

令和 5 年度 国内石油天然ガス地質調査・メタン
ハイドレート研究開発等事業
(浅海域におけるメタンガス湧出量調査)

－成果報告書－
(公表用)

令和 6 年 3 月

海洋エンジニアリング株式会社

— 目 次 —

1. 事業目的	1
2. 事業内容	1
3. 調査工程	1
4. 調査海域	2
5. 調査方法	2
5.1. 概要	2
5.2. 調査に供する装備や観測機器	3
5.2.1. 調査船	4
5.2.2. ROV	4
5.2.3. MBES(調査船搭載)	5
5.2.4. MBES(ROV搭載)	5
5.2.5. 三次元音響ビデオカメラ(ROV搭載).....	5
5.2.6. ガス捕集器(ROV搭載)	6
5.2.7. 計量魚探(調査船搭載用).....	7
5.2.8. 計量魚探(ROV搭載用).....	7
5.3. 現地調査(調査準備)	7
5.4. 現地調査(調査航海)	8
5.4.1. 母船からのマルチビーム音響測深機 EM122 _{wcd} 計測	8
5.4.2. ROVによる低高度計測	8
5.4.3. 重点観測区域におけるROVによる海底スキミング(直上)計測	9
5.4.4. 母船及びROVによる、科学計量魚探等の多角的計測	10
5.5. 湧出量の算出.....	11
6. 調査結果	12
6.1. 現地調査(調査航海)の概要	12
6.2. 母船からのマルチビーム音響測深機 EM122 _{wcd} 計測	14
6.2.1. EM122 _{wcd} 詳細解析について	14
6.2.2. 湧出点の平面分布	14
6.3. ROVによる低高度計測.....	15
6.3.1. EM2040 _{wcd} 解析によるプルームの検出	15
6.3.2. 湧出点の平面分布	15
6.4. 重点観測区域におけるROVによる海底スキミング(直上)計測	16
6.4.1. 三次元音響ビデオカメラ ARIS Voyager 3000 による計測.....	16
6.4.2. 湧出量の直接計測(湧出量の計測、ガスの直接捕集).....	16
6.4.3. ガスの直接捕集及び化学分析.....	16
6.5. 母船及びROVによる、科学計量魚探等の多角的計測	17
6.5.1. 母船からの計量魚探 EK60 計測	17
6.5.2. ROVからの計量魚探 WBAT 計測.....	18

7. 考察	19
7.1. ガス湧出量の算出	19
7.2. ガス湧出量の基準状態への換算	20
8. 今後の課題	21
9. 謝辞	21
10. 引用文献	21

1. 事業目的

日本周辺海域には海底からメタンガスが噴出している地域が存在することが知られている。これまで、メタンハイドレートが賦存する海域(水深500メートル以深)のうち、メタンプルーム(メタンガス気泡の湧昇流)の観測報告が多い上越沖の水深900m付近(海鷹海脚)において、湧出量の調査手法の確立及び湧出量把握のための調査が行われてきた。これは、メタンハイドレートの回収・生産の研究開発に必要な海底状況を把握するための調査の一環として、行われてきた。

他方、上越沖(海鷹海脚)周辺のメタンハイドレートが賦存しない海域(水深400メートル以浅)では、海底からのメタンガス湧出量の調査は実施されていない。

海底からのメタンガス湧出量を総合的に把握するためには、メタンハイドレートが賦存しない浅海域での湧出現象の実態と湧出量を把握することが非常に重要であることから、本事業では、既存手法等を発展的に利用して浅海域での時空間的に変動するメタンガス湧出量を把握することを目的とする。

【注記】

本報告におけるメタンガス湧出量の表記について

今回、水深約 130～450m までの海域を対象にメタンガス湧出量を試算する。湧出点の水温や水圧に大きな幅があることから、比較のための条件を揃える必要がある。計測水深(約 130～450m)ごとの湧出量は q と表記し、比較のため、基準状態に換算した湧出量を Q と表記して、区別する。

- | | |
|--|-----------|
| ・ 計測水深での湧出量 : | q (ℓ/h) |
| ・ 天然ガスの基準状態に換算した湧出量 : | Q (ℓ/h) |
| (基準状態 : 温度 15.6℃、絶対圧 101.325kPa、相対湿度 100%としたガスの状態) | |

2. 事業内容

本調査では、メタンハイドレートが賦存しない上越沖の周辺浅海域において、メタンガスの湧出量の総合的定量化のため、海底面から活発に湧出する調査海域を選定し、(1)湧出量を計測する場所の把握・特定のための海洋調査(概査)及び(2)湧出量把握のための計測を実施した。概査に対し、湧出状況把握のために実施する近距離計測及び最接近計測を精査として扱う。

これまで、メタンハイドレートが賦存する海域(水深 900 メートル付近)において湧出量調査手法開発を行ってきた。これらの手法を活用し、広域のメタンガス湧出地点を効率的に捉えるマルチビーム水中音響計測や計量魚探等による間接定量計測やメタンガスの直接捕集による湧出量の直接計測等と同等の複数の水中音響計測を効果的に組み合わせた調査を実施し、それら計測結果のクロスチェック等を行うことで計測データの信頼性向上を図るとともに、既存手法を更に発展的に改善して、浅海域での時空間的に変動する湧出量情報を取得・整理した。

また、本事業を行うにあたって、外部有識者で構成される第三者委員会(以後、運営会議という)を設置して、意見を聴取した。

3. 調査工程

潮汐の振幅の増減によってメタンガスの湧出状況が変化すると推定されるため、振幅の大きな時期と

比較的小さな時期を含む一続きの範囲を調査航海の時期とすることが望ましい(固体地球潮汐¹⁾、海洋潮汐²⁾)。固体地球潮汐の変動幅が大きな時期は年に複数回存在するが、このうち9月26日～28日を含む令和5年9月18日～10月2日を調査航海の実施時期とした。なお、出港及び帰港場所は新潟港をとし、調査日程は関係各所と十分協議したうえで決定した。また、現地に到着後、気象・海象の状況やメタンプルームの湧出状況など現地の状況に応じて対応した。

4. 調査海域

新潟県佐渡島の鷲崎(弾崎灯台)から東へ約30kmに位置する佐渡北東沖海域を調査海域とした。調査海域内の水深は130～450m程度で、メタンハイドレートは賦存しないと考えられる一方、メタンプルームの存在が確認されている。

5. 調査方法

5.1. 概要

湧出場所及び湧出量の概要を把握するため、調査船装備のマルチビーム音響測深機(Multibeam echosounder, 以下、MBES)にて EM122_{wcd}(WCD: Water column display: 水中の音響画像)計測を実施するとともに、調査船装備の計量魚探 EK60 を用いた計量計測を行った。

また、ROV を用いた精密 MBES EM2040_{wcd} 計測でメタンプルームの位置とメタンガス湧出量を精密計測するとともに、計量魚探 WBAT による計量計測を実施した。

更に、詳細に実態を把握するため、ROV に装備した三次元音響ビデオカメラ ARIS Voyager 3000 による計量計測、ガスサンプラーによる湧出量の計量計測、ガス採集器による直接捕集を行った。併せて、三次元音響ビデオカメラで計測を行い、採集したガスは実験室で成分分析を実施した。

以上、三段階の計測解析を連携し、計量手法を高度化した。

現地作業のイメージを図1に示す。実作業としては、洋上からメタンプルームの位置を特定し、湧出するガス気泡を ROV に搭載された探査装置(MBES、計量魚探、三次元音響ビデオカメラなど)を用いて、湧出量を計測した。また、キャリブレーションに必要な各種データを取得した。得られた観測結果と既往解析技術を統合して解析し、当該海域におけるメタンガス湧出量を把握した。

