令和 3 年度　経済産業省委託事業

令和 3 年産業保安等技術基準策定研究開発等

（火薬類爆発影響低減化技術基準検討事業）

報告書

令和 4 年 2 月

公益社団法人　全国火薬類保安協会

目　次

第 I 部　概要 **1**

第 1 章　実施報告 **2**
1.1　事業目的 2
1.2　事業内容 2
1.3　実施内容 2

第 2 章　委員会 **3**
2.1　火薬類爆発影響低減化技術基準検討委員会 本委員会 3
2.2　火薬類爆発影響低減化技術基準検討委員会 小委員会 4
2.3　委員会開催実績 4

第 3 章　検討結果の総括 **5**

第 II 部　爆発影響低減化実験 **7**

第 4 章　爆発影響低減化実験（野外実験） **8**
総論 8
実験の目的 8
実験項目および概要 9
実験期日および日程 10
実験場所 11
気象状況 15
4.1　防爆壁に関する実験 16
4.1.1　目的 16
4.1.2　実験方法 17
4.1.3　実験結果 41
4.1.3.1　爆発後の爆点の様子 41
4.1.3.2　爆風圧計測結果 60
4.1.3.3　地盤振動計測結果 90
4.1.3.4　高速度カメラ撮影結果 104
4.1.3.5　騒音測定結果 115
4.1.4　まとめ 122
4.2　基準爆風圧実験 123
4.2.1　目的 123
4.2.2　実験方法 123
4.2.3　実験結果 128
4.2.3.1　爆発後の爆点の様子 128
4.2.3.2　爆風圧計測結果 132
4.2.3.3　地盤振動計測結果 188
4.2.3.4　高速度カメラ撮影結果 195
4.2.3.5　騒音測定結果 199
4.2.4　まとめ 203
4.3　総合考察 206

第 5 章　爆発影響低減化実験（室内実験）　208
5.1　概要　. 208
5.2　実験方法　. 209
5.3　実験結果　. 218
5.4　検討 1 - 爆風パラメータと換算距離　. 238
5.5　検討 2 - 最大過圧と角度　. 252
5.6　検討 3 - 正圧相インパルスと角度　. 303
5.7　まとめ　. 357

第 6 章　地中式一級火薬庫の保安距離策定に関するシミュレーション　358
6.1　背景　. 358
6.2　目的　. 359
6.3　数値解析項目および概要　. 360
6.4　結果　. 366
6.5　まとめ　. 378

第 7 章　煙火火薬庫等の新規防爆壁等に関する実験のまとめ　380

第 8 章　地中式一級火薬庫の保安距離の考え方　382
8.1　地中式一級火薬庫の爆風に対する保安距離　. 382
8.2　地中式一級火薬庫の地盤振動に対する保安距離　. 386
8.3　地中式一級火薬庫の飛散物に対する保安距離　. 388
8.4　まとめ　. 389

付録　390
2.A.1（付録 1）　委員会議事録　. 391
4.A.1（付録 2）　実験関連事項　. 404
4.A.2（付録 3）　野外実験記録写真　. 406
4.A.3（付録 4）　高速度カメラ撮影画像　. 432
4.A.4（付録 5）　使用器材一覧　. 454
4.A.5（付録 6）　野外実験関連資料　. 457
5.A.1（付録 7）　室内実験　圧力波形　. 462
6.A.1（付録 8）　シミュレーション参考資料　. 534

執筆者一覧　. 540

第 I 部

概要

第１章　実施報告

1.1　事業目的

火薬類（火薬、爆薬、火工品）は、その有する爆発・燃焼という危険性から、火薬類取締法（以下「法」という。）において、製造、販売、貯蔵、運搬、消費その他の取扱いについて規制されている。

本事業では、火薬類に係る保安技術の進展に伴う保安技術基準の策定・改正、火薬類による事故原因の解析・再発防止対策の検討等の際に必要となる科学的データの取得等の事業を実施し、火薬類による災害を防止し、公共の安全確保に資することを目的とする。

1.2　事業内容

煙火製造施設等の火薬関連施設は、立地後の周辺環境の変化等に伴い、保安距離や施設の能力の見直しが求められている。このため、爆発実証実験を実施するとともにシミュレーションを活用し、爆発影響低減化に資する防爆壁の位置、構造及びこれらを踏まえた保安距離等について提案した。

1.3　実施内容

（1）煙火製造施設及び火薬庫の爆発影響低減化に資する爆発実証実験計画の検討等

煙火製造施設（危険工室や火薬類一時置場等）及び煙火製造所内の火薬庫は、その停滞量又は貯蔵量に応じ施設等の外壁から保安物件に対し保安距離をとらなければならないことと規定されている。過去の調査研究及び実験等の結果から、これらの施設等に用いられる防爆壁の構造によっては、施設等に停滞又は貯蔵されている火薬類が万が一爆発したときの爆風圧は、通常構造の防爆壁と比較して減衰することが確認されている。

そこで、爆発影響低減化に資する防爆壁の構造、爆点から防爆壁までの位置関係等を含めた爆発実証実験計画について、令和元年度及び令和２年度の実験結果を踏まえて検討を行い、同実験により取得したデータを元に、爆発影響低減化に資する防爆壁の位置、構造及びこれらを踏まえた保安距離等について技術的知見をとりまとめ、技術基準改正案の提案を行った。なお、実験の条件設定等のため、小規模室内実験等を行った。

（2）爆発実証実験の実施

爆発実証実験は、1/4.4 スケールの既存防爆壁及び新防爆壁を設置して 5 回、また、既存防爆壁がある場合とない場合の基準爆風圧を計測するため 2 回、合計 7 回の爆発実験を行い、爆風圧、飛散物、地盤振動等のデータを取得して、爆発影響低減化に係る効果を検証した。

なお、爆発実証実験では、爆発現象を捉えるため、換算距離に対応した爆風圧と地盤振動、飛散物及び新防爆壁の破壊状況、漏斗孔の大きさ、騒音、並びに高速度及び常速度カメラによる防爆壁の破壊状況及び爆発状況の映像のデータを取得した。

（3）シミュレーションを活用した地中式一級火薬庫の保安距離策定に必要なデータの取得

平成 27 年度から平成 30 年度までの地中式一級火薬庫の爆発実験結果から、前室の断面積と薬室の断面積の比を変数として保安距離を検討したが、厳密に保安距離を検討するためには火薬庫全長(L)と薬室径(D)の比（L/D 比）も考慮する必要がある。そのため、令和２年度に実施したシミュレーション活用調査の結果を踏まえ、保安距離の検討に適切と考えるL/D比を４つ抽出しシミュレーションを行い、保安距離について技術的知見を取りまとめ、L/D 比を組み入れた技術基準改正案の提案を行った。

第２章　委員会

爆発衝撃等に関する学識経験者、土木、材料及び火薬特に煙火に関する専門家等を含む 19 名の委員から構成する火薬類爆発影響低減化技術基準検討委員会 本委員会を設置し、3 回開催した。また、本委員会の下に学識経験者等 15 名の委員で構成する小委員会を設置し、1 回開催した。

委員会では、爆発実証実験の計画の検討を行うとともに、実証実験の結果を踏まえ、爆発影響低減化に資する新防爆壁の位置、構造及びこれらを踏まえた保安距離等について審議した。

2.1　火薬類爆発影響低減化技術基準検討委員会 本委員会

（敬称略、五十音順）

	新井　充	東京大学 名誉教授
	浦川　克也	防衛装備庁 プロジェクト管理部
	大野　友則	大野防衛工学研究所
●	小川　輝繁	公益財団法人 総合安全工学研究所
	奥永　一郎	株式会社ダイセル セイフティ SBU 特機事業部 事業推進部
	海沼　敏恭	防衛省 陸上自衛隊 陸上幕僚監部装備計画部 武器・化学課 弾薬班
	久保田 士郎	国立研究開発法人産業技術総合研究所 安全科学研究部門 爆発利用・産業保安研究G
	後藤　浩司	日本火薬工業会 技術部
	須山　恭三	一般社団法人 日本建設業連合会 安全部
	多田　達士	中国化薬株式会社 営業本部 化薬営業部
	吐合　育輝	防衛省 陸上自衛隊 陸上幕僚監部装備計画部 武器・化学課 化学室
	畑中　修二	公益社団法人 日本煙火協会 技術部
	福田　光寿	日本カーリット株式会社 生産本部 赤城工場
	藤原　和彦	日油株式会社 化薬事業部 企画室
	水書　稔治	東海大学 湘南校舎 工学部 航空宇宙学科
	三宅　淳巳	横浜国立大学 理事・副学長
	山田　隆宏	日本工機株式会社 白河製造所 研究開発部
	山本　和彦	カヤク・ジャパン株式会社 環境安全品質保証本部 環境安全部
	若林　邦彦	国立研究開発法人産業技術総合研究所 安全科学研究部門 爆発安全研究G

●：委員長

G：グループ

2.2 火薬類爆発影響低減化技術基準検討委員会 小委員会

（敬称略、五十音順）

	浦川　克也	防衛装備庁 プロジェクト管理部
	大野　友則	大野防衛工学研究所
	奥永　一郎	株式会社ダイセル セイフティ SBU 特機事業部 事業推進部
	海沼　敏恭	防衛省 陸上自衛隊 陸上幕僚監部装備計画部 武器・化学課 弾薬班
	久保田 士郎	国立研究開発法人産業技術総合研究所 安全科学研究部門 爆発利用・産業保安研究G
	後藤　浩司	日本火薬工業会 技術部
	須山　恭三	一般社団法人 日本建設業連合会 安全部
	多田　達士	中国化薬株式会社　営業本部　化薬営業部
	吐合　育輝	防衛省 陸上自衛隊 陸上幕僚監部装備計画部 武器・化学課 化学室
	畑中　修二	公益社団法人 日本煙火協会 技術部
	福田　光寿	日本カーリット株式会社 生産本部 赤城工場
	藤原　和彦	日油株式会社 化薬事業部 企画室
	山田　隆宏	日本工機株式会社 白河製造所 研究開発部
	山本　和彦	カヤク・ジャパン株式会社 環境安全品質保証本部 環境安全部
●	若林　邦彦	国立研究開発法人産業技術総合研究所 安全科学研究部門　爆発安全研究G

●：委員長

G：グループ

2.3 委員会開催実績

令和 3 年 6 月 25 日	火薬類爆発影響低減化技術基準検討委員会　第 1 回本委員会
令和 3 年 8 月 27 日	火薬類爆発影響低減化技術基準検討委員会　第 2 回本委員会
令和 4 年 1 月 13 日	火薬類爆発影響低減化技術基準検討委員会　第 1 回小委員会
令和 4 年 1 月 31 日	火薬類爆発影響低減化技術基準検討委員会　第 3 回本委員会

第３章　検討結果の総括

煙火火薬庫及び煙火製造施設の既存の防爆壁に新たな構造の防爆壁等を追加した場合の爆発影響低減効果を確認するため 1/4.4 スケールの爆発実証実験を行い、爆発影響低減化に資する新規防爆壁等の位置、構造及びこれらを踏まえた保安距離等についての技術的知見をとりまとめた。

爆発実証実験では、まず、防爆壁等の実験と同じ条件（含水爆薬、薬量、地表面高さ）で基準爆風圧を求める実験を行った。昨年度と同様、何も構築物の無い地表面爆発と、周囲に既存の防爆壁（高さ 2.5 m、火薬庫壁から 2 m、実寸）を模擬した構築物を設置した状態の 2 回の実験とした。

既存防爆壁がない地表面爆発の爆風圧は、昨年度の結果と同じく、過去の地表面爆発実験データとほぼ同じであることが分かった。これは、過去と昨年及び今年度の爆薬の地表面換算高さの違いの影響がほぼ無いことを意味しており、今後、どの換算高さまで同じなのか、爆薬量が増えても同じなのか等を確認することが望まれる。

既存防爆壁がある場合も、昨年度と同様で、防爆壁の 4 面の背後近傍（換算距離 3 m/kg$^{1/3}$ 以内）では爆風圧が低減されること、防爆壁の面の接合部、4 隅の方向では遠方（換算距離 9 m/kg$^{1/3}$ 以遠）で爆風圧が地表面爆発の場合より若干高くなることが確認された。今後、傾き 45 度の基準土堤や片側垂直土堤でも同じ傾向があるのか、確認する必要があると考えられる。

防爆壁に関する爆発実証実験では、既存の防爆壁に加え、火薬庫壁と既存防爆壁との間の 1 面から 3 面に昨年度より高密度のウレタンフォームを設置（高さ 2.5 m、奥行き 2 m）した場合、火薬庫壁から 2 m の位置に高さ 8 m の積層樹脂メッシュを設置した場合、既存防爆壁面の接合部の方向の火薬庫中心から 8 m の位置に高さ 8 m の合板の壁を設置した場合（以上の高さや長さは実寸）の計 5 回の 1/4.4 スケールの爆発実験を行い、新しい構造の防爆壁等の爆発影響低減効果を確認した。

ウレタンフォームの実験では、高密度（52±3 kg/m^3）のウレタンフォームを設置した方向の近傍（換算距離 6 m/kg$^{1/3}$ 以内）で爆風圧が低減した。さらに、3 面に同じウレタンフォームを設置した場合は、低減効果が 1 面のみの場合よりも高く、ウレタンフォームを設置しない方向も、つまり、全方向において換算距離 9 m/kg$^{1/3}$ まで爆風圧が低減した。これらの結果は昨年度の低密度（20±2 kg/m^3）のウレタンフォームを用いた場合と同様であり、ウレタンフォームのこの程度の密度の差は爆風低減効果に殆ど影響がないことが確認された。

積層樹脂メッシュの実験では、昨年度の積層金網の実験結果と同様に、樹脂メッシュの背後近傍（換算距離 6 m/kg$^{1/3}$ 以内）で爆風圧が低減したが、背後遠方（換算距離 12 m/kg$^{1/3}$ 付近）や前面（火薬庫側）斜め方向（換算距離 6～9 m/kg$^{1/3}$ 以内）で逆に爆風圧が地表面爆発の場合より若干高くなることが確認された。

合板の実験では、昨年度の火薬庫壁から 6 m の位置に合板を設置した場合と同様に、合板の背後近傍（換算距離 6 m/kg$^{1/3}$ 以内）で爆風圧が低減することが確認された。

本年度の実験結果は以上であるが、煙火火薬庫等の既存防爆壁に新たな構造の防爆壁等の防護施設を追加した場合の爆発影響低減効果の確認実験は、一昨年度から本年度にかけて 3 年間にわたり実施してきた。新規の防護施設として検討したのは、いずれも高さ 8 m の鉄板のコの字形壁、水の壁、合板のコの字形壁、積層金網の壁、積層樹脂メッシュの壁、及び、火薬庫外壁と既存防爆壁との間の 1 面から 3 面に高さ 2.5 m のウレタンフォームを設置する場合である。

実験結果を総括すると、高さ 8 m の壁の材料については、爆風低減効果の大きさや施工の容易さから合板のコの字形壁が適当であると判断される。鉄板の壁は重量飛散物が発生するために不適で、水の

壁は合板の場合と同様の爆風低減効果があるが施工の容易さや維持管理に問題があり、積層金網の壁と積層樹脂メッシュの壁は爆風低減効果が合板の場合より劣り、壁前面方向で爆風圧が高くなる箇所があるためである。また、火薬庫外壁と既存防爆壁との間に高さ 2.5 m のウレタンフォームを設置する場合については、その密度に関係なく、ウレタンフォーム 1 面を設置した方向の爆風低減効果が確認され、さらに、3 面にウレタンフォームを設置した場合は、爆風低減効果が 1 面のみの場合よりも高く、全方向において爆風低減効果が確認された。

以上の結果から、煙火火薬庫等のある方向に存在する第三種及び第四種保安物件に対する保安距離の低減対策として、保安物件の方向にコの字形合板壁を設置する場合、または、保安物件の方向等の火薬庫外壁と既存防爆壁との間にウレタンフォームを設置する場合の技術基準案をまとめた。

本年度は、爆発実証実験の他に、地中式一級火薬庫の保安距離策定に必要なデータを取得するため、地中式火薬内で爆薬が爆発した場合の爆風シミュレーションを実施した。昨年度実施された「火薬類爆発影響低減化技術基準検討におけるシミュレーション活用に係る調査」において、地盤振動と飛散物のシミュレーションの実験代替は現時点では困難であるが、爆風については野外実験と組み合わせたシミュレーションで実験代替が可能で、産業技術総合研究所で開発されたコードが優れているという内容の報告が為されている。これを踏まえ、産業技術総合研究所で開発されたコードを用いて、平成 30 年度に行われた地中式火薬庫の爆発実験結果を精度よく再現できることを検証し、火薬庫全長／火薬庫径の 4 水準についてシミュレーションを実施した。その結果を用いて、これまでのトンネル断面積／火薬庫断面積の変化に対応した地中式火薬庫の保安距離案を拡張し、火薬庫全長／火薬庫径及びトンネル断面積／火薬庫断面積の両者の変化に対応した地中式火薬庫の保安距離案をまとめた。

以上のように、本年度の爆発実証実験及び爆風シミュレーションにより、貴重なデータを取得でき、技術基準案の作成まで完了することができた。最後に、本実験に際しての、爆発影響低減化委員各位、関係団体からのご協力、ご指導に深く感謝し、御礼申し上げる次第である。

第 II 部

爆発影響低減化実験

第４章　爆発影響低減化実験（野外実験）

総論

実験の目的

通商産業省（現経済産業省）は、昭和３６年以降、各地の陸上自衛隊演習場を借用して、火薬類の製造、貯蔵、消費等の保安技術基準を確立するための基礎資料を得るために、大規模な実験を実施してきた。本実験により得られた成果は、火薬類取締法に反映され、法令の改正、保安行政上の指導のための資料として広く活用されている。また、実験の実施は、火薬類取扱者の保安意識の向上及び保安教育の実地体験としても大きな役割を果たしてきた。平成１４年度からは、社団法人全国火薬類保安協会（現公益社団法人全国火薬類保安協会）への委託事業として、火薬庫の保安距離などの見直しに資する爆発影響低減化の研究を行っている。この研究と平行して平成１６年度からは、保安設備の検討に資するために保安設備の強度評価の研究を行った。平成１９年度から平成２２年度までは、爆発影響低減化技術基準検討のため、地下式火薬庫技術基準、防爆壁の補強改良技術、および爆発飛散物の影響評価に関する実験を行った。平成２３年度から平成２７年度までは、既存の土堤の性能評価及び土堤改良の検討、垂直土堤の防護性能等に関する実験、さらには地震による損傷の有無で爆発影響低減化効果を比較検討してきた。平成２７年度には、火薬類の爆発威力定量化に関する技術基準の検討を開始した。

近年、火薬類の貯蔵施設である火薬庫が、立地後の周辺環境の変化に伴い、保安距離や施設の能力の見直しが求められている。これを受けて、平成２８年度から平成３０年度までは、地中式火薬庫を対象として、庫口を基点とする爆風圧及び保安距離に関する技術基準の検討を行った。令和元年度からは、煙火製造工場の火薬関連施設を対象とした爆発実証実験を実施し、周辺環境が変化した場合に応じて保安距離が確保できる防爆壁の位置及び構造等に関する技術基準を作成する上で必要となる爆発影響低減化に資するデータを取得している。

上記を踏まえ、本年度は次のテーマについて検討を行う。

（１）煙火製造施設及び火薬庫等の爆発影響低減化に関する技術基準検討

煙火製造施設及び煙火製造所内の火薬庫等に存置又は貯蔵されている火薬類が万が一爆発したときの爆風圧は、用いられる防爆壁の構造によっては、通常構造の防爆壁と比較してより減衰することが過去の調査研究及び実験等の結果から、確認されている。そのため、爆発影響低減化に資する防爆壁の構造、爆点から防爆壁までの位置関係等に関する技術基準を策定するために必要となるデータを取得する。

実験項目および概要

実験 No.1　防爆壁に関する実験　5 ショット

煙火製造施設及び火薬庫の爆発影響低減化に資するデータ取得の一環として、防爆壁の位置、構造等を検討する。防爆壁を設置し、前面で爆薬を爆発させ、防爆壁前方、側方、後方の爆風圧、後方の飛散物等を測定する。防爆壁の大きさ、構造を変えて計 5 回の実験を行う。1 回の実験で含水爆薬 15.49 kg を使用する。

実験 No.2　基準爆風圧実験　2 ショット

既存の防爆壁を設置した状態及び設置しない状態で火薬類を爆発させる実験を行い、基準となる爆風圧等のデータを取得する。実験 No.1 で計測される爆風圧等との比較を行う。1 回の実験で含水爆薬 15.49 kg を使用する。

実験期日および日程（実績）

実験期間　令和 3 年 10 月 18 日（月）～10 月 26 日（火）

月　日	実験 No.	爆点	点火時刻	実験項目名	薬種・薬量
10 月 17 日（日）	＜移動日＞				
10 月 18 日（月）	準備（測量・爆点決定）				
10 月 19 日（火）	準備（計測・設備）				
10 月 20 日（水）	準備（計測・設備）／実験会議				
10 月 21 日（木）	1-1	L	10:12	煙火防爆壁（高密度ウレタン1面）	EMX2　15.49 kg
	1-2	L	13:40	煙火防爆壁（高密度ウレタン2面）	EMX2　15.49 kg
10 月 22 日（金）	1-3	L	9:30	煙火防爆壁（高密度ウレタン3面）	EMX2　15.49 kg
	2-2	L	13:33	基準爆風圧（壁あり）	EMX2　15.49 kg
10 月 23 日（土）	予備日				
10 月 24 日（日）	1-4	L	9:42	煙火防爆壁（樹脂メッシュ）	EMX2　15.49 kg
	2-1	L	11:29	基準爆風圧（壁なし）	EMX2　15.49 kg
10 月 25 日（月）	1-5	L	9:14	煙火防爆壁（コの字型合板）	EMX2　15.49 kg
	清掃・撤収				
10 月 26 日（火）	撤収				
10 月 27 日（水）	＜移動日＞				

注）L：下爆点（今年度は下爆点のみ）

EMX2：含水爆薬（カヤクジャパン㈱砂川工場製アルテックス）

10 月 23 日が雨だったので、基準爆風圧の実験を翌日に回し、実験順番を一部変更した。

実験場所

陸上自衛隊矢臼別演習場（北海道野付郡別海町）の一部で実験を行った。

実験場広域図を図 4.0-1 に示す。

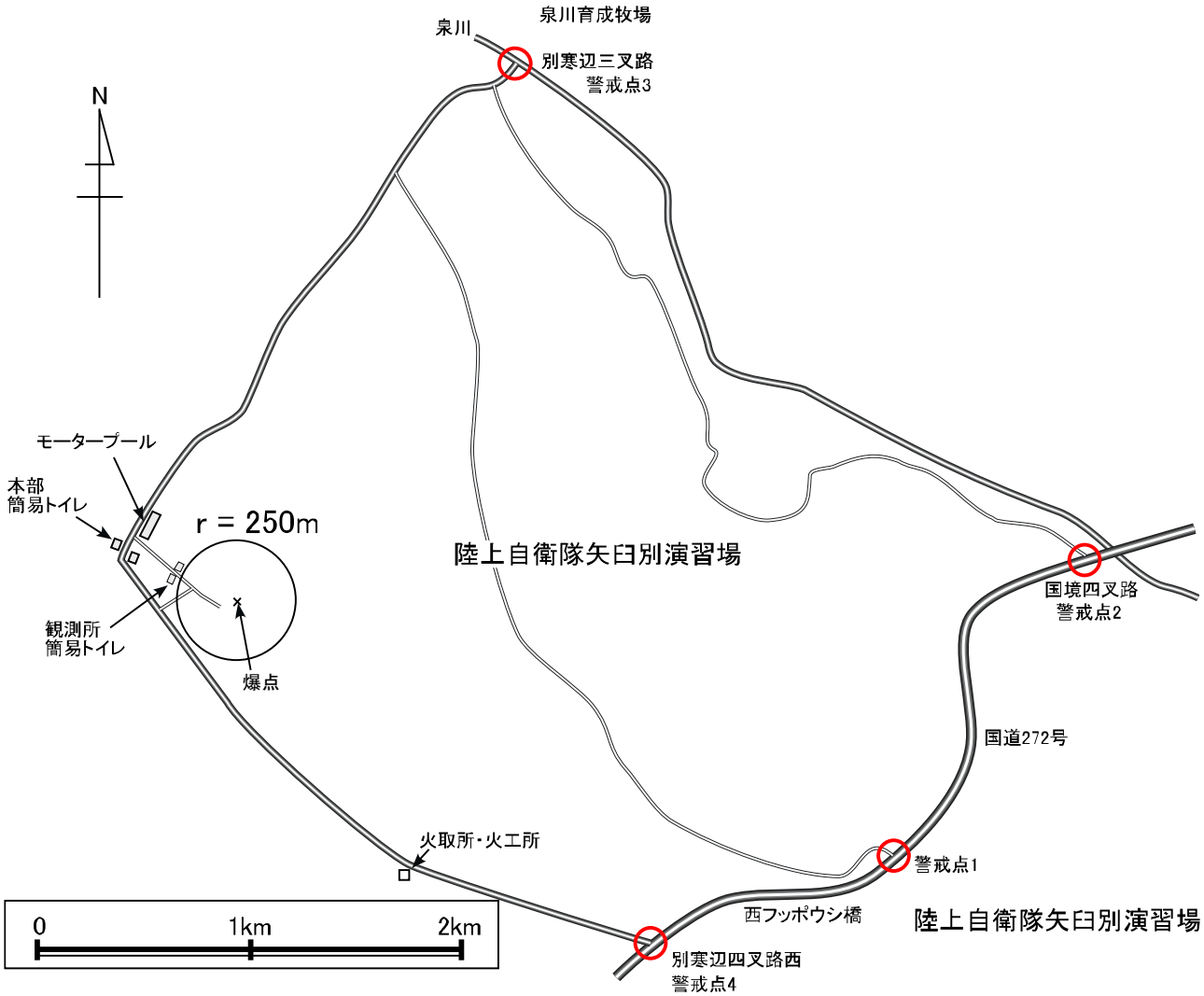


図 4.0-1　実験場広域図

保安距離

図 4.0-1 に保安距離を示す。原則として、保安距離は次式により算出した距離とする。

$$r = KW^{1/3}$$

ここに、r：保安距離（m）、W：同一実験において 1 回に爆発する火薬・爆薬の最大薬量（kg）、K：係数（K＝100 とする）である。本実験の最大薬量は下爆点で W＝15.49(kg）なので、下爆点からの保安距離は 250 m となる。図 4.0.-1 に示された爆点を中心とする半径 r＝250（m）の円よりも内側を危険区域とする。

本部、観測所

図 4.0-1 に本部、観測所を示す。図 4.0-3 に本部、図 4.0-4 に観測所の写真を示す。本部、観測所はプレハブ（既製品レンタル）である。

火薬類取扱所（火取所）、火工所

図 4.0-1 に火薬類取扱所（火取所）、火工所を示す。図 4.0-5 にその写真を示す。

モータープール

図 4.0-1 にモータープールを示す。必要に応じて車両はそこへ退避しておく。

観測所の防護措置

観測所プレハブ（2 棟）は危険区域の外にあるため、今年度は防護壁を設けなかった。なお、観測所１の天井には鉄板を敷き、高速度・常速度カメラ、風速計、放送設備等を設置した。

実験レイアウト（全体）

図 4.0-2 に実験レイアウト（全体）を示す。観測所、爆点および計測系の位置の概要を示す。

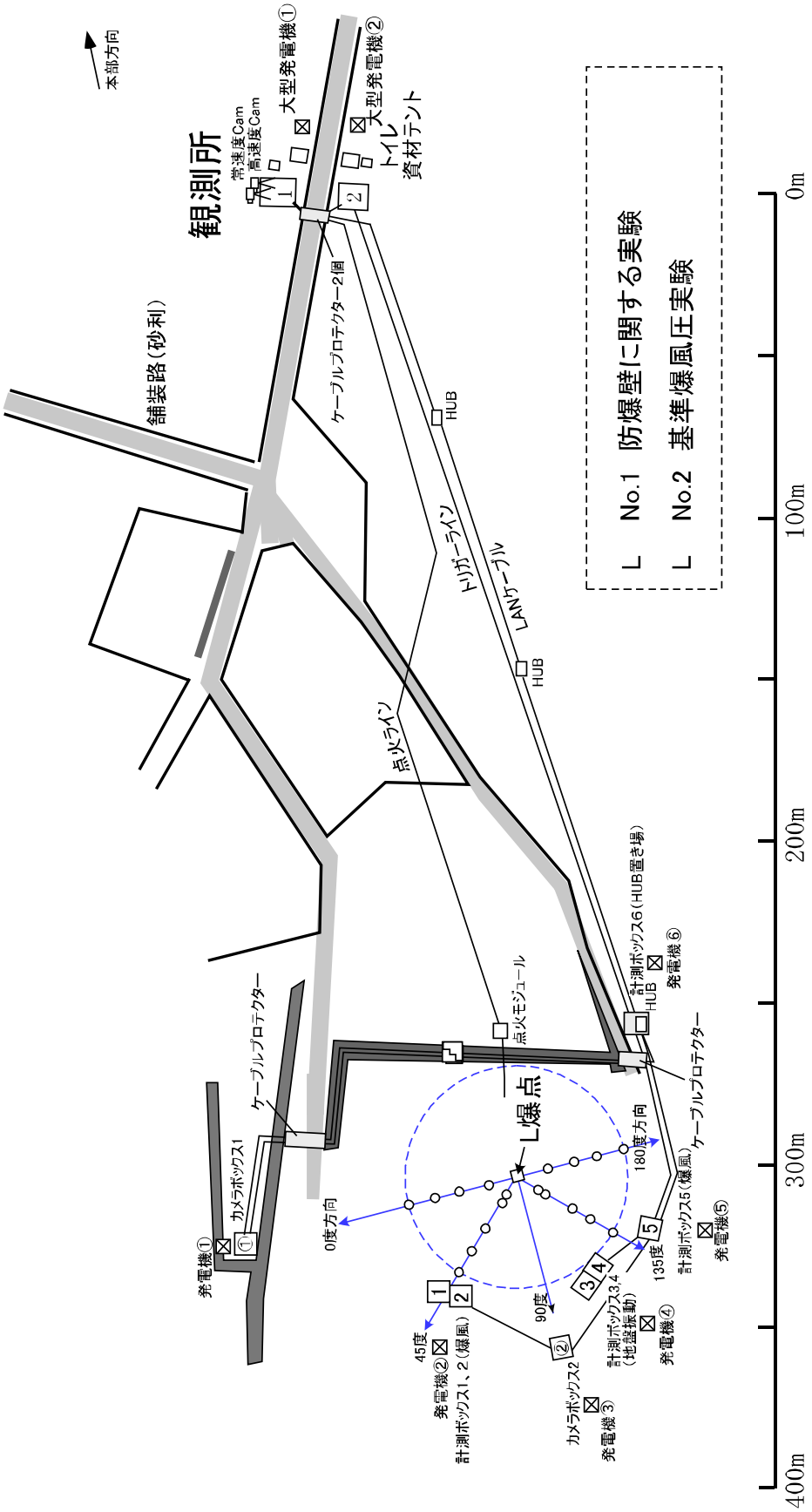


図 4.0-2　実験レイアウト（全体）

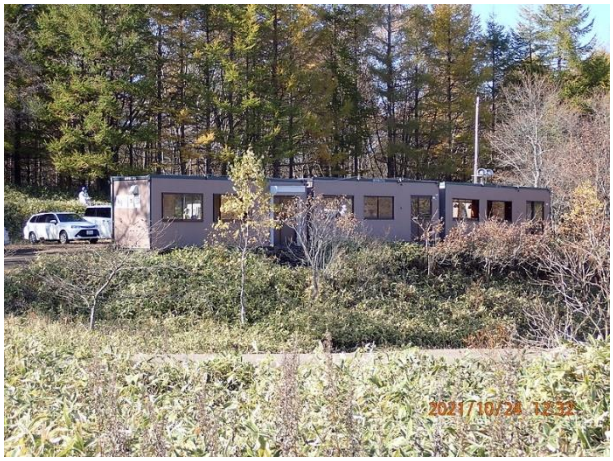


図 4.0-3　本部

図 4.0-4　観測所（左：第一観測所、右：第二観測所）

図 4.0-5　火薬類取扱所（火取所）、火工所

気象状況

実験	実施日	点火時刻	天候	気温 ℃	湿度 %	気圧 hPa	風向·風速 m/s
No.1-1 煙火防爆壁(高密度ウレタン1面)	10/21	10:12	雨	8.9	92.7	998	東·1.8
No.1-2 煙火防爆壁(高密度ウレタン2面)	10/21	13:40	雨	8.0	93.5	998	北東·0.5
No.1-3 煙火防爆壁(高密度ウレタン3面)	10/22	9:30	晴	11.1	75.2	1007	·0.0
No.1-4 煙火防爆壁(樹脂メッシュ)	10/24	9:42	晴	10.5	61.7	1009	0.0
No.1-5 煙火防爆壁(コの字型合板)	10/25	9:14	晴	13.5	65.8	1015	南東·3.5
No.2-1 基準爆風圧(壁なし)	10/24	11:29	晴	14.5	52.7	1008	南東·2.4
No.2-2 基準爆風圧(壁あり)	10/22	13:33	曇	11.5	72.3	1005	東南東·2.5

4.1　防爆壁に関する実験

4.1.1　目的

新規形状及び構造の模擬防爆壁の近傍で爆薬を爆発させ、防爆壁前方、側方、後方の爆風圧や地盤振動、後方の飛散物等を測定する。その他に、騒音、衝撃波伝播状況などを、電気的・光学的手法により計測する。

なお、実験で使用する薬種薬量および模擬防爆壁のサイズは次のように計画した。

・防爆壁が設置できる「煙火火薬庫」は火薬又は爆薬 2 トンまで。
⇒ 貯蔵量 2 トンの煙火火薬庫の約 1/4 スケール（薬量約 30 kg）を本実験で行う。
（防爆壁の設置が必要なのは、他に、「爆発の危険がある危険工室」（最大停滞量は火薬又は爆薬 300 kg）及び「火薬類一時置場」（最大停滞量は火薬又は爆薬 1 トン）がある。）

・既存防爆壁と爆薬との間隔

煙火火薬庫外壁～既存防爆壁：2 m、煙火火薬庫の平均サイズは 4 m。
⇒ 既存防爆壁～爆薬間隔は 4 m とし、実験では約 1/4 スケールの約 1 m とする。正確には、既存防爆壁に用いる合板の規格から、実寸 4m を 910mm にスケールダウンして、実験を行う。よって、0.91/4=1/4.396≒1/4.4 スケールの実験となる。

・使用する火薬類

貯蔵量 2 トンの煙火火薬庫の 1/4.4 スケールなので、薬量は煙火 23.55kg。
（本実験の換算距離は、この薬量を用いて計算する。）
実験は、煙火 23.55kg 相当のエマルション爆薬を使用する。

・雷薬・滝剤	KClO4/Al	TNT 換算率 約 0.6
・割薬	KClO4/KNO3/C	TNT 換算率 約 0.5
・色火薬(星薬)	KClO4,KNO3,金属塩	TNT 換算率 0.3~0.4
・黒色火薬	KNO3/C/S	TNT 換算率 0.2~0.4

⇒ 雷薬・滝剤は少量であることから、煙火の「火薬又は爆薬」は TNT 換算率 0.5 として実験

・エマルション爆薬　NH4NO3/(CH2)n/H2O　TNT 換算率 0.76
⇒ 煙火の「火薬又は爆薬」 23.55kg → TNT 11.775kg → エマルション爆薬 15.49kg

・既存防爆壁の高さ

既存の防爆壁の平均高さを 2.5 m とし、実験では 1/4.4 スケールの 569 mm とする。

4.1.2　実験方法

4.1.2.1　供試火薬類

表 4.1-1 に供試火薬類を示す。図 4.1-1 に爆薬の形状を示す。図 4.1-2 に導爆線（二重導爆線）と雷管の固定方法を示す。図 4.1-3 に装薬状況を、また、図 4.1-4 に装薬台の形状を示す。薬種・薬量は含水爆薬（EMX2）15.49 kg で、直円柱形に成形した含水爆薬を用意した。導爆線の先端から 30 mm 程度の位置に電気雷管 2 個を取り付け、反対側の端には短い導爆線を重ねた（図 4.1-2）。導爆線を重ねた側を含水爆薬の内部に 70 mm 程度押し込み固定した。

表 4.1-1　供試火薬類

実験 No.	薬種	薬量 (kg)	二重導爆線	電気雷管 (個) ()内は予備	爆薬の形状　※	
					直径 φ ×長さ (mm)	密度 (kg/m³)
1-1	EMX2	15.49	100 mm×2 本 40mm×2 本	2	φ 254×262	1190
1-2	EMX2	15.49	100 mm×2 本 40mm×2 本	2	φ 254×261	1190
1-3	EMX2	15.49	100 mm×2 本 40mm×2 本	2	φ 254×261	1190
1-4	EMX2	15.49	100 mm×2 本 40mm×2 本	2	φ 254×264	1190
1-5	EMX2	15.49	100 mm×2 本 40mm×2 本	2 (+2)	φ 254×263	1190
合計		77.45	100 mm×10 本 40mm×10 本	12		

※　爆薬の薬量、大きさ、密度は検査成績書の値

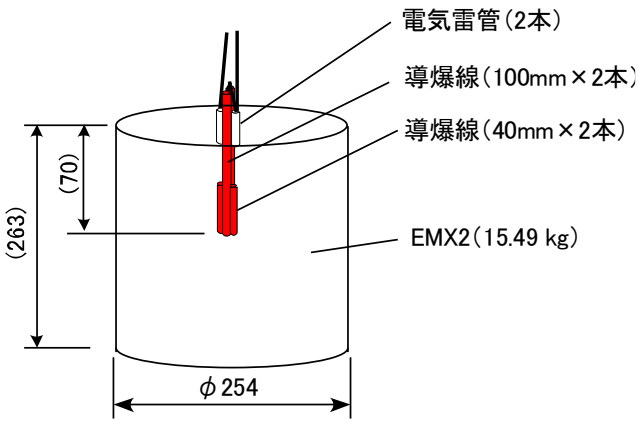


図 4.1-1　爆薬（EMX2）の形状

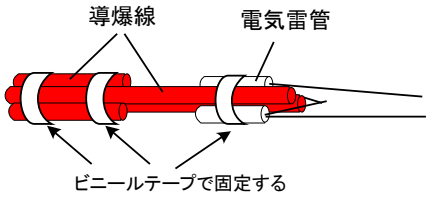


図 4.1-2　導爆線と雷管の固定方法

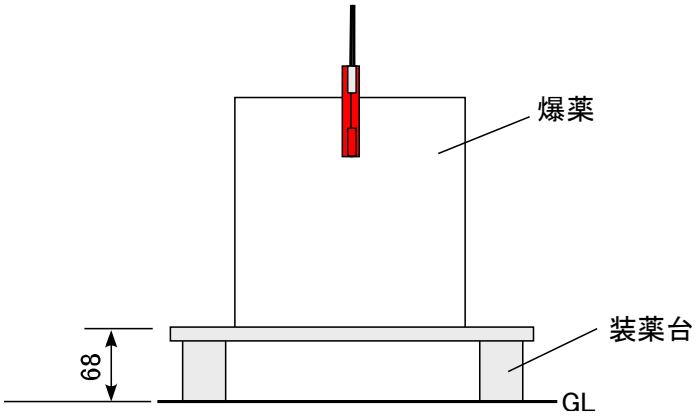


図 4.1-3　爆薬（EMX2）の装薬状況

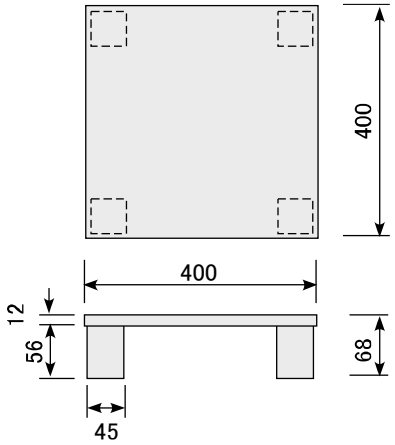


図 4.1-4　装薬台図面

爆薬の設置高さは、火薬庫の床の高さ 30 cm を 1/4.4 スケールに換算した 68 mm とした。

図 4.1-5　爆薬（EMX2）

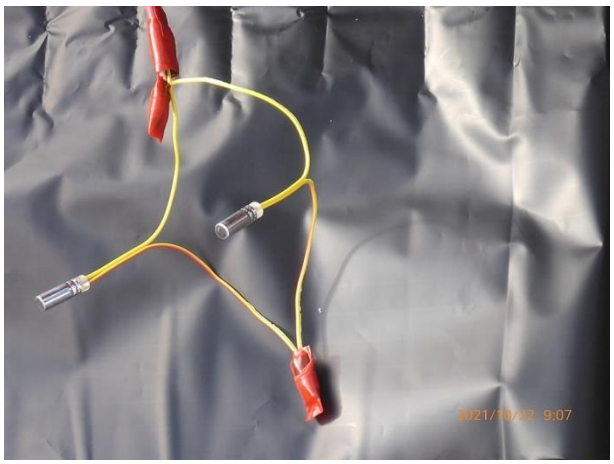


図 4.1-6　雷管

図 4.1-7　雷管を取り付けた導爆線

4.1.2.2　試験体

既存防爆壁を模擬した、砂を用いて作る防爆壁（図 4.1-8 参照）を作成した。その内側または外側に追加の防爆壁を設置した。表 4.1-2 に実験条件を示す。

表 4.1-2　実験条件

実験 No.	防爆壁種類	設置場所	面数
1-1	高密度ウレタンフォーム	内側	1
1-2	高密度ウレタンフォーム	内側	2
1-3	高密度ウレタンフォーム	内側	3
1-4	樹脂メッシュ	外側	1
1-5	コの字型合板（回転）	外側	3

（1）砂防爆壁（既存の防爆壁）

合板（9t×910×1820）2 枚で垂木（49 mm 角）を挟み、隙間に砂を充填した壁を作成する。これを砂防爆壁と呼ぶ。図 4.1-9 参照。これを 4 枚使って爆薬を 4 面で囲う。

作成した壁は高さ 910 mm のうち地上部分が 569 mm になるようにし、341 mm 地中に埋める。図 4.1-12 参照。

コンクリートの密度 2.3 t/m^3 で砂の密度 1.6 t/m^3 のとき、15 cm 厚さのコンクリートは砂の厚さ 21.56 cm のとき質量が同等であり、実験は 1/4.4 スケールであるから砂の厚さ 49 mm とした。

砂防爆壁 1 体あたりの砂の重さ（見積り）：内寸 1.722×0.861×0.049×密度 1.6（t/m^3）＝116 kg

この砂防爆壁を作成したときの実測値は、木枠の重さ 21.4 kg で、砂を入れた後の重さが 137.68 kg であったため、砂の重さは 116.28 kg であった。図 4.1-10 参照。

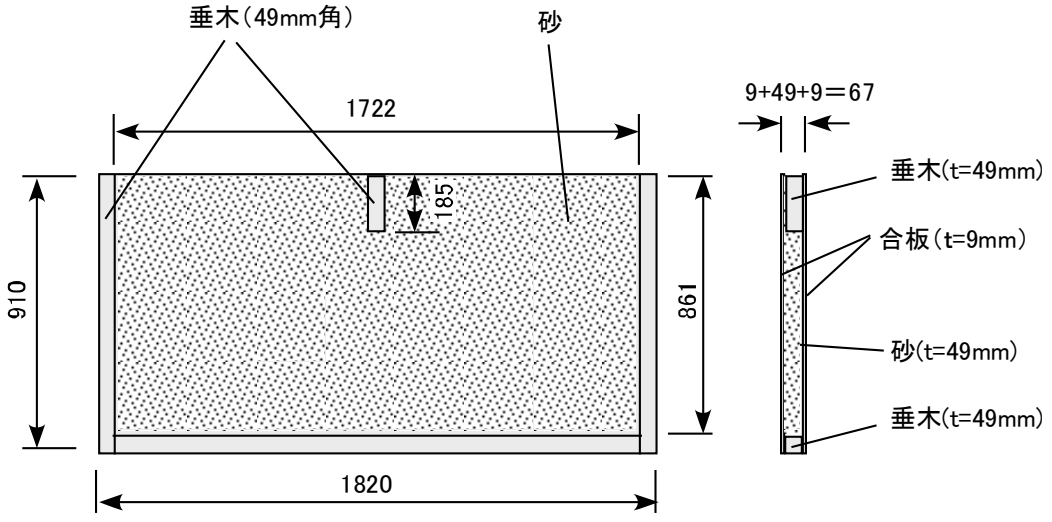
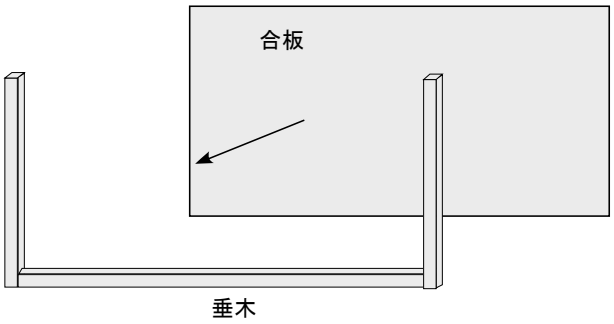
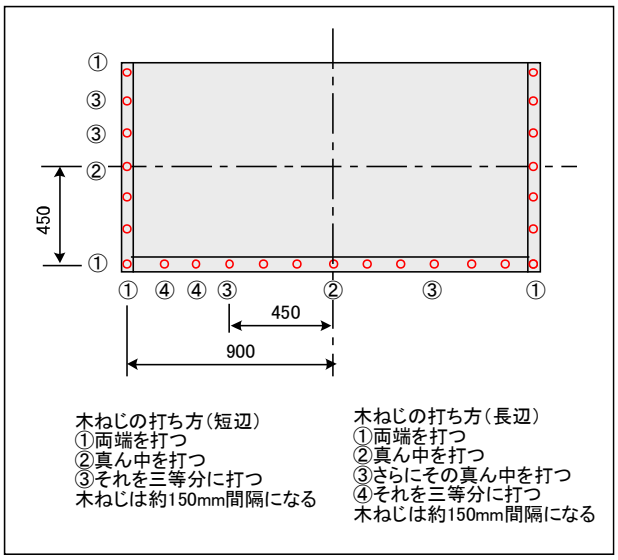


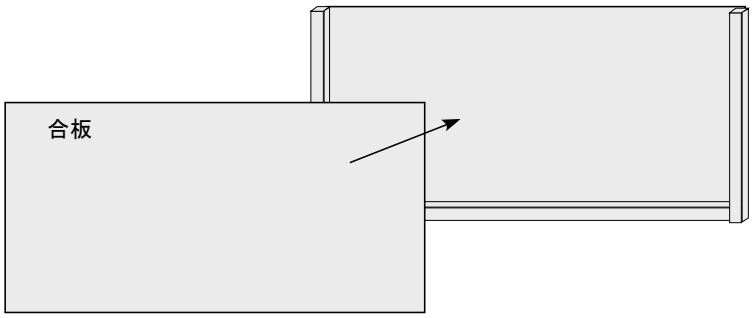
図 4.1-8　砂防爆壁の概要

①垂木の枠を作り、合板を木ねじで固定する
　木ねじはコーススレッドL=60mm程度が適当



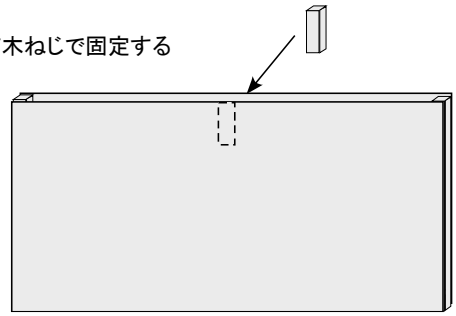


②もう1枚の合板を木ねじで固定する



2枚目の合板を木ねじでとめるとき、
1枚目の合板で打った木ねじと当たらないように
20mm程度ずらして打ってください

③中央に短い垂木を入れて木ねじで固定する



これを 4 面組み合わせたものを爆点に設置する。その後、

④砂を充填する。

湿って粒径の不揃いな砂は、充填時に隙間ができやすいため、乾燥砂を使用し充填時につき固める必要がある。実験時には、周囲の地面を転圧機（プレートコンパクター）で転圧した際に、木枠も振動して中の砂が詰まっていき、隙間なく充填できた。

図 4.1-9　砂防爆壁の作成方法

図 4.1-10　模擬防爆壁内の砂の計量

砂を入れる前の重さ　21.40 kg

砂を入れた後の重さ　137.68 kg

よって、砂の重さは 116.28 kg

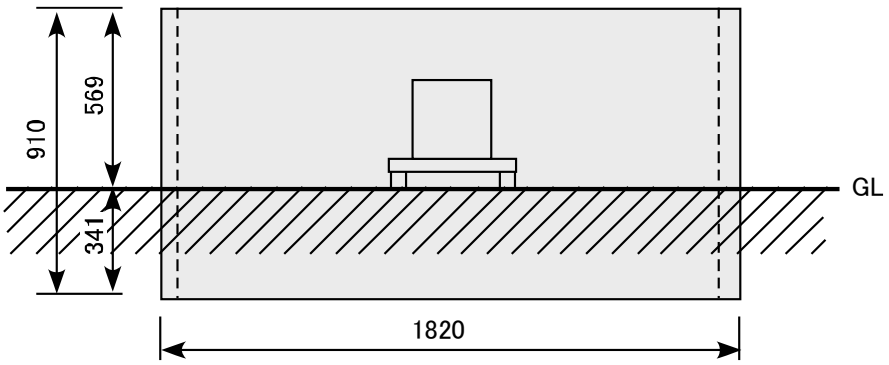


図 4.1-11　砂防爆壁の設置深さ（正面図）

※　砂防爆壁の設置深さは No.1-1～1-5 および No.2-2 で統一。

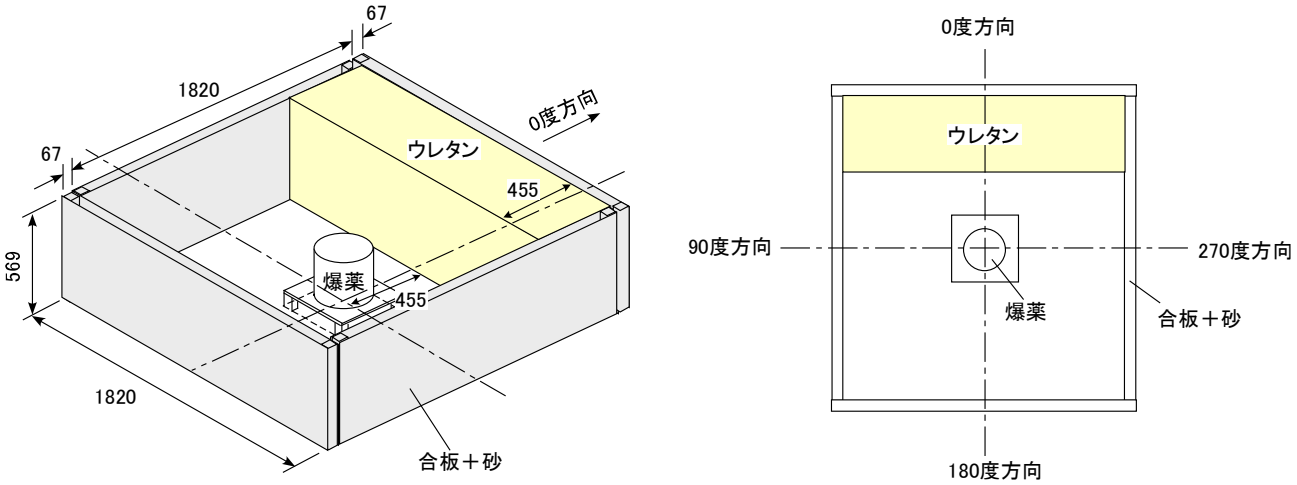


図 4.1-12　No.1-1 防爆壁　設置状況概略図

※　No.1-1～1-3 で同じウレタンを使用する。

※　ウレタンは高密度ウレタンフォーム（密度 40～60 kg/m^3）。
昨年度と同じメーカ「イノアック」の EMM　52 kg/m^3 が第一候補。

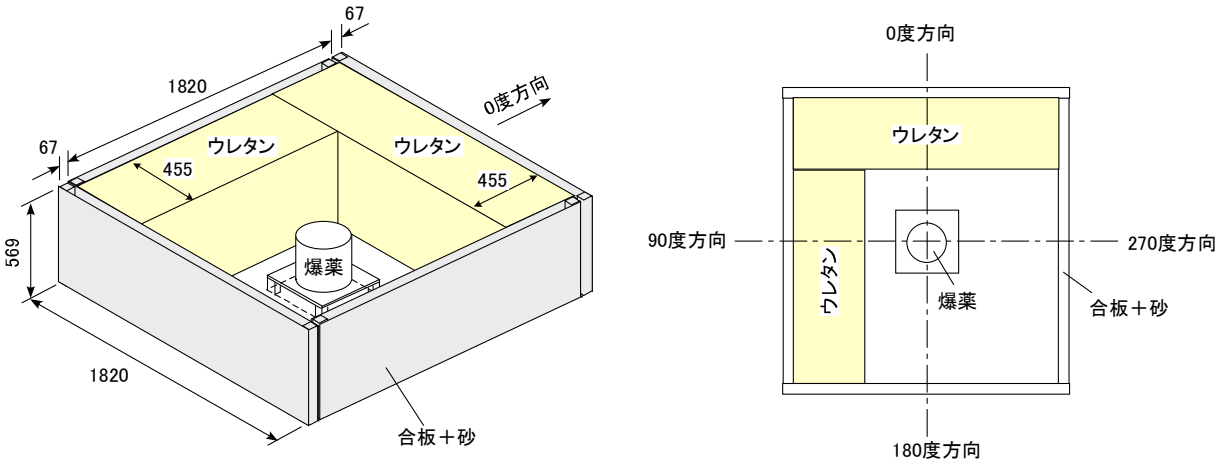


図 4.1-13　No.1-2 防爆壁　設置状況概略図

※　設置方向は 0 度と 90 度方向。

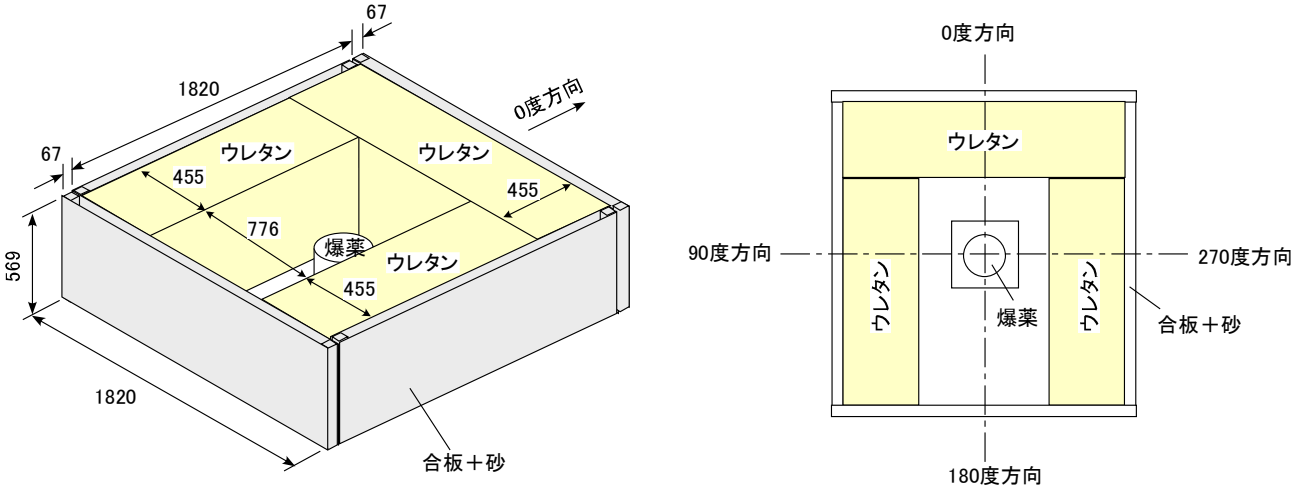


図 4.1-14　No.1-3 防爆壁　設置状況概略図

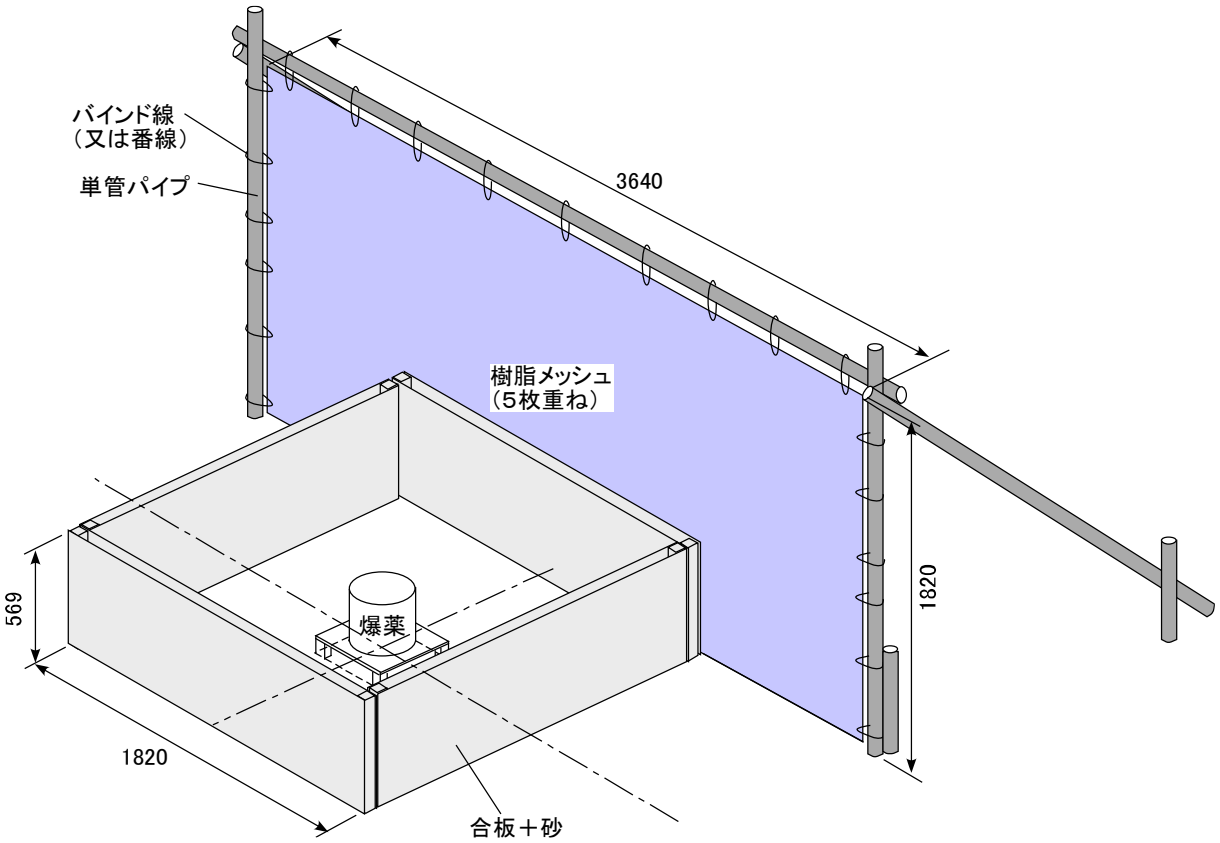


図 4.1-15　No.1-4 防爆壁　設置状況概略図

※樹脂メッシュのピッチは 1.8mm のもの。５枚重ねで設置する。

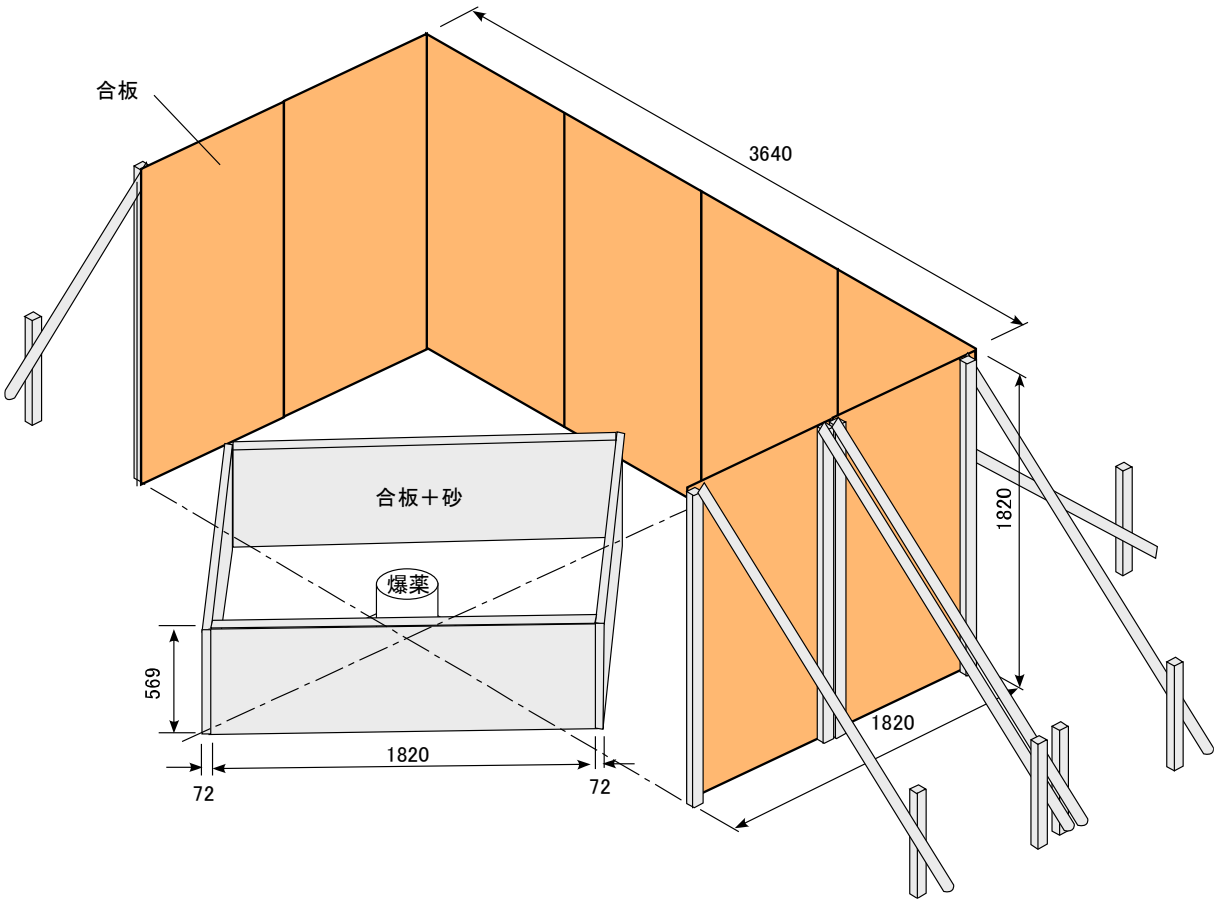


図 4.1-16　No.1-5 防爆壁　設置状況概略図

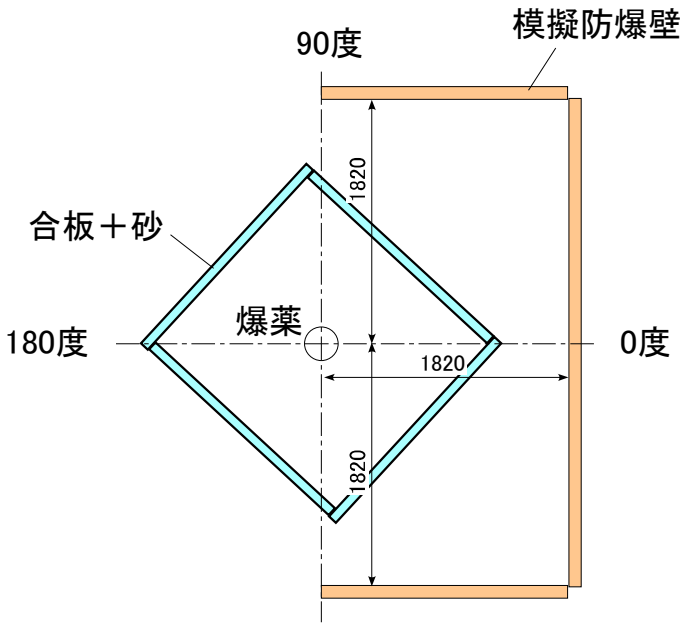


図 4.1-17　No.1-5 防爆壁　設置向き（平面図）

※　0 度と 180 度のラインが防爆壁の角になるように設置する。

試験体の設置状況写真

図 4.1-18～図 4.1-23 に各実験の試験体設置状況を示す。

図 4.1-18　No.1-1　試験体設置状況写真（1/2）
（作製日 10 月 20 日、装薬～実験 10 月 21 日）

図 4.1-19　No.1-1　試験体設置状況写真（2/2）
（作製日 10 月 20 日、装薬～実験 10 月 21 日）

図 4.1-20　No.1-2　試験体設置状況写真
（作製日 10 月 21 日、装薬～実験 10 月 21 日）

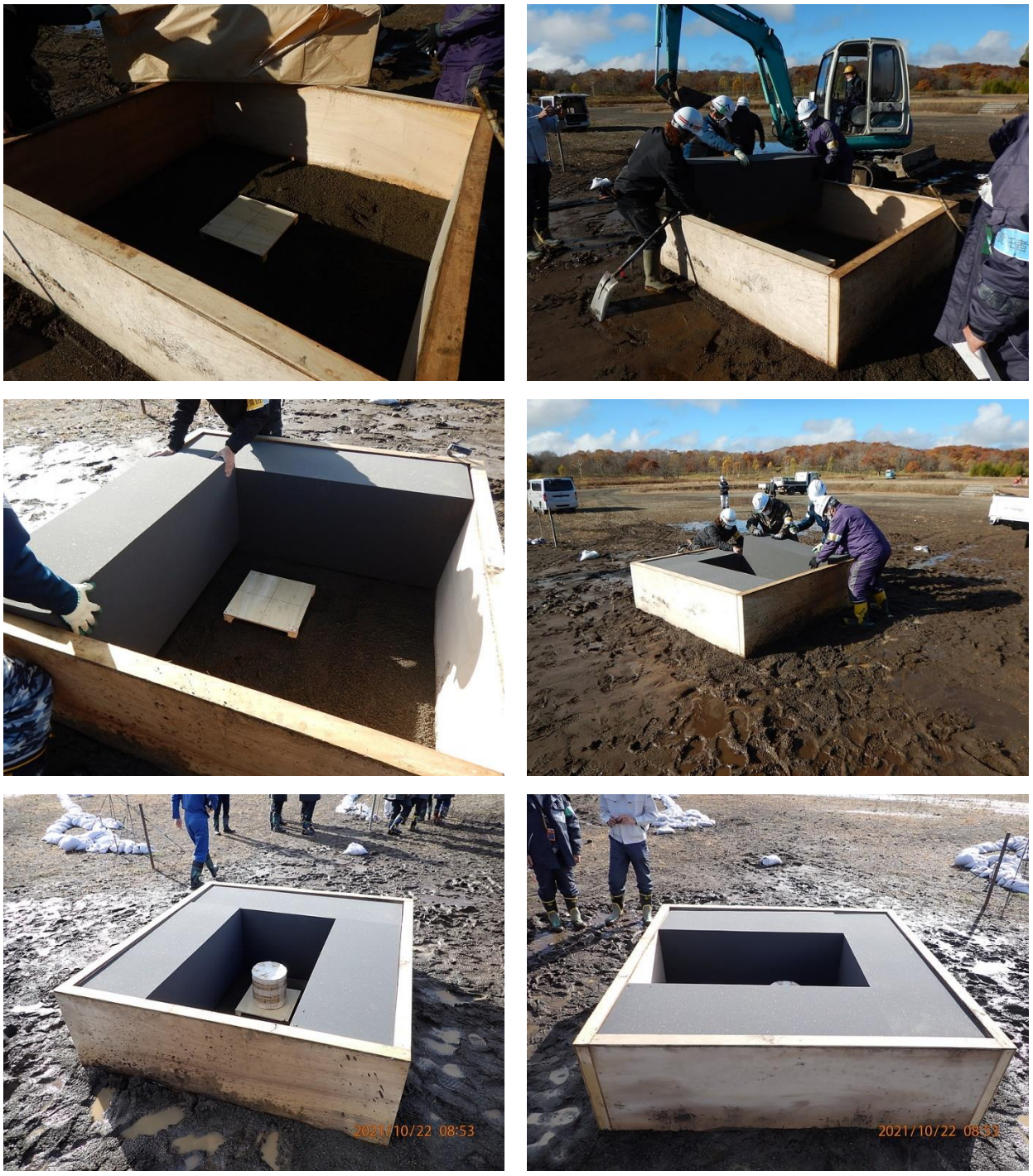


図 4.1-21　No.1-3　試験体設置状況写真
（作製日 10 月 21 日、装薬～実験 10 月 22 日）

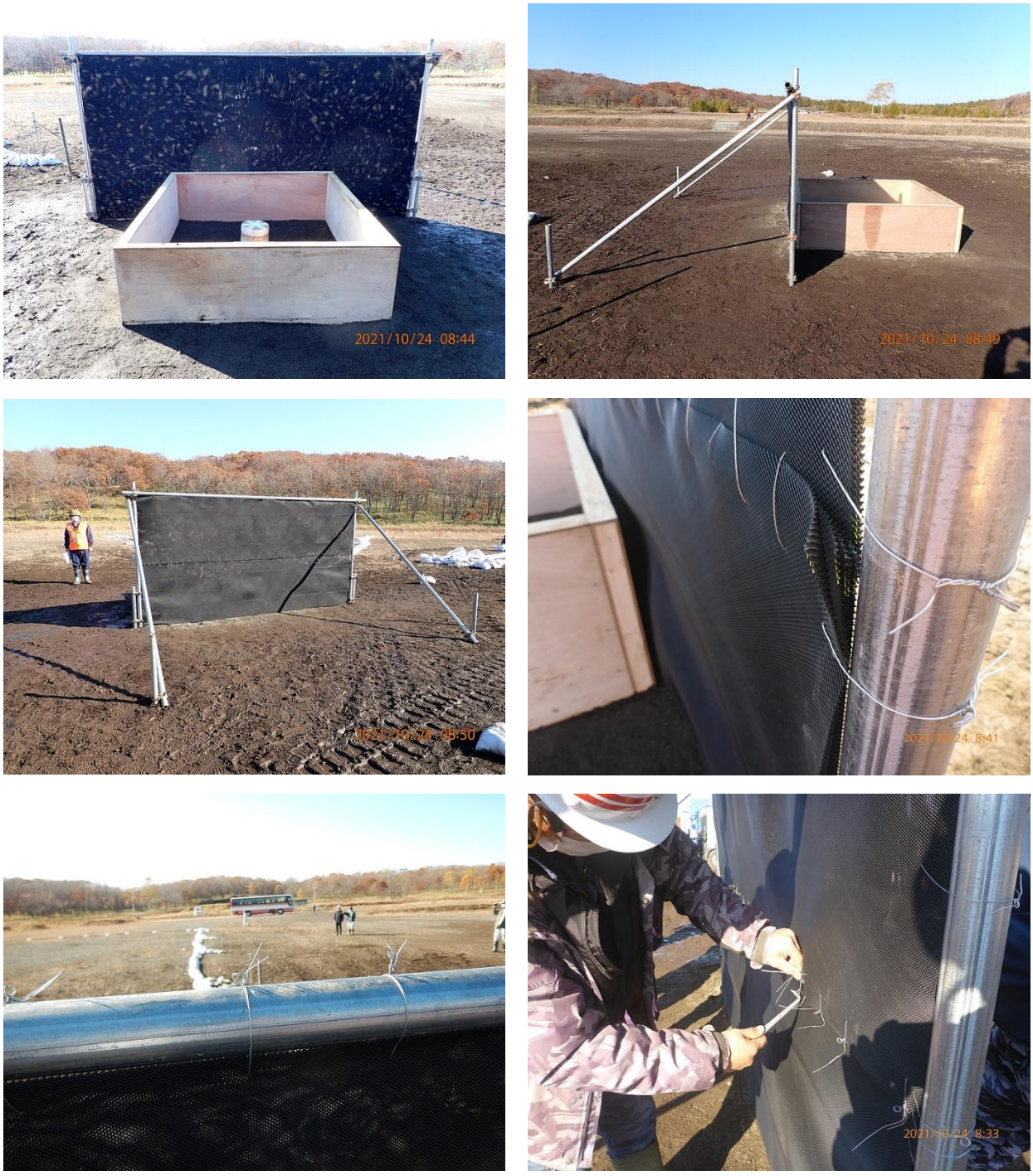


図 4.1-22　No.1-4　試験体設置状況写真
（作製日 10 月 22 日、装薬～実験 10 月 24 日）

図 4.1-23　No.1-5　試験体設置状況写真
（作製日 10 月 24 日、装薬～実験 10 月 25 日）

4.1.2.3　計測項目

爆風圧計測、飛散物計測、地盤振動計測、常速度・高速度カメラ撮影、騒音計測を行った。

(1) 爆風圧計測

表 4.1-3 に爆風圧計の各 ch の距離を示す。図 4.1-24 に爆風圧計設置状況、図 4.1-25 に爆風圧計設置位置、図 4.1-26 に設置写真を示す。爆薬中心を原点に防爆壁のある方向を 0 度方向とし、23.55 kg（含水爆薬 15.49 kg を煙火薬で換算した薬量）に対する換算距離 2（45、135 度方向）、3、6、9、12 m/kg$^{1/3}$（0、45、135、180 度方向）の距離に爆風圧計を設置する。爆風圧計は地面から高さ 1.0 m に専用のホルダー（整流板）で側圧を測定するように設置する。また、換算距離 2 と 3 m/kg$^{1/3}$ には高さ 0.3 m に爆風圧計も設置した。なお、飛散物を防護するために、全角度について一番近い爆風圧計の 1 m 前に、1 m 高さの金属管を立てた（4 か所）。

表 4.1-3　爆風圧計の各 ch の距離

原点：爆薬中心 換算距離：煙火 23.55 kg 基準					No.1 薬量（kg） 15.49	
ch	角度	距離(m)	高さ(m)	換算距離 (m/kg$^{1/3}$)	記録機器 Tasler	 HIOKI
ch1a	0	8.60	1.0	3	○	○
ch1b	0	8.60	0.3	3	×	○
ch2	0	17.20	1.0	6	○	×
ch3	0	25.80	1.0	9	○	×
ch4	0	34.40	1.0	12	○	×
ch5a	45	5.73	1.0	2	○	○
ch5b	45	5.73	0.3	2	×	○
ch6a	45	8.60	1.0	3	○	○
ch6b	45	8.60	0.3	3	×	○
ch7	45	17.20	1.0	6	○	×
ch8	45	25.80	1.0	9	○	×
ch9	45	34.40	1.0	12	○	×
ch10a	135	5.73	1.0	2	○	○
ch10b	135	5.73	0.3	2	×	○
ch11a	135	8.60	1.0	3	○	○
ch11b	135	8.60	0.3	3	×	○
ch12	135	17.20	1.0	6	○	×
ch13	135	25.80	1.0	9	○	×
ch14	135	34.40	1.0	12	○	×
ch15a	180	8.60	1.0	3	○	○
ch15b	180	8.60	0.3	3	×	○
ch16	180	17.20	1.0	6	○	×
ch17	180	25.80	1.0	9	○	×
ch18	180	34.40	1.0	12	○	×

※　表中の距離は目標値である。実験結果では測量して求めた距離の実測値を使用し、換算距離を求めている。

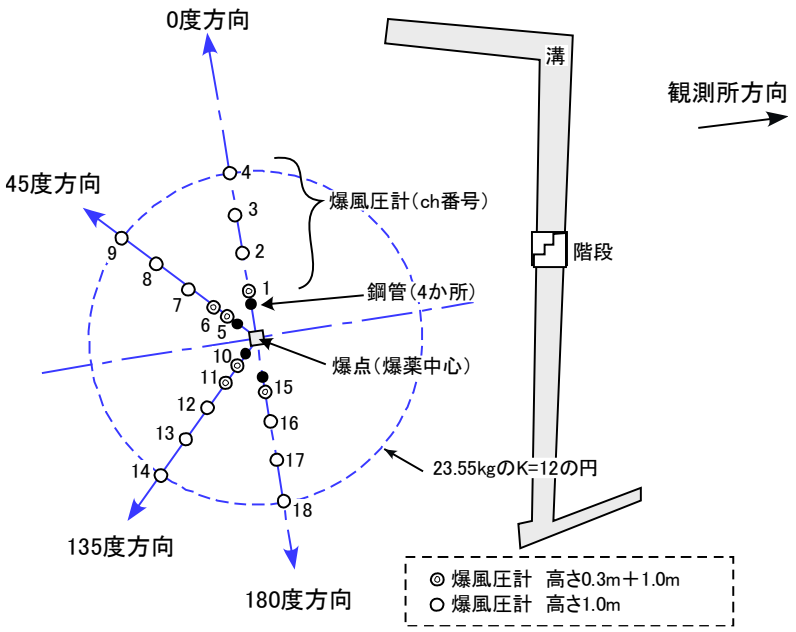


図 4.1-24　爆風圧計の設置状況

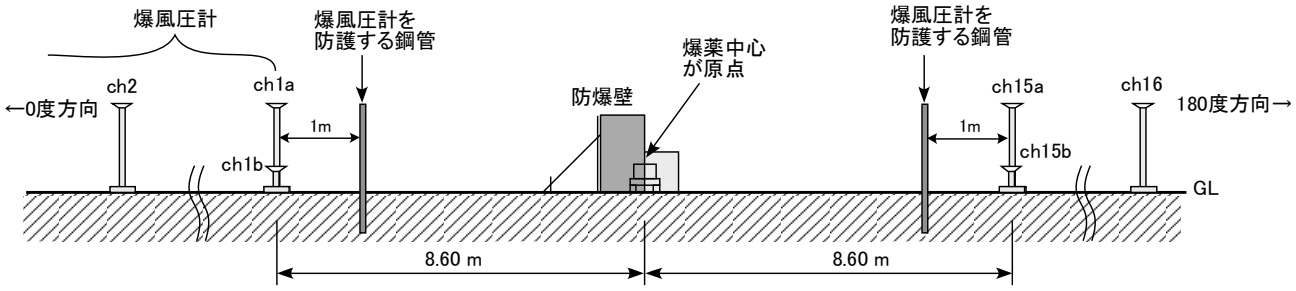


図 4.1-25　爆風圧計の設置位置　No.1

図 4.1-26　爆風圧計設置状況写真

(2) 飛散物計測

爆発後の爆点や爆点周囲の様子を記録（写真撮影、測量）した。

(3) 地盤振動計測

煙火の薬量 23.55kg に相当する換算距離 3、6、9、12 m/kg$^{1/3}$ となる位置の地盤振動（加速度または速度）を計測した。表 4.1-4 に地盤振動計の距離および換算距離を、図 4.1-27 に地盤振動計の設置位置を示す。図 4.1-28 に計測軸方向を示す

加速度センサーは圧電型の 3 軸加速度計 TEAC 612ZS（電荷出力型, 感度 0.16p C/m/s^2, 周波数応答 fc -20kHz）、ならびに 707Z（電圧出力型）を用いた。加速度センサーの地盤への固定は、一本杭に平面皿を取付けた設置台としてアルミ製の治具（直径 20 mm、長さ 200 mm の杭）を地盤にハンマーで打ち込み、そこにセンサーを接着固定した（図 4.1-29）。センサーからの出力はローノイズケーブル TEAC CL-601（1.5 m）で Ac1~Ac3 では圧電型加速度計センサー用アンプ TEAC SA-611（最大振動数範囲 0.2~30kHz, 最大入力 100kpC, ±10V）（図 4.1-30）、Ac4 では同 TEAC SA-630（最大振動数範囲 0.2~50kHz, 最大入力 10kpC, ±10V）（図 4.1-31）に接続し、増幅した上で同軸ケーブルにより信号を観測 BOX まで伝送し、観測 BOX に設置した高速データロガーMR8847-51（16 チャンネル、サンプリング 1MHz に設定）で電圧情報として記録した。また、同一の計測点には二つのセンサーを設置し、センサーは爆風や飛散物による影響を低減するため、一方は図 4.1-32、33 に示すような爆風避けを設置し他方のセンサーは例年と同様に土嚢による養生を行なった。以下の検討では主に、爆風避けを設置して計測した結果を元に議論を行う。一部、センサー不調やノイズ除去が困難であったデータに関しては、土嚢によりセンサー保護を行なった場合の結果に差し替えた。

表 4.1-4 地盤振動計（加速度計）の各 ch の距離

計測点	爆薬中心および庫口から	
	距離 (m)	換算距離 (m/kg$^{1/3}$)
P1	8.6	3
P2	17.2	6
P3	25.8	9
P4	34.4	12

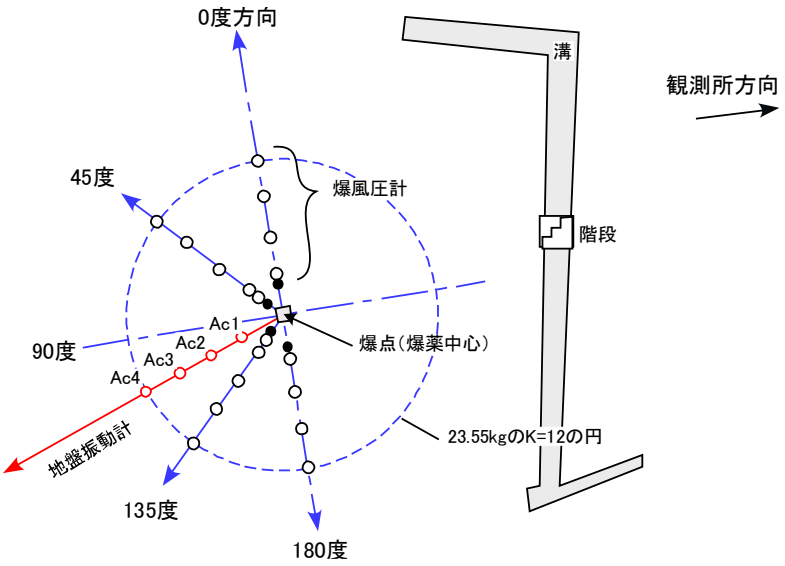


図 4.1-27　地盤振動計の設置位置　No.1

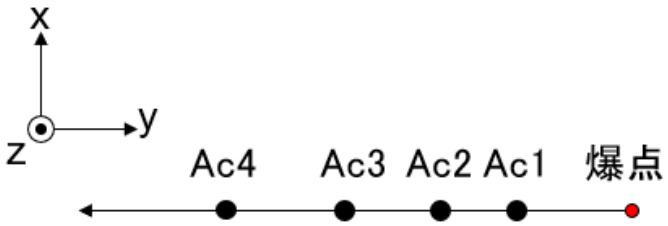


図 4.1-28　地盤振動計の設置距離と計測軸方向

図 4.1-29　加速度センサー　TEAC 612ZS

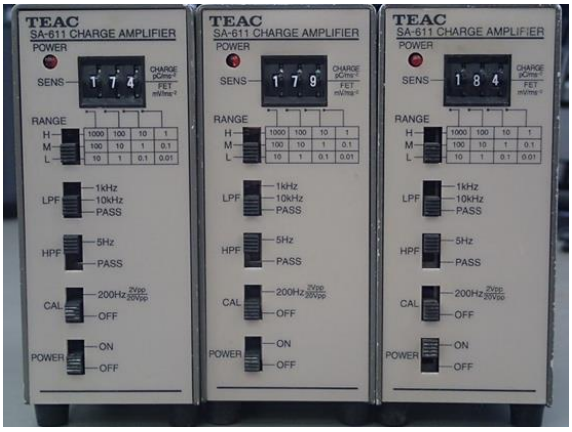


図 4.1-30　加速度センサーのアンプ　TEAC SA-611

図 4.1-31 加速度センサーのアンプ TEAC SA-630

図 4.1-32　爆風避け設置後の状況

図 4.1-33　爆風避け設置後の概要図　断面図

(4)　高速度カメラ撮影

爆発によって発生した衝撃波の伝播状況や飛散物の飛散状況等を観察するために、高速度カメラによる撮影を行った。観測所 1 の屋上に Vision Research 社製高速度カメラ Phantom V640 カラーモデルを設置し、爆発状況の全景を撮影した。また、0 度方向のカメラボックス①にはナックイメージテクノロジー社製高速度カメラ MEMRECAM fx-K4 カラーモデルを設置し、90 度方向のカメラボックス②には Vision Research 社製高速度カメラ Phantom V1210 カラーモデルを設置した。カメラボックスから撮影する際には 20 mm 厚さのアクリル製窓を使用し、カメラボックス前面に土嚢を設置するなど飛散物の衝突からカメラを防護した。撮影タイミングの制御には観測所 1 に設置したデジタル遅延パルス発生装置（Berkeley Nucleonics 社製、BNC model 575-8ch.）を使用し、雷管起爆信号と同期した電気信号をトリガーパルスとして使用した。また、観測所 1 の屋上、カメラボックス①及び②に常速度カメラを設置し、爆発状況の撮影を実施した。

図 4.1-34　観測所１屋上の高速度カメラ

図 4.1-35　カメラボックス①と高速度カメラ

図 4.1-36　カメラボックス②と高速度カメラ

(5)　騒音計測

マイクロフォンと騒音計を用いて爆発時の騒音を測定した。図 4.1-37 に測定位置を示す。観測所付近にマイクロフォンを、遠方の２点（別寒辺四叉路、国境四叉路）に騒音計を設置した。表 4.1-5 に爆点から計測位置までの距離を示す。

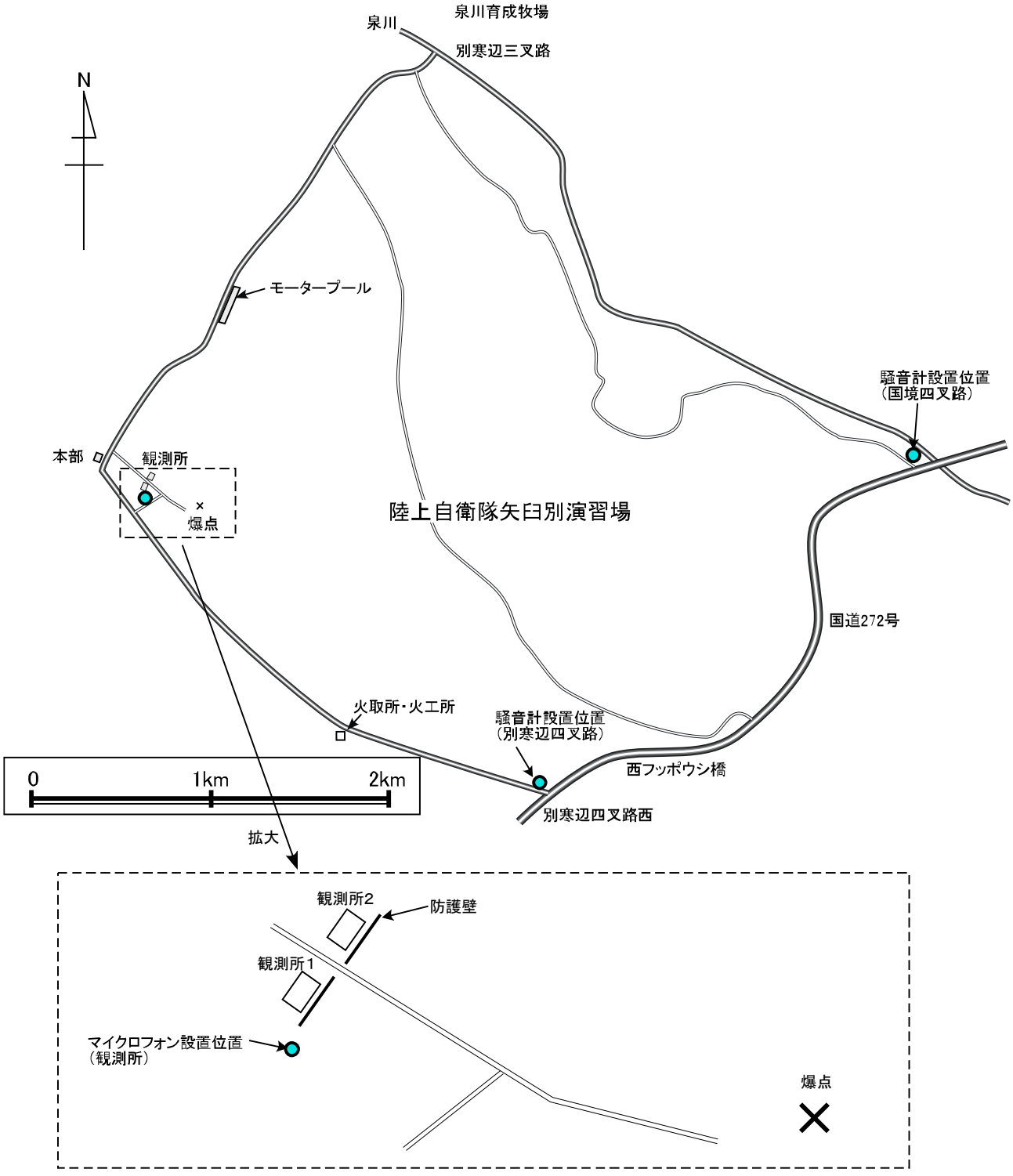


図 4.1-37　騒音計測点　No.1

観測所 1 の脇にマイクロフォン（PCB 社 377C01）を設置した。三脚の頭部に 200mm ほどの棒をビニールテープで固定し、その先端にマイクロフォンをビニールテープで固定した。これを爆点の方向へ向けて設置した。図 4.1-38 に使用したマイクロフォンの写真を示す。これを観測所内に設置したリアルタイムアナライザ OROS によりパソコンと接続し、測定データを記録した。

別寒辺四叉路、国境四叉路では、騒音計 BK2250 と騒音計 NL-31 をそれぞれ 1 台ずつ設置し、爆発前後の約 1～2 分間の騒音を測定した。

表 4.1-5　使用機器および爆点までの距離

計測場所	使用機器	機器型番	距離 m	換算距離 $m/kg^{1/3}$
観測所付近	マイクロフォン	377C01	314	126
別寒辺四叉路	騒音計	BK2250	2730	1095
		NL-31	2730	1095
国境四叉路	騒音計	BK2250	4170	1673
		NL-31	4170	1673

図 4.1-38　PCB 社製マイクロフォン

図 4.1-39　マイクロフォン設置状況

図 4.1-40　騒音計　BK2250

図 4.1-41　騒音計　NL-31

4.1.3　実験結果

4.1.3.1　爆発後の爆点の様子

(1)　漏斗孔の大きさ

No.1-1～1-3 は、昨年度使用したウレタンより高密度のウレタンを用いた。No.1-1 では防爆壁の内側に 1 面、No.1-2 では内側に 2 面、No.1-3 では内側に 3 面設置した。No.1-4 は防爆壁の外に 5 枚重ねた樹脂メッシュを設置した。No.1-5 は防爆壁の外に、45 度回転させたコの字型の合板を設置した。図 4.1-42～6.1-46 に爆発後の爆点の写真を示す。

表 4.1-6 に実験ごとの漏斗孔の大きさを示す。漏斗孔の直径は 0 度方向と 180 度方向のライン、90 度と 270 度方向のラインを巻尺で GL＝0 の直径を測定した。漏斗孔の深さは漏斗孔の最深部（＝爆点中心）と GL=0 で張った巻尺の距離（深さ）を測定した。参考として No.2-1 および 2-2 の結果を示した。爆薬の薬種薬量、設置状況が同じ実験のため、漏斗孔の大きさ深さはおおよそ同じになった。模擬防爆壁有りの実験では漏斗孔が四角くなり、模擬防爆壁なしの実験では漏斗孔は円形だった。模擬防爆壁を 4 面で爆薬を四角く囲んでおり、かつ模擬防爆壁は 0.34 m ほど地面に埋めて設置したためである。

No.1-1 だけは、本年度最初の実験であったため漏斗孔の深さが他の結果より浅くなった。それ以外は、実験ごとに有意な差は見られなかった。

昨年度と本年度は同じ薬種薬量の実験で模擬防爆壁を変えただけであるため、漏斗孔の大きさは昨年度と似た結果となった。参考までに表 4.1-7 に昨年度の実験結果を示す。

表 4.1-6　漏斗孔の大きさ

実験 No.	漏斗孔の形状と直径（mm） （0-180 度方向×90-270 度方向）	漏斗孔の深さ（mm）
1-1	□　2800×3300	590
1-2	□　2800×2900	660
1-3	□　3300×3200	645
1-4	□　3100×3200	620
1-5	□　3250×3100	630
（参考）2-1	○　2500×2500	690
（参考）2-2	□　3050×3000	680

表 4.1-7　（参考）漏斗孔の大きさ　令和 2 年度実験結果

実験 No.	漏斗孔の形状と直径（mm） （0-180 度方向×90-270 度方向）	漏斗孔の深さ（mm）
1-1	□　3400×3100	500
1-2	□　3000×3100	640
1-3	□　3500×3400	600
1-4	□　2800×3000	600
1-5	□　2800×3000	650
2-1	○　2900×3000	600
2-2	□　2900×2800	620

図 4.1-42　爆発後の爆点の様子（写真）　No.1-1

図 4.1-43　爆発後の爆点の様子（写真）　No.1-2

図 4.1-44　爆発後の爆点の様子（写真）　No.1-3

図 4.1-45　爆発後の爆点の様子（写真）　No.1-4

図 4.1-46　爆発後の爆点の様子（写真）　No.1-5

No.1-1

爆発後、爆点には四角い漏斗孔が形成された。漏斗孔は 2 段構造で中心部分により深い孔が見られた。1 段目は模擬防爆壁を埋めるためにあらかじめ約 0.34 m 地面を掘っており、埋めた模擬防爆壁が爆発によって広がった影響を受けて形成されたものである。2 段目は爆薬が爆発によって地面を真下に掘り下げた通常に形成される漏斗孔である。図に示すように爆点付近には模擬防爆壁の地中に埋めた部分（大きさ 1.8 m×約 0.34 m）が残っていた。模擬防爆壁は爆点から約 0.9 m 位置に埋めて設置したので元の位置から 0.4～2.5 m 程度移動したことになる。模擬防爆壁の上部は細かく（50～200 mm 角の木片が多くみられた）分かれて遠方に飛散した。遠方の飛散物は(2)　飛散物の飛散状況に記載する。

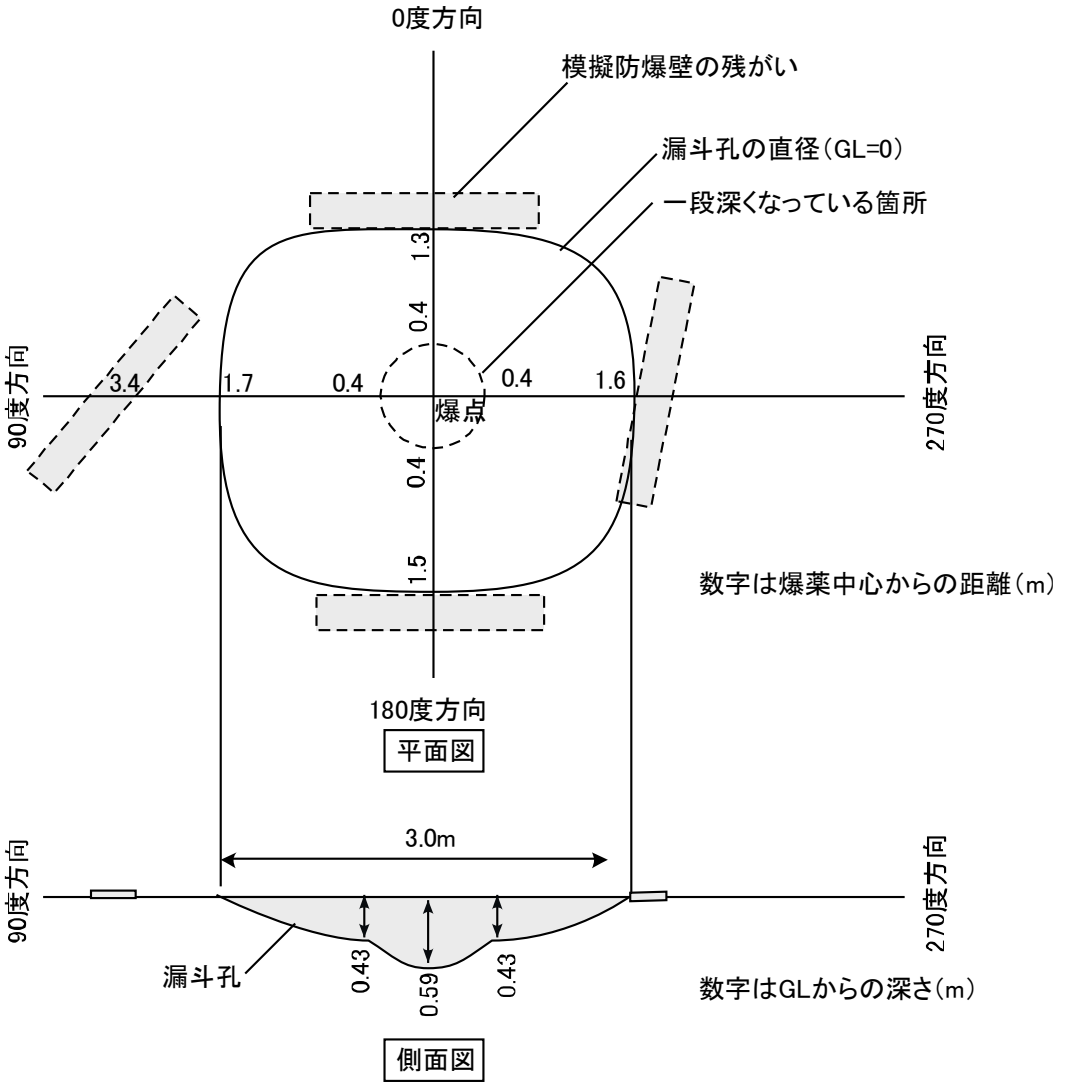


図 4.1-47　爆発後の爆点の様子　No.1-1

No.1-2

他の実験結果と同様に爆発後、爆点には四角い漏斗孔ができ、その中心部には一段深い円形の漏斗孔が形成された。

模擬防爆壁の地中部分だけが爆点に残り、地上部分は細かく分かれて飛散した。ウレタンも細かく分かれて飛散した。遠方の飛散物については(2)　飛散物の飛散状況に記載する。

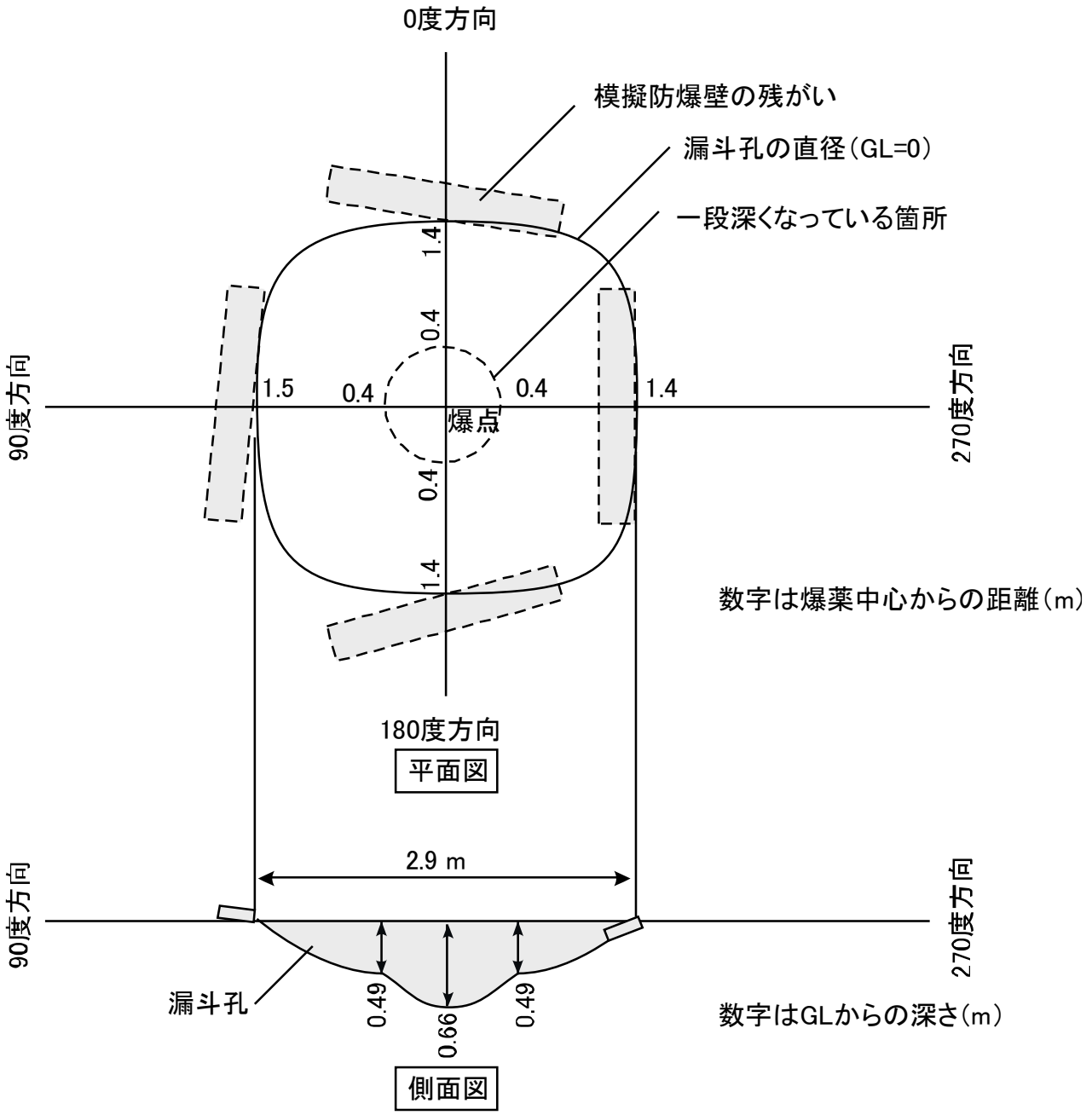


図 4.1-48　爆発後の爆点の様子　No.1-2

No.1-3

他の実験結果と同様に爆発後、爆点には四角い漏斗孔ができ、その中心部には一段深い円形の漏斗孔が形成された。

模擬防爆壁の地中部分だけが爆点に残り、地上部分は細かく分かれて飛散した。ウレタンも細かく分かれて飛散した。遠方の飛散物については(2)　飛散物の飛散状況に記載する。

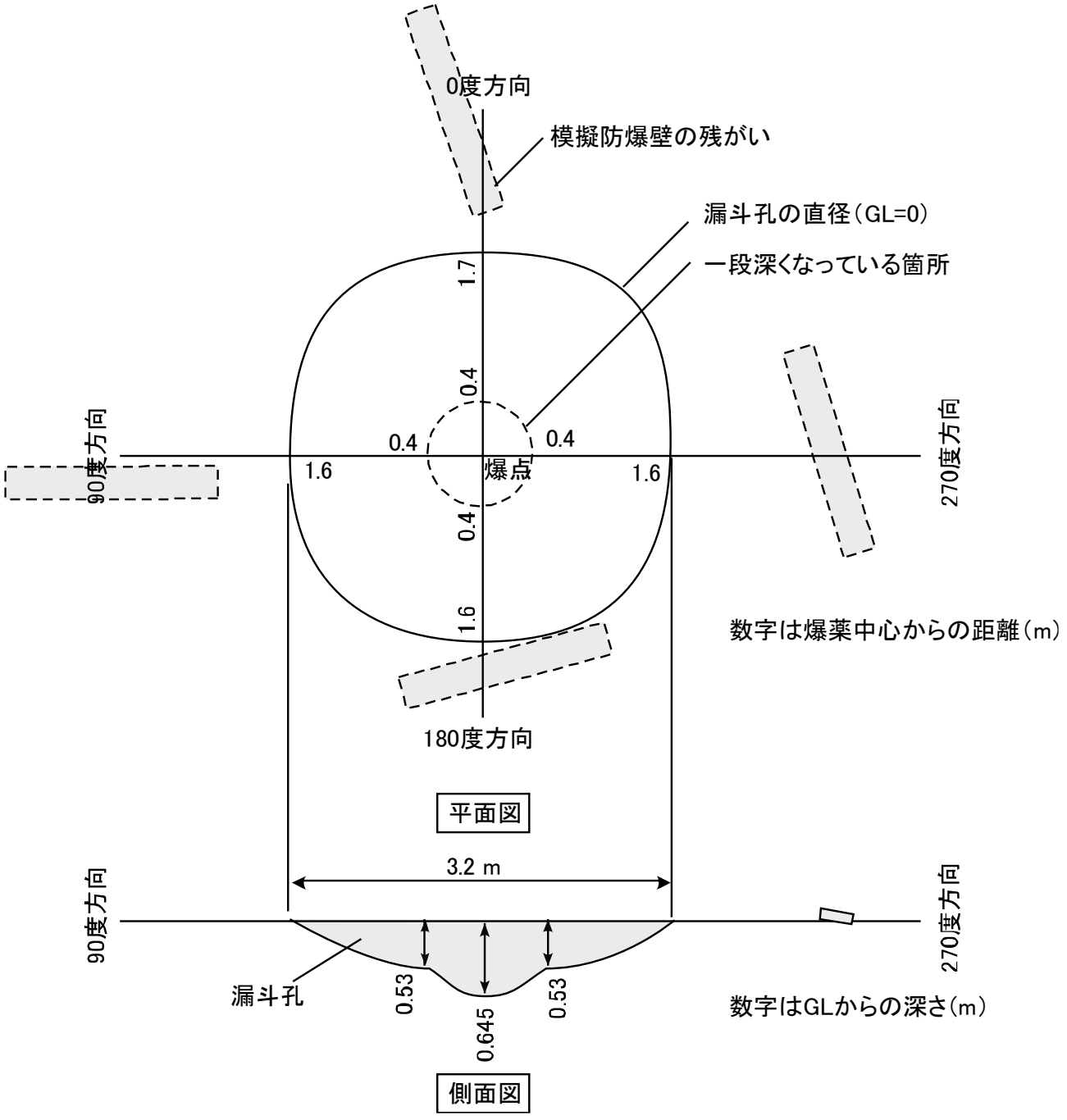


図 4.1-49　爆発後の爆点の様子　No.1-3

No.1-4

他の実験結果と同様に爆発後、爆点には四角い漏斗孔ができ、その中心部には一段深い円形の漏斗孔が形成された。

模擬防爆壁の地中部分だけが爆点に残り、地上部分は細かく分かれて飛散した。樹脂メッシュも細かく分かれて飛散した。樹脂メッシュを支えていた単管パイプは、天井部分が曲がりはしたがその場に残った。遠方の飛散物については(2)　飛散物の飛散状況に記載する。

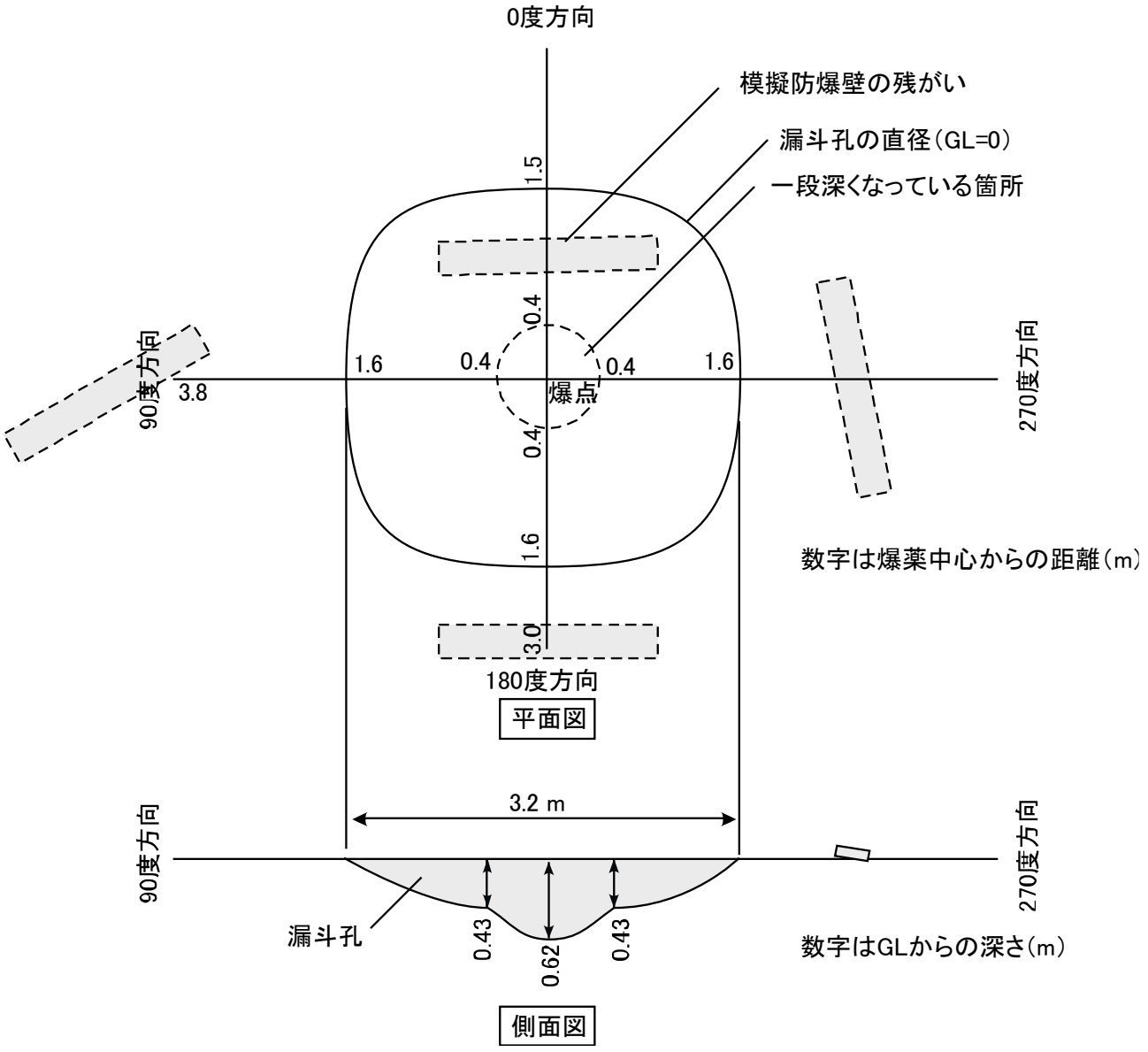


図 4.1-50　爆発後の爆点の様子　No.1-4

No.1-5

他の実験結果と同様に爆発後、爆点には四角い漏斗孔ができ、その中心部には一段深い円形の漏斗孔が形成された。No.1-5 だけ模擬防爆壁が 45 度回転して設置しているので、漏斗孔にその影響がみられる。

模擬防爆壁の地中部分だけが爆点に残り、地上部分は細かく分かれて飛散した。遠方の飛散物については(2)　飛散物の飛散状況に記載する。

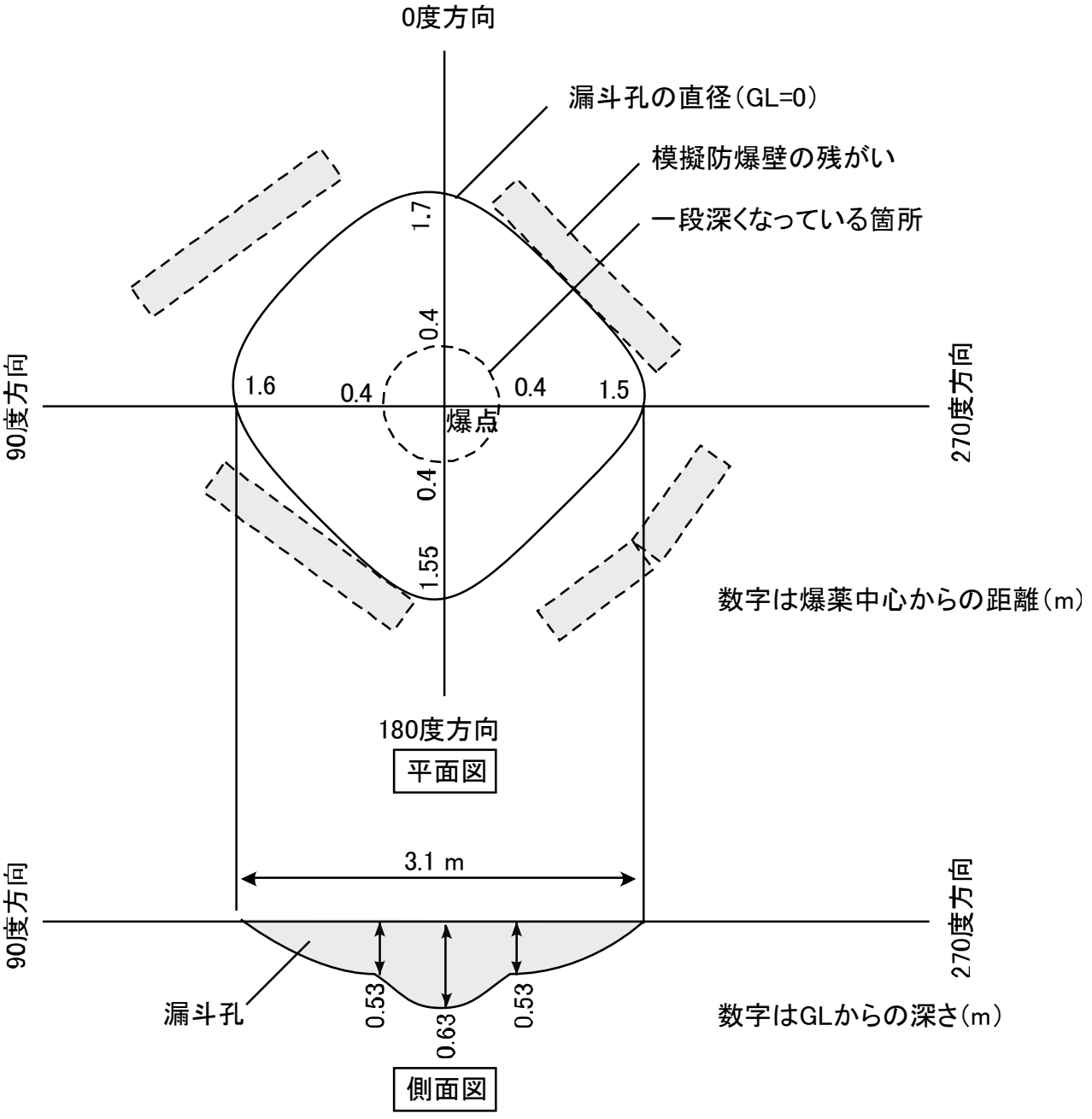


図 4.1-51　爆発後の爆点の様子　No.1-5

(2)　飛散物の飛散状況

模擬防爆壁は爆発によって模擬防爆壁の地上部分が細かく分かれて吹き飛ばされており、木片が爆点付近から遠方まで散らばっていた。その大きさは 20 mm 角から 400 mm 角のさまざまであった。飛散方向、飛散距離は No.1-1～1-4 でおおよそ同じ結果となった。No.1-5 は模擬防爆壁を 45 度回転しているので、飛散傾向も 45 度回転した形となった。図 4.1-52 に模擬防爆壁の木片の飛散範囲を示す。No.1-1～1-4 はまとめて飛散範囲の傾向として図中の点線で示した。No.1-5 は 45、135、225、315 度の方向で遠くに飛散したものを示した。飛散距離は、壁に正対する方向では最大 70 m 程度で、斜め方向には 40 m ほどであった。

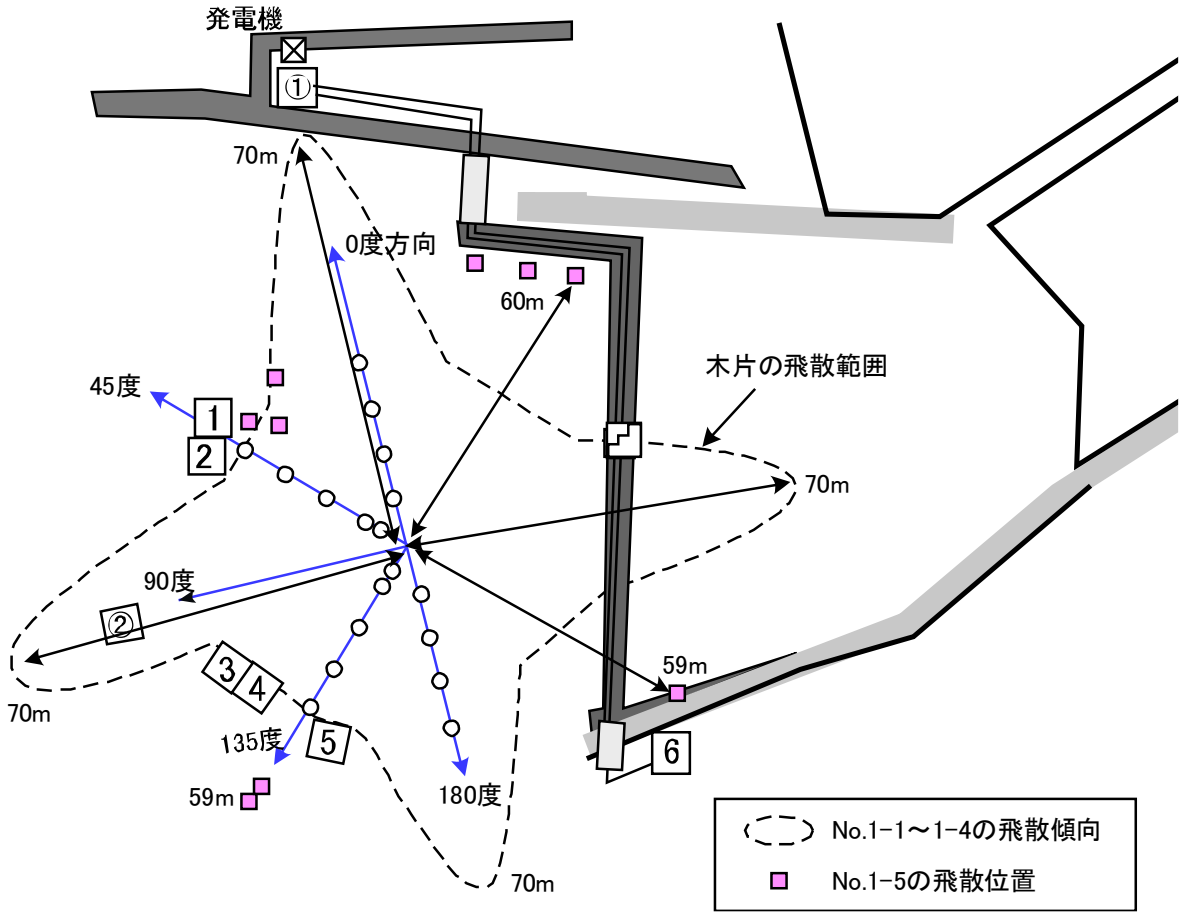


図 4.1-52　模擬防爆壁の飛散範囲

No.1-1　飛散物の飛散状況

図 4.1-53 に模擬防爆壁とウレタンの飛散状況を示す。爆発後ウレタンは粉々になり、全方向へ飛散していた。風の影響で 0 度から 270 度方向への飛散が多かった。飛散距離はおよそ 20 m であった。

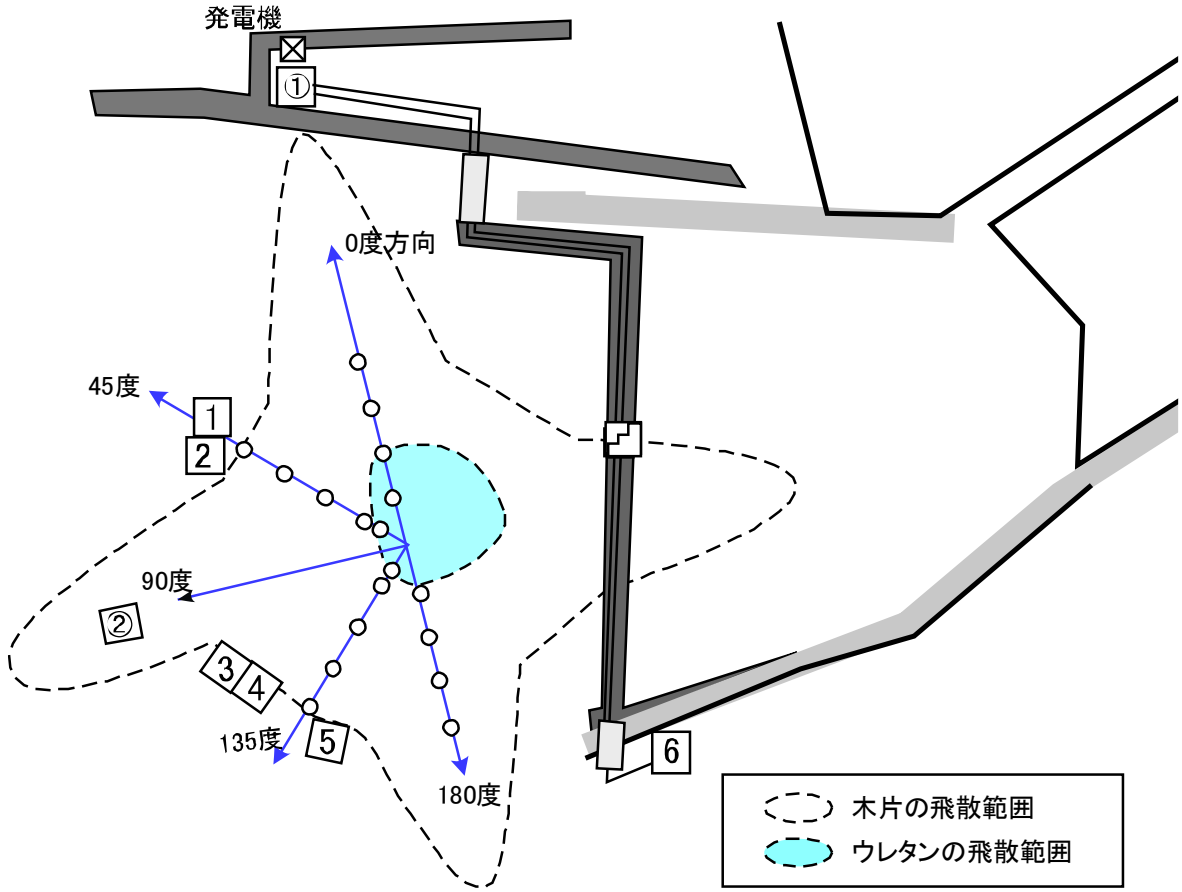


図 4.1-53　ウレタンの飛散状況　No.1-1

図 4.1-54　点火前と点火直後の写真　No.1-1

（左）0 度方向爆風圧計 ch1 に直撃した飛散物。
（右）270 度方向へ飛散したウレタンの破片。

（左）90 度方向 71 m 地点（カメラボックス付近）の飛散物。
（右）180 度方向 64 m 地点の飛散物。

図 4.1-55　飛散物の写真　No.1-1

No.1-2　飛散物の飛散状況

図 4.1-56 に模擬防爆壁とウレタンの飛散状況を示す。爆発後ウレタンは粉々になり、全方向へ飛散していた。若干 180 度方向だけ飛散範囲が抑えめであった。飛散距離はおよそ 20 m であった。

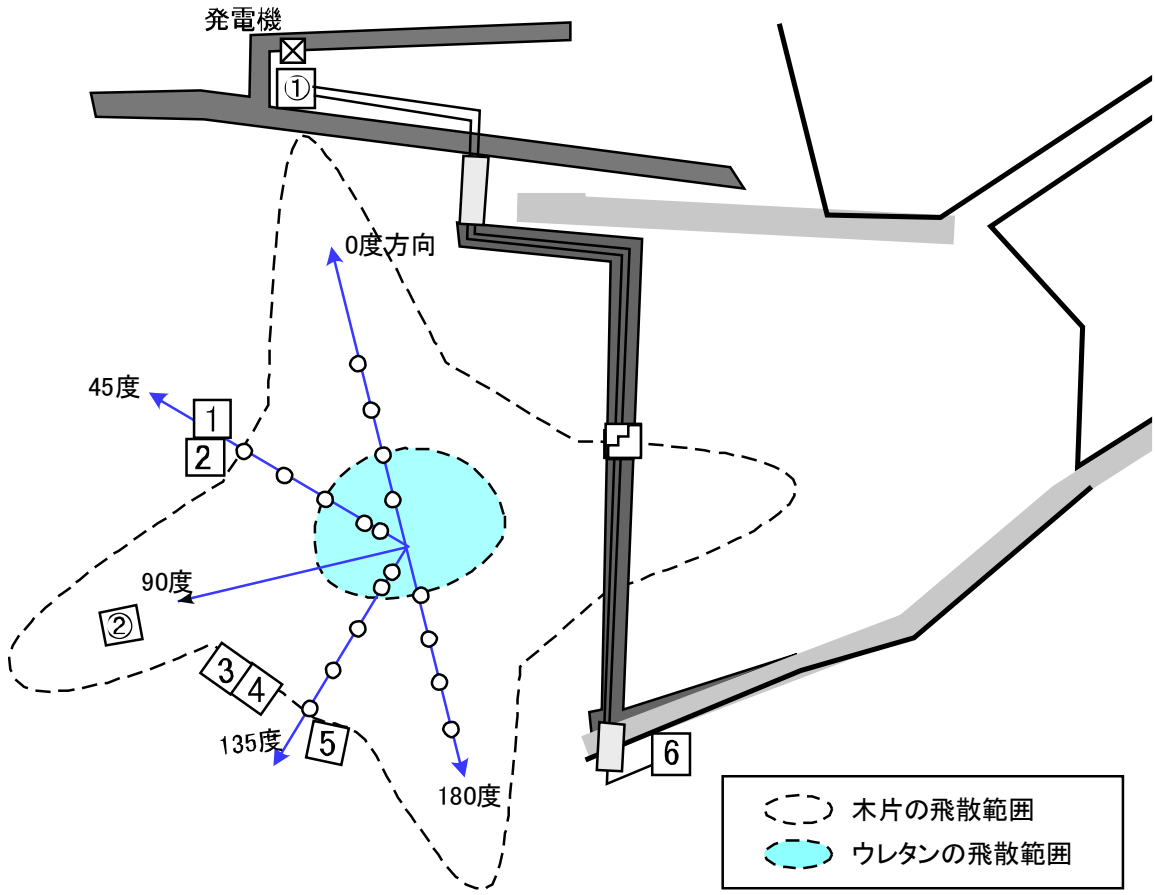


図 4.1-56　ウレタンの飛散状況　No.1-2

図 4.1-57　点火前と点火直後の写真　No.1-2

（左）0 度方向 73 m 地点に飛散した木片。
（右）180 度方向 53 m 地点に飛散した木片。

（左）0 から 45 度方向へのウレタンの飛散状況
（右）0 から 315 度方向へのウレタンの飛散状況。

（左）ウレタン破片の大きさが主に 10 cm 角～20 cm 角の大きさ
（右）ウレタン破片の大きさが主に 2 cm 角～5 cm 角の大きさ

図 4.1-58　飛散物の写真　No.1-2

No.1-3　飛散物の飛散状況

図 4.1-59 に模擬防爆壁とウレタンの飛散状況を示す。爆発後ウレタンは粉々になり、全方向へ飛散していた。風の影響で 0 度から 270 度方向への飛散が多かった。飛散距離はおよそ 20 m であった。

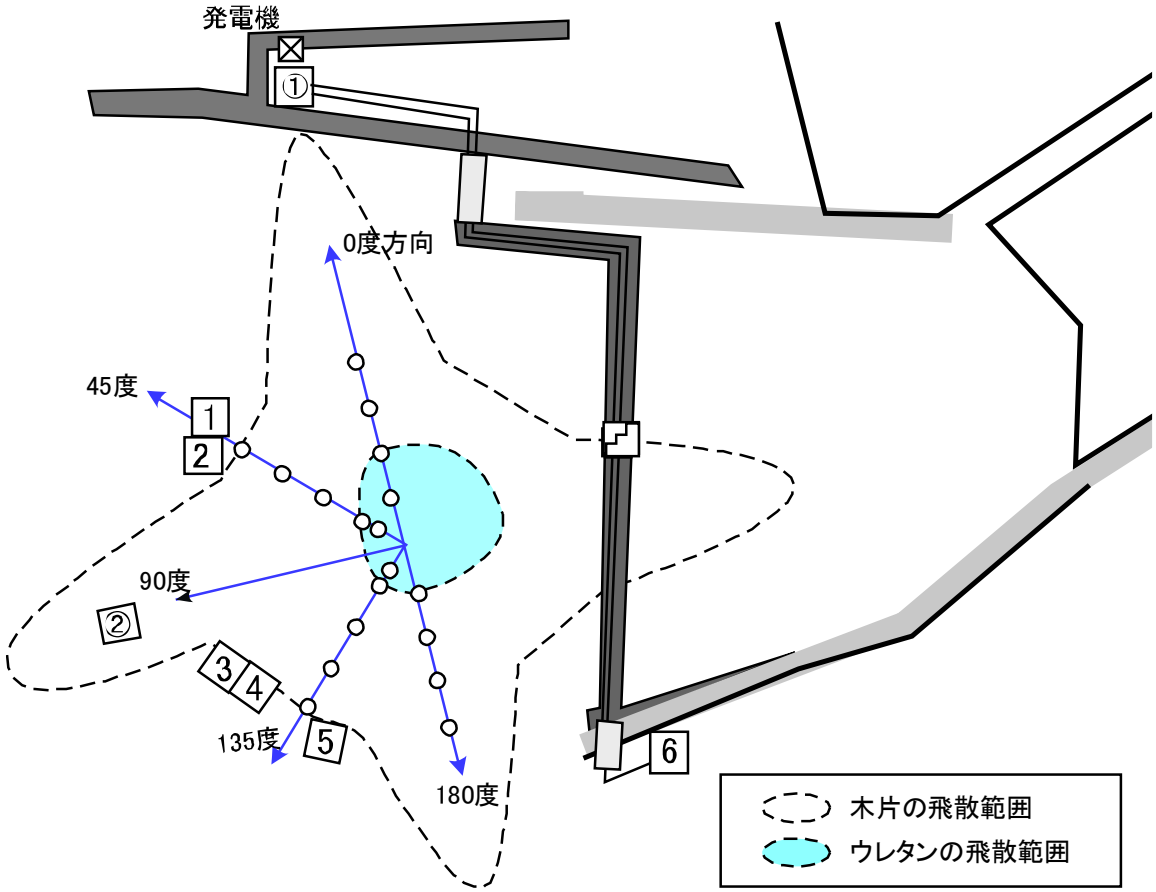


図 4.1-59　ウレタンの飛散状況　No.1-3

図 4.1-60　点火前と点火直後の写真　No.1-3

（左）特に大きかった破片。長さは 30 cm×12 cm。
（右）特に大きかった破片。長さは 30 cm×20 cm。

（左）0 度方向 62 m 地点に飛散した木片。
（右）180 度方向 57 m 地点に飛散した木片

図 4.1-61　飛散物の写真　No.1-3

No.1-4　飛散物の飛散状況

図 4.1-62 に模擬防爆壁と樹脂ネットの飛散状況を示す。樹脂ネットは 0 度方向へ最大 45 m ほど飛散していた。

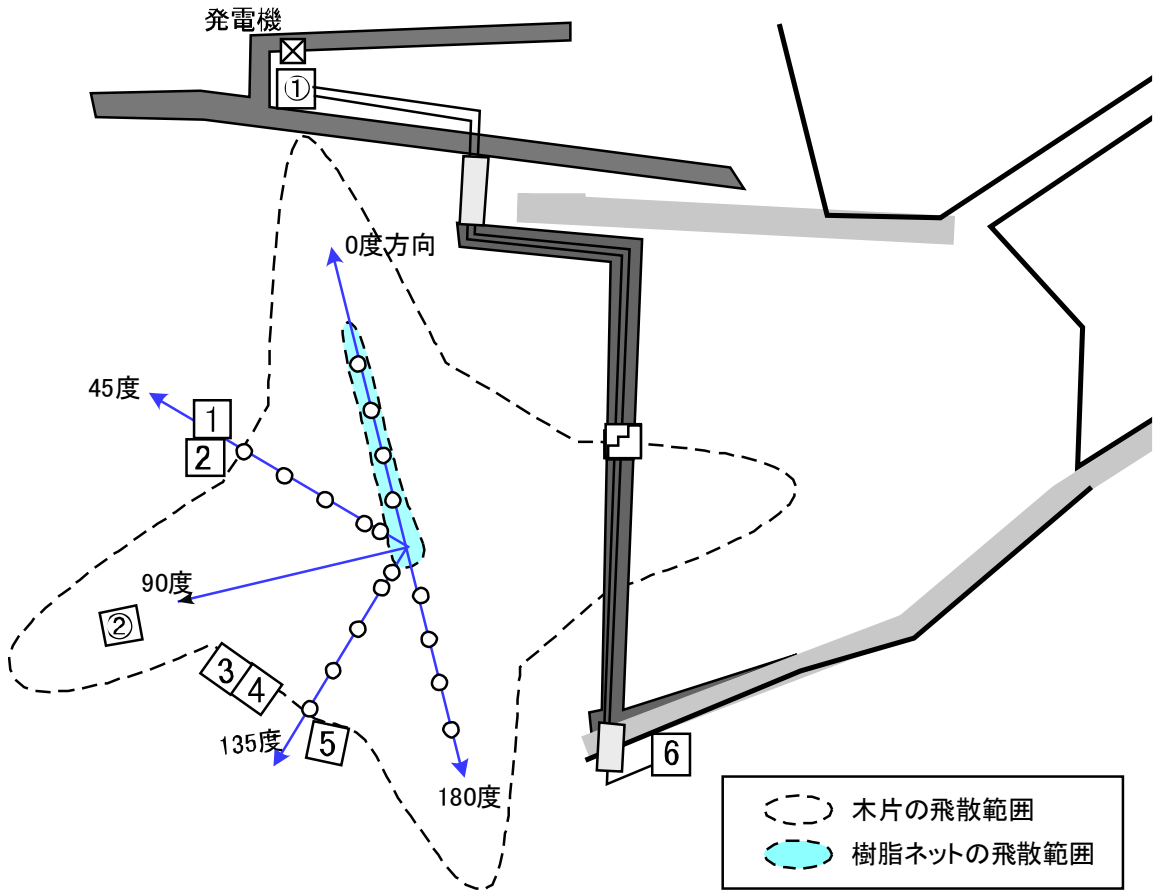


図 4.1-62　樹脂ネットの飛散状況　No.1-4

図 4.1-63　点火前と点火直後の写真　No.1-4

（左）0 度方向の飛散状況。
（右）細かくなった樹脂ネット。

（左）90 度方向へ飛散した木片。
（右）90 度方向へ飛散した木片（左の拡大写真）。

図 4.1-64　飛散物の写真　No.1-4

No.1-5　飛散物の飛散状況

図 4.1-65 に飛散物の飛散状況を示す。前述の模擬防爆壁の破片の飛散に加え、8 枚の合板からなる追加で設置した防爆壁の飛散位置を水色で示した。合板（図中の水色）は、ほとんどが 1 枚板のまま爆点から 14 m～40 m の位置に飛散していた。

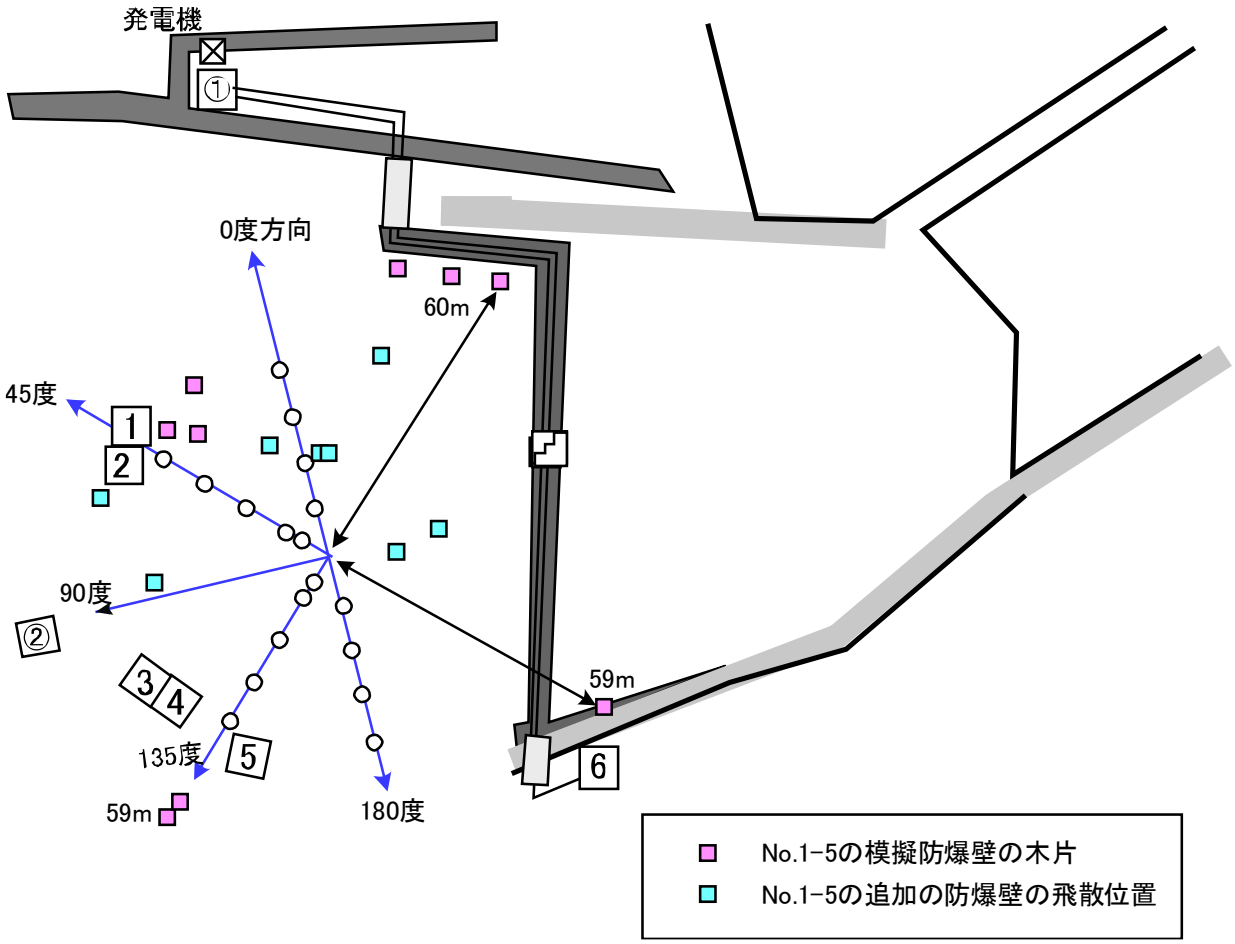
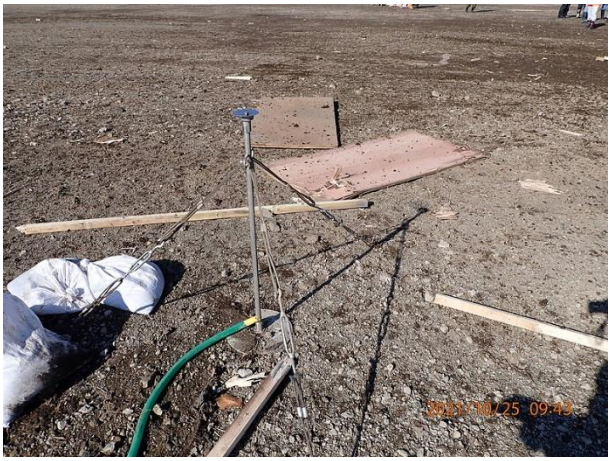


図 4.1-65　合板の飛散状況　No.1-5

図 4.1-66　点火前と点火直後の写真　No.1-5



（左）270 度方向 14 m 地点に飛散した合板。
（右）0 度方向 17 m 地点に飛散した合板。

（左）45 度方向 42 m 地点に飛散した模擬防爆壁の木片。
（右）225 度方向 59 m 地点に飛散した模擬防爆壁の木片

図 4.1-67　飛散物の写真　No.1-5

爆発後の爆点の様子まとめ

爆発後、爆点に約 3 m 角で最大深さ約 0.6 m の四角い漏斗孔ができた。四角いのは模擬防爆壁の影響である。昨年度と薬量が同じのため、漏斗孔の直径も深さもほぼ同じになった。

飛散物の飛散状況も昨年度同様で、模擬防爆壁の木片は最大 70 m ほど飛散した。壁に対して正対する方向への飛散物は数も多く、飛散距離も長くなる。計測機器への直撃もあった。

No.1-1～1-3 で設置したウレタンは、爆点から半径 20 m の範囲で飛散した。

No.1-4 で設置した樹脂ネットは、設置した 0 度方向へ最大 45 m の範囲で飛散した。

No.1-5 で設置した合板は、ほとんどが 1 枚板のまま爆点から 14 m～40 m の位置に飛散していた。

4.1.3.2　爆風圧計測結果

(1) 爆風の時間履歴

図 4.1-68～図 4.1-87 に実験ごとの爆風波形を示す。チャンネル番号の英字 a は 1m 計測、b は 0.3m 計測、英字なしは 1m 計測である。以下に注目点を記載する。

