除くことを目的として、サーフェス・コンシステント振幅補正を適用した。反射波の振幅を発振点・受振点・CMP・オフセットの4成分に分解し、発振点の成分について振幅補正を適用した。

14)CMP編集

「3) ジオメトリ情報の設定」において定義した重合測線に従い共通反射点編集を実施した。

15)重合速度解析

重合速度解析は、JGI社の速度解析システム“iVAS”を使用し、定速度のNMO補正と重合を用いて重合速度を走査する定速度重合法による速度解析を 500 m間隔で実施した。

16)多重反射波抑制処理（高分解能放物線ラドン変換法）

長周期の多重反射波とムーブアウトの大きなノイズの抑制を目的として、共通反射点領域において高分解能放物線ラドン変換法を適用した。高分解能放物線ラドン変換法は、一次反射波と多重反射波との間の走時差を利用し、多重反射波を抑制する手法であり、特に長周期の多重反射波を効果的に抑制する手法である。

ここまでのデータ再処理が実施された結果を「CMP記録」としてSEG-Yファイルに出力した。

17)振幅調整（AGC）

振幅バランスを整えるため、AGCを適用した。相対振幅を保存する処理では本

処理を実施しなかった。

18)PSTM 速度解析

PSTM 速度解析は、TECHCO 社の速度解析ソフトウェア“VELANAL”を使用し、速度スケーリング重合法による速度解析を 500 m 間隔で実施した。

ここで得られた速度を「PSTM 速度データ」としてテキストファイルおよび SEG-Y ファイルに出力した。

19)PSTM

重合前データの見かけの反射点位置を真の反射点位置に移動させるとともに、回析波を回析点に収斂させるため、「18) PSTM 速度解析」にて求めた速度を用いて、PSTM を適用した。本データ処理では、共通オフセット領域におけるキルヒホッフ積分法マイグレーションを採用した。

20)PSTM 後ノイズ抑制

PSTM 後の共通イメージ点（CIP）記録に対して、以下のノイズ抑制処理を適用した。

ⅰ）高分解能放物線ラドン変換法

PSTM 後に残存するムーブアウトの大きなノイズの抑制を目的として、高分解能放物線ラドン変換法を適用した。

ⅱ）ファンフィルター

PSTM 後に残存する線形ノイズの抑制を目的として、ファンフィルターを適用した。

21)アウトサイドミュート

重合効果や分解能を低下させるデータの除去を目的として、アウトサイドミュートを適用した。

ここまでのデータ再処理が適用された結果を「CIP 記録」として SEG-Y ファイルに出力した。出力したデータにはアウトサイドミュートは適用せず、ミュート位置をトレースヘッダーに保存した。

22)CIP 重合

CIP ごとにトレースの重合を行った。重合トレース数にて除算を行い、振幅の正規化を行った。

23)振幅調整（指数関数型）

重合記録における振幅バランスを整えるため、指数関数型の振幅調整を適用した。

AGC を適用した処理では本処理は実施しなかった。

24)F-X 予測フィルター

ランダムノイズを抑制し、反射波の連続性を向上させるため、F-X 予測フィルターを適用した。

25)帯域通過フィルター

反射波の周波数帯域外のノイズを抑制するため、帯域通過フィルターを適用した。

26)基準面補正

浮動基準面から基準面への補正を行った。基準面は平均海水面とした。

ここまでのデータ再処理が適用された結果を「PSTM 記録」として SEG-Y ファイルに出力した。

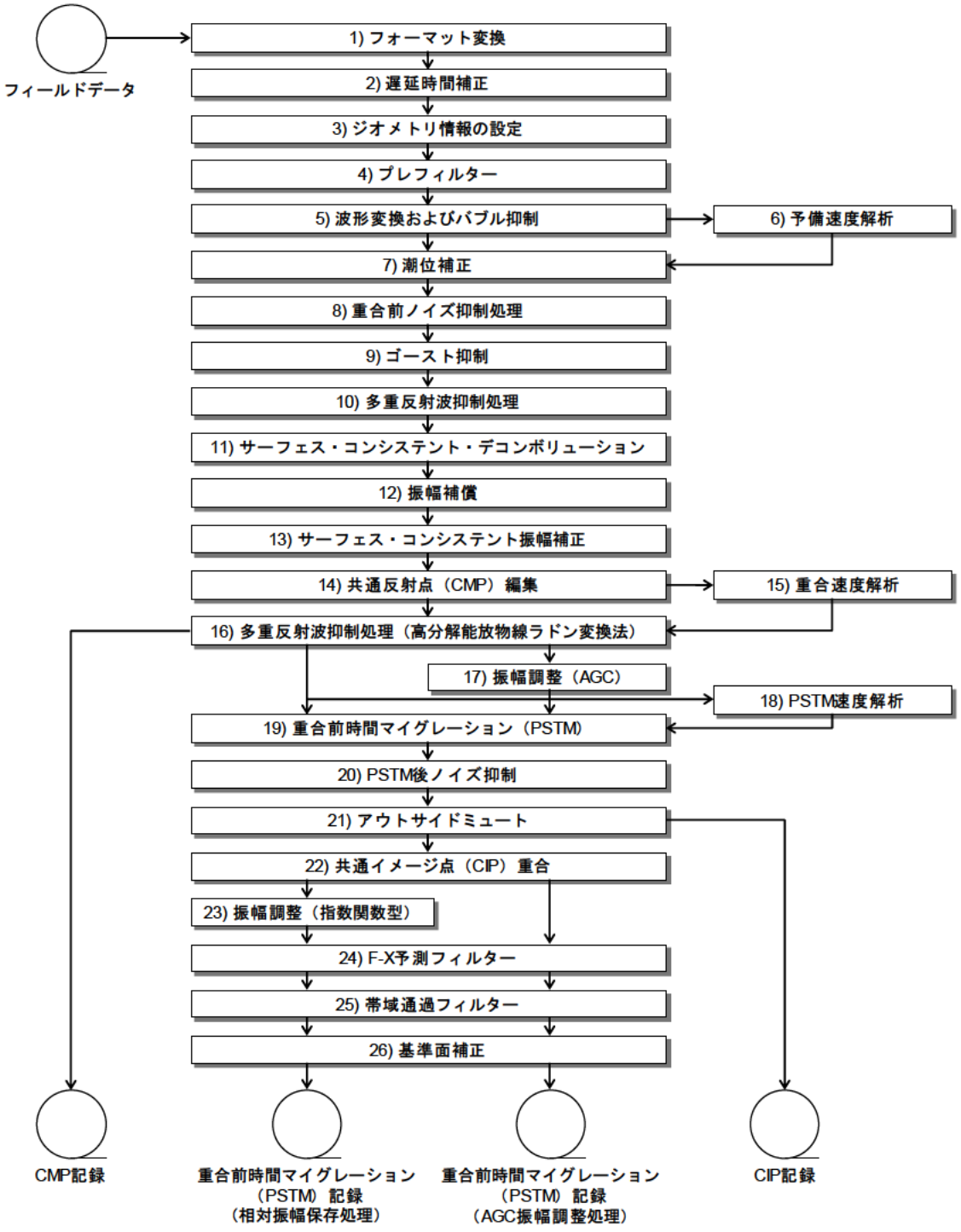


図 3.2-6　データ再処理フローチャート

(4)　考察

今回のデータ再処理の着目点について以下に示す。

①　ノイズ抑制処理

本データ再処理では、相対振幅の保存に留意しつつ、ノイズ特性に応じた各種ノイズ抑制処理を適用した。重合前ノイズ抑制処理では、主に突発的かつ強振幅のノイズ、波浪ノイズやその他のランダムノイズ、線形ノイズを対象としてノイズ抑制処理を適用した。重合前ノイズ抑制処理を適用することで、これらのノイズを効果的に抑制できた。

また、上記の重合前ノイズ抑制処理に加え、PSTM 後の CIP 記録におけるノイズ抑制も実施した。これらノイズ特性に応じた複合型のノイズ抑制処理が最終的な重合記録の品質向上に貢献している。

②　多重反射波抑制処理

対象データは、海底面および強反射面に起因する各種多重反射波が顕著であったことから、多重反射波の抑制が重要である。

SRME 法は、海底地形が複雑な場合でも海底面に起因する長周期の多重反射波を効果的に抑制することができるため、海水面－海底面間の多重反射波の抑制や海水面－強反射面の多重反射波の抑制を目的として適用した。層間多重反射波等の短周期の多重反射波の抑制を目的として、ラディアル・トレース・デコンボリューションを適用した。さらに、高分解能放物線ラドン変換法による多重反射波抑制処理も適用することで、残存する海水面－海底面間の多重反射波や海水面－強反射面の多重反射波等の各種多重反射波を効果的に抑制した。

多重反射波の特性に応じた複合型の多重反射波抑制処理を適用することで、重複的に生じる多重反射波を適切に抑制した。複合型の多重反射波抑制処理は、重合記録の品質向上に寄与しただけでなく、速度解析の精度向上にも貢献している。

③　振源位相の補償

本データ再処理では、エアガンの型式、容量、配列、および深度の情報を基に作成した合成エアガン波形を用いて最小位相に変換した。その後、サーフェス・コンシステント・デコンボリューションを実施し、各発振点・受振点における差分応答を用いて波形の均等化を行うとともに基本波形のパルス化を行った。これにより最終的な位相はゼロ位相となり、極性は正の反射波がピークとなっている。

【参考文献】

1) (国研)海洋研究開発機構、“日本海東縁ひずみ集中帯における地震探査調査研究”（2010）

2) Newman, P., “Divergence effects in a layered earth”, Geophysics, 38, 481-488(1973)

3.3　京都－福井沖

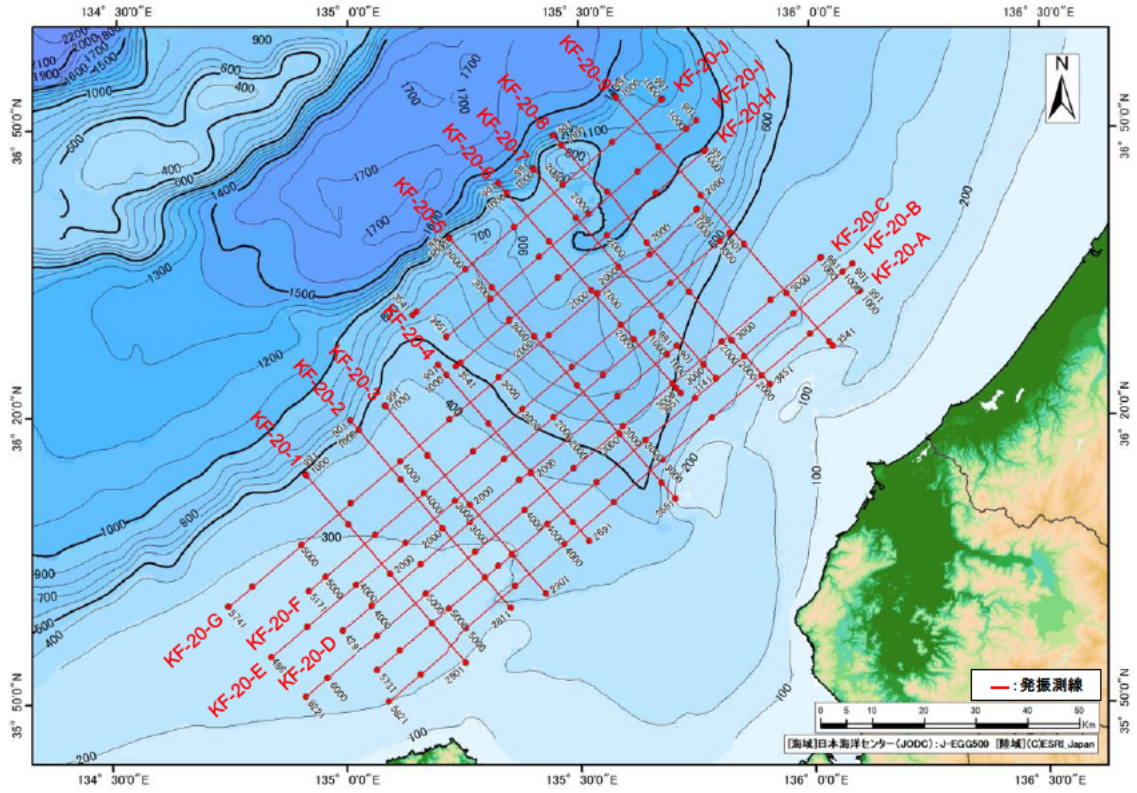
平成３１年度委託事業において実施した基礎物理探査の 2D 探査データおよび公的機関の 2D 探査データの再処理結果から本地点に厚い堆積層が存在する可能性が示唆され、貯留可能域を抽出できる可能性が指摘された。本地点における地質解析と貯留適地評価に資するデータを得ることを目的として、2020 年 7 月～8 月に 2D 探査を実施し、取得したデータを用いてデータ処理を実施した。さらに、本地点における地質解析と貯留適地評価の精度向上に資するデータを得ることを目的として、平成３１年度委託事業において実施した既存 2D 探査データの再処理範囲の周囲を対象として基礎物理探査の 2D 探査データおよび公的機関の 2D 探査データの再処理を実施した。

3.3.1　2D 探査の実施

本地点において、振源にエアガン、受振にストリーマーケーブルを用いた 2D 探査を実施した。

(1)　探査位置

図 3.3-1 に探査位置図（実績）を示す。探査海域は、兵庫県美方郡香美町から福井県あわら市までの沖合である。北西～南東方向の測線が 9 測線（KF-20-1 測線～KF-20-9 測線）、北東～南西方向の測線が 10 測線（KF-20-A 測線～KF-20-J 測線）の合計 19 測線を設定し、観測作業を実施した。表 3.3-1 に測線情報一覧を示す。



注）海域は日本海洋センター（JODC）に、陸域は(C)ESRI_Japan に加筆
注）各測線中に示している数字は、発振点番号を表している

図 3.3-1　探査位置図（実績）

表 3.3-1　測線情報一覧

測線名	始点位置の発振点番号 / 終点位置の発振点番号	始点位置の緯度 / 終点位置の緯度	始点位置の経度 / 終点位置の経度	発振測線長(km)
KF-20-1	991	36° 14′ 15.63″ N	134° 54′ 36.98″ E	47.75
	2901	35° 54′ 35.42″ N	135° 15′ 14.37″ E	
KF-20-2	901	36° 19′ 55.34″ N	135° 00′ 22.36″ E	47.75
	2811	36° 00′ 15.80″ N	135° 21′ 02.07″ E	
KF-20-3	991	36° 21′ 26.93″ N	135° 04′ 52.12″ E	47.75
	2901	36° 01′ 47.39″ N	135° 25′ 32.25″ E	
KF-20-4	901	36° 25′ 41.96″ N	135° 11′ 44.32″ E	44.75
	2691	36° 07′ 16.75″ N	135° 31′ 07.96″ E	
KF-20-5	991	36° 38′ 59.94″ N	135° 13′ 10.34″ E	66.75
	3661	36° 11′ 36.69″ N	135° 42′ 16.97″ E	
KF-20-6	901	36° 44′ 41.29″ N	135° 19′ 34.12″ E	53.75
	3051	36° 22′ 37.56″ N	135° 43′ 02.35″ E	

測線名	始点位置の発振点番号 終点位置の発振点番号	始点位置の緯度 終点位置の緯度	始点位置の経度 終点位置の経度	発振測線長(km)
KF-20-7	991	36° 46′ 13.43″ N	135° 24′ 06.59″ E	53.75
	3141	36° 24′ 09.58″ N	135° 47′ 34.98″ E	
KF-20-8	901	36° 49′ 38.93″ N	135° 26′ 44.71″ E	63.75
	3451	36° 23′ 29.38″ N	135° 54′ 36.58″ E	
KF-20-9	991	36° 53′ 37.43″ N	135° 34′ 50.66″ E	63.75
	3541	36° 27′ 27.75″ N	136° 02′ 43.73″ E	
KF-20-A	991	36° 33′ 10.94″ N	136° 06′ 23.65″ E	120.75
	5821	35° 50′ 32.63″ N	135° 05′ 20.65″ E	
KF-20-B	901	36° 36′ 01.16″ N	136° 05′ 23.28″ E	120.75
	5731	35° 53′ 50.47″ N	135° 03′ 49.08″ E	
KF-20-C	991	36° 36′ 43.47″ N	136° 01′ 20.41″ E	130.75
	6221	35° 51′ 03.79″ N	134° 54′ 40.46″ E	
KF-20-D	901	36° 27′ 36.68″ N	135° 42′ 34.57″ E	84.75
	4291	35° 57′ 56.66″ N	134° 59′ 26.72″ E	
KF-20-E	991	36° 29′ 00.91″ N	135° 39′ 32.46″ E	96.75
	4861	35° 55′ 10.28″ N	134° 50′ 17.18″ E	
KF-20-F	901	36° 39′ 21.72″ N	135° 49′ 31.23″ E	106.75
	5171	36° 02′ 03.19″ N	134° 55′ 02.53″ E	
KF-20-G	991	36° 41′ 52.43″ N	135° 45′ 22.54″ E	118.75
	5741	36° 00′ 23.03″ N	134° 44′ 45.21″ E	
KF-20-H	991	36° 48′ 02.51″ N	135° 46′ 30.13″ E	63.75
	3541	36° 25′ 33.80″ N	135° 14′ 04.04″ E	
KF-20-I	901	36° 51′ 05.48″ N	135° 45′ 17.32″ E	63.75
	3451	36° 28′ 37.48″ N	135° 12′ 49.26″ E	
KF-20-J	991	36° 53′ 22.84″ N	135° 40′ 53.49″ E	63.75
	3541	36° 30′ 54.43″ N	135° 08′ 24.83″ E	

準拠楕円体は、WGS84 を使用

(2)　探査期間

本調査の作業期間は、2020 年 7 月 27 日～8 月 14 日までの 19 日間であった。当初の作業期間は 2020 年 7 月 27 日～8 月 11 日までの 16 日間の計画であったが、調査機器の不具合、漁船ならびに漁具との遭遇による回避行動、台風の影響による調査の中断により、19 日間の作業期間となった。本調査の作業開始前に観測船の艤装作業を 2020 年 7 月 19 日～7 月 23 日まで実施し、作業終了後に観測船の解装作業を 2020 年 8 月 17 日～8 月 20 日まで実施した。

(3) 探査工程

本調査を開始するに当たり、事前に地元自治体、関係公的機関、漁業関係者等への作業説明や各種許可申請を行った。

観測船の艤装作業は、2020 年 7 月 19 日～7 月 23 日まで神奈川県横須賀新港において実施した。2020 年 7 月 27 日に、石川県金沢港の観測船内にて、HSE ミーティングならびに本作業の最終的な打ち合わせを実施した。2020 年 7 月 28 日に、傭船した警戒船とともに調査海域に向けて出港した。調査海域到着後、ストリーマーケーブルおよびエアガンを投入し、機器動作テストを実施した。使用機器が正常に動作していることを確認し、KF-20-H 測線から観測作業を実施した。2020 年 8 月 10 日の KF-20-2 測線の観測作業終了後、台風 5 号の当該海域通過による影響を避けるため、2020 年 8 月 10 日午後～8 月 11 日明け方まで観測作業を中断した。2020 年 8 月 11 日午後から観測作業を再開し、2020 年 8 月 14 日に本作業を終了した。観測船の解装作業は、2020 年 8 月 17 日～8 月 20 日まで神奈川県横須賀新港において実施した。探査工程一覧を表 3.3-2 に示す。

表 3.3-2　探査工程一覧表

作業日	作業内容	測線番号	備考
7 月 27 日	調査員入場 HSE ミーティング		石川県金沢港
7 月 28 日	観測船および警戒船出港 ストリーマーケーブル投入作業 エアガン投入作業 機器動作テスト		石川県金沢港
7 月 29 日	観測作業	KF-20-H-01 KF-20-I-02 KF-20-J-03	観測作業開始／終了、測線移動 観測作業開始／終了、測線移動 観測作業開始
7 月 30 日	観測作業	KF-20-J-03 KF-20-5-04 KF-20-6-05	観測作業継続／終了、測線移動 観測作業開始／終了（漁船と遭遇したため測線途中で終了）、測線移動 観測作業開始
7 月 31 日	観測作業	KF-20-6-05 KF-20-7-06 KF-20-6-07 KF-20-7-08	観測作業継続／終了、測線移動 観測作業開始／終了（調査機器の不具合のため測線途中で終了）、測線移動 観測作業開始／終了、測線移動 観測作業開始

作業日	作業内容	測線番号	備考
8月1日	観測作業	KF-20-7-08 KF-20-8-09 KF-20-8-10	観測作業継続／終了、測線移動 観測作業開始／中断（調査機器の不具合） 観測作業再開
8月2日	観測作業	KF-20-8-10 KF-20-9-11 KF-20-G-12	観測作業継続／終了、測線移動 観測作業開始／終了（調査機器の不具合のため測線途中で終了）、測線移動 観測作業開始
8月3日	観測作業	KF-20-G-12 KF-20-F-13	観測作業継続／終了、測線移動 観測作業開始
8月4日	観測作業	KF-20-F-13 KF-20-9-14 KF-20-A-15	観測作業継続／終了、測線移動 観測作業開始／終了、測線移動 観測作業開始
8月5日	観測作業	KF-20-A-15 KF-20-B-16	観測作業継続／終了、測線移動 観測作業開始
8月6日	観測作業	KF-20-B-16 KF-20-C-17	観測作業継続／終了、測線移動 観測作業開始
8月7日	観測作業	KF-20-C-17 KF-20-D-18 KF-20-E-19	観測作業継続／終了、測線移動 観測作業開始／終了、測線移動 観測作業開始
8月8日	観測作業	KF-20-E-19 KF-20-1-20	観測作業継続／終了、測線移動 観測作業開始
8月9日	観測作業	KF-20-1-20 KF-20-B-21 KF-20-4-22	観測作業継続／終了、測線移動 観測作業開始／終了、測線移動 観測作業開始／終了、測線移動
8月10日	観測作業 エアガン揚収作業 ストリーマーケーブル揚収作業	KF-20-3-23 KF-20-2-24	観測作業開始／終了、測線移動 観測作業開始／終了 台風５号の通過による荒天待機のため、観測作業を一時中断
8月11日	荒天待機 ストリーマーケーブル投入作業 エアガン投入作業 観測作業	 KF-20-2-25	台風５号の通過による荒天待機のため、観測作業を一時中断 観測作業再開／終了、測線移動
8月12日	観測作業	KF-20-5-26 KF-20-B-27	観測作業開始／終了（遊漁船と遭遇したため測線途中で終了）、測線移動 観測作業開始／終了、測線移動

作業日	作業内容	測線番号	備考
		KF-20-B-28 KF-20-8-29 KF-20-6-30	観測作業開始／終了、測線移動 観測作業開始／終了、測線移動 観測作業開始／終了、測線移動
8 月 13 日	観測作業 エアガン揚収作業 ストリーマーケーブル揚収作業	KF-20-5-31 KF-20-8-32 KF-20-G-33 KF-20-G-34	観測作業開始／終了、測線移動 観測作業開始／終了、測線移動 観測作業開始／中断（フェリーの航行ノイズ） 観測作業再開／終了
8 月 14 日	ストリーマーケーブル揚収作業（継続） 観測船および警戒船帰港 調査員離場		観測作業開始／終了 石川県金沢港

注）測線名の後ろの枝番号は、観測作業開始から終了または中断を一つの作業単位とした作業番号である。

(4) 探査詳細

① 探査内容

観測作業模式図を図 3.3-2 に示す。観測船が曳航するエアガンにより水中で音波を発生させ、同じく観測船が曳航する長さ 4,050 m のストリーマーケーブルに内蔵した多数の受振器で海底面や地下の地層境界面等から反射して戻ってくる音波を受振した。受振した信号は、観測船内の探鉱機にて収録した。発振した時刻の GPS 時間を発振時刻として記録した。観測作業は、24 時間の連続作業で実施した。

本調査は、観測船 1 隻のほかに、漁具および航行船舶を警戒、監視する警戒船 2 隻の合計 3 隻で調査を実施した。警戒船は、観測船前方ならびに曳航するストリーマーケーブルの側方または後方に配置した。漁業関係者から事前に入手したカニ籠ブイの位置を確認するため、日中に警戒船による予察を適宜実施した。レーダーによる航行船舶および漁船の位置の確認を適宜行い、接近する航行船舶および漁船に対しては、回避を依頼する連絡等を行い船舶の航行に大きな障害とならないよう観測作業を実施した。調査船舶一覧を表 3.3-3 に示す。

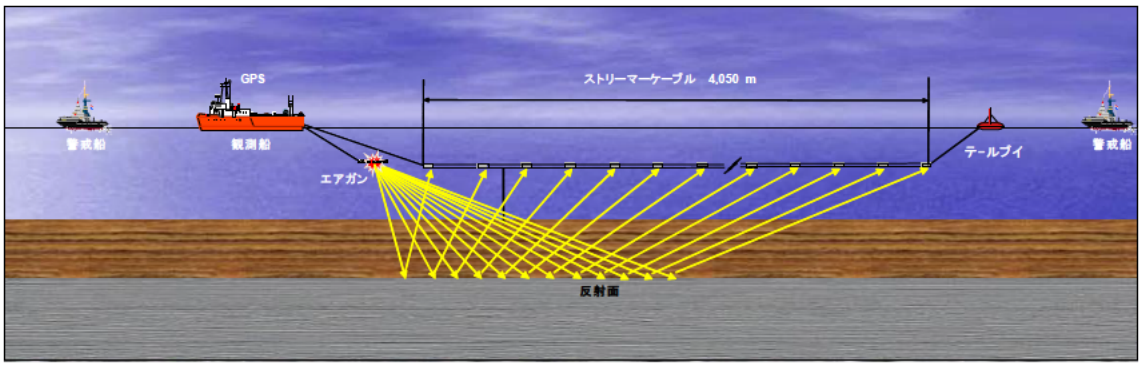


図 3.3-2　観測作業模式図

表 3.3-3　調査船舶一覧

	観測船	警戒船 1	警戒船 2
船名	かいゆう	第八阿蘇丸	第八英祥丸
全長（m）	62.40	40.51	35.40
総重量（t）	1,292	253	167
最大喫水（m）	5.00	4.00	3.30
航行最大速度（knots）	13.50	11.00	11.00
定員船員数（人）	40	18	14

②　使用した主要機器およびデータ取得仕様

本調査において使用した主要機器一覧を表 3.3-4 に、データ取得仕様一覧を表 3.3-5 に、測地諸元を表 3.3-6 に示す。

本調査における振源は、エアガンを複数組み合わせたエアガンアレイを使用した。エアガン本体が発振予定位置に到達した時に発振するため、ジャイロコンパスの方位データを用いてディファレンシャル GPS 測位（以下、「DGPS」と称する。）位置（GPS 受信アンテナ位置）から曳航しているエアガン位置を算出し、振源位置での発振制御を行った。DGPS 補正データは、静止衛星型衛生航法補強システム（SBAS：Satellite-Band Augmentation System）を利用した。

本調査における受振器は、ストリーマーケーブル方式の受振器を使用し、ストリーマーケーブルと一体となったデータ収録装置を使用した。ストリーマーケーブルには、磁気コンパスによってストリーマーケーブルの軌跡情報を取得する Compass Bird を取り付けた。Compass Bird から定期的に方位情報と深度情報が観測船に送信される。これらの位置情報から発振時刻におけるストリーマーケーブルの偏奇情報が得られる。このストリーマー

ケーブルの偏奇情報、観測船に設置した DGPS 受信機およびテールブイに設置したリライディブ GPS 測位（以下、「RGPS」と称する。）システムから得た情報を合わせることで各発振点における受振点位置を制御した。

本調査における航法装置は、GPS 受信機から送信される位置データ、ジャイロコンパスから得られる方位データ、測深機から得られる水深データ等を毎秒取り込み、観測船と予定測線の位置関係をリアルタイムでモニター上にグラフィックと数値で表示できるシステムを使用した。操船者（航海士）は、モニターに表示される位置情報を参照しながら操船を行った。

表 3.3-4　本調査において使用した主要機器一覧

発振に関する主要機器	
機器項目	機器名称および機器仕様等
エアガン	名称　：Bolt 社製 1500LL Long Life Airgun エアガン容量：1,950 cu.in. エアガン圧力：2,000 psi
制御装置	名称　：Seamap 社製 GunLink 2000
コンプレッサー	名称　：Hamworthy KSE 社製 4TH565W100-425E
受振に関する主要機器	
機器項目	機器名称および機器仕様等
ストリーマーケーブル	名称　：Sercel 社製 Sentinel Solid Active Section 受振器　：Sercel 社製 10 Hz Hydrophone Vinci NH 95-200 ケーブル長　：4,050 m
ストリーマーケーブル深度制御装置	名称　：ION Digicourse 社製 Compass Bird
データ収録に関する主要機器	
機器項目	機器名称および機器仕様等
データ収録装置	名称　：Sercel 社製 Seal 428 Ver.1.1 A/D 変換　：24 bit Delta-Sigma 記録形式　：SEG-D 8058 rev.1
測量・航法に関する主要機器	
機器項目	機器名称および機器仕様等
航法システム	名称　：JGI 社製 CHiPS2
DGPS システム	名称　：ニコン・トリンブル社製 SPS855
RGPS システム	名称　：Seamap 社製 Buoylink 4DX RGPS システム
GPS GYRO	名称　：Kongsberg 社製 Seapath 330

表 3.3-5　データ取得仕様一覧

発振に関する仕様	
仕様項目	仕様等
エアガン深度	6 m
発振点間隔	25 m
受振に関する仕様	
仕様項目	仕様等
ストリーマーケーブル深度	8 m
受振点間隔	12.5 m
チャンネル数	324 ch
取得オフセット範囲	110～4,160 m
データ収録に関する仕様	
仕様項目	仕様等
サンプリング間隔	2 msec
極性	Compression = Negative
記録長	8 sec
標準重合数	81
低域遮断周波数	3 Hz（6 dB/OCT）
高域遮断周波数	200 Hz（370 dB/OCT）
プリアンプゲイン	0 dB

表 3.3-6　本調査において使用した測地諸元

準拠楕円体	WGS84
長半径	6,378,137.00000000 m
短半径	6,356,752.31424500 m
投影法	Universal Transverse Mercator（UTM 図法）
系番号	53
座標原点 緯度	00° 00′ 00.000" N
座標原点 経度	135° 00′ 00.000" E
縮尺係数	0.999600
北方加数	0.000 m
東方加数	500,000.000 m

③　観測作業実績

測線実績一覧を表 3.3-7 に示す。設定した北西～南東方向の測線が 9 測線（KF-20-1 測線～KF-20-9 測線）、北東～南西方向の測線が 10 測線（KF-20-A 測線～KF-20-J 測線）の合計 19 測線で観測作業を実施した。発振測線長の合計は、1534.45 km であった。

表 3.3-7　測線実績一覧

測線番号	FSP 日時	LSP 日時	FSP 番号	FGSP 番号	LGSP 番号	LSP 番号	発振点数	発振測線長 (km)	観測方向
KF-20-H-01	7/29 0:24	7/29 9:26	991	1001	3521	3541	2550	63.750	NE → SW
KF-20-I-02	7/29 11:45	7/29 20:17	3451	3441	921	901	2550	63.750	SW → NE
KF-20-J-03	7/29 22:33	7/30 6:43	991	1001	3521	3541	2550	63.750	NE → SW
KF-20-5-04	7/30 11:49	7/30 20:31	991	1001	3061	3061	2070	51.750	NW → SE
KF-20-6-05	7/30 23:15	7/31 5:57	3051	2951	921	901	2150	53.750	SE → NW
KF-20-7-06	7/31 8:03	7/31 8:52	991	1001	1200	1233	242	6.050	NW → SE
KF-20-6-07	7/31 17:58	7/31 18:24	1640	1600	1551	1511	129	3.225	SE → NW
KF-20-7-08	7/31 22:16	8/1 7:13	991	1201	3121	3141	2150	53.750	NW → SE
KF-20-8-09	8/1 9:23	8/1 14:14	3221	3171	2151	1692	1530	38.250	SE → NW
KF-20-8-10	8/1 19:53	8/2 0:08	2217	2150	921	901	1316	32.900	SE → NW
KF-20-9-11	8/2 2:58	8/2 9:49	991	1001	3095	3157	2166	54.150	NW → SE
KF-20-G-12	8/2 18:00	8/3 10:43	991	1774	5721	5741	4750	118.750	NE → SW
KF-20-F-13	8/3 13:39	8/4 3:15	5171	5161	921	901	4270	106.750	SW → NE
KF-20-9-14	8/4 5:48	8/4 7:20	3056	3096	3521	3541	486	12.150	NW → SE
KF-20-A-15	8/4 11:16	8/5 6:38	991	1001	5801	5821	4830	120.750	NE → SW
KF-20-B-16	8/5 9:21	8/6 0:09	5731	5721	921	901	4830	120.750	SW → NE
KF-20-C-17	8/6 3:24	8/7 0:33	991	1001	6201	6221	5230	130.750	NE → SW
KF-20-D-18	8/7 3:39	8/7 14:07	4291	4281	921	901	3390	84.750	SW → NE
KF-20-E-19	8/7 16:08	8/8 9:46	991	1001	4841	4861	3870	96.750	NE → SW
KF-20-1-20	8/8 19:32	8/9 1:28	991	1001	2881	2901	1910	47.750	NW → SE
KF-20-B-21	8/9 7:07	8/9 7:23	4690	4650	4645	4605	86	2.150	SW → NE
KF-20-4-22	8/9 16:08	8/9 21:44	2691	2681	921	901	1790	44.750	SE → NW
KF-20-3-23	8/10 0:46	8/10 7:28	991	1001	2881	2901	1910	47.750	NW → SE
KF-20-2-24	8/10 9:56	8/10 12:56	2811	2801	1851	1848	964	24.100	SE → NW
KF-20-2-25	8/11 15:58	8/11 19:45	1890	1850	921	901	989	24.725	SE → NW
KF-20-5-26	8/12 3:49	8/12 5:40	3022	3062	3510	3510	489	12.225	NW → SE
KF-20-B-27	8/12 8:07	8/12 8:41	2860	2820	2715	2675	186	4.650	SW → NE
KF-20-B-28	8/12 11:01	8/12 11:16	1814	1774	1771	1731	83	2.075	SW → NE
KF-20-8-29	8/12 16:18	8/12 17:31	3451	3441	3220	3180	272	6.800	SE → NW
KF-20-6-30	8/12 21:24	8/12 22:48	3051	3041	2679	2639	413	10.325	SE → NW
KF-20-5-31	8/13 2:59	8/13 3:40	3471	3511	3641	3661	190	4.750	NW → SE
KF-20-8-32	8/13 9:45	8/13 10:14	3259	3219	3172	3132	128	3.200	SE → NW
KF-20-G-33	8/13 14:57	8/13 15:09	1401	—	—	1459	—	—	NE → SW
KF-20-G-34	8/13 20:28	8/13 23:29	991	1001	1773	1900	909	22.725	NE → SW

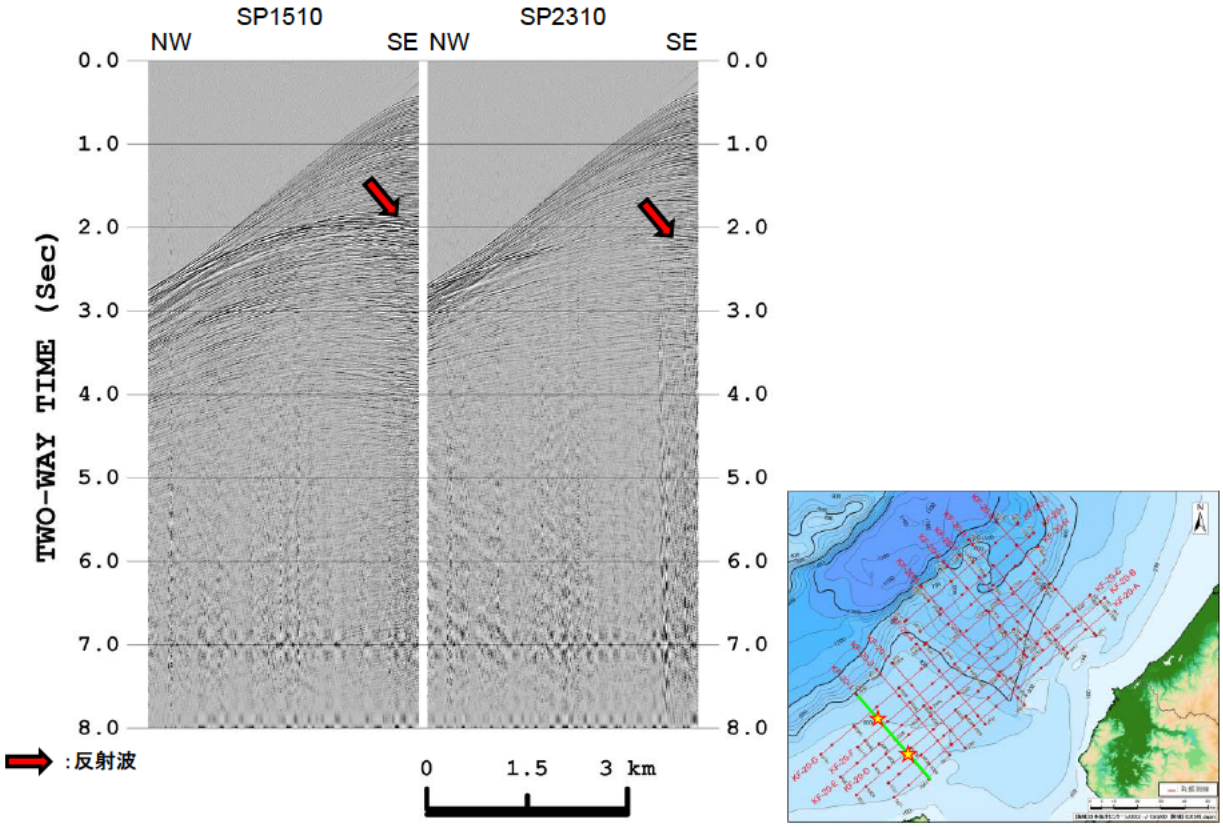
注）FSP：First Shot Point の略称、FGSP：First Good Shot Point の略称である。
注）LSP：Last Shot Point の略称、LGSP：Last Good Shpt Point の略称である。
注）測線名の後ろの枝番号は、観測作業開始から終了または中断を一つの作業単位とした作業番号である。

(5)　データ取得結果

取得した発振記録のうち､各測線における代表的な発振記録を図 3.3-3(1)～(19)に示す。海況が良く、天候の悪化による影響も軽微だったため、全体的に S/N 比の高い発振記録を取得できた。

①　KF-20-1 測線の発振記録例

KF-20-1 測線における SP1510 と SP2310 の発振記録を図 3.3-3(1)に示す。海況が穏やかであったため、潮流の影響によるノイズは軽微であった。SP1510 の発振記録には、往復走時 1.9 秒付近まで反射波が確認できる（赤矢印）。SP2310 の発振記録には、往復走時 2.1 秒付近まで反射波が確認できる（赤矢印）。

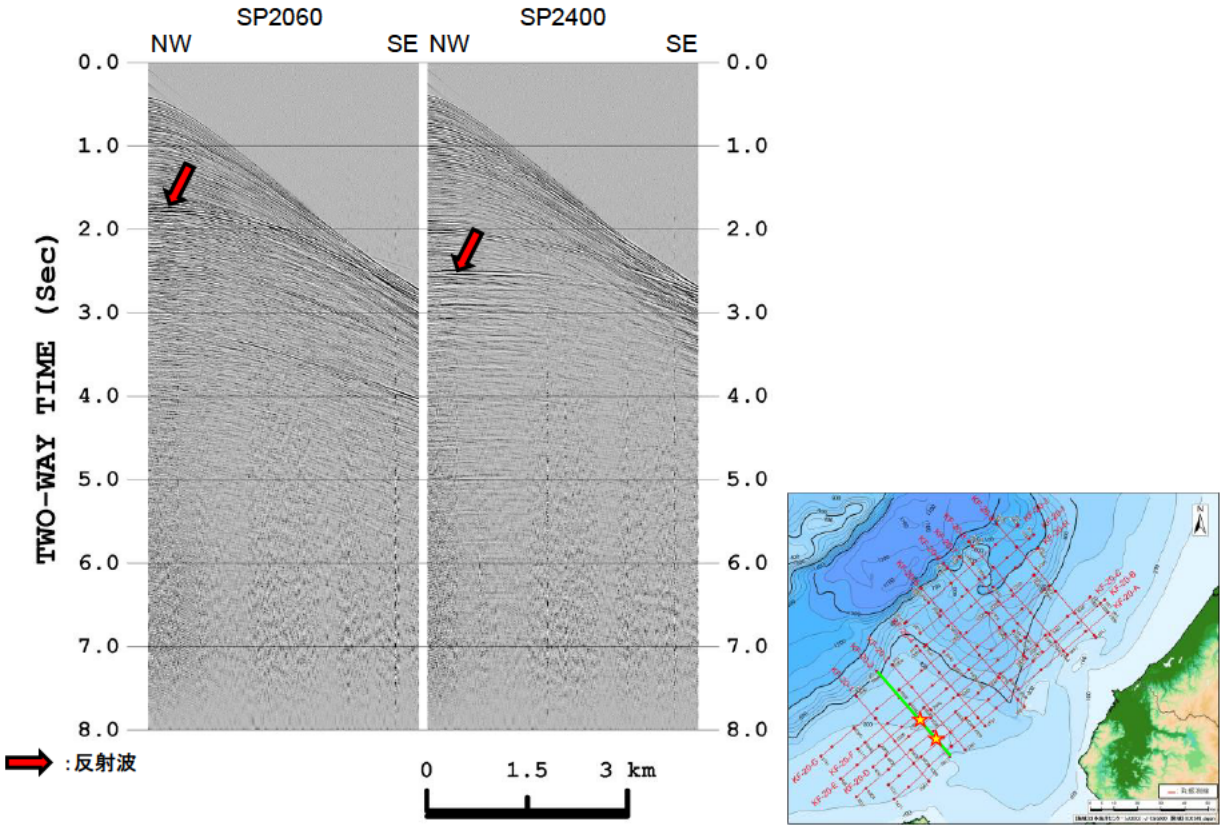


注）インデックスマップ：海域は日本海洋センター（JODC）に、陸域は(C)ESRI_Japan に加筆
注）時間関数ゲインを適用、3 Hz のローカットフィルターを適用
注）発振記録の下方に見えるノイズのようなものは、ローカットフィルターを適用したことによるものであり、実際の発振記録にはこのようなノイズはみられない。

図 3.3-3(1)　KF-20-1 測線の発振記録例（SP1510、SP2310）

② KF-20-2 測線の発振記録例

KF-20-2 測線における SP2060 と SP2400 の発振記録を図 3.3-3(2)に示す。海況が穏やかであったため、潮流の影響によるノイズは軽微であった。SP2060 の発振記録には、往復走時 1.8 秒付近まで反射波が確認できる（赤矢印）。SP2400 の発振記録には、往復走時 2.5 秒付近まで反射波が確認できる（赤矢印）。

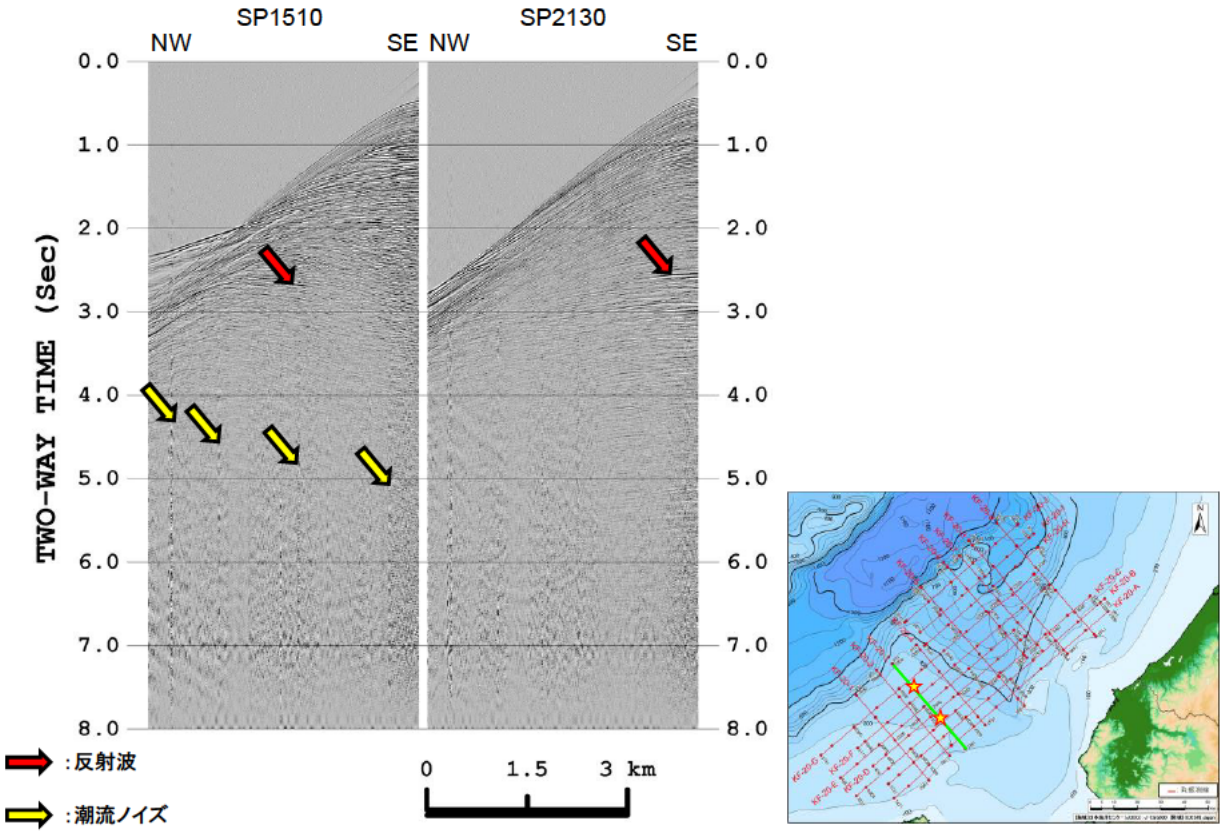


注）インデックスマップ：海域は日本海洋センター（JODC）に、陸域は(C)ESRI_Japan に加筆
注）時間関数ゲインを適用、3 Hz のローカットフィルターを適用
注）発振記録の下方に見えるノイズのようなものは、ローカットフィルターを適用したことによるものであり、実際の発振記録にはこのようなノイズはみられない。

図 3.3-3(2)　KF-20-2 測線の発振記録例（SP2060、SP2400）

③　KF-20-3 測線の発振記録例

KF-20-3 測線における SP1510 と SP2130 の発振記録を図 3.3-3(3)に示す。海況が穏やかであったが、SP1510 の発振記録には、潮流の影響により一部のチャンネルにノイズの混入が確認できる（黄色矢印）。SP1510、SP2310 の発振記録ともに、往復走時 2.5 秒付近まで反射波が確認できる（赤矢印）。

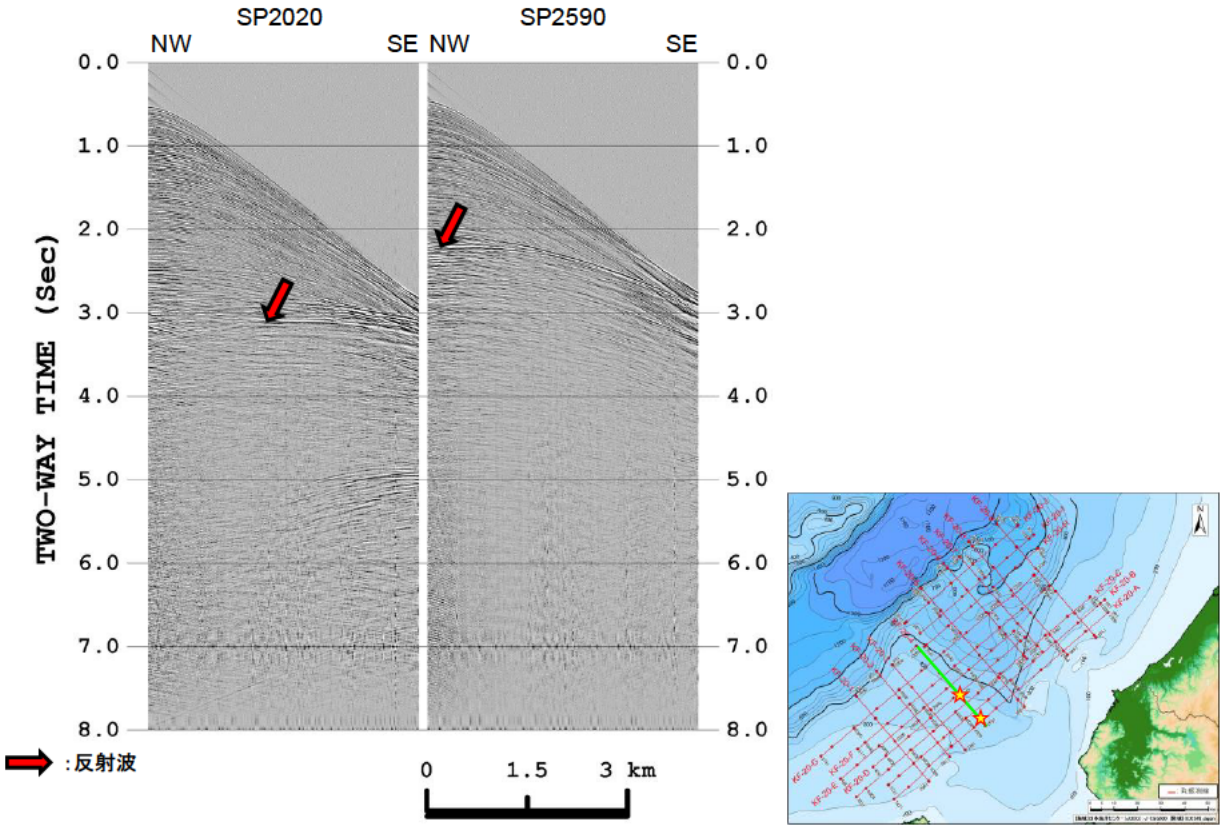


注）インデックスマップ：海域は日本海洋センター（JODC）に、陸域は(C)ESRI_Japan に加筆
注）時間関数ゲインを適用、3 Hz のローカットフィルターを適用
注）発振記録の下方に見えるノイズのようなものは、ローカットフィルターを適用したことによるものであり、実際の発振記録にはこのようなノイズはみられない。

図 3.3-3(3)　KF-20-3 測線の発振記録例（SP1510、SP2130）

④ KF-20-4 測線の発振記録例

KF-20-4 測線における SP2020 と SP2590 の発振記録を図 3.3-3(4)に示す。海況が穏やかであったため、潮流の影響によるノイズは軽微であった。SP2020 の発振記録には、往復走時 3.1 秒付近まで反射波が確認できる（赤矢印）。SP2590 の発振記録には、往復走時 2.2 秒付近まで反射波が確認できる（赤矢印）。

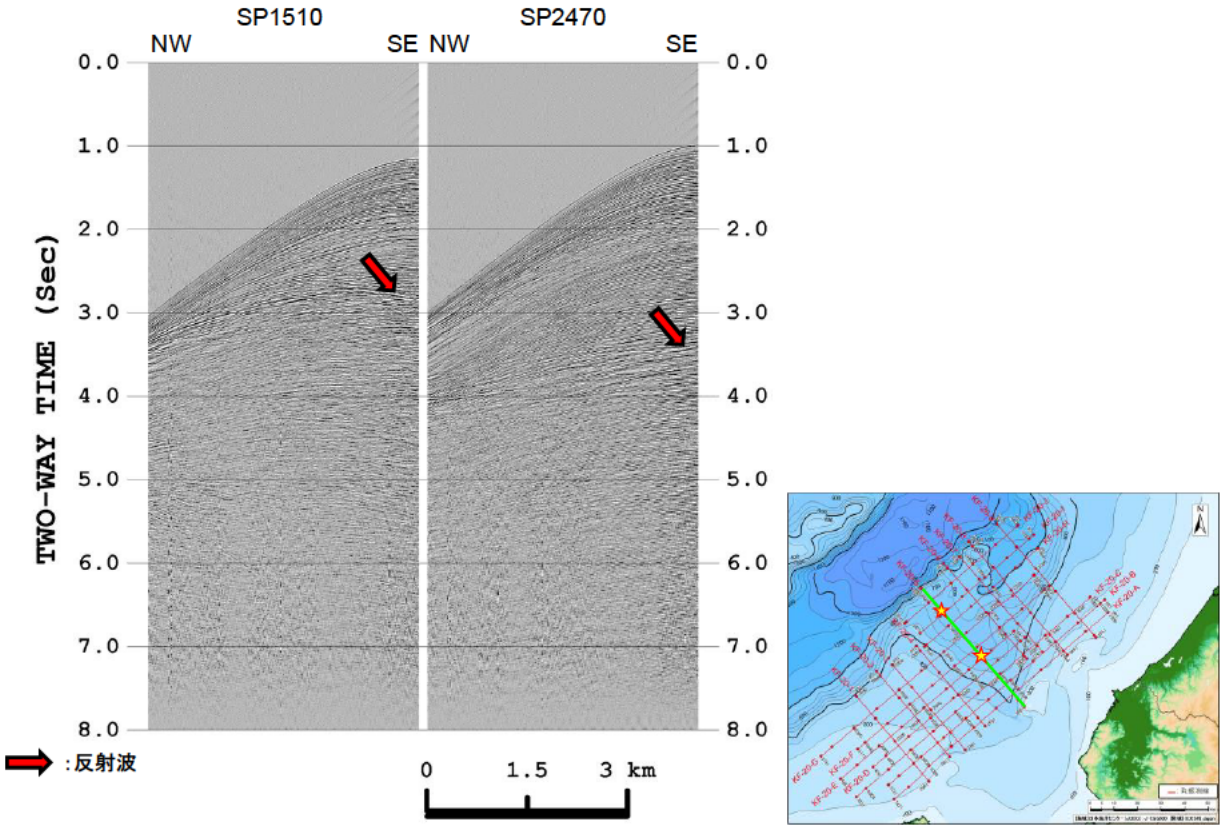


注）インデックスマップ：海域は日本海洋センター（JODC）に、陸域は(C)ESRI_Japan に加筆
注）時間関数ゲインを適用、3 Hz のローカットフィルターを適用
注）発振記録の下方に見えるノイズのようなものは、ローカットフィルターを適用したことによるものであり、実際の発振記録にはこのようなノイズはみられない。

図 3.3-3(4)　KF-20-4 測線の発振記録例（SP2020、SP2590）

⑤　KF-20-5 測線の発振記録例

KF-20-5 測線における SP1510 と SP2470 の発振記録を図 3.3-3(5)に示す。海況が穏やかであったため、潮流の影響によるノイズは軽微であった。SP1510 の発振記録には、往復走時 2.8 秒付近まで反射波が確認できる（赤矢印）。SP2470 の発振記録には、往復走時 3.5 秒付近まで反射波が確認できる（赤矢印）。

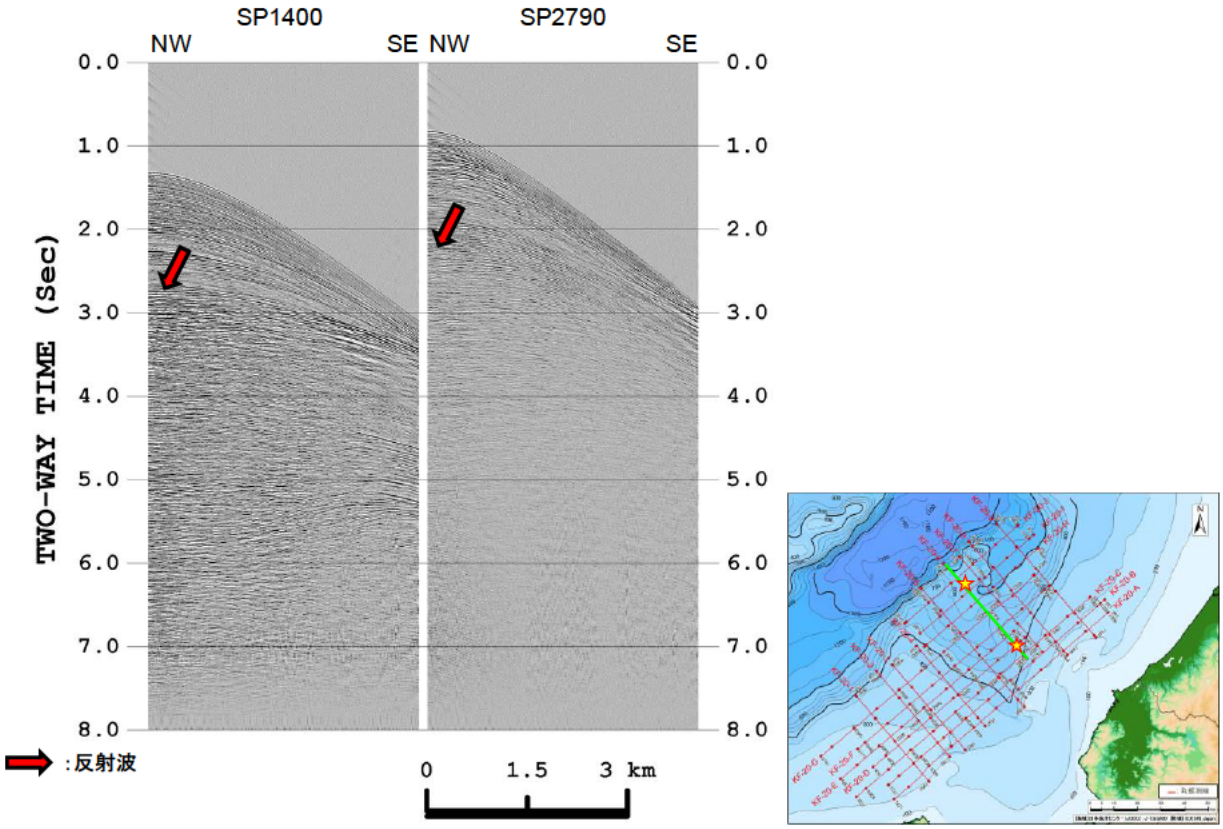


注）インデックスマップ：海域は日本海洋センター（JODC）に、陸域は(C)ESRI_Japan に加筆
注）時間関数ゲインを適用、3 Hz のローカットフィルターを適用
注）発振記録の下方に見えるノイズのようなものは、ローカットフィルターを適用したことによるものであり、実際の発振記録にはこのようなノイズはみられない。

図 3.3-3(5)　KF-20-5 測線の発振記録例（SP1510、SP2470）

⑥　KF-20-6 測線の発振記録例

KF-20-6 測線における SP1400 と SP2790 の発振記録を図 3.3-3(6)に示す。海況が穏やかであったため、潮流の影響によるノイズは軽微であった。SP1400 の発振記録には、往復走時 2.5 秒付近まで反射波が確認できる（赤矢印）。SP2790 の発振記録には、往復走時 2.2 秒付近まで反射波が確認できる（赤矢印）。

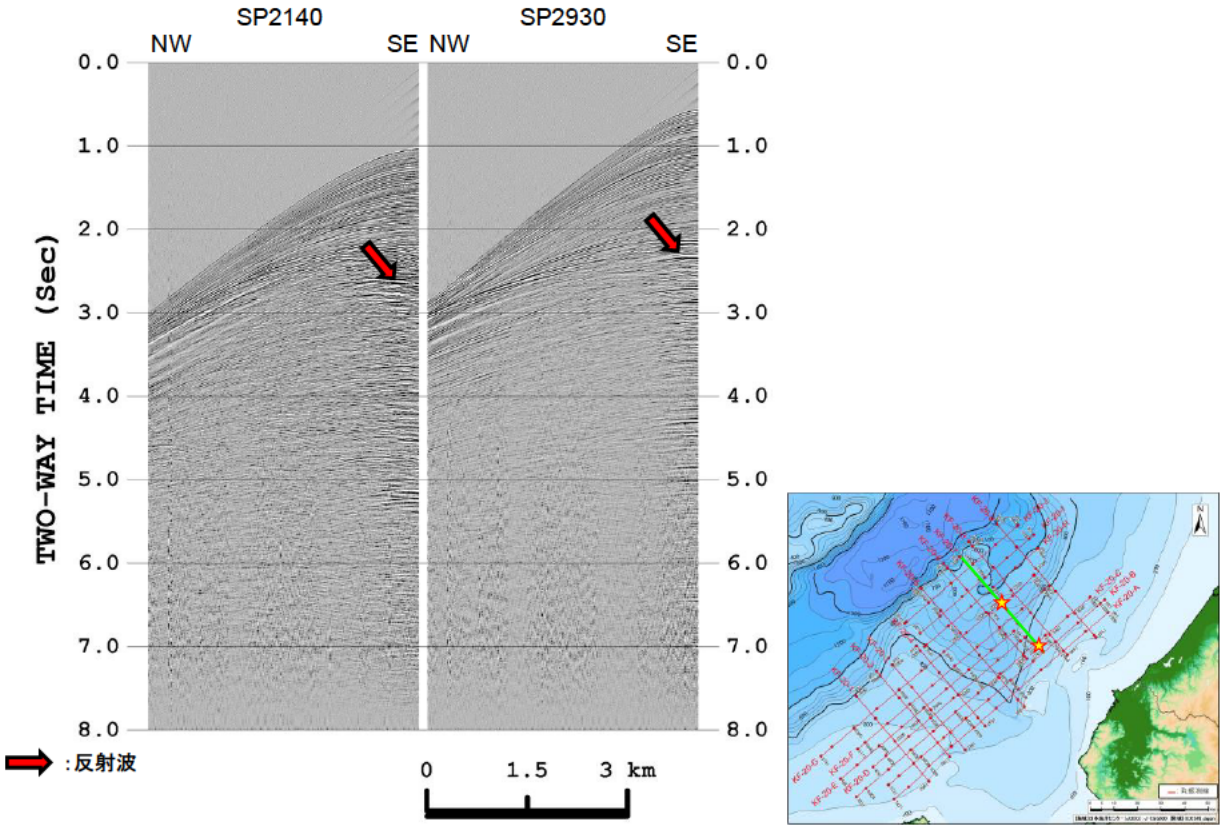


注）インデックスマップ：海域は日本海洋センター（JODC）に、陸域は(C)ESRI_Japan に加筆
注）時間関数ゲインを適用、3 Hz のローカットフィルターを適用
注）発振記録の下方に見えるノイズのようなものは、ローカットフィルターを適用したことによるものであり、実際の発振記録にはこのようなノイズはみられない。

図 3.3-3(6)　KF-20-6 測線の発振記録例（SP1400、SP2790）

⑦　KF-20-7 測線の発振記録例

KF-20-7 測線における SP2140 と SP2930 の発振記録を図 3.3-3(7)に示す。海況が穏やかであったため、潮流の影響によるノイズは軽微であった。SP2140 の発振記録には、往復走時 2.5 秒付近まで反射波が確認できる（赤矢印）。SP2930 の発振記録には、往復走時 2.2 秒付近まで反射波が確認できる（赤矢印）。

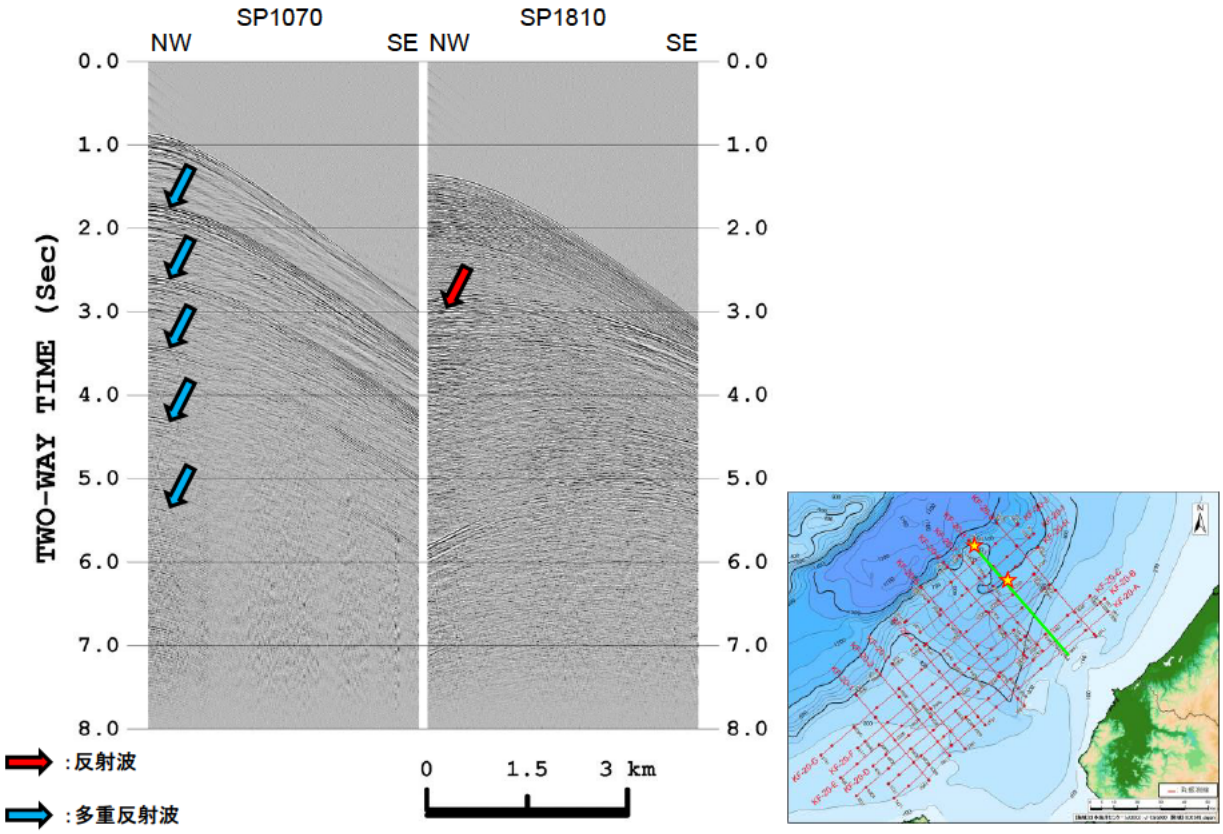


注）インデックスマップ：海域は日本海洋センター（JODC）に、陸域は(C)ESRI_Japan に加筆
注）時間関数ゲインを適用、3 Hz のローカットフィルターを適用
注）発振記録の下方に見えるノイズのようなものは、ローカットフィルターを適用したことによるものであり、実際の発振記録にはこのようなノイズはみられない。

図 3.3-3(7)　KF-20-7 測線の発振記録例（SP2140、SP2930）

⑧　KF-20-8 測線の発振記録例

KF-20-8 測線における SP1070 と SP1810 の発振記録を図 3.3-3(8)に示す。海況が穏やかであったため、潮流の影響によるノイズは軽微であった。SP1070 の発振記録には、5 次までの多重反射波が確認できる（青矢印）。SP1810 の発振記録には、往復走時 3.0 秒付近まで反射波が確認できる（赤矢印）。

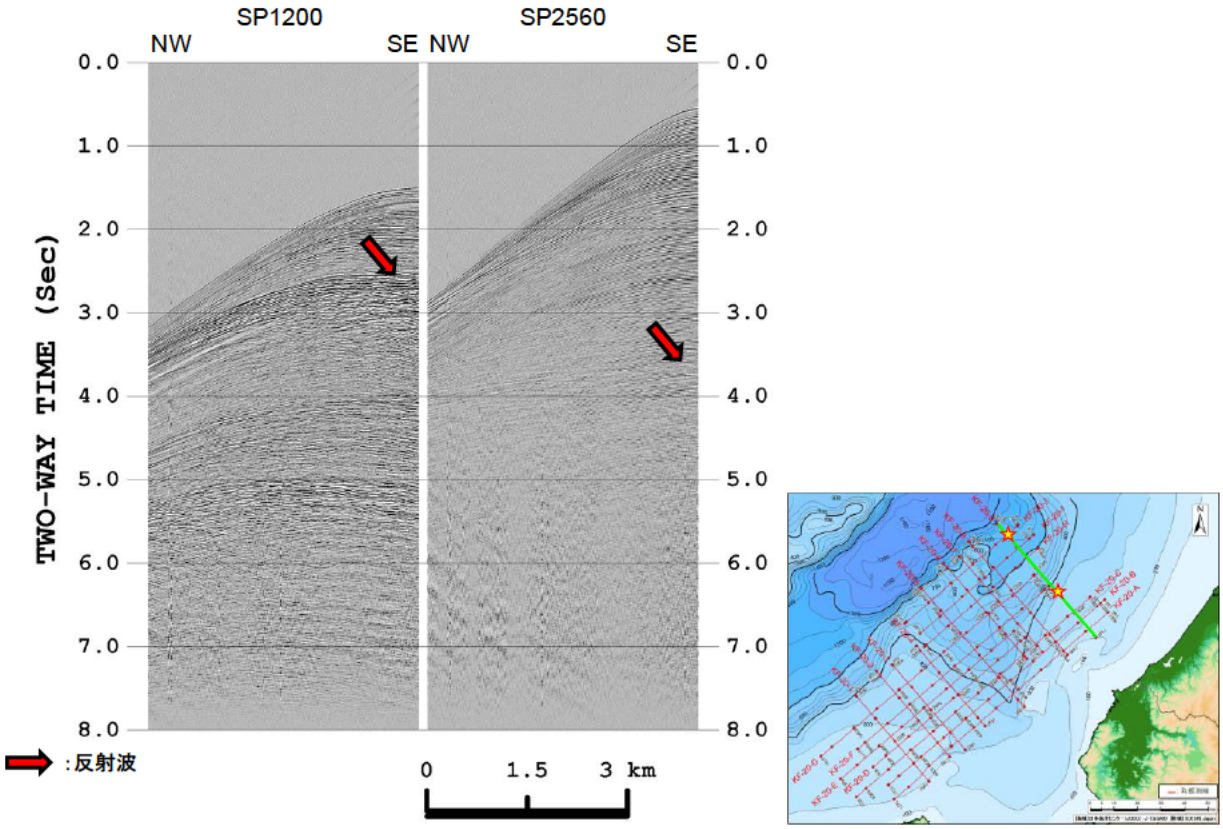


注）インデックスマップ：海域は日本海洋センター（JODC）に、陸域は(C)ESRI_Japan に加筆
注）時間関数ゲインを適用、3 Hz のローカットフィルターを適用
注）発振記録の下方に見えるノイズのようなものは、ローカットフィルターを適用したことによるものであり、実際の発振記録にはこのようなノイズはみられない。

図 3.3-3(8)　KF-20-8 測線の発振記録例（SP1070、SP1810）

⑨　KF-20-9 測線の発振記録例

KF-20-9 測線における SP1200 と SP2560 の発振記録を図 3.3-3(9)に示す。海況が穏やかであったため、潮流の影響によるノイズは軽微であった。SP1200 の発振記録には、往復走時 2.5 秒付近まで反射波が確認できる（赤矢印）。SP2560 の発振記録には、往復走時 3.5 秒付近まで反射波が確認できる（赤矢印）。

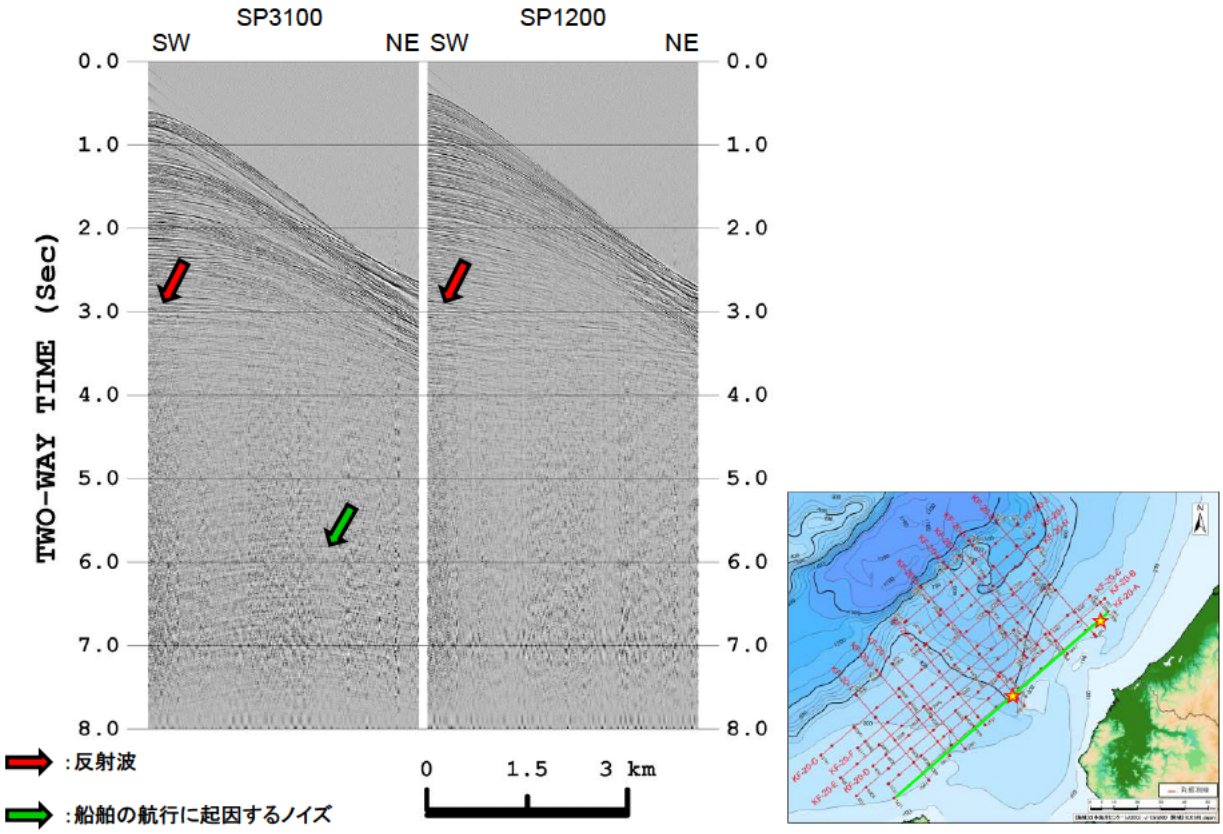


注）インデックスマップ：海域は日本海洋センター（JODC）に、陸域は(C)ESRI_Japan に加筆
注）時間関数ゲインを適用、3 Hz のローカットフィルターを適用
注）発振記録の下方に見えるノイズのようなものは、ローカットフィルターを適用したことによるものであり、実際の発振記録にはこのようなノイズはみられない。

図 3.3-3(9)　KF-20-9 測線の発振記録例（SP1200、SP2560）

⑩　KF-20-A 測線の発振記録例

KF-20-A 測線における SP1200 と SP3100 の発振記録を図 3.3-3(10)に示す。海況が穏やかであったため、潮流の影響によるノイズは軽微であった。SP1200、SP3100 の発振記録ともに、往復走時 3.0 秒付近まで反射波が確認できる（赤矢印）。SP3100 の発振記録には、船舶の航行に起因するノイズの混入が確認できる（緑色矢印）。

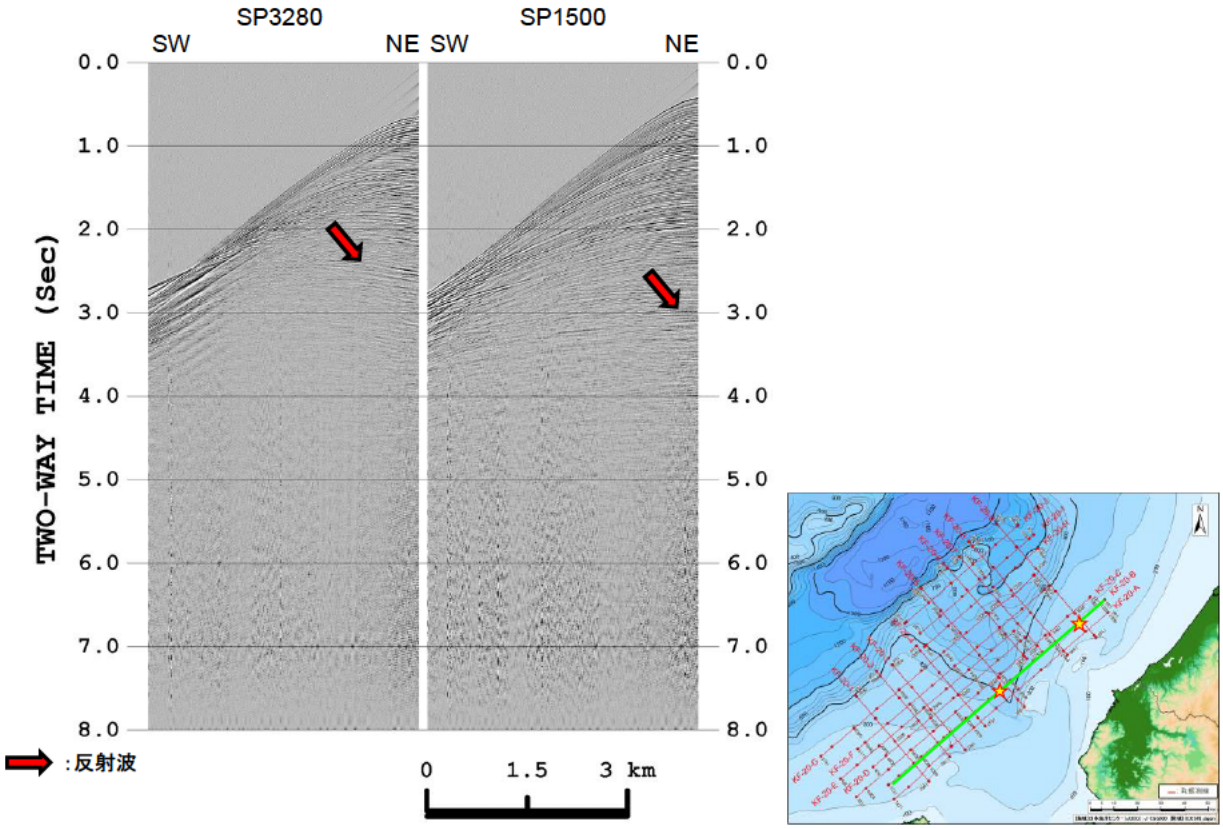


注）インデックスマップ：海域は日本海洋センター（JODC）に、陸域は(C)ESRI_Japan に加筆
注）時間関数ゲインを適用、3 Hz のローカットフィルターを適用
注）発振記録の下方に見えるノイズのようなものは、ローカットフィルターを適用したことによるものであり、実際の発振記録にはこのようなノイズはみられない。

図 3.3-3(10)　KF-20-A 測線の発振記録例（SP1200、SP3100）

⑪　KF-20-B 測線の発振記録例

KF-20-B 測線における SP1500 と SP3280 の発振記録を図 3.3-3(11)に示す。海況が穏やかであったため、潮流の影響によるノイズは軽微であった。SP1500 の発振記録には、往復走時 3.0 秒付近まで反射波が確認できる（赤矢印）。SP3280 の発振記録には、往復走時 2.5 秒付近まで反射波が確認できる（赤矢印）。

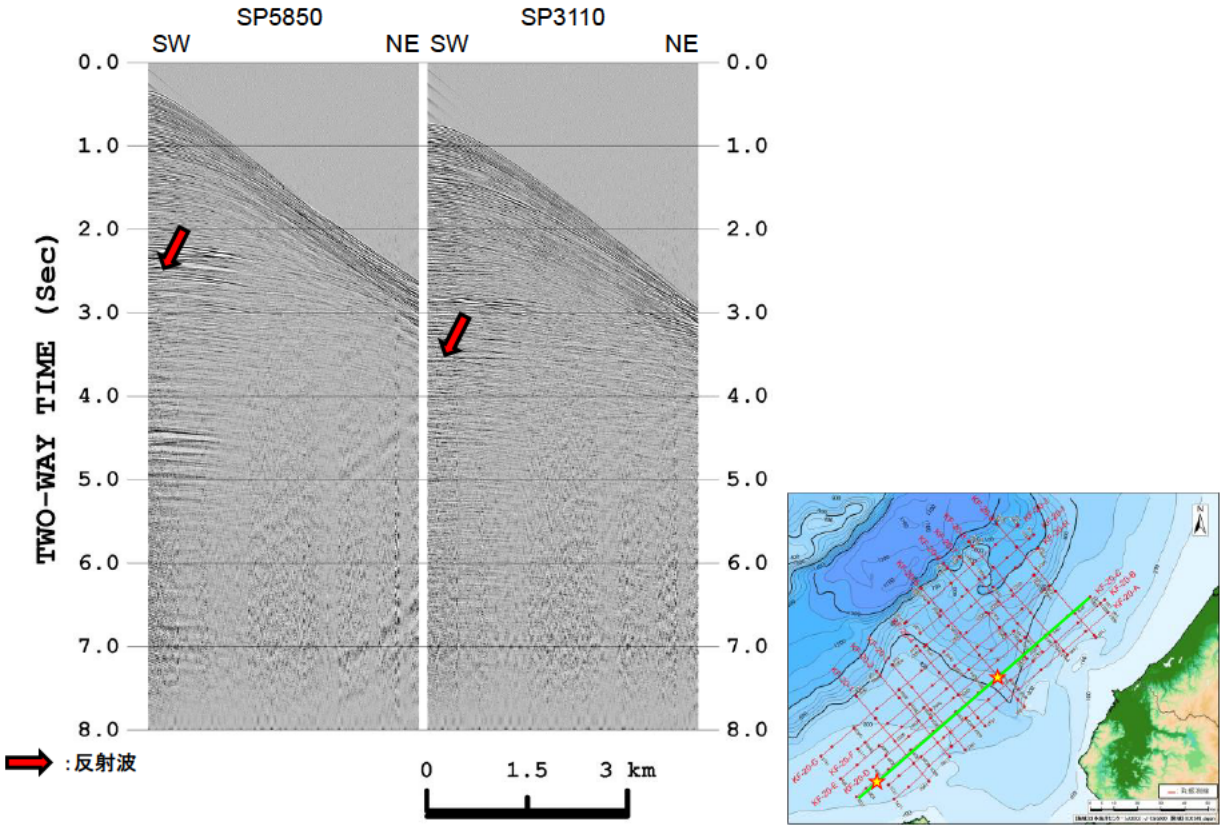


注）インデックスマップ：海域は日本海洋センター（JODC）に、陸域は(C)ESRI_Japan に加筆
注）時間関数ゲインを適用、3 Hz のローカットフィルターを適用
注）発振記録の下方に見えるノイズのようなものは、ローカットフィルターを適用したことによるものであり、実際の発振記録にはこのようなノイズはみられない。

図 3.3-3(11)　KF-20-B 測線の発振記録例（SP1500、SP3280）

⑫　KF-20-C 測線の発振記録例

KF-20-C 測線における SP3110 と SP5850 の発振記録を図 3.3-3(12)に示す。海況が穏やかであったため、潮流の影響によるノイズは軽微であった。SP3110 の発振記録には、往復走時 3.5 秒付近まで反射波が確認できる（赤矢印）。SP5850 の発振記録には、往復走時 2.3 秒付近まで反射波が確認できる（赤矢印）。

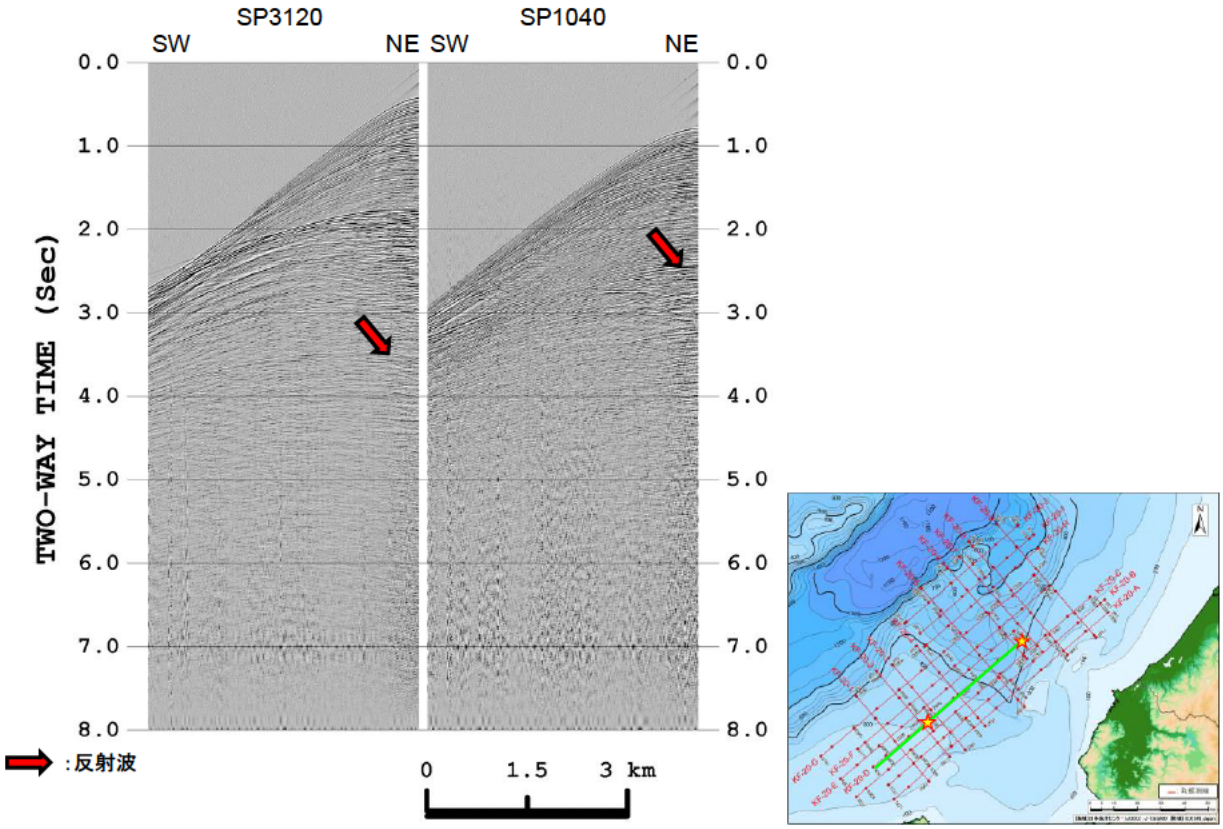


注）インデックスマップ：海域は日本海洋センター（JODC）に、陸域は(C)ESRI_Japan に加筆
注）時間関数ゲインを適用、3 Hz のローカットフィルターを適用
注）発振記録の下方に見えるノイズのようなものは、ローカットフィルターを適用したことによるものであり、実際の発振記録にはこのようなノイズはみられない。

図 3.3-3(12)　KF-20-C 測線の発振記録例（SP3110、SP5850）

⑬　KF-20-D 測線の発振記録例

KF-20-D 測線における SP1040 と SP3120 の発振記録を図 3.3-3(13)に示す。海況が穏やかであったため、潮流の影響によるノイズは軽微であった。SP1040 の発振記録には、往復走時 2.5 秒付近まで反射波が確認できる（赤矢印）。SP3120 の発振記録には、往復走時 3.5 秒付近まで反射波が確認できる（赤矢印）。

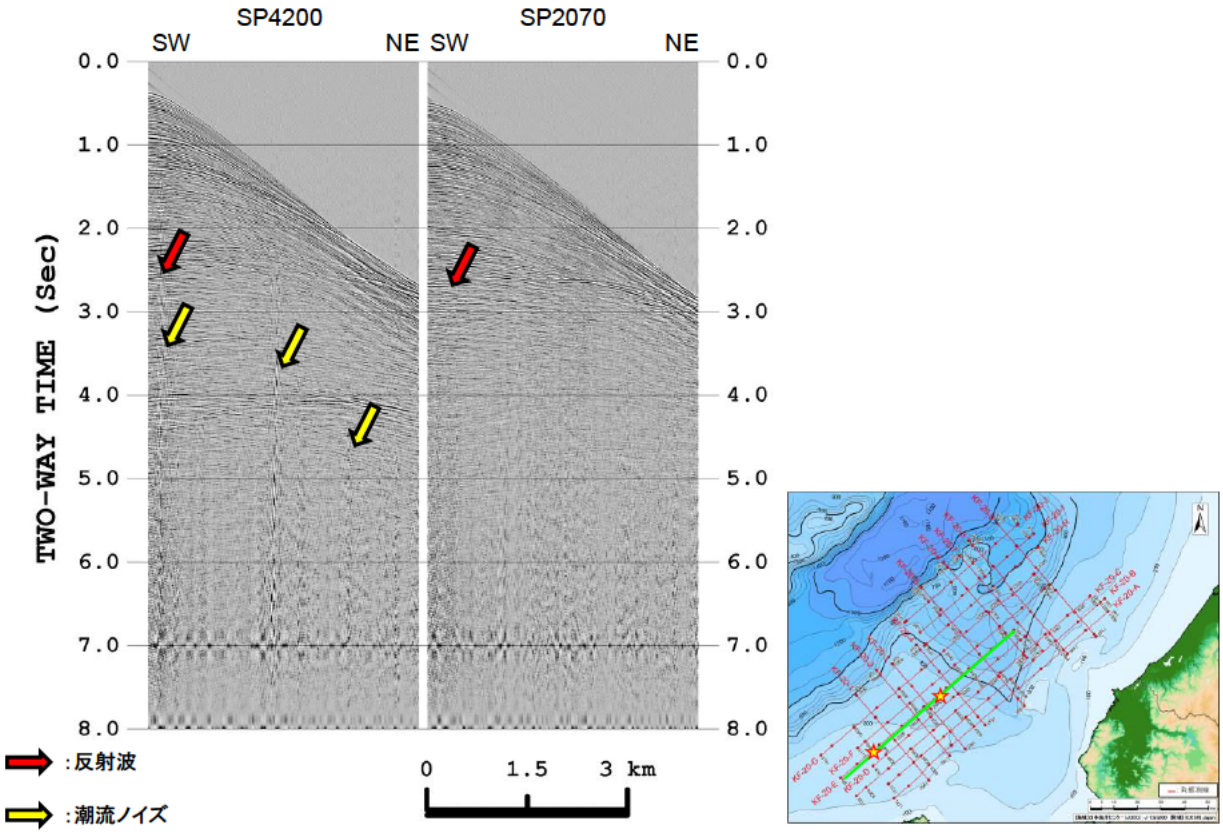


注）インデックスマップ：海域は日本海洋センター（JODC）に、陸域は(C)ESRI_Japan に加筆
注）時間関数ゲインを適用、3 Hz のローカットフィルターを適用
注）発振記録の下方に見えるノイズのようなものは、ローカットフィルターを適用したことによるものであり、実際の発振記録にはこのようなノイズはみられない。

図 3.3-3(13)　KF-20-D 測線の発振記録例（SP1040、SP3120）

⑭ KF-20-E 測線の発振記録例

KF-20-E 測線における SP2700 と SP4200 の発振記録を図 3.3-3(14)に示す。海況が穏やかであったが、SP4200 の発振記録には、潮流の影響により一部のチャンネルにノイズの混入が確認できる（黄色矢印）。SP2700、SP4200 の発振記録ともに、往復走時 2.6 秒付近まで反射波が確認できる（赤矢印）。

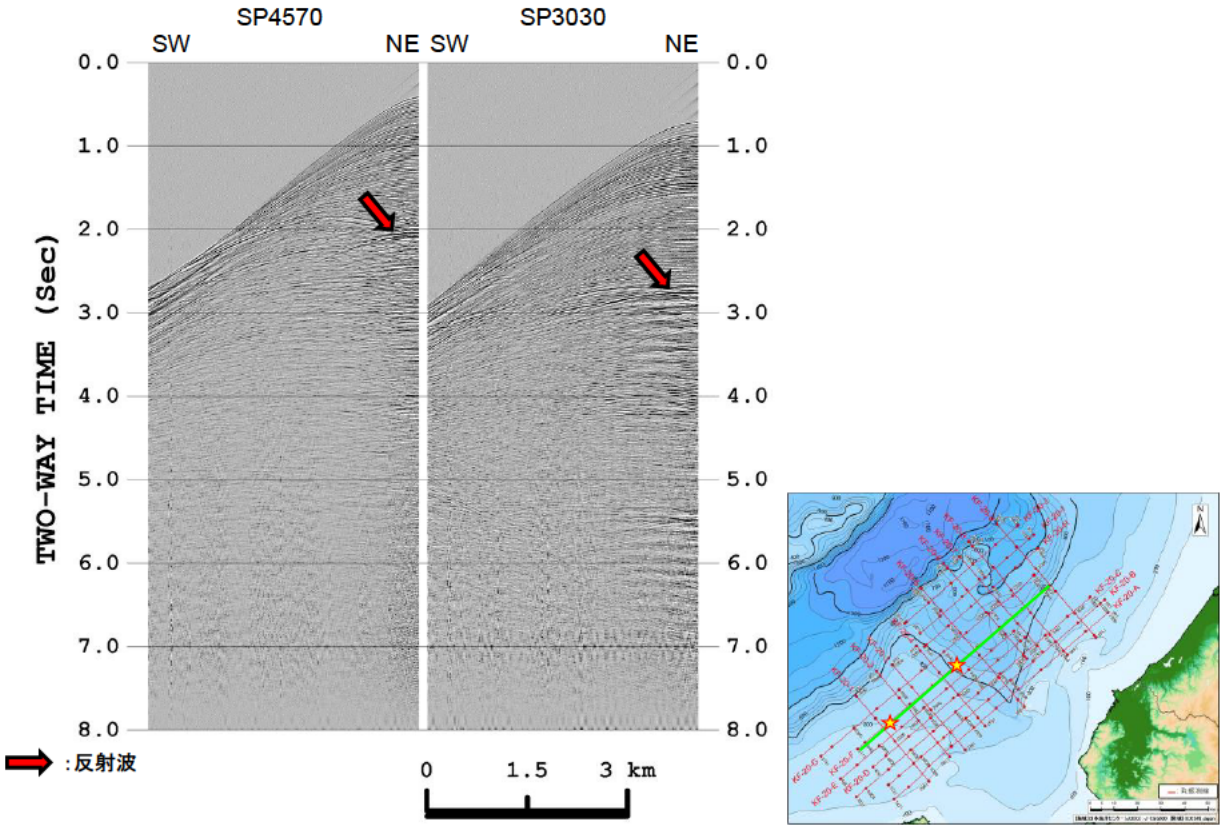


注）インデックスマップ：海域は日本海洋センター（JODC）に、陸域は(C)ESRI_Japan に加筆
注）時間関数ゲインを適用、3 Hz のローカットフィルターを適用
注）発振記録の下方に見えるノイズのようなものは、ローカットフィルターを適用したことによるものであり、実際の発振記録にはこのようなノイズはみられない。

図 3.3-3(14)　KF-20-E 測線の発振記録例（SP2700、SP4200）

⑮　KF-20-F 測線の発振記録例

KF-20-F 測線における SP3030 と SP4570 の発振記録を図 3.3-3(15)に示す。海況が穏やかであったため、潮流の影響によるノイズは軽微であった。SP3030 の発振記録には、往復走時 2.8 秒付近まで反射波が確認できる（赤矢印）。SP4570 の発振記録には、往復走時 2.0 秒付近まで反射波が確認できる（赤矢印）。

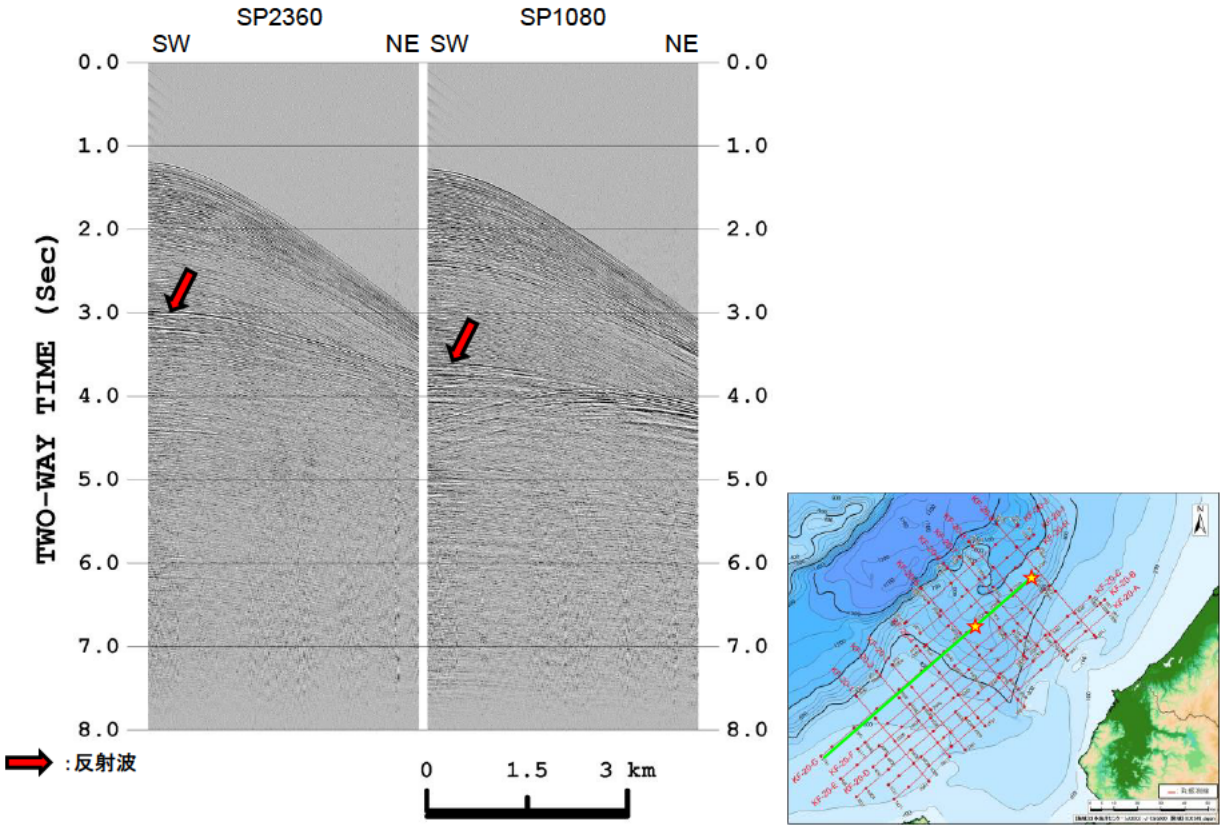


注）インデックスマップ：海域は日本海洋センター（JODC）に、陸域は(C)ESRI_Japan に加筆
注）時間関数ゲインを適用、3 Hz のローカットフィルターを適用
注）発振記録の下方に見えるノイズのようなものは、ローカットフィルターを適用したことによるものであり、実際の発振記録にはこのようなノイズはみられない。

図 3.3-3(15)　KF-20-F 測線の発振記録例（SP3030、SP4570）

⑯　KF-20-G 測線の発振記録例

KF-20-G 測線における SP1080 と SP2360 の発振記録を図 3.3-3(16)に示す。海況が穏やかであったため、潮流の影響によるノイズは軽微であった。SP1080 の発振記録には、往復走時 3.8 秒付近まで反射波が確認できる（赤矢印）。SP2360 の発振記録には、往復走時 3.0 秒付近まで反射波が確認できる（赤矢印）。

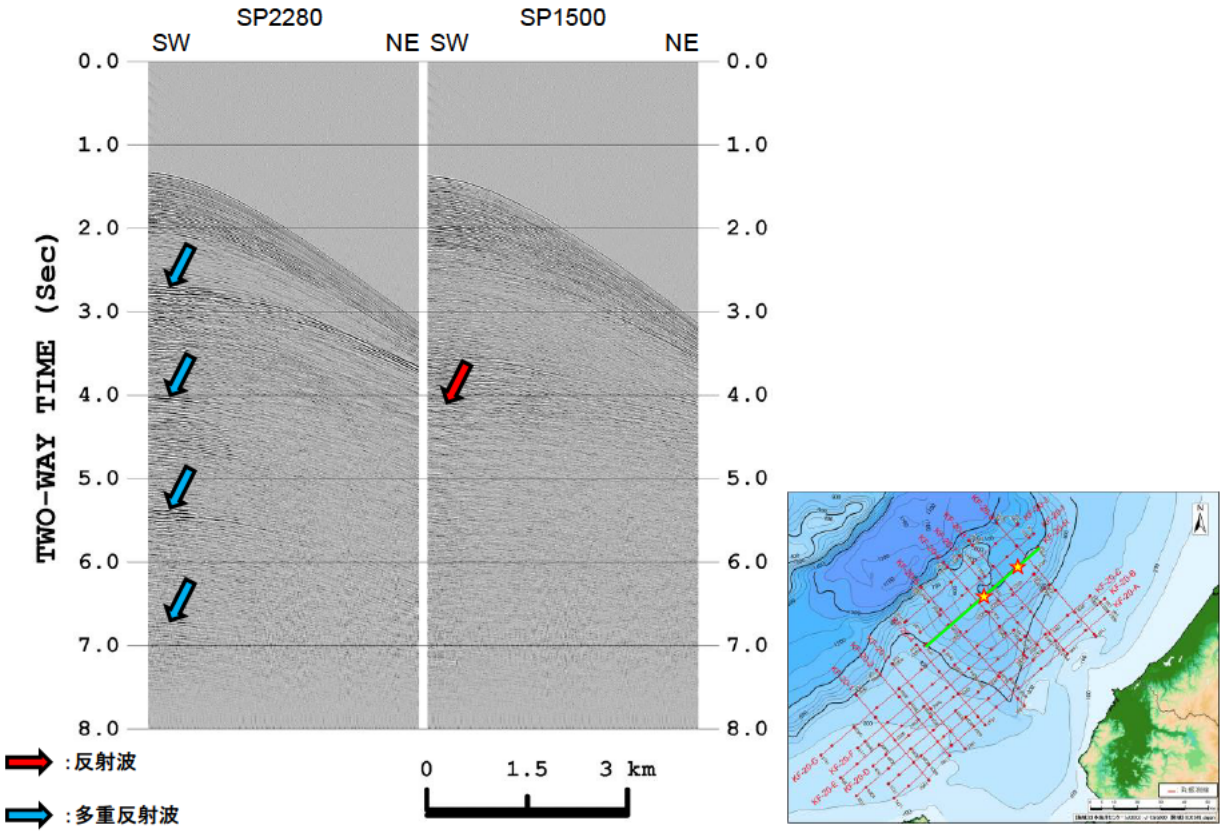


注）インデックスマップ：海域は日本海洋センター（JODC）に、陸域は(C)ESRI_Japan に加筆
注）時間関数ゲインを適用、3 Hz のローカットフィルターを適用
注）発振記録の下方に見えるノイズのようなものは、ローカットフィルターを適用したことによるものであり、実際の発振記録にはこのようなノイズはみられない。

図 3.3-3(16)　KF-20-G 測線の発振記録例（SP1080、SP2360）

⑰　KF-20-H 測線の発振記録例

KF-20-H 測線における SP1500 と SP2280 の発振記録を図 3.3-3(17)に示す。海況が穏やかであったため、潮流の影響によるノイズは軽微であった。SP1500 の発振記録には、往復走時 4.0 秒付近まで反射波が確認できる（赤矢印）。SP2280 の発振記録には、4 次までの多重反射波が確認できる（青矢印）。

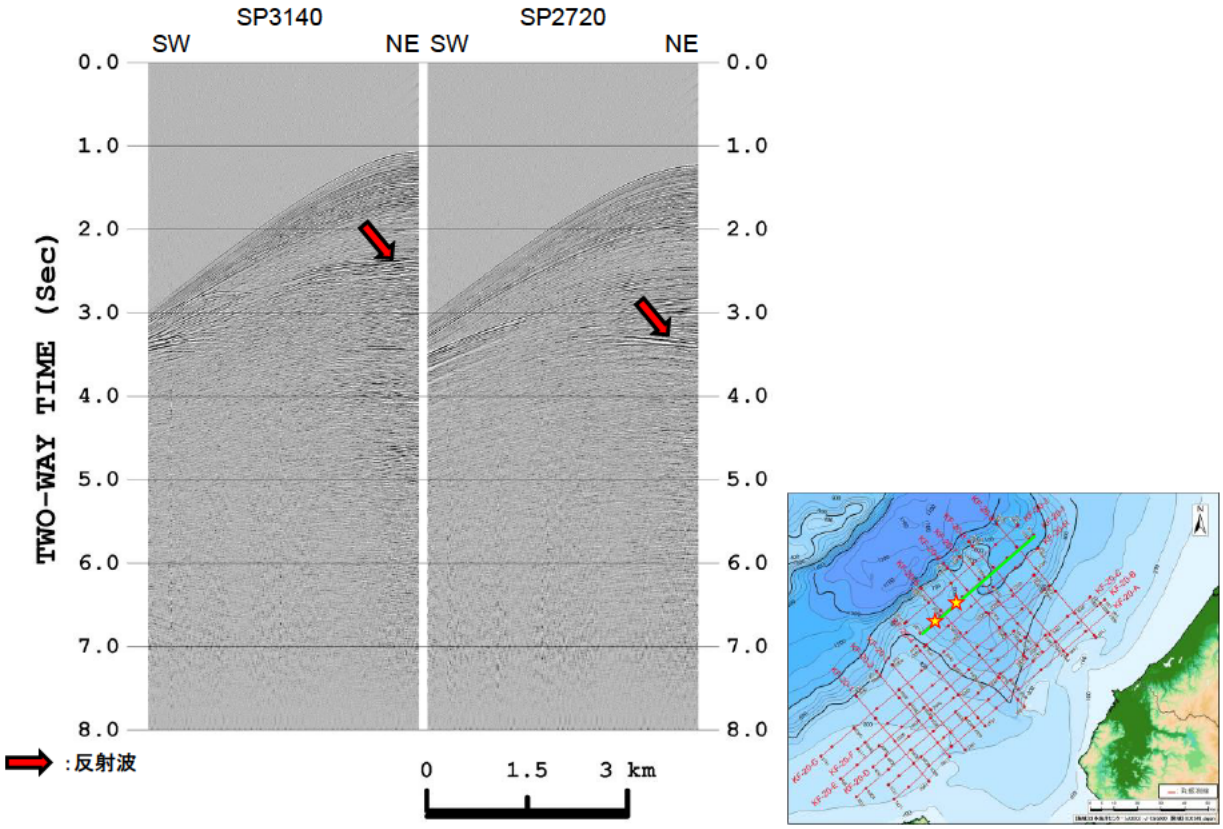


注）インデックスマップ：海域は日本海洋センター（JODC）に、陸域は(C)ESRI_Japan に加筆
注）時間関数ゲインを適用、3 Hz のローカットフィルターを適用
注）発振記録の下方に見えるノイズのようなものは、ローカットフィルターを適用したことによるものであり、実際の発振記録にはこのようなノイズはみられない。

図 3.3-3(17)　KF-20-H 測線の発振記録例（SP1500、SP2280）

⑱　KF-20-I 測線の発振記録例

KF-20-I 測線における SP2720 と SP3140 の発振記録を図 3.3-3(18)に示す。海況が穏やかであったため、潮流の影響によるノイズは軽微であった。SP2720 の発振記録には、往復走時 3.4 秒付近まで反射波が確認できる（赤矢印）。SP3140 の発振記録には、往復走時 2.5 秒付近まで反射波が確認できる。

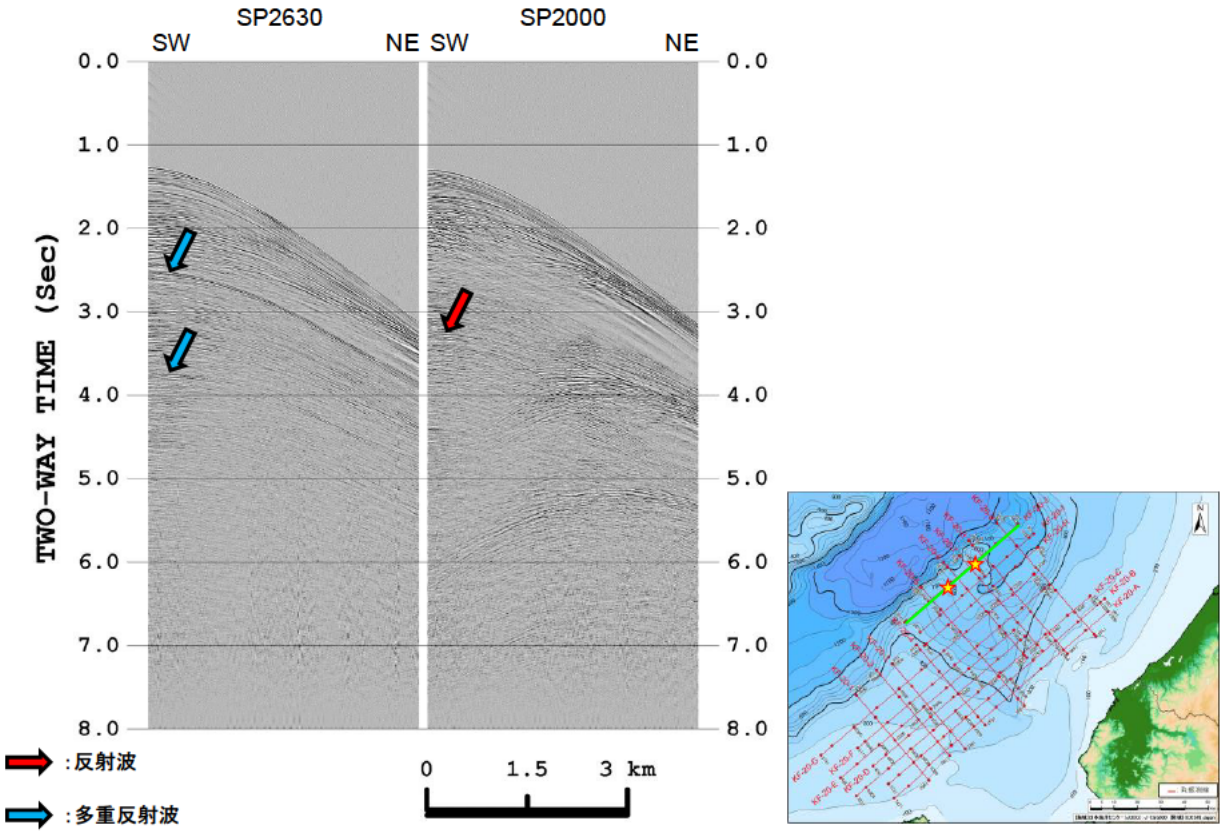


注）インデックスマップ：海域は日本海洋センター（JODC）に、陸域は(C)ESRI_Japan に加筆
注）時間関数ゲインを適用、3 Hz のローカットフィルターを適用
注）発振記録の下方に見えるノイズのようなものは、ローカットフィルターを適用したことによるものであり、実際の発振記録にはこのようなノイズはみられない。

図 3.3-3(18)　KF-20-I 測線の発振記録例（SP2720、SP3140）

⑲　KF-20-J 測線の発振記録例

KF-20-J 測線における SP2000 と SP2630 の発振記録を図 3.3-3(19)に示す。海況が穏やかであったため、潮流の影響によるノイズは軽微であった。SP2000 の発振記録には、往復走時 3.5 秒付近まで反射波が確認できる（赤矢印）。SP2630 の発振記録には、2 次までの多重反射波が確認できる（青矢印）。



注）インデックスマップ：海域は日本海洋センター（JODC）に、陸域は(C)ESRI_Japan に加筆
注）時間関数ゲインを適用、3 Hz のローカットフィルターを適用
注）発振記録の下方に見えるノイズのようなものは、ローカットフィルターを適用したことによるものであり、実際の発振記録にはこのようなノイズはみられない。

図 3.3-3(19)　KF-20-J 測線の発振記録例（SP2000、SP2630）

3.3.2　2D 探査データの処理

本調査範囲において新規に取得した 2D 探査データに対し、取得データに含まれる反射波を対象とした反射法データ処理を行った。

(1)　データ処理の概要

貯留層、遮蔽層の解釈に資する反射波記録を得ることを目的として、各種ノイズ抑制処理、多重反射波抑制処理等によって S/N 比の向上を図り、PSTM を適用した処理を実施した。相対振幅を保存する処理を適用した反射波記録に加え、反射波の追跡に適するよう重合前に AGC を適用した反射波記録を作成した。

本データ処理に使用した主要ソフトウェアを表 3.3-8 に示す。

表 3.3-8　主要ソフトウェア一覧

処理ソフトウェア	実施した処理
『SuperX』JGI 社	データ処理全般
『iVAS』JGI 社	予備速度解析、重合速度解析
『VELANAL』Techco Geophysical Services 社	PSTM 速度解析
『SUMMIG』Techco Geophysical Services 社	PSTM 処理

(2)　データ処理の基本仕様

データ処理の基本仕様を以下に、測地諸元を表 3.3-9 に示す。

1）サンプリング間隔　　：2 msec
2）トレース当たりのサンプル数　　：4,001
3）処理データ長　　：8.0 s
4）CMP/CIP 間隔　　：6.25 m

表 3.3-9　データ処理で使用した測地諸元

準拠楕円体	WGS84
長半径	6,378,137.00000000 m
短半径	6,356,752.31424500 m
投影法	Universal Transverse Mercator（UTM 図法）
系番号	53
座標原点 緯度	00° 00′ 00.000" N
座標原点 経度	135° 00′ 00.000" E
縮尺係数	0.999600
北方加数	0.000 m
東方加数	500,000.000 m

(3)　データ処理のフローチャート

図 3.3-4 に反射法データ処理フローチャートを示す。

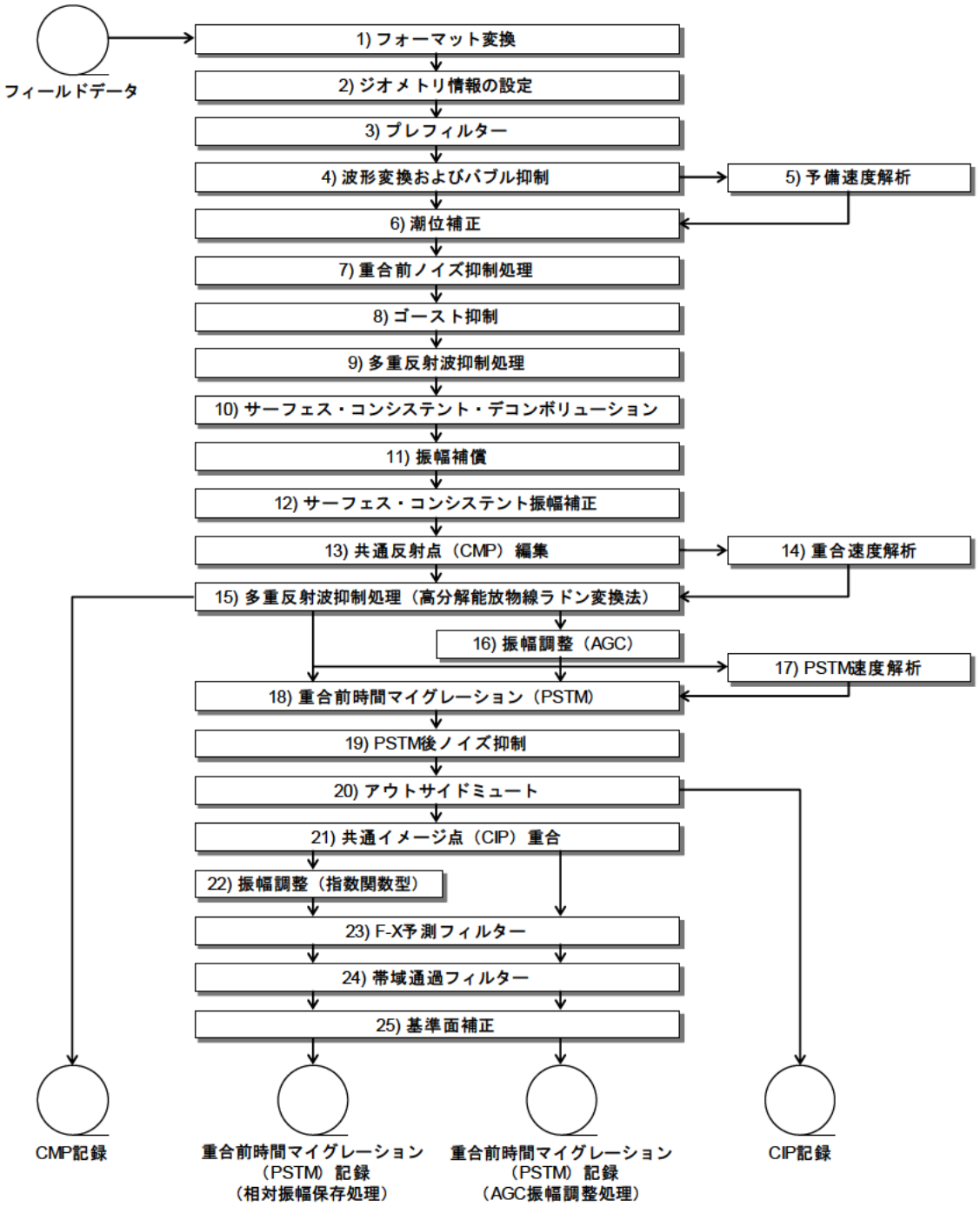


図 3.3-4　反射法データ処理フローチャート

(4)　データ処理の詳細

データ処理の詳細について、処理ステップごとに内容を記述する。

1）フォーマット変換

磁気テープまたは磁気ディスクに保存されたフィールドデータをデータ処理ソ

フトウェアの内部フォーマットへ変換した。

2) ジオメトリ情報の設定

以降に続く処理のために発振点・受振点・CMP に関する情報やその他の諸情報をトレースヘッダーにセットした。

3) プレフィルター

図 3.3-5 に代表的な発振記録の周波数成分解析図を示す。極低周波数の波浪ノイズを除去するため、4 Hz のローカットフィルターを適用した。

4) 波形変換およびバブル抑制

エアガンの型式、容量、配列、および深度の情報を基に作成した合成エアガン波形を用いて、最小位相への変換およびバブル抑制を行った。合成エアガン波形の作成には、Oakwood Computing Associates 社のエアガン波形シミュレーションソフトである Gundalf™ を使用した。

5) 予備速度解析

予備速度解析は、JGI 社の速度解析システム “iVAS” を使用し、定速度の NMO 補正と重合を用いて重合速度を走査する定速度重合法による速度解析を 1 km 間隔で実施した。ここで得られた速度は、ノイズ抑制処理における一時的な速度のほか、各処理の適用前後の結果を重合記録上で比較・確認するために用いた。

6) 潮位補正

潮汐による海水面の変位の補正を目的として、潮位補正を実施した。

7) 重合前ノイズ抑制処理

突発的かつ強振幅のノイズ、波浪ノイズやその他のランダムノイズ、線形ノイズを抑制するため、各種ノイズ特性を考慮して以下のノイズ抑制を実施した。

ⅰ）F-X エディット

発振記録上に混入する突発的かつ強振幅のノイズの抑制を目的として、共通発振点領域において F-X エディットを適用した。

ⅱ）F-X 予測フィルター

発振記録上に混入する波浪ノイズやその他のランダムノイズ、船舶の航行に起因するノイズの抑制を目的として、共通発振点領域および共通受振点領域において F-X 予測フィルターを適用した。

ⅲ）線形ラドンフィルター

発振記録上に混入する線形ノイズの抑制を目的として、共通発振点領域において F-X 速度フィルターを適用した。

図 3.3-6 に重合前ノイズ抑制処理の適用前後の重合記録の比較例を示す。

8) ゴースト抑制

ストリーマーケーブルを用いた海上調査では、受振器は海底面または海底面下で反射した上方進行波を記録した後、この反射波が受振器を超えて海水面で再度反射した下方進行波を記録する。この下方進行波はゴーストと呼ばれ、海水面の反射係数がほぼ -1 であるために反射波とは逆の極性を持つ。これにより、受振器深度と海水中の平均速度（海水速度）により決まるノッチ周波数周辺の振幅が顕著に減衰してしまう。この現象は、発振点においても同様に発生する。これらの影響を取り除くため、発振ゴーストと受振器ゴーストの両方のゴースト抑制を実施した。

9) 多重反射波抑制処理

海水面を介在する短周期および長周期の多重反射波、層間多重反射波等の短周期の多重反射波の抑制を目的として、各種多重反射波の特性を考慮して、SRME およびラディアル・トレース・デコンボリューションを適用した。

ｉ）SRME

海水面を介在する長周期の多重反射波の抑制を目的として、SRME を適用した。SRME は、波動方程式に準拠する多重反射波抑制手法であり、原記録の共通発振点記録と共通受振点記録のクロスコンボリューションを計算することにより、多重反射波を予測する。SRME により予測された多重反射波モデルを原記録とマッチングさせ、原記録から減ずることにより多重反射波を抑制した。

ⅱ）ラディアル・トレース・デコンボリューション

層間多重反射波等の短周期の多重反射波の抑制を目的として、ラディアル・トレース領域においてデコンボリューションを適用した。

ラディアル・トレース記録は、空間－時間領域のデータを振源からの見かけ速度が一定な直線に沿ってリサンプリングし、見かけ速度－時間領域に変換したものである。振源からある射出角で出た反射波およびそれに起因する多重反射波は、同じ見かけ速度を持つ。通常の空間－時間領域の記録上では、同一トレースに出現する反射波と多重反射波は、対応する射出角が異なり、出現間隔も一定ではない。一方、ラディアル・トレース記録上では、理論上、同一トレースにおいて時間方向に等間隔で出現する。これらの性質を利用し、ラディアル・トレース領域においてデコンボリューショ

ンを適用することで、多重反射波を抑制した。

10)サーフェス・コンシステント・デコンボリューション

地層の非弾性および観測系の諸特性の影響を取り除き、短周期の多重反射波を抑制することを目的として、サーフェス・コンシステント・デコンボリューションを適用した。

本処理では、各発振点における差分応答を用いて波形の均等化を行うとともに基本波形のパルス化を行った。周波数領域における各トレースの平均スペクトルからのずれを発振点・受振点・CMP・オフセットの 4 成分に分解し、各トレースにおいて平均スペクトル・発振点成分を用いてデコンボリューションオペレータを設計し、適用した。

11)振幅補償

振源から放出される弾性波は、三次元的に伝播することによる幾何学的発散効果、多層構造内を透過および反射することによる伝播損失、そして非弾性減衰による振幅の減衰を被っている。本データ処理では、地中を伝播する弾性波の幾何学的発散効果による振幅の減衰を補償した。手法として、水平成層構造を仮定したゼロオフセット距離において成立する以下の式（Newman,1973[1)] による）を用いた。この式に必要な RMS 速度として、「5) 予備速度解析」で求めた速度関数を用いた。

$$G(x,t) = T \times Vrms(T_0)^2 / V_1$$

$$T = SQRT(T_0^2 + (X / Vrms(T_0))^2)$$

G(x,t)	: 振幅補償値
T	: 往復垂直走時
T_0	: ゼロオフセット距離における往復垂直走時
X	: オフセット距離
Vrms	: 往復垂直走時（T_0）における RMS 速度
V_1	: 最上層における RMS 速度

12)サーフェス・コンシステント振幅補正

各発振点において、振幅のばらつきを取り除くことを目的として、サーフェス・コンシステント振幅補正を適用した。反射波の振幅を発振点・受振点・CMP・オフセットの 4 成分に分解し、発振点の成分について振幅補正を適用した。

13)CMP 編集

「2) ジオメトリ情報の設定」において定義した重合測線に従い共通反射点編集

を実施した。

14)重合速度解析

重合速度解析は、JGI 社の速度解析システム“iVAS”を使用し、定速度の NMO 補正と重合を用いて重合速度を走査する定速度重合法による速度解析を 500 m 間隔で実施した。

15)多重反射波抑制処理（高分解能放物線ラドン変換法）

長周期の多重反射波とムーブアウトの大きなノイズの抑制を目的として、共通反射点領域において高分解能放物線ラドン変換法を適用した。高分解能放物線ラドン変換法は、一次反射波と多重反射波との間の走時差を利用し、多重反射波を抑制する手法であり、特に長周期の多重反射波を効果的に抑制する手法である。図 3.3-7 に各種多重反射波抑制処理前後（「7) 重合前ノイズ抑制処理」直後と「15) 多重反射波抑制処理（高分解能放物線ラドン変換法)」直後）の重合記録の比較例を示す。

ここまでのデータ再処理が実施された結果を「CMP 記録」として SEG-Y ファイルに出力した。

16)振幅調整（AGC）

振幅バランスを整えるため、AGC を適用した。相対振幅を保存する処理では本処理を実施しなかった。

17)PSTM 速度解析

PSTM 速度解析は、TECHCO 社の速度解析ソフトウェア“VELANAL”を使用し、速度スケーリング重合法による速度解析を 500 m 間隔で実施した。図 3.3-8(1)～(19)に後述する最終的な PSTM 記録に重ねた速度プロファイル（RMS 速度）を示す。

ここで得られた速度を「PSTM 速度データ」としてテキストファイルおよび SEG-Y ファイルに出力した。

18)PSTM

重合前データの見かけの反射点位置を真の反射点位置に移動させるとともに、回析波を回析点に収斂させるため、「17) PSTM 速度解析」にて求めた速度を用いて、PSTM を適用した。本データ処理では、共通オフセット領域におけるキルヒホッフ積分法マイグレーションを採用した。

19)PSTM 後ノイズ抑制

PSTM 後の共通イメージ点（CIP）記録に対して、以下のノイズ抑制処理を適用

した。

ⅰ）高分解能放物線ラドン変換法

PSTM 後に残存するムーブアウトの大きなノイズの抑制を目的として、高分解能放物線ラドン変換法を適用した。

ⅱ）ファンフィルター

PSTM 後に残存する線形ノイズの抑制を目的として、ファンフィルターを適用した。

20)アウトサイドミュート

重合効果や分解能を低下させるデータの除去を目的として､アウトサイドミュートを適用した。

ここまでのデータ処理が適用された結果を「CIP 記録」として SEG-Y ファイルに出力した。出力したデータにはアウトサイドミュートは適用せず、ミュート位置をトレースヘッダーに保存した。

21)CIP 重合

CIP ごとにトレースの重合を行った。重合トレース数にて除算を行い、振幅の正規化を行った。

22)振幅調整（指数関数型）

重合記録における振幅バランスを整えるため､指数関数型の振幅調整を適用した。

AGC を適用した処理では本処理は実施しなかった。

23)F-X 予測フィルター

ランダムノイズを抑制し、反射波の連続性を向上させるため、F-X 予測フィルターを適用した。

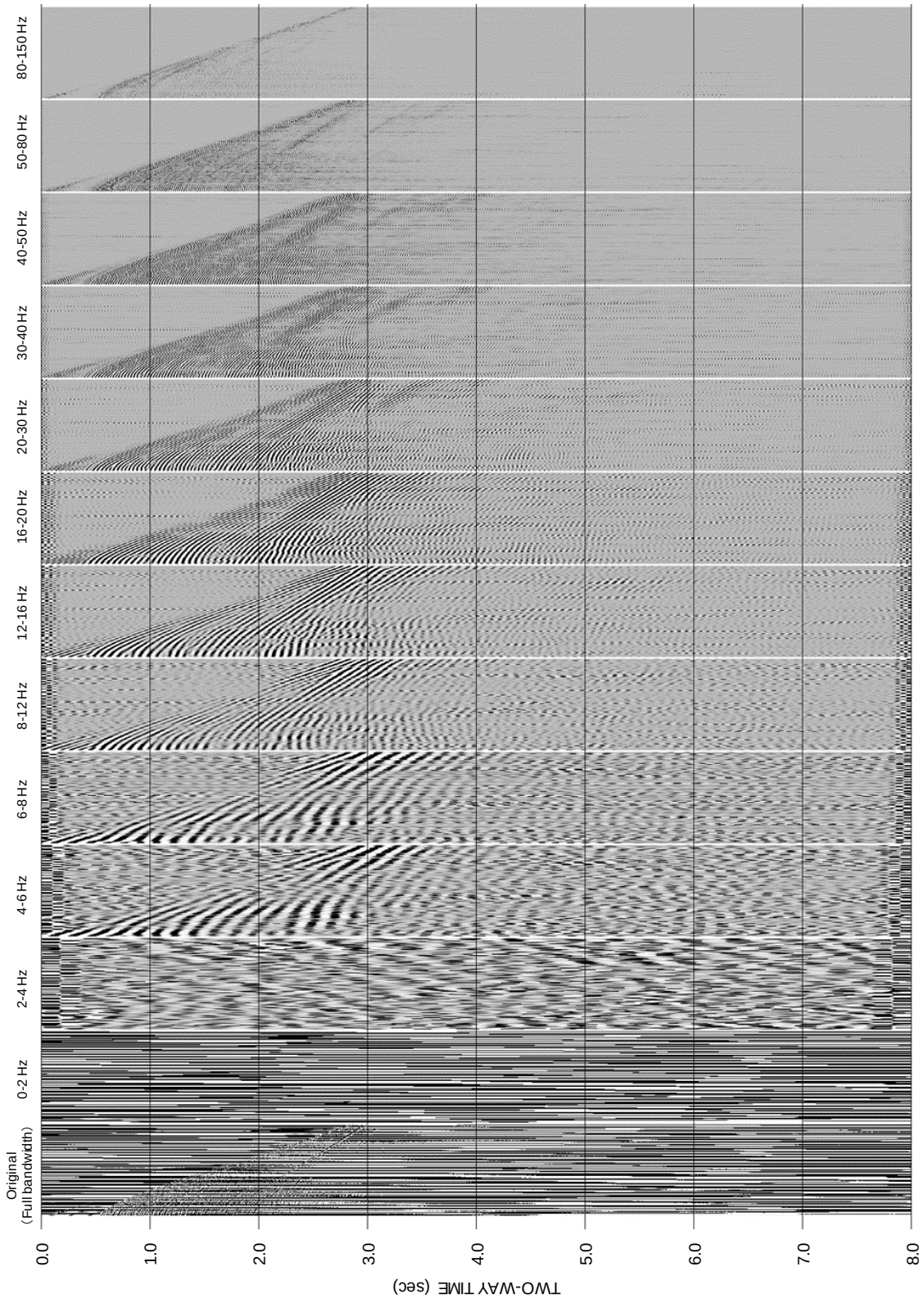
24)帯域通過フィルター

反射波の周波数帯域外のノイズを抑制するため､帯域通過フィルターを適用した。

25)基準面補正

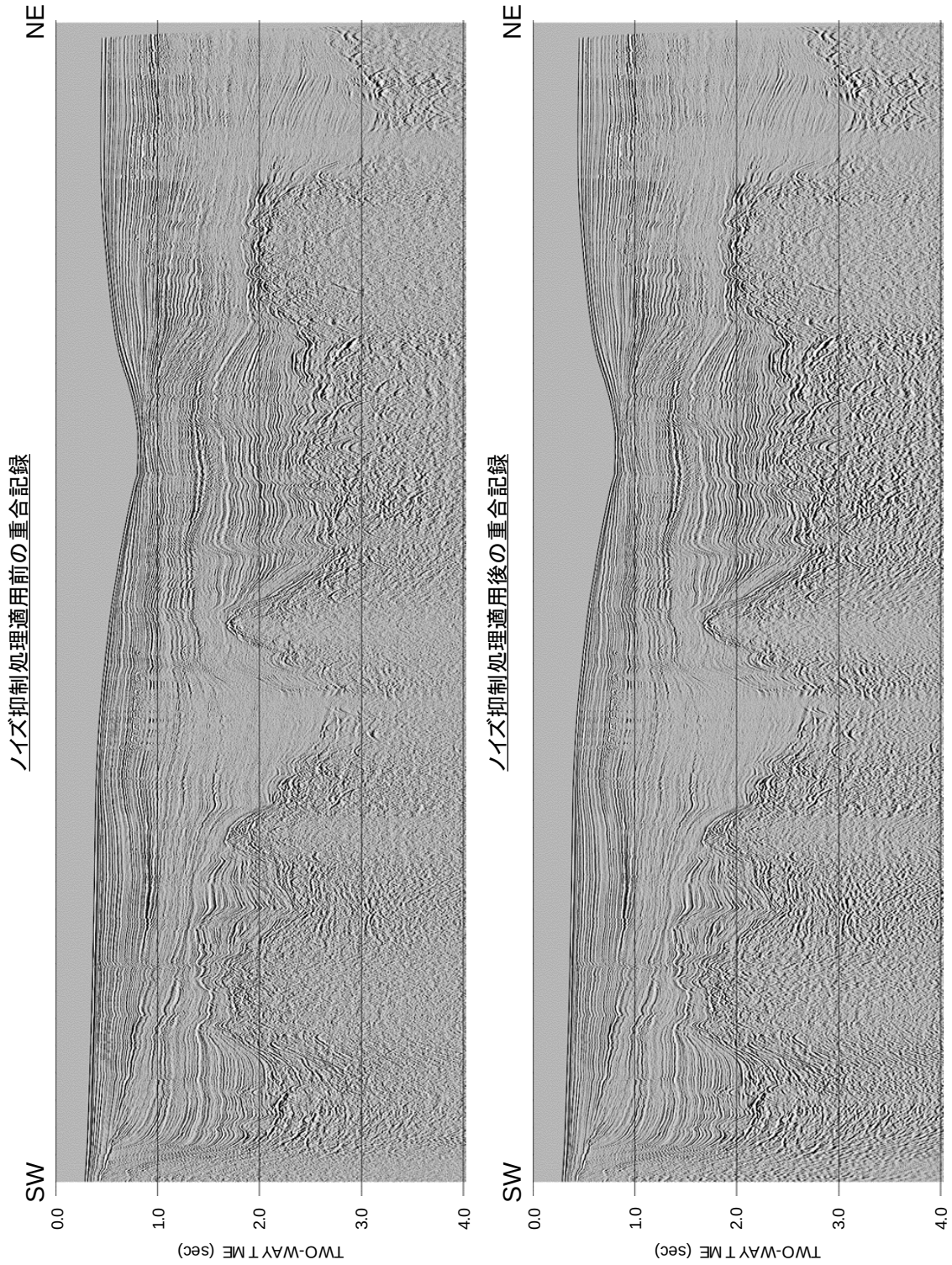
浮動基準面から基準面への補正を行った。基準面は平均海水面とした。図 3.3-9(1)～(19)に AGC を適用した最終的な PSTM 処理結果を示す。

ここまでのデータ処理が適用された結果を「PSTM 記録」として SEG-Y ファイルに出力した。



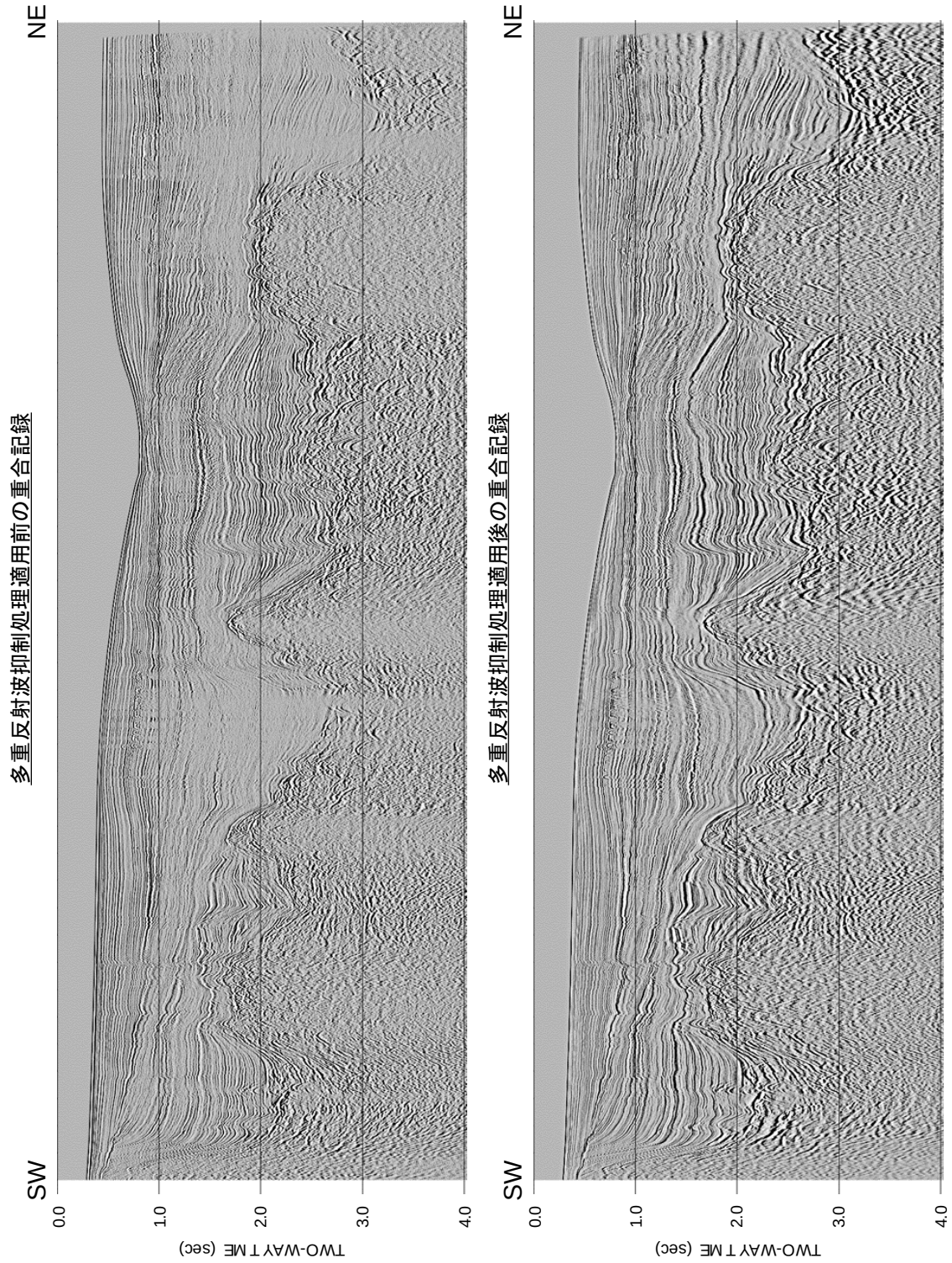
図面表示のために AGC を一時的に適用

図 3.3-5　周波数成分解析図（KF-20-C 測線、SP3500）



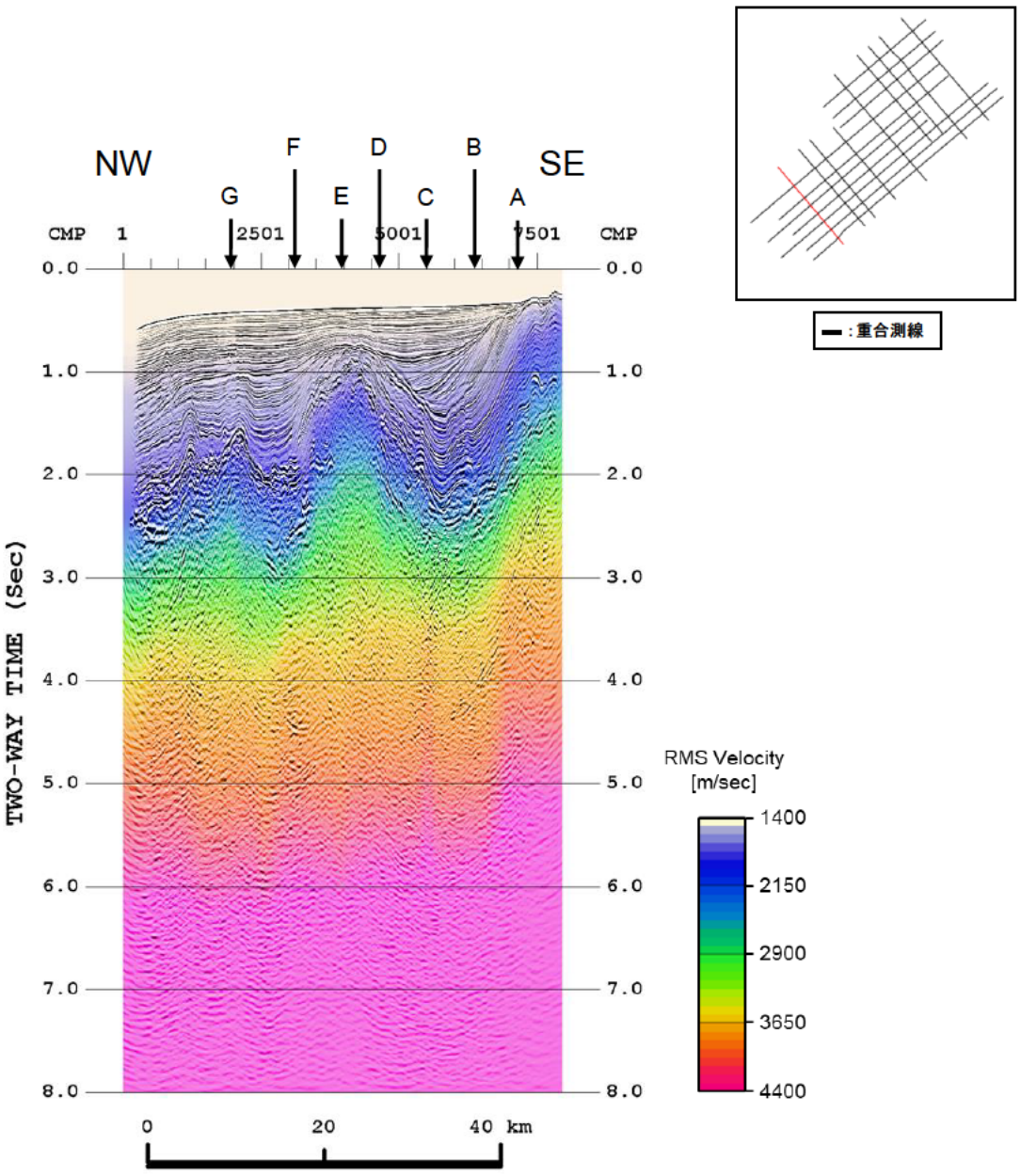
上図：ノイズ抑制処理適用前の重合記録、下図：ノイズ抑制処理適用後の重合記録

図 3.3-6　重合前ノイズ抑制処理適用前後の重合記録の比較例（KF-20-C 測線）



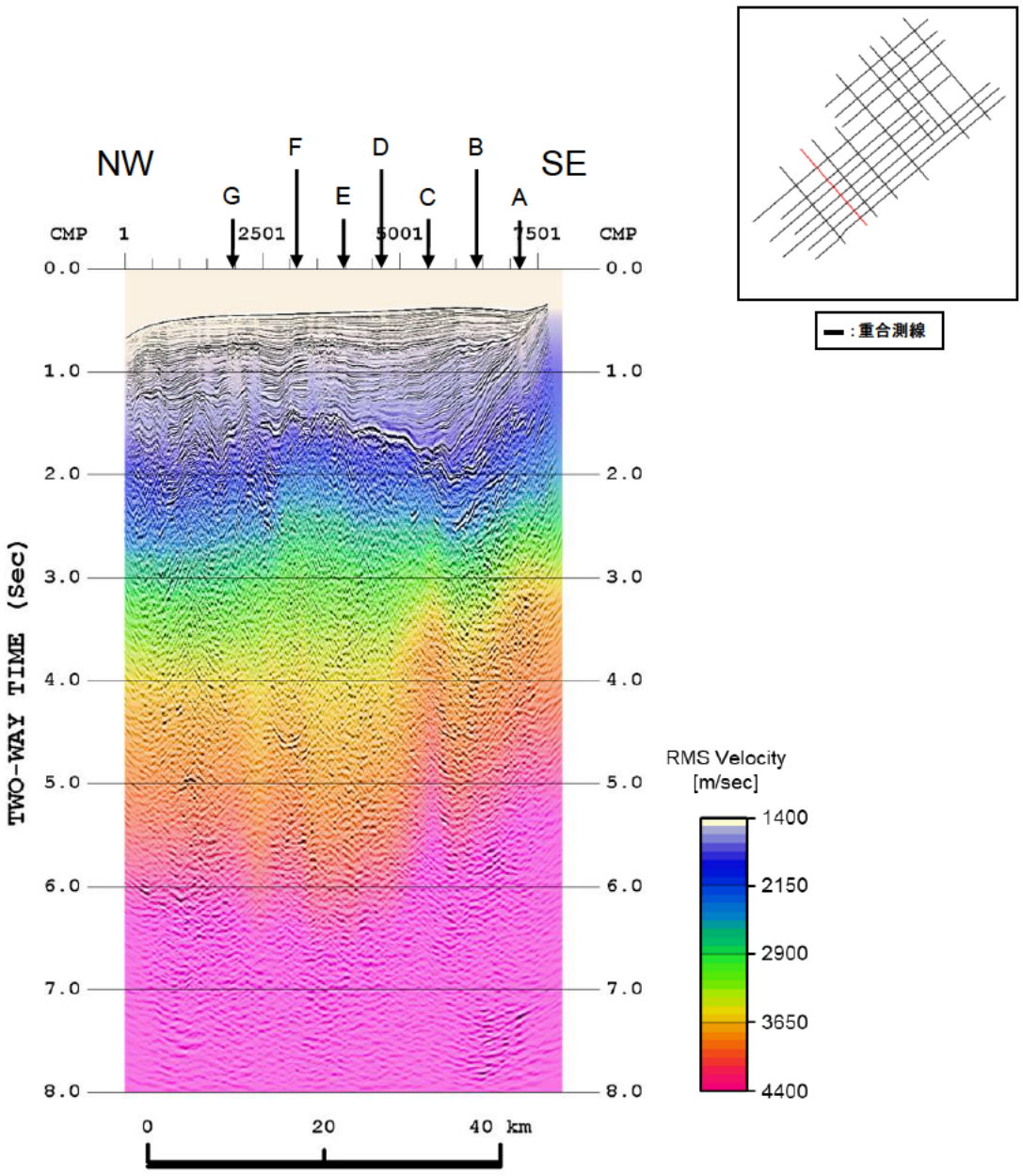
上図：多重反射波抑制処理適用前の重合記録、下図：多重反射波抑制処理適用後の重合記録