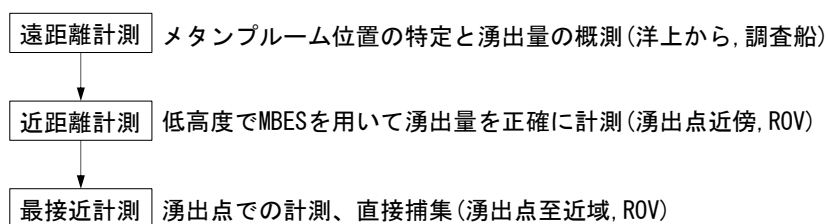
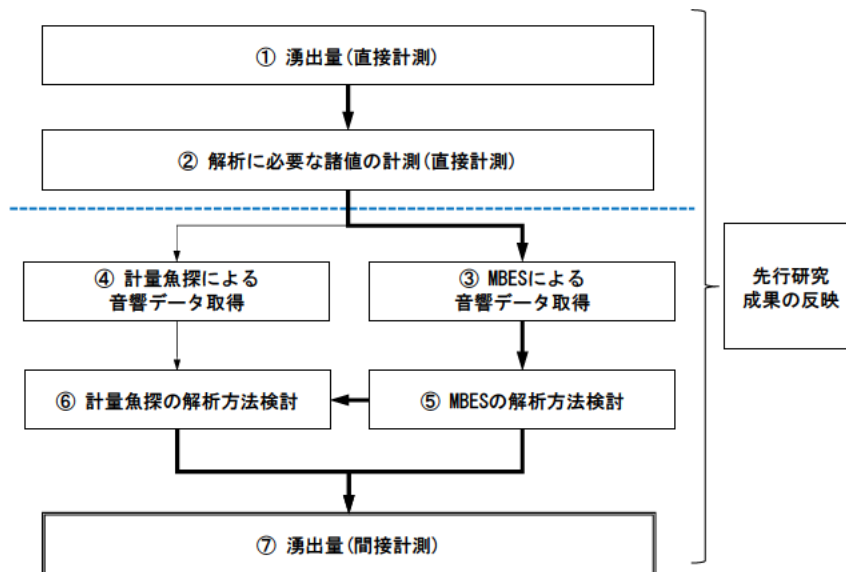


図1 調査航海における現地作業のイメージ

調査航海で得られた計測値の解析手順を図2に示す。解析の手順としては、直接計測できた確実なものから解析に着手し、間接計測まで、それぞれ対応するソフトウェアを構築していった。解析にあたっては、先行する研究の成果を活用した。



解析の手順：直接計測できた確実なものから着手し、湧出量(間接計測)まで、それぞれのソフトウェアを構築していった。
解析にあたっては、先行する研究成果を活用した。

図 2 計測結果の解析手順

5. 2. 調査に供する装備や観測機器

調査船は海洋エンジニアリング株式会社所有の第一開洋丸を用いた。ROV は海洋エンジニアリング株式会社が所有する水深 3,000m 対応の SAAB Seaeye 社製 ROV 型式 LEOPARD を使用した。

観測機器等一覧を表 1 に示す。観測機器やガス捕集器は、調査船もしくは ROV に搭載し、観測や試料採集に使用した。調査船、ROV 及び個々の観測機器等の基本性能は、次ページ以降に示す。

表 1 観測機器等一覧

観測機器、ガス捕集器	調査船 搭載	ROV 搭載
MBES	EM122 (Kongsberg 社製)	EM2040 (Kongsberg 社製)
三次元音響ビデオカメラ	—	ARIS Voyager 3000 (Sound Metrics 社製)
計量魚群探査機 (計量魚探)	EK60 (SIMRAD 社製)	WBAT (SIMRAD 社製)
ガス捕集器	—	大型ガスサンプラー
		海底ガス採集器
		液量計利用サンプラー

- ・大型ガスサンプラーは、メタンガス湧出量の把握やメタンバブルのサイズや上昇速度の把握に使用する計画だったものの、本調査海域での使用に適さないことが判明し、別の方法に変更した。
- ・海底ガス採集器(真空採水器と漏斗状採取部分の組合せ)は、ガスの直接捕集に使用した。
- ・液量計利用サンプラーは、現地の実情に合わせて、急遽、現場で用意した。

ROV の艀装方式一覧を表 2 に示す。ROV は用途によって 3 種類のペイロード艀装方式を使い分けた。

表 2 ROVの主な艀装方式

艀装方式	主に使用する観測装置や採集装置	航走・定点
艀装 1a	前方監視ソナー(M3)：前方配置 MBES(EM2040)：鉛直下向 計量魚探(WBAT)：鉛直下向	近距離計測用
艀装 1b	海底ガス採集器	最接近計測用
艀装 2	音響ビデオカメラ(ARIS Voyager3000) 大型ガスサンプラー 液量計利用ガスサンプラー	

5.2.1. 調査船

調査船は海洋エンジニアリング株式会社所有の第一開洋丸を用いた。精査に使用する ROV や各種観測機器等を搭載して、現地調査を実施した。第一開洋丸の外観を図 3 に示す。



図 3 調査船 第一開洋丸外観

5.2.2. ROV

精査に使用した ROV は、海洋エンジニアリング株式会社が所有する水深 3,000m 対応の SAAB Seaeye 社製 ROV 型式 LEOPARD を使用した。LEOPARD の外観を図 4 に示す。

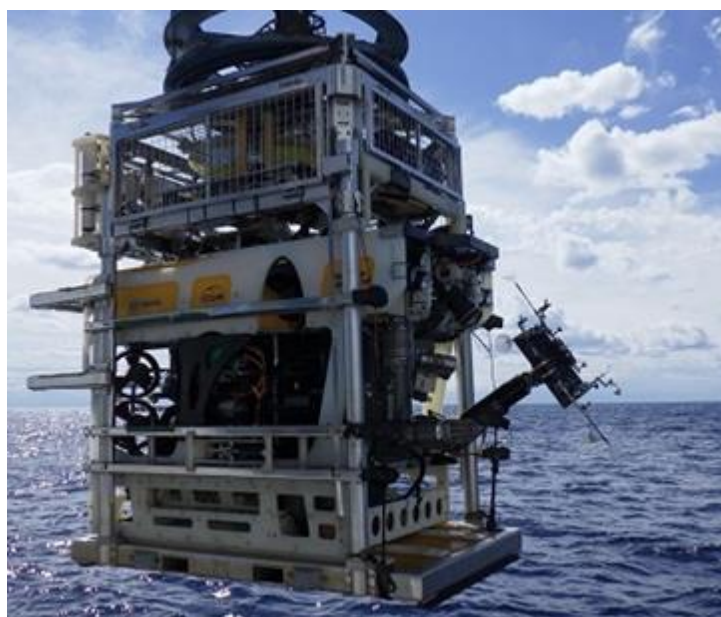


図 4 ROV LEOPARD外観

5.2.3. MBES(調査船搭載)

調査船搭載の MBES は Kongsberg 社製の型式 EM122 を使用した。EM122 の主な諸元を表 3 に示す。

表 3 MBES(型式：EM122,調査船搭載(船底艀装))の主な諸元

機器名	EM122 (Kongsberg 社製)
周波数	12 kHz (10.5 to 13.5kHz：セクター分け)
ビーム数	432(設定), 864(Dual Swath)
ビーム幅	2°×2°
スワス幅	2,000m (設定)、水深の 6 倍, 30 km
水深幅	10～11,000 m
調査時の計測条件	周波数: 12 kHz ビーム数: 288 本

5.2.4. MBES(ROV 搭載)

ROV 搭載の MBES は、Kongsberg 社製の型式 EM2040 を使用した。EM2040 の主な諸元を表 4 に示す。

表 4 MBES(型式：EM2040,ROV搭載)の主な諸元

機器名	EM2040 (Kongsberg 社製)
周波数	200～400 kHz
ビーム幅	1°×1°
調査時の計測条件	周波数:300 kHz,

5.2.5. 三次元音響ビデオカメラ(ROV 搭載)

三次元音響ビデオカメラは、SOUND METRICS 社製の型式 ARIS Voyager 3000 を使用した。Voyager3000 の主な諸元を表 5 に示す。三次元音響ビデオカメラはメタンバブルの湧出量と上昇速度を測るのに使用した。