・計測位置によっては正圧相に複数の急峻な局所ピーク圧が観測される。１つめは爆風の先頭波面、２つめ以降は防爆壁との干渉によって生成されていると考えられる。

・飛散物がセンサ架台に衝突したことによって振動が観測される。爆点に近いセンサーほどその影響が観測されやすい。

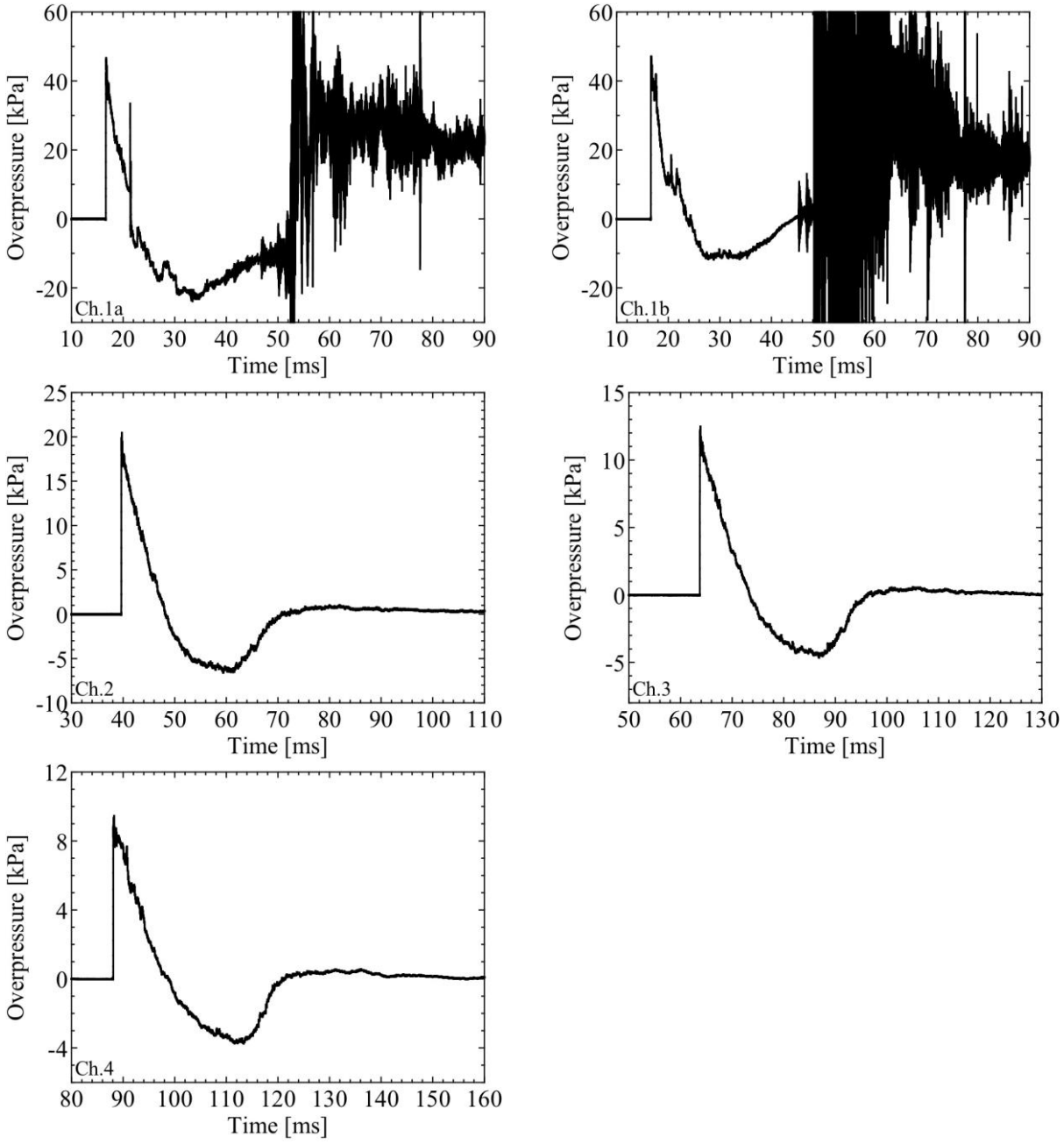


図 4.1-68　No1-1　0º 方向

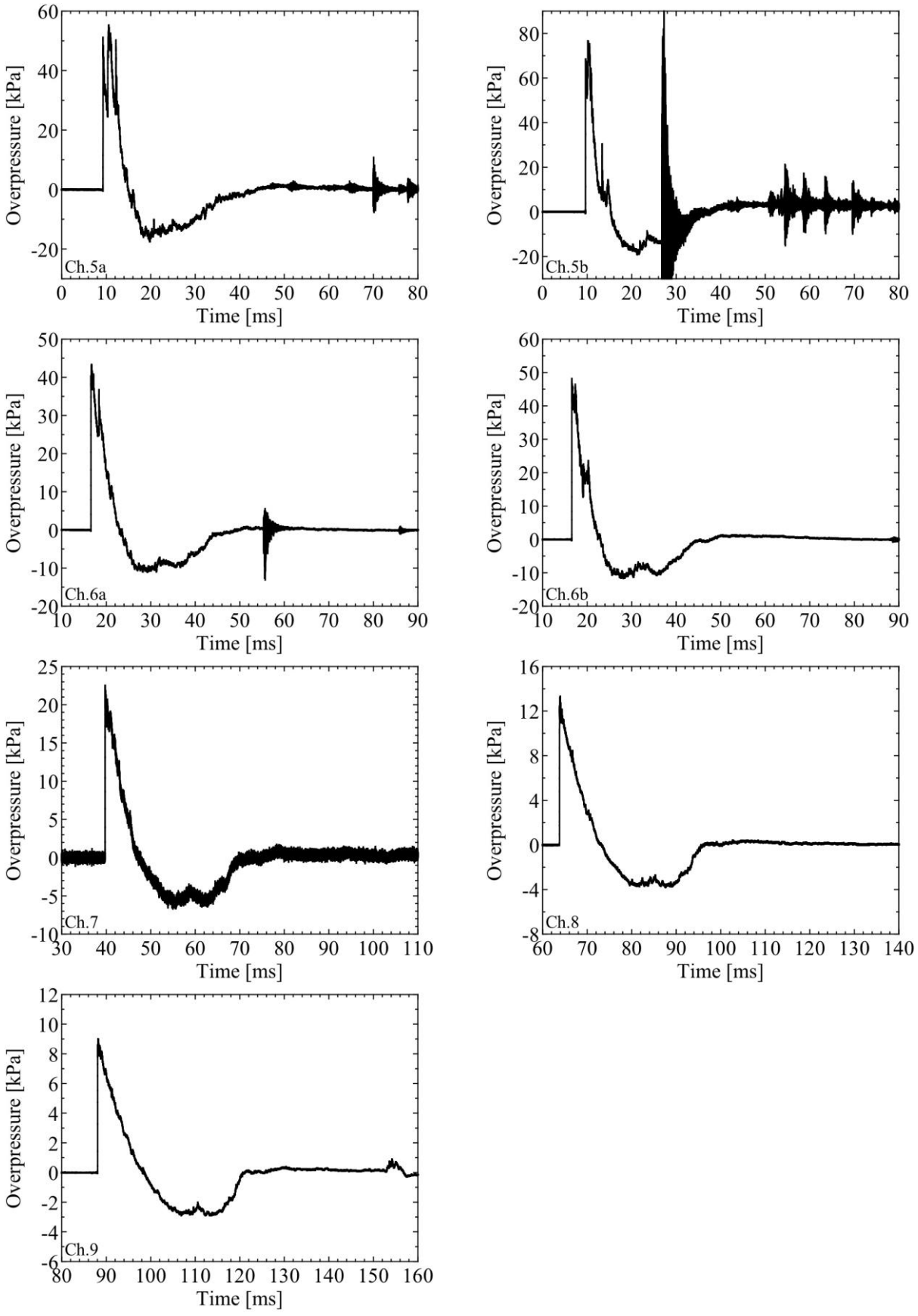


図 4.1-69　No1-1　45º 方向

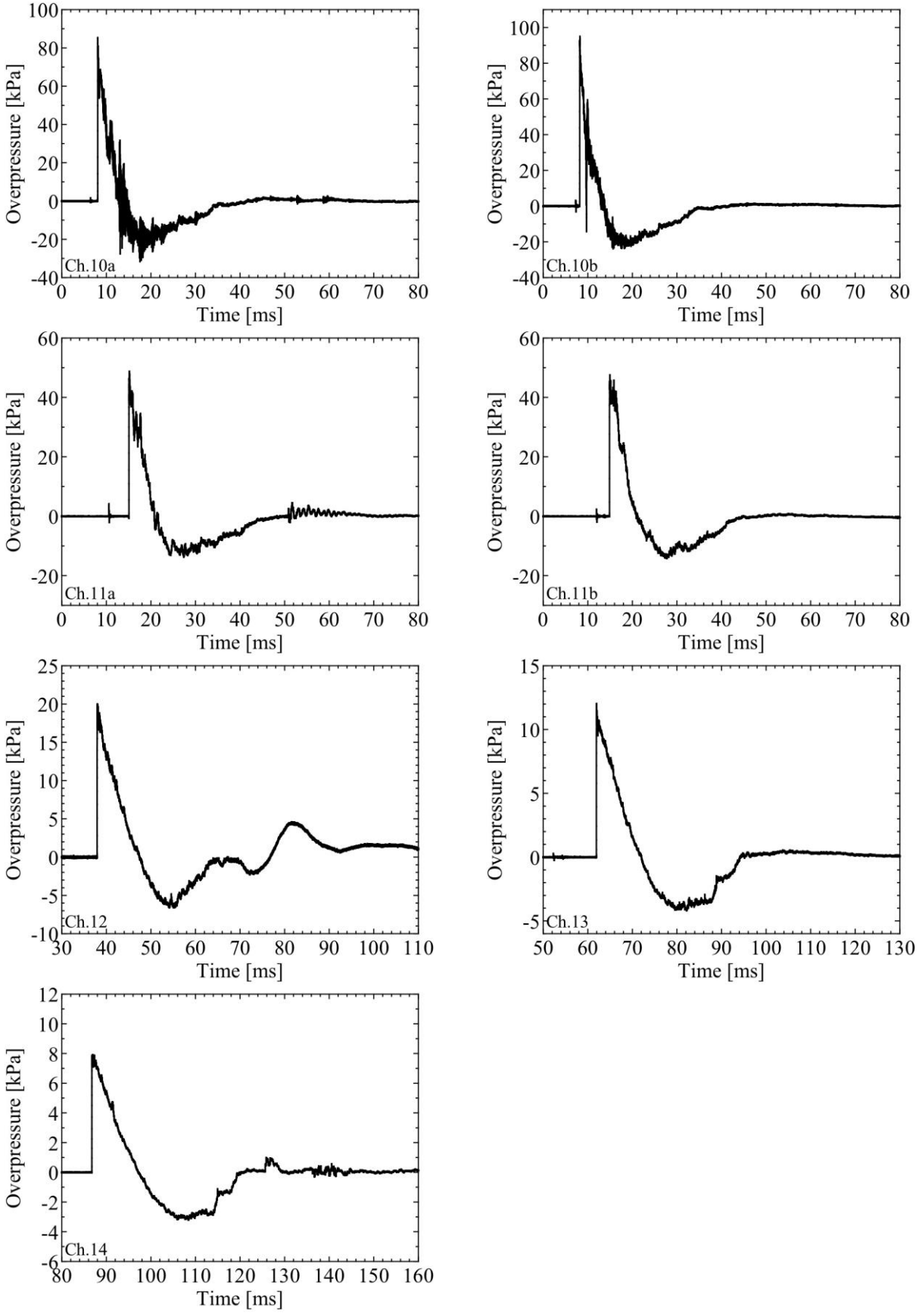


図 4.1-70　No1-1　135º 方向

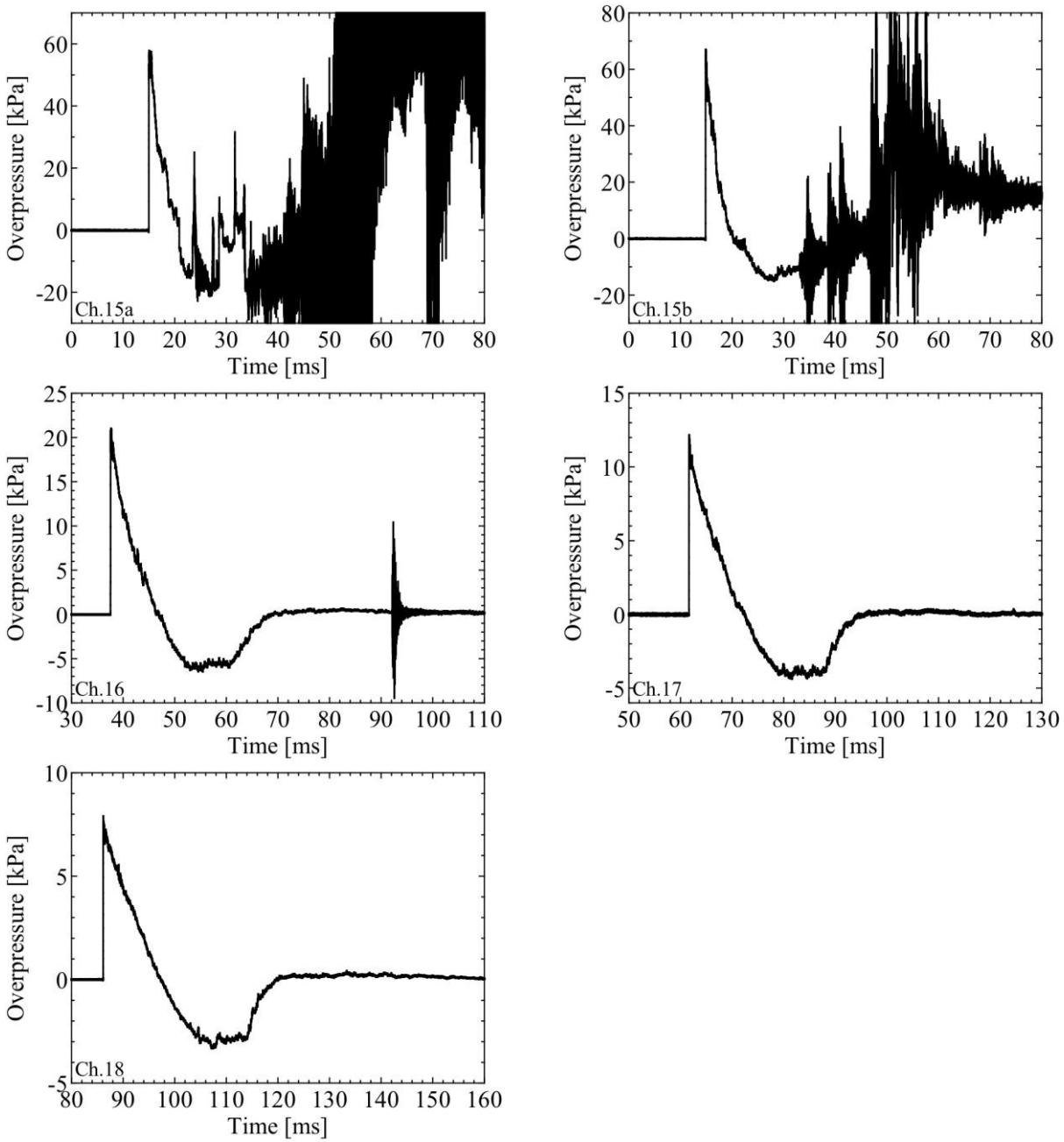


図 4.1-71　No1-1　180º 方向

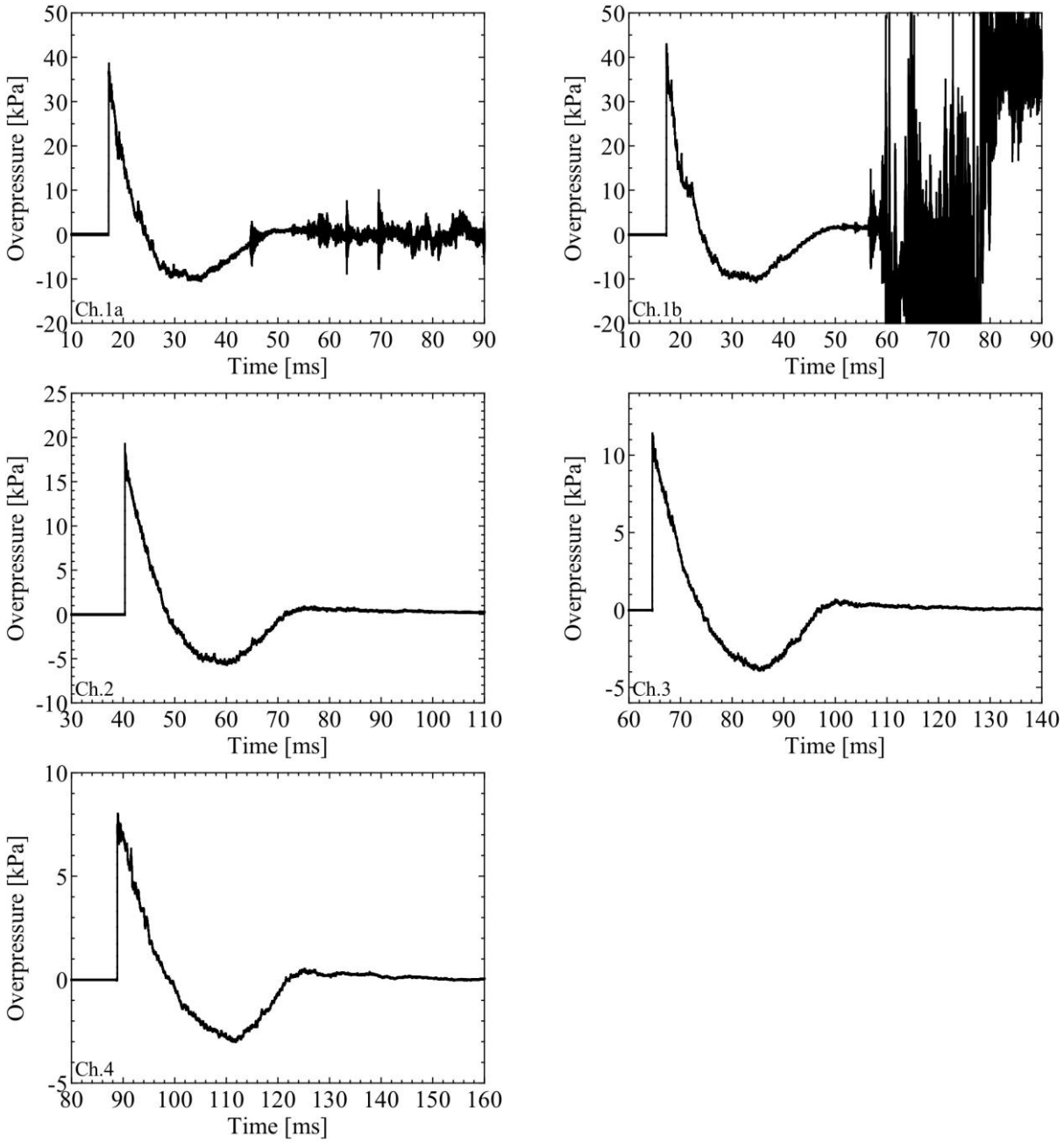


図 4.1-72　No1-2　0º 方向

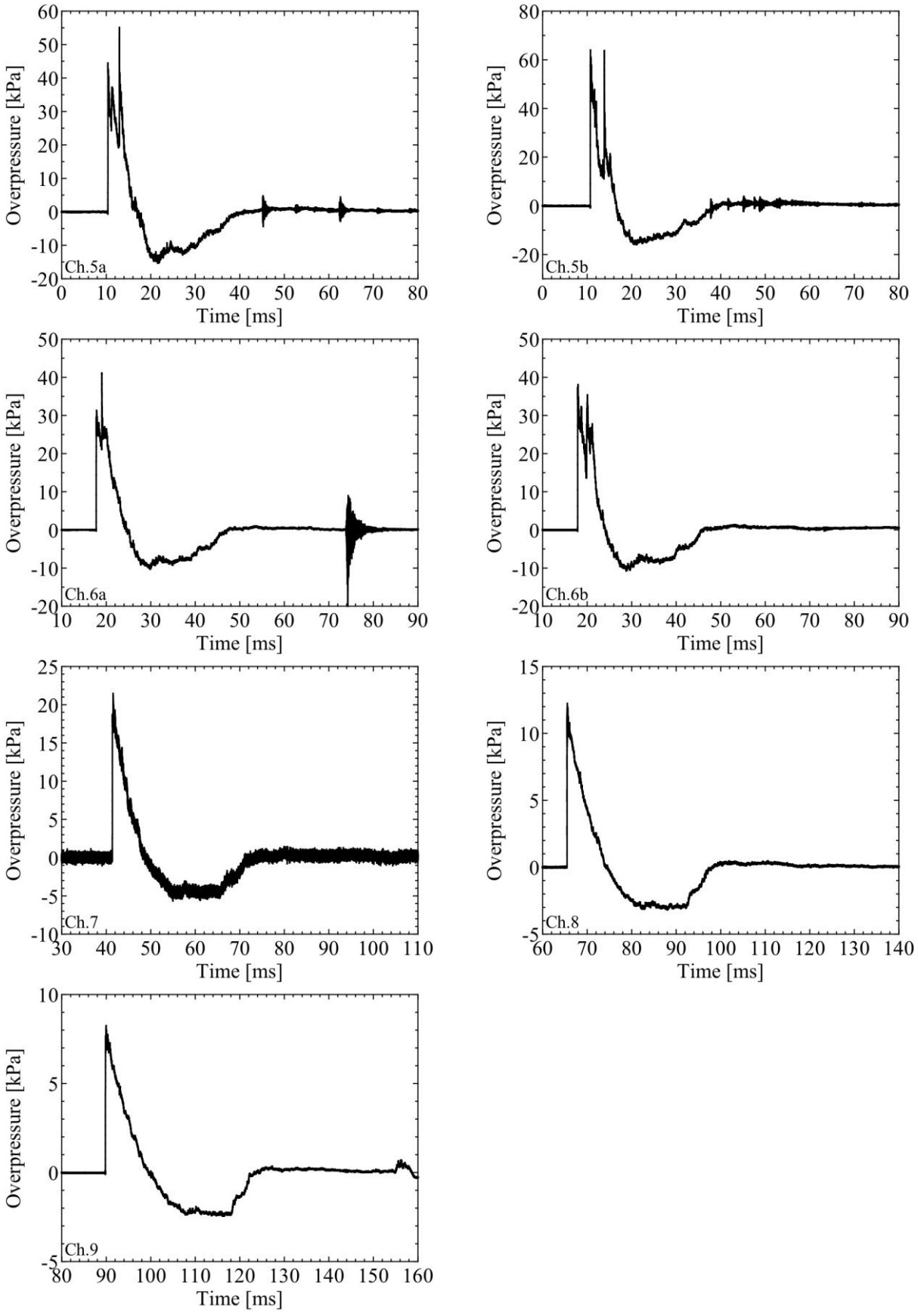


図 4.1-73　No1-2　45º 方向

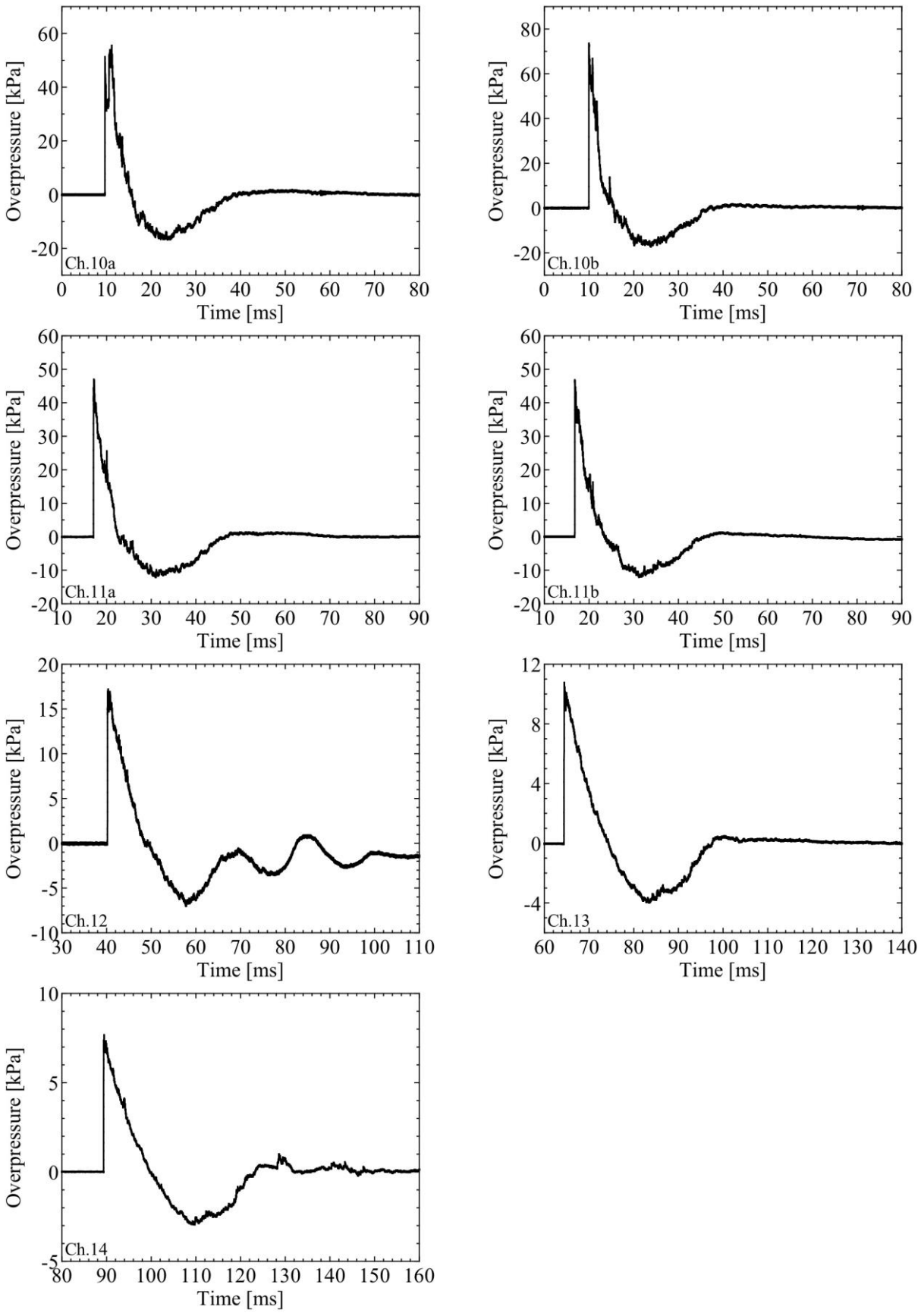


図 4.1-74　No1-2　135º 方向

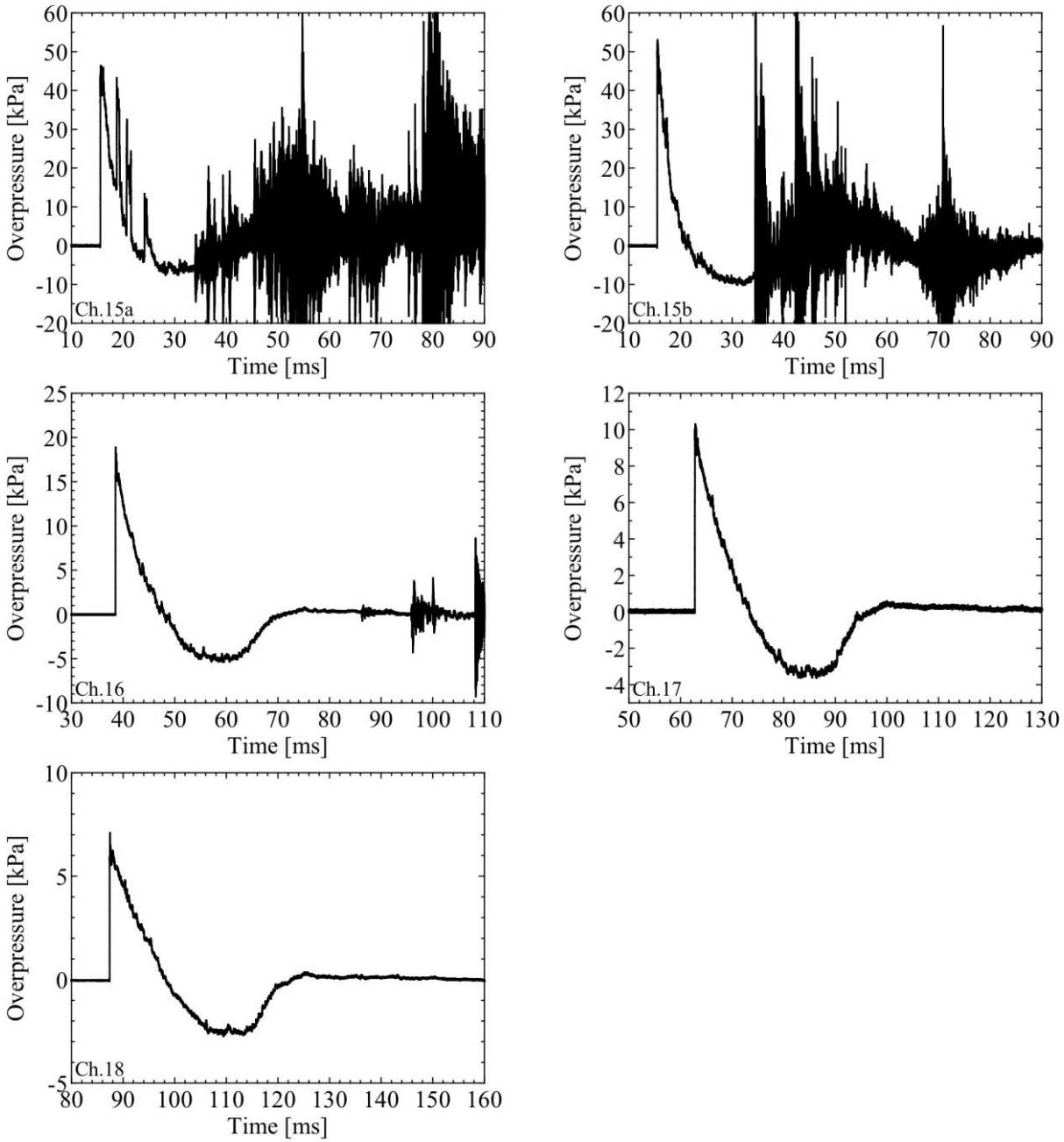


図 4.1-75　No1-2　180º 方向

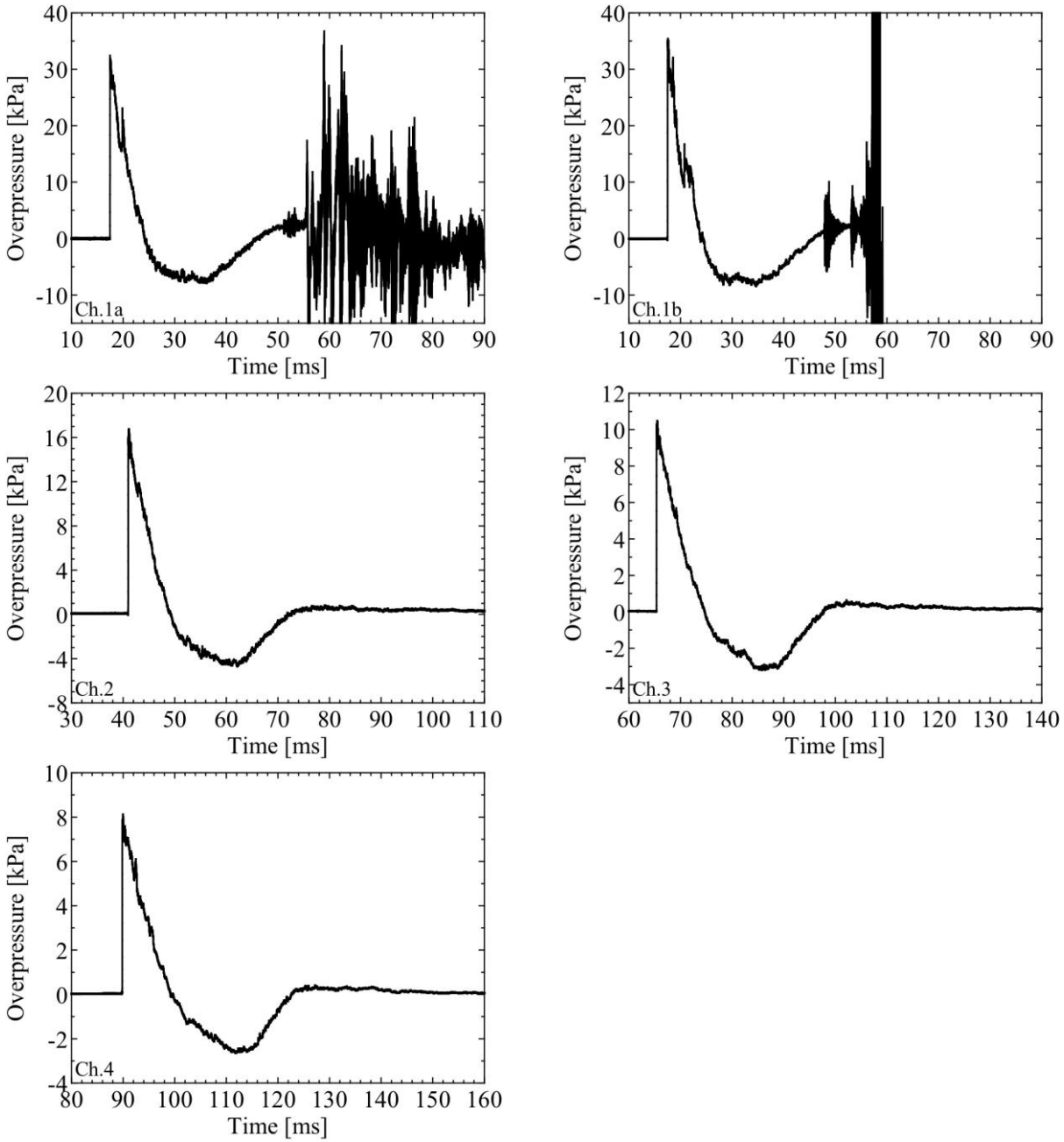


図 4.1-76　No1-3　0º 方向

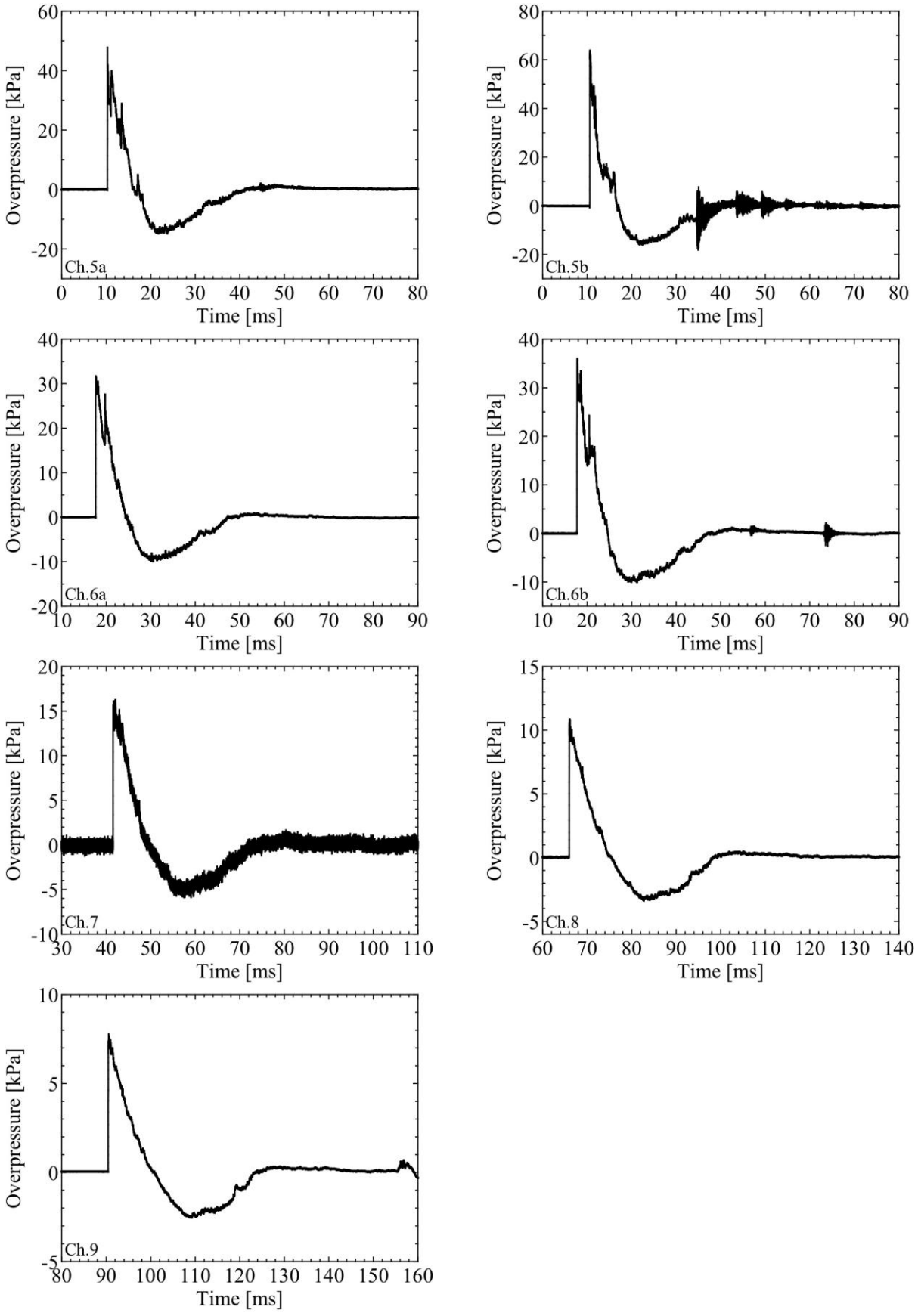


図 4.1-77　No1-3　45º 方向

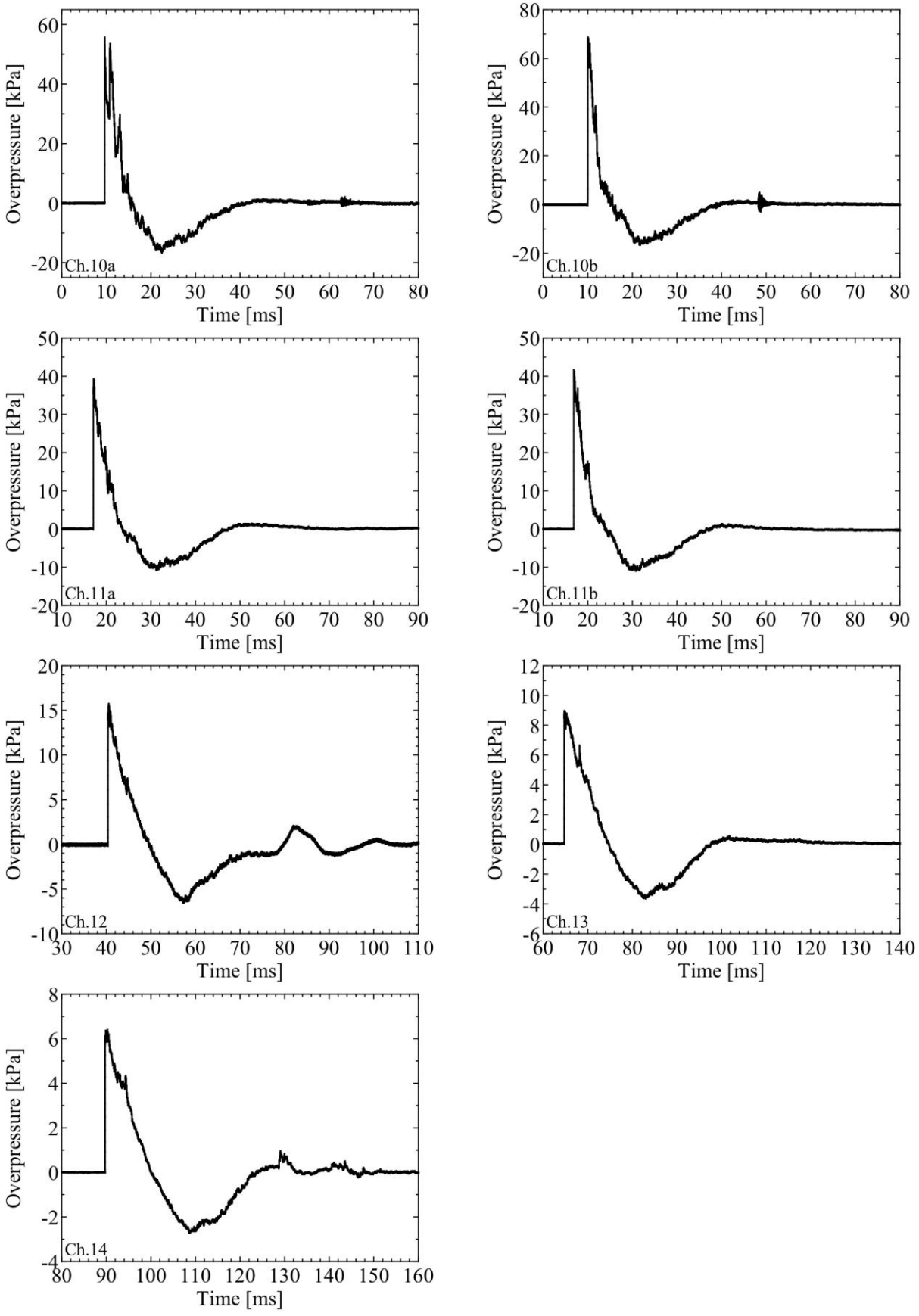


図 4.1-78　No1-3　135º 方向

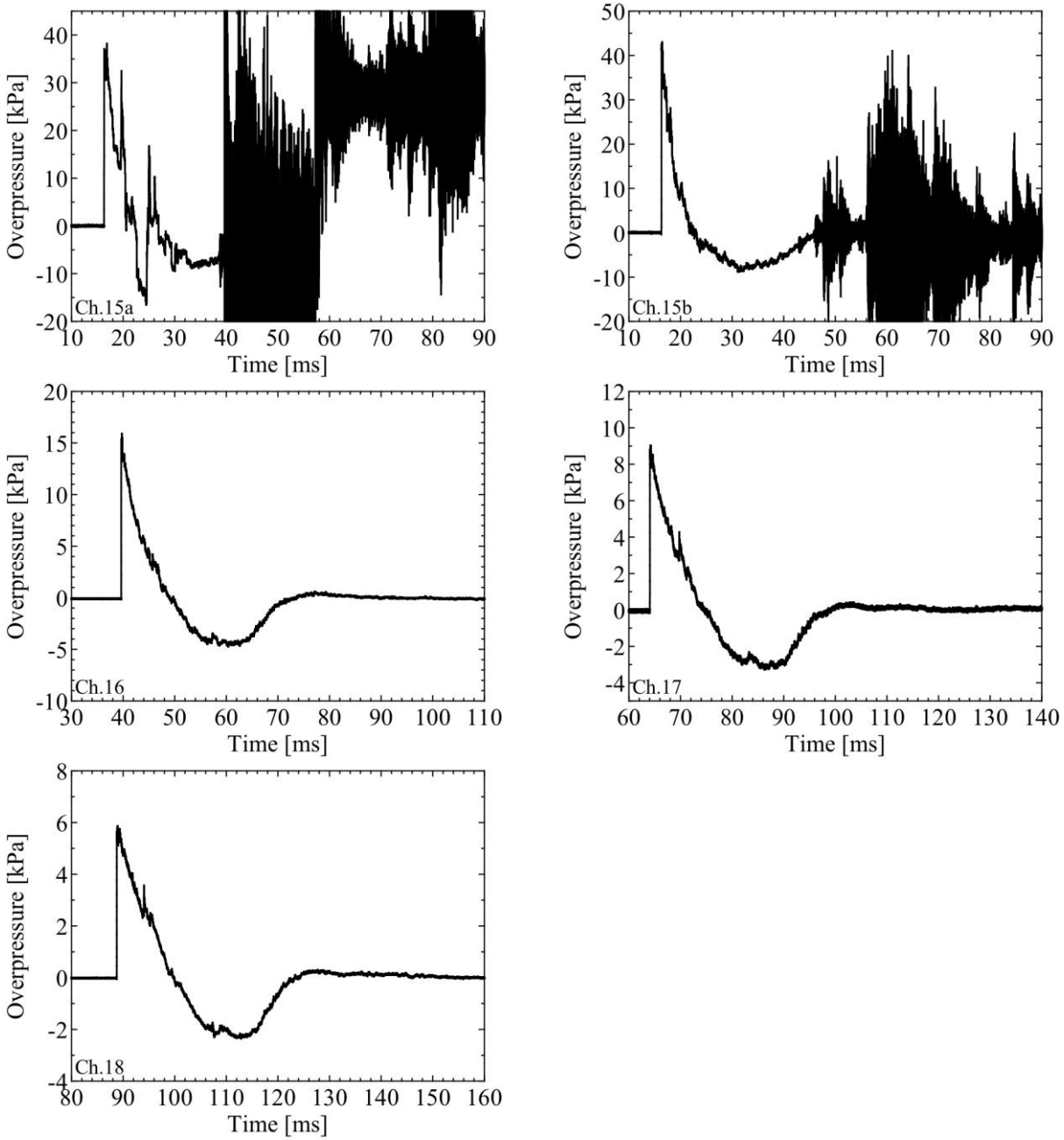


図 4.1-79　No1-3　180º 方向

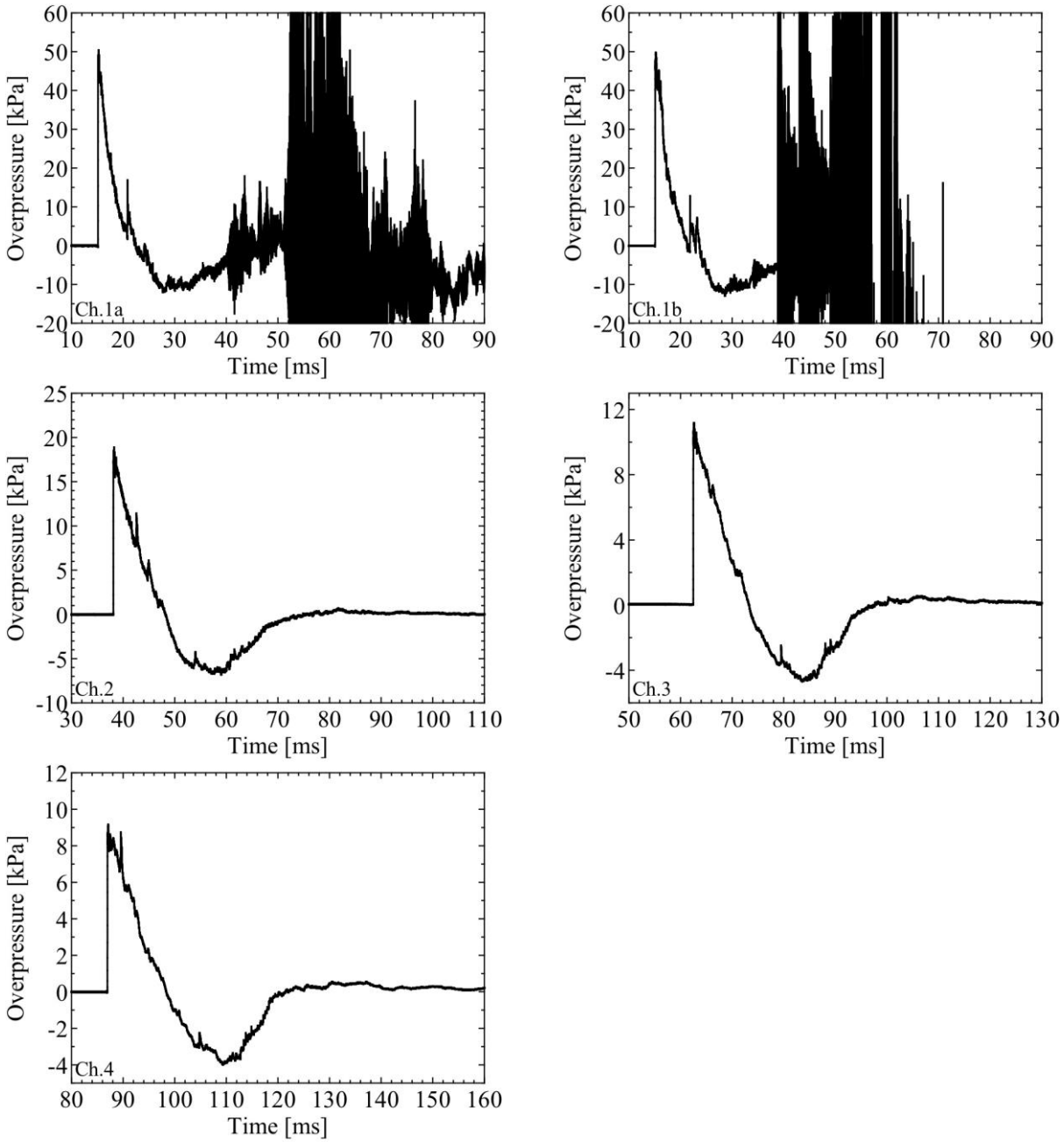


図 4.1-80　No1-4　0º 方向

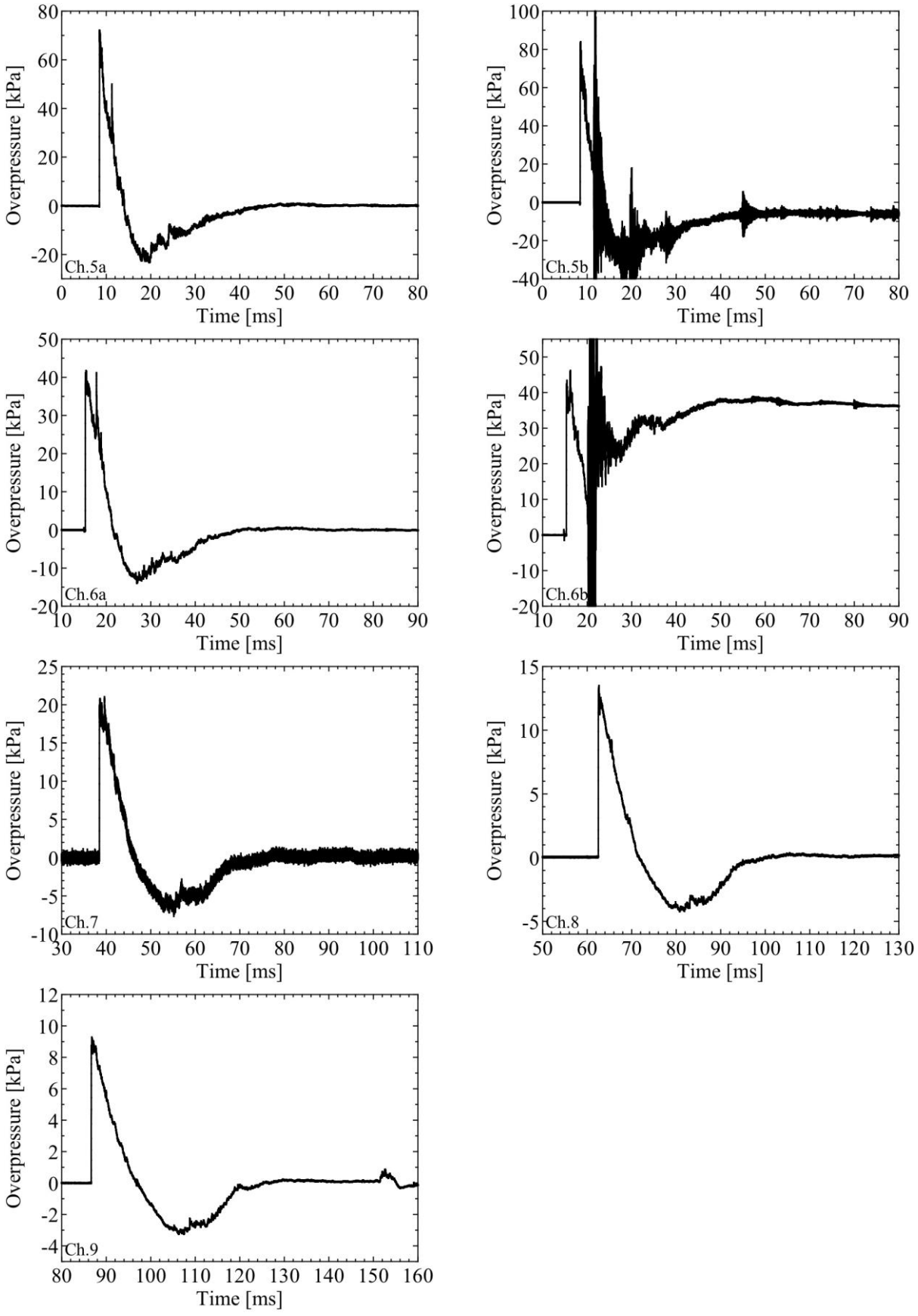


図 4.1-81　No1-4　45º 方向

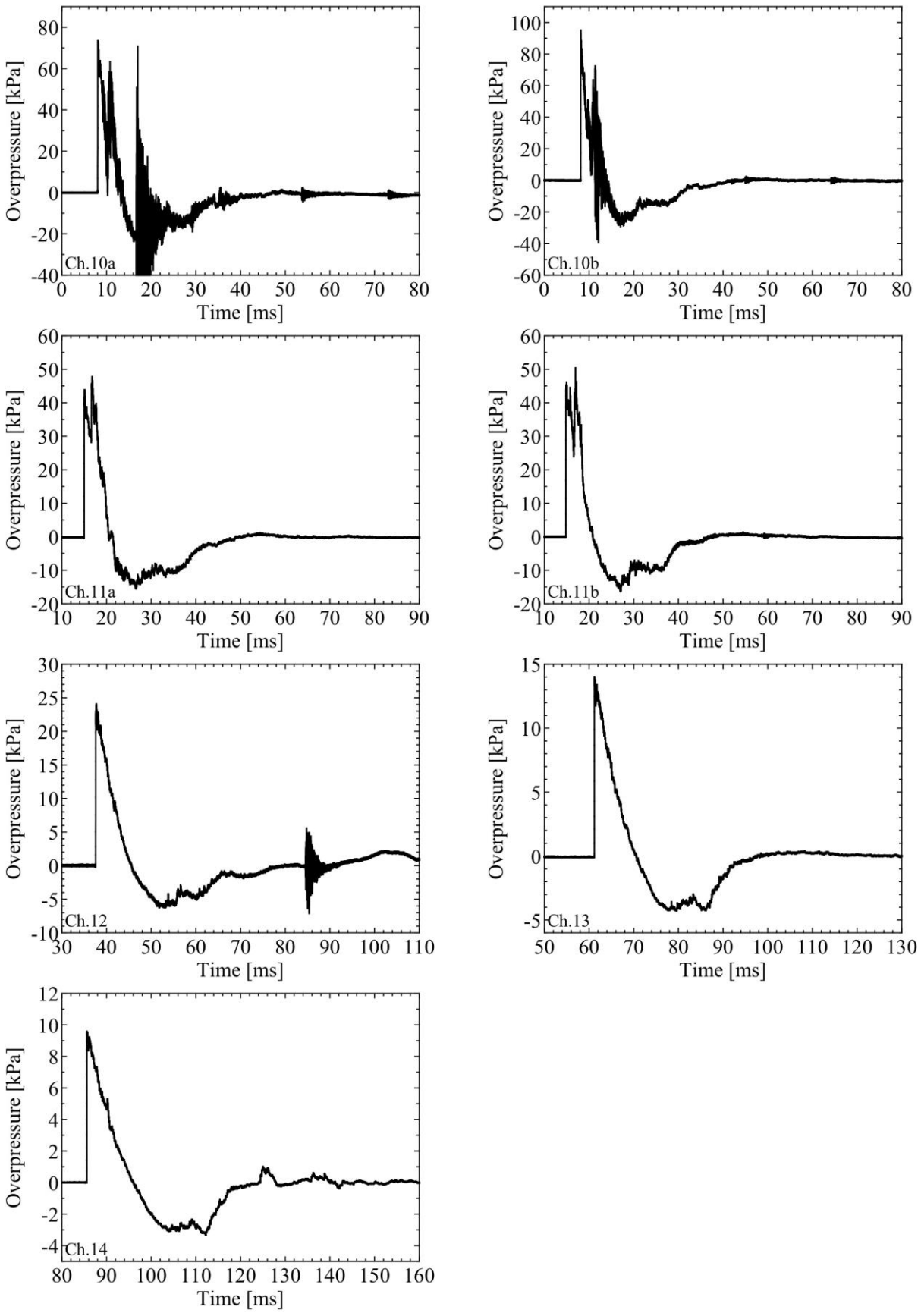


図 4.1-82　No1-4　135º 方向

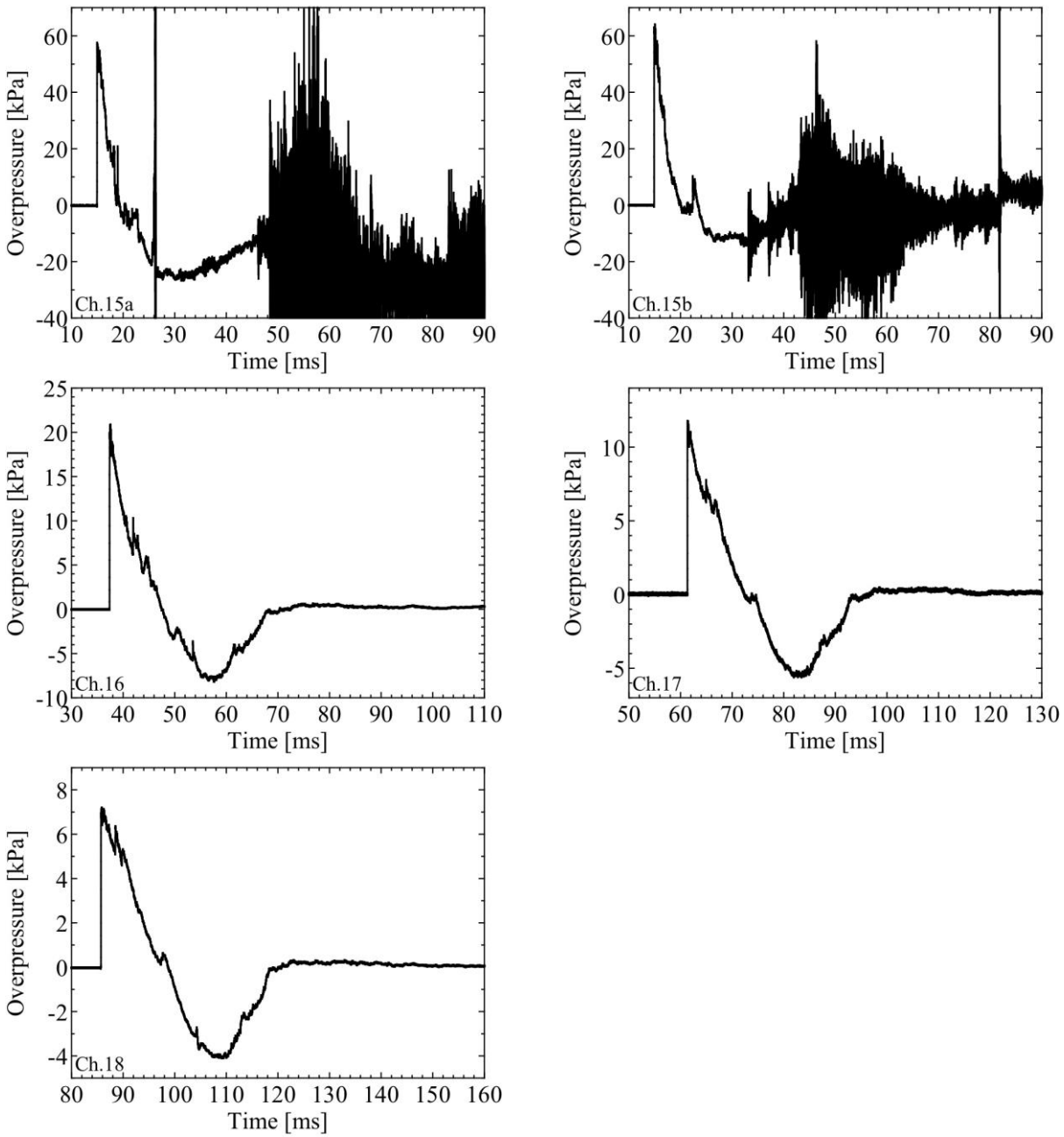


図 4.1-83　No1-4　180º 方向

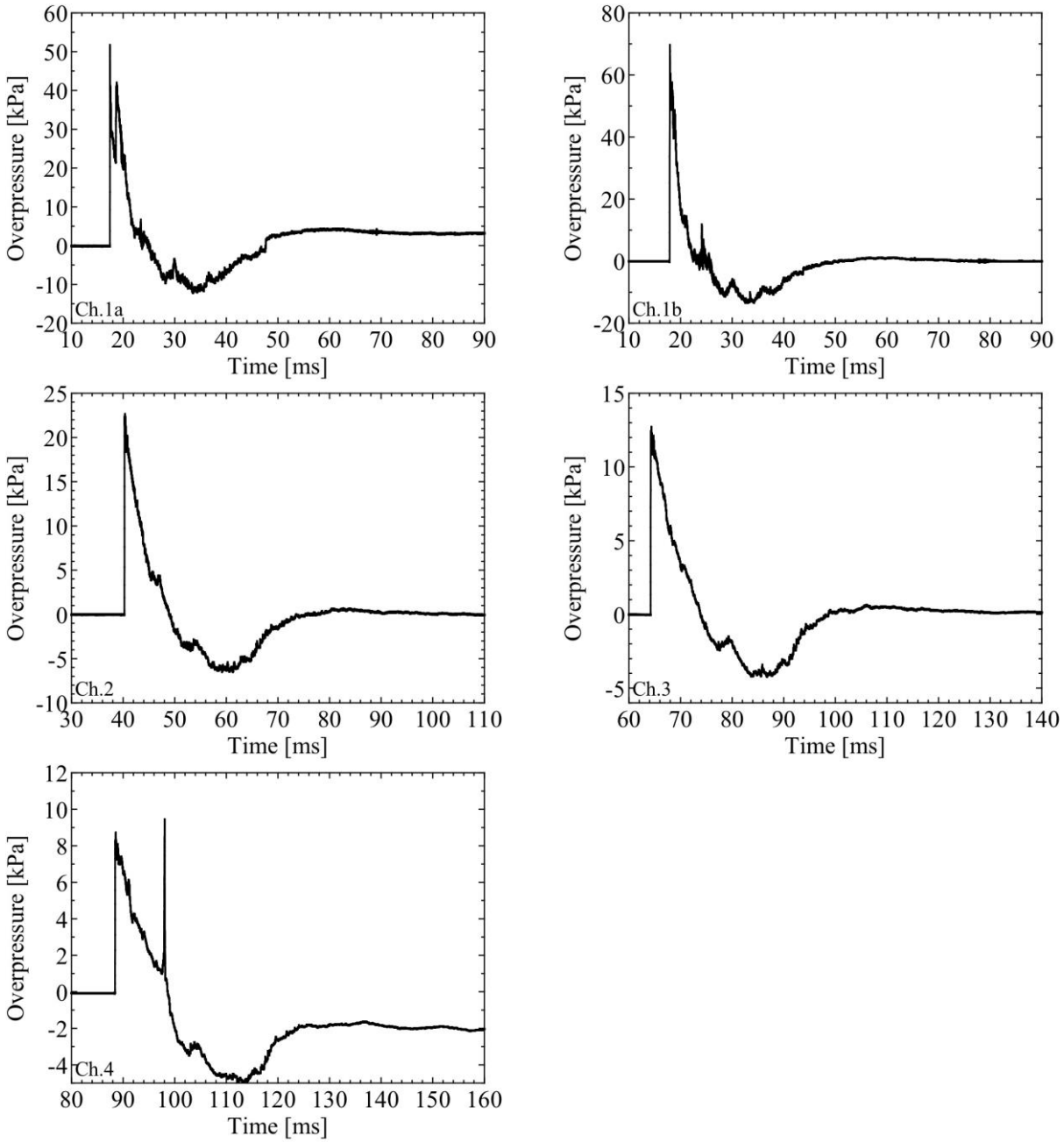


図 4.1-84　No1-5　0º 方向

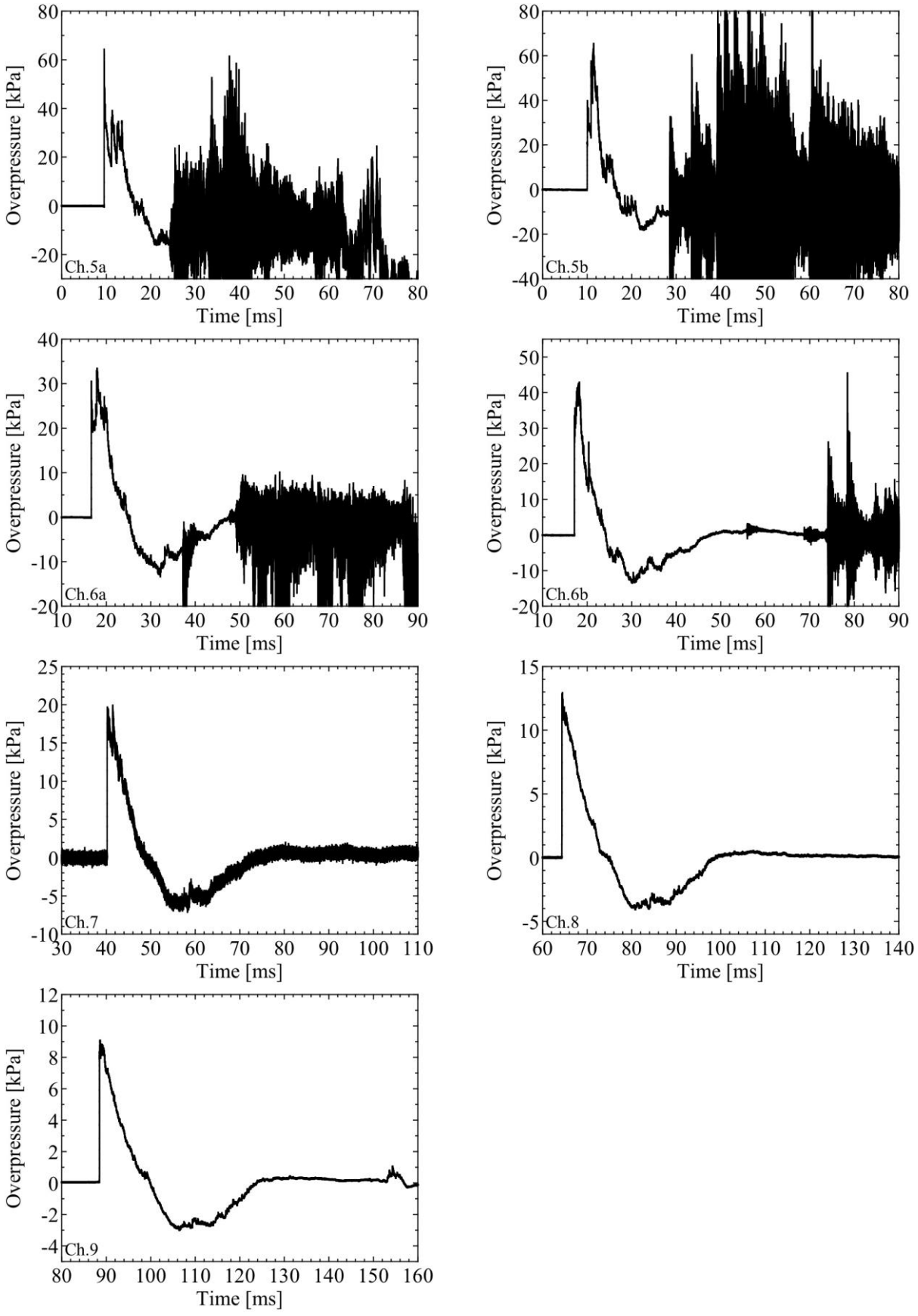


図 4.1-85　No1-5　45º 方向

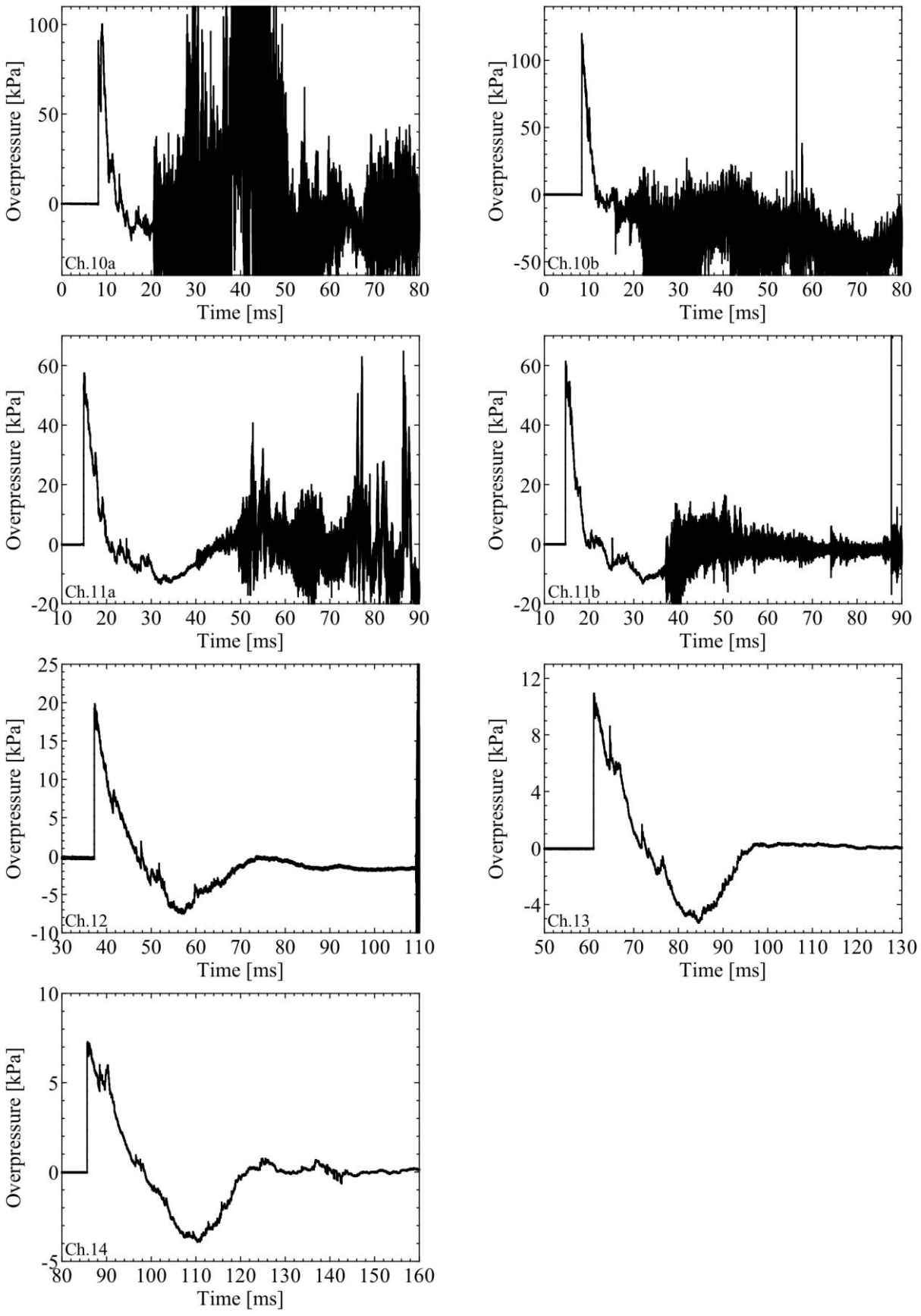


図 4.1-86　No1-5　135º 方向

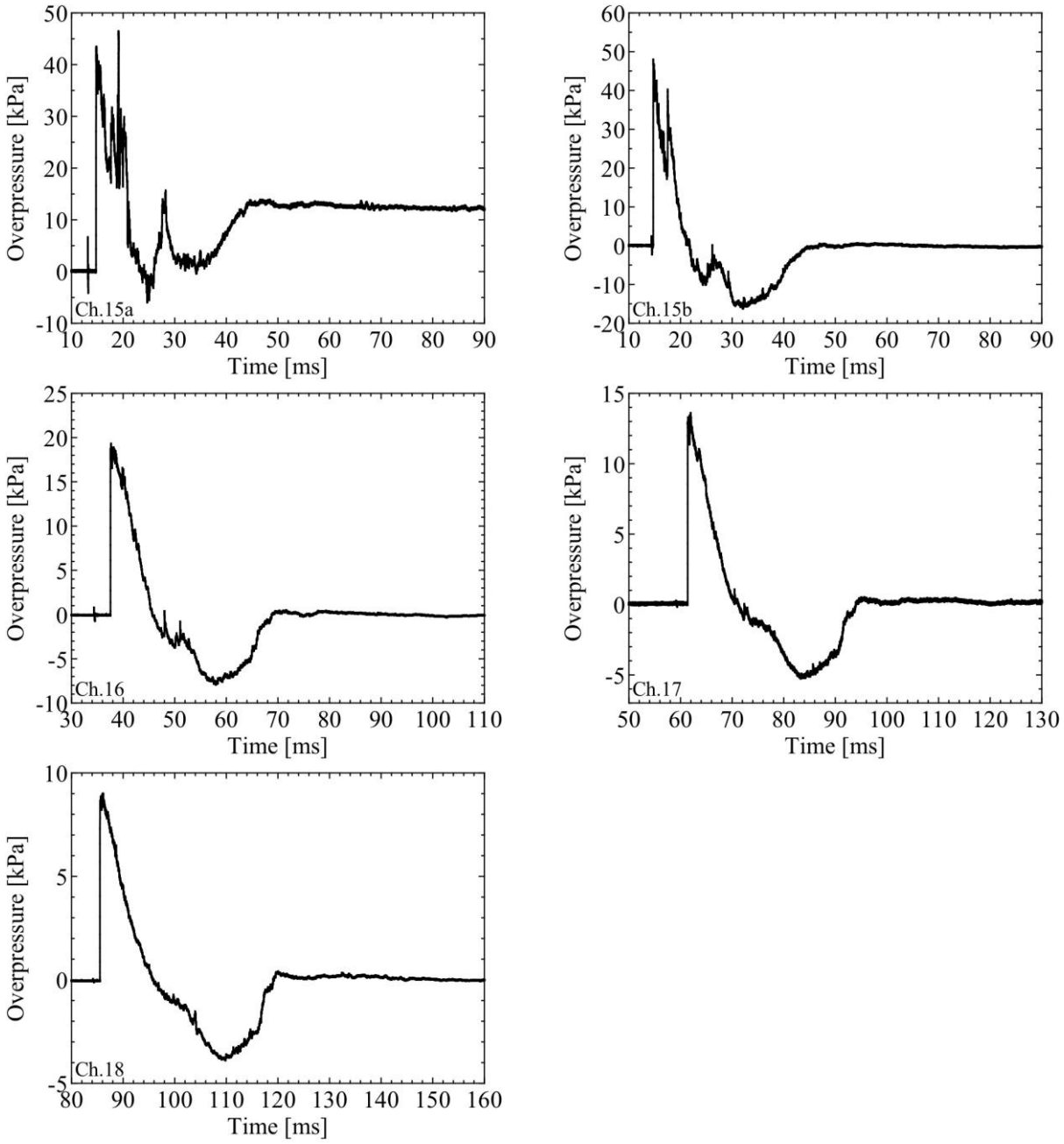


図 4.1-87　No1-5　180º 方向

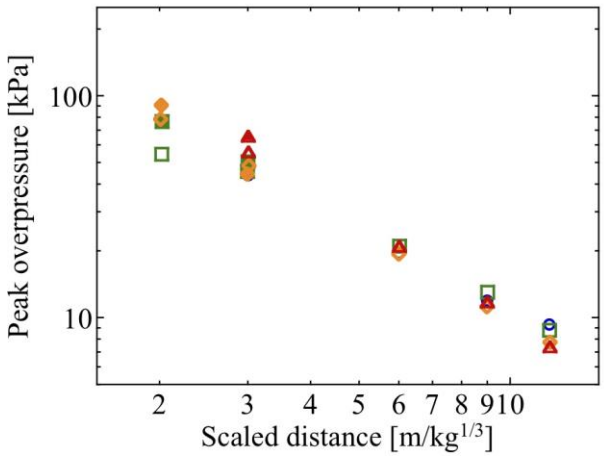
(2) 爆風パラメータ

得られた爆風波形は、自然スプライン関数により補間され、爆風パラメータ（ピーク静水過圧、正圧相インパルス、到達時刻、持続時間）を算出した。その結果を表 4.1-8～表 4.1-12 と図 4.1-88～図 4.1-92 に示す。なお、実験では EMX2 を 15.49 kg を使用したが、2 トン煙火火薬庫の 1/4.396 スケールである 23.55 kg を用いて換算距離を求めた。

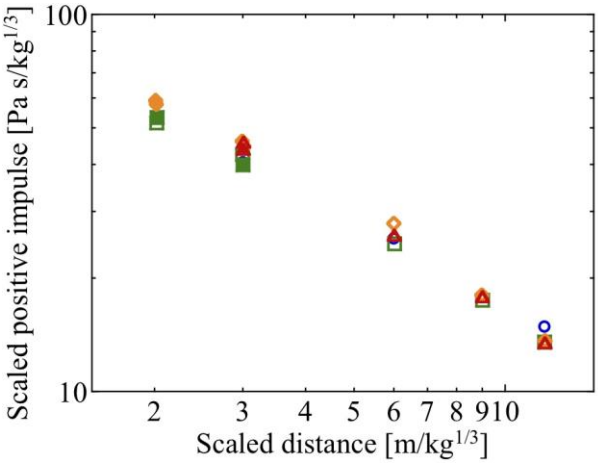
・No1-1 Ch.1a、No1-3 Ch.15a、No1-4 Ch.6b、No1-5 Ch.15a は正圧相において大きな振動によって波形が不連続的に変化してしまったため、ピーク静水過圧と到達時刻以外は括弧つきの参考値である。

表 4.1-8　No1-1 の爆風パラメータ

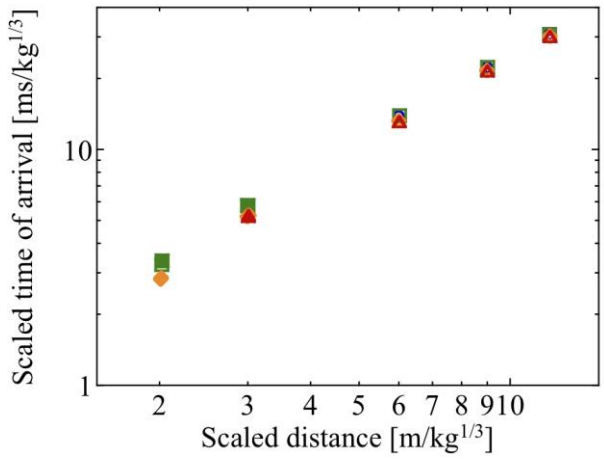
	角度 (º)	換算距離 ($m/kg^{1/3}$)	ピーク静水過圧 (kPa)	正圧相インパルス (Pa s)	到達時刻 (ms)	持続時間 (ms)
Ch.1a	0	3.00	43.85	105.05	16.70	4.81
Ch.1b		3.00	45.21	116.16	16.65	6.88
Ch.2		5.99	19.57	73.02	39.69	8.50
Ch.3		8.99	11.93	50.99	63.80	9.51
Ch.4		11.96	9.32	42.62	88.13	10.63
Ch.5a	45	2.02	54.50	147.75	9.32	5.65
Ch.5b		2.02	76.55	152.71	9.66	5.59
Ch.6a		2.99	45.64	121.79	16.59	6.43
Ch.6b		3.00	50.46	114.44	16.60	6.82
Ch.7		6.02	20.99	70.66	39.80	7.38
Ch.8		9.01	13.01	50.07	63.85	9.34
Ch.9		11.98	8.77	38.76	88.07	10.40
Ch.10a	135	2.01	78.44	169.42	8.09	5.87
Ch.10b		2.02	90.65	165.55	8.19	5.55
Ch.11a		3.01	48.39	127.87	15.08	5.70
Ch.11b		2.99	44.40	132.12	14.90	6.24
Ch.12		5.99	19.37	79.99	37.96	9.45
Ch.13		8.98	11.21	51.64	61.95	10.07
Ch.14		12.00	7.75	39.11	86.78	10.35
Ch.15a	180	3.01	55.84	131.27	15.03	5.87
Ch.15b		3.00	65.76	125.74	14.90	5.28
Ch.16		6.01	21.00	74.45	37.57	9.34
Ch.17		9.01	11.76	51.11	61.67	10.68
Ch.18		11.99	7.40	38.53	86.17	11.13



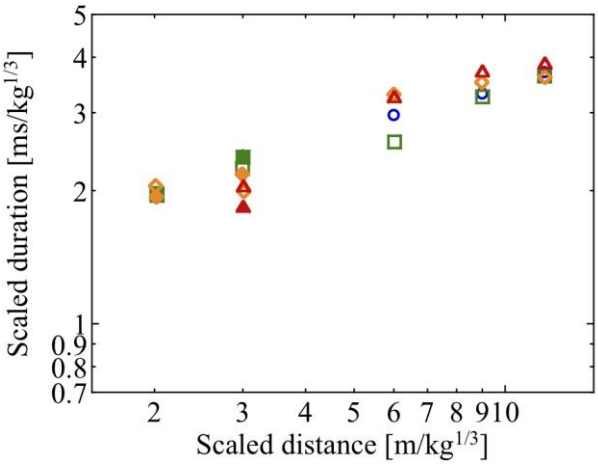
(a) 換算距離対ピーク静水過圧



(b) 換算距離対換算正圧相インパルス



(a) 換算距離対換算到達時刻

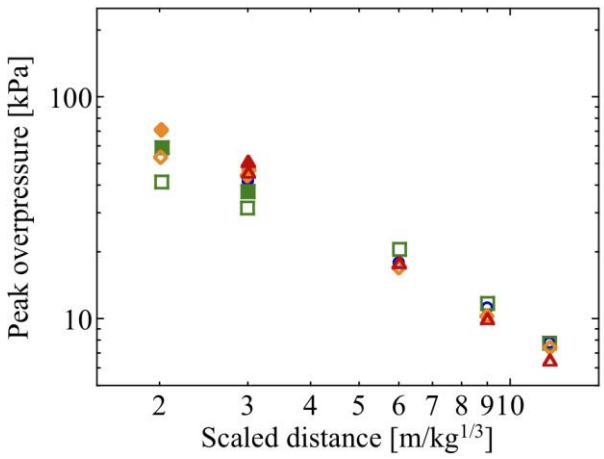


(b) 換算距離対換算持続時間

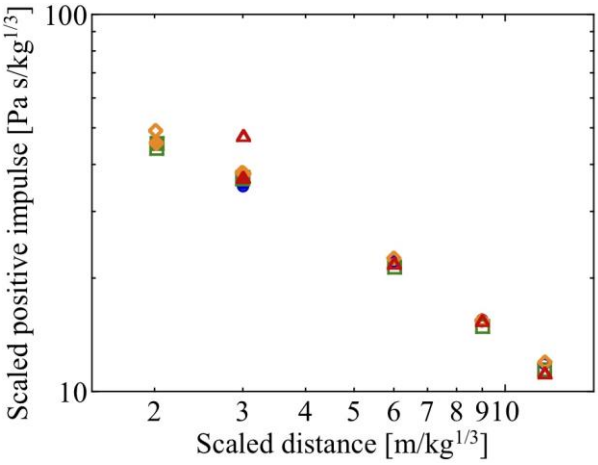
図 4.1-88　No1-1 の爆風パラメータ

表 4.1-9　No1-2 の爆風パラメータ

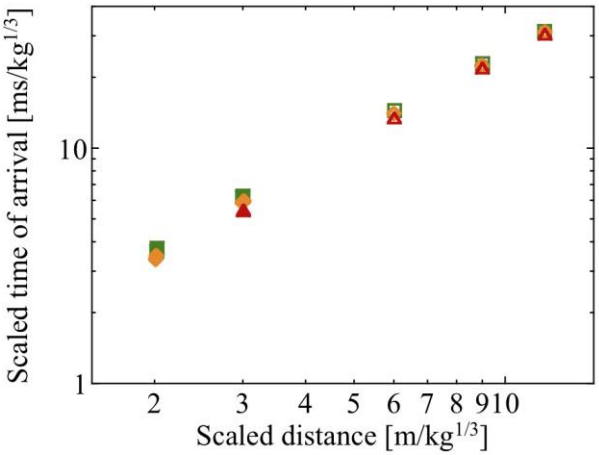
	角度 (º)	換算距離 ($m/kg^{1/3}$)	ピーク静水過圧 (kPa)	正圧相インパルス (Pa s)	到達時刻 (ms)	持続時間 (ms)
Ch.1a	0	3.00	37.37	100.39	17.21	7.16
Ch.1b		3.00	41.88	102.26	17.32	6.77
Ch.2		5.99	17.95	63.44	40.36	8.28
Ch.3		8.99	11.23	44.42	64.58	9.51
Ch.4		11.96	7.80	33.97	88.91	10.12
Ch.5a	45	2.02	41.29	126.49	10.44	6.49
Ch.5b		2.02	58.98	130.35	10.77	5.76
Ch.6a		2.99	31.52	104.93	17.77	6.77
Ch.6b		3.00	37.39	105.94	17.93	6.15
Ch.7		6.02	20.51	61.25	41.42	7.41
Ch.8		9.01	11.73	42.62	65.53	8.95
Ch.9		11.98	7.76	32.73	89.86	9.68
Ch.10a	135	2.01	53.36	140.97	9.66	6.04
Ch.10b		2.02	70.87	130.64	10.02	5.52
Ch.11a		3.01	46.83	108.38	17.10	5.43
Ch.11b		2.99	44.17	109.13	16.82	6.64
Ch.12		5.99	16.96	64.66	40.25	8.50
Ch.13		8.98	10.27	44.22	64.41	9.96
Ch.14		12.00	7.42	34.28	89.36	10.29
Ch.15a	180	3.01	45.75	136.76	15.64	6.26
Ch.15b		3.00	51.08	105.98	15.54	6.16
Ch.16		6.01	17.87	62.74	38.52	9.40
Ch.17		9.01	9.99	44.18	62.79	10.51
Ch.18		11.99	6.51	32.09	87.46	10.79



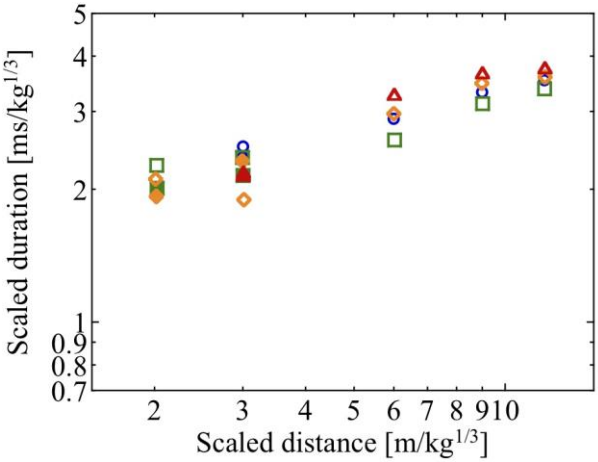
(a) 換算距離対ピーク静水過圧



(b) 換算距離対換算正圧相インパルス



(a) 換算距離対換算到達時刻

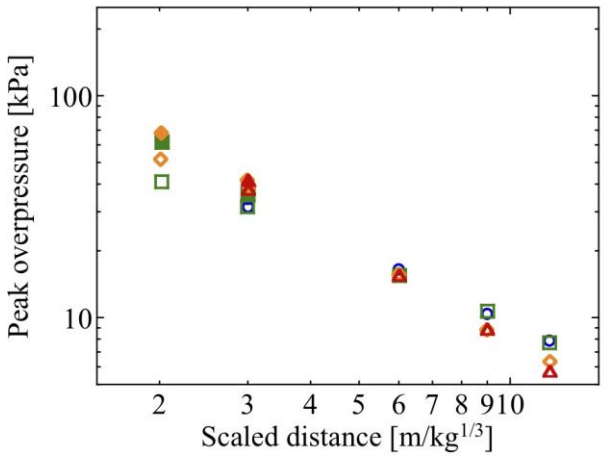


(b) 換算距離対換算持続時間

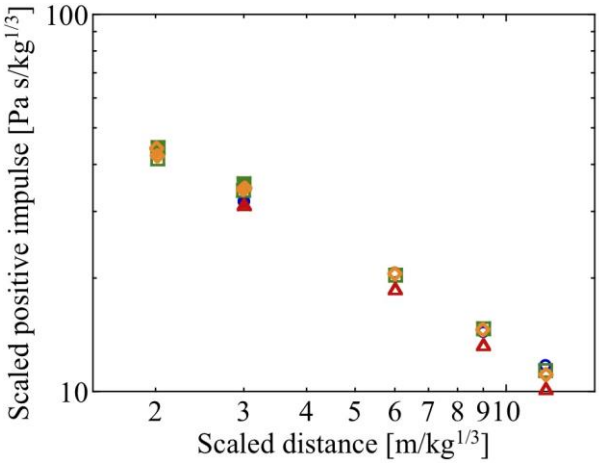
図 4.1-89　No1-2 の爆風パラメータ

表 4.1-10　No1-3 の爆風パラメータ

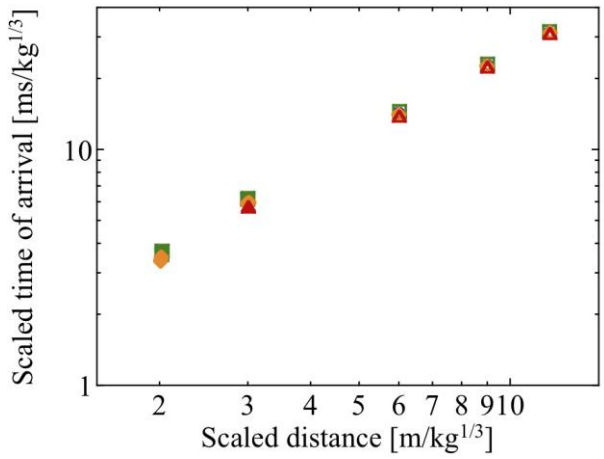
	角度 (º)	換算距離 (m/kg$^{1/3}$)	ピーク静水過圧 (kPa)	正圧相インパルス (Pa s)	到達時刻 (ms)	持続時間 (ms)
Ch.1a	0	3.00	31.54	91.54	17.49	6.66
Ch.1b		3.00	34.40	91.52	17.54	6.26
Ch.2		5.99	16.51	59.21	41.03	8.22
Ch.3		8.99	10.40	41.27	65.36	9.28
Ch.4		11.96	7.89	33.64	89.86	9.84
Ch.5a	45	2.02	40.97	118.70	10.27	5.98
Ch.5b		2.02	61.86	127.14	10.61	6.04
Ch.6a		2.99	31.61	97.82	17.65	7.05
Ch.6b		3.00	35.76	101.95	17.77	6.82
Ch.7		6.02	15.49	58.30	41.54	8.11
Ch.8		9.01	10.69	42.04	65.98	9.45
Ch.9		11.98	7.71	32.59	90.48	10.35
Ch.10a	135	2.01	51.72	126.49	9.66	6.21
Ch.10b		2.02	68.01	120.93	10.02	5.52
Ch.11a		3.01	39.16	99.21	17.10	6.54
Ch.11b		2.99	41.71	98.48	16.90	7.04
Ch.12		5.99	15.69	58.86	40.42	9.12
Ch.13		8.98	8.82	41.81	64.75	9.96
Ch.14		12.00	6.34	31.77	89.75	10.29
Ch.15a	180	3.01	37.94	(94.09)	16.37	(6.04)
Ch.15b		3.00	41.59	89.70	16.34	6.24
Ch.16		6.01	15.54	53.66	39.63	9.34
Ch.17		9.01	8.86	38.15	64.08	10.51
Ch.18		11.99	5.74	29.15	88.80	10.96



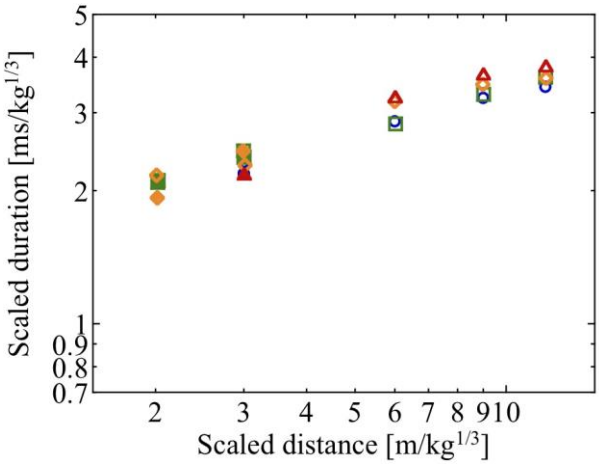
(a) 換算距離対ピーク静水過圧



(b) 換算距離対換算正圧相インパルス



(a) 換算距離対換算到達時刻

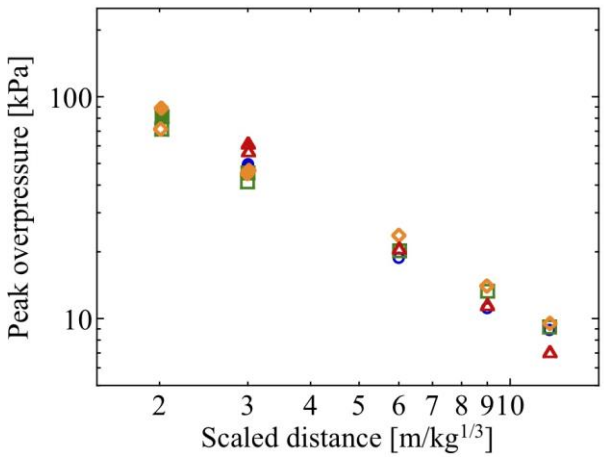


(b) 換算距離対換算持続時間

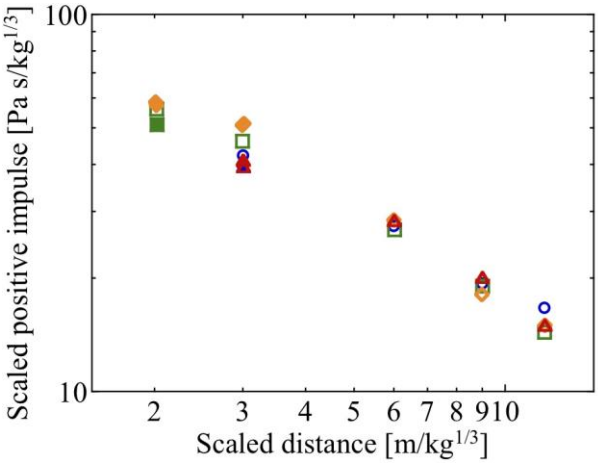
図 4.1-90　No1-3 の爆風パラメータ

表 4.1-11　No1-4 の爆風パラメータ

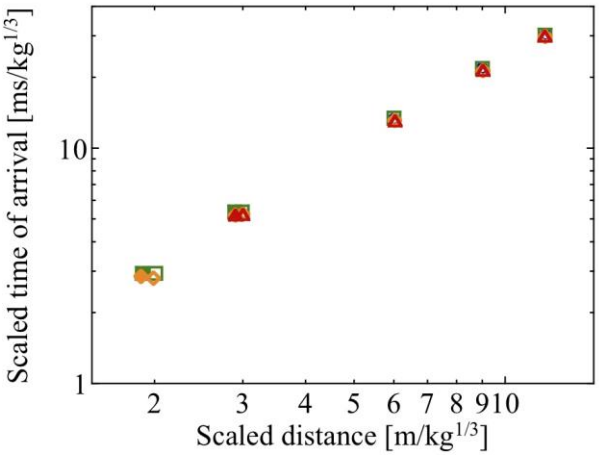
	角度 (º)	換算距離 (m/kg$^{1/3}$)	ピーク静水過圧 (kPa)	正圧相インパルス (Pa s)	到達時刻 (ms)	持続時間 (ms)
Ch.1a		3.00	49.70	121.26	15.14	7.27
Ch.1b		3.00	48.82	114.19	15.14	6.10
Ch.2	0	5.99	18.81	78.78	38.12	10.07
Ch.3		8.99	11.16	55.46	62.51	10.74
Ch.4		11.96	8.90	47.80	87.01	11.35
Ch.5a		2.02	71.40	160.88	8.43	5.59
Ch.5b		2.02	81.36	146.28	8.43	4.64
Ch.6a		2.99	41.34	132.10	15.36	6.15
Ch.6b	45	3.00	45.37	127.57	15.36	4.92
Ch.7		6.02	20.24	76.97	38.46	7.89
Ch.8		9.01	13.30	54.55	62.51	9.17
Ch.9		11.98	9.17	41.16	86.67	10.35
Ch.10a		2.01	71.48	167.95	8.03	5.65
Ch.10b		2.02	88.75	164.63	8.18	5.12
Ch.11a		3.01	46.53	147.17	15.03	6.38
Ch.11b	135	2.99	45.05	145.66	14.90	5.92
Ch.12		5.99	23.72	81.68	37.62	7.94
		8.98	14.02	51.87	61.22	9.34
Ch.14		12.00	9.52	42.97	85.61	10.35
Ch.15a		3.01	57.08	113.04	14.97	4.42
Ch.15b		3.00	61.90	117.70	14.90	5.12
Ch.16	180	6.01	20.79	81.35	37.40	10.07
Ch.17		9.01	11.56	57.50	61.34	11.02
Ch.18		11.99	7.10	42.95	85.72	13.03



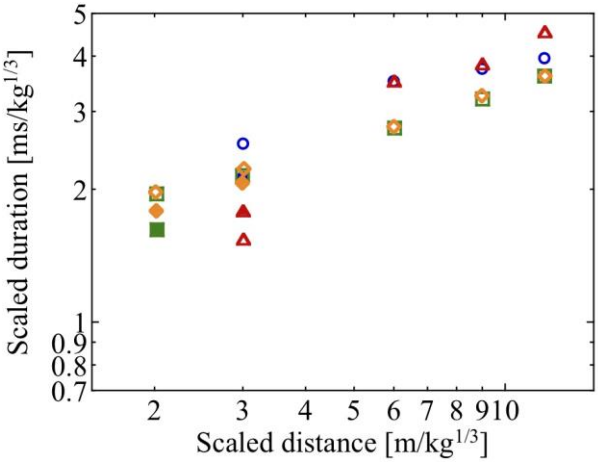
(a) 換算距離対ピーク静水過圧



(b) 換算距離対換算正圧相インパルス



(a) 換算距離対換算到達時刻

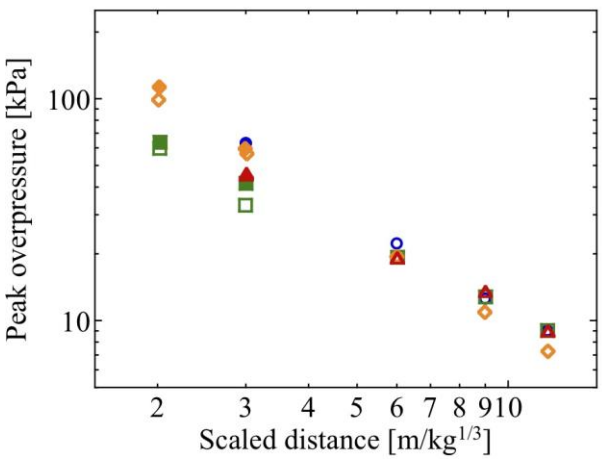


(b) 換算距離対換算持続時間

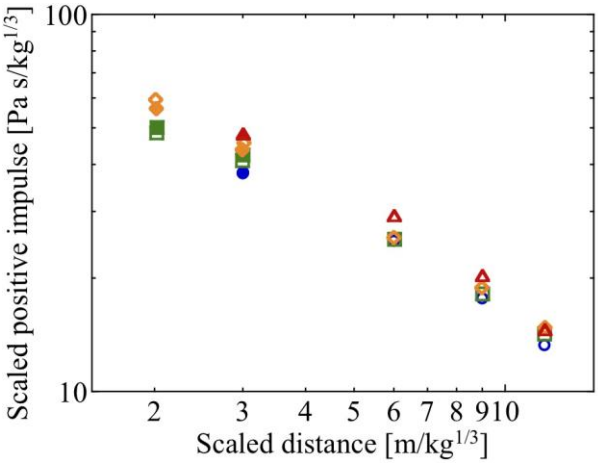
図 4.1-91　No1-4 の爆風パラメータ

表 4.1-12　No1-5 の爆風パラメータ

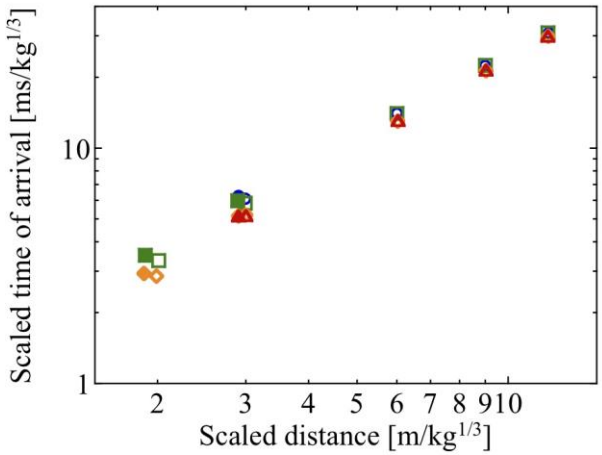
	角度 (º)	換算距離 (m/kg$^{1/3}$)	ピーク静水過圧 (kPa)	正圧相インパルス (Pa s)	到達時刻 (ms)	持続時間 (ms)
Ch.1a	0	3.00	42.62	109.21	17.49	7.49
Ch.1b		3.00	63.11	108.83	17.93	6.88
Ch.2		5.99	22.28	71.99	40.31	8.56
Ch.3		8.99	12.57	50.68	64.24	9.56
Ch.4		11.96	9.04	38.09	88.46	10.12
Ch.5a	45	2.02	59.86	139.05	9.54	8.50
Ch.5b		2.02	63.67	143.67	10.05	6.54
Ch.6a		2.99	33.16	117.36	16.70	8.05
Ch.6b		3.00	41.58	121.53	17.15	7.05
Ch.7		6.02	19.30	72.59	40.25	8.61
Ch.8		9.01	12.80	52.03	64.36	10.24
Ch.9		11.98	9.03	40.74	88.52	11.30
Ch.10a	135	2.01	98.88	170.34	8.20	3.92
Ch.10b		2.02	112.87	161.42	8.42	2.96
Ch.11a		3.01	56.56	130.87	14.91	5.43
Ch.11b		2.99	59.57	125.59	14.74	5.12
Ch.12		5.99	19.44	73.36	37.29	9.45
Ch.13		8.98	10.93	54.04	61.06	11.58
Ch.14		12.00	7.28	42.31	85.67	12.86
Ch.15a	180	3.01	46.04	(175.00)	14.80	(9.28)
Ch.15b		3.00	45.28	138.21	14.74	6.96
Ch.16		6.01	19.18	83.88	37.57	8.11
Ch.17		9.01	13.53	58.16	61.45	9.79
Ch.18		11.99	8.99	41.78	85.55	10.29



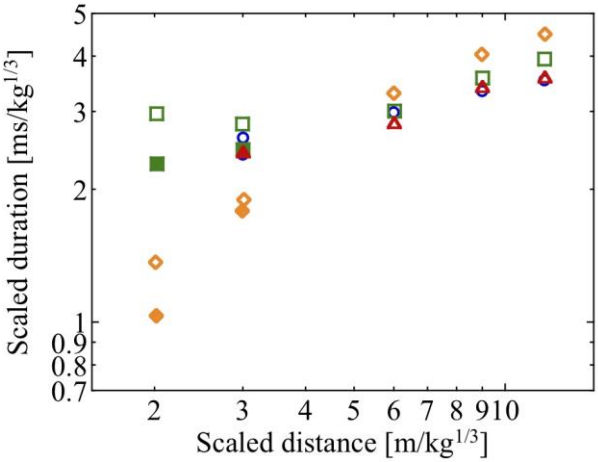
(a) 換算距離対ピーク静水過圧



(b) 換算距離対換算正圧相インパルス



(a) 換算距離対換算到達時刻



(b) 換算距離対換算持続時間

図 4.1-92　No1-5 の爆風パラメータ

爆風圧測定まとめ

新規構造を追加した No1 シリーズの爆風圧力の計測を行い、爆風パラメータをまとめた。基準となる No2-1 と No2-2 などとの比較は 4.2 節にて行う。

4.1.3.3　地盤振動計測結果

No.1-1 から No.1-5 における各計測点で計測した振動加速度の波形を図 4.1-93 から図 4.1-97 にそれぞれ示す。また、計測した加速度波形について、ベースラインや定常的に重畳されるノイズなとどの積分時の影響を取り除くためのローカットフィルタ付の積分を行い、速度成分に変換した速度波形を図 4.1-98 から図 4.1-102 にそれぞれ示す。地盤振動による人体や建物等への影響は、その周波数特性から振動加速度よりも振動速度による評価が適しているとされているため、No.1-1 から No.1-5 について、換算距離に対する最大変位速度（以下 PPV）を算出し図 4.1-103 に示した。地盤振動は縦波 (P 波)と横波 (SH 波、SV 波)の３成分を有するが PPV の評価においてはいくつかの評価値が用いられている。

・振動の地表面垂直成分の最大値(PPV_H)
・３方向の振動成分のうち最大となる(ピーク)成分の最大値
・３方向の振動成分の(ベクトル)合成値の最大値 (PPV_{true})
・３方向の各振動成分の最大値の二乗和平方根(SRSS: Square root of sum squares)

$$PPV_{SRSS} = \sqrt{PPV_x{}^2 + PPV_y{}^2 + PPV_z{}^2}$$

さらに、NATO AASTP-1[1]では、以下のように、水平成分と垂直成分の各振動成分の最大値の二乗和平方根が PPV として採用されている

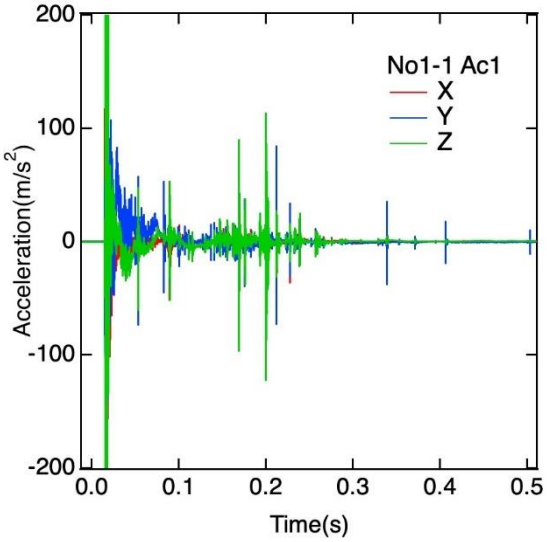
$$PPV_{NATO} = \sqrt{PPV_H{}^2 + PPV_V{}^2}$$

PPV_H = 水平方向の最大粒子速度
PPV_V = 垂直方向の最大粒子速度

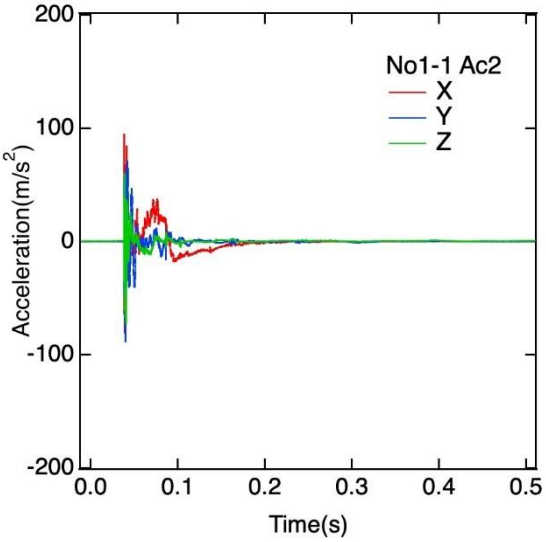
たとえば、二乗和平方根による最大変位速度は、各成分において最大値が（その発現時刻に関係なく）採用されるため最も保守的な値として報告されている。人体や建物への影響の観点からの振動レベルの基準ではピークが最大となる成分の値が指定されている[2,3]。また、３方向の振動成分の合成値の最大値は決まった時刻での合成ベクトルの最大値となるため、より正味の振動に近い値となる。今回の解析では上記の全ての PPV について算出を行いプロットしている。

図 4.1-93 中 No.1-1 の Ac4 の結果については、y 軸方向に異常波形が認められたため、センサー交換を行なった。このため本結果に関しては、土嚢保護による測定結果を使用し PPV 算出を行なっている。また、Ac2 の計測点における x 軸方向の測定結果 は一部に積分時に低周波成分に由来する異常に大きな振幅が確認できたため、この異常振幅に関しては PPV 評価から除外している。

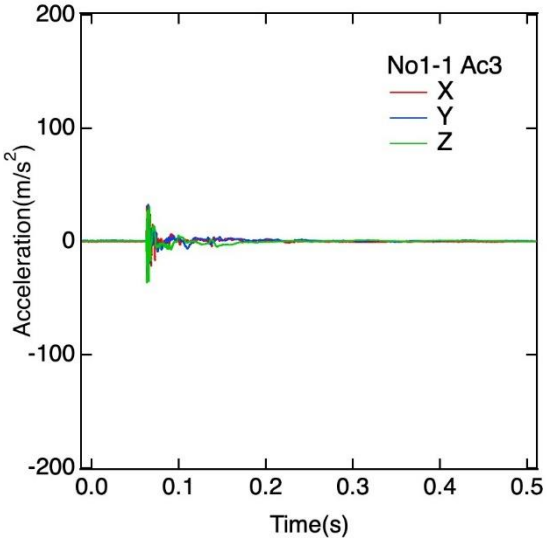
全ての試験における PPV_{SRSS} と換算距離をまとめたものが図 4.1-104 である。今回の試験においては、最も保守的な数値となる PPV_{SRSS} でも第一種・第二種保安物件における PPV 10 cm/s、第三種・第四種保安物件における PPV 40 cm/s の目標値 [4)]を下回っており、さらに防爆壁の種類による PPV_{SRSS} の有意な差は認められなかった。



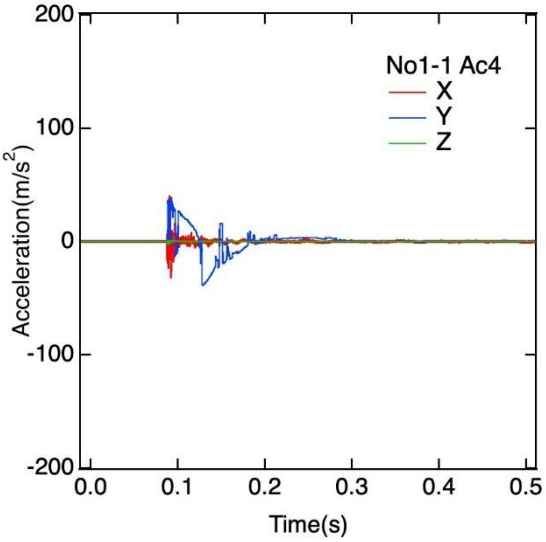
換算距離 3(8.60m)



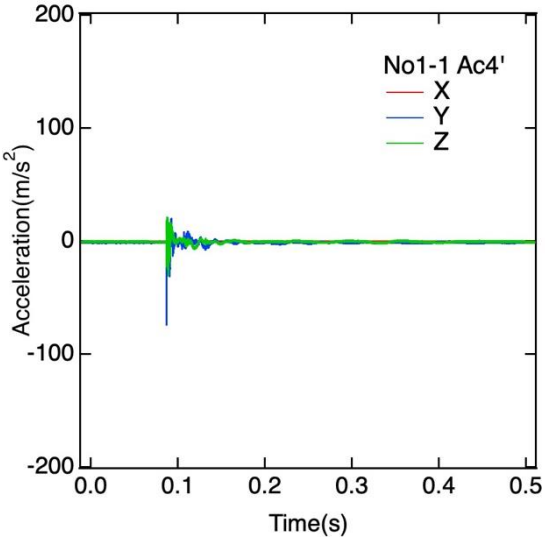
換算距離 6(17.2m)



換算距離 9(25.8m)

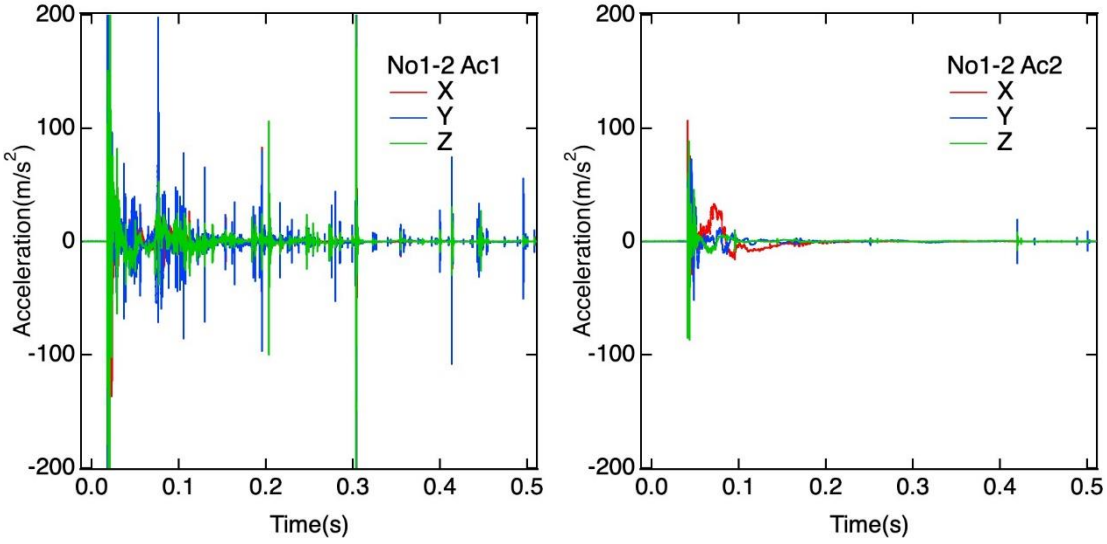


換算距離 12(34.4m)



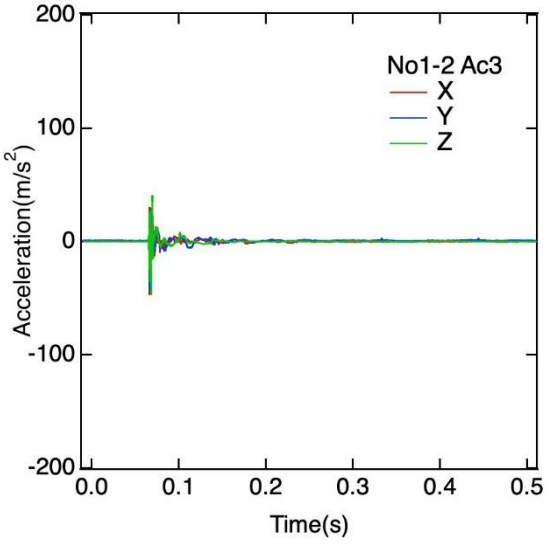
換算距離 12(34.4m) ※土嚢でセンサー保護した場合の計測結果

図 4.1-93　防爆壁　地盤振動加速度(No1-1)

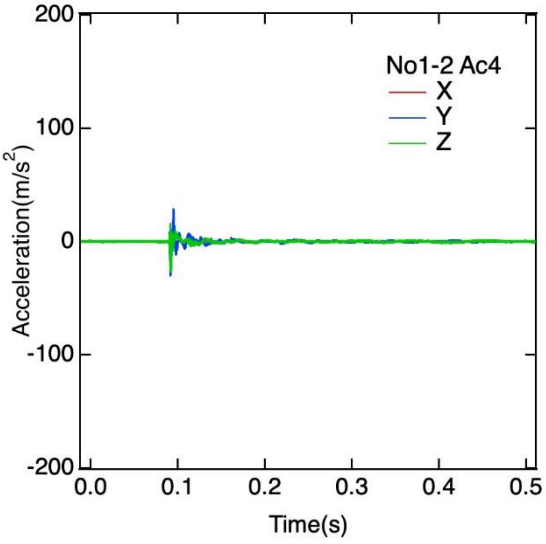


換算距離 3(8.60m)

換算距離 6(17.2m)

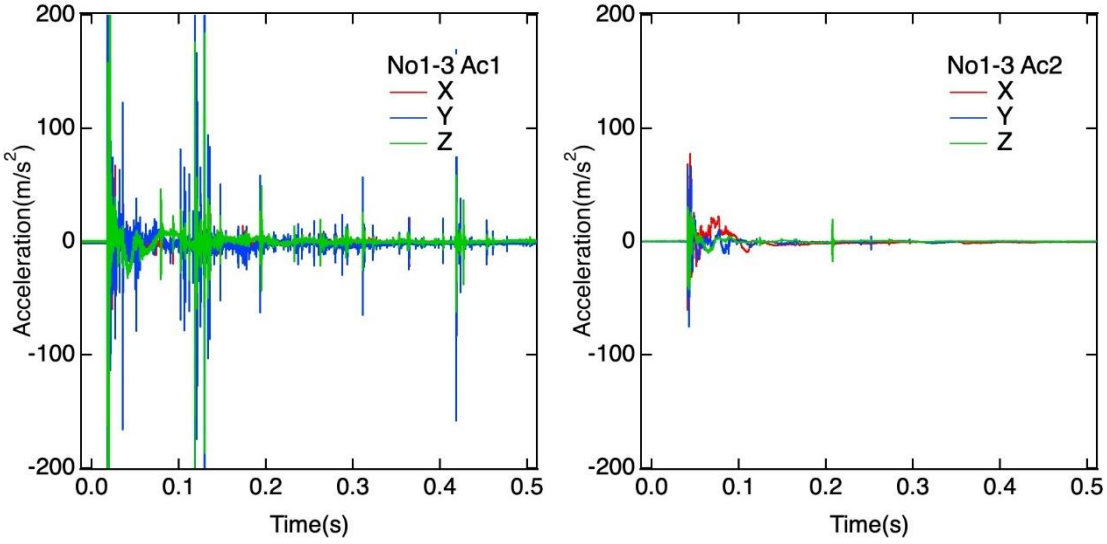


換算距離 9(25.8m)



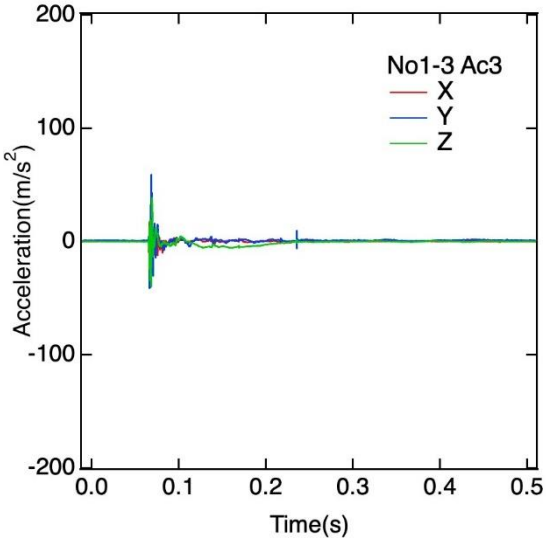
換算距離 12(34.4m)

図 4.1-94　防爆壁　地盤振動加速度(No1-2)

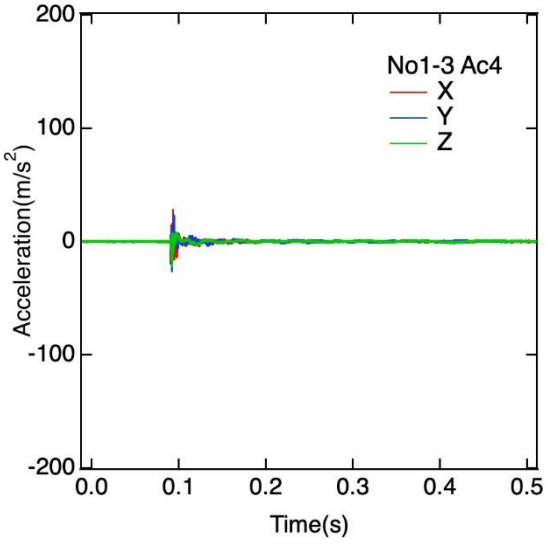


換算距離 3(8.60m)

換算距離 6(17.2m)

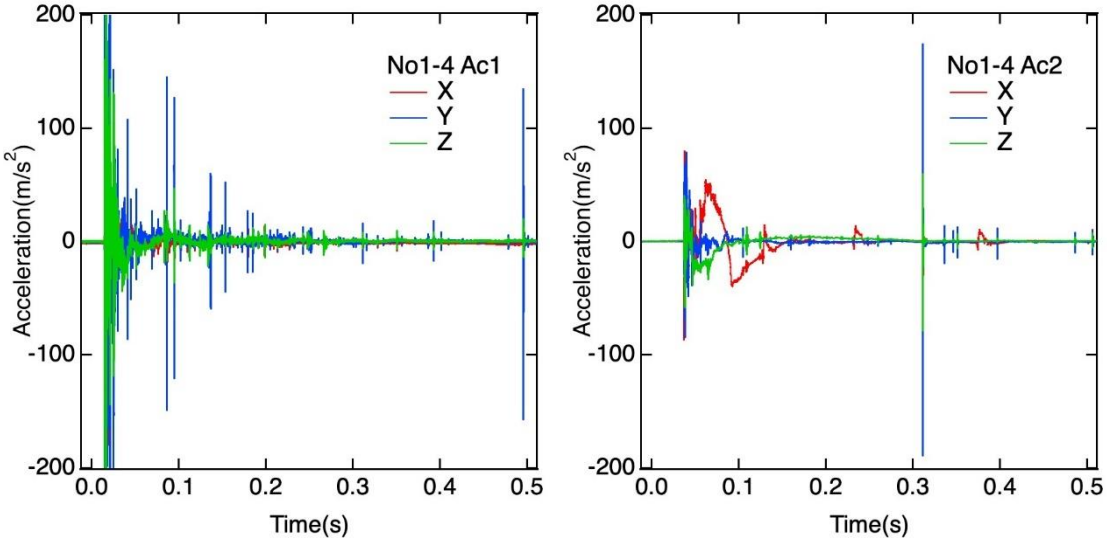


換算距離 9(25.8m)



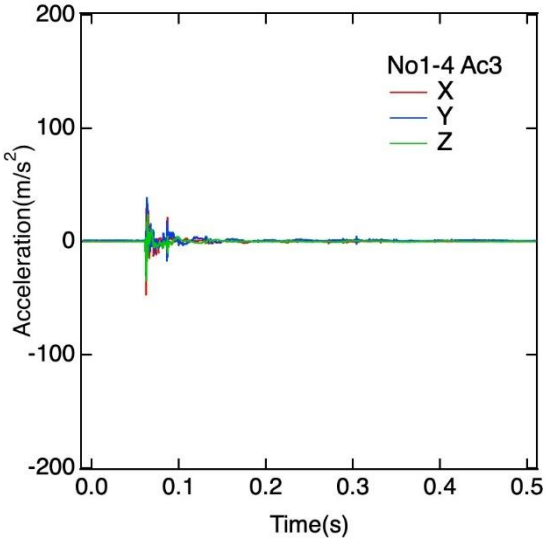
換算距離 12(34.4m)

図 4.1-95　防爆壁　地盤振動加速度(No1-3)

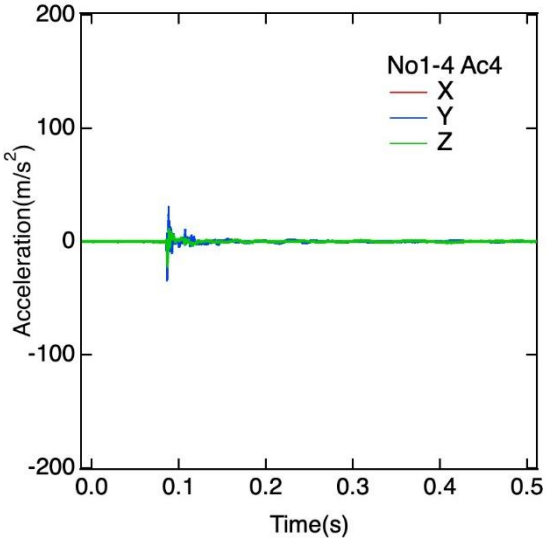


換算距離 3(8.60m)

換算距離 6(17.2m)

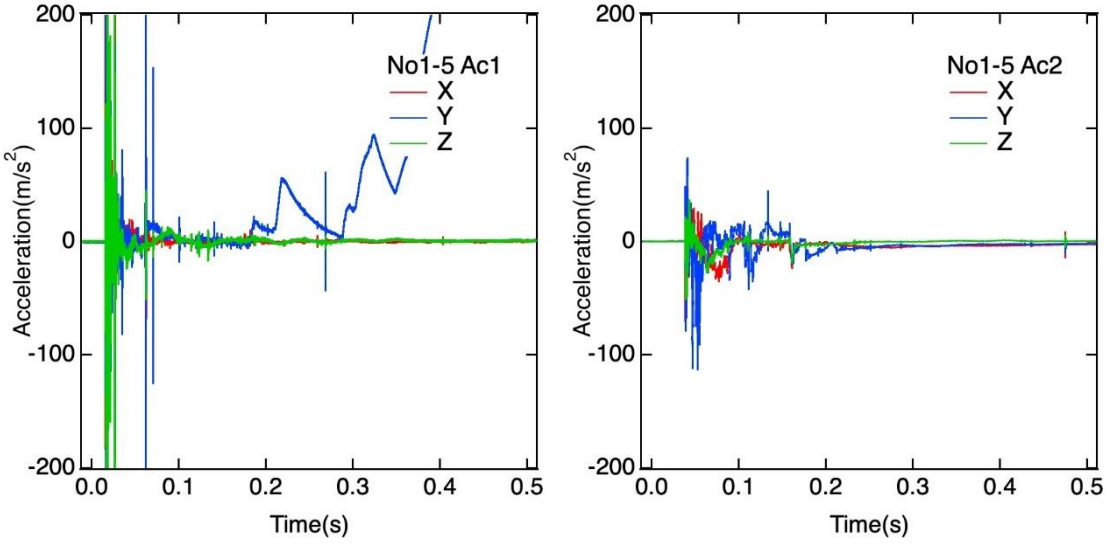


換算距離 9(25.8m)



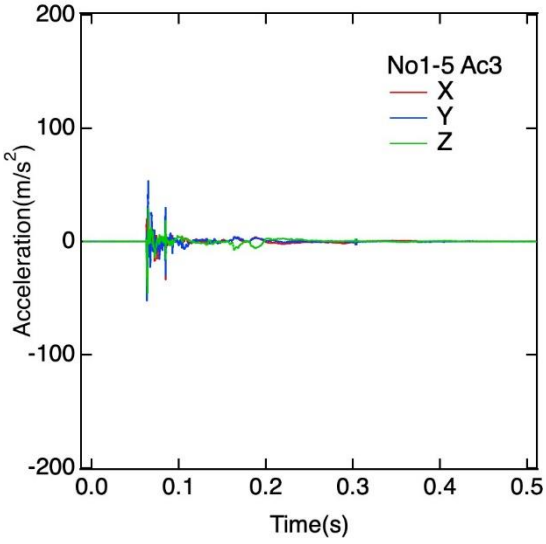
換算距離 12(34.4m)

図 4.1-96　防爆壁　地盤振動加速度(No1-4)

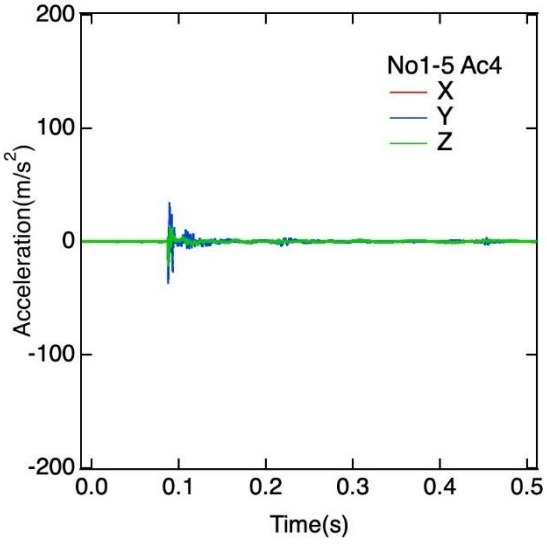


換算距離 3(8.60m)

換算距離 6(17.2m)

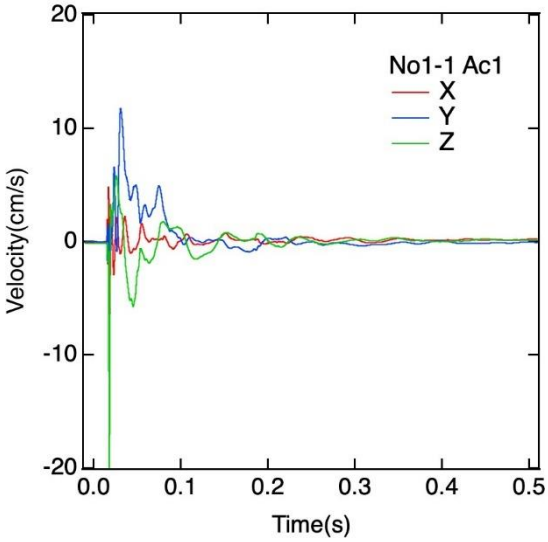


換算距離 9(25.8m)

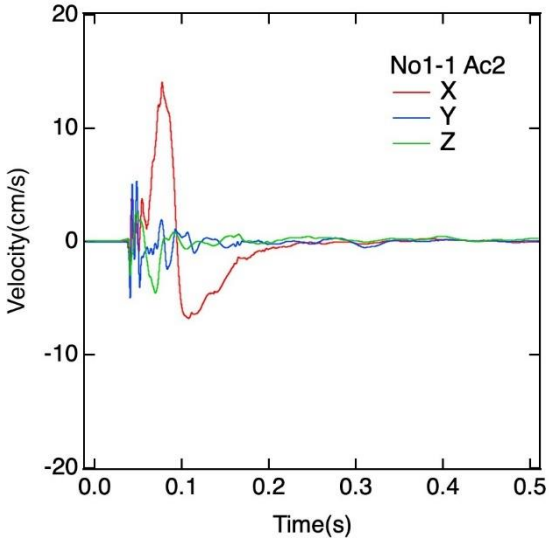


換算距離 12(34.4m)

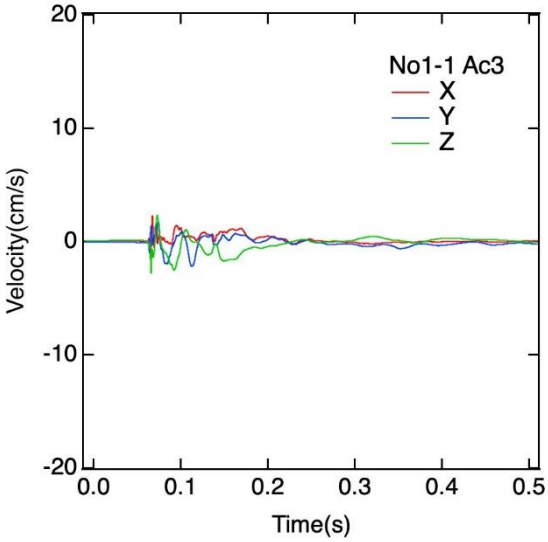
図 4.1-97　防爆壁　地盤振動加速度(No1-5)



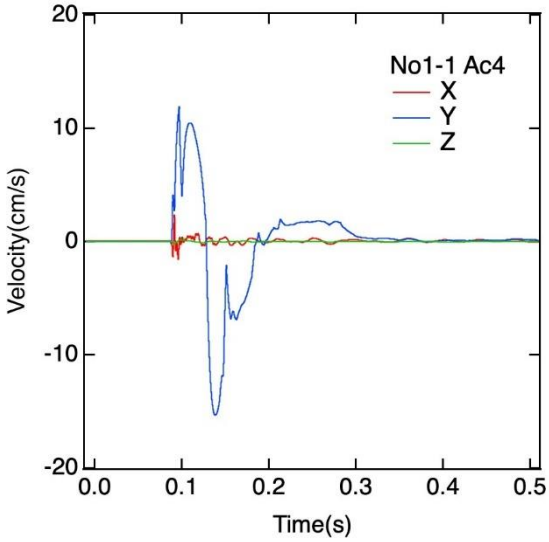
換算距離 3(8.60m)



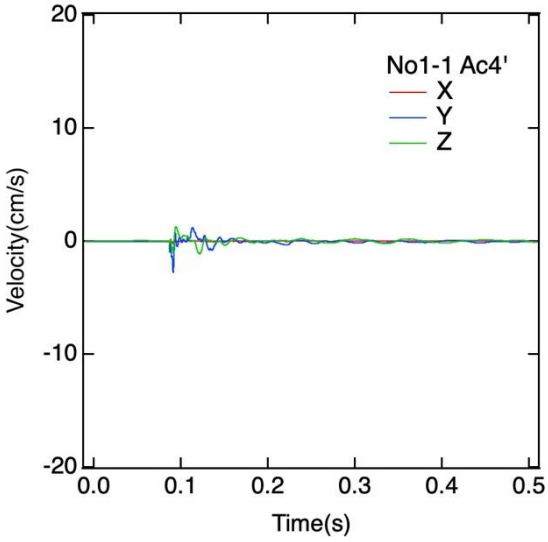
換算距離 6(17.2m)



換算距離 9(25.8m)

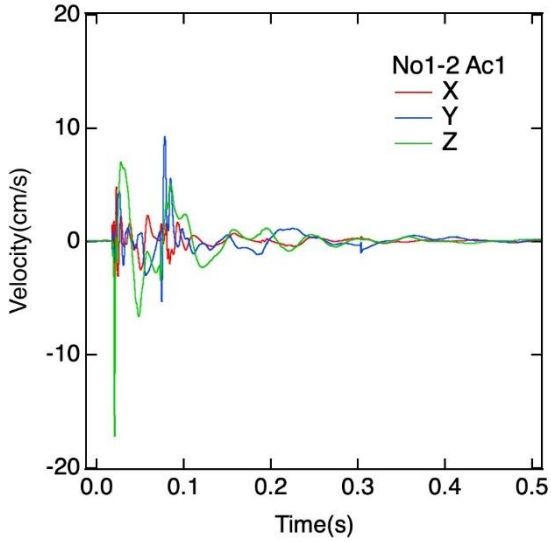


換算距離 12(34.4m)

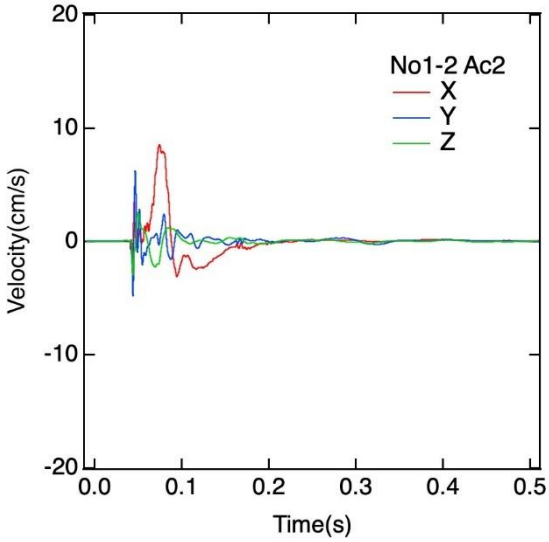


換算距離 12(34.4m) ※土嚢でセンサー保護した場合の計測結果

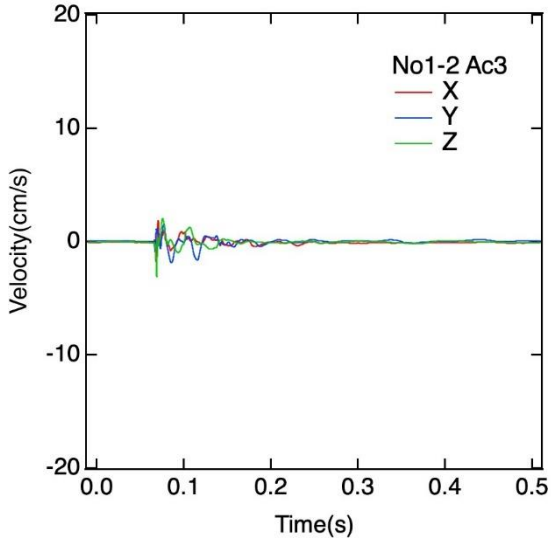
図 4.1-98　防爆壁　地盤振動速度(No1-1)



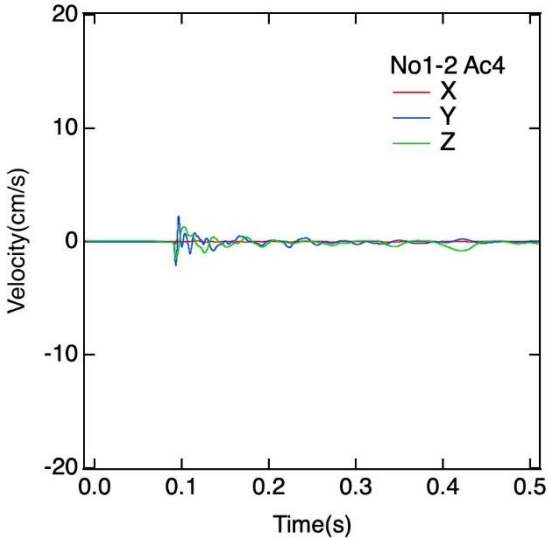
換算距離 3(8.60m)



換算距離 6(17.2m)

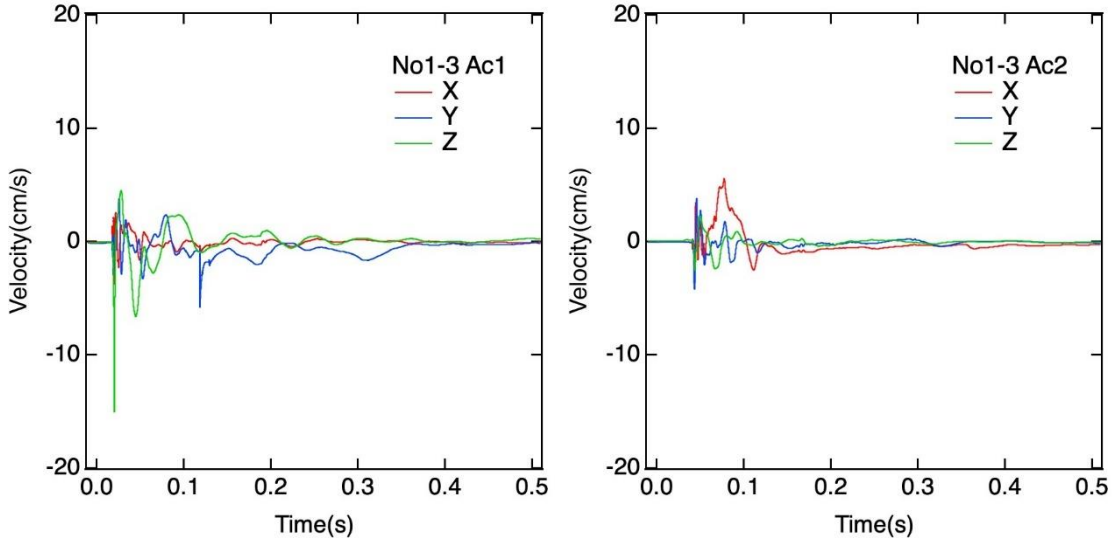


換算距離 9(25.8m)



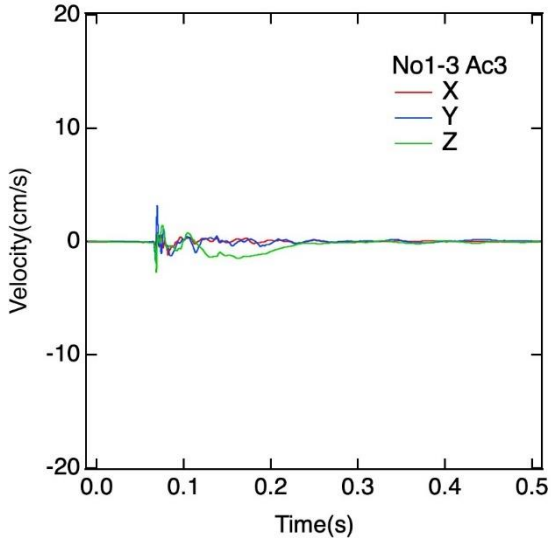
換算距離 12(34.4m)

図 4.1-99　防爆壁　地盤振動速度(No1-2)

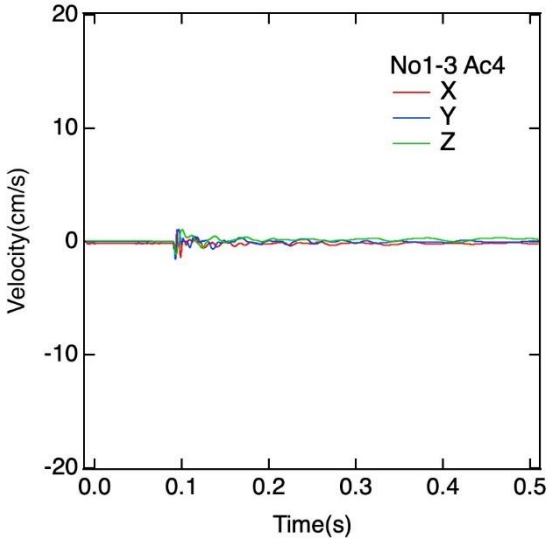


換算距離 3(8.60m)

換算距離 6(17.2m)

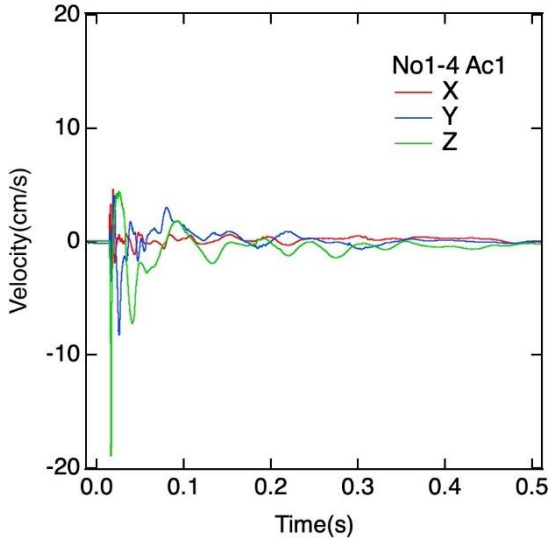


換算距離 9(25.8m)

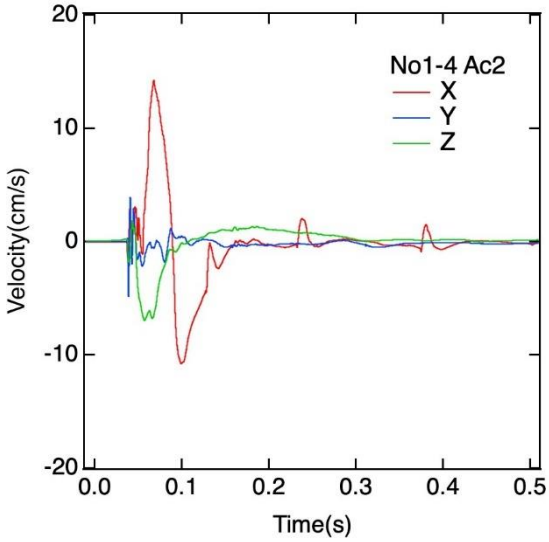


換算距離 12(34.4m)

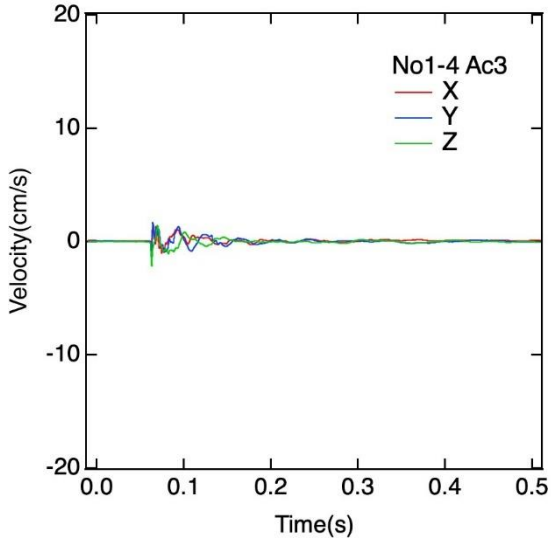
図 4.1-100　防爆壁　地盤振動速度(No1-3)



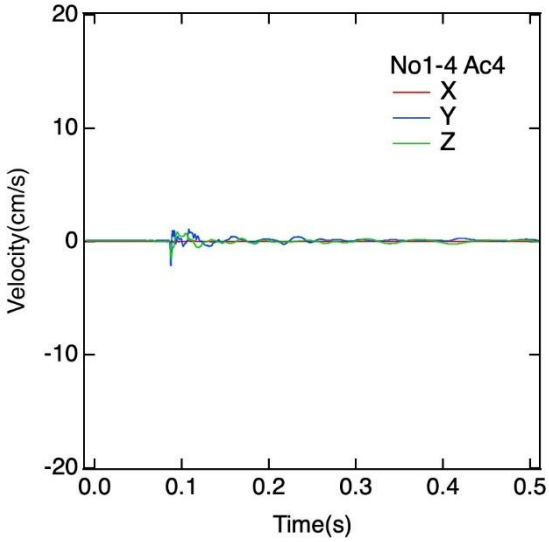
換算距離 3(8.60m)



換算距離 6(17.2m)

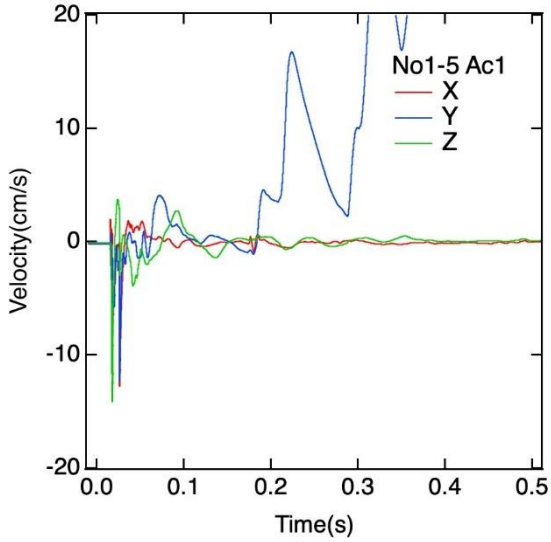


換算距離 9(25.8m)

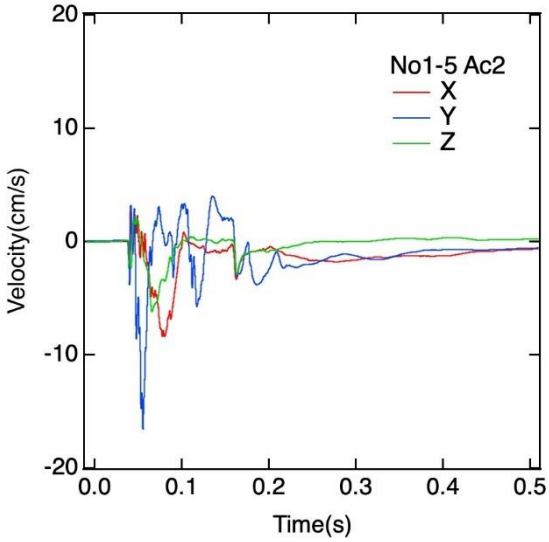


換算距離 12(34.4m)

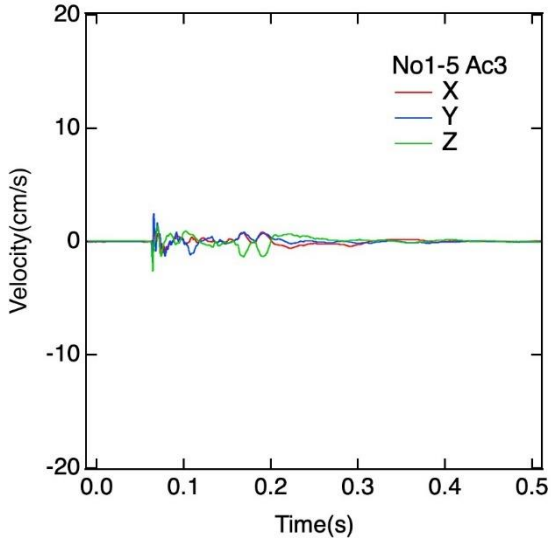
図 4.1-101　防爆壁　地盤振動速度(No1-4)



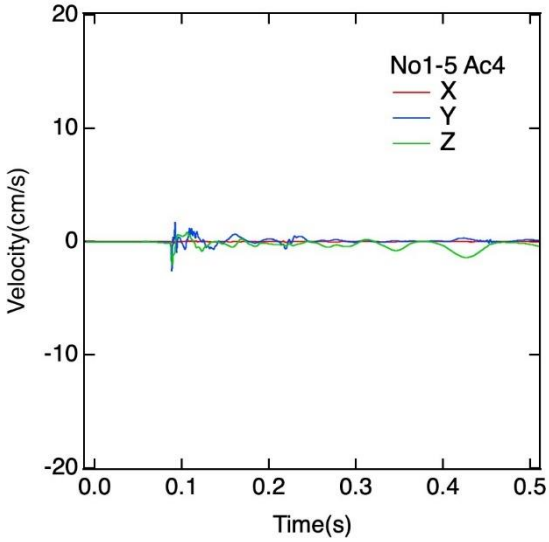
換算距離 3(8.60m)



換算距離 6(17.2m)



換算距離 9(25.8m)



換算距離 12(34.4m)

図 4.1-102　防爆壁　地盤振動速度(No1-5)

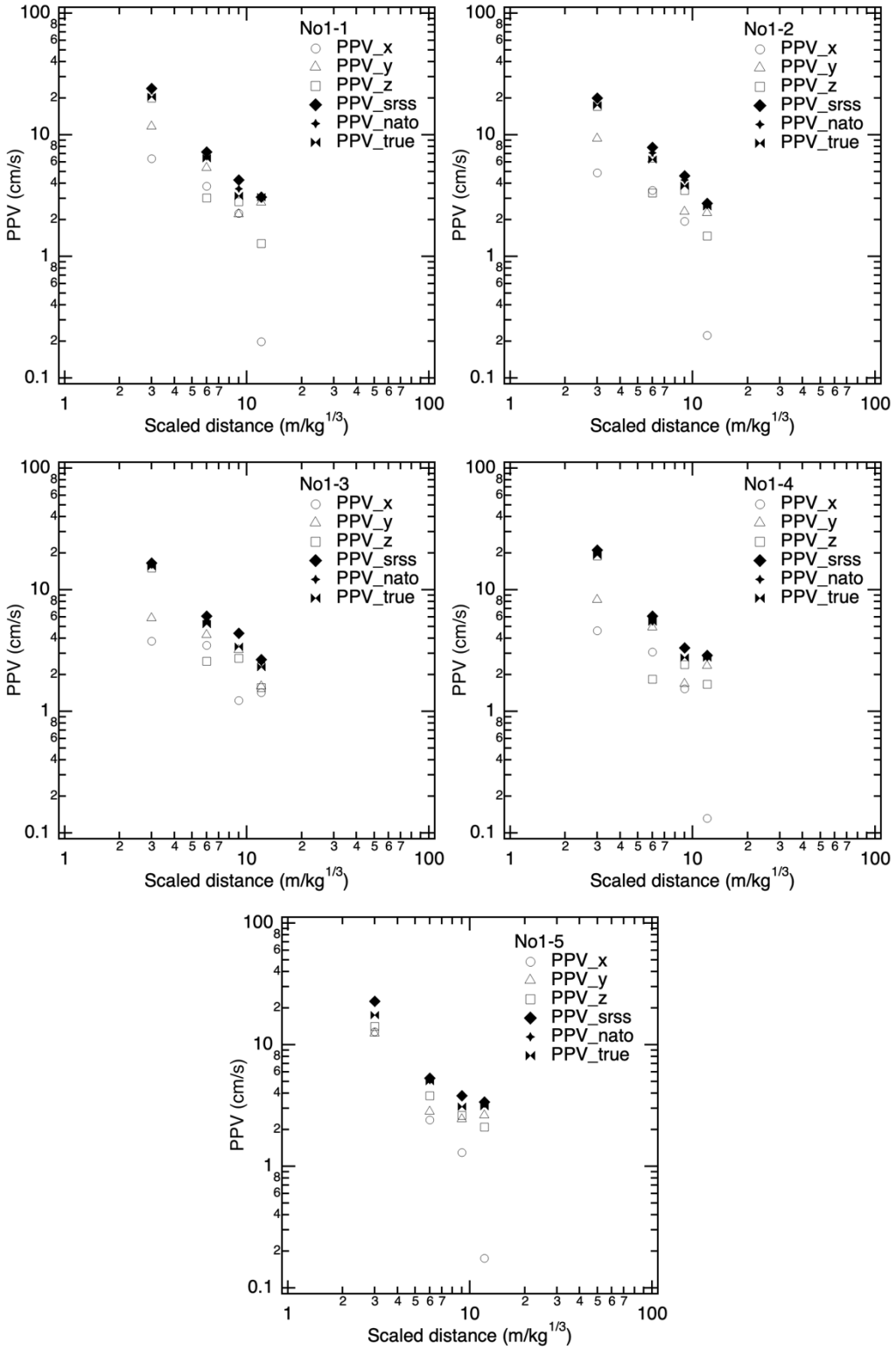


図 4.1-103　防爆壁 換算距離に対する最大変位速度 (No1-1～1-5)

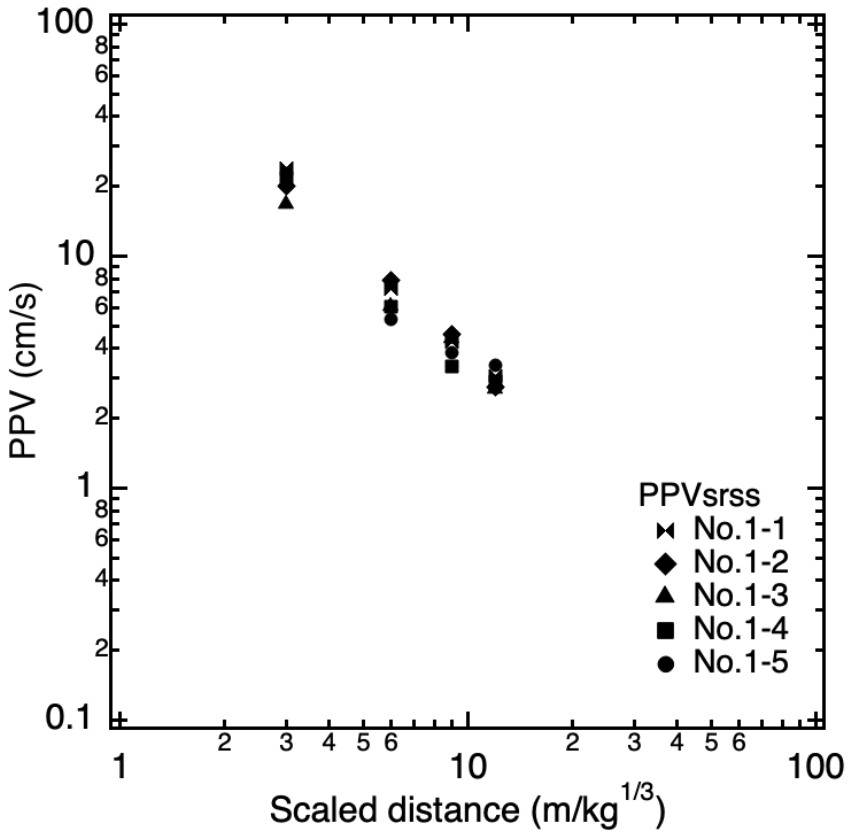


図 4.1-104　防爆壁 換算距離に対する最大変位速度(PPV_{SRSS})の比較 (No1-1～1-5)

地盤振動計測まとめ

爆点から換算距離 3、6、9、12 となる位置において地盤振動計測を行った。今回の実験では、最も保守的な PPV_{SRSS} でも第一種・第二種保安物件における PPV 10 cm/s、第三種・第四種保安物件における PPV 40 cm/s の目標値を満足しており、また、防爆壁の種類による有意な変化は認められなかった。

参考文献：

[1] NATO AASTP-1, NATO Guidelines for the Storage of Military Ammunition and Explosives, Edition B, Version 1, December 2015.