図 3.3-7　各種多重反射波抑制処理適用前後の重合記録の比較例（KF-20-C 測線）



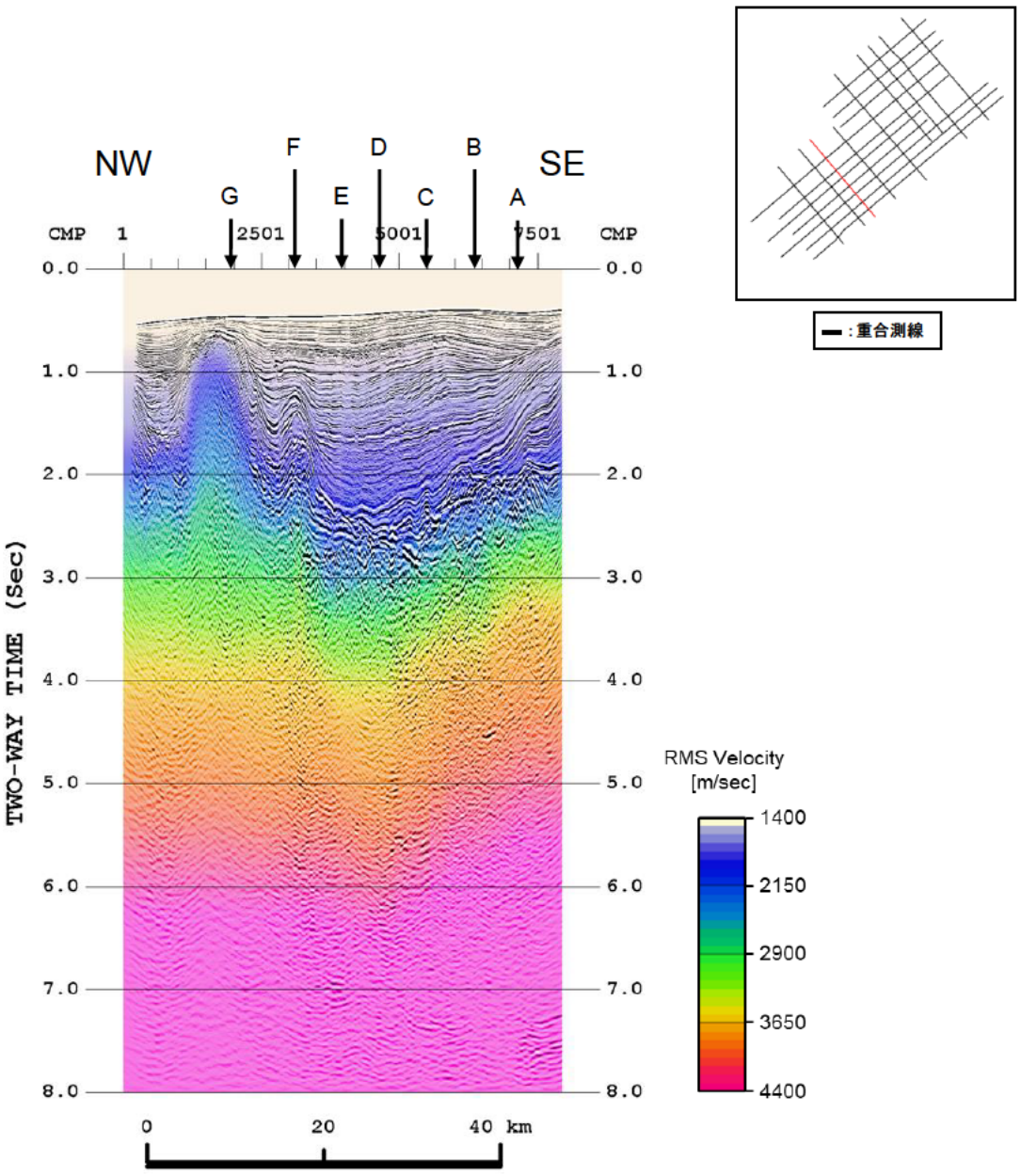
交差する交点の測線名は、測線名の末尾のみ表示

図 3.3-8(1)　RMS 速度プロファイル（KF-20-1 測線）



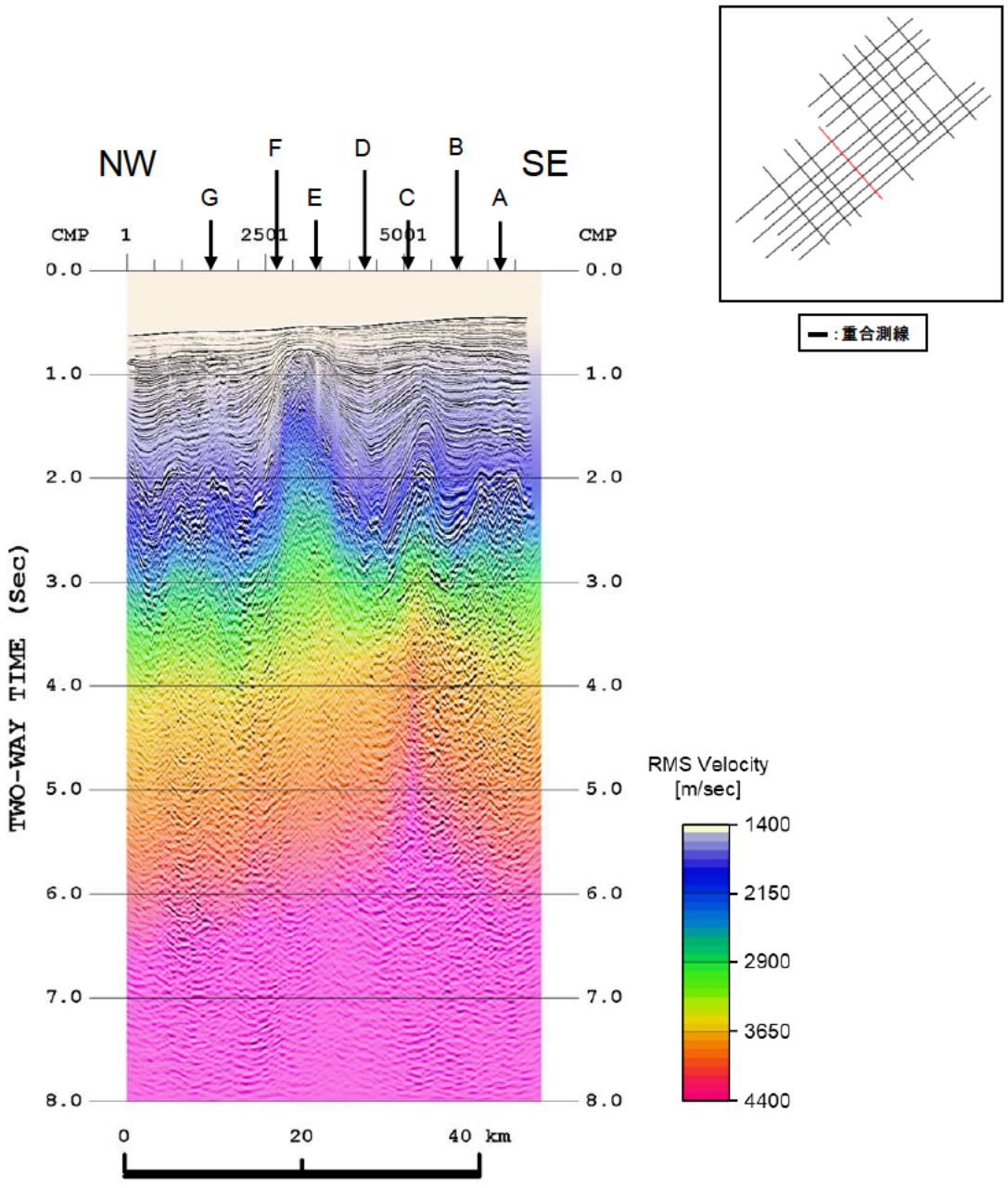
交差する交点の測線名は、測線名の末尾のみ表示

図 3.3-8(2)　RMS 速度プロファイル（KF-20-2 測線）



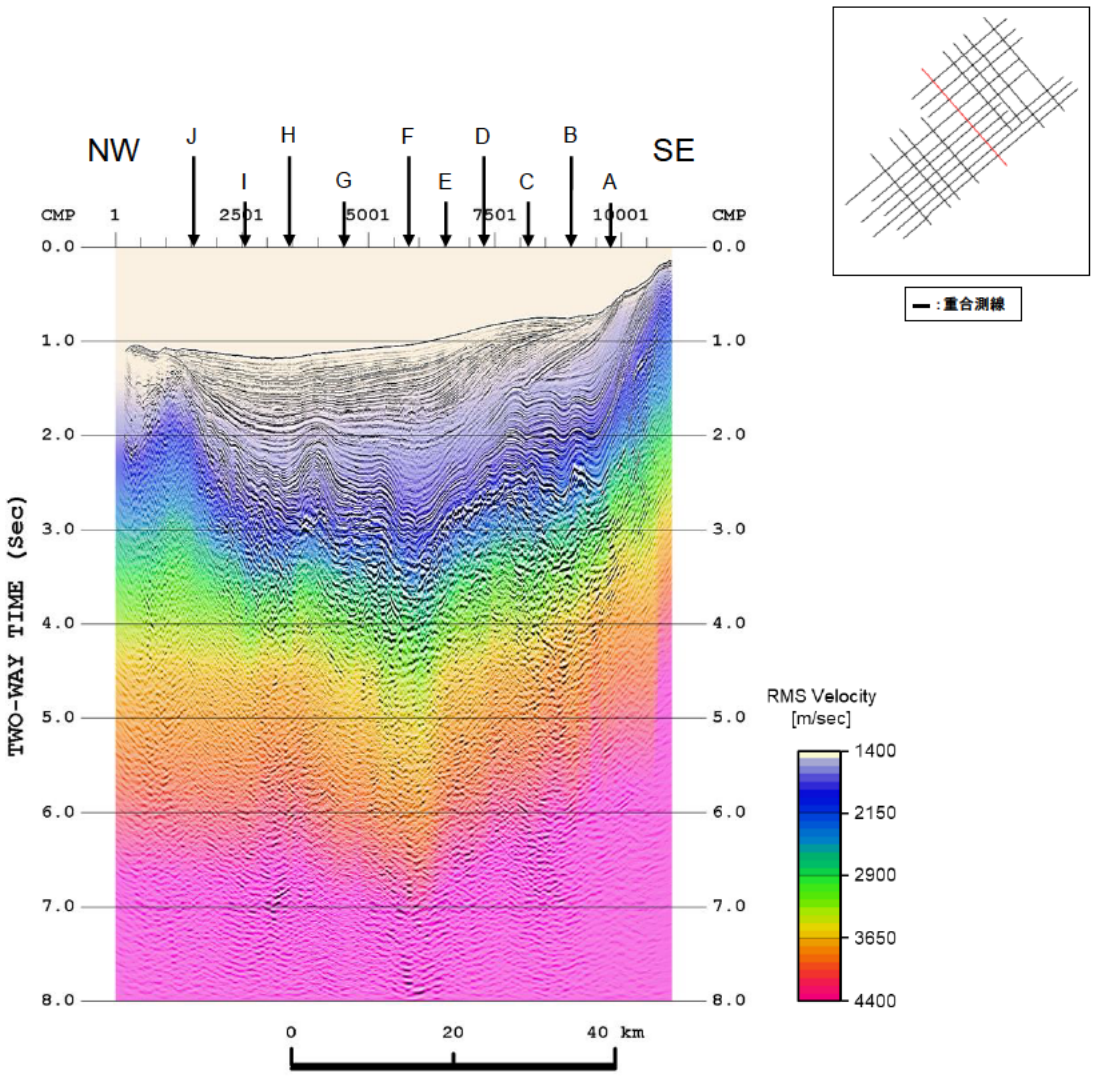
交差する交点の測線名は、測線名の末尾のみ表示

図 3.3-8(3)　RMS 速度プロファイル（KF-20-3 測線）



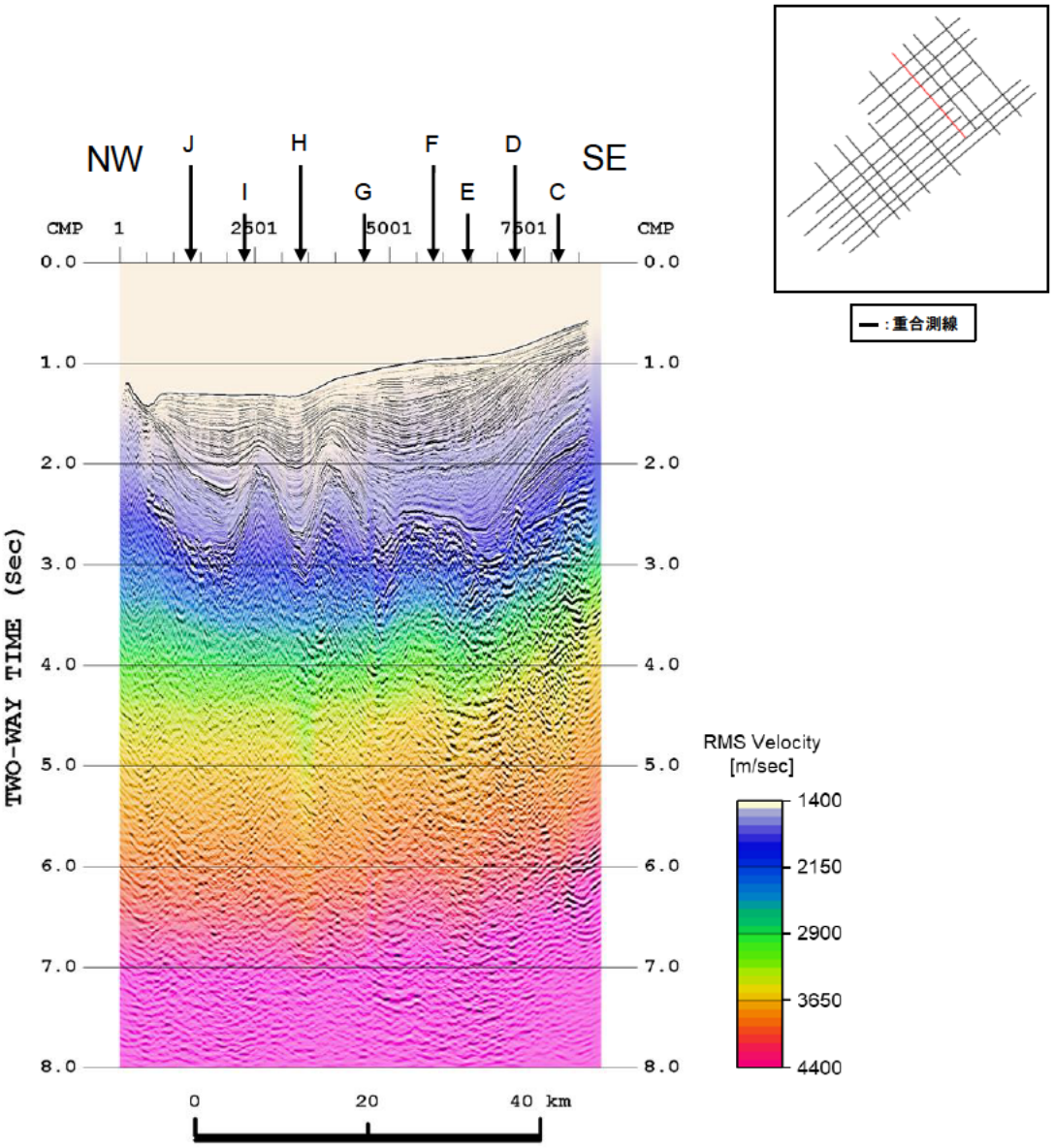
交差する交点の測線名は、測線名の末尾のみ表示

図 3.3-8(4)　RMS 速度プロファイル（KF-20-4 測線）



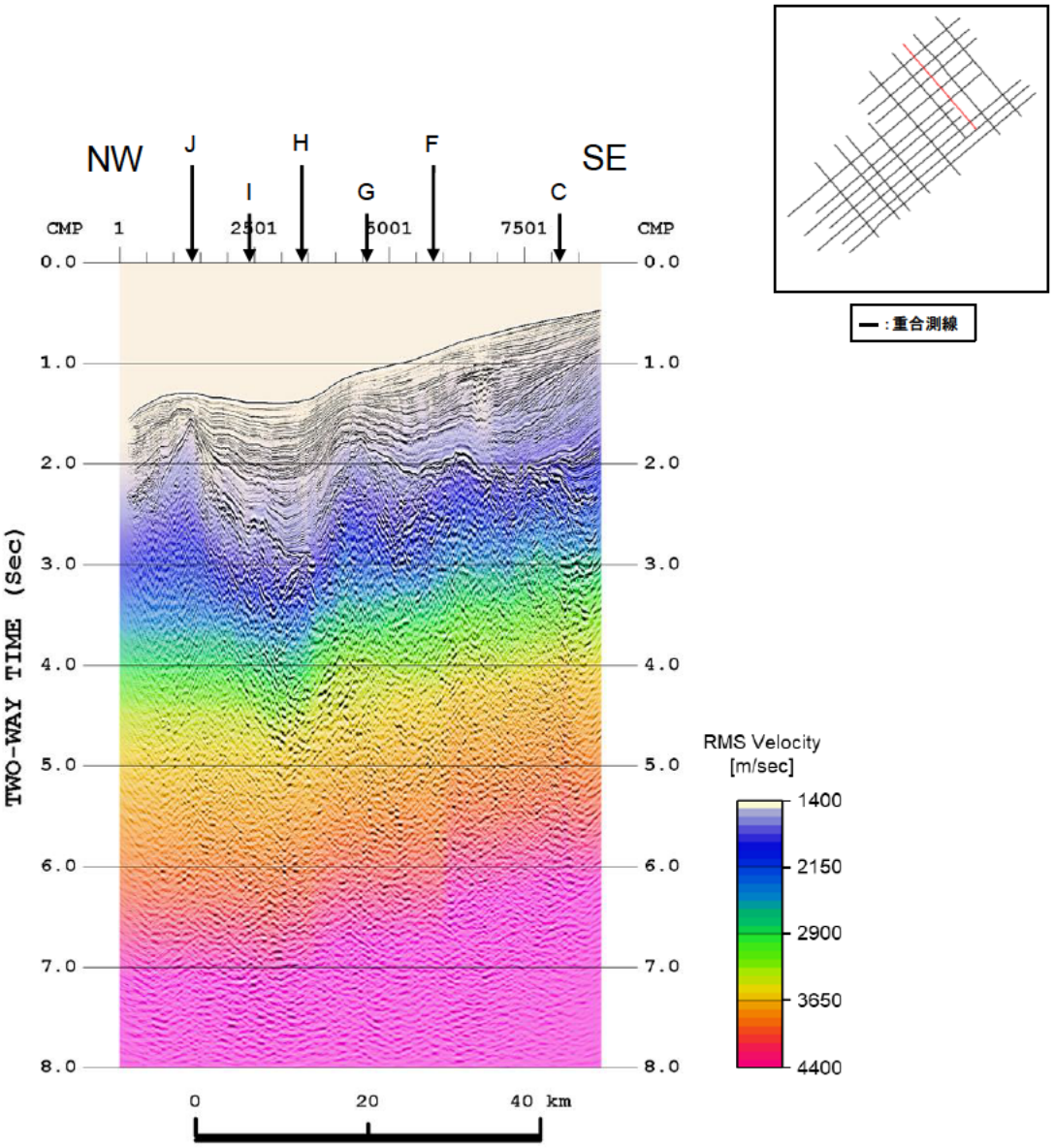
交差する交点の測線名は、測線名の末尾のみ表示

図 3.3-8(5)　RMS 速度プロファイル（KF-20-5 測線）



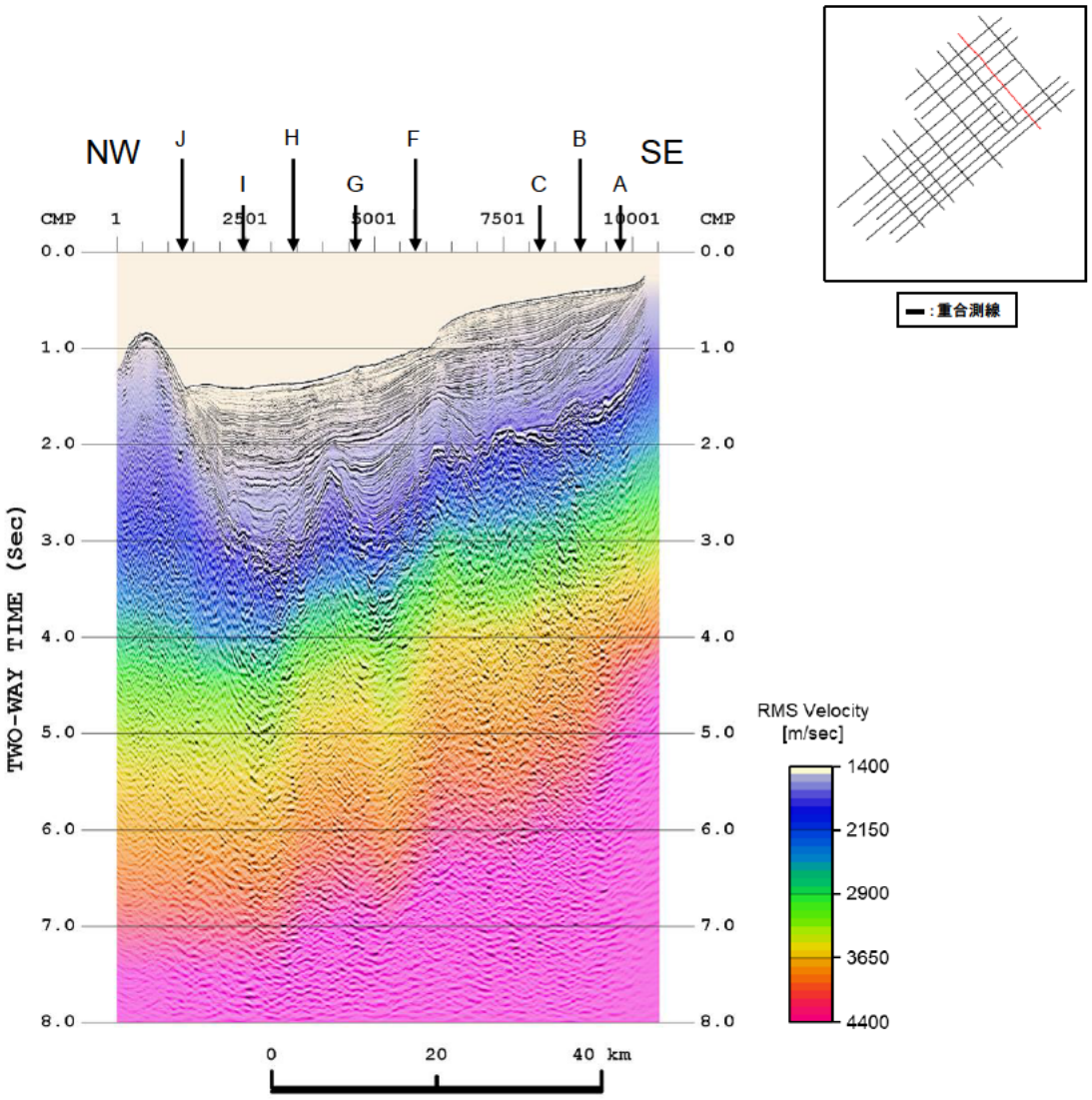
交差する交点の測線名は、測線名の末尾のみ表示

図 3.3-8(6)　RMS 速度プロファイル（KF-20-6 測線）



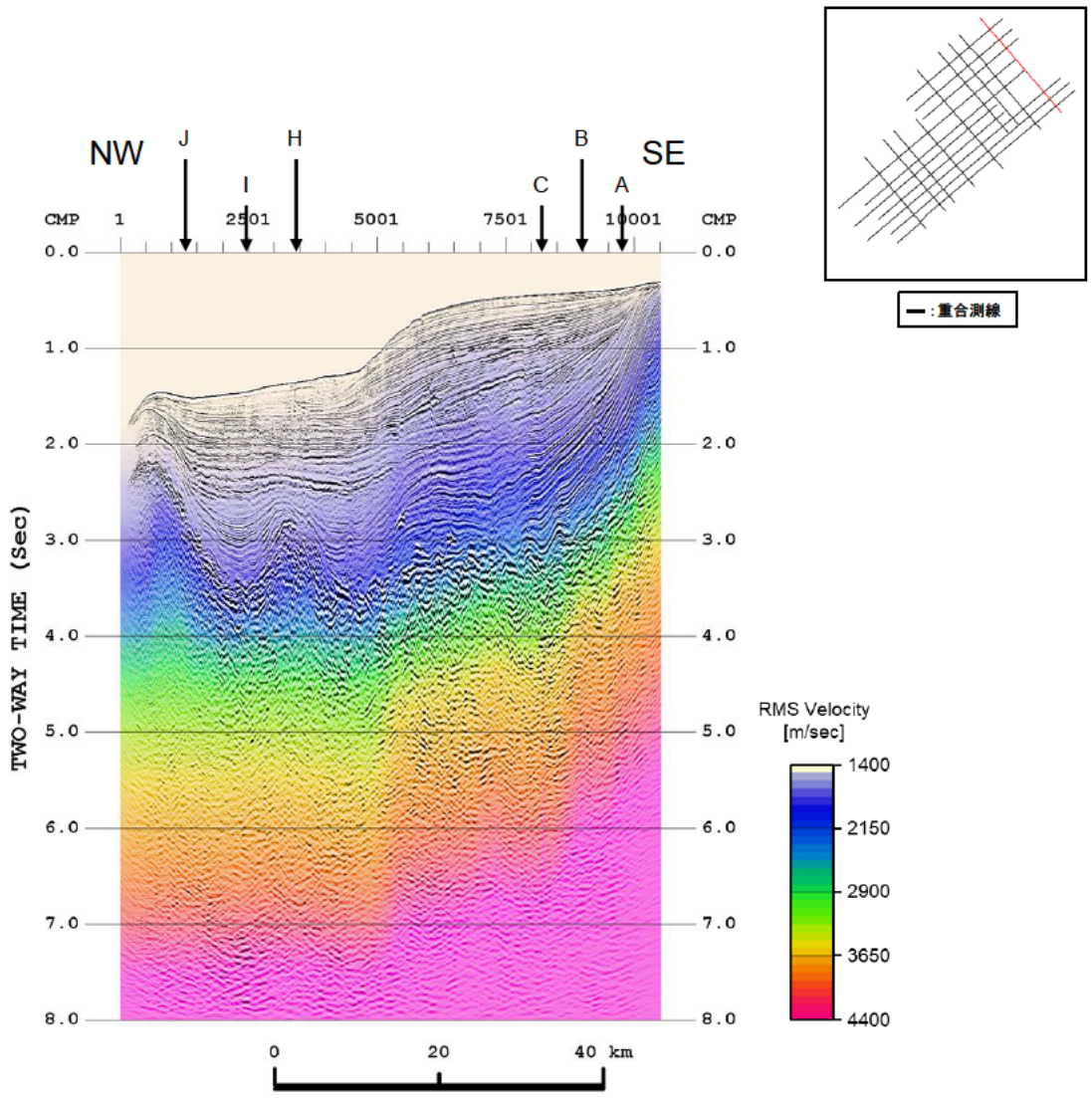
交差する交点の測線名は、測線名の末尾のみ表示

図 3.3-8(7)　RMS 速度プロファイル（KF-20-7 測線）



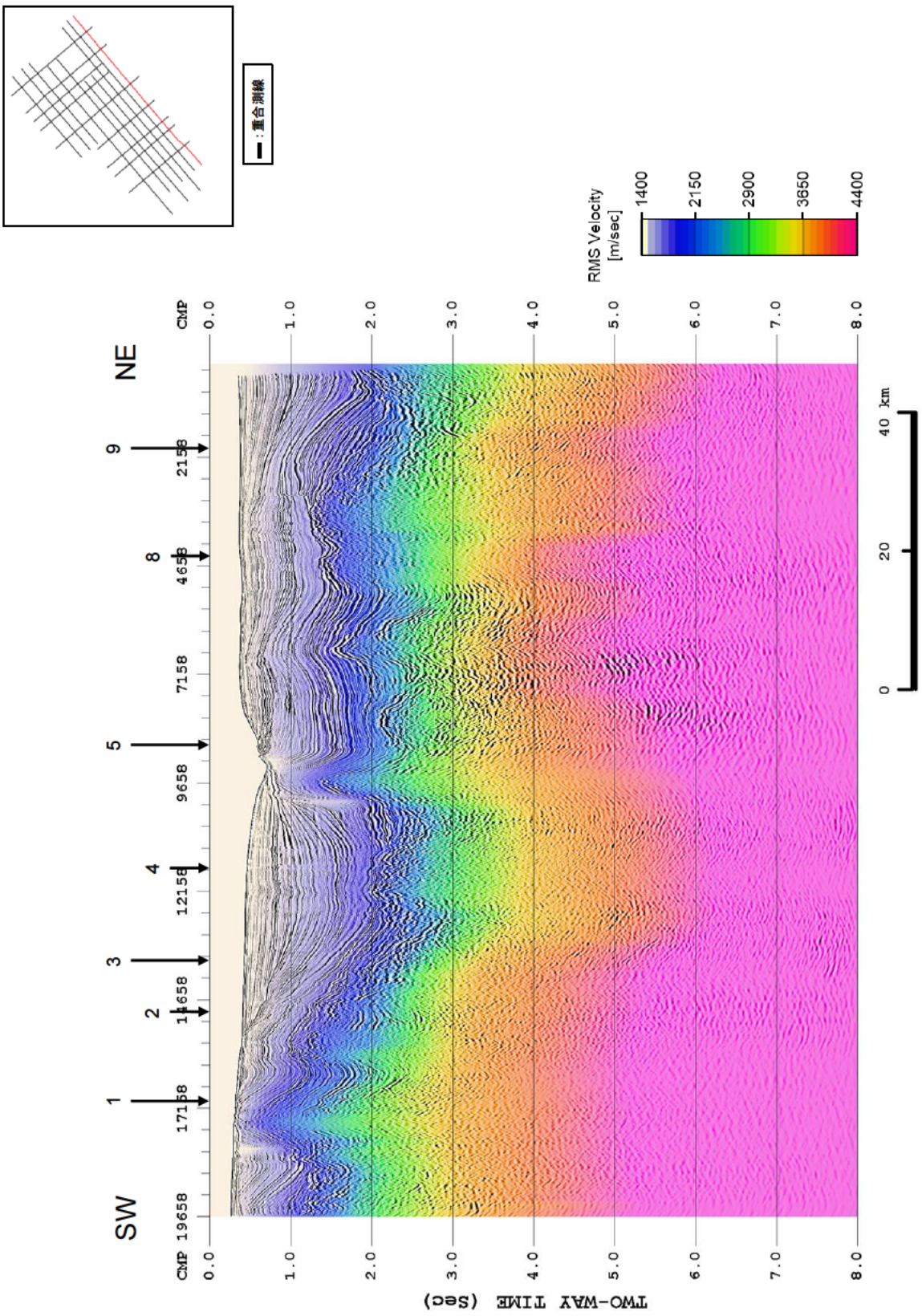
交差する交点の測線名は、測線名の末尾のみ表示

図 3.3-8(8)　RMS 速度プロファイル（KF-20-8 測線）



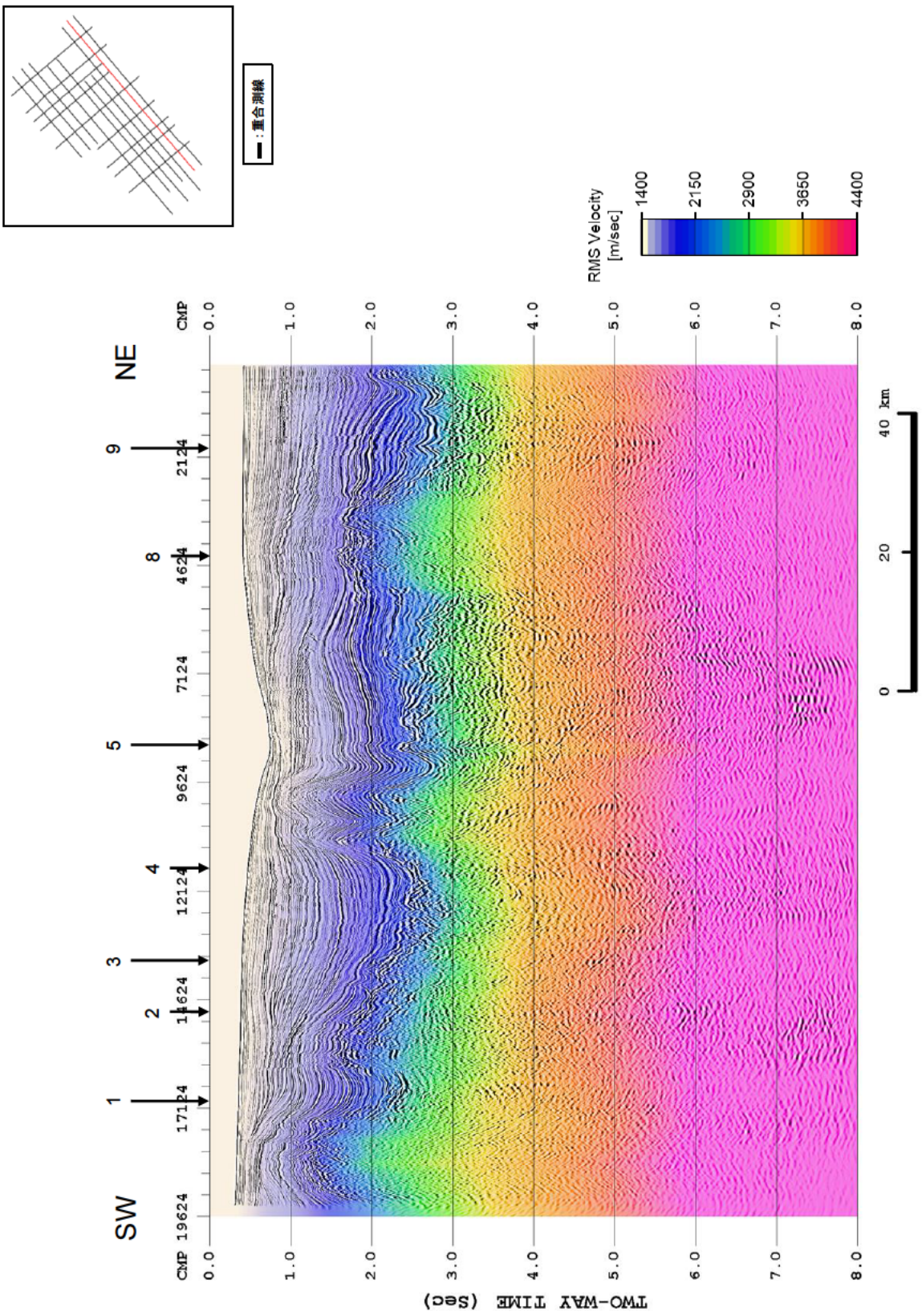
交差する交点の測線名は、測線名の末尾のみ表示

図 3.3-8(9)　RMS 速度プロファイル（KF-20-9 測線）



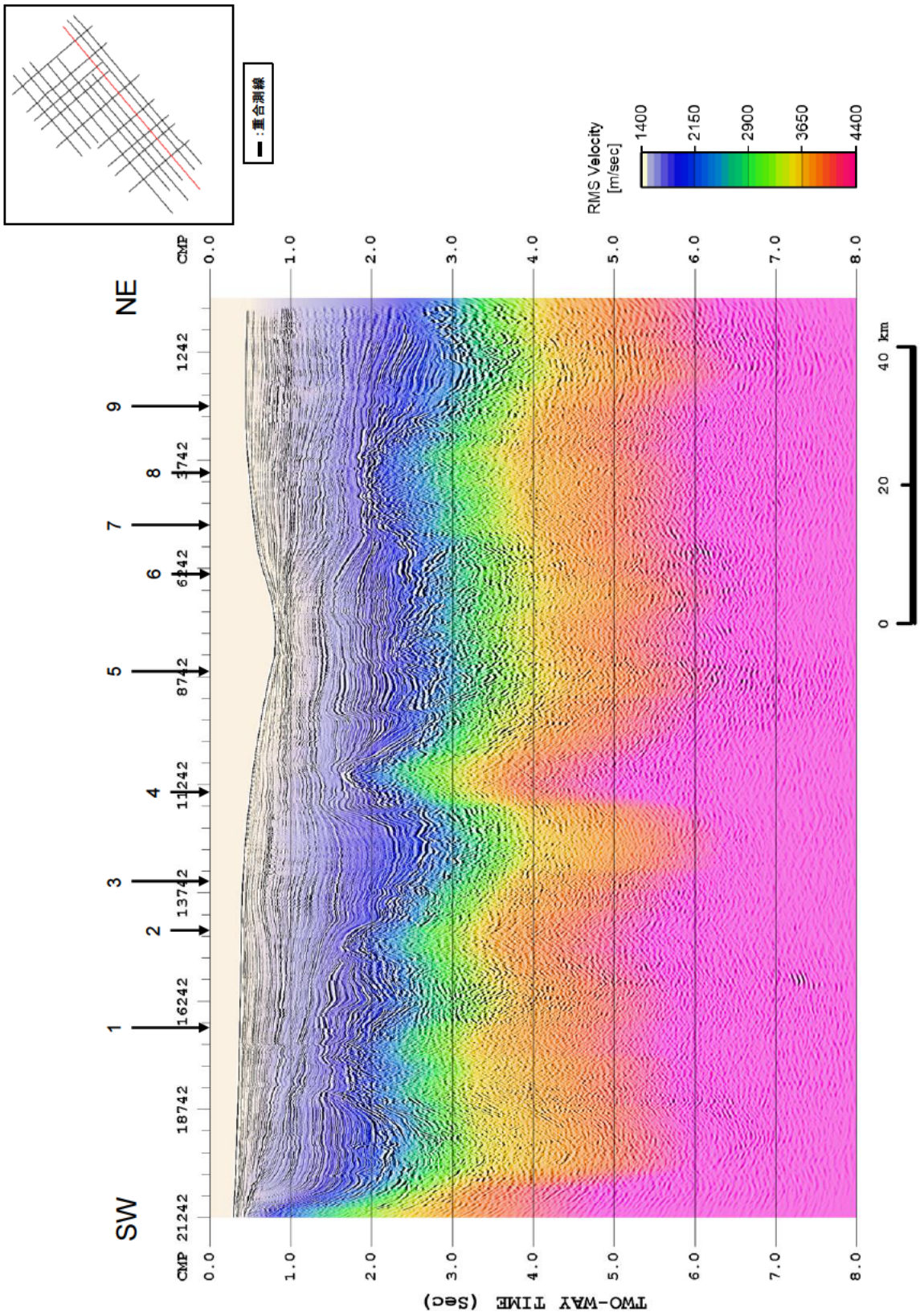
交差する交点の測線名は、測線名の末尾のみ表示

図 3.3-8(10)　RMS 速度プロファイル（KF-20-A 測線）



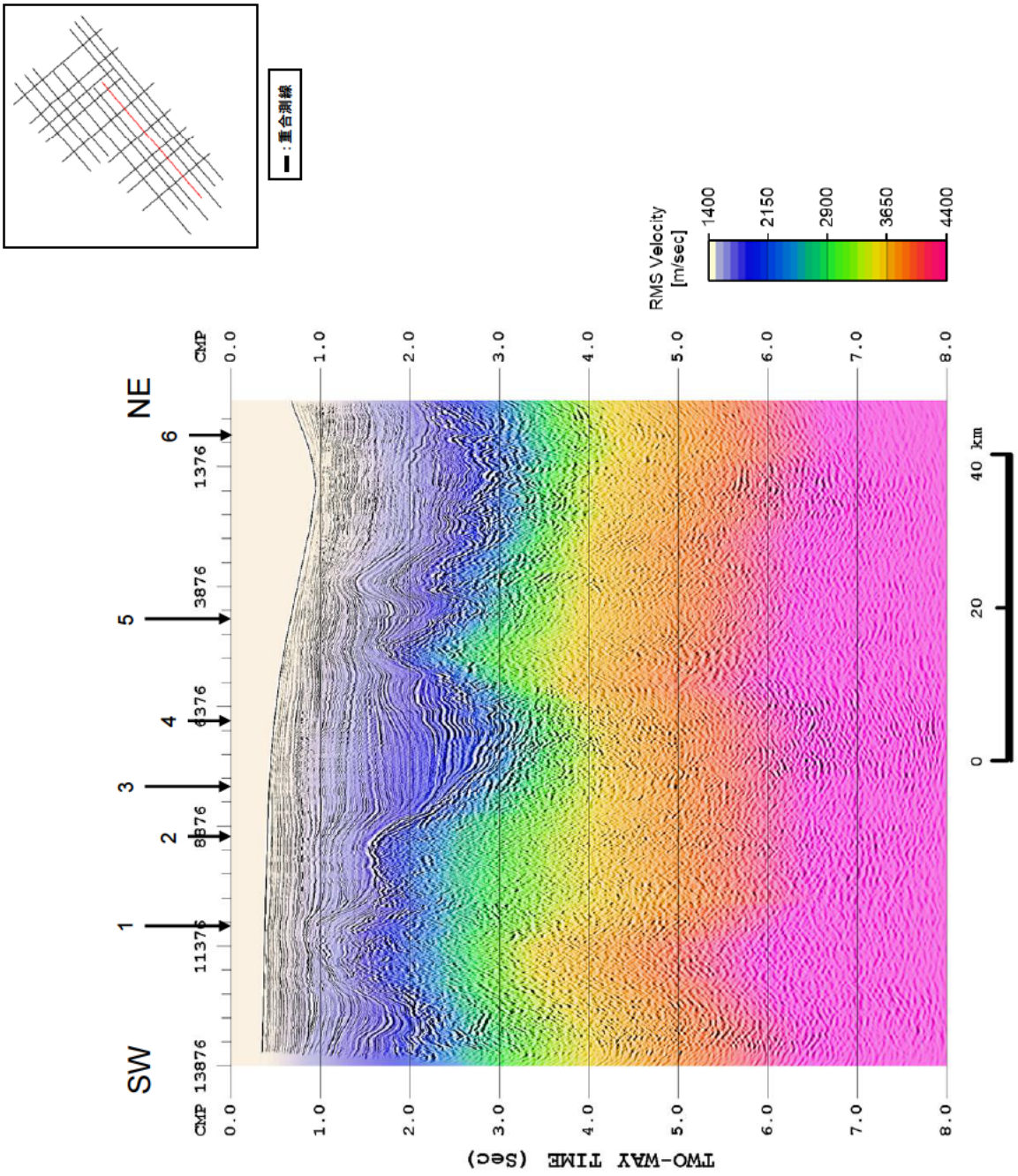
交差する交点の測線名は、測線名の末尾のみ表示

図 3.3-8(11)　RMS 速度プロファイル（KF-20-B 測線）



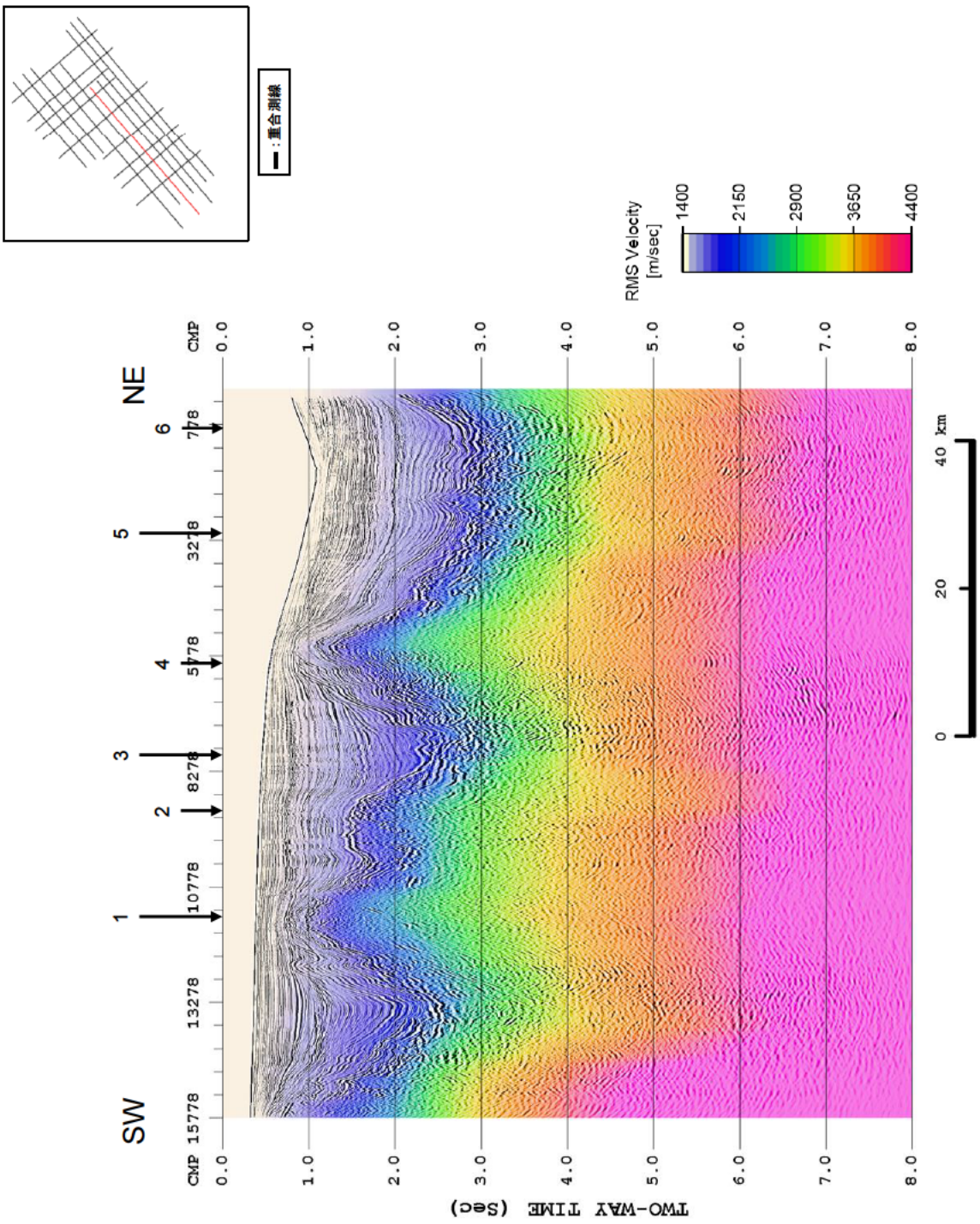
交差する交点の測線名は、測線名の末尾のみ表示

図 3.3-8(12)　RMS 速度プロファイル（KF-20-C 測線）



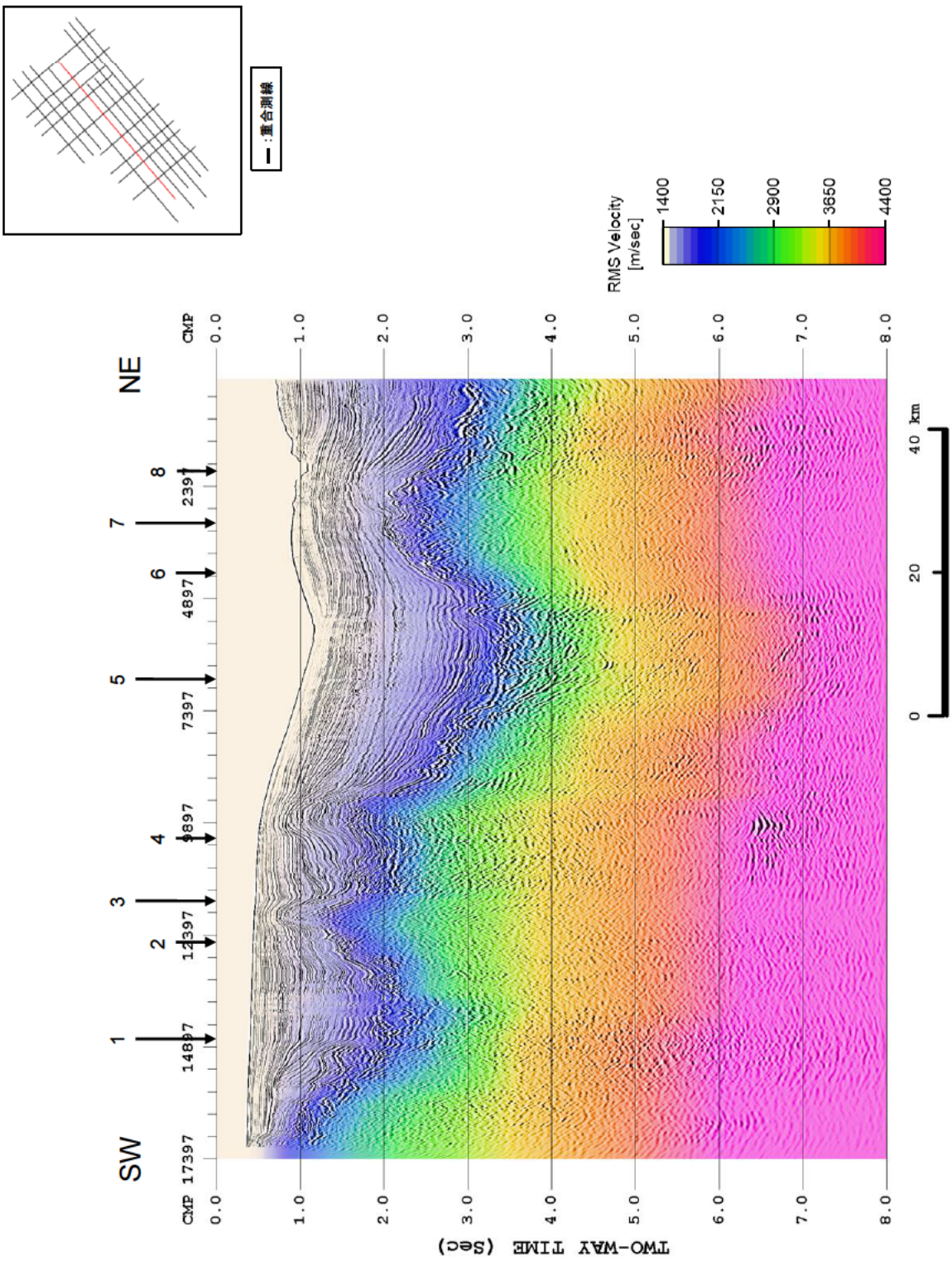
交差する交点の測線名は、測線名の末尾のみ表示

図 3.3-8(13)　RMS 速度プロファイル（KF-20-D 測線）



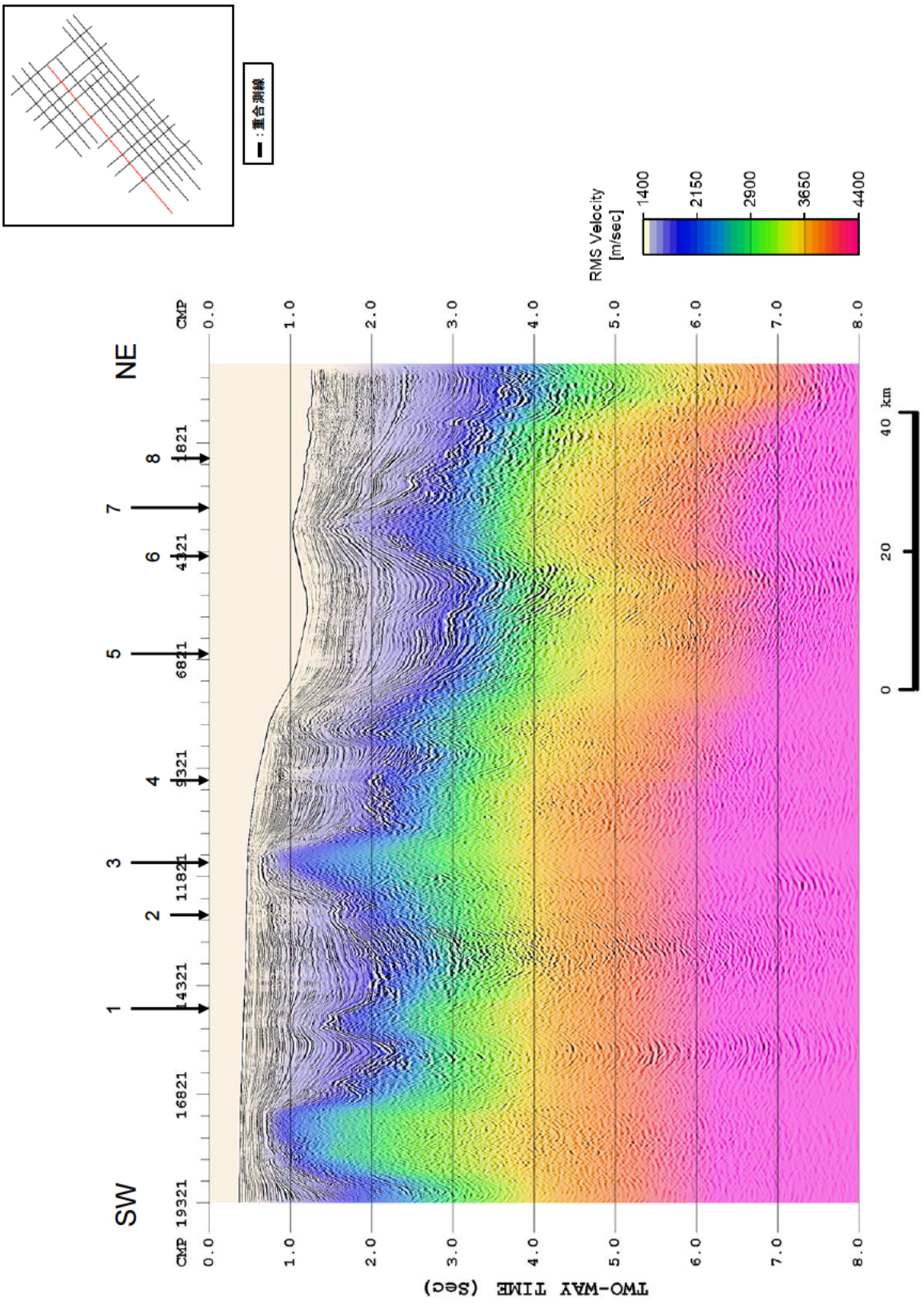
交差する交点の測線名は、測線名の末尾のみ表示

図 3.3-8(14)　RMS 速度プロファイル（KF-20-E 測線）



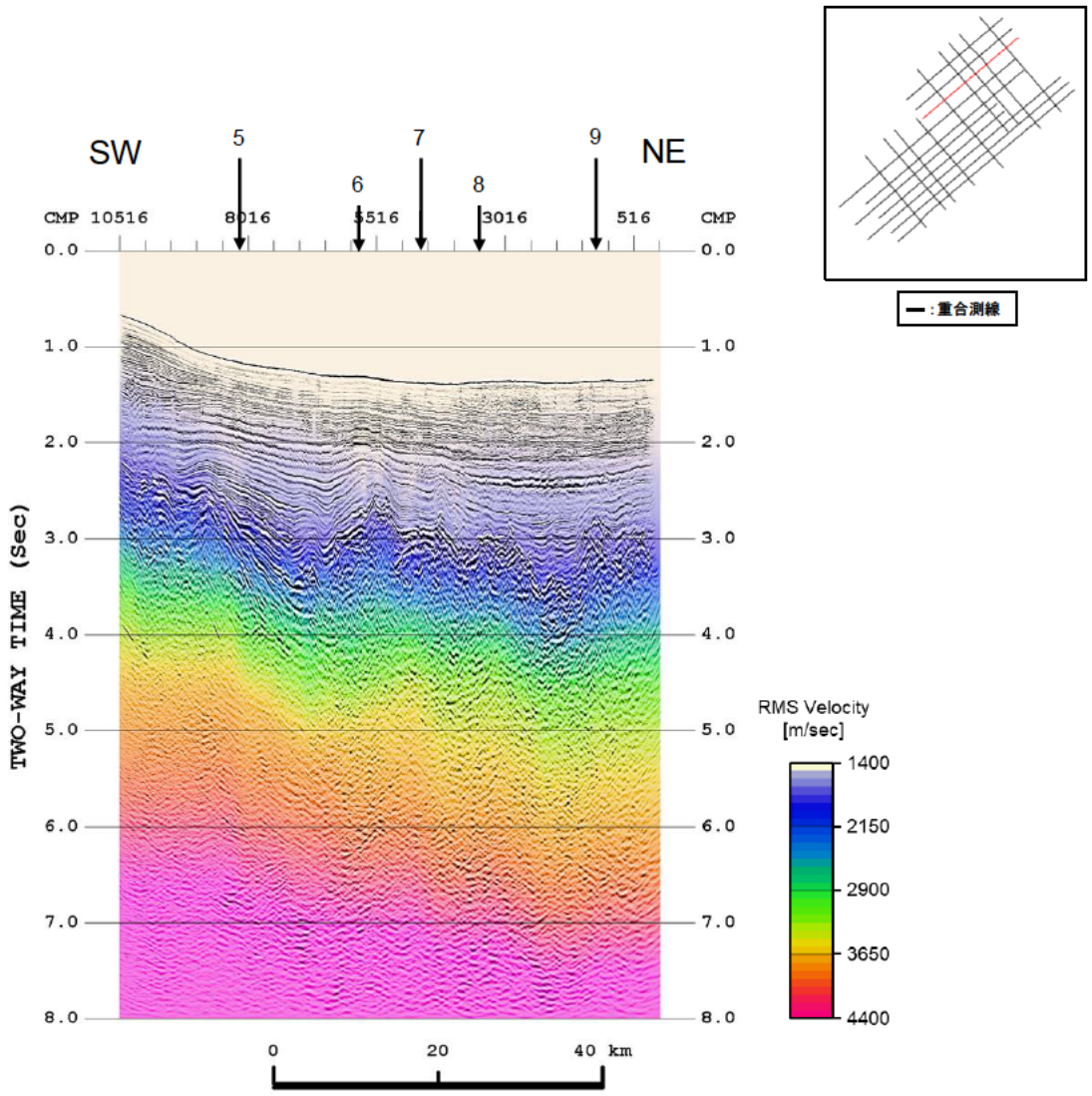
交差する交点の測線名は、測線名の末尾のみ表示

図 3.3-8(15)　RMS 速度プロファイル（KF-20-F 測線）



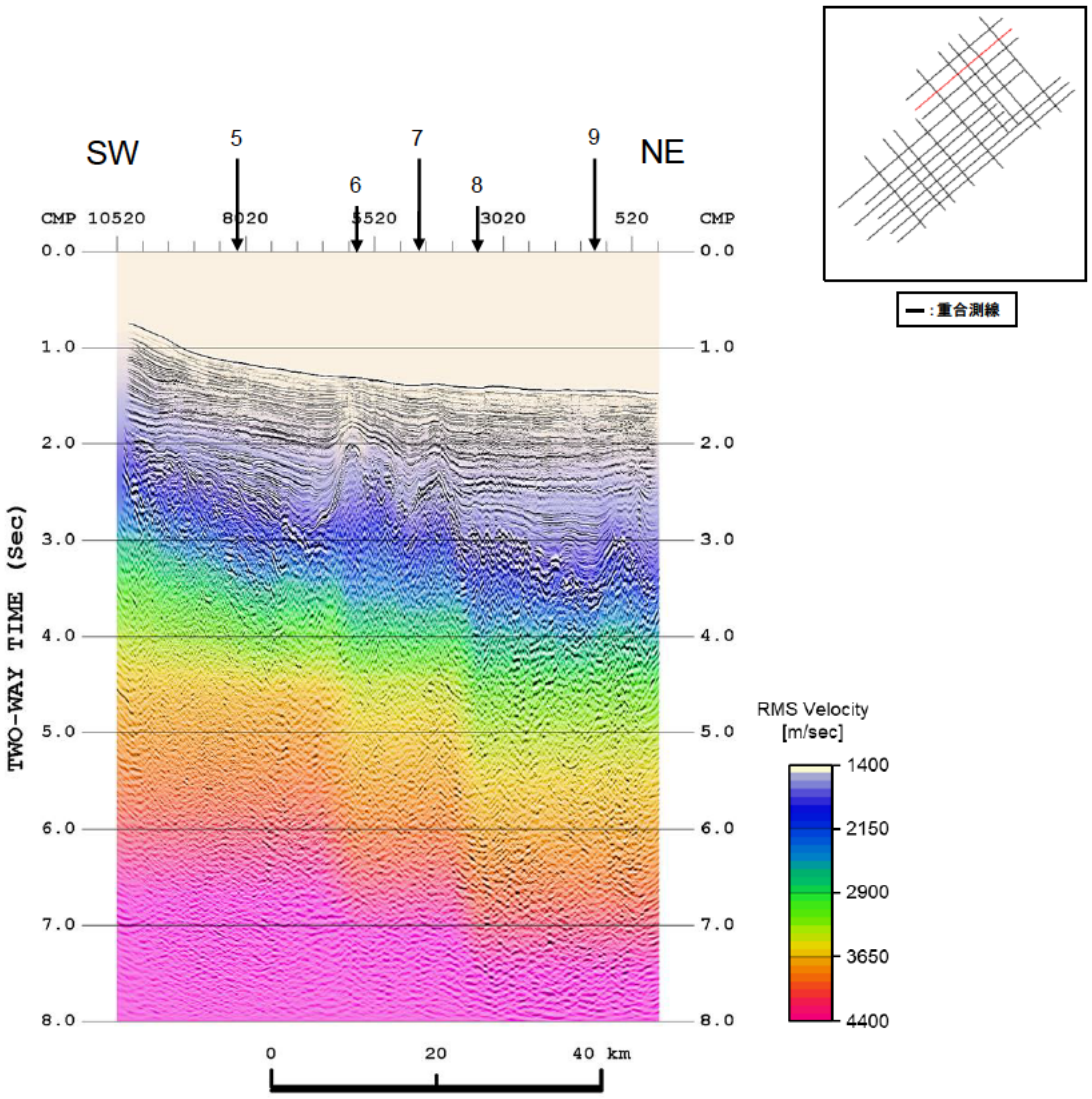
交差する交点の測線名は、測線名の末尾のみ表示

図 3.3-8(16)　RMS 速度プロファイル（KF-20-G 測線）



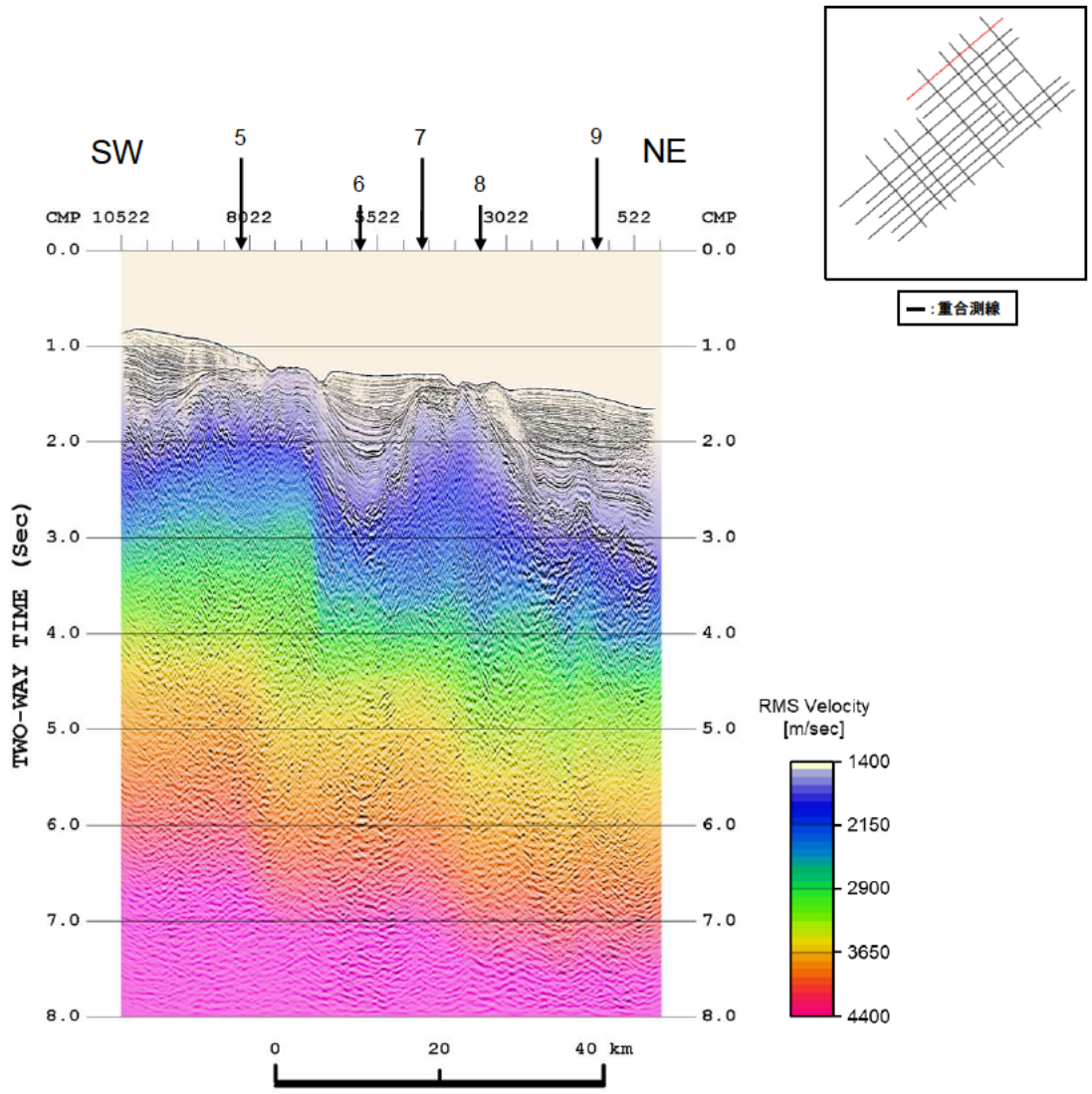
交差する交点の測線名は、測線名の末尾のみ表示

図 3.3-8(17)　RMS 速度プロファイル（KF-20-H 測線）



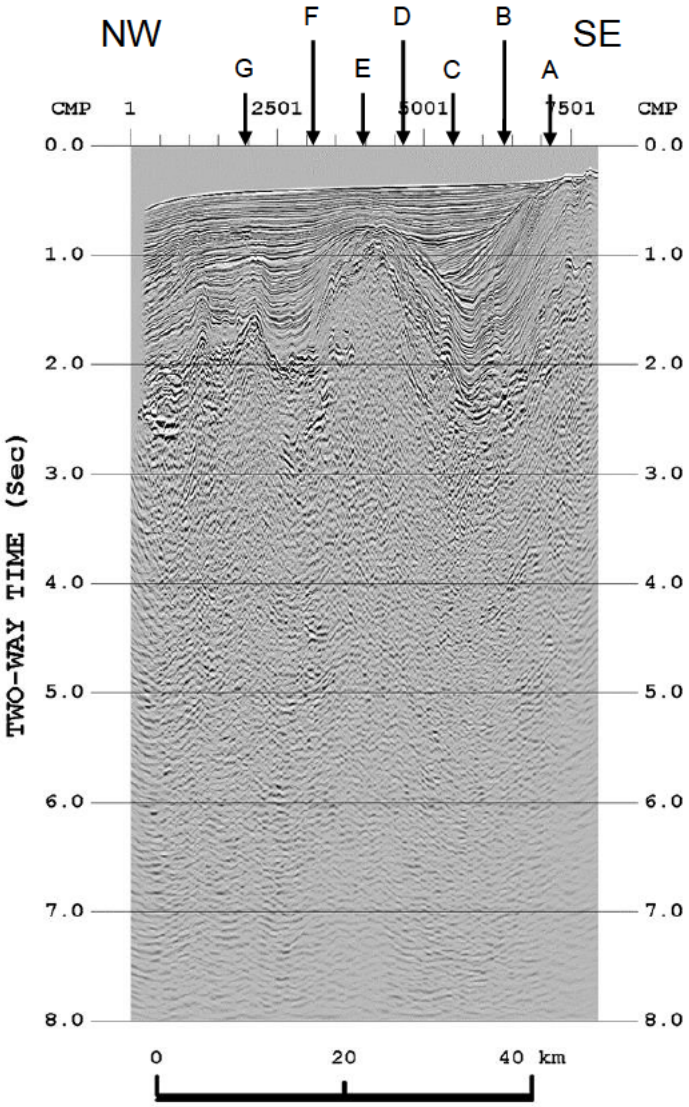
交差する交点の測線名は、測線名の末尾のみ表示

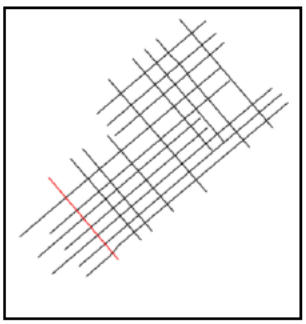
図 3.3-8(18)　RMS 速度プロファイル（KF-20-I 測線）



交差する交点の測線名は、測線名の末尾のみ表示

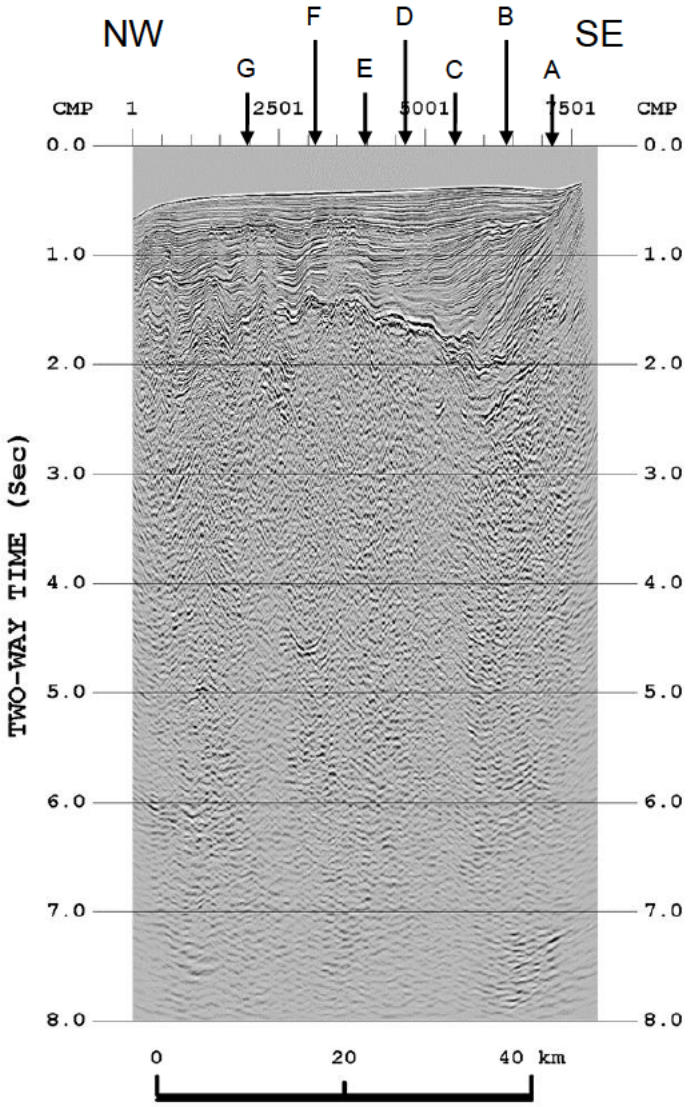
図 3.3-8(19)　RMS 速度プロファイル（KF-20-J 測線）

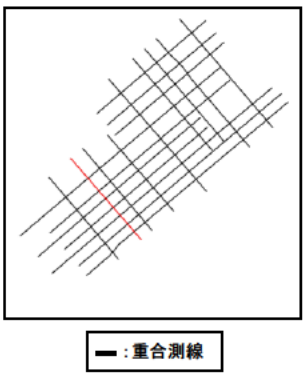




交差する交点の測線名は、測線名の末尾のみ表示

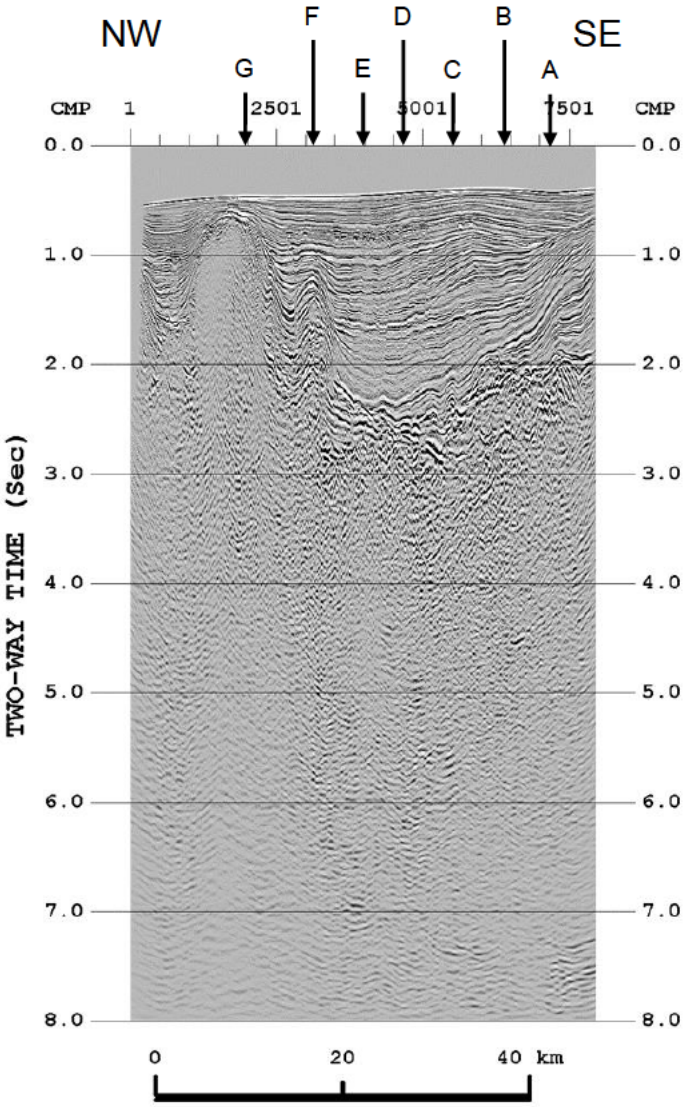
図 3.3-9(1)　PSTM 記録（KF-20-1 測線）

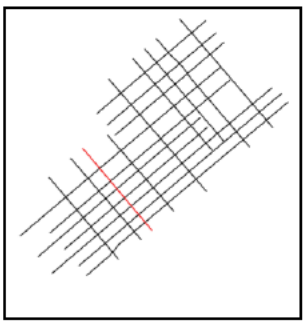




交差する交点の測線名は、測線名の末尾のみ表示

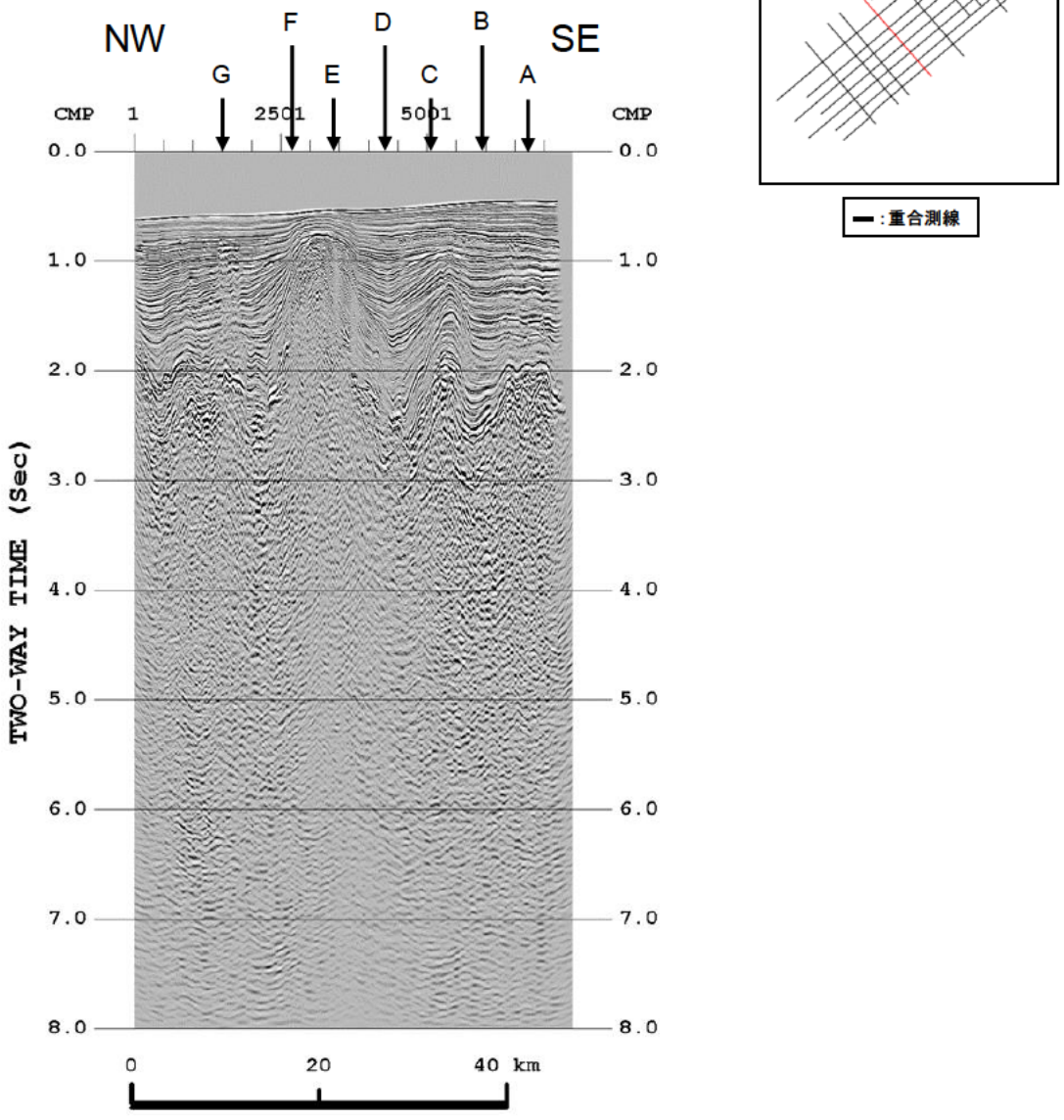
図 3.3-9(2)　PSTM 記録（KF-20-2 測線）





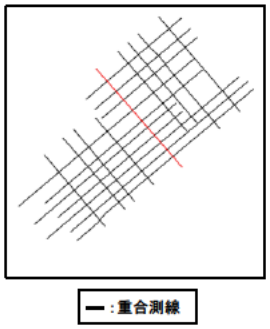
交差する交点の測線名は、測線名の末尾のみ表示

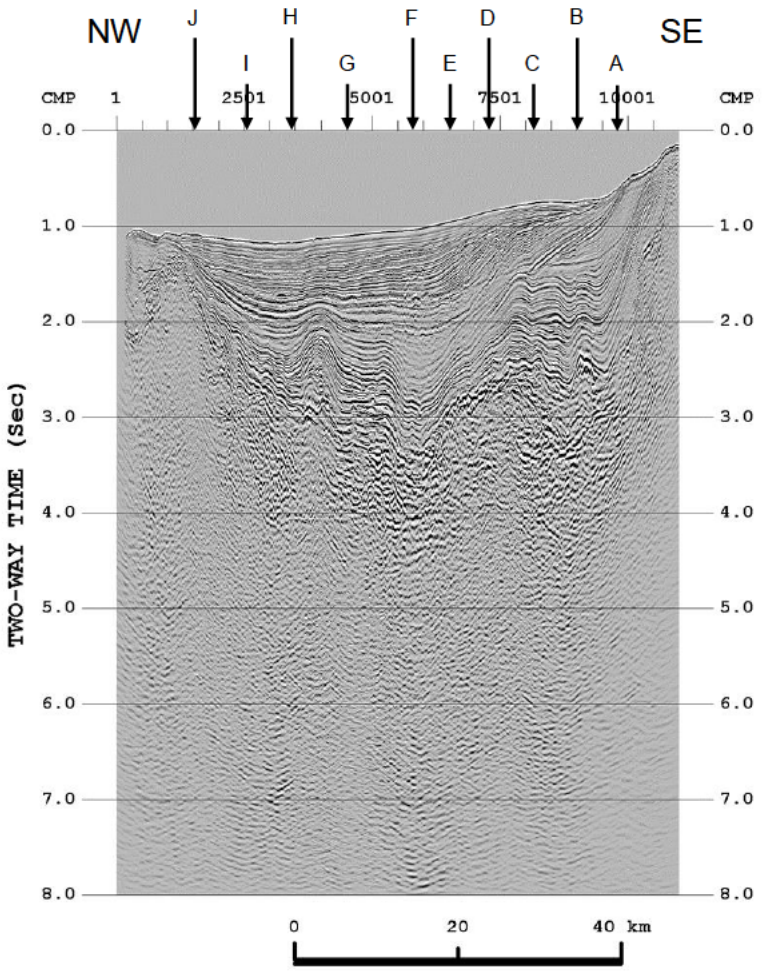
図 3.3-9(3)　PSTM 記録（KF-20-3 測線）



交差する交点の測線名は、測線名の末尾のみ表示

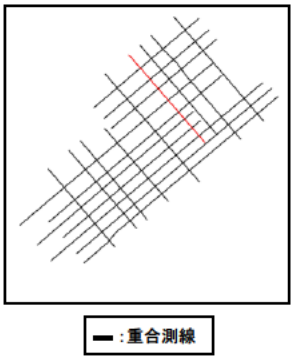
図 3.3-9(4)　PSTM 記録（KF-20-4 測線）

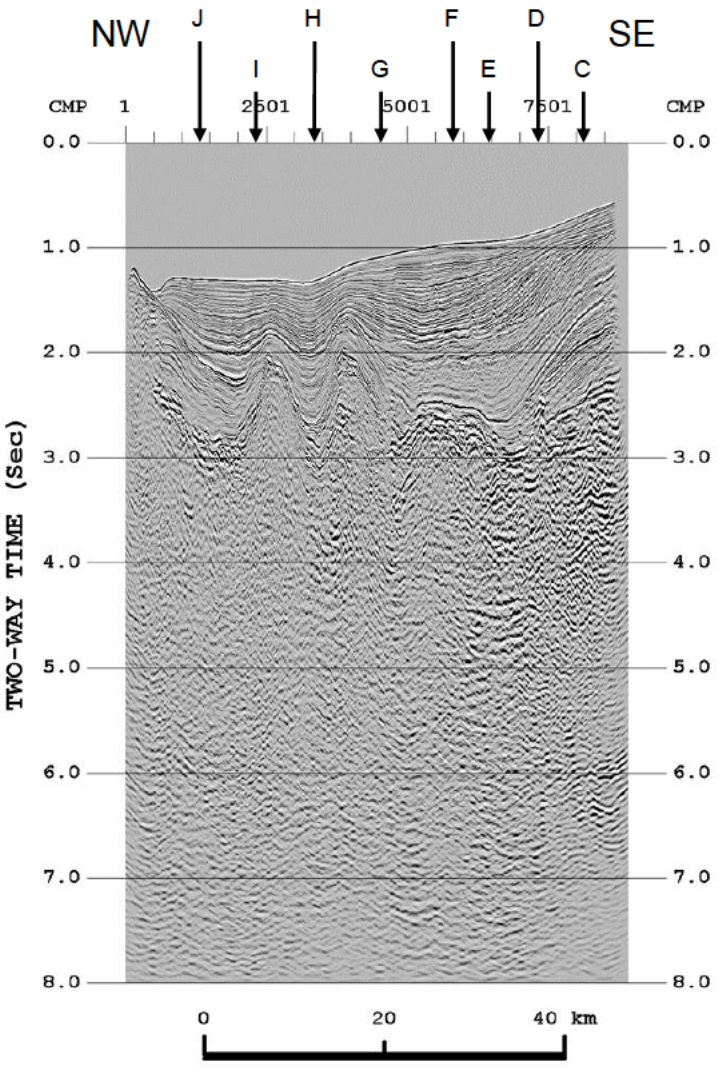




交差する交点の測線名は、測線名の末尾のみ表示

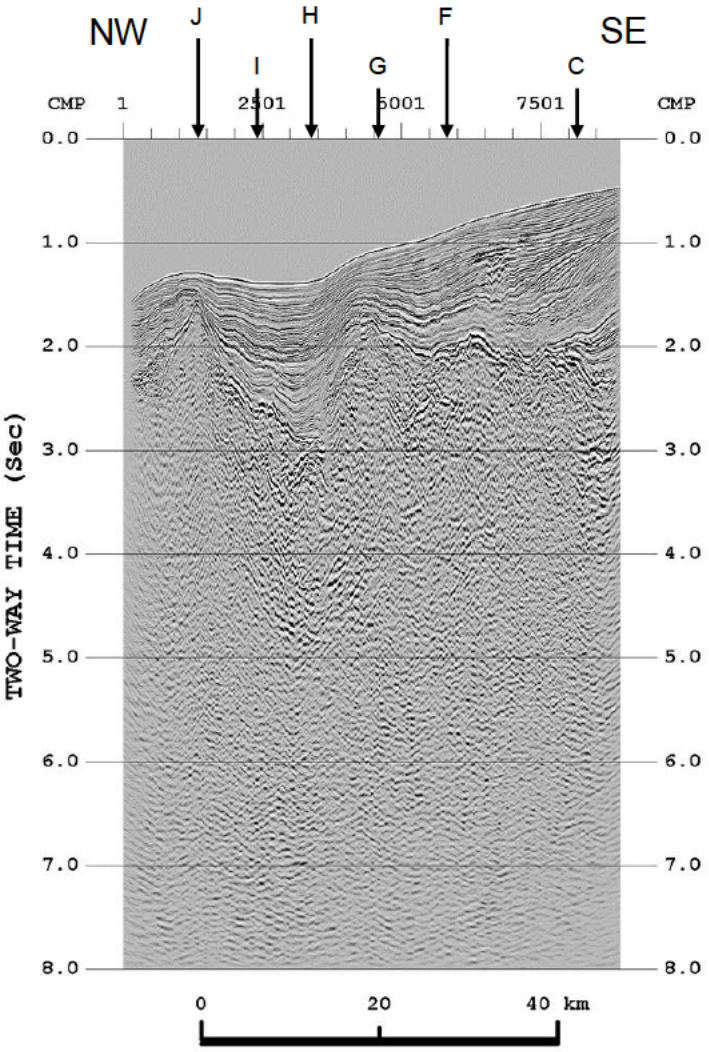
図 3.3-9(5)　PSTM 記録（KF-20-5 測線）

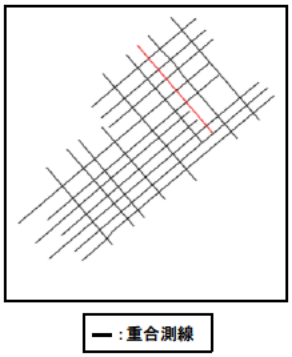




交差する交点の測線名は、測線名の末尾のみ表示

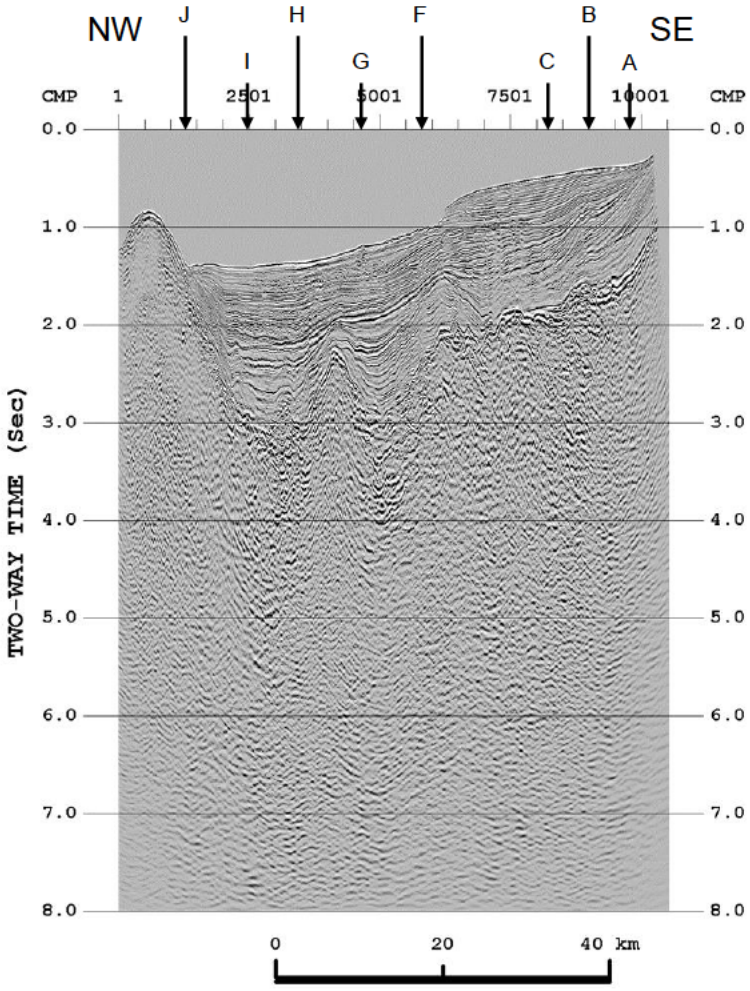
図 3.3-9(6)　PSTM 記録（KF-20-6 測線）

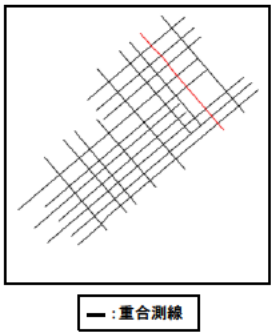




交差する交点の測線名は、測線名の末尾のみ表示

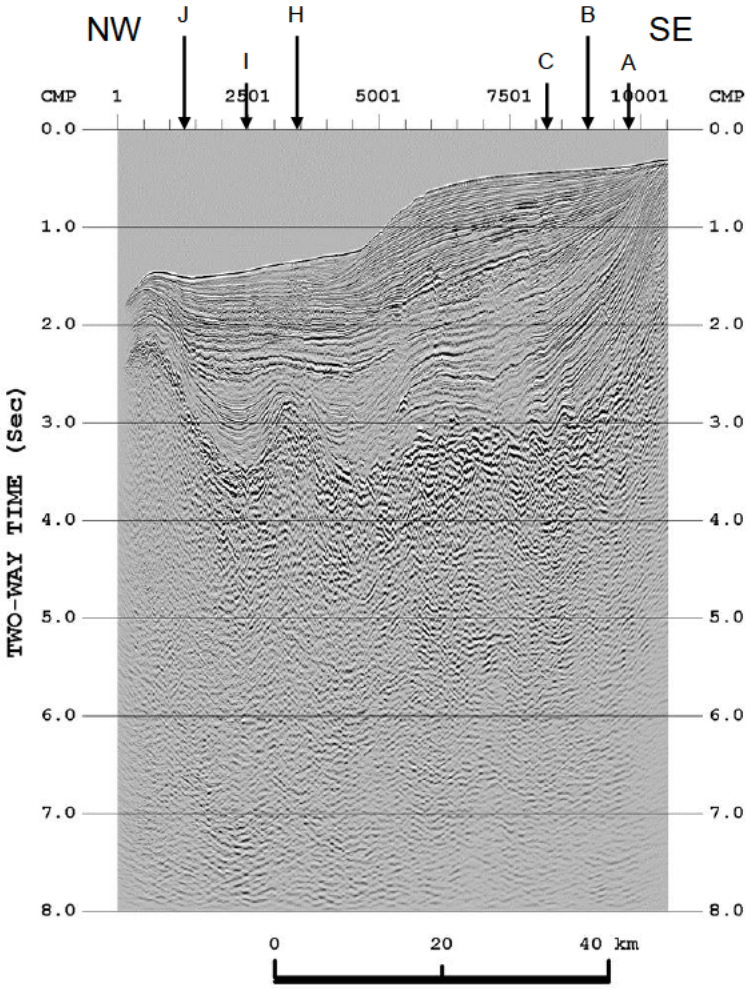
図 3.3-9(7)　PSTM 記録（KF-20-7 測線）

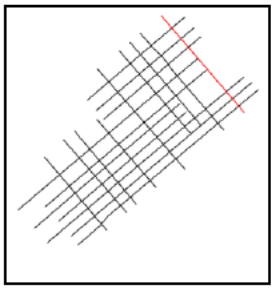




交差する交点の測線名は、測線名の末尾のみ表示

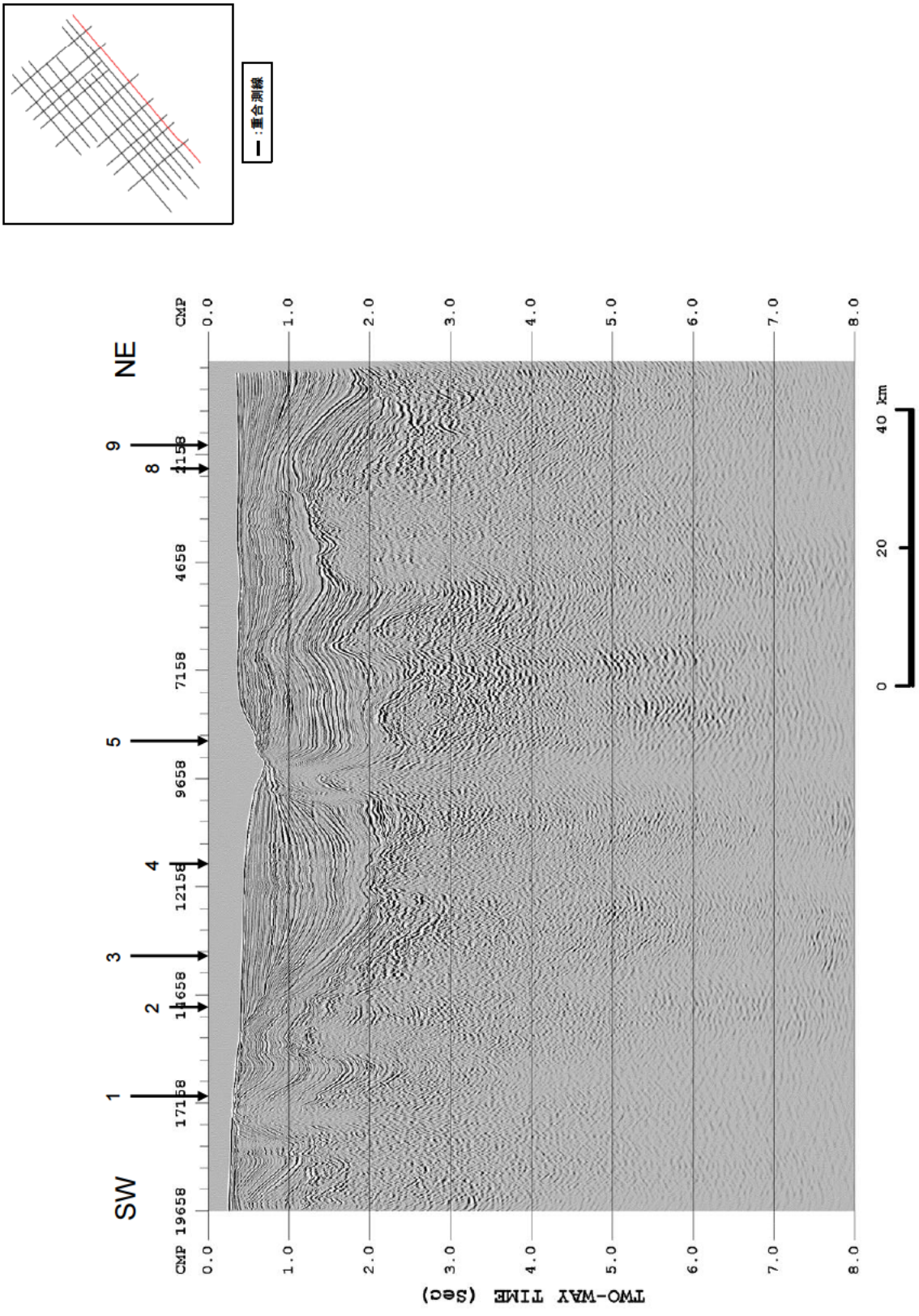
図 3.3-9(8)　PSTM 記録（KF-20-8 測線）





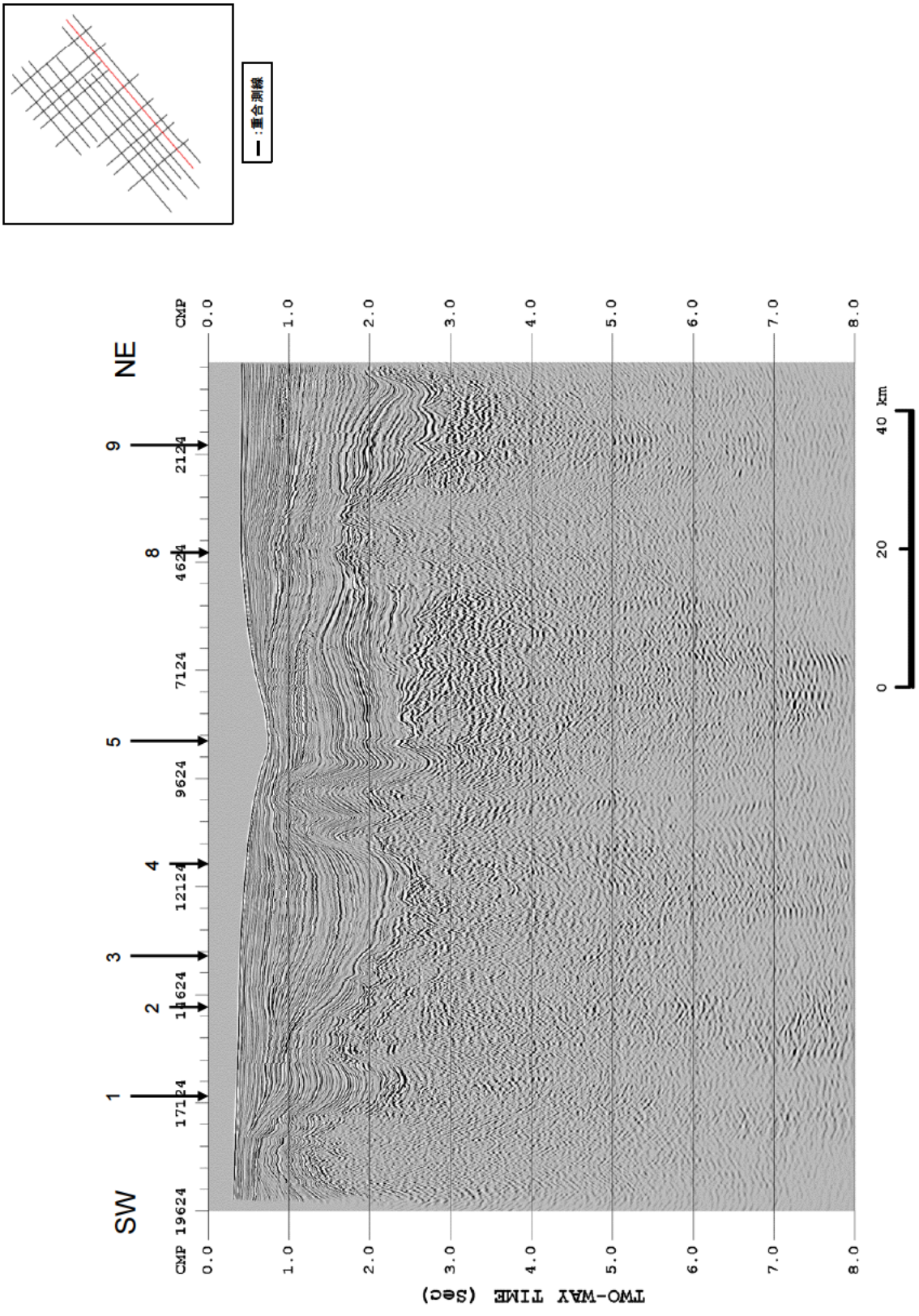
交差する交点の測線名は、測線名の末尾のみ表示

図 3.3-9(9)　PSTM 記録（KF-20-9 測線）



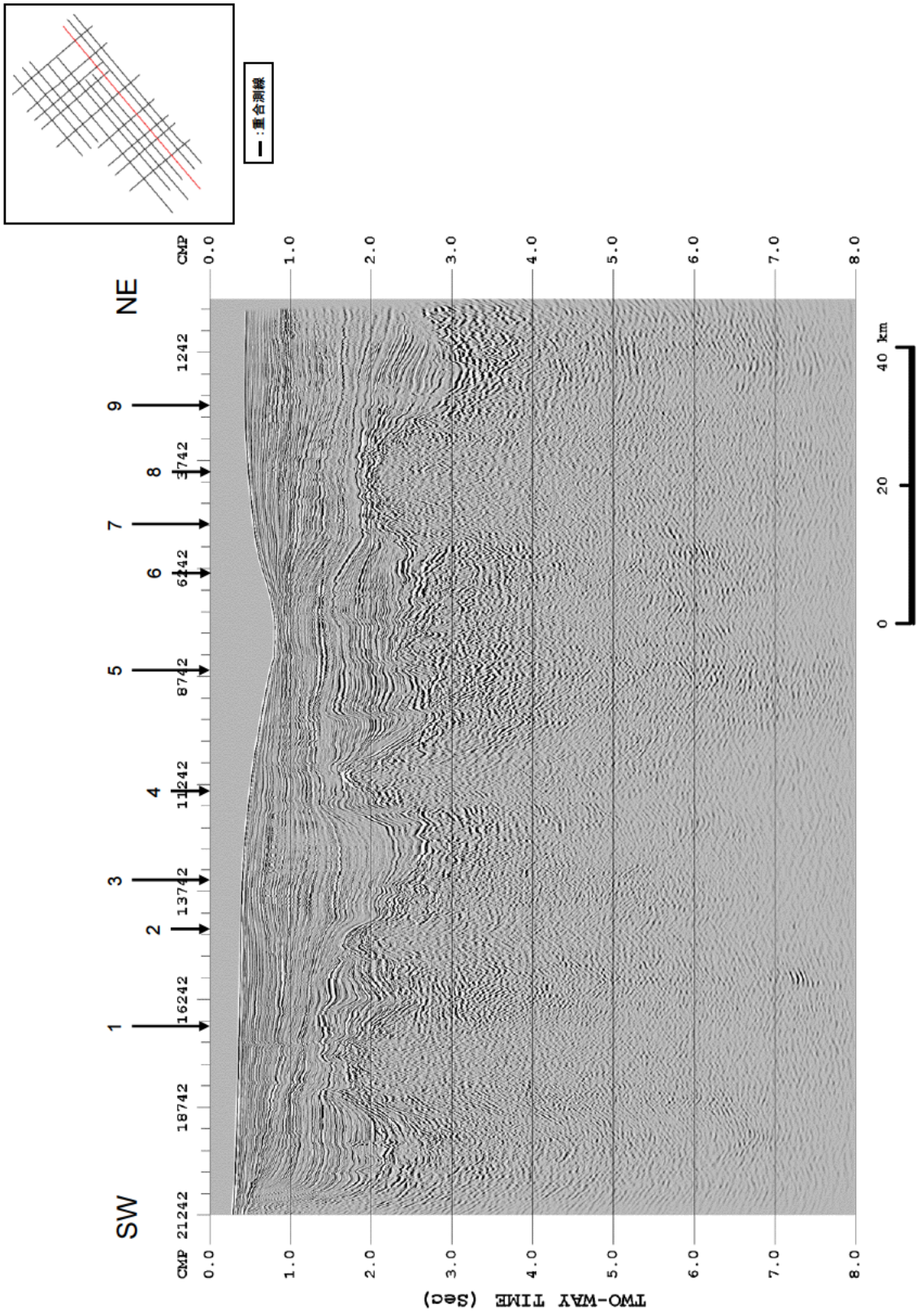
交差する交点の測線名は、測線名の末尾のみ表示

図 3.3-9(10)　PSTM 記録（KF-20-A 測線）



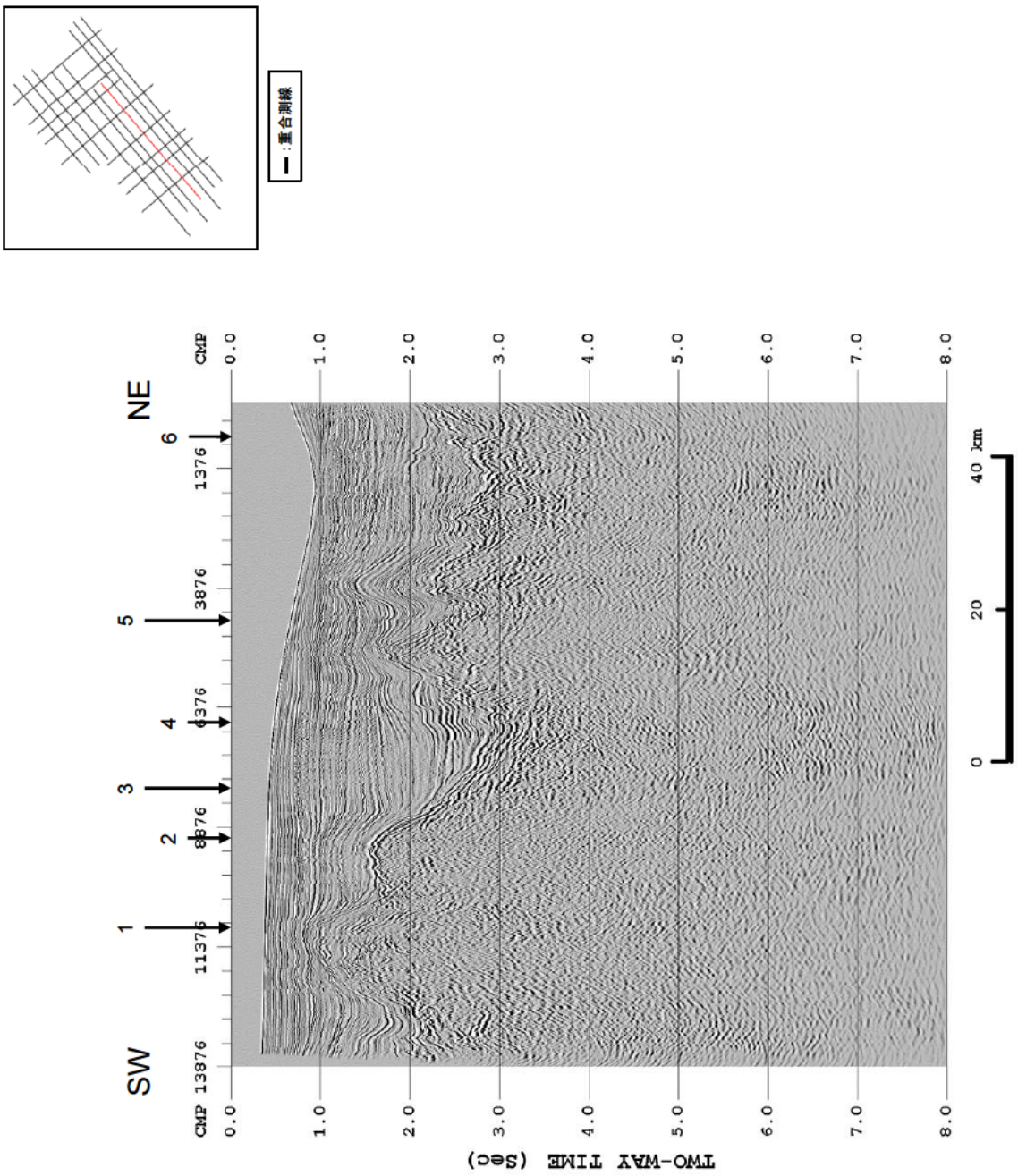
交差する交点の測線名は、測線名の末尾のみ表示

図 3.3-9(11)　PSTM 記録（KF-20-B 測線）



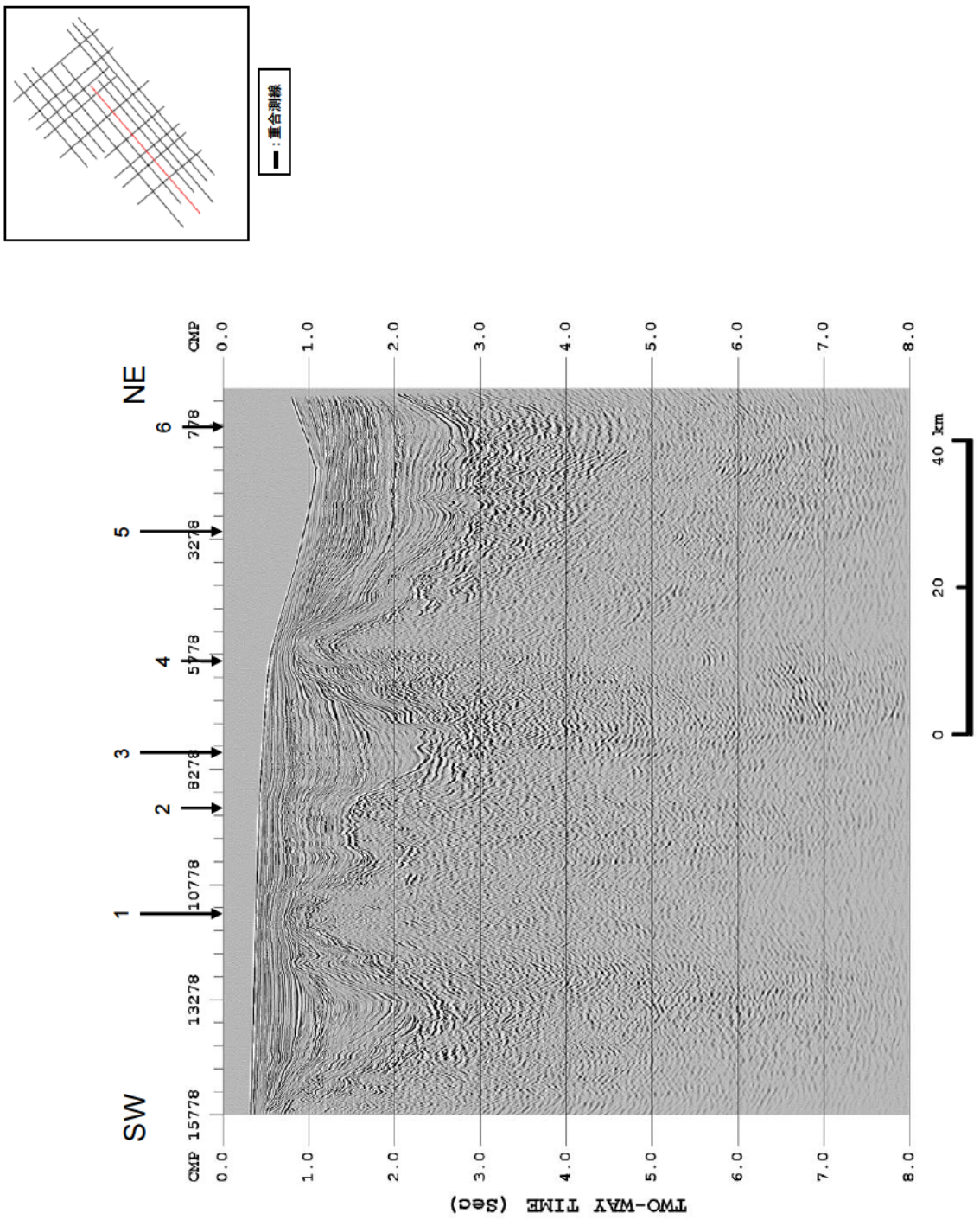
交差する交点の測線名は、測線名の末尾のみ表示

図 3.3-9(12)　PSTM 記録（KF-20-C 測線）



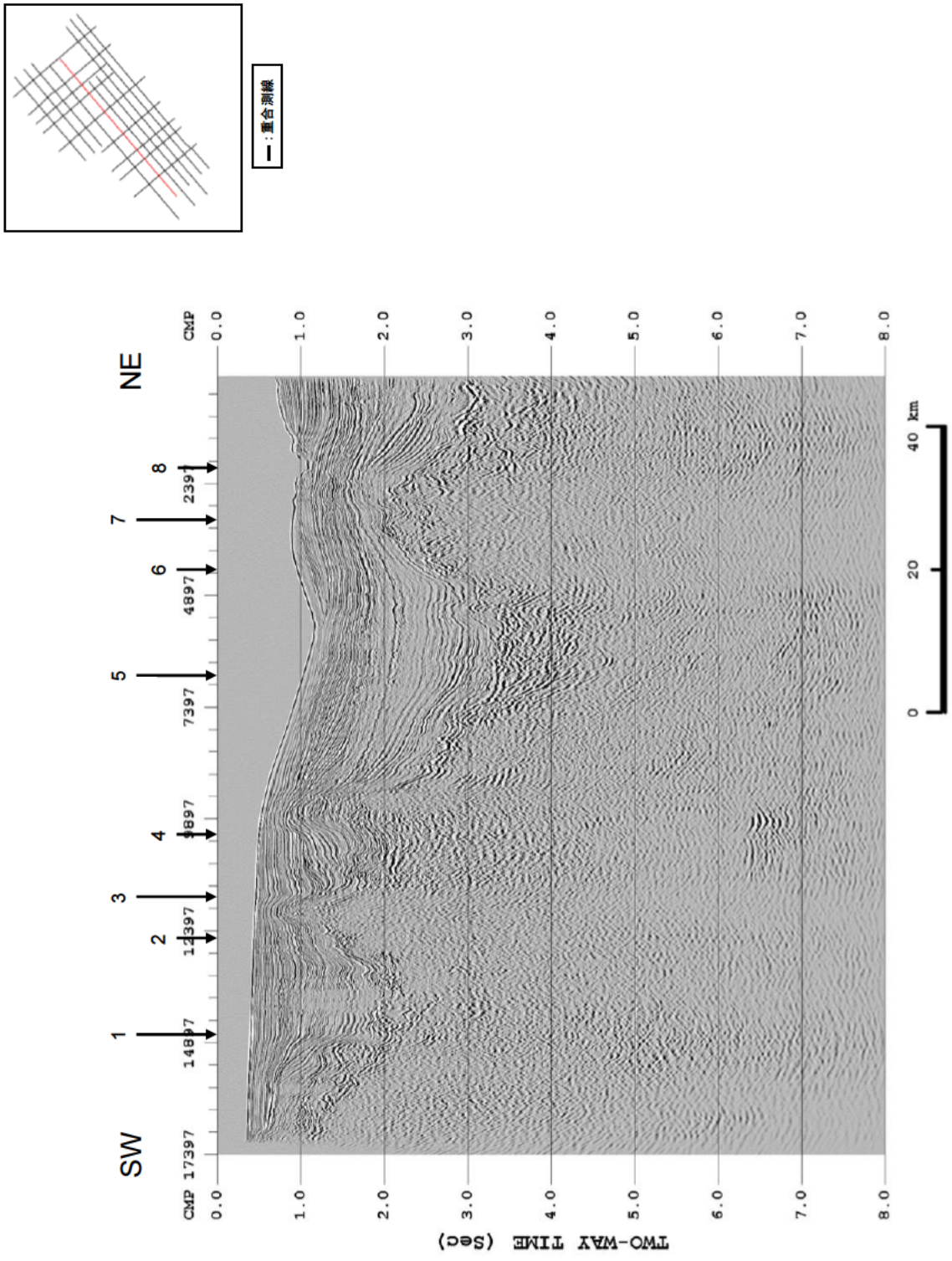
交差する交点の測線名は、測線名の末尾のみ表示

図 3.3-9(13)　PSTM 記録（KF-20-D 測線）



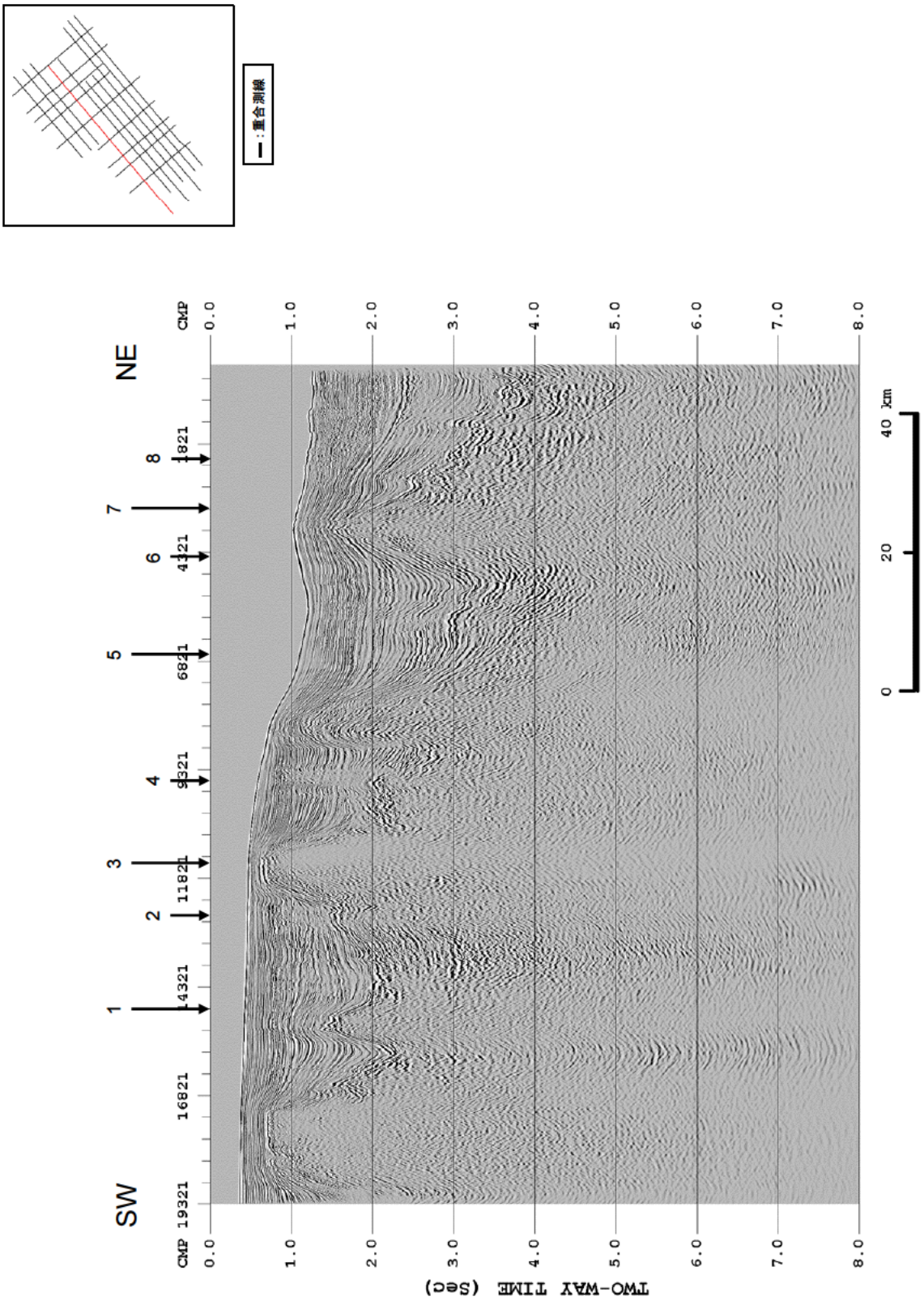
交差する交点の測線名は、測線名の末尾のみ表示

図 3.3-9(14)　PSTM 記録（KF-20-E 測線）



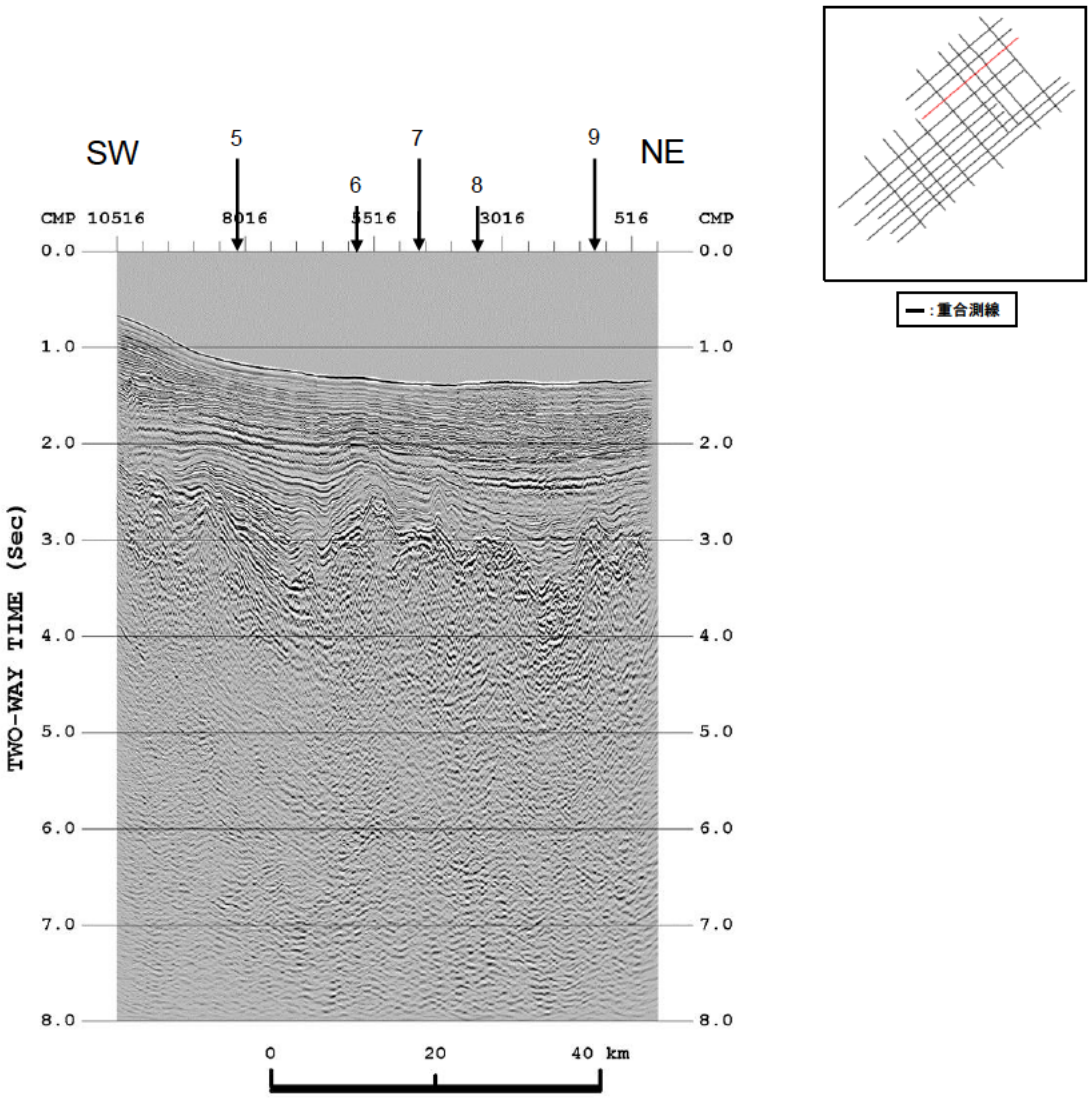
交差する交点の測線名は、測線名の末尾のみ表示

図 3.3-9(15)　PSTM 記録（KF-20-F 測線）



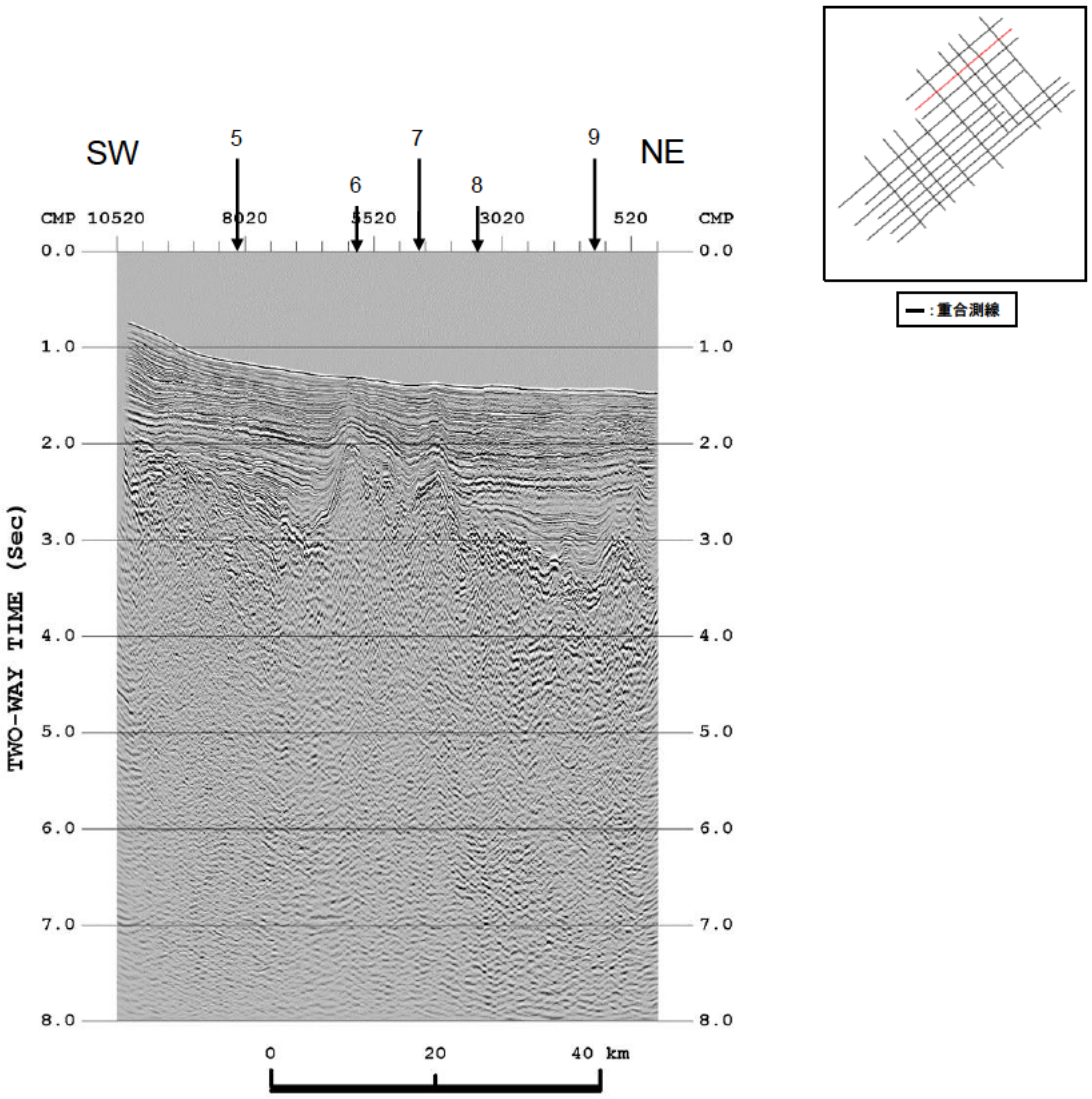
交差する交点の測線名は、測線名の末尾のみ表示

図 3.3-9(16)　PSTM 記録（KF-20-G 測線）



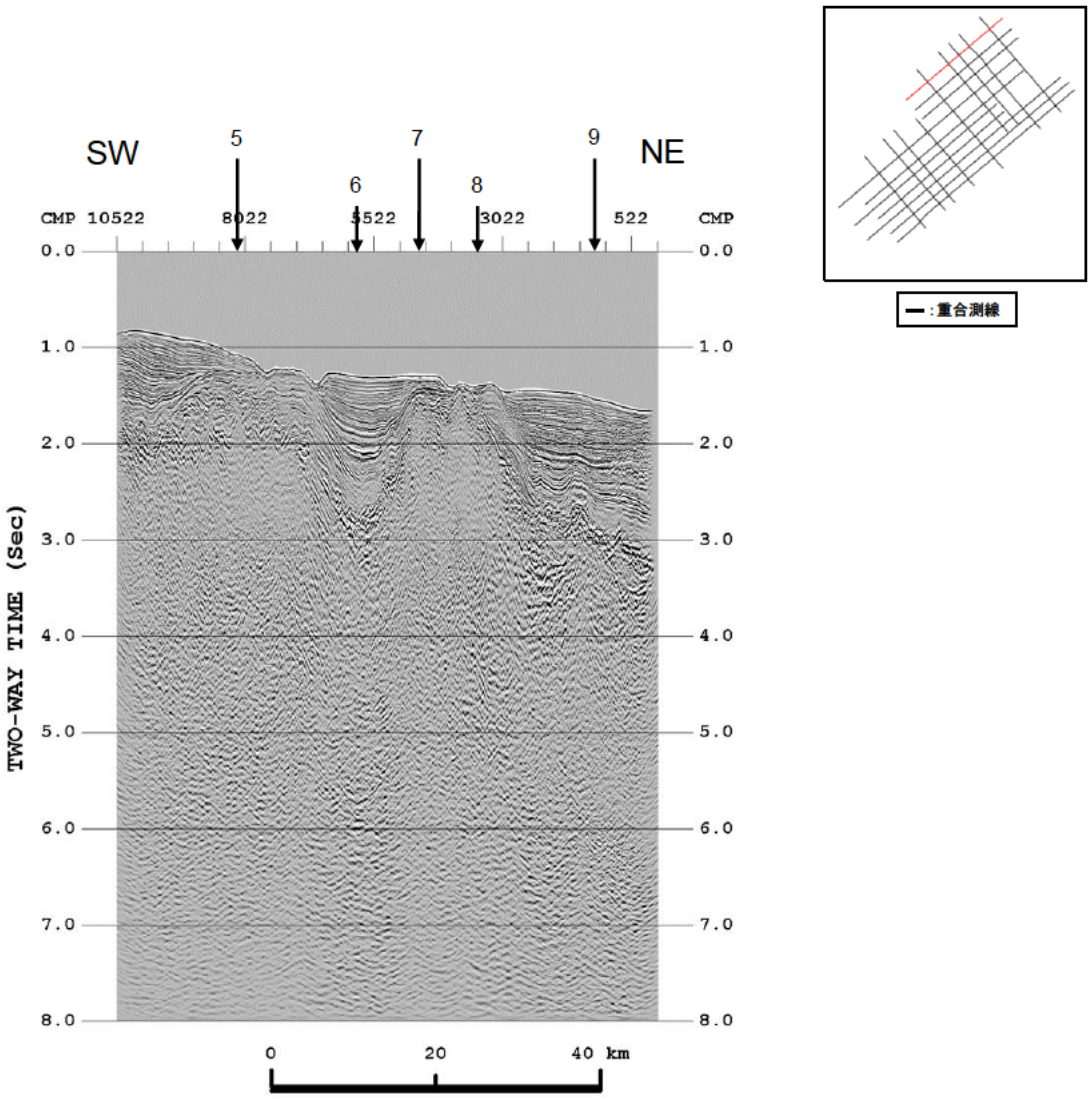
交差する交点の測線名は、測線名の末尾のみ表示

図 3.3-9(17)　PSTM 記録（KF-20-H 測線）



交差する交点の測線名は、測線名の末尾のみ表示

図 3.3-9(18)　PSTM 記録（KF-20-I 測線）



交差する交点の測線名は、測線名の末尾のみ表示

図 3.3-9(19)　PSTM 記録（KF-20-J 測線）

(5)　考察

今回のデータ処理の着目点について以下に示す。

①　ノイズ抑制処理

本データ処理では、相対振幅の保存に留意しつつ、ノイズ特性に応じたノイズ抑制処理を適用した。重合前ノイズ抑制処理では、主にランダムノイズ、線形ノイズを対象としてノイズ抑制を適用した。重合前ノイズ抑制処理を適用することで、特に船舶の航行に起因するノイズおよび波浪ノイズ等のランダムノイズ、線形ノイズが効果的に抑制できた。

また、上記の重合前ノイズ抑制処理に加え、PSTM 後の CIP 記録におけるノイズ抑制も実施した。これらノイズ特性に応じた複合型のノイズ抑制処理が最終的な重合記録の品質

向上に貢献している。

②　多重反射波抑制処理

本調査で取得したデータは､海底面に起因する各種多重反射波が顕著であったことから、多重反射波抑制処理の適用が重要である。

SRME 法は、海底地形が複雑な場合でも海底面に起因する長周期の多重反射波を効果的に抑制することができるため、海水面－海底面間の多重反射波の抑制や海水面－強反射面の多重反射波の抑制を目的として適用した。一方で、SRME 法は海底面反射波が取得されていないような浅海域では効果が得られにくい手法であるため、浅海域における海水面－海底面間の多重反射波の抑制を目的として、ラディアル・トレース・デコンボリューションを適用した。さらに、高分解能放物線ラドン変換法による多重反射波抑制処理も適用することで、残存する海水面－海底面間の多重反射波や海水面－強反射面の多重反射波等の各種多重反射波を効果的に抑制した。

多重反射波の特性に応じた複合型の多重反射波抑制処理を適用することで、重複的に生じる多重反射波を適切に抑制した。複合型の多重反射波抑制処理は、重合記録の品質向上に寄与しただけでなく、速度解析の精度向上にも貢献している。

③　振源位相の補償

本データ処理では、エアガンの型式、容量、配列、および深度の情報を基に作成した合成エアガン波形を用いて最小位相に変換した。その後、サーフェス・コンシステント・デコンボリューションを実施し、各発振点・受振点における差分応答を用いて波形の均等化を行うとともに基本波形のパルス化を行った。これにより最終的な位相はゼロ位相となり、極性は正の反射波がピークとなっている。

【参考文献】

1）Newman, P., “Divergence effects in a layered earth”, Geophysics, 38, 481-488(1973)

3.3.3　既存 2D 探査データの再処理

本地点内の既存弾性波探査データのうち、本事業で利用可能な 2D 探査データを借用し、再処理を実施した。

(1)　基礎物理探査の 2D 探査データの再処理

本地点内の基礎物理探査の 2D 探査データのうち、本事業で利用可能なものを借用し、再処理を実施した。

①　対象データの概要

対象データは、「1973 年度 大陸棚石油・天然ガス基礎調査 基礎物理探査「北陸」」[1)]にて取得された 2D 探査データの一部である。対象データは、振源にエアガン、受振にストリーマーケーブルを用いた海域の調査である。

②　データ再処理の概要

対象データはフィールドデータのデジタルデータが保存されていなかったため、大判印刷の最終重合断面図のデジタイズ処理を実施し、重合後時間マイグレーション処理を実施した。

本データ再処理に使用した主要ソフトウェアを表 3.3-10 に、データ再処理の基本仕様を表 3.3-11 に、測地諸元を表 3.3-12 に示す。

表 3.3-10　主要ソフトウェア一覧

処理ソフトウェア	実施した処理
『SuperX』JGI 社[注)]	データ処理全般
『SSV』Lynx Information Systems 社	トレースのデジタイズ処理
『TRACEPREP』Lynx Information Systems 社	復元データの振幅補正等

表 3.3-11　データ再処理の基本仕様

調査名	測線名	CMP 間隔 (m)	サンプリング間隔 (msec)	再処理データ長 (sec)
基礎物理探査「北陸」	73-10	50	4	5.00
	73-11	50	4	5.00

表 3.3-12　データ再処理で使用した測地諸元

準拠楕円体	WGS84
長半径	6,378,137.00000000 m
短半径	6,356,752.31424500 m
投影法	Universal Transverse Mercator（UTM 図法）
系番号	53
座標原点 緯度	00° 00′ 00.000" N
座標原点 経度	135° 00′ 00.000" E
縮尺係数	0.999600
北方加数	0.000 m
東方加数	500,000.000 m

③　データ再処理の詳細

データ再処理フローチャートを図 3.3-10 に示す。

データ再処理の詳細について、処理ステップごとに内容を記述する。

1）大判印刷原図のスキャン

大判印刷原図（重合断面図）を大型スキャナーで読み込み、画像データを作成した。スキャン時の読み取り解像度は 400 dpi とした。

2）トレースのデジタイズ処理

「1）大判印刷原図のスキャン」にて得られた画像データに対して、トレースデータの復元処理（デジタイズ処理）と振幅補正等の処理を実施した。

トレースデータの復元処理は、Lynx Information System 社の“SSV”を使用した。振幅補正等の処理は、Lynx Information System 社の“TRACEPREP”を使用した。

3）F-X 予測フィルター

ランダムノイズを抑制し、反射波の連続性を向上させるため、F-X 予測フィルターを適用した。

4）位相補償

デジタイズ処理した重合記録の海底面反射波形から抽出した波形を用いて、位相補償を行った。デジタイズ処理した重合記録から海底面反射波形の走時を読み取り、これを同一時間に揃えて重合することで波形を抽出した。

5）ジオメトリ情報の設定

以降に続く処理のためにCMPに関する情報をトレースヘッダーにセットした。

6) 時間マイグレーション

重合断面記録上における見かけの反射点位置を真の反射点位置に移動させるとともに、回析波を回析点に収斂させるため、時間マイグレーションを適用した。本データ再処理では､時間－空間領域における差分法マイグレーションを採用した。

時間マイグレーション速度は、大判印刷原図に重合速度の情報が無かったため、各測線の交点における平成３１年度委託事業[2)]にて実施した当該地域におけるフィールドデータの再処理のPSTM速度解析から得た速度、本事業において実施した2D探査データの処理（3.3.2節）のPSTM速度解析から得た速度を用いた。

ここで得られた速度を「時間マイグレーション速度データ」としてテキストファイルに出力した。

7) 帯域通過フィルター

反射波の周波数帯域外のノイズを抑制するため､帯域通過フィルターを適用した。通過帯域は、大判印刷原図（重合断面図）に記載されている帯域通過フィルターのパラメータを用いた。

ここまでのデータ再処理が適用された結果を「デジタイズ処理＋マイグレーション処理記録」としてSEG-Yファイルに出力した。

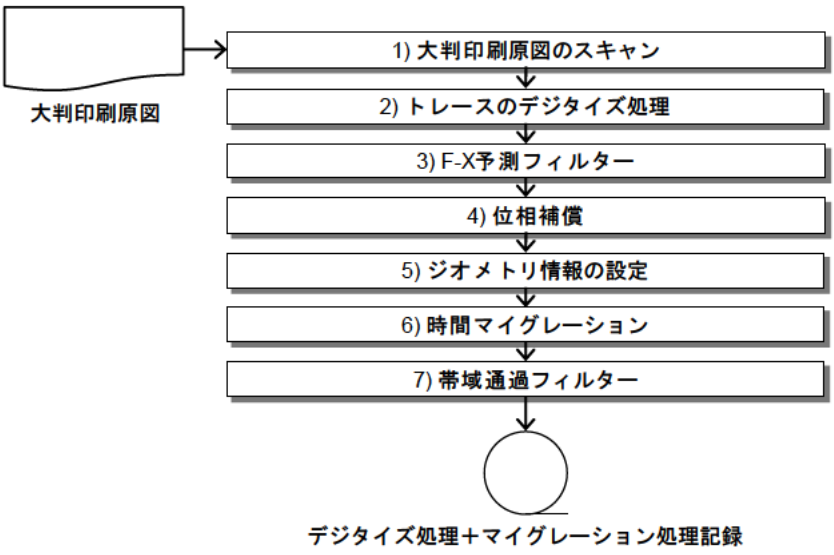


図 3.3-10　データ再処理フローチャート

④　考察

今回のデータ再処理の着目点について以下に示す。

デジタイズ処理は、既存の大判印刷原図（重合断面図）からデジタルデータを復元する処理であるため､既存データ処理結果の位相がそのまま反映される｡既存データ処理では、エアガン振源波形に基づく波形変換処理が適用されていなかったため、位相はゼロ位相とはならず、平成３１年度委託事業[2)]にて実施した当該地域におけるフィールドデータの再処理結果および本事業において実施した 2D 探査データの処理（3.3.2 節）の処理結果の位相との間に位相差が存在する。本データ再処理では、この位相差を補正するため、位相補償を適用した。

【参考文献】

1) 石油公団、“昭和 48 年度 大陸棚石油・天然ガス基礎調査 基礎物理探査「北陸」調査報告書”（1973）

2) 日本 CCS 調査(株)、“平成３１年度「二酸化炭素貯留適地調査事業委託業務」成果報告書”(2019)

(2) 公的機関の 2D 探査データの再処理

本地点内の公的機関が実施した 2D 探査データのうち、本事業で利用可能なものを借用し、再処理を実施した。

① 対象データの概要

対象データは、「平成 26 年度 日本海地震・津波調査プロジェクトにおける地震探査調査研究」[1)] にて取得された 2D 探査データの一部である。対象データは、振源にエアガン、受振にストリーマーケーブルを用いた海域の調査である。

② データ再処理の概要

既存データ処理結果に残存していた貯留層、遮蔽層を抽出するうえで問題となるノイズ、多重反射波を抑制して記録の品質の改善を図ることを目的として、各種ノイズ抑制処理、多重反射波抑制処理および PSTM を適用する再処理を実施した。相対振幅を保存する処理を適用した反射記録に加え、反射波の追跡に適するよう重合前に AGC を適用した反射波記録を作成した。

本データ再処理に使用した主要ソフトウェアを表 3.3-13 に、データ再処理の基本仕様を表 3.3-14 に、測地諸元を表 3.3-15 に示す。

表 3.3-13 主要ソフトウェア一覧

処理ソフトウェア	実施した処理
『SuperX』 JGI 社	データ処理全般
『iVAS』 JGI 社	予備速度解析、重合速度解析
『VELANAL』 Techco Geophysical Services 社	PSTM 速度解析
『SUMMIG』 Techco Geophysical Services 社	PSTM 処理

表 3.3-14 データ再処理の基本仕様

調査名	測線名	CMP 間隔 (m)	サンプリング間隔 (msec)	再処理データ長 (sec)
平成 26 年度 日本海地震・津波調査プロジェクトにおける地震探査調査研究	SJ14A	6.25	2	8.00

表 3.3-15　データ再処理で使用した測地諸元

準拠楕円体	WGS84
長半径	6,378,137.00000000 m
短半径	6,356,752.31424500 m
投影法	Universal Transverse Mercator（UTM 図法）
系番号	53
座標原点 緯度	00° 00′ 00.000" N
座標原点 経度	135° 00′ 00.000" E
縮尺係数	0.999600
北方加数	0.000 m
東方加数	500,000.000 m

③　データ再処理の詳細

データ再処理フローチャートを図 3.3-11 に示す。

データ再処理の詳細について、処理ステップごとに内容を記述する。

1) フォーマット変換

磁気テープまたは磁気ディスクに保存されたフィールドデータをデータ処理ソフトウェアの内部フォーマットへ変換した。

2) 遅延時間補正

探鉱器では、発振時刻より 200 msec 遡って記録を開始しているため、これを補正した。

3) ジオメトリ情報の設定

以降に続く処理のために発振点・受振点・CMP に関する情報やその他の諸情報をトレースヘッダーにセットした。

4) プレフィルター

極低周波数の波浪ノイズを除去するため、4 Hz のローカットフィルターを適用した。

5) 波形変換およびバブル抑制処理

エアガンの型式、容量、配列、および深度の情報を基に作成した合成エアガン波形を用いて、最小位相への変換およびバブル抑制を行った。合成エアガン波形の作成には、Oakwood Computing Associates 社のエアガン波形シミュレーションソフトである Gundalf™ を使用した。

6) 予備速度解析

予備速度解析は、JGI 社の速度解析システム“iVAS”を使用し、定速度の NMO 補正と重合を用いて重合速度を走査する定速度重合法による速度解析を 1 km 間隔で実施した。ここで得られた速度は、ノイズ抑制処理における一時的な速度のほか、各処理の適用前後の結果を重合記録上で比較・確認するために用いた。

7) 潮位補正

潮汐による海水面の変位の補正を目的として、潮位補正を実施した。

8) 重合前ノイズ抑制処理

突発的かつ強振幅のノイズ、波浪ノイズやその他のランダムノイズを抑制するため、各種ノイズ特性を考慮して以下のノイズ抑制を実施した。

ⅰ）F-X エディット

発振記録上に混入する突発的かつ強振幅のノイズの抑制を目的として、共通発振点領域において F-X エディットを適用した。

ⅱ）F-X 予測フィルター

発振記録上に混入する波浪ノイズやその他のランダムノイズの抑制を目的として、共通発振点領域および共通受振点領域において F-X 予測フィルターを適用した。

9) ゴースト抑制

ストリーマーケーブルを用いた海上調査では、受振器は海底面または海底面下で反射した上方進行波を記録した後、この反射波が受振器を超えて海水面で再度反射した下方進行波を記録する。この下方進行波はゴーストと呼ばれ、海水面の反射係数がほぼ-1 であるために反射波とは逆の極性を持つ。これにより、受振器深度と海水中の平均速度（海水速度）により決まるノッチ周波数周辺の振幅が顕著に減衰してしまう。この現象は、発振点においても同様に発生する。これらの影響を取り除くため、発振ゴーストと受振器ゴーストの両方のゴースト抑制を実施した。

10)多重反射波抑制処理

海水面を介在する短周期および長周期の多重反射波、層間多重反射波等の短周期の多重反射波の抑制を目的として、各種多重反射波の特性を考慮して、SRME およびラディアル・トレース・デコンボリューションを適用した。

ⅰ）SRME

海水面を介在する長周期の多重反射波の抑制を目的として、SRME を適用

した。SRME は、波動方程式に準拠する多重反射波抑制手法であり、原記録の共通発振点記録と共通受振点記録のクロスコンボリューションを計算することにより、多重反射波を予測する。SRME により予測された多重反射波モデルを原記録とマッチングさせ、原記録から減ずることにより多重反射波を抑制した。

ⅱ）ラディアル・トレース・デコンボリューション

層間多重反射波等の短周期の多重反射波の抑制を目的として、ラディアル・トレース領域においてデコンボリューションを適用した。

ラディアル・トレース記録は、空間－時間領域のデータを振源からの見かけ速度が一定な直線に沿ってリサンプリングし、見かけ速度－時間領域に変換したものである。振源からある射出角で出た反射波およびそれに起因する多重反射波は、同じ見かけ速度を持つ。通常の空間－時間領域の記録上では、同一トレースに出現する反射波と多重反射波は、対応する射出角が異なり、出現間隔も一定ではない。一方、ラディアル・トレース記録上では、理論上、同一トレースにおいて時間方向に等間隔で出現する。これらの性質を利用し、ラディアル・トレース領域においてデコンボリューションを適用することで、多重反射波を抑制した。

11)サーフェス・コンシステント・デコンボリューション

地層の非弾性および観測系の諸特性の影響を取り除き、短周期の多重反射波を抑制することを目的として、サーフェス・コンシステント・デコンボリューションを適用した。

本データ再処理では、各発振点における差分応答を用いて波形の均等化を行うとともに基本波形のパルス化を行った。周波数領域における各トレースの平均スペクトルからのずれを発振点・受振点・CMP・オフセットの 4 成分に分解し、各トレースにおいて平均スペクトル・発振点成分を用いてデコンボリューションオペレータを設計し、適用した。

12)振幅補償

振源から放出される弾性波は、三次元的に伝播することによる幾何学的発散効果、多層構造内を透過および反射することによる伝播損失、そして非弾性減衰による振幅の減衰を被っている。本データ処理では、地中を伝播する弾性波の幾何学的発散効果による振幅の減衰を補償した。手法として、水平成層構造を仮定したゼロオフセット距離において成立する以下の式（Newman,1973[2)] による）を用い

た。この式に必要な RMS 速度として、「6) 予備速度解析」で求めた速度関数を用いた。

$G(x,t) = T \times Vrms(T_0)^2 / V_1$

$T = SQRT(T_0^2 + (X / Vrms(T_0))^2)$

G(x,t)　　：振幅補償値

T　　：往復垂直走時

T_0　　：ゼロオフセット距離における往復垂直走時

X　　：オフセット距離

Vrms　　：往復垂直走時（T_0）における RMS 速度

V_1　　：最上層における RMS 速度

13)サーフェス・コンシステント振幅補正

各発振点において、振幅のばらつきを取り除くことを目的として、サーフェス・コンシステント振幅補正を適用した。反射波の振幅を発振点・受振点・CMP・オフセットの 4 成分に分解し、発振点の成分について振幅補正を適用した。

14)CMP 編集

「3) ジオメトリ情報の設定」において定義した重合測線に従い共通反射点編集を実施した。

15)重合速度解析

重合速度解析は、JGI 社の速度解析システム“iVAS”を使用し、定速度の NMO 補正と重合を用いて重合速度を走査する定速度重合法による速度解析を 500 m 間隔で実施した。

16)多重反射波抑制処理（高分解能放物線ラドン変換法）

長周期の多重反射波とムーブアウトの大きなノイズの抑制を目的として、共通反射点領域において高分解能放物線ラドン変換法を適用した。高分解能放物線ラドン変換法は、一次反射波と多重反射波との間の走時差を利用し、多重反射波を抑制する手法であり、特に長周期の多重反射波を効果的に抑制する手法である。

ここまでのデータ再処理が実施された結果を「CMP 記録」として SEG-Y ファイルに出力した。

17)振幅調整（AGC）

振幅バランスを整えるため、AGC を適用した。相対振幅を保存する処理では本処理を実施しなかった。

18)PSTM 速度解析

PSTM 速度解析は、TECHCO 社の速度解析ソフトウェア“VELANAL”を使用し、速度スケーリング重合法による速度解析を 500 m 間隔で実施した。

ここで得られた速度を「PSTM 速度データ」としてテキストファイルおよび SEG-Y ファイルに出力した。

19)PSTM

重合前データの見かけの反射点位置を真の反射点位置に移動させるとともに、回析波を回析点に収斂させるため、「18) PSTM 速度解析」にて求めた速度を用いて、PSTM を適用した。本データ処理では、共通オフセット領域におけるキルヒホッフ積分法マイグレーションを採用した。

20)PSTM 後ノイズ抑制

PSTM 後の共通イメージ点（CIP）記録に対して、以下のノイズ抑制処理を適用した。

ⅰ）高分解能放物線ラドン変換法

PSTM 後に残存するムーブアウトの大きなノイズの抑制を目的として、高分解能放物線ラドン変換法を適用した。

ⅱ）ファンフィルター

PSTM 後に残存する線形ノイズの抑制を目的として、ファンフィルターを適用した。

21)アウトサイドミュート

重合効果や分解能を低下させるデータの除去を目的として、アウトサイドミュートを適用した。

ここまでのデータ再処理が適用された結果を「CIP 記録」として SEG-Y ファイルに出力した。出力したデータにはアウトサイドミュートは適用せず、ミュート位置をトレースヘッダーに保存した。

22)CIP 重合

CIP ごとにトレースの重合を行った。重合トレース数にて除算を行い、振幅の正規化を行った。

23)振幅調整（指数関数型）

重合記録における振幅バランスを整えるため、指数関数型の振幅調整を適用した。

AGC を適用した処理では本処理は実施しなかった。

24)F-X 予測フィルター

ランダムノイズを抑制し、反射波の連続性を向上させるため、F-X 予測フィル

ターを適用した。

25)帯域通過フィルター

反射波の周波数帯域外のノイズを抑制するため、帯域通過フィルターを適用した。

26)基準面補正

浮動基準面から基準面への補正を行った。基準面は平均海水面とした。

ここまでのデータ再処理が適用された結果を「PSTM 記録」として SEG-Y ファイルに出力した。

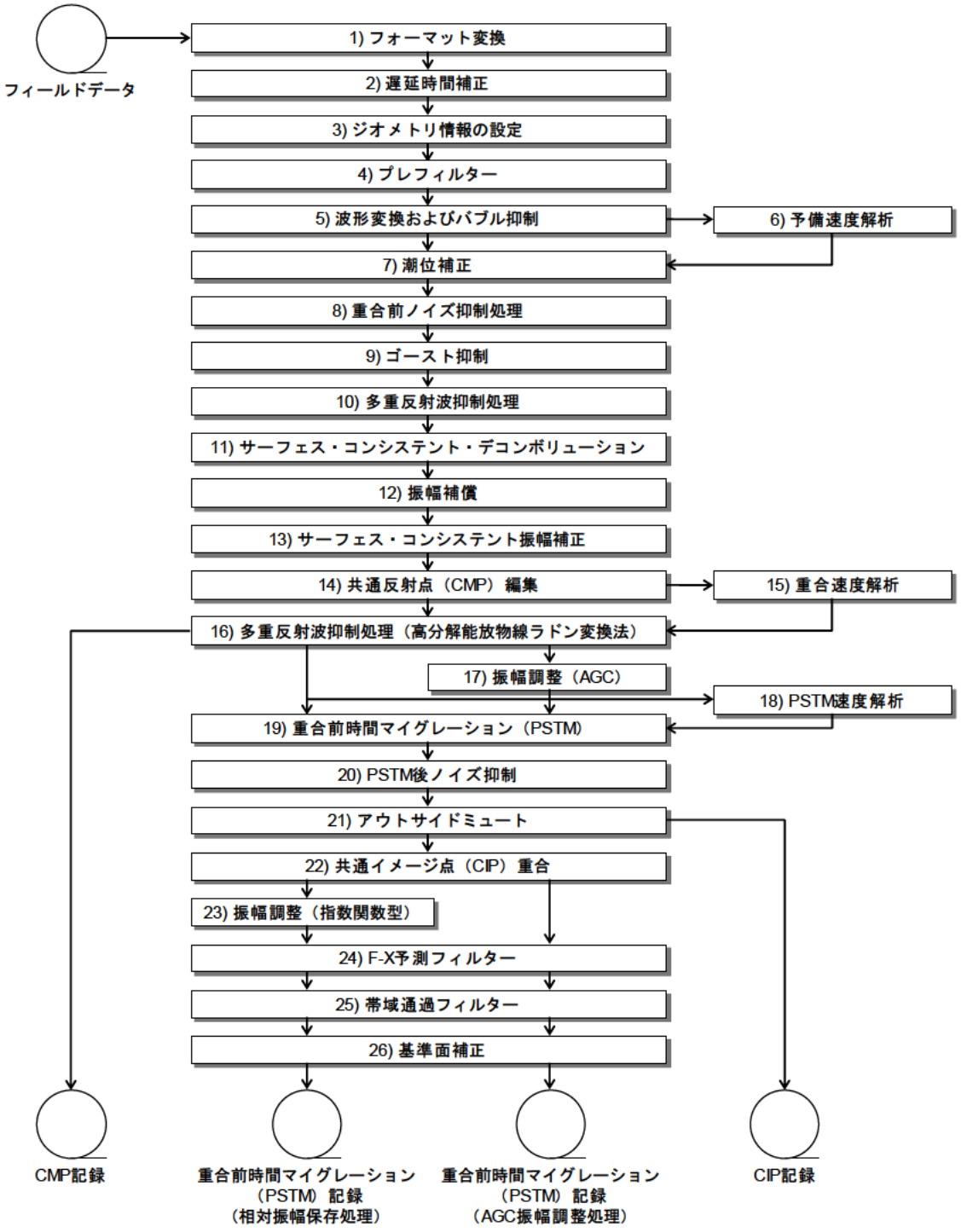


図 3.3-11　データ再処理フローチャート

④ 考察

今回のデータ再処理の着目点について以下に示す。

a. ノイズ抑制処理

本データ再処理では、相対振幅の保存に留意しつつ、ノイズ特性に応じた各種ノイズ抑制処理を適用した。重合前ノイズ抑制処理では、主に突発的かつ強振幅のノイズ、波浪ノイズやその他のランダムノイズを対象としてノイズ抑制処理を適用した。重合前ノイズ抑制処理を適用することで、これらのノイズを効果的に抑制できた。

また、上記の重合前ノイズ抑制処理に加え、PSTM 後の CIP 記録におけるノイズ抑制も実施した。これらノイズ特性に応じた複合型のノイズ抑制処理は最終的な重合記録の品質向上に貢献している。

b. 多重反射波抑制処理

対象データは、海底面および強反射面に起因する各種多重反射波が顕著であったことから、多重反射波の抑制が重要である。

SRME 法は、海底地形が複雑な場合でも海底面に起因する長周期の多重反射波を効果的に抑制することができるため、海水面－海底面間の多重反射波の抑制や海水面－強反射面の多重反射波の抑制を目的として適用した。層間多重反射波等の短周期の多重反射波の抑制を目的として、ラディアル・トレース・デコンボリューションを適用した。さらに、高分解能放物線ラドン変換法による多重反射波抑制処理も適用することで、残存する海水面－海底面間の多重反射波や海水面－強反射面の多重反射波等の各種多重反射波を効果的に抑制した。

多重反射波の特性に応じた複合型の多重反射波抑制処理を適用することで、重複的に生じる多重反射波を適切に抑制した。複合型の多重反射波抑制処理は、重合記録の品質向上に寄与しただけでなく、速度解析の精度向上にも貢献している。

c. 振源位相の補償

本データ再処理では、エアガンの型式、容量、配列、および深度の情報を基に作成した合成エアガン波形を用いて最小位相に変換した。その後、サーフェス・コンシステント・デコンボリューションを実施し、各発振点・受振点における差分応答を用いて波形の均等化を行うとともに基本波形のパルス化を行った。これにより最終的な位相はゼロ位相となり、極性は正の反射波がピークとなっている。

【参考文献】

1) (国研)海洋研究開発機構、“日本海地震・津波調査プロジェクトにおける地震探査調査研究”（2014）

2) Newman, P., “Divergence effects in a layered earth”, Geophysics, 38, 481-488(1973)

3.4　弾性波探査データの整理状況と再処理成果の移管状況

平成２６年度委託事業、平成２７年度委託事業、平成２８年度委託事業、平成２９年度委託業務、平成３０年度委託業務、平成３１年度委託業務および本業務で取得した 2D/3D 探査データを一元的に管理するため、データ形式を揃えてリスト化した。

基礎物理探査データの再処理成果について、借用元の JOGMEC への移管状況をとりまとめた。

3.4.1　貯留適地調査事業の 2D/3D 探査データ

平成２６年度委託事業では鳥取沖と金沢沖にて、平成２７年度委託事業では西津軽沖と枕崎沖にて新規 2D 探査を実施し、平成２８年度委託事業では、能代沖および宮崎沖にて新規 3D 探査を実施し、平成２９年度委託業務では、秋田沖および金沢沖にて新規 3D 探査、能代沖の陸域の新規 2D 探査、能代沖の南部の新規 2D 探査（繰越）を実施し、平成３０年度委託業務では、宮崎沖にて陸域と海域を結ぶ新規 2D 探査を実施し、平成３１年度委託業務では、鳥取沖の北部にて新規 2D 探査を実施し、本業務では、京都－福井沖にて新規 2D 探査を実施し、それぞれ探査データを取得した。これらの探査データを一元的に管理するため、ハードディスクに調査地点ごとのフォルダを作成し、弾性波探査の分野で一般的に扱われる SEG-Y 形式または SEG-D 形式のデータとして保管している。表 3.4-1 に、ハードディスク上で一元的に管理している探査データの保管リストを示す。

表 3.4-1　ハードディスク上で一元的に管理している探査データの保管リスト

地点名	事業年度	探査区分	2D 探査 測線数	2D 探査 総測線長	3D 探査 面積	備考
西津軽沖	平成 27 年度 （2015 年度）	2D 探査	5	約 250 km		海域調査 発振測線長
能代沖	平成 28 年度 （2016 年度）	3D 探査			約 111 km^2	海陸横断調査 発振範囲
	平成 29 年度 （2017 年度）	2D 探査	2	約 40 km		陸域調査 発振測線長
		2D 探査	3	約 41 km		海陸横断調査 発振測線長
秋田沖	平成 29 年度 （2017 年度）	3D 探査			約 158 km^2	海域調査 フル重合範囲
金沢沖	平成 26 年度 （2014 年度）	2D 探査	29	約 1,197 km		海域調査 発振測線長
	平成 29 年度 （2017 年度）	3D 探査			約 296 km^2	海域調査 フル重合範囲
京都ー 福井沖	令和 2 年度 （2020 年度）	2D 探査		約 1,460 km		海域調査 発振測線長
鳥取沖	平成 26 年度 （2014 年度）	2D 探査	23	約 1,045 km		海域調査 発振測線長
	平成 31 年度 （2019 年度）	2D 探査	12	約 895 km		海域調査 発振測線長
宮崎沖	平成 28 年度 （2016 年度）	2D/3D 探査	1	約 28 km	約 404 km^2	海域調査 発振測線長 フル重合範囲
	平成 30 年度 （2018 年度）	2D 探査	3	約 68 km		海陸横断調査 発振測線長
枕崎沖	平成 27 年度 （2015 年度）	2D 探査	28	約 995 km		海域調査 発振測線長

3.4.2　基礎物理探査の 2D/3D 探査データ（再処理）

JOGMEC から借用した基礎物理探査データを基に JCCS において再処理した成果については、借用元の JOGMEC に移管する方針としている。これまでの移管実績を表 3.4-2 と表 3.4-3 に示す。

表 3.4-2　JOGMEC に移管した再処理成果一覧（その 1）

再処理実施年度	再処理成果品の移管対象データ	移管年月日
平成 26 年度	平成元年度基礎物理探査「山陰～北九州沖」	2017 年 4 月 13 日
	「対馬海盆」＊元民間データ。現在 JOGMEC が管理。	
平成 27 年度	昭和 45 年度基礎物理探査「北上～阿武隈」	
	昭和 48 年度基礎物理探査「北陸」	
	昭和 49 年度基礎物理探査「東海～九州」	
	昭和 53 年度基礎物理探査 「東海沖～熊野灘、宮崎沖、伊豆七島海域（一部）」	
	昭和 49 年度基礎物理探査「北陸～山陰」	
	昭和 60 年度基礎物理探査「大和堆」	
	昭和 61 年度基礎物理探査「南三陸～鹿島沖」	
	昭和 62 年度基礎物理探査「秋田～青森浅海域」	
	昭和 62 年度基礎物理探査「西津軽～新潟沖」	
	平成 5 年度基礎物理探査「常磐～鹿島浅海域」	
	平成 8 年度基礎物理探査「南海トラフ」	

表 3.4-3　JOGMEC に移管した再処理成果一覧（その 2）

再処理実施年度	再処理成果品の移管対象データ	移管年月日
平成 27 年度	昭和 50 年度基礎物理探査「沖縄西方海域」	2017 年 12 月 11 日
	昭和 55 年度基礎物理探査「トカラ列島海域」	
	「トカラ」＊元民間データ。現在 JOGMEC が管理。	

第４章

二酸化炭素貯留適地調査に係る
調査・解析・検討の実施

第４章　二酸化炭素貯留適地調査に係る調査・解析・検討の実施

4.1　概要

本業務では、平成３１年度委託事業に係る有識者委員会において 2020 年度調査対象として確認された地点に対し、貯留層と遮蔽層の抽出、地質解析、貯留可能量の算定を実施し、貯留適地の評価を行うことを目的として以下の業務を実施した。

4.1.1　地質解析と貯留適地評価

日高沖、京都－福井沖の 2 地点で地表地質調査試料分析を行った。日高沖、本荘沖、佐渡西方沖の 3 地点では、地質解析と貯留適地評価の前段階として海底地形および海底地質に関する情報の整理を実施した。既存 2D/3D 探査データに基づき、日高沖、本荘沖、佐渡西方沖、鳥取沖、茨城沖北部の 5 地点において地質解析と貯留適地評価を実施した。

1) 地表地質調査試料分析（日高沖）（4.2 節）

日高沖を対象に地表地質調査を実施した。貯留層および遮蔽層に相当する地層の岩石試料を陸上で採取し、岩石鉱物分析、貯留岩分析、遮蔽岩分析および岩石物性分析を実施し、分析結果の評価を実施した。

2) 地表地質調査試料分析（京都－福井沖）（4.3 節）

京都－福井沖を対象に地表地質調査を実施した。貯留層および遮蔽層に相当する地層の岩石試料を陸上で採取し、岩石鉱物分析、貯留岩分析、遮蔽岩分析および岩石物性分析を実施し、分析結果の評価を実施した。

3) 海底地形判読および海底地質情報コンパイル（日高沖）（4.4 節）

基礎物理探査の 3D 探査の航跡データに含まれる音響測深データと、公開されている海底地形および海底地質に関する資料を用いて、海底地形および海底地質に関する情報を整理した。

4) 海底地形判読および海底地質情報コンパイル（本荘沖）（4.5 節）

平成２９年度委託事業にて実施した範囲の南側において、基礎物理探査の 3D 探査の航跡データに含まれる音響測深データと、公開されている海底地形および海底地質に関する資料を用いて、海底地形および海底地質に関する情報を整理した。

5) 海底地形判読および海底地質情報コンパイル（佐渡西方沖）（4.6 節）

基礎物理探査の 3D 探査の航跡データに含まれる音響測深データと、公開されている海底地形および海底地質に関する資料を用いて、海底地形および海底地質に関する情報を整理した。

6) 地質解析と貯留適地評価（日高沖）（4.7 節）

基礎物理探査の 3D 探査データおよび基礎試錐の坑井データを用い、地質解析と貯留可能量評価を実施した。

7) 地質解析と貯留適地評価（本荘沖）（4.8 節）

基礎物理探査の 3D 探査データ、既存 2D 探査の再処理データ、基礎試錐および民間坑井のデータを用い、地質解析と貯留可能量評価を実施した。

8) 地質解析と貯留適地評価（佐渡西方沖）（4.9 節）

基礎物理探査の 3D 探査データおよび基礎試錐の坑井データを用い、地質解析と貯留可能量評価を実施した。

9) 地質解析と貯留適地評価（鳥取沖）（4.10 節）

平成３１年度委託事業の 2020 年度繰越業務にて実施した 3D 探査データを用いた地質解析範囲およびその周辺部の 2D 探査データ範囲について、統合的に地質解析と貯留可能量評価を実施した。

10) 地質解析と貯留適地評価（茨城沖北部）（4.11 節）

平成３１年度委託事業の 2020 年度繰越業務にて実施した 3D 探査データを用いた物性解析結果を活用した地質解析を本業務の 2021 年度繰越業務で実施した。

4.1.2 その他の業務

地質解析と貯留適地評価に加えた、下記業務を実施した。

1) 貯留層シミュレーションによる貯留可能性検討（本荘沖の南部）（4.12 節）

本業務の地質解析業務（4.8 節）の結果等を反映して本荘沖の南部の地質モデルを構築し、調査井掘削前 CO_2 挙動予測シミュレーションを、本業務の 2021 年度繰越業務にて実施した。

2) 貯留層シミュレーションによる貯留可能性検討（佐渡西方沖）（4.13 節）

本業務の地質解析業務（4.9 節）の結果を反映して佐渡西方沖の地質モデルを構築し、調査井掘削前 CO_2 挙動予測シミュレーションを、本業務の 2021 年度繰越業務にて実施した。

4.2　地表地質調査試料分析（日高沖）

4.2.1　概要

日高沖を対象として地表調査を実施し、貯留層および遮蔽層に相当する岩石試料を採取して各種分析を行うことにより対象地点の貯留層および遮蔽層の性状を把握し、堆積システムを考察した。分析によって得られた値を、調査井掘削前 CO_2 挙動予測シミュレーションのパラメータの推定に利用する。

地表地質調査を実施した範囲を図 4.2-1 に示す。



注）国土地理院ホームページ、地理院地図（電子国土 Web）[1] に加筆。

図 4.2-1　調査対象地域

4.2.2　調査・分析試験内容

(1)　地表地質調査および分析試料採取

①　地表地質調査

貯留岩および遮蔽岩能力評価対象の岩石試料を採取した露頭において岩相の記載、岩相

の側方変化の記録、堆積相の推定、砂岩・泥岩比の記載を行い、岩相の評価を実施した。

② 試料採取

地表地質調査と並行して、貯留岩および遮蔽岩能力評価対象となる岩石試料を採取した。ハンドコアドリルもしくはハンマーを用いて露頭から採取するか転石から採取し、できるだけ風化の影響が少ない部分で露頭の代表的な性状を示す岩石を採取した。

(2) 試料分析項目および手法

① 岩石鉱物分析

貯留岩能力評価対象の砂岩および礫岩試料について、以下の a.、d.の分析を 16 試料、b.、c.、e.の分析を 17 試料で実施した。遮蔽岩能力評価対象の泥岩およびシルト岩試料について、c.粒度分析と e.熱伝導率測定を除く a.、d.の分析を 5 試料、b.の分析を 8 試料で実施した。

a. 岩石薄片鑑定

岩石試料にブルーレジン（青色染色樹脂）を注入し、孔隙部分が明瞭に識別できるようにしたうえで薄片を作成し、偏光顕微鏡を用いて岩相、構成粒子、基質量、孔隙性状、続成変質の観察を行った。

構成粒子の粒度、淘汰度および円磨度には変化幅がみられるため、その量比を ◎（非常に多い：30%以上）、○（多い：30%未満～10%以上）、△（普通：10%未満～5%以上）、＋（少ない：5%未満）で表した。孔隙について粒子間孔隙および粒子内孔隙の多くは初成孔隙と考えられ、溶脱と推定されるものは溶脱孔隙（二次孔隙）に区分した。孔隙率は視認孔隙率であり、視覚的な概値（目分量で求めたブルーレジンの割合）を示した。砂岩・泥岩の分類は、Pettijohn（1949）[2)] に従った。薄片鑑定は、Nikon 製の偏光顕微鏡である ECLIPSE LV100N POL を用いた。

b. X 線鉱物分析

岩石試料を乾燥後、以下に示す各処理を施した試料を準備して X 線鉱物分析を実施した。

1) 未処理不定方位試料：鉱物の同定および半定量分析に使用する。
2) 定方位試料：主に粘土鉱物の同定に使用する。
3) エチレングリコール処理試料：粘土鉱物であるスメクタイトや各種混合層鉱物の膨潤性の判定に使用する。
4) 塩酸処理試料：粘土鉱物である緑泥石とカオリナイトの区別、鉄に富む鉱物およ

び炭酸塩鉱物の判定に使用する。

分析によって同定された鉱物の X 線回折強度値は、石英外部標準法[3)]を用いて半定量化した。測定にはスペクトリス株式会社 PANalytical 製の X'PERT PRO 型自動 X 線回折分析装置を用いた。平取軽舞層砂岩 14-1 については、斜プチロル沸石と輝沸石を同定するため、500℃と 600℃の加熱処理を行いピーク強度の変化を確認した[4)]。

c. 粒度分析（篩法）

岩石試料を乾燥し、篩い分け法[5)]により分析を行った。一部のセメントや基質が比較的多い試料は粒子単位にほぐれ難く、過酸化水素水処理および塩酸処理を行った。粒度パラメータ（平均粒径、淘汰度、歪度、尖度）の算出には、Folk and Ward（1957）[6)]の式を用いた。

d. 孔径分布測定

岩石試料を約 5 mm 角大に成形し、それらを乾燥させて測定用試料とした。孔隙半径の算出には Washburn（1921）[7)]の式を用いた。測定にはマイクロメリティクス社製の AutoPore V 9600 型水銀ポロシメーターを用いた。

e. 熱伝導率測定

熱伝導率測定では、コアの長軸方向に対して垂直な方向で上下を切断した平粗面にプローブを押し当て、室温から 30℃までの温度変化を持たせプローブ法を実施した。測定には京都電子工業株式会社製の Kemtherm QTM-D3 迅速熱伝導率計を用いた。

② 貯留岩分析

貯留岩能力評価対象の試料について貯留岩分析用にプラグコアを 13 試料成形し、それらを乾燥した後、a.から e.の分析を実施した。以下の a.の分析を荷菜層礫岩 2 個、平取軽舞層砂岩 11 個の計 13 試料、b.の分析を荷菜層礫岩 2 個、平取軽舞層砂岩 9 個の計 11 試料、c.の分析を平取軽舞層砂岩 2 個、d.の分析を荷菜層礫岩 2 個、平取軽舞層砂岩 6 個の計 8 試料、e.の分析を荷菜層礫岩 1 個、平取軽舞層砂岩 1 個の計 2 試料で行った。分析条件の根拠とした貯留岩の想定深度、圧力を表 4.2-1 に示す。

表 4.2-1　貯留岩の想定深度、圧力

層準・岩相	想定深度 (m)	静水圧 (MPa)	上載圧 (MPa)
荷菜層礫岩	3,000	30	57
平取軽舞層砂岩			

a.　孔隙率、粒子密度、空気浸透率測定（大気圧下）

孔隙率および粒子密度測定については、コア試料の重量および体積を測定したうえでコア試料の粒子体積を測定し、次式[8)]を用いて孔隙率・粒子密度を算出した。測定にはコアラボ社製のヘリウムポロシメーターを用いた。

$$\Phi = \frac{BV\text{-}GV}{BV} \times 100$$

$$GD = \frac{m}{GV}$$

注）Φ：孔隙率（%）、BV：コアの体積（cm^3）、GV：コア粒子体積（cm^3）、GD：コア粒子密度（g/cm^3）、m：コア乾燥時重量（g）

空気浸透率についてはコア試料に空気を透過させ、その時の空気の流量と下流の大気圧との差圧を計測し、気体に対するダルシーの式[9)]より空気浸透率を算出した。

$$k_a = \frac{2000 P_1 \mu_a Q L}{(P_1^2 - P_2^2) A}$$

注）k_a：空気浸透率（mD）、μ_a：空気粘性（cP）、P_1：コア上流圧力（atm）、P_2：コア下流圧力（atm）、L：コア長さ（cm）、A：コア断面積（cm^2）、Q：空気の流量（cm^3/s）

測定時に加圧した空気が試料の側面から流れないように、コア試料に必要最低封圧として 2.76 MPa の封圧をかけて測定した。測定にはコアラボ社製のエアパーミアメーターを用いた。

b.　孔隙率、空気浸透率測定（封圧下）

封圧条件下での孔隙率と空気浸透率を測定した。測定にはコアラボ社製の自動コア分

析装置を用いた。封圧条件は各コア試料で測定機器の最低封圧（7 MPa）と想定深度での封圧（27 MPa）、および中間の封圧（17 MPa）の 3 段階で測定を実施した各コア試料の設定封圧を表 4.2-2 に示す。

表 4.2-2　貯留岩コア試料の設定封圧、温度

層準・岩相	設定封圧 (MPa)			設定温度 (℃)
	一段階	二段階	三段階	
荷菜層礫岩	7	17	27	室温 (25℃)
平取軽舞層砂岩				

c.　水浸透率測定

水浸透率測定には、水浸透率のみの測定と相対浸透率測定前の水浸透率の測定があるが、装置や使用流体が異なるためここでは水浸透率のみの測定について述べる。大気圧下および封圧下の孔隙率、浸透率を測定したコアに対して水浸透率の測定を行った。測定条件は表 4.2-3 に示すとおりである。水の粘度μ_wは Wagner and Kruse（1998）[10] の式から算出した。

水浸透率測定では、三軸圧縮コアホルダーを用いて軸方向および周方向から全封圧をかけることで、貯留層条件の封圧を再現した。ブライン（NaCl:30,000 mg/L）を用いて、一定温度条件（40℃）にて測定した。数段階の流量で測定を実施し、流量と差圧の測定データからダルシーの式[9] を用いて水浸透率を算出した。

$$k_w=\frac{Q_w \mu_w L}{A\Delta P}\times 1000$$

注）k_w：水浸透率（mD）、L：コア試料の長さ（cm）、Qw：圧入流量（cm^3/s）、A：コア試料の断面積（cm^2）、μ_w：粘性（cP）、ΔP：差圧（atm）

表 4.2-3　水浸透率測定　圧力温度条件および使用流体

層準・岩相	実験条件			流体	
	下流圧 (MPa)	有効封圧 (MPa)	温度 (℃)	ブライン	
				種類	粘度 (mPa・s)
平取軽舞層砂岩	10	4	40	NaCl (30,000 mg/L)	0.687

d.　毛細管圧力測定

遠心分離法による空気－水系の排水（drainage）過程と吸水（imbibition）過程の毛細管圧力と水飽和率の測定を実施した。測定には Vinci 社製の遠心分離型毛細管圧力測定装置を用いた。毛細管圧力（Pc）は次式[11)]を用いて回転数から算出した。

$$Pc = \frac{\Delta\rho}{2} \times \left(\frac{2\pi N}{60}\right)^2 \times \left(r_2^2 - r_1^2\right)$$

注）Pc：毛細管圧力（Pa）、Δ ρ：ブラインと空気の密度差（kg/m³）、N：回転数（rpm）、r_1：回転軸からコア試料上端までの長さ（m）、r_2：回転軸からコア試料下端までの長さ（m）

毛細管圧力はコア上端の流体入口で評価されるが、飽和率はコア平均値であり正確に評価するためにはコア上端の飽和率で評価する必要がある。Forbes の式[12)]を用いて飽和率を補正しコア上端での値に換算し、グラフ中に Forbes 補正として表示した。今回の試料には岩石が脆く変形の影響を受けやすい試料や岩石中に粘土鉱物を含み膨潤しやすい試料もあったため、水飽和率の測定値が 100%を超えた分析があった。測定値が 100%を超えた試料については上限が 100%になるように補正した。

e.　相対浸透率測定（CO_2－水系）

CO_2－水系の相対浸透率測定を実施した。相対浸透率測定を実施した試料は、相対浸透率測定前に水浸透率も測定した。飽和率評価のため測定には東芝社製の X 線 CT 装置を用いた。測定条件を表 4.2-4 に示す。測定条件は装置の制約を考慮し設定した。水と CO_2 の粘度はそれぞれ Wagner and Kruse （1998）[10)]、Span and Wagner（1996）[13)]の式から算出した。

表 4.2-4　相対浸透率測定　圧力温度条件および使用流体

層準・岩相	実験条件			流体			
	下流圧 (MPa)	有効封圧 (MPa)	温度 (℃)	ブライン		ガス	
				種類	粘度 (mPa・s)	種類	粘度 (mPa・s)
荷菜層礫岩	10	4	40	KI (11.5wt%)	0.653	CO_2	0.0478
平取軽舞層砂岩							

③　遮蔽岩分析

遮蔽岩能力評価対象の試料について遮蔽岩分析用にプラグコアを 5 試料成形し、a.から e.の分析を実施した。以下の a.および b.の分析を荷菜層泥岩 1 個、荷菜層シルト岩 1 個、平取軽舞層泥岩 2 個、平取軽舞層シルト岩 1 個の計 5 試料、c.の分析を荷菜層シルト岩 1 個、d.の分析を荷菜層泥岩 1 個、荷菜層シルト岩 1 個、平取軽舞層泥岩 1 個、平取軽舞層シルト岩 1 個の計 4 試料、e.の分析を荷菜層泥岩 1 個、平取軽舞層泥岩 1 個の計 2 試料で行った。泥岩およびシルト岩は乾燥すると崩壊を起こす可能性があるため、乾燥せず湿潤状態を維持して c.と d.と e.の分析を行い、その後乾燥させて a.および b.の分析を行った。分析条件の根拠とした遮蔽岩の想定深度、圧力を表 4.2-5 に示す。

表 4.2-5　遮蔽岩の想定深度、圧力

層準・岩相	想定深度 (m)	静水圧 (MPa)	上載圧 (MPa)
荷菜層泥岩	3,000	30	57
荷菜層シルト岩			
平取軽舞層泥岩			
平取軽舞層シルト岩			

a.　孔隙率、粒子密度、空気浸透率測定（大気圧下）

②貯留岩分析の a.に示した手法で測定を実施した。

b.　孔隙率、空気浸透率測定（封圧下）

②貯留岩分析の b.に示した手法で測定を実施した。各コアの設定封圧を表 4.2-6 に示す。

表 4.2-6　遮蔽岩コアの設定封圧、温度

層準・岩相	設定封圧 (MPa)			設定温度 (℃)
	一段階	二段階	三段階	
荷菜層泥岩	7	17	27	室温 (25℃)
荷菜層シルト岩				
平取軽舞層泥岩				
平取軽舞層シルト岩				

c.　水浸透率測定

②貯留岩分析の c.に示した手法で測定を実施した。測定の圧力温度条件および使用流体を表 4.2-7 に示す。スレッショルド圧力測定に使用したガス流体も表に示した。水と CO_2 の粘度はそれぞれ Wagner and Kruse （1998）[10]、Span and Wagner（1996）[13] の式から算出した。

表 4.2-7　水浸透率およびスレッショルド圧力測定　圧力温度条件および使用流体

層準・岩相	実験条件			流体			
				ブライン		ガス	
	下流圧 (MPa)	有効封圧 (MPa)	温度 (℃)	種類	粘度 (mPa・s)	種類	粘度 (mPa・s)
荷菜層泥岩	11.2	10.3	40	NaCl (30,000 mg/L)	0.717	CO_2	0.0556
荷菜層シルト岩							
平取軽舞層泥岩							

注）水と CO_2 の粘度はそれぞれ Wagner and Kruse（1998）[10]、Span and Wagner（1996）[13] の式から算出した。

d.　毛細管圧力測定

②貯留岩分析の d.に示した手法で測定を実施した。

e.　スレッショルド圧力測定

水浸透率測定後に CO_2－水系スレッショルド測定を実施した。スレッショルド圧力測定を実施した試料は、スレッショルド圧力測定前に水浸透率も測定した。測定手法はダイナミック法[14)]を用いて、測定装置は水浸透率測定と同じ装置を用いた。測定条件を表 4.2-7 に示す。

④　岩石物性分析

円柱状の分析試料を成形し、a.から c.の測定を実施した。以下の a.および b.の分析を荷菜層砂岩 1 個、平取軽舞層砂岩 2 個、荷菜層シルト岩 1 個、荷菜層泥岩 1 個、平取軽舞層泥岩 1 個の計 6 試料、c.の分析を荷菜層シルト岩 1 個、荷菜層泥岩 1 個、平取軽舞層泥岩 1 個の計 3 試料で行った。

a.　弾性波速度試験

地盤工学会基準（JGS 2110-2009）[15)]に準拠し弾性波速度試験を行った。計測した体積および質量から算出される湿潤密度、測定した P 波速度と S 波速度を用いて、次式[16)]を用いて動ヤング率および動ポアソン比を算出した。

$$\nu_d = \frac{\left(V_p/V_s\right)^2 - 2}{2\{\left(V_p/V_s\right)^2 - 1\}}, \quad E_d = \frac{\rho V_s^2\left(3V_p^2 - 4V_s^2\right)}{V_p^2 - V_s^2}$$

注）E_d：動ヤング率、ν_d：動ポアソン比、ρ：湿潤密度、V_p：計測された P 波速度、V_s：計測された S 波速度

b.　一軸、三軸圧縮試験

弾性波速度試験後に、地盤工学会基準（JGS 2531-2009）[17)]に準拠し一軸・三軸圧縮試験を行った。一軸圧縮試験においてひずみゲージを用いて載荷による変形過程での縦・横の歪を計測し、静ポアソン比の算出を行った。三軸圧縮試験において砂岩試料は圧密排水条件（CD 試験）、泥岩およびシルト岩試料は非圧密非排水条件（UU 試験）で行った。三軸圧縮試験は 4 MPa、8 MPa、20 MPa の 3 封圧において 0.2 MPa の背圧で試験を実施し、各封圧条件での静ヤング率、破壊強度を計測した。一軸圧縮試験の結果を大気圧相当の結果として、三軸圧縮試験の各封圧条件での結果とあわせて評価し、摩擦角と固着力を算出した。測定にはテスコ株式会社製の電気式圧縮試験機および丸東製作所製の油圧

式圧縮試験機を用いた。

c. 圧裂引張試験

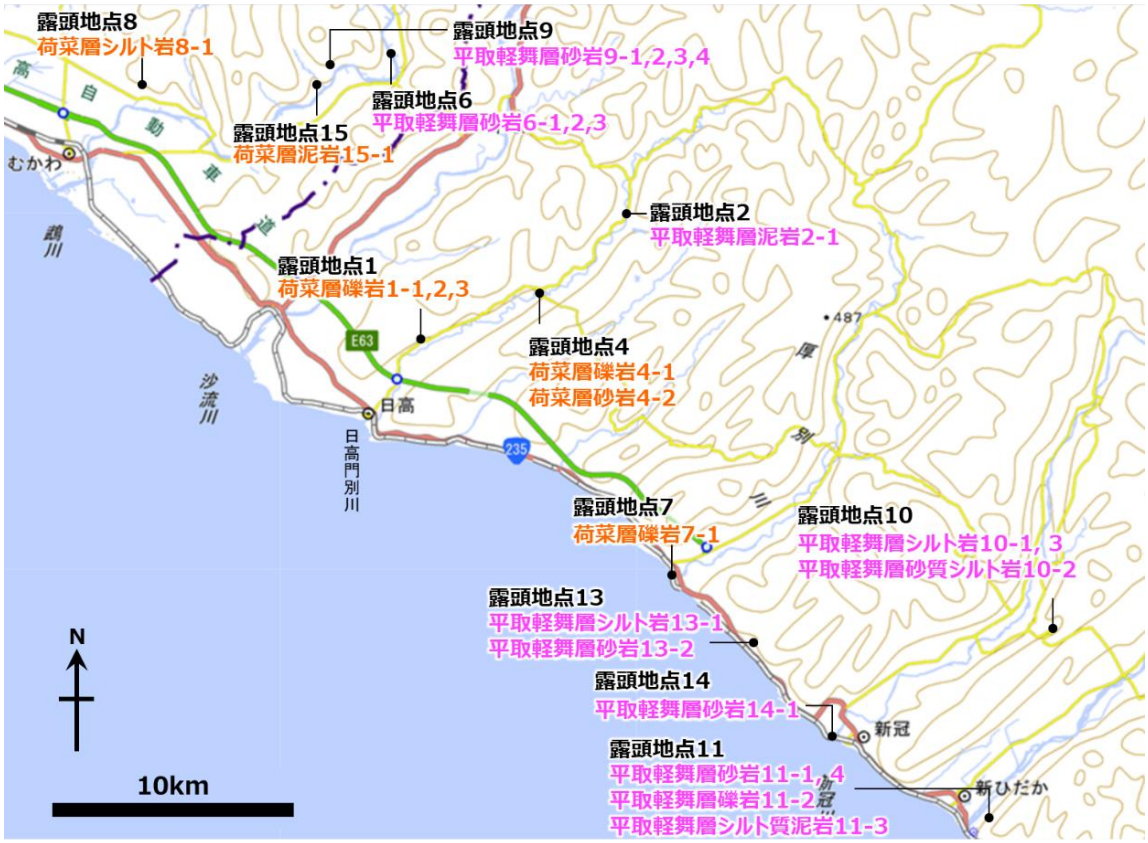
日本工業規格（JIS M0303）[18)]の岩石の引張強さ試験方法に準拠し圧裂引張試験を行った。層理面に対して垂直な方向で圧縮した。測定にはテスコ株式会社製の載荷装置、株式会社東京測器研究所製の荷重計、株式会社小野測器製の変位計、株式会社 A&D 製の電子天秤を用いた。

4.2.3 地表調査および分析試料採取結果

後期中新世から前期鮮新世の荷菜層および平取軽舞層を対象に調査を実施した。岩相層序区分に基づいた日高沿岸地域の地表の地層区分は、上下関係と時代区分が錯綜しているため[19)]、北海道新第三紀堆積物の標準層序[20)]として用いられている北海道勇払地域の珪藻化石帯による層序区分に基づく地層名を使用した。荷菜層、平取軽舞層ともに粗粒相が卓越する層準は貯留層層準として、細粒相が卓越する層準は遮蔽層層準として期待される。そのため両地層から貯留層評価の対象として粗粒な岩相を、遮蔽層評価の対象として細粒な岩相を採取した。露頭で記載した堆積岩は粒度により分類した[21)]。沖合に掘削された基礎試錐「日高トラフ」[22)]と地表調査を対比すると、坑井層序 B 層は荷菜層に相当し、坑井層序 A 層は荷菜層および平取軽舞層上部に相当する。

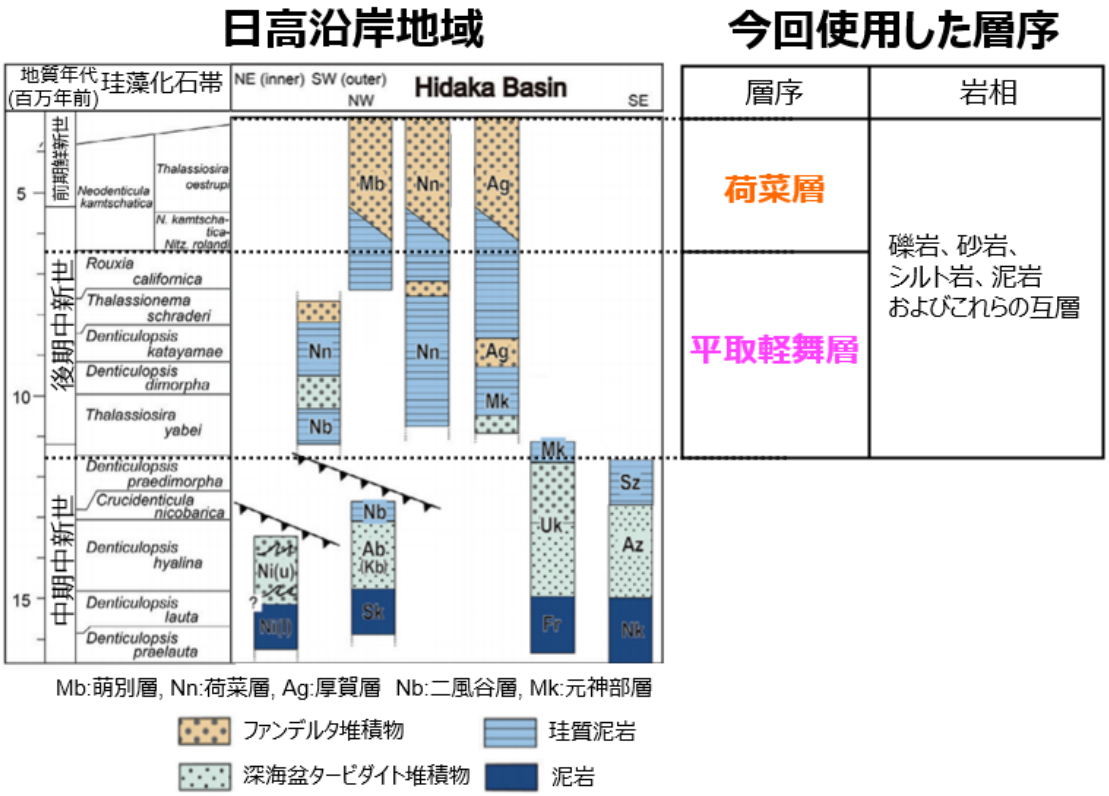
露頭位置を図 4.2-2 に、日高沿岸地域の層序[19)]と今回使用した層序の対比を図 4.2-3 に示す。対比の際は基礎試錐「日高トラフ」[22)]の層序も参考にした。補助として露頭地点 3、5、12 を用意していたが、測定に十分な量の試料を採取できたため今回は調査を実施しなかった。

以下に、荷菜層および平取軽舞層の岩石試料を採取した露頭の地質を西から順に記載する。



注 1）国土地理院ホームページ、地理院地図（電子国土 Web）[1] から引用し、加筆した。
注 2）露頭地点名を黒、荷菜層の試料名をオレンジ、平取軽舞層の試料名をピンクで記載する。

図 4.2-2　調査露頭位置図



注）日高沿岸地域の層序図は加瀬ほか（2018）[19]から引用し、加筆した。

図 4.2-3　日高沿岸地域[19]と今回使用した層序の対比

(1)　平取軽舞層

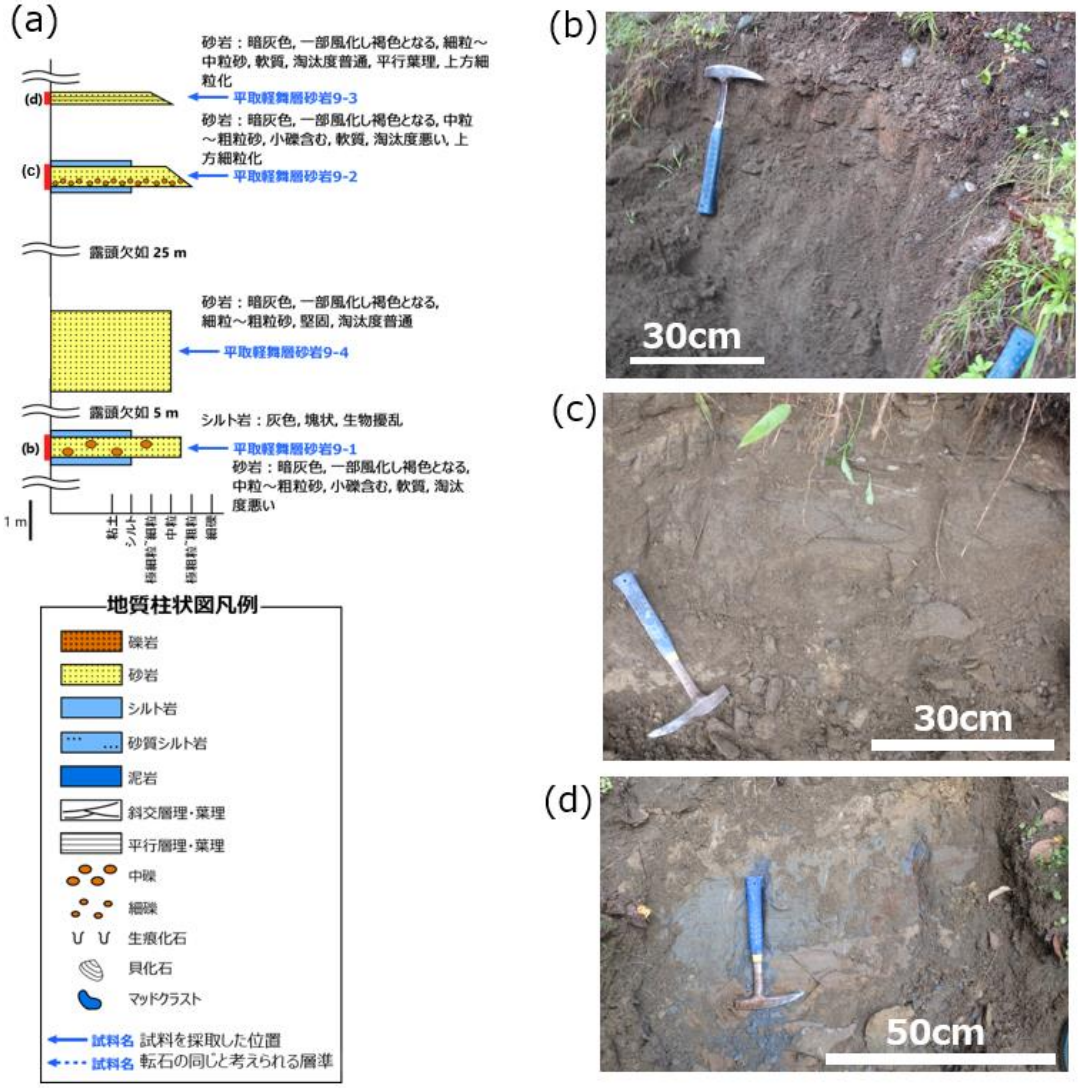
平取軽舞層の貯留岩能力および遮蔽岩能力を評価するため、露頭観察と試料採取を実施した。砂岩および礫岩は貯留岩試料、泥岩およびシルト岩は遮蔽岩試料として採取した。先行研究によると北海道日高地域において平取軽舞層は三角州から海洋底の海底扇状地で堆積したと解釈される[19]。

①　露頭地点 9

むかわ町春日を流れる鵡川支流沿いの露頭において露頭観察を実施し砂岩試料を採取した。作成した地質柱状図および露頭の写真を図 4.2-4 に示す。

本露頭は平取軽舞層の砂岩優勢砂岩シルト岩互層が露出する。多くの砂岩層の単層厚は 50 cm 以下で上方細粒化が認められるが一部で癒着し、厚さ 2.5 m の塊状砂岩も認められる。露出が悪く不明瞭だが、上位、下位にはシルト岩が認められることから砂岩優勢の砂岩シルト岩互層であると推定した。単層厚が比較的薄く、シルト岩を挟むことからシュートレヴィーからプロデルタの環境で堆積したと解釈した。プロデルタは、デルタの外縁部分に相

当し細粒な堆積物が卓越する。本露頭の砂岩層から平取軽舞層砂岩 9-1、平取軽舞層砂岩 9-2、平取軽舞層砂岩 9-3、平取軽舞層砂岩 9-4 を採取した。



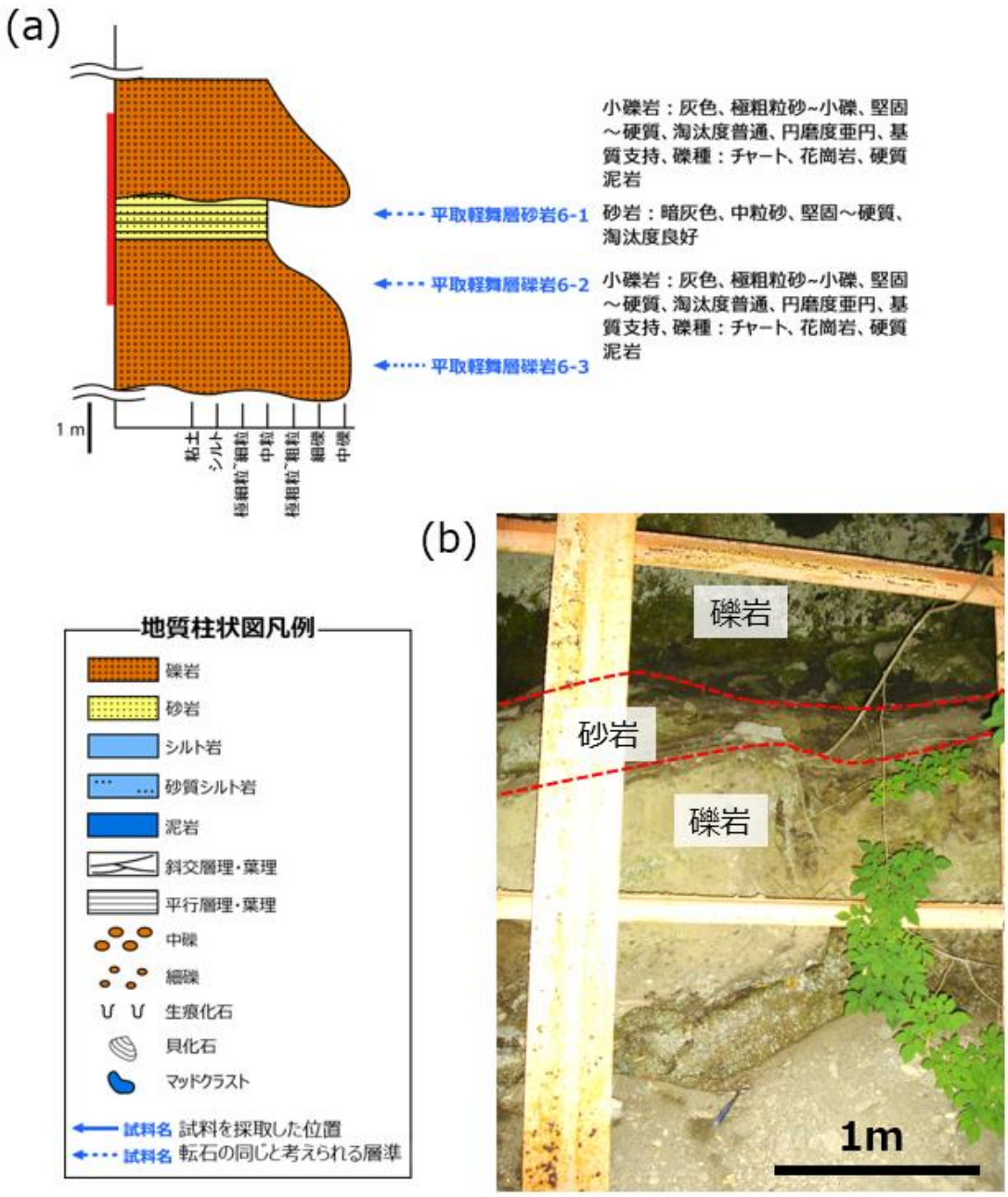
注）(a)の柱状図の赤線は露頭写真の撮影位置を示す。

図 4.2-4　平取軽舞層砂岩 9-1、平取軽舞層砂岩 9-2、平取軽舞層砂岩 9-3、平取軽舞層砂岩 9-4 の(a)地質柱状図、(b)～(d)露頭写真

② 露頭地点 6

むかわ町旭岡の廃トンネル内の露頭において露頭観察を実施し砂岩および礫岩試料を採取した。作成した地質柱状図および露頭の写真を図 4.2-5 に示す。

本露頭は厚さ 3～4 m 程度の中礫岩層が下位層を削り込みながら累重する。砂岩層は中粒砂を主体とし淘汰が良く平行葉理が認められる。固結度は堅固～硬質である。礫岩は灰色を示し、堅固から硬質で粗粒砂を主体とする基質支持であり、淘汰は普通である。亜円礫で、礫種はチャートや花崗岩、硬質泥岩等多様である。礫岩層の削り込みはチャネリングに伴うものと考えられ、ファンデルタシュート堆積物と解釈した。ファンデルタシュートは、ファンデルタ堆積体にみられる小規模なチャネル構造であり、堆積体内側から外縁部へと堆積物を運搬する経路となる。本露頭は廃トンネルの中に位置しているため安全面を考慮し、露頭からブロック状に崩れ落ちていた転石から平取軽舞層砂岩 6-1、平取軽舞層礫岩 6-2、平取軽舞層礫岩 6-3 の試料を採取した。



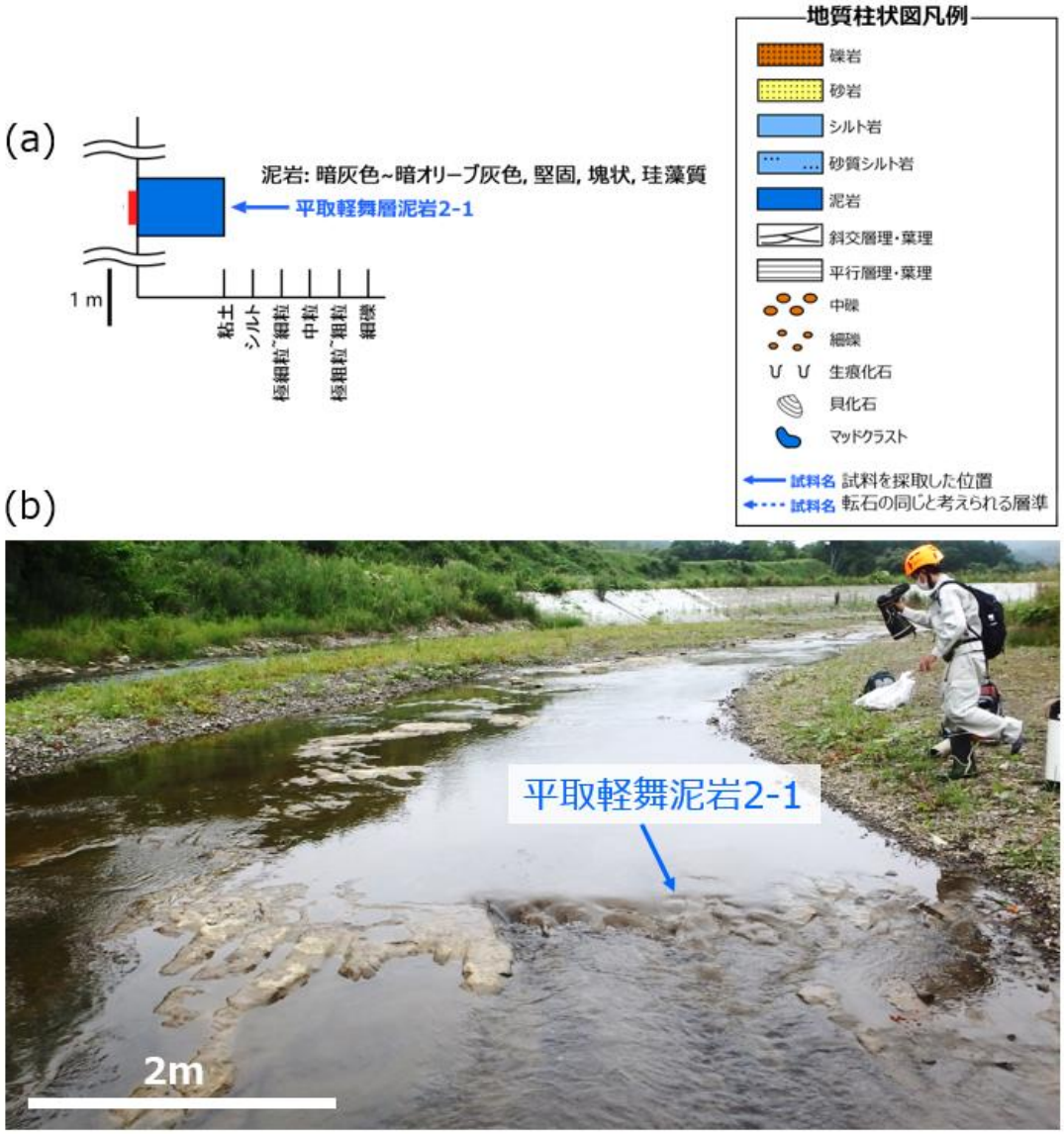
注 1）(a)の柱状図の赤線は露頭写真の撮影位置を示す。
注 2）(b)の露頭写真の赤破線は層理面を示す。
注 3）平取軽舞層砂岩 6-1、平取軽舞層礫岩 6-2、平取軽舞層礫岩 6-3 は転石から試料を採取した。

図 4.2-5　平取軽舞層砂岩 6-1、平取軽舞層礫岩 6-2、平取軽舞層礫岩 6-3 の (a)地質柱状図、(b)露頭写真

③　露頭地点 2

日高町を流れる日高門別川沿いの露頭において露頭観察を実施し泥岩試料を採取した。作成した地質柱状図および露頭の写真を図 4.2-6 に示す。

本露頭は河床に泥岩が露出している。泥岩は、暗灰色から暗オリーブ灰色を示し、堅固で珪藻質である。塊状で層理は認められないが板状に割れる。本露頭から平取軽舞層泥岩 2-1 を採取した。



注）(a)の柱状図の赤線は露頭写真の撮影位置を示す。

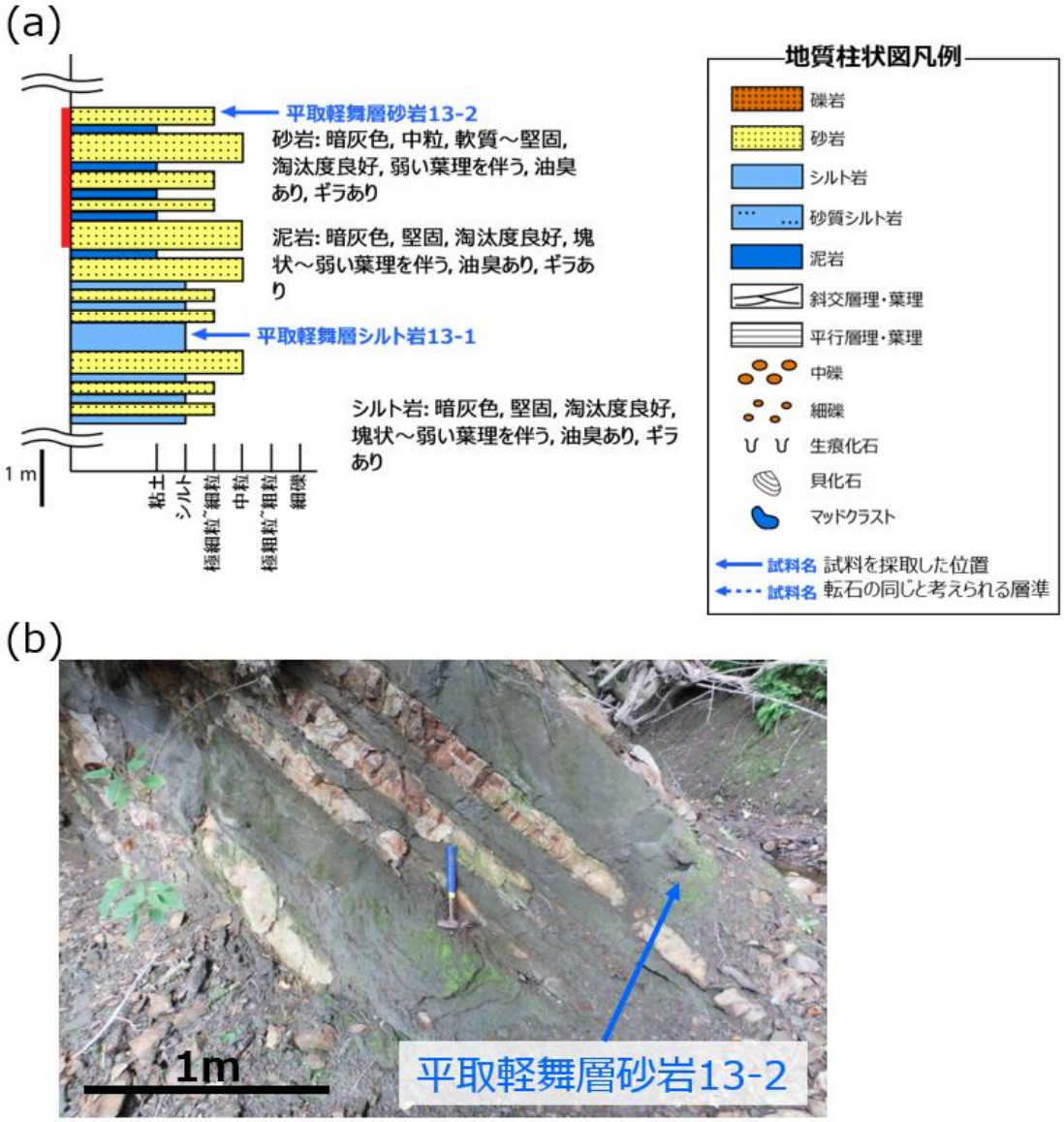
図 4.2-6　平取軽舞層泥岩 2-1 の(a)地質柱状図、(b)露頭写真

④　露頭地点 13

新冠町節婦を流れる大節婦川沿いの露頭において露頭観察を実施しシルト岩試料を採取した。作成した地質柱状図および露頭の写真を図 4.2-7 に示す。

本露頭では砂岩シルト岩泥岩互層が分布する。シルト岩は暗灰色を示し堅固で淘汰はよ

く、一部平行葉理が認められる。砂岩は暗灰色を示し中粒砂主体で軟質から堅固で淘汰はよく、不明瞭ながら平行葉理が認められる。本露頭はほぼ新冠背斜軸上に位置するが[2 3)]、堆積同時性構造運動の形跡は認められない。したがって平取軽舞層の堆積した時代はまだ構造運動は顕著でなかったと推定される。堆積時は海底谷の隣に位置し、海底谷からあふれ出したレヴィー堆積物の砂と静穏な環境で堆積した泥が互層をなしていると解釈した。本露頭は油臭があり、新鮮な岩石を割って水に浸すと水面に油膜が観察できる。本露頭のシルト岩層から平取軽舞層シルト岩 13-1、平取軽舞層シルト岩 13-2 を採取した。



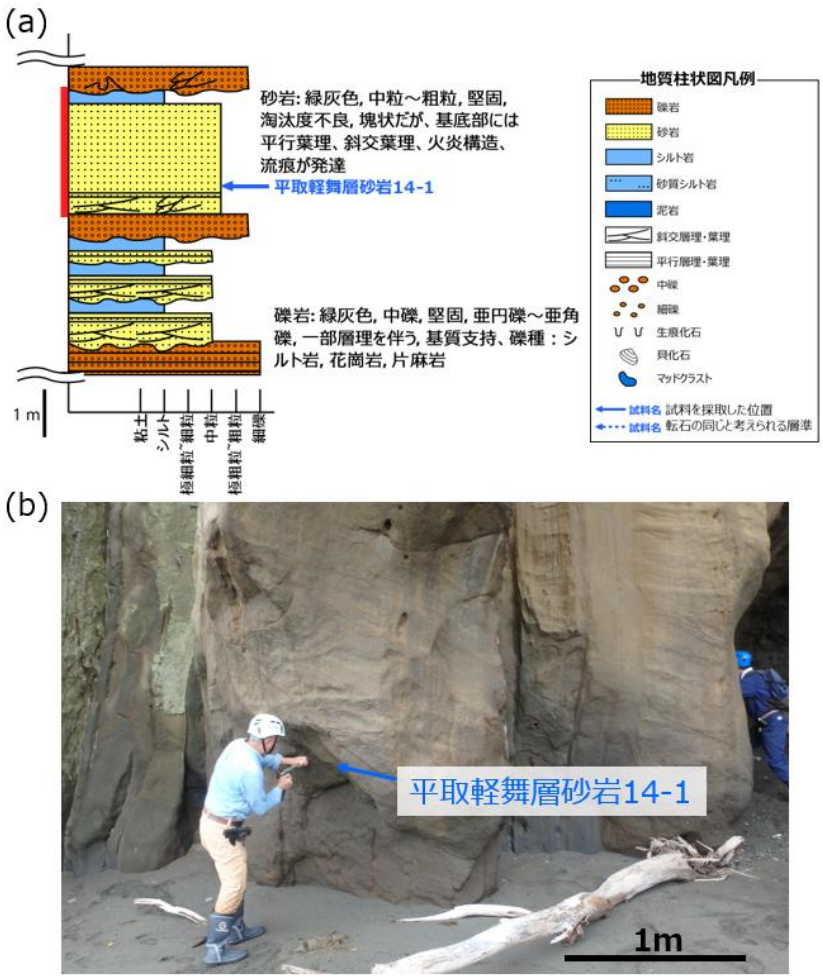
注）(a)の柱状図の赤線は露頭写真の撮影位置を示す。

図 4.2-7　平取軽舞層シルト岩 13-1、平取軽舞層シルト岩 13-2 の (a)地質柱状図、(b)露頭写真

⑤　露頭地点 14

新冠町判官館の露頭において露頭観察を実施し砂岩試料を採取した。作成した地質柱状図および露頭の写真を図 4.2-8 に示す。

本露頭では新冠町を流れる新冠川の河口に平取軽舞層の礫岩砂岩シルト岩互層が分布する。礫質砂岩優勢で、厚さ 1～10 m の上方細粒化サクセッションが累重する。礫岩層の礫は亜円礫～亜角礫で、シルト岩、片麻岩、花崗岩等多様な岩質からなる。砂岩層は極粗粒砂～中粒砂で礫を含み、斜交葉理、平行葉理、流痕等の堆積構造が観察できる。本露頭の側方では泥質岩が卓越し、本露頭のような粗粒岩はレンズ状に分布する[2 3)]。砂岩層、礫岩層の底面には削り込みや流痕や火炎構造が観察され、上方細粒化することから水深数 100 m において海底谷本体を埋積した高密度タービダイト主体の堆積物であると解釈した。本露頭の砂岩層から平取軽舞層砂岩 14-1 を採取した。



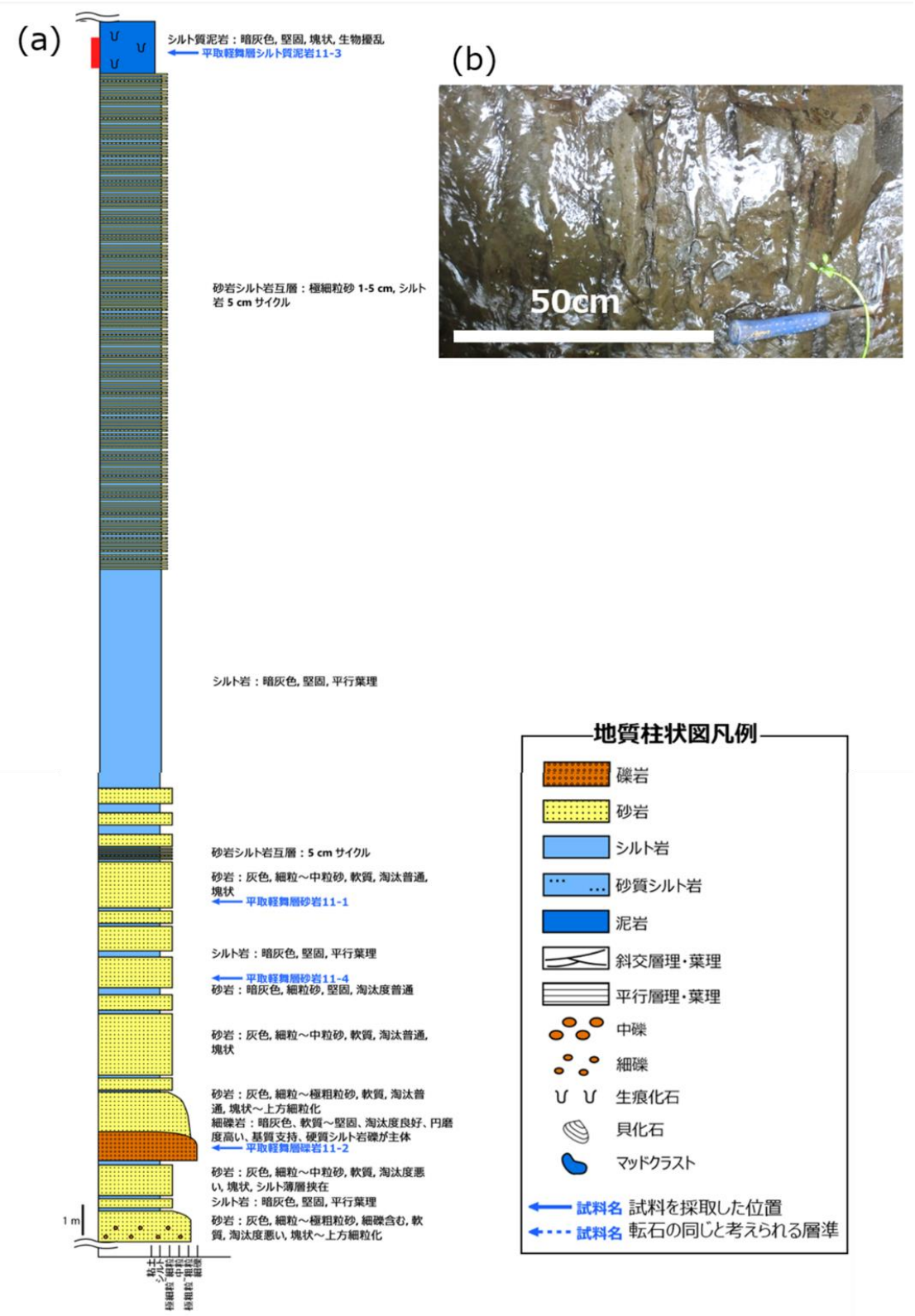
注）(a)の柱状図の赤線は露頭写真の撮影位置を示す。

図 4.2-8　平取軽舞層シルト岩 14-1 の(a)地質柱状図、(b)露頭写真

⑥　露頭地点 11

新ひだか町を流れる静内川支流ウグイス谷沿いの露頭において露頭観察を実施し砂岩および泥岩試料を採取した。作成した地質柱状図および露頭の写真を図 4.2-9 に示す。

本露頭では平取軽舞層の礫岩砂岩シルト岩泥岩互層にシルト質泥岩が重なる。本露頭では上方薄層化が顕著である。露頭下部では砂岩層が優勢で細礫岩を挟む。単層厚は 1 m 以下であることが多いが、一部では癒着し塊状で 2 m 程度となる。露頭上部では 5 cm サイクルの砂岩シルト岩互層が主体となる。露頭最上部は生物擾乱を受けたシルト質泥岩層である。砂岩層および礫岩層の平行葉理や級化構造はタービダイト流に伴い形成されたチャネル充填堆積物と解釈し、砂岩泥岩互層はレヴィー堆積物と解釈した。本露頭から平取軽舞層砂岩 11-1、平取軽舞層礫岩 11-2、平取軽舞層シルト質泥岩 11-3、平取軽舞層砂岩 11-4 を採取した。



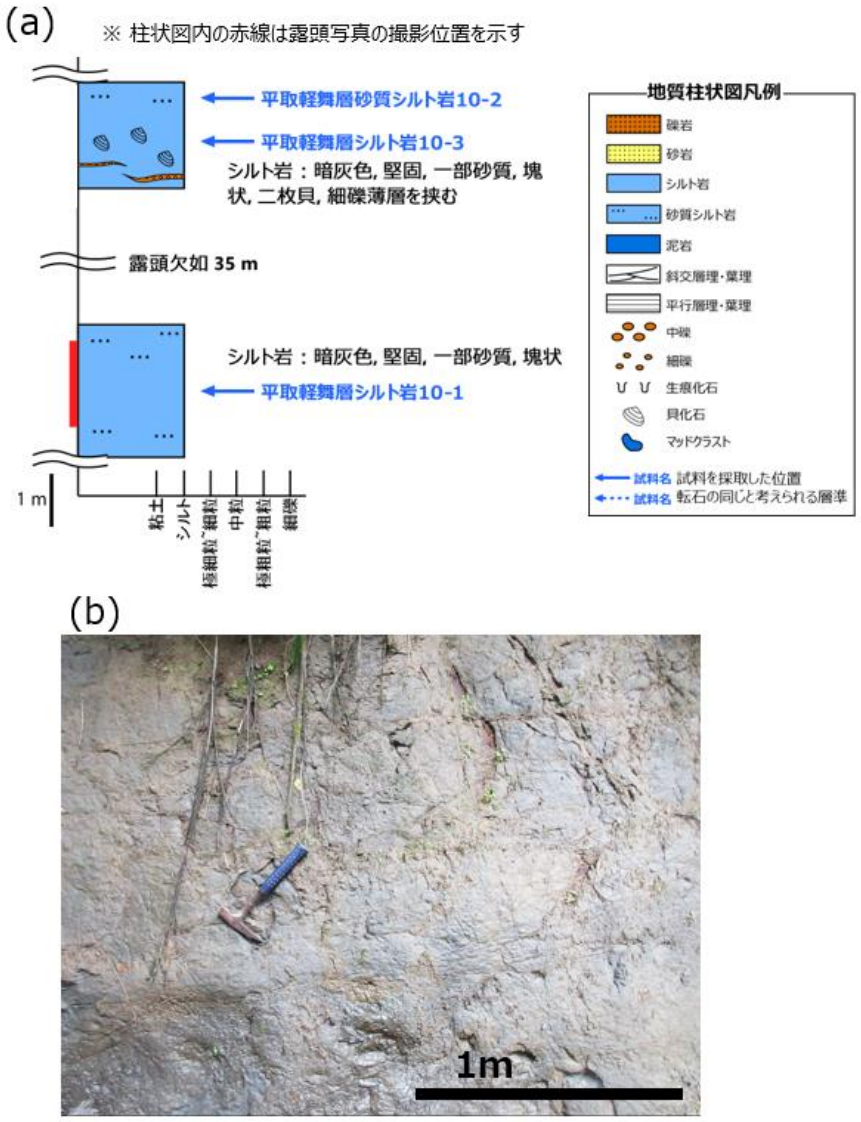
注）(a)の柱状図の赤線は露頭写真の撮影位置を示す。

図 4.2-9　平取軽舞層砂岩 11-1、平取軽舞層礫岩 11-2、平取軽舞層シルト質泥岩 11-3、平取軽舞層砂岩 11-4 の(a)地質柱状図、(b)露頭写真

⑦　露頭地点 10

新冠町を流れる新冠川の支流沿いの露頭において露頭観察を実施しシルト岩試料を採取した。作成した地質柱状図および露頭の写真を図 4.2-10 に示す。

本露頭では平取軽舞層のシルト岩および砂質シルト岩が露出する。シルト岩は塊状で一部砂質となり、二枚貝破片を含む。上部ではシルト岩に細礫岩薄層をレンズ状に 2 層挟む。泥質プロデルタ環境の堆積物と解釈した。本露頭から平取軽舞層シルト岩 10-1、平取軽舞層砂質シルト岩 10-2、平取軽舞層シルト岩 10-3 を採取した。



注）(a)の柱状図の赤線は露頭写真の撮影位置を示す。

図 4.2-10　平取軽舞層シルト岩 10-1、平取軽舞層砂質シルト岩 10-2、平取軽舞層シルト岩 10-3 の(a)地質柱状図、(b)露頭写真

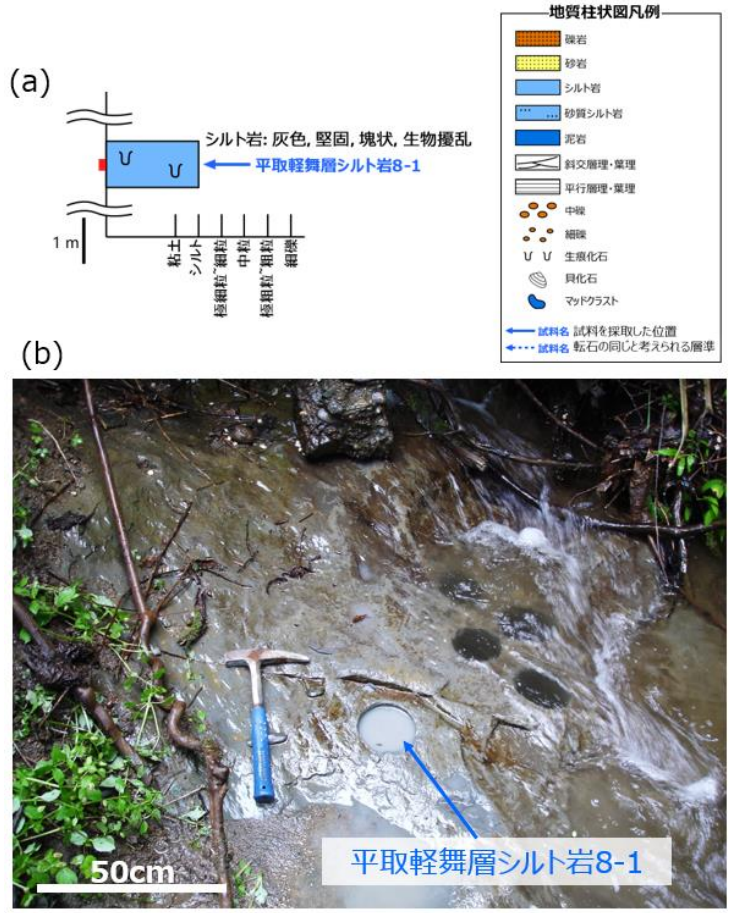
(2)　荷菜層

荷菜層の貯留岩能力および遮蔽岩能力を評価するため、露頭観察と試料採取を実施した。砂岩および礫岩は貯留岩試料、泥岩およびシルト岩は遮蔽岩試料として採取した。先行研究によると北海道日高地域において荷菜層は三角州から陸棚斜面の環境で堆積したと解釈される[19)]。

①　露頭地点 8

荷菜層の遮蔽岩能力を評価するため、むかわ町春日を流れる鵡川の支流沿いの露頭において露頭観察を実施しシルト岩試料を採取した。作成した地質柱状図および露頭の写真を図 4.2-11 に示す。

本露頭で荷菜層のシルト岩層が露出する。シルト岩は灰色を示し、堅固および塊状で生物擾乱が認められる。本露頭東側に位置する鵡川背斜を挟み同層準は粗粒相に変化しており、堆積同時性の構造運動が示唆される[24)、25)]。本露頭から荷菜層シルト岩 8-1 を採取した。



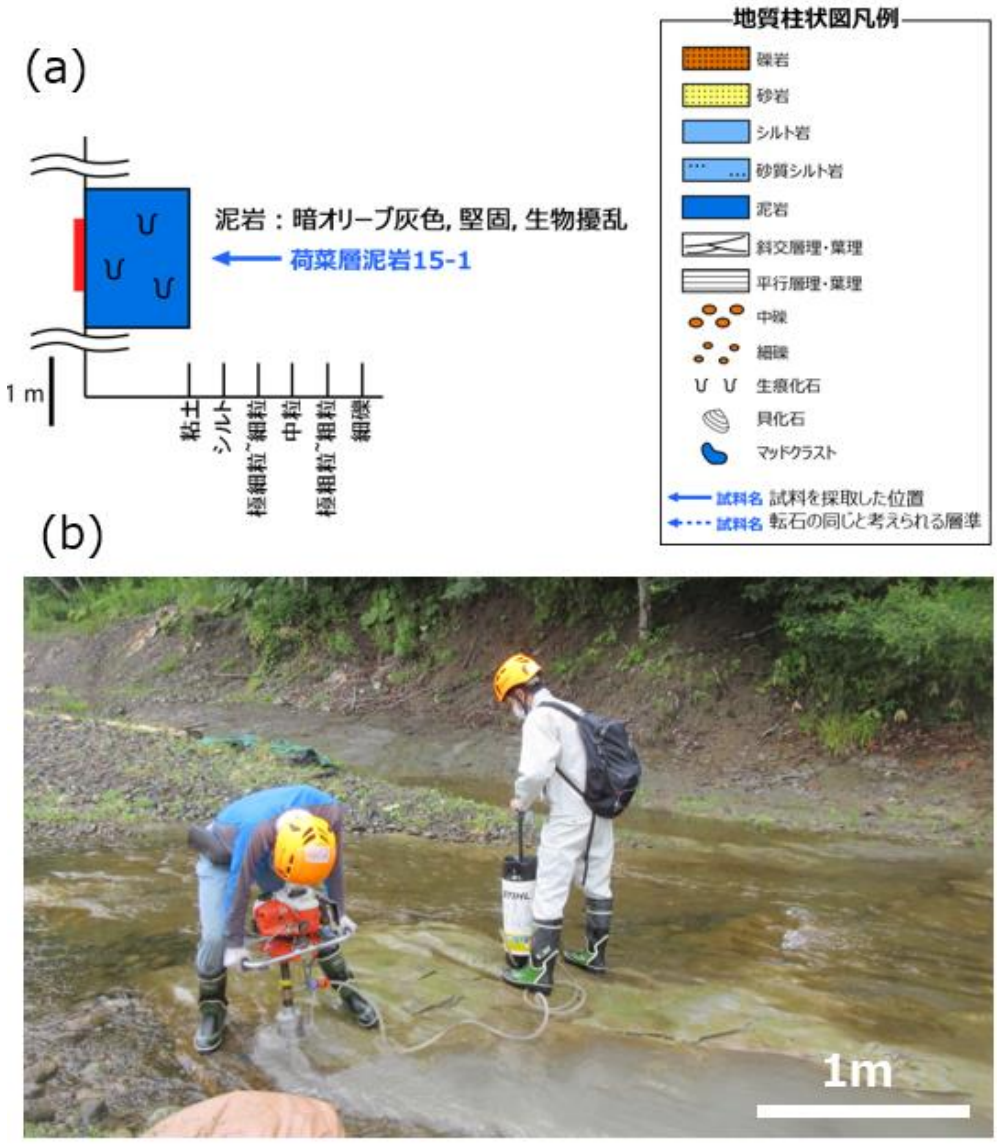
注）(a)の柱状図の赤線は露頭写真の撮影位置を示す。

図 4.2-11　荷菜層シルト岩 8-1 の(a)地質柱状図、(b)露頭写真

②　露頭地点 15

荷菜層の遮蔽岩能力を評価するため、むかわ町を流れる鵡川支流イクベツ沢沿いの露頭において露頭観察を実施し泥岩試料を採取した。作成した地質柱状図および露頭の写真を図 4.2-12 に示す。

本露頭では荷菜層の泥岩層が分布する。泥岩は生物擾乱を受けており塊状である。周辺には露頭地点 6 や露頭地点 9 等荷菜層においてファンデルタと解釈できる粗粒相が卓越するため、相対的海水準の上昇によって一時的にファンデルタが後退し、プロデルタから陸棚斜面環境となったと解釈した。本露頭から荷菜層泥岩 15-1 を採取した。



注）(a)の柱状図の赤線は露頭写真の撮影位置を示す。

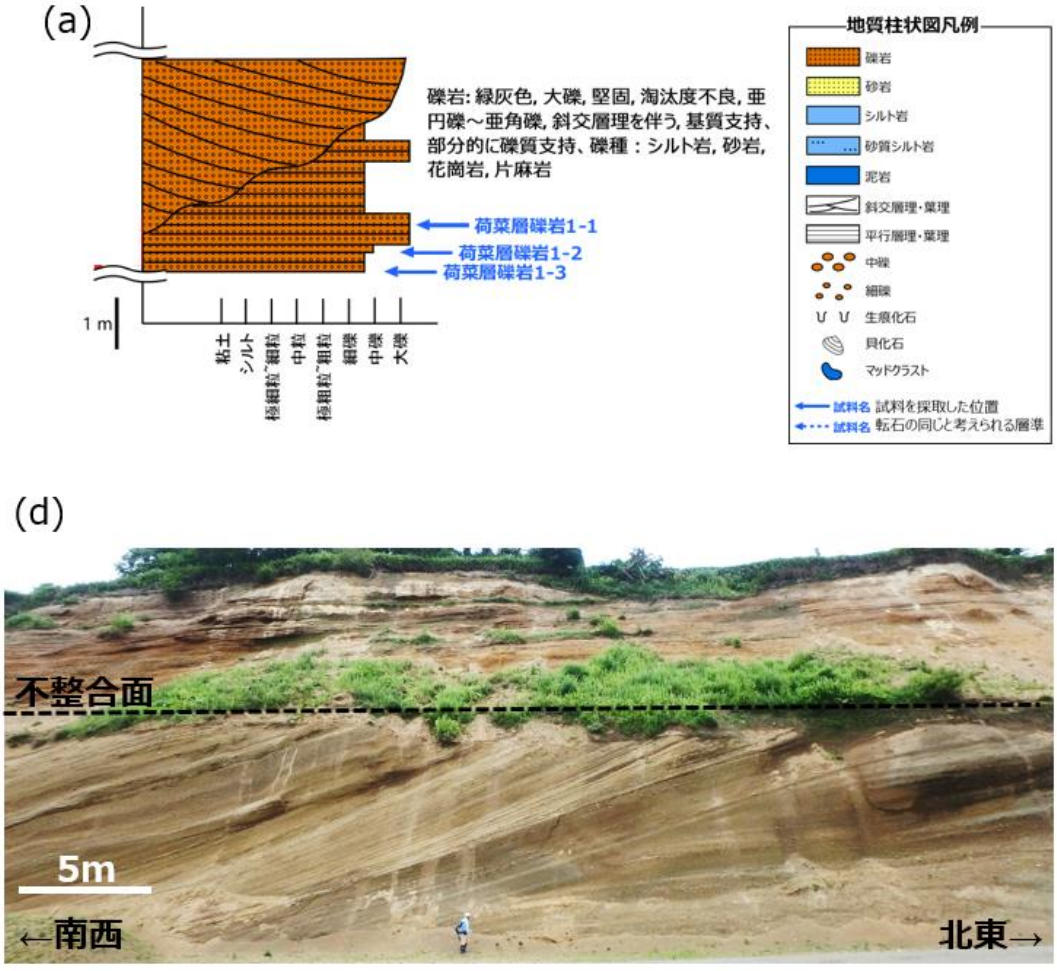
図 4.2-12　荷菜層泥岩 15-1 の(a)地質柱状図、(b)露頭写真

③　露頭地点 1

荷菜層の貯留岩能力を評価するため、日高町緑町の採石場の露頭において所有者の許可を得て露頭観察を実施し礫岩試料を採取した。作成した地質柱状図および露頭の写真を図 4.2-13 に示す。

本露頭では礫岩層が露出する。礫岩の単層厚は数 10 cm～数 m であり、固結度は低く軟質である。基質支持だが一部では礫質支持となる。礫種は花崗岩やチャート、変成岩等多様である。層理面は、南西側へ約 20 度傾斜している。本露頭はファンデルタの堆積物でありデルタローブが浅海において南西側へ前進しながら堆積したものと解釈した。

本露頭から荷菜層礫岩 1-1、荷菜層礫岩 1-2、荷菜層礫岩 1-3 を採取した。



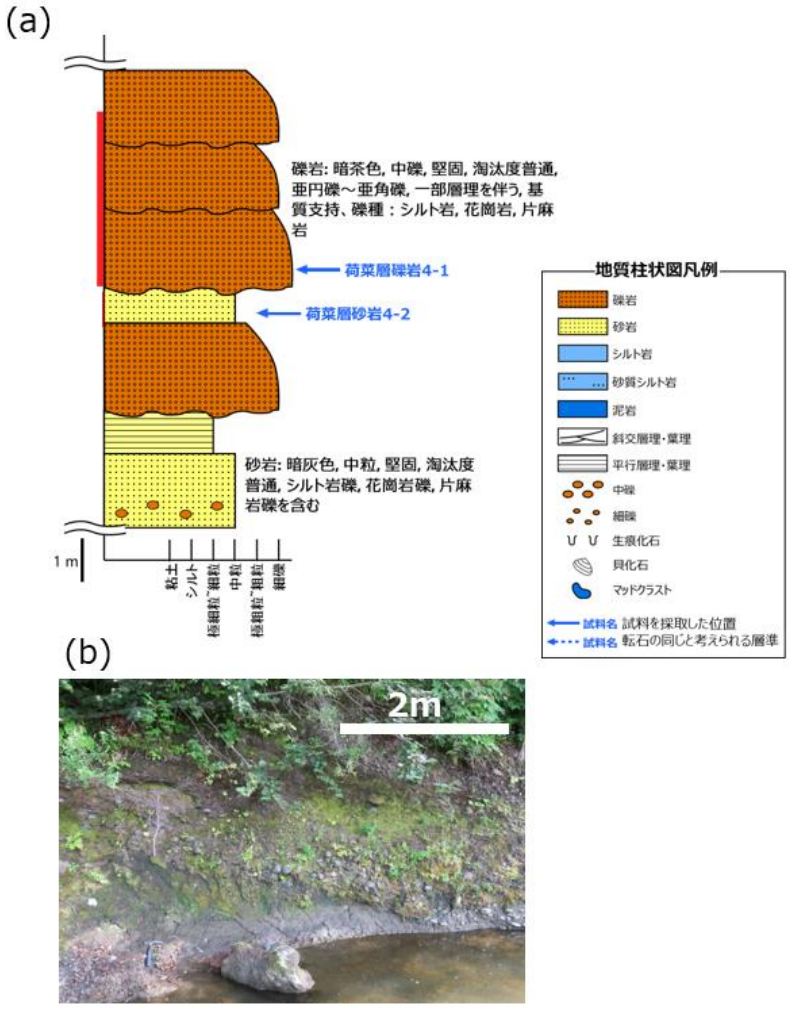
注 1）(a)の柱状図は試料採取した箇所の近傍を記載した。柱状図の赤線は露頭写真の撮影位置を示す。
注 2）(b)は露頭全体の遠望写真を示す。黒破線は不整合面を示す。

図 4.2-13　荷菜層礫岩 1-1、荷菜層礫岩 1-2、荷菜層礫岩 1-3 の (a)地質柱状図、(b)露頭全体の遠望写真

④　露頭地点 4

荷菜層の貯留岩能力を評価するため、日高町を流れる日高門別川沿いの露頭において露頭観察を実施し砂岩試料を採取した。作成した地質柱状図および露頭の写真を図 4.2-14 に示す。

本露頭では砂岩層、礫岩層が分布する。柱状図より下位に位置する露頭では砂質シルト岩層および泥岩砂岩薄互層も露出している。下位から上位に向けて、生物擾乱砂質シルト岩、泥岩砂岩薄互層、砂岩、チャネル状礫岩と累重し、上方粗粒化を呈する。これは堆積環境が、泥質なプロデルタからファンデルタの前進によりファンデルタシュート環境に変化したことを示す。シュートが複雑に積み重なって厚い礫岩層を形成するが、個々のシュートの厚さは 2～5 m であり、その内部は 50 cm～1 m オーダーのチャネルの複合体から構成される。本露頭から荷菜層礫岩 4-1、荷菜層砂岩 4-2 を採取した。



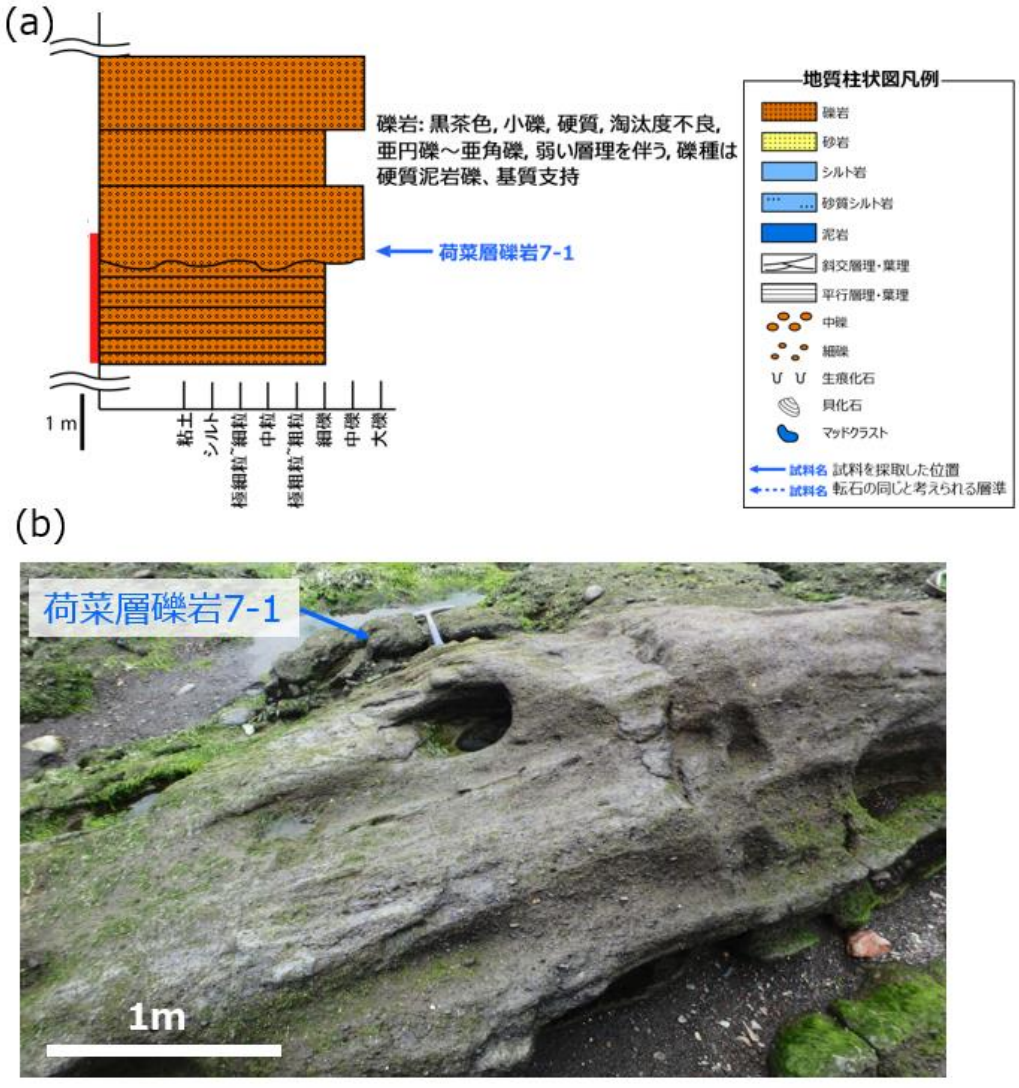
注）(a)の柱状図の赤線は露頭写真の撮影位置を示す。

図 4.2-14　荷菜層礫岩 4-1、荷菜層砂岩 4-2 の(a)地質柱状図、(b)露頭写真

⑤　露頭地点 7

荷菜層の貯留岩能力を評価するため、日高町を流れる厚別川河口の露頭において露頭観察を実施し礫岩試料を採取した。作成した地質柱状図および露頭の写真を図 4.2-15 に示す。

本露頭では荷菜層の礫岩層が分布する。厚さ 1～1.5 m 程度の中礫岩層が下位層を削り込みながら累重する。礫岩層は全体が強いセメンテーション作用を被り非常に硬い。礫種は硬質泥岩が主体で露頭地点 1 や露頭地点 4 の荷菜層礫岩とは供給源が異なることが示唆される。礫岩層の削り込みはチャネリングに伴うものと考えられ、ファンデルタシュート堆積物と解釈した。本露頭から荷菜層礫岩 7-1 を採取した。



注）(a)の柱状図の赤線は露頭写真の撮影位置を示す。

図 4.2-15　荷菜層礫岩 7-1 の(a)地質柱状図、(b)露頭写真

(3)　地表調査まとめ

北海道日高地域において中新統～鮮新統層準の地表調査を実施し、貯留岩および遮蔽岩に相当する以下の試料を採取した。

貯留岩能力評価対象試料：　荷菜層（3 地点 6 試料）、平取軽舞層（5 地点 12 試料）

遮蔽岩能力評価対象試料：　荷菜層（2 地点 2 試料）、平取軽舞層（4 地点 6 試料）

対象層準について推定した堆積環境模式図 4.2-16 に示す。先行研究によると、北海道日高地域において荷菜層は三角州から陸棚斜面の環境で堆積したと推定され、平取軽舞層は三角州から海洋底の海底扇状地で堆積したと推定される。地表調査でも同様の結果が得られた。

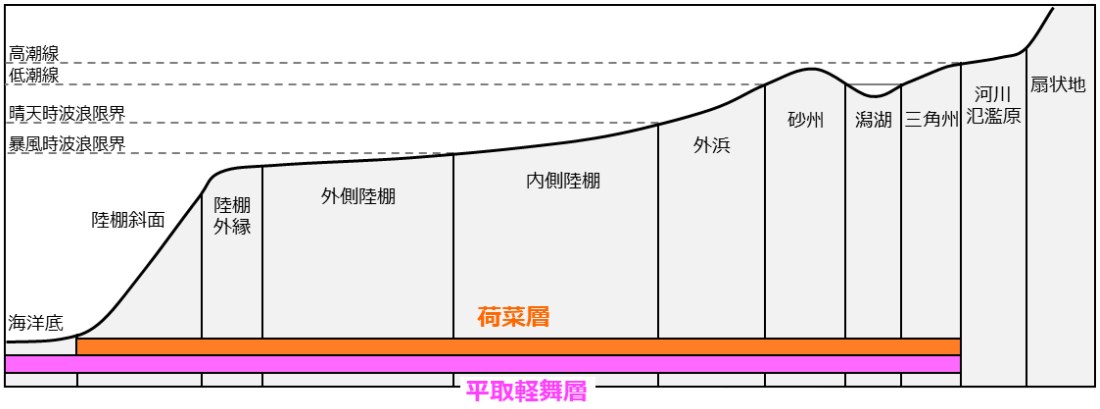


図 4.2-16　対象層準について推定した堆積環境模式図

4.2.4　試料分析結果

地表調査で採取した荷菜層および平取軽舞層の岩石試料について、形状、岩相、硬さ等を考慮し各種分析に供する試料を選出した。同じ岩石試料から分析用の試料を複数成形した場合には試料名の末尾に A、B とつけて区別をした。試料と分析項目を表 4.2-8 に示す。

表 4.2-8　試料と分析項目

	試料名	岩相	岩石鉱物分析								貯留岩分析						遮蔽岩分析						岩石物性					
			貯留岩					遮蔽岩			貯留岩						遮蔽岩						貯留岩		遮蔽岩		
			岩石薄片鑑定	X線鉱物分析	粒度分析（篩法）	孔径分布測定	熱伝導率測定	岩石薄片鑑定	X線鉱物分析	孔径分布測定	ブラグコア成形	孔隙率、粒子密度、空気浸透率測定（大気圧下）	孔隙率、空気浸透率測定（封圧下）	水浸透率測定	毛管圧力測定	相対浸透率測定	ブラグコア成形	孔隙率、粒子密度、空気浸透率測定（大気圧下）	孔隙率、空気浸透率測定（封圧下）	水浸透率測定	毛管圧力測定	スレッショルド圧力測定	弾性波速度試験	一軸、三軸圧縮強度試験	弾性波速度試験	一軸、三軸圧縮強度試験	圧裂試験
貯留岩能力評価対象試料	荷菜層礫岩1-1	礫岩	●	●	●	●	●				●	×	×															
	荷菜層礫岩1-2	礫岩																										
	荷菜層礫岩1-3	礫岩	●	●	●	●	●				●	×	×															
	荷菜層礫岩4-1	礫岩	●	●	●	●	●				●	●	●		●	●												
	荷菜層砂岩4-2	砂岩	●	●	●	●	●																×	●				
	荷菜層礫岩7-1	礫岩	●	●	●	●	●				●	●	●		●													
	平取軽舞層砂岩6-1A	砂岩	●	●	●	●	●				●	●	●		●													
	平取軽舞層砂岩6-1B	砂岩									●	●	●															
	平取軽舞層礫岩6-2	礫岩	●	●	●	●	●																					
	平取軽舞層礫岩6-3	礫岩	●	●	●	●	●																					
	平取軽舞層砂岩9-1	砂岩	●	●	●	●	●																					
	平取軽舞層砂岩9-2	砂岩	●	●	●	●	●																					
	平取軽舞層砂岩9-3	砂岩		●	●		●																					
	平取軽舞層砂岩9-4A	砂岩	●	●	●	●	●				●	●	×		●													
	平取軽舞層砂岩9-4B	砂岩									●	●	×															
	平取軽舞層砂岩11-1A	砂岩	●	●	●	●	●				●	●	●		●													
	平取軽舞層砂岩11-1B	砂岩									●	●	●	●														
	平取軽舞層礫岩11-2	礫岩	●	●	●	●	●																					
	平取軽舞層砂岩11-4A	砂岩	●	●	●	●	●				●	●	●		●								×	●				
	平取軽舞層砂岩11-4B	砂岩									●	●	●			●												
	平取軽舞層砂岩13-2	砂岩	●	●	●	●	●				●	●	●	●	●								×	●				
	平取軽舞層砂岩14-1A	砂岩	●	●	●	●	●				●	●	●		●													
	平取軽舞層砂岩14-1B	砂岩									●	●	●															
遮蔽岩能力評価対象試料	荷菜層シルト岩8-1	シルト岩						●	●	●							●	●	●	●	●				×	●	●	
	荷菜層泥岩15-1	泥岩						●	●	●							●	●	●		●	●			×	●	●	
	平取軽舞層泥岩2-1	泥岩						●	●	●							●	●	●		●	●			●	●	●	
	平取軽舞層シルト岩10-1	シルト岩						●	●	●							●	●	●		●							
	平取軽舞層砂質シルト岩10-2	砂質シルト岩							●																			
	平取軽舞層シルト岩10-3	シルト岩							●																			
	平取軽舞層シルト質泥岩11-3	シルト質泥岩						●	●	●							●	●	●									
	平取軽舞層シルト岩13-1	シルト岩							●																			
	分析個数		16	17	17	16	17	5	8	5	15	13	11	2	8	2	5	5	5	1	4	2	0	3	3	1	3

注 1）×は分析を予定していたが崩壊等により分析ができなかった試料を示す。
注 2）貯留岩能力評価用の試料を黄色、遮蔽岩能力評価用の試料を水色で着色した。

(1)　岩石鉱物分析

①　岩石薄片鑑定

岩石薄片鑑定結果を表 4.2-9(1)～(3)に示す。薄片写真を図 4.2-17(1)～(3)に示す。

a.　貯留岩試料

荷菜層の貯留岩能力評価対象の試料は、一部礫を含む石質アレナイトおよび礫岩に分類される。いずれも構成粒子は岩片が多く、鉱物片の割合は少ない。鉱物片は極細粒～細粒の石英と斜長石を主体とする。ほかに角閃石、黒雲母、海緑石を少量含む。岩片としては細粒～極粗粒の砂岩および泥質岩等の堆積岩片が主体で、ほかに花崗岩等の深成岩片、安山岩等の火山岩片、稀に粘板岩等の変成岩を含む。石質アレナイトは粒子支持構造で基質がほとんどみられず、孔隙は粒子間孔隙が顕著に発達する。視認孔隙率は 20～40%である。一方、礫岩試料では、粒子支持構造は認められるが、鉱物片や岩片の縁辺に一部鉄酸化物の膠着がみられる、あるいは粒子間全体に炭酸塩鉱物（ドロマイト）の膠着がみられる等、初生的な粒子間孔隙を減じている。視認孔隙率は 5%未満あるいは 10～20%程度である。

平取軽舞層の貯留岩能力評価対象の試料は、一部礫を含む石質アレナイトに分類される。いずれも構成粒子は岩片が多く、鉱物片の割合は少ない。鉱物片は極細粒～細粒の石英と斜長石を主体とする。ほかに角閃石と黒雲母を少量含む。岩片としては、細粒～極粗粒の砂岩や泥質岩等の堆積岩片が主体で、ほかに花崗岩等の深成岩片、安山岩等の火山岩片、粘板岩等の変成岩を含む。石質アレナイトは粒子支持構造で基質がほとんどみられず、孔隙は粒子間孔隙が顕著に発達する。視認孔隙率は 30～40%程度である。

荷菜層砂岩と平取軽舞層砂岩はともに特徴がよく似ており、層準による顕著な変化は認められなかった。

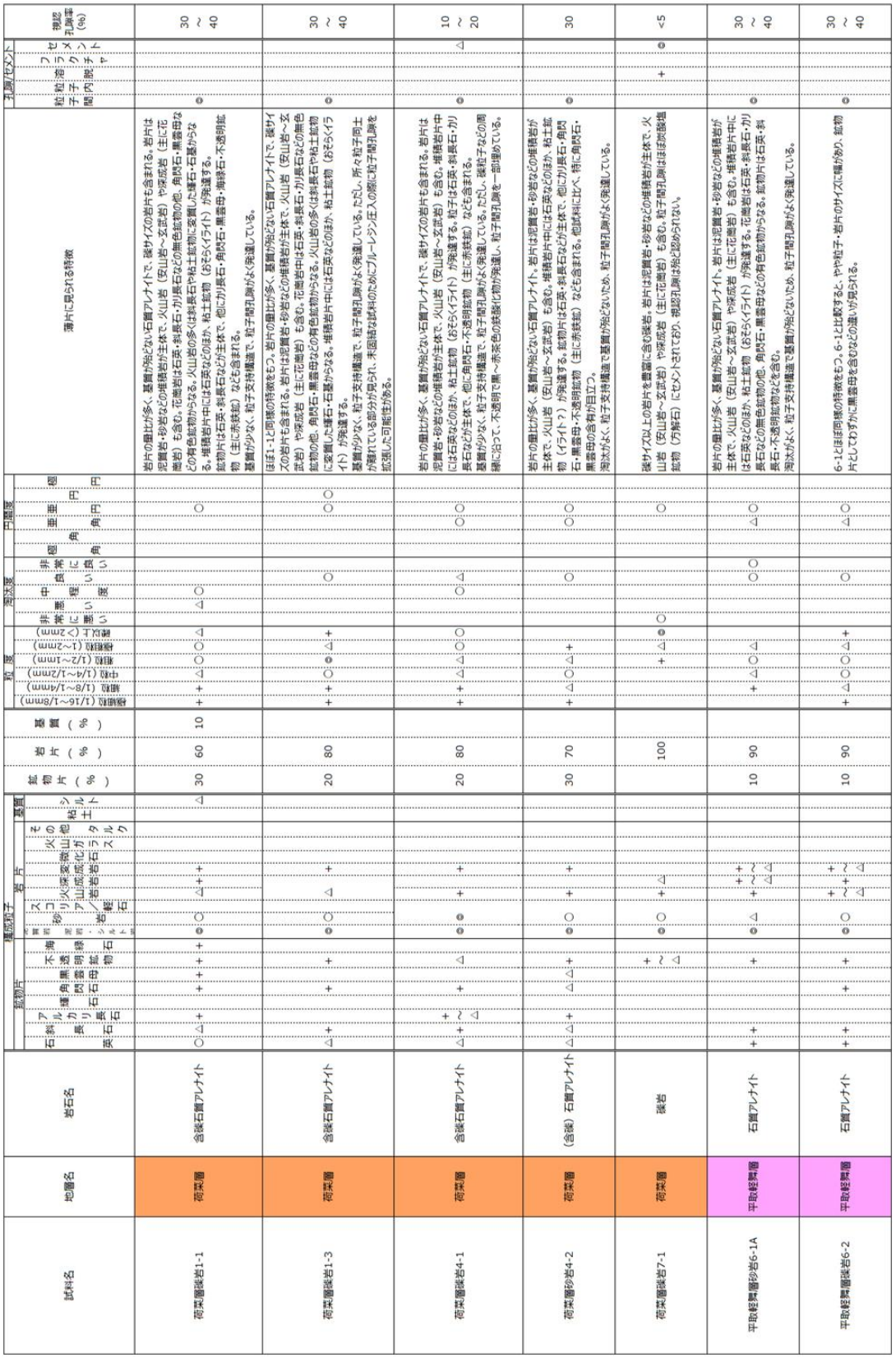
b.　遮蔽岩試料

荷菜層の遮蔽岩能力評価対象の試料は、シルト岩に分類される。シルトサイズ以下の基質が主体である。構成粒子は、鉱物片として極細粒サイズの石英を少量含むほか、稀に長石類、角閃石、黒雲母を含む。また、シルトサイズ以下のものがほとんどであるが、珪藻等の微化石を豊富に含むほか、火山ガラスも含む。稀に粒子が濃集して基質に乏しく、粒子間孔隙が確認できる所も不連続に認められるが、全体に視認孔隙はほとんどなく 5%未満である。

平取軽舞層の遮蔽岩能力評価対象の試料は、石質ワッケおよび泥岩とシルト岩に分類される。石質ワッケは、粒子を 30%程度含むが、シルトサイズ以下の基質を主体とする。

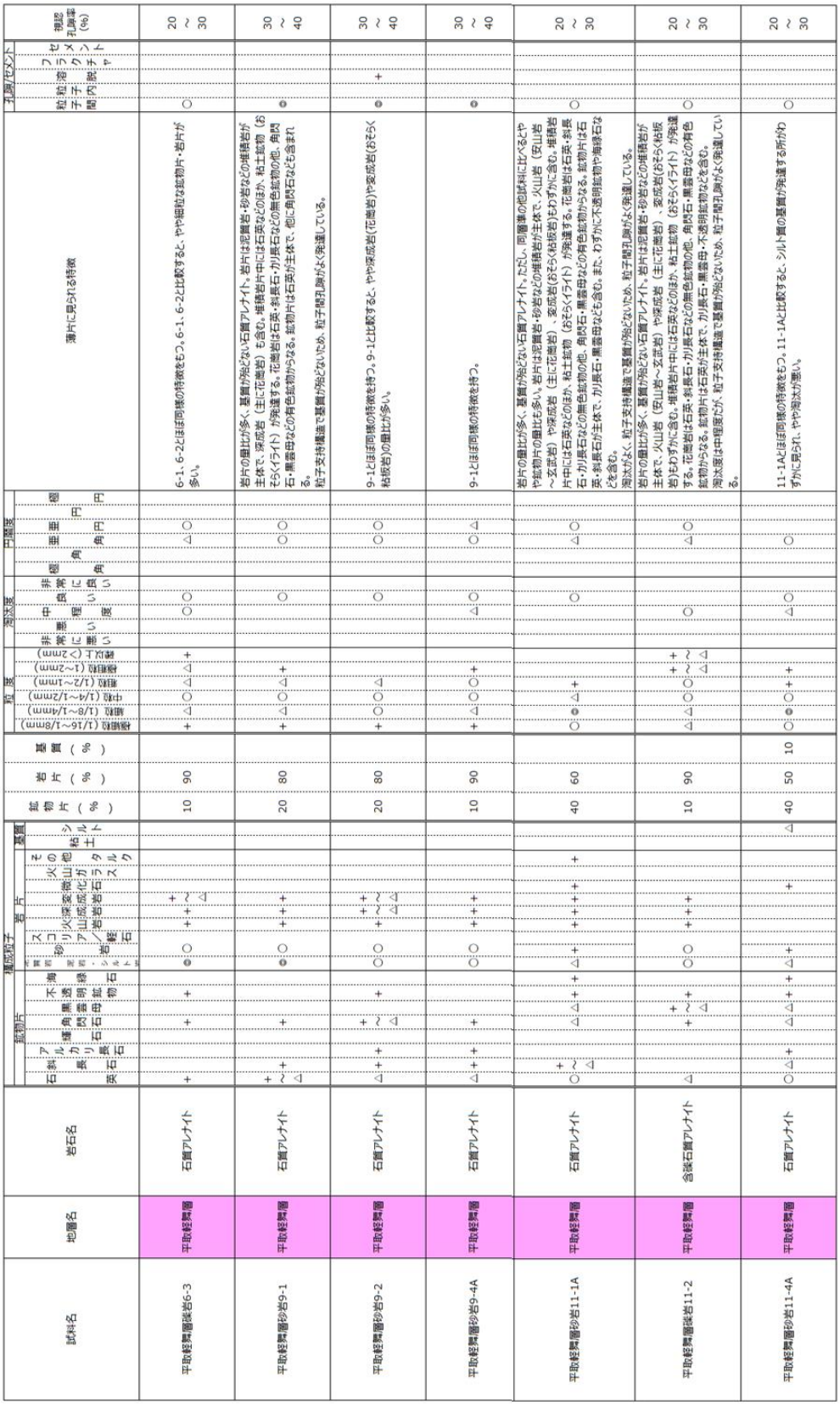
構成粒子は、鉱物片として極細粒～細粒サイズの石英を含むほか、稀に角閃石と黒雲母を含む。また、シルトサイズ以下のものがほとんどであるが、珪藻等の微化石を豊富に含む。稀に粒子が濃集して基質に乏しく、粒子間孔隙が確認できる所も不連続に認められるが、全体に視認孔隙は少なく 5～10%程度である。泥岩とシルト岩は、シルトサイズ以下の基質が主体である。構成粒子は、鉱物片として極細粒サイズの石英を少量含むほか、稀に角閃石・黒雲母を含む。また、シルトサイズ以下のものがほとんどであるが、珪藻等の微化石を豊富に含む。稀に粒子が濃集して基質に乏しく、粒子間孔隙が確認できる所も不連続に認められるが、全体に視認孔隙はほとんどなく 5%未満である。

表 4.2-9(1)　岩石薄片鑑定結果



| 試料名 | 地層名 | 岩石名 | 構成粒子 鉱物片 | | |

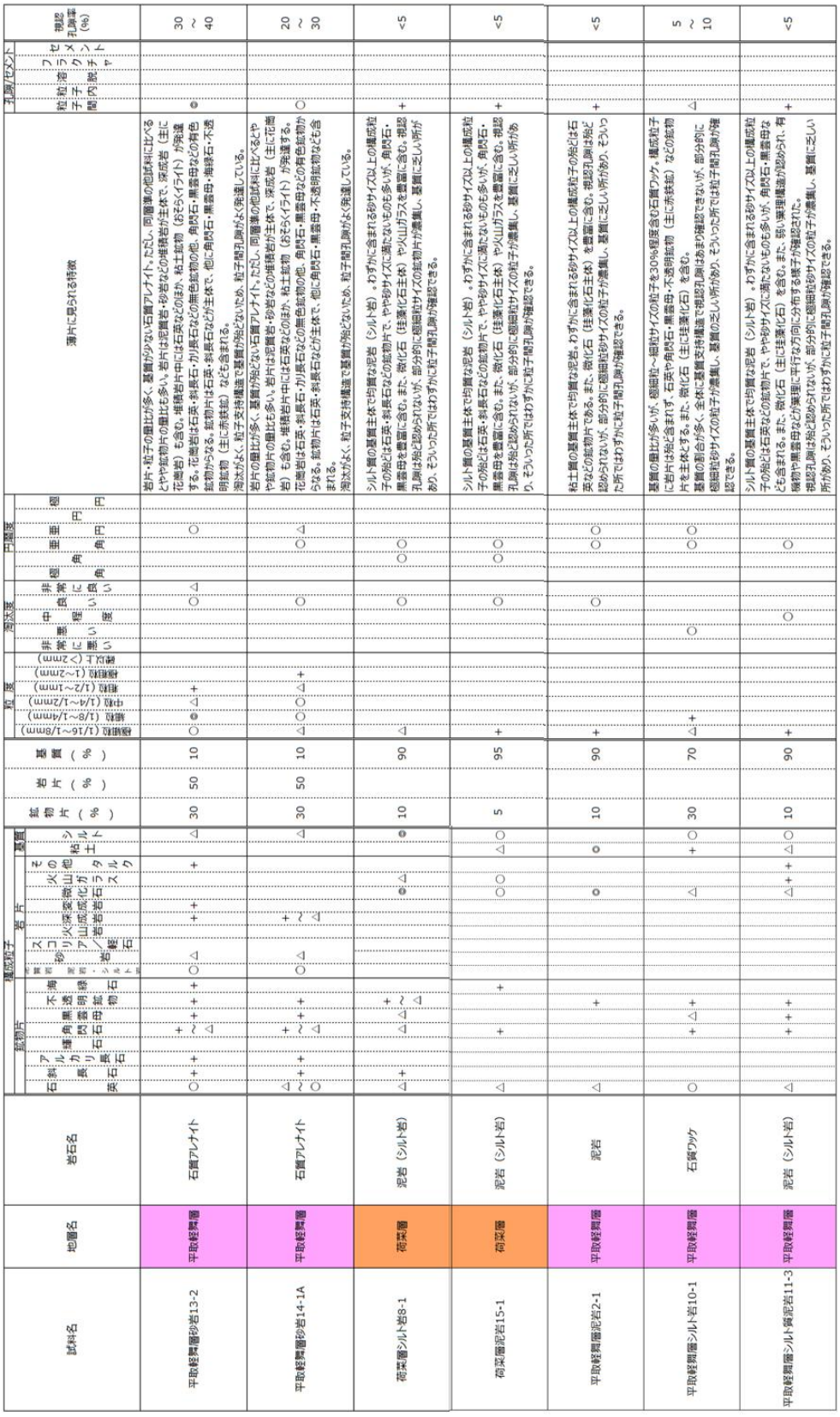
表 4.2-9(2)　岩石薄片鑑定結果



試料名	地層名	岩石名	構成粒子 鉱物片 石英	斜長石	アルカリ長石	角閃石	黒雲母	不透明鉱物	緑色岩・シルト岩	岩片 砂岩・頁岩	凝灰岩	火山岩	深成岩	変質岩	ガラス	その他	基質 粘土	シルト	鉱物片（%）	岩片（%）	基質（%）	円磨度 礫 極円～円	礫 円～亜円	礫 亜角～角	重重 極円～円	重重 亜角～角	中礫 円～亜円	中礫 亜角～角	非常に良い	中礫 悪い～良い	非常に悪い	淘汰度 礫混じり(1/2～1mm)	細粒(1/4～1/2mm)	中粒(1/8～1/4mm)	細粒(1/8～1/16mm)	極細粒(1/16～1/32mm)	孔隙パセント 粒子内溶解孔隙	粒子間孔隙	クセ孔隙率(%)
平取軽舞層礫岩6-3	平取軽舞層	石質アルナイト	+	○	+	+	◎	+	○	+	+	+	+	+	+	+	+	+	10	90	+	+	○	△	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	20～30
平取軽舞層砂岩9-1	平取軽舞層	石質アルナイト	+	～	+	+	◎	+	○	+	+	+	+	+	+	+	+	+	20	80	+	+	○	△	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	30～40
平取軽舞層砂岩9-2	平取軽舞層	石質アルナイト	△	+	+	+	○	+	○	+	+	+	+	+	+	+	+	+	20	80	+	+	○	△	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	30～40
平取軽舞層砂岩9-4A	平取軽舞層	石質アルナイト	△	+	+	+	○	+	○	+	+	+	+	+	+	+	+	+	10	90	+	+	○	△	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	30～40
平取軽舞層砂岩11-1A	平取軽舞層	石質アルナイト	○	～	△	△	△	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	40	60	+	+	○	△	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	20～30
平取軽舞層礫岩11-2	平取軽舞層	含礫石質アルナイト	△	+	～	+	○	+	○	+	+	+	+	+	+	+	+	+	10	90	+	+	○	△	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	20～30
平取軽舞層砂岩11-4A	平取軽舞層	石質アルナイト	○	△	+	△	+	+	△	+	+	+	+	+	+	+	+	+	40	50	10	◎	○	+	○	△	○	△	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	20～30

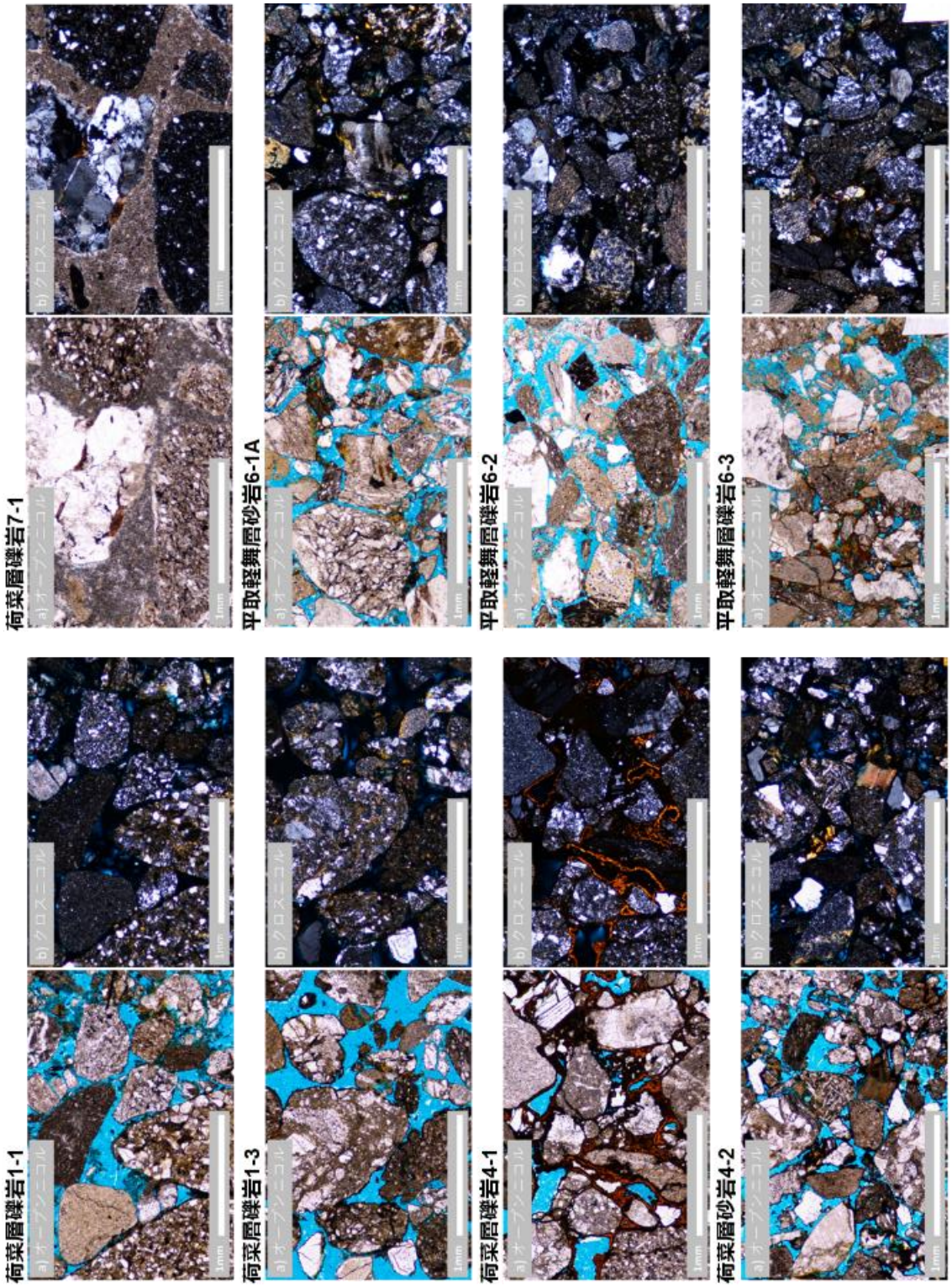
注）◎は非常に多い（30%以上）、○は多い～普通（30%未満 10%以上）、△は普通～少ない（10%未満 5%以上）、＋は少ない（5%未満）を示す。

表 4.2-9(3)　岩石薄片鑑定結果



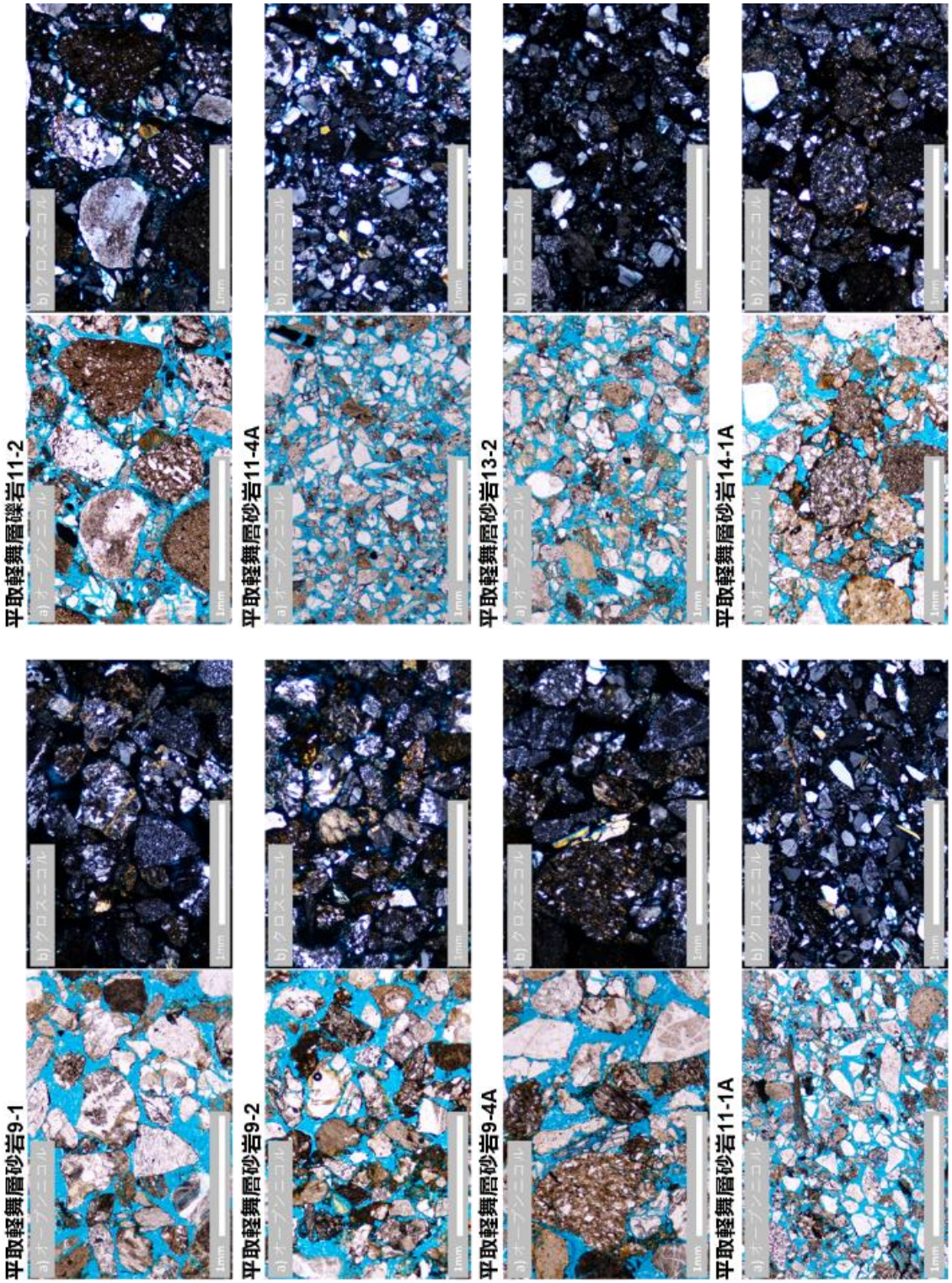
試料名	地層名	岩石名	構成粒子 岩片 石灰質砂質・シルト質	構成粒子 鉱物片	基質	鉱物片（%）	岩片（%）	基質（%）	円度	淘汰度	孔隙/セメント	推定孔隙率（%）
平取経舞層砂岩13-2	平取経舞層	石質アルカイト	○	＋	△	30	50	10	○	○	◎	30～40
平取経舞層砂岩14-1A	平取経舞層	石質アルカイト	△～＋	＋～△	△	30	50	10	△	○	○	20～30
荷菜層シルト岩8-1	荷菜層	泥岩（シルト岩）	△	△～△	◎	10		90	△	○	＋	<5
荷菜層泥岩15-1	荷菜層	泥岩（シルト岩）	△	＋	△○	5		95	＋	○	＋	<5
平取経舞層泥岩2-1	平取経舞層	泥岩	△	＋	◎	10		90	＋	○	＋	<5
平取経舞層シルト岩10-1	平取経舞層	石質ワッケ	○	＋△	△○	30		70	△＋	○	△	5～10
平取経舞層シルト岩泥岩11-3	平取経舞層	泥岩（シルト岩）	△	＋＋	△＋＋	10		90	＋	○	＋	<5

注）◎は非常に多い（30%以上）、○は多い～普通（30%未満 10%以上）、△は普通～少ない（10%未満 5%以上）、＋は少ない（5%未満）を示す。



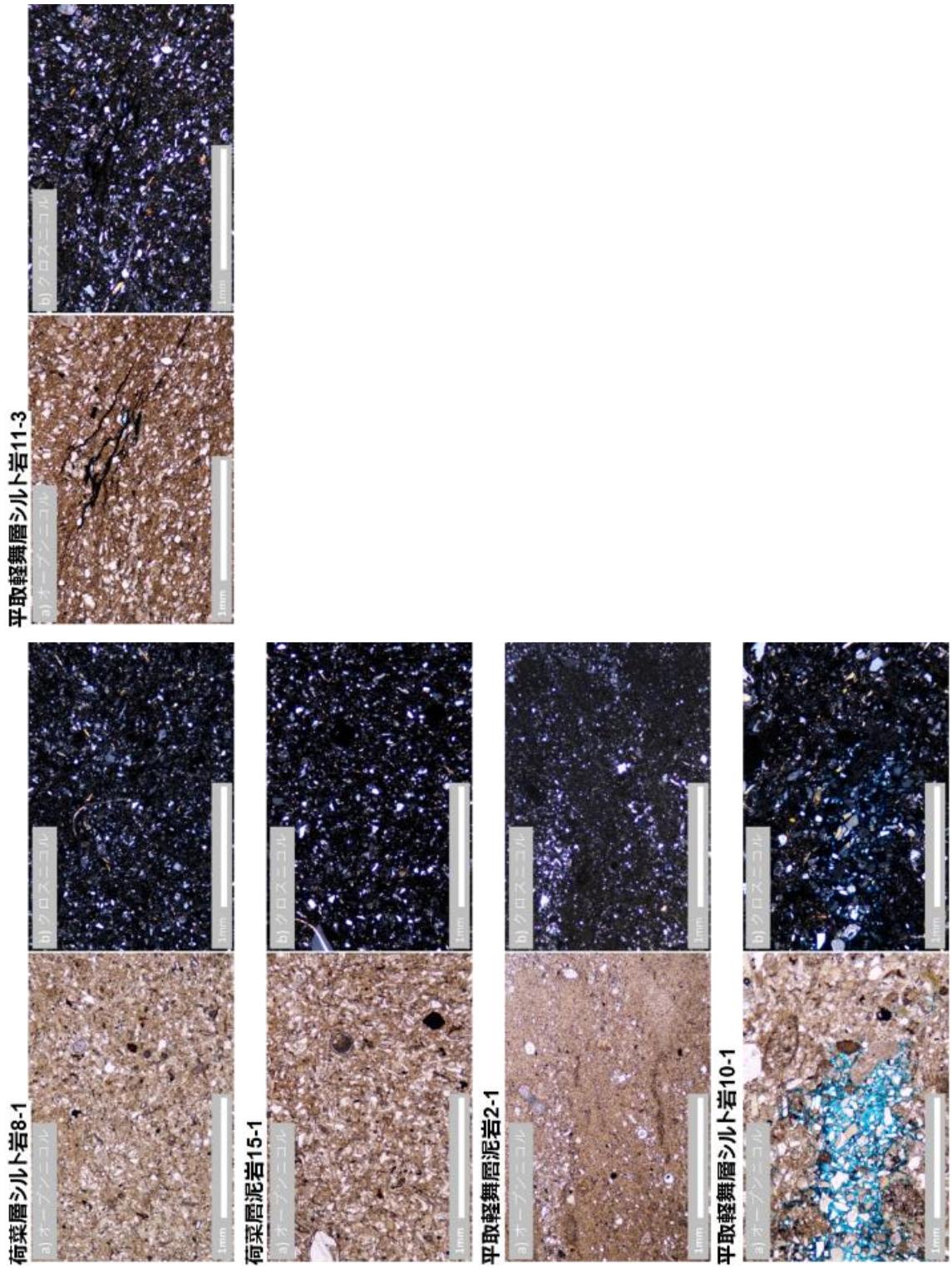
注）各試料の薄片写真の左がオープンニコル、右がクロスニコルを示す。

図 4.2-17(1)　薄片写真



注）各試料の薄片写真の左がオープンニコル、右がクロスニコルを示す。

図 4.2-17(2)　薄片写真



注）各試料の薄片写真の左がオープンニコル、右がクロスニコルを示す。

図 4.2-17(3)　薄片写真

②　X 線鉱物分析

石英外部標準法[3)]により求めた、貯留岩および遮蔽岩能力評価対象の試料の X 線鉱物分析結果を表 4.2-10 に、同定された鉱物の含有量比を図 4.2-18 に示す。半定量値の量比のため合計は 100%ではない。

a.　貯留岩試料

貯留岩能力評価対象の礫岩および砂岩試料について、荷菜層と平取軽舞層で鉱物の出現パターンに大きな差異はなく、イライト、緑泥石、石英、斜長石、普通角閃石、黄鉄鉱から構成される。イライトと緑泥石については、薄片鑑定で砕屑性のものが確認されている。続成鉱物として平取軽舞層でごく一部から Opal-CT や斜プチロル沸石が晶出しており、弱い続成変質を受けていると推測される。その他、タルク、カリ長石も一部で認められた。荷菜層礫岩 4-1 は基質の部分が強く固結しており、酸化鉄の影響と推察される。荷菜層礫岩 7-1 に関しても強く固結しており、ドロマイトが多量に含まれることから続成の影響を受けていることが分かった。

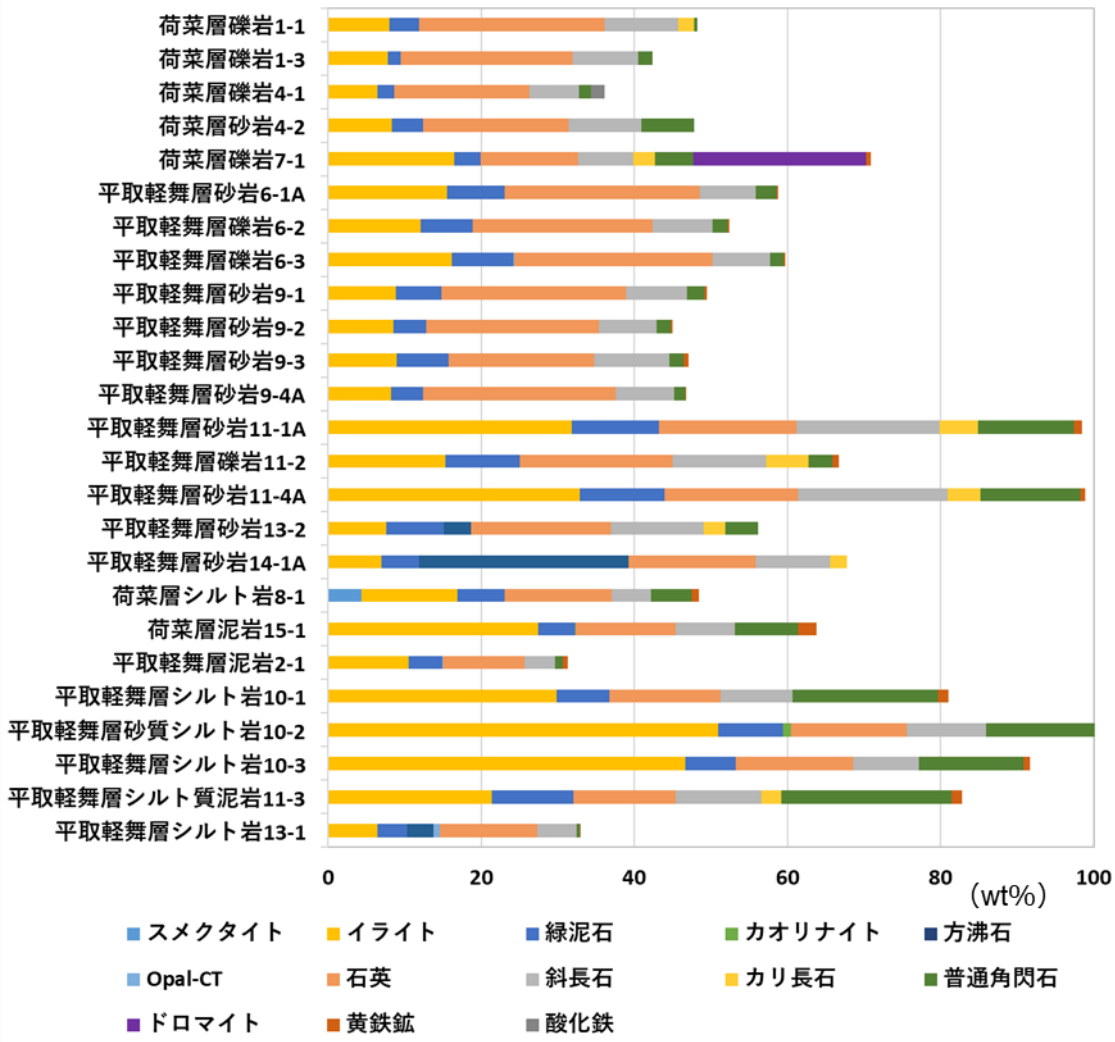
b.　遮蔽岩試料

遮蔽岩能力評価対象のシルト岩および泥岩試料でも、荷菜層と平取軽舞層は大きな差異が認められなかった。イライト、緑泥石、石英、斜長石、普通角閃石、黄鉄鉱からなり、一部試料には、スメクタイト、カオリナイトを含む。シルト岩および泥岩試料でも続成鉱物として平取軽舞層の一部試料から Opal-CT や斜プチロル沸石が認められた。平取軽舞層のシルト岩および泥岩試料の全般にタルクが認められるのが特徴的であった。

表 4.2-10　X 線鉱物分析結果

試料名	定量結果 (wt%)														
	スメクタイト	イライト	緑泥石	カオリナイト	斜プチロル沸石	Opal-CT	石英	斜長石	カリ長石	普通角閃石	方解石	ドロマイト	黄鉄鉱	酸化鉄	
荷菜層礫岩1-1		8.0	3.9				24.2	9.6	2.1	0.4					
荷菜層礫岩1-3		7.8	1.7				22.5	8.5		2.0					
荷菜層礫岩4-1		6.5	2.1				17.7	6.5		1.6				1.7	
荷菜層砂岩4-2		8.3	4.0				19.1	9.5		6.9					
荷菜層礫岩7-1		16.5	3.4				12.8	7.1	2.8	5.0		22.6	0.6		
平取軽舞層砂岩6-1A		15.5	7.6				25.5	7.3		2.7			0.2		
平取軽舞層礫岩6-2		12.1	6.8				23.4	7.8		2.1			0.2		
平取軽舞層礫岩6-3		16.2	8.0			0.5未満	25.9	7.5		1.8			0.2		
平取軽舞層砂岩9-1		8.8	6.0				24.1	8.0		2.3			0.4		
平取軽舞層砂岩9-2		8.6	4.2				22.6	7.6		1.8			0.2		
平取軽舞層砂岩9-3		9.0	6.8				19.1	9.8		1.9			0.6		
平取軽舞層砂岩9-4A		8.2	4.2				25.2	7.6		1.5			0.1		
平取軽舞層砂岩11-1A		31.8	11.4				18.0	18.7	5.0	12.5			1.0		
平取軽舞層礫岩11-2		15.3	9.8				19.9	12.2	5.6	3.1			0.8		
平取軽舞層砂岩11-4A		32.9	11.1				17.4	19.6	4.3	13.0			0.7		
平取軽舞層砂岩13-2		7.6	7.4		3.6		18.3	12.1	2.8	4.2					
平取軽舞層砂岩14-1A		7.0	4.8		27.4		16.6	9.7	2.2	0.0					
荷菜層シルト岩8-1	4.4	12.6	6.2				14.0	5.1		5.3			0.9		
荷菜層泥岩15-1		27.5	4.7	0.5未満			13.1	7.6		8.3			2.3		
平取軽舞層泥岩2-1		10.5	4.4			0.5未満	10.7	4.0		1.1			0.6		
平取軽舞層シルト岩10-1		29.8	6.9				14.5	9.5		18.9			1.4		
平取軽舞層砂質シルト岩10-2		51.0	8.4	1.1			15.1	10.3		18.0			1.9		
平取軽舞層シルト岩10-3		46.6	6.6				15.4	8.5		13.7			0.9		
平取軽舞層シルト質泥岩11-3		21.4	10.6				13.3	11.2	2.6	22.2			1.4		
平取軽舞層シルト岩13-1		6.4	3.9		3.4	0.9	12.7	5.1		0.5			0.1		

注 1）単位は wt%である。
注 2）半定量値の量比のため合計は 100 ではない。



注 1）単位は wt%である。
注 2）半定量値の量比のため合計は 100 ではない。

図 4.2-18　X 線鉱物分析結果から同定された鉱物の含有量比

③　粒度分析

貯留岩能力評価対象の試料の粒度分析結果を表 4.2-11(1)～(3)に示す。粒度パラメータの評価結果を表 4.2-12 に示す。

Folk and Ward（1957）[6)] の式を用いて求めた粒度パラメータの評価には次の基準を用いた。φ値は、McManus（1963）[26)] の式で表される値である。荷菜層礫岩 4-1 および荷菜層礫岩 7-1 の 2 試料は固結度が高かったため篩法で分析するために希塩酸処理により粒子分離を行った。

平均粒径：-6.0　φ＜中礫≦-2.0　φ＜細礫≦-1.0　φ＜極粗粒砂≦0　φ＜粗粒砂≦1.0　φ＜中粒砂≦2.0　φ＜細粒砂≦3.0　φ＜極細粒砂≦4.0　φ

＜粗粒シルト≦5.0 φ＜中粒シルト以下

分級度：非常によい≦0.35＜よい≦0.50＜ややよい≦0.71＜普通≦1.00

＜悪い≦2.00

歪度：-1.0＜著しい負≦-0.3＜負≦-0.1＜ほぼ対称≦+0.1＜正＜+0.3

≦著しい正＜+1.0

尖度：0.67＜扁平≦0.90＜中間的≦1.11＜突出≦1.50

粒度パラメータは、荷菜層の砂岩および礫岩は粗粒砂岩～礫岩で歪度はほぼ対称、尖度はやや突出であった。平取軽舞層の砂岩および礫岩は中粒～粗粒砂岩で歪度は対称～粗粒に偏った正の歪、尖度はやや突出であった。分級度については荷菜層も平取軽舞層も悪い評価となる。基質量は荷菜層では極少、平取軽舞層では少ない。

表 4.2-11(1)　粒度分析結果

荷菜層礫岩 1-1

粒径	重量	重量	累積
φ(μm)	gr	%	%
-5.0(32,000)	17.99	13.47	13.47
-4.5(22,627)	0.00	0.00	13.47
-4.0(16,000)	0.00	0.00	13.47
-3.5(11,314)	0.00	0.00	13.47
-3.0(8,000)	4.28	3.21	16.68
-2.5(5,657)	6.60	4.94	21.62
-2.0(4,000)	8.59	6.43	28.06
-1.5(2,830)	12.45	9.32	37.38
-1.0(2,000)	19.83	14.85	52.23
-0.5(1,410)	21.72	16.27	68.50
0.0(1,000)	11.35	8.50	77.00
0.5(707)	5.17	3.87	80.87
1.0(500)	2.70	2.02	82.89
1.5(354)	2.28	1.71	84.60
2.0(250)	2.77	2.07	86.68
2.5(177)	5.46	4.09	90.77
3.0(125)	4.95	3.71	94.47
3.5(88)	3.17	2.37	96.85
4.0(63)	2.03	1.52	98.37
4.5(44)	0.99	0.74	99.11
5.0(32)	1.10	0.82	99.93
5.5(20)	0.09	0.07	100.00
5.5φ以下(20以下)	0.00	0.00	100.00
分析後の重量	133.52		
分析前の重量	133.16		
loss	-0.36		
error (%)	-0.27		

粒度パラメータ
平均粒径：-1.06 φ(2085μm)
分級度：3.21
歪度：-0.18
尖度：2.59

荷菜層礫岩 1-3

粒径	重量	重量	累積
φ(μm)	gr	%	%
-5.0(32,000)	3.88	3.93	3.93
-4.5(22,627)	0.00	0.00	3.93
-4.0(16,000)	0.00	0.00	3.93
-3.5(11,314)	0.00	0.00	3.93
-3.0(8,000)	1.68	1.70	5.63
-2.5(5,657)	0.00	0.00	5.63
-2.0(4,000)	1.20	1.21	6.84
-1.5(2,830)	3.31	3.35	10.19
-1.0(2,000)	5.80	5.87	16.06
-0.5(1,410)	8.91	9.01	25.07
0.0(1,000)	13.79	13.95	39.02
0.5(707)	21.05	21.30	60.32
1.0(500)	20.61	20.85	81.17
1.5(354)	11.88	12.02	93.19
2.0(250)	3.56	3.60	96.79
2.5(177)	1.49	1.51	98.30
3.0(125)	0.65	0.66	98.96
3.5(88)	0.38	0.38	99.34
4.0(63)	0.29	0.29	99.64
4.5(44)	0.19	0.19	99.83
5.0(32)	0.13	0.13	99.96
5.5(20)	0.04	0.04	100.00
5.5φ以上(20以下)	0.00	0.00	100.00
分析後の重量	98.84		
分析前の重量	98.85		
loss	0.01		
error (%)	0.01		

粒度パラメータ
平均粒径：0.12 φ(919μm)
分級度：1.28
歪度：-0.29
尖度：1.49

荷菜層礫岩 4-1

粒径	重量	重量	累積
φ(μm)	gr	%	%
-5.0(32,000)			
-4.5(22,627)			
-4.0(16,000)			
-3.5(11,314)			
-3.0(8,000)			
-2.5(5,657)			
-2.0(4,000)	3.98	4.12	4.12
-1.5(2,830)	6.94	7.19	11.32
-1.0(2,000)	13.54	14.03	25.35
-0.5(1,410)	13.19	13.67	39.02
0.0(1,000)	9.99	10.35	49.37
0.5(707)	8.42	8.73	58.09
1.0(500)	7.03	7.28	65.38
1.5(354)	7.38	7.65	73.03
2.0(250)	5.65	5.85	78.88
2.5(177)	5.80	6.01	84.89
3.0(125)	4.02	4.17	89.06
3.5(88)	4.14	4.29	93.35
4.0(63)	3.78	3.92	97.26
4.5(44)	1.68	1.74	99.01
5.0(32)	0.94	0.97	99.98
5.5(20)	0.02	0.02	100.00
5.5φ以下(20以下)	0.00	0.00	100.00
分析後の重量	96.50		
分析前の重量	96.26		
loss	-0.24		
error (%)	-0.25		

粒度パラメータ
平均粒径：0.38 φ(770μm)
分級度：1.8
歪度：0.29
尖度：0.86

荷菜層砂岩 4-2

粒径	重量	重量	累積
φ(μm)	gr	%	%
-5.0(32,000)			
-4.5(22,627)			
-4.0(16,000)			
-3.5(11,314)			
-3.0(8,000)			
-2.5(5,657)			
-2.0(4,000)	0.22	0.15	0.15
-1.5(2,830)	0.90	0.61	0.75
-1.0(2,000)	1.77	1.19	1.94
-0.5(1,410)	3.33	2.24	4.18
0.0(1,000)	6.28	4.22	8.40
分析後の重量	12.45	8.37	16.77
分析前の重量	22.34	15.02	31.79
1.5(354)	35.24	23.69	55.48
2.0(250)	26.31	17.69	73.17
2.5(177)	20.23	13.60	86.77
3.0(125)	9.51	6.39	93.16
3.5(88)	4.26	2.86	96.03
4.0(63)	4.13	2.78	98.80
4.5(44)	0.64	0.43	99.23
5.0(32)	1.02	0.69	99.92
5.5(20)	0.12	0.08	100.00
5.5φ以上(20以下)	0.00	0.00	100.00
分析後の重量	148.75		
分析前の重量	148.61		
loss	-0.14		
error (%)	-0.09		

粒度パラメータ
平均粒径：1.41 φ(376μm)
分級度：1.05
歪度：0.04
尖度：1.18

荷菜層礫岩 7-1

粒径	重量	重量	累積
φ(μm)	gr	%	%
-5.0(32,000)	9.58	6.05	6.05
-4.5(22,627)	6.78	4.28	10.33
-4.0(16,000)	0.00	0.00	10.33
-3.5(11,314)	0.00	0.00	10.33
-3.0(8,000)	16.98	10.72	21.05
-2.5(5,657)	14.22	8.98	30.03
-2.0(4,000)	16.41	10.36	40.39
-1.5(2,830)	18.82	11.88	52.27
-1.0(2,000)	18.21	11.50	63.77
-0.5(1,410)	15.00	9.47	73.24
0.0(1,000)	11.53	7.28	80.52
0.5(707)	10.05	6.35	86.86
1.0(500)	7.01	4.43	91.29
1.5(354)	4.88	3.08	94.37
2.0(250)	2.33	1.47	95.84
2.5(177)	1.75	1.10	96.94
3.0(125)	1.38	0.87	97.82
3.5(88)	0.69	0.44	98.25
4.0(63)	2.17	1.37	99.62
4.5(44)	0.50	0.32	99.94
5.0(32)	0.08	0.05	99.99
5.5(20)	0.01	0.01	99.99
5.5φ以下(20以下)	0.01	0.01	100.00
分析後の重量	158.39		
分析前の重量	157.77		
loss	-0.62		
error (%)	-0.39		

粒度パラメータ
平均粒径：-1.68φ(3204μm)
分級度：2.03
歪度：-0.04
尖度：1.16

注）分級度、尖度、歪度は Folk and Ward（1957）[6] を用いて求めた。

表 4.2-11(2)　粒度分析結果

平取軽舞層砂岩 6-1A

粒径	重量	重量	累積
φ(μm)	gr	%	%
-5.0(32,000)			
-4.5(22,627)			
-4.0(16,000)			
-3.5(11,314)			
-3.0(8,000)			
-2.5(5,657)			
-2.0(4,000)	0.75	0.46	0.46
-1.5(2,830)	0.09	0.06	0.52
-1.0(2,000)	0.55	0.34	0.86
-0.5(1,410)	1.35	0.84	1.70
0.0(1,000)	1.79	1.11	2.80
0.5(707)	4.91	3.04	5.84
1.0(500)	14.17	8.77	14.61
1.5(354)	33.39	20.66	35.26
2.0(250)	34.08	21.08	56.34
2.5(177)	32.87	20.33	76.68
3.0(125)	17.54	10.85	87.53
3.5(88)	7.40	4.58	92.11
4.0(63)	6.44	3.98	96.09
4.5(44)	3.41	2.11	98.20
5.0(32)	2.80	1.73	99.93
5.5(20)	0.10	0.06	99.99
5.5φ以上(20以下)	0.01	0.01	100.00
分析後の重量	161.65		
分析前の重量	161.31		
loss	-0.34		
error (%)	-0.21		

粒度パラメータ
平均粒径：1.91 φ(267μm)
分級度：0.98
歪度：0.12
尖度：1.19

平取軽舞層礫岩 6-2

粒径	重量	重量	累積
φ(μm)	gr	%	%
-5.0(32,000)			
-4.5(22,627)			
-4.0(16,000)			
-3.5(11,314)			
-3.0(8,000)			
-2.5(5,657)			
-2.0(4,000)	3.59	2.89	2.89
-1.5(2,830)	4.36	3.51	6.40
-1.0(2,000)	9.96	8.03	14.43
-0.5(1,410)	17.54	14.13	28.56
0.0(1,000)	19.14	15.42	43.99
0.5(707)	18.55	14.95	58.93
1.0(500)	14.62	11.78	70.71
1.5(354)	12.29	9.90	80.62
2.0(250)	7.08	5.71	86.32
2.5(177)	5.46	4.40	90.72
3.0(125)	3.51	2.83	93.55
3.5(88)	2.49	2.01	95.56
4.0(63)	2.93	2.36	97.92
4.5(44)	1.67	1.35	99.26
5.0(32)	0.91	0.73	100.00
5.5(20)	0.00	0.00	100.00
5.5φ以下(20以下)	0.00	0.00	100.00
分析後の重量	124.10		
分析前の重量	123.96		
loss	-0.14		
error (%)	-0.11		