表 5 次元音響ビデオカメラの主な諸元(型式:ARIS Voyager3000,ROV搭載)の主な諸元

機器	ARIS Voyager 3000 (Sound Metrics 社製)
周波数	3.0MHz / 5m レンジ, 1.8MHz / 15m レンジ
ビーム数	128 本
ビーム幅	0.25°×1.00°(with concentrator lens)
カバレッジ範囲	30°horizontal×1°vertical (with concentrator lens)
更新レート	最大 15 Hz
耐圧深度	4,000 m
調査時の計測条件	周波数: 3.0 MHz, サンプルング間隔: 10 Hz

5.2.6. ガス捕集器 (ROV 搭載)

ガス湧出量の直接計測や分析試料採取に、大型ガスサンプラー、海底ガス採取器及び液量計利用のガスサンプラーを使用した。

(1) ガス等捕集器 (ROV搭載)

海底ガス採集器は真空採水器と漏斗状の採取部分から成る(図 5)。海底ガス採集器は、ROV に搭載しガスの直接捕集に使用した。



図 5 海底ガス採集器(2セット分)

(2) 大型ガスサンプラー (ROV搭載)

大型ガスサンプラー(図 6)は、メタンガス湧出量の把握、メタンバブルのサイズや湧出速度を把握するために使用を予定していた。しかし、現地作業を行ったところ、調査対象の水深帯(海底でガスハイドレートが安定して存在できない温度・圧力領域)では、気泡同士がひとつの大きなガスの塊となり、メタンバブルのサイズ計測ができなかった。また、上面の蓋の隙間からガス漏出も認められた。

この大型ガスサンプラーは、上越沖(水深約 900m, ガスハイドレートが安定して存在できる温度・圧力領域)で、ガスバブルを効率よく計測・放出するために設計されたものであり、本調査海域での使用には適さなかった。

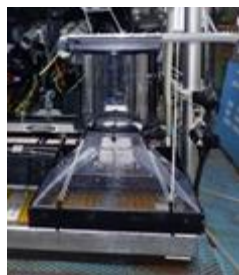


図 6 ROVに艀装された大型ガスサンプラー

(3) 液量計利用ガスサンプラー

大型ガスサンプラーではガスの湧出量を計測することが困難となったため、急遽、液量計を利用したガスサンプラーを用意した。ガス湧出量の直接計測は、このサンプラーを用いて行った。

5.2.7. 計量魚探(調査船搭載用)

調査船搭載の計量魚探は SIMRAD 社製の型式 EK60 を使用した。EK60 の主な諸元を表 6 に示す。

表 6 計量魚探(型式：EK60,調査船搭載)の主な諸元

機器	EK60 (SIMRAD 社製)
周波数	38 kHz (18, 38, 70, 120, 200 kHz)
ビーム幅	7°(38 kHz)
スプリットビーム	1～5,000 m
調査時の計測条件	パルス長: 1.024 ms, サンプリング間隔: 0.256 ms, 周波数: 38 kHz, ピング間隔: 1500ms

5.2.8. 計量魚探(ROV 搭載用)

ROV 搭載の計量魚探は SIMRAD 社製の型式 WBAT を使用した。WBAT の主な諸元を表 7 に示す。

表 7 計量魚探(型式：WBAT,ROV搭載)の主な諸元

機器	WBAT (Wide Band Autonomous Transducer) SIMRAD 社製
周波数	38 kHz
ビーム幅	18°
パルス形式	CW(連続波)、FM チャープ
パルス長	128 μ s～2 ms
耐圧深度	1,500 m
調査時の計測条件	パルス長: 1.024 ms, サンプリング間隔: 0.235 ms, 周波数: 38 kHz ピング間隔: 500 ms

5.3. 現地調査(調査準備)

調査航海に必要な機器や装備の入手や借用手続きを行った。また、現地での作業にあたり必要とされる計測機器の較正なども実施した。

三次元音響ビデオカメラは、調査船搬入前に東陽テクニカにて事前調整を行った。調査船へ搬入した三次元音響ビデオカメラは、ROV へ搭載し、動作確認を行った。

5.4. 現地調査(調査航海)

佐渡北東沖海域にて調査航海を実施し、メタンガス湧出量について各種計測を行った。

5.4.1. 母船からのマルチビーム音響測深機 EM122_{wcd} 計測

調査船の船底に艀装された EM122(周波数 12kHz)を用いて、調査測線上を航走し、洋上から計測を行って、WCD 解析からメタンブルームの位置を特定した(図 7)。

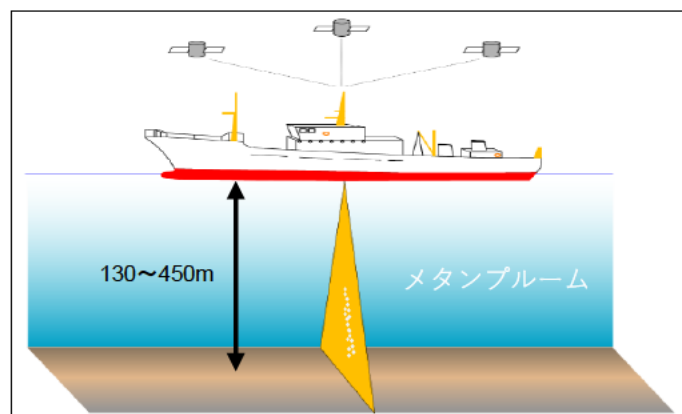


図 7 調査船のMBESを用いた計測イメージ

調査測線(調査船の航走経路)の設定にあたって、広域航走、重点航走及び準広域航走を使い分けた。原則として、調査時の船速は 5kt(4~6kt)とした。広域航走は調査海域全体を対象範囲とした。一方、広域航走は航走に多大な時間を要することから、より対象範囲を絞り込んだ重点航走、準広域航走を設定した。観測漏れを避ける意味で、1本の調査測線では同一の計測条件で行うこととし、測線の途中で条件を変更しなかった。計測は、海洋潮汐と固体地球潮汐の変動を踏まえ、期間中、最大振幅が予測されている 9月27日に広域航走が実施できるように調整した。他に、比較のために、振幅の小さな日(9月19日,10月2日)も広域航走の実施日となるよう調整した(計3日間)。なお、調査開始直後に、広域航走を2回実施した後、重点航走を試したうえで準広域航走に移行した。

EM122を用いた計測では、水深 130m~450m の調査海域をカバーし、湧出量の多い重点観測区域を設定した。その後、設定した重点観測区域において、ROVを用いた精査を実施した。当初、調査対象は A、B、D、E、F 及び G を想定(図 10)したが、現地の状況を鑑み、A、B、D、E 及び F の 5 サイトで MBES と計量魚探による近距離計測、三次元音響ビデオカメラによる最接近計測、ガスの直接捕集及び湧出量の直接計測を実施した(後述、表 10 参照)。

5.4.2. ROV による低高度計測

前項でメタンブルーム湧出点の絞り込みを行った後、重点観測区域内にて、詳細検討すべきメタンブルームを特定し、ROV に搭載した探査装置(EM2040, ARIS Voyager 3000, WBAT)を用いて詳細計測を行った。ROV を海底近くの低高度で水平移動させ、特に注目すべき湧出点を選出した。

計測範囲は、複数の測線を設定して行った。船速は、原則として、0.3~0.4 kt とした。また、湧出口周辺の湧出現象に伴う特徴地形を把握するため、メタンブルーム計測と同時に地形計測を実施した。

5.4.3. 重点観測区域における ROV による海底スキミング(直上)計測

(1) 音響ビデオカメラ ARIS Voyager 3000 による計測

重点観測区域にて、ROV 搭載の三次元音響ビデオカメラ ARIS Voyager 3000(周波数 3MHz)を用い、メタンブルームの精密計測を行った(図 8)。ROV の艀装方式は艀装 2(表 2)を用いた。