[2] BSI. BS 5228-2: 2009+ A1: 2014: Code of practice for noise and vibration control on construction and open sites. Vibration. 2014.

[3] DIN (GERMAN INSTITUTE FOR STANDARDIZATION); DIN 4150-3,. Structural vibration–Part 3: Effects of vibration on structures. 1999.

4.1.3.4　高速度カメラ撮影結果

図 4.1-105 及び図 4.1-106 に各実験で高速度撮影された静止画像を示す。

実験 No.1-1（煙火防爆壁（高密度ウレタン 1 面））

点火直後、爆点周囲は明るい火炎に包まれたが、明確な火炎は 3 ミリ秒程度で急速に減衰し、白い爆発生成気体が発生する様子が観測された。4 ミリ秒後頃には爆発生成気体の周囲に爆風波面が観測され、時間とともに周囲に伝播していく様子が確認された。8 ミリ秒後には、0°方向の斜め上方（概ね 45 度程度）に黒色の物体が多数飛散する様子が確認された。この黒色物体は主に砂防爆壁の内側に設置した高密度ウレタンが粉砕されたものであると考えられる。既存防爆壁を模擬した砂防爆壁の砂は低い角度で飛散した。砂防爆壁を構成する合板の破片などが飛散する様子も観測された。

実験 No.1-2（煙火防爆壁（高密度ウレタン 2 面））

点火直後の火炎の様子は、概ね実験 No. 1-1 と類似であったが、0°方向に飛散する高密度ウレタン破片の量が多い傾向が認められた。本実験では爆風波面が通過した背後に白っぽい霧状のものが観測された。これは爆風波面通過後の負圧によって大気中の水蒸気が凝固したものだと考えられる。

実験 No.1-3（煙火防爆壁（高密度ウレタン 3 面））

点火直後の火炎の様子は概ね実験 No. 1-1 と類似であった。起爆から 50 ミリ秒程度経過すると白っぽい爆発生成気体は概ね黒い爆発生成気体様のもので覆われた。実験 No. 1-1 や 1-2 と比較し、全体的に黒い飛散物が多い様子が観測された。

実験 No.1-4（煙火防爆壁（樹脂メッシュ））

点火直後に発生した火炎が、樹脂メッシュ越しに拡がる様子が観測された。4 ミリ秒程度経過すると、0°方向に細かな黒い飛散物が飛散し始める様子が観測された。黒い飛散物は樹脂メッシュの破片と考えられる。樹脂メッシュの破片は概ね 0°方向に飛散した。

実験 No.1-5（煙火防爆壁（コの字型合板））

点火直後の様子は前述までの実験と同様であり、火炎が発生した後、周囲が爆発生成気体に包まれる様子が観測された。点火から 3 ミリ秒程度経過すると、コの字型合板の角部に隙間ができ、徐々に隙間が大きくなり様子が観測された。約 9 ミリ秒後には、その隙間から砂が飛散する様子が観測された。コの字型合板の角部に膨張する衝撃波や爆発生成気体が集中することによって隙間が発生し、その隙間に 315 度方向に設置された砂防爆壁の砂が飛散したものと考えられる。

実験 No.1-1（高密度ウレタン 1 面）

実験 No.1-2（高密度ウレタン 2 面）

実験 No.1-3（高密度ウレタン 3 面）

実験 No.1-4（樹脂メッシュ）

実験 No.1-5（コの字型合板）

図 4.1-105　点火 5 ミリ秒後の爆発状況
（画面右が 0°方向、画面左が 180°方向）

実験 No.1-1（高密度ウレタン 1 面）

実験 No.1-2（高密度ウレタン 2 面）

実験 No.1-3（高密度ウレタン 3 面）

実験 No.1-4（樹脂メッシュ）

実験 No.1-5（コの字型合板）

図 4.1-106　点火 100 ミリ秒後の爆発状況
（画面右が 0°方向、画面左が 180°方向）

座標系の定義と距離の校正

撮影画像を解析するために図 4.1-107 に示すような座標系を定義した。原点 O を、爆点の真上で地表からの高さ 0.569 m の地点（すなわち砂防爆壁の上辺の高さ）に定義した。

校正画像をもとに求めた、画像横幅の実距離（カメラの水平視野）等を表 4.1-13 に整理した。

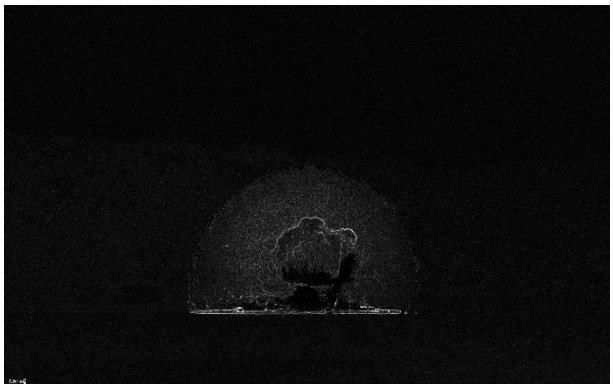
図 4.1-107　原点 O の定義と土砂の仰角定義（180°方向、0.1 秒後の場合）

表 4.1-13　画像横幅の実距離等一覧

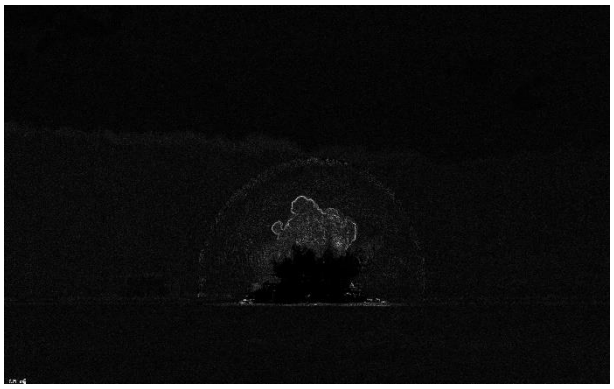
撮影機器の配置場所	撮影機器	画像の横幅/pixel	1画素あたり長さ/mm	画像横幅の実距離/m
観測所1（270°方向）	V640	2560	17.346054	44.4059
カメラボックス①（0°方向）	fx-K4	1280	18.181818	23.27273
カメラボックス②（+90°方向）	V1210	1280	11.037528	14.12804

高速度カメラ撮影によって、火薬類の爆発によって誘起された爆風が大気中を伝播する様子が観測された。爆風波面の伝播状況を詳細に調べるため、爆風波面を明確化することを目的とした画像処理を行った。各実験で撮影されたカラー画像を濃度諧調８ビットのモノクロ画像に変換し、爆発後の画像と爆発前の画像の差分を求め、輝度の変化を強調した画像に変換した。変換された画像から、0°方向、180°方向及び鉛直上方へ伝播する爆風波面の位置を読み取った。図 4.1.3.4-4 に爆風波面を強調した画像例を示す。

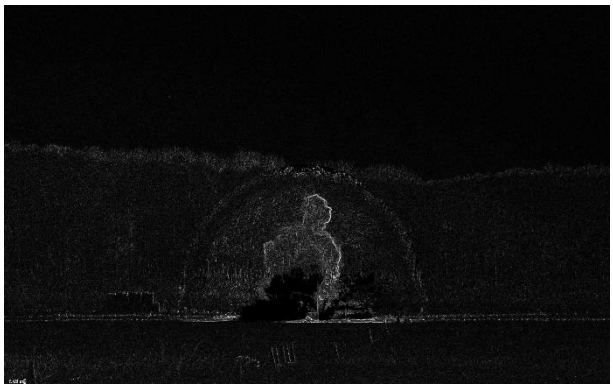
実験 No.1-1（高密度ウレタン 1 面）



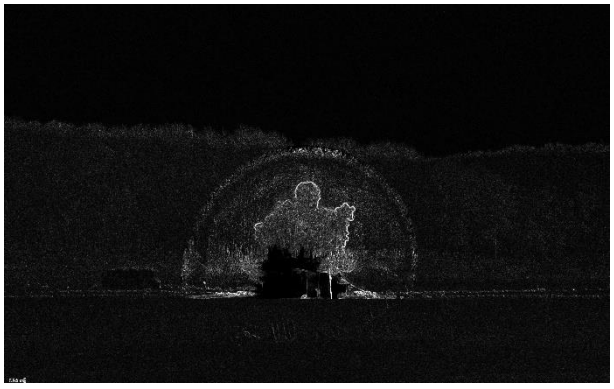
実験 No.1-2（高密度ウレタン 2 面）



実験 No.1-3（高密度ウレタン 3 面）



実験 No.1-4（樹脂メッシュ）



実験 No.1-5（コの字型合板）

図 4.1-108　爆風波面を強調した画像
（点火 16 ミリ秒後、画面右が 0°方向、画面左が 180°方向）

各実験について、0°方向、180°方向及び鉛直上方へ伝播する爆風波面の位置を読み取った結果を図 4.1-109 から図 4.1-113 に示す。爆風伝播方向（0°、180°及び鉛直方向）に着目し、各実験を比較した結果を図 4.1-114 から図 4.1-116 に示す（比較のため、基準爆風圧（No.2-1、No.2-2）の結果も示す）。2020 年度の実験と比較した結果を図 4.1-117 から図 4.1-119 に示す。

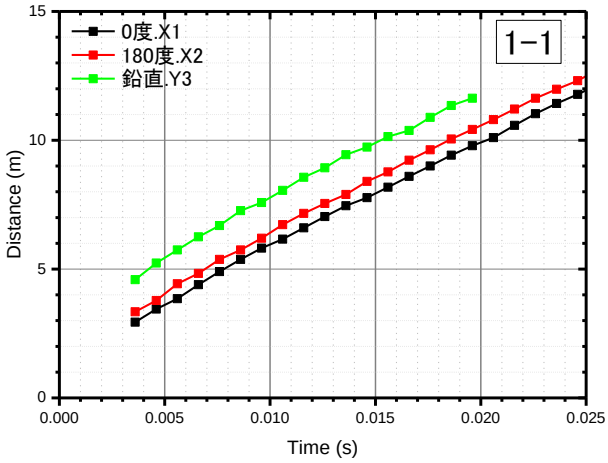


図 4.1-109　爆風波面の時間変化（No.1-1）

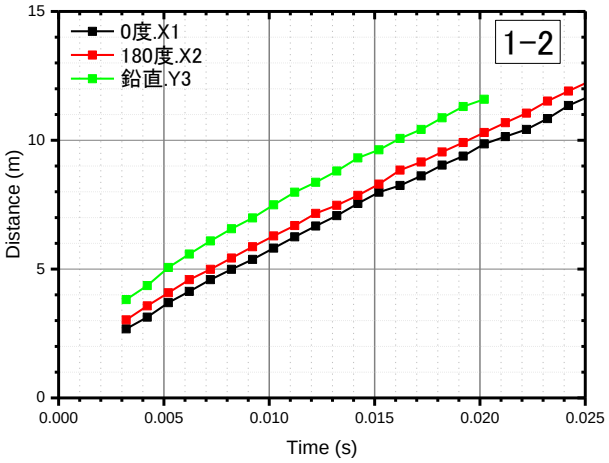


図 4.1-110　爆風波面の時間変化（No.1-2）

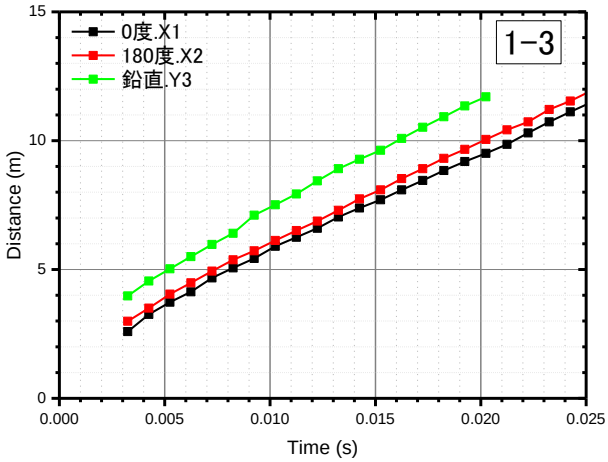


図 4.1-111　爆風波面の時間変化（No.1-3）

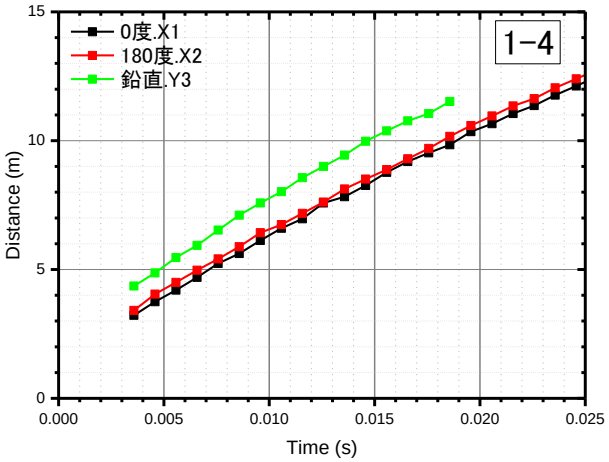


図 4.1-112　爆風波面の時間変化（No.1-4）

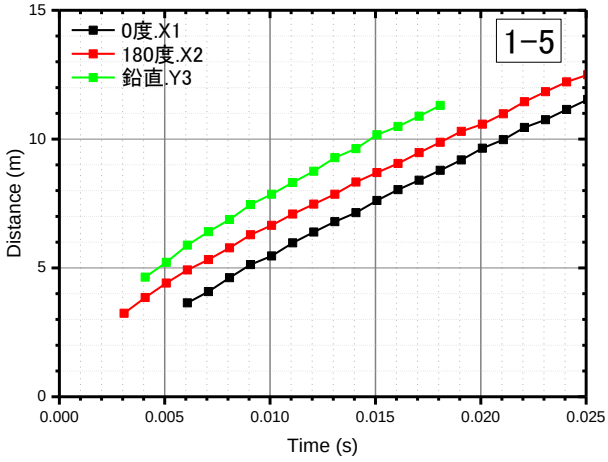


図 4.1-113　爆風波面の時間変化（No.1-5）

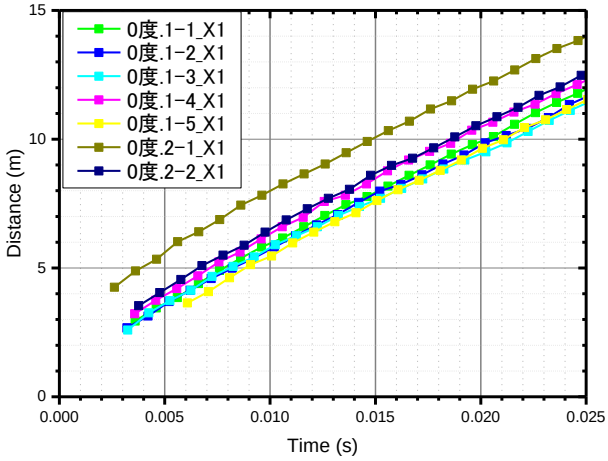


図 4.1-114　爆風波面の時間変化（0°方向）

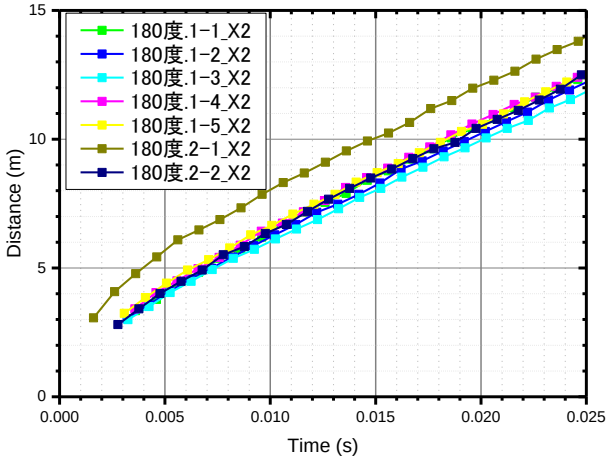


図 4.1-115　爆風波面の時間変化（180°方向）

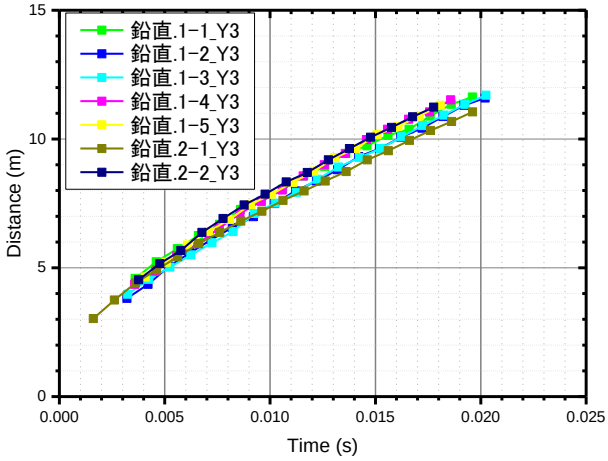


図 4.1-116　爆風波面の時間変化（鉛直上方）

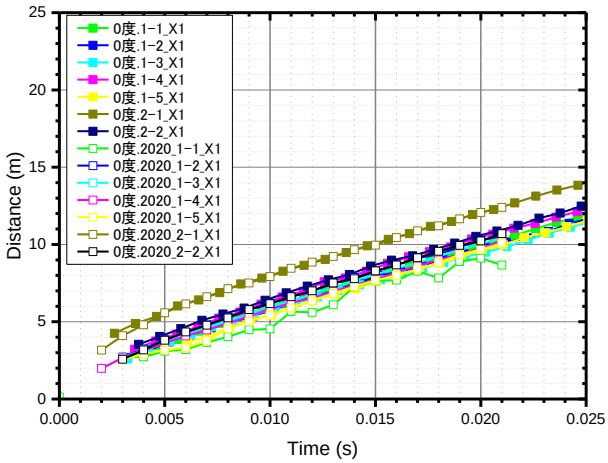


図 4.1-117　2020 年度結果との比較（0°方向）

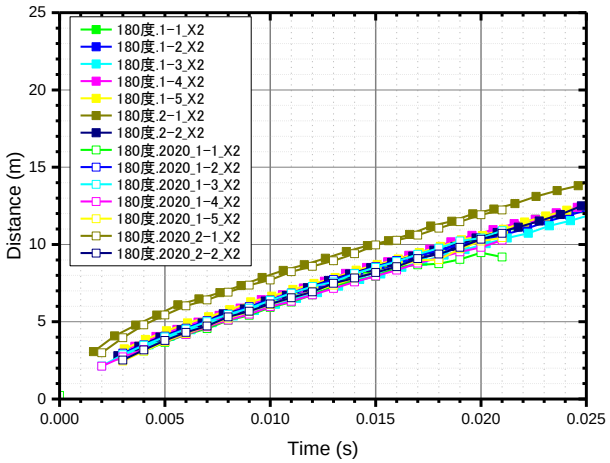


図 4.1-118　2020 年度結果との比較（180°方向）

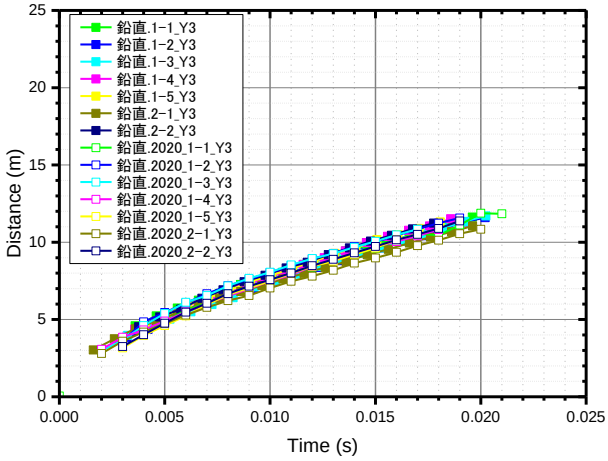


図 4.1-119　2020 年度結果との比較（鉛直上方）

爆風波面の時間変化は、砂防爆壁の有（No.1-1～No.1-5, No.2-2）と、無（No.2-1）で異なる傾向が示された。砂防爆壁の無い実験 No.2-1 では水平方向（0°及び 180°方向）の爆風伝播が速く、砂防爆壁が有る実験（No.2-1 以外）では総じて遅い傾向が示された。一方、鉛直上方へ伝播する衝撃波は逆の傾向であり、砂防爆壁の無い実験 No.2-1 が最も遅い傾向が示された。この結果は砂防爆壁によって水平方向に伝播する爆風が抑制された閉じ込めの効果によるものと考えられる。昨年度も同様の結果が得られている。

各実験について、0°方向、180°方向へ飛散する砂先端部の位置を読み取った結果を図 4.1-120 から図 4.1-125 に示す。各実験を比較した結果を図 4.1-126 から図 4.1-127 に示す。

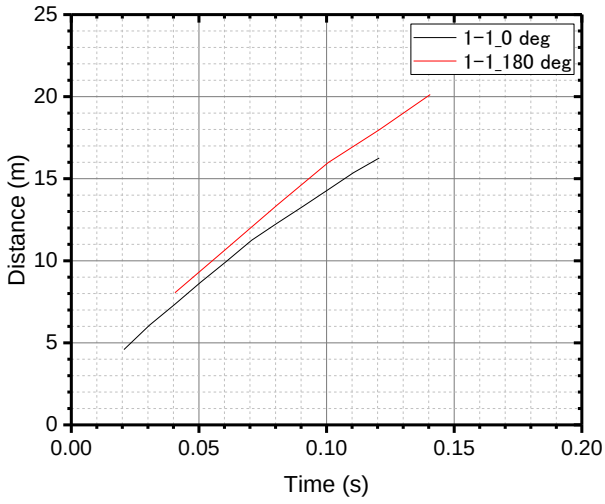


図 4.1-120　砂先端部の時間変化（No.1-1）

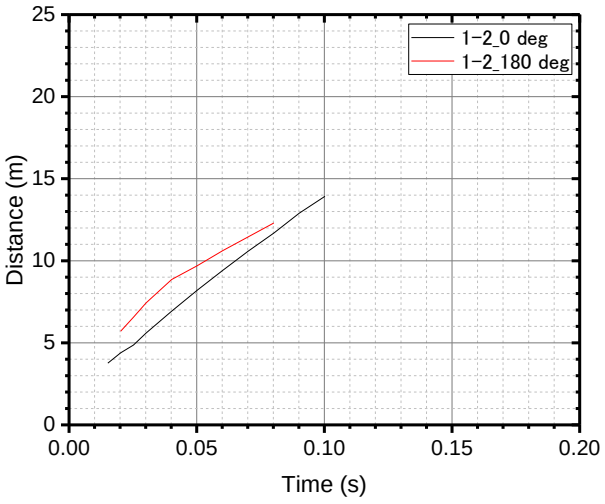


図 4.1-121　砂先端部の時間変化（No.1-2）

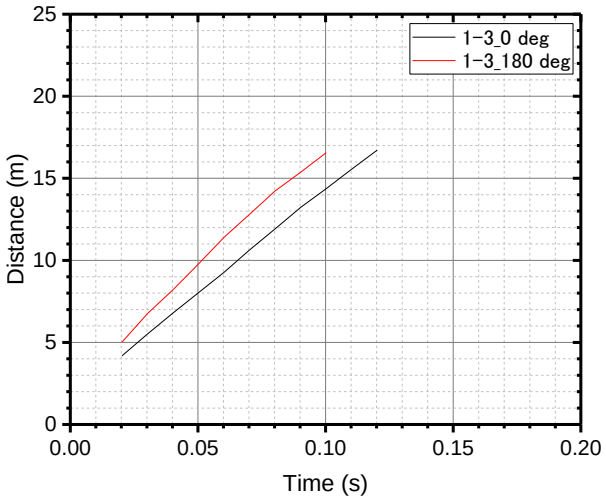


図 4.1-122　砂先端部の時間変化（No.1-3）

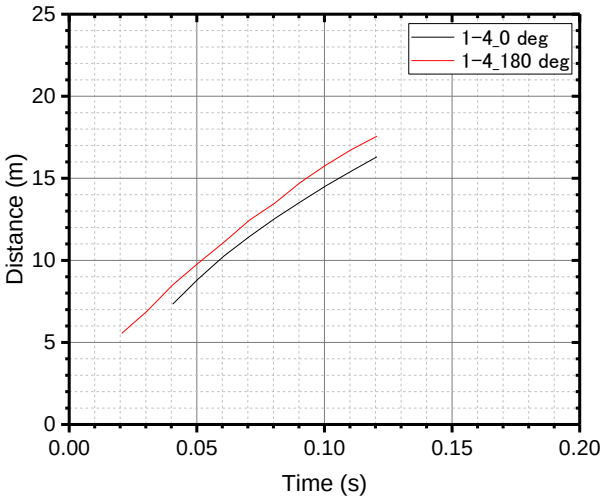


図 4.1-123　砂先端部の時間変化（No.1-4）

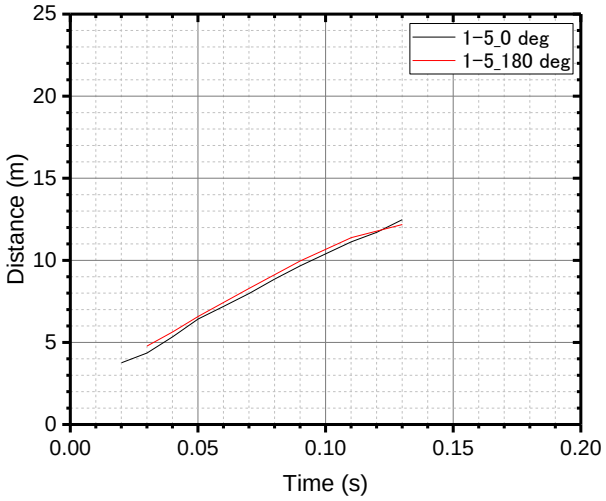


図 4.1-124　砂先端部の時間変化（No.1-5）

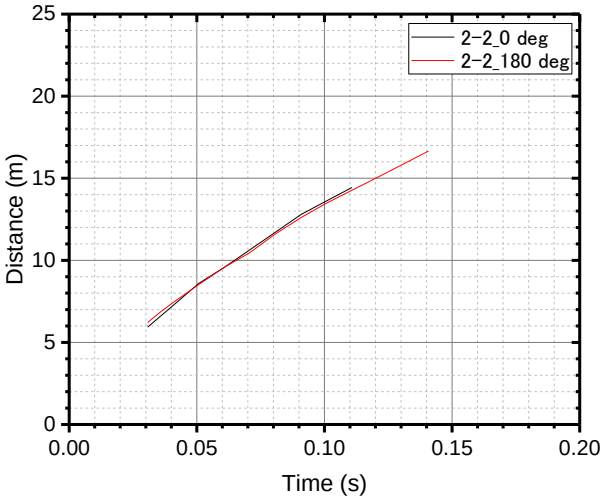


図 4.1-125　砂先端部の時間変化（No.2-2）

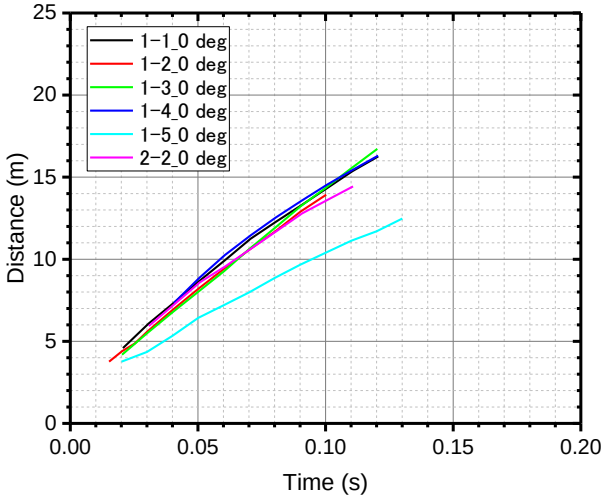


図 4.1-126　砂先端の時間変化（0° 方向）

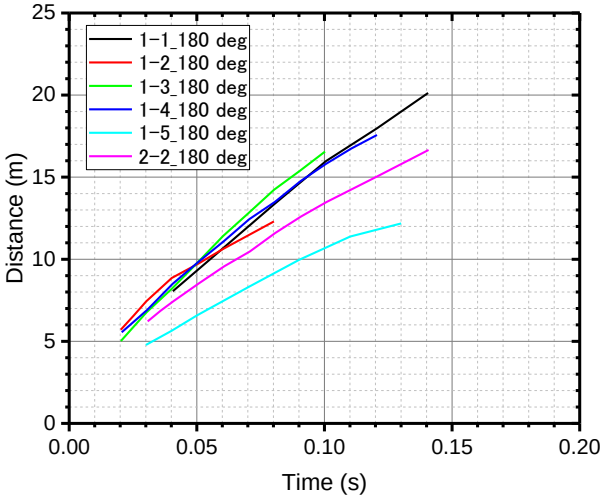


図 4.1-127　砂先端の時間変化（180° 方向）

ウレタンや樹脂メッシュなどを設置していない方向（180°方向）への土砂の拡がりが速い傾向が示された。各実験を比較した結果（図 4.1-126 及び図 4.1-127）に着目すると、実験 No.1-5 の挙動が他の実験と異なることが示されたが、これは 225°と 315°方向に設置した砂防爆壁を 270°方向からカメラ撮影したためである。実験 No.1-5 の砂飛散距離を約 1.4 倍すると、概ね他の実験と一致することが分かった。また実験 No.1-5 では、爆発直後の衝撃波や爆発生成気体の膨張によって合板防爆壁の角部に隙間が生じ、その隙間から砂が真っ先に飛散する様子が観測された。最も速い砂は合板防爆壁に衝突していない様子が観測された。そのため 225°と 315°方向への砂の飛散状態に顕著な差異が認められなかったものと考えられる。

砂防爆壁を有する実験では、土砂が水平方向の小さい仰角で飛散しており、壁を設置した 4 方向へ指向性を有して飛散した。図 4.1-107 で定義した仰角を図 4.1-128 に示す。0°方向及び 180°方向へ飛散する土砂先端部分の速度を図 4.1-129、図 4.1-130 にそれぞれ示す。土砂先端部分の速度は次第に減速する傾向を示しており、爆風や空気の音速より十分遅いことが示された。

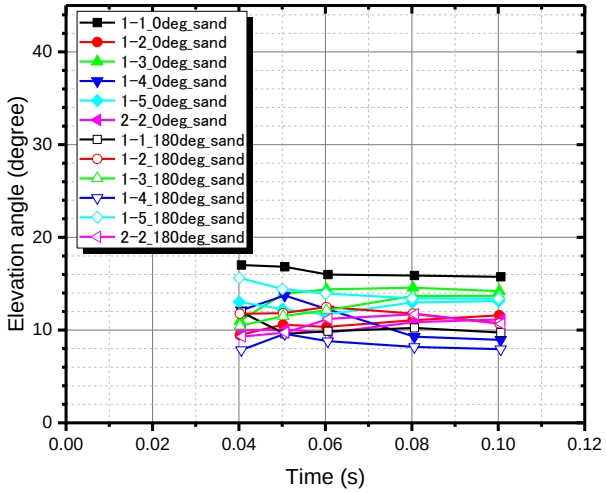


図 4.1-128　土砂の仰角

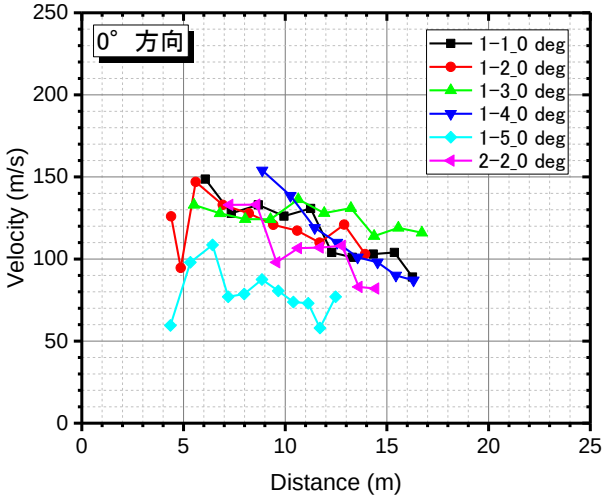


図 4.1-129　土砂先端部分の速度（0°方向）

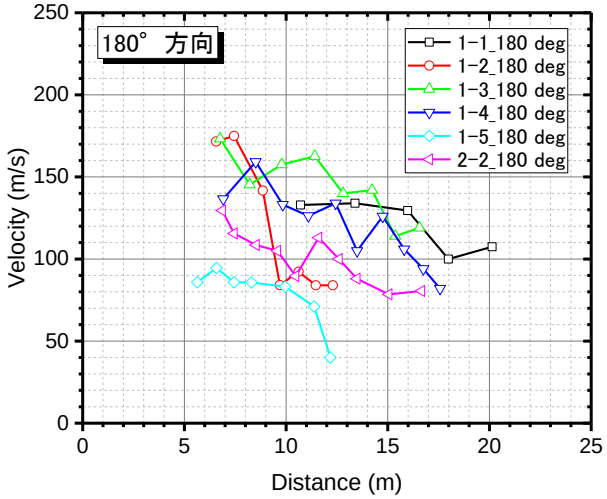


図 4.1-130　土砂先端部分の速度（180°方向）

高速度撮影まとめ

高速度カメラを用いて爆発状況を撮影した結果、以下の知見を得た。

・砂防爆壁を設置した実験では 0° 及び 180° 方向への爆風伝播が遅い傾向が示された。

・爆発生成気体の膨張によって、防爆壁の角部に隙間が生じる様子が観測された。結果として、砂の飛散抑制に寄与しない条件があることが示された。

・砂防爆壁を設置した方向へ小さい仰角で土砂が飛散しており、昨年と類似の結果であった。

・土砂先端部分の速度は次第に減速する傾向を示しており、爆風や空気の音速より十分遅いことが示された。

4.1.3.5　騒音計側結果

表 4.1-14 に観測所付近で計測した騒音計測結果を示す。

表 4.1-15 に遠方で測定した騒音計測結果の読み値を示す。得られた値をそのまま記載したが、記録中に付近を走る車の音、雨風の音など爆発音以外の音も拾っているため、爆発音以外の影響を受けた値になっていることを考慮する。これも No.1-1 と No.1-2 は悪天候（雨も風も強かった）での計測であった。

図 4.1-131 に観測所付近のマイクロフォンで測定した音圧波形を示す。No.1-1～1-5 すべて波形の形状としては一致していた。No.1-4 のピーク値が一番小さくなった。

図 4.1-132、133 に別寒辺四叉路警戒点の、図 4.1-134、135 に国境四叉路警戒点の、騒音計 BK2250 で測定した音圧波形を示す。爆発約 1 分前から爆発後まで記録した全体波形と、爆発音と思われる部分を切り抜いて圧力に変換した図を示す。横軸は時間（秒）で、全体波形では記録開始ボタンを押してからの時間であり、拡大表示の波形は任意に切り抜いた 1 秒間である。

国境四差路の No.1-1 と No.1-2 は、ノイズに埋もれて爆発音の位置が特定できなかった。

表 4.1-14　騒音計測結果　観測所脇

実験 No.	距離 m	薬種	薬量 kg	換算薬量 m/kg$^{1/3}$	到達時間 ms	ピーク圧 Pa	音圧レベル* dB
No.1-1	314	EMX2	15.49	126	908	459	
No.1-2	314	EMX2	15.49	126	912	447	
No.1-3	314	EMX2	15.49	126	915	417	
No.1-4	314	EMX2	15.49	126	913	362	
No.1-5	314	EMX2	15.49	126	906	489	

*：音圧レベルは計測したピーク圧（Pa）を 20log(Pa/0.00002)で変換した値。

表 4.1-15　騒音計測結果　遠方での計測結果

別寒辺四叉路		2730 m		BK2250		NL-31			
実験 No.	**薬種**	薬量	換算距離	LZpeak	LCeq	LAeq	LAE	LAmax	Lpk
		kg	m/kg$^{1/3}$	dB	dB	dB	dB	dB	dB
No.1-1	EMX2	15.49	1095	102.8	66.2	-	-	-	-
No.1-2	EMX2	15.49	1095	129.0	78.9	-	-	-	-
No.1-3	EMX2	15.49	1095	117.4	75.3	53.7	71.4	65.6	116.1
No.1-4	EMX2	15.49	1095	117.0	74.7	51.5	70.2	70.3	115.5
No.1-5	EMX2	15.49	1095	113.7	71.1	55.1	76.6	75.3	112.5

国境四叉路		4170 m		BK2250		NL-31			
実験 No.	**薬種**	薬量	換算距離	LZpeak	LCeq	LAeq	LAE	LAmax	Lpk
		kg	m/kg$^{1/3}$	dB	dB	dB	dB	dB	dB
No.1-1	EMX2	15.49	1673	123.2	80.9	-	-	-	-
No.1-2	EMX2	15.49	1673	130.8	87.2	-	-	-	-
No.1-3	EMX2	15.49	1673	106.0	67.6	57.4	76.5	69.8	102.9
No.1-4	EMX2	15.49	1673	116.7	75.8	58.5	78.1	76.2	111.8
No.1-5	EMX2	15.49	1673	111.7	69.5	52.6	71.9	67.4	107.8

-：未測定（悪天候のため）

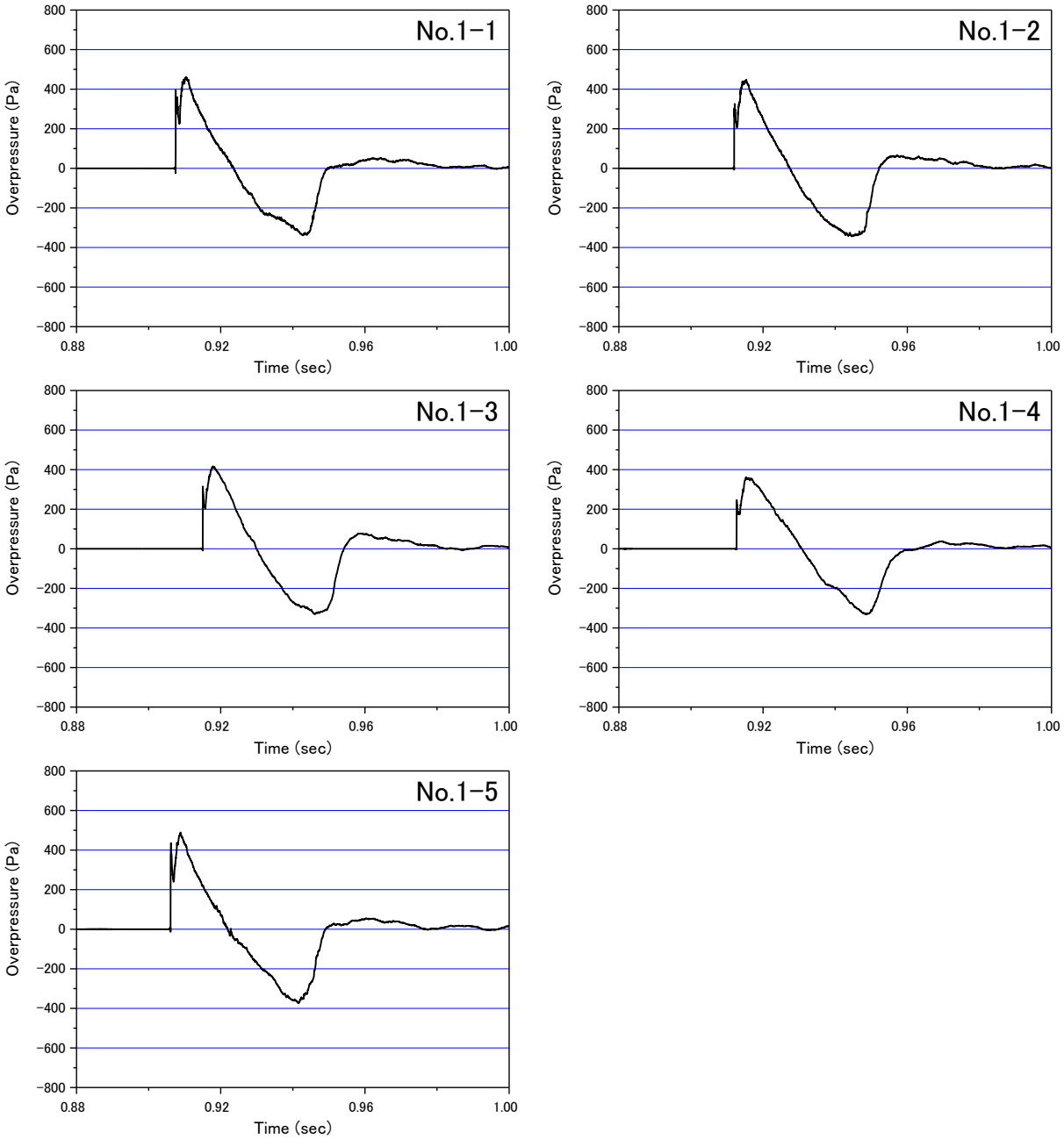
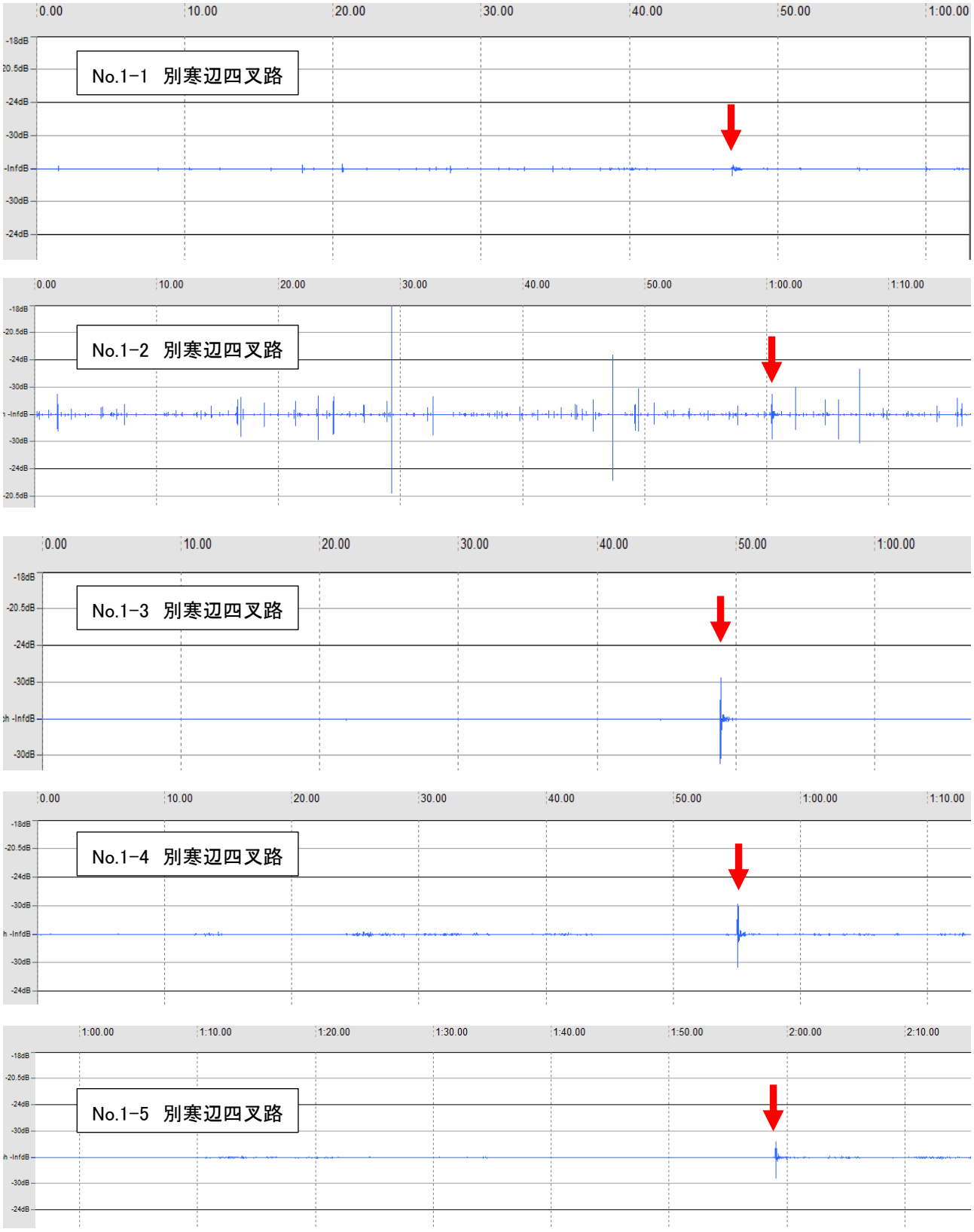
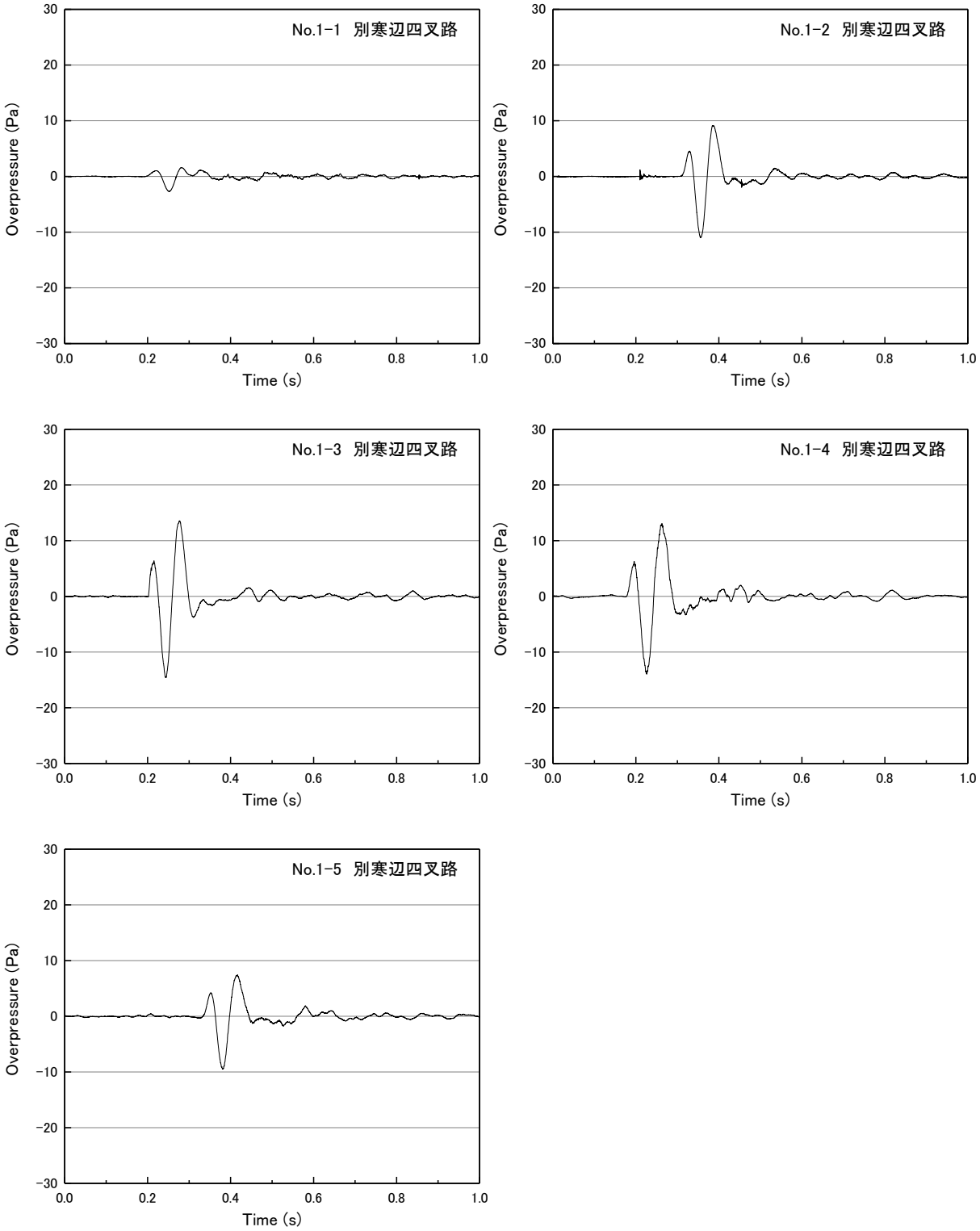


図 4.1-131　観測所で計測した音圧波形



全体波形

図 4.1-132　別寒辺四叉路の騒音計 BK2250 で計測した音圧波形



爆発音部分の拡大

図 4.1-133　別寒辺四叉路の騒音計 BK2250 で計測した音圧波形

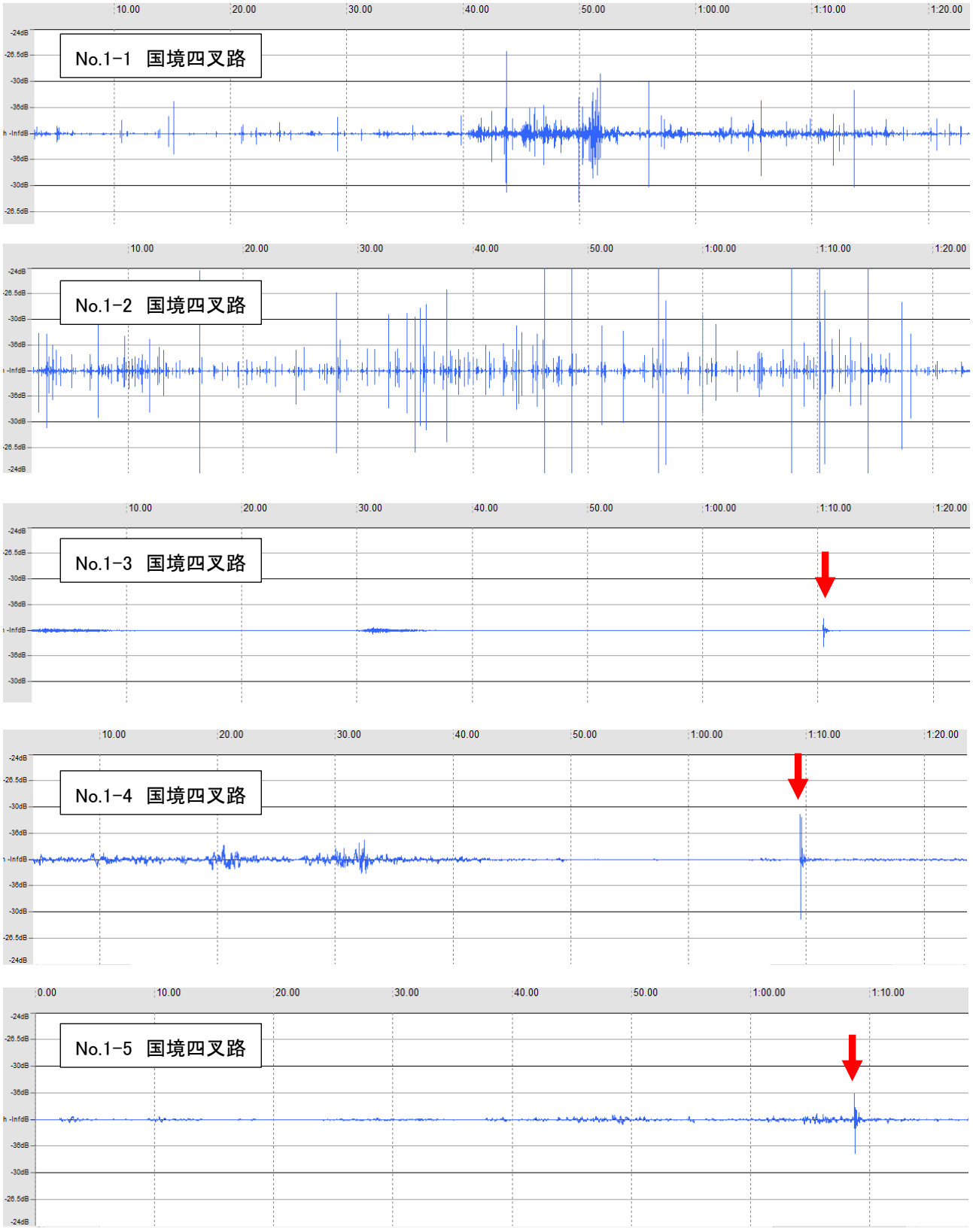
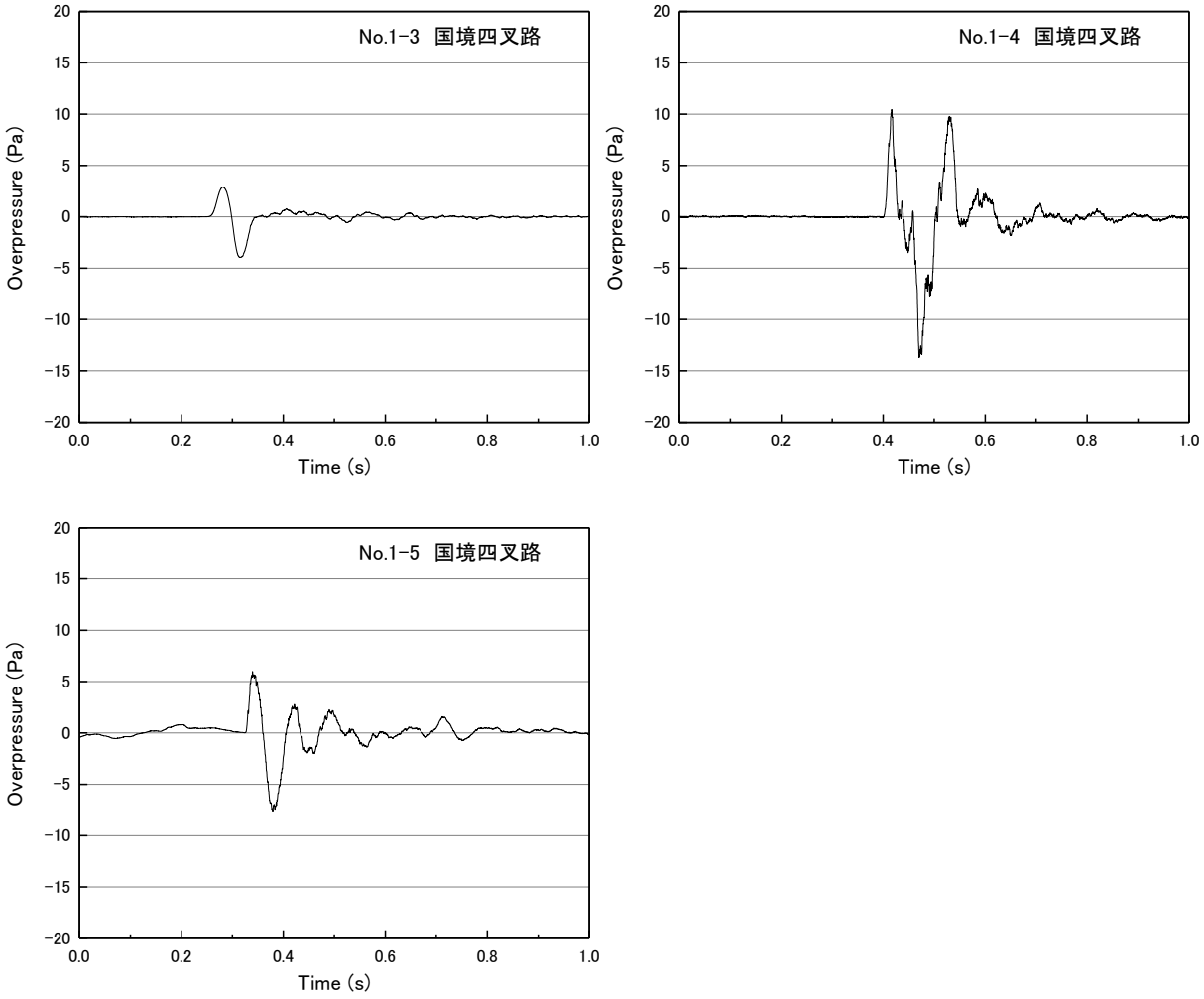


図 4.1-134　国境四叉路の騒音計 BK2250 で計測した音圧波形

※No.1-1 と No.1-2 は、悪天候の中での計測のため爆発音の位置が不明。



爆発音部分の拡大

図 4.1-135　国境四叉路の騒音計 BK2250 で計測した音圧波形

※No.1-1 と No.1-2 は、爆発音の位置が不明。

騒音計側まとめ

・観測所脇（爆点から 316 m 地点）でマイクロフォンにより爆発音の騒音計測をおこなった。No.1-1～1-5 すべて波形の形状は一致していた。No.1-4 のピーク値が一番小さくなった。

・遠方の警戒点（爆点から 2.7 km 地点および 4.2 km 地点）では騒音計で測定した。測定した地点では爆発音が耳でわずかに確認できる程度であり、また、計測結果も騒音的に問題ない値であることが確認できた。

4.1.4　まとめ

爆発後の爆点の様子まとめ

爆発後、爆点に約 3 m 角で最大深さ約 0.6 m の四角い漏斗孔ができた。四角いのは模擬防爆壁の影響である。昨年度と薬量が同じのため、漏斗孔の直径も深さもほぼ同じになった。

飛散物の飛散状況も昨年度同様で、模擬防爆壁の木片は最大 70 m ほど飛散した。壁に対して正対する方向への飛散物は数も多く、飛散距離も長くなる。計測機器への直撃もあった。

No.1-1～1-3 で設置したウレタンは、爆点から半径 20 m の範囲で飛散した。

No.1-4 で設置した樹脂ネットは、設置した 0 度方向へ最大 45 m の範囲で飛散した。

No.1-5 で設置した合板は、ほとんどが 1 枚板のまま爆点から 14 m～40 m の位置に飛散していた。

爆風圧測定まとめ

新規構造を追加した No1 シリーズの爆風圧力の計測を行い、爆風パラメータをまとめた。基準となる No2-1 と No2-2 などとの比較は 4.2 節にて行う。

地盤振動計測まとめ

爆点から換算距離 3、6、9、12 となる位置において地盤振動計測を行った。今回の実験では、最も保守的な PPV_{SRSS} でも第一種・第二種保安物件における PPV 10 cm/s、第三種・第四種保安物件における PPV 40 cm/s の目標値を満足しており、また、防爆壁の種類による有意な変化は認められなかった。

高速度撮影まとめ

高速度カメラを用いて爆発状況を撮影した結果、以下の知見を得た。

・砂防爆壁を設置した実験では 0°及び 180°方向への爆風伝播が遅い傾向が示された。

・爆発生成気体の膨張によって、防爆壁の角部に隙間が生じる様子が観測された。結果として、砂の飛散抑制に寄与しない条件があることが示された。

・砂防爆壁を設置した方向へ小さい仰角で土砂が飛散しており、昨年と類似の結果であった。

・土砂先端部分の速度は次第に減速する傾向を示しており、爆風や空気の音速より十分遅いことが示された。

騒音計側まとめ

・観測所脇（爆点から 316 m 地点）でマイクロフォンにより爆発音の騒音計測をおこなった。No.1-1～1-5 すべて波形の形状は一致していた。No.1-4 のピーク値が一番小さくなった。

・遠方の警戒点（爆点から 2.7 km 地点および 4.2 km 地点）では騒音計で測定した。測定した地点では爆発音が耳でわずかに確認できる程度であり、また、計測結果も騒音的に問題ない値であることが確認できた。

4.2　基準爆風圧実験

4.2.1　目的

防爆壁等を設置しない地表面上（実験No.2-1）で、及び既存の防爆壁を設置した状態（実験No.2-2）で火薬類を爆発させ、基準となる爆風圧データを取得する。その他に、飛散物、地盤振動、衝撃波伝播状況、騒音などを、電気的・光学的手法により計測する。

4.2.2　実験方法

4.2.2.1　供試火薬類

表 4.2-1 に供試火薬類を示す。図 4.2-1 に爆薬の形状を示す。図 4.2-2 に導爆線と雷管の固定方法を示す。薬種・薬量は実験 No.1（防爆壁に関する実験）と同じ含水爆薬（EMX2）15.49 kg である。電気雷管 2 個と導爆線により起爆した。図 4.2-3～6.2-6 に火薬類の設置状況を示す。

表 4.2-1　供試火薬類

実験 No.	薬種	薬量 (kg)	導爆線	電気雷管 (個) ()内は予備	火薬の形状　※	
					直径 φ ×長さ (mm)	密度 (kg/m³)
2-1	EMX2	15.49	100mm×2 本 40mm×2 本	2	φ 254×259	1190
2-2	EMX2	15.49	100mm×2 本 40mm×2 本	2	φ 254×261	1190
合計		30.98	100mm×4 本 40mm×4 本	4		

※　爆薬の薬量、大きさ、密度は検査成績書の値

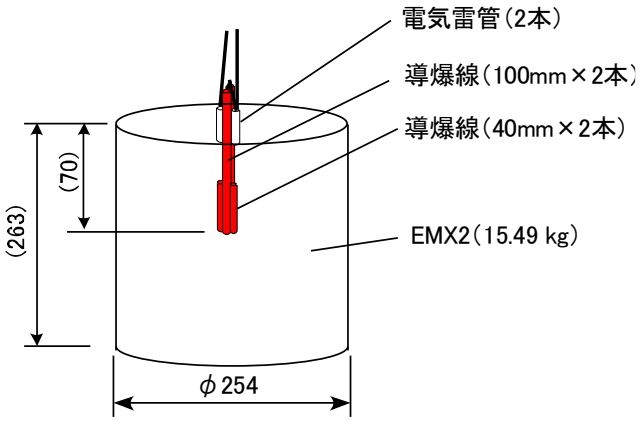


図 4.2-1　爆薬（EMX2）の形状

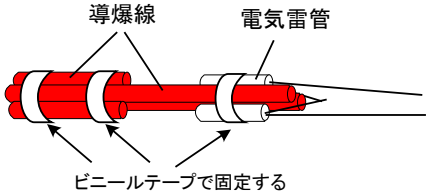


図 4.2-2　導爆線と雷管の固定方法

図 4.2-3　装薬状況　No.2-1　EMX2　15.49 kg

図 4.2-4　雷管と導爆線を固定した状態

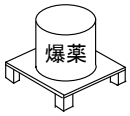


図 4.2-5　爆薬の設置状況 No.2-1

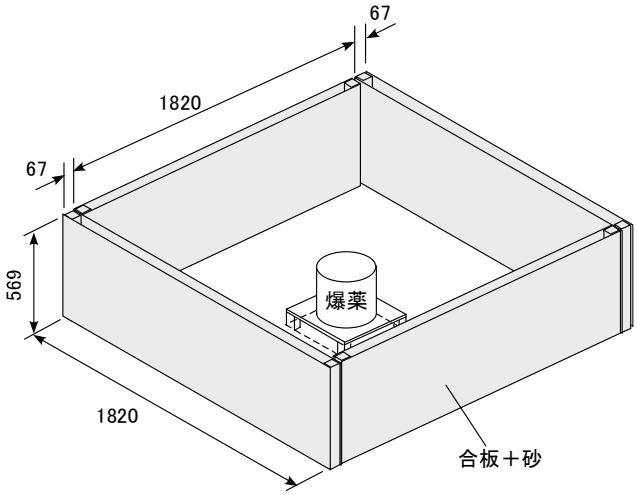


図 4.2-6　爆薬の設置状況 No.2-2

爆薬高さ

実験 No.1 と同様に、火薬庫の床の高さ 30 cm を 1/4.4 スケールに換算して 68 mm とした。

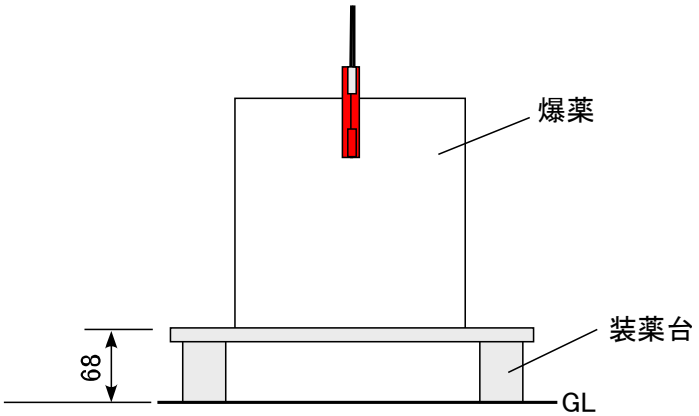


図 4.2-7　爆薬の設置高さ（No.2）

4.2.2.2　計測項目

爆風圧計測、飛散物計測、地盤振動計測、常速度・高速度カメラ撮影、騒音計測を行った。

(1)　爆風圧計測

表 4.2-2 に爆風圧計の各 ch の距離を示す。図 4.2-8 に爆風圧計の設置位置を、図 4.2-9 に爆風圧計の設置状況を示す。実験 No.1 で使用した爆風圧計をそのまま使用した。爆風圧計は地面から 1.0 m および 0.3 m の高さに専用のホルダー（整流板）で側圧を測定するように設置した。飛散物の直撃を防ぐため防護用の金属管（高さ約 1.0 m）も引き続き設置した状態で計測した。

表 4.2-2　爆風圧計の各 ch の距離

原点：爆薬中心 換算距離：煙火 23.55 kg 基準					No.2 薬量（kg） 15.49	
ch	角度	距離(m)	高さ(m)	換算距離 ($m/kg^{1/3}$)	記録機器 Tasler	 HIOKI
ch1a	0	8.60	1.0	3	○	○
ch1b	0	8.60	0.3	3	×	○
ch2	0	17.20	1.0	6	○	×
ch3	0	25.80	1.0	9	○	×
ch4	0	34.40	1.0	12	○	×
ch5a	45	5.73	1.0	2	○	○
ch5b	45	5.73	0.3	2	×	○
ch6a	45	8.60	1.0	3	○	○
ch6b	45	8.60	0.3	3	×	○
ch7	45	17.20	1.0	6	○	×
ch8	45	25.80	1.0	9	○	×
ch9	45	34.40	1.0	12	○	×
ch10a	135	5.73	1.0	2	○	○
ch10b	135	5.73	0.3	2	×	○
ch11a	135	8.60	1.0	3	○	○
ch11b	135	8.60	0.3	3	×	○
ch12	135	17.20	1.0	6	○	×
ch13	135	25.80	1.0	9	○	×
ch14	135	34.40	1.0	12	○	×
ch15a	180	8.60	1.0	3	○	○
ch15b	180	8.60	0.3	3	×	○
ch16	180	17.20	1.0	6	○	×
ch17	180	25.80	1.0	9	○	×
ch18	180	34.40	1.0	12	○	×

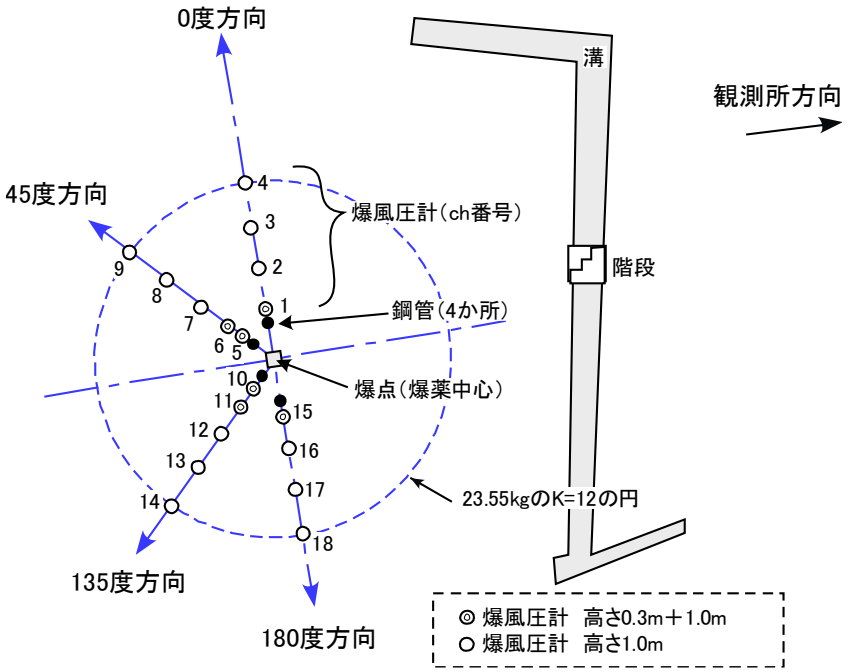


図 4.2-8　爆風圧計の設置位置

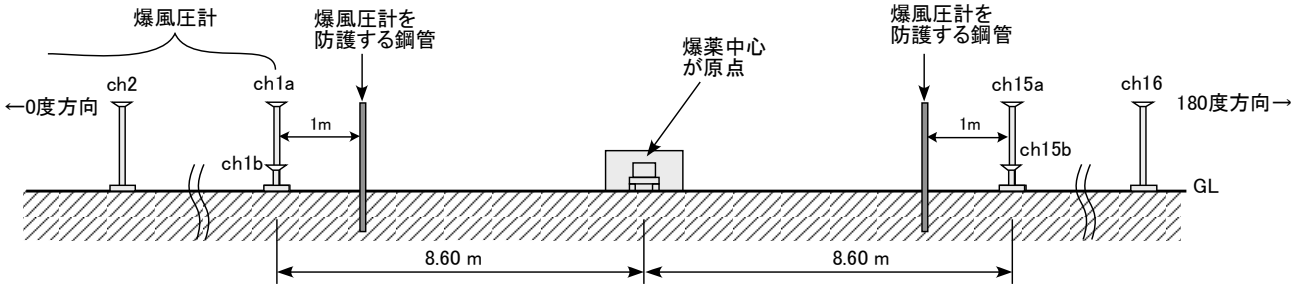


図 4.2-9　爆風圧計の設置状況

(2)　飛散物計測

爆発後の爆点や爆点周囲の様子を記録（写真撮影、測量）した。

(3)　地盤振動計測

実験 No.1 と同じ位置、方法で、地盤振動（加速度または速度）を計測した。表 4.2-3 に地盤振動計（加速度計）の各 ch の距離を、図 4.2-10 に設置位置を示す。

表 4.2-3　地盤振動計（加速度計）の各 ch の距離

計測点	爆薬中心から	
	距離 (m)	換算距離 (m/kg$^{1/3}$)
P1	8.6	3
P2	17.2	6
P3	25.8	9
P4	34.4	12

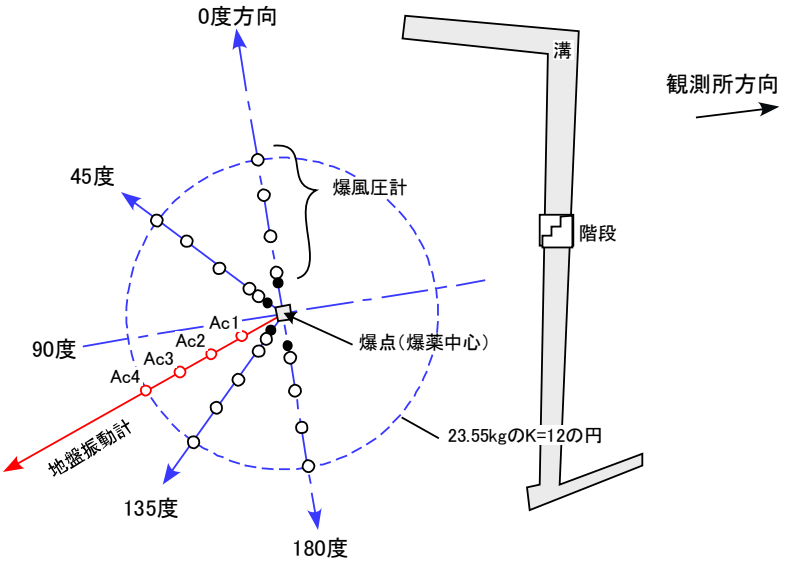


図 4.2-10　地盤振動計の設置位置と計測軸の方向　No.2

(4)　常速度・高速度カメラ撮影

爆発によって発生した衝撃波の伝播状況や飛散物の飛散状況等を観察するために、高速度カメラによる撮影を行った。高速度カメラ及び常速度カメラの設置場所等は、防爆壁に関する実験と同様である。

(5)　騒音計測

マイクロフォンと騒音計を用いて爆発時の騒音を測定した。測定位置、測定方法など No.1 と同様に行った。

4.2.3　実験結果

4.2.3.1　爆発後の爆点の様子

(1)　漏斗孔の大きさ

表 4.2-4 に実験条件を示す。No.2-1 は装薬台のみで何もない状態で、No.2-2 は模擬防爆壁がある状態で実験を行った。

表 4.2-4　実験条件

実験 No.	模擬防爆壁の有無	追加の防爆壁
2-1	なし	なし
2-2	有	なし

表 4.2-5 に実験ごとの漏斗孔の大きさを示す。漏斗孔の直径は 0 度方向と 180 度方向のライン、90 度と 270 度方向のラインを巻尺で GL＝0 の直径を測定した。漏斗孔の深さは漏斗孔の最深部（＝爆点中心）と GL=0 で張った巻尺の距離（深さ）を測定した。模擬防爆壁有りの実験では漏斗孔が四角くなり、模擬防爆壁なしの実験では漏斗孔は円形になった。模擬防爆壁を 4 面で爆薬を四角く囲んでおり、かつ模擬防爆壁は 0.34 m ほど地面に埋めて設置したためである。No.2-2 の漏斗孔の直径は No.1 と同じぐらいの大きさになり、No.2-1 の漏斗孔の直径は他と比べて若干小さくなった。漏斗孔の深さは No.2-1 も No.2-2 も No.1 と比べて若干深くなった。

表 4.2-5　漏斗孔の大きさ

実験 No.	漏斗孔の形状と直径（mm） （0-180 度方向×90-270 度方向）	漏斗孔の深さ（mm）
2-1	○　2500×2500	690
2-2	□　3050×3000	680

No.2-1

爆発後、爆点には丸い漏斗孔が形成された。漏斗孔は 2 段構造で中心部分により深い孔が見られた。2 段構造なのは、同じ爆点で続けて実験を行っていること、他の実験で模擬防爆壁を埋めるためにあらかじめ重機で約 0.34 m ほど地面を掘っている影響を受けたものとみられる。

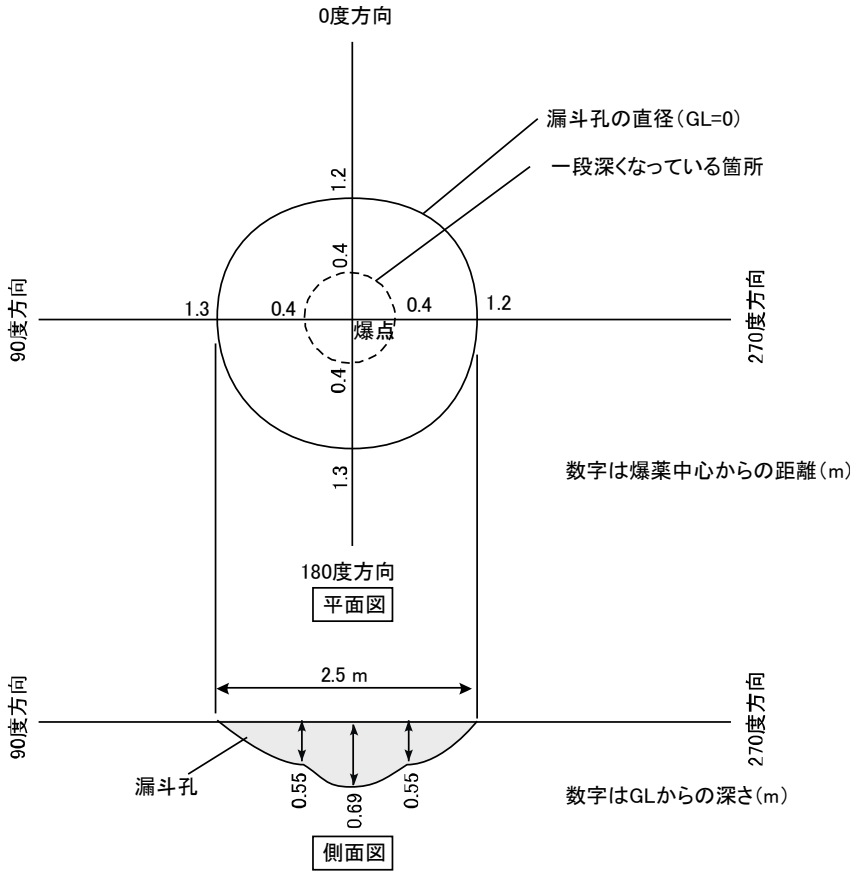


図 4.2-11　爆発後の爆点の様子　No.2-1

図 4.2-12　点火前と点火直後の写真　No.2-1

No.2-2

爆発後、爆点には模擬防爆壁由来の四角い漏斗孔が形成された。漏斗孔は 2 段構造で中心部分により深い孔が見られた。

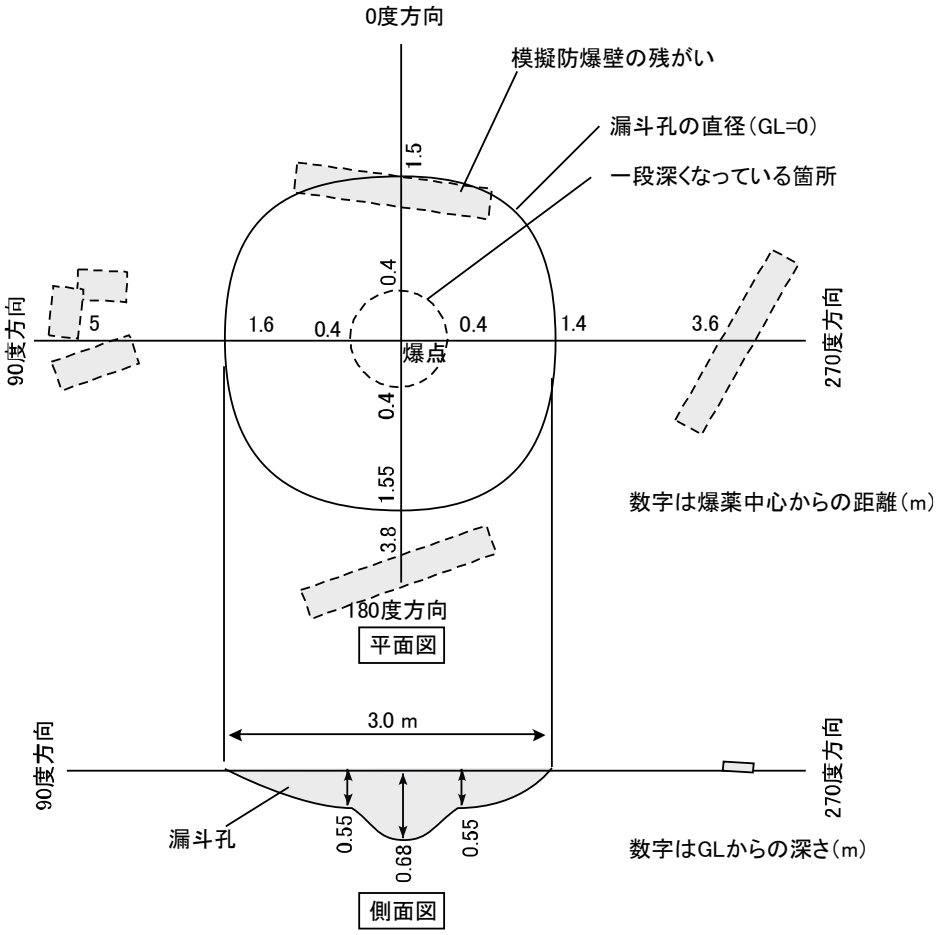


図 4.2-13　爆発後の爆点の様子　No.2-2

図 4.2-14　点火前と点火直後の写真　No.2-2

(2)　飛散物の飛散状況

模擬防爆壁を設置した実験はすべて、爆発によって模擬防爆壁の地上部分が細かく分かれて吹き飛ばされており、木片が爆点付近から遠方まで散らばっていた。模擬防爆壁に正対する方向（0、90、180、270 度方向）に多く飛散しており、その大きさは 20 mm 角から 400 mm 角のさまざまであった。大きめの飛散物ほど、遠くまで飛散していた。

飛散距離は、壁に正対する方向に最大 66 m 地点まで飛散していた。図 4.2-15 に模擬防爆壁の木片の最大飛散位置を示す。

模擬防爆壁の飛散傾向は、実験 No.1 の結果との違いは確認できなかった。

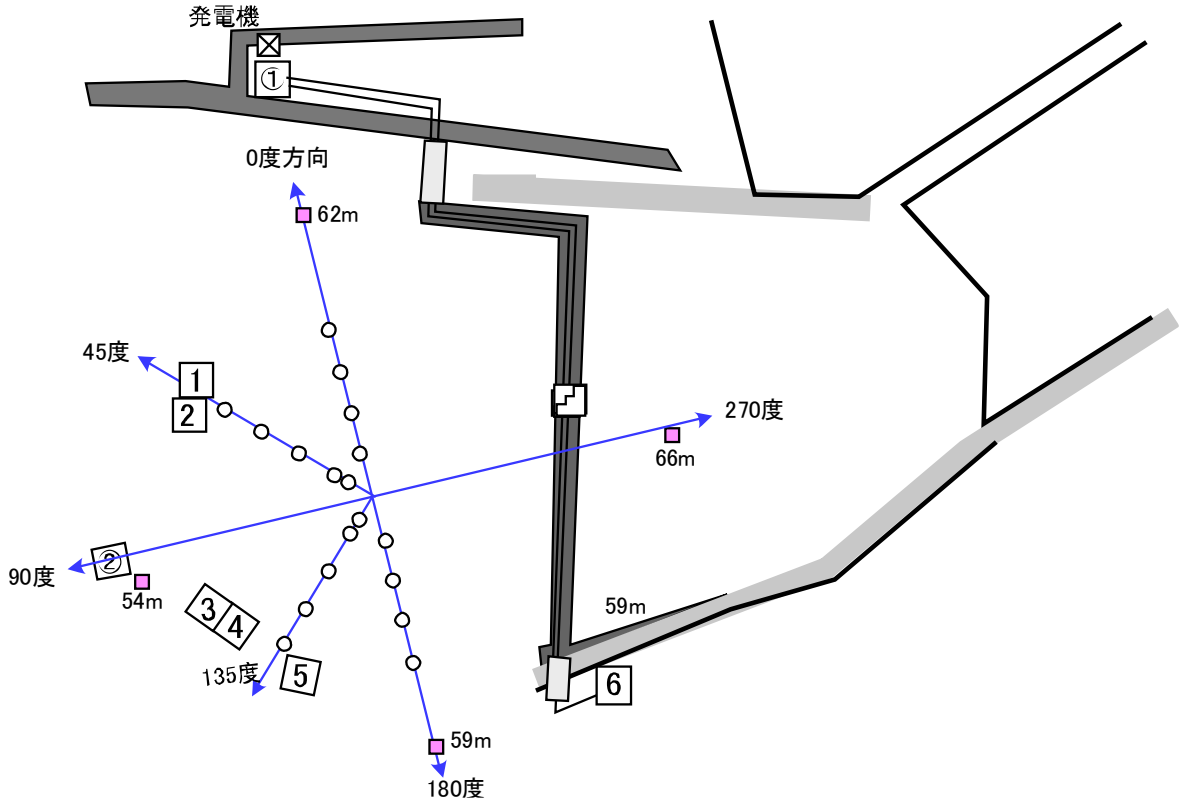


図 4.2-15　模擬防爆壁の最大飛散位置　No.2-2

爆発後の爆点の様子まとめ

爆発後、爆点にできた漏斗孔の大きさを計測した。模擬防爆壁有りの実験では漏斗孔が四角くなり、模擬防爆壁なしの実験では漏斗孔は円形になった。No.2-2 の漏斗孔の直径は No.1 と同じぐらいの大きさになり、No.2-1 の漏斗孔の直径は他と比べて若干小さくなった。

No.2-2 の模擬防爆壁有りの実験では、飛散物が発生したが模擬防爆壁自体の飛散状況は No.1 で行った実験とほぼ同じであった。

4.2.3.2　爆風圧計測結果

(1) 爆風の時間履歴

図 4.2-16～図 4.2-23 に実験ごとの爆風波形を示す。チャンネル番号の英字 a は 1m 計測、b は 0.3m 計測、英字なしは 1m 計測である。

No2-1

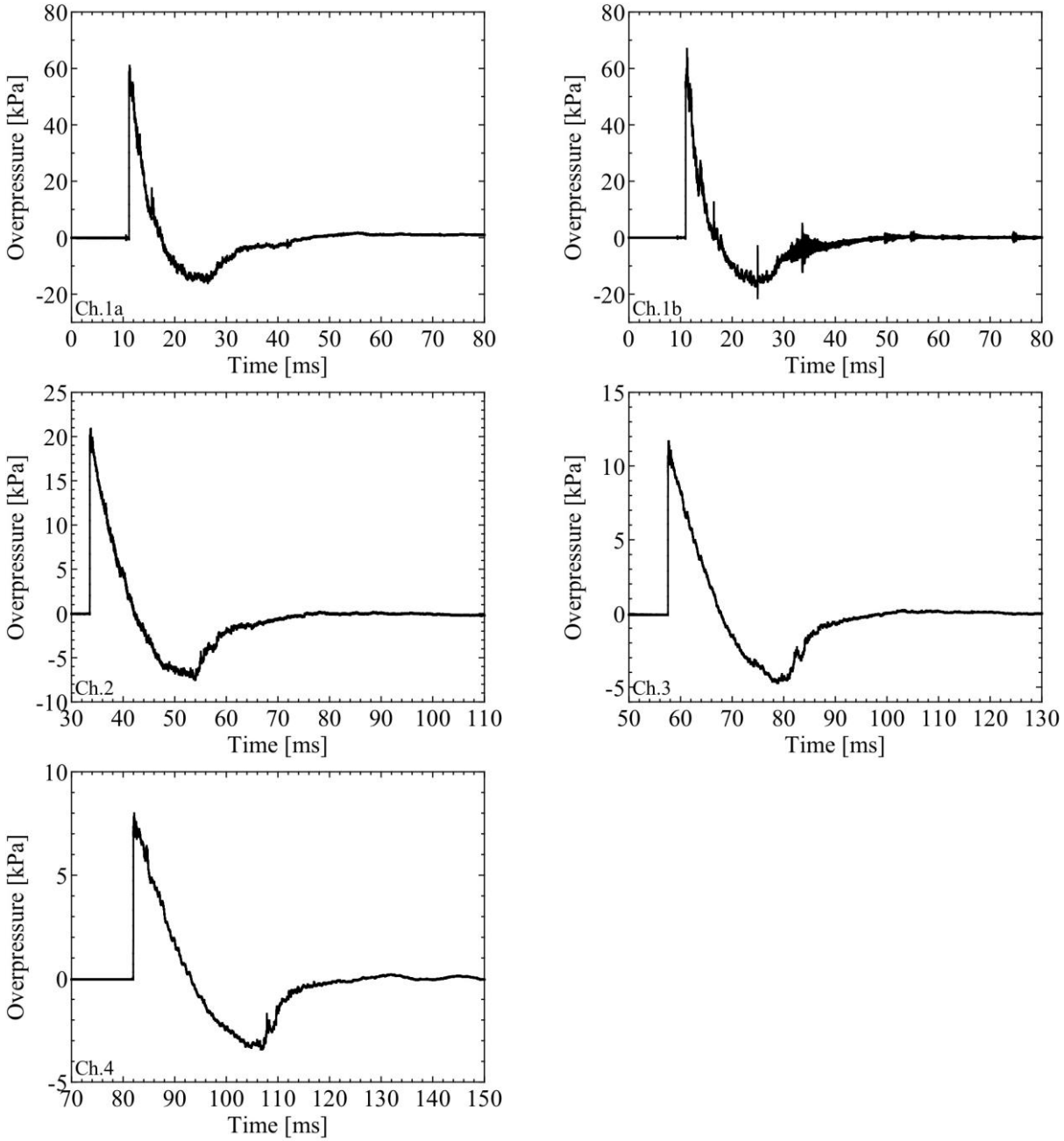


図 4.2-16　No2-1　0 度方向

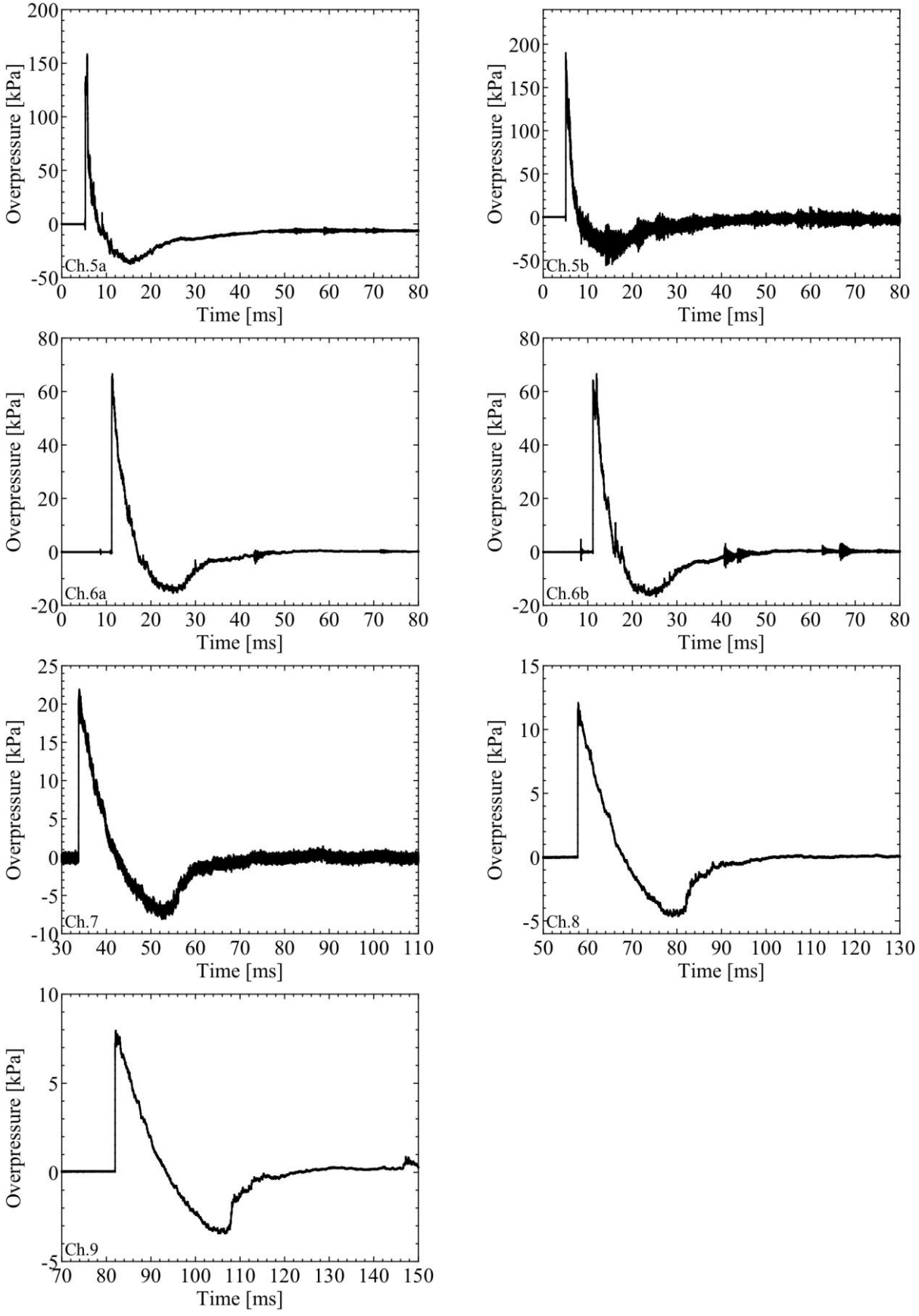


図 4.2-17　No2-1　45 度方向

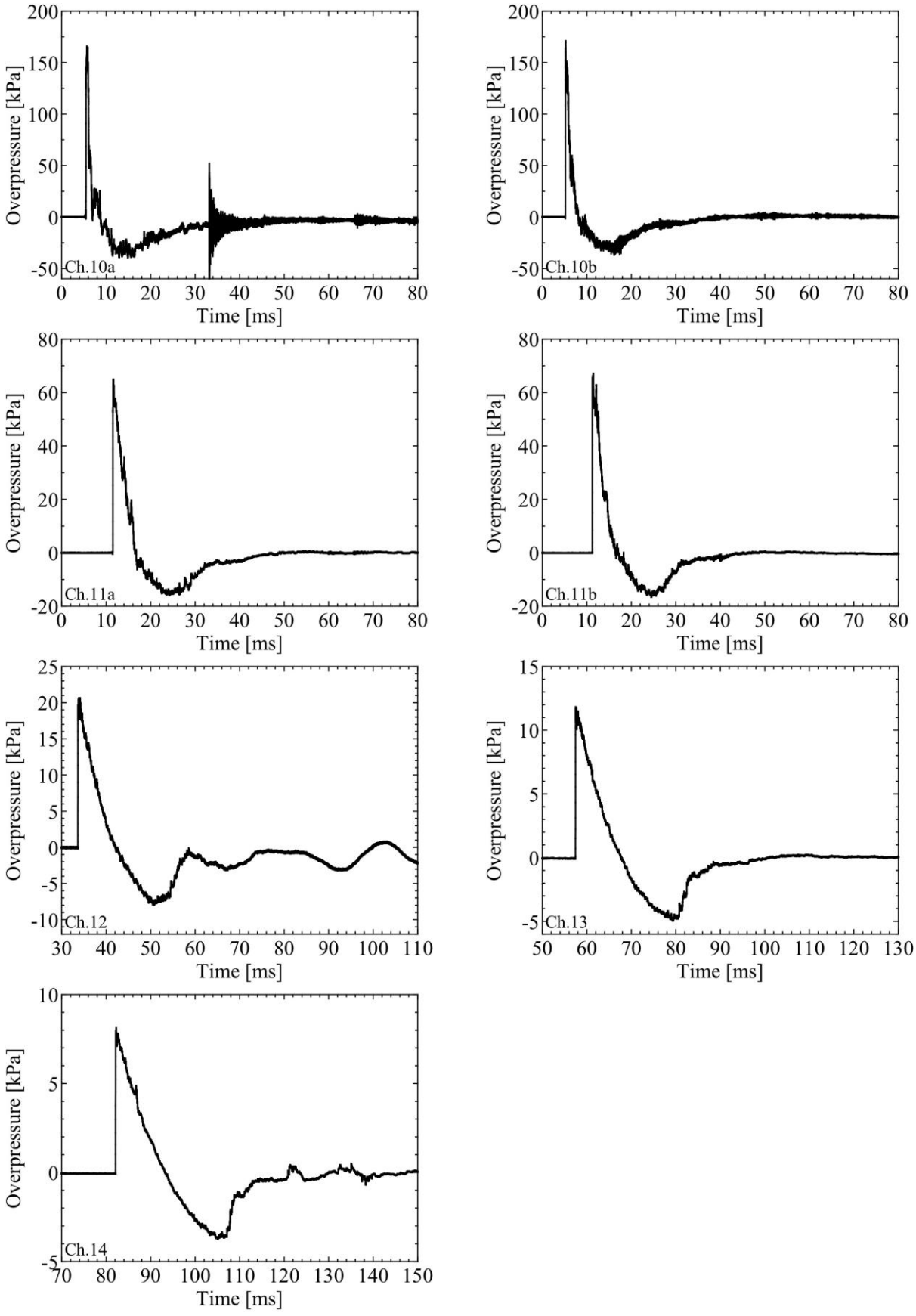


図 4.2-18　No2-1　135 度方向

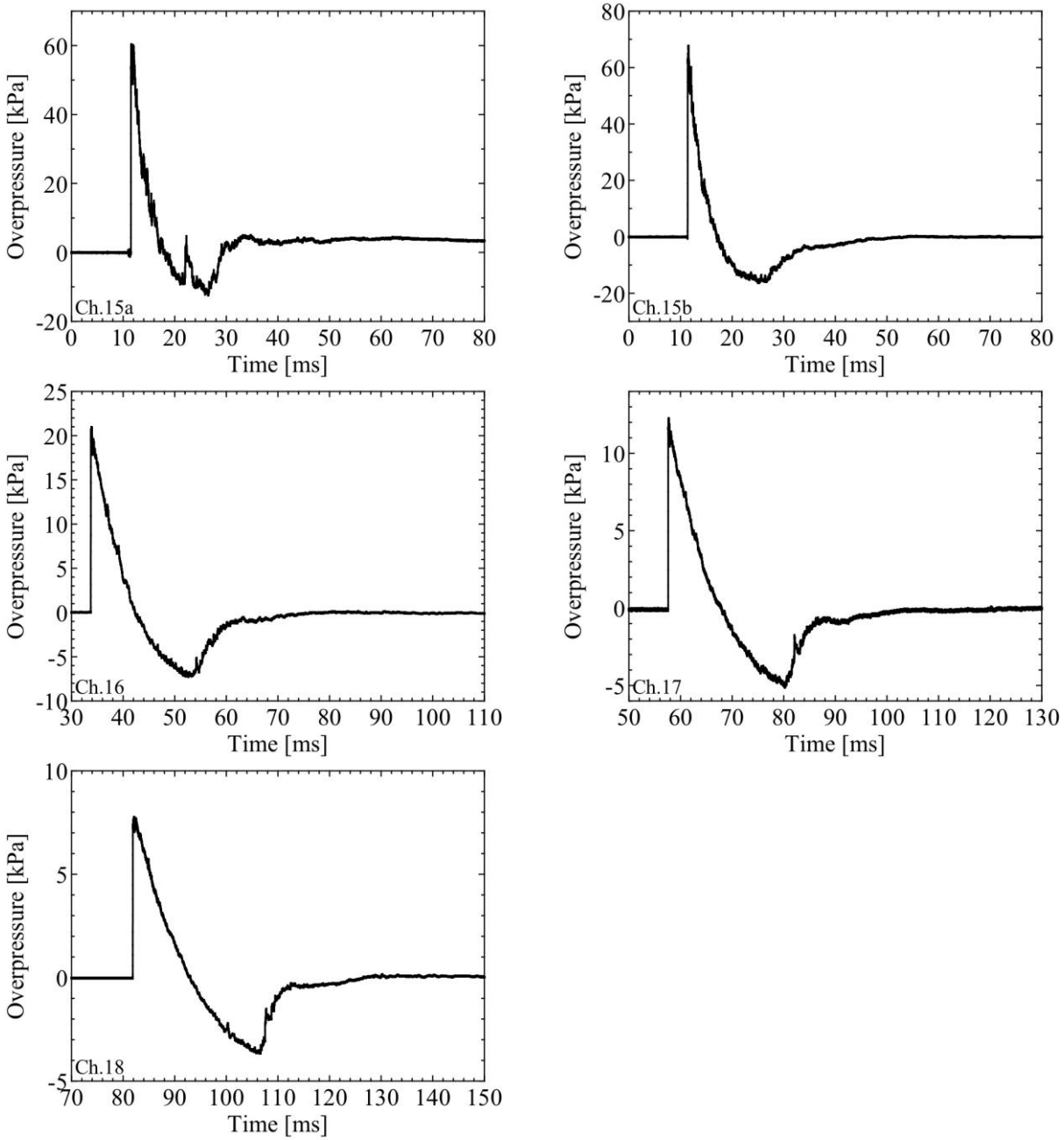


図 4.2-19　No2-1　180 度方向

No2-2

・飛散物がセンサ架台に衝突したことによって振動が観測される。爆点に近いセンサーほど影響が観測されやすい。

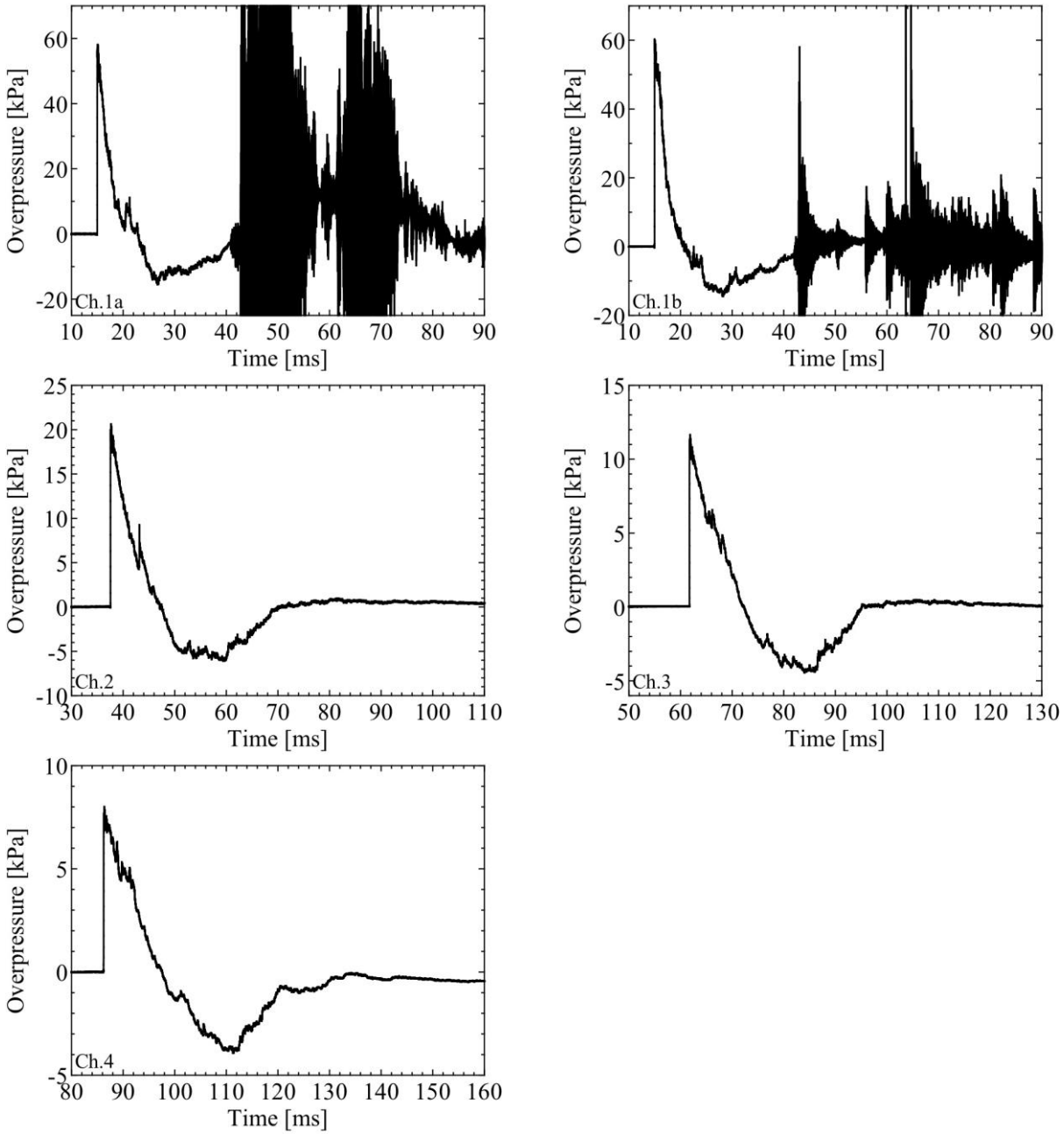


図 4.2-20　No2-2　0 度方向

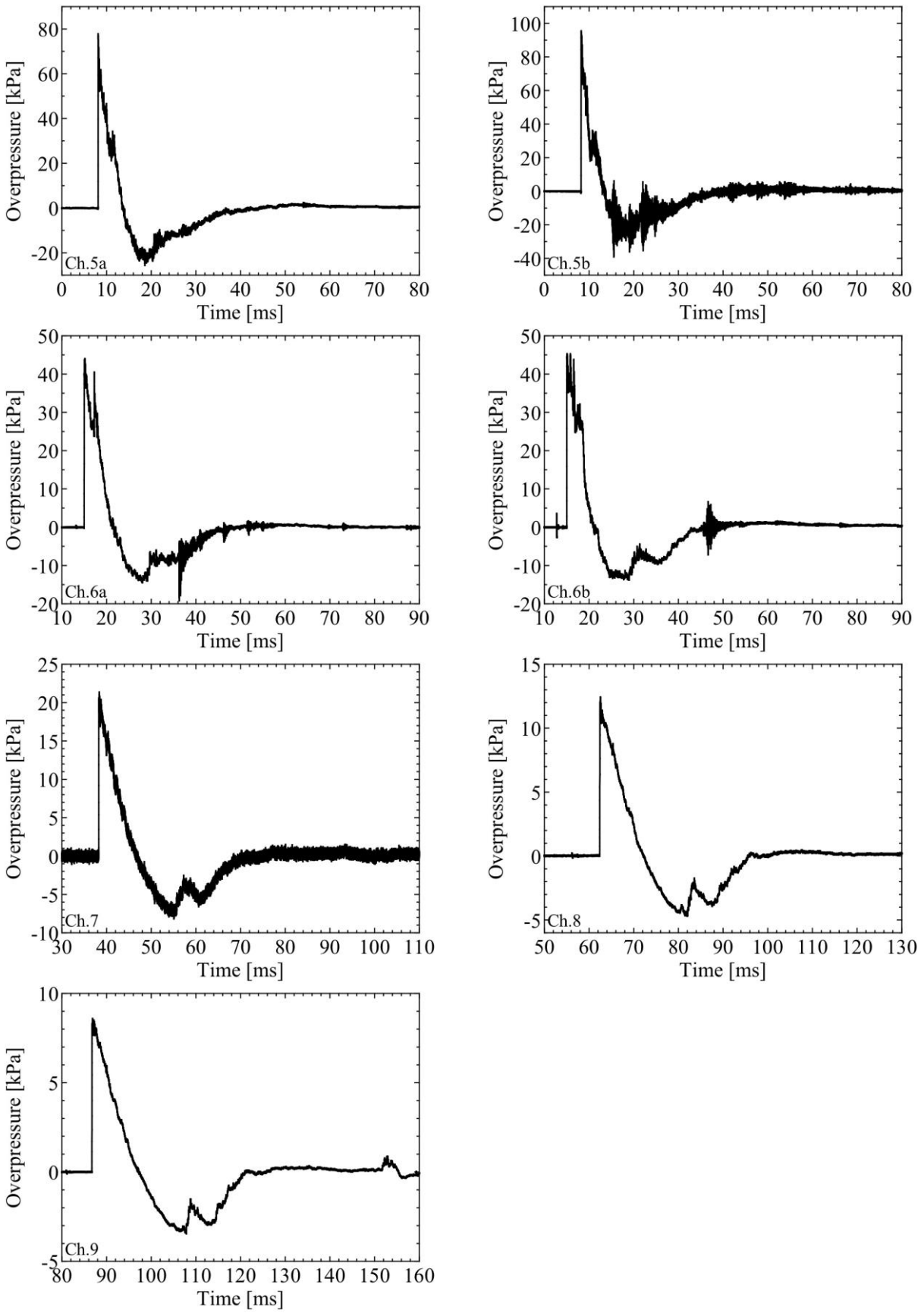


図 4.2-21　No2-2　45 度方向

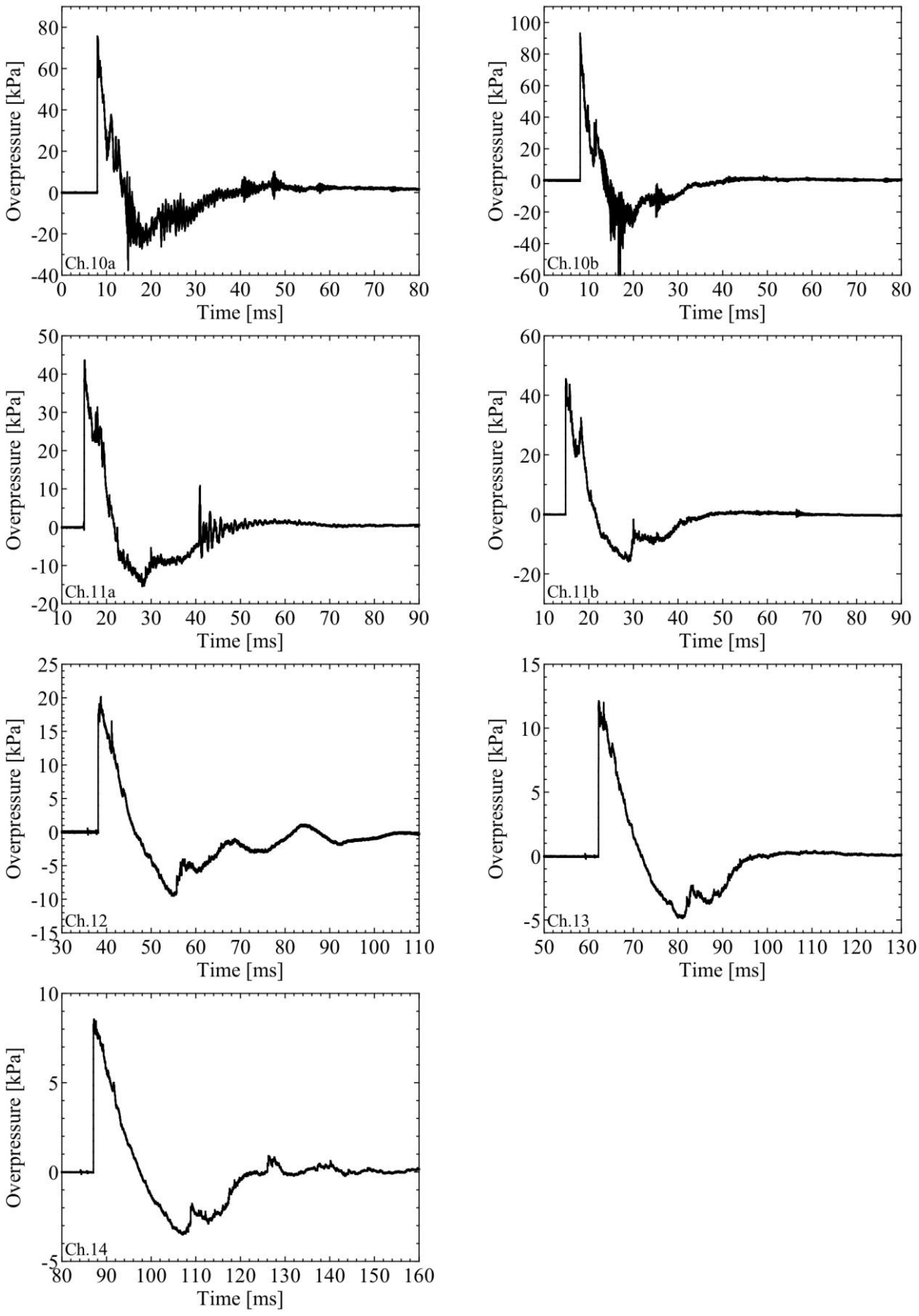


図 4.2-22　No2-2　135 度方向

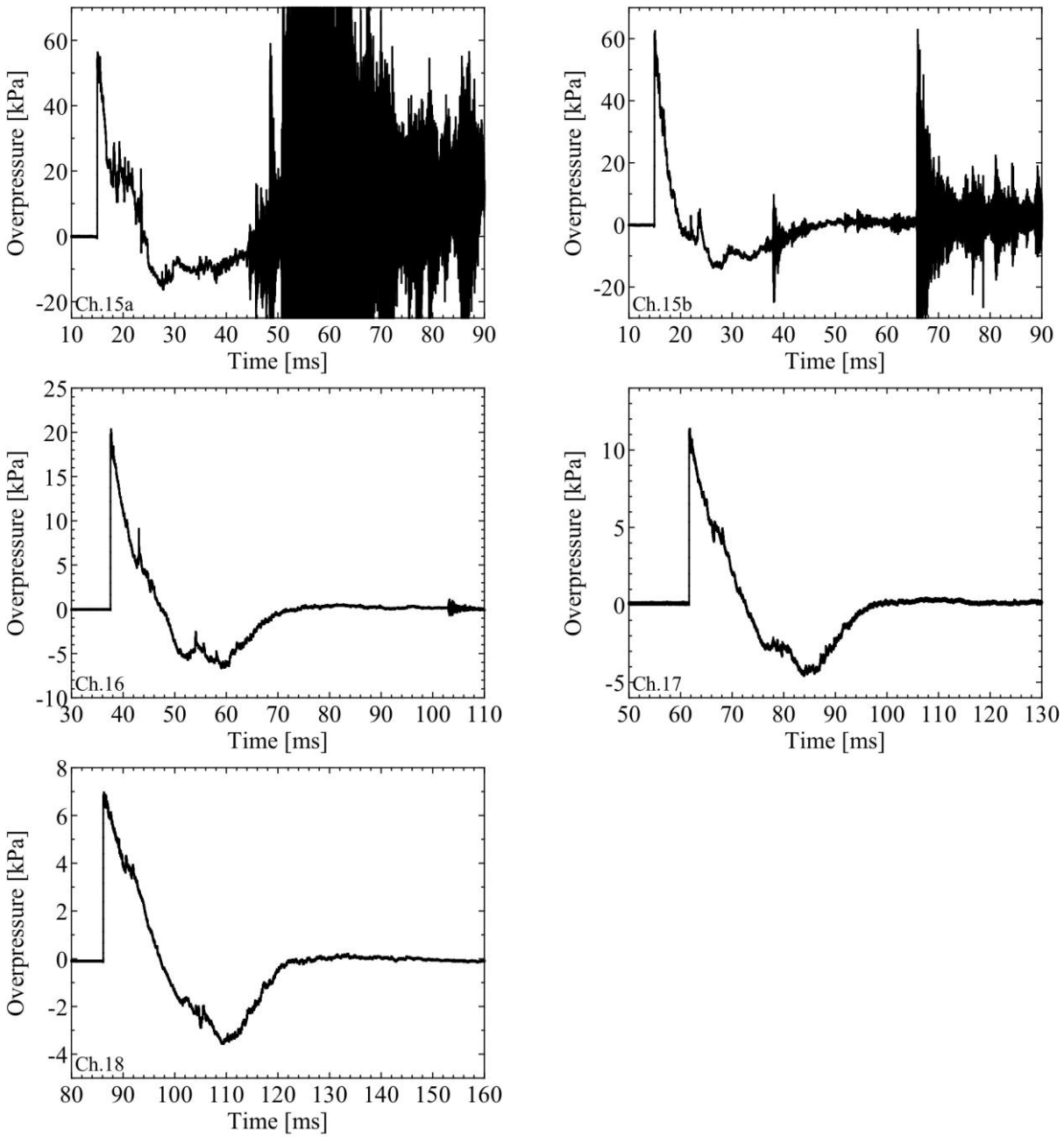


図 4.2-23　No2-2　180 度方向

(2) 爆風パラメータ

得られた爆風波形は、自然スプライン関数により補間され、爆風パラメータ（ピーク静水過圧、正圧相の時間積分であるインパルス、到達時間、持続時間）を算出した。その結果を表 4.2-6、6.2-7 に示す。なお、実験では EMX2 を 15.49 kg を使用したが、2 トン煙火火薬庫の 1/4.396 スケールである 23.55 kg を用いて換算距離を求めた。

表 4.2-6　No2-1 の爆風パラメータ

	角度 (º)	換算距離 ($m/kg^{1/3}$)	ピーク静水過圧 (kPa)	正圧相インパルス (Pa s)	到達時刻 (ms)	持続時間 (ms)
Ch.1a	0	3.00	59.96	143.05	11.17	6.21
Ch.1b		3.00	63.61	130.78	11.00	5.37
Ch.2		5.99	20.91	76.53	33.59	8.45
Ch.3		8.99	11.58	53.25	57.59	10.24
Ch.4		11.96	7.77	39.59	82.03	11.13
Ch.5a	45	2.02	141.40	130.13	5.35	2.74
Ch.5b		2.02	177.78	182.86	5.07	2.74
Ch.6a		2.99	65.33	143.80	11.22	5.70
Ch.6b		3.00	63.61	141.81	11.11	5.70
Ch.7		6.02	20.86	76.46	33.76	8.61
Ch.8		9.01	11.88	53.18	57.76	10.24
Ch.9		11.98	7.81	41.05	81.97	11.47
Ch.10a	135	2.01	163.58	147.87	5.24	3.47
Ch.10b		2.02	153.64	170.87	5.14	2.96
Ch.11a		3.01	64.91	148.76	11.50	5.20
Ch.11b		2.99	66.35	142.91	11.30	5.76
Ch.12		5.99	20.47	76.05	33.65	8.45
Ch.13		8.98	11.55	52.77	57.48	10.18
Ch.14		12.00	8.02	39.75	82.14	11.07
Ch.15a	180	3.01	60.21	142.19	11.56	6.54
Ch.15b		3.00	65.15	135.54	11.46	5.44
Ch.16		6.01	20.76	78.69	33.76	8.56
Ch.17		9.01	12.25	51.60	57.64	10.24
Ch.18		11.99	7.65	39.02	81.92	11.13

表 4.2-7　No2-2 の爆風パラメータ

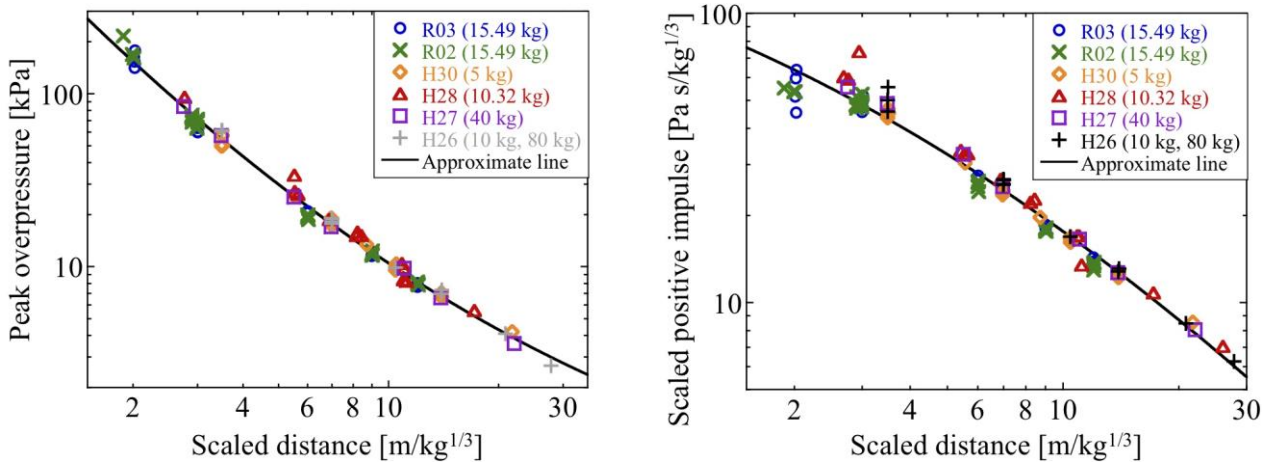
	角度 (º)	換算距離 (m/kg$^{1/3}$)	ピーク静水過圧 (kPa)	正圧相インパルス (Pa s)	到達時刻 (ms)	持続時間 (ms)
Ch.1a	0	3.00	57.13	128.94	15.03	7.83
Ch.1b		3.00	59.18	121.82	14.91	6.10
Ch.2		5.99	20.38	75.67	37.57	9.90
Ch.3		8.99	11.59	53.45	61.78	10.51
Ch.4		11.96	7.81	40.74	86.28	11.24
Ch.5a	45	2.02	71.56	170.46	8.15	5.59
Ch.5b		2.02	93.79	172.86	8.26	5.26
Ch.6a		2.99	44.01	131.17	15.03	6.54
Ch.6b		3.00	44.11	134.64	15.03	5.98
Ch.7		6.02	20.22	75.72	38.29	8.28
Ch.8		9.01	12.16	54.55	62.45	9.84
Ch.9		11.98	8.46	41.25	86.73	10.46
Ch.10a	135	2.01	74.89	170.95	7.92	6.26
Ch.10b		2.02	92.59	169.45	8.10	5.84
Ch.11a		3.01	42.50	136.97	15.03	6.77
Ch.11b		2.99	44.94	134.10	14.82	6.88
Ch.12		5.99	20.06	78.81	38.18	8.11
Ch.13		8.98	11.87	53.80	62.23	9.51
Ch.14		12.00	8.41	40.86	87.12	10.40
Ch.15a	180	3.01	55.27	187.35	15.03	8.67
Ch.15b		3.00	62.09	117.99	14.98	4.72
Ch.16		6.01	20.24	73.45	37.57	9.68
Ch.17		9.01	11.24	52.41	61.73	10.91
Ch.18		11.99	6.91	37.88	86.17	11.02

(3) 基準爆風圧実験の爆風パラメータの距離減衰（R03 と過去の全ての EMX2 の基準爆風圧実験の比較）No2-1

これまでに円柱形の EMX2 を使用した基準爆風圧実験と比較する。これまでの実施条件は下記の通り。H は平成、R は令和である。R03 と R02 は他年度よりも地面に近い位置での起爆である。

表 4.2-8　これまでに実施した EMX2 を使用した基準爆風圧実験

実施年度	実験No	薬量 (kg)	爆薬中心までの地表面からの高さ	
			($m/kg^{1/3}$)	(m)
R03	2-1	15.49	0.078	0.195
R02	2-1	15.49	0.078	0.195
H30	2-1	5	0.18	0.308
H28	2-6	10.32	0.18	0.388
H27	2-2	40	0.18	0.616
H26	4-1	10	0.18	0.388
	4-2	80	0.18	0.776



(a) 換算距離対ピーク静水過圧　　(b) 換算距離対換算正圧相インパルス

図 4.2-24　R02 No2-1 と過去の実験結果（EMX2）の比較

図 4.2-24 にピーク静水過圧と正圧相インパルス分布を示した。R03 では EMX2 15.49 kg を使用したが、煙火火薬庫の 1/4.396 スケールとして 23.55 kg を用いて換算距離を求めたため、R02、H30、H29、H27、H26 の薬量も 23.55/15.49 = 1.52 倍して薬量換算した。図 4.2-24 より、R03 の結果は他の 5 年度分のピーク静水過圧と正圧相インパルスは同等であることが確認された。令和 2 年度火薬類爆発影響低減化技術基準検討報告書で示した EMX2 のピーク静水過圧と換算正圧相インパルスを評価する基準線（図中の Approximate line）によって、精度良く 6 年分の実験データを評価できる。この近似線は式(1)~(3)で得られ、今後は All と記載する。ピーク静水過圧 P (kPa)と正圧相インパルス I (Pa s)である。Z は換算距離 ($m/kg^{1/3}$)である。

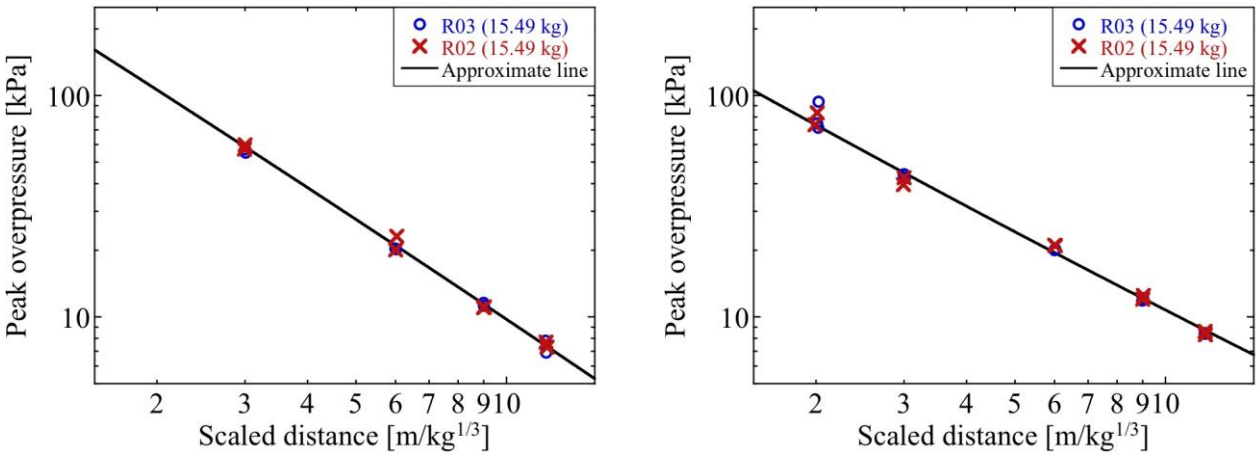
$$X = \log_{10}(Z) \quad (1)$$

$$\log_{10}(P) = 2.8046 - 2.1729X + 0.38845X^2 \quad (2)$$

$$\log_{10}(I/W^{1/3}) = 1.9801 - 0.51793X - 0.21643X^2 \quad (3)$$

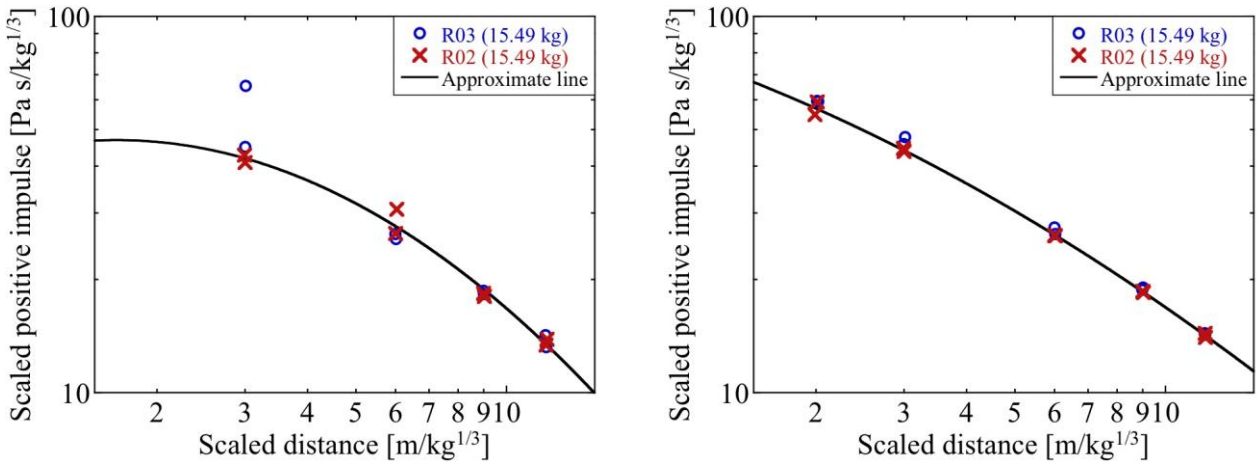
No2-2

同じ実験条件で実施した R02 と R03 の基準防爆壁実験の結果を整理する。EMX2 15.49 kg を使用したが、煙火火薬庫の 1/4.396 スケールとして 23.55 kg を用いて換算距離を求めた。



(a) 0 度と 180 度　　(b) 45 度と 135 度

図 4.2-25　R03 No2-2 と R02 No2-2 の比較、ピーク静水過圧



(a) 0 度と 180 度　　(b) 45 度と 135 度

図 4.2-26　R03 No2-2 と R02 No2-2 の比較、換算正圧相インパルス

図 4.2-25 にピーク静水過圧、図 4.2-26 に正圧相インパルス分布を示した。R02 と R03 のピーク静水過圧と正圧相インパルスは同等であることが確認された。令和 2 年度火薬類爆発影響低減化技術基準検討報告書で示した EMX2 のピーク静水過圧と換算正圧相インパルスを評価する近似線（図中の Approximate line）を基準防爆壁の基準線とする。これは式(4)~(6)で得られ、今後は wall-standard と記載する。ピーク静水過圧 P (kPa)と正圧相インパルス I (Pa s)である。Z は換算距離 (m/kg$^{1/3}$)である。

$$X = \log_{10}(Z) \quad (4)$$

$$\log_{10}(P) = a + b \cdot X + c \cdot X^2 \quad (5)$$

$$\log_{10}(I/W^{1/3}) = l + m \cdot X + n \cdot X^2 \quad (6)$$

表 4.2-9　距離減衰式の定数

		a	b	c	l	m	n
wall-standard	0º, 180 º	2.4593	-1.4287	-0.04149	1.6355	0.32474	-0.73669
	45º,135º	2.2437	-1.2690	0.056595	1.9121	-0.45010	-0.23546

(4) 爆風パラメータの距離減衰（All を基準とした場合における No1 シリーズの等圧、等正圧相インパルス位置）

爆風パラメータを用いて保安距離を決定する場合、基準実験と同等な爆風パラメータが得られる位置を把握する必要がある。ここでは基準を All とした場合について、No1 シリーズの近似線を用いての保安距離の減少/増加を検討する。表 4.2-10 に式(5)と式(6)の距離減衰式の定数を示した。