粒度パラメータ
平均粒径：0.35 φ(787μm)
分級度：1.45
歪度：0.21
尖度：1.13

平取軽舞層礫岩 6-3

粒径	重量	重量	累積
φ(μm)	gr	%	%
-5.0(32,000)			
-4.5(22,627)	2.98	4.18	4.18
-4.0(16,000)	0.00	0.00	4.18
-3.5(11,314)	0.00	0.00	4.18
-3.0(8,000)	3.35	4.70	8.87
-2.5(5,657)	5.44	7.62	16.50
-2.0(4,000)	1.90	2.65	18.92
-1.5(2,830)	4.82	6.72	25.64
-1.0(2,000)	4.32	6.03	31.67
-0.5(1,410)	4.87	6.79	38.46
0.0(1,000)	4.22	5.89	44.35
0.5(707)	5.10	7.11	51.46
1.0(500)	6.59	9.19	60.65
1.5(354)	7.54	10.52	71.17
2.0(250)	5.82	8.12	79.28
2.5(177)	4.81	6.71	85.99
3.0(125)	2.62	3.65	89.65
3.5(88)	3.22	4.49	94.14
4.0(63)	2.25	3.14	97.27
4.5(44)	1.08	1.51	98.78
5.0(32)	0.65	0.91	99.69
5.5(20)	0.12	0.17	99.85
5.5φ以下(20以下)	0.00	0.00	99.85
分析後の重量	71.70		
分析前の重量	71.35		
loss	-0.35		
error (%)	-0.49		

粒度パラメータ
平均粒径：0.07 φ(950μm)
分級度：2.41
歪度：-0.19
尖度：0.98

平取軽舞層砂岩 9-1

粒径	重量	重量	累積
φ(μm)	gr	%	%
-5.0(32,000)			
-4.5(22,627)			
-4.0(16,000)			
-3.5(11,314)			
-3.0(8,000)			
-2.5(5,657)			
-2.0(4,000)			
-1.5(2,830)			
-1.0(2,000)			
-0.5(1,410)	0.23	0.35	0.35
0.0(1,000)	1.57	2.38	2.73
0.5(707)	6.69	10.13	12.86
1.0(500)	14.43	21.85	34.71
1.5(354)	19.10	28.92	63.63
2.0(250)	10.94	16.57	80.19
2.5(177)	6.31	9.55	89.75
3.0(125)	2.90	4.39	94.14
3.5(88)	1.56	2.36	96.50
4.0(63)	1.06	1.61	98.11
4.5(44)	0.61	0.92	99.03
5.0(32)	0.44	0.67	99.70
5.5(20)	0.20	0.30	100.00
5.5φ以下(20以下)	0.00	0.00	100.00
分析後の重量	66.04		
分析前の重量	66.09		
loss	0.05		
error (%)	0.08		

粒度パラメータ
平均粒径：1.35 φ(394μm)
分級度：0.87
歪度：0.2
尖度：1.18

平取軽舞層砂岩 9-2

粒径	重量	重量	累積
φ(μm)	gr	%	%
-5.0(32,000)			
-4.5(22,627)			
-4.0(16,000)			
-3.5(11,314)			
-3.0(8,000)			
-2.5(5,657)			
-2.0(4,000)	1.83	3.09	3.09
-1.5(2,830)	1.55	2.62	5.71
-1.0(2,000)	1.36	2.30	8.01
-0.5(1,410)	1.18	1.99	10.01
0.0(1,000)	1.25	2.11	12.12
0.5(707)	2.02	3.41	15.53
1.0(500)	5.15	8.71	24.24
1.5(354)	10.62	17.95	42.19
2.0(250)	10.45	17.66	59.85
2.5(177)	8.50	14.37	74.22
3.0(125)	5.74	9.70	83.92
3.5(88)	4.70	7.94	91.87
4.0(63)	2.86	4.83	96.70
4.5(44)	1.30	2.20	98.90
5.0(32)	0.62	1.05	99.95
5.5(20)	0.03	0.05	100.00
5.5φ以下(20以下)	0.00	0.00	100.00
分析後の重量	59.16		
分析前の重量	59.04		
loss	-0.12		
error (%)	-0.20		

粒度パラメータ
平均粒径：1.75 φ(297μm)
分級度：1.45
歪度：-0.1
尖度：1.47

平取軽舞層砂岩 9-3

粒径	重量	重量	累積
φ(μm)	gr	%	%
-5.0(32,000)			
-4.5(22,627)			
-4.0(16,000)			
-3.5(11,314)			
-3.0(8,000)			
-2.5(5,657)			
-2.0(4,000)			
-1.5(2,830)			
-1.0(2,000)			
-0.5(1,410)			
0.0(1,000)	0.11	0.20	0.20
0.5(707)	0.12	0.21	0.41
1.0(500)	0.14	0.25	0.66
1.5(354)	0.30	0.53	1.19
2.0(250)	3.10	5.50	6.69
2.5(177)	15.34	27.21	33.89
3.0(125)	19.32	34.27	68.16
3.5(88)	11.33	20.10	88.26
4.0(63)	3.65	6.47	94.73
4.5(44)	2.12	3.76	98.49
5.0(32)	0.80	1.42	99.91
5.5(20)	0.05	0.09	100.00
5.5φ以下(20以下)	0.00	0.00	100.00
分析後の重量	56.38		
分析前の重量	55.57		
loss	-0.81		
error (%)	-1.46		

粒度パラメータ
平均粒径：2.77 φ(147μm)
分級度：0.64
歪度：0.13
尖度：1.08

注）分級度、尖度、歪度は Folk and Ward（1957）[6] を用いて求めた。

表 4.2-11(3)　粒度分析結果

平取軽舞層砂岩 9-4A

粒径	重量	重量	累積
φ（μm）	gr	%	%
-5.0(32,000)			
-4.5(22,627)			
-4.0(16,000)			
-3.5(11,314)			
-3.0(8,000)			
-2.5(5,657)			
-2.0(4,000)			
-1.5(2,830)			
-1.0(2,000)			
-0.5(1,410)	0.32	0.36	0.36
0.0(1,000)	1.69	1.93	2.29
0.5(707)	8.20	9.35	11.64
1.0(500)	22.96	26.17	37.80
1.5(354)	27.27	31.08	68.89
2.0(250)	11.57	13.19	82.07
2.5(177)	6.18	7.04	89.12
3.0(125)	3.20	3.65	92.76
3.5(88)	2.36	2.69	95.45
4.0(63)	2.67	3.04	98.50
4.5(44)	1.09	1.24	99.74
5.0(32)	0.23	0.26	100.00
5.5(20)	0.00	0.00	100.00
5.5φ以上(20以下)	0.00	0.00	100.00
total	87.74		
分析後の重量	87.65		
分析前の重量	-0.09		
error (%)	-0.10		

粒度パラメータ
平均粒径：1.31 φ（405μm）
分級度：0.88
歪度：0.28
尖度：1.37

平取軽舞層砂岩 11-1A

粒径	重量	重量	累積
φ（μm）	gr	%	%
-5.0(32,000)			
-4.5(22,627)			
-4.0(16,000)			
-3.5(11,314)			
-3.0(8,000)			
-2.5(5,657)			
-2.0(4,000)			
-1.5(2,830)			
-1.0(2,000)			
-0.5(1,410)			
0.0(1,000)	0.21	0.38	0.38
0.5(707)	0.18	0.32	0.70
1.0(500)	0.22	0.40	1.10
1.5(354)	0.54	0.97	2.07
2.0(250)	0.89	1.60	3.67
2.5(177)	3.04	5.47	9.14
3.0(125)	17.55	31.56	40.69
3.5(88)	17.49	31.45	72.15
4.0(63)	6.75	12.14	84.28
4.5(44)	4.05	7.28	91.57
5.0(32)	4.26	7.66	99.23
5.5(20)	0.42	0.76	99.98
5.5φ以上(20以下)	0.01	0.02	100.00
total	55.61		
分析後の重量	56.94		
分析前の重量	1.33		
error (%)	2.34		

粒度パラメータ
平均粒径：3.25 φ（105μm）
分級度：0.74
歪度：0.21
尖度：1.23

平取軽舞層礫岩 11-2

粒径	重量	重量	累積
φ（μm）	gr	%	%
-5.0(32,000)			
-4.5(22,627)			
-4.0(16,000)			
-3.5(11,314)			
-3.0(8,000)			
-2.5(5,657)			
-2.0(4,000)	1.75	2.27	2.27
-1.5(2,830)	2.94	3.82	6.09
-1.0(2,000)	4.45	5.78	11.87
-0.5(1,410)	6.56	8.52	20.40
0.0(1,000)	6.14	7.98	28.37
0.5(707)	8.03	10.43	38.81
1.0(500)	8.75	11.37	50.18
1.5(354)	7.70	10.00	60.18
2.0(250)	4.98	6.47	66.65
2.5(177)	4.97	6.46	73.11
3.0(125)	8.38	10.89	83.99
3.5(88)	6.36	8.26	92.26
4.0(63)	3.57	4.64	96.89
4.5(44)	1.87	2.43	99.32
5.0(32)	0.49	0.64	99.96
5.5(20)	0.03	0.04	100.00
5.5φ以下(20以下)	0.00	0.00	100.00
total	76.97		
分析後の重量	76.88		
分析前の重量	-0.09		
error (%)	-0.12		

粒度パラメータ
平均粒径：1.08 φ（474μm）
分級度：1.76
歪度：0.05
尖度：0.8

平取軽舞層砂岩 11-4A

粒径	重量	重量	累積
φ（μm）	gr	%	%
-5.0(32,000)			
-4.5(22,627)			
-4.0(16,000)			
-3.5(11,314)			
-3.0(8,000)			
-2.5(5,657)			
-2.0(4,000)			
-1.5(2,830)			
-1.0(2,000)			
-0.5(1,410)	0.30	0.34	0.34
0.0(1,000)	0.30	0.34	0.68
0.5(707)	0.34	0.38	1.06
1.0(500)	0.81	0.92	1.98
1.5(354)	1.96	2.22	4.20
2.0(250)	2.65	3.00	7.20
2.5(177)	7.46	8.45	15.65
3.0(125)	26.02	29.46	45.11
3.5(88)	25.35	28.70	73.81
4.0(63)	11.06	12.52	86.33
4.5(44)	5.04	5.71	92.04
5.0(32)	5.74	6.50	98.54
5.5(20)	1.23	1.39	99.93
5.5φ以上(20以下)	0.06	0.07	100.00
分析後の重量	88.32		
分析前の重量	88.42		
loss	0.10		
error (%)	0.11		

粒度パラメータ
平均粒径：3.17 φ（111μm）
分級度：0.82
歪度：0.12
尖度：1.43

平取軽舞層砂岩 13-2

粒径	重量	重量	累積
φ（μm）	gr	%	%
-5.0(32,000)			
-4.5(22,627)			
-4.0(16,000)			
-3.5(11,314)			
-3.0(8,000)			
-2.5(5,657)			
-2.0(4,000)			
-1.5(2,830)			
-1.0(2,000)			
-0.5(1,410)			
0.0(1,000)	0.25	0.21	0.21
0.5(707)	0.31	0.27	0.48
1.0(500)	0.74	0.63	1.11
1.5(354)	3.20	2.74	3.85
2.0(250)	11.38	9.74	13.59
2.5(177)	36.38	31.13	44.72
3.0(125)	30.33	25.95	70.67
3.5(88)	18.58	15.90	86.57
4.0(63)	9.85	8.43	95.00
4.5(44)	4.03	3.45	98.45
5.0(32)	1.68	1.44	99.89
5.5(20)	0.13	0.11	100.00
5.5φ以下(20以下)	0.00	0.00	100.00
分析後の重量	116.86		
分析前の重量	117.27		
loss	0.41		
error (%)	0.35		

粒度パラメータ
平均粒径：2.69 φ（155μm）
分級度：0.71
歪度：0.16
尖度：1.05

平取軽舞層砂岩 14-1A

粒径	重量	重量	累積
φ（μm）	gr	%	%
-5.0(32,000)			
-4.5(22,627)			
-4.0(16,000)			
-3.5(11,314)			
-3.0(8,000)			
-2.5(5,657)			
-2.0(4,000)			
-1.5(2,830)			
-1.0(2,000)	0.14	0.15	0.15
-0.5(1,410)	0.36	0.37	0.52
0.0(1,000)	0.89	0.92	1.44
0.5(707)	3.60	3.74	5.18
1.0(500)	12.97	13.46	18.64
1.5(354)	21.85	22.68	41.31
2.0(250)	18.51	19.21	60.52
2.5(177)	14.35	14.89	75.42
3.0(125)	7.86	8.16	83.57
3.5(88)	7.46	7.74	91.31
4.0(63)	3.69	3.83	95.14
4.5(44)	2.43	2.52	97.67
5.0(32)	1.86	1.93	99.60
5.5(20)	0.39	0.40	100.00
5.5φ以上(20以下)	0.00	0.00	100.00
分析後の重量	96.36		
分析前の重量	96.41		
loss	0.05		
error (%)	0.05		

粒度パラメータ
平均粒径：1.89 φ（271μm）
分級度：1.06
歪度：0.26
尖度：1.07

注）分級度、尖度、歪度は Folk and Ward（1957）[6] を用いて求めた。

表 4.2-12　粒度パラメータの評価結果

試　料	平均粒径 (μm)	分級度	尖　度	歪　度
荷菜層 (砂岩および礫岩)	粗粒砂岩～礫岩 376 ～ 2,872 (平均1,375)	悪　い 1.05 ～ 2.38 (平均1.68)	やや突出 0.86 ～ 1.63 (平均1.26)	ほぼ対称 -0.29 ～ +0.29 (平均 0.02)
平取軽舞層 (砂岩および礫岩)	中～粗粒砂岩 105 ～ 950 (平均364)	悪　い 0.64 ～ 2.41 (平均1.15)	やや突出 0.80 ～ 1.47 (平均1.16)	対称～正の歪 -0.19 ～ +0.28 (平均0.12)

注）分級度、尖度、歪度は Folk and Ward（1957）[6] を用いて求めた。

④　孔径分布測定

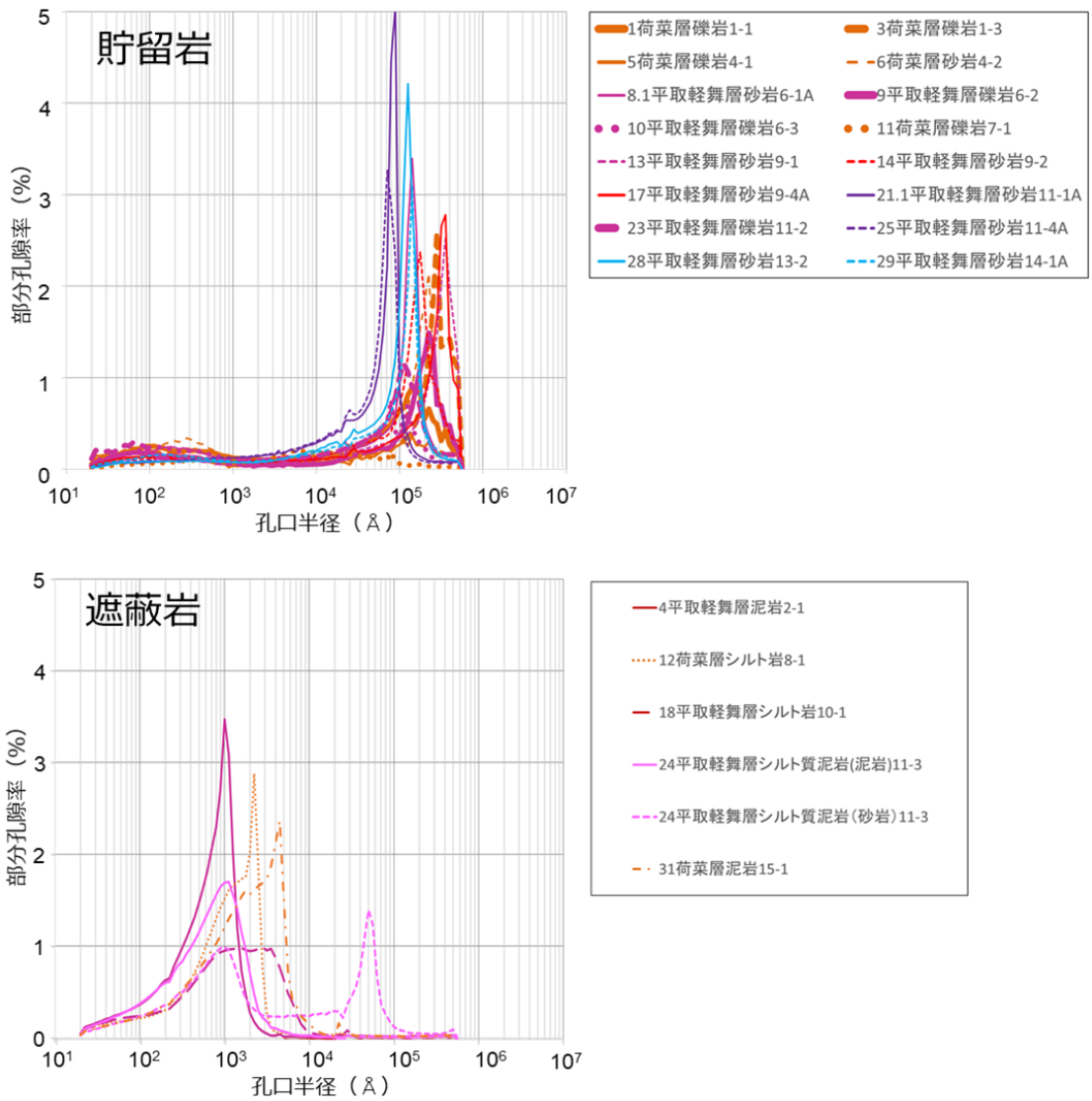
貯留岩および遮蔽岩能力評価対象の 16 試料について孔径分布測定を実施した。このうち遮蔽岩能力評価対象の平取軽舞層シルト質泥岩 11-3 試料の一部には砂岩部が混じっていたため、平取軽舞層シルト質泥岩 11-3（泥岩部）と平取軽舞層シルト質泥岩 11-3（砂岩部）に細分して分析を行った。

全試料の坑径分布測定結果のうち、試料本来の孔隙でないと推定される試料表面の凹凸等の影響を取り除いた測定結果を表 4.2-13 に、同様に試料本来の孔隙でない凹凸等の影響を取り除いた孔径分布曲線を図 4.2-19 に示す。表 4.2-13 には Winland の式[27] を用いて計算した計算浸透率も示す。貯留岩分析の浸透率と Winland の式[27] を用いて計算した計算浸透率は相関を示すことを確認し、Winland の式[27] を用いた。

表 4.2-13　測定結果

	試料名	測定試料重量 (g)	孔隙率 (%)	バルク密度 (g/cm³)	粒子密度 (g/cm³)	中央孔口半径 (Å)	総比表面積 (m²/g)	総水銀圧入量 (mm³/g)	計算浸透率 (mD)	S_{Hg} (@$_{Hg}$Pc=10 MPa)	採用測定圧力範囲 最小～最大値 (MPa)
砕屑岩試料水銀圧入試験	荷菜層礫岩1-1	0.833	22.1	1.90	2.44	48,643.4	6.73	116.0	324.43	50.74	0.0133～350.0
	荷菜層礫岩1-3	0.568	24.0	1.79	2.35	225,896.8	6.52	134.5	1,872.67	35.86	0.0133～350.0
	荷菜層礫岩4-1	1.187	12.0	2.09	2.37	9,609.2	5.83	57.5	57.99	26.23	0.0133～350.0
	荷菜層砂岩4-2	0.843	25.0	1.89	2.51	116,828.5	7.30	132.5	947.37	18.47	0.0133～350.0
	荷菜層礫岩7-1	2.685	8.2	2.49	2.72	6,931.4	1.32	33.0	2.48	27.73	0.0133～350.0
	平取輕舞層砂岩6-1A	1.700	25.6	1.92	2.57	114,365.6	4.13	133.8	599.15	7.37	0.0133～350.0
	平取輕舞層礫岩6-2	1.092	19.2	2.06	2.55	142,990.1	4.88	93.0	736.69	14.48	0.0133～350.0
	平取輕舞層礫岩6-3	1.208	17.5	2.07	2.51	18,584.5	5.88	84.3	75.76	25.59	0.0133～350.0
	平取輕舞層砂岩9-1	0.828	25.1	1.89	2.53	237,293.9	3.64	132.6	2,462.31	23.21	0.0133～350.0
	平取輕舞層砂岩9-2	0.755	26.8	1.65	2.25	139,014.7	4.78	162.7	956.86	51.56	0.0133～350.0
	平取輕舞層砂岩9-4A	1.490	25.3	1.94	2.60	224,752.7	3.91	130.2	2,299.03	32.43	0.0133～350.0
	平取輕舞層砂岩11-1A	1.131	30.9	1.77	2.56	67,308.2	2.74	175.1	328.53	31.60	0.0133～350.0
	平取輕舞層礫岩11-2	1.179	21.4	1.84	2.34	52,291.1	8.72	116.4	266.06	23.13	0.0133～350.0
	平取輕舞層砂岩11-4A	1.213	29.7	1.79	2.55	55,694.7	2.94	165.9	240.85	12.97	0.0133～350.0
	平取輕舞層砂岩13-2	1.144	30.3	1.76	2.52	110,533.8	2.65	172.4	670.18	17.96	0.0133～350.0
	平取輕舞層砂岩14-1A	1.732	24.4	1.91	2.53	89,440.6	3.89	127.9	495.26	21.12	0.0133～350.0
堆積岩試料水銀圧入試験	荷菜層シルト岩8-1	1.012	33.0	1.66	2.48	1,204.7	10.49	198.8	0.47	7.79	0.0133～350.0
	荷菜層泥岩15-1	0.866	40.8	1.32	2.23	1,833.8	12.47	309.1	1.55	8.78	0.0133～350.0
	平取輕舞層泥岩2-1	0.773	37.5	1.39	2.21	734.1	18.55	270.5	0.22	35.05	0.0133～350.0
	平取輕舞層シルト岩10-1	1.639	28.4	1.83	2.56	1,262.0	9.27	155.0	0.54	12.33	0.0133～350.0
	平取輕舞層シルト質泥岩11-3（泥岩部）	1.260	32.0	1.63	2.40	715.4	14.16	196.0	0.19	32.16	0.0133～350.0
	平取輕舞層シルト質泥岩11-3（砂岩部）	1.073	31.0	1.77	2.56	1,468.5	8.28	175.8	6.89	12.09	0.0133～350.0

注 1）試料本来の孔隙でないと推定される試料表面の凹凸等の影響を取り除いた値を示す。
注 2）計算浸透率は Winland の式[27)] を用いて算定した。



注 1）試料本来の孔隙でないと推定される試料表面の凹凸等の影響を取り除いた値を示す。
注 2）上図は貯留岩能力評価対象の試料、下図は遮蔽岩能力評価対象の試料の結果を示す。

図 4.2-19　孔径分布曲線

⑤　熱伝導率測定

貯留岩能力評価対象の砂岩および礫岩の 17 試料について熱伝導率測定を実施した。荷菜層および平取軽舞層の熱伝導率測定結果を表 4.2-14 と図 4.2-20 に示す。

荷菜層礫岩の熱伝導率は 0.314～2.491 W/mK、平取軽舞層砂岩の熱伝導率は 0.259～0.725 W/mK、平取軽舞層礫岩の熱伝導率は 0.312～0.957 W/mK であった。

荷菜層礫岩について、荷菜層礫岩 4-1 および荷菜層礫岩 7-1 の 2 試料は固結度が高く、熱伝導率測定の結果が大きく測定値のばらつきも大きかった。②X 線鉱物分析の結果から、荷菜層礫岩 7-1 は他の試料には認められていない炭酸塩鉱物であるドロマイトが含まれ、炭

酸塩鉱物によるセメントにより固結度が高い。荷菜層礫岩 4-1 も鉄酸化物によるセメントにより固結度が高い。また，これらの試料には数 cm 程度の比較的大きな礫が含まれ、セメントによる固結度の高さと礫によって熱伝導率の測定値が高くなったと考えられる。残りの荷菜層砂岩と礫岩の 3 試料については成形が困難なほど固結度が低く軟質な岩質であった。

平取軽舞層砂岩および礫岩の熱伝導率はばらつく試料はあるが、ほぼ 0.25～0.75 W/mK の間に分布する。平取軽舞層礫岩 6-3 のみが 0.95 W/mK を超える値を示し測定値のばらつきも大きい。この試料は荷菜層の熱伝導率の大きい礫岩と同様に数 cm 程度の比較的大きな礫を含み、他の試料に比べやや緻密な岩質である。

特異な値を示す荷菜層礫岩 4-1、荷菜層礫岩 7-1、平取軽舞層礫岩 6-3 の礫岩を除けば荷菜層と平取軽舞層の熱伝導率にそれほど大きな差は認められない。

表 4.2-14　荷菜層および平取軽舞層の熱伝導率測定結果

試料名	平均値	最大値	最小値	標準偏差
荷菜層礫岩1-1	0.314	0.335	0.287	0.016
荷菜層礫岩1-3	0.452	0.472	0.428	0.015
荷菜層礫岩4-1	2.491	2.906	2.095	0.265
荷菜層礫岩4-2	0.726	0.815	0.675	0.042
荷菜層礫岩7-1	2.314	2.506	2.129	0.128
平取軽舞層砂岩6-1A	0.259	0.309	0.215	0.033
平取軽舞層礫岩6-2	0.312	0.342	0.287	0.015
平取軽舞層礫岩6-3	0.957	1.371	0.694	0.226
平取軽舞層砂岩9-1	0.571	0.610	0.530	0.028
平取軽舞層砂岩9-2	0.357	0.403	0.313	0.032
平取軽舞層砂岩9-3	0.368	0.393	0.352	0.013
平取軽舞層砂岩9-4A	0.467	0.481	0.448	0.009
平取軽舞層砂岩11-1A	0.536	0.573	0.504	0.021
平取軽舞層礫岩11-2	0.541	0.607	0.502	0.035
平取軽舞層砂岩11-4A	0.599	0.625	0.576	0.015
平取軽舞層砂岩13-2	0.589	0.598	0.579	0.006
平取軽舞層砂岩14-1A	0.725	0.820	0.682	0.035

注 1）単位は W/mK である。
注 2）試料温度は 18～24 度で測定した。

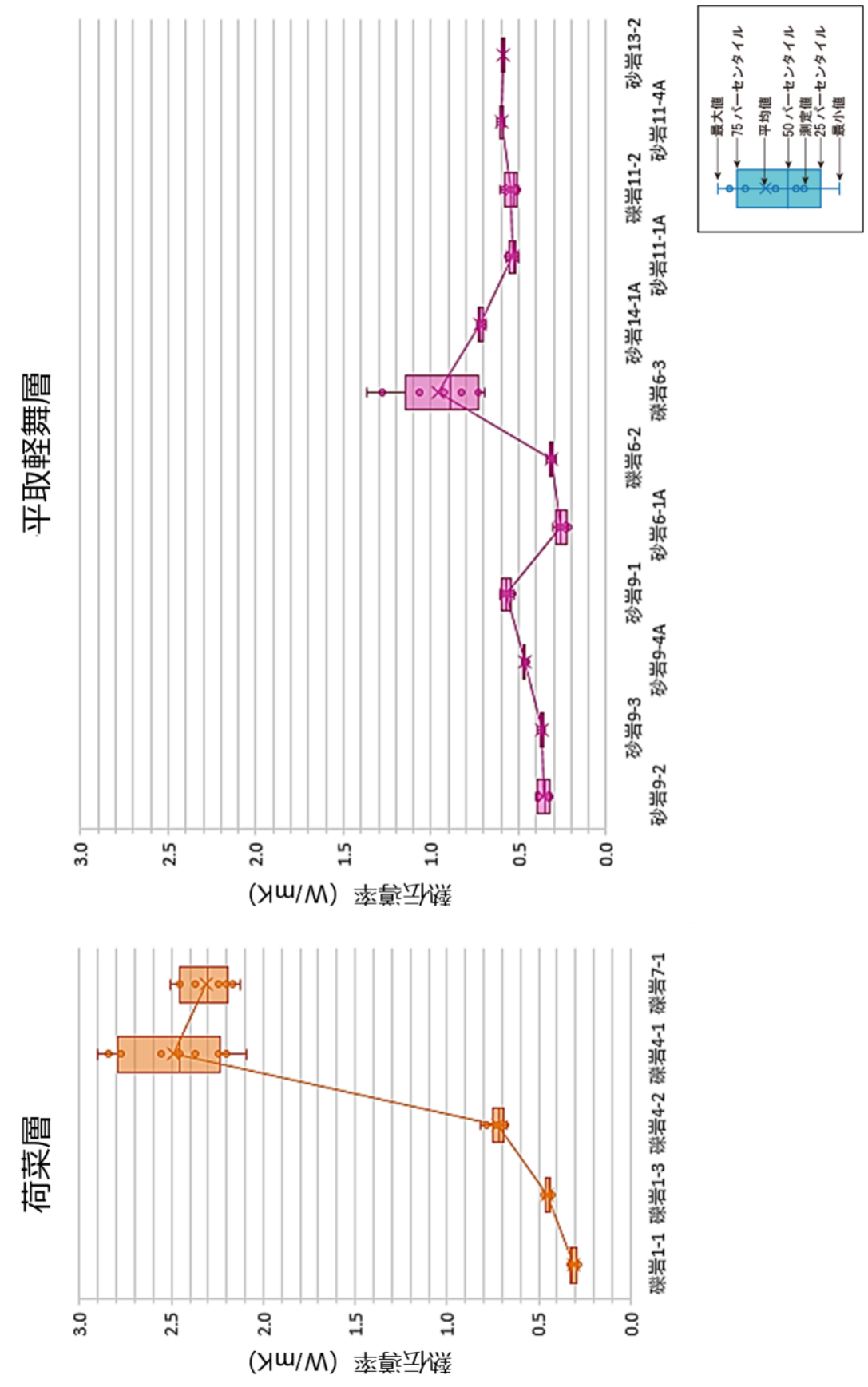


図 4.2-20　荷菜層および平取軽舞層の熱伝導率測定結果

(2)　貯留岩分析

貯留岩能力評価の対象として荷菜層および平取軽舞層の砂岩および礫岩に貯留岩分析を実施した。貯留岩分析を実施した試料を表 4.2-8 に示す。プラグコア成形ができず崩壊した試料が多くあった。プラグコアを成形できた荷菜層礫岩と平取軽舞層砂岩の 13 試料に対して、貯留岩分析を実施した。

①　孔隙率、粒子密度、空気浸透率測定（大気圧下）

荷菜層礫岩、平取軽舞層砂岩から成形した 13 試料について測定を実施した。測定結果を表 4.2-15 に示す。

表 4.2-15　貯留岩の孔隙率、粒子密度、空気浸透率測定結果（大気圧下、封圧下）

	試料名	粒子密度	大気圧下孔隙率	封圧2.76 MPa空気浸透率	封圧下					
					孔隙率（%）			空気浸透率（mD）		
		[g/cm^3]	[%]	[mD]	7MPa	17MPa	27MPa	7MPa	17MPa	27MPa
貯留岩能力評価対象試料	荷菜層礫岩4-1	2.731	16.04	55.90	14.86	14.47	14.25	49.50	46.30	44.00
	荷菜層礫岩7-1	2.735	2.88	2.050	2.770	2.560	2.460	0.690	0.250	0.110
	平取軽舞層砂岩6-1A	2.705	30.80	1,500	27.95	27.09	26.48	1,690	1,550	1,430
	平取軽舞層砂岩6-1B	2.718	31.57	1,860	27.87	27.08	26.46	1,970	1,810	1,700
	平取軽舞層砂岩9-4A	2.699	32.66	3,240	コア形状が測定装置仕様に適さないため測定不可					
	平取軽舞層砂岩9-4B	2.646	33.45	4,650	コア形状が測定装置仕様に適さないため測定不可					
	平取軽舞層砂岩11-1A	2.693	32.14	369.5	28.95	28.21	27.70	341.0	303.0	272.0
	平取軽舞層砂岩11-1B	2.687	33.36	359.7	29.31	28.44	27.90	322.0	281.0	256.0
	平取軽舞層砂岩11-4A	2.687	33.08	416.8	29.83	29.16	28.53	381.0	336.0	306.0
	平取軽舞層砂岩11-4B	2.689	33.45	341.7	29.49	28.73	28.19	317.0	282.0	255.0
	平取軽舞層砂岩13-2	2.653	32.69	1,290	29.96	29.37	28.70	1,400	1,220	1,100
	平取軽舞層砂岩14-1A	2.624	28.35	526.9	25.21	24.44	23.90	459.0	421.0	390.0
	平取軽舞層砂岩14-1B	2.636	26.75	467.0	25.08	24.38	23.90	451.0	417.0	390.0

②　孔隙率、空気浸透率測定（封圧下）

荷菜層礫岩、平取軽舞層砂岩から成形した 13 試料のうち 11 試料について 7 MPa、17 MPa、27 MPa の封圧下で測定を実施した。平取軽舞層砂岩 9-4A および平取軽舞層砂岩 9-4B についてはコア形状が測定装置仕様に適さず、測定不能であった。測定結果を表 4.2-15、図 4.2-21、図 4.2-22 に示す。

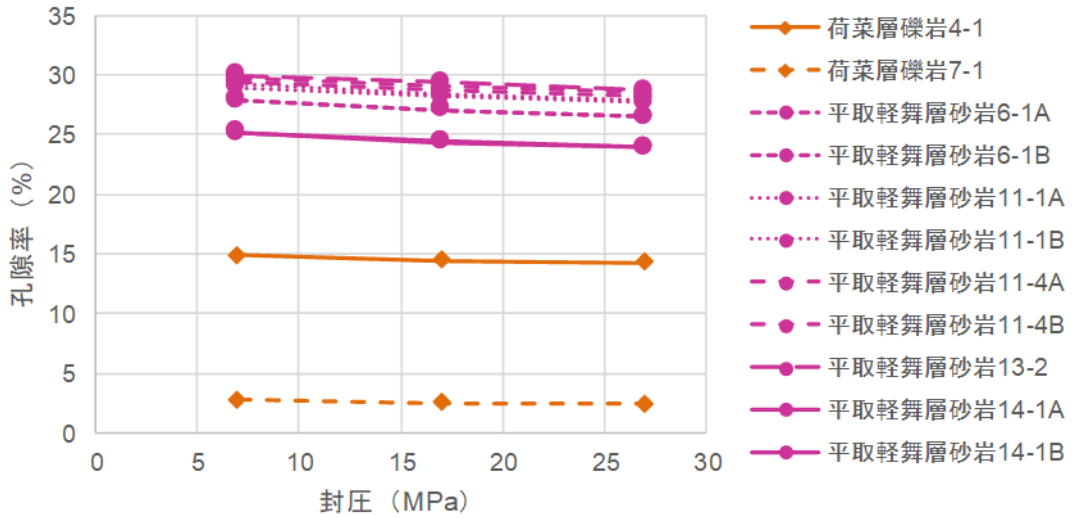


図 4.2-21　貯留岩の孔隙率（封圧下）

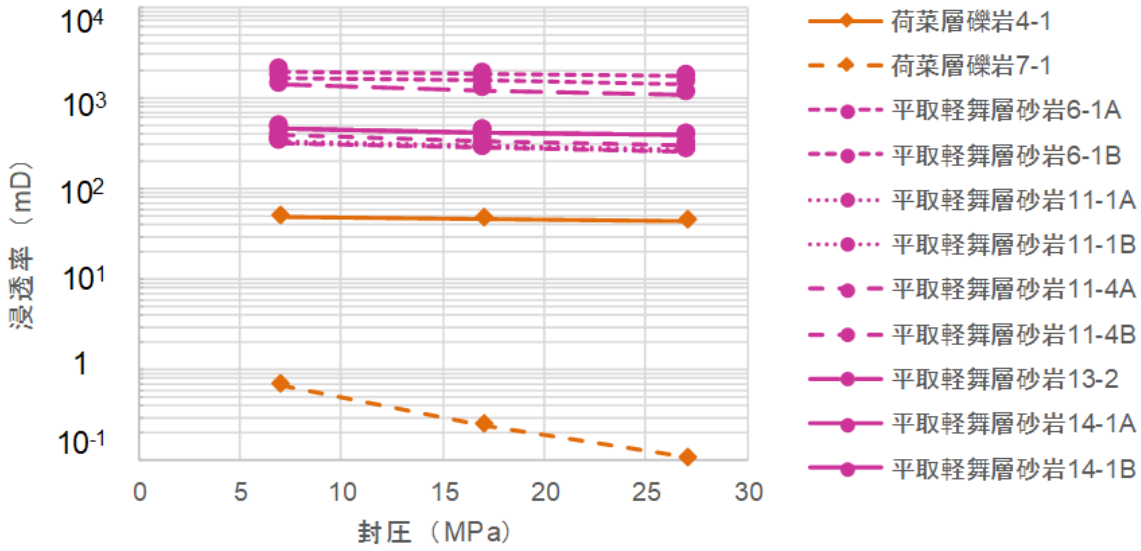


図 4.2-22　貯留岩の浸透率（封圧下）

③　水浸透率測定

平取軽舞層砂岩 11-1B、平取軽舞層砂岩 13-2 について水浸透率測定を実施した。水浸透率測定結果を表 4.2-16 に示す。相対浸透率測定前に測定した荷菜層礫岩 4-1、平取軽舞層砂岩 11-4B の水浸透率結果もあわせて示す。

表 4.2-16　貯留岩の水浸透率測定結果

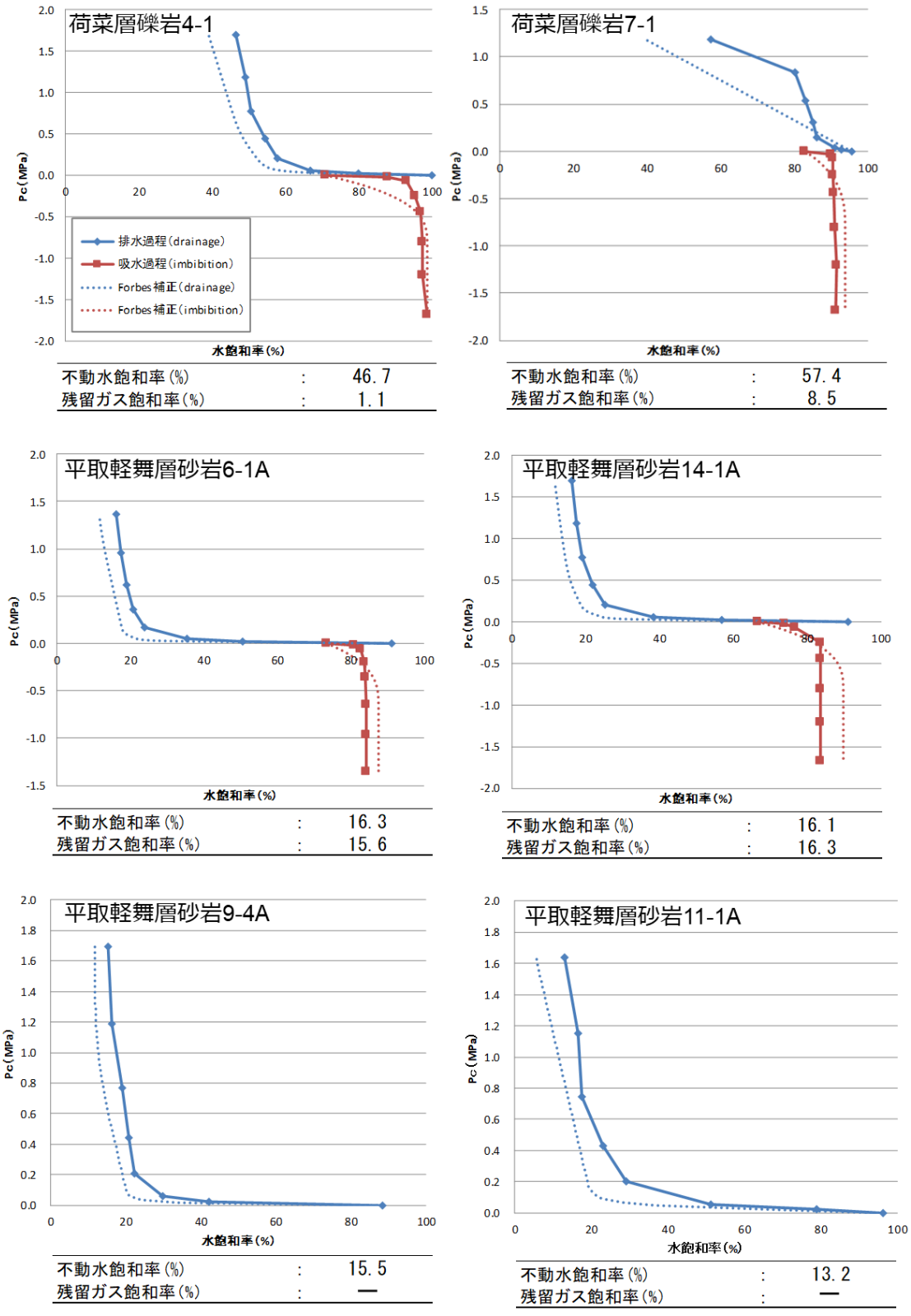
試料名	封圧 (MPa)	上流圧 (MPa)	差圧 (MPa)	水浸透率 (mD)
荷菜層礫岩4-1	14	10	0.1	11.0
平取軽舞層砂岩13-2				20.1
平取軽舞層砂岩11-1B				17.6
平取軽舞層砂岩11-4B				78.0

④　毛細管圧力測定

荷菜層礫岩 2 試料および平取軽舞層砂岩 6 試料の合計 8 試料について毛細管圧力測定を実施した。毛細管圧力測定結果を図 4.2-23(1)～(2)に示す。

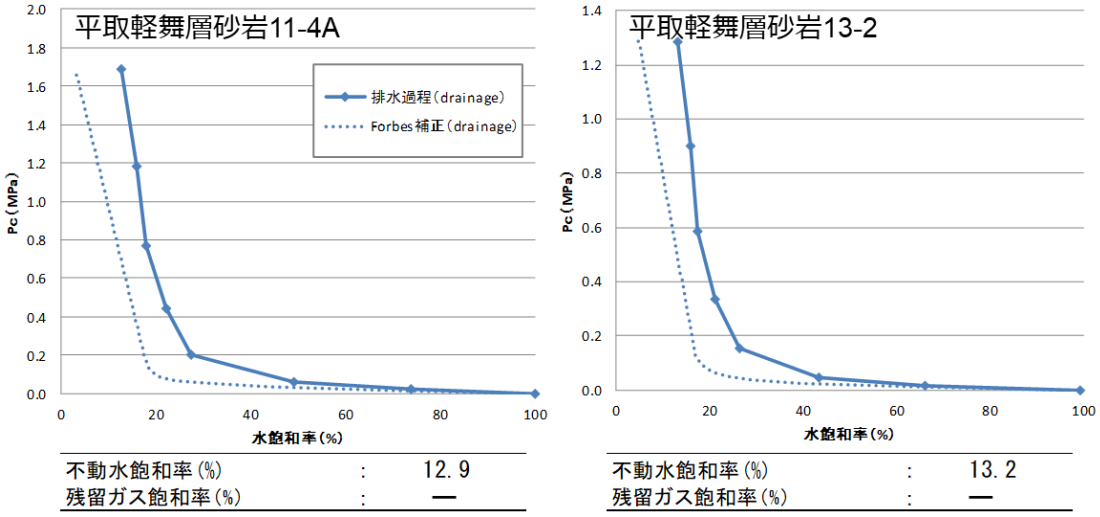
平取軽舞層砂岩について平取軽舞層砂岩 6-1A および平取軽舞層砂岩 14-1A は吸水過程まで測定できた。残りの平取軽舞層砂岩 4 試料は排出過程での測定終了後にコアが崩壊し吸水過程は測定できなかった。

平取軽舞層砂岩 6 試料の毛細管圧力曲線は類似しており、試料による顕著な差異はみられなかった。荷菜層礫岩 7-1 はコアの不均質性の影響を大きく受けている。荷菜層礫岩 4-1 は比較的均質であり荷菜層礫岩の岩石特性を表していると考えられる。荷菜層礫岩は平取軽舞層と比較し不動水飽和率が高く、毛細管圧力は水飽和率に対しより敏感と考えられる。



注）破線の毛細管圧力曲線は Forbes 補正[12] 後の値を示す。

図 4.2-23(1)　貯留岩の毛細管圧力測定結果



注）破線の毛細管圧力曲線は Forbes 補正[12)] 後の値を示す。

図 4.2-23(2)　貯留岩の毛細管圧力測定結果

⑤　相対浸透率測定

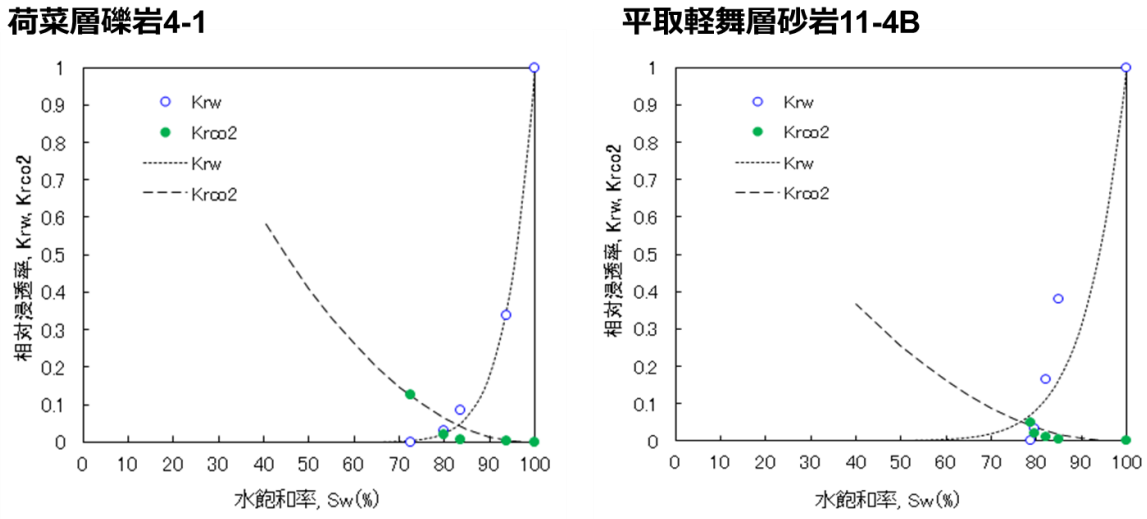
荷菜層礫岩 4-1、平取軽舞層砂岩 11-4B について相対浸透率測定を実施した。表 4.2-17 に相対浸透率測定結果のまとめを示す。図 4.2-24 に相対浸透率測定結果と相対浸透率曲線を示す。相対浸透率曲線は相対浸透率の測定結果を基に Brooks and Corey の式[28)] を用いて作成した。

水浸透率は荷菜層礫岩 4-1 が 11 mD、平取軽舞層砂岩 11-4B が 78 mD であった。十分な水浸透率を有するため定常流法により飽和水と CO_2 の一定流量の同時圧入を行って相対浸透率測定を実施した。

荷菜層礫岩 4-1 では CO_2 の比率が上昇するのに合わせてコア全体に CO_2 掃攻領域が拡大する傾向があった。CO_2 掃攻領域は礫の存在が影響していると推測した。平取軽舞層砂岩では CO_2 の比率が低い段階からコアの中で不均質に CO_2 掃攻領域が存在し、CO_2 の比率を上げても同様の傾向が続いた。平取軽舞層砂岩 11-4B は垂直方向に不均質性があり CO_2 掃攻領域に影響したと推測した。荷菜層礫岩 4-1 は CO_2－水の二相状態において、相対的に平取軽舞層砂岩 11-4B よりも CO_2 が流動しやすく水が流動しにくい傾向がある。

表 4.2-17　相対浸透率測定結果

	流量 mL/min (合計流量: 0.5) KI 水溶液	CO_2	定常時水飽和率 Sw %	相対浸透率 Krw	$Krco_2$
荷菜層礫岩4-1	0.50	0.00	100.00	1.000	0.000
	0.45	0.05	93.80	0.338	0.003
	0.25	0.25	83.47	0.084	0.006
	0.05	0.45	79.94	0.031	0.020
	0.00	0.50	72.55	0.000	0.126
平取軽舞層砂岩 11-4B	0.50	0.00	100.00	1.000	0.000
	0.45	0.05	84.92	0.381	0.003
	0.25	0.25	82.27	0.164	0.012
	0.05	0.45	79.55	0.032	0.021
	0.00	0.50	78.78	0.000	0.049



注 1）プロットした点は相対浸透率測定の結果を示す。
注 2）相対浸透率曲線は Brooks and Corey の式[28)] を用いて作成した。

図 4.2-24　相対浸透率測定結果と相対浸透率曲線

(3)　遮蔽岩分析

遮蔽岩能力評価の対象として荷菜層泥岩、荷菜層シルト岩、平取軽舞層泥岩、平取軽舞層シルト岩の合計 5 試料に対して遮蔽岩分析を実施した。遮蔽岩分析を実施した試料を表

4.2-8 に示す。

①　孔隙率、粒子密度、空気浸透率測定（大気圧下）

荷菜層シルト岩 8-1、荷菜層泥岩 15-1、平取軽舞層泥岩 2-1、平取軽舞層シルト岩 10-1、平取軽舞層シルト質泥岩 11-3 の 5 試料について測定を実施した。測定結果を表 4.2-18 に示す。

表 4.2-18　遮蔽岩の孔隙率、粒子密度、空気浸透率測定結果（大気圧下、封圧下）

	試料名	粒子密度	大気圧下孔隙率	封圧2.76 MPa空気浸透率	封圧下					
					孔隙率（%）			空気浸透率（mD）		
		[g/cm^3]	[%]	[mD]	7MPa	17MPa	27MPa	7MPa	17MPa	27MPa
遮蔽岩能力評価対象試料	荷菜層シルト岩8-1	2.607	33.20	0.332	31.63	30.85	29.91	0.355	0.326	0.281
	荷菜層泥岩15-1	2.451	42.25	0.925	41.12	40.18	38.93	1.030	0.909	0.820
	平取軽舞層泥岩2-1	2.447	40.79	0.215	40.09	39.39	38.86	0.118	0.0986	0.0894
	平取軽舞層シルト岩10-1	2.610	28.37	0.485	26.33	25.42	24.77	0.702	0.379	0.324
	平取軽舞層シルト質泥岩11-3	2.524	31.81	0.298	31.12	30.59	30.13	0.291	0.262	0.238

②　孔隙率、空気浸透率測定（封圧下）

荷菜層シルト岩 8-1、荷菜層泥岩 15-1、平取軽舞層泥岩 2-1、平取軽舞層シルト岩 10-1、平取軽舞層シルト質泥岩 11-3 の 5 試料について 7 MPa、17 MPa、27 MPa の封圧下で測定を実施した。測定結果を表 4.2-18、図 4.2-25、図 4.2-26 に示す。

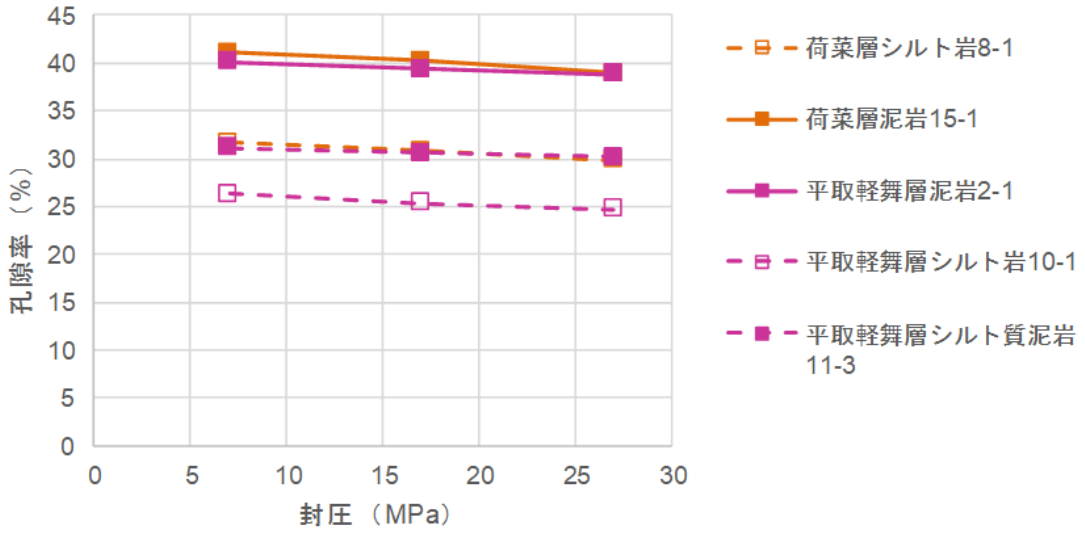


図 4.2-25　遮蔽岩の孔隙率（封圧下）

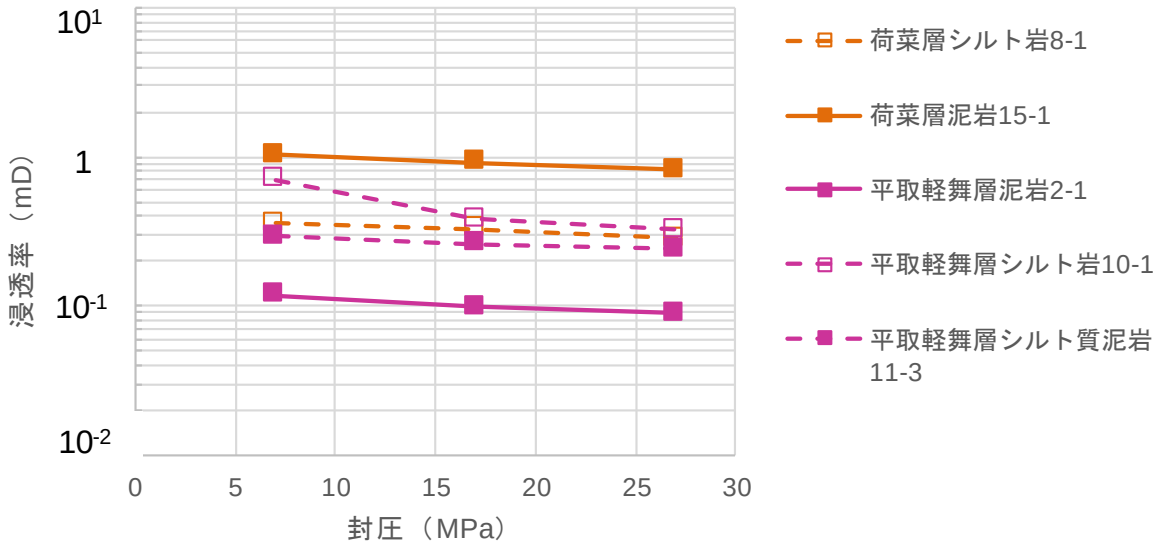


図 4.2-26　遮蔽岩の浸透率（封圧下）

③　水浸透率測定

荷菜層シルト岩 8-1 について水浸透率測定を実施した。結果を表 4.2-19 に示す。相対浸透率測定前に測定した荷菜層泥岩 15-1、平取軽舞層泥岩 2-1 の水浸透率結果もあわせて示す。

表 4.2-19　遮蔽岩の水浸透率測定結果

試料名	封圧 (MPa)	上流圧 (MPa)	水浸透率 (mD)
荷菜層シルト岩8-1	21.5	11.2	0.0095
荷菜層泥岩15-1			0.0267
平取軽舞層泥岩2-1			0.0091

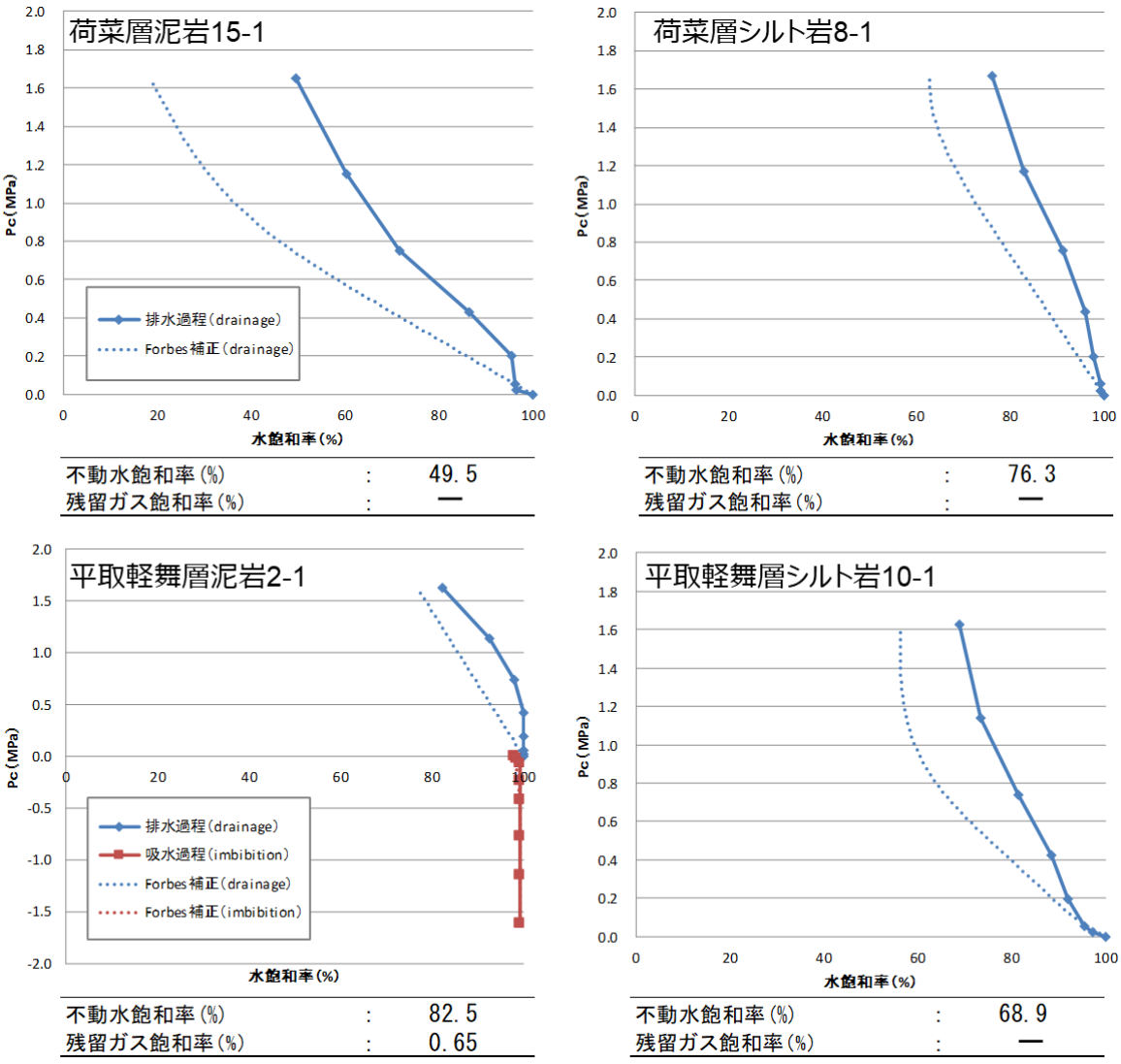
④　毛細管圧力測定

荷菜層シルト岩 8-1、荷菜層泥岩 15-1、平取軽舞層泥岩 2-1、平取軽舞層シルト岩 10-1 の 4 試料について毛細管圧力測定を実施した。毛細管圧力測定結果を図 4.2-27 に示す。

平取軽舞層泥岩 2-1 は吸水過程まで測定できた。残りの 3 試料は排出過程での測定終了後にコアが崩壊し吸水過程は測定できなかった。

荷菜層泥岩 15-1、平取軽舞層シルト岩 10-1、荷菜層シルト岩 8-1、平取軽舞層泥岩 2-1 の順に不動水飽和率や毛細管圧力の立ち上がりが小さい。荷菜層泥岩 15-1 は今回の測定試料

では不動水飽和率がもっとも低く、泥岩としても低い値である。毛細管圧力曲線もなだらかである。荷菜層シルト岩 8-1、平取軽舞層泥岩 2-1、平取軽舞層シルト岩 10-1 の不動水飽和率は高く、水飽和率に対し敏感である。



注）破線の毛細管圧力曲線は Forbes 補正[12)] 後の値を示す。

図 4.2-27　遮蔽岩の毛細管圧力測定結果

⑤　スレッショルド圧力測定

荷菜層泥岩 15-1、平取軽舞層泥岩 2-1 についてスレッショルド圧力測定を実施した。測定結果を表 4.2-20 に示す。

表 4.2-20　スレッショルド圧力測定結果

試料名	封圧 (MPa)	上流圧 (MPa)	スレッショルド圧力 (MPa)
荷菜層泥岩15-1	21.5	11.2	0.35
平取軽舞層泥岩2-1			0.84

(4)　岩石物性分析

貯留岩能力評価の対象として荷菜層砂岩 1 試料、平取軽舞層砂岩 2 試料の合計 3 試料、遮蔽岩能力評価の対象として荷菜層シルト岩 1 試料、平取軽舞層泥岩 2 試料の合計 3 試料に岩石物性分析を実施した。岩石物性分析を実施した試料を表 4.2-8 に示す。

①　弾性波速度試験

荷菜層砂岩 4-2、平取軽舞層砂岩 11-4A、平取軽舞層砂岩 13-2、荷菜層シルト岩 8-1、荷菜層泥岩 15-1、平取軽舞層泥岩 2-1 に弾性波速度試験を実施した。弾性波速度試験の結果を表 4.2-21 に示す。

荷菜層砂岩 4-2、平取軽舞層砂岩 11-4A、平取軽舞層砂岩 13-2、荷菜層シルト岩 8-1、荷菜層泥岩 15-1 は非常に軟質であったため、超音波信号が検出できず測定できなかった。

②　一軸、三軸圧縮試験

荷菜層砂岩 4-2、平取軽舞層砂岩 11-4A、平取軽舞層砂岩 13-2、荷菜層シルト岩 8-1、荷菜層泥岩 15-1、平取軽舞層泥岩 2-1 に一軸、三軸圧縮試験を実施した。一軸、三軸圧縮試験の測定結果を表 4.2-21 に示す。

荷菜層砂岩 4-2、平取軽舞層砂岩 11-4A、平取軽舞層砂岩 13-2、荷菜層シルト岩 8-1、荷菜層泥岩 15-1 は非常に軟質であったためひずみゲージの貼り付けができず、静ポアソン比を評価できなかった。荷菜層および平取軽舞層の砂岩試料については最大封圧用の試料を成形できず、最大封圧条件での圧縮試験を実施できなかった。

一軸圧縮試験の結果から地盤工学会基準[17)]を基に分類すると、平取軽舞層泥岩 2-1 が軟岩 D に、荷菜層シルト岩 8-1 が軟岩 E に、荷菜層砂岩 4-2、平取軽舞層砂岩 13-2、荷菜層泥岩 15-1 が軟岩 F に、平取軽舞層砂岩 11-4A が軟岩 G に分類された。

表 4.2-21　弾性波速度試験および一軸、三軸圧縮試験結果

	試料名	直径 (cm)	長さ (cm)	体積 (cm^3)	質量 (g)	密度 (g/cm^3)	P波速度 (m/s)	S波速度 (m/s)	動ヤング率 (MPa)	動ポアソン比	封圧 (MPa)	静ヤング率 (MPa)	静ポアソン比	破壊強度(主応力差) (MPa)	破壊強度(軸応力) (MPa)	延性度 (%)	UCS (MPa)	固着力 (MPa)	摩擦角 (度)
貯留岩能力試掘坑掘削試料	荷菜層砂岩4-2	3.52	7.07	68.80	125.58	1.825	-	-	-	-	0.1	78.5	-	1.126	1.226	2.2			
		3.58	8.11	81.64	154.31	1.890	-	-	-	-	4.0	694.5	-	12.079	16.079	5.3	1.664	0.463	31.8
		3.52	8.12	79.02	151.54	1.918	-	-	-	-	8.0	697.5	-	18.747	26.747	16.1			
		-	-	-	-	-	-	-	-	-	20.0	-	-	-	-	-			
	平取軽舞層砂岩11-4A	3.52	8.15	79.31	150.70	1.900	-	-	-	-	0.1	27.4	-	0.369	0.469	1.8			
		3.54	8.01	78.84	158.36	2.009	-	-	-	-	4.0	713.2	-	13.733	17.733	3.3	0.936	0.241	35.6
		3.50	8.02	77.16	160.88	2.085	-	-	-	-	8.0	807.3	-	22.368	30.368	12.2			
		-	-	-	-	-	-	-	-	-	20.0	-	-	-	-	-			
	平取軽舞層砂岩13-2	3.69	8.01	85.66	168.86	1.971	-	-	-	-	0.1	123.9	-	0.833	0.933	1.1			
		3.57	8.01	80.18	162.00	2.020	-	-	-	-	4.0	595.8	-	11.307	15.307	14.8	1.027	0.280	32.8
		3.55	7.99	79.08	158.97	2.010	-	-	-	-	8.0	787.4	-	19.471	27.471	15.5			
		-	-	-	-	-	-	-	-	-	20.0	-	-	-	-	-			
構造岩能力試掘坑掘削試料	荷菜層シルト岩8-1	3.45	6.95	64.97	133.89	2.061	-	-	-	-	0.1	468.7	-	5.652	5.752	1.3			
		3.46	7.10	66.76	137.35	2.057	-	-	-	-	4.0	853.8	-	10.871	14.871	2.0	5.631	2.563	5.4
		3.46	7.04	66.19	136.19	2.058	-	-	-	-	8.0	767.4	-	12.730	20.730	6.3			
		1.92	4.20	12.20	25.11	2.058	-	-	-	-	20.0	925.8	-	9.765	29.765	2.2			
	荷菜層泥岩15-1	3.46	6.99	65.72	122.54	1.865	-	-	-	-	0.1	521.4	-	4.903	5.003	1.1			
		3.46	7.06	66.38	124.20	1.871	-	-	-	-	4.0	1163.8	-	12.958	16.958	2.1	4.867	2.088	8.7
		3.47	7.07	66.86	123.96	1.854	-	-	-	-	8.0	850.7	-	13.839	21.839	12.0			
		1.92	4.08	11.84	21.74	1.836	-	-	-	-	20.0	781.9	-	12.023	32.023	2.5			
	平取軽舞層泥岩2-1	3.48	7.08	67.34	120.19	1.785	1669.8	784.1	2981.6	0.359	0.1	1309.9	0.150	12.030	12.130	0.9			
		3.48	7.08	67.34	121.80	1.809	-	-	-	-	4.0	1089.1	-	18.865	22.865	2.1	12.022	5.777	2.3
		3.48	7.06	67.15	121.13	1.804	-	-	-	-	8.0	1314.7	-	21.655	29.655	2.5			
		1.93	4.16	12.11	22.21	1.834	-	-	-	-	20.0	924.6	-	13.676	33.676	1.5			

注）―は測定ができなかった試料を示す。

③　圧裂引張試験

荷菜層シルト岩 8-1、荷菜層泥岩 15-1、平取軽舞層泥岩 2-1 に圧裂引張試験を実施した。圧裂引張試験の結果を表 4.2-22 に示す。

圧裂引張試験で評価された引張強度は、荷菜層シルト岩 8-1、荷菜層泥岩 15-1 の 2 試料ではおよそ 0.5 MPa 程度、平取軽舞層泥岩 2-1 も 1.2 MPa となっており、比較的軟質な岩石強度を示す結果であった。

表 4.2-22　圧裂引張試験結果

	直径 (cm)	長さ (cm)	質量 (g)	密度 (g/cm^3)	破壊荷重 (kN)	引張強度 (MPa)
荷菜層 泥岩8-1	4.97	4.92	193.48	2.03	1.70	0.44
荷菜層 泥岩15-1	4.97	5.18	183.45	1.83	2.30	0.57
平取軽舞層 泥岩2-1	4.97	4.80	172.79	1.86	4.50	1.20

4.2.5　考察

(1)　後背地の検討

薄片観察および X 線鉱物分析結果と先行研究[19)]から後背地や堆積環境を検討した。

荷菜層および平取軽舞層の砂岩と礫岩は層準ごとの岩石鉱物的な特徴に明瞭な差は認められない。これは、日高沿岸地域では荷菜層と平取軽舞層は堆積環境に差がないという先行研究結果と整合的である[19)]。

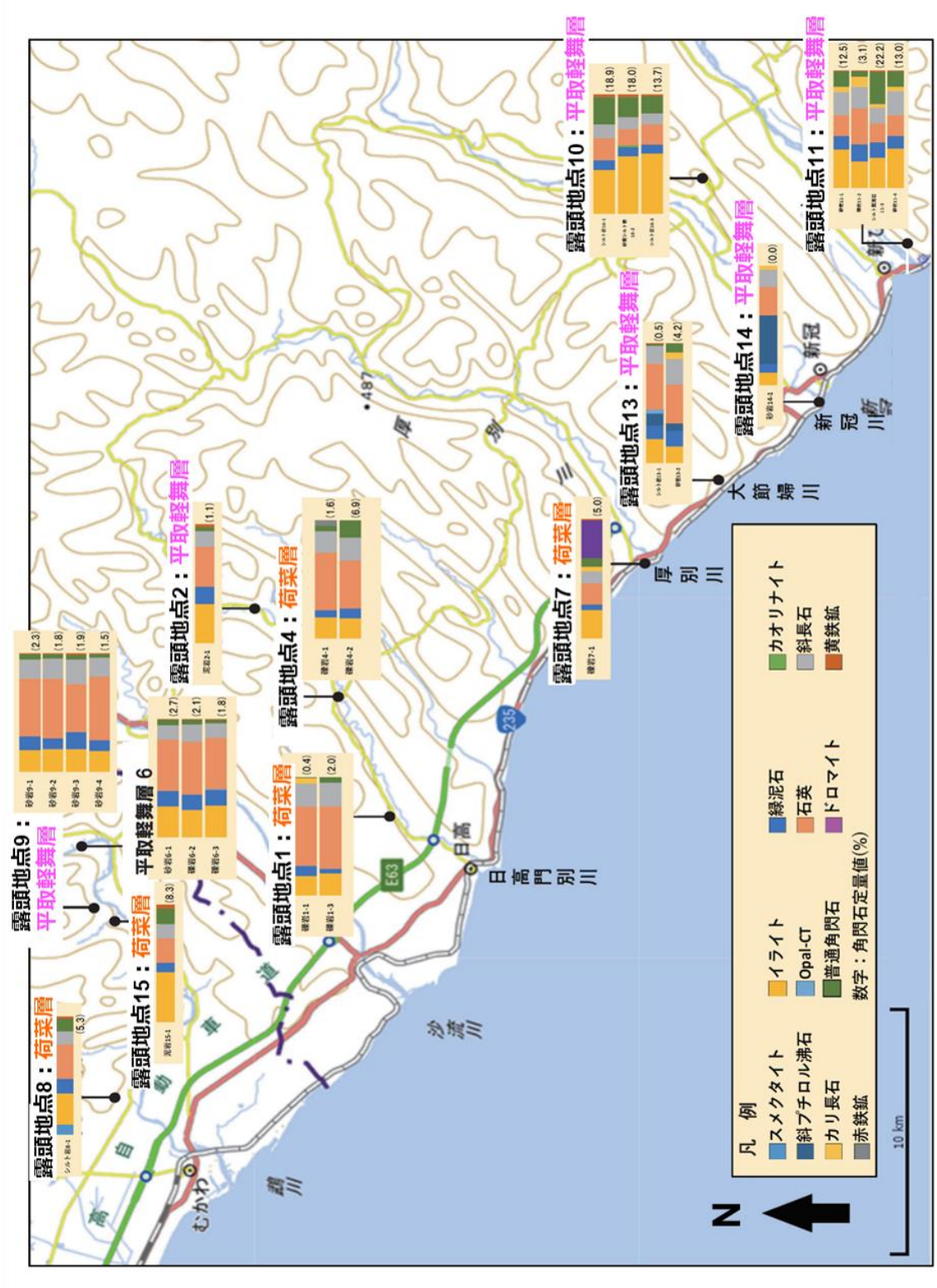
X 線鉱物分析結果と試料採取位置を図 4.2-28 に示す。荷菜層および平取軽舞層の砂岩と礫岩は地域ごとに構成鉱物の量比に特徴がみられた。調査範囲の北北西～南に位置する露頭地点 9～13 では石英と斜長石が主体でイライトや緑泥石等の粘土鉱物を伴う。粒子は主に砂岩や泥質岩等のやや粗粒な堆積岩片から構成される。一方、調査範囲の南東に位置する露頭地点 11 では角閃石が比較的多く産する。

X 線鉱物分析の結果から荷菜層および平取軽舞層の堆積岩には、粘土鉱物としてイライトや緑泥石等のやや続成の進行したものが確認された。ただし薄片鑑定の結果から、荷菜層および平取軽舞層の砂岩と礫岩の構成粒子は、泥質岩や砂岩の岩片を主体とし、深成岩、変

成岩等の岩片や、石英、斜長石、黒雲母、角閃石等の鉱物片を含み、基質がほとんど発達しないという特徴が確認されている。以上の結果から X 線鉱物分析で確認されたイライトや緑泥石等の粘土鉱物は主に泥質岩等の堆積岩片由来の砕屑物である可能性が高い。同様に薄片鑑定の結果と X 線鉱物分析結果を比較すると、石英と斜長石等は砂岩等の堆積岩片由来が主で、一部は花崗岩片由来であると推定した。角閃石については日高変成帯西帯に角閃岩の分布が確認されていること[29)、30)]を考慮すると角閃岩由来の可能性もあるが、岩片中ではなく鉱物片として単体で産することが多いことから当時の火山活動によるテフラ由来と推定した。

日高沿岸地域の堆積システムと[19)]、各露頭地点の鉱物量比の関係を検討した。やや粗粒な堆積岩片から構成される砂岩と礫岩が露出している露頭地点 9～13 は、先行研究で三角州等の粗粒な堆積物の分布域と対応しており[19)]、調和的な結果となった。角閃石が比較的多く産するという特徴が認められた露頭地点 11 の砂岩は、海底扇状地の下流には位置するが流下方向とは逸れた場所で堆積したと推定されている[19)]。構成粒子の粒径が比較的細粒であることは推定された堆積環境と調和的である。角閃石がテフラ由来のものだとすると、堆積物の供給量の少ない環境のためテフラ由来の角閃石の割合が相対的に多くなっていると推定でき、堆積環境と矛盾しない。角閃石が角閃岩由来のものだとすると、露頭地点 11 は露頭地点 9～13 のエリアとはやや異なった供給源を持つ可能性がある。

荷菜層および平取軽舞層の泥岩とシルト岩はイライトや緑泥石等の粘土鉱物や角閃石の量比がやや多い特徴を持つ。X 線鉱物分析ではイライトと黒雲母の判別が困難であるため、泥岩とシルト岩中のイライトの定量結果は黒雲母を含み、やや多めに定量された可能性がある。角閃石がテフラ由来と考えると、露頭地点 11 の砂岩礫岩と同様に泥質岩で角閃石の量比が多い理由は堆積物の供給量の少ない環境のためテフラ由来の角閃石の割合が相対的に多くなっていると推定できる。



注）X 線鉱物分析結果を 100%に規格化した値を示す。単位は wt%である。

図 4.2-28　X 線鉱物分析結果と試料採取位置図

(2)　最大埋没深度の推定

岩石鉱物分析結果から地表調査試料の最大埋没深度を推定した。砂岩の圧密曲線と続成変質鉱物組み合わせを用いて推定した最大埋没深度を図 4.2-29、推定した最大埋没深度の一覧を表 4.2-23 に示す。

①　続成鉱物組み合わせを用いた最大埋没深度の推定

岩石鉱物分析結果の続成鉱物の組み合わせから、埋没深度に伴う続成鉱物の変化を用いて最大埋没深度を推定した。Aoyagi（1983）[31)] は、続成鉱物の転換温度自体はおおむね一義的に決まり、地域や地質時代が同じであれば地温勾配を仮定して埋没深度が推定できるとしている。Aoyagi（1983）[31)] を用いて、続成鉱物組み合わせやそれぞれの転換温度から地表調査試料の最大埋没深度を推定した。地温勾配が地質時代を通じて変化しなかったと仮定して推定を行った。調査地域に近い陸域で掘削された坑井では地温勾配が 1.8℃/100m と推定されている。海域にて掘削された基礎試錐「日高トラフ」の地温勾配は 1.7℃/100m と推定されたことから[22)]、日高周辺では海域も含めて地温勾配の大きな変化はないことがわかる。地表温度は 15℃とした。

X 線鉱物分析の結果から、荷菜層では続成鉱物として一部でスメクタイトが同定される。荷菜層の変質帯は、続成変質がもっとも微弱なスメクタイト―ガラス―非晶出シリカ帯に区分できる。変質帯から推定した荷菜層の最大埋没深度は 1,700 m 以浅となる[31)]。

X 線鉱物分析の結果から、平取軽舞層では続成鉱物として一部で斜プチロル沸石およびオパール CT（クリストバライト）が同定される。平取軽舞層の変質帯は、スメクタイト―ガラス―クリストバライト帯から、スメクタイト―斜プチロル沸石―クリストバライト帯に区分できる。変質帯から推定した平取軽舞層の最大埋没深度は 1,700～2,400 m となる[31)]。しかし地表調査で採取した試料の中には完全には固結していない砂岩もみられたことから、最大埋没深度 1,700 m は過大評価の可能性がある。青柳（1978）[32)] によると非晶質シリカからオパール CT（クリストバライト）への転換温度は平均すると 45℃であるが、低温側では 30℃程度でも転換が可能であるとしている。飯島（1978）[33)] ではガラスから斜プチロル沸石への転換温度範囲を 30～50℃としている。仮にクリストバライトと斜プチロル沸石の最低転換温度がともに 30℃と仮定した場合、整合一連で堆積している平取軽舞層と荷菜層境界の最大埋没深度は約 800 m と推定できる。

以上の結果から、荷菜層の最大埋没深度は 1,700 m 以浅で、平取軽舞層の最大埋没深度は 800～2,400 m と推定した。基礎試錐「日高トラフ」では、クリストバライトや斜プチロル沸石への変化は荷菜層に対比された Unit B において海底面下深度 2,000～2,100 m 付近

で確認された[22)]。このことから基礎試錐「日高トラフ」の貯留層になりうる層準の最大埋没深度と地表試料の最大埋没深度はほぼ同程度であると考えられる。

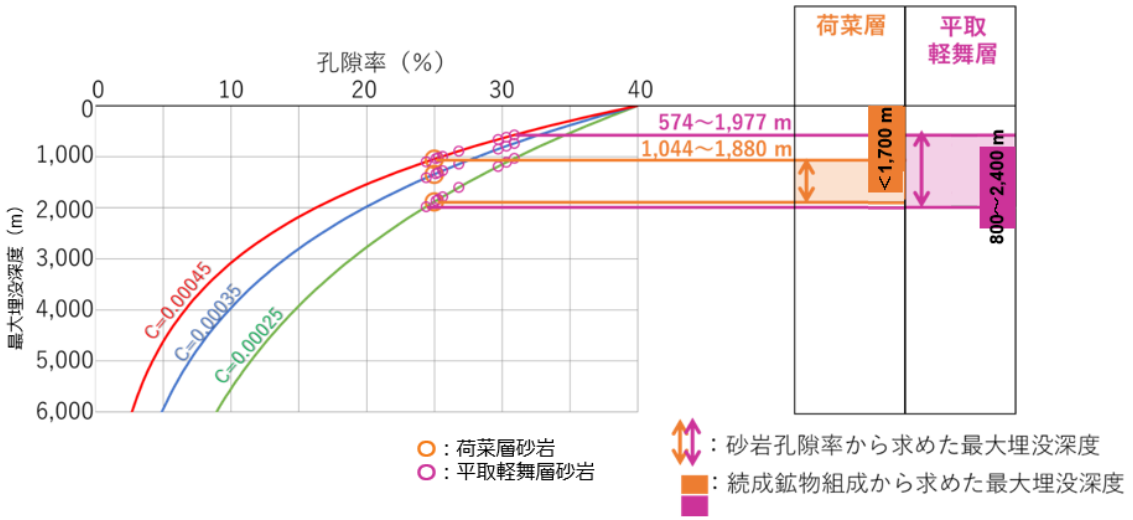
② 孔隙率を用いた最大埋没深度の推定

砂岩の孔径分布測定結果から荷菜層および平取軽舞層の最大埋没深度を推定した。孔径分布測定結果の孔隙率から Athy（1930）[34)] の提唱した以下の経験式を用いて砂岩の圧密曲線を求めた。

$$\Phi=\Phi_0{}^{-cz}$$

注）Φ：孔隙率（%）、Φ_0：初期孔隙率（%）、c：圧密係数、z：埋没深度（m）

本曲線は圧密過程を良く表現することから、地質モデルへの入力データとして広く用いられている。Atashbari ほか（2012）[35)] がまとめた各種堆積盆の砂岩圧密曲線に合うように圧密係数 c と初期孔隙率 Φ_0 を設定した。設定した c は 0.00025、0.00035、0.00045 の三つ、Φ_0 は 40%である。これに貯留岩能力評価対象の試料の孔径分布測定結果から求めた孔隙率を代入することで最大埋没深度を求めた。各層準の最大埋没深度は荷菜層砂岩が 1,044～1,880 m、平取軽舞層砂岩が 574～1,997 m と推定された。続成変質鉱物から求めた最大埋没深度と比較すると、荷菜層砂岩では圧密係数 c を 0.00045、0.00035、0.00025 としたときの埋没曲線のいずれとも整合的、平取軽舞層砂岩では 0.00025 としたときのみ整合的である。



注 1）圧密曲線は Athy（1930）[34)] の経験式を用いて求めた。
注 2）続成鉱物組み合わせは Aoyagi（1983）[31)]、青柳（1978）[32)]、飯島（1978）[33)] から求めた。

図 4.2-29　貯留岩の圧密曲線と続成変質鉱物組み合わせを用いて推定した最大埋没深度

表 4.2-23　貯留岩評価対象試料の最大埋没深度推定結果

試料名	岩相	孔隙率 (%)	最大埋没深度（m） 圧密係数 c=0.00025	圧密係数 c=0.00035	圧密係数 c=0.00045
荷菜層砂岩4-2	砂岩	25.0	1,880	1,343	1,044
平取軽舞層砂岩6-1A	砂岩	25.6	1,785	1,275	992
平取軽舞層砂岩9-1	砂岩	25.1	1,864	1,331	1,036
平取軽舞層砂岩9-2	砂岩	26.8	1,602	1,144	890
平取軽舞層砂岩9-4A	砂岩	25.3	1,832	1,309	1,018
平取軽舞層砂岩11-1A	砂岩	30.9	1,032	737	574
平取軽舞層砂岩11-4A	砂岩	29.7	1,191	851	662
平取軽舞層砂岩13-2	砂岩	30.3	1,111	794	617
平取軽舞層砂岩14-1A	砂岩	24.4	1,977	1,412	1,098

注）最大埋没深度は Athy（1930）[34)] の経験式を用いて求めた。

(3)　炭酸塩セメントの成因

荷菜層は基質に乏しい砂岩と礫岩を主体とし、高い孔隙率と浸透率を有するのが特徴である。しかし、中には荷菜層礫岩 7-1 のように炭酸塩セメントで膠結される試料も存在する。このような炭酸塩セメントは部分的に貯留岩性状を極端に悪化させる。炭酸塩セメントの成因と分布形態を考察する。

荷菜層礫岩 7-1 の炭酸塩（ドロマイト）セメントは孔隙を炭酸塩セメントが埋めている産状から、堆積後間もなく圧密をまだほとんど受けていない時期に沈殿したと考えられる。このことは炭酸塩鉱物による続成セメント作用が、海底直下で起きていたことを示唆する。

最近のメタンハイドレートの研究[36)]で、メタン湧水に伴う硫酸還元作用により海底面直下で炭酸塩鉱物が形成されることが知られている。基礎試錐「日高トラフ」で微生物起源ガスが確認されたことから[22)]、地表調査地域でも過去にメタンハイドレートを起源とした微生物起源ガスが存在したと推定できる。この影響により荷菜層礫岩 7-1 は堆積直後に炭酸塩セメント作用を受けたと推定した。

4.2.6　評価

地表調査結果および分析結果から、貯留岩能力および遮蔽岩能力を評価した。貯留岩および遮蔽岩能力を評価するため地表調査範囲の沖合で掘削されている基礎試錐「日高トラフ」[22)]と比較した。

(1)　貯留岩能力評価

貯留岩能力評価のため地表調査で採取した荷菜層砂岩、荷菜層礫岩、平取軽舞層砂岩、平取軽舞層礫岩について分析を実施した。基礎試錐「日高トラフ」[22)]と地表調査試料を比較し、貯留岩性状を検討した。地表調査試料の孔隙率および浸透率の関係を図 4.2-30 に示す。貯留岩能力の評価結果を表 4.2-24 に示す。4.2.4 項の表 4.2-15 に示した貯留岩の孔隙率、粒子密度、空気浸透率測定結果（大気圧下、封圧下）および表 4.2-16 に示した貯留岩の水浸透率測定結果も用いて検討した。

平取軽舞層砂岩は極細粒砂から中粒砂を主体とする一部含礫の石質アレナイトであり、分級度は普通、もしくは一部でよい。孔隙率は 26.8～33.5%、浸透率は 341.7～4,650 mD である（表 4.2-15 参照）。水浸透率は 17.6～78 mD である（表 4.2-16 参照）。基礎試錐「日高トラフ」[22)]と比較した結果、平取軽舞層は基礎試錐「日高トラフ」とは同一層での比較はできないが、浸透率が 100～10,000 mD の範囲にあり基礎試錐「日高トラフ」の荷菜層と比べ格段に高く、孔隙率は同程度である。

平取軽舞層礫岩は中粒砂から細礫を主体とする石質アレナイト質の礫岩であり、分級度は悪い。試料が軟質なためコア成形ができず、貯留岩分析は実施できなかった。粒子間孔隙が顕著に発達し、視認孔隙率は 20～40%である。

平取軽舞層砂岩は、岩石鉱物分析、コア分析ともに良好な結果となった。基礎試錐「日高トラフ」[22)]と比較しても、平取軽舞層砂岩は高い貯留岩能力を有していると評価できる。

平取軽舞層礫岩については試料が脆く貯留岩分析を実施できなかったため、詳細な評価を行うことはできない。岩石鉱物分析結果からは良好な貯留岩性状を有している可能性がある。

荷菜層砂岩は細粒砂から粗粒砂を主体とする石質アレナイトであり、分級度は悪い。試料が軟質なためコア成形ができず、貯留岩分析は実施できなかった。粒子間孔隙が顕著に発達し、視認孔隙率は 20～40%である。

荷菜層礫岩は中粒砂から細礫を主体とする石質アレナイト質の礫岩であり、分級度は悪い。孔隙率は 2.9～16.0%、浸透率は 2.1～55.9 mD である（表 4.2-15 参照）。水浸透率は 11 mD である（表 4.2-16 参照）。粒子支持構造は認められるものの、鉱物片や岩片の縁辺

に一部鉄酸化物の膠着がみられる、または粒子間全体に炭酸塩鉱物の膠着がみられる等、初生的な粒子間孔隙を減じている。炭酸塩セメントは、堆積して間もない時期に沈殿したと考えられる。つまり極初期の続成セメント作用が、海底直下で起きていたことを示唆する。基礎試錐「日高トラフ」[22)]と比較した結果、浸透率は振れ幅があるものの 1～100 mD の範囲でおおむね同じ水準である。孔隙率は地表調査試料の荷菜層礫岩では 20%未満であるのに対し、基礎試錐「日高トラフ」の荷菜層砂岩では 20～40%と高い。

荷菜層砂岩については試料が脆く貯留岩分析を実施できなかったため、詳細な評価を行うことはできない。岩石鉱物分析結果からは良好な貯留岩性状を有している可能性がある。

荷菜層礫岩の貯留岩性状は低いことが示唆された。荷菜層礫岩は主に三角州周辺で堆積したと考えられ、供給源と考えられる日高山脈に近接していることから分級度が悪く、貯留岩性状を悪化させた可能性が考えられる。さらに、鉄酸化物やドロマイト等の二次鉱物が発達するため、貯留岩性状を悪化させている。基礎試錐「日高トラフ」[22)]と比較して、荷菜層礫岩は貯留岩性状が良くないと評価される。

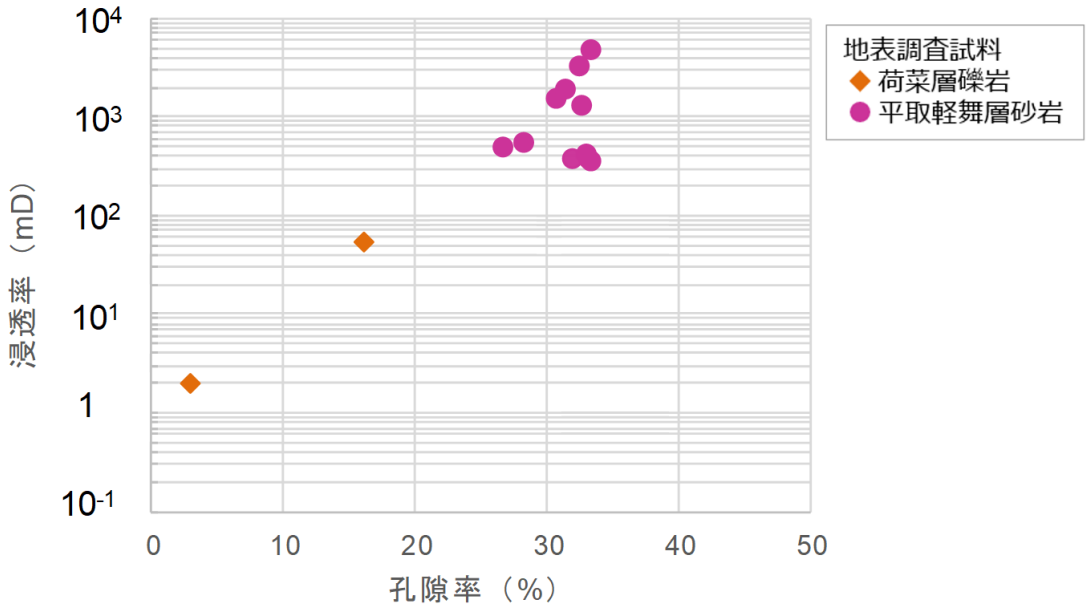


図 4.2-30　地表調査試料の孔隙率および浸透率の関係

表 4.2-24　貯留岩能力の評価結果

	分析項目											コメント
	岩石鉱物分析				孔隙率		空気浸透率			水浸透率	毛細管圧力	
	岩質	粒径	分級度	孔径分布	大気圧	封圧	大気圧	封圧				
荷菜層砂岩	◎	細粒砂～粗粒砂	▲	◎	コア試料成形不能							試料が軟質で貯留岩分析はできなかったが、良好な貯留岩性状が示唆される。
荷菜層礫岩	◎	中粒砂～細礫	▲	◎	▲～△	▲	▲～○	▲～○		○	△	二次鉱物が認められ、貯留岩性状は劣る。
平取軽舞層砂岩	◎	極細粒砂～中粒砂	△、一部○	◎	◎	○～◎	◎	◎		○	○	良好な貯留岩性状を得た。
平取軽舞層礫岩	◎	中粒砂～細礫	▲	◎	コア試料成形不能							試料が軟質で貯留岩分析はできなかったが、良好な貯留岩性状が示唆される。

岩質
◎:アレナイト
▲:ワッケ

分級度
◎:0.50以下
○:0.50～0.71
△:0.71以上

孔径分布
◎：50,000Å以上
○：10,000～50,000Å
△：5,000～10,000Å
▲：3,000～5,000Å

孔隙率
◎：25%以上
○：20～25%
△：15～20%
▲：15%以下

浸透率
◎：100 mD以上
○：50～100 mD
△：10～50 mD
▲：10 mD以下

水浸透率
○：1mD以上
△：1mD未満

(2) 遮蔽岩能力評価

遮蔽岩能力評価のため地表調査で採取した荷菜層泥岩、荷菜層シルト岩、平取軽舞層泥岩、平取軽舞層シルト質泥岩、平取軽舞層シルト岩について分析を実施した。基礎試錐「日高トラフ」[22)]、苫小牧 CCS-1[37)]、苫小牧 CCS-2[38)、39)]、地表調査試料を比較し、遮蔽岩性状を検討した。苫小牧 CCS-1[37)]、苫小牧 CCS-2[38)、39)]、地表調査試料のスレッショルド圧力の比較を図 4.2-31 に示す。地表調査試料と坑井試料の比較のため測定条件を同一にした場合のスレッショルド圧力に換算した。遮蔽岩能力の評価結果を表 4.2-25 に示す。

荷菜層泥岩、荷菜層シルト岩、平取軽舞層泥岩、平取軽舞層シルト質泥岩、平取軽舞層シルト岩について遮蔽岩分析を実施した（表 4.2-18 および表 4.2-19）。荷菜層泥岩および平取軽舞層泥岩はスレッショルド圧力測定を実施した（表 4.2-20）。荷菜層泥岩、荷菜層シルト岩、平取軽舞層泥岩、平取軽舞層シルト質泥岩、平取軽舞層シルト岩の孔径分布測定結果から、スレッショルド圧力を推定した。

平取軽舞層の封圧下の空気浸透率は 0.215～0.485 mD、水浸透率は 0.0091 mD である。コア分析のスレッショルド圧力は 0.84 MPa である。孔径分布から推定されるスレッショルド圧力は 0.06～0.3 MPa である。荷菜層の封圧下の空気浸透率は 0.332～0.925 mD、水浸透率は 0.0095～0.0267 mD である。コア分析のスレッショルド圧力は 0.35 MPa である。孔径分布から推定されるスレッショルド圧力は 0.06～0.18 MPa である。すべての測定結果において遮蔽岩能力は平取軽舞層が荷菜層よりも優れている。

基礎試錐「日高トラフ」[22)]、苫小牧 CCS-1[37)]、苫小牧 CCS-2[38)、39)]、地表調査試料の水浸透率とスレッショルド圧力を比較した。

基礎試錐「日高トラフ」[22)]ではコア分析を 4 試料で実施し、水浸透率とスレッショルド圧力が得られている。萌別層シルト岩では水浸透率は 0.034～0.048 mD、スレッショルド圧力は 0.54～0.61 MPa である。荷菜層シルト質泥岩では水浸透率は 0.062～0.480 mD、スレッショルド圧力は 0.25～0.51 MPa である。

苫小牧調査井 CCS-1[37)]はコア分析を 4 試料で実施し、水浸透率とスレッショルド圧力が得られている。振老層泥岩では水浸透率 8.2～36.7 nD、スレッショルド圧力 1.29～2.90 MPa もしくは 12.3 MPa 以上の値が得られている。

苫小牧調査井 CCS-2 はコア分析を 2 回実施している。ひとつは萌別層 4 試料、荷菜層 1 試料でコア分析を実施している[38)]。萌別層の残差圧入法の水浸透率は 1.00～7.05 μD、残差圧入法のスレッショルド圧力は 0.028～0.877 MPa、段階昇圧法でのスレッショルド圧力は 1.17～1.38 MPa の間である。荷菜層の残差圧入法の水浸透率は 1.36 μD、残差圧入法のスレッショルド圧力は 0.007 MPa である。もうひとつの分析は、萌別層泥岩 4 試料でコア

分析を実施している[39]。萌別層の残差圧入法の水浸透率は 0.00080～0.00086 mD、残差圧入法のスレッショルド圧力は 0.5～0.7 MPa、段階昇圧法でのスレッショルド圧力は 0.75～1.67 MPa である。

水浸透率について比較した。地表調査試料の水浸透率は、荷菜層泥岩で 0.00948～0.0267 mD、平取軽舞層泥岩で 0.009 mD である。したがって、荷菜層について地表調査試料の遮蔽岩能力は基礎試錐「日高トラフ」よりも優れ[22]、苫小牧調査井 CCS-2 よりも劣る[38]、[39]。地表調査試料の平取軽舞層泥岩の遮蔽岩能力は基礎試錐「日高トラフ」の萌別層よりも優れ[22]、苫小牧調査井 CCS-1 の振老層[37]、苫小牧調査井 CCS-2 の萌別層、荷菜層よりも劣る[38]、[39]。

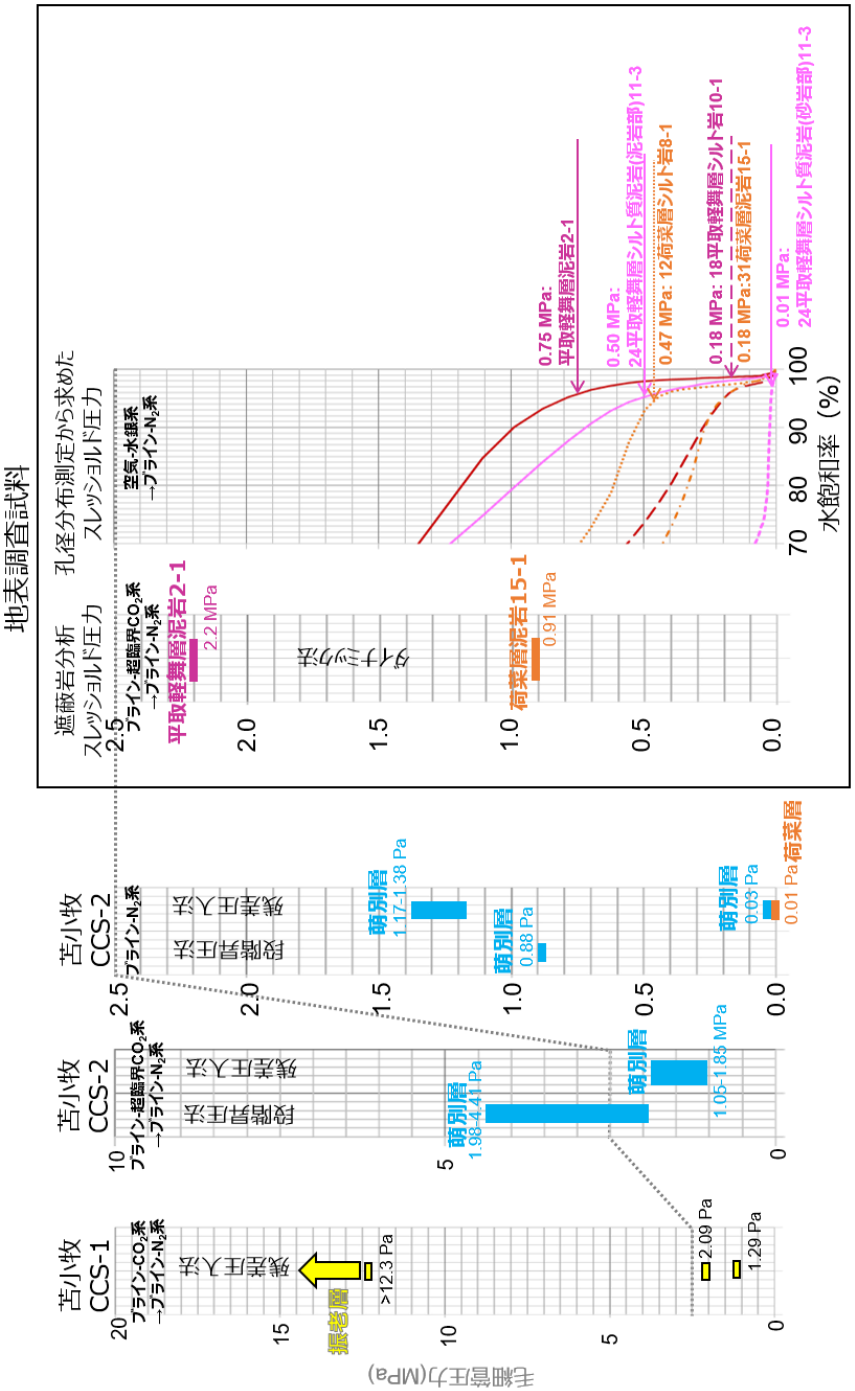
地表調査試料や坑井のスレッショルド圧力を比較できるように、それぞれのスレッショルド圧力を同じ条件での値に換算した。地表調査試料の遮蔽岩分析で得られるスレッショルド圧力はブライン－CO_2 系で測定されている。地表調査試料の孔径分布測定に基づくスレッショルド圧力は空気－水銀系の孔径分布測定で得られた毛細管圧力曲線から読み取った。基礎試錐「日高トラフ」[22]、苫小牧 CCS-1[37]、苫小牧 CCS-2[38]、[39] で実施されたコア分析についても使用流体、温度、圧力等の分析条件が異なる。これらについても同様に、地表調査試料の分析結果のスレッショルド圧力と比較できるようにした。変換する際は遮蔽岩分析の分析条件を考慮し、既存文献[40]、[41]、[42]からパラメータを推定し Washburn（1921）[7] の式を用いて変換した。比較したスレッショルド圧力の測定条件でもっとも多かったブライン－N_2 系、界面張力 70 mN/m を基準としてスレッショルド圧力を換算し、換算後のスレッショルド圧力を比較した。

基礎試錐「日高トラフ」[22]、苫小牧 CCS-2[38]、[39] では、萌別層と荷菜層のスレッショルド圧力しか得られていない。苫小牧 CCS-2 の萌別層は 1.05～4.41 MPa、荷菜層は 0.01 MPa、基礎試錐「日高トラフ」の萌別層は 0.57～0.64 MPa、荷菜層は 0.27～0.55 MPa である。したがって、地表調査試料の荷菜層の遮蔽岩能力は苫小牧 CCS-2 の荷菜層よりも優れ、基礎試錐「日高トラフ」の荷菜層よりもやや優れた遮蔽岩能力を持つ。地表調査試料の平取軽舞層の遮蔽岩能力は苫小牧調査井 CCS-2 の萌別層と同等かやや劣るが、基礎試錐「日高トラフ」の萌別層よりも優れた遮蔽岩能力を持つ。

振老層は苫小牧 CCS-1[37] でのみスレッショルド圧力が得られている。スレッショルド圧力は最低で 1.29 MPa、最高で 12.3 MPa 以上である。苫小牧 CCS-1 の振老層と比較すると、地表調査試料の遮蔽岩能力は荷菜層で劣り、平取軽舞層で同等か劣る。

以上のことをまとめると、地表調査試料の荷菜層と平取軽舞層の遮蔽岩能力は基礎試錐「日高トラフ」[22] の萌別層と同等か萌別層より遮蔽岩能力が優れる。苫小牧 CCS-1[37] の

振老層よりも遮蔽岩能力が劣る。苫小牧 CCS-2[38)、39)] の萌別層と同等か劣る。



注 1）苫小牧 CCS-1 は JAPEX（2011）[37)] から引用した。
注 2）苫小牧 CCS-2 は JAPEX（2011）[38)]、財団法人 地球環境産業技術研究機構（2011）[39)] から引用した。
注 3）スレッショルド圧力をブライン－N_2 系に換算した値を示す。

図 4.2-31　苫小牧 CCS-1[37)]、苫小牧 CCS-2[38)、39)]、
地表調査試料のスレッショルド圧力の比較

表 4.2-25　遮蔽岩能力の評価結果

試料	分析項目						コメント
	岩石鉱物分析	空気浸透率			水浸透率	スレッショルド圧力	毛細管圧力	
	岩質	大気圧	封圧					
荷菜層泥質岩	泥岩・シルト岩	△	△		△	×	○	全ての項目で遮蔽岩として低評価である。 スレッショルド圧力は苫小牧CCS-2と基礎試錐「日高トラフ」の荷菜層より⇧高い。水浸透率は基礎試錐「日高トラフ」の荷菜層より⇧やや低く、苫小牧CCS-1の振老層、苫小牧CCS-2の萌別層より⇧高い。
平取軽舞層泥質岩	泥岩・シルト岩	△	○～△		△	×	△	一部で封圧下浸透率0.1 mD未満であるが、全体としては遮蔽岩として低評価である。 スレッショルド圧力は苫小牧CCS-2の萌別層より⇧高いか同等、基礎試錐「日高トラフ」の萌別層より⇧高い。水浸透率は基礎試錐「日高トラフ」の荷菜層より⇧やや低く、苫小牧CCS-1の振老層、苫小牧CCS-2の萌別層より⇧高い。

空気浸透率
◎：0.01mD未満
○：0.1mD未満
△：0.1mD以上

水浸透率
◎：0.001mD未満
△：0.001mD以上

スレッショルド圧力
◎：10MPa以上
○：5MPa以上
△：1MPa以上
×：1MPa未満

毛細管圧力
○:影響度小
△:影響度中

注 1）苫小牧 CCS-1 は JAPEX（2011）[37] から引用した。
注 2）苫小牧 CCS-2 は JAPEX（2011）[38]、財団法人 地球環境産業技術研究機構（2011）[39] から引用した。
注 3）基礎試錐「日高トラフ」は独立行政法人石油天然ガス・金属資源機構（2019）[22] から引用した。

【参考文献】

1) 国土地理院ホームページ、地理院地図（電子国土 Web）、https://maps.gsi.go.jp
2) Pettijohn, F.J., “Sedimentary rocks”, New York, Harper & Bros, 326p, (1949)
American Association of Petroleum Geologists
HP (http://archives.datapages.com/data/sgs_wb_utf/data/0011/0001/figs/fg6.jpg)
3) Cullity, B.D., “Elements of X-ray diffraction 1978”, Addison-Wesley Pub. Inc., p531, (1978)
4) 湊 秀雄、歌田 実、“輝沸石と斜プチロル沸石の化学処理と熱変化について”、岩石鉱物鉱床学会誌、第 60 巻(第 6 号)、p.213-221、(1968)
5) 地学団体研究会、“新版砕屑物の研究法”、公文富士夫・立石雅昭編、(1998)
6) Folk, R.L. and Ward, W., “Brazos river bar; a study in the significance of grainsize parameters”, Journal of Sedimentary Petrology, Vol.27, p.3-26, (1957)
7) Washburn, E.W., “Note on a method of determining the distribution of pore sizes in porous material”, Proceedings of the National Academy of Sciences of U.S.A., Vol.7, p.115–116, (1921)
8) 石油技術協会、“石油鉱業便覧”、石油技術協会、p.566-567、(2013)
9) 石油技術協会、“石油鉱業便覧”、石油技術協会、p.568-570、(2013)
10) Wagner, W. and Kruse, A., Properties of water and steam: The industrial standard IAPWS-IF97 for the thermodynamic properties and supplementary equations for other properties: tables based on these equations. Springer-Verlag, Berlin, (1998)
11) 石油技術協会、“石油鉱業便覧”、p.570-571、(2013)
12) Forbes, P., Simple and accurate methods for converting centrifuge data into drainage and imbibition capillary pressure curves: SPWLA-1994-v35n4a, 3, p.31-53, (1994)
13) Span, R. and Wagner, W., “A New Equation of State for Carbon Dioxide Covering the Fluid Region from the Triple-Point Temperature to 1100 K at Pressures up to 800 MPa”, Journal of Physical and Chemical Reference Data, 25, p.1509, (1996)
14) Egermann, P., Lombard, J. M. and Bretonnier, P., “A fast and accurate method to measure threshold capillary pressure of caprocks under representative conditions”, SCA2006, A46, (2006)
15) 公益財団法人地盤工学会、“Japanese Geotechnical society standards laboratory testing standards of geomaterials (Vol.3)”、(2018)

16) Zoback, M. D., “Reservoir Geomechanics”, Cambridge, University Press, (2007)
17) 地盤工学会、“地盤調査の方法と解説”、公益社団法人地盤工学会、(2013)
18) 日本工業規格、“岩石の引張強さ試験方法”, JIS M0303:2000、(2000)
19) 加瀬善洋、川上源太郎、高野修、“北海道日高海岸地域の中部～上部中新統前縁盆地埋積物の堆積システムと石油地質”、地質学雑誌 124(8) 、p. 627-642、(2018)
20) 平松力、勇払油・ガス田における上部中新統～鮮新統の珪藻化石層序. 石技協 69.3 (2004): 291-299.
21) 産総研地質調査総合センターウェブサイト、https://www.gsj.jp/geology/fault-fold/formation/r-classification/index.html
22) 独立行政法人石油天然ガス・金属資源機構、“平成 29 年度～令和元年度国内石油・天然ガス基礎調査 基礎試錐「日高トラフ」調査報告書”、(2019)
23) 松野久也、山口昇一、“5 万分の 1 地質図幅「静内」および同説明書”、北海道開発庁、(1958)
24) 山口昇一、“5 萬分の 1 地質図幅「鵡川」および同説明書”、地質調査所、(1960)
25) 今井功、角靖夫、“5 万分の 1 地質図幅「富川」および同説明書”、北海道開発庁、(1958)
26) McManus, Dean A., "A criticism of certain usage of the phi-notation", Journal of Sedimentary Research, 33(3),p.670-674, (1963)
27) Kolodzie,S.,Jr., “Analysis of pore throat size and use of the Waxman-Smits equation to determine OOIP in Spindle Field”, Colorado: Society of Petroleum Engineers, 55th Annual Fall Technical Conference, Paper SPE-9382, 10 p, (1980).
28) Brooks, R.H. and Corey, A.T., “Properties of porous media affecting fluid flow”, Journal of Irrigation and Drainage Division of the American Society of Civil Engineers, Vol.92, 61-88.12, p.478-492, (1966)
29) 田中真二、木崎健治、宮下純夫、“北海道日高帯ポロシリオフィオライト北部地域の地質と変成作用”、地質学雑誌、第 118 巻（第 11 号）、p.723-740、(2012)
30) 宮下純夫、“日高帯変成帯西帯におけるオフィオライト層序の復元”、地質学雑誌、 第 89 巻（第 2 号）、p. 69-86、(2012)
31) Aoyagi, K., “Porosity-depth relationships in the Neogene argillaceous and arenaceous sediments of Japan” 、堆積学研究会報、第 17-19 巻、p.127-136、(1983)
32) 青柳宏一、“海成泥質堆積物の続成作用”、地質学論集、Vol.15、p.3-14、(1978)
33) 飯島 東、“沸石続成作用”、地質学論集、Vol.15、p.135-150、(1978)
34) Athy, L., F., Density, porosity, and compaction of sedimentary rocks, AAPG Bulletin,

p.1-24, (1930)

35) Atashbari, V., Tingay, M., Zareian, M. H., “Compressibility method for pore pressure prediction”, SPE 156337, (2012)

36) 松本良、青木豊、渡部芳夫、“メタンハイドレート”、地質学雑誌、第 102 巻（第 11 号）、p.931-931、(1996)

37) JAPEX、“平成 22 年度「二酸化炭素削減技術実証試験」のうち「苫小牧調査井 CCS-1 試料分析/地層流体分析」報告書”、(2011)

38) JAPEX、“平成 22 年度「二酸化炭素削減技術実証試験」のうち「苫小牧調査井 CCS-2 試料分析/地層流体分析」報告書”、(2011)

39) RITE、“平成 22 年度「二酸化炭素削減技術実証試験委託費」のうち苫小牧萌別層調査ボーリング（苫小牧 CCS-2）コアフラッド試験分析成果報告書”、(2011)

40) Chalbaud, C., Robin, M., Egermann, P., “Interfacial Tension Data and Correlations of Brine-CO_2 Systems under Reservoir Conditions”, SPE 102918, (2006)

41) Leonard, C., Ferrasse, J.,　Boutin, O., Lefevre, S., Viand. A., “Measurements and correlations for gas liquid surface tension at high pressure and high temperature”, AIChE Journal, p.4110-4117, (2018)

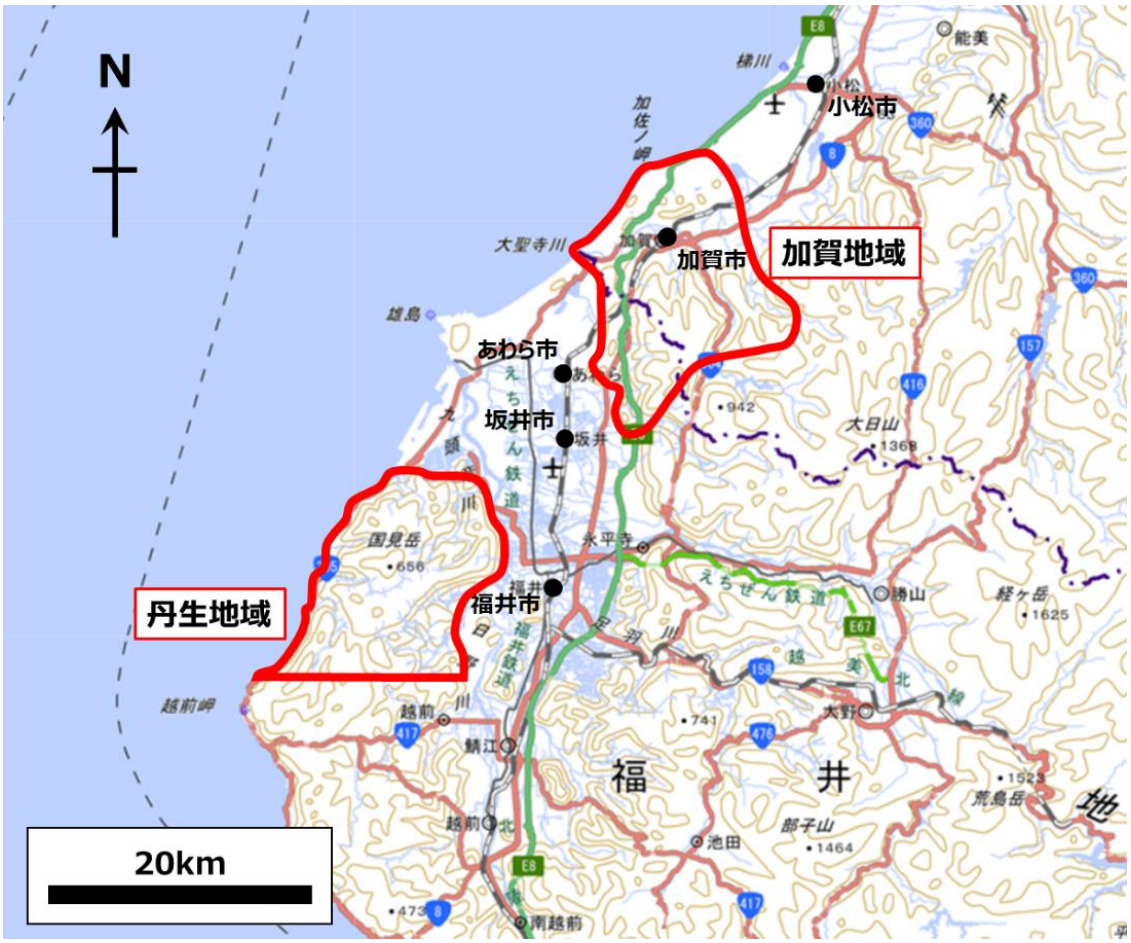
42) Web サイト「ピリカで化学工学」
（https://pirika.com/Chemistry/JP/ChemEng/SCFDenJavaScript.html）

4.3　地表地質調査試料分析（京都－福井沖）

4.3.1　概要

京都－福井沖を対象として地表調査を実施し、貯留層および遮蔽層に相当する岩石試料を採取して各種分析を行うことにより対象地点の貯留層および遮蔽層の性状を把握し、堆積システムを考察した。分析によって得られた値を、調査井掘削前 CO_2 挙動予測シミュレーションのパラメータの推定に利用する。

地表地質調査を実施した範囲を図 4.3-1 に示す。本作業において北側の調査範囲を加賀地域、南側の調査範囲を丹生地域と称する。



注 1）国土地理院ホームページ、地理院地図（電子国土 Web）[1] に加筆。
注 2）赤枠は調査範囲を示す。

図 4.3-1　調査対象地域

4.3.2　調査・分析試験内容

(1)　地表地質調査および分析試料採取

①　地表地質調査

貯留岩および遮蔽岩能力評価対象の岩石試料を採取した露頭において、岩相の記載、岩相の側方変化の記録、堆積相の推定、砂岩・泥岩比の記載を行い、岩相の評価を実施した。

②　試料採取

地表地質調査と並行して、貯留岩および遮蔽岩能力評価対象となる岩石試料を採取した。ハンドコアドリルもしくはハンマーを用いて露頭から採取するか転石から採取し、できるだけ風化の影響が少ない部分で露頭の代表的な性状を示す岩石を採取した。地表調査範囲の沿岸部は越前加賀海岸国定公園に指定されており露頭から岩石試料の採取は禁止されているため、沿岸部の露頭では転石から岩石試料を採取した。

(2)　試料分析項目および手法

①　岩石鉱物分析

貯留岩能力評価対象の砂岩および火山礫凝灰岩試料について、以下の a.、c.～e.の分析を 15 試料、b.の分析を 17 試料で実施した。遮蔽岩能力評価対象の泥岩およびシルト岩試料について、c.粒度分析と e.熱伝導率測定を除く a.、d.の分析を 5 試料、b.の分析を 6 試料で行った。

a.　岩石薄片鑑定

岩石試料にブルーレジン（青色染色樹脂）を注入し、孔隙部分が明瞭に識別できるようにしたうえで薄片を作成し、偏光顕微鏡を用いて岩相、構成粒子、基質量、孔隙性状、続成変質の観察を行った。

構成粒子の粒度、淘汰度および円磨度には変化幅がみられるため、その量比を ◎（非常に多い：30%以上）、○（多い：30%未満～10%以上）、△（普通：10%未満～5%以上）、＋（少ない：5%未満）で表した。孔隙について粒子間孔隙および粒子内孔隙の多くは初成孔隙と考えられ、溶脱と推定されるものは溶脱孔隙（二次孔隙）に区分した。孔隙率は視認孔隙率であり、視覚的な概値（目分量で求めたブルーレジンの割合）を示した。砂岩・泥岩の分類は、Pettijohn（1949）[2)] に従った。薄片鑑定は、Nikon 製の偏光顕微鏡である ECLIPSE LV100N POL を用いた。

b.　X 線鉱物分析

岩石試料を乾燥後、以下に示す各処理を施した試料を準備して X 線鉱物分析を実施し

た。

1) 未処理不定方位試料：鉱物の同定および半定量分析に使用する。
2) 定方位試料：主に粘土鉱物の同定に使用する。
3) エチレングリコール処理試料：粘土鉱物であるスメクタイトや各種混合層鉱物の膨潤性の判定に使用する。
4) 塩酸処理試料：粘土鉱物である緑泥石とカオリナイトの区別、鉄に富む鉱物および炭酸塩鉱物の判定に使用する。

分析によって同定された鉱物の X 線回折強度値は、石英外部標準法[3)]を用いて半定量化した。測定にはスペクトリス株式会社 PANalytical 製の X'PERT PRO 型自動 X 線回折分析装置を用いた。荒谷層砂岩 6-1 および糸生層シルト岩 10-1 については、斜プチロル沸石と輝沸石を同定するため、500℃と 600℃の加熱処理を行いピーク強度の変化を確認した[4)]。

c. 粒度分析（薄片ポイント法）

岩石試料は固結度が高く、粒子にほぐすことが困難であった。そのため、薄片ポイント法[5)]により分析を行った。粒子のカウント数は 500 点とし、測定格子点間隔は測定範囲が薄片全体を網羅するように設定した。粒度パラメータ（平均粒径、淘汰度、歪度、尖度）の算出には、Folk and Ward（1957）[6)]の式を用いた。

d. 孔径分布測定

岩石試料を約 5 mm 角大に成形し、それらを乾燥させて測定用試料とした。孔隙半径の算出には Washburn（1921）[7)]の式を用いた。測定にはマイクロメリティクス社製の AutoPore V 9600 型水銀ポロシメーターを用いた。

e. 熱伝導率測定

熱伝導率測定では、コアの長軸方向に対して垂直な方向で上下を切断した平粗面にプローブを押し当て、室温から 30℃までの温度変化を持たせプローブ法を実施した。測定には京都電子工業株式会社製の Kemtherm QTM-D3 迅速熱伝導率計を用いた。

② 貯留岩分析

貯留岩分析用にプラグコアを 15 個成形し、それらを乾燥した後、a.から e.の分析を実施した。以下の a.、b.の分析を荒谷層砂岩 1 個、荒谷層火山礫凝灰岩 1 個、河南層砂岩 2 個、国見層砂岩 8 個、国見層火山礫凝灰岩 2 個、糸生層砂岩 1 個の計 15 試料、c.の分析を河南層砂岩 1 個、国見層砂岩 1 個の計 2 試料、d.の分析を河南層砂岩 1 個、国見層砂岩 3 個の

計 4 試料、e.の分析を国見層砂岩 2 試料でそれぞれ行った。分析条件の根拠とした貯留岩の想定深度、圧力を表 4.3-1 に示す。

表 4.3-1　貯留岩の想定深度、圧力

層準・岩相	想定深度 (m)	静水圧 (MPa)	上載圧 (MPa)
荒谷層砂岩	3,000	30	66
荒谷層火山礫凝灰岩			
河南層砂岩			
国見層砂岩			
国見層火山礫凝灰岩			
糸生層砂岩			

a.　孔隙率、粒子密度、空気浸透率測定（大気圧下）

孔隙率および粒子密度測定については、コア試料の重量および体積を測定したうえでコア試料の粒子体積を測定し、次式[8)]を用いて孔隙率・粒子密度を算出した。測定にはコアラボ社製のヘリウムポロシメーターを用いた。

$$\Phi = \frac{BV\text{-}GV}{BV} \times 100$$

$$GD = \frac{m}{GV}$$

注）Φ：孔隙率（%）、BV：コアの体積（cm^3）、GV：コア粒子体積（cm^3）、GD：コア粒子密度（g/cm^3）、m：コア乾燥時重量（g）

空気浸透率についてはコア試料に空気を透過させ、その時の空気の流量と下流の大気圧との差圧を計測し、気体に対するダルシーの式[9)]より空気浸透率を算出した。

$$k_a = \frac{2000 P_1 \mu_a Q L}{(P_1^2 - P_2^2) A}$$

注）k_a：空気浸透率（mD）、μ_a：空気粘性（cP）、P_1：コア上流圧力（atm）、P_2：コア下流圧力（atm）、L：コア長さ（cm）、A：コア断面積（cm^2）、Q：空気の流量（cm^3/s）

測定時に加圧した空気が試料の側面から流れないように、コア試料に必要最低封圧として 2.76 MPa の封圧をかけて測定した。測定にはコアラボ社製のエアパーミアメーターを用いた。

b. 孔隙率、空気浸透率測定（封圧下）

封圧条件下での孔隙率と空気浸透率を測定した。測定にはコアラボ社製の自動コア分析装置を用いた。封圧条件は各コア試料で測定機器の最低封圧（7 MPa）と想定深度での封圧（36 MPa）、および中間の封圧（22 MPa）の 3 段階で測定を実施した各コア試料の設定封圧を表 4.3-2 に示す。

表 4.3-2　貯留岩コア試料の設定封圧、温度

層準・岩相	設定封圧（MPa）			設定温度（°C）
	一段階	二段階	三段階	
荒谷層砂岩	7	22	36	室温（25°C）
荒谷層火山礫凝灰岩				
河南層砂岩				
国見層砂岩				
国見層火山礫凝灰岩				
糸生層砂岩				

c. 水浸透率測定

水浸透率測定には、水浸透率のみの測定と相対浸透率測定前の水浸透率の測定があるが、装置や使用流体が異なるためここでは水浸透率のみの測定について述べる。大気圧下および封圧下の孔隙率、浸透率を測定したコアに対して水浸透率の測定を行った。測定条件は表 4.3-3 に示すとおりである。水の粘度μ_wは Wagner and Kruse（1998）[10] の式から算出した。

水浸透率測定では、三軸圧縮コアホルダーを用いて軸方向および周方向から全封圧をかけることで、貯留層条件の封圧を再現した。ブライン（NaCl:30,000 mg/L）を用いて、一定温度条件（40℃）にて測定した。数段階の流量で測定を実施し、流量と差圧の測定データからダルシーの式[9] を用いて水浸透率を算出した。

$$k_w=\frac{Q_w \mu_w L}{A \Delta P} \times 1000$$

注）k_w：水浸透率（mD）、L：コア試料の長さ（cm）、Qw：圧入流量（cm^3/s）、A：コア試料の断面積（cm^2）、μ_w：粘性（cP）、ΔP：差圧（atm）

表 4.3-3　水浸透率測定　圧力温度条件および使用流体

層準・岩相	実験条件				流体	
	上流圧 (MPa)	下流圧 (MPa)	有効封圧 (MPa)	温度 (℃)	ブライン	
					種類	粘度 (mPa･s)
河南層砂岩	10	9	4	40	NaCl (30,000 mg/L)	0.687
国見層砂岩		7				

d.　毛細管圧力測定

遠心分離法による空気－水系の排水（drainage）過程と吸水（imbibition）過程の毛細管圧力と水飽和率の測定を実施した。測定には Vinci 社製の遠心分離型毛細管圧力測定装置を用いた。毛細管圧力（Pc）は次式[11)]を用いて回転数から算出した。

$$Pc = \frac{\Delta\rho}{2} \times \left(\frac{2\pi N}{60}\right)^2 \times \left(r_2^2 - r_1^2\right)$$

注）Pc：毛細管圧力（Pa）、Δ ρ：ブラインと空気の密度差（kg/m^3）、N：回転数（rpm）、r_1：回転軸からコア試料上端までの長さ（m）、r_2：回転軸からコア試料下端までの長さ（m）

毛細管圧力はコア上端の流体入口で評価されるが、飽和率はコア平均値であり正確に評価するためにはコア上端の飽和率で評価する必要がある。Forbes の式[12)]を用いて飽和率を補正しコア上端での値に換算し、グラフ中に Forbes 補正として表示した。今回の試料には岩石が脆く変形の影響を受けやすい試料や岩石中に粘土鉱物を含み膨潤しやすい試料もあったため、水飽和率の測定値が 100%を超えた分析があった。測定値が 100%を超えた試料については上限が 100%になるように補正した。

e.　相対浸透率測定（CO_2－水系）

CO_2－水系の相対浸透率測定を実施した。相対浸透率測定を実施した試料は、相対浸透率測定前に水浸透率も測定した。飽和率評価のため測定には東芝社製の X 線 CT 装置を用いた。測定条件を表 4.3-4 に示す。測定条件は装置の制約を考慮し設定した。水と CO_2

の粘度はそれぞれ Wagner and Kruse （1998）[10]、Span and Wagner（1996）[13]の式から算出した。

砂岩試料の水浸透率が 1 mD 未満であったため、飽和水と CO_2 の一定流量での同時圧入での定常状態到達が困難と判断し、CO_2 圧入のみ行って、コア内の経時的な CO_2 飽和率分布を CT 値より求め、その分布に合うよう Lawrence Berkeley National Laboratory 製貯留層シミュレーターの TOUGH2 を用いて数値解析を行い、相対浸透率曲線を算出した。

表 4.3-4　相対浸透率測定　圧力温度条件および使用流体

試料名	実験条件				流体			
	上流圧 (MPa)	下流圧 (MPa)	有効封圧 (MPa)	温度 (℃)	ブライン		ガス	
					種類	粘度 (mPa･s)	種類	粘度 (mPa･s)
国見層砂岩5-1	11	7～9	3	40	KI (11.5 wt%)	0.653	CO_2	0.0478
国見層砂岩5-2		7						

③　遮蔽岩分析

遮蔽岩能力評価対象の試料について遮蔽岩分析用にプラグコアを成形し、2 試料が崩壊によりプラグコアの成形ができず、4 試料は成形できた。成形できた 4 試料について a.から e.の分析を実施した。以下の a.および b.の分析を荒谷層シルト岩 1 個、河南層泥岩 1 個、国見層シルト岩 1 個、糸生層シルト岩 1 個の計 4 試料、c.の分析を糸生層シルト岩 1 個、d.の分析を荒谷層シルト岩 1 個、河南層泥岩 1 個、国見層シルト岩 1 個の計 3 試料、e.の分析を河南層泥岩 1 個、国見層シルト岩 1 個の計 2 試料で行った。泥岩およびシルト岩は乾燥すると崩壊を起こす可能性があるため、乾燥せず湿潤状態を維持して c.と d.と e.の分析を行い、その後乾燥させて a.および b.の分析を行った。分析条件の根拠とした遮蔽岩の想定深度、圧力を表 4.3-5 に示す。

表 4.3-5　遮蔽岩の想定深度、圧力

層準・岩相	想定深度 (m)	静水圧 (MPa)	上載圧 (MPa)
荒谷層シルト岩	3,000	30	66
河南層泥岩			
国見層シルト岩			
糸生層シルト岩			

a.　孔隙率、粒子密度、空気浸透率測定（大気圧下）

②貯留岩分析の a.に示した手法で測定を実施した。

b.　孔隙率、空気浸透率測定（封圧下）

②貯留岩分析の b.に示した手法で測定を実施した。各コアの設定封圧を表 4.3-6 に示す。

表 4.3-6　遮蔽岩コアの設定封圧、温度

層準・岩相	設定封圧（MPa）			設定温度 (°C)
	一段階	二段階	三段階	
荒谷層シルト岩	7	22	36	室温 (25°C)
河南層泥岩				
国見層シルト岩				
糸生層シルト岩				

c.　水浸透率測定

②貯留岩分析の c.に示した手法で測定を実施した。測定の圧力温度条件および使用流体を表 4.3-7 に示す。スレッショルド圧力測定に使用したガス流体も表に示した。水と CO_2 の粘度はそれぞれ Wagner and Kruse （1998）[10]、Span and Wagner（1996）[13] の式から算出した。

表 4.3-7　水浸透率およびスレッショルド圧力測定　圧力温度条件および使用流体

層準・岩相	実験条件			流体			
	下流圧 (MPa)	有効封圧 (MPa)	温度 (℃)	ブライン		ガス	
				種類	粘度 (mPa･s)	種類	粘度 (mPa･s)
河南層泥岩	11.2	10.3	40	NaCl (30,000 mg/L)	0.717	CO_2	0.0556
国見層シルト岩							
糸生層シルト岩							

注 1）水と CO_2 の粘度はそれぞれ Wagner and Kruse （1998）[10]、Span and Wagner（1996）[13] の式から算出した。
注 2）糸生層シルト岩は水浸透率測定のみ実施し、スレッショルド圧力測定は実施していない。

d.　毛細管圧力測定

②貯留岩分析の d.に示した手法で測定を実施した。

e.　スレッショルド圧力測定

水浸透率測定後に CO_2－水系スレッショルド測定を実施した。スレッショルド圧力測定を実施した試料は、スレッショルド圧力測定前に水浸透率も測定した。測定手法はダイナミック法[14] を用いて、測定装置は水浸透率測定と同じ装置を用いた。測定条件を表 4.3-7 に示す。

④　岩石物性分析

円柱状の分析試料を成形し、a.から c.の測定を実施した。以下の a.および b.の分析を国見層砂岩 2 個、河南層砂岩 1 個、荒谷層シルト岩 1 個、河南層泥岩 1 個、糸生層シルト岩 1 個の計 6 試料、c.の分析を荒谷層シルト岩 1 個、河南層泥岩 1 個、糸生層シルト岩 1 個の計 3 試料で行った。

a.　弾性波速度試験

地盤工学会基準（JGS 2110-2009）[15] に準拠し弾性波速度試験を行った。計測した体積および質量から算出される湿潤密度、測定した P 波速度と S 波速度を用いて、次式[16] を用いて動ヤング率および動ポアソン比を算出した。

$$\nu_d = \frac{\left(V_p/V_s\right)^2 - 2}{2\{\left(V_p/V_s\right)^2 - 1\}} \quad , \quad E_d = \frac{\rho V_s^2\left(3V_p^2 - 4V_s^2\right)}{V_p^2 - V_s^2}$$

注）E_d：動ヤング率、ν_d：動ポアソン比、ρ：湿潤密度、V_p：計測された P 波速度、V_s：計測された S 波速度

b.　一軸、三軸圧縮試験

弾性波速度試験後に、地盤工学会基準（JGS 2531-2009）[17]に準拠し一軸・三軸圧縮試験を行った。一軸圧縮試験においてひずみゲージを用いて載荷による変形過程での縦・横の歪を計測し、静ポアソン比の算出を行った。三軸圧縮試験において砂岩試料は圧密排水条件（CD 試験）、泥岩およびシルト岩試料は非圧密非排水条件（UU 試験）で行った。三軸圧縮試験は 4 MPa、8 MPa、20 MPa の 3 封圧において 0.2 MPa の背圧で試験を実施し、各封圧条件での静ヤング率、破壊強度を計測した。一軸圧縮試験の結果を大気圧相当の結果として、三軸圧縮試験の各封圧条件での結果とあわせて評価し、摩擦角と固着力を算出した。測定にはテスコ株式会社製の電気式圧縮試験機および丸東製作所製の油圧式圧縮試験機を用いた。

c.　圧裂引張試験

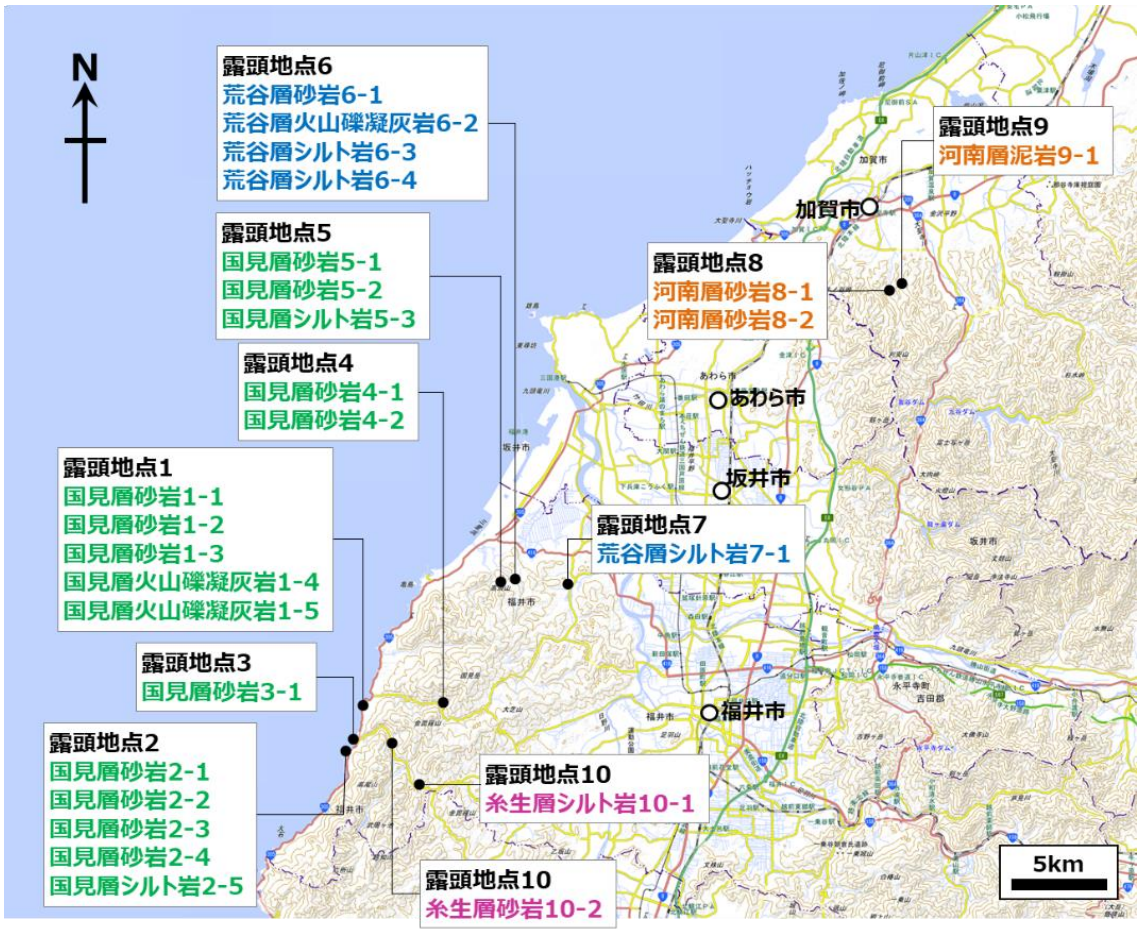
日本工業規格（JIS M0303）[18]の岩石の引張強さ試験方法に準拠し圧裂引張試験を行った。層理面に対して垂直な方向で圧縮した。測定にはテスコ株式会社製の載荷装置、株式会社東京測器研究所製の荷重計、株式会社小野測器製の変位計、株式会社 A&D 製の電子天秤を用いた。

4.3.3　地表調査および分析試料採取結果

丹生地域に分布する糸生層、国見層、荒谷層および加賀地域に分布する国見層相当層の河南層の層準を対象に調査を実施した。糸生層、国見層、河南層、荒谷層について粗粒相が卓越する層準は貯留層層準として、細粒相が卓越する層準は遮蔽層層準として期待される。糸生層砂岩、国見層砂岩および火山礫凝灰岩、河南層砂岩、荒谷層砂岩および火山凝灰岩を貯留岩能力の評価対象試料として採取した。糸生層シルト岩、国見層シルト岩、河南層泥岩、荒谷層シルト岩を遮蔽岩能力の評価対象試料として採取した。

基礎試錐「金沢沖」[19]において確認された黒瀬谷層は国見層および河南層に、東別所層は荒谷層に対比される[20]。基礎試錐「鳥取沖」[21]において確認された成相寺層は国見層および荒谷層に、古浦層は糸生層に対比される[22]。露頭で記載した堆積岩は粒度により分類した[23]。

露頭位置を図 4.3-2 に、丹生地域および加賀地域の層序を図 4.3-3 に示す。以下に、下位層準から順に各層準の岩石試料を採取した露頭の地質を記載する。



注）国土地理院ホームページ、地理院地図（電子国土 Web）[1)] から引用し、加筆した。

図 4.3-2　調査露頭位置図

年代層序区分	丹生地域			丹生地域採取層準	加賀地域			加賀地域採取層準
	地層名	岩相	堆積環境		地層名	岩相	堆積環境	
中期中新世前期(15.3~12.3Ma)	国見岳火山岩	玄武岩～安山岩溶岩・火砕岩、デイサイト溶岩ドーム	海浜、湖沼などの浅い水域～陸上		米ヶ脇層 尼御前岬層	礫岩、砂岩、泥岩、安山岩火砕岩	潟湖、潮間帯～浅海帯上部	
	市ノ瀬流紋岩	流紋岩火砕岩・溶岩ドーム	潮間帯～浅海帯上部		加佐ノ岬層	砂岩、シルト岩、火砕岩	潮間帯～浅海帯上部	
前期中新世後期(18~15.3Ma)					大聖寺層	砂岩、泥岩、安山岩火砕岩	浅海帯上部	
	荒谷層	砂岩、シルト岩、泥岩、流紋岩火砕岩、安山岩火砕岩	浅海帯上部～下部	荒谷層シルト岩7-1 荒谷層火山礫凝灰岩6-2 荒谷層シルト岩6-4 荒谷層砂岩6-1 荒谷層シルト岩6-3	細坪層	泥岩	浅海帯下部～半深海帯上部	
	国見層	礫岩、砂岩、シルト岩、デイサイト火砕岩、安山岩火砕岩	沖積平野～浅海帯上部（扇状地、河川、氾濫原、三角州、潟湖、外浜）	国見層砂岩5-2 国見層砂岩5-1 国見層シルト岩5-3 国見層火山礫凝灰岩1-4 国見層砂岩1-1 国見層砂岩1-2 国見層砂岩1-3 国見層火山礫凝灰岩1-5 国見層砂岩4-2 国見層砂岩4-1 国見層砂岩3-1 国見層砂岩2-1 国見層砂岩2-3 国見層砂岩2-5 国見層砂岩2-2 国見層砂岩2-4	河南層	砂岩、泥岩、珪長質火砕岩	潮間帯～浅海帯上部	河南層泥岩9-1 河南層砂岩8-1 河南層砂岩8-2
前期中新世中期(20~18Ma)	糸生層	礫岩、砂岩、シルト岩、泥岩、玄武岩～デイサイト溶岩・火砕岩	沖積平野（扇状地、河川、氾濫原、淡水湖）	糸生層砂岩10-2 糸生層シルト岩10-1	山中層 栢野層	珪長質火砕岩、砂岩、泥岩	沖積平野～浅海（扇状地、三角州、潟湖）	

注 1）丹生地域の層序図は鹿野ほか（2007）[24]を基に作成した。
注 2）加賀地域の層序図は三浦・吉澤（1987）[25]、紺野・山田（1988）[26]、鹿野ほか（1999）[27]を基に作成した。

図 4.3-3　丹生地域[24]および加賀地域[25]、[26]、[27]の層序

(1) 糸生層

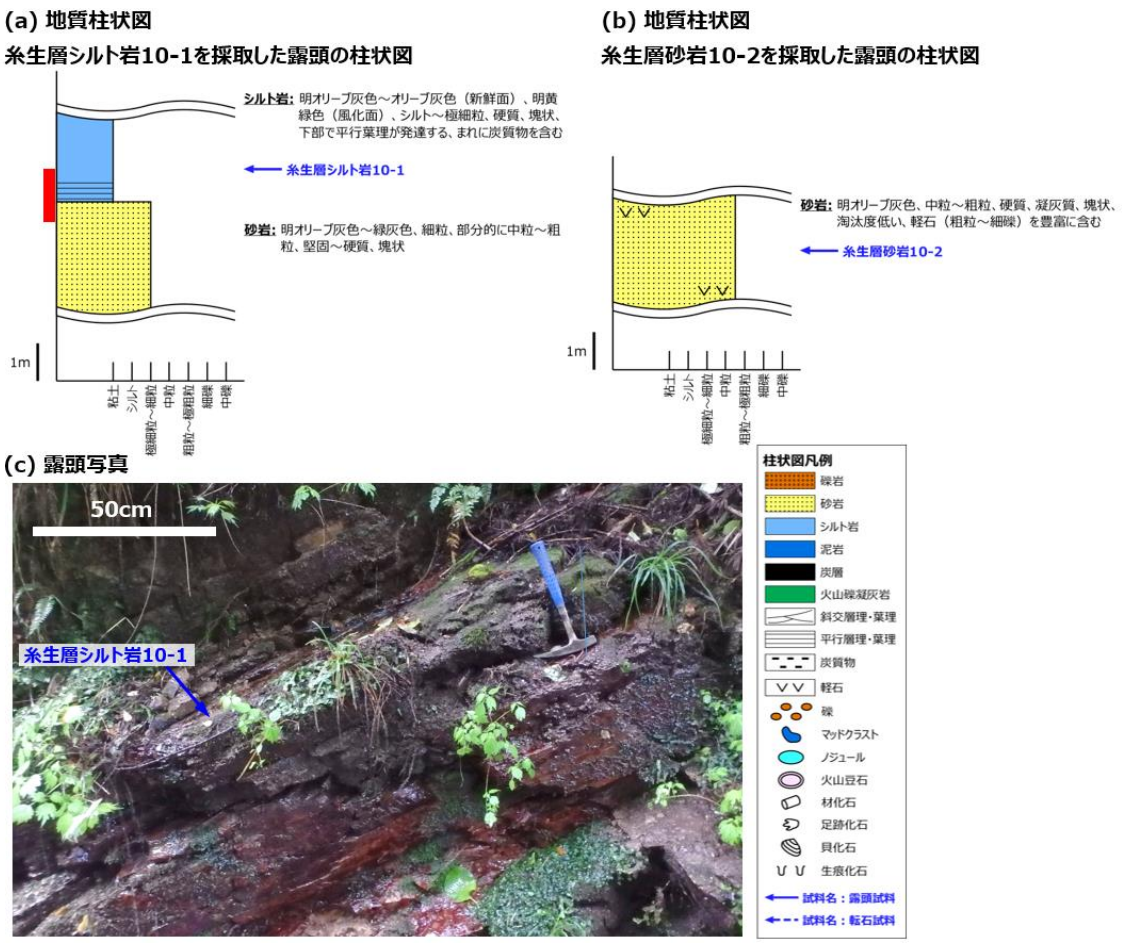
糸生層の貯留岩能力および遮蔽岩能力を評価するため、地表調査地域南側の丹生地域において露頭観察と試料採取を実施した。砂岩は貯留岩試料、シルト岩は遮蔽岩試料として採取した。

先行研究[24)]から糸生層は玄武岩～安山岩溶岩、火砕岩、デイサイト火砕岩等の火山岩、砂岩、シルト岩、泥岩、礫岩等の堆積岩からなり、下位の西谷流紋岩や上部白亜系の面谷流紋岩を不整合に覆う。糸生層は沖積平野（扇状地、河川、氾濫原、淡水湖）に堆積し、近傍の火山から溶岩や火山灰等の火山噴出物が噴出したと解釈される。

① 露頭地点 10

福井市水谷町と国山町にかけて大味川沿いの露頭において露頭観察を実施し糸生層砂岩およびシルト岩試料を採取した。作成した地質柱状図および露頭の写真を図 4.3-4 に示す。

本露頭は糸生層中～上部に相当する凝灰質砂岩およびシルト岩層が露出する。凝灰質砂岩・シルト岩は、火山ガラス片や長石片、火山岩片を含み、後背地での活発な火山活動が示唆される。糸生層シルト岩 10-1 を採取した露頭の西方 200 m の地域で玄武岩の貫入が認められ、貫入による接触変成作用を受けている可能性がある。本地域の糸生層堆積岩は淡水湖に堆積したと解釈される[24)]。糸生層シルト岩 10-1、糸生層砂岩 10-2 を採取した。



注）(a)の柱状図の赤線は露頭写真の撮影位置を示す。

図 4.3-4　糸生層シルト岩 10-1、糸生層砂岩 10-2 の(a)～(b)地質柱状図、(c)露頭写真

(2) 国見層

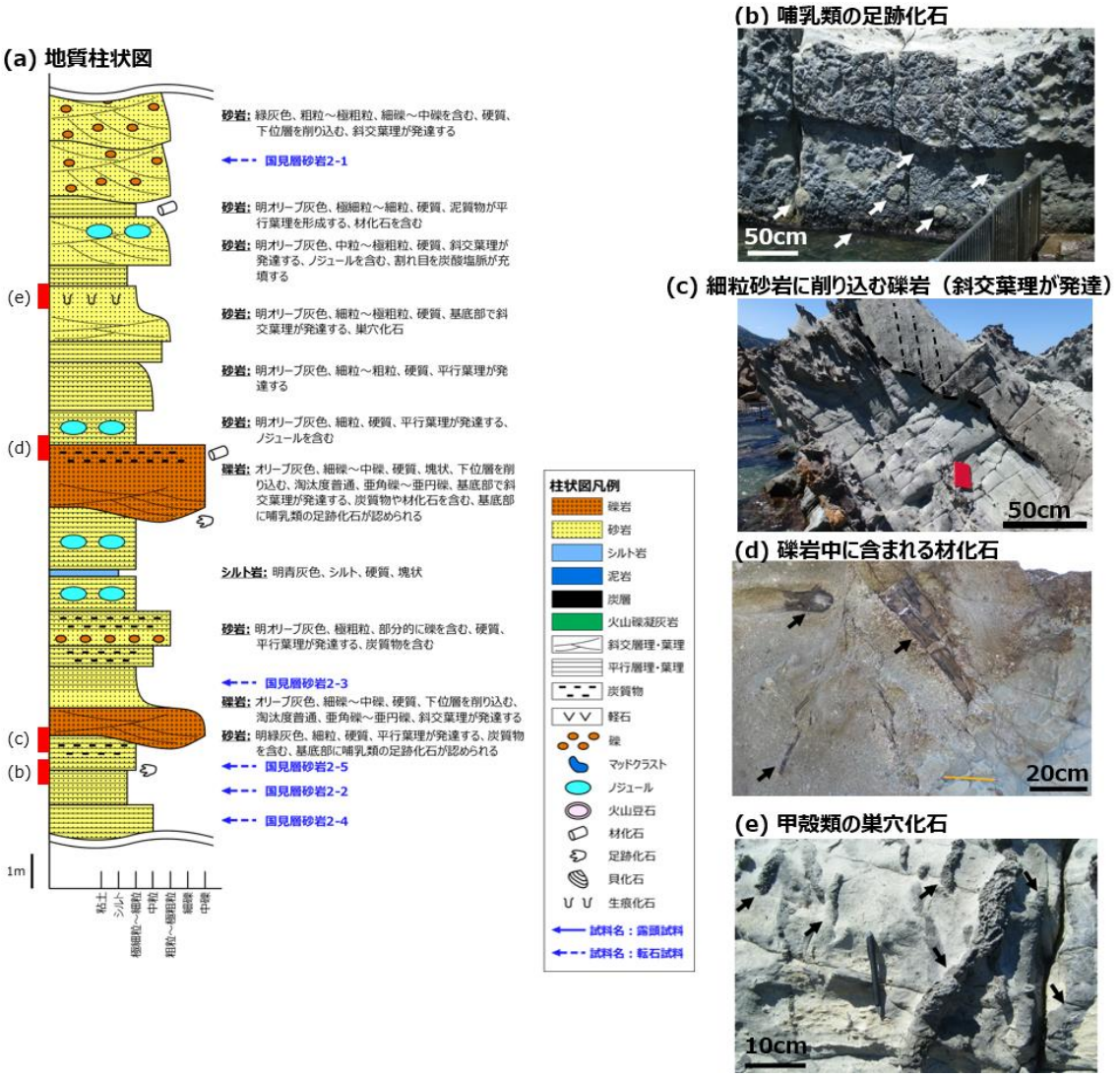
国見層の貯留岩能力および遮蔽岩能力を評価するため、地表調査地域南側の丹生地域において露頭観察と試料採取を実施した。砂岩および凝灰角礫岩は貯留岩試料、シルト岩は遮蔽岩試料として採取した。

先行研究[24)、28)]から国見層は砂岩、シルト岩、礫岩等の堆積岩を主体とし、デイサイト軽石火山礫凝灰岩～凝灰岩や安山岩火砕岩を複数枚挟在する。越前海岸に分布するデイサイト軽石火山礫凝灰岩～凝灰岩は下位よりそれぞれ K0～K11 と定義され、側方に連続して分布する。国見層の各露頭の層序関係を火砕岩 K0～K11 との関係から記載する。下位の糸生層との間には構造的な著しい不整合は認められない。国見層の堆積環境は沖積平野（扇状地、河川、氾濫原、三角州）から浅海帯上部（潟湖、外浜）へと繰り返し変化したと解釈される。

① 露頭地点 2

福井市茱崎町の軍艦岩の露頭において露頭観察を実施し国見層砂岩試料を採取した。作成した地質柱状図および露頭の写真を図 4.3-5 に示す。

本露頭は国見層の厚さ約 30 m の砂岩礫岩層が露出する。K0 の下位に位置し、地層は北東―南西方向の走向で約 60° 北に傾斜する。本露頭は 1 ユニットの厚さが 1～2 m の砂岩を主体とし、礫岩やシルト岩を挟む。本露頭の下部では極細粒～中粒砂岩が卓越し、上部では中粒～極粗粒砂岩が卓越する。下部の極細粒～中粒砂岩には炭質物や平行葉理の発達が認められ、上部の中粒～極粗粒砂岩および礫岩には斜交葉理や下位層への削り込みが認められる。ほかに植物化石や生痕化石が多数認められる。岩相および化石の産出状況から、下部の干潟が卓越する環境から、上部の河川流路が卓越する環境へ変化したと考えられる。本露頭から国見層砂岩 2-1、国見層砂岩 2-2、国見層砂岩 2-3、国見層砂岩 2-4、国見層砂岩 2-5 を採取した。



注 1）(a)の柱状図の赤線は露頭写真の撮影位置を示す。
注 2）(b)の白矢印は足跡化石の位置、(c)の黒破線は層理面、(d)の黒矢印は材化石の位置、(e)の黒矢印は巣穴化石の位置を示す。

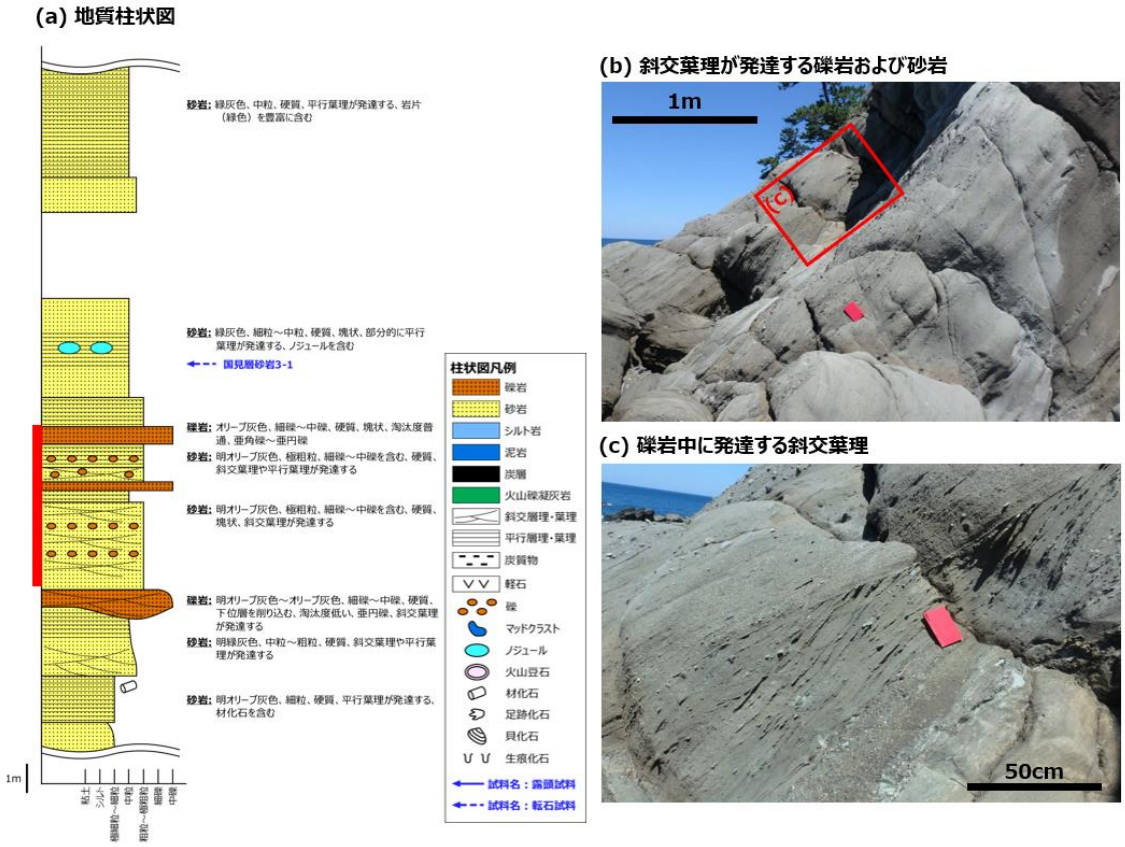
図 4.3-5　国見層砂岩 2-1、国見層砂岩 2-2、国見層砂岩 2-3、国見層砂岩 2-4、国見層砂岩 2-5 の(a)地質柱状図、(b)～(e)露頭写真

②　露頭地点 3

福井市大味町佐武の露頭において露頭観察を実施し国見層砂岩試料を採取した。作成した地質柱状図および露頭の写真を図 4.3-6 に示す。

本露頭は国見層の厚さ 20 m 以上の砂岩礫岩層が露出する。本露頭は K0 の下位に位置し、露頭地点 2 の上部と同層準もしくはやや上位の層準である。地層は北東―南西方向の走向で 40～50° 北に傾斜する。1 ユニットの厚さが数 m の平行ないし斜交葉理を伴う砂岩を主

体とし、礫岩を挟む。本露頭下部は、斜交葉理を伴う中粒～極粗粒砂岩からなり、礫質砂岩や礫岩を挟む。礫岩は下位層を削り込む。下部の砂岩からは材化石が認められる。上部は、平行葉理を伴う中粒～粗粒砂岩からなる。岩相から、河川流路が卓越する環境だったと考えられる。本露頭から国見層砂岩 3-1 を採取した。



注 1）(a)の柱状図の赤線は(b)露頭写真の撮影位置を示す。
注 2）(b)の露頭写真の赤枠は(c)の写真の撮影位置を示す。

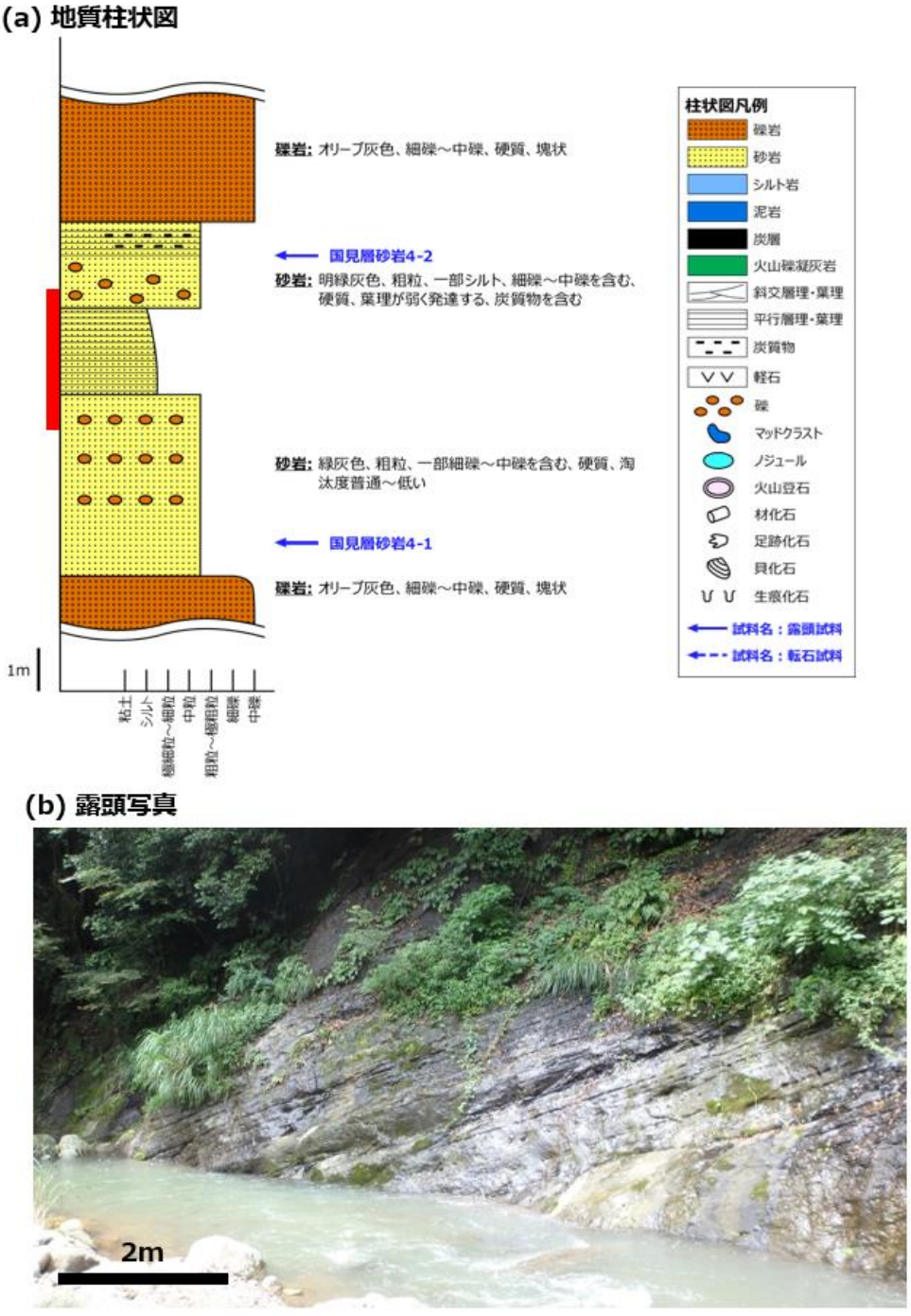
図 4.3-6　国見層砂岩 3-1 の(a)地質柱状図、(b)～(c)露頭写真

③　露頭地点 4

福井市大丹生町一光川沿いの露頭において露頭観察を実施し国見層砂岩試料を採取した。作成した地質柱状図および露頭の写真を図 4.3-7 に示す。

本露頭は国見層の厚さ 10 数 m の砂岩礫岩層が露出する。本露頭は K0 と K1 の間に位置し、地層は北東―南西方向の走向で約 20° 北に傾斜する。1 ユニットの厚さが 2～4 m の極細粒～中粒砂岩からなり、平行葉理が発達する。礫や炭質物が砂岩層中に認められ、層理に平行に礫が分布する。砂岩層の上下には、厚さ数 m の塊状礫岩が分布する。炭質物を伴う

ことや岩相から、河川流路ないし氾濫原の環境で堆積したと考えられる。本露頭から国見層砂岩 4-1、国見層砂岩 4-2 を採取した。



注）(a)の柱状図の赤線は露頭写真の撮影位置を示す。

図 4.3-7　国見層砂岩 4-1、国見層砂岩 4-2 の(a)地質柱状図、(b)露頭写真

④　露頭地点 1

福井市小丹生町南の海岸沿いの露頭において露頭観察を実施し国見層砂岩および火山礫凝灰岩試料を採取した。作成した地質柱状図および露頭の写真を下位から順に図 4.3-8 に示す。

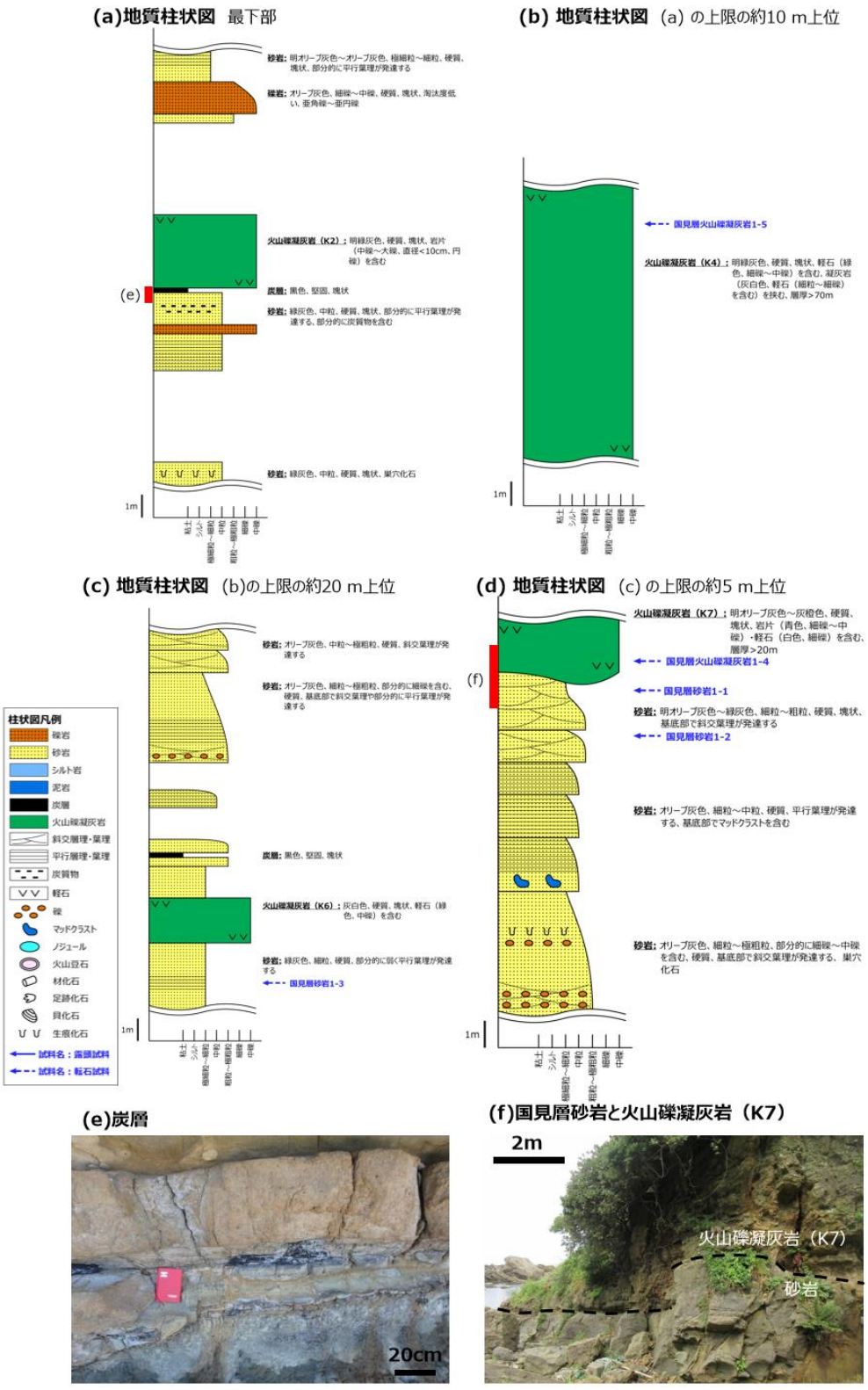
本露頭では、厚さ約 200　m の国見層の砂岩礫岩層および K0～K7 がほぼ連続して露出する。地層は北東―南西方向の走向で約 40～50°北に傾斜する。露頭地点 4 より上位に位置する K2～K7 層準周辺の調査および試料採取を行った。

K2 の下位では、平行葉理や炭質物を伴う厚さ数 m の中粒砂岩からなり、薄い炭層や礫岩層を挟む。K2 は厚さ約 4 m の直径 10 cm 以下の火山礫からなる火山礫凝灰岩である。

K4 は細礫～中礫サイズの軽石を伴う火山礫凝灰岩からなり、厚さ 70 m 以上を有する。

K6 は中礫サイズの軽石を伴う火山礫凝灰岩である。K6～K7 の間は 1 ユニットの厚さが 1～4 m の細粒～極粗粒砂岩からなり、斜交ないし平行葉理の発達や上方細粒化が認められる。砂岩の基底には礫やマッドクラストを伴うことがある。また、一部の砂岩では、生物擾乱により堆積構造が不明瞭になり、甲殻類の巣穴化石や貝化石を伴う。K7 は細礫～中礫サイズの岩片および軽石を伴う火山礫凝灰岩からなり、厚さ 20 m 以上を有する。堆積岩の岩相から、河口付近の河川流路や干潟等の潮間帯の堆積物と考えられる。

本露頭から国見層砂岩 1-1、国見層砂岩 1-2、国見層砂岩 1-3、国見層火山礫凝灰岩 1-4、国見層火山礫凝灰岩 1-5 を採取した。



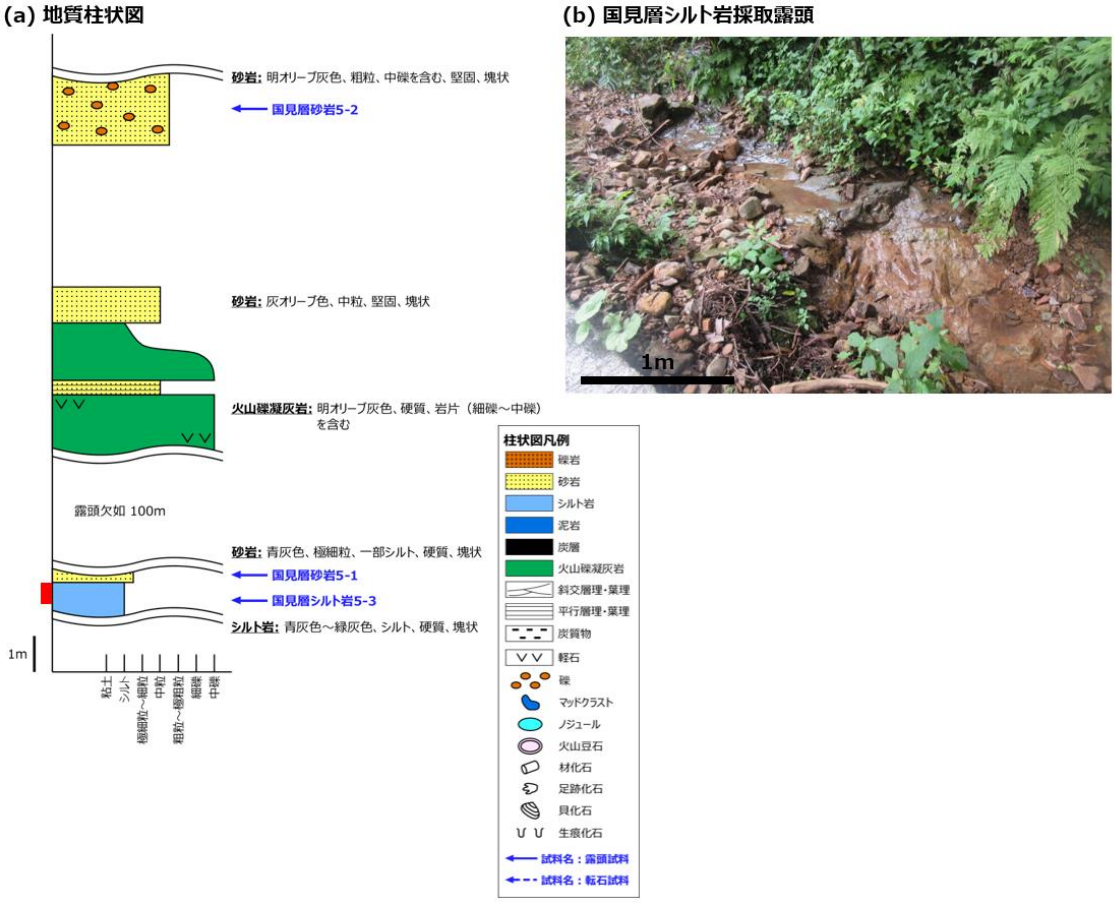
注 1）(a)、(d)の柱状図の赤線は露頭写真の撮影位置を示す。
注 2）柱状図は(a)がもっとも下位で、順番に上位になる。
注 3）(f)の写真の黒破線は国見層砂岩と K7 の火山礫凝灰岩の岩相境界を示す。

図 4.3-8　国見層砂岩 1-1、国見層砂岩 1-2、国見層砂岩 1-3、国見層火山礫凝灰岩 1-4、国見層火山礫凝灰岩 1-5 の(a)～(d)地質柱状図、(e)～(f)露頭写真

⑤　露頭地点 5

福井市市ノ瀬町の宮郷川支流沿いの露頭において露頭観察を実施し国見層砂岩およびシルト岩試料を採取した。作成した地質柱状図および露頭の写真を図 4.3-9 に示す。

本露頭は国見層最上部に相当するシルト岩および砂岩、火山礫凝灰岩が露出する。地層は北東―南西方向の走向で約 30° 南に傾斜する。下部ではシルト岩および極細粒砂岩からなり、その上位では露頭欠如区間を挟んで厚さ数 10 cm～数 m の塊状中粒砂岩および火山礫凝灰岩が分布する。火山礫凝灰岩は、細礫～中礫サイズの岩片を伴い、塊状を示す。露頭の連続性が悪く、堆積環境の推定は困難であった。本露頭から国見層砂岩 5-1、国見層砂岩 5-2、国見層シルト岩 5-3 を採取した。



注）(a)の柱状図の赤線は露頭写真の撮影位置を示す。

図 4.3-9　国見層砂岩 5-1、国見層砂岩 5-2、国見層シルト岩 5-3 の (a)地質柱状図、(b)露頭写真

(3) 河南層

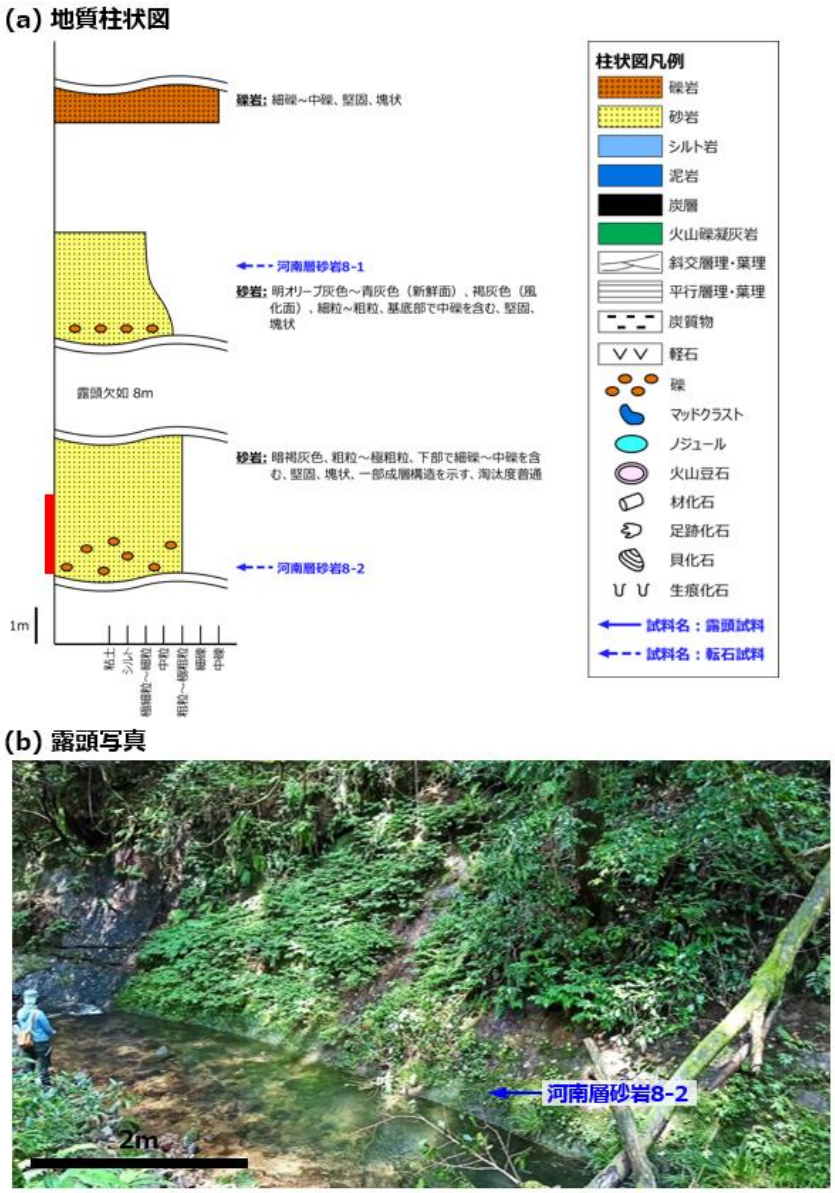
河南層の貯留岩能力および遮蔽岩能力を評価するため、地表調査地域北側の加賀地域において露頭観察と試料採取を実施した。砂岩は貯留岩試料、泥岩は遮蔽岩試料として採取した。

先行研究[26)]から河南層は砂岩泥岩互層からなる下部、角礫凝灰岩を主体とする上部からなり、山中層から漸移する。熱帯の潮間帯～浅海帯上部の堆積物と解釈され、丹生地域の国見層に対比される[24)]。

① 露頭地点 8

加賀市直下町の三谷川支流沿いの露頭において露頭観察を実施し河南層砂岩試料を採取した。作成した地質柱状図および露頭の写真を図 4.3-10 に示す。

本露頭は河南層に相当する砂岩および礫岩層が露出する。地層は南北方向の走向で約 10～20° 東に傾斜する。厚さ数 m の細礫～中礫を伴う砂岩が露出しており、成層構造が認められる。本露頭から河南層砂岩 8-1、河南層砂岩 8-2 を採取した。



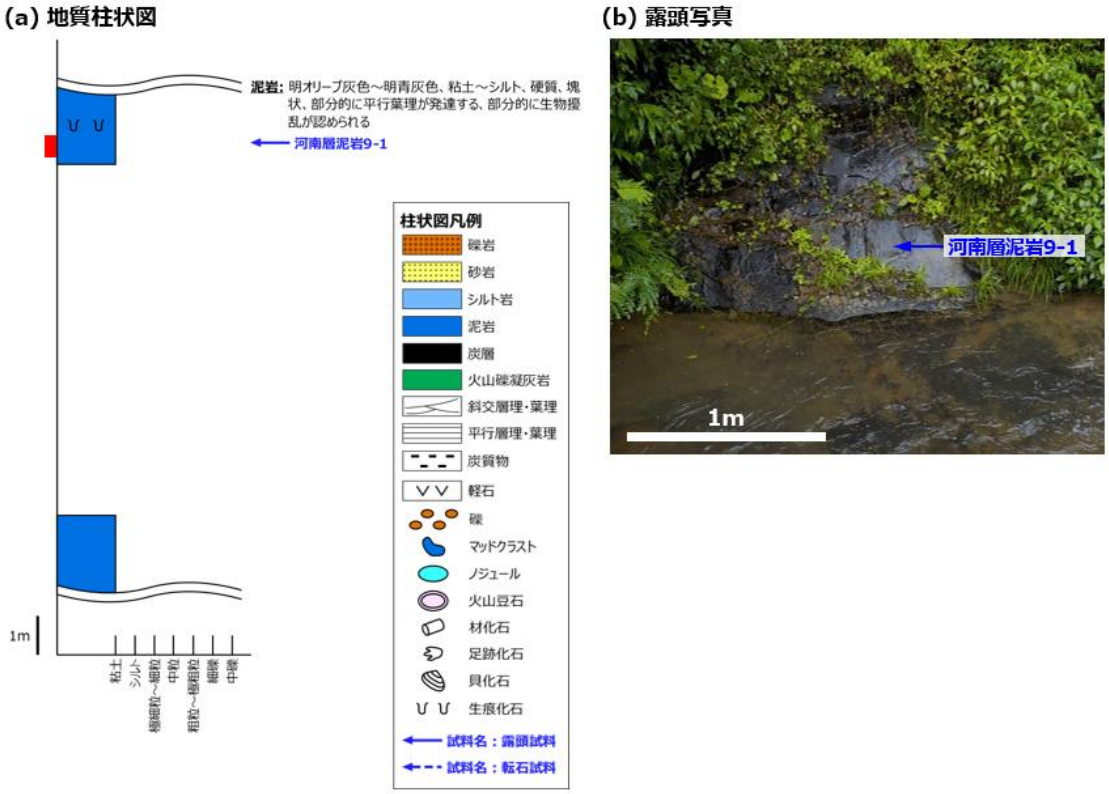
注）(a)の柱状図の赤線は露頭写真の撮影位置を示す。

図 4.3-10　河南層砂岩 8-1、河南層砂岩 8-2 の(a)地質柱状図、(b)露頭写真

②　露頭地点 9

加賀市日谷町の三谷川支流沿いの露頭において露頭観察を実施し河南層泥岩試料を採取した。作成した地質柱状図および露頭の写真を図 4.3-11 に示す。

本露頭では河南層に相当する泥岩層が露出する。地層の走向傾斜を測定できていないが、ほぼ水平と考えられる。塊状の泥岩からなり一部生物擾乱が認められる。本露頭から河南層泥岩 9-1 を採取した。



注）(a)の柱状図の赤線は露頭写真の撮影位置を示す。

図 4.3-11　河南層泥岩 9-1 の(a)地質柱状図、(b)露頭写真

(4) 荒谷層

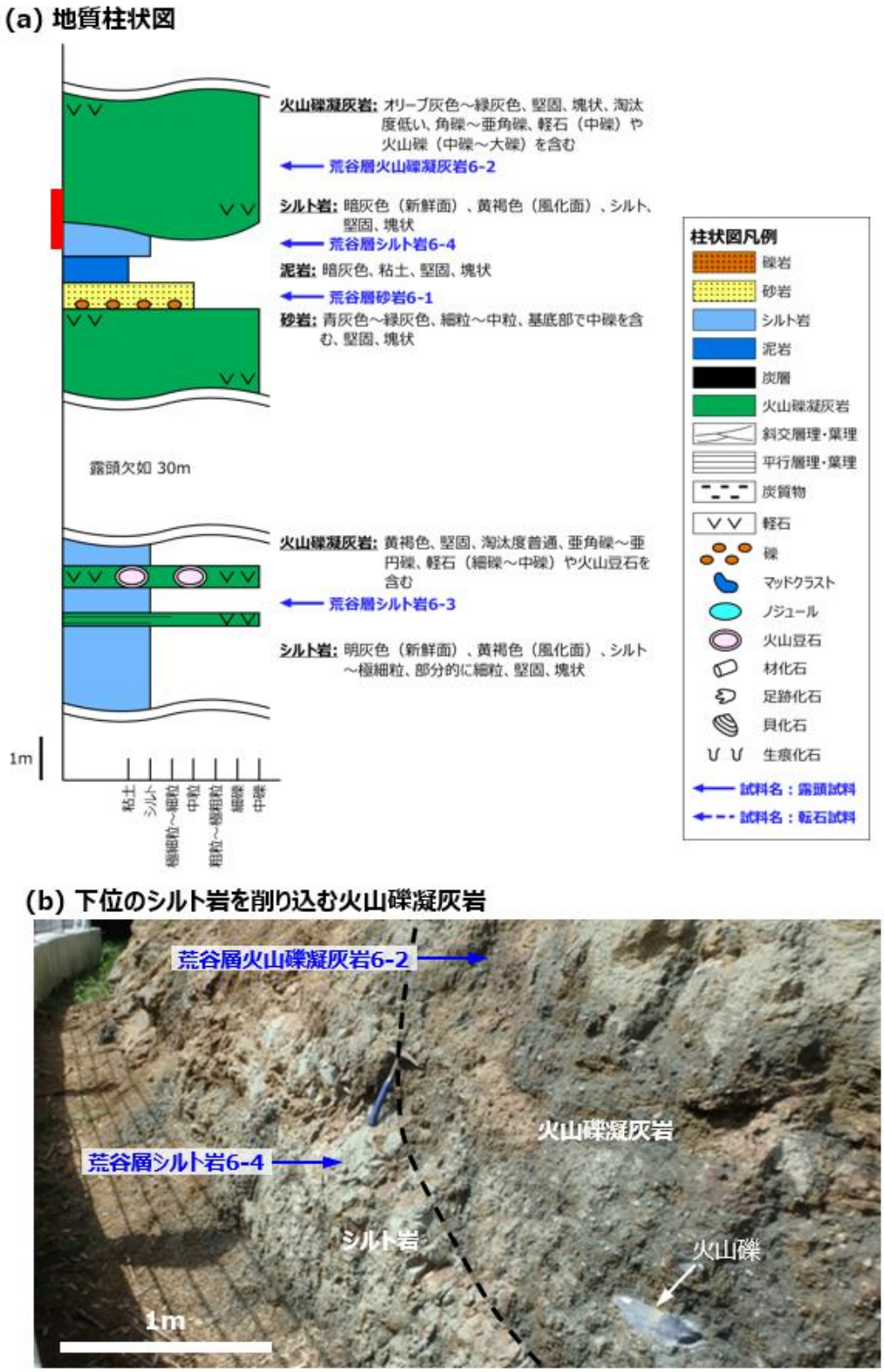
荒谷層の貯留岩能力および遮蔽岩能力を評価するため、地表調査地域南側の丹生地域において露頭観察と試料採取を実施した。砂岩および凝灰角礫岩は貯留岩試料、シルト岩は遮蔽岩試料として採取した。

先行研究[24)]によると荒谷層は凝灰質砂岩、シルト岩、泥岩を主体とし、下位の国見層から漸移する。基底に玄武岩質安山岩火山礫凝灰岩～凝灰岩等を伴い、中部には流紋岩軽石火山礫凝灰岩～凝灰岩を挟む。荒谷層は外浜から陸棚の環境で堆積したと解釈される[24)、27)]。

① 露頭地点 6

福井市市ノ瀬町の高須川付近の露頭において露頭観察を実施し荒谷層砂岩、火山礫凝灰岩、シルト岩試料を採取した。作成した地質柱状図および露頭の写真を図 4.3-12 に示す。

本露頭は荒谷層下部に相当するシルト岩および火山礫凝灰岩が主に露出する。露頭中部に砂岩を挟む。地層は北東―南西方向の走向で約 40～50° 南に傾斜する。下部では厚さ数 10 cm～2 m の塊状のシルト岩中に厚さ数 10 cm の軽石を伴う火山礫凝灰岩を挟む。その上位では露頭欠如区間を挟んで厚さ 2 m 以上の火山礫凝灰岩が砂岩～泥岩を挟んで分布する。火山礫凝灰岩は中礫～大礫サイズの軽石を伴い、下位層を大きく削り込む。砂岩～泥岩は塊状を示し、砂岩の基底には中礫が含まれる。厚い火山礫凝灰岩が下位層を削り込んで重なることから、火山が近傍の後背地に位置する浅海の環境で、活発な火山活動により火砕岩が堆積したと考えられる。本露頭から荒谷層砂岩 6-1、荒谷層火山礫凝灰岩 6-2、荒谷層シルト岩 6-3、荒谷層シルト岩 6-4 を採取した。



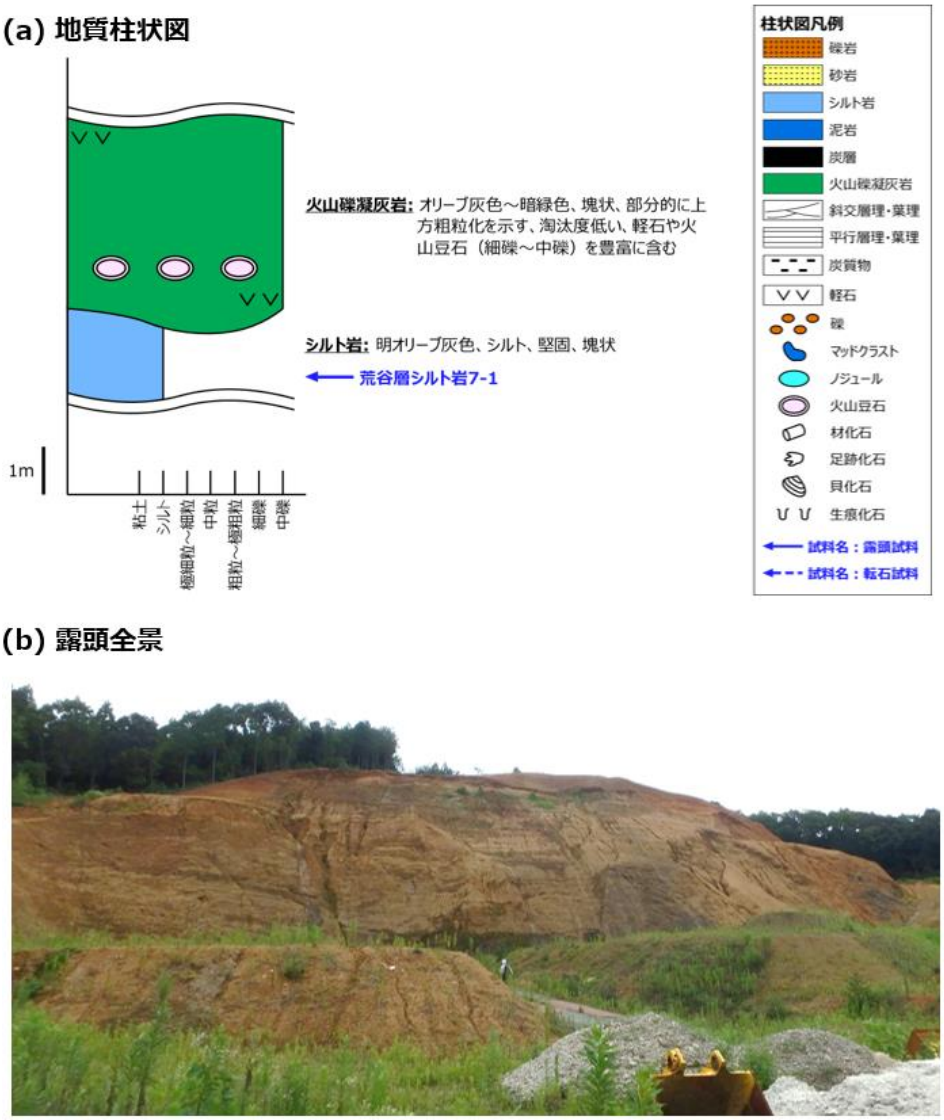
注 1）(a)の柱状図の赤線は露頭写真の撮影位置を示す。
注 2）(b)の黒破線は火山礫凝灰岩の削り込みを示す。

図 4.3-12　荒谷層砂岩 6-1、荒谷層火山礫凝灰岩 6-2、荒谷層シルト岩 6-3、荒谷層シルト岩 6-4 の(a)地質柱状図、(b)露頭写真

② 露頭地点 7

福井市燈豊町の露頭において露頭観察を実施し荒谷層シルト岩試料を採取した。作成した地質柱状図および露頭の写真を図 4.3-13 に示す。

本露頭は荒谷層中部に相当する火山礫凝灰岩およびシルト岩が露出する。露頭は幅約 50 m、高さ約 20 m の露頭である。地層は東北東―西南西方向の走向で約 20° 北に傾斜する。厚さ 10 m 以上の火山礫凝灰岩が下位のシルト岩を削り込む。火山礫凝灰岩には、火山豆石が顕著に認められ、一部で上方細粒化やシルト岩を伴う。火山豆石は水分を伴う噴煙柱の中で火山礫と火山灰もしくは火山灰同士が付着したものであり、浅海域において水中噴火が起こったと考えられる。本露頭から荒谷層シルト岩 7-1 を採取した。



注）(b)の写真中央に写っている調査者は身長 180 cm である。

図 4.3-13　荒谷層シルト岩 7-1 の(a)地質柱状図、(b)露頭写真

(5)　地表調査まとめ

丹生地域に分布する糸生層、国見層、荒谷層および加賀地域に分布する国見層相当層の河南層の層準の地表調査を実施し、貯留岩および遮蔽岩に相当する以下の試料を採取した。同じ層準の中でもさまざまな堆積環境が推定され、堆積環境により貯留岩能力および遮蔽岩能力に差がある可能性を考慮し、堆積環境の異なる試料を採取した。

貯留岩能力評価対象試料：荒谷層（1 地点 2 試料）
河南層（1 地点 2 試料）
国見層（5 地点 15 試料）
糸生層（1 地点 1 試料）

遮蔽岩能力評価対象試料：荒谷層（2 地点 3 試料）
河南層（1 地点 1 試料）
国見層（1 地点 1 試料）
糸生層（1 地点 1 試料）

対象層準について推定した堆積環境模式図 4.3-14 に示す。先行研究[24)、27)]によると、丹生地域に分布する糸生層は湖や河川の環境、国見層は河川から三角州や外浜の環境、荒谷層は外浜から陸棚の環境で堆積したとされ、糸生層から荒谷層が堆積した時代は堆積盆地の沈降に伴い海進が進んだと推定される。加賀地域の河南層は、丹生地域の国見層に対比され、国見層よりも浅海域で堆積したと推定される。各層準には凝灰岩や火山礫凝灰岩が複数挟まれており、活発な火山活動が起こっていたと推定される。地表調査でも同様の結果が得られた。

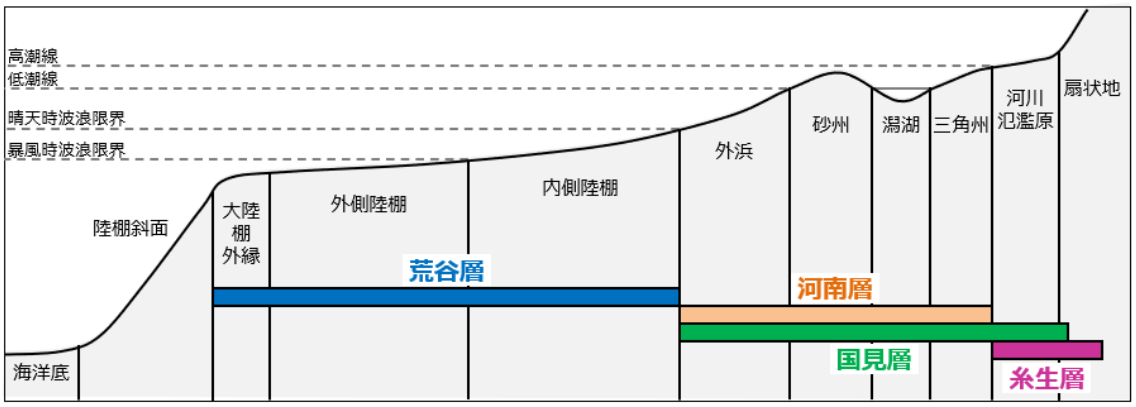


図 4.3-14　対象層準について推定した堆積環境模式図

4.3.4　試料分析結果

地表調査で採取した糸生層、国見層、河南層、荒谷層の岩石試料について、形状、岩相、硬さ等を考慮し各種分析に供する試料を選出した。試料と分析項目を表 4.3-8 に示す。

表 4.3-8　試料と分析項目

	試料名	岩相	岩石鉱物分析								貯留岩分析						遮蔽岩分析						岩石物性					
			貯留岩					遮蔽岩			貯留岩						遮蔽岩						貯留岩		遮蔽岩			
			岩石薄片鑑定	X線鉱物分析	粒度分析（薄片ポイント法）	孔径分布測定	熱伝導率測定	岩石薄片鑑定	X線鉱物分析	孔径分布測定	ブラグコア成形	孔隙率、粒子密度、空気浸透率測定（大気圧下）	孔隙率、空気浸透率測定（封圧下）	水浸透率測定	毛管圧力測定	相対浸透率測定	ブラグコア成形	孔隙率、粒子密度、空気浸透率測定（大気圧下）	孔隙率、空気浸透率測定（封圧下）	水浸透率測定	毛管圧力測定	スレッショルド圧力測定	弾性波速度試験	一軸、三軸圧縮強度	弾性波速度試験	一軸、三軸圧縮強度	圧裂試験
貯留岩能力評価対象試料	荒谷層砂岩6-1	砂岩	●	●	●	●	●				●	●	●															
	荒谷層火山礫凝灰岩6-2	火山礫凝灰岩	●	●	●	●	●				●	●	●															
	河南層砂岩8-1	砂岩	●	●	●	●	●				●	●	●															
	河南層砂岩8-2	砂岩	●	●	●	●	●				●	●	●	●	●								●	●				
	国見層砂岩1-1	砂岩（河口流路）	●	●	●	●	●				●	●	●	●	●													
	国見層砂岩1-2	砂岩（河口流路）	●	●	●	●	●				●	●	●															
	国見層砂岩1-3	砂岩（潟-内湾？）	●	●	●	●	●				●	●	●															
	国見層火山礫凝灰岩1-4	火山礫凝灰岩（K7）	●	●	●	●	●				●	●	●															
	国見層火山礫凝灰岩1-5	火山礫凝灰岩（K4）	●	●	●	●	●				●	●	●															
	国見層砂岩2-1	砂岩（河川流路）	●	●	●	●	●				●	●	●										●	●				
	国見層砂岩2-2	砂岩（砂質干潟）	●	●	●	●	●				●	●	●										●	●				
	国見層砂岩2-3	砂岩（河川流路）		●																								
	国見層砂岩2-4	砂岩（砂質干潟）		●																								
	国見層砂岩3-1	砂岩（河川流路）	●	●	●	●	●				●	●	●															
	国見層砂岩5-1	砂岩	●	●	●	●	●				●	●	●		●	●												
	国見層砂岩5-2	砂岩	●	●	●	●	●				●	●	●		●	●												
	糸生層砂岩10-2	砂岩	●	●	●	●	●				●	●	●															
遮蔽岩能力評価対象試料	荒谷層シルト岩6-3	シルト岩						●	●	●							×	×	×									
	荒谷層シルト岩6-4	シルト岩							●								●	●	●		●				●	●	●	
	荒谷層シルト岩7-1	シルト岩						●	●	●							×	×	×									
	河南層泥岩9-1	泥岩						●	●	●							●	●	●		●	●			●	●	●	
	国見層シルト岩5-3	シルト岩						●	●	●							●	●	●		●	●						
	糸生層シルト岩10-1	シルト岩						●	●	●							●	●	●	●					●	●	●	
	分析個数		15	17	15	15	15	5	6	5	15	15	15	2	4	2	4	4	3	1	3	2	3	3	3	3	3	

注 1）×は分析を予定していたが崩壊等により分析ができなかった試料を示す。
注 2）貯留岩能力評価用の試料を黄色、遮蔽岩能力評価用の試料を水色で着色した。

(1)　岩石鉱物分析

①　岩石薄片鑑定

岩石薄片鑑定結果を表 4.3-9(1)～(3)に示す。薄片写真を図 4.3-15(1)～(3)に示す。

a.　貯留岩試料

荒谷層の砂岩試料は石質ワッケに分類される。結晶片として石英、斜長石、不透明鉱物等を、岩片として軽石、凝灰質砂岩等を含む。荒谷層の火山礫凝灰岩試料は粒子として石英、斜長石、軽石片、真珠岩片、ガラス質の流紋岩片を含む。開口割れ目がわずかに観察されるものの粒子間孔隙は凝灰質の砕屑物で充填され、視認孔隙率は 1%程度である。基質は 25%程度と少ない。岩片として細礫～極細粒サイズの軽石片を多量含み、少量の真珠岩片とガラス質の流紋岩片を伴う。粒子としては細粒～極細粒サイズの石英、斜長石を少量～微量含む。

河南層の砂岩試料は石質ワッケに分類される。凝灰質で、細粒～極細粒サイズの軽石を多量含み、中量の凝灰質泥岩片、少量～微量の極細粒サイズの石英、斜長石、不透明鉱物・火山ガラスを伴う。凝灰質泥岩片が圧密を受け粒子間に入り込み一見基質のように見える疑似マトリックス（以下、「pseudo matrix」と称する。）を形成する。

国見層の砂岩は石質アレナイト～ワッケに分類される。結晶片として石英、斜長石、アルカリ長石、不透明鉱物、黒雲母、緑泥石等を、岩片として泥質岩片、真珠岩片、火山ガラス片、花崗岩片、チャート片等を含む。国見層の砂岩試料 8 個のうち、国見層砂岩 1-1、国見層砂岩 1-2、国見層砂岩 1-3、国見層砂岩 2-1、国見層砂岩 2-2、国見層砂岩 3-1 は安山岩片を、国見層砂岩 5-1、国見層砂岩 5-2 はチャート片と花崗岩片を主体とする。国見層の火山礫凝灰岩試料は異種岩片からなる凝灰岩である。基質が 10～50%程度で、岩片としてシルト片を多量に含み軽石片、安山岩片、真珠岩片、火山ガラスを伴う。結晶片として斜長石を多量～中量、アルカリ長石を中量～少量、石英を少量～微量含む。国見層砂岩 1-3、国見層凝灰角礫岩 1-4、国見層凝灰角礫岩 1-5 はシルト片を、国見層砂岩 2-1、国見層砂岩 2-2 は泥質岩片を多量～中量含むが、この中の一部は pseudo matrix として存在する。国見層の砂岩および凝灰角礫岩の粒子間孔隙は砕屑粒子もしくは緑泥石、イライト／スメクタイト混合層粘土鉱物（以下、「I/S mix 粘土鉱物」と称する。）に充填されている。国見層凝灰角礫岩 1-4、国見層凝灰角礫岩 1-5、国見層砂岩 5-1 は斜長石とアルカリ長石が溶脱し、視認孔隙率は最大で 5%に達する。

糸生層の砂岩試料は凝灰質で基質は 20%程度と少なく石質アレナイトである。岩片は粗粒～極細粒サイズの安山岩、流紋岩、真珠岩片が主体で、結晶片は粗粒～極細粒サイズ

の石英、斜長石を主とし黄鉄鉱等を伴う。粒子間は砕屑粒子に充填され視認孔隙はほとんど認められない。

b. 遮蔽岩試料

荒谷層のシルト岩試料は結晶片として極細粒サイズの石英、長石を少量～微量含み、岩片として極細粒サイズの泥岩を含む。

河南層の泥岩試料は基質が粘土からなり、結晶片として極細粒サイズの石英を、岩片として極細粒サイズの炭質物等を少量含む。

国見層のシルト岩試料はシルト質の基質が 75%程度と基質主体で均一な岩相である。結晶片として細粒～極細粒サイズの石英、斜長石片を中～少量、岩片として安山岩片を微量に伴う。圧密を受け基質中の炭化物が定向配列を呈し、弱い葉理構造がある。

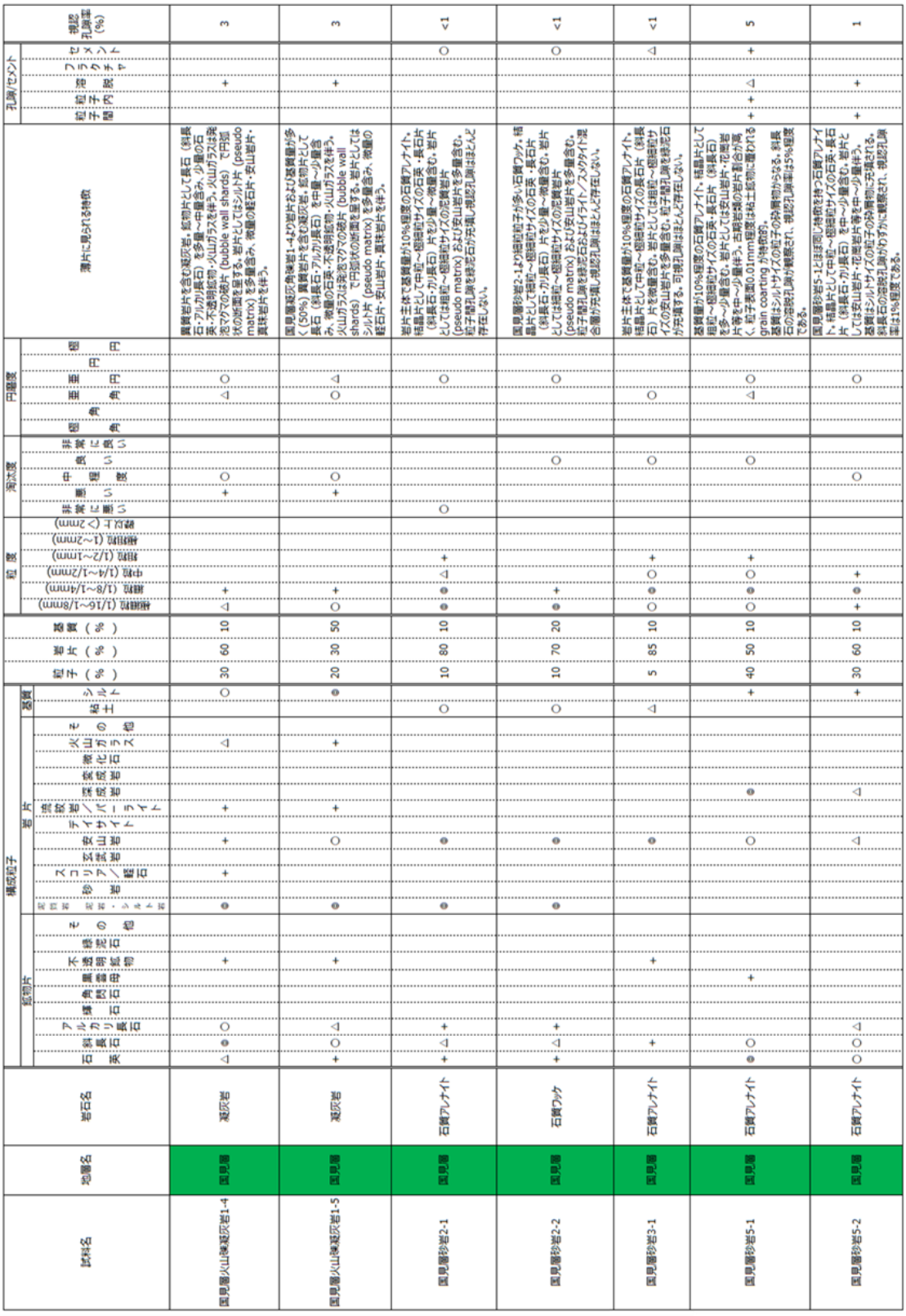
糸生層のシルト岩試料は凝灰質で、岩片として細粒～中粒サイズの火山ガラス、軽石等を中量含む。視認孔隙はほとんど認められない。

表 4.3-9(1)　岩石薄片鑑定結果

試料名	地層名	岩石名	構成粒子 岩片	構成粒子 鉱物片	構成粒子 基質	粒度	淘汰度	円磨度	孔隙/セメント	観察孔隙率 (%)
			石英 / 長石 / アルカリ長石 / 斜長石 / 黒雲母 / 白雲母 / 緑泥石 / 角閃石 / 輝石 / その他	石英 / 長石 / アルカリ長石 / 斜長石 / 黒雲母 / 白雲母 / 緑泥石 / 角閃石 / 輝石 / その他	シルト / 粘土	粒子 (%) / 岩片 (%) / 基質 (%) / 礫岩 (1/16~1/8mm) / 礫岩 (1/8~1/4mm) / 礫岩 (1/4~1/2mm) / 中粒 (1/2~1mm) / 粗粒 (1~2mm) / 粗粒 (>2mm)	淘汰している / 淘汰 / 中 / 悪い / 非常に悪い	円 / 亜円 / 亜角 / 角 / 亜角	セメント / ひびわれ / 空隙 / 粒子内 / 粒子間	
試料名	地層名	岩石名	構成粒子 岩片	構成粒子 鉱物片	構成粒子 基質	粒度	淘汰度	円磨度	孔隙/セメント	観察孔隙率 (%)
荒谷層砂岩6-1	荒谷層	石質ワック	＋ / △ / ○ / ◎	○	◎	○ / ● / ● / ● / ● / ● / ● / ●	○ / △	○		1
荒谷層火山噴出物砂岩6-2	荒谷層	火山噴出物質	＋ / △ / ○ / ◎	○	○	25 / 50 / 25 / ○ / ● / ○ / ○ / ＋ / ＋	○ / △	○	＋	1
河南層砂岩8-1	河南層	石質ワック	○ / △ / ＋	＋	○	30 / 60 / 10 / ● / ● / ○ / ＋ / ＋	○ / △	○		<1
河南層砂岩8-2	河南層	石質ワック	○ / △ / ＋ / ●	＋ / △	● / ○	10 / 70 / 20 / ● / ○ / ＋ / ＋	○ / △	○		1
国見層砂岩1-1	国見層	石質アレナイト	＋ / △ / ○ / ●	＋	○ / △	20 / 60 / 20 / ○ / ● / ● / ＋ / ＋	○ / △	○ / △		<1
国見層砂岩1-2	国見層	石質アレナイト	○ / ＋ / ●	＋	○ / △	10 / 60 / 30 / ● / ● / ＋ / ＋	○ / △	○		<1
国見層砂岩1-3	国見層	石質ワック	△ / ＋ / ●	＋	● / ○	20 / 60 / 20 / ○ / ● / ＋ / ＋ / ＋	○ / △	○		<1

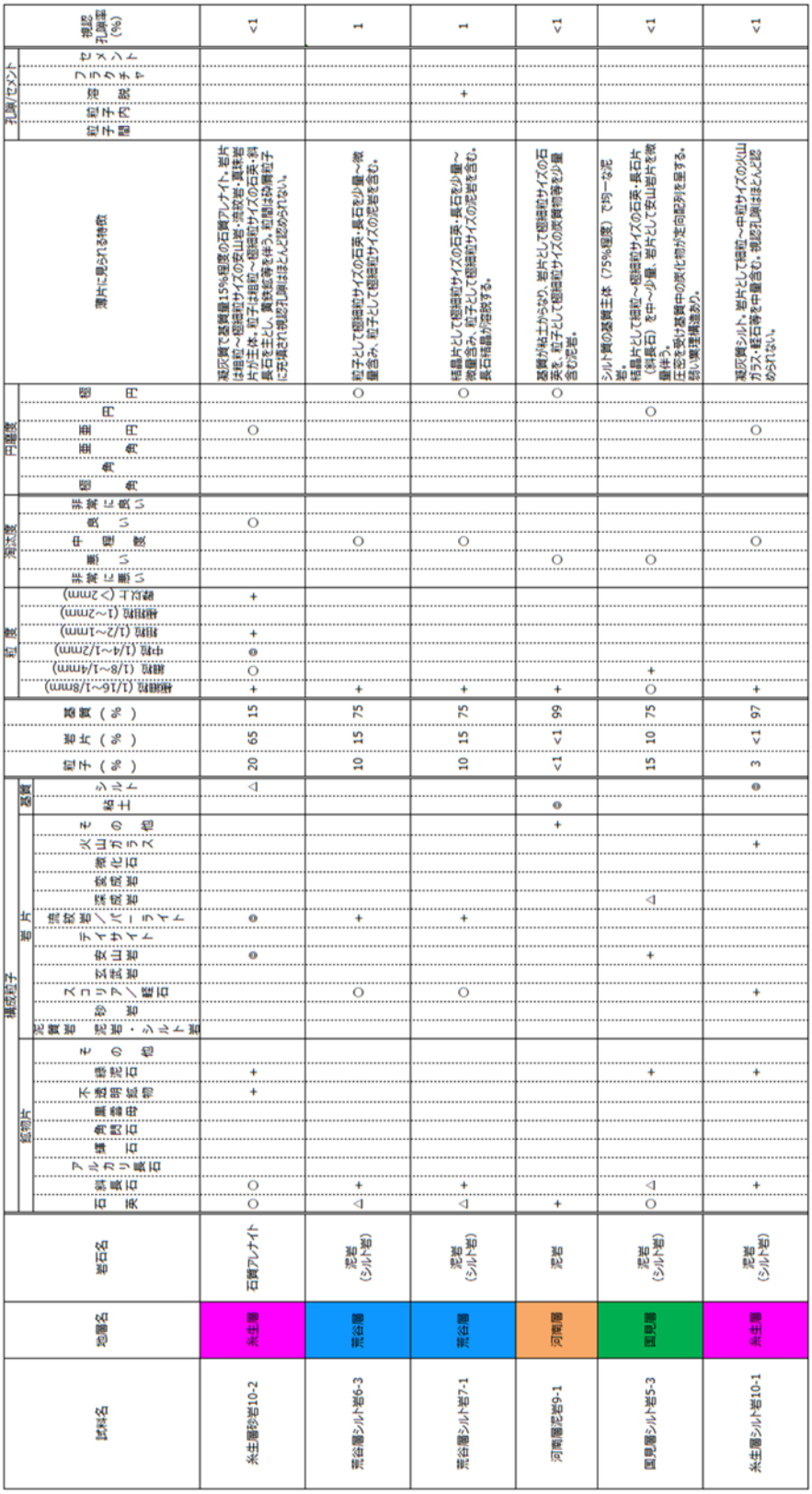
注）◎は非常に多い（30%以上）、○は多い～普通（30%未満 10%以上）、△は普通～少ない（10%未満 5%以上）、＋は少ない（5%未満）を示す。

表 4.3-9(2)　岩石薄片鑑定結果

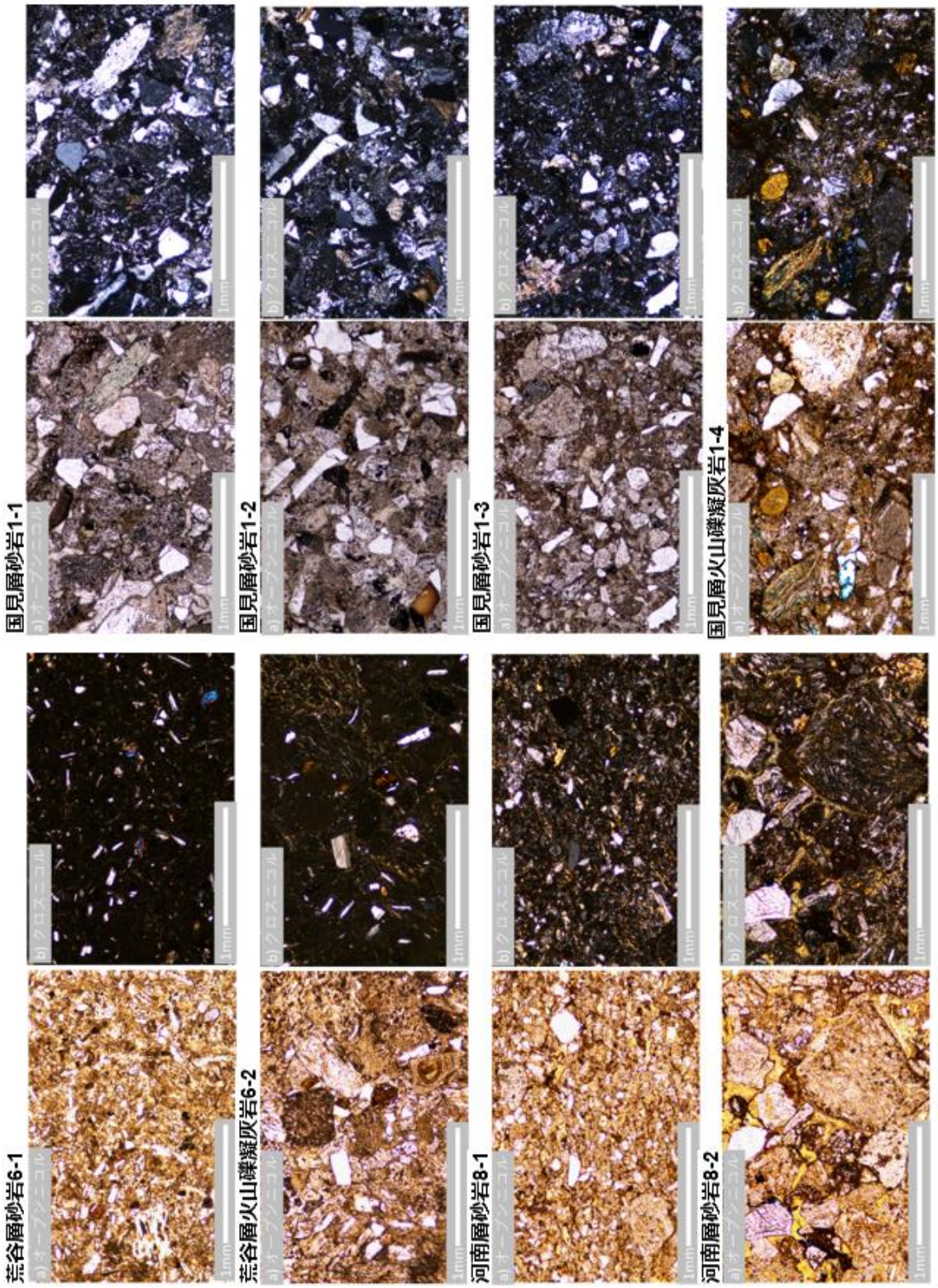


| 試料名 | 地層名 | 岩石名 | 構成粒子 | | |

表 4.3-9(3)　岩石薄片鑑定結果

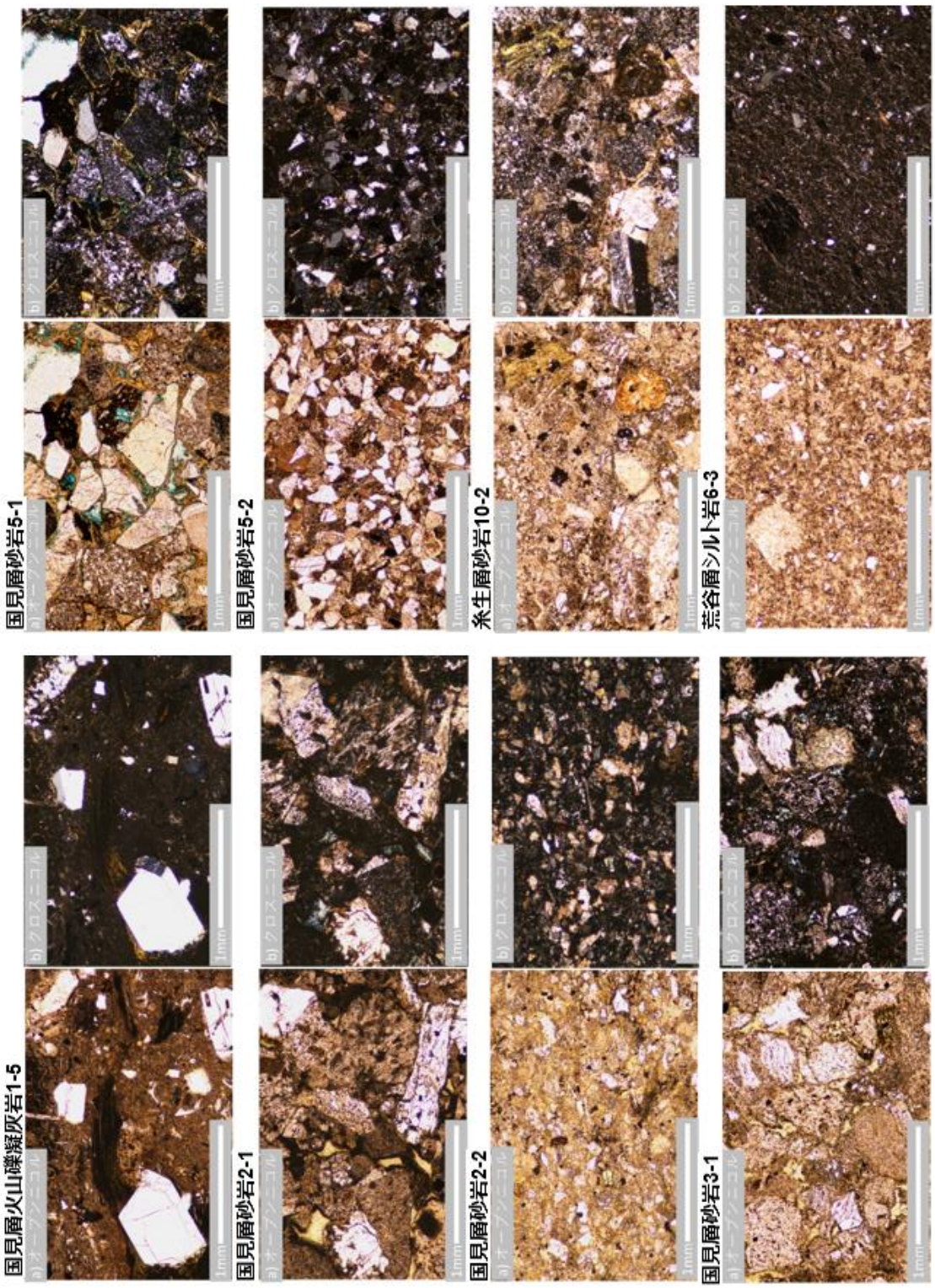


| 試料名 | 地層名 | 岩石名 | 構成粒子 | | |



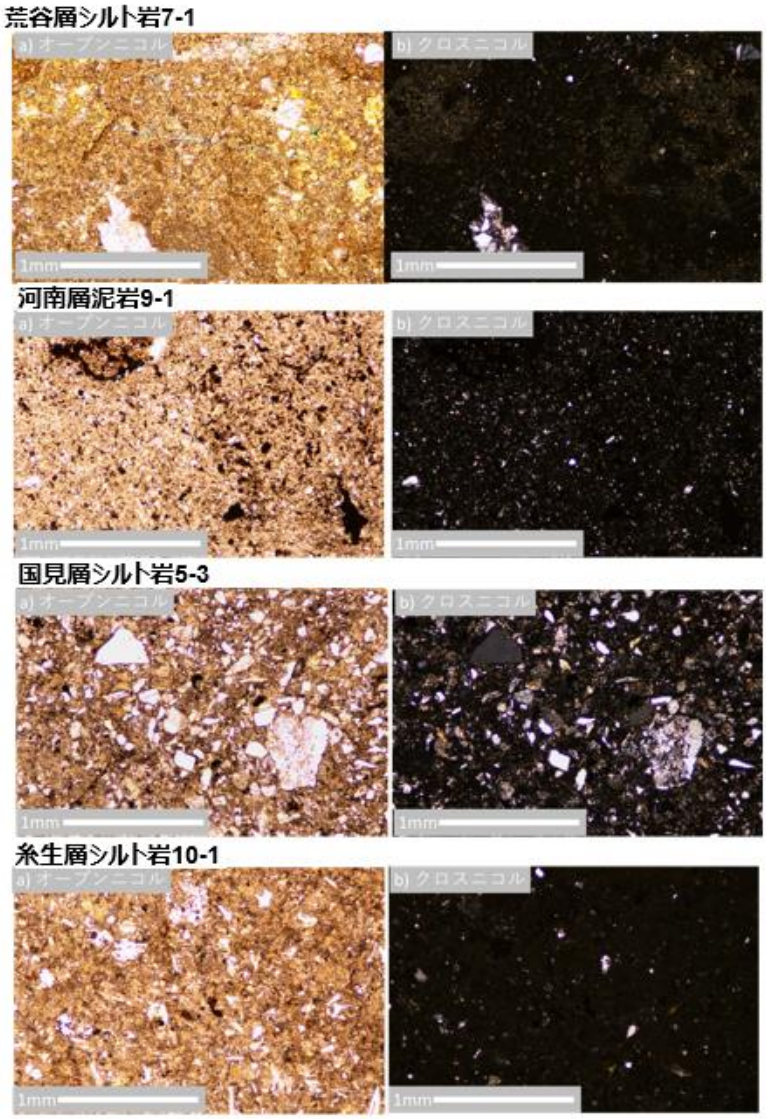
注）各試料の薄片写真の左がオープンニコル、右がクロスニコルを示す。

図 4.3-15(1)　薄片写真



注）各試料の薄片写真の左がオープンニコル、右がクロスニコルを示す。

図 4.3-15(2)　薄片写真



注）各試料の薄片写真の左がオープンニコル、右がクロスニコルを示す。

図 4.3-15(3)　薄片写真

②　X 線鉱物分析

石英外部標準法[3)]により求めた、貯留岩および遮蔽岩能力評価対象の試料の X 線鉱物分析結果を表 4.3-10 に、同定された鉱物の含有量比を図 4.3-16 に示す。半定量値の量比のため合計は 100%ではない。

a.　貯留岩試料

貯留岩能力評価対象の砂岩および火山礫凝灰岩試料について、国見層の砂岩試料は主にイライト、緑泥石、石英、斜長石、方解石から構成される。一部の試料に続成鉱物として濁沸石が晶出していることから、高温の変質を受けていることが推察される。その他、

スメクタイト、I/S mix 粘土鉱物、緑泥石／スメクタイト混合層粘土鉱物（以下、「C/S mix 粘土鉱物」と称する。）、カリ長石、黄鉄鉱、赤鉄鉱も一部で認められた。国見層の火山礫凝灰岩試料については沸石の種類が、スティルバイトと極微量の斜プチロル沸石、方沸石が認められる。それ以外の鉱物に関しては、国見層の砂岩試料とおおむね同じ構成である。

荒谷層の砂岩および火山礫凝灰岩試料はスメクタイト、緑泥石、石英、斜長石、方解石を主体とする。続成鉱物として、モルデン沸石と輝沸石が認められた。輝沸石については斜プチロル沸石と同角度にピークを持ってくるため、粉末試料を加熱処理し、ピークの有無によって判別した。