得られた計測結果は、後述する湧出量の直接計測の成果と併せて、EM122 及び EM2040 のキャリブレーションデータとして利活用した。

音響ビデオカメラの撮像間隔は、原則として、毎秒 10 回とした。計測範囲は、複数の調査測線を設定し、方向を変えて、それぞれ計測を行った。測線 1 本あたりの距離は約 10~20m とした。ROV 航走にあたり海底面からの高度は、原則として、約 2~3m とした。ROV 航走速度は、原則として、0.1~0.2 kt とした。航走方位は底層流による浮遊底泥の影響を避けた。

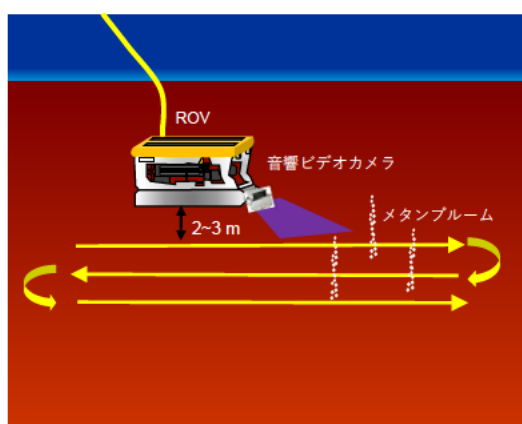


図 8 音響ビデオカメラを用いた計測イメージ

(2) 湧出量の直接計測(湧出量の計測、ガスの直接捕集)

・メタンガス湧出量の直接計測及び変動の確認

現地状況を鑑み、液量計型サンプラーを用いて、湧出量を直接計測した。また、計測する時間と場所を変えて、隣接区域内を移動計測することで時空間的な変動を把握した。

・メタンバブルのサイズ把握

現地状況を鑑み、三次元音響ビデオカメラから粒径を推測した。

・ガスの直接捕集

ガスを採取した測点は、三次元音響ビデオカメラを用いて定量計測を行った観測点から、複数点を選定した。ROV はガス捕集器を取り付けた艀装 1b で対応した。

ガスの採取(直接捕集)は、真空採水器を利用した海底ガス採集器を用いて行った(図 9)。ガスを捕集した真空採水器は、そのままの状態で行き先へ持ち込み、ガス組成を分析した。

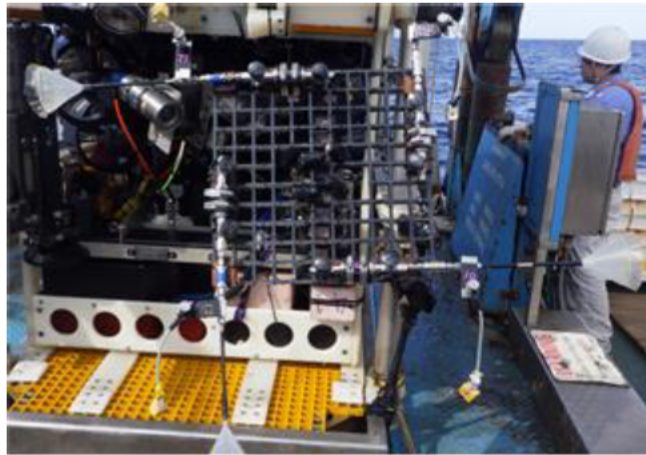


図 9 調査に使用する海底ガス採集器(ROVに搭載した状態)

5.4.4. 母船及び ROV による、科学計量魚探等の多角的計測

(1) 母船からの計量魚探 (EK60) 計測

調査船の船底に艀装された EK60(周波数 38kHz)を用いて、調査測線上を航走し、洋上からメタンプルームの計測を行った。

調査対象は、原則として、調査船の MBES 計測で選定した重点区域のメタンプルームから選択した。調査測線は、対象とする湧出点(海底)の直上を通過するように設定し、2 測線とした(図 10)。

計測は、a)調査線上の航走計測、b)定点計測を行った。a)に関して、それぞれのメタンプルームについて調査測線を航走し、航走観測を実施した。船速は、原則として、5kt (4~6kt)とした。b)の定点計測は、調査測線の交点上において、調査船を定位もしくは微速移動させた状態で連続計測を行った。定点計測の実施時期は、原則として、ガスの直接捕集を行った ROV を揚収直後に実施した。

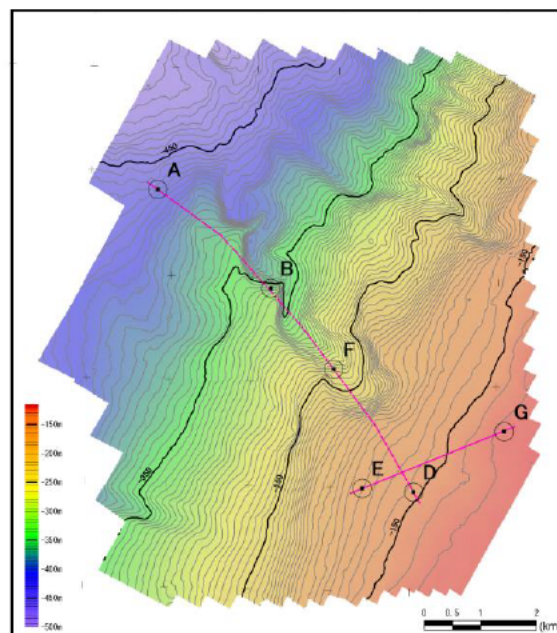


図 10 計量魚探 EK60 の調査測線

(2) ROVからの計量魚探(WBAT)計測

ROVに搭載したWBAT(周波数38kHz)を用いて、調査測線上を低高度で航走し、湧出点近傍からメタンプルームの精密計測を行った。ROVの艀装方式は艀装1a(表2)を用いた。

計量魚探による計測は、a)近距離計測、b)最接近計測を行った。

a)に関して、調査対象は、原則として、別途、選定した詳細計測すべき観測区域から選択した。M3及びEM2040でメタンプルームを検出するのに併せ、低高度でROV航走するのと同時に、WBATでも計測を行った。海底からの高度は、原則として30~40mとした。調査測線は、1区域ごとに1~3測線とし、1本の調査測線の距離は約100mとした。船速は、原則として、0.3~0.4ktとした(近距離計測)。

b)に関して、近距離計測で検出したメタンプルームのうち、特に注目すべき湧出点を選定し、メタンプルーム直上を通過する測線を設定した上で、詳細計測を行った(最接近計測)。特に重視すべき湧出点を見いだした場合には、さらに重点的な計測を行った。計測方法は、湧出状況を確認しながら詳細は決定すべきであるが、基本的な計測方法は低高度(海底上約30m~40m)、船速0.3~0.4kt、短めの測線距離(1測線あたり約100m程度)、その場に滞留しての計測時間は10~20分程度とした。

5.5. 湧出量の算出

これまでに得られた観測結果を統合し、メタンガス湧出量の推定を行った。

音響画像データの反射強度、メタンバブルの体積散乱強度(Sv)、気泡球の径とターゲットストレングス(Ts)等から1ピング1サンプリングあたりの気泡の分布個数を求め、湧出量を見積もった。三次元音響ビデオカメラの計測・解析から見積もった湧出量と直接計測によって見積もった単位時間当たりの湧出量、さらに計量魚探で得られた湧出量と併せ、異なる計測手法結果を基に総合的に評価検討を行った。

6. 調査結果

6.1. 現地調査(調査航海)の概要

調査船搭載の MBES(EM122)、計量魚探(EK60)、ROV 搭載の各計測機器などの運用実績について、以下に示す。表 10 に示すように、当初、調査対象は A、B、D、E、F 及び G の 6 サイトを想定していたが、実際に作業をはじめたところ、G は湧出量が乏しかったことに加え、D での WBAT 計測を優先する事としたため、G でのガスの直接捕集などを取りやめた。そのため、A、B、D、E 及び F の 5 サイトについて、ROV に搭載した MBES(EM2040)と計量魚探(WBAT)による近距離計測、三次元音響ビデオカメラによる最接近計測、ガスの直接捕集及び湧出量の直接計測を実施した。

表 8 調査数量 実績(調査船用 MBES : EM122)

機材	広域航走		重点航走		
EM122	137.6km	3 回	狭 域	19.1km	4 回
			準広域	38.7km	13 回

表 9 調査数量 実績(調査船用 計量魚探 : EK60)