表 4.2-10　距離減衰式の定数

		a	*b*	*c*	*l*	*m*	*n*
No1-1	0º	2.3037	-1.4940	0.23204	1.9625	-0.68519	-0.05057
	45º	1.8797	-0.31262	-0.51461	1.8527	-0.35233	-0.29723
	135º	2.2634	-1.1997	-0.077399	1.8956	-0.31679	-0.36150
	180º	2.3436	-1.1582	-0.19063	1.9717	-0.54525	-0.21909
No1-2	0º	1.9819	-0.73813	-0.25238	1.7216	-0.18695	-0.38517
	45º	1.6068	0.22498	-0.82071	1.7688	-0.28301	-0.35286
	135º	1.9706	-0.58475	-0.42342	1.8534	-0.45816	-0.24424
	180	2.2455	-1.1415	-0.17187	2.2677	-1.3248	0.18654
No1-3	0º	1.9000	-0.76086	-0.16161	1.7296	-0.35157	-0.24681
	45º	1.8299	-0.61357	-0.24239	1.7510	-0.33861	-0.28572
	135º	1.9730	-0.68409	-0.38898	1.7967	-0.41946	-0.25722
	180º	2.0947	-0.95303	-0.26320	1.8212	-0.57420	-0.16590
No1-4	0º	2.6172	-2.2217	0.61962	1.9239	-0.58745	-0.066282
	45º	2.2100	-1.2403	0.088571	1.8767	-0.30203	-0.33971
	135º	2.0817	-0.68242	-0.31211	1.8942	-0.24742	-0.40812
	180º	2.3664	-1.1802	-0.20413	1.5546	0.43689	-0.73150
No1-5	0º	1.9190	-0.36298	-0.50013	1.6754	0.0052403	-0.52407
	45º	2.0946	-1.1731	0.12479	1.7908	-0.22795	-0.34034
	135º	2.4597	-1.5222	0.035130	1.9911	-0.67579	-0.080806
	180º	2.2862	-1.3786	0.14364	1.8541	-0.12425	-0.47563

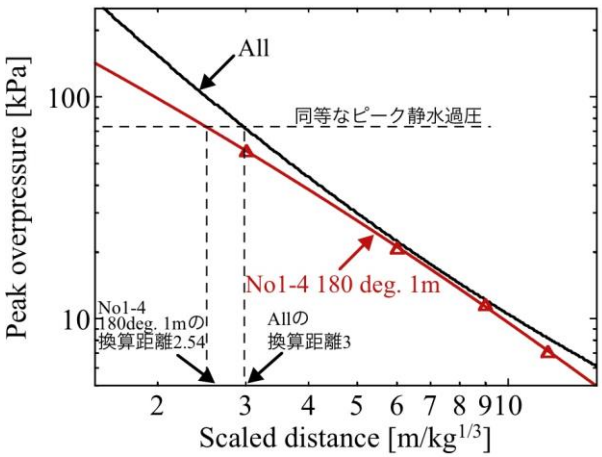


図 4.2-27　All の換算距離 3 のピーク静水過圧に相当する No1-4 の 180 度における換算距離の算出例

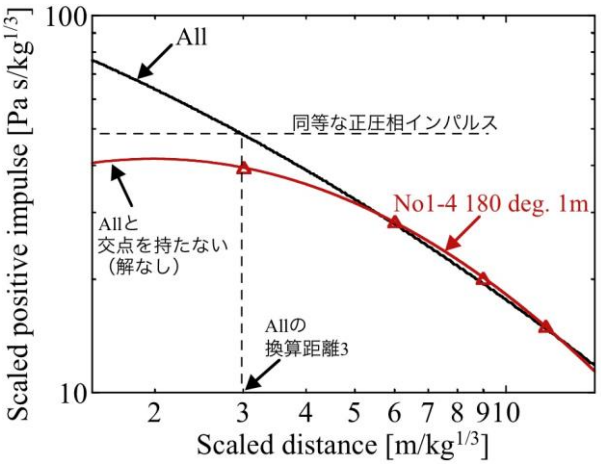


図 4.2-28　All の換算距離 3 の正圧相インパルスに相当する No1-4 の 180 度における換算距離の算出例

図 4.2-27 と図 4.2-28 に All の換算距離 3 のピーク静水過圧と正圧相インパルスが得られる No1-4 の 180 度における換算距離の算出例を示した。No1-4 の 180 度においてピーク静水過圧は換算距離 2.54 において All の換算距離 3 のピーク静水過圧と同等な値が得られる（横の破線と青線の交点の位置）のに対し、正圧相インパルスは近似線の外挿領域において同等な値が得られない（横の破線と青線の交点を持たない）。このような場合を「解なし」として記載する。

角度ごとのピーク静水過圧比較、正圧相インパルス比較、基準と同等の爆風パラメータが得られる No1 シリーズの換算距離を図 4.2-29～図 4.2-43 に示した。黒点線は原点を通る傾き 1 の線であり基準と同じ保安距離である。そのため、黒点線よりも下側では保安距離減少（爆風低減）、上側では保安距離増大（爆風強化）を意味する。また、基準の換算距離 3、6、9、12 と同等なピーク静水過圧と正圧相インパルスが得られる各実験の換算距離を表 4.2-11～6.2-20 に示した。

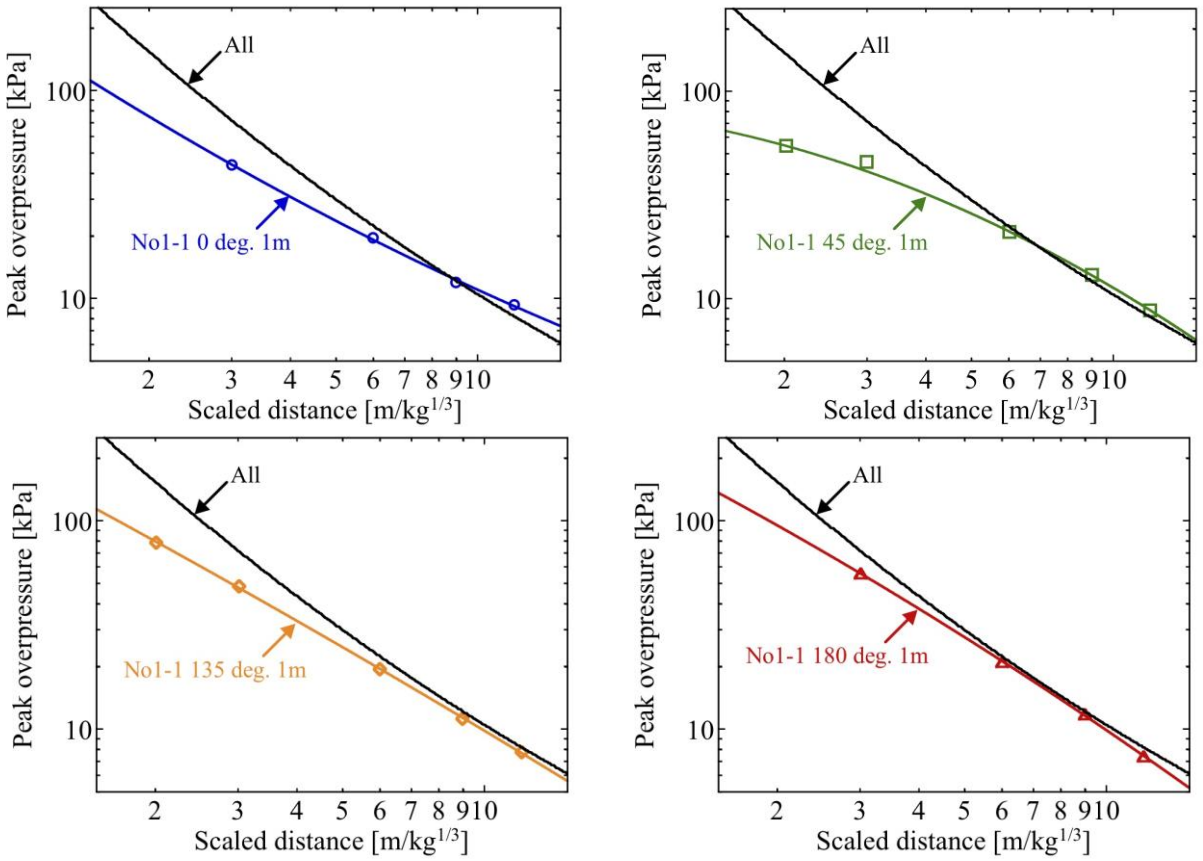


図 4.2-29　All と No1-1 の角度ごとのピーク静水過圧比較

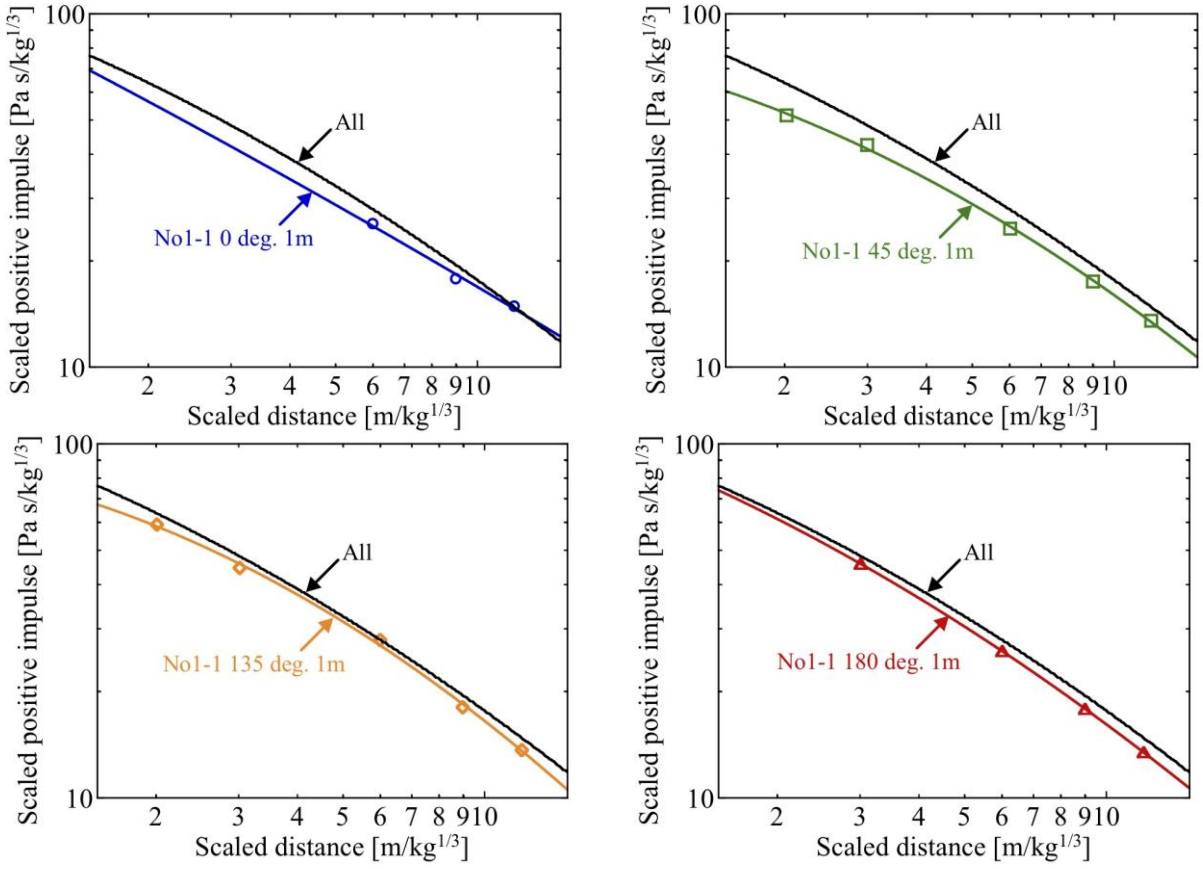
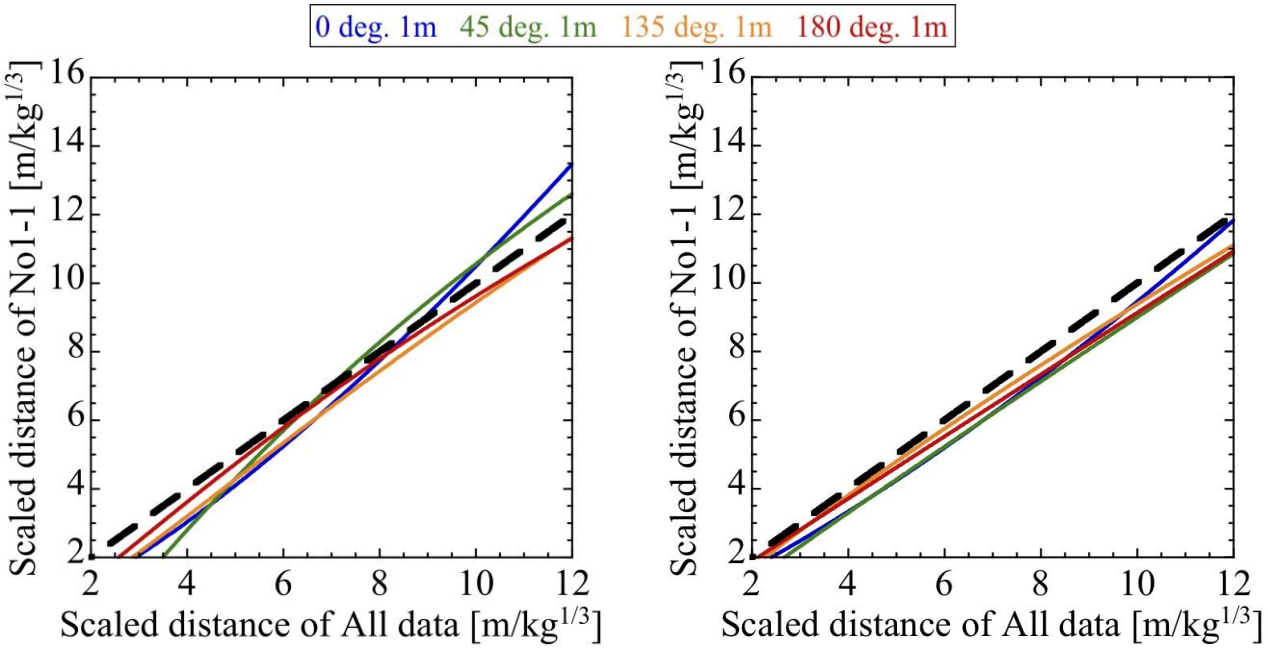


図 4.2-30　All と No1-1 の角度ごとの正圧相インパルス比較



(a) ピーク静水過圧基準　　(b) 正圧相インパルス基準

図 4.2-31　All と同等の爆風パラメータが得られる No1-1 の換算距離

表 4.2-11　All と同等のピーク静水過圧が得られる No1-1 の換算距離

All	No1-1			
	0 度	45 度	135 度	180 度
3	2.06	1.17	2.15	2.48
6	5.24	5.70	5.35	5.79
9	9.09	9.45	8.45	8.73
12	13.48	12.61	11.34	11.31

表 4.2-12　All と同等の正圧相インパルスが得られる No1-1 の換算距離

All	No1-1			
	0 度	45 度	135 度	180 度
3	2.49	2.32	2.78	2.80
6	5.20	5.23	5.75	5.53
9	8.33	8.07	8.50	8.23
12	11.83	10.85	11.11	10.93

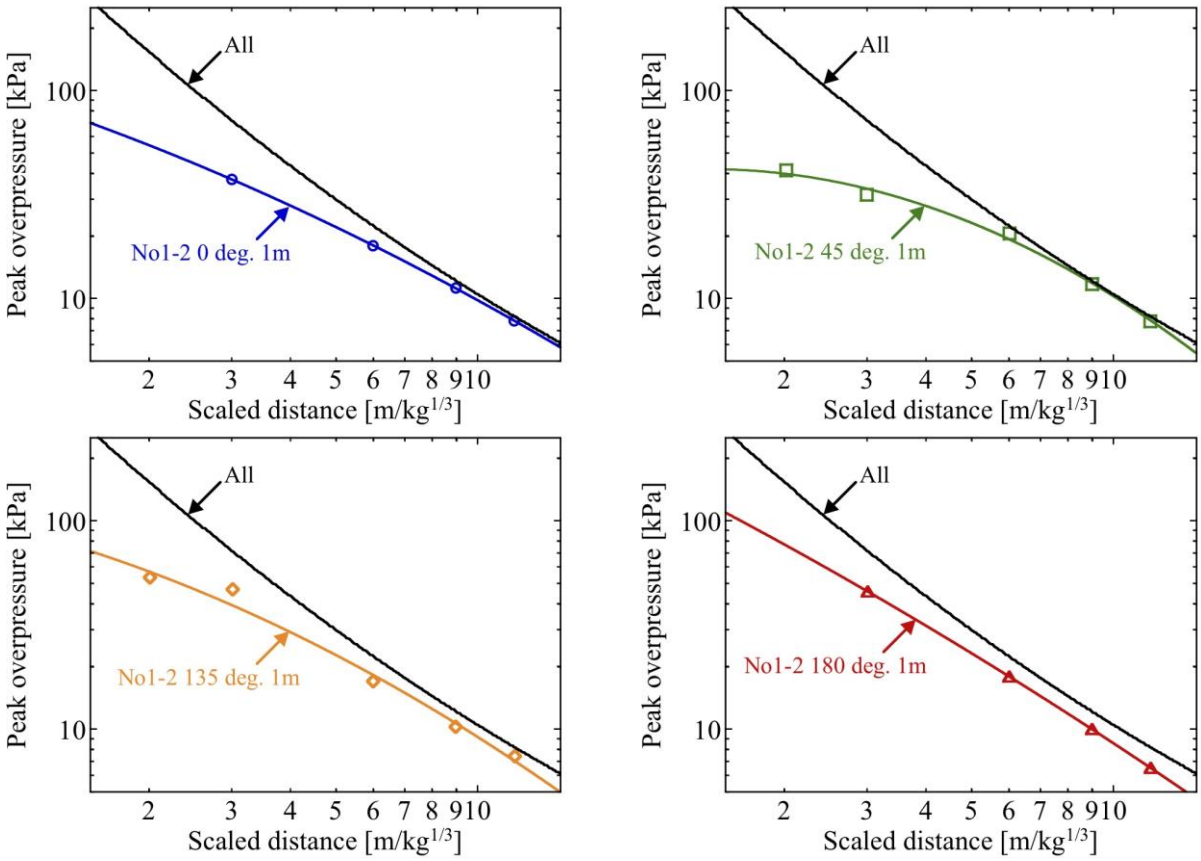


図 4.2-32　All と No1-2 の角度ごとのピーク静水過圧比較

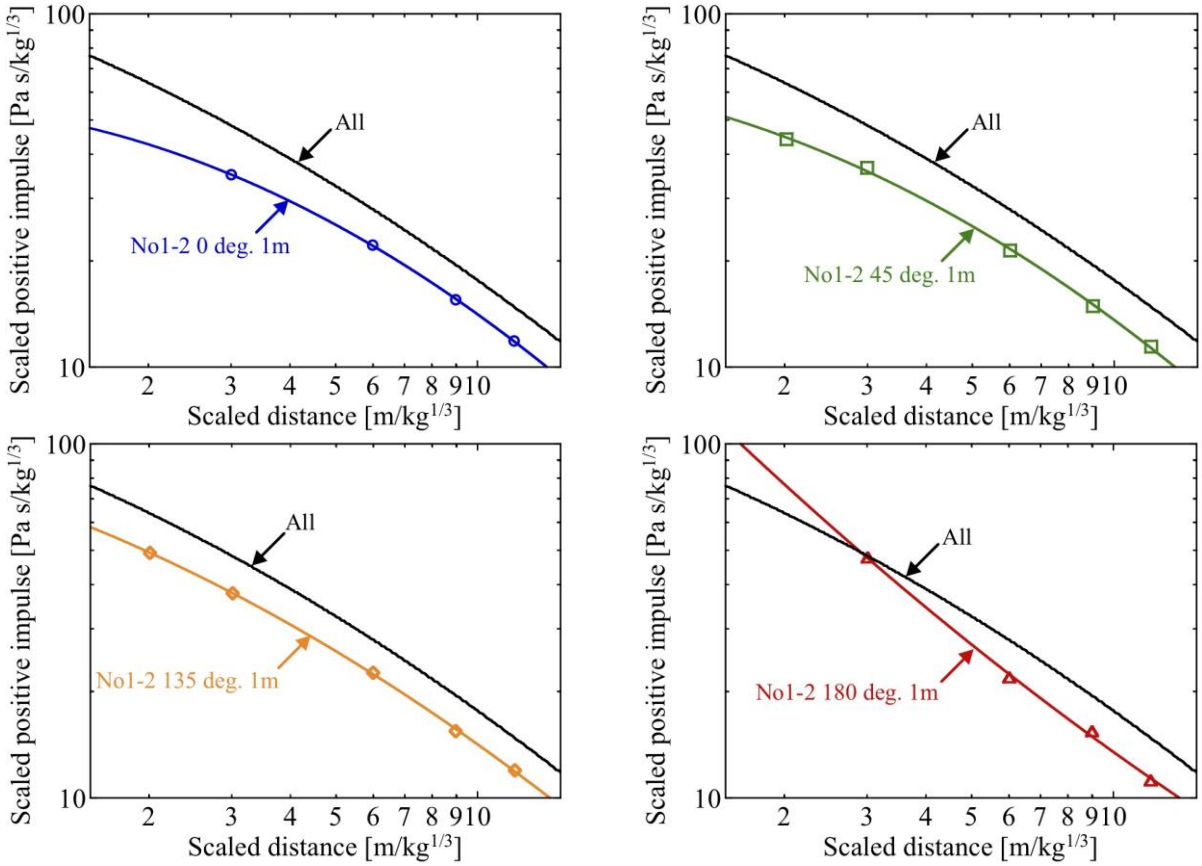
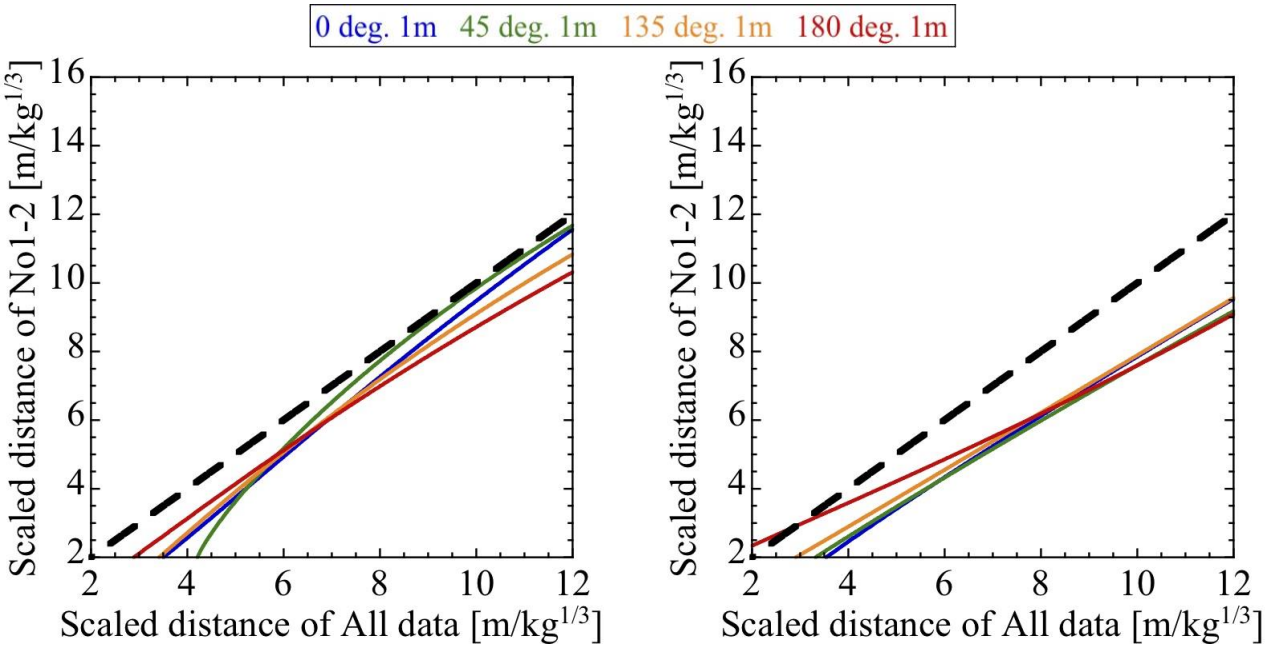


図 4.2-33　All と No1-2 の角度ごとの正圧相インパルス比較



(a) ピーク静水過圧基準　　(b) 正圧相インパルス基準

図 4.2-34　All と同等の爆風パラメータが得られる No1-2 の換算距離

表 4.2-13　All と同等のピーク静水過圧が得られる No1-2 の換算距離

All	No1-2			
	0 度	45 度	135 度	180 度
3	1.45	解なし	1.49	2.11
6	4.93	5.18	5.06	5.12
9	8.39	8.84	8.17	7.87
12	11.56	11.68	10.84	10.32

表 4.2-14　All と同等の正圧相インパルスが得られる No1-2 の換算距離

All	No1-2			
	0 度	45 度	135 度	180 度
3	1.43	1.71	2.07	2.97
6	4.34	4.33	4.55	4.86
9	6.99	6.80	7.06	6.88
12	9.54	9.18	9.57	9.09

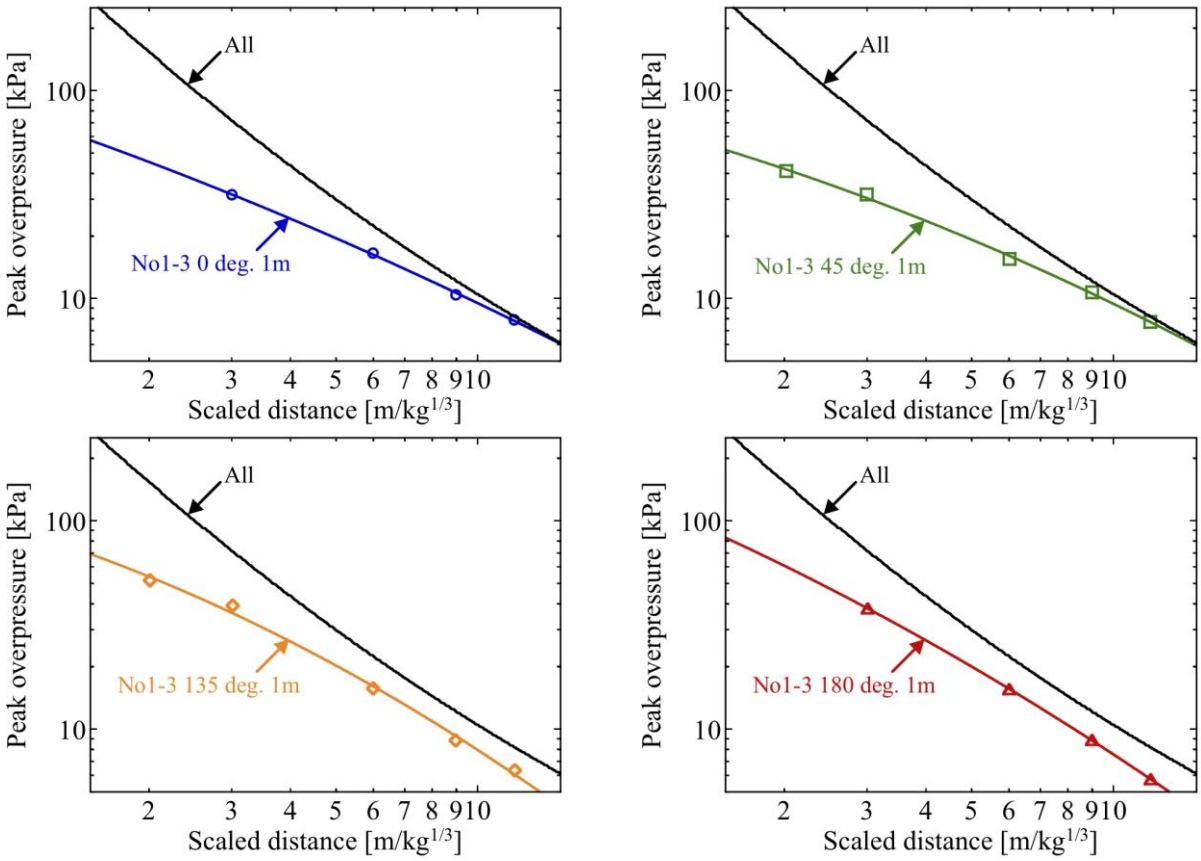


図 4.2-35　All と No1-3 の角度ごとのピーク静水過圧比較

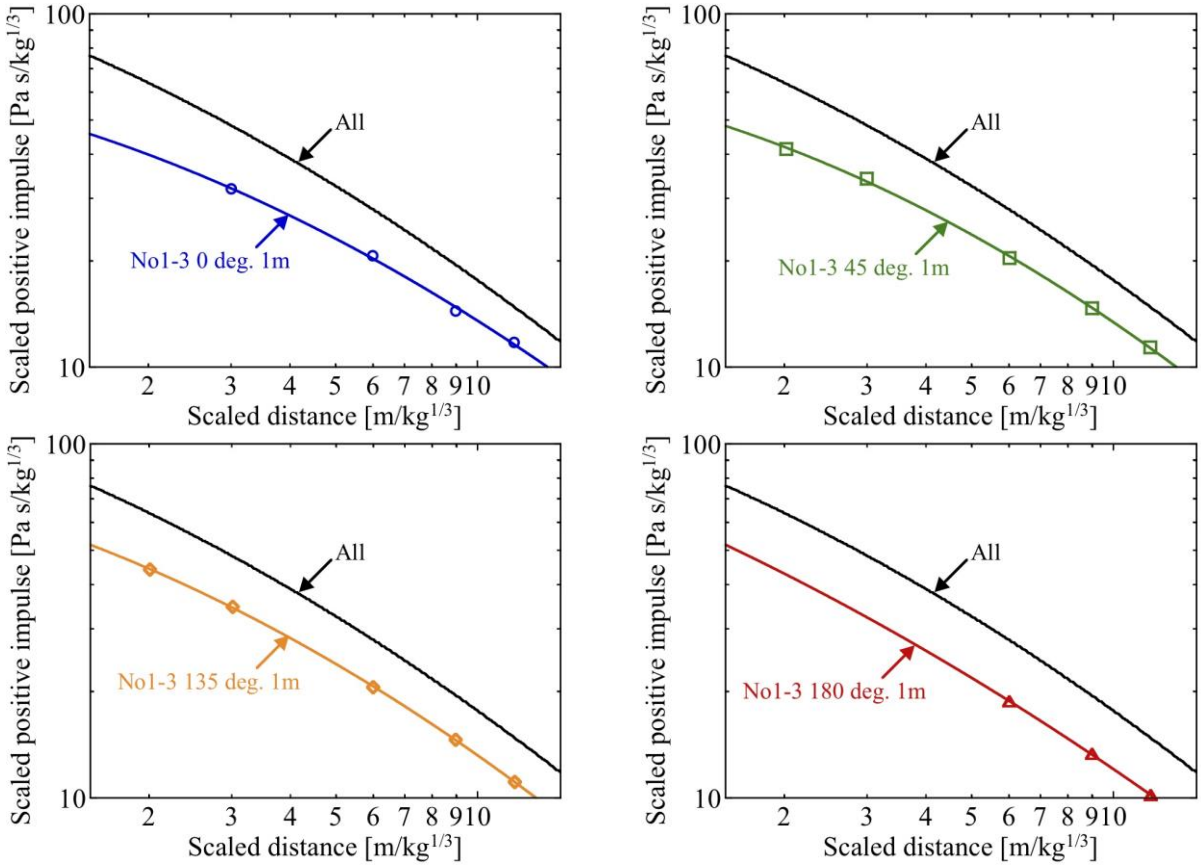
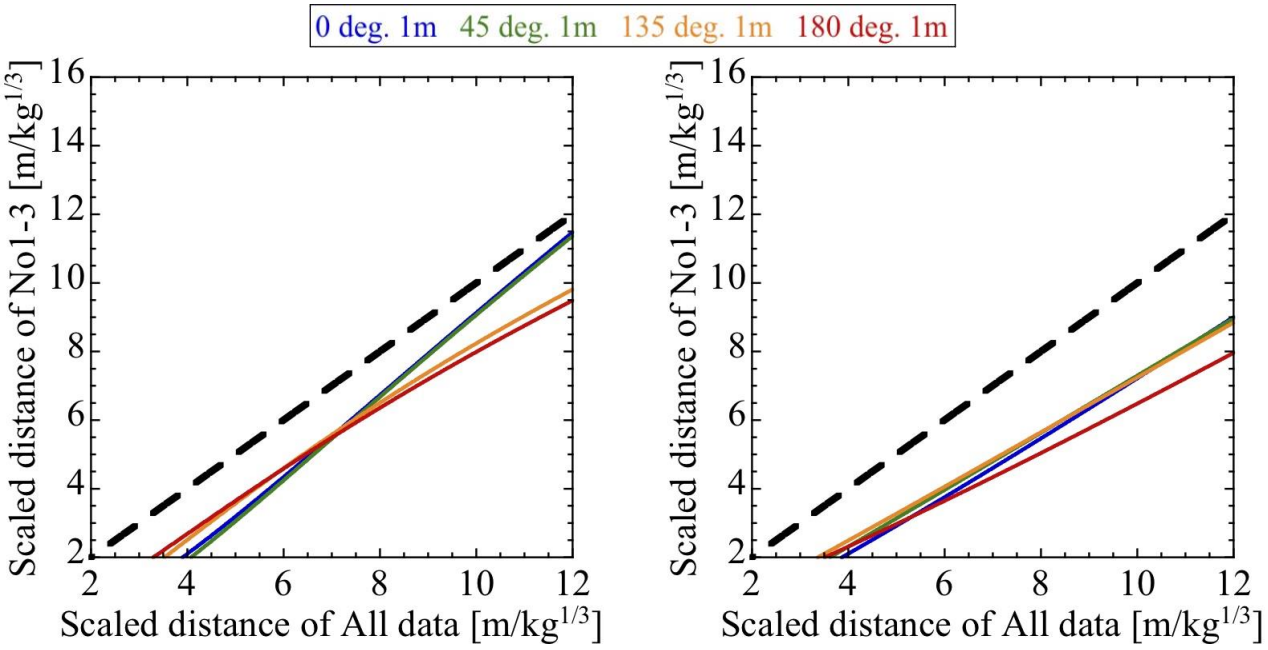


図 4.2-36　All と No1-3 の角度ごとの正圧相インパルス比較



(a) ピーク静水過圧基準　　(b) 正圧相インパルス基準

図 4.2-37　All と同等の爆風パラメータが得られる No1-3 の換算距離

表 4.2-15　All と同等のピーク静水過圧が得られる No1-3 の換算距離

All	No1-3			
	0 度	45 度	135 度	180 度
3	1.14	0.90	1.43	1.72
6	4.34	4.25	4.60	4.59
9	7.93	7.88	7.40	7.19
12	11.48	11.37	9.81	9.49

表 4.2-16　All と同等の正圧相インパルスが得られる No1-3 の換算距離

All	No1-3			
	0 度	45 度	135 度	180 度
3	1.32	1.49	1.72	1.68
6	3.76	3.97	4.06	3.65
9	6.34	6.47	6.45	5.76
12	9.01	8.97	8.84	7.96

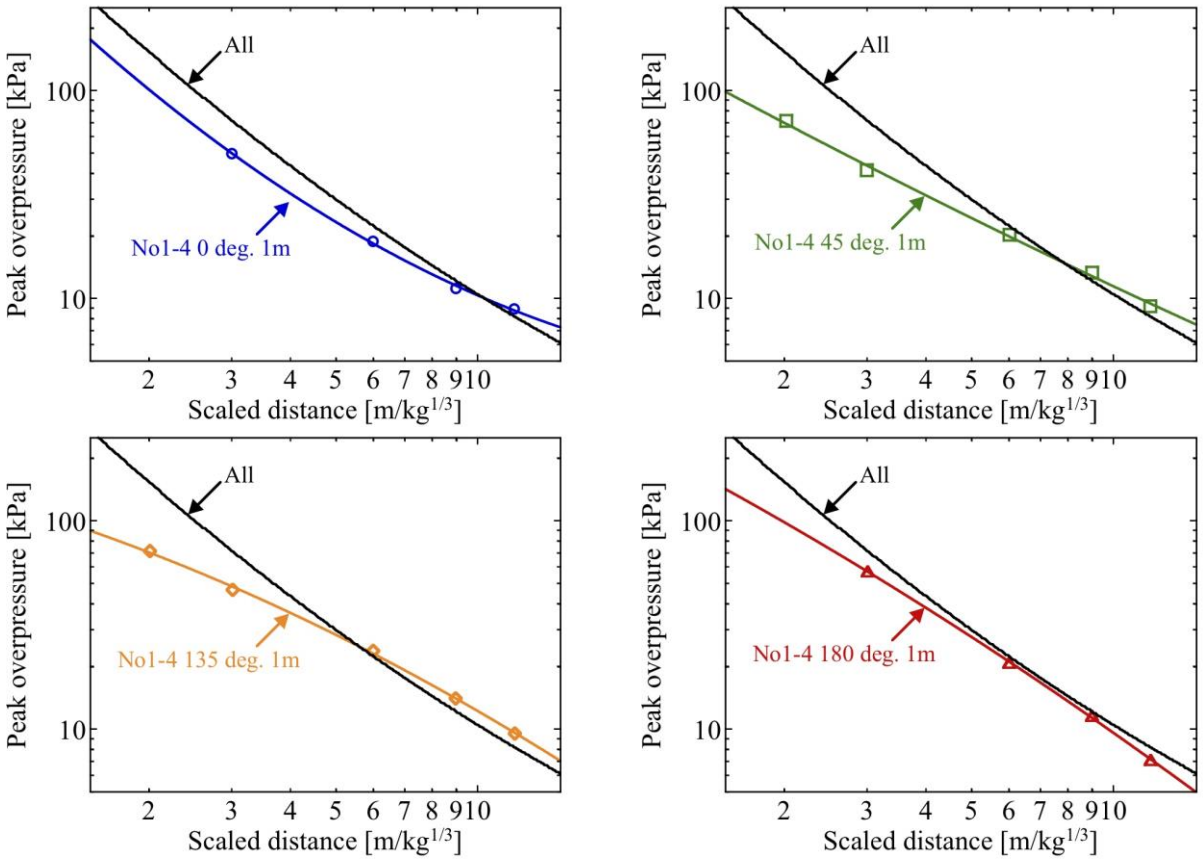


図 4.2-38　All と No1-4 の角度ごとのピーク静水過圧比較

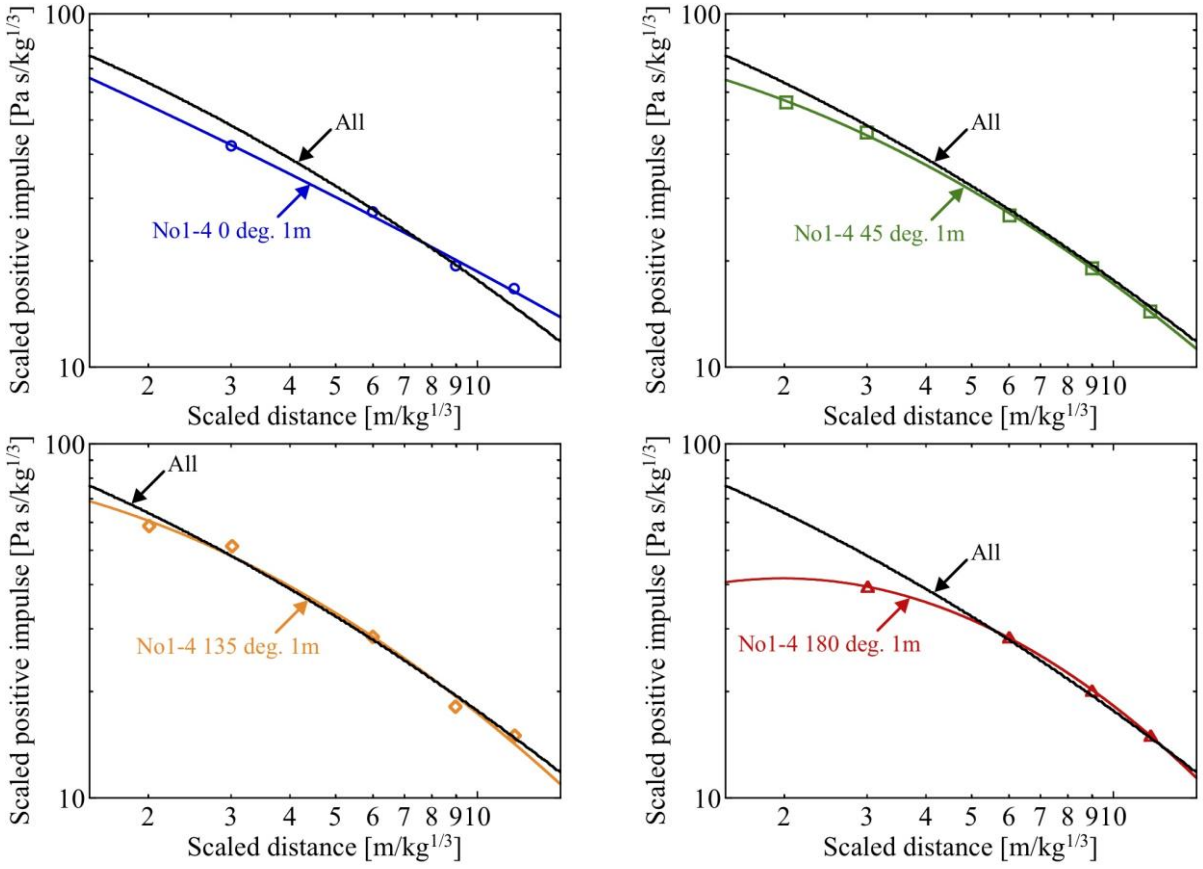
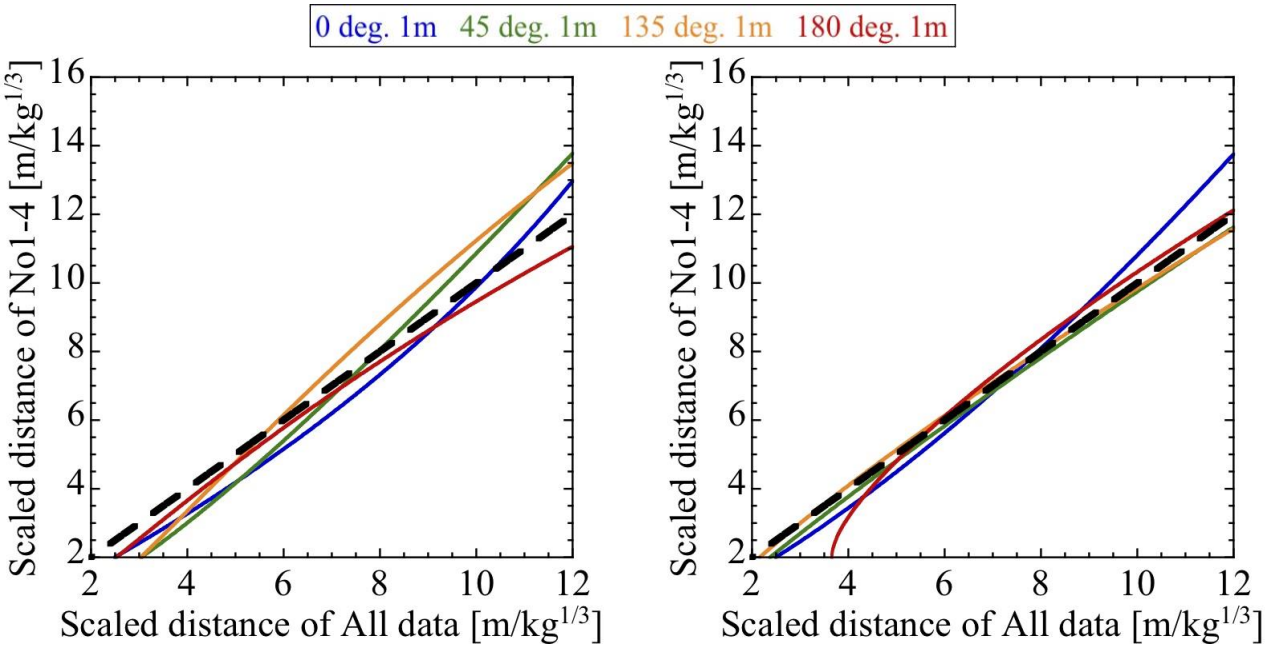


図 4.2-39　All と No1-4 の角度ごとの正圧相インパルス比較



(a) ピーク静水過圧基準　　(b) 正圧相インパルス基準

図 4.2-40　All と同等の爆風パラメータが得られる No1-4 の換算距離

表 4.2-17　All と同等のピーク静水過圧が得られる No1-4 の換算距離

All	No1-4			
	0 度	45 度	135 度	180 度
3	2.42	1.96	1.96	2.54
6	5.16	5.40	6.15	5.78
9	8.55	9.44	10.04	8.61
12	12.97	13.78	13.49	11.06

表 4.2-18　All と同等の正圧相インパルスが得られる No1-4 の換算距離

All	No1-4			
	0 度	45 度	135 度	180 度
3	2.46	2.69	2.99	解なし
6	5.62	5.83	6.13	6.11
9	9.42	8.79	8.95	9.36
12	13.76	11.63	11.58	12.12

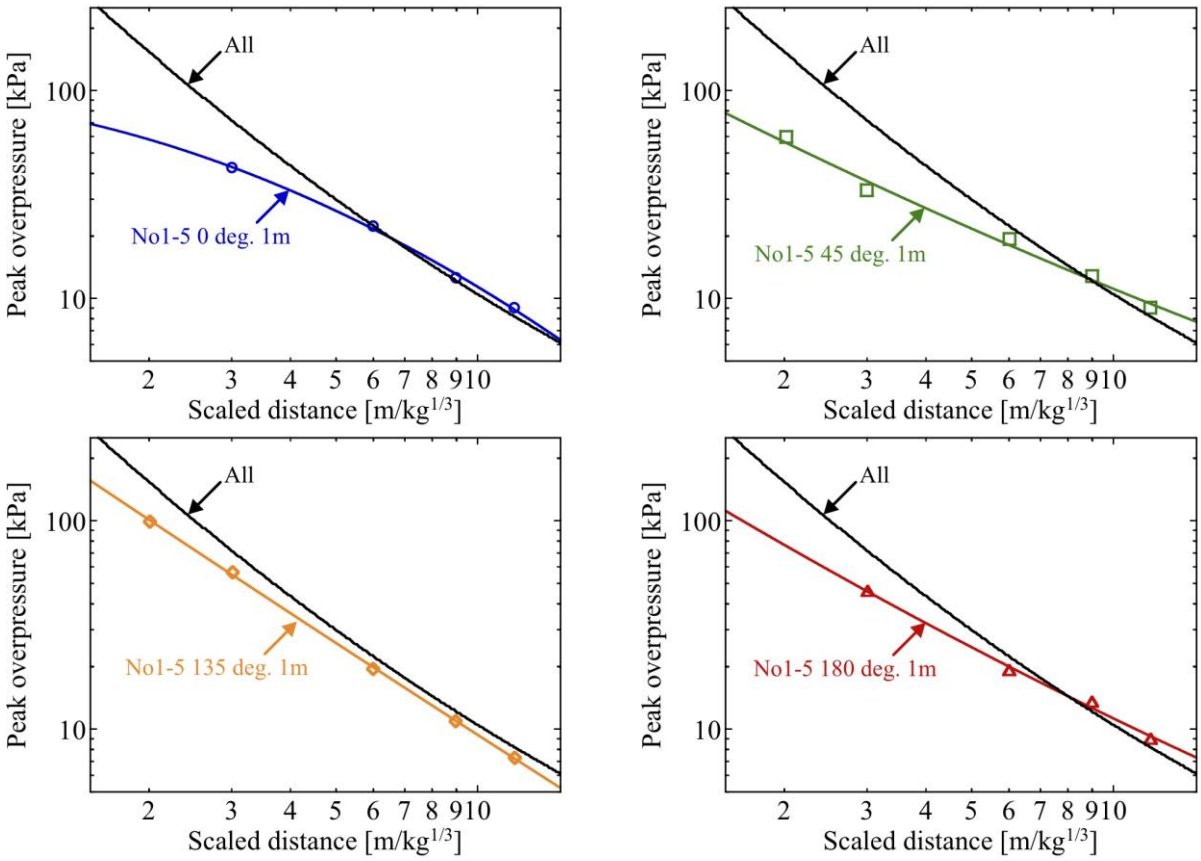


図 4.2-41　All と No1-5 の角度ごとのピーク静水過圧比較

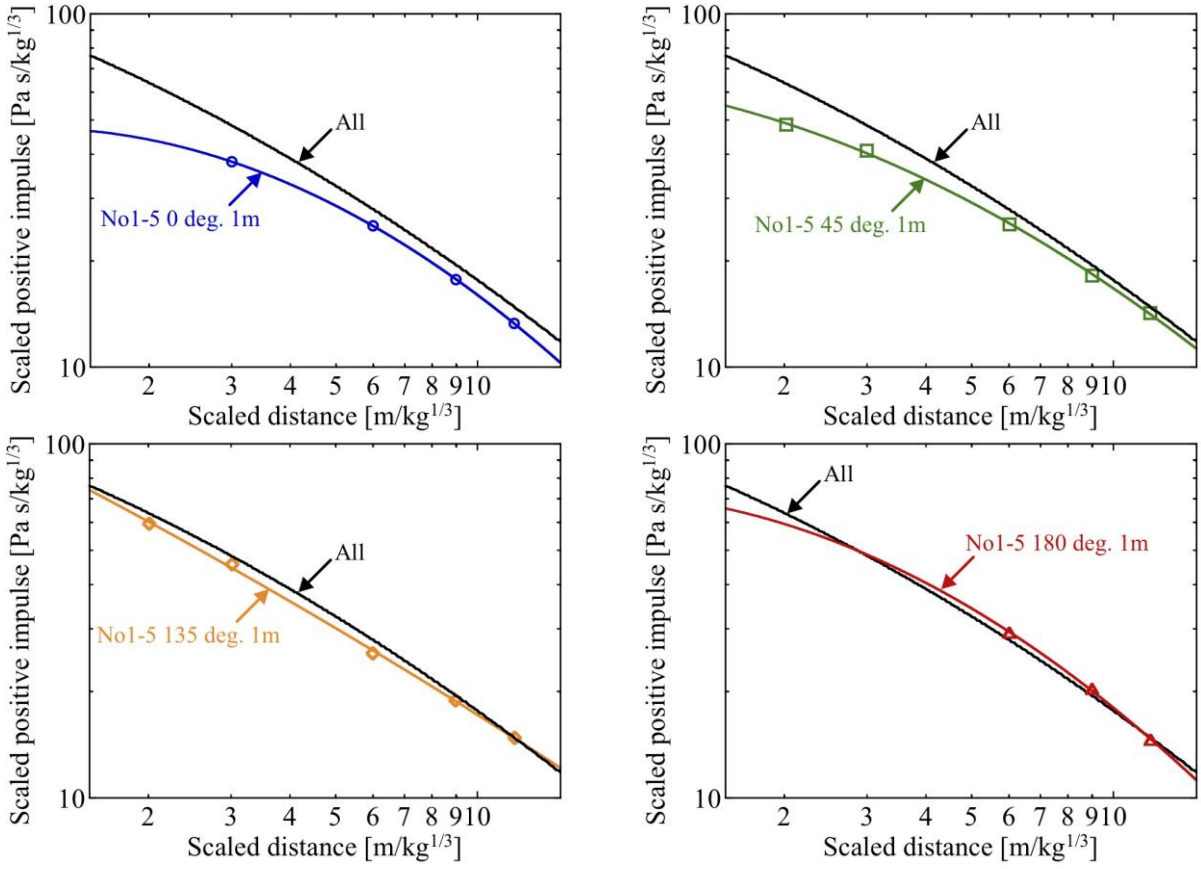
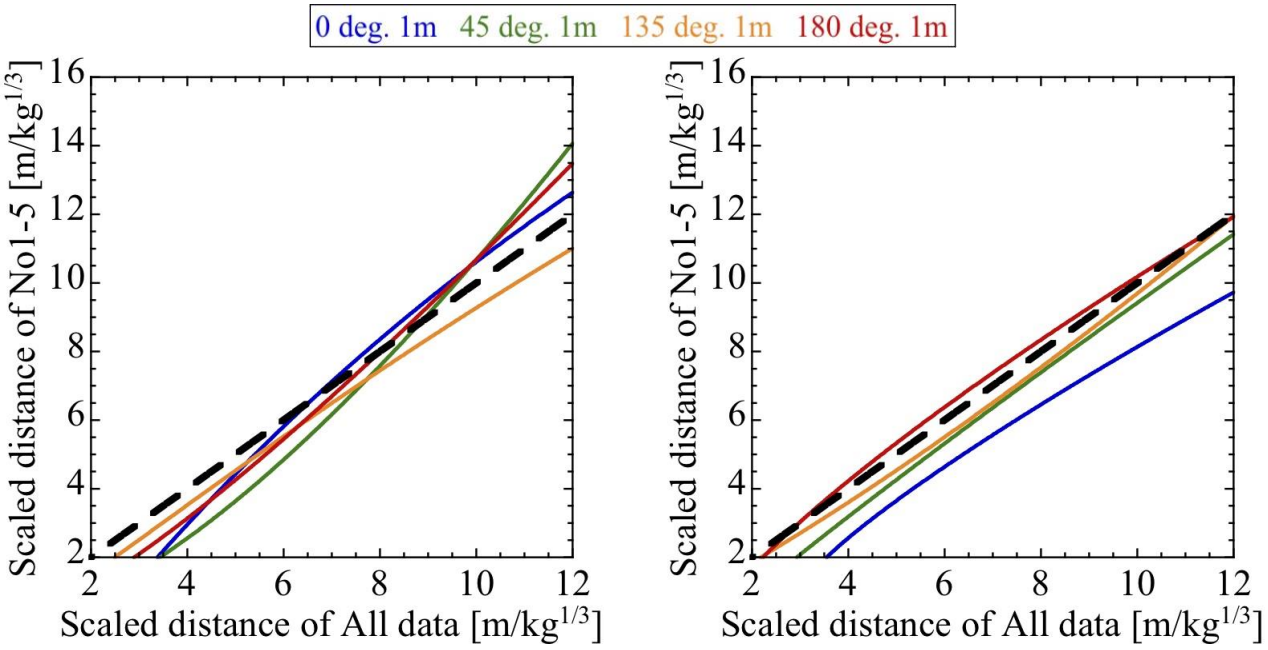


図 4.2-42　All と No1-5 の角度ごとの正圧相インパルス比較



(a) ピーク静水過圧基準　　(b) 正圧相インパルス基準

図 4.2-43　All と同等の爆風パラメータが得られる No1-5 の換算距離

表 4.2-19　All と同等のピーク静水過圧が得られる No1-5 の換算距離

All	No1-5			
	0 度	45 度	135 度	180 度
3	1.39	1.61	2.51	2.10
6	5.82	4.85	5.53	5.45
9	9.52	9.09	8.37	9.32
12	12.64	14.07	11.01	13.48

表 4.2-20　All と同等の正圧相インパルスが得られる No1-5 の換算距離

All	No1-5			
	0 度	45 度	135 度	180 度
3	解なし	2.08	2.71	3.03
6	4.64	5.32	5.51	6.38
9	7.31	8.41	8.61	9.28
12	9.73	11.42	11.95	11.93

(5) 爆風パラメータの距離減衰（All を基準とした場合における wall-standard の等圧、等正圧相インパルス位置）

All と wall-standard の比較で使用する近似線は令和 2 年度火薬類爆発影響低減化技術基準検討報告書と同じであり、両者の比較は実施済みである。ここではその報告書で整理した結果を再掲する。

ピーク静水過圧基準の保安距離

・0 度と 180 度は保安距離 3 のみ減少したが、それ以外はほぼ変化しなかった。壁の影響によってその近傍は大きく低減できると考えられる。
・45 度と 135 度の壁近傍は保安距離減少するが、遠方では若干の保安距離増大となる。

表 4.2-21　All と同等のピーク静水過圧が得られる wall-standard の換算距離

All	wall-standard	
	0 度, 180 度	45 度, 135 度
3	2.61	2.04
6	5.76	5.35
9	8.64	8.99
12	11.24	12.70

正圧相インパルス基準の保安距離

・0 度と 180 度は保安距離 3 のみ減少したが、それ以外はほぼ変化しなかった。壁の影響によってその近傍は大きく低減できると考えられる。
・45 度と 135 度の遠方では若干の保安距離増大となる。

表 4.2-22　All と同等の正圧相インパルスが得られる wall-standard の換算距離
（赤字：10%以上保安距離縮小）

All	wall-standard	
	0 度, 180 度	45 度, 135 度
3	解なし	2.61
6	5.93	5.56
9	8.73	8.53
12	11.12	11.52

(6) 爆風パラメータの距離減衰（wall-standard を基準とした場合における No1 シリーズの等圧、等正圧相インパルス位置）

防爆壁の追加構造の影響を検討するため、ここでは基準を wall-standard とした場合について、No1 シリーズの近似線を用いての保安距離の減少/増加を検討する。角度ごとのピーク静水過圧比較、正圧相インパルス比較、基準と同等の爆風パラメータが得られる No1 シリーズの換算距離を図 4.2-44～図 4.2-58 に示した。黒点線は原点を通る傾き 1 の線であり基準と同じ保安距離である。そのため、黒点線よりも下側では保安距離減少（爆風低減）、上側では保安距離増大（爆風強化）を意味する。また、基準の換算距離 3、6、9、12 と同等なピーク静水過圧と正圧相インパルスが得られる各実験の換算距離を表 4.2-23～表 4.2-32 に示した。

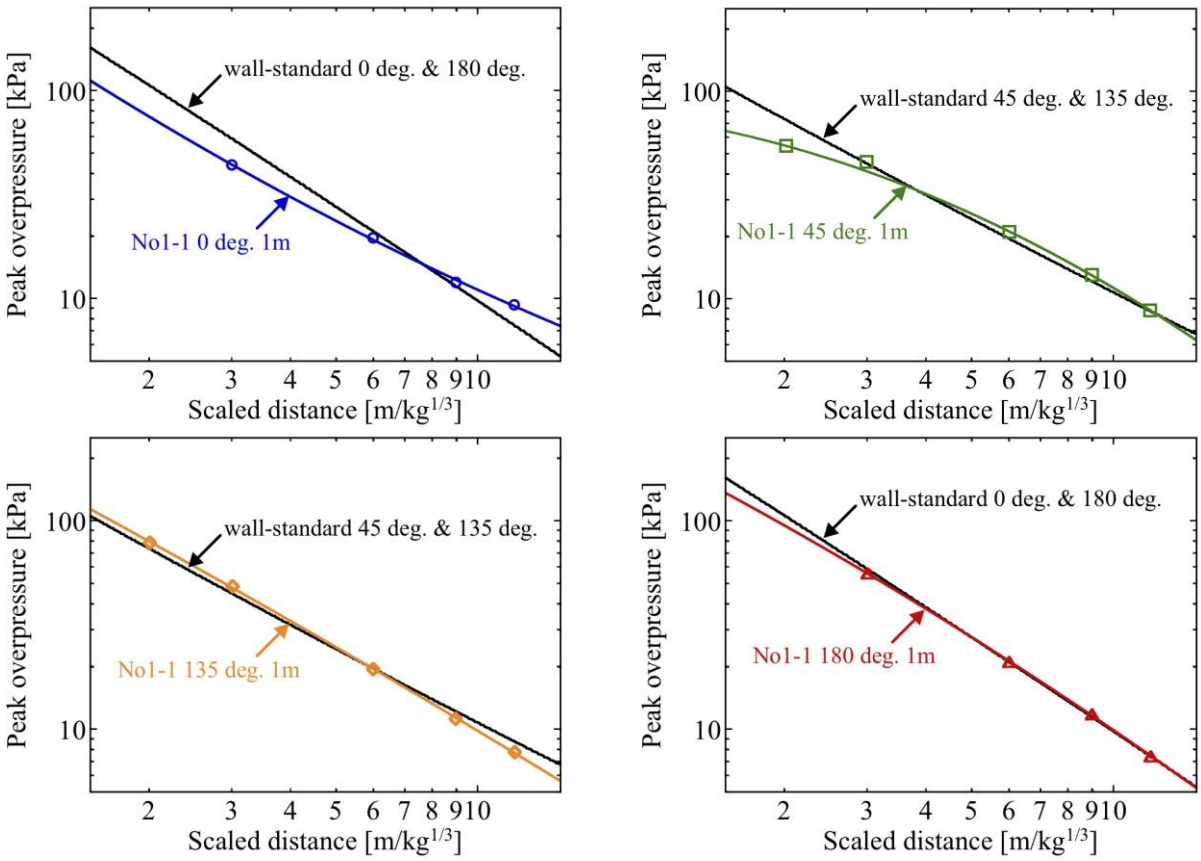


図 4.2-44　wall-standard と No1-1 の角度ごとのピーク静水過圧比較

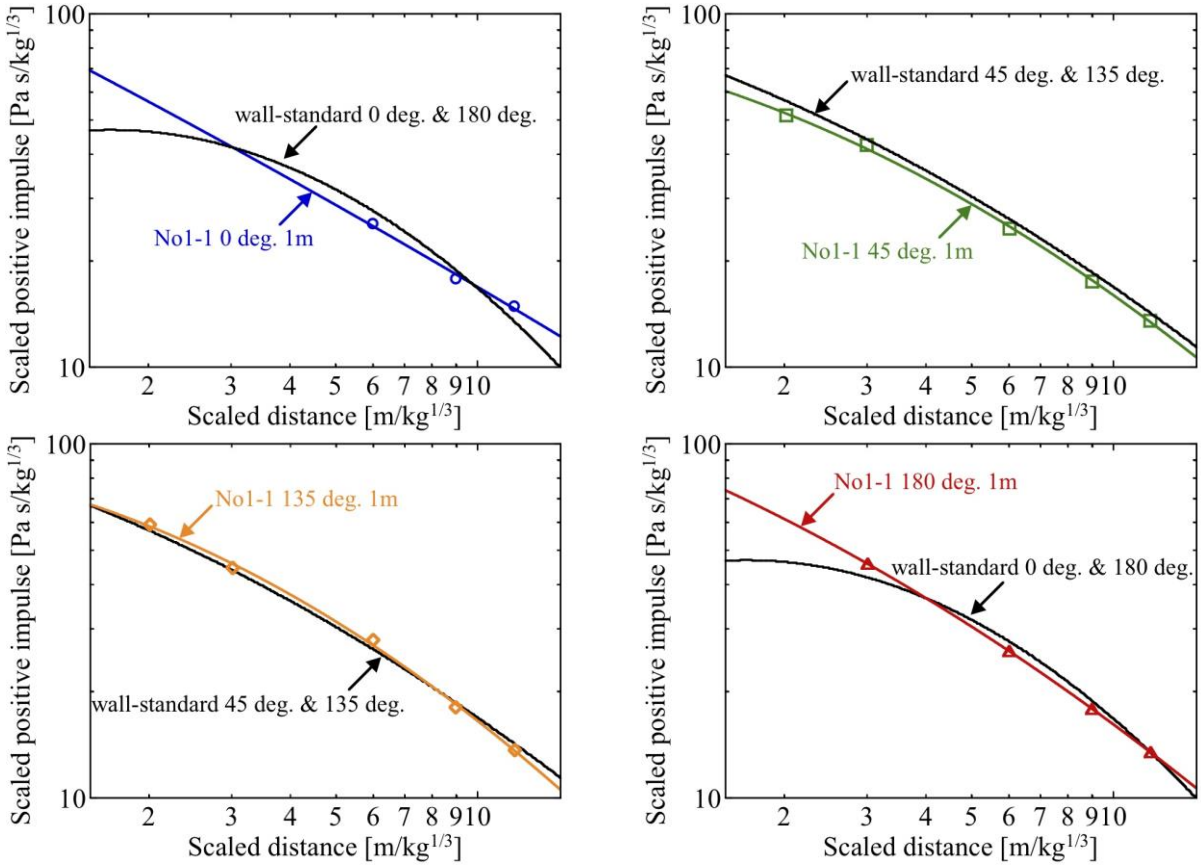
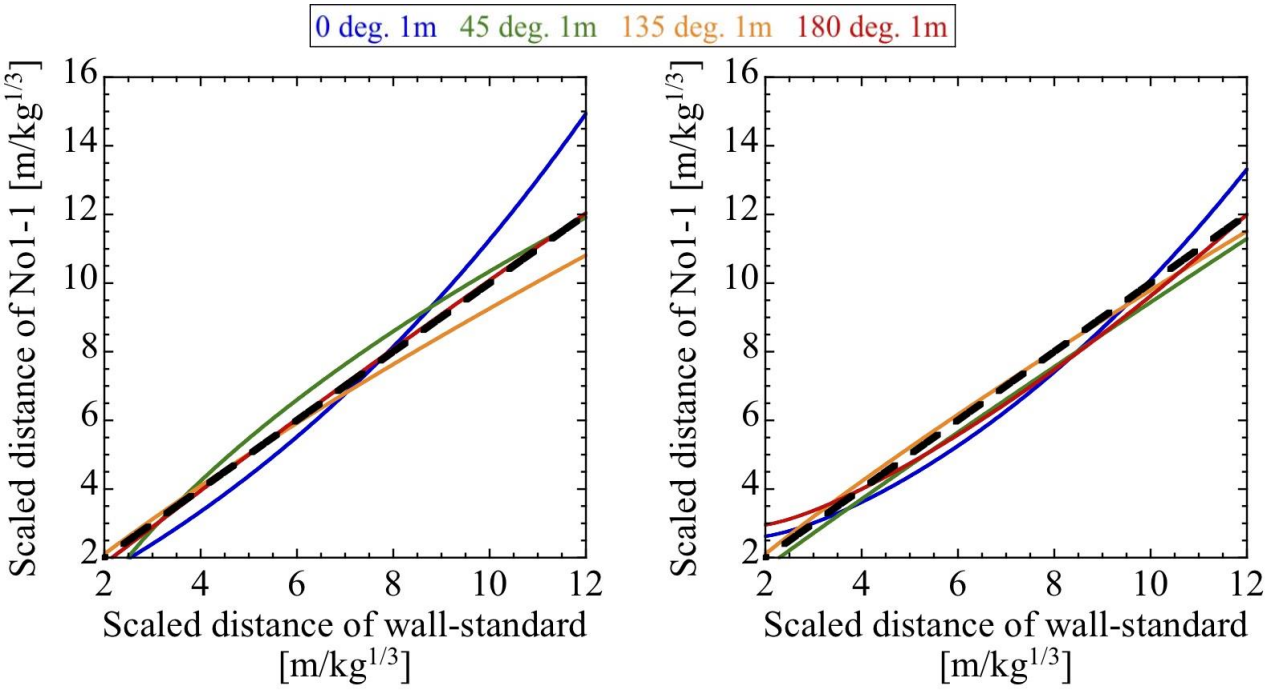


図 4.2-45　wall-standard と No1-1 の角度ごとの正圧相インパルス比較



(a) ピーク静水過圧基準　　(b) 正圧相インパルス基準

図 4.2-46　wall-standard と同等の爆風パラメータが得られる No1-1 の換算距離

表 4.2-23　wall-standard と同等のピーク静水過圧が得られる No1-1 の換算距離

wall-standard	No1-1			
	0 度	45 度	135 度	180 度
3	2.40	2.68	3.12	2.90
6	5.53	6.44	5.92	6.04
9	9.64	9.46	8.46	9.09
12	14.94	12.06	10.81	12.04

表 4.2-24　wall-standard と同等の正圧相インパルスが得られる No1-1 の換算距離

wall-standard	No1-1			
	0 度	45 度	135 度	180 度
3	3.01	2.72	3.20	3.37
6	5.26	5.66	6.17	5.59
9	8.69	8.51	8.92	8.52
12	13.32	11.30	11.52	12.00

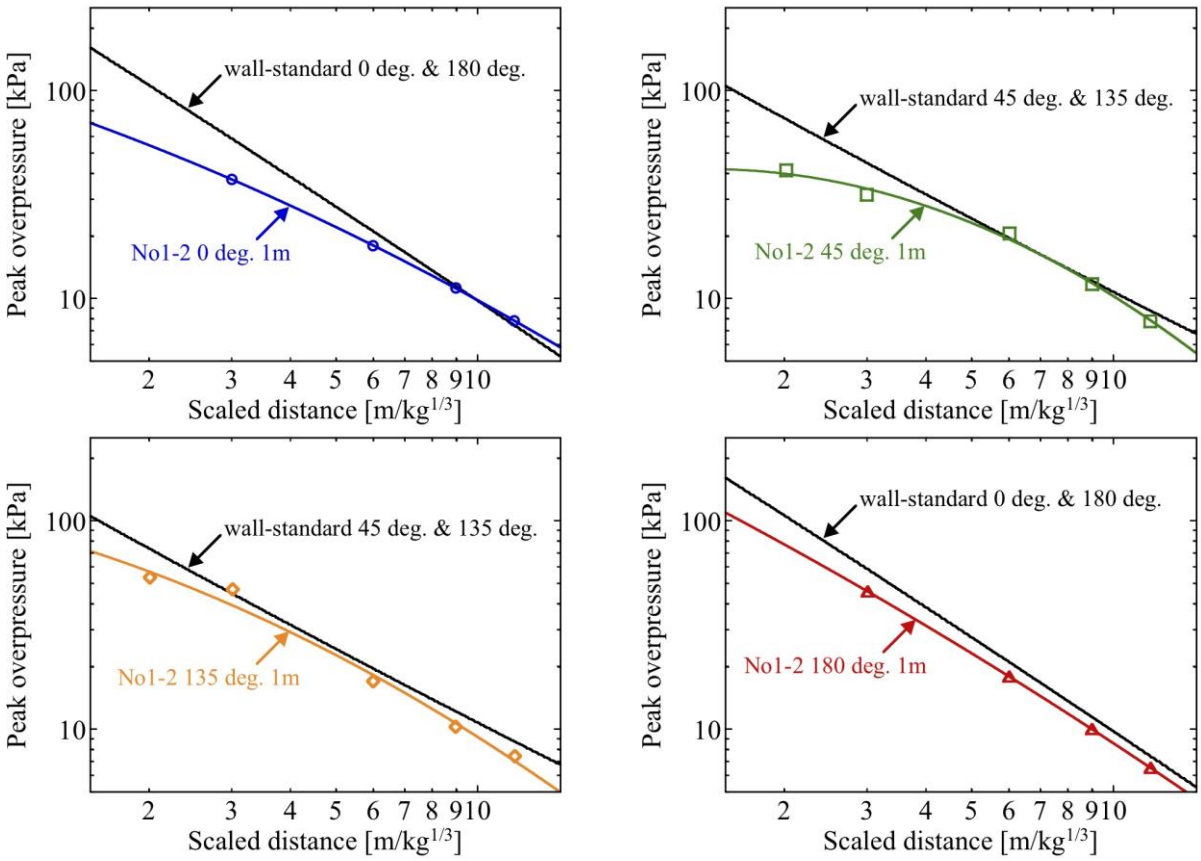


図 4.2-47　wall-standard と No1-2 の角度ごとのピーク静水過圧比較

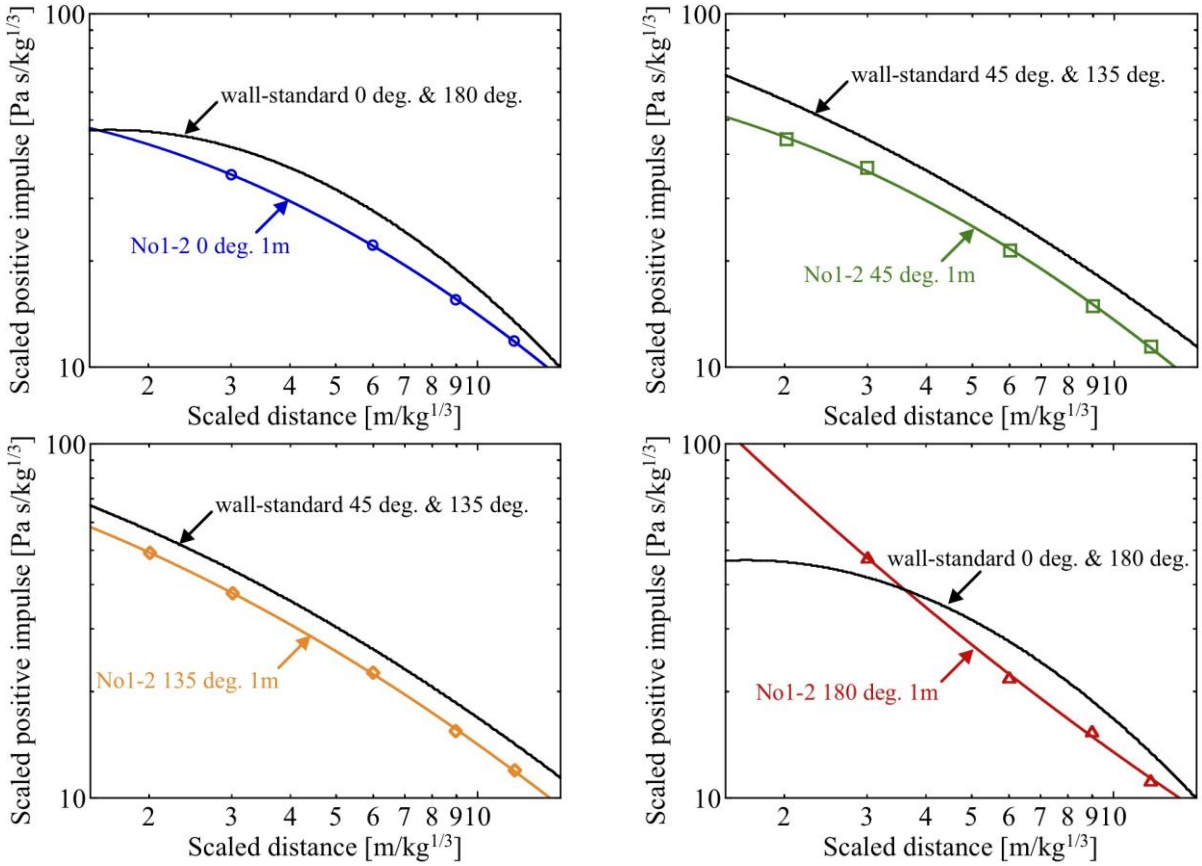
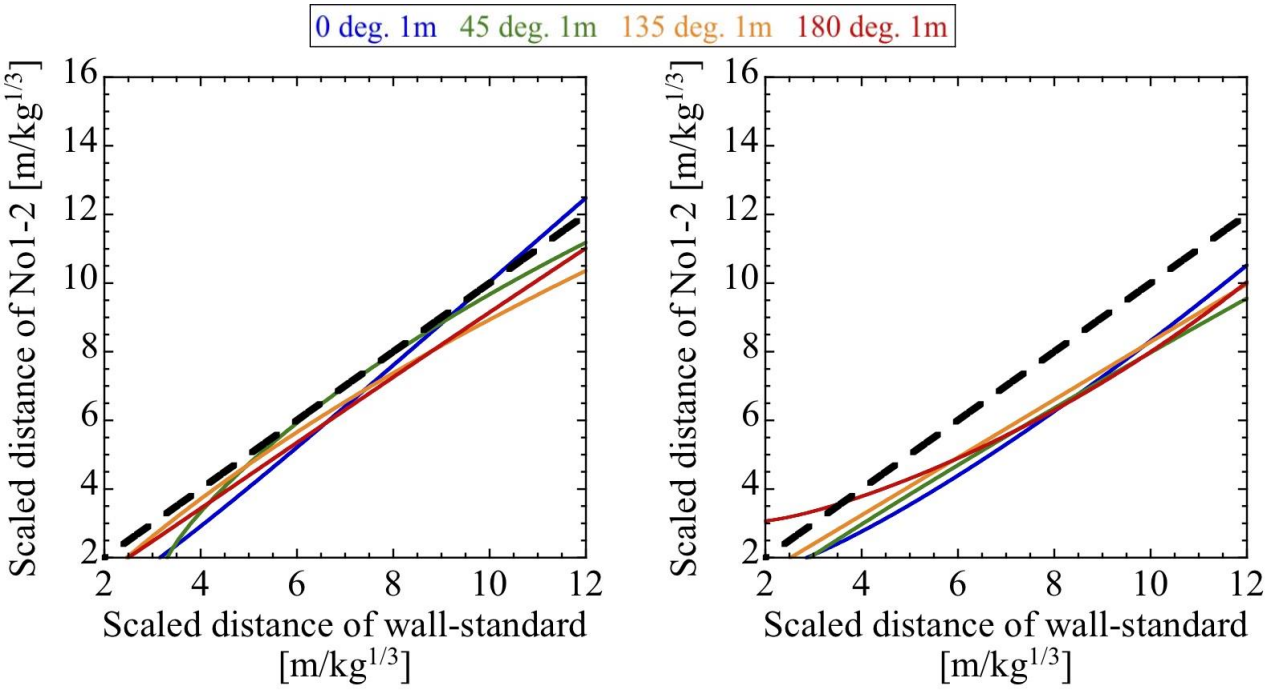


図 4.2-48　wall-standard と No1-2 の角度ごとの正圧相インパルス比較



(a) ピーク静水過圧基準　　(b) 正圧相インパルス基準

図 4.2-49　wall-standard と同等の爆風パラメータが得られる No1-2 の換算距離

表 4.2-25　wall-standard と同等のピーク静水過圧が得られる No1-2 の換算距離

wall-standard	No1-2			
	0 度	45 度	135 度	180 度
3	1.84	解なし	2.63	2.48
6	5.22	5.93	5.66	5.35
9	8.82	8.84	8.18	8.21
12	12.49	11.19	10.36	11.02

表 4.2-26　wall-standard と同等の正圧相インパルスが得られる No1-2 の換算距離

wall-standard	No1-2			
	0 度	45 度	135 度	180 度
3	2.08	2.07	2.40	3.36
6	4.40	4.70	4.92	4.90
9	7.27	7.17	7.45	7.11
12	10.53	9.56	9.97	10.04

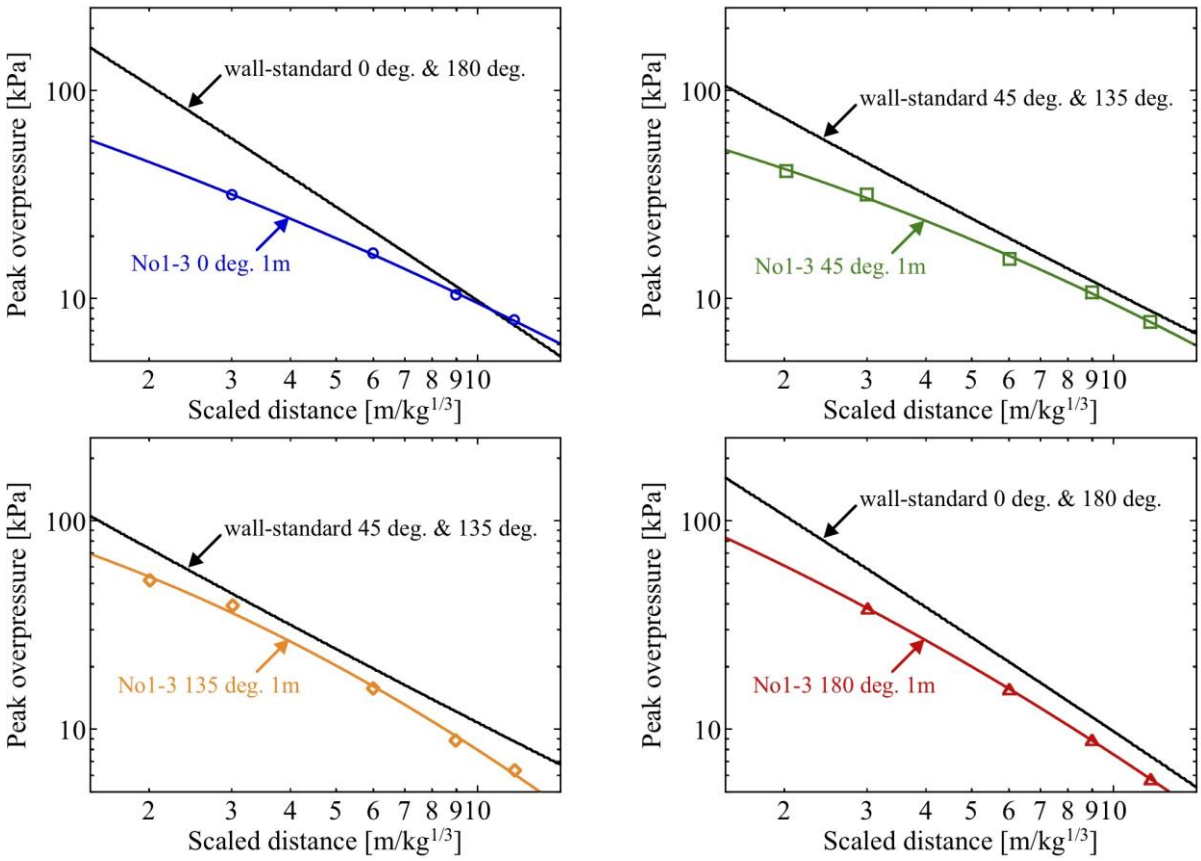


図 4.2-50　wall-standard と No1-3 の角度ごとのピーク静水過圧比較

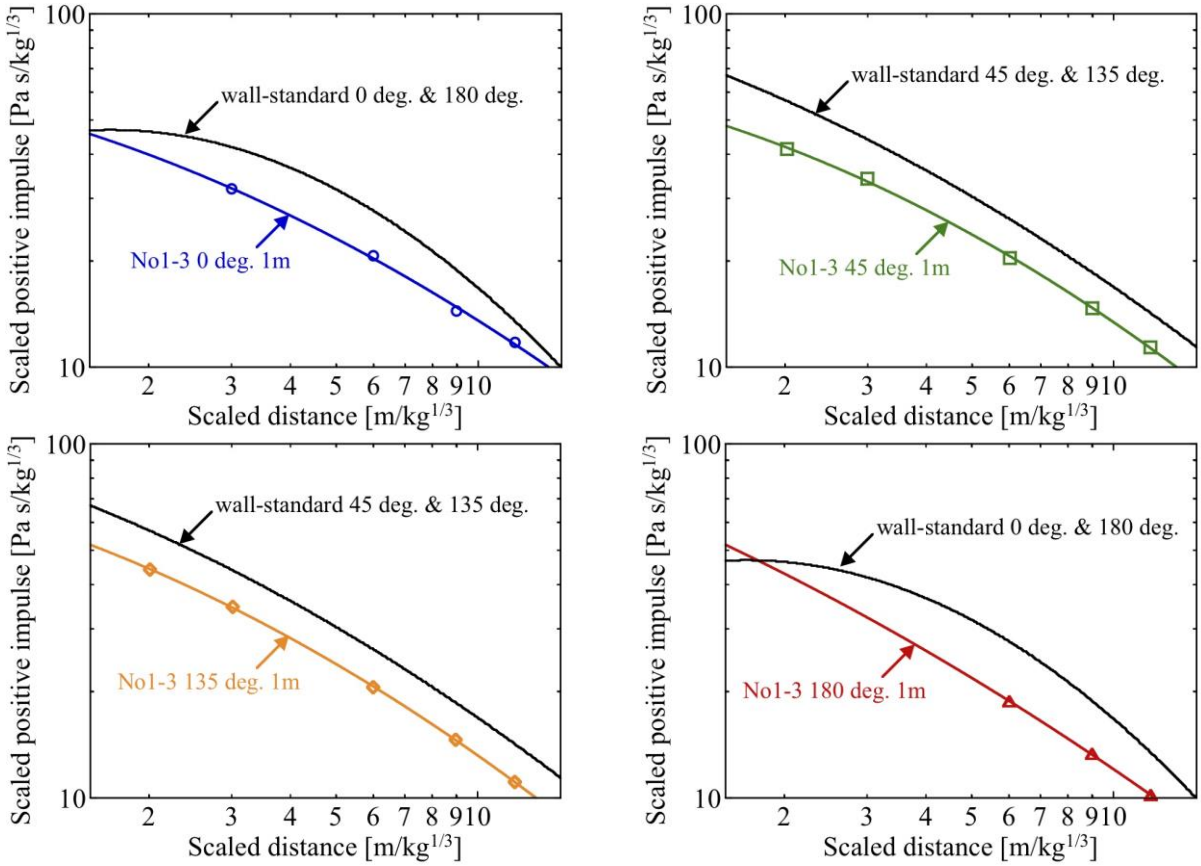
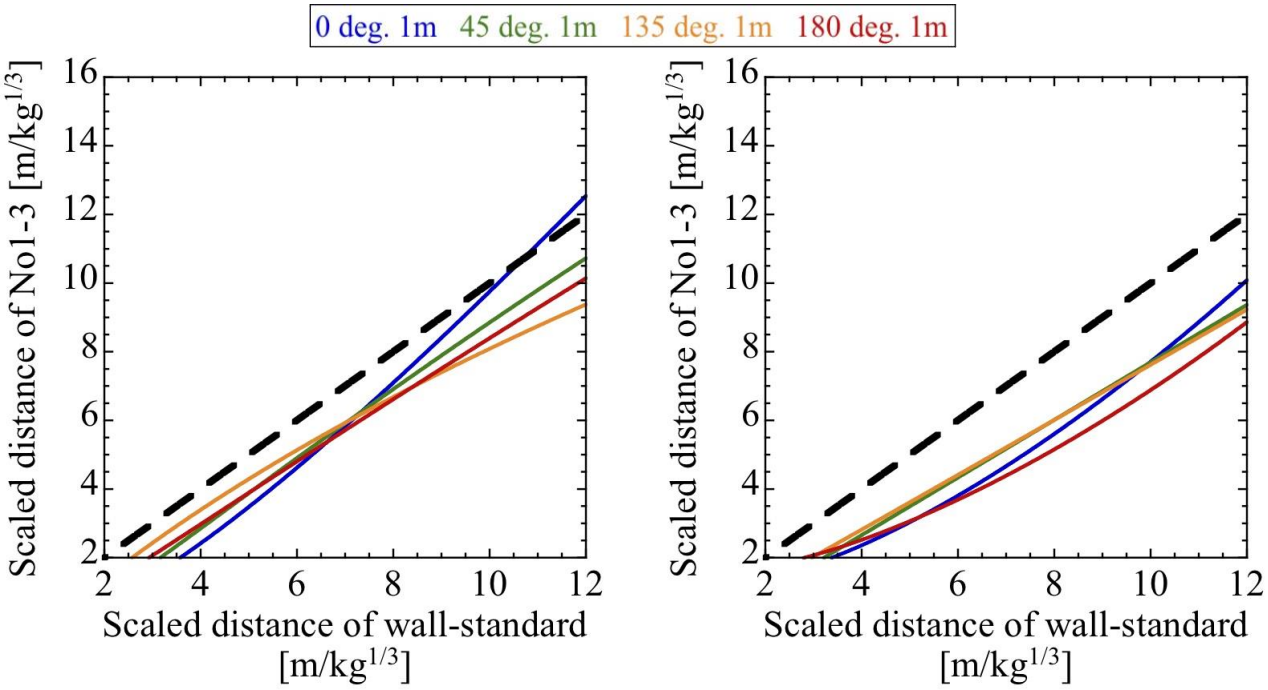


図 4.2-51　wall-standard と No1-3 の角度ごとの正圧相インパルス比較



(a) ピーク静水過圧基準　　(b) 正圧相インパルス基準

図 4.2-52　wall-standard と同等の爆風パラメータが得られる No1-3 の換算距離

表 4.2-27　wall-standard と同等のピーク静水過圧が得られる No1-3 の換算距離

wall-standard	No1-3			
	0 度	45 度	135 度	180 度
3	1.47	1.84	2.43	2.07
6	4.63	4.91	5.14	4.81
9	8.41	7.89	7.40	7.51
12	12.55	10.73	9.38	10.15

表 4.2-28　wall-standard と同等の正圧相インパルスが得られる No1-3 の換算距離

wall-standard	No1-3			
	0 度	45 度	135 度	180 度
3	1.81	1.82	2.03	2.07
6	3.81	4.34	4.41	3.69
9	6.62	6.86	6.82	5.99
12	10.09	9.37	9.23	8.87

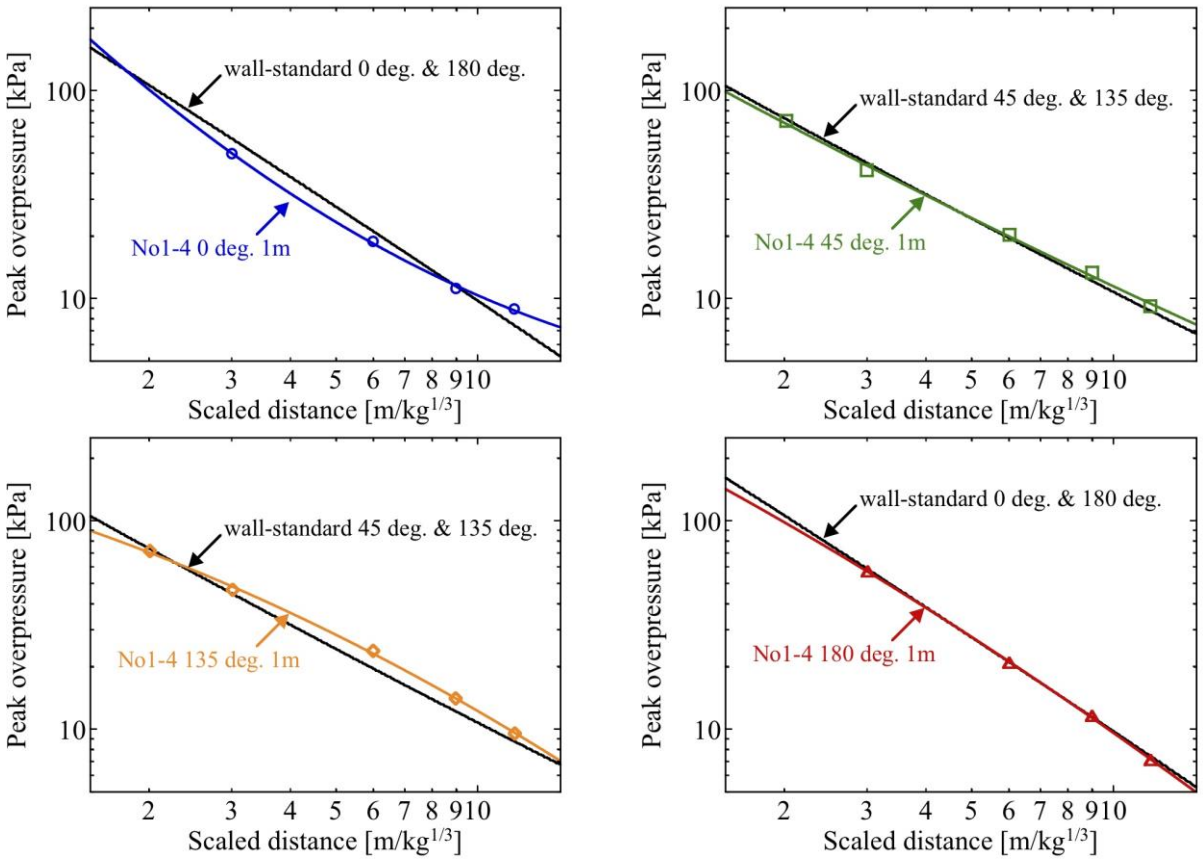


図 4.2-53　wall-standard と No1-4 の角度ごとのピーク静水過圧比較

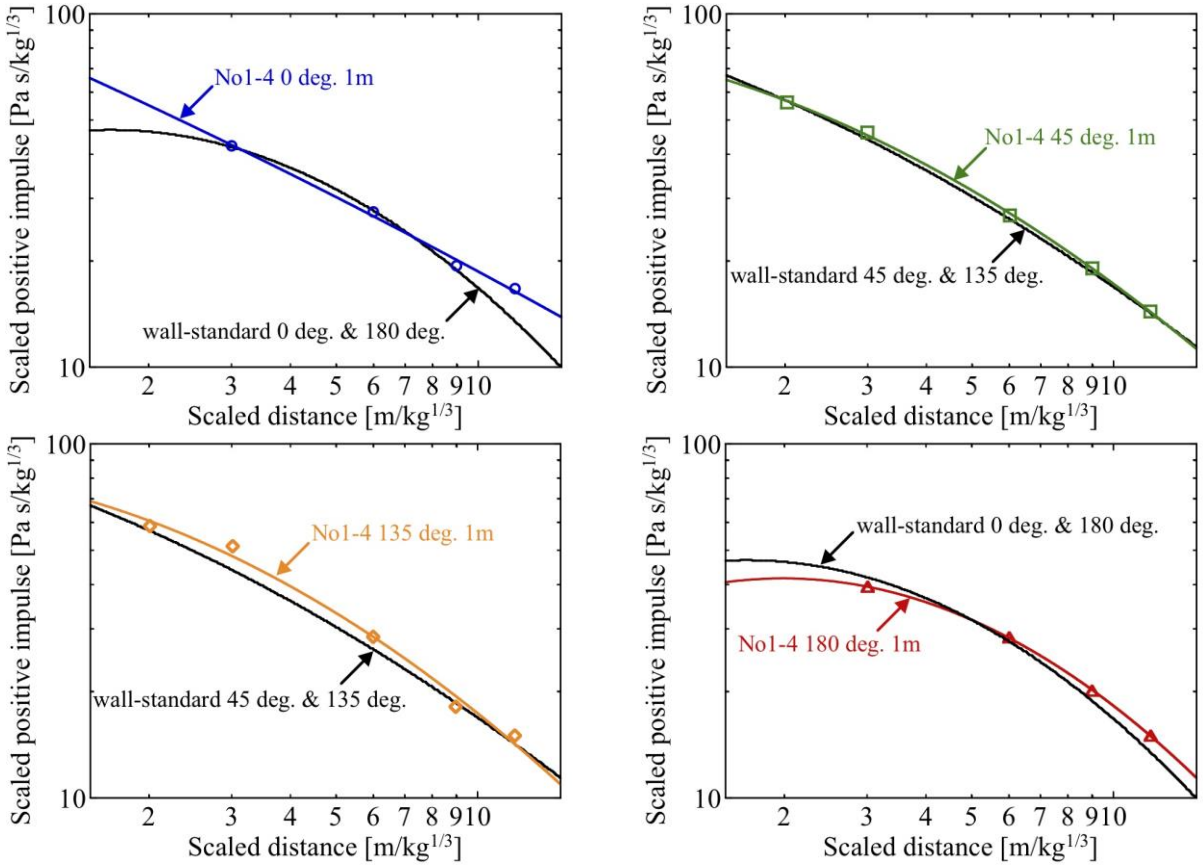
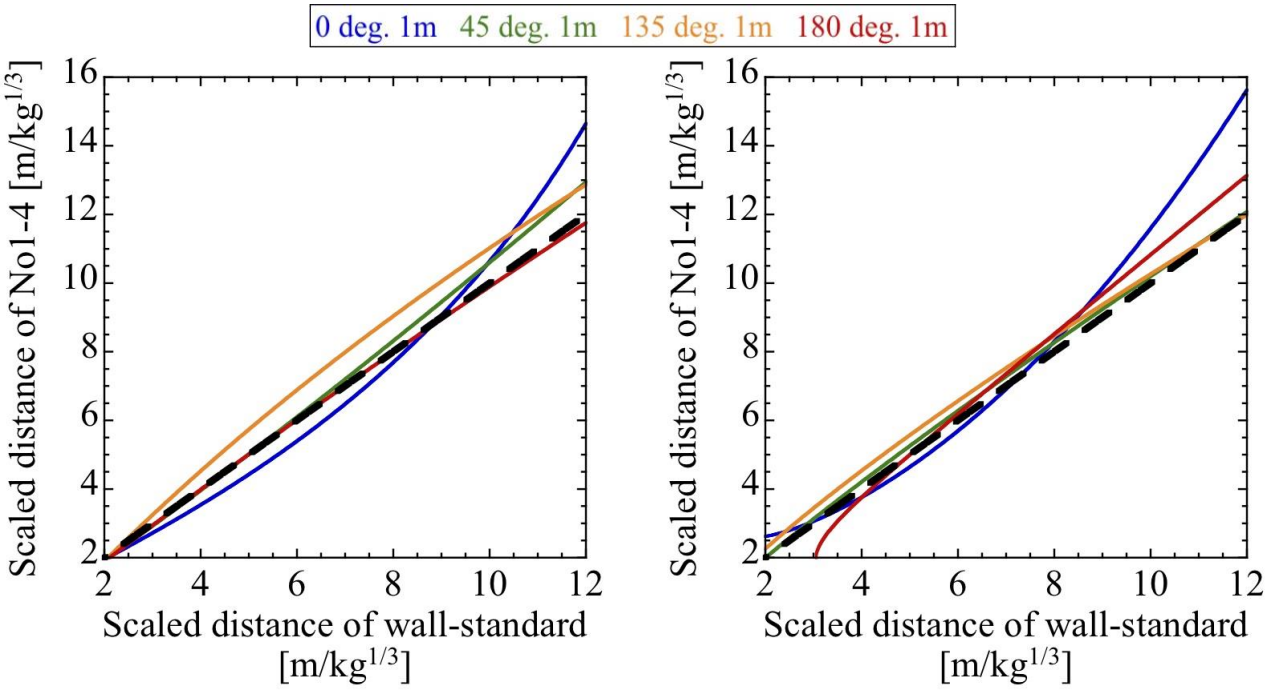


図 4.2-54　wall-standard と No1-4 の角度ごとの正圧相インパルス比較



(a) ピーク静水過圧基準　　(b) 正圧相インパルス基準

図 4.2-55　wall-standard と同等の爆風パラメータが得られる No1-4 の換算距離

表 4.2-29　wall-standard と同等のピーク静水過圧が得られる No1-4 の換算距離

wall-standard	No1-4			
	0 度	45 度	135 度	180 度
3	2.72	2.92	3.25	2.94
6	5.40	6.10	6.89	6.02
9	9.06	9.45	10.05	8.95
12	14.65	12.95	12.87	11.76

表 4.2-30　wall-standard と同等の正圧相インパルスが得られる No1-4 の換算距離

wall-standard	No1-4			
	0 度	45 度	135 度	180 度
3	3.06	3.13	3.44	解なし
6	5.70	6.28	6.57	6.19
9	9.86	9.24	9.37	9.67
12	15.63	12.08	11.99	13.14

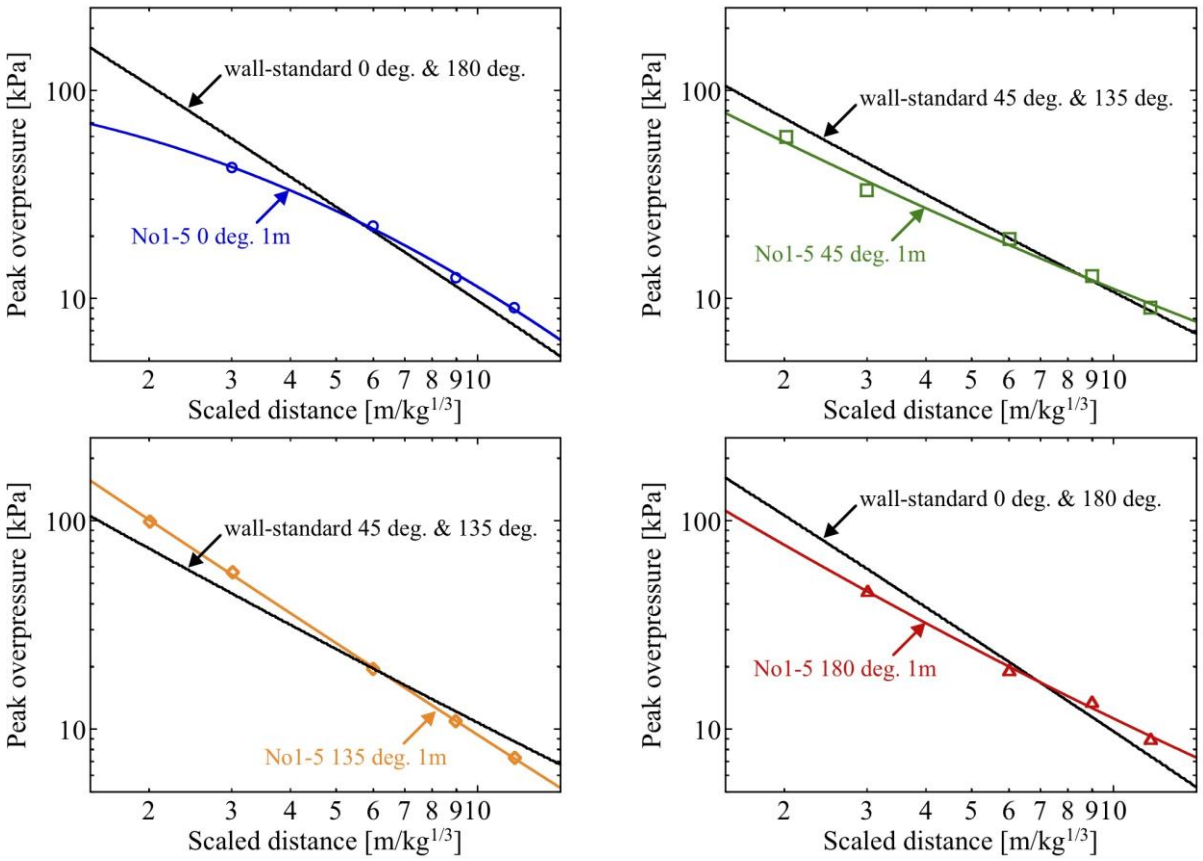


図 4.2-56　wall-standard と No1-5 の角度ごとのピーク静水過圧比較

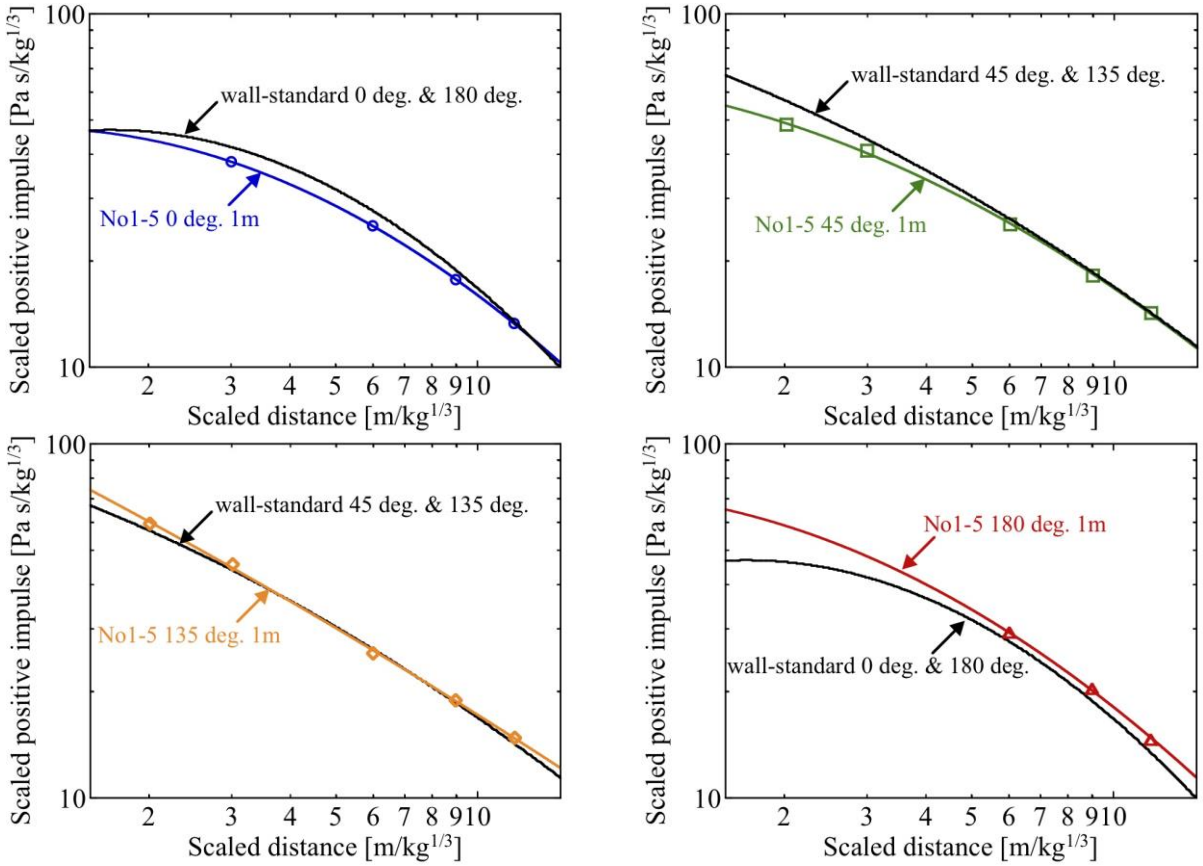
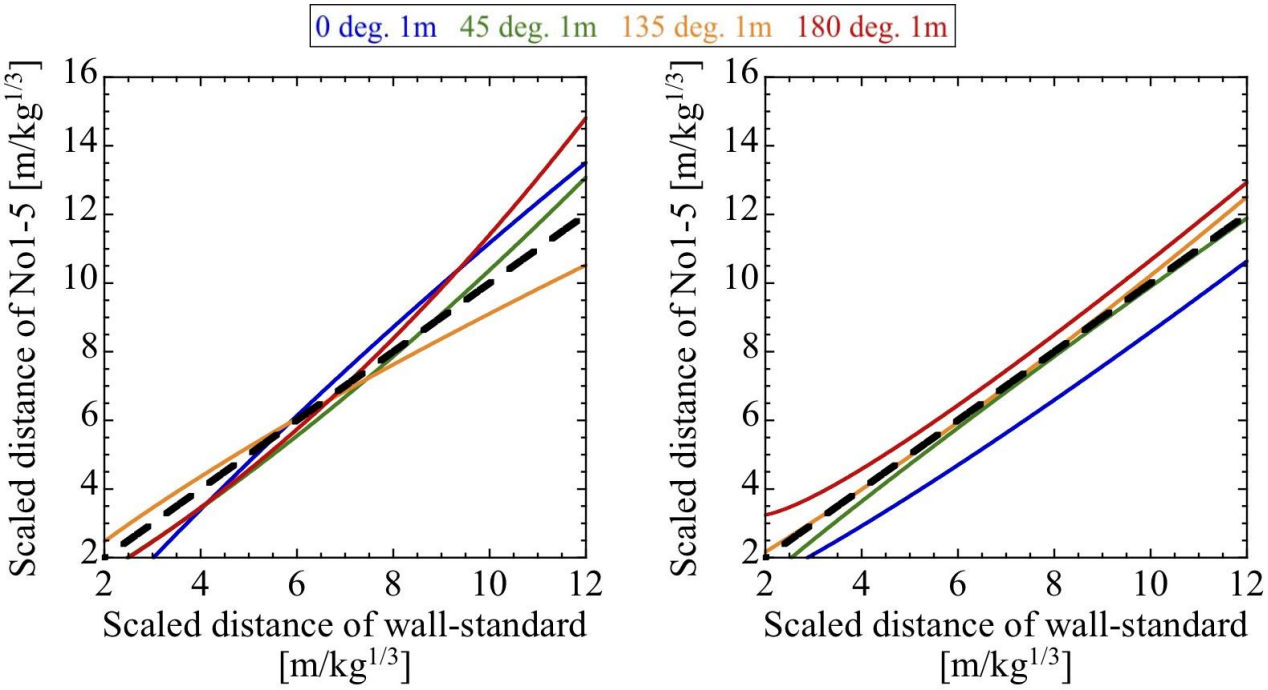


図 4.2-57　wall-standard と No1-5 の角度ごとの正圧相インパルス比較



(a) ピーク静水過圧基準　　(b) 正圧相インパルス基準

図 4.2-58　wall-standard と同等の爆風パラメータが得られる No1-5 の換算距離

表 4.2-31　wall-standard と同等のピーク静水過圧が得られる No1-5 の換算距離

wall-standard	No1-5			
	0 度	45 度	135 度	180 度
3	1.97	2.48	3.45	2.46
6	6.14	5.55	6.06	5.74
9	9.96	9.10	8.38	9.85
12	13.51	13.09	10.53	14.81

表 4.2-32　wall-standard と同等の正圧相インパルスが得られる No1-5 の換算距離

wall-standard	No1-5			
	0 度	45 度	135 度	180 度
3	2.10	2.53	3.06	3.79
6	4.70	5.78	5.95	6.44
9	7.58	8.89	9.11	9.57
12	10.64	11.89	12.52	12.94

(7) R02 低密度ウレタンフォームと R03 高密度ウレタンフォームの比較

R02 と R03 で使用したウレタンフォームの仕様を表 4.2-33 に示した。R03 は R02 に比べて密度が 2.5 倍程度大きいことが特徴である。図 4.2-59～図 4.2-62 と表 4.2-34～表 4.2-41 にピーク静水過圧と正圧相インパルスを比較した結果を示した。1 面では両者に大きな違いは確認されなかったが、3 面の場合は密度が大きい R03 の爆風低減効果が高かった。

表 4.2-33　低密度、高密度ウレタンフォームの比較

実験	密度 [kg/m^3]	反発弾性 [%]	硬さ [N]	引張り強さ [kPa]	伸び [%]	圧縮残留歪 [%]	繰返し圧縮残留歪 [%]	セル数 [個/in]
R02*	20±2	40 以上	115±30	70 以上	120 以上	5 以下	3 以下	35±5
R03**	52±3	45 以上	225±40	100 以上	100 以上	3.5 以下	2.5 以下	-

*カラーフォーム ECM　　株式会社イノアックコーポレーション製

**ウレタンフォーム EMM　株式会社イノアックコーポレーション製

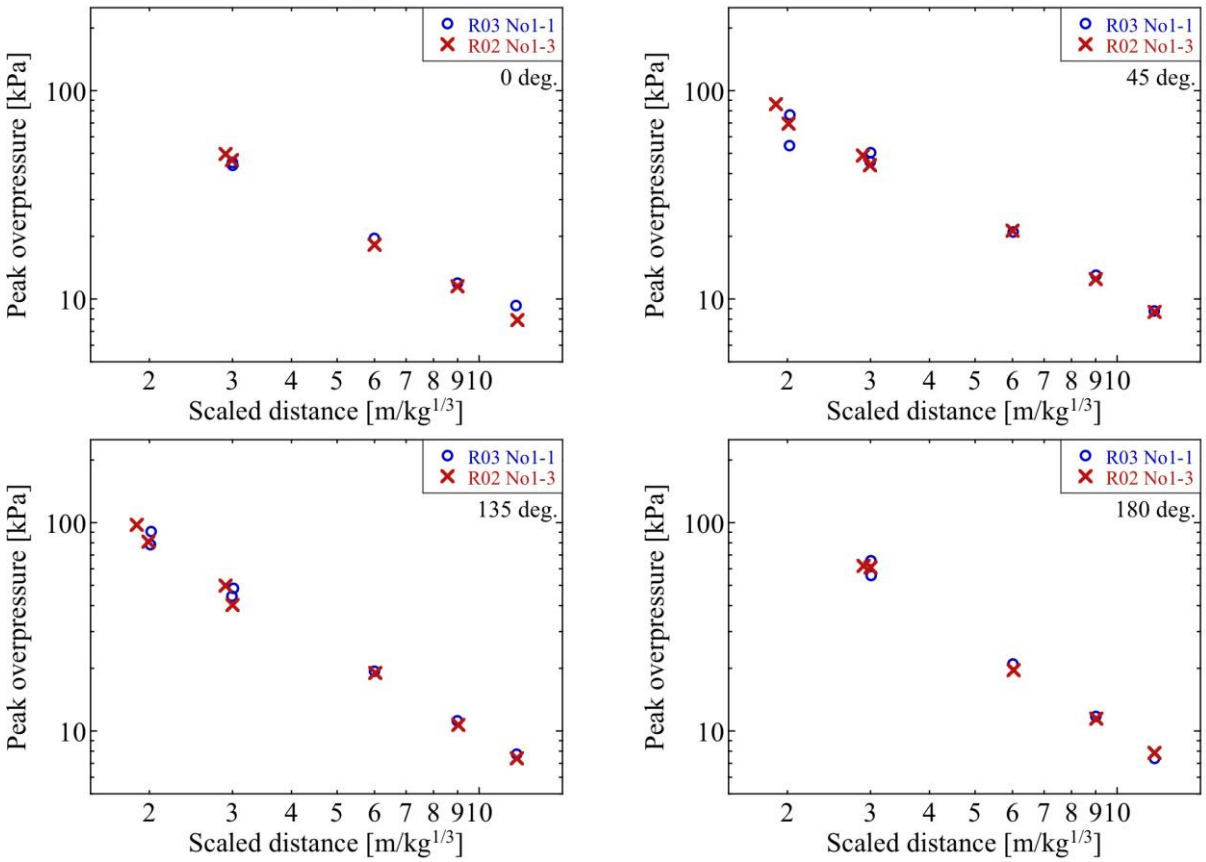


図 4.2-59　R03 No1-1（高密度ウレタンフォーム 1 面）と R02 No1-3（低密度ウレタンフォーム 1 面）の角度ごとのピーク静水過圧比較

表 4.2-34　All と同等のピーク静水過圧が得られる R03 No1-1（高密度ウレタンフォーム 1 面）と R02 No1-3（低密度ウレタンフォーム 1 面）の換算距離

All	R03 No1-1（高密度ウレタンフォーム 1 面）				R02 No1-3（低密度ウレタンフォーム 1 面）			
	0 度	45 度	135 度	180 度	0 度	45 度	135 度	180 度
3	2.06	1.17	2.15	2.48	2.19	1.91	2.09	2.73
6	5.24	5.70	5.35	5.79	5.17	5.61	5.00	5.56
9	9.09	9.45	8.45	8.73	8.44	9.25	8.11	8.55
12	13.48	12.61	11.34	11.31	11.86	12.61	11.27	11.69

表 4.2-35　wall-standard と同等のピーク静水過圧が得られる R03 No1-1（高密度ウレタンフォーム 1 面）と R02 No1-3（低密度ウレタンフォーム 1 面）の換算距離

wall-standard	R03 No1-1（高密度ウレタンフォーム 1 面）				R02 No1-3（低密度ウレタンフォーム 1 面）			
	0 度	45 度	135 度	180 度	0 度	45 度	135 度	180 度
3	2.40	2.68	3.12	2.90	2.52	3.02	2.95	3.07
6	5.53	6.44	5.92	6.04	5.42	6.29	5.55	5.80
9	9.64	9.46	8.46	9.09	8.88	9.26	8.12	8.95
12	14.94	12.06	10.81	12.04	12.94	12.00	10.68	12.70

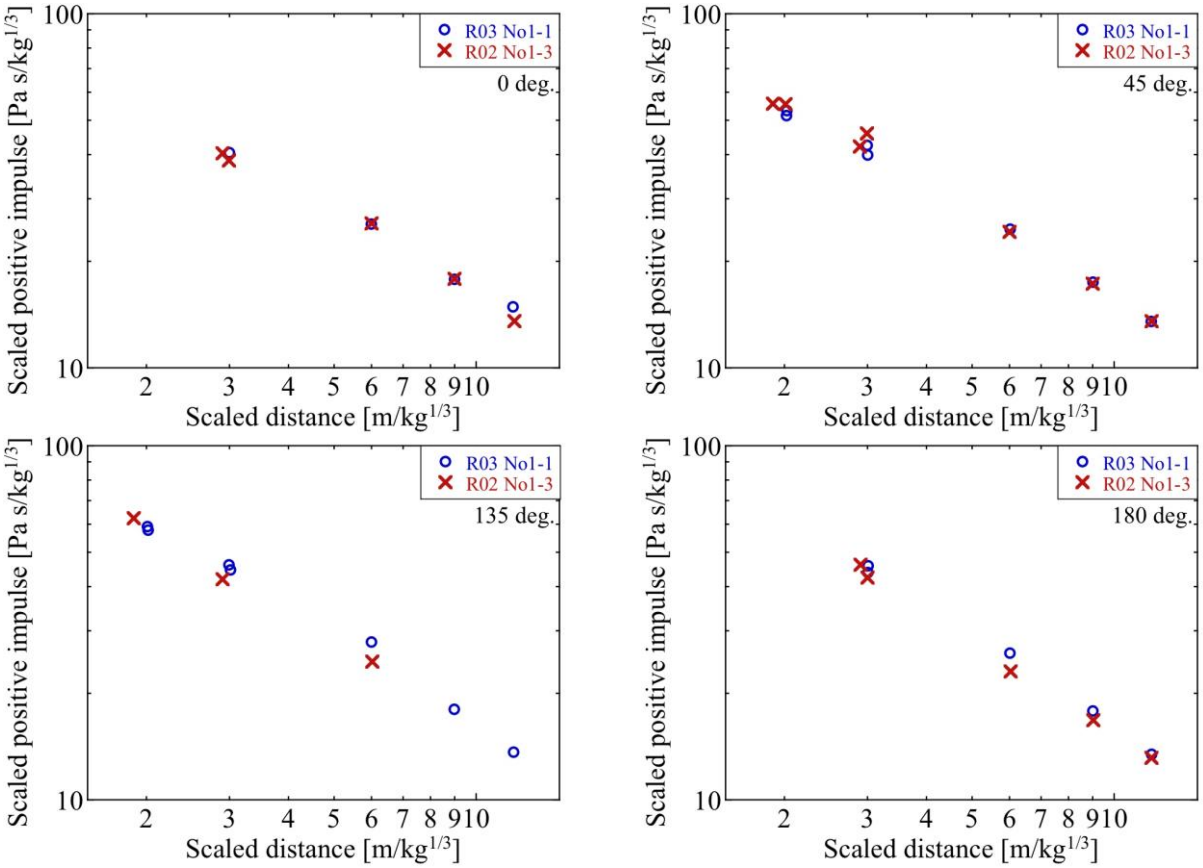


図 4.2-60　R03 No1-1（高密度ウレタンフォーム 1 面）と R02 No1-3（低密度ウレタンフォーム 1 面）の角度ごとの正圧相インパルス比較

表 4.2-36　All と同等の正圧相インパルスが得られる R03 No1-1（高密度ウレタンフォーム 1 面）と R02 No1-3（低密度ウレタンフォーム 1 面）の換算距離

All	R03 No1-1（高密度ウレタンフォーム 1 面）				R02 No1-3（低密度ウレタンフォーム 1 面）			
	0 度	45 度	135 度	180 度	0 度	45 度	135 度	180 度
3	2.49	2.32	2.78	2.80	1.18	2.57	2.32	2.59
6	5.20	5.23	5.75	5.53	5.26	5.26	5.10	4.85
9	8.33	8.07	8.50	8.23	8.29	8.00	7.90	7.45
12	11.83	10.85	11.11	10.93	11.05	10.77	10.69	10.44

表 4.2-37　wall-standard と同等の正圧相インパルスが得られる R03 No1-1（高密度ウレタンフォーム 1 面）と R02 No1-3（低密度ウレタンフォーム 1 面）の換算距離

wall-standard	R03 No1-1（高密度ウレタンフォーム 1 面）				R02 No1-3（低密度ウレタンフォーム 1 面）			
	0 度	45 度	135 度	180 度	0 度	45 度	135 度	180 度
3	3.01	2.72	3.20	3.37	2.42	2.92	2.69	3.03
6	5.26	5.66	6.17	5.59	5.33	5.66	5.52	4.90
9	8.69	8.51	8.92	8.52	8.60	8.43	8.33	7.75
12	13.32	11.30	11.52	12.00	12.10	11.22	11.14	11.75

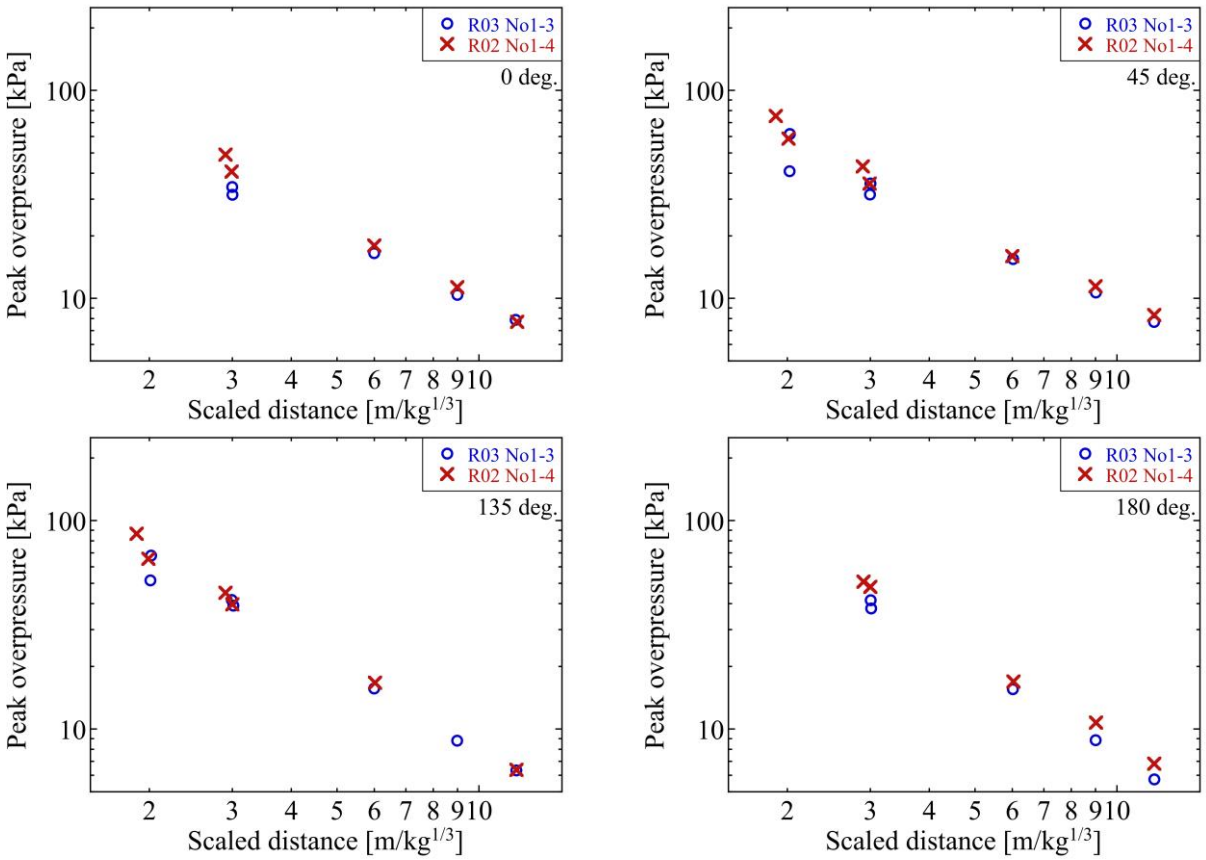


図 4.2-61　R03 No1-3（高密度ウレタンフォーム 3 面）と R02 No1-4（低密度ウレタンフォーム 3 面）の角度ごとのピーク静水過圧比較

表 4.2-38　All と同等のピーク静水過圧が得られる R03 No1-3（高密度ウレタンフォーム 3 面）と R02 No1-4（低密度ウレタンフォーム 3 面）の換算距離

All	R03 No1-3（高密度ウレタンフォーム 3 面）				R02 No1-4（低密度ウレタンフォーム 3 面）			
	0 度	45 度	135 度	180 度	0 度	45 度	135 度	180 度
3	1.14	0.90	1.43	1.72	1.79	1.72	1.83	2.29
6	4.34	4.25	4.60	4.59	5.03	4.48	4.78	5.06
9	7.93	7.88	7.40	7.19	8.37	8.07	7.57	7.87
12	11.48	11.37	9.81	9.49	11.57	12.52	10.10	10.63

表 4.2-39　wall-standard と同等のピーク静水過圧が得られる R03 No1-3（高密度ウレタンフォーム 3 面）と R02 No1-4（低密度ウレタンフォーム 3 面）の換算距離

wall-standard	R03 No1-3（高密度ウレタンフォーム 3 面）				R02 No1-4（低密度ウレタンフォーム 3 面）			
	0 度	45 度	135 度	180 度	0 度	45 度	135 度	180 度
3	1.47	1.84	2.43	2.07	2.16	2.48	2.74	2.62
6	4.63	4.91	5.14	4.81	5.30	5.06	5.31	5.29
9	8.41	7.89	7.40	7.51	8.80	8.08	7.58	8.24
12	12.55	10.73	9.38	10.15	12.52	11.61	9.65	11.48

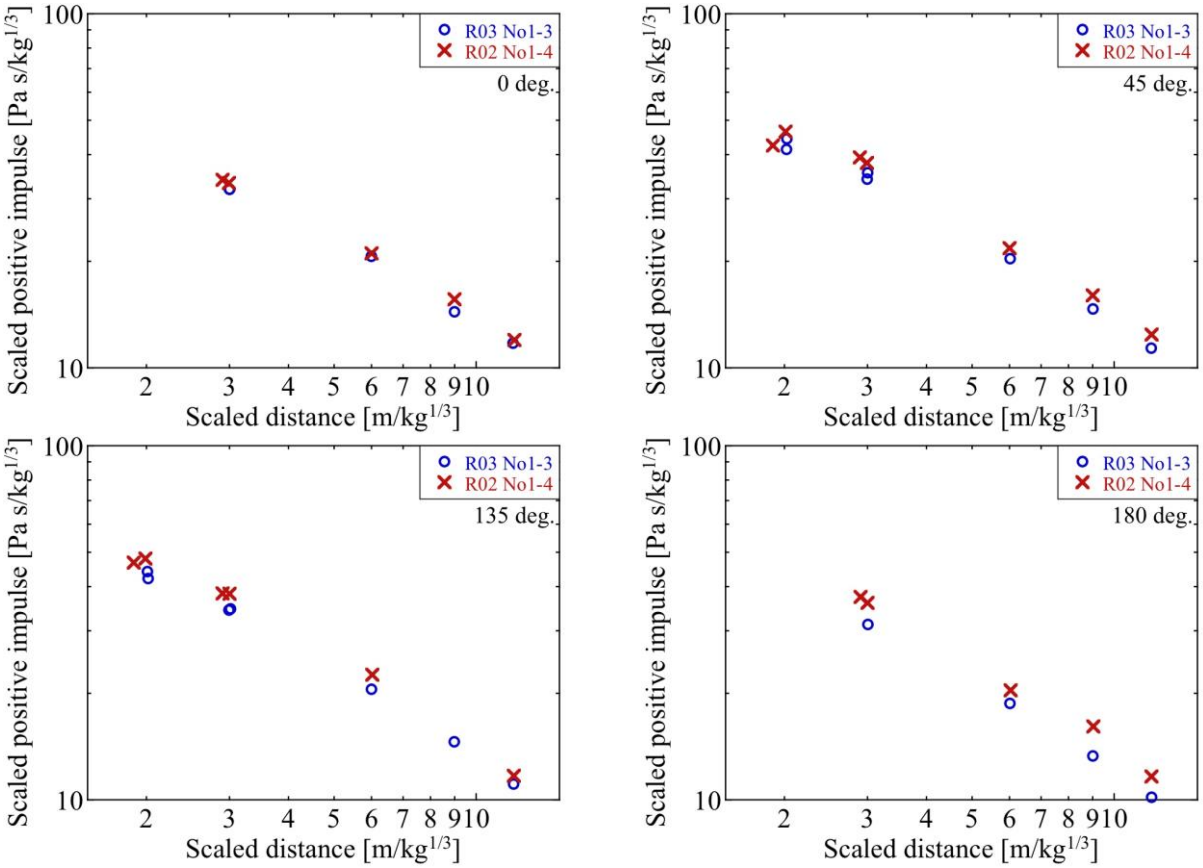


図 4.2-62　R03 No1-3（高密度ウレタンフォーム 3 面）と R02 No1-4（低密度ウレタンフォーム 3 面）の角度ごとの正圧相インパルス比較

表 4.2-40　All と同等の正圧相インパルスが得られる R03 No1-3（高密度ウレタンフォーム 3 面）と R02 No1-4（低密度ウレタンフォーム 3 面）の換算距離

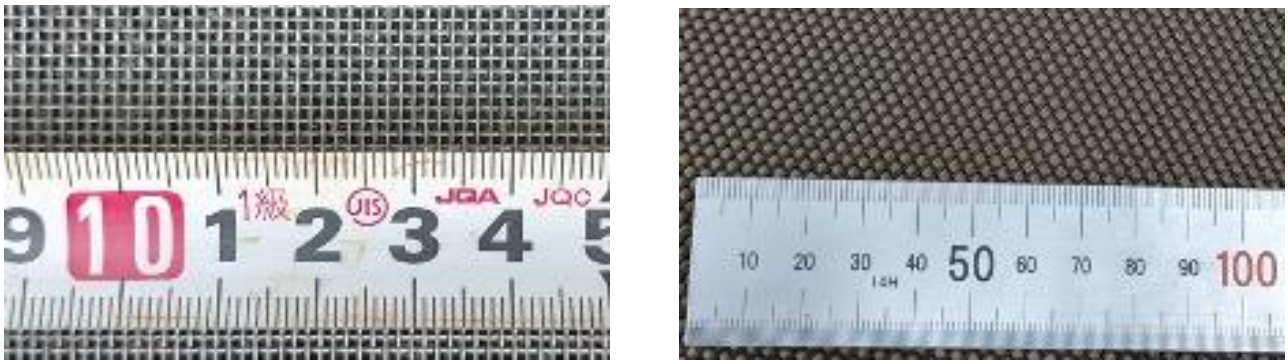
All	R03 No1-3（高密度ウレタンフォーム 3 面）				R02 No1-4（低密度ウレタンフォーム 3 面）			
	0 度	45 度	135 度	180 度	0 度	45 度	135 度	180 度
3	1.32	1.49	1.72	1.68	1.36	1.93	1.98	1.95
6	3.76	3.97	4.06	3.65	4.00	4.45	4.65	4.20
9	6.34	6.47	6.45	5.76	6.73	7.11	7.16	6.68
12	9.01	8.97	8.84	7.96	9.52	9.84	9.57	9.35

表 4.2-41　wall-standard と同等の正圧相インパルスが得られる R03 No1-3（高密度ウレタンフォーム 3 面）と R02 No1-4（低密度ウレタンフォーム 3 面）の換算距離

wall-standard	R03 No1-3（高密度ウレタンフォーム 3 面）				R02 No1-4（低密度ウレタンフォーム 3 面）			
	0 度	45 度	135 度	180 度	0 度	45 度	135 度	180 度
3	1.81	1.82	2.03	2.07	1.90	2.25	2.35	2.39
6	3.81	4.34	4.41	3.69	4.06	4.84	5.03	4.25
9	6.62	6.86	6.82	5.99	7.03	7.53	7.54	6.96
12	10.09	9.37	9.23	8.87	10.64	10.29	9.95	10.46

(8) R02 No1-2（金網）と R03 No1-4（樹脂メッシュ）の比較

R02 No1-2 と R03 No1-4 で使用した金網と樹脂メッシュを図 4.2-63 に、表 4.2-42 に仕様を示した。図 4.2-65、66 と表 4.2-43～表 4.2-46 にピーク静水過圧と正圧相インパルスの比較を示した。実験で使用した金網と樹脂メッシュの高さと幅が同じなので、枚数×1 平方メートル当たりの質量 [kg/m^2]の比が質量比となり、2.8 : 1 となり金網の方が 3 倍程度重かった。ピーク静水過圧は 0 度方向おいて、正圧相インパルスは 0 度方向と 45 度方向において金網の方が小さくなった。



(a) 金網　　(b) 樹脂メッシュ

図 4.2-63　金網と樹脂メッシュ

表 4.2-42　実験で使用する金網と樹脂メッシュの仕様

実験	目開き [mm]	線径 [mm]	開口率 [%]	枚数	1 平方メートル当たりの質量** [kg/m^2]
R02 No1-2、金網	0.96	0.45	46	3	1.73
R03 No1-4、樹脂メッシュ	2	0.70*	55	5	0.373

*図 4.2-64 より計算（目開きと開口率は下記 URL のカタログ値）

https://www.tc-civil.co.jp/catalog/tcic6/6_14_netronsheet.pdf.pdf

** 1 枚、1 m^2 あたり

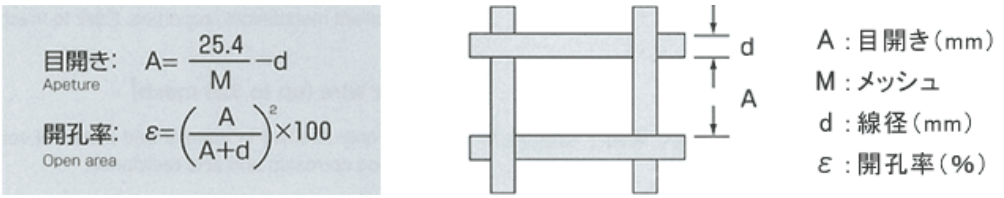


図 4.2-64　諸量の関係

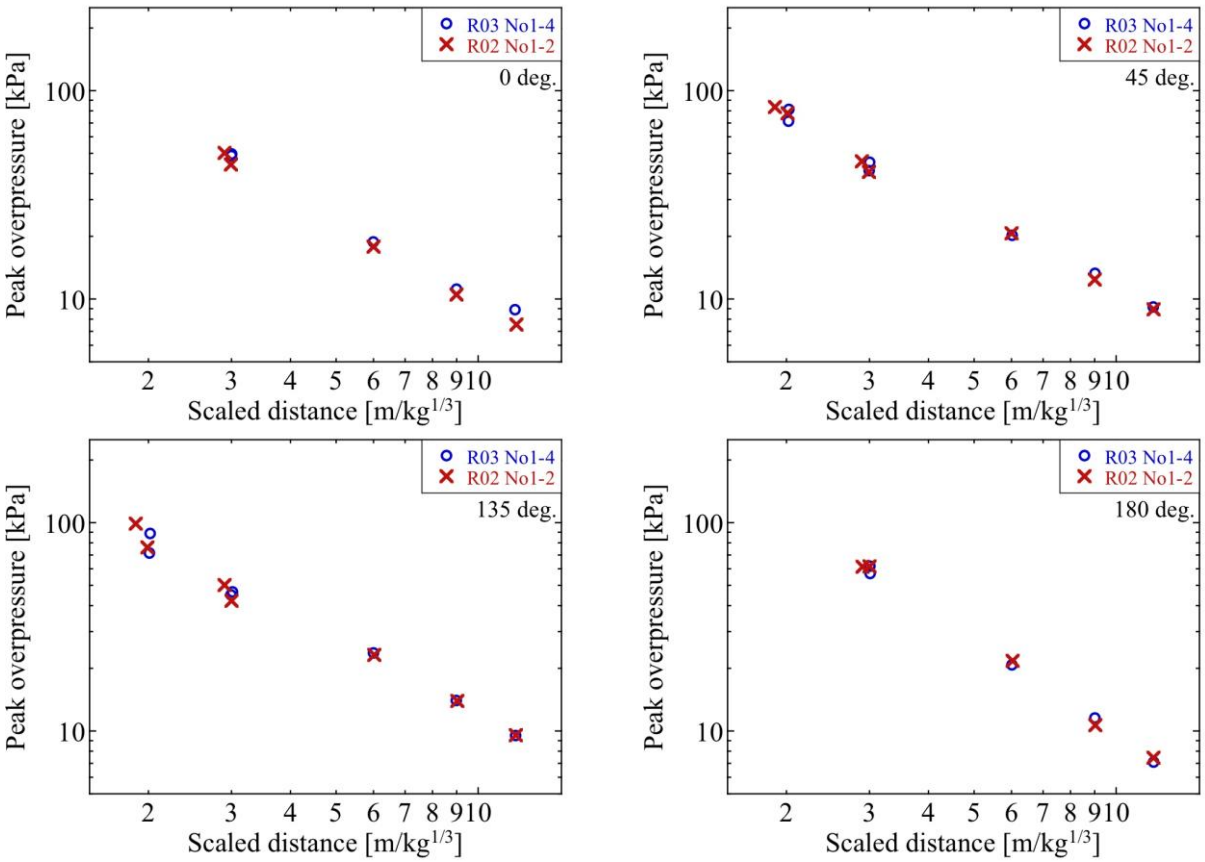


図 4.2-65　R03 No1-4（樹脂メッシュ）と R02 No1-2（金網）の角度ごとのピーク静水過圧比較

表 4.2-43　All と同等のピーク静水過圧が得られる R03 No1-4（樹脂メッシュ）と R02 No1-2（金網）の換算距離

All	R03 No1-4（樹脂メッシュ）				R02 No1-2（金網）			
	0 度	45 度	135 度	180 度	0 度	45 度	135 度	180 度
3	2.42	1.96	1.96	2.54	2.11	2.06	1.99	2.74
6	5.16	5.40	6.15	5.78	5.01	5.27	5.83	5.79
9	8.55	9.44	10.04	8.61	8.09	9.12	10.01	8.58
12	12.97	13.78	13.49	11.06	11.22	13.45	14.18	11.10

表 4.2-44　wall-standard と同等のピーク静水過圧が得られる R03 No1-4（樹脂メッシュ）と R02 No1-2（金網）の換算距離

wall-standard	R03 No1-4（樹脂メッシュ）				R02 No1-2（金網）			
	0 度	45 度	135 度	180 度	0 度	45 度	135 度	180 度
3	2.72	2.92	3.25	2.94	2.44	2.96	3.09	3.11
6	5.40	6.10	6.89	6.02	5.25	5.93	6.58	6.02
9	9.06	9.45	10.05	8.95	8.50	9.13	10.02	8.92
12	14.65	12.95	12.87	11.76	12.19	12.60	13.40	11.84

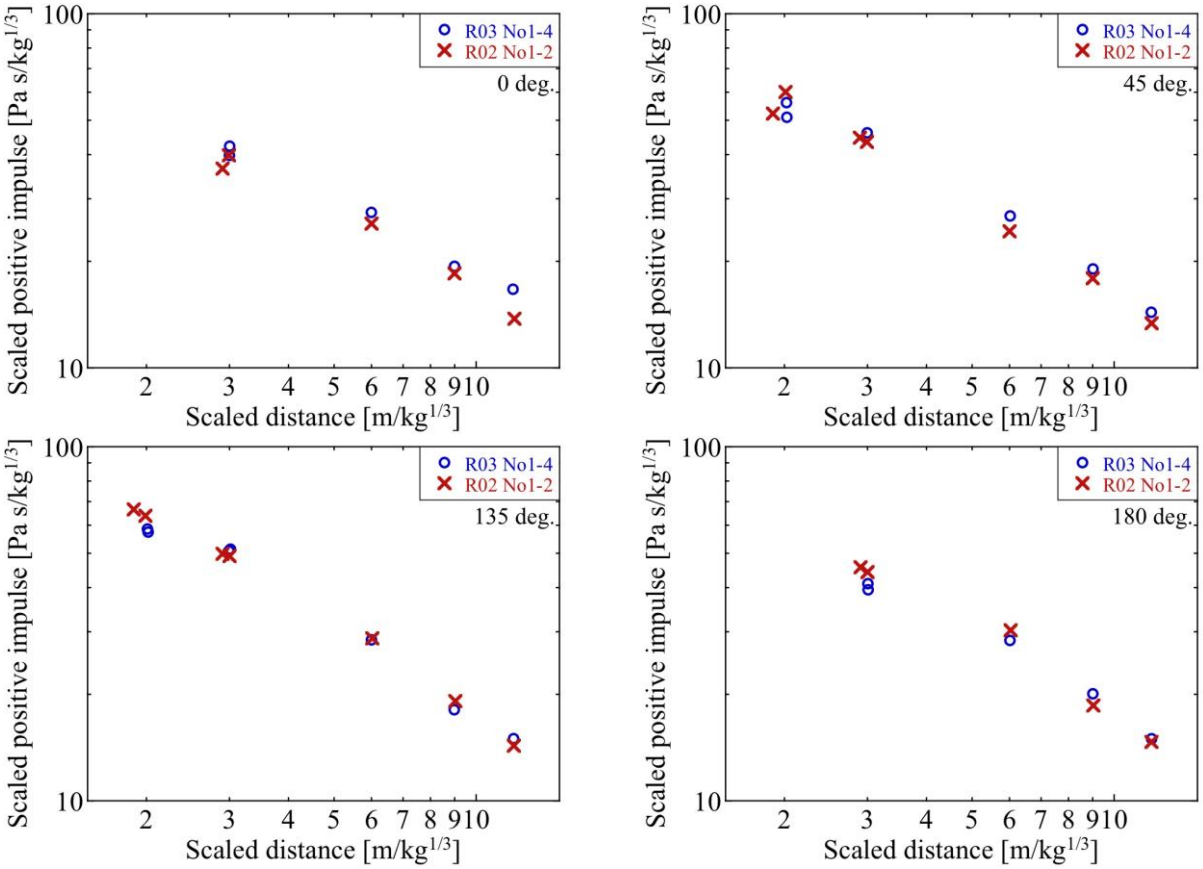


図 4.2-66　R03 No1-4（樹脂メッシュ）と R02 No1-2（金網）の角度ごとの正圧相インパルス比較

表 4.2-45　All と同等の正圧相インパルスが得られる R03 No1-4（樹脂メッシュ）と R02 No1-2（金網）の換算距離

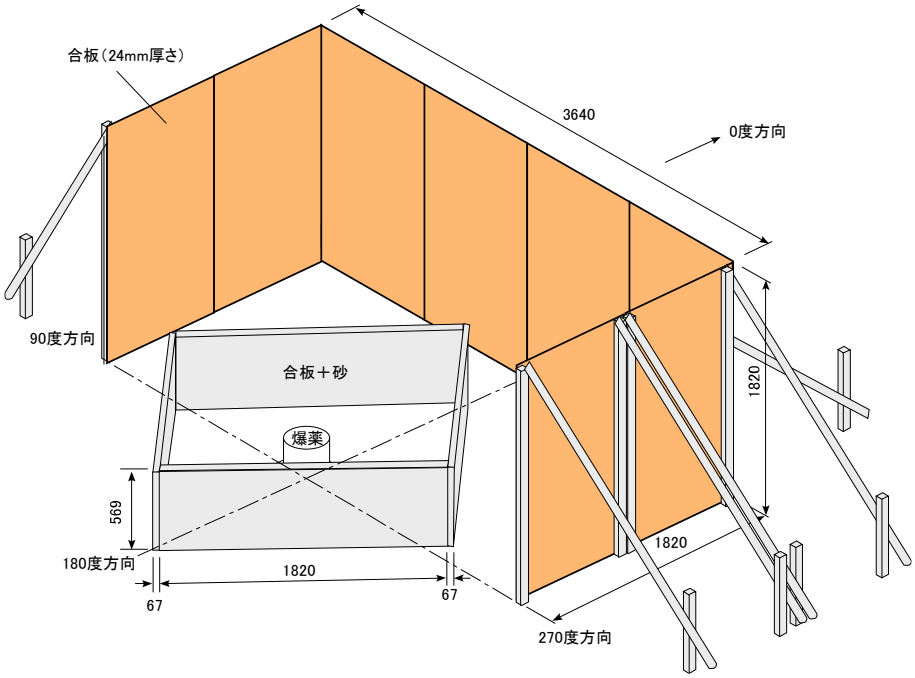
All	R03 No1-4（樹脂メッシュ）				R02 No1-2（金網）			
	0 度	45 度	135 度	180 度	0 度	45 度	135 度	180 度
3	2.46	2.69	2.99	解なし	1.87	2.64	3.10	2.37
6	5.62	5.83	6.13	6.11	5.36	5.15	6.16	6.30
9	9.42	8.79	8.95	9.36	8.42	7.91	8.97	9.16
12	13.76	11.63	11.58	12.12	11.28	10.89	11.64	11.63