河南層の砂岩試料は C/S mix 粘土鉱物、石英、斜長石を主体としており、沸石としては濁沸石が出現している。一部、イライト、カリ長石を含む。

糸生層の砂岩試料は、緑泥石、石英、斜長石、方解石からなり、沸石は濁沸石が晶出している。

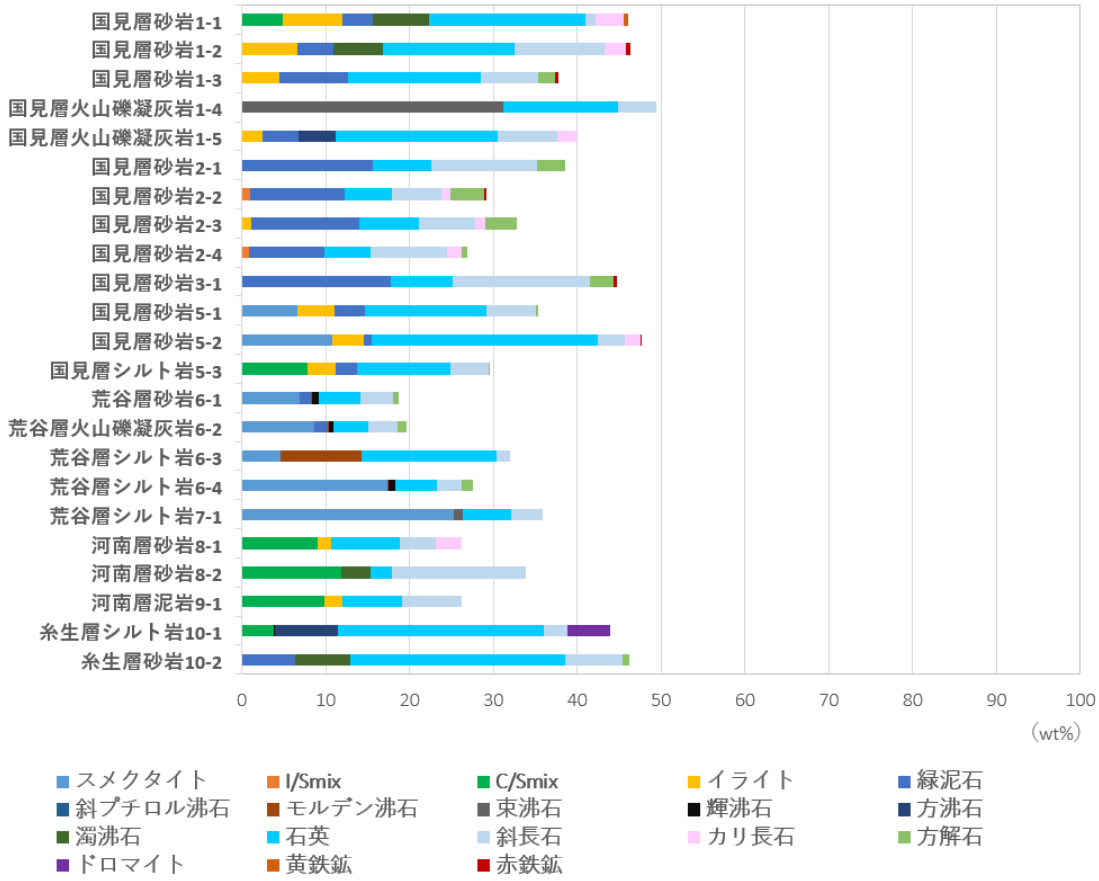
b.　遮蔽岩試料

国見層のシルト岩試料は、国見層の砂岩試料と同様な鉱物から構成されている。荒谷層のシルト岩試料も同様に、砂岩および火山礫凝灰岩試料と構成されている鉱物はほぼ同じだが、スメクタイトの量比が多く一部試料ではスティルバイトが出現している。河南層の泥岩試料も、砂岩試料とほぼ同様な鉱物から構成されている。糸生層のシルト岩試料は C/S mix 粘土鉱物、石英、斜長石、ドロマイトからなり、微量の斜プチロル沸石と方沸石を含む。

表 4.3-10　X 線鉱物分析結果

地域	備考	定量結果(wt%)																		
		クオーツ	イライト/スメクタイト混合層	緑泥石/スメクタイト混合層	イライト	緑泥石	カオリナイト	斜ブチロル沸石	モルデン沸石	アルバイト	灰曹長石	方沸石	凝灰石	曹長石	カリ長石	方解石	アロマイト	黄鉄鉱	赤鉄鉱
国見層砂岩1-1		49		7.1	3.7							6.7	18.6	1.2	3.3			0.5	
国見層砂岩1-2				6.7	4.3							5.8	15.7	10.7	2.6				0.5
国見層砂岩1-3				4.5	8.1								15.9	6.8		2.1			0.4
国見層火山礫凝灰岩1-4						0.5未満				31.1			13.7	4.5					
国見層火山礫凝灰岩1-5				2.4	4.3						4.4		19.3	7.2	2.2				
国見層砂岩2-1					15.6								7.0	12.7		3.3			
国見層砂岩2-2		1.0			11.2								5.7	5.8	1.1	4.1			0.2
国見層砂岩2-3				1.1	13.0								7.0	6.7	1.3	3.8			
国見層砂岩2-4			0.8		9.0								5.4	9.2	1.7	0.7			
国見層砂岩3-1			0.0		17.8								7.3	16.4		2.7			0.5
国見層砂岩5-1		6.7		4.4	3.6								14.6	5.8		0.3			
国見層砂岩5-2		10.8		3.8	0.9								27.0	3.2	1.8				0.2
国見層シルト岩5-3			7.9	3.3	2.5				0.5未満				11.1	4.6		0.2			
荒谷層砂岩6-1		6.9			1.3				0.5未満		0.8		4.9	3.9		0.7			
荒谷層火山礫凝灰岩6-2		8.7			1.6				0.5未満		0.6		4.1	3.4		1.1			
荒谷層シルト岩6-3		4.6							9.7				16.2	1.6					
荒谷層シルト岩6-4		17.4							0.5未満		0.8		5.0	3.0		1.2			
荒谷層シルト岩7-1		25.2											5.7	3.7					
河南層砂岩8-1			9.1	1.6									8.2	4.2	3.1				
河南層砂岩8-2			11.8										2.5	15.9					
河南層泥岩9-1			9.8	2.1									7.2	7.1					
糸生層シルト岩10-1	追加試料		3.9								0.1	7.5	24.6	2.8			5.1		
糸生層砂岩10-2	追加試料				6.3							6.6	25.7	6.8		0.8			

注 1）単位は wt%である。
注 2）半定量値の量比のため合計は 100 ではない。



注 1）単位は wt%である。
注 2）半定量値の量比のため合計は 100 ではない。

図 4.3-16　X 線鉱物分析結果から同定された鉱物の含有量比

③　粒度分析

貯留岩能力評価対象の試料の粒度分析結果を表 4.3-11(1)～(2)に示す。粒度パラメータの評価結果を表 4.3-12 に示す。

Folk and Ward（1957）[6)] の式を用いて求めた粒度パラメータの評価には次の基準を用いた。φ値は、McManus（1963）[29)] の式で表される値である。

平均粒径：-6.0 φ＜中礫≦-2.0 φ＜細礫≦-1.0 φ＜極粗粒砂≦0 φ＜粗粒砂≦1.0 φ＜中粒砂≦2.0 φ＜細粒砂≦3.0 φ＜極細粒砂≦4.0 φ＜粗粒シルト≦5.0 φ＜中粒シルト以下

分級度：非常によい≦0.35＜よい≦0.50＜ややよい≦0.71＜普通≦1.00＜悪い≦2.00

歪度：-1.0＜著しい負≦-0.3＜負≦-0.1＜ほぼ対称≦+0.1＜正＜+0.3≦著しい正＜+1.0

尖度：0.67＜扁平≦0.90＜中間的≦1.11＜突出≦1.50

平均粒径は荒谷層砂岩、同火山礫凝灰岩は、4.20φ（54 μm）、3.31φ（101 μm）、河南層砂岩は 3.64φ（80 μm）、1.79φ（290 μm）、国見層砂岩は 2.10φ（233 μm）～4.12φ（57 μm）、同火山礫凝灰岩は 3.43φ（93 μm）、3.63φ（81 μm）、糸生層砂岩は 2.70φ（154 μm）であった。

粒度パラメータは、荒谷層の砂岩および火山礫凝灰岩試料は極細粒砂で歪度は負の歪で細粒に偏り、尖度は中間的であった。河南層の砂岩試料は極細粒～中粒砂で歪度はほぼ対称、尖度は中間的であった。国見層の砂岩および火山礫凝灰岩試料は極細粒砂～細粒砂で歪度は正の歪で粗粒に偏り、尖度は中間的であった。糸生層の砂岩試料は細粒砂で歪度は正の歪、尖度は扁平～中間的であった。分級度についてはいずれの試料も悪い評価であった。

表 4.3-11(1)　粒度分析結

国見層砂岩1-1

粒径	個数	体積	累積
φ（μm）		%	%
-2.0(4,000)			
-1.5(2,830)			
-1.0(2,000)			
-0.5(1,410)			
0.0(1,000)			
0.5(707)			
1.0(500)	22.00	4.40	4.40
1.5(354)	88.00	17.60	22.00
2.0(250)	114.00	22.80	44.80
2.5(177)	95.00	19.00	63.80
3.0(125)	80.00	16.00	79.80
3.5(88)	42.00	8.40	88.20
4.0(63)	30.00	6.00	94.20
4.5(44)	4.00	0.80	95.00
5.0(32)	8.00	1.60	96.60
5.5(20)	1.00	0.20	96.80
5.5φ以上(20以下)	16.00	3.20	100.00
total	500.00	100.00	100.00

粒度パラメータ
平均粒径：2.24φ(212μm)
分級度　：　1.01
歪　度　：　0.26
尖　度　：　1.11

国見層砂岩1-2

粒径	個数	体積	累積
φ（μm）		%	%
-2.0(4,000)			
-1.5(2,830)			
-1.0(2,000)			
-0.5(1,410)			
0.0(1,000)			
0.5(707)	1.00	0.20	0.20
1.0(500)	1.00	0.20	0.40
1.5(354)	11.00	2.20	2.60
2.0(250)	78.00	15.60	18.20
2.5(177)	147.00	29.40	47.60
3.0(125)	110.00	22.00	69.60
3.5(88)	63.00	12.60	82.20
4.0(63)	33.00	6.60	88.80
4.5(44)	20.00	4.00	92.80
5.0(32)	9.00	1.80	94.60
5.5(20)	2.00	0.40	95.00
5.5φ以上(20以下)	25.00	5.00	100.00
total	500.00	100.00	100.00

粒度パラメータ
平均粒径：2.54φ(172μm)
分級度　：　0.9
歪　度　：　0.24
尖　度　：　1.47

国見層砂岩1-3

粒径	個数	体積	累積
φ（μm）		%	%
-2.0(4,000)			
-1.5(2,830)			
-1.0(2,000)			
-0.5(1,410)			
0.0(1,000)			
0.5(707)			
1.0(500)	1.00	0.20	0.20
1.5(354)	8.00	1.60	1.80
2.0(250)	21.00	4.20	6.00
2.5(177)	53.00	10.60	16.60
3.0(125)	74.00	14.80	31.40
3.5(88)	82.00	16.40	47.80
4.0(63)	84.00	16.80	64.60
4.5(44)	80.00	16.00	80.60
5.0(32)	44.00	8.80	89.40
5.5(20)	26.00	5.20	94.60
5.5φ以上(20以下)	27.00	5.40	100.00
total	500.00	100.00	100.00

粒度パラメータ
平均粒径：3.58φ(84μm)
分級度　：　1.12
歪　度　：　0.05
尖　度　：　0.99

国見層火山礫凝灰岩1-4

粒径	個数	体積	累積
φ（μm）		%	%
-2.0(4,000)			
-1.5(2,830)			
-1.0(2,000)	1.00	0.20	0.20
-0.5(1,410)	3.00	0.60	0.80
0.0(1,000)	5.00	1.00	1.80
0.5(707)	11.00	2.20	4.00
1.0(500)	13.00	2.60	6.60
1.5(354)	19.00	3.80	10.40
2.0(250)	34.00	6.80	17.20
2.5(177)	40.00	8.00	25.20
3.0(125)	43.00	8.60	33.80
3.5(88)	61.00	12.20	46.00
4.0(63)	77.00	15.40	61.40
4.5(44)	81.00	16.20	77.60
5.0(32)	61.00	12.20	89.80
5.5(20)	17.00	3.40	93.20
5.5φ以上(20以下)	34.00	6.80	100.00
total	500.00	100.00	100.00

粒度パラメータ
平均粒径：3.43φ(93μm)
分級度　：　1.47
歪　度　：　-0.2
尖　度　：　1.06

国見層火山礫凝灰岩1-5

粒径	個数	体積	累積
φ（μm）		%	%
-2.0(4,000)			
-1.5(2,830)			
-1.0(2,000)			
-0.5(1,410)	3.00	0.60	0.60
0.0(1,000)	9.00	1.80	2.40
0.5(707)	15.00	3.00	5.40
1.0(500)	23.00	4.60	10.00
1.5(354)	17.00	3.40	13.40
2.0(250)	20.00	4.00	17.40
2.5(177)	20.00	4.00	21.40
3.0(125)	40.00	8.00	29.40
3.5(88)	41.00	8.20	37.60
4.0(63)	73.00	14.60	52.20
4.5(44)	73.00	14.60	66.80
5.0(32)	75.00	15.00	81.80
5.5(20)	41.00	8.20	90.00
5.5φ以上(20以下)	50.00	10.00	100.00
total	500.00	100.00	100.00

粒度パラメータ
平均粒径：3.63φ(81μm)
分級度　：　1.63
歪　度　：　-0.29
尖　度　：　1.06

国見層砂岩2-1

粒径	個数	体積	累積
φ（μm）		%	%
-2.0(4,000)			
-1.5(2,830)			
-1.0(2,000)	2.00	0.40	0.40
-0.5(1,410)	8.00	1.60	2.00
0.0(1,000)	18.00	3.60	5.60
0.5(707)	35.00	7.00	12.60
1.0(500)	41.00	8.20	20.80
1.5(354)	33.00	6.60	27.40
2.0(250)	36.00	7.20	34.60
2.5(177)	85.00	17.00	51.60
3.0(125)	75.00	15.00	66.60
3.5(88)	71.00	14.20	80.80
4.0(63)	48.00	9.60	90.40
4.5(44)	24.00	4.80	95.20
5.0(32)	12.00	2.40	97.60
5.5(20)	2.00	0.40	98.00
5.5φ以上(20以下)	10.00	2.00	100.00
total	500.00	100.00	100.00

粒度パラメータ
平均粒径：2.28φ(206μm)
分級度　：　1.43
歪　度　：　-0.14
尖　度　：　0.94

国見層砂岩2-2

粒径	個数	体積	累積
φ（μm）		%	%
-2.0(4,000)			
-1.5(2,830)			
-1.0(2,000)			
-0.5(1,410)			
0.0(1,000)			
0.5(707)			
1.0(500)			
1.5(354)	5.00	1.00	1.00
2.0(250)	10.00	2.00	3.00
2.5(177)	21.00	4.20	7.20
3.0(125)	57.00	11.40	18.60
3.5(88)	63.00	12.60	31.20
4.0(63)	77.00	15.40	46.60
4.5(44)	65.00	13.00	59.60
5.0(32)	83.00	16.60	76.20
5.5(20)	56.00	11.20	87.40
5.5φ以上(20以下)	63.00	12.60	100.00
total	500.00	100.00	100.00

粒度パラメータ
平均粒径：4.12φ(57μm)
分級度　：　1.15
歪　度　：　-0.03
尖　度　：　0.85

国見層砂岩3-1

粒径	個数	体積	累積
φ（μm）		%	%
-2.0(4,000)	1.00	0.20	0.20
-1.5(2,830)	0.00	0.00	0.20
-1.0(2,000)	1.00	0.20	0.40
-0.5(1,410)	4.00	0.80	1.20
0.0(1,000)	13.00	2.60	3.80
0.5(707)	20.00	4.00	7.80
1.0(500)	49.00	9.80	17.60
1.5(354)	60.00	12.00	29.60
2.0(250)	52.00	10.40	40.00
2.5(177)	59.00	11.80	51.80
3.0(125)	72.00	14.40	66.20
3.5(88)	57.00	11.40	77.60
4.0(63)	44.00	8.80	86.40
4.5(44)	30.00	6.00	92.40
5.0(32)	23.00	4.60	97.00
5.5(20)	5.00	1.00	98.00
5.5φ以上(20以下)	10.00	2.00	100.00
total	500.00	100.00	100.00

粒度パラメータ
平均粒径：2.40φ(189μm)
分級度　：　1.44
歪　度　：　0
尖　度　：　0.91

国見層砂岩5-1

粒径	個数	体積	累積
φ（μm）		%	%
-2.0(4,000)			
-1.5(2,830)			
-1.0(2,000)			
-0.5(1,410)	3.00	0.60	0.60
0.0(1,000)	3.00	0.60	1.20
0.5(707)	15.00	3.00	4.20
1.0(500)	84.00	16.80	21.00
1.5(354)	109.00	21.80	42.80
2.0(250)	98.00	19.60	62.40
2.5(177)	42.00	8.40	70.80
3.0(125)	40.00	8.00	78.80
3.5(88)	13.00	2.60	81.40
4.0(63)	24.00	4.80	86.20
4.5(44)	15.00	3.00	89.20
5.0(32)	12.00	2.40	91.60
5.5(20)	10.00	2.00	93.60
5.5φ以上(20以下)	32.00	6.40	100.00
total	500.00	100.00	100.00

粒度パラメータ
平均粒径：2.10φ(233μm)
分級度　：　1.5
歪　度　：　0.49
尖　度　：　1.25

注）分級度、尖度、歪度は Folk and Ward（1957）[6] を用いて求めた。

表 4.3-11(2)　粒度分析結果

国見層砂岩5-2

粒径	個数	体積	累積
φ（μm）		%	%
-2.0(4,000)			
-1.5(2,830)			
-1.0(2,000)			
-0.5(1,410)			
0.0(1,000)			
0.5(707)	3.00	0.60	0.60
1.0(500)	2.00	0.40	1.00
1.5(354)	7.00	1.40	2.40
2.0(250)	53.00	10.60	13.00
2.5(177)	96.00	19.20	32.20
3.0(125)	146.00	29.20	61.40
3.5(88)	62.00	12.40	73.80
4.0(63)	61.00	12.20	86.00
4.5(44)	27.00	5.40	91.40
5.0(32)	16.00	3.20	94.60
5.5(20)	13.00	2.60	97.20
5.5φ以上(20以下)	14.00	2.80	100.00
total	500.00	100.00	100.00

粒度パラメータ
平均粒径：2.93φ(131μm)
分級度：0.98
歪度：0.27
尖度：1.14

荒谷層砂岩6-1

粒径	個数	体積	累積
φ（μm）		%	%
-2.0(4,000)			
-1.5(2,830)			
-1.0(2,000)			
-0.5(1,410)			
0.0(1,000)			
0.5(707)			
1.0(500)	1.00	0.20	0.20
1.5(354)	2.00	0.40	0.60
2.0(250)	9.00	1.80	2.40
2.5(177)	17.00	3.40	5.80
3.0(125)	44.00	8.80	14.60
3.5(88)	56.00	11.20	25.80
4.0(63)	82.00	16.40	42.20
4.5(44)	88.00	17.60	59.80
5.0(32)	78.00	15.60	75.40
5.5(20)	66.00	13.20	88.60
5.5φ以上(20以下)	57.00	11.40	100.00
total	500.00	100.00	100.00

粒度パラメータ
平均粒径：4.20φ(54μm)
分級度：1.08
歪度：-0.05
尖度：0.91

荒谷層火山礫凝灰岩6-2

粒径	個数	体積	累積
φ（μm）		%	%
-2.0(4,000)			
-1.5(2,830)			
-1.0(2,000)	4.00	0.80	0.80
-0.5(1,410)	2.00	0.40	1.20
0.0(1,000)	12.00	2.40	3.60
0.5(707)	16.00	3.20	6.80
1.0(500)	24.00	4.80	11.60
1.5(354)	31.00	6.20	17.80
2.0(250)	32.00	6.40	24.20
2.5(177)	33.00	6.60	30.80
3.0(125)	30.00	6.00	36.80
3.5(88)	37.00	7.40	44.20
4.0(63)	72.00	14.40	58.60
4.5(44)	76.00	15.20	73.80
5.0(32)	66.00	13.20	87.00
5.5(20)	33.00	6.60	93.60
5.5φ以上(20以下)	32.00	6.40	100.00
total	500.00	100.00	100.00

粒度パラメータ
平均粒径：3.31φ(101μm)
分級度：1.72
歪度：-0.29
尖度：0.91

河南層砂岩8-1

粒径	個数	体積	累積
φ（μm）		%	%
-2.0(4,000)			
-1.5(2,830)			
-1.0(2,000)			
-0.5(1,410)			
0.0(1,000)			
0.5(707)	1.00	0.20	0.20
1.0(500)	5.00	1.00	1.20
1.5(354)	5.00	1.00	2.20
2.0(250)	16.00	3.20	5.40
2.5(177)	21.00	4.20	9.60
3.0(125)	55.00	11.00	20.60
3.5(88)	104.00	20.80	41.40
4.0(63)	131.00	26.20	67.60
4.5(44)	89.00	17.80	85.40
5.0(32)	42.00	8.40	93.80
5.5(20)	14.00	2.80	96.60
5.5φ以上(20以下)	17.00	3.40	100.00
total	500.00	100.00	100.00

粒度パラメータ
平均粒径：3.64φ(80μm)
分級度：0.91
歪度：-0.05
尖度：1.22

河南層砂岩8-2

粒径	個数	体積	累積
φ（μm）		%	%
-2.0(4,000)			
-1.5(2,830)			
-1.0(2,000)	4.00	0.80	0.80
-0.5(1,410)	2.00	0.40	1.20
0.0(1,000)	18.00	3.60	4.80
0.5(707)	48.00	9.60	14.40
1.0(500)	70.00	14.00	28.40
1.5(354)	86.00	17.20	45.60
2.0(250)	75.00	15.00	60.60
2.5(177)	69.00	13.80	74.40
3.0(125)	36.00	7.20	81.60
3.5(88)	40.00	8.00	89.60
4.0(63)	21.00	4.20	93.80
4.5(44)	6.00	1.20	95.00
5.0(32)	3.00	0.60	95.60
5.5(20)	0.00	0.00	95.60
5.5φ以上(20以下)	22.00	4.40	100.00
total	500.00	100.00	100.00

粒度パラメータ
平均粒径：1.79φ(290μm)
分級度：1.33
歪度：0.21
尖度：1.11

糸生層砂岩10-2

粒径	個数	体積	累積
φ（μm）		%	%
-2.0(4,000)			
-1.5(2,830)			
-1.0(2,000)	2.00	0.40	0.40
-0.5(1,410)	3.00	0.60	1.00
0.0(1,000)	13.00	2.60	3.60
0.5(707)	20.00	4.00	7.60
1.0(500)	32.00	6.40	14.00
1.5(354)	63.00	12.60	26.60
2.0(250)	58.00	11.60	38.20
2.5(177)	62.00	12.40	50.60
3.0(125)	55.00	11.00	61.60
3.5(88)	32.00	6.40	68.00
4.0(63)	44.00	8.80	76.80
4.5(44)	33.00	6.60	83.40
5.0(32)	36.00	7.20	90.60
5.5(20)	26.00	5.20	95.80
5.5φ以上(20以下)	21.00	4.20	100.00
total	500.00	100.00	100.00

粒度パラメータ
平均粒径：2.70φ(154μm)
分級度：1.66
歪度：0.16
尖度：0.87

注）分級度、尖度、歪度は Folk and Ward（1957）[6] を用いて求めた。

表 4.3-12　粒度パラメータの評価結果

試　料	平均粒径 (μm)	分級度	尖　度	歪　度
荒谷層 (砂岩･凝灰岩 2試料)	極細粒砂 54, 101 (平均77)	悪　い 1.08, 1.72 (平均1.40)	中間的 0.91 (平均0.91)	負の歪 -0.29, -0.05 (平均-0.17)
河南層 (砂岩　2試料)	極細粒～中粒砂 80, 290 (平均185)	悪　い 0.91, 1.33 (平均1.12)	中間的 1.11, 1.22 (平均1.16)	ほぼ対称 -0.05, 0.21 (平均0.08)
国見層 (砂岩･凝灰岩 10試料)	極細粒～細粒砂 54～ 233 (平均146)	悪　い 0.90 ～ 1.63 (平均1.26)	中間的 0.85～1.47 (平均1.08)	正の歪 -0.29 ～ 0.49 (平均0.06)
糸生層 (砂岩　1試料)	細粒砂 154	悪　い 1.66	扁平～中間的 0.87	正の歪 0.16

注）分級度、尖度、歪度は Folk and Ward（1957）[6] を用いて求めた。

④　孔径分布測定

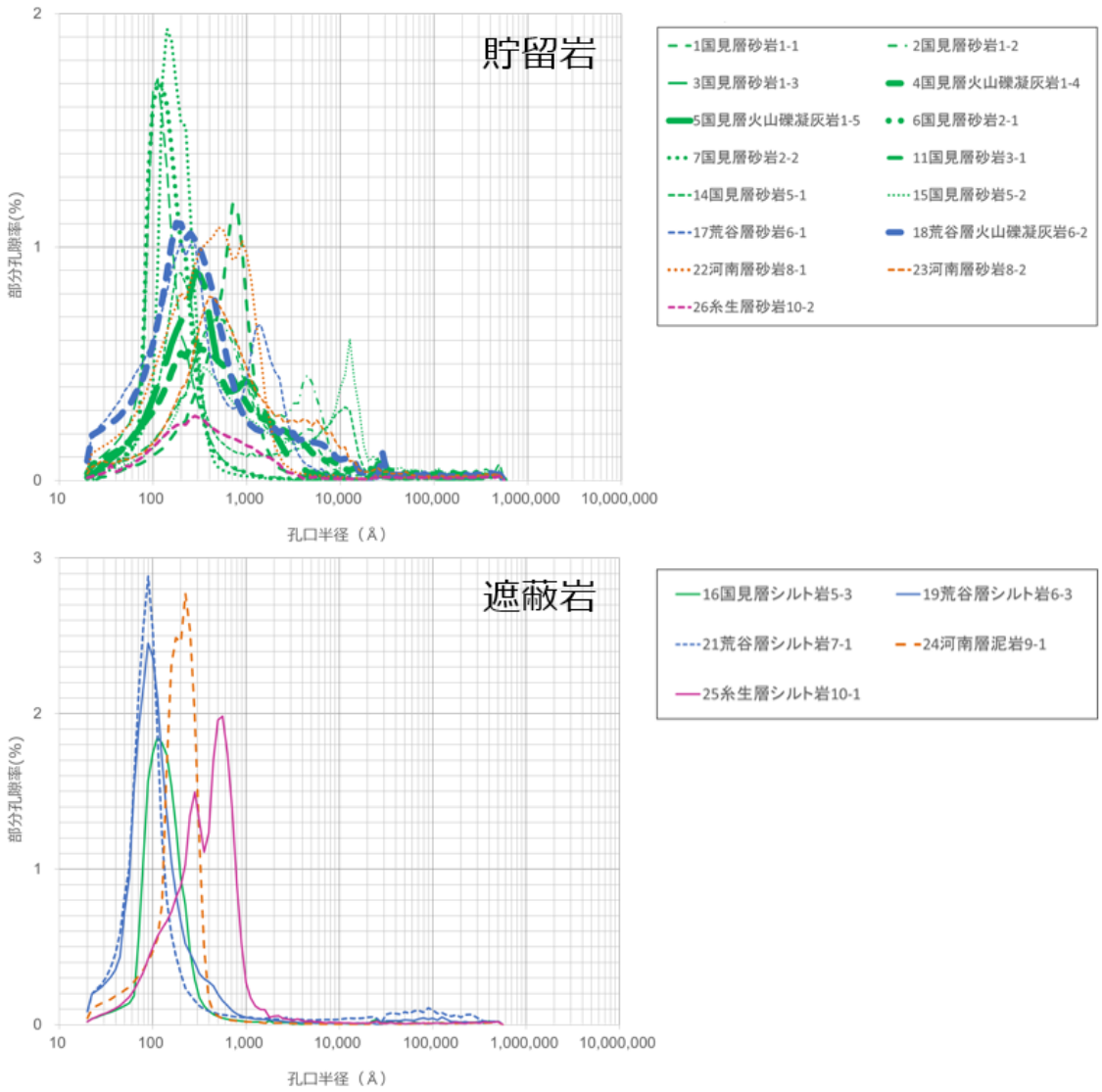
貯留岩能力評価対象の 15 試料、遮蔽岩能力評価対象の 5 試料について孔径分布測定を実施した。

全試料の坑径分布測定結果のうち、試料本来の孔隙でないと推定される試料表面の凹凸等の影響を取り除いた測定結果を表 4.3-13 に、同様に試料本来の孔隙でない凹凸等の影響を取り除いた孔径分布曲線を図 4.3-17 に示す。表 4.3-13 には Pittman の式[30] を用いて計算した計算浸透率も示す。貯留岩分析の浸透率と Pittman の式[30] を用いて計算した計算浸透率は相関を示すことを確認し、Pittman の式[30] を用いた。

表 4.3-13　測定結果

	試料名	測定試料重量 (g)	孔隙率 (%)	バルク密度 (g/cm^3)	粒子密度 (g/cm^3)	中央孔径半径 (Å)	総比表面積 (m^2/g)	総水銀圧入量 (mm^3/g)	計算浸透率 (mD)	S_{Hg} ($@_{Hg}Pc$=10 Mpa)	採用測定圧力範囲 最小～最大値 (Mpa)
貯留岩能力評価技術試料	荒谷層砂岩6-1	1.450	24.0	1.78	2.35	71.1	17.88	134.7	0.16	14.6	0.0133～350.0
	荒谷層火山礫凝灰岩6-2	1.244	24.7	1.75	2.32	82.3	17.44	141.5	0.10	12.7	0.0133～350.0
	河南層砂岩8-1	1.773	24.8	1.88	2.50	102.5	12.78	132.1	0.14	9.0	0.0133～350.0
	河南層砂岩8-2	1.732	18.3	2.09	2.56	130.3	5.66	87.5	0.34	5.2	0.0133～350.0
	国見層砂岩1-1	1.974	15.5	2.19	2.59	147.6	4.55	71.0	0.17	4.9	0.0133～350.0
	国見層砂岩1-2	1.961	17.4	2.15	2.60	135.0	4.94	81.0	0.45	4.9	0.0133～350.0
	国見層砂岩1-3	2.222	15.8	2.23	2.65	104.2	12.06	70.6	0.01	21.7	0.0133～350.0
	国見層火山礫凝灰岩1-4	2.154	16.5	2.07	2.48	95.4	7.34	79.5	0.16	8.9	0.0133～350.0
	国見層火山礫凝灰岩1-5	2.157	16.9	2.12	2.55	125.6	7.43	79.7	0.08	8.0	0.0133～350.0
	国見層砂岩2-1	2.152	17.2	2.23	2.69	117.7	11.25	77.1	0.01	16.6	0.0133～350.0
	国見層砂岩2-2	2.154	16.5	2.19	2.62	148.7	9.31	75.5	0.01	9.6	0.0133～350.0
	国見層砂岩3-1	3.024	13.5	2.30	2.66	253.0	3.08	58.9	0.07	2.9	0.0133～350.0
	国見層砂岩5-1	2.805	15.3	2.21	2.61	115.7	6.85	69.3	0.47	9.0	0.0133～350.0
	国見層砂岩5-2	1.742	15.5	2.17	2.56	135.1	3.89	71.5	2.61	4.3	0.0133～350.0
	糸生層砂岩10-2	2.082	6.5	2.38	2.54	109.2	2.67	27.5	0.02	9.1	0.0133～350.0
遮蔽岩能力評価技術試料	荒谷層シルト岩6-3	1.289	26.3	1.69	2.30	78.8	32.76	155.4	0.01	27.8	0.0133～350.0
	荒谷層シルト岩7-1	1.626	25.2	1.91	2.55	74.6	29.64	132.2	0.01	31.3	0.0133～350.0
	河南層泥岩9-1	2.162	23.5	2.01	2.62	150.6	15.54	117.0	0.02	9.7	0.0133～350.0
	国見層シルト岩5-3	2.081	17.9	2.13	2.59	109.5	13.56	84.2	0.01	19.4	0.0133～350.0
	糸生層シルト岩10-1	1.697	26.2	1.77	2.40	155.6	12.44	147.8	0.09	6.2	0.0133～350.0

注 1）試料本来の孔隙でないと推定される試料表面の凹凸等の影響を取り除いた値を示す。
注 2）計算浸透率は Pittman の式[30)] を用いて算定した。



注 1）試料本来の孔隙でないと推定される試料表面の凹凸等の影響を取り除いた値を示す。
注 2）上図は貯留岩能力評価対象の試料、下図は遮蔽岩能力評価対象の試料の結果を示す。

図 4.3-17　孔径分布曲線

⑤　熱伝導率測定

貯留岩能力評価対象の砂岩および凝灰角礫岩の 15 試料について熱伝導率測定を実施した。荒谷層、国見層、河南層、糸生層の熱伝導率測定結果を表 4.3-14 と図 4.3-18 に示す。

荒谷層砂岩の熱伝導率は 0.968 W/mK、火山礫凝灰岩の熱伝導率は 0.961 W/mK であった。国見層砂岩の熱伝導率は 1.587～2.077 W/mK、火山礫凝灰岩の熱伝導率は 1.259～1.773 W/mK であった。河南層砂岩の熱伝導率は 1.183～1.193 W/mK、糸生層砂岩の熱伝導率は 2.206 W/mK であった。

中期中新世の荒谷層から前期中新世の糸生層に向かい熱伝導率の増大傾向が認められる。

荒谷層から糸生層へ熱伝導率が高い試料ほど埋没深度が増大することを示唆する。

孔隙率および浸透率と熱伝導率の関係を検討した。孔隙率と熱伝導率、浸透率と熱伝導率には負の相関が認められ、埋没により圧密が進み孔隙率と浸透率が減少し熱伝導率が増大することを反映したと推定できる。

基礎試錐「金沢沖」[19)]の試料でも熱伝導率測定が行われており、国見層に対比される黒瀬谷層のうち火山岩類のコア試料の熱伝導率は、1.257～1.869 W/mK の範囲にあり地表調査試料の測定結果と調和的である。

表 4.3-14　荒谷層、国見層、河南層、糸生層の熱伝導率測定結果

試料名	平均値	最大値	最小値	標準偏差
荒谷層砂岩6-1	0.968	1.061	0.902	0.054
荒谷層火山礫凝灰岩6-2	0.961	1.011	0.915	0.033
河南層砂岩8-1	1.183	1.288	1.098	0.058
河南層砂岩8-2	1.193	1.288	1.138	0.050
国見層砂岩1-1	1.816	1.906	1.725	0.065
国見層砂岩1-2	1.596	1.680	1.466	0.065
国見層砂岩1-3	2.050	2.242	1.878	0.110
国見層火山礫凝灰岩1-4	1.259	1.329	1.169	0.050
国見層火山礫凝灰岩1-5	1.773	1.935	1.637	0.091
国見層砂岩2-1	2.077	2.242	1.799	0.142
国見層砂岩2-2	1.862	2.061	1.704	0.105
国見層砂岩3-1	1.922	2.095	1.747	0.093
国見層砂岩5-1	1.587	1.749	1.433	0.092
国見層砂岩5-2	1.716	1.878	1.538	0.117
糸生層砂岩10-2	2.206	2.367	1.935	0.145

注 1）単位は W/mK である。
注 2）試料温度は 19～21 度で測定した。

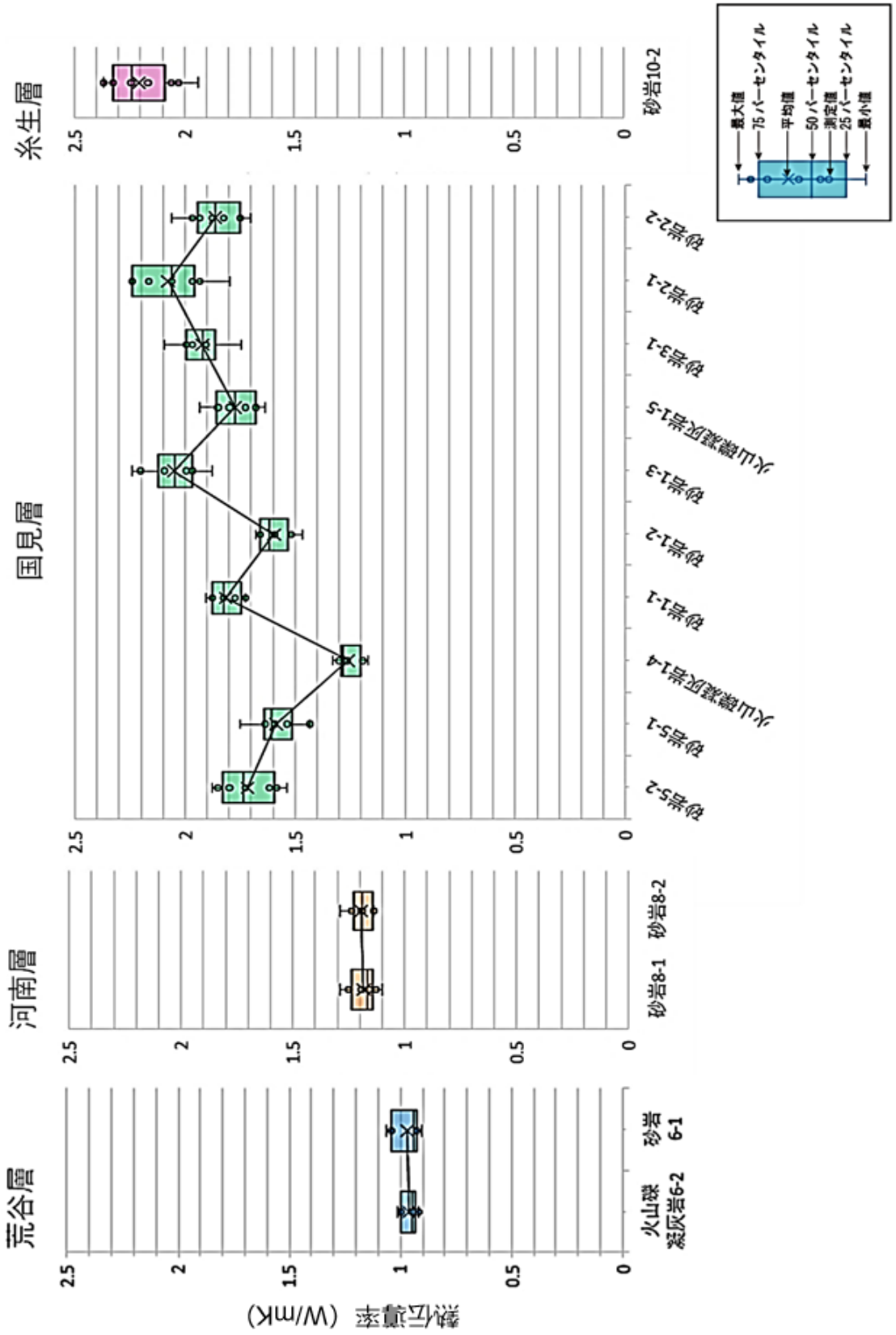


図 4.3-18　荒谷層、国見層、河南層、糸生層の熱伝導率測定結果

(2) 貯留岩分析

貯留岩能力評価の対象として荒谷層砂岩 1 個、荒谷層火山礫凝灰岩 1 個、河南層砂岩 2 個、国見層砂岩 8 個、国見層火山礫凝灰岩 2 個、糸生層砂岩 1 個の 15 試料に貯留岩分析を実施した。貯留岩分析を実施した試料を表 4.3-8 に示す。

① 孔隙率、粒子密度、空気浸透率測定（大気圧下）

荒谷層砂岩、荒谷層火山礫凝灰岩、河南層砂岩、国見層砂岩、国見層火山礫凝灰岩、糸生層砂岩から成形した 15 試料のうち 13 試料について測定を実施した。国見層砂岩 2-1 および国見層砂岩 2-2 は空気浸透率が測定下限値である 0.01 mD 以下のため測定不能であった。測定結果を表 4.3-15 に示す。

表 4.3-15　貯留岩の孔隙率、粒子密度、空気浸透率測定結果（大気圧下、封圧下）

試料名	粒子密度	大気圧下孔隙率	封圧=2.76MPa空気浸透率	封圧下					
				孔隙率（%）			空気浸透率（mD）		
	(g/cm^3)	(%)	(mD)	7MPa	22MPa	36MPa	7MPa	22MPa	36MPa
荒谷層砂岩6-1	2.389	24.45	0.109	23.78	23.17	22.72	0.0221	0.0123	0.0089
荒谷層火山礫凝灰岩6-2	2.380	24.90	1.890	24.39	23.12	23.11	0.6040	0.0824	0.0341
河南層砂岩8-1	2.601	24.05	0.033	23.28	22.22	21.57	0.0120	0.0068	0.0053
河南層砂岩8-2	2.589	18.09	0.454	16.06	15.24	14.62	0.0715	0.0244	0.0120
国見層砂岩1-1	2.623	13.96	0.185	14.00	13.58	13.23	0.0206	0.0075	0.0050
国見層砂岩1-2	2.637	17.91	0.229	17.33	16.68	16.29	0.0219	0.0097	0.0072
国見層砂岩1-3	2.692	16.47	0.011	16.12	12.75	12.38	0.0022	測定下限値：0.001md以下	
国見層火山礫凝灰岩1-4	2.523	12.58	0.093	12.50	11.97	11.64	0.0277	0.0091	0.0056
国見層火山礫凝灰岩1-5	2.610	18.02	0.080	17.32	16.92	16.68	0.0151	0.0075	0.0061
国見層砂岩2-1	2.596	12.64	測定下限値：0.01md以下	10.88	8.70	7.30	測定下限値：0.001md以下		
国見層砂岩2-2	2.626	13.27	測定下限値：0.01md以下	13.86	11.33	10.62	0.0021	0.0015	0.0013
国見層砂岩3-1	2.685	14.40	0.023	13.04	12.84	12.49	0.0047	0.0031	0.0027
国見層砂岩5-1	2.617	13.20	0.486	11.66	10.76	9.33	0.0341	0.0040	0.0015
国見層砂岩5-2	2.624	16.71	0.804	13.37	12.62	12.14	0.1350	0.0244	0.0135
糸生層砂岩10-2	2.561	6.59	0.028	6.18	5.64	5.17	0.0065	0.0025	0.0015

② 孔隙率、空気浸透率測定（封圧下）

荒谷層砂岩、荒谷層火山礫凝灰岩、河南層砂岩、国見層砂岩、国見層火山礫凝灰岩、糸生層砂岩から成形した 15 試料のうち 13 試料について 7 MPa、22 MPa、36 MPa の封圧下で測定を実施した。国見層砂岩 1-3 は封圧 22 MPa および 36 MPa で、国見層砂岩 2-1 は全封圧下で空気浸透率が測定下限値の 0.001 mD 以下であり測定不能であった。測定結果を

表 4.3-15、図 4.3-19、図 4.3-20 に示す

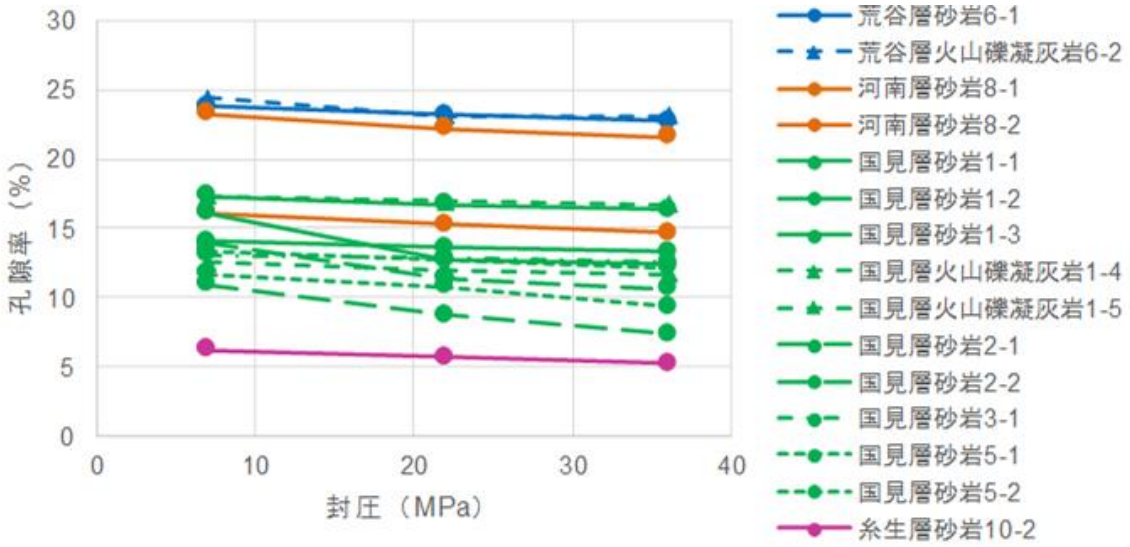


図 4.3-19　貯留岩の孔隙率（封圧下）

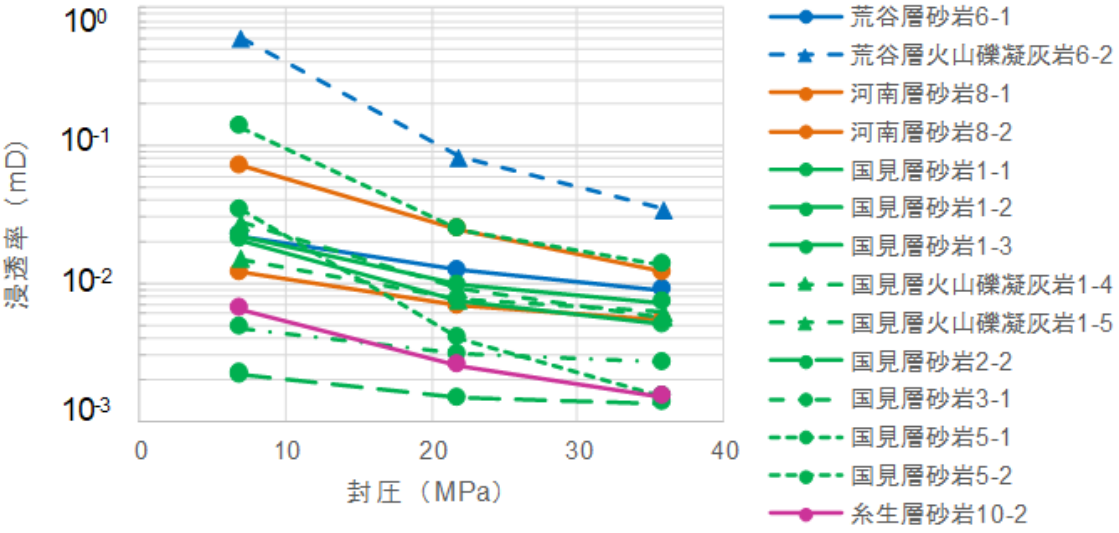


図 4.3-20　貯留岩の浸透率（封圧下）

③　水浸透率測定

河南層砂岩 8-1、国見層砂岩 1-1 について水浸透率測定を実施した。水浸透率測定結果を表 4.3-16 に示す。相対浸透率測定前に測定した国見層砂岩 5-1、国見層砂岩 5-2 の水浸透率結果もあわせて示す。

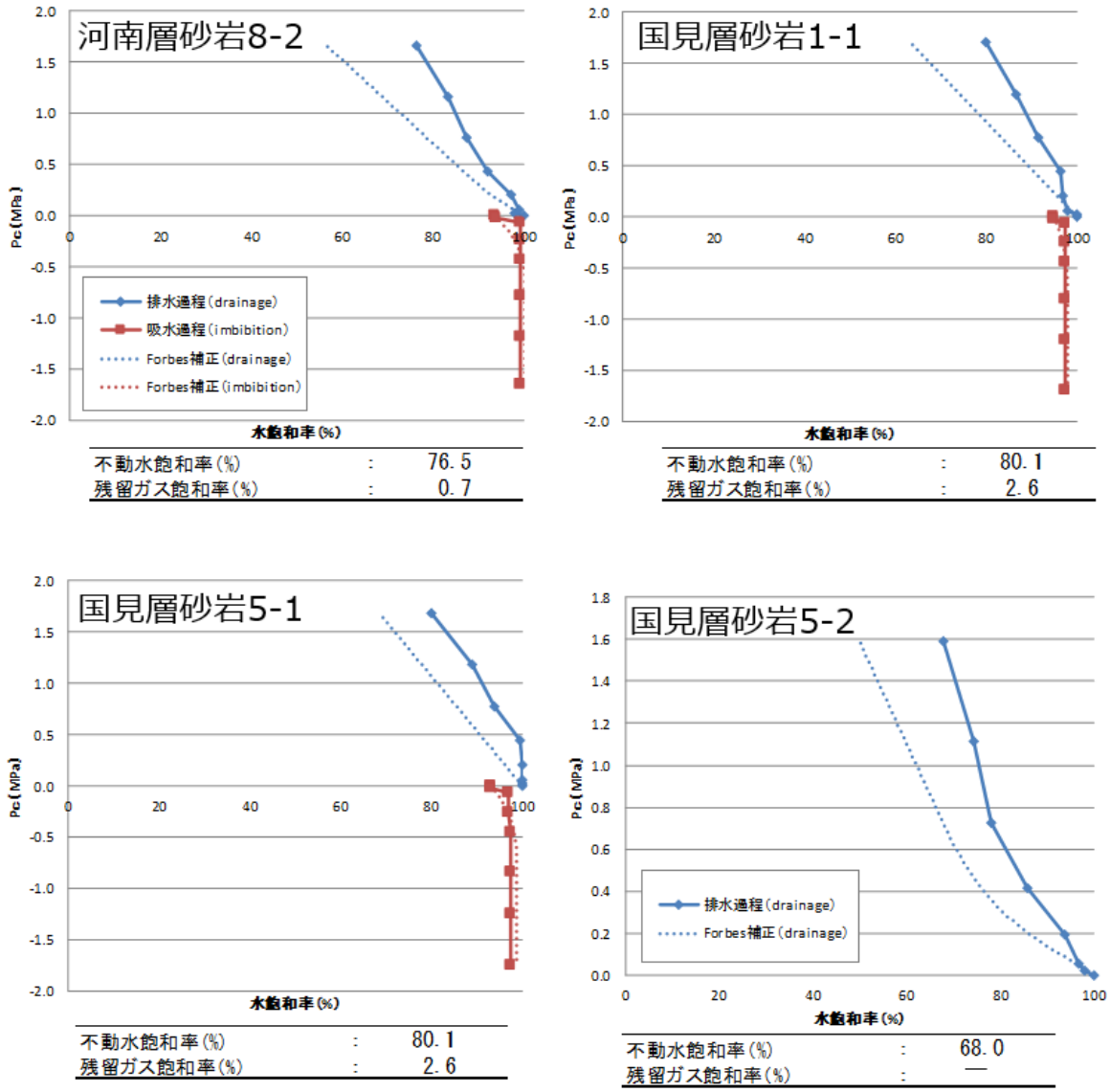
表 4.3-16　貯留岩の水浸透率測定結果

試料名	封圧 (MPa)	上流圧 (MPa)	差圧 (MPa)	水浸透率 (mD)
河南層砂岩8-2	14	10	1	0.0043
国見層砂岩1-1			3	0.0009
国見層砂岩5-1		11	4	0.000031
国見層砂岩5-2			2	0.007

④　毛細管圧力測定

河南層砂岩 8-2、国見層砂岩 1-1、国見層砂岩 5-1、国見層砂岩 5-2 について毛細管圧力測定を実施した。毛細管圧力測定結果を図 4.3-21 に示す。

国見層砂岩 5-2 は排出過程での測定終了後にコアが崩壊し吸水過程は測定できなかった。いずれの試料も不動水飽和率が高く、毛細管圧力曲線も類似しており急激な立ち上がりが認められ、毛細管圧力は水飽和率に対し敏感と考えられる。水浸透率も低いことからガスの流動性は低いと推定される。



注）破線の毛細管圧力曲線は Forbes 補正[12] 後の値を示す。

図 4.3-21　貯留岩の毛細管圧力測定結果

⑤　相対浸透率測定

国見層砂岩 5-1、国見層砂岩 5-2 の 2 試料について相対浸透率測定を実施した。しかし国見層砂岩 5-1 については低浸透性で CO_2 圧入が困難なため、相対浸透率を評価できる測定データが得られなかった。図 4.3-22 に国見層砂岩 5-2 について数値解析で得られたモデルを用いて描いた相対浸透率曲線を示す。

国見層砂岩 5-2 は水浸透率が 1 mD 以下であったため、CO_2 圧入のみ行い CO_2 飽和率分布から数値解析により相対浸透率曲線を算出した。CO_2 圧入後、時間経過とともに掃攻領域が拡大しコア全体に CO_2 が拡大する傾向があった。測定終了時の CO_2 飽和率は 35.3%と高

く圧入方向に対する飽和率変化も小さかったことから比較的均質性が高い試料と推定される。

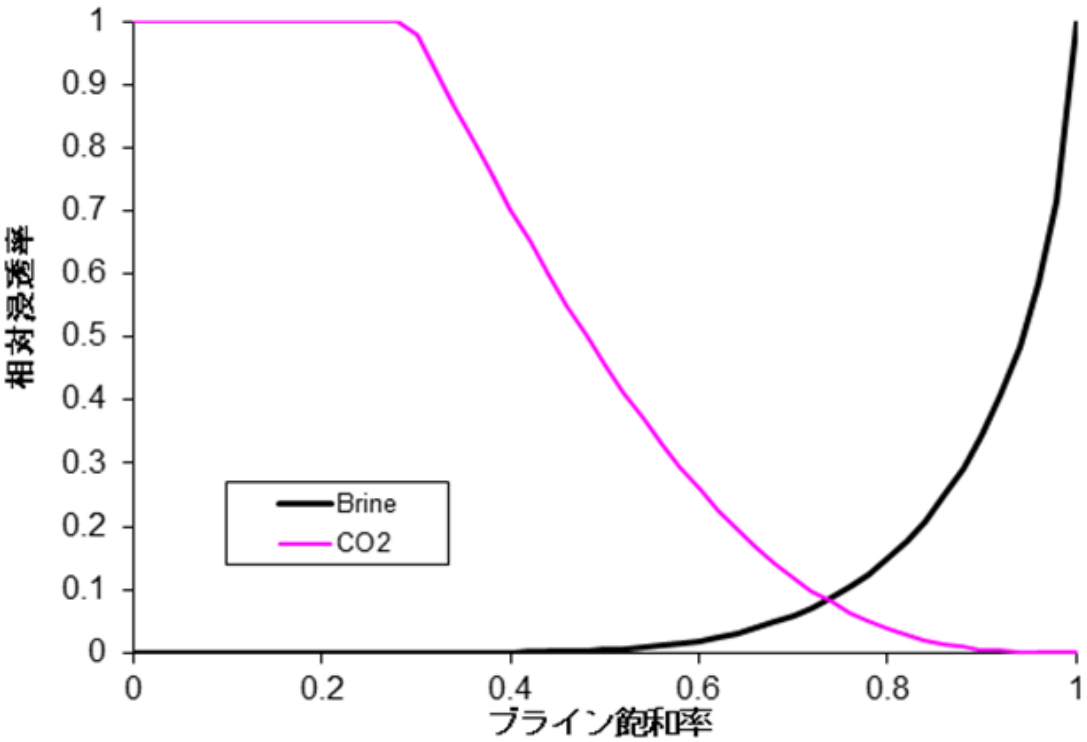


図 4.3-22　国見層砂岩 5-2 について数値解析で得られたモデルを用いて描いた相対浸透率曲線

(3)　遮蔽岩分析

遮蔽岩能力評価の対象として荒谷層シルト岩、河南層泥岩、国見層シルト岩、糸生層シルト岩に対して遮蔽岩分析を実施した。遮蔽岩分析を実施した試料を表 4.3-8 に示す。プラグコア成形ができず崩壊した試料が 2 試料あった。プラグコアを成形できた 4 試料に対して、遮蔽岩分析を実施した。

①　孔隙率、粒子密度、空気浸透率測定（大気圧下）

荒谷層シルト岩 6-4、河南層泥岩 9-1、国見層シルト岩 5-3、糸生層シルト岩 10-1 の 4 試料について測定を実施した。測定結果を表 4.3-17 に示す。糸生層シルト岩 10-1 については空気浸透率が測定下限値の 0.01 mD 以下であったため、浸透率を測定することができなかった。

表 4.3-17　遮蔽岩の孔隙率、粒子密度、空気浸透率測定結果（大気圧下、封圧下）

試料名	粒子密度 (g/cm^3)	大気圧下 孔隙率 (%)	封圧=2.76MPa 空気浸透率 (mD)	封圧下					
				孔隙率（%）			空気浸透率（mD）		
				7MPa	22MPa	36MPa	7MPa	22MPa	36MPa
荒谷層シルト岩6-4	2.448	26.03	3.450	25.29	23.39	22.60	0.7170	0.2370	0.0750
河南層泥岩9-1	2.665	24.48	0.025	24.48	22.78	22.60	0.0071	0.0047	0.0042
国見層シルト岩5-3	2.620	15.22	0.011	9.96	6.99	3.63	測定下限値：0.001mD以下		
糸生層シルト岩10-1	2.515	22.16	測定下限値：0.01mD以下	21.15	19.04	18.61	0.0027	0.0017	0.0015

② 孔隙率、空気浸透率測定（封圧下）

荒谷層シルト岩 6-4、河南層泥岩 9-1、国見層シルト岩 5-3、糸生層シルト岩 10-1 の 4 試料について 7 MPa、22 MPa、36 MPa の封圧下で測定を実施した。測定結果を表 4.3-17、図 4.3-23、図 4.3-24 に示す。国見層シルト岩 5-3 については空気浸透率が測定下限値の 0.001 mD 以下であったため、浸透率を測定することができなかった。

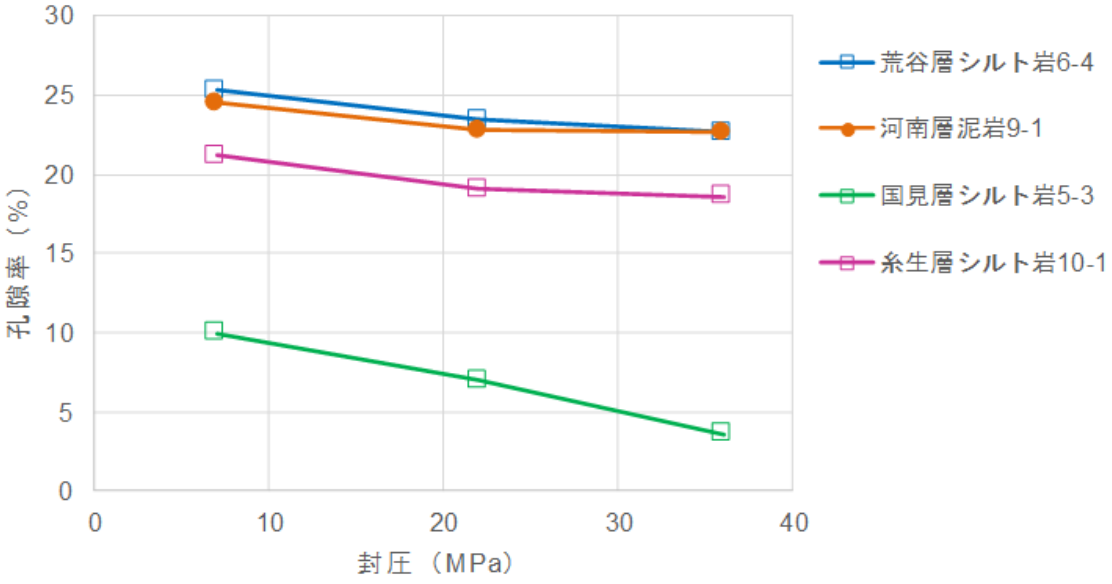
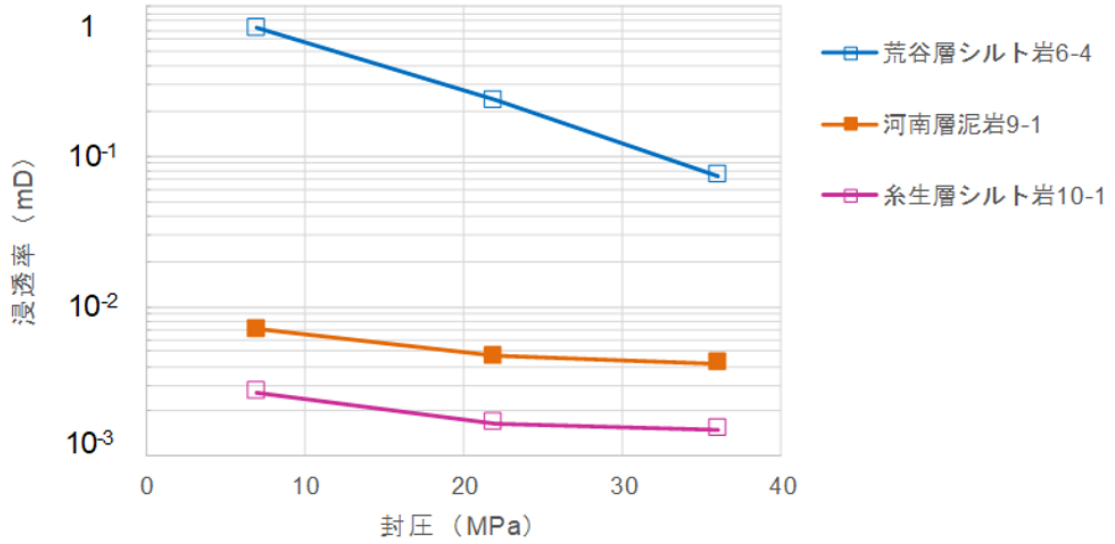


図 4.3-23　遮蔽岩の孔隙率（封圧下）



注）国見層シルト岩 5-3 については空気浸透率が測定下限値の 0.001 mD 以下であったため、浸透率を測定することができなかった。

図 4.3-24　遮蔽岩の浸透率（封圧下）

③　水浸透率測定

糸生層シルト岩 10-1 について水浸透率測定を実施した。結果を表 4.3-18 に示す。相対浸透率測定前に測定した河南層泥岩 9-1、国見層シルト岩 5-3 の水浸透率結果もあわせて示す。

表 4.3-18　遮蔽岩の水浸透率測定結果

試料名	封圧 (MPa)	間隙圧 (MPa)	水浸透率 (mD)
河南層泥岩9-1	21.5	11.2	0.000291
国見層シルト岩5-3			0.000048
糸生層シルト岩10-1			0.000227

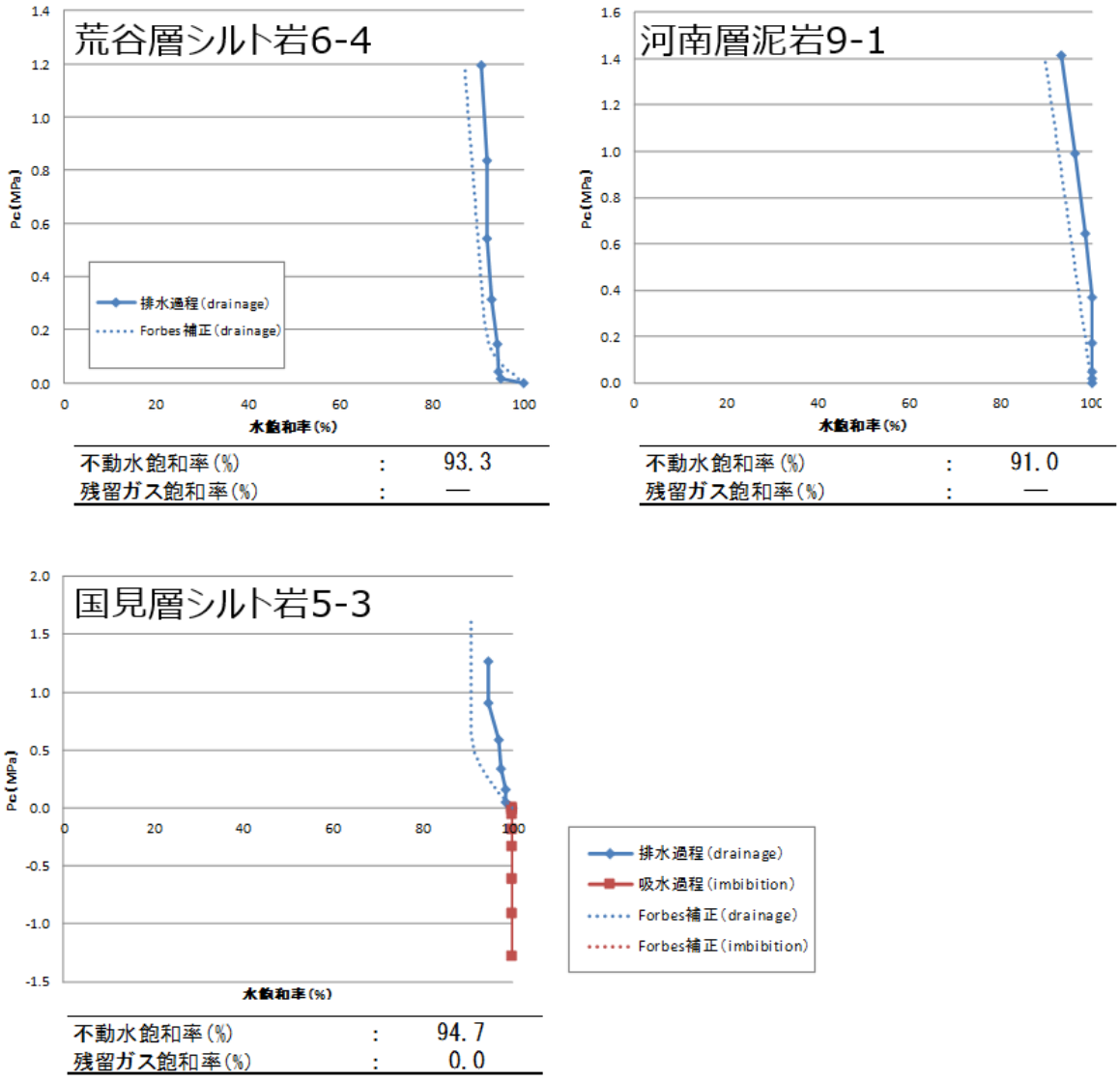
④　毛細管圧力測定

荒谷層シルト岩 6-4、河南層泥岩 9-1、国見層シルト岩 5-3 の 3 試料について毛細管圧力測定を実施した。毛細管圧力測定結果を図 4.3-25 に示す。

荒谷層シルト岩 6-4 と河南層泥岩 9-1 は排出過程での測定で試料が崩壊したことから、吸水過程は測定不可であった。

河南層泥岩 9-1 は浸透性が非常に悪く毛細管圧力が上り切るまで測定できなかったが、

ガスが浸入してからも流動性やガストラップ能力を有すると評価される。いずれの岩石試料も不動水飽和率が 90%以上と高く急激な毛細管圧力の立ち上がりであることから、遮蔽岩性状はよいと評価できる。



注）破線の毛細管圧力曲線は Forbes 補正[1 2)] 後の値を示す。

図 4.3-25　遮蔽岩の毛細管圧力測定結果

⑤　スレッショルド圧力測定

河南層泥岩 9-1、国見層シルト岩 5-3 についてスレッショルド圧力測定を実施した。測定結果を表 4.3-19 に示す。

表 4.3-19　スレッショルド圧力測定結果

試料名	封圧 (MPa)	間隙圧 (MPa)	スレッショルド圧力 (MPa)
河南層泥岩9-1	21.5	11.2	1.42
国見層シルト岩5-3			3.89

(4)　岩石物性分析

貯留岩能力評価の対象として河南層砂岩 1 個、国見層砂岩 2 個の合計 3 試料、遮蔽岩能力評価の対象として荒谷層シルト岩 1 個、河南層泥岩 1 個、糸生層シルト岩 1 個の合計 3 試料に岩石物性分析を実施した。岩石物性分析を実施した試料を表 4.3-8 に示す。

①　弾性波速度試験

河南層砂岩 8-2、国見層砂岩 2-1、国見層砂岩 2-2、荒谷層シルト岩 6-4、河南層泥岩 9-1、糸生層シルト岩 10-1 に弾性波速度試験を実施した。弾性波速度試験の結果を表 4.3-20 に示す。

②　一軸、三軸圧縮試験

河南層砂岩 8-2、国見層砂岩 2-1、国見層砂岩 2-2、荒谷層シルト岩 6-4、河南層泥岩 9-1、糸生層シルト岩 10-1 に一軸、三軸圧縮試験を実施した。一軸、三軸圧縮試験の測定結果を表 4.3-20 に示す。

荒谷層シルト岩 6-4 は最大封圧用の試料を成形できず、最大封圧条件での圧縮試験を実施できなかった。

一軸圧縮試験の結果から地盤工学会基準[17)]を基に分類すると、国見層砂岩 2-2 が軟岩 B に、国見層砂岩 2-1、糸生層シルト岩 10-1 が軟岩 C に、河南層砂岩 8-2、荒谷層シルト岩 6-4、河南層泥岩 9-1 が軟岩 D に分類された。

表 4.3-20　弾性波速度試験および一軸、三軸圧縮試験結果

	試料名	直径 (cm)	長さ (cm)	体積 (cm^3)	質量 (g)	密度 (g/cm^3)	P波速度 (m/s)	S波速度 (m/s)	動ヤング率 (MPa)	動ポアソン比	封圧 (MPa)	静ヤング率 (MPa)	静ポアソン比	破壊強度 (主応力差) (MPa)	破壊強度 (軸応力) (MPa)	延性度 (%)	UCS (MPa)	固着力 (MPa)	摩擦角 (度)
貯留岩能力試験模擬試料	国見層砂岩2-1	3.50	7.07	68.02	165.81	2.438	3448.8	1850.8	21675.6	0.298	0.1	10262.5	0.136	46.581	46.681	0.5			
		3.50	7.09	68.21	163.15	2.392	-	-	-	-	4.0	2838.7	-	45.594	49.594	1.8	43.839	12.866	29.2
		3.50	7.11	68.41	165.53	2.420	-	-	-	-	8.0	4598.1	-	62.634	70.634	1.7			
		1.93	4.12	12.01	29.18	2.430	-	-	-	-	20.0	9536.0	-	81.618	101.618	1.5			
	国見層砂岩2-2	3.50	7.01	67.44	164.22	2.435	3291.1	1681.1	18214.4	0.323	0.1	19668.0	0.261	51.168	51.268	0.3			
		3.50	7.06	67.93	165.21	2.432	-	-	-	-	4.0	3930.4	-	49.248	53.248	1.7	48.413	14.381	28.6
		3.50	7.01	67.44	163.91	2.430	-	-	-	-	8.0	5870.8	-	67.481	75.481	1.7			
		1.93	4.13	12.03	28.91	2.403	-	-	-	-	20.0	7895.8	-	84.609	104.609	1.5			
	河南層砂岩8-2	3.50	6.99	67.25	152.51	2.268	1676.3	952.3	5190.3	0.262	0.1	2258.1	0.100	9.852	9.952	0.5			
		3.49	7.05	67.44	155.20	2.301	-	-	-	-	4.0	1221.4	-	18.316	22.316	2.0	11.154	3.473	26.2
		3.50	6.98	67.16	152.93	2.277	-	-	-	-	8.0	1551.9	-	25.083	33.083	2.0			
		1.92	4.15	12.04	27.63	2.295	-	-	-	-	20.0	2036.0	-	42.059	62.059	4.0			
貯留岩能力試験模擬試料	荒谷層シルト岩6-4	3.49	6.87	65.72	130.29	1.983	1946.2	970.3	4983.6	0.335	0.1	2193.8	0.194	11.022	11.122	0.5			
		3.49	6.86	65.62	131.23	2.000	-	-	-	-	4.0	1365.7	-	19.118	23.118	1.8	11.022	5.511	0.0
		3.49	6.90	66.01	126.44	1.915	-	-	-	-	8.0	1145.0	-	20.100	28.100	4.0			
		-	-	-	-	-	-	-	-	-	20.0	-	-	-	-	-			
	河南層泥岩9-1	3.47	6.74	63.74	136.65	2.144	1893.3	1184.5	7089.8	0.178	0.1	2100.7	0.227	19.910	20.010	0.9			
		3.47	6.89	65.16	140.10	2.150	-	-	-	-	4.0	1950.0	-	28.573	32.573	2.0	19.910	9.955	0.0
		3.46	6.77	63.65	135.55	2.130	-	-	-	-	8.0	2156.0	-	32.183	40.183	2.2			
		1.94	4.07	12.01	26.78	2.230	-	-	-	-	20.0	(284.7)	-	(5.602)	(14.398)	(2.3)			
	糸生層シルト岩10-1	3.49	6.99	66.87	138.94	2.078	2470.0	1480.9	11114.3	0.219	0.1	4902.7	0.141	29.421	29.521	0.6			
		3.49	6.87	65.72	135.60	2.063	-	-	-	-	4.0	2416.7	-	30.842	34.842	1.7	29.482	12.950	7.4
		3.49	7.05	67.44	137.04	2.032	-	-	-	-	8.0	2137.0	-	31.759	39.759	2.6			
		1.92	4.14	12.03	25.50	2.120	-	-	-	-	20.0	3039.0	-	26.073	46.073	1.1			

注）―は測定ができなかった試料を示す。

③　圧裂引張試験

荒谷層シルト岩 6-4、河南層泥岩 9-1、糸生層シルト岩 10-1 に圧裂引張試験を実施した。圧裂引張試験の結果を表 4.3-21 に示す。

表 4.3-21　圧裂引張試験結果

	直径 (cm)	長さ (cm)	質量 (g)	密度 (g/cm^3)	破壊荷重 (kN)	引張強度 (MPa)
荒谷層 シルト岩6-4	5.00	3.10	122.95	2.02	1.30	0.53
河南層 泥岩9-1	4.98	3.75	155.90	2.13	2.50	0.85
糸生層 シルト岩10-1	4.97	4.93	202.18	2.11	17.10	4.44

4.3.5　考察

(1)　砂岩組成の変化と後背地の検討

薄片観察および X 線鉱物分析結果と先行研究[24)]から砂岩組成の変化と後背地を検討した。X 線鉱物分析結果と試料採取位置を図 4.3-26 に、X 線鉱物分析結果から推定した苦鉄質火山岩と珪長質火山岩の割合を図 4.3-27 示す。連続した露頭地点では下位から上位に表示した。

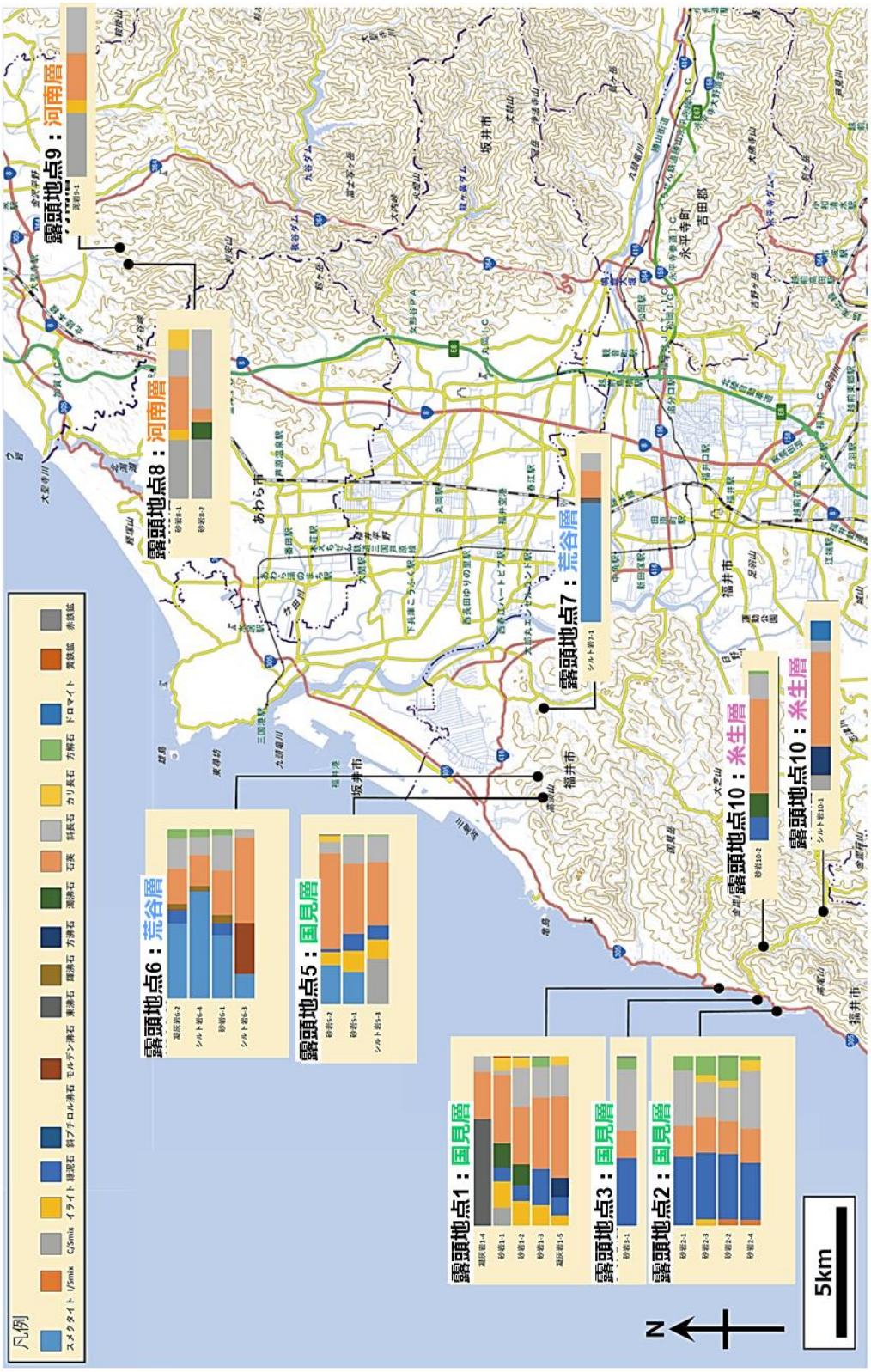
西南日本の日本海沿岸の砂岩の多くは、主として火山岩片や火山起源の粒子からなる岩片質アレナイトからなる。先行研究[24)]では糸生層、国見層、河南層、荒谷層について各層準の具体的な供給源を示す記述はない。しかし地表調査範囲では同時代に活動した苦鉄質および珪長質火山岩が沿岸から内陸にかけで数多く存在することから、これらを主たる供給源として数 km～十数 km に渡り砂岩が供給されていたと考えられる。岩石薄片鑑定では糸生層や国見層にはごく少量の多結晶石英が見つかった。このことから内陸の飛騨帯の花崗岩からの供給もあると考えられるが、その寄与は小さいと推定される。

同定鉱物には本来の砕屑粒子や砕屑岩片のほかに二次鉱物が含まれる。苦鉄質火山岩はその多くが続成変質過程でスメクタイトや緑泥石等に変化する。このことからスメクタイト、C/S mix 粘土鉱物、緑泥石を合わせた緑泥石系粘土鉱物の和を苦鉄質火山岩の指標とする。一方、I/S mix 粘土鉱物を含むイライトと石英の和を珪長質火山岩の指標とする。この指標を用いて、苦鉄質火山岩と珪長質火山岩の量比を検討した。

砂岩組成の変化について下位から上位に検討する。糸生層砂岩は地表調査範囲南側の丹生地域に分布し、珪長質岩を主体とする。同様に地表調査範囲南側の丹生地域に分布する国見層について、先行研究[24)]により挟在する凝灰岩を基に海岸沿いでの北方へ時代が若くなる層序が明らかになっている。国見層は下部では苦鉄質岩を主体とするが、中部～上部ではしだいに珪長質火山岩の割合が大きくなる。そして荒谷層ではまた苦鉄質火山岩が主体となる。地表調査範囲北側の加賀地域に分布する河南層は層序学的に国見層に対比される。河南層では苦鉄質火山岩と珪長質火山岩が同程度の割合か、珪長質火山岩のほうが多くなっている。苦鉄質火山岩と珪長質火山岩の割合だけを見ると国見層の中部に対比できるが、河南層と国見層の地域的な火山岩の供給源の違いを反映している可能性も高い。

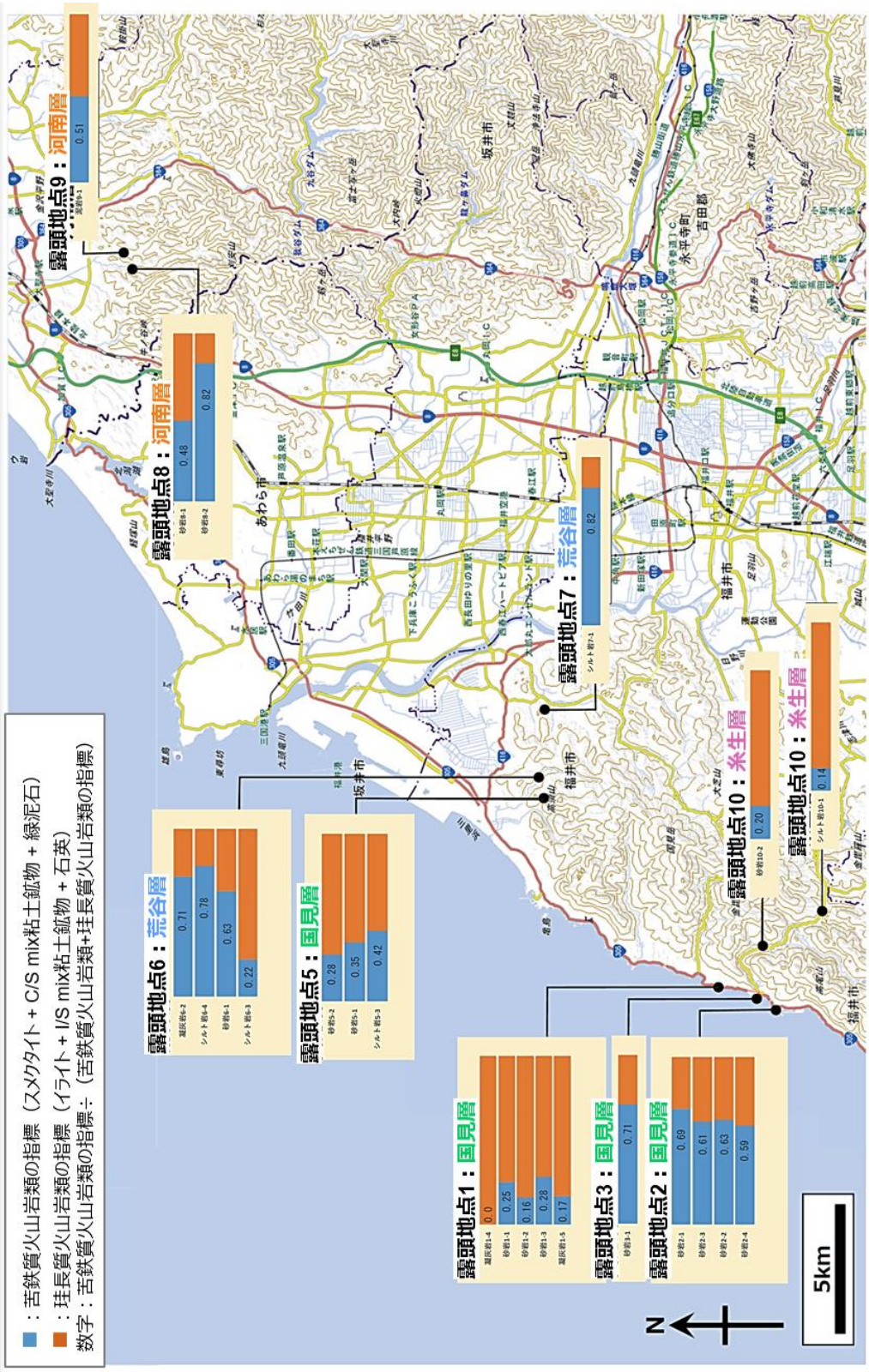
先行研究[24)]では糸生層から荒谷層に至るグリーンタフ期には、苦鉄質火山と珪長質火山が同時に活動していたとされる。国見層と河南層の砂岩組成の違いにみられるように、供給源の火山岩の種類に堆積物の組成は大きく作用される可能性がある。一般に、苦鉄質火山岩を供給源とする砂岩は粘土鉱物を主体とし、珪長質火山岩を供給源とする砂岩に比べて貯留岩性状が劣る。一般論にならえば、国見層の下部よりも中部～上部のほうがより貯留岩性

状が良くなっていると推定され、このことは貯留岩分析結果とも整合的である。



注）X 線鉱物分析結果を 100%に規格化した値を示す。単位は wt%である。

図 4.3-26　X 線鉱物分析結果と試料採取位置図



注 1）値は 100%に規格化した値を示す。
注 2）青は苦鉄質火山岩類の指標、橙は珪長質火山岩類の指標を示す。

図 4.3-27　X 線鉱物分析結果から推定した苦鉄質火山岩と珪長質火山岩の割合

(2) 最大埋没深度の推定

岩石鉱物分析結果から地表調査試料の最大埋没深度を推定した。砂岩の圧密曲線と続成変質鉱物組み合わせを用いて推定した最大埋没深度を図 4.3-28、推定した最大埋没深度の一覧を表 4.3-22 に示す。

① 続成鉱物組み合わせを用いた最大埋没深度の推定

岩石鉱物分析結果の続成鉱物の組み合わせから、埋没深度に伴う続成鉱物の変化を用いて最大埋没深度を推定した。Aoyagi（1983）[31)]は、続成鉱物の転換温度自体はおおむね一義的に決まり、地域や地質時代が同じであれば地温勾配を仮定して埋没深度が推定できるとしている。Aoyagi（1983）[31)]を用いて、続成鉱物組み合わせやそれぞれの転換温度から地表調査試料の最大埋没深度を推定した。地表調査範囲の沖合で掘削された基礎試錐「金沢沖」の温度測定結果から地温勾配は 4.2℃/100m と推定される[19)]。地表温度は 15℃とした。地温勾配が地質時代を通じて変化しなかったと仮定して最大埋没深度の推定を行った。

X 線鉱物分析の結果から、荒谷層では続成変質鉱物としてスメクタイト、モルデン沸石、輝沸石および石英が共存する。国見層では続成変質鉱物としてスメクタイトまたは I/S mix 粘土鉱物、方沸石、濁沸石、石英が共存する。国見層と時代的に同層準とされる河南層では続成変質鉱物として C/S mix 粘土鉱物、イライト、濁沸石および石英が共存する。糸生層では続成変質鉱物として緑泥石、濁沸石および石英が共存する。

飯島（1978）[32)]は沸石の転換には原岩組成が影響するとしている。モルデン沸石から輝沸石への変換温度は、飯島（1978）[32)]では 84～91℃と推定している。荒谷層では沸石としてモルデン沸石や輝沸石が出現するが、Aoyagi（1983）[31)]から斜プチロル沸石帯の温度範囲でこれら二つの沸石がそれぞれ出現することは十分あり得ると考えられる。

以上の結果から、地表調査で採取した各層準の砂岩試料の温度領域から最大埋没深度を推定した。荒谷層の最大埋没深度は 1,500～2,000 m、国見層と河南層の最大埋没深度は 2,000～3,000 m、糸生層の最大埋没深度は 3,000 m 以上と推定した。

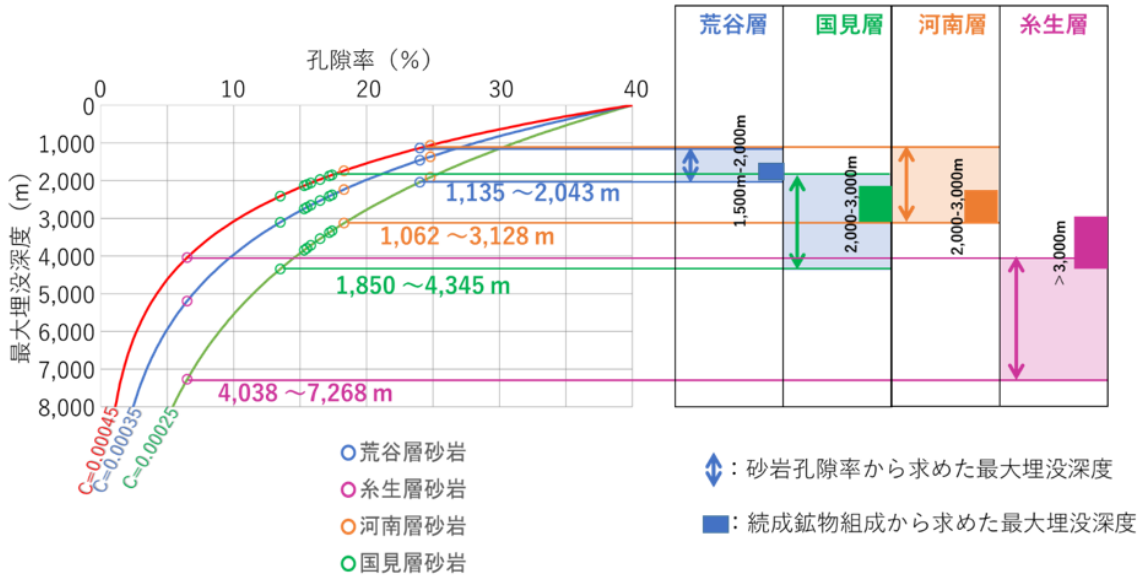
② 孔隙率を用いた最大埋没深度の推定

砂岩の孔径分布測定分析結果から荒谷層、国見層、河南層、糸生層の最大埋没深度を推定した。孔径分布測定結果の孔隙率から Athy（1930）[33)]の提唱した以下の経験式を用いて砂岩の圧密曲線を求めた。

$$\Phi=\Phi_0^{-cz}$$

注）Φ：孔隙率（%）、Φ_0：初期孔隙率（%）、c：圧密係数、z：埋没深度（m）

本曲線は圧密過程を良く表現することから、地質モデルへの入力データとして広く用いられている。Atashbari ほか（2012）[34] がまとめた各種堆積盆の砂岩圧密曲線に合うように圧密係数 c と初期孔隙率Φ_0を設定した。設定した c は 0.00025、0.00035、0.00045 の三つ、Φ_0は 40%である。これに貯留岩能力評価対象の砂岩試料の孔径分布測定結果から求めた孔隙率を代入することで最大埋没深度を求めた。各層準の最大埋没深度は荒谷層砂岩が 1,135～2,043 m、国見層砂岩が 1,850～4,345 m、河南層砂岩が 1,062～3,128 m、糸生層砂岩が 4,038～7,268 m と推定された。続成変質鉱物から求めた最大埋没深度と比較すると、圧密係数 c を 0.00035 から 0.00045 とした時の圧密係数が相対的に大きい曲線とおおむね整合的である。地表調査を実施した地域の地温勾配が 4.2℃/100m と背弧特有の高い地温勾配となっており、続成変質が進んだと考えられる。



注 1）圧密曲線は Athy（1930）[33] の経験式を用いて求めた。
注 2）続成鉱物組み合わせは Aoyagi（1983）[31]、飯島（1978）[32] から求めた。

図 4.3-28　貯留岩の圧密曲線と続成変質鉱物組み合わせを用いて推定した最大埋没深度

表 4.3-22　貯留岩評価対象試料の最大埋没深度推定結果

試料名	岩相	孔隙率 (%)	最大埋没深度（m） 圧密係数 c=0.00025	圧密係数 c=0.00035	圧密係数 c=0.00045
荒谷層砂岩6-1	砂岩	24.0	2,043	1,460	1,135
河南層砂岩8-1	砂岩	24.8	1,912	1,366	1,062
河南層砂岩8-2	砂岩	18.3	3,128	2,234	1,738
国見層砂岩1-1	砂岩	15.5	3,792	2,709	2,107
国見層砂岩1-2	砂岩	17.4	3,330	2,378	1,850
国見層砂岩1-3	砂岩	15.8	3,715	2,654	2,064
国見層砂岩2-1	砂岩	17.2	3,376	2,411	1,875
国見層砂岩2-2	砂岩	16.5	3,542	2,530	1,968
国見層砂岩3-1	砂岩	13.5	4,345	3,103	2,414
国見層砂岩5-1	砂岩	15.3	3,844	2,746	2,136
国見層砂岩5-2	砂岩	15.5	3,792	2,709	2,107
糸生層砂岩10-2	砂岩	6.5	7,268	5,192	4,038

注）最大埋没深度は Athy（1930）[34)] の経験式を用いて求めた。

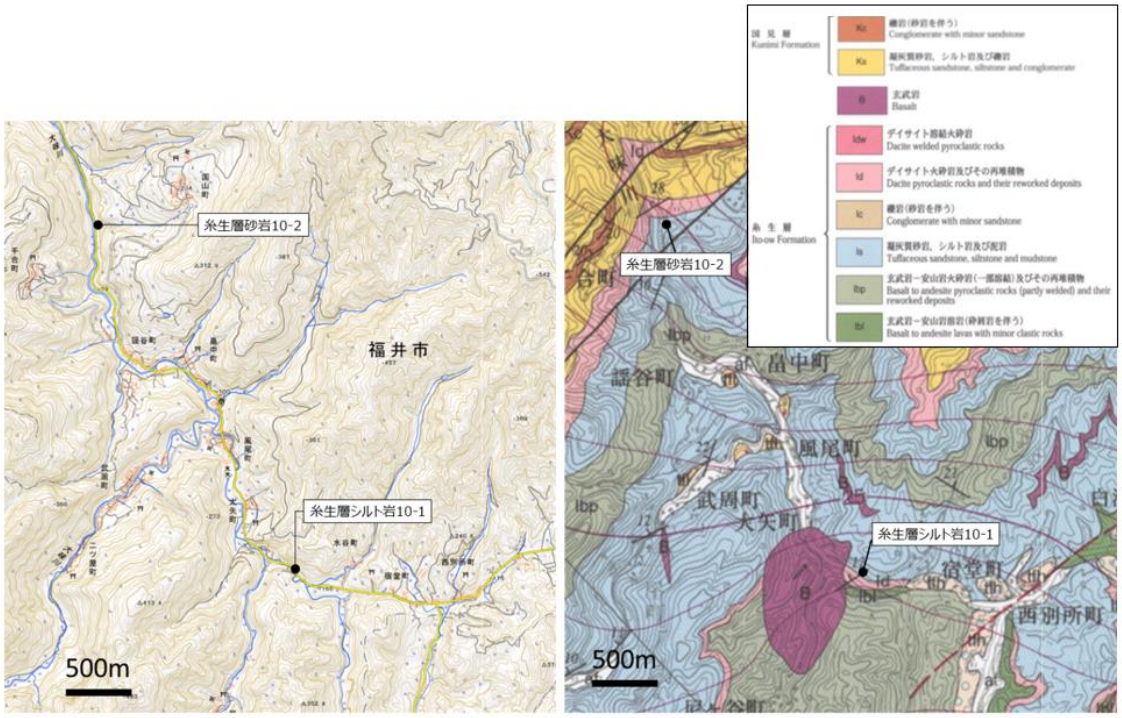
(3)　玄武岩貫入による続成作用の逆転

X 線鉱物分析の結果から、糸生層砂岩 10-2 は変質鉱物として緑泥石、濁沸石、石英が同定されるのに対して、糸生層シルト岩 10-1 の変質鉱物は C/S mix 粘土鉱物、方沸石、輝沸石、石英である。糸生層砂岩 10-2 と糸生層シルト岩 10-1 は同じ層準であり比較的近い露頭で採取したにも関わらず、糸生層砂岩 10-2 は明らかに糸生層シルト岩 10-1 に比較して変質作用が進んでいない粘土鉱物や沸石鉱物の組み合わせとなっている。鹿野ほか（2007）[24)] から、シルト岩 10-1 は砂岩 10-2 よりも層準的に下位に位置する。飯島（1978）[32)] によると、方沸石と輝沸石から濁沸石に転換する温度は 120～125℃（平均 123℃）と狭い温度帯である。高温での沸石転換変化ほど、原岩組成にあまり依存せず一定の値を示し、地質温度計として使用できる。以上のことから、糸生層の地表調査試料について明らかに続成変質作用の逆転現象が起きていると推定できる。

糸生層の岩石試料を採取した露頭位置と福井地域の地質図[24)] を図 4.3-29 に示す。糸生層の地表調査試料に続成変質作用の逆転が起きた原因として、糸生層シルト岩 10-1 を採取した露頭のごく近傍の玄武岩の貫入岩体が関係していると考えられる。地質調査において直接的な糸生層と玄武岩貫入岩体の接触関係は確認できなかったが、糸生層の岩石試料を採取した露頭の近傍の河床および対岸の露頭で玄武岩貫入岩体を確認した。

鹿野ほか（2007）[24]から糸生層から国見層にかけては日本海が開口した時期に当たり、流紋岩に加え玄武岩の活動が活発であった。糸生層のシルト岩が堆積して間もなく、玄武岩貫入岩体の熱の影響を受けて接触変成したと推定される。糸生層シルト岩 10-1 は凝灰質であるため、接触変成を受けて最大埋没温度を上回る温度をごく短期間に受けることにより、ガラスが一度に高温ガラスに変化した。高温ガラスに変化した部分は周囲の岩石に比べて含水率がきわめて少なく、続成変質作用に大きく関与する間隙水の比率が低くなり、続成変質作用の遅延が生じたと推定される。

薄片鑑定結果からも糸生層シルト岩 10-1 はガラスの一部が残っている等、明らかに続成作用が弱い。孔隙率についても糸生層砂岩 10-2 は孔隙率が 6%あるが、糸生層シルト岩 10-1 は 25%以上の孔隙率を有し地質時代や最大埋没深度の割に孔隙性状がよいままである。こうした続成作用の遅延現象と孔隙の保持は、多くの火山岩噴出や貫入岩を有する地表調査範囲の特徴の一つと考えられる。



注 1）左図は国土地理院ホームページ、地理院地図（電子国土 Web）[1]に加筆した。
注 2）右図は福井地域の 5 万分の 1 地質図[24]を引用し、加筆した。

図 4.3-29　糸生層の岩石試料を採取した露頭位置と福井地域の地質図[24]

(4) 岩石鉱物分析結果を用いた貯留岩試料の分類

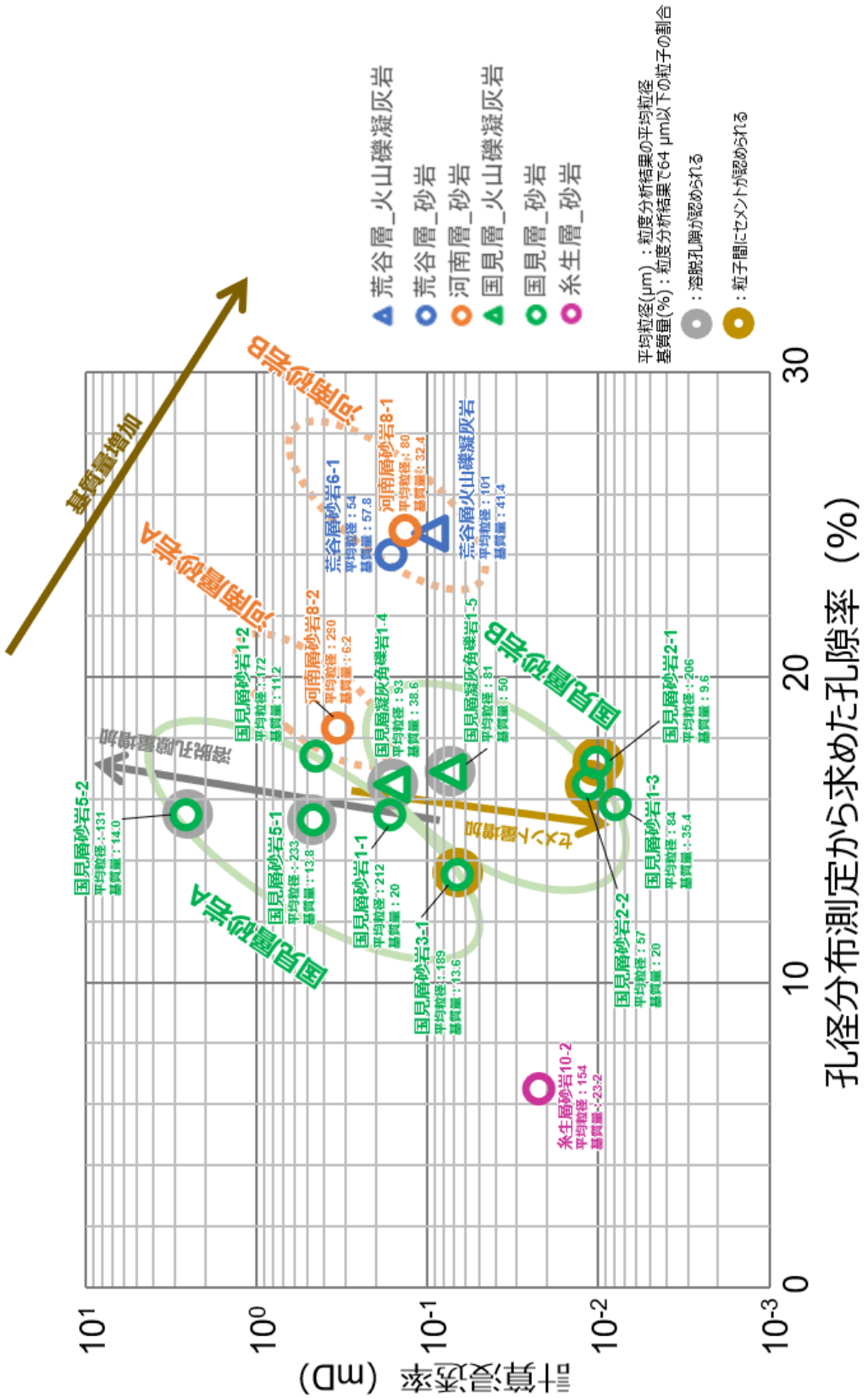
孔径分布測定結果から求めた孔隙率および計算浸透率を図 4.3-30 に示す。粒度分析結果から求めた基質量と平均粒径、薄片鑑定結果の溶脱孔隙や粒子間セメントの有無もあわせて示した。

国見層砂岩および火山礫凝灰岩を二つのグループに分類した。孔隙率も浸透率も比較的大きく貯留岩性状のよりよいグループを国見層砂岩 A、孔隙率と浸透率が小さい貯留岩性状が劣るグループを国見層砂岩 B とした。国見層砂岩 B は国見層凝灰角礫岩も含む。国見層砂岩 A は平均粒径 100μm 以上かつ基質量 15%以下の試料が多く、国見層砂岩 B は平均粒径 100μm 以下かつ基質量 30%以上の試料が多い。国見層砂岩 A、国見層砂岩 B に共通して、グループ内で浸透率が比較的高い試料には溶脱孔隙が認められる。一方、グループ内で浸透率が比較的低い試料には粒子間セメントが認められる。以上の結果から国見層の砂岩および凝灰角礫岩について溶脱孔隙は貯留岩性状を良くし、粒子間セメントは貯留岩性状を悪くすると考えられる。特に国見層砂岩 B に分類される国見層砂岩 2-1 は平均粒径 206μm、基質量 9.6%と国見層砂岩 A と同等の粒径と基質量であるが、粒子間セメントが認められることで国見層砂岩 B の領域まで貯留岩性状が劣化している。

荒谷層の砂岩および火山礫凝灰岩はともに平均粒子径はほぼ 100μm 以下で基質量 30%以上であり、平均粒子径と基質量は国見層砂岩 B と同等である。

河南層砂岩は平均粒径 100μm 以上、基質量 15%以下の河南層砂岩 A と、平均粒径 100μm 以下、基質量 30%以上の河南層砂岩 B に区分できる。

糸生層砂岩は平均粒径 100μm 以上で、基質量 30%以下であり、すべての試料の中でもっとも孔隙率が低い。



注 1）試料本来の孔隙でないと推定される試料表面の凹凸等の影響を取り除いた値を示す。
注 2）計算浸透率は Pittman の式[30] を用いて算定した。
注 3）粒度分布測定結果から粒径が 64 μ m 以下の割合を基質量として示した。

図 4.3-30　孔径分布測定結果から求めた孔隙率および計算浸透率

4.3.6　評価

地表調査結果および分析結果から、貯留岩能力および遮蔽岩能力を評価した。貯留岩および遮蔽岩能力を評価するため地表調査範囲の沖合で掘削されている基礎試錐「金沢沖」[19)]、鳥取の沖合で掘削されている基礎試錐「鳥取沖」[21)]および基礎試錐「香住沖」[35)]と比較した。

(1)　貯留岩能力評価

貯留岩能力評価のため地表調査で採取した荒谷層砂岩、荒谷層火山礫凝灰岩、河南層砂岩、国見層砂岩、国見層火山礫凝灰岩、糸生層砂岩について分析を実施した。貯留岩能力の評価結果を表 4.3-23 に示す。

貯留岩能力評価に際して国見層および河南層は、4.3.5(4)で分類したグループを用いた。貯留岩分析結果より、荒谷層火山礫凝灰岩がもっとも貯留岩性状が良く、次に荒谷層砂岩、河南層砂岩、国見層砂岩、国見層火山礫凝灰岩が同程度の貯留岩性状で続き、糸生層砂岩がもっとも貯留岩性状が悪い。もっとも浸透率の高い荒谷層火山礫凝灰岩でも浸透率が 1.89 mD であることから、地表調査で採取した岩石試料はすべての層準で貯留岩能力は低い結果となった。

すべての層準において貯留岩評価が低い結果の理由として、以下の二つの地質的要因が考えられる。

一つ目の要因は、すべての層準で極細粒～細粒砂岩が主であることである。薄片鑑定結果から細粒な砂岩に一部粗粒な岩片が入ってくる等、分級度はあまり良くなく、淘汰が悪い。

もう一つの要因は、すべての層準で砂岩が玄武岩、流紋岩、またはそれらの火砕堆積物を多く含むことである。軽石とスコリア岩片が圧密によって潰れて、pseudo matrix を形成し貯留岩性状を悪化させている。特に玄武岩凝灰岩質の基質は埋没続成変質の過程で容易に粘土化して、粒子および岩片の周りに粘土リムを形成し、孔隙にセメントを形成する。粘土リムとセメントは孔隙を閉塞させ、浸透率を大きく減少させる。地表調査範囲周辺では基礎試錐「金沢沖」[19)]から推定した地温勾配が 4.2℃/100m と高く、粘土リムとセメントを伴う続成変質作用が進行しやすい条件であったと考えられ、そのことが貯留岩性状の悪化に作用したと推定した。

封圧下で測定した空気浸透率測定でもすべての層準において、浸透率が極端に減少した。これは封圧によって粒子間の孔隙が狭窄したことが原因と推定される。毛細管圧力測定結果では国見層砂岩、河南層砂岩の毛細管圧力が急激に立ち上がり、不動水飽和率も高く、水浸透率も低く、ガスの流動性は低いと推定される。この結果についても粘土リムとセメント

に起因する孔隙の狭窄が原因と推定される。

基礎試錐「金沢沖」[19]、基礎試錐「鳥取沖」[21]、基礎試錐「香住沖」[35]と地表調査試料を比較し、貯留岩性状を検討した。地表調査試料の孔隙率および浸透率の関係を図 4.3-31 に示す。基礎試錐「金沢沖」、基礎試錐「鳥取沖」、基礎試錐「香住沖」の貯留岩は、孔隙率 20～40%かつ浸透率 1～数 100 mD の貯留岩性状がよいものと、孔隙率 1～13%で浸透率 0.1 mD 以下の貯留岩性状が極端に悪いものに分かれる。貯留岩性状がよい坑井試料は、基礎試錐「金沢沖」の黒瀬谷層ハイアロクラスタイト、基礎試錐「鳥取沖」の古江層砂岩と成相寺層砂岩である。基礎試錐「金沢沖」の黒瀬谷層ハイアロクラスタイトは地表調査試料と同時代の層準で玄武岩凝灰角礫岩の再堆積相と推定される。基礎試錐「鳥取沖」の古江層砂岩は地表調査試料よりも地質時代的に新しく火山性物質を伴わない後期中新世のシルト質砂岩である。基礎試錐「鳥取沖」の成相寺層砂岩は地表調査試料と同時代の層準で、珪長質な前期～中期中新世の流紋岩質砂岩である。

貯留岩性状が悪い坑井試料は、基礎試錐「金沢沖」と基礎試錐「香住沖」の玄武岩、安山岩、流紋岩と、基礎試錐「鳥取沖」の古浦層砂岩が含まれる。基礎試錐「鳥取沖」の古江層砂岩は、地表調査試料の糸生層と同じ前期中新世の火山物質を含む砂岩であり、同程度の貯留岩性状を示す。これらの前期中新世の砂岩は、埋没による圧密が進んでいることが貯留岩性状を悪化させたと考えられる。

地表調査試料は孔隙率 7～25%、浸透率 0.01～1 mD の範囲に落ち、基礎試錐 3 坑井の貯留岩性状のよい試料と悪い試料の中間的な性状を示す。4.3.5 項(2)から地表調査試料は基礎試錐の試料と同程度の深度まで過去に埋没を受けていたと推定した。このことから、地表調査試料と基礎試錐試料は埋没深度については同等で、岩質および岩相の差が貯留岩性状に大きく影響したと考えられる。

地質調査結果から荒谷層、国見層、河南層、糸生層は陸域から浅海にかけての堆積物であり、分布はリフト断層上盤内の狭い範囲に限られ沖合まで続かない[20]。しかし今回の検討により、基礎試錐 3 坑井の中間的な性状の値を得ることができたため、岩質と岩相と埋没深度に留意して貯留岩性状の評価を行えば貯留岩性状の予測に繋げることが可能である。

表 4.3-23　貯留岩能力の評価結果

	分析項目									コメント
	岩石鉱物分析				孔隙率		空気浸透率		水浸透率	毛細管圧力	
	岩質	粒径	分級度	孔径分布	大気圧	封圧	大気圧	封圧			
荒谷層 砂岩および 火山礫凝灰岩	◎～▲	極細粒～細粒	△	×	○	○	▲	▲	—	—	火山岩片を主体とする極細粒～細粒石質アルナイト～ワッカからなる。孔隙率と孔径が小さく低浸透率である。
河南層砂岩A	▲	細粒～中粒	△	×	△	△	▲	▲	△	△	玄武岩岩片を主体とする細粒～中粒石質ワッカからなる。相対的に基質量が10%以下と少ないことで河南層砂岩Bとは区別される。孔隙率と孔径が小さく低浸透率である。
河南層砂岩B	▲	極細粒	△	×	○	○	▲	▲	—	—	玄武岩岩片を主体とする極細粒石質ワッカからなる。相対的に基質量が多いことで河南層砂岩Aとは区別される。孔隙率と孔径が小さく低浸透率である。
国見層砂岩A	◎～▲	極細粒～中粒	△	×	△～▲	▲	▲	▲	△	△	火山岩片を主体とする石質アルナイト～ワッカからなる。相対的に基質の量が少なく、長石粒子の溶脱があることで国見層砂岩Bとは区別される。孔隙率と孔径が小さく低浸透率である。
国見層砂岩B (火山礫凝灰岩を含む)	◎～▲	極細粒～細粒	△	×	▲	▲	▲	▲	△	△	火山岩片を主体とする石質アルナイト～ワッカからなる。相対的に基質量が多く粘土や炭酸塩鉱物によるセメントを有することで国見層砂岩 Aとは区別される。孔隙率と孔径が小さく低浸透率である。
糸生層砂岩	◎	極細粒～細粒	△	×	▲	▲	▲	▲	—	—	火山岩片を主体とする極細粒～細粒石質アルナイト～からなる。圧密作用を比較的強く受けている。孔隙率と孔径が小さく低浸透率である。

岩質
◎:アルナイト
▲:ワッカ

分級度
◎:0.50以下
○:0.50~0.71
△:0.71以上

孔径分布
◎:50,000 Å以上
○:10,000~50,000 Å
△:5,000~10,000 Å
▲:3,000~5,000 Å

孔隙率
◎:25%以上
○:20~25%
△:15~20%
▲:15%以下

浸透率
◎:100 mD以上
○:50~100 mD
△:10~50 mD
▲:10 mD以下

水浸透率
○:1mD以上
△:1mD未満

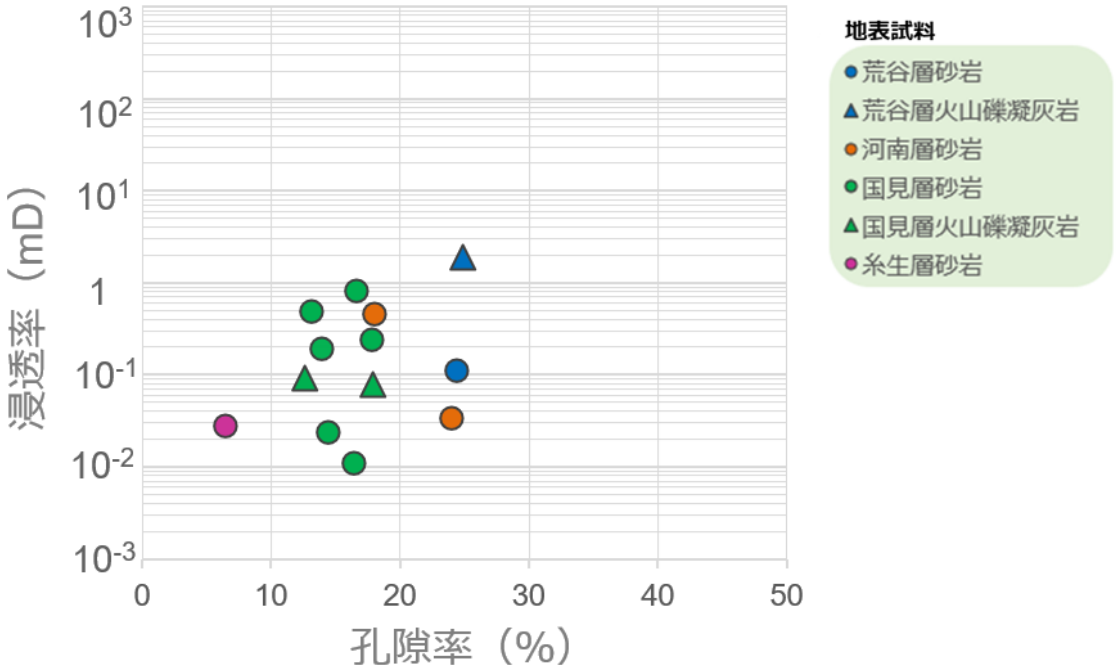


図 4.3-31　地表調査試料の孔隙率および浸透率の関係

(2)　遮蔽岩能力評価

遮蔽岩能力評価のため地表調査で採取した国見層シルト岩、荒谷層シルト岩、河南層泥岩、糸生層シルト岩について分析を実施した。基礎試錐「金沢沖」[19]、基礎試錐「鳥取沖」[21]、基礎試錐「香住沖」[35]、苫小牧 CCS-1[36]、苫小牧 CCS-2[37)、38]、地表調査試料のスレッショルド圧力を比較した。苫小牧 CCS-1[36]、苫小牧 CCS-2[37)、38]、地表調査試料のスレッショルド圧力の比較した結果を図 4.3-32 に示す。地表調査試料と坑井試料の比較のため測定条件を同一にした場合のスレッショルド圧力に換算した。遮蔽岩能力の評価結果を表 4.3-24 に示す。

国見層シルト岩、荒谷層シルト岩、河南層泥岩、糸生層シルト岩について遮蔽岩分析を実施した。国見層シルト岩および河南層泥岩はスレッショルド圧力測定を実施した。国見層シルト岩、荒谷層シルト岩、河南層泥岩、糸生層シルト岩の孔径分布測定結果から、スレッショルド圧力を推定した。

国見層シルト岩の封圧下の空気浸透率は 0.001 mD 以下で測定することができなかった。水浸透率は 0.000048 mD、スレッショルド圧力は 3.89 MPa である。荒谷層シルト岩の封圧下の空気浸透率は 0.0750 mD である。河南層泥岩の封圧下の空気浸透率は 0.0042 mD、水浸透率は 0.000291 mD、スレッショルド圧力は 1.42 MPa である。糸生層シルト岩の封圧下の空気浸透率は 0.0015 mD、水浸透率は 0.000227 mD である。

遮蔽岩分析後の荒谷層シルト岩は半壊したことから、浸透率測定時にフラクチャーがす

でに存在しその影響で荒谷層シルト岩の浸透率が実際よりも高く測定された可能性がある。このため荒谷層シルト岩については浸透率を考慮せずに遮蔽岩能力の評価を実施した。

基礎試錐「金沢沖」[19]では黒瀬谷層の泥岩 9 試料においてコア分析によるスレッショルド圧力が得られており、スレッショルド圧力は 5.2～42.1 kg/cm² である。基礎試錐「鳥取沖」[21]では下部古江層～牛切層の泥岩 1 試料、成相寺層の泥岩 1 試料でコア分析によるスレッショルド圧力が得られており、下部古江層～牛切層の泥岩のスレッショルド圧力は 5.27～7.031 kg/cm²、成相寺層泥岩は 16.87～22.50 kg/cm² である。基礎試錐「香住沖」[35]では中新世の泥岩 4 試料でコア分析によるスレッショルド圧力が得られており、スレッショルド圧力は 7.0～21.1 kg/cm² である。

苫小牧調査井 CCS-1[36]はコア分析を 4 試料で実施し、水浸透率とスレッショルド圧力が得られている。振老層泥岩では水浸透率 8.2～36.7 nD、スレッショルド圧力 1.29～2.90 MPa もしくは 12.3 MPa 以上の値が得られている。

苫小牧調査井 CCS-2 はコア分析を 2 回実施している。ひとつは萌別層 4 試料、荷菜層 1 試料でコア分析を実施している[37]。萌別層の残差圧入法の水浸透率は 1.00～7.05 μD、残差圧入法のスレッショルド圧力は 0.028～0.877 MPa、段階昇圧法でのスレッショルド圧力は 1.17～1.38 MPa の間である。荷菜層の残差圧入法の水浸透率は 1.36 μD、残差圧入法のスレッショルド圧力は 0.007 MPa である。もうひとつの分析は、萌別層泥岩 4 試料でコア分析を実施している[38]。萌別層の残差圧入法の水浸透率は 0.00080～0.00086 mD、残差圧入法のスレッショルド圧力は 0.5～0.7 MPa、段階昇圧法でのスレッショルド圧力は 0.75～1.67 MPa である。

地表調査試料や坑井のスレッショルド圧力を比較できるように、それぞれのスレッショルド圧力を同じ条件での値に換算した。地表調査試料の遮蔽岩分析で得られるスレッショルド圧力はブライン—CO_2 系で測定されている。地表調査試料の孔径分布測定に基づくスレッショルド圧力は空気—水銀系の孔径分布測定で得られた毛細管圧力曲線から読み取った。地表調査試料の国見層シルト岩 5-3 については遮蔽岩分析と孔径分布測定のスレッショルド圧力が異なっているが、これはそれぞれの測定の際に使用する分析試料の大きさによるばらつきであると推定される。

基礎試錐「金沢沖」[19]、基礎試錐「鳥取沖」[21]、基礎試錐「香住沖」[35]、苫小牧 CCS-1[36]、苫小牧 CCS-2[37]、[38]で実施されたコア分析についても使用流体、温度、圧力等の分析条件が異なる。これらについても同様に、地表調査試料の分析結果のスレッショルド圧力と比較できるようにした。変換する際は遮蔽岩分析の分析条件を考慮し、既存文献[39]、[40]、[41]からパラメータを推定し Washburn（1921）[7]の式を用いて変換した。比較した

スレッショルド圧力の測定条件でもっとも多かったブライン—N_2 系、界面張力 70 mN/m を基準としてスレッショルド圧力を換算し、換算後のスレッショルド圧力を比較した。

初めに水浸透率を比較する。苫小牧 CCS-1[36)] の振老層の水浸透率は 0.0000082～0.000036 mD である。苫小牧 CCS-2[37)、38)] の萌別層の水浸透率は 0.001～0.00705 mD、0.00080～0.00086 mD、0.00086～0.00173　mD、荷菜層の水浸透率は 0.00136 mD である。地表調査試料の国見層シルト岩、河南層泥岩、糸生層シルト岩の水浸透率は、苫小牧 CCS-1 の振老層よりも高いが、苫小牧 CCS-2 の萌別層と荷菜層よりも低い。したがって水浸透率測定の結果から、地表調査試料の国見層シルト岩、河南層泥岩、糸生層シルト岩の遮蔽岩能力は、苫小牧 CCS-1 の振老層よりも低いが、苫小牧 CCS-2 の萌別層、荷菜層よりも高い。

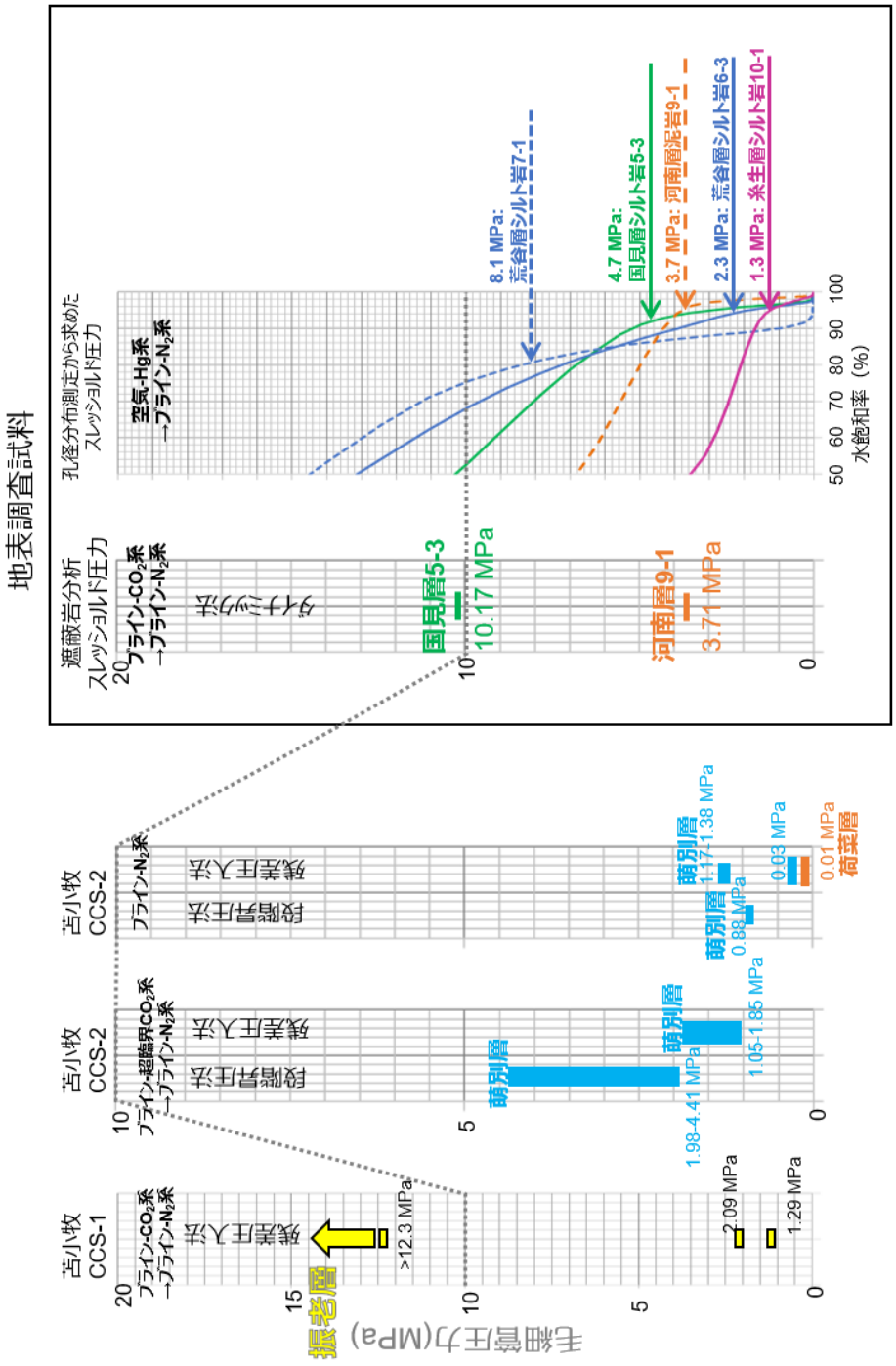
次にスレッショルド圧力を比較する。同じ測定条件の場合のスレッショルド圧力に換算した結果は次のようになった。地表調査試料の孔径分布測定によるスレッショルド圧力については、国見層は 4.7 MPa、荒谷層は 2.3 MPa と 8.1 MPa、河南層は 3.7 MPa、糸生層は 1.3 MP である。地表調査試料の遮蔽岩分析のスレッショルド圧力については、国見層は 10.17 MPa、河南層は 3.71 MPa である。一方、坑井のスッレショルド圧力については次のようになった。苫小牧 CCS-1[36)] の振老層は 1.29～2.90 MPa、12.3 MPa 以上の値である。苫小牧 CCS-2[37)、38)] の萌別層は 1.05～4.41 MPa、荷菜層は 0.01 MPa である。基礎試錐「金沢沖」[19)] の黒瀬谷層泥岩は 0.51～4.13 MPa、基礎試錐「鳥取沖」[21)] の下部古江層～牛切層泥岩は 0.52～0.69 MPa、成相寺層泥岩は 1.65～2.21 MPa、基礎試錐「香住沖」[35)] の中新世の泥岩は 0.69～2.07 MPa である。

換算したスレッショルド圧力用いて遮蔽岩能力を評価した結果は以下である。国見層シルト岩、荒谷層シルト岩、河南層泥岩、糸生層シルト岩の遮蔽岩能力は苫小牧 CCS-1 の振老層と比較すると同程度かそれより劣っている。苫小牧 CCS-2 の萌別層と荷菜層、基礎試錐「金沢沖」の黒瀬谷層の泥岩と比較すると同程度もしくはそれより優れている。基礎試錐「鳥取沖」の下部古江層～牛切層の泥岩、成相寺層の泥岩、基礎試錐「香住沖」の中新世の泥岩と比較すると同程度かそれよりも優れている。

地表調査試料を比較すると、荒谷層シルト岩の孔径分布から推定した二つのスレッショルド圧力の一つは遮蔽岩候補のうちもっとも高く、もう一つは河南層泥岩より低いが糸生層シルト岩よりも高い。

以上の結果を遮蔽岩能力評価の結果をまとめると、遮蔽岩能力は国見層シルト岩もしくは荒谷層シルト岩でもっとも高く、次に高いのが河南層泥岩、もっと低いのが糸生層シルト岩となる。ただし、4.3.5(3)に記載したように糸生層シルト岩は玄武岩による熱変質によっ

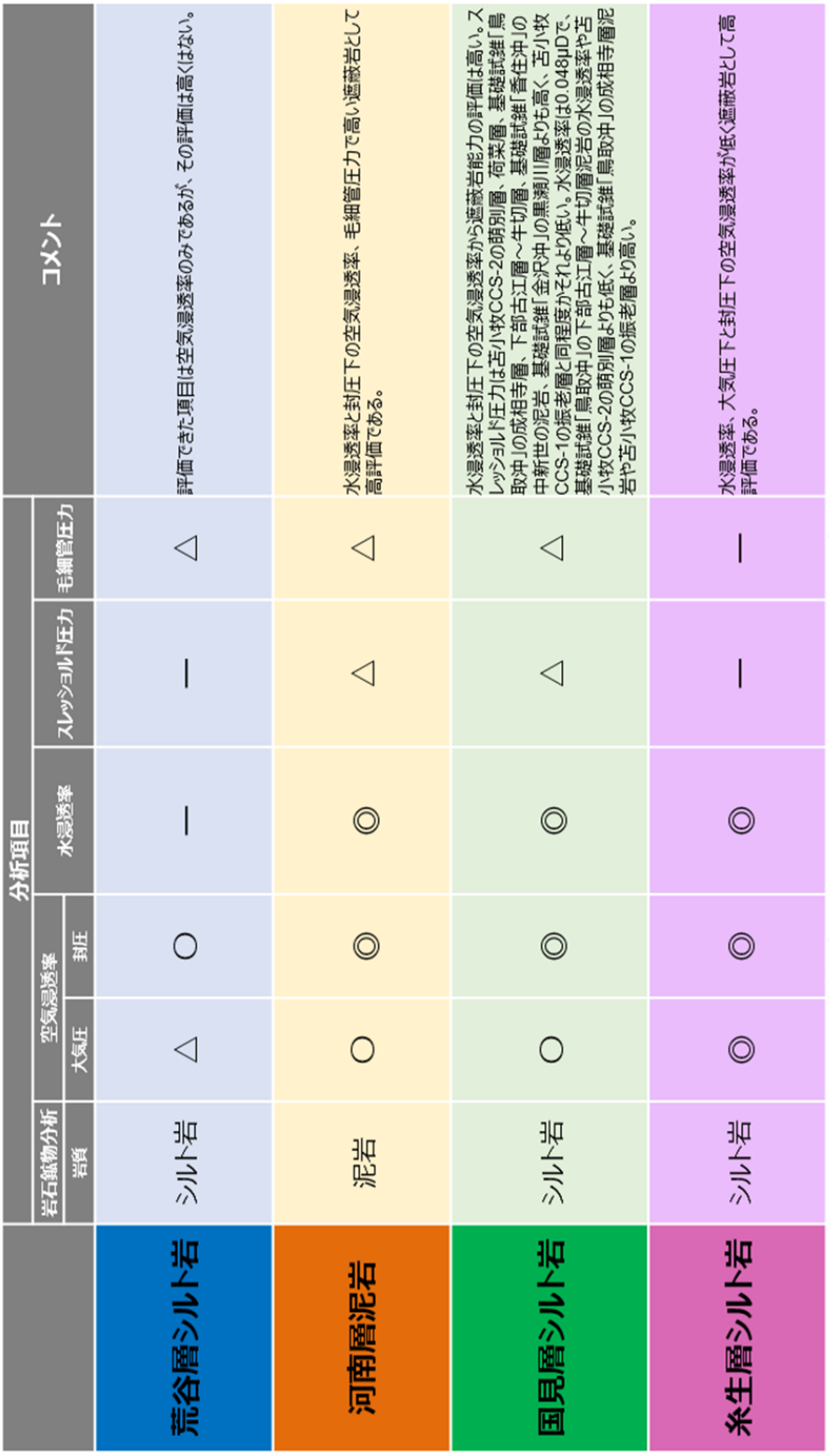
て圧密が抑制されていた可能性があり、糸生層シルト岩の代表的な値を示していない可能性がある。



注 1）苫小牧 CCS-1 は JAPEX（2011）[36] から引用した。
注 2）苫小牧 CCS-2 は JAPEX（2011）[37]、財団法人 地球環境産業技術研究機構（2011）[38] から引用した。
注 3）スレッショルド圧力をブライン—N_2 系に換算した値を示す。

図 4.3-32　苫小牧 CCS-1、苫小牧 CCS-2、地表調査試料のスレッショルド圧力の比較

表 4.3-24　遮蔽岩能力の評価結果



	分析項目						コメント
	岩石鉱物分析	空気浸透率		水浸透率	スレッショルド圧力	毛細管圧力	
	岩質	大気圧	封圧				
荒谷層シルト岩	シルト岩	△	○	—	—	△	評価できた項目は空気浸透率のみであるが、その評価は高くはない。
河南層泥岩	泥岩	○	◎	◎	△	△	水浸透率と封圧下の空気浸透率、毛細管圧力で高い遮蔽岩として高評価である。
国見層シルト岩	シルト岩	○	◎	◎	△	△	水浸透率と封圧下の空気浸透率から遮蔽岩能力の評価は高い。スレッショルド圧力は苫小牧CCS-2の萌別層、荷菜層、基礎試錐「鳥取沖」の成相寺層、下部古江層～牛切層、基礎試錐「沓形沖」の中新世の泥岩、基礎試錐「金沢沖」の黒瀬川層よりも高く、苫小牧CCS-1の振老層と同程度かそれより低い。水浸透率は0.048μDで、基礎試錐「鳥取沖」の下部古江層～牛切層泥岩の水浸透率や苫小牧CCS-2の萌別層よりも低く、基礎試錐「鳥取沖」の成相寺層泥岩や苫小牧CCS-1の振老層より高い。
糸生層シルト岩	シルト岩	◎	◎	◎	—	—	水浸透率、大気圧下と封圧下の空気浸透率が低く遮蔽岩として高評価である。

空気浸透率
◎：0.01mD未満
○：0.1mD未満
△：0.1mD以上

水浸透率
◎：0.001mD未満
△：0.001mD以上

スレッショルド圧力
◎：10MPa以上
○：5MPa以上
△：1MPa以上
×：1MPa未満

毛細管圧力
○：影響度小
△：影響度中

注 1）苫小牧 CCS-1 は JAPEX（2011）[36] から引用した。
注 2）苫小牧 CCS-2 は JAPEX（2011）[37]、財団法人 地球環境産業技術研究機構（2011）[38] から引用した。
注 3）基礎試錐「日高トラフ」は独立行政法人石油天然ガス・金属資源機構（2019）[22] から引用した。

【参考文献】

1) 国土地理院ホームページ、地理院地図（電子国土 Web）、https://maps.gsi.go.jp
2) Pettijohn, F.J., “Sedimentary rocks”, New York, Harper & Bros, 326p, (1949)
American Association of Petroleum Geologists
HP (http://archives.datapages.com/data/sgs_wb_utf/data/0011/0001/figs/fg6.jpg)
3) Cullity, B.D., “Elements of X-ray diffraction 1978”, Addison-Wesley Pub. Inc., p531, (1978)
4) 湊秀雄、歌田実、“輝沸石と斜プチロル沸石の化学処理と熱変化について”、岩石鉱物鉱床学会誌、第 60 巻(第 6 号)、p.213-221、(1968)
5) Friedman, G.M., “Determination of sieve-size distribution from thin-section data for sedimentary petrological studies”. Journal of Geology, 66, 394-416, (1958)
6) Folk, R.L. and Ward, W., “Brazos river bar; a study in the significance of grainsize parameters”, Journal of Sedimentary Petrology, Vol.27, p.3-26, (1957)
7) Washburn, E.W., “Note on a method of determining the distribution of pore sizes in porous material”, Proceedings of the National Academy of Sciences of U.S.A., Vol.7, p.115–116, (1921)
8) 石油技術協会、“石油鉱業便覧”、石油技術協会、p.566-567、(2013)
9) 石油技術協会、“石油鉱業便覧”、石油技術協会、p.568-570、(2013)
10) Wagner, W. and Kruse, A., Properties of water and steam: The industrial standard IAPWS-IF97 for the thermodynamic properties and supplementary equations for other properties: tables based on these equations. Springer-Verlag, Berlin, (1998)
11) 石油技術協会、“石油鉱業便覧”、p.570-571、(2013)
12) Forbes, P., Simple and accurate methods for converting centrifuge data into drainage and imbibition capillary pressure curves: SPWLA-1994-v35n4a, 3, p.31-53, (1994)
13) Span, R. and Wagner, W., “A New Equation of State for Carbon Dioxide Covering the Fluid Region from the Triple-Point Temperature to 1100 K at Pressures up to 800 MPa”, Journal of Physical and Chemical Reference Data, 25, p.1509, (1996)
14) Egermann, P., Lombard, J. M. and Bretonnier, P., “A fast and accurate method to measure threshold capillary pressure of caprocks under representative conditions”, SCA2006, A46, (2006)
15) 公益財団法人地盤工学会、“Japanese Geotechnical society standards laboratory

testing standards of geomaterials (Vol.3)”、(2018)

16) Zoback, M. D., “Reservoir Geomechanics”, Cambridge, University Press, (2007)

17) 地盤工学会、“地盤調査の方法と解説”、公益社団法人地盤工学会、(2013)

18) 日本工業規格、“岩石の引張強さ試験方法”, JIS M0303:2000、(2000)

19) 石油公団、“昭和 60 年度 国内石油・天然ガス基礎調査 基礎試錐「金沢沖」調査報告書”、(1986)

20) 藤井昭二、紺野義夫、中川登美雄、“北陸地域における新第三系の層序対比と新第三紀古地理”、地質学論集、Vol.37、p.85-95、(1992)

21) 石油公団、“昭和 57 年度 国内石油・天然ガス基礎調査 基礎試錐「鳥取沖」調査報告書”、(1983)

22) 鹿野和彦、“グリーンタフの層序学的枠組みと地質学的事象”、地質学雑誌、Vol.124(No.10)、p.781-803、(2018)

23) 産総研地質調査総合センターウェブサイト、
https://www.gsj.jp/geology/fault-fold/formation/r-classification/index.html

24) 鹿野和彦、山本博文、中川登美雄、“福井地域の地質．地域地質研究報告（5 万分の 1 地質図幅）”、産総研地質調査総合センター、(2007)

25) 三浦静、吉澤康暢、“5 万分の 1 土地分類基本調査「大聖寺」表層地質図”、福井県、p.15-19、(1987)

26) 紺野義夫、山田一雄、“5 万分の 1 土地分類基本調査「大聖寺・三国・永平寺（石川県分）」表層地質図”、石川県、p.22-33、(1988)

27) 鹿野和彦、原山智、山本博文、竹内誠、宇都浩三、駒澤正夫、広島敏男、須藤定久、“20 万分の 1 地質図幅「金沢」”、地質調査所、(1999)

28) 東洋一、“福井県丹生山地北西部の中新統層序　―特に新たに見い出された中期中新世の不整合について―”、福井県立博物館紀要、Vol.1、p.1−17、(1985)

29) McManus, Dean A., "A criticism of certain usage of the phi-notation", Journal of Sedimentary Research, 33(3),p.670-674, (1963)

30) Pittman, E. D., “Relationship of porosity and permeability to various parameters derived from mercury injection-capillary pressure curves for sandstone”, AAPG Bulletin, **76**, p.191–198(1992)

31) Aoyagi, K., “Porosity-depth relationships in the Neogene argillaceous and arenaceous sediments of Japan”、堆積学研究会報、第 17-19 巻、p.127-136、(1983)

32) 飯島東、“沸石続成作用”、地質学論集、Vol.15、p.135-150、(1978)

33) Athy, L., F., Density, porosity, and compaction of sedimentary rocks, AAPG Bulletin, p.1-24, (1930)
34) Atashbari, V., Tingay, M., Zareian, M. H., “Compressibility method for pore pressure prediction”, SPE 156337, (2012)
35) 石油公団、“昭和 63 年度 国内石油・天然ガス基礎調査 基礎試錐「香住沖」調査報告書”、(1990)
36) JAPEX、“平成 22 年度「二酸化炭素削減技術実証試験」のうち「苫小牧調査井 CCS-1 試料分析／地層流体分析」報告書”、(2011)
37) JAPEX、“平成 22 年度「二酸化炭素削減技術実証試験」のうち「苫小牧調査井 CCS-2 試料分析／地層流体分析」報告書”、(2011)
38) RITE、“平成 22 年度「二酸化炭素削減技術実証試験委託費」のうち苫小牧萌別層調査ボーリング（苫小牧 CCS-2）コアフラッド試験分析成果報告書”、(2011)
39) Chalbaud, C., Robin, M., Egermann, P., “Interfacial Tension Data and Correlations of Brine-CO_2 Systems under Reservoir Conditions”, SPE 102918, (2006)
40) Leonard, C., Ferrasse, J., Boutin, O., Lefevre, S., Viand. A., “Measurements and correlations for gas liquid surface tension at high pressure and high temperature”, AIChE Journal, p.4110-4117, (2018)
41) Web サイト「ピリカで化学工学」
（https://pirika.com/Chemistry/JP/ChemEng/SCFDenJavaScript.html）

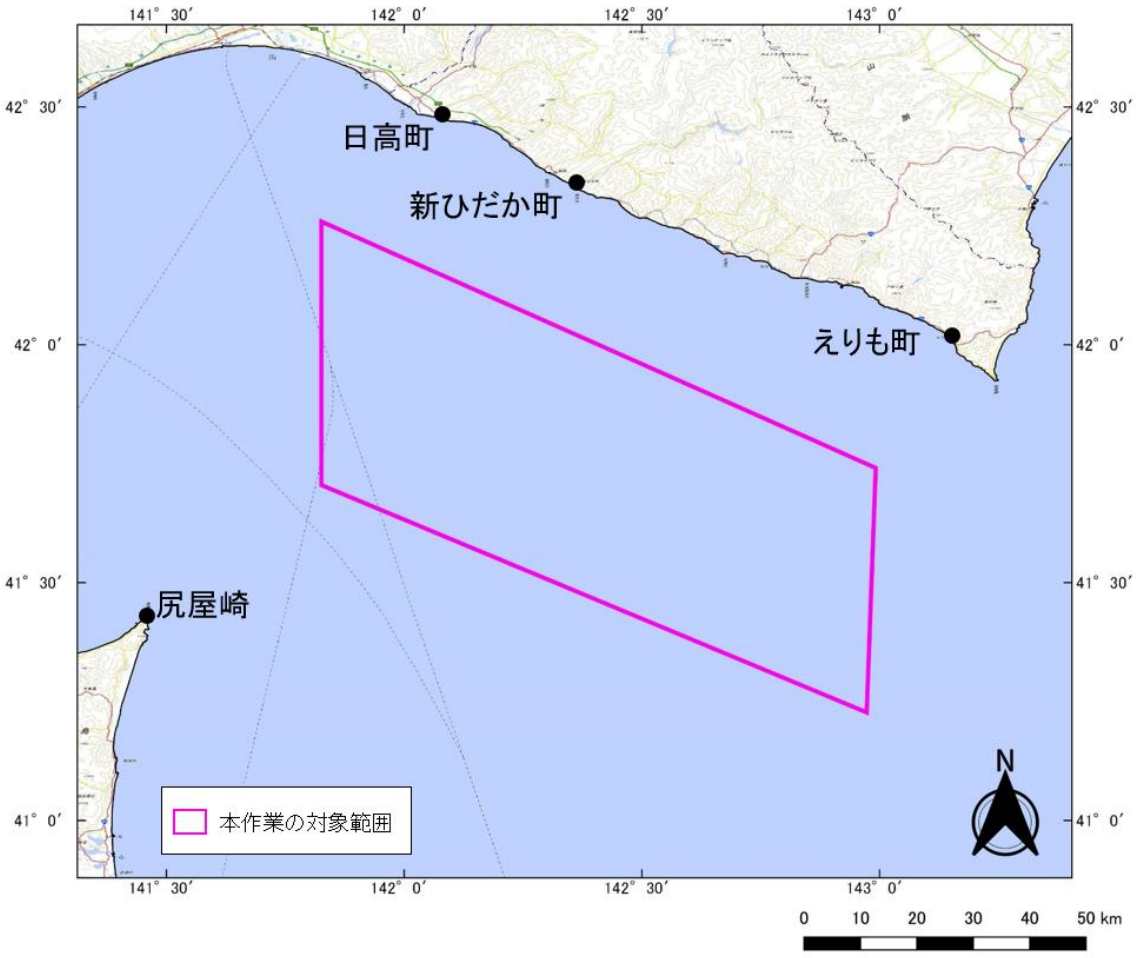
4.4　海底地形判読および海底地質情報コンパイル（日高沖）

調査範囲内の基礎物理探査 3D 探査データ、公開されている海底地形および海底地質に関する資料を用いて、海底地形および海底地質に関する情報を収集し整理した。

4.4.1　概要

『平成 24～25 年度 国内石油・天然ガス基礎調査「日高舟状海盆」』[1)、2)] および『平成 26 年度 国内石油・天然ガス基礎調査「日高舟状海盆西部 3D」』[3)] の 3D 弾性波探査航跡データに含まれる音響測深データ（以下、「3D 測深データ」と称する。）と公開されている資料を使用して、海底地形および海底地形に関わる情報の収集と整理を行った。

図 4.4-1 に調査範囲を示す。使用した主要ソフトウェアを表 4.4-1 に示す。測地系は WGS84/UTM zone54N を使用した。測地諸元を表 4.4-2 に示す。



注）国土地理院「電子地形図（タイル）」に追記。

図 4.4-1　対象範囲

表 4.4-1　使用した主要ソフトウェア一覧

処理ソフトウェア	制作会社	実施した処理
『QGIS』	オープンソース	地理情報の統合 浅層の地質解釈およびマッピング
『Simple DEM Viewer』	Yoshiaki Katayanagi	三次元モデル作成・地形解析
『VULCAN』	Maptek 社	

表 4.4-2　使用した測地諸元

準拠楕円体	WGS84
長半径	6,378,137.00000000 m
短半径	6,356,752.31424500 m
投影法	Universal Transverse Mercator（UTM 図法）
系番号	54
座標原点 緯度	00° 00′ 00.000" N
座標原点 経度	141° 00′ 00.000" E
縮尺係数	0.999600
北方加数	0.000 m
東方加数	500,000.000 m

4.4.2　海底地形および海底地質情報に係るデータの収集

参照した海底地形、海底地質および既存音波探査に係る資料を表 4.4-3 に示す。

海底地形に係る資料として、基礎物理探査「日高舟状海盆 3D」および基礎物理探査「日高舟状海盆西部 3D」の 3D 測深データを使用した。3D 測深データを取得していない領域を補うため、(一財)日本水路協会が発行する海底地形デジタルデータ[4)]（以下、「水路協会データ」と称する。）を収集した。

海底地質に係る資料として(国研)産業技術総合研究所（以下、「AIST」と称する。）発行の日高舟状海盆海底地質図[5)]および襟裳岬沖海底地質図[6)]を収集した。第四紀層を変形させる断層の分布、海底面下の層序等を把握するために基礎物理探査「日高舟状海盆 3D」および基礎物理探査「日高舟状海盆西部 3D」のデータ解釈報告書[7)、8)]を参照した。

既往音波探査資料として、AIST が公開している高分解能音波探査断面データベース[9)]から高分解能音波探査（Sub-Bottom Profiler、以下、「SBP」と称する。）による断面画像と測線位置情報を、海域地質構造データベース[10)]からエアガンによる断面画像と測線位置情報を収集した。

陸域から海域に連続する地質構造の推定に資するため、AIST が公開している 20 万分の

1 日本シームレス地質図[11)]を参照した。陸域の活断層の分布を把握するため、活断層研究会発行の新編日本の活断層[12)]および AIST が公開している活断層データベース[13)]も参照した。

表 4.4-3　参照した海底地形、海底地質および既存音波探査に係るデーター覧

	呼称	作成／発行機関	内容	形態	備考
海底地形	3D 測深データ[1)、2)、3)]	(独)石油天然ガス・金属鉱物資源機構	航跡座標、水深	Text ファイル	緯度緯度座標を UTM 座標に変換
	海底地形デジタルデータ「M7006 津軽海峡東部」[4)]	(一財)日本水路協会	等深線座標	Text ファイル	経緯度座標を UTM 座標に変換
海底地質	基礎物理探査「日高舟状海盆 3D」調査報告書[7)]	(独)石油天然ガス・金属鉱物資源機構	断層分布、層序、地質構造、断層分布、地史	PDF ファイル	
	基礎物理探査「日高舟状海盆西部 3D」調査報告書[8)]				
	日高舟状海盆海底地質図[5)]	AIST	地質分布、断層、褶曲軸、重力異常	Shape ファイル PDF ファイル	
	襟裳岬沖海底地質図[6)]				
既存音波探査	高分解能音波探査断面データベース[9)]	AIST	航跡位置	Text ファイル	経緯度座標を UTM 座標に変換
			プロファイル図	画像（gif）ファイル	
	海域地質構造データベース[10)]		航跡位置	画像（png）ファイル	画像から航跡位置をデジタイズ
			プロファイル図	画像（png）ファイル	
その他	日本シームレス地質図[11)]	AIST	陸域の地質分布、陸域の断層	Shape ファイル	
	新編日本の活断層[12)]	活断層研究会	活断層分布	冊子	活断層位置をデジタイズ
	活断層データベース[13)]	AIST		オンライン画像	

4.4.3　海底地形モデルの作成

海底地形の特徴を把握し、断層等による変位地形を抽出するために、海底地形モデルを作成した。収集した海底地形データの比較を表 4.4-4 に示す。3D 測深データは、データ点密度が高いものの、本作業の対象範囲の南西部と北東部についてはデータが取得されていない。一方、水路協会データは、本作業の対象範囲の沖合の南西部ではデータ点密度が低くなっているものの全域をカバーしている。3D 測深データが利用可能なエリアでは 3D 測深データを使用し、3D 測深データでカバーできないエリアは水路協会データを使用し、海底地形モデルを作成した。

断層活動や地質構造を反映している可能性のある変動地形あるいは構造地形は、一般的に線状に連なる谷、尾根および崖地形ならびに尾根や谷の屈曲等で認定される。これらの変動地形は、比高や変位量が小さいものが多く、尾根や谷の急な屈曲や傾斜の急変で識別されることが多い。そのため、データの補間や平滑化等の処理を適用した海底地形モデルでは、微小な変動地形が隠されてしまうことが懸念される。そこで、データの補間や平滑化等の処理は適用せず、元データの起伏を尊重することを優先した海底地形モデルを作成した。

表 4.4-4　海底地形データの比較

	3D 測深データ	水路協会データ
データ形式	測線沿いの水深	等深線
データ点密度	25 m	10～500 m
測線／等深線間隔	200～700 m	5 m（沿岸部）～20 m（沖合）
データ範囲	水深およそ 750 m 以深	全域
評価	データ点密度が高い。 全域をカバーしていない。	沖合ではデータ点密度が 3D 促進データより低い。 全域をカバーしている。

4.4.4　海底地形判読

「4.4.3 海底地形モデルの作成」にて作成した海底地形モデルと既存音波探査資料から海底地形の特徴を把握するとともに、浅部地下構造が海底地形に与える影響を確認した。

(1)　海底地形の特徴

本作業の対象範囲は日高舟状海盆が発達しており、大まかに大陸棚、大陸斜面、日高舟状海盆北東斜面、日高舟状海盆南西斜面、襟裳岬沖斜面に区分できる。本作業の対象範囲の北東端部には大陸棚の末端部が位置する。大陸棚から続く、急傾斜した斜面を大陸斜面とする。日高舟状海盆を海盆軸で分け、北海道側を日高舟状海盆北東斜面、下北半島側を日高舟状海

盆南西斜面とする。本作業の対象範囲東部の南東方向に傾斜したやや急な傾斜面を襟裳岬沖斜面とする。

①　傾斜区分

海底地形の傾斜角度から海底地形の特徴を検討するために、傾斜区分図を作成した。海底地形の傾斜角度は、海底地形モデルを 1 辺 25 m の格子に分割して算出した。

本作業の対象範囲は北東部の大陸斜面で 3 度以上の急傾斜となっているほかは、おおむね 2 度未満の緩傾斜となっている。2 度未満の緩傾斜の領域においても、相対的に急傾斜の部分が線状、モザイク状、弧状に分布していることが確認できる。弧状およびモザイク状の急傾斜の部分は、「4.4.4(1)⑤ マスムーブメント地形」で後述するマスムーブメント地形と対応する。

②　傾斜方位区分

海底地形の傾斜方位から海底地形の特徴を検討するために、傾斜方位区分図を作成した。海底地形の傾斜方位は、海底地形モデルを 1 辺 25 m の格子に分割して算出した。

本作業の対象範囲の北西部では南～南東、南西部で東、北東部で南西の傾斜方位を示す。これらは日高舟状海盆を形成する斜面の傾斜方位と対応している。南東部では南南東の傾斜方位を示し、日高舟状海盆の軸の屈曲を反映している。本作業の対象範囲の中央北部では様々な傾斜方位の小規模な斜面がモザイク状に分布し、マスムーブメントに起因する地形と対応する。全体に分布する西北西―東南東方向の平行した筋は、3D 測深データの測線間の差の影響である。

③　リニアメント

リニアメントは、阿部ほか（1985）[14]によると地質構造に起因すると考えられる直線状あるいは多少湾曲して配列する地形であり、谷、鞍部、傾斜変換部、異種地形の境界部等の地形が線状に配列しているのが一般的であるとされている。判読したリニアメントは、急崖、直線状谷および傾斜変換線の 3 種類であり、本作業の対象範囲の南東部に集中して分布する。

④　谷地形

海底地形モデルから海底地形の形状が V 字型および U 字型を示す海底地形の最下点を結び谷地形の判読をした。本作業の対象範囲では、南西部を除いて全体的に谷地形が分布しており、特に南東部に多く分布する。いわゆる海底谷のような蛇行あるいは支流を伴うものは

少ない。南東部に分布する谷地形は、リニアメントと調和的な分布を示し、リニアメントに関連して形成された可能性が高い。

⑤　海底地形モデルから判読したその他の特徴的な海底地形

海底地形モデルからマスムーブメント地形を判読した。マスムーブメント地形の判読に際しては、地滑り学会（2012）[15)]を参考とした。本作業の対象範囲にあるマスムーブメント地形は、すべり面より上位の移動土塊であるマスムーブメント移動体によって形成されており、本作業の対象範囲の北西部から中央部にかけて分布する。東部ではマスムーブメント地形は認められないが、リニアメントおよび海底谷の配列がマスムーブメントにより形成される側方崖と類似した形状をしており、本作業の対象範囲の全域においてマスムーブメント地形が分布する可能性がある。

(2)　海底地形の特徴と浅部地下構造の関係の把握

海底地形の特徴と浅部地下構造の関係を把握するために、AIST が公開しているエアガンによる音波探査断面[10)]と SBP による音波探査断面[9)]を用いて、海底地形と浅部地下構造の関係を検討した。二つの音波探査のうち一部の調査は同一測線上で実施されている。公開されている断面図の解像度や残存する多重反射波を考慮して、SBP による音波探査断面[9)]では逆向き崖、谷地形、非対称谷、凸状地形および海底地形の傾斜変換点等に着目し、変位地形の可能性のある海底地形を抽出した。エアガンによる音波探査断面[10)]では SBP による音波探査断面[9)]から抽出した変位地形の可能性のある海底地形周辺の浅部地下構造を確認し、成因や構造を推定した。抽出した変位地形の可能性のある海底地形は、推定される成因や構造から以下の 6 種類に分類した。

1) 断層の変位地形
2) 褶曲の変位地形
3) マスムーブメントおよび浸食等の変位地形
4) 大陸棚縁辺部の変異地形
5) 成因は不明であるが変異地形である可能性が低いもの
6) エアガンによる音波探査断面の反射波が不鮮明またはエアガンによる音波探査断面が存在しないため、成因や構造を推定することが困難な変位地形

4.4.5　海底地形情報と海底地質情報のコンパイル

「4.4.4 海底地形判読」にて得たリニアメントおよび変位地形の可能性のある海底地形、海底地質に関する既存資料から得た海底地質および断層等の情報を整理した。

「4.4.4 海底地形判読」にて得たリニアメントのほかに、本作業の対象範囲内に AIST の海底地質図[5)、6)]において示された 5 本の構造についても評価を実施した。AIST の海底地質図[5)、6)]から引用した構造は、「4.4.4 海底地形判読」にて得たリニアメントと対応するものはなかった。この内 3 本の構造が伏在逆断層であり 1 本が日高舟状海盆中央背斜（伏在）、1 本が幌満沖 5 号背斜である。

「4.4.4 海底地形判読」にて得たリニアメントと AIST の海底地質図[5)、6)]から引用した構造について確実度を評価するために、「4.4.4 海底地形判読」にて得た変位地形の可能性のある海底地形との対応関係を検討し、対応する異常地形の種類等に応じてリニアメントおよび構造を四つに分類した。本作業の対象範囲で取得された基礎物理探査「日高舟状海盆 3D」および「日高舟状海盆西部 3D」のデータ解釈報告書[7)、8)]では第四紀層を変位させる断層は認定されておらず、リニアメントおよび構造と対応する断層は示されていない。

【参考文献】

1) (独)石油天然ガス・金属鉱物資源機構、“平成 24 年度 国内石油・天然ガス基礎調査 基礎物理探査「日高舟状海盆 3D」データ取得報告書”（2014）
2) (独)石油天然ガス・金属鉱物資源機構、“平成 25 年度 国内石油・天然ガス基礎調査 基礎物理探査「日高舟状海盆 3D」データ取得報告書”（2015）
3) (独)石油天然ガス・金属鉱物資源機構、“平成 26 年度 国内石油・天然ガス基礎調査 基礎物理探査「日高舟状海盆西部 3D」データ取得報告書”（2016）
4) (一財)日本水路協会、“海底地形デジタルデータ M7000 シリーズ「M7006 津軽海峡東部」”
5) (国研)産業技術総合研究所地質調査総合センター、“日高舟状海盆海底地質図”（2012）
6) (国研)産業技術総合研究所地質調査総合センター、“襟裳岬沖海底地質図”（2014）
7) (独)石油天然ガス・金属鉱物資源機構、“平成 25 年度 国内石油・天然ガス基礎調査 基礎物理探査「日高舟状海盆 3D」データ解釈報告書”（2015）
8) (独)石油天然ガス・金属鉱物資源機構、“平成 26 年度 国内石油・天然ガス基礎調査 基礎物理探査「日高舟状海盆西部 3D」データ解釈報告書”（2016）
9) (国研)産業技術総合研究所地質調査総合センター、“高分解能音波探査断面データベース”、https://gbank.gsj.jp/sbp_db/pages/cover.html
10) (国研)産業技術総合研究所地質調査総合センター、“海域地質構造データベース”、https://gbank.gsj.jp/marineseisdb/
11) (国研)産業技術総合研究所地質調査総合センター、“20 万分の 1 日本シームレス地質

図”、https://gbank.gsj.jp/seamless2015/2d/
12) 活断層研究会、“新編日本の活断層”（1991）
13) (国研)産業技術総合研究所地質調査総合センター、“活断層データベース”、https://gbank.gsj.jp/activefault/
14) 阿部勝征、笹原稔、岡田篤正、山崎晴雄、垣見俊弘、“地震と活断層”（1985）
15) 社団法人日本地すべり学会、“地すべり　地形地質的認識と用語”（2004）

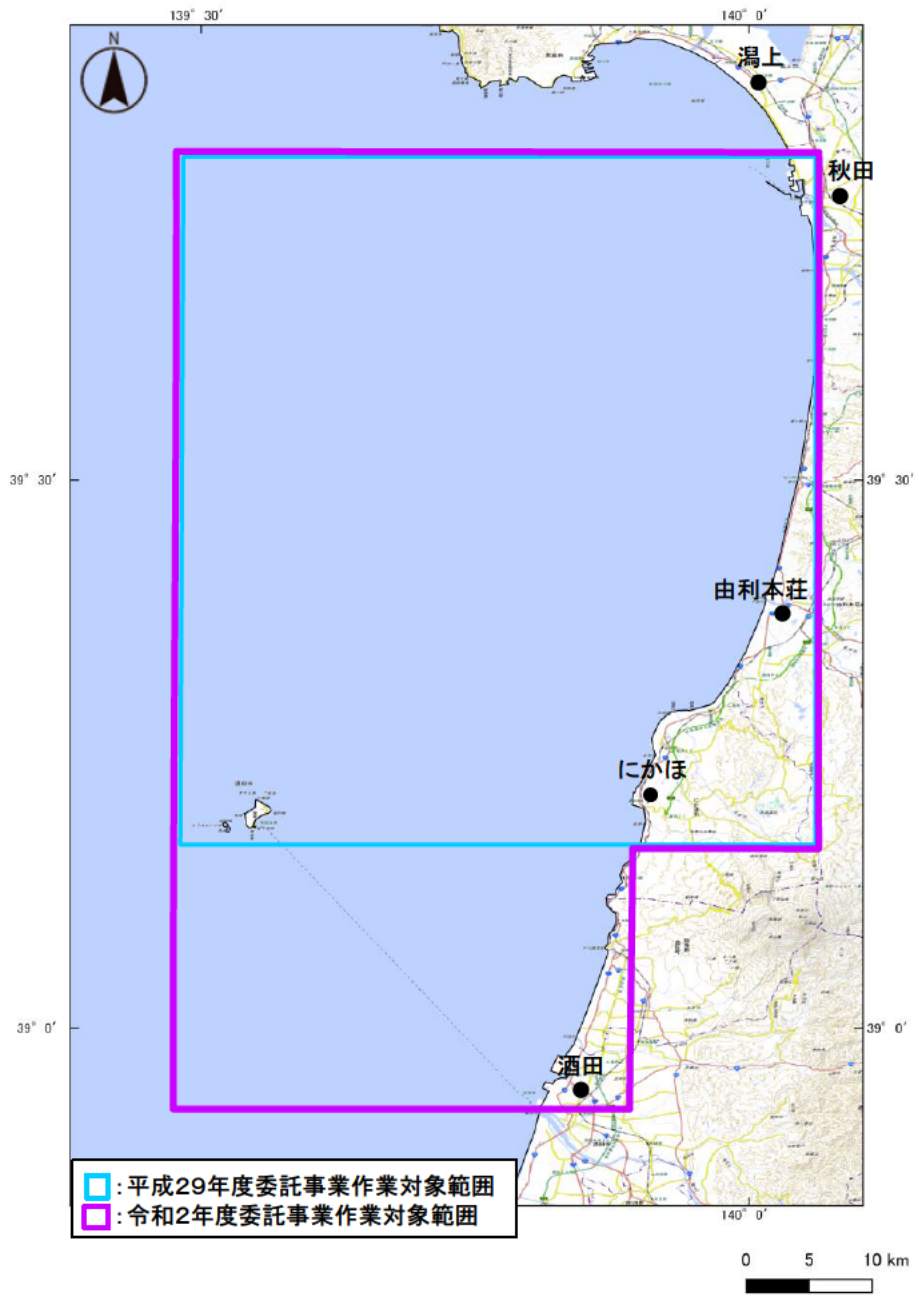
4.5　海底地形判読および海底地質情報コンパイル（本荘沖）

本地点内の基礎物理探査の 3D 探査データのうち本事業で利用可能なデータ、公開されている海底地形および海底地質に関する資料を用いて、海底地形および海底地質に関する情報を整理した。

4.5.1　作業概要

『平成 26 年度 国内石油・天然ガス基礎調査 基礎物理探査「秋田～山形沖 3D」』[1)]の 3D 測深データと公開されている資料を使用し、海底地形および海底地質に関する情報の収集と整理を行った。なお、本作業では平成２９年度委託事業で実施した海底地形判読および海底地質情報のコンパイル作業結果[2)]と統合し、最終的な作業結果とした。

図 4.5-1 に対象範囲を示す。使用した主要ソフトウェアを表 4.5-1 に、測地諸元を表 4.5-2 に示す。



注）国土地理院「電子地形図（タイル）」に追記。

図 4.5-1　対象範囲

表 4.5-1　主要ソフトウェア一覧

処理ソフトウェア	実施した処理
『ArcGIS』ESRI 社	海底地形および海底地質情報コンパイル作業全般
『Petrel』Schlumberger 社	海底地形判読

表 4.5-2　本作業で使用した測地諸元

準拠楕円体	WGS84
長半径	6,378,137.00000000 m
短半径	6,356,752.31424500 m
投影法	Universal Transverse Mercator（UTM 図法）
系番号	54
座標原点 緯度	00° 00′ 00.000" N
座標原点 経度	141° 00′ 00.000" E
縮尺係数	0.999600
北方加数	0.000 m
東方加数	500,000.000 m

4.5.2　海底地形および海底地質情報に係るデータの収集

収集または参照した海底地形、海底地質、既存音波探査に係る資料を表 4.5-3 に示す。

海底地形に係る資料として、基礎物理探査「秋田～山形沖 3D」の 3D 測深データと、3D 測深データがカバーしていない領域を補うために水路協会データ[3)]を収集した。

海底地質に係る資料として、AIST 発行の秋田西方海底地質図[4)]、粟島周辺海底地質図[5)]、秋田西方表層堆積図[6)]、粟島周辺表層堆積図[7)]を収集し、海上保安庁発行の沿岸の海の基本図（5 万分の 1）の秋田図幅[8)]を収集した。

既往音波探査資料として、AIST が公開している海域地質構造データベース[9)]および高分解能音波探査断面データベース[10)]から、エアガンによる音波探査断面図および SBP による音波探査断面図を収集した。

陸域の活断層の分布を把握するために、東京大学出版会が刊行している活断層詳細デジタルマップを収集した。海底地形と浅部地下構造を把握するために、地震調査研究推進本部が公開している北由利断層に関する調査報告書」[11)～13)]、酒田隆起帯における浅層音波探査に関する文献（堀川ほか、2011）[14)]を収集した。陸域から海域に連続する地質構造や断層等の情報として、AIST が公開している 20 万分の 1 日本シームレス地質図[15)]を収集した。

表 4.5-3　収集した海底地形および海底地質情報に係る資料一覧

	呼称	作成／発行機関	内容	形態	備考
海底地形	3D 測深データ	(独)石油天然ガス・金属鉱物資源機構	航跡座標、水深	Text ファイル	
	海底地形デジタルデータ「M70011 佐渡」	(一財)日本水路協会	等深線座標	Text ファイル	緯度経度座標を UTM 座標に変換
海底地質	秋田西方海底地質図	AIST	地質分布、断層、褶曲軸	紙図面	紙図面からデジタイズ
	粟島周辺海底地質図	AIST	地質分布、断層、褶曲軸	紙図面	紙図面からデジタイズ
	秋田西方表層堆積図	AIST		紙図面	
	粟島周辺表層堆積図	AIST		紙図面	
	沿岸の海の基本図（5 万分の 1）秋田	海上保安庁	地質分布、断層、褶曲軸	紙図面	紙図面からデジタイズ
既存音波探査	海域地質構造データベース	AIST	航跡位置	画像（png）ファイル	画像からデジタイズ
			断面図		
	高分解能音波探査断面データベース		航跡位置座標	Text ファイル	緯度経度座標を UTM 座標に変換
			断面図	画像（png）ファイル	
その他	活断層詳細デジタルマップ［新編］	東京大学出版会	断層分布	付属データ閲覧ソフト	印刷した紙図面からデジタイズ
	平成 14～16 年度 北由利断層に関する調査成果報告書[11)～13)]	地震調査研究推進本部	測線位置、断面図、断層	画像（jpg、pdf）ファイル	画像からデジタイズ
	堀川ほか（2011）	AIST	測線位置、断層	画像（pdf）ファイル	画像からデジタイズ
	日本シームレス地質図	AIST	陸域の地質分布、陸域の断層分布	Shape ファイル	

4.5.3　海底地形モデルの作成

海底地形の特徴を把握し、断層等による変位地形を抽出するために、海底地形モデルを作成した。収集した海底地形データの比較を表 4.5-4 に示す。3D 測深データは、データ点密度が高いものの、沿岸域についてはデータが取得されていない。一方、水路協会データは、データ点密度にはばらつきがあるものの全域をカバーしている。3D 測深データが利用可能なエリアでは 3D 測深データを使用し、3D 測深データでカバーできないエリアは水路協会データを使用し、海底地形モデルを作成した。

断層活動や地質構造を反映している可能性のある変動地形あるいは構造地形は、一般的に線状に連なる谷、尾根および崖地形ならびに尾根や谷の屈曲等で認定される。これらの変動地形は、比高や変位量が小さいものが多く、尾根や谷の急な屈曲や傾斜の急変で識別されることが多い。そのため、データの補間や平滑化等の処理を適用した海底地形モデルでは、微小な変動地形が隠されてしまうことが懸念される。そこで、データの補間や平滑化等の処理は適用せず、元データの起伏を尊重することを優先した海底地形モデルを作成した。

表 4.5-4　海底地形データの比較

	3D 測深データ	水路協会データ
データ形式	測線沿いの水深	等深線
データ点密度	18～25 m	20～2,000 m
測線／等深線間隔	200～500 m	1 m（対象範囲の北部） 10～20 m（対象範囲の中央部および南部）
データ範囲	沿岸域を除くほぼ全域	全域
評価	データ点密度が高い。 全域をカバーしていない。	データ点密度にばらつきがある。 全域をカバーしている。

4.5.4　海底地形判読

「4.5.3 海底地形モデルの作成」にて作成した海底地形モデルと既存音波探査資料から海底地形の特徴を把握するとともに、浅部地下構造が海底地形に与える影響を確認した。

(1)　海底地形の特徴

東北日本、日本海東縁にあたる本作業の対象範囲は、後期鮮新世以降の東西圧縮場を反映し、南北もしくは北北東～南南西方向に延びる隆起帯とトラフが発達する。本作業の対象範囲の北部～中央部では、幅約 30 km の陸棚の沖合に男鹿海盆と飛島海盆が存在し、これらの海盆を挟むように飛島堆および新礁等の高まりが存在する。本作業の対象範囲の南部では、幅 30 km を超える陸棚が広がり、本作業の対象範囲よりも西の最上トラフへとつながる。

①　傾斜区分

海底地形の傾斜角度から海底地形の特徴を検討するために、傾斜区分図を作成した。

本作業の対象範囲の北部沿岸域では海岸線から 20～30 km、中央部沿岸域では海岸線から 5～10 km、南部沿岸域では海岸線から 20～30 km の範囲にわたって、おおむね傾斜角度が 1 度未満の平坦な海底地形が広がる。この平坦面の沖合には、傾斜角度が 3～4 度程度の緩やかな斜面が 5 km 程度にわたって広がる。本作業の対象範囲の北部や中央部ではさらに沖合に向かうと再び傾斜角度が 1 度未満の平坦な海底地形が広がるが、この平坦面の西側には南北に筋状に延びる傾斜角度が 5 度以上の急傾斜面帯が数条確認できる。これらの急傾斜面帯は北東～南西方向に延びる急傾斜面帯と、北西～南東もしくは南北方向に延びる急傾斜面帯の組み合わせからなり、ジグザグ状につながってほぼ南北方向に延びる特徴を有する。本作業の対象範囲の南部および中央部の沿岸域では、平坦面の中に一部緩傾斜面を示す地形を認めることができる。

②　傾斜方位区分

海底地形の傾斜方位から海底地形の特徴を検討するために、傾斜方位区分図を作成した。

本作業の対象範囲の海底地形は、大局的には北西もしくは西方向の傾斜方位を示す。一方、傾斜区分図で確認した急傾斜面帯周辺では、北東もしくは東方向または南東もしくは南方向の傾斜方位を示し、大局的な傾斜方位の傾向とは逆の傾向を示す。

③　リニアメント

リニアメントは、阿部ほか（1985）[16)] によると地質構造に起因すると考えられる直線状あるいは多少湾曲して配列する地形であり、谷、鞍部、傾斜変換部、異種地形の境界部等の

地形が線状に配列しているのが一般的であるとされている。本作業の対象範囲の北部沿岸域ではリニアメントは確認できない。一方、南部沿岸域では酒田隆起帯を中心に北東～南西方向のリニアメントが分布する。沖合では多数のリニアメントが分布する。

(2)　海底地形の特徴と浅部地下構造の関係の把握

海底地形の特徴と浅部地下構造の関係を把握するために、AIST が公開しているエアガンによる音波探査断面[9)]と SBP による音波探査断面[10)]を用いて、海底地形と浅部地下構造の関係を検討した。初めにエアガンによる音波探査断面[9)]を用いて浅部の構造解釈を実施した。次に解釈した地下構造について、SBP による音波探査断面[10)]を用いて海底地形への影響を確認した。エアガンによる音波探査断面を用いて解釈した断層のうち、飛島堆および新礁周辺の急傾斜面帯で確認できる断層の多くは、海底地形に何らかの影響を与えていた。これらの断層の一部は、沿岸域にも伸びており（飛島－船川隆起帯）褶曲等の構造を形成するが、褶曲構造の頂部は削剥され平坦面となっているため、現在の海底地形面から断層の影響を認めることはできない。エアガンによる音波探査断面の測線間隔が粗いため、解釈した断層の連続性については精度よく把握することが難しい。

4.5.5　海底地形情報と海底地質情報のコンパイル

「4.5.4　海底地形判読」にて得たリニアメントおよび既存音波探査断面から解釈した断層、海底地質に関する既存資料から得た海底地質および断層等の情報を整理した。

【参考文献】

1) (独)石油天然ガス・金属鉱物資源機構、“平成 26 年度 国内石油・天然ガス基礎調査 基礎物理探査「秋田～山形沖 3D」データ取得報告書”（2016）
2) 日本 CCS 調査(株)、“「平成２９年度二酸化炭素貯留適地調査事業委託業務」成果報告書”（2017）
3) (一財)日本水路協会、“海底地形デジタルデータ M7000 シリーズ「M7011 佐渡”
4) (国研)産業技術総合研究所地質調査総合センター、“秋田西方海底地質図”（1996）
5) (国研)産業技術総合研究所地質調査総合センター、“粟島周辺海底地質図”（1996）
6) (国研)産業技術総合研究所地質調査総合センター、“秋田西方表層堆積図”（1994）
7) (国研)産業技術総合研究所地質調査総合センター、“粟島周辺表層堆積図”（1994）
8) 海上保安庁、“5 万分の１海の基本図 海底地形地質調査報告書「秋田」”（1983）
9) (国研)産業技術総合研究所地質調査総合センター、“海域地質構造データベース”、https://gbank.gsj.jp/marineseisdb/

10) (国研)産業技術総合研究所地質調査総合センター、“高分解能音波探査断面データベース”、https://gbank.gsj.jp/sbp_db/pages/cover.html
11) 地震調査研究推進本部、“平成 14 年度 北由利断層に関する調査成果報告書”（2003）
12) 地震調査研究推進本部、“平成 15 年度 北由利断層に関する調査成果報告書”（2004）
13) 地震調査研究推進本部、“平成 16 年度 北由利断層に関する調査成果報告書”（2005）
14) 堀川晴央、岡村行信、村上文敏、“酒田沖陸域帯における浅層音波探査”、活断層・古地震研究報告、11、p.83-96(2011)
15) (国研)産業技術総合研究所地質調査総合センター、“20 万分の 1 日本シームレス地質図”、https://gbank.gsj.jp/seamless2015/2d/
16) 阿部勝征、笹原稔、岡田篤正、山崎晴雄、垣見俊弘、“地震と活断層”（1985）

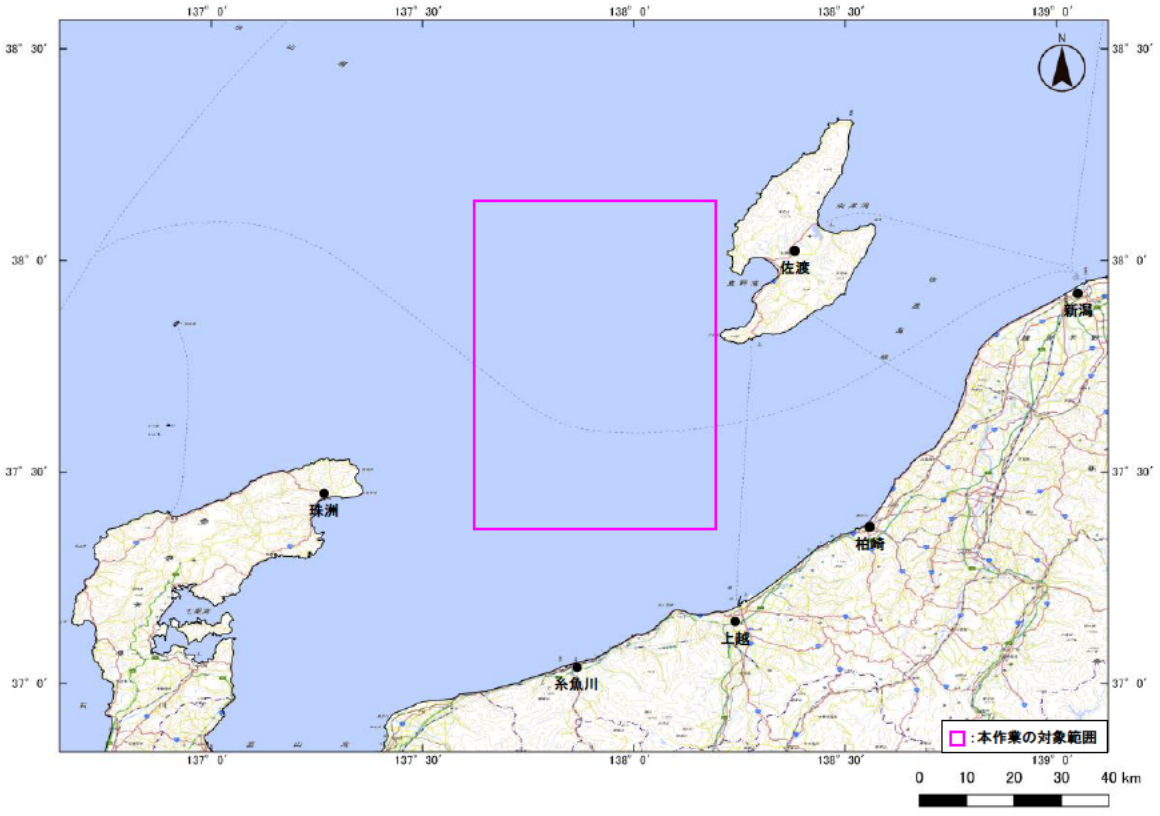
4.6　海底地形判読および海底地質情報コンパイル（佐渡西方沖）

本地点内の基礎物理探査の 3D 探査データのうち本事業で利用可能なデータ、公開されている海底地形および海底地質に関する資料を用いて、海底地形および海底地質に関する情報を整理した。

4.6.1　作業概要

『平成 13 年度 国内石油・天然ガス基礎調査 基礎物理探査「佐渡沖南西」』[1)]、『平成 20 年度 国内石油・天然ガス基礎調査 基礎物理探査「佐渡西方 3D」』[2)]、『平成 22 年度 国内石油・天然ガス基礎調査 基礎物理探査「能登東方 3D」』[3)] の 3D 測深データと公開されている資料を使用し、海底地形および海底地質に関する情報の収集と整理を行った。

図 4.6-1 に対象範囲を示す。使用した主要ソフトウェアを表 4.6-1 に、測地諸元を表 4.6-2 に示す。



注）国土地理院「電子地形図（タイル）」に追記。

図 4.6-1　対象範囲

表 4.6-1　主要ソフトウェア一覧

処理ソフトウェア	実施した処理
『QGIS』オープンソース	海底地形および海底地質情報コンパイル作業全般
『VULCAN』Maptek 社	海底地形モデル作成
『Simple DEM Viewer』フリーソフトウェア	海底地形モデル作成

表 4.6-2　本作業で使用した測地諸元

準拠楕円体	WGS84
長半径	6,378,137.00000000 m
短半径	6,356,752.31424500 m
投影法	Universal Transverse Mercator（UTM 図法）
系番号	54
座標原点 緯度	00° 00′ 00.000" N
座標原点 経度	141° 00′ 00.000" E
縮尺係数	0.999600
北方加数	0.000 m
東方加数	500,000.000 m

4.6.2　海底地形および海底地質情報に係るデータの収集

収集または参照した海底地形、海底地質、既存音波探査に係る資料を表 4.6-3 に示す。

海底地形に係る資料として、基礎物理探査「佐渡沖南西」、基礎物理探査「佐渡西方 3D」、基礎物理探査「能登東方 3D」の 3D 測深データと、3D 測深データがカバーしていない領域を補うために水路協会データ[4)]を収集した。

海底地質に係る資料として、AIST 発行の能登半島東方海底地質図[5)]、佐渡島北方海底地質図[6)]、佐渡島南方海底地質図[7)]、日本海中部海域広域海底地質図[8)]を収集した。第四紀層の基底面を変形させる断層の分布を把握するために、基礎物理探査「能登東方 3D」の調査報告書[9)]を収集した。

既往音波探査資料として、AIST が公開している海域地質構造データベース[10)]および高分解能音波探査断面データベース[11)]から、エアガンによる音波探査断面図および SBP による音波探査断面図を収集した。

陸域の活断層の分布を把握するために、AIST が発行している活断層データベース[12)]および活断層研究会発行の新編日本の活断層[13)]を収集した。海域の活断層の分布を把握するために、徳山ほか（2001）[14)]、岡村（2013）[15)]、泉ほか（2014）[16)]、海底断層ワーキ

ングループ報告書[17]、森本ほか（2017）[18]、平成 25～30 年度 海域における断層情報総合評価プロジェクト成果報告書[19]を収集した。陸域から海域に連続する地質構造や断層等の情報として、AIST が公開している 20 万分の 1 日本シームレス地質図[20]を収集した。

表 4.6-3　収集した海底地形および海底地質情報に係る資料一覧

	呼称	作成／発行機関	内容	形態	備考
海底地形	3D 測深データ	(独)石油天然ガス・金属鉱物資源機構	航跡座標、水深	Text ファイル	
	海底地形デジタルデータ「M70011 佐渡」	(一財)日本水路協会	等深線座標	Text ファイル	緯度経度座標を UTM 座標に変換
海底地質	基礎物理探査「能登東方 3D」調査報告書	(独)石油天然ガス・金属鉱物資源機構	断層分布	PDF ファイル	断層位置をデジタイズ
	能登半島東方海底地質図	AIST	地質分布、断層、褶曲軸	紙図面	紙図面からデジタイズ
	佐渡島北方海底地質図	AIST	地質分布、断層、褶曲軸	紙図面	紙図面からデジタイズ
	佐渡島南方海底地質図	AIST	地質分布、断層、褶曲軸	紙図面	紙図面からデジタイズ
	日本海中部海域広域海底地質図	AIST	地質分布、断層、褶曲軸	紙図面	紙図面からデジタイズ
既存音波探査	海域地質構造データベース	AIST	航跡位置	画像 (png) ファイル	画像からデジタイズ
			断面図		
	高分解能音波探査断面データベース		航跡位置座標	Text ファイル	緯度経度座標を UTM 座標に変換
			断面図	画像 (png) ファイル	
その他	活断層データベース	AIST	活断層分布	オンライン画像	
	新編日本の活断層	活断層研究会	活断層分布	紙図面	紙図面からデジタイズ
	日本シームレス地質図	AIST	陸域の地質分布、陸域の断層分布	Shape ファイル	

	徳山ほか（2001）	海洋調査技術学会	活断層分布等	画像（pdf）ファイル	画像からデジタイズ
	岡村（2013）	国土地理院	活断層分布等	画像（pdf）ファイル	画像からデジタイズ
	泉ほか（2014）	海上保安庁	活断層分布等	画像（pdf）ファイル	画像からデジタイズ
	海底断層ワーキンググループ報告書	国土交通省	活断層分布等	画像（pdf）ファイル	画像からデジタイズ
	森本ほか（2017）	海上保安庁	活断層分布等	画像（pdf）ファイル	画像からデジタイズ
	平成25～平成30年度 海域における断層情報総合評価プロジェクト成果報告書	地震調査研究推進本部	活断層分布等	画像（pdf）ファイル	画像からデジタイズ

4.6.3 海底地形モデルの作成

海底地形の特徴を把握し、断層等による変位地形を抽出するために、海底地形モデルを作成した。収集した海底地形データの比較を表 4.6-4 に示す。3D 測深データは、データ点密度が高いものの、対象範囲の東部および南東部についてはデータが取得されていない。一方、水路協会データは、データ点密度にばらつきがあるものの全域をカバーしている。3D 測深データが利用可能なエリアでは 3D 測深データを使用し、3D 測深データでカバーできないエリアは水路協会データを使用し、海底地形モデルを作成した。

断層活動や地質構造を反映している可能性のある変動地形あるいは構造地形は、一般的に線状に連なる谷、尾根および崖地形ならびに尾根や谷の屈曲等で認定される。これらの変動地形は、比高や変位量が小さいものが多く、尾根や谷の急な屈曲や傾斜の急変で識別されることが多い。そのため、データの補間や平滑化等の処理を適用した海底地形モデルでは、微小な変動地形が隠されてしまうことが懸念される。そこで、データの補間や平滑化等の処理は適用せず、元データの起伏を尊重することを優先した海底地形モデルを作成した。

表 4.6-4　海底地形データの比較

	3D 測深データ	水路協会データ
データ形式	測線沿いの水深	等深線
データ点密度	25 m	1.5～2,450 m
測線／等深線間隔	200～500 m	10 m（対象範囲の北西部） 20 m（対象範囲の北東部） 100 m（対象範囲の南部）
データ範囲	対象範囲の東部および南東部を除くほぼ全域	全域
評価	データ点密度が高い。 全域をカバーしていない。	対象範囲の南部ではデータ点密度が 3D 測深データよりも劣る。 全域をカバーしている。

4.6.4　海底地形判読

「4.6.3 海底地形モデルの作成」にて作成した海底地形モデルと既存音波探査資料から海底地形の特徴を把握するとともに、浅部地下構造が海底地形に与える影響を確認した。

(1)　海底地形の特徴

本作業の対象範囲の海底地形は非常に起伏に富んでおり、大まかに海底谷、海盆、海丘、海脚、大陸棚、縁辺台地に区分できる。緩傾斜面（おおむね傾斜角度 5～10 度未満）は、海盆、大陸棚、縁辺台地、海盆谷、海丘および海脚の頂部に確認できる。急傾斜面（おおむね傾斜角度 5～10 度以上）は、海丘および海脚の縁辺部、大陸斜面、海底谷の側壁に確認できる。

①　傾斜区分

海底地形の傾斜角度から海底地形の特徴を検討するために、傾斜区分図を作成した。海底地形の傾斜角度は、海底地形モデルを 1 辺 25 m の格子に分割して算出した。

本作業の対象範囲の中央部はおおむね傾斜角度が 2 度未満の緩傾斜面となっている。佐渡西方大陸斜面は傾斜角度が 10～20 度の急傾斜面となっている。本作業の対象範囲の西部はおおむね急傾斜面となっており、局所的に傾斜角度が 30 度を超える領域が確認できる。この局所的な急傾斜面は斜面崩壊地形に対応する。

②　傾斜方位区分

海底地形の傾斜方位から海底地形の特徴を検討するために、傾斜方位区分図を作成した。海底地形の傾斜方位は、海底地形モデルを 1 辺 25 m の格子に分割して算出した。

傾斜区分図において確認した本作業の対象範囲中央部の緩傾斜面は全体として北北西～

北北東方向の傾斜方位を示し、緩い傾斜角度で北北西～北北東方向に傾斜していることがわかる。佐渡西方大陸斜面は全体として南西方向の傾斜方位を示すが、北～西北西方向の傾斜方位の斜面が筋状に分布しており、傾斜区分図では判別できなかった谷地形の存在が確認できる。

③ リニアメント

リニアメントは、阿部ほか（1985）[27]によると地質構造に起因すると考えられる直線状あるいは多少湾曲して配列する地形であり、谷、鞍部、傾斜変換部、異種地形の境界部等の地形が線状に配列しているのが一般的であるとされている。判読したリニアメントは、主に海丘、海脚および大陸斜面と海盆との境界部に分布する。抽出したリニアメントには1～19までの番号を振り、リニアメントであることを識別できるように番号の頭に「L-」をつけた。

④ 海底谷

海底地形モデルから海底地形の形状がV字型およびU字型を示す海底地形の最下点を結び海底谷を判読した。本作業の対象範囲では、富山深海長谷と上越海谷の二つの主要な海底谷を判読した。

⑤ 海底地形モデルから判読したその他の特徴的な海底地形

海底地形モデルから谷系屈曲、小谷および鞍部、微細なしわ状地形群、微細な凹凸地形群、平坦面、滑落崖～崩落崖および地すべり堆～崩落堆を判読した。谷系屈曲は 5 地点で認めることができる。谷系屈曲はリニアメントに沿って系統的に発達するものではなく、谷系の下流部が隆起し、隆起部を避けて谷系が屈曲したと解釈した。小谷は斜面部にガリー状に多く発達するが、平坦面には少ない。微細なしわ状地形群は上越海丘およびL-15リニアメントの北側の斜面に斜面の傾斜方向に直交する方向に分布する。微細な凹凸地形群は海鷹海脚の頂部および上越海丘の頂部に認めることができる。平坦面（傾斜角度が約 1 度で広がりを持つ部分）は、海底谷の底、海盆の底、海丘・海脚の頂部、大陸棚、縁辺台地、富山深海長谷に関連して形成された自然堤防地形等に認めることができる。滑落崖～崩落崖は弧状を呈する急崖で特徴づけられ、禄剛海脚北東部の斜面および飯田海脚の斜面等の急斜面部に多く認めることができる。これらの急崖の下方には比較的緩い傾斜角度の凹凸地形が認められ、地すべり堆～崩落堆と推定することができる。滑落崖～崩落崖は富山深海長谷の側壁にも確認することができ、地すべり堆～崩落堆は佐渡西方大陸斜面に近接した海盆内にも確認することができる。

(2)　海底地形の特徴と浅部地下構造の関係の把握

海底地形の特徴と浅部地下構造の関係を把握するために、AIST が公開しているエアガンによる音波探査断面[10)]と SBP による音波探査断面[11)]を用いて、海底地形と浅部地下構造の関係を検討した。二つの音波探査のうち一部の調査は同一測線上で実施されている。公開されている断面図の解像度や残存する多重反射波を考慮して、SBP による音波探査断面[11)]では逆向き崖、非対称谷、凸状地形および海底地形の傾斜変換点に着目し、変位地形の可能性のある海底地形を抽出した。エアガンによる音波探査断面[10)]では SBP による音波探査断面[11)]から抽出した変位地形の可能性のある海底地形周辺の浅部地下構造を確認し、成因や構造を推定した。抽出した変位地形の可能性のある海底地形は、推定される成因や構造から以下の 6 種類に分類した。

1) 逆断層系の変位地形
2) 正断層系の変位地形
3) 褶曲の変位地形
4) 侵食谷の変位地形
5) その他（地すべり、地すべり土塊等）の変位地形
6) エアガンによる音波探査断面の解像度が不鮮明またはエアガンによる音波探査断面が存在しないため成因や構造を推定することが困難な変位地形

4.6.5　海底地形情報と海底地質情報のコンパイル

「4.6.4　海底地形判読」にて得たリニアメントおよび変位地形の可能性のある海底地形、海底地質に関する既存資料から得た海底地質および断層等の情報を整理した。

「4.6.4　海底地形判読」にて得たリニアメントは、その確実度を評価するために AIST の海底地質図[5)~8)]、基礎物理探査「能登東方 3D」の調査報告書[9)]に示されている第四紀層の基底面を変形させる断層、既往文献に示されている海域の活断層の分布[14)~19)]の 3 種類の既往資料と「4.6.4　海底地形判読」にて得た変位地形の可能性のある海底地形の合計 4 種類の情報との対応関係を検討し、対応する情報の数等に応じてリニアメントを五つに分類した。

【参考文献】

1) (独)石油天然ガス・金属鉱物資源機構、“平成 13 年度 国内石油・天然ガス基礎調査 基礎物理探査「佐渡沖南西」調査報告書”（2003）
2) (独)石油天然ガス・金属鉱物資源機構、“平成 20 年度 国内石油・天然ガス基礎調査 基

礎物理探査「佐渡西方 3D」データ取得報告書”（2010）
3) (独)石油天然ガス・金属鉱物資源機構、“平成 22 年度 国内石油・天然ガス基礎調査 基礎物理探査「能登東方 3D」データ取得報告書”（2012）
4) (一財)日本水路協会、“海底地形デジタルデータ M7000 シリーズ「M7011 佐渡」”
5) (国研)産業技術総合研究所地質調査総合センター、“能登半島東方海底地質図”（2002）
6) (国研)産業技術総合研究所地質調査総合センター、“佐渡島北方海底地質図”（1995）
7) (国研)産業技術総合研究所地質調査総合センター、“佐渡島南方海底地質図”（1994）
8) (国研)産業技術総合研究所地質調査総合センター、“日本海中部海域広域海底地質図”（1981）
9) (独)石油天然ガス・金属鉱物資源機構、“平成 23 年度 国内石油・天然ガス基礎調査 基礎物理探査「能登東方 3D」データ解釈報告書”（2013）
10) (国研)産業技術総合研究所地質調査総合センター、“海域地質構造データベース”、https://gbank.gsj.jp/marineseisdb/
11) (国研)産業技術総合研究所地質調査総合センター、“高分解能音波探査断面データベース”、https://gbank.gsj.jp/sbp_db/pages/cover.html
12) (国研)産業技術総合研究所地質調査総合センター、“活断層データベース”、https://gbank.gsj.jp/activefault/
13) 活断層研究会、“新編日本の活断層”（1991）
14) 徳山英一、本座栄一、木村政昭、倉本真一、芦寿一郎、岡村行信、荒戸裕之、伊藤康人、徐垣、日野亮太、野原壮、阿部寛信、坂井眞一、向山健二郎、“日本海周辺海域中新世最末期以降の構造発達史”、海洋調査技術、13、1、p.27-53(2001)
15) 岡村行信、“日本海の地形・地質調査から分かる活断層”、地震予知連絡会会報、90、p.530-536(2013)
16) 泉紀明、西澤あずさ、堀内大嗣、木戸ゆかり、中田高、後藤秀昭、渡辺満久、鈴木康弘、“3 秒グリッド DEM から作成した日本海東縁民間部の 3D 海底地形”、海洋情報部研究報告、51、p.127-143(2014)
17) 日本海における大規模地震に関する調査検討会、“海底断層ワーキンググループ報告書”、平成 26 年 8 月（2013）
18) 森本ひかる、隈本崇、中田高、後藤秀昭、泉紀明、西澤あずさ、“アナグリフ画像による日本周辺の海底地すべりの判読と分布特性の検討”、海洋情報部研究報告、54、P.1-16(2017)
19) 地震調査研究推進本部、“平成 25～平成 30 年度 海域における断層情報総合評価プロ

ジェクト成果報告書、https://www.jishin.go.jp/database/project_report/kaiiki/

20) (国研)産業技術総合研究所地質調査総合センター、“20 万分の 1 日本シームレス地質図”、https://gbank.gsj.jp/seamless2015/2d/

21) 海上保安庁、“海底地形の名称に関する検討会（JCUFN）”、https://www1.kaiho.mlit.go.jp/KOKAI/ZUSHI3/topographic/JCUFN/jcufn.html

22) 岩淵義郎、“日本海南東部の海底地質”、東北大学理学部地質学古生物学研究邦文報告、66、p.1-75(1968)

23) 中川洋、鈴木麻希、竹内瑛一、松本良、“上越沖海鷹海脚メタン湧出域の過去 32,000 年の岩相変化と有孔虫層序”、地学雑誌、118、5、p.969-985(2009)

24) 松本良、奥田義久、蛭田明宏、戸丸仁、竹内瑛一、山王梨沙、鈴木麻希、土永和博、石田泰士、石崎理、武内里香、小松原純子、FREIRE Antonio Fernando、町山栄章、青山千春、上嶋正人、弘松峰男、SNYDER Glen、沼波秀樹、佐藤幹夫、的場保望、中川洋、角和善隆、萩原成騎、柳川勝則、砂村倫成、後藤忠則、盧海龍、小林武志、“日本海東縁、上越海盆の高メタンフラックス域におけるメタンハイドレートの成長と崩壊”、地学雑誌、118、1、p.43-71(2009)

25) 角和善隆、中嶋健、公文富士夫、松本良、仲村祐哉、大井剛志、富山隆將、町山栄章、“日本海MD179航海において採取されたコアの層相と対比--上越沖海鷹海脚周辺--”、石油技術協会誌、78、1、p.97-103(2013)

26) 天野和孝、長谷川四郎、石浜左栄子、“MD179 航海上越沖コア試料から産出した貝類化石”、石油技術協会誌、78、1、p.92-96(2013)

27) 阿部勝征、笹原稔、岡田篤正、山崎晴雄、垣見俊弘、“地震と活断層”（1985）

4.7　地質解析と貯留適地評価（日高沖）

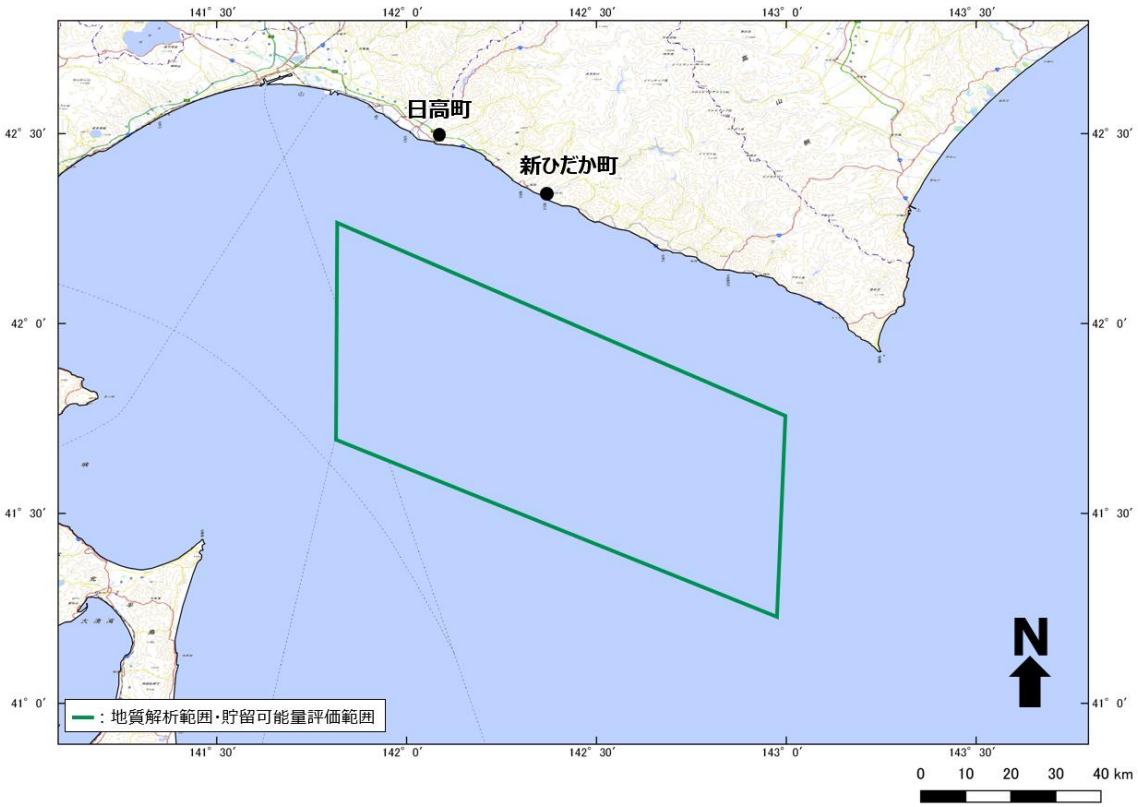
北海道日高地方の沖合海域を調査対象範囲として、基礎物理探査 3D 探査データ、基礎試錐データを用いて、地質解析と貯留適地評価を実施した。

4.7.1　概要

(1)　調査範囲

本作業の対象範囲を図 4.7-1 に示す。本調査範囲は北海道日高郡新ひだか町沖合の約 50 km に位置し、南北方向が約 60 km、東西方向が約 100 km の範囲で、面積は約 6,000 km² である。水深は 700～1,900 m であり、南東部がもっとも深くなる。

本作業に使用した測地諸元を表 4.7-1 に示す。



注）国土地理院ホームページ、地理院地図[1)]を用いて作成した。

図 4.7-1　本作業の対象範囲

表 4.7-1　本作業で使用した測地諸元

準拠楕円体	WGS84
長半径	6,378,137.00000000 m
短半径	6,356,752.31424500 m
投影法	Universal Transverse Mercator（UTM 図法）
系番号	54
座標原点 緯度	00° 00′ 00.000" N
座標原点 経度	141° 00′ 00.000" E
縮尺係数	0.999600
北方加数	0.000 m
東方加数	500,000.000 m

(2)　使用データ

本作業で使用した弾性波探査データおよび坑井データを表 4.7-2 に示す。調査範囲では、基礎物理探査による 3D 弾性波探査が実施されおり、基礎試錐による試掘井が掘削されている。本作業では、『平成 24～25 年度 国内石油・天然ガス基礎調査 基礎物理探査「日高舟状海盆 3D」』[2)]、『平成 26 年度 国内石油・天然ガス基礎調査 基礎物理探査「日高舟状海盆西部 3D」』[3)] の弾性波探査データ、『平成 29 年度～令和元年度 国内石油・天然ガス基礎調査 基礎試錐「日高トラフ」』[4)] の坑井データを使用した。

弾性波探査データおよび坑井データのほかに、本業務にて実施した海底地形判読および海底地質情報のコンパイル（4.4 節）にて得た資料も使用して作業を実施した。

使用した主要ソフトウェアを表 4.7-3 に示す。

表 4.7-2　本作業で使用した弾性波探査探査データおよび坑井データ

弾性波探査データ
基礎物理探査「日高舟状海盆 3D」
基礎物理探査「日高舟状海盆西部 3D」
坑井データ
基礎試錐「日高トラフ」

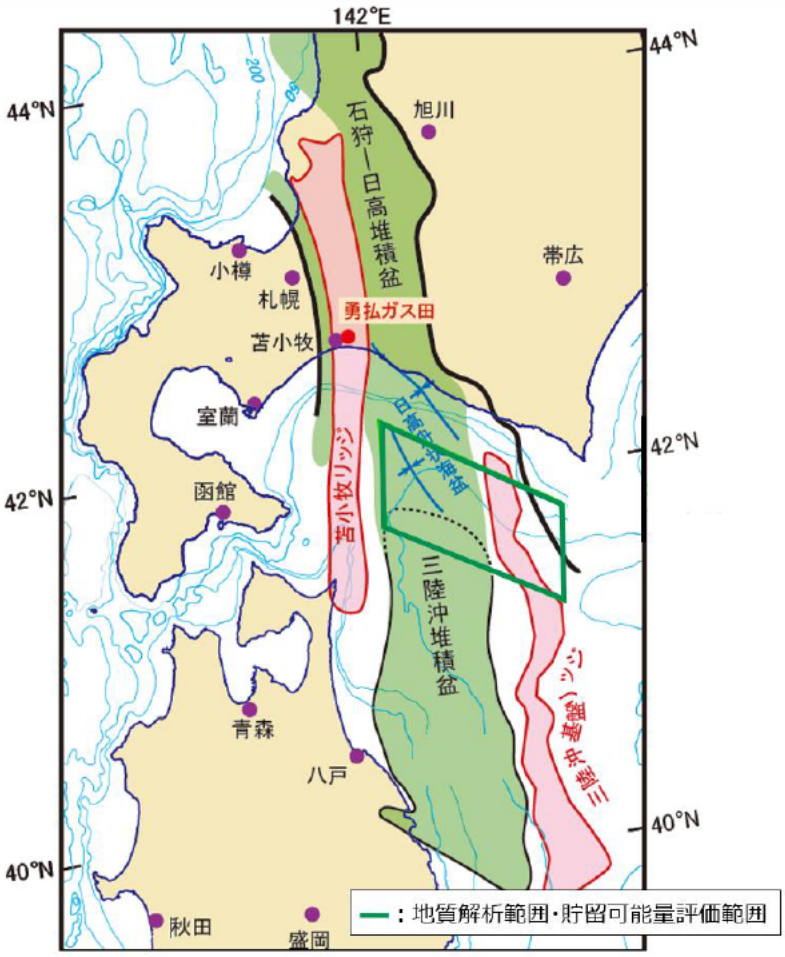
表 4.7-3　主要ソフト一覧

ソフトウェア	実施した作業
『Petrel』 Schlumberger 社	地質構造解析、深度変換速度モデル作成、堆積相解析、貯留可能量評価
『Interactive Petrophysics』 Lloyd's Register 社	検層解析

4.7.2　一般地質

(1)　地質概要

本作業の対象範囲は、石狩－日高堆積盆に位置する。日高沖における地質構造を図 4.7-2 に示す。本作業の対象範囲内にある苫小牧リッジの東方の沈降域は日高舟状海盆と呼称される[6]。石狩－日高堆積盆はジュラ紀付加体を基盤とする白亜紀に形成された堆積盆地であり、白亜紀から第四紀の堆積岩類が厚く堆積する[4]。



注）石田（2005）[5] に加筆した。

図 4.7-2　日高沖における堆積盆位置

(2) 地質層序

本作業の対象範囲を含む日高沖地域は地表地質層序と対比が試みられており、白亜紀の堆積物は三陸沿岸地域と対比され、古第三紀から第四紀の堆積物は勇払から日高沿岸地域に対比される[7)、8)]。

本作業の対象範囲の層序は、ジュラ紀付加体を基盤とし、下位より宮古層群、久慈層群、函淵層群、石狩層群、幌内層、紅葉山層、南長沼層、幌向層、滝ノ上層、振老層、平取層－軽舞層、荷菜層、萌別層に対比される。以下に各層序の概要を記載する。

1) ジュラ紀付加体（ジュラ紀）

チャートや硬質泥岩、緑色岩、石灰岩等からなる付加体である。地表地質の堆積環境は、大洋底である[9)]。本作業の対象範囲は付加体起源の石灰岩やチャートからなると示唆される[8)]。基礎試錐「日高トラフ」では未到達である[4)]。

2) 宮古層群（前期白亜紀）

基盤岩を不整合で覆う。地表地質は浅海成の礫岩、砂岩、シルト岩からなる[9)]。本作業の対象範囲では浅海から河川成の堆積物からなると示唆される[8)]。基礎試錐「日高トラフ」では未到達である[4)]。

3) 久慈層群（後期白亜紀）

下位層を不整合に覆う。地表地質は内湾から河川環境で堆積した礫岩、砂岩、泥岩、石炭からなる[9)]。本作業の対象範囲では浅海から河川成が主で、一部内湾成の堆積物からなると示唆される[8)]。基礎試錐「日高トラフ」では未到達である[4)]。

4) 函淵層群（暁新世）

下位層を不整合に覆う。地表地質は浅海から河川環境で堆積した礫岩、砂岩、泥岩、石炭からなる[9)]。本作業の対象範囲では浅海から河川成の堆積物からなると示唆される[7)]。基礎試錐「日高トラフ」では未到達である[4)]。

5) 石狩層群（始新世）

下位層を不整合に覆う。地表地質は浅海から河川環境で堆積した礫岩、砂岩、泥岩、石炭からなる[9)]。本作業の対象範囲では浅海から河川成堆積物からなると示唆される[8)]。基礎試錐「日高トラフ」では未到達である[4)]。

6) 幌内層（後期始新世）

下位層を不整合に覆う。地表地質は半深海成の暗オリーブ灰色泥岩から成り、海緑石を含む[9)]。本作業の対象範囲では深海成となり薄化することが示唆される[7)]。基礎試錐「日高トラフ」では未到達である[4)]。

7) 紅葉山層（前期漸新世）

地表地質は浅海から半深海成の砂岩、砂質シルト岩からなる[10)]。本作業の対象範囲では深海成となり薄化することが示唆される[7)]。基礎試錐「日高トラフ」では未到達である[4)]。

8) 南長沼層（後期漸新世）

下位層を不整合に覆う。地表地質は浅海成泥岩から成り火山岩類を挟む[10)]。本作業の対象範囲では斜面から深海成の堆積物からなると示唆される[8)]。基礎試錐「日高トラフ」では未到達である[4)]。

9) 幌向層（前期中新世）

下位層を不整合に覆う。地表地質は硬質泥岩からなる[10)]。本作業の対象範囲では斜面から深海成の堆積物からなると示唆される[8)]。基礎試錐「日高トラフ」では未到達である[4)]。

10) 滝ノ上層（前期中新世）

下位層を不整合に覆う。地表地質は泥岩から成り火山岩類を挟む[10)]。日本海側で卓越するグリーンタフに対比される。本作業の対象範囲では斜面から深海成の堆積物からなると示唆される[8)]。基礎試錐「日高トラフ」では未到達である[4)]。

11) 振老層（中期中新世）

地表地質は浅海から半深海成の砂岩、砂質シルト岩からなる[10)]。本作業の対象範囲では斜面から深海成の堆積物からなると示唆される[8)]。基礎試錐「日高トラフ」では未到達である[4)]。

12) 平取層－軽舞層（後期中新世）

地表地質は半深海成の泥岩を主体として、砂岩を挟む[10)]。基礎試錐「日高トラフ」の坑井層序 A 層に対比され、カッティングスの有孔虫化石群集により斜面から深海成の堆積物からなると推定される[4)]。

13) 荷菜層（後期中新世～鮮新世）

地表地質は浅海成からデルタ成の礫岩や砂岩からなるが、一部で泥質相も認められる[10)]。基礎試錐「日高トラフ」の坑井層序 B 層に対比され、カッティングスの有孔虫化石群集により斜面から深海成の堆積物からなると推定される[4)]。

14) 萌別層（第四紀）

地表地質は浅海成からデルタ成の礫岩や砂岩からなるが、一部で泥質相も認められる[10)]。基礎試錐「日高トラフ」の坑井層序 C 層に対比され、カッティングスの有孔虫化石群集により斜面から深海成の堆積物からなると推定される[4)]。

(3)　地質構造および構造発達史

本作業の対象範囲の地質構造は後期漸新世不整合（以下、「OUNC 不整合」と称する。）を境にその上下で形態が異なっている[8)]。OUNC 不整合より下位層は前弧堆積盆地で形成したのに対して、OUNC 不整合より上位層は前弧堆積盆地かつ日高褶曲帯の前縁堆積盆地に形成したものである。

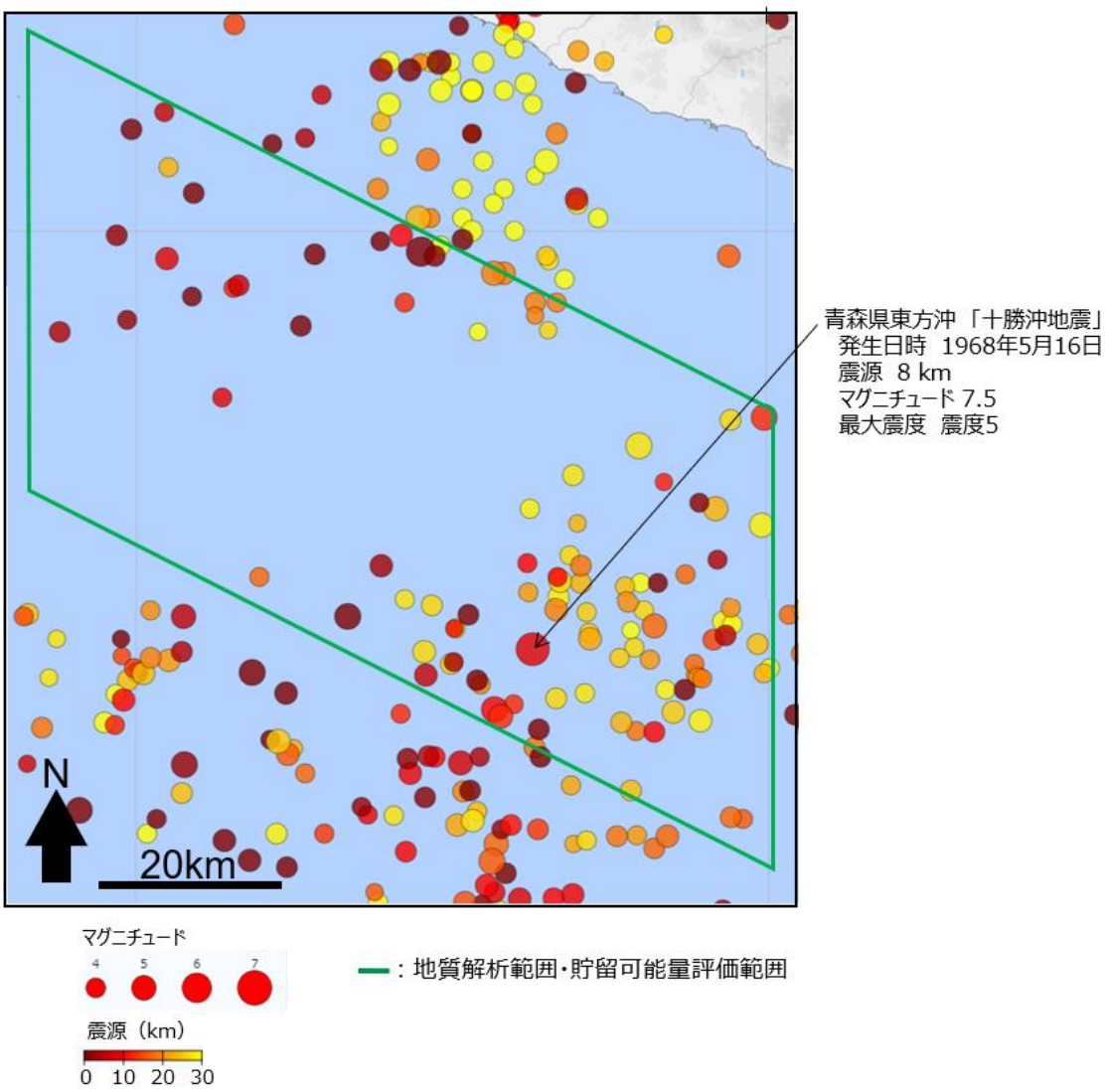
OUNC 不整合は三陸沖基盤リッジの上昇と、前弧堆積盆の沈降により形成したと推定される[9)、11)]。白亜紀から始新世の堆積物が三陸沖基盤リッジに対して薄化やオンラップを示さないことから、一部の白亜系堆積物が三陸沖基盤リッジにより分断され東側にも分布していたことが示唆される[9)]。

OUNC 不整合より上位では、三陸沖堆積盆から海溝にかけての地域は東への傾動を伴う急激な沈降を続けたと考えられる。後期漸新世～前期中新世では中央北海道が大規模な横ずれ境界であったとする見解を考慮し、プルアパート堆積盆に堆積したと示唆される[12)、13)]。新第三紀に古東北日本弧と古千島弧が会合し、古東北日本弧に対して千島前弧が衝突することにより日高衝突帯が形成され、これに伴って西方が圧縮変形により褶曲・衝上断層帯を形成したと考えられている[8)]。日高衝突の時期は、先行研究によれば滝ノ上層の堆積時である中期中新世以降と解釈される[13)]。

(4)　活断層および地震活動

本作業の対象範囲外の北部～東部にかけて日高衝突帯の衝上断層が卓越するため[15)]数多くの活断層と思われる逆断層が認められる[16)、17)]。しかし本業務にて実施した海底地形判読および海底地質情報のコンパイル（4.4 節）から、本作業の対象範囲内では北東部の一部のみが衝上断層帯に位置しており、活構造である可能性が否定できない 3 条の構造が北東部に分布することを除き、明瞭な活構造は認められていない。

日高沖における過去 100 年間に発生したマグニチュード 4 以上、震源の深さ 0～30 km の震央分布を図 4.7-3 に示す。本作業の対象範囲内では、マグニチュード 5.0 規模の地震が散発的に発生しているものの、相対的にみれば地震活動は低調であるといえる。本作業の対象範囲の南東部に 1968 年 5 月 16 日に発生した「十勝沖地震」の震央があるが、震源の深さは 8 km と本作業で対象としている CO_2 貯留層下限深度より深いため、本作業で想定する遮蔽層および貯留層とは十分な深度方向の離隔距離を有しているといえる。



注 1）気象庁震度データベース[18)]に加筆した。
注 2）発生日時：1920 年 12 月 13 日から 2020 年 12 月 19 日、地震の規模：マグニチュード 4.0 以上、震源の深さ：0～30 km の地震をプロットした。

図 4.7-3　日高沖における震央分布

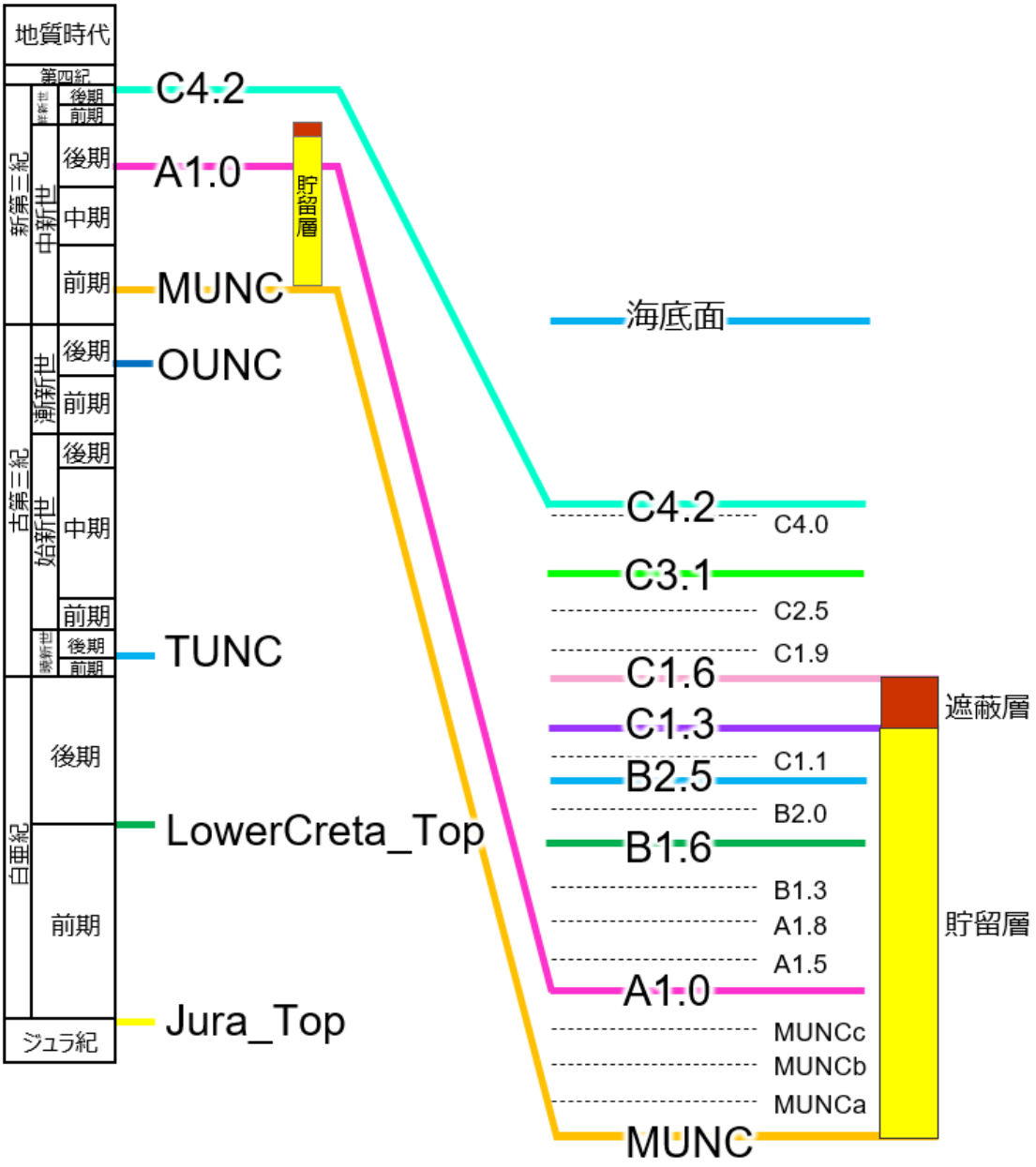
4.7.3　地質構造解析

(1)　解析ホライズンの設定

基礎物理探査「日高舟状海盆 3D」[7)]、基礎物理探査「日高舟状海盆西部 3D」[8)]、基礎試錐「日高トラフ」[4)]を基に、本作業では下位より Jura_Top ホライズン（基盤上面）、LowerCreta_Top ホライズン、TUNC ホライズン、OUNC ホライズン、MUNC ホライズン、A1.0 ホライズン、B1.6 ホライズン、B2.5 ホライズン、C1.3 ホライズン、C1.6 ホライズン、C3.1 ホライズン、C4.2 ホライズン、海底面の計 13 ホライズンを設定した。基礎試

錐「日高トラフ」[4)]の坑井層序境界は広域に追跡することができなかった。本作業では、基礎試錐「日高トラフ」[4)]の坑井層序名を参考にして、広域に追跡可能なホライズンを追加して評価に用いた。図 4.7-4 に設定したホライズンを示す。

本作業では MUNC ホライズンから C1.3 ホライズンを貯留層層準、C1.3 ホライズンから C1.6 ホライズンを遮蔽層層準として抽出した。抽出した貯留層層準および遮蔽層層準について 4.7.5 項で説明する。



注）実線は設定した解析ホライズン、破線は堆積相解析で用いたプロポーショナルスライスを示す。

図 4.7-4　設定したホライズン

(2) 解析ホライズンの特徴

「(1) 解析ホライズンの設定」にて設定した各ホライズンの追跡を実施した。基礎物理探査「日高舟状海盆 3D」[2)] および基礎物理探査「日高舟状海盆西部 3D」[3)] の 3D 弾性波探査データを用いて基礎試錐「日高トラフ」[4)] を参考に地質構造解析を行った。

1) Jura_Top ホライズン

Jura_Top ホライズンは、ジュラ紀付加体上限の不整合面に相当するホライズンである。広域に正の反射波として追跡されるが、本作業の対象範囲の中央部において不整合面である OUNC ホライズンにより削剥されて消滅する。東側の OUNC ホライズンに突き当たる Jura_Top ホライズンの反射波の形状から OUNC ホライズンの下位ではジュラ紀付加体が連続すると推定される。Jura_Top ホライズンより下位には連続的な反射イベントは認められず、本ホライズンは本作業における音響基盤である。基礎試錐「日高トラフ」では未到達である。

2) LowerCreta_Top ホライズン

LowerCreta_Top ホライズンは、前期白亜紀上限の不整合面に相当するホライズンである。広域に正の反射波として追跡されるが、本作業の対象範囲の中央部において不整合面である OUNC ホライズンにより削剥されて消滅する。基礎試錐「日高トラフ」では未到達である。

3) TUNC ホライズン

TUNC ホライズンは、後期白亜紀上限の不整合面に相当するホライズンである。本作業の対象範囲の北端部にのみ正の反射波として追跡されるが、本作業の対象範囲の中央部において不整合面である OUNC ホライズンにより削剥されて消滅する。基礎試錐「日高トラフ」では未到達である。

4) OUNC ホライズン

OUNC ホライズンは、漸新世の不整合面に相当するホライズンである。本作業の対象範囲の全域に正の反射波として追跡される。本ホライズンにより下位の地層が明瞭に削剥されている。基礎試錐「日高トラフ」では未到達である。

5) MUNC ホライズン

MUNC ホライズンは、前期中新世の不整合面に相当するホライズンである。本作業の対象範囲の全域に負の反射波として追跡される。本ホライズンは平行不整合となっている。基礎試錐「日高トラフ」では未到達である。

6) A1.0 ホライズン

A1.0 ホライズンは、後期中新世の平取層－軽舞層内に認められる。本作業の対象範囲で広域に追跡可能な正の反射波である。基礎試錐「日高トラフ」では未到達である。

7) B1.6 ホライズン

B1.6 ホライズンは、後期中新世後期から前期鮮新世の荷菜層内に認められる。広域に追跡可能な正の反射波で、本作業の対象範囲の北東部では A1.0 ホライズンにオンラップし消滅する。基礎試錐「日高トラフ」で掘削しており、本ホライズンは浅部ガスの影響で不明瞭ながら坑井と弾性波探査データの対比が可能であった。坑井層序の B1 層中の砂岩上面に相当すると推定した。そこで本ホライズンと同名の B1.6 マーカーを坑井マーカーとして追加した。

8) B2.5 ホライズン

B2.5 ホライズンは、後期中新世後期から前期鮮新世の荷菜層内に認められる。広域に追跡可能な正の反射波である。基礎試錐「日高トラフ」で掘削しており、詳細な坑井と弾性波探査データの対比は浅部ガスの影響で困難だが坑井層序の B2 層中の砂岩泥岩互層に相当すると推定した。

9) C1.3 ホライズン

C1.3 ホライズンは、前期更新世から中期更新世の萌別層下部に認められる。広域に追跡可能な正の反射波で、本作業の対象範囲の北部および北東部では B2.5 ホライズンにオンラップし消滅する。基礎試錐「日高トラフ」で掘削しており、詳細な坑井と弾性波探査データの対比は浅部ガスの影響で困難だが坑井層序の C1 層中の砂岩泥岩互層に相当すると推定した。