機材	測線航走(6 地点通過)		定点観測
EK60	10.7km	17 回	5 地点

表 10 調査数量・実績(ROV 関連)

ROV 観測		A	B	F	E	D	G
水深		430m	335m	265m	170m	150m	140m
EM2040		計測あり	計測あり	計測あり	計測あり	計測あり	計測あり
EM2040 & WBAT		計測あり	計測あり	計測あり	計測あり	計測あり	—
ガス捕集(分析用)		実施	実施	実施	実施	実施	無※1
ARIS Voyager 3000	20m 高度	実施	実施	実施	実施	—	無
	2m 高度	実施	実施	実施	実施	実施	無
	浮上時	実施	実施	無	無	実施	無
湧出量の直接計測		実施	実施	実施	実施	実施	無

- ・ 調査サイトについて：当初、調査対象は表中の 6 サイトを想定していた。作業開始後、G は湧出量が乏しいこと、D での計測を優先させることなどから、実際に湧出量の直接計測などを実施したのは A、B、D、E 及び F とした。

※1 欠測していた D での WBAT 計測を優先するため、G でのガス捕集などを取りやめた。

今回、調査対象とした海域の水深は約 130～450m であり、別途、計測手法の検討が進められている上越沖海域(水深約 900m)と比較して生物が多い海域であった。MBES の取得データに記録されたプランクトン由来と考えられる散乱層の例を図 11 に、計量魚探 WBAT の取得データに記録されたメタンブルームや魚類の反応の例を図 12 に、魚類(ホッケ)による海底攪乱やガス直接採集への阻害行動を図 13 に示す。これらのように、計測にあたって生物の影響が認められた。

なお、音響データではノイズ処理により散乱層の影響を除去し、ガスの直接採集では可能な限り影響を軽減するように作業を行った。

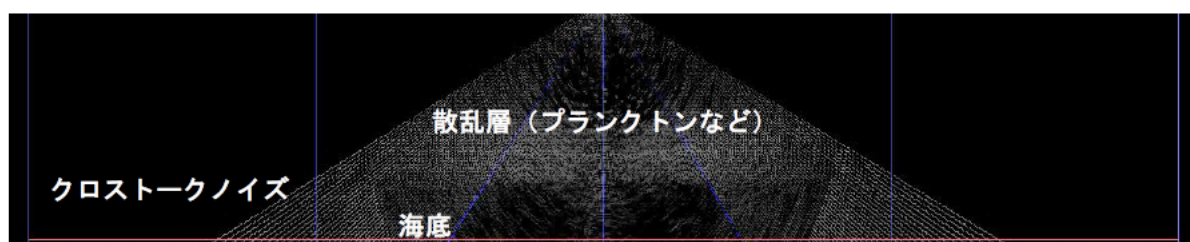


図 11 MBES 取得データに記録されたプランクトン由来と考えられる散乱層の例

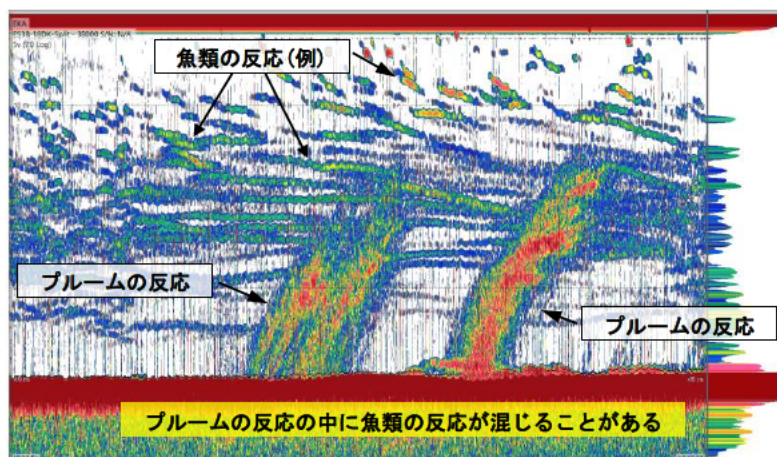


図 12 計量魚探 WBATの取得データに記録されたブルームや魚類の反応例



図 13 魚類(ホッケ)によるガスの直接捕集への阻害行動の例(海底攪乱)

6.2. 母船からのマルチビーム音響測深機 EM122_{wcd} 計測

6.2.1. EM122_{wcd} 詳細解析について

EM122_{wcd} 詳細解析の大まかな処理手順と事例を図 14 に示す。

取得したデータには、メタンプルームの反応の他にも、海底、散乱層などの反応があり、クロストークノイズなどが含まれている。ここから、一次処理によりクロストークノイズの除去を行い、二次処理として時定数フィルタによって海底とメタンプルーム以外の反応を除去した。ここでは、検出したメタンプルームの反応は緑色に着色し、判別しやすいようにした。

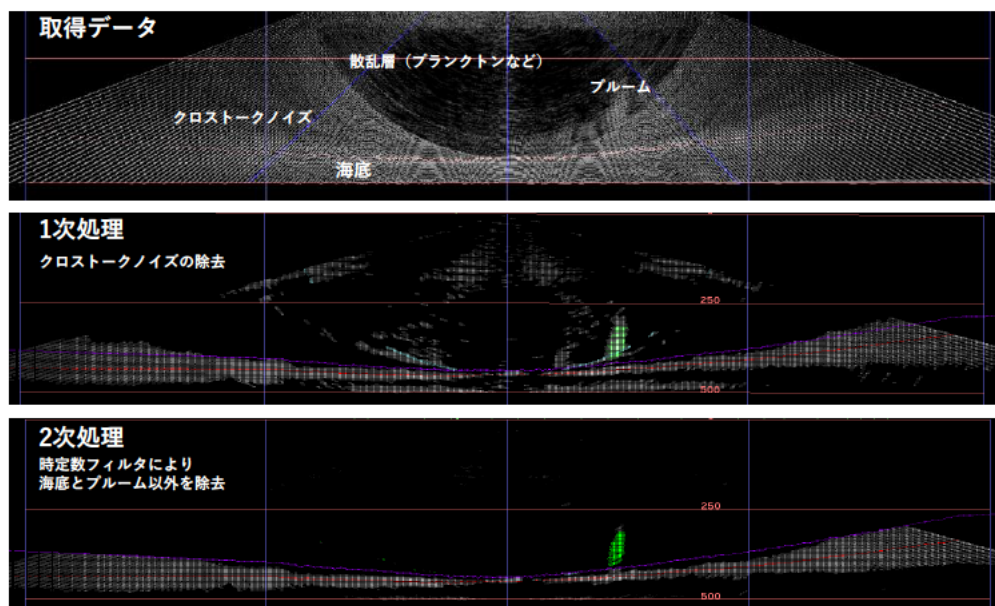


図 14 EM122_{wcd}詳細解析の処理手順と事例(模式図)

6.2.2. 湧出点の平面分布

EM122_{wcd} 詳細解析の結果、複数点でメタンプルームの反応を検出した。平面分布として整理した例を図 15 に示す。反応の強弱から湧出現象の違いが判断可能と考えられた。

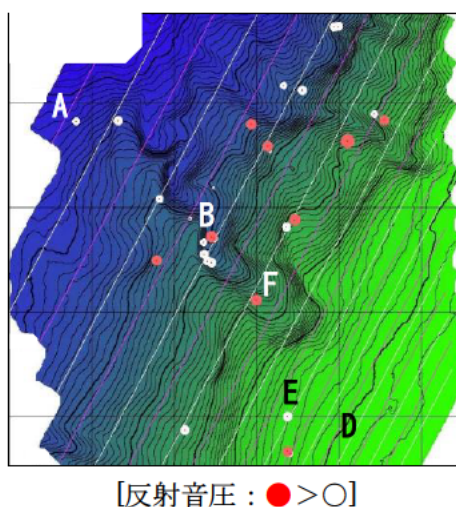


図 15 EM122_{wcd}詳細解析から湧出点の平面配置(データは反射音圧)