表 4.2-46　wall-standard と同等の正圧相インパルスが得られる R03 No1-4（樹脂メッシュ）と R02 No1-2（金網）の換算距離

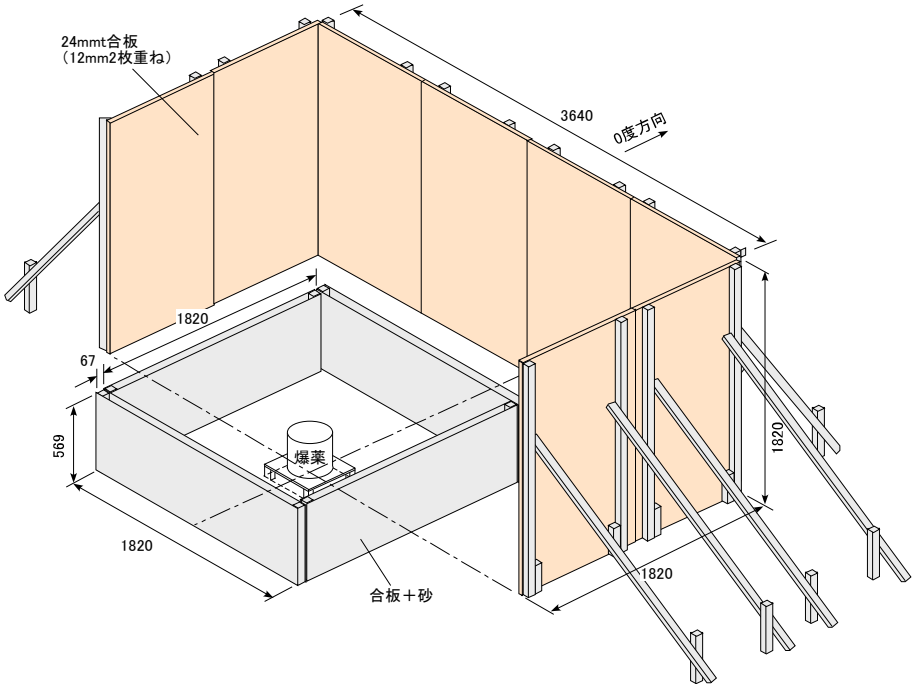
wall-standard	R03 No1-4（樹脂メッシュ）				R02 No1-2（金網）			
	0 度	45 度	135 度	180 度	0 度	45 度	135 度	180 度
3	3.06	3.13	3.44	解なし	2.68	2.96	3.53	3.44
6	5.70	6.28	6.57	6.19	5.43	5.55	6.59	6.37
9	9.86	9.24	9.37	9.67	8.74	8.36	9.40	9.44
12	15.63	12.08	11.99	13.14	12.39	11.39	12.06	12.55

(9) コの字型追加構造の比較

図 4.2-67 にコの字の防爆壁の追加方法の設置概要を示す。R03 は R02 に比べてコの字型追加構造を 45 度向きを変えて設置している。図 4.2-68、69 と表 4.2-47～表 4.2-50 にピーク静水過圧と正圧相インパルスを示した。



(a) R03 No1-5 の防爆壁設置概要



(b) R02 No1-1 の防爆壁設置概要

図 4.2-67　コの字の防爆壁の追加方法

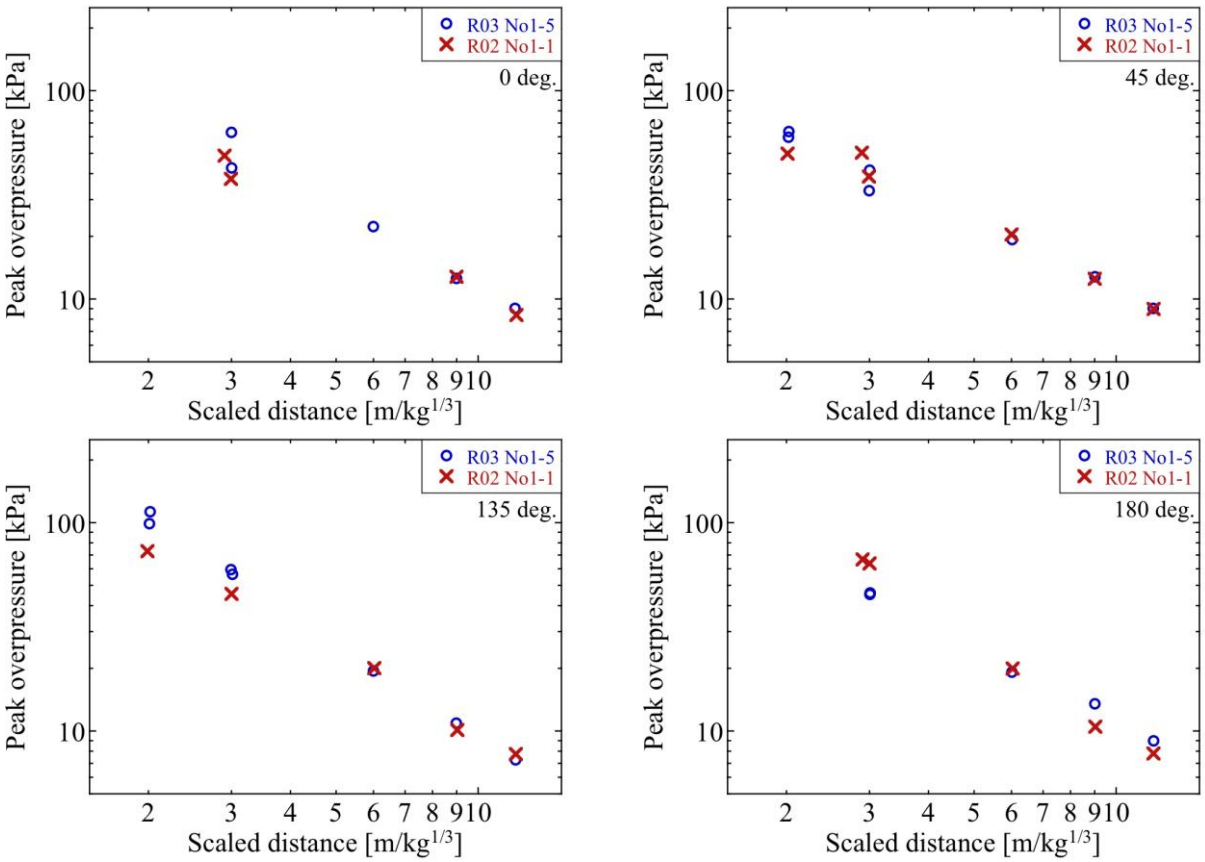


図 4.2-68　R03 No1-5 と R02 No1-1 の角度ごとのピーク静水過圧比較

表 4.2-47　All と同等のピーク静水過圧が得られる R03 No1-5 と R02 No1-1 の換算距離

All	R03 No1-5				R02 No1-1			
	0 度	45 度	135 度	180 度	0 度	45 度	135 度	180 度
3	1.39	1.61	2.51	2.10	1.65	0.86	2.03	2.83
6	5.82	4.85	5.53	5.45	4.98	5.48	5.31	5.51
9	9.52	9.09	8.37	9.32	8.85	9.39	8.39	8.33
12	12.64	14.07	11.01	13.48	12.90	12.73	11.18	11.36

表 4.2-48　wall-standard と同等のピーク静水過圧が得られる R03 No1-5 と R02 No1-1 の換算距離

wall-standard	R03 No1-5				R02 No1-1			
	0 度	45 度	135 度	180 度	0 度	45 度	135 度	180 度
3	1.97	2.48	3.45	2.46	2.00	2.41	3.04	3.15
6	6.14	5.55	6.06	5.74	5.27	6.24	5.89	5.73
9	9.96	9.10	8.38	9.85	9.38	9.40	8.40	8.72
12	13.51	13.09	10.53	14.81	14.17	12.14	10.68	12.35

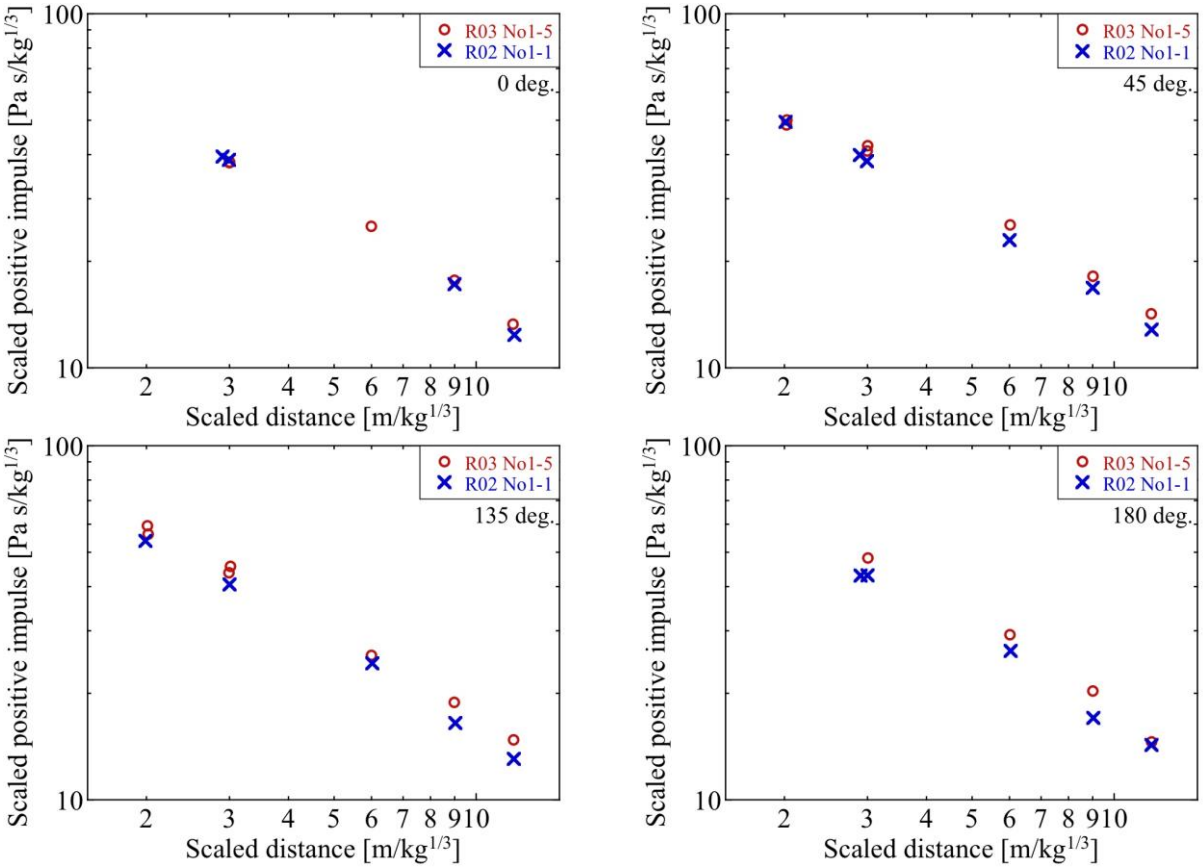


図 4.2-69　R03 No1-5 と R02 No1-1 の角度ごとの正圧相インパルス比較

表 4.2-49　All と同等の正圧相インパルスが得られる R03 No1-5 と R02 No1-1 の換算距離

All	R03 No1-5				R02 No1-1			
	0 度	45 度	135 度	180 度	0 度	45 度	135 度	180 度
3	解なし	2.08	2.71	3.03	2.29	2.09	2.35	2.58
6	4.64	5.32	5.51	6.38	4.56	4.69	4.97	5.35
9	7.31	8.41	8.61	9.28	7.19	7.45	7.67	8.25
12	9.73	11.42	11.95	11.93	10.16	10.32	10.43	11.23

表 4.2-50　wall-standard と同等の正圧相インパルスが得られる R03 No1-5 と R02 No1-1 の換算距離

wall-standard	R03 No1-5				R02 No1-1			
	0 度	45 度	135 度	180 度	0 度	45 度	135 度	180 度
3	2.10	2.53	3.06	3.79	2.74	2.42	2.69	3.14
6	4.70	5.78	5.95	6.44	4.61	5.09	5.37	5.41
9	7.58	8.89	9.11	9.57	7.49	7.89	8.10	8.56
12	10.64	11.89	12.52	12.94	11.45	10.79	10.88	12.45

コの字型追加構造の位置に応じて、爆風と壁の反射形態の変化に伴い爆風圧に若干の変化が現れた。そこで安全性を検討する際、表 4.2-47～表 4.2-50 の換算距離において両条件の大きい方を採用すると表 4.2-51～54 となった。

表 4.2-51　All と同等のピーク静水過圧が得られる R03 No1-5 と R02 No1-1 の換算距離の最大値

All	R03 No1-5 と R02No1-1 の最大値			
	0 度	45 度	135 度	180 度
3	**1.65**	1.61	2.51	**2.83**
6	5.82	**5.48**	5.53	**5.51**
9	9.52	**9.39**	**8.39**	9.32
12	**12.90**	14.07	**11.18**	13.48

太字は R02 No1-1 のデータを採用

表 4.2-52　wall-standard と同等のピーク静水過圧が得られる R03 No1-5 と R02 No1-1 の換算距離の最大値

wall-standard	R03 No1-5 と R02No1-1 の最大値			
	0 度	45 度	135 度	180 度
3	**2.00**	2.48	3.45	**3.15**
6	6.14	**6.24**	6.06	5.74
9	9.96	**9.40**	**8.40**	9.85
12	**14.17**	13.09	**10.68**	14.81

太字は R02 No1-1 のデータを採用

表 4.2-53　All と同等の正圧相インパルスが得られる R03 No1-5 と R02 No1-1 の換算距離の最大値

All	R03 No1-5 と R02No1-1 の最大値			
	0 度	45 度	135 度	180 度
3	**2.29**	**2.09**	2.71	3.03
6	4.64	5.32	5.51	6.38
9	7.31	8.41	8.61	9.28
12	**10.16**	11.42	11.95	11.93

太字は R02 No1-1 のデータを採用

表 4.2-54　wall-standard と同等の正圧相インパルスが得られる R03 No1-5 と R02 No1-1 の換算距離

wall-standard	R03 No1-5 と R02No1-1 の最大値			
	0 度	45 度	135 度	180 度
3	**2.74**	2.53	3.06	3.79
6	4.70	5.78	5.95	6.44
9	7.58	8.89	9.11	9.57
12	**11.45**	11.89	12.52	12.94

太字は R02 No1-1 のデータを採用

爆風圧計測まとめ

火薬類の爆発威力に関する実験において、現行の火薬類取締法に準拠した防爆壁に追加構造を設置した場合の爆風圧力の計測を行い、以下の知見を得た。

これまでの円柱形の EMX2 を使用した基準爆風圧実験との比較

表 4.2-55　これまでに実施した EMX2 を使用した基準爆風圧実験

実施年度	実験No	薬量 (kg)	爆薬中心までの地表面からの高さ	
			($m/kg^{1/3}$)	(m)
R03	2-1	15.49	0.078	0.195
R02	2-1	15.49	0.078	0.195
H30	2-1	5	0.18	0.308
H28	2-6	10.32	0.18	0.388
H27	2-2	40	0.18	0.616
H26	4-1	10	0.18	0.388
	4-2	80	0.18	0.776

地表面爆発の基準データが蓄積されてきていることから、R03 とこれまでに実施した EMX2 を使用した基準爆風圧実験を比較した。その結果、R03 の結果は他の 5 年度分のピーク静水過圧と正圧相インパルスは同等であることが確認された。令和 2 年度火薬類爆発影響低減化技術基準検討報告書で示した EMX2 のピーク静水過圧と換算正圧相インパルスを評価する基準線（All）によって、精度良く 6 年分の実験データを評価できる。ピーク静水過圧 P (kPa)と正圧相インパルス I (Pa s)である。Z は換算距離 ($m/kg^{1/3}$)である。

$$X = \log_{10}(Z)$$
$$\log_{10}(P) = 2.8046 - 2.1729X + 0.38845X^2$$
$$\log_{10}(I/W^{1/3}) = 1.9801 - 0.51793X - 0.21643X^2$$

No1 シリーズと All の比較

追加構造を考慮した防爆壁の効果を検討するため、All を基準として No1 シリーズの爆風低減効果を検討した。

ピーク静水過圧基準の保安距離

・No1-1~1-3 はポリウレタンフォーム 1~3 面であり、面数の増大に従って爆風低減効果が大きくなり遠方においても低減効果が維持された。

・No1-4 は樹脂メッシュによる爆風の透過と反射が起きるため、0 度方向と 45 度方向の近場は保安距離縮小を達成した。0 度方向おいて、重い金網の方が小さくなった。

・No1-5 はコの字防爆壁であり 45 度方向、180 度方向の遠方が保安距離拡大となった。

表 4.2-56　All と同等のピーク静水過圧が得られる各実験条件の換算距離
（赤字：10%以上保安距離縮小、青字：10%以上保安距離拡大）

All	No1-1				No1-2			
	0 度	45 度	135 度	180 度	0 度	45 度	135 度	180 度
3	2.06	1.17	2.15	2.48	1.45	解なし	1.49	2.11
6	5.24	5.70	5.35	5.79	4.93	5.18	5.06	5.12
9	9.09	9.45	8.45	8.73	8.39	8.84	8.17	7.87
12	13.48	12.61	11.34	11.31	11.56	11.68	10.84	10.32
All	No1-3				No1-4			
	0 度	45 度	135 度	180 度	0 度	45 度	135 度	180 度
3	1.14	0.90	1.43	1.72	2.42	1.96	1.96	2.54
6	4.34	4.25	4.60	4.59	5.16	5.40	6.15	5.78
9	7.93	7.88	7.40	7.19	8.55	9.44	10.04	8.61
12	11.48	11.37	9.81	9.49	12.97	13.78	13.49	11.06
All	No1-5							
	0 度	45 度	135 度	180 度				
3	1.39	1.61	2.51	2.10				
6	5.82	4.85	5.53	5.45				
9	9.52	9.09	8.37	9.32				
12	12.64	14.07	11.01	13.48				

正圧相インパルス基準の保安距離

・No1-1~1-3 はポリウレタンフォーム 1~3 面であり、面数の増大に従って爆風低減効果が大きくなり、遠方においても低減効果が維持された。

・No1-4 は樹脂メッシュによる爆風の透過と反射が起きるため、0 度方向と 45 度方向の近場は保安距離縮小を達成した。0 度方向の遠方において保安距離拡大となった。0 度方向と 45 度方向において重い金網の方が小さくなった。

・No1-5 はコの字防爆壁であり 0 方向と 45 度方向の近場は低減し、0 度方向については遠方においても保安距離拡大となった。

表 4.2-57　All と同等の正圧相インパルスが得られる各実験条件の換算距離
（赤字：10%以上保安距離縮小、青字：10%以上保安距離拡大）

All	No1-1				No1-2			
	0 度	45 度	135 度	180 度	0 度	45 度	135 度	180 度
3	2.49	2.32	2.78	2.80	1.43	1.71	2.07	2.97
6	5.20	5.23	5.75	5.53	4.34	4.33	4.55	4.86
9	8.33	8.07	8.50	8.23	6.99	6.80	7.06	6.88
12	11.83	10.85	11.11	10.93	9.54	9.18	9.57	9.09
All	No1-3				No1-4			
	0 度	45 度	135 度	180 度	0 度	45 度	135 度	180 度
3	1.32	1.49	1.72	1.68	2.46	2.69	2.99	解なし*
6	3.76	3.97	4.06	3.65	5.62	5.83	6.13	6.11
9	6.34	6.47	6.45	5.76	9.42	8.79	8.95	9.36
12	9.01	8.97	8.84	7.96	13.76	11.63	11.58	12.12
All	No1-5							
	0 度	45 度	135 度	180 度				
3	解なし	2.08	2.71	3.03				
6	4.64	5.32	5.51	6.38				
9	7.31	8.41	8.61	9.28				
12	9.73	11.42	11.95	11.93				

*解なしは同等の爆風パラメータが存在しない。

基準爆風圧実験（All）と基準防爆壁実験（wall-standard）の比較

All と wall-standard の比較で使用する近似線は令和 2 年度火薬類爆発影響低減化技術基準検討報告書と同じでああるため、同様なまとめとなるがここに再掲する。

ピーク静水過圧基準の保安距離

・0 度と 180 度は特に保安距離 3 が減少し、遠方でも減少が維持された。
・45 度と 135 度の壁近傍は保安距離減少するが、遠方では若干の保安距離増大となった。

表 4.2-58　All と同等のピーク静水過圧が得られる wall-standard の換算距離
（赤字：10%以上保安距離縮小）

All	wall-standard	
	0 度, 180 度	45 度, 135 度
3	2.61	2.04
6	5.76	5.35
9	8.64	8.99
12	11.24	12.70

正圧相インパルス基準の保安距離

・0 度と 180 度は減少～同等であった。
・45 度と 135 度は常に減少であった。

表 4.2-59　All と同等の正圧相インパルスが得られる wall-standard の換算距離
（赤字：10%以上保安距離縮小）

All	wall-standard	
	0 度, 180 度	45 度, 135 度
3	解なし*	2.61
6	5.93	5.56
9	8.73	8.53
12	11.12	11.52

*解なしは同等の爆風パラメータが存在しない。

以上のことから、防爆壁を設けることで、その近場においては爆風低減効果があることがわかった。

No1 シリーズと wall-standard の比較

基準防爆壁への追加構造の影響を検討するため、wall-standard を基準として No1 シリーズの爆風低減効果を検討した。

ピーク静水過圧基準の保安距離

・全ての条件において目的としていた追加構造による、0 度の保安距離 3 の短縮となった。
・No1-1~1-3 はポリウレタンフォーム 1~3 面であり、面数の増大に伴って爆風低減効果が大きくなり、遠方においても保安距離縮小を達成した。
・No1-4 は、樹脂メッシュによる爆風の透過と反射が起き、0 度の壁近傍は保安距離 6 も縮小となったが、0 度の壁遠方や反射側の 135 度の保安距離が拡大する傾向であった。
・No1-5 はコの字防爆壁であり、0 度、180 度の遠方が保安距離拡大となった。

表 4.2-60　wall-standard と同等のピーク静水過圧が得られる各実験条件の換算距離
（赤字：10%以上保安距離縮小、青字：10%以上保安距離拡大）

wall-standard	No1-1				No1-2			
	0 度	45 度	135 度	180 度	0 度	45 度	135 度	180 度
3	2.40	2.68	3.12	2.90	1.84	解なし	2.63	2.48
6	5.53	6.44	5.92	6.04	5.22	5.93	5.66	5.35
9	9.64	9.46	8.46	9.09	8.82	8.84	8.18	8.21
12	14.94	12.06	10.81	12.04	12.49	11.19	10.36	11.02
wall-standard	No1-3				No1-4			
	0 度	45 度	135 度	180 度	0 度	45 度	135 度	180 度
3	1.47	1.84	2.43	2.07	2.72	2.92	3.25	2.94
6	4.63	4.91	5.14	4.81	5.40	6.10	6.89	6.02
9	8.41	7.89	7.40	7.51	9.06	9.45	10.05	8.95
12	12.55	10.73	9.38	10.15	14.65	12.95	12.87	11.76
wall-standard	No1-5							
	0 度	45 度	135 度	180 度				
3	1.97	2.48	3.45	2.46				
6	6.14	5.55	6.06	5.74				
9	9.96	9.10	8.38	9.85				
12	13.51	13.09	10.53	14.81				

正圧相インパルス基準の保安距離

・No1-1~3 はポリウレタンフォーム 1~3 面であり、面数の増大に伴って遠方においても保安距離縮小を達成した。

・No1-4 は樹脂メッシュであり、0 度の遠方のみ強化された。

・No1-5 はコの字防爆壁であり、特に 0 度の低減が顕著であり遠方でも維持された。

表 4.2-61　wall-standard と同等の正圧相インパルスが得られる各実験条件の換算距離
（赤字：10%以上保安距離縮小、青字：10%以上保安距離拡大）

wall-standard	No1-1				No1-2			
	0 度	45 度	135 度	180 度	0 度	45 度	135 度	180 度
3	3.01	2.72	3.20	3.37	2.08	2.07	2.40	3.36
6	5.26	5.66	6.17	5.59	4.40	4.70	4.92	4.90
9	8.69	8.51	8.92	8.52	7.27	7.17	7.45	7.11
12	13.32	11.30	11.52	12.00	10.53	9.56	9.97	10.04
wall-standard	No1-3				No1-4			
	0 度	45 度	135 度	180 度	0 度	45 度	135 度	180 度
3	1.81	1.82	2.03	2.07	3.06	3.13	3.44	解なし*
6	3.81	4.34	4.41	3.69	5.70	6.28	6.57	6.19
9	6.62	6.86	6.82	5.99	9.86	9.24	9.37	9.67
12	10.09	9.37	9.23	8.87	15.63	12.08	11.99	13.14
wall-standard	No1-5							
	0 度	45 度	135 度	180 度				
3	2.10	2.53	3.06	3.79				
6	4.70	5.78	5.95	6.44				
9	7.58	8.89	9.11	9.57				
12	10.64	11.89	12.52	12.94				

*解なしは同等の爆風パラメータが存在しない。

R02 低密度ウレタンフォームと R03 高密度ウレタンフォームの比較

ピーク静水過圧と正圧相インパルスを比較した結果、1 面では両者に大きな違いは確認されなかったが、3 面の場合は密度が大きい R03 の爆風低減効果が高かった。

R02 No1-2（金網）と R03 No1-4（樹脂メッシュ）の比較

ピーク静水過圧と正圧相インパルスを比較した結果、ピーク静水過圧は 0 度方向おいて、正圧相インパルスは 0 度方向と 45 度方向において重い金網の方が小さくなった。

コの字型追加構造の設置位置の影響比較

R03 は R02 に比べてコの字型追加構造を 45 度ずらして設置した場合を検討した。爆風と壁の反射形態の変化に伴い爆風圧に若干の変化が現れた。そこで安全性を検討する際には、R03 と R02 で得られたピーク静水過圧基準と正圧相インパルス基準の換算距離において両条件の大きい方を採用した方が望ましい。

ピーク静水過圧基準の保安距離

・0 度の保安距離 3 の短縮となった。
・45 度と 180 度の遠方で爆風が強化され保安距離が特に拡大する傾向であった。

表 4.2-62　All と同等のピーク静水過圧が得られる R03 No1-5 と R02 No1-1 の換算距離の最大値
（赤字：10%以上保安距離縮小、青字：10%以上保安距離拡大）

All	R03 No1-5 と R02No1-1 の最大値			
	0 度	45 度	135 度	180 度
3	**1.65**	1.61	2.51	**2.83**
6	5.82	**5.48**	5.53	**5.51**
9	9.52	**9.39**	**8.39**	9.32
12	**12.90**	14.07	**11.18**	13.48

太字は R02 No1-1 のデータを採用

表 4.2-63　wall-standard と同等のピーク静水過圧が得られる R03 No1-5 と R02 No1-1 の換算距離の最大値
（赤字：10%以上保安距離縮小、青字：10%以上保安距離拡大）

wall-standard	R03 No1-5 と R02No1-1 の最大値			
	0 度	45 度	135 度	180 度
3	**2.00**	2.48	3.45	**3.15**
6	6.14	**6.24**	6.06	5.74
9	9.96	**9.40**	**8.40**	9.85
12	**14.17**	13.09	**10.68**	14.81

太字は R02 No1-1 のデータを採用

正圧相インパルス基準の保安距離

・コの字防爆壁によって 0 度方向の正圧相インパルスは低減を維持した。また 45 度の近傍においても低減を確認した。

表 4.2-64　All と同等の正圧相インパルスが得られる R03 No1-5 と R02 No1-1 の換算距離の最大値
（赤字：10%以上保安距離縮小、青字：10%以上保安距離拡大）

All	R03 No1-5 と R02No1-1 の最大値			
	0 度	45 度	135 度	180 度
3	**2.29**	**2.09**	2.71	3.03
6	4.64	5.32	5.51	6.38
9	7.31	8.41	8.61	9.28
12	**10.16**	11.42	11.95	11.93

太字は R02 No1-1 のデータを採用

表 4.2-65　wall-standard と同等の正圧相インパルスが得られる R03 No1-5 と R02 No1-1 の換算距離
（赤字：10%以上保安距離縮小、青字：10%以上保安距離拡大）

wall-standard	R03 No1-5 と R02No1-1 の最大値			
	0 度	45 度	135 度	180 度
3	**2.74**	2.53	3.06	3.79
6	4.70	5.78	5.95	6.44
9	7.58	8.89	9.11	9.57
12	**11.45**	11.89	12.52	12.94

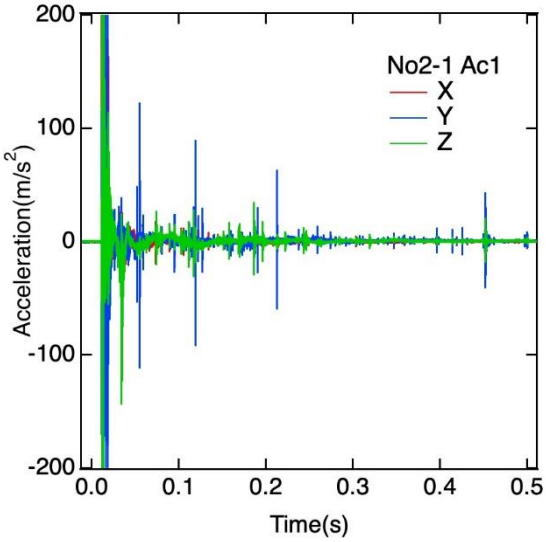
太字は R02 No1-1 のデータを採用

4.2.3.3　地盤振動計測結果

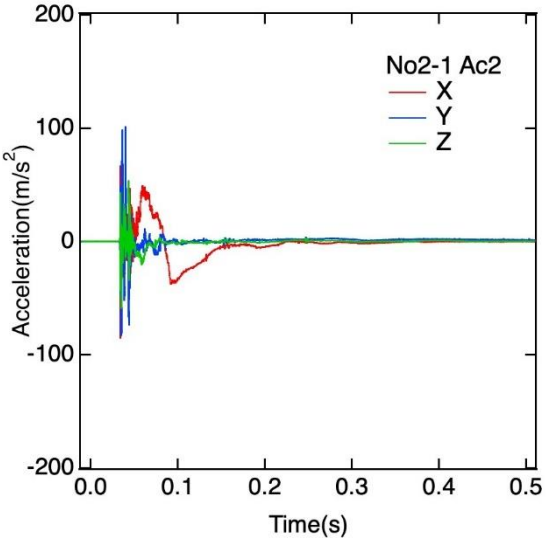
基準爆風圧実験として含水爆薬(EMX2) を換算高さ 0.027 m/kg$^{1/3}$ に設置し、起爆後の地盤振動を計測した。No2-1 および No2-2 において各計測点で計測した振動加速度の波形を図 4.2-70、71 に示す。計測した加速度波形について、ベースラインや定常的に重畳されるノイズなどの積分時の影響を取り除くためのローカットフィルタ付の積分を行い、速度成分に変換した速度波形を図 4.2-72、73 に示す。さらに換算距離に対する最大変位速度（PPV）を図 4.2-74 に示した。防爆壁実験結果と同様に、最も保守的な数値となる PPV_{SRSS} に加え、参考のため PPV_{NATO}、PPV_{ture} も併せて図に掲載した。

基準爆風圧の結果に関しても PPV_{SRSS} でも第一種・第二種保安物件における PPV 10 cm/s、第三種・第四種保安物件における PPV 40 cm/s の目標値を満足していることがわかる。また、図 4.2-75 に防爆壁実験と基準爆風圧実験における PPV_{SRSS} の比較を示す。なお基準爆風圧の測定結果に関しても Ac2 の計測点における x 軸方向の測定結果に低周波成分に由来する異常に大きな振幅が確認できたのでこの異常振幅に関しては PPV 評価から除外している。

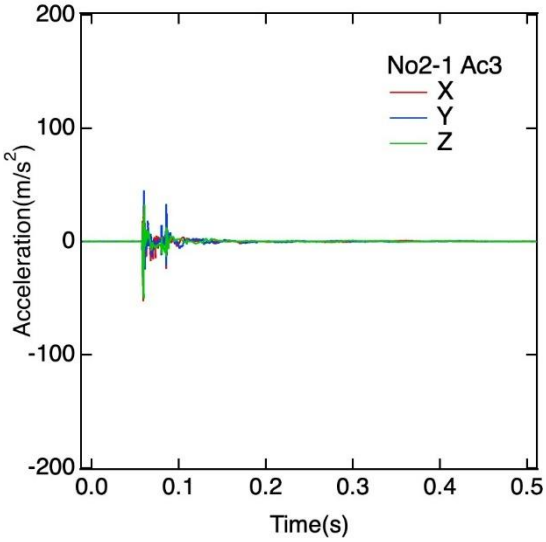
基準爆風圧の結果は、防爆壁を設置した場合と比べ有意な差は認められなかった。また、比較のため H28 年度の基準爆風圧実験結果および換算距離を実際に使用した爆薬基準へと変更した場合における R1、R2、R3 年度の最大変位速度をプロットしたものを図 4.2-76 に示した。今回の実験条件と同様である近年の試験結果と比較しても大きな差は認められず、今回の試験の再現性が確認できた。



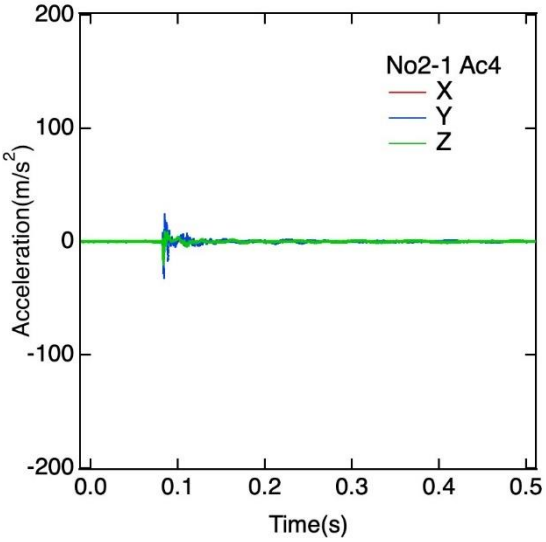
換算距離 3(8.60m)



換算距離 6(17.2m)

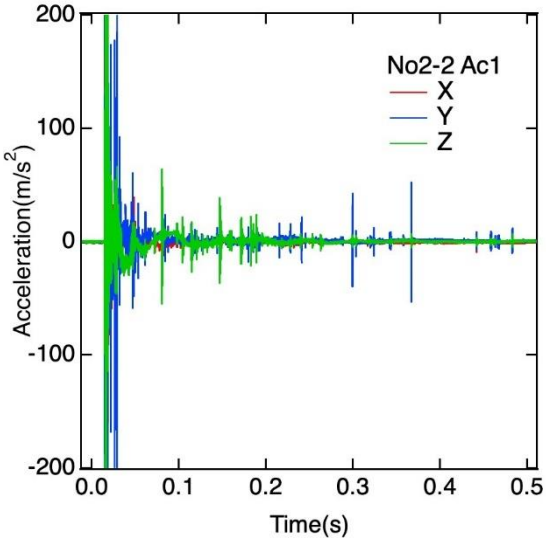


換算距離 9(25.8m)

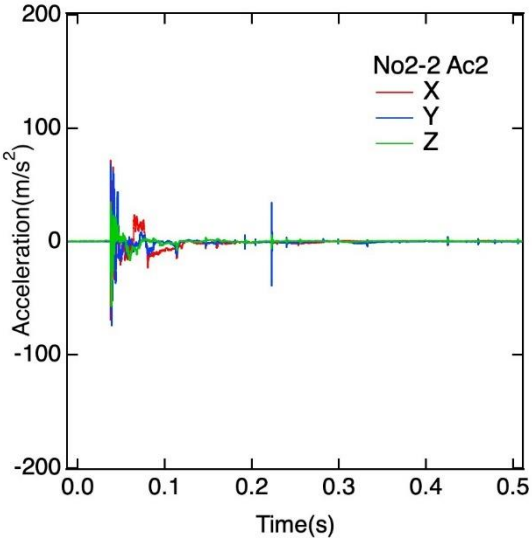


換算距離 12(34.4m)

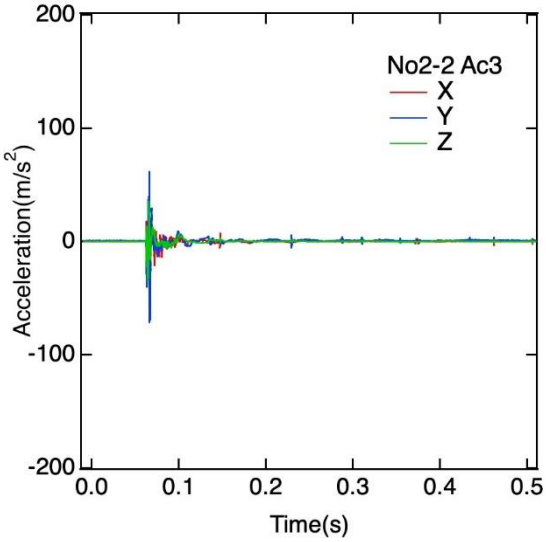
図 4.2-70　基準爆風圧　地盤振動加速度(No.2-1)



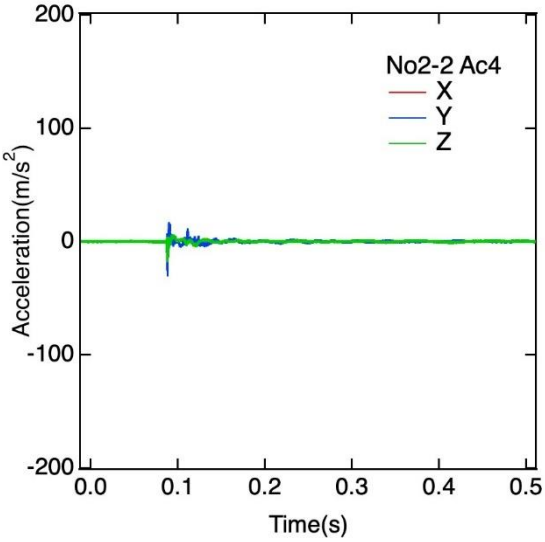
換算距離 3(8.60m)



換算距離 6(17.2m)

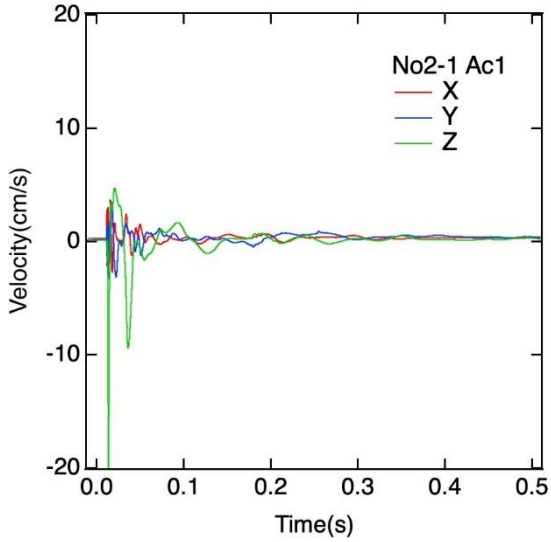


換算距離 9(25.8m)

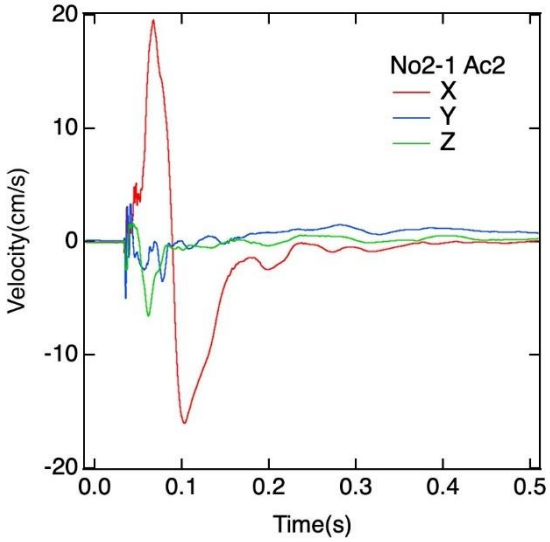


換算距離 12(34.4m)

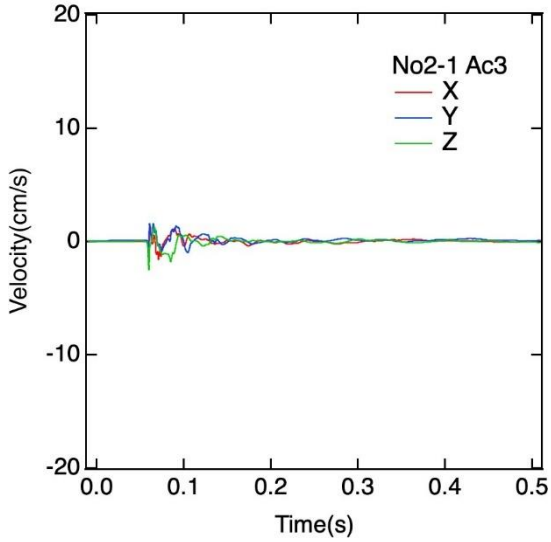
図 4.2-71　基準爆風圧　地盤振動加速度(No.2-2)



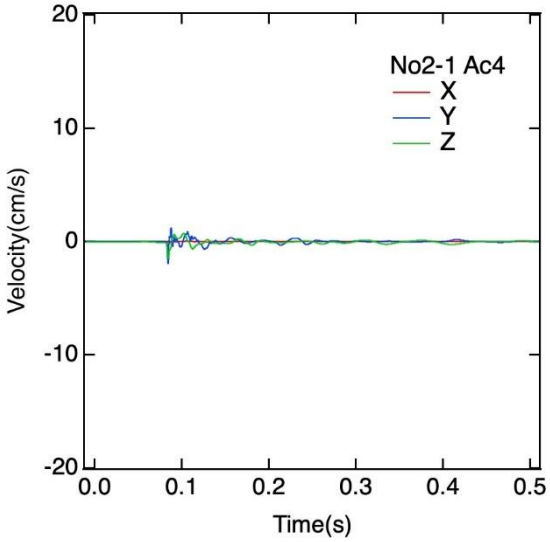
換算距離 3(8.60m)



換算距離 6(17.2m)

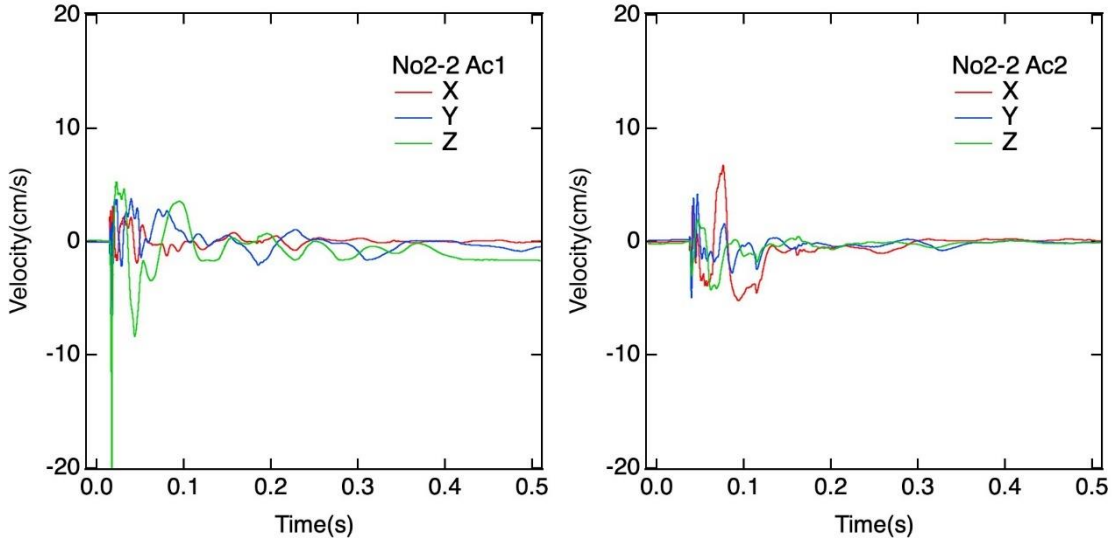


換算距離 9(25.8m)



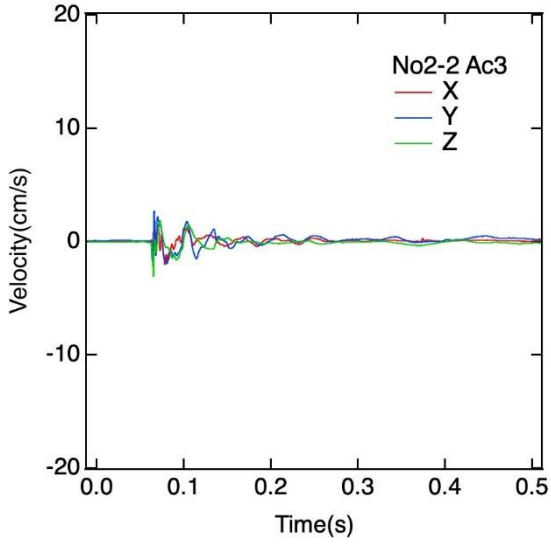
換算距離 12(34.4m)

図 4.2-72　基準爆風圧　地盤振動速度(No.2-1)

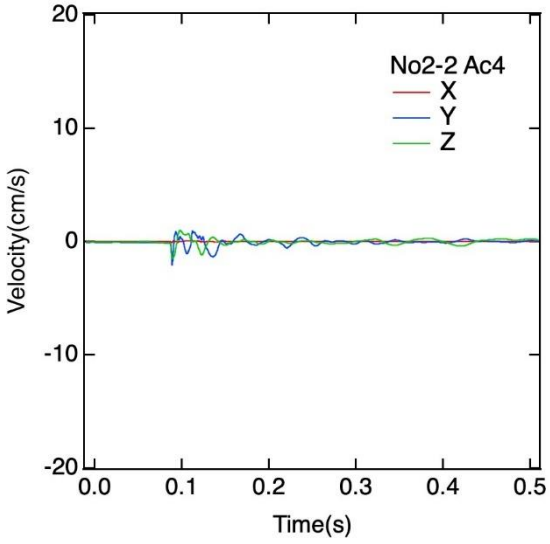


換算距離 3(8.60m)

換算距離 6(17.2m)



換算距離 9(25.8m)



換算距離 12(34.4m)

図 4.2-73　基準爆風圧　地盤振動速度(No.2-2)

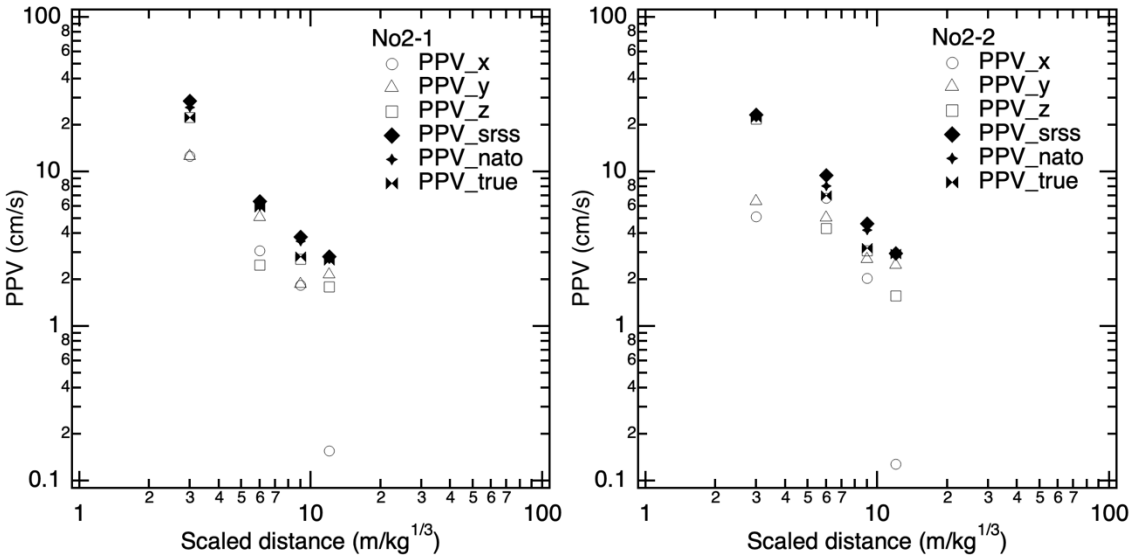


図 4.2-74　基準爆風圧 換算距離に対する最大変位速度(No2-1, 2-2)

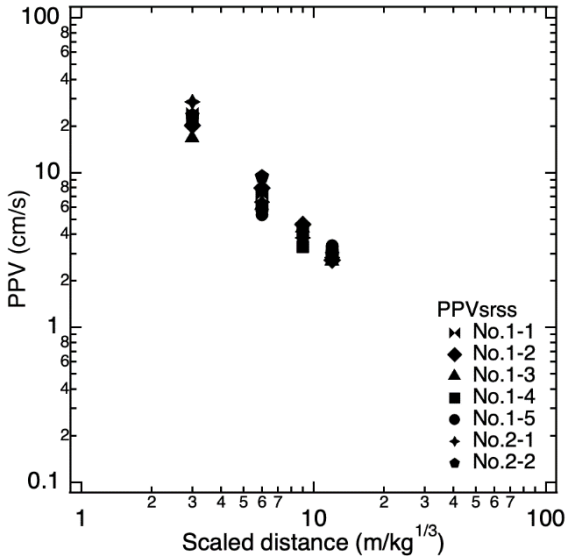


図 4.2-75　防爆壁/基準爆風圧 換算距離に対する最大変位速度(PPV_{SRSS})の比較

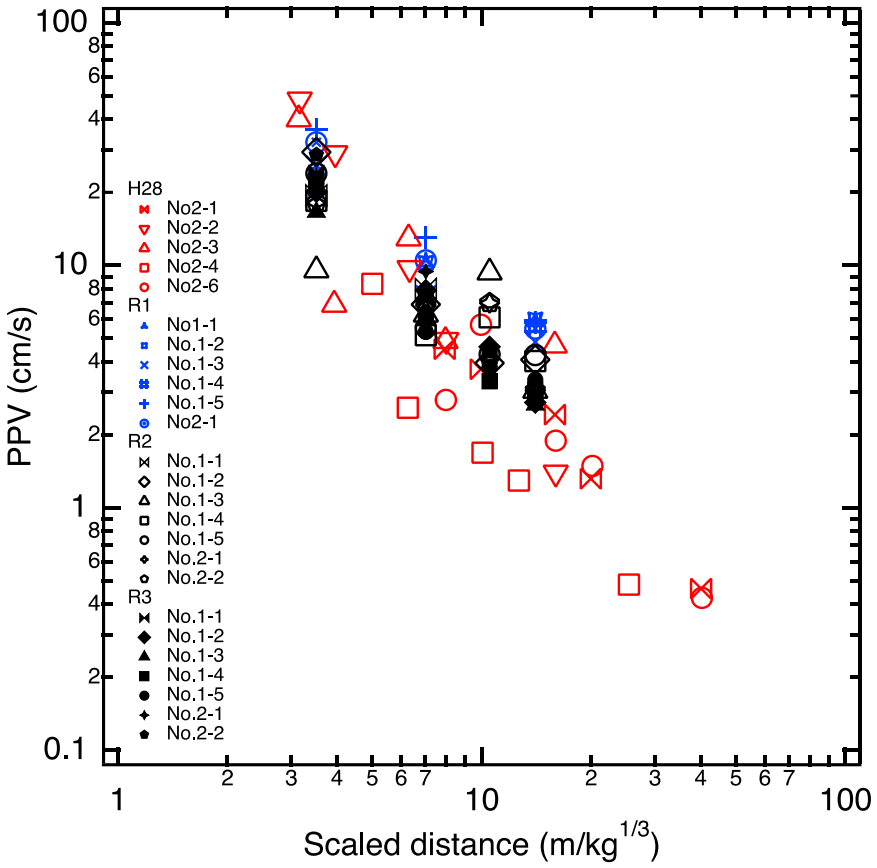


図 4.2-76　換算距離に対する最大変位速度の比較 (実使用爆薬基準, H28/R01/R02/R03)

地盤振動計測まとめ

爆点から換算距離 3、6、9、12 となる位置において地盤振動計測を行った。基準爆風圧に関する実験においても、今回の実験では、第一種・第二種保安物件における PPV 10 cm/s、第三種・第四種保安物件における PPV 40 cm/s の目標値を満足しており、防爆壁を設置した場合と比べて有意な差は認められなかった。また、近年の試験結果と比較しても大きな差は認められず今回の試験の再現性も確認できた。

4.2.3.4　高速度カメラ撮影結果

図 4.2-77 及び図 4.2-78 に高速度撮影の静止画像の一例を示す。

実験 No.2-1（基準爆風圧（壁無し））

起爆後 1 ミリ秒程度での火炎形状は鏡餅型の二段構造であった。2 ミリ秒後には白い爆発生成気体が観測され、火炎は認められなかった。爆発性生成気体は地表に沿って 13 ミリ秒程度まで膨張し、その後わずかに収縮するような挙動を示した。約 7 ミリ秒後には、鉛直上方に膨張する爆発生成気体と地表面に沿って膨張する爆発生成気体の間から土砂が噴出する様子が撮影された。衝撃波、火炎や煙の形成は概ね軸対称な形状であることが確認された。

実験 No.2-2（基準爆風圧（壁有り））

起爆直後の火炎形状は実験 No.2-1 のそれより縦長の傾向であった。これは周囲が砂防爆壁で囲まれ、上部が開いた構造を反映したものと思われる。2 ミリ秒後には砂防爆壁の上部が爆発生成気体で覆われたが、周囲に火炎も確認できた。また、地面付近の 225°、315°方向に火炎が認められることから、砂防爆壁の角部から火炎が噴出していると考えられる。7 ミリ秒後には火炎は概ね認められなくなり、爆発生成気体の膨張と衝撃波が伝播していく様子が撮影された。10 ミリ秒後付近から地表面方向に砂防爆壁の砂や木片が飛散する様子が撮影された。砂が飛散する高さ、距離は 0°方向と 180°方向で概ね同程度であり、試験体の対称性を反映した結果だと考えられる。衝撃波や爆発生成気体、土砂に関し、対称性の良い形状であることを映像から確認した。

No.2-1（壁無し）　　No.2-2（壁有り）

図 4.2-77　爆発初期に形成された衝撃波
（撮影：Phantom V640、点火 5 ミリ秒後）
（画面左が 180°方向、画面右が 0°方向）

No.2-1（壁無し）

No.2-2（壁有り）

図 4.2-78　爆発生成気体の形状
（撮影：Phantom V640、点火 100 ミリ秒後）
（画面左が 180°方向、画面右が 0°方向）

防爆壁の実験と同様に爆風波面の強調化を行った。図 4.2-79 及び図 4.2-80 に爆風波面の強調化前後の画像の一例を示す。

No.2-1（壁無し）

No.2-2（壁有り）

図 4.2-79　16 ミリ秒後の爆発状況（爆風波面の強調化前）

No.2-1（壁無し）

No.2-2（壁有り）

図 4.2-80　16 ミリ秒後の爆発状況（爆風波面の強調化後）

爆風波面の強調化前の画像（図 4.2-79）では爆風波面が明確ではないが、強調化処理後の画像（図 4.2-80）では爆風波面が明瞭になった。爆風波面の強調化後の画像を用い、砂防爆壁の高さにおける 0° 方向、180° 方向に伝播する爆風波面及び鉛直上方に伝播する爆風波面の伝播距離の時間変化を読み取った結果を図 4.2-81 及び図 4.2-82 に示す。2020 年度との比較を図 4.2-83 及び図 4.2-84 に示す。

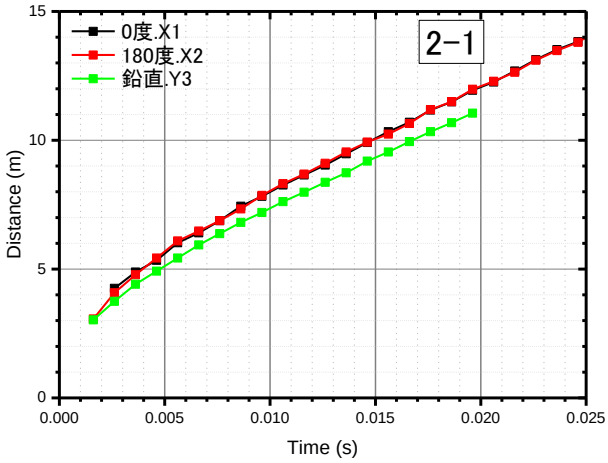


図 4.2-81　爆風波面の伝播距離の時間変化
No.2-1（壁無し）

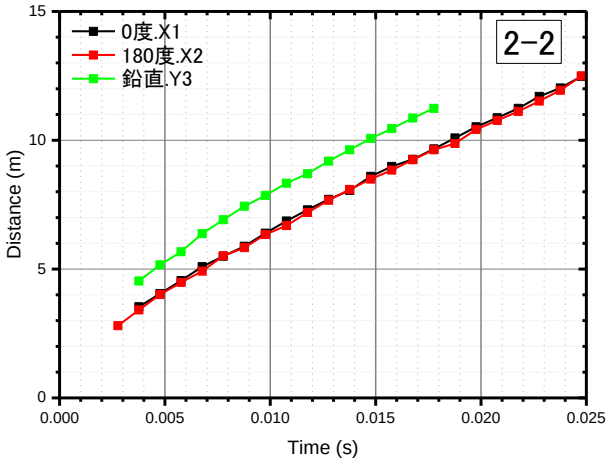


図 4.2-82　爆風波面の伝播距離の時間変化
No.2-2（壁有り）

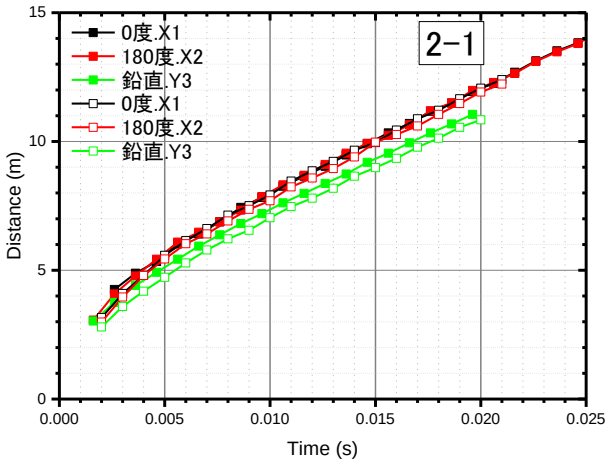


図 4.2-83　No.2-1_2020 年度との比較
（空白：2020 年度、単色：2021 年度）

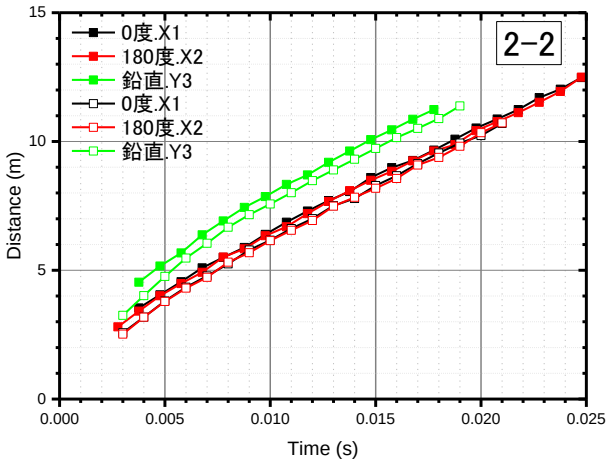


図 4.2-84　No.2-2_2020 年度との比較
（空白：2020 年度、単色：2021 年度）

No.2-1（壁無し）について、0° 及び 180° 方向の結果は良く一致しており対称性が良いことが示された。鉛直上方へ伝播する爆風波面は水平方向と比較し、伝播速度が遅いことが示された。

No.2-2（壁有り）について、No.2-1（壁無し）と同様に 0° 及び 180° 方向の結果は比較的良く一致しており対称性が良いことが示された。しかし、鉛直方向への伝播速度は水平方向より速いことが示された。火薬類の周囲に設置された砂防爆壁が爆風を閉じ込めるように作用したため、水平方向への爆風速度は遅くなり、鉛直上方へは速くなる傾向が示されたと考えられる。2020 年度の結果と比較したところ、0° 方向、180° 方向に伝播する爆風波面の再現性が良いことが確認された。鉛直上方につ

いては、若干、今年度の方が速い傾向が認められたが、これは地盤の状態（締固め具合、水分など）を反映している可能性が考えられる。

高速度撮影まとめ

・爆発によって誘起された火炎、爆発生成気体や爆風形状の対称性を確認した。
・砂防爆壁の有無によって、爆風の伝播状況が顕著に異なることが分かった。

4.2.3.5　騒音計測結果

表 4.2-66 に観測所付近で計測した騒音計測結果を示す。No.2-1 と比べ No.2-2 のほうが高い値になった。防爆壁の反射の影響が考えられる。No.2-2 のピーク値は本年度の実験を通して一番高い値になった。No.2-1 は、No.1-4 に次いで低い値になった。

表 4.2-67 に遠方で測定した騒音計測結果の読み値を示す。得られた値をそのまま記載したが、記録中に付近を走る車の音、雨風の音など爆発音以外の音も拾っているため、爆発音以外の影響を受けた値になっていることを考慮する。

図 4.2-85 に観測所付近のマイクロフォンで測定した音圧波形を示す。いずれも波形の形状としては No.1 と同様であった。

図 4.2-86 に別寒辺四叉路警戒点の、図 4.2-87 に国境四叉路警戒点の、騒音計 BK2250 で測定した音圧波形を示す。爆発約 1 分前から爆発後まで記録した全体波形と、爆発音と思われる部分を切り抜いて圧力に変換した図を示す。横軸は時間（秒）で、全体波形では記録開始ボタンを押してからの時間であり、拡大表示の波形は任意に切り抜いた 1 秒間である。

表 4.2-66　騒音計測結果　観測所脇

実験 No.	距離 m	薬種	薬量 kg	換算薬量 m/kg$^{1/3}$	到達時間 ms	ピーク圧 Pa	音圧レベル* dB
No.2-1	314	EMX2	15.49	126	901	371	145
No.2-2	314	EMX2	15.49	126	905	539	149

*：音圧レベルは計測したピーク圧（Pa）を 20log(Pa/0.00002)で変換した値。

表 4.2-67　騒音計測結果　遠方での計測結果

別寒辺四叉路		2730 m		BK2250		NL-31			
実験 No.	薬種	薬量	換算距離	LZpeak	LCeq	LAeq	LAE	LAmax	Lpk
		kg	m/kg$^{1/3}$	dB	dB	dB	dB	dB	dB
No.2-1	EMX2	15.49	1095	116.0	82.4	60.9	78.0	73.3	114.5
No.2-2	EMX2	15.49	1095	106.0	64.0	51.8	70.8	64.5	104.5

国境四叉路		4170 m		BK2250		NL-31			
実験 No.	薬種	薬量	換算距離	LZpeak	LCeq	LAeq	LAE	LAmax	Lpk
		kg	m/kg$^{1/3}$	dB	dB	dB	dB	dB	dB
No.2-1	EMX2	15.49	1673	112.1	72.8	57.5	78.6	77.7	109.2
No.2-2	EMX2	15.49	1673	10.5.6	67.1	52.2	72.0	63.0	101.6

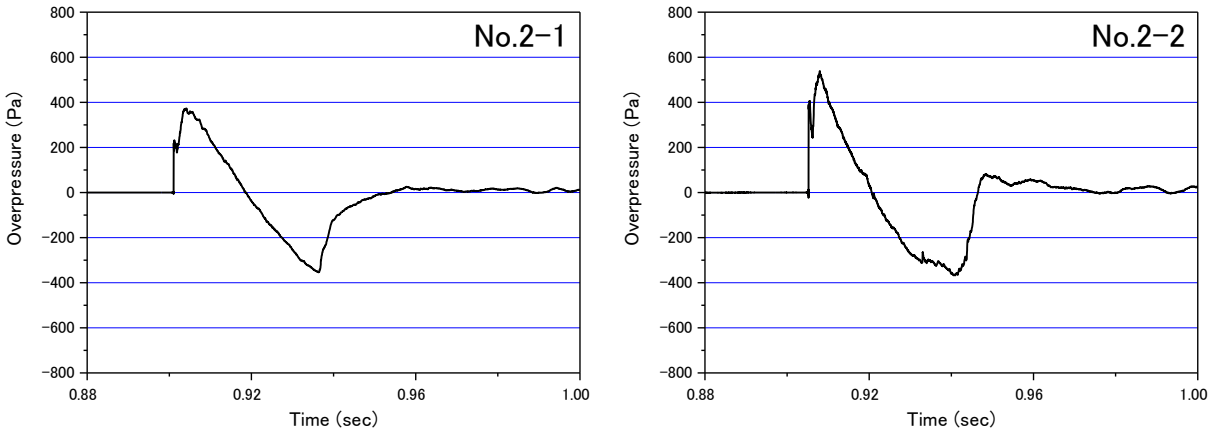
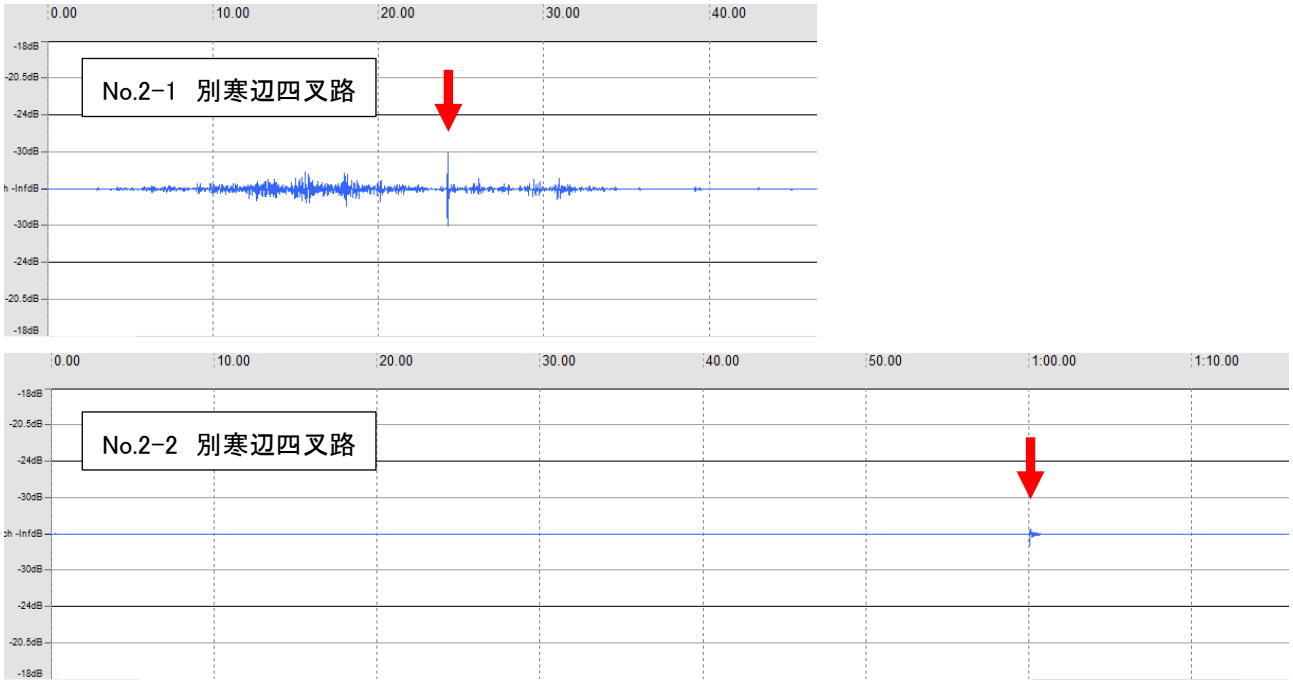
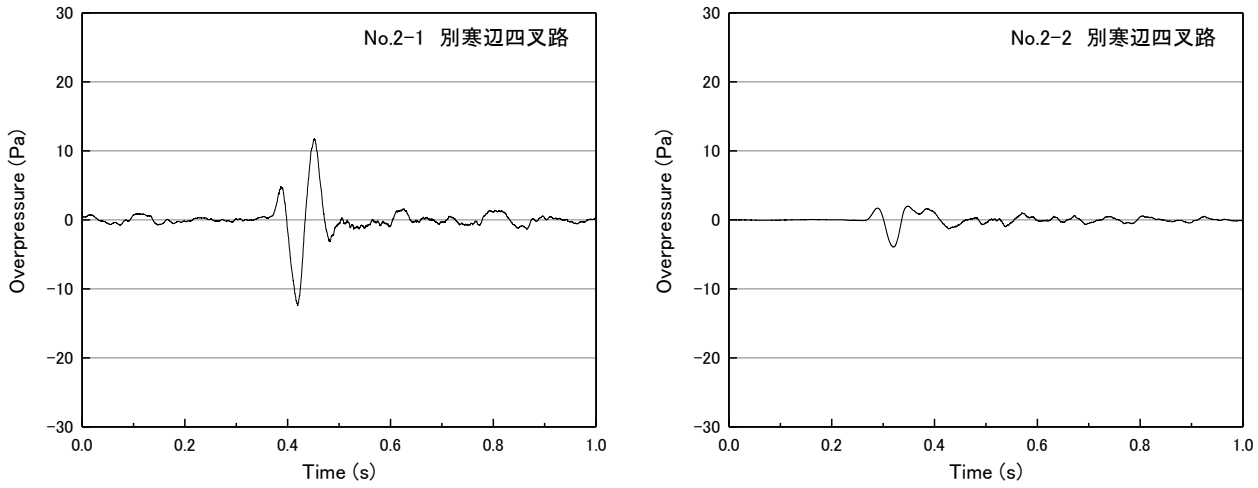


図 4.2-85　観測所脇マイクロフォンによる音圧波形

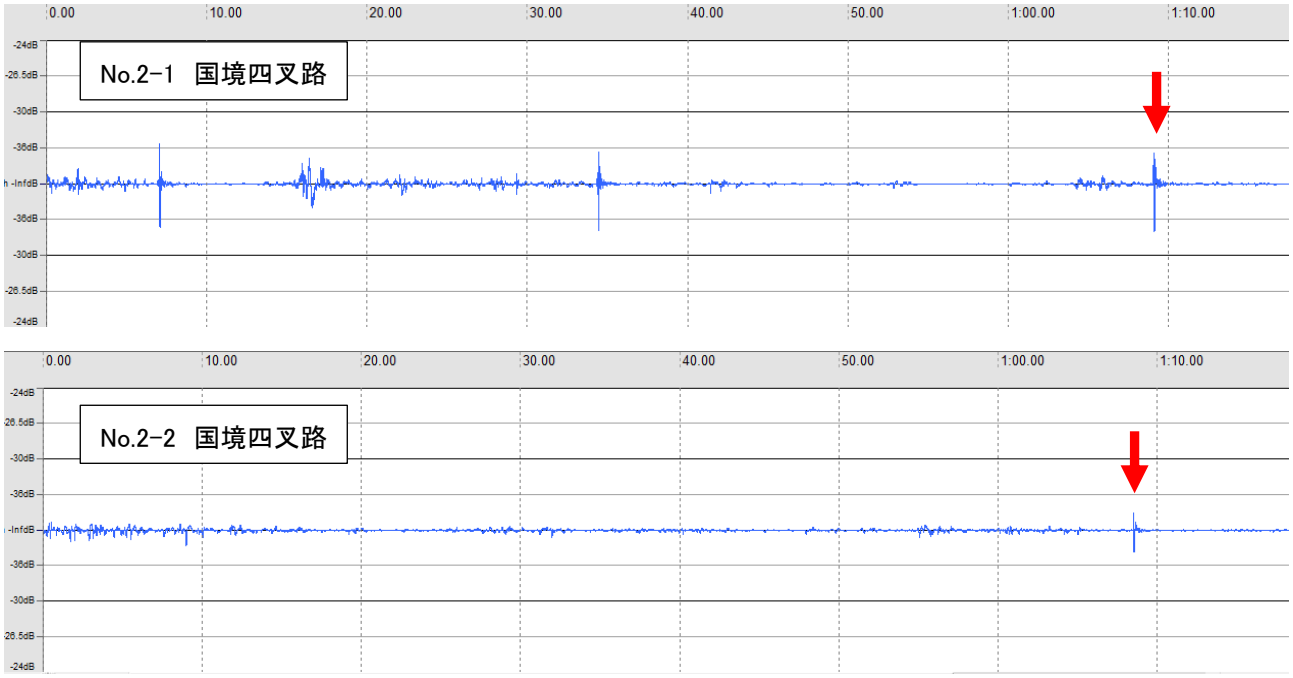


全体波形

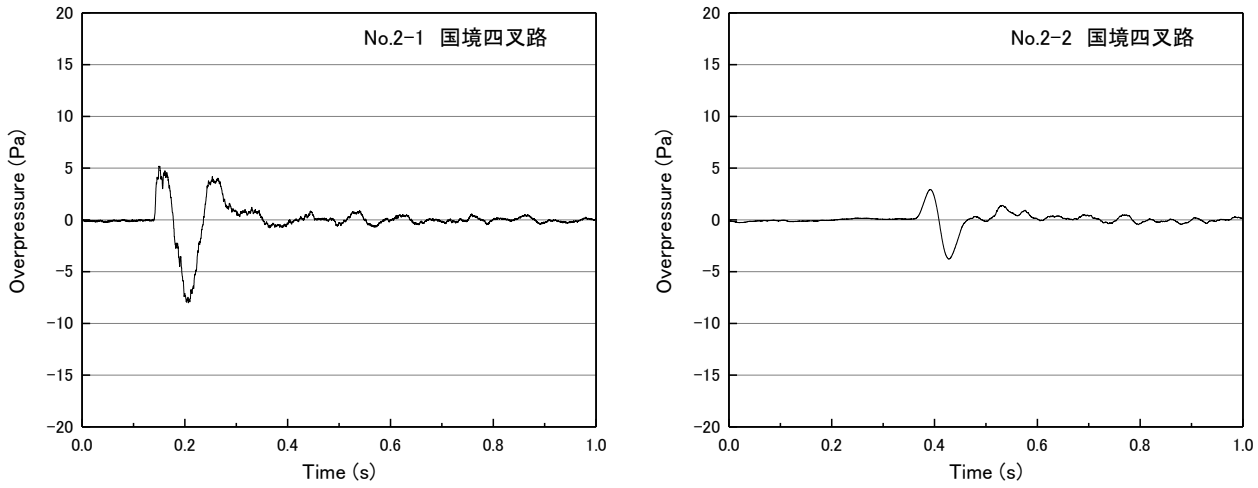


爆発音部分の拡大

図 4.2-86　別寒辺四叉路警戒点の騒音計 BK2250 で計測した音圧波形



全体波形



爆発音部分の拡大

図 4.2-87　国境四叉路警戒点の騒音計 BK2250 で計測した音圧波形

騒音計側まとめ

・観測所脇（爆点から 316 m 地点）でマイクロフォンにより爆発音の騒音計測をおこなった。No.2-1 と比べ No.2-2 のほうが高い値になった。防爆壁の反射の影響が考えられる。No.2-1 は No.1-4 についで低い値になった。

・遠方の警戒点（爆点から 2.7 km 地点および 4.2 km 地点）では騒音計で測定した。測定した地点では爆発音が耳でわずかに確認できる程度であり、また、計測結果も騒音的に問題ない値であることが確認できた。

4.2.4　まとめ

爆発後の爆点の様子まとめ

爆発後、爆点にできた漏斗孔の大きさを計測した。模擬防爆壁有りの実験では漏斗孔が四角くなり、模擬防爆壁なしの実験では漏斗孔は円形になった。No.2-2 の漏斗孔の直径は No.1 と同じぐらいの大きさになり、No.2-1 の漏斗孔の直径は他と比べて若干小さくなった。

No.2-2 の模擬防爆壁有りの実験では、飛散物が発生したが模擬防爆壁自体の飛散状況は No.1 で行った実験とほぼ同じであった。

爆風圧計測まとめ

火薬類の爆発威力に関する実験において、現行の火薬類取締法に準拠した防爆壁に追加構造を設置した場合の爆風圧力の計測を行い、以下の知見を得た。

これまでの円柱形の EMX2 を使用した基準爆風圧実験との比較

地表面爆発の基準データが蓄積されてきていることから、R03 とこれまでに実施した EMX2 を使用した基準爆風圧実験を比較した。その結果、R03 の結果は他の 5 年度分のピーク静水過圧と正圧相インパルスは同等であることが確認された。令和 2 年度火薬類爆発影響低減化技術基準検討報告書で示した EMX2 のピーク静水過圧と換算正圧相インパルスを評価する基準線（All）によって、精度良く 6 年分の実験データを評価できる。ピーク静水過圧 P (kPa)と正圧相インパルス I (Pa s)は次式のように表される。ここに Z は換算距離 (m/kg$^{1/3}$)、W は薬量(kg)である。

$$X = \log_{10}(Z)$$
$$\log_{10}(P) = 2.8046 - 2.1729X + 0.38845X^2$$
$$\log_{10}(I/W^{1/3}) = 1.9801 - 0.51793X - 0.21643X^2$$

No1 シリーズと All の比較

追加構造を考慮した防爆壁の効果を検討するため、All を基準として No1 シリーズの爆風低減効果を検討した。

ピーク静水過圧基準の保安距離

・No1-1~1-3 はポリウレタンフォーム 1~3 面であり、面数の増大に従って爆風低減効果が大きくなり遠方においても低減効果が維持された。

・No1-4 は樹脂メッシュによる爆風の透過と反射が起きるため、0 度方向と 45 度方向の近場は保安距離縮小を達成した。0 度方向おいて、重い金網の方が小さくなった。

・No1-5 はコの字防爆壁であり 45 度方向、180 度方向の遠方が保安距離拡大となった。

正圧相インパルス基準の保安距離

・No1-1~1-3 はポリウレタンフォーム 1~3 面であり、面数の増大に従って爆風低減効果が大きくなり、遠方においても低減効果が維持された。

・No1-4 は樹脂メッシュによる爆風の透過と反射が起きるため、0 度方向と 45 度方向の近場は保安距離縮小を達成した。0 度方向の遠方において保安距離拡大となった。0 度方向と 45 度方向において重い金網の方が小さくなった。

・No1-5 はコの字防爆壁であり 0 方向と 45 度方向の近場は低減し、0 度方向については遠方においても保安距離拡大となった。

基準爆風圧実験（All）と基準防爆壁実験（wall-standard）の比較

All と wall-standard の比較で使用する近似線は令和 2 年度火薬類爆発影響低減化技術基準検討報告書と同じでああるため、同様なまとめとなるがここに再掲する。

ピーク静水過圧基準の保安距離
・0 度と 180 度は特に保安距離 3 が減少し、遠方でも減少が維持された。
・45 度と 135 度の壁近傍は保安距離減少するが、遠方では若干の保安距離増大となった。
正圧相インパルス基準の保安距離
・0 度と 180 度は減少～同等であった。
・45 度と 135 度は常に減少であった。

以上のことから、防爆壁を設けることで、その近場においては爆風低減効果があることがわかった。

No1 シリーズと wall-standard の比較

基準防爆壁への追加構造の影響を検討するため、wall-standard を基準として No1 シリーズの爆風低減効果を検討した。

ピーク静水過圧基準の保安距離
・全ての条件において目的としていた追加構造による、0 度の保安距離 3 の短縮となった。
・No1-1~1-3 はポリウレタンフォーム 1~3 面であり、面数の増大に伴って爆風低減効果が大きくなり、遠方においても保安距離縮小を達成した。
・No1-4 は、樹脂メッシュによる爆風の透過と反射が起き、0 度の壁近傍は保安距離 6 も縮小となったが、0 度の壁遠方や反射側の 135 度の保安距離が拡大する傾向であった。
・No1-5 はコの字防爆壁であり、0 度、180 度の遠方が保安距離拡大となった。
正圧相インパルス基準の保安距離
・No1-1~3 はポリウレタンフォーム 1~3 面であり、面数の増大に伴って遠方においても保安距離縮小を達成した。
・No1-4 は樹脂メッシュであり、0 度の遠方のみ強化された。
・No1-5 はコの字防爆壁であり、特に 0 度の低減が顕著であり遠方でも維持された。

R02 低密度ウレタンフォームと R03 高密度ウレタンフォームの比較

ピーク静水過圧と正圧相インパルスを比較した結果、1 面では両者に大きな違いは確認されなかったが、3 面の場合は密度が大きい R03 の爆風低減効果が高かった。

R02 No1-2（金網）と R03 No1-4（樹脂メッシュ）の比較

ピーク静水過圧と正圧相インパルスを比較した結果、ピーク静水過圧は 0 度方向おいて、正圧相インパルスは 0 度方向と 45 度方向において重い金網の方が小さくなった。

コの字型追加構造の設置位置の影響比較

R03 は R02 に比べてコの字型追加構造を 45 度ずらして設置した場合を検討した。爆風と壁の反射形態の変化に伴い爆風圧に若干の変化が現れた。そこで安全性を検討する際には、R03 と R02 で得られたピーク静水過圧基準と正圧相インパルス基準の換算距離において両条件の大きい方を採用した方が望ましい。

ピーク静水過圧基準の保安距離
・0 度の保安距離 3 の短縮となった。
・45 度と 180 度の遠方で爆風が強化され保安距離が特に拡大する傾向であった。
正圧相インパルス基準の保安距離
・コの字防爆壁によって 0 度方向の正圧相インパルスは低減を維持した。また 45 度の近傍においても低減を確認した。

地盤振動計測まとめ
　爆点から換算距離 3、6、9、12 となる位置において地盤振動計測を行った。基準爆風圧に関する実験においても、今回の実験では、第一種・第二種保安物件における PPV 10 cm/s、第三種・第四種保安物件における PPV 40 cm/s の目標値を満足しており、防爆壁を設置した場合と比べて有意な差は認められなかった。また、近年の試験結果と比較しても大きな差は認められず今回の試験の再現性も確認できた。

高速度撮影まとめ
・爆発によって誘起された火炎、爆発生成気体や爆風形状の対称性を確認した。
・砂防爆壁の有無によって、爆風の伝播状況が顕著に異なることが分かった。

騒音計側まとめ
・観測所脇（爆点から 316 m 地点）でマイクロフォンにより爆発音の騒音計測をおこなった。No.2-1 と比べ No.2-2 のほうが高い値になった。防爆壁の反射の影響が考えられる。No.2-1 は No.1-4 についで低い値になった。
・遠方の警戒点（爆点から 2.7 km 地点および 4.2 km 地点）では騒音計で測定した。測定した地点では爆発音が耳でわずかに確認できる程度であり、また、計測結果も騒音的に問題ない値であることが確認できた。

4.3　総合考察

実験 No.1 防爆壁に関する実験

煙火製造施設及び火薬庫を想定して、既存の防爆壁の内側 1 面、2 面および 3 面に昨年度より高密度のウレタンを設置した場合の爆発影響低減効果、また、既存の防爆壁の外側（0 度方向または 45 度方向）にそれぞれ追加の構造（積層樹脂メッシュ或いはコの字型の合板）を設置した場合の爆発影響低減効果を確認するために、昨年度と同様、約 1/4.4 スケールの試験体と含水爆薬 15.49 kg を用いて全 5 回の実験を行い、爆発影響データを取得した。

高速度撮影の結果からは、程度の差はあるものの、5 回の実験すべてで 0 度方向の爆風伝播と既存の防爆壁（砂防爆壁）の土砂の飛散速度が 180 度方向のそれに比べて遅い傾向が得られた。また、昨年度と同様、砂防爆壁の土砂が水平 4 方向（0 度、90 度、180 度、270 度）へ小さい仰角（7 度から 18 度）で飛散する傾向が顕著であることに加えて、土砂先端部分の速度が起爆からの時間経過とともに減速する傾向を示し、爆風や空気の音速より十分遅いことが示された。

爆風圧の計測結果からは、基準爆風圧実験（実験 No.2-1）との比較において、計測した 4 方向（0 度、45 度、135 度、180 度）の保安物件に対するピーク静水過圧に着目すると、今年度も検討したすべての実験条件で、0 度方向の第四種保安物件（現行法の換算距離 3 相当、以下同じ）の爆風圧が低減された。

もう少し詳しく見ると、実験 No.1-1（ウレタン 1 面を 0 度方向に設置）では、0 度方向の第四種および第三種保安物件（換算距離 3、6 相当）については、爆風圧の低減により、保安距離が 20 %および 7.8 %程度、それぞれ減少する可能性がある。

実験 No.1-2（ウレタン 2 面を 0 度、90 度方向に設置）では、0 度方向の第四種および第三種保安物件（換算距離 3、6 相当）の保安距離が 38.7 %および 13 %程度、それぞれ減少の可能性が示されたほか、ウレタンを設置していない 180 度方向の第四種および第三種保物件（換算距離 3、6 相当）の保安距離もそれぞれ、17.3 %および 10.8 %程度、減少の可能性がある。また、全ての計測点で実験 No.1-1 よりも爆風圧の値は小さかった。

実験 No.1-3（ウレタン 3 面を 0 度、90 度、270 度方向に設置）では、0 度方向の第四種保安物件（換算距離 3 相当）の爆風圧から考えて保安距離が 51 %減少する可能性もあり、第三種および第二種保安物件（換算距離 6、9 相当）の保安距離もそれぞれ、22.8 %および 6.6 %程度、減少の可能性があるほか、45 度、135 度、180 度方向のすべての保安物件に対して 10 %を超える減少の可能性が確認された。昨年度と同様、ウレタン量（設置する面の数）と爆風圧の低減効果の間には正の相関が確認された。ウレタンを用いた実験では、総じて昨年度と同様の結果が得られていることから、2 倍程度のウレタン密度の差が爆風圧低減効果に与える影響は殆どないものと思われる。

実験 No.1-4（積層樹脂メッシュを 0 度方向に設置）では、0 度方向の第四種および第三種保安物件（換算距離 3、6 相当）の保安距離がそれぞれ、9.3 %および 10 %程度減少の可能性がある一方、0 度方向の第一種保安物件（換算距離 12 相当）や 135 度方向の第三種および第二種保安物件（換算距離 6、9 相当）では 10 %を超える保安距離の増大の必要性が見られた。これらの結果は、昨年度実施した積層金網の実験と同様であり、重量飛散物になりにくい樹脂メッシュも金網と同様の爆発影響低減効果を有することを確認できた意義は大きい。

加えて、特定の方向の爆発影響を低減する目的で実施した実験 No.1-5（コの字型の追加構造を既存防爆壁の角部 45 度方向に正対して設置）では、0 度方向と 45 度方向の第四種保安物件（換算距離 3 相当）の保安距離がそれぞれ、34.3 %および 17.3 %程度、減少の可能性が示されたほか、180 度方向の第四種保安物件（換算距離 3 相当）についても 18 %の保安距離減少の可能性が見られた。

地盤振動計測の結果からは、昨年度と同様、換算距離 9、12 における最大振動速度（PPV）が 10 cm/s に満たないこと、換算距離 3、6 における PPV は 40 cm/s に満たないことに加えて、過去に同じ実験場で取得した地盤振動計測結果と同様の傾向を示すことが分かった。また、実験条件の違いによる優位な差についても昨年度と同様、認められなかった。

以上のことから、令和元年度から 3 年間にわたり実施してきた一連の実験により、既存の防爆壁に追加する構造と設置位置、並びにそれらの爆発影響低減効果に関する基礎的な技術データが取得できたと思われる。もちろん、実用化に際しては、まだ、いくつかの課題をクリアする必要があると思われるが、今後、本実験で得られた技術データが、煙火製造施設及び火薬庫の防爆壁に関する技術基準案の検討に有効活用されることを期待する。

実験 No.2 基準爆風圧に関する実験

昨年度と同じ条件、すなわち、防爆壁等を設置しない状態（実験 No.2-1）で 1 回、および既存の防爆壁を模擬した試験体（砂防爆壁、実験 No.1 と同一寸法）を設置した状態（実験 No.2-2）で 1 回、含水爆薬 15.49 kg を爆発させる実験を行い、爆発影響データを取得した。

高速度撮影については、昨年度と同様、爆発よって誘起された火炎、爆発生成気体や爆風形状の対称性を確認したことに加えて、既存の防爆壁（砂防爆壁）の有無により、鉛直方向と水平方向への爆風の伝播状況には顕著な違いのあることが示された。

爆風圧の計測結果からは、実験 No.2-1 と No.2-2 の比較において、ピーク静水過圧基準の保安距離に着目すると、既存の防爆壁により、0 度方向と 180 度方向の第四種保安物件（現行法の換算距離 3 相当）については、保安距離が低減される一方で、45 度方向と 135 度方向の第二種および第一種保安物件（同じく換算距離 9 と 12 相当）については、若干の保安距離の増大が示唆されるという、昨年度と同様の傾向を得た。また、過去に同一薬種（含水爆薬）で実施した基準爆風圧実験データとの比較から、昨年度と同様、本実験で使用した薬量では爆薬の設置高さの影響は僅かであることが示された。

地盤振動計測の結果からは、昨年度と同様、換算距離 9、12 における最大振動速度（PPV）が 10 cm/s を下回ること、換算距離 3、6 における PPV は 40 cm/s を下回ることに加えて、過去に同じ実験場で取得した地盤振動計測結果と同様の傾向を示すことが分かった。また、昨年度と同様、防爆壁の設置の有無による優位な差も認められなかった。

以上のことから、本実験では良好な基準爆風圧データを取得できたと思われる。また、実験 No.2-1 と過去の基準爆風圧実験データとの比較から、本実験で使用した薬量においては、昨年度に続き、爆薬設置高さの影響は僅かであることが示された。今後、基準爆風圧に関する実験を実施する際には、薬種・薬量に加えて爆薬設置高さの影響も丁寧に評価することが望ましいと考える。

第 5 章　爆発影響低減化実験（室内実験）

5.1　概要

5.1.1　目的

野外実験の条件を補完するため、煙火火薬庫の既存防爆壁に追加する高密度ウレタンフォームおよびコの字障壁が爆風の威力と指向性に与える影響を調査する。

5.1.2　実験の概要

煙火火薬庫の防爆壁構造を模擬する模擬防爆壁模型に対し、防爆壁の内側に挿入した高密度ウレタンフォームおよび防爆壁の外側に設置したコの字障壁による爆風低減効果を検討した。爆点から防爆壁までの距離 L_0 = 42.3 mm、防爆壁の高さ H_0 = 26.5 mm とした。高密度ウレタンフォームは令和 3 年度野外実験と同じものを使用し、防爆壁の内側 1 面、2 面（L 型：0 度、90 度方向に設置）、3 面、4 面、2 面（II 型：0 度、180 度方向に設置）の場合の 5 条件を設定した。コの字障壁は、爆点からの距離 L_1 = 84.7 mm、高さ H_1 = 77.2 mm とし、防爆壁に対して 45 度傾けて設置した。PETN/C ペレット 1 g の爆発で生じた爆風の圧力履歴の波形を取得した。防爆壁の載った回転盤を回転させて爆発実験を行うことで、爆風の方位角依存性を 10° 刻みで測定し、爆風の指向性に関するデータを取得した。

実験は総数 72 ショットで、すべて産総研つくば第五事業所内 5-2C 棟（大ピット）で実施した。

5.1.3　過去の結果の参照

過去の実験結果を参照し、本年度の爆発影響低減化の効果について検討した。データ名と参照元の対応を以下に示す。年度の示されていないものは、今年度（R03 年度）の結果を表す。

H28 年度野外実験 No. * → 平成 27 年度火薬類爆発影響低減化技術基準検討報告書、野外実験 No. *
H28 年度野外実験 No. * → 平成 28 年度火薬類爆発影響低減化技術基準検討報告書、野外実験 No. *
R01 年度 No. * → 令和元年度火薬類爆発影響低減化技術基準検討報告書、室内実験 No. *
R01 年度野外実験 No. * → 令和元年度火薬類爆発影響低減化技術基準検討報告書、野外実験 No. *
R02 年度 No. * → 令和 2 年度火薬類爆発影響低減化技術基準検討報告書、室内実験 No. *
R02 年度野外実験 No. * → 令和 2 年度火薬類爆発影響低減化技術基準検討報告書、野外実験 No. *

5.2 実験方法

5.2.1 想定する施設と供試火薬、保安距離の考え方

煙火火薬庫（2 トン庫）に煙火薬が 2 トン保管されており、全量が一度に爆発したケースを想定する。火薬庫は、高さ 2.5 m の基準防爆壁で四方を囲まれているものとする（火薬庫中心から防爆壁までの距離：4 m、防爆壁内の領域：8.0 m × 8.0 m）。本実験では、基準防爆壁の内側に、厚さ 1.0 m の高密度ウレタンフォームを追加した場合、高さ 7.3 m のコの字障壁を追加した場合の効果について検証した。

当該火薬庫の第四種、第三種、第二種、第一種保安物件に対する K 値はそれぞれ 3, 6, 9, 12 である。産総研が現在所有している実験台（図 5-4a）では、爆点から 0.267～1.600 m の範囲で爆風圧が計測可能であり、この範囲を煙火薬量換算距離 $Z = 3 \sim 12$ m/kg$^{1/3}$ にあわせるとき、薬量は 2.37 g となる。これは想定の火薬庫に対し 94.5 分の 1 のスケールに対応する。

煙火薬や、基準爆薬である TNT は数グラム程度の量では完爆しないため、所内実験では PETN/C ペレットを使用した。過去の実験から、エマルション爆薬の PETN/C 換算は 0.60（Sugiyama et al., Sci. Tech. Energetic Materials, 79 (1), 2018）、エマルション爆薬の TNT 換算は 0.80 であることが確認されており、ここから PETN/C の TNT 換算は 1.33（= 0.80 / 0.60）となる。火薬庫に保管される煙火薬の TNT 換算は 0.5 であることから、煙火薬の PETN/C 換算は 0.38（= 0.50 / 1.33）となる。よって、今回想定している煙火薬 2.37 g は、爆発威力の観点において 0.89 g（= 2.37 × 0.38）の PETN/C と同等であると計算される。実際には、0.50 g の PETN/C ペレット 2 個を使用することで、PETN/C の薬量 1.00 g で室内実験を行った。PETN/C 1.00 g は煙火薬量に換算すると 2.63 g であり、これは 1/91.3 スケールに相当する。

ペレットは昭和金属工業株式会社製であり、構成は PETN：C = 95：5、形状は外径 7.64 mm、高さ 7.55 mm の円柱、密度は 1.44 g/cm^3、1 つあたりの重量は 0.498 g であった。2 つのペレットをエポキシ樹脂で接着し 1.0 g とし、小型電気雷管 2 型（昭和金属工業株式会社製）を接着することで使用した。図 5-1 に示すように、片側のペレット中央に雷管を接触し、エポキシ樹脂で接着した。

5.2.2　実験項目

実施した実験項目を表 5-1 に示す。基準爆風の測定（No. O1：爆薬のみで防爆壁がない状態での爆風の測定）と、防爆壁のみの場合（No. O2）、高密度ウレタンフォームを用いた実験 5 種（実験 No. A1, A2, A3, A4, A5）、コの字障壁を用いた実験（No. B）を実施した。

測定する角度θは、模擬防爆壁の位置を基準とする水平方向の相対角である。座標系の原点を模擬防爆壁の中心にとり、爆点から見て防爆壁と垂直をなす方向を$\theta = 0^{\circ}$、左向きを正の角度として表した。実験では 30º ずつ回転盤を動かし、爆風の圧力履歴波形を 10º 刻みで取得した。再現性を確認するため測定はすべて 2 回以上実施し、明瞭な波形データが得られなかった場合は、必要に応じて追加の測定を行った。

基準爆発（No. O1）では防爆壁のない平らな実験台の上に、防爆壁のみの実験（No. O2）およびウレタン（No. A1 ~ A5）、コの字障壁（No. B）の実験では防爆壁内の中央に装薬した。いずれもペレットと雷管は重ねたアルミホイルをハンマーで叩いて作った底上げ板の上に設置した。底上げ板の高さは 3 mm（煙火薬庫の床高さ 300 mm の約 1/94.5 スケール）とした。雷管は実験台に対し垂直下向きとし脚線で自立させ、紙の接着テープで軽く固定した。

表 5-1　実験項目

実験番号	Shot数	ウレタン/障壁	ウレタン/障壁の設置方向	測定した角度	野外実験との対応
No. O1	2	基準	―	−10º, 0º, 10º	No.2-1
No. O2	2	防爆壁のみ	―	−10º, 0º, 10º	No.2-2
No. A1	14	高密度ウレタン 1面	0º方向	−10º, 0º, 10º, 20º, 30º, 40º, 50º, 60º, 70º, 80º, 90º, 100º, 110º, 120º, 130º, 140º, 150º, 160º, 170º, 180º, 190º, 270º	No.1-1
No. A2	14	高密度ウレタン 2面（L型）	0º, 90º方向	40º, 50º, 60º, 70º, 80º, 90º, 100º, 110º, 120º, 130º, 140º, 150º, 160º, 170º, 180º, 190º, 200º, 210º, 220º, 230º, 240º	No.1-2
No. A3	14	高密度ウレタン 3面	0º, 90º, 270º方向	−10º, 0º, 10º, 20º, 30º, 40º, 50º, 60º, 70º, 80º, 90º, 100º, 110º, 120º, 130º, 140º, 150º, 160º, 170º, 180º, 190º, 270º	No.1-3
No. A4	4	高密度ウレタン 4面	0º, 90º, 180º, 270º方向	10º, 0º, 10º, 20º, 30º, 40º	―
No. A5	8	高密度ウレタン 2面（II型）	0º, 180º方向	10º, 0º, 10º, 20º, 30º, 40º, 50º, 60º, 70º, 80º, 90º, 100º	―
No. B	14	コの字障壁	45º方向	40º, 50º, 60º, 70º, 80º, 90º, 100º, 110º, 120º, 130º, 140º, 150º, 160º, 170º, 180º, 190º, 200º, 210º, 220º, 230º, 240º	No.1-5
合計	72				

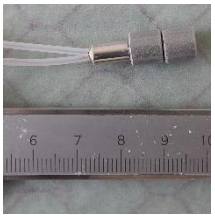
5.2.3　供試体の構造

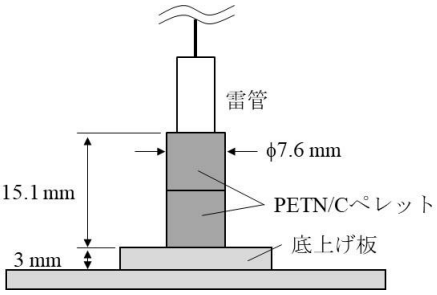
鋼板で製作した防爆壁を実験台上の回転盤の上に設置した。防爆壁の内側に高密度ウレタンフォームを挿入し、No. A1, A2, A3, A4, A5 の実験を行った。模擬防爆壁の外側にコの字障壁を設置し、No. B の実験を行った。図 5-1 に爆薬の写真、寸法と基準爆発の装薬時の写真を示す。図 5-2a, b に防爆壁のみと高密度ウレタンフォームの実験、図 5-2c にコの字障壁の実験の設置状況図面と装薬時の写真を示す。爆点から見たとき、防爆壁が直角をなす方向を 0°とした。

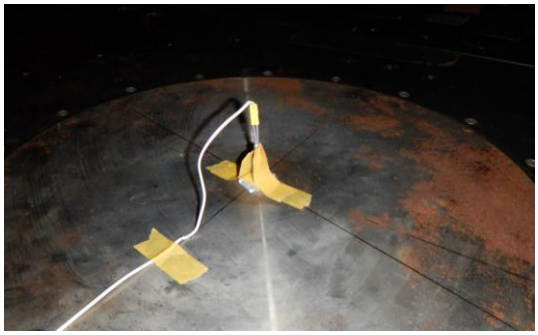
爆点から防爆壁までの距離 L_0 は 4.0 m / 94.5 = 42.3 mm、壁の幅 W_0 は距離 L_0 の 2 倍（$W_0 = 2L_0$）、高さ H_0 は 2.5 m / 94.5 = 26.5 mm とした。防爆壁に使用する鋼板は板厚 6.0 mm とした。

高密度ウレタンフォームは 0°方向の 1 面（No. A1）、0°/90°方向の 2 面（No. A2）、0°/90°/270°方向の 3 面（No. A3）、0°/90°/180°/270°方向の 4 面（No. A4）、0°/180°方向の 2 面（No. A5）に配置したものを比較した。高密度ウレタンフォームには、野外実験で使用したものと同一のものを使用した。高密度ウレタンフォームの厚さは爆点から防爆壁までの距離の半分（42.3 mm / 2 = 21.2 mm）とした。高密度ウレタンフォームの物性を表 5-2 に示す。

コの字障壁は、防爆壁の角の方向に設置した（No. B）。爆点からコの字障壁の距離 L_1 は、L_0 の 2 倍（$L_1 = 2L_0 = 84.7$ mm）とした。コの字障壁の幅 W_1 は距離 L_1 の 2 倍（$W_1 = 2L_0 = 169.3$ mm）、高さ H_1 は 77.2 mm とした。コの字障壁の距離、幅、高さは実寸法でそれぞれ 8.0 m, 16.0 m, 7.3 m に対応する。

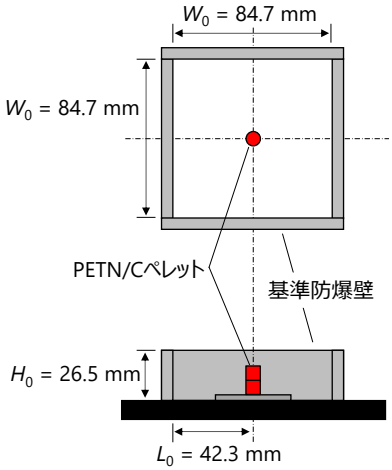


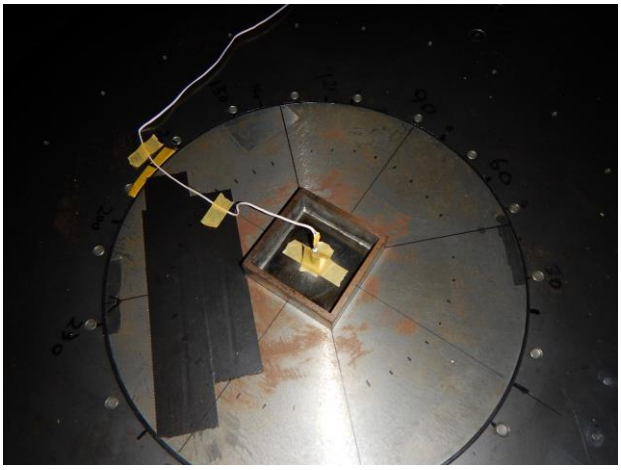




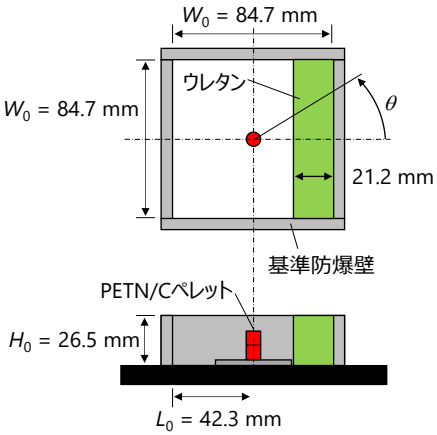
爆薬の写真　　爆薬の寸法　　基準爆発の装薬状況

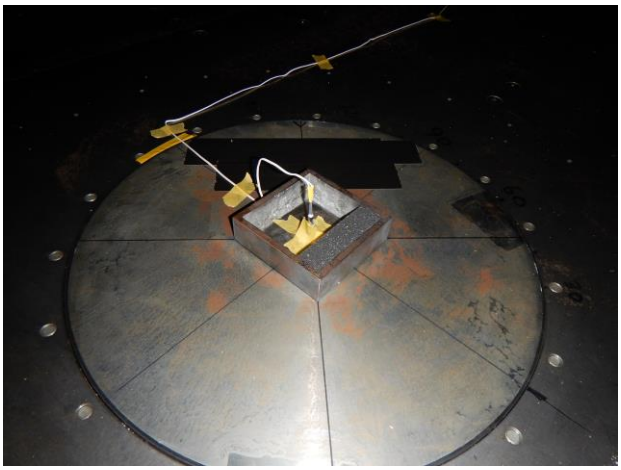
図5-1　爆薬の写真、寸法と基準爆発の装薬状況



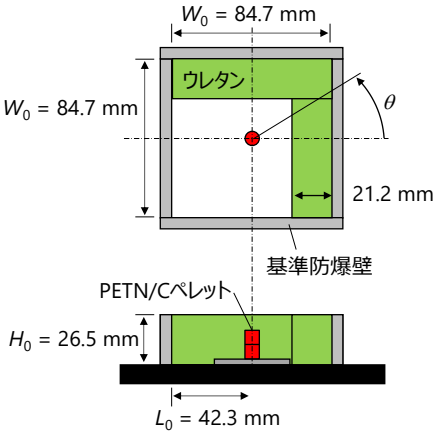


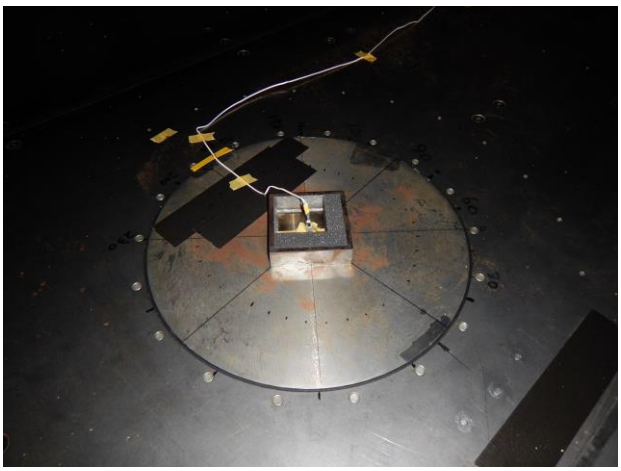
No. O2（防爆壁のみ）





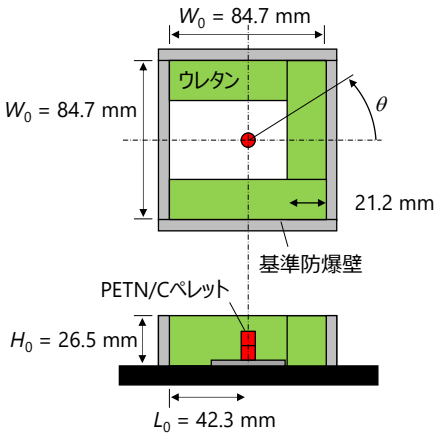
No. A1（ウレタン1面）

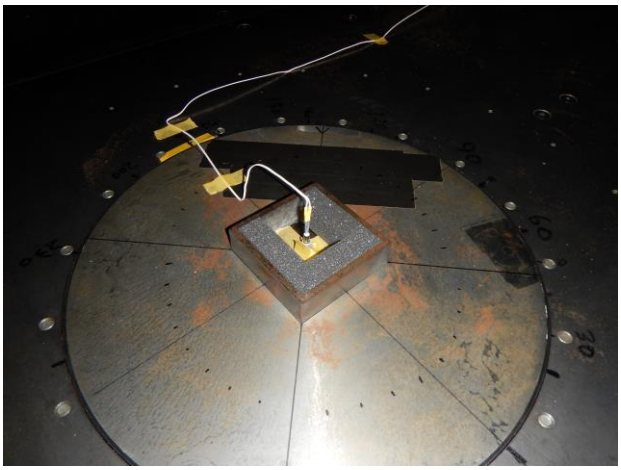




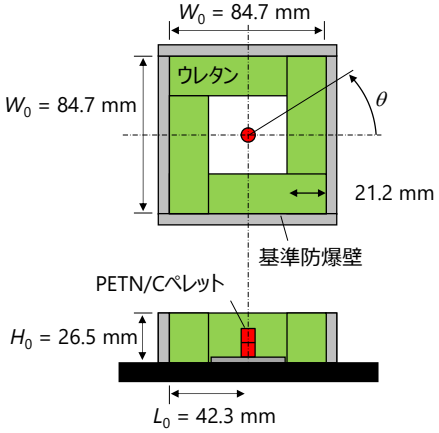
No. A2（ウレタン2面、L型）

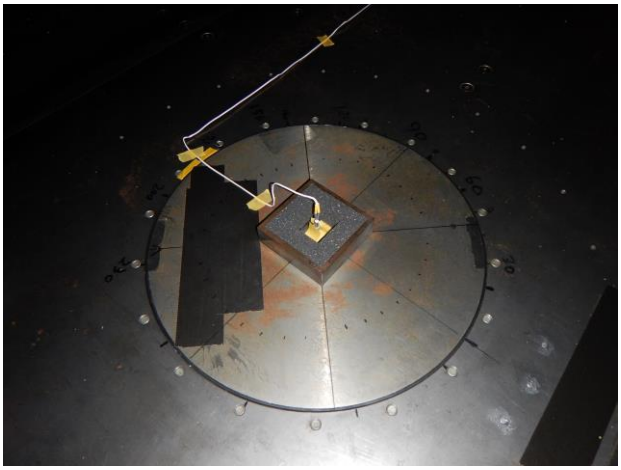
図5-2a　防爆壁、ウレタンフォームと爆薬設置状況



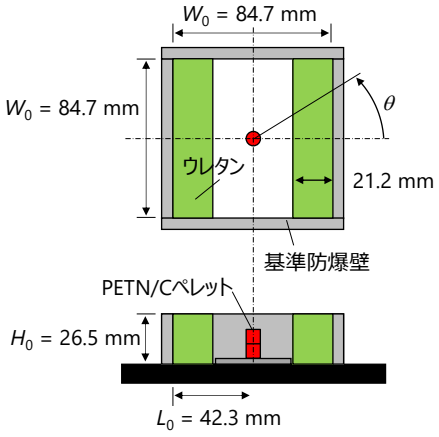


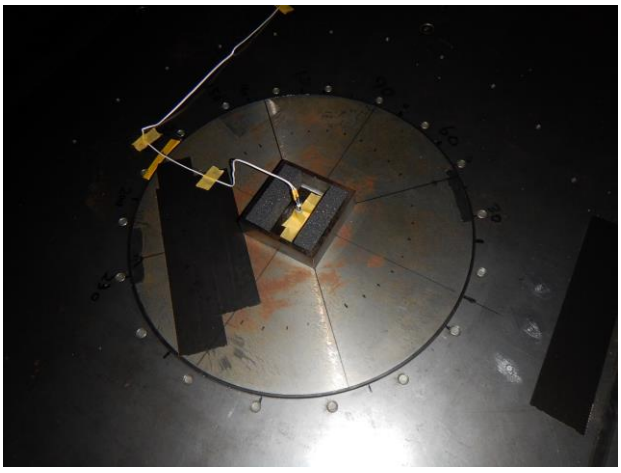
No. A3（ウレタン3面）





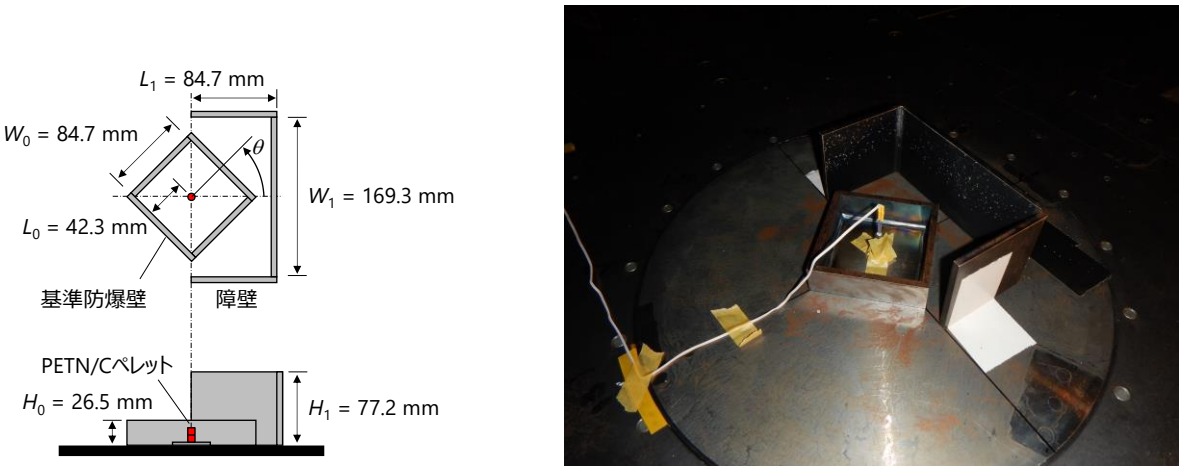
No. A4（ウレタン4面）





No. A5（ウレタン2面、II型）

図5-2b　防爆壁、ウレタンフォームと爆薬設置状況



No. B（コの字障壁）

図5-2c　防爆壁、コの字障壁と爆薬設置状況

表5-2　ウレタンフォームの物性

密度	52± 2 kg/m^3
反発弾性	45%以上
硬さ	225 ± 40
引張強さ	100 kPa以上
伸び	100%以上
引裂強さ	5 N/cm以上
圧縮残留歪	3.5%以下
繰り返し圧縮残留歪	2.5%以下

5.2.4　実験台の配置

厚さ 10 mm の鋼板で作られた実験台を地表面とみなし、爆風の伝播状況は地表面における過圧をもとに評価した。 図 5-3a に実験台の平面図を示す。回転盤の中心を原点とし、原点に爆薬を設置するように設計した。原点から距離 R = 0.267, 0.400, 0.800, 1.200, 1.600 m で 10°刻みの 3 方向に計 15 個の圧力センサーを配置した。この距離は煙火薬量 2.56 g で換算すると換算距離 Z = 1.95, 2.92, 5.84, 8.77, 11.69 m/kg$^{1/3}$ となり、以降はこの換算距離で表記する。

実験台では 3 方向を同時に測定できるため、図 5-3b に示すように回転盤を反時計回りに 30°ずつ動かし、−10°から 190°まで 10°刻みのデータを取得した。この回転方向では 0°から時計回りの 180°について計測することになるため、角度について鏡像反転させ、図 5-3 で定義するθについて解析する。

測定の対称性から、−10º 方向は 10º 方向と、190º 方向は 170º 方向と、270º 方向は 90º 方向と同等とみなした。なお、No. A2 は 45º で、No. A5 は 90º で対称であることから、それぞれ 50º~230º および 0°~90º の範囲で測定を行った。

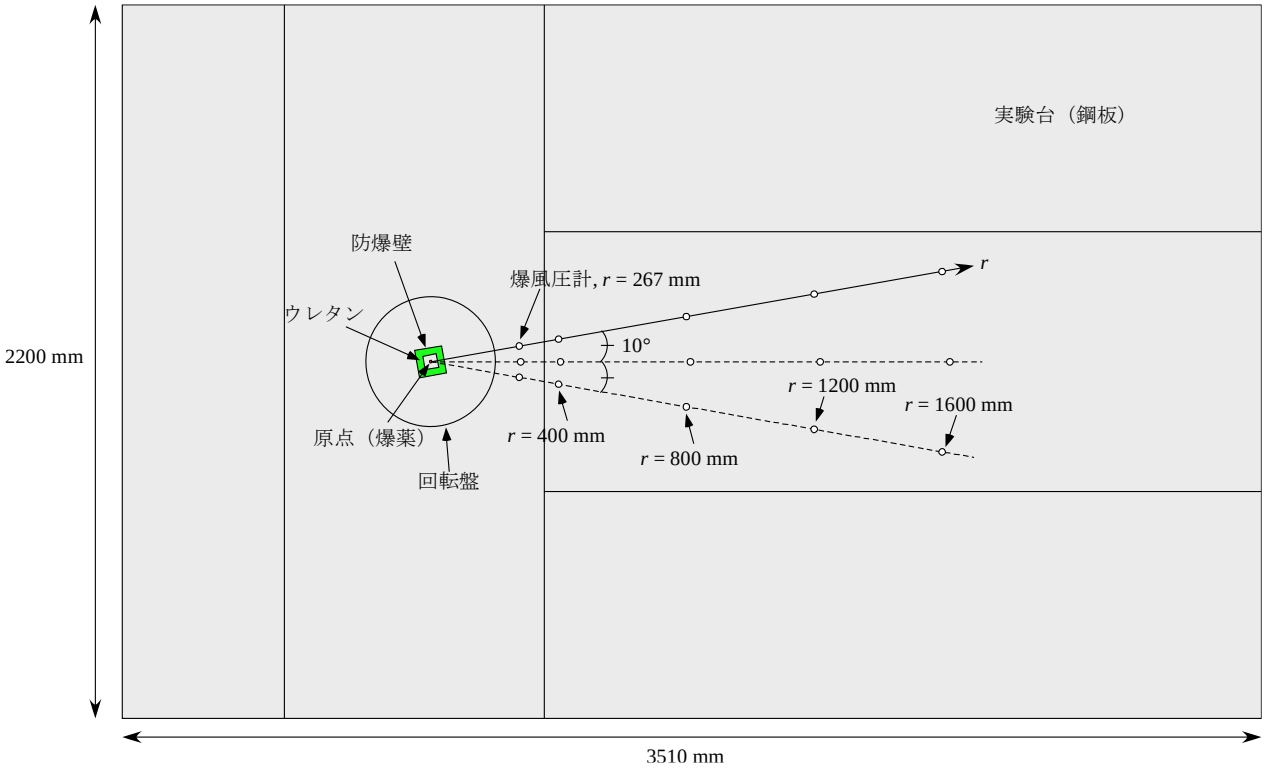


図5-3a　実験台の配置（〇印：圧力センサの位置）

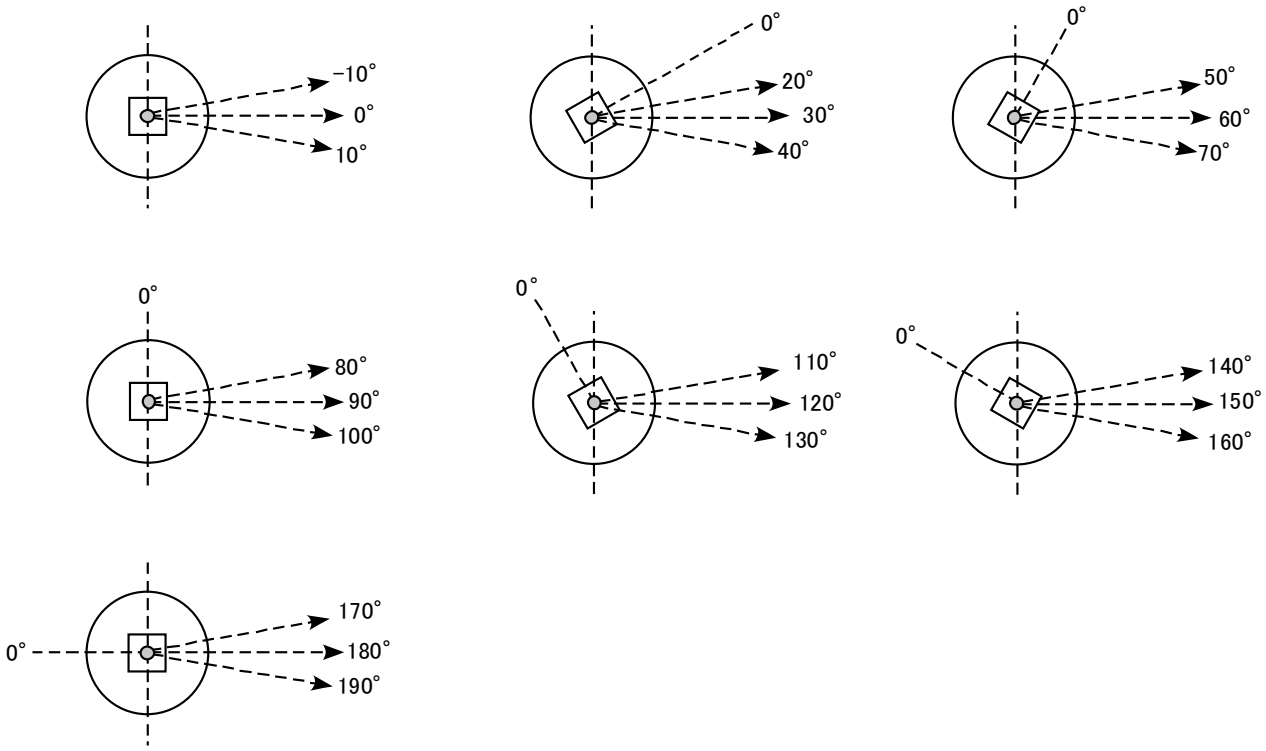


図5-3b　回転盤の方向と測定する角度
（実験台は図5-3aと同じ向きとして、回転盤付近を描いたもの）

5.2.5　圧力センサー

最大過圧を適切に測定するため、圧電素子を利用した PCB 社製のピエゾ式圧力トランスデューサ 113B28 型（共振周波数 ≥ 500 kHz, 100 mV/psi）をセンサーとして選択した。サンプリングは 0.96 μs 毎に行い、出力信号はラインドライバーH-TECH Triple mode 30622 で 0.2 ~ 10 倍に増幅し、低ノイズケーブルを通して波形記憶装置 Tasler LTT184/8 に入力し記録した。

圧力センサーは図 5-4 のように、周囲にタイカジェルテック GT-5（換算距離 2.92 ~ 11.69 m/kg$^{1/3}$ の場合）またはビニールテープ（換算距離 1.95 m/kg$^{1/3}$ の場合）を巻き付け、厚さ 10 mm の実験台の窪みに固定した。受圧面が実験台の表面と同じ位置に来るよう調整したのち、表面にシリコングリースを塗布して受圧面を保護した。

図5-4　実験台に固定した圧力センサー（換算距離2.92 ~ 11.69 m/kg$^{1/3}$の場合）

5.2.6 爆風パラメータの算出

爆風圧は、過剰圧力（大気圧からの超過分）の時間履歴を示す波形データとして取得した。波形から読み取れる爆風パラメータの概要を図 5-5 に示す。測定された爆風圧波形のそれぞれに対し、3 次の自然スプライン関数を用いた補間を行い、各々の角度 θ における爆風パラメータを算出した。爆風パラメータは、最大過圧、正圧相インパルス、到達時間、持続時間の 4 種であり、定義は以下の通りである。

・最大過圧：過圧の最大値。
・到達時刻：過圧の立ち上がりの時刻。
・持続時間：過圧が初めてゼロに戻った時刻と、到達時刻との時間差。
・正圧相インパルス：過圧を持続時間にわたって時間積分した値。

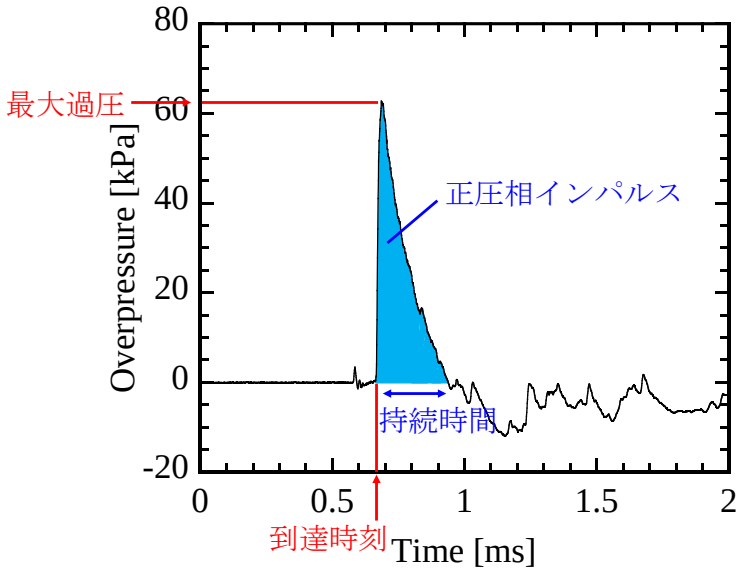


図5-5　爆風パラメータの読み取り
（No. O1（1回目）10度方向、換算距離2.92 m/kg$^{1/3}$地点での波形）

5.3 実験結果

5.3.1 基準爆風の過圧履歴

基準爆風の実験はNo.O1-1, O1-2の2回実施した。設計上1回の実験で3方向の波形を同時測定するが、基準爆風は等方的に拡がり、方向による差異は生じないことが想定される。そのため2回の各換算距離につき、同一の条件とみなせる過圧履歴波形が最大で6得られる（波形は付録を参照）。

取得した波形を3次の自然スプライン関数で補間処理し、各々から爆風パラメータを読み取った。読み取った値の平均を表5-3に示す。換算インパルスの算出には、煙火換算薬量2.63 gを用いた（以降、同様）。この値をもとに基準圧力および基準インパルスを定め、安全区画の検討に利用した。なお示した値はすべて、2回の測定結果の平均値である。

表 5-4 に、R01～R03 年度に室内実験で取得した基準爆発の爆風パラメータについて、全体の平均値を示す。基準爆発は、R01 年度 No. O、R02 年度 No. O に対応する。No. O1 の値は表 5-3 から抽出した。

図5-6に、No. O1と対応するR01年度No. O、R02年度No. Oについて、最大過圧と換算インパルスの比較を示す。横軸の煙火換算距離Zおよび換算インパルスの算出には、煙火換算薬量を用いた。室内実験では煙火薬2.63 g、野外実験ではエマルション爆薬のTNT換算薬量比0.76として23.55 kgとした（以降、同様）。

表5-4の爆風パラメータを用いた2次の近似線を「地表面爆発」と定義する。最大過圧、正圧相インパルスともに、No. O1とR01年度No. O、R02年度No. Oは地表面爆発の近似線でよく近似できている。以降の議論では、表5-4の爆風パラメータ（平均値）を基準として用いる。

本実験で使用した爆薬の薬量換算比を求めるため、平成 28 年度爆発影響低減化技術基準検討事業報告書に記載された最大過圧の式を用いる。最大過圧の式は H28 年度野外実験 No. 2-3（TNT 160 kg）および H27 年度野外実験 No. 2-1 から算出され、eq. 2 で示される。換算インパルスの式も eq. 3 に示す。

$$X = \log_{10}(Z_{\mathrm{TNT}}) \qquad \text{eq. 1}$$

$$\log_{10}(P) = 3.2678 - 2.6162 \cdot X + 0.51452 \cdot X^2 \qquad \text{eq. 2}$$

$$\log_{10}\left(I/W^{1/3}\right) = 1.9717 - 0.017917 \cdot X - 0.46544 \cdot X^2 \qquad \text{eq. 3}$$

ここで、Z_{TNT}はTNT薬量基準の換算距離 [m/kg$^{1/3}$]、Pは最大過圧 [kPa]、Iは正圧相インパルス [Pa·s]、W は薬量 [kg]である。TNT 換算薬量 W_{eq}、および換算薬量比 r を次式により算出する。

$$W_{\mathrm{eq}} = (R/Z_{\mathrm{st}})^3 \qquad \text{eq. 4}$$

$$r = W_{\mathrm{eq}}/W \qquad \text{eq. 5}$$

ここで、R は地表面爆発における計測地点の距離 [m]、Z_{st} は eq. 2, 3 おいて本実験で計測した最大過圧や正圧相インパルスと同一の値を与える換算距離である。算出した最大過圧基準の薬量換算比を表 5-5 に示す。本実験で使用した PETN/C ペレット 1.0 g + 雷管の TNT 換算薬量の平均値は W_{eq} = 1.24、薬量換算比の平均は r = 1.24 であった。

図 5-7 に、地表面爆発の最大過圧と換算インパルス $I/W_{\mathrm{eq}}^{1/3}$を示す。地表面爆発の爆風パラメータは表 5-4 から抽出した。横軸の換算距離 Z_{TNT} および換算インパルスの計算には TNT 換算薬量 W_{eq} = 1.24 g を用いた。参考として、eq. 2、eq. 3 で表される最大過圧、換算インパルスのフィット式を実線で示す。最大過圧は TNT 基準爆風圧実験で求められたフィット式によく一致した。換算インパルスについては、R = 0.267 m での計測値が外れるものの、$R \geq 0.400$ m においてフィット式と概ね一致した。

図 5-8 に、地表面爆発と対応する野外実験 No. 2-1 について、最大過圧と換算インパルスの比較を示す。No. O1 の爆風パラメータは表 5-3 から、地表面爆発の爆風パラメータは表 5-4 から抽出した。最大過圧の場合には野外実験よりも室内実験のほうが値が多少大きいものの、おおむね一致している。換算インパルスの場合には、野外実験と室内実験の乖離が大きいが、これは換算インパルスや換算距離の算出に利用した薬量が最大過圧を基にスケール化されているためだと考えられる。

野外実験よりも室内実験のほうが値が大きい原因として、漏斗孔の生成が挙げられる。本年度の野外実験は 68 mm 高さの装薬台の上に爆薬を設置した。産総研の行った過去の野外実験では、地面の影響を小さくするために爆薬中心高さを 0.18 $m/kg^{1/3}$ 程度とするように装薬台を設定した。この値を基準とすると、本年度の野外実験での装薬台高さは 283 mm となる。野外実験では装薬台高さが過小であったため、地表面での漏斗孔の生成に爆発エネルギーが配分され、爆風が弱くなった。なお、本実験では装薬台にアルミ板を使用したため、1 回の実験では鉄製の模擬地表面はほとんど損傷しなかった。

表5-3　No. O1の爆風パラメータ

換算距離 [m/kg$^{1/3}$]	最大過圧 [kPa]	正圧相インパルス [Pa·s]	換算インパルス [Pa·s/kg$^{1/3}$]	到達時刻 [ms]	持続時間 [ms]
1.93	238.47	12.19	88.33	0.192	0.179
2.90	80.99	6.83	49.50	0.447	0.284
5.79	19.22	3.76	27.21	1.465	0.441
8.69	10.98	2.56	18.54	2.569	0.489
11.59	7.70	1.90	13.78	3.696	0.504

表5-4　基準となる爆風パラメータ

換算距離 [m/kg$^{1/3}$]	最大過圧 [kPa]	正圧相インパルス [Pa·s]	換算インパルス [Pa·s/kg$^{1/3}$]	到達時刻 [ms]	持続時間 [ms]
1.93	215.08	11.62	84.18	0.211	0.179
2.90	82.06	7.47	54.14	0.475	0.274
5.79	22.36	3.85	27.86	1.440	0.418
8.69	12.55	2.60	18.82	2.577	0.473
11.59	8.40	1.93	13.95	3.699	0.523

表5-5　最大過圧基準のTNT換算薬量比

換算距離 [m/kg$^{1/3}$]	R [m]	Z_{TNT} [m/kg$^{1/3}$]	W_{eq} [g]	r [-]
1.93	0.267	2.33	1.31	1.31
2.90	0.400	3.87	1.13	1.13
5.79	0.800	8.47	1.11	1.11
8.69	1.200	12.05	1.28	1.28
11.59	1.600	15.40	1.35	1.35
平均			1.24	1.24

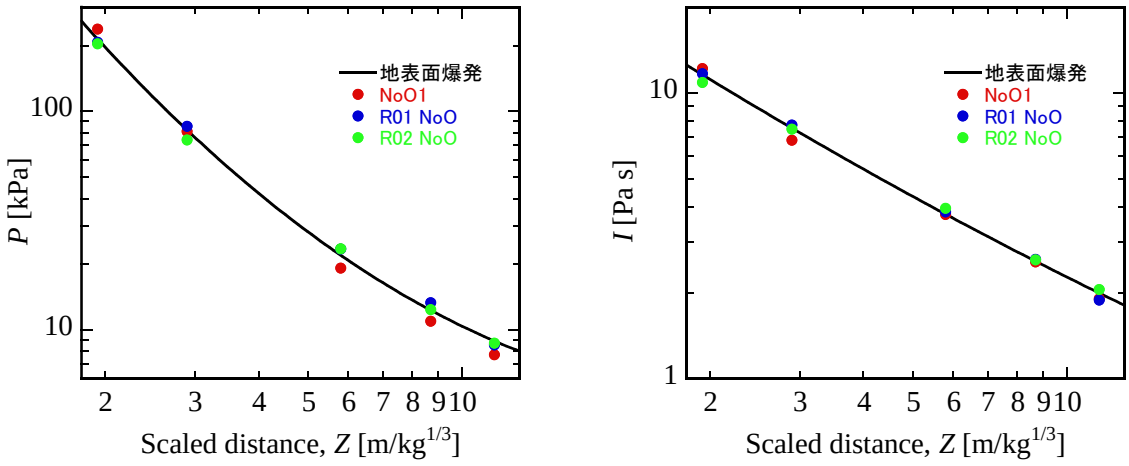


図5-6　No. O1とR01年度No. O、R02年度No. Oの比較

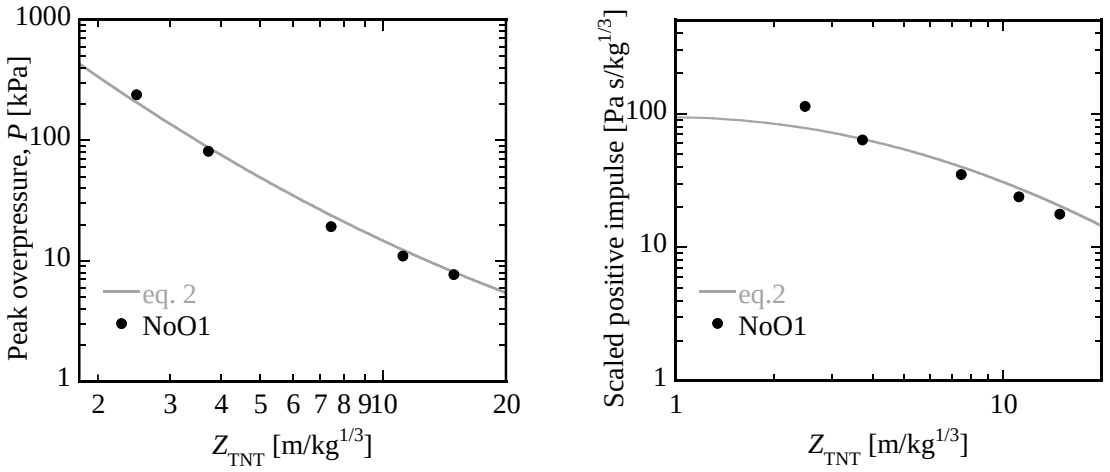


図5-7　爆風パラメータのTNT換算薬量比較

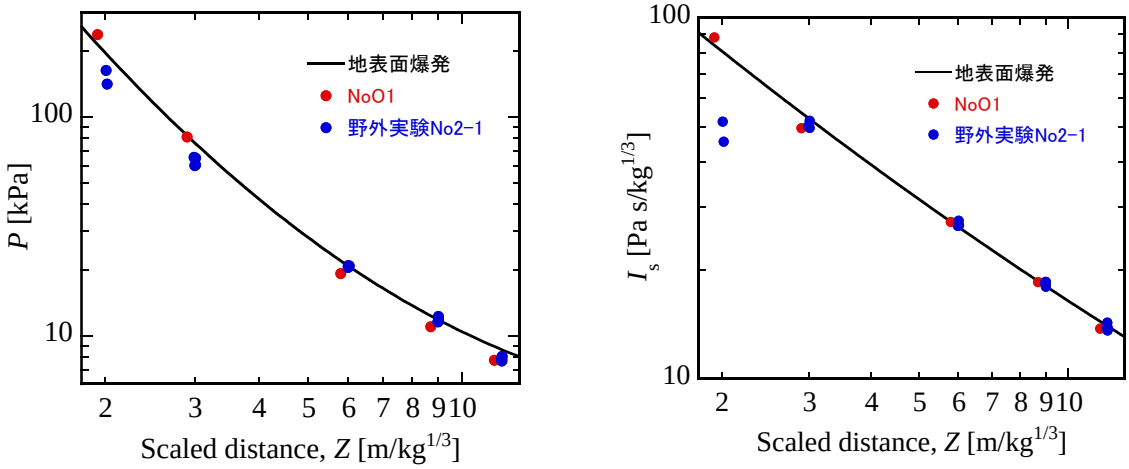


図5-8　No. O1と野外実験No. 2-1の比較

5.3.2　爆風の過圧履歴

実験で得られた過圧履歴を方向ごとに整理した（波形は付録を参照）。読み取った最大過圧を表 5-6a～d に、正圧相インパルスを表 5-7a～d に、到達時間を表 5-8a～d に、持続時間を表 5-9a～d に示す。なお示した値はすべて、2 回の測定結果の平均値である。

表5-6a　角度と最大過圧 [kPa]（No. O2, No. A1）

		No. O2					No. A1				
		防爆壁のみ					ウレタン1面				
	換算距離 [m/kg$^{1/3}$]	1.93	2.90	5.79	8.69	11.59	1.93	2.90	5.79	8.69	11.59
角度 θ[°]	0	114.54	72.01	22.75	13.63	8.80	86.86	61.82	20.17	12.25	8.01
	10	115.61	67.15	23.60	13.46	9.29	88.75	57.02	21.31	12.51	8.47
	20						94.68	57.15	21.02	12.31	8.42
	30						97.26	63.99	20.66	12.30	8.02
	40						92.50	55.61	21.84	12.35	8.55
	50						88.16	56.48	21.01	12.58	8.53
	60						92.36	60.50	21.10	12.33	7.96
	70						97.16	53.81	21.02	12.23	8.71
	80						97.47	51.78	19.73	11.93	8.08
	90						95.62	60.30	20.05	11.85	7.68
	100						98.86	56.09	21.48	11.95	8.42
	110						100.42	66.12	21.07	12.35	8.48
	120						125.31	75.44	21.55	12.23	8.10
	130						131.50	64.90	23.21	12.76	8.85
	140						108.75	68.87	22.98	13.59	9.11
	150						120.31	74.30	23.01	13.28	8.49
	160						123.52	60.72	24.19	13.20	9.31
	170						108.69	54.93	23.30	13.36	9.11
	180						111.76	59.97	22.62	13.20	8.51

表5-6b　角度と最大過圧 [kPa]（No. A2）

		No. A2				
		ウレタン2面（L型）				
	換算距離 [m/kg$^{1/3}$]	1.93	2.90	5.79	8.69	11.59
	50	67.56	52.25	19.65	11.08	7.51
	60	75.23	50.53	19.11	10.81	7.99
	70	67.92	49.36	19.39	10.74	7.78
	80	73.16	51.25	18.59	11.19	7.26
	90	76.94	46.37	20.06	11.26	7.83
	100	74.26	51.95	20.23	11.07	7.90
	110	72.81	55.58	20.29	11.59	7.54
	120	80.38	53.44	21.44	11.83	8.02
角度	130	80.89	52.72	20.70	11.41	8.37
θ [°]	140	80.30	51.20	20.05	12.39	7.98
	150	101.90	45.55	19.34	12.61	8.76
	160	96.00	44.13	21.52	11.91	8.54
	170	95.27	50.98	20.39	12.35	7.98
	180	102.43	45.77	20.45	11.98	8.43
	190	98.48	57.00	20.87	11.94	8.41
	200	107.15	73.45	21.09	12.36	8.06
	210	105.39	66.47	22.38	12.61	8.59
	220	104.12	73.39	22.27	12.57	8.50

表5-6c　角度と最大過圧 [kPa]（No. A3, No. A4）

		No. A3					No. A4				
		ウレタン3面					ウレタン4面				
	換算距離 [m/kg$^{1/3}$]	1.93	2.90	5.79	8.69	11.59	1.93	2.90	5.79	8.69	11.59
角度 θ[°]	0	75.22	45.15	17.50	11.11	7.04	70.04	40.72	16.31	10.14	6.76
	10	72.39	41.86	18.48	10.71	7.96	70.07	36.95	16.06	10.47	7.65
	20	69.23	46.47	18.00	10.86	7.45	66.26	34.92	19.08	10.94	7.43
	30	68.89	46.50	19.13	12.23	7.48	65.75	40.44	17.81	10.80	7.09
	40	70.51	42.22	20.77	11.68	8.10	66.17	35.54	18.97	10.84	7.56
	50	62.84	44.14	18.74	11.15	7.56	70.04	40.72	16.31	10.14	6.76
	60	63.80	42.82	17.94	11.40	7.04	70.07	36.95	16.06	10.47	7.65
	70	78.19	37.26	18.19	10.65	7.20	66.26	34.92	19.08	10.94	7.43
	80	78.25	41.38	17.85	10.80	7.49	65.75	40.44	17.81	10.80	7.09
	90	75.59	43.53	18.03	10.94	7.09	66.17	35.54	18.97	10.84	7.56
	100	76.29	37.16	19.21	11.22	8.14					
	110	78.94	38.85	20.48	11.94	8.08					
	120	75.82	46.66	20.32	11.87	7.74					
	130	77.79	42.66	20.71	11.66	8.35					
	140	82.06	40.94	20.09	11.96	8.20					
	150	80.07	45.52	18.50	11.66	7.58					
	160	82.17	41.49	16.69	11.09	7.83					
	170	88.67	42.20	17.49	10.43	7.61					
	180	86.70	47.46	16.58	10.38	7.07					

表5-6d　角度と最大過圧 [kPa]（No. A5, No. B）

		No. A5					No. B				
		ウレタン2面（II型）					コの字障壁				
	換算距離 [m/kg$^{1/3}$]	1.93	2.90	5.79	8.69	11.59	1.93	2.90	5.79	8.69	11.59
角度 θ[°]	0	84.00	45.81	18.48	11.61	7.57	135.78	70.92	21.12	12.07	7.76
	10	85.94	41.95	18.74	11.46	8.07	132.70	64.31	21.86	12.02	8.33
	20	81.15	45.80	20.84	12.19	8.26	114.19	59.20	21.14	13.08	9.13
	30	76.06	64.66	21.10	12.21	7.70	91.53	56.16	23.67	13.80	9.04
	40	82.17	56.84	21.95	12.18	8.36	110.19	69.44	25.62	13.95	9.50
	50	79.13	48.56	20.35	11.90	8.15	103.16	67.99	23.08	14.02	9.37
	60	76.20	53.31	19.48	11.53	7.52	126.03	63.35	21.84	13.08	8.34
	70	79.63	45.51	18.50	10.91	7.67	137.39	62.59	22.19	12.47	8.82
	80	84.00	44.85	18.17	10.98	7.91	122.19	71.50	22.17	12.28	8.73
	90	80.98	50.47	16.94	10.80	7.22	112.77	76.86	22.72	13.10	8.41
	100						128.74	63.82	25.15	13.60	8.88
	110						105.33	63.29	23.68	13.57	9.34
	120						109.26	65.13	23.03	13.61	8.84
	130						111.25	54.52	23.90	13.56	9.46
	140						111.55	69.38	22.55	13.28	9.37
	150						109.64	75.52	22.78	13.17	8.74
	160						158.01	71.17	24.38	13.48	9.19
	170						151.13	73.05	23.52	13.73	9.60
	180						150.45	75.44	23.35	13.63	9.17