10) C1.6 ホライズン

C1.6 ホライズンは、前期更新世から中期更新世の萌別層下部に認められる。広域に追跡可能な正の反射波で、本作業の対象範囲の北東部では C1.3 ホライズンにオンラップし消滅する。基礎試錐「日高トラフ」で掘削しており、詳細な坑井と弾性波探査データの対比は浅部ガスの影響で困難だが坑井層序の C1 層中の砂岩泥岩互層に相当すると推定した。

11) C3.1 ホライズン

C3.1 ホライズンは、前期更新世から中期更新世の萌別層中部に認められる。広域に追跡可能な正の反射波である。基礎試錐「日高トラフ」で掘削しており、詳細な坑井と弾性波探査データの対比は浅部ガスの影響で困難だが坑井層序の C3 層中の泥優勢の砂泥互層に相当すると推定した。

12) C4.2 ホライズン

C4.2 ホライズンは、前期更新世から中期更新世の萌別層上部に認められる。広域に追跡可能な正の反射波である。基礎試錐「日高トラフ」で掘削しており、詳細な坑井と弾性波探査データの対比は浅部ガスの影響で困難だが坑井層序の C4 層中の泥優勢の砂泥互層に相当すると推定した。

(3) 断層の解析

弾性波探査断面図上での反射波の明瞭な変位を主な根拠とし、時間構造図やバリアンスアトリビュート解析結果を用いて、断層解析を行った。バリアンスアトリビュートは弾性波探査反射波の不連続部分を抽出した弾性波探査アトリビュートである。弾性波探査断面図上では抽出しがたい変位量の小さな断層や微小な反射波の不連続を確認するのに有効な解析手法である。

本断層解析では、遮蔽層層準への影響の有無によって、遮蔽層層準～貯留層層準全体を切る断層、遮蔽層層準全体を切る断層、それ以外の断層と三つに分類した。

断層解析の結果、本作業の対象範囲内に 172 条の断層を認めた。遮蔽層層準～貯留層層準全体を切る断層は 16 条認められ、すべて正断層である。遮蔽層層準全体を切る断層は 34 条認められ、すべて正断層である。それ以外の断層は 122 条認められ、正断層および逆断層である。バリアンスアトリビュート解析結果の断層は比較的明瞭である。

本作業の対象範囲の南部では、北東－南西方向に延びる東落ち正断層が数多く認められ、断層の頻度はおおむね 300～500 m 間隔である。変位量は、5～15 m と見積もられ、その多くは海底面ホライズン直下から OUNC ホライズンまたは、Jura_Top ホライズンまで変位が認められる。

本作業の対象範囲の中央部に位置する基礎試錐「日高トラフ」周辺の背斜軸上では、西北西－東南東方向の変位量 5 m 程度の正断層が多数発達している。これらの正断層は C4.2 ホライズンより上位の地層のみに変位が認められる。

OUNC ホライズンから Jura_Top ホライズンには南北方向および東西方向の正断層が発達しており、断層面角度が 60 度以上と急傾斜であることから横ずれ運動を伴っていることが示唆される。これは先行研究[19)、20)]において推定された右横ずれ運動に伴うプルアパート堆積盆地群形成に関連する断層と解釈される。これらの正断層群については OUNC ホライズンより上位では変位が認められない。

(4) 深度変換手法

基礎物理探査「日高舟状海盆 3D」[2)]、基礎物理探査「日高舟状海盆西部 3D」[3)]の弾性

波探査データ、基礎試錐「日高トラフ」[4)]を用いて、本作業の対象範囲において弾性波探査および坑井で整合的な深度変換速度モデルを作成した。作成した深度変換速度モデルの平面グリッド間隔は 100 m、時間方向のサンプリング間隔は 4 msec とした。作成した深度変換速度モデルは、SEGY ファイルで出力した。

作成した深度変換速度モデルを用いて、時間構造図および弾性波探査断面を深度領域に変換した。

(5) 時間構造図および深度構造図

1) Jura_Top ホライズン

Jura_Top ホライズンは本作業対象範囲の中央部がもっとも深くなる。最深部より東側においては西傾斜となり、不整合である OUNC ホライズンに削剥されて消滅する。東側の OUNC ホライズンに突き当たる Jura_Top ホライズンの反射波の形状から OUNC ホライズンの下位ではジュラ紀付加体が連続すると推定される。そのため構造図は、東側を OUNC ホライズンと結合させて作成した。本作業対象範囲の西部では、苫小牧リッジに相当する構造的高まりへ向かって西方向へ高くなる地層傾斜が顕著であり、北北東－南南西方向の正断層を伴う。本作業対象範囲の東部では、三陸沖基盤リッジに相当する構造的高まりが認められる。三陸沖基盤リッジ内は、北東－南西方向および直交する北西－南東方向の正断層によっていくつかの構造ブロックに分断される。

2) LowerCreta_Top ホライズン

LowerCreta_Top ホライズンは本作業の対象範囲の中央部において西傾斜となり、不整合である OUNC ホライズンに削剥され消滅する。本作業の対象範囲の西部では、苫小牧リッジに相当する構造的高まりへ向かって西方向へ高くなる地層傾斜が顕著である。北北東－南南西方向の正断層を伴う。

3) TUNC ホライズン

TUNC ホライズンは本作業の対象範囲の北端部にのみ分布し、不整合である OUNC ホライズンに削剥され消滅する。苫小牧リッジに相当する構造的高まりへ向かって西方向に高くなる地層傾斜が顕著である。北北東－南南西方向の正断層を伴う。

4) OUNC ホライズン

OUNC ホライズンは本作業の対象範囲の西部では苫小牧リッジに相当する構造的高まりへ向かって西方向に高くなる地層傾斜が顕著である。北北東－南南西方

向の正断層を伴う。本作業の対象範囲の東部では、三陸沖基盤リッジに相当する構造的高まりが認められる。三陸沖基盤リッジ内では、北東－南西方向および直交する北西－南東方向の正断層によっていくつかの構造ブロックに分断される。

5) MUNC ホライズン

MUNC ホライズンは本作業の対象範囲の西部では苫小牧リッジに相当する構造的高まりへ向かって西方向に高くなる地層傾斜が顕著である。本ホライズンより下位に発達していた北北東－南南西方向の正断層は認められない。また本作業の対象範囲の全域において北西－南東方向を長軸とする狭長な背斜群が卓越するようになる。北東部には衝上断層帯の南端が認められる。南東部には浅部まで達する北北東－南南西方向の正断層が多数認められる。

6) A1.0 ホライズン

A1.0 ホライズンは MUNC ホライズンと大局的な構造の傾向が一致する。MUNC ホライズンに整合的に累重したと考えられる。背斜群周辺の地層傾斜が緩傾斜となることから、堆積同時性の構造運動があったことが示唆される。本作業の対象範囲の南東部には継続して多数の正断層が認められる。

7) B1.6 ホライズン

B1.6 ホライズンは A1.0 ホライズンに整合的で緩傾斜である。B1.6 ホライズンより下位では本作業の対象範囲の中央部の北西よりに最沈降部が存在したが、B1.6 ホライズンより上位では中央部の南西よりが最沈降部となる。本作業の対象範囲の南東部には継続して多数の正断層が認められる。

8) B2.5 ホライズン

B2.5 ホライズンは B1.6 ホライズンに整合的で緩傾斜である。本作業の対象範囲の南東部には継続して多数の正断層が認められる。

9) C1.3 ホライズン

C1.3 ホライズンは B2.5 ホライズンに整合的で緩傾斜である。本作業の対象範囲の南東部には継続して多数の正断層が認められる。

10) C1.6 ホライズン

C1.6 ホライズンは C1.3 ホライズンに整合的で緩傾斜である。本作業の対象範囲の南東部には継続して多数の正断層が認められる。

11) C3.1 ホライズン

C3.1 ホライズンは背斜群の長軸トレンドは不明瞭となり、雄大なドーム状を呈するようになる。最沈降部は本作業の対象範囲の南東部へ移動する。南東部には継

続して多数の正断層が認められる。

12) C4.2 ホライズン

C4.2 ホライズンは C3.1 と同様の構造の傾向である。背斜群の長軸トレンドは不明瞭となり、雄大なドーム状を呈するようになる。最沈降部は本作業の対象範囲の南東部へ移動する。南東部には継続して多数の正断層が認められる。

13) 海底面ホライズン

海底面ホライズンは顕著な構造運動や断層の形跡は認められず、舟状を呈し南東部へ向かって徐々に深くなる。

(6) 層厚分布および構造発達史

「(5) 時間構造図および深度構造図」にて作成した時間構造図および深度構造図を元に、等時間層厚線図および等層厚線図を作成した。

構造図、層厚図、基礎試錐「日高トラフ」を通る東西方向の断面を用いて、各ホライズンをフラットニングすることにより構造発達史を考察した。以下に代表的なホライズンについて構造発達史の特徴を述べる。

1) LowerCreta_Top 堆積時（前期白亜紀）～TUNC 不整合（後期白亜紀）

北西側の苫小牧リッジから南東へ徐々に厚くなる傾向が認めらる。このことから、この時期は典型的な前弧堆積盆地であったと解釈される。中新世以降のホライズンに認められるような雄大な構造系列はまだ認められない。本ホライズンは不整合面である OUNC ホライズンにより削剥されて消滅しているため、本作業の対象範囲の東側の現在の三陸沖基盤リッジに相当する地域にまで前弧堆積盆地が広がっていたかは不明である。先行研究[9)]では白亜紀から始新世の堆積物が三陸沖基盤リッジに対して薄化やオンラップを示さないことから、一部の白亜紀の堆積物が三陸沖基盤リッジにより分断され東側にも分布していたと推定している。

2) OUNC 不整合（漸新世）

本ホライズンが堆積した時期は堆積盆地全体が隆起し、大規模な不整合が形成された。OUNC ホライズン以深の堆積物は、三陸沖基盤リッジ周辺で現在と同じ西傾斜となる。このことから漸新世には三陸沖基盤リッジが形成されていたと解釈される。

3) MUNC 不整合（前期中新世）

先行研究[14)]によれば、MUNC ホライズン堆積時は横ずれ伸長から圧縮への転換期である。断層はごく一部に認められるのみである。MUNC ホライズンでは、中

新世以降のホライズンに認められるような雄大な構造系列の端緒がみられることから、すでに堆積同時性の構造運動が開始していた可能性がある。

4) A1.0 堆積時（後期中新世）～海底面（現在）

本作業の貯留層および遮蔽層層準の堆積期に相当する。先行研究[14)]によれば A1.0 ホライズン以降は圧縮場において継続的に日高山脈由来の大量の砕屑物が前縁盆地を埋積した時期である。主要な背斜構造において、下位のホライズンがより地層面傾斜が大きくなる傾向があることから、堆積同時性の構造運動が存在した可能性が高い。ただし背斜部に掘削された基礎試錐「日高トラフ」ではほぼ連続的に粗粒相が認められたことから[4)]、堆積同時性の構造運動は粗粒物の堆積場に影響を与えるほど顕著な構造運動ではなかった。

4.7.4 堆積相解析

貯留層層準、遮蔽層層準の認定およびその区間における堆積物の分布形態の把握と堆積システムを推定するために、基礎物理探査「日高舟状海盆 3D」[2)]、基礎物理探査「日高舟状海盆西部 3D」[3)]の 3D 弾性波探査データ、基礎試錐「日高トラフ」[4)]の坑井データを用いて堆積相解析を実施した。堆積相解析の対象区間は、貯留対象深度となる海底面下 3,000 m 以浅に分布する MUNC ホライズンから C4.2 ホライズンまでとした。MUNC ホライズンから C4.2 ホライズンの区間について、プロポーショナルスライスを参考にしてサブホライズンを設定し 18 区間に分割した。

図 4.7-4 に示した解析ホライズンとプロポーショナルスライスを堆積相解析で使用した。

(1) 堆積相解析手法

「4.7.3 地質構造解析」にて解析したホライズンおよび設定したサブホライズンを用いて、各ホライズン間について層厚図、3D 弾性波探査データ、坑井データから振幅分布、周波数成分の分布（スペクトラルデコンポジション）の各アトリビュートマップを作成した。あわせて、反射波列の形状（サイスミックファシス）の区分をマッピングしサイスミックファシス図を作成した。作成した各種マップと坑井における岩相、検層データおよび検層解析結果を統合し、総合的な堆積システムおよび砕屑物の供給系を推定した。

図 4.7-5 に堆積相解析のフローチャートを示す。

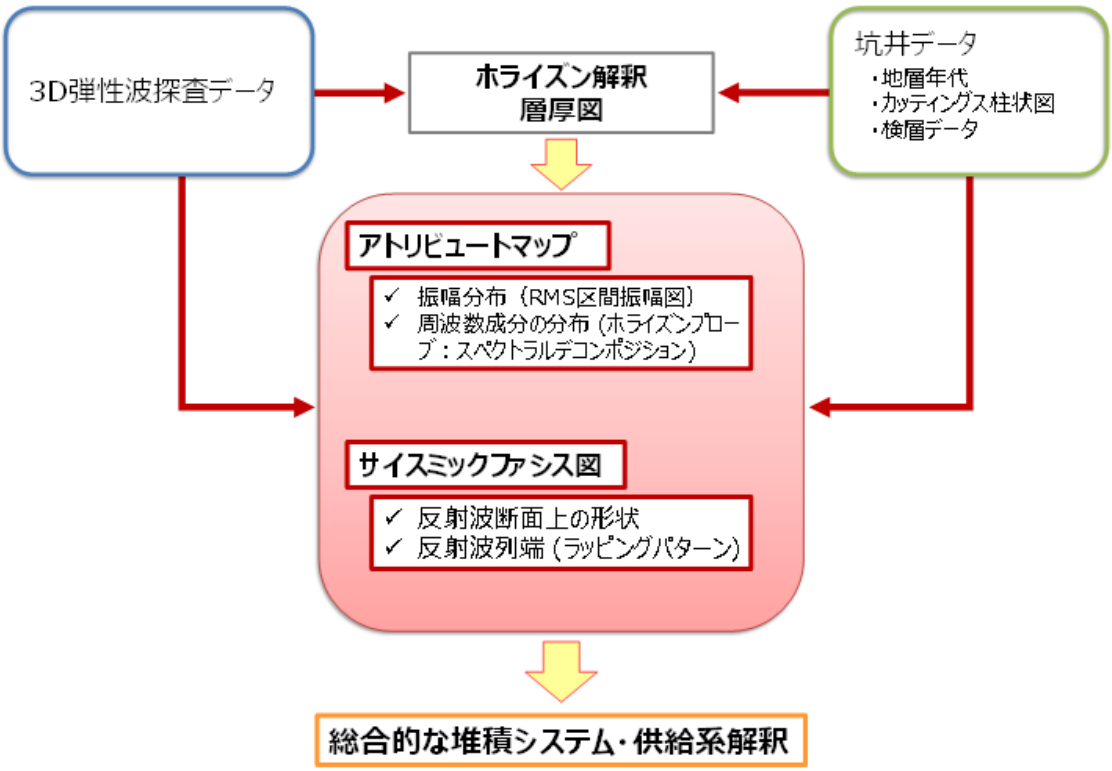


図 4.7-5　堆積相解析のフローチャート

(2)　サイスミックファシス区分

基礎試錐「日高トラフ」では微化石種を基に、坑井層序 A 層から C 層の全区間において深海環境が推定されている[4)]。したがって堆積相解析では、一般的な深海の堆積環境のファシスモデルを基に堆積システムの推定を行った。サイスミックファシス区分は弾性波探査断面における反射波列端のターミネーションパターンや振幅の強弱を参考にして、四つに区分した。以下に、区分した四つのサイスミックファシスの特徴および推定される堆積環境について記述する。図 4.7-6 にサイスミックファシス区分図を示す。

1）ファシス CH

3D 弾性波探査断面において、反射波が強い振幅を示し、垂直方向および水平方向に不連続で側方にせん滅し、下に凸の形状を示す。浅部ガスの影響で振幅が減衰しており不確実性が残るものの、周囲では本ファシスが卓越しており、基礎試錐「日高トラフ」の A 層上部に出現した粗粒相は[4)]本ファシスを掘削した可能性が高い。本ファシスは深海成重力流堆積物のチャネル部に相当すると解釈した。推定される岩相は礫岩、砂岩、砂岩泥岩互層である。

2）ファシス LB

3D 弾性波探査断面において、反射波が強い振幅を示し、平行で連続的な特徴を示し側方へせん滅する。基礎試錐「日高トラフ」の砂岩泥岩互層が卓越する B1 層中部から C3 層にかけては[4)] 本ファシス区間を掘削している。本ファシスは深海成重力流堆積物であるシート状タービダイトが発達するローブ部に相当すると解釈した。推定される岩相は砂岩優勢互層、礫岩、砂岩である。

3) ファシス MTD

3D 弾性波探査断面において、弱い連続性を示し、多くの小断層が認められる。またファシス基底に浸食面が認められることもある。本ファシスは深海における斜面から堆積盆底に発達する海底地すべり堆積物（Mass Transport Deposit、以下「MTD」と称する。）に相当すると解釈した。MTD とは、重力によって直接起こる岩石や砕屑物の斜面下方への移動であるマスムーブメントによって形成された堆積物を示す。推定される岩相は不連続な礫岩、砂岩、砂岩泥岩互層、シルト岩、泥岩である。

4) ファシス SL-BF

3D 弾性波探査断面において、反射波が弱い振幅を示し、不連続で混沌とした反射波で特徴づけられる。基礎試錐「日高トラフ」の泥質岩が卓越する A 層最下部、C1 層上部、C4 層最下部では[4)]、本ファシス区間を掘削している。本ファシスは、斜面～海盆底に相当すると解釈した。推定される岩相は泥岩、泥岩優勢互層である。

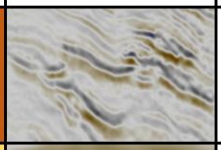
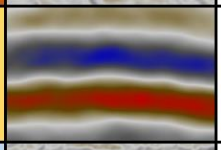
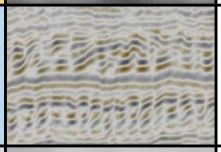
ファシス	断面例	特徴	堆積環境解釈	推定岩相
CH		・強振幅 ・側方へせん滅 ・下に凸の形状	深海成重力流堆積物の チャネル部	礫岩、砂岩、 砂岩泥岩互層
LB		・連続性良い ・強振幅 ・側方へせん滅	深海成重力流堆積物の ローブ部	砂岩優勢互層、 礫岩、砂岩
MTD		・弱い連続性 ・小逆断層	斜面～堆積盆底に発達する 海底地すべり堆積物	不連続な礫岩、 砂岩、砂岩泥 岩互層、シル ト岩、泥岩
SL-BF		・混沌～弱い連続性 ・連続性悪い ・弱振幅	斜面～堆積盆底	泥岩、 泥岩優勢互層

図 4.7-6　サイスミックファシス区分図

(3)　堆積システムおよび供給系の解釈結果

各ホライズン間について作成した振幅分布、周波数成分の分布（スペクトラルデコンポジション）の各種アトリビュートマップ、反射波列の形状（サイスミックファシス）の区分をマッピングしたサイスミックファシスマップ、坑井における岩相および検層データ、微化石に基づく古環境推定結果を用いて、総合的な堆積システムおよび砕屑物の供給系を解釈した。

①　MUNC ホライズン～A1.0 ホライズン区間

MUNC ホライズンから A1.0 ホライズンに 3 枚のサブホライズンを設定し、4 区間に分割した。設定したサブホライズンは下位から MUNCa ホライズン、MUNCb ホライズン、MUNCc ホライズンとした。分割した区間に基づいて、下位から順に堆積相解析結果を記載する。

1）MUNC ホライズン～MUNCa ホライズン区間

本作業の対象範囲に広くファシス SL-BF が広がり、南東部においてファシス LB が認められる。北部から南東部にかけて狭長なファシス CH が認められるため、本区間において貯留岩となりうる粗粒物はファシス CH を通じて、北部から南東部に運搬されたと解釈した。

2）MUNCa ホライズン～MUNCb ホライズン区間

本作業の対象範囲に広くファシス SL-BF が広がり、南東部においてファシス LB が認められる。MUNC ホライズンから MUNCa ホライズン区間で認められた北部のチャネルは消失する。一方、東部ではファシス LB が認められるため東部に新たな供給系が存在した可能性もある。

3) MUNCb ホライズン～MUNCc ホライズン区間

本作業の対象範囲全域に広くファシス SL-BF が広がり、南東部においてファシス LB が認められる。ファシス LB の範囲は、南東部から北へ拡大する。前区間同様、東部の供給系が卓越する。

4) MUNCc ホライズン～A1.0 ホライズン区間

本作業の対象範囲全域に広くファシス SL-BF が広がり、南東部においてファシス LB が認められる。再び北部から南東部にかけて狭長なファシス CH が認められるため、本区間において貯留岩となりうる粗粒物はファシス CH を通じて、北部から南東部に運搬されたと解釈した。

② A1.0 ホライズン～B1.6 ホライズン区間

A1.0 ホライズンから B1.6 ホライズンに 3 枚のサブホライズンを設定し、4 区間に分割した。設定したサブホライズンは下位から A1.5 ホライズン、A1.8 ホライズン、B1.3 ホライズンとした。分割した区間に基づいて、下位から順に堆積相解析結果を記載する。

1) A1.0 ホライズン～A1.5 ホライズン区間

本作業の対象範囲全域に広くファシス SL-BF が広がり、南東部においてファシス LB が認められる。北部から南東部にかけてファシス CH が認められる。前区間までの狭長で単一のファシス CH の分布とは異なり、ファシス CH が複数認められる。これはチャネルの蛇行と放棄によって形成された可能性が示唆される。一部にスプレー状の形態を示すファシス LB も認められるが、大部分のファシス LB は南東部に分布しており、貯留岩となりうる粗粒物は CH ファシスを通じて、北部から南東部に運搬されたと解釈した。

2) A1.5 ホライズン～A1.8 ホライズン区間

本作業の対象範囲全域に広くファシス SL-BF が広がり、南東部においてファシス LB が認められる。北部から南東部にかけて狭長なファシス CH が認められるため、本区間において貯留岩となりうる粗粒物は CH ファシスを通じて、北部から南東部に運搬されたと解釈した。浅部ガスの影響で基礎試錐「日高トラフ」周辺の振幅が減衰しており不確実性が残るものの周囲ではファシス CH が卓越して

おり、基礎試錐「日高トラフ」[4)]のA層上部に出現した粗粒相は本区間ではファシス CH を掘削した可能性が高い。前区間まで認められたファシス CH に加え、さらに北部にもファシス CH が認められるため、複数の供給系が存在した可能性がある。最南東部ではファシス MTD が認められる。

3) A1.8 ホライズン～B1.3 ホライズン区間

本作業の対象範囲全域に広くファシス SL-BF が広がる。前区間で南東部に分布していたファシス LB は、本区間では中央部から南部において広く認められる。また西部にも部分的にファシス LB が認められる。ファシス CH は北部の 2 箇所にまとまって分布するため、2 系列の供給系の存在を示唆する。浅部ガスの影響で基礎試錐「日高トラフ」周辺の振幅が減衰しており不確実性が残るものの周囲ではファシス CH が卓越しており、基礎試錐「日高トラフ」[4)]のA層上部に出現した粗粒相は本区間でもファシス CH を掘削した可能性が高い。本区間において貯留岩となりうる粗粒物は CH ファシスを通じて、基礎試錐「日高トラフ」より南東部に広く供給されたと解釈できる。

4) B1.3 ホライズン～B1.6 ホライズン区間

本区間のファシス SL-BF の広がりは、本作業の対象範囲中央部において北北西－南南東トレンドに分布するファシス CH およびファシス LB によって東西に分割される。ファシス LB の分布はさらに北部へ広がり、中央部から南部において認められる。ファシス CH は北部の 2 箇所にまとまって分布するため、2 系列の供給系の存在を示唆する。浅部ガスの影響で基礎試錐「日高トラフ」周辺の振幅が減衰しており不確実性が残るものの周囲ではファシス LB が卓越しており、基礎試錐「日高トラフ」[4)]の B1 層に出現した粗粒相は本区間ではファシス LB を掘削した可能性が高い。最南東部ではファシス MTD が認められる。

③　B1.6 ホライズン～B2.5 ホライズン区間

B1.6 ホライズンから B2.5 ホライズンに 1 枚のサブホライズンを設定し、2 区間に分割した。設定したサブホライズンは B2.0 ホライズンとした。分割した区間に基づいて、下位から順に堆積相解析結果を記載する。

1) B1.6 ホライズン～B2.0 ホライズン区間

前区間と同様に、本区間のファシス SL-BF の広がりは、本作業の対象範囲の東西に分割される。ファシス LB の分布はさらに北部へ広がり、中央部から南部において広く認められる。北部のファシス CH はこれまで比較的狭長な分布を示して

いたが、本区間では複数のチャネルが積み重なり、面的な広がりを持っている。浅部ガスの影響で基礎試錐「日高トラフ」周辺の振幅が減衰しており不確実性が残るものの周囲ではファシス LB が卓越しており、基礎試錐「日高トラフ」[4)] の B1 層に出現した粗粒相は本区間でもファシス LB を掘削した可能性が高い。振幅の強さについて南部のファシス LB はやや弱くなり、中央部のファシス LB がより強く認められることから、タービダイトの主要堆積域は南部から中央部に遷移したと考えられる。

2) B2.0 ホライズン～B2.5 ホライズン区間

前区間と同様に、本区間のファシス SL-BF の広がりは、本作業の対象範囲の東西に分割される。B1.3 ホライズン～B1.6 ホライズン区間以深と同様にファシス CH は北部と最北部の 2 箇所に分布し、2 系列の供給系の存在を示唆する。ファシス LB は、中央部に広く分布する。2 系列のチャネルから供給された粗粒物は、中央部において合流し、タービダイトのローブ相として中央部に分布すると考えられる。浅部ガスの影響で基礎試錐「日高トラフ」周辺の振幅が減衰しており不確実性が残るものの周囲ではファシス LB が卓越しており、基礎試錐「日高トラフ」[4)]の B2 層に出現した粗粒相は本区間でもファシス LB を掘削した可能性が高い。振幅の強さについて南部のファシス LB は振幅がますます弱くなり、中央部のファシス LB がより強く認められることから、タービダイトの主要堆積域の中心は中央部であった考えられる。不明瞭ではあるが、東部にもファシス CH、ファシス LB が分布するため北部とは異なる供給系が存在した可能性も示唆される。

④ B2.5 ホライズン～C1.3 ホライズン区間

B2.5 ホライズンから C1.3 ホライズンに 1 枚のサブホライズンを設定し、2 区間に分割した。設定したサブホライズンは C1.1 ホライズンとした。分割した区間に基づいて、下位から順に堆積相解析結果を記載する。

1) B2.5 ホライズン～C1.1 ホライズン区間

前区間と同様に、本区間のファシス SL-BF の広がりは、本作業の対象範囲の東西に分割される。ファシス CH は北部と最北部の 2 箇所に分布し、2 系列の供給系の存在を示唆する。2 系列のチャネルから供給された粗粒物は中央部において合流し、タービダイトのローブ相として中央部に分布すると考えられる。さらに中央部に分布するローブから南部、南東部へも連続的に分布することから、大量の粗粒物供給が示唆される。一方、北西部と東部では徐々に層厚を減じ、下位層へ

ダウンラップし消滅する。浅部ガスの影響で基礎試錐「日高トラフ」周辺の振幅が減衰しており不確実性が残るものの周囲ではファシス LB が卓越しており、基礎試錐「日高トラフ」[4)] の B2 層に出現した粗粒相は本区間でもファシス LB を掘削した可能性が高い。

2) C1.1 ホライズン～C1.3 ホライズン区間

本区間では本作業の対象範囲の中央部のファシス LB の広がりは縮小し、B2.0 ホライズン～B2.5 ホライズン区間と同様に南北に狭長な分布となる。東部ではファシス CH とファシス LB が認められ、新たな供給系が加わったと考えられる。北西部と東部では徐々に層厚を減じ、下位層へダウンラップし消滅する。浅部ガスの影響で基礎試錐「日高トラフ」周辺の振幅が減衰しており不確実性が残るものの周囲ではファシス LB が卓越しており、基礎試錐「日高トラフ」[4)] の C1 層に出現した粗粒相は本区間でもファシス LB を掘削した可能性が高い。南東部ではファシス MTD が広く認められる。

⑤　C1.3 ホライズン～C1.6 ホライズン区間

C1.3 ホライズンから C1.6 ホライズンはサブホライズンを設定せず、1 区間として評価した。本区間ではファシス SL-BF が本作業の対象範囲の東部と西部に広く分布する。ファシス LB は中央部に分布し、東部にも局所的に認められる。浅部ガスの影響で基礎試錐「日高トラフ」周辺の振幅が減衰しており不確実性が残るものの周囲ではファシス LB が卓越しており、基礎試錐「日高トラフ」[4)] の C1 層に出現した粗粒相は本区間でもファシス LB を掘削した可能性が高い。

⑥　C1.6 ホライズン～C3.1 ホライズン区間

C1.6 ホライズンから C3.1 ホライズンに 2 枚のサブホライズンを設定し、3 区間に分割した。設定したサブホライズンは下位から C1.9 ホライズン、C2.5 ホライズンとした。分割した区間に基づいて、下位から順に堆積相解析結果を記載する。

1) C1.6 ホライズン～C1.9 ホライズン区間

本区間ではファシス LB は本作業の対象範囲の中央部および南東部に広く認められる。浅部ガスの影響で基礎試錐「日高トラフ」周辺の振幅が減衰しており不確実性が残るものの周囲ではファシス SL-BF が卓越しており、基礎試錐「日高トラフ」[4)] の C1 層上部に出現した細粒相は本区間でもファシス SL-BF を掘削した可能性が高い。北西部や東部において広くファシス MTD が広く認められる。

2) C1.9 ホライズン～C2.5 ホライズン区間

本作業の対象範囲の北西部から南東部にかけて広くファシス LB が分布する。中央部にはファシス MTD が分布する。浅部ガスの影響で基礎試錐「日高トラフ」周辺の振幅が減衰しており不確実性が残るものの周囲ではファシス MTD が卓越しており、基礎試錐「日高トラフ」[4)] の C2 層に出現した粗粒相は本区間でもファシス MTD を掘削した可能性が高い。

3) C2.5 ホライズン～C3.1 ホライズン区間

本作業の対象範囲の中央部から南東部にかけて広くファシス LB が分布する。ファシス CH は北部から北西部にかけて複数認められる。複数の供給系路から大量の粗粒物が供給され、対象範囲全域を広く覆ったことが示唆される。浅部ガスの影響で基礎試錐「日高トラフ」周辺の振幅が減衰しており不確実性が残るものの周囲ではファシス LB が卓越しており、基礎試錐「日高トラフ」[4)] の C2 層上部から C3 層下部に出現した粗粒相は本区間でもファシス LB を掘削した可能性が高い。東部ではファシス MTD が広く認められる。

⑦ C3.1 ホライズン～C4.2 ホライズン区間

C3.1 ホライズンから C4.2 ホライズンに 1 枚のサブホライズンを設定し、2 区間に分割した。サブホライズンは基礎試錐「日高トラフ」[4)] の C4 層基底の坑井マーカーとプロポーショナルスライスを用いて設定し、C4.0 ホライズンとした。分割した区間に基づいて、下位から順に堆積相解析結果を記載する。

1) C3.1 ホライズン～C4.0 ホライズン区間

前区間と同様に、本作業の対象範囲の中央部から南東部にかけて広くファシス LB が分布する。ファシス CH は北部から北西部にかけて複数認められる。複数の供給系路から大量の粗粒物が供給され、対象範囲を広く覆ったことが示唆される。浅部ガスの影響で基礎試錐「日高トラフ」周辺の振幅が減衰しており不確実性が残るものの周囲ではファシス LB が卓越しており、基礎試錐「日高トラフ」[4)]の C3 層に出現した粗粒相は本区間でもファシス LB を掘削した可能性が高い。中央部および東部ではファシス MTD が広く認められる。

2) C4.0 ホライズン～C4.2 ホライズン区間

前区間と同様に、本作業の対象範囲の中央部から南東部にかけて広くファシス LB が分布する。ファシス CH は北部から東部にかけて複数認められる。複数の供給系路から大量の粗粒物が供給され、対象範囲を広く覆ったことが示唆される。浅部ガスの影響で基礎試錐「日高トラフ」周辺の振幅が減衰しており不確実性が

残るものの周囲ではファシス LB が卓越しており、基礎試錐「日高トラフ」[4)] の C4 層に出現した粗粒相は本区間でもファシス LB を掘削した可能性が高い。東部ではファシス MTD が広く認められる。

4.7.5　貯留層層準と遮蔽層層準の設定

本調査の対象範囲周辺の坑井情報および「4.7.4　堆積相解析」の結果を基に MUNC ホライズンから C1.6 ホライズンを貯留層層準とし、C1.6 ホライズンから C1.3 ホライズンを遮蔽層層準として設定した。

MUNC ホライズンから C1.6 ホライズンの貯留層層準のうち、粗粒な岩相と推定されるファシス CH とファシス LB を貯留層ファシスとした。C1.6 ホライズンから C1.3 ホライズンの遮蔽層層準のうち、細粒な岩相と推定されるファシス SL-BF を遮蔽層ファシスとした。

4.7.6　貯留可能量の算定

(1)　CO_2 超臨界深度

基礎試錐「日高トラフ」[4)] の坑井データを用いて、RITE（2006）[2 1)] に示されている CO_2 超臨界状態の条件（温度 31.1℃以上、圧力 7.38 MPa 以上）を満たす深度の検討を行った。

基礎試錐「日高トラフ」において地温勾配は 1.7℃/100m という結果が得られている[4)]。基礎試錐「日高トラフ」の地温勾配を用いて、CO_2 超臨界状態の温度条件である 31.1℃以上に達するのは、海底面下深度 1,333 m 以深と推定した。

海水比重のばらつきを考慮して海水比重は 1.02 SG、1.03 SG、1.04 SG で計算し、CO_2 超臨界状態の圧力条件である 7.38 MPa 以上に達するのは、平均海水面下深度 740 m 以深と推定した。

地層温度と深度および圧力と深度の検討から、本作業の対象範囲において CO_2 超臨界状態の条件（温度 31.1℃以上、圧力 7.38 MPa 以上）を満たす深度は、海底面下深度 1,333 m 以深と推定し、貯留層区間の上限深度を海底面下深度 1,333 m とした。

(2)　CO_2 貯留可能量の算定式

CO_2 貯留可能量の算定には、以下に示す RITE（2006）[2 1)] の式を用いた。貯留率は構造タイプでは 50%、緩傾斜部（同斜構造）タイプでは 25%の値を使用した。超臨界 CO_2 飽和率は、中間値の 50%を使用した。

$$CO_2\text{貯留可能量} = Sf \times A \times h \times \Phi \times Sg / BgCO_2 \times \rho$$

Sf：貯留率（構造タイプ：50%、緩傾斜部タイプ：25%）

A：貯留可能域の面積（km^2）

h：有効層厚（m）

Φ：孔隙率（%）

Sg：超臨界 CO_2 飽和率（20%、50%、80%）

$BgCO_2$：CO_2 の容積係数（約 0.003 m^3/m^3）

ρ：CO_2 密度（標準状態で 1.976 kg/m^3）

本作業では Petrel ソフトウェア上において、貯留層上限および貯留層下限の深度構造図を用いた全岩容積（Gross Rock Volume）の算出が可能であることから、上記式の一部を改編した以下の計算式を用いて CO_2 貯留可能量を算定した。全岩容積の算出には堆積相解析で設定したサブホライズンを用いることにより、貯留層層準において貯留層ファシスが分布する割合を考慮した。坑井における堆積体のネットグロス比（以下、「N/G 比」と称する。）は、本作業の対象範囲に位置する基礎試錐「日高トラフ」[4)] の検層解析結果を使用した。孔隙率は基礎試錐「日高トラフ」の検層解析から得たファシス CH とファシス LB の圧密曲線を用いて、ファシスごとに圧密曲線と堆積体の出現する深度を使用して算出した。

CO_2 貯留可能量 $= Sf \times GRV \times N/G \times \Phi \times Sg / BgCO_2 \times \rho$

GRV：Gross Rock Volume（km^3）

N/G：N/G 比

(3) 貯留可能域の検討および貯留可能量評価

ここまでの作業結果から以下の五つの条件を満たす貯留可能域を検討し、MUNC ホライズンから C1.6 ホライズンの貯留可能域を抽出した。貯留可能域を合計で 20 個抽出し、そのうち 1 億 t 以上貯留可能な貯留可能域は 6 個であった。1 億 t 以上貯留可能な貯留可能域の貯留可能量は合計で約 26.3 億 t と算定した。表 4.7-3 に貯留可能量評価の検討結果を示す。表 4.7-4 に各貯留可能域の貯留可能量を示す。

1) CO_2 超臨界状態の条件を満たす海底面下深度 1,333 m～CO_2 貯留層下限深度である海底面下深度 3,000 m を満たす深度範囲。
2) 遮蔽層層準を切る断層から 2.5 km 以上離れた範囲。
3) 地層傾斜が 30 度未満の範囲。
4) 貯留層層準に堆積相解析結果から貯留層ファシスと推定したファシス CH ないしファシス LB が分布する範囲。
5) 遮蔽層層準に堆積相解析結果から遮蔽層ファシスと推定したファシス SL-BF が分布し、その層厚が 20 m 以上の範囲。

表 4.7-3　本作業の対象範囲における貯留可能量評価の検討結果

貯留可能域		貯留層			貯留可能量	遮蔽層		地質構造		評価点数
貯留可能域番号	エリア	海底面下深度（m）	グロス層厚（m）	平均孔隙率（%）	億トン-CO2	層厚（m）	遮蔽能力（堆積環境・岩相）	構造安定度（断層など）	地層傾斜	×10^{-3}
1	中央部	2,166-2,855	689	21	11.05	200	深海性・泥岩	少ない	≦10	64.8
2	中央部	1,860-2,548	1,377	23	9.96	150	深海性・泥岩	少ない	≦10	64.8
3	南部	1,999-2,429	430	23	2.11	100	深海性・泥岩	多い	≦10	19.4
4	北部	2,147-2,740	593	20	1.08	100	深海性・泥岩	なし	≦20	10.8
5	東部	2,070-2,487	417	22	1.08	75	深海性・泥岩	多い	≦10	1.9
6	南東部	1,421-2,378	957	26	1.01	75	深海性・泥岩	多い	≦10	10.8

技術要素 / 評価点数			貯留層			貯留可能量	遮蔽層		地質構造	
			深　度（m）	層　厚（m）	性状（孔隙率）（%）	（百万トン-CO_2）	層厚（m）	遮蔽能力（堆積環境・岩相）	構造安定度（断層など）	地層傾斜（deg）
評価点数	◎	1	800-2,000m	≧500	≧25	≧5,000	≧100	深海性・泥岩	断層なし	≦10
	○	0.6	800-3,000m	≧200	≧20	≧1,000	≧50	半深海性・泥質岩	断層があるが極浅部まで達していない	≦20
	△	0.3	≧2,000m	≧50	≧15	≧200	≧20	陸棚以浅・泥質岩	断層が多いが極浅部まで達していない	≦30
	△−	0.1			≧5				広域地質構造の安定度が低い	
	×	0	≧3,000m	<50	<5	<100	<20	砂質シルト岩	対象区域内に活断層あり	>30
	NA	0.5	（評価できず）				（評価できず）		（評価できず）	

表 4.7-4　各貯留可能域の貯留可能量

貯留可能域	層準	ファシス	貯留率 (%)	GRV (km^3)	面積 (km^2)	N/G比	孔隙率 (%)	超臨界 CO_2飽和度 (%)	CO_2容積係数	CO_2密度 (kg/m^3)	貯留可能量 (億トン)
1	B1.3～B1.6	LB	25	3.5	17.2	0.43	22.0	50	0.003	1.979	11.05
	B1.3～B1.6	LB	50	2.4	19.3	0.43	22.0	50	0.003	1.979	
	B1.3～B1.6	CH	25	2.1	15.5	0.50	9.6	50	0.003	1.979	
	B1.6～B2.0	LB	25	6.3	40.8	0.43	22.2	50	0.003	1.979	
	B1.6～B2.0	LB	50	1.7	17.0	0.43	22.2	50	0.003	1.979	
	B1.6～B2.0	CH	25	7.5	88.4	0.50	9.8	50	0.003	1.979	
	B2.0～B2.5	LB	25	39.5	133.5	0.43	20.5	50	0.003	1.979	
	B2.0～B2.5	LB	50	1.7	18.5	0.43	20.5	50	0.003	1.979	
	B2.0～B2.5	CH	25	11.6	55.7	0.50	10.5	50	0.003	1.979	
	B2.5～C1.1	LB	25	39.8	330.5	0.43	21.3	50	0.003	1.979	
	B2.5～C1.1	LB	50	2.8	34.4	0.43	21.3	50	0.003	1.979	
	B2.5～C1.1	CH	25	3.5	26.6	0.50	11.8	50	0.003	1.979	
	C1.1～C1.3	LB	25	19.3	119.6	0.43	23.1	50	0.003	1.979	
	C1.1～C1.3	LB	50	2.5	30.2	0.43	23.1	50	0.003	1.979	
	C1.1～C1.3	CH	25	1.1	8.2	0.50	13.0	50	0.003	1.979	
2	MUNCc～A1.0	CH	25	2.2	16.6	0.50	11.2	50	0.003	1.979	9.96
	A1.0～A1.5	LB	25	1.2	14.4	0.43	23.2	50	0.003	1.979	
	A1.0～A1.5	CH	25	2.5	23.5	0.50	12.3	50	0.003	1.979	
	A1.5～A1.8	LB	25	4.6	56.1	0.43	22.7	50	0.003	1.979	
	A1.5～A1.8	CH	25	1.6	19.2	0.50	12.1	50	0.003	1.979	
	A1.8～B1.3	LB	25	15.5	211.5	0.43	21.8	50	0.003	1.979	
	A1.8～B1.3	CH	25	0.4	4.8	0.50	15.0	50	0.003	1.979	
	B1.3～B1.6	LB	25	16.1	247.5	0.43	21.9	50	0.003	1.979	
	B1.3～B1.6	CH	25	1.1	14.7	0.50	14.5	50	0.003	1.979	
	B1.6～B2.0	LB	25	17.6	198.2	0.43	22.6	50	0.003	1.979	
	B1.6～B2.0	CH	25	2.7	16.7	0.50	14.8	50	0.003	1.979	
	B2.0～B2.5	LB	25	27.4	119.7	0.43	24.4	50	0.003	1.979	
	B2.0～B2.5	CH	25	1.0	3.3	0.50	14.3	50	0.003	1.979	
	B2.5～C1.1	LB	25	28.2	296.9	0.43	24.8	50	0.003	1.979	
	B2.5～C1.1	CH	25	0.4	4.7	0.50	15.8	50	0.003	1.979	
	C1.1～C1.3	LB	25	1.7	22.1	0.43	24.2	50	0.003	1.979	
3	MUNC～MUNCa	LB	25	2.4	32.5	0.43	20.8	50	0.003	1.979	2.11
	MUNCa～MUNCb	LB	25	3.1	44.0	0.43	21.3	50	0.003	1.979	
	MUNCb～MUNCc	LB	25	3.2	53.4	0.43	21.7	50	0.003	1.979	
	MUNCc～A1.0	LB	25	2.1	29.2	0.43	22.9	50	0.003	1.979	
	MUNCc～A1.0	CH	25	0.6	13.7	0.50	12.9	50	0.003	1.979	
	A1.0～A1.5	LB	25	2.8	42.4	0.43	22.8	50	0.003	1.979	
	A1.0～A1.5	CH	25	0.5	6.4	0.50	13.4	50	0.003	1.979	
	A1.5～A1.8	LB	25	3.7	57.8	0.43	23.5	50	0.003	1.979	
	A1.5～A1.8	CH	25	0.2	3.3	0.50	14.7	50	0.003	1.979	
	A1.8～B1.3	LB	25	4.0	64.7	0.43	24.2	50	0.003	1.979	
	B1.3～B1.6	LB	25	3.8	64.1	0.43	24.7	50	0.003	1.979	
4	A1.5～A1.8	CH	25	4.9	31.0	0.50	10.6	50	0.003	1.979	1.08
	A1.8～B1.3	LB	25	5.0	40.0	0.43	18.4	50	0.003	1.979	
	A1.8～B1.3	CH	25	4.4	21.5	0.50	11.0	50	0.003	1.979	
	B1.3～B1.6	CH	25	3.1	19.5	0.50	12.0	50	0.003	1.979	
	B1.6～B2.0	CH	25	0.4	5.2	0.50	10.7	50	0.003	1.979	
	B2.0～B2.5	CH	25	3.1	44.5	0.50	13.7	50	0.003	1.979	
5	MUNC～MUNCa	CH	25	1.9	9.9	0.50	11.5	50	0.003	1.979	1.08
	MUNCa～MUNCb	LB	25	3.1	17.8	0.43	21.2	50	0.003	1.979	
	MUNCb～MUNCc	LB	25	7.2	33.9	0.43	21.6	50	0.003	1.979	
	MUNCc～A1.0	LB	25	1.8	6.2	0.43	21.8	50	0.003	1.979	
	A1.0～A1.5	CH	25	0.2	1.8	0.50	13.6	50	0.003	1.979	
	A1.5～A1.8	LB	25	0.7	6.0	0.43	24.0	50	0.003	1.979	
6	MUNC～MUNCa	LB	25	1.1	6.4	0.43	21.2	50	0.003	1.979	1.01
	MUNCa～MUNCb	LB	25	0.5	2.7	0.43	22.0	50	0.003	1.979	
	MUNCb～MUNCc	LB	25	2.7	20.8	0.43	25.0	50	0.003	1.979	
	MUNCc～A1.0	LB	25	2.5	19.8	0.43	26.2	50	0.003	1.979	
	A1.0～A1.5	LB	25	1.7	20.8	0.43	27.1	50	0.003	1.979	
	A1.5～A1.8	LB	25	1.4	17.7	0.43	28.4	50	0.003	1.979	
	B1.3～B1.6	LB	25	0.3	3.6	0.43	29.8	50	0.003	1.979	
	B1.6～B2.0	LB	25	0.6	5.1	0.43	31.2	50	0.003	1.979	

4.7.7　調査井の検討

ここまでの作業結果から本作業の対象範囲における調査井の掘削位置を検討した。調査井の掘削位置は、本作業の対象範囲の東側中央に位置し貯留可能域 2 の分布する位置にて検討した。調査井は遮蔽層層準および貯留層層準の全区間を掘り抜く掘削深度約 4,250 m の垂直井とした。以下に、本調査井の選定理由および特記事項を記載する。

1) 本調査井掘削位置には貯留可能量評価結果から大きな貯留可能量が見込める貯留可能域 2 が分布する。貯留可能域 2 の主な分布層準である C1.1 ホライズンから A1.8 ホライズンにかけてファシス LB が解釈され、良好な貯留ファシスの分布が期待でき、その性状を調査できる。
2) 本調査井掘削位置では、貯留層層準の全区間が海底面下深度 1,333 m 以深に分布し、CO_2 の超臨界状態安定領域内である。
3) 本調査井掘削位置では、貯留層層準の全区間が海底面下深度 3,000 m 以浅に分布し、貯留層として機能しうる孔隙率を保持する深度である。
4) 本調査井掘削位置では、遮蔽層層準について厚さ 200 m 以上の厚さを期待できるため、遮蔽層性状を調査できる。
3) 本調査井掘削位置は、周囲に断層が少ない。遮蔽層層準より上位ではいくつか小規模な断層が認められるものの、遮蔽層を切っている断層はない。地質構造解析より本作業の対象範囲において断層が多く発達するエリアは南東部であり、本調査井の提案位置とは十分な距離を有している。

【参考文献】

1) 国土地理院ホームページ、地理院地図（電子国土 Web）、https://maps.gsi.go.jp
2) 独立行政法人石油天然ガス・金属鉱物資源機構、“平成 25 年度 国内石油・天然ガス基礎調査 基礎物理探査「日高舟状海盆 3D」データ処理報告書”（2015）
3) 独立行政法人石油天然ガス・金属鉱物資源機構、“平成 26 年度 国内石油・天然ガス基礎調査 基礎物理探査「日高舟状海盆西部 3D」データ処理報告書”（2016）
4) 独立行政法人石油天然ガス・金属資源機構、“平成 29 年度～令和元年度国内石油・天然ガス基礎調査 基礎試錐「日高トラフ」調査報告書”（2019）
5) 石田聖、2005、“ガス資源埋蔵の期待高まる東北の太平洋沖合-北海道・東北地方のガス・エネルギーサイクルを考える”、石油・天然ガスレビュー、39(1)、p.41-56（2005）
6) 岡孝雄、“北海道の後期新生代堆積盆の分布とその形成に関わるテクトニクス”、地団研専報、31、p.295-320（1986）

7) 独立行政法人石油天然ガス・金属鉱物資源機構、“平成 25 年度 国内石油・天然ガス基礎調査 基礎物理探査「日高舟状海盆 3D」データ解釈報告書”（2015）
8) 独立行政法人石油天然ガス・金属鉱物資源機構、“平成 26 年度 国内石油・天然ガス基礎調査 基礎物理探査「日高舟状海盆西部 3D」データ解釈報告書”（2016）
9) 安藤寿男、“東北日本の白亜系-古第三系蝦夷前弧堆積盆の地質学的位置づけと層序対比”、石油技術協会誌、70(1)、p.24-36（2005）
10) 栗田裕司、横井悟、“中央北海道南部における新生代テクトニクスの変遷と油田構造形成”、石技誌、v.65、p.58-70（2000）
11) 大澤正博、中西敏、棚橋学、小田浩、“三陸～日高沖前弧堆積盆の地質構造・構造発達史とガス鉱床ポテンシャル”、石技誌、v.67、p.38-51（2002）
12) 木村学、“プレート収束帯のテクトニクス学”、東京大学出版会、p.280（2002）
13) 木村学、楠香織、“日高造山運動と島弧会合部のテクトニクス”、地質学論集、n.47、p.295-305（1997）
14) 伊藤谷生、森谷武男、井川秀雄、井川崇、在田一則、津村紀子、篠原雅尚、宮内崇裕、木村学、奥池司郎、清水信之、井川猛、“日高衝突帯におけるデラミネーション-ウェッジ構造”、月刊地球、21(3)、p.130-136（1999）
15) 伊藤谷生、“日高衝突帯-前縁褶曲・衝上断層帯の地殻構造”、石技誌、v.65、p.103-109（2000）
16) 辻野匠、井上卓彦、“日高舟状海盆海底地質図”、海洋地質図（CD-ROM）、No.77（2012）
17) 辻野匠、井上卓彦、“襟裳岬沖海底地質図”、海洋地質図（CD-ROM）、No.83（2014）
18) 気象庁震度データベース、
https://www.data.jma.go.jp/svd/eqdb/data/shindo/index.html
19) 高野修、伊藤康人、楠本成寿、“三陸沖～道央～道北古第三系前弧～横ずれ堆積盆群の形成プロセス･形態変遷と堆積システム（要旨）”、日本地質学会第 119 年学術大会講演要旨、p.24（2012）
20) Itoh, Y., O. Takano, S. Kusumoto, M. Tamaki, 2014, Mechanism of long-standing Cenozoic basin formation in central Hokkaido: an integrated basin study on an oblique convergent margin. Progress Earth Planet Science 1:6, http://www.progearthplanetsci.com/content/1/1/6.
21) (公財)地球環境産業技術研究機構、“平成 17 年度 二酸化炭素固定化・有効利用技術等対策事業 二酸化炭素地中貯留技術研究会月成果報告書”（2006）

4.8　地質解析と貯留適地評価（本荘沖）

本地点内の基礎物理探査の 3D 探査データのうち本事業で利用可能なデータ、既存 2D 弾性波探査データの再処理データ、基礎試錐および民間坑井のうち本事業で利用可能なデータを用いて、地質解析と貯留適地評価を実施した。

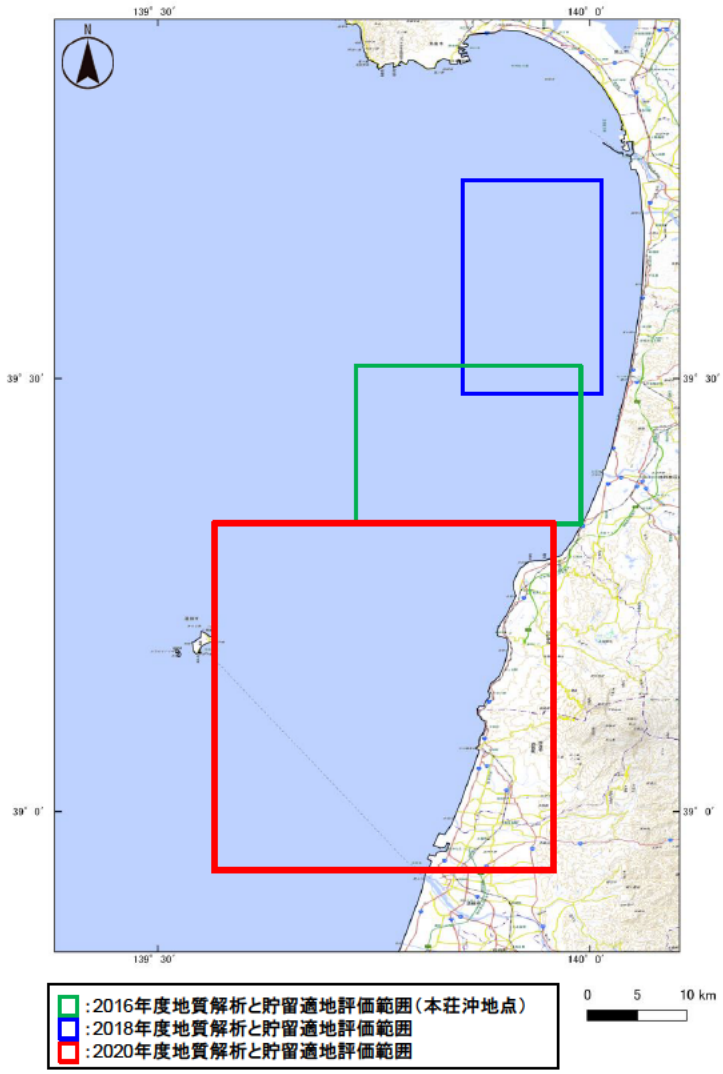
4.8.1　調査地点概要と使用データ

(1)　調査地点概要

本調査地点は、秋田県由利本荘市の沖合約 11 km に位置する。本調査地点の北側には秋田沖地点が隣接する。本調査地点および秋田沖地点では、平成２７年度委託事業[1)]、平成２８年度委託事業[2)]、平成３０年度委託事業[3)]において、地質解析と貯留適地評価が行われ、桂根相下部貯留層で約 5.0 億 t、桂根相上部貯留層で約 2.5 億 t、笹岡層貯留層で約 39.6 億 t の貯留可能量を算出した。

平成２８年度委託事業[2)]では、地質解析と貯留適地評価範囲の南側に貯留可能域が延長される可能性が示唆された。本作業では、平成２８年度委託事業にて実施した地質解析と貯留適地評価範囲の南側において、地質解析と貯留適地評価を実施する。本作業の対象範囲を図 4.8-1 に示す。本作業の対象範囲は、秋田県由利本荘市南西沖合の東西約 34 km、南北約 44 km の範囲で、面積は約 1,500 km² である。水深は 0～450 m であり、西に向かって徐々に深くなる。

本作業に使用した測地諸元を表 4.8-1 に示す。



国土地理院「電子地形図（タイル）」に追記

図 4.8-1　本作業の対象範囲

表 4.8-1　本作業で使用した測地諸元

準拠楕円体	WGS84
長半径	6,378,137.00000000 m
短半径	6,356,752.31424500 m
投影法	Universal Transverse Mercator（UTM 図法）
系番号	54
座標原点 緯度	00° 00′ 00.000" N
座標原点 経度	141° 00′ 00.000" E
縮尺係数	0.999600
北方加数	0.000 m
東方加数	500,000.000 m

(2)　使用データおよび使用ソフトウェア

本作業で使用した弾性波探査データおよび坑井データを表 4.8-2 に示す。本作業では、『平成 26 年度 国内石油・天然ガス基礎調査 基礎物理探査「秋田～山形沖 3D」』[4)]、平成２７年度委託事業にて実施した既存 2D 弾性波探査データの再処理[1)]、平成３１年度委託事業にて実施した既存 2D 弾性波探査データの再処理[5)]の弾性波探査データ、および『昭和 58 年度 国内石油・天然ガス基礎調査 基礎試錐「最上川沖」』[6)]、『平成 5 年度 国内石油・天然ガス基礎調査 基礎試錐「本荘沖」』[7)]、民間会社が掘削した庄内沖 SI-1、遊佐沖 SI-1 の坑井データを使用した。

弾性波探査データおよび坑井データのほかに、平成２７年度委託事業にて実施した地質解析と貯留適地評価[1)]、平成２８年度委託事業にて実施した地質解析と貯留適地評価[2)]、平成３０年度委託事業にて実施した地質解析と貯留適地評価[3)]、本業務にて実施した海底地形判読および海底地質情報のコンパイル（4.5 節）にて得た資料も使用して作業を実施した。

使用した主要ソフトウェアを表 4.8-3 に示す。

表 4.8-2　本作業で使用した弾性波探査探査データおよび坑井データ

弾性波探査データ
基礎物理探査「秋田～山形沖 3D」（一部）
平成２７年度委託事業にて実施した既存 2D 弾性波探査データの再処理（一部）
平成３１年度委託事業にて実施した既存 2D 弾性波探査データの再処理
坑井データ
基礎試錐「最上川沖」
基礎試錐「本荘沖」
民間坑井「庄内沖 SI-1」
民間坑井「遊佐沖 SI-1」

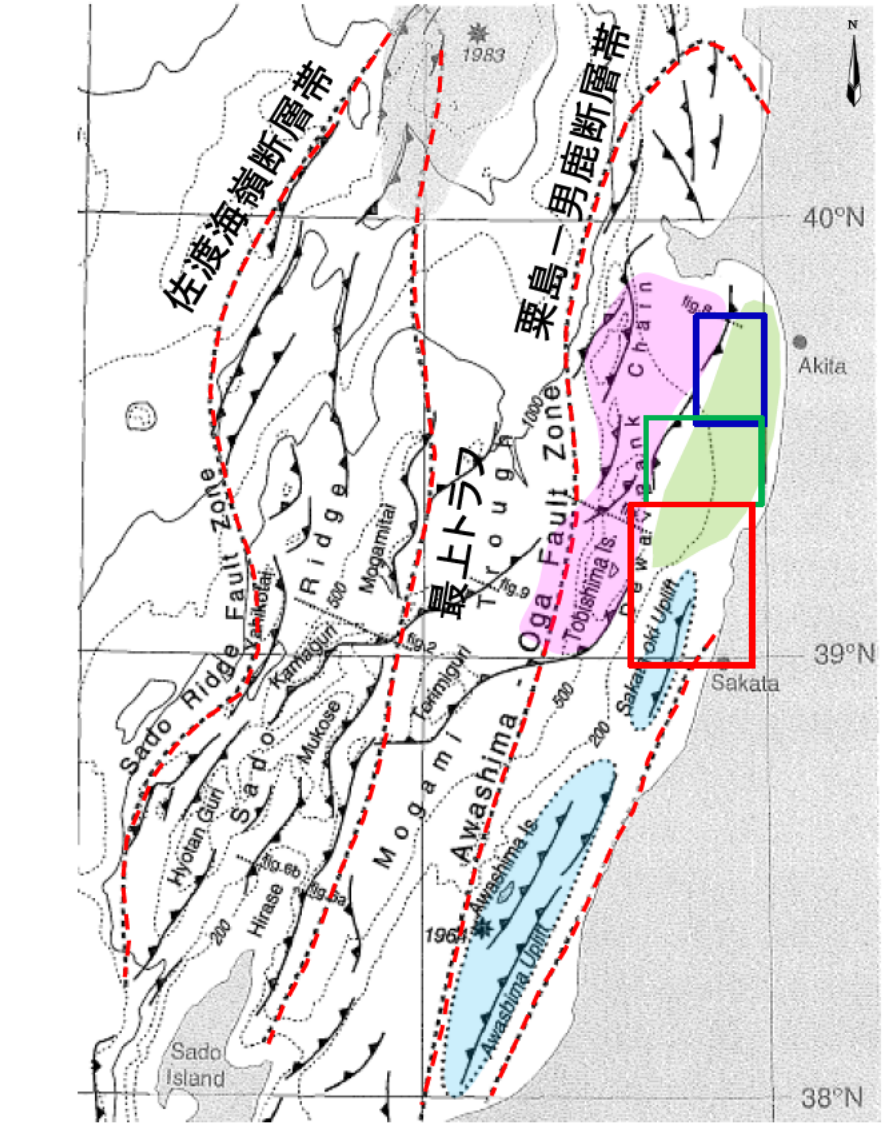
表 4.8-3　主要ソフト一覧

ソフトウェア	実施した作業
『Kingdom』HIS 社	地質構造解析、深度変換速度モデル作成
『Petrel』Schlumberger 社	堆積相解析、貯留可能量評価
『Interactive Petrophysics』Lloyd's Register 社	検層解析

4.8.2　一般地質

(1)　地質概要

本作業の対象範囲は、秋田～山形堆積盆地に位置する。秋田－庄内沖における地質構造を図 4.8-2 に示す。秋田～山形堆積盆地は、新第三紀に形成された堆積盆地であり、その基盤は先第三系花崗岩類から構成される[8)]。堆積盆地内には、層厚 5,000 m 以上の火成岩類や堆積岩類が確認されている[9) 10)]。



飛島－船川隆起帯　飛島海盆と大陸棚沈降帯　栗島－酒田隆起帯

□：2016年度地質解析と貯留適地評価範囲（本荘沖地点）
□：2018年度地質解析と貯留適地評価範囲
□：2020年度地質解析と貯留適地評価範囲

岡村ほか（1998）[11)] に加筆

図 4.8-2　秋田－庄内沖における地質構造

(2) 地質層序

本作業の対象範囲を含む庄内地域では、秋田－山形地域の標準層序に対比される地層名が用いられ、各層準はおおむね同様の岩相が分布する[12)]。秋田～山形地域と庄内地域の層序対比を図 4.8-3 に示す。

本作業の対象範囲の層序は、下位から、門前層（漸新統）、台島層／善宝寺層（下部中新統）、西黒沢層／青沢層（下～中部中新統）、女川層／草薙層（中～上部中新統）、船川層／北俣層（上部中新統～下部鮮新統）、下部天徳寺層／楯山層（上部鮮新統）、上部天徳寺層／丸山層（下部更新統）、笹岡層／観音寺層（上部更新統）、鮎川層－潟西層／庄内層群（上部更新統）が確認されている。以下に各層序の概要を記載する。

門前層（漸新統）

基盤岩を不整合に覆う第三系最下部の地層であり、粗面岩質安山岩、変質輝石安山岩～玄武岩、玄武岩および阿仁合型植物群化石を含む砂礫岩・火砕岩からなる。

台島層／善宝寺層（下部中新統）

下～中部は溶結凝灰岩を伴うデイサイト、凝灰岩および玄武岩からなり、上部は礫岩・凝灰質砂岩・泥岩からなる。

西黒沢層／青沢層（下～中部中新統）

かんらん石玄武岩の溶岩・ハイアロクラスタイトと海成層の泥岩から成り、ドレライトや酸性凝灰岩を伴う。南部の青沢層は主に火山礫岩、凝灰岩からなり、硬質泥岩を狭在する。

女川層／草薙層（中～上部中新統）

硬質泥岩、泥岩および珪質泥岩からなり、酸性凝灰岩や凝灰岩、シルト岩を伴う。

船川層／北俣層（上部中新統～下部鮮新統）

暗灰色～黒色泥岩からなり、酸性凝灰岩や凝灰質砂岩と泥岩の互層を伴う。船川層の上部には「桂根相」と呼ばれる粗粒相が一部の地域で認められる。

下部天徳寺層／楯山層（上部鮮新統）

灰色泥岩、シルト岩泥岩からなり、下部天徳寺層の下部および楯山層の上部では一部砂岩泥岩互層となる。下部天徳寺層には「桂根相」と呼ばれる粗粒相が一部の地域で認められる。

上部天徳寺層／丸山層（下部更新統）

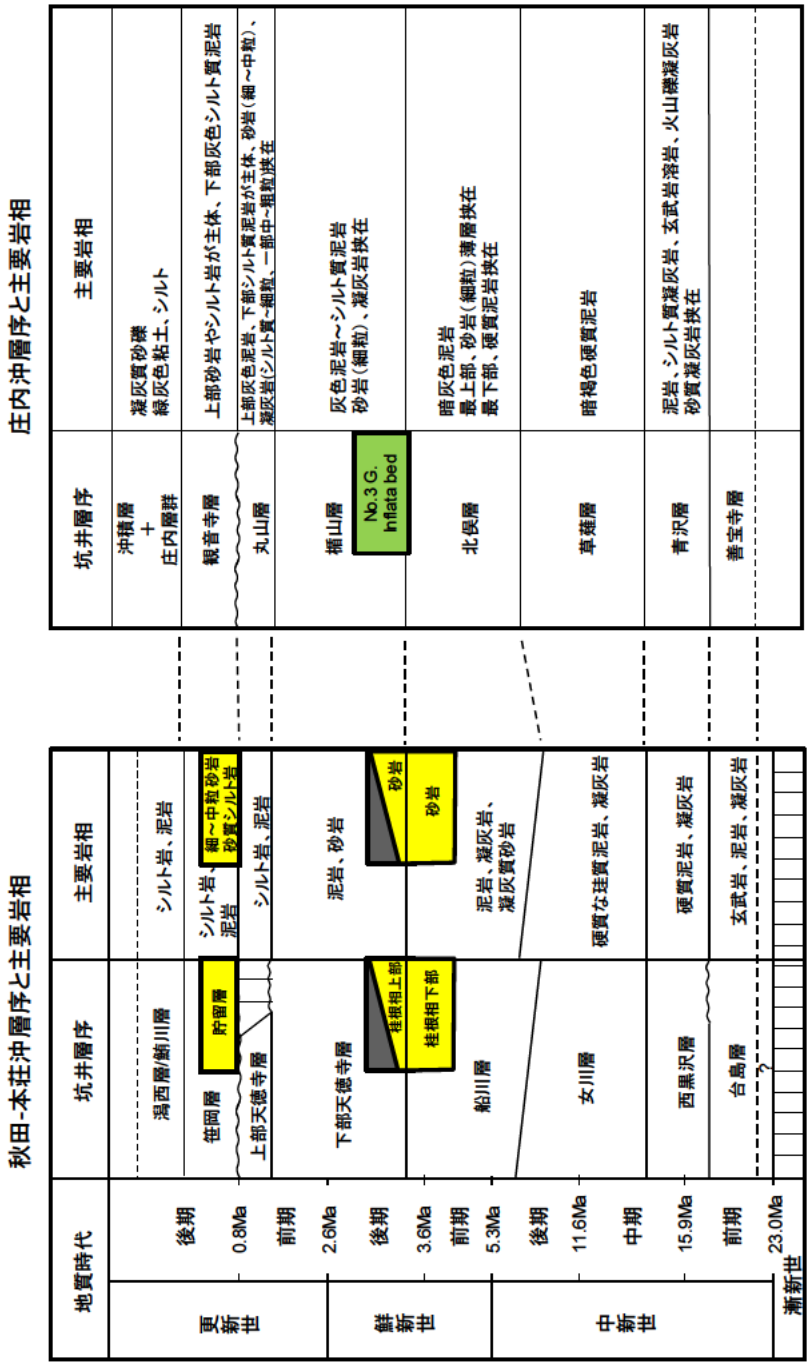
緑灰色ないし灰色泥岩、シルト岩からなり、基底には浮石質凝灰岩や凝灰質砂岩を挟む。海域では本層基底に不整合が明瞭に確認される。丸山層には細～中粒砂岩、凝灰岩の薄層が狭在する。

笹岡層／観音寺層（上部更新統）

青灰色砂質シルト岩および細粒～中粒砂岩からなり、下位層とは不整合で接することが多い。

鮎川層－潟西層／庄内層群（上部更新統）

砂、礫層を主とし、時に泥、シルト層が狭在する。



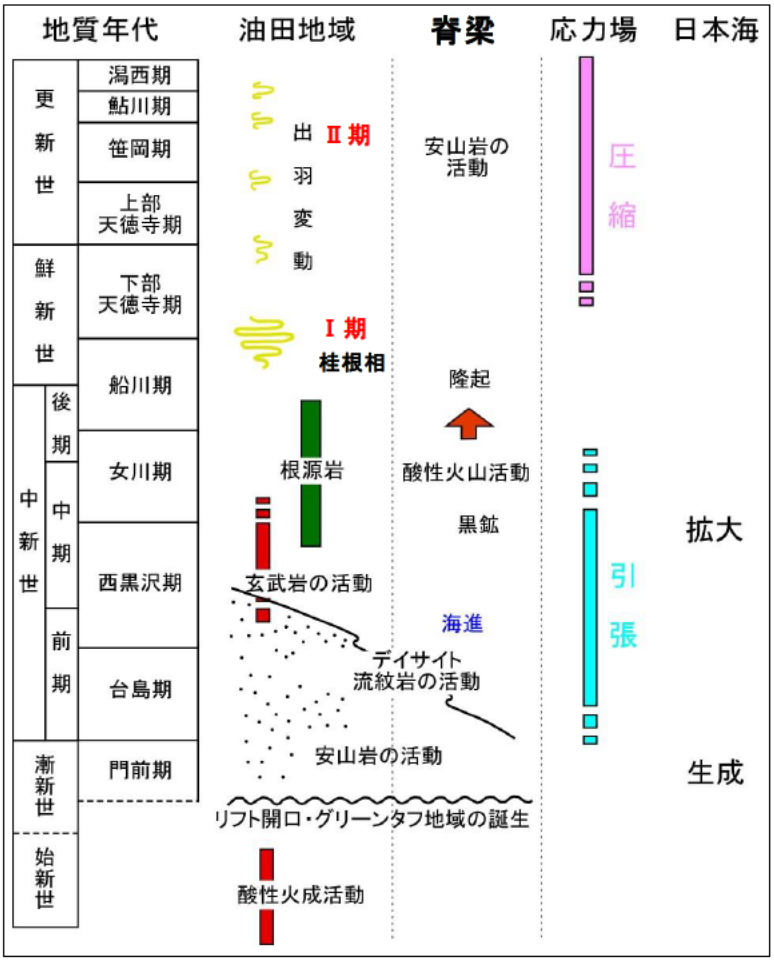
天然ガス鉱業会・大陸棚石油開発協会（1992）[12]および民間坑井資料を基に作成

図 4.8-3　秋田－山形地域の標準層序と庄内地域層序の対比

(3)　地質構造および構造発達史

秋田－庄内沖では、陸棚から沖合にかけて南北方向に伸びる３列の構造帯から構成され、西から佐渡海嶺断層帯（隆起帯）、最上トラフ（沈降帯）、粟島－男鹿断層帯と呼ばれる[8)]（図 4.8-2）。粟島－男鹿断層帯には、飛鳥－船川隆起帯、粟島隆起帯、酒田隆起帯等、顕著な隆起帯が断続的に分布する。飛鳥－船川隆起帯の東側では、飛鳥海盆と大陸棚沈降帯が発達している。

秋田～山形堆積盆地は、東北本州弧の背弧堆積盆地であり、中新世の日本海の生成・拡大に伴う伸張応力テクトニクスと鮮新世～更新世の圧縮応力テクトニクス（出羽変動）で特徴付けられる。この伸張－圧縮テクトニクスは、前期～中期中新世のリフト期、後期中新世のポストリフト期、後期中新世～鮮新世のプレインバージョン期、更新世のインバージョン期の四つのステージに分けられる。東北本州弧の背弧堆積盆地における構造発達史を図 4.8-4 に示す。[8) 13)]



天然ガス鉱業会・大陸棚石油開発協会（1992）[12)] を一部修正

図 4.8-4　東北本州弧の背弧堆積盆地における構造発達史

(4) 活断層および地震活動

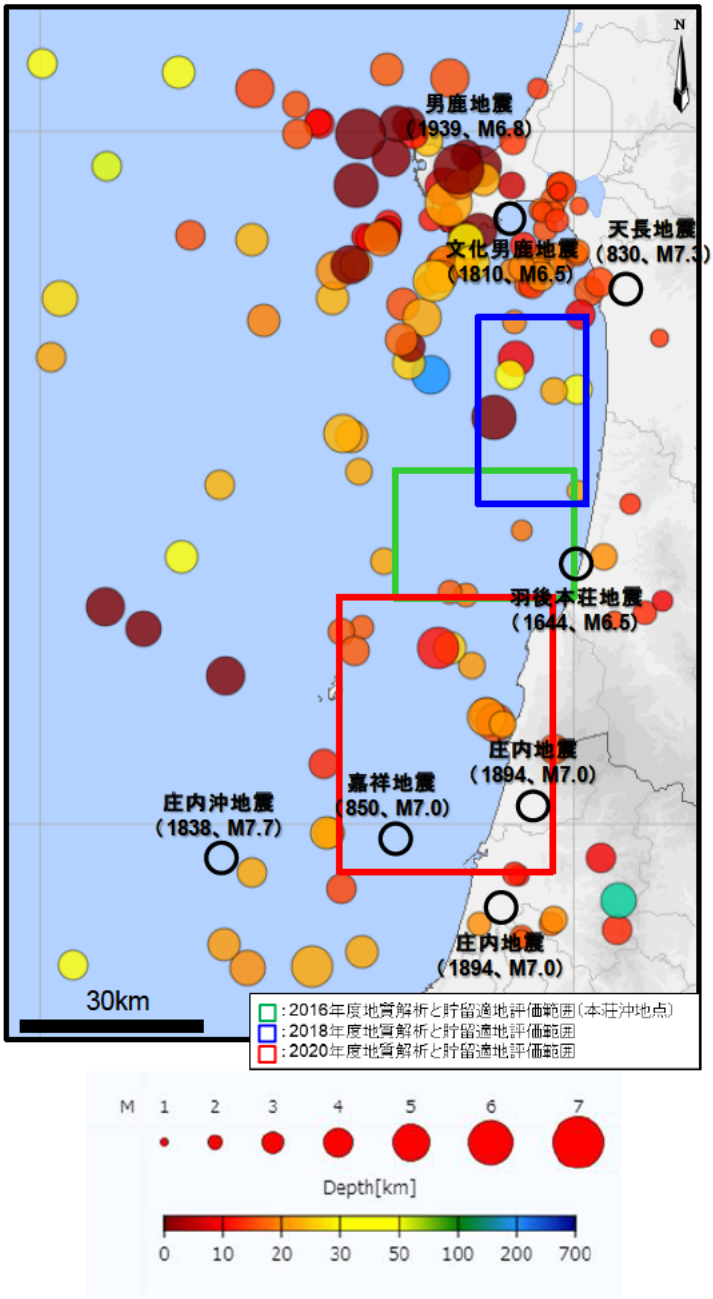
本作業の対象範囲を含む日本海東縁南部の断層の特徴として、比較的規模の小さい活断層が数多く認められ、それらは大陸棚から佐渡海嶺を含む幅 100 km 以上に達する大陸棚斜面に発達する。その中で、規模の大きい断層が集中する断層帯が 2 列認められる[8)11)]。一つは佐渡海嶺のほぼ全域を含む「佐渡海嶺断層帯」、もう一つは粟島から飛島・男鹿半島を経て能代沖に達する「粟島－男鹿断層帯」である（図 4.8-2）。これらの断層帯は海域の地質学的歪集中帯に相当する[11)14)]。

「佐渡海嶺断層帯」の断層の大部分は日本海拡大時に形成された正断層が鮮新世後期以降に逆断層として再活動したもので、現在の断層走向や形態は前期中新世の正断層の形態に大きく規制されている[13)15)]。それらの逆断層周辺では大きな地震の発生は認められないが、佐渡海嶺東縁の逆断層は最上トラフ底を覆う表層付近の堆積物にまで変形を与え、一部では海底段差が認められることから、現在も活動的である可能性が高いと考えられる[11)]。

「粟島－男鹿断層帯」には、粟島隆起帯、酒田隆起帯、飛島－船川隆起帯等、顕著な隆起帯が断続的に分布する。飛鳥－船川隆起帯は酒田隆起帯の北方延長ではなく、最上トラフ内の東北東方向の断層の北東延長上に相当すると考えられる[8)]。飛鳥－船川隆起帯の東側の飛鳥海盆および秋田沖大陸棚には南北走向から北北東－南南西方向の逆断層や褶曲が複数形成されているが、これらの逆断層の大部分は完新世以降に活動した可能性は低く、また地震活動も比較的低調になったと報告されている[11)]。しかし、酒田隆起帯東側の逆断層は第四系を変形させているため、活動的である可能性がある[16)]。

本業務にて実施した海底地形判読および海底地質情報のコンパイル（4.5 節）から、本作業の対象範囲の西側で多数の断層とリニアメントが存在していることが確認できる。その一方で、本作業の対象範囲内では、飛島周辺および対象範囲の中央南部において断層とリニアメントが存在しているものの、対象範囲の大部分は断層とリニアメントが比較的少ない。

秋田－庄内沖における過去 100 年間に発生したマグニチュード 2.0～9.9、震源の深さ 0～200 km の地震分布を図 4.8-5 に示す。本作業の対象範囲内では、マグニチュード 5.0 規模の地震が数点確認されるものの、相対的にみれば地震活動は低調であるといえる。



気象庁震度データベース[17]に加筆
発生日時：1920 年 1 月 1 日 0:00～2021 年 1 月 4 日 23:59、地震の規模：M 2.0～M 9.9、震源の深さ：0～200 km の地震をプロット

図 4.8-5　秋田－庄内沖における震央分布

4.8.3　地質構造解析

(1)　解析ホライズンの設定

平成２７年度委託事業にて実施した地質解析と貯留適地評価[1)]、平成２８年度委託事業にて実施した地質解析と貯留適地評価[2)]、平成３０年度委託事業にて実施した地質解析と貯留適地評価[3)]にて設定したホライズンを基に、本作業では、下位よりグリーンタフ上限ホライズン、桂根相下限ホライズン、No.3 *G. inflata bed* 下限ホライズン、No.3 *G. inflata bed* 上限ホライズン、上部天徳寺層下限／丸山層下限ホライズン、笹岡層下限／観音寺層下限ホライズン、Intra 笹岡／Intra 観音寺ホライズン、海底面ホライズンの 8 ホライズンを設定した。図 4.8-6 に設定したホライズンおよび地質の総括図を示す。

本作業における貯留層は、平成２７年度委託事業にて実施した地質解析と貯留適地評価[1)]、平成２８年度委託事業にて実施した地質解析と貯留適地評価[2)]、平成３０年度委託事業にて実施した地質解析と貯留適地評価[3)]にて設定した貯留層と同様に、桂根相下部相当層、桂根相上部相当層、笹岡層貯留層の三つの貯留層を抽出した。抽出した貯留層層準および遮蔽層層準は、4.8.5 にて説明する。

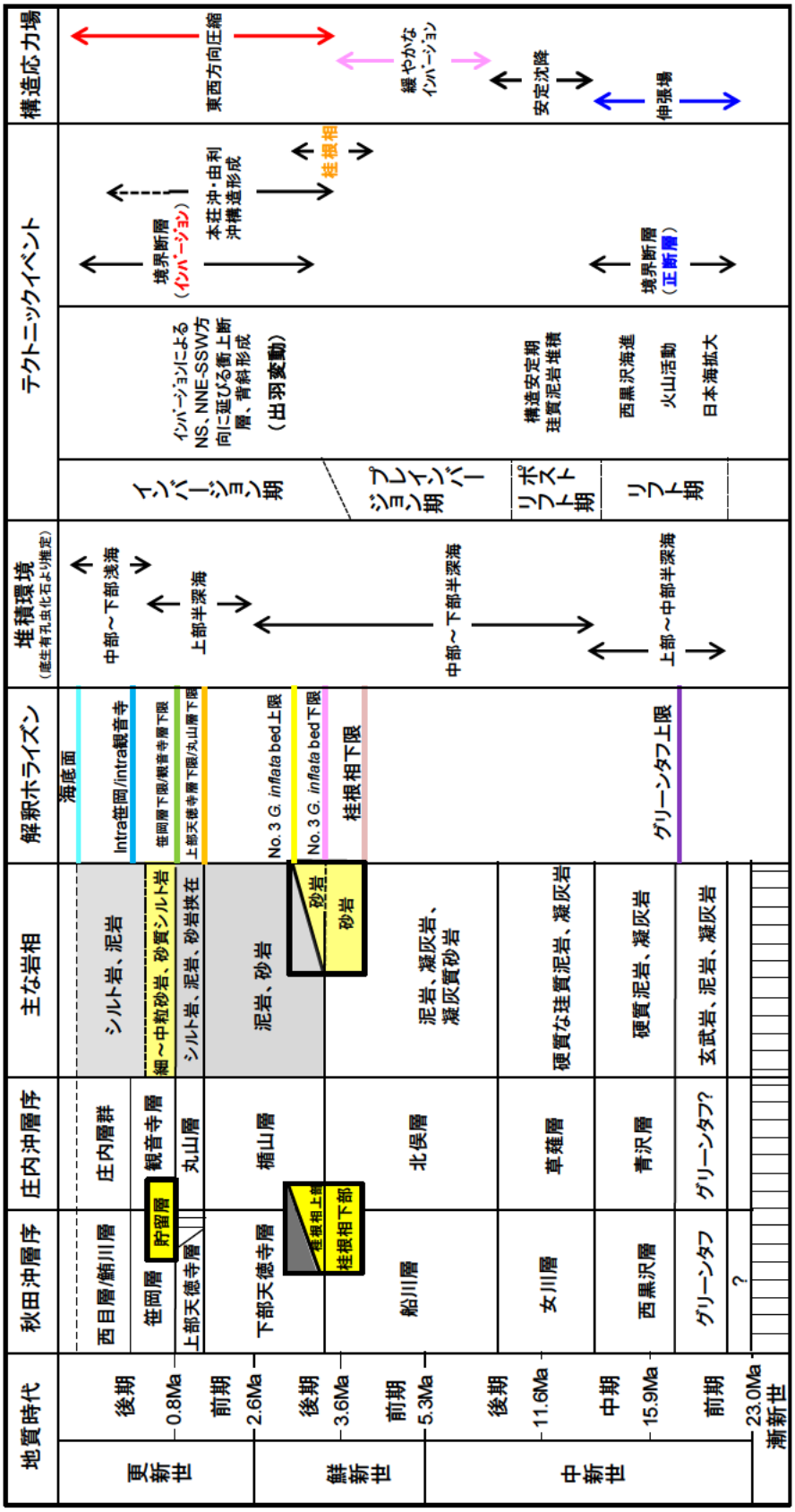


図 4.8-6　設定したホライズンおよび地質総括図

(2) 解析ホライズンの特徴

「(1) 解析ホライズンの設定」にて設定した各ホライズンの追跡は、隣接する平成２８年度委託事業にて実施した地質解析と貯留適地評価[2)]と整合性をとるため、初めに基礎試錐「本荘沖」、民間会社が掘削した庄内沖 SI-1 および遊佐沖 SI-1 をとおり、本作業範囲と平成２８年度委託事業にて実施した地質解析と貯留適地評価範囲[2)]にまたがる任意測線を作成し、ホライズンを追跡した。次に、このホライズン追跡結果を基に基礎物理探査「秋田～山形沖 3D」[4)]、平成２７年度委託事業にて実施した既存 2D 弾性波探査データの再処理[1)]、平成３１年度委託事業にて実施した既存 2D 弾性波探査データの再処理[5)]の弾性波探査データへホライズン追跡を広げた。

① グリーンタフ上限ホライズン

グリーンタフ上限ホライズンは、民間会社が掘削した庄内沖 SI-1 および遊佐沖 SI-1 では確認されていないが、基礎試錐「本荘沖」において確認されている。本作業の対象範囲全域で断続的な反射波パターンで特徴づけられる。本ホライズンより上位はおおむね平行状の反射波で特徴づけられ、堆積層が累積する様子が伺える。一方、本ホライズンより下位は全体的に反射波が乏しく、連続性の悪い反射波パターンが認められる。以上のことから、本ホライズンが音響基盤と考える。

本ホライズンは、本作業の対象範囲中央部（飛鳥海盆）では往復走時約 3～4 秒に確認でき、その上位に中新統～更新統の堆積物が厚く堆積している。本作業の対象範囲西部の飛鳥ー船川隆起帯と南部の酒田沖隆起帯では、本ホライズンは、往復走時約 1～2 秒以浅に確認でき、海底面に露出している場所もある。

② 桂根相下限ホライズン、No.3 *G. inflata bed* 下限ホライズン、No.3 *G. inflata bed* 上限ホライズン

桂根相下限ホライズンは、民間会社が掘削した庄内沖 SI-1 および遊佐沖 SI-1 では確認されていないが、基礎試錐「本荘沖」において確認されている。一方、No.3 *G. inflata bed* 下限ホライズンおよび No.3 *G. inflata bed* 上限ホライズンは、民間会社が掘削した庄内沖 SI-1 および遊佐沖 SI-1 ならびに基礎試錐「本荘沖」において確認されている。桂根相下限ホライズン、No.3 *G. inflata bed* 下限ホライズン、No.3 *G. inflata bed* 上限ホライズンは、本作業の対象範囲南部の酒田隆起帯を除き、大部分の 3D 探査範囲では反射波の連続性が良く、広域に追跡可能である。相対的に強振幅で平行状の反射波パターンが認められるが、一部では相対的に弱振幅の反射波も確認できる。本作業の対象範囲東部の 2D 探査範囲では、反射波の連続性が悪く不明瞭になっており、一部ホライズンの追跡が困難であった。

本作業の対象範囲西部の飛鳥－船川隆起帯と南部の酒田沖隆起帯では、グリーンタフ上限ホライズンが極浅部に確認できることから、本ホライズン区間に相当する地層は非常に薄いもしくは欠如している可能性がある。

③　上部天徳寺層下限／丸山層下限ホライズン

上部天徳寺層／丸山層下限ホライズンは、民間会社が掘削した庄内沖 SI-1 および遊佐沖 SI-1 において確認されている。本作業において新たに追加したホライズンである。本作業の対象範囲南部の酒田隆起帯を除き、おおむね本作業の対象範囲全域で追跡可能である。反射波の連続性は、下位の No.3 *G. inflata bed* 上限ホライズンおよび上位の笹岡層下限/観音寺層下限ホライズンに比べて劣っており、一部で反射波が不明瞭な場所も確認できる。

④　笹岡層下限／観音寺層下限ホライズン

笹岡層下限／観音寺層下限ホライズンは、民間会社が掘削した庄内沖 SI-1 および遊佐沖 SI-1 ならびに基礎試錐「本荘沖」において確認されている。本作業の対象範囲西部の飛鳥－船川隆起帯と南部の酒田沖隆起帯を除いて、おおむね本作業の対象範囲全域で反射波の連続性が良く、ホライズンの追跡が比較的容易であった。本作業の対象範囲北部では、相対的に強振幅で平行状の反射波パターンで特徴付けられ、本作業の対象範囲南部では、相対的に弱振幅の反射波パターンで特徴付けられる。

⑤　Intra 笹岡／Intra 観音寺ホライズン

Intra 笹岡／Intra 観音寺ホライズンは、基礎試錐「本荘沖」では笹岡層中の砂岩層の上限に対比できる。一方、民間会社が掘削した庄内沖 SI-1 および遊佐沖 SI-1 では観音寺層中のカッティング調査や検層データが不足しており、基礎試錐「本荘沖」において確認した砂岩層がどの深度に対比されるかが不明である。本作業では、基礎試錐「本荘沖」周辺の 3D 探査の反射波パターンを参考にし、本作業の対象範囲全域でホライズンの追跡を行った。

下位の笹岡層下限／観音寺層下限ホライズンと同様に、本作業の対象範囲北部では、相対的に強振幅で平行状の反射波パターンで特徴付けられ、本作業の対象範囲南部では、相対的に弱振幅の反射波パターンで特徴付けられる。

⑥　海底面ホライズン

連続性のよい強振幅の正の反射波を追跡した。既存 2D 弾性波探査データの再処理データについては、一部の測線において海底面反射波が取得されていなかったため、反射波の追跡は困難であった。

(3) 断層の解析

弾性波探査断面図上での反射波の明瞭な変位を主な根拠とし、時間構造図やシミラリティアトリビュート解析結果（3D 探査範囲のみ）を用いて、断層解析を行った。シミラリティアトリビュート解析は、周囲のトレースとの相関係数を計算し、隣接するトレースの反射波の相似性に関する弾性波探査アトリビュートを導出する解析である。弾性波探査断面図上では抽出しがたい変位量の小さな断層や微小な反射波の不連続を確認するのに有効な解析手法である。

本断層解析では、遮蔽層層準への影響の有無によって、下部遮蔽層全体を切る断層、それ以外の断層の二つに分類した。海底面ホライズンに達し、上部遮蔽層全体を切る断層は、本断層解析では確認できなかった。なお、平成２８年度委託事業にて実施した地質解析と貯留適地評価[2)]においては、切る層準による断層の分類を行っていないため、本作業では上記二つに分類した断層とは区別して示す。

本作業の対象範囲西部の飛鳥－船川隆起帯東縁部には、相対的に大規模な逆断層が発達する。この逆断層は、飛島－船川隆起帯と飛鳥海盆の境界断層を成しており、西傾斜で連続的に発達する。海底面までは達していないと解釈できるが、変形が海底面におよんでいることから、更新世以降も活動を続ける活構造であると解釈できる。

本作業の対象範囲南東部には、相対的に規模の小さい逆断層が数条発達している。これらの逆断層は北東－南西方向に延び、上盤側で同方向に伸張する背斜構造が発達している。これらの構造はインバージョン期に形成されたものと解釈できる。

(4) 深度変換手法

基礎試錐「最上川沖」、民間会社が掘削した庄内沖 SI-1 および遊佐沖 SI-1、平成２８年度委託事業にて実施した地質解析と貯留適地評価において作成した深度変換速度モデル[2)]、基礎物理探査「秋田～山形沖 3D」[4)]、平成２７年度委託事業にて実施した既存 2D 弾性波探査データの再処理[1)]、平成３１年度委託事業にて実施した既存 2D 弾性波探査データの再処理[5)]の弾性波探査データを用いて、本作業の対象範囲および平成２８年度委託事業にて実施した地質解析と貯留適地評価範囲において、弾性波探査間および坑井間で整合的な深度変換速度モデルを作成した。作成した深度変換速度モデルの平面グリッド間隔は 100 m、時間方向のサンプリング間隔は 4 msec とした。作成した深度変換速度モデルは、SEG-Y ファイルに出力した。

作成した深度変換速度モデルを用いて、時間構造図および弾性波探査断面を深度領域に変換した。

(5)　時間構造図および深度構造図

本調査地点および秋田沖地点の地質構造は、北部では深く、本調査地点南部の酒田隆起帯に向かって浅くなる傾向が認められる。ほぼ南北方向のトレンドを持つ三つの背斜構造（由利沖構造、本荘沖構造、庄内沖構造）が発達している。これらの背斜構造は、構造の西翼部に逆断層が発達しており、西急東緩の構造形態を呈している。

海底面の構造図に関しては、本業務にて実施した海底地形判読および海底地質情報のコンパイル（4.5 節）にて得た海底地形データを利用して作成した。海底面を除く各ホライズンの構造形態について考察する。

①　グリーンタフ上限ホライズン

グリーンタフ上限ホライズンは、北部では深く、本調査地点南部の酒田隆起帯に向かって浅くなる傾向が認められる。ほぼ南北方向のトレンドを持つ三つの背斜構造（由利沖構造、本荘沖構造、庄内沖構造）が発達しており、南あるいは南と北の両方向に向かってプランジしている。これらの背斜構造の西側に逆断層が発達しており、西翼が東翼より急傾斜である非対称褶曲で特徴づけられる。これらの構造は後期鮮新世以降の構造反転によって形成された構造であると解釈できる。

②　桂根相下限ホライズン、No.3 *G. inflata bed* 下限ホライズン、No.3 *G. inflata bed* 上限ホライズン

下位のグリーンタフ上限ホライズンと同様の構造形態が確認できる。酒田沖隆起帯では、桂根相下限ホライズン、No.3 *G. inflata bed* 下限ホライズンは無堆積または削剥により欠如している。一方、No.3 *G. inflata bed* 上限ホライズンは下位の No.3 *G. inflata bed* 下限ホライズンにダウンラップしてせん滅する。三つの背斜構造（由利沖構造、本荘沖構造、庄内沖構造）系列を除いた場所では、海底面下深度 3,000 m 以深に分布する。

③　上部天徳寺層下限／丸山層下限ホライズン

本作業において新たに設定したホライズンであるため、本作業の対象範囲内でのみホライズン解析を実施している。そのため、平成２８年度委託事業にて実施した地質解析と貯留適地評価範囲および平成３０年度委託事業にて実施した地質解析と貯留適地評価範囲における構造形態は不明である。本作業の対象範囲における構造形態は、下位の桂根相下限ホライズン、No.3 *G. inflata bed* 下限ホライズン、No.3 *G. inflata bed* 上限ホライズンと同様の構造形態が確認できる。

④　笹岡層下限／観音寺層下限ホライズン

下位の桂根相下限ホライズン、No.3 *G. inflata bed* 下限ホライズン、No.3 *G. inflata bed* 上限ホライズンと同様の構造形態が確認できる。三つの背斜構造（由利沖構造、本荘沖構造、庄内沖構造）が発達するが、下位のホライズンの構造と比較して背斜構造の軸部が開いた構造を呈する。本作業の対象範囲、2016 年度地質解析と貯留適地評価範囲および 2018 年度地質解析と貯留適地評価範囲の全域において平均海水面下深度 1,000～3,000 m の間に分布する。

⑤　Intra 笹岡／Intra 観音寺ホライズン

下位の笹岡層下限／観音寺層下限ホライズンと同様の構造形態が確認できる。三つの背斜構造（由利沖構造、本荘沖構造、庄内沖構造）が発達するが、No.3 *G. inflata bed* 上限ホライズンよりも下位のホライズンの構造と比較して背斜構造の軸部が開いた構造を呈する。本作業の対象範囲、2016 年度地質解析と貯留適地評価範囲および 2018 年度地質解析と貯留適地評価範囲の全域において平均海水面下深度 400～1,400 m の間に分布する。由利沖構造の一部および酒田沖隆起帯の北端部では、海底面下深度 750 m 以浅に分布する。

(6)　層厚分布および構造発達史

「(5) 時間構造図および深度構造図」にて作成した時間構造図および深度構造図を元に、等時間層厚線図および等層厚線図を作成した。

民間会社が掘削した庄内沖 SI-1 を通る東西方向の断面を用いて、各ホライズンをフラットニングすることにより各ホライズンにおいて推定される構造発達史を考察した。

①　グリーンタフ上限ホライズン～桂根相下限ホライズン層準

平成２８年度委託事業にて実施した地質解析と貯留適地評価範囲および平成３０年度委託事業にて実施した地質解析と貯留適地評価範囲において、おおむね 1,000 m 前後の層厚を有する。酒田沖隆起帯に向かって薄くなり、300 m 前後の層厚となる。

ポストリフト期の安定的な沈降かつ堆積する堆積場で堆積したと考える。酒田沖隆起帯では堆積層が薄いため、この段階において酒田沖隆起帯はすでに構造的高まりであったと推定できる。由利沖構造から本荘沖構造にかけて層厚がほとんど変わっていないことから、この段階において由利沖構造および本荘沖構造は形成されていないと推定できる。

②　桂根相下限ホライズン～No.3 *G. inflata bed* 下限ホライズン層準

本作業の対象範囲、平成２８年度委託事業にて実施した地質解析と貯留適地評価範囲および平成３０年度委託事業にて実施した地質解析と貯留適地評価範囲の全域において、お

おむね 600～1,000 m の層厚を有する。酒田沖隆起帯に向かって薄くなり、200 m 前後の層厚となる。

本荘沖構造系列では、600～800 m の層厚を有し、飛鳥海盆内に分布する同層準（層厚 400 m 程度）よりもやや厚い傾向がある。これは、本層準が堆積する段階で、酒田沖隆起帯が構造的な高まりとしてすでに存在するが、本荘沖構造はまだ形成されていないことを示唆すると考える。同様の特徴は由利沖構造でも確認できる。鮮新世以降の構造反転により、陸域が隆起した影響で陸域に近い由利沖構造においても本層準の層厚が薄くなっている。

本作業の対象範囲の東部では緩やかな構造反転に転じ、それにともなって逆断層の形成が始まり、衝上断層が形成された。陸側では隆起が進み、堆積の中心は西の海側へ移動した。

③　No.3 *G. inflata bed* 下限ホライズン～No.3 *G. inflata bed* 上限ホライズン層準

本層準の下位の桂根相下限ホライズン～No.3 *G. inflata bed* 下限ホライズン層準と同様の層厚分布を有し、飛鳥海盆では層厚が厚く 500 m 前後の層厚を、本荘沖構造および由利沖構造では層厚が薄く 200 m 以下の層厚となる。酒田沖隆起帯に向かって薄化し、せん滅する。

④　No.3 *G. inflata bed* 上限ホライズン～笹岡層下限／観音寺層下限ホライズン層準

本作業の対象範囲、2016 年度地質解析と貯留適地評価範囲および 2018 年度地質解析と貯留適地評価範囲の全域において、大部分で 500～1,000 m の層厚を有する。由利沖構造、本荘沖構造、庄内沖構造等の構造の高まりでは薄化し、約 100～500 m の層厚となる。これらの構造の存在は堆積層の層厚に影響を与えている。酒田沖隆起帯の東部および庄内沖構造の北部ならびに南部のプランジ部では、本層準の層厚が厚くなる。

⑤　笹岡層下限／観音寺層下限ホライズン～Intra 笹岡／Intra 観音寺ホライズン層準

2018 年度地質解析と貯留適地評価範囲の北部では、最大で 1,300 m 以上の層厚を有する。由利沖構造および本荘沖構造においても 800 m 前後の層厚を有するが、庄内沖構造では 300 m 以下の層厚となり薄化する。

構造反転がさらに強くなり、陸側では隆起の進行し、堆積場の中心が西の海側へ進行した。これにより、東側ほど層厚が薄く、西側ほど層厚が厚くなり、現在の構造形態がおおむね完成された。

⑥　Intra 笹岡／Intra 観音寺ホライズン～海底面ホライズン層準

本作業の対象範囲、2016 年度地質解析と貯留適地評価範囲および 2018 年度地質解析と貯留適地評価範囲の全域において、おおむね 800～1,200 m の層厚を有する。庄内沖構造に

おいては薄化し、500 m 以下の層厚となる。酒田沖隆起帯では削剥により部分的に欠如する。

4.8.4　堆積相解析

貯留層層準、遮蔽層層準の認定およびその区間における堆積物の分布形態の把握と堆積システムを推定するために、基礎物理探査「秋田～山形沖 3D」[4)]、平成２７年度委託事業にて実施した既存 2D 弾性波探査データの再処理[1)]、平成３１年度委託事業にて実施した既存 2D 弾性波探査データの再処理[5)]の弾性波探査データ、基礎試錐「最上川沖」[6)]、基礎試錐「本荘沖」[7)]、民間会社が掘削した庄内沖 SI-1、遊佐沖 SI-1 の坑井データを用いて堆積相解析を実施した。堆積相解析の対象区間は、グリーンタフ上限ホライズンから海底面ホライズンの間の 7 区間とした。サイスミックファシス区分および推定される堆積環境は、平成２７年度委託事業にて実施した地質解析と貯留適地評価[1)]、平成２８年度委託事業にて実施した地質解析と貯留適地評価[2)]、平成３０年度委託事業にて実施した地質解析と貯留適地評価[3)]を参照した。

(1)　堆積相解析手法

「4.8.3　地質構造解析」にて解析したホライズンを用いて、各ホライズン間について時間層厚分布、振幅分布、周波数成分の分布（スペクトラルデコンポジション）の各アトリビュートマップを作成した。あわせて、反射波列の形状（サイスミックファシス）の区分および反射波列端のラッピングパターンをマッピングした。作成した各種マップと坑井における岩相および検層データを統合し、総合的な堆積システムおよび砕屑物の供給系を解釈した。

図 4.8-7 に堆積相解析のフローチャートを示す。

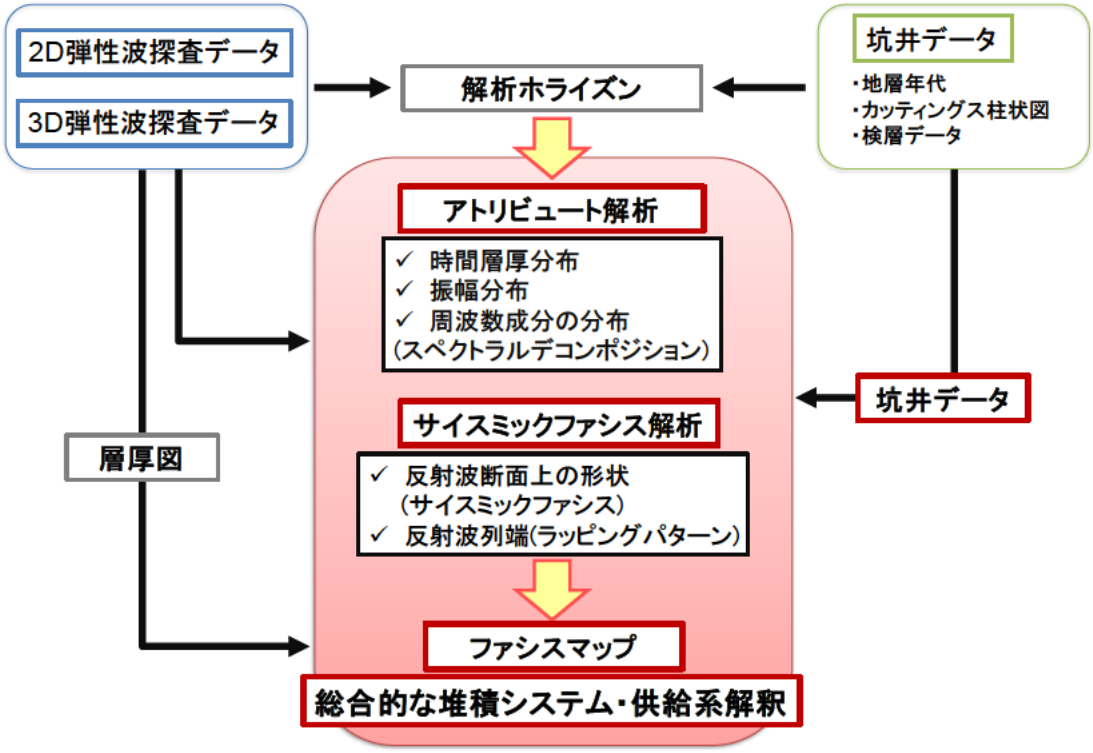


図 4.8-7　堆積相解析フローチャート

(2)　サイスミックファシス区分

平成２７年度委託事業にて実施した地質解析と貯留適地評価[1)]、平成２８年度委託事業にて実施した地質解析と貯留適地評価[2)]、平成３０年度委託事業にて実施した地質解析と貯留適地評価[3)]にて区分したサイスミックファシス区分を参照し、本作業で使用した 2D 探査データおよび 3D 探査データにおける反射波パターン等から八つのサイスミックファシスを区分した。

以下に、区分した八つのサイスミックファシスの特徴および推定される堆積環境について記述する。ファシス A からファシス G までは平成２７年度委託事業にて実施した地質解析と貯留適地評価[1)]、平成２８年度委託事業にて実施した地質解析と貯留適地評価[2)]、平成３０年度委託事業にて実施した地質解析と貯留適地評価[3)]にて区分したサイスミックファシスであり、ファシス H は本作業において新たに追加したサイスミックファシスである。図 4.8-8 にサイスミックファシス区分図を示す。

1) ファシス A

弾性波探査断面において、反射波が比較的強い振幅を示し、垂直方向および水平方向に不連続な部分を含み、下に凸の形状を示す。

デルタシステムの中でも沖合のプロデルタに発達するチャネルの集合体を示すと解釈した。

本作業の対象範囲内の坑井では確認されていないが、基礎試錐「本荘沖」では粗粒な岩相が確認されており、上方細粒化するパターンと上方粗粒化するパターンの繰り返しが確認されている。

ファシス A は、笹岡層下限／観音寺層下限ホライズン～Intra 笹岡／Intra 観音寺ホライズン区間に主に確認できる。

2) ファシス B

弾性波探査断面において、反射波が中程度～強い振幅を示し、垂直方向および水平方向に不連続な部分を含み、下に凸の形状を示す。

海底扇状地システムにおける中部扇状地の上流部に発達する分岐状チャネルを示すと解釈した。

ファシス B は、本作業の対象範囲内では確認できない。2016 年度地質解析と貯留適地評価範囲および 2018 年度地質解析と貯留適地評価範囲のグリーンタフ上限ホライズン～笹岡層下限／観音寺層下限ホライズン区間に確認できる。

3) ファシス C

弾性波探査断面において、反射波が中程度～強い振幅を示し、水平に連続～不連続で、一部反射波が下面にぶつかるようなレンズ状～マウンド状の形状を示す。

デルタシステムにおけるプロデルタにおいてチャネルベルトが構造的底部に到着した後に広がって堆積したローブ中央部を示すと解釈した。

民間会社が掘削した遊佐沖 SI-1 におけるガンマ線検層および検層解析から得た Vsh では上方粗粒化の傾向を示し、砂岩のスタックを示唆している。

ファシス C は、笹岡層下限／観音寺層下限ホライズン～Intra 笹岡／Intra 観音寺ホライズン区間に主に確認できる。

4) ファシス D

弾性波探査断面において、反射波が中程度～強い振幅を示し、平行で連続的な形状を示す。

海底扇状地システムにおいてファシス B よりも沖合の中部扇状地のシート状タービダイトが発達するローブ中央部を示すと解釈した。

基礎試錐「本荘沖」および基礎試錐「由利沖中部」の桂根相区間では、砂岩優勢互層の岩相が確認されている。民間会社が掘削した遊佐沖 SI-1 の上部天徳寺層下限／丸山層下限ホライズン～笹岡層下限／観音寺層下限ホライズン区間では、砂

岩および凝灰岩を狭在する泥岩の岩相を示す。

ファシス D は、グリーンタフ上限ホライズン～笹岡層下限／観音寺層下限ホライズン区間に主に確認できる。

5) ファシス E

弾性波探査断面において、反射波が相対的に弱い振幅を示し、平行で連続的な形状を示す。

笹岡層区間ではデルタシステムにおけるプロデルタのローブ縁辺～末端部を示し、桂根相区間では海底扇状地システムにおける外側扇状地のローブ縁辺～末端部を示すと解釈した。

民間会社が掘削した遊佐沖 SI-1 のグリーンタフ上限ホライズン～桂根相下限ホライズン区間では、泥岩主体の岩相を示す。

ファシス E は、グリーンタフ上限ホライズン～海底面ホライズン区間の全区間に確認できる。

6) ファシス F

弾性波探査断面において、反射波が弱い振幅を示し、不連続で混沌とした形状を示す。

泥質岩が発達するような斜面～海盆底を示すと解釈した。

民間会社が掘削した遊佐沖 SI-1 の桂根相下限ホライズン～No.3 *G. inflata bed* 下限ホライズン区間では、泥岩主体の岩相を示す。

ファシス F は、グリーンタフ上限ホライズン～海底面ホライズン区間の全区間に確認できる。

7) ファシス G

弾性波探査断面において、反射波が弱い振幅を示し、比較的不連続な形状を示す中に、一部強い振幅を示し、下に凸の形状を示す。

プロデルタの斜面および斜面に分布するチャネルを示すと解釈した。

ファシス G は、本作業の対象範囲内では確認できない。2018 年度地質解析と貯留適地評価範囲の笹岡層下限／観音寺層下限ホライズン～Intra 笹岡／Intra 観音寺ホライズン区間に確認できる。

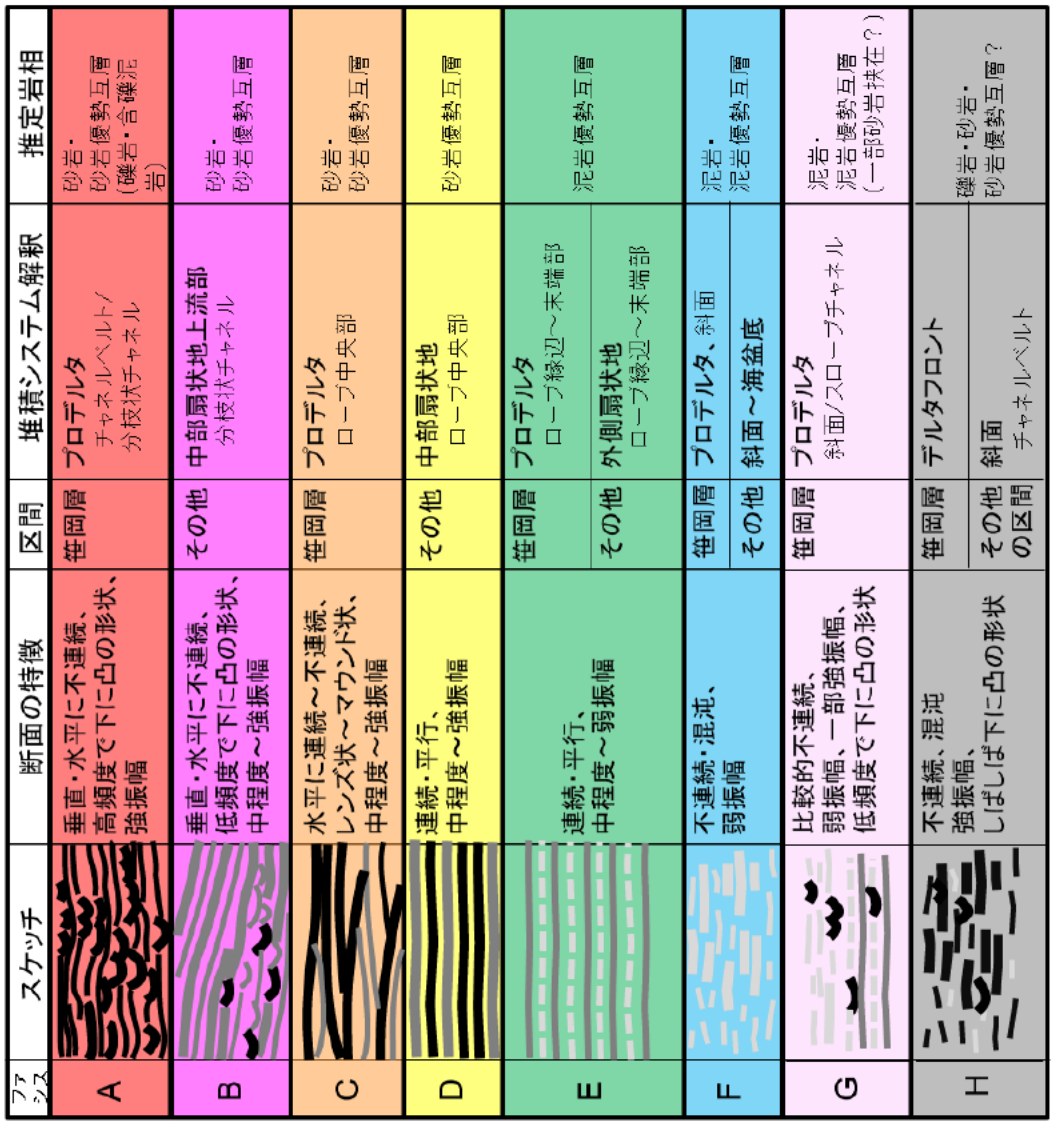
8) ファシス H

弾性波探査において、比較的強い振幅を示し、垂直方向および水平方向に不連続な部分を含み、下に凸の形状を示す。ファシス A と異なり、反射波の周波数が高いという特徴がある。

海底扇状地システムではサブベーズン間の高まりを乗り越える小規模なチャネルの集合体、デルタシステムではプロデルタに発達するチャネルの集合体もしくはデルタフロントの分岐状チャネルを示すと解釈した。

民間会社が掘削した庄内沖 SI-1 では、凝灰岩もしくは砂岩、礫岩と泥岩との互層の岩相を示す。

ファシス H は、グリーンタフ上限ホライズン～海底面ホライズン区間の全区間に、主に 3D 探査範囲の南東端および 2D 探査範囲に広く確認できる。



ファシス	スケッチ	断面の特徴	区間	堆積システム解釈	推定岩相
A		垂直・水平に不連続、高頻度で下に凸の形状、強振幅	笹岡層	プロデルタ チャネルベルト/分枝状チャネル	砂岩・ 砂岩優勢互層 (礫岩・含礫泥岩)
B		垂直・水平に不連続、低頻度で下に凸の形状、中程度～強振幅	その他	中部扇状地上流部 分枝状チャネル	砂岩・ 砂岩優勢互層
C		水平に連続～不連続、レンズ状～マウンド状、中程度～強振幅	笹岡層	プロデルタ ローブ中央部	砂岩・ 砂岩優勢互層
D		連続・平行、中程度～強振幅	その他	中部扇状地 ローブ中央部	砂岩優勢互層
E		連続・平行、中程度～弱振幅	笹岡層	プロデルタ ローブ縁辺～末端部	泥岩優勢互層
			その他	外側扇状地 ローブ縁辺～末端部	
F		不連続・混沌、弱振幅	笹岡層	プロデルタ、斜面	泥岩・ 泥岩優勢互層
			その他	斜面～海盆底	
G		比較的不連続、弱振幅、一部強振幅、低頻度で下に凸の形状	笹岡層	プロデルタ 斜面/スローブチャネル	泥岩・ 泥岩優勢互層 (一部砂岩挟在？)
H		不連続、混沌 強振幅、 しばしば下に凸の形状	笹岡層	デルタフロント	礫岩・砂岩・ 砂岩優勢互層？
			その他の区間	斜面 チャネルベルト	

図 4.8-8　サイスミックファシス区分図

(3) 堆積システムおよび供給系の解釈結果

各ホライズン間について作成した時間層厚分布、振幅分布、周波数成分の分布（スペクトラルデコンポジション）の各種アトリビュートマップ、反射波列の形状（サイスミックファシス）の区分および反射波列端のラッピングパターンをマッピングしたサイスミックファシスマップ、坑井における岩相および検層データ、微化石に基づく古環境推定結果を用いて、総合的な堆積システムおよび砕屑物の供給系を解釈した。

① グリーンタフ上限ホライズン～桂根相下限ホライズン区間

本作業の対象範囲の中央北部にはファシス D が分布し、その周辺にはファシス D を取り囲むようにファシス E、さらに南西の方へファシス F が分布し南西へオンラップする。これらの特徴から、本作業の対象範囲の中央北部ではタービダイトからなるローブが比較的厚く分布する可能性があると解釈できる。本作業の対象範囲の南部に向かって層厚が薄くなるに従い、ファシス E、ファシス F と分布が変化することから、砕屑物の供給方向は北もしくは東と推定できる。ファシス D からファシス E にかけてローブの縁辺～末端となり細粒化していると解釈できる。

本作業の対象範囲の東部には、比較的層厚の薄いエリアにファシス H が広く分布している。民間会社が掘削した庄内沖 SI-1 の岩相および検層データの特徴から、構造的な高まりからファシス H の分布域にかけて小規模な複数のチャネルおよび小規模なローブが分布すると解釈できる。本作業の対象範囲の南東部には、ファシス E が分布する。

② 桂根相下限ホライズン～No.3 *G. inflata bed* 下限ホライズン区間

本作業の対象範囲の北部～中央部にかけてファシス D が広く分布する。このファシス D は、東へオンラップ、西にダウンラップする。下位のグリーンタフ上限ホライズン～桂根相下限ホライズン区間と同様に、本作業の対象範囲の南西に向かいファシス E、ファシス F と変化するが、下位区間よりもファシス D は堆積盆内に広く分布する。砕屑物の供給は主に北もしくは東からと解釈でき、ファシス D からファシス E にかけてローブの縁辺～末端となり細粒化していると解釈できる。

本作業の対象範囲の東部では、ファシス H が南北方向に三つのエリアに分かれて分布する。民間会社が掘削した庄内沖 SI-1 の岩相および検層データの特徴から、サブベーズン間の構造的な高まりを通る小規模なチャネルやその溢れだしが分布すると解釈できる。

③ No.3 *G. inflata bed* 下限ホライズン～No.3 *G. inflata bed* 上限ホライズン区間

本作業の対象範囲の北東部と中央北部にファシス D が部分的に分布し、このファシス D

を囲むようにファシス E が分布する。ファシス D は西へダウンラップし、西方へファシス E、ファシス F へと変化する。砕屑物の供給は北もしくは東からと解釈でき、ファシス D からそれを囲むように分布するファシス E にかけてローブの縁辺～末端となり細粒化していると解釈できる。

本作業の対象範囲の東部では、下位の桂根相下限ホライズン～No.3 *G. inflata bed* 下限ホライズン区間と同様に、ファシス H が南北方向に三つのエリアに分かれて分布する。下位区間と同様に、サブベーズン間の構造的な高まりを通る小規模なチャネルやその溢れだしが分布すると解釈できる。

④　No.3 *G. inflata bed* 上限ホライズン～上部天徳寺層下限／丸山層下限ホライズン区間

本作業の対象範囲内に広くファシス E およびファシス F が分布する。ファシス D は本作業の対象範囲の中央部および南東部に部分的に分布する。本作業の対象範囲の中央東部にはファシス H が分布する。本区間の大部分でファシス E およびファシス F が分布することから、泥岩主体の岩相を示す区間であると解釈できる。

⑤　上部天徳寺層下限／丸山層下限ホライズン～笹岡層下限／観音寺層下限ホライズン区間

下位の No.3 *G. inflata bed* 上限ホライズン～上部天徳寺層下限／丸山層下限ホライズン区間と同様に、本作業の対象範囲内に広くファシス E およびファシス F が分布する。ファシス D は本作業の対象範囲の中央部および南東部に部分的に分布する。本作業の対象範囲の中央東部ではファシス H が分布する。本区間の大部分でファシス E およびファシス F が分布することから、下位区間と同様に泥岩主体の岩相を示す区間であると解釈できる。

⑥　笹岡層下限／観音寺層下限ホライズン～Intra 笹岡／Intra 観音寺ホライズン区間

本作業の対象範囲の北部～中央部にかけて広くファシス C が分布し、2016 年度地質解析と貯留適地評価範囲からローブ中心部が連続して分布すると解釈できる。ファシス C は本作業の対象範囲の南東部にも広く分布し、スロープ～陸棚環境のプロデルタのローブが分布すると解釈できる。砕屑物の供給は東からと解釈できる。

本作業の対象範囲の中央東部にはファシス H が分布する。民間会社が掘削した庄内沖 SI-1 の岩相および検層データの特徴から、陸棚環境において東方から供給されるプロデルタのローブ～沿岸環境のデルタフロントの分布を示していると解釈できる。

⑦　Intra 笹岡／Intra 観音寺ホライズン～海底面ホライズン区間

本作業の対象範囲内に広くファシス E およびファシス F が分布する。本作業の対象範囲

の南東部にはファシス H が分布する。本区間の大部分でファシス E およびファシス F が分布することから、泥岩主体の岩相を示す区間であると解釈できる。

4.8.5　貯留層層準と遮蔽層層準の設定

本調査の対象範囲周辺の坑井情報および「4.8.4　堆積相解析」の結果から根相下部相当層、桂根相上部相当層、笹岡層貯留層の三つの貯留層を抽出した。表 4.8-4 に本作業における貯留層層準と遮蔽層層準の組み合わせを示す。本作業における貯留層は、平成２７年度委託事業にて実施した地質解析と貯留適地評価[1)]、平成２８年度委託事業にて実施した地質解析と貯留適地評価[2)]、平成３０年度委託事業にて実施した地質解析と貯留適地評価[3)]にて設定した貯留層と同様である。

表 4.8-4　本作業における貯留層層準と遮蔽層層準

	貯留層層準	遮蔽層層準
笹岡層 貯留層	・笹岡層下部／観音寺層下部（笹岡層下限／観音寺層下限ホライズン～Intra 笹岡／Intra 観音寺ホライズン）	・笹岡層上部／観音寺層上部および鮎川層・潟西層/庄内層群（Intra 笹岡／Intra 観音寺ホライズン～海底面ホライズン）
桂根相上部 相当層	・下部天徳寺層下部／楯山層下部（No.3 G. inflata bed 上限ホライズン～No.3 G. inflata bed 下限ホライズン）	・上部天徳寺層／丸山層（上部天徳寺層／丸山層下限ホライズン～笹岡層／観音寺層下限ホライズン）
桂根相下部 相当層	・船川層上部／北俣層上部（桂根相下限ホライズン～No.3 G. inflata bed 下限ホライズン）	・下部天徳寺層上部／楯山層上部（No.3 G. inflata bed 上限ホライズン～上部天徳寺層／丸山層下限ホライズン）

4.8.6　貯留可能量の算定

(1)　CO_2 超臨界深度

基礎試錐「最上川沖」[6)]、民間会社が掘削した庄内沖 SI-1、遊佐沖 SI-1 の坑井データを用いて、RITE（2006）[18)] に示されている CO_2 超臨界状態の条件（温度 31.1℃以上、圧力 7.38 MPa 以上）を満たす深度の検討を行った。

三つの坑井における地層温度と深度のクロスプロットから、地温勾配は 4.4℃/100 m と推定した。推定した地温勾配を用いて、CO_2 超臨界状態の温度条件である 31.1℃以上に達するのは、海底面下深度約 750 m 以深と推定した。

三つの坑井における掘削中の泥水比重から求めた地層圧力、ワイヤーライン検層時にリピートフォーメーションテスター（Repeat Formation Tester、以下、「RFT」と称する。）およびリークオフテスト（Leak-off Test、以下、「LOT」と称する。）から得られた地層圧力と深度のクロスプロットから、CO_2 超臨界状態の圧力条件である 7.38 MPa 以上に達するのは、平均海水面下深度約 750 m 以深と推定した。

三つの坑井における地層温度と深度および地層圧力と深度の検討から、本作業の対象範囲において CO_2 超臨界状態の条件（温度 31.1℃以上、圧力 7.38 MPa 以上）を満たす深度は、海底面下深度約 750 m 以深と推定し、貯留層区間の上限深度を海底面下深度 750 m とした。

(2)　CO_2 貯留可能量の算定式

CO_2 貯留可能量の算定には、以下に示す RITE（2006）[18)] の式を用いた。貯留率は構造タイプの区域では 50%、緩傾斜部（同斜構造）タイプでは 25%の値を使用した。超臨界 CO_2 飽和率は、中間値の 50%を使用した。

$$CO_2\text{貯留可能量} = Sf \times A \times h \times \Phi \times Sg / BgCO_2 \times \rho$$

Sf：貯留率（構造タイプ：50%、緩傾斜部タイプ：25%）

A：貯留可能域の面積（km^2）

h：有効層厚（m）

Φ：孔隙率（%）

Sg：超臨界 CO_2 飽和率（20%、50%、80%）

$BgCO_2$：CO_2 の容積係数（約 0.003 m^3 / m^3）

ρ：CO_2 密度（標準状態で 1.976 kg / m^3）

本作業では Petrel ソフトウェア上において、貯留層上限および貯留層下限の深度構造図を用いた全岩容積（Gross Rock Volume）の算出が可能であることから、上記式の一部を改

編した以下の計算式を用いて CO_2 貯留可能量を算定した。堆積体の出現率は、貯留層層準における堆積相解析において設定したプロポーショナルスライスのうち貯留層ファシスが認定できた区間の割合である。坑井における堆積体の N/G は、本作業の対象範囲周辺に位置する基礎試錐「本荘沖」の値を使用した。孔隙率は、堆積体の出現する深度（堆積体が出現する中間部分の深度）と検層解析から得た圧密曲線を用いて算出した。

CO_2 貯留可能量 = Sf × GRV × N/G × Φ × Sg / $BgCO_2$ × ρ

GRV：Gross Rock Volume（km^3）

N/G：貯留層層準の N/G = 堆積体の出現率 × 坑井における堆積体の N/G

(3) 貯留可能域の検討および貯留可能量評価

ここまでの作業結果から以下の五つの条件を満たす貯留可能域を検討し、桂根相下部相当層、桂根相上部相当層、笹岡層貯留層の三つの貯留層を抽出した。貯留可能量は、桂根相下部相当層で約 5.3 億 t、桂根相上部相当層で約 2.3 億 t、笹岡層貯留層で約 16.0 億 t と算定した。表 4.8-5 に貯留可能量評価の検討結果を示す。

1) CO_2 超臨界状態の条件を満たす海底面下深度約 750 m～CO_2 貯留層下限深度である海底面下深度 3,000 m を満たす深度範囲。
2) 遮蔽層層準を切る断層から 2.5 km 離した範囲。
3) 地層傾斜が 30° 未満の範囲。
4) 堆積相解析結果から貯留層ファシスと推定したファシス A、ファシス B、ファシス C、ファシス D、ファシス H が分布する範囲。
5) 堆積相解析結果から遮蔽層ファシスと推定したファシス E、ファシス F が分布し、層厚が 20 m 以上の範囲。

表 4.8-5　本作業の対象範囲における貯留可能量評価の検討結果

	貯留層			貯留可能量	遮蔽層		地質構造	
	深度（m）	グロス層厚（m）	孔隙率（%）	（百万トン-CO_2）	層厚（m）	遮蔽能力（堆積環境・岩相）	構造安定度（断層など）	地層傾斜（度）
笹岡層貯留層	750～1,100	600～1,000	30～35	1,600	700～1,000	半深海成泥岩	断層は近傍に明瞭に確認されない。	20度未満
桂根相上部相当層	750～2,600	200～500	26～35	230	200～800	半深海成泥岩	断層は近傍に明瞭に確認されない。	5～20
桂根相下部相当層	750～3,000	200～1,000	20～30	530	200～800	半深海成泥岩	・近傍に船川隆起帯衝上断層がある。 ・断層は近傍に明瞭に確認されない。	10～25

① 桂根相下部相当層

各貯留可能域の貯留可能量を表 4.8-6 に示す。四つの貯留可能域を抽出し、四つの貯留可

能域合計で約 5.3 億 t の貯留可能量を算定した。

表 4.8-6　本作業の対象範囲における桂根相下部相当層の貯留可能量

貯留可能域	貯留率	GRV（km^3）	貯留層層準のN/G	孔隙率（%）	超臨界CO_2飽和率	CO_2容積係数	CO_2密度（kg / m^3）	貯留可能量（億トン）
①	緩傾斜タイプ：25%	91.6 （面積：184.1 km^2）	0 22 （堆積体の出現率：3/8） （坑井のN/G：0 58）	20～22	50%	0 003	1 976	3 3
②		9.0 （面積：38.8 km^2）	0 58 （堆積体の出現率：8/8） （坑井のN/G：0 58）	30	50%	0 003	1 976	1 3
③		2.2 （面積：6.0 km^2）	0 29 （堆積体の出現率：4/8） （坑井のN/G：0 58）	28	50%	0 003	1 976	0 2
④		3.7 （面積：18.1 km^2）	0 58 （堆積体の出現率：8/8） （坑井のN/G：0 58）	25 5	50%	0 003	1 976	0 5

②　桂根相上部相当層

各貯留可能域の貯留可能量を表 4.8-7 に示す。三つの貯留可能域を抽出し、三つの貯留可能域合計で約 2.3 億 t の貯留可能量を算定した。

表 4.8-7　本作業の対象範囲における桂根相上部相当層の貯留可能量

貯留可能域	貯留率	GRV（km^3）	貯留層層準のN/G	孔隙率（%）	超臨界CO_2飽和率	CO_2容積係数	CO_2密度（kg / m^3）	貯留可能量（億トン）
①	緩傾斜タイプ：25%	25.9 （面積：77.4 km^2）	0.10～0.39 （堆積体の出現率：1/8～4/8） （坑井のN/G：0.77）	26～28	50%	0 003	1.976	1.7
②		1.5 （面積：8.7 km^2）	0.77 （堆積体の出現率：8/8） （坑井のN/G：0.77）	35	50%	0 003	1.976	0 3
③		1.3 （面積：9.4 km^2）	0.77 （堆積体の出現率：8/8） （坑井のN/G：0.77）	34	50%	0 003	1.976	0 3

③　笹岡層貯留層

各貯留可能域の貯留可能量を表 4.8-8 に示す。一つの貯留可能域を抽出し、約 16.0 億 t の貯留可能量を算定した。

表 4.8-8　本作業の対象範囲における笹岡層貯留層の貯留可能量

貯留可能域	貯留率	GRV（km^3）	貯留層層準のN/G	孔隙率（%）	超臨界CO_2飽和率	CO_2容積係数	CO_2密度（kg / m^3）	貯留可能量（億トン）
①	緩傾斜タイプ：25%	158.6 （面積：180.7 km^2）	0.13～0.38 （堆積体の出現率：2/11～6/11） （坑井のN/G：0.7）	30～35	50%	0 003	1.976	16.0

(4) 本荘沖地点および秋田沖地点における貯留可能域および貯留可能量

本作業と平成２８年度委託事業にて実施した地質解析と貯留適地評価[2)]および平成３０年度委託事業にて実施した地質解析と貯留適地評価[3)]において抽出した貯留可能域および算定した貯留可能量を統合した。統合した貯留可能量を表 4.8-9 に示す。本荘沖地点および秋田沖地点における貯留可能量は、桂根相下部相当層で約 10.3 億 t、桂根相上部相当層で約 4.8 億 t、笹岡層相当層で約 55.6 億 t と算定した。

表 4.8-9　本荘沖地点および秋田沖地点における貯留可能量

	貯留可能量（億 t）			
	平成２８年度 委託事業範囲	平成３０年度 委託事業範囲	本作業範囲	合計
笹岡層貯留層	25.3	14.3	16.0	55.6
桂根相上部相当層	0.3	2.2	2.3	4.8
桂根相下部相当層	2.3	2.7	5.3	10.3

4.8.7 調査井の検討

ここまでの作業結果から本作業の対象範囲における調査井の掘削位置を検討した。調査井の掘削位置は、本作業の対象範囲北方に位置し、本荘沖構造の南部延長部に位置する。桂根相下部相当層、桂根相上部相当層、笹岡層貯留層の三つの貯留層の貯留可能域が分布し、調査井はそれらを掘り抜く掘削深度約 3,200 m の垂直井とした。調査井掘削位置を表 4.8-10 に示し、予想層序を表 4.8-11 に示す。以下に、本調査井の選定理由および特記事項を記載する。

1) 本調査井掘削位置には、堆積相解析から、桂根相下部相当層および桂根相上部相当層ではファシス D、笹岡層貯留層ではファシス C の貯留層ファシスの分布が推定できる。本調査井を掘削することで、各貯留層における貯留ファシスの貯留層性状を確認することができる。
2) 本調査井掘削位置では、地質構造が比較的浅く、垂直深度約 3,200 m の坑井で三つの貯留層の貯留層性状を確認することができる。
3) 本調査井掘削位置は、離岸距離が約 5 km 程度であり、比較的水深が浅いため、掘削費用の抑制が期待できる。
4) 本調査井掘削位置の周辺には 2D 探査データしか存在しないため、本調査井掘削

位置を含む本荘沖構造の南部延長部および東部にかけて新たな 3D 探査が必要である。

表 4.8-10　調査井掘削位置

掘削深度	3,200 mTVDSS
X 座標（Easting）	402,534 m
Y 座標（Northing）	4,352,935 m

準拠楕円体：WGS84、投影法：UTM 54

表 4.8-11　予想層序

出現予想ホライズン	出現予想深度（mTVDSS）
海底面ホライズン	85
Intra 笹岡／Intra 観音寺ホライズン	905
笹岡層下限／観音寺層下限ホライズン	1,490
上部天徳寺層／丸山層下限ホライズン	1,695
No.3 *G. inflata bed* 上限ホライズン	1,895
No.3 *G. inflata bed* 下限ホライズン	2,175
桂根相下限ホライズン	3,135

【参考文献】

1) 日本 CCS 調査(株)、“平成２７年度二酸化炭素貯留適地調査事業成果報告書”（2017）
2) 日本 CCS 調査(株)、“平成２８年度二酸化炭素貯留適地調査事業成果報告書”（2018）
3) 日本 CCS 調査(株)、“平成３０年度二酸化炭素貯留適地調査事業委託業務成果報告書”（2020）
4) (独)石油天然ガス・金属鉱物資源機構、“平成 26 年度 国内石油・天然ガス基礎調査 基礎物理探査「秋田～山形沖 3D」データ処理報告書”（2016）
5) 日本 CCS 調査(株)、“平成３１年度二酸化炭素貯留適地調査事業委託業務成果報告書”（2021）
6) 石油公団、“昭和 58 年度 国内石油・天然ガス基礎調査 基礎試錐「最上川沖」調査報告書”（1984）
7) 石油公団、“平成 5 年度 国内石油・天然ガス基礎調査 基礎試錐「本荘沖」調査報告書”

（1994）
8) 岡村行信、森尻理恵、佐藤幹夫、“秋田西方海底地質図及び同説明書”、地質調査所、36（1996）
9) 佐藤比呂志、吉田武義、岩崎貴哉、佐藤時幸、池田安隆、海野徳仁、“後期新生代における東北日本中部背弧域の地殻構造発達－最近の地殻構造探査を中心として－”、石油技術協会、69（2）、145-154（2004）
10) 佐藤時幸、山崎誠、千代延俊、“秋田県の地質”、東北地質調査協会誌「大地」、50、70-83（2009）
11) 岡村行信、倉本真一、佐藤幹夫、“日本海東縁海域の活構造およびその地震との関係”、地質調査所月報、49（1）、1-18（1998）
12) 天然ガス鉱業会・大陸棚石油開発協会、“日本の石油・天然ガス資源（改訂版）”、53-80（1992）
13) 岡村行信、中村光一、“反転テクトニクス（inversion tectonics）あるいは盆地反転（basin inversion）－日本海東縁における例を交えて－”、地球科学、49、302-305（1995）
14) 岡村行信、“日本海東縁の地質構造と震源断層との関係”、地質学雑誌、116（11）、582-591（2010）
15) 岡村行信、“日本海東縁のインバージョンテクトニクス”、石油技術協会誌、65（1）、40-47（2000）
16) 堀川晴央、岡村行信、村上文敏、“酒田沖隆起帯における浅層音波探査”、活断層・古地震研究報告、11、83-96（2011）
17) 気象庁震度データベース、
https://www.data.jma.go.jp/svd/eqdb/data/shindo/index.html
18) (公財)地球環境産業技術研究機構、“平成 17 年度 二酸化炭素固定化・有効利用技術等対策事業 二酸化炭素地中貯留技術研究会月成果報告書”（2006）

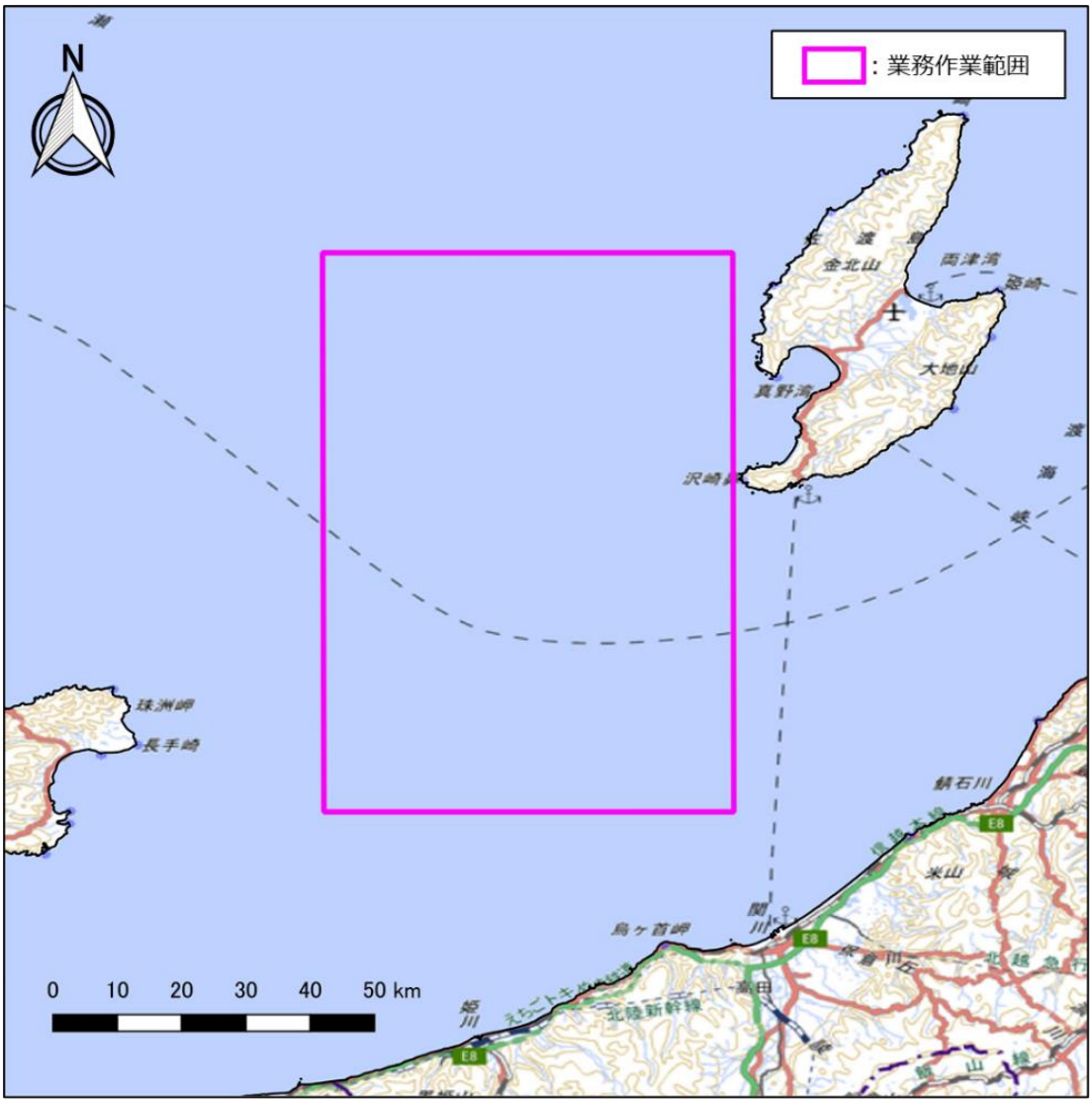
4.9　地質解析と貯留適地評価（佐渡西方沖）

佐渡島の西方および能登半島東方の海域を調査対象範囲として、基礎物理探査 3D 探査データ、基礎試錐データを用いて、地質解析と貯留適地評価を実施した。

4.9.1　概要

(1)　調査範囲

本作業の対象範囲を図 4.9-1 に示す。本調査範囲は佐渡島の西方および能登半島の東方に位置しており、離岸距離は新潟県糸魚川市から北の沖合に約 35 km、新潟県佐渡市沢崎鼻から西の沖合に約 1 km である。作業範囲の面積は約 4,700 km² であり、水深は約 10～2,100 m である。



注）国土地理院「電子地形図（タイル）」に加筆

図 4.9-1　本作業の対象範囲

(2) 使用データ

調査範囲では、基礎物理探査による 3D 弾性波探査が実施されおり、その後、基礎試錐による試掘井が掘削されている。本作業では、以下の弾性波探査データおよび坑井データを使用した。

1) 平成 13 年度基礎物理探査「佐渡沖南西」[1)]
2) 平成 20 年度基礎物理探査「佐渡西方 3D」[2)]
3) 平成 22 年度基礎物理探査「能登東方 3D」[3)]
4) 昭和 56 年度基礎試錐「直江津沖北」[4)]
5) 平成 15 年度基礎試錐「佐渡南西沖 S」「佐渡南西沖 D」[5)]
6) 平成 23～25 年度基礎試錐「上越海丘」[6)]

4.9.2 一般地質

(1) 地質概要

新潟地域の海成新第三系から下部更新統は、複雑な褶曲構造、側方岩相変化も大きく、当該地層が確認されている新潟の各地域で異なる地層名が与えられている。後述の(2)地質層序では基礎試錐「佐渡南西沖 S」「佐渡南西沖 D」の結果に基づいて地層層序を記載している。

解析対象範囲である佐渡西方沖は深海域であり、十分な地質調査が行われておらず、新第三系基盤の地質構造は不明である。一方、新潟県およびその周辺地域の陸域では、地質学的大構造は 3 方向の構造で構成されている（図 4.9-2）。これらを構成する三つの構造線は、南北方向の糸魚川－静岡構造線、北西－南東方向の柏崎－千葉構造線および北北東－南南西方向の新発田－小出構造線である。糸魚川－静岡構造線と柏崎－千葉構造線との間はフォッサマグナと呼ばれている[7)]。フォッサマグナは、本州の中央部を南北に横断する大構造帯であり、地質学的な西南日本と東北日本の境界とされている。中新世以降に堆積し、その後著しい変形を被った厚い海底火山噴出物・海成砕屑岩類が分布している。

解析対象範囲の海域は、富山トラフに位置している。現在の富山トラフの堆積環境は、深海チャネル－自然堤防－海底扇状地システムであり、富山深海長谷が深海チャネルとなっている。富山平野から供給される堆積物は混濁流により富山トラフおよびより北方の大和海盆へと運ばれている[8)]。

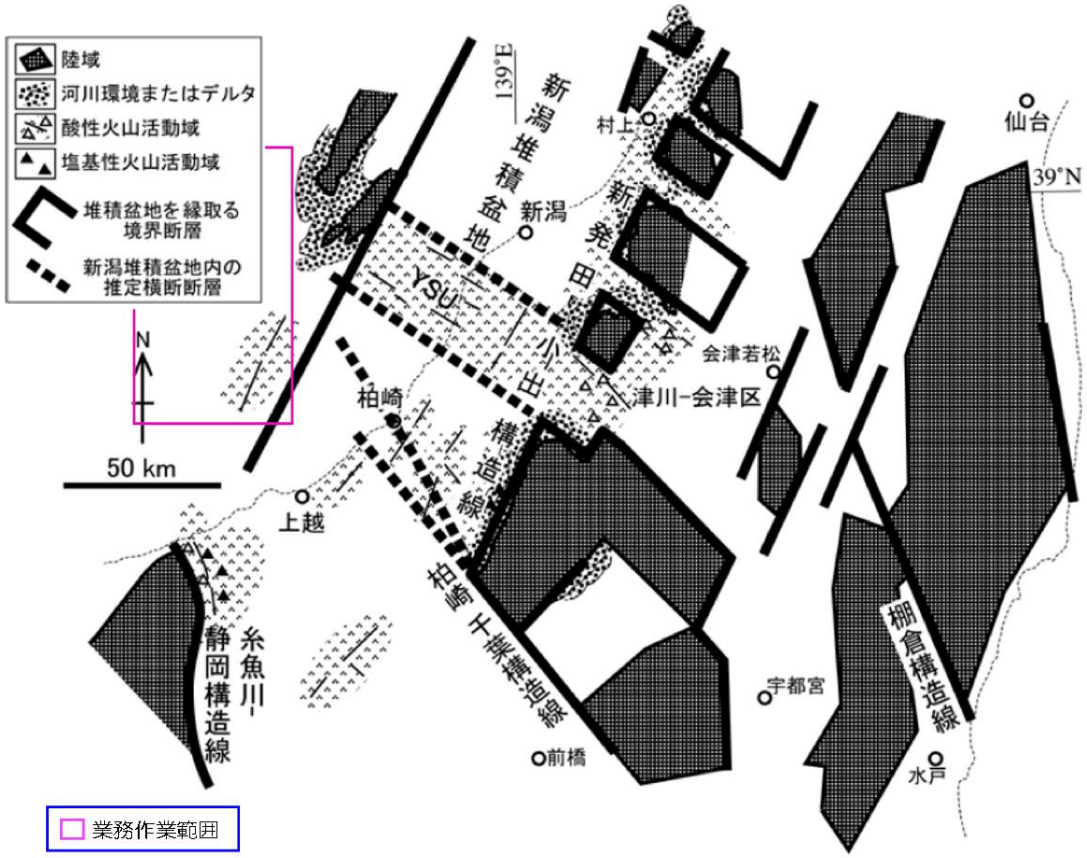


図 2　新潟県およびその周辺地域の中新世初期～中期（16–15 Ma，津川－七谷期）の古地理図
小林・立石（1992）の第 4 図に堆積盆地を縁取る境界断層などを加筆。地質調査所（1992）の地質図をもとに改変。YSU：弥彦－三条隆起帯

注）豊島（2014）[7] に加筆

図 4.9-2　新潟県周辺の主要構造線

(2)　地質層序

調査範囲の層序は、基礎試錐「佐渡南西沖 S」「佐渡南西沖 D」の結果に基づき、下位よりグリーンタフ（音響基盤）、七谷層、下部寺泊層、上部寺泊層、椎谷層、西山層、灰爪層からなる。

(3)　地質構造および構造発達史

新潟陸域における新第三系基盤の地質構造については、(1)地質概要で記述したように、新潟県およびその周辺地域の地質学的大構造は 3 方向の構造で構成されている。これらを構成する三つの構造線については、「新版 地学事典」[9] では以下のように記載されている。

糸魚川－静岡構造線は、フォッサマグナ西縁に位置し、本州中央部をほぼ南北に横切る大断層である。新潟県糸魚川市から太平洋側の静岡市付近に達する。南部地域では西側が東側に押し上げた衝上断層、北部地域では主に東側が西側に押し上げた衝上断層で、中部地域で

は横ずれ断層である。主要な活動時期は中新世であるが、断層に沿う活動は現在も続いている部分が多く、活断層としての北端は長野県白馬村付近である。

柏崎－千葉構造線は、新潟県柏崎市付近から、千葉県千葉市付近へと抜けると想定されるおおむね北西－南東方向の構造線である。北部では米山－谷川岳構造線、南部では関東構造線および利根川構造線にほぼ相当する。本構造線を境として北東・南西部で地形地質上の相違がみられるとされているが詳細は不明である。

新発田－小出構造線は、新第三系～第四系からなる新潟堆積盆と下部中新統以下の古期岩層よりなる東側の山地との境界部に沿う北北東－南南西方向の構造線である。

新第三系～第四系におけるもっとも顕著な構造としては、海岸線に平行な北北東－南南西方向（部分的に南北、北東－南西方向）の軸を持つ褶曲構造が複数列並走している（図 4.9-3）。これらの構造は一般に「新潟方向」と呼ばれ、同方向の新発田－小出構造線との関連が考えられている[10)]。

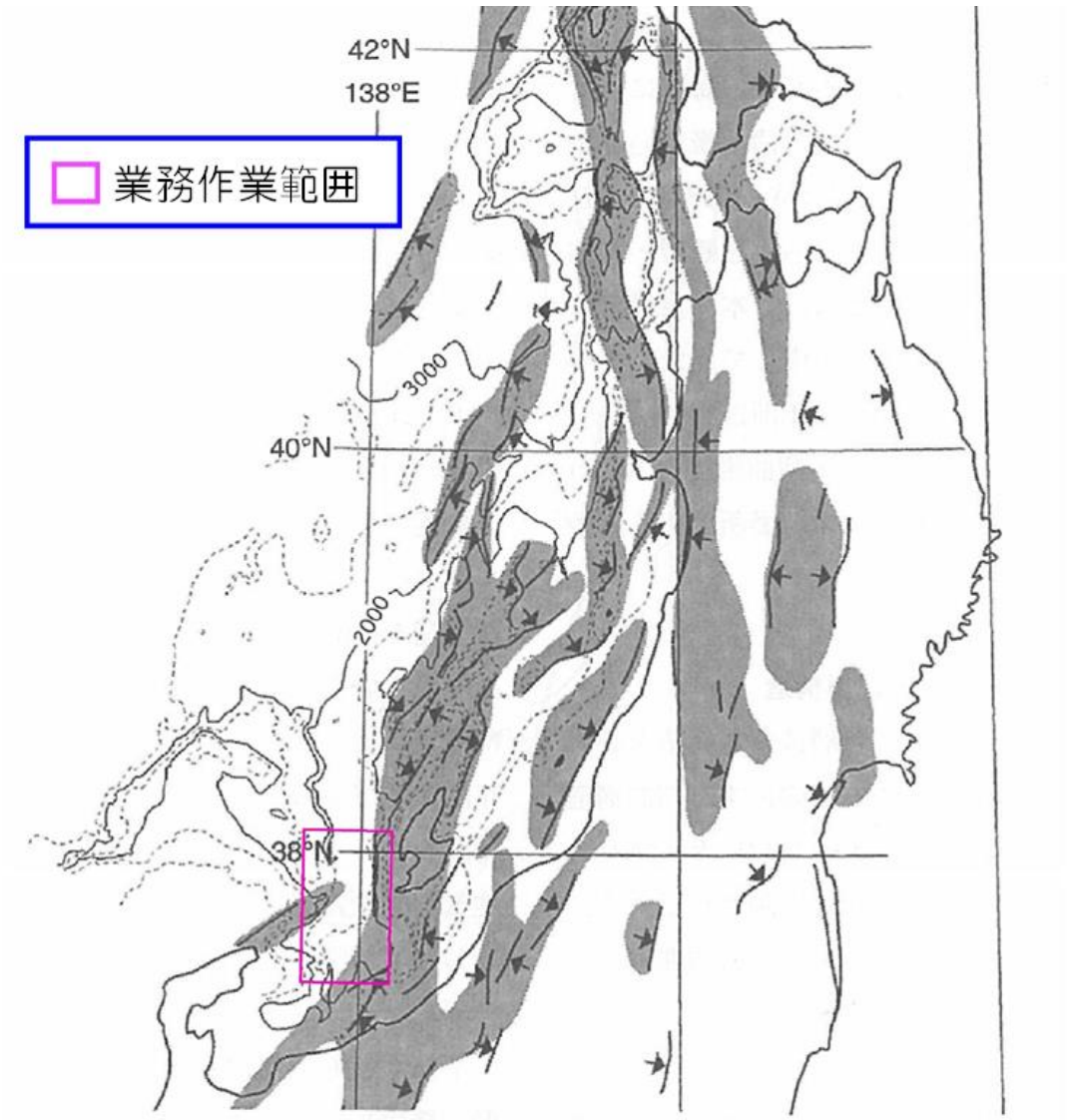
その他の構造として、新第三系の分布から主要な北北東－南南西方向と直交する北西－南東方向の構造が指摘されており、弥彦－三条隆起帯と呼ばれている[11)]。この隆起帯はグリーンタフからなり、この隆起帯により新潟新第三系堆積盆は南北に大きく二分され、隆起帯の縁には北西－南東方向の断層が推定されている。豊島（2014）[7)]によれば、北西－南東方向の断層は新潟方向（北北東－南南西方向）の褶曲、断層の形態や成長を規制していると考えられている（前述の図 4.9-2）。

本作業の対象範囲である佐渡西方沖海域は、富山トラフに位置している。日本海の拡大は 18 Ma 以前に開始し、西南日本弧は 18 Ma から 16 Ma 間に時計回りに 40° 程度回転し現在の位置に移動したと考えられている[12)]。

富山トラフは西南日本弧と東北日本弧の境界にあり、グリーンタフ形成時（～17 Ma）には基盤の大規模な水平移動および回転を受けたと考えられ、富山トラフ剪断帯と呼んでいる。このように富山トラフ深部のグリーンタフは横ずれによる剪断変形を受けている可能性があるが、上位の七谷層（下限が約 17 Ma）堆積時以降の地層は、おおむね現在の位置で堆積した地層で、水平移動、回転による大規模な横ずれ剪断変形を受けていない可能性が高い（図 4.9-4）[13)]。

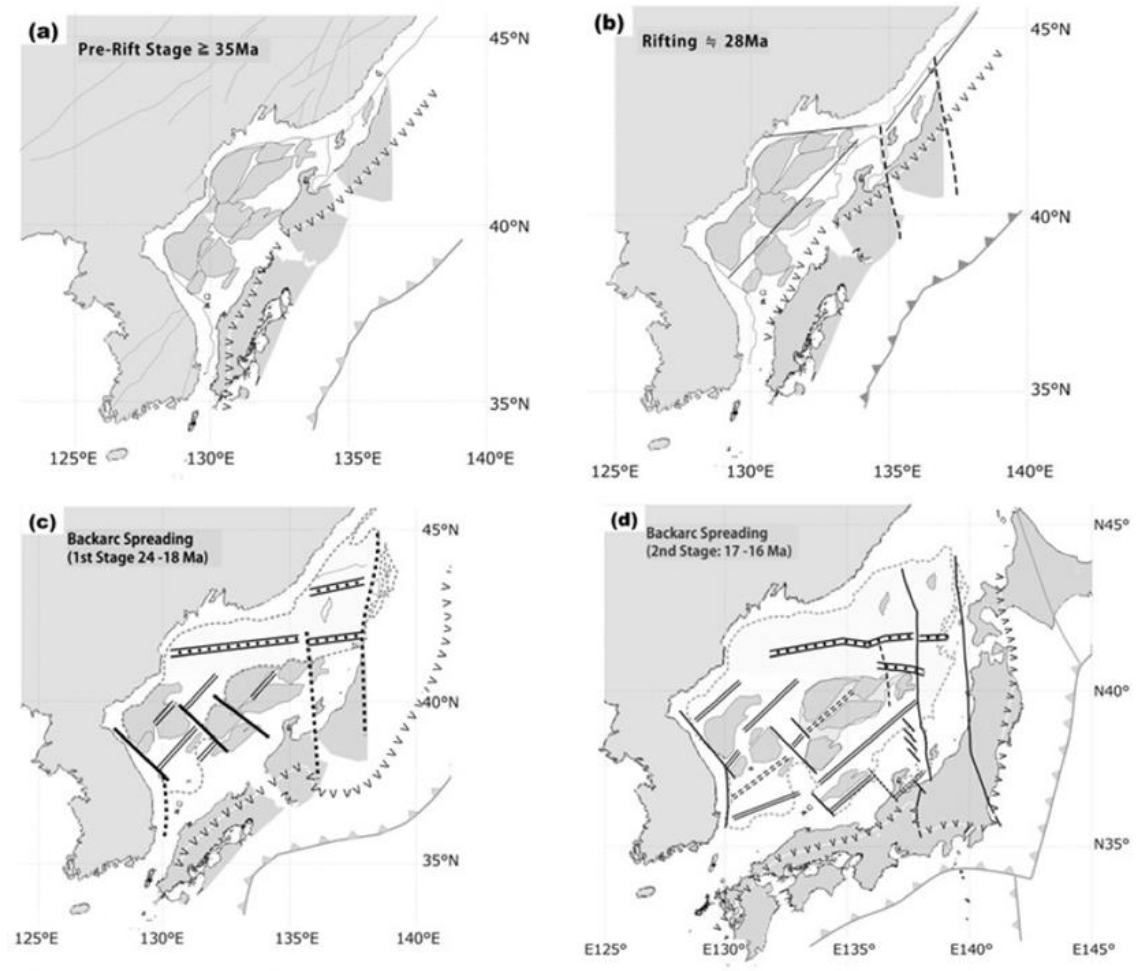
約 16 Ma の日本海拡大終了に伴い、グリーンタフの形成は終了したが、引張場は継続し、リフト堆積盆が形成され七谷層下部が堆積した。その後圧縮場に転換し、上部寺泊層堆積時までおおむね南北圧縮のステージが複数あり，椎谷層堆積時には東西圧縮，西山層堆積時以降は北西－南東圧縮に変化したとしている。新潟、日本海東縁域でもっとも顕著に認められる上部新生界の北北東－南南西から北西－南東方向の活褶曲・断層構造は、西山層堆積以降

の北西－南東圧縮場において形成されたと考えられている（図 4.9-5）[14]。



注）岡村（2002）[10]に加筆

図 4.9-3　日本海東縁の褶曲・断層構造



注）竹内（2017）[13]より引用

図 4.9-4　日本海拡大時の地質構造発達過程

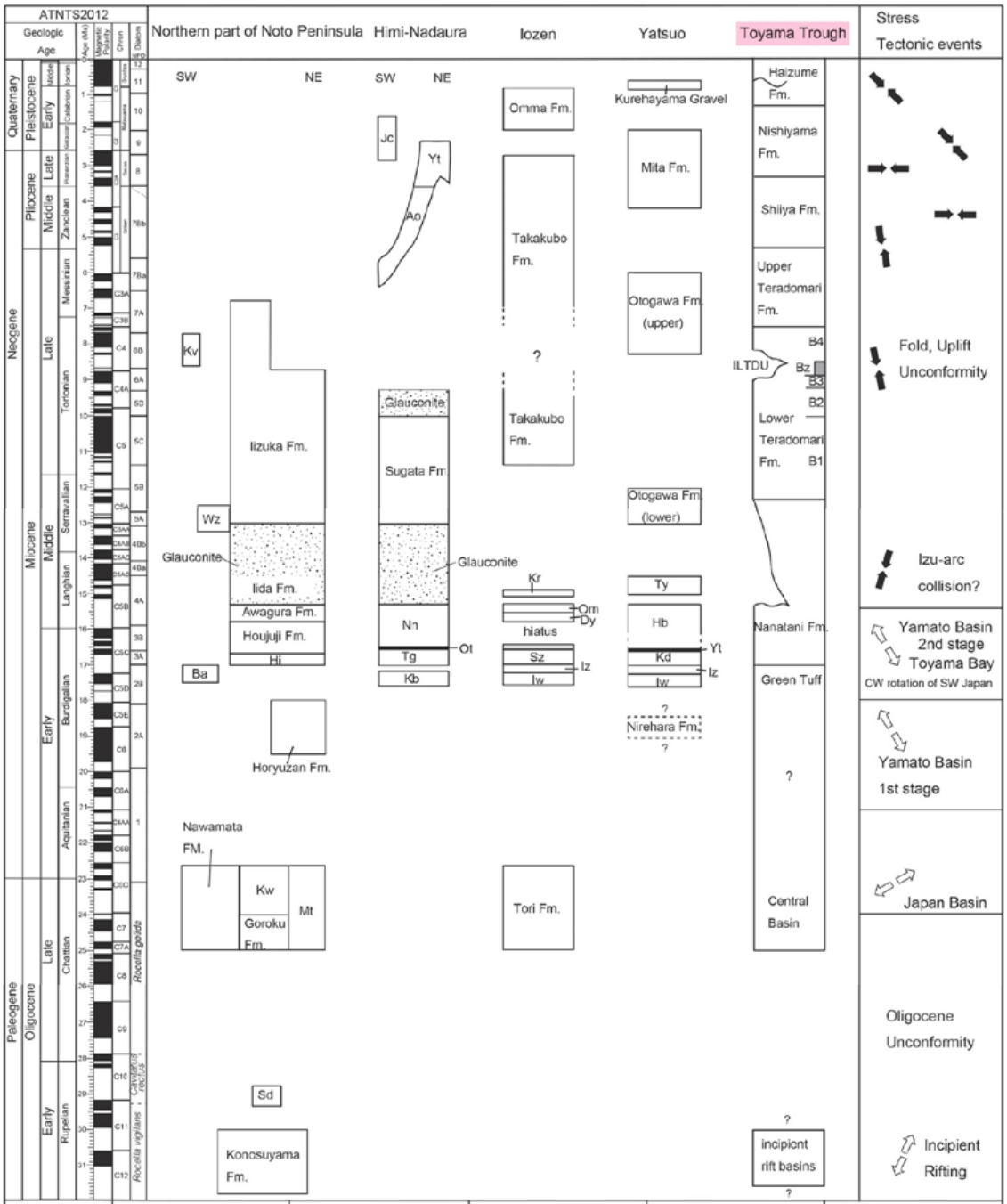


Fig. 7. Chronostratigraphic correlations in the Hokuriku district and Toyama Trough. Inferred paleostress and tectonic events are also shown. The geomagnetic time scale is modified after ATNTS2012 (Gradstein et al., 2012). Diatom biostratigraphy is taken from Yanagisawa and Akiba (1998).

注）中嶋ほか（2019）[14]より引用

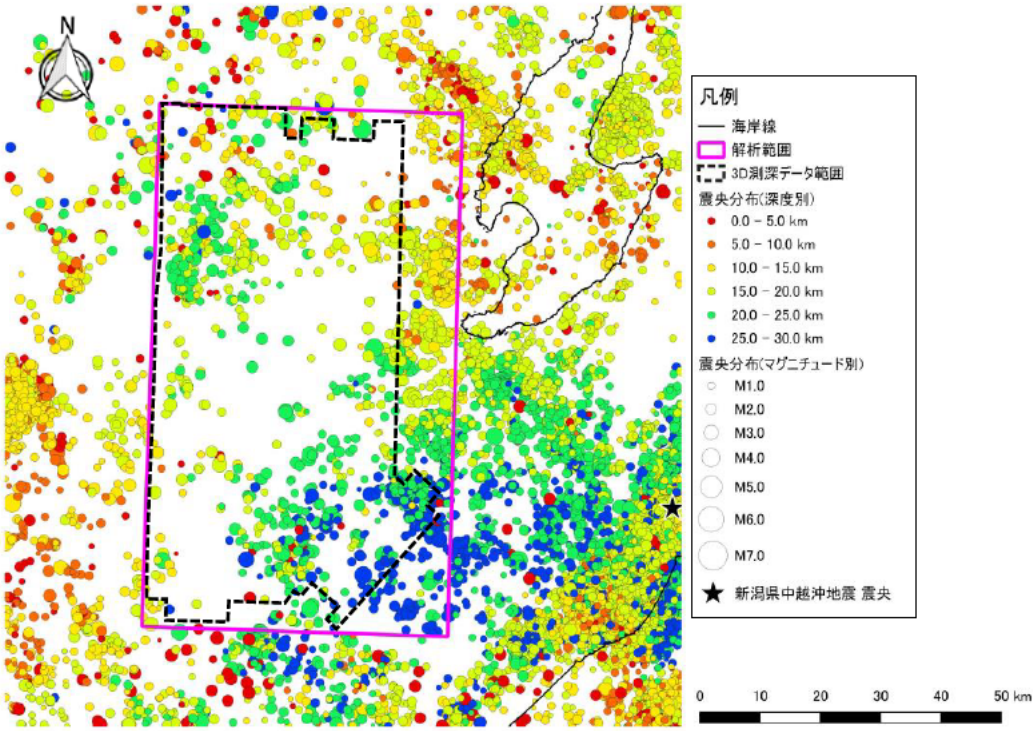
図 4.9-5　北陸地方および富山トラフの上部新生界対比およびテクトニクス

(4) 活断層および地震活動

調査範囲に分布する活構造の特徴として、岡村（2002）[10)]によれば、日本海東縁域には広く幅 100 km 以上の範囲に逆断層や褶曲が発達し、短縮変形帯が広がっている。その中に地質学的歪み集中帯（断層・褶曲が集中しているゾーン）がいくつかあり、それらは幅 10～20 km、長さ 20～50 km 程度の規模を持つ非対称な背斜構造の集合体からなっている。背斜構造の多くは非対称な断面を持ち、その急傾斜する翼の基部に逆断層が認められる。

形成過程については、前期中新世の日本海の拡大時には、日本海東縁には正断層が発達し、リフトが多数形成されたが、鮮新世の後期から第四紀にはそれらの古い正断層が逆断層として再活動している。

本作業の対象範囲周辺における地震活動について、4.6 節の海底地形判読および海底地形コンパイル業務（佐渡西方）による震央の分布を図 4.9-6 に示す。この図は気象庁一元化震源データ[15)]を基に、1997 年 10 月 1 日～2018 年 8 月 31 日の期間において、深さ 30 km 以浅で発生した地震のうち、震源決定精度がよいとされるイベントの震央位置をプロットしたものである。また、周辺で発生した被害地震として新潟県中越沖地震（M6.8、2007 年 7 月 16 日 10 時 13 分発生）の震央位置も示されている。本地域の地震活動の特徴は、10～25 km 程度の深さでは活発であるが、深さ 10 km までの浅部においては低調であるといえる。



注）4.6 節の海底地形判読および海底地形コンパイル業務（佐渡西方）から引用

図 4.9-6　作業対象範囲周辺の地震活動

4.9.3　地質構造解析

(1)　解析ホライズンの設定

ホライズン設定は、基礎物理探査「佐渡沖南西」調査報告書[1)]、基礎物理探査「佐渡西方 3D」データ解釈報告書[2)]および基礎物理探査「能登東方 3D」データ解釈報告書[3)]における既存の解釈を参考に、基礎試錐「上越海丘」[6)]の坑井地質情報および坑井周辺における再解釈結果を基準とした。本作業では下位よりグリーンタフ上限、七谷層上限、下部寺泊層中マーカー、下部寺泊層上限、上部寺泊層上限、D2 上限、D3 上限、椎谷層上限、西山層上限、灰爪層中部、灰爪層上部および海底面の計 12 ホライズンを設定した。なお、D2 および D3 の名称は基礎試錐「佐渡南西沖 S」「佐渡南西沖 D」[5)]の岩相区分名に準じた。また、ホライズン間の地層の呼称としてユニット名を設定し、ユニット名には対応する地質時代の頭文字を使用した。

(2)　解析ホライズンの特徴

(1)にて設定した各ホライズンの特徴を以下に示す。

1）グリータフ上限ホライズン

全域に分布する。調査範囲南東端（3D 探査範囲外）に位置する基礎試錐「直江津沖北」で確認されたグリーンタフの上面に当たり、強振幅を追跡している。本ホライズンは、反射波が連続的な上位層と、やや不連続で強振幅な下位層（基盤）の境界にあたる。

2) 七谷層上限ホライズン

調査範囲の中央部北寄りから北西部にかけて、また中央部西端、南西端の一部で下位のグリーンタフ上限ホライズンにオンラップする。基礎試錐「佐渡南西沖 D」において本ホライズンは有孔虫化石帯から設定されており、反射波に顕著な特徴は認められない。全体として弱振幅な地層中の連続的な反射波を追跡している。

3) 下部寺泊層中マーカーホライズン

調査範囲の中央部、北西部、南西部の一部で、下位のグリーンタフ上限ホライズンにオンラップする。基礎試錐「上越海丘」で認められる凝灰岩層の下面に位置する。明瞭で強振幅な反射波を追跡している。

4) 下部寺泊層上限ホライズン

調査範囲の中央部の一部を除き、ほぼ全域に分布する。海盆内では上下層とおおむね調和的であるが、グリーンタフ上昇域では上位層が本ホライズンにオンラップする。

5) 上部寺泊層上限ホライズン

グリーンタフ上昇域では主に下位の下部寺泊層上限ホライズンにオンラップするが、南西部ではおおむね分布する。基礎試錐「佐渡南西沖 D」で認められる砂岩層の下面に位置し、基礎試錐「上越海丘」で認められる砂岩優勢の砂泥互層の上面に位置する。

6) D2 上限ホライズン

基礎試錐「佐渡南西沖 S」で確認された D2 多孔質凝灰岩の上面に位置する。上位の D3 上限ホライズンと同様に調査範囲の中央部西側および北西部で無堆積であり、南西部のグリーンタフ上昇域ではところにより下位の上部寺泊層上限ホライズンにオンラップする。また、南西端の一部では上位層による削剥が認められる。

7) D3 上限ホライズン

調査範囲の中央部西側および北西部のグリーンタフ上昇域で無堆積であり、南西部のグリーンタフ上昇域ではところにより下位の D2 上限ホライズンにオンラップする。弱振幅な上位層と強振幅な下位層の境界にあたる。

8) 椎谷層上限ホライズン

調査範囲の中央部西側および北西部のグリーンタフ上昇域で無堆積であるが、南西部のグリーンタフ上昇域では高まりを乗り越えて分布する。比較的強振幅な上位層と弱振幅な下位層の境界にあたる。

9) 西山層上限ホライズン

グリーンタフ上昇域には分布しない。基礎試錐「佐渡南西沖 D」のカッティングスに記載された砂岩層の深度に対応する。上下層とはおおむね調和的である。海底谷分布域においては、チャネル様の強振幅の下面に位置する。

10) 灰爪層中部ホライズン

調査範囲の南西部で海底谷による削剥が認められ、グリーンタフ上昇域では無堆積となる。灰爪層中で比較的強振幅を示す層の上面に位置する。

11) 灰爪層上部ホライズン

調査範囲の南西部で海底谷による削剥が認められる。グリーンタフ上昇域および上越海丘、海鷹海脚において上位層が本ホライズンにオンラップする。海底下の強振幅層の下面に位置する。

12) 海底面ホライズン

調査範囲の中央部に南北へ延びる海底谷が存在し、北部で大きく蛇行する。全体として南南西－北北東方向に深度を増す。

(3) 断層の解析

反射断面では抽出しがたい変位量の小さな断層や微小な不連続を確認するためにシミラリティアトリビュート解析を行った。この解析では周囲のトレースとの相関係数を計算して、相関の高い部分（高シミラリティ部）を白色で、低い部分（低シミラリティ部）を紫色で示すことにより、ホライズン追跡では認定困難な細かな反射面の不連続（断層や亀裂等）が検出できる。

3D 探査データを用いて、解析対象範囲全体に対してシミラリティボリュームを作成した。このシミラリティアトリビュート解析結果を用いて、各ホライズンにおける平面図および断面図から断層の分布を確認し、反射断面において変位量が確認できたものを断層として認識した。

本作業ではすべての断層を抽出しているわけではなく、地形を変位させている断層、リニアメントに対応する断層、変位量が大きな断層および複数のホライズンを変位させている断層を中心に追跡を行った。さらに、グリーンタフ上昇域等において同系統の断層が近接し

て多数分布している場合には、後述の貯留可能域の抽出に影響する断層からの離隔距離を考慮して、代表的な断層を選択して解析した。したがって、同系統の断層が近接して多数分布している領域では特に変位量の小さい断層、一部のホライズンしか変位させていない断層、連続性に乏しい断層は追跡していないものがある。

断層解析では、遮蔽層の性状評価に資するため、遮蔽層層準への影響の有無により断層を分類し、色分けをして区別した。海底面から基盤までを切る断層をピンク色、遮蔽層層準を貫通するように切る断層を赤色、それ以外の断層を黒色で示した。分類の模式図を図 4.9-7 に示す。

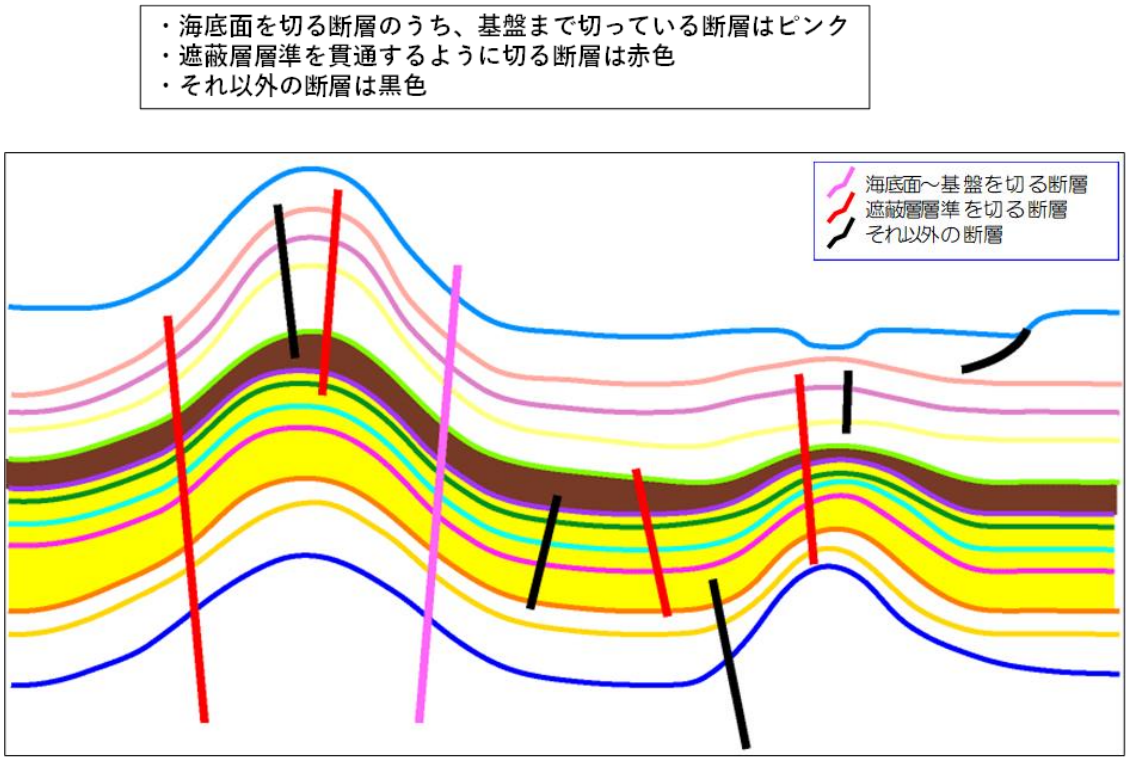


図 4.9-7　断層分類模式図

椎谷層上限、D3 上限の二つのホライズンのシミラリティアトリビュート解析の概要は以下のとおりである。

1）椎谷層上限ホライズン

シミラリティアトリビュート解析では、グリーンタフ上昇域および上越海丘、海鷹海脚の頂部付近、調査範囲北東部の禄剛北東海盆において、上位の西山層上限ホライズンとおおむね同様の低シミラリティ部の分布が認められる。調査範囲の中央部では、あまり明瞭ではないものの北西－南東方向の細い線状の低シミラリ

ティ部が認められる。これらは反射断面においては明瞭に断層として認識でき、赤色の断層として抽出している。

調査範囲の南東部にシミラリティが極端に低く、黒く表示されている領域が存在するが、この領域は反射波がガスチムニーのように白く抜けていることによるもので、断層として抽出はしていない。

チャネルの形状は調査範囲の北部で再び蛇行するが、中央部から南部にかけてはチャネルの形状が不明瞭となる。

2) D3 上限ホライズン

シミラリティアトリビュート解析では、グリーンタフ上昇域および上越海丘、海鷹海脚の頂部付近、調査範囲北東部の禄剛北東海盆において、上位の椎谷層上限ホライズンとおおむね同様の低シミラリティ部の分布が認められる。椎谷層上限ホライズンにおいてあまり明瞭でなかった調査範囲中央部の北西－南東方向の線状の低シミラリティ部は、本ホライズンにおいては明瞭に認められる。

チャネルの形状は調査範囲北部では上位の椎谷層上限ホライズンとおおむね同様であり、中央部から南部にかけても明瞭に表現されている。一部で、流路が交差する領域がある。

抽出した主な断層位置および背斜軸、向斜軸等を記載した地質構造図を作成した。この図では、海水面からの深度 1,000～6,000 m 間について 500 m ごとに別途作成した等深度面図に記載した断層を、深部ほど濃淡度を低くして重ね合わせ、準三次元的な表示としている。なお断層は変位層準による区分ではなく、逆断層と正断層の 2 区分で表示している。またこの図には海盆、海脚などの海底地形の位置も示している。

背斜構造である海丘および海脚ならびに大陸斜面と海盆との境界に逆断層が多く認められ、これらの多くは北東－南西から南北走向で現在も活発に活動を続けている。逆断層は背斜構造の片側に発達する場合が多く、下盤盆地側の地層は断層方向に傾斜し、非対称な断層・褶曲構造を呈している。

一方、富山トラフの深部には、上記の断層・褶曲構造とは直交方向の北西－南東から東西走向の構造が認められる。同様な走向の構造は富山トラフの西側にも認められる。これらは北東－南西から南北走向の構造と比較すると現在は不活発であり、北東－南西から南北走向の構造に切断されている場合が認められる。なお、これらの構造は、褶曲変形としては現在も活動の継続が認められるものも多い。これら古期構造はトラフ中央部に向かってプランジしており、富山トラフの両縁を境する断層の活動に関連して、トラフが沈降していることを示している。

正断層は海丘、海脚の背斜部に多く分布している。これらは、背斜構造頂部の伸張応力場により形成されたものと考えられる。また、地すべり重力性断層が海谷近傍に認められる。海谷の削剥により近傍の海底面付近が不安定化したためと考えられる。なお、背斜部に認められる正断層の中には、背斜構造の斜面部に形成された重力性断層も含まれていることが考えられる。また、海盆中においても正断層が認められるが、これらの分布の深部には活動が停止または不活発な背斜構造が存在しており、上位の被覆層に影響を与えていると考えられる。

(4) 深度変換手法

3D 探査データの深度変換に当たり、3D 探査の重合速度データから得た区間速度を用いて深度変換速度モデルを構築した。坑井近傍では、地層境界深度とホライズンの関係から速度を補正した。作成した深度変換速度モデルは平面グリッド間隔 200 m、時間方向 7 s（時間間隔 1 msec）であり、SEG-Y ファイルに出力した。

(5) 時間構造図および深度構造図

各ホライズンの特徴を以下に記す。

① グリーンタフ上限ホライズン

本ホライズンは音響基盤面に当たり、地質解析範囲の全域に分布する。本ホライズンより下位は全体に強振幅で、連続性に乏しく混沌とした反射面が認められる部分がある。調査範囲の北西部には、北西－南東方向に延びる高まりの構造（禄剛北海丘および禄剛北東海丘）がある。その南側には北西－南東方向から北北東－南南西方向に軸を変える高まり（禄剛海脚北東部）があり、その内側を盆状に孤立させている。さらに調査範囲の南西部にも高まり（飯田海脚）があり、これらは基礎物理探査「能登東方 3D」データ解釈報告書[3)]で命名されたいわゆる“グリーンタフ上昇域”である。調査範囲の中央部東端から南南西へ、北北東－南南西方向の軸を持つ尾根（上越海丘）と調査範囲の南東端の高まり（海鷹海脚）により、調査範囲南部の盆状構造（富山トラフ）が V 字形を呈している。

また、調査範囲北東部にも北西－南東方向の盆地（富山トラフ）が存在している。富山トラフは北東部でもっとも深く、深度 7,400 m に達している。調査範囲内における最浅部は禄剛海脚北東部の西端で、深度 400 m であり、海底面直下までグリーンタフが上昇している。

断層分布については、構造方向と同様に北西－南東方向および北北東－南南西方向に発達する傾向があり、ほとんどが長大な逆断層である。グリーンタフ上昇域の尾根部には、連

続距離の短い正断層が分布する。

②　七谷層上限ホライズン

構造的には、下位のグリーンタフ上限ホライズンとおおむね調和的な傾向を示す。調査範囲の中央部南西側および北東部で深度 5,700 m の深さに位置し、禄剛海脚北東部の西端では深度 500 m と浅い。M2 ユニット（グリーンタフ上限～七谷層上限）の層厚は、北東部の富山トラフおよび南東部の上越海丘と海鷹海脚の周辺で厚く、海鷹海脚では 2,000 m に達する部分がある。

断層の分布傾向もおおむね下位のグリーンタフ上限ホライズンと同様であるが、南西部の飯田海脚をはじめとする構造の高まりにおいて、水平連続距離の短い正断層が複数分布する。

③　下部寺泊層中マーカーホライズン

本ホライズンは貯留層層準の下面である。構造的には下位の七谷層上限ホライズンと調和的な傾向を示すが、上越海丘の南部と海鷹海脚の北部が連続し、V 字形を呈していた富山トラフを西側と東側に隔てる。分布深度は、もっとも深いところで深度 5,200 m、最浅部は深度 420 m である。M3 ユニット（七谷層上限～下部寺泊層中マーカー）の層厚は南東部の上越海丘と海鷹海脚の周辺で厚く 900 m 程度、北西部のグリーンタフ上昇域で薄く、中央部北寄りから北西端にかけて削剥または無堆積による無層厚の領域が存在する。

断層分布も下位の七谷層上限ホライズンと同傾向であるが、上越海丘の北西の尾根部に東西系の連続距離の短い正断層が複数分布する。

④　下部寺泊層上限ホライズン

構造的には、調査範囲南部の富山トラフが狭まり、下位で上越海丘の北西に延びていた尾根部を埋積して中央部から北東部へ富山トラフが緩やかに連続する。分布深度は富山トラフの東部の湾曲部で深くなる傾向にあり、北東部でもっとも深く深度 4,500 m、禄剛海脚北東部の西端でもっとも浅く深度 360 m である。

M4 ユニット（下部寺泊層中マーカー～下部寺泊層上限）の層厚は、下位のグリーンタフ上限から下部寺泊層中マーカーホライズンで V 字形を呈していた南部の富山トラフの西側でもっとも厚く 1,700 m、北西部のグリーンタフ上昇域で 150 m 程度と薄く、中央部西寄りから北部にかけて無層厚の領域が存在する。

グリーンタフ上昇域をはじめとする構造の高まりに正断層が目立つほか、北西部のグリーンタフ上昇域に囲まれた盆地にも複数の正断層が分布している。

⑤　上部寺泊層上限ホライズン

調査範囲北西部のグリーンタフ上昇域において、広い範囲で下位の下部寺泊層上限または下部寺泊層中マーカーホライズンにオンラップし、無堆積となっている。

構造的には下位の下部寺泊層上限ホライズンと調和的な傾向を示し、分布深度は、もっとも深いところで深度 3,990 m、最浅部では深度 410 m である。M5 ユニット（下部寺泊層上限～上部寺泊層上限）の層厚は、北東部の富山トラフでもっとも厚く 650 m 程度である。

断層分布は下位の下部寺泊層上限ホライズンとほぼ同傾向であるが、南部において北西－南東方向に延びる逆断層が、本ホライズンには達していない。

⑥　D2 上限ホライズン

構造的にも断層分布も、下位の上部寺泊層上限ホライズンとおおむね同じ傾向を示し、分布深度は、もっとも深い範囲で深度 3,900 m、最浅部では深度 410 m である。調査範囲の北西部で下位の下部寺泊層上限または下部寺泊層中マーカーホライズンにオンラップし無堆積、または削剥され分布していない。また、飯田海脚の急傾斜部でも下位の上部寺泊層上限ホライズンと同様に分布していない。

本ホライズンは貯留層層準の内部ホライズンであり、北西部等でところにより非常に弱い振幅を示す領域もあるが、富山トラフの北東部に強振幅を示す領域がある。反射波はグリーンタフ上昇域でやや不連続となるもののおおむね連続的である。

PL1 ユニット（上部寺泊層上限～D2 上限）の層厚は基礎試錐「上越海丘」の周辺で 450 m 程度と厚く、富山トラフの広い範囲で 200 m 以上の層厚が認められる。本ホライズンの分布域と PL1 ユニットの層厚分布はほぼ同一である。

⑦　D3 上限ホライズン

構造的にも断層分布も、下位の D2 上限ホライズンとおおむね同じ傾向を示し、分布深度は、富山トラフの最深部で深度 3,860 m、飯田海脚の最浅部では深度 560 m である。D2 上限ホライズンと同様に、椎谷層の内部ホライズンであり、貯留層層準の上面かつ遮蔽層層準の下面である。富山トラフにおいて非常に強い振幅を示す領域があり、反射波はおおむね連続的で、下位層に対してほぼ平行である。

PL2 ユニット（D2 上限～D3 上限）の層厚は、調査範囲の南端中央部で局所的に 180 m の厚さが認められ、調査範囲の南半分の広い範囲で 60 m 以上の層厚が認められる。

⑧　椎谷層上限ホライズン

構造的にも断層分布も、下位の D3 上限ホライズンとおおむね同じ傾向を示し、分布深度

は、富山トラフの最深部で深度 3,660 m、飯田海脚の最浅部では深度 390 m である。下位の D3 上限ホライズンと調和的な傾向を示すが、調査範囲南西部の飯田海脚の南西端では高まりを乗り越えて分布する。調査範囲の広い範囲で弱振幅を示し、遮蔽層層準の上面にあたる。

PL3 ユニット（D3 上限～椎谷層上限）の層厚は、調査範囲の南部で局所的に 200 m を超える厚さが認められ、調査範囲の南半分の広い範囲で 80 m 以上の層厚が認められる。北部では一部、遮蔽層評価の基準となる層厚 20 m を下回る領域も認められる。

⑨　西山層上限ホライズン

構造的には下位の椎谷層上限ホライズンと調和的な傾向を示し、分布深度は、富山トラフのもっとも深い範囲で深度 3,500 m、禄剛海脚北東部の最浅部では深度 1,020 m であり、断層分布もおおむね同様の傾向を示すが、調査範囲中央部の東西系の断層がほとんど認められなくなる。調査範囲南西部の飯田海脚においては高まりを乗り越えず、椎谷層上限ホライズンにオンラップして途切れる。調査範囲の大部分は連続性のよい反射波を呈し、下位層に対しておおむね平行であるが、ところによりチャネル状の反射波の下面を追跡している。また、海鷹海脚周辺においては上位の灰爪層最下部の砂岩泥岩互層による強振幅の下限を追跡している。富山トラフの南部では比較的強い振幅を示すが、調査範囲北東部では弱振幅を示す傾向がある。

PL4 ユニット（椎谷層上限～西山層上限）の層厚は、調査範囲の南部で局所的に 550 m を超える厚さが認められ、そこから北方へ筋状に層厚 250 m 程度の領域が伸びている。調査範囲の東半分の広い範囲で 150 m 以上の層厚が認められる。

⑩　灰爪層中部ホライズン

下位の西山層上限ホライズンと同様の分布域であり、構造および断層分布も下位の西山層上限ホライズンとおおむね同様の傾向を示す。深度は、最深部で深度 2,960 m、最浅部では深度 900 m である。主に椎谷層上限または下部寺泊層上限ホライズンにオンラップして途切れる。飯田海脚の東部では富山深海長谷により削剥を受け、また禄剛海脚北東部の急傾斜部では海底面の崩落による削剥を受け分布していない。

Q1 ユニット（西山層上限～灰爪層中部）の層厚は、調査範囲の中央部北寄りの富山トラフ内で 400 m ともっとも厚く、海盆では広い範囲で層厚 200 m を超えている。グリーンタフ上昇域および上越海丘、海鷹海脚では層厚 100 m 以下の領域が分布する。

⑪　灰爪層上部ホライズン

調査範囲の広い範囲に分布するが、南西部では富山深海長谷により削剥を受け、飯田海脚および禄剛海脚北東部、禄剛北東海丘の急傾斜部では海底面の崩落により削剥され分布していない。北西端の白抜け領域では、下位の下部寺泊層上限ホライズンにオンラップしているため分布していない。

灰爪層中の比較的弱振幅層の上面であり、グリーンタフ上昇域および上越海丘、海鷹海脚において、これより上位の強振幅層が本ホライズンにオンラップする。ところによりタービダイトまたはMTD様の擾乱した地層を含む。富山トラフの北東部では、クロスラミナ様の波打った形状の反射波が累重しており、富山深海長谷の氾濫原が厚く堆積している可能性が考えられる。

調査範囲全体の傾向として、下位の灰爪層中部ホライズンと調和的な構造である。最深部は富山トラフの深度 2,610 m、最浅部は飯田海脚の深度 370 m である。断層分布も下位の灰爪層中部ホライズンとおおむね同様の傾向を示す。Q2 ユニット（灰爪層中部～灰爪層上部）の層厚は、富山トラフの中央部東側から北東部にかけて 300 m 以上と厚い。

⑫　海底面

下部寺泊層上限から灰爪層上部ホライズンまで富山トラフの深度構造は調和的であり、東部の湾曲部で深度を増す傾向にあったが、海底面では富山深海長谷の北端でもっとも深く、下位に認められていた東部の湾曲形状は埋積されている。禄剛海脚北東部および飯田海脚では大規模な崩落地形が認められ、富山深海長谷北部の蛇行部分では側方浸食によるがけ崩れと推定される地形が認められる。

断層は、海底面から基盤までを切る規模の大きな逆断層が禄剛海脚北東部の東縁および調査範囲東部、上越海丘東縁をはじめ数条認められるほか、連続距離の短い正断層が西部および南西部に分布している。海底面深度は最深部で深度 2,110 m、最浅部で深度 330 m である。

Q3 ユニット（灰爪層上部～海底面）の層厚は、調査範囲中央部東寄りの富山トラフでもっとも厚く 850 m である。

(6)　層厚分布および構造発達史

堆積盆地の変遷と地質構造発達史を視覚的に表示するため、地層の堆積時には各ホライズンは平坦であったと仮定し、フラットニング断面を作成し、各地層の堆積時の構造を復元した。フラットニング断面は、解析対象範囲の南北方向の富山トラフ底および上越海丘と海鷹海脚を横断するランダムライン A-A’において作成した。

ランダムライン A-A'の断面では、七谷層堆積以降、2 箇所の隆起部（背斜構造）に境された北部、中部および南部の三つの沈降部（向斜構造）が形成され、上部寺泊層の堆積時まで同じ傾向で沈降が継続した。北部沈降部は断層 NO.497 の延長の褶曲構造の活動、中部沈降部は断層 NO.322 の活動、南部沈降部は断層 NO.321-502 延長の褶曲構造の活動が関係していると考えられる。下部寺泊層の上部堆積時には沈降速度が上昇している。椎谷層下部の堆積時には、中部と南部の沈降部を境する背斜構造の活動が停止し、中部と南部の沈降部は一様な厚さの堆積が認められる。椎谷層中部から西山層堆積時には全体にほぼ一様な厚さで堆積しており、わずかに北部と中部の沈降部を境する背斜構造が活動している。灰爪層の堆積が始まると、南部沈降部中の近接した断層 NO.291 および NO.325 が活動を開始し、両断層に挟まれた小規模な向斜部は相対的に沈降しているが、南部沈降部が全体として隆起域に転換し、北部から中部沈降部が沈降域になっている。北部沈降部と中部沈降部の境界に位置する背斜構造には活動の継続が認められる。灰爪層の堆積以降の沈降速度は著しく上昇している。

4.9.4　堆積相解析

基礎物理探査「佐渡西方 3D」「能登東方 3D」「佐渡沖南西」の 3D 探査データおよび基礎試錐「上越海丘」「佐渡南西沖 S」「佐渡南西沖 D」のデータを用いて堆積相解析を実施した。解析対象区間は、貯留層および遮蔽層を含むと想定されているグリーンタフ上限から海底面までの 12 ホライズン間の 11 区間とし、貯留層、遮蔽層の認定およびその区間における堆積物の分布形態の把握と堆積システムの推定を目的とした。基礎試錐「佐渡南西沖 S」「佐渡南西沖 D」「上越海丘」の岩相については、それぞれ基礎試錐「佐渡南西沖 S」「佐渡南西沖 D」報告書[5)]、基礎試錐「上越海丘」の調査報告書[6)]の記載を参照した。

(1)　堆積相解析手法

堆積相解析のワークフローは、図 4.9-8 に示すように、まず提供されたホライズンを用いて、各ホライズン間について 3D 探査データから時間層厚分布、振幅分布、周波数成分の分布（スペクトラルデコンポジション）の各アトリビュートマップを作成し、あわせて 3D 探査データの断面において反射波列の形状（サイスミックファシス）を観察した。このとき、基礎試錐で確認されている岩相や検層カーブのパターンとサイスミックファシスとの関係性を確認し、サイスミックファシス区分を行い、総合的に堆積システムおよび砕屑物の供給系を解釈した。

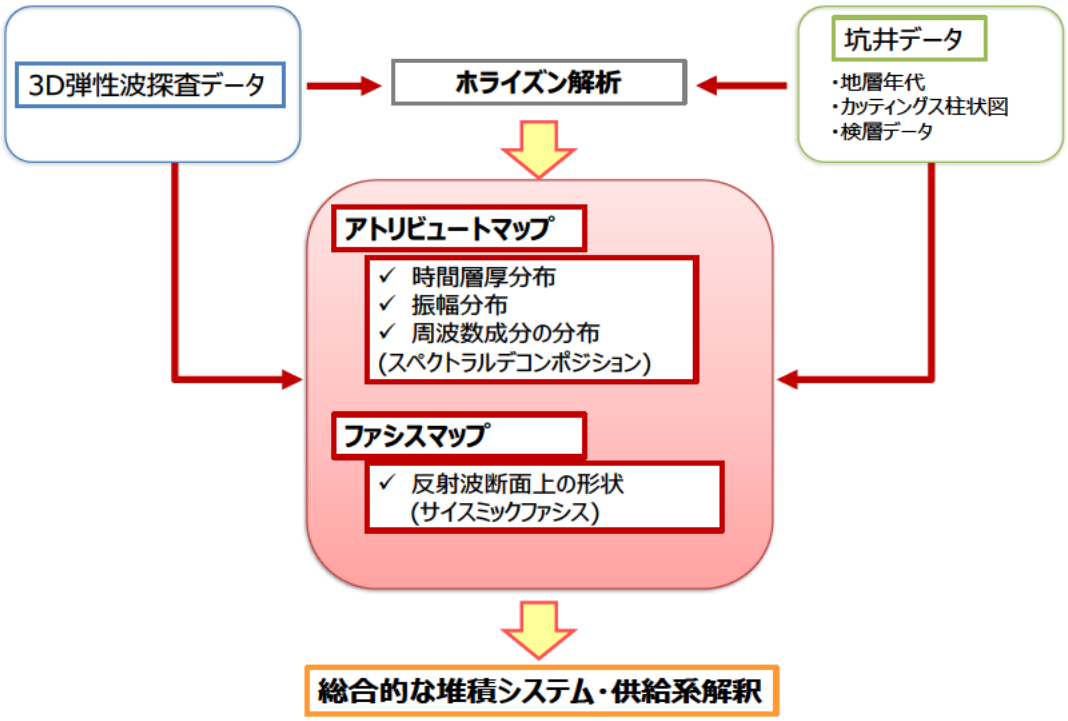


図 4.9-8　堆積相解析のワークフロー

(2)　サイスミックファシス区分

サイスミックファシスは反射波が作る形状やパターンであり、堆積物の分布形態、堆積システムを示す重要な情報源となる。3D 探査データにおける反射波断面からサイスミックファシスを認定し、その分布を平面的にマッピングした上で、振幅の平面的分布やラッピングパターン、坑井データと統合することにより、堆積物の供給系や堆積体の分布形態を推定することができる。本堆積相解析では、図 4.9-9 に示すように弾性波探査の断面にみられる反射波の形状の特徴から七つのサイスミクファシスを認定し、各アトリビュートマップ上での分布および坑井における岩相情報と合わせて、堆積システムを推定した。

以下に、区分した七つのサイスミックファシスの特徴および推定される堆積環境について記述する。

A) 反射波列は、強い振幅を示す。側方への連続性が悪く、高頻度で下に凸の形状の反射波列が認められる。基礎試錐「佐渡南西沖 S」の椎谷層ではファシス A 区間を掘削しており、坑井で粗粒な岩相が確認されていることを踏まえると、深海底で発達したチャネルファシスを示すと推定される。

B) 反射波列は、中程度振幅を示す。側方には連続からやや不連続であり、低頻度で下に凸の形状の反射波列が認められる。基礎試錐「佐渡南西沖 S」の椎谷層ではファシス B 区間を掘削しており、坑井で粗粒な岩相が確認されていることも合わ

せると深海底で発達したチャネルファシスおよびチャネルからあふれたレビー堆積物を示すと推定される。

C1) 反射波列は、中程度から強い振幅を示す。側方への連続性が良く正の反射波列と負の反射波列が層状に平行に分布する。基礎試錐「上越海丘」の椎谷層ではファシス C1 区間が掘削されており、砂岩主体の岩相が確認されている。このことから深海底で発達したローブの中央部、またはチャネルレビーシステムが発達する環境におけるレビー堆積物を示すと推定される。本堆積相解析の対象区間のうち、主に椎谷層以浅の層準で認められる。

C2) 反射波列は中程度から弱い振幅を示す。側方への連続性が良く正の反射波列と負の反射波列が層状に平行に分布する。本堆積相解析の対象区間のうち、主に寺泊層以深で認められ、反射波の減衰の影響を受け、振幅値が弱化していることが想定される。基礎試錐「上越海丘」の上部寺泊層ではファシス C2 区間を掘削しており、砂岩主体の岩相が確認されていることおよびガンマ線検層において上方粗粒化のパターンが認められることを踏まえると、C1 と同様に深海底で発達したローブの中央部、またはチャネルレビーシステムが発達する環境におけるレビー堆積物を示すことが推定される。

D) 反射波列は中程度から弱い振幅を示す。側方への連続性が良く正の反射波列と負の反射波列が層状に平行に分布する。基礎試錐「佐渡南西沖 D」の西山層ではファシス D 区間を掘削しており、カッティングス調査において泥岩が主体の岩相が確認されていることを踏まえると、ローブの末端部やレビーファシスを示すと推定される。

E) 反射波列は弱い振幅を示す。側方への連続性が比較的悪く、低頻度で下に凸の形状を示す反射波列が認められる。泥質な堆積物を充填するチャネルファシスを示すことが推定される。なお、ファシス E は坑井では確認されていない。

F) 反射波列は弱い振幅を示す。側方への連続性は悪く、混沌とした反射波列が目立つ。基礎試錐「佐渡南西沖 D」では、上部寺泊層でファシス F 区間を掘削している。カッティングス調査から泥質な堆積物が確認されていることを踏まえると、堆積盆底に堆積した細粒な堆積物を示すと推定される。

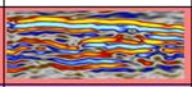
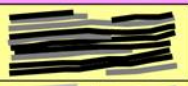
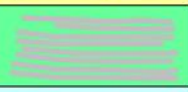
ファシス	断面例	スケッチ	断面の特徴	堆積環境解釈	推定岩相
A			強振幅 高頻度下に凸の形状 水平に不連続	深海底チャネル	砂岩 砂岩優勢互層
B			強振幅～やや強振幅 低頻度で下に凸の形状 水平に連続～やや不連続	深海底チャネル/レビー	砂岩優勢互層
C1 （椎谷層以浅）			強振幅～やや強振幅 水平に連続的	ローブ中央部 レビー	砂岩 砂岩優勢互層
C2 （寺泊層以深）			やや強振幅～弱振幅 水平に連続的	ローブ中央部 レビー	砂岩 砂岩優勢互層
D			やや強振幅～弱振幅 水平に連続的	ローブ末端部 レビー	泥岩優勢互層
E			弱振幅 比較的不連続 低頻度で下に凸の形状	泥質な堆積物が充填する深海底チャネル	泥岩 泥岩優勢互層
F			弱振幅 混沌とした不連続性	堆積盆底	泥岩

図 4.9-9　サイスミックファシス区分

(3)　堆積システムおよび供給系の解釈結果

基礎試錐「佐渡南西沖 S」「佐渡南西沖 D」調査報告書[5)]および基礎試錐「上越海丘」調査報告書[6)]によると、微化石調査の結果から、これらの基礎試錐で確認された M3 ユニットから PL4 ユニット相当層（下部寺泊層～西山層）堆積時は半深海から深海の環境であったと推定されており、陸棚斜面から深海底盆といった堆積環境であったことが想定される。

中期から後期中新世の M3 ユニットおよび M4 ユニットでは、グリーンタフ上昇域周辺を除いて粗粒な堆積物を示すファシスは認められず、ファシス F に区分される深海底盆に堆積する泥質な堆積物に特徴づけられる層準であることが示唆された。なお、M4 ユニットにおいては東側の一部のエリアにおいて斜面環境における小規模なローブが発達したことも示唆された。

その上位にあたる後期中新世後期の M5 ユニットでは、エリア南部においてファシス C2 が分布し、斜面環境におけるローブ堆積物の発達が示唆された。同層準において基礎試錐「上越海丘」では砂岩主体の岩相が確認されていることを踏まえると、ファシス C2 と区分されるエリアは貯留層になり得ると考えられる。また、同層準における二乗平均平方根（Root Mean Square、以下、「RMS」と称する。）振幅図からはエリア北部において海底チャネルが発達することが示唆されたが、3D 探査データにおいて強い振幅は示さず、比較的泥質な堆積物が充填する海底チャネルシステムを示すことが推測された。

鮮新世に入り PL1 ユニットからは、富山トラフ内においてファシス A やファシス B が広く分布するようになり、深海底チャネルの発達が示唆された。特に、前期鮮新世の PL1 ユ

ニットや PL2 ユニットにおいては、エリアの東側や南東側から発達したと考えられる海底チャネルの存在が推定され、ファシス A やファシス B が分布するエリアについては貯留層となり得る粗粒な堆積物の存在が期待される。また、同層準においてファシス C1 と区分されるエリアについてもローブ堆積物の存在が示唆されたことから、貯留層となり得ると考えられる。なお、これらの海底チャネルの発達は、検討対象エリアの南東部にあたる北部フォッサマグナ地域からの堆積物の供給が増加したことを示していると考えられる[5)]。

一方で、その上位の PL3 ユニットにおいてはエリア全体にわたって振幅のコントラストが小さくなる。これまで強い振幅として表れていたチャネル状の形態についても、周囲との振幅のコントラストが小さくなり、比較的泥質な堆積物が充填していることが予想される（ファシス E）。同層準においてはファシス D、ファシス E、ファシス F と区分されるエリアが遮蔽層としてのポテンシャルを持つと期待される。

後期鮮新世から前期更新世の PL4 ユニットおよび Q1 ユニットにおいては、再び深海域において海底チャネルが発達する環境となったことが示唆された。その流路は現在の富山深海長谷とおおよそ同様な位置をとり、富山湾側からの堆積物の供給の増加が示唆された。また、基礎試錐「上越海丘」が掘削された位置付近においては、椎谷層堆積時以降に生じた上越海丘の急速な隆起に伴った、斜面環境におけるローブの発達が示唆された。

その上位の Q2 ユニットおよび Q3 ユニットにおいては、エリアの南西部および南東部から発達する 2 条の海底チャネルが発達する堆積環境にあったことが示されており、PL4 ユニットから Q3 ユニットにおいては富山トラフの深海底に海底チャネルを通して粗粒な堆積物が供給されるといった堆積システムが成り立っていたと考えられる。

4.9.5　貯留層層準と遮蔽層層準の設定

本調査の対象範囲周辺の坑井情報および 4.9.4 項の結果から、本作業範囲においてはファシス A、ファシス B、ファシス C1、ファシス C2 が広く分布する M4 ユニット（下部寺泊層中マーカー～下部寺泊層上限）、M5 ユニット（下部寺泊層上限～上部寺泊層上限）、PL1 ユニット（上部寺泊層上限～D2 上限）、PL2 ユニット（D2 上限～D3 上限）が貯留層層準に相当し、ファシス D、ファシス E、ファシス F が広く分布する PL3 ユニット（D3 上限～椎谷層上限）が遮蔽層層準に相当すると考えられる。

4.9.6　貯留可能量の算定

(1)　CO_2 超臨界深度

基礎試錐「上越海丘」、「佐渡南西沖 S」、「佐渡南西沖 D」の坑井データを用いて、RITE（2006）[16)] に示されている CO_2 超臨界状態の条件（温度 31.1℃以上、圧力 7.38 MPa 以

上）を満たす深度の検討を行った。

3 坑井の地層温度と海底面下深度のクロスプロットおよびフィッティング結果より、CO_2 超臨界状態の温度条件である 31.1℃以上に達するのは、海底面下深度 642 m 以深と推定した。

次に圧力条件から求まる超臨界上限深度は、圧力と深度の関係により、超臨界圧力 7.38 MPa を満たす深度 738 m(MSL)となる。本作業範囲における海底面深度（水深）の最浅部は約 400 m であるため、圧力条件は海底面下深度 338 m となり、温度条件と圧力条件では温度条件のほうが深い深度となった。このことから本作業範囲では、温度条件による海底面下深度 642 m の等深度線を超臨界上限面とした。

海底面下深度 3,000 m 以深は圧入井の掘削のコストや技術的難易度の面だけでなく、CO_2 圧入においても孔隙率低下等の貯留層性状の面から現実的でないと考えられている。そのため、貯留層に適した地層の深度範囲は、海底面下深度 3,000 m から超臨界上限面までとする。

M2 ユニット（グリーンタフ上限～七谷層上限）および Q3 ユニット（灰爪層上部～海底面）は条件を満たさない貯留対象外領域が多いが、M4 ユニット（下部寺泊層中マーカー～下部寺泊層上限）および PL2 ユニット（D2 上限～D3 上限）はほぼ貯留対象領域となっている。

(2) CO_2 貯留可能量の算定式

ここまでに抽出した貯留候補域に対し、RITE（2006）[16] の全国賦存量調査に示された以下の算定式を用いて貯留可能量を試算した。

$$CO_2\text{貯留可能量} = Sf \times A \times h \times \Phi \times Sg / BgCO_2 \times \rho$$

Sf：貯留率（緩傾斜部タイプとして 25%を採用）

A：貯留可能域の面積（km^2）

h：有効層厚（m）（＝貯留層の層厚×N/G 比×堆積体の出現率）

Φ：孔隙率（%）

Sg：超臨界 CO_2 飽和率（20%・50%・80%のうち 50%を採用）

$BgCO_2$：CO_2 の容積係数（0.003 m^3/m^3 を採用）

ρ：CO_2 密度（標準状態で 1.976 kg/m^3 を採用）

必要なパラメータは、貯留率、貯留層の面積、貯留層の層厚、N/G 比、堆積体の出現率、孔隙率、超臨界 CO_2 飽和率、CO_2 の容積係数および標準状態の CO_2 密度（一定値）である。このうち貯留層の面積 A および貯留層の有効層厚 h は、地質構造解析、堆積相解析、およ

び検層解析結果から設定した。貯留層層準の各ファシスの N/G 比については、ファシス A：0.72、ファシス B：0.43、ファシス C1：0.55、ファシス C2：0.40 と設定した。

(3) 貯留可能域の検討および貯留可能量評価

堆積相解析結果で粗粒な堆積物であると推定されたファシス A（深海底チャネル）、B（深海底チャネルおよびレビー）、C1/C2（ローブ中央部またはレビー）のファシスマップを基に、以下の 3 段階の条件により貯留候補域を抽出した。

1) 超臨界条件および海底面下深度 3,000 m 以浅の条件を満たす貯留層が存在すること。また、貯留層の地層傾斜が 30° 以下であること。
2) 遮蔽層厚が 20 m 以上存在すること。また、遮蔽層層準が細粒で泥質な堆積物であること。
3) 海底面から基盤までを切る断層および遮蔽層層準を切る断層からの離隔距離半径 2.5 km の断層影響範囲に該当しないこと。

各貯留候補域の概算貯留可能量計算結果と貯留層の上面深度、貯留面積、平均層厚、N/G 比、堆積体の出現率、平均孔隙率、概算貯留可能量を表 4.9-1 に示す。貯留可能量が 1 億 t を上回った貯留候補域は、PL2_A_1、PL1_C1_3、PL1_C1_4、PL1_A_1-01、M5_C2_3 の 5 箇所である。

次に、すべての貯留候補域の面的分布から、隣接または上下に接して分布する貯留候補域を区域Ⅰから区域Ⅸの九つの区域とし、区域ごとの貯留可能量を求めた。区域Ⅴ、Ⅵ、Ⅶは隣接する貯留候補域が存在せず独立している。

これらの各区域における貯留可能量を表 4.9-2 に示す。表には、各貯留候補域における貯留層の上面深度、貯留面積、平均層厚、N/G 比、堆積体の出現率、平均孔隙率、概算貯留可能量、区域における貯留可能量、遮蔽層の平均層厚、最小層厚、遮蔽能力、貯留対象域の地質構造としての安定度（断層分布）、地層傾斜を記し一覧とした。区域Ⅰ、Ⅱ、Ⅲで貯留可能量が 1 億 t を上回り、それぞれ 2.79 億 t、1.61 億 t、7.40 億 t となった。佐渡西方沖の本作業範囲における区域Ⅰ～Ⅸの貯留可能量の合計は 13.49 億 t と見積もられた。

各区域について、表 5.2-1 の技術要素と評価点数基準を基に評価した。各区域の評点の計算結果を表 4.9-3 に示し、表 5.2-1 の評価表に基づいて着色した。貯留層の平均層厚は、各区域の分布の上下の重なりを考慮して平均値を計算した。貯留層の性状は各区域の平均孔隙率に体積比を乗じて和をとり、体積を考慮して計算した。地質構造の地層傾斜は安全側をとって最高傾斜角の評価を採用した。各技術要素の内容に対する評価から技術評点を計算し、表 4.9-3 の右から 2 列目に示した。なお、表 5.2-1 の評価表では 0.1 点と 0.3 点が同色

（黄色）のため、0.1 点の数値に下線を引き区別した。技術評点は、区域Ⅰで 1.2 点、区域Ⅱで 6.5 点、区域Ⅲで 3.2 点、区域Ⅳ～Ⅸは貯留可能量が 1 億 t に満たないため技術要素のうち貯留可能量で×評価が付き 0 点となり、区域Ⅰ～Ⅲを貯留可能域であると評価した。区域Ⅰ～Ⅲの貯留可能域全域での貯留可能量は 11.80 億 t である。

表 4.9-1　各貯留候補域における概算貯留可能量計算結果

ユニット	区域番号	貯留層						
		*1)上面平均深度(m)	貯留面積(km^2)	平均層厚(m)	*2)N/G比	堆積体出現率(%)	性状(平均孔隙率%)	概算貯留可能量(億t)
PL2	PL2_A_1	1,005	134.5	92	0.72	100	19.3	1.41
	PL2_A_2	818	8.7	68	0.72	100	22.0	0.08
	PL2_A_3	1,870	14.2	81	0.72	100	10.5	0.07
	PL2_B_1	1,486	19.1	58	0.43	100	13.9	0.05
	PL2_B_2-01	1,686	24.8	71	0.43	100	12.0	0.07
	PL2_B_2-02	1,370	0.3	68	0.43	100	15.0	0.00
	PL2_B_3-01	642	2.9	51	0.43	100	25.1	0.01
	PL2_B_3-02	642	0.2	16	0.43	100	25.5	0.00
	PL2_C1_1	901	50.3	84	0.55	100	20.7	0.40
	PL2_C1_3	1,775	24.9	49	0.55	100	11.4	0.06
PL1	PL1_B_6	1,086	23.3	397	0.43	33	16.5	0.18
	PL1_C1_2	1,694	21.1	304	0.55	33	11.0	0.11
	PL1_C1_3	881	52.5	362	0.55	67	19.1	1.10
	PL1_C1_4	1,032	96.0	312	0.55	67	17.5	1.59
	PL1_A_1-01	1,107	115.8	159	0.72	100	18.1	1.98
	PL1_A_1-02	1,943	16.8	215	0.72	100	9.5	0.20
	PL1_B_3	1,047	25.8	54	0.43	100	19.0	0.09
	PL1_B_4-01	1,745	19.8	268	0.43	100	10.8	0.20
	PL1_B_4-02	1,443	0.5	276	0.43	100	13.3	0.01
	PL1_B_5	1,040	34.0	251	0.43	100	17.8	0.54
	PL1_C1_1	700	14.2	133	0.55	100	23.4	0.20
	PL1_B_1	1,510	28.7	263	0.43	50	12.7	0.17
	PL1_B_2-01	1,555	9.4	243	0.43	50	12.4	0.05
	PL1_B_2-02	1,736	24.7	230	0.43	50	11.0	0.11
M5	M5_B_1	2,174	28.3	245	0.43	100	8.0	0.20
	M5_B_2	1,264	38.1	329	0.43	100	14.8	0.66
	M5_C2_1	804	12.4	201	0.40	100	21.3	0.17
	M5_C2_2	2,005	31.7	443	0.40	100	8.5	0.39
	M5_C2_3	1,408	225.4	331	0.40	100	13.4	3.29
M4	M4_C2_1	976	6.9	363	0.40	64	17.8	0.09
	M4_C2_2	829	2.8	110	0.40	64	21.6	0.01

*1)貯留層上面平均深度は、計算に使用した貯留層上面の海底面からの深度。

*2)坑井で確認されるファシス毎の代表的なN/G比。

表 4.9-2　各区域における貯留可能量

区域	区域番号	貯留層							遮蔽層			地質構造	
		*1)上面平均深度(m)	貯留面積(km^2)	平均層厚(m)	*2)N/G比	堆積体出現率(%)	性状(平均孔隙率%)	概算貯留可能量(億t)	区域の貯留可能量(億t)	平均層厚(m)	最小層厚(m)	遮蔽能力(堆積環境・岩相)	構造安定度(断層など)	地層傾斜(deg)
Ⅰ	PL2_B_1	1,486	19.1	58	0.43	100	13.9	0.05	2.79	98	44	半深海性・泥岩および砂泥互層	遮蔽層準および貯留層準を切る断層は分布しない	西上がりに25.7° 南上がりに5.8°
	PL1_A_1-01	1,107	115.8	159	0.72	100	18.1	1.98		68	20			
	PL1_B_1	1,510	28.7	263	0.43	50	12.7	0.17		50	20			
	PL1_B_2-02	1,736	24.7	230	0.43	50	11.0	0.11		50	20			
	PL1_B_3	1,047	25.8	54	0.43	100	19.0	0.09		57	20			
	M5_C2_2	2,005	31.7	443	0.40	100	8.5	0.39		53	20			
Ⅱ	PL2_B_3-01	642	2.9	51	0.43	100	25.1	0.01	1.61	57	41		断層があるが遮蔽層準を切っていない	西上がりに5.7° 南上がりに3.3°
	PL2_B_3-02	642	0.2	16	0.43	100	25.5	0.00		83	66			
	PL2_C1_1	901	50.3	84	0.55	100	20.7	0.40		101	36			
	PL1_B_5	1,040	34.0	251	0.43	100	17.8	0.54		114	44			
	M5_B_2	1,264	38.1	329	0.43	100	14.8	0.66		111	43			
Ⅲ	PL2_A_1	1,005	134.5	92	0.72	100	19.3	1.41	7.40	158	66		断層があるが遮蔽層準を切っていない	東上がりに14.6° 南上がりに20.1°
	PL2_B_2-02	1,370	0.3	68	0.43	100	15.0	0.00		109	97			
	PL1_B_4-02	1,443	0.5	276	0.43	100	13.3	0.01		112	97			
	PL1_C1_3	881	52.5	362	0.55	67	19.1	1.10		174	104			
	PL1_C1_4	1,032	96.0	312	0.55	67	17.5	1.59		148	85			
	M5_C2_3	1,408	225.4	331	0.40	100	13.4	3.29		162	95			
Ⅳ	PL1_C1_1	700	14.2	133	0.55	100	23.4	0.20	0.37	57	20		遮蔽層準および貯留層準を切る断層は分布しない	西上がりに4.0° 南上がりに8.5°
	M5_C2_1	804	12.4	201	0.40	100	21.3	0.17		53	20			
Ⅴ	PL1_B_2-01	1,555	9.4	243	0.43	50	12.4	0.05	0.05	46	23		遮蔽層準および貯留層準を切る断層は分布しない	西上がりに0.7° 北上がりに1.6°
Ⅵ	M4_C2_1	976	6.9	363	0.40	64	17.8	0.09	0.09	116	105		遮蔽層準および貯留層準を切る断層は分布しない	西上がりに6.9° 南上がりに5.3°
Ⅶ	M4_C2_2	829	2.8	110	0.40	64	21.6	0.01	0.01	134	113		遮蔽層準および貯留層準を切る断層は分布しない	西上がりに6.3° 北上がりに10.7°
Ⅷ	PL2_A_3	1,870	14.2	81	0.72	100	10.5	0.07	0.91	79	26		遮蔽層準および貯留層準を切る断層は分布しない	西上がりに1.2° 北上がりに8.9°
	PL2_B_2-01	1,686	24.8	71	0.43	100	12.0	0.07		88	20			
	PL2_C1_3	1,775	24.9	49	0.55	100	11.4	0.06		109	48			
	PL1_A_1-02	1,943	16.8	215	0.72	100	9.5	0.20		82	26			
	PL1_B_4-01	1,745	19.8	268	0.43	100	10.8	0.20		91	20			
	PL1_C1_2	1,694	21.1	304	0.55	33	11.0	0.11		130	75			
	M5_B_1	2,174	28.3	245	0.43	100	8.0	0.20		79	20			
Ⅸ	PL2_A_2	818	8.7	68	0.72	100	22.0	0.08	0.26	82	33		遮蔽層準および貯留層準を切る断層は分布しない	東上がりに3.1° 南上がりに7.8°
	PL1_B_6	1,086	23.3	397	0.43	33	16.5	0.18		97	33			
佐渡西方－能登東方沖海域の合計									13.49					

*1)貯留層上面平均深度は、計算に使用した貯留層上面の海底面からの深度。
*2)坑井で確認されるファシス毎の代表的なN/G比。

表 4.9-3　各区域における評点結果

区域	区域番号	貯留層				遮蔽層		地質構造		評点	貯留可能域 可：○ 不可：×
		*1)上面-下面深度(m)	平均層厚(m)	*2)性状(平均孔隙率%)	*2)貯留可能量(億t)	平均層厚(m)	遮蔽能力(堆積環境・岩相)	構造安定度(断層など)	地層傾斜(deg)		
Ⅰ	PL2_B_1	1,047～2,005	377	12.2	2.79	63	半深海性・泥岩および泥岩優勢砂泥互層	遮蔽層層準および貯留層層準を切る断層は分布しない	西上がりに25.7°南上がりに5.8°	1.2	○
	PL1_A_1-01										
	PL1_B_1										
	PL1_B_2-02										
	PL1_B_3										
	M5_C2_2										
Ⅱ	PL2_B_3-01	642～1,264	629	18.5	1.61	93		断層があるが遮蔽層層準を切っていない	西上がりに5.7°南上がりに3.3°	6.5	○
	PL2_B_3-02										
	PL2_C1_1										
	PL1_B_5										
	M5_B_2										
Ⅲ	PL2_A_1	881～1,443	561	13.1	7.40	144		断層があるが遮蔽層層準を切っていない	東上がりに14.6°南上がりに20.1°	3.2	○
	PL2_B_2-02										
	PL1_B_4-02										
	PL1_C1_3										
	PL1_C1_4										
	M5_C2_3										
Ⅳ	PL1_C1_1	700～804	300	22.0	0.37	55		遮蔽層層準および貯留層層準を切る断層は分布しない	西上がりに4.0°南上がりに8.5°	0	×
	M5_C2_1										
Ⅴ	PL1_B_2-01	1,555	243	12.4	0.05	46		遮蔽層層準および貯留層層準を切る断層は分布しない	西上がりに0.7°北上がりに1.6°	0	×
Ⅵ	M4_C2_1	976	363	17.8	0.09	116		遮蔽層層準および貯留層層準を切る断層は分布しない	西上がりに6.9°南上がりに5.3°	0	×
Ⅶ	M4_C2_2	829	110	21.6	0.01	134		遮蔽層層準および貯留層層準を切る断層は分布しない	西上がりに6.3°北上がりに10.7°	0	×
Ⅷ	PL2_A_3	1,686～2,174	390	12.2	0.91	94		遮蔽層層準および貯留層層準を切る断層は分布しない	西上がりに1.2°北上がりに8.9°	0	×
	PL2_B_2-01										
	PL2_C1_3										
	PL1_A_1-02										
	PL1_B_4-01										
	PL1_C1_2										
	M5_B_1										
Ⅸ	PL2_A_2	818～1,086	422	19.0	0.26	89		遮蔽層層準および貯留層層準を切る断層は分布しない	東上がりに3.1°南上がりに7.8°	0	×
	PL1_B_6										
佐渡西方ー能登東方沖海域の合計					13.49						

*1)海底面からの深度。
*2)下線を引いた数値の評点は0.1点。

注）表の塗り潰しの色は、表 5.2-1 の評価表に基づく。

4.9.7　調査井の検討

CO_2貯留可能域として抽出した範囲について、調査井の位置および掘削深度を検討した。掘削位置は、以下の基準を満たすように選定した。なお、掘削位置は地質学的な条件のみにより選定したもので、海象、航路、漁場等の条件は考慮していない。

1）遮蔽層および貯留層を確認できること

2）抽出した貯留可能域の個々の貯留候補域が確認できること

3）海底下深度は 3,000 m 以浅であること

掘削する調査井は、上記の三つの基準を満たし、既存の基礎試錐の位置も考慮したうえで、貯留可能量が最大となる貯留候補区域Ⅲの背斜部に位置する地点に垂直井とし、上位よりユニット PL3 からユニット M4 まで掘り抜く坑井として設定した。

【参考文献】

1) 石油公団、“平成 13 年度 国内石油・天然ガス基礎調査 基礎物理探査「佐渡沖南西」調査報告書”(2003)
2) 独立行政法人石油天然ガス・金属鉱物資源機構、“平成 20 年度国内石油・天然ガス基礎調査基礎物理探査「佐渡西方 3D」データ解釈報告書”(2010)
3) 独立行政法人石油天然ガス・金属鉱物資源機構、“平成 23 年度国内石油天然ガス基礎調査基礎物理探査「能登東方 3D」データ解釈報告書”(2013)
4) 石油公団、“昭和 56 年度 国内石油・天然ガス基礎調査 基礎試錐「直江津沖北」調査報告書”(1982)
5) 独立行政法人石油天然ガス・金属鉱物資源機構、“平成 15 年度 国内石油・天然ガス基礎調査 基礎試錐「佐渡南西沖 S」「佐渡南西沖 D」調査報告書”(2005)
6) 独立行政法人石油天然ガス・金属鉱物資源機構、“平成 23～25 年度 国内石油・天然ガス基礎調査 基礎試錐「上越海丘」調査報告書”(2014)
7) 豊島　剛志(2014)、新潟県およびその周辺地域の地質構造--3 方向の大構造からなる東北日本弧の地質構造モデルとその形成テクトニクス--、石油技術協会誌、79、4、203-211、石油技術協会
8) T Nakajima, M Satoh, Y Okamura 1998Channel-levee complexes, terminal deep-sea fan and sediment wave fields associated with the Toyama Deep-Sea channel system in the Japan Sea Marine Geology V.147, Issues 1–4, May 1998, Pages 25-41
9) 新版地学事典(1996)、平凡社
10) 岡村 行信(2002)、新第三紀以降の歪み集中帯、日本海東縁の活断層と地震テクトニクス、111-121、東京大学出版会、東京
11) 小林　巌雄・立石　雅昭(1992)、新潟地域における新第三系の層序と新第三紀古地理、地質学論集・古日本海東縁の新第三系--層序・古地理・古環境--、37、53-70、日本地質学会
12) 星　博幸(2018)、中新世における西南日本の時計回り回転、地質学雑誌、124、9、675-691、日本地質学会

13) 竹内　章(2017)、日本海富山トラフ剪断帯とアムールプレート東縁の現生テクトニクス(SCG62-P05)(ポスターセッション)(演旨)、日本地球惑星科学連合大会予稿集
14) 中嶋健・岩野英樹・檀原徹・山下透・柳沢幸夫・谷村好洋・渡辺真人・佐脇貴幸・中西敏・三石裕之・山科起行・今堀誠一(2019)、富山県八尾地域の新生界年代層序の再検討とテクトニクス、地質学雑誌、125、7、483-516、日本地質学会
15) 気象庁、“一元化震源”、
https://www.data.jma.go.jp/svd/eqev/data/bulletin/index.html
16) 財団法人地球環境産業技術研究機構、“平成 17 年度二酸化炭素固定化・有効利用技術等対策事業「二酸化炭素地中貯留技術研究開発」成果報告書”(2006)