6.3. ROV による低高度計測

6.3.1. EM2040_{wcd} 解析によるブルームの検出

二次処理後の EM2040_{wcd} 詳細解析結果例を、図 16 に示す。それぞれ、メタンブルームの反応を検出することができた。

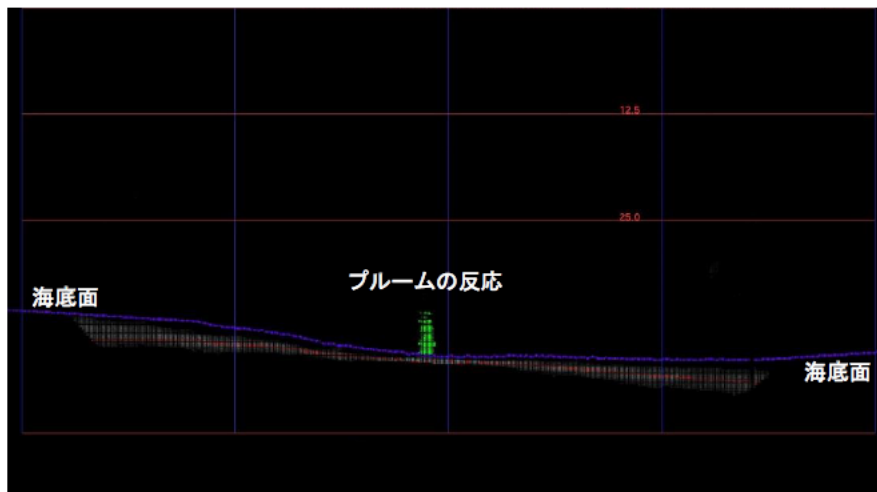


図 16 二次処理後のEM2040_{wcd}詳細解析結果例

6.3.2. 湧出点の平面分布

EM2040_{wcd} 詳細解析から湧出点の平面配置例(三次元表現)を図 17 に示す。それぞれ、複数の湧出点が発見され、湧出位置を特定できた。また、反応の強弱から湧出現象の違いも判断可能であった。

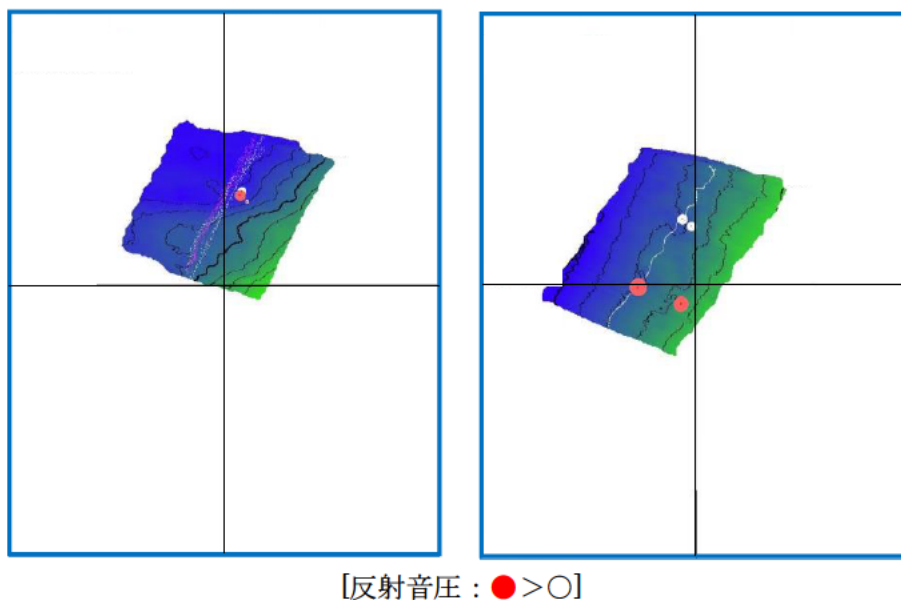


図 17 EM2040_{wcd}詳細解析から湧出点の平面配置(三次元表現)

6.4. 重点観測区域における ROV による海底スキミング(直上)計測

6.4.1. 三次元音響ビデオカメラ ARIS Voyager 3000 による計測

気泡の上昇速度を見積もるため、連続する 2 枚の音響画像を重ね、目印とする箇所位置のずれから上昇速度を推定した。得られた上昇速度は気泡の粒径推定に利用した。

また、ガスサンプラーを用いて計量計測した湧出量と ARIS Voyager 3000 の計測結果から、A～F の 5 サイトの気泡の上昇速度、湧出粒数及び粒径を推定した。

6.4.2. 湧出量の直接計測(湧出量の計測、ガスの直接捕集)

ガスサンプラーを使用した計測時の状況を図 18 に示す。ガスサンプラーを用いて、直接、A～F の湧出量を計測した。



図 18 液量計利用ガスサンプラーを用いた計測例

6.4.3. ガスの直接捕集及び化学分析

湧出するガスを直接捕集し組成分析を行った。分析結果から、A～F のいずれの地点でもほぼメタンが占め、エタンとプロパンの割合はわずかであった。一酸化炭素、二酸化炭素、エチレンは検出されなかった。また、ガス分析の際、複数検体で硫化水素臭を感じられたことから、硫黄成分がごく僅かに含まれている可能性が考えられたが、ガス検知管では検出することができなかった。

6.5. 母船及び ROV による、科学計量魚探等の多角的計測

6.5.1. 母船からの計量魚探 EK60 計測

調査船(母船)搭載の計量魚探 EK60 の収録例を図 19 に示す。図 19 に A と B のプルームの反応が記録されている。

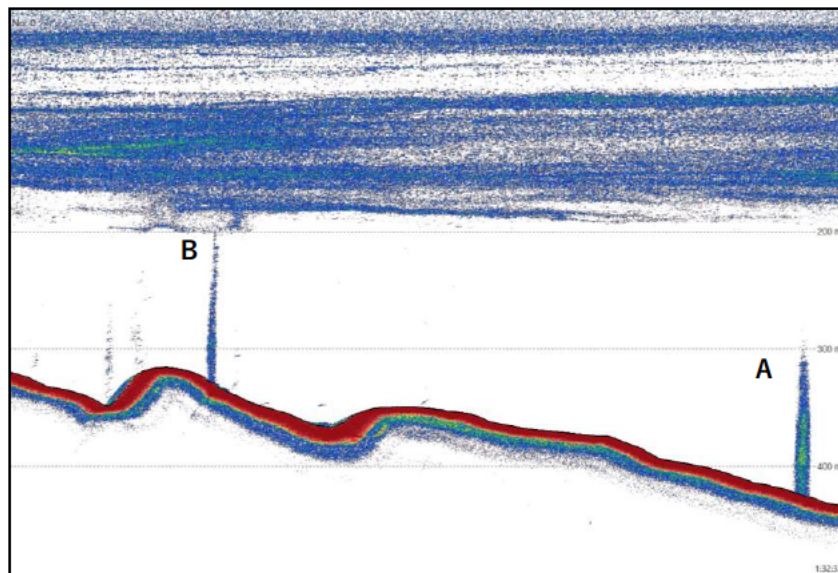


図 19 調査船の計量魚探 EK60 の収録例

EK60 の raw データから復元したエコーグラム例を図 20 に示す。左のエコーグラムから、A と B のメタンブルームを分離して、個別のエコーグラム(右)とした。このエコーグラムを元に解析を行った。