表5-7a　角度と正圧相インパルス [Pa s]（No. O2, No. A1）

		No. O2					No. A1				
		防爆壁のみ					ウレタン1面				
	換算距離 [m/kg$^{1/3}$]	1.93	2.90	5.79	8.69	11.59	1.93	2.90	5.79	8.69	11.59
角度 θ[°]	0	9.57	7.71	3.86	2.66	1.96	8.19	6.07	3.49	2.43	1.83
	10	9.64	7.14	3.77	2.61	1.99	8.52	6.05	3.48	2.38	1.80
	20						8.39	5.99	3.44	2.38	1.77
	30						8.42	6.20	3.43	2.40	1.81
	40						8.55	5.90	3.46	2.33	1.78
	50						8.53	6.17	3.44	2.37	1.76
	60						8.39	6.17	3.42	2.39	1.80
	70						8.43	6.11	3.40	2.34	1.83
	80						8.01	5.83	3.30	2.27	1.70
	90						8.16	6.02	3.29	2.31	1.76
	100						8.74	5.91	3.38	2.29	1.80
	110						9.08	6.72	3.59	2.47	1.81
	120						10.01	6.64	3.66	2.51	1.88
	130						10.39	6.65	3.66	2.47	1.90
	140						10.22	7.01	3.75	2.57	1.89
	150						10.17	7.06	3.84	2.62	1.96
	160						9.82	7.00	3.85	2.53	1.97
	170						9.14	6.76	3.77	2.56	1.90
	180						9.06	6.98	3.78	2.58	1.94

表5-7b　角度と正圧相インパルス [Pa s]（No. A2）

		No. A2				
		ウレタン2面（L型）				
	換算距離 [m/kg$^{1/3}$]	1.93	2.90	5.79	8.69	11.59
角度 θ[°]	50	7.59	5.46	2.97	2.06	1.55
	60	7.33	5.15	2.97	2.02	1.62
	70	7.26	5.40	2.87	2.09	1.56
	80	7.11	5.55	3.03	2.11	1.60
	90	7.15	5.39	3.08	2.07	1.62
	100	7.44	5.49	3.07	2.11	1.57
	110	7.60	5.90	3.11	2.17	1.65
	120	7.97	5.75	3.19	2.15	1.66
	130	8.22	5.86	3.27	2.22	1.66
	140	8.33	6.28	3.35	2.30	1.73
	150	8.28	6.01	3.35	2.25	1.73
	160	7.93	6.14	3.33	2.30	1.72
	170	8.28	6.58	3.45	2.37	1.78
	180	8.19	6.27	3.42	2.27	1.77
	190	8.36	6.37	3.47	2.34	1.73
	200	9.19	6.76	3.48	2.38	1.79
	210	9.48	6.32	3.47	2.31	1.77
	220	9.73	6.85	3.50	2.35	1.74

表5-7c　角度と正圧相インパルス [Pa s]（No. A3, No. A4）

		No. A3					No. A4				
		ウレタン3面					ウレタン4面				
	換算距離 [m/kg$^{1/3}$]	1.93	2.90	5.79	8.69	11.59	1.93	2.90	5.79	8.69	11.59
角度 θ[°]	0	6.65	5.41	2.82	1.95	1.48	6.25	5.26	2.78	1.90	1.44
	10	6.65	5.12	2.82	1.92	1.53	7.23	4.90	2.62	1.86	1.46
	20	6.84	5.03	2.80	1.93	1.46	6.44	5.01	2.63	1.82	1.36
	30	7.19	5.50	2.84	1.94	1.50	6.72	5.27	2.72	1.86	1.39
	40	7.44	5.35	2.88	1.95	1.52	6.51	4.67	2.74	1.84	1.40
	50	6.66	5.12	2.73	1.92	1.44	6.25	5.26	2.78	1.90	1.44
	60	6.69	5.27	2.82	1.96	1.48	7.23	4.90	2.62	1.86	1.46
	70	6.58	4.96	2.83	1.93	1.50	6.44	5.01	2.63	1.82	1.36
	80	6.56	5.19	2.90	1.99	1.49	6.72	5.27	2.72	1.86	1.39
	90	6.68	5.49	2.96	2.03	1.54	6.51	4.67	2.74	1.84	1.40
	100	6.79	5.23	2.97	1.99	1.58					
	110	7.29	5.59	2.94	2.07	1.54					
	120	7.45	5.94	3.06	2.11	1.59					
	130	7.77	5.45	3.03	2.04	1.60					
	140	7.37	5.69	2.97	2.04	1.52					
	150	7.43	5.87	3.01	2.05	1.55					
	160	7.15	5.17	2.98	1.98	1.53					
	170	7.17	5.32	3.03	2.05	1.56					
	180	7.12	5.57	3.02	2.08	1.57					

表5-7d　正圧相インパルス [Pa s]（No. A5, No. B）

		No. A5					No. B				
		ウレタン2面（II型）					コの字障壁				
	換算距離 [m/kg$^{1/3}$]	1.93	2.90	5.79	8.69	11.59	1.93	2.90	5.79	8.69	11.59
角度 θ[°]	0	7.29	5.90	3.18	2.20	1.66	8.26	5.44	3.62	2.62	1.97
	10	7.42	5.66	3.09	2.15	1.59	8.13	5.75	3.40	2.53	1.92
	20	8.14	6.01	3.13	2.20	1.63	8.53	6.25	3.64	2.45	1.86
	30	8.48	6.41	3.23	2.20	1.67	9.59	6.73	3.77	2.60	1.96
	40	8.98	5.92	3.21	2.14	1.60	9.89	6.56	3.92	2.63	2.00
	50	7.67	5.77	3.05	2.11	1.56	10.07	7.19	3.95	2.76	2.05
	60	7.36	5.72	3.06	2.10	1.59	9.22	6.81	4.03	2.80	2.10
	70	7.03	5.00	3.03	2.04	1.55	8.80	6.33	3.95	2.70	2.09
	80	7.16	5.30	3.02	2.05	1.59	9.40	6.96	3.90	2.74	2.07
	90	7.07	5.61	3.03	2.08	1.58	9.94	6.76	3.91	2.79	2.14
	100						10.58	6.90	3.92	2.75	2.06
	110						9.76	7.08	3.95	2.86	2.12
	120						10.01	7.74	4.29	2.97	2.23
	130						10.52	7.83	4.35	2.95	2.24
	140						10.84	8.17	4.48	3.10	2.32
	150						11.43	8.28	4.60	3.18	2.38
	160						11.99	7.88	4.60	3.11	2.35
	170						11.72	8.01	4.45	3.07	2.30
	180						11.60	8.14	4.52	3.11	2.36

表5-8a　角度と到達時刻 [ms]（No. O2, No. A1）

		No. O2					No. A1				
		防爆壁のみ					ウレタン1面				
	換算距離 [m/kg$^{1/3}$]	1.93	2.90	5.79	8.69	11.59	1.93	2.90	5.79	8.69	11.59
角度 θ[°]	0	0.370	0.669	1.685	2.774	3.897	0.433	0.739	1.763	2.856	3.979
	10	0.371	0.670	1.683	2.775	3.895	0.434	0.739	1.761	2.856	3.975
	20						0.435	0.740	1.760	2.855	3.972
	30						0.438	0.740	1.762	2.854	3.975
	40						0.437	0.741	1.760	2.854	3.974
	50						0.429	0.732	1.753	2.847	3.965
	60						0.418	0.720	1.745	2.838	3.960
	70						0.404	0.708	1.735	2.829	3.950
	80						0.391	0.699	1.729	2.830	3.950
	90						0.391	0.694	1.721	2.817	3.941
	100						0.391	0.689	1.713	2.810	3.932
	110						0.382	0.680	1.693	2.792	3.910
	120						0.386	0.676	1.689	2.782	3.904
	130						0.383	0.674	1.685	2.777	3.896
	140						0.384	0.683	1.689	2.780	3.894
	150						0.388	0.680	1.687	2.774	3.893
	160						0.378	0.670	1.684	2.772	3.890
	170						0.372	0.671	1.690	2.780	3.897
	180						0.372	0.671	1.690	2.779	3.898

表5-8b　角度と到達時刻 [ms]（No. A2）

		No. A2				
		ウレタン2面（L型）				
	換算距離 $[m/kg^{1/3}]$	1.93	2.90	5.79	8.69	11.59
角度 θ[°]	50	0.460	0.785	1.821	2.923	4.050
	60	0.462	0.781	1.821	2.926	4.054
	70	0.460	0.779	1.816	2.920	4.044
	80	0.456	0.772	1.814	2.916	4.045
	90	0.450	0.769	1.811	2.913	4.040
	100	0.442	0.763	1.800	2.902	4.026
	110	0.441	0.757	1.793	2.891	4.019
	120	0.433	0.752	1.786	2.884	4.008
	130	0.427	0.747	1.783	2.883	4.005
	140	0.423	0.731	1.772	2.869	3.995
	150	0.409	0.712	1.758	2.857	3.980
	160	0.401	0.709	1.758	2.856	3.976
	170	0.393	0.697	1.743	2.840	3.964
	180	0.386	0.689	1.726	2.826	3.949
	190	0.381	0.690	1.717	2.815	3.936
	200	0.388	0.690	1.710	2.806	3.931
	210	0.391	0.690	1.704	2.801	3.923
	220	0.391	0.692	1.704	2.796	3.918

表5-8c　角度と到達時刻 [ms]（No. A3, No. A4）

		No. A3					No. A4				
		ウレタン3面					ウレタン4面				
	換算距離 [m/kg$^{1/3}$]	1.93	2.90	5.79	8.69	11.59	1.93	2.90	5.79	8.69	11.59
角度 θ[°]	0	0.454	0.770	1.822	2.928	4.059	0.459	0.778	1.841	2.950	4.082
	10	0.452	0.773	1.822	2.930	4.058	0.455	0.779	1.844	2.952	4.082
	20	0.452	0.779	1.824	2.932	4.059	0.449	0.776	1.846	2.951	4.079
	30	0.456	0.777	1.824	2.928	4.058	0.455	0.776	1.845	2.950	4.082
	40	0.454	0.777	1.824	2.926	4.053	0.455	0.776	1.846	2.951	4.080
	50	0.463	0.792	1.841	2.948	4.074					
	60	0.464	0.784	1.838	2.943	4.075					
	70	0.456	0.774	1.834	2.942	4.073					
	80	0.448	0.769	1.823	2.932	4.059					
	90	0.446	0.762	1.820	2.925	4.056					
	100	0.443	0.760	1.818	2.923	4.052					
	110	0.440	0.760	1.818	2.919	4.043					
	120	0.440	0.756	1.809	2.908	4.036					
	130	0.432	0.750	1.800	2.900	4.026					
	140	0.429	0.745	1.800	2.903	4.026					
	150	0.422	0.735	1.793	2.895	4.023					
	160	0.412	0.726	1.783	2.893	4.021					
	170	0.404	0.718	1.772	2.883	4.012					
	180	0.405	0.715	1.771	2.880	4.013					

表5-8d　角度と到達時刻 [ms]（No. A5, No. B）

		No. A5					No. B				
		ウレタン2面（II型）					コの字障壁				
	換算距離 [m/kg$^{1/3}$]	1.93	2.90	5.79	8.69	11.59	1.93	2.90	5.79	8.69	11.59
角度 θ[°]	0	0.434	0.745	1.801	2.904	4.032	0.480	0.758	1.771	2.865	3.989
	10	0.434	0.747	1.800	2.904	4.029	0.478	0.759	1.774	2.870	3.992
	20	0.438	0.752	1.788	2.889	4.010	0.484	0.774	1.793	2.887	4.004
	30	0.438	0.755	1.781	2.878	4.004	0.493	0.786	1.801	2.887	4.005
	40	0.433	0.750	1.776	2.874	3.998	0.491	0.794	1.797	2.883	4.000
	50	0.426	0.743	1.778	2.879	4.000	0.486	0.775	1.780	2.871	3.985
	60	0.420	0.733	1.775	2.875	4.004	0.468	0.752	1.765	2.856	3.977
	70	0.410	0.724	1.769	2.876	4.005	0.447	0.728	1.747	2.841	3.960
	80	0.410	0.723	1.772	2.880	4.008	0.434	0.718	1.725	2.817	3.935
	90	0.412	0.720	1.771	2.878	4.009	0.420	0.707	1.709	2.797	3.918
	100						0.405	0.690	1.698	2.785	3.902
	110						0.390	0.690	1.698	2.785	3.900
	120						0.379	0.678	1.694	2.780	3.897
	130						0.370	0.668	1.688	2.776	3.893
	140						0.370	0.672	1.682	2.773	3.888
	150						0.379	0.671	1.677	2.764	3.883
	160						0.389	0.667	1.672	2.760	3.877
	170						0.386	0.668	1.672	2.760	3.874
	180						0.387	0.669	1.673	2.758	3.875

表5-9a　角度と持続時間 [ms]（No. O2, No. A1）

		No. O2					No. A1				
		防爆壁のみ					ウレタン1面				
	換算距離 [m/kg$^{1/3}$]	1.93	2.90	5.79	8.69	11.59	1.93	2.90	5.79	8.69	11.59
角度 θ[°]	0	0.223	0.294	0.389	0.504	0.556	0.235	0.275	0.398	0.442	0.472
	10	0.225	0.266	0.401	0.493	0.527	0.231	0.268	0.392	0.447	0.483
	20						0.219	0.259	0.404	0.447	0.479
	30						0.225	0.267	0.393	0.451	0.480
	40						0.218	0.266	0.381	0.448	0.485
	50						0.219	0.265	0.381	0.444	0.469
	60						0.219	0.267	0.387	0.454	0.472
	70						0.217	0.276	0.381	0.476	0.506
	80						0.216	0.291	0.399	0.471	0.509
	90						0.237	0.275	0.401	0.486	0.545
	100						0.214	0.265	0.408	0.494	0.536
	110						0.224	0.273	0.395	0.463	0.507
	120						0.205	0.269	0.406	0.464	0.517
	130						0.210	0.259	0.401	0.449	0.482
	140						0.209	0.267	0.379	0.457	0.487
	150						0.211	0.276	0.391	0.451	0.499
	160						0.215	0.277	0.403	0.451	0.496
	170						0.236	0.279	0.402	0.462	0.488
	180						0.215	0.296	0.391	0.443	0.530

表5-9b　角度と持続時間 [ms]（No. A2）

		No. A2				
		ウレタン2面（L型）				
	換算距離 [m/kg$^{1/3}$]	1.93	2.90	5.79	8.69	11.59
角度 θ[°]	50	0.233	0.247	0.358	0.421	0.456
	60	0.224	0.254	0.375	0.418	0.460
	70	0.227	0.268	0.381	0.441	0.457
	80	0.245	0.277	0.384	0.434	0.469
	90	0.257	0.272	0.383	0.453	0.470
	100	0.235	0.263	0.383	0.431	0.467
	110	0.223	0.263	0.392	0.438	0.473
	120	0.243	0.268	0.368	0.433	0.490
	130	0.241	0.274	0.374	0.438	0.472
	140	0.241	0.276	0.376	0.430	0.455
	150	0.256	0.288	0.375	0.432	0.478
	160	0.274	0.309	0.378	0.436	0.467
	170	0.285	0.316	0.391	0.440	0.485
	180	0.288	0.308	0.388	0.460	0.500
	190	0.244	0.290	0.387	0.449	0.480
	200	0.213	0.273	0.389	0.444	0.482
	210	0.217	0.259	0.376	0.435	0.470
	220	0.207	0.252	0.360	0.436	0.470

表5-9c　角度と持続時間 [ms]（No. A3, No. A4）

		No. A3					No. A4				
		ウレタン3面					ウレタン4面				
	換算距離 [m/kg$^{1/3}$]	1.93	2.90	5.79	8.69	11.59	1.93	2.90	5.79	8.69	11.59
角度 θ[°]	0	0.251	0.298	0.371	0.435	0.459	0.293	0.307	0.362	0.414	0.441
	10	0.283	0.293	0.362	0.431	0.465	0.297	0.301	0.350	0.410	0.430
	20	0.257	0.274	0.375	0.428	0.465	0.259	0.296	0.336	0.412	0.456
	30	0.247	0.256	0.352	0.413	0.467	0.267	0.284	0.351	0.401	0.457
	40	0.252	0.259	0.347	0.415	0.464	0.251	0.287	0.353	0.407	0.447
	50	0.246	0.273	0.357	0.416	0.456					
	60	0.258	0.269	0.361	0.421	0.456					
	70	0.267	0.294	0.369	0.429	0.471					
	80	0.293	0.311	0.377	0.430	0.467					
	90	0.279	0.312	0.370	0.424	0.481					
	100	0.281	0.301	0.362	0.416	0.446					
	110	0.246	0.284	0.364	0.420	0.452					
	120	0.237	0.279	0.358	0.417	0.458					
	130	0.240	0.273	0.366	0.415	0.449					
	140	0.236	0.280	0.340	0.418	0.439					
	150	0.251	0.295	0.353	0.416	0.447					
	160	0.261	0.298	0.379	0.420	0.450					
	170	0.287	0.329	0.388	0.431	0.465					
	180	0.300	0.326	0.387	0.430	0.473					

表5-9d　角度と持続時間 [ms]（No. A5, No. B）

		No. A5					No. B				
		ウレタン2面（II型）					コの字障壁				
	換算距離 [m/kg$^{1/3}$]	1.93	2.90	5.79	8.69	11.59	1.93	2.90	5.79	8.69	11.59
角度 θ[°]	0	0.219	0.301	0.555	0.589	0.643	0.480	0.758	1.771	2.865	3.989
	10	0.266	0.321	0.429	0.599	0.614	0.478	0.759	1.774	2.870	3.992
	20	0.256	0.291	0.455	0.481	0.535	0.484	0.774	1.793	2.887	4.004
	30	0.253	0.275	0.391	0.441	0.473	0.493	0.786	1.801	2.887	4.005
	40	0.261	0.272	0.406	0.454	0.483	0.491	0.794	1.797	2.883	4.000
	50	0.277	0.301	0.431	0.457	0.495	0.486	0.775	1.780	2.871	3.985
	60	0.278	0.326	0.430	0.464	0.493	0.468	0.752	1.765	2.856	3.977
	70	0.256	0.327	0.451	0.499	0.520	0.447	0.728	1.747	2.841	3.960
	80	0.209	0.312	0.476	0.520	0.546	0.434	0.718	1.725	2.817	3.935
	90	0.209	0.253	0.502	0.562	0.601	0.420	0.707	1.709	2.797	3.918
	100	0.228	0.265	0.469	0.584	0.606	0.405	0.690	1.698	2.785	3.902
	110	0.241	0.272	0.428	0.555	0.575	0.390	0.690	1.698	2.785	3.900
	120	0.310	0.357	0.448	0.516	0.535	0.379	0.678	1.694	2.780	3.897
	130	0.345	0.371	0.454	0.507	0.549	0.370	0.668	1.688	2.776	3.893
	140	0.332	0.357	0.435	0.530	0.532	0.370	0.672	1.682	2.773	3.888
	150	0.332	0.355	0.454	0.501	0.536	0.379	0.671	1.677	2.764	3.883
	160	0.293	0.339	0.452	0.520	0.557	0.389	0.667	1.672	2.760	3.877
	170	0.256	0.315	0.441	0.508	0.546	0.386	0.668	1.672	2.760	3.874
	180	0.260	0.311	0.445	0.511	0.560	0.387	0.669	1.673	2.758	3.875

5.4 検討 1 – 爆風パラメータと換算距離

5.4.1 最大過圧と換算距離

両対数グラフ上では、換算距離 Z が 1.93 ~ 11.59 m/kg$^{1/3}$ の範囲において最大過剰圧力 P は直線とみなせる。いずれの角度についても、最大過圧が換算距離の 1 次式

$$\log_{10} P = a_0 + a_1 \log_{10} Z \qquad \text{eq. 6}$$

で表されるとし、5 つの測定点（換算距離 1.93, 2.90, 5.79, 8.69, 11.59 m/kg$^{1/3}$）から補間直線を作成した（図 5-9a ~ c）。図 5-9a ~ c の最大過圧は表 5-6a ~ d から抽出し、係数 a_0, a_1 の値は表 5-10a ~ d に整理した。なお Z < 1.93 m/kg$^{1/3}$, 11.59 m/kg$^{1/3}$ < Z の範囲は外挿である。

表5-10a　補間直線 eq. 6の係数

角度 θ[°]	No. O2		No. A1	
	防爆壁のみ		ウレタン1面	
	a_1	a_0	a_1	a_0
0	-1.45855	2.49568	-1.37001	2.36832
10	-1.42572	2.47416	-1.33017	2.34655
20			-1.36526	2.37398
30			-1.42455	2.42194
40			-1.33952	2.35644
50			-1.32158	2.33905
60			-1.38905	2.38910
70			-1.35063	2.36302
80			-1.38019	2.36662
90			-1.42921	2.40906
100			-1.38537	2.38945
110			-1.42334	2.43365
120			-1.56903	2.56392
130			-1.50450	2.52749
140			-1.41236	2.45848
150			-1.50620	2.53181
160			-1.43162	2.47594
170			-1.35919	2.40111
180			-1.42298	2.44649

表5-10b　補間直線 eq. 6の係数

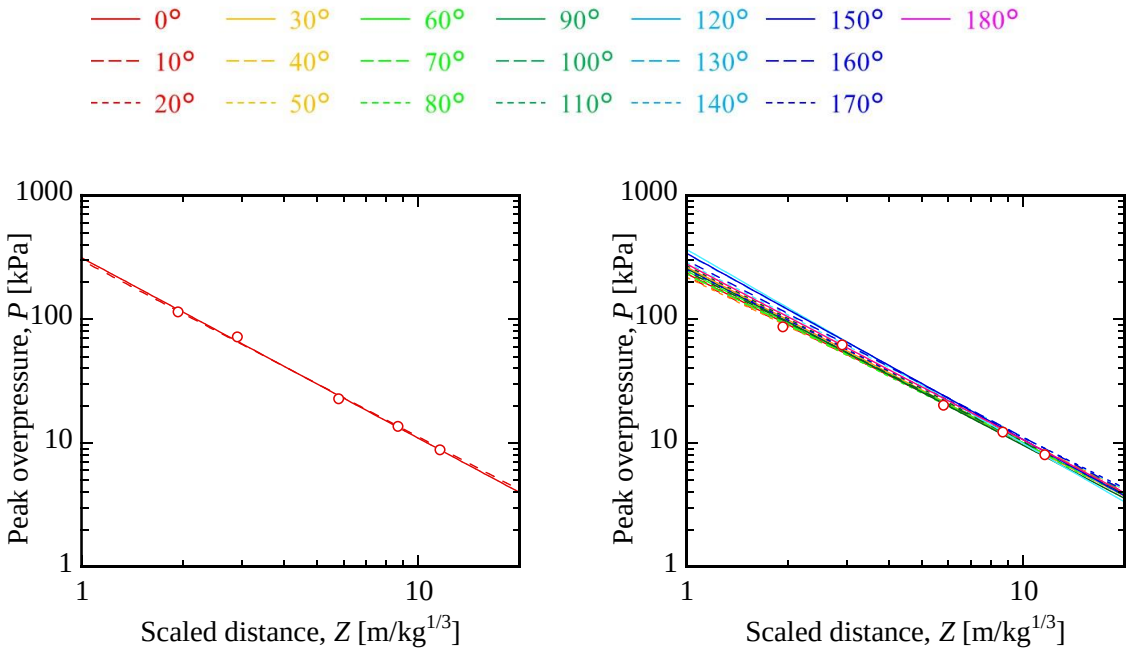
角度 θ[°]	No. A2	
	ウレタン2面（II型）	
	a_1	a_0
50	-1.27065	2.24542
60	-1.29316	2.26848
70	-1.25408	2.22848
80	-1.31383	2.27408
90	-1.27614	2.25700
100	-1.28915	2.27303
110	-1.30392	2.28764
120	-1.30503	2.30558
130	-1.29918	2.29846
140	-1.28861	2.28804
150	-1.32524	2.33076
160	-1.30831	2.31312
170	-1.36064	2.35432
180	-1.35168	2.34736
190	-1.38988	2.39107
200	-1.49575	2.49514
210	-1.43145	2.45225
220	-1.45640	2.47560

表5-10c　補間直線 eq. 6の係数

角度 θ[°]	No. A3 ウレタン3面		No. A4 ウレタン4面（II型）	
	a_1	a_0	a_1	a_0
0	-1.31091	2.25493	-1.29624	2.21194
10	-1.23558	2.20428	-1.21945	2.16171
20	-1.26536	2.22355	-1.17078	2.13400
30	-1.22924	2.21378	-1.22937	2.17595
40	-1.19133	2.19090	-1.17121	2.13584
50	-1.19647	2.16938		
60	-1.21905	2.17591		
70	-1.27964	2.22121		
80	-1.28881	2.23994		
90	-1.30312	2.24862		
100	-1.20653	2.18742		
110	-1.21594	2.21116		
120	-1.26196	2.25100		
130	-1.22556	2.22662		
140	-1.24056	2.23622		
150	-1.29724	2.26686		
160	-1.29185	2.24683		
170	-1.35101	2.29282		
180	-1.40264	2.32587		

表5-10d　補間直線 eq. 6の係数

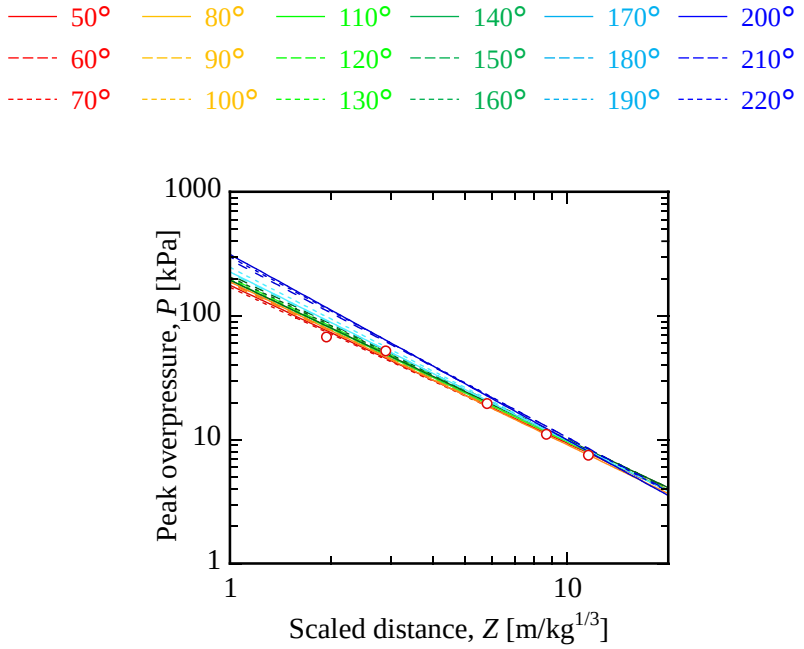
角度 θ[°]	No. A5 ウレタン2面（II型）		No. B コの字障壁	
	a_1	a_0	a_1	a_0
0	-1.32094	2.28767	-1.60864	2.58672
10	-1.28710	2.26391	-1.54688	2.54165
20	-1.25449	2.26014	-1.40939	2.43706
30	-1.33717	2.33776	-1.28493	2.33944
40	-1.30576	2.32155	-1.39117	2.46083
50	-1.27002	2.26878	-1.36802	2.42715
60	-1.31781	2.29357	-1.50024	2.51039
70	-1.30640	2.26810	-1.52427	2.53576
80	-1.31392	2.27841	-1.51434	2.52795
90	-1.37012	2.30947	-1.49462	2.51784
100			-1.46954	2.51241
110			-1.36668	2.42094
120			-1.41106	2.45082
130			-1.34801	2.40140
140			-1.42126	2.46641
150			-1.46229	2.49520
160			-1.57580	2.61389
170			-1.54483	2.59277
180			-1.56987	2.60758



No. O2（防爆壁のみ）　　No. A1（ウレタン1面）

図5-9a　最大過圧と換算距離（補間直線 $Z < 1.93$ m/kg$^{1/3}$, 11.59 m/kg$^{1/3} < Z$の範囲は外挿）

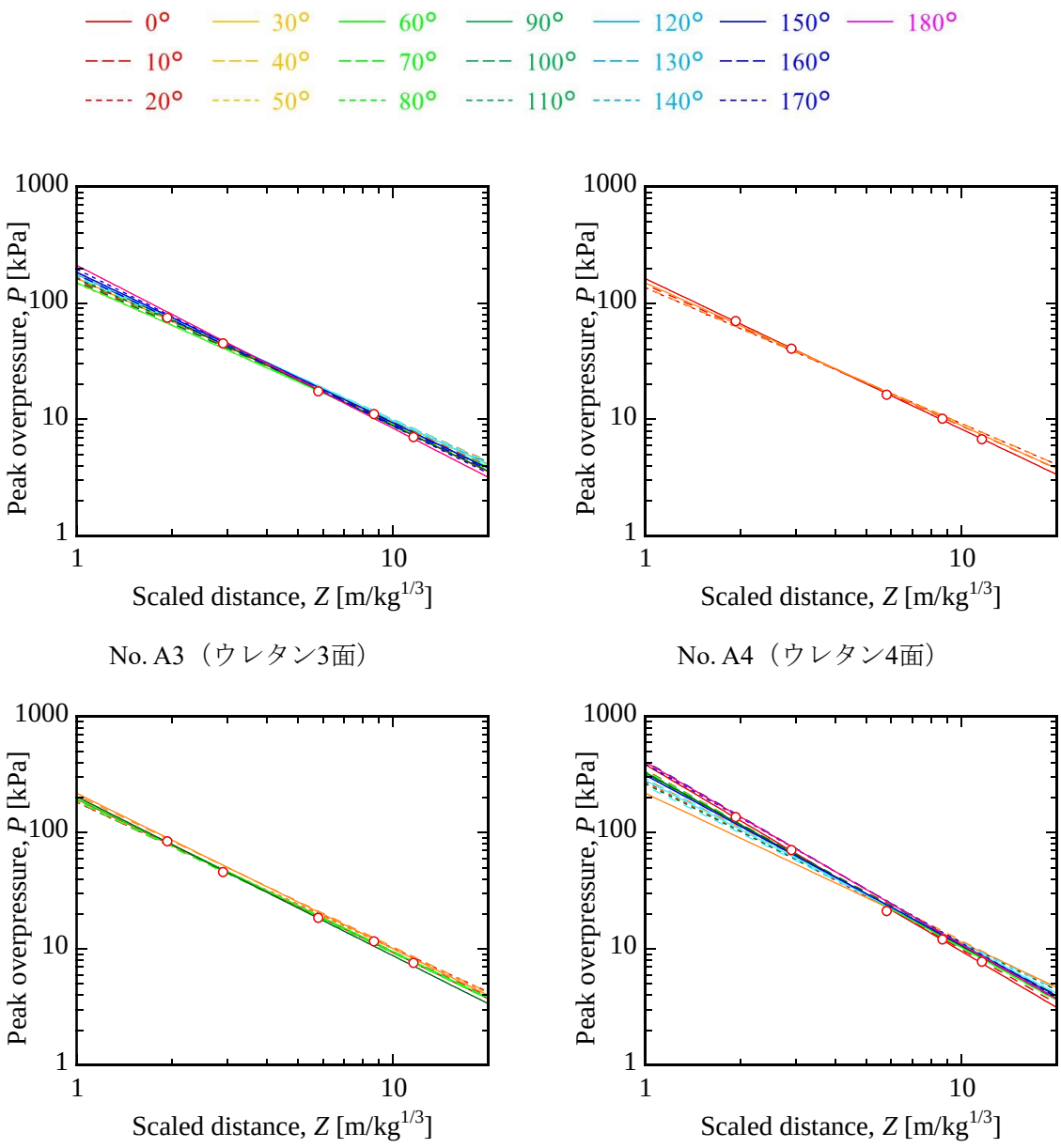
※ 0°方向のみ測定値を白抜きの丸印で示した。



No. A2（ウレタン2面、L型）

図5-9b　最大過圧と換算距離（補間直線 $Z < 1.93$ m/kg$^{1/3}$, 11.59 m/kg$^{1/3} < Z$の範囲は外挿）

※ 0º方向のみ測定値を白抜きの丸印で示した。



No. A3（ウレタン3面）　　No. A4（ウレタン4面）

No. A5（ウレタン2面、II型）　　No. B（コの字障壁）

図5-9c　最大過圧と換算距離（補間直線 $Z < 1.93$ m/kg$^{1/3}$, 11.59 m/kg$^{1/3} < Z$の範囲は外挿）

※ 0°方向のみ測定値を白抜きの丸印で示した。

5.4.2　正圧相インパルスと換算距離

最大過圧と同様、両対数グラフ上では、換算距離 Z が 1.93 ~ 11.59 m/kg$^{1/3}$ の範囲において正圧相インパルス I も直線とみなせる。いずれの角度についても、正圧相インパルスが換算距離の 1 次式

$$\log_{10} I = a_0 + a_1 \log_{10} Z \qquad \text{eq. 7}$$

で表されるとし、5 つの測定点（換算距離 1.93, 2.90, 5.79, 8.69, 11.59 m/kg$^{1/3}$）から補間直線を作成した（図 5-10a～c）。図 5-10a～c の正圧相インパルスは表 5-7a～d から抽出した。係数 a_0, a_1 の値は表 5-11a ~ d に整理した。なお Z < 1.93 m/kg$^{1/3}$, 11.59 m/kg$^{1/3}$ < Z の範囲は外挿である。

表5-11a　補間直線 eq. 7の係数

角度 θ[°]	No. O2		No. A1	
	防爆壁のみ		ウレタン1面	
	a_1	a_0	a_1	a_0
0	-0.90393	1.26989	-0.83174	1.16213
10	-0.88863	1.25054	-0.86026	1.18163
20			-0.85666	1.17476
30			-0.85765	1.18091
40			-0.86480	1.17995
50			-0.87451	1.19049
60			-0.85818	1.17960
70			-0.85633	1.17694
80			-0.85924	1.15895
90			-0.85990	1.16772
100			-0.87602	1.18709
110			-0.89944	1.23044
120			-0.91970	1.25859
130			-0.93622	1.27286
140			-0.93188	1.27838
150			-0.91212	1.27159
160			-0.90234	1.25833
170			-0.87504	1.22594
180			-0.86942	1.22662

表5-11b　補間直線 eq. 7の係数

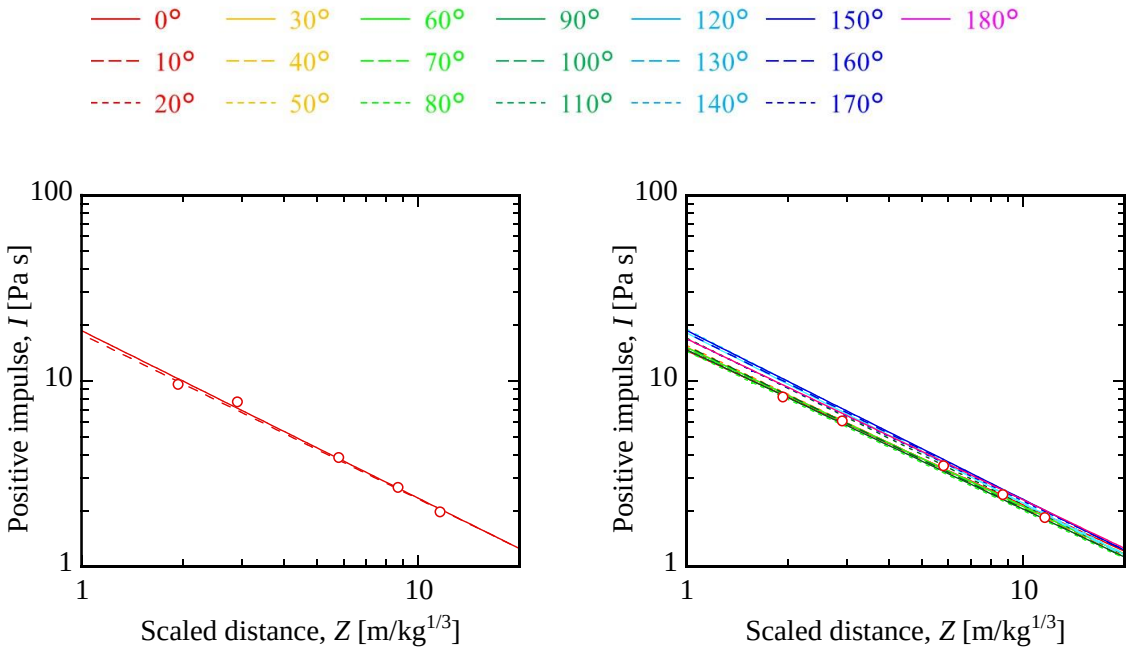
角度 θ[°]	No. A2	
	ウレタン2面（II型）	
	a_1	a_0
50	-0.88607	1.14170
60	-0.84312	1.10581
70	-0.85897	1.11653
80	-0.84269	1.11359
90	-0.83642	1.10804
100	-0.86494	1.13172
110	-0.86663	1.14865
120	-0.87750	1.16068
130	-0.88670	1.17609
140	-0.88535	1.19068
150	-0.87593	1.17832
160	-0.86047	1.16632
170	-0.87477	1.19463
180	-0.87007	1.18141
190	-0.88272	1.19555
200	-0.92295	1.24152
210	-0.93040	1.23988
220	-0.96310	1.27266

表5-11c　補間直線 eq. 7の係数

角度 θ[°]	No. A3 ウレタン3面		No. A4 ウレタン4面（II型）	
	a_1	a_0	a_1	a_0
0	-0.85898	1.09737	-0.84369	1.07254
10	-0.83758	1.07858	-0.89289	1.10784
20	-0.86192	1.09249	-0.87933	1.08267
30	-0.89228	1.13028	-0.89615	1.10894
40	-0.89522	1.13500	-0.85246	1.06508
50	-0.86417	1.08923		
60	-0.85500	1.09282		
70	-0.83121	1.06967		
80	-0.83438	1.07994		
90	-0.83734	1.09506		
100	-0.82731	1.08559		
110	-0.87411	1.13118		
120	-0.88122	1.15089		
130	-0.88421	1.14595		
140	-0.89131	1.14423		
150	-0.89417	1.15250		
160	-0.86080	1.10980		
170	-0.85084	1.11176		
180	-0.85502	1.11944		

表5-11d　補間直線 eq. 7の係数

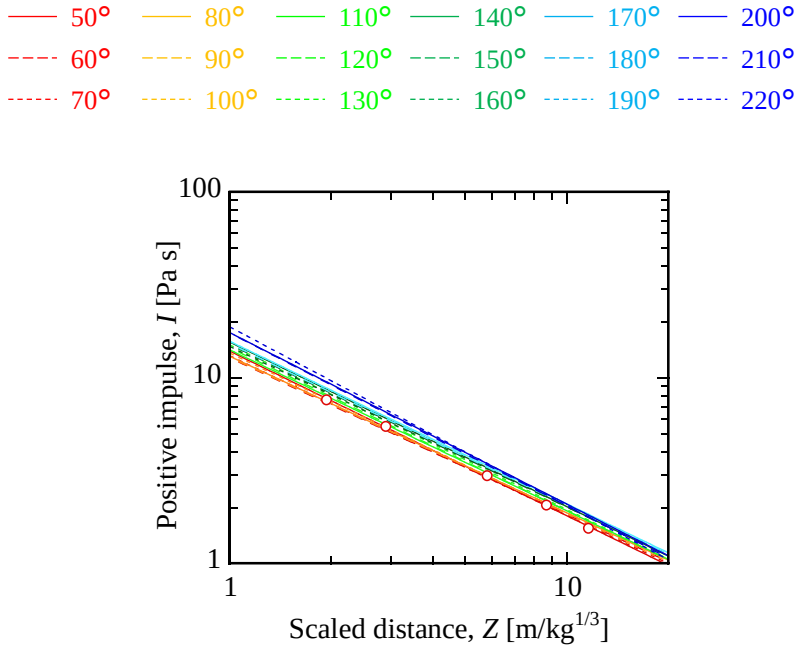
角度 θ[°]	No. A5 ウレタン2面（II型）		No. B コの字障壁	
	a_1	a_0	a_1	a_0
0	-0.84013	1.13047	-0.76049	1.11924
10	-0.86093	1.13497	-0.78987	1.13260
20	-0.90004	1.18079	-0.84546	1.18405
30	-0.92460	1.21171	-0.87976	1.23671
40	-0.95134	1.22189	-0.87180	1.23827
50	-0.89283	1.15734	-0.88246	1.26210
60	-0.86845	1.13678	-0.81765	1.20916
70	-0.83180	1.09036	-0.79087	1.17450
80	-0.84405	1.10762	-0.84337	1.22490
90	-0.84957	1.11678	-0.84395	1.23215
100			-0.89300	1.26963
110			-0.84355	1.23690
120			-0.84250	1.26107
130			-0.86683	1.28419
140			-0.86224	1.29739
150			-0.87248	1.31673
160			-0.89067	1.32641
170			-0.89828	1.32528
180			-0.88292	1.31997



No. O2（防爆壁のみ）　　No. A1（ウレタン1面）

図5-10a　正圧相インパルスと換算距離（補間直線 $Z < 1.93$ m/kg$^{1/3}$, 11.59 m/kg$^{1/3} < Z$の範囲は外挿）

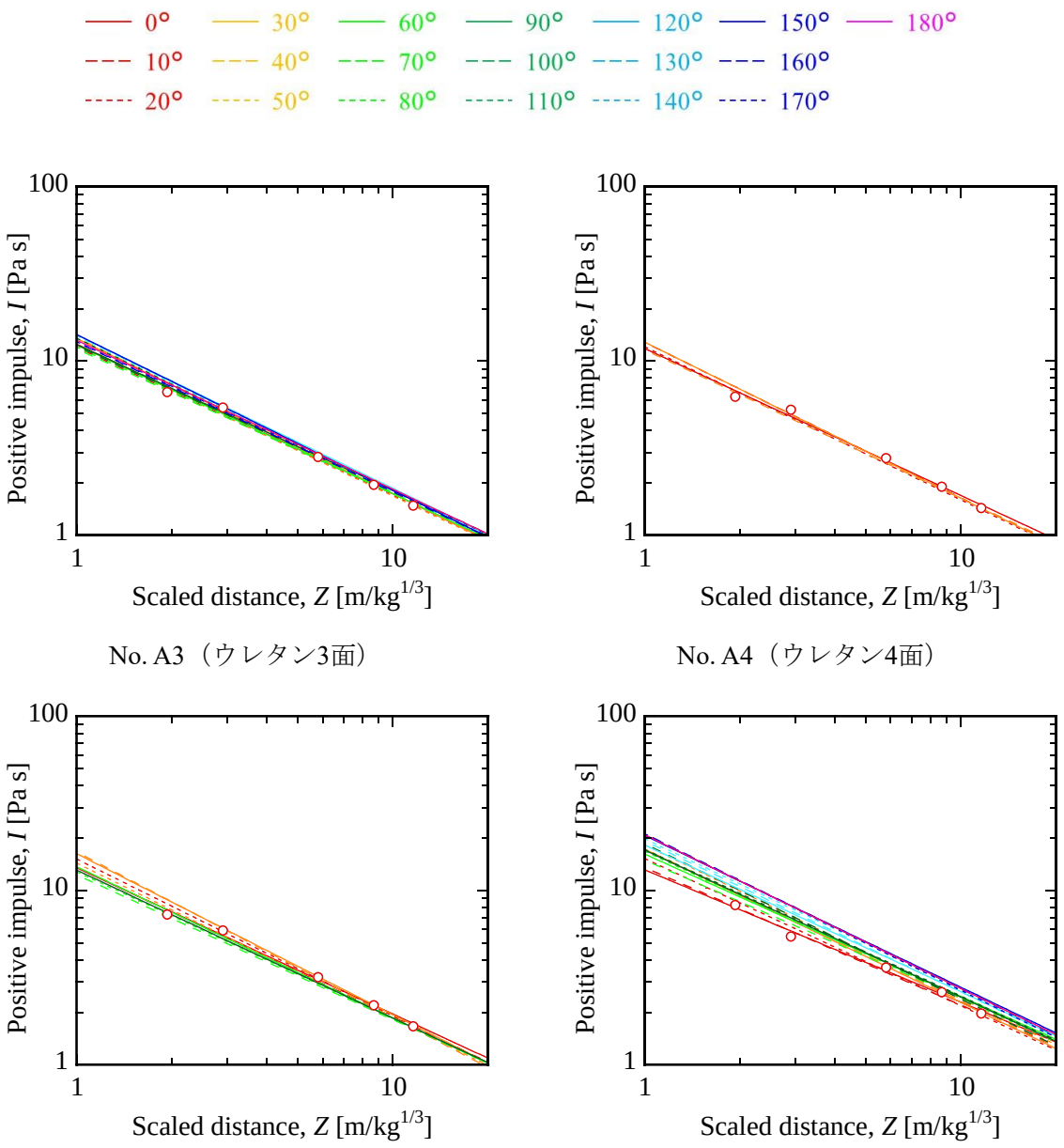
※ 0°方向のみ測定値を白抜きの丸印で示した。



No. A2（ウレタン2面、L型）

図5-10b　正圧相インパルスと換算距離（補間直線 $Z < 1.93$ m/kg$^{1/3}$, 11.59 m/kg$^{1/3} < Z$の範囲は外挿）

※ 0º方向のみ測定値を白抜きの丸印で示した。



No. A3（ウレタン3面）

No. A4（ウレタン4面）

No. A5（ウレタン2面、II型）

No. B（コの字障壁）

図5-10c　正圧相インパルスと換算距離（補間直線 $Z < 1.93$ m/kg$^{1/3}$, 11.59 m/kg$^{1/3} < Z$の範囲は外挿）

※ 0º方向のみ測定値を白抜きの丸印で示した。

5.5 検討 2 – 最大過圧と角度

5.5.1 最大過圧

実験 No. A1 ~ A5, B の結果を、地表面爆発や過去の結果と比較することで、ウレタンフォームおよびコの字障壁の設置の影響について検討する。これらの実験で得られた最大過圧 P について、0º、90º、180º 方向の換算距離に対する分布を図 5-11a ~ g に示した。対応する野外実験および R01、R02 年度室内実験の結果を併記する。

また、P をθの関数とみて図 5-12a, b に整理した。図 5-13a, b に地表面爆発の最大過圧の平均値 P_0 との比（P/P_0）をθの関数として示した。0º、90º、180º 方向の P/P_0 を換算距離ごとに表 5-12a ~ e に整理し、図 5-14a ~ g に示した。P は表 5-6a ~ d から、P_0 は表 5-4 から抽出して用いた。

No. O2, A4 は 45º で対称のため、90º、180º、270º のプロットは 0º のものを用いた。同様に、No. A1, A3 は 180º で対称のため、270º のプロットは 90º のものを用いた。No. A2 は 45º で対称のため、0º のプロットは 90º のものを用いた。No. A5 は 90º で対称のため、180º のプロットは 0º のものを、270º のプロットは 90º のものを用いた。

(a) 防爆壁のみ

No. O2 の最大過圧は、同一条件で実施した R01 年度 No. A、R02 年度 No. A0 とよく一致した。そのため、爆風パラメータの角度依存性を考察する際には、R01 年度 No. A を参考に用いる。一方で、野外実験実験 No. 2-2 との比較では、室内実験で取得した最大過圧は野外実験よりも大きかった。

この原因は、漏斗孔の生成の他に、爆薬高さの影響が挙げられる。野外実験で使用した爆薬頂部の高さは基準防爆壁の高さの 57%であるのに対し、PETN/C ペレット 2 つを縦に接合して使用した No. O2 では 68%であり、さらにその上に雷管が置かれた。そのため、爆薬が基準防爆壁を見上げる角度が小さくなり、基準防爆壁を超えてくる爆風が強くなった。

防爆壁のみの 0°方向の最大過圧は、爆点近傍で地表面爆発よりも減少し、遠方で地表面爆発と同等か上回った。

(b) ウレタン

No. A1 より、ウレタンを 1 面に配置した場合には、
・0°方向：防爆壁のみ、R02 年度の低密度ウレタンよりも減少し、全域で地表面爆発と同等か下回る。
・90°方向：防爆壁のみ、R02 年度の低密度ウレタンよりも減少し、全域で地表面爆発を下回る。
・180°方向：防爆壁と同等であり、遠方で地表面爆発を上回った。ただし、遠方での増加の程度は R02 年度の低密度ウレタンよりも小さい。

No. A2 より、ウレタンを 1 面（L 型）に配置した場合には、
・0°（90°）方向：防爆壁よりも減少し、全域で地表面爆発を下回る。
・180°方向：防爆壁よりも減少し、全域で地表面爆発と同等か下回る。

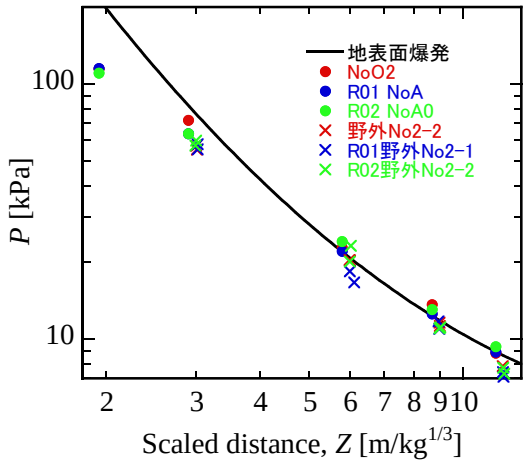
No. A3 より、ウレタンを 3 面に配置した場合には、
・0°方向：全域で地表面爆発、防爆壁のみを下回る。遠方では R02 年度の低密度ウレタンよりも大きく減少。
・90°方向：全域で地表面爆発、防爆壁のみを下回る。遠方では R02 年度の低密度ウレタンよりも大きく減少。
・180°方向：全域で地表面爆発、防爆壁のみを下回る。遠方では R02 年度の低密度ウレタンよりも大きく減少。

No. A4 より、ウレタンを 4 面に配置した場合には、
・0°方向：全域で地表面爆発、防爆壁のみ、R02 年度の低密度ウレタンのすべてを下回る。

No. A5 より、ウレタンを 2 面（II 型）に配置した場合には、
・0°方向：全域で地表面爆発、防爆壁のみを下回る。遠方では R02 年度の低密度ウレタンよりも大きく減少。
・90°方向：全域で地表面爆発、防爆壁のみを下回る。遠方では R02 年度の低密度ウレタンよりも大きく減少。

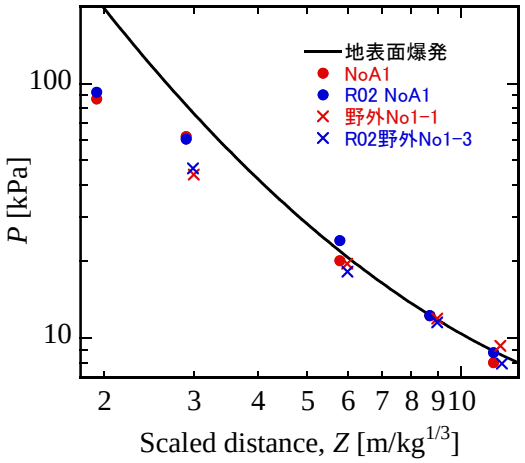
(c) コの字障壁

No. B より、コの字障壁を防爆壁に対して 45 度傾けて設置した場合には、
・0°方向：近傍で防爆壁のみを上回り、中距離では防爆壁のみと同等。遠方では地表面爆発、防爆壁のみを下回る。R01 年度のコの字障壁（防爆壁と平行に設置）と同等か下回る。
・90°方向：換算距離 2.90 $m/kg^{1/3}$ で防爆壁のみを上回るが、それ以外の地点では防爆壁のみと同等程度。遠方では R01 年度のコの字障壁（防爆壁と平行に設置）と同等程度。
・180°方向：全域で防爆壁のみを上回る。R01 年度のコの字障壁（防爆壁と平行に設置）と比較して、近傍では上回り、遠方では同等。

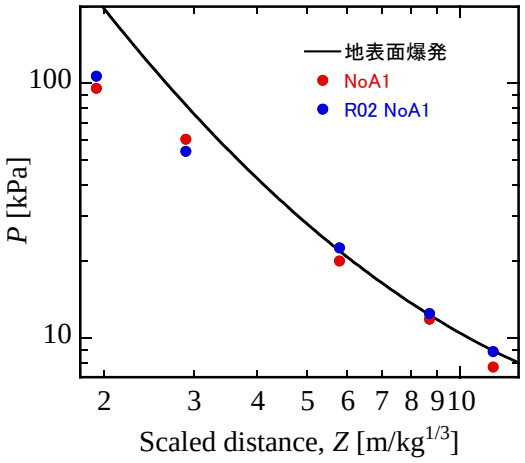


0°方向

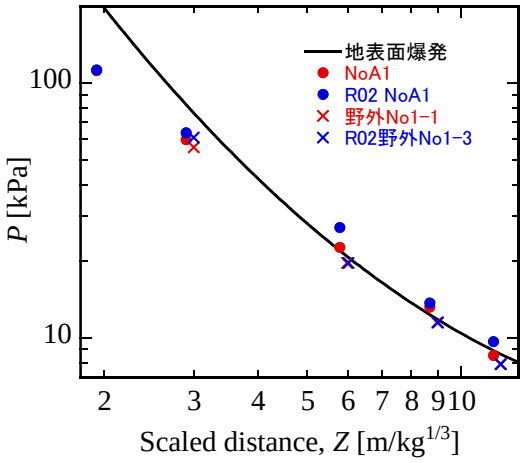
図5-11a　換算距離とP（防爆壁のみ）



0°方向

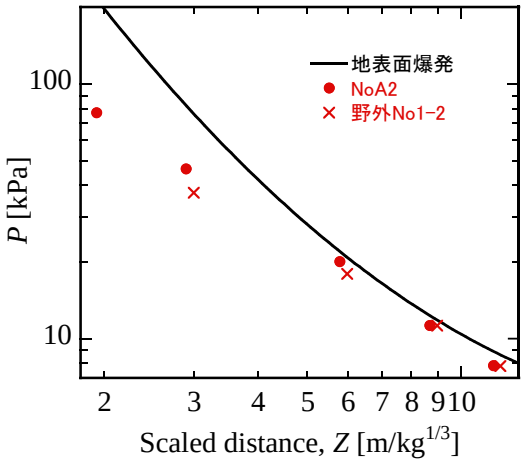


90°方向

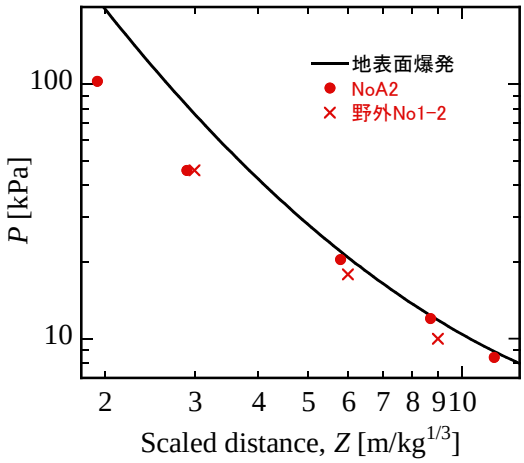


180°方向

図5-11b　換算距離とP（ウレタン1面）

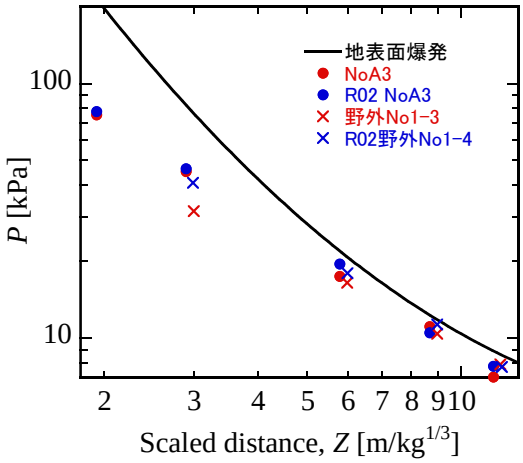


0º（90º）方向

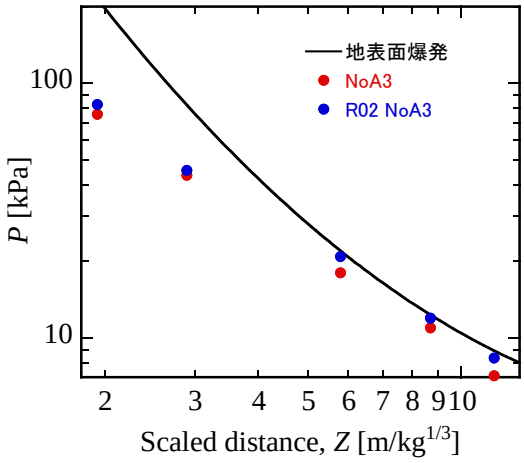


180º方向

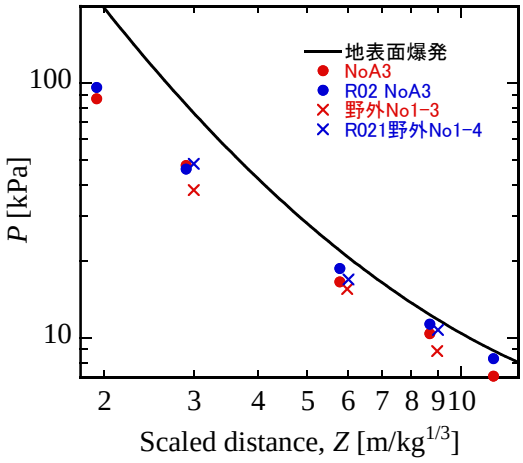
図5-11c　換算距離とP（ウレタン2面（L型））



0º方向

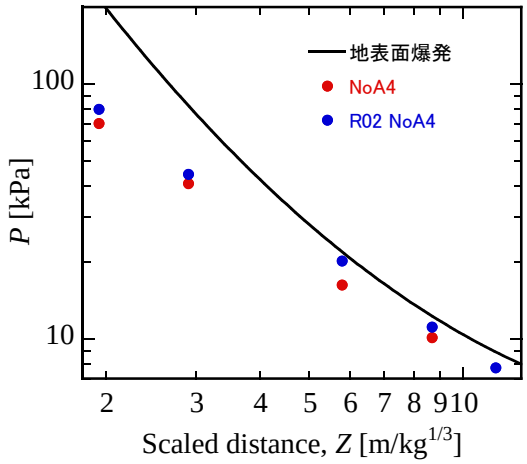


90º方向



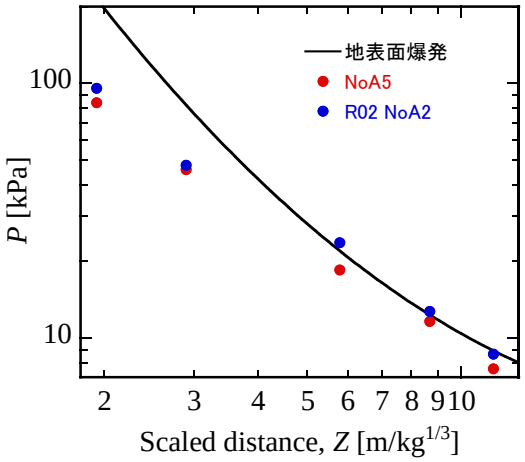
180º方向

図5-11d　換算距離とP（ウレタン3面）

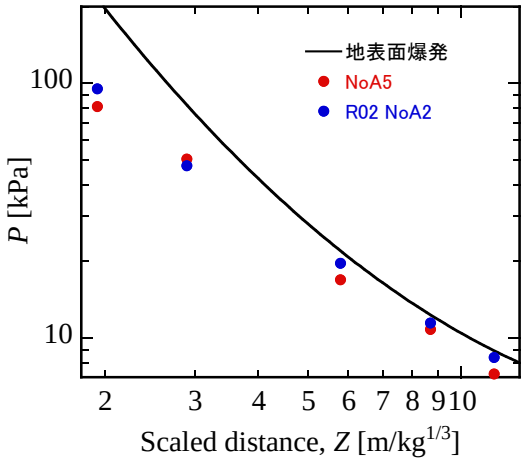


0º方向

図5-11e　換算距離とP（ウレタン4面）

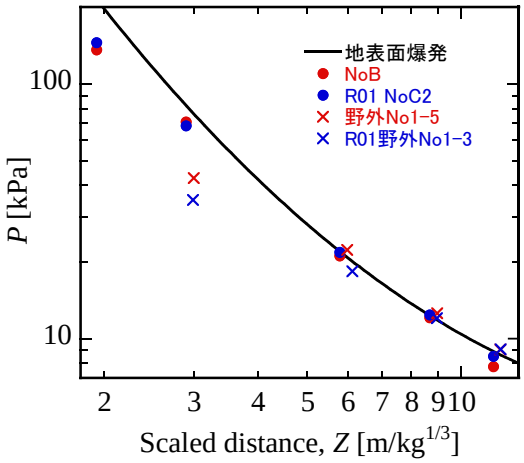


0º方向

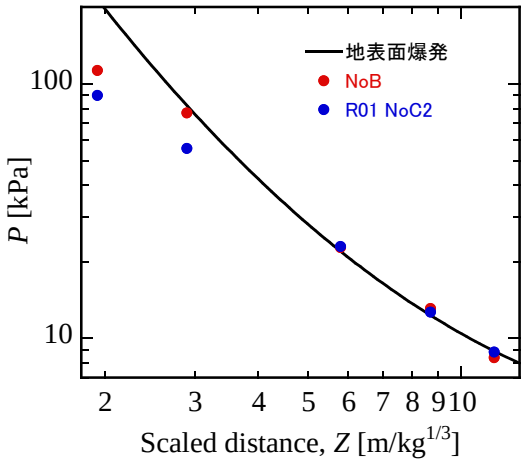


90º方向

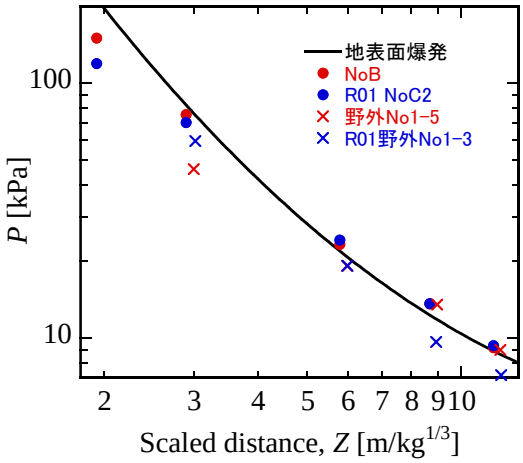
図5-11f　換算距離とP（ウレタン2面（II型））



0º方向



90º方向



180º方向

図5-11g　換算距離とP（コの字障壁）

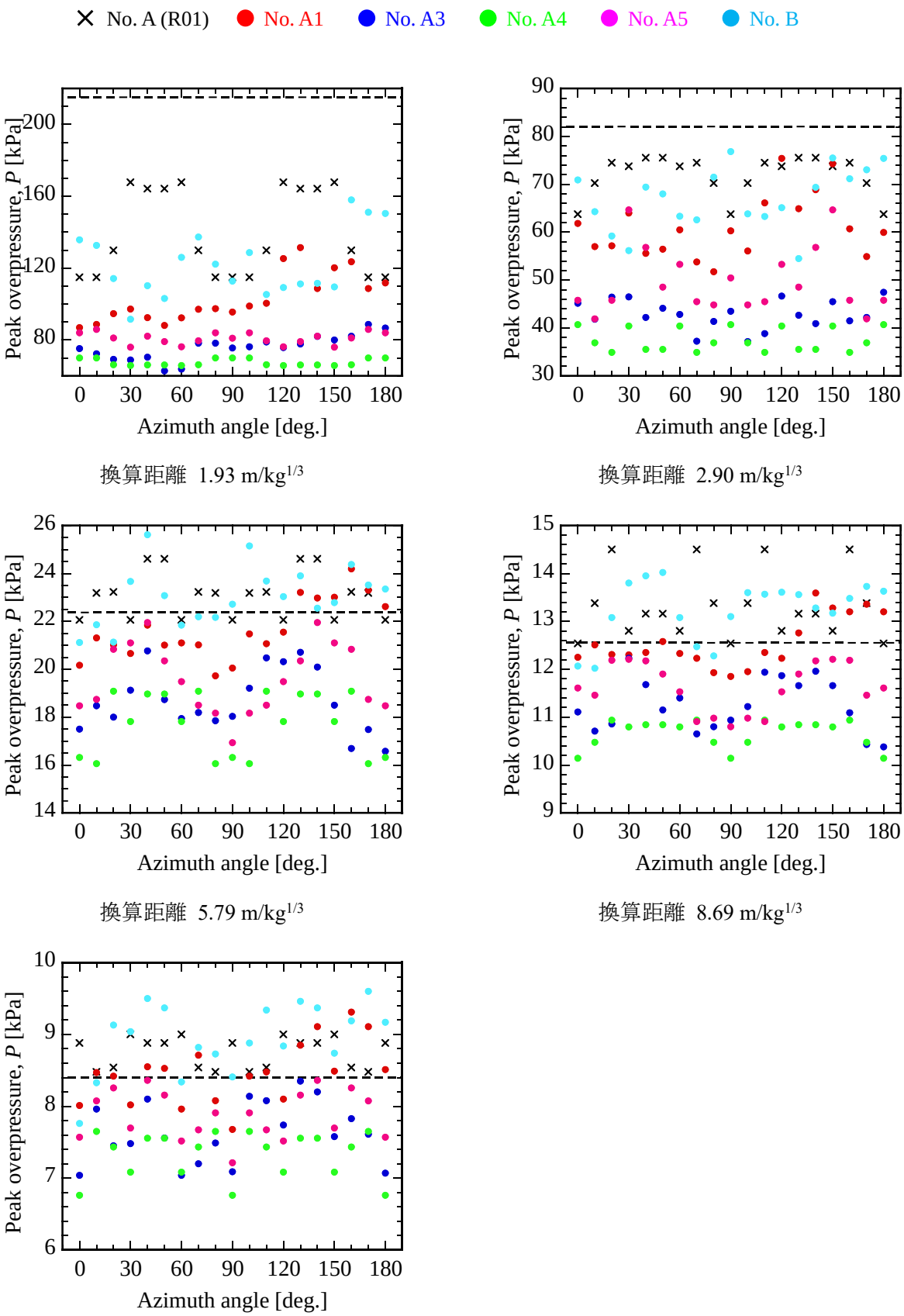


図5-12a　*P*の角度分布（No. A2以外、破線は地表面爆発）

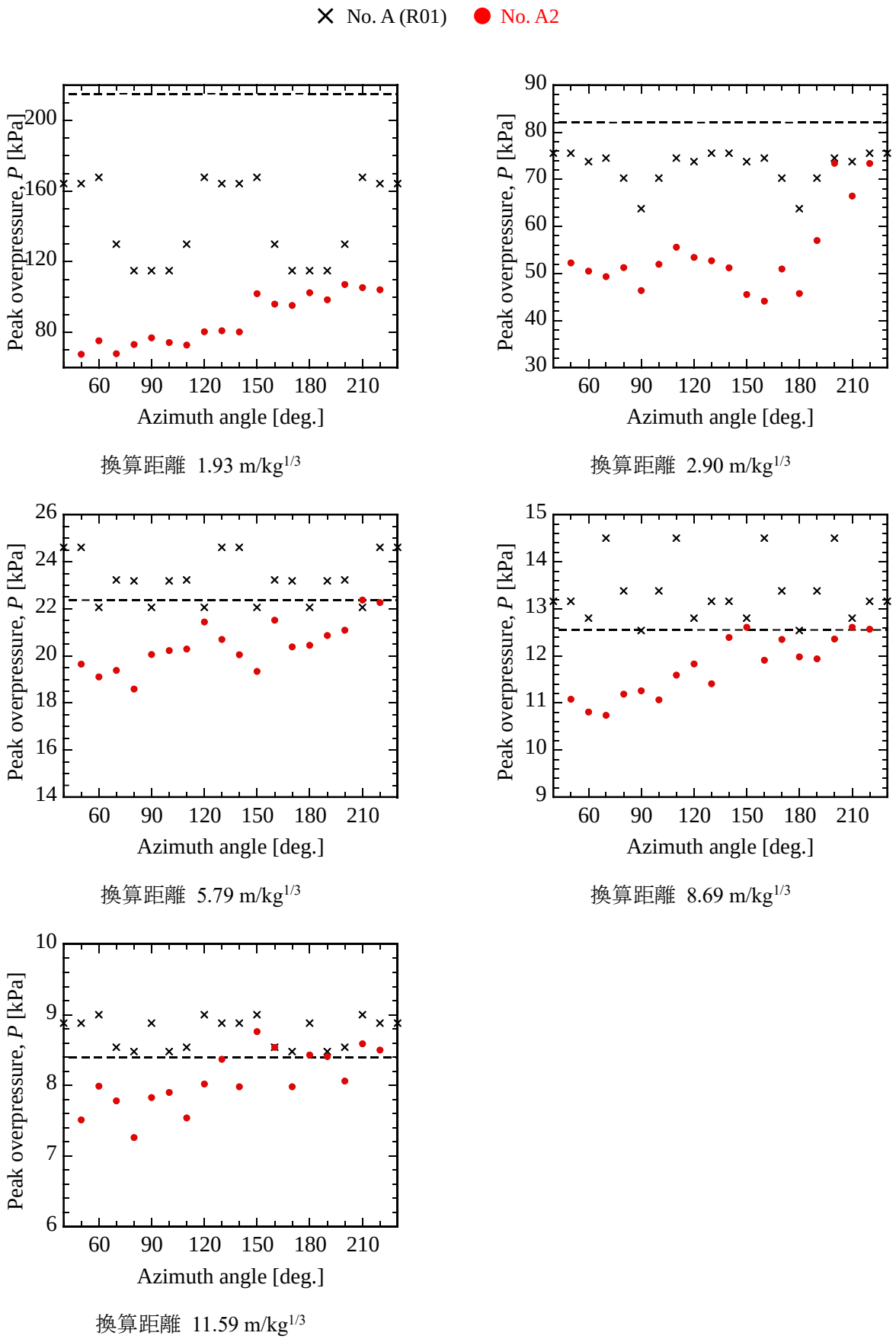


図5-12b　*P*の角度分布（No. A2、破線は地表面爆発）

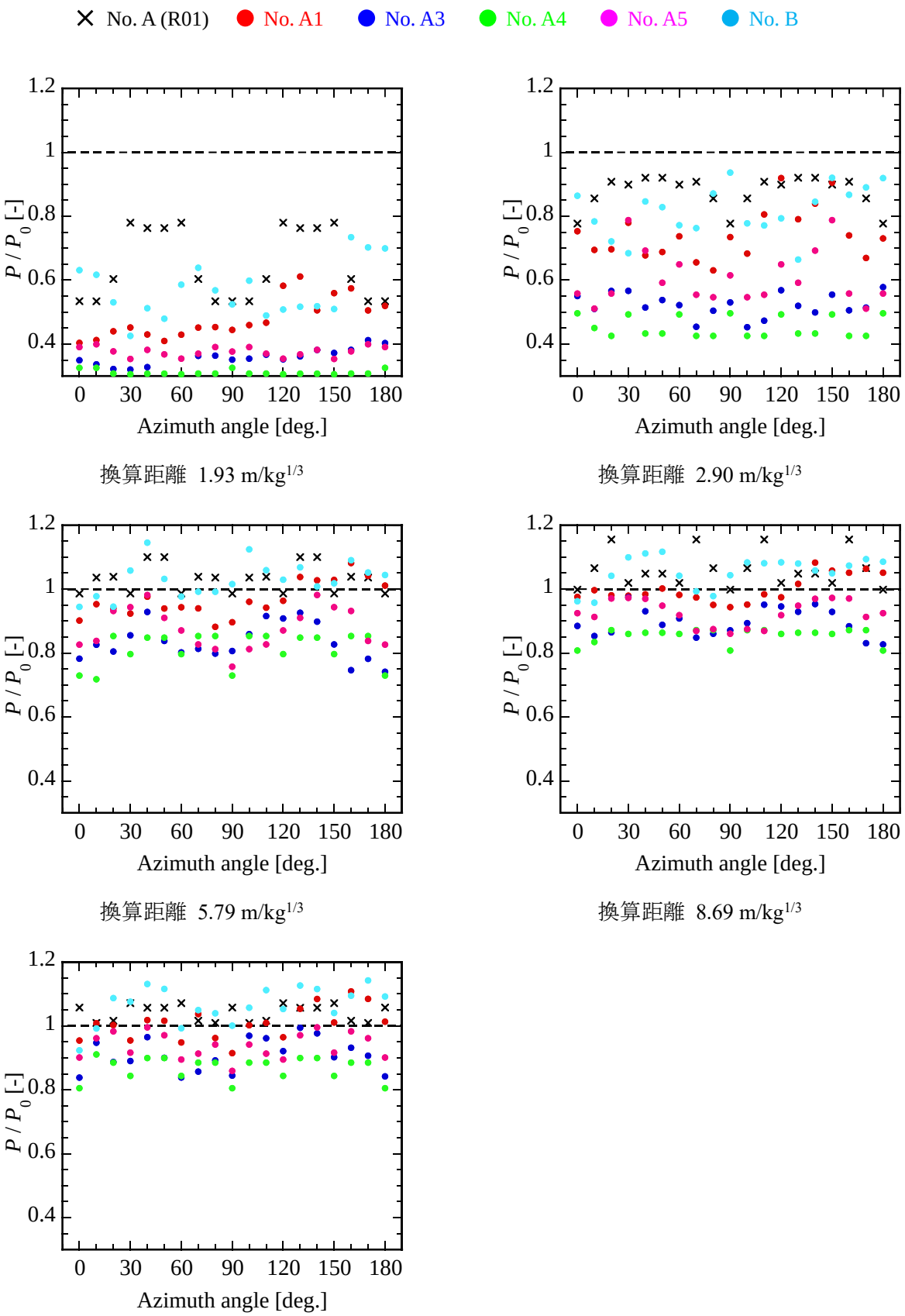
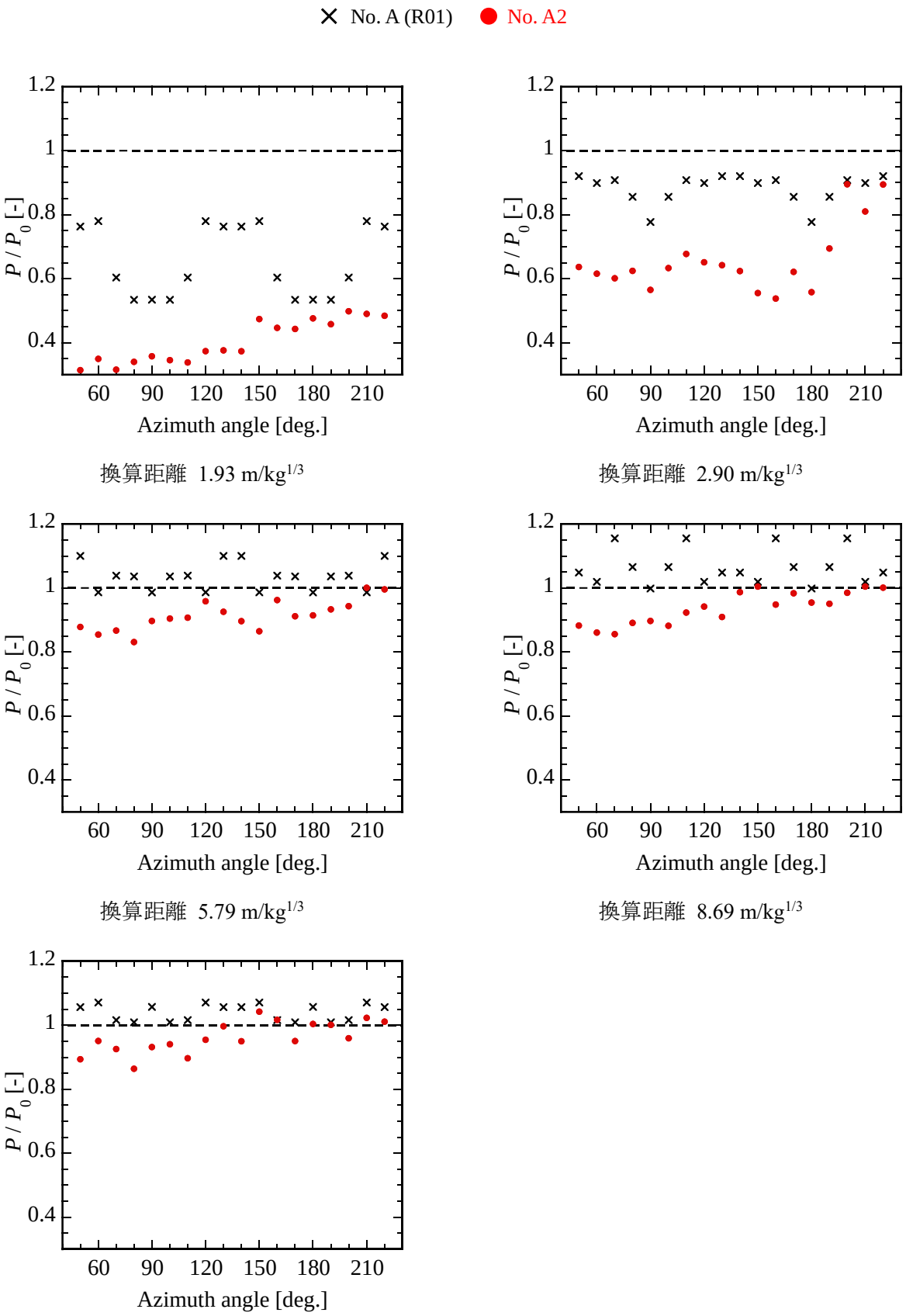


図5-13a　P/P_0の角度分布（No. A2以外、破線は地表面爆発）



換算距離 1.93 m/kg$^{1/3}$

換算距離 2.90 m/kg$^{1/3}$

換算距離 5.79 m/kg$^{1/3}$

換算距離 8.69 m/kg$^{1/3}$

換算距離 11.59 m/kg$^{1/3}$

図5-13b　P/P_0の角度分布（No. A2、破線は地表面爆発）

表5-12a　P/P_0

換算距離 [m/kg$^{1/3}$]	No. O2	R01年度No. A	R02年度No. A0
	防爆壁のみ	防爆壁のみ	防爆壁のみ
	0º	0º	0º
1.93	0.5325	0.5344	0.5128
2.90	0.8776	0.7773	0.7775
5.79	1.0173	0.9864	1.0780
8.69	1.0857	0.9987	1.0392
11.59	1.0473	1.0575	1.1109

表5-12b　P/P_0

換算距離 [m/kg$^{1/3}$]	No. A1			No. A2		No. A3		
	ウレタン1面			ウレタン2面（L型）		ウレタン3面		
	0º	90º	180º	90º	180º	0º	90º	180º
1.93	0.4039	0.4446	0.5196	0.3577	0.4762	0.3497	0.3514	0.4031
2.90	0.7534	0.7348	0.7309	0.5651	0.5578	0.5503	0.5305	0.5784
5.79	0.9017	0.8965	1.0112	0.8971	0.9144	0.7823	0.8064	0.7413
8.69	0.9758	0.9437	1.0513	0.8968	0.9544	0.8850	0.8712	0.8268
11.59	0.9542	0.9149	1.0135	0.9319	1.0041	0.8384	0.8446	0.8419

表5-12c　P/P_0

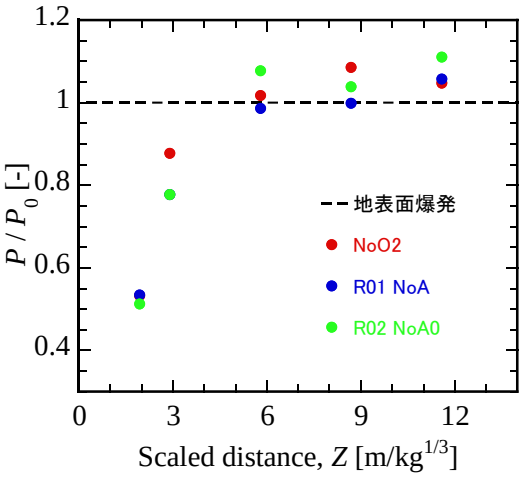
換算距離 [m/kg$^{1/3}$]	No. A4	No. A5		No. B		
	ウレタン4面	ウレタン2面（II型）		コの字障壁		
	0º	0º	90º	0º	90º	180º
1.93	0.3256	0.3906	0.3765	0.6313	0.5243	0.6995
2.90	0.4963	0.5582	0.6151	0.8642	0.9367	0.9194
5.79	0.7294	0.8263	0.7573	0.9443	1.0158	1.0441
8.69	0.8079	0.9248	0.8603	0.9618	1.0436	1.0859
11.59	0.8051	0.9012	0.8590	0.9237	1.0009	1.0922

表5-12d　P/P_0

換算距離 [m/kg$^{1/3}$]	No. A1 (R02)			No. A2 (R02)		No. A3 (R02)		
	ウレタン1面（低密度）			ウレタン2面（II型）（低密度）		ウレタン3面（低密度）		
	0º	90º	180º	90º	180º	0º	90º	180º
1.93	0.4300	0.4966	0.5234	0.4444	0.4431	0.3608	0.3843	0.4468
2.90	0.7370	0.6587	0.7779	0.5819	0.5780	0.5639	0.5548	0.5595
5.79	1.0798	1.0098	1.2105	1.0581	0.8790	0.8734	0.9323	0.8374
8.69	0.9774	0.9925	1.0911	1.0126	0.9125	0.8356	0.9542	0.9015
11.59	1.0451	1.0524	1.1490	1.0275	0.9970	0.9224	0.9929	0.9861

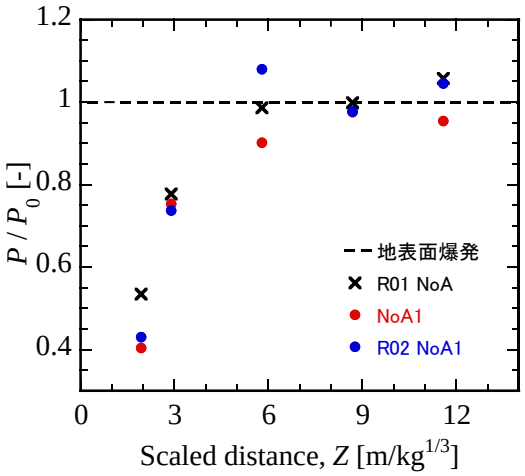
表5-12e　P/P_0

換算距離 [m/kg$^{1/3}$]	No. A4 (R02)	No. C2 (R01)		
	ウレタン4面（低密度）	コの字障壁（防爆壁と平行）		
	0º	0º	90º	180º
1.93	0.3701	0.6746	0.4186	0.5559
2.90	0.5391	0.8329	0.6795	0.8557
5.79	0.9061	0.9762	1.0269	1.0864
8.69	0.8875	0.9868	1.0096	1.0883
11.59	0.9197	1.0147	1.0512	1.1141

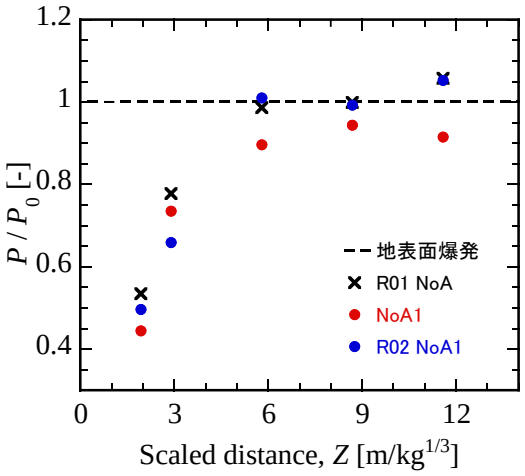


0°方向

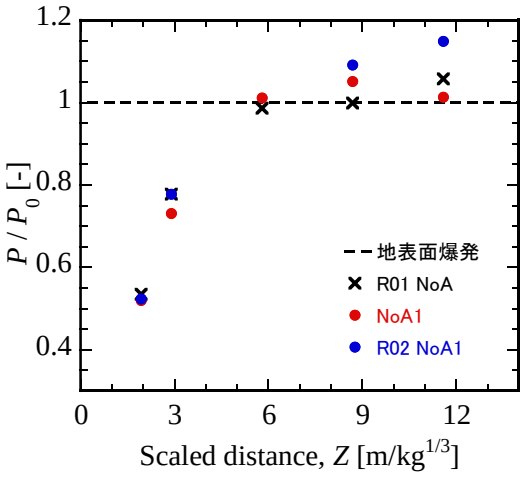
図5-14a　換算距離とP/P_0（防爆壁のみ）



0°方向

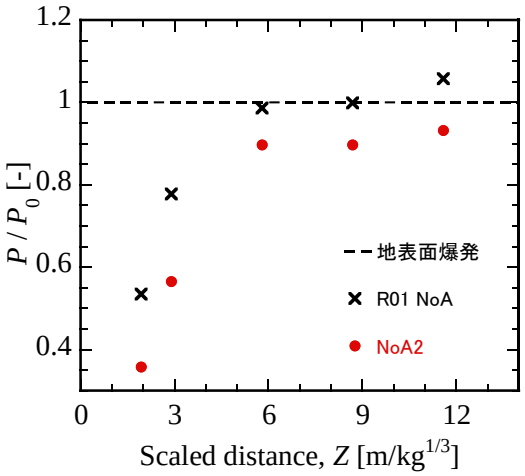


90°方向

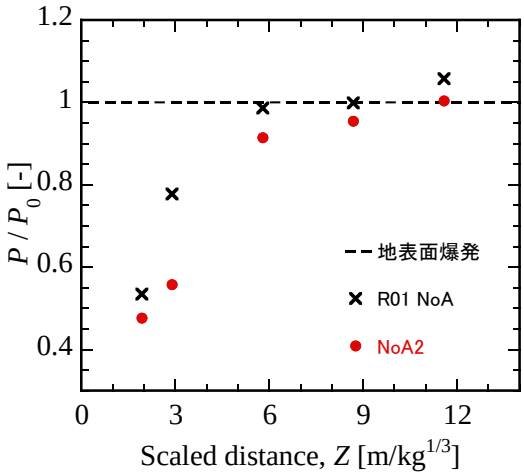


180°方向

図5-14b　換算距離とP/P_0（ウレタン1面）

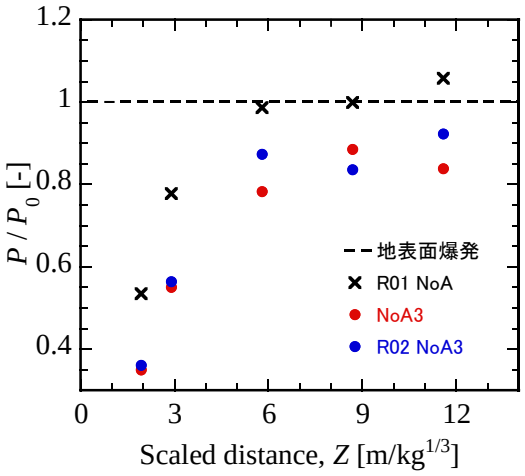


0º（90º）方向

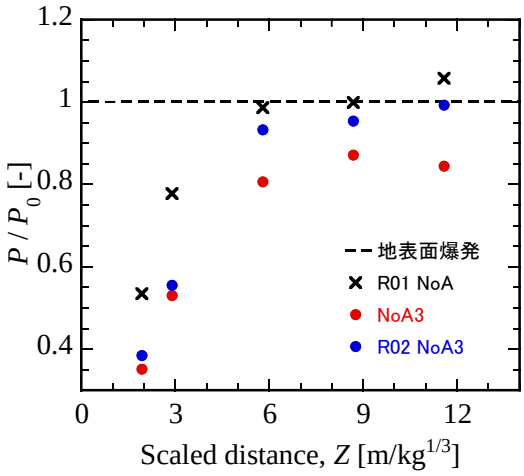


180º方向

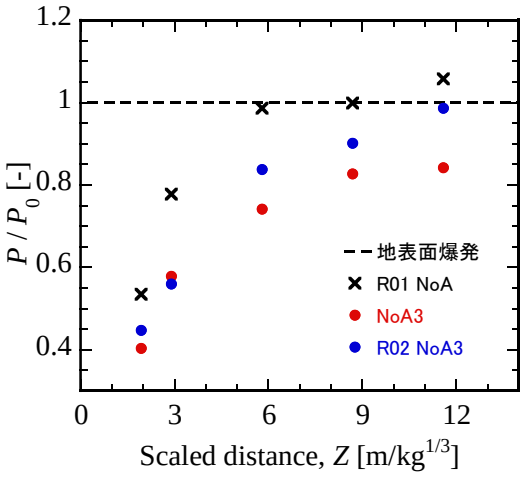
図5-14c　換算距離とP/P_0（ウレタン2面（L型））



0º方向

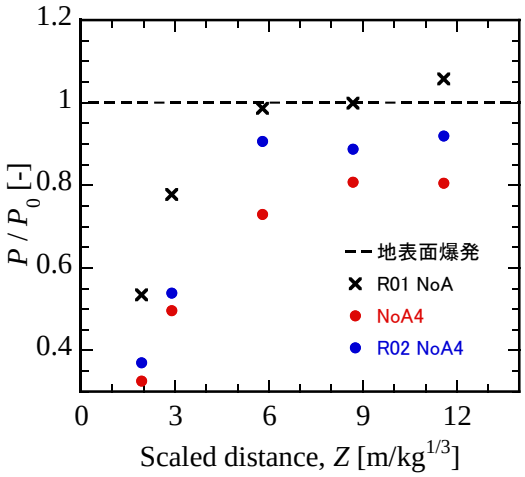


90º方向



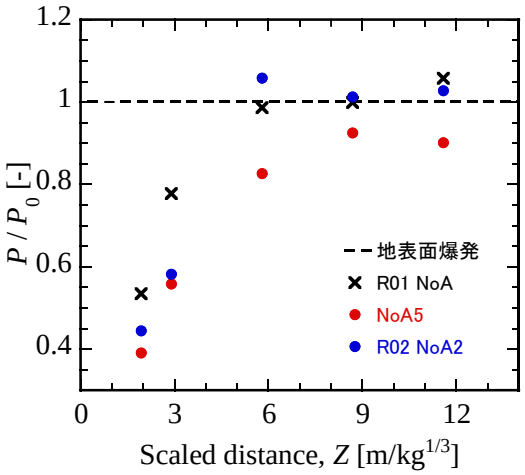
180º方向

図5-14d　換算距離とP/P_0（ウレタン3面）

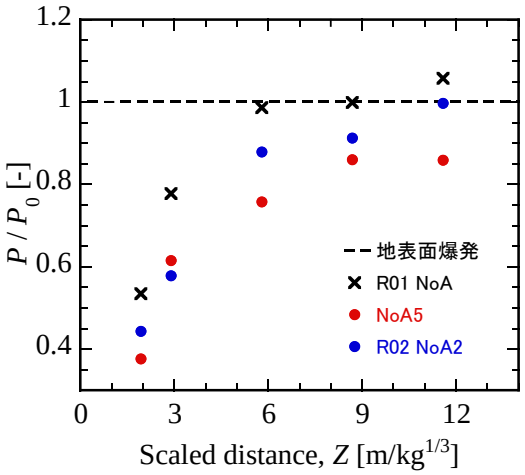


0º方向

図5-14e　換算距離とP/P_0（ウレタン4面）

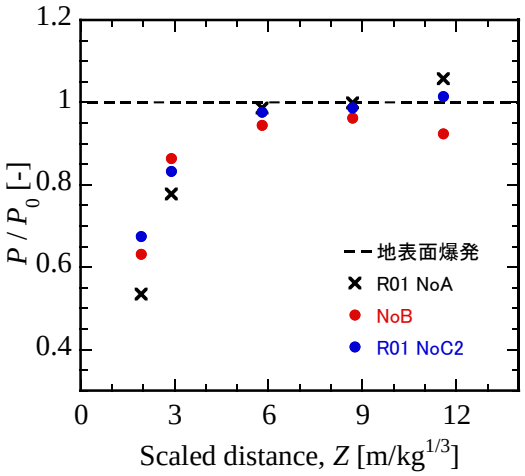


0º方向

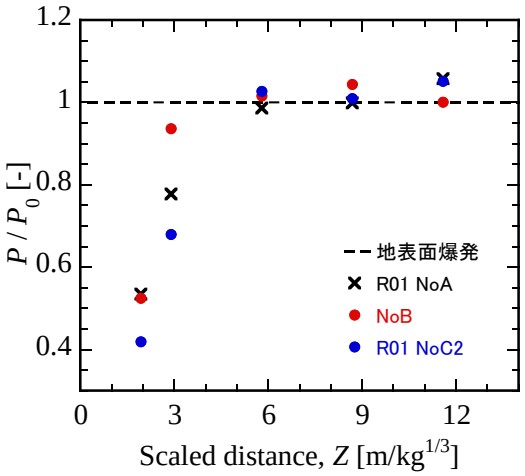


90º方向

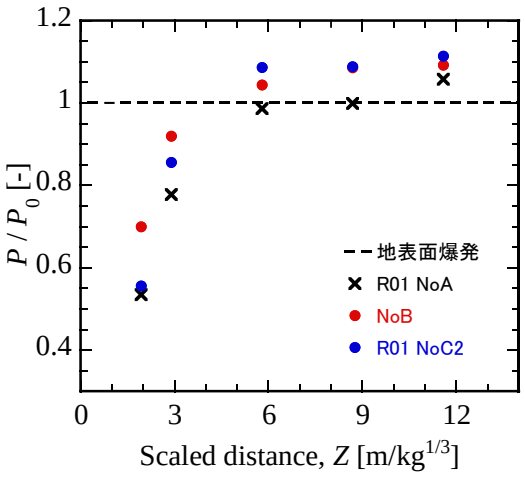
図5-14f　換算距離とP/P_0（ウレタン2面（II型））



0º方向



90º方向



180º方向

図5-14g　換算距離とP/P_0（コの字障壁）

5.5.2　等圧線

eq. 6 を変形して得られる eq. 8 の関係から、最大過圧 P に対応する換算距離 Z が求められる。

$$Z = 10^{\frac{\log_{10} P - a_0}{a_1}} \qquad \text{eq. 8}$$

表 5-4 に示す最大過圧を 5 種の基準圧力とし、各々の角度 θ について基準圧力と同等の最大過圧が生じる換算距離 Z を求め表 5-13a ~ d に整理した。同様に、野外実験については表 5-13e ~ g に、令和元年度および令和 2 年度の室内実験結果については表 5-13h ~ k に、令和元年度および令和 2 年度の野外実験結果については表 5-13l ~ n に示した。等圧線は、対応する野外実験の結果と比較して図 5-15a ~ e に、過去の室内実験の結果と比較して図 5-16a, b に示した。

測定点の間は、Z を θ の関数とみなし eq. 9 に示す 3 次の自然スプライン $Z(\theta)$で補間した。スプラインの節点は、19 個の測定点に θ = –30º, –20º, –10º, 190º, 200º の 6 点を加えた 25 点とした。

$$Z = a_0 + a_1\theta + \sum_{n=3}^{21} c_n(\theta + 10n)_+^3 \qquad \text{eq. 9}$$

$$\text{ただし、} \begin{cases} \theta^3 & (\theta \geq 0 \text{のとき}) \\ 0 & (\theta < 0 \text{のとき}) \end{cases}$$

ただし、No. A2 の場合には、50º ~ 220º の 18 個の測定点に θ = 20º, 30º, 40º, 230º, 240º, 250º の 6 点を加えた 24 点とした。No. A2 の 3 次の自然スプライン $Z(\theta)$を eq. 10 に示す。

$$Z = a_0 + a_1\theta + \sum_{n=3}^{20} c_n(\theta + 10n)_+^3 \qquad \text{eq. 10}$$

$$\text{ただし、} \begin{cases} \theta^3 & (\theta \geq 0 \text{のとき}) \\ 0 & (\theta < 0 \text{のとき}) \end{cases}$$

スプライン係数の一覧は表 5-14a ~ l に示した。

図 5-15a ~ e から等圧線を選別し、表面爆発と同等の最大過圧が生じる換算距離の角度依存性について、今年度の室内実験と過去の対応する室内実験を比較したものが図 5-17a ~ e である。

各実験における換算距離毎の等圧線の特徴を述べる。

・No. A1
爆点近傍では 0º ~ 90º 方向の最大過圧の減少が大きいが、遠方では同等程度となる。180º 方向では地表面爆発と同等以上となる。

・No. A2
-45º ~ 135º 方向の最大過圧が減少し、地表面爆発を下回る。爆点近傍では 225º 方向で増加する。

・No. A3
全角度で最大過圧が減少、または地表面爆発と同等程度となる。特に 0º ~ 90º 方向、180º 方向で減少する。

・No. A4
全角度で最大過圧が減少する。

・No. A5
全角度で最大過圧が減少、または地表面爆発と同等程度となる。遠方では 0º、90º 方向の最大過圧が減少するが、減少する角度の範囲は 90º 方向でより大きい。

・No. B
爆点近傍では最大過圧が減少するが、遠方では全角度で最大過圧が増加する。

爆風に対する安全確保の観点から等圧線図を眺めると、等圧線の外側が安全区画に相当する。たとえば、第四種保安物件（国道や高圧電線などが該当）に対する火薬庫の場合は、換算距離 3 m/kg$^{1/3}$ に相当する円が境界となる（境界となる円は図示されていない）。同様に第三種保安物件、第二種保安物件、第一種保安物件に対しては、換算距離 6, 9, 12 m/kg$^{1/3}$ に相当する円が境界となる（同上）。今年度の室内実験で、保安物件の換算距離に対応するのは、2.90, 5.79, 8.69, 11.59 m/kg$^{1/3}$ である。これらの換算距離を基準とするとき、それぞれの等圧線について、前方（0º ~ 90º 方向）の全域で基準となる換算距離を下回るものは以下のとおりであった。

・82.1 kPa 等圧線（換算距離 2.90 m/kg$^{1/3}$ 相当）：No. A1, No. A2, No. A3, No. A4, No. A5, No. B
・22.4 kPa 等圧線（換算距離 5.79 m/kg$^{1/3}$ 相当）：No. A1, No. A2, No. A3, No. A4, No. A5
・12.6 kPa 等圧線（換算距離 8.69 m/kg$^{1/3}$ 相当）：No. A2, No. A3, No. A4, No. A5
・8.4 kPa 等圧線（換算距離 11.59 m/kg$^{1/3}$ 相当）：No. A2, No. A3, No. A4

本年度の室内実験と野外実験とを比較し、以下のことを述べる。

・防爆壁のみの場合
0º、180º 方向では、野外実験と室内実験は比較的よく一致している。
45º、135º 方向では、爆点近傍では室内実験のほうが最大過圧を大きく評価しているが、遠方では室内実験のほうが最大過圧を小さく評価している。
・ウレタン 1 面の場合
0º、45º 方向では、爆点近傍では野外実験と室内実験は比較的近い値をとっているが、遠方では室内実験のほうが最大過圧を小さく評価している。
135º 方向では、室内実験のほうが最大過圧を大きく評価している。
180º 方向では、野外実験と室内実験は比較的よく一致している。
・ウレタン 2 面（L 型）の場合
0º 方向では、野外実験と室内実験は比較的よく一致している。
45º 方向では、室内実験のほうが最大過圧を小さく評価している。
135º、180º 方向では、室内実験のほうが最大過圧を大きく評価している。
・ウレタン 3 面の場合
0º 方向の遠方を除き、室内実験のほうが最大過圧を大きく評価している。
・コの字障壁の場合
0º、45º、180º 方向では、爆点近傍では室内実験のほうが最大過圧を大きく評価しているが、遠方では室内実験のほうが最大過圧を小さく評価している。
135º 方向では、爆点近傍では室内実験と野外実験は良く一致しているが、遠方では室内実験のほうが最大過圧を大きく評価している。

室内実験と野外実験では全体的な角度依存性は定性的にも一致していない。結果の乖離の原因は、5.3.1、5.3.2 で指摘した事項の他に、防爆壁が変形・破壊される影響や、ウレタンフォームの物性がスケール化されていないことが可能性として挙げられる。実環境を正確に模擬するためには、薄い金属板などで防爆壁を模擬し、ウレタンフォームの物性のスケール化も考慮する必要がある。

本年度の室内実験を過去の室内実験の結果と比較し、ウレタンの密度の違い、コの字障壁の設置方

向に関し、以下のことを述べる。

・ウレタン 1 面の場合
高密度ウレタンの場合には、低密度ウレタンに比べて、ほとんどの角度、距離で最大過圧を小さく評価している。ただし、爆点近傍の 30º 方向、遠方の 140º、160º 方向では、高密度ウレタンのほうが最大過圧を大きく評価している。全体的な角度依存性は定性的に一致している。
・ウレタン 3 面の場合
高密度ウレタンの場合には、低密度ウレタンに比べて、すべての角度、距離で最大過圧を小さく評価している。低密度ウレタンの場合には、遠方で地表面爆発を上回る角度が現れる。一方、高密度ウレタンの場合には、すべての角度、距離で地表面爆発を下回った。全体的な角度依存性は定性的に一致している。
・ウレタン 4 面の場合
高密度ウレタンの場合には、低密度ウレタンに比べて、すべての角度、距離で最大過圧を小さく評価している。低密度ウレタンの場合には、遠方で地表面爆発を上回る角度が現れる。一方、高密度ウレタンの場合には、すべての角度、距離で地表面爆発を下回った。全体的な角度依存性は定性的に一致している。
・ウレタン 2 面（II 型）の場合
高密度ウレタンの場合には、低密度ウレタンに比べて、すべての角度、距離で最大過圧を小さく評価している。全体的な角度依存性は定性的に一致している。
・コの字障壁の場合
コの字障壁を防爆壁に対して 45 度傾けて設置した場合には、防爆壁に並行に設置した場合に比べて、すべての角度、距離で最大過圧を大きく評価している。防爆壁に並行に設置した場合には、すべての角度、距離で地表面爆発を下回った。一方、45 度傾けて設置した場合には、遠方の大半の角度で地表面爆発を上回った。全体的な角度依存性は定性的に一致している。

表5-13a　基準圧力を与える換算距離（No. O2, No. A1）

角度 θ[°]	No. O2					No. A1				
	ウレタン1面					ウレタン1面				
	換算距離 Z [m/kg$^{1/3}$]					換算距離 Z [m/kg$^{1/3}$]				
	215.1 kPa	82.1 kPa	22.4 kPa	12.6 kPa	8.4 kPa	215.1 kPa	82.1 kPa	22.4 kPa	12.6 kPa	8.4 kPa
0	1.29	2.50	6.11	9.07	11.95	1.06	2.15	5.54	8.45	11.33
10	1.26	2.47	6.15	9.22	12.22	1.02	2.11	5.62	8.67	11.73
20						1.07	2.17	5.63	8.59	11.53
30						1.16	2.27	5.66	8.49	11.25
40						1.04	2.14	5.65	8.69	11.73
50						1.01	2.10	5.61	8.68	11.76
60						1.10	2.20	5.60	8.49	11.34
70						1.05	2.15	5.63	8.63	11.62
80						1.06	2.13	5.46	8.29	11.09
90						1.13	2.22	5.51	8.26	10.94
100						1.10	2.20	5.63	8.54	11.42
110						1.18	2.32	5.78	8.67	11.49
120						1.40	2.60	5.94	8.59	11.09
130						1.35	2.56	6.07	8.91	11.63
140						1.23	2.43	6.10	9.18	12.20
150						1.36	2.57	6.09	8.94	11.68
160						1.26	2.47	6.12	9.16	12.13
170						1.12	2.28	5.94	9.08	12.21
180						1.20	2.37	5.90	8.85	11.74

表5-13b　基準圧力を与える換算距離（No. No. A2）

角度 θ[°]	No. A2				
	ウレタン2面（L型）				
	換算距離 Z [m/kg$^{1/3}$]				
	215.1 kPa	82.1 kPa	22.4 kPa	12.6 kPa	8.4 kPa
50	0.85	1.82	5.07	7.99	10.96
60	0.89	1.88	5.14	8.03	10.95
70	0.83	1.78	5.02	7.96	10.96
80	0.90	1.88	5.05	7.84	10.65
90	0.87	1.86	5.14	8.08	11.08
100	0.90	1.90	5.20	8.15	11.12
110	0.92	1.93	5.24	8.16	11.11
120	0.95	2.00	5.40	8.41	11.44
130	0.94	1.98	5.38	8.38	11.42
140	0.92	1.95	5.35	8.37	11.44
150	1.00	2.06	5.50	8.50	11.52
160	0.97	2.02	5.45	8.48	11.52
170	1.04	2.11	5.48	8.37	11.25
180	1.03	2.09	5.47	8.39	11.29
190	1.10	2.20	5.62	8.51	11.36
200	1.28	2.45	5.83	8.58	11.23
210	1.21	2.38	5.89	8.82	11.68
220	1.25	2.43	5.93	8.82	11.62

表5-13c　基準圧力を与える換算距離（No. A3, No. A4）

角度 θ[°]	No. A3 ウレタン3面 換算距離 Z [m/kg$^{1/3}$]					No. A4 ウレタン4面 換算距離 Z [m/kg$^{1/3}$]				
	215.1 kPa	82.1 kPa	22.4 kPa	12.6 kPa	8.4 kPa	215.1 kPa	82.1 kPa	22.4 kPa	12.6 kPa	8.4 kPa
0	0.87	1.82	4.91	7.62	10.35	0.81	1.70	4.63	7.22	9.85
10	0.79	1.72	4.92	7.85	10.86	0.72	1.60	4.63	7.44	10.35
20	0.82	1.76	4.91	7.74	10.64	0.68	1.54	4.68	7.66	10.80
30	0.80	1.75	5.05	8.07	11.20	0.75	1.63	4.70	7.52	10.43
40	0.76	1.71	5.08	8.26	11.57	0.68	1.55	4.69	7.68	10.83
50	0.73	1.63	4.84	7.85	10.98					
60	0.74	1.64	4.76	7.65	10.64					
70	0.82	1.74	4.80	7.54	10.32					
80	0.85	1.79	4.91	7.68	10.49					
90	0.86	1.81	4.90	7.63	10.38					
100	0.76	1.68	4.95	7.99	11.14					
110	0.79	1.76	5.11	8.22	11.44					
120	0.86	1.85	5.18	8.19	11.25					
130	0.82	1.80	5.20	8.32	11.55					
140	0.84	1.82	5.18	8.26	11.42					
150	0.89	1.87	5.09	7.95	10.84					
160	0.86	1.81	4.95	7.74	10.56					
170	0.93	1.91	4.99	7.65	10.30					
180	0.99	1.97	4.97	7.50	9.98					

表5-13d　基準圧力を与える換算距離（No. A5, No. B）

角度 θ[°]	No. A5 ウレタン2面（II型） 換算距離 Z [m/kg$^{1/3}$]					No. B コの字障壁（防爆壁に対し45度） 換算距離 Z [m/kg$^{1/3}$]				
	215.1 kPa	82.1 kPa	22.4 kPa	12.6 kPa	8.4 kPa	215.1 kPa	82.1 kPa	22.4 kPa	12.6 kPa	8.4 kPa
0	0.92	1.92	5.13	7.94	10.77	1.44	2.62	5.88	8.41	10.80
10	0.88	1.87	5.13	8.04	10.99	1.37	2.54	5.90	8.57	11.11
20	0.88	1.89	5.32	8.43	11.61	1.19	2.35	5.91	8.90	11.84
30	1.01	2.07	5.48	8.44	11.40	1.01	2.14	5.89	9.24	12.63
40	0.98	2.05	5.55	8.64	11.75	1.24	2.47	6.29	9.53	12.72
50	0.89	1.90	5.29	8.34	11.45	1.17	2.37	6.13	9.35	12.55
60	0.93	1.94	5.20	8.07	10.94	1.31	2.50	5.94	8.73	11.41
70	0.89	1.87	5.05	7.85	10.68	1.36	2.56	6.00	8.76	11.41
80	0.91	1.89	5.09	7.90	10.73	1.35	2.54	6.00	8.79	11.46
90	0.96	1.94	5.02	7.65	10.26	1.33	2.53	6.05	8.90	11.65
100						1.33	2.55	6.18	9.16	12.04
110						1.16	2.35	6.08	9.28	12.45
120						1.21	2.40	6.03	9.08	12.07
130						1.12	2.30	6.03	9.25	12.47
140						1.24	2.45	6.11	9.17	12.16
150						1.29	2.50	6.07	9.02	11.87
160						1.51	2.78	6.34	9.15	11.81
170						1.47	2.75	6.38	9.27	12.02
180						1.50	2.77	6.33	9.14	11.81

表5-13e　基準圧力を与える換算距離（野外実験No. 1-3, No. 1-4）

角度 θ[°]	野外実験No. 1-1 ウレタン1面 換算距離 Z [m/kg$^{1/3}$]					野外実験No. 1-2 ウレタン2面（L型） 換算距離 Z [m/kg$^{1/3}$]				
	215.1 kPa	82.1 kPa	22.4 kPa	12.6 kPa	8.4 kPa	215.1 kPa	82.1 kPa	22.4 kPa	12.6 kPa	8.4 kPa
0	0.73	1.71	5.36	8.91	12.69	0.64	1.52	4.81	8.03	11.47
45	0.81	1.85	5.57	9.09	12.79	0.48	1.26	4.62	8.24	12.31
135	0.98	2.02	5.37	8.30	11.24	0.94	1.93	5.09	7.84	10.58
180	1.15	2.26	5.65	8.48	11.26	1.01	2.00	5.05	7.61	10.13

表5-13f　基準圧力を与える換算距離（野外実験No. 1-3, No. 1-4）

角度 θ[°]	野外実験No. 1-3 ウレタン3面 換算距離 Z [m/kg$^{1/3}$]					野外実験No. 1-5 コの字障壁 換算距離 Z [m/kg$^{1/3}$]				
	215.1 kPa	82.1 kPa	22.4 kPa	12.6 kPa	8.4 kPa	215.1 kPa	82.1 kPa	22.4 kPa	12.6 kPa	8.4 kPa
0	0.45	1.18	4.28	7.58	11.29	0.74	1.74	5.50	9.17	13.09
45	0.44	1.16	4.22	7.49	11.17	0.41	1.17	4.78	8.92	13.77
135	0.83	1.72	4.57	7.06	9.55	1.21	2.32	5.56	8.21	10.76
180	0.85	1.73	4.50	6.88	9.25	0.78	1.80	5.54	9.13	12.92

表5-13g　基準圧力を与える換算距離（野外実験No. 2-2）

角度 θ[°]	野外実験No. 2-2 防爆壁のみ 換算距離 Z [m/kg$^{1/3}$]				
	215.1 kPa	82.1 kPa	22.4 kPa	12.6 kPa	8.4 kPa
0	1.18	2.31	5.71	8.52	11.26
45	0.80	1.80	5.37	8.74	12.26
135	0.77	1.75	5.28	8.63	12.14
180	1.22	2.33	5.57	8.20	10.74

表5-13h　基準圧力を与える換算距離（R01 No. A, R02 No. A0）

角度 θ[°]	R01 No. A 防爆壁のみ 換算距離 Z [m/kg$^{1/3}$]					R02 No. A0 防爆壁のみ 換算距離 Z [m/kg$^{1/3}$]				
	215.1 kPa	82.1 kPa	22.4 kPa	12.6 kPa	8.4 kPa	215.1 kPa	82.1 kPa	22.4 kPa	12.6 kPa	8.4 kPa
0	1.24	2.42	5.93	8.83	11.66	1.20	2.40	6.08	9.20	12.26
10	1.30	2.50	6.05	8.96	11.77	1.27	2.47	6.08	9.06	11.96
20	1.40	2.65	6.24	9.13	11.90					
30	1.56	2.82	6.23	8.87	11.33					
40	1.57	2.85	6.34	9.04	11.58					

表5-13i　基準圧力を与える換算距離（R02 No. A1, R02 No. A2）

角度 θ[°]	R02 No. A1 ウレタン1面 換算距離 Z [m/kg$^{1/3}$]					R02 No. A2 ウレタン2面（II型） 換算距離 Z [m/kg$^{1/3}$]				
	215.1 kPa	82.1 kPa	22.4 kPa	12.6 kPa	8.4 kPa	215.1 kPa	82.1 kPa	22.4 kPa	12.6 kPa	8.4 kPa
0	1.08	2.21	5.82	8.93	12.04	0.99	2.08	5.66	8.83	12.02
10	1.10	2.23	5.77	8.80	11.80	1.05	2.13	5.59	8.57	11.54
20	1.09	2.22	5.76	8.80	11.81	1.12	2.25	5.73	8.69	11.61
30	1.11	2.28	5.99	9.21	12.41	0.99	2.09	5.73	8.97	12.26
40	1.14	2.29	5.88	8.93	11.96	1.07	2.19	5.76	8.85	11.93
50	1.03	2.14	5.79	9.00	12.23	0.96	2.05	5.65	8.87	12.13
60	1.02	2.15	5.85	9.12	12.43	0.94	2.01	5.57	8.77	12.03
70	1.02	2.12	5.67	8.78	11.90	1.02	2.07	5.37	8.21	11.04
80	1.13	2.26	5.76	8.72	11.63	1.02	2.08	5.39	8.23	11.05
90	1.12	2.25	5.79	8.80	11.78	1.00	2.04	5.37	8.25	11.12
100	1.20	2.36	5.85	8.75	11.58					
110	1.35	2.54	5.94	8.67	11.28					
120	1.41	2.64	6.14	8.93	11.59					
130	1.40	2.63	6.12	8.91	11.56					
140	1.41	2.67	6.32	9.26	12.08					
150	1.36	2.62	6.31	9.33	12.24					
160	1.34	2.57	6.19	9.14	11.99					
170	1.30	2.52	6.16	9.17	12.10					
180	1.21	2.45	6.30	9.59	12.84					

表5-13j　基準圧力を与える換算距離（R02 No. A3, R02 No. A4）

角度 θ[°]	R02 No. A3 ウレタン3面 換算距離 Z [m/kg$^{1/3}$]					R02 No. A4 ウレタン4面 換算距離 Z [m/kg$^{1/3}$]				
	215.1 kPa	82.1 kPa	22.4 kPa	12.6 kPa	8.4 kPa	215.1 kPa	82.1 kPa	22.4 kPa	12.6 kPa	8.4 kPa
0	0.89	1.86	5.06	7.89	10.74	0.88	1.86	5.12	8.02	10.96
10	0.88	1.87	5.11	7.99	10.90	0.83	1.80	5.13	8.17	11.29
20	0.85	1.83	5.14	8.14	11.21	0.84	1.81	5.07	8.01	11.01
30	0.83	1.83	5.29	8.49	11.80	0.85	1.85	5.30	8.47	11.72
40	0.82	1.85	5.47	8.87	12.42	0.78	1.78	5.36	8.75	12.31
50	0.93	1.96	5.31	8.27	11.26					
60	0.82	1.79	5.16	8.25	11.44					
70	0.94	1.99	5.43	8.48	11.56					
80	0.92	1.93	5.26	8.21	11.19					
90	0.88	1.90	5.32	8.41	11.57					
100	0.90	1.94	5.49	8.71	12.01					
110	0.92	1.96	5.41	8.50	11.63					
120	1.02	2.12	5.71	8.88	12.06					
130	0.94	2.03	5.80	9.23	12.76					
140	0.94	2.01	5.64	8.93	12.28					
150	0.89	1.95	5.61	8.97	12.43					
160	1.00	2.08	5.53	8.54	11.56					
170	0.99	2.02	5.29	8.11	10.91					
180	0.99	2.02	5.29	8.12	10.93					

表5-13k　基準圧力を与える換算距離（R01 No. C2）

角度 θ[°]	R01 No. C2				
	コの字障壁（防爆壁と平行）				
	換算距離 Z [m/kg$^{1/3}$]				
	215.1 kPa	82.1 kPa	22.4 kPa	12.6 kPa	8.4 kPa
0	0.87	1.82	4.91	7.62	10.35
10	0.79	1.72	4.92	7.85	10.86
20	0.82	1.76	4.91	7.74	10.64
30	0.80	1.75	5.05	8.07	11.20
40	0.76	1.71	5.08	8.26	11.57
50	0.73	1.63	4.84	7.85	10.98
60	0.74	1.64	4.76	7.65	10.64
70	0.82	1.74	4.80	7.54	10.32
80	0.85	1.79	4.91	7.68	10.49
90	0.86	1.81	4.90	7.63	10.38
100	0.76	1.68	4.95	7.99	11.14
110	0.79	1.76	5.11	8.22	11.44
120	0.86	1.85	5.18	8.19	11.25
130	0.82	1.80	5.20	8.32	11.55
140	0.84	1.82	5.18	8.26	11.42
150	0.89	1.87	5.09	7.95	10.84
160	0.86	1.81	4.95	7.74	10.56
170	0.93	1.91	4.99	7.65	10.30
180	0.99	1.97	4.97	7.50	9.98

表5-13l　基準圧力を与える換算距離（R01年度野外実験No. 1-1, No. 2-1）

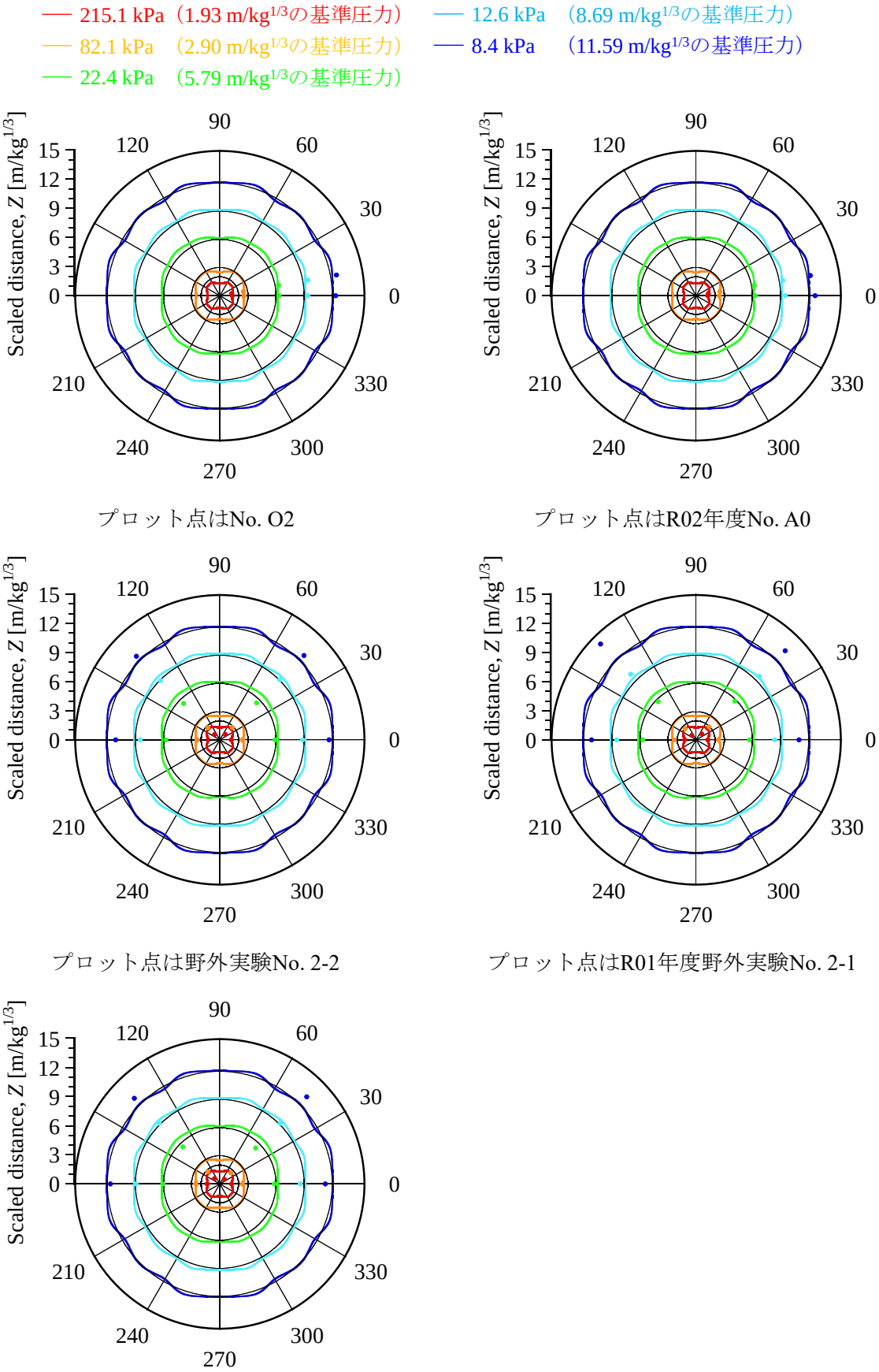
角度 θ[°]	R01年度野外実験No. 1-3 コの字障壁（防爆壁と平行） 換算距離 Z [m/kg$^{1/3}$]					R01年度野外実験No. 2-1 防爆壁のみ 換算距離 Z [m/kg$^{1/3}$]				
	215.1 kPa	82.1 kPa	22.4 kPa	12.6 kPa	8.4 kPa	215.1 kPa	82.1 kPa	22.4 kPa	12.6 kPa	8.4 kPa
0	0.48	1.27	4.81	8.68	13.10	1.20	2.29	5.49	8.09	10.60
45	0.66	1.61	5.36	9.15	13.26	0.82	1.86	5.64	9.21	12.97
135	0.94	1.95	5.22	8.08	10.96	0.65	1.62	5.53	9.55	13.95
180	1.30	2.41	5.52	7.98	10.32	1.17	2.27	5.52	8.19	10.78

表5-13m　基準圧力を与える換算距離（R02年度野外実験No. 1-1, No. 1-3）

角度 θ[°]	R02年度野外実験No. 1-1 コの字障壁（防爆壁と平行） 換算距離 Z [m/kg$^{1/3}$]					R02年度野外実験No. 1-3 低密度ウレタン1面 換算距離 Z [m/kg$^{1/3}$]				
	215.1 kPa	82.1 kPa	22.4 kPa	12.6 kPa	8.4 kPa	215.1 kPa	82.1 kPa	22.4 kPa	12.6 kPa	8.4 kPa
0	0.59	1.45	4.91	8.44	12.30	0.88	1.88	5.26	8.32	11.44
45	0.61	1.51	5.19	8.99	13.16	0.78	1.79	5.47	8.97	12.66
135	0.93	1.94	5.24	8.15	11.07	0.79	1.72	4.98	7.98	11.08
180	1.33	2.49	5.78	8.40	10.89	1.25	2.40	5.77	8.53	11.19

表5-13n　基準圧力を与える換算距離（R02年度野外実験No. 1-4, No. 2-2）

角度 θ[°]	R02年度野外実験No. 1-4 低密度ウレタン3面 換算距離 Z [m/kg$^{1/3}$]					R02年度野外実験No. 2-2 低密度防爆壁のみ 換算距離 Z [m/kg$^{1/3}$]				
	215.1 kPa	82.1 kPa	22.4 kPa	12.6 kPa	8.4 kPa	215.1 kPa	82.1 kPa	22.4 kPa	12.6 kPa	8.4 kPa
0	0.74	1.67	4.98	8.10	11.37	1.22	2.34	5.62	8.29	10.88
45	0.51	1.31	4.58	8.01	11.80	0.67	1.61	5.22	8.81	12.67
135	0.84	1.75	4.70	7.28	9.87	0.77	1.77	5.38	8.83	12.46
180	1.01	2.01	5.14	7.79	10.40	1.30	2.48	5.88	8.63	11.27



プロット点はNo. O2

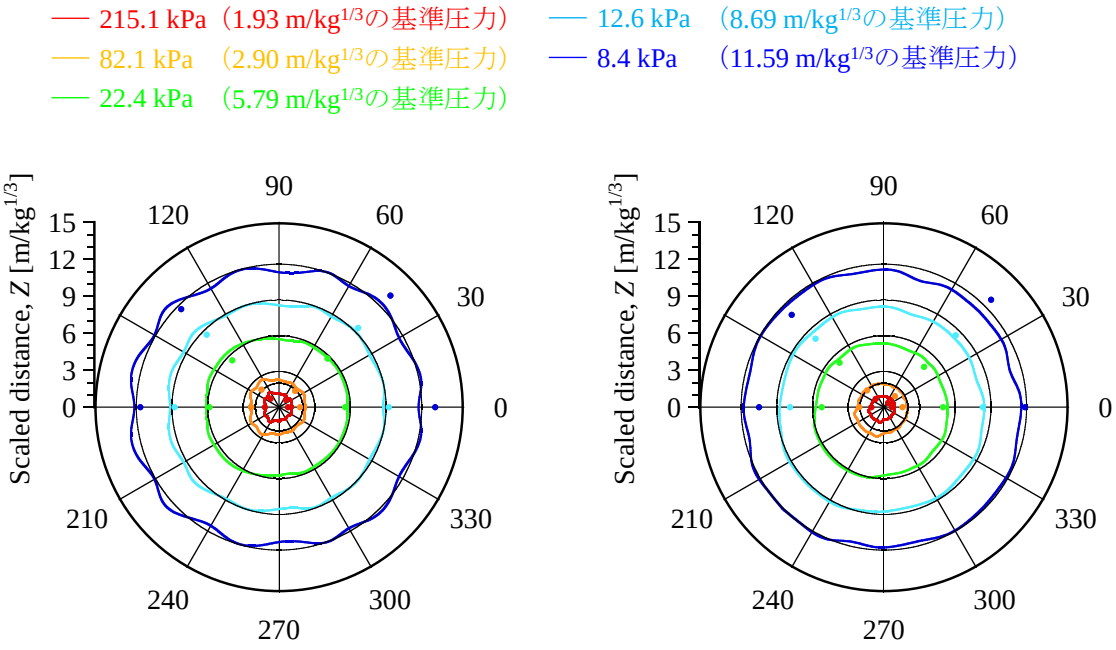
プロット点はR02年度No. A0

プロット点は野外実験No. 2-2

プロット点はR01年度野外実験No. 2-1

プロット点はR02年度野外実験No. 2-2

図5-15a　最大過圧の分布（R01年度No. A（防爆壁のみ））



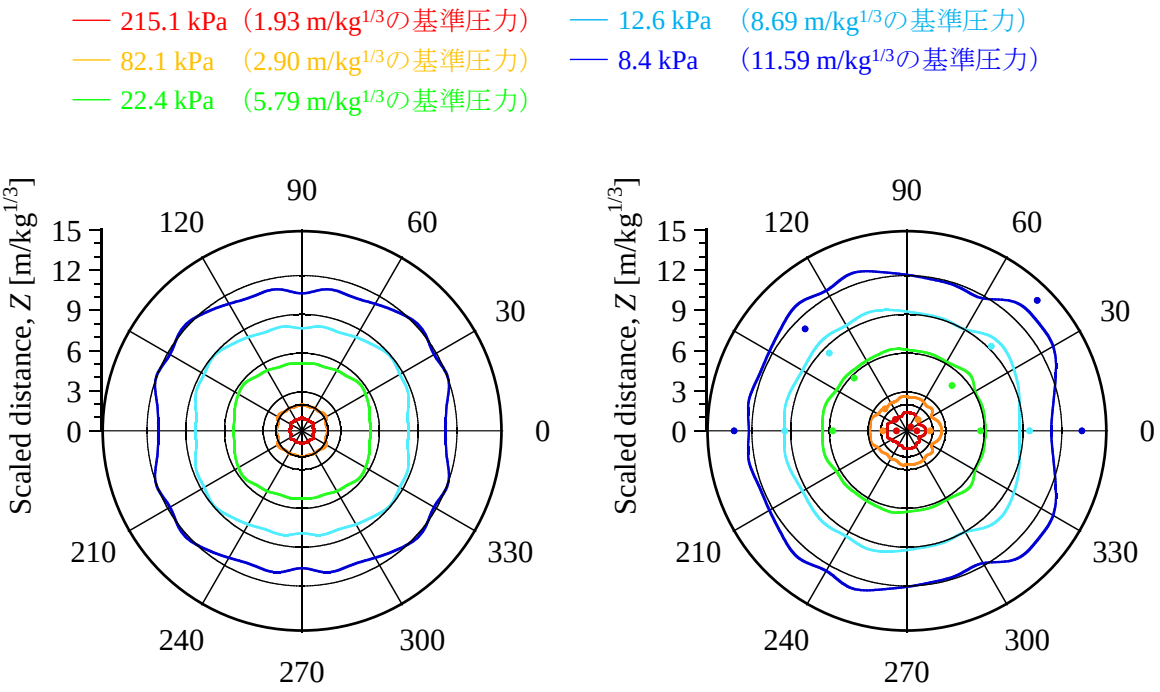
No. A1（ウレタン1面）
プロット点は野外実験No. 1-1

No. A2（ウレタン2面（L型））
プロット点は野外実験No. 1-2

No. A3（ウレタン3面）
プロット点は野外実験No. 1-3

No. A4（ウレタン4面）

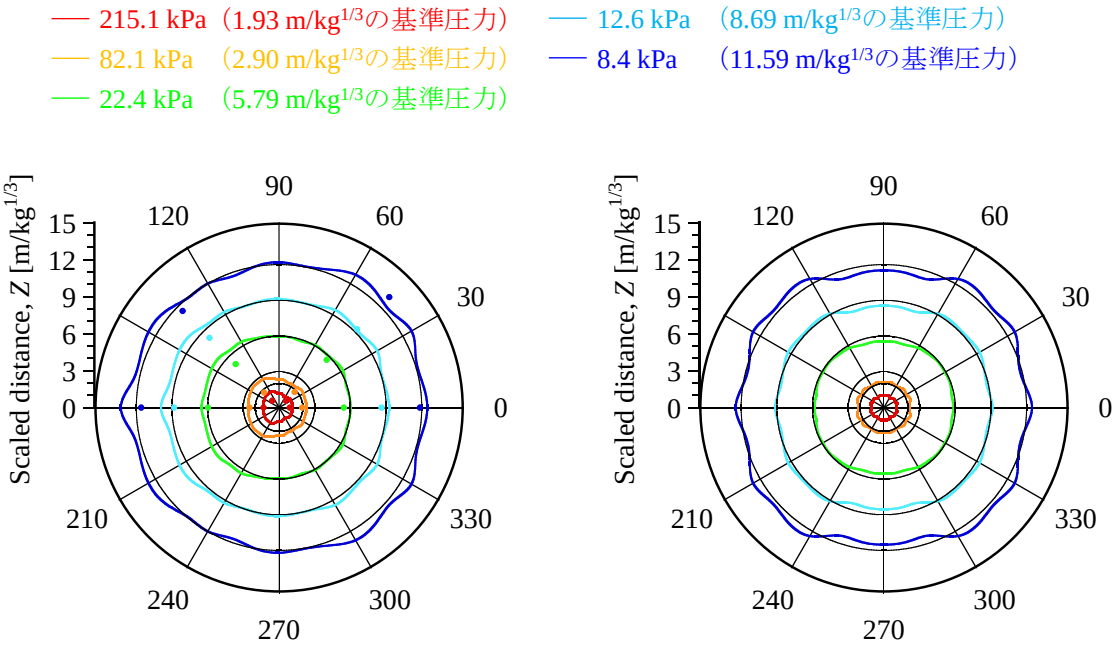
図5-15b　最大過圧の分布



No. A5（ウレタン2面（II型））

No. B（コの字障壁）
プロット点は野外実験No. 1-5

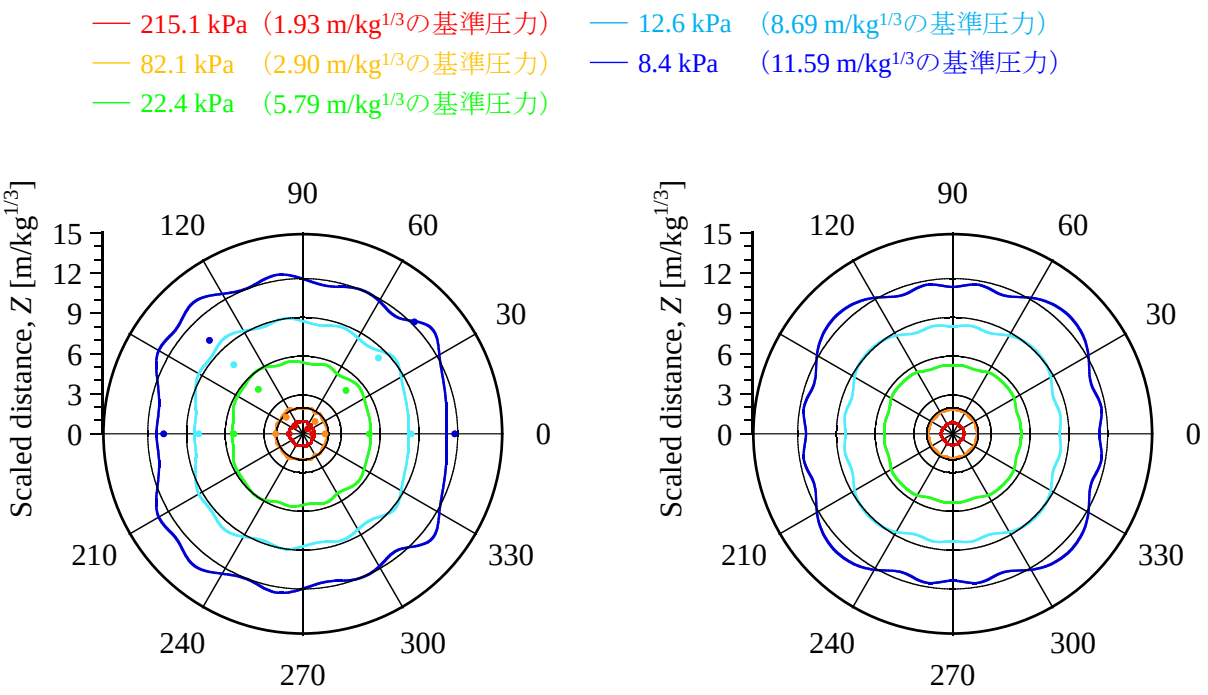
図5-15c　最大過圧の分布



R02年度No. A1（低密度ウレタン1面）
プロット点はR02年度野外実験No. 1-3

R02年度No. A2（低密度ウレタン2面（II型））

図5-15d　最大過圧の分布



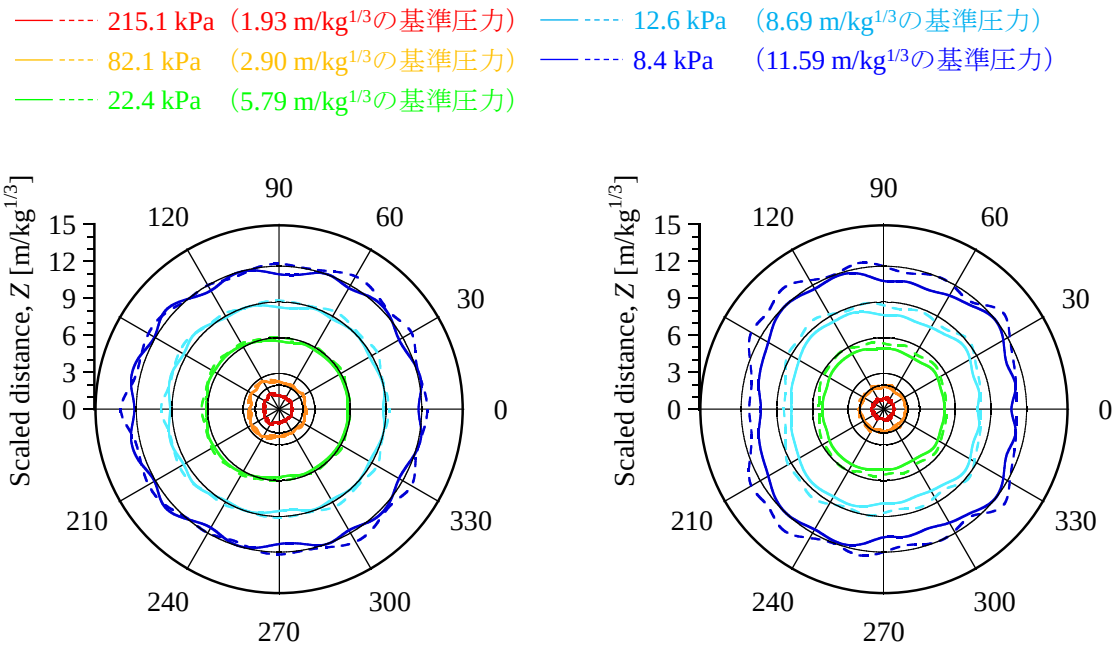
R02年度No. A3（低密度ウレタン3面）
プロット点はR02年度野外実験No. 1-4

R02年度No. A4（低密度ウレタン4面）

R01年度No. C2（コの字障壁（防爆壁と平行））
プロット点はR01年度野外実験No. 1-3

R01年度No. C2（コの字障壁（防爆壁と平行））
プロット点はR02年度野外実験No. 1-1

図5-15e　最大過圧の分布



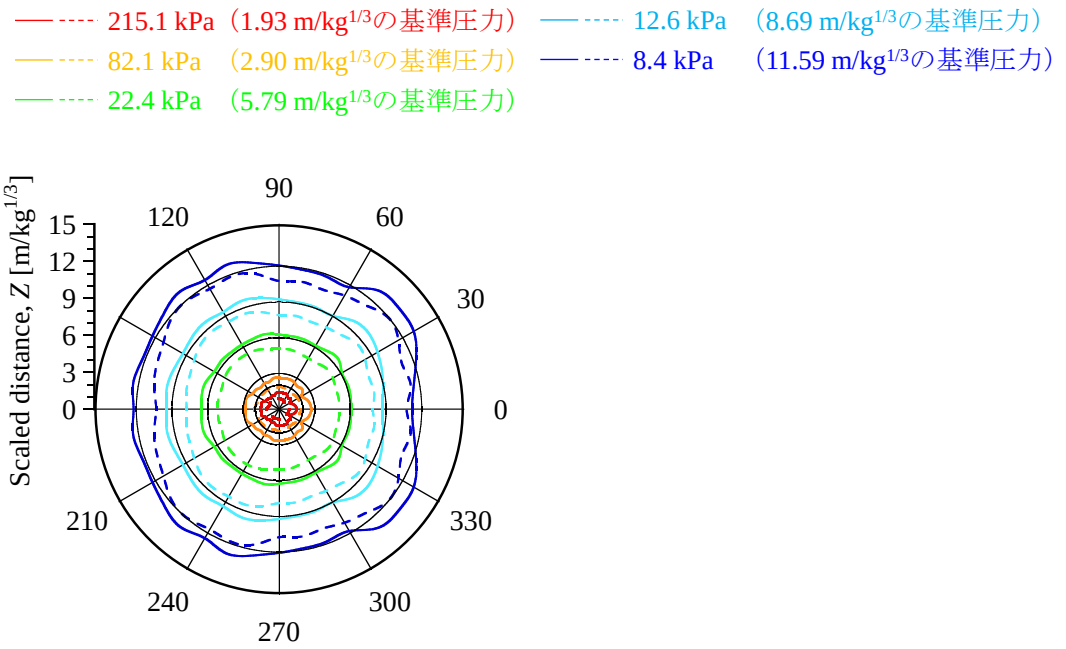
ウレタン1面
実線：No. A1
破線：R02年度No. A1（低密度ウレタン1面）