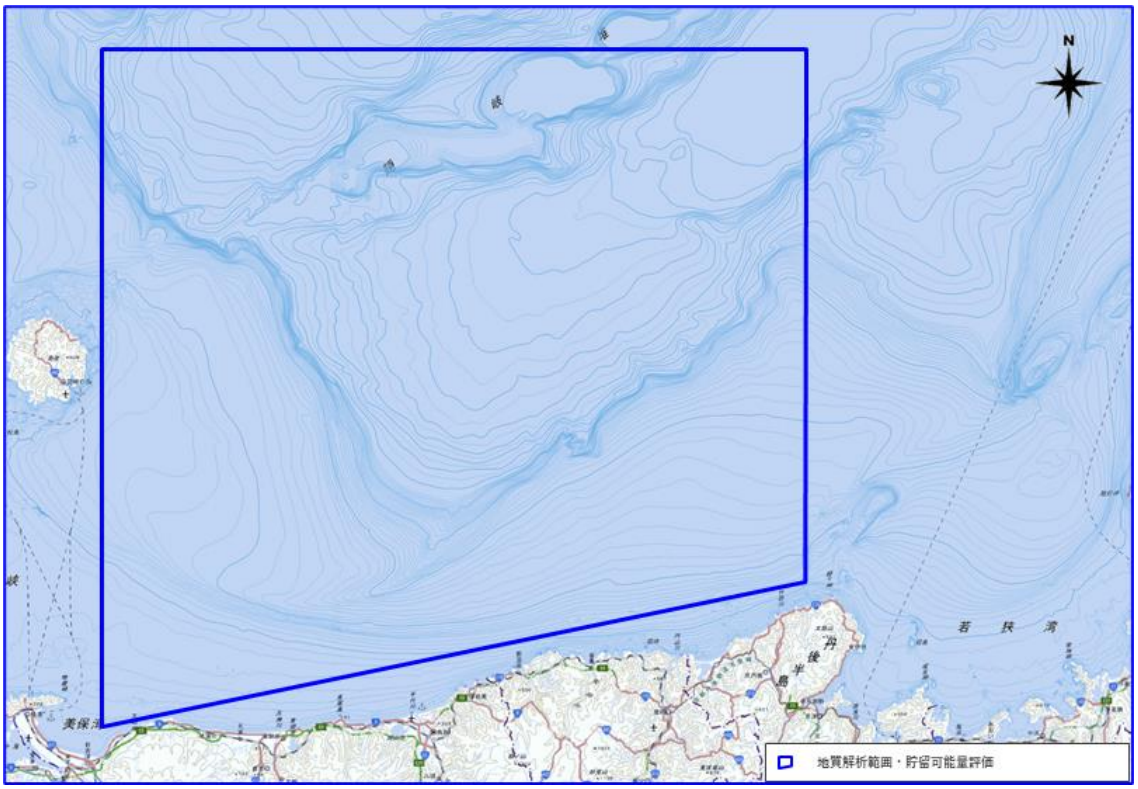
4.10　地質解析と貯留適地評価（鳥取沖）

平成２７年度委託事業において、鳥取沖の地質解析・貯留可能量評価を行った。この結果、二つの貯留層候補（上部貯留層、下部貯留層）を抽出し、合計 3.47 億 t の貯留可能量を評価した。続けて 2019 年度委託事業において、基礎物理探査 3D 探査データを用いた地質解析を行った。本業務では、2019 年度地質解析結果に加え、基礎物理探査 2D 探査データ、2019 年度実施の 2D 探査データを用いた地質解析および貯留可能量評価を実施した。

4.10.1　概要

(1)　調査範囲

図 4.10-1 に調査範囲を示す。鳥取市の沖合約 10 km に位置し、南北方向が約 150 km、東西方向が約 190 km の範囲である。調査範囲は、南から北に向かって、大陸棚、大陸斜面、陸棚斜面下と分類でき、水深は最大約 1,700 m である。



注）国土地理院ホームページ、地理院地図[1)]を用いて作成。

図 4.10-1　調査範囲位置図

(2) 使用データ

調査範囲では、基礎物理探査による 3D 弾性波探査が実施されおり、基礎試錐による試掘井が掘削されている。

以下に使用したデータの一覧を示す。

A) 3D 探査データ

1) 2016～2017 年度 国内石油・天然ガス基礎調査　基礎物理探査「鳥取～兵庫沖 3D」[2)] データ

B) 2D 探査データ

1) 2015 年度　既存データ再処理データ[3)]

2) 2018 年度　既存データ再処理データ[4)]

3) 2019 年度　既存データ再処理データ[5)]

4) 2014 年度　二酸化炭素貯留適地調査事業取得データ[6)]

5) 2019 年度　二酸化炭素貯留適地調査事業取得データ[7)]

C) 坑井データ

1) 基礎試錐「鳥取沖」データ[8)]

2) 基礎試錐「香住沖」データ[9)]

4.10.2 地質

(1) 地質概要

地質解析範囲を含む山陰沖から北陸沖にかけては多くの堆積盆地が分布し、おおむね地質は、著しく褶曲した中新世の地層を鮮新世の地層が不整合で覆い、中新世から鮮新世にかけての層厚は 5,000 m 以上である。岩崎（1992）[10)] によれば九州西方～山陰沖海域では、褶曲構造やこれに伴う逆断層を削剥する大規模な傾斜不整合が発達する。調査対象範囲は、山陰沖堆積盆地の一部であり、南部に鳥取沖堆積盆地、北部に隠岐トラフが分布する。

(2) 地質構造発達史

山陰沖堆積盆地は、新潟・秋田でみられるグリーンタフ堆積盆地とよく似た特徴を有しており、その構造運動は図 4.10-2 に示すように大きく三段階に区分される。

1) 第一段階

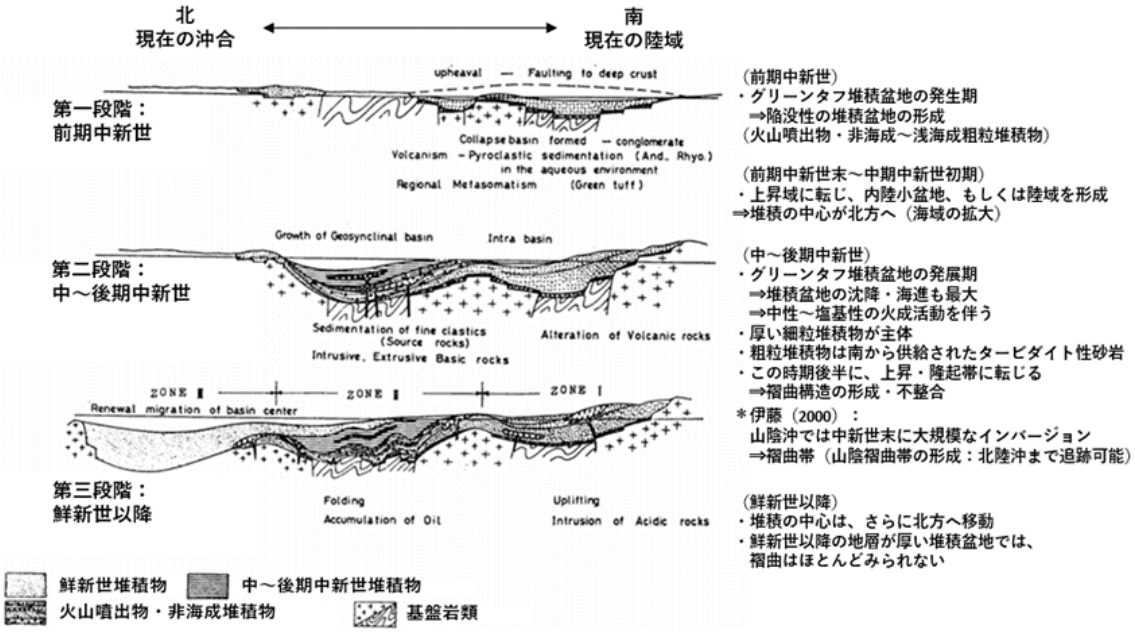
前期中新世は陥没性の堆積盆地が形成され、主な堆積物は火山噴出物や非海成～浅海成の粗粒砕屑物から構成される。前期中新世末期から中期中新世初期にかけては、堆積盆地は上昇域に転じ、ブロック化し、内陸小盆地あるいは陸域となり、堆積の中心は北方へと移動するとともに、海域が拡大した。

2）第二段階

中期から後期中新世は、堆積盆地の沈降が進み、海進が最大となった。主な堆積物は細粒砕屑物で厚く堆積しており、南方から供給されたタービダイト性の粗粒砕屑物を挟む。堆積盆地の沈降域と南方の隆起域との境界部では火山活動があり、この火山活動により中性から塩基性の火山砕屑物が供給された。この時期の後半には、厚い堆積物が堆積した沈降域が上昇・隆起域に転じ、褶曲構造を形成した。

3）第三段階

鮮新世以降では、中新世末からの上昇・隆起運動に伴い、堆積の中心がさらに北方に移動した。鮮新世以降の地層が厚い堆積盆地では、地層の褶曲等はほとんどみられず、この点は東北日本の日本海側グリーンタフ堆積盆地とは異なる。

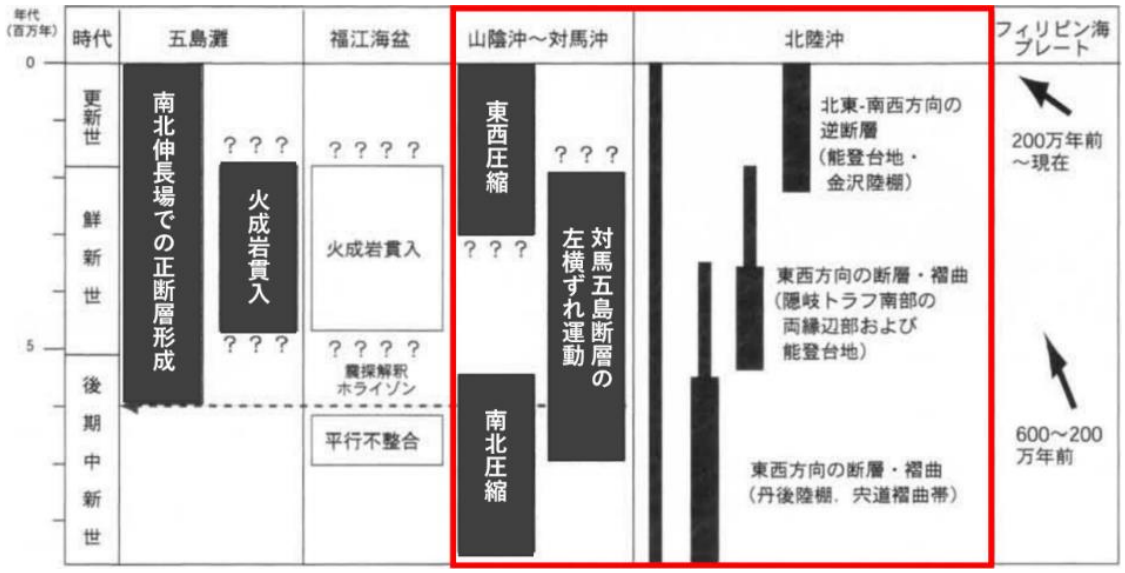


注）田中（1979）[11] の Fig.5 から引用し、加筆。

図 4.10-2　グリーンタフ堆積盆地の発展様式

第二段階における褶曲構造の形成について、田中・小草（1981）[12] により、「中新世の地層の堆積中あるいは堆積後に激しい褶曲運動がおこり、褶曲構造の傾斜は北緩傾斜・南急傾斜で、褶曲構造の南翼部は逆断層系の断層で切られていることが多い」とされている。伊藤（2000）[13] は、「山陰沖では、強い圧縮応力の下で、中新世末に大規模なインバージョンが起こり、東北東–西南西・北東–南西方向の褶曲が形成した」としている。この構造は東方の北陸沖まで追跡できることが指摘されている。

伊藤・荒戸（1999）[14]によれば、九州西方から山陰沖に顕著にみられる傾斜不整合の形成は、6 Ma 前後とされる。九州西部・山陰沖・北陸沖の構造発達に関わるイベントの変遷を、図 4.10-3 に示す。

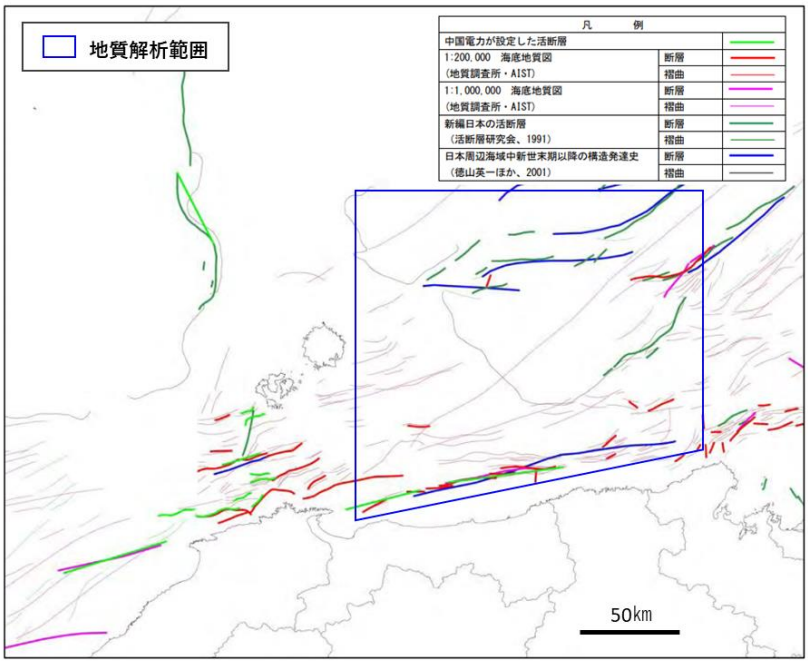


注）徳山ほか（2001）[15]の Table.9 から引用し、加筆。

図 4.10-3　九州西部・山陰沖・北陸沖の構造発達史

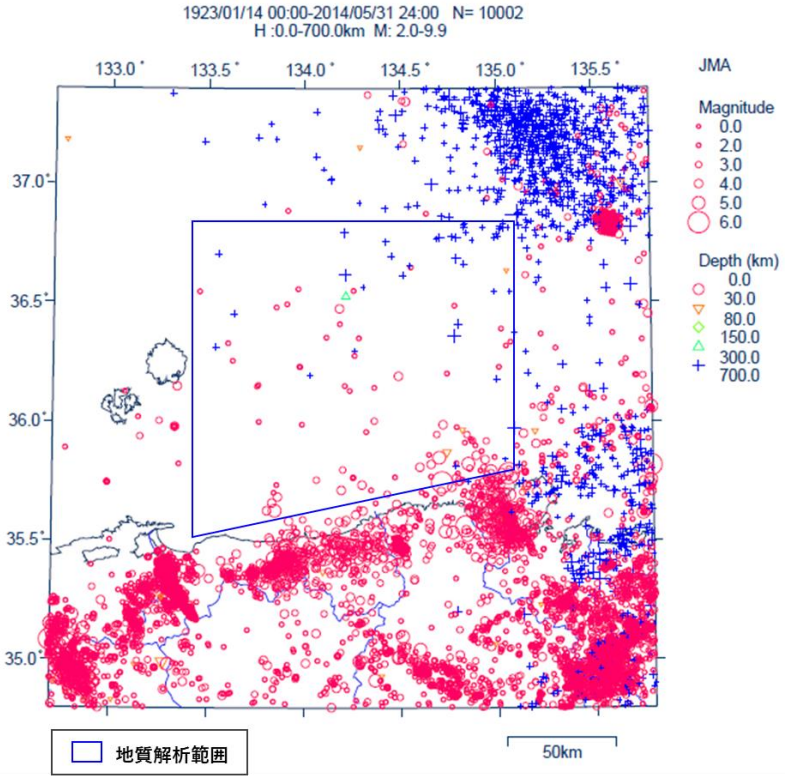
(3)　断層分布

図 4.10-4 に鳥取沖における断層分布を示す。調査範囲においては、南部で活断層の存在が示唆されている。なお、鳥取県西部内陸部では、2004 年にマグニチュード 7.3 の地震（鳥取県西部地震）が発生している。図 4.10-5 に、1923～2014 年の地震の発生状況と震源分布を示す。確認されている地震の多くは陸域を震源とし、震源の深さは 30 km 以浅である。調査範囲から 50 km 以上離れた北東部および東部には、地震が頻発している地域が存在するが、震源の深さは 300～700 km と非常に深い。



注）鳥取県米子市ホームページ[16]より引用し、加筆。

図 4.10-4　鳥取沖における海域断層の分布



注１）気象庁提供地震カタログを用いて検索[17]
注２）検索内容：期間　1923.1.14 - 2014.5.31、深度　0 - 700 km、マグニチュード　2.0 - 9.9

図 4.10-5　調査範囲およびその周辺の地震発生状況および震源分布

4.10.3　地質構造解析

(1)　坑井地質層序

調査範囲において、基礎試錐「鳥取沖」および「香住沖」の 2 坑の基礎試錐が掘削されており、その地質概要および層序を以下に示す。

基礎試錐「鳥取沖」では、下位から古浦層・成相寺層・古江層下部（以上、中新統）・更新統に区分されている。これらの地層の岩相および底棲有孔虫化石分析の結果から推定される堆積環境は、おおむね海成の泥質岩が主である。堆積環境の変遷を見ると、成相寺層堆積時には、もっとも水深が深くなり、その後、上位に向かってしだいに浅海化する傾向がみられる。これは既存文献に示される地質構造発達史とも整合的である。

次に、基礎試錐「香住沖」は、下位から中新世の地層である A 層・B 層・C 層・D 層・E 層・F 層、続いて鮮新世の地層である G 層・更新世の地層である H 層と区分されている。これらの地層の岩相および底棲有孔虫化石分析の結果から推定される堆積環境は、海成であるが、E 層以深では火山岩類主体、F 層以浅では砕屑岩が主体となる。F 層以浅については、基礎試錐「鳥取沖」と同様に、上位ほど浅海化する傾向がみられる。

(2)　坑井における貯留層層準および遮蔽層層準

基礎試錐「鳥取沖」における孔隙率は、成相寺層上部の砂岩で 28～34%、成相寺層中部の砂岩で 18～24%と、良好な値を示す。一方で古浦層では 3～4%と低い値を示す。成相寺層下部の砂岩・凝灰岩については、深度 3,000 m を超える。この坑井は背斜構造の頂部に掘削されており、坑井から離れた地点では、同層準の出現深度はさらに深くなることが想定される。よって基礎試錐「鳥取沖」では、成相寺層上部の砂岩（深度 955～1,215 m）および成相寺層中部の砂岩・流紋岩質凝灰岩（深度 1,843～2,474 m）が貯留層層準の候補となる。遮蔽層については、それぞれの貯留層層準の上位に、古江層下部の泥岩および成相寺層の泥岩がそれぞれ存在するため、古江層下部と成相寺層の泥岩を遮蔽層の候補とした。なお、スレッシュホールド圧力の測定結果では、古江層下部の泥岩で 0.52～0.69 MPa、成相寺層の泥岩で 1.65～2.21 MPa の値が得られている。

次に基礎試錐「香住沖」では、D2 層の流紋岩で孔隙率がおよそ 13%や 22%の値が得られており、コア観察結果からは、一部でフラクチャーの発達とそれに沿ったバグ状の孔隙が認められている。しかしながら、空気浸透率は 0.03 mD ときわめて低い値を示し、貯留岩として適していない。D2 層同様に、火山岩類である A 層・B 層の浸透率も非常に低い。

これらのことから、基礎試錐「香住沖」については、貯留層層準の候補は選択することができなかった。遮蔽層については、基礎試錐「鳥取沖」の古江層下部と対比される F 層のシ

ルト質泥岩の岩相・層厚および堆積環境の観点から、遮蔽層層準の候補とした。なお、F 層のスレッシュホールド圧力の測定結果では、0.69～2.07 MPa の値が得られている。基礎試錐「鳥取沖」で抽出した貯留層および下位の遮蔽層（成相寺層の泥岩）については、基礎試錐「香住沖」では確認できなかった。

(3)　解析ホライズンの設定

既存文献調査結果、抽出した坑井における貯留層層準・遮蔽層層準の候補を考慮して、層序総括図を作成し、解析するホライズンの設定を行った（図 4.10-6）。

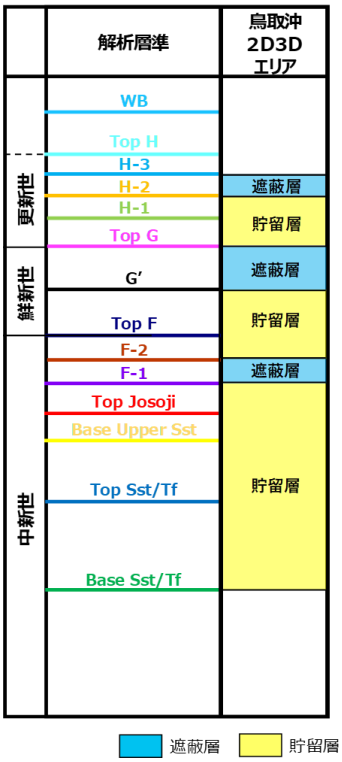


図 4.10-6　層序総括図

設定したホライズンは 14 ホライズンで、これらは 2019 年実施の地質解析で用いたホライズンである。下位から、成相寺層中部の砂岩の下限を Base Sst/Tf、その上限を Top Sst/Tf、その上位の泥質岩主体部分の上限を Base Upper Sst、成相寺層の上面を Top Josoji と設定した。成相寺層の上位の古江層下部はその上面を Top F とし、内部に、特徴的な反射面として F-1 と F-2 を設定した。基礎試錐「鳥取沖」および「香住沖」の両坑井においては、主に泥岩から構成されるが、調査範囲中央部では、層厚が比較的厚くなり、坑井では確認できていない貯留層相当の岩相の分布について評価を行うために設定した。基礎試錐「鳥取沖」

では欠如している鮮新世ではその内部にG'を設定した。更新世の基底をTop G、上面をTop Hとし、更新世の地層中の特徴的な反射面としてH-1、H-2、H-3を設定した。これらの13ホライズンに海底面をくわえて14ホライズンとした。Top Gホライズン以浅の、H層中の各ホライズンについては、調査範囲の南部では埋没深度が浅く、貯留層・遮蔽層の対象層となっていないが、北部に向かって埋没深度が深くなり、調査範囲の北部においては貯留層や遮蔽層の対象層となりうることから、解析するホライズンとした。

(4) ホライズン追跡

3D探査データを用いて、設定した解析ホライズンの追跡を行った。各ホライズンの反射波の連続性は一部地域を除き、おおむね良好で、特に、Top Fホライズン以浅で明瞭である。各ホライズンは大局的に北に向かって深くなる傾向を示し、調査範囲中央部付近で、もっとも深くなる。最下位に設定したBase Sst/Tfホライズンは、他のホライズンと比較するとやや連続性が乏しい。これは貫入岩の影響と考えられる強反射や火山砕屑物等による岩相の変化等の可能性がある。基礎試錐「香住沖」周辺では、Base Sst/Tfホライズン以浅は、その上位のF-2ホライズンまでがオンラップしていることから、成相寺層堆積時にはすでに火山岩が構造的高まりを形成していたと考えられる。Top Fホライズンは、広域に追跡可能な不整合面であり、下位の地層を削剥している。Top Fホライズン以深では、逆断層の発達に伴って形成された褶曲構造が顕著にみられる。Top Gホライズンについても不整合面が追跡できるが、南西部では、下位の地層にオンラップすることで尖滅し欠如している。

追跡したホライズンの平面的な分布を確認する目的で、時間構造図を作成した。時間構造図から、Base Sst/Tf、Top Sst/Tf、Base Upper Sst、Top Josojiホライズンは、東西方向の明瞭な背斜構造が多数確認できる。各ホライズンは、大局的に北に向かって深くなる傾向を示し、地質解析範囲中央部の隠岐トラフ付近でもっとも深くなる。Base Sst/Tfホライズンは、他のホライズンと比較するとやや連続性が乏しい。これは、Top Sst/Tf～Base Sst/Tfホライズン間に分布する火山岩（貫入岩）と考えられる強反射波や、火山砕屑物等による岩相の変化等が影響している可能性があるためである。また「香住沖」周辺ではBase Sst/Tfホライズンに、F-2ホライズン以下がオンラップしている。このことから、「香住沖」周辺では、成相寺層堆積時にはすでに火山岩が構造的高まりを形成していたと考えられる。Top Fホライズンは、広域に追跡可能な不整合面であり、下位の地層を削剥している。またTop Fホライズン以深では、逆断層の発達に伴って形成された褶曲構造が顕著にみられる。Top Gホライズンについても不整合面が追跡できるが、「鳥取沖」周辺では欠如している。

また、更新統（H層）内では、反射波が下位の地層にダウンラップし、全体として南から

北に前進する様子が確認できる。

弾性波探査データ、基礎試錐の坑井データ、地質解析データ等を用いて、三次元速度構造モデルを作成した。作成した三次元速度モデルの平面グリッド間隔は 100 m、時間方向が 4 msec のサンプリングレートとした。作成した速度モデルを基に、時間構造図および弾性波探査時間断面の深度領域への変換を行った。

(5) 断層の分布

断層の解析は、弾性波探査断面上における反射波の明瞭な変位を主な根拠とし実施した。3D 探査範囲においては、2019 年度に 3D 探査データから抽出したシミラリティアトリビュートを併用して、断層の平面的連続性についても検討した。シミラリティアトリビュートは、弾性波データの連続性の良し悪しを、白から黒のグラデーションで示す。断層は黒色で線状に現れることが多い。

断層分布の特徴は、大きく二分され、Top F ホライズン以深の地層の形成に大きな影響を与えた東西方向に伸びる逆断層系の断層と、Top F ホライズン以浅で卓越する南北方向の延びを持つ正断層系の断層である。

Top F ホライズン以深の断層は、逆断層系の発達によって形成されたと考えられ、褶曲構造の南翼部において変位量が大きく、東西方向に数十 km に亘って追跡できる。

Top F ホライズン以浅の断層は、下位の構造的高まりの直上や、堆積盆地の中心部付近等に多く認められ、変位量は小さい。Top H ホライズン以浅にまで達するものは多くない。

(6) 地質構造発達史

各ホライズンを平坦化した堆積時の復元深度断面図、各ホライズン間の等層厚線図、および既存文献調査の結果を参考にして、調査範囲の構造発達史について考察した。

Top Sst/Tf ホライズン時は、日本海拡大に伴い堆積盆地が発達した時期に当たり、鳥取堆積盆地の中央部付近で下部貯留層がやや厚く堆積した。この時期、逆断層系の断層の顕著な活動はない。Top Josoji ホライズン時になると、南北圧縮の応力場となり、東西方向の逆断層の活動が始まったと考えられる。南北圧縮による逆断層の発達は Top F ホライズン以前、おそらく F-2 ホライズンの頃には収束した。Top F ホライズン時には、広域な不整合面を形成し、その後東西方向の圧縮の場となり、Top G ホライズンの頃には、横ずれ運動の影響で堆積盆地の中央部は徐々に沈降し、正断層系の断層が卓越した。少なくとも H-2 ホライズン頃までは、同様の傾向がみられる。Top H ホライズン時は、深部構造の影響はほとんどみられない。

4.10.4　堆積相解析

堆積相解析のワークフローは、図 4.10-7 に示すように、まず 2D 探査データにおいて解析されたホライズンを用いて、各ホライズン間について 2D 探査データの断面において反射波列の形状（サイスミックファシス）の区分および反射波列端のラッピングパターンをマッピングし、このマップと区間層厚の分布および 2019 年度鳥取沖 3D 堆積相解析の結果を合わせて、ファシスマップの作成を行い堆積システムおよび砕屑物の供給系を解釈するという流れで行った。以下にファシスマップの作成に関して記載する。

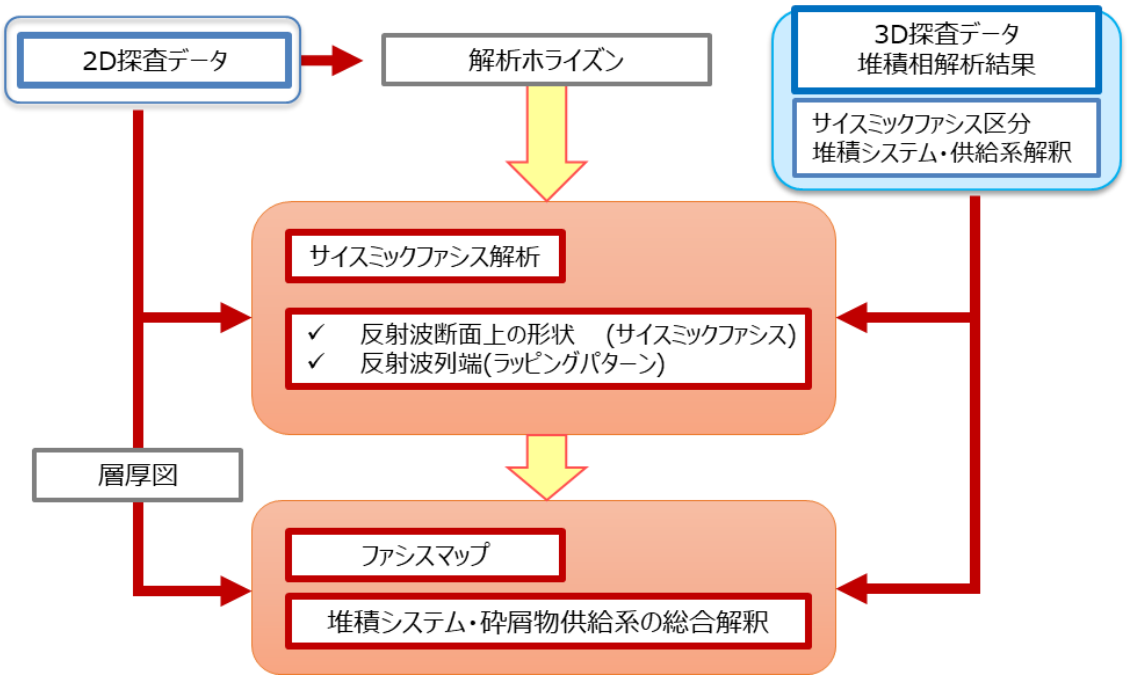


図 4.10-7　堆積相解析のワークフロー

(1)　ファシスマップ

①　サイスミックファシス

サイスミックファシスは反射波が作る形状やパターンであり、堆積物の分布形態、堆積システムを示す重要な情報源となる。3D 探査データにおける反射波断面からサイスミックファシスを認定し、その分布を平面的にマッピングしたうえで、振幅の平面的分布やラッピングパターン、坑井データと統合することにより、堆積物の供給系や堆積体の分布形態を推定する。2019 年度業務の地質解析においてサイスミックファシスは、3D 探査データの断面においてみられる反射波の形状の特徴から七つに区分した。本業務においても 3D 探査データと同様なサイスミックファシスが連続あるいは分布することが確認されたため、表 4.10-1 に示す同様の 7 区分を採用した。各ファシスの概要を図 4.10-8 に示す。以下に、推

定された堆積システムおよび岩相について記述する。

・ファシス A　：チャネルベルトおよびローブの分枝状チャネルを埋積する砂岩・砂岩優勢の砂岩泥岩互層。礫岩・含礫泥岩を含む。
・ファシス B　：ローブ中央部に堆積する砂岩・砂岩優勢の砂岩泥岩互層。
・ファシス C　：ローブ縁辺~末端部に堆積する泥岩優勢の砂岩泥岩互層。
・ファシス D　：斜面に堆積する泥岩または泥岩優勢の砂岩泥岩互層。
・ファシス E　：斜面およびスロープチャネルに堆積する泥岩または泥岩優勢の砂岩泥岩互層。
・ファシス F　：ガスを胚胎する層。堆積システムは問わず、砂岩・砂岩優勢の砂岩泥岩互層。
・ファシス G　：斜面～ベーズンに形成されるマストランスポート堆積物（MTD)。礫岩・砂岩・泥岩混合堆積物。MTD とは、重力によって直接起こる岩石や砕屑物の斜面下方への移動であるマスムーブメントによって形成された堆積物を示す。

②　ラッピングパターン

次に、弾性波探査断面において、反射波が他の反射波に突き当たり、収れんしている状態である反射波列端を確認した。時間面である反射波列端のラッピングパターン（累重様式）は地層の堆積環境や堆積システムの時空間的変遷を示す。

表 4.10-1　反射波の形状と特徴（サイスミックファシス区分）

ファシス	スケッチ	断面の特徴	堆積システム解釈	推定岩相
A		垂直・水平に不連続、下に凸の形状、強振幅	チャネルベルト/ローブの分枝状チャネル	砂岩・砂岩優勢互層（礫岩・含礫泥岩）
B		連続・平行、中程度～強振幅	ローブ中央部	砂岩・砂岩優勢互層
C		連続・平行、中程度～弱振幅	ローブ縁辺～末端部	泥岩優勢互層
D		不連続・混沌、弱振幅	斜面～ベーズン	泥岩・泥岩優勢互層
E		比較的不連続、弱振幅、一部強振幅、低頻度で下に凸の形状	斜面/スロープチャネル	泥岩・泥岩優勢互層一部砂岩挟在
F		非常に強い振幅、比較的直線的な形状、低い周波数	(ガスを胚胎する層)	砂岩・砂岩優勢互層
G		すべり面を持つ、不連続、下に凸の形状、強振幅	マストランスポート堆積物 (MTD)	礫岩・砂岩・泥岩混合堆積物

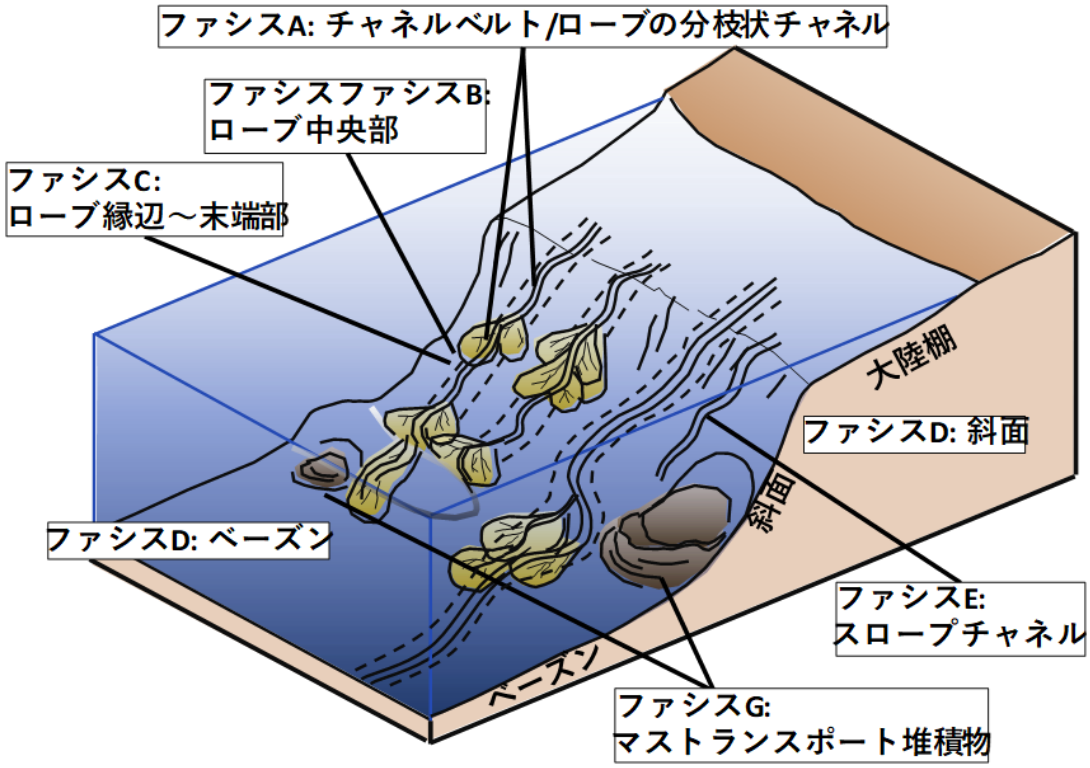


図 4.10-8　推定した堆積システムの模式図

(2)　解釈結果

弾性波探査データおよび坑井データを用いた堆積学的解析結果と、それらから考えられる堆積システム・砕屑物供給系の解釈結果を述べる。堆積システムに関しては、坑井における有孔虫分析結果等から推測される堆積環境の変遷から、中新世から更新世にかけて深海環境から陸棚環境に全体的には浅海化していったことが示唆される。

①　坑井における堆積層区分

基礎試錐の各坑井における GR カーブ、岩相柱状図および弾性波探査断面、弾性波探査データを用いて推定した堆積システム、および坑井位置におけるファシス区分の対応を確認した。サイスミックファシスによる推定岩相と坑井で確認された岩相は大部分の区間で一致した。ただし、基礎試錐「鳥取沖」の Base Sst/Tf ホライズンから Top Sst/Tf ホライズン間においては、サイスミックファシス区分ではファシス E としたが、坑井で確認されている岩相は砂岩・凝灰岩優勢の泥岩との互層であった。この不一致は、Top Josoji ホライズンより深部における基礎試錐「鳥取沖」付近の弾性波探査データが白抜けで解像度が低下していることによるものと考えられる。ただし、上位層にガス層は認められず、白抜けの原因ははっきりしない。

②　堆積システムおよび砕屑物の供給方向

表 4.10-2 に解析により推定した堆積システムおよび砕屑物の供給方向についてまとめた。

表 4.10-2　堆積システムおよび砕屑物の供給方向

解析区間	特徴
Base Sst/Tf～Top Sst/Tf 区間	・ 中央南部から中央北部にファシス A が発達し、ファシス A に伴い並列するようにファシス B およびファシス C が分布する。東部あるいは西部でのファシス A～C の分布は限定的で、主にファシス D、ファシス E からなる。 ・ ベーズン環境において層厚が比較的厚い相対的にやや深い環境と推測される範囲にファシス A のチャネルベルトが発達し、その経路にチャネルからのあふれ出しあるいはローブを伴っていたと考えられる。これらの堆積体は、砂岩もしくは砂岩・凝灰岩からなる可能性もあるが、火成活動の影響を強く受けた凝灰岩や凝灰角礫岩からなる可能性がある。
Top Sst/Tf～Base Upper Sst 区間	・ 南西部に特にファシス A およびファシス C が発達し、北東に向かってまばらになる。主にファシス D もしくはファシス E が主体となる。

解析区間	特徴
	・スロープ～ベーズン環境において南西部の層厚が比較的厚い相対的にやや深い環境であったと推測される範囲に、ファシス B、ファシス C のような砂質あるいは凝灰岩質および泥質なローブやファシス A のようなチャネルベルトが発達し、北東へ向かって発達が弱まったと推測した。 ・これらのファシス A の堆積体は、砂岩もしくは砂岩・凝灰岩からなる可能性もあるが、火成活動の影響を強く受けた凝灰岩や凝灰角礫岩からなる可能性がある。
Base Upper Sst～Top Josoji 区間	・南西部に広くファシス C が分布し、部分的にファシス B、ファシス A を含む。中央から北部にかけてはにファシス D が卓越し、南西から北東にかけて一部にファシス E およびファシス C が分布する。 ・スロープ～ベーズン環境において南西を中心とする砕屑物の供給により、層厚の厚さから示唆される構造的に低い範囲にファシス B～C によって示されるローブが広がったが、形成が始まった東西性の褶曲構造の高まりによって分布を制限され、中央部から北部にかけてはファシス E、ファシス C で示されるような泥質なチャネルやローブのみが限定的に分布したと推定される。
Top Josoji～F-1 区間	・南部のみに存在し、小規模なファシス A、ファシス B の分布と、比較的広いファシス C の分布を示す。 ・構造によって堆積物は南部の限定的なベーズンのみに分布し、堆積物の供給もあまり活発ではなかったと推定した。
F-1～F-2 区間	・2D 探査データの範囲の、極南部に主にファシス C が分布しており、ファシス A.、ファシス B の分布はほとんどない。 ・構造によって堆積物は南部の限定的なベーズンのみに分布し、粗粒な堆積物の供給は活発ではなかったことが示唆される。
F-2～Top F 区間	・南部にファシス A とそれをとりまくようにファシス C が分布し、南西部にもファシス C と部分的にファシス B が分布している。中央部は多くファシス D からなるが、北部にはファシス C および部分的にファシス A、ファシス B が分布している。 ・中央から南部では、南部にみられるファシス A～C で示されるチャネルベルトへ続く、南からの砕屑物の供給系と、南西から続く供給系が、スロープ～ベーズンの構造に規制されてファシス A～C を分布させていると推測した。一方、北部のファシス C については、南部とファシス D の分布を挟んで隔たり、南部からのファシスの連続性がないため、北方からの供給によって分布した可能性がある。
Top F～G’ 区間	・南西部や南東部で無堆積～削剥域の北にファシス A、ファシス B とそれをとりまくファシス C が分布する。また北部の中央にもファシス C が広く分布しており、それ以外の範囲は主にファシス D からなる。 ・スロープ～ベーズン環境において、南からの砕屑物供給によりファシス A およびファシス B で示されるチャネル～ローブが過去の陸棚

解析区間	特徴
	に近接するスロープ上に複数分布し、ベーズンの方へは比較的泥質な堆積物しか供給しなかったと推定した。
G’ ～Top G 区間	・ ファシス D の分布が卓越し、南部を中心に部分的にファシス C が分布している。 ・ スロープ環境において全体的に泥質な堆積物が堆積し、粗粒な堆積物の供給も活発ではなかったと推定した。
Top G～H-1 区間	・ 南部と北部においてファシス B およびファシス C が広く分布し、中央部にはファシス D の分布がみられる。ファシス B は側方にファシス C、ファシス D と変化して高まりにオンラップしており、地形に規制されつつも広がりをもった堆積体である。 ・ 南部では陸棚に近接するスロープ環境において、ファシス A、ファシス B によって示されるローブやこれに関連する分枝状チャネルが部分的に発達し、それが泥質化して北方へファシス C が広く分布したと考えられる。一方、北部においては、北方の高まりからファシス B で示されるローブが分布し、南部と同様に泥質化したローブが広く北から南へファシス C として分布したと推定した。
H-1～H-2 区間	・ 南西部および北部に広くファシス B が分布し、またその周辺から北方、南方に向かってファシス C も広く分布している。北部に分布するファシス C は、断面において連続的に広く分布し、側方へファシス C に変化していることを確認した。 南部および北部からの砕屑物の供給が増え、陸棚近くのスロープ上部にファシス B で示されるローブが広く分布したと推測する。
H-2～H-3 区間	・ 南方から西にファシス B が分布するほか、北部にも小規模なファシス B が複数分布する。南東部にも層厚の薄い範囲にファシス B が部分的に分布する。中央付近にはファシス G が広く分布している。これは、ファシス B 分布域の北端を一部削剥して上に分布している。 ・ 南部では層厚の薄い範囲に陸棚環境がひろがって、主にファシス D、ファシス C で示される泥質な堆積物が堆積し、中央部ではスロープ環境に広くファシス B で示されるローブが分布し、北部のスロープから南方へかけて分布するファシス G で示される MTD と接していると考えられる。また、北部のスロープにおいては比較的小規模なファシス B で示されるローブがいくつか分布している可能性がある。南東部にも、陸棚上に比較的小規模なローブが分布していると推測した。
H-3～TopH 区間	・ 東部に比較的小規模なファシス B が分布するほかは、中央部から南部には広くファシス C が分布する。また、下位の区間と同様に北部から中央部にかけてはファシス G が分布している。南西部については主にファシス D からなり、部分的にファシス B およびファシス C が分布している。 ・ 陸棚に近接するスロープ環境にファシス B で示されるローブが分布し、広く泥質化したローブがファシス B として分布していたと考え

解析区間	特徴
	られる。一方、北部の高まりからはスロープからベーズンにかけてMTD が広く分布する。南西部は陸棚環境で、基本的にはファシス D、ファシス C で示されるように泥質な堆積物が示唆されるが、部分的にファシス B で示される小規模なローブあるいはチャネルが分布する。

4.10.5　貯留層層準と遮蔽層層準の評価

(1)　貯留層層準の評価

既存坑井における層序の検討を基に認定された貯留層は、成相寺層最上部（上部貯留層）と同層中部（下部貯留層）である。この間で追跡された解析層準は、上位から Top F、F-2、F-1、Top Josoji、Base Upper Sst、Top Sst/Tf、および Base Sst/Tf で、この上位の更新世以降の堆積物は地質解析範囲の南部では埋没深度が浅く、貯留層、遮蔽層の対象とはならない。しかし地質解析範囲の北部においては埋没深度が深くなることから貯留層、遮蔽層対象となる可能性がある。実施した堆積相解析の結果、解析範囲の北部で埋没深度が深くなる更新統以浅の堆積物中に砂岩優勢相の分布が期待されることから、本業務では更新統以浅の砂岩優勢相についても、圧密曲線や周辺坑井データも用いてその性状の推定を行った。

①　孔隙率の算出

貯留層層準となる砂岩の確認されている基礎試錐「鳥取沖」で取得された検層データを使用し、貯留層および遮蔽層区間において物理検層解析をおこなった。

上部貯留層および下部貯留層の孔隙率のそれぞれの層準で密度検層-中性子検層（ρb-ϕN）および音波検層-中性子検層（⊿T-ϕN）のクロスプロットを作成し、マトリックス値を求めた。遮蔽層についても同様の方法で、マトリックス値を求めた。クロスプロットから求めた密度のマトリックス値（ρma）と、一般コア分析から求められている粒子密度を比較すると、コア分析での粒子密度は、上部貯留層の砂岩で 2.644～2.657 g/cm^3、下部貯留層の砂岩で 2.572～2.680 g/cm^3 の値を示し、クロスプロットで求めた値（2.8 g/cm^3）のほうが大きい値となった。

次に、求めたマトリックス値を用いて、密度検層から求めた孔隙率（ϕD）および音波検層から求めた孔隙率（ϕS）を、以下の式を用いて算出した。また、基礎試錐「鳥取沖」で使用されているマトリックス値（ρma=2.65、コア分析での粒子密度の値に近い、⊿Tma=55.5）を用いた場合の孔隙率も算出した。一般コア分析結果の孔隙率との比較の結果、ρma を用いた密度検層から求めた孔隙率（ϕD）がコア分析の孔隙率ともっとも調和的で

あった。このため貯留層評価には密度検層から求めた孔隙率（φD）を採用し、圧密曲線を作成した。

(2) 遮蔽層層準の評価

基礎試錐「鳥取沖」および基礎試錐「香住沖」の遮蔽層層準について、岩相および堆積環境から評価を行った。

上部遮蔽層は、基礎試錐「鳥取沖」の古江層下部で泥岩、「香住沖」のF層でシルト質泥岩を主体とする[1)、2)]。また、堆積環境はそれぞれ漸深海帯上部（水深 200～500 m）、上～中部半深海帯以深であることから、遮蔽層と成り得る。スレッシュホールド圧力の測定結果では、古江層下部で 0.52～0.69 MPa、F 層では 0.69～2.07 MPa の値が得られている。

下部遮蔽層は、基礎試錐「鳥取沖」の成相寺層で泥岩・硬質泥岩を主体としている。堆積環境は漸深海帯中～下部（水深 500～4,000 m）であり、水深の深いところに堆積した泥岩であり、ある程度一様に分布していると考えられ遮蔽層と成り得る。スレッシュホールド圧力の測定結果では、1.65～2.21 MPa の値が得られている。また、この層準ではマットオフテストもおこなわれており、泥水相当比重、深度 1722 m で 20.4 MPa の値が得られている。

また、上部遮蔽層および下部遮蔽層は、一部で欠如しているが、分布域においては大部分で層厚 20 m 以上となっている。深部の逆断層系の断層は、浅部まで連続しておらず、また不整合面（Top F ホライズン）より浅い部分にも連続していないため活断層ではないと考えらる。浅部に卓越する正断層系の断層は、上部遮蔽層層準より浅部に発達し、貯留層層準から遮蔽層層準の上位まで連続する断層はあまりみられない。

4.10.6 貯留可能量評価

調査対象範囲で CO_2 が超臨界状態になる深度を検討した。CO_2 が超臨界状態となる条件は、温度 31.1℃以上、圧力 7.38 MPa 以上である。温度の場合、基礎試錐「香住沖」で 620 m に達し、海底面からは 378 m である。また圧力の場合、基礎試錐「鳥取沖」で海面下 730 m に達する。よって、いずれの条件も満たす深度を浅部貯留可能限界と設定した。以下に貯留可能域から除外した条件を示す。

- CO_2 の超臨界上限深度より浅い範囲。
- 遮蔽層を切る断層とその他の断層を区分し、遮蔽層を切る断層から 2.5 km の範囲。
- 地層の傾斜が一部で 30° を超える範囲。
- 海底面下 3,000 m より深い範囲。

CO_2貯留可能量の算定には、以下に示すRITE（2006）[18)]の式を用い、貯留率は構造タイプでは50 %、緩傾斜部（同斜構造）タイプでは25 %の値を使用した。超臨界CO_2飽和率は原則として、中間値の50 %とした。各貯留層層準ホライズン間において抽出、貯留可能量を算出した。次に、これらの貯留可能ファシスのうち接点のあるものを空間的に連結し、1億tを超えるものを貯留可能域とした。貯留可能量は、上部貯留層で約8.38億t、下部貯留層で7.58億tである。

4.10.7　評価

既存の弾性波探査データと既存の坑井データを活用して、鳥取沖における地質解析を行った。その結果、地質構造、地質層序、堆積環境等を基に、堆積相や堆積体の分布を推定したことで、調査範囲に、貯留層層準と遮蔽層層準となる範囲があることを確認した。これらは、中新世および鮮新世の地層に含まれる、砂岩泥岩互層や泥岩である。

調査範囲は、堆積盆地を内包し、既存の坑井は調査範囲の南側に 2 坑井ある。調査範囲は、周辺に比べ地震が少なく、発生している地震の多くは陸上である。活断層についても確認されている多くは陸に近い調査範囲の南部沿岸部分である。

地質性状は、坑井で得られた情報からは、おおむね海成の堆積物であり、貯留層層準では孔隙率 20%以上が推定され、比較的良好であることが確認できた。弾性波探査データを用いた堆積相解析によって決定した貯留可能ファシス範囲における正確な性状の把握・評価のために、適地調査事業における次の調査段階で計画される調査井掘削による直接的なデータの取得が重要であり、欠かせない。抽出した貯留可能域の大半は、2D探査データを用いた解析範囲であることから、3D探査データを用いた精査の必要がある。

【参考文献】

1) 国土地理院ホームページ、地理院地図（電子国土Web）、https://maps.gsi.go.jp
2) 独立行政法人石油天然ガス・金属鉱物資源機構、“平成28～29年度国内石油天然ガス基礎調査基礎物理探査「鳥取～兵庫沖3D」データ処理報告書”(2019)
3) 日本CCS調査(株)、“平成２７年度二酸化炭素貯留適地調査事業成果報告書”(2017)
4) 日本CCS調査(株)、“平成３０年度二酸化炭素貯留適地調査事業委託業務成果報告書”(2020)
5) 日本CCS調査(株)、“平成３１年度二酸化炭素貯留適地調査事業委託業務成果報告書”(2021)
6) 日本CCS調査(株)、“平成２６年度二酸化炭素貯留適地調査事業成果報告書”(2016)

7) 日本CCS調査(株)、“平成３０年度二酸化炭素貯留適地調査事業委託業務成果報告書”(2020)
8) 石油公団、“昭和 57 年度 国内石油・天然ガス基礎調査 基礎試錐「鳥取沖」調査報告書”(1983)
9) 石油公団、“昭和 63 年度 国内石油・天然ガス基礎調査 基礎試錐「香住沖」調査報告書”(1990)
10) 岩崎哲治、“北陸～山陰海域の石油地質”、石油技術協会誌、57、1、p.59-66 (1992)
11) 田中隆、小草欽治、“山陰沖における中期中新世以降の構造運動”、地質学雑誌、87、11、p.725-736 (1981)
12) 田中隆、“北陸・山陰沖の堆積盆地の分布と性格”、石油技術協会誌、44、5、p.76-88 (1979)
13) 伊藤康人、“日本海南部～九州周辺の新生代後期テクトニクス”、石油技術協会誌、65、1、p.48-57 (2000)、
14) 伊藤康人、荒戸裕之、“九州西方-山陰・北陸海域 日本海南部における鮮新世以降の応力場変遷”、地質ニュース、541、p.25-31 (1999)
15) 徳山英一、本座栄一、木村政昭、倉本真一、芦寿一郎、岡村行信、荒戸裕之、伊藤康人、徐垣、日野亮太、野原壮、阿部寛信、坂井眞一、向山健二郎、“日本周辺海域中新世最末期以降の構造発達史”、海洋調査技術、13、1、p.27-53 (2001)
16) 鳥取県米子市ホームページ、https://www.city.yonago.lg.jp/secure/13274/data1.pdf
17) 東京大学地震研究所ホームページ、
http://evrrss.eri.u-tokyo.ac.jp/db/jma1/index.html
18) (公財)地球環境産業技術研究機構、“平成 17 年度 二酸化炭素固定化・有効利用技術等対策事業 二酸化炭素地中貯留技術研究会月成果報告書”(2006)

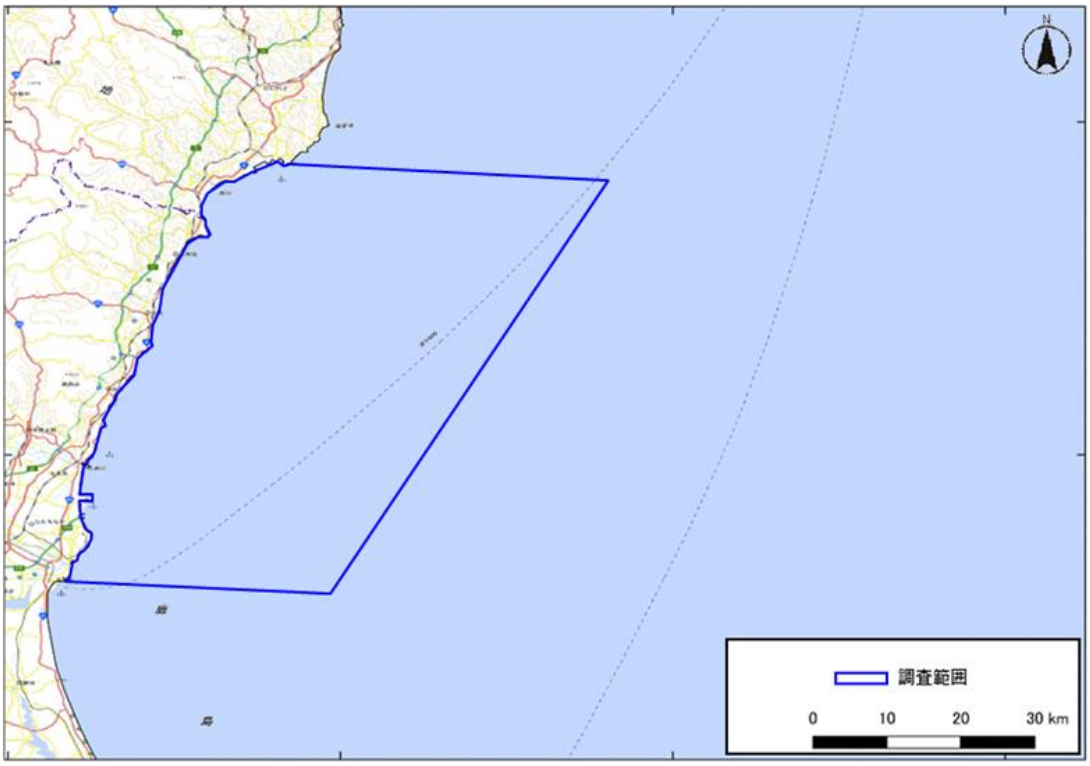
4.11　地質解析と貯留適地評価（茨城沖北部）

平成３１年度委託事業において、茨城沖北部の地質解析・貯留可能量評価[1)]（以下、「H31地質解析」と称する。）を行った。この結果、貯留層候補として上部貯留層に 4.81 億 t、下部貯留層 1 に 1.44 億 t、下部貯留層 2 に 8.51 億 t、合計 14.76 億 t の貯留可能量を評価した。続けて地質解析実施結果を受けて、平成３１年度委託事業において、基礎物理探査の 3D 探査データの一部、および民間坑井データを用いて、3D 探査データ物性解析[1)]（以下、「H31物性解析」と称する。）を実施した。本業務において、これらの成果を用いて地質解析および貯留可能量の再評価を実施した。

4.11.1　概要

(1)　調査範囲

図 4.11-1 に調査範囲を示す。茨城県から福島県南部にかけての沿岸域から沖合に至る南北約 60 km、東西約 50 km の範囲（図中青枠）、およそ 2,500 km^2 の範囲である。調査範囲の水深はおよそ 100 m～600 m で、東部は陸棚斜面にかかり南東方向に向かって深くなっている。



国土地理院「電子地形図（タイル）」[2)]に追記。

図 4.11-1　調査範囲位置図

(2) 使用データ

調査範囲では、基礎物理探査による 2D および 3D 弾性波探査、および民間会社による試掘井の掘削が実施されている。

以下に使用したデータの一覧を示す。

A) 3D 探査データ

1) 2017 年度 国内石油・天然ガス基礎調査　基礎物理探査「茨城沖北部 3D」[3)] の一部データ

B) 2D 探査データ

1) 1971 年度 大陸棚石油・天然ガス基礎調査 基礎物理探査「北上–阿武隈」[4)] の再処理データ[5)]

2) 1987 年度 国内石油・天然ガス基礎調査 海上基礎物理探査「南三陸～鹿島沖」[6)] の再処理データ[5)]

3) 1994 年度 国内石油・天然ガス基礎調査 海上基礎物理探査「常磐～鹿島浅海域」[7)] の再処理データ[5)]

4) 1995 年度 国内石油・天然ガス基礎調査 海上基礎物理探査「常磐～鹿島浅海域」[8)] の再処理データ[5)]

C) 坑井データ

1) 民間会社による坑井データ

D) 物性解析データ

1) 平成３１年度委託事業で実施した再処理データおよび物性解析データ

4.11.2 解析ホライズンの設定と地質構造解析

(1) 貯留層層準および遮蔽層層準の設定

H31 地質解析で設定された貯留層層準および遮蔽層層準を参照したうえで、新たに貯留層層準および遮蔽層層準を設定した。図 4.11-2 に示すように、H31 地質解析を参照し、下部と上部にそれぞれ貯留層と遮蔽層を設定した。

下部貯留層の基底はライトピンクホライズンのまま変更しなかったが、上限をブルーホライズンから新設したマジェンダホライズンに変更した。これに伴い、下部遮蔽層の基底をブルーホライズンからマジェンダホライズンに変更した。変更した理由は、ブルーホライズンからマジェンダホライズンまでの区間は坑井データおよび H31 物性解析から砂質であると判断したためである。下部遮蔽層の上限は、ライトグリーンホライズンのままである。

上部貯留層はライトグリーンホライズンからライトブルーホライズンのままとした。上

部遮蔽層の上限をイエロー（PS13）ホライズンに変更した。イエロー（PS13）ホライズンは、H31 地質解析において設定した上部遮蔽層の基底であるライトブルーホライズンと上限であるイエローホライズンの間に設定したプロポーショナルスライスの一つである。これより上位は H31 物性解析から砂質であると判断したため、遮蔽層層準から除外した。

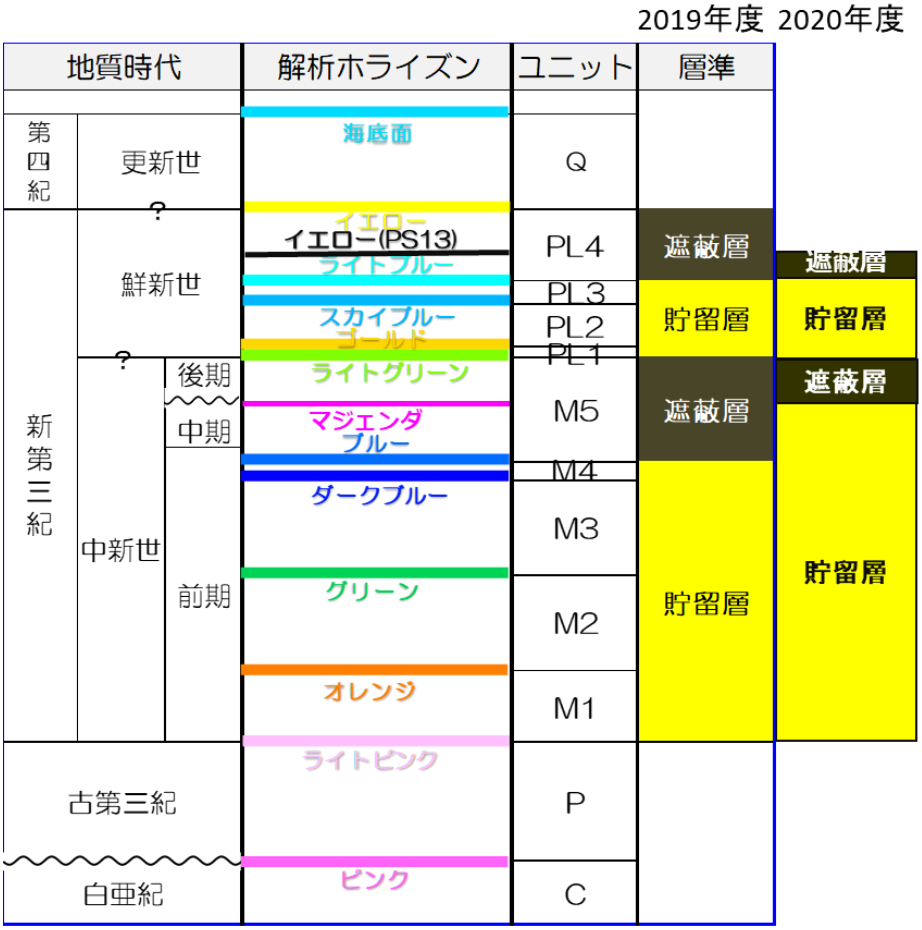


図 4.11-2　貯留層層準と遮蔽層層準の再設定

(2)　解析ホライズンの設定

H31 地質解析で設定した 12 ホライズンに加え、地質解析の後に実施した H31 物性解析結果や堆積相解析の予察検討から、マジェンダホライズンを新たに追加した。マジェンダホライズンは、ブルーホライズンとライトグリーンホライズンの間に位置し、弾性波探査データの音響インピーダンスの変化が明瞭で、その上下においてサイスミックファシスの差異が認められる。図 4.11-3 に層序総括図を示す。

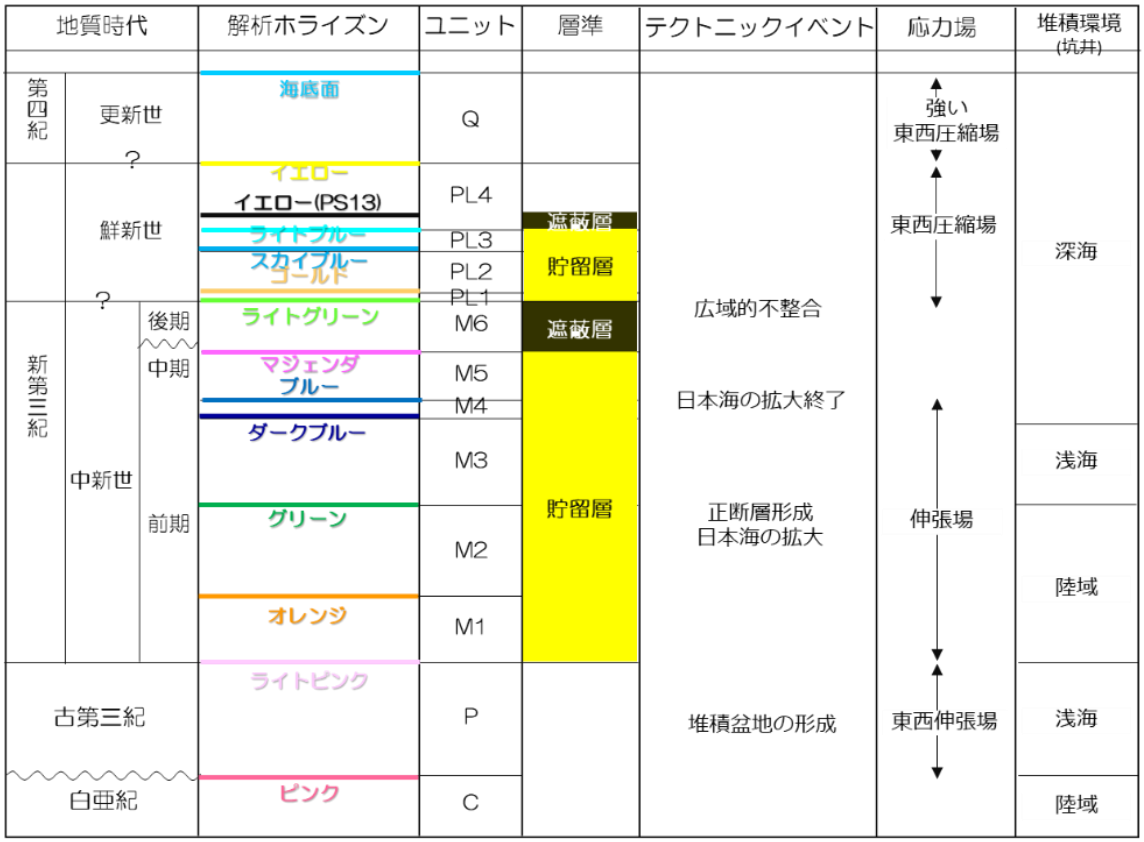


図 4.11-3　層序総括図

(3)　地質構造解析

ホライズン追跡は、新たに追加したマジェンダホライズンで実施し、残りのホライズンは H31 地質解析で追跡したものを踏襲した。地質構造解析結果は、基本的に H31 地質解析から変更はない。下部貯留層の基底のライトピンクホライズンは古第三系上限相当で音響基盤ではないが、白亜紀以前の構造形態を残していることから、このホライズンに着目して構造概要を述べる。H31 地質解析において実施した地質構造区分によると、対象とした再解析範囲の大半は西部堆積盆地であり、範囲の東端は中央部隆起帯に相当する。表 4.11-1 に西部堆積盆地および中央隆起帯の特徴をまとめた。

表 4.11-1　再解析範囲における地質構造の特徴

西部堆積盆地
地質解析範囲全域に北北東－南南西に延びる舟底状の構造が認められ、これは馬場（2017）[9)] の常磐沖堆積盆地の一部に相当する。この堆積盆地は西翼が緩傾斜で東翼が急傾斜の非対称な堆積盆地である。ここでは、C ユニットを基盤として、P ユニットから Q ユニットまでの一連の地層が堆積しており、最大層厚はピンクホライズン以浅で 5,000 m に達する。堆積盆地は現世までにすでに埋積されて大陸棚となっているため、現在の海底地形に盆状の地形は認められない。 西部堆積盆地には、東西方向で堆積盆地を胴切りする断層がほぼ平行に発達している。これらの断層は正断層であり、変位量は小さい。
中央部隆起帯
地質解析範囲東端には、西部堆積盆地の東側に隣接して北北東－南南西方向の隆起帯が認められる。ここでは、ライトピンクホライズンの分布深度が浅くなっており、隆起帯頂部では P ユニットおよび M1 ユニットを欠いており、ライトピンクホライズン～ピンクホライズン間の P ユニットはピンチアウトする形となっている。また、M2 ユニットおよび M3 ユニットも中央部隆起帯の北半部に薄く分布しているが、南部ではピンクホライズンの上に直接 M5 ユニットが堆積している。また、隆起帯の北半部で、最上位の地層である Q ユニットを欠いている。 西部堆積盆地との境界付近には第四紀層の基底であるイエローホライズンを切る北北東－南南西方向の隆起帯の軸に平行な断層が発達している。隆起帯は南南西に向かってプランジし、地質解析範囲南端部では不明瞭となる。

(4)　深度変換

新規に追跡したマジェンダホライズンおよび、H31 物性解析において再処理した範囲の弾性波探査データの深度変換を行った。深度変換には、H31 地質解析で作成した深度変換速度モデルを用いた。

(5)　等層厚線図

深度構造図を用いて、各ホライズン間の等層厚線図を作成した。表 4.11-2 に貯留層および遮蔽層区間の特徴を示す。

表 4.11-2　貯留層および遮蔽層区間の層厚的特徴

上部遮蔽層区間（イエロー（PS13）～ライトブルーホライズン間）
堆積中心が上部貯留層区間よりも西方に移動し、上部貯留層区間の堆積が厚い場所ではあまり発達してない。坑井の西方や地質解析範囲南端部で厚く発達する。
上部貯留層区間（ライトブル―～ライトグリーンホライズン間）
西部堆積盆地の南端部を除く全域に厚く分布する。坑井周辺には顕著な発達がみられない。
下部遮蔽層区間（ライトグリーン～マジェンダホライズン間）
西部堆積盆地に沿って厚く発達し、特に地質解析範囲よりも北方の 3D エリア内で厚く発達する。坑井周辺には顕著な発達がみられない。
下部貯留層区間（マジェンダ～ライトピンクホライズン間）
西部堆積盆地東縁部に沿って厚く発達し、特に地質解析範囲よりも北方の 3D エリア内で厚く発達する。また、坑井周辺においても時代により厚く発達する。

(6)　地質構造発達史

調査範囲は、馬場（2017）[9]、岩田（2002）[10]、安藤（2011）[11]によると以下のように述べられている。常磐沖堆積盆は、白亜紀当時はユーラシア大陸の東縁であった東北日本太平洋岸に沿って発達した白亜紀以降の前弧堆積盆の最南部に位置する。西側を阿武隈山塊に、北西および東側を先第三系の隆起域（東側の隆起域は阿武隈リッジと呼ばれる）によって限られ、北北東－南南西の延びを有し、大部分は海域に位置する。陸域の常磐地域は、常磐沖堆積盆の西縁に当たり河川－浅海－斜面相が累重する。上部白亜系双葉層群、古第三系白水層群、新第三系の下部中新統湯長谷層群、白土層群と、中部～上部中新統の多賀層群、および最上部中新統から鮮新統の仙台層群と日立層群からなる。

本堆積盆中には、前期～後期白亜紀前期に形成されたトランスファー断層に関連する北西－南東ないしは西北西－東南東方向の正断層、西北西－東南東ないしは東西方向の右横ずれ断層が発達し、中新世の日本海の拡大期に再活動している。また、北北東－南南西方向の断層（高角の逆断層あるいは正断層）および北北東－南南西方向の褶曲構造が発達する。

3D 探査データ範囲の民間坑井を通る東西方向の断面図を用いて、ホライズンごとのフラットニング処理を行い、各ユニット堆積時の構造を復元した断面図を作成した。

上記の文献に示される構造発達史、平成３１年度委託事業の解析結果および作成した堆積時の構造復元断面図を用いて構造発達史を考察し、表 4.11-3 にまとめた。また、文献に基づいた陸域の層序および周辺地域の構造運動・イベントについて図 4.11-4 にまとめた。

表 4.11-3　各ユニットの構造発達史

(I)　古第三紀：P ユニット　（ピンク～ライトピンクホライズン）
P ユニットは、陸域に分布する古第三系白水層群に対比される。前期白亜紀に形成された常磐沖堆積盆地を埋積している。P ユニットは本検討範囲である西部堆積盆地のみに堆積しており、阿武隈リッジの南方延長部である中央部隆起帯の東へは分布していない。また東西方向の断層によって、より小規模なグラーベン、ハーフグラーベンが形成されており、部分的に堆積物が厚く埋積している。
(II)　前期中新世：M1～M4 ユニット（ライトピンク～ブルーホライズン）
M1 ユニットから M4 ユニットは前期中新世に対比されている。これらのユニットも、主に西部堆積盆地に分布し、堆積盆地を埋積している。それぞれ、ライトピンクホライズンにオンラップし、上位に向かって構造的に高い西側と東側の中央部隆起帯の方へ分布範囲を拡げているが、区間トップのブルーホライズンにおいて、東側の中央隆起帯と、西側の 2D 探査データ範囲において削剥をうけている。 前期中新世は、日本海が拡大を始めた時期に当たり、伸長応力場において、白亜紀に形成されていたトランスファー断層が再活動し、日本海のシンリフト期盛期には東西性の無数の小さな正断層が形成された。また、前期中新世の後期には、海域の坑井においても陸域においても、急速な海進が起きており、各ユニットがオンラップして分布範囲を拡げていったことと整合的である。
(III)　中期～後期中新世：M5～M6 ユニット（ブルー～ライトグリーン）
M5－M6 ユニットは、中期中新世から後期中新世に対比されている。H31 地質解析の層厚分布から、堆積の中心は、西部堆積盆地ではなく中央隆起帯を超えた東側の堆積盆地へと移ったことが示されている。この区間の基底であるブルーホライズンは、中央隆起帯では顕著な不整合となっているが、先の期間に（一部は堆積同時に）形成された断層による沈降域にオンラップしながら広く堆積盆地を埋積しており、深海化がすすんで堆積場が広がっていたことが示唆される。中期中新世から後期中新世は、日本海の拡大が終了した時期に相当し、比較的安定した応力場において、比較的静穏な環境で細粒物質が堆積したと推定される。
(IV)　鮮新世：PL1～PL4 ユニット（ライトグリーン～イエロー）
PL1 ユニットから PL4 ユニットは鮮新世の地層に対比され、このうち、PL1 ユニットから PL3 ユニットは前期鮮新世に、PL4 ユニットは後期鮮新世に対比されている。前期鮮新世の PL1 ユニットと PL2 ユニットの主な堆積領域は、中央部隆起帯よりも東の堆積盆地であり、西部堆積盆地では薄く欠如している部分もある。PL1 から PL3 ユニットは、西へオンラップしていき、PL3 ユニットは、西部堆積盆地のみに分布する。一方、後期鮮新世の PL4 ユニットでは、堆積域が西部堆積盆地に移動し、中央部隆起帯と東の堆積盆地では薄いか欠如している。これらの堆積物の分布から、前期鮮新世では堆積中心が東部であったのに対し、後期鮮新世には西部に移動したことが推定されている。 この期間の基底においては、構造性のオンラップが知られており ODP サイトでハイエイタスが認められている。馬場（2017）において、これは基底での圧縮テクトニックイベントによって下位のユニットが変形し本期間のユニットがオンラップしながら薄化尖滅したことによって生じたと解釈されている。また ODP サイトで堆積速度が急増しているが、陸域における隆起上昇の反映である可能性も指摘されている。
(V)　更新世：Q ユニット（イエロー～海底面）
Q ユニットは第四紀更新世の地層に対比されている。陸域では第四紀の地層として、中期更新世の高位段丘堆積物および後期更新世の中位段丘堆積物が分布するが、前期更新世の地層は確認されていない。しかしながら、海域においては前期更新世の地層が堆積している可能性もあるため、Q ユニットの下限は前期更新世のいずれかの時期に対比できると解釈されている。

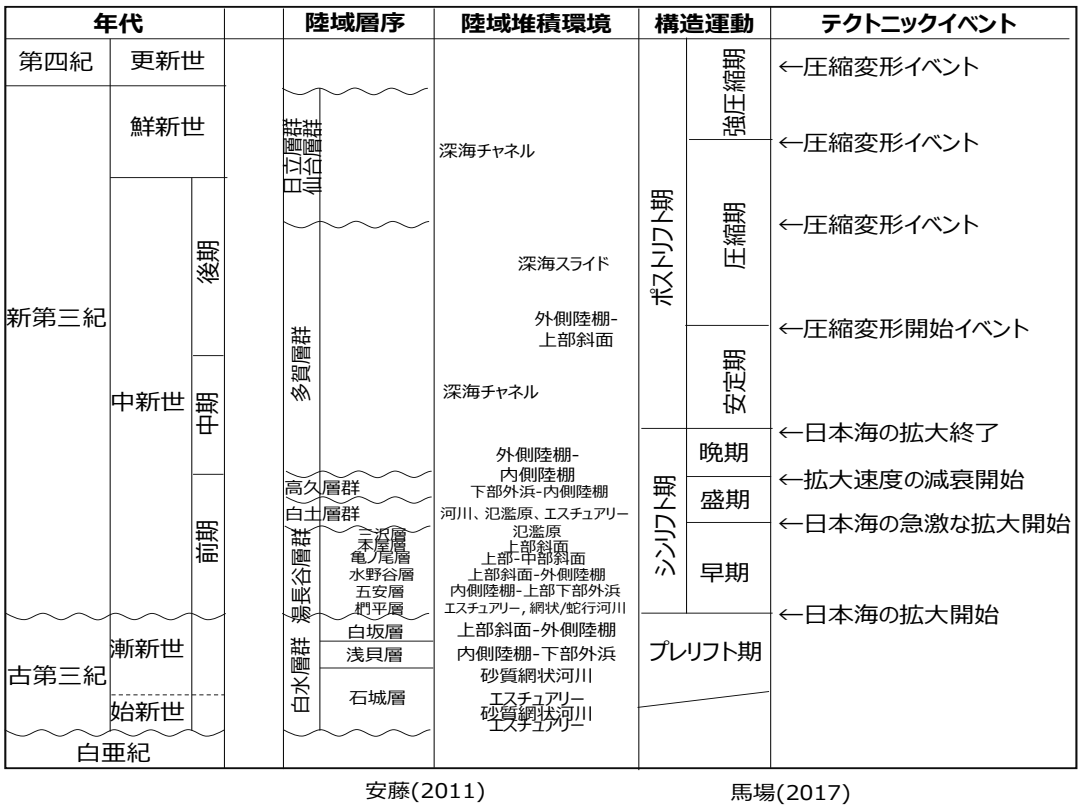


図 4.11-4　陸域の層序および周辺地域の構造運動・イベント

4.11.3　堆積相解析

H31 地質解析において実施した堆積相解析に加え、H31 物性解析結果を加えて見直しを行った。

堆積相解析範囲は、地質解析範囲と同様に、阿武隈リッジ西方派生部よりも西の常磐沖堆積盆から陸方向にかけての範囲とした。堆積相解析の対象区間は、設定した貯留層および遮蔽層区間を含むライトピンクからイエロー (PS13) ホライズン間に設定し、目的は貯留層、遮蔽層の認定およびその区間における堆積物の分布形態の把握と堆積システムの推定とした。解析には、H31 物性解析において得られたファシスインデックスボリューム、音響インピーダンスボリューム、Vp/Vs ボリューム、再処理後の 3D 探査データ、および H31 地質解析に際して実施した堆積相解析結果を用いた。また、民間坑井データも適宜参照した。

堆積相解析のワークフローを図 4.11-5 に示す。

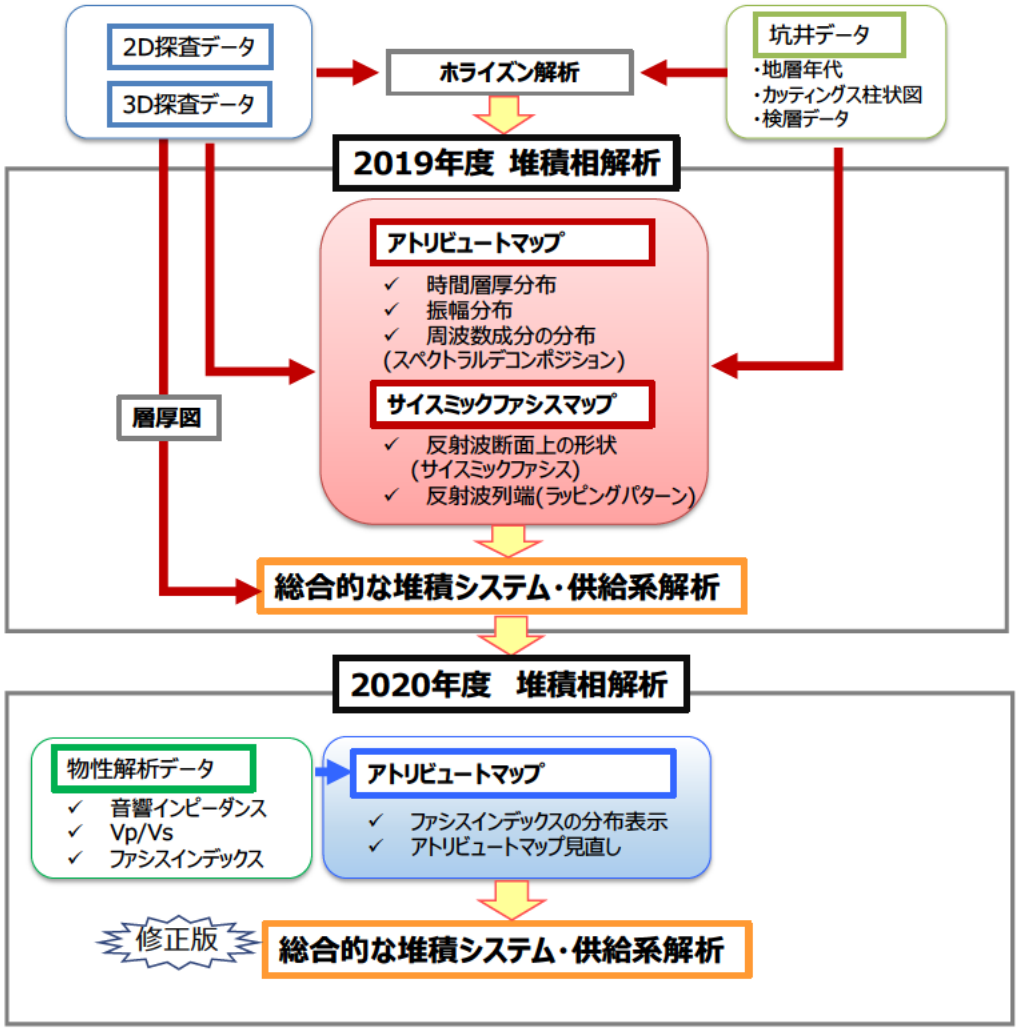


図 4.11-5　堆積相解析のワークフロー

H31 地質解析において実施した堆積相解析においては、各ホライズン間について 3D 探査データから時間層厚分布、振幅分布、周波数成分の分布（スペクトラルデコンポジション）の各アトリビュートマップを作成し堆積システムの分布を確認した。さらに弾性波探査データの断面における反射波列の形状（サイスミックファシス）の区分や、反射波列端のラッピングパターンを平面図上にマッピングした。ラッピングパターンは、弾性波探査断面において、反射波が他の反射波に突き当たり、収れんする状態を示している。これをいくつかのパターンに区分することで、地層の堆積環境や堆積システムの時空間的変遷を推定する。これらの結果と坑井における岩相や検層カーブのパターンをあわせて解釈することにより、堆積システムおよび砕屑物の供給系を推定した。これらに加え、H31 物性解析結果のうちファシスインデックスデータを用いたアトリビュートマップ、再処理した 3D 探査データを用いた RMS 振幅および時間層厚のアトリビュートマップを作成した。H31 地質

解析において実施した堆積相解析結果と新たに作成したアトリビュートマップを比較し、ファシスマップの修正や堆積システム・供給系の見直しを行った。

(1) RMS 振幅分布

RMS 振幅はある区間における振幅値の二乗平均の平方根であり、振幅値の正・負に関わらずその大きさをある任意の区間で積算して平面的に表示するものである。本解析手法を用いることで、解析対象区間の振幅の平面的な分布傾向により、間接的に堆積体・岩相の分布を推定することが可能となる。

(2) ファシスインデックス

ファシスインデックスとは、H31 物性解析で解析した Vp/Vs－音響インピーダンスのクロスプロットにおいて、近似した砂岩のトレンドラインから各プロット点における差を示したアトリビュートである。

(3) サイスミックファシス

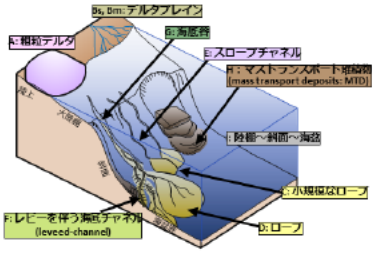
サイスミックファシスは、弾性波探査断面における反射波の形状やパターンを分類したものであり、堆積物の分布形態、堆積システムを示す。弾性波探査断面からサイスミックファシスを認定し、その分布を平面的にマッピングし、この平面的分布に加え、ラッピングパターンや坑井データの統合により堆積物の供給系や堆積体の分布形態を推定した。

ファシス区分は、H31 地質解析で実施した堆積相解析で分類した区分を用いた。解析に用いた弾性波探査断面においてみられる反射波の形状の特徴からサイスミックファシスを区分し、これらのサイスミックファシスとその面的な広がり方から 10 のファシスに区分した。

表 4.11-4 に反射波の特徴によるサイスミックファシスの区分を、図 4.11-6 および表 4.11-5 に堆積システムとファシス区分を示す。

サイスミックファシス	特徴 模式図	
1		強い振幅。 連続的で上下の反射面に平行な反射面。
2		強い振幅。 不連続、混沌とした形状。
3		中程度の振幅。 連続的で上下の反射面に平行な反射面。
4		弱い～強い振幅。 凹状の形状。
5		弱い振幅。 比較的連続～混沌とした形状。
6		強い振幅。 分布幅が比較的狭い。 やや直線的な形状。

※サイスミックファシス6の一部については、ガスの胚胎を示すものと解釈し、右表のファシス区分の際には考慮に含めていない。



ファシス	断面における主要なｻｲｽﾐｯｸﾌｧｼｽと平面での分布の特徴	堆積システム解釈
A	【サイスミックファシス1】 平面では面的に広がる分布を示す。	粗粒デルタ
Bs	【サイスミックファシス3、4】 中程度の振幅から成るものをBs、 弱い振幅から成るものをBmとした。	砂質デルタプレイン
Bm		泥質デルタプレイン
C	【サイスミックファシス1、3】 平面では楕円状に広がる分布を示す。	小規模なロ ーブ
D	【サイスミックファシス1、2】 平面では扇状～広い分布を示す。 サイスミックファシス2は、 サイスミックファシス1に隣接し ローカルな高まりの周辺に分布。	ロ ーブ
E	【サイスミックファシス4】 (サイスミックファシス4の規模は比較的小)平面では細長いリボン状の形を示す。	スロープチャネル
F	【サイスミックファシス1、4】 (サイスミックファシス4の規模は比較的大)平面では部分的に弧を描く形を示す。	レビーを伴う 海底チ ャネル
G	【サイスミックファシス4 】 (規模は比較的大。小規模凹状がスタック)平面では比較的直線的な分布。	海底谷
H	弱い～中程度の振幅で不連続、屈曲、スラスト状などの形状。平面的にはしわ状の圧縮リッジが見える。	マストランスポート 堆積物
I	【サイスミックファシス3、5】	陸棚～ 斜面～海盆

図 4.11-6　サイスミックファシス区分

表 4.11-4　反射波の特徴によるサイスミックファシスの区分

サイスミックファシス	
サイスミックファシス 1：	振幅が強く側方へ連続性がよい。正と負の反射波列が層状に平行に分布する。
サイスミックファシス 2：	振幅が強く側方へ不連続あるいは混沌とした形状となる。
サイスミックファシス 3：	振幅は中程度で側方への連続性がよい。正と負の反射波列が層状に平行に分布する。
サイスミックファシス 4：	局所的に強い振幅から弱い振幅まであり振幅値は幅広い。反射波列は凹状の形を特徴とする。
サイスミックファシス 5：	全体的に振幅が弱く形状は不明瞭ながら弱く連続的であるか、もしくは不連続で混沌とした形状を示す。
サイスミックファシス 6：	強い振幅を示すが、サイスミックファシス 1 と比較して分布幅が比較的狭く、周波数が低い傾向がある。やや直線的な形状を示す。

表 4.11-5　堆積システムとファシス区分

堆積システムとファシス区分
ファシス A： サイスミックファシス 1 からなり、平面的に広く分布する。坑井の周辺では、陸域の堆積環境と示されている M1 ユニットの下部に観察される。坑井の岩相は、砂岩、シルト岩からなり、下位から上位に

向けて礫岩が主体となる上方粗粒化を示している。泥岩含有率（以下、「Vcl」と称する。）カーブのパターンも同様に上方粗粒化を示す。砂岩、礫岩がスタックして上方粗粒化を示し、陸域において面的な広がりを示すことから、粗粒デルタを示すと解釈した。
ファシス B： サイスミックファシス 4 と、サイスミックファシス 3 の組合せからなる。全体的に中程度の振幅からなるものを Bs、比較的弱い振幅からなるものを Bm として細分した。坑井の周辺では、陸域の堆積環境と示されている M2 ユニットにみられる。このユニットの坑井における岩相は砂岩とシルト岩であり、一部に石炭を挟在する。Vcl カーブは、数 m～数 10 m で変動する上方細粒化の重なるサクセッションを示す。 陸域において複数連なって広域に分布する凹状のサイスミックファシスと、上方細粒化する砂岩の積み重なるパターンを示すことから、デルタプレインを示すと解釈した。Bs と Bm については、振幅のコントラストの強弱の違いから、それぞれ砂質なデルタプレイン、泥質なデルタプレインを示すと考えた。
ファシス C： サイスミックファシス 1 もしくは 3 からなり、平面的には楕円状の分布を示す。坑井の周辺では、浅海～深海の堆積環境と示される M3 ユニット、M4 ユニット、M5 ユニットにおいて観察される。坑井におけるこのユニットの岩相は、シルト岩を主体とする中に 10～数 10 m 区間程度砂岩（一部礫岩）を挟む。Vcl カーブは、上方粗粒化した後、上方細粒化するパターンを示す。泥質な浅海～深海環境に砂岩を挟み、平面的には楕円状の分布を示すことから、浅海～深海に堆積した比較的小規模なローブであると解釈した。
ファシス D： サイスミクファシス 1 およびサイスミックファシス 2 からなる。サイスミックファシス 1 は平面的にはでは扇状～広い分布を示し、サイスミックファシス 2 はサイスミックファシス 1 に隣接してローカルな高まりの周辺に分布する。ファシス D は、PL2 ユニットにおいて特徴的に広く分布するが、坑井の周辺には分布しないため岩相の詳細は不明である。平面的に連続して広い分布を示すこと、および後述する海底谷を示すと推測されるファシス G の上位に漸移的に観察されることから、海底扇状地システムの広く広がるローブの集合体であると解釈した。サイスミックファシス 2 は、堆積とほぼ同時期に形成されたローカルな高まりの周辺に観察されることから、ローブの集合体に由来する地すべり性の堆積物であることが推測された。
ファシス E： 小規模なサイスミックファシス 4 からなる。平面的には、細長いリボン状の形を示し、坑井周辺では M6 ユニットで観察される。坑井における岩相はシルト岩である。後述するファシス I が分布する中に、リボン状の面的な分布形態を示すことから、小規模なスロープチャネルを示すと解釈した。
ファシス F： サイスミックファシス 4 に、サイスミックファシス 1 を伴う。サイスミックファシス 4 は、ファシス B やファシス E と比較して規模は大きく、平面的には部分的に円弧状を示す。坑井周辺においては PL1 ユニットおよび PL3 ユニットにおいて観察される。岩相は砂岩層を挟むシルト岩主体の岩相であり、Vcl カーブは上方粗粒化および上方細粒化の両方を示す。断面において連続的な強振幅の反射波列を伴う凹状の形状と、平面的には弧を描く形状を示すことから、レビーを伴う海底チャネルと解釈した。
ファシス G： 規模の大きな凹状の形の中に、小規模なサイスミックファシス 4 がスタックする。下位のホライズンを切るように凹部が形成されている。坑井周辺には分布せず、PL2 ユニットにおいて観察される。面的には比較的直線的な分布を示す。下位の面を凹状に削剥し、凹状の反射面がスタックする形態から、スロープを削剥して分布する海底谷を示すと解釈した。
ファシス H： 弱い～中程度の振幅で、不連続、屈曲、スラスト状等の形状を示す。平面的にはしわ状の圧縮リッジが観察されることから、マストランスポート堆積物を示すと解釈した。坑井周辺において PL4 ユニット最上部において観察される。

ファシス I： サイスミックファシス 5 やサイスミックファシス 3 からなる。全体的に弱い振幅を示し、坑井においてはシルト岩の区間にみられることから、泥質な陸棚～斜面～海盆を示すと解釈した。

(4) 解析結果

再処理を施した弾性波探査データの RMS 振幅、ファシスインデックスを用いて、ファシスの分布や、堆積システムおよび供給系を再検討した。ユニットごとの再検討結果を、表 4.11-6 にまとめた。

表 4.11-6　各ユニットの特徴

M1 ユニット（ライトピンク～オレンジ）
ファシス A の分布、および小規模な凹状の形状が広く連なるファシス B を解釈した。既往評価においてファシス Bs を解釈していた北側でも、ファシスインデックス値が低めで砂質よりであることや、RMS 振幅マップからも比較的強振幅が示されることから、ファシス Bs の分布をより北方まで拡張した。また、Bs と解釈していたエリアのうち、振幅がより強く、サイスミックファシス 4 が集まっている範囲は、粗粒デルタに近いファシスが見込まれることから、ファシス A-Bs として再区分した。
M2 ユニット（オレンジ～グリーン）
既往評価においては、サイスミックファシス 4 とサイスミックファシス 3 の組合せが広域に広がることや、坑井においてスタックする砂岩が確認されていること等から、ファシス B と解釈していた。しかし、これまで Bs を解釈していた南側にも砂岩を示す低ファシスインデックス値が分布することから、ファシス Bs の分布をやや南へ拡大した。
M3 ユニット（グリーン～ダークブルー）
既往評価において、サイスミックファシス 4 からファシス E のスロープチャネル、サイスミックファシス 1 からファシス C の小規模なローブの分布を解釈していた。しかし、南部の断層沿いの低地部は、砂岩を示すファシスインデックス値が分布し、RMS 振幅も周囲に比べて比較的高く、かつサイスミックファシス 4 がまとまって分布することから、断層で下がっている範囲にスロープチャネルから比較的砂質な堆積物が供給された可能性を考え、ファシス C と解釈を修正した。
M4 ユニット（ダークブル～ブルー）
坑井周辺のみに分布し、主にサイスミックファシス 3 からなる。既往評価において、坑井周辺のみにファシス C を解釈していたが、ファシスインデックスでは北側も顕著な差はみられず、またサイスミックファシス 3 は北側にも一部分布することから、ローブを示すファシス C が北側にも分布する可能性を考慮して分布範囲を修正した。
M5 ユニット（ブルー～マジェンダ）
新たに追加したマジェンダホライズンによって分割された M5 ユニットの下部にあたる。坑井では砂岩が含まれ、サイスミックファシス 3 が分布している。サイスミックファシス 5 の中に部分的にサイスミックファシス 4 やサイスミックファシス 3 が分布する。全体的に振幅は強くはないが、サイスミックファシス 3 やサイスミックファシス 4 が分布する範囲ではやや強い振幅を示す。ファシスインデックスマップにおいても、コントラストは比較的弱いが、サイスミックファシス 3 が分布するエリアにおいて砂岩を示すファシスインデックス値が分布する。これらの結果から、サイスミックファシス 4 が分布するリボン状の形態のエリアをファシス E、サイスミックファシス 3 が分布するやや楕円状に広がったエリアをファシス C と修正し、おのおのスロープチャネル、小規模なローブが分布すると解釈した。
M6 ユニット（マジェンダ～ライトグリーン）

新たに追加したマジェンダホライズンによって分割された M5 ユニットの上部にあたる。このユニットはサイスミックファシス 4 が分布し、坑井における岩相は主にシルト岩からなる。3D 探査データ範囲は主にサイスミックファシス 3 もしくはサイスミックファシス 5 の弱い振幅で、部分的に凹状のサイスミクファシス 4 が分布する。2D 探査データ範囲においても、サイスミックファシス 4 が分布し、一部において強い振幅を示す。RMS 振幅マップと比較すると、サイスミックファシス 3 の中でもやや強い振幅が坑井の南方に分布する。また、砂岩を示すファシスインデックス値が全体に散らばっているがコントラストは弱い。 以上の結果から、M6 ユニットでは、比較的泥質な環境を示すファシス I が分布する中に一部ファシス E が、坑井南部の狭い範囲に小規模にファシス C が分布し、それぞれスロープチャネル、小規模なローブが分布すると解釈した。
PL1 ユニット（ライトグリーン～ゴールド）
北部はサイスミックファシス 5 が、南部はサイスミックファシス 3 とサイスミックファシス 4 が分布し、既往評価においてはレビーを伴う海底チャネルと解釈していた。比較的ファシスインデックス値が低い値を示す範囲を、RMS 振幅のマップと比較したところ、RMS 振幅が周囲に比べてやや高い値を示し、凹状のサイスミックファシス 4 も部分的に確認できた。このことから既往評価においてファシス I であった一部をファシス F として修正した。
PL2 ユニット（ゴールド～スカイブルー）
サイスミックファシス 4 が東西方向に延び、その上位にサイスミックファシス 1 が陸域に向かってオンラップしながら広域に分布することから、既往評価においては、海底谷から始まり、海進につれてより深く海底谷の先に広がる海底扇状地の大規模なローブの集合体が陸に向かって漸移的に分布すると解釈していた。堆積システムの解釈に修正はないが、再処理前では比較的振幅の弱かった南部は、砂岩を示すファシスインデックス値や、RMS 振幅マップの比較的強い振幅が南部に延長することから、ファシス D の範囲を南に広く延長した。
PL3 ユニット（スカイブルー～ライトブルー）
サイスミックファシス 3 あるいはサイスミックファシス 1 がサイスミックファシス 4 の一部に伴って認められ、既往評価においては、レビーを伴う海底チャネルと解釈していた。砂岩を示すファシスインデックス値の範囲は、RMS 振幅では周囲に比べてやや高い振幅値を示す。このため、既往評価においてファシス I であった一部をファシス F とした。
PL4 ユニット（ライトブルー～イエロー（PS13））
PL4 ユニットは、ライトブルーからイエロー間を均等に 16 等分したプロポーショナルスライスの上から 13 枚目のスライス（PS13）によって上下に区分した。下部はサイスミックファシス 3 からなり、部分的にサイスミックファシス 4 とそれに伴う連続的な反射面が分布し、各アトリビュートは、弧を描いて側方移動する分布が確認された。このためレビーを伴う海底チャネルとして解釈した。RMS 振幅はコントラストがなく、砂岩を示すファシスインデックス値の分布もほとんどみられない。このため全体的に泥質であると考えた。坑井における岩相は、シルト岩が主体となっている。上部は、比較的大きな規模のチャネルや最上位付近ではマストランスポート堆積物の分布を解釈していた。坑井における岩相は砂岩が発達している。

4.11.4　貯留可能量評価

(1)　貯留層評価

貯留層評価は、H31 地質解析に従った。民間坑井における岩相は、M1 ユニットに約 300 m の礫岩層および礫質砂岩層、M2 ユニットに砂岩泥岩互層、M3～M5 ユニットに約 50 m の砂岩層、PL1～PL3 ユニットに約 40 m の砂岩層、が分布する。ライトブルーホライズンより上位の地層は、半固結および未固結と考えられる後期鮮新世から第四紀の地層であるこ

とから、貯留には不適であると判断した。

得られた坑井情報は、地質年代、坑井地質、堆積環境、ガンマ線検層（GR）、自然電位検層（SP）、孔径検層（CALI）、密度検層（DENS）、泥岩含有率（Vcl）、トータル孔隙率（PHIT）、有効孔隙率（PHIE）、ファシス、Vcl でカットオフした PHIE の圧密曲線である。

(2) 貯留可能域の抽出

H31 地質解析に従って、貯留可能域を抽出した。

CO_2 が超臨界状態となる条件は、RITE（2006）[12)] による温度 31.1℃以上、圧力 7.38 MPa 以上を採用した。民間坑井で観測された温度データを基に地温勾配を計算した結果、臨界温度 31.1℃に達する水面下深度は 1,057 m（海底下深度 935 m）となった。静水圧力と深度の関係から、CO_2 の超臨界圧力 7.38 MPa を満たす深度は水面下深度 738 m となった。温度条件による深度が圧力条件による深度より深くなることから、CO_2 の超臨界条件深度については、温度条件による深度を超臨界上限面とした。貯留下限面については、CO_2 貯留に必要となる孔隙率が十分に確保される深度として、海底面下 3,000 m とした。

漏洩や圧力変化を考慮して、貯留可能域は断層から 2.5 km の離隔距離を取ることとした。断層を、上部下部両方の遮蔽層を切る断層、上部遮蔽層のみを切る断層、下部遮蔽層のみを切る断層およびそれ以外の断層に区分し、遮蔽層を切る断層から 2.5 km 範囲を貯留可能域から除外した。この他に、遮蔽層厚 20 m 以下の範囲、地層傾斜角が 30 度以上の範囲等も除外して最終的な貯留可能域を決定した。

(3) 貯留可能量の計算

抽出した貯留可能域について貯留可能量を算出した。貯留可能量の算定には、以下に示す RITE（2006）[12)] の式を用いた。貯留率は構造タイプの区域では 50%、緩傾斜部（同斜構造）タイプでは 25%の値を使用した。超臨界 CO_2 飽和率は原則として、中間値の 50%を使用した。

CO_2 貯留可能量＝$Sf \times A \times h \times \Phi \times Sg / BgCO_2 \times \rho$

Sf：貯留率（構造タイプ：50%、緩傾斜部タイプ：25%）

A：貯留可能域の面積（km^2）

h：有効層厚（m）

Φ：孔隙率（%）

Sg：超臨界 CO_2 飽和率（20%・50%・80%）

$BgCO_2$：CO_2 の容積係数（約 0.003 m^3/m^3）

ρ ：CO_2 密度（標準状態で 1.976 kg/m^3）

実際の計算では、複数の貯留層ファシスが存在するため、全岩容積（Gross Rock Volume：以下、「GRV」と称する。）と N/G 比を用いた以下の計算式を用いた。

CO_2 貯留可能量＝Sf×GRV×N/G×Φ×Sg / BgCO_2×ρ

GRV：Gross Rock Volume (m^3×10^6)

N/G：N/G 比

GRV は、図 4.11-7 に示したように貯留層ファシスが分布するエリアに対して貯留層ユニットの上限、下限、および CO_2 超臨界条件による上限、海底面下 3,000 m の面で区切られた範囲内で計算した。N/G 比は、堆積相解析で作成したプロポーショナルスライスにおけるカウントの結果をユニット層厚に対する貯留層ファシスの区間出現率とし、これに坑井における貯留層ファシス区間での N/G 比を乗じて算出した。

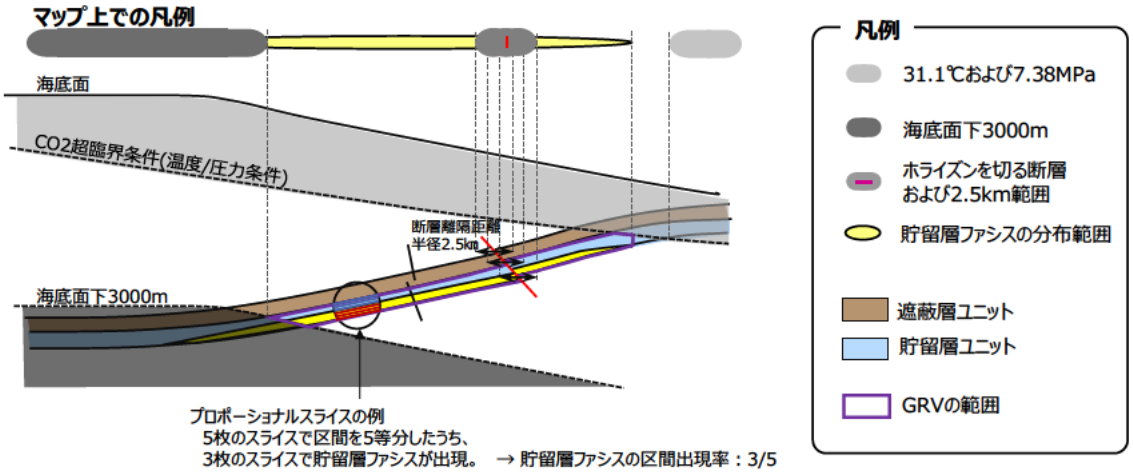


図 4.11-7　貯留可能量の計算

各貯留可能域について、単体の領域あるいは連続している貯留層ファシスの領域を合計しても貯留可能量が 1 億 t に満たない場合は除外し、1 億 t を超す貯留可能量を持つ貯留可能域のみを抽出した。M4 ユニット、M5 ユニットに関しては、貯留可能量が 1 億 t を超す領域は確認できなかった。

CO_2 貯留可能量は、上部貯留層層準で約 15.1 億 t、下部貯留層層準で約 13.8 億 t である。両貯留層区間ともに北東部に遮蔽層層準を切る断層が発達しており構造安定度はやや低めの評価となっており、上部については遮蔽能力、下部については孔隙率の評価点数も中程度のものとなった。各貯留可能域について技術要素を抽出しまとめたものを表 4.11-7 に示す。技術要素の点数は、表 5.2-1 に基づいて算出した。

表 4.11-7　技術要素と技術評点

貯留可能域	貯留層			貯留可能量	遮蔽層		地質構造	
貯留層区間	海底面下平均深度（m）	平均層厚（m）	平均孔隙率（%）	億トン-CO2	平均層厚（m）	遮蔽能力（堆積環境・岩相）	構造安定度（断層など）	地層傾斜
上部	1356	234	34	15.06	128	半深海性・砂質シルト岩	多い	≦20
下部	2588	256	17	13.77	270	半深海性・シルト岩	多い	≦30

貯留可能域	貯留層			貯留可能量	遮蔽層		地質構造		評点
貯留層区間	海底面下平均深度（m）	平均層厚（m）	平均孔隙率（%）	億トン-CO2	平均層厚（m）	遮蔽能力（堆積環境・岩相）	構造安定度（断層など）	地層傾斜	
上部	1.0	0.6	1.0	1.0	1.0	0.3	0.3	0.6	32.4
下部	0.6	0.6	0.3	1.0	1.0	0.6	0.3	0.3	5.8

4.11.5　調査井の検討

これまでの地質解析および貯留可能量評価の結果を踏まえ、下部貯留層層準および上部貯留層層準のすべてのユニットにおいて貯留候補ファシスを掘削可能な位置として、民間坑井の南東側約 5 km に調査井位置を設定した。

4.11.6　評価

既存の弾性波探査データの再処理および H31 物性解析結果と既存の坑井データを活用して、茨城沖北部における地質解析について再検討を行った。その結果、地質構造、地質層序、堆積環境等を基に、堆積相や堆積体の分布を再解釈し、調査範囲において推定していた貯留層層準と遮蔽層層準の分布範囲をより精度高く評価することができた。これらは、中新世および鮮新世の地層に含まれる、砂岩泥岩互層や泥岩である。

調査範囲では周辺に比べ地震が少ないが、歴史地震を発生している震央が分布することから注意が必要である。

地質性状は、坑井で得られた情報からは、おおむね海成の堆積物であり、貯留層層準では孔隙率 20%以上が推定され、比較的良好である。解析に用いた H31 物性解析結果には孔隙率分布を評価した結果もあるが、深度方向に比較的長い区間を同一の基準で評価しているため岩相ごとの孔隙率変化を表現することができておらず使用を断念した。また調査範囲においては多数の断層を確認しており、この断層により水理的な閉鎖区間が多く存在する可能性があることから、貯留地点における正確な圧力を含む性状の把握・評価のための、調査井による直接的なデータの取得が重要である。また、抽出した貯留可能域のおおよそ半分は、2D 探査データを用いた解析範囲であることから、さらなる精度向上のためには新規 3D 探査データを取得した上で精査が必要である。

【参考文献】

1) 日本CCS調査(株)、“平成３１年度二酸化炭素貯留適地調査事業委託業務成果報告書”(2021)
2) 国土地理院ホームページ、地理院地図（電子国土 Web）、https://maps.gsi.go.jp
3) 独立行政法人石油天然ガス・金属鉱物資源機構、“平成２７年度国内石油天然ガス基礎調査基礎物理探査「茨城沖北部３D」データ処理報告書、データ解釈報告書”(2018)
4) 石油公団、“昭和 45 年度 大陸棚石油・天然ガス資源基礎調査 基礎物理探査「北上－阿武隈」調査報告書”(1971)
5) 日本CCS調査(株)、“平成３０年度二酸化炭素貯留適地調査事業委託業務成果報告書”(2020)
6) 石油公団、“昭和 61 年度 国内石油・天然ガス基礎調査 海上基礎物理探査「南三陸～鹿島沖」調査報告書”(1987)
7) 石油公団、“平成 5 年度 国内石油・天然ガス基礎調査 海上基礎物理探査「常磐～鹿島浅海域」現場作業及び処理作業 調査報告書”(1994)
8) 石油公団、“平成 6 年度 国内石油・天然ガス基礎調査 海上基礎物理探査「常磐～鹿島浅海域」現場作業及び処理作業 調査報告書”(1995)
9) 馬場敬、“１０. 海洋地質”、日本地質学会編「日本地方地質誌２東北地方」、朝倉書店、p.427-478 (2017)
10) 岩田尊夫、平井明夫、稲場土誌典、平野真史 : “常磐沖堆積盆における石油システム”、石油技術協会誌、Vol.67、No.1、p.62-71
11) 安藤寿男、柳沢幸夫、小松原純子 : “常磐地域の白亜系から新第三系と前弧盆堆積作用”、地質学雑誌、Vol.117、p.49-67 (2011)
12) 財団法人地球環境産業技術研究機構、“平成 17 年度二酸化炭素固定化・有効利用技術等対策事業「二酸化炭素地中貯留技術研究開発」成果報告書”(2006)

4.12　貯留層シミュレーションによる貯留可能性検討（本荘沖の南部）

本荘沖の南部では、地質解析・貯留可能量評価および 2D/3D 探査データの解析を実施し、笹岡層貯留層で 16 億 t、桂根相上下部貯留層で 7.6 億 t 程度貯留できる可能性を 4.8 節で報告した。本節では、地質解析結果を中心として、後述の 4.12.1(2)に記載する坑井データ、地表調査・分析業務結果、苫小牧 CCS 坑井分析データおよびその他公開情報を反映した三次元地質モデルを構築し、調査井掘削前 CO_2 挙動予測シミュレーションを実施した結果について報告する。

4.12.1　概要

本荘沖の南部の貯留層モデルの特徴として、以下があげられる。

1) 貯留可能域は層序で笹岡層と桂根相に大きく分かれており、特に笹岡層については 2020 年度評価区間のみで 16 億 t-CO_2、2016 年度、2018 年度評価区間を加えると約 56 億 t-CO_2 の貯留可能量が見込まれる。
2) 隣接する本荘沖の貯留層は背斜構造に位置しているのに対して本荘沖の南部は向斜構造となっている。したがって構造的な（構造）トラップが働かず、縁辺部に CO_2 が移動しやすい。
3) 地質解析の結果、上部貯留層のうち、Intra 笹岡/観音寺～PS2（上部）の上部貯留層は泥質岩発達ゾーンとなっており低浸透率な地層となっている。

上記のような特徴から、調査井掘削前 CO_2 挙動予測シミュレーションについては、以下の経緯で検討を進めた。

1) 今回の貯留シミュレーションについては 2017 年度に実施した隣接する本荘沖のシミュレーション結果から 10 億 t-CO_2 規模の貯留量が見込める可能性があることから、まず事前検討として 5 坑井で 1 億 t-CO_2 貯留ケースについて実施可能性を確認した後で、5 坑井最大貯留ケースおよび 10 坑井最大貯留ケースについて最大貯留可能量を検討した。
2) 制限条件であるスレッショルド圧を超えないように CO_2 の圧入をした場合には上部貯留層に垂直井 5 坑配置では、低レートで圧入を行う必要があるため、1 億 t-CO_2 を圧入するためには 100 年以上の期間がかかることが判明した。
3) スレッショルド圧を制限せずにシミュレーションを試みたところ 1,000 年後も遮蔽層下端まで CO_2 が到達しないことが判明した。CO_2 が貯留層内に留まるのであれば、安全に貯留できていると考えられることから制限条件を「遮蔽層下端まで CO_2 が達せず、遮蔽層内に溶存 CO_2 が分布しないこと。」に変更して以後の検討

を進めた。

4) 3)の結果、遮蔽層に CO_2 が浸透せずに 5 坑井で 1 億 t-CO_2 の貯留が可能であった。同様の条件で 5 坑井では最大貯留量 1.8 億 t-CO_2 の貯留が可能であることを確認した。

5) 同様に 10 坑井で最大貯留量 3.1 億 t-CO_2 の貯留が可能であることを確認した。

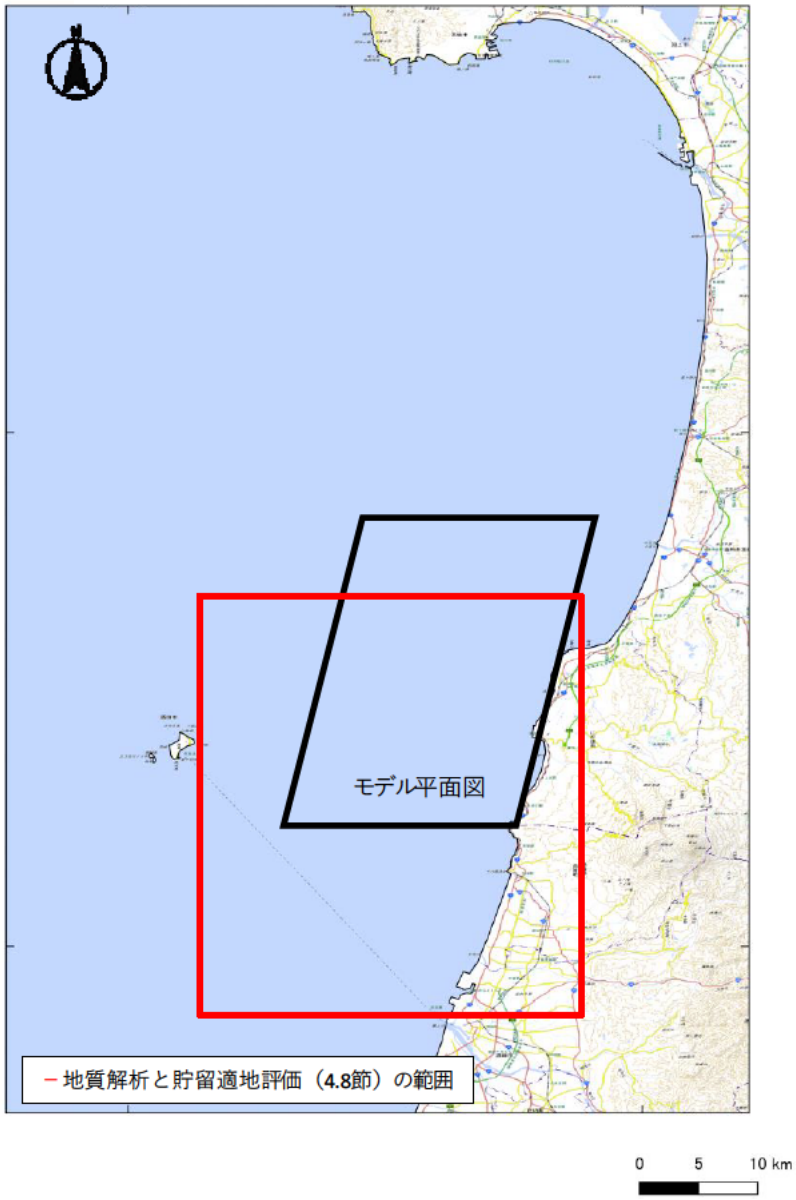
6) 圧入された CO_2 は浮力により貯留層上部へ到達した後は低浸透性の層準の下面に沿って浅部に向かって広がる挙動が観察された。

7) 制限条件である CO_2 超臨界条件から外れる深度に達しないようにする必要があるため、坑井配置や仕上げ深度を考慮して坑井配置を決定した。

今後、圧入条件の最適化および貯留可能量の最大化を図るために、調査井掘削により得られるデータを加味して、貯留層の浸透性分布や貯留層上部の低浸透性の層準の広がりや勾配、遮蔽層内の複数のコアからのスレッショルド圧測定や遮蔽層内の砂体の広がり等に関するデータを詳細に調査する必要がある。

(1) 調査範囲

4.8 節で示した地質解析範囲を含む更新世の笹岡層（上部貯留層）および鮮新世の桂根相（下部貯留層）を対象に調査井掘削前 CO_2 挙動予測シミュレーションを実施した（図 4.12-1）。



国土地理院「電子地形図（タイル）」に加筆。

図 4.12-1　CO_2 挙動予測シミュレーション実施範囲

(2)　使用データ

シミュレーションによる貯留可能量の検討に使用した主なデータを表 4.12-1 に示す。4.8 節に示す坑井データ、地質解析・貯留可能量評価業務結果、および苫小牧 CCS 坑井分析データ、その他公開されている地質情報に関する資料等を使用した。

表 4.12-1 地質モデルの作成で使用した主なデータ一覧

[1]　坑井データ	
石油公団 国内石油・天然ガス基礎調査	掘削深度
昭和58年度 基礎試錐「最上川沖」	2,391.5 m
平成5年度 基礎試錐「本荘沖」	4,800 m
平成7年度 基礎試錐「子吉川沖」	4,802 m
民間坑井	掘削深度
庄内沖SI-1	2,004 m
遊佐沖SI-1	2,605 m
[2]　地質解析・貯留可能量評価業務データ	
「平成２７年度二酸化炭素貯留適地調査事業」に係る「既存2D/3D探査データを利用したデータ処理・地質解析・貯留可能量評価のうち、地質解析・貯留可能量評価（3）秋田沖」	
「平成２８年度二酸化炭素貯留適地調査事業」に係る「既存探査データを利用した地質解析・貯留可能量評価業務（1）秋田沖」	
「平成２８年度二酸化炭素貯留適地調査事業」に係る「既存探査データを利用した地質解析・貯留可能量評価業務（2）本荘沖」	
平成３０年度「二酸化炭素貯留適地調査事業委託業務」に係る「地質解析・貯留可能量評価業務（秋田沖）3D探査データの解析」	
令和２年度「二酸化炭素貯留適地調査委託業務」に係る「地質解析・貯留可能量評価（本荘沖南部）2D探査データ、3D探査データの解析」	
[4]　調査井掘削前CO_2挙動予測シミュレーション業務結果	
「平成２９年度二酸化炭素貯留適地調査事業委託業務」に係る「本荘沖区域における、第一次地質モデルの作成と第一次CO_2挙動予測シミュレーション」	
「平成２９年度二酸化炭素貯留適地調査事業委託業務」に係る「本荘沖区域における、調査井掘削前CO_2挙動予測シミュレーションに係る追加検討」	
[5]　地表調査・分析業務結果	
「平成２９年度二酸化炭素貯留適地調査事業委託業務」に係る「地表地質調査採取試料の分析・検討業務（「秋田区域」、「宮崎区域」、「金沢区域」）」のうち「秋田区域」	
[6]　苫小牧ＣＣＳ坑井データ	
苫小牧調査井CCS-1	
苫小牧調査井CCS-2	
[7]　その他公開されている地質情報に関するデータ	
本業務を実施するにあたって必要となるその他の地質情報データ	

4.12.2　地質モデルの作成

(1)　構造モデルの作成

ホライズン・層序および貯留層・遮蔽層の対応関係を図 4.12-2 に示す。4.8 節に示す地質解析により作成した深度構造図および断層解析結果を使用し、笹岡層を貯留層とする上部貯留層モデルおよび桂根相を貯留層とする下部貯留層モデルについて、以下に示される 10 ホライズンからなる九つの区間を基に構造モデルを作成した。

1）海底面～Intra 笹岡／観音寺：上部遮蔽層

2）Intra 笹岡／観音寺～PS2（上部）：上部貯留層（泥質岩卓越ゾーン）

3）PS2（上部）～笹岡層／観音寺層下限：上部貯留層

4）笹岡層／観音寺層下限～上部天徳寺層／丸山層下限：下部遮蔽層上部

5）上部天徳寺層／丸山層下限～No. 3 G. inflata bed 上限：下部遮蔽層上部

6）No. 3 G. inflata bed 上限～No. 3 G. inflata bed 下限：下部貯留層上部

7）No. 3 G. inflata bed 下限～PS2（下部）：下部貯留層下部（泥質岩卓越ゾーン）

8）PS2（下部）～桂根相下限：下部貯留層下部

9）桂根相下限～グリーンタフ上限

今回の調査対象範囲では、Intra 笹岡／観音寺ホライズン直下において泥質岩が卓越していることから PS2（上部）ホライズンを設定し、Intra 笹岡／観音寺ホライズン～PS2（上部）ホライズン間を上部貯留層内の泥質岩が卓越するゾーン、PS2（上部）～笹岡層／観音寺層下限ホライズンを砂質岩が広がるゾーンとした。

貯留可能域評価を行ううえで離隔距離を考慮すべき断層として、断層 4 条をシミュレーションモデルに組み込んだ。いずれの断層も下部遮蔽層層準の上限には到達するものの上部遮蔽層層準までは到達しておらず、下部貯留層（桂根相）でシミュレーションを行う際に考慮すべきものであるが、桂根相を対象とした CO_2 貯留シミュレーションを実施しなかったため、結果的に制限条件には該当しなかった。

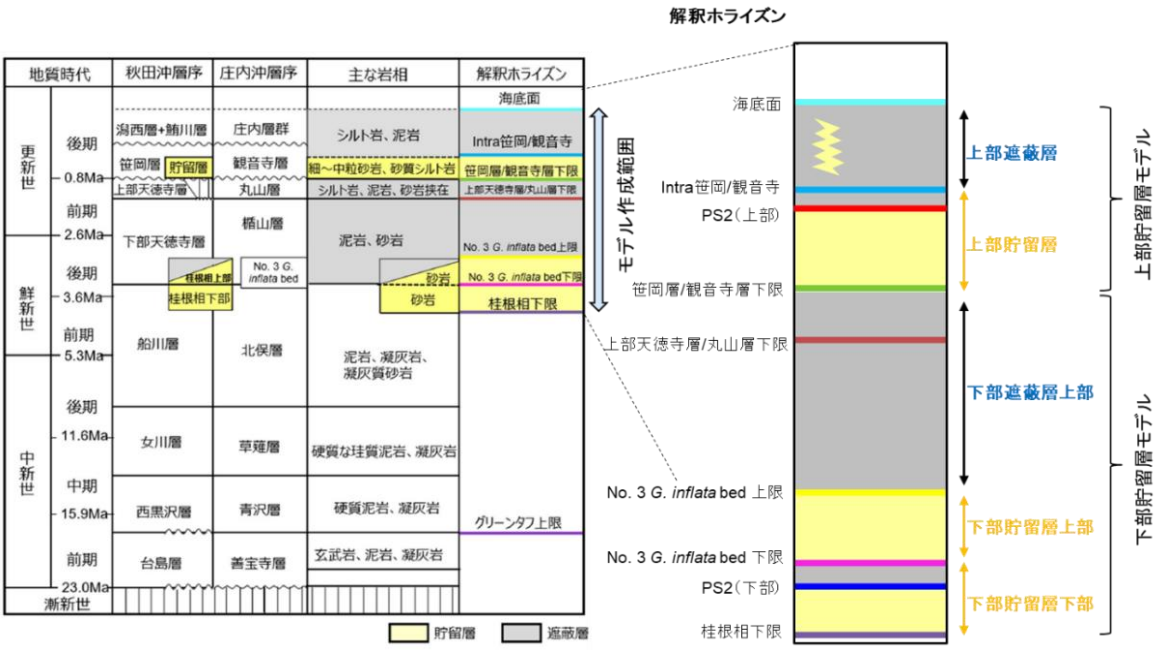


図 4.12-2　層序表（左）および貯留層・遮蔽層の対応関係

(2)　グリッドモデルの作成

作成した構造モデルを基に、上部貯留層および下部貯留層を合わせて東西方向（I）が 145 セル、南北方向（J）が 146 セル、深度方向（K）が 348 セルの合計 7,367,160 グリッドからなるグリッドモデルを構築した。図 4.12-3 に層序とグリッドモデルの深度方向のセルの番号（K）の対応関係を記す。

グリッドモデルの作成では平面グリッドは調査対象範囲の構造トレンドを考慮し、南北系の構造トレンドに極力平行になる軸およびそれに直交するようなグリッドとした。また、深度方向のグリッドサイズは圧入後の CO_2 の挙動を精緻に再現するため、いずれの区間においても平均で約 10 m となるように分割した。一方、平面方向のグリッドサイズはシミュレーションの計算時間と圧入後の CO_2 の挙動再現を両立するのに適切なサイズとなるように考慮して 200 m×200 m とした。

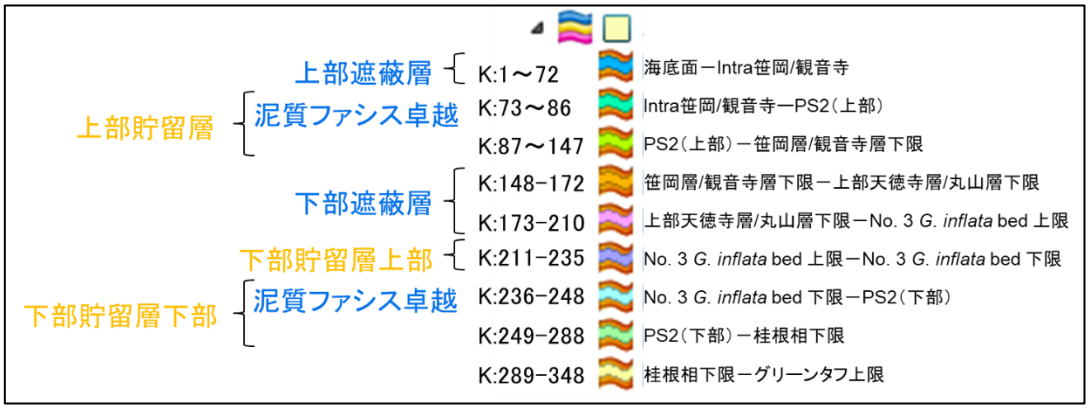
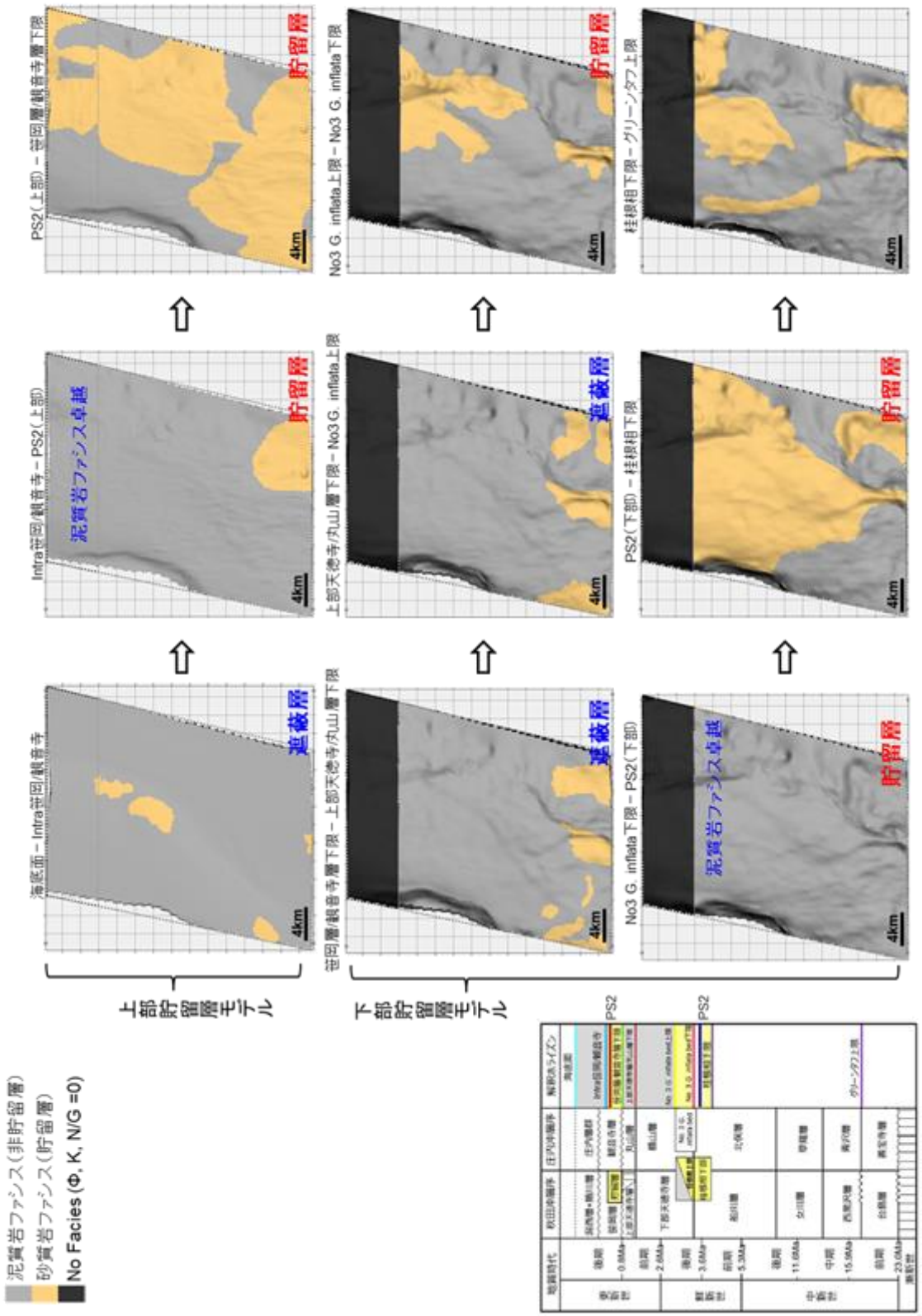


図 4.12-3　層序とグリッドモデルの K 番号の対応関係

(3)　ファシス設定

地質モデルでは、4.8 節に示す地質解析で抽出された A～H からなるファシスを基に設定した。これら設定したファシスの分布を図 4.12-4 に示す。設定したファシスは、堆積相解析により認定した七つのサイスミックファシス A、B、C1、C2、D、E、F である。上部貯留層モデルでは砂質岩ファシス（貯留層）としてファシス A、C および H を、泥質岩ファシス（非貯留層）としてファシス E および F を設定した。下部貯留層モデルでは、砂質岩ファシスとしてファシス D および H を、泥質岩ファシスとしてファシス E および F を設定した。なお、下部貯留層モデルにおける北側のモデル作成範囲外のエリアにおいて、ファシスを与えない部分を「No Facies」として区別し、物性値を 0 とした。



注）堆積相解析結果は 4.8 節を参照

図 4.12-4　設定したファシスの分布

(4) 貯留層・遮蔽層にかかる物性値

① 孔隙率

調査対象範囲周辺で掘削された坑井のコアおよび検層データを用いて、孔隙率と深度の関係（圧密曲線）を検討した。

検層データは泥岩（Shale）含有率が 0.3 以下を砂質岩ファシスとして、泥岩（Shale）含有率が 0.7 以上を泥質岩ファシスとして区別し、また、坑径を基に信頼性の低い値はカットオフして、信頼性が高いデータのみ抽出して使用した。

圧密曲線については Athy[6)] の圧密曲線の式（式（4.12-1））を基に測定値から圧密曲線を作成したが、孔隙率は地層堆積の影響を受けて深度とともに指数関数的に減少する傾向がある。今回は抽出した孔隙率の最小値、中間値、最大値を通る圧密曲線のうち中間値を通る圧密曲線（式（4.12-2）および式（4.12-3））を使用した。

Athy の圧密曲線

$$\Phi = \Phi_0 \times \exp(-b \times Depth) \quad \cdots\cdots \text{式（4.12-1）}$$

Φ_0：孔隙率

b：圧密係数

Depth：埋没深度（m）

砂質岩ファシス（貯留層）

$$\Phi = 0.43 \times \exp(-0.00031 \times Depth) \quad \cdots\cdots \text{式（4.12-2）}$$

泥質岩ファシス（非貯留層）

$$\Phi = 0.50 \times \exp(-0.00038 \times Depth) \quad \cdots\cdots \text{式（4.12-3）}$$

② 浸透率

浸透率は周辺坑井のコアデータを基に、孔隙率－浸透率の関係からファシスごとの代表トレンドとして相関式（4.12-4）および（4.12-5）を作成した。

砂質岩ファシス（貯留層）

$$Perm = 0.0191\exp(26.87 \times \Phi) \quad \cdots\cdots \text{式（4.12-4）}$$

泥質岩ファシス（非貯留層

$$Perm = 0.0354\exp(8.2708 \times \Phi) \quad \cdots\cdots \text{式（4.12-5）}$$

深度方向の浸透率の変化は式（4.12-2）および式（4.12-3）に示す圧密曲線により、深部に向かって孔隙率が低下する傾向を考慮しており、上記相関式を適用することで浸透率についても深部に向かって低下していく不均質モデルを作成した。

③ Kv/Kh

垂直浸透率と水平浸透率の比 Kv/Kh については明確な裏付けとなるデータはなかったため、一般的な値として貯留層内は Kv/Kh=0.1、遮蔽層内は Kv/Kh=1 と仮定した。

④ N/G 比

N/G 比は、堆積相解析の結果を踏まえ、表 4.12-2 に示す区間ごとにファシス A、B、C、D および H のファシスの出現率と検層解析の N/G 比を用いて算出した。泥質岩ファシスの N/G 比は一律で 0.1 とし、検層解析が未実施でありファシスの出現率が不明な区間の N/G 比は一律で 0.5 とした。

表 4.12-2　区間ごとの砂質岩ファシスの N/G 比

区間	ファシスの出現率 (A)	検層解析の N/G 比 (B)	N/G 比 (A×B)
海底面～Intra 笹岡／観音寺	-	0.5	0.50
Intra 笹岡／観音寺～PS2（上部）	-	0.5	0.50
PS2（上部）～笹岡層／観音寺層下限	0.63	0.7	0.44
笹岡層／観音寺層下限～上部天徳寺層／丸山層下限	0.93	0.5	0.47
上部天徳寺層／丸山層下限～No.3 G. inflata bed 上限	0.93	0.5	0.46
No.3 G inflata bed 上限～No.3 G. inflata bed 下限	0.45	0.75	0.34
No.3 G. inlata bed 下限～PS2（下部）	-	0.5	0.50
PS2（下部）～桂根相下限	0.39	0.6	0.23
桂根相下限～グリーンタフ上限	0.55	0.5	0.28

注 1）ファシスの出現率は、4.8 節を参考に検討を実施した
注 2）検層解析の N/G 比は、4.8 節を参考に検討を実施した

⑤ 貯留層温度

周辺坑井での温度検層の結果から温度勾配を 3.33℃/100m と想定し、各深度における貯留層温度を以下の式に基づいて設定した。

貯留層温度（℃）= 0.0333 × 深度（m(TVDSS)）+ 6.46 ……式（4.12-6）

⑥ 塩分濃度

周辺坑井の検層解析に用いた値を基に、32,000 ppm（NaCl）とした。

⑦ 貯留層圧力

貯留層圧力は、周辺坑井での物理検層結果に基づき比重を 1.05 と仮定した地層水の静水圧として、各深度における貯留圧力を以下の式に基づき設定した。

貯留層圧力（MPa）= 1.05/100 × 深度（m[TVDSS]）× 0.98066 ··式（4.12-7）

⑧ 岩石圧縮率

本荘地域地表サンプル（笹岡層砂岩）の試料分析から、3.49×10^{-6} kPa^{-1} とした。

⑨ 相対浸透率

相対浸透率曲線については、これまで調査対象範囲周辺で行われているシミュレーション評価[8)、9)]および地表調査分析[8)]で報告されている標準化曲線およびエンドポイントを基に以下の式を作成した。

標準化 CO_2 相対浸透率 krg*は式（4.12-8）で示される Corey(1954)[10)]モデル、標準化塩水相対浸透率 krw*は式(4.12-9)で示される van Genuchten(1980)[11)]モデルを用いた。

$$k_{rg}^{*} = (1 - S_{w}^{*})^{n} \quad \cdots\cdots\text{式（4.12-8）}$$

$$k_{rw}^{*} = \begin{cases} \sqrt{S_{w}^{*}}\left(1 - \left(1 - S_{w}^{*\frac{1}{\lambda}}\right)^{\lambda}\right)^{2} & (S_{gr} = 0) \\ \left(1 - \hat{S}_{w}\right)^{2}\left(1 - \hat{S}_{w}^{2}\right) & (S_{gr} > 0) \end{cases} \quad \cdots\cdots\text{式（4.12-9）}$$

$$k_{rg}^{*} = k_{rg}/k_{rg}@S_{wir} \ 、\ k_{rw}^{*} = k_{rw}/k_{rw}@S_{wmax} \quad \cdots\cdots\text{式（4.12-10）}$$

$$S_{w}^{*} = \frac{S_{w}-S_{wir}}{1-S_{wir}}、\ \hat{S}_{w} = \frac{S_{w}-S_{wir}}{1-S_{wir}-Sgr} \quad \cdots\cdots\text{式（4.12-11）}$$

k_{rg}^{*}：標準化 CO_2 相対浸透率

S_{w}^{*}、$\hat{S}_{w}$：標準化水飽和率

n：定数

k_{rw}^{*}：標準化水相対浸透率

λ：定数

k_{rg}^{*}：CO_2 相対浸透率

k_{rw}：水相対浸透率

S_{wir}：不動水飽和率

S_{w}：水飽和率

砂質岩と泥質岩の標準化浸透率曲線として、調査対象範囲周辺で実施したシミュレーション評価[8)、9)]を基に表 4.12-3 と表 4.12-4 に示されるエンドポイントにより相対浸透率曲線を作成した。

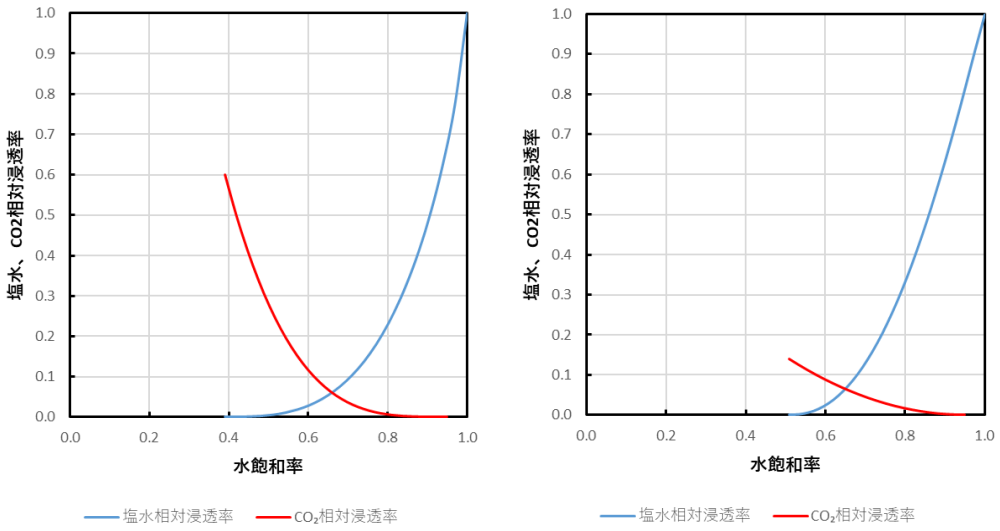
表 4.12-3　各相対浸透率曲線のエンドポイント（上部貯留層）

項目	ファシス	値	備考
Krg	砂質岩	0.6	「秋田沖シミュレーション」[2)]で使用された笹岡層貯留層のエンドポイント
	泥質岩	0.14	
Krw	砂質岩	1.0	
	泥質岩	1.0	
Sgc	砂質岩	0.05	一般的な値として仮定
	泥質岩	0.05	
Sgrmax	砂質岩	0.33	GEM の標準的な計算方法: $S_{grmax} = S_{gc} + 0.5 \times (1 - S_{wir} - S_{gc})$
	泥質岩	0.27	
Swir	砂質岩	0.39	秋田地域 笹岡層地表サンプル分析値
	泥質岩	0.51	能代地域 笹岡層地表サンプル分析値

表 4.12-4　各相対浸透率曲線のエンドポイント（下部貯留層上部／下部）

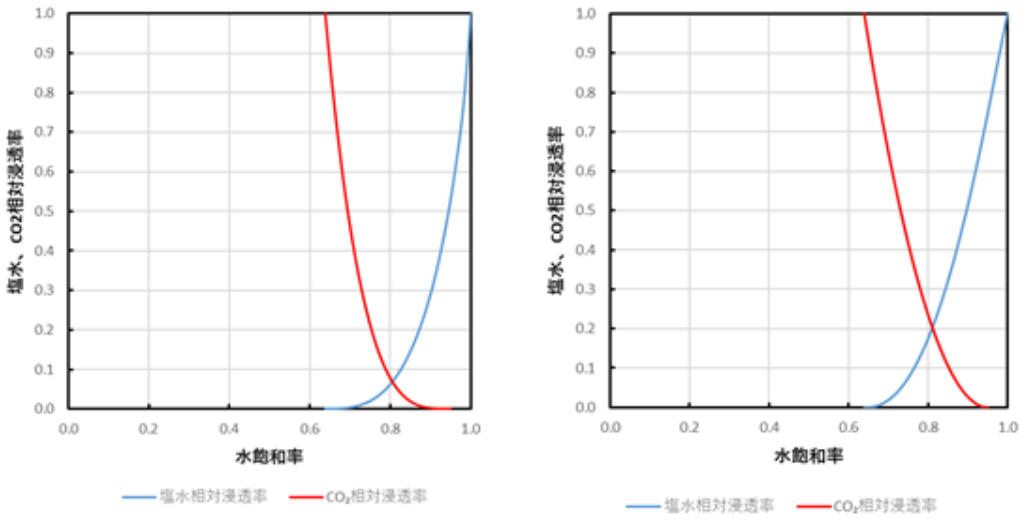
項目	ファシス	値	備考
Krg	砂質岩	0.14	「秋田沖シミュレーション」[2)]における桂根相シミュレーションの設定を引用
	泥質岩	0.0169	
Krw	砂質岩	1.0	
	泥質岩	1.0	
Sgc	砂質岩	0.05	一般的な値として仮定
	泥質岩	0.05	
Sgrmax	砂質岩	0.28 / 0.24	GEM の標準的な計算（上部／下部） $S_{grmax} = S_{gc} + 0.5 \times (1 - S_{wir} - S_{gc})$
	泥質岩	0.1	
Swir	砂質岩	0.49 / 0.56	萌別層相関式[9)]による計算（上部／下部） Swir=0.78-0.0542×Log(K)/ϕ
	泥質岩	0.85	能代地域 桂根相相当層地表サンプル[7)]

なお、遮蔽層のエンドポイントは正確なデータが取得されておらず、周辺のシミュレーション予測は文献調査に基づき評価を行った。本シミュレーションにおいても同様の設定として Krg および Krw は 1、臨界ガス飽和率は 0.05 とし、不動水飽和率（Swir）は Bennion ほか（2007）[12)]の低浸透性岩石に対する CO_2－水系のフラッド実験結果より得られた 0.638 と仮定し、Sgrmax は GEM のデフォルトの計算式から得られる値の 0.206 を基に相対浸透率曲線を作成した。図 4.12-5～図 4.12-9 に作成した相対浸透率曲線を示す。



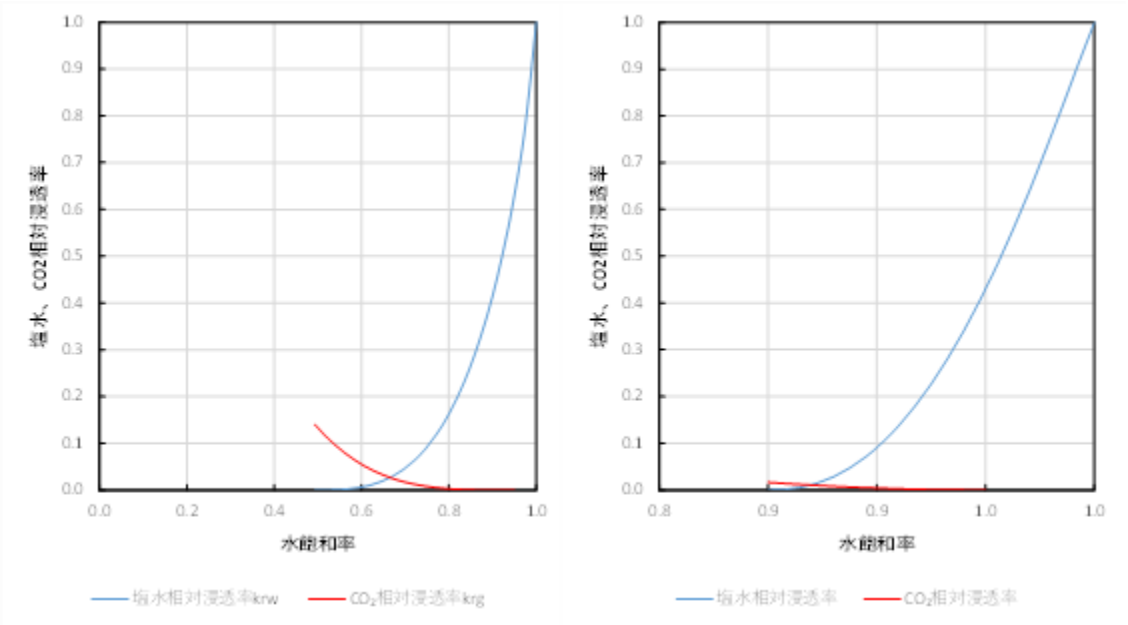
注）左：砂質岩ファシス、右：泥質岩ファシス

図 4.12-5　上部貯留層 相対浸透率曲線



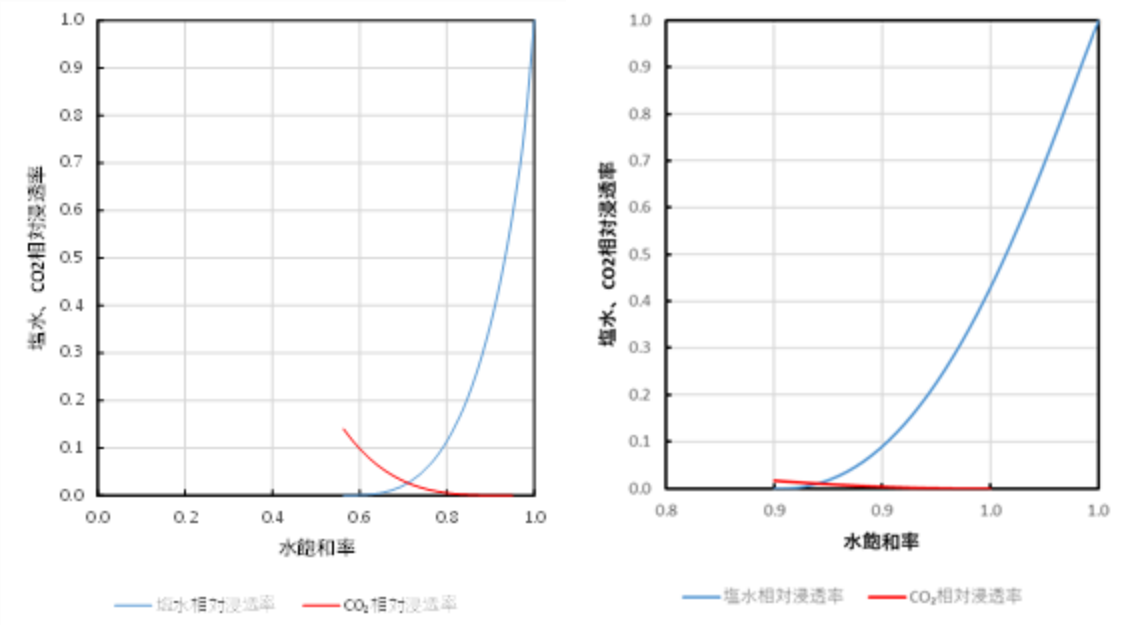
注）左：砂質岩ファシス、右：泥質岩ファシス

図 4.12-6　上部遮蔽層 相対浸透率曲線



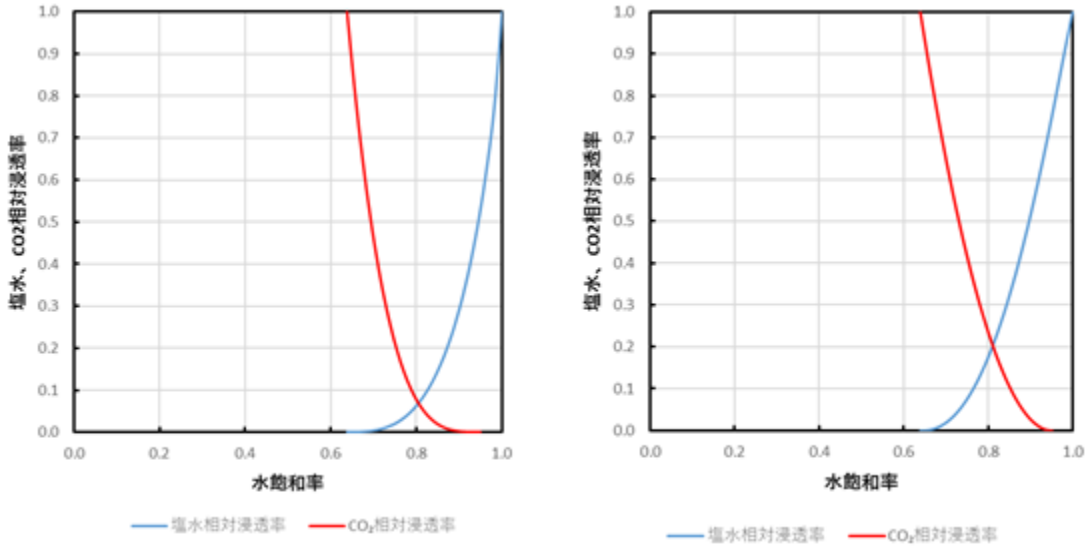
注）左：砂質岩ファシス、右：泥質岩ファシス

図 4.12-7　下部貯留層上部 相対浸透率曲線



注）左：砂質岩ファシス、右：泥質岩ファシス

図 4.12-8　下部貯留層下部 相対浸透率曲線



注）左：砂質岩ファシス、右：泥質岩ファシス

図 4.12-9　下部遮蔽層 相対浸透率曲線

⑩　毛細管圧力

砂岩ファシス（貯留層）の毛細管圧力曲線は苫小牧における CCS 大規模実証試験に関わる調査の成果として得られた図 4.12-10 に示す標準化水飽和率と J-function の関係および式（4.12-12）を基に算出した。

$$Pc = J(Sw^*) * Tcos\theta * \sqrt{\varphi/k} * CF \quad \cdots\cdots \text{式（4.12-12）}$$

Pc：毛細管圧力

Sw*：　標準化水飽和率

Tcosθ：界面張力×Cos（接触角）

φ：孔隙率

k：浸透率

CF：Conversion Factor

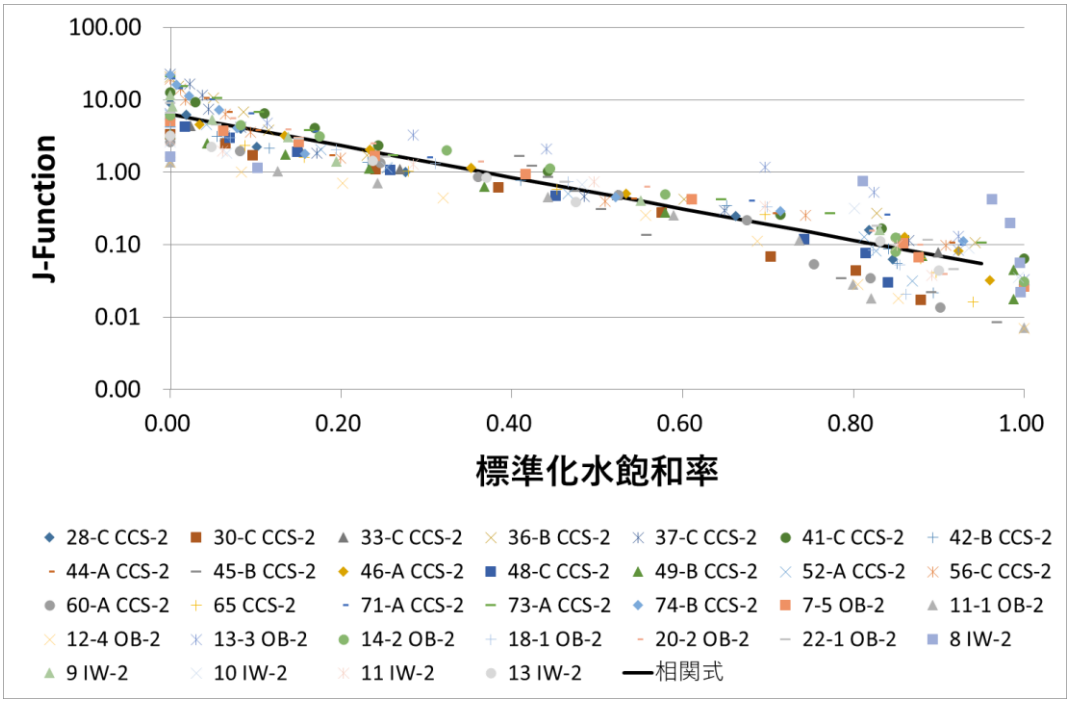


図 4.12-10　毛細管圧力曲線の算出に用いた標準化水飽和率と J-function の関係

泥質岩ファシス（非貯留層）の毛細管圧力曲線は、シール能力の基準となるスレッショルド圧力を再現できるモデルとして van Genuchten の式（4.12-13）を適用した。なお、J-function 式（4.12-12）と整合的な van Genuchten の式による毛細管圧曲線を作成するうえでは調査対象範囲周辺のシミュレーションモデルで使用した図 4.12-11 に示す標準化水飽和率-J-function の関係を参照した。

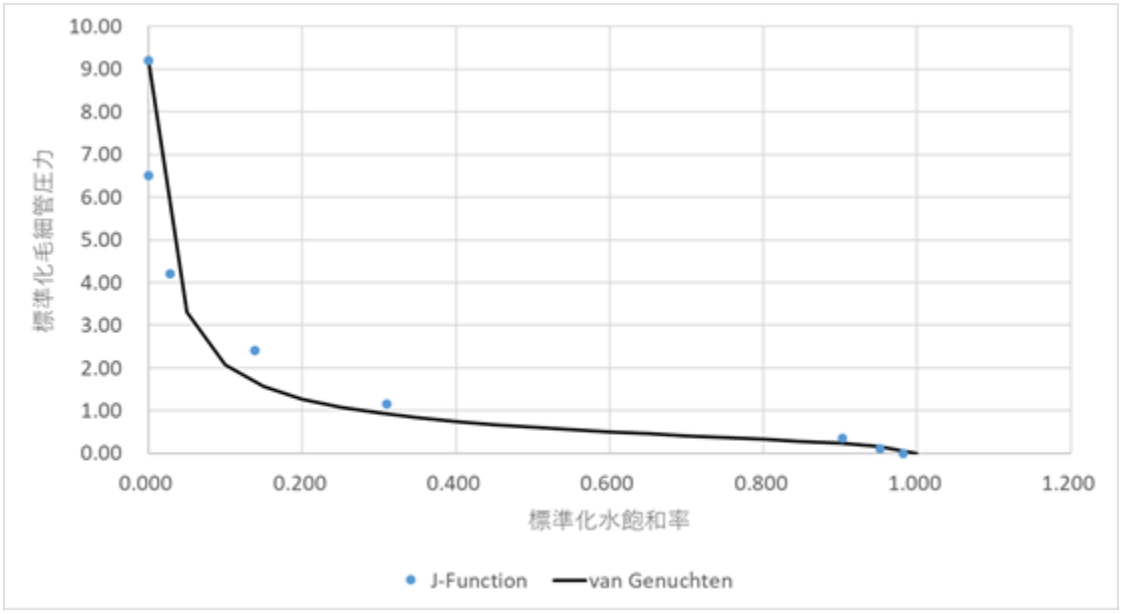
$$Pc = P_O \times \left([S^*]^{-\frac{1}{\lambda}} - 1 \right)^{(1-\lambda)} \quad \cdots\cdots \text{式（4.12-13）}$$

Pc：毛細管圧力（kPa）

Po：置換圧力（kPa）

S*：標準化水飽和率

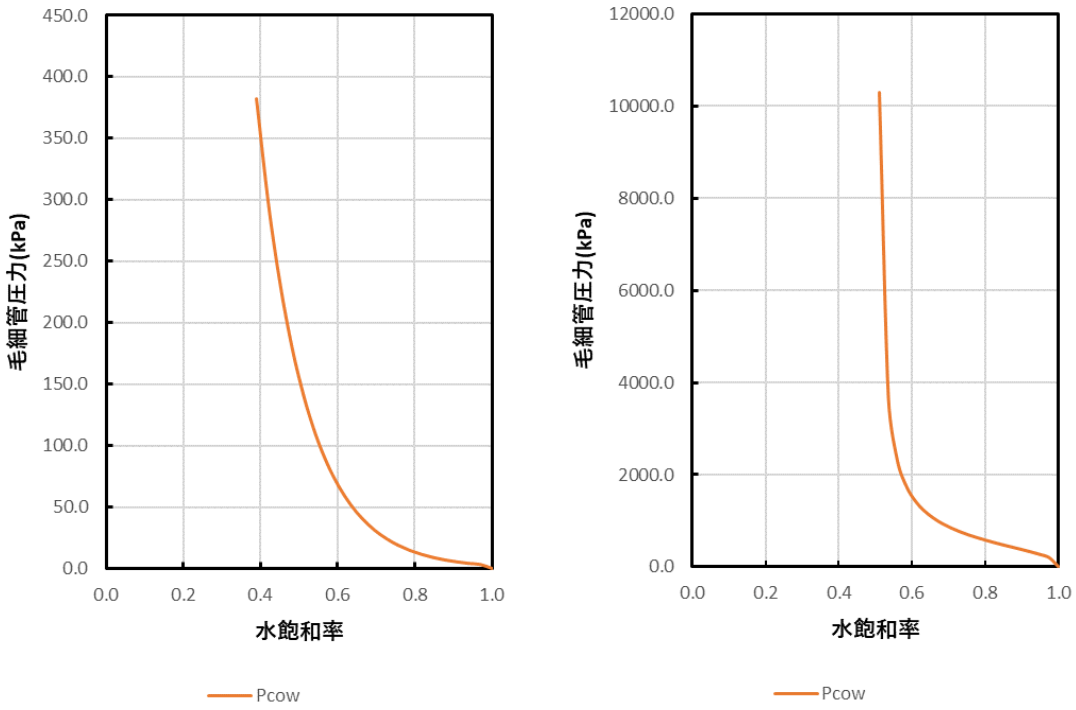
λ：係数（λ=0.6）



注）標準化水飽和率と J-function の関係への適用する際は Pc（毛細管圧力）を$J(Sw^*)$と読み替える。

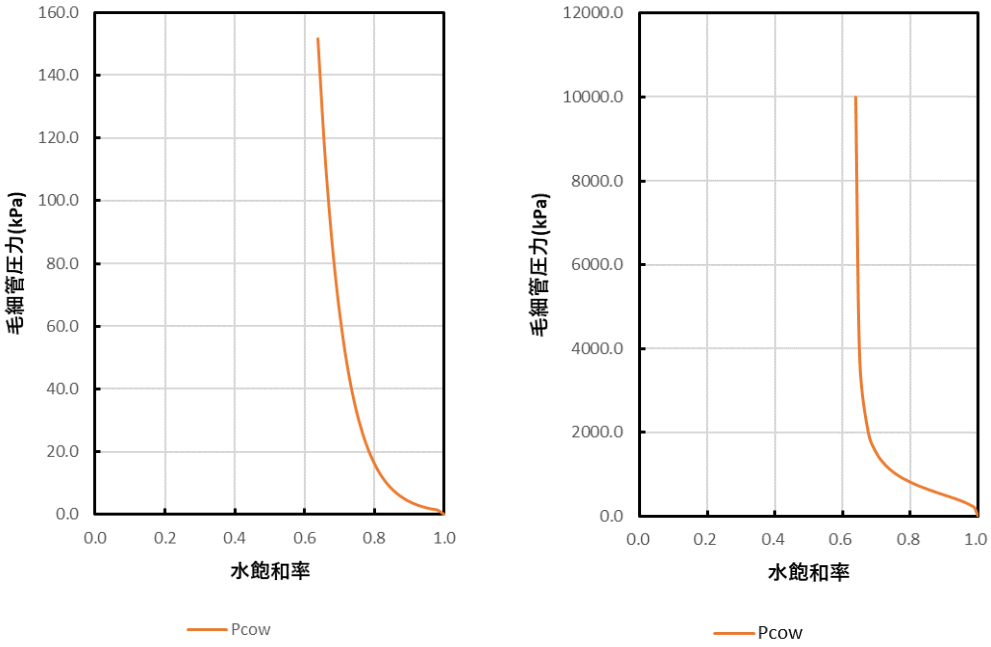
図 4.12-11　毛細管圧力曲線の算出に用いた標準化水飽和率と J-function の関係

また、標準化毛細管圧曲線から毛細管圧曲線を作成する際は、式（4.12-13）において臨界飽和率における毛細管圧力がスレッショルド圧力となるように設定した。上部遮蔽層のスレッショルド圧力は調査対象範囲周辺で実施したシミュレーションモデルの設定を参考に萌別層泥岩のスレッショルド圧力 370 kPa を採用し、下部遮蔽層のスレッショルド圧力は基礎試錐「本荘沖」[1)] で確認されている下限値である 13,700 kPa となるように定数を設定した。図 4.12-12～図 4.12-16 に作成した毛細管圧力曲線を示す。



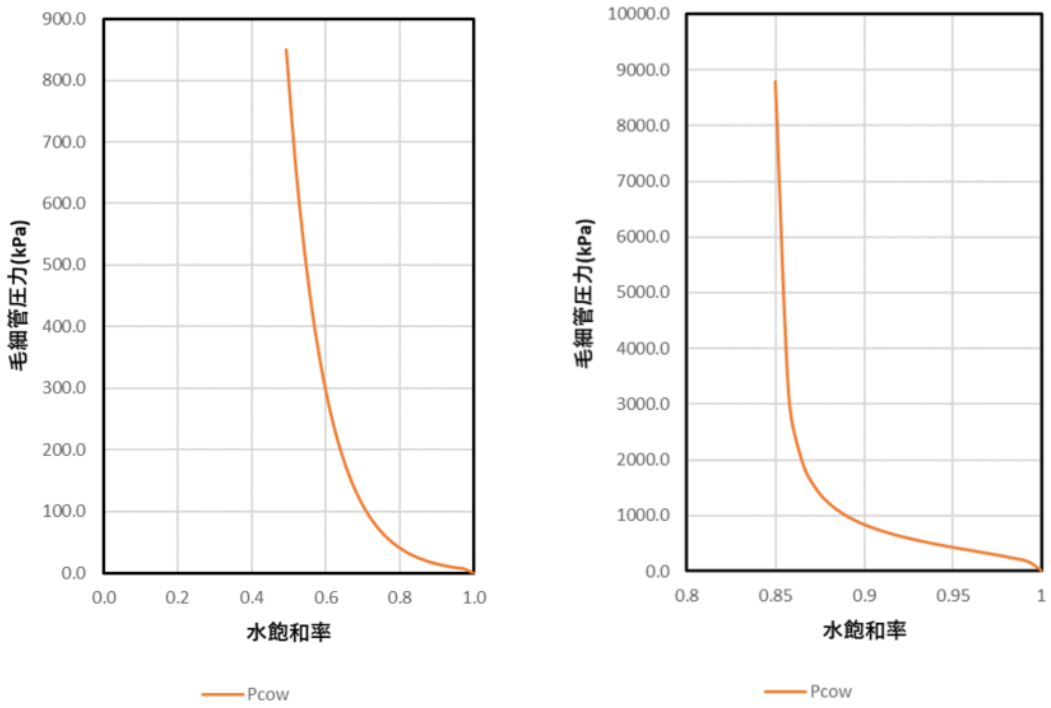
注）左：砂質岩ファシス、右：泥質岩ファシス

図 4.12-12　上部貯留層毛細管圧力曲線



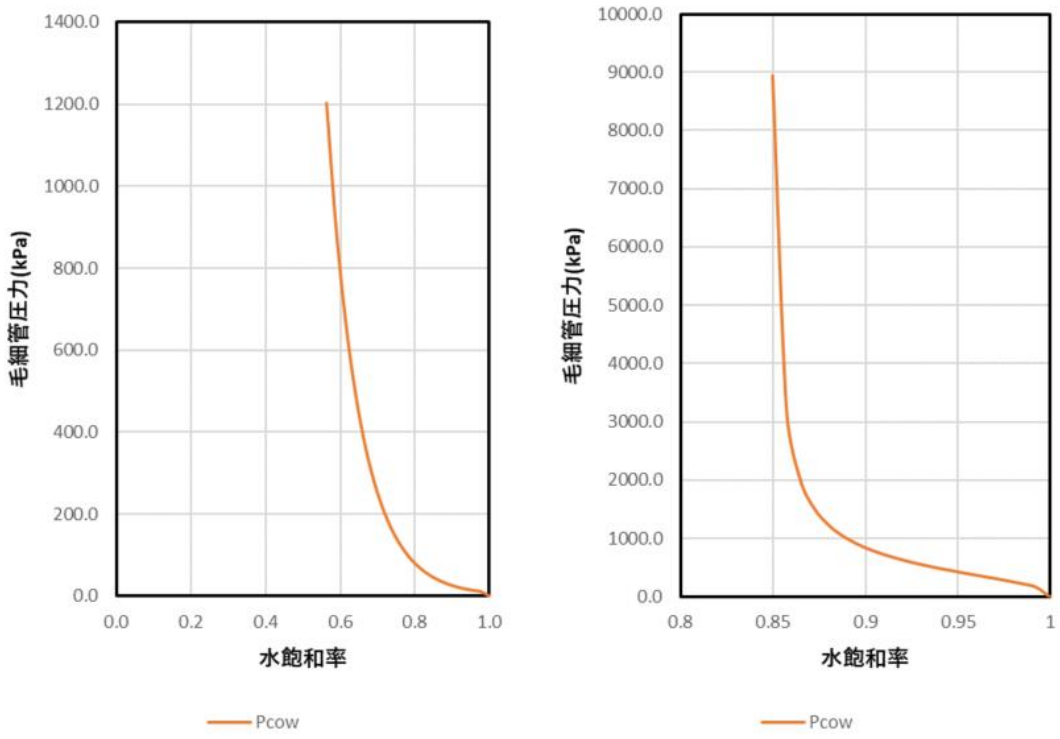
注）左：砂質岩ファシス、右：泥質岩ファシス

図 4.12-13　上部遮蔽層毛細管圧力曲線



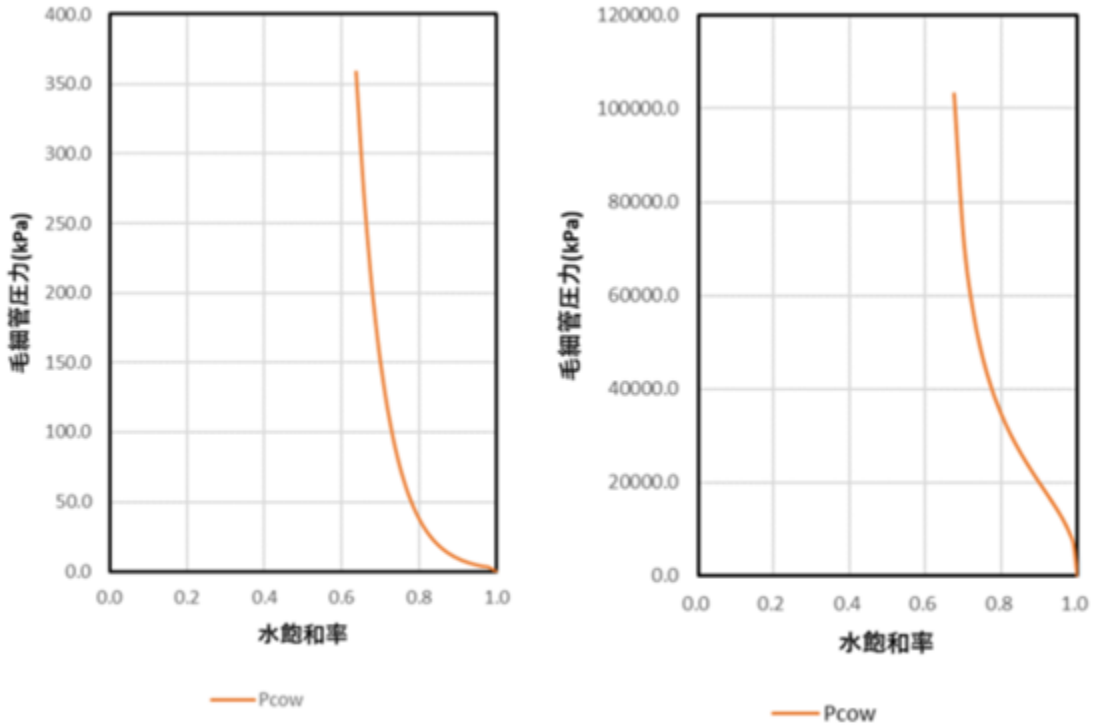
注）左：砂質岩ファシス、右：泥質岩ファシス

図 4.12-14　下部貯留層上部毛細管圧力曲線



注）左：砂質岩ファシス、右：泥質岩ファシス

図 4.12-15　下部貯留層下部毛細管圧力曲線



注）左：砂質岩ファシス、右：泥質岩ファシス

図 4.12-16　下部遮蔽層毛細管圧力曲線

⑪　リークオフ圧力およびスレッショルド圧

周辺坑井のリークオフテスト結果については 4.8 節に基づいて表 4.12-5 を作成した。上部遮蔽層においては比較対象となるスレッショルド圧力データがないため CO_2 挙動予測シミュレーションでは周辺のシミュレーション評価の設定を参考にスレッショルド圧力 370 kPa と同程度と仮定したが、各深度におけるリークオフ圧力を換算したものと比較する限りでは小さめな想定となる。下部遮蔽層においては基礎試錐「本荘沖」[1)] の下部天徳寺層泥岩コアにおいて 13.7 MPa 以上のスレッショルド圧が確認されており、船川層（桂根相）の泥質岩のリークオフ圧力ともおおむね整合性があり、下部貯留層モデル範囲内ではシール能力が高い泥質岩が繰返し出現することで異常に高いスレッショルド圧を維持していると考えられる。

表 4.12-5　周辺坑井におけるリークオフテスト結果

坑井名 (基礎試錐)	深度 m	層準	岩質 %	EMW sg	換算圧力 MPa
本荘沖	642	笹岡層	Sst20, Mdst80	1.3	7.9
	2,180	船川層(桂根相)	Sst10, Mdst40, Tuff50	1.6	34.8
	2,606	船川層	Sst10, Mdst70, Tuff20	1.9	48.4
子吉川沖	521	笹岡層	Slty Mdst100	1.3	6.7
	2,413	船川層(桂根相)	Sdy Tuff40, Mdy Tuff60	-	-
	4,377	女川層	Mdst100	-	-
由利沖中部	558	笹岡層	Sltst100	1.4	7.7
	2522	船川層	Sst10, Mdst40, Tuff50	1.7	43.0
	3907	西黒沢層	Mdst10, Tuff90	1.9	70.8
芦川沖 SI-1	374	西目層	Cgl10, Tuff30, Sltst60	1.3	4.8
	1,715	下部天徳寺層	Mdst60, Tuff40	1.6	27.4
	3,006	船川層	Mdst100	2.0	57.4

岩質の割合はカッティング調査結果を参照。Sst：砂岩, Tuff：凝灰岩, Sltst：シルト岩, Cgl：礫岩

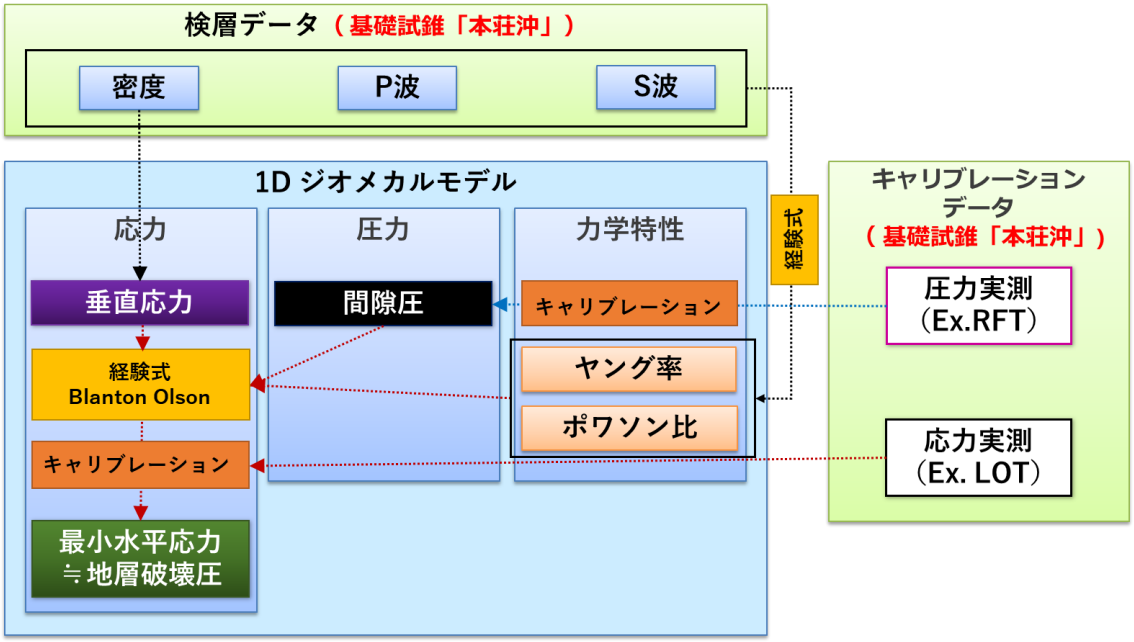
(5)　地層破壊圧力

CO_2 を圧入する際の圧入上限圧力の基準値に関して、ジオメカニクス（地下岩盤力学）に基づき地層破壊圧力を予測した。

①　評価ワークフロー

図 4.12-17 に示す評価ワークフローに従って、以下の 1)～7)の手順で地層破壊圧力予測を実施した。

1) 地層破壊圧力予測を実施する対象井として、基礎試錐「本荘沖」[1)] を選定
2) 基礎試錐「本荘沖」[1)] の検層データ、キャリブレーションデータ（圧力実測データ、応力実績データ）を収集
3) 力学特性（ヤング率・ポアソン比）を、検層データ（密度・P 波速度・S 波速度）から経験式を用いて推定
4) 圧力実績データ（RFT）に整合するように間隙圧力を推定
5) 密度検層データを深度方向に積分することで垂直応力を推定
6) 3)～5)で推定した力学特性・間隙圧力・垂直応力を用いて経験式から地層破壊圧力を算出
7) 算出した地層破壊圧力を応力実測データ（LOT）に合うようにキャリブレーションし、最終的な地層破壊圧力を推定



注）RFT：Repeated Formation Test、LOT：Leak off Test

図 4.12-17　地層破壊圧予測の評価ワークフロー

②　使用データ

本項では、使用した「坑井データ」、「検層データ」、「キャリブレーションデータ」について記載する。

a.　坑井（参照井）データ

調査対象範囲周辺で利用できる坑井は基礎試錐「本荘沖」[1)]、庄内沖 SI-1[3)]、遊佐沖 SI-1[4)]、基礎試錐「最上川沖」[5)] の 4 坑井である。このうち基礎試錐「最上川沖」については既往の地質解析・貯留可能量評価の範囲外となっており、貯留層および遮蔽層層準の解釈作業も行われていないため予測対象外とした。

以下 2 点の理由により基礎試錐「本荘沖」[1)] を中心に地層破壊圧力予測を実施したため、以後ではその手順について説明する。

1) 4 坑の参照井のうち、基礎試錐「本荘沖」[1)] が対象とする貯留可能域の延長部に位置する。
2) 4 坑の参照井のうち、基礎試錐「本荘沖」1）についてのみ、上部遮蔽層における地層破壊圧力予測が可能であった（上部遮蔽層区間の検層データが取得されている）。

b.　検層データおよびキャリブレーションデータ

地層破壊圧力予測（1D ジオメカニカルモデルの構築）作業に使用する検層データおよびキャリブレーションデータの有無を表 4.12-6 に示す。

表 4.12-6　参照井の検層データ・キャリブレーションデータの有無

項目	識別	基礎試錐「本荘沖」[1)]
検層データ	Gamma Ray	○
検層データ	Sonic (P-wave)	○
検層データ	Sonic (S-wave)	○
検層データ	Density	○
検層データ	Resistivity	○
検層データ	Caliper	○
キャリブレーションデータ	LOT	○
キャリブレーションデータ	RFT	○

注）RFT：Repeated Formation Test、LOT：Leak off Test

③　1D ジオメカニカルモデルの構築

地層破壊圧予測に必要なパラメータである、「ヤング率」、「ポアソン比」、「垂直応力」、「間隙圧」について、以下のように推定した。

a.　ヤング率

動的ヤング率（E_{dyn}）は検層データを用いて式（4.12-14）により推定した。

$$E_{dyn} = \rho_{bulk} \times (1 + Vp) \times Vs^2 \quad \cdots\cdots \text{式（4.12-14）}$$

ρ_{bulk}：岩石バルク密度

Vp：P 波速度

Vs：S 波速度

静的ヤング率（E_{stat}）は岩相ごとに式（4.12-15）および式（4.12-16）により推定した。岩相は、検層解析により得た Vsh の値を用いて分類した。

砂岩（Lacy for sand）[13)]

$$E_{stat} = 0.0293 \times E_{dyn}^2 + 0.4533 \times E_{dyn} \quad \cdots\cdots \text{式（4.12-15）}$$

泥岩（Lacy for shale）[13)]

$$E_{stat} = 0.0428 \times E_{dyn}^2 + 0.2334 \times E_{dyn} \quad \cdots\cdots \text{式（4.12-16）}$$

b.　ポアソン比

動的ポアソン比は検層データを用いて式（4.12-17）により推定した。

$$\nu_{dyn} = \frac{(Vp/Vs)^2-2}{2\times(Vp/Vs)^2-1} \quad \cdots\cdots\text{式（4.12-17）}$$

ν_{dyn}：動的ポアソン比

Vp：P 波速度

Vs：S 波速度

静的ポアソン比は動的ポアソン比と同値であると仮定した。

c. 垂直応力

垂直応力の深度分布は式（4.12-18）に示すとおりバルク密度を積分して推定した。

$$\sigma_v(z) = \int_0^z \rho_{bulk}(z) g\, dz \quad \cdots\cdots\text{式（4.12-18）}$$

σ_v：垂直応力

ρ_{bulk}：岩石バルク密度

z：深度

g：重力加速度

検層データが取得されていない区間の密度に関し、海上から海底までの密度は 1.03 g/cm^3（海水の密度）、海底から密度検層開始深度までの区間は 1.80 g/cm^3（密度データ取得区間上限深度での密度）と仮定した。

d. 間隙圧

RFT（Repeated Formation Test）の結果を用いて、間隙圧をキャリブレーションした。下部遮蔽層である「笹岡層／観音寺層下限ホライズン」～「No.3 G Inflata bed 上限ホライズン」の区間、および、下部貯留層内の、「RFT（2,073 m[TVDSS]）」～「RFT（2363 m[TVDSS]）」の区間は、異常高圧、それ以外の区間は、静水圧勾配と判断した。

各層の圧力勾配を表 4.12-7 に示す。

表 4.12-7　各層の EMW

区間	深度区間 m[TVDSS]	EMW g/cm^3
笹岡層／観音寺層下限以浅	0 – 1,668	1.03
笹岡層／観音寺層下限 - No.3 G Inflata bed 上限	1,668 – 1,955	1.03 - 1.12
No.3 G Inflata bed 上限 – RFT（2,073 m[TVDSS]）	1,955 – 2,073	1.12
RFT（2,073 m[TVDSS]）- RFT（2,363 m[TVDSS]）	2,073 – 2,363	1.12 - 1.52
RFT（2,363 m[TVDSS]）- 桂根相下限	2,363 – 2,518	1.52

e.　地層破壊圧

a.～d.で推定した「ヤング率」、「ポアソン比」「垂直応力」、「間隙圧力」を用いて、Blanton and Olson（1999）[14]の式（4.12-19）により、深度に対する地層破壊圧力の分布を推定した。

$$FP = \left(\frac{\nu}{1-\nu}\right)\left(S_V - P_p\right) + \frac{E}{1-\nu^2}\varepsilon_{hmin} + \frac{E\nu}{1-\nu^2}\varepsilon_{Hmax} + P_p \quad \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots \text{式（4.12-19）}$$

FP：地層破壊圧

E：ヤング率

ν：ポアソン比

Pp：間隙圧

Sv：垂直応力

ε_{hmin}：最小主応力 shmin 方向のひずみ

ε_{Hmax}：最大主応力 sHmax 方向のひずみ

ε_{hmiin} と ε_{Hmax} は、LOT 結果に地層破壊圧がマッチするように値を求めた。

ε_{hmin}＝0.000010

ε_{Hmax}＝0.000050

4.12.3　CO_2 挙動予測シミュレーションモデルの作成

(1)　貯留エリアの設定および坑井の設定

上部貯留層に 5 坑の圧入井（垂直井）を設定した。浸透率等の影響で坑底圧が上昇する坑井に対しては最大坑底圧を設定することにより各坑井の圧入レートを制御し、最大坑底圧に達した坑井の圧入レートを減らし、圧入しやすい坑井で圧入量を増やす等の調整を行い合計で 250 万 t/年を維持するように設定した。これにより、各坑井の圧入量は、坑底圧力により 50 万 t-CO_2/年から増減することとなる。

上部貯留層で累計 1 億 t-CO_2 の圧入条件を満たせない場合には、下部貯留層に上部貯留層の累計 1 億 t-CO_2 の貯留に満たない分だけを圧入するシミュレーションを実施して合わせて 1 億 t-CO_2 の貯留を計画した。しかし、後述の(3)に示す事前検討においてスレッショルド圧の制限を緩和すれば 5 坑井の配置で上部貯留層に 1 億 t-CO_2 の圧入が可能で圧入終了後 1,000 年後までの CO_2 の広がりや圧力変化を踏まえても安定的に上部貯留層のみで 1 億 t-CO_2 の貯留が可能であることを確認したことから、貯留可能量評価は上部貯留層のみで行うこととした。

(2)　圧入制限条件

上部貯留層に CO_2 を安定的に圧入および地下貯留するための条件として表 4.12-8 に示す

圧入井の条件と表 4.12-9 に示す圧入中および圧入停止後 1,000 年間における制限条件を設定した。

なお、実際のシミュレーションでは制限条件の内、制限条件 6)および 7)については、いずれのケースにおいてもモデルの設定で制御するため実質的な制限条件にはならなかった。制限条件 3)については、上部貯留層においては遮蔽層内を通る断層は存在しないため該当せず、制限条件 4)および 5)についても制限条件 2)を満たすことで常に満足するため主要な制限条件にはならなかった。したがって、実際にシミュレーションの拘束条件となったのは制限条件 1)および 2)であった。ただし、制限条件 1)については、4.12.4(2)に記述したように条件を変更した。

表 4.12-8　圧入井の設定（圧入条件の抽出）

項目	条件
坑井	垂直井
累計圧入量	1 億 t-CO_2 以上
坑井長	海底面下 3,000 m 以浅、もしくは貯留層下限までの浅い方
圧入井数	5 坑もしくは 10 坑
圧入制御および圧入レート	坑底圧力制御（坑底圧力は地層破壊圧の 90%） 最大 100 万 t-CO_2/（年・坑）
圧入井設定位置	貯留可能域内で試行錯誤
仕上げ区間	上部層区間内で試行錯誤（最大で貯留層区間）

表 4.12-9　シミュレーション結果が満たすべき制限条件

圧入中～圧入停止後 1,000 年間
1）遮蔽層下端での圧力上昇がスレッショルド圧力（370 kPa）を上回らないこと。 2）溶存 CO_2 量の分布範囲が超臨界条件を外れる深度に到達しないこと。 3）溶存 CO_2 量の分布範囲が活断層の 2.5 km 範囲内に到達しないこと。 4）溶存 CO_2 量の分布範囲が試掘井や基礎試錐井に達しないこと。 5）溶存 CO_2 量の分布範囲がシミュレーション範囲を超えないこと。
圧入中
6）圧入圧力が地層破壊圧の 90%を上回らないこと 7）流速が TBG（4-1/2 “）のエロージョナルベロシティーに到達しないこと。

(3)　境界条件

グリッドモデルの境界グリッドの有効孔隙に一定の倍率を掛け、開境界とした。モデル境界の設定は、調査対象範囲周辺で以前に実施したシミュレーション評価を参考に、開境界での倍率を 2,000 倍に設定した。

4.12.4　最大貯留可能量の事前検討

隣接するエリアで 2017 年度に実施した調査井掘削前 CO_2 挙動予測シミュレーションの結果から、本荘沖の南部において 1 億 t-CO_2 を大きく超える貯留量が見込める可能性があることから、本シミュレーションでは、2017 年度のシミュレーションと比較可能なように最大貯留可能量の検討を中心に行った。

そのため、事前検討として下記の条件を想定し、5 坑井で 250 万 t/年のレートで圧入し、1 億 t-CO_2 圧入の可能性を確認し、その後に最大貯留可能量の検討を進めることとした。

(1)　圧入条件

PS2 ホライズン以深の砂質岩ファシスが発達した層準について、遮蔽層への圧力伝搬の影響を考慮し、笹岡層／観音寺層下限（いずれの地点も海面下 3,000 m 以浅）から下部 50%の区間を仕上げた圧入井（垂直井）を 5 坑配置し、仕上げ区間上端深度における地層破壊圧の 90%を圧入圧力上限として設定したうえで、1 坑当たり 50 万 t-CO_2/年のレートで 40 年間連続圧入することで累計 1 億 t-CO_2 の貯留が可能か否かの確認と圧力および CO_2 挙動を確認した。

図 4.12-18 に、4.8 節で報告した CO_2 の貯留可能域と配置した坑井の位置を示す。地層傾斜や遮蔽層内に存在する砂質ファシスの分布および坑井間隔を考慮して 5 坑の坑井を配置した。

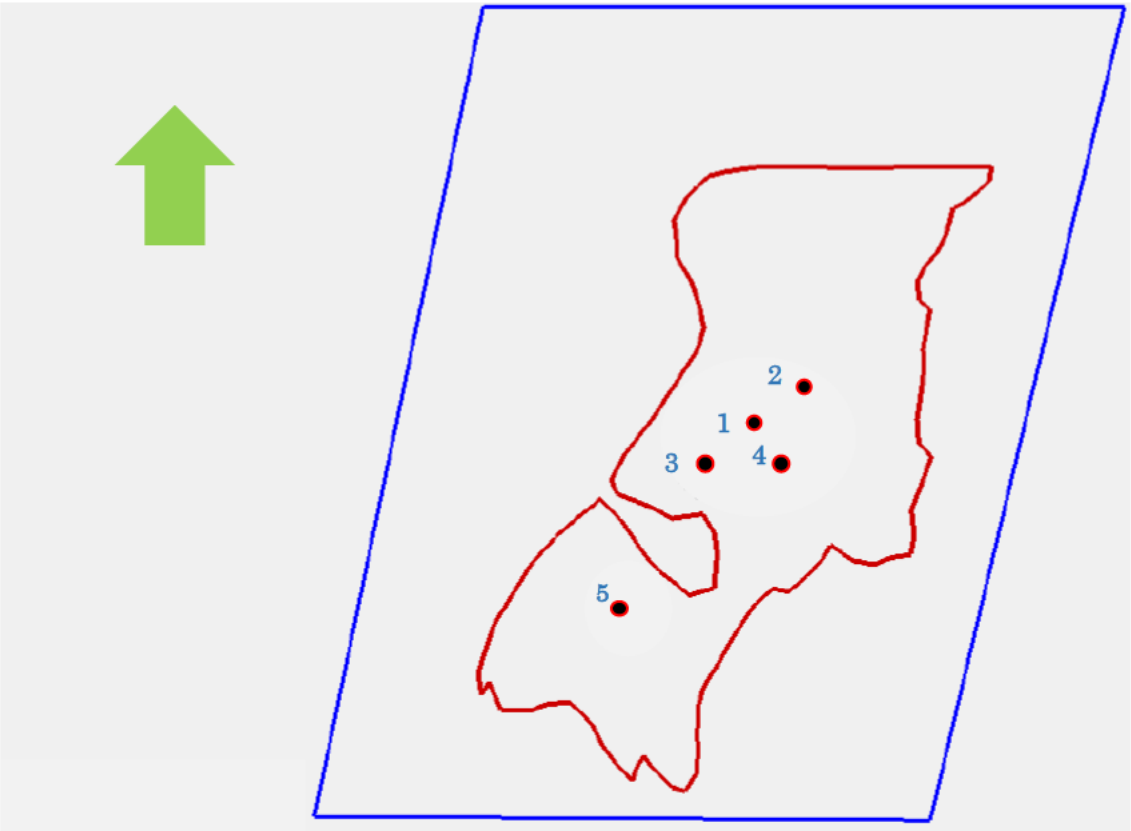


図 4.12-18　上部貯留層（笹岡層）CO_2の貯留可能域と圧入井の配置

(2)　遮蔽層下端の圧力挙動（事前検討１）

当初、スレッショルド圧を超えないようにシミュレーションを試行錯誤したが、図 4.12-19 および表 4.12-10 に示す例のように遮蔽層下端の圧力をスレッショルド圧以下に抑制しようとすると低レートで圧入する必要があり、1 億 t-CO_2 の貯留をするためには 100 年以上の期間が必要となることが判明した。そこで、スレッショルド圧制限を外して 1 億 t-CO_2 貯留の可能性があるかシミュレーションを試みたところ、遮蔽層下端における圧力上昇幅がスレッショルド圧力 370 kPa を超えるものの 1 億 t-CO_2 以上の貯留は可能であった。さらに検討を進めると、1 億 t-CO_2 圧入しても貯留層上部 PS2 上位の泥質ファシスへの浸透はわずかであり、遮蔽層下端まで CO_2 が到達しないことが判明した。CO_2 が遮蔽層下端まで達していないため、遮蔽層下端の圧力がスレッショルド圧力を超えても CO_2 が遮蔽層に浸透することはなく、CO_2 を安全に貯留できていると判断した。したがって、今回の検討では、当初の制限条件である表 4.12-9 の「1) 遮蔽層下端での圧力上昇がスレッショルド圧力（370 kPa）を上回らないこと。」の代わりに表 4.12-11 の「1) 遮蔽層下端まで CO_2 が達せず、遮蔽層内に溶存 CO_2 が分布しないこと。」を制限条件とし、遮蔽層下端まで CO_2 が達していないことを確認しながらシミュレーションを進めることとした。

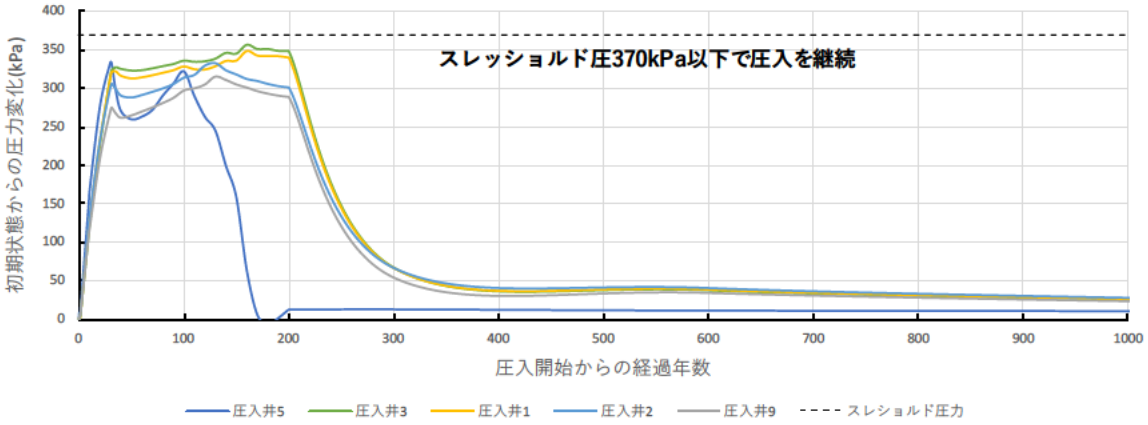


図 4.12-19　遮蔽層下端圧力推移（スレッショルド圧以下での圧入）

表 4.12-10　シミュレーション結果（スレッショルド圧以下での圧入）

シミュレーション結果（例）

- 条件・結果
- 坑井数：5
- 圧入レート：50万ton/(年・本)
- 仕上げ区間：貯留層区間の下1/4
- 圧入制御：BHP制御
- 遮蔽層下端でスレッショルド圧を上回らないように圧入

Field累計ガス圧入量：0.814億 t -CO_2
坑井1：0.135億t-CO_2(200年)
坑井2：0.145億t-CO_2 (200年)
坑井3：0.122億t-CO_2(200年)
坑井4：0.222億t-CO_2 (200年)
坑井5：0.190億t-CO_2(200年)

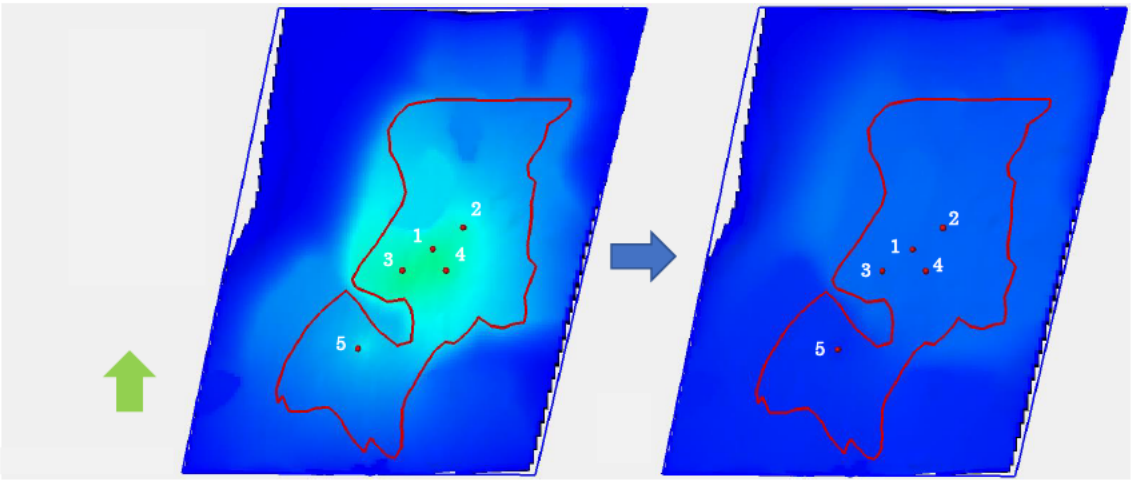
(3)　遮蔽層下端の圧力挙動（事前検討２）

以降のシミュレーションでは、制限条件を表 4.12-11 に変更した。その結果、遮蔽層下限の圧力を下げ、CO_2 が超臨界条件から外れる深度に達しないようにするため、圧入井は構造深度が深く、仕上げ区間も下部 50%を仕上げる必要があった。圧入停止後の遮蔽層最下層における初期状態からの圧力上昇値の推移を図 4.12-20 に示す。また、各坑井における遮蔽層下端の初期状態からの圧力変化推移を図 4.12-21 に示す。

表 4.12-11　シミュレーション結果が満たすべき制限条件（変更後）

圧入中～圧入停止後 1,000 年間
1）遮蔽層下端まで CO_2 が達せず、遮蔽層内に溶存 CO_2 が分布しないこと。
2）溶存 CO_2 量の分布範囲が超臨界条件を外れる深度に到達しないこと。

注）4.12.3(2)より、有効な制限条件は表 4.12-9 の 1)および 2)のみである。



圧入停止時 （平面図)　　圧入停止1,000年後 (平面図)

図 4.12-20　圧入停止 1,000 年後の初期状態からの圧力上昇値（遮蔽層最下層）

もっとも圧力上昇値が大きくなるのは圧入停止直後であり、初期圧力に対して圧入井 1～圧入井 4 では最大で 1,800 kPa 程度まで上昇し、圧入井 5 では 1,000 kPa 程度まで上昇し、スレッショルド圧力 370 kPa を超過するが、圧入停止 200 年後には、圧力はおおむね 100 kPa を下回っている。一方で、遮蔽層への溶存 CO_2 の浸透はみられないことから、遮蔽層下端の圧力がスレッショルド圧力以下という当初の制限条件は満たしていないものの、安定的な CO_2 貯留は達成されているものと判定した。

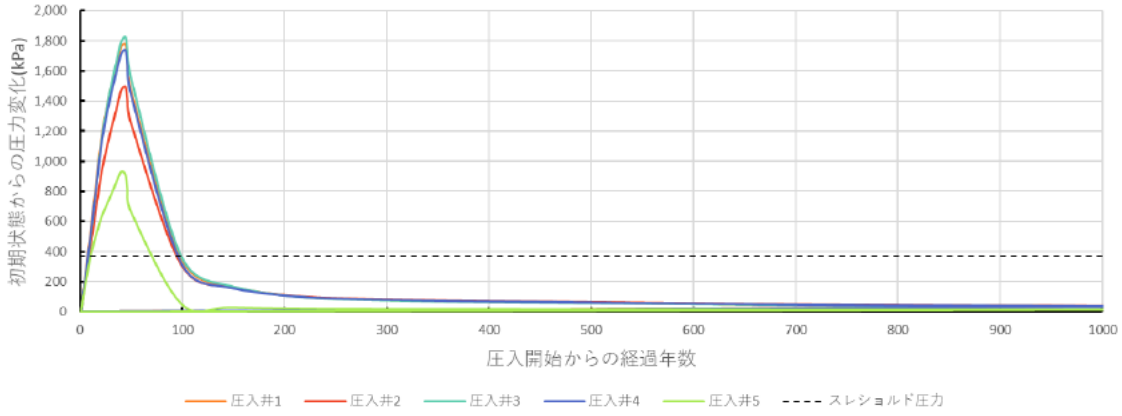


図 4.12-21　遮蔽層下端圧力推移

(4)　坑底圧力および圧入レート推移

各圧入井における圧入停止時の坑底圧力と地層破壊圧力を表 4.12-12 に示す。いずれのケースにおいても、坑底圧力は地層破壊圧力より 3.0 MPa 以上小さくなった。地層破壊圧

力は深度に伴って大きくなるため、仕上げ区間の深度が大きくなると、坑底圧力と地層破壊圧力の差は大きくなる傾向にあった。

表 4.12-12　各圧入井の圧入停止直後の坑底圧力と地層破壊圧力

坑井	仕上げ区間上端深度 圧入停止時の圧力 （A）	地層破壊圧力 （B）	地層破壊圧力-圧入停止時の圧力 （B - A）
1	22.2	25.7	3.43
2	21.3	25.1	3.78
3	22.3	25.8	3.46
4	21.6	25.0	3.43
5	19.7	24.1	4.43

注）単位：MPaG

坑底圧力推移を図 4.12-22 に、圧入レート推移を図 4.12-23 に示す。

図 4.12-22 の点線は各圧入井仕上げ区間上端深度の地層破壊圧を示す。圧入期間および監視期間内において、仕上げ区間上端の圧入圧力は地層破壊圧を下回っている。各坑井の圧力推移は、圧入開始から 8 年～12 年間は圧入圧力一定の期間が継続し、その後圧入圧力は漸減していく。これは、圧入初期は坑井周りの CO_2 飽和率が低く、ガス相対浸透率が低いために、地層破壊圧の 90%で設定した圧入圧力上限で圧入レートを行うためである。坑井周辺の CO_2 飽和率が上昇すると相対浸透率の上昇とともに圧入レートは上昇する。

図 4.12-22 に示すように各坑井 50 万 t-CO_2/年の定レート圧入に移行してからは、CO_2 飽和率の上昇に伴って圧入に必要な圧力は徐々に低下する。

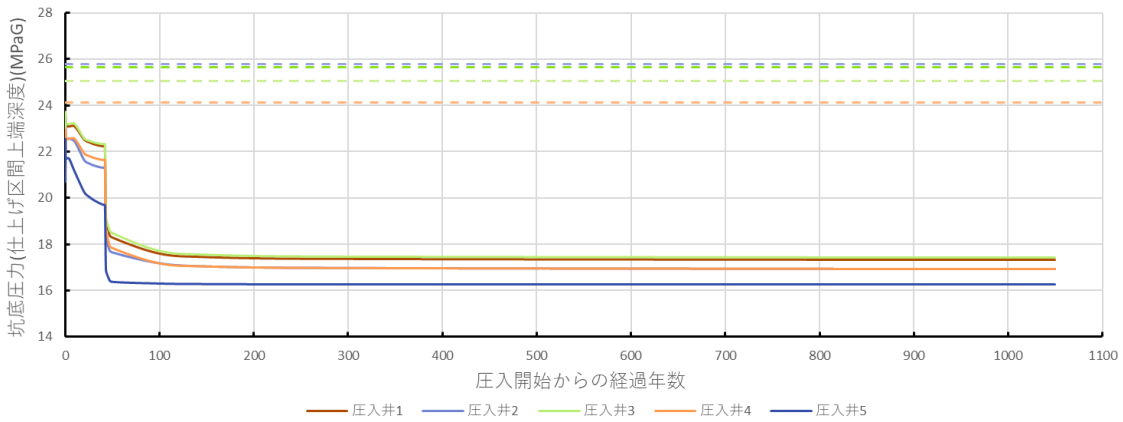


図 4.12-22　圧入井仕上げ区間上端深度の坑底圧力推移

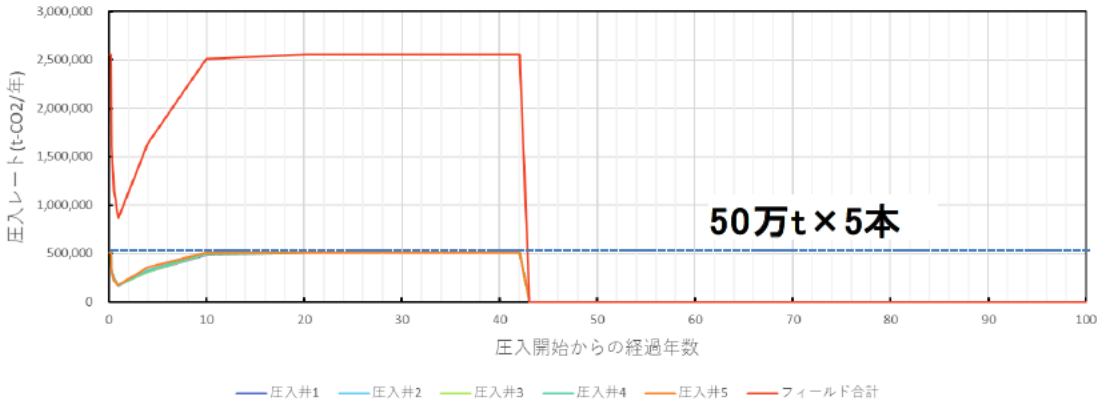
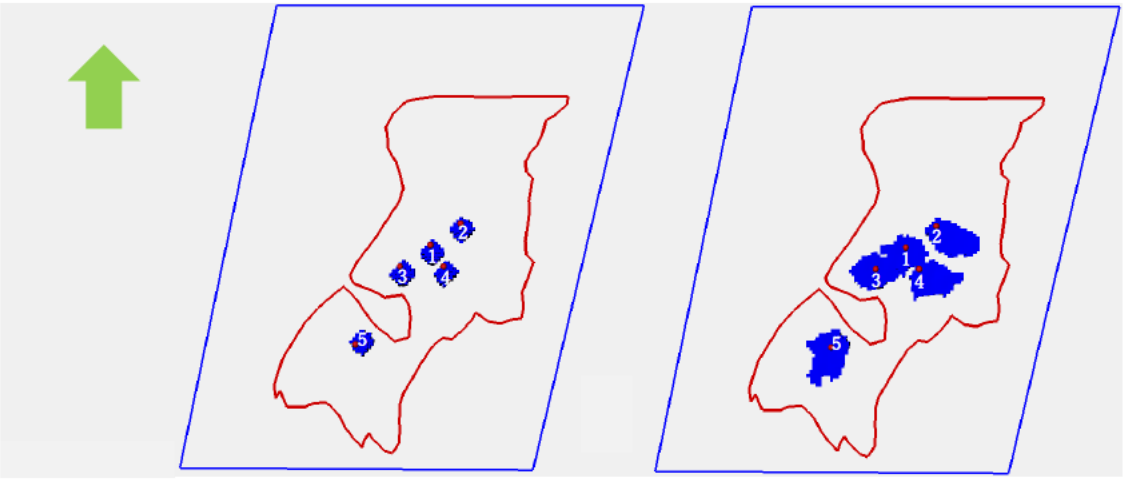


図 4.12-23　各坑井の圧入レート推移

(5)　CO_2 飽和率の分布

各圧入井における圧入停止直後と圧入停止 1,000 年後の CO_2 飽和率分布を図 4.12-24 に示す。超臨界 CO_2 は深部塩水層よりも密度が小さいため、圧入中および圧入停止中には、浮力により浅部に向かって移動する。上部貯留層上部には泥質岩が広がっているため、浅部へ移動した超臨界 CO_2 は砂質岩と泥質岩の境界（PS2 ホライズン）に沿うように、深度の浅い方向へ流れていく。坑井 1 および坑井 3 は PS2 ホライズンの傾斜が緩いエリアに配置しているため、おおむね円形に分布が広がっている。一方、坑井 2、坑井 4 および坑井 5 は、PS2 ホライズンの傾斜の大きい方向（坑井 2、4 は東方、坑井 5 は南方）へ CO_2 の顕著な移動がみられた。



圧入停止直後　　圧入停止1,000年後

注）平面図（PS2 ホライズン）

図 4.12-24　CO_2 飽和率分布の推移

(6)　溶存 CO_2 量の分布

溶存 CO_2 量分布は CO_2 飽和率分布より若干大きい範囲に分布する。これは超臨界 CO_2 が時間経過とともに周辺の深部塩水に溶存するためである。CO_2 プルームの外周では溶存 CO_2 は低濃度であり、新しく CO_2 が溶存可能な水相との接点となっている。基本的な挙動としては、前項で示した CO_2 飽和率分布と同様に、坑井 1 および坑井 3 では均一に溶存 CO_2 の分布が広がっているのに対して、坑井 2、坑井 4 および坑井 5 では、PS2 ホライズンの傾斜の大きい方向（坑井 2、4 は東方、坑井 5 は南方）へ超臨界 CO_2 の移動に伴って広がる傾向にある。

(7)　貯留形態の割合推移

CO_2 貯留形態の推移を図 4.12-25 に示す。溶存 CO_2 は深部塩水に溶存した CO_2 の割合であり、残留 CO_2 は岩石にトラップされた CO_2 の割合となる。超臨界 CO_2 の割合から残留 CO_2 の割合を引いた値が流動可能な超臨界 CO_2 の割合である。圧入停止後、特に残留 CO_2 の割合が増加するものの、圧入停止 1,000 年後には溶存 CO_2 の割合、残留 CO_2 の割合、流動可能な超臨界 CO_2 の割合がそれぞれ 25%、64%、11%となった。

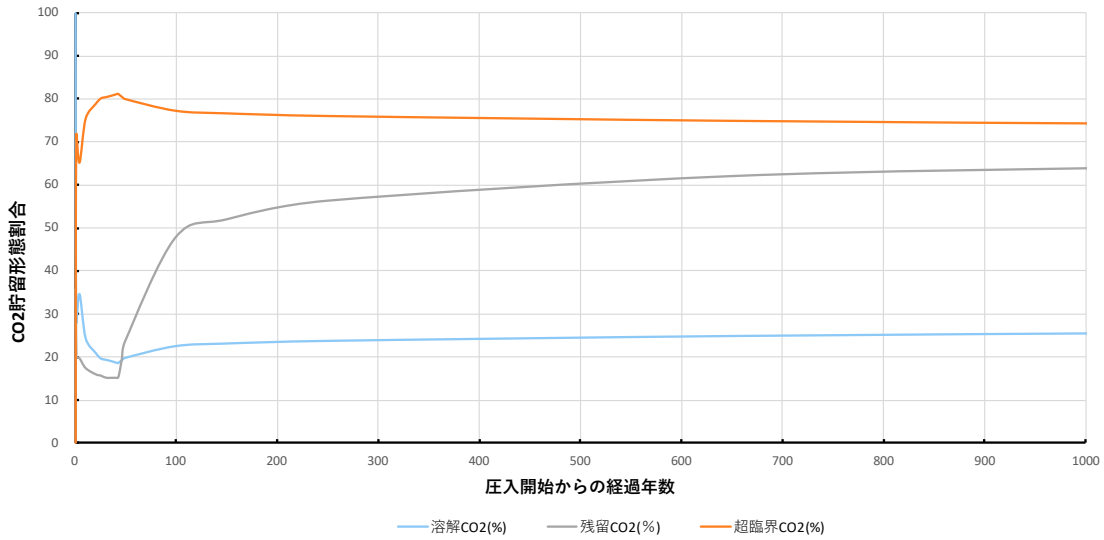


図 4.12-25　CO_2 貯留形態の推移

(8)　仕上げ区間、圧入レートを変更した場合の溶存 CO_2 量分布の検討

各坑井に 2,000 万 t-CO_2 を圧入し、合計 1 億 t-CO_2 を貯留する条件は変えず、仕上げ区間および圧入レートを変更し、溶存 CO_2 量の分布の変化を検討した。

仕上げ区間を下部 25%とした場合、仕上げ区間を下部 50%とした場合と比べ、超臨界

CO_2 が貯留層下部に多く圧入されることで、浮力により上昇する移動可能な超臨界 CO_2 が減少し、PS2 ホライズン付近で水相と接触する CO_2 が抑制され、溶存 CO_2 の広がりが小さくなることを確認した。この結果から、最大圧入量の検討に当たっては、貯留層下部 25%を仕上げることとし、さらに各坑井の最大レートを 100 万 t/年として圧入を調整することにより、効率的に貯留可能域内に溶存 CO_2 の分布が収まるようにした。

(9) 最大貯留可能量の事前検討まとめ

上部貯留層への 1 億 t-CO_2 の貯留可能性を検討した。制限条件の内、圧入圧力が地層破壊圧力以下、および溶存 CO_2 量の分布に関する条件は満たしたが、遮蔽層下端圧力の上昇がスレッショルド圧力（370 kPa）を超えないという条件は満たさなかった。

一方で、溶存 CO_2 量の分布に関しては、浮力により貯留層内を上昇した CO_2 は PS2 ホライズンに沿った流れが主なものになり、貯留層上端には到達していないことを確認した。貯留層上部（PS2 ホライズン～貯留層上端）に分布する泥質岩卓越ゾーンにはわずかしか CO_2 が浸透しないことから遮蔽層下端まで CO_2 が達しないため、遮蔽層下端の圧力がスレッショルド圧力を超えても CO_2 が遮蔽層に浸透することはない。この結果を基にスレッショルド圧力に関する制限条件を満足していない場合でも貯留層上端にまで CO_2 が達していなければ CO_2 を安全に貯留できていると判断し、制限条件を変更して検討を進めるこた。

仕上げ区間については、貯留層下部 25%を仕上げで、かつ最大限圧入することにより、貯留可能域内に溶存 CO_2 の分布をより効率的に収めることが可能であると考えられることから、最大貯留可能量の検討はこの設定で行った。

4.12.5 最大貯留可能量（5 坑井ケース）の検討

前項での検討を踏まえ、圧入条件を変更して 5 坑井での最大貯留可能量を検討した。

(1) 圧入条件

前項同様、圧入井を 4.8 節に示した CO_2 の貯留可能域に配置した。表 4.12-13 に坑井位置、仕上げ区間深度、仕上げ区間長を示す。図 4.12-26 に示すとおり坑井 1、坑井 2、坑井 3 および坑井 5 は前項と同位置であり、坑井間隔と PS2 ホライズンの傾斜を考慮して坑井 9 を中央北部に配置した。仕上げ区間は笹岡層 PS2 ホライズンから笹岡層／観音寺層下限間の下部 25%とした。

表 4.12-13　圧入井の設置位置座標（UTM54 WGS84）

圧入井	X (m)	Y (m)	仕上げ区間 上端深度(m)	仕上げ区間長(m)
1	395,809	4,344,644	1,881	199
2	397,703	4,345,987	1,826	184
3	393,914	4,343,301	1,883	192
5	391,138	4,338,413	1,747	171
9	397,972	4,348,960	1,899	196

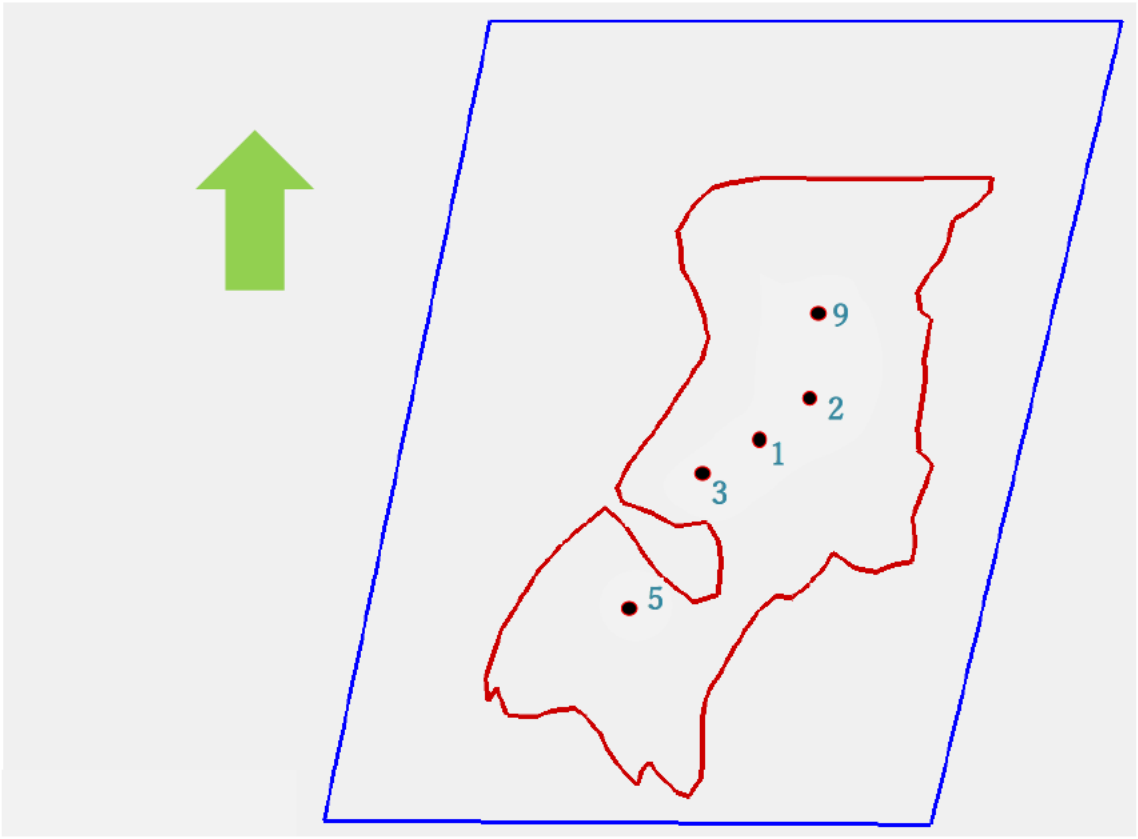


図 4.12-26　CO_2 の貯留可能域と圧入井の配置

(2)　制限条件

制限条件は表 4.12-11 と同じ以下のとおりとした。

1）遮蔽層下端まで CO_2 が達せず遮蔽層内に溶存 CO_2 が分布しないこと

2）溶存 CO_2 量の分布範囲が超臨界条件を外れる深度に到達しないこと

(3)　圧入レート、圧入量および坑底圧力推移

表 4.12-14 は各坑井の圧入期間、圧入量および最大圧入レートである。また、坑底圧力推移を図 4.12-27、圧入レート推移を図 4.12-28 に示す。圧入期間に関しては、後述の溶存 CO_2

量の分布範囲が貯留可能域を超えない範囲で設定しており、坑井 2 および坑井 5 は PS2 ホライズンの傾斜に沿った流動の影響で、他坑井と比較して、圧入期間および圧入量は少なくなっている。最大圧入レートに関しては、圧入井 5 が最大となっているが、これは坑井周辺の kh が相対的に高いことに起因すると考えられる。結果として、フィールドの累計圧入量としては 1.83 億 t-CO_2 に達した。

図 4.12-27 の点線は各圧入井仕上げ区間上端深度の地層破壊圧を示しており、圧入圧力が全坑井で圧入期間内一定となっているのは、地層破壊圧の 90%で設定した坑底圧力の上限が効いているためであり、圧入期間内を通して最大レートでの圧入を行っていることになる。CO_2 圧入レートが圧入期間内で徐々に上昇しているのは、CO_2 飽和率の上昇に伴う、相対浸透率の上昇によるものと考えられる。

なお、CO_2 圧入レートは、チュービング管内の流体流速上限(エロージョナルベロシティ)を超えず、十分余裕があることを確認している。

表 4.12-14　各坑井の圧入期間、圧入量および最大圧入レート

坑井	圧入期間 (年)	圧入量 (億 t-CO_2)	最大圧入レート (万 t-CO_2/年)
1	90	0.37	50.9
2	80	0.34	52.9
3	90	0.36	49.6
5	70	0.34	66.1
9	90	0.42	58.9
合計	-	1.83	268.7

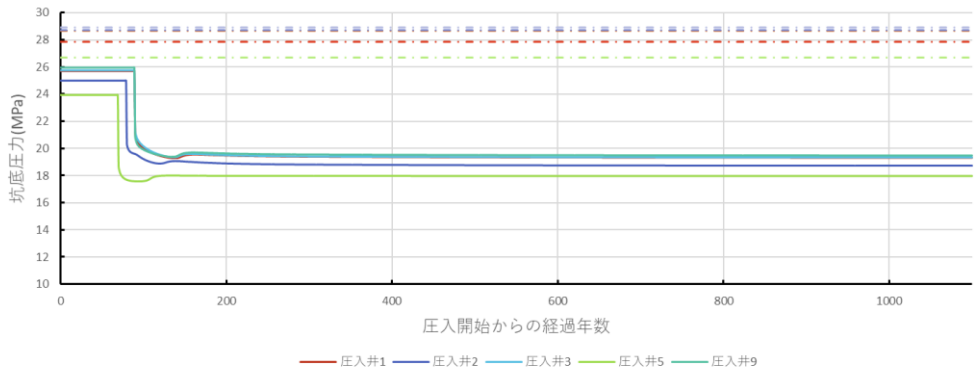


図 4.12-27　坑底圧力推移

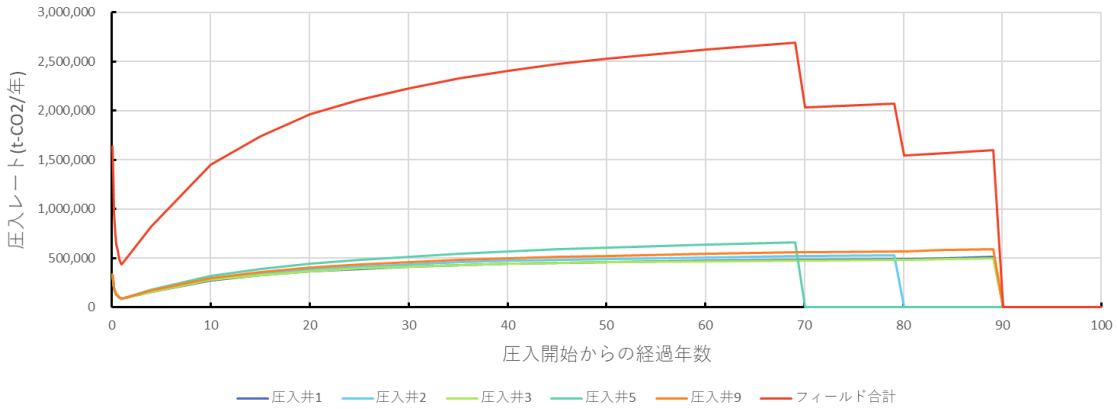
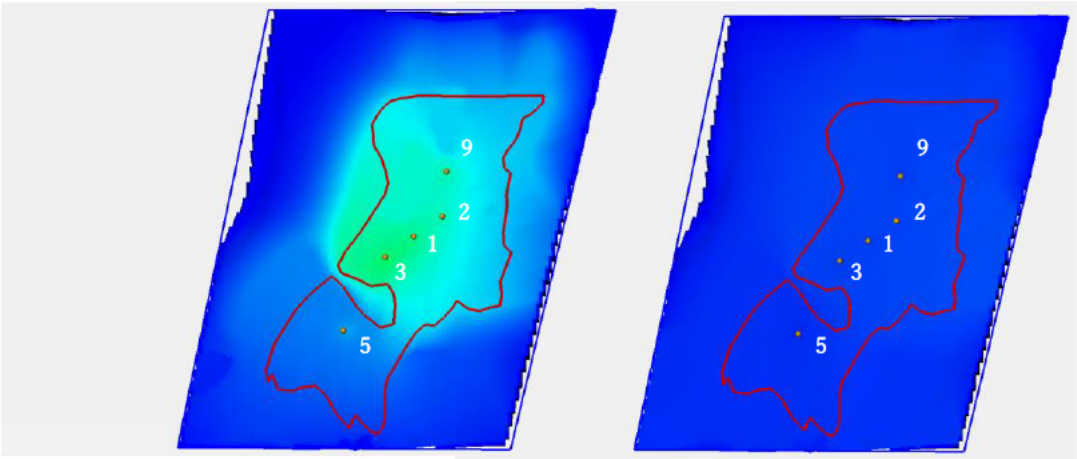


図 4.12-28　圧入レート推移

(4)　貯留層の圧力挙動

圧入停止後の遮蔽層最下層における初期状態からの圧力上昇値の推移（平面図）を図 4.12-29 に示す。また、各坑井における遮蔽層下端の初期状態からの圧力変化推移（グラフ）を図 4.12-30 に示す。

もっとも圧力上昇値が大きくなるのは、各坑井の圧入停止直後であり、初期圧力に対して圧入井 1、圧入井 2、圧入井 3、圧入井 9 は 2,000 kPa 程度上昇、圧入井 5 は 1,000 kPa 程度上昇し、スレッショルド圧力 370 kPa を超過している。一方で、前項で推定されたとおり、遮蔽層への溶存 CO_2 の浸透はみられないことから、遮蔽層下端の圧力がスレッショルド圧力以下という当初の制限条件は満たしていないものの、安定的な CO_2 貯留は達成されているものと推定する。そして、圧入井 5 は圧入開始 100 年以降、他坑井は圧入開始 200 年以降には、スレッショルド圧力以下になり、1,000 年後にはおおむね初期圧力近くまで低下している。