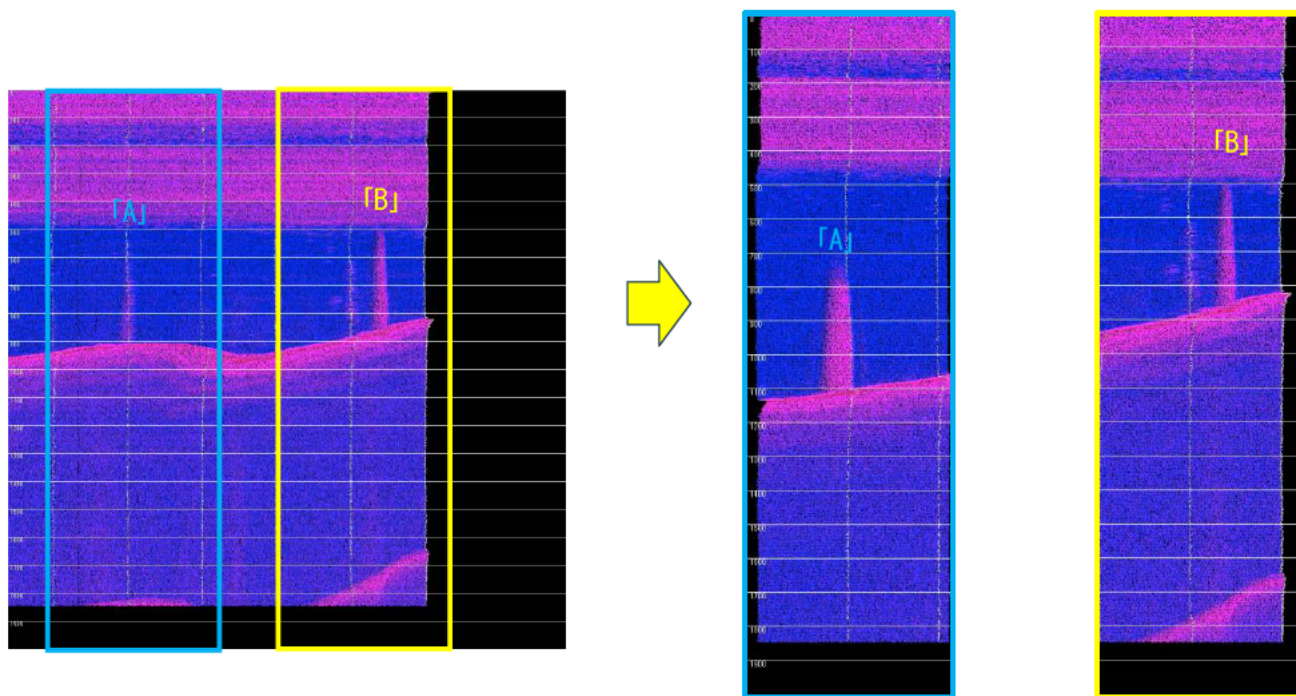
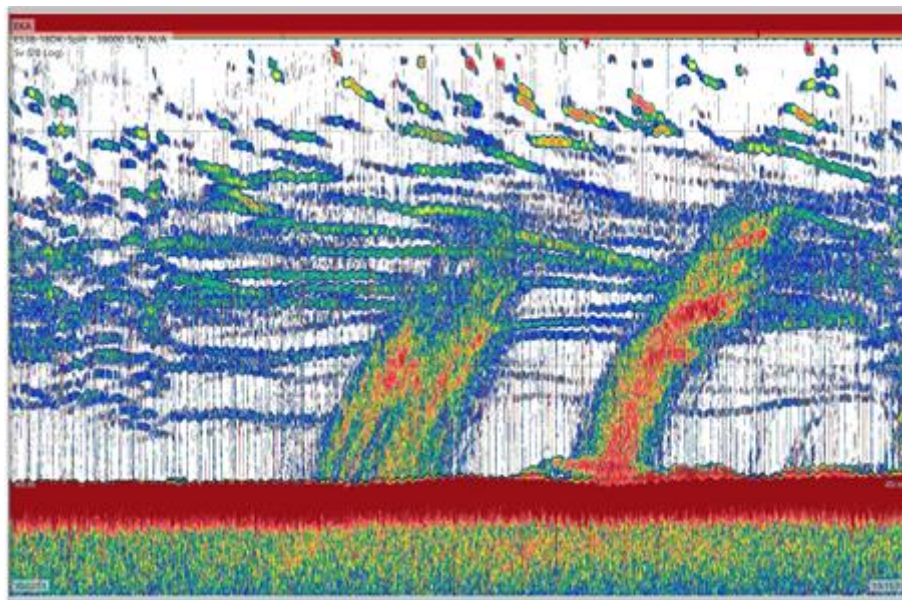


図 20 EK60 のrawデータから復元したエコーグラム例

6.5.2. ROV からの計量魚探 WBAT 計測

ROV 搭載の計量魚探 WBAT の収録例を図 21 に示す。図には複数のプルームの反応が記録されていることが分かる。



【左】E 海域／断続的に噴出するプルーム、【右】E 海域／連続的に噴出するプルーム

図 21 ROV搭載の計量魚探 WBATの収録例

WBAT の raw データから再現したエコーグラム例を図 22 に示す。メタンプルーム全体の形状が明確なエコーグラムであることが分かる。図中に○で示す場所は、メタンプルームの Sv_0 と考えられる点である。 Sv_0 の説明は後述するが、各プルームを代表する体積散乱強度として、湧出量計算に使用する。

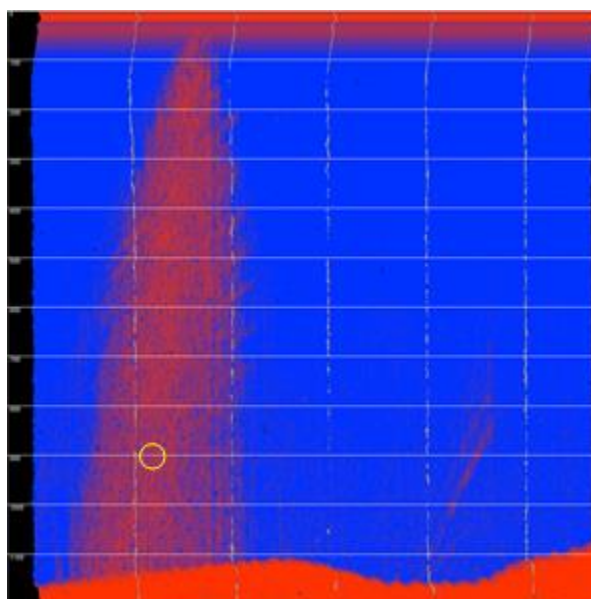


図 22 rawデータから再現したエコーグラムと Sv_0 の位置

7. 考察

7.1. ガス湧出量の算出

これまでに得られた観測結果を統合し、メタンガス湧出量の推定を行った。

音響画像データの反射強度、メタンバブルの体積散乱強度、気泡球の径とターゲットストレングス等から個数を求め、メタンガス湧出量全量を見積もった。音響ビデオカメラの計測・解析から見積もったメタンガス湧出量と直接計測によって見積もった単位時間当たりのメタンガス湧出量、さらに計量魚探で得られたメタンガス湧出量とを併せ、異なる計測手法結果をもとに総合的に評価検討を行った。

計量魚探の計測データからメタンガス湧出量を算出するにあたって、ROV に搭載した計量魚探 WBAT のデータを用いて解析の基本パターンを整理した。その後、同様の考え方にに基づき、調査船に搭載した計量魚探 EK60 のデータを解析した。

まず、計量魚探で得られた raw データからエコーグラムの反射音圧図を抽出した。例を図 23 に示す。解析にあたりエコーグラムを垂直方向に層別に比較した(レイヤー化)。レイヤー化にあたり基準面は海底ではなく、海底から低高度で推移する ROV の底面(WBAT の送受波器の底面)に置いた。ROV の底面を ROV(基準面)とし、そこから下方を鉛直方向に層別に区分した。層別に反射音圧の高い部分(S_v /体積散乱強度)を探し、その中からブルームを代表する S_v を抽出し、50sample (図では、 900 ± 25 sample) の体積散乱強度の平均値を体積散乱強度 $S_{v0}(=S_v \times dt)$ とした。