ウレタン3面
実線：No. A3
破線：R02年度No. A3（低密度ウレタン3面）

ウレタン4面
実線：No. A4
破線：R02年度No. A4（低密度ウレタン4面）

ウレタン2面（L型）
実線：No. A5
破線：R02年度No. A2（低密度ウレタン2面（L型））

図5-16a　最大過圧の分布（比較）

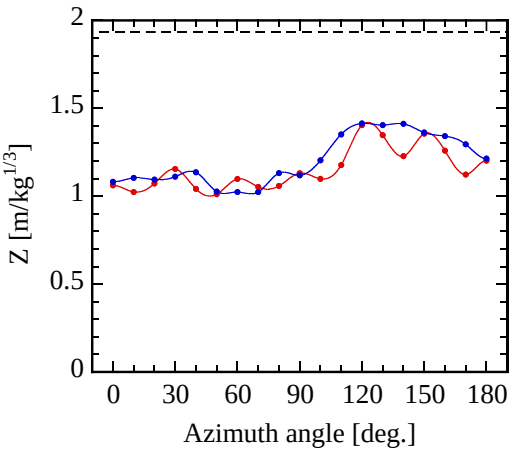


コの字障壁

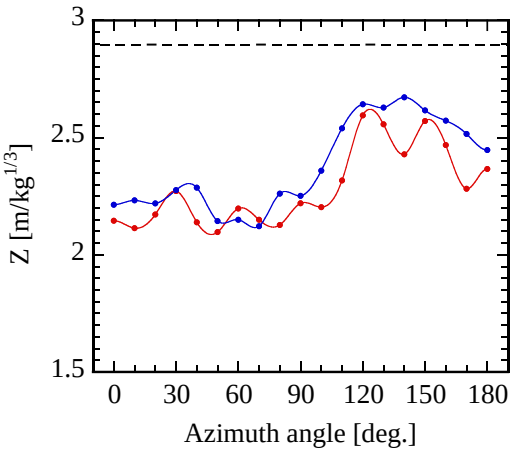
実線：No. B

破線：R01年度No. C2（コの字障壁（防爆壁と並行））

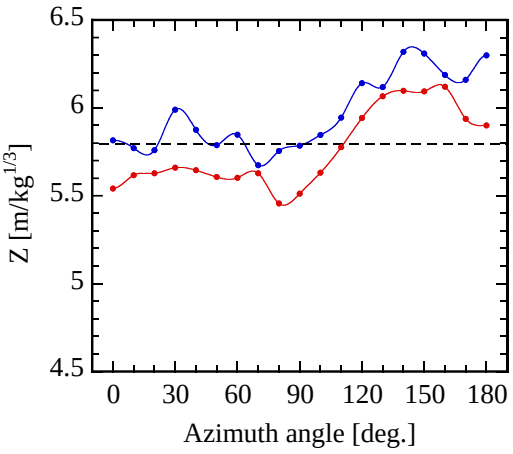
図5-16b　最大過圧の分布（比較）



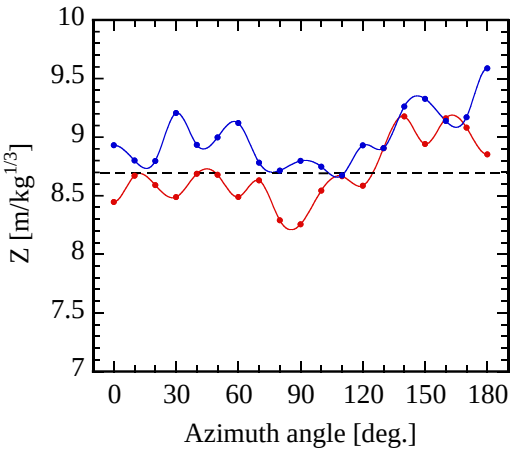
215.1 kPa 等圧線（換算距離 1.93 m/kg$^{1/3}$相当）



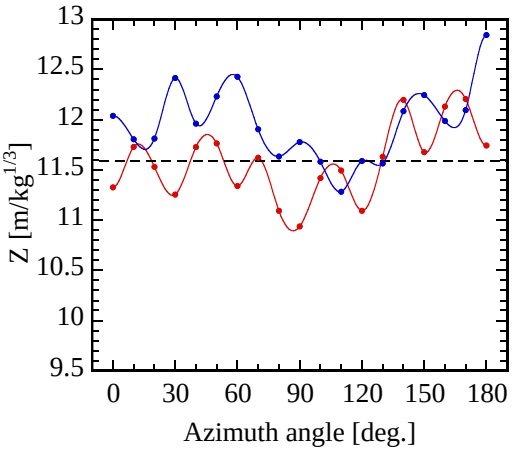
82.1 kPa 等圧線（換算距離 2.90 m/kg$^{1/3}$相当）



22.4 kPa 等圧線（換算距離 5.79 m/kg$^{1/3}$相当）



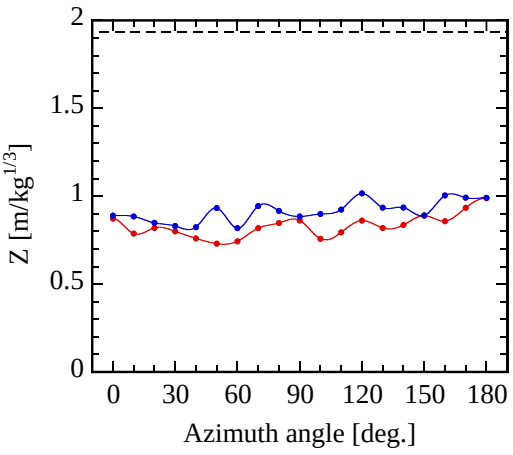
12.6 kPa 等圧線（換算距離 8.69 m/kg$^{1/3}$相当）



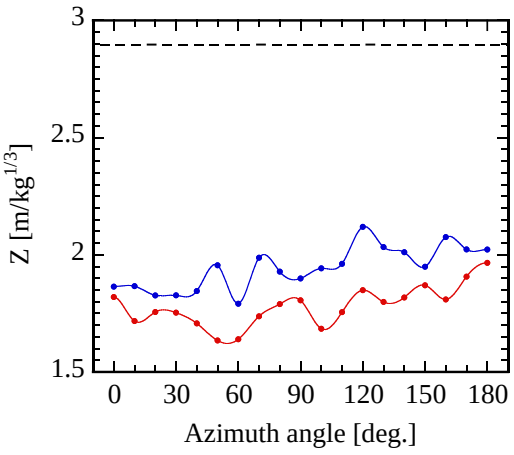
8.4 kPa 等圧線（換算距離 11.59 m/kg$^{1/3}$相当）

図5-17a　地表面爆発と同等の最大過圧を得る換算距離（ウレタン1面）

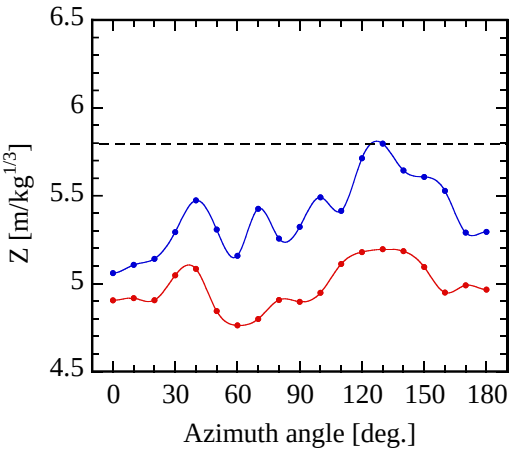
破線：地表面爆発、赤点：No. A1、青点：R02年度No. A1（低密度ウレタン）



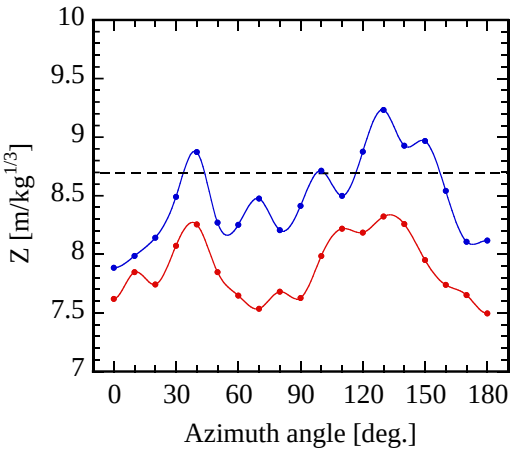
215.1 kPa 等圧線（換算距離 1.93 m/kg$^{1/3}$相当）



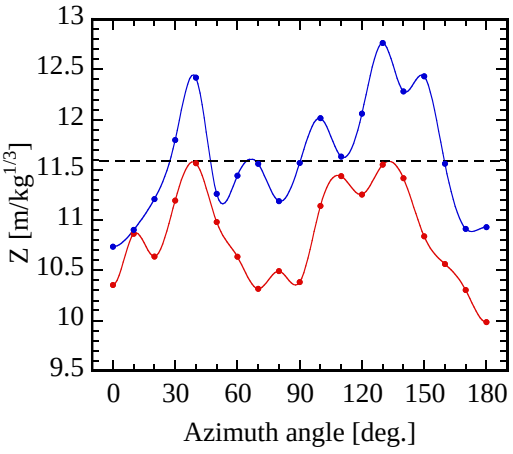
82.1 kPa 等圧線（換算距離 2.90 m/kg$^{1/3}$相当）



22.4 kPa 等圧線（換算距離 5.79 m/kg$^{1/3}$相当）



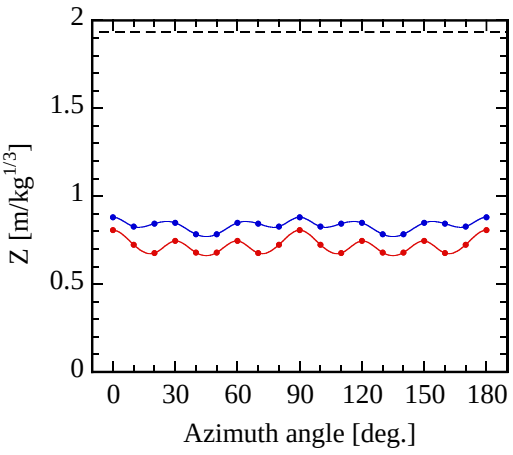
12.6 kPa 等圧線（換算距離 8.69 m/kg$^{1/3}$相当）



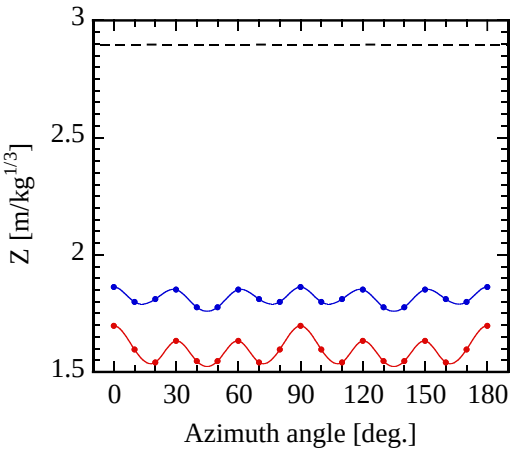
8.4 kPa 等圧線（換算距離 11.59 m/kg$^{1/3}$相当）

図5-17b　地表面爆発と同等の最大過圧を得る換算距離（ウレタン3面）

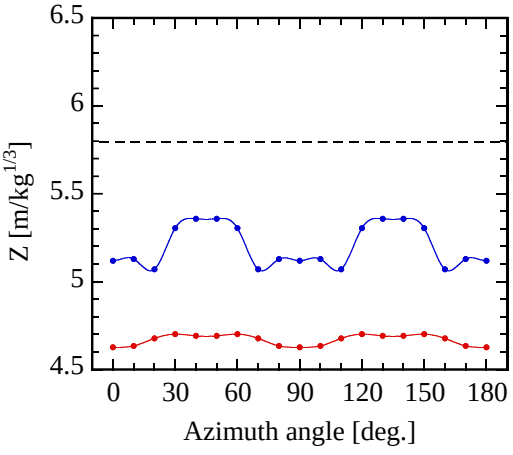
破線：地表面爆発、赤点：No. A3、青点：R02年度No. A3（低密度ウレタン）



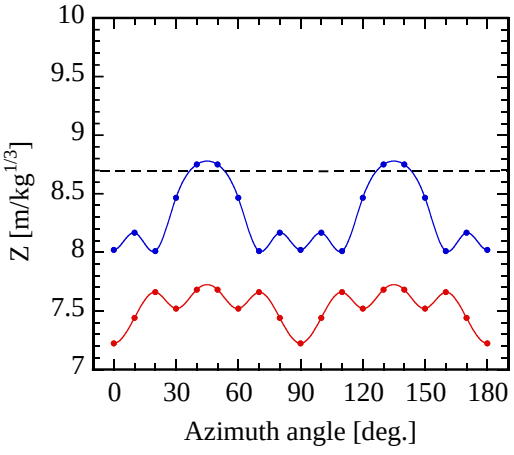
215.1 kPa 等圧線（換算距離 1.93 m/kg$^{1/3}$相当）



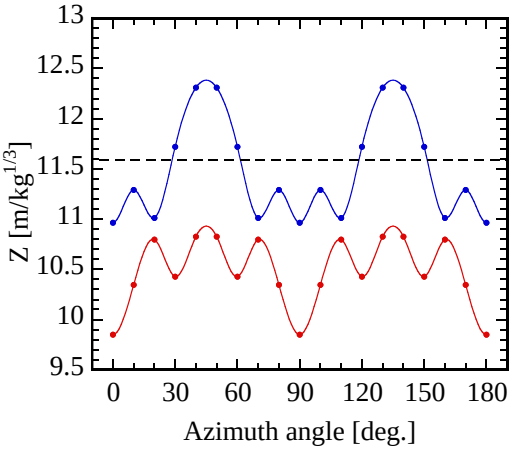
82.1 kPa 等圧線（換算距離 2.90 m/kg$^{1/3}$相当）



22.4 kPa 等圧線（換算距離 5.79 m/kg$^{1/3}$相当）



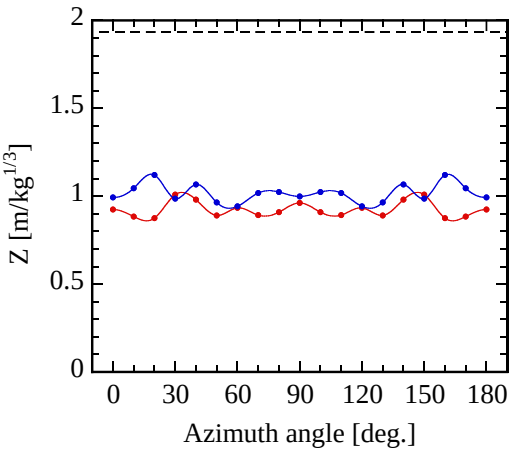
12.6 kPa 等圧線（換算距離 8.69 m/kg$^{1/3}$相当）



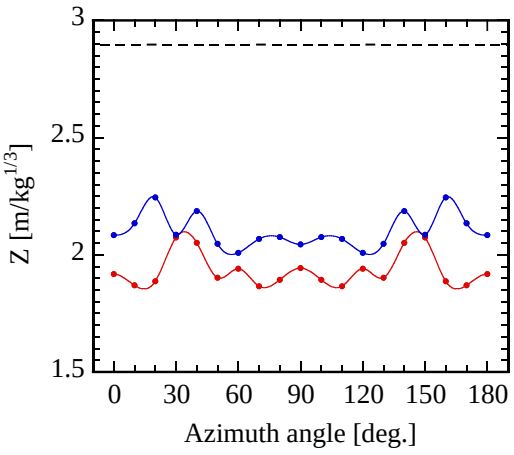
8.4 kPa 等圧線（換算距離 11.59 m/kg$^{1/3}$相当）

図5-17c　地表面爆発と同等の最大過圧を得る換算距離（ウレタン4面）

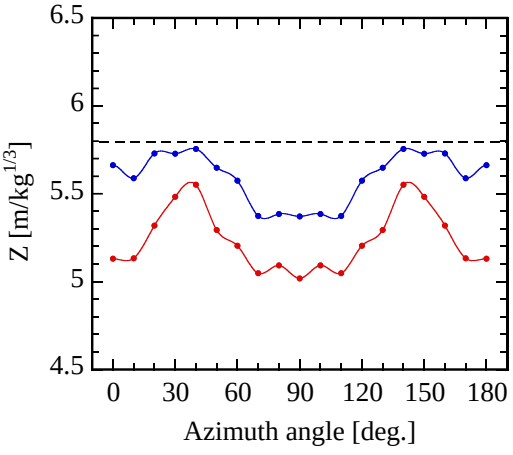
破線：地表面爆発、赤点：No. A4、青点：R02年度No. A4（低密度ウレタン）



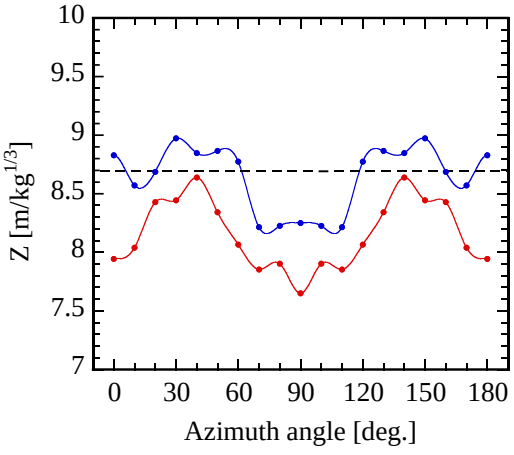
215.1 kPa 等圧線（換算距離 1.93 m/kg$^{1/3}$相当）



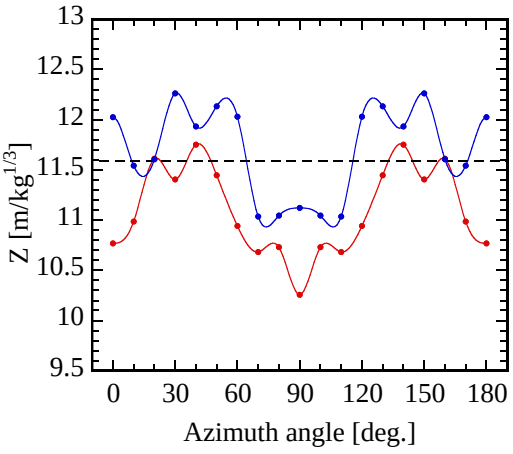
82.1 kPa 等圧線（換算距離 2.90 m/kg$^{1/3}$相当）



22.4 kPa 等圧線（換算距離 5.79 m/kg$^{1/3}$相当）



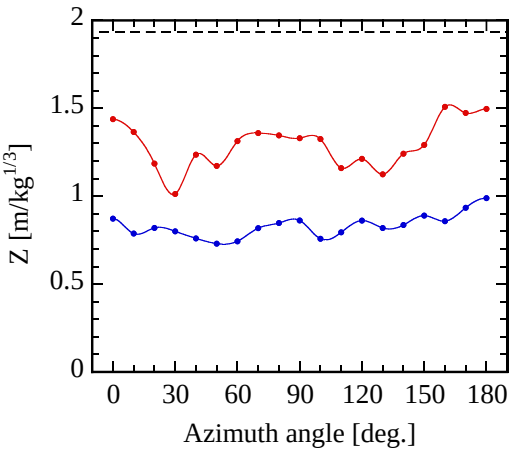
12.6 kPa 等圧線（換算距離 8.69 m/kg$^{1/3}$相当）



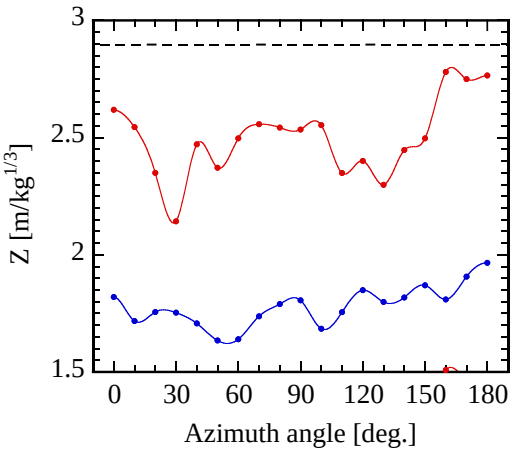
8.4 kPa 等圧線（換算距離 11.59 m/kg$^{1/3}$相当）

図5-17d 地表面爆発と同等の最大過圧を得る換算距離（ウレタン2面（II型））

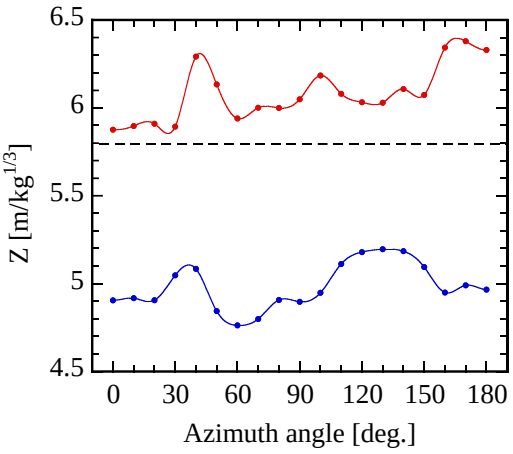
破線：地表面爆発、赤点：No. A5、青点：R02年度No. A2（低密度ウレタン）



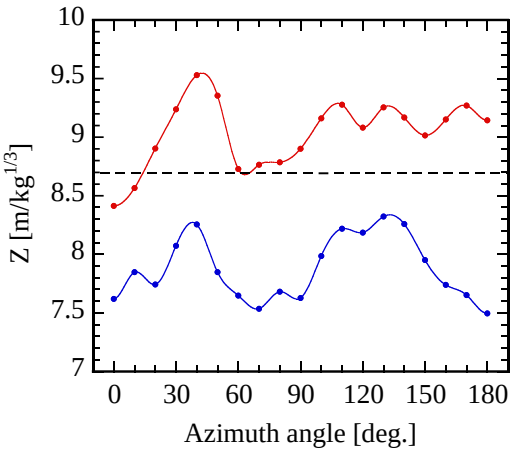
215.1 kPa 等圧線（換算距離 1.93 m/kg$^{1/3}$相当）



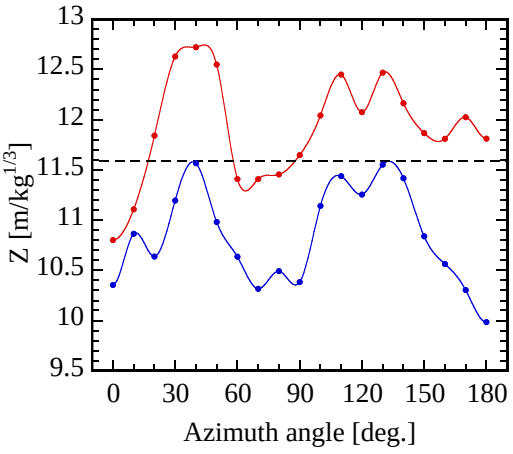
82.1 kPa 等圧線（換算距離 2.90 m/kg$^{1/3}$相当）



22.4 kPa 等圧線（換算距離 5.79 m/kg$^{1/3}$相当）



12.6 kPa 等圧線（換算距離 8.69 m/kg$^{1/3}$相当）



8.4 kPa 等圧線（換算距離 11.59 m/kg$^{1/3}$相当）

図5-17e　地表面爆発と同等の最大過圧を得る換算距離（コの字障壁）

破線：地表面爆発、赤点：No. B、青点：R01年度No. C2（防爆壁と並行）

表5-14a　等圧線の自然スプライン係数

	R01 No. A				
	防爆壁のみ				
	215.1 kPa	82.1 kPa	22.4 kPa	12.6 kPa	8.4 kPa
a_0	1.03151E+00	2.28716E+00	6.40354E+00	9.99606E+00	1.35791E+01
a_1	-1.77316E-02	-1.76417E-02	5.76707E-03	3.76763E-02	7.49128E-02
c_{-3}	1.46390E-05	5.11801E-06	-5.25774E-05	-1.15372E-04	-1.83566E-04
c_{-2}	-2.79864E-05	-5.38878E-06	1.23052E-04	2.60579E-04	4.09080E-04
c_{-1}	3.98162E-05	3.47333E-05	-3.88229E-05	-1.31408E-04	-2.37221E-04
c_0	-5.60387E-05	-7.15335E-05	-5.97846E-05	-1.64981E-05	4.31243E-05
c_1	5.84218E-05	5.03843E-05	-5.99391E-05	-1.98010E-04	-3.55485E-04
c_2	-1.02409E-04	-6.79927E-05	2.07517E-04	5.26988E-04	8.82134E-04
c_3	1.27212E-04	9.52704E-05	-2.04269E-04	-5.61342E-04	-9.62107E-04
c_4	-5.36491E-05	-4.05861E-05	8.48168E-05	2.35042E-04	4.04003E-04
c_5	-5.36842E-05	-4.06156E-05	8.48566E-05	2.35168E-04	4.04226E-04
c_6	1.27317E-04	9.53590E-05	-2.04388E-04	-5.61719E-04	-9.62777E-04
c_7	-1.02795E-04	-6.83175E-05	2.07955E-04	5.28371E-04	8.84589E-04
c_8	5.98611E-05	5.15950E-05	-6.15726E-05	-2.03163E-04	-3.64633E-04
c_9	-6.14097E-05	-7.60516E-05	-5.36888E-05	2.72857E-06	7.72645E-05
c_{10}	5.98611E-05	5.15950E-05	-6.15726E-05	-2.03163E-04	-3.64633E-04
c_{11}	-1.02795E-04	-6.83175E-05	2.07955E-04	5.28371E-04	8.84589E-04
c_{12}	1.27317E-04	9.53590E-05	-2.04388E-04	-5.61719E-04	-9.62777E-04
c_{13}	-5.36842E-05	-4.06156E-05	8.48566E-05	2.35168E-04	4.04226E-04
c_{14}	-5.36491E-05	-4.05861E-05	8.48168E-05	2.35042E-04	4.04003E-04
c_{15}	1.27212E-04	9.52704E-05	-2.04269E-04	-5.61342E-04	-9.62107E-04
c_{16}	-1.02409E-04	-6.79927E-05	2.07517E-04	5.26988E-04	8.82134E-04
c_{17}	5.84218E-05	5.03843E-05	-5.99391E-05	-1.98010E-04	-3.55485E-04
c_{18}	-5.60387E-05	-7.15335E-05	-5.97846E-05	-1.64981E-05	4.31243E-05
c_{19}	3.98162E-05	3.47333E-05	-3.88229E-05	-1.31408E-04	-2.37221E-04
c_{20}	-2.79864E-05	-5.38878E-06	1.23052E-04	2.60579E-04	4.09080E-04
c_{21}	1.46390E-05	5.11801E-06	-5.25774E-05	-1.15372E-04	-1.83566E-04

表5-14b　等圧線の自然スプライン係数

	No. A1				
	ウレタン1面				
	215.1 kPa	82.1 kPa	22.4 kPa	12.6 kPa	8.4 kPa
a_0	9.01433E-01	1.96042E+00	5.52385E+00	8.71861E+00	1.19622E+01
a_1	-8.46372E-03	-1.03982E-02	-4.52456E-03	7.66140E-03	2.35823E-02
c_{-3}	1.56247E-06	3.46453E-06	1.35799E-05	2.58302E-05	4.03873E-05
c_{-2}	2.58568E-05	2.18204E-05	-6.05439E-05	-1.77587E-04	-3.20677E-04
c_{-1}	-8.86061E-05	-8.30042E-05	1.35208E-04	4.51349E-04	8.38135E-04
c_0	1.18347E-04	1.10655E-04	-1.77504E-04	-5.93238E-04	-1.10082E-03
c_1	-6.44470E-05	-5.43000E-05	1.41302E-04	4.15675E-04	7.48889E-04
c_2	-7.07794E-05	-9.29963E-05	-8.49213E-05	-3.48887E-05	3.63071E-05
c_3	1.65794E-04	1.96673E-04	4.52653E-05	-2.33694E-04	-5.90590E-04
c_4	-8.10005E-05	-9.22534E-05	-6.71146E-06	1.36947E-04	3.16251E-04
c_5	-8.69230E-05	-1.00429E-04	1.70146E-05	2.21281E-04	4.82940E-04
c_6	1.44990E-04	1.49705E-04	-1.23143E-04	-5.39044E-04	-1.05352E-03
c_7	-6.18210E-05	-3.17098E-05	2.52205E-04	6.15972E-04	1.04447E-03
c_8	-6.22642E-05	-1.08691E-04	-2.33381E-04	-3.30569E-04	-4.23088E-04
c_9	1.21305E-04	1.54664E-04	9.26042E-05	-6.16428E-05	-2.69274E-04
c_{10}	-3.56341E-05	-4.81683E-05	-1.16127E-05	7.31140E-05	1.88954E-04
c_{11}	-1.56303E-04	-1.67354E-04	-1.20159E-05	2.17389E-04	4.89611E-04
c_{12}	1.91889E-04	2.04785E-04	1.03106E-06	-3.00956E-04	-6.61353E-04
c_{13}	4.02759E-05	5.39184E-05	1.93722E-05	-6.25305E-05	-1.74059E-04
c_{14}	-2.62195E-04	-2.87494E-04	3.17088E-05	5.35228E-04	1.15434E-03
c_{15}	2.24695E-04	2.22617E-04	-1.41306E-04	-6.53238E-04	-1.26257E-03
c_{16}	2.16284E-05	7.14616E-05	2.31879E-04	3.59902E-04	4.76925E-04
c_{17}	-2.41543E-04	-3.13155E-04	-1.95532E-04	1.18785E-04	5.48617E-04
c_{18}	3.15341E-04	3.84774E-04	1.29105E-04	-3.80485E-04	-1.04465E-03
c_{19}	-2.71517E-04	-3.44292E-04	-1.84149E-04	1.92680E-04	6.97855E-04
c_{20}	1.41522E-04	1.96010E-04	1.86347E-04	6.43223E-05	-1.20025E-04
c_{21}	-3.01731E-05	-4.66995E-05	-6.58023E-05	-6.06021E-05	-4.30692E-05

表5-14c　等圧線の自然スプライン係数

	No. A2				
	ウレタン2面（L型）				
	215.1 kPa	82.1 kPa	22.4 kPa	12.6 kPa	8.4 kPa
a_0	6.35356E-01	1.49737E+00	4.69273E+00	7.76106E+00	1.09985E+01
a_1	9.53127E-03	1.41828E-02	1.64467E-02	9.88061E-03	-1.70954E-03
c_{-3}	-2.91949E-05	-4.34120E-05	-5.04039E-05	-3.05162E-05	4.62644E-06
c_{-2}	7.08031E-05	1.05383E-04	1.23001E-04	7.56071E-05	-8.61452E-06
c_{-1}	-3.62322E-05	-5.46804E-05	-6.78022E-05	-4.82480E-05	-1.05054E-05
c_0	-6.84887E-05	-9.84238E-05	-9.65729E-05	-2.93055E-05	7.64553E-05
c_1	1.67573E-04	2.36613E-04	2.09313E-04	1.87796E-05	-2.69497E-04
c_2	-2.12170E-04	-2.84570E-04	-1.69560E-04	1.62693E-04	6.30759E-04
c_3	1.84870E-04	2.32413E-04	4.96968E-05	-3.32599E-04	-8.45173E-04
c_4	-1.14897E-04	-1.41786E-04	-1.46242E-05	2.37898E-04	5.73061E-04
c_5	5.29575E-05	7.77164E-05	8.59109E-05	4.54906E-05	-2.27060E-05
c_6	-3.12697E-05	-6.58057E-05	-1.78738E-04	-2.78134E-04	-3.78078E-04
c_7	1.79908E-05	4.80833E-05	1.68354E-04	2.88474E-04	4.17487E-04
c_8	4.25808E-05	5.20994E-05	5.99216E-06	-8.40497E-05	-2.02728E-04
c_9	-1.27705E-04	-1.85522E-04	-2.05541E-04	-1.15619E-04	3.56713E-05
c_{10}	1.76361E-04	2.52295E-04	2.62836E-04	1.21938E-04	-1.04272E-04
c_{11}	-1.77193E-04	-2.41734E-04	-1.94178E-04	9.83530E-06	3.05734E-04
c_{12}	1.42107E-04	1.91320E-04	1.38055E-04	-4.33040E-05	-3.00950E-04
c_{13}	-3.50728E-05	-5.94914E-05	-8.27193E-05	-6.11334E-05	-1.33826E-05
c_{14}	-1.55096E-04	-1.78700E-04	-5.11481E-05	1.68755E-04	4.41933E-04
c_{15}	2.76348E-04	3.28542E-04	1.24153E-04	-2.60966E-04	-7.51210E-04
c_{16}	-2.21093E-04	-2.59250E-04	-7.53915E-05	2.56319E-04	6.75576E-04
c_{17}	8.48668E-05	9.86119E-05	2.36414E-05	-1.08381E-04	-2.74464E-04
c_{18}	3.65923E-05	4.04082E-05	-2.00872E-06	-6.95842E-05	-1.52804E-04
c_{19}	-7.62700E-05	-8.46391E-05	1.55871E-06	1.39928E-04	3.10595E-04
c_{20}	3.16319E-05	3.45303E-05	-3.82500E-06	-6.38774E-05	-1.37515E-04

表5-14d　等圧線の自然スプライン係数

	No. A3				
	ウレタン3面				
	215.1 kPa	82.1 kPa	22.4 kPa	12.6 kPa	8.4 kPa
a_0	9.38311E-01	1.84039E+00	4.49170E+00	6.62660E+00	8.65680E+00
a_1	4.59520E-03	2.91307E-03	-1.85180E-02	-4.82465E-02	-8.46203E-02
c_{-3}	-2.64091E-05	-2.60652E-05	4.36750E-05	1.51573E-04	2.87689E-04
c_{-2}	1.06214E-04	1.14528E-04	-1.08687E-04	-4.73994E-04	-9.41194E-04
c_{-1}	-2.02507E-04	-2.33215E-04	1.03605E-04	6.93055E-04	1.45828E-03
c_0	2.45498E-04	2.89399E-04	-7.84244E-05	-7.43740E-04	-1.61336E-03
c_1	-2.03071E-04	-2.32572E-04	1.11033E-04	7.07895E-04	1.48120E-03
c_2	1.08469E-04	1.11955E-04	-1.38401E-04	-5.33356E-04	-1.03290E-03
c_3	-2.89519E-05	-3.29095E-05	6.81036E-06	7.32204E-05	1.56733E-04
c_4	6.14732E-06	3.55468E-05	1.96713E-04	3.86850E-04	6.08620E-04
c_5	7.11545E-06	-1.87578E-05	-1.85151E-04	-3.88144E-04	-6.26326E-04
c_6	-5.01041E-05	-5.17279E-05	6.62641E-05	2.53122E-04	4.90030E-04
c_7	6.88106E-05	7.24034E-05	-8.39899E-05	-3.35545E-04	-6.56088E-04
c_8	-8.73388E-05	-8.90810E-05	1.24785E-04	4.61782E-04	8.88967E-04
c_9	1.45055E-04	1.72594E-04	-4.44191E-05	-4.43419E-04	-9.68116E-04
c_{10}	-1.29111E-04	-1.71092E-04	-7.59652E-05	1.65108E-04	5.00914E-04
c_{11}	1.89706E-06	1.49314E-05	8.80566E-05	1.74549E-04	2.75273E-04
c_{12}	9.17361E-05	1.11407E-04	-2.34470E-05	-2.80077E-04	-6.21314E-04
c_{13}	-6.06645E-05	-7.87118E-05	-1.27343E-05	1.33576E-04	3.34636E-04
c_{14}	-3.94330E-05	-4.74411E-05	-3.60299E-06	7.85392E-05	1.85288E-04
c_{15}	1.18259E-04	1.59720E-04	1.03729E-04	-7.06107E-05	-3.18089E-04
c_{16}	-1.18293E-04	-1.74503E-04	-1.93547E-04	-1.01608E-04	5.40165E-05
c_{17}	3.23231E-05	7.05125E-05	1.75972E-04	2.49843E-04	3.10667E-04
c_{18}	3.09785E-05	9.19382E-06	-1.42784E-04	-3.19070E-04	-5.16750E-04
c_{19}	1.87535E-05	5.23319E-05	1.65382E-04	2.60856E-04	3.52071E-04
c_{20}	-6.40147E-05	-1.01781E-04	-1.51186E-04	-1.45660E-04	-1.11600E-04
c_{21}	2.86411E-05	4.33370E-05	5.63137E-05	4.52574E-05	2.13549E-05

表5-14e　等圧線の自然スプライン係数

	No. A4				
	ウレタン4面				
	215.1 kPa	82.1 kPa	22.4 kPa	12.6 kPa	8.4 kPa
a_0	4.61860E-01	1.26053E+00	4.65317E+00	8.20559E+00	1.21307E+01
a_1	-9.46193E-03	-1.24152E-02	-1.60071E-03	2.28516E-02	5.67935E-02
c_{-3}	2.55552E-05	3.21902E-05	-7.66476E-06	-8.84088E-05	-1.98530E-04
c_{-2}	-3.67188E-05	-4.61902E-05	2.65734E-05	1.71826E-04	3.71113E-04
c_{-1}	-5.10337E-05	-6.28496E-05	-3.18895E-05	3.08735E-05	1.09718E-04
c_0	1.21103E-04	1.49395E-04	2.54470E-05	-2.20599E-04	-5.44851E-04
c_1	-3.12858E-05	-3.70262E-05	-2.88018E-05	-1.70187E-05	-8.78740E-06
c_2	-1.15710E-04	-1.49484E-04	1.42228E-05	3.63395E-04	8.45136E-04
c_3	1.60637E-04	2.08759E-04	1.32535E-05	-4.16164E-04	-1.00912E-03
c_4	-7.25400E-05	-9.47863E-05	-1.11397E-05	1.76081E-04	4.35285E-04
c_5	-7.25773E-05	-9.48350E-05	-1.11455E-05	1.76172E-04	4.35508E-04
c_6	1.60748E-04	2.08905E-04	1.32709E-05	-4.16435E-04	-1.00979E-03
c_7	-1.16120E-04	-1.50020E-04	1.41587E-05	3.64389E-04	8.47596E-04
c_8	-2.97581E-05	-3.50286E-05	-2.85630E-05	-2.07236E-05	-1.79548E-05
c_9	1.15402E-04	1.41941E-04	2.45556E-05	-2.06774E-04	-5.10641E-04
c_{10}	-2.97581E-05	-3.50286E-05	-2.85630E-05	-2.07236E-05	-1.79548E-05
c_{11}	-1.16120E-04	-1.50020E-04	1.41587E-05	3.64389E-04	8.47596E-04
c_{12}	1.60748E-04	2.08905E-04	1.32709E-05	-4.16435E-04	-1.00979E-03
c_{13}	-7.25773E-05	-9.48350E-05	-1.11455E-05	1.76172E-04	4.35508E-04
c_{14}	-7.25400E-05	-9.47863E-05	-1.11397E-05	1.76081E-04	4.35285E-04
c_{15}	1.60637E-04	2.08759E-04	1.32535E-05	-4.16164E-04	-1.00912E-03
c_{16}	-1.15710E-04	-1.49484E-04	1.42228E-05	3.63395E-04	8.45136E-04
c_{17}	-3.12858E-05	-3.70262E-05	-2.88018E-05	-1.70187E-05	-8.78740E-06
c_{18}	1.21103E-04	1.49395E-04	2.54470E-05	-2.20599E-04	-5.44851E-04
c_{19}	-5.10337E-05	-6.28496E-05	-3.18895E-05	3.08735E-05	1.09718E-04
c_{20}	-3.67188E-05	-4.61902E-05	2.65734E-05	1.71826E-04	3.71113E-04
c_{21}	2.55552E-05	3.21902E-05	-7.66476E-06	-8.84088E-05	-1.98530E-04

表5-14f　等圧線の自然スプライン係数

	No. A5				
	ウレタン2面（II型）				
	215.1 kPa	82.1 kPa	22.4 kPa	12.6 kPa	8.4 kPa
a_0	5.05241E-01	1.39733E+00	5.05190E+00	8.75664E+00	1.27666E+01
a_1	-1.67890E-02	-2.25572E-02	-1.43711E-02	1.03968E-02	4.54013E-02
c_{-3}	3.44294E-05	3.87557E-05	-2.00153E-05	-1.19572E-04	-2.47394E-04
c_{-2}	-6.42026E-05	-6.32504E-05	9.78378E-05	3.43996E-04	6.52325E-04
c_{-1}	3.44860E-06	-1.99735E-05	-1.63394E-04	-3.35878E-04	-5.37167E-04
c_0	4.94146E-05	8.51199E-05	1.71647E-04	2.31221E-04	2.82931E-04
c_1	2.28565E-05	2.92456E-06	-1.66417E-04	-3.85763E-04	-6.47919E-04
c_2	-1.41834E-04	-1.54843E-04	1.09931E-04	5.43538E-04	1.09533E-03
c_3	1.29443E-04	1.33905E-04	-1.40918E-04	-5.69631E-04	-1.10769E-03
c_4	2.80255E-05	8.12948E-05	2.97249E-04	5.12895E-04	7.43789E-04
c_5	-1.46383E-04	-2.28442E-04	-3.25578E-04	-2.99263E-04	-2.08254E-04
c_6	1.44235E-04	2.18262E-04	2.78683E-04	2.13738E-04	8.04591E-05
c_7	-6.90819E-05	-1.29748E-04	-2.88171E-04	-3.99829E-04	-4.95376E-04
c_8	-3.39835E-05	7.17924E-06	2.87413E-04	6.22724E-04	1.00839E-03
c_9	8.72654E-05	5.76308E-05	-2.76535E-04	-7.16352E-04	-1.23886E-03
c_{10}	-3.39835E-05	7.17924E-06	2.87413E-04	6.22724E-04	1.00839E-03
c_{11}	-6.90819E-05	-1.29748E-04	-2.88171E-04	-3.99829E-04	-4.95376E-04
c_{12}	1.44235E-04	2.18262E-04	2.78683E-04	2.13738E-04	8.04591E-05
c_{13}	-1.46383E-04	-2.28442E-04	-3.25578E-04	-2.99263E-04	-2.08254E-04
c_{14}	2.80255E-05	8.12948E-05	2.97249E-04	5.12895E-04	7.43789E-04
c_{15}	1.29443E-04	1.33905E-04	-1.40918E-04	-5.69631E-04	-1.10769E-03
c_{16}	-1.41834E-04	-1.54843E-04	1.09931E-04	5.43538E-04	1.09533E-03
c_{17}	2.28565E-05	2.92456E-06	-1.66417E-04	-3.85763E-04	-6.47919E-04
c_{18}	4.94146E-05	8.51199E-05	1.71647E-04	2.31221E-04	2.82931E-04
c_{19}	3.44860E-06	-1.99735E-05	-1.63394E-04	-3.35878E-04	-5.37167E-04
c_{20}	-6.42026E-05	-6.32504E-05	9.78378E-05	3.43996E-04	6.52325E-04
c_{21}	3.44294E-05	3.87557E-05	-2.00153E-05	-1.19572E-04	-2.47394E-04

表5-14g　等圧線の自然スプライン係数

	No. B				
	コの字障壁				
	215.1 kPa	82.1 kPa	22.4 kPa	12.6 kPa	8.4 kPa
a_0	1.51414E+00	2.75459E+00	5.96426E+00	8.26298E+00	1.02823E+01
a_1	1.67272E-02	2.03888E-02	2.35795E-03	-3.24915E-02	-7.82176E-02
c_{-3}	6.48501E-06	3.04124E-06	-6.80800E-06	-9.27893E-06	-6.20601E-06
c_{-2}	-3.37182E-05	-3.00907E-05	1.09409E-05	5.23610E-05	9.17671E-05
c_{-1}	1.91960E-05	2.28982E-05	7.84048E-06	-1.77792E-05	-4.82102E-05
c_0	2.54022E-05	2.10890E-05	-1.30994E-05	-4.97010E-05	-8.83737E-05
c_1	-3.67702E-05	-5.38204E-05	-5.72440E-05	-2.32076E-05	3.38215E-05
c_2	1.90146E-04	2.76783E-04	2.71279E-04	7.40748E-05	-2.36360E-04
c_3	-4.41627E-04	-6.15131E-04	-5.60849E-04	-1.23535E-04	5.33984E-04
c_4	4.97780E-04	6.71709E-04	5.53931E-04	3.38660E-05	-7.16400E-04
c_5	-3.70377E-04	-4.52378E-04	-1.59453E-04	4.28951E-04	1.19706E-03
c_6	1.89594E-04	1.91796E-04	-1.49031E-04	-6.51666E-04	-1.26418E-03
c_7	-5.01278E-05	-3.32519E-05	1.49239E-04	3.85333E-04	6.63141E-04
c_8	3.05545E-05	3.22297E-05	-1.98388E-05	-1.00006E-04	-1.99084E-04
c_9	-1.15690E-04	-1.56406E-04	-1.43701E-04	-4.78383E-05	9.31713E-05
c_{10}	2.48389E-04	3.22475E-04	2.30253E-04	-4.49117E-05	-4.23739E-04
c_{11}	-3.29716E-04	-4.03178E-04	-1.55255E-04	3.46932E-04	1.00180E-03
c_{12}	3.35579E-04	3.99489E-04	8.63376E-05	-4.95134E-04	-1.24218E-03
c_{13}	-3.09200E-04	-3.79770E-04	-1.47794E-04	3.28128E-04	9.51272E-04
c_{14}	2.82305E-04	3.67090E-04	2.81991E-04	3.39736E-08	-3.91424E-04
c_{15}	-3.12444E-04	-4.08889E-04	-3.77136E-04	-1.63243E-04	1.43754E-04
c_{16}	3.14978E-04	3.89863E-04	2.75761E-04	-1.06776E-05	-3.87958E-04
c_{17}	-2.20514E-04	-2.43895E-04	-3.90746E-05	2.84732E-04	6.78266E-04
c_{18}	1.54227E-04	1.49558E-04	-8.41345E-05	-3.99901E-04	-7.68930E-04
c_{19}	-1.88563E-04	-2.01076E-04	6.26725E-06	3.14921E-04	6.84762E-04
c_{20}	1.87174E-04	2.18588E-04	9.43939E-05	-1.31431E-04	-4.13943E-04
c_{21}	-7.30619E-05	-8.87226E-05	-5.48154E-05	1.89759E-05	1.14187E-04

表5-14h　等圧線の自然スプライン係数

	R02 No. A1				
	ウレタン1面（低密度）				
	215.1 kPa	82.1 kPa	22.4 kPa	12.6 kPa	8.4 kPa
a_0	1.03091E+00	2.03981E+00	5.11398E+00	7.68844E+00	1.02080E+01
a_1	-2.67395E-03	-7.88275E-03	-2.91926E-02	-5.05897E-02	-7.35672E-02
c_{-3}	1.01986E-05	2.19047E-05	6.13506E-05	9.68951E-05	1.33141E-04
c_{-2}	-3.52803E-05	-6.16032E-05	-1.25324E-04	-1.68128E-04	-2.04050E-04
c_{-1}	5.81095E-05	7.55932E-05	4.77229E-05	-2.81782E-05	-1.32429E-04
c_0	-6.52297E-05	-7.20692E-05	2.48606E-05	1.82417E-04	3.80206E-04
c_1	5.31549E-05	7.72722E-05	9.35659E-05	7.02525E-05	2.64018E-05
c_2	-1.54620E-05	-6.83192E-05	-3.08696E-04	-5.61851E-04	-8.39375E-04
c_3	-6.56844E-05	-2.11057E-05	3.42703E-04	7.96155E-04	1.32525E-03
c_4	1.52093E-04	1.61451E-04	-1.02289E-04	-5.13923E-04	-1.02618E-03
c_5	-1.57686E-04	-2.14431E-04	-1.86119E-04	-3.20600E-05	1.93033E-04
c_6	1.32389E-04	2.10179E-04	3.47417E-04	3.99847E-04	4.16471E-04
c_7	-1.61173E-04	-2.41774E-04	-3.35896E-04	-3.18902E-04	-2.48652E-04
c_8	1.77815E-04	2.40030E-04	2.02859E-04	2.60990E-05	-2.29364E-04
c_9	-1.04230E-04	-1.38164E-04	-8.94120E-05	5.23921E-05	2.49632E-04
c_{10}	-1.22489E-05	5.70156E-06	8.31425E-05	1.53736E-04	2.22586E-04
c_{11}	3.77701E-05	5.64914E-06	-1.94863E-04	-4.19797E-04	-6.68694E-04
c_{12}	2.49661E-05	8.53384E-05	3.25872E-04	5.59749E-04	8.05465E-04
c_{13}	-6.38609E-05	-1.33870E-04	-3.56966E-04	-5.48925E-04	-7.39262E-04
c_{14}	6.91334E-05	1.17400E-04	2.31736E-04	3.08197E-04	3.72820E-04
c_{15}	-5.36201E-05	-6.54639E-05	-3.93538E-05	1.76212E-05	9.13409E-05
c_{16}	3.70836E-06	7.10227E-06	3.17561E-05	6.49884E-05	1.05962E-04
c_{17}	8.63541E-05	6.26628E-05	-2.20261E-04	-5.90097E-04	-1.02627E-03
c_{18}	-1.43353E-04	-1.07833E-04	3.33186E-04	9.10061E-04	1.58962E-03
c_{19}	9.18793E-05	6.78436E-05	-2.25050E-04	-6.08316E-04	-1.06026E-03
c_{20}	-1.83924E-05	-1.36212E-05	5.09146E-05	1.37867E-04	2.41896E-04
c_{21}	-1.34980E-06	1.25640E-07	7.14324E-06	1.39002E-05	2.07200E-05

表5-14i　等圧線の自然スプライン係数

	R02 No. A2				
	ウレタン2面（II型、低密度）				
	215.1 kPa	82.1 kPa	22.4 kPa	12.6 kPa	8.4 kPa
a_0	1.56045E+00	2.79144E+00	5.90659E+00	8.09537E+00	9.99429E+00
a_1	1.91373E-02	2.35244E-02	5.95236E-03	-2.92437E-02	-7.55619E-02
c_{-3}	-5.65771E-05	-7.57389E-05	-5.78223E-05	7.17023E-06	9.95333E-05
c_{-2}	1.29034E-04	1.83908E-04	2.04324E-04	1.26327E-04	-4.25009E-06
c_{-1}	-7.17755E-05	-1.33699E-04	-3.17149E-04	-4.70909E-04	-6.22991E-04
c_0	4.88847E-06	5.88696E-05	3.43778E-04	6.66106E-04	1.03180E-03
c_1	-1.09286E-04	-1.80559E-04	-3.32046E-04	-4.18607E-04	-4.81305E-04
c_2	2.79075E-04	3.71348E-04	2.63913E-04	-8.28800E-05	-5.70995E-04
c_3	-3.47012E-04	-4.42427E-04	-1.94369E-04	3.73528E-04	1.13962E-03
c_4	2.83763E-04	3.66071E-04	1.78095E-04	-2.74791E-04	-8.91464E-04
c_5	-1.24925E-04	-1.78239E-04	-1.85468E-04	-8.69493E-05	7.08626E-05
c_6	-3.02095E-05	4.29876E-07	2.32918E-04	5.22537E-04	8.62250E-04
c_7	5.86970E-05	3.21959E-05	-2.43279E-04	-6.06970E-04	-1.04179E-03
c_8	5.62062E-06	3.10614E-05	1.60748E-04	3.06647E-04	4.72259E-04
c_9	-4.25865E-05	-6.64416E-05	-1.07284E-04	-1.22419E-04	-1.27056E-04
c_{10}	5.62062E-06	3.10614E-05	1.60748E-04	3.06647E-04	4.72259E-04
c_{11}	5.86970E-05	3.21959E-05	-2.43279E-04	-6.06970E-04	-1.04179E-03
c_{12}	-3.02095E-05	4.29876E-07	2.32918E-04	5.22537E-04	8.62250E-04
c_{13}	-1.24925E-04	-1.78239E-04	-1.85468E-04	-8.69493E-05	7.08626E-05
c_{14}	2.83763E-04	3.66071E-04	1.78095E-04	-2.74791E-04	-8.91464E-04
c_{15}	-3.47012E-04	-4.42427E-04	-1.94369E-04	3.73528E-04	1.13962E-03
c_{16}	2.79075E-04	3.71348E-04	2.63913E-04	-8.28800E-05	-5.70995E-04
c_{17}	-1.09286E-04	-1.80559E-04	-3.32046E-04	-4.18607E-04	-4.81305E-04
c_{18}	4.88847E-06	5.88696E-05	3.43778E-04	6.66106E-04	1.03180E-03
c_{19}	-7.17755E-05	-1.33699E-04	-3.17149E-04	-4.70909E-04	-6.22991E-04
c_{20}	1.29034E-04	1.83908E-04	2.04324E-04	1.26327E-04	-4.25009E-06
c_{21}	-5.65771E-05	-7.57389E-05	-5.78223E-05	7.17023E-06	9.95333E-05

表5-14j　等圧線の自然スプライン係数

	R02 No. A3				
	ウレタン3面（低密度）				
	215.1 kPa	82.1 kPa	22.4 kPa	12.6 kPa	8.4 kPa
a_0	8.62116E-01	1.78414E+00	4.73337E+00	7.28521E+00	9.82521E+00
a_1	1.04858E-03	-1.44257E-03	-1.86824E-02	-4.02112E-02	-6.57165E-02
c_{-3}	7.33208E-06	1.39815E-05	3.44662E-05	5.23016E-05	7.04097E-05
c_{-2}	-2.53222E-05	-4.40779E-05	-8.88890E-05	-1.18673E-04	-1.43566E-04
c_{-1}	3.19591E-05	5.54428E-05	1.07387E-04	1.37123E-04	1.57920E-04
c_0	-2.88629E-05	-5.16327E-05	-1.04441E-04	-1.36155E-04	-1.59247E-04
c_1	3.75089E-05	6.10815E-05	9.84669E-05	1.05032E-04	9.62418E-05
c_2	-4.75215E-05	-6.66326E-05	-5.32095E-05	9.69371E-06	1.03148E-04
c_3	9.47354E-05	1.02271E-04	-1.05723E-04	-4.49055E-04	-8.90662E-04
c_4	-2.20827E-04	-2.46121E-04	1.90992E-04	9.32344E-04	1.89155E-03
c_5	3.46815E-04	4.42044E-04	8.08577E-05	-6.94637E-04	-1.74698E-03
c_6	-3.63406E-04	-5.21670E-04	-4.79403E-04	-6.40452E-05	5.77651E-04
c_7	2.47217E-04	3.94012E-04	5.84284E-04	5.56341E-04	4.12613E-04
c_8	-8.18990E-05	-1.52153E-04	-3.31779E-04	-4.54909E-04	-5.57509E-04
c_9	-1.66943E-05	-2.93701E-05	-6.36643E-05	-9.08633E-05	-1.17244E-04
c_{10}	6.18910E-05	1.31908E-04	3.72633E-04	5.94775E-04	8.25211E-04
c_{11}	-1.40692E-04	-2.41145E-04	-4.56970E-04	-5.74963E-04	-6.52750E-04
c_{12}	2.06879E-04	2.89383E-04	2.40295E-04	-1.29922E-05	-3.89817E-04
c_{13}	-1.93536E-04	-2.26814E-04	6.86932E-05	5.98324E-04	1.28898E-03
c_{14}	1.85357E-04	2.06176E-04	-1.43849E-04	-7.32558E-04	-1.48996E-03
c_{15}	-2.14792E-04	-2.64989E-04	-3.17362E-06	5.13349E-04	1.20145E-03
c_{16}	1.82973E-04	2.56390E-04	1.99586E-04	-5.07795E-05	-4.21093E-04
c_{17}	-9.41618E-05	-1.59950E-04	-2.79273E-04	-3.17589E-04	-3.15801E-04
c_{18}	4.59365E-05	9.86844E-05	2.65869E-04	4.06757E-04	5.43616E-04
c_{19}	-6.92193E-05	-1.29687E-04	-2.81916E-04	-3.82887E-04	-4.63935E-04
c_{20}	8.32030E-05	1.35341E-04	2.10158E-04	2.10414E-04	1.71445E-04
c_{21}	-3.48734E-05	-5.24738E-05	-6.13962E-05	-3.63472E-05	8.33828E-06

表5-14k　等圧線の自然スプライン係数

	R02 No. A4				
	ウレタン4面（低密度）				
	215.1 kPa	82.1 kPa	22.4 kPa	12.6 kPa	8.4 kPa
a_0	8.66963E-01	1.73030E+00	4.34779E+00	6.51580E+00	8.61666E+00
a_1	6.05706E-04	-4.04973E-03	-3.18883E-02	-6.50103E-02	-1.03462E-01
c_{-3}	-1.06198E-05	-4.00842E-07	8.45099E-05	1.94279E-04	3.25510E-04
c_{-2}	5.16168E-05	3.14493E-05	-2.14200E-04	-5.52261E-04	-9.64549E-04
c_{-1}	-1.12680E-04	-1.08278E-04	2.03307E-04	6.78205E-04	1.27451E-03
c_0	1.42005E-04	1.51985E-04	-1.52037E-04	-6.46281E-04	-1.27715E-03
c_1	-1.04506E-04	-9.34332E-05	2.32134E-04	7.13212E-04	1.31171E-03
c_2	1.89184E-05	-2.79311E-05	-3.29509E-04	-6.92286E-04	-1.11336E-03
c_3	5.28340E-05	1.06249E-04	2.51569E-04	3.53336E-04	4.37263E-04
c_4	-3.75651E-05	-5.96357E-05	-7.57640E-05	-4.81927E-05	6.06963E-06
c_5	-3.75805E-05	-5.96637E-05	-7.58184E-05	-4.82587E-05	5.99944E-06
c_6	5.28803E-05	1.06333E-04	2.51732E-04	3.53534E-04	4.37473E-04
c_7	1.87487E-05	-2.82392E-05	-3.30107E-04	-6.93013E-04	-1.11413E-03
c_8	-1.03873E-04	-9.22848E-05	2.34364E-04	7.15920E-04	1.31459E-03
c_9	1.39645E-04	1.47700E-04	-1.60359E-04	-6.56387E-04	-1.28789E-03
c_{10}	-1.03873E-04	-9.22848E-05	2.34364E-04	7.15920E-04	1.31459E-03
c_{11}	1.87487E-05	-2.82392E-05	-3.30107E-04	-6.93013E-04	-1.11413E-03
c_{12}	5.28803E-05	1.06333E-04	2.51732E-04	3.53534E-04	4.37473E-04
c_{13}	-3.75805E-05	-5.96637E-05	-7.58184E-05	-4.82587E-05	5.99944E-06
c_{14}	-3.75651E-05	-5.96357E-05	-7.57640E-05	-4.81927E-05	6.06963E-06
c_{15}	5.28340E-05	1.06249E-04	2.51569E-04	3.53336E-04	4.37263E-04
c_{16}	1.89184E-05	-2.79311E-05	-3.29509E-04	-6.92286E-04	-1.11336E-03
c_{17}	-1.04506E-04	-9.34332E-05	2.32134E-04	7.13212E-04	1.31171E-03
c_{18}	1.42005E-04	1.51985E-04	-1.52037E-04	-6.46281E-04	-1.27715E-03
c_{19}	-1.12680E-04	-1.08278E-04	2.03307E-04	6.78205E-04	1.27451E-03
c_{20}	5.16168E-05	3.14493E-05	-2.14200E-04	-5.52261E-04	-9.64549E-04
c_{21}	-1.06198E-05	-4.00842E-07	8.45099E-05	1.94279E-04	3.25510E-04

表5-14l　等圧線の自然スプライン係数

	R01 No. C2				
	コの字障壁（防爆壁と並行）				
	215.1 kPa	82.1 kPa	22.4 kPa	12.6 kPa	8.4 kPa
a_0	9.38311E-01	1.84039E+00	4.49170E+00	6.62660E+00	8.65680E+00
a_1	4.59520E-03	2.91307E-03	-1.85180E-02	-4.82465E-02	-8.46203E-02
c_{-3}	-2.64091E-05	-2.60652E-05	4.36750E-05	1.51573E-04	2.87689E-04
c_{-2}	1.06214E-04	1.14528E-04	-1.08687E-04	-4.73994E-04	-9.41194E-04
c_{-1}	-2.02507E-04	-2.33215E-04	1.03605E-04	6.93055E-04	1.45828E-03
c_0	2.45498E-04	2.89399E-04	-7.84244E-05	-7.43740E-04	-1.61336E-03
c_1	-2.03071E-04	-2.32572E-04	1.11033E-04	7.07895E-04	1.48120E-03
c_2	1.08469E-04	1.11955E-04	-1.38401E-04	-5.33356E-04	-1.03290E-03
c_3	-2.89519E-05	-3.29095E-05	6.81036E-06	7.32204E-05	1.56733E-04
c_4	6.14732E-06	3.55468E-05	1.96713E-04	3.86850E-04	6.08620E-04
c_5	7.11545E-06	-1.87578E-05	-1.85151E-04	-3.88144E-04	-6.26326E-04
c_6	-5.01041E-05	-5.17279E-05	6.62641E-05	2.53122E-04	4.90030E-04
c_7	6.88106E-05	7.24034E-05	-8.39899E-05	-3.35545E-04	-6.56088E-04
c_8	-8.73388E-05	-8.90810E-05	1.24785E-04	4.61782E-04	8.88967E-04
c_9	1.45055E-04	1.72594E-04	-4.44191E-05	-4.43419E-04	-9.68116E-04
c_{10}	-1.29111E-04	-1.71092E-04	-7.59652E-05	1.65108E-04	5.00914E-04
c_{11}	1.89706E-06	1.49314E-05	8.80566E-05	1.74549E-04	2.75273E-04
c_{12}	9.17361E-05	1.11407E-04	-2.34470E-05	-2.80077E-04	-6.21314E-04
c_{13}	-6.06645E-05	-7.87118E-05	-1.27343E-05	1.33576E-04	3.34636E-04
c_{14}	-3.94330E-05	-4.74411E-05	-3.60299E-06	7.85392E-05	1.85288E-04
c_{15}	1.18259E-04	1.59720E-04	1.03729E-04	-7.06107E-05	-3.18089E-04
c_{16}	-1.18293E-04	-1.74503E-04	-1.93547E-04	-1.01608E-04	5.40165E-05
c_{17}	3.23231E-05	7.05125E-05	1.75972E-04	2.49843E-04	3.10667E-04
c_{18}	3.09785E-05	9.19382E-06	-1.42784E-04	-3.19070E-04	-5.16750E-04
c_{19}	1.87535E-05	5.23319E-05	1.65382E-04	2.60856E-04	3.52071E-04
c_{20}	-6.40147E-05	-1.01781E-04	-1.51186E-04	-1.45660E-04	-1.11600E-04
c_{21}	2.86411E-05	4.33370E-05	5.63137E-05	4.52574E-05	2.13549E-05

5.6 検討 3 – 正圧相インパルスと角度

5.6.1 換算インパルス

実験 No. A1 ~ A5, B の結果を、地表面爆発や過去の結果と比較することで、ウレタンフォームおよびコの字障壁の設置の影響について検討する。これらの実験で得られた換算インパルス I_s について、0º、90º、180º 方向の換算距離に対する分布を図 5-18a ~ g に示した。対応する野外実験および R01、R02 年度室内実験の結果を併記する。

また、正圧相インパルス I をθの関数とみて図 5-19a, b に整理した。図 5-20a, b に地表面爆発の正圧相インパルスの平均値 I_0 との比（I/I_0）をθの関数として示した。0º、90º、180º 方向の I/I_0 を換算距離ごとに表 5-15a ~ e に整理し、図 5-21a ~ g に示した。I は表 5-7a ~ d から、I_0 は表 5-4 から抽出して用いた。

No. O2, A4 は 45º で対称のため、90º、180º、270º のプロットは 0º のものを用いた。同様に、No. A1, A3 は 180º で対称のため、270º のプロットは 90º のものを用いた。No. A2 は 45º で対称のため、0º のプロットは 90º のものを用いた。No. A5 は 90º で対称のため、180º のプロットは 0º のものを、270º のプロットは 90º のものを用いた。

(a) 防爆壁のみ

No. O2 の換算インパルスは、同一条件で実施した R01 年度 No. A、R02 年度 No. A0 とよく一致した。そのため、爆風パラメータの角度依存性を考察する際には、R01 年度 No. A を参考に用いる。野外実験実験 No. 2-2 との比較では、室内実験で取得した換算インパルスは野外実験と同程度であった。

防爆壁のみの 0°方向の正圧相インパルスは、爆点近傍で地表面爆発よりも減少し、遠方で地表面爆発と同等か上回った。

(b) ウレタン

No. A1 より、ウレタンを 1 面に配置した場合には、
・0°方向：近傍で防爆壁のみよりも減少し、全域で地表面爆発を下回る。R02 年度の低密度ウレタンと同程度。
・90°方向：防爆壁のみ、R02 年度の低密度ウレタンよりも減少し、全域で地表面爆発を下回る。
・180°方向：近傍で防爆壁と同等、遠方で防爆壁のみを上回り、地表面爆発と同等。近傍では R02 年度の低密度ウレタンよりも減少。

No. A2 より、ウレタンを 1 面（L 型）に配置した場合には、
・0°（90°）方向：防爆壁よりも減少し、全域で地表面爆発を下回る。
・180°方向：防爆壁よりも同等または減少し、全域で地表面爆発を下回る。

No. A3 より、ウレタンを 3 面に配置した場合には、
・0°方向：全域で地表面爆発、防爆壁のみを下回る。遠方では R02 年度の低密度ウレタンよりも大きく減少。

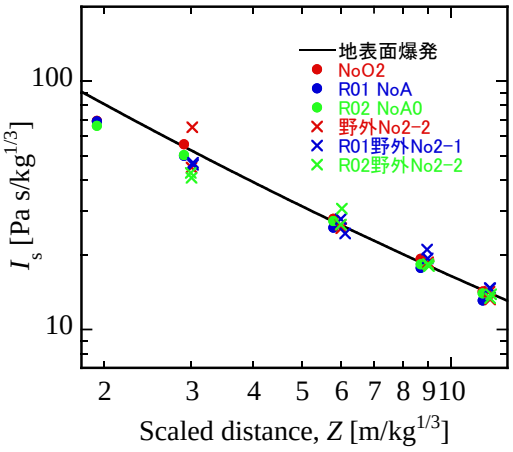
・90°方向：全域で地表面爆発、防爆壁のみを下回る。遠方では R02 年度の低密度ウレタンよりも大きく減少。
・180°方向：全域で地表面爆発、防爆壁のみを下回る。遠方では R02 年度の低密度ウレタンよりも大きく減少。

No. A4 より、ウレタンを 4 面に配置した場合には、
・0°方向：全域で地表面爆発、防爆壁のみ、R02 年度の低密度ウレタンのすべてを下回る。

No. A5 より、ウレタンを 2 面（II 型）に配置した場合には、
・0°方向：全域で地表面爆発、防爆壁のみ、R02 年度の低密度ウレタンのすべてを下回る。
・90°方向：全域で地表面爆発、防爆壁のみを下回る。遠方では R02 年度の低密度ウレタンよりも大きく減少。

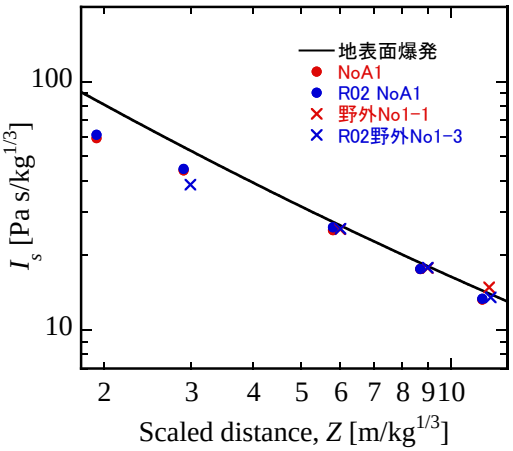
(c) コの字障壁

No. B より、コの字障壁を防爆壁に対して 45 度傾けて設置した場合には、
・0°方向：近傍で防爆壁のみを下回り、中距離では防爆壁のみと同等。遠方では地表面爆発、防爆壁のみを上回る。遠方で R01 年度のコの字障壁（防爆壁と平行に設置）を上回る。
・90°方向：近傍では防爆壁のみと同等程度。遠方では地表面爆発、防爆壁のみを上回る。遠方で R01 年度のコの字障壁（防爆壁と平行に設置）を上回る。
・180°方向：全域で防爆壁のみを上回る。R01 年度のコの字障壁（防爆壁と平行に設置）と比較して、近傍では下回り、遠方では同等。

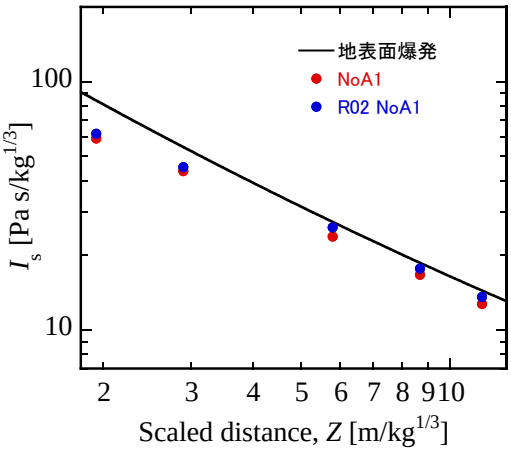


0º方向

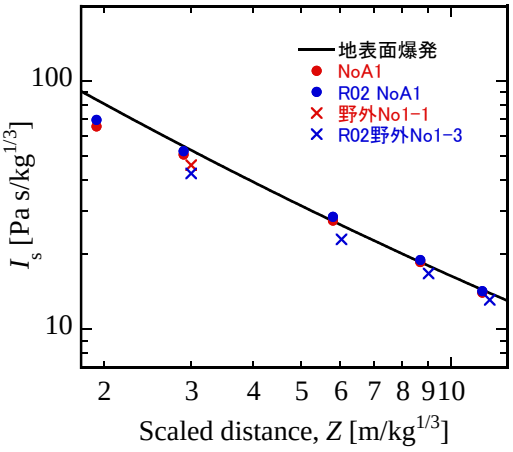
図5-18a　換算距離とI_s（防爆壁のみ）



0º方向

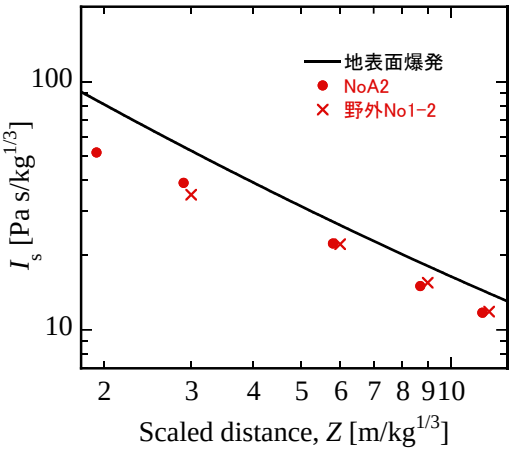


90º方向

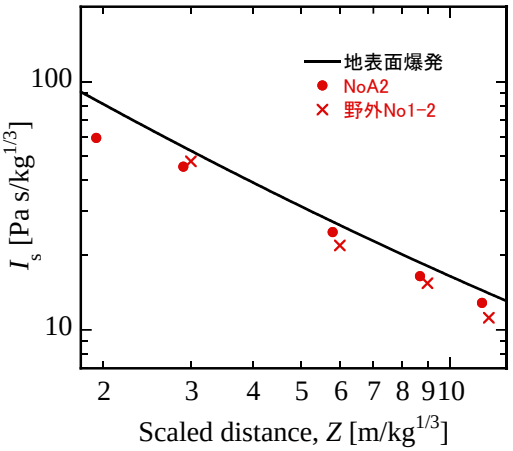


180º方向

図5-18b　換算距離とI_s（ウレタン1面）

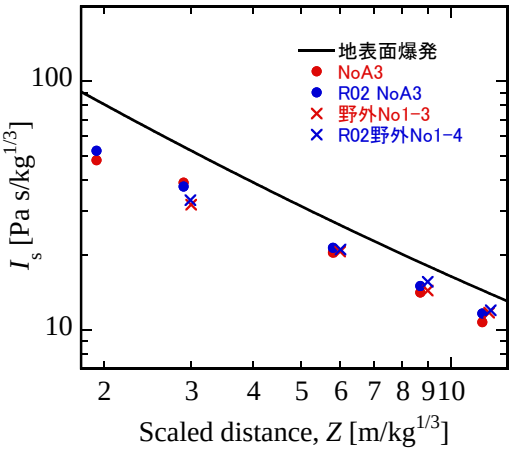


0º（90º）方向

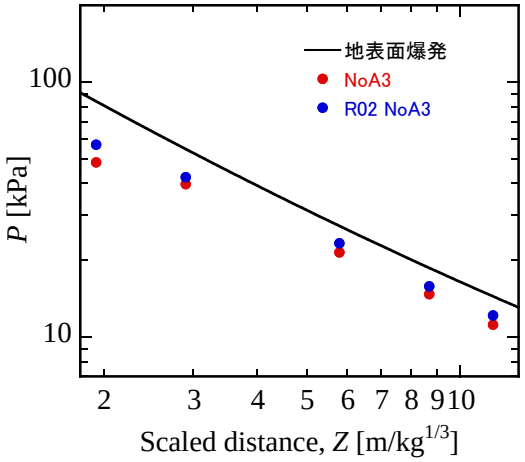


180º方向

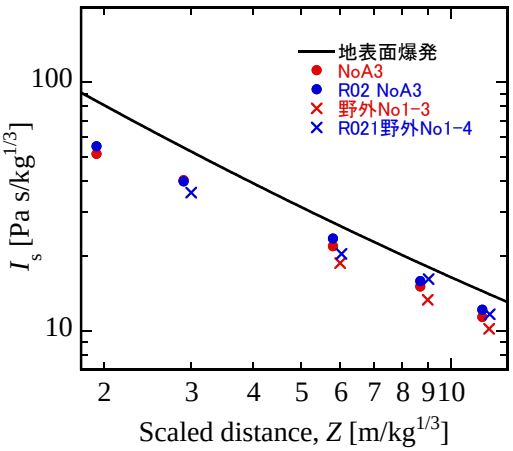
図5-18c　換算距離とI_s（ウレタン2面（L型））



0º方向

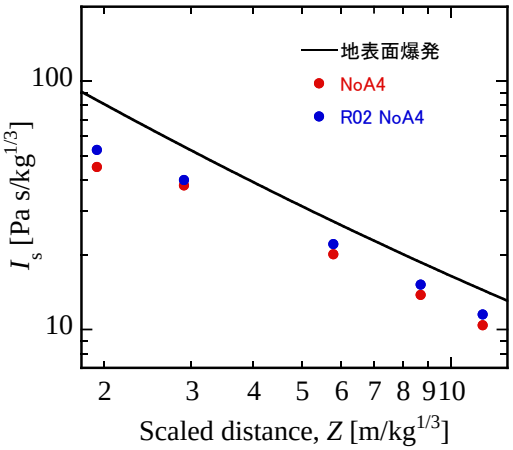


90º方向



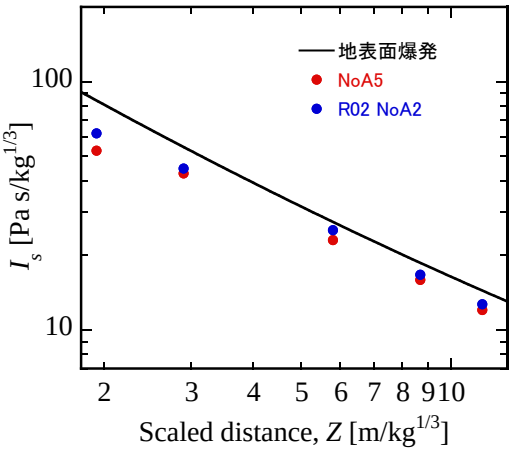
180º方向

図5-18d　換算距離とI_s（ウレタン3面）

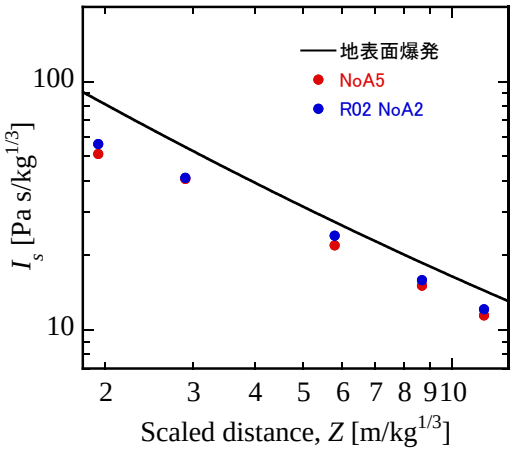


0º方向

図5-18e　換算距離とI_s（ウレタン4面）

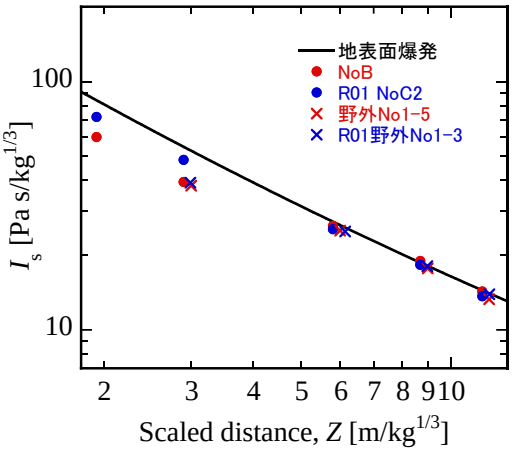


0º方向

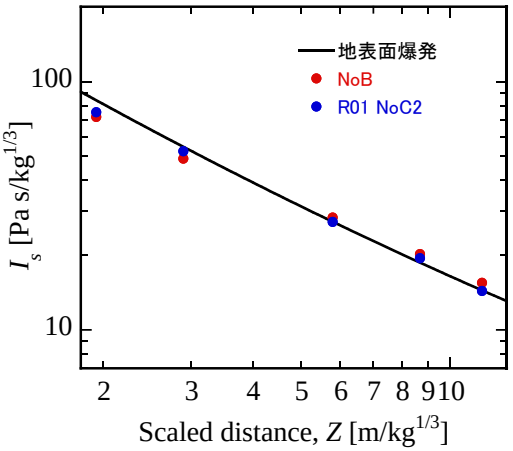


90º方向

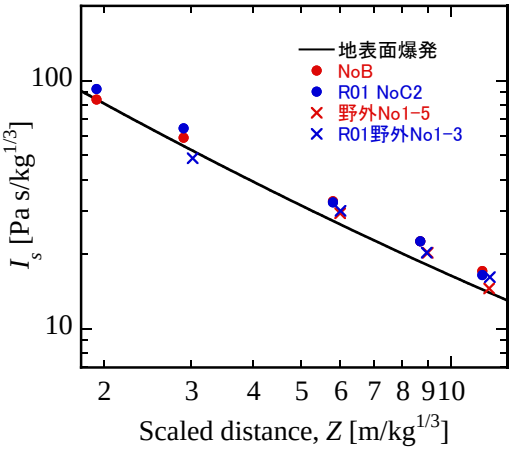
図5-18f　換算距離とI_s（ウレタン2面（II型））



0º方向



90º方向



180º方向

図5-18g　換算距離とI_s（コの字障壁）

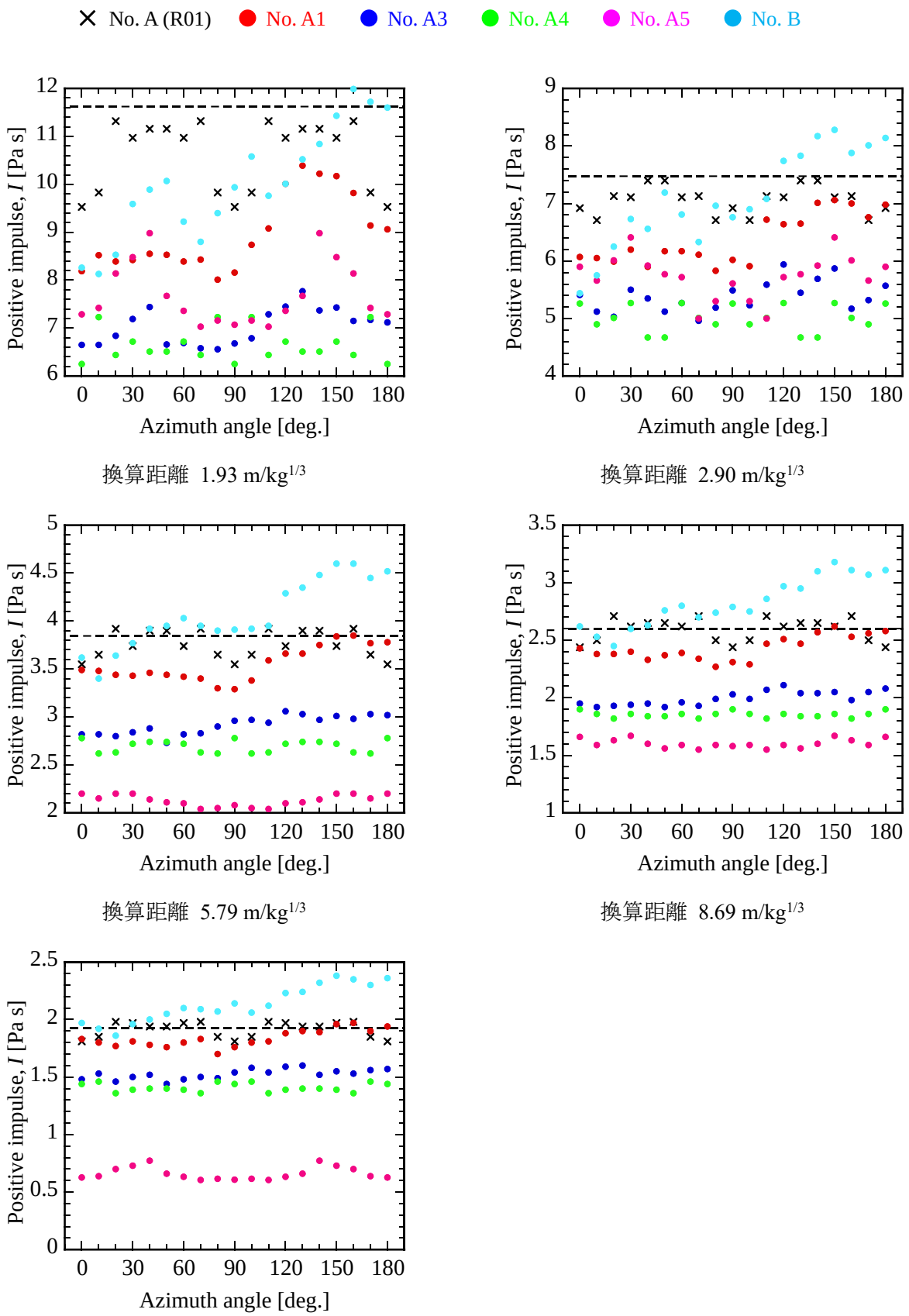


図5-19a　*I*の角度分布（No. A2以外、破線は地表面爆発）

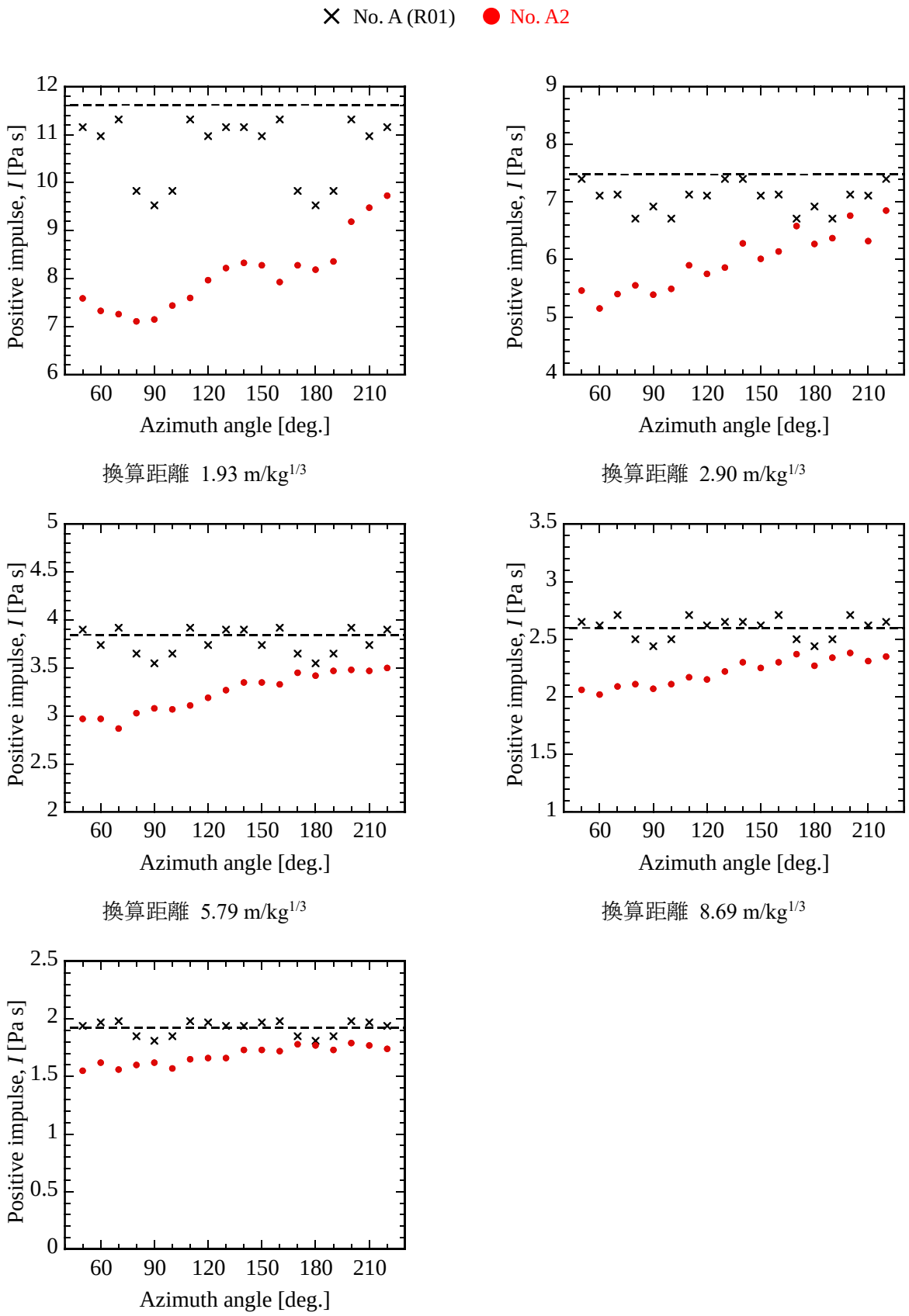


図5-19b　*I*の角度分布（No. A2、破線は地表面爆発）

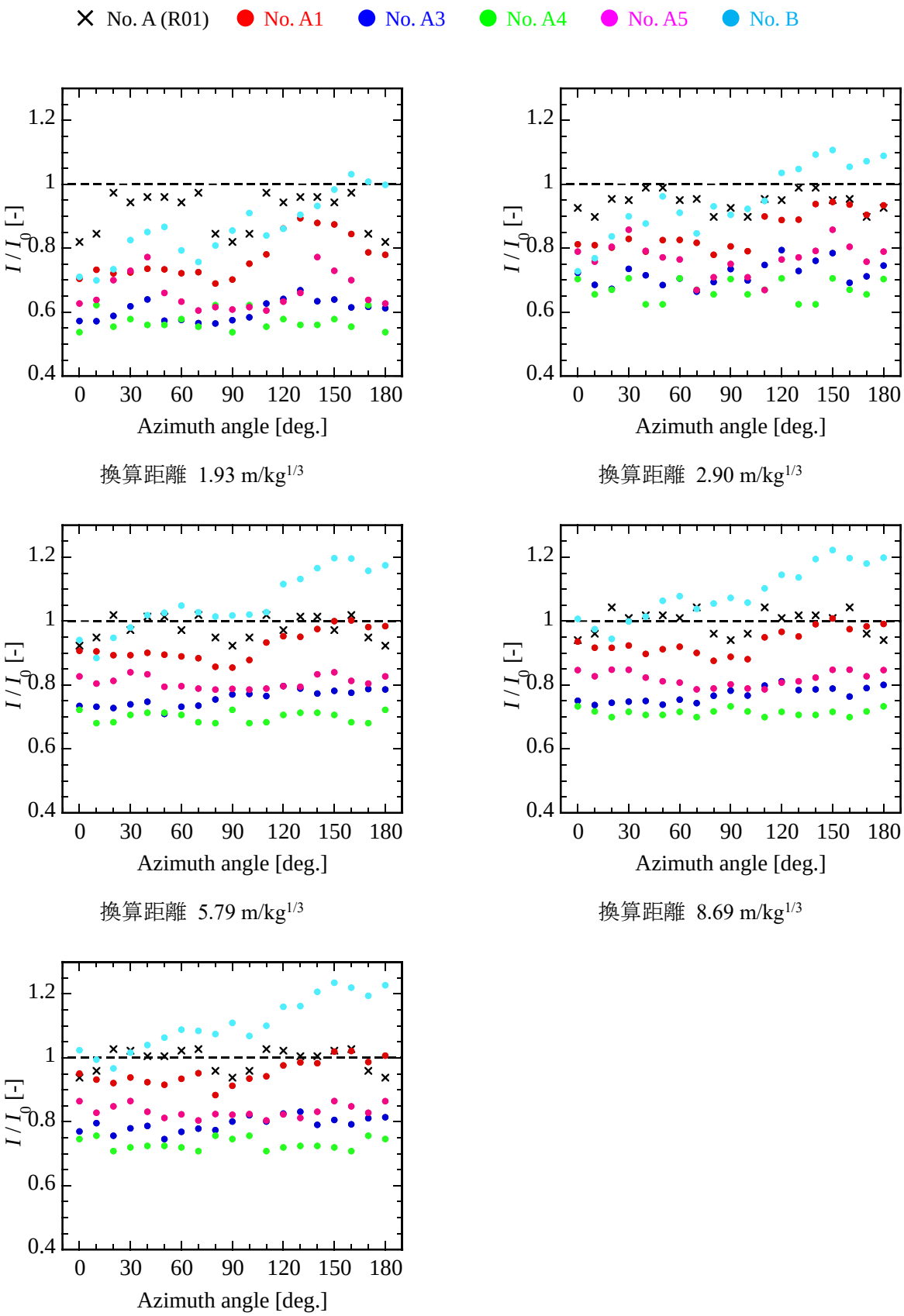


図5-20a　I/I_0の角度分布（No. A2以外、破線は地表面爆発）

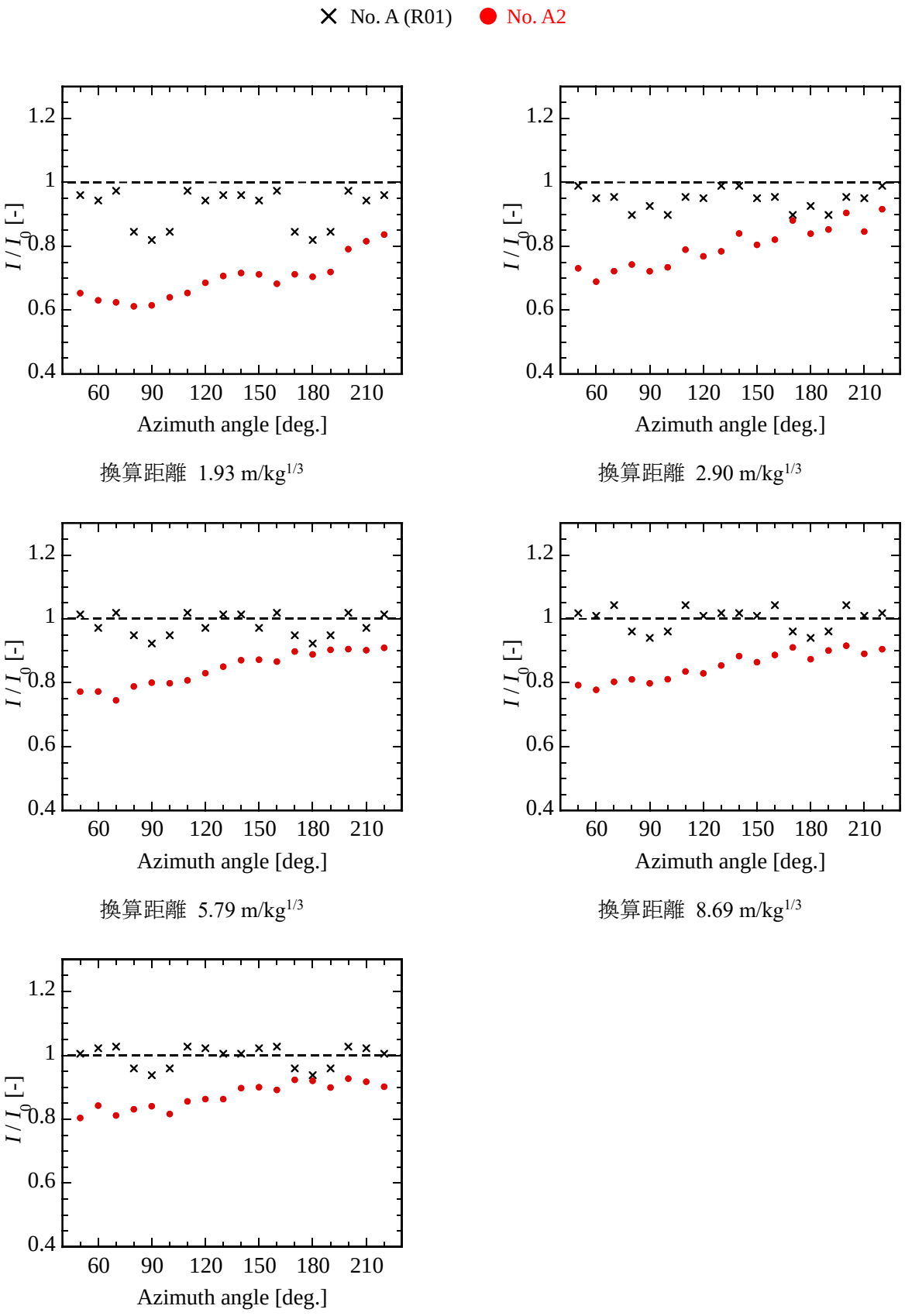


図5-20b　I/I_0の角度分布（No. A2、破線は地表面爆発）

表5-15a　I/I_0

換算距離 [m/kg$^{1/3}$]	No. O2	R01年度No. A	R02年度No. A0
	防爆壁のみ	防爆壁のみ	防爆壁のみ
	0º	0º	0º
1.93	0.8238	0.8200	0.7862
2.90	1.0312	0.9264	0.9324
5.79	1.0031	0.9232	0.9832
8.69	1.0243	0.9407	0.9730
11.59	1.0198	0.9380	1.0019

表5-15b　I/I_0

換算距離 [m/kg$^{1/3}$]	No. A1			No. A2		No. A3		
	ウレタン1面			ウレタン2面（L型）		ウレタン3面		
	0º	90º	180º	90º	180º	0º	90º	180º
1.93	0.7044	0.7020	0.7794	0.6152	0.7045	0.5723	0.5749	0.6123
2.90	0.8123	0.8060	0.9340	0.7216	0.8394	0.7232	0.7348	0.7458
5.79	0.9069	0.8544	0.9841	0.8003	0.8888	0.7343	0.7704	0.7861
8.69	0.9360	0.8885	0.9912	0.7981	0.8739	0.7509	0.7823	0.8005
11.59	0.9507	0.9127	1.0071	0.8410	0.9203	0.7699	0.8007	0.8141

表5-15c　I/I_0

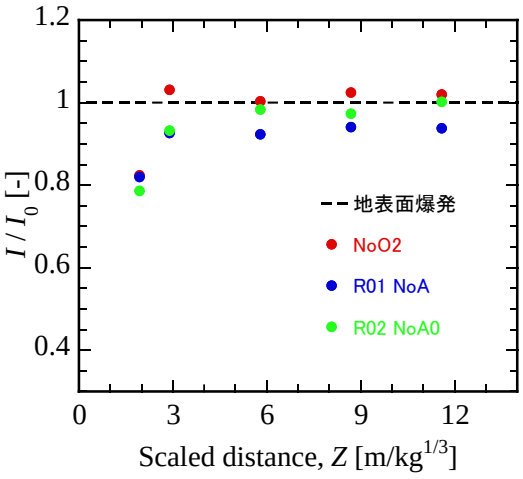
換算距離 [m/kg$^{1/3}$]	No. A4	No. A5		No. B		
	ウレタン4面	ウレタン2面（II型）		コの字障壁		
	0º	0º	90º	0º	90º	180º
1.93	0.5373	0.6270	0.6082	0.7104	0.8553	0.9981
2.90	0.7037	0.7893	0.7506	0.7278	0.9043	1.0891
5.79	0.7224	0.8272	0.7878	0.9409	1.0175	1.1743
8.69	0.7331	0.8467	0.8021	1.0069	1.0727	1.1987
11.59	0.7461	0.8645	0.8220	1.0239	1.1094	1.2273

表5-15d　I/I_0

換算距離 [m/kg$^{1/3}$]	No. A1 (R02) ウレタン1面（低密度）			No. A2 (R02) ウレタン2面（II型）（低密度）		No. A3 (R02) ウレタン3面（低密度）		
	0º	90º	180º	90º	180º	0º	90º	180º
1.93	0.7270	0.7336	0.8280	0.7362	0.6668	0.6247	0.6748	0.6569
2.90	0.8239	0.8370	0.9634	0.8259	0.7581	0.6972	0.7827	0.7375
5.79	0.9314	0.9302	1.0188	0.9073	0.8617	0.7681	0.8366	0.8437
8.69	0.9370	0.9404	1.0107	0.8878	0.8448	0.7977	0.8397	0.8411
11.59	0.9588	0.9751	1.0214	0.9114	0.8697	0.8338	0.8706	0.8710

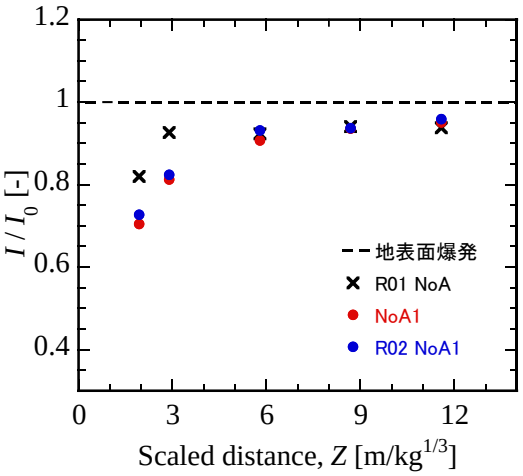
表5-15e　I/I_0

換算距離 [m/kg$^{1/3}$]	No. A4 (R02) ウレタン4面（低密度）	No. C2 (R01) コの字障壁（防爆壁と平行）		
	0º	0º	90º	180º
1.93	0.6296	0.8551	0.8938	1.1000
2.90	0.7402	0.8935	0.9679	1.1872
5.79	0.7932	0.9134	0.9763	1.1624
8.69	0.8065	0.9711	1.0327	1.1984
11.59	0.8250	0.9803	1.0282	1.1831

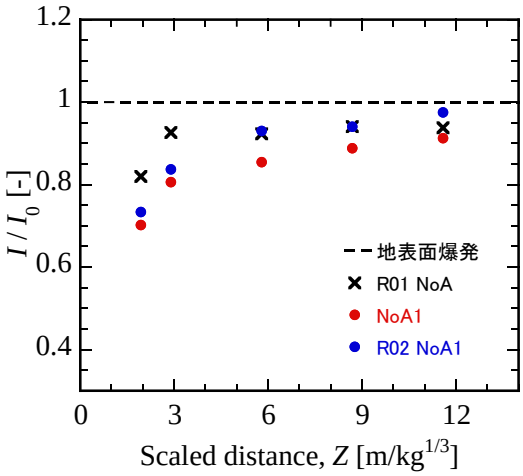


0º方向

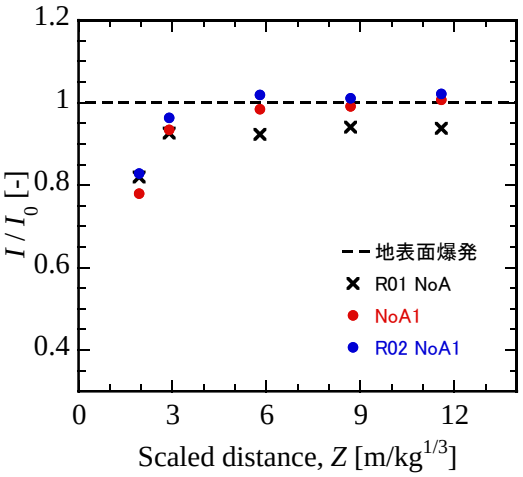
図5-21a　換算距離とI/I_0（防爆壁のみ）



0º方向

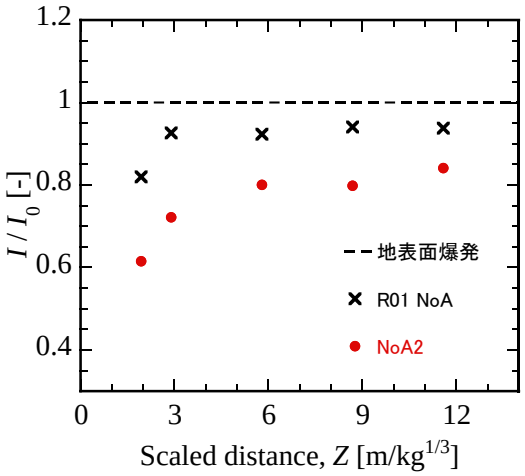


90º方向

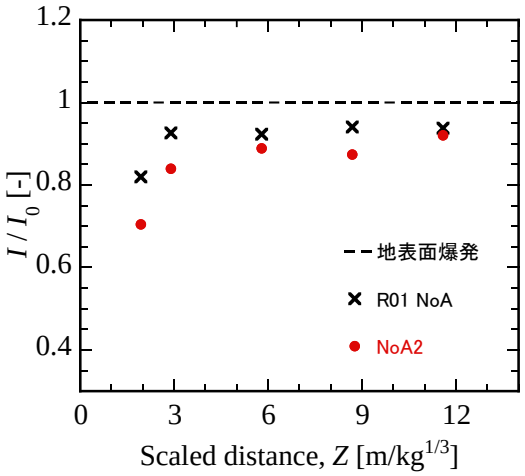


180º方向

図5-21b　換算距離とI/I_0（ウレタン1面）

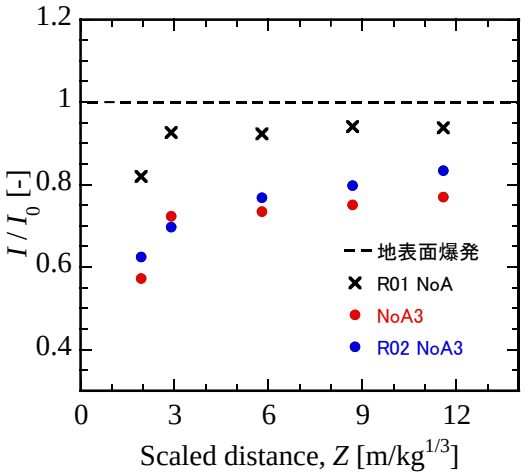


0º（90º）方向

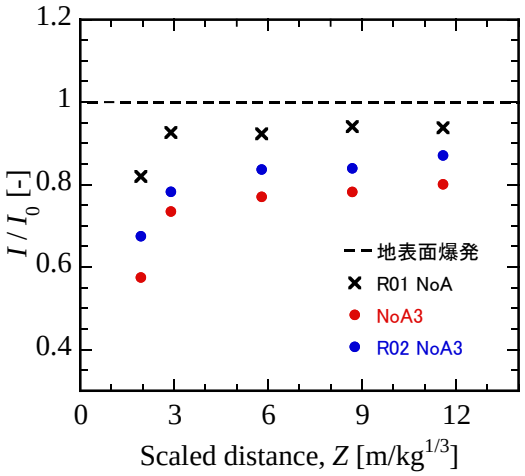


180º方向

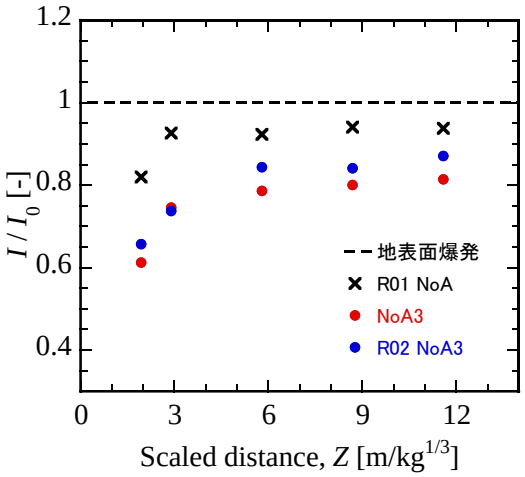
図5-21c　換算距離とI/I_0（ウレタン2面（L型））



0º方向

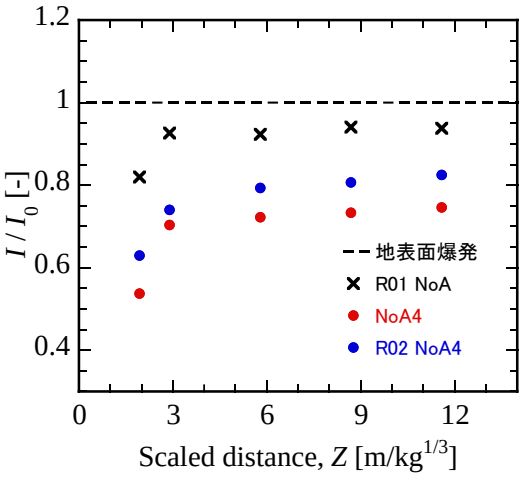


90º方向



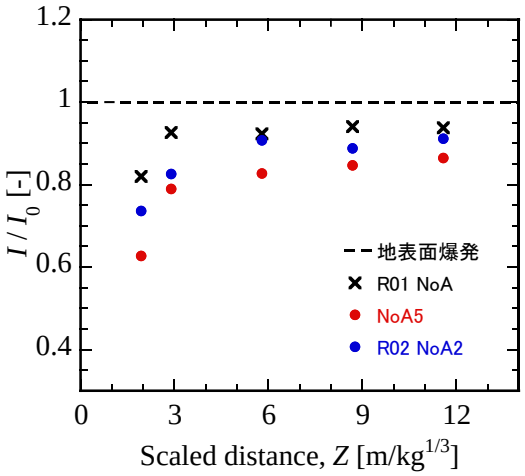
180º方向

図5-21d　換算距離とI/I_0（ウレタン3面）

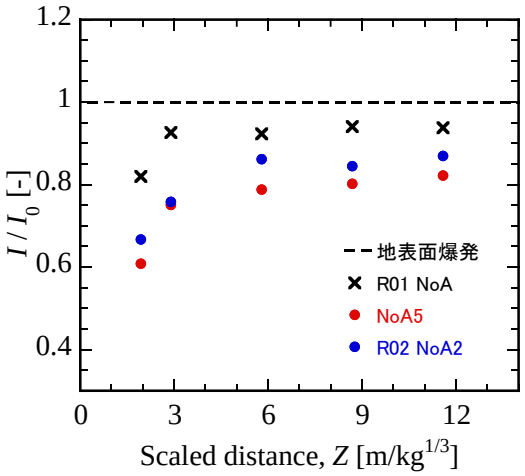


0º方向

図5-21e　換算距離とI/I_0（ウレタン4面）

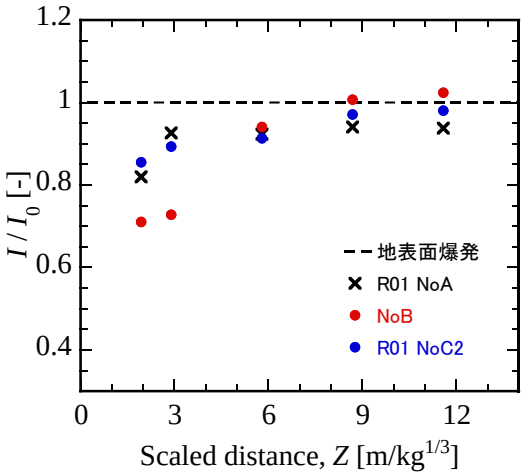


0º方向

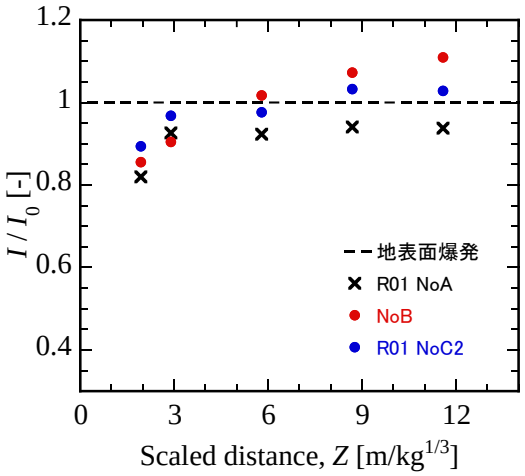


90º方向

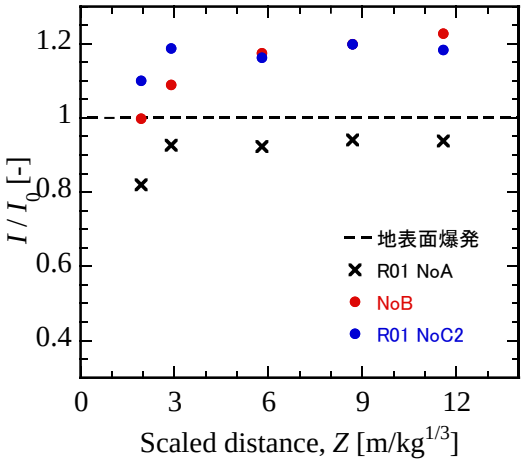
図5-21f　換算距離とI/I_0（ウレタン2面（II型））



0º方向



90º方向



180º方向

図5-21g　換算距離とI/I_0（コの字障壁）

5.6.2　等インパルス線

eq. 7 を変形して得られる eq. 11 の関係から、正圧相インパルス I に対応する換算距離 Z が求められる。

$$Z = 10^{\frac{\log_{10} I - a_0}{a_1}} \qquad \text{eq. 11}$$

表 5-4 に示す正圧相インパルスを 5 種の基準インパルスとし、各々の角度 θ について基準インパルスと同等の正圧相インパルスが生じる換算距離 Z を求め表 5-16a ~ d に整理した。同様に、野外実験については表 5-16e ~ g に、令和元年度および令和 2 年度の室内実験結果については表 5-16h ~ k に、令和元年度および令和 2 年度の野外実験結果については表 5-16l ~ n に示した。等インパルス線は、対応する野外実験の結果と比較して図 5-22a ~ e に、過去の室内実験の結果と比較して図 5-23a, b に示した。ただし、野外実験の場合には、表 5-4 に示す正圧相インパルスから換算インパルスを算出し、それと同等の換算インパルスが生じる換算距離とした。

測定点の間は、Z を θ の関数とみなし eq. 12 に示す 3 次の自然スプライン $Z(\theta)$で補間した。スプラインの節点は、19 個の測定点に θ = –30º, –20º, –10º, 190º, 200º の 6 点を加えた 25 点とした。

$$Z = a_0 + a_1\theta + \sum_{n=3}^{21} c_n(\theta + 10n)_+^3 \qquad \text{eq. 12}$$

$$\text{ただし、} \begin{cases} \theta^3 & (\theta \geq 0 \text{のとき}) \\ 0 & (\theta < 0 \text{のとき}) \end{cases}$$

ただし、No. A2 の場合には、50º ~ 220º の 18 個の測定点に θ = 20º, 30º, 40º, 230º, 240º, 250º の 6 点を加えた 24 点とした。No. A2 の 3 次の自然スプライン $Z(\theta)$を eq. 13 に示す。

$$Z = a_0 + a_1\theta + \sum_{n=3}^{20} c_n(\theta + 10n)_+^3 \qquad \text{eq. 13}$$

$$\text{ただし、} \begin{cases} \theta^3 & (\theta \geq 0 \text{のとき}) \\ 0 & (\theta < 0 \text{のとき}) \end{cases}$$

スプライン係数の一覧は表 5-17a ~ l に示した。

図 5-22a ~ e から等インパルス線を選別し、表面爆発と同等の正圧相インパルスが生じる換算距離の角度依存性について、今年度の室内実験と過去の対応する室内実験を比較したものが図 5-24a ~ e である。

各実験における換算距離毎の等インパルス線の特徴を述べる。

・No. A1
　0º ~ 90º 方向の正圧相インパルスが減少する。180º 方向では遠方で地表面爆発を上回る。
・No. A2
　全角度で正圧相インパルスが減少し、地表面爆発を下回る。特に-45º ~ 135º 方向で減少する。
・No. A3
　全角度で正圧相インパルスが減少し、地表面爆発を下回る。特に 0º ~ 90º 方向で減少する。
・No. A4
　全角度で正圧相インパルスが減少し、地表面爆発を下回る。
・No. A5
　全角度で正圧相インパルスが減少し、地表面爆発を下回る。
・No. B

爆点近傍では 0º ~ 90º 方向で正圧相インパルスが減少するが、遠方では地表面爆発と同等以上となる。他の角度では地表面爆発を上回る。

爆風に対する安全確保の観点から等インパルス線図を眺めると、等インパルス線の外側が安全区画に相当する。たとえば、第四種保安物件（国道や高圧電線などが該当）に対する火薬庫の場合は、換算距離 3 m/kg$^{1/3}$ に相当する円が境界となる（境界となる円は図示されていない）。同様に第三種保安物件、第二種保安物件、第一種保安物件に対しては、換算距離 6, 9, 12 m/kg$^{1/3}$ に相当する円が境界となる（同上）。今年度の室内実験で、保安物件の換算距離に対応するのは、2.90, 5.79, 8.69, 11.59 m/kg$^{1/3}$ である。これらの換算距離を基準とするとき、それぞれの等インパルス線について、前方（0º ~ 90º 方向）の全域で基準となる換算距離を下回るものは以下のとおりであった。

・7.47 Pa s 等インパルス線（換算距離 2.90 m/kg$^{1/3}$ 相当）：No. A1, No. A2, No. A3, No. A4, No. A5, No. B

・3.85 Pa s 等インパルス線（換算距離 5.79 m/kg$^{1/3}$ 相当）：No. A1, No. A2, No. A3, No. A4, No. A5

・2.60 Pa s 等インパルス線（換算距離 8.69 m/kg$^{1/3}$ 相当）：No. A1, No. A2, No. A3, No. A4, No. A5

・1.93 Pa s 等インパルス線（換算距離 11.59 m/kg$^{1/3}$ 相当）：No. A1, No. A2, No. A3, No. A4, No. A5

本年度の室内実験と野外実験とを比較し、以下のことを述べる。

・防爆壁のみの場合
0º、45º、135º、180º 方向では、爆点近傍では野外実験と室内実験は比較的近い値をとっているが、遠方では室内実験のほうが正圧相インパルスを小さく評価している。
・ウレタン 1 面の場合
0º、45º、135º 方向では、爆点近傍では野外実験と室内実験は比較的近い値をとっているが、遠方では室内実験のほうが正圧相インパルスを小さく評価している。
180º 方向では、野外実験と室内実験は比較的近い値をとっている。
・ウレタン 2 面（L 型）の場合
0º、45º、135º 方向では、野外実験と室内実験は比較的近い値をとっている。
180º 方向では、室内実験のほうが正圧相インパルスを大きく評価している。
・ウレタン 3 面の場合
0º、45º 方向では、爆点近傍では野外実験と室内実験は比較的近い値をとっているが、遠方では室内実験のほうが正圧相インパルスを小さく評価している。
135º 方向では、野外実験と室内実験は比較的近い値をとっている。
180º 方向では、爆点近傍では野外実験と室内実験は比較的近い値をとっているが、遠方では室内実験のほうが正圧相インパルスを大きく評価している。
・コの字障壁の場合
0º 方向では、野外実験と室内実験は比較的近い値をとっている。
45º 方向では、爆点近傍では室内実験のほうが正圧相インパルスを大きく評価しているが、遠方では野外実験と室内実験は比較的近い値をとっている。
135º 方向では、室内実験のほうが正圧相インパルスを大きく評価している
180º 方向では、爆点近傍では野外実験と室内実験は比較的近い値をとっているが、遠方では室内実験のほうが正圧相インパルスを大きく評価している。

室内実験と野外実験では全体的な角度依存性は定性的にも一致していない。結果の乖離の原因は、5.3.1、5.3.2 で指摘した事項の他に、防爆壁が変形・破壊される影響や、ウレタンフォームの物性

がスケール化されていないことが可能性として挙げられる。実環境を正確に模擬するためには、薄い金属板などで防爆壁を模擬し、ウレタンフォームの物性のスケール化も考慮する必要がある。

本年度の室内実験を過去の室内実験の結果と比較し、ウレタンの密度の違い、コの字障壁の設置方向に関し、以下のことを述べる。

・ウレタン 1 面の場合
高密度ウレタンの場合には、低密度ウレタンに比べて、ほとんどの角度、距離で正圧相インパルスを小さく評価している。ただし、遠方の 120º、150º 方向では、高密度ウレタンのほうが正圧相インパルスを大きく評価している。全体的な角度依存性は定性的に一致している。
・ウレタン 3 面の場合
高密度ウレタンの場合には、低密度ウレタンに比べて、すべての角度、距離で正圧相インパルスを小さく評価している。低密度ウレタン、高密度ウレタンのどちらの場合においても、すべての角度、距離で地表面爆発を下回った。全体的な角度依存性は定性的に一致している。
・ウレタン 4 面の場合
高密度ウレタンの場合には、低密度ウレタンに比べて、すべての角度、距離で正圧相インパルスを小さく評価している。低密度ウレタン、高密度ウレタンのどちらの場合においても、すべての角度、距離で地表面爆発を下回った。高密度ウレタンのほうが、角度による正圧相インパルスの変動が大きい。
・ウレタン 2 面（II 型）の場合
高密度ウレタンの場合には、低密度ウレタンに比べて、ほとんどの角度、距離で正圧相インパルスを小さく評価している。ただし、爆点近傍の 40º 方向では、高密度ウレタンのほうが正圧相インパルスを大きく評価している。低密度ウレタン、高密度ウレタンのどちらの場合においても、すべての角度、距離で地表面爆発を下回った。全体的な角度依存性は定性的に一致している。
・コの字障壁の場合
コの字障壁を防爆壁に対して 45 度傾けて設置した場合には、防爆壁に並行に設置した場合に比べて、障壁がない方向（90 ~ 180º 側）で正圧相インパルスを大きく評価している。遠方に行くに従い、45 度傾けて設置した場合が上回る角度範囲が広がる。全体的な角度依存性は定性的に一致している。

表5-16a　基準正圧相インパルスを与える換算距離（No. O2, No. A1）

角度 θ[°]	No. O2					No. A1				
	ウレタン1面					ウレタン1面				
	換算距離 Z [m/kg$^{1/3}$]					換算距離 Z [m/kg$^{1/3}$]				
	11.62 Pa s	7.47 Pa s	3.85 Pa s	2.60 Pa s	1.93 Pa s	11.62 Pa s	7.47 Pa s	3.85 Pa s	2.60 Pa s	1.93 Pa s
0	1.68	2.74	5.72	8.83	12.30	1.31	2.22	4.94	7.92	11.35
10	1.62	2.66	5.61	8.72	12.22	1.37	2.28	4.94	7.79	11.03
20						1.34	2.25	4.88	7.71	10.94
30						1.36	2.28	4.95	7.82	11.09
40						1.36	2.26	4.88	7.67	10.85
50						1.39	2.30	4.92	7.71	10.86
60						1.36	2.27	4.93	7.79	11.04
70						1.35	2.26	4.91	7.77	11.02
80						1.29	2.15	4.66	7.35	10.41
90						1.32	2.20	4.76	7.51	10.64
100						1.38	2.28	4.87	7.62	10.72
110						1.53	2.49	5.22	8.07	11.26
120						1.62	2.62	5.40	8.27	11.46
130						1.67	2.67	5.43	8.25	11.37
140						1.69	2.72	5.55	8.45	11.65
150						1.68	2.73	5.66	8.70	12.08
160						1.64	2.67	5.57	8.61	12.00
170						1.53	2.53	5.40	8.46	11.91
180						1.53	2.55	5.47	8.59	12.12

表5-16b　基準正圧相インパルスを与える換算距離（No. No. A2）

角度 θ[°]	No. A2				
	ウレタン2面（L型）				
	換算距離 Z [m/kg$^{1/3}$]				
	11.62 Pa s	7.47 Pa s	3.85 Pa s	2.60 Pa s	1.93 Pa s
50	1.22	2.01	4.25	6.62	9.28
60	1.12	1.89	4.15	6.60	9.42
70	1.15	1.92	4.16	6.56	9.30
80	1.14	1.93	4.24	6.75	9.63
90	1.12	1.91	4.22	6.75	9.65
100	1.19	1.99	4.29	6.75	9.54
110	1.25	2.08	4.47	7.03	9.93
120	1.28	2.12	4.53	7.08	9.96
130	1.33	2.19	4.64	7.22	10.13
140	1.39	2.28	4.83	7.53	10.55
150	1.35	2.23	4.76	7.45	10.48
160	1.31	2.19	4.74	7.47	10.59
170	1.41	2.33	4.98	7.79	10.97
180	1.36	2.26	4.85	7.61	10.73
190	1.40	2.32	4.92	7.67	10.77
200	1.55	2.50	5.14	7.87	10.89
210	1.54	2.48	5.06	7.71	10.64
220	1.64	2.60	5.18	7.78	10.62

表5-16c　基準正圧相インパルスを与える換算距離（No. A3, No. A4）

角度 θ[°]	No. A3 ウレタン3面 換算距離 Z [m/kg$^{1/3}$]					No. A4 ウレタン4面 換算距離 Z [m/kg$^{1/3}$]				
	11.62 Pa s	7.47 Pa s	3.85 Pa s	2.60 Pa s	1.93 Pa s	11.62 Pa s	7.47 Pa s	3.85 Pa s	2.60 Pa s	1.93 Pa s
0	1.09	1.82	3.95	6.23	8.84	1.02	1.72	3.78	6.02	8.59
10	1.04	1.76	3.88	6.20	8.87	1.12	1.83	3.85	5.98	8.36
20	1.08	1.79	3.88	6.12	8.66	1.05	1.73	3.68	5.75	8.08
30	1.18	1.94	4.08	6.34	8.87	1.12	1.83	3.84	5.95	8.32
40	1.20	1.96	4.12	6.38	8.91	1.00	1.68	3.66	5.79	8.23
50	1.07	1.78	3.83	6.03	8.53					
60	1.08	1.80	3.93	6.21	8.82					
70	1.01	1.72	3.83	6.14	8.80					
80	1.04	1.77	3.92	6.27	8.98					
90	1.09	1.84	4.07	6.50	9.29					
100	1.06	1.80	4.03	6.47	9.29					
110	1.19	1.97	4.22	6.60	9.30					
120	1.25	2.06	4.39	6.85	9.62					
130	1.23	2.03	4.31	6.72	9.42					
140	1.23	2.01	4.24	6.59	9.21					
150	1.25	2.05	4.31	6.69	9.35					
160	1.13	1.88	4.07	6.42	9.09					
170	1.13	1.91	4.16	6.60	9.38					
180	1.16	1.94	4.22	6.67	9.47					

表5-16d　基準正圧相インパルスを与える換算距離（No. A5, No. B）

角度 θ[°]	No. A5 ウレタン2面（II型） 換算距離 Z [m/kg$^{1/3}$]					No. B コの字障壁（防爆壁に対し45度） 換算距離 Z [m/kg$^{1/3}$]				
	11.62 Pa s	7.47 Pa s	3.85 Pa s	2.60 Pa s	1.93 Pa s	11.62 Pa s	7.47 Pa s	3.85 Pa s	2.60 Pa s	1.93 Pa s
0	1.20	2.02	4.46	7.11	10.16	1.18	2.10	5.04	8.44	12.52
10	1.20	2.01	4.35	6.87	9.72	1.22	2.13	4.94	8.11	11.85
20	1.34	2.19	4.59	7.10	9.90	1.38	2.33	5.11	8.13	11.59
30	1.44	2.32	4.76	7.28	10.06	1.57	2.59	5.51	8.60	12.09
40	1.46	2.32	4.67	7.06	9.67	1.58	2.62	5.62	8.81	12.41
50	1.27	2.08	4.38	6.79	9.50	1.67	2.76	5.85	9.13	12.82
60	1.21	2.01	4.32	6.79	9.58	1.50	2.57	5.80	9.37	13.51
70	1.07	1.82	4.05	6.49	9.31	1.37	2.40	5.56	9.14	13.34
80	1.12	1.89	4.16	6.62	9.44	1.55	2.61	5.74	9.14	13.03
90	1.15	1.93	4.23	6.71	9.54	1.58	2.66	5.85	9.30	13.27
100						1.69	2.78	5.84	9.07	12.68
110						1.60	2.70	5.93	9.44	13.46
120						1.71	2.88	6.35	10.11	14.42
130						1.79	2.98	6.41	10.07	14.23
140						1.86	3.10	6.70	10.56	14.95
150						1.94	3.22	6.90	10.81	15.24
160						1.96	3.22	6.80	10.56	14.78
170						1.95	3.18	6.67	10.32	14.41
180						1.94	3.20	6.80	10.60	14.88

表5-16e　基準換算インパルスを与える換算距離（野外実験No. 1-3, No. 1-4）

角度 θ[°]	野外実験No. 1-1 ウレタン1面 換算距離 Z [m/kg$^{1/3}$]					野外実験No. 1-2 ウレタン2面（L型） 換算距離 Z [m/kg$^{1/3}$]				
	84.18	54.14	27.86	18.81	13.95	84.18	54.14	27.86	18.81	13.95
	Pa s/kg$^{1/3}$	Pa s/kg$^{1/3}$	Pa s/kg$^{1/3}$	Pa s/kg$^{1/3}$	Pa s/kg$^{1/3}$	Pa s/kg$^{1/3}$	Pa s/kg$^{1/3}$	Pa s/kg$^{1/3}$	Pa s/kg$^{1/3}$	Pa s/kg$^{1/3}$
0	1.29	2.26	5.27	8.68	12.70	1.01	1.78	4.17	6.91	10.14
45	1.32	2.26	5.07	8.16	11.75	1.13	1.91	4.23	6.75	9.66
135	1.51	2.52	5.45	8.61	12.19	1.18	2.00	4.44	7.11	10.18
180	1.54	2.54	5.38	8.39	11.78	1.71	2.62	4.97	7.26	9.68

表5-16f　基準換算インパルスを与える換算距離（野外実験No. 1-3, No. 1-4）

角度 θ[°]	野外実験No. 1-3 ウレタン3面 換算距離 Z [m/kg$^{1/3}$]					野外実験No. 1-5 コの字障壁 換算距離 Z [m/kg$^{1/3}$]				
	84.18	54.14	27.86	18.81	13.95	84.18	54.14	27.86	18.81	13.95
	Pa s/kg$^{1/3}$	Pa s/kg$^{1/3}$	Pa s/kg$^{1/3}$	Pa s/kg$^{1/3}$	Pa s/kg$^{1/3}$	Pa s/kg$^{1/3}$	Pa s/kg$^{1/3}$	Pa s/kg$^{1/3}$	Pa s/kg$^{1/3}$	Pa s/kg$^{1/3}$
0	0.82	1.50	3.72	6.37	9.60	1.10	1.98	4.78	8.05	11.98
45	0.96	1.69	3.93	6.47	9.47	1.18	2.12	5.08	8.52	12.64
135	1.03	1.77	4.00	6.46	9.32	1.41	2.42	5.49	8.90	12.87
180	1.10	1.81	3.85	6.01	8.44	2.12	3.29	6.39	9.45	12.74

表5-16g　基準換算インパルスを与える換算距離（野外実験No. 2-2）

角度 θ[°]	野外実験No. 2-2 防爆壁のみ 換算距離 Z [m/kg$^{1/3}$]				
	84.18	54.14	27.86	18.81	13.95
	Pa s/kg$^{1/3}$	Pa s/kg$^{1/3}$	Pa s/kg$^{1/3}$	Pa s/kg$^{1/3}$	Pa s/kg$^{1/3}$
0	1.43	2.44	5.45	8.76	12.57
45	1.45	2.47	5.54	8.91	12.81
135	1.60	2.66	5.69	8.92	12.57
180	2.32	3.41	6.10	8.59	11.15

表5-16h　基準正圧相インパルスを与える換算距離（R01 No. A, R02 No. A0）

角度 θ[°]	R01 No. A					R02 No. A0				
	防爆壁のみ					防爆壁のみ				
	換算距離 Z [m/kg$^{1/3}$]					換算距離 Z [m/kg$^{1/3}$]				
	11.62 Pa s	7.47 Pa s	3.85 Pa s	2.60 Pa s	1.93 Pa s	11.62 Pa s	7.47 Pa s	3.85 Pa s	2.60 Pa s	1.93 Pa s
0	1.61	2.59	5.27	8.03	11.08	1.55	2.56	5.44	8.50	11.96
10	1.62	2.61	5.36	8.20	11.34	1.58	2.64	5.75	9.10	12.92
20	1.82	2.90	5.85	8.85	12.13					
30	1.77	2.83	5.71	8.63	11.85					
40	1.85	2.91	5.80	8.71	11.87					

表5-16i　基準正圧相インパルスを与える換算距離（R02 No. A1, R02 No. A2）

角度 θ[°]	R02 No. A1					R02 No. A2				
	ウレタン1面					ウレタン2面（II型）				
	換算距離 Z [m/kg$^{1/3}$]					換算距離 Z [m/kg$^{1/3}$]				
	11.62 Pa s	7.47 Pa s	3.85 Pa s	2.60 Pa s	1.93 Pa s	11.62 Pa s	7.47 Pa s	3.85 Pa s	2.60 Pa s	1.93 Pa s
0	1.36	2.29	5.04	8.02	11.44	1.40	2.31	4.91	7.66	10.74
10	1.38	2.34	5.16	8.22	11.75	1.46	2.39	5.03	7.79	10.88
20	1.52	2.48	5.17	7.99	11.14	1.49	2.43	5.08	7.85	10.94
30	1.46	2.41	5.14	8.04	11.31	1.48	2.41	5.02	7.75	10.80
40	1.49	2.47	5.32	8.37	11.83	1.45	2.38	5.03	7.83	10.97
50	1.48	2.44	5.19	8.11	11.40	1.47	2.41	5.07	7.85	10.96
60	1.38	2.32	5.06	8.01	11.39	1.39	2.29	4.88	7.62	10.70
70	1.37	2.33	5.20	8.34	11.98	1.29	2.18	4.76	7.55	10.73
80	1.40	2.36	5.19	8.27	11.80	1.29	2.15	4.63	7.29	10.30
90	1.37	2.32	5.09	8.10	11.55	1.24	2.08	4.54	7.19	10.22
100	1.45	2.44	5.34	8.47	12.05					
110	1.66	2.66	5.37	8.14	11.18					
120	1.66	2.66	5.41	8.22	11.33					
130	1.74	2.78	5.63	8.54	11.73					
140	1.79	2.85	5.75	8.71	11.96					
150	1.70	2.74	5.63	8.60	11.88					
160	1.72	2.80	5.81	8.94	12.42					
170	1.72	2.79	5.79	8.91	12.38					
180	1.64	2.68	5.66	8.79	12.30					

表5-16j　基準正圧相インパルスを与える換算距離（R02 No. A3, R02 No. A4）

角度 θ[°]	R02 No. A3 ウレタン3面 換算距離 Z [m/kg$^{1/3}$]					R02 No. A4 ウレタン4面 換算距離 Z [m/kg$^{1/3}$]				
	11.62 Pa s	7.47 Pa s	3.85 Pa s	2.60 Pa s	1.93 Pa s	11.62 Pa s	7.47 Pa s	3.85 Pa s	2.60 Pa s	1.93 Pa s
0	1.11	1.88	4.15	6.63	9.46	1.18	1.97	4.27	6.75	9.56
10	1.13	1.92	4.24	6.77	9.67	1.19	1.99	4.28	6.74	9.53
20	1.29	2.12	4.49	7.00	9.81	1.23	2.04	4.36	6.82	9.60
30	1.28	2.11	4.51	7.06	9.94	1.23	2.05	4.43	6.97	9.86
40	1.34	2.19	4.62	7.17	10.04	1.23	2.06	4.45	7.02	9.94
50	1.31	2.16	4.60	7.17	10.06					
60	1.26	2.10	4.56	7.20	10.20					
70	1.24	2.07	4.50	7.11	10.08					
80	1.29	2.15	4.59	7.19	10.13					
90	1.27	2.12	4.56	7.16	10.10					
100	1.31	2.17	4.64	7.27	10.24					
110	1.39	2.27	4.73	7.30	10.16					
120	1.39	2.27	4.76	7.37	10.28					
130	1.39	2.28	4.81	7.47	10.46					
140	1.44	2.35	4.93	7.64	10.68					
150	1.37	2.26	4.82	7.53	10.59					
160	1.30	2.20	4.83	7.69	10.96					
170	1.24	2.08	4.55	7.23	10.29					
180	1.20	2.02	4.46	7.11	10.15					

表5-16k　基準正圧相インパルスを与える換算距離（R01 No. C2）

角度 θ[°]	R01 No. C2				
	コの字障壁（防爆壁と平行）				
	換算距離 Z [m/kg$^{1/3}$]				
	11.62 Pa s	7.47 Pa s	3.85 Pa s	2.60 Pa s	1.93 Pa s
0	1.61	2.60	5.36	8.22	11.39
10	1.56	2.56	5.41	8.42	11.79
20	1.65	2.71	5.70	8.84	12.37
30	1.70	2.75	5.66	8.67	12.00
40	1.64	2.70	5.72	8.90	12.49
50	1.61	2.67	5.72	8.97	12.64
60	1.65	2.71	5.72	8.90	12.47
70	1.68	2.75	5.77	8.94	12.48
80	1.76	2.83	5.78	8.81	12.16
90	1.72	2.78	5.72	8.76	12.13
100	1.67	2.75	5.84	9.10	12.77
110	1.71	2.83	6.04	9.45	13.30
120	1.72	2.81	5.89	9.10	12.70
130	1.79	2.91	6.02	9.25	12.84
140	1.92	3.11	6.41	9.83	13.63
150	1.94	3.14	6.47	9.90	13.71
160	1.89	3.14	6.73	10.56	14.90
170	2.01	3.29	6.90	10.69	14.93
180	2.16	3.42	6.83	10.27	14.03

表5-16l　基準換算インパルスを与える換算距離（R01年度野外実験No. 1-1, No. 2-1）

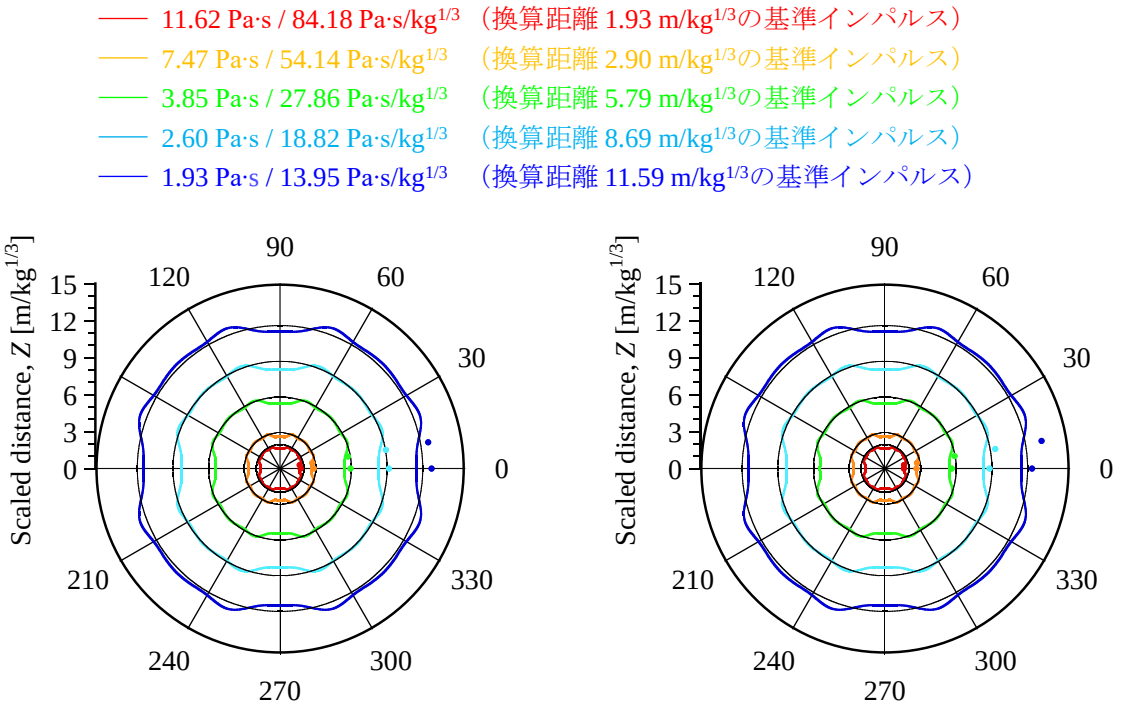
角度 θ[°]	R01年度野外実験No. 1-3 コの字障壁（防爆壁と平行） 換算距離 Z [m/kg$^{1/3}$]					R01年度野外実験No. 2-1 防爆壁のみ 換算距離 Z [m/kg$^{1/3}$]				
	84.18	54.14	27.86	18.81	13.95	84.18	54.14	27.86	18.81	13.95
	Pa s/kg$^{1/3}$	Pa s/kg$^{1/3}$	Pa s/kg$^{1/3}$	Pa s/kg$^{1/3}$	Pa s/kg$^{1/3}$	Pa s/kg$^{1/3}$	Pa s/kg$^{1/3}$	Pa s/kg$^{1/3}$	Pa s/kg$^{1/3}$	Pa s/kg$^{1/3}$
0	1.10	2.00	4.92	8.36	12.54	1.42	2.44	5.50	8.89	12.82
45	1.38	2.34	5.22	8.38	12.02	1.74	2.90	6.30	9.95	14.10
135	1.53	2.59	5.71	9.10	12.99	1.59	2.75	6.31	10.31	14.99
180	1.57	2.72	6.19	10.07	14.59	1.52	2.61	5.88	9.50	13.69

表5-16m　基準換算インパルスを与える換算距離（R02年度野外実験No. 1-1, No. 1-3）

角度 θ[°]	R02年度野外実験No. 1-1 コの字障壁（防爆壁と平行） 換算距離 Z [m/kg$^{1/3}$]					R02年度野外実験No. 1-3 低密度ウレタン1面 換算距離 Z [m/kg$^{1/3}$]				
	84.18	54.14	27.86	18.81	13.95	84.18	54.14	27.86	18.81	13.95
	Pa s/kg$^{1/3}$	Pa s/kg$^{1/3}$	Pa s/kg$^{1/3}$	Pa s/kg$^{1/3}$	Pa s/kg$^{1/3}$	Pa s/kg$^{1/3}$	Pa s/kg$^{1/3}$	Pa s/kg$^{1/3}$	Pa s/kg$^{1/3}$	Pa s/kg$^{1/3}$
0	1.14	1.98	4.58	7.51	10.96	1.10	1.99	4.87	8.24	12.32
45	1.11	1.95	4.58	7.58	11.14	1.48	2.45	5.23	8.17	11.49
135	1.26	2.16	4.85	7.81	11.23	1.25	2.16	4.93	8.00	11.59
180	1.35	2.32	5.24	8.47	12.23	1.32	2.23	4.91	7.82	11.15

表5-16n　基準換算インパルスを与える換算距離（R02年度野外実験No. 1-4, No. 2-2）

角度 θ[°]	R02年度野外実験No. 1-4 低密度ウレタン3面 換算距離 Z [m/kg$^{1/3}$]					R02年度野外実験No. 2-2 防爆壁のみ 換算距離 Z [m/kg$^{1/3}$]				
	84.18	54.14	27.86	18.81	13.95	84.18	54.14	27.86	18.81	13.95
	Pa s/kg$^{1/3}$	Pa s/kg$^{1/3}$	Pa s/kg$^{1/3}$	Pa s/kg$^{1/3}$	Pa s/kg$^{1/3}$	Pa s/kg$^{1/3}$	Pa s/kg$^{1/3}$	Pa s/kg$^{1/3}$	Pa s/kg$^{1/3}$	Pa s/kg$^{1/3}$
0	0.85	1.57	3.92	6.74	10.20	1.33	2.31	5.28	8.61	12.49
45	1.10	1.92	4.42	7.22	10.51	1.39	2.39	5.42	8.79	12.71
135	1.22	2.05	4.46	7.06	10.04	1.38	2.37	5.35	8.66	12.51
180	1.02	1.79	4.17	6.86	10.03	1.38	2.38	5.38	8.73	12.62