圧入停止直後　　圧入停止1,000年後

注）平面図（遮蔽層最下端）

図 4.12-29　圧入停止後の初期状態からの圧力上昇値の推移

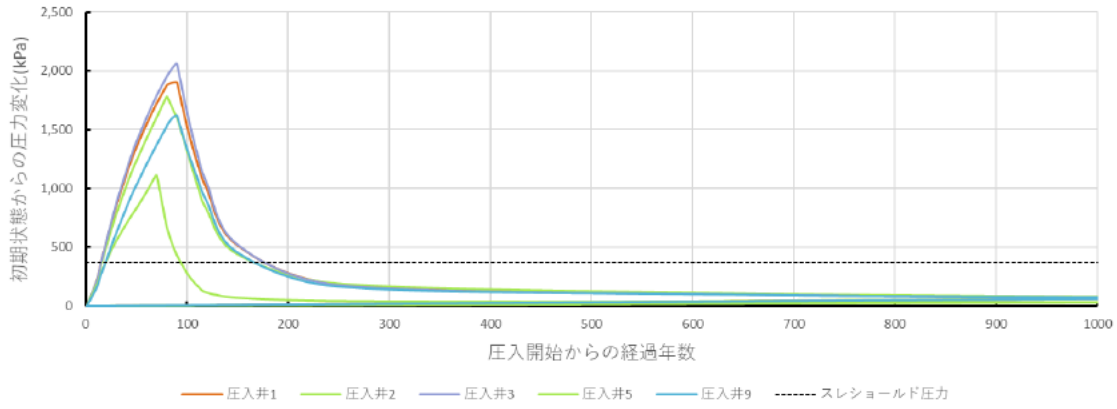
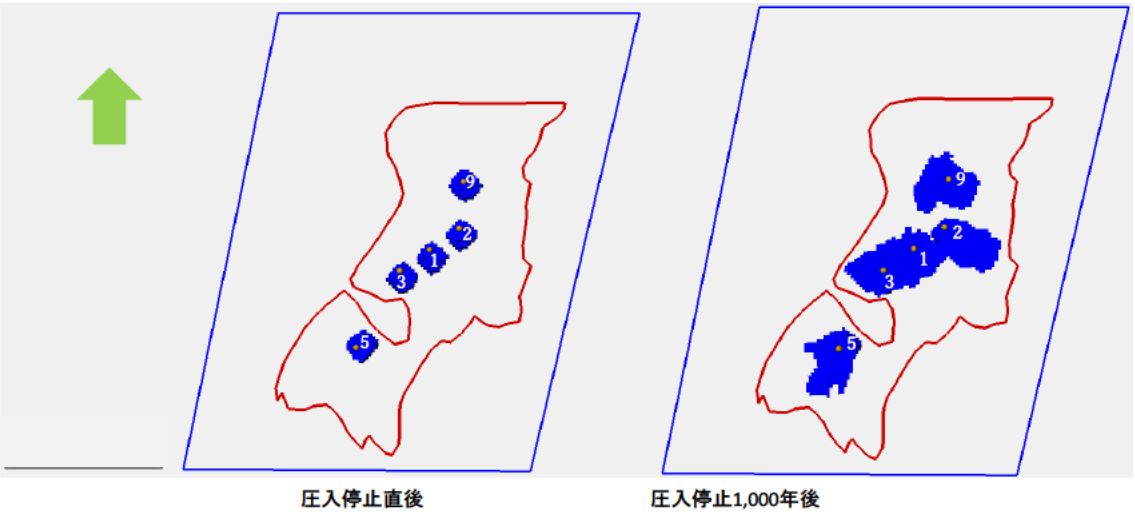


図 4.12-30　各坑井の遮蔽層下端圧力推移

(5)　CO_2 飽和率の分布

圧入停止後の CO_2 飽和率分布の推移を図 4.12-31 に示す。4.12.4 項に示した図 4.12-24 と同様、移動した CO_2 は、貯留層の砂質ファシス上面と低浸透性の非貯留層ファシスとの境界（PS2 ホライズン）に沿うように、深度の浅い方向へ流れている。坑井 2 と坑井 5 は PS2 ホライズンの傾斜の大きい方向（坑井 2、4 は東方、坑井 5 は南方）へ CO_2 の顕著な移動がみられる。また、坑井 9 は 5 坑井の中では最大量の圧入を達成しているが、分布の東端が PS2 ホライズンの斜度の急なエリアに到達し、西側は遮蔽層内に砂質ファシスが分布するエリアの直下に CO_2 飽和率分布が入り込んでいる。



注）平面図（PS2 ホライズン）

図 4.12-31　CO_2 飽和率分布の推移

(6)　溶存 CO_2 量の分布

溶存 CO_2 量分布は前項の CO_2 飽和率分布より若干大きい範囲に分布しているが、同様の傾向を示し、移動した CO_2 は、貯留層の砂質岩ファシスと泥質岩ファシスの境界（PS2 ホライズン）に沿うように、深度の浅い方向へ流れる。貯留可能域の東側は PS2 ホライズンも傾斜が大きくなっており、坑井 9 は図 4.12-26 の位置にすることで貯留層上部における CO_2 の移動を抑えられるが、位置を決めるには試行錯誤が必要であった。

また、貯留可能域内に溶存 CO_2 分布は収まっており、また遮蔽層下端まで CO_2 が達せず、遮蔽層内に CO_2 は浸透していないため制限条件を満足している。

(7)　貯留形態の割合推移

CO_2 貯留形態推移を図 4.12-32 に示す。溶存 CO_2 は深部塩水に溶存した CO_2 の割合であり、残留 CO_2 は岩石にトラップされた CO_2 の割合となる。超臨界 CO_2 の割合から残留 CO_2 の割合を引いた値が流動可能な CO_2 の割合である。圧入停止から急激に残留 CO_2 の割合が増加するものの、1,000 年後には、溶存 CO_2 の割合、残留 CO_2 の割合、流動可能な CO_2 の割合がそれぞれ 23%、64%、13%に落ち着いており、流動可能な CO_2 は大幅に減少しており、安全に貯留されていることを示している。

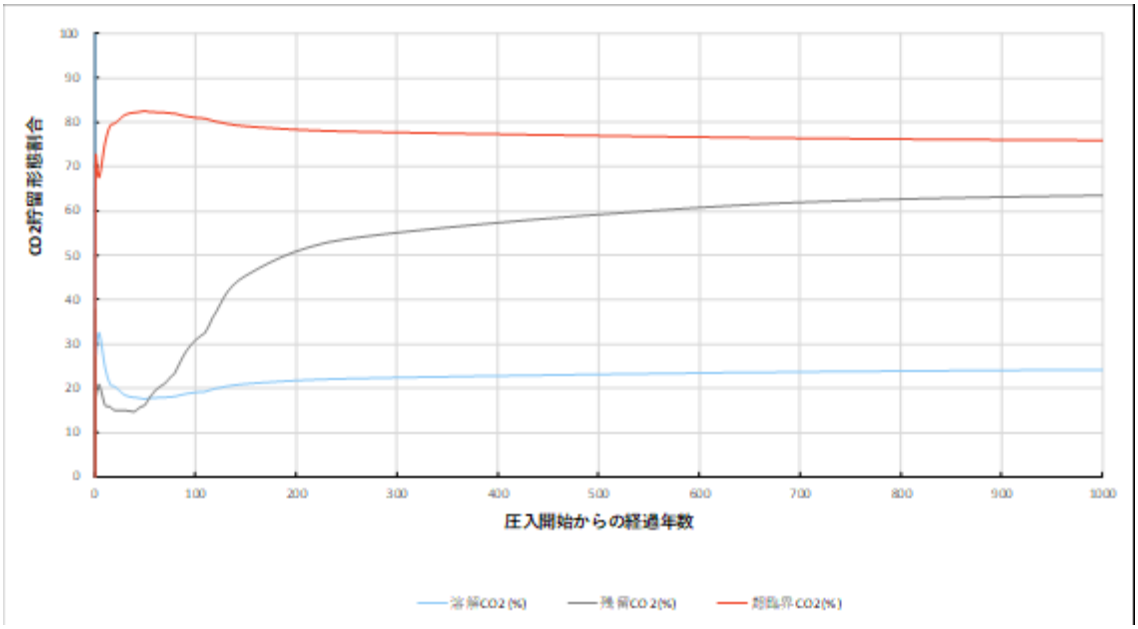


図 4.12-32　CO_2 貯留形態の推移

(8)　最大貯留可能量（5 坑井ケース）の検討まとめ

5 坑井による上部貯留層の最大貯留可能量を検討して 1.83 億 t-CO_2 の貯留を確認し、1,000 万 t-CO_2 の単位では 1.8 億 t-CO_2 の貯留が可能であるという結果を得た。遮蔽層下端圧力変化がスレッショルド圧力（370 kPa）を超えているが、遮蔽層下端まで CO_2 が達せず遮蔽層に CO_2 は浸透していないことから CO_2 を安全に貯留できると判断した。

また、仕上げ区間については、貯留層下部 25%仕上げで最大限圧入することにより、効率的に貯留可能域内に溶存 CO_2 の分布を収めることができ、可能な限りレートを上げることで坑井周辺に均一に CO_2 を貯留できることを確認した。

4.12.6　最大貯留可能量（10 坑井ケース）の検討

前項での検討を踏まえ、坑井数を変更して 10 坑井での最大貯留可能量を検討した。

(1)　圧入条件

表 4.12-15 は、坑井位置、仕上げ区間深度、仕上げ区間長をまとめたものである。図 4.12-33 に示す坑井 1、坑井 2、坑井 3、坑井 5 および坑井 9 は前項の 5 坑井ケースと同位置とし、PS2 ホライズンの傾斜および CO_2 貯留可能域を考慮して、PS2 ホライズンの傾斜の緩い中央部に坑井 4 および坑井 10、北部に坑井 6、坑井 7 および坑井 8 を追加配置した。仕上げ区間は笹岡層 PS2 ホライズンから笹岡層／観音寺層下限間の下部 25%とした。

表 4.12-15　圧入井の設置位置座標（UTM54 WGS84）

圧入井	X (m)	Y (m)	仕上げ区間 上端深度(m)	仕上げ区間長(m)
1	395,809	4,344,644	1,881	199
2	397,703	4,345,987	1,826	184
3	393,914	4,343,301	1,883	192
4	396,789	4,343,301	1,833	193
5	391,138	4,338,413	1,747	171
6	395,340	4,352,677	2,033	222
7	394,548	4,351,079	1,967	209
8	399,789	4,352,005	1,642	152
9	397,972	4,348,960	1,899	196
10	395,379	4,342,162	1872	199

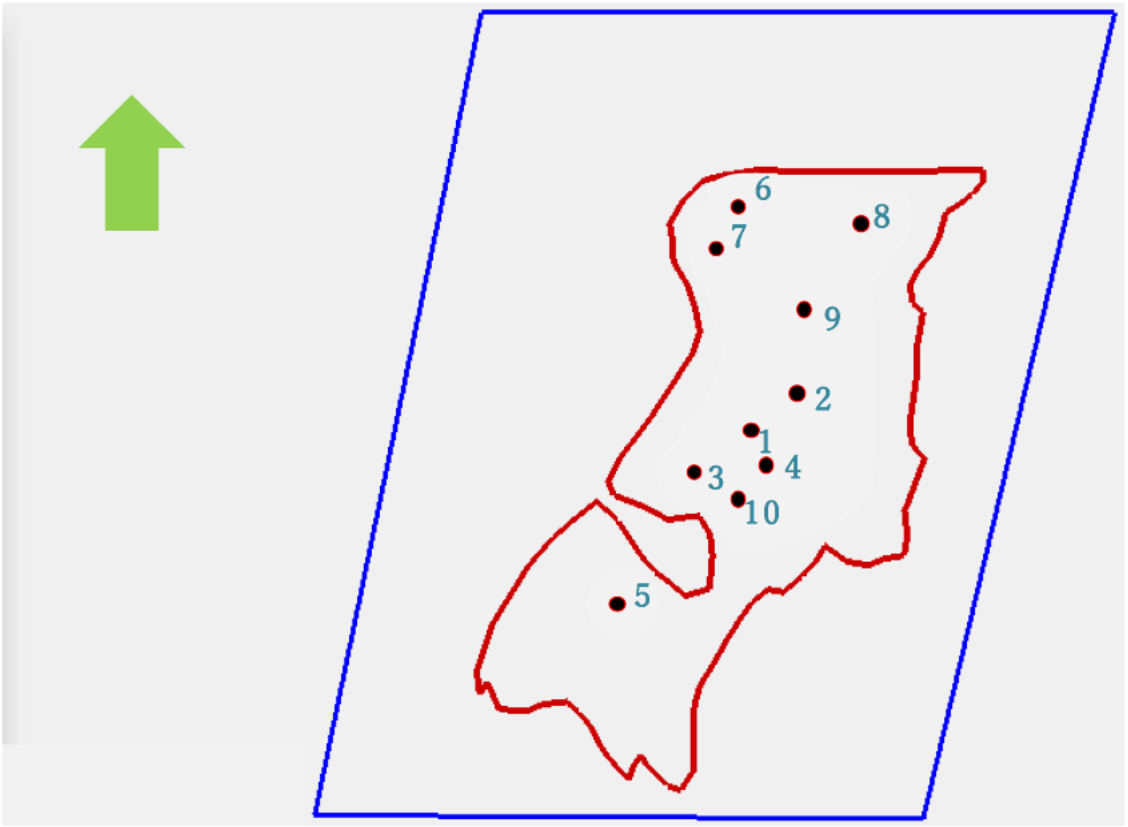


図 4.12-33　上部貯留層（笹岡層）圧入可能域と圧入井設置エリア

(2)　制限条件

制限条件は、4.12.5 と同様に以下のとおりとした。

1）遮蔽層下端まで CO_2 が達せず遮蔽層内に溶存 CO_2 が分布しないこと

2）溶存 CO_2 量の分布範囲が超臨界条件を外れる深度に到達しないこと

(3) 圧入レート、圧入量および坑底圧力推移

表 4.12-16 は各坑井の圧入期間、圧入量および最大圧入レートである。また、坑底圧力推移を図 4.12-34、圧入レート推移を図 4.12-35 に示す。圧入期間に関しては、後述の溶存 CO_2 量の分布範囲が貯留可能域を超えない範囲で設定しており、坑井 6、坑井 7 および坑井 8 はその影響で圧入期間および圧入量は少なくなっており、とりわけ坑井 8 は PS2 ホライズンの傾斜に沿った流動の影響で、圧入量は約 0.12 億 t-CO_2 に留まっている。最大圧入レートに関しては、圧入井 5 が最大となっているが、これは前述のように坑井周辺の kh が相対的に高いことに起因すると考えられる。結果として、フィールドの累計圧入量は 3.07 億 t-CO_2 に達した。

図 4.12-35 の点線は各圧入井仕上げ区間上端深度の地層破壊圧を示しており、坑井 8 を除き圧入圧力が全坑井で圧入期間内一定となっているのは、地層破壊圧の 90%で設定した坑底圧力の上限が効いているためであり、圧入期間内を通して最大レートでの圧入を行っていることになる。坑井 8 については、圧入期間を 40 年以上にするために、レート制限（34 万 t-CO_2/年）を入れた影響で圧入期間内に坑底圧力が低下している。また、CO_2 圧入レートが圧入期間内で徐々に上昇しているのは、CO_2 飽和率の上昇に伴う、相対浸透率の上昇によるものであると考えられる。

表 4.12-16　各坑井の圧入期間、圧入量および最大圧入レート

坑井	圧入期間 （年）	圧入量 （億 t-CO_2）	最大圧入レート （万 t-CO_2/年）
1	110	0.39	47.7
2	80	0.29	44.5
3	110	0.39	46.1
4	80	0.27	39.7
5	70	0.33	64.8
6	50	0.26	63.0
7	50	0.26	62.6
8	40	0.12	34.1
9	110	0.47	56.5
10	80	0.26	39.0
合計	-	3.07	440.1

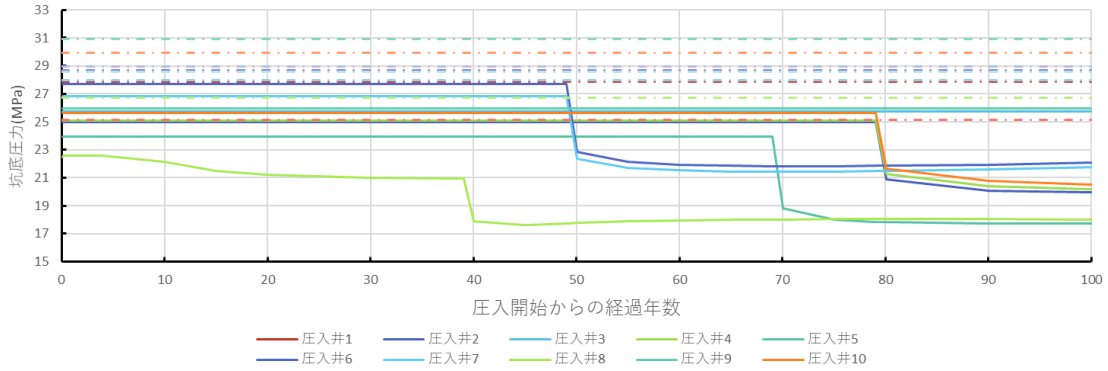


図 4.12-34　坑底圧力推移

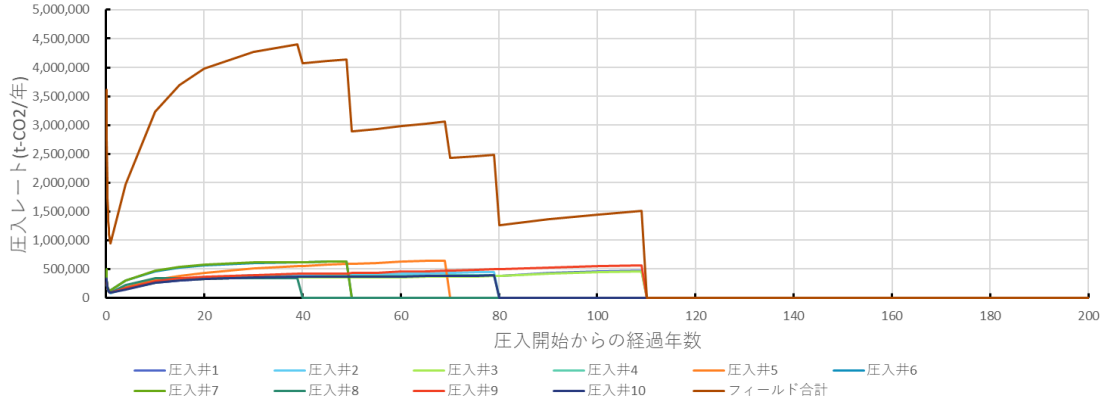
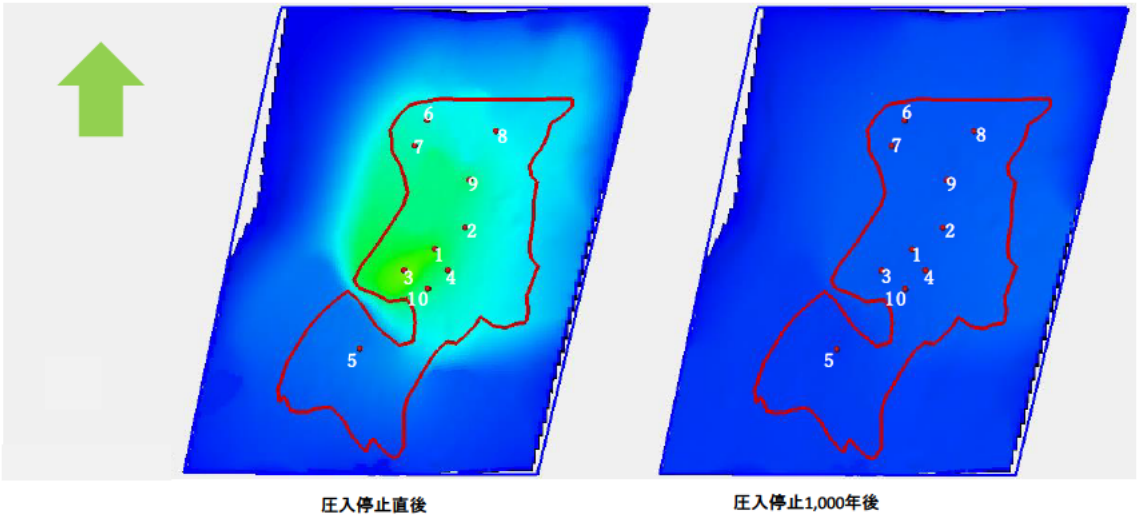


図 4.12-35　圧入レート推移

(4)　貯留層の圧力挙動

圧入停止 1,000 年後の遮蔽層最下層における初期状態からの圧力上昇値を図 4.12-36 に示す。また、各坑井における遮蔽層下端の初期状態からの圧力変化推移を図 4.12-37 に示す。

もっとも圧力上昇値が大きくなるのは、各坑井の圧入停止直後であり、初期圧力に対して圧入井 5 と圧入井 8 は 1,000 kPa 程度、その他の坑井は 2,000～2,500 kPa 程度上昇し、スレッショルド圧力 370 kPa を超過している。一方で、前項で考察したとおり、遮蔽層下端まで CO_2 が達せず、遮蔽層への溶存 CO_2 の浸透はみられないことから、遮蔽層下端の圧力がスレッショルド圧力以下という制限条件は満たしていないものの、安定的な CO_2 貯留は達成されているものと判断する。そして、圧入井 5 は圧入開始から 100 年以降、他坑井は圧入開始 300 年以降には、スレッショルド圧力以下になり、1,000 年後にはおおむね初期圧力近くまで低下している。



注）平面図（遮蔽層最下端）

図 4.12-36　圧入停止後の初期状態からの圧力上昇値の推移

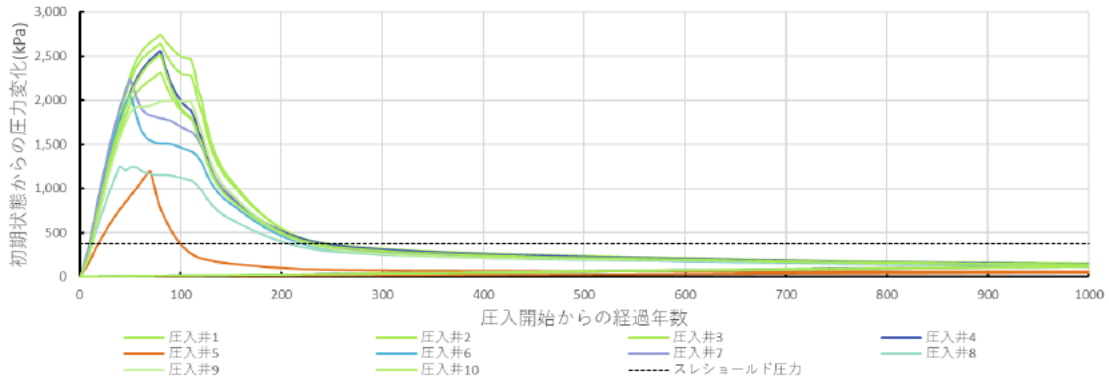
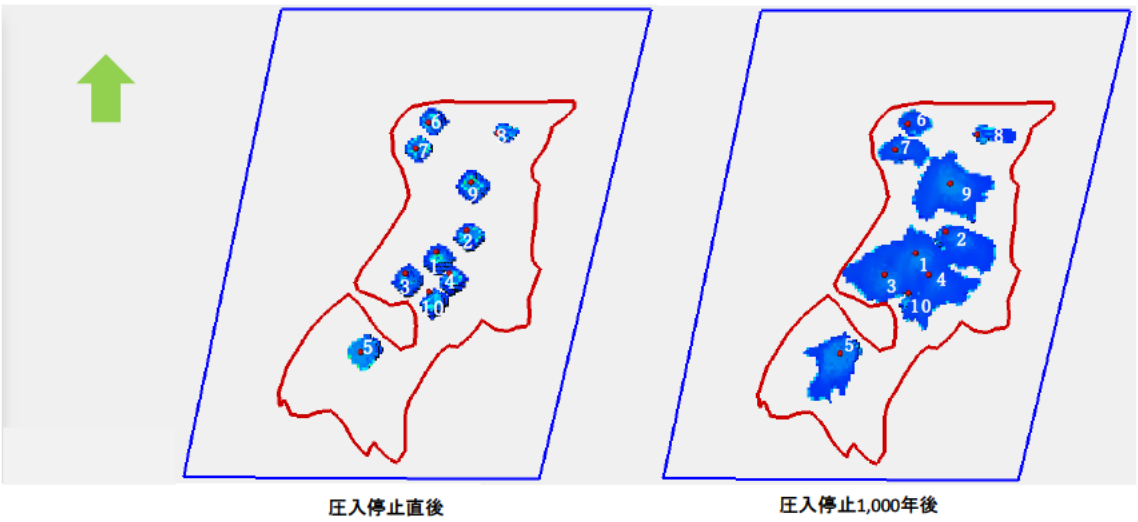


図 4.12-37　遮蔽層下端圧力推移

(5)　CO_2 飽和率の分布

圧入停止後の CO_2 飽和率分布の推移を図 4.12-38 に示す。これまでの検討と同様、移動した CO_2 は、貯留層の砂質ファシス上面と低浸透性の非貯留層ファシスとの境界（PS2 ホライズン）に沿うように、深度の浅い方向へ流れている。前項の 5 坑井での検討と比較して、坑井 4 と坑井 10 の追加により、中央部の PS2 ホライズンの傾斜の緩いエリアを満たすように圧入できている様子が見てとれる。また、坑井 6、坑井 7 および坑井 8 により、貯留可能域北部に CO_2 の圧入を追加できているが、遮蔽層内に砂質ファシスが分布しているエリアに近接していることや、貯留可能域の境界に近いことからその量は限られる。



注）平面図（PS2 ホライズン）

図 4.12-38　CO_2 飽和率分布の推移

(6)　溶存 CO_2 量の分布

溶存 CO_2 量分布は前項の CO_2 飽和率分布より若干大きい範囲に分布しているが、同様の傾向を示し、移動した CO_2 は、貯留層の砂質ファシス上面と低浸透性の非貯留層ファシスとの境界（PS2 ホライズン）に沿うように、深度の浅い方向へ流れている。ただし、貯留可能域内に溶存 CO_2 分布は収まっていることから、制限条件は満足している。また、遮蔽層下端まで CO_2 が達せず遮蔽層内に溶存 CO_2 が分布しないため制限条件は満足している。

(7)　貯留形態の割合推移

CO_2 貯留形態推移を図 4.12-39 に示す。溶存 CO_2 は深部塩水に溶存した CO_2 の割合であり、残留 CO_2 は岩石にトラップされた CO_2 の割合である。超臨界 CO_2 の割合から残留 CO_2 の割合を引いた値が流動可能な CO_2 の割合である。圧入停止後、残留 CO_2 の割合が大幅に増加するものの、1,000 年後には、溶存 CO_2 の割合、残留 CO_2 の割合、流動可能な CO_2 の割合がそれぞれ 24%、63%、13%に落ち着いており、CO_2 の割合の変化は少なく、安全に貯留されていることを示している。

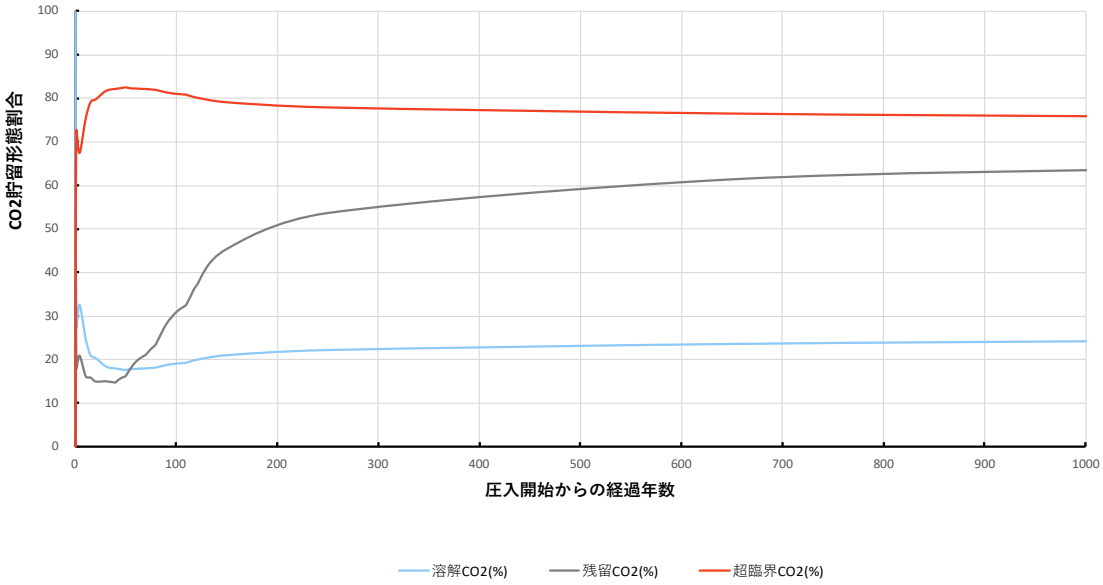


図 4.12-39　CO_2 貯留形態推移

(8)　最大貯留可能量（10 坑井ケース）の検討まとめ

10 坑井による上部貯留層の最大貯留可能量を検討して 3.07 億 t-CO_2 の貯留を確認し、1,000 万 t-CO_2 の単位では 3.1 億 t-CO_2 の貯留が可能であるという結果を得た。遮蔽層下端圧力変化がスレッショルド圧力（370 kPa）を超えているが、遮蔽層下端まで CO_2 が達せず遮蔽層に CO_2 は浸透していないことから CO_2 を安全に貯留できると判断した。

5 坑井における最大貯留可能ケースと比較して、追加した坑井は、貯留層上部の傾斜が急なエリア、CO_2 の超臨界状態を保持できる貯留可能域の境界に近接したエリア、直上の遮蔽層内に砂質ファシスが分布するエリアといった、圧入量が制限される条件に触れやすくなるエリアとなるため、結果として 5 坑井ケースの 2 倍の圧入量には到達しなかった。

4.12.7　まとめと今後の課題

(1)　まとめ

4.8 節の地質解析結果に基づき地質モデルを作成し、本地域において累計 1 億 t-CO_2 以上の CO_2 が地下貯留可能であるか、調査井掘削前の CO_2 挙動予測シミュレーションとして評価・検討を行った。地質モデルは上部貯留層、下部貯留層上部および下部貯留層下部のモデルを構築した。地質モデルの深度方向のグリッドサイズはいずれの区間においても平均で約 10 m となるように設定した。また、平面方向のグリッドサイズは 200 m×200 m に設定した。

シミュレーションによる検討では当初スレッショルド圧を超えない圧力で圧入するように試行錯誤を行ったが、上部貯留層に垂直井を 5 坑配置した場合、1 億 t-CO_2 の圧入するた

めの期間は 100 年以上の期間が必要となることが判明した。しかしながらシミュレーション結果を確認したところ、遮蔽層下端まで CO_2 が到達していないため、スレッショルド圧の制限については制限条件を「遮蔽層下端まで CO_2 が達せず遮蔽層内に溶存 CO_2 が分布しないこと。」に変更して検討を進めた。

その結果、上部貯留層のみで 5 坑で累計 1 億 t-CO_2 を圧入可能であったことから「最大貯留可能量（5 坑井）」と「坑井数の変更ケース（10 坑井）」の検討を進め、上部貯留層において 5 坑井で 1.8 億 t-CO_2、10 坑井で 3.1 億 t-CO_2 の貯留が可能であるとの結論を得た。

また、本検討で貯留可能量を最大化するためには以下について考慮が必要であった。

1) 本荘沖の南部の貯留層は向斜構造となっており構造的な（構造）トラップが働かず、縁辺部に CO_2 は移動しやすい。
2) 圧入した CO_2 は浮力により貯留層上部へ到達した後、貯留層上部に広がる泥質ファシス（PS2 ホライズン）にはあまり浸透せず、境界面に沿って浅部に向かって広がりが卓越していく挙動が観察された。
3) このような CO_2 の挙動から制限条件である CO_2 超臨界条件から外れる深度に達しないようにするため坑井配置や仕上げ深度の設定が重要な要素となった。

(2) 今後の課題

今回のシミュレーションでは、貯留可能量を見極めるうえで「遮蔽層下端まで CO_2 が達せず遮蔽層内に溶存 CO_2 が分布しないこと」と「溶存 CO_2 量の分布範囲について CO_2 が超臨界条件から外れる深度に到達しないこと」の二つが主な制限条件となり、断層や既存坑井からの距離、地層破壊圧やエロージョナルベロシティーは主な制限条件にはならないことを確認した。

通常のシミュレーションでは「遮蔽層下端圧力がモデル全体でスレッショルド圧力を超えないこと」を制限条件とするが、今回のシミュレーションでは遮蔽層下端まで CO_2 が遮蔽層に到達していないため、制限条件を「遮蔽層下端まで CO_2 が達せず遮蔽層内に溶存 CO_2 が分布しないこと」に変更して検討を進めたことから、今回はスレッショルド圧を制限条件としなかった。

「溶存 CO_2 量の分布範囲について CO_2 が超臨界条件から外れる深度に到達しないこと」が今回の圧入のボトルネックとなったのは、地質構造が向斜構造になっている影響が大きい。この対策として坑井数を増やす、あるいは水平井を貯留層下位に配置し、効率的に圧入することで圧入レートおよび最大圧入量を増加させることが可能であると考えられる。

しかしながら、本地域はスレッショルド圧力が不確実なため他の地域のデータで代用し

てシミュレーションを行っている。今後より詳細な検討を進めるうえでは、調査井掘削等により遮蔽層層準でのコア採取やリークオフテストを実施することにより、正確な遮蔽層層準のスレッショルド圧力やリークオフ圧力等、シール性を示すデータの追加取得が必要であると考えられる。また、これらのデータの追加取得が貯留可能量評価の精度向上や最大貯留可能量評価の上振れ余地追求に繋がると考えられる。

「溶存 CO_2 量の分布範囲について CO_2 が超臨界条件から外れる深度に到達しないこと」が制限になるのは、浮力により上昇した超臨界状態の CO_2 が、浸透性が低い岩相まで到達するとその境界面の傾斜に沿って流れることに起因する。特に今回対象となった向斜構造の貯留層に CO_2 の地下貯留を実施する際には坑井周辺の砂体の連続性やその傾斜に関するイメージを詳細化して流動可能な CO_2 の挙動を予測することが長期的に CO_2 を貯留範囲内に留めるうえで重要な要素になると考えられる。

【参考文献】

1) 石油公団、“平成 5 年度　国内石油・天然ガス基礎調査　基礎試錐「本荘沖」調査報告書”（1994）
2) 石油公団、“平成 7 年度　国内石油・天然ガス基礎調査　基礎試錐「子吉川沖」調査報告書”（1996）
3) 日本海洋石油資源開発株式会社、“昭和 49 年度「庄内沖 SI-1 号井」坑井完了報告”（1974）
4) 日本海洋石油資源開発株式会社、“昭和 59 年度「遊佐沖 SI-1 号井」試掘完了報告”（1985）
5) 石油公団、“昭和 58 年度　国内石油・天然ガス基礎調査　基礎試錐「最上川沖」調査報告書”（1984）
6) Athy, L. F., “Density, porosity, and compaction of sedimentary rock”, AAPG Bulletin, Vol. 14, No.1, p.1-24 (1930)
7) 天然ガス鉱業会　大陸棚石油開発協会、“改訂版　日本の石油・天然ガス資源”、p.477（1992）
8) 日本 CCS 調査(株)、“平成２９年度二酸化炭素貯留適地調査事業委託業務報告書”（2019）
9) 日本 CCS 調査(株)、“平成３０年度二酸化炭素貯留適地調査事業委託業務報告書”（2020）
10) Corey, A.T., “The Interrelation between Gas and Oil Relative Permeabilities”

Producers Monthly November, p.38-41 (1954)

11) van Genuchten, M.TH., “A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of undersaturated soils” Soil Science Society of America. Journal Vol 44 p.892-898 (1980)

12) Bennion,B., Bachu, S., “Permeability and Relative Permeability Measurements at Reservoir Conditions for CO_2-Water System in Ultra low Permeability Confining Caprocks” SPE 106995 (2007)

13) Lacy, L.L., “Dynamic Rock Mechanics Testing for Optimized Fracture Designs.”, SPE Annu. Tech. Conf. Exhib. (1997)

14) Blanton, T. L. and Olson, J. E., “Stress magnitudes from logs: effects of tectonic strains and temperature”, SPE Reservoir Evaluation and Engineering, 2, 62-68(1999)

4.13　貯留層シミュレーションによる貯留可能性検討（佐渡西方沖）

佐渡西方沖では、基礎物理探査 3D 探査データ、基礎試錐データを用いて、地質解析を実施し、貯留適地候補地点として 3 区域合計で超臨界状態の CO_2 を約 11.8 億 t 圧入できる可能性を 4.9 節で報告した。4.9 節では、佐渡西方沖での地質解析結果を反映した地質モデルを構築し、調査井掘削前 CO_2 挙動予測シミュレーションを実施した結果について報告する。

4.13.1　概要

佐渡西方沖の貯留層モデルの特徴として、以下があげられる。

1) 貯留可能域は層準的に椎谷層と上部寺泊層に大きく分かれる。遮蔽層は確認されていないものの椎谷層と上部寺泊層では圧力トレンドが異なり、椎谷層までは静水圧に近い圧力勾配を示し、上部寺泊層以深から徐々に圧力が上昇し、異常高圧層を形成している。
2) 解析ホライズンとして遮蔽層が一つ、貯留層が四つの地質ユニットでそれぞれ構成される。
3) 地質解析の結果、七つの異なる物性のファシスが分布しており、七つのファシスの内、主として粗粒堆積物あるいは砂質岩を形成するファシスは四つが存在し、主として細粒堆積物あるいは泥質岩を形成するファシスは三つがあると判断される。また、各ユニットに複数のファシスが分布しており、深度方向にも複数のファシスが存在する。
4) 上部寺泊層以深の異常高圧層については地質的なメカニズム等が不明であるためシミュレーション上で正確に再現することは困難で、CO_2 挙動の不確実性が大きい。

上記のような特徴から、調査井掘削前 CO_2 挙動予測シミュレーションについては、以下の経緯で検討を進めた。

1) 上部寺泊層については異常高圧層であり不確実性が大きいことから、貯留エリアの選定については、まず椎谷層のみで 1 億 t-CO_2 の貯留を試み、それができなかった場合に上部寺泊層への圧入を想定することとした。
2) 1)結果として、椎谷層のみの圧入では CO_2 の 1 億 t-CO_2 貯留はできなかった。これは地質構造が複雑で地質解析の結果から想定される椎谷層の貯留可能量も大きくないため椎谷層に 5 坑の圧入井を配置した場合、遮蔽層下端での圧力上昇が制限条件であるスレッショルド圧を超過するか、溶存 CO_2 が断層エリアに到達するか、あるいは十分な圧入レートを確保できない等、何かしらの制限条件を満た

せない結果となったためである。

3) 椎谷層と上部寺泊層を組み合わせた圧入では 1 億 t-CO_2 の圧入を達成できた。後述するように不確実性はあるものの上部寺泊層も貯留可能であると仮定し、椎谷層と上部寺泊層を合わせた坑井配置では複数のケースで制限条件を満たし、かつ 1 億 t-CO_2 の貯留が可能であった。ただし、上部寺泊層は異常高圧層であり、圧力シールのメカニズム等の不確実性が高いため、上部寺泊層へ配置する坑井数は少ないほうが妥当であると判断し、エリア B を貯留エリアに選択し、椎谷層に 4 坑と上部寺泊層に 1 坑の圧入井を配置するケースをリスク感度分析など行うためのベースケースとした。

4) 最小坑井数については、1億t-CO_2圧入時点で制限条件に近い状態であったため、制限条件を満足する坑井数は 4 坑では不可能で、ベースケースと同様に 5 坑が必要であった。

5) 最小坑井数と同様に圧入レートや圧入量を増加させることが難しく、最大圧入レートおよび最大圧入量は制限条件を満たせず、スレッショルド圧をわずかに超過するがベースケースと同様の坑井配置で最大圧入レートは 263 万 t-CO_2/年（38 年で 1 億 t-CO_2）最大圧入量は 1.13 億 t-CO_2（263 万 t-CO_2/年×43 年）となった。

リスク感度分析の結果から、地層圧および浸透率が最大圧入量の増減に大きな影響を与えるものと思料される。上部寺泊層は異常高圧層を形成しているが、シミュレーションモデルでは圧力シールの分布等を詳細に再現できず圧入した CO_2 挙動の不確実が大きい。したがって、シミュレーションで高圧層を評価する際には坑井の配置や圧入レート等留意が必要である。

(1) 調査範囲

4.9 節で示した地質解析範囲を含む前期中新世から鮮新世の遮蔽層および貯留層を対象に調査井掘削前 CO_2 挙動予測シミュレーションを実施した。（図 4.13-1）

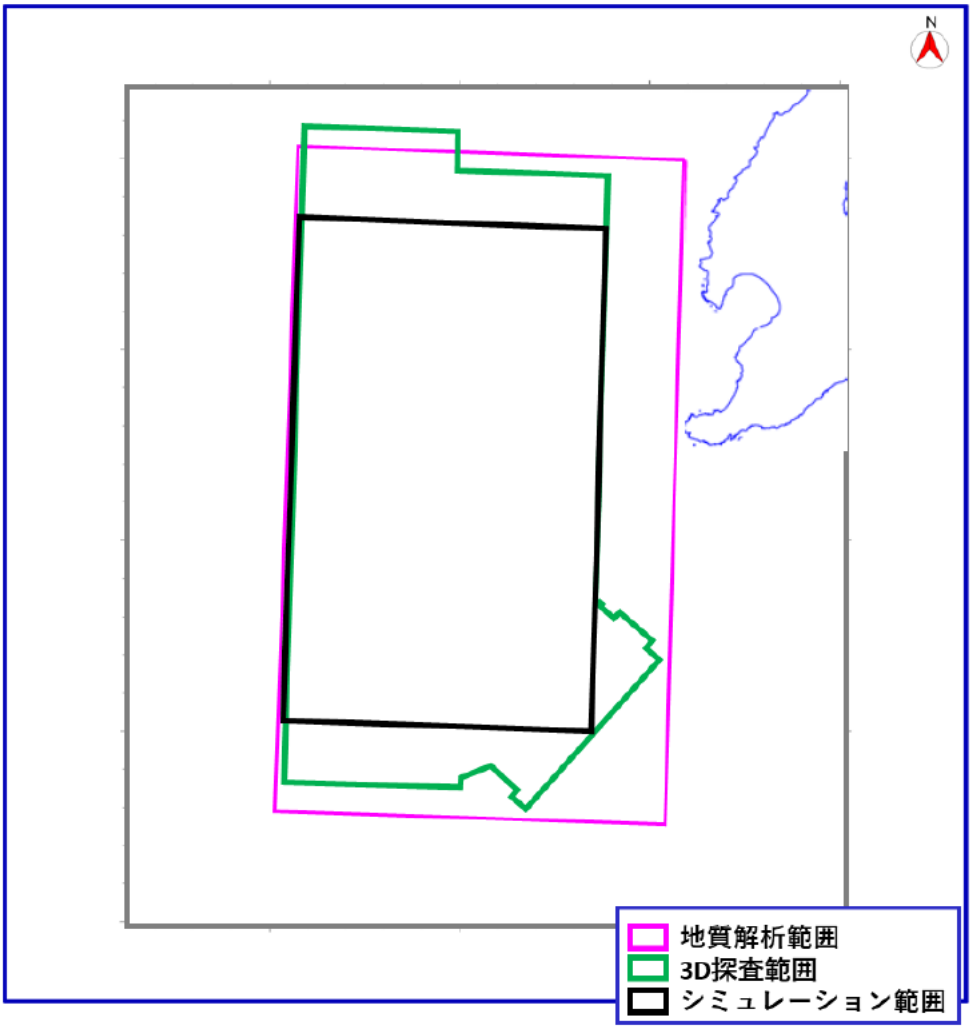


図 4.13-1　CO_2 挙動予測シミュレーション実施範囲

(2)　使用データ

4.9 節に示す坑井データ、地質解析・貯留可能量評価業務結果、および苫小牧 CCS 坑井分析データや、その他公開されている地質情報に関する資料等を使用した。

4.13.2　地質モデルの作成

(1)　構造モデルの作成

図 4.13-2 にホライズン・層序および地質モデルの作成概要を示す。4.9 節に示す地質解析により作成した深度構造図を用いてホライズンモデルおよび構造モデルを作成した。ホライズンモデリングでは図 4.13-2 に示す層序を用いて海底面を上限、下部寺泊層中マーカーの 100 m 下位ホライズンを下限とする区間における、椎谷層上限、D3 上限、D2 上限、上部寺泊層上限、下部寺泊層上限、下部寺泊層中マーカーをそれぞれ使用した。ま

た、グリッドモデルの下限は、下部寺泊層中マーカーホライズンの 100 m 下位として下部寺泊層中マーカーホライズンを深度方向にシフトすることによって 100 m 下位のホライズンを作成した。ホライズンモデルでは遮蔽層が一つ、貯留層が四つの地質ユニットでそれぞれ構成されている。さらに、遮蔽層の上位には一つの地質ユニットを設定した。

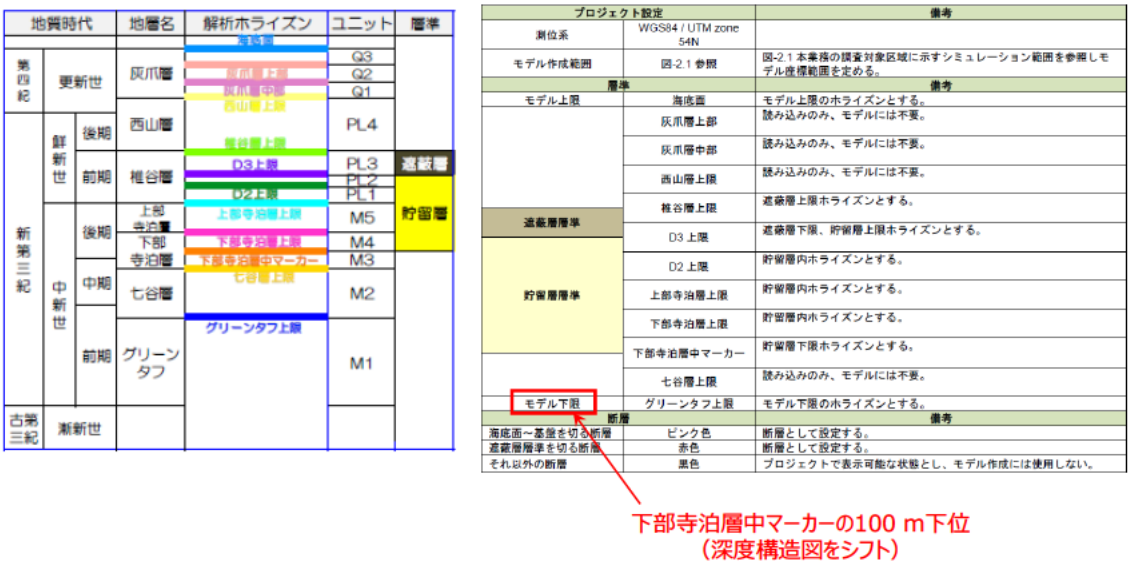


図 4.13-2　ホライズン・層序（左図）および地質モデルの作成概要（右図）

表 4.13-1 に上部モデルの各ユニットにおけるレイヤー数および平均層厚を示す。厚さは地質構造により各グリッドで異なる。遮蔽層はレイヤー6～11 に、貯留層はレイヤー12～43 に相当する。遮蔽層レイヤーは場所により厚さが異なるが、貯留可能域での平均層厚が約 20 m 程度となるよう設定した。（レイヤー6～11）。また貯留層のレイヤー12～43 については、平均層厚が 20～70 m 程度となるように設定した。

表 4.13-1　各ユニットにおけるレイヤー数および平均層厚（上部モデル）

	地質ユニット	レイヤー数	解析ホライゾン	平均層厚 (m)	
				モデル領域	貯留可能域
遮蔽層	PL3	6	椎谷層上限－D３上限	17.18m	19.65m
貯留層	PL2	4	D3上限－D２上限	17.74m	19.46m
	PL1	8	D２上限-上部寺泊層上限	28.78m	33.32m
	M5	8	上部-下部寺泊層上限	30.93m	37.17m
	M4	12	下部寺泊層上限-下限下位100m	41.81m	67.45m

(2)　ファシス設定

4.9 節に示す地質解析で作成されたファシス分布を基に設定した。設定したファシスは、3D 弾性波探査データを用いた堆積相解析により認定された七つのサイスミックファシス A、B、C1、C2、D、E、F である。図 4.13-3 に各層準のファシス分布を示す。

また、孔隙率・浸透率等の物性値モデル設定については各層準において上記のファシス分布を考慮して設定した。

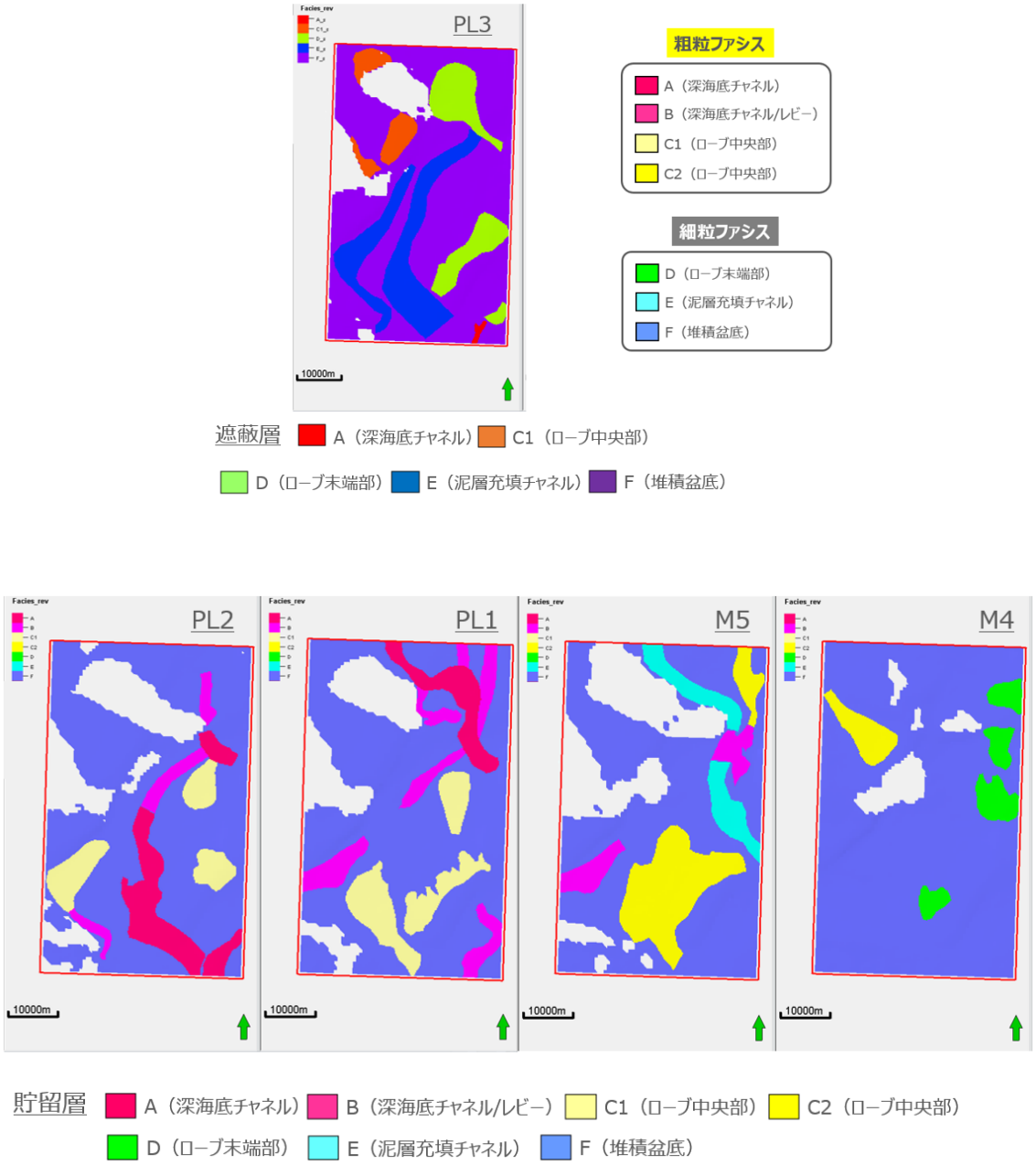


図 4.13-3　各層準におけるファシス分布　（遮蔽層上段、貯留層下段）

(3)　貯留層・遮蔽層にかかる物性値

圧密曲線、有効孔隙率、浸透率、Kv/Kh、N/G 比についてはファシスごとに一括した物性値を設定した。詳細は後述する。

表 4.13-2　物性値（圧密曲線、有効孔隙率-浸透率相関、Kv/Kh、N/G 比）

圧密曲線		ファシス	A	B	C1	C2	D	E	F
遮蔽層		PL3	PHI_E=0.40e$^{-0.000567 \times depth}$				PHI_E=0.80e$^{-0.001494 \times depth}$		
貯留層	椎谷層	D4							
		D3		PHI_E=0.40e$^{-0.000679 \times depth}$	PHI_E=0.40e$^{-0.000937 \times depth}$		PHI_E=0.80e$^{-0.003023 \times depth}$		
		PL2							
		D2D1							
		PL1							
	上部寺泊層	C							
	下部寺泊層	B4,B3,(B2)							

φe-k相関		ファシス	A	B	C1	C2	D	E	F
遮蔽層		PL3							
貯留層	椎谷層	D4							
		D3	k = 40078 × φe$^{4.2375}$	k = 24218 × φe$^{5.2378}$	k = 526215 × φe$^{4.8078}$	k = 2490 × φe$^{1.8718}$	k = 5.8199 × φe$^{3.1434}$		
		D2,D1							
	上部寺泊層	C							
	下部寺泊層	B4,B3,(B2)							

Kv/Kh		ファシス	A	B	C1	C2	D	E	F
遮蔽層		PL3							
貯留層	椎谷層	D4							
		D3	0.314	0.258	0.246	0.259	0.256		
		D2,D1							
	上部寺泊層	C							
	下部寺泊層	B4,B3,(B2)							

ネットグロス比		ファシス	A	B	C1	C2	D	E	F
遮蔽層		PL3							
貯留層	椎谷層	D4							
		D3	0.72	0.43	0.55	0.40	0.04		
		D2,D1							
	上部寺泊層	C							
	下部寺泊層	B4,B3,(B2)							

① 孔隙率

孔隙率は基礎試錐の検層データを基に解析した有効孔隙率と海底面からの深度の相関に基づいて圧密曲線を基礎試錐井ごとに検討し、その検討を基に基礎試錐井の位置にて補正したファシスごとに海底面からの深度と有効孔隙率の相関を設定した。なお泥質岩の圧密曲線作成に際しては新潟地域と対象にした井波・星野（1974）の文献[3)]を参考にした。

1）貯留層

ファシス C1,C2　　$PHI_E = 0.40e^{-0.000937 \times Depth}$

ファシス A,B　　$PHI_E = 0.40e^{-0.000679 \times Depth}$

ファシス D,E,F　　$PHI_E = 0.80e^{-0.003023 \times Depth}$

2）遮蔽層

ファシス A,B,C1,C2　　$PHI_E = 0.40e^{-0.000567 \times Depth}$

ファシス D,E,F　　$PHI_E = 0.80e^{-0.001494 \times Depth}$

② 浸透率

ファシスごとに有効孔隙率と浸透率の相関関係式を基に浸透率を求めた。有効孔隙率と浸透率の相関は遮蔽層と貯留層のファシスと区別していないため、貯留層および遮蔽層ともこの相関関係式を使用して求めている。

③ Kv/Kh

Kv/Kh については、基礎試錐「佐渡南西沖」報告書[1)]および基礎試錐「上越海丘」報告書[2)]を参考に設定した。

④ N/G 比

N/G 比については、4.9 節に記載されている N/G 比の算出結果を参考にして、各ファシスを代表する N/G 比を設定した。

⑤ 貯留層温度

貯留層温度は 4.9 節に示す地質解析のデータを適用し、海水面下 1,057 m において 31.1℃、海水面下 2,000 m において 47.2℃とした。

⑥ 塩分濃度

塩分濃度（NaCl 濃度）は基礎試錐「佐渡南西沖」報告書[1)]、基礎試錐「上越海丘」報告書[2)]を参考に、28,000 ppm とした。

⑦　貯留層圧力

本対象エリアにおける貯留層圧力については、基礎試錐「佐渡南西沖」報告書[1)]、基礎試錐「上越海丘」報告書[2)]において、椎谷層までは静水圧に近い圧力勾配を示し、上部寺泊層以深から徐々に圧力が上昇し、異常高圧層を形成していることが記載されている。

シミュレーションモデルではこのような異常高圧層を圧力勾配の傾向が異なる椎谷層－上部寺泊層間、下部寺泊層 B4 部層～B3b 部層間に圧力シールを設定し異常高圧層を再現した。圧力シールについては、シミュレーションモデル内で上下のトランスミシビリティを 0 と仮定した。また、シミュレーションモデルにおける各区間の参照深度と参照圧力を表 4.13-3 に示す。下部寺泊層の B4 部層については、本シミュレーションの地質モデルでは考慮して作成されていないため、基礎試錐「上越海丘」における深度を基に圧力シールを設定した。

なお、異常高圧層については薄互層等で挟み込んだ低浸透率の圧力シール発達により、垂直方向の流体の移動を妨げられ、圧力が階段状に変化しているものと仮定した。また、地質的な特徴として高い地層圧により地層破壊圧との差が少ないため、圧入レートが制限され、圧入能力は低下する。また、浮力や重力による CO_2 の移動も限定されるため、貯留量は減少するものの CO_2 圧入は可能な想定とした。ただし 4.9 節では異常高圧のメカニズムについては言及されておらず、圧力シールの分布も不明確である。今回モデル上では最小限の圧力シールは想定したものの異常高圧層のメカニズムについては不明点があり、圧入による CO_2 挙動の不確実性が大きい。したがって寺泊層圧入の優先順位を下げ、基本的に椎谷層のみで 1 億 t-CO_2 の圧入を行い、それができなかった場合に一部を上部寺泊層へ圧入する方針でシミュレーションを行うこととした。

表 4.13-3 モデルにおける貯留層圧力の参照深度と参照圧力

区間	参照深度（m）	参照圧力（kPa）
椎谷層	1,888	19,070
上部寺泊層～下部寺泊層（B4 部層）	2,330	28,100
下部寺泊層（B4 部層以深）	2,716	37,560

⑧　岩石圧縮率

岩石圧縮率は孔隙圧力の変化に対する孔隙率の変化率を表し下式で定義する。

$$C = -\frac{\partial V_p}{V_p \partial p}$$

本シミュレーションでは、基礎試錐「佐渡南西沖」報告書[1)]、基礎試錐「上越海丘」報告書[2)]に記載されているコア試験の結果から各層序に相当する試験データを選択し、圧力と孔隙率の変化から相関式を決定した。相関式については、各測定圧力における孔隙率の平均値から近似式を求めた。この相関式の傾き（$\frac{\partial V_p}{\partial p}$=-0.15989）と各ファシスの代表的な孔隙率から岩石圧縮率を計算した。本対象エリアでは泥岩におけるコア試験データがないため、すべてのファシスで同一の相関式を使用した。粗粒ファシスと細粒ファシスについては全孔隙率と深度の相関式を検層データから作成し、各ファシスの代表的な孔隙率についてはこの相関式を用いて、示すファシスの代表的深度における全孔隙率を求めた。またここで求めた全孔隙率を基に表 4.13-4 に示す各ファシスの岩石圧縮率一覧から岩石圧縮率を求めた。

表 4.13-4　各ファシスの岩石圧縮率一覧

ファシス	代表深度（海底面下）（m）	孔隙率（PHIT）（%）	岩石圧縮率（1/kPa）
貯留層			
ファシスA	1,750	23.9	6.69×10^{-6}
ファシスB	1,750	23.9	6.69×10^{-6}
ファシスC1	1,250	32.8	4.87×10^{-6}
ファシスC2	1,400	32.1	4.98×10^{-6}
ファシスD, E, F	1,430	25.0	6.40×10^{-6}
遮蔽層			
ファシスA	690	35.7	4.48×10^{-6}
ファシスC1	350	37.8	4.23×10^{-6}
ファシスD, E, F	850	40.1	3.99×10^{-6}

⑨　毛細管圧・相対浸透率

本対象エリアでは毛細管圧・相対浸透率の測定データがないため、「苫小牧調査井 CCS-2 試料分析／地層流体分析」報告書[4)]に記載された萌別層砂岩のデータ、および萌別層と振

老層の泥岩のデータを参考に作成した。

a. 貯留層粗粒ファシスの毛細管圧と相対浸透率

貯留層粗粒ファシスについては、ファシス A、B、C1、C2 の四つのファシスが定義されている。ファシスごとに毛細管圧と相対浸透率を作成するためには、ファシスごとにエンドポイントを決定する必要がある。

不動水飽和率の評価のため、物理検層で孔隙率と不動水飽和率を用いて浸透率を推測する手法の一つである Coates の式[5)、6)、7)]を使用した。ここでは、孔隙率と浸透率から下式のように不動水飽和率を計算した。

$$Swir=\frac{100\phi^2}{k^{1/2}+100\phi^2}$$

Coates の式から不動水飽和率を計算する際に、ファシスごとに代表的な孔隙率と浸透率を圧密曲線と孔隙率-浸透率相関式から計算した。圧密曲線からファシスごとに代表的な孔隙率を計算するためには代表深度を決める必要がある。ファシスごとの代表深度は、地質モデルにおけるファシスの分布から決定した。臨界ガス飽和率（Sgc）は 5%とし、湿潤過程における最大残留ガス飽和率（Sgrmax）は、本対象エリアにおける実測データがないため、CMG 社（Computer Modelling Group Ltd.）の貯留層シミュレータ（GEM）のデフォルト式 Sgrmax = Sgc + 0.5×(1 - Swir - Sgc)から計算した。各ファシスの代表的な物性値とエンドポイントを表 4.13-5 に示し、毛細管圧と相対浸透率曲線を図 4.13-4 および図 4.13-5 に示す。毛細管圧は J-function と各ファシスの孔隙率・浸透率やエンドポイントから作成し、相対浸透率曲線は実測値と合うようにエンドポイントとフィッティングパラメータ（n1、n2）を変化させることで作成した。

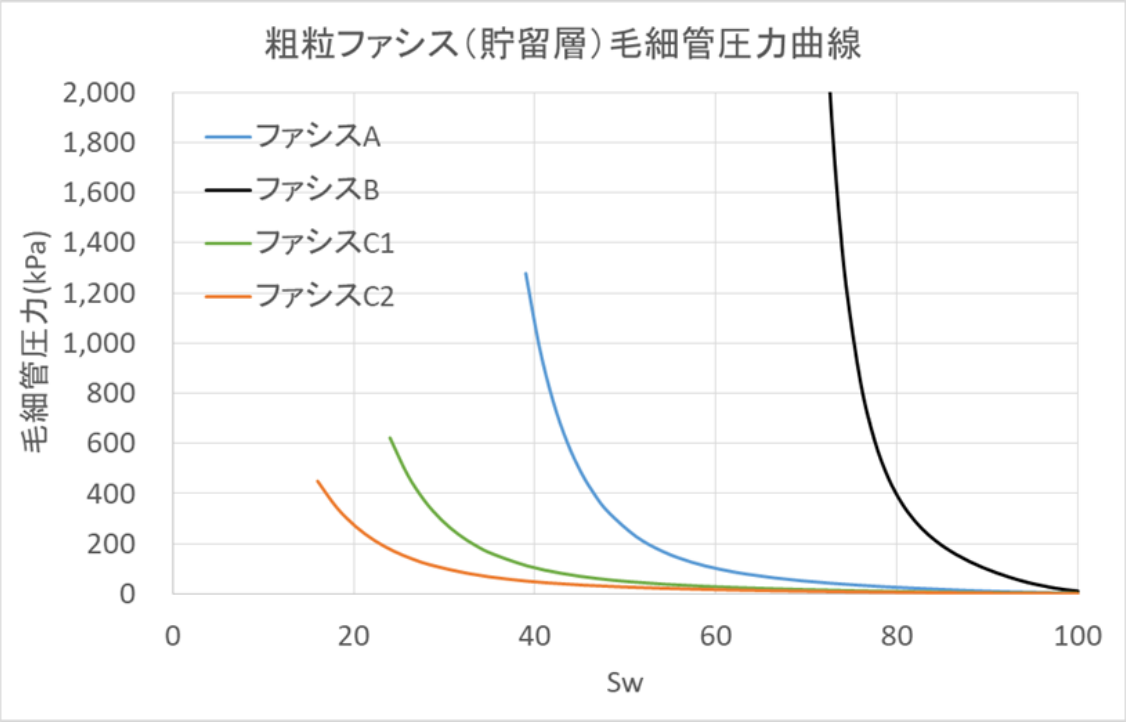
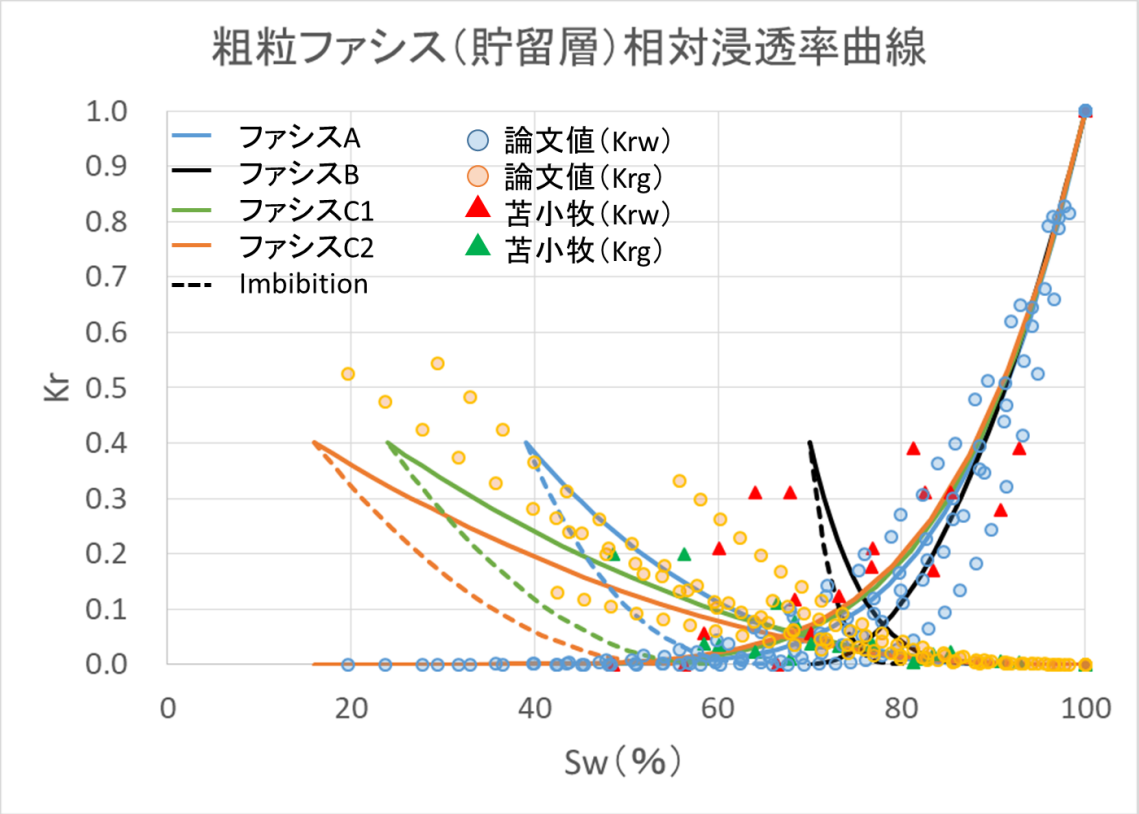


図 4.13-4　貯留層粗粒ファシスの毛細管圧



注）（苫小牧 CCS-2）コアフラッド試験分析成果報告書[4]、Bennion and Bachu(2005)[6] から作成

図 4.13-5　貯留層粗粒ファシスの相対浸透率曲線

b.　遮蔽層粗粒ファシスの毛細管圧と相対浸透率

本対象エリアでは分布は限られるが、遮蔽層にも粗粒ファシス A と C1 が分布している。貯留層粗粒ファシスと同様の手法で遮蔽層の粗粒ファシスの代表的物性値とエンドポイントから毛細管圧と相対浸透率曲線を作成した。表 4.13-5 に遮蔽層粗粒ファシスの代表物性値とエンドポイントを図 4.13-6 と図 4.13-7 に毛細管圧と相対浸透率曲線を示す。貯留層粗粒ファシスと同様に、毛細管圧は J-function と各ファシスの孔隙率・浸透率やエンドポイントから作成し、相対浸透率曲線は実測値と合うように各ファシスのエンドポイントとフィッティングパラメータ（n1、n2）を変化させることで作成した。

表 4.13-5　遮蔽層粗粒ファシスの代表的物性値とエンドポイント

パラメータ	ファシスA	ファシスC1
代表深度（海底面下）（m）	690	350
孔隙率（%）	27.0	32.8
浸透率（mD）	157.3	2,475.0
Swir（%）	37	18
Sgc（%）	5	5
Krg@Swir	0.4	0.4
Krw@Sw＝1	1.0	1.0
n1	5.0	6.0
n2	2.3	2.0
Sgrmax	34	44

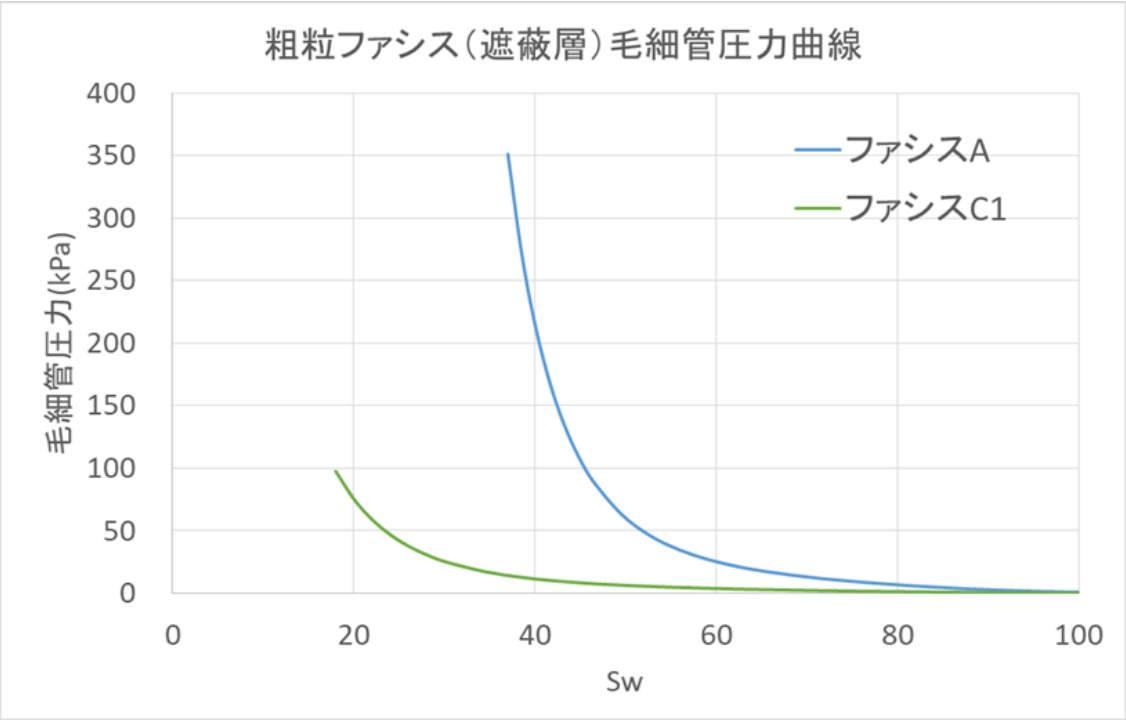
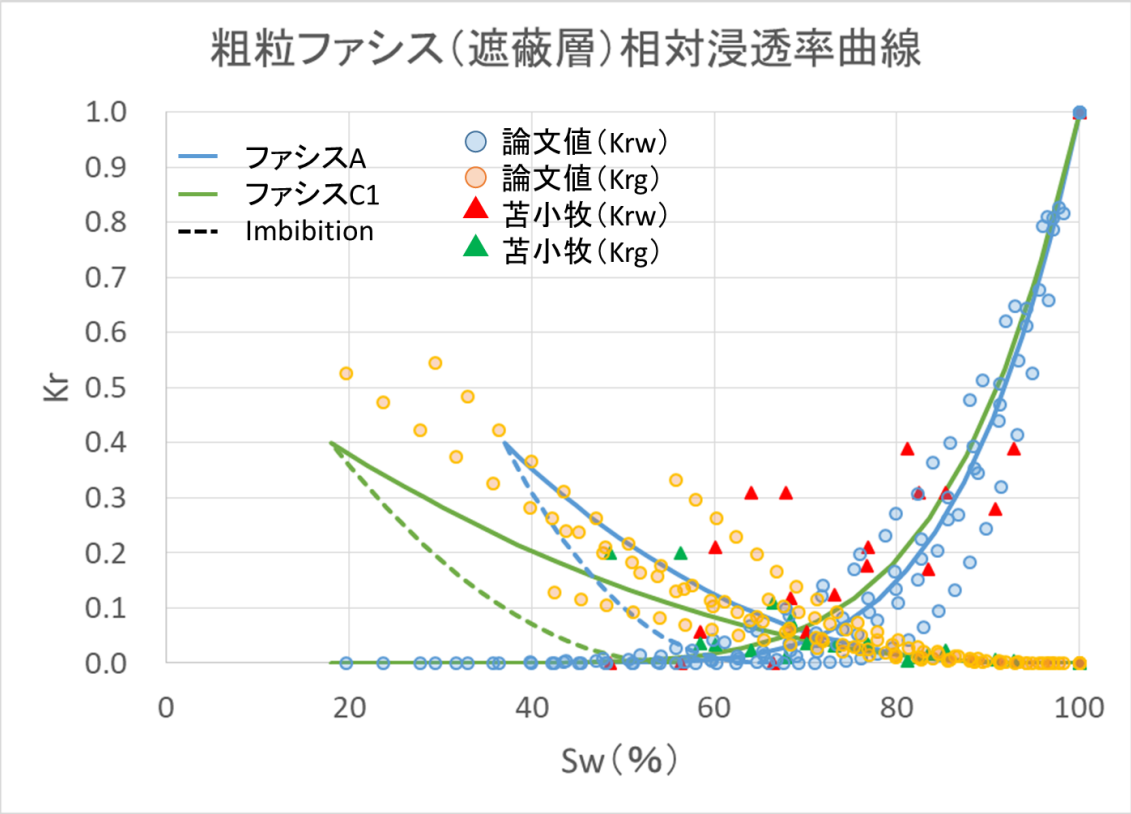


図 4.13-6　遮蔽層粗粒ファシスの毛細管圧



注）（苫小牧 CCS-2）コアフラッド試験分析成果報告書[4]、Bennion and Bachu(2005)[6] から作成

図 4.13-7　遮蔽層粗粒ファシスの相対浸透率曲線

c.　細粒ファシスの毛細管圧と相対浸透率

本対象エリアでは、細粒ファシス D、E、F が定義されており、遮蔽層と貯留層ともに細粒ファシスが分布している。細粒ファシスについてはファシスごとに差別化して毛細管圧と相対浸透率曲線を作成することが困難であるため、細粒ファシス D、E、F で共通の相対浸透率曲線を使用する。

細粒ファシスの毛細管圧については、苫小牧 CCS 調査井における泥岩のデータや粗粒ファシスの不動水飽和率等を考慮し作成した。振老層と萌別層の泥岩で測定された毛細管圧曲線における不動水飽和率の中間的値は約 75%であり、貯留層粗粒ファシスでもっとも不動水飽和率が高かったファシス B の値より大きいため、細粒ファシスにおける不動水飽和率を 75%とした。また、貯留層粗粒ファシスと同様の手法で遮蔽層の細粒ファシスの代表的物性値とエンドポイントから毛細管圧と相対浸透率曲線を作成した。表 4.13-6 に遮蔽層粗粒ファシスの代表物性値とエンドポイントを図 4.13-8 に毛細管圧と相対浸透率曲線を示す。

表 4.13-6　遮蔽層の相対浸透率、毛細管圧およびスレッショルド圧力

相対浸透率 エンドポイント	Krg@Swir	1.0	van Genuchten の相対浸透率の式を用いて、n=4.9728 として作成
	Krw@Sw=1	1.0	
	Sgc	0.05	
	Swir	0.75	
毛細管圧	Pc	排水過程	Sgc でスレッショルド圧となるように van Genuchten の式で a=0.000319, n=4.9728 として作成

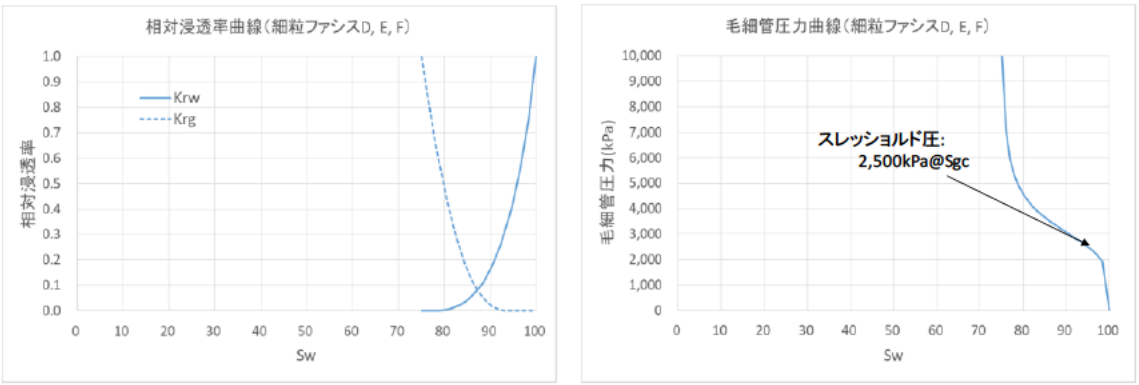


図 4.13-8　細粒ファシスの相対浸透率と毛細管圧

⑩　スレッショルド圧

スレッショルド圧については、基礎試錐「上越海丘」、「佐渡南西沖 D」の特殊コア試験

により測定されている。両基礎試錐ともにスレッショルド圧は水－空気系で測定されており、それぞれの測定値を下記式から水－CO_2系に換算した。対象エリアの中央付近に位置するのは上越海丘であるが、10.5 MPa は極端に高いため、本シミュレーションでは保守的な設定として佐渡南西沖 D で測定された 2.5 MPa をスレッショルド圧に設定する。

4.13.3 CO_2 挙動予測シミュレーションモデルの設定

(1) 貯留エリアと圧入井の設定

主要な貯留層は図 4.13-9 に示すように北部の貯留エリア（A）と南部の貯留エリア（B）に大きく分かれるためおのおののエリアでシミュレーションを行い 1 億 t-CO_2 の圧入が可能か確認を試みた。また、それぞれのエリアの主要な貯留層はともに椎谷層と上部寺泊層となるが、上部寺泊層は異常高圧層であり、4.9 節で推定された貯留可能量は大きいものの圧入後の圧力挙動等の不確実性は高いため圧入井は椎谷層への配置を基本とし、各貯留可能エリア内に 5 坑の圧入井（垂直井）を設定した。基本的に 1 坑井当たり 50 万 t-CO_2/年の圧入レートで 40 年間継続して累計で 1 億 t-CO_2 圧入し、後述の(2)で述べる圧入制限条件を満たすことのできる坑井配置、パーフォレーション区間を各エリア内で探索した。

また、浸透率等の影響で坑底圧が上昇する坑井に対しては最大坑底圧を設定することにより各坑井の圧入レートを制御し、最大坑底圧に達した坑井の圧入レートを減らし、圧入しやすい坑井で圧入量を増やす等の調整を行い合計で 250 万 t/年を維持するように設定した。したがって、各坑井の圧入量は坑底圧力によって 50 万 t-CO_2/年から増減する。

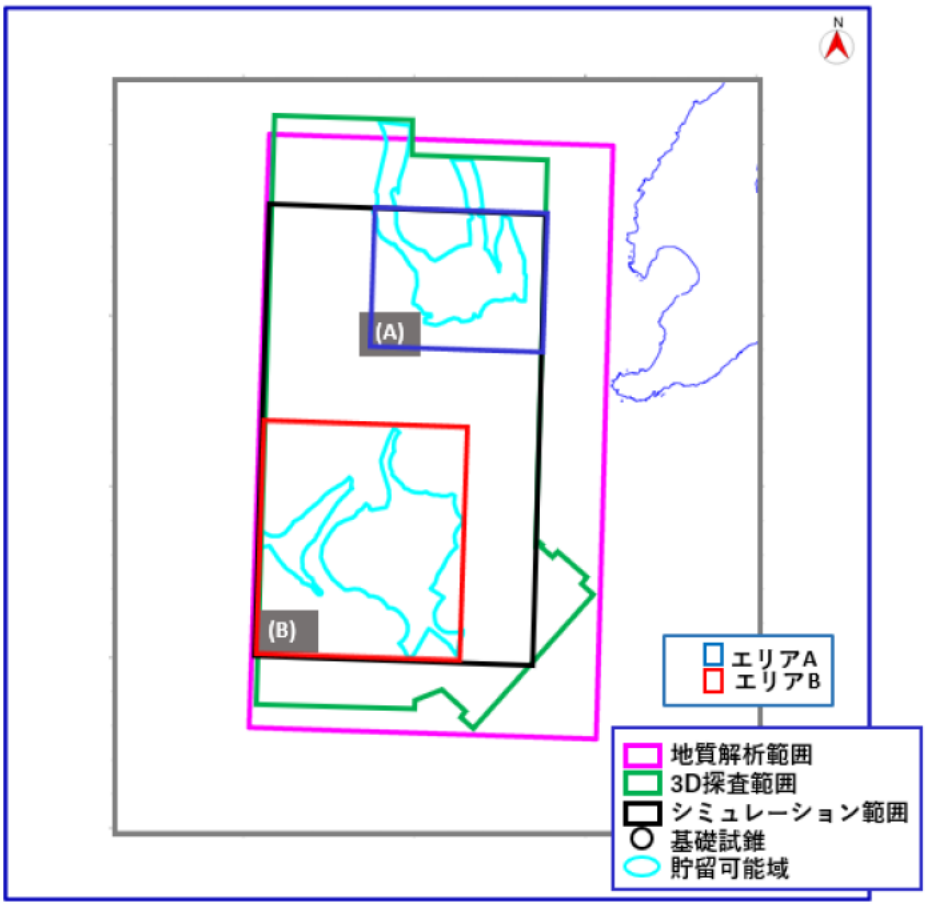


図 4.13-9　シミュレーションの範囲と貯留可能エリア

(2)　圧入制限条件

北部の貯留エリア（A）と南部の貯留エリア（B）でもっとも圧入に適した坑井配置を抽出するために、40 年間で 1 億 t-CO_2 を圧入する CO_2 挙動予測シミュレーションを実施した。基本的に各坑井で 50 万 t-CO_2/年で一定の圧入レートとし、表 4.13-7 に示す圧入井の条件と表 4.13-8 に示す圧入中および圧入停止後 1,000 年間における制限条件を設定した。

表 4.13-7　圧入井の設定（圧入条件の抽出）

項目	設定
坑井	垂直井
坑井長	海底面下 3,000 m 以浅、もしくは貯留層下限までの浅い方
圧入井数	5 坑
坑井間隔	試行錯誤
圧入井設定位置	試行錯誤
仕上げ区間	試行錯誤（最大で貯留層区間）

表 4.13-8　シミュレーション結果が満たすべき制限条件

圧入中～圧入停止後 1,000 年間
遮蔽層下端圧力がモデル全体でスレッショルド圧力を超えない。
溶存 CO_2 量の分布範囲が以下を満たす。 ・遮蔽層を切る断層から 2.5 km の範囲に到達しない。 ・シミュレーションモデルの端に到達しない。 ・超臨界条件（7.38 MPa、31.1℃）から外れる深度（浅部）に到達しない。
圧入中
各坑井の圧入量の制御は坑底圧制御とする。また、坑底圧の上限は周辺の坑井データを参考に地層破壊圧を推定し、その 90%とする。 流速が TBG（4-1/2“）のエロージョナルベロシティーに到達しない。

(3)　圧入条件の検討

①　貯留層における遮蔽層下端のスレッショルド圧力

遮蔽層のスレッショルド圧は 4.13-2(3)貯留層・遮蔽層にかかる物性値⑩で述べたように 2.5 MPa とした。遮蔽層下端のレイヤーにおける圧力の初期圧からの圧力差が、2.5 MPa より小さい値になれば、制限を満たしていることになる。

②　溶存 CO_2 量の分布許容範囲

溶存 CO_2 量の広がりを目視確認するため、濃度 3×10^{-5} mol/kg でカットオフを行い、この濃度以上のものが各貯留エリアから 1 億 t-CO_2 を圧入した際に遮蔽層を切る断層から 2.5 km 圏内や貯留層モデルの境界部に到達しないことを確認した。また超臨界条件（7.38 MPa、31.1℃）を満たす範囲に溶存 CO_2 が留まることが必要であり、既存の基礎試錐井に到達しないことも考慮した。

③　圧入時の坑底圧の最大値

国内石油・天然ガス基礎調査　基礎試錐「上越海丘」報告書[2)]におけるリークオフテストの結果を基に坑底圧の最大値を算出した。表 4.13-9 に上越海丘におけるリークオフテストの結果を示す。これらリークオフテストの結果を基に、圧入井設定位置における深度に応じて最大坑底圧を設定した。

表 4.13-9　上越海丘におけるリークオフテスト結果と最大坑底圧

深度	海底面下深度	リークオフテスト結果	破壊圧	破壊圧×90%
mMDBRT	mTVDSS	EMW(g/cc)	(MPa)	(MPa)
2,055	863	1.27	25.2	22.3
2,350	1,158	1.43	32.6	29.3
2,595	1,403	1.53	38.5	34.7
2,921	1,729	1.56	44.2	39.8
2,992	1,800	1.56	45.3	40.8

注）基礎試錐「上越海丘」報告書[2)]から作成

④　エロージョナルベロシティー

貯留エリアの抽出に際し、圧入井の流速がエロージョナルベロシティーを超えない制限を圧入井に課すため、エロージョナルベロシティーの計算を行う。エロージョナルベロシティーV_e (m/s)は以下の式から計算される。

$$V_e = 1.21C/\sqrt{\rho}$$

C は empirical constant ($\sqrt{\mathrm{lb}/(\mathrm{ft\,s^2})}$)、1.21 は C を SI 単位にするための常数、ρは坑底における CO_2 密度 kg/m^3 となる。ここでは C の値は C=200 とする。

本シミュレーションにおいてエロージョナルベロシティーを満たす最大圧入レートについて検討したところ、図 4.13-10 に示すように、1 坑井当たり 170 万 t-CO_2/年でもエロージョナルベロシティの制限条件を満たすことを確認した。なお、170 万 t-CO_2/年の圧入では坑口圧は 7～13 MPa 程度、坑底圧は 25～29.3 MPa 程度であることが必要である。

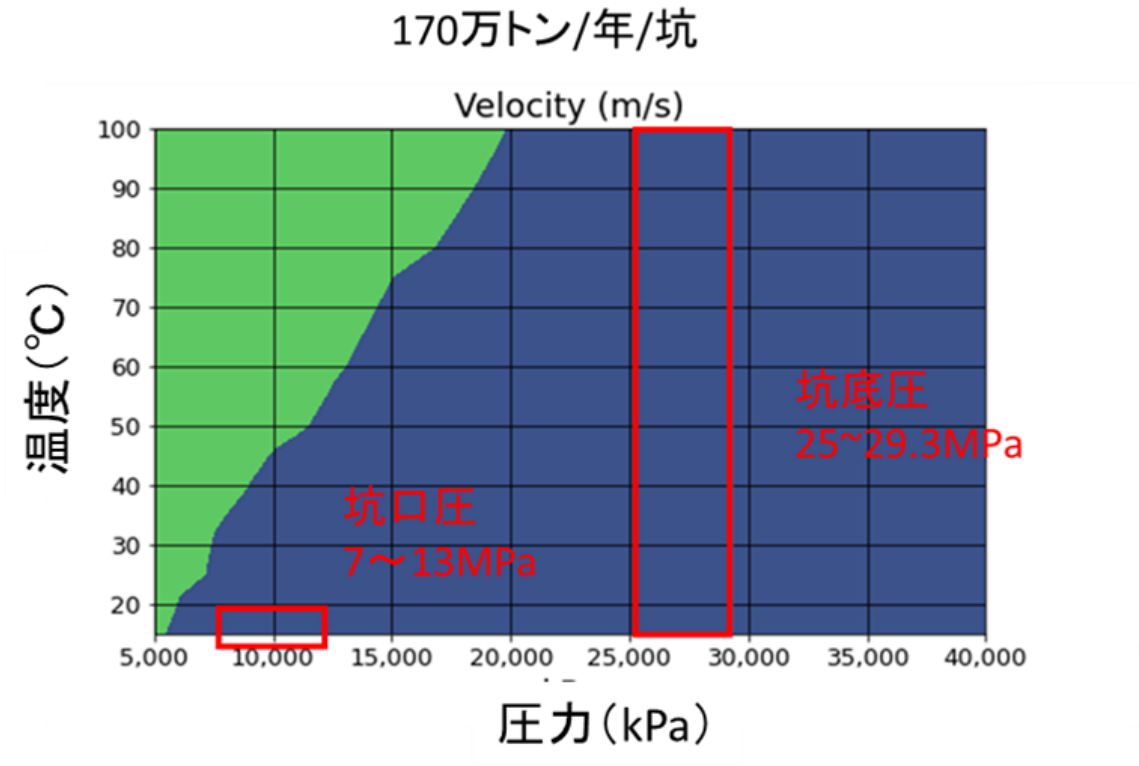


図 4.13-10　圧入レートとエロージョナルベロシティーを超える領域（緑）

(4)　エリア A 選定の検討

エリア A について詳細は割愛するが、以下の理由により貯留エリアとして選定しなかった。

1) エリア A では浸透率が高いところでも数十 md であり、数 md 以下の領域も多く、坑井を配置できる場所が限られる。
2) シミュレーションを実施してエリア A の坑井配置について試行錯誤して検討したが、1 億 t-CO_2 を大幅に下回る貯留可能量に留まる。

したがって貯留エリアの選択としてエリア B に絞って検討を行うこととした。

(5)　エリア B 選定の検討

①　椎谷層における坑井配置の検討

エリア B の貯留エリアについては区域Ⅱと区域Ⅲが存在するが、区域Ⅱの浸透率は低く、東西方向の幅も狭いため、坑井の配置は困難と判断して区域Ⅲを坑井配置エリアとした。椎谷層では PL1 ユニットに粗粒ファシス C1 が分布し、その上部の PL2 ユニットには粗粒ファシス A が分布する。粗粒ファシス C1 の上部では大部分で PL2 ユニットの細粒ファシ

スが分布するが、一部で粗粒ファシス A と C1 が接している。なお、青色の領域は細粒ファシス F である。

粗粒ファシス A は遮蔽層と接しており、遮蔽層では粗粒ファシス A の分布に沿って圧力が上昇しやすい。特に粗粒ファシス A の直下に坑井を配置すると、遮蔽層下端（レイヤー11）での圧力上昇が大きくなり、スレッショルド圧を超えてしまうため、粗粒ファシス A の直下は坑井配置の候補から除外した。またエリア B の貯留可能域では地層傾斜により、圧入した CO_2 が傾斜に沿って構造上位に移動する傾向にある。このため CO_2 の移動を考慮した構造的な位置や浸透率等を勘案し、坑井配置を検討した。圧入区間については、貯留層上部、下部、全区間の各ケースでシミュレーションを行い、圧入区間の影響を確認した。

椎谷層 PL1 ユニットへの 5 坑の圧入井配置について、図 4.13-11 に示すように、ケース 1 として PL1 ユニットの粗粒ファシス C1 の東部に 2 坑、西部に 3 坑の圧入井配置を想定した。また、ケース 2 として、東部に 3 坑、西部に 2 坑の圧入井を配置した。なお図 4.13-11 における黄色の領域が粗粒ファシス C1 であり、青色の領域は細粒ファシス F である。

ケース 1 については、貯留層上部区間、下部区間、全区間での圧入の影響を確認し、ケース 2 については上部区間と下部区間で圧入した場合の影響を確認した。各ケースにおけるシミュレーション結果の一覧を表 4.13-10 に示し、各シミュレーションの結果を図 4.13-12～図 4.13-16 に示す。もっとも圧力上昇の少ないケース 1-2 でも圧入停止後、溶存 CO_2 がファシス F に比べて浸透率のよいファシス A を経由して遮蔽層に浸透する。椎谷層に 5 坑の圧入井を配置した場合、遮蔽層下端での圧力上昇がスレッショルド圧を超過するか、溶存 CO_2 が断層エリアに到達するか、あるいは十分な圧入レートを確保できない等、何かしらの制限条件を満たせない結果となった。仕上げ区間による CO_2 挙動の特徴を以下に示す。

1) 貯留層区間上部での圧入は遮蔽層下端での圧力が上昇しやすく、スレッショルド圧の制限を超える。
2) 貯留層区間下部からの圧入では坑底圧の制限により圧入レートを確保できない。またスレッショルド圧の制限をわずかに超える。
3) 全区間圧入では全体的に坑底圧がやや低めとなるものの遮蔽層下端圧力がスレッショルド圧の制限を超える。

また、粗粒ファシス A の分布する PL2 ユニットに圧入井を配置しない場合、坑井は 4.9 節で解釈された PL1 ユニットへの配置に限定されることから貯留層の分布や制限条件を考慮すると椎谷層に 5 坑の圧入井を設置する想定では 0.88 億 t-CO_2 までの圧入（わずかにスレッショルド圧を超過）しかできないと判断した。

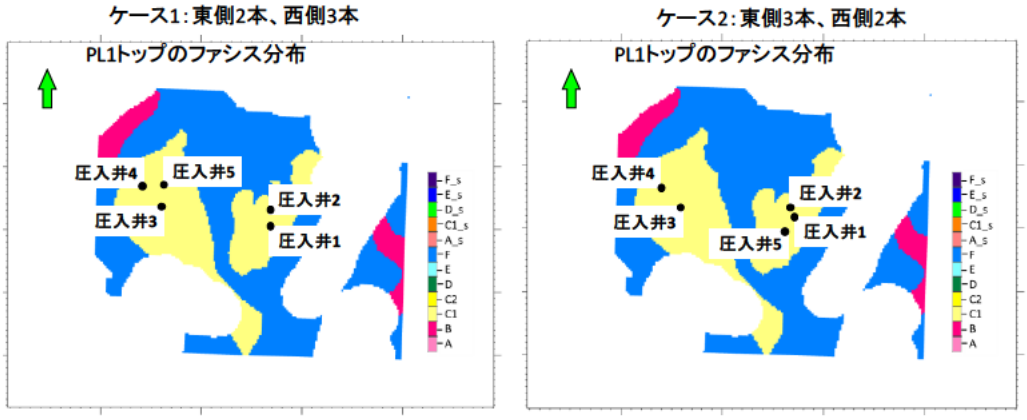


図 4.13-11　エリア B における坑井配置（断層エリア非表示）

表 4.13-10　椎谷層に 5 坑井配置した場合のシミュレーション結果一覧

ケース名	坑井数	圧入区間	坑井配置	計算結果	圧入量
ケース1	椎谷層PL1 上部に5本	16～19	PL1東側に2本 PL1西側に3本	・遮蔽層下端でスレッショルド圧を超える。 ・東側に圧入量が偏り、CO_2が断層エリアに到達する。	東側：6,200万t 西側：3,800万t
ケース1-2	椎谷層PL1 下部に5本	20～23	PL1東側に2本 PL1西側に3本	・西側3本は坑底圧の制限により圧入レートを確保できない。 ・東側では遮蔽層下端でスレッショルド圧を超えるが、圧力の上昇は少ない。	東側：6,500万t 西側：2,300万t
ケース1-3	椎谷層PL1 全区間に5本	16～23	PL1東側に2本 PL1西側に3本	・遮蔽層下端でスレッショルド圧を超える。 ・他のケースに比べて、坑底圧がやや低めであり、圧入しやすい傾向にある。	東側：5,900万t 西側：4,000万t
ケース2	椎谷層PL1 上部に5本	16～19	PL1東側に3本 PL1西側に2本	・東側への圧入量が過大になり、遮蔽層下端でスレッショルド圧を超える。 ・溶解CO_2が断層エリアに到達する。	東側：6,800万t 西側：3,100万t
ケース2-2	椎谷層PL1 下部に5本	20～23	PL1東側に3本 PL1西側に2本	・西側3本のケース1-2と同様に、西側での圧入量を確保できない。 ・東側に圧入が偏り、遮蔽層下端でスレッショルド圧を超える。	東側：7,800万t 西側：1,800万t

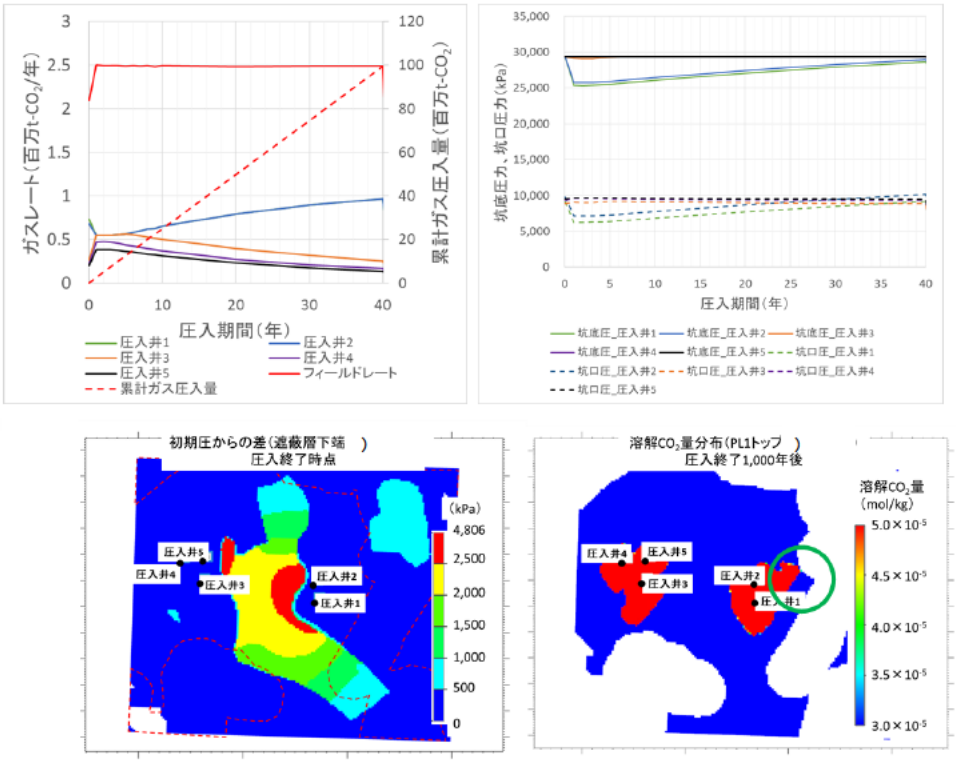


図 4.13-12　ケース 1（上部圧入）のシミュレーション結果

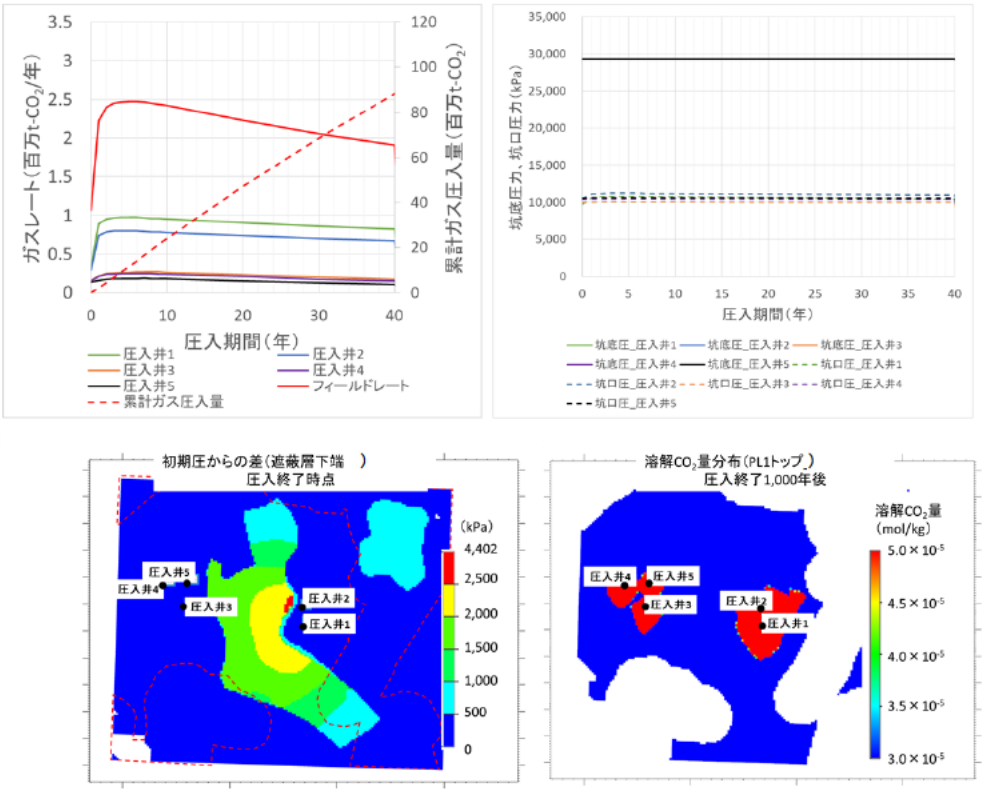


図 4.13-13　ケース 1-2（下部圧入）のシミュレーション結果

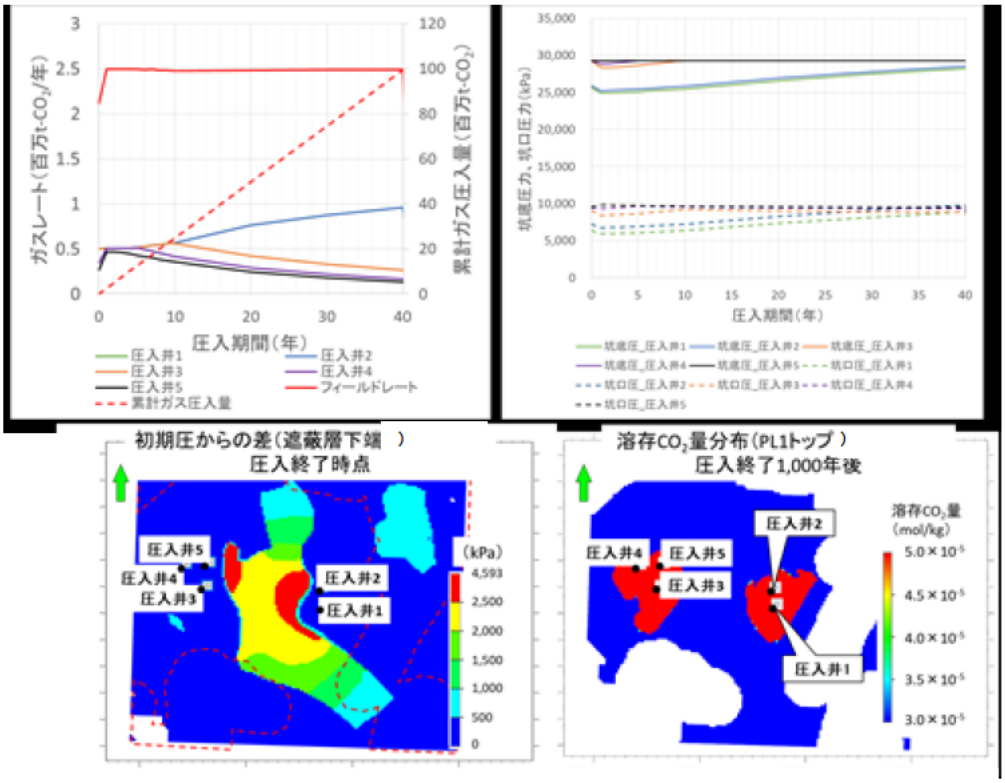


図 4.13-14　ケース 1-3（全区間圧入）のシミュレーション結果

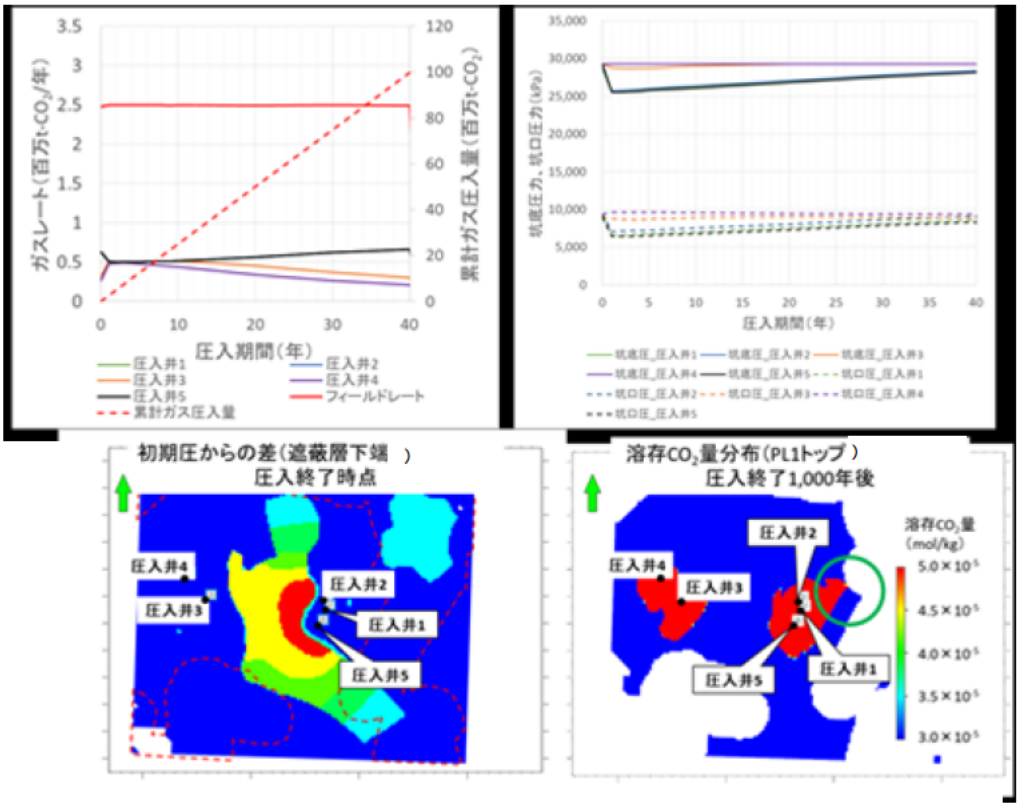


図 4.13-15　ケース 2（上部圧入）のシミュレーション結果

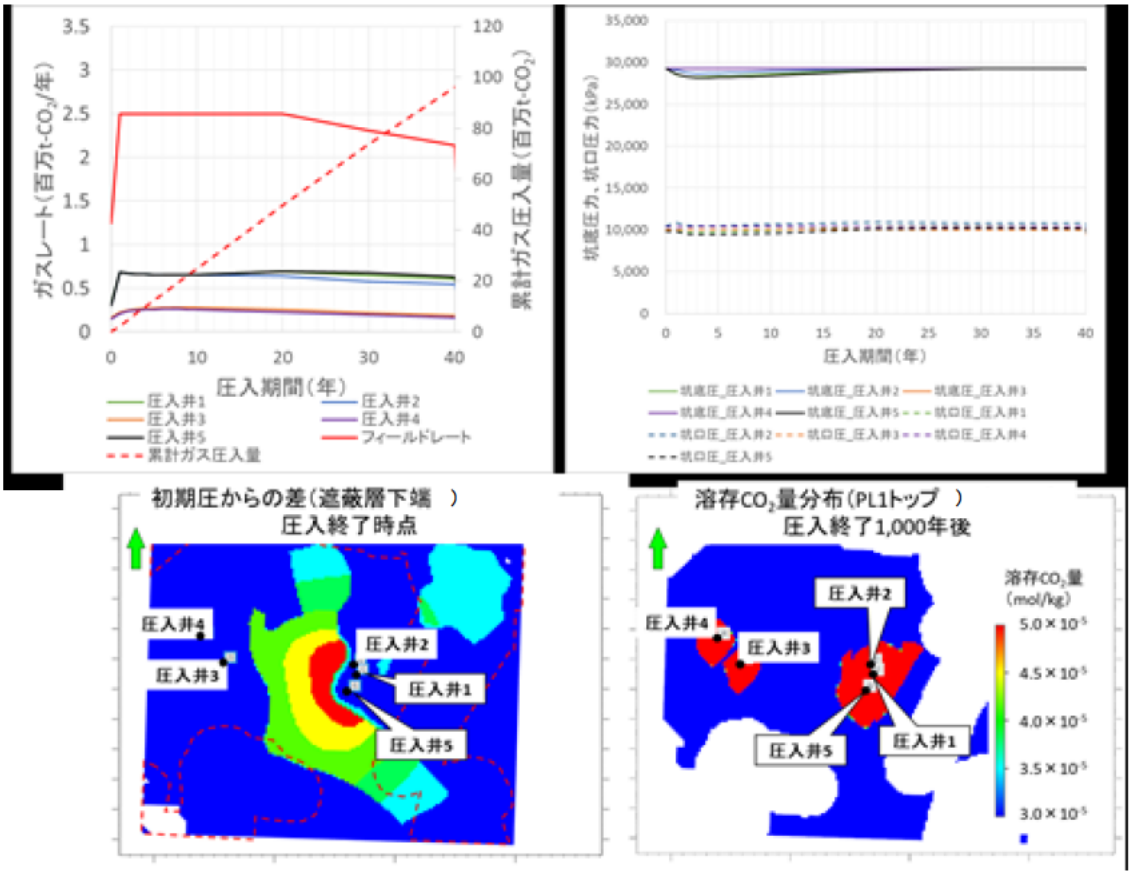


図 4.13-16　ケース 2-2（下部圧入）のシミュレーション結果

②　椎谷層と上部寺泊層を合わせた坑井配置の検討

椎谷層のみで 1 億 t-CO_2 の圧入は困難であったため、不確実性はあるものの上部寺泊層も貯留可能であると想定し、椎谷層と上部寺泊層を合わせた坑井配置について検討した。

その結果、複数のケースで制限条件を満たし、かつ 40 年で 1 億 t-CO_2 の圧入が可能であった。椎谷層と上部寺泊層への坑井配置は、図 4.13-17 に示すように、椎谷層 PL1 ユニットの東西に 2 坑ずつ、上部寺泊層東部に 1 坑の圧入井を配置するケース 1、ケース 1 の坑井位置、坑底圧の参照深度、圧入区間を修正したケース 2、図 4.13-18 に示すように椎谷層 PL1 ユニットに 3 坑、上部寺泊層に 2 坑の圧入井を配置したケース 3 の三つのケースを想定してシミュレーションを実施した（表 4.13-11）。シミュレーション結果としてはケース 2 と 3 がどちらも制限条件を満たし、ケース 3 のほうが遮蔽層下端の圧力上昇が少ない結果となった。しかしながら、上部寺泊層は異常高圧層であり、椎谷層との圧力シールのメカニズムについても不確実性が高いため、上部寺泊層へ配置する坑井数は少ないほうが妥当であると判断した。したがって、エリア B を貯留エリアとして選択し、椎谷層に 4 坑と上部寺泊層へ 1 坑の圧入井を配置するケース 2 をベースケースとして選定した。

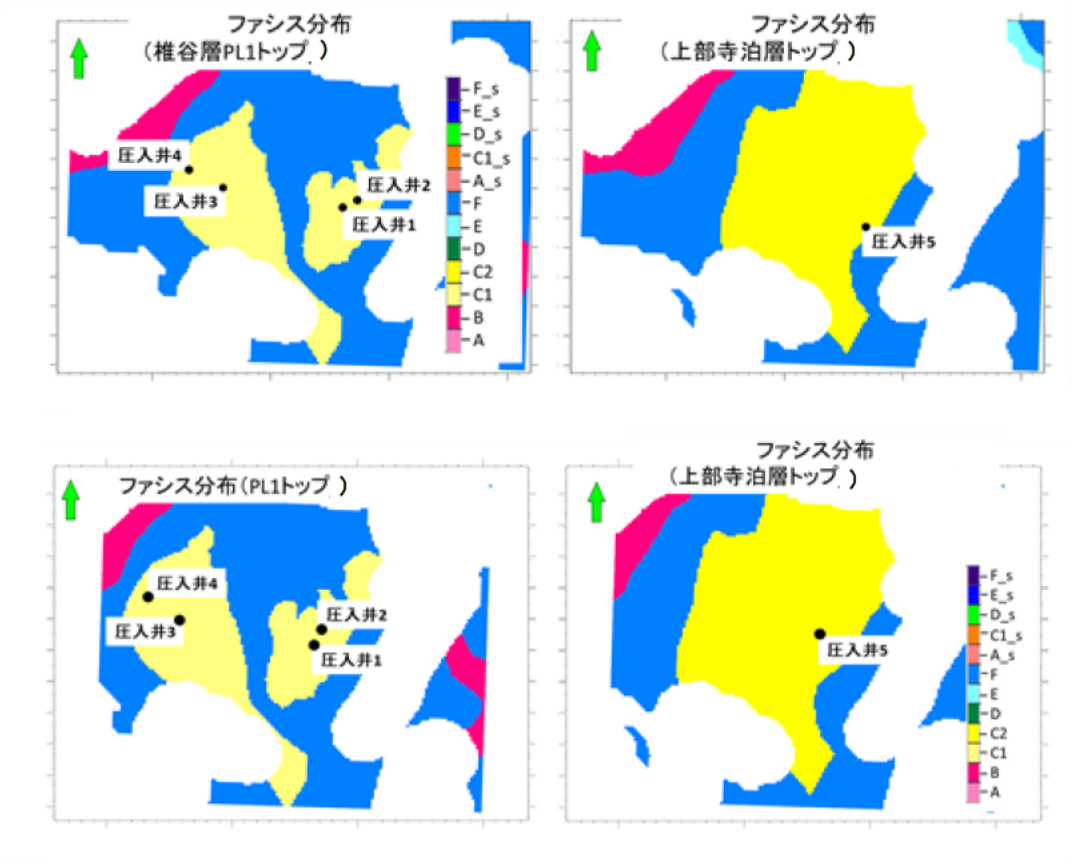


図 4.13-17　ケース 1（上図）およびケース 2（下図）の坑井配置（断層エリア非表示）

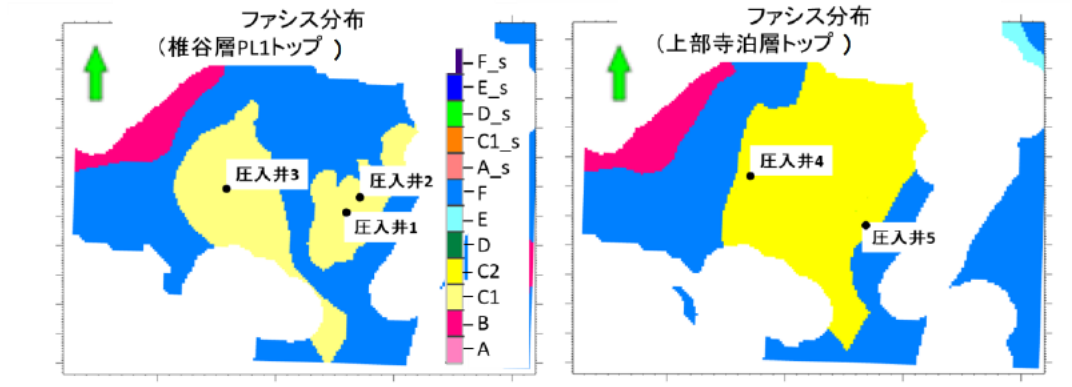


図 4.13-18　ケース 3 の坑井配置（断層エリア非表示）

表 4.13-11　坑井配置・圧入区間と計算結果一覧

ケース名	特徴	坑井数	坑井位置	圧入区間	計算結果
ケース1	椎谷層に4本、上部寺泊層に1本設置	椎谷層PL1：4本（圧入井1～4） 上部寺泊層：1本（圧入井5）	圧入井1：(118, 65) 圧入井2：(121, 72) 圧入井3：(65, 73) 圧入井4：(52, 82) 圧入井5：(116, 69)	圧入井1：20～23 圧入井2：20～23 圧入井3：16～19 圧入井4：16～19 圧入井5：24～27	・遮蔽層下端でスレッショルド圧を僅かに超える（72kPa）。 ・遮蔽層下部に微量の溶解CO_2が浸透する。
ケース2	坑井位置・BHP深度・圧入区間などを修正	椎谷層PL1：4本（圧入井1～4） 上部寺泊層：1本（圧入井5）	圧入井1：(116, 65) 圧入井2：(121, 71) 圧入井3：(65, 73) 圧入井4：(51, 81) 圧入井5：(120, 59)	圧入井1：17～23 圧入井2：17～23 圧入井3：16～23 圧入井4：16～23 圧入井5：24～31	・制限条件を全て満たす。 ・遮蔽層下部に微量の溶解CO_2が浸透する。
ケース3	椎谷層に3本、上部寺泊層に2本設置	椎谷層PL1：3本（圧入井1～3） 上部寺泊層：2本（圧入井4・5）	圧入井1：(116, 65) 圧入井2：(121, 71) 圧入井3：(65, 73) 圧入井4：(71, 78) 圧入井5：(120, 59)	圧入井1：17～23 圧入井2：17～23 圧入井3：16～23 圧入井4：24～31 圧入井5：24～31	・制限条件を全て満たす。 ・ケース2よりも遮蔽層下端の圧力上昇は少ない。 ・遮蔽層下部に微量の溶解CO_2が浸透する。

(6)　ベースケースの計算結果

リスク感度分析などの以降のシミュレーションを進めるためのベースケースとして選択したケース 2 のシミュレーション結果について以下に述べる。

図 4.13-19 に圧入期間中の坑底圧と坑口圧の推移、図 4.13-20 に圧入レートおよび累計圧入量の推移を示す。

図 4.13-19 および図 4.13-20 に示すように圧入初期段階においてすぐに坑底圧制御にかかり、各坑井において圧入レートが調整される。圧入開始から 5 年程度で坑底圧の制限により、椎谷層 PL1 の西部に配置した圧入井 3、4 の圧入レートが低下し、圧入開始から 20 年ほどで、上部寺泊層に圧入している圧入井 5 も坑底圧の制限により圧入レートが低下する。椎谷層 PL1 東部に配置した圧入井 1、2 では、他の坑井でレートが低下した分、圧入レートが増加し、フィールド全体では年間 250 万 t-CO_2 で 40 年間の圧入が可能である。坑口圧は坑底圧の高い圧入井 5 で 13 MPa 程度ともっとも高くなるが、他の 4 坑の坑井では 8 MPa 程度で推移している。

①　貯留層の圧力挙動

図 4.13-21 に示すように、各坑井位置における遮蔽層下端圧力の初期圧からの差圧は、スレッショルド圧 2.50 MPa を超えていないものの圧入停止後に増加する傾向を示す。なお圧入井 5 は上部寺泊層に圧入しており、椎谷層との境界には圧力シールを設定していることから、スレッショルド圧は考慮されないため、図には含めていない。

貯留層の圧力については、圧入している PL1 ユニットの上部には、貯留層の PL2 ユニットが分布するが、坑井位置の直上に分布している細粒ファシス F では浸透率が非常に低いため、PL2 ユニットの粗粒ファシス A の部分の圧力が上昇しやすくなる。また、PL2 ユニットは遮蔽層と接しているため、粗粒ファシス A を介して上昇した遮蔽層以浅の圧力が徐々

に伝播していくため、圧入停止後に遅れて圧力が増加すると考えられる。

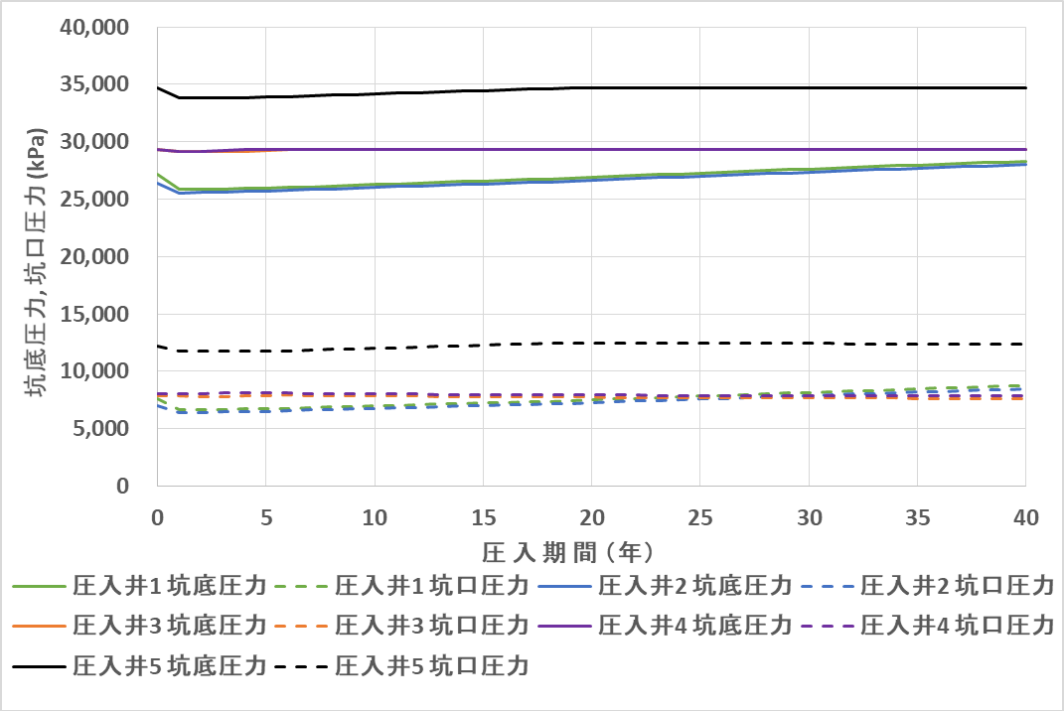


図 4.13-19　圧入期間中の坑底圧と坑口圧の推移

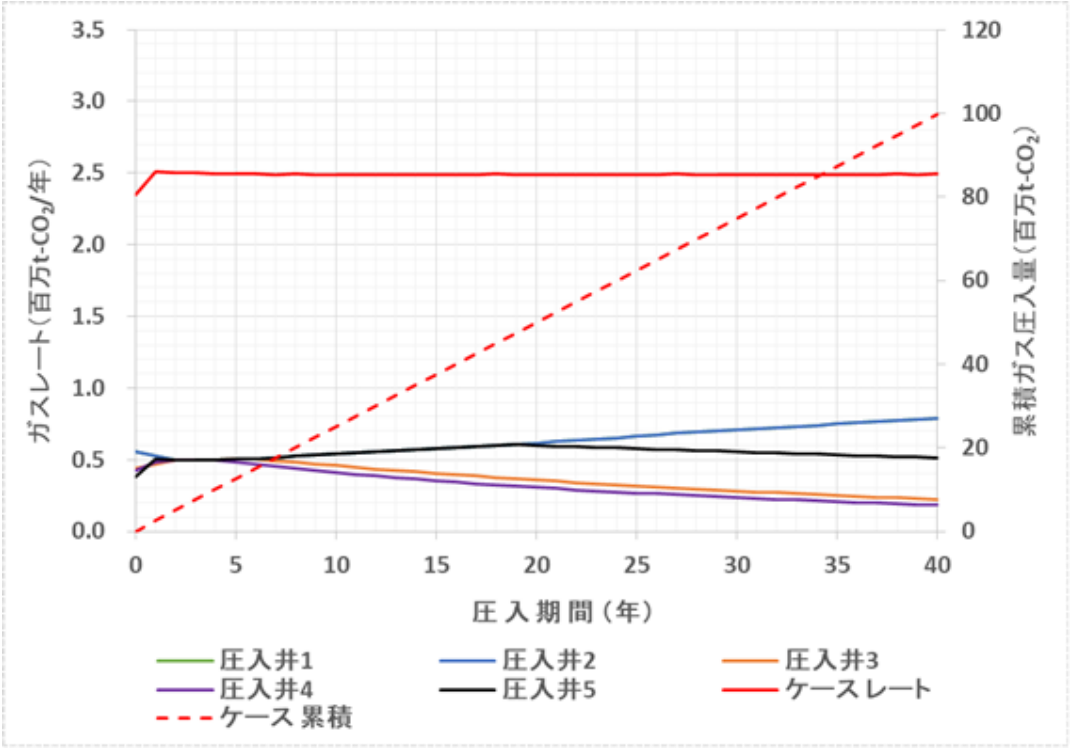


図 4.13-20　圧入レートおよび累計圧入量の推移

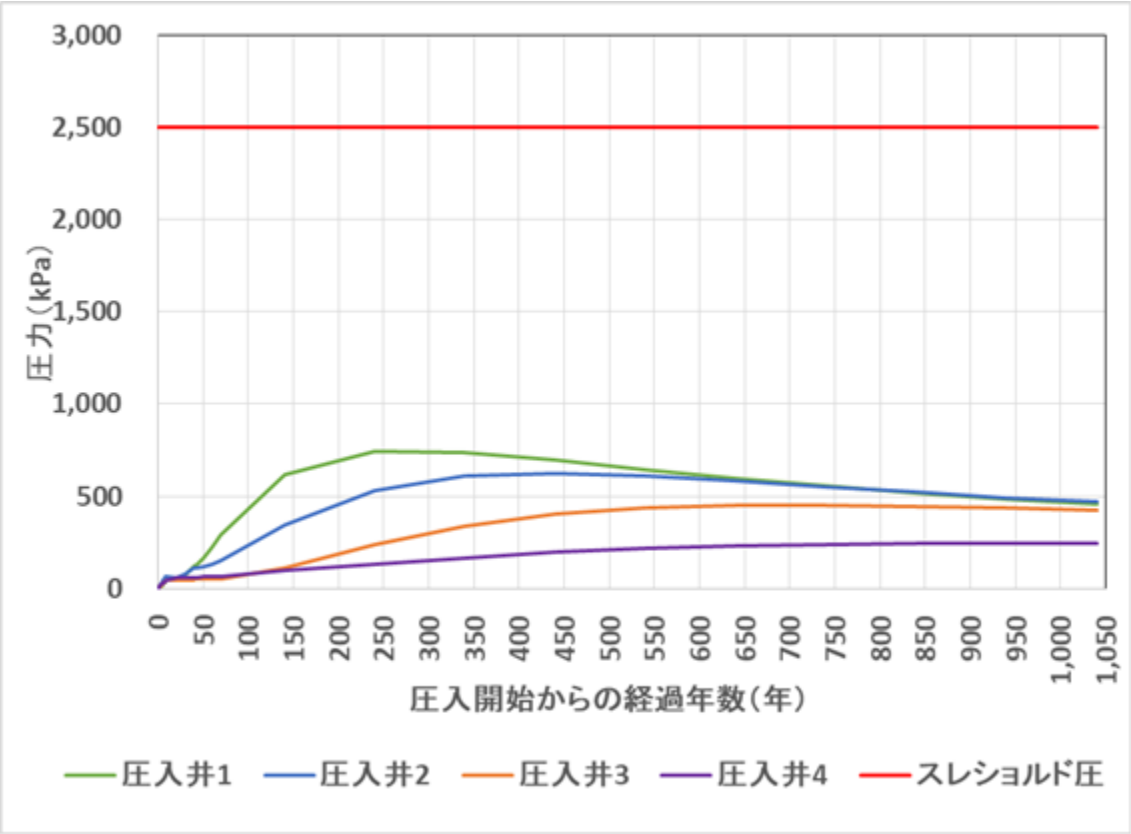


図 4.13-21　各圧入井における遮蔽層下端の圧力挙動（初期圧からの差）

②　CO_2 飽和率の分布

CO_2 飽和率は時間経過とともに構造の傾斜に沿って広がる。CO_2 飽和率は圧入停止までは坑井中心に高飽和率のエリアが広がるが、圧入井 1、2 では 100 年後には構造的に高い東部へ移動し、ガス飽和率が高くなる。圧入井 3、4 では 100 年後から徐々に構造的に高い南側へ移動する。

③　溶存 CO_2 量の分布

溶存 CO_2 は圧入停止 1,000 年後も断層エリアから離れて分布する。また、時間経過とともに超臨界 CO_2 分布域を取り囲むように溶存 CO_2 が広がる。CO_2 プルームの外周では溶存 CO_2 は低濃度であり、新しく CO_2 が溶存可能な水相との接点となる。また、圧入終了 1,000 年後には溶存 CO_2 を含んだ水相が重くなり、重力によって氷柱状に下方に移動する。

④　貯留形態の割合推移

図 4.13-22 に圧入開始より圧入停止 1,000 年後までの圧入した CO_2 の貯留形態割合の推移を示す。CO_2 は超臨界状態で圧入され、一部が水相に溶存し溶存 CO_2 となるが、溶存しない超臨界 CO_2 は貯留層の孔隙を移動する。移動する過程でその一部が孔隙から移動せず

に取り残され残留 CO_2 となる。残留 CO_2 以外の超臨界 CO_2 は、移動しうる超臨界 CO_2 として存在する。圧入停止後の溶存 CO_2 割合は 20%程度であり、圧入停止直後は超臨界 CO_2 の割合が高く、圧入停止後からは溶存 CO_2 が徐々に増加していく。また、残留 CO_2 割合が高く、超臨界 CO_2 のほとんどが残留 CO_2 としてトラップされている結果となった。これは貯留可能域が傾斜構造であり、圧入した CO_2 が構造の傾斜に沿って移動したためと考えられる。

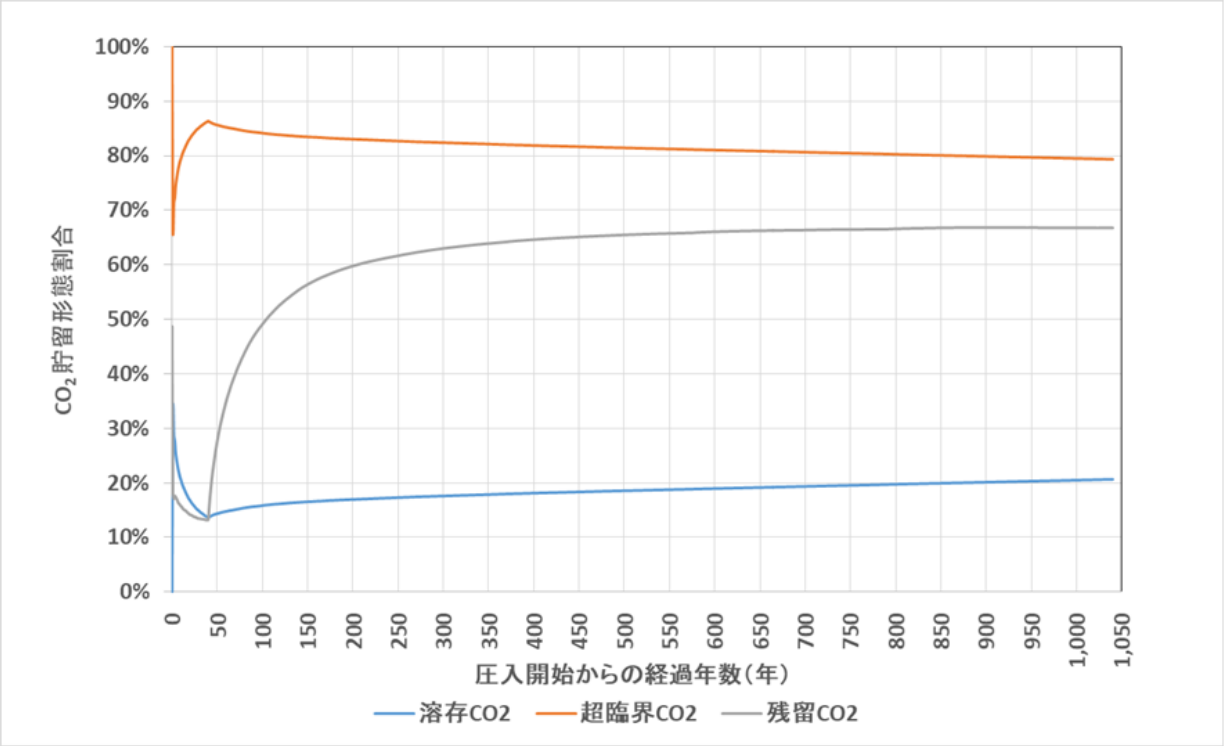


図 4.13-22　圧入した CO_2 の貯留形態の推移

4.13.4　最小坑井数、最大圧入レートおよび最大圧入量の検討

佐渡西方沖の貯留層に対する CO_2 の圧入は、5 坑の圧入井で 40 年間に 1 億 t-CO_2 の圧入・貯留を行うためには椎谷層に加え、上部寺泊層にも圧入を行う必要があるとする結果を得た。圧入井設備の最適化を検討するため、40 年間で 1 億 t-CO_2 の圧入・貯留を実施する際の最小の圧入井数、最大圧入レート、さらに最大圧入レートを基にした最大圧入量を検討したが、4.13.1 概要に記載したようにいずれのケースも制限条件を満たすことはできなかったため、詳細な説明は割愛する。したがってリスク感度分析についてはベースケースを使って検討することとした。

4.13.5　リスク感度分析

前述の圧入井設備の最適化の検討にて 5 坑井で約 1 億 t-CO_2 の圧入・貯留が可能であるとする結果を得た。ただし現状は調査井掘削前であり、地質的な不確実性を考慮すると 1) 地層圧、2) 浸透率、3) Kv/Kh、4) 塩分濃度、の四つが圧入量に影響を与える可能性の大きいパラメータと考えられるため、表 4.13-12 に示すように四つのパラメータの値を変化させ、CO_2 圧入量や圧入状況、貯留形態に与える影響について比較検討を行い、圧入量や CO_2 の分布等がどのように変化するかリスク感度分析を行った。さらに、各感度分析結果において、累計圧入量が減少するパラメータを組み合わせたワーストケースのシミュレーションを行った。

表 4.13-12　感度分析ケース設定

パラメータ	小	ベース	大
地層圧	（-15%） 16.210 MPa 23.885 MPa 31.926 MPa	19.070 MPa(1,888 m) 28.100 MPa(2,330 m) 37.560 MPa(2,716 m)	（+15%） 21.931 MPa 32.315 MPa 43.194 MPa
浸透率	0.5 倍	深度の関数	2 倍
Kv/Kh （垂直浸透率／水平浸透率）	0.5 倍	表 1.13-2 のとおり	3 倍
塩分濃度	（-20%） 22,400 ppm	28,000 ppm	（+20%） 33,600 ppm
ワーストケース	地層圧(大)＋浸透率(小)＋Kv/Kh(小)＋塩分濃度(大)		

(1)　地層圧を変化させたケース

地層圧を小と大に変化させたケースの各坑井の坑底圧を図 4.13-23 に、各坑井の圧入レートを図 4.13-24 にベースケースとともに示す。地層圧を大きくしたケースは、各坑井とも坑底圧の最大値で推移し、圧入レートは椎谷層 PL1 ユニット東部の圧入井 1、2 で 40～80 万 t-CO_2/年/坑で推移し、圧入井 3～5 では最大 3.5 万 t-CO_2/年/坑と非常に低い圧入レートに留まる。また、累計圧入量を見ると、地層圧（大）ケースでは 0.46 億 t-CO_2 となった。一方、地層圧（小）ケースでは各坑井とも圧入初期から 50 万 t-CO_2/年/坑での圧入が可能であり、累計圧入量は 1 億 t-CO_2 となった。また坑底圧はベースケースより低い圧力で推移し

た。椎谷層西側への圧入量が増加したことで、図 4.13-25 に示すように圧入停止時点において遮蔽層下端の圧力上昇がスレッショルド圧を超過している（最大 321 kPa）。また、溶存 CO_2 量分布は、椎谷層西側における溶存 CO_2 が、圧入停止 1,000 年後には超臨界 CO_2 の上限深度に到達している。

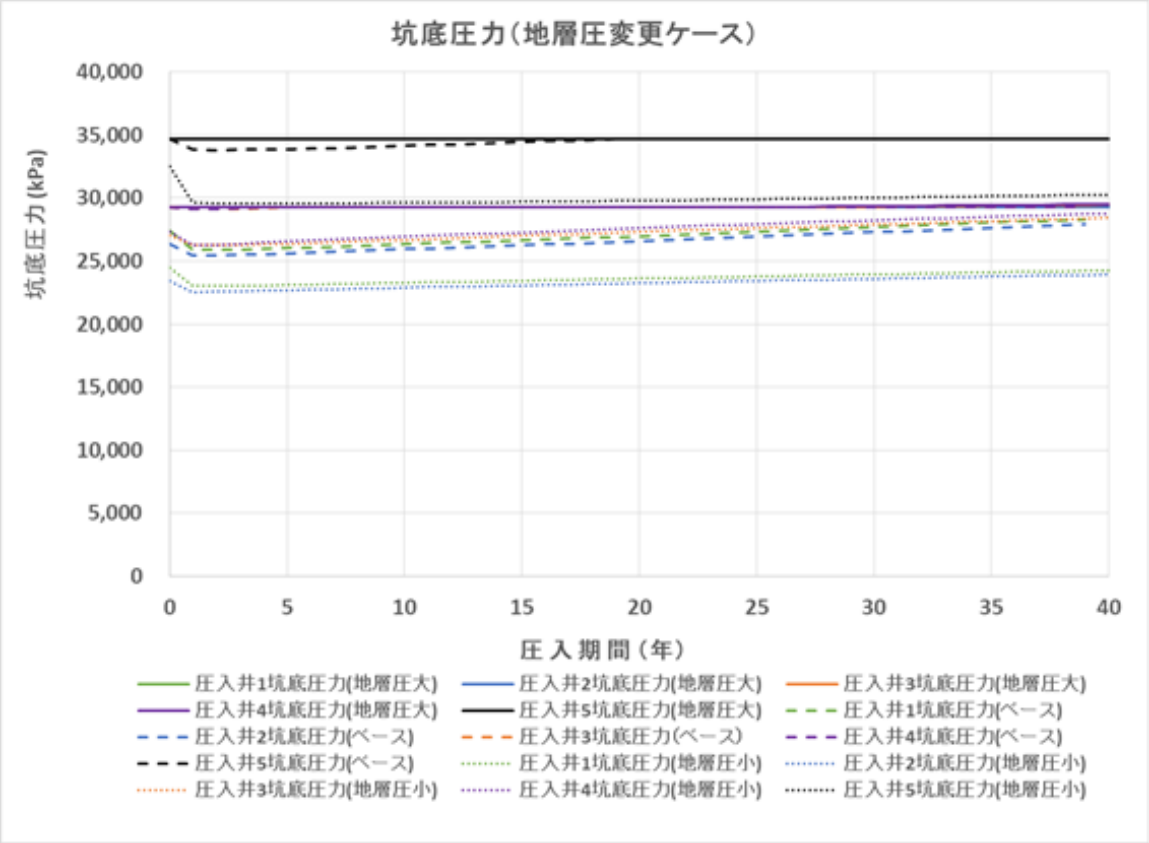


図 4.13-23　圧入期間中の坑底圧および坑口圧の推移

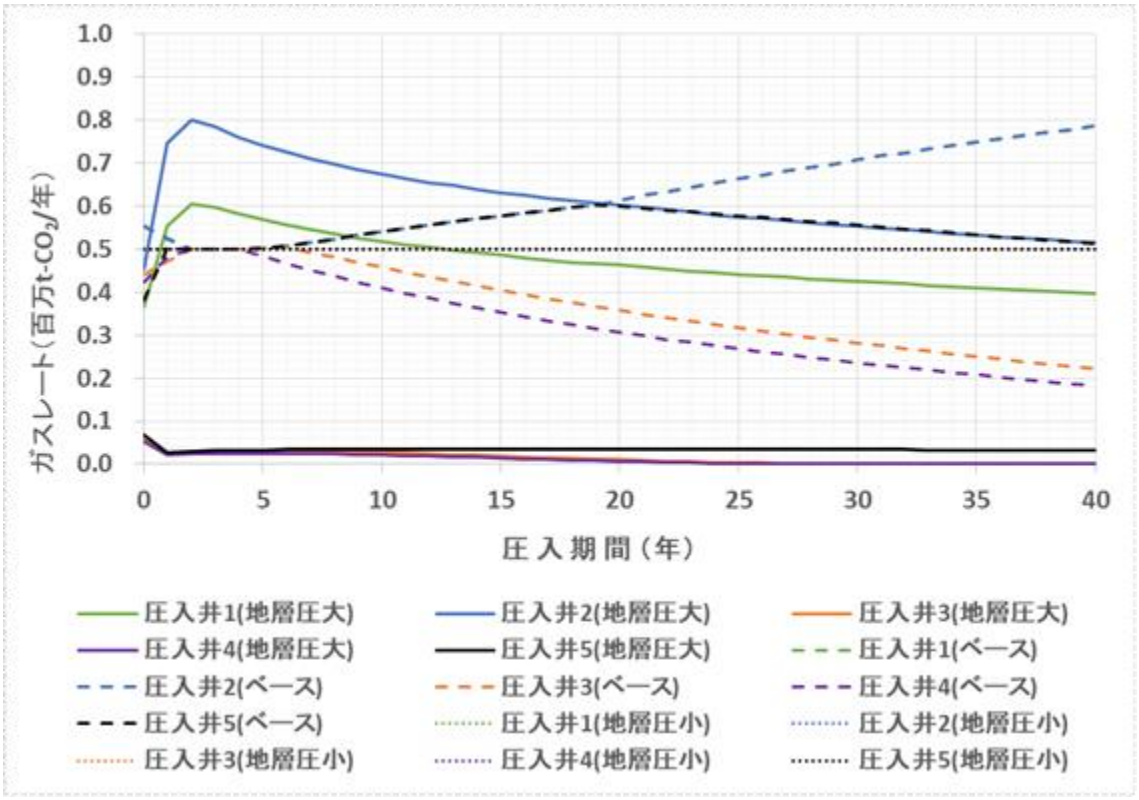
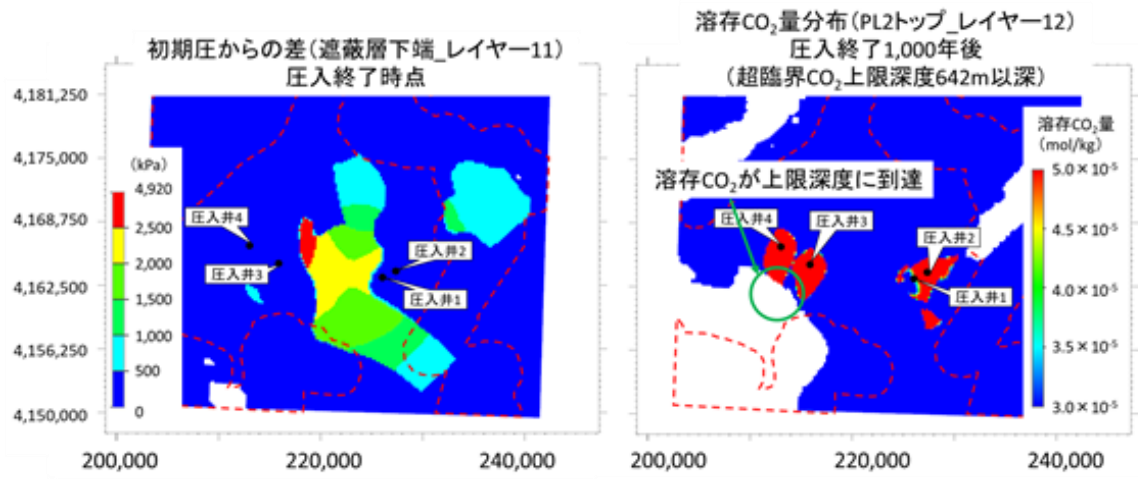


図 4.13-24　各坑井の圧入レートの推移



注）点線は断層からの 2.5 ㎞の範囲

図 4.13-25　地層圧（小）ケースの圧力変化と溶存 CO_2 量分布

①　圧力分布の比較（地層圧（小）と地層圧（大）ケース）

地層圧については、地層圧（大）ケースで圧力変化はベースケースより低い。圧力制御によりベースケースより圧入レートが少なく、累計圧入量も 0.46 億 t-CO_2 と非常に低い値であったためである。一方、地層圧（小）ケースでは椎谷層の特に西部で圧力が高くなる。こ

れはベースケースに比べて地層圧が小さいため、すべての坑井で 50 万 t/年/坑で圧入されたことで、椎谷層への累計圧入量が増加したためと考えられる。

② CO_2 飽和率分布の比較（地層圧（小）と地層圧（大）ケース）

地層圧の増加に対して圧入量が減少するため、CO_2 飽和率は地層圧（大）ケースでベースケースよりも飽和率の広がりも少なくなる傾向がみられ、各坑井を取り囲む CO_2 プルームが小さめになる。特に椎谷層西部および上部寺泊層の坑井でその現象が顕著である。一方、地層圧（小）ケースではベースケースから目立った違いはみられない。

③ 溶存 CO_2 量分布の比較（地層圧（小）と地層圧（大）ケース）

地層圧（大）ケースでベースケースよりも各坑井を取り囲む溶存 CO_2 の広がりも少なくなる傾向がみられる。特に椎谷層西部および上部寺泊層の坑井でその現象が顕著である。一方、地層圧（小）ではベースケースと比べて目立った違いはみられない。

④ 貯留形態割合の推移

図 4.13-26 に地層圧（大）ケースの、図 4.13-27 に地層圧（小）ケースの、圧入開始より圧入停止 1,000 年後までの、貯留層モデル内における圧入した CO_2 の貯留形態割合の推移を示す。地層圧（大）ケースでは溶存 CO_2 割合、残留 CO_2 割合はベースケースより増加している。地層圧が高いため、CO_2 の移動は抑制されるが圧入量が少ないこと等が影響していると考えられる。地層圧が高いため、また Henry の法則に則って CO_2 の溶存が促進されたためと考えられる。一方、地層圧（小）ケースでは溶存 CO_2 割合、残留 CO_2 割合はベースケースとほぼ同じ傾向となった。

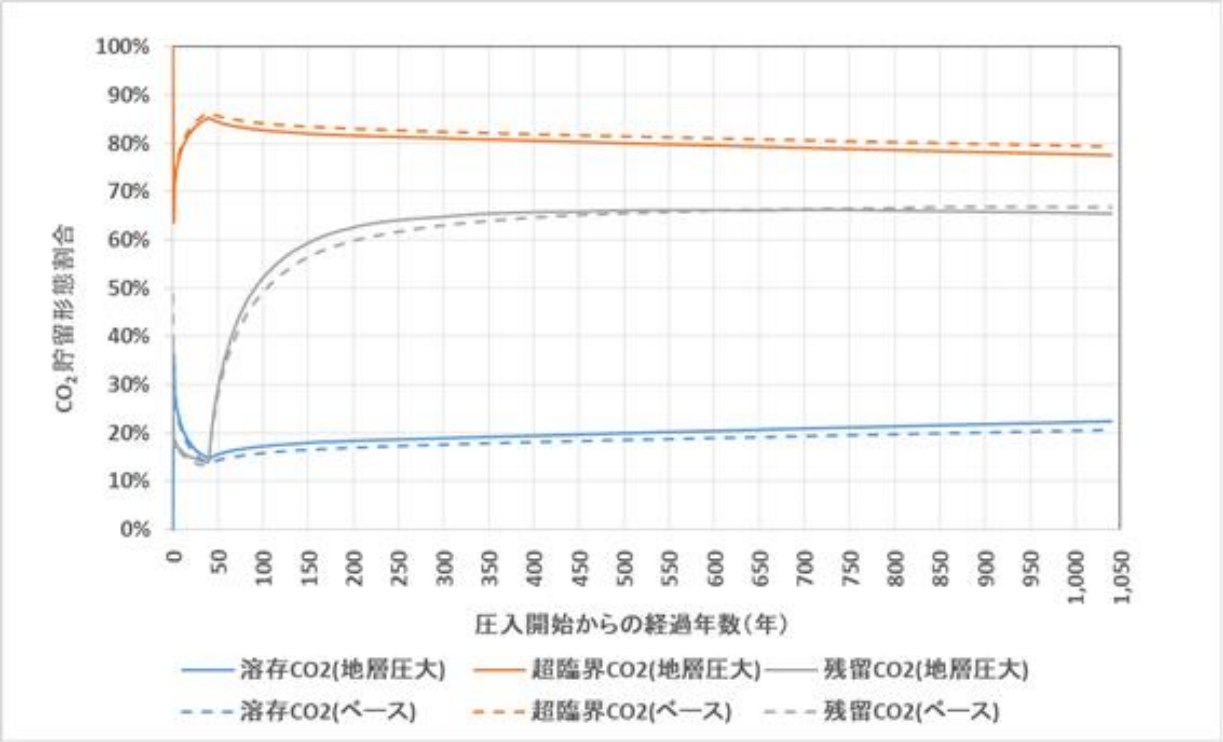


図 4.13-26　CO_2 貯留形態の経時変化　（地層圧（大））

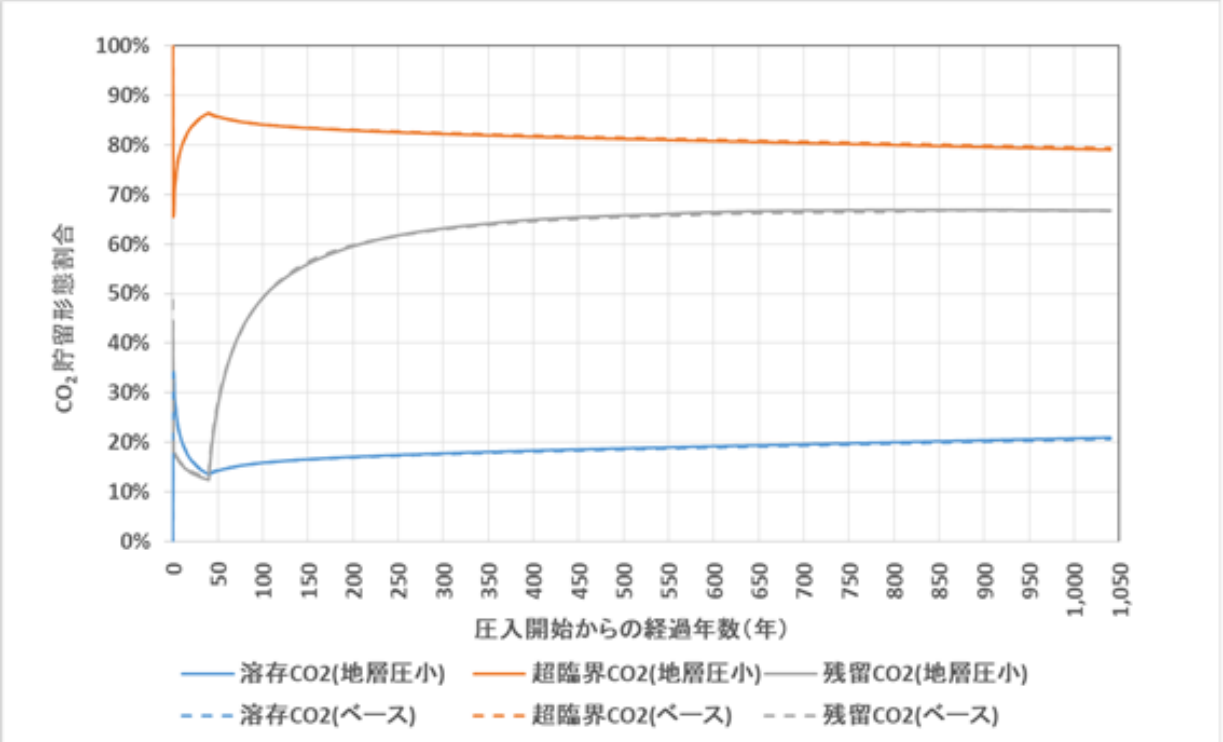


図 4.13-27　CO_2 貯留形態の経時変化（地層圧（小））

(2)　浸透率を変化させたケース

浸透率を小（0.5 倍）、大（2 倍）へと変化させたケースの各坑井の坑底圧を図 4.13-28 に、各坑井の圧入レートを図 4.13-29 に、ベースケースとともに示す。浸透率（小）ケースでは各坑井とも坑底圧の最大値で推移し、圧入井 3～5 では圧入レートが低くなり、その分圧入井 1、2 への圧入量が増加している。また、総圧入レート 250 万 t-CO_2/年でのレートは維持できず低下する結果となった。一方、浸透率（大）ケースでは、圧入井 3、4 のみ圧入期間後半に坑底圧の最大値に達し、圧入レートが低下する結果となったが、総圧入レート 250 万 t-CO_2/年の圧入は期間を通して維持できる結果となった。ただし、椎谷層西部への圧入量が増加したことで、図 4.13-30 に示すように圧入停止 1,000 年後には溶存 CO_2 が超臨界 CO_2 の上限深度に到達する。累計圧入量を見ると、浸透率（大）ケースで 1 億 t-CO_2 だが、浸透率（小）ケースでは 0.81 億 t-CO_2 まで低下した。

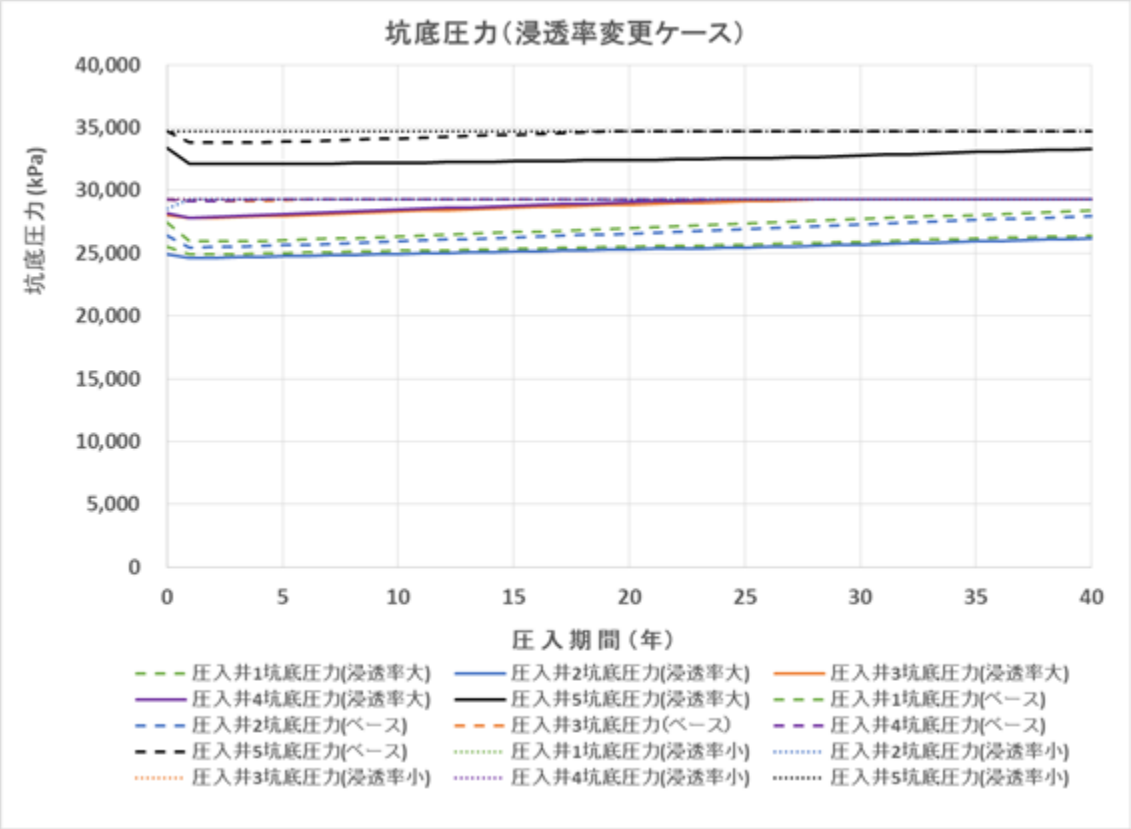


図 4.13-28　圧入期間中の坑底圧の推移

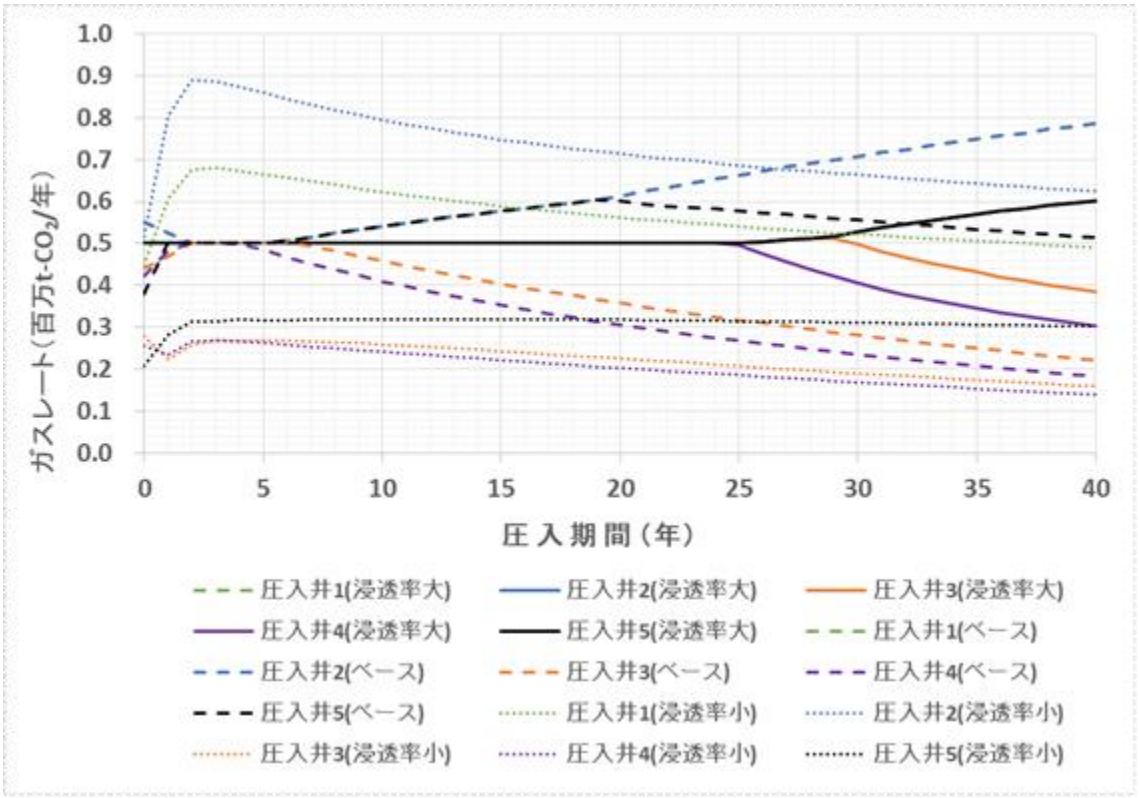
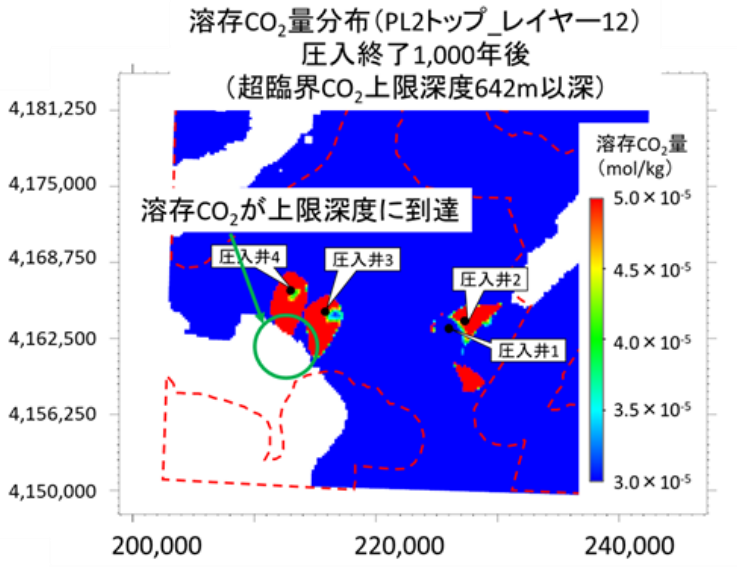


図 4.13-29　各坑井の圧入レートの推移



注）点線は断層からの 2.5 ㎞の範囲

図 4.13-30　浸透率（大）ケースの溶存 CO_2 量分布

①　圧力分布の比較（浸透率（小）と浸透率（大）ケース）

浸透率（小）のケースでは、圧入井１においてはベースケースより圧入停止時の坑井周辺

の圧力が増加し、その後圧力はベースケースより低下する。一方、圧入井 5 では圧力の増加は小さく、圧力が変化する範囲も小さくなる。これは坑底圧制御によりベースケースより圧入レートが少なく、累計圧入量も 0.81 億 t-CO_2 と低いためと考えられる。一方、浸透率(大)ケースではベースケースとほぼ同様の圧力挙動を示すが圧入停止後の坑井周辺の圧力分布範囲はベースケースより低くなる。浸透率が高い分、圧力の伝播が早くなったこと等が影響していると考えられる。

② CO_2 飽和率分布の比較（浸透率（小）と浸透率（大）ケース）

浸透率（小）ケースではベースケースよりも各坑井を取り囲む CO_2 プルームが小さくなる。また各坑井の断面図も同様の傾向を示しており、上部での CO_2 の移動がベースケースと比べて遅く、広がりが小さくなる。浸透率（大）ケースにおいては、ベースケースより早く CO_2 のプルームが広がる。また圧入井 1 において貯留層下部の CO_2 分布範囲はベースケースより小さくなる。圧入井 5 では貯留層上部の CO_2 分布範囲がベースケースより広がる。浸透率が高いため各坑井への圧入量がベースケースより均等になり、圧入井 1、2 への圧入量が減少し、圧入井 3～5 への圧入量が増加したためと考えられる。

③ 溶存 CO_2 量分布の比較（浸透率（小）と浸透率（大）ケース）

浸透率（小）ケースでは、特に圧入量の低下する圧入井 5 で溶存 CO_2 の広がりも少なくなる傾向がみられる。浸透率（大）ケースでは CO_2 飽和率と同様に圧入井 1 において貯留層下部の CO_2 分布範囲はベースケースより小さくなる。圧入井 5 では貯留層上部の CO_2 分布範囲がベースケースより広がる。また、圧入終了 1,000 年後には溶存 CO_2 を含んだ水相が重くなり、重力によって氷柱状に下方に移動している様子が、ベースケースより顕著となる。

④ 貯留形態割合の推移

図 4.13-31 に浸透率（小）ケースの、図 4.13-32 に浸透率（大）ケースの圧入開始より圧入停止 1,000 年後までの、貯留層モデル内における圧入した CO_2 の貯留形態割合の推移を示す。浸透率（小）ケースでは、残留 CO_2 割合は圧入開始から 300 年ころまではベースケースより低く推移する。浸透率が低いため、CO_2 の移動が抑制されたためと考えられる。浸透率（大）ケースでは溶存 CO_2 割合、残留 CO_2 割合がベースケースより増加している。これは浸透率が高いため CO_2 が広がりやすく特に圧入井 3～5 において CO_2 分布範囲がベースケースより広がったためと考えられる。

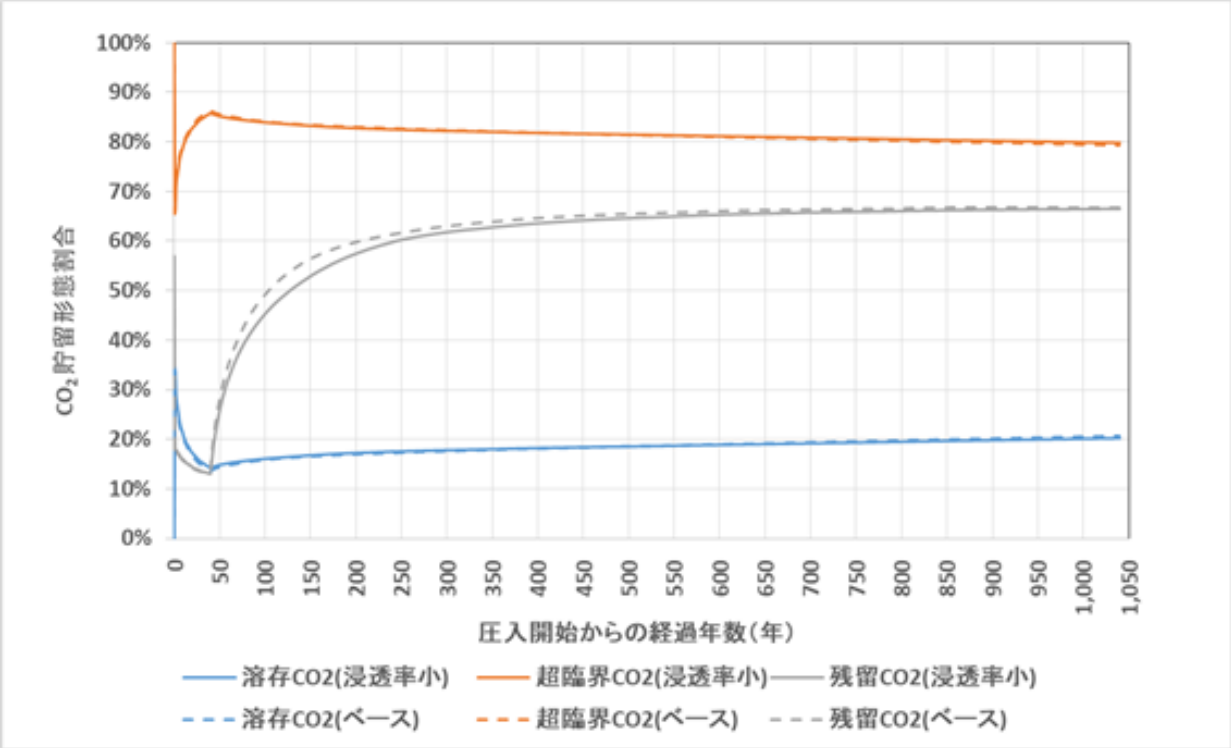


図 4.13-31　CO_2 貯留形態の経時変化（浸透率（小））

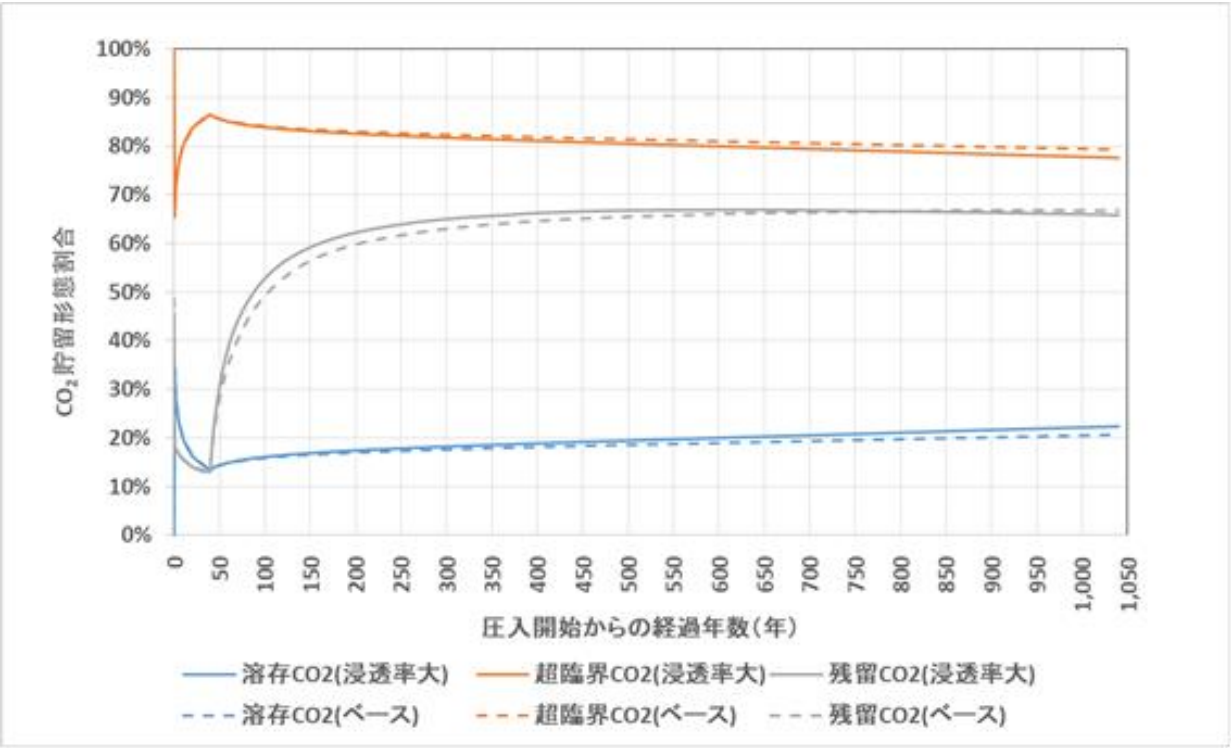


図 4.13-32　CO_2 貯留形態の経時変化（浸透率（大））

(3)　Kv/Kh を変化させたケース

Kv/Kh を小、大と変化させたケースの各坑井の坑底圧を図 4.13-33 に、各坑井の圧入レートを図 4.13-34 に、ベースケースとともに示す。両ケースともベースケースとほぼ同じ挙動を示すが、Kv/Kh（小）ケースでは各坑井とも坑底圧はベースケースよりわずかに高く、Kv/Kh（大）ケースでは各坑井とも坑底圧はベースケースよりわずかに低く推移する。圧入レートに関しては、Kv/Kh（小）のほうがレートの低下がやや早く、Kv/Kh（大）のほうがベースケースよりやや遅い結果となった。

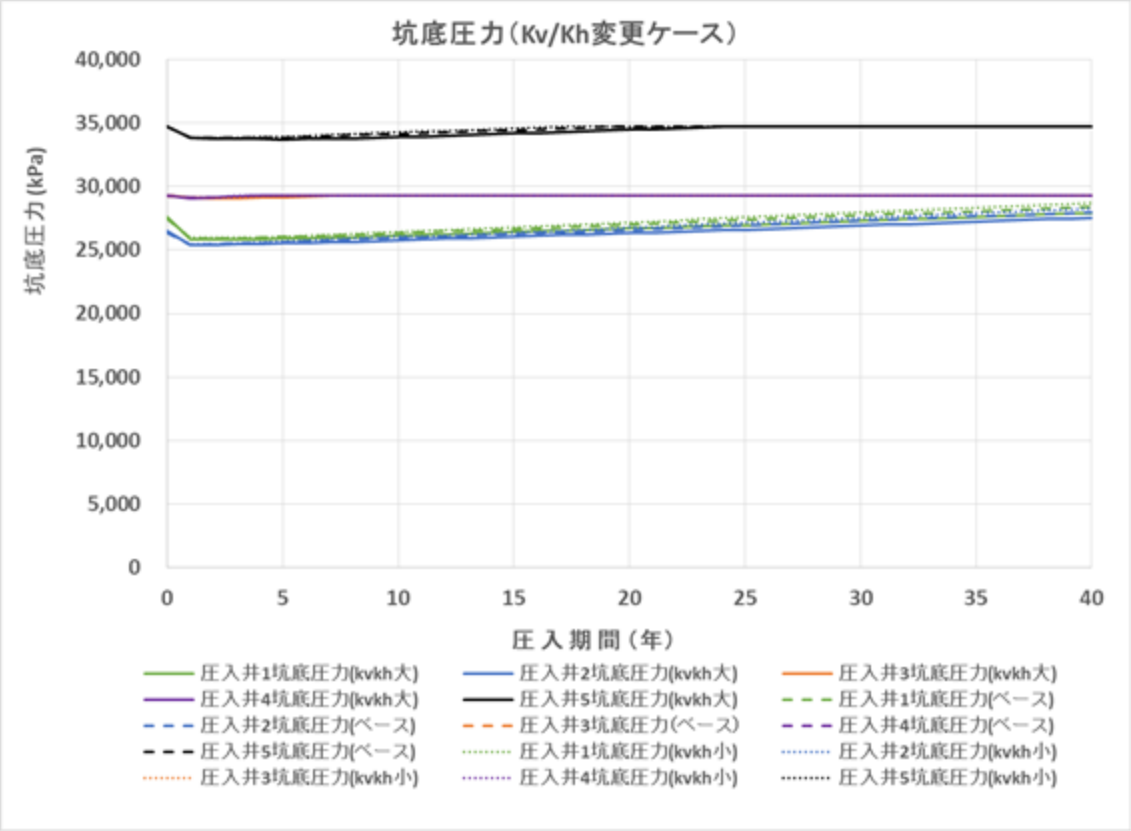


図 4.13-33　圧入期間中の坑底圧の推移

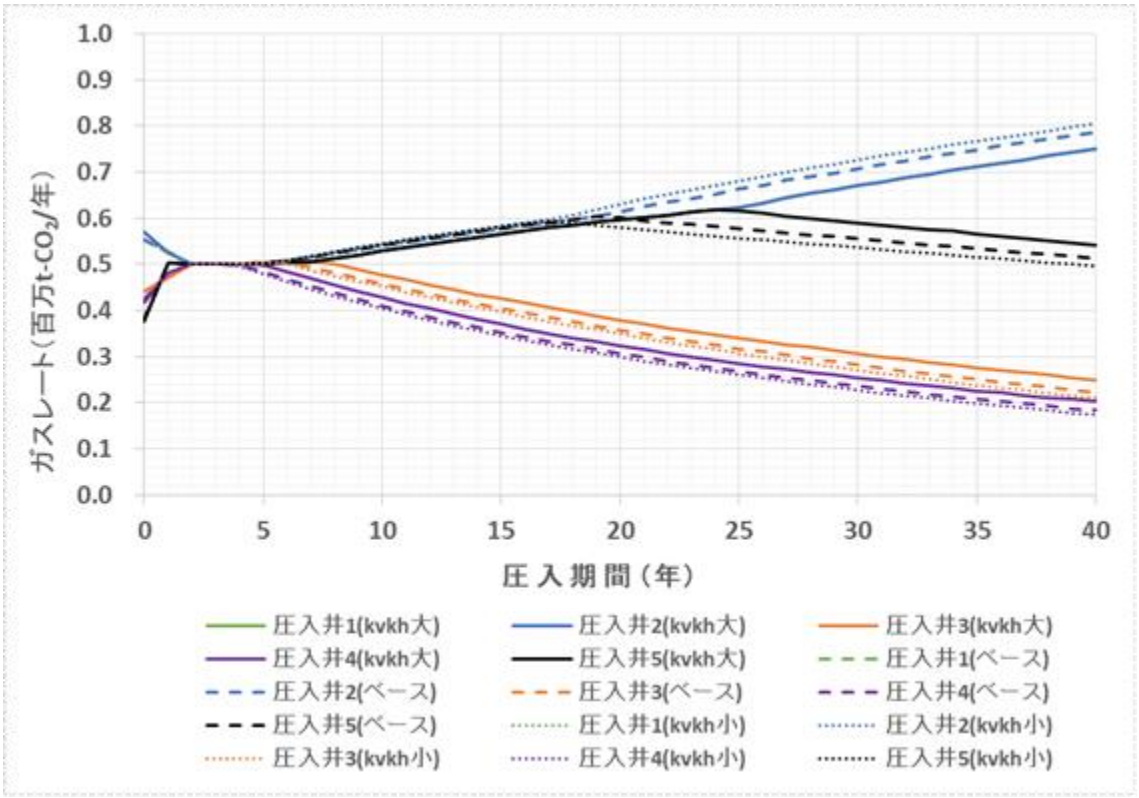


図 4.13-34　各坑井の圧入レートの推移

①　圧力分布の比較（Kv/Kh（小）と Kv/Kh（大）ケース）

Kv/Kh（大）ケースはベースケースとほぼ同じであったが Kv/Kh（小）ケースでは坑井周辺でやや高くなる。これは Kv/Kh が小さくなったことで、圧力の伝播が遅くなったためと考えられる。

②　CO_2 飽和率分布の比較（Kv/Kh（小）と Kv/Kh（大）ケース）

Kv/Kh（小）ケースでは CO_2 の広がりはベースケースとほぼ同じであるが、坑井周辺の CO_2 飽和率はベースケースより低めになる。これは Kv/Kh が小さくなったことで上部へ移動しにくくなり、ベースケースよりゆっくりと CO_2 が上部へ移動し、傾斜構造に沿って CO_2 が移動したためと考えられる。そのため、水平方向（A-A’方向）の CO_2 の広がりが上部レイヤーと深部のレイヤーで変化が少なくなる。一方、Kv/Kh（大）ケースではベースケースより坑井位置周辺に高飽和率の CO_2 が分布する。これは Kv/Kh が大きくなったことで、CO_2 が上部へ移動しやすくなったためである。

③　溶存 CO_2 量分布の比較（Kv/Kh（小）と Kv/Kh（大）ケース）

KKv/Kh（小）ケースでは CO_2 飽和率と同様な分布を示すが圧入終了 1,000 年後には溶存 CO_2 を含んだ水相が重くなり、重力によって氷柱状に下方への移動が、ベースケースより減

少する。一方、Kv/Kh（大）ケースでも CO_2 飽和率と同様な分布を示すが、圧入終了 1,000 年後には溶存 CO_2 を含んだ水相が重くなり、重力によって氷柱状に下方への移動が、ベースケースより顕著になる。

④　貯留形態割合の推移

図 4.13-35 に Kv/Kh（大）ケースの、図 4.13-36 に Kv/Kh（小）ケースの圧入開始より圧入停止 1,000 年後までの、貯留層モデル内における圧入した CO_2 の貯留形態割合の推移を示す。Kv/Kh（大）ケースでは、溶存 CO_2 割合と残留 CO_2 割合はベースケースより低くなった。これは、ベースケースより早い時期に CO_2 が上部へ移動したことで、CO_2 プルームの縁辺部における新しく溶存可能な水相との接点が減少したためと考えられる。

一方、Kv/Kh（小）ケースでは、溶存 CO_2 割合、残留 CO_2 割合はベースケースとほぼ同じだが若干多くなる。これは、CO_2 がゆっくりと上方へ移動するため、ベースケースに比べて水相と接する CO_2 が増えたためと考えられる。また、深部レイヤーにおいて CO_2 が水平方向に移動し、新しく溶存可能な水相との接点が多くなったためと考えられる。

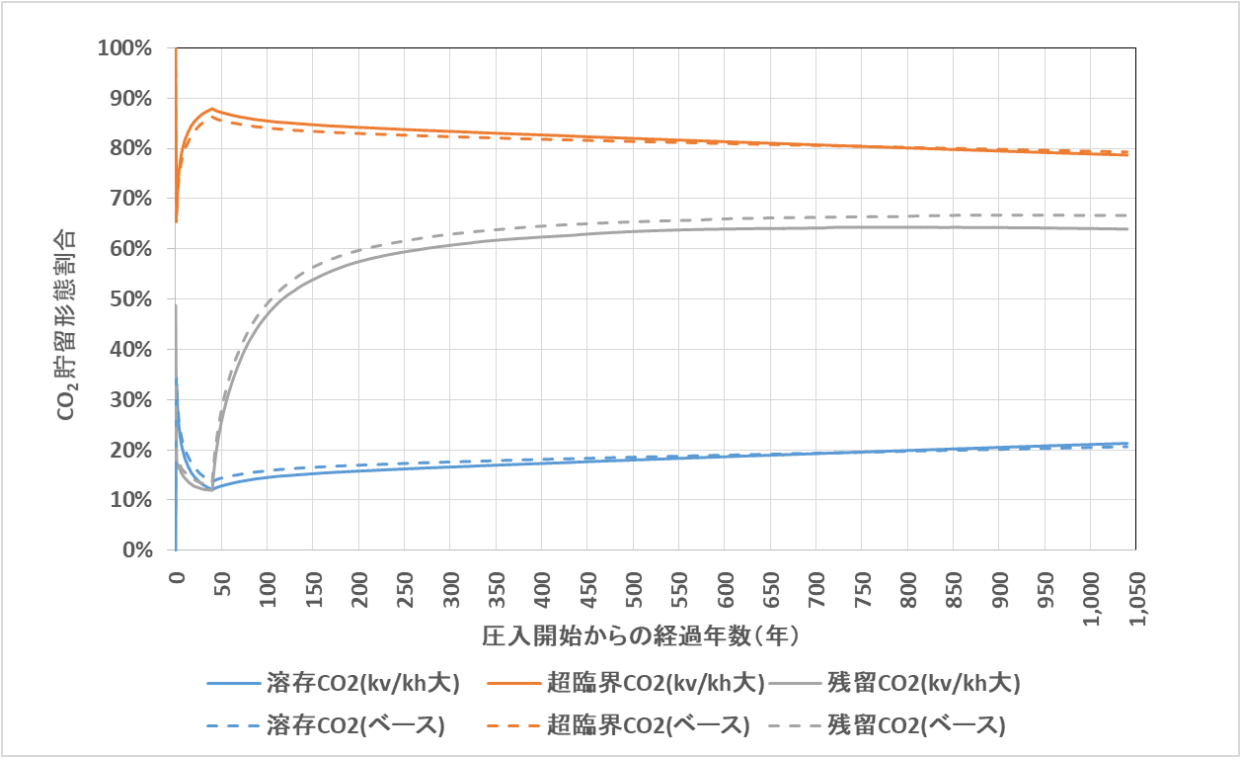


図 4.13-35　CO_2 貯留形態の経時変化（Kv/Kh（大））

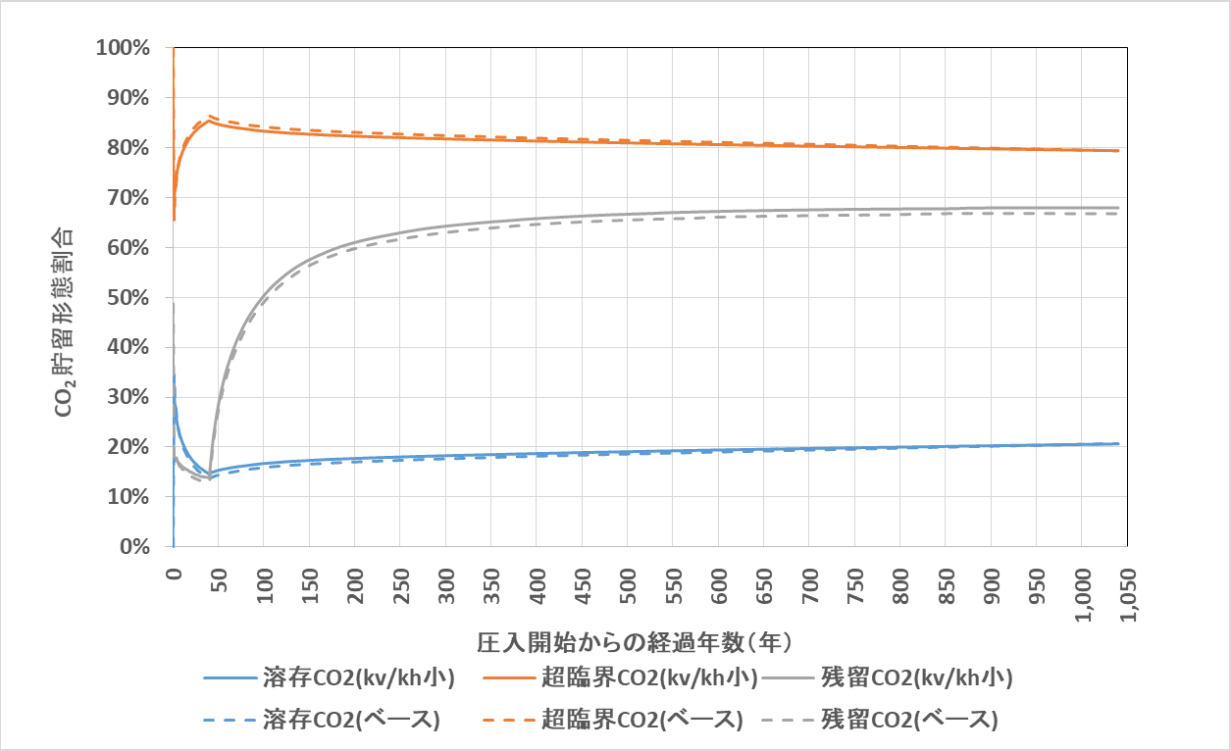


図 4.13-36　CO_2 貯留形態の経時変化（Kv/Kh（小））

(4)　塩分濃度を変化させたケース

塩分濃度を大、小と変化させたケースは異常高圧層での塩分濃縮の可能性を考慮し、実施した。図 4.13-37 に塩分濃度（大）ケースの、図 4.13-38 に塩分濃度（小）ケースの圧入開始より圧入停止 1,000 年後までの、貯留層モデル内における圧入した CO_2 の貯留形態割合の推移を示す。両ケースともベースケースとほぼ同じであるが、塩分濃度（大）ケースでは溶存 CO_2 割合がわずかに減少している。塩分濃度が高いことで CO_2 が水相に溶存しにくくなるため、その影響が表れたと考えられる。塩分濃度（小）ケースでは溶存 CO_2 割合がわずかに増加している。塩分濃度が低いことで CO_2 が水相に溶存しやすくなるため、その影響が表れたと考えられる。また、圧力変化、CO_2 飽和度、溶存 CO_2 の分布はベースケースと大きな差がなかったため平面図および断面図の記載は割愛する。

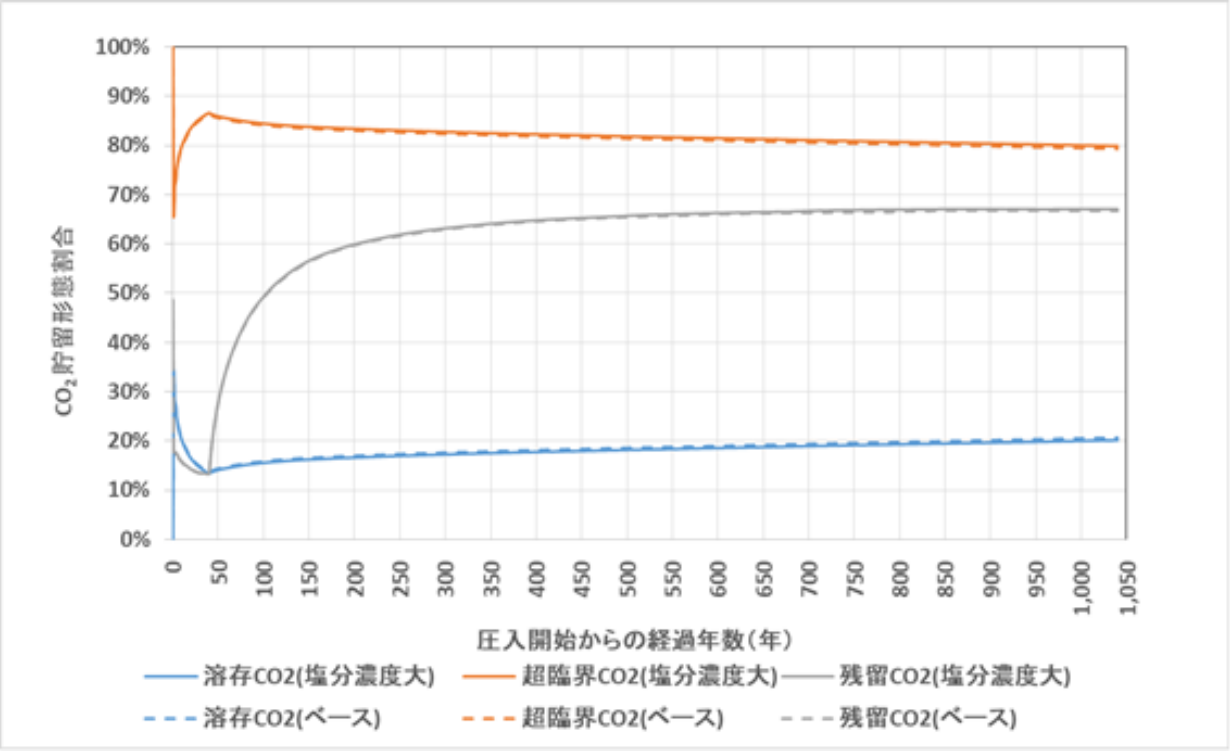


図 4.13-37　CO_2 貯留形態の経時変化（塩分濃度（大））

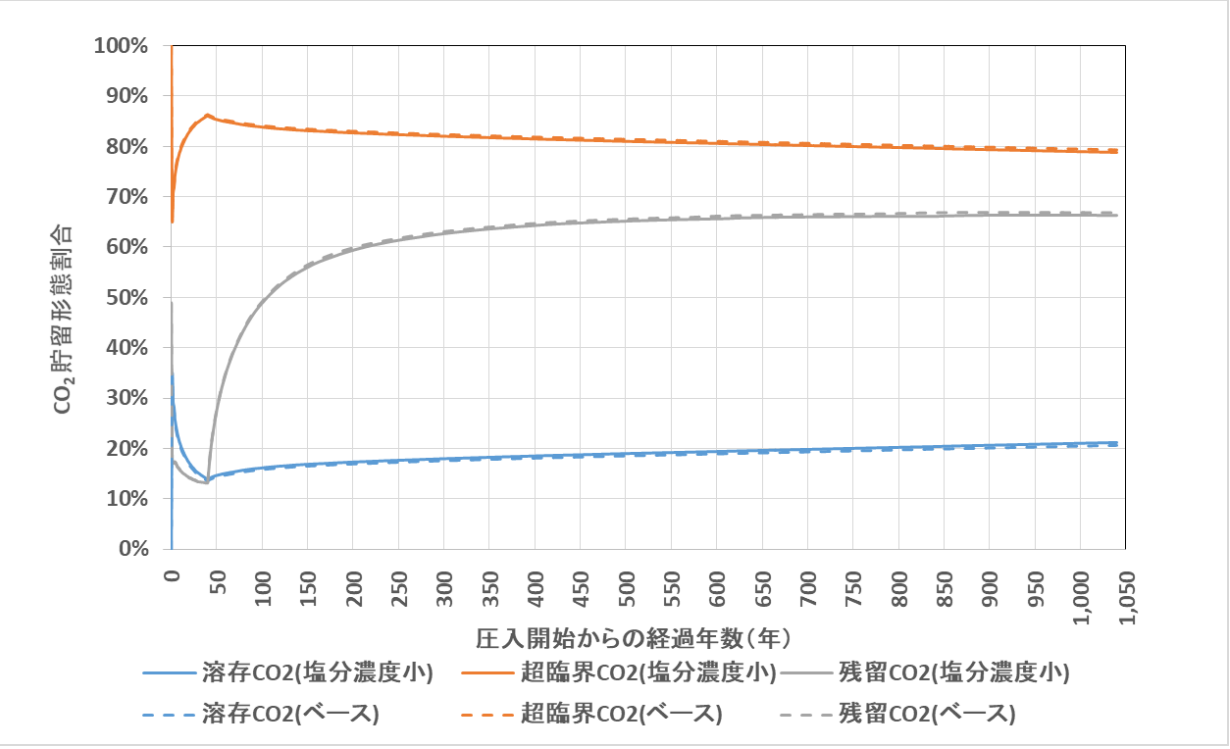


図 4.13-38　CO_2 貯留形態の経時変化（塩分濃度（小））

(5)　ワーストケース

四つの感度分析から累計圧入量が減少したケースを組み合わせたワーストケースについてシミュレーションを実施した。ワーストケースの組み合わせとしては、地層圧（大）、浸透率（小）、Kv/Kh（小）、塩分濃度（大）を組み合わせた。ワーストケースの各坑井の坑底圧の推移を図 4.13-39 に、各坑井の圧入レートを図 4.13-40 に、総圧入レートと累計圧入量を図 4.13-41 にベースケースとともに示す。ワーストケースでは圧入開始と同時にすべての坑井で坑底圧の制限により圧入レートが低下する。特に圧入井 3～5 では 1～1.7 万 t-CO_2/年/坑であり、ほとんど圧入できていない。ワーストケースでの累計圧入量は 2,500 万 t-CO_2 である。

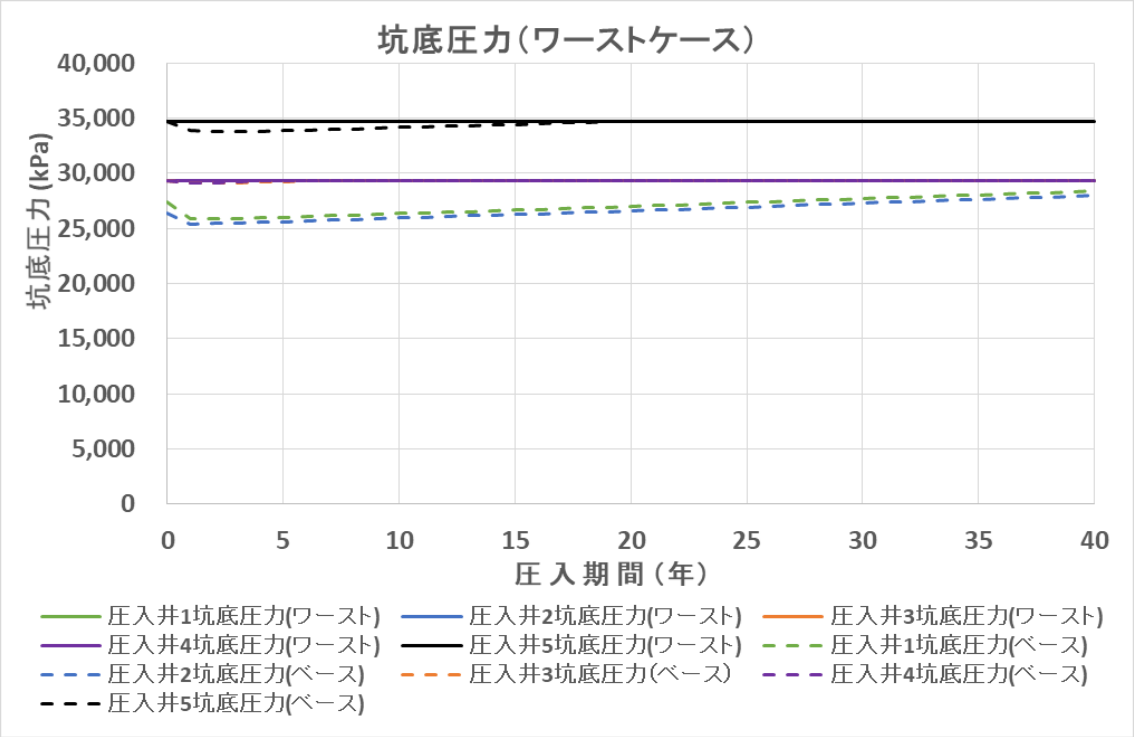


図 4.13-39　圧入期間中の坑底圧力の推移

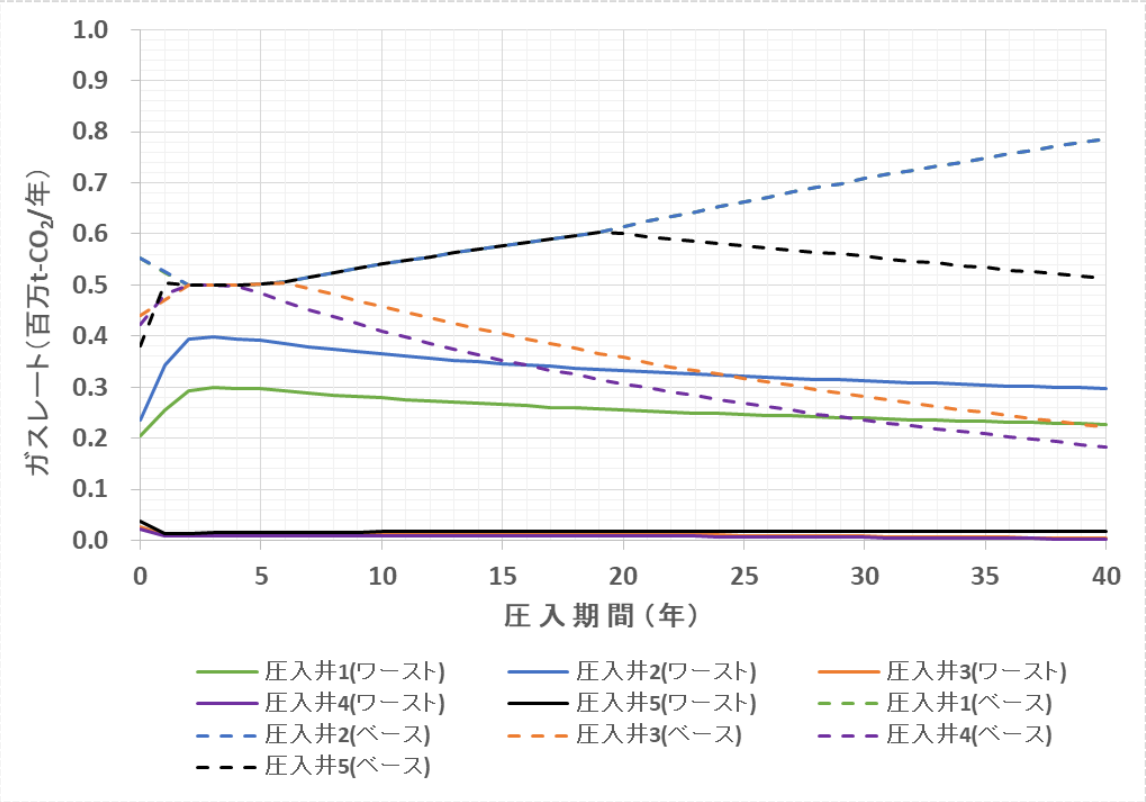


図 4.13-40　各坑井の圧入レートの推移

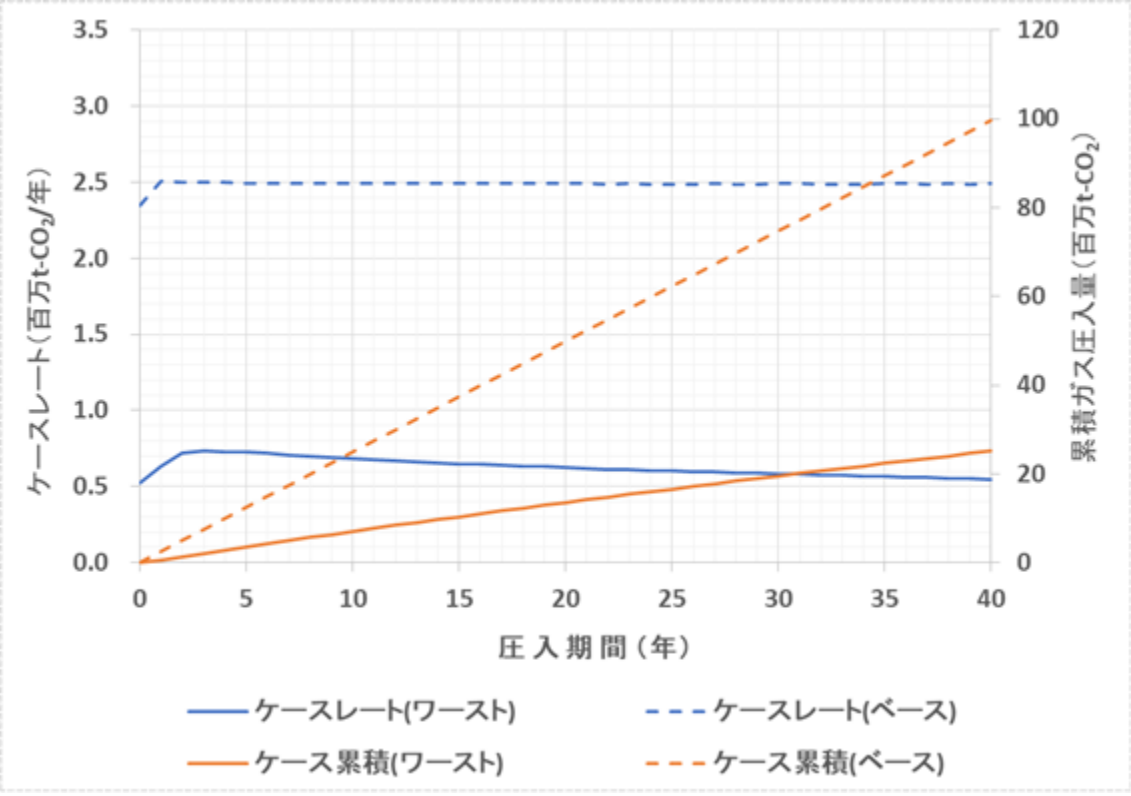


図 4.13-41　総圧入レートと累計圧入量の推移

①　圧力分布の比較（ベースケースとワーストケース）

圧力分布はベースケースと比べて低くなる。特に坑井周辺で圧力が増加していない。これはワーストケースでは地層圧が大きく浸透率も低いため、累計圧入量が 2,500 万 t-CO_2 とベースケースの 1/4 まで低下しているためと考えられる。

②　CO_2 飽和率分布の比較（ベースケースとワーストケース）

ワーストケースではベースケースと比べて、CO_2 の分布範囲が縮小している。特に圧入井 3～5 では分布が大きく縮小している。圧入井 3～5 周辺は水深や海底面下深度が深いため、地層圧が大きくなると最大坑底圧の制限にかかりやすくなり、圧入が困難になるためである。

③　溶存 CO_2 量分布の比較（ベースケースとワーストケース）

ワーストケースでは CO_2 飽和率と同様な分布を示すが圧入終了 1,000 年後には溶存 CO_2 を含んだ水相が重くなり、重力によって氷柱状に下方への移動が、ベースケースと比べると少ない。

④　貯留形態割合の推移

図 4.13-42 に圧入開始より圧入停止 1,000 年後までの、貯留層モデル内における圧入した CO_2 の貯留形態割合の推移を示す。ワーストケースでは溶存 CO_2 割合、残留 CO_2 割合もベースケースより増加しているが、圧入量が少ないため、水層に接する CO_2 の割合が多くなっているためと考えられる。

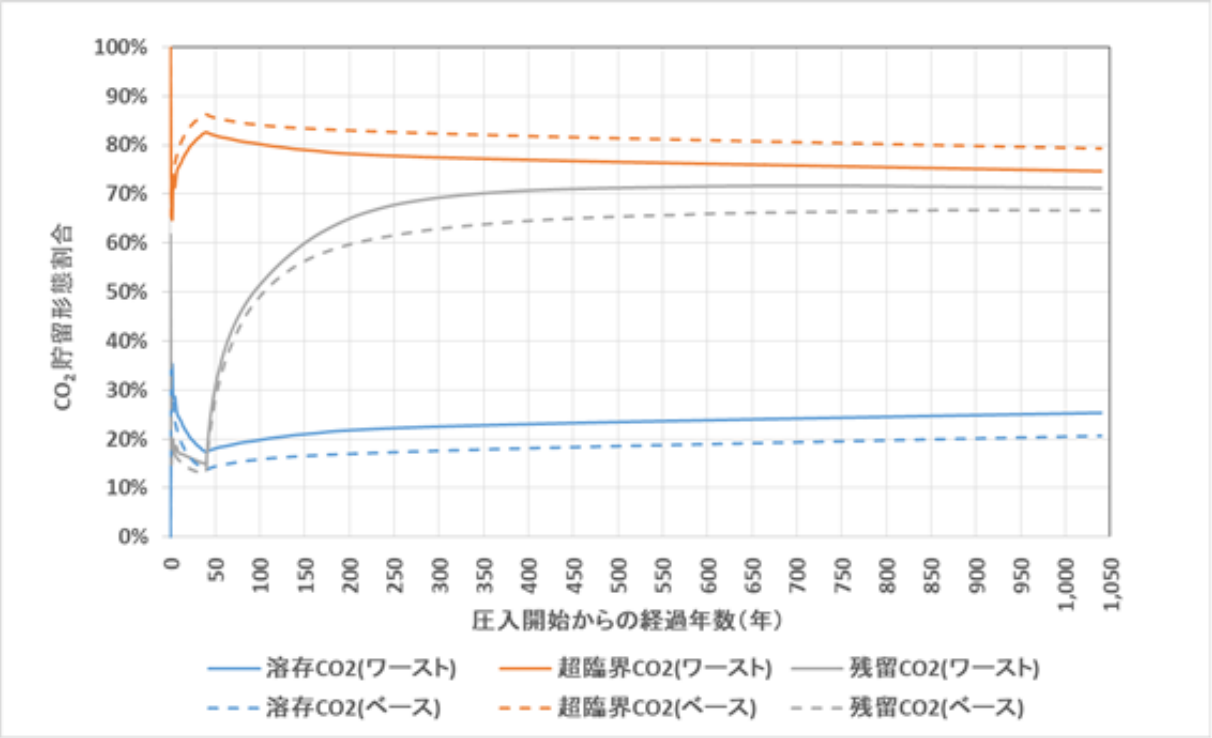


図 4.13-42　貯留形態の比較（ワーストケース）

(6)　感度分析のまとめ

地層圧（小）ケース及び地層圧（大）ケースにおける 1,000 年後の溶存 CO_2 量の分布を図 4.13-43 に、浸透率（小）ケース及び浸透率（大）ケースにおける 1,000 年後の溶存 CO_2 量の分布を図 4.13-44 に示す。地層圧（大）ケース、浸透率（小）ケースでは坑底圧制御により、圧入量が大きく減少する結果となった。特にこれは圧入井 3～5 で顕著でこれにより圧入井 3～5 では CO_2 分布範囲がベースケースより縮小した。

地層圧（小）ケースでは、椎谷層 PL1 ユニット西部の坑井において、圧入量が増加したため圧入停止時点における遮蔽層下端の圧力上昇がスレッショルド圧を最大 204 kPa 超過した。さらに、圧入停止 1,000 年後には溶存 CO_2 が超臨界 CO_2 の上限深度に到達する。その他のケースではベースケースと比べて圧入量に大きな影響はなく、ベースケースと同様にほぼ 1 億 t-CO_2 を圧入できる結果となった。

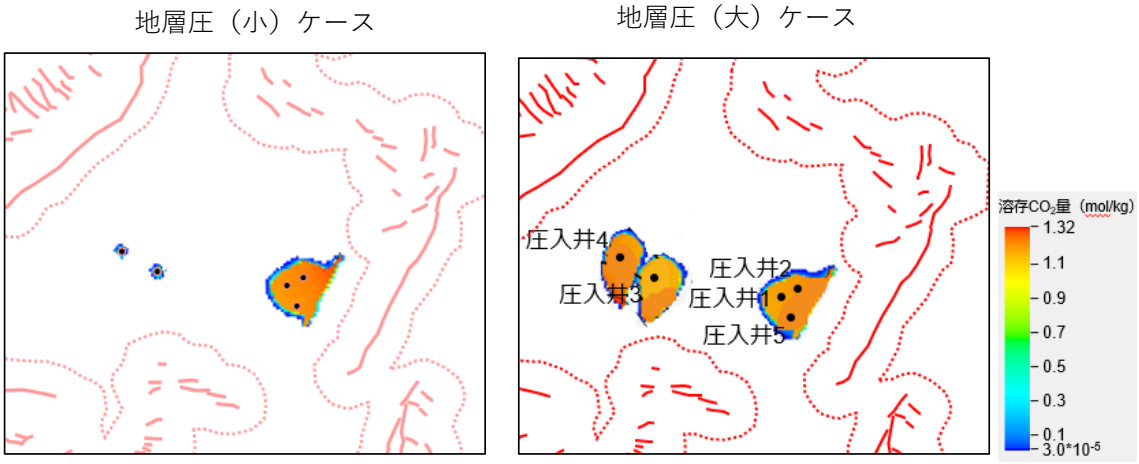
Kv/Kh の違いによる影響は比較的明瞭に確認できた。Kv/Kh が高いと CO_2 が上方に早く移動するため、構造上部で CO_2 飽和率が高くなっている様子が確認できた。水平方向への移動より、上部へ移動する CO_2 量が多くなり、結果的に CO_2 の動きがベースケースより抑えられ、水相との接点が減少したことで溶存 CO_2 割合、残留 CO_2 割合はベースケースよりわずかに低くなったと考えられる。

浸透率（大）ケースでは、圧入性が改善されるため坑井周辺の圧力はベースケースより低

く、CO_2 分布はベースケースより早く広がっている様子が確認できた。水平方向への移動が多くなった分、溶存 CO_2 割合がベースケースより若干増えたと考えられる。また、各坑井への圧入量がベースケースより均等になり、圧入井 1、2 への圧入量が減少し、圧入井 3～5 への圧入量が増加した。これにより圧入井 1、2 では CO_2 分布範囲がベースケースより縮小し、圧入井 3～5 では広がっている様子が確認できた。ただし、椎谷層 PL1 ユニット西部への圧入量が増加したことで、圧入停止 1,000 年後には溶存 CO_2 が超臨界 CO_2 の上限深度に到達する。

塩分濃度は CO_2 の溶存量に影響を与えるが、塩分濃度が高いと溶存量が減少し、塩分濃度が低いと溶存量が多くなる結果となった。本シミュレーションでは感度分析として±20%で塩分濃度を変化させたが、この程度の振れ幅では CO_2 の水への溶存や圧入量等にほとんど影響を与えないことが分かった。

ワーストケースでは、圧入量への影響が特に大きかった地層圧（大）ケースと浸透率（小）ケースが組み合わさっているため、累計圧入量は約 2,500 万 t-CO_2 と非常に少なくなった。坑井周辺の孔隙容積が小さく、浸透率が低い圧入井 3～5 では、ほとんど圧入できない結果となった。



注１）実線は断層、点線は断層から 2.5 ㎞範囲

図 4.13-43　1,000 年後の溶存 CO_2 量分布（椎谷層）



注１）実線は断層、点線は断層から 2.5 ㎞範囲

図 4.13-44　1,000 年後の溶存 CO_2 量分布（椎谷層）

4.13.6　まとめと課題

4.9 節の地質解析結果に基づき、構造モデルを作成した。構造モデルの水平方向のグリッドサイズは 200 m×200 m とした。鉛直方向のグリッドサイズは、遮蔽層では約 20 m 程度、貯留層（貯留可能域）では約 20～70 m 程度として設定した。

作成した構造モデルに基礎試錐三坑のファシス分布を考慮してシミュレーションに使用する地質モデルを作成した。対象エリアには七つの異なる物性のファシスが分布しており、七つのファシスの内、主として粗粒堆積物あるいは砂質岩からなるファシスは四つが存在し、主として細粒堆積物あるいは泥質岩からなるファシスは三つあると判断される。また、各ユニットに複数のファシスが分布しており、深度方向にも複数のファシスが存在する。

また、貯留層については上部寺泊層以深では異常高圧層を形成しており、椎谷層単独での 1 億 t-CO_2 の圧入を試みたが、制限条件をすべて満たして圧入することができなかった。そこで、椎谷層に 4 坑、異常高圧層である上部寺泊層に 1 坑の圧入井を配置したところ、制限条件をすべて満たした状態で 1 億 t-CO_2 を圧入できる結果であった。ただし、上部寺泊層の圧力勾配については本シミュレーションでは簡略的な設定としているため、異常高圧層を詳細にモデル化した際には圧入量に影響が出る可能性があることに留意する必要がある。なお、椎谷層のみに 5 坑井で圧入するケースでは累計圧入量は約 8,800 万 t-CO_2 の圧入が可能であった。

感度分析では、地層圧と浸透率、Kv/Kh の影響について明確に確認できた。塩分濃度については、本シミュレーションにおける上限値と下限値ではほとんど計算結果に影響を与えなかった。これら上限値と下限値を超えるような塩分濃度が確認できた場合は、結果に影響が出る可能性があるため、留意が必要である。なお、ワーストケースでは累計圧入量が

2,500 万 t-CO_2 と非常に少なくなった。ワーストケースについては、今後の感度分析パラメータの確率分布を考慮した不確実性分析を行った上で累計圧入量の確率分布を算出し、ワーストケースの確率的な観点からの位置づけを明確にすることが課題として考えられる。

また、本対象エリアは上部寺泊層以深で異常高圧層を形成していることから地層圧勾配を 3 分割して高圧層を再現したが､地質的なメカニズム等が不明であるためシミュレーション上で正確に再現することは困難で CO_2 の挙動については不確実性が高い。高圧層については地質的に圧力コンパートメント化が推定されることから CO_2 の貯留対象層としての優先順位を下げるべきだと考えられる。

【参考文献】

1) 独立行政法人石油天然ガス・金属鉱物資源機構、平成 15 年度　国内石油・天然ガス基礎調査　基礎試錐「佐渡南西沖 S」　基礎試錐「佐渡南西沖 D」調査報告書(2005)
2) 独立行政法人石油天然ガス・金属鉱物資源機構、平成 23～25 年度　国内石油天然ガス基礎調査　基礎試錐「上越海丘」調査報告書(2014)
3) 井波和夫・星野一男(1974)：堆積岩の圧縮率と圧密について．石油技術協会誌，39，第 6 号
4) 石油資源開発株式会社，平成 22 年度　「二酸化炭素削減技術実証試験」のうち「苫小牧調査井 CCS-2 試料分析／地層流体分析」報告書(2011)
5) 財団法人地球環境産業技術研究機構，平成 22 年度　「二酸化炭素削減技術実証試験委託費」のうち苫小牧萌別調査ボーリング(苫小牧 CCS-2)コアフラッド試験分析　成果報告書(2011)
6) Bennion, B. and Bachu, A., “Relative Permeability Characteristics for supercritical CO_2 Displacing Water in a Variety of Potential Sequestration Zones in the Western Canada Sedimentary Basin”, Paper SPE 95547, presented at the SPE Annual Technical Conference and Exhibition, Dallas, TX, USA, October 9-12, 2005(2005)
7) 財団法人地球環境産業技術研究機構，平成 18 年度「全国貯留層賦存量調査報告書 第 2 章」(2005)

第５章

2021 年度以降の調査候補地点の選定
および調査計画（案）の作成

第５章　2021 年度以降の調査候補地点の選定および調査計画（案）の作成

当社は、苫小牧 CCS 実証試験事業が完了する予定の 2020 年度末までに 1 億 t 以上の CO_2 を貯留可能な複数の大規模貯留適地を選定することを目的として 2014 年度に開始された貯留適地調査事業を毎年度受託し、貯留適地調査を実施してきた。調査の進行により貯留適地として有望と判断した地点において調査井を掘削したうえで貯留適地としての総合評価を行うことを予定していたが、調査井の掘削が見送られ、5.3 節で述べるように調査井掘削前の段階での貯留適地評価により複数地点の有望な貯留適地候補を 2021 年度末までに選定することとなった。調査井掘削による貯留適地の総合評価については、貯留適地調査事業に継続して 2022 年度以降に実施されると想定される事業（以下、「第二段階の貯留適地調査事業」と称する。）で実施されるものとして 2021 年度の貯留適地調査を計画した。

本業務では、平成３１年度委託事業に係る有識者委員会において 2020 年度調査対象として確認された地点に対し貯留適地としての評価を行うとともに、2021 年度末までに複数地点の有望な貯留適地候補を選定することを目的として、以下の業務を実施した。

1）調査候補地点の見直し（5.1 節）

平成３１年度委託事業までの調査候補区域地点の見直しを実施した。

2）調査候補地点の選定（総合評価）（5.2 節）

本業務および平成３１年度委託事業で実施した各調査地点の調査結果を用いて、調査候補地点の選定（総合評価）を再検討し、評価を見直した。

ただし、ここで示した調査候補地点の選定（総合評価）は 2020 年度末（2021 年 3 月末）時点での評価であり、2021 年度に実施する本業務の繰越業務による成果は含まれていない。

3）2021 年度以降の調査計画（案）の作成（5.3 節）

上記評価に基づき、平成３１年度委託事業で作成した 2020 年度以降の調査計画（案）を見直し、2021 年度の調査計画（案）を作成した。

本業務に係る有識者委員会において 2021 年度調査対象として確認された地点に対し、2021 年度新規 2D 探査計画案の策定および地元調整準備を実施した。

5.1　貯留適地調査の経緯と調査候補地点の見直し

平成３１年度委託事業報告書で述べたとおり、調査地点の見直しと整理を実施した結果、2019 年度末時点の調査候補地点数は、25 区域 39 地点となった。本業務においてもこの見直し方針を踏襲し、新たに新潟－富山沖海域に新潟－富山沖（新潟北西沖、佐渡南方沖）の 2 地点を追加したことにより、2020 年度末の調査候補地点数は、表 5.1-3 に示す 25 区域 41

地点となった。

表 5.1-3　2020 年度末の調査候補地点

海域番号	海域名	区域番号	区域名	地点番号	地点名	地点の範囲
1	石狩－礼文沖海域	1	石狩-礼文沖	1-1	石狩-礼文沖	石狩－礼文沖海域の石狩湾を除いた範囲
		2	石狩湾	1-2	石狩湾	石狩－礼文沖海域の石狩湾内
2	オホーツク海域	3	オホーツク海	2-1	北見大和堆	オホーツク海域の北見大和亜堆
				2-2	紋別沖	オホーツク海域の紋別沖堆積盆地
3	北海道南部－久慈沖海域	4	内浦湾　海域	3-1	内浦湾	北海道南部－久慈沖海域の内浦湾内
			日高沖	3-2	日高沖	北海道南部－久慈沖海域の日高沖地点
			渡島半島東方沖	3-3	渡島半島東方沖	北海道南部－久慈沖海域の渡島半島東方沖の堆積盆地
4	十勝－釧路沖海域		十勝－釧路沖	4-1	十勝沖	十勝－釧路沖海域の十勝沖堆積盆地
5	渡島半島－津軽沖海域	5	渡島半島－津軽沖	5-1	西津軽沖	渡島半島－津軽沖海域の西津軽沖堆積盆地
6	秋田－庄内沖海域	6	能代沖	6-1	能代沖	秋田－庄内沖海域の能代沖堆積盆地
		7	秋田沖	6-2	秋田沖	秋田－庄内沖海域の由利沖北部構造とその周辺海域
				6-3	本荘沖	秋田－庄内沖海域の本荘沖構造とその周辺
		8	酒田沖	6-4	酒田沖	秋田－庄内沖海域の酒田沖堆積盆地
7	新潟－富山沖海域	9	新潟-富山沖	7-1	新潟沖	新潟－富山沖海域の新潟沖堆積盆地
				7-2	佐渡西方沖	新潟－富山沖海域の佐渡西方－能登東方堆積盆地
				7-3	新潟北西沖	新潟－富山沖海域の新潟北西沖の堆積盆地
				7-4	佐渡南方沖	新潟－富山沖海域の佐渡南方の堆積盆地
8	北陸－隠岐沖海域	10	北陸-隠岐沖	8-1	金沢沖	北陸－隠岐沖海域の金沢沖構造とその周辺
				8-2	京都－福井沖	北陸－隠岐沖海域の京都－福井沖の堆積盆地
				8-3	鳥取沖	北陸－隠岐沖海域の鳥取沖構造とその周辺、隠岐トラフ
9	山陰－九州北部海域	11	山陰沖	9-1	山口沖	山陰－北部九州海域の山口沖
				9-2	対馬西沖	山陰－北部九州海域の長崎県対馬の西方沖
				9-3	萩沖	山陰－北部九州海域の山口県萩沖
				9-4	浜田沖	山陰－北部九州海域の島根県浜田沖
				9-5	隠岐西沖	山陰－北部九州海域の隠岐の島西方
				9-6	隠岐北沖	山陰－北部九州海域の隠岐の島北方
		12	北部九州小倉海域	9-7	小倉沖	山陰－北部九州海域の福岡県小倉沖
		13	北部九州松浦海域	9-8	松浦沖	山陰－北部九州海域の福岡県松浦沖
10	釜石－金華山沖海域					釜石－金華山沖海域の堆積盆地
11	常磐－鹿島沖海域	21	常磐－鹿島沖	11-1	鹿島沖周辺福島沿岸	常磐－鹿島沖海域の福島沿岸域
				11-2	鹿島沖周辺北部	常磐－鹿島沖海域の磐城沖ガス田周辺
				11-3	鹿島沖周辺中部	常磐－鹿島沖海域の福島県いわき沖
				11-4	鹿島沖周辺南部	常磐－鹿島沖海域の茨城県北茨城沖
				11-5	茨城沖北部	常磐－鹿島沖海域の茨城県日立沖
12	房総沖海域					房総沖海域の堆積盆地
13	東海－四国沖海域	20	御前崎沖	13-1	御前崎沖	東海－四国沖海域の御前崎沖
14	宮崎沖海域	19	宮崎沖	14-1	宮崎沖	宮崎沖海域の宮崎沖
		15	別府湾	14-2	別府湾	宮崎沖海域の別府湾内
15	天草－五島沖海域	14	天草沖	15-1	天草沖	天草－五島沖海域の天草沖
		18	天草-五島沖	15-2	甑島西方	天草沖－五島沖海域の甑島西方の堆積盆地
		22	枕崎沖	15-3	枕崎沖	天草－五島沖海域の南端部枕崎沖の堆積盆地
16	沖縄－南西諸島沖海域	16	沖縄-南西諸島	16-1	沖縄-南西諸島	沖縄から南西諸島に掛けての堆積盆地
		17	宮古島沖	16-2	宮古島沖	沖縄から宮古島に掛けての堆積盆地

2013年度1次スクリーニング時の17区域23地点である。
2014年度から2019年度末までに追加した8区域16地点、合計25区域39地点となる。
2020年度に追加した2地点、合計25区域41地点となる。
2020年度末までに、区域・地点が設定されていない。

5.2　調査候補地点の選定（総合評価）

本業務における各調査地点の評価および総合評価は、平成３１年度委託事業報告書[1)]をベースとし、第３章および第４章に述べた各調査地点の調査結果にくわえて、本業務の 5.1 で述べた 41 地点の中で据え置きしていた地点と新たに加えた地点について地質解析・貯留可能量評価の実施可能性を再検討した。

5.2.1　調査地点の評価方法（技術要素）

調査地点の評価方法としては、平成２５年度経済産業省委託事業報告書[2)]で示された評価手法に則り、二酸化炭素貯留適地の条件となる各調査地点の個々の技術要素に対して、表 5.2-1 の基準に従って評価点数を与えた。データがなく、評価できなかった項目については NA とし、中間点数 0.5 を与えた。

次に、各技術要素の点数をすべて掛け合わせ、技術評点（図 5.2-1 の B）を算出した。さらに、この技術評点に各地点の貯留可能量（図 5.2-1 の A）を掛け合わせ、リスク付き貯留可能量（図 5.2-1 の C）を求めた。このリスク付き貯留可能量によって、調査地点の技術評価順位付け（図 5.2-1 の技術評価ランキング R）を行なった。

表 5.2-1　技術要素と評価点数基準

			技術要素							
			貯留層			貯留可能量	遮蔽層		地質構造	
			深　度 (m)	層　厚 (m)	性状(孔隙率) (%)	(百万 ton)	規模(層厚) (m)	遮蔽能力 (環境・岩相)	構造安定度 (断層など)	地層傾斜 (deg)
技術評点	◎	1	800-2,000m	>=500	>=25	>=5,000	>=100	深海性・泥岩	断層なし	<=10
	○	0.6	800-3,000m	>=200	>=20	>=1,000	>=50	半深海性・泥質岩	断層あるが極浅部まで達していない	<=20
	△	0.3	>=2,000m	>=50	>=15	>=200	>=20	陸棚以浅・泥質岩	断層多いが極浅部まで達していない	<=30
	△−	0.1			>=5	>=100			広域地質構造の安定度が低い	
	×	0	>=3,000m	<50	<5	<100	<20	砂質シルト岩	対象区域内に活断層あり	>30
	NA	0.5	(評価できず)			(評価できず)	(評価できず)		(評価できず)	