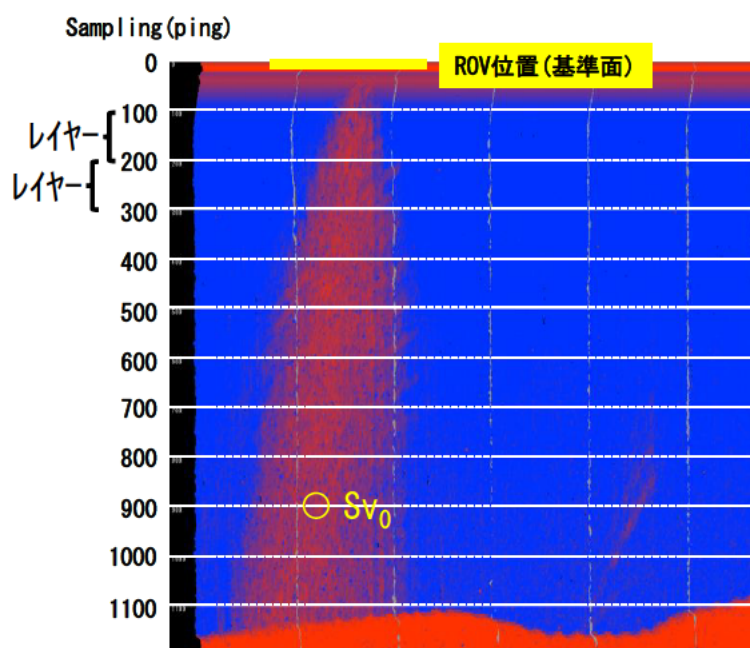


図 23 WBATのrawデータから再現したエコーグラム例(解析手順に関する模式図)

別途、三次元音響ビデオカメラの解析結果から、気泡の上昇速度や粒径などの計算に必要な前提条件を整理した。一方、 T_s (Target Strength)は理論式^{3),4)}より推定した。 T_s は気泡粒径や水深帯(水圧)によって変化するため、選定にあたっては注意した。

これら前提条件を揃えてから、ROV に搭載した計量魚探 WBAT の raw データから復元したエコーグラムから、メタンガス湧出量 q を推定した。また、調査船に搭載した計量魚探 EK60 の raw データも、

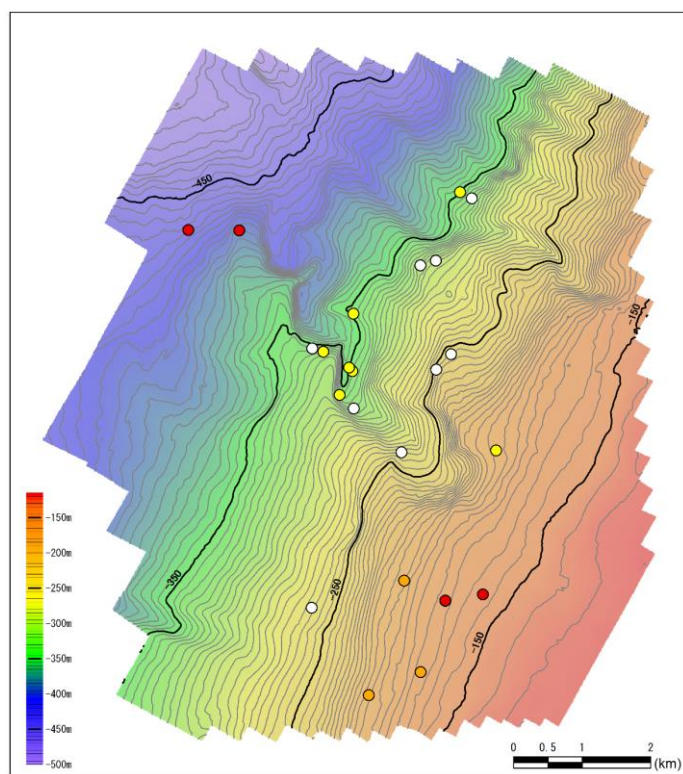
WBAT の解析方法を踏襲し、計測データからメタンガス湧出量 q を推定した。

7.2. ガス湧出量の基準状態への換算

今回、水深約 130～450m までの海域を対象にメタンガス湧出量を試算してきた。湧出点の水温は 0.9～17.4℃、水圧は 1.31～4.54 MPa と環境条件に大きな幅があるため、比較のための条件を整える必要がある。比較にあたり、天然ガスの基準状態 **standard condition** に換算することとした。ガス容量を比較する際、標準状態 **normal condition** (1atm, 0℃(=273.15K)) で換算することも考えられるが、経済産業省生産動態統計調査の 2024 年調査用資源・エネルギー関係月報記入要領⁵⁾によれば、『数量の記入にあたっては、調査票に指定した単位(原油:Kℓ、天然ガス: 10³m³[基準状態])で記入』との指定があることから、基準状態に換算した。天然ガスの計量方法(JIS M8010:2020)⁶⁾の 3 用語及び定義には、『基準状態 (standard condition) 温度 15.6℃, 絶対圧 101.325 kPa, 相対湿度 100 %としたガスの状態。変数に添え字 S を用いることによって、基準状態での値であることを表す』とある。

今年度は、MBES の計測結果のうち EM122_{wcd} 詳細解析、計量魚探の計測結果のうち EK60 の解析結果から基準状態のメタンガス湧出量の換算を試みた。なお、基準状態で示すメタンガス湧出量は記号 Q と表示し、湧出点の条件で試算したメタンガス湧出量は記号 q と区別した。

換算したメタンガス湧出量 Q を用いて作成した湧出口の平面分布図の事例を図 24 に示す。基準状態に換算することで、異なる水深帯のメタンガス湧出量も比較することが可能になると考えられる。



[メタンガス湧出量 : ● > ● > ● > ○]

図 24 MBES wcd解析により求めたメタンガス湧出量 Q の平面分布の事例

また、得られたメタンガス湧出量 Q と海洋潮汐及び固体地球潮汐との比較を試みた。調査期間中であ

れば、海洋潮汐及び固体地球潮汐の振幅が最大となる時期に向けて、メタンガス湧出量も多くなる傾向があると考えられた。

8. 今後の課題

令和5年度業務では、計測地点によって環境条件(水深や水温)に大きな幅があり、かつ魚類など生物による影響の多い海域で最初の試みであったことから、解析ソフトウェアの構築と湧出状況の概要を把握することに努めた。

今後の課題として、これまでの計測方法や使用機器の見直し、解析方法の改善、精度向上、湧出口周辺の地形及び地質変化の状況の把握、ガス成分の把握、生物や浮遊粒子等に由来するノイズの除去などが考えられる。

9. 謝辞

メタンガス湧出量の定量化のための音響計測、定量計測ならびに WCD 詳細解析、メタンブルーム詳細解析及び計量魚探による解析について、東京大学 浅田 昭 名誉教授に監修していただきました。また、計量魚探による解析について、東京海洋大学 青山 千春 特任准教授(運営会議委員)よりアドバイスをいただきました。ガスの直接捕集に必要な機材(真空採水器など)の提供及び捕集したガス分析は、千葉大学 戸丸 仁 准教授にご協力いただくとともに、海底でのガスの直接捕集方法や分析結果に関するアドバイスをいただきました。以上の方々に、厚く御礼申し上げます。

10. 引用文献

1)Milbert(2018-Jul-07, 更新): Solid Earth Tide (固体地球潮汐計算プログラム).

<https://geodesyworld.github.io/SOFTS/solid.htm> (参照 2024-01-30)

2)気象庁(2023 年 9-10 月, 新潟県 佐渡市 鷺崎): 潮位表

<https://www.data.jma.go.jp/kaiyou/db/tide/suisan/suisan.php> (参照 2023-06-08)

3)Uric, R.J., Principles of Underwater Sound (3rd) (1996), p.251 参照.

4)海洋音響学会編 (2004): 水中音響の基礎と応用, 成山堂書店, 306pp.

5)経済産業省大臣官房調査統計グループ・鉱工業動態統計室(2024.1): 2024 年度調査用 経済産業省生産動態統計調査 資源・エネルギー関係月報記入要領, 経済産業省, 13p.

<https://www.meti.go.jp/statistics/tyo/seidou/gaiyo/chosahyo/2024kinyuoryo/shigen.pdf>

6)一般財団法人日本規格協会(2020.改訂): JIS M8010 (天然ガスの計量方法).