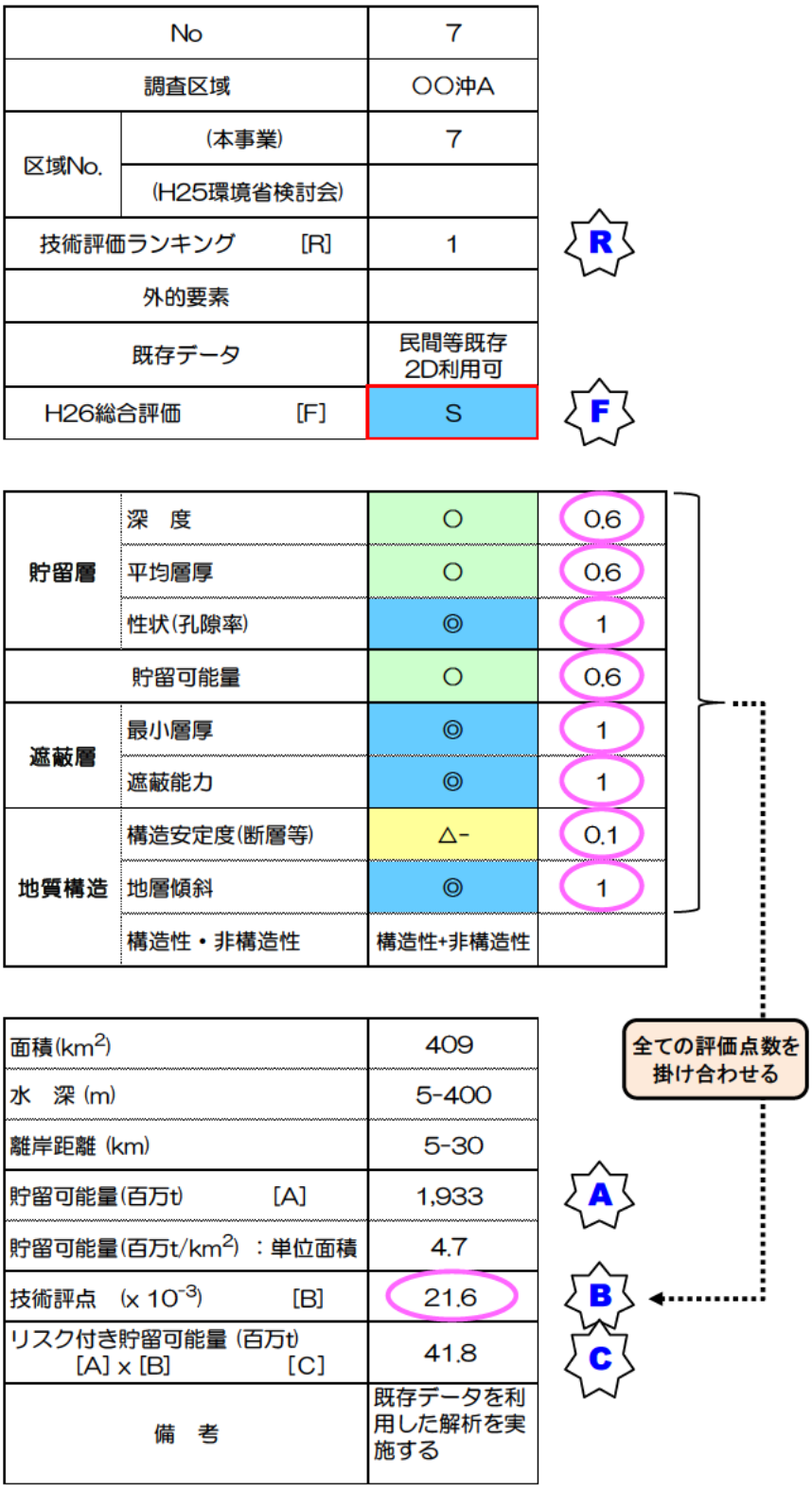


図 5.2-1 技術評点の算出方法の例

5.2.2　調査地点の評価方法（外的要素と総合評価）

調査地点には、地点ごとに考慮すべき地域・環境等の特殊性（外的要素）が存在する。本業務での総合評価では、5.2.1 項の技術評価に加え、このような外的要素も考慮し、既存探査データの借用とこれを活用した地質解析が実施可能か否かにも焦点をあて、次の調査ステップへ進むかどうかを判断する。以下に、2020 年度末の総合評価を示す。

表 5.2-2 に本業務での総合評価基準を示す。平成３１年度委託事業の総合評価基準と同様、S、A、B、C、NA の 5 段階の基準に加え、S の上位に AD（Advanced）、AD の上位に SA（Super Advanced）を加えた 7 段階の総合評価基準を用いて、各調査地点を総合的に評価した。

表 5.2-2　本業務での総合評価基準

令和２年度 貯留適地調査のための総合評価基準	
SA	掘削調査結果やその他の最新知見を反映させ、地質の不均質などを反映させたより正確な地質・物性モデルを用いたCO_2挙動予測シミュレーション結果など多角的な視点から地質の再評価を基に、安全かつ安定的な貯留が可能と予測できる地点
AD	2D/3D探査データや既存坑井等を基にした地質構造解析や地質評価、地質・物性モデル構築および調査井掘削前CO_2挙動予測シミュレーションの結果から、圧入影響範囲とその周辺の地質構造等と照らし合わせ、安定的な貯留が可能と予測（期待）できる地点で、かつ、外的要因も含めて掘削調査に進む事が可能と見込まれる地点
S [2D] S [3D]	民間等の比較的豊富な既存2D/3D 探査データを利用した地質解析が実施できる地点
A [2D] A [3D]	技術的評価が高く、2D/3D探査に進める地点
	民間等の既存2Dデータを利用した地質解析が見込めるが、必要に応じて探査を実施する地点
B [2D] B [3D]	A以外の技術的評価が高い地点
	解決すべき特定の課題があり、調査保留となっている地点
C	技術的評価が低い地点
NA	データが不足し技術評価が実施できない地点

(1) 総合評価 SA の調査地点

2020 年度末時点で調査井は掘削されておらず、地層の不均質性を反映させたより正確な地質・物性モデルを用いた CO_2 挙動予測シミュレーション等が行われていない。そのため、SA と評価した地点はない。

(2) 総合評価 AD の調査地点

AD と評価した地点は、2019 年度末の能代沖、秋田沖および本荘沖の 3 地点に、新たに茨城沖北部および宮崎沖を加えた 5 地点である。

1) 能代沖

2020 年度には、本調査地点に関する調査を実施していない。2019 年度末時点で、調査井掘削前 CO_2 挙動予測シミュレーションにより 1 億 t 以上の CO_2 の安定的貯留を確認し、陸上から掘削する調査井の基本設計を終了しており、総合評価を AD で継続した。

2) 秋田沖

本調査地点の北部の地質解析および貯留可能量評価のため、平成３１年度委託事業の 2020 年度繰越業務において、本事業で利用可能な基礎物理探査の 2D 探査データおよび民間の 2D 探査データの再処理を実施した。2019 年度末時点で、調査井掘削前 CO_2 挙動予測シミュレーションによる 1 億 t 以上の CO_2 の安定的貯留の確認を終了しており、総合評価を AD で継続した。

3) 本荘沖

従来の貯留可能域の南方への延長が示唆されていたため、本業務において、本荘沖の南部について地質解析・貯留可能量評価を実施した。2019 年度末時点で、調査井掘削前 CO_2 挙動予測シミュレーションによる 1 億 t 以上の CO_2 の安定的貯留の確認、海上から掘削する調査井の基本設計を終了しており、総合評価を AD で継続した。

4) 茨城沖北部

2018 年 8 月に基礎物理探査「茨城沖北部 3D」[5)] のデータが公開され、探査範囲に本地点が含まれていることを確認したことから、平成３０年度委託事業報告書にて茨城沖北部と呼称して調査地点として追加した。本業務にて地質解析・貯留可能量評価を実施した結果、15 億 t 以上の貯留可能量が見込まれた。平成３１年度委託事業の 2020 年度繰越業務にて調査井掘削前 CO_2 挙動予測シミュレーションを実施し、1 億 t 以上の CO_2 を安定的に貯留できることを確認したことから、

総合評価をSからADに格上げした。

5) 宮崎沖

平成３０年度委託事業の 2019 年度繰越業務で陸域と海域の 3D 探査範囲を対比して地質解析・貯留可能量評価を更新した。その結果、北部貯留域と南部貯留域を合わせて14億t以上の貯留可能量が見込まれた。平成３１年度委託事業の2020年度繰越業務にて調査井掘削前 CO_2 挙動予測シミュレーションを実施し、1 億 t 以上の CO_2 の安定的貯留を確認したことから、総合評価を S から AD に格上げした。

(3) 総合評価 S の調査地点

S と評価した地点は合計 7 地点である。

平成３１年度委託事業で 2019 年度末に S と評価した 8 地点のうち、AD に格上げした茨城沖北部および宮崎沖ならびにAに格下げした石狩－礼文沖および紋別沖を除き、日高沖、新潟沖、佐渡西方沖および鳥取沖の 4 地点の評価を S で継続した。

1) 日高沖

貯留適地調査を全国に拡げる方向性へと見直したことに伴い、2019 年度に文献調査を実施し、本業務において、基礎物理探査「日高舟状海盆 3D」[10)、11)]、基礎物理探査「日高舟状海盆西部 3D」[12)] 等の 3D 探査データおよび基礎試錐「日高トラフ」[13)] の坑井データを活用して地質解析・貯留可能量評価を実施した。その結果、26 億 t 以上の貯留可能量が見込まれたことから、総合評価を S で継続した。

2) 新潟沖

新潟県から富山県の沖合までを含めた広域を調査対象として想定していた新潟－富山沖海域の内、平成３０年度委託事業の 2019 年度繰越業務で新潟沖と呼称した範囲において、既存 3D 探査データの再処理データを用いた地質解析・貯留可能量評価を実施し、13 億 t 以上の貯留可能量が見込まれたことから、総合評価を S で継続した。

3) 佐渡西方沖

富山湾の北方、能登半島と佐渡島の間に位置する地点である。貯留適地調査を全国に拡げる方向性へと見直したことに伴い、2019 年度に JCCS 社内にて文献調査を実施した。本業務において、基礎物理探査「佐渡沖南西」[14)]、基礎物理探査「佐渡西方 3D」[15)]、基礎物理探査「能登東方 3D」[16)、17)] の 3D 探査データお

よび基礎試錐「佐渡南西沖 S、佐渡南西沖 D」[18]、基礎試錐「上越海丘」[19]の坑井データを活用して地質解析・貯留可能量評価を実施した。その結果、11 億 t 以上の貯留可能量が見込まれたことから、総合評価を S で継続した。

4) 鳥取沖

2016 年度および 2017 年度に JOGMEC が取得した基礎物理探査「鳥取～兵庫沖 3D」[3][4]のデータが 2019 年度中に公開される見込みであるとして、2018 年度末に総合評価を A から S に上げた。2020 年 6 月にデータが公開され、地質解析・貯留可能量評価が実施可能となった。さらに、これまで評価を実施してこなかった鳥取沖の北部海域の隠岐トラフに厚い堆積層が拡がることが期待されたことから、本業務において既存 2D 探査の再処理データおよび新規 2D 探査データと上述の 3D 探査データを活用した統合地質解析・貯留可能量評価を実施した。その結果、鳥取沖全体でおよそ 16 億 t の貯留可能量が見込まれたことから、総合評価を S で継続した。

2020 年度末に新たに総合評価を S とした地点は、新潟北西沖、佐渡南方沖および京都－福井沖の 3 地点である。なお、新潟北西沖および佐渡南方沖は 2020 年度から新たに評価を開始した地点である。

1) 新潟北西沖

新潟県から富山県の沖合までを含めた広域を調査対象として想定していた新潟－富山沖海域の内、平成３０年度委託事業の 2019 年度繰越業務で新潟沖と呼称した範囲の北西側に隣接し、これまで評価を実施してこなかった地点である。2019 年度～2020 年度に文献調査を実施した。今後、基礎物理探査「新潟沖 3D」、基礎物理探査「佐渡海盆 3D」等の 3D 探査データおよび基礎試錐「佐渡沖」の坑井データを活用して地質解析・貯留可能量評価を実施できる見込みとなったことから、総合評価を S とした。

2) 佐渡南方沖

新潟県から富山県の沖合までを含めた広域を調査対象として想定していた新潟－富山沖海域の内、本業務で地質解析・貯留可能量評価を実施した佐渡西方沖と上記の新潟北西沖の間に位置し、これまで評価を実施してこなかった地点である。2019 年度～2020 年度に文献調査を実施し、今後、基礎物理探査「佐渡海盆 3D」等の 3D 探査データおよび基礎試錐「佐渡南西沖 S、佐渡南西沖 D」[18]、基礎試錐「上越海丘」[19]の坑井データを活用して地質解析・貯留可能量評価を実施できる見込みとなったことから、総合評価を S とした。

3) 京都－福井沖

これまで総合評価をＡとしていた。平成２５年度環境省委託業務の北陸－隠岐沖海域の中では金沢沖や鳥取沖とともに評価の高い地点として設定されていた。平成３１年度委託事業の 2020 年度繰越業務および本業務にて既存 2D 探査データの再処理および新規 2D 探査データ取得を実施したことにより、豊富な 2D 探査データを利用した地質解析が見込めることから、総合評価をＳに上げた。

2020 年度末に総合評価をＳから下げた地点は、石狩－礼文沖および紋別沖の 2 地点である。いずれも、技術的理由により評価を下げたものではなく、2021 年度までの適地調査事業の枠内において評価作業計画に含まなかったことによるものである。

1) 石狩－礼文沖

2019 年度に文献調査を行った結果、基礎物理探査「天北西方 3D」[6]、基礎物理探査「利尻・礼文トラフ 2D/3D」[7] の 3D 探査データおよび 2D 探査データを活用して評価を実施できる見込みとなったため、総合評価をＳに上げた。しかしながら、現時点では 2021 年度末までに評価を実施する計画がないため、総合評価をＡとした。

2) 紋別沖

2019 年度における調査候補地点の見直しで、基礎物理探査「オホーツク枝幸沖 3D」[8) 9)] と民間坑井データを活用して地質解析・貯留可能量評価を実施できる見込みとなったことから、総合評価をＳに上げた。しかしながら、現時点では 2021 年度末までに評価を実施する計画がないため、総合評価をＡとした。

(4) 総合評価Ａの調査地点

Ａと評価した地点は、上述の石狩－礼文沖および紋別沖にくわえて、酒田沖、隠岐西沖および隠岐北沖の 5 地点である。

1) 酒田沖

平成２５年度環境省委託業務の秋田－庄内沖海域に含まれる地点であるが、貯留可能域の大半が陸域に位置するため総合評価をＣとしていた。本業務における調査候補地点の見直しの一環で、沖合にも堆積盆の存在が示唆されたことから既存 2D 探査データの再処理を実施した。その結果を踏まえ、今後、既存 2D 探査測線を補完するための新規 2D 探査の実施を 2021 年度に計画した。2D 探査データを利用した地質解析が見込めることから、総合評価をＡに上げた。

2) 隠岐西沖

平成２６年度事業から山陰沖 11f（中央）として地元調整を継続している地点である。総合評価を A で継続した。

3) 隠岐北沖

平成２６年度事業から山陰沖 11a を含めて山陰沖 11f（北部）として地元調整を継続している地点である。総合評価を A で継続した。

(5) その他の調査地点

その他の調査地点の総合評価は 2019 年度末と同様とした。

5.2.3 総合評価結果（2020 年度末）

調査地点の総合評価を表 5.2-3 に、総合評価状況（主要地点および評価を変えた地点）を表 5.2-4 にまとめた。

総合評価結果は、2020 年度末時点の暫定的なものである。今後、新たな地質データや解析結果が加わること、地元自治体等のヒアリング結果から考慮すべき要素が判明すること等、貯留適地調査の進展にともない各調査地点の総合評価を適宜更新する。

表 5.2-3(1)　調査地点の総合評価結果（2020 年度末）（その１）

海域番号	1			2		3				4	5			6								7						
海域名	石狩ー礼文沖			オホーツク		北海道南部ー久慈沖				十勝ー釧路沖	渡島半島ー津軽沖			秋田ー庄内沖								新潟ー富山沖						
区域名（参考）	石狩ー礼文沖	石狩湾		オホーツク海		内浦湾海域	日高沖		渡島半島東方沖	十勝ー釧路沖	渡島半島ー津軽沖			能代沖	秋田沖			本荘沖			酒田沖	新潟ー富山沖						
地点番号	1-1	1-2		2-1	2-2	3-1	3-2		3-3	4-1	5			6-1	6-2			6-3			6-4	7-1				7-2	7-3	7-4
地点名	石狩ー礼文沖	石狩湾		北見大和堆	紋別沖	内浦湾	日高沖		渡島半島東方沖	十勝沖	西津軽沖			能代沖	秋田沖			本荘沖			酒田沖	新潟沖				佐渡西方沖	新潟北西沖	佐渡南方沖
個別貯留可能域		石狩湾北西部	石狩湾南東部				砂体1	砂体3			西津軽 Unit C南部	西津軽 Unit D南部	西津軽 Unit B南部		秋田沖 桂根相 上部貯留層	秋田沖 桂根相 下部貯留層	秋田沖 笹岡層	本荘沖 (笹岡層)	本荘沖 (桂根相) 上部相	本荘沖 (桂根相) 下部相		西方	西部ブロック(阿賀沖)	中部ブロック	東部ブロック(沿岸域)	区域Ⅲ		
2013年度末総合評価	B [2D]	A [2D]	A [2D]	B [2D]		NA			NA	NA	B [2D]	B [2D]	B [2D]	C	B [2D]	B [2D]	B [2D]	B [2D]	B [2D]	B [2D]	C	B [2D]	B [2D]	B [2D]	B [2D]			
2014年度末総合評価	B [2D]	A [2D]	A [2D]	B [2D]		NA			NA	NA	A [2D]	A [2D]	A [2D]	S [2D]	S [2D]	S [2D]	S [2D]	S [2D]	S [2D]	S [2D]	C	B [2D]	B [2D]	B [2D]	B [2D]			
2015年度末総合評価	B [2D]	B [2D]	B [2D]	B [2D]		NA			NA	NA	S [2D]	S [2D]	S [2D]	A [3D]	S [3D]	S [3D]	S [3D]	S [3D]	S [3D]	S [3D]	C	B [2D]	B [2D]	B [2D]	B [2D]			
2016年度末総合評価	B [2D]	B [2D]	B [2D]	B [2D]		NA			NA	NA	S [2D]	S [2D]	S [2D]	A [3D]	S [3D]	S [3D]	S [3D]	S [3D]	S [3D]	S [3D]	C	B [2D]	B [2D]	B [2D]	B [2D]			
2017年度末総合評価	B [2D]	B [2D]	B [2D]	B [2D]		NA			NA	NA	B [3D]	B [3D]	B [3D]	AD	S [3D]	S [3D]	S [3D]	S [3D]	S [3D]	S [3D]	C	B [2D]	S [3D]	S [3D]	S [3D]			
2018年度末総合評価	B [2D]	B [2D]	B [2D]	B [2D]		NA			NA	NA	B [3D]	B [3D]	B [3D]	AD	S [3D]	S [3D]	S [3D]	AD	AD	AD	C	B [2D]	S [3D]	S [3D]				
2019年度末総合評価	S [3D]	B [2D]	B [2D]	B [2D]	S [3D]	NA	S [3D]	S [3D]	NA	NA	B [3D]	B [3D]	B [3D]	AD	AD	AD	AD	AD	AD	AD	C	S [3D]	S [3D]	S [3D]		S [3D]		
2020年度末総合評価	A [3D]	B [2D]	B [2D]	B [2D]	A [3D]	NA	S [3D]	S [3D]	NA	NA	B [3D]	B [3D]	B [3D]	AD	AD	AD	AD	AD	AD	AD	A [2D]	S [3D]	S [3D]	S [3D]		S [3D]	S [3D]	S [3D]
貯留層 深　度	○	○	○	○	令和２年度から評価開始予定（保留）		△	○			◎	◎	△	◎	○	○	○	◎	○	○	○	△	△	△	△	◎	令和３年度から評価を開始	令和３年度から評価を開始
貯留層 平均層厚	△	◎	◎	○			◎	◎			○	△	◎	○	○	○	○	◎	○	◎	△	NA	◎	◎	◎	◎		
貯留層 性状(孔隙率)	△	◎	◎	○			○	○			○	◎	△-	◎	○	○	◎	◎	△-	△-	◎	○	○	○	○	△		
貯留可能量	△	△-	△	△			○	△			△	×	×	△-	△	△	○	○	×	△	△	△	△	△		△		
遮蔽層 最小層厚	○	△	△	○			◎	◎			◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	○	◎	◎		◎		
遮蔽層 遮蔽能力	○	○	○	◎			◎	◎			◎	◎	◎	○	○	○	△	○	○	○	◎	○	△	△		○		
地質構造 構造安定度(断層等)	△	○	○	△			○	○			○	○	○	○	○	△	◎	○	○	○	△	○	△	○	NA	○		
地質構造 地層傾斜	○	△	△	○			◎	◎			◎	◎	◎	○	△	△	○	○	○	○	◎	○	○	○	○	△		
構造性・非構造性	非構造性	非構造性	非構造性	非構造性			非構造性	非構造性			非構造性	非構造性	非構造性	構造性+非構造性	非構造性	非構造性	非構造性	非構造性	非構造性	非構造性	非構造性	非構造性	非構造性	非構造性	非構造性	非構造性		
面積(km^2)	541	8	22	596			331	297			75	35	53	42	57	47	123	287	13	82	270	398	40	30		225		
水　深 (m)	100-130	0-100	0-100	150-200			1000-1100	1100-1200			1,900	1,900	1,900	10-30	60	60	60	100	100	100	0-60	50-100	50-100	50-80		1000-1100		
離岸距離 (km)	30	20	5	40-70			30-50	50-80			50	50	50	1-5	10	10	10	15	15	15	0-5	5	5	5		30-50		
貯留可能量(百万t)　[A]	647	115	334	950			1,105	996			254	31	44	251	216	226	1,429	4,769	34	239	320	633	691	608		740		
貯留可能量(百万t/km^2)：単位面積	1.2	14.9	14.9	1.6			3.3	3.4			3.4	0.9	0.8	6.0	3.8	4.8	11.6	16.6	2.6	2.9	1.2	1.6	17.3	20.3		3.3		
技術評点　(x 10^{-3})　[B]	1.0	1.9	5.8	7.0			64.8	64.8			64.8	0.0	0.0	13.0	7.0	3.5	38.9	129.6	0.0	3.9	16.2	3.5	2.9	5.8		9.7		
リスク付き貯留可能量(百万t) [A] x [B]　[C]	0.7	0.2	1.9	6.6			71.6	64.5			16.5	0.0	0.0	3.3	1.5	0.8	55.6	618.1	0.0	0.9	5.2	2.2	2.0	3.5		7.2		
備　考	2013年度末時点の既往文献を利用した総合評価。基礎探査の3D弾性波探査が利用可能。民間坑井の借用が困難であるため、評価実施時期は未定。	2015年度末時点の密な2D探査データを利用した総合評価。	2015年度末時点の密な2D探査データを利用した総合評価。	2013年度末時点の既往文献を利用した総合評価。流氷の影響再検討が必要なため評価を保留。			2020年度末時点の3D探査データを利用した総合評価。	2020年度末時点の3D探査データを利用した総合評価。			2018年度末時点の3D探査データを利用した総合評価。広域地質構造の安定性に懸念があるため評価を保留。	2018年度末時点の3D探査データを利用した総合評価。広域地質構造の安定性に懸念があるため評価を保留。	2018年度末時点の3D探査データを利用した総合評価。広域地質構造の安定性に懸念があるため評価を保留。	2019年度末時点の3D探査データを利用した総合評価。	2018年度末時点の3D探査データを利用した総合評価。	2018年度末時点の3D探査データを利用した総合評価。	2018年度末時点の3D探査データを利用した総合評価。	2017年度末時点の3D探査データを利用した総合評価。	2017年度末時点の3D探査データを利用した総合評価。	2017年度末時点の3D探査データを利用した総合評価。	2013年度末時点の既往文献を利用した総合評価。貯留層分布域の周辺に活断層が推定されている。貯留層が陸域と海域にまたがり、主な貯留層は陸域にある。	2013年度末時点の既往文献を利用した総合評価。	2018年度末時点の3D探査データを利用した総合評価。	2018年度末時点の3D探査データを利用した総合評価。	2018年度末時点の3D探査データを利用した総合評価。遮蔽層が欠如しているため、貯留可能域を設定不可。	2020年度末時点の3D探査データを利用した総合評価。		

注）黄色に着色した調査地点は 2020 年度末（2021 年 3 月末）時点での有望な CO_2 貯留適地候補地点

表 5.2-3(2)　調査地点の総合評価結果（2020 年度末）（その２）

海域番号	8			9								11							13		14			15			16	
海域名	北陸ー隠岐沖			山陰ー九州北部								常磐ー鹿島沖							東海ー四国沖		宮崎沖			天草ー五島沖			沖縄ー南西諸島	
区域名（参考）	北陸ー隠岐沖			山陰沖						北部九州小倉海域	北部九州松浦海域	常磐ー鹿島沖							御前崎沖		宮崎沖		別府湾	天草沖ー五島沖		枕崎沖	沖縄ー南西諸島	宮古島沖
地点番号	8-1	8-2	8-3	9-1	9-2	9-3	9-4	9-5	9-6	9-7	9-8	11-1	11-2	11-3	11-4	11-5			13-1		14-1		14-2	15-1	15-2	15-3	16-1	16-2
地点名	金沢沖	京都-福井沖	鳥取沖	山口沖	対馬西沖	萩沖	浜田沖	隠岐西沖	隠岐北沖	小倉沖	松浦沖	鹿島沖周辺福島沿岸	鹿島沖周辺北部	鹿島沖周辺中部	鹿島沖周辺南部	茨城沖北部			御前崎沖		宮崎沖		別府湾	天草沖	甑島西方	枕崎沖	沖縄-南西諸島	宮古島沖
個別貯留可能域			B構造													下部（北部）	下部（南部）	上部	御前崎沖B	御前崎沖A2	宮崎沖北部	宮崎沖南部		（下層）			沖縄-南西諸島	宮古島沖
2013年度末総合評価	A [2D]		A [2D]	S [2D]	S [2D]	S [2D]	B [2D]	S [2D]		NA	NA												C	B [2D]			NA	C
2014年度末総合評価	A [2D]		A [2D]	B [3D]	B [3D]	C	B [2D]	A [2D]	A [2D]	NA	NA	A [2D]	A [2D]	A [2D]	A [2D]				S [2D]	S [2D]	S [3D]	S [3D]	C	A [2D]			NA	C
2015年度末総合評価	B [3D]		S [3D]	B [3D]	B [3D]	C	B [2D]	A [2D]	A [2D]	NA	NA	S [2D]	S [2D]	S [2D]	S [2D]				B [3D]	B [3D]	S [3D]	S [3D]	C	B [2D]	C	C	NA	C
2016年度末総合評価	S [3D]		A [3D]	B [3D]	B [3D]	C	B [2D]	A [2D]	A [2D]	NA	NA	B [2D]	B [2D]	S [2D]	S [2D]				C	C	S [3D]	S [3D]	C	B [2D]	C	C	NA	C
2017年度末総合評価	S [3D]		A [3D]	B [3D]	B [3D]	C	B [2D]	A [2D]	A [2D]	NA	NA	B [2D]	B [2D]	S [2D]	S [2D]				C	C	S [3D]	S [3D]	C	B [2D]	C	C	NA	C
2018年度末総合評価	C	A [2D]	S [3D]	B [3D]	B [3D]	C	B [2D]	A [2D]	A [2D]	NA	NA	B [2D]	B [2D]	B [2D]	S [2D]	S [3D]	S [3D]	S [3D]	C	C	S [3D]	S [3D]	C	B [2D]	C	C	NA	C
2019年度末総合評価	C	A [2D]	S [3D]	B [3D]	B [3D]	C	B [2D]	A [2D]	A [2D]	NA	NA	B [2D]	B [2D]	B [2D]	C	S [3D]	S [3D]	S [3D]	C	C	S [3D]	S [3D]	C	B [2D]	C	C	NA	C
2019年度末総合評価	C	S [3D]	S [3D]	B [3D]	B [3D]	C	B [2D]	A [2D]	A [2D]	NA	NA	B [2D]	B [2D]	B [2D]	C	AD	AD	AD	C	C	AD	AD	C	B [2D]	C	C	NA	C
貯留層 深　度	○		○	○	○	○	○	○	○	○		◎	○	○	○	○	○	○	○	◎	○	○	○	○	○		○	△
貯留層 平均層厚	△		△	○	◎	◎	◎	○	◎	△		△	○	△	△	◎	◎	○	△	△	○	◎	NA	○	◎		NA	○
貯留層 性状(孔隙率)	△		◎	◎	◎	△	△-	○	◎	△-		○	○	○	○	△	△	◎	◎	◎	△	△	NA	○	△		NA	○
貯留可能量			△	△	○	◎	○	◎	◎	NA		○	△	△-	△	△-	△	△	△	△	△	△	△	○	◎		NA	
遮蔽層 最小層厚	◎		◎	◎	◎	◎	◎	◎	△	△		◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	△	NA	◎		NA	◎
遮蔽層 遮蔽能力	◎		○	△	△	△	○	NA	NA	◎		△	○	△	△	○	○	△-	○	○	○	○	△	△	NA		NA	NA
地質構造 構造安定度(断層等)	×		○	△	△	△-	△	△	△-	△		○	○	○	○	○	○	○	△-	○	○	○	×	△	NA	×	△	×
地質構造 地層傾斜	◎		△	◎	◎	◎	○	◎	◎	○		○	◎	○	◎	○	△	◎	○	○	◎	◎	NA	NA	◎	NA	NA	NA
構造性・非構造性	非構造性		構造性+非構造性	非構造性	非構造性	非構造性	非構造性	非構造性	非構造性	非構造性		非構造性	非構造性	構造性+非構造性	非構造性	非構造性	非構造性	非構造性	構造性+非構造性	構造性+非構造性	非構造性	非構造性	非構造性	NA	NA	非構造性	NA	非構造性
面積(km^2)			95	148	128	167	1,433	496	1,043	NA		600	170	20	120	80	555	581	195	239	328	77	54	240	338		NA	
水　深 (m)			291	>180	130-180	100	150	80-200	200-1000	0-10		100-150	150-200	150-200	200-300	120-300	120-500	120-500	500-1,000	500-1,000	100-800	200-600	5-50	50-150	835		>200	>200
離岸距離 (km)			25	110	5-15	20-40	20	30	80-100	0-5		10-35	40	35	33	25	25	25	20	30	10-20	20	5-10	5-10	67		NA	30
貯留可能量(百万t)　[A]			203	905	2,000	10,937	3,546	8,127	15,344	NA		1,186	924	101	304	144	851	481	302	293	960	458	217	1,046	7,300		NA	
貯留可能量(百万t/km^2)：単位面積			2.1	6.1	15.6	65.5	2.5	16.4	14.7	NA		2.0	5.4	5.1	2.5	1.8	1.5	0.8	1.5	1.2	2.9	6.0	4.0	4.4	21.6		NA	
技術評点　(x 10^{-3})　[B]			5.8	9.7	32.4	5.4	3.9	32.4	9.0	0.5		11.7	23.3	1.2	5.8	11.7	5.8	6.5	1.9	19.4	11.7	19.4	0.0	2.9	45.0		NA	
リスク付き貯留可能量(百万t)　[A] x [B]　[C]			1.2	8.8	64.8	59.1	13.8	263.3	138.1	NA		13.8	21.5	0.1	1.8	1.7	5.0	3.1	0.6	5.7	11.2	8.9	0.0	3.0	328.5		NA	
備　考	2018年度末時点の3D探査データを利用した総合評価。解析範囲に第四紀に活動した断層が多数分布するため、貯留可能域を設定不可。		2015年度末時点の密な2D探査データを利用した総合評価。	2014年度末時点の粗い2D探査データを利用した総合評価。有望区域は中間線に近接する。	2014年度末時点の粗い2D探査データを利用した総合評価。有望区域は中間線に近接する。	2014年度末時点の粗い2D探査データを利用した総合評価。広域地質構造の安定性に懸念があるため評価を保留。	2013年度末時点の既往文献を利用した総合評価。	2014年度末時点の粗い2D探査データを利用した総合評価。	2014年度末時点の粗い2D探査データを利用した総合評価。	2013年度末時点の既往文献を利用した総合評価。		2015年度末時点の粗い2D探査データを利用した総合評価。	2015年度末時点の粗い2D探査データを利用した総合評価。	2015年度末時点の粗い2D探査データを利用した総合評価。	2015年度末時点の粗い2D探査データを利用した総合評価。広域地質構造の安定性に懸念があるため評価を保留。	2019年度末時点の3D探査データを利用した総合評価。	2019年度末時点の3D探査データを利用した総合評価。	2019年度末時点の3D探査データを利用した総合評価。	2015年度末時点の粗い2D探査データを利用した総合評価。	2015年度末時点の粗い2D探査データを利用した総合評価。	2019年度末時点の3D探査データおよび追加2D探査データを利用した総合評価。	2019年度末時点の3D探査データおよび追加2D探査データを利用した総合評価。	2013年度末時点の既往文献を利用した総合評価。	2013年度末時点の既往文献を利用した総合評価。	MOE（2014）の調査候補地点案の情報を基に評価。	2016年度末時点の密な2D探査データを利用した総合評価。広域地質構造の安定性に懸念があるため評価を保留。	2013年度末時点の既往文献を利用した総合評価。	2013年度末時点の既往文献を利用した総合評価。

平成31年度から評価を開始

注）黄色に着色した調査地点は 2020 年度末（2021 年 3 月末）時点での有望な CO_2 貯留適地候補地点

表 5.2-4　総合評価状況（主要地点および評価を変えた地点）

調査地点名	評価	総合評価状況
石狩ー礼文沖	A	・総合評価を S としていたが、スケジュール上、2021 年度までに評価を実施できないことから、総合評価を A とした。
紋別沖	A	・総合評価を S としていたが、スケジュール上、2021 年度までに評価を実施できないことから、総合評価を A とした。
日高沖	S	・総合評価を S で継続する。
能代沖	AD	・総合評価を AD で継続する。
秋田沖	AD	・総合評価を AD で継続する。
本荘沖	AD	・総合評価を AD で継続する。
酒田沖	A	・既存 2D 探査データを再処理した。今後、新規 2D 探査を実施する地点として、総合評価を A に上げた。
新潟沖	S	・総合評価を S で継続する。
新潟北西沖	S	・基礎物理探査の 3D 探査データと基礎試錐の坑井データを活用して評価を実施できることから、総合評価を S とした。
佐渡南方沖	S	・基礎物理探査の 3D 探査データと基礎試錐の坑井データを活用して評価を実施できることから、総合評価を S とした。
佐渡西方沖	S	・総合評価を S で継続する。
京都-福井沖	S	・既存 2D 探査の再処理データおよび新規取得した 2D 探査データを活用して評価を実施できることから、総合評価を S に上げた。
鳥取沖（北部を含む）	S	・総合評価を S で継続する。
隠岐西沖	A	・地元調整が難航しているため、調査を順延している。 ・総合評価を A で継続する。
隠岐北沖	A	・地元調整が難航しているため、調査を順延している。 ・総合評価を A で継続する。
茨城沖北部	AD	・調査井掘削前 CO_2 挙動予測シミュレーションを実施し、1 億 t 以上の CO_2 が安定的に貯留できることが示された。 ・総合評価を AD に上げた。
宮崎沖	AD	・調査井掘削前 CO_2 挙動予測シミュレーションを実施し、1 億 t 以上の CO_2 が安定的に貯留できることが示された。 ・総合評価を AD に上げた。

【参考文献】

1）日本 CCS 調査、“平成３０年度二酸化炭素貯留適地調査事業委託業務報告書”（2019）

2）日本 CCS 調査、“平成２５年度中小企業等環境問題対策調査等委託費（全国二酸化炭素貯留層基礎調査）成果報告書”（2014）

3) (独)石油天然ガス・金属鉱物資源機構“平成 28・29 年度 国内石油・天然ガス基礎調査 基礎物理探査「鳥取～兵庫沖 3D」データ取得報告書、データ処理報告書”（2019）
4) (独)石油天然ガス・金属鉱物資源機構“平成 29・30 年度 国内石油・天然ガス基礎調査 基礎物理探査「鳥取～兵庫沖 3D」データ解釈報告書”（2020）
5) (独)石油天然ガス・金属鉱物資源機構“平成 27 年度 国内石油・天然ガス基礎調査 基礎物理探査「茨城沖北部 3D」データ取得報告書、データ処理報告書、データ解釈報告書”（2018）
6) (独)石油天然ガス・金属鉱物資源機構“平成 22 年度 国内石油・天然ガス基礎調査 基礎物理探査「天北西方 3D」データ取得報告書、データ処理報告書、データ解釈報告書”（2012）
7) (独)石油天然ガス・金属鉱物資源機構“平成 28 年度 国内石油・天然ガス基礎調査 基礎物理探査「利尻・礼文トラフ 2D/3D」データ取得報告書、データ処理報告書、データ解釈報告書”（2018）
8) (独)石油天然ガス・金属鉱物資源機構“平成 23 年度 国内石油・天然ガス基礎調査 基礎物理探査「オホーツク枝幸沖 3D」データ取得報告書”（2013）
9) (独)石油天然ガス・金属鉱物資源機構“平成 24 年度 国内石油・天然ガス基礎調査 基礎物理探査「オホーツク枝幸沖 3D」データ取得報告書、データ処理報告書、データ解釈報告書”（2014）
10) (独)石油天然ガス・金属鉱物資源機構“平成 24 年度 国内石油・天然ガス基礎調査 基礎物理探査「日高舟状海盆 3D」データ取得報告書”（2014）
11) (独)石油天然ガス・金属鉱物資源機構“平成 25 年度 国内石油・天然ガス基礎調査 基礎物理探査「日高舟状海盆 3D」データ取得報告書、データ処理報告書、データ解釈報告書”（2015）
12) (独)石油天然ガス・金属鉱物資源機構“平成 26 年度 国内石油・天然ガス基礎調査 基礎物理探査「日高舟状海盆西部 3D」データ取得報告書、データ処理報告書、データ解釈報告書”（2016）
13) (独)石油天然ガス・金属鉱物資源機構“平成 29 年度～令和元年度 国内石油・天然ガス基礎調査 基礎試錐「日高トラフ」調査報告書”（2020）
14) (独)石油天然ガス・金属鉱物資源機構“平成 13 年度 国内石油・天然ガス基礎調査 基礎物理探査「佐渡沖南西」調査報告書”（2003）
15) (独)石油天然ガス・金属鉱物資源機構“平成 20 年度 国内石油・天然ガス基礎調査 基礎物理探査「佐渡西方 3D」データ取得報告書、データ処理報告書、データ解釈報告書”

（2010）

16) (独)石油天然ガス・金属鉱物資源機構“平成 22 年度 国内石油・天然ガス基礎調査 基礎物理探査「能登東方 3D」データ取得報告書、データ処理報告書”（2012）

17) (独)石油天然ガス・金属鉱物資源機構“平成 23 年度 国内石油・天然ガス基礎調査 基礎物理探査「能登東方 3D」データ解釈報告書”（2013）

18) (独)石油天然ガス・金属鉱物資源機構“平成 15 年度 国内石油・天然ガス基礎調査 基礎試錐「佐渡南西沖 S」、基礎試錐「佐渡南西沖 D」調査報告書”（2005）

19) (独)石油天然ガス・金属鉱物資源機構“平成 23～25 年度 国内石油・天然ガス基礎調査 基礎試錐「上越海丘」調査報告書”（2014）

5.3　2021 年度以降の調査計画（案）の作成

2020 年度末時点での 2021 年度以降の調査計画（案）を記述する。

5.3.1　基本方針

本業務では、図 5.3-1 に示した従来から採用している貯留適地調査の進め方を踏襲し、以下の手順で 2021 年度以降の調査を段階的に進めることを基本方針とする。

1）2D 探査データ取得処理・データ地質解析

2）3D 探査データ取得処理･データ地質解析、調査井掘削前 CO_2 挙動予測シミュレーション

3）調査井掘削位置選定、基本設計、掘削、試料分析

4）CO_2 挙動予測シミュレーション、貯留適地総合評価

5）貯留適地決定

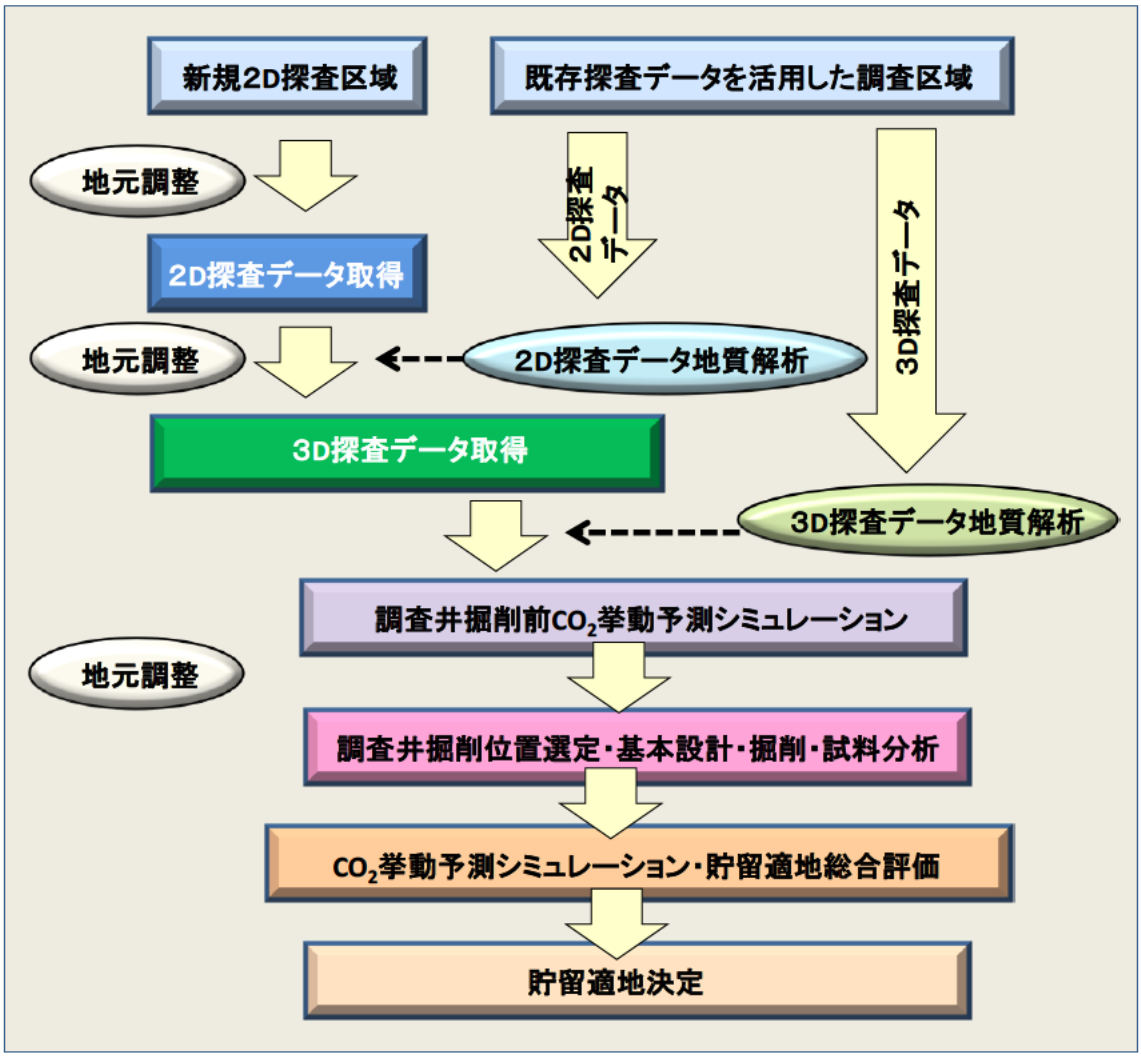


図 5.3-1　貯留適地調査の進め方

1)、2)については、利用可能な既存探査データがあれば、それらを可能な限り活用する。また、有識者委員会での検討と指摘を踏まえ、3D 探査データの地質解析が終了した地点のうち優先度の高い地点に対し調査井掘削前 CO_2 挙動予測シミュレーションを実施することとする。2021 年度末までに、調査井掘削前の段階での貯留適地評価により、より多くの有望な貯留適地候補を選定する。

3)～5)については、2022 年度以降に想定される第二段階の適地調査事業で実施されるものとし、2021 年度末までに抽出された有望な貯留適地候補から調査井を掘削する地点を選択するものと想定する。

5.3.2 貯留適地調査の進め方

5.2 節に記載した総合評価結果に基づき、調査進捗度が高い地点順に調査の進め方について記述する。

1) 本荘沖（総合評価 AD）

今後は、調査井掘削のために地元への周知、漁業関係者への周知等の調整を始め、掘削に向けた準備を検討する。一方で、貯留可能量算定域の南方に貯留可能域が広がる可能性が示唆されたことから、本業務において本地点の南部についての海底地形判読および海底地質情報のコンパイル、地質解析･貯留可能量評価を実施した。今後、本地点の南部についても調査井掘削前 CO_2 挙動予測シミュレーションを実施して、貯留可能量推定の精度を高める。

2) 能代沖（総合評価 AD）

今後は、調査井掘削のために地元への周知等の調整を進め、掘削に向けた準備を検討する。浅海域から陸上に掛けて実施した 3D 探査は貯留可能算定域全体をカバーしていないことから、貯留可能量推定の精度を高めるためには、貯留可能域の北部で新たな 3D 探査（OBC）データを取得して、地質解析･貯留可能量評価を実施する必要がある。

3) 秋田沖（総合評価 AD）

貯留可能量算定域の北方に貯留可能域が広がる可能性があるため、北部海域で取得された既存探査データの再処理、地質解析･貯留可能量評価、調査井掘削前 CO_2 挙動予測シミュレーションを実施して、貯留可能量推定の精度を高める。調査井掘削のためには、提案した調査井掘削位置において調査井の基本設計を実施して、準備を進める必要がある。

4) 宮崎沖（総合評価 AD）

本業務における調査井掘削前 CO_2 挙動予測シミュレーションにより、1 億 t 以上の CO_2 が安定的に貯留できることが示された。調査井掘削のためには、提案した調査井掘削位置において調査井の基本設計を実施して、準備を進める必要がある。

5) 茨城沖北部（総合評価 AD）

本業務における調査井掘削前 CO_2 挙動予測シミュレーションにより、1 億 t 以上の CO_2 が安定的に貯留できることが示された。また、貯留層および遮蔽層評価の精度向上を目的として、本業務において基礎物理探査の 3D 探査データを使用した物性解析を実施した。この結果を踏まえた地質解析と貯留可能量評価を本業務（来年度に繰越）において実施する。調査井掘削のためには、提案した調査井掘

削位置において調査井の基本設計を実施して、準備を進める必要がある。

6) 日高沖、新潟沖、佐渡西方沖、鳥取沖（総合評価 S）

本業務において地質解析･貯留可能量評価を実施し、それぞれ 1 億 t 以上の CO_2 貯留可能量が算定されたことから、調査井掘削前 CO_2 挙動予測シミュレーションの実施を検討する。

7) 新潟北西沖、佐渡南方沖（総合評価 S）

JOGMEC が公開した基礎物理探査の 3D 探査データを活用して地質解析を実施して、貯留可能量評価を実施する。評価の結果次第で調査井掘削前 CO_2 挙動予測シミュレーションの実施も検討する。

8) 京都－福井沖（総合評価 S）

新規に取得した 2D 探査データおよび既存 2D 探査の再処理データを用いて、隣接する金沢沖および鳥取沖の評価も活用しながら、地質解析･貯留可能量評価を実施し、貯留可能量を算定する。評価の結果次第で、新規 3D 探査および調査井掘削前 CO_2 挙動予測シミュレーションの実施も検討する。

9) 酒田沖（総合評価 A）

新規に 2D 探査を実施する。同データと既存 2D 探査の再処理データを用いて、地質解析･貯留可能量評価を実施し、貯留可能量を算定する。評価の結果次第で、新規 3D 探査および調査井掘削前 CO_2 挙動予測シミュレーションの実施も検討する。

10) 石狩－礼文沖、紋別沖（総合評価 A）

利用可能な基礎物理探査の 2D/3D 探査データ、基礎試錐の坑井データおよび民間坑井データが存在し、地質解析･貯留可能量評価の実施が可能であるが、調査実施保留とし、2021 年度までの調査計画に含めない。

11) 隠岐西沖、隠岐北沖（総合評価 A）

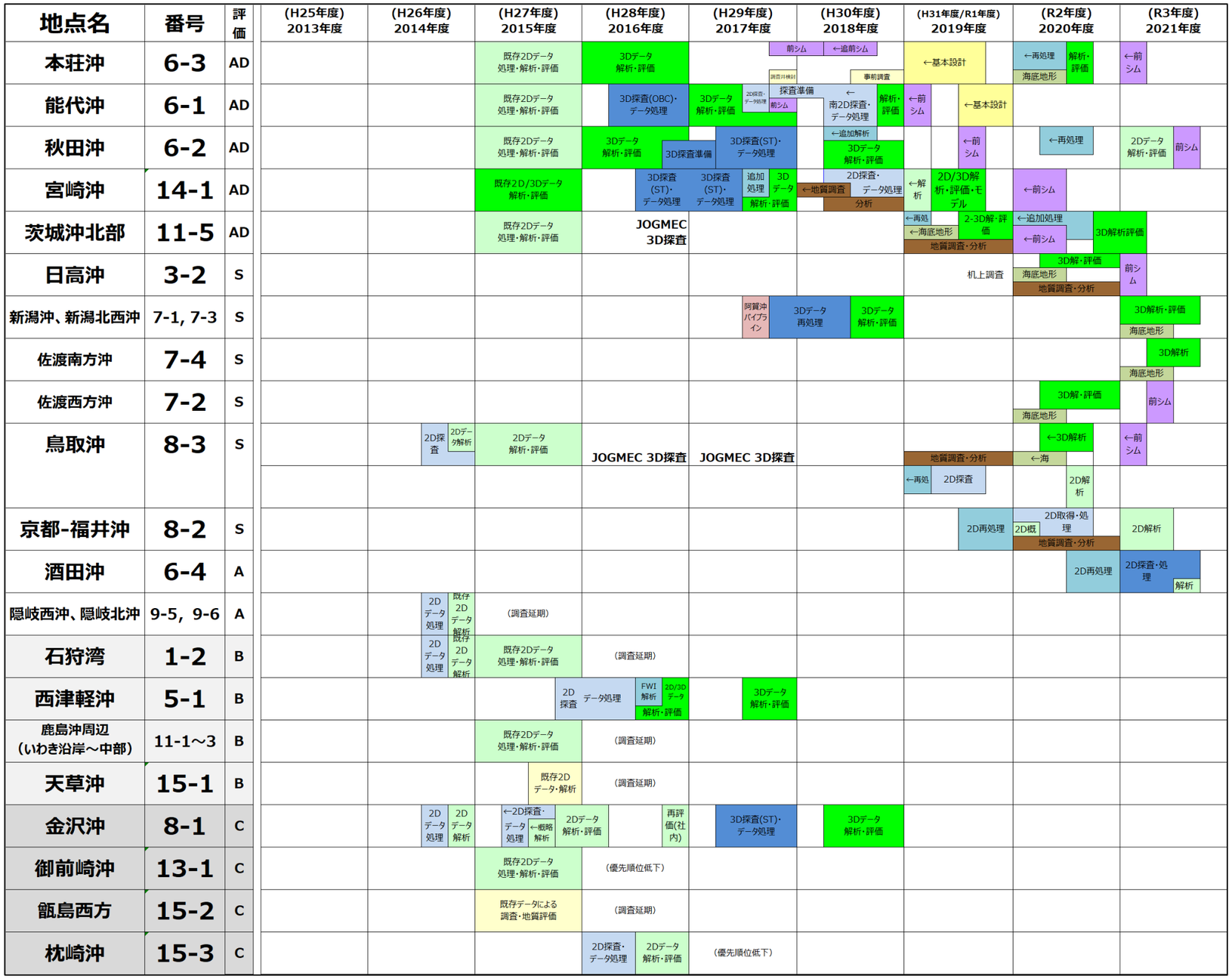
地元調整が難航しているため 2021 年度までには 2D 探査を実施できる態勢にはないが、最新の情報を収集し、2022 年度以降に実施できるように地元調整を継続する。

総合評価 B の地点のうち、基礎物理探査の 3D 探査データの公開待ちの状況である山口沖、対馬西沖、浜田沖の 3 地点について、2021 年度以降に 2D 探査を実施できるように地元調整を継続する。平成３１年度委託事業において、貯留適地調査の追加候補地点としてあげた天草－五島沖海域の福江沖（仮称）および茨城沖南部（仮称）は、調査実施保留とした。

5.3.3　2021 年度の調査計画（案）

2021 年度末にこれまでの適地調査事業の総括を行うものとし、図 5.3-2 に、2020 年度末時点における評価経緯と 2021 年度の予定を記載した。平成３１年度委託事業の報告書で示したように、第二段階の適地調査事業において、2022 年度以降に 2021 年度末評価 AD の地点から複数地点を選択し調査井掘削に向けた準備を開始すると仮定すると、調査井掘削が最早で 2024～2027 年度となり、評価作業の終了は 2028 年度と想定される。

本計画（案）は 2020 年度末（2021 年 3 月末）時点の暫定的なものであり、2D/3D 探査および調査井掘削作業のタイミングは、漁業活動の時期や海象条件の制約にくわえて、地元調整や資機材調達等の影響を受けるため、計画は随時更新することとする。



注）前シム：調査井掘削前 CO_2 挙動予測シミュレーションの略である。
注）薄灰色の地点は諸般の事情により調査を中断した地点、濃灰色の地点は技術評価により調査継続を中止した地点である。
注）石狩ー礼文沖、紋別沖、福江沖（仮称）、茨城沖南部（仮称）については、調査保留のため計画案に含まない。

図 5.3-2　貯留適地調査計画（案）（2021 年 3 月）

5.4　適地調査地点のデータ管理方法の検討

当社は、2014 年度から 2020 年度まで経済産業省と環境省による共同事業（平成２６年度委託事業～本業務）を受託し、本業務および 2021 年度業務において新たに追加する 2 地点（新潟北西沖、佐渡南方沖）を含めて 16 海域 41 地点（表 5.1-3）の中から優先調査地点を設定し、貯留適地調査を実施してきた。2021 年度までに 41 地点のうち 27 地点において貯留適地調査を実施する予定である。

貯留適地調査で得たデータおよび資料は、2022 年度以降に想定される第二段階の適地調査事業においても活用されることが望ましい。そのため、平成３１年度委託事業において、貯留適地の調査で得た各種データおよび資料の散逸を防ぎ、一元管理できるようなデータ管理方法（データアーカイブシステム）の検討を Phase-1 として実施した。令和３年度委託事業において、2021 年度までの貯留適地調査実施 27 地点（予定を含む。）においてデータアーカイブを Phase-2 として実施する予定である。本業務ではデータアーカイブに関する作業を実施しないが、表 5.4-1 に、データアーカイブの対象地点、2020 年度末の地点評価および 2021 年度末の調査概況予測を示す。

Phase-1 では、データアーカイブシステムの概念設計およびデータアーカイブのサンプルの作成を実施した。データアーカイブシステムの概念設計では、データストレージの検討、フロントエンドの検討、アーカイブするデータの種類およびデータフォーマット等の検討、アーカイブするデータのデータ所有者によるデータの選別方法等の検討を実施した。データアーカイブのサンプル作成では、能代沖と茨城沖北部の 2 地点を例として、データアーカイブシステムの概念設計にて検討した方針に従い、貯留適地調査で得たデータおよび資料を用いてデータの整理ならびに収集を実施した。データアーカイブのサンプル作成作業において得た問題点および課題を検討し、Phase-2 の作業に反映させるべく作業方針を整理した。

令和３年度委託事業にて計画している Phase-2 では、Phase-1 で決めた作業方針に従い、残りの 25 地点において、貯留適地調査で得たデータおよび資料を用いてデータの整理ならびに収集を実施するとともに、Phase-1 で実施した 2 地点において残りの 25 地点と整合するように修正作業を実施する予定である。

表 5.4-1　データアーカイブの対象地点、2020 年度末の地点評価および 2021 年度末の調査概況予測

海域番号	海域名	追番	地点番号	地点名	データアーカイブ対象地点	対象地点の2020年度末の総合評価	対象地点の2021年度末の調査概況予測	
1	石狩ー礼文沖海域	1	1-1	石狩-礼文沖		A	未着手	2020年度に民間データ借用不可能となったため中止
		2	1-2	石狩湾	○	B	延期	2015年度末で延期、海域の漁業状況により2D探査の実施困難
2	オホーツク海域	3	2-1	北見大和堆		B	未着手	
		4	2-2	紋別沖		A	未着手	調査業務量により2021年度末までの実施を中止
3	北海道南部ー久慈沖海域	5	3-1	内浦湾		NA	未着手	
		6	3-2	日高沖	○	S	継続	2021年度調査井掘削前シム実施予定
		7	3-3	渡島半島東方沖		NA	未着手	
4	十勝ー釧路沖海域	8	4-1	十勝沖		NA	未着手	
5	渡島半島ー津軽沖海域	9	5-1	西津軽沖	○	B	終了	2016年度末で終了、水深が深すぎるため不適と判定
6	秋田ー庄内沖海域	10	6-1	能代沖	○	AD	継続	調査井掘削計画まで実施
		11	6-2	秋田沖	○	AD	継続	前シムまで実施、2021年度追加で地質解析＆前シム実施予定
		12	6-3	本荘沖	○	AD	継続	調査井掘削計画まで実施、2021年度追加で前シム実施
		13	6-4	酒田沖	○	A	継続	2021年度2D探査、地質解析実施予定
7	新潟ー富山沖海域	14	7-1	新潟沖	○	S	継続	地質解析まで実施
		16	7-2	佐渡西方沖	○	S	継続	2021年度前シム実施予定
		15	7-3	新潟北西沖	○	S	継続	3D探査2020年度JOGMEC公開、2021年度地質解析実施予定
		17	7-4	佐渡南方沖	○	S	継続	3D探査2020年度JOGMEC公開、2021年度地質解析実施予定
8	北陸ー隠岐沖海域	18	8-1	金沢沖	○	C	終了	2018年度末で終了、技術評価で不適と判定
		19	8-2	京都－福井沖	○	S	継続	2021年度地質解析実施予定
		20	8-3	鳥取沖	○	S	継続	2021年度前シム実施予定
9	山陰－九州北部海域	21	9-1	山口沖	○	B	継続	3D探査公開待ち（JOGMEC）
		22	9-2	対馬西沖	○	B	継続	3D探査公開待ち（JOGMEC）
		23	9-3	萩沖	○	C	延期	3D探査公開待ち（JOGMEC）
		24	9-4	浜田沖		B	継続	3D探査公開待ち（JOGMEC）
		25	9-5	隠岐西沖	○	A	延期	2D探査の実施許諾待ち（JF島根）
		26	9-6	隠岐北沖	○	A	延期	2D探査の実施許諾待ち（JF島根）
		27	9-7	小倉沖		NA	未着手	
		28	9-8	松浦沖		NA	未着手	
11	常磐ー鹿島沖海域	29	11-1	鹿島沖周辺福島沿岸		B	延期	東日本大震災の影響で今後の調査は未定
		30	11-2	鹿島沖周辺北部		B	延期	東日本大震災の影響で今後の調査は未定
		31	11-3	鹿島沖周辺中部		B	延期	東日本大震災の影響で今後の調査は未定
		32	11-4	鹿島沖周辺南部	○	C	終了	2019年度末で終了、技術評価で不適と判定
		33	11-5	茨城沖北部	○	AD	継続	前シムまで実施、2019年度追加解析実施、2020年度追加で地質解析実施予定
13	東海ー四国沖海域	34	13-1	御前崎沖	○	C	終了	2016年度末で終了、技術評価で不適と判定
14	宮崎沖海域	35	14-1	宮崎沖	○	AD	継続	前シムまで実施
		36	14-2	別府湾		C	未着手	
15	天草ー五島沖海域	37	15-1	天草沖	○	B	延期	2D探査の実施許諾待ち
		38	15-2	甑島西方	○	C	延期	2D探査の実施許諾待ち
		39	15-3	枕崎沖	○	C	終了	2016年度末で終了、技術評価で不適と判定
16	沖縄ー南西諸島沖海域	40	16-1	沖縄-南西諸島		NA	未着手	
		41	16-2	宮古島沖		C	未着手	

注）　前シム：調査井掘削前 CO_2 挙動予測シミュレーションの略

第６章

社会的受容性の醸成活動

第６章　社会的受容性の醸成活動

6.1　概要

貯留適地調査事業に関連して、社会的受容性の醸成活動の一環として、CCS への理解促進のため、2020 年度は全国 6 箇所の環境系展示会に出展する計画であった。しかしながら、新型コロナウイルス感染症拡大の影響によりほとんどのイベントが中止となり、下記 1 箇所の展示会に出展するに留まった。

1）いしかわ環境展（石川県金沢市）

出展については、本事業の調査地域や情報発信の継続性、および事業委託者のアドバイスにより選択した。

展示会で配布した貯留適地調査パンフレットを図 6.1-1 に示す。また、今年度は説明員がいない状態でも CCS 技術や適地調査事業の概要を理解してもらえるように展示用ポスターを新規制作した。新規制作した貯留適地調査用ポスターを図 6.1-2 に示す。また、「苫小牧におけるＣＣＳ大規模実証試験事業」で制作した図 6.1-3 に示すツール（パンフレット類）を CCS 事業の説明で使用した。



図 6.1-1　配布した貯留適地調査パンフレット



図 6.1-2　貯留適地調査用ポスター（新規制作）



CCS パンフレット　　CCS 実証試験パンフレット　　まんが（続編）

図 6.1-3　CCS 事業説明用ツール（パンフレット類）

6.2　いしかわ環境展

6.2.1　実施目的

貯留適地調査事業における社会的受容性の醸成に向けた情報発信活動の一環として、いしかわ環境展に出展を行い、石川県内の一般市民に向けて、地球温暖化対策としての CCS 関連技術および貯留適地調査事業の情報発信を行う。

6.2.2　実施戦略

今年度は、新型コロナウイルス感染症拡大の影響を受け、従来の開催方式とは異なり説明員を置かないポスター展示のみのブース出展となった。それに伴い、既存のパネルでは十分に情報を伝えられないことから、新たにポスターを制作し分かりやすい情報発信に努めた。また、成果測定のためにアンケートを実施し、定量的データの獲得を行った。

6.2.3　開催実績

［名　　称］　いしかわ環境展

［会　　期］　第 1 期：2020 年 10 月 27 日（火）～11 月 4 日（水）

第 2 期：2020 年 11 月 26 日（木）～12 月 2 日（水）

［会　　場］　第 1 期：石川県庁 19 階「展望ロビー」

第 2 期：石川県地場産業振興センター本館「じばさんギャラリー」

［テ　ー　マ］　「環境問題への取り組みをご紹介！」

海洋汚染の原因となっているプラスチックごみ対策や節電等による省エネルギー、食品ロス削減、異常気象等の気候変動への適応、里山里海の保全等、暮らしと密接に関連する環境問題やその対応策をパネル等で分かりやすく紹介する。

［主　　催］　公益社団法人いしかわ環境パートナーシップ県民会議

［出 展 内 容］　ポスターの展示、パンフレットの配布、アンケート調査

［来場者数］　第 1 期：4,000 名

第 2 期：4,000 名

※来場者数は、主催者からの報告による。

［主な出展者］　石川県温暖化・里山対策室、石川県健康福祉部健康推進課、石川県土木部、一般財団法人日本気象協会、金沢地方気象台ほか 48 ブース

ブース来訪者への各パンフレット種類別配布部数を表 6.2-1 に、アンケケート結果を表 6.2-2 に示す。

表 6.2-1　各パンフレット種類別配布部数

種類【配布部数】※配布部数は第 1 期と第 2 期の合計
1) 貯留適地調査パンフレット【33 部】 2) CCS パンフレット【27 部】 3) CCS 実証試験パンフレット【33 部】 4) まんが（続編）【48 部】
合計配布部数【141 部】

表 6.2-2　アンケート結果

回答者数：9 名
1) 弊社の展示ブースについて、全体的にいかがでしたか？ A.満足【5 名】、B.やや満足【3 名】、C.どちらともいえない【1 名】、 D.やや不満足【0 名】、E.不満【0 名】
2) 弊社の展示ブースでは、下記のどれにご興味を持たれましたか？（複数回答可） A.展示ポスター【5 名】、B.パンフレット（貯留適地調査）【2 名】、 C.パンフレット（CCS）【2 名】、D.パンフレット（CCS 実証試験）【3 名】、 E.パンフレット（まんが続編）【3 名】
3) 展示内容は分かりやすかったですか？ A.とても分かりやすかった【1 名】、B.分かりやすかった【8 名】、 C.どちらともいえない【0 名】、D.分かりにくかった【0 名】、 E.とても分かりにくかった【0 名】
4) CCS について、本日ご来場前は、どの程度ご存じでしたか？ A.すでによく知っていた【0 名】、B.ある程度知っていた【4 名】、 C.言葉は聞いたことがある程度【2 名】、D.まったく知らなかった【3 名】
5) 弊社の展示ブースをご覧になられて、CCS についてどの程度、ご理解いただけましたか？ A.十分理解できた【1 名】、B.ある程度理解できた【8 名】、 C.どちらともいえない【0 名】、D.あまり理解できなかった【0 名】、 E.まったく理解できなかった【0 名】
6) あなた自身について、さしつかえない範囲でお答えください。 性別：A.男性【3 名】、B.女性【6 名】、C.答えたくない【0 名】 年代：A.10 代以下【1 名】、B.20 代【0 名】、C.30 代【2 名】、D.40 代【0 名】、 E.50 代【3 名】、F.60 代【1 名】、G.70 代【2 名】、H.80 代【0 名】 職業：A.会社員・役員【3 名】、B.大学・研究機関【0 名】、C.公務員【1 名】、 D.農水産業【0 名】、E.自営業（農業・水産業以外）【1 名】、 F.専業主婦（夫）【1 名】、G.学生【1 名】、H.パート・派遣等【1 名】、 I.無職【0 名】、その他【1 名】 住い：A.石川県内【9 名】、B.石川県外【0 名】

6.2.4　考察

今回は説明員を置かない方式での展示会のため来場者と対面でのコミュニケーションを取ることができず、一方通行の情報発信活動となった。しかしながら、パンフレット類の合計配布部数が 141 冊という結果から見て、ある程度の人数のほうが当社のブースに興味を持っていただいたと考える。また、アンケートの回答者は 9 名と少ないながら、定量的なデータを取得することができた。

アンケートの集計結果から以下を考察する。

Q1 と Q3 の当社ブースの満足度について、Q1 では A.満足・B.やや満足と回答した方が全体の 89%、Q3 では A.とても分かりやすかった・B.分かりやすかったと回答した方が全体の 100%となり、おおむね満足してもらえたと考える。また、Q4 の CCS 認知度については、C.言葉は聞いたことがある・D.まったく知らなかったと回答した方が全体の 56%で、CCS の周知活動として成果があったことがわかる。アンケートは、手書き用にくわえて、回答率の向上を図るためにスマートフォン等から回答可能な web アンケートも準備したが、web 回答者はゼロであったため、次回への課題としたい。

北陸地方では貯留適地調査を今後も実施する可能性があり、主催者や事務局には地元自治体等が関係していることから、地元との関係強化のためにも、今後も出展・協力していくべきと考える。

6.3　総括

これまで貯留適地調査事業における社会的受容性の醸成活動の一環として出展してきた展示会では、地球温暖化対策としての CCC 技術の概要や安全性、国内における本事業の実施、また、我が国における CCS の実証例である苫小牧 CCS 実証試験について、対面による丁寧な説明に重点を置きながら実施してきた。しかしながら、2020 年度は新型コロナウイルス感染症が急速に拡大し、感染が落ち着くのか拡大するのか先が見えない状態が続き、結果として予定していたイベントの多くが中止となった。また、開催されたイベントでも説明員を置くことができず、年度を通して対面での説明がまったくできなかった。今後の活動においては、本状況を鑑み、新たな情報発信の手段を検討・実施することが肝要となる。

本事業に関してはフェーズが最終段階に近づくに当たり、ブース出展地域住民との関わり方に留意する必要があるため、出展する展示会の選定に関しては委託者と協議のうえ判断するとともに、with コロナの中で、展示会への出展以外にも効果的な広報の在り方や活動の方法を検討し、社会的受容性の醸成に努めたい。

第７章

有識者委員会の運営

第７章　有識者委員会の運営

本業務では、以下に示す委員会を設置した。

1) 令和２年度二酸化炭素貯留適地調査事業委託業務に係る有識者委員会

2) 再委託契約の技術的妥当性を判断する第三者委員会

2)の第三者委員会に関しては、入札可能性調査の結果、再委託契約に伴う委託業者の技術的妥当性の判断を必要とする再委託業務の発生がなく、2020 年度は開催していない。

7.1　有識者委員会の目的と設置

第三者の有識者による助言と確認を受け、本事業を的確に推進することを目的に、本事業に係る委員会「令和２年度二酸化炭素貯留適地調査事業委託業務に係る有識者委員会」（以下、「有識者委員会」と称する。）を設置した。

7.2　委員構成および基本的な運営方針

有識者委員会は、委員長１名、CCS に関わる専門的知見および地質調査・研究等の実績を有する大学・研究機関等の学識経験者 11 名、計 12 名の委員により構成する。2020 年度は、新型コロナウィルス感染拡大防止のため Web 開催を併用したハイブリット方式により東京で 2 回開催した。また、本業務期間の繰り越しに伴い 2021 年度に東京で 3 回目の有識者委員会を開催した。

有識者委員会の構成委員は、以下に示すとおりである。

〈委員長〉

松岡 俊文　　(公財)深田地質研究所 顧問
　　専門：地球物理学、CCS 全般

〈委員〉　（アイウエオ順）

東　垣　　(国研)海洋研究開発機構 理事
　　専門：海洋調査・研究を専門とする機関の責任者、海洋地質学、堆積学

安藤 寿男　　(国学)茨城大学 理学部理学科 地球環境科学コース 教授
　　専門：地質（堆積学）

伊藤 慎　　(国学)千葉大学 大学院理学研究科 生命圏科学専攻 地学コース 教授
　　専門：地質（層序学、堆積学）

佐藤 徹　(国学)東京大学 大学院新領域創成科学研究科 環境学研究系
海洋技術環境学専攻 教授
専門：CO_2の海洋隔離法と海域地中貯留での環境影響評価手法の開発等

薛　自求　二酸化炭素地中貯留技術研究組合 技術部長
兼 (公財)地球環境産業技術研究機構 CO_2 貯留研究グループ 主席研究員
専門：CCS 全般、特にモニタリング

高木 是　(独)石油天然ガス・金属鉱物資源機構 石油天然ガス開発推進本部
探査部 アドバイザー
専門：油層工学、民間企業での探鉱、開発、生産および CO_2-EOR の実務経験、現在は北米シェールの研究開発

辻　健　(国学)九州大学 大学院工学研究院 地球資源システム工学部門 地球工学講座 物理探査研究室 教授
兼務 カーボンニュートラル・エネルギー国際研究所 CO_2 貯留部門長
専門：海洋地質、物理探査、シミュレーション

遠田 晋次　(国学)東北大学 災害科学国際研究所 災害理学研究部門 教授
専門：活断層の地震発生履歴および地震の連鎖現象と断層間相互作用

中尾 信典　(国研)産業技術総合研究所 地質調査総合センター 研究戦略部長
CO_2 地中貯留に関する研究を統轄
専門：地熱貯留層工学、物理探査

長縄 成実　(国学) 秋田大学国際資源学研究科 資源開発環境学 教授
専門：石油掘削、坑口装置閉鎖技術

松島 潤　(国学)東京大学 大学院新領域創成科学研究科 環境システム学専攻
エネルギー資源システム学分野 教授
専門：弾性波探査、メタンハイドレート、岩石物理学

7.3 開催実績

7.3.1 第 1 回有識者委員会

開催日時：2020 年 6 月 29 日（月） 14：30～17：45

開催場所：日本ＣＣＳ調査(株) 1901/1902 会議室

議題

1) 平成３０年度二酸化炭素貯留適地調査事業委託業務

A) 2018 年度第 4 回有識者委員会（書面開催）における指摘事項への回答

2) 平成３１年度二酸化炭素貯留適地調査事業委託業務（繰越含）報告

A) 2019 年度委託業務の進捗報告

B) 鳥取沖 2D 探査データの取得・処理

C) 鳥取周辺、茨城周辺地表調査・試料分析

D) 茨城沖北部地質解析・貯留可能量評価

E) 貯留適地決定プロセスの検討業務

F) 廃坑井による CO_2 漏洩リスク評価に係る予備調査

3) 令和２年度二酸化炭素貯留適地調査事業委託業務報告

A) 2020 年度委託業務の概要

B) 候補区画の探査データ取得・評価実績と今後の見通し

7.3.2　第 2 回有識者委員会

開催日時：2021 年 3 月 1 日（月）　14：00～17：45

開催場所：日本ＣＣＳ調査(株)　1901/1902/1903 会議室

議題

1) 二酸化炭素貯留適地調査事業委託業務進捗報告

A) 2020 年度第 1 回有識者委員会での指摘事項整理

2) 平成３１年度二酸化炭素貯留適地調査事業委託業務（繰越）報告

A) 2019 年度委託業務の進捗報告およびデータアーカイブについて

B) 茨城沖北部物性解析

C) 茨城沖北部調査井掘削前 CO_2 挙動予測シミュレーション

D) 宮崎沖調査井掘削前 CO_2 挙動予測シミュレーション

3) 令和２年度二酸化炭素貯留適地調査事業委託業務報告

A) 2020 年度委託業務の進捗報告

B) 京都-福井沖 2D 探査データ取得・処理

C) 北海道日高周辺、京都-福井沖周辺地表地質調査・試料分析

D) 日高沖地質解析・貯留可能量評価

E) 本荘沖南部地質解析・貯留可能量評価

F) 鳥取沖統合地質解析・貯留可能量評価

4) 2021 年度以降の貯留適地調査計画（案）

A) 2021 年度計画概要および廃坑井是正実現可能性調査について

B) 適地調査事業の実績と今後の見通し

C) 総括報告書のとりまとめ方針（案）

7.3.3 第 3 回有識者委員会

開催日時：2021 年 11 月 25 日（木） 14：30～16：00

開催場所：日本ＣＣＳ調査(株) 1901/1902/1903 会議室

議題

1) 令和 2 年度二酸化炭素貯留適地調査事業委託業務（繰越）報告

A) 2020 年度委託業務の進捗報告

B) 茨城沖北部地質解析・貯留可能量評価

C) 本荘沖の南部調査井掘削前 CO_2 挙動予測シミュレーション

D) 佐渡西方沖調査井掘削前 CO_2 挙動予測シミュレーション

7.4 検討内容の概要

第 1 回～第 3 回の各有識者委員会における検討内容の概要を以下に記載する。

7.4.1 第 1 回有識者委員会

(1) 平成３０年度二酸化炭素貯留適地調査事業委託業務

① 2018 年度第 4 回有識者委員会（書面開催）における指摘事項への回答

7 件の議題のうち、図面なしでは説明が困難であった 3 件、宮崎沖地質解析、秋田沖シミュレーション、本荘沖調査井基本設計について図面をもとに指摘事項へ回答した。

(2) 平成３１年度二酸化炭素貯留適地調査事業委託業務（繰越含）報告

① 2019 年度委託業務の進捗報告

2019 年度に終了した業務と 2020 年度に繰り越した業務に関してその進捗および概要を説明した。

② 鳥取沖 2D 探査データ取得・処理

鳥取沖は 2014 年度から調査を実施してきたが、2015 年度に実施した貯留可能量評価範囲の北側に堆積層が厚く存在する地域が見いだされた。この地域が貯留可能区域となりうる可能性を確認するために、2019 年度に 2D 探査を行った。12 測線の探査データの取得と処理が完了し、貯留可能候補区域の評価を可能にする資料が得られたので、2020 年度業務として地質解析と貯留可能量評価作業に入る。

委員との主な質疑応答は以下のとおりである。

1) 質問 : 取得データのクオリティーが高く、データ処理と結果断面も適切であると思われるが、やや深いところにある強い反射イベントは基盤と考えてよいか。また、基盤であれば空間的な変化があるようにも見えるので、最終的な構造を推定しようとするとき、2D 解析で妥当か。

   回答 : 指摘のとおり音響基盤相当の層準と考えている。今回の取得データは測線間隔が 5～10 km と粗いので既存のデータを加えて 2D で解釈する予定であるが、有望であることが確認された場合は 3D 探査も考慮している。

2) 質問 : 直交する測線もあるので、直交部分の整合性も検証するのか。

   回答 : 検証する。

3) 指摘 : 基盤が、西北西―東南東方向の構造になっているのに対し、直交する測線は機械的に南北方向に設定している。3D を実施するときは構造と平行に切るのがよいか、それとも今回のように機械的に南北に切るのがよいのか、測線の取り方に注意して検討を進めてはどうか。

4) 指摘 : 地質解釈はこれからだと思うが、活断層のような気になる構造が見えている。日本海プロジェクトとして丹念に調査されているので、注意して進めるとよい。

③　鳥取周辺・茨城周辺地表地質調査・試料分析

対象地域の貯留層・遮蔽層評価に資するための物性データの取得を目的として、地表調査・分析を実施した。今回実施した分析項目は、岩石鉱物分析、貯留岩分析、遮蔽岩分析、岩石物性分析で、これらに基づいて貯留岩性状、遮蔽岩性状を評価した。

1) 鳥取周辺

   2015 年度の地質解析で基礎試錐「鳥取沖」で確認された中部中新統層準の砂岩部分を貯留層、泥岩部分を遮蔽層に設定したが、それらの層準に加え、松江層と古浦層の調査を実施し、先行研究および地表調査の結果から堆積環境の推定を行った。貯留層対象層準については、松江層砂岩がもっとも貯留岩性状が良く、牛切層砂岩にはばらつきがあり、古浦層砂岩は性状が悪いという結果を得た。遮蔽層対象層準については、成相寺層、牛切層、松江層の遮蔽岩性状が良いという結果となった。

2) 茨城周辺

   2016 年度の地質解析で、基礎試錐「常磐沖」から下部中新統の砂岩部を貯留層、泥岩部を遮蔽層と設定しており、これらの層準について地表調査を実施し、先行

研究および地表調査の結果から堆積環境を推定した。貯留層対象層準の水野谷層は埋没が進んでいないため貯留岩性状が良く、五安層は基質の少ない外浜で堆積したと推定される性状の良い砂岩と基質の少ない内側陸棚で堆積したと推定される性状の悪い砂岩が混じり、ばらつきがある結果を得た。遮蔽層対象層準では、水野谷層、亀ノ尾層、多賀層群の泥岩は、埋没が進んでいないため遮蔽能力が低いという結果となったが、海域でより埋没が進んだ泥岩では、遮蔽岩性状がいい可能性があると考えている。

委員との主な質疑応答は以下のとおりである。

1) 質問：コアの採取が、地表なので試料の風化の影響が問題になるかもしれない。例えば風化に耐えて崩れていない岩石は浸透率が小さくなったりするので、それを排除するためには少し掘ったほうがよい。5～10 m 程度ボーリングしてコアを採取し分析するとばらつきも少なくなりハンドリングもしやすくなると思うが、どうか。

回答：少しでも深く掘って試料を採取すれば良くなると思うが、現在はできるだけ新鮮な部分を採取するにとどめている。今後の参考にしたい。

2) 質問：鳥取、茨城の岩石薄片で黄鉄鉱（パイライト）が異常に多いが、断言できるのか。

回答：XRD の分析結果であり、正しいと考えている。

3) 質問：1/3 から 1/4 くらいがパイライトというのは違和感がある。パイライトと特定してよいのか調べてもらいたい。

回答：もう少し追究してみる。

4) 質問：露頭の詳しいデータが出てきたが、実際に野外で採取したデータと、想定されるより沖合のデータとは当然ずれがあると思うが、それを結びつけるようなアイデアはあるのか。

回答：採取した試料は地表のものであるが、鉱物から埋没深度の推定を行っており、実際に海域で想定している対象層の深度と比較して、地表調査試料の分析結果を使用する際には補正しながら使用していきたいと考えている。坑井がある場合はより確かなものを優先し、地表調査試料の分析結果は参考として扱っていきたい。

5) 質問：整理すると、対象層準と地表試料を対比するというのは、堆積相や堆積環境の変化がどうなっているか、また圧密曲線に沿って圧密の影響はどうなっていくかという二つの要素を入れながら、地表に戻して相当するかどうかを確認

し対比をするということか。

回答：そのように考えている。

6) 質問：そのように戻すのであれば、地表試料は浸透率や孔隙率だけではなく、波の速度を測定すべきではないか。浸透率や孔隙率は坑井データとは直接的にはリンクしにくいと思われるので、例えばコアに圧力をかけていく段階で P 波の速度も測れば、坑井のログデータと結び付けられるのではないかという気がする。試料が短いので P 波は簡単に取れると考える。なお、P 波には、指向性があるので測定方法に配慮が必要である。

回答：コアを採取するときに方向は確認しているが、地下でどうなっているのかについては問題が残る。P 波測定について検討していきたい。

7) 指摘：島根半島も常磐地域も対象となる地域と陸で露頭した位置が非常に離れているので、地表データを外挿することに疑問もあると思う。しかし、この方法以外では物性データを得られないとすれば、この方法を第一次近似として検討を開始して、種々検討しながら進めるしかないだろう。

④　茨城沖北部地質解析・貯留可能量評価

報告内容は、経緯と解析範囲、地質概要と地質構造解析、堆積相解析と貯留可能量評価、今後の対応の 4 項目である。

1) 経緯と解析範囲

2018 年度に再処理した既往 2D 探査データおよび既往 3D 探査データを用いて、地質解析ならびに貯留可能量の推定を行った。地質解析範囲は常磐沖堆積盆、阿武隈リッジの南端に位置する。

2) 地質概要と地質構造解析

解析の結果、おおむね四つのブロックに分かれており、西から西部堆積盆地、中央隆起帯、東部隆起帯、南東部堆積盆地となる。断面図を見ると西部に中新世前期の堆積物が比較的厚く分布し、中央隆起部から東部はそれが薄くなると同時に、断層が多い。また中部から西部にかけては比較的地震が少なく震源深度は 10～30 km であり、東側や陸域は深度 0～10 km にかけて集中して発生している。なお、解析に先立って民間坑井の柱状図、基礎試錐「常磐沖」の坑井情報から貯留層、遮蔽層となりうる層序を確認している。これらにより、隆起頂部より西側の部分は断層が少ないであろうということで、詳細解析範囲として設定し、解析を進めることにした。

3) 堆積相解析と貯留可能量評価

複雑な地質構造であることから、貯留可能域を抽出するために堆積相解析を実施して得た堆積相の範囲と貯留可能域の条件を用いて貯留可能域を絞り込んだ。貯留層となりそうな岩相を示す地層は、上部と下部にわかれ、上部は鮮新世、下部は前期中新世の堆積岩であった。抽出した三つの貯留可能域における貯留可能量は、上部貯留可能域で 4.81 億 t、下部貯留可能域で 1.44 億 t および 8.51 億 t となり、合計で 14.76 億 t であった。この結果は陸域に近い部分は 2D 探査結果のみを用いていること、南部に粗粒な堆積物が期待されていることから、これらの地域で 3D 探査を行えば、より多くの貯留可能域が抽出できる可能性がある。

4) 今後の対応

調査井掘削前 CO_2 挙動予測シミュレーション、物性解析および貯留可能量再評価を実施する予定である。

委員との主な質疑応答は以下のとおりである。

1) 指摘：この地域で課題となるのは活構造と考える。3.11 の東北大震災以後この陸域では新断層が出現しており、海域でも活発な地震活動が続いている。防災科研の F-net から拾った結果を地図上にプロットしたことがあるが、昔の古い構造に沿うように存在していることが多い。反射波で見ると古い構造はもう活動を停止しているように見えても、3.11 で圧縮場から引張場に突然変わって、再活性化してその一部のいくつかは動いている。大きな変位はないかもしれないが、古い地下の構造から浅い地層まで切っているようなものが多いということが気になるので、今後、丹念に見ていく必要がある。また震源分布も気象庁のデータは深めに出されているので、S-net 等の浅いデータにも留意し、両方での検討が必要であると考える。

2) 質問：弾性波探査断面上でいろいろなイベントが認められており、詳細な解析作業が行われているような印象を受ける。どの点に注目して今後作業をしていくのか、その方針の立て方が見えづらい。この地域の対応方針は他とは違うのか、それとも断層等に気を付ければ、基本方針は他のエリアと同様に作業は進められるということか。

回答：詳細に行っているように見えるが、他のエリアと変わっておらず、同様の対応でよいと考えている。

3) 質問：貯留量として、14.76 億 t を評価した時のポロシティーの値はどのような

値を用いて推定したのか。また、14.76 億 t という貯留量の制度は保守的な量なのか。

回答 : ポロシティーの値は民間坑井の圧密曲線をベースに推定している。また、貯留量については保守的な量であると理解している。

⑤　貯留適地決定プロセスの検討業務

検討業務は貯留適地事業をベースに、貯留適地選定作業の技術的検討を深掘りして、評価フローの確認や評価指標の科学的根拠の検討等を行い、体系化することにある。

具体的には、海外文献、既存の適地調査事業の事例をもとに、JCCS の貯留適地調査事業と対比させながら、評価項目、評価指標、評価フローの 3 項目に注目して整理・検討した。検討に際しては、国際基準に沿ったものとするために ISO を参考にするとともに、実施過程では、運営委員会と個別技術案件を扱う専門部会を組織し有識者の助言を得ながら作成した。その結果、JCCS で実施してきた貯留適地選定活動はおおむね海外事例の評価と整合し、同様の評価フロー、評価基準で調査が進められていたことが確認された。

実際には、これらをなんらかの形でどこかのフィールドに応用して確認しないと、作成したものが妥当であるかの確認が難しいと考える。

専門部会では、今回、断層の考え方として漏洩・遮蔽、流体の流入による誘発地震、貯留域周辺における地震活動の影響等の観点から貴重な助言が得られたが、今後も必要に応じて有識者の助言を得ながら、考え方の整理を継続していくことは有効となる。

2 箇年で実施した貯留適地決定プロセスの検討業務において、プロセス案を「 貯留適地選定に関する技術手引書案」として取りまとめた。

委員との主な質疑応答は以下のとおりである。

1) 質問 : この貯留適地調査事業が国際的な基準と比較して、大きく外れてはいないことが示されたということはおおむね理解できた。しかし、断層の考え方の中で、誘発地震の検討を行ったという説明が理解できなかった。なぜならば、この調査事業の中で断層をどう考えるかはすでに方針が決まっていたと思うが、誘発地震まで適地調査のテーマとするべきなのかの点が理解できない。

回答 : この貯留適地決定プロセスというのは、将来の事業化を前提にした評価全体の体系であり、現在実施している貯留適地調査事業は事業化前の部分にあたる。説明抜きに将来を見据えた検討の説明をしたために誤解を招いたと考える。

2) 質問 : 断層の扱いに関する部分で、参考値として 2.5 km となっているが、これはこの適地選定事業の中で議論されたということか。圧入プラン、圧入レート、

期間、総量、圧力伝播、プルームの広がり等、ケースバイケースで見ないと絶対値で 2.5 km というのは決められないと思う。

回答 : 現在はこの事業の中の仮の決まり事として 2.5 km という値を設定している。しかし、実際にはフィールド毎に断層や破砕帯の規模は異なるので、圧入地点毎にシミュレーションを交えて検討するのが本来正しいと理解している。したがって参考値という表現を使っている。

⑥ 廃坑井による CO_2 漏洩リスク評価に係る予備調査

油ガス田の廃坑処置は、セメントプラグを坑内に設置し、下部からの流体を遮断するものであるが、廃坑措置基準は 1986 年に制定されているため、それ以前に関しては廃坑措置が十分でない坑井がある可能性を否定できない。廃坑井からの CO_2 の漏洩は、セメントの不良部分や CO_2 との接触により劣化したセメント、もしくは CO_2 と接触したことにより腐食したケーシング部がその経路となる可能性がある。

今回の調査では、関連法規に関しては国内外の CCS に関する法規制等を調査し、その中から廃坑井の漏洩リスクと関連性の高いものを抽出した。ただし、日本には法規制がないため、経済産業省「CCS 実証事業の安全な実施にあたって」（2009 年）を参照した。

また、CCS プロジェクトに関する漏洩事例として見つかったのは、アルジェリアにおいて実施された In Salah での事故のみで、廃坑井からの漏洩事例はない。CCS 以外の類似分野での事故事例としては、ガス貯留井における漏洩事例で、いずれもセメントやケーシングの損傷が原因であった。

廃坑井からの CO_2 漏洩リスクに関しては、SPE、GHGT の発表論文を対象として調査を実施したが、9 件しか見つからず、リスクアセスメントに使用する手法に共通したものはなく、プロジェクト毎に異なったツールが使われていること、NRAP（National Risk Assessment Partnership、米国エネルギー省の CCS リスクアセスメント事業）等では定量評価を重視する傾向にあることが分かった。

なお、2010 年度に磐城沖のガス田で、既存廃坑井 17 坑を対象とした漏洩リスク評価を JCCS が実施しており、漏洩リスクはきわめて低く、1,000 年たっても CO_2 はセメントプラグ下部でとどまるという評価結果であった。また、スコットランドで Shell 社が参加した CCS プロジェクトにおけるリスクの評価事例を調査した結果では、貯留層に接触しない坑井および最大 CO_2 賦存予測域外の 8 坑井からは漏洩リスクが低いと評価され、貯留域近傍にある 1 坑井であっても良好なセメントプラグがあるため漏洩リスクは低いと評価された。

委員との主な質疑応答は以下のとおりである。

1) 質問：セメントプラグに関する設定がいろいろ規制されているのは説明があったが、セメント自体にも規制はあるのか。

回答：一般の CCS 以外の坑井であれば、廃坑措置には通常のポルトランドセメントが使われている。ポルトランドセメントの遮蔽性に与える CO_2 の影響は研究が進められているところである。

助言：2010 年度の磐城沖 17 坑井を対象とした調査では、使用されていたのは通常のセメントで、外部の専門会社に詳細の調査を依頼したが漏洩リスクはないとの結果を得ている。

2) 助言：技術組合が 2020 年度事業の中で、長岡の圧入井を開けて調査する予定になっている。その中で普通のポルトランドセメントがどのくらい腐食に耐えるのか、ケーシングがどうなっているか調査するので、結果を情報共有したいと考えている。

3) 助言：ケーシングの CO_2 による腐食については、データがかなり取られていて、腐食速度から長期的な予測ができる状況にある。しかし、セメント自体への CO_2 の影響については、実は理解されていない状況で、通常のポルトランドセメントは CO_2 腐食に耐えられないだろうということで、CCS プロジェクトでは耐 CO_2 セメントを使っているのが実状である。したがってポルトランドセメントで 1,000 年後まで大丈夫ということとは矛盾している。石油業界は、100 年後でさえセメントがどうなっているか誰もわからないと言っている。秋田や新潟で今、明治や大正ぐらいに掘った井戸で廃坑のやり直しを行っているが、セメントがどうなっているのかは、実際にサンプルを取ることができないので、確認できたとは聞いていない。日本の場合は基本的に廃坑データが残っていると思われるので、実施するときに調べればよいので、現時点で「絶対に大丈夫である」と断言するのはいかがなものかと思う。

4) 質問：リスクアセスメントで「漏洩量」と「発生確率」を算出するといっているが、どうやって行うのか。シミュレーションは、パラメータスタディーであり、恣意的であるわけで、それで確率といえるのか。

回答：セメントの浸透率がパラメータの一つとなるが、設置した時の状況やダメージによりばらつきが生ずるものとして、そこに確率分布を持たせるようにして、漏洩する量をシミュレーションで計算するということを行っている。

5) 質問：リスクの判断を、CO_2 の移動が廃坑井に接触するか、廃坑井に来た時に適

正にセメントプラグがされているか、されていない時はモニタリングして必要に応じて補修できるかという流れで行うということだと思うが、このようなリスクアセスメントでリスクが大きい小さいという話をすることに意味があるのか。

回答：補修ができるかどうかは坑井の状況次第であるが、必ずしも無理な話ではないと考えている。

(3) 令和２年度二酸化炭素貯留適地調査事業委託業務報告

① 2020 年度委託業務の概要

2020 年度委託業務の対象である 6 地点での取り組み状況の全体像を示したうえで、その内の 4 地点について業務の概要を説明した。

京都-福井沖での新規 2D 探査を 2020 年夏に実施予定である。この地点は、2019 年に既存 2D 探査データの再処理を行った結果、緑辺台地、若狭盆地あたりに厚い堆積層が確認されたが、測線間隔が非常に粗かったため、隙間を埋めることを目的としている。

佐渡西方-能登東方エリアで地質解析と貯留可能量評価を行う。ここは RITE の調査で 2,000 m 以上の厚い堆積層が確認されている地域であり、基礎試錐が 3 坑井ある。北方の海域では断層が増える傾向にあるが、調査予定エリアには断層は確認されていない。

さらに北海道日高沖での地質解析を予定している。この地域も堆積物が 2,000 m 以上確認されており、基礎試錐が 1 本あり、陸に近いエリアには海域活断層があるが、調査予定エリアでは活断層は抽出されていない。

鳥取沖については沖合の 2D 探査エリアでの地質解析を予定している。

次に全体的な各候補区域の評価進捗を貯留適地調査の流れに沿って説明した。調査エリアには、JCCS が新規に 2D、3D 探査を行い評価したエリアと既存の JOGMEC、JAMSTEC、あるいは民間のデータを使って評価したエリアがある。特に鳥取沖、宮崎沖、秋田沖、能代沖、茨城沖北部、新潟沖、本荘沖を重点評価地点として、容積法による貯留可能量算定までいたっており、それぞれの貯留可能量を図に従い紹介した。

委員との主な質疑応答は以下のとおりである。

1) 質問：調査エリアが、長方形であったり、平行四辺形であったり、あるいは一部堆積層が確認されていない区域も含む計画になっているが、どのように決めているのか。

回答：地質解析エリアは、既存のデータのある範囲を含み、それよりは若干広くとっているため、その中に堆積層が確認されていない区域が含んでいる場合も

ある。形状については評価したい区域が含まれていれば、長方形でも平行四辺形でも構わない。

質問者：方針が明確であれば問題は無い。

2) 質問：測線を計画するときには、ぜひ構造に配慮した形で測線を切るよう配慮願いたい。

回答：現在は構造を意識していない測線となっている。今後考えたい。

3) 質問：佐渡西方の説明で、「周辺はひずみ集中地帯で活断層が多い」とあるが、東方は以外とないということが言いたいのか。

回答：東方とは、佐渡の北東エリアを指しており、これから海底地形のコンパイル等を実施する予定だが、現時点では断層が多いとは予想していない。

② 候補区域の探査データ取得・評価実績と今後の見通し

貯留適地調査事業の当初の目的は、2021 年頃までに国内に 3 箇所程度の貯留可能候補地を具体的に示すことであった。しかし、計画は遅れており、2019 年度第 1 回有識者委員会のなかで、調査井を掘って貯留層総合評価を行い、最終的に候補地として有望であることを示すというゴールに対して 3.5 年から 5 年程度遅れていることを報告した。その遅れの要因は調査先行区域での調査井掘削ならびにその準備に着手することが保留されているためであり、調査井を順次掘削していくための体制が必要であると指摘された。その後 2019 年度第 2 回有識者委員会では、本荘沖と能代沖の 2 箇所に限定して調査井の基本設計を行うことが決まるとともに、国内の未評価区域へ地質解析の範囲を広げて貯留可能量評価を広く展開していくこととなり、調査方針に変更が行われた。

当初から進めてきた候補地の中には、2D 探査データ、3D 探査データを評価して、調査井掘削に向けて進むことができる段階にきているグループと、これとは逆に既存の探査データを使った技術的な評価で調査の優先順位が落ちたもの、あるいは調査が止まったグループがある。また、今後調査をすべき有望と考えられる地点として鳥取沖、京都―福井沖、新潟沖、茨城沖、北海道日高沖等があり、さらに、大きな貯留可能量が見込まれる山陰地区がある。これらに地点についても評価を開始または再開する計画を立てている。

現在容積法による貯留可能量評価の算定まで来ている地点が 7 地点程度あり、これまでに約 100 億 t の貯留可能量が算定されているが、2021 年度末にはそれが 10 地点ぐらいになると考えられる。

この適地調査の課題をあらためて考えると、2021 年度末までの調査井の掘削は実際には難しく、また候補地点を増やすべく進めてはいるが全国への展開はできていない。そこ

で、2021 年度以降も継続して調査を進めていく絵を描いてみた。この時の課題は、調査井掘削の費用をどのようにして捻出するかであり、また候補地を増やすための 2D/3D 探査の費用を確保することである。予算が確保され、調査を継続した場合、2025 年度末には容積法による貯留可能量評価を終えられる地点は、現在の 7 地点から 15~20 地点程度になると考えられる。

委員との主な質疑応答は以下のとおりである。

1) 質問 : 調査井を掘削して、初めて貯留適地であることが示せるということには同意する。2021 年度以降の絵を示すのもよいが、2021 年度末で事業が終了するとした場合の事業のアウトプットのあり方はどのようになるか。

   回答 : 調査井を掘削していないため、詳細なデータがなく、貯留適地を示すことはできないが、候補地毎のデータの豊富さ、容積法による貯留可能量評価結果、どういった優位性があるか等、地点毎の相対的な星取表のようなまとめは示せると考えている。

2) 質問 : 本来の調査事業としてそれでよいのか、調査事業を実施したことになるのか疑問に思う。現実としては仕方のないことかもしれないが、そういうことで事業が成立するのかという点は気になる。

   回答 : そのとおりであり、委託者とも相談しているところで、もし適地調査が 2021 年で終わるのであれば、「適地」を今までと同じ定義とすると 2021 年度段階では適地は示せないことになる。単に「適地候補地」を複数拠点あげたことにとどまり、リスクを示しながら貯留可能量を示すことになる。

3) 指摘 : 今の説明の様な形で 2021 年の段階でも報告書をまとめられると理解した。「データ整備がなされていない」という結論とはなるだろうが、すでに 10 年近くいろいろな地域の情報を集め、JCCS として処理・解析を進めた資産をどう残すのか。具体的には、2030 年頃の CCS 実用化の段階で他の事業者が CCS を始めようと考えたエリアに関する情報を調べようとしたとき、有益に使えるようにするべきであると考えるので本調査事業にて得られたデータ整備をお願いしたい。

4) 指摘 : 同じような指摘になるが、2030 年に経済産業省は商業化をするといっているが、2021 年に報告書を作ったとして、そのあとどのように商業化するかというシナリオがないと不十分ではないか。国と民間が手を携えてやっていかないといけないわけで、2021 年から 2030 年の間をどのように結んでいくのかのシナリオがないとこれまでの適地調査事業が中途半端に終わってしまう気がす

る。委託者と十分話をして、シナリオを示していくべきである。

回答：JCCS としてもこれからの適地調査事業が 2030 年に向けてどうあるべきかについて委託者とよく相談し方向性のシナリオを示したいと考えている。そのうえで本委員会にてシナリオの説明をおこないたい。本委員会には JCCS が示すシナリオについて助言をいただきたい。また今後も適地調査事業を延長する方向で支持をいただきたい。

7.4.2　第 2 回有識者委員会

(1)　二酸化炭素貯留適地調査事業委託業務進捗報告

①　2020 年度第 1 回有識者委員会での指摘事項整理

第 1 回有識者委員会で報告された「鳥取周辺、茨城周辺　地表地質調査・試料分析」および「候補区域の探査データ取得・評価実績と今後の見通し」において指摘された事項について回答と対応案を示した。

(2)　平成３１年度二酸化炭素貯留適地調査事業委託業務（繰越）報告

繰越業務に係る進捗状況を報告し、2019 年度事業として追認された。報告内容の概要は以下のとおりである。

①　2019 年度委託業務の進捗報告およびデータアーカイブについて

2019 年度委託業務とて 15 件の業務（うち繰越業務 7 件）を実施し、すべての業務を終了した。また、現在追加の繰越業務として、これまでの貯留適地調査事業にて得られた各種データの散逸を防ぎ、データを一元管理できるよう整理・集約すること等を目的とした各調査地点のデータアーカイブ業務（Phase1：データアーカイブの概念設計および 2 地点におけるデータアーカイブの実施）を実施中である。

委員との主な質疑応答は以下のとおりである。

1）質問：各調査地点のデータアーカイブは今後の CCS 事業において価値があることである。CCS 事業は長いスパンで実施されるわけで、このデータアーカイブも時間軸に沿って更新されるべきと考えるがどうか。

回答：指摘のとおりである。それぞれの評価地点において再評価を行った場合には、それを更新していくことが必要と考える。

②　茨城沖北部物性解析

茨城沖北部について 2019 年度に実施した地質解析・貯留可能量評価から抽出した貯留可能候補区域のうち、基礎物理探査の 3D 探査のフル重合範囲を対象として物性解析を実

施し、貯留層および遮蔽層の性状に関わる物性情報として孔隙率分布、岩相インデックス分布を推定した。この物性解析結果を用いた茨城沖北部の地質解析・貯留可能量業務は、2020 年度事業にて実施予定である。

委員との主な質疑応答は以下のとおりである。

1) 質問 : 本格的な物性解析結果を見せてもらい、あらためて物理的な物性情報を得ることの重要性を示して頂いた。孔隙率や岩相インデックスの分布を推定するときは岩石物理モデルに基づいてやっているのか。

回答 : そうである。今回の岩石物理モデルにより推定した岩相インデックス分布に関しては、実坑井にてデータをプロットして整合性があることを確認している。

③ 茨城沖北部調査井掘削前 CO_2 挙動予測シミュレーション

茨城沖北部について調査井掘削前 CO_2 挙動予測シミュレーションを実施し、下部層で 50 万 t/年×5 坑×約 40 年間で 1 億 t-CO_2 の圧入が可能である結果を得た。なお、今回のシミュレーションでは、地表で採取した試料を用いて測定したスレッショルド圧力に振れ幅があり不確実性がある。より精度の高いシミュレーションを行うには、調査井掘削等により精度の高い地質データを取得する必要がある。

委員との主な質疑応答は以下のとおりである。

1) 質問 : 下部層の貯留層エリアを使い、40 年間で 1 億 t- CO_2 の圧入が可能な最小坑井数のケーススタディの結果、最低 2 坑井必要であるとのことであるが、この場合、坑井数を増やしたら、当然コストがかかるが 1 億 t-CO_2 の圧入は 40 年間より短くなるということでよいか。

回答 : そのとおりである。CO_2 は坑井数を増やした分だけ効果的に圧入される。

2) 質問 : シミュレーションにおいて、貯留層の水平方向および上限の境界はどのようになっているのか。

回答 : 水平方向については解放境界で行っている。

指摘 : 水平方向が解放境界となっているということは、圧力一定境界ということで、圧入停止時と停止後 1,000 年の CO_2 飽和率と溶存 CO_2 分布を示している中で圧力分布が重要になるのではないか。

3) 指摘 : 今回の茨城沖北部上部層のシミュレーション結果では、容積法では CO_2 が 1 億 t 以上入る貯留層が、シミュレーションでは入らないという事例が示されている。このような事例についてのまとめ方を考えるべきである。

④　宮崎沖調査井掘削前 CO_2 挙動予測シミュレーション

宮崎沖について調査井掘削前 CO_2 挙動予測シミュレーションを実施し、設定した貯留エリアにおいて 50 万 t/年×5 坑×約 40 年間で 1 億 t-CO_2 の圧入が可能である結果を得た。圧入対象区域は陸域から約 30 km の距離にあり、圧入対象層は比較的平坦でほとんどが海水面下 2,500 m 以深となる。なお、今回のシミュレーションでは、圧入量を左右する近隣既存坑井における遮蔽層のリークオフ圧力等の情報がなく、他の区域のデータを使用したため重要なパラメータの不確実性がある。より精度の高いシミュレーションを行うには、調査井掘削等により精度の高い地質データを取得する必要がある。

委員からの主な指摘は以下のとおりである。

1) 指摘：貯留層モデルの境界条件等の記載をするべきである。また、シミュレーション結果において、圧入停止後の圧力分布についても基礎的な情報になるので示したほうがよい。さらに、感度解析のところでパラメータの組み合わせで圧入が一番しにくいケースについても検討したほうがよい。
2) 指摘：圧入対象貯留層の浸透率の違いが大きく、特に浸透率が小さい場合、圧入圧力の上昇や高い圧入コスト等となるので、圧入対象貯留層の浸透率について一定の制限を設けることを考えたほうがよいのではないか。

(3)　令和２年度二酸化炭素貯留適地調査事業委託業務報告

①　2020 年度委託業務の進捗報告

2020 年度実施した区域は、日本海側 5 地点、太平洋側 2 地点であり、今年度末までに終了せず一部作業を継続する業務（繰越）が、茨城沖北部の地質解析・貯留可能量評価、鳥取沖および本荘沖南部の調査井掘削前 CO_2 挙動予測シミュレーションの 3 件である。

②　京都－福井沖 2D 探査データ取得・処理

この地点は 2019 年度から評価を開始した。既存 2D 探査データの再処理結果から、厚い堆積層の存在する若狭海盆と緑辺台地を抽出し、今回、当該区域を対象とした新規 2D 探査を実施した。データ取得は 8 月初旬から中旬にかけて行い、データ処理作業は翌年 1 月末までに完了した。ノイズ抑制処理、多重反射波抑制処理、重合前時間マイグレーション処理を行った結果、緑辺台地に厚い堆積層を推定させる反射イベントがあり、また北側の南西－北東ラインの若狭海盆に堆積層らしい反射イベントが得られた。結果として、当該区域から 2 地域が貯留可能域として検討可能であると考えられる。この区域における地質解析・貯留可能量評価作業は、2021 年度業務にて実施予定である。

委員との主な質疑応答は以下のとおりである。

1）質問：今回の 2D 探査で、貯留可能エリアが広がったというのは、今までに 2D 探査等のデータでは見えていなかったのか。

回答：従来のデータでは、測線間隔が広く見えていなかった。

③　北海道日高周辺、京都－福井周辺地表地質調査・試料分析

前回の委員会でX線回折結果からの黄鉄鉱の割合に関する質問があったが、検討の結果、黄鉄鉱は堆積時に嫌気的な環境で生成したものであり、特殊な環境で生じたものではなかった。前回示した図は同定した鉱物内の相対的な割合を示したもので、実際には泥岩には非晶質物質が多く、それを加えた鉱物の合計値に対する黄鉄鉱の割合は特別に多いわけではなかった。

日高沖の貯留層・遮蔽層評価に資するための物性データを取得するために日高周辺での地表地質調査および試料分析を実施した。具体的には基礎試錐「日高トラフ」で確認された後期中新世から前期鮮新世の荷菜層、平取軽舞層を対象とした。平取軽舞層砂岩は、貯留岩性状が良いとの結果となった。平取軽舞層礫岩と荷菜層砂岩に関しては、コア試料が崩壊しており、貯留岩分析はできなかったが、岩石鉱物分析結果からは良好な貯留岩性状が示唆された。荷菜層礫岩は一部で二次鉱物が認められ、貯留岩性状は平取軽舞層より劣る結果となった。

遮蔽層性状に関しては、荷菜層、平取軽舞層ともに遮蔽岩性状は比較的悪い結果となったが、スレッショルド圧力という観点からは、基礎試錐「日高トラフ」でガスを胚胎している層や苫小牧 CCS で CO_2 を圧入している層準の上位の遮蔽層と比較して、同程度との結果が得られた。

京都－福井周辺については、基礎試錐「鳥取沖」「金沢沖」で確認された中新世の堆積岩を貯留層・遮蔽層対象層準として、下位から糸生層、国見層、河南層、荒谷層の調査を実施した。貯留岩候補として、砂岩と凝灰岩を採取したが、砂岩は粒径が比較的細かく、軽石を含むものもあり、凝灰岩も軽石を含んでいた。遮蔽岩候補としては、泥岩とシルト岩を採取した。貯留層岩性状は、すべての層準で砂岩、火山礫凝灰岩ともに沖合の坑井データと比較して、中間的から悪い範囲に分布していた。地表地質調査試料について推定される最大埋没深度は坑井試料の埋没深度と同程度であることから、岩相と岩質の差が貯留岩性状に大きく影響している。遮蔽岩性状については、すべての層準で能力が高い結果となった。

今回の地表地質調査の結果から、沖合の堆積岩の性状を推定する際には注意が必要であることが分かった。すなわち、地表地質調査を実施した層準は、外浜から陸棚にかけての

浅い部分の堆積物であり、沖合まで同様の岩相は続いていないと考えられる。また、火砕堆積物を多く含む岩石が続成作用を受けることで､貯留岩性状が悪化していると考えられ、沖合で火山岩体が切れるようであれば、良くなる可能性もあると考えられる。

今回の結果はシミュレーションのパラメータとして利用する予定である。

委員との主な質疑応答は以下のとおりである。

1) 質問：X 線回析結果からはパイライトと断定できるのか。不透明鉱物であれば、ほかにも、鉄の炭酸塩とかシデライトのような炭酸塩鉱物である可能性もある。鉄が硫化物と一緒になればパイライトになるが、銅との鉱物は含まれていなかったということか。

   回答：そのとおりでパイライトである。説明不足であったが、円グラフは同定した鉱物内の黄鉄鉱の割合を表しているが、同定した鉱物は全体の 40%であり、全体としての黄鉄鉱の比率は特に高いとは言えない。

2) 質問：火山性の堆積物は続成を受けているため、貯留層には向かないという結論であるが、どのように考えたのか。

   回答：薄片観察をした結果として、粒子間孔隙に火山砕石物が入っている状態が観察できた。さらに軽石とかも多く含んでいたためそれが圧密によって疑似的にマトリックスのような状態になっている様子も観察できたためそのように結論付けた。

3) 質問：P 波速度が、地表観測と検層結果で整合していたというのは素晴らしかった。岩石物理モデルのようなアプローチをすると、さらに定量的な貯留岩性状を追求できる可能性があると考える。今まで質的な評価というか、定量的な方法は扱ってこなかったとはいえ、今後は従来のほかにもアプローチがあることも念頭に置いて、少し物理的なアプローチにつなげる展開も検討願いたい。

   回答：今回、資料の P 波、S 波速度の分析の際、大気圧下の飽和率を一定として実施したが、地下条件を再現するために封圧を変えて水飽和率を変化させて測定を行う方法もあるため、そのような方法をとればより地下条件を推定できる手段となると考える。

4) 質問：日高沖の二つの地層の大まかな環境がカバーされているが、かなり広範囲にわたっており、一つの地層名としてこれだけの岩相があるのか不思議に思う。多分砂岩が卓越する地層なのだと思うが、特定の環境を反映しているはずであるため、どのような観点から復元させたのか説明するべきである。

   回答：説明を割愛したが、本来はこの地域の層序でいうと、岩相毎に層名が分か

れているが、ここでは今後地質解析とかシミュレーションで使うことを考えて時代を優先し、坑井でいう荷菜層、平取軽舞層という名付け方で評価している。同時代であるが、いろいろなタイプの岩相があり、平取軽舞層であれば、ファンデルタもあれば、深海性タービタイトもあり、いろいろと分布している地域である。

4) 質問 : 層準的に上中下に分けたとき、例えばファンデルタと海底扇状地はどちらが上位層準にあるかとか、このぐらい狭い範囲で同時期に二つができてもおかしくはないと思うが、何かデータはあるのか。
回答 : そこまでは見ていないが、平取軽舞層だと深海のほうまで行くファンデルタも見られ、荷菜層ではどちらかというと浅いほうを見ている。

5) 質問 : 日高の陸上地層を見ると、貯留性状の良い砂がある。ということは沖合のほうは地下にはそういうものはなくなってしまうとの心配はないか。
回答 : 逆に日高では、沖合に行くとさらに淘汰されてよい砂があると解釈されている。このファンデルタが沖合で何段も重なっているイメージである。今回貯留岩性状を悪くしていたのは礫が悪さをしていたからで、いい淘汰がされなかったと解釈している。実際「日高トラフ」のコア試料とかでも、20%とか 30%という孔隙率を有する砂を見ている。

6) 指摘 : 海底扇状地というシステムは、海底谷を伴うシステムであるため、海底谷を想定しておくべきと考える。

④ 日高沖地質解析・貯留可能量評価

日高沖の地質解析範囲で、既存 3D 探査データを用いて海底地形および海底地質情報のコンパイル作業を実施し、北東部に三つの活構造の可能性のある構造を抽出した。また、3D 探査データおよび既存坑井データを用いて地質解析と貯留可能量の推定を実施し、1 億 t 以上の貯留が可能な地域を 6 箇所抽出し、その合計貯留可能量を 26.3 億 t と評価した。貯留可能域には活断層はみられない。

この地域は苫小牧リッジと三陸沖基盤リッジの 2 列の隆起帯に挟まれた日高舟状盆地に位置している。構造発達史的には、ジュラ紀付加体を基盤とし、南北に長大な帯状の前弧堆積盆地葉が形成されており、白亜紀には広域不整合が形成され、後期漸新世から前期中新世には顕著な削剥を伴う不整合が、中新世にも広域不整合が形成されている。また、中期中新世以降は、日高山脈の上昇によって大量の砕屑物が供給されており、この時代の堆積岩を貯留層、遮蔽層候補として設定した。比較的地震活動の少ない地域であるが南東部

には十勝沖地震の震源が深部に位置している。

委員との主な質疑応答は以下のとおりである。

1) 指摘：今回対象となるターゲットとは直接は関係ないが、石狩層群よりも下の層序の時代範囲が違っているので修正願いたい。
   回答：対応する。
2) 質問：北西 - 南東方向の構造には、大きな断層構造はないということでよいか。
   回答：3D 探査断面、アトリビュートで解釈した範囲では認められない。
3) 質問：陸上のデータを詳しく分析しているようだが、それとこの日高沖の結果をどのように結び付け、活用しようとしているのか。
   回答：今後、シミュレーションを行うときに地表データを使用すると思うが、その際、より礫質なファシスがチャネルと考えているので、チャネルには礫質なものを参照し、ローブには砂質な岩相の結果を参照するという工夫をする。
4) 質問：ローブの堆積物が非常に厚くて、26.3 億 t という大きな貯留量を示していると思うが、地質解析範囲の右端に海底地すべり堆積物のような乱雑な堆積物が気になる。
   回答：堆積相解析の結果から供給方向を解釈していて、海底地すべり堆積物は北西側から来たものではなく、東から別系統が来たと推定している。
5) 質問：その点について、補助的な、サポートするような情報は、このエリアの範囲外で、あるいは既存の情報は見つけていないのか。
   回答：他の情報はなく、今回検討した結果として解釈している。
6) 質問：日高沖はよい結果であったが、ほとんど議論はされてこなかった三陸沖堆積盆のもっと南側については可能性がありそうか。
   回答：わからない。

⑤　本荘沖南部地質解析・貯留可能量評価

この地域は 2015 年に調査を開始し、三つの貯留可能区域を抽出し、貯留可能量を算出している。その中で 2016 年に抽出した貯留可能エリアが解析エリア外の南北に伸びる可能性が想定できたので、2018 年にはその北のエリアで新規 3D 探査データによる評価を行い、2020 年度は南側にどれだけ伸びるか既存探査データによる評価を行った。その結果、貯留可能量は大きく増えた。

このエリアは広域地質構造で、中に三つの南北に広がる広域構造があり、断層帯の東縁部にあたる。海域地質コンパイル、震源分布をみると過去にマグニチュード 5 規模の地震

が数回確認されているが、相対的には地震活動は少ないと考えられる。また 2016 年と 2018 年の調査で設定した解析ホライズンを基本として、今回上部天徳寺層・丸山層下限というホライズンを追加し、合計 8 ホライズンで解析を行った。南北断面では、桂根相下限ホライズンという、北に向かって堆積物が厚くなる傾向は認められた。東西断面では陸に向かって、比較的堆積物は厚く堆積している傾向にあった。全体的な傾向としては、北側で厚く、南部は坂田隆起帯に向かって浅くなる傾向がみられ、由利沖構造、本荘沖構造、庄内沖構造という三つの背斜構造が確認できるのが特徴的であった。

今回、既存の 2D および 3D 探査データを用いて、堆積相解析を貯留層ファシスと遮蔽層ファシスに分類して行った。桂根相貯留層では、北側と東側に粗粒な貯留層ファシスのありうる堆積帯が、またその上部の笹岡層貯留層にも、北側と東側に粗粒な堆積帯が解釈された。貯留可能量評価については、桂根相下部貯留層で 5.3 億 t（これまでの合計で 10.3 億 t）、桂根相上部貯留層 2.3 億 t（同合計で 4.8 億 t）桂根相上部貯留層で 16.0 億 t（同合計で 55.6 億 t）を算出した。

この貯留可能区域は、北側に伸ばした 2018 年の解析エリアのさらに北側にも貯留可能区域が伸びているとみられるので、今後、北側に 2D 探査データを使った評価作業を行うことを考えている。また今回実施する本荘沖南部の地域で、調査井掘削前 CO_2 挙動予測シミュレーションを実施する予定である。

委員との主な質疑応答は以下のとおりである。

1) 質問：北側に対し実施するための 2D 探査データはすでに取得されているものか。

   回答：民間と JOGMEC の既存探査データの再処理を実施しており、その処理結果を用いる予定である。

2) 質問：2D と 3D 探査データをつないで評価したと理解している。しかしファシス解析を行う際には、3D と 2D の探査データの品質が違うように思うが、どのように扱ったのか。

   回答：3D 探査データに関しては、RMS 振幅等面的な属性値を用いて解釈し、2D 探査データに関しては反射波のパターン、対象測線の部分部分を空間的に分布域として推定した。

3) 質問：さらにファシス解析も行ったのか。

   回答：一番下のファシスが 2D エリアで貯留層になりうるファシスとして解析されたものであるが、3D と比べて品質に違いはあるものの、面的か、線的かということがあるので、違うファシスとして分類している。

⑥　鳥取沖統合地質解析・貯留可能量評価

この地域は、2015 年度に地質解析評価を行い、3.47 億 t の貯留可能量を評価した。2019 年度に既存 3D 探査データを用いた地質解析を行っており、2020 年度はより広い範囲を対象とした 2D 探査データの再処理データとあわせて地質解析を行い、15.96 億 t の貯留可能量を評価した。

山陰沖は複数の堆積盆が分布しており、中新世には堆積盆地の上昇・沈降の繰り返しにより、褶曲構造が形成され、この地層を鮮新世の地層が不整合で覆っているとされる。また、中新世から鮮新世にかけての層厚は最大で 5,000 m 以上あるといわれており、応力方向の変化に伴って断層の方向が東西から南北に変化している特徴を持っている。断層分布は、海底地形コンパイルの結果から解析範囲の南部と北部の一部に活構造の可能性が高い構造が抽出されたが、地震活動は海域では比較的少なく、陸域で多いが、震央深度は 30 km 以浅である。また東西断面、南北断面の解析から東西方向の断層は連続距離が長くて、構造形成に寄与するようなもので変位量も大きい。一方、南北方向の断層は 3D 範囲で多く確認されているが、連続距離が短く、変位量も小さい。さらに深度構造図の解析をもとに、構造発達史の考えを入れて解析を行った結果、中新世中期ころの日本海拡大に伴って堆積盆地が発達し始め、中新世後期になると徐々に圧縮場が南北に変化して、逆断層の活動が開始され、その影響で褶曲活動が発達し始め、中新世末期には堆積の中心が北部の隠岐トラフに移行し始め、広域な不整合が形成された。

これらの地質構造解析と弾性波探査データを用いて、堆積相解析を行った。結果は分解能の高い 3D 探査データを用いることで、断層の詳細な分布や貯留可能なファシス分布を確認することができ、貯留可能量は上部で 8.38 億 t、下部で 7.58 億 t となり、合計で 15.96 億 t となった。

今後は調査井掘削前 CO_2 挙動予測シミュレーションを実施する予定である。

委員との主な質疑応答は以下のとおりである。

1) 質問:貯留層とされるファシス A(チャンネルベルト／ローブの分枝状チャネル)は、砂の広がりが陸から離れたところにポツンとあるが、供給源をどのように考えているか。

回答 : 南の陸側からの供給であることは確認している。陸に近い側はそのまま陸からと想定しているが、北側の沖の方は低くなっているので、付近のものが崩れてできた再堆積であると推定している。

2) 質問：ファシス A は、かなり広範囲にあるファシス B（ローブ中央）とは別に堆積した層ということか。

回答：そのように考えている。

(4) 2021 年度以降の貯留適地調査計画（案）

① 2021 年度計画概要および廃坑井是正実現可能性調査について

2021 年度の調査区域としては、日本海側に 6 地点、太平洋側に 1 地点を考えている。日本海側の新潟北西部と佐渡南方沖は JOGMEC の 3D 探査データが公開され、初めて評価が可能となった地点である。

新規 2D 探査は酒田沖で計画しており、これにより秋田県の男鹿半島の南から能登半島の東まで、地質解析を連続して行うことが可能となる。

地質解析は新潟北西沖、佐渡南方沖、秋田沖北部、酒田沖、京都－福井沖の 5 地点、掘削前 CO_2 挙動予測シミュレーションは秋田沖北部、佐渡西方沖、日高沖の 3 地点を予定している。

既存廃坑井からの漏洩リスクに関して、2019 年度に「廃坑井による CO_2 漏洩リスク評価に係る予備調査」として文献調査を行った。それを受けて、今後、既存廃坑井に対するリエントリーおよび実現可能性調査を行うことを計画している。

② 適地調査事業の実績と今後の見通し

この貯留適地調査事業の当初の目的は、2021 年頃までに国内に 3 箇所程度の貯留適地を具体的に示すことであった。しかし、2019 年度の第 1 回有識者委員会の時点で、先行区域での調査井掘削の準備着手が保留され、約 3 年～5 年半程度遅れていることが報告された。第 2 回有識者委員会の時点では、本荘沖と能代沖のみについて調査井掘削の基本設計を行い、それ以外の地域については当面調査井掘削の検討を行わないことが決まった。一方、全国の未評価区域において、地質評価の範囲を広げるとの方針も決まった。これを踏まえ、2020 年度、2021 年度の評価作業を行う計画を立てている。

2022 年度以降の展望に関しては、前回有識者委員会での指摘を考慮し、JCCS 案として、複数の候補地点で調査井を掘削すること、さらに調査エリアを沿岸域に限定せずに拡大すること、またこれらの作業と並行して 2030 年までに官民の役割分担を模索しつつ社会実装への道筋を明らかにすることを考えている。

委員との主な質疑応答は以下のとおりである。

1) 指摘：今後、調査井が掘削できなくなるかもしれないということだが、調査井掘削の必要性をどのようなストーリーで訴えていくか、英知を結集する必要があると思う。

一つの方向性だが、今までは量的な評価をしていたが、質的な評価も必要で、も

う少し解析・解釈的に突っ込んだことをして、調査プロセスの最後の 1 ピースとして調査井掘削があり、最後の 1 ピースが埋まって初めて全体がわかるという流れに持っていく必要性があると思う。定性的な議論だけでは、なぜ調査井掘削が必要なのかが浮き彫りになってこないので、新しいストーリーが必要ではないかと個人的には思う。

2) 指摘：適地候補の数を増やすということはわかるが、もう少し枠組みを広げて、カーボンニュートラルという枠組みの中で、事業自体のターゲットというか作業工程を見直して考え直す必要があるのではないか。この事業で多くのノウハウを得て、技術も含めてかなりレベルが上がった。そもそも CCS というのは CO_2 を地層に圧入し、貯留することが目的で、それを実現するための貯留場所を探すことに絞り込んでいかねばならない。それも時間と予算があれば可能であることもわかってきた。次の方向づけとしてこの事業をベースから押し上げていく戦略が必要と思うので、両省にはこの点考慮いただきたい。

3) 指摘：この委員会が始まった時と現状がどう違うのかというと、やっと国が本気で脱炭素ということを言い始めた中で、このペースで本当にやっていけるのかという危惧がある。年間 1 億 t 以上を CCS に頼らなければ 2050 年目標を達成できないという状況になっているとき、年間 100 万 t 規模の井戸を 100 本掘るということを本当に実現できるのか。

また、海外の情報からも、CO_2 問題に端を発して、有望なポテンシャルを持っている地下の空間は、今や取り合いになっているという現状があることを知るべきだ。

③　総括報告書のとりまとめ方針（案）

総括報告書の取りまとめ方針案に関して、現時点で想定している報告書に盛り込む項目をまとめたものを紹介する。今回は貯留適地調査事業の経緯、先行した調査との比較、貯留適地調査事業の実績、各地点の評価結果の概要と比較、今後の道筋について具体的に説明し助言を求めた。

委員からの主な指摘は以下のとおりである。

1) 指摘：この事業では、断層の詳しい評価とか、堆積層の詳しい評価を行っているという説明であり、非常に良いことであると思うが、一方、委員はその成果物を短時間で説明され、それを評価するということになっている。できれば調査井掘削の検討を行う場合等は、ワークショップのようなものを開催し、委員も生デー

タで検討に加われるステップを取ってもらえるとよい。

2) 指摘：事業の目的そのものが調査であり、調査結果は国が CCS プロジェクトを実施しようとするときに必要なデータである。一方で民間事業者が CCS に参入する際に、すでに国が行った調査データがあれば、費用の削減になるので、民間に出すことを意識してまとめるのがよい。また、貯留可能容量と実際に入れられる圧入量が違うという点をきちんと区別して、わかりやすい説明として記載してほしい。

7.4.3 第 3 回有識者委員会

(1) 令和２年度二酸化炭素貯留適地調査事業委託業務（繰越）報告

繰越業務に係る進捗状況・成果を報告し、2020 年度事業として追認された。報告内容の概要は以下のとおりである。

① 2020 年度委託事業の進捗報告

2020 年度事業のうち、2021 年度に繰り越した業務について、その進捗および概要を説明した。

② 茨城沖北部地質解析・貯留可能量評価

茨城沖北部では前年度に 3D 探査データ範囲のみで地質解析と物性解析を実施している。今年度は前年度の地質解析結果と物性解析データを用いて 2D 探査データ範囲を含めた貯留可能量評価の再評価を行った。地層境界の設定を見直し、物性解析結果を用いることで、ファシスの分布範囲を見直すことができ、その有効性が確認できた。しかし、物性解析による孔隙率分布は、特徴的に他のアトリビュートと整合的でないため使用しなかった。物性解析結果を用いた見直しおよび 2D 探査範囲における貯留可能量の追加を行った結果、上部貯留層で約 15 億 t-CO_2、下部貯留層で約 14 億 t-CO_2 を確認し全体で 29 億 t-CO_2 の貯留可能量を評価した。この地域は断層が多いが、その中から断層の少ない範囲を抽出し、比較的大きなポテンシャルを評価した。同時に有識者委員の助言から、本調査範囲ではまだ地震活動が比較的活発であるとの指摘があり、調査井掘削に向けた優先順位は下げる方針で検討している。

委員との主な質疑応答は以下のとおりである。

1) 質問：貯留可能量が前年度評価のおおよそ 2 倍となったことになるが、前年度評価との違いの主な原因は何か。

回答：今回は 3D 探査範囲だけでなく 2D 探査データ範囲を含めたため、評価範

囲域が広がったためである。物性解析をやり直したため、貯留可能量が 2 倍となったわけではない。

2) 質問：貯留可能量が前年度評価のおおよそ 2 倍となり、貯留可能域が陸側に広がったことは非常に良いと考えるが、前年度の評価に加えて、今年度、2D 探査データ範囲を含めた経緯は何か。

回答：2D 探査データは測線が粗く、評価するべきであるか検討していたが、2D 探査データ範囲でもポテンシャルが認められるのであれば今後の評価の進め方にも影響が出るので、今年度再評価を行った。

3) 質問：音響インピーダンスの確認から、通常処理断面では判断のつかない振幅の弱い区間に地層境界を設定したというのは非常によい例だと考えるが、通常処理断面上で境界が明瞭でない理由に関しても明確にするべきではないか。

回答：坑井データを見るとシャープな音響インピーダンスコントラストではなく、緩やかな変化となっているので通常処理断面上では明瞭に見えないと考えている。

意見：坑井データからも緩やかであるがコントラストが確認できるので、この地層境界の設定は合理的であると考える。

③　本荘沖の南部調査井掘削前 CO_2 挙動予測シミュレーション

本調査範囲の北部に位置する本荘沖の本体では、2017 年度にシミュレーションを実施しており、200 年で 10 億 t-CO_2 規模の圧入が可能と評価されている。本調査範囲でも同等な規模の圧入が可能と想定されるため、まず事前検討として垂直井 5 坑で 1 億 t-CO_2 圧入できることを確認した後、5 坑井と 10 坑井で最大どの程度圧入できるかを評価した。今回のシミュレーションでは上部貯留層のみに圧入を行ったが、上部貯留層の上部に泥質岩の発達した低浸透率な地層が存在するため、CO_2 が遮蔽層へ到達せず、低浸透率な地層で浸透が止まる現象が見られた。遮蔽層下端まで CO_2 は到達しないため、今回の検討結果ではスレッショルド圧は制限条件とならず、地層破壊圧に対しても十分余裕のある圧入が可能であることを確認した。貯留可能量を増加させるために、圧入井の仕上げ区間を貯留層の下位 1/4 とすることにより圧入レートは低下したが、シミュレーション結果としては垂直井 5 坑で 1 億 t-CO_2 圧入するには 40 年間強かかり、最大圧入量は 5 坑井で 1.8 億 t-CO_2、10 坑井では 3.1 億 t-CO_2 の貯留が可能であることを確認した。今後の課題としては坑井数を増やす、水平井などを用いて効率化を図り、圧入レートおよび圧入量を増加する検討などが考えられる。

委員との主な質疑応答は以下のとおりである。

1) 質問：シミュレーションを行う際に孔隙率・浸透率の精度はどれくらいのものがあれば役に立つのか。

回答：数値よりも分布が重要となるので、孔隙率・浸透率の分布が精度よくわかる方法があれば非常に役に立つと考える。

2) 質問：今回は上部貯留層への圧入を検討しているが、下部遮蔽層への影響等はシミュレーションの際に見ているのか。

回答：今回は上部遮蔽層・貯留層への圧入のみを検討しているため、下部遮蔽層に関しては検討外である。しかし、上部貯留層と下部貯留層の両方に圧入を行うケースであれば通常の遮蔽層検討に加えて、下部遮蔽層への浸透なども確認する。

3) 質問：この検討では圧入レートが圧入を継続するにつれて上昇しているが、総圧入量を考えて圧入開始時にできるだけ高い圧入レートを設定するのが通常ではないか。圧入レートが時間と共に上昇する理由は何か。

回答：相対浸透率の関係で圧入を継続すると貯留 CO_2 の量が増えるので浸透性が向上し圧入がしやすくなり、圧入レートが上昇する。

4) 質問：スレッショルド圧と地層破壊圧を制限条件として挙げている。この検討では地層破壊圧のみが守られる結果となったが、どちらかが守られていれば良いということか。

回答：原則としては両方の制限条件を守る方針である。しかし、実際にシミュレーションを行い、両条件が守れないケースに関しては、遮蔽層への浸透がどれくらいのものなのかを示す。

5) 質問：5 坑井から 10 坑井へ増やした際に最大圧入量が 2 倍にならない理由は何か。また、10 坑井以上に増やしたケースを検討しても、坑井数が増えるにつれて圧入量の増加率が減少するという理解で正しいか。

回答：圧入の効率が高いと思われる坑井位置を優先するため、5 坑井から 10 坑井へ増やしたとしても、単純に 2 倍にならない。また、坑井の位置にもよるが坑井を増やすと圧力干渉も起こるので坑井数が増えるにつれて圧入量の増加率は減少する。

④ 佐渡西方沖調査井掘削前 CO_2 挙動予測シミュレーション

本シミュレーションでは 5 坑井で 250 万 t-CO_2/年のレートで 1 億 t-CO_2 の圧入が可能

か確認し、パラメータ（浸透率等）の変更により圧入量に影響を与えるリスクを評価することを目的としている。この地域では複数のファシスから成る複雑な地質構造のため、1 億 t-CO_2 の圧入には坑井配置や仕上げ区間の設定が重要な要素であった。今回は椎谷層への圧入を主に検討したが、1 億 t-CO_2 の圧入は困難であったが、椎谷層に加えて高圧層である上部寺泊層への圧入が可能と想定すれば 1 億 t-CO_2 の圧入が可能であることが確認できた。しかし、高圧層はシミュレーションによる CO_2 の挙動予測も困難であり、圧力コンパートメント化が推定されることから圧入対象から除外すべきと考える。また、近傍に活構造があることから本調査範囲の総合評価の優先順位は下げる方針で検討している。

委員との主な質疑応答は以下のとおりである。

1) 質問 : 深度に対する圧力の変化を示した坑井データプロットがあるが、設定した二つの圧力シール間の高圧層部分の測定データに対してモデルの再現性がよくないように見える。

回答 : シミュレーションモデルの影響である。シミュレーションの性質上、計算を進めるにつれて、モデルが静水圧の勾配に近づいてしまう。そのため圧力シールを細かく設定し、層を分ければモデルにより観測データを再現することは可能であると考えるが、今回は検討しなかった。シミュレーションで高圧層を再現するのは難しいため、今回はシンプルなモデルとして表現する対応をした。

2) 質問 : 高圧層に関して、シミュレーションである程度の年数が経過すれば、圧力が抜けていくと考えるが、圧力をどのようにコントロールしてシミュレーションを行ったのか。

回答 : 完全に圧力が上部へ抜けないという設定にしている。

質問 : それでは圧入が可能であれば、シミュレーションでは絶対に漏れないということか。

回答 : 今回のモデルではそのような設定で行った。

3) 指摘 : シミュレーション結果の圧力プロットの比較を圧入終了時のコンター図のみで示しているが、どの段階でどのような圧力ビルドアップがあったのかが解れば、解釈の幅が広がりコンターの理解が深まるので、できればそのような情報も表示するとよい。

第８章

まとめと課題

第８章　まとめと課題

本業務では、2D 探査、地表地質調査と試料分析、地質解析と貯留適地評価、調査井掘削前 CO_2 挙動予測シミュレーション等の調査業務を実施し、調査地点の総合評価を見直した。本業務による総合評価に基づき、2021 年度以降の貯留適地調査の予定を作成した。その他の業務として、社会的受容性の醸成活動を実施した。

なお、適地調査事業では、有識者委員会での確認を経て一連の業務を実施している。

8.1　本業務の成果

本業務の成果は以下のとおりである。

8.1.1　2D/3D 探査の実施

貯留適地調査業務では、基礎物理探査、公的機関および民間の既存 2D/3D 探査データの有無を確認し、必要に応じて新規の 2D/3D 探査を実施している。

本業務では、酒田沖で既存 2D 探査データの再処理を、京都－福井沖で新規 2D 探査および既存 2D 探査データの再処理を実施した。

酒田沖には既存 2D 探査データにより厚い堆積層が広がることが推定されている。既存データによる地質解析の精度を上げるために、探査データの品質向上を目的として既存 2D 探査データの再処理を実施した。

京都－福井沖は平成２５年度環境省委託業務において比較的評価の高い地点として設定されており、平成３１年度委託業務において実施した基礎物理探査の 2D 探査データおよび公的機関の 2D 探査データの再処理結果から本地点に厚い堆積層が存在する可能性が示唆され、貯留可能域を抽出できる可能性が指摘された。本地点における地質解析と貯留適地評価に資するデータを得ることを目的として、新規 2D 探査を実施した。また既存の 2D 探査データの再処理を実施した。

8.1.2　二酸化炭素貯留適地調査に係る調査・解析・検討の実施

本業務において実施した業務の成果を以下に示す。

(1)　地表地質調査と試料分析（日高沖および京都－福井沖）

日高沖および京都－福井沖を対象として地表地質調査を実施し、貯留層・遮蔽層に相当する岩石試料の採取および各種分析を行うことにより、対象地点の貯留層および遮蔽層の性状を把握するとともに、調査井掘削前 CO_2 挙動予測シミュレーションのための参考データを得た。

(2) 海底地形判読および海底地質情報コンパイル

日高沖、本荘沖および佐渡西方沖の 3 地点において、海底地形および海底地質に関する情報を整理した。

(3) 地質解析と貯留適地評価

日高沖において、基礎物理探査 3D 探査データと基礎試錐坑井データを用いて地質解析と貯留適地評価を実施した。その結果、荷菜層・平取軽米層・萌別層の貯留層で 1 億 t 以上の貯留可能域を六つ抽出し、貯留可能量の合計を 26.3 億 t と評価した。

本荘沖では、平成２８年度委託事業にて実施した地質解析と貯留適地評価範囲の南側において、基礎物理探査 3D 探査データ、基礎物理探査および民間の 2D 探査データ、基礎試錐坑井データを用いた地質解析と貯留適地評価を本業務にて実施した。その結果、笹岡層貯留層で 1 億 t 以上の貯留可能域を一つ抽出し、貯留可能量を 16.0 億 t、桂根相上部貯留層で 1 億 t 以上の貯留可能域を一つ抽出し、貯留可能量を 2.3 億 t、桂根相下部貯留層で 1 億 t 以上の貯留可能域を二つ抽出し、貯留可能量を 5.3 億 t と評価した。この結果、本荘沖の貯留可能量の合計はこれまでの評価量に比べて 23.6 億 t 増加すると評価した。

佐渡西方沖において、基礎物理探査 3D 探査データと基礎試錐坑井データを用いて地質解析と貯留適地評価を実施した。その結果、椎谷層・寺泊層の貯留層で 1 億 t 以上の貯留可能域を三つ抽出し、貯留可能量の合計を 11.8 億 t と評価した。

鳥取沖において、基礎物理探査 2D 探査データ、2019 年度に実施した 2D 探査のデータおよび基礎試錐坑井データを用いた地質解析を実施した。この地質解析結果と、平成３１年度委託事業で実施した基礎物理探査 3D 探査データおよび基礎試錐坑井データを用いた地質解析の結果を合わせ、貯留適地評価を実施した。その結果、更新世の貯留層（上部貯留層）で 1 億 t 以上の貯留可能域を二つ抽出し、貯留可能量を 8.4 億 t、中新世の貯留層（下部貯留層）で 1 億 t 以上の貯留可能域を三つ抽出し、貯留可能量を 7.6 億 t と評価し、貯留可能量の合計を 16 億 t と評価した。

茨城沖北部においては平成３１年度委託事業にて基礎物理探査 3D 探査範囲における地質解析と貯留適地評価を実施しているが、平成３１年度委託事業の繰越業務にて実施した基礎物理探査 3D 探査データを用いた物性解析結果を踏まえ、かつ 3D 探査範囲に基礎物理探査 2D 探査範囲を加えたエリアに対する地質解析と貯留適地評価を本業務の繰越業務で実施した。その結果、鮮新世の貯留層（上部貯留層）で 1 億 t 以上の貯留可能域を一つ抽出し、貯留可能量は 2019 年度評価の 4.8 億 t から 15.1 億 t に増加した。また前期～中期中新世の貯留層（下部貯留層）で 1 億 t 以上の貯留可能域を一つ抽出し、貯留可能量は 2019 年

度評価の 10.0 億 t から 13.8 億 t に増加した。貯留可能量の合計を 28.9 億 t と評価した。

(4)　調査井掘削前 CO_2 挙動予測シミュレーションによる貯留可能性検討

本業務の繰越業務で、本荘沖（本業務において地質解析と貯留適地評価を行った範囲）と佐渡西方沖の 2 地点において調査井掘削前 CO_2 挙動予測シミュレーションを実施した。

本荘沖の笹岡層貯留層において、5 本の圧入井により 40 年間で累計 1 億 t-CO_2 の圧入が可能であることを確認した。さらに最大ケースとして 5 本の圧入井により 90 年間で累計 1.8 億 t、10 本の圧入井により 110 年間で 3.1 億 t の圧入が可能であることを確認した。なお、本シミュレーションでは、遮蔽層下端圧力が制限条件であるスレッショルド圧を超えるが、貯留層の最上部に泥質な地層が存在するため、遮蔽層下端までは CO_2 が達せず、遮蔽層内には溶存 CO_2 は分布していないことで貯留可能と判断した。

佐渡西方沖において、上部寺泊層以深では異常高圧層を形成しており、椎谷層単独での 1 億 t-CO_2 の圧入を試みたが、制限条件をすべて満たして圧入することができなかった（累計圧入量：5 坑井 40 年間の椎谷層への圧入で 0.88 億 t）。そこで、椎谷層に 4 本、異常高圧層である上部寺泊層に 1 本の圧入井を配置したところ、制限条件をすべて満たした状態で、40 年間で 1 億 t の圧入が可能であった。ただし、寺泊層の圧力勾配については簡略的な設定としているため、異常高圧層を詳細にモデル化した際には圧入量に影響が出る可能性があることに留意する必要がある。

(5)　報告書

JCCS は、JOGMEC から国内石油天然ガス基礎調査基礎試錐および同海上基礎物理探査等に関する資料ならびに民間会社から坑井掘削および 2D/3D 探査に関する資料を借用し、本業務を遂行した。借用資料には経済産業省および民間会社が公開不可としている資料が含まれており、本報告書では公開不可資料を掲載することなく調査結果をまとめた。

8.1.3　2021 年度以降の調査候補地点の選定および調査計画（案）の作成

(1)　貯留適地調査地点の総合評価

本業務において、2020 年度の調査結果に基づき、平成３１年度委託事業における 2019 年度末の調査地点の総合評価を、表 5.2-2 に記載している総合評価基準により見直した。2020 年度末の調査地点の総合評価結果は表 5.2-3(1)～(2)に示したとおりである。同表に記載の 41 地点のうち、総合評価 AD の 5 地点（能代沖、秋田沖、本荘沖、茨城沖北部、宮崎沖）、総合評価 S の 7 地点（日高沖、新潟沖、佐渡西方沖、新潟北西沖、佐渡南方沖、京都－福井沖、鳥取沖）、総合評価 A の 5 地点（石狩－礼文沖、紋別沖、酒田沖、隠岐西沖、隠岐北

沖）の計 17 地点を有望な貯留適地候補として評価した。

(2) 貯留適地調査の 2021 年度の予定

図 5.3-2 に示した 2021 年度の貯留適地調査計画（案）では、有望な貯留適地として評価した 17 地点のうち 2 地点（石狩－礼文沖、紋別沖）を除いた 15 地点で調査を継続する計画としている。

① 2D/3D 探査を実施する調査地域の選定

本業務による総合評価の結果、2021 年度に 2D 探査を実施する地点として酒田沖を選定した。酒田沖では、2020 年度に JCCS が実施した既存 2D 探査データの再処理の結果、厚い堆積層の存在を確認したが、測線密度が粗いことからより詳細な構造形態を把握することを目的として、新規 2D 探査を実施する。

隠岐西沖および隠岐北沖では、依然として地元調整が難航しているため 2021 年度に 2D 探査を実施できる体制にはないが、最新情報を収集し、2022 年度以降に実施できるように地元調整を継続する。

② 2021 年度に地質解析を実施する地点の選定

2021 年度は、秋田沖の北部、酒田沖、新潟北西沖、佐渡南方沖、京都－福井沖の 5 地点について、地質構造解析と貯留層・遮蔽層分布評価および CO_2 貯留可能量試算を行う予定である。

8.1.4 その他

(1) 社会的受容性の醸成活動

本事業に関する社会的受容性の醸成を図るため、自治体や地域住民への事業説明や展示会を計画したが、新型コロナウィルス感染症の影響によって、イベント中止、説明員不在での開催という事態となった。説明員不在でも理解してもらえるよう、新規にポスターを制作した。

(2) 有識者委員会の運営

本事業を的確に推進することを目的に、第三者の有識者による助言および指導確認を受けるための委員会を設置し、3 回開催した。

8.2　課題

今後の課題として、次の項目をあげる。

8.2.1　事業の進捗状況

適地調査事業の当初目的は、2020 年度末の CCS 技術の実用化という目標（苫小牧 CCS 実証試験開始時の目標）を受けて、国内に 3 箇所程度の大規模貯留適地を提示することであった。2013 年度に、RITE による既往調査結果を参照し、17 区域 23 地点の候補地（調査対象地点）を CO_2 貯留可能量 1 億 t 以上の貯留適地候補として抽出した。その後、各年度事業において地質調査および地質解析等を実施し、2020 年度末において有望な貯留適地候補として評価した 17 地点のうちの 15 地点について貯留適地調査計画（案）（2020 年 3 月）を作成し、図 5.3-2 に示した。

同計画では、図 5.3-1 に示した従来から採用している貯留適地調査の進め方を踏襲した。2022 年度以降に想定される第二段階の貯留適地調査事業において調査井掘削に向けた準備を開始すると仮定すると、調査井掘削および評価分析の完了年度が最短の能代沖で 2025 年度、本荘沖で 2026 年度上期、秋田沖で 2028 年度上期、その他の地点では未定となっており、当初目標から 5 年～7.5 年遅れている[1)]。遅れの要因は、2D/3D 探査実施時期の制約および地元交渉の難航により地質調査の実施が遅れたこと、基礎物理探査データの公開が見込みより遅れたこと、地質解析結果により必要となった追加地質調査を実施したこと、調査井掘削候補地点での事前調査と準備および 3 箇年度以上の事業で実施する必要がある調査井掘削の保留等があげられる。

貯留層総合評価には調査井掘削が必要であり、有望な貯留適地候補で調査井を掘削した場合であっても貯留適地として不適と判定される可能性があるため、貯留適地候補の中から有望であることを確認した地点において、順次、調査井を掘削するための体制を構築する必要がある。

8.2.2　社会的受容性の醸成

今後、貯留適地調査事業を推進継続するためには、地元自治体と関係者および調査対象海域で操業する漁業関係者に対して丁寧な事前説明を行い、調査実施時期の調整を行うとともに、貯留適地調査事業に対する理解と協力を得ることがきわめて重要である。これまで 2D/3D 探査の実施について地元に対し説明を重ねてきたが、調査井掘削段階に向けて、2D/3D 探査調査と調査井掘削でわかることの違いや調査井の必要性について丁寧かつ解りやすく説明する必要がある。調査地域住民に対しては、CCS に関する正しい情報を発信し、CCS の社会的受容性を醸成していくことが重要である。

また、新型コロナウィルス感染拡大防止のため、これまで基本としてきた対面での説明が必ずしもできない状況が続くことも考えられるので、その状況に適した説明の手段を検討する必要がある。

【参考文献】

1) 日本 CCS 調査(株)、“平成３１年度二酸化炭素貯留適地調査事業委託業務”報告書（2021）

令和２年度二酸化炭素貯留適地調査事業委託業務
報告書　附属書１
令和４年１月

用 語 集

１．略語一覧

【組織名】

AIST　：National Institute of Advanced Industrial Science and Technology／
国立研究開発法人産業技術総合研究所

JAMSTEC　：Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology／
国立研究開発法人海洋研究開発機構

JOGMEC　：Japan Oil, Gas and Metals National Corporation／
独立行政法人石油天然ガス・金属鉱物資源機構

NEDO　：New Energy and Industrial Technology Development Organization／
国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構

RITE　：Research Institute of Innovative Technology for the Earth／
公益財団法人地球環境産業技術研究機構

【委員会・検討会】

Ｈ２５経済産業省委員会　：「平成２５年度中小企業等環境問題対策調査等委託費（全国二酸化炭素貯留層基礎調査）に係る委員会」

Ｈ２５環境省検討会　：「平成２５年度我が国周辺水域二酸化炭素貯留適地検討会」

【事業名】

平成２５年度経済産業省委託事業　：経済産業省委託事業　「平成２５年度中小企業等環境問題対策調査等委託費（全国二酸化炭素貯留層基礎調査）」

平成２５年度環境省委託事業　：環境省委託事業　「平成２５年度シャトルシップによるＣＣＳを活用した二国間クレジット制度実現可能性調査委託業務」

平成２６年度委託事業　：経済産業省・環境省委託事業　「平成２６年度二酸化炭素貯留適地調査事業」

平成２７年度委託事業　：経済産業省・環境省委託事業　「平成２７年度二酸化炭素貯留適地調査事業」

平成２８年度委託事業　：経済産業省・環境省委託事業　「平成２８年度二酸

化炭素貯留適地調査事業」

平成２９年度委託事業　：環境省・経済産業省委託業務　「平成２９年度二酸化炭素貯留適地調査事業委託業務」

平成３０年度委託事業本業務　：環境省・経済産業省委託業務　「平成３０年度二酸化炭素貯留適地調査事業委託業務」

平成３１年度委託事業本業務　：環境省・経済産業省委託業務　「平成３１年度二酸化炭素貯留適地調査事業委託業務」

本業務　：環境省・経済産業省委託業務　「令和２年度二酸化炭素貯留適地調査事業委託業務」

令和３年度委託事業　：経済産業省・環境省委託業務　「令和３年度二酸化炭素貯留適地調査事業委託業務」

２．用語一覧

表１　用語集（五十音）

五十音	用語	説明
ア行	アイソクロン	特定の層準の垂直方向で同じ厚さ（往復走時）のこと。
	アウトサイドミュート	弾性波探査のデータ処理内容の一つで、大きなオフセット範囲の波形の振幅を抑制する処理のこと。
	圧縮強度	一軸ないし三軸圧縮試験において、試料が破壊に達した時の試料への載荷圧力のこと。
	アトリビュート解析	属性解析ともいう。3D 探査によって得られた弾性波動トレースの 3 次元ボリュームデータを使用して、波動トレースが持つ各種特徴（属性）を抽出し可視化する技術である。 着目する属性によりさまざまな解析の種類があり、類似性・相関性に着目したシミラリティアトリビュート解析、反射強度と卓越周波数に着目したスイートネスアトリビュート解析、3 つの周波数成分と堆積相の相関を基に、光の 3 原色（RGB）を用いて可視化する RGB ブレンディング解析等がある。
	アニュラス	坑壁とケーシング、パイプとケーシング間等の環状の間隙のこと。
	阿武隈リッジ	宮城県南部から茨城県北部にかけての沿岸に発達する、常磐沖堆積盆地の東縁部に南北方向に連なる先第三系のリッジのこと。
	安山岩	火山岩の一種。斜長石・輝石の斑晶 （はんしょう） を含み、また、角閃石 （かくせんせき） や黒雲母 （くろうんも）、輝石(きせき) を含むこともある。日本で最も普通の火山岩で、土木・建築材や墓石などに使用される。
	イートン法	弾性波探査や物理探査データから地層圧力を推定する手法の一つ。
	異常高圧	地層圧が地層水による静水圧力を超えること。
	逸泥	坑井内の泥水が地層中に失われること。
	イライト	ケイ酸塩鉱物の一種でカリウムを含む粘土鉱物のこと。砕屑性または高温な熱水変質鉱物として出現する。
	インターセプト・アトリビュート	AVO 解析で得られるアトリビュートの一つ。P アトリビュートともいう。P 波の反射係数を表し、音響インピーダンスの変化に反応する。
	インバージョンテクトニクス	既存の断層が、これまでとは異なった運動方向に再活動することによって新しい地質構造を形成すること。特に、堆積盆の拡大期に引張応力により正断層として活動した断層が、その後の応力場の変化により圧縮応力によって逆断層として再活動する例がある。
	インピーダンス	弾性波速度と密度の積で与えられる物理量のこと。単にインピーダンスという場合は、P 波（音響）インピーダンスを指すことが多い。
	インライン CMP ビンサイズ	受振器測線方向（海上調査ではストリーマケーブル曳航方向）の CMP ビンの大きさ。受振点間隔の 1/2 となる。受振点が 25m であれば 12.5m となる。
	ウェットガス	メタンとともにエタン、プロパン、ブタン、ペンタンなどの高級炭化水素をある程度以上含む可燃性天然ガスのこと。
	エアガン	水中で圧縮空気を瞬間的に放出して弾性波を発生させる非爆薬振源装置のひとつ。海域での反射法弾性波探査では最も一般的に使用される。
	エアガンアレイ	容量の異なるエアガンを複数組み合わせたもの。エアガンアレイにより波形をパルスに近づけることができる。

五十音	用語	説明
	エクスパンダブルライナーハンガー	上部ケーシング内からライナーケーシングを吊り下げる機器であり、パイプを塑性変形により拡張させ、上方ケーシング内に密着させる機構を有するもの。
	エチレングリコール	溶媒、不凍液、合成原料などとして広く用いられる 2 価アルコールの一種で、分子式は $C_2H_6O_2$ である。粘土鉱物の同定に利用される。
	延性度	一軸ないし三軸圧縮試験において、試料が破壊に達した時の試料への歪のこと。
	オングストローム	長さの単位で、Å と表記する。1Å = 10^{-10}m = 0.0001 μm = 0.1nm である。
	オーバーバーデン圧	それより上部にある岩石の重量によって生じる圧力。
	オープンニコル	偏光顕微鏡の光路に偏光子のみを差し込んだ状態のこと。鉱物の形状、色、屈折率、多色性などが観察できる。
	オフセット	弾性波探査における、発振点と受振点の間の距離のこと。
	音響インピーダンス	媒質の弾性波速度と密度の積で与えられる物理量である。
	音響インピーダンス解析	坑井において求めた音響インピーダンスログと岩相分布を対比し、砂岩層や泥岩層の特徴を音響インピーダンスボリュームから抽出する解析手法のこと。
	音響基盤	弾性波探査や音波探査記録断面上で、層序解析が可能な最も下位の反射面の総称である。音響基盤の基準は、絶対的ではなく、使用機器の特性や調査の目的によって異なる。
	温度勾配	地温勾配。地球内部の熱源から地表に伝播してくる熱エネルギーに起因して、深度の増加とともに温度（地温）が高くなる割合。100 m（もしくは 300 ft）当たりの温度で表すことが多い。世界の多くの堆積盆地では 1.5～5℃/ 100 m とされる。
	音波探査	水中で音を発振し、反射または屈折する音波により水底下の地質構造を調べる手法である。音源として、水中放電を使用するスパーカー、高圧空気を使用するエアガン、振動板を使用するブーマーなどがある。
	オンラップ	弾性波探査データの比較的水平な反射波の端が、傾斜した下位の反射波に斜めにぶつかる形態のこと。便宜的には陸方向へ向かって反射波が消滅する現象をいう。
カ行	外圧加圧式のテスターバルブ	坑内流体の産出テスト時に、パイプに接続して坑内に降下されるバルブであり、パイプ外側の圧力制御によりその開閉を行うもの。
	海進期堆積体	Transgressive systems tract (TST) 地層成因論を相対的海水準変動によるものとする概念「シーケンス層序学」の用語であり、堆積盆内の海水準が上昇している時期に堆積した堆積体のこと。
	海底擬似反射面	Bottom Simulating Reflector(BSR)。海底擬似断面ともいう。 弾性波記録断面上で、層理面とは関係なくほぼ海底面に並行（往復走時差で通常 0.5 秒以内）して現れる強振幅のイベントで海底擬似反射面といわれる。例としてメタンハイドレート層の下限に見られることが多い。
	海底受振ケーブル	Ocean Bottom Cable(OBC)。 地震計およびデータ転送装置を内蔵した、海底に設置するケーブルである。長期間設置用に開発されたものは、設置型 OBC とよばれ、長期間にわたる地震動のモニタリングに適している。
	カオリナイト	ケイ酸塩鉱物の一種で粘土鉱物のこと。化学組成は $Al_4Si_4O_{10}(OH)_8$、結晶系は三斜晶系である。

五十音	用語	説明
	火砕岩	火山砕屑岩ともいう。 火山活動により放出された破片状の固体物質を火山砕屑物と総称し、これが固結したもの。
	火山角礫岩	火砕岩のうち、主として粒径 64mm 以上の火山破屑物から構成される岩石（図２「火砕岩の分類」を参照）のこと。
	火山岩	マグマが冷え固まってできた岩石のうち地上もしくは比較的浅い地下で固まった岩石のこと。
	火山礫凝灰岩	火砕岩のうち、主として粒径 2～64mm の火山破屑物から構成される岩石（図２「火砕岩の分類」を参照）のこと。
	ガスチムニー	地層中の深いところから浅部に向かってメタンガスなどが抜けた形態のこと。
	活断層	最近の時代まで活動しており、将来も活動する可能性のある断層のこと。〈最近〉とは、一般に第四紀の後期（およそ十数万年前以降）を指す。
	カッティングス	坑井掘削時にビットで掘り起こした岩石片のこと。
	カットオフ値	定量的検査について、検査の陽性／陰性を判別する値のこと。
	桂根相	秋田地域標準層序では天徳寺層に発達する砂泥互層を指し、秋田沖坑井層序では船川層から下部天徳寺層中に発達する砂泥互層を指す。
	ガラス基流晶質組織	火山岩の石基組織の名称の１つ。細かい柱～針状の斜長石の隙間を主としてガラスが埋めたもののこと。
	ガラスシャード	マグマが急激に冷却され、非晶質のままガラス状に固化した破片のこと。
	軽石ガラス質石質ワッケ	基質含有量 15%未満の砂岩のうち、砕屑粒子として軽石ガラス片を特徴的に多く含むもの。
	含角閃石紫蘇輝石普通輝石安山岩	紫蘇輝石、普通輝石を含む安山岩で、角閃石もまれに含むもの。
	岩石圧縮率	岩石が加圧されることにより変化する体積の割合のこと。
	岩相	地層の特徴のこと。
	基質量	砂岩を構成する砕屑粒子のうち、直径が 20 もしくは 30μm 以下のもの。
	基図	GIS を利用して図を作成する場合に背景図となる地図データのこと。
	基礎試錐	長期計画に基づき、国の事業として石油・天然ガスの基礎データ取得を目的として掘削された調査井のこと。
	基礎物理探査	国の事業として石油・天然ガスの基礎的データ取得を目的とした調査の中で実施されてきた物理探査のこと。
	キック	地層流体が坑内に侵入すること。
	キックオフポイント	傾斜掘り掘削において、坑井傾斜の増角を開始する深度。
	凝灰角礫岩	火砕岩のうち、粒径 64mm 以上の火山破屑物と基質である火山灰よりなる岩石（図２「火砕岩の分類」を参照）のこと。
	凝灰質石質ワッケ	基質含有量 15%未満の砂岩のうち、砕屑粒子として凝灰岩岩片を特徴的に多く含むもの。
	共通受振点記録	弾性波探査において、同一地点での受振によって得られる観測記録波形のこと。
	共通発振点記録	ショットギャザーともいう。 弾性波探査において、同一地点での発振によって得られる観測記録波形のこと。
	共役断層	同一時期に同一条件下の力の作用でできた、ずれの向きが互いに逆である断層の組のこと。

五十音	用語	説明
	極隆部	背斜構造の中で相対的に高い部分をいう。
	キルマッド	地層流体の坑内流入を停止させるための高比重泥水。
	キンク構造	結晶に見られる変形構造のひとつである。滑り面が局所的に屈曲した変形帯状領域や、岩石の劈開面に見られるシャープな屈曲で示される帯状部分のこと。
	空気浸透率	多孔質媒体内における空気の流れやすさを示す測度で，その媒体に固有の性質である。
	空気粘性	空気浸透率測定時に、対象試料内を流れる空気の粘度のこと。
	掘削深度	坑井の掘削に使用するパイプ長さより求められる坑井の深度。
	掘削船	海洋での掘削が可能となるように、掘削装置を装備し、定点保持を可能とした船。
	掘削装置	坑井は地上から降下されるパイプの先端にビットと称する歯を取り付け、これを回転させ岩石を砕くことで掘削する。パイプを吊るための巻き揚げ装置や、回転機構、砕いた岩石屑を地表に回収するための泥水循環機構など掘削に必要な設備の総称を掘削装置という。
	屈折トモグラフィー	弾性波探査により得られた地下の速度分布をセル分割し、各セルの速度値を求め、その結果得られた最適な速度分布から地下の構造を解析する方法である。
	屈折波	地中を伝わる波（弾性波）の中で、地層の境界面（速度と密度が変化する面）で屈折し、地層を伝わり、地表に帰ってくる波のこと。
	グラーベン	ほぼ平行に発達する正断層群によって形成された狭長な地形的凹地帯のこと。地溝とも呼ぶ。（図 3「グラーベンとハーフグラーベン」参照。）
	グラディエント・アトリビュート	AVO 解析で得られるアトリビュートの一つであり、G アトリビュートともいう。S 波速度の情報を含み、S 波速度またはポアソン比の変化に反応する。
	グリーンタフ	日本海側に発達する新第三紀下部緑色凝灰岩層のこと。
	クロージャー	貯留層の地下構造図で、背斜構造によってコンター線が閉塞する地質構造形態のこと。
	クロススプレッドギャザー	3D 探査では、同一地点の発振によって、2 方向（主測線方向とクロス方向）の観測記録が得られる。そのうち、クロス方向（主測線に交差した方向）の測線で得られる観測波形のこと。
	グロス層厚	地層ユニットの全層厚をいう。
	クロスニコル	偏光顕微鏡の光路に偏光子に加え、検光子を差し込んだ状態のこと。複屈折で生じる「干渉色」や、試料の色が暗く見えたり明るく見えたりする「消光」を観察することができる。
	グロスロックボリューム	Gross Rock Volume(GRV)。総岩石容積。 貯留層全体の容積（体積）であり、一般的には、石油・ガス鉱床において端水面より上位の岩石の総量を指す。
	珪藻化石（の分帯）	堆積物中から珪藻化石を検出し、種類・化石群から堆積環境、地層の対比などを化石分帯により考察する方法のこと。
	ケーブル深度調整機器	曳航式ケーブルに取り付ける深度調整用の機器である。調整装置には翼が付随しており、船上からの指示により角度を変化させることによりケーブル深度を任意に調整できる。
	ケーブル展開用機器	OBC もしくはストリーマケーブルを船上から降下したり巻き上げる装置のこと。
	ゲルマッド	掘削屑の坑井内からの除去を目的として使用される高粘性の泥水。

五十音	用語	説明
	検層解析	検層による測定結果を基にし、岩石タイプ、岩相、有効層厚、孔隙率、流体のタイプ、孔隙中の流体の分布、流体の飽和率、生産可能性、二次的孔隙率、浸透率などの性状を明らかにすること。
	玄武岩	塩基性の火山岩であり、斜長石・輝石・橄欖（かんらん）石を含み、暗灰色ないし黒色である。最も多く世界各地に産する火山岩である。
	コア	坑井内などから採取される円柱形の岩石試料のこと。
	コア試験	コアに対しておこなう各種試験のこと。一般コア試験により得られるデータとしては孔隙率測定、絶対浸透率測定、飽和率測定などがある。特殊コア試験としては相対浸透率測定や毛細管圧力測定などがある。
	コア分析	コアの観察結果、コア試験結果などから分析をすること。
	高温型石英	二酸化ケイ素結晶の多形の一つで、1 気圧、573℃で低温型石英から転移する六方晶系の鉱物のこと。
	鉱山保安法	鉱山の保安等について定めた日本の法律。
	高海水準期堆積体	Highstand Systems Tract(HST)。 地層成因論を相対的海水準変動によるものとする概念「シーケンス層序学」の用語。堆積盆内の海水準が高い位置で停滞している時期に堆積した堆積体のこと。
	高傾斜井	坑井傾斜が大きく、掘削開始地点と地下の目的地点の偏距が大きな坑井。
	孔径半径分布	孔径分布測定では孔隙の入り口（孔口）のサイズを測定する。したがって、ここでの孔径分布は孔口半径分布である。
	孔径分布	孔隙サイズの体積頻度分布のこと。
	孔隙性状	孔隙率・浸透率などの良し悪しのこと。
	孔隙率	岩石の総容積に対する孔隙容積の割合のこと。%で表すこともある。
	坑口装置	坑井頂部に位置し内部にケーシングやチュービングを懸垂する機構を有する装置。
	向斜構造	褶曲している地層の谷に当たる構造のこと。
	更新世	表 4「地質年代表」参照。
	合成地震記録	Synthetic Seismogram。 速度検層と密度検層または速度検層のみから理論的に合成された反射弾性波記録のこと。一般に反射特性とウェーブレット（基本波形）のコンボリューションとして計算される。反射特性は速度と密度から求まる反射係数を使用して、平行多層構造の仮定のもとに作成される。1 次反射だけでなく、重複反射や球面発散の効果を考慮することもある。ウェーブレットとしては振源波形や地下のフィルタ効果、観測装置の特性、処理過程で使用されるフィルタなどが考慮される。
	構成粒子	砂岩に含まれる砕屑粒子のこと。
	坑跡	坑井の軌跡。
	構造運動	地殻を構成する岩石や地層の形成後、それらに褶曲ないし断層などの構造的な変位、変形および破壊を引き起こす原因となる運動およびその過程の総称である。
	構造モデル	深度構造図をもとに地質構造を再現した数値モデル。このモデルを細かくセルに分割後、物性値を入力し貯留層モデルを作成する。
	広帯域三次元弾性波探査	広帯域（Broadband）3D 探査ともいう。 従来の 3D 探査よりも周波数帯域の広いデータが得られる 3D 探査のこと。
	後背地	堆積盆に堆積物をもたらした供給源地、つまり背後の陸地のこと。

五十音	用語	説明
	鉱物相	火成岩でも変成岩でも、その鉱物組み合わせは化学組成と生成時の温度・圧力条件に支配される。一定の化学組成の岩石が一定の鉱物組み合わせを生ずる温度・圧力の範囲を相と呼び、火成岩と変成岩においてそれぞれの相に特有の岩石名をつけた相区分が提案された。それぞれ火成相、変成相というが、それらを一括して鉱物相という。
	坑壁	掘削後、ケーシングセット前の坑井の壁面。
	坑壁のせり出し	坑壁が坑井内に押し出してくること。
	坑壁の崩壊	坑壁が崩れること。
	コヒーレントノイズ	弾性波探査において連続的に線上に出現するノイズ波群のこと。
	コンター線、コンター図	図面上である量が等しい値を結んだ線をコンター線、複数のコンター線が描かれた図をコンター図という。
サ行	サイスミックインバージョン	反射法弾性波探査データをある一定の仮定の基で、岩石の物性値（密度など）を求める手法のこと。数学的な逆解析で無いので、初期モデル依存性が高く、入力データ（解釈ホライズン、坑井、弾性波データ）の質が結果に大きく影響する。
	サイスミックファシス解析	弾性波探査断面上で反射波群がつくる定性的・形態的特徴の違いから堆積システムとその分布を推定する解析方法のこと。
	最大海氾濫面	Maximum flooding surface（MFS） 相対的海水準の上昇速度が最も早い時期に、海岸線は最も陸側に移動する。このときの時間面を最大海氾濫面と呼ぶ。
	最大残留ガス飽和率	岩石の孔隙を満たす水をガスにより排除したのち、再び水を最大限押し込んだ際のガスの割合。ガスを押し込む前よりもガスの割合は高くなる。初期状態との差分が岩石に固定され移動しなくなり、これを残留トラップと称する。
	ザク揚げ	泥水の循環により、掘削屑を坑内から排出すること。
	三軸圧縮試験機	油圧により封圧を制御することで第２主応力と第３主応力が等しい条件下での圧縮試験を行うことができる圧縮試験機のこと。
	三次元弾性波探査	3D 探査ともいう。 面的に発振点、受振点を配置し、測定を空間的に密に行うことで、三次元的な地下構造を把握することができる。
	シーケンス境界	sequence boundary (SB) 不連続面の一種で、陸上や浅海での不整合とそれに連続する沖側の整合面のこと。上下の２つのシーケンス境界によって境された１つの堆積シーケンスは、幾つかの堆積体（低海水準期堆積体、海進期堆積体、高海水準期堆積体）から構成される。
	シール能力	貯留層の上部を覆っている不浸透性の岩石（遮蔽層）について、流体の上方への移動を阻止する能力のこと。
	時間構造図	弾性波探査時間断面図の解析ホライズンにより解析された地下構造図のこと。
	時間層厚図	等時間層厚図（アイソクロンマップ）ともいう。 水平方向に厚さが変化する地層について、その厚さの変化をコンター図で表現したもので、厚さの単位が時間であるもの。
	軸歪	一軸ないし三軸圧縮試験における、ピストンによる載荷方向の歪のこと。
	地震探鉱機	反射法弾性波探査で使用されるデータ収録装置のこと。探鉱を目的とした弾性波探査で用いられ、探鉱機の能力が探鉱成果を大きく左右する。

五十音	用語	説明
	地震探鉱機フィルター	地震探鉱機の観測パラメータ設定で、あらかじめ特定の周波数帯域の弾性波を除去・抑制した観測を行うために適用するフィルターのこと。
	紫蘇輝石普通輝石安山岩	紫蘇輝石、普通輝石を含む安山岩のこと。
	シデライト	日本語で、菱鉄鉱のこと。炭酸塩鉱物の一種で化学組成は $FeCO_3$、結晶系は三方晶系である。
	自動振幅補償	Automatic Gain Control(AGC)。 入力の大小に応じ、増幅器利得を増減するもので無線機、通信機をはじめ各種の電子機器に幅広く利用されている。ダイナミックレンジの狭いアナログ弾性波探査探鉱器においても、適度に AGC を行い振幅を抑圧するように設計されている。
	視認孔隙率	薄片鑑定の際に、顕微鏡下で目視で定性的に算出した孔隙率のこと。
	シミラリティーアトリビュート解析	隣接する波動トレース間の類似性・相関の指標であり、反射波の連続性や不連続性を強調することで、断層や亀裂等の抽出を目的とした解析方法のこと。
	斜交葉理	地層中に見られる、層理面に斜めな筋（粒子の配列）のこと。
	ジャッキアップリグ	移動式海洋掘削装置の一種。掘削時は昇降可能な脚を海底面に設置する。
	斜プチロル沸石	沸石の一種で、ケイ酸分に富むものの一つのこと。火山ガラスが変成して出来るものが多い。 化学組織は $(Na,K,Ca_{0.5},Sr_{0.5},Ba_{0.5},Mg_{0.5})_6[Al_6Si_{30}O_{72}]\cdot\sim 20H_2O$ である。
	遮蔽層	キャップロックともいう。 CO_2 などの流体を通しにくい泥岩などで構成された層のこと。
	シャローガス	地下の浅い深度に貯まった掘削障害となるようなガスのこと。
	衝上断層	断層によって地層が切断され、一方が他方の上に乗り上げた形となっている逆断層のうち、断層面の傾斜が比較的緩いもの。
	初成孔隙	岩石が形成された初期に持っていた孔隙のこと。続成作用や二次的に生じた鉱物に埋められるなどして初生孔隙は減少していくことが多い。
	初動屈折波	地中を伝わる波（弾性波）の中で、地層の境界面（速度と密度が変化する面）で屈折し、地層の境界を伝わり、地表に帰ってくる波を屈折波と呼ぶ。 振源から近い受振器では直接波が初動（受振器に最も早く到達する波）となるが、ある程度振源から離れた受振器では、屈折波が初動となる。この波を初動屈折波と呼ぶ。
	シルト岩	図１「砕屑性堆積物の粒度」参照。
	真空飽和	水飽和の方法のこと。孔隙内に空気が残ると十分に飽和ができないことから、孔隙内を真空にしてから孔隙内を水で飽和する。
	震探相	サイスミックファシス（Seismic Facies）。 弾性波探査記録の反射波の連続性、振幅強度、形態などにおいて類似性を持つ特徴（反射波断面上において類似性を持つ反射波の様相）、あるいはその類似性をもとに分類されるユニットのこと。
	浸透率	岩石などの中を流れる流体の通りやすさを表す物性値のこと。
	深部塩水層	孔隙や割目が地下水で飽和された地層のこと。

五十音	用語	説明
	シンリフト期	地球のマントル上昇に伴い地殻に伸張作用が働く地質現象をリフトという。リフトが生じる時代をシンリフト期といい、シンリフト期の前の時代をプレリフト期、シンリフト期の後の時代をポストリフト期という。
	水系泥水	掘削泥水の内、水をベースとしたもの。
	垂直深度	傾斜掘りにおいて垂直方向の距離で表される深度。
	スイートネス解析	3D 探査データにおいて、RMS エネルギーを平均周波数（瞬時振幅を瞬時周波数の平方根）で割ることにより得られ、砂層の領域を示す相対値として使用する。不透明度調整解析により、砂層イベントが明瞭に表示されるスイートネス領域を予め選定し、選定したスイートネスの不透明度領域を、三次元地形図上に投影させ、海底谷や海底扇状地に堆積する砂層分布を表す。
	スイープ回数	同一発振点でのバイブレータを振動させる回数のこと。スイープ回数が多いほど信号/雑音比が改善されるが、その分測定時間が長くなり、作業効率に影響する。
	スイープ周波数	バイブレータの振動周波数帯域。スイープ周波数帯域が広いほど信号がパルスに近づく。
	スイープ長	バイブレータの振動時間長のこと。1 回当たりのスイープ長が長いほど地中に送られる波のエネルギーが大きい。
	水和・膨潤	粘土鉱物の層間に水分子が入り込むことを水和と言い、水和により底面間隔が広がる現象を膨潤と言う。
	スウェルノイズ	海域での弾性波探査において影響を受ける波浪に起因したノイズ波のこと。
	スタンドオフ比	坑壁とケーシングの最小距離（スタンドオフ）の最大距離に対する比。
	増角率	坑井傾斜が増す割合。通常、増角度/30 m で表される。
	ストリーマーケーブル	海上の反射法弾性波探査で一般に用いられるハイドロフォンを複数内蔵したケーブルのこと。
	ストレッチミュート	弾性波探査のデータ処理の中の NMO 補正処理に伴う波形の伸長および Far オフセット側に残留する屈折初動部分を抑制する処理のこと。
	スピルポイント	Spill Point。 背斜トラップなどで形成されたクロージャーは、構造形態上、流体が貯留しうる限界レベルがあり、それ以上は溢れ出すことになる。この溢れ出すレベル（点）をスピルポイント（こぼれ出し点）という。
	スメクタイト	ケイ酸塩鉱物の一種で粘土鉱物のこと。化学組成は $(Na,Ca)_{0.33}(Al,Mg)_2Si_4O_{10}(OH)_2 \cdot nH_2O$ である。結晶系は単斜晶系である。モンモリロナイト族の総称をさす。
	スランプ・スカー	海底地すべりにより形成された凹状の崖面のこと。
	スレッショルド圧力	非濡れ性流体が岩石サンプルに浸入を開始する最小の圧力のことを置換圧力といい、スレッシュホルド圧力と呼ばれることもある。
	整合	重なり合う二つの地層の堆積した年代がほぼ連続していること。
	石英外部標準法	X 線回折分析において、鉱物の量比を定量化する手法の一つ。測定試料とは別に石英 100%の試料（標準試料）を測定し、その強度との比から鉱物の量比を算出する。
	石質アレナイト	基質含有量 15%未満の砂岩のうち、砕屑粒子として岩片を多く含むもののこと。
	接触角	固体表面で液体と気体が接しているとき、この 3 相が接触する境界線で液体面が固体面となす角度のこと。

五十音	用語	説明
	絶対浸透率	単一流体が流動する時の浸透率のこと。
	セミサブマージブルリグ	移動式海洋掘削装置の一種。半潜水型海洋掘削装置と呼ばれる。
	セメンチング	掘削後にケーシングを降下し、その外側をセメントで固めること。
	セメント柱圧	固化前のセメントスラリー柱により発生する圧力。
	セメントプラグ	セメンチングにおいて、セメントスラリーと泥水の混合を防止するために用いられるゴムとアルミニウムから構成される栓。
	浅海 3D 探査	浅海三次元弾性波探査ともいう。浅海域および浅海域と陸域に跨るエリアにて実施する 3D 探査のこと。
	浅海帯	低潮線から大陸棚外縁（水深 140m 前後）までの海底のこと。晴天時波浪限界（水深 30m 前後）を境に、上部と下部に区分される。
	尖度	分布が正規分布からどれだけ尖っているかを表す統計量で、山の尖り度と裾の広がり度を示す。
	セントラライザー	セメンチング時にセメントスラリーがケーシングと坑壁の隙間に一様に満たすようにケーシング外側に設置される芯だし器具。
	層厚	地層の厚さのこと。
	層準	層序上のある特定の位置を指す。例えば、A 層と B 層が同層準にあるとは、両者が同時期に形成されたことを意味する。
	層序	ある地域において、下位から上位に向け、どのような地層が重なっているのかを示したもの。すなわち時代の古い順から新しい順にどのような地層が重なっているかを示したもの。
	相対浸透率	孔隙内に 2 つの流体が存在する時の各流体の浸透率（有効浸透率）を単一流体での浸透率（絶対浸透率）で除したもの。
	相転移面	珪質岩の鉱物相の転移面のこと。珪藻殻は続成作用（温度上昇）によりシリカ鉱物のオパール A からオパール CT、石英へ鉱物相が転移する。ここではオパール A とオパール CT の境界のことを指す。
	層理面	堆積岩ないし堆積相の重なりにおいて、岩相の変化により肉眼的に区別される単層の表面のこと。
	続成変質	堆積物が堆積し、埋没して温度・圧力が上昇し、岩石化していく過程で生じる変質のこと。
	（弾性波探査での）測線	弾性波探査において、発振点や受振点を設ける位置の連なりをいう。発振点の連なりを発振測線、受振点の連なりを受振測線という。
	速度フィルター	弾性波探査データ処理において、特定の見かけ速度域の情報を強調したり、抑制したりする操作を行うためのフィルター。
タ行	タービダイト	混濁流と呼ばれる重力流により運搬された堆積物。混濁流堆積物とも呼ばれる。砂岩と泥岩の互層となることが多い。級化成層が発達すること、堆積の下底面に堆積時の水底が水流によって侵食された跡（ソールマーク）が見られること、などで特徴付けられる。
	堆積環境	堆積物が堆積する場のいろいろな条件。例えば、地理的、物理的、化学的、生物的といった諸条件を含む。堆積物はこれらの諸条件に支配されて堆積しており、またこれらの諸条件を反映した特徴を示す。したがって堆積物の特徴からその場の堆積環境を推定することや、あるいは逆に堆積環境からその場に分布する堆積物の種類を推定することができる。
	堆積相	地層をその総合的な諸性質（岩相、鉱物相、化石相、化学相など）によってとらえた特徴。

五十音	用語	説明
	堆積相解析	Sedimentary Facies Analysis。 堆積相自身および各種の堆積相の時間的・空間的関係に基づいて、地層の形成過程と環境を解明すること。個々の堆積相の検討から、その堆積相を形成した水理学的・地質学的条件を研究する一方、普遍的な堆積相の組み合わせやその時間的・空間的分布から、現世の堆積環境における堆積相や堆積相モデルなどと比較検討して、層序区分単元の形成環境とその変遷を明らかにする。古地理の復元や地史の解明に重要である。
	堆積相分布図	地層をその総合的な諸性質（岩相、鉱物相、化石相、化学相など）によってとらえた特徴を面的にあらわした図のこと。
	堆積体	相対的海水準変動に応じた、堆積システムの連なりや組み合わせによって形成されたもの。
	堆積盆地	ある期間、沈降が継続し、その間に堆積物が累積した地域のこと。
	大偏距井	一般に、傾斜井において水平偏距と垂直深度の比が 2 以上の坑井。広義には、技術的な難易度に応じて、この比にとらわれず大規模な水平に近い坑井を大偏距井と呼ぶこともある。ERDは Extended Reach Drilling の略で、大偏距掘削をいう。
	ダウンホールモーター	ビット直上に取り付けられ、循環する泥水の力でビットを回転させる機器。
	ダウンラップ	弾性波探査データの反射波の端が、比較的水平な下位の反射波面に斜めにぶつかる形態。陸側での堆積と沖側での無堆積を意味する。
	多角測量	トラバース測量ともいう。 基準点から測点 1、測点 1 から測点 2、測点 2 から測点 3 のように測点を結んで測量エリアを多角形で示し、それぞれの測点間の距離と角度を観測して位置関係を求める方法である。
	卓越	周期または波長に用いられる場合、他の波に比べて顕著に大きくなること。
	多重反射波	海上弾性波探査において、地層又は海水層などで 2 回以上反射を繰り返した反射波のこと。反射断面図に現れる多重反射波は、地下構造を解釈する上で障害となる。
	縦歪	定義は軸歪に同じ。文脈の中で、横歪と対比するかたちで縦歪が使われる。
	ダルシーの式	ヘンリー・ダルシーが発見した多孔質媒体内の単一相の流量と圧力損失および粘性係数との関係を表した経験式のこと。この関係の比例定数 K が浸透率と定義される。
	単結晶（高温型）石英	二酸化ケイ素結晶の多形の一つで、1 気圧、573℃で低温型石英から転移する六方晶系の鉱物のこと。
	弾性波探査	地下を伝わる弾性波が物性（主に P 波速度、S 波速度および密度）の異なる境界で屈折や反射などの現象を生じることを利用して、地下構造を調査するための手法のこと。
	地質層準	層準を参照。
	地質層序	層序を参照。
	地質リスク	地盤・地質のさまざまな不確実性に起因して生じる不都合な事象に対し、地質的リスク、ジオリスク、地盤リスク、地下リスク、地山リスクなどいくつか類似な言葉が用いられている。地質リスク学会では、「地質に係わる事業リスク」を"地質リスク"と定義し、事業コスト損失そのものとその要因の不確実性を指すとした。
	地層圧	地層の孔隙内に存在する流体の圧力。

五十音	用語	説明
	地層破壊圧	地層に亀裂が生じる圧力。
	チャネル	海底に形成された河川のような谷の形態を示す地形のこと。
	中央孔口半径	測定された孔口半径データを、大きさ順に並べたときの中央の値のこと。
	チュービング	地層流体を地上に導くための小口径のパイプ。
	中性子検層	高速中性子を地層に照射して地層流体の水素密度を計測することにより、地層の孔隙率を求める検層のこと。測定結果は水素原子エーピーアイ（API）ユニット、あるいは石灰岩で較正された孔隙率を単位として表示される。孔隙率は、岩質に影響をうけるほか、ガス層では見掛け上減少する。
	貯留層	CCS において、CO_2 を圧入し、長期間留めておく地層のこと。一般的に、砂岩などの浸透性の高い地層が貯留の対象層とされる。
	貯留層モデル	遮蔽層や貯留層を再現した数値モデルのこと。細かく分割したセルに物性値を入力し、CO_2 挙動シミュレーションで使用される。
	低海水準期堆積体	Lowstand systems tract (LST) 地層成因論を相対的海水準変動によるものとする概念「シーケンス層序学」の用語のひとつである。堆積盆内の相対的海水準が低下した時期に堆積した堆積体のこと。
	泥火山	泥ダイアピルともいう。 頁岩･泥岩のような塑性流動を起こしやすい地層が、上位に乗る地層の荷重を受けて、地層の割れ目などに沿って、上位層を押し上げて上昇することによってできるドーム状または背斜状の構造のこと。
	ディジタルテレメトリ	受振点の近くでアナログ信号をディジタル化して中央制御装置に伝送するシステムのこと。
	泥水比重	単位体積あたりの泥水の重量。泥水による泥水柱圧が地層圧より小さくならないように調整する。
	ディスタル	堆積物の供給源から離れた場所に堆積した地層の岩相を指す。海底扇状地堆積物では、扇状地の先端（縁辺）部で堆積した地層の岩相を指す。
	底生有孔虫	海底付近に生息する有孔虫のこと。
	ディファレンシャル GPS	DGPS。 任意点の位置座標を GPS で求めるときに、位置座標が正確に判明している基準局で受信した GPS 信号から求めた位置座標と正確な位置座標の差を補正値として使用し、GPS 受信時の誤差を補正して位置座標の精度を高めた GPS のこと。
	データ伝送ケーブル	有線型探鉱機データ伝送装置の伝送ケーブルのこと。
	デコンボリューション	反射法弾性波探査データ処理において、振源特性、観測機器の特性、地層特性および観測系の特性等の影響を除去して記録の分解能を高めるフィルターのこと。
	デタッチメント断層	断層・褶曲で変形した上盤と、変形を被っていない下盤との境界をなす低角度の断層のこと。
	デブリフロー様堆積物	砕屑粒子と水の混合物が粒子濃度の高い状態で、重力を駆動力として斜面などを流下し、堆積したもの。
	テレス（テラス）状構造	ある一方向に傾斜した地層が、部分的に平たんになっている場合に、その平たんな部分をテレス（テラス）状構造という。

五十音	用語	説明
	出羽変動	秋田の油田構造を作った造陸・造山運動である。船川階後期における羽越地向斜の地域的背斜化による隆起運動に始まり、天徳寺階桂根期に主要造山運動があり、南北系の褶曲・断層構造を生じた。この造構によって、女川層・船川層および天徳寺層下部（桂根相）などの秋田油田における油母層が構造をうけ、それらの集油形態に石油が集積し、鉱床を成立させた。
	撓曲	地下の断層が動き続けると、地表では断層の延長上の一部分に変形が集中し、そこだけ地層が急傾斜したり、ときには地層が逆転したりする。このような構造を撓曲（撓曲構造）という。
	同時異相	同時期に堆積した地層が場所によって異なる層相を示すもの。
	等時間層厚図	時間層厚図や等時間層厚線図ともいう。
	同斜構造	地層がある程度の広範囲にわたって、おおむね同一方向に傾斜している地質構造のこと。
	等層厚線図	地層の厚さの水平的変化を表すために、厚さの等しい点を結んで示した図のこと。
	淘汰度	岩石を構成する粒子の粒径分布のばらつきの度合いのこと。粒径の揃ったものは淘汰が良く、揃っていない（粒径がばらついている）ものは淘汰が悪いといえる。
	トータルステーション	光波距離計とセオドライトを一体化した測距測角儀のこと。1 回の測定で水平角、鉛直角、距離を同時に観測できる。
	ドーム（状）構造	地下において地層がドーム状に上に凸に盛り上がっている地質構造を指す。
	独立型探鉱機データ収録装置	受振器のアナログ信号を受振点近くでディジタル化し収録するシステム。データ伝送は行わずデータは装置内部に収録される。
	トップドライブシステム	地表部でドリルパイプに回転を与える装置。
	トップラップ	弾性波探査データの反射波の端が、上位の反射波に斜めにぶつかる形態のこと。
	トラフ充填型タービダイト	トラフ状の堆積盆地を埋積したタービダイトのこと。
	トランスポンダー	送信機が発出した信号に応答して自身の位置を知らせる信号を送信する応答器。
	ドリルシップ	移動式海洋掘削装置の一種。船型で掘削装置を装備したもの。
	ドリルステムテスト	掘削直後に掘削装置を用いて実施される流体生産試験。
	トルク・ドラッグ	掘削作業時に使用するパイプが坑壁やケーシング内面との接触によって生じるトルクや摩擦。
	トレーサビリティ	品質マネージメントシステムにおいては、管理対象とするものの履歴、適用や所在等を追跡できること。
	トレース	弾性波探査において時間的に連続して観測された一観測点のデータ、あるいはこのデータの経時変化を連続する線として表示した波形のこと。
	ドレライト	Dolerite。 半深成岩の一つ。化学組成上、火山岩では玄武岩が相当する。岩床･岩脈として産する。
	トレンド	走向ともいう。 地層面・岩脈壁・節理面・断層面・片理面・鉱床面などが水平面と交わる直線の方向のこと。

五十音	用語	説明
ナ行	ナイキスト周波数	連続信号を等間隔で離散的にサンプリングする際のサンプリング周波数の 1/2 に相当する周波数のこと。
	内部摩擦角	モール円の包絡線を直線で表した場合の、その直線の傾きを角度として表したもの。
	二次元弾性波探査	2D 探査ともいう。 直線状に発振点、受振点を配置し、測定を行い、測線に沿う地下構造を把握することができる。
	ネット／グロス比 ネット／グロス	貯留層砂岩を含むある地層ユニットの全層厚（グロス）に対する有効砂岩層厚（ネット）の比率を指す。
	ネット孔隙率	岩石中に存在する孔隙のうち、流体の移動が可能な隙間をネット孔隙といい、単位岩石中に含まれるネット孔隙の割合を指す。
	ネット層厚	地層ユニットの中での、貯留層の有効層厚のこと。
	ネットワーク型 RTK 法	3 点以上の電子基準点のリアルタイムデータを使用して、電子基準点から離れた場所でも利用者のごく近傍に仮想の基準点を作り出し、精度良く観測できるようにしたリアルタイムキネマティック GPS 測量のこと。
	熱フラックス	熱による伝導性が高められる促進効果のこと。
	粘性係数	物質のねばりの度合のこと。SI 単位は Pa·s（パスカル秒）である。
	粘着力	モール円の包絡線を直線で表した場合の、その直線の切片に相当する強度のこと。
	ノーマルトレンドライン	正常圧力状態での音波検層速度もしくはモデル化された音波速度データの傾向の近似線を指し、正常圧力状態からどれほど変化が発生しているかで異常高圧状態を予測するもの。
ハ行	パードシステム	ストリーマーケーブルを使用した弾性波探査においてストリーマーケーブルの曳航深度を一定に保つため、ストリーマーケーブルに取り付けられる調整装置のこと。
	パーフォレーション	セメントで固められたケーシングを火薬にて穿孔すること。
	ハーフグラーベン	ほぼ平行に発達する正断層群によって形成された狭長な地形的凹地帯をグラーベン（地溝）と言い、片側のみ正断層によって沈降した凹地帯をハーフグラーベン（半地溝）という。図 3「グラーベンとハーフグラーベン」参照。
	ハイアロクラスタイト	水冷破砕された火砕岩の一種である。
	背斜構造	褶曲している地層の波の山に当たる構造のこと。
	廃水	使用済みとなった泥水等の不要となった水。
	ハイドロフォン	海上の弾性波探査において、エアガンから発射された音波が海底面下の地層境界で反射し、海水内で圧力変化として伝わる反射波を捉える受振器（圧力計）のこと。
	ハイドロリクス	泥水循環系に適用される水力工学。
	バイブレーター	ダイナマイトと並び、陸上用の主要な震源の１つ。マスと呼ばれる重りが付いたプレートを大地に接地し、油圧機構により、スイープ波形という特殊な振動を発生させることができる。
	破壊強度	固体試料が、外力の作用のもとに二つまたはそれ以上の部分に分離する現象を破壊という。このときの応力（単位断面積当りの荷重）、すなわち破壊応力を破壊強さ、または破壊強度という。
	破壊限界線	モールの包絡線のこと。応力状態がモールの包絡線に達したところで岩石試料が破壊することを明示する文脈で使われる。

五十音	用語	説明
	発震機構	地震を起こした断層が地下でどのようになっているか（断層がどちらの方向に伸びているか、傾きはどうか）とその断層がどのように動いたかを示すもの。
	パッチ	3D 弾性波探査では、通常、調査エリア全体を幾つかの小エリアに分割してデータ収録作業を実施する。この小エリアをパッチという。
	バライト	硫酸バリウムの微粉末。比重調整のため泥水に添加される。
	バルク体積	見かけの体積のこと。本体積中には試料中の孔隙も含まれる。
	バルク密度	試料の質量を見かけの体積で除し、単位体積当たりで表現した密度のこと。
	パルス	弾性波探査において瞬間的に急峻な変化をする信号の総称である。
	反射波	エアガンやバイブレータなどの振源より発生した波動が水中、地中を伝播し、反射面で反射して受振点で観測される波のこと。
	反射波列端解析	反射波列端とは弾性波探査断面上において、ある反射波列が別の反射波列にぶつかる終端部分を示す。反射波列端がどのような形態で終結するかを観察し、不連続面や地層の層位関係、堆積方向を推定する解析手法のこと。
	反射法弾性波探査	反射法探査ともいう。 地表や海中で振動を発生させ、地下の地層境界ではね返ってくる弾性波（反射波）を計測することにより、地下の地質構造を知る手法のこと。
	斑晶	斑状の火成岩において、より細粒の石基中に肉眼的に目だって大きく見える結晶。多くの火山岩・半深成岩などに認められる。
	半潜水型海上掘削装置	セミサブマージブルリグ。
	比エンタルピー	単位質量あたりのエンタルピーのこと。単位は、kJ/kg(DA)である。
	歪（ひずみ）集中帯	長期的に見て、地殻変動による歪が特に集中している地域のこと。日本では、1990 年代以降に GPS による精密な測地が可能となったことにより、その存在が明らかとなった。
	歪速度	一軸ないし三軸圧縮試験において、単位時間あたりに増加する岩石試料の歪量のこと。
	歪速度制御	一軸ないし三軸圧縮試験において、歪速度を任意に設定することでピストンによる載荷速度を制御すること。
	歪度	分布が正規分布からどれだけ歪んでいるかを表す統計量で、左右対称性を示す指標である。
	比表面積	孔径分布測定で測定された孔隙が、真円管と仮定して求めた孔隙の表面積のこと。
	ビン	反射法弾性波探査のデータ解析において、面的に分布する反射点に対して、共通の CMP を構成するトレースを集める正方形あるいは長方形の範囲のこと。
	ϕe	Effective Porosity。 有効孔隙率を参照。
	ファインマイグレーション	岩石の基質中の粘土鉱物などの細粒物質が、水やガスの浸透に伴い移動する現象のこと。この現象が起きると浸透率が実際の数値よりも悪くなる。
	ファシスマップ	岩相図のこと。層位学的単位の岩石特性の地域的変化を示す地図のこと。
	ファンデルタ	海または湖に接している扇状地のこと。

五十音	用語	説明
	フーリエの法則	熱伝導における基本法則である。物体内に温度差があり、温度の高い方から低い方へと熱が流れるときに、熱の流れに垂直な面を考えると、この面を通過する熱の量（q）は、そこの温度勾配（dt/dx）と面積（A）とに比例する。
	フォースアウト	バイブレーターによる発振作業において発振毎の地面へ与える振動の最大圧力値のこと。バイブレータの最大圧力値（ピークフォース）に対する割合で表す。
	不整合	上下に重なる地層二つの間に堆積の不連続があり、地層形成時期にも大きな時間的間隙が認められる場合の両者の関係のこと。
	物性解析	反射法弾性波探査解析結果を用いて、弾性波速度、密度、ポアソン比等の岩石物性を推定すること。
	不動水飽和率	岩石の孔隙に占める水のうち、他の流体で孔隙を満たしても移動せずに無くならない水の割合のこと。
	ブライン	塩水のこと。一般的に地層水には塩化物が含まれることから、実験では地層水相当の塩水が使われることが多い。
	フラクショナルフロー	２つの流体の非定常流動を表す指標のこと。
	フラワー構造	横ずれ断層帯内で、上方で分岐している断層が、下方で収束していく配置のこと。地塁状の盛り上がりの形態を正のフラワー（ポジティブフラワー）構造と、地溝状に落ち込む形態を負のフラワー（ネガティブフラワー）構造と呼ぶ。
	フランボイダル黄鉄鉱	急激に成長した鉱物は結晶系に関わらず微細な針状結晶になる傾向があり、それが放射状に集合した黄鉄鉱のこと。
	ブリッジプラグ	坑井ケーシング内に圧力遮蔽を目的として装置される栓。
	フリップフロップ発振	海上 3D 探査において、２組のエアガンアレイを交互に発振すること。
	プルアパート、プルアパート堆積盆地	横ずれ断層に付随して発生する盆地のこと。
	ブルーレジン	青色に染色した樹脂のこと。岩石中にブルーレジンを圧入することで、薄片鑑定の際に孔隙分布・形状などの評価を容易にできる。
	プレッシャービルドアップ	坑井を密閉し坑内圧力の時間的変化を測定解析すること。
	プレッシャーフォールオフ	圧入を停止し、坑内圧力時間的変化を測定解析すること。
	フローバック	坑内にある流体を地上に排出すること。
	プログラデーション	海退期に海岸線が海側へ前進することに伴い、三角州が前進平衡（埋め広め）作用によって沖合側へ前進、発達すること。
	プロダクト・アトリビュート	AVO 解析で得られるアトリビュートの一つ。P×G アトリビュートともいう。インターセプト・アトリビュート（P アトリビュート）とグラディエント・アトリビュート（G アトリビュート）の積であり、水飽和のトレンドからの乖離（流体異常）を示す。
	分級度	堆積物の粒子の大きさの揃い具合のこと。粒子の大きさの分布を統計的に処理し、その標準偏差の大小で表わすことが多い。
	分枝状チャネル	本流から分岐したチャネルで、本流と合流することなく流下する。このチャネルは側方へ移動しやすく、運搬してきた砂質堆積物の堆積場となる。
	平均粒径	その岩石を構成する粒子の平均の粒子径のこと。

五十音	用語	説明
	平行葉理	地層中に見られる、層理面に平行な筋（粒子の配列）のこと。
	米国石油協会	American Petroleum Insutitute（API） 原油比重やガンマ線検層・中性子検層の単位にもその名称が用いられる。
	ポアソン比	物体に弾性限界内で応力を加えたとき、応力に直角方向に発生する歪と応力方向に沿って発生する歪の比のこと。 ヤング率などと同じく弾性限界内では材料固有の定数と見なされる。縦歪に対する横歪の比に-1を乗じたもの。(=-横歪/縦歪)
	放物線ラドン変換法	多重反射波抑制手法のひとつ。水平に並ぶ反射波以外の反射波を抽出し、これを本処理適用前のデータから除去することにより、多重反射波を抑制する手法のこと。
	防噴装置	坑井からの地層流体の噴出を防止するために坑井を密閉する装置。
	飽和率	孔隙内に含まれる流体や流体の体積と孔隙容積との比のこと。
	ポストリフト期	シンリフト期を参照。
	ポップアップ	もともとは断層一褶曲帯において反対の傾斜を持つスラスト間にある相対的な隆起に対して用いられた。現在ではその構造的な位置は問わない。圧縮場において背斜構造の両翼に断層が形成され、両者に挟まれた部分が上位へ持ち上げられた構造形態のこと。
	ホライズン	層準。 地層を時間層序学的に解析する上で基準となるような特定の層又は層理面のこと。
	ポルトランドシステム	セメント種類の一つであるポルトランドセメントをベースとしたセメントシステム。
マ行	マール	marl。 炭酸塩鉱物成分が 25～75%、粘土鉱物成分の多い不純な細粒石灰質堆積物のこと。
	マイグレーション	反射法弾性波探査のデータ処理に含まれる処理ステップのひとつである。反射法弾性波探査では、反射波はその到達方向によらず受振点で往復走時として記録される。これをそのまま横軸を受振位置、縦軸を往復走時として表示すると、傾斜した反射面や地下回折源からの反射波はその真の位置ではなく、その受振点直下に表示されることになり、またその往復走時は真の深度と対応していないため、表示される記録断面は歪んだイメージとなる。例えば重合記録断面では、背斜構造は見掛け上大きくなり、逆に向斜構造は見掛け上小さくなる。マイグレーションは、この様な反射波をその反射点・回折点に対応する水平位置と垂直往復走時に移動する処理である。地層の起伏の形状や、断層の位置・傾斜の把握をより正確に行えるようになる。
	マッドダイアピル	泥火山（泥ダイアピル）を参照。
	マリンカッター	廃坑時にケーシングを切断する機器。
	水浸透率	水で測定した絶対浸透率のこと。
	密度検層	ガンマ線の散乱現象を利用して地層の密度を測定する検層のこと。
	ミュートスタートタイム	弾性波探査のデータ処理の中で、ストレッチミュート等の処理を適用するスタート時間のこと。
	毛管圧	互いに溶け合わない二つの流体が固体表面で接したとき、固体表面を濡らそうとする両流体性状の違いから生じる両流体間の圧力差のこと。
	毛細管圧力（毛管圧）	混ざり合わない二つの流体と、接触する固体（岩石等）の濡れ性から生じる流体間の圧力差のこと。

五十音	用語	説明
	モール円の包絡線	異なる封圧条件での圧縮強度と、その封圧によって描かれるモールの応力円を包絡する線のこと。一般的に直線で近似されることが多い。
	モールの応力円	横軸に垂直応力、縦軸にせん断応力を取った平面において描かれる円のこと。モール円と垂直応力軸の交点が当該応力場の主応力強度を表す。当該応力場に与えられるいかなる面の応力状態（垂直応力とせん断応力）も、モール円の内部にプロットされることが証明されており、当該応力場の応力状態を表す目的で、しばしば使われる。
ヤ行	ヤング率	物質を押す（もしくは引く）際に、単位面積あたりに働く力をF、同軸方向の物質の伸びをεとすると、フックの法則 F＝Eεが成り立つ。この時の比例定数Eがヤング率である。軸歪に対する載荷応力の比を示す。（ヤング率＝載荷応力／軸歪）
	有効孔隙率	岩石中の連続してつながっている隙間（すきま）の割合のこと。
	有効層厚	層厚から貯留層の対象となり得ない部分を除いた層厚のこと。 貯留層の有効層厚＝貯留層の層厚×ネット／グロス比。
	有線型探鉱機データ伝送装置	受振器のアナログ信号を受振点近くでディジタル化して中央録音装置に有線でデータを伝送するシステムのこと。送られたデータは中央録音装置でディジタル記録して保存される。有線型ディジタルテレメトリともいう。
	油系泥水	掘削泥水の内、油をベースとしたもの。
	溶岩	岩石を構成する物質が溶融状態にあったもの。マグマとほぼ同じだが、マグマは地下にあるものを、溶岩は地上に噴出したものを指す。主として珪酸塩の溶融帯からなるものが多い。
	容積係数	地表条件における単位体積の流体が地層内で占める体積の比率のこと。
	溶脱孔隙（二次孔隙）	岩石が形成された初期には存在せず、変質作用などで二次的に形成された孔隙のこと。特に岩石中の鉱物などが溶解した孔隙を溶脱孔隙と言う。
	抑留	掘削作業中に坑井内での負荷により、予期しないところでパイプが動かなくなる事故のこと。回復しない場合は掘削作業の中断となる。
	抑留時の強引	抑留後パイプを動かすために、機器やパイプ自体の強度限界を勘案して強く引張ること。
ラ行	ライザーレス掘削	海洋掘削において、海底から海上掘削装置までの泥水循環を可能とするパイプをライザーと称する。海底からの掘削開始時等、ライザーを用いないで掘削すること。
	ライナーケーシング	その頂部が坑口装置まで伸びておらず、上部ケーシングの途中から吊り下げられるケーシング。
	ラディアルトレースデコンボリューション	多重反射波抑制手法のひとつで、主に短周期多重反射波を抑制する手法である。反射法弾性波探査のデータにおいて空間-時間領域のデータを振源からの見かけ速度が一定な直線に沿ってリサンプルし、見かけ速度-時間領域に変換し、予測型デコンボリューションを適用することで周期性を持つ多重反射波を抑制することができる。
	リアルタイムキネマティック GPS 測量	RTK-GPS。 位置が分かっている既知点（基準局）で観測したデータを、移動局に無線や携帯電話を利用して伝送してその位置を求める測量方法である。信号波の位相を用いるため数 cm 程度の精度があり、現在、陸上測量の主流となっている。

五十音	用語	説明
	リークオフ圧力	地層に亀裂が入り始める圧力のこと。
	リークオフテスト	坑井掘削作業において、地層強度の把握のため坑井内に流体を圧入し、圧力に応じた圧入量の変化を見る試験のこと。エクステンデッドリークオフテストは再現性の確認のため、これを繰り返し実施すること。
	リグネート NC	泥水添加剤の一つ。
	リストリック断層	断層面の形状（傾斜面）が地表付近で高角であるが、深部になるにつれて低角（著しい場合は水平）になる断層のこと。インバージョンの様式の１典型でもあることが指摘されている。
	粒子支持	主に礫層で、礫と礫が互いに接して支え合うように堆積をしているもの。対義語は「基質支持」。
	粒子密度	試料の質量を孔隙を除いた体積で除し、単位体積当たりで表現した密度のこと。
	流速	気体や流体の流れる速さのこと。
	流紋岩	酸性の火山岩。流紋岩は一般に斑状をなし、石英・アルカリ長石、少量のソーダ斜長石・黒雲母の斑晶を有する。
	緑泥石	ケイ酸塩鉱物の一種で粘土鉱物のこと。化学組成は $(Mg、Fe、Al、Cr、Mn)_{12}(Si、Al)_8O_{20}(OH)_{16}$ である。結晶系は単斜晶系または三斜晶系である。
	臨界ガス飽和率	岩石の孔隙に占めるガスのうち水などで押しやっても 0%にならないガスの割合のこと。
	燐灰石	リン酸塩鉱物に対する一般的な名称である。
ワ行	ワイヤーライン検層	らせん状に織り込まれたケーブルをワイヤーラインと言い、このケーブルを用いて坑内に検層ツールを降下して測定をおこなうこと。

表 2　用語集（英字）

英字	用語	説明
A	A/D 変換	アナログ-ディジタル変換。 アナログ量をディジタル量に変換する操作を A/D 変換という。測定量が電気量（電圧、電量）に変換されれば、目的に応じた電気的変換方式によりディジタル化することができる。
	AGC	Automatic Gain Control の略称である。 自動振幅補償を参照。
B	BSR	Bottom Simulating Reflector の略称である。 海底擬似反射面を参照。
	BroadSeis/BroadSource	CGG 社が実施する広帯域弾性波探査の商標名である。
C	CaBr2 ブライン	坑井仕上げに用いられる無機塩類溶液の一つ。
	CCS	Carbon dioxide Capture and Storage の略称である。 CO_2 の回収と貯留のこと。
	CDP	Common Depth Point（共通反射点）の略称である。 CMP と同義である。
	CDP 重合	CMP 重合と同義である。

英字	用語	説明
	CIP（ギャザー）	Common Image Point の略称である。反射法弾性波探査のデータ処理において重合前時間マイグレーション処理の共通イメージポイントのトレース群のこと。
	CIP 重合	同一の CIP に属する複数のトレースを加算する処理のこと。
	CMP	Common Mid Point （共通反射点）の略称である。CDP(Common Depth Point)ともいう。 同一の反射点に対応する発振点と受振点の組み合わせから構成されるトレース群、あるいはその反射点のこと。
	CMP 重合	同一の CMP に属する複数のトレースを加算する処理のこと。NMO 補正後に適用される。これによりランダムな雑音が抑制され、S/N 比が向上する。CDP 重合とも呼ばれる。
	Corey	相対浸透率曲線の一般的なモデルのこと。U 字カーブを示すことが特徴である。
	CRS 法	Common Reflection Surface 法の略称であり、共通反射面重合法ともいう。連続する複数の CMP 記録に含まれる反射イベントを近軸波線理論に基づき重合する手法であり、微弱な反射イベントの強調を目的とする重合処理法である。
D	DMO 補正	Dip Move Out（ディップムーブアウト）補正の略称である。 地表で観測される反射記録は地下構造が水平層であれば、発振点と受振点の中点直下で反射するが、地下構造が傾斜している場合は、反射点は傾斜の上側へずれる。より正しいと考えられる反射点の位置で、トレースを足し合わせる処理を DMO 補正といい、この補正によって、より正確な地下構造とより高品質の反射法断面図が得られることになる。
	DSDP	Deep Sea Drilling Program の略称である。1968～1983 年に実施された深海底掘削調査プログラムのこと。
E	ERD	ERDは Extended Reach Drilling の略で、大偏距掘削のことをいう。大偏距掘削とは、一般に、傾斜井において水平偏距と垂直深度の比が 2 以上の坑井の掘削である。
F	F-X 予測フィルター	直線的な反射波イベントは、周波数－空間（F-X）領域において、空間方向に予測可能である。こうした特性を利用して、反射波イベントに対応する振幅および位相スペクトルを空間方向に予測するフィルターを設計し、それを適用することでランダムノイズを抑制する。
	FWI 解析	フルウェーブインバージョン（Full Waveform Inversion）解析の略称である。逆解析手法によって地下の速度構造を求める解析技術である。解析の際、地下の初期速度モデルを仮定して理論波形を計算し、実際の弾性波探査で得られた観測波形と比較し、その差分から速度モデルを更新する。さらに更新した速度モデルを用いて再び理論波形計算と観測波形の比較を行う。この計算過程を差分が所定の収束条件に達するまで逐次繰り返し、最終的な速度モデルを解析結果として地下の速度構造を得る。 FWI 解析は、従来の地下速度構造を求める解析手法に比して、走時データだけではなく、波動トレース全体の情報（周波数、位相、振幅、減衰率など多くの情報）を考慮した波形フィッテングを行うことを特徴とする。
G	GIS	Geographic Information System の略称で、『ジーアイエス』または『地理情報システム』と呼ばれる。地理情報という位置に関連づけられたさまざまな情報を、作成、加工、管理、分析、可視化、共有するための情報技術のこと。

英字	用語	説明
	GNSS 測位	Global Navigation Satellite System の略称で『全地球測位システム』と呼ばれる。人工衛星を使用して地上の現在位置を計測する「衛星測位システム」のうち、全地球を測位対象とすることができるシステムのこと。「衛星測位システム」の代表的なシステムとしては、米国の GPS、ロシアの GLONASS がある。
	GPS 時刻	1980 年 1 月 6 日 0 時に UTC(協定世界時)に同期して開始された GPS 衛星の原子時計が刻む時刻のこと。
	GRV	Gross Rock Volume の略称である。グロスロックボリューム参照。
H	HCF	High-Cut Filter の略称である。高い周波数帯域の波を遮断するファイルターのこと。
	HST	Highstand System Tract の略称である。高海水準期堆積体を参照。
K	KCl ブライン	坑井仕上げに用いられる無機塩類溶液の一つ。
	Krg	ガスの相対浸透率。超臨界状態の CO_2 もガスとして表現している。
	Krw	水の相対浸透率。
L	LCF	Low-Cut Filter の略称である。低い周波数帯域の波を遮断するファイルターのこと。
	LWD	Logging While Drilling の略称である。特殊坑内機器を用いて、掘削作業を行いながら物理検層を行うこと。
M	MTD	Mass Transport Deposit の略称である。斜面崩壊によって形成されたスライドブロック、スランプ堆積物、デブリフロー堆積物などを含めた総称のこと。混沌堆積物ともいう。
N	NaBr ブライン	坑井仕上げに用いられる無機塩類溶液の一つ。
	N/G 比	Net gross ratio の略称である。 ネット／グロス比を参照。
	NMO 補正（動補正）	Normal Move Out correction の略称である。 反射法弾性波探査のデータ処理において、CMP 重合に先だって行われる処理。各 CMP トレース上の同一反射波について、オフセット距離（発振点と受振点距離）による到達時間の遅れをオフセット距離 0 の場合の時間に補正する操作のこと。
O	OBC	Ocean Bottom Cable の略称である。 海底受振ケーブルを参照。
P	P 波インピーダンス	弾性波探査におけるインピーダンスとは、「P 波速度」＊「密度」のこと。反射法処理を用いたインピーダンスの求め方は、使用できるデータの制限から弾性波探査データだけを使用した（instantaneous）なものから、坑井データ等を用いて初期モデルを使用したインバージョンによって求めたものまで様々なものがある。
	PDO	Plan for Development and Operation
	PSDM	Pre-Stack Depth Migration（重合後深度マイグレーション）の略称である。反射波弾性波探査のデータ処理において、重合処理の前に行うマイグレーション処理。地下構造が複雑で水平多層構造とみなせない場合には、重合後マイグレーションでは精度の良い処理が困難となる。この場合、重合処理の前にマイグレーション処理を行い、精度を向上させる。
	PSTM	Pre-Stack Time Migration（重合前時間マイグレーション）の略称である。反射波弾性波探査のデータ処理において、重合処理の前に行うマイグレーション処理。地下構造が複雑で水平多層構造とみなせない場合には、重合後マイグレーションでは精度の良い処理が困難となる。この場合、重合処理の前にマイグレーション処理を行い、精度を向上させる。

英字	用語	説明
Q	QICS プロジェクト	Quantifying and Monitoring Potential Ecosystem Impacts of Geological Carbon Storage の略称である。CO_2 海域地中貯留の環境影響評価を目的とした日英共同プロジェクト。2012 年度にスコットランドの海域で CO_2 放出実証実験が行われ、浅部海底堆積物の CO_2 移動解析、生物地球化学的・生態学的な影響評価、漏出を検出／モニタリングするツール評価、CO_2 拡散とその影響を予測するモデリングツール開発などを目的とした。
R	RGB ブレンディング解析	3D 探査データを周波数特性から三つの周波数（赤、緑、青）に選択・分解し、それぞれの周波数の振幅強度を光の三原色の強度で表現する解析手法のこと。表現された同色の堆積相の形に着目し体積形態を同定する。
	RMS 速度	Root Mean Square 速度の略称である。 各層の区間速度を一定とする多層構造において次式で定義される。 $Vrms = SQRT(\Sigma Vi^2 Ti / \Sigma Ti)$ ここで Vi は各層の区間速度、Ti は各層の垂直往復走時を表す。 水平多層構造においては、任意の反射面に至る速度構造を、当該反射面までの Vrms を区間速度とする二層構造で近似することができる。
	Rotary Steerable Tool	パイプを回転させながら、坑跡のコントロールを可能とする掘削機器。
	RTK-GPS	リアルタイムキネマティック GPS 測量を参照。
S	SEG-D 形式 SEG-Y 形式	地球物理学的データを格納するため、米国物理探査学会（the Society of Exploration Geophysicists：SEG）によって開発された規格。オープン規格であり、SEG 技術標準委員会（非営利組織）によって管理されている。
	Sgc	臨界ガス飽和率参照。本報告では、水-CO_2 相対浸透率曲線を作成するために考慮したもので、CO_2 を圧入する際に CO_2 の相対浸透率が 0 ではなくなる CO_2 飽和率。
	Sgrmax	最大残留ガス飽和率参照。本報告では、水-CO_2 相対浸透率曲線を作成するために考慮したもので、貯留層（水飽和率=1）に圧入した CO_2 が移動しても、水飽和率＝１には戻らず CO_2 が残留する割合。
	Shear Failure Gradient	せん断破壊圧力勾配
	S/N 比	Signal to Noise Ratio の略称である。 信号と雑音の比のこと。
	Spill Point	スピルポイントを参照。
	SRME 法	Surface Related Multiple Elimination の略称である。 多重反射波抑制手法のひとつ。波動方程式に準拠する多重反射波抑制手法であり、波線経路に海面での反射を含む Surface-Related 型の多重反射波を予測し、抑制する手法。
	Staging Area	陸棚縁辺部で運ばれてきた堆積物が集まっている場所のこと。
	Swir	不動水飽和率参照。本報告では、水-CO_2 相対浸透率曲線を作成するために考慮したもので、全孔隙に CO_2 を圧入可能な最大の比率に相当。
T	TCP	Tubing Conveyed Perforation の略称である。ワイヤーラインを用いず、テストや仕上げのパイプの先端に火薬を取り付けパーフォレーションを実施するシステム。
	T-D 関係 （時間－深度関係）	基準面（地表面、海面）から各地層の境界面までの弾性波の伝播時間と深度の関係。地層の弾性波速度の分布を把握する際や伝播時間から深度に変換する際に用いられる。T は Time（時間）、D は Depth（深度）を表す。

英字	用語	説明
	Traction	流体の流れにより、土砂が滑ったり、転がったり、跳ねたりして移動すること。
	TVDss	True Vertical Depth Subsea の略称である。 平均海水面からの垂直深度のこと。
V	Vclay	単位岩石中の泥質分の含有量。検層解析によりこの値が得られる。
	VRS 方式	Virtual reference station の略称で、ネットワーク型 RTK-GPS 観測（ネットワーク型 RTK 法）のうちの仮想基準点方式のこと。
W	Wheeler ダイアグラム解析	不連続面（反射面）として痕跡が残る堆積休止の時代を、堆積時間の欠如として、そのまま（縦軸に時間をとった）二次元座標に表現する解析手法のこと。堆積時間の欠如や不連続面の移動から、堆積体の推定を行う。
	Wyllie 式	音波検層から孔隙率を求める式の一つである。 Φs=(ΔT-ΔTma)/(ΔTf-ΔTma)*1/Cp ΔT=音波検層の測定値、ΔTma=55.5μsec/ft（典型的な砂岩の場合）、ΔTf=189μsec/ft（泥水の値）、Cp=ΔTsh/100μsec/ft、1.0＜Cp＜1.4(一般的な手法)。 Cp：Compaction Factor。
	WGS84	World Geodetic System 1984 の略称である。 世界測地系のひとつ。アメリカ合衆国が構築・維持している世界測地系で、GPS によるナビゲーションの位置表示の基準として使用されている。
X	X 線回折	X 線が結晶格子を回り込んで進行する現象のこと。この現象を利用して物質の結晶構造を調べることが可能となる。
	X 線回折強度	X 線回折分析において、発射した X 線が測定試料に反射して返って来た際にどれだけ検出されたかを示した値のこと。単位は cps（Count Per Second）で示す。

表 3　用語集（数字）

数字	用語	説明
2	2D 探査	二次元弾性波探査を参照。
	24 ビット Delta-sigma 型 A/D 変換	A/D 変換の一種でサンプリングした値の差分を積分していく方式。アナログ回路が少なく小型化できる。
3	3D 探査	三次元弾性波探査を参照。
4	4way クロージャー	構造頂部を持つ背斜構造のこと。

３．地質年代表

表 4　地質年代表

<table>
<tr><th>界／代
(Era)</th><th>系／紀
(Period)</th><th>統／世
(Epoch)</th><th>年代／
百万年前</th></tr>
<tr><td rowspan="7">新生界／代
(Cenozoic)</td><td rowspan="2">第四系／紀
(Quatemary)</td><td>完新統／世
(Holocene)</td><td rowspan="8">0.0117
2.58
5.333
23.03
33.9
56.0
66.0
145.0
201.3±0.2
251.902±0.024
541.0±1.0</td></tr>
<tr><td>更新統／世
(Pleistocene)</td></tr>
<tr><td rowspan="2">新第三系／紀
(Neogene)</td><td>鮮新統／世
(Pliocene)</td></tr>
<tr><td>中新統／世
(Miocene)</td></tr>
<tr><td rowspan="3">古第三系／紀
(Paleogene)</td><td>漸新統／世
(Oligocene)</td></tr>
<tr><td>始新統／世
(Eocene)</td></tr>
<tr><td>暁新統／世
(Paleocene)</td></tr>
<tr><td rowspan="3">中生界／代
(Mesozoic)</td><td>白亜系／紀
(Cretaceous)</td><td>※</td></tr>
<tr><td>ジュラ系／紀
(Jurassic)</td><td>※</td></tr>
<tr><td>三畳系／紀
(Triasic)</td><td>※</td></tr>
<tr><td>古生界／代
(Paleozoic)</td><td colspan="2">※</td></tr>
</table>

出典：国際年代層序表（2019 年 5 月）から抜粋して作成。
http://www.geosociety.jp/uploads/fckeditor//name/ChronostratChart_jp.pdf
注：「界」「系」「統」「階」は各地質時代に堆積した地層区分を表す場合に用い、
「代」「紀」「世」「期」は地質時代を表す場合に用いる。
※：省略。

砕屑性堆積物の粒度　(Wentworth 1922)

堆積物の種類		主要構成粒子の区分と境界粒径	mm	(φ数)
礫岩		巨　礫　(boulder)	256	(−8)
		大　礫　(cobble)	64	(−6)
		中　礫　(pebble)	4	(−2)
		細　礫　(granule)	2	(−1)
砂岩		極粗粒砂　(very coarse sand)	1	(0)
		粗粒砂　(coarse sand)	1/2	(1)
		中粒砂　(medium sand)	1/4	(2)
		細粒砂　(fine sand)	1/8	(3)
		極細粒砂　(very fine sand)	1/16	(4)
泥岩	シルト岩	シルト　(silt)	1/256	(8)
	粘土岩	粘　土　(clay)		

図 1　砕屑性堆積物の粒度（地学事典、1980 年）

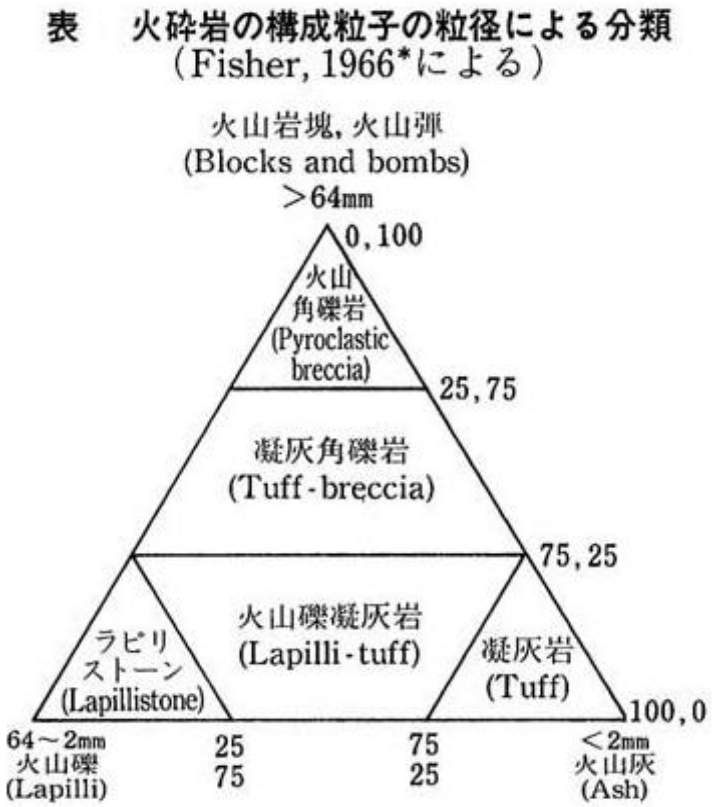
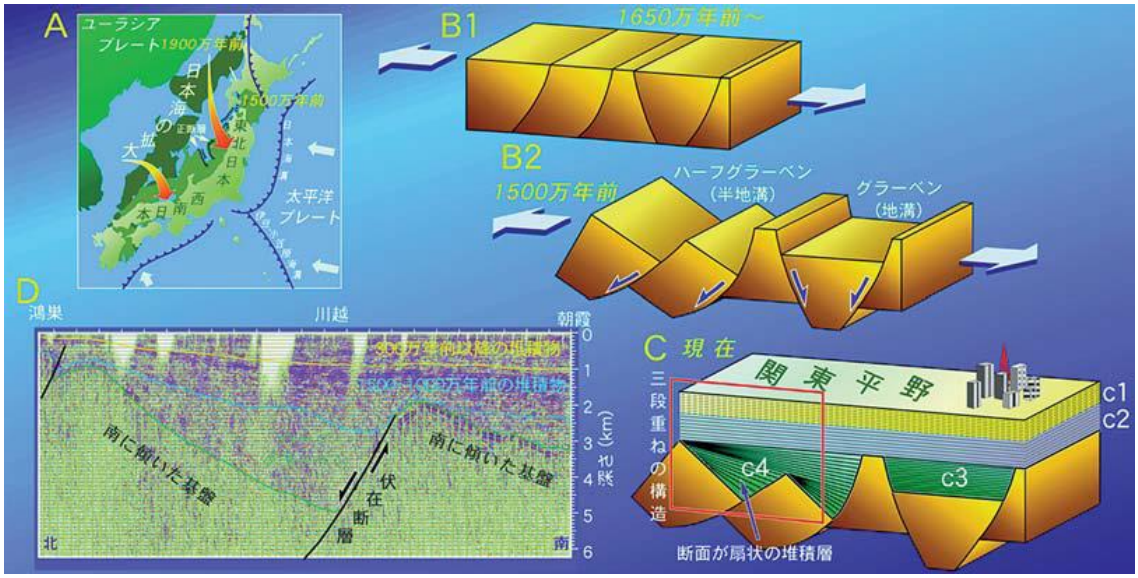


図 2　火砕岩の分類（JOGMEC、石油天然ガス用語辞典）



http://www.zisin.jp/pdf/nf-vol63.pdf

図３　グラーベンとハーフグラーベン（日本地震学会広報誌、2007 年）