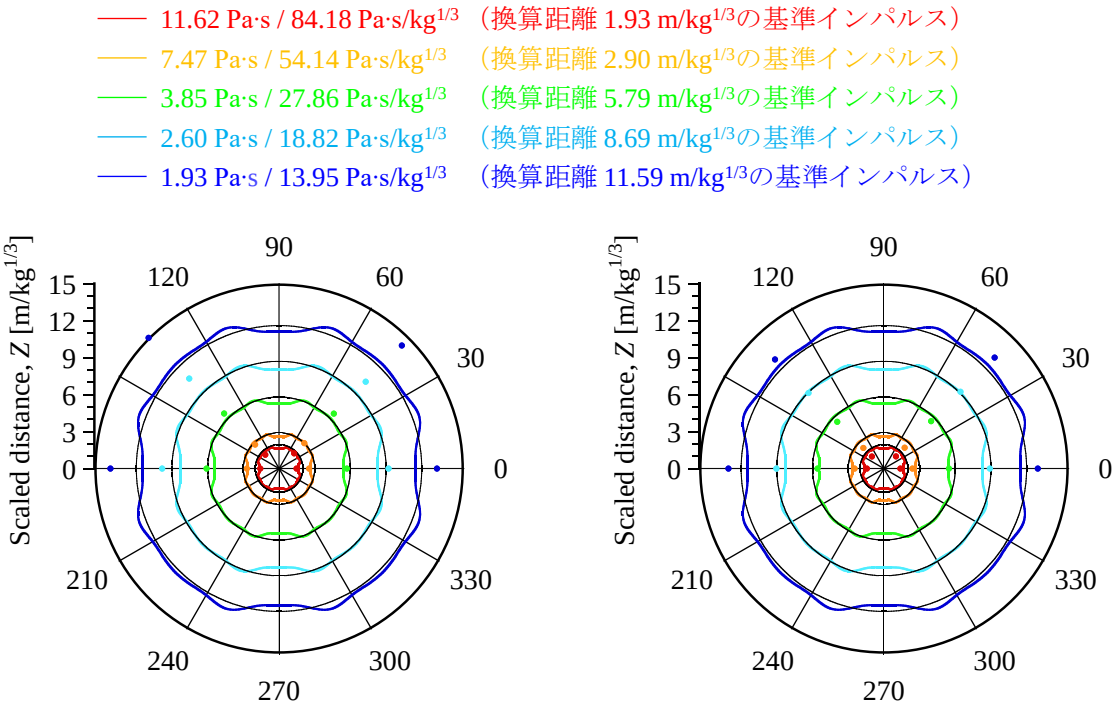


プロット点はNo. O2

プロット点はR02年度No. A0

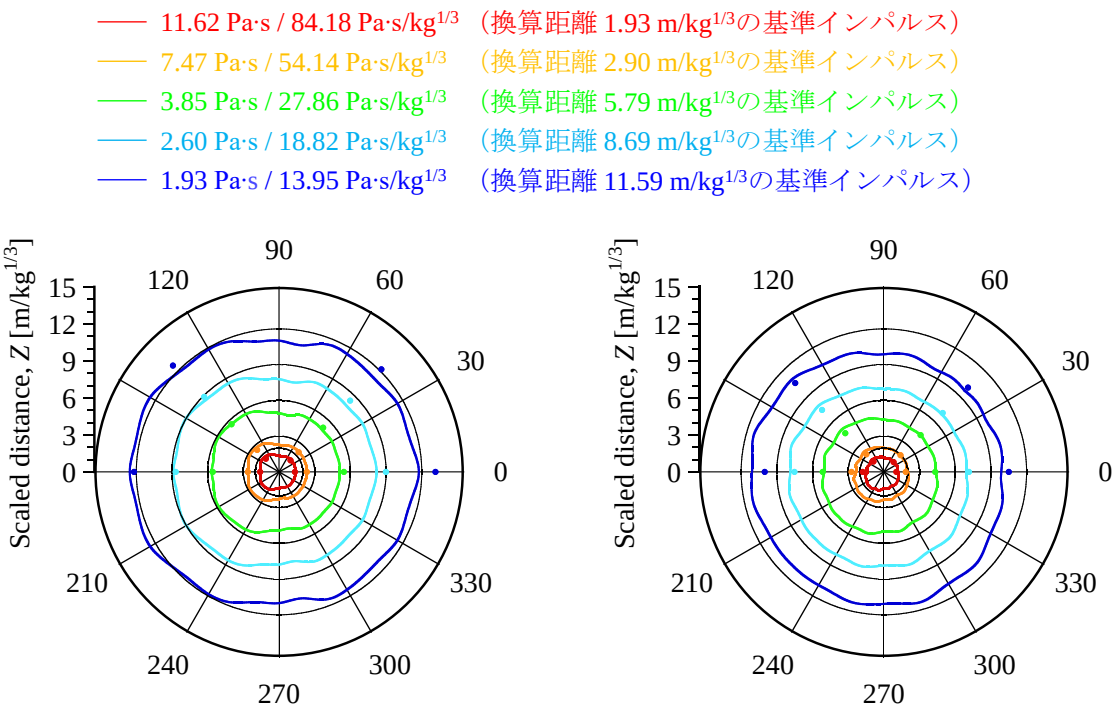
プロット点は野外実験No. 2-2

図5-22a　正圧相インパルスの分布（R01年度No. A（防爆壁のみ）1）



プロット点はR01年度野外実験No. 2-1　　プロット点はR02年度野外実験No. 2-2

図5-22b　正圧相インパルスの分布（R01年度No. A（防爆壁のみ）2）



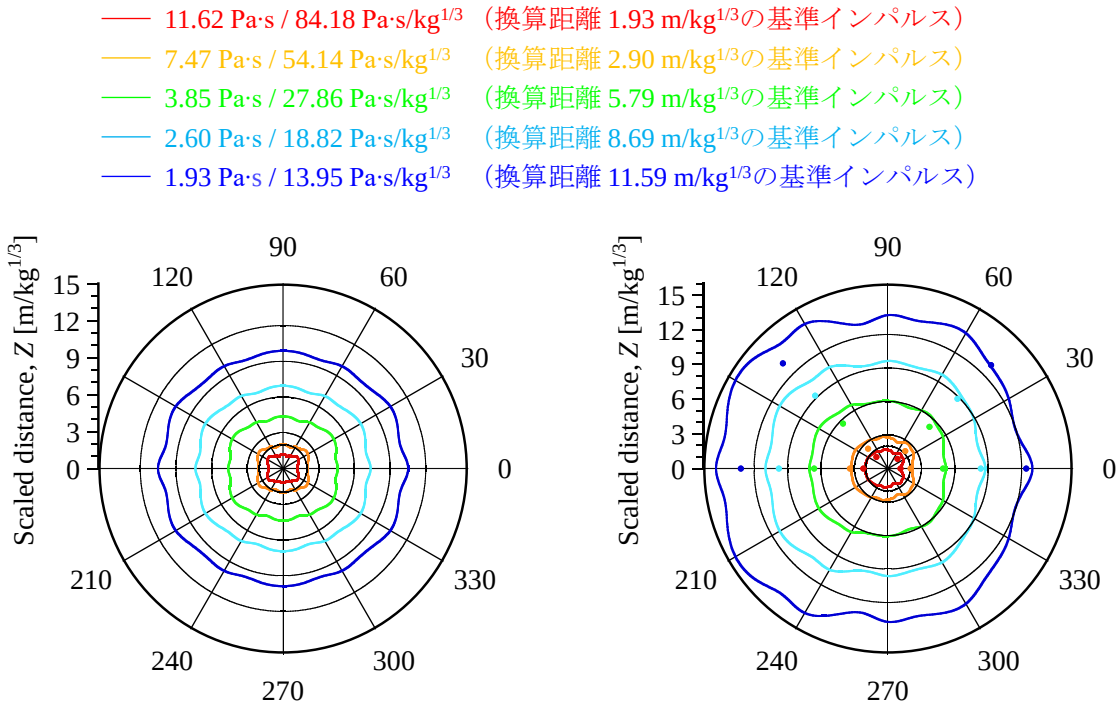
No. A1（ウレタン1面）
プロット点は野外実験No. 1-1

No. A2（ウレタン2面（L型））
プロット点は野外実験No. 1-2

No. A3（ウレタン3面）
プロット点は野外実験No. 1-3

No. A4（ウレタン4面）

図5-22c　正圧相インパルスの分布

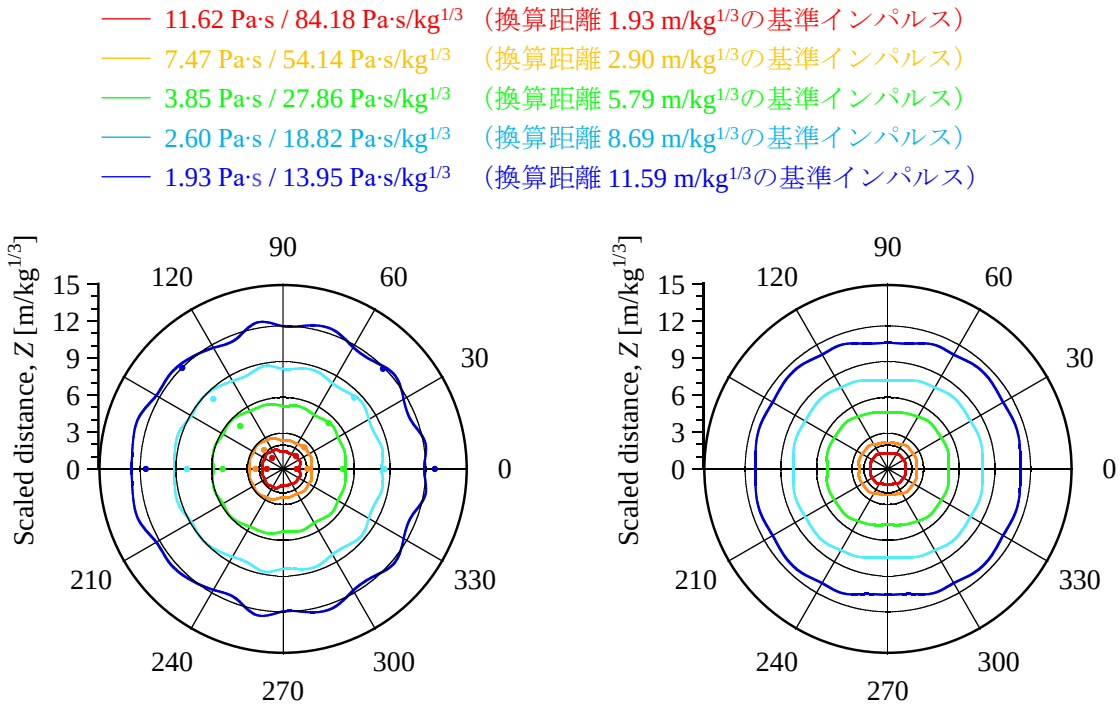


No. A5（ウレタン2面（II型））

No. B（コの字障壁）

プロット点は野外実験No. 1-5

図5-22d　正圧相インパルスの分布



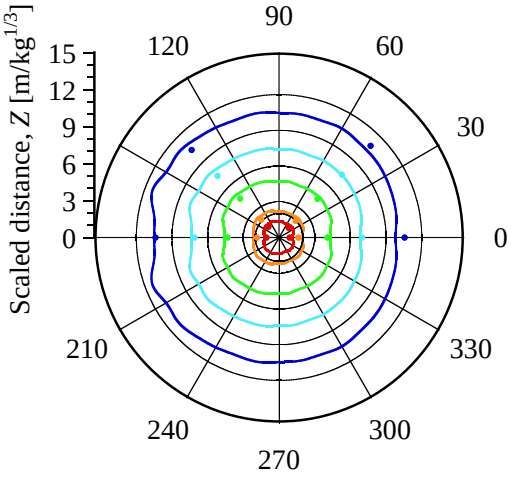
R02年度No. A1（低密度ウレタン1面）

プロット点はR02年度野外実験No. 1-3

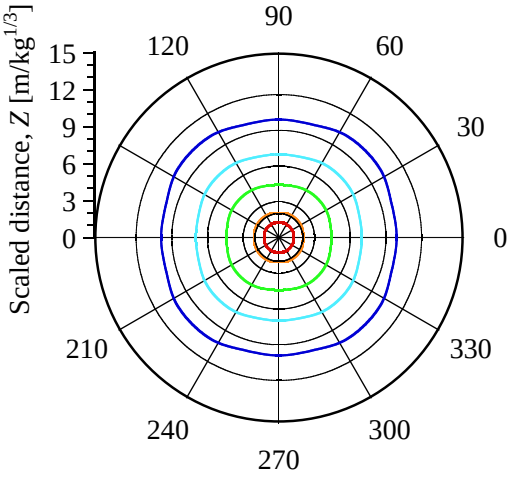
R02年度No. A2（低密度ウレタン2面（II型））

図5-22e　正圧相インパルスの分布

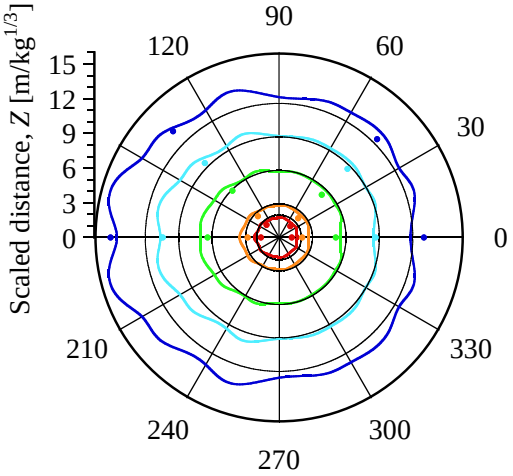
11.62 Pa·s / 84.18 Pa·s/kg$^{1/3}$ （換算距離 1.93 m/kg$^{1/3}$の基準インパルス）
7.47 Pa·s / 54.14 Pa·s/kg$^{1/3}$ （換算距離 2.90 m/kg$^{1/3}$の基準インパルス）
3.85 Pa·s / 27.86 Pa·s/kg$^{1/3}$ （換算距離 5.79 m/kg$^{1/3}$の基準インパルス）
2.60 Pa·s / 18.82 Pa·s/kg$^{1/3}$ （換算距離 8.69 m/kg$^{1/3}$の基準インパルス）
1.93 Pa·s / 13.95 Pa·s/kg$^{1/3}$ （換算距離 11.59 m/kg$^{1/3}$の基準インパルス）



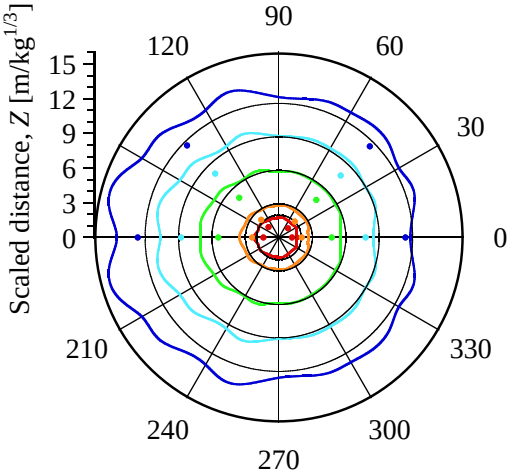
R02年度No. A3（低密度ウレタン3面）
プロット点はR02年度野外実験No. 1-4



R02年度No. A4（低密度ウレタン4面）



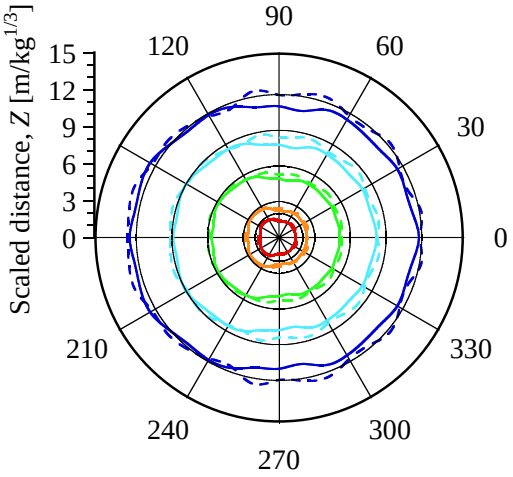
R01年度No. C2（コの字障壁（防爆壁と平行））
プロット点はR01年度野外実験No. 1-3



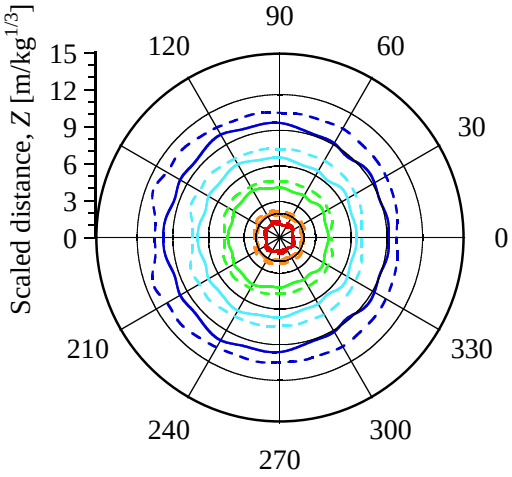
R01年度No. C2（コの字障壁（防爆壁と平行））
プロット点はR02年度野外実験No. 1-1

図5-22f　正圧相インパルスの分布

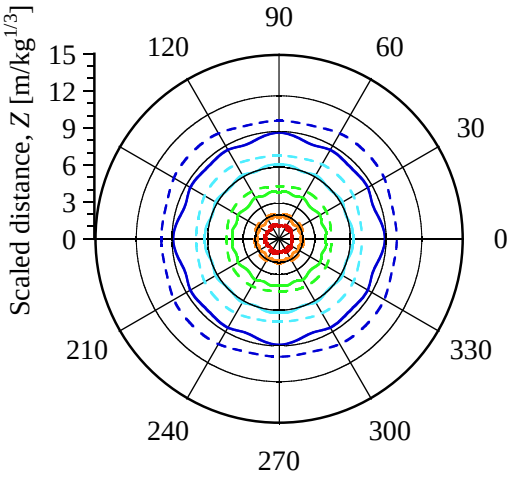
11.62 Pa·s / 84.18 Pa·s/kg$^{1/3}$ （換算距離 1.93 m/kg$^{1/3}$の基準インパルス）
7.47 Pa·s / 54.14 Pa·s/kg$^{1/3}$ （換算距離 2.90 m/kg$^{1/3}$の基準インパルス）
3.85 Pa·s / 27.86 Pa·s/kg$^{1/3}$ （換算距離 5.79 m/kg$^{1/3}$の基準インパルス）
2.60 Pa·s / 18.82 Pa·s/kg$^{1/3}$ （換算距離 8.69 m/kg$^{1/3}$の基準インパルス）
1.93 Pa·s / 13.95 Pa·s/kg$^{1/3}$ （換算距離 11.59 m/kg$^{1/3}$の基準インパルス）



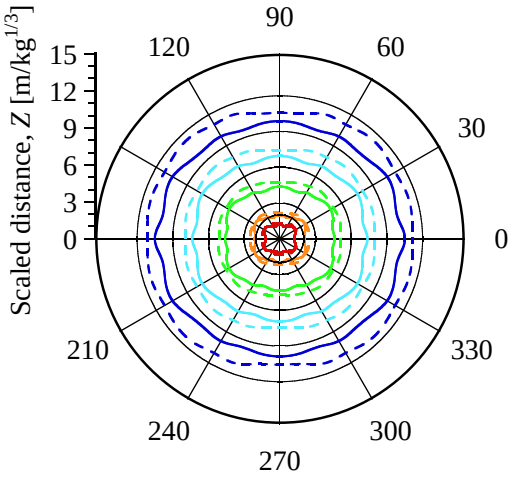
ウレタン1面
実線：No. A1
破線：R02年度No. A1（低密度ウレタン1面）



ウレタン3面
実線：No. A3
破線：R02年度No. A3（低密度ウレタン3面）

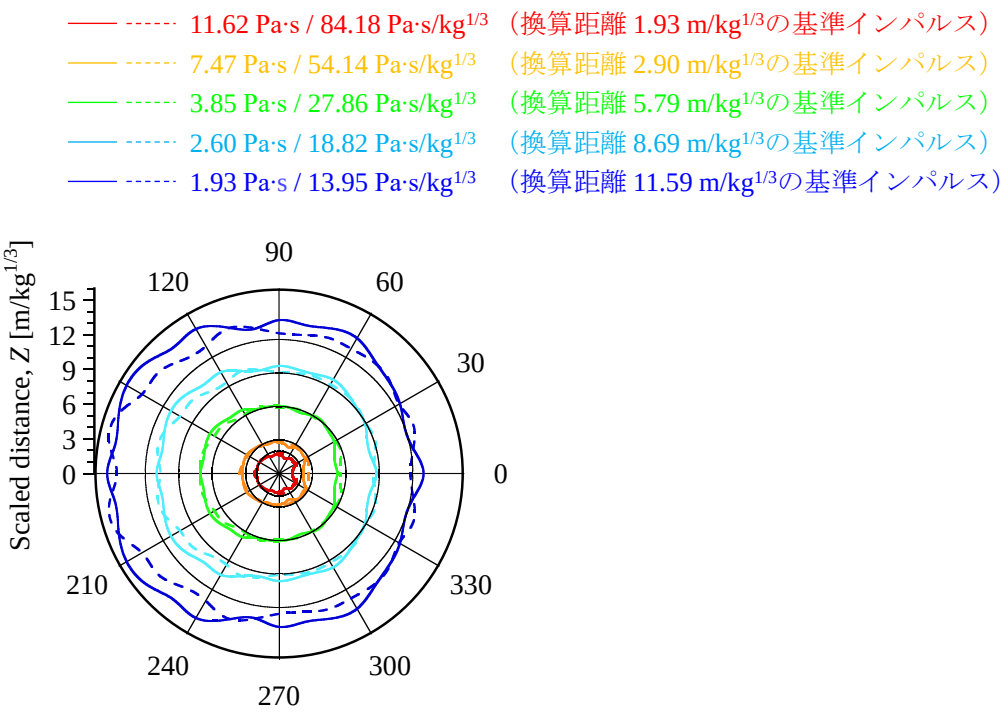


ウレタン4面
実線：No. A4
破線：R02年度No. A4（低密度ウレタン4面）



ウレタン2面（L型）
実線：No. A5
破線：R02年度No. A2（低密度ウレタン2面（L型））

図5-23a　正圧相インパルスの分布（比較）

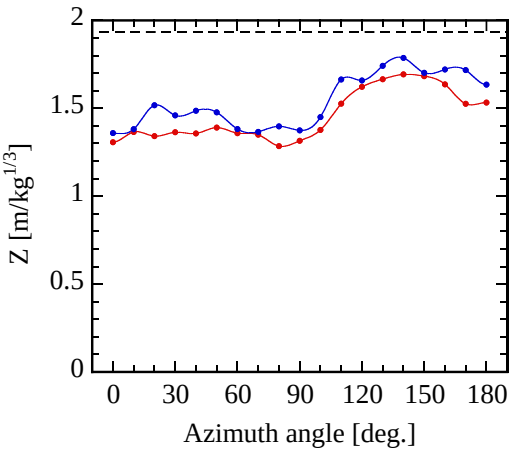


コの字障壁

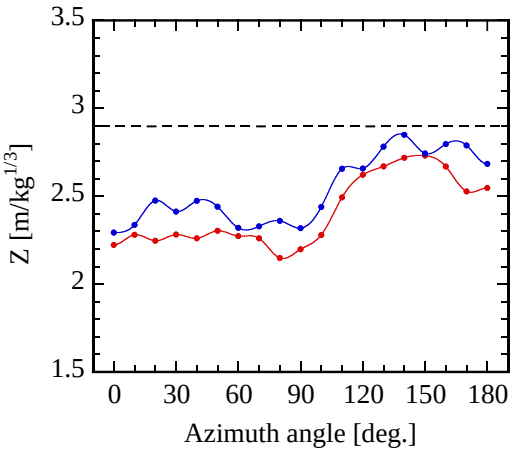
実線：No. B

破線：R01年度No. C2（コの字障壁（防爆壁と並行））

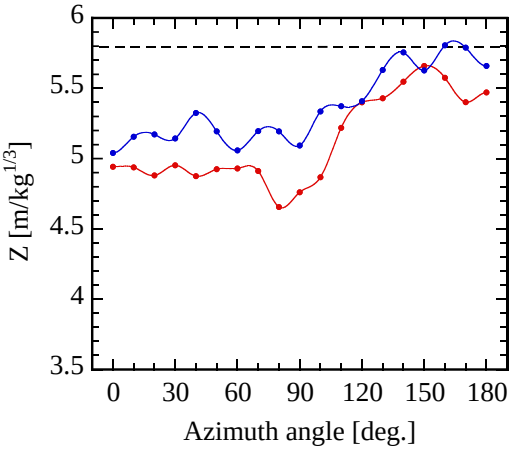
図5-23b　正圧相インパルスの分布（比較）



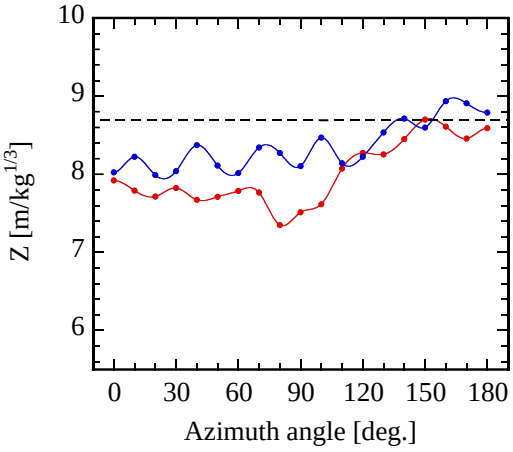
11.62 Pa s 等インパルス線
（換算距離 1.93 m/kg$^{1/3}$相当）



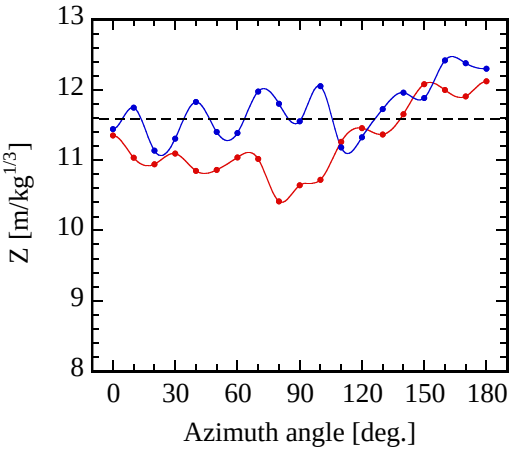
7.47 Pa s 等インパルス線
（換算距離 2.90 m/kg$^{1/3}$相当）



3.85 Pa s 等インパルス線
（換算距離 5.79 m/kg$^{1/3}$相当）

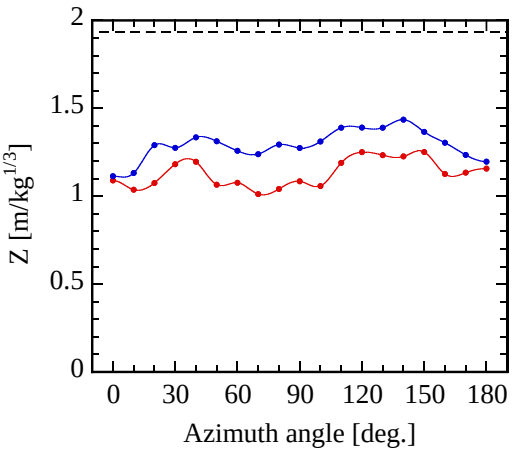


2.60 Pa s 等インパルス線
（換算距離 8.69 m/kg$^{1/3}$相当）

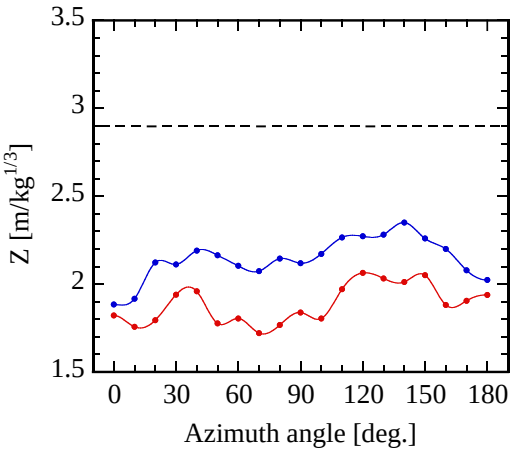


1.93 Pa s 等インパルス線
（換算距離 11.59 m/kg$^{1/3}$相当）

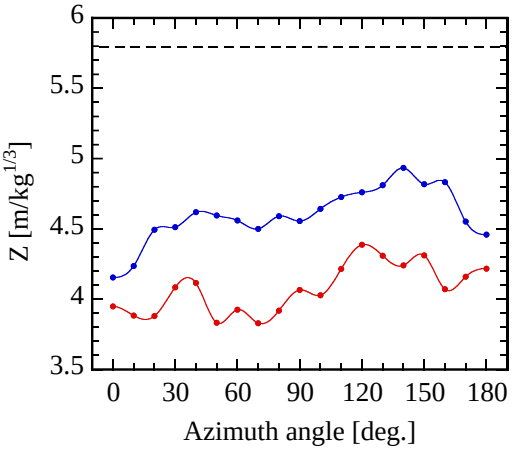
図5-24a　地表面爆発と同等の正圧相インパルスを得る換算距離（ウレタン1面）
破線：地表面爆発、赤点：No. A1、青点：R02年度No. A1（低密度ウレタン）



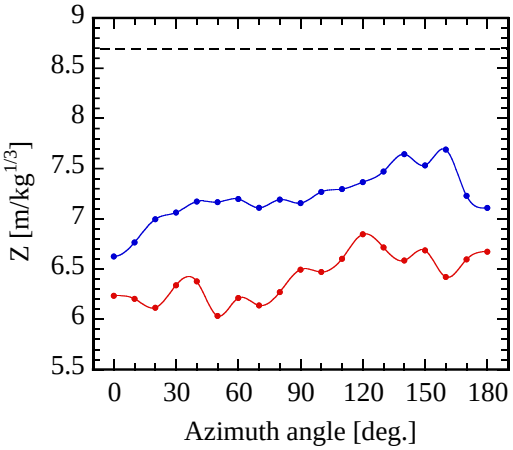
11.62 Pa s 等インパルス線
（換算距離 1.93 m/kg$^{1/3}$相当）



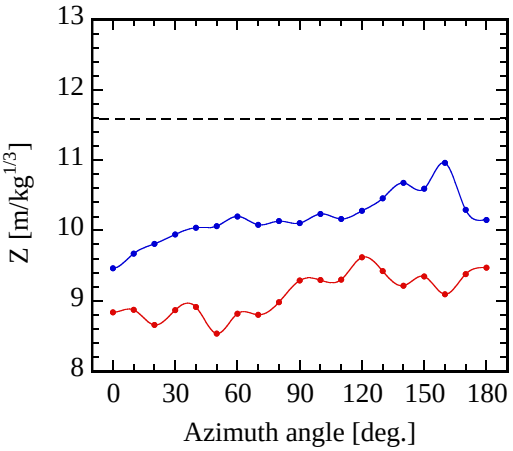
7.47 Pa s 等インパルス線
（換算距離 2.90 m/kg$^{1/3}$相当）



3.85 Pa s 等インパルス線
（換算距離 5.79 m/kg$^{1/3}$相当）

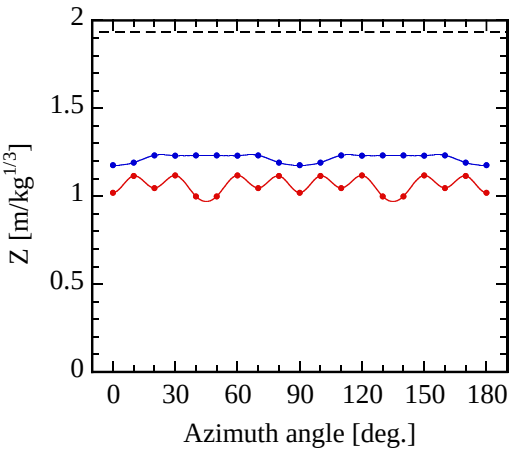


2.60 Pa s 等インパルス線
（換算距離 8.69 m/kg$^{1/3}$相当）

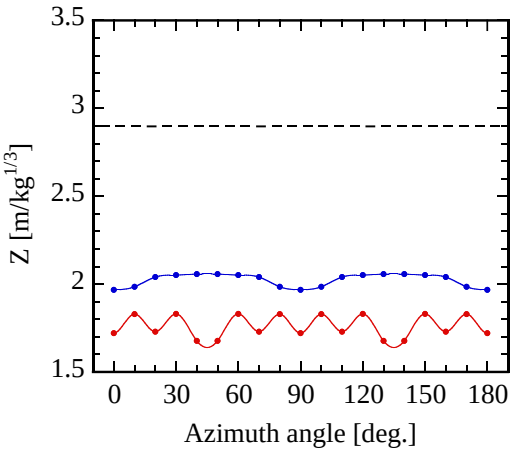


1.93 Pa s 等インパルス線
（換算距離 11.59 m/kg$^{1/3}$相当）

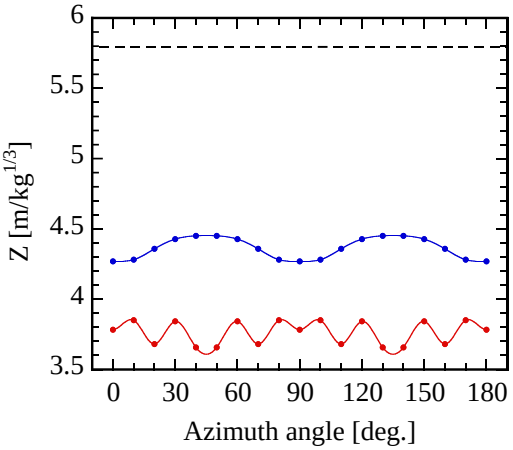
図5-24b　地表面爆発と同等の正圧相インパルスを得る換算距離（ウレタン3面）
破線：地表面爆発、赤点：No. A3、青点：R02年度No. A3（低密度ウレタン）



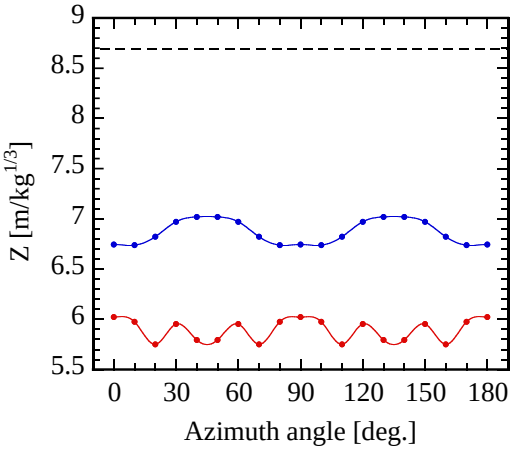
11.62 Pa s 等インパルス線
（換算距離 1.93 m/kg$^{1/3}$相当）



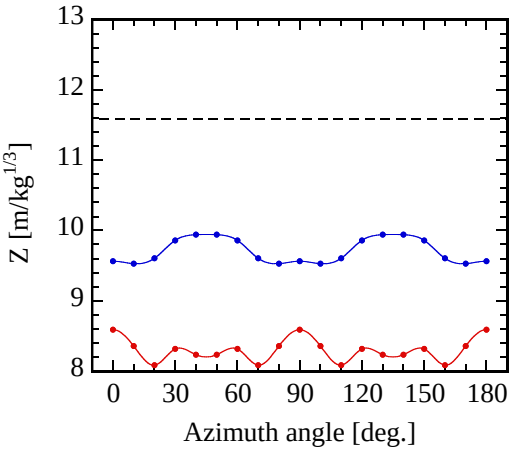
7.47 Pa s 等インパルス線
（換算距離 2.90 m/kg$^{1/3}$相当）



3.85 Pa s 等インパルス線
（換算距離 5.79 m/kg$^{1/3}$相当）

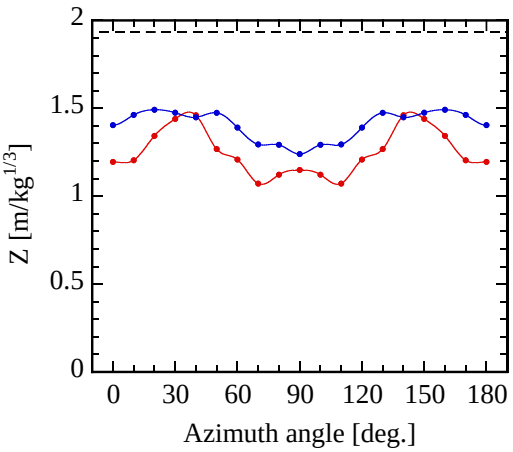


2.60 Pa s 等インパルス線
（換算距離 8.69 m/kg$^{1/3}$相当）

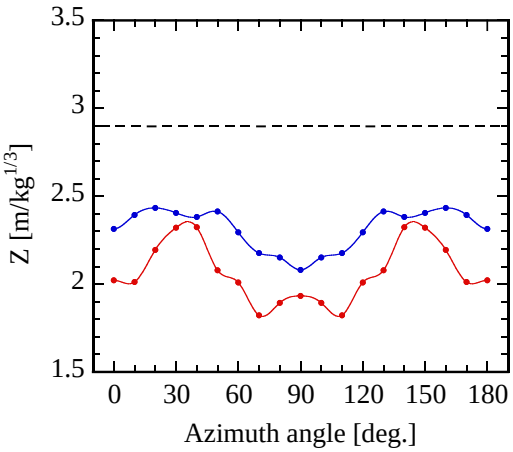


1.93 Pa s 等インパルス線
（換算距離 11.59 m/kg$^{1/3}$相当）

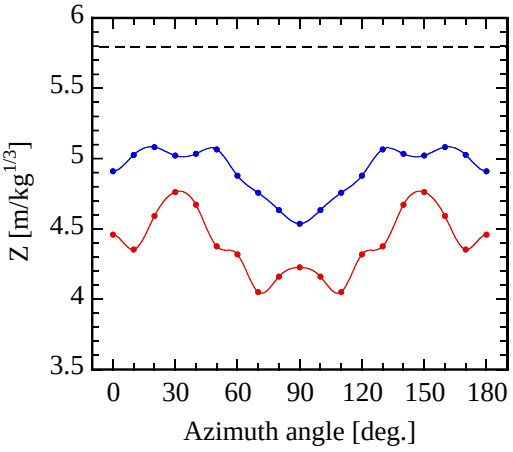
図5-24c　地表面爆発と同等の正圧相インパルスを得る換算距離（ウレタン4面）
破線：地表面爆発、赤点：No. A4、青点：R02年度No. A4（低密度ウレタン）



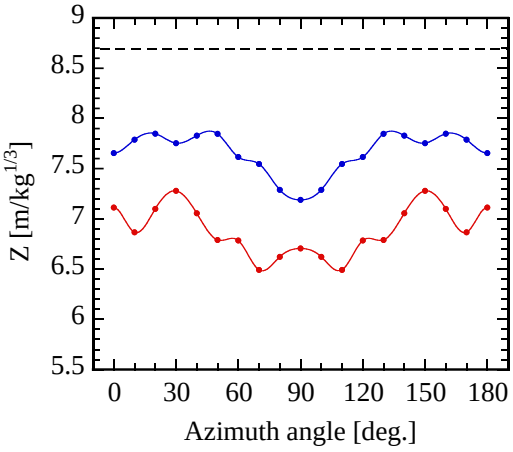
11.62 Pa s 等インパルス線
（換算距離 1.93 m/kg$^{1/3}$相当）



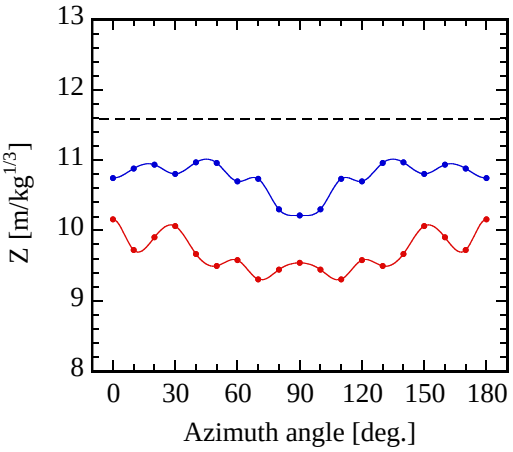
7.47 Pa s 等インパルス線
（換算距離 2.90 m/kg$^{1/3}$相当）



3.85 Pa s 等インパルス線
（換算距離 5.79 m/kg$^{1/3}$相当）

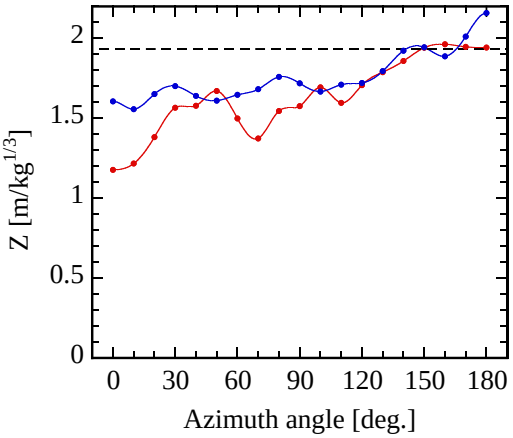


2.60 Pa s 等インパルス線
（換算距離 8.69 m/kg$^{1/3}$相当）

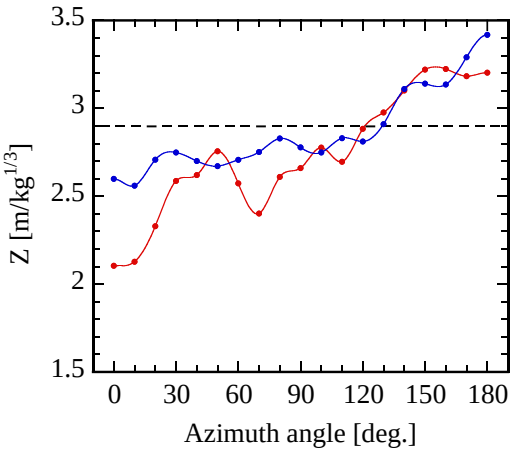


1.93 Pa s 等インパルス線
（換算距離 11.59 m/kg$^{1/3}$相当）

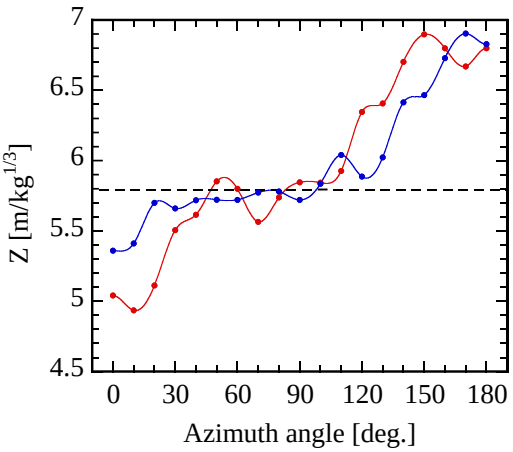
図5-24d　地表面爆発と同等の正圧相インパルスを得る換算距離（ウレタン2面（II型））
破線：地表面爆発、赤点：No. A5、青点：R02年度No. A2（低密度ウレタン）



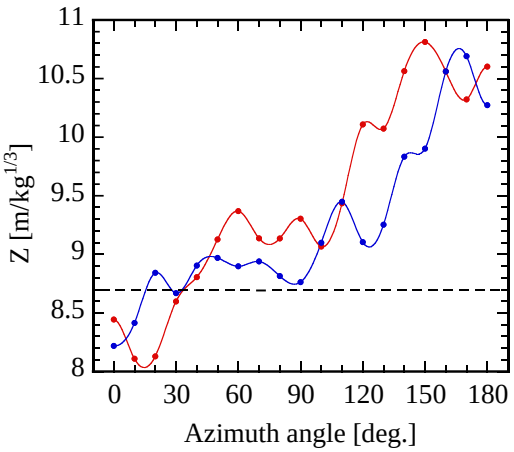
11.62 Pa s 等インパルス線
（換算距離 1.93 m/kg$^{1/3}$相当）



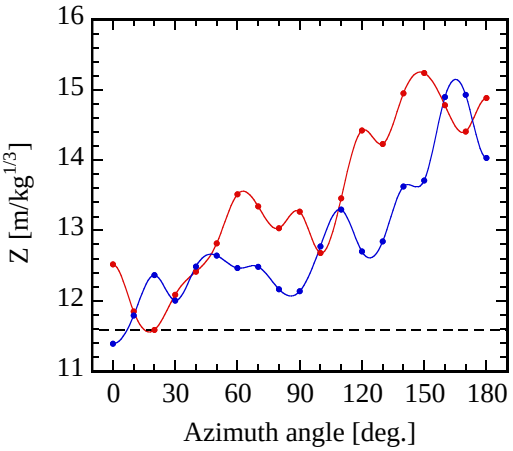
7.47 Pa s 等インパルス線
（換算距離 2.90 m/kg$^{1/3}$相当）



3.85 Pa s 等インパルス線
（換算距離 5.79 m/kg$^{1/3}$相当）



2.60 Pa s 等インパルス線
（換算距離 8.69 m/kg$^{1/3}$相当）



1.93 Pa s 等インパルス線
（換算距離 11.59 m/kg$^{1/3}$相当）

図5-24e　地表面爆発と同等の正圧相インパルスを得る換算距離（コの字障壁）
破線：地表面爆発、赤点：No. B、青点：R01年度No. C2（防爆壁と並行）

表5-17a　等インパルス線の自然スプライン係数

	R01 No. A				
	防爆壁のみ				
	11.62 Pa s	7.47 Pa s	3.85 Pa s	2.60 Pa s	1.93 Pa s
a_0	2.17422E+00	3.41663E+00	6.74213E+00	1.00663E+01	1.36671E+01
a_1	1.33578E-02	1.96431E-02	3.45583E-02	4.77124E-02	6.06234E-02
c_{-3}	-8.43561E-05	-1.20501E-04	-2.00077E-04	-2.63790E-04	-3.20714E-04
c_{-2}	2.49995E-04	3.51187E-04	5.62571E-04	7.18985E-04	8.46463E-04
c_{-1}	-2.85990E-04	-3.86663E-04	-5.66229E-04	-6.62645E-04	-7.03508E-04
c_0	2.44846E-04	3.17636E-04	4.16150E-04	4.25555E-04	3.67542E-04
c_1	-3.10843E-04	-4.20759E-04	-6.18308E-04	-7.26572E-04	-7.75656E-04
c_2	3.49406E-04	4.87572E-04	7.70888E-04	9.74694E-04	1.13506E-03
c_3	-2.51940E-04	-3.48218E-04	-5.40304E-04	-6.72600E-04	-7.70803E-04
c_4	8.88754E-05	1.19735E-04	1.75293E-04	2.06353E-04	2.21597E-04
c_5	8.89223E-05	1.19799E-04	1.75391E-04	2.06473E-04	2.21733E-04
c_6	-2.52081E-04	-3.48411E-04	-5.40599E-04	-6.72961E-04	-7.71212E-04
c_7	3.49922E-04	4.88280E-04	7.71969E-04	9.76021E-04	1.13655E-03
c_8	-3.12766E-04	-4.23397E-04	-6.22336E-04	-7.31517E-04	-7.81237E-04
c_9	2.52020E-04	3.27479E-04	4.31184E-04	4.44009E-04	3.88370E-04
c_{10}	-3.12766E-04	-4.23397E-04	-6.22336E-04	-7.31517E-04	-7.81237E-04
c_{11}	3.49922E-04	4.88280E-04	7.71969E-04	9.76021E-04	1.13655E-03
c_{12}	-2.52081E-04	-3.48411E-04	-5.40599E-04	-6.72961E-04	-7.71212E-04
c_{13}	8.89223E-05	1.19799E-04	1.75391E-04	2.06473E-04	2.21733E-04
c_{14}	8.88754E-05	1.19735E-04	1.75293E-04	2.06353E-04	2.21597E-04
c_{15}	-2.51940E-04	-3.48218E-04	-5.40304E-04	-6.72600E-04	-7.70803E-04
c_{16}	3.49406E-04	4.87572E-04	7.70888E-04	9.74694E-04	1.13506E-03
c_{17}	-3.10843E-04	-4.20759E-04	-6.18308E-04	-7.26572E-04	-7.75656E-04
c_{18}	2.44846E-04	3.17636E-04	4.16150E-04	4.25555E-04	3.67542E-04
c_{19}	-2.85990E-04	-3.86663E-04	-5.66229E-04	-6.62645E-04	-7.03508E-04
c_{20}	2.49995E-04	3.51187E-04	5.62571E-04	7.18985E-04	8.46463E-04
c_{21}	-8.43561E-05	-1.20501E-04	-2.00077E-04	-2.63790E-04	-3.20714E-04

表5-17b　等インパルス線の自然スプライン係数

	No. A1				
	ウレタン1面				
	11.62 Pa s	7.47 Pa s	3.85 Pa s	2.60 Pa s	1.93 Pa s
a_0	1.23635E+00	2.09226E+00	4.61865E+00	7.37036E+00	1.05303E+01
a_1	-4.25284E-03	-6.32883E-03	-1.11375E-02	-1.51496E-02	-1.88149E-02
c_{-3}	2.06324E-05	2.79762E-05	3.90686E-05	4.12997E-05	3.62778E-05
c_{-2}	-7.86777E-05	-9.85929E-05	-1.04410E-04	-6.13442E-05	2.62196E-05
c_{-1}	1.43407E-04	1.64028E-04	1.03877E-04	-7.46914E-05	-3.67083E-04
c_0	-1.71989E-04	-1.88902E-04	-8.14466E-05	1.82689E-04	5.99694E-04
c_1	1.51004E-04	1.76497E-04	1.30126E-04	-3.39933E-05	-3.10224E-04
c_2	-1.09069E-04	-1.48469E-04	-2.09405E-04	-2.24137E-04	-2.01216E-04
c_3	8.51170E-05	1.30442E-04	2.43907E-04	3.48736E-04	4.54781E-04
c_4	-8.81967E-05	-1.26982E-04	-2.09456E-04	-2.70244E-04	-3.18188E-04
c_5	9.30901E-05	1.20067E-04	1.45865E-04	1.25139E-04	6.45966E-05
c_6	-9.11198E-05	-1.24949E-04	-1.82808E-04	-2.07754E-04	-2.07759E-04
c_7	1.04910E-04	1.69943E-04	3.51184E-04	5.38946E-04	7.47363E-04
c_8	-9.86065E-05	-1.74268E-04	-4.08610E-04	-6.73982E-04	-9.86447E-04
c_9	7.47816E-05	1.34784E-04	3.24826E-04	5.43963E-04	8.05027E-04
c_{10}	-8.13316E-05	-1.34614E-04	-2.88734E-04	-4.54199E-04	-6.42716E-04
c_{11}	5.52962E-05	8.70514E-05	1.71927E-04	2.56528E-04	3.47901E-04
c_{12}	-2.50806E-07	6.70855E-06	3.50628E-05	7.22466E-05	1.19198E-04
c_{13}	-1.83797E-05	-3.54787E-05	-8.95329E-05	-1.50789E-04	-2.22383E-04
c_{14}	1.80753E-05	1.51029E-05	-1.35260E-05	-6.18570E-05	-1.29703E-04
c_{15}	-3.45906E-05	-2.45200E-05	4.86365E-05	1.65800E-04	3.27319E-04
c_{16}	9.42509E-05	1.14946E-04	1.16876E-04	6.70742E-05	-2.80342E-05
c_{17}	-1.34877E-04	-1.88234E-04	-2.92269E-04	-3.58577E-04	-4.00325E-04
c_{18}	1.33074E-04	1.95477E-04	3.40404E-04	4.63906E-04	5.80711E-04
c_{19}	-1.35045E-04	-1.91552E-04	-3.08612E-04	-3.92265E-04	-4.56165E-04
c_{20}	9.49205E-05	1.28219E-04	1.82248E-04	2.01824E-04	1.95327E-04
c_{21}	-2.64271E-05	-3.46820E-05	-4.52007E-05	-4.43193E-05	-3.41705E-05

表5-17c　等インパルス線の自然スプライン係数

	No. A2				
	ウレタン2面（L型）				
	11.62 Pa s	7.47 Pa s	3.85 Pa s	2.60 Pa s	1.93 Pa s
a_0	1.28810E+00	2.07637E+00	4.24807E+00	6.47025E+00	8.91261E+00
a_1	-7.04631E-03	-7.92202E-03	-4.53213E-03	4.67033E-03	1.94469E-02
c_{-3}	4.02600E-05	4.68514E-05	3.50253E-05	-6.51911E-06	-7.59967E-05
c_{-2}	-1.08740E-04	-1.27106E-04	-9.78146E-05	1.05409E-05	1.92994E-04
c_{-1}	6.67021E-05	7.87863E-05	6.45428E-05	3.37357E-06	-1.01492E-04
c_0	7.73689E-05	8.75965E-05	5.40216E-05	-4.09985E-05	-1.94524E-04
c_1	-1.40740E-04	-1.53537E-04	-6.62508E-05	1.43657E-04	4.72091E-04
c_2	8.09908E-05	7.33085E-05	-4.41495E-05	-2.59340E-04	-5.73000E-04
c_3	1.22236E-05	3.28619E-05	1.11264E-04	2.12497E-04	3.40652E-04
c_4	-6.13238E-05	-6.98257E-05	-4.26797E-05	3.56905E-05	1.63388E-04
c_5	3.93228E-05	2.26269E-05	-9.33846E-05	-2.81750E-04	-5.45740E-04
c_6	-8.95704E-07	2.45786E-05	1.39076E-04	3.00169E-04	5.13042E-04
c_7	-1.47070E-06	-8.67427E-06	-3.98182E-05	-8.30877E-05	-1.40071E-04
c_8	-3.29124E-05	-5.76222E-05	-1.32684E-04	-2.16124E-04	-3.13047E-04
c_9	4.73554E-05	8.43270E-05	1.99693E-04	3.31086E-04	4.86346E-04
c_{10}	3.43612E-05	3.43499E-05	-6.50983E-07	-7.07801E-05	-1.75592E-04
c_{11}	-1.53990E-04	-2.12475E-04	-3.15154E-04	-3.63239E-04	-3.70285E-04
c_{12}	1.83211E-04	2.63611E-04	4.32943E-04	5.55262E-04	6.48693E-04
c_{13}	-7.53697E-05	-1.17707E-04	-2.24050E-04	-3.21413E-04	-4.18308E-04
c_{14}	-1.01592E-04	-1.26476E-04	-1.44692E-04	-1.17971E-04	-5.45296E-05
c_{15}	2.07922E-04	2.73718E-04	3.70494E-04	3.92621E-04	3.58629E-04
c_{16}	-1.95839E-04	-2.55798E-04	-3.41400E-04	-3.57512E-04	-3.21623E-04
c_{17}	8.87200E-05	1.14032E-04	1.46060E-04	1.45263E-04	1.19410E-04
c_{18}	5.53383E-05	6.94632E-05	8.37078E-05	7.66977E-05	5.31845E-05
c_{19}	-9.56940E-05	-1.22093E-04	-1.54343E-04	-1.51816E-04	-1.22945E-04
c_{20}	3.47921E-05	4.52016E-05	6.02434E-05	6.36904E-05	5.87231E-05

表5-17d　等インパルス線の自然スプライン係数

	No. A3				
	ウレタン3面				
	11.62 Pa s	7.47 Pa s	3.85 Pa s	2.60 Pa s	1.93 Pa s
a_0	8.32039E-01	1.44953E+00	3.32309E+00	5.40652E+00	7.82897E+00
a_1	-1.16835E-02	-1.63321E-02	-2.53797E-02	-3.10990E-02	-3.46248E-02
c_{-3}	9.61360E-06	1.84694E-05	4.91978E-05	8.73985E-05	1.35214E-04
c_{-2}	1.13882E-05	-3.68517E-06	-8.60896E-05	-2.12210E-04	-3.85756E-04
c_{-1}	-9.29626E-05	-9.68126E-05	-1.34784E-05	1.66322E-04	4.41943E-04
c_0	1.42915E-04	1.62673E-04	9.86716E-05	-8.54622E-05	-3.85396E-04
c_1	-8.69214E-05	-8.85103E-05	-1.06651E-06	1.80962E-04	4.57502E-04
c_2	-1.27765E-05	-3.68944E-05	-1.35737E-04	-2.70769E-04	-4.47993E-04
c_3	-2.81651E-06	-8.90407E-07	1.24105E-05	3.46414E-05	6.65705E-05
c_4	1.35682E-04	1.96498E-04	3.29322E-04	4.31945E-04	5.18336E-04
c_5	-2.03142E-04	-2.95769E-04	-5.00608E-04	-6.61599E-04	-7.99761E-04
c_6	1.73522E-04	2.51245E-04	4.17183E-04	5.39239E-04	6.34472E-04
c_7	-1.03829E-04	-1.45933E-04	-2.24201E-04	-2.66371E-04	-2.81448E-04
c_8	-6.68692E-06	-1.19395E-05	-2.82385E-05	-4.66661E-05	-6.83030E-05
c_9	1.23197E-04	1.66035E-04	2.26475E-04	2.30344E-04	1.86717E-04
c_{10}	-1.70114E-04	-2.13574E-04	-2.26846E-04	-1.33559E-04	5.70061E-05
c_{11}	9.86305E-05	1.05424E-04	3.00604E-05	-1.41492E-04	-4.07832E-04
c_{12}	-3.32385E-06	1.72731E-05	1.14380E-04	2.54479E-04	4.42160E-04
c_{13}	9.83964E-06	1.07494E-05	3.86535E-06	-1.27521E-05	-3.89977E-05
c_{14}	-9.97461E-05	-1.47218E-04	-2.56772E-04	-3.48527E-04	-4.33247E-04
c_{15}	1.81468E-04	2.62460E-04	4.39634E-04	5.77317E-04	6.94377E-04
c_{16}	-1.58397E-04	-2.33108E-04	-4.06424E-04	-5.53525E-04	-6.91853E-04
c_{17}	5.09174E-05	8.39198E-05	1.80624E-04	2.86288E-04	4.08540E-04
c_{18}	1.07776E-05	4.40484E-06	-3.63680E-05	-1.01520E-04	-1.92502E-04
c_{19}	2.87606E-05	5.25319E-05	1.30489E-04	2.23342E-04	3.36539E-04
c_{20}	-6.97700E-05	-1.07556E-04	-2.05885E-04	-3.01741E-04	-4.03850E-04
c_{21}	3.37742E-05	5.02062E-05	8.94026E-05	1.23914E-04	1.57562E-04

表5-17e　等インパルス線の自然スプライン係数

	No. A4				
	ウレタン4面				
	11.62 Pa s	7.47 Pa s	3.85 Pa s	2.60 Pa s	1.93 Pa s
a_0	7.38435E-01	1.30061E+00	3.02638E+00	4.96372E+00	7.23016E+00
a_1	-1.26732E-02	-1.76712E-02	-2.72236E-02	-3.29937E-02	-3.61868E-02
c_{-3}	5.46181E-05	7.49070E-05	1.10377E-04	1.27142E-04	1.30119E-04
c_{-2}	-1.86178E-04	-2.46956E-04	-3.30493E-04	-3.35244E-04	-2.76268E-04
c_{-1}	2.96242E-04	3.73702E-04	4.20878E-04	3.08312E-04	5.60703E-05
c_0	-3.34455E-04	-4.10110E-04	-4.10861E-04	-2.10242E-04	1.71472E-04
c_1	3.26788E-04	4.14537E-04	4.76897E-04	3.67242E-04	1.08186E-04
c_2	-3.08360E-04	-4.10298E-04	-5.54569E-04	-5.70962E-04	-4.84729E-04
c_3	2.66829E-04	3.57390E-04	4.92923E-04	5.22305E-04	4.67908E-04
c_4	-1.15473E-04	-1.53158E-04	-2.05135E-04	-2.08534E-04	-1.72740E-04
c_5	-1.15531E-04	-1.53235E-04	-2.05241E-04	-2.08645E-04	-1.72839E-04
c_6	2.67001E-04	3.57621E-04	4.93240E-04	5.22638E-04	4.68203E-04
c_7	-3.08994E-04	-4.11145E-04	-5.55731E-04	-5.72185E-04	-4.85811E-04
c_8	3.29151E-04	4.17696E-04	4.81231E-04	3.71800E-04	1.12217E-04
c_9	-3.43273E-04	-4.21898E-04	-4.27033E-04	-2.27254E-04	1.56427E-04
c_{10}	3.29151E-04	4.17696E-04	4.81231E-04	3.71800E-04	1.12217E-04
c_{11}	-3.08994E-04	-4.11145E-04	-5.55731E-04	-5.72185E-04	-4.85811E-04
c_{12}	2.67001E-04	3.57621E-04	4.93240E-04	5.22638E-04	4.68203E-04
c_{13}	-1.15531E-04	-1.53235E-04	-2.05241E-04	-2.08645E-04	-1.72839E-04
c_{14}	-1.15473E-04	-1.53158E-04	-2.05135E-04	-2.08534E-04	-1.72740E-04
c_{15}	2.66829E-04	3.57390E-04	4.92923E-04	5.22305E-04	4.67908E-04
c_{16}	-3.08360E-04	-4.10298E-04	-5.54569E-04	-5.70962E-04	-4.84729E-04
c_{17}	3.26788E-04	4.14537E-04	4.76897E-04	3.67242E-04	1.08186E-04
c_{18}	-3.34455E-04	-4.10110E-04	-4.10861E-04	-2.10242E-04	1.71472E-04
c_{19}	2.96242E-04	3.73702E-04	4.20878E-04	3.08312E-04	5.60703E-05
c_{20}	-1.86178E-04	-2.46956E-04	-3.30493E-04	-3.35244E-04	-2.76268E-04
c_{21}	5.46181E-05	7.49070E-05	1.10377E-04	1.27142E-04	1.30119E-04

表5-17f　等インパルス線の自然スプライン係数

	No. A5				
	ウレタン2面（II型）				
	11.62 Pa s	7.47 Pa s	3.85 Pa s	2.60 Pa s	1.93 Pa s
a_0	1.21465E+00	2.03177E+00	4.39647E+00	6.92475E+00	9.78961E+00
a_1	-7.50936E-03	-9.64581E-03	-1.22038E-02	-1.18163E-02	-9.12873E-03
c_{-3}	-2.11152E-05	-3.02227E-05	-4.87104E-05	-6.10941E-05	-6.93990E-05
c_{-2}	8.39947E-05	1.25501E-04	2.24697E-04	3.11930E-04	3.96699E-04
c_{-1}	-1.20960E-04	-1.97809E-04	-4.19285E-04	-6.57512E-04	-9.30100E-04
c_0	1.16451E-04	2.04832E-04	4.84006E-04	8.07510E-04	1.19556E-03
c_1	-1.22705E-04	-1.96434E-04	-4.03744E-04	-6.22459E-04	-8.69829E-04
c_2	9.09745E-05	1.20002E-04	1.62534E-04	1.71720E-04	1.55615E-04
c_3	-1.01528E-04	-1.03834E-04	-2.84232E-05	1.23122E-04	3.46107E-04
c_4	2.09385E-04	2.41638E-04	2.01503E-04	4.39404E-05	-2.17028E-04
c_5	-2.50141E-04	-3.18449E-04	-3.89596E-04	-3.55356E-04	-2.36103E-04
c_6	2.32396E-04	3.17286E-04	4.62095E-04	5.24590E-04	5.25011E-04
c_7	-2.03135E-04	-2.81617E-04	-4.19297E-04	-4.81906E-04	-4.86580E-04
c_8	1.04646E-04	1.42966E-04	2.03589E-04	2.20526E-04	2.01997E-04
c_9	-3.65287E-05	-4.77172E-05	-5.87378E-05	-5.00222E-05	-2.38893E-05
c_{10}	1.04646E-04	1.42966E-04	2.03589E-04	2.20526E-04	2.01997E-04
c_{11}	-2.03135E-04	-2.81617E-04	-4.19297E-04	-4.81906E-04	-4.86580E-04
c_{12}	2.32396E-04	3.17286E-04	4.62095E-04	5.24590E-04	5.25011E-04
c_{13}	-2.50141E-04	-3.18449E-04	-3.89596E-04	-3.55356E-04	-2.36103E-04
c_{14}	2.09385E-04	2.41638E-04	2.01503E-04	4.39404E-05	-2.17028E-04
c_{15}	-1.01528E-04	-1.03834E-04	-2.84232E-05	1.23122E-04	3.46107E-04
c_{16}	9.09745E-05	1.20002E-04	1.62534E-04	1.71720E-04	1.55615E-04
c_{17}	-1.22705E-04	-1.96434E-04	-4.03744E-04	-6.22459E-04	-8.69829E-04
c_{18}	1.16451E-04	2.04832E-04	4.84006E-04	8.07510E-04	1.19556E-03
c_{19}	-1.20960E-04	-1.97809E-04	-4.19285E-04	-6.57512E-04	-9.30100E-04
c_{20}	8.39947E-05	1.25501E-04	2.24697E-04	3.11930E-04	3.96699E-04
c_{21}	-2.11152E-05	-3.02227E-05	-4.87104E-05	-6.10941E-05	-6.93990E-05

表5-17g　等インパルス線の自然スプライン係数

	No. B				
	コの字障壁				
	11.62 Pa s	7.47 Pa s	3.85 Pa s	2.60 Pa s	1.93 Pa s
a_0	1.02189E+00	1.80698E+00	4.22591E+00	6.94850E+00	1.01383E+01
a_1	-1.81421E-02	-2.59937E-02	-4.26596E-02	-5.50160E-02	-6.49196E-02
c_{-3}	-2.90698E-06	2.42549E-06	3.27876E-05	8.08263E-05	1.48434E-04
c_{-2}	3.66715E-05	4.14360E-05	2.04194E-05	-3.60654E-05	-1.27269E-04
c_{-1}	-5.93836E-05	-1.00046E-04	-2.33392E-04	-3.98602E-04	-6.09462E-04
c_0	4.72409E-05	1.07078E-04	3.53322E-04	7.00564E-04	1.17077E-03
c_1	-3.54008E-05	-6.83006E-05	-1.91097E-04	-3.55887E-04	-5.74494E-04
c_2	-5.92595E-05	-8.55447E-05	-1.48761E-04	-2.06929E-04	-2.67139E-04
c_3	1.88313E-04	2.51951E-04	3.50066E-04	3.78130E-04	3.52842E-04
c_4	-2.52741E-04	-3.15267E-04	-3.38146E-04	-2.16413E-04	3.37315E-05
c_5	2.29198E-04	2.60926E-04	1.73629E-04	-8.46841E-05	-5.03448E-04
c_6	-1.10720E-05	2.35117E-05	1.67622E-04	3.54050E-04	5.84075E-04
c_7	-2.44402E-04	-3.17834E-04	-3.59453E-04	-2.29016E-04	6.51022E-05
c_8	2.99575E-04	3.43113E-04	2.03172E-04	-2.07529E-04	-8.84038E-04
c_9	-2.87274E-04	-2.93590E-04	-2.08631E-05	5.47114E-04	1.40797E-03
c_{10}	3.21425E-04	3.43658E-04	1.17869E-04	-3.94148E-04	-1.18366E-03
c_{11}	-2.78983E-04	-3.51873E-04	-3.94875E-04	-2.85678E-04	-4.28960E-05
c_{12}	1.39782E-04	2.35150E-04	5.17973E-04	8.28512E-04	1.18786E-03
c_{13}	-2.70629E-05	-9.88636E-05	-3.90799E-04	-7.82823E-04	-1.28975E-03
c_{14}	-2.50245E-05	-3.87539E-06	1.16554E-04	3.01405E-04	5.54799E-04
c_{15}	2.88909E-05	4.16656E-05	6.73600E-05	8.38101E-05	9.35883E-05
c_{16}	4.86068E-06	1.82301E-05	7.06588E-05	1.39030E-04	2.25705E-04
c_{17}	-1.81355E-05	-7.96191E-05	-3.25447E-04	-6.49373E-04	-1.06219E-03
c_{18}	1.23750E-05	9.30830E-05	4.26812E-04	8.73920E-04	1.44831E-03
c_{19}	-2.41098E-05	-9.01044E-05	-3.49525E-04	-6.88409E-04	-1.11845E-03
c_{20}	2.87578E-05	6.01716E-05	1.66974E-04	2.95176E-04	4.50749E-04
c_{21}	-1.13334E-05	-1.74824E-05	-3.28613E-05	-4.69803E-05	-6.11374E-05

表5-17h　等インパルス線の自然スプライン係数

	R02 No. A1				
	ウレタン1面（低密度）				
	11.62 Pa s	7.47 Pa s	3.85 Pa s	2.60 Pa s	1.93 Pa s
a_0	1.81236E+00	2.77923E+00	5.23030E+00	7.53836E+00	9.91915E+00
a_1	1.17524E-02	1.21998E-02	2.90579E-03	-1.66884E-02	-4.62154E-02
c_{-3}	-5.99296E-05	-5.97170E-05	-2.40603E-07	1.17559E-04	2.92509E-04
c_{-2}	1.66262E-04	1.57556E-04	-4.36660E-05	-4.21288E-04	-9.73715E-04
c_{-1}	-1.65324E-04	-1.34073E-04	1.66219E-04	6.81695E-04	1.41528E-03
c_0	1.20789E-04	7.62878E-05	-2.39077E-04	-7.49627E-04	-1.46179E-03
c_1	-1.82157E-04	-1.56990E-04	1.32935E-04	6.43861E-04	1.37720E-03
c_2	2.33593E-04	2.49224E-04	8.94691E-05	-2.69954E-04	-8.21401E-04
c_3	-1.68537E-04	-2.21358E-04	-2.88807E-04	-2.83159E-04	-2.17855E-04
c_4	4.43886E-05	9.76361E-05	2.87443E-04	5.23812E-04	8.17555E-04
c_5	5.81730E-05	5.18246E-05	-3.07159E-05	-1.77154E-04	-3.86942E-04
c_6	-5.92753E-05	-9.39447E-05	-1.94801E-04	-3.06497E-04	-4.38346E-04
c_7	-1.96812E-05	9.65817E-07	1.21529E-04	3.11196E-04	5.75856E-04
c_8	6.94849E-05	1.00892E-04	1.59906E-04	1.89777E-04	1.95575E-04
c_9	-5.00211E-06	-7.43261E-05	-3.60116E-04	-7.40146E-04	-1.22511E-03
c_{10}	-1.61245E-04	-1.02744E-04	2.91151E-04	9.12748E-04	1.76628E-03
c_{11}	2.51622E-04	2.37113E-04	-5.13705E-05	-5.79637E-04	-1.34174E-03
c_{12}	-1.79043E-04	-1.94982E-04	-1.02589E-04	1.19146E-04	4.61474E-04
c_{13}	2.83203E-05	2.57267E-05	-1.14473E-05	-7.78780E-05	-1.73149E-04
c_{14}	1.03624E-04	1.54203E-04	2.79380E-04	3.95905E-04	5.16097E-04
c_{15}	-1.20480E-04	-1.92367E-04	-3.92097E-04	-5.99608E-04	-8.31138E-04
c_{16}	1.94556E-05	6.20595E-05	2.25840E-04	4.37269E-04	7.03972E-04
c_{17}	1.14699E-04	1.26806E-04	7.51756E-05	-5.69379E-05	-2.63556E-04
c_{18}	-1.81961E-04	-2.23491E-04	-2.36008E-04	-1.53866E-04	9.89064E-06
c_{19}	1.29618E-04	1.50261E-04	1.21799E-04	1.32520E-05	-1.67451E-04
c_{20}	-4.02219E-05	-3.17624E-05	3.93470E-05	1.56510E-04	3.19552E-04
c_{21}	2.82784E-06	-4.79887E-06	-3.92566E-05	-8.69797E-05	-1.49037E-04

表5-17i　等インパルス線の自然スプライン係数

	R02 No. A2				
	ウレタン2面（II型、低密度）				
	11.62 Pa s	7.47 Pa s	3.85 Pa s	2.60 Pa s	1.93 Pa s
a_0	1.55093E+00	2.52673E+00	5.26808E+00	8.12843E+00	1.13191E+01
a_1	2.52601E-03	4.04355E-03	8.21029E-03	1.24720E-02	1.71623E-02
c_{-3}	-8.19401E-06	-1.22003E-05	-2.18786E-05	-3.05606E-05	-3.91886E-05
c_{-2}	2.23048E-06	5.13992E-06	1.59381E-05	2.97859E-05	4.73098E-05
c_{-1}	5.64732E-05	7.57885E-05	1.05555E-04	1.13710E-04	1.05110E-04
c_0	-1.01434E-04	-1.37599E-04	-1.97834E-04	-2.22157E-04	-2.19620E-04
c_1	5.89615E-05	7.66460E-05	9.71838E-05	9.14301E-05	6.40540E-05
c_2	-7.72269E-06	1.70984E-06	4.94229E-05	1.18904E-04	2.11535E-04
c_3	2.84741E-05	1.79694E-05	-5.28947E-05	-1.64920E-04	-3.18922E-04
c_4	-8.39301E-05	-9.75611E-05	-7.93996E-05	-8.68018E-06	1.09529E-04
c_5	8.52828E-05	1.18766E-04	1.86523E-04	2.34240E-04	2.70796E-04
c_6	3.88374E-06	-2.22540E-05	-1.45652E-04	-3.23836E-04	-5.62623E-04
c_7	-9.66353E-05	-8.86458E-05	4.65182E-05	2.96493E-04	6.61924E-04
c_8	1.35592E-04	1.45737E-04	5.18226E-05	-1.64214E-04	-4.98849E-04
c_9	-1.45964E-04	-1.66991E-04	-1.10609E-04	5.96087E-05	3.37891E-04
c_{10}	1.35592E-04	1.45737E-04	5.18226E-05	-1.64214E-04	-4.98849E-04
c_{11}	-9.66353E-05	-8.86458E-05	4.65182E-05	2.96493E-04	6.61924E-04
c_{12}	3.88374E-06	-2.22540E-05	-1.45652E-04	-3.23836E-04	-5.62623E-04
c_{13}	8.52828E-05	1.18766E-04	1.86523E-04	2.34240E-04	2.70796E-04
c_{14}	-8.39301E-05	-9.75611E-05	-7.93996E-05	-8.68018E-06	1.09529E-04
c_{15}	2.84741E-05	1.79694E-05	-5.28947E-05	-1.64920E-04	-3.18922E-04
c_{16}	-7.72269E-06	1.70984E-06	4.94229E-05	1.18904E-04	2.11535E-04
c_{17}	5.89615E-05	7.66460E-05	9.71838E-05	9.14301E-05	6.40540E-05
c_{18}	-1.01434E-04	-1.37599E-04	-1.97834E-04	-2.22157E-04	-2.19620E-04
c_{19}	5.64732E-05	7.57885E-05	1.05555E-04	1.13710E-04	1.05110E-04
c_{20}	2.23048E-06	5.13992E-06	1.59381E-05	2.97859E-05	4.73098E-05
c_{21}	-8.19401E-06	-1.22003E-05	-2.18786E-05	-3.05606E-05	-3.91886E-05

表5-17j　等インパルス線の自然スプライン係数

	R02 No. A3				
	ウレタン3面（低密度）				
	11.62 Pa s	7.47 Pa s	3.85 Pa s	2.60 Pa s	1.93 Pa s
a_0	1.48909E+00	2.35687E+00	4.68264E+00	7.00147E+00	9.50257E+00
a_1	7.12259E-03	8.16468E-03	5.68162E-03	-2.05691E-03	-1.47271E-02
c_{-3}	-5.66344E-05	-7.05735E-05	-7.49294E-05	-4.60969E-05	1.24273E-05
c_{-2}	1.67201E-04	2.06371E-04	2.10155E-04	1.12071E-04	-7.80136E-05
c_{-1}	-1.83318E-04	-2.18136E-04	-1.85831E-04	-2.69601E-05	2.49367E-04
c_0	1.48398E-04	1.68272E-04	1.05036E-04	-7.56001E-05	-3.67966E-04
c_1	-2.00687E-04	-2.39699E-04	-2.08776E-04	-4.15269E-05	2.51796E-04
c_2	2.36679E-04	2.92623E-04	3.01932E-04	1.70338E-04	-8.77321E-05
c_3	-1.86288E-04	-2.33233E-04	-2.55704E-04	-1.75485E-04	-4.96980E-06
c_4	1.05182E-04	1.37006E-04	1.74580E-04	1.65318E-04	1.17530E-04
c_5	-2.72958E-05	-4.67770E-05	-1.06474E-04	-1.73983E-04	-2.53710E-04
c_6	1.95389E-05	4.21967E-05	1.22198E-04	2.21230E-04	3.43899E-04
c_7	-7.77704E-05	-1.14503E-04	-1.97752E-04	-2.65364E-04	-3.25495E-04
c_8	1.03478E-04	1.44509E-04	2.20789E-04	2.62884E-04	2.80166E-04
c_9	-5.61287E-05	-8.67378E-05	-1.63134E-04	-2.32912E-04	-3.02427E-04
c_{10}	-2.57186E-05	-1.38775E-05	5.93824E-05	1.72347E-04	3.25999E-04
c_{11}	5.56748E-05	5.54299E-05	3.17978E-06	-9.89245E-05	-2.49174E-04
c_{12}	-1.44755E-06	6.46793E-06	4.18358E-05	9.09548E-05	1.55147E-04
c_{13}	-7.92356E-05	-1.12097E-04	-1.80263E-04	-2.29390E-04	-2.67584E-04
c_{14}	1.08640E-04	1.65053E-04	3.09384E-04	4.48286E-04	5.95233E-04
c_{15}	-6.94758E-05	-1.37581E-04	-3.72682E-04	-6.61715E-04	-1.01981E-03
c_{16}	3.08492E-05	1.00935E-04	3.82336E-04	7.58218E-04	1.24329E-03
c_{17}	-3.38063E-07	-4.52681E-05	-2.45832E-04	-5.27413E-04	-8.99306E-04
c_{18}	-2.34598E-05	-2.63779E-06	1.15535E-04	2.97098E-04	5.46334E-04
c_{19}	4.80187E-06	-3.40032E-05	-2.12205E-04	-4.65317E-04	-8.01267E-04
c_{20}	1.02895E-05	5.58754E-05	2.47829E-04	5.09832E-04	8.51130E-04
c_{21}	-2.93315E-06	-1.96147E-05	-9.05900E-05	-1.87889E-04	-3.14860E-04

表5-17k　等インパルス線の自然スプライン係数

	R02 No. A4				
	ウレタン4面（低密度）				
	11.62 Pa s	7.47 Pa s	3.85 Pa s	2.60 Pa s	1.93 Pa s
a_0	1.27282E+00	2.05891E+00	4.24104E+00	6.49182E+00	8.98134E+00
a_1	1.40004E-03	2.41722E-04	-6.21301E-03	-1.59885E-02	-2.92745E-02
c_{-3}	-1.26940E-05	-1.39322E-05	-6.82780E-06	1.06345E-05	3.79820E-05
c_{-2}	3.41392E-05	4.01178E-05	3.27371E-05	2.13043E-06	-4.99100E-05
c_{-1}	-2.70252E-05	-3.59148E-05	-4.86819E-05	-5.06177E-05	-4.40014E-05
c_0	1.14459E-05	1.96246E-05	4.49083E-05	7.37877E-05	1.08166E-04
c_1	-2.87405E-05	-3.69124E-05	-4.48600E-05	-3.91110E-05	-2.18466E-05
c_2	4.10005E-05	4.41082E-05	1.74495E-05	-4.38964E-05	-1.38529E-04
c_3	-2.34638E-05	-2.11499E-05	1.20121E-05	7.18848E-05	1.58428E-04
c_4	5.33735E-06	4.05825E-06	-6.73598E-06	-2.48088E-05	-5.02819E-05
c_5	5.34059E-06	4.06013E-06	-6.74319E-06	-2.48305E-05	-5.03237E-05
c_6	-2.34735E-05	-2.11555E-05	1.20337E-05	7.19499E-05	1.58553E-04
c_7	4.10361E-05	4.41289E-05	1.73701E-05	-4.41352E-05	-1.38989E-04
c_8	-2.88732E-05	-3.69896E-05	-4.45644E-05	-3.82209E-05	-2.01328E-05
c_9	1.19411E-05	1.99126E-05	4.38050E-05	7.04660E-05	1.01771E-04
c_{10}	-2.88732E-05	-3.69896E-05	-4.45644E-05	-3.82209E-05	-2.01328E-05
c_{11}	4.10361E-05	4.41289E-05	1.73701E-05	-4.41352E-05	-1.38989E-04
c_{12}	-2.34735E-05	-2.11555E-05	1.20337E-05	7.19499E-05	1.58553E-04
c_{13}	5.34059E-06	4.06013E-06	-6.74319E-06	-2.48305E-05	-5.03237E-05
c_{14}	5.33735E-06	4.05825E-06	-6.73598E-06	-2.48088E-05	-5.02819E-05
c_{15}	-2.34638E-05	-2.11499E-05	1.20121E-05	7.18848E-05	1.58428E-04
c_{16}	4.10005E-05	4.41082E-05	1.74495E-05	-4.38964E-05	-1.38529E-04
c_{17}	-2.87405E-05	-3.69124E-05	-4.48600E-05	-3.91110E-05	-2.18466E-05
c_{18}	1.14459E-05	1.96246E-05	4.49083E-05	7.37877E-05	1.08166E-04
c_{19}	-2.70252E-05	-3.59148E-05	-4.86819E-05	-5.06177E-05	-4.40014E-05
c_{20}	3.41392E-05	4.01178E-05	3.27371E-05	2.13043E-06	-4.99100E-05
c_{21}	-1.26940E-05	-1.39322E-05	-6.82780E-06	1.06345E-05	3.79820E-05

表5-17l　等インパルス線の自然スプライン係数

	R01 No. C2				
	コの字障壁（防爆壁と並行）				
	11.62 Pa s	7.47 Pa s	3.85 Pa s	2.60 Pa s	1.93 Pa s
a_0	1.62608E+00	2.75826E+00	6.09198E+00	9.70934E+00	1.38490E+01
a_1	-2.52279E-03	2.96601E-04	1.43886E-02	3.46897E-02	6.15470E-02
c_{-3}	-2.48688E-05	-4.44519E-05	-1.04765E-04	-1.72419E-04	-2.51385E-04
c_{-2}	1.04831E-04	1.60350E-04	3.00691E-04	4.32566E-04	5.68459E-04
c_{-1}	-1.86808E-04	-2.42172E-04	-3.08533E-04	-2.96100E-04	-2.20239E-04
c_0	2.11964E-04	2.51654E-04	2.29356E-04	8.37475E-05	-1.71396E-04
c_1	-1.76443E-04	-2.36807E-04	-3.33383E-04	-3.67153E-04	-3.53880E-04
c_2	6.33692E-05	1.38888E-04	4.00090E-04	7.16776E-04	1.10302E-03
c_3	4.40743E-05	-9.95935E-06	-2.75459E-04	-6.55286E-04	-1.15611E-03
c_4	-2.97779E-05	-4.54063E-06	1.24732E-04	3.11288E-04	5.57408E-04
c_5	-3.29167E-05	-3.72345E-05	-2.13351E-05	2.26787E-05	9.37678E-05
c_6	5.84629E-05	5.12061E-05	-3.37309E-05	-1.82065E-04	-3.93255E-04
c_7	-8.83812E-05	-8.50790E-05	5.65446E-06	1.73877E-04	4.16666E-04
c_8	8.97838E-05	1.02587E-04	8.04499E-05	5.75273E-06	-1.15677E-04
c_9	-3.01351E-06	-1.38552E-05	-5.93350E-05	-1.21312E-04	-2.01960E-04
c_{10}	-7.88697E-05	-1.09541E-04	-1.69835E-04	-2.09571E-04	-2.36662E-04
c_{11}	8.52136E-05	1.53990E-04	3.72367E-04	6.24573E-04	9.25255E-04
c_{12}	-3.81770E-05	-7.85163E-05	-2.18286E-04	-3.89501E-04	-6.00522E-04
c_{13}	-3.82752E-05	-7.36521E-05	-1.88364E-04	-3.21758E-04	-4.80729E-04
c_{14}	3.94013E-05	1.17761E-04	4.16695E-04	8.01522E-04	1.28662E-03
c_{15}	7.25290E-05	8.73682E-06	-3.34125E-04	-8.44268E-04	-1.53065E-03
c_{16}	-1.04637E-04	-9.27221E-05	6.82528E-05	3.58791E-04	7.79716E-04
c_{17}	-6.36936E-05	-1.88268E-05	2.00380E-04	5.04310E-04	8.93842E-04
c_{18}	1.94123E-04	1.24856E-04	-3.09098E-04	-9.68830E-04	-1.85385E-03
c_{19}	-7.36383E-05	-2.17521E-05	2.36772E-04	5.99889E-04	1.06937E-03
c_{20}	-6.48587E-05	-8.10206E-05	-7.73163E-05	-2.35226E-05	7.76182E-05
c_{21}	4.06069E-05	4.01008E-05	-1.87422E-06	-8.39862E-05	-2.05434E-04

5.7 まとめ

煙火火薬庫に追加する構造体の影響を評価するため、防爆壁の内側にウレタンフォームを挿入した場合、防爆壁の外側にコの字障壁を設置した場合について検討した。爆点から防爆壁までの距離 L_0 = 42.3 mm、防爆壁の高さ H_0 = 26.5 mm とした。PETN/C ペレット 1 g の爆発で生じた爆風の圧力履歴の波形を取得し、以下の場合について爆風の威力と角度分布を測定した。

・高密度ウレタンフォームを防爆壁の内側 1 面、2 面、3 面、4 面に設置した場合。

・高さ H_1 = 77.2 mm のコの字障壁を爆点からの距離 L_1 = 84.7 mm に、防爆壁に対して 45 度傾けて設置した場合。

最大過圧の結果から、以下の点についてまとめる。

高密度ウレタンフォームについて

低密度ウレタンに比べて、ほとんどの角度、距離で最大過圧を小さく評価している。全体的な角度依存性は定性的に一致している。

・1 面に設置した場合には、爆点近傍では 0º ~ 90º 方向の最大過圧の減少が大きいが、遠方では同等程度となる。180º 方向では地表面爆発と同等以上となる。

・2 面（0º、90º 方向）に設置した場合には、-45º ~ 135º 方向の最大過圧が減少し、地表面爆発を下回る。爆点近傍では 225º 方向で増加する。

・3 面に設置した場合には、全角度で最大過圧が減少、または地表面爆発と同等程度となる。特に 0º ~ 90º 方向、180º 方向で減少する。

・4 面に設置した場合には、全角度で最大過圧が減少し、地表面爆発を下回る。

・2 面（0º、180º 方向）に設置した場合には、全角度で最大過圧が減少、または地表面爆発と同等程度となる。遠方では 0º、90º 方向の最大過圧が減少するが、減少する角度の範囲は 90º 方向でより大きい。

コの字障壁について

コの字障壁を防爆壁に対して 45 度傾けて設置した場合には、爆点近傍では最大過圧が減少するが、遠方では全角度で最大過圧が増加する。防爆壁に並行に設置した場合に比べて、すべての角度、距離で最大過圧を大きく評価している。

第 6 章　地中式一級火薬庫の保安距離策定に関するシミュレーション

6.1　背景

平成 27 年度から平成 30 年度まで、地中式一級火薬庫の前室入口方向に対する角度に応じた保安距離策定に資するデータを得るため、地中式火薬庫の小規模室内実験[1-4]および大規模野外実験[2-4]（表 6-1）を行い、以下のような結果を得た。各文字の説明は図 6-1 の通りである。

・爆風圧は前室入口前方が強くなり入口方向に対する角度依存性がある。
・前室の断面積（S_1）と火薬庫（薬室）の断面積（S_2）の比（S_1/S_2）が小さくなると爆風圧は小さくなる。
（S_1/S_2=1 の場合を基準とすると、S_1/S_2=0.068 で爆風圧は約 70%減少する。）
・火薬庫全長（$L=L_1+L_2$）と薬室径（D_2）の比（L/D_2）が大きくなると爆風圧が小さくなる。
（L/D_2=3 の場合を基準とすると、L/D_2=21 で爆風圧は約 24%減少する。）
・前室長（L_1）と薬室長（L_2）の比（L_1/L_2）は爆風圧にほとんど影響を与えない。
（L_1/L_2=0.125 の場合を基準とすると、L_1/L_2=2 で爆風圧は約 8%減少する。）

表 6-1　地中式火薬庫の野外実験及び室内実験

年度	野外実験					室内実験				
	薬種	薬量	L/D_2	S_1/S_2	土堤	薬種	薬量	L/D_2	S_1/S_2	土堤
H27						PETN	1g	3	1	有無
H28	EMX2	5kg	3	1	有無	PETN	1g	9, 21	1	有無
H29	EMX2	5kg	9	1	有	PETN	1g	9	0.26	有
H30	EMX2	5kg	8.6	0.24	有	PETN	1g	9	0.58, 0.068	有

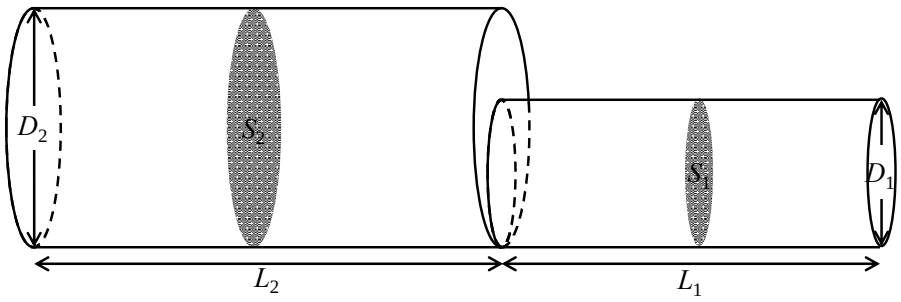


図 6-1　断面積変化を伴う地中式火薬庫モデルの模式図

6.2 目的

保安距離の検討にあたっては、爆風圧に与える影響が一番大きい S_1/S_2 比を変数として用いたが、任意形状の地中式火薬庫の保安距離を検討するためには L/D_2 も考慮に入れる必要がある。そのため、令和 2 年度に実施した「火薬類爆発影響低減化技術基準検討におけるシミュレーション活用に係る調査」事業の結果を踏まえ、保安距離の検討に適切な L/D_2 を 4 つ抽出しシミュレーションを行い、保安距離について技術的知見を取りまとめ、L/D_2 を組み入れた技術基準改正案の提案を行う。

6.3　数値解析項目および概要

本数値解析は野外実験を再現することから、まず平成 30 年度爆発影響低減化技術基準検討報告書[4]の野外実験の条件等を図 6-2 から図 6-6 に示す。野外実験では模擬覆土構造体を塗装合板で作成し、模擬地中式火薬庫として鋼管杭と圧力配管用鋼管を使用し、実験後は破壊された。

平成 29 年度、平成 30 年度爆発影響低減化技術基準検討報告書[3,4]の室内実験の模擬火薬庫形状の一例と写真を図 6-7 と図 6-8 に示す。野外実験とは異なり粘土と金属板によって地形を考慮しており、実験後に変形しなかった。土堤や火薬庫モデルも地形と同様に変形しておらず、すべて剛体とみなして良い。

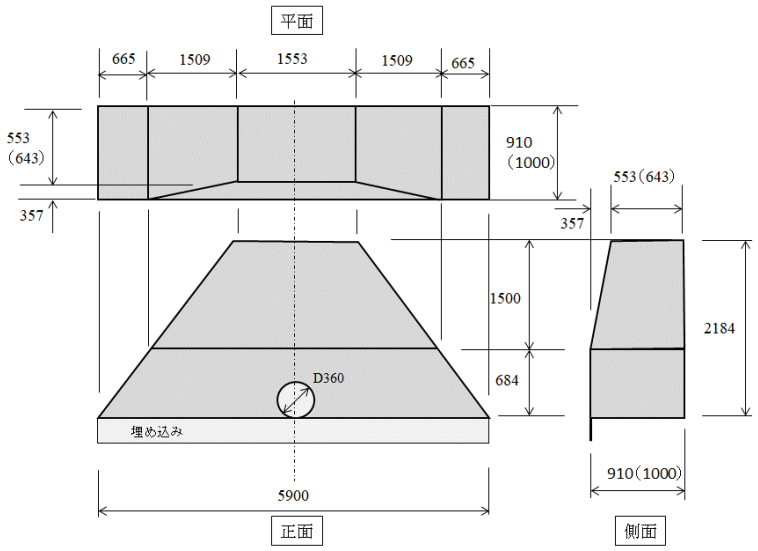


図 6-2　平成 30 年度火薬類保安技術実験の模擬覆土（三面図）[4]

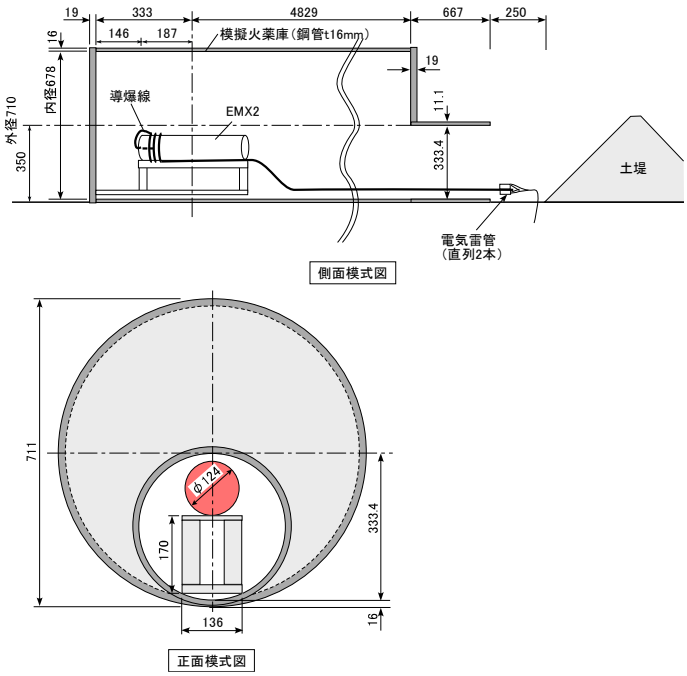


図 6-3　平成 30 年度火薬類保安技術実験の火薬庫の形状と爆薬（EMX2）の装薬状況[4]

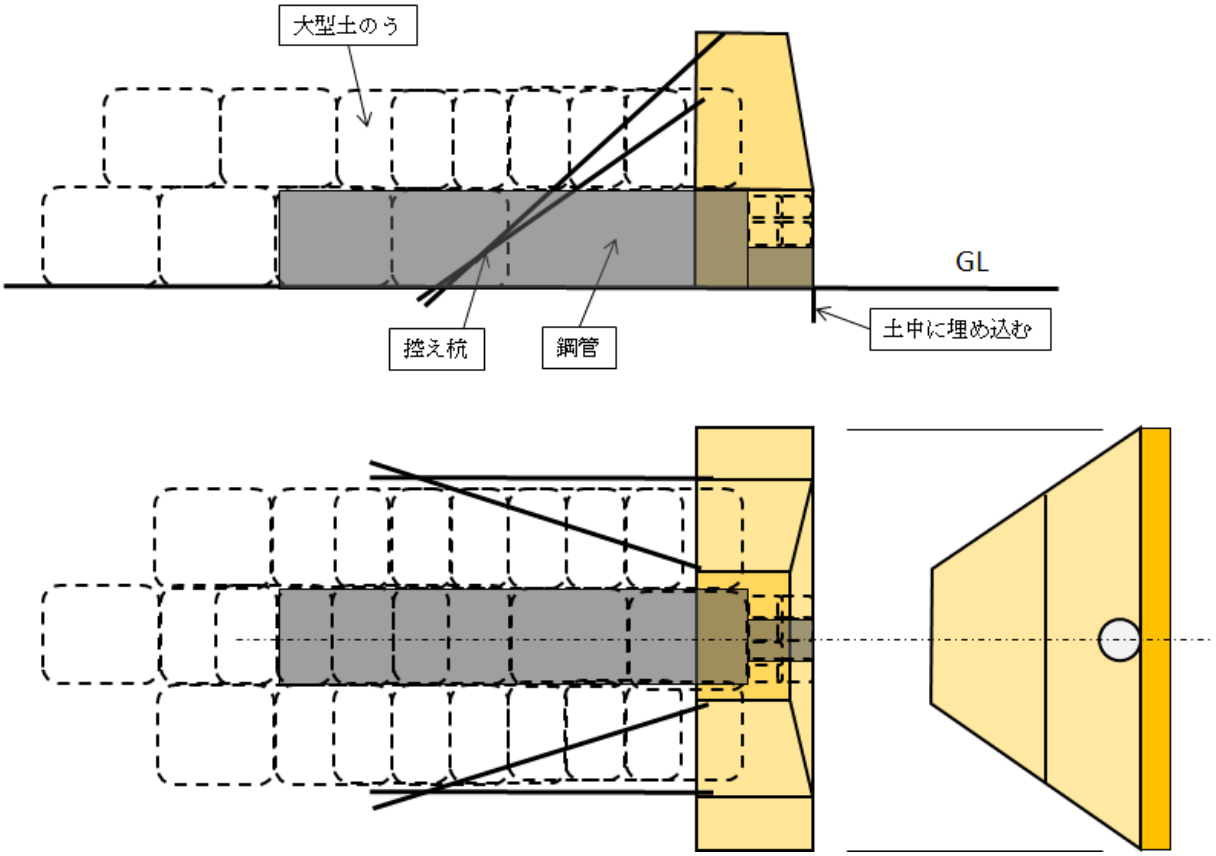


図 6-4　平成 30 年度火薬類保安技術実験の模擬覆土構成図[4]

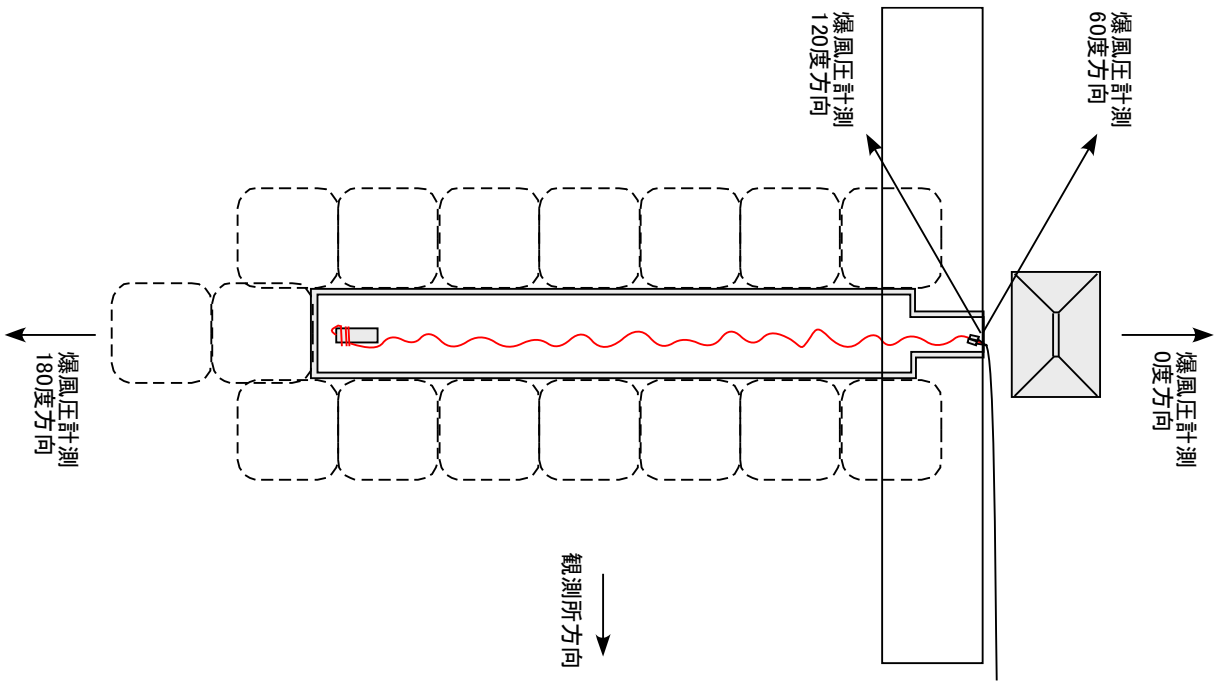


図 6-5　平成 30 年度火薬類保安技術実験の爆薬と土堤の設置方向[4]

図 6-6　平成 30 年度火薬類保安技術実験 No.1-2　試験体設置状況写真[4]

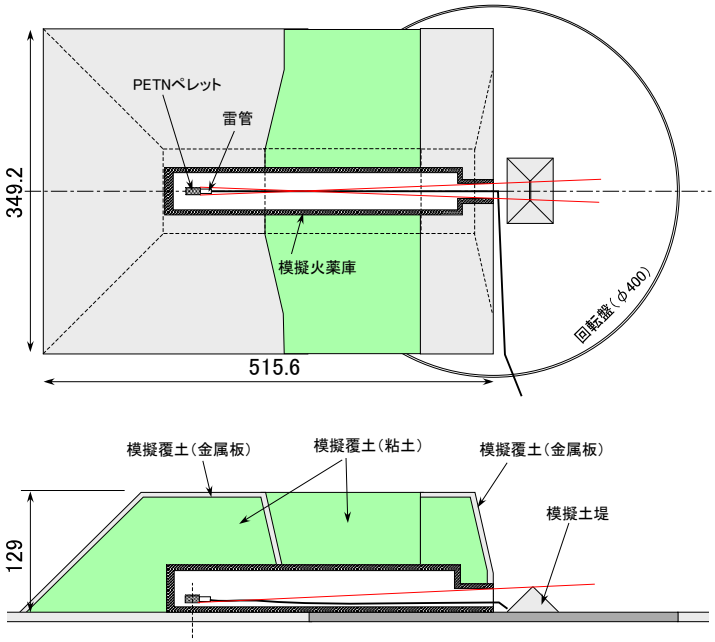


図 6-7　平成 29 年度火薬類保安技術実験の室内実験で使用した模擬火薬庫・模擬土堤の位置関係[3]

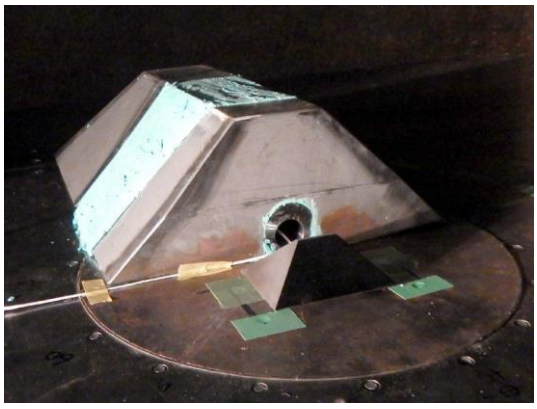


図 6-8　平成 30 年度火薬類保安技術実験の室内実験の装薬状況（実験 No.1）[4]

6.3.1　計算手法

過去[5-7]に室内実験を模擬する数値解析によって爆風圧を検討している。本数値解析でもその際に使用した計算手法を用いる。詳細は下記の通りである。

支配方程式：多種媒体を考慮した二次元軸対称または三次元圧縮性 Euler 方程式[8]

二次元軸対称圧縮性 Euler 方程式（基準爆風圧）

$$\frac{\partial \mathbf{Q}}{\partial t}+\frac{\partial \mathbf{E}}{\partial x}+\frac{\partial \mathbf{F}}{\partial y}=-\frac{u}{x}\mathbf{S}, \tag{1}$$

$$\mathbf{Q}=\begin{bmatrix}\alpha_1\rho_1\\ \alpha_2\rho_2\\ \rho u\\ \rho v\\ \rho e\end{bmatrix},\mathbf{E}=\begin{bmatrix}\alpha_1\rho_1 u\\ \alpha_2\rho_2 u\\ \rho u^2+p\\ \rho vu\\ (\rho e+p)u\end{bmatrix},\mathbf{F}=\begin{bmatrix}\alpha_1\rho_1 v\\ \alpha_2\rho_2 v\\ \rho uv\\ \rho v^2+p\\ (\rho e+p)v\end{bmatrix},\mathbf{S}=\begin{bmatrix}\alpha_1\rho_1\\ \alpha_2\rho_2\\ \rho u\\ \rho v\\ (\rho e+p)\end{bmatrix}, \tag{2}$$

$$\frac{\partial \alpha_1}{\partial t}+u\frac{\partial \alpha_1}{\partial x}+v\frac{\partial \alpha_1}{\partial y}=0. \tag{3}$$

三次元圧縮性 Euler 方程式（地中式火薬庫）

$$\frac{\partial \mathbf{Q}}{\partial t}+\frac{\partial \mathbf{E}}{\partial x}+\frac{\partial \mathbf{F}}{\partial y}+\frac{\partial \mathbf{G}}{\partial z}=0, \tag{4}$$

$$\mathbf{Q}=\begin{bmatrix}\alpha_1\rho_1\\ \alpha_2\rho_2\\ \rho u\\ \rho v\\ \rho w\\ \rho e\end{bmatrix},\mathbf{E}=\begin{bmatrix}\alpha_1\rho_1 u\\ \alpha_2\rho_2 u\\ \rho u^2+p\\ \rho vu\\ \rho wu\\ (\rho e+p)u\end{bmatrix},\mathbf{F}=\begin{bmatrix}\alpha_1\rho_1 v\\ \alpha_2\rho_2 v\\ \rho uv\\ \rho v^2+p\\ \rho wv\\ (\rho e+p)v\end{bmatrix},\mathbf{G}=\begin{bmatrix}\alpha_1\rho_1 w\\ \alpha_2\rho_2 w\\ \rho uw\\ \rho vw\\ \rho w^2+p\\ (\rho e+p)w\end{bmatrix}, \tag{5}$$

$$\frac{\partial \alpha_1}{\partial t}+u\frac{\partial \alpha_1}{\partial x}+v\frac{\partial \alpha_1}{\partial y}+w\frac{\partial \alpha_1}{\partial z}=0. \tag{6}$$

流体：周囲空気（下添字 1）と爆発生成ガス（下添字 2）

状態方程式：理想気体の状態方程式（比熱比；周囲空気 γ_1=1.4、爆発生成ガス γ_2=1.4）

$$p_1=(\gamma_1-1)\rho_1\varepsilon_1 \tag{7}$$

$$p_2=(\gamma_2-1)\rho_2\varepsilon_2 \tag{8}$$

$$\begin{cases}\alpha_1+\alpha_2=1\\ \alpha_1\rho_1+\alpha_2\rho_2=\rho\\ \rho_i e_i=\rho_i\varepsilon_i+\frac{1}{2}\rho_i(u^2+v^2+w^2)\quad (i=1,2)\\ \alpha_1\rho_1 e_1+\alpha_2\rho_2 e_2=\rho e\\ p_1=p_2\end{cases} \tag{9}$$

$$\rho\xi c^2=\sum_i\rho_i\alpha_i\xi_i c_i^2\,,where,\xi_i=\left(\frac{\partial\rho_i\varepsilon_i}{\partial p}\right)_{\rho_i},\xi=\sum\alpha_i\xi_i\,,c_i^2=\left(\frac{\partial p_i}{\partial\rho_i}\right)_{\varepsilon_i}+\frac{p_i}{\rho_i^2}\left(\frac{\partial p_i}{\partial\varepsilon_i}\right)_{\rho_i} \tag{10}$$

対流項の離散化： Harten-Lax-van Leer for Contact (HLLC) Scheme [9] + linear scaling limiter [10]

時間積分法：3 段階 Total Variation Diminishing (TVD) Runge-Kutta 法 [11]

火薬庫、地形、土堤モデル：剛体壁

6.3.2　基準爆風圧

使用する数値解析手法を検証するため、図 6-9 に示す基準爆風圧実験を模擬した解析を行う。ここでは二次元軸対称系において直円柱形の含水爆薬（EMX2）の爆発生成ガスを地面から爆薬中心高さ 0.18 m/kg$^{1/3}$ の位置に設置し、実験と同様に 1 m 高さの最大過圧分布を取得する。EMX2 の密度は 1200 kg/m^3 とし、爆発生成ガスは理想気体の状態方程式でモデル化する。平成 28 年度爆発影響低減化技術基準検討報告書[2]から EMX2 の TNT 換算比は 0.76 であることから、比エネルギー3.26 MJ/kg（=4.29×0.76）とした。薬量は平成 28 年度火薬類保安技術実験に合わせて 10.32 kg とする。薬量換算距離 1 m/kg$^{1/3}$（2.18 m）に配置する格子点数を約 70 点とするため、0.0311 m として解析を行う。なお格子幅から丸め誤差が存在し、図 6-9 の数字を厳密に再現できないため最大で格子幅の半分の誤差がある。

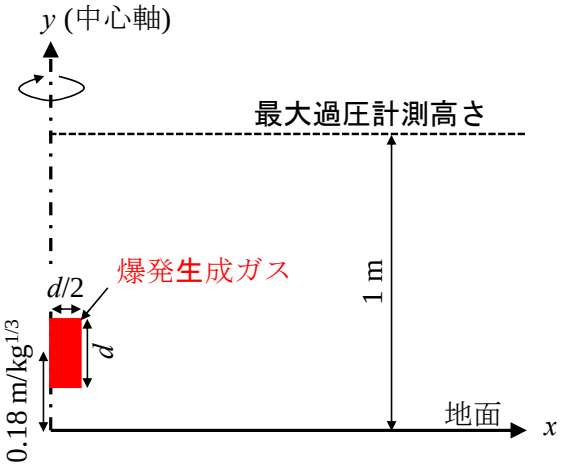


図 6-9　二次元軸対称解析で使用する基準爆風圧実験の初期条件と最大過圧計測高さ

6.3.3　地中式火薬庫

野外実験では図 6-5 や図 6-6 のように大型土のうを並べていたが、ここでは平成 30 年度火薬類保安技術実験で実施した室内実験の地形モデルを採用し、野外実験スケールに変更した図 6-10 を使用する。L/D_2 比を考慮した保安距離を検討するために、表 6-2 に示す 4 ケースについて解析を行う。ここでは前室長 L_1 一定（0.667 m）の条件において薬室長 L_2 を変化させ、爆風圧に対する全長 L（=L_1+L_2）と薬室径（D_2）の比（L/D_2）を検討する。EMX2 の薬量 5.318 kg の爆発生成ガス相当の高エネルギー部を火薬庫内に用意する。なお、頂部長さ T は薬室長 L_2 に応じて変化する。壁は剛体として扱う。

表 6-2　計算条件

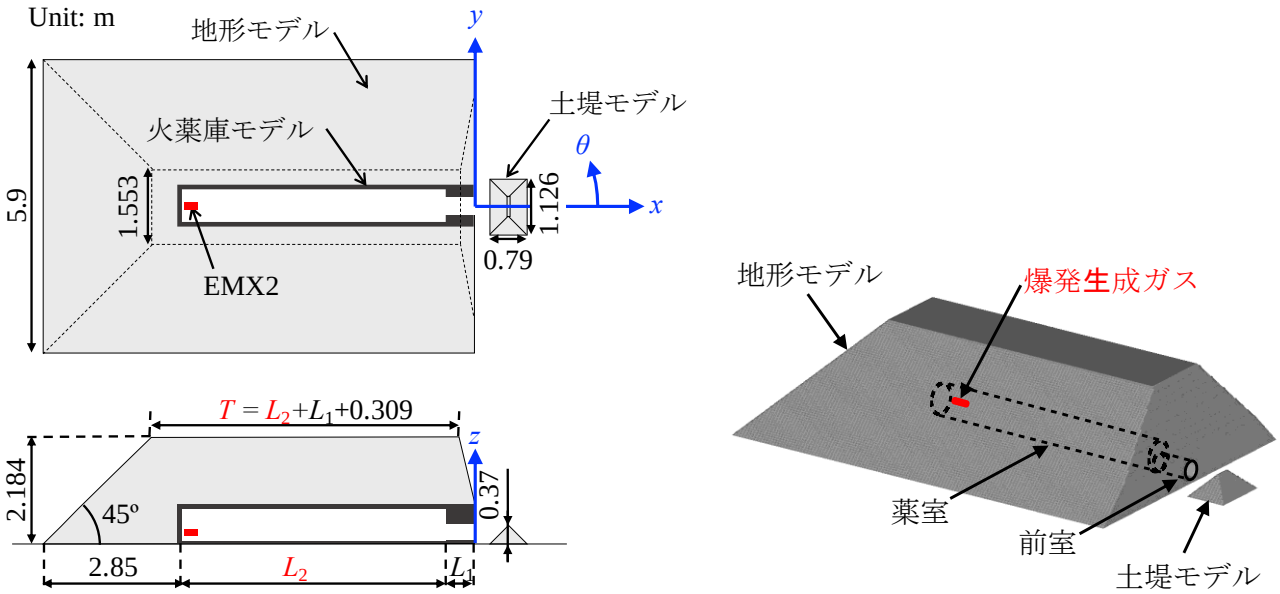
L/D_2	薬量 m [kg]	薬室長 L_2 [m]	前室長 L_1 [m]	全長 L [m]	薬室の断面積*** S_2 [m^2]	前室の断面積**** S_1 [m^2]	備考
3	5.318**	1.367	0.667*	2.034	0.361*	0.0873*	
8.6*		5.162		5.829			検証を兼ねる
21		13.571		14.238			
40		26.453		27.120			

* 平成 30 年度爆発影響低減化技術基準検討報告書[4]の野外実験の条件

** 平成 30 年度火薬類保安技術実験[4]では、主爆薬の含水爆薬（EMX2）5 kg と伝爆薬の導爆線（芯薬：PETN、10.6 g/m）18 m を使用した。EMX2 の PETN 薬量換算比 0.60[12]より、導爆線 18 m の EMX2 相当薬量は 0.318 kg となるため、主爆薬の薬量を加えた 5.318 kg とする。

*** 直径 $D_2 = 0.678$ m の円[4]

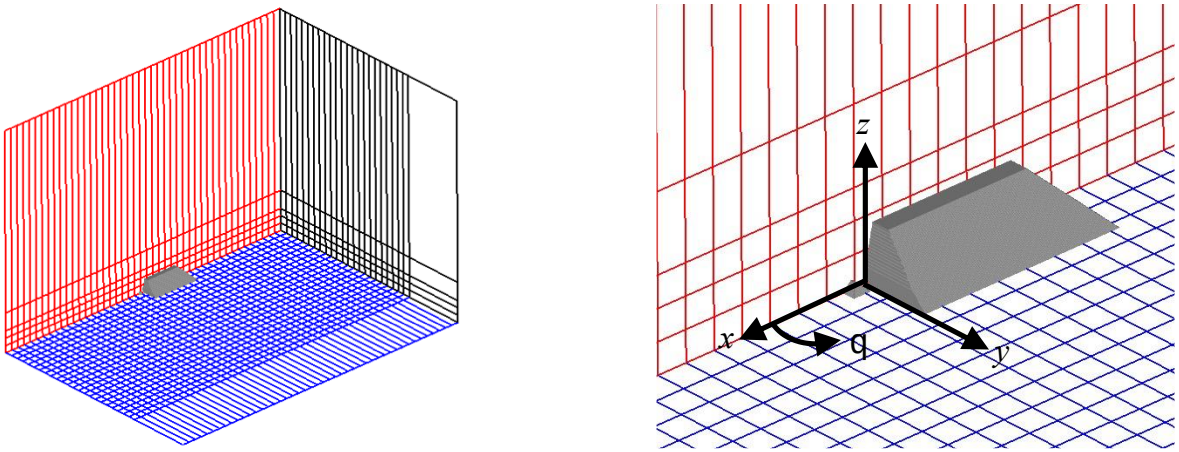
**** 直径 $D_1 = 0.3334$ m の円[4]



(a) 本解析における火薬庫と土堤の設計　　(b) 数値解析で作成したモデル（$L/D_2 = 8.6$）

図 6-10　地中式火薬庫モデル

図 6-11 は数値解析で使用する計算格子に火薬庫モデルを重ねた図である。計算格子は 50 点おきに表示しており、$x = -16$ m/kg$^{1/3}$ 面上、$y = 0$ m/kg$^{1/3}$ 面上、$z = 0$ m/kg$^{1/3}$ 面上の格子をそれぞれ黒、赤、青で示した。実験で使用した地中式火薬庫モデルは左右対称であることから 1/2 系を計算領域全体とした。本解析では、EMX2 の薬量 5.318 kg であるから 1 m/kg$^{1/3}$ は 1.75 m に相当し、そこに配置する格子点を約 70 点とするため、格子幅 0.025 m として解析を行った。具体的には、地表面近傍で保安距離の検討で重要な地表面付近 $-16 \le x$ [m/kg$^{1/3}$] ≤ 25、$0 \le y$ [m/kg$^{1/3}$] ≤ 16、$0 \le z$ [m/kg$^{1/3}$] ≤ 2.5 は等間隔直交格子とし、それよりも外側は格子幅を大きくして計算コストを削減した。図 6-11(b)に示すように+x 軸（出口方向）を 0 度として方位角 θ を定義する。野外実験と同様に 1 m 高さにおいて圧力計測を行い、詳細な最大過圧分布や爆風圧の角度指向性から L/D_2 の影響を評価する。なお、格子幅から丸め誤差が存在し、表 6-2 の数字を厳密に再現できないため最大で格子幅の半分の誤差がある。



(a) 全体　　(b) 火薬庫近傍

図 6-11　用意する計算格子

（50 点おきに表示、*x* 軸方向 3101 点、*y* 軸方向 1201 点、*z* 軸方向 235 点）

6.4　結果

6.4.1　基準爆風圧実験

数値解析の検証として基準爆風圧実験を対象とした計算を行う。図 6-12 に本数値解析（CFD）と過去 6 年度分の野外実験の比較を示した。これより広い換算距離の範囲において数値解析が実験の最大過圧を再現できた。このことから、EMX2 の模擬には TNT 換算比 0.76[2]を使用することが妥当であることを確認した。

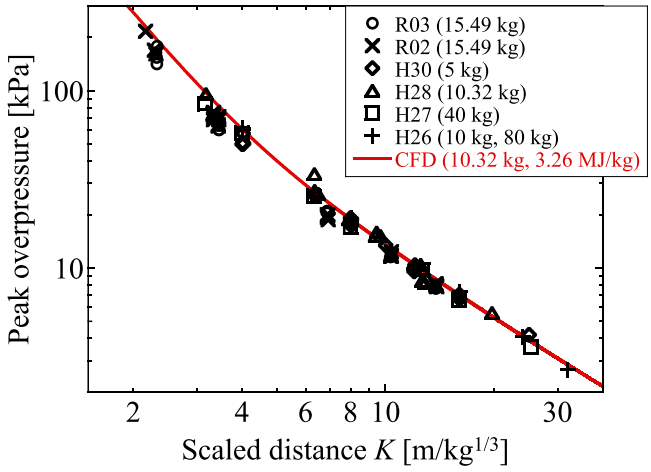


図 6-12　野外実験と数値解析の最大過圧比較（基準爆風圧）

6.4.2　地中式火薬庫実験

6.4.2.1　野外実験（平成 30 年度火薬類保安技術実験、$L/D_2 = 8.6$）との比較

野外実験と数値解析の違いは火薬庫破壊の有無と地形形状であり、剛体壁を使用する数値解析において野外実験で得られた爆風圧を再現できるか検討する。図 6-13 に本数値解析（CFD）と野外実験の比較として 0 度、60 度、90 度、120 度、180 度方向の最大過圧分布を示した。図 6-13 の 180 度方向は線の左端（薬量換算距離 4.4）まで地形モデルが配置されており、それ以降のデータを示した。

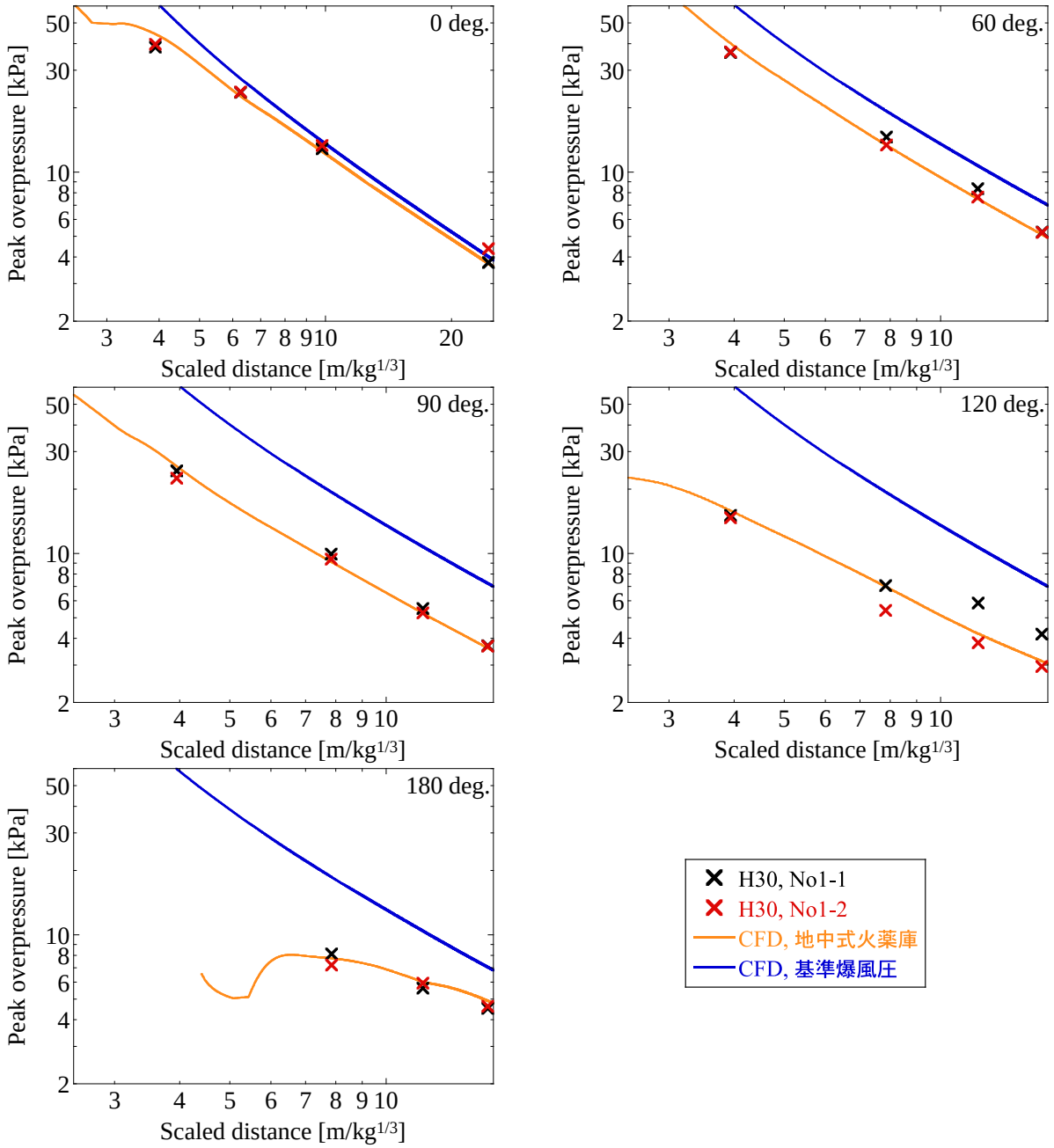


図 6-13　野外実験と数値解析の最大過圧比較

図 6-13 より実験のプロットと同等な爆風圧が広範囲、全ての角度において得られていることが確認できた。このことから、本計算対象の地中式火薬庫については剛体壁であっても適切に爆風圧を評価できると考えられる。角度が大きくなるにつれて爆風圧が小さくなる傾向があり、出口方向から見て横や後方の保安距離縮小の可能性が数値解析でも確認できた。また図 6-13 には 8.3.1 で得られた基準爆風圧のデータ（青線）も載せた。過去の研究成果[7, 13]と同様に断面積縮小の効果が顕著に表れており、薬室（D_2）と前室（D_1）の直径比 $D_1/D_2 = 0.492$ では 0 度においても基準爆風圧を下回ることが示された。

図 6-14 は 4 つの最大過圧の等値線とその外接円である。値については EMX2 の基準爆風圧の数値解析において薬量換算距離 K=4、8、12、16 で得られる最大過圧 60.81 kPa、18.83 kPa、10.47 kPa、7.06 kPa を採用し、それぞれ赤、橙、緑、青実線で示した。なお外接円の描写の際には 180 度における爆風の集合に伴う最大過圧上昇によって形成される飛び地の等圧線の影響は無視した。数値解析や実験で詳細に爆風の角度指向性を取得したとしても火薬類取締法に保安距離として規定する際にはできる限り単純化することが望ましい。そこで、平成 30 年度爆発影響低減化技術基準検討報告書[4]と同様に、等圧線を中心が移動する円と仮定し、等値線の外接円を黒破線で示した。その中心 C と半径 R を表 6-3 にまとめ、図 6-15 に図示した。これより中心 C と半径 R は基準爆風圧の換算距離 K に対して原点を通る直線として近似できることがわかった。

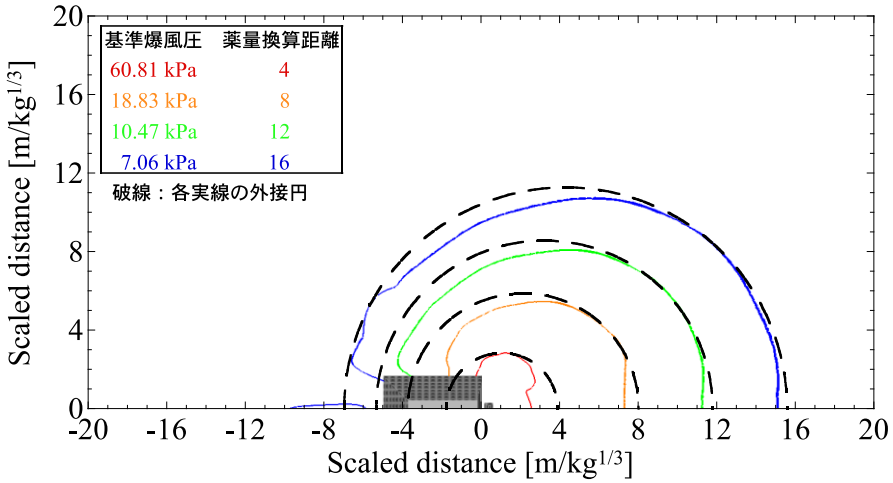


図 6-14　最大過圧の等値線とその外接円（$L/D_2 = 8.6$）

表 6-3　近似線で得られた等値線の半径 R と中心 C（単位は m/kg$^{1/3}$）

基準爆風圧の換算距離 K	$L/D_2 = 8.6$	
	R	C
4	2.83	1.08
8	5.81	2.16
12	8.49	3.24
16	11.42	4.32

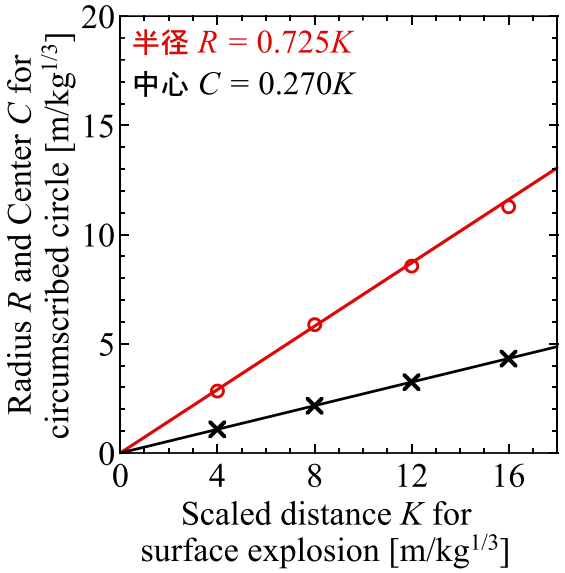


図 6-15　地中式火薬庫の等値線の半径 R と中心 C と基準爆風圧の換算距離 K の関係（$L/D_2 = 8.6$）

表 6-3 の半径 R と中心 C は数値解析から得られた外接円の値であるが、さらなる単純化のために図 6-15 の近似線を用いる。それによって外接円を書き換えると図 6-16 の円となり、数値解析の等値線の外側に描写され、保安距離の過小評価がなく適切に描写できた。次の項ではその他の L/D_2 に対して以下の検討を行う。

・数値解析結果から等値線の外接円の半径 R と中心 C を求める。
・外接円の半径 R と中心 C に対して直線近似を行う。
・直線の傾きを L/D_2 に対して整理し、$3 \leq L/D_2 \leq 40$ に対する半径 R と中心 C を求め、保安距離を表現する円を取得する。

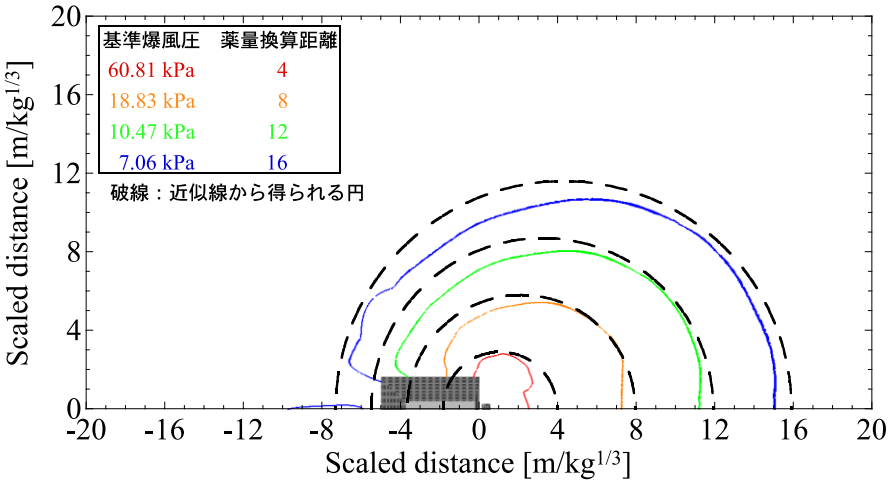


図 6-16　最大過圧の等値線と近似線から得られる円（$L/D_2 = 8.6$）

6.4.2.2　L/D_2 の影響

図 6-17 に 0 度、60 度、90 度、120 度、180 度の最大過圧分布の L/D_2 依存性、図 6-18 に薬量換算距離 4、8、12、16 における最大過圧の角度指向性を示した。図 6-17 の 180 度方向は線の左端まで地形モデルが配置されており、それ以降のデータを示した（L/D_2=40 の場合薬量換算距離 16 まで地形モデルで覆われているため、データはない）。また図 6-18 は地形モデルと重なっている角度（180 度付近）のデータは載せていない。図 6-17、図 6-18 ともに L/D_2 増大に伴って最大過圧が減少しており、保安距離に対する L/D_2 依存性を考慮することは妥当と考えられる。

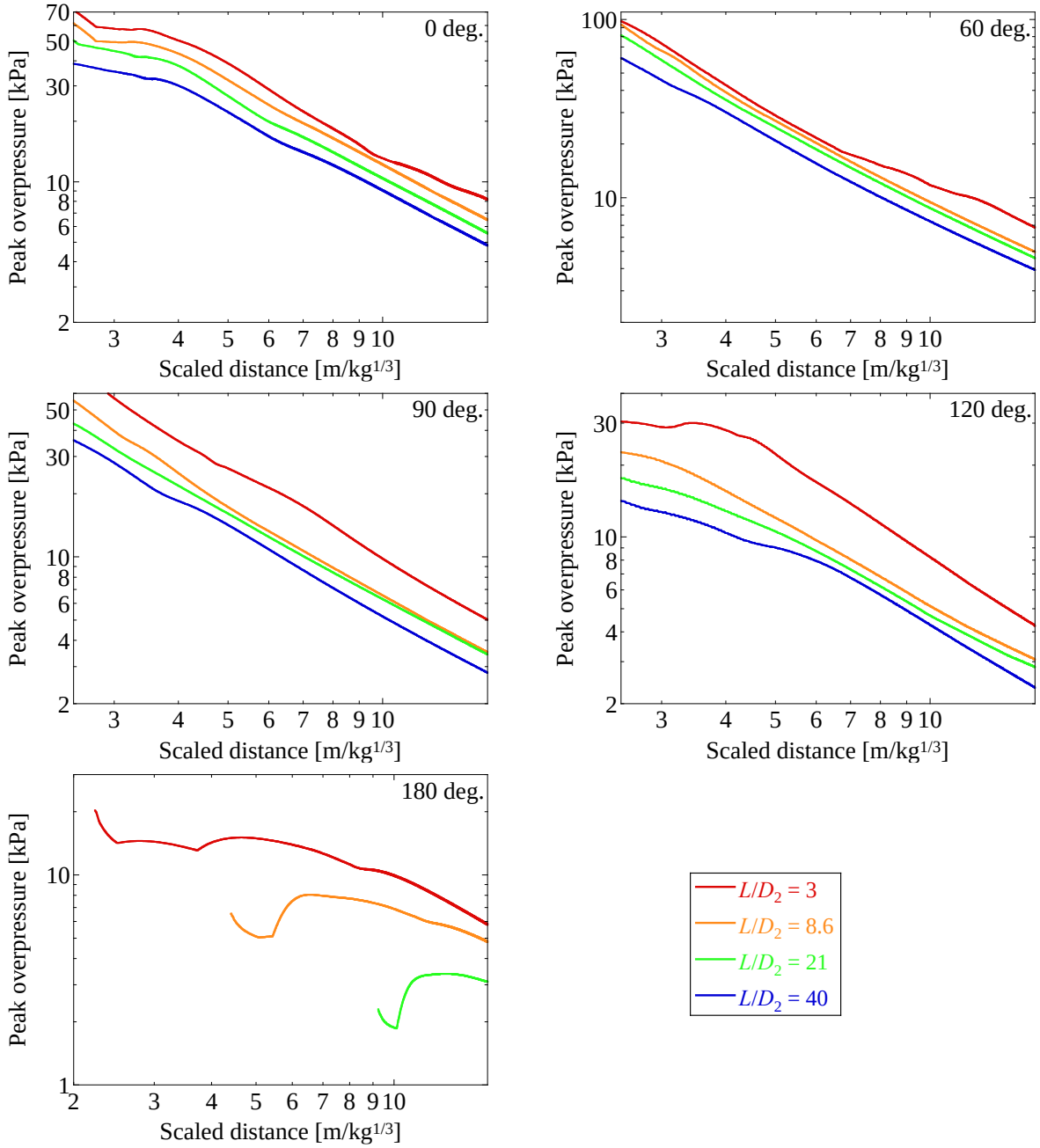


図 6-17　最大過圧の角度指向性に対する L/D_2 の影響

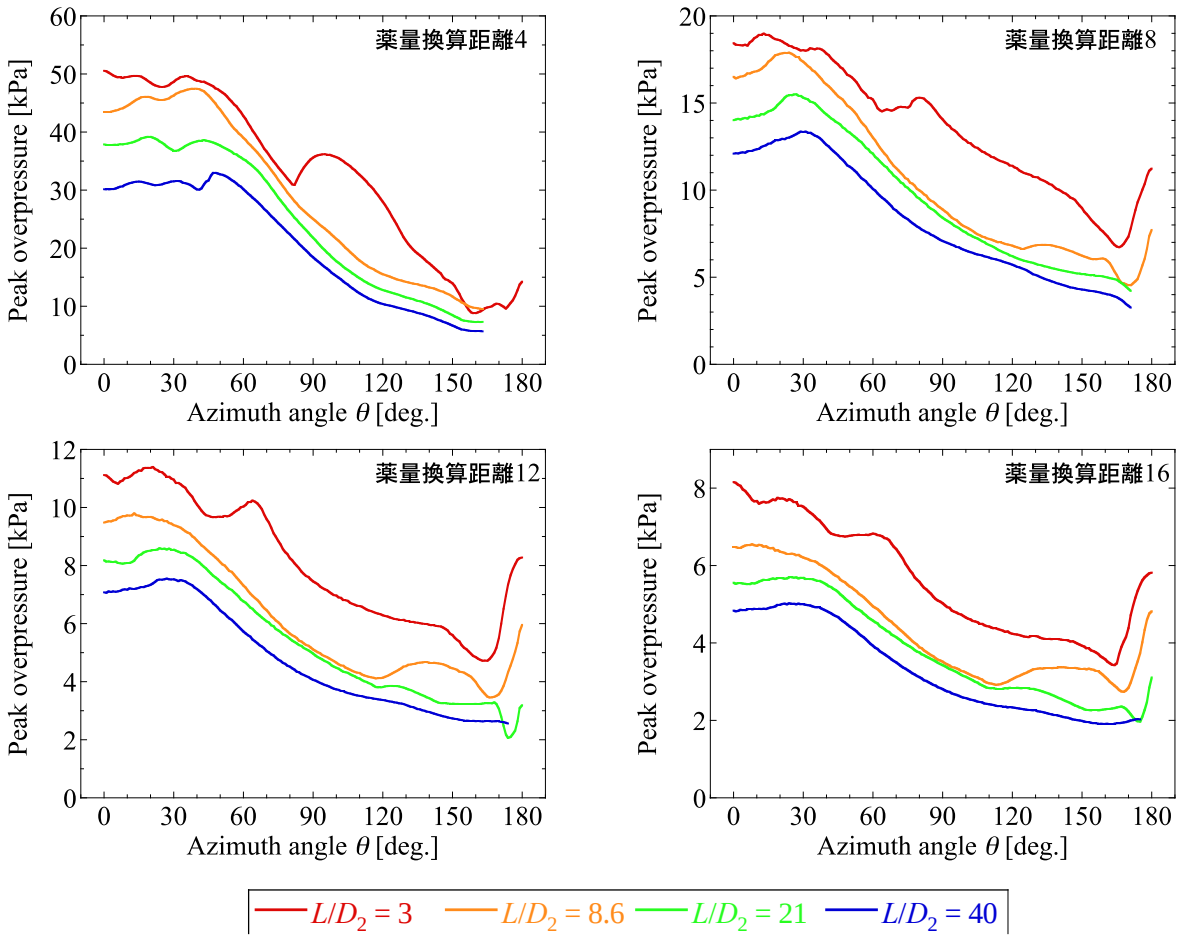
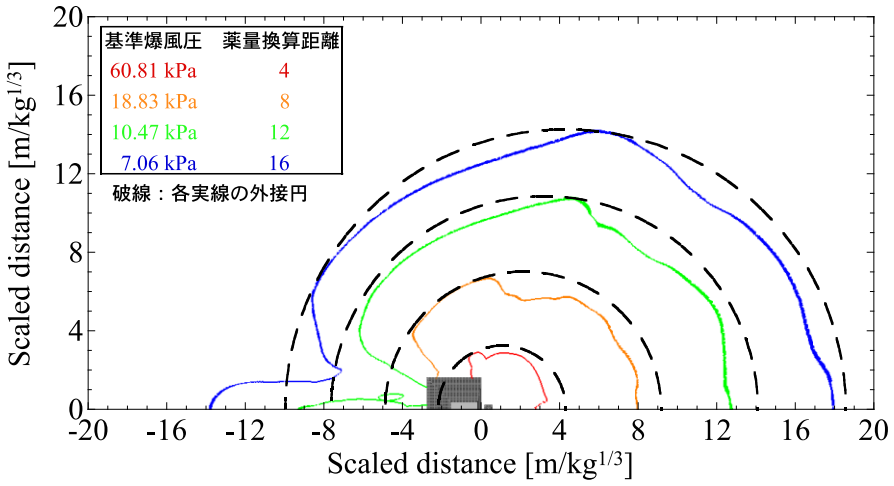
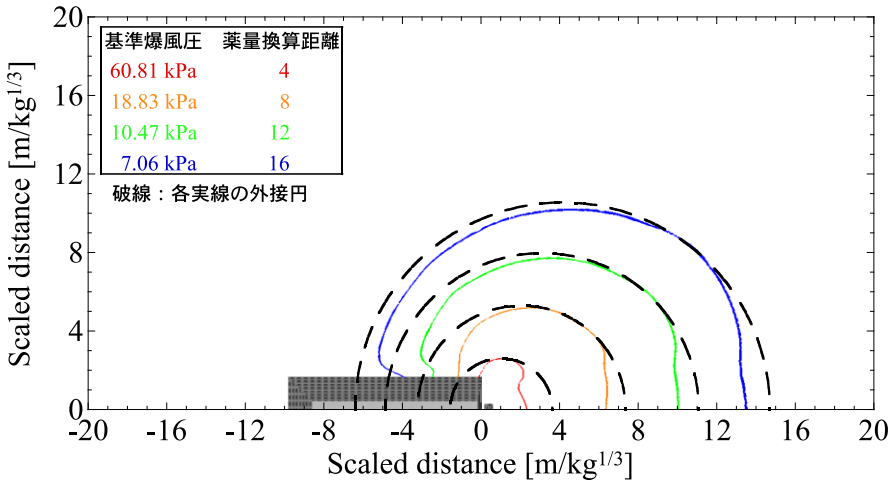


図 6-18　数値解析で得られた各薬量換算距離における最大過圧の角度指向性

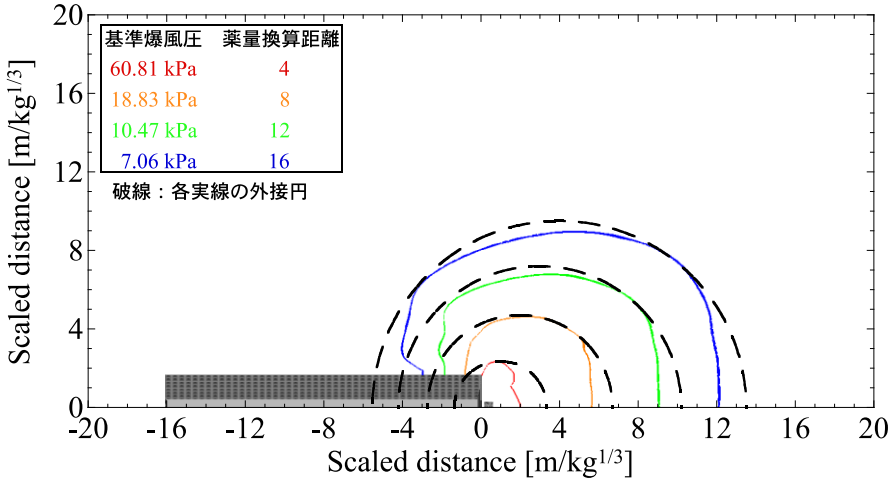
図 6-19 は 4 つの最大過圧の等値線とその外接円である。値については図 6-14 と同様に EMX2 の基準爆風圧の数値解析において薬量換算距離 K=4、8、12、16 で得られる最大過圧 60.81 kPa、18.83 kPa、10.47 kPa、7.06 kPa を採用し、それぞれ赤、橙、緑、青実線で示した。なお左右対称面（180 度）における爆風の集合に伴う最大過圧上昇によって形成される飛び地の等圧線の影響は無視した。等圧線を中心が移動する円と仮定し、等値線の外接円を黒破線で示した。その半径 R と中心 C を表 6-4 にまとめ、図 6-20 に図示した。図 6-20 の近似線によって外接円を書き換えると図 6-21 の円となり、数値解析の等値線の外側に描写され、保安距離の過小評価がなく適切に描写できた。



(a) $L/D_2 = 3$



(b) $L/D_2 = 21$

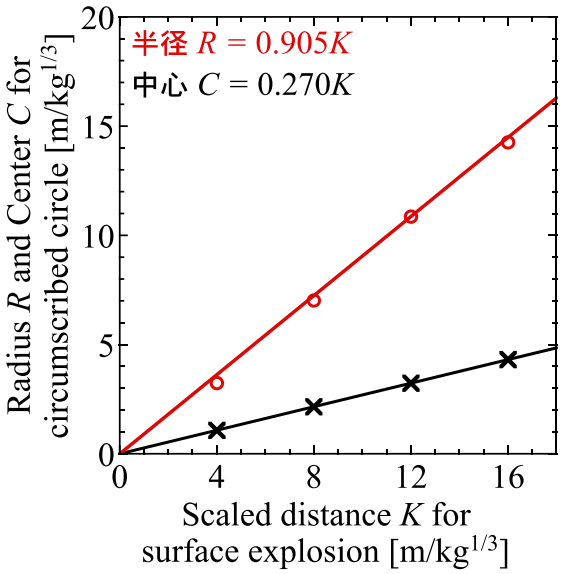


(c) $L/D_2 = 40$

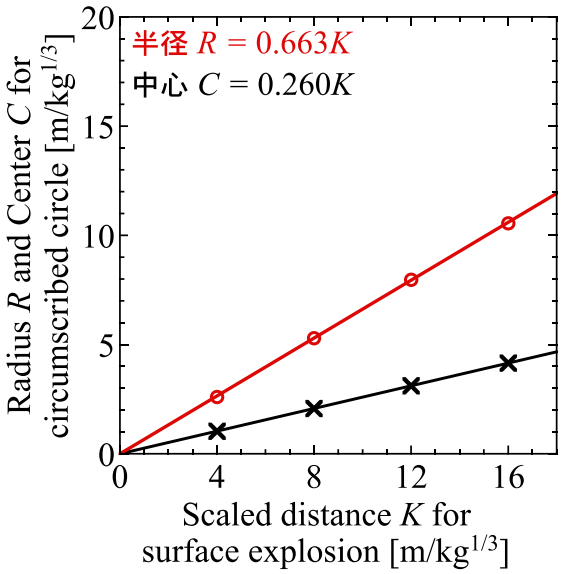
図 6-19　最大過圧の等値線とその外接円

表 6-4　近似線で得られた等値線の半径 R と中心 C（単位は m/kg$^{1/3}$）

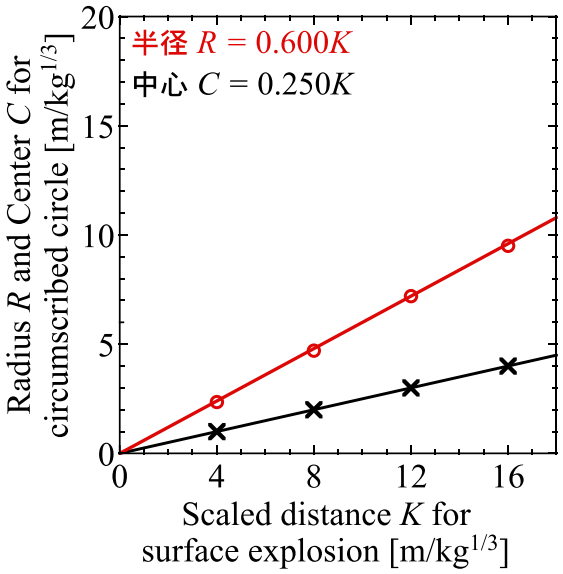
基準爆風圧の換算距離 K	$L/D_2 = 3$		$L/D_2 = 21$		$L/D_2 = 40$	
	R	C	R	C	R	C
4	3.25	1.08	2.61	1.04	2.36	1.00
8	7.02	2.16	5.29	2.08	4.71	2.00
12	10.87	3.24	7.97	3.12	7.20	3.00
16	14.27	4.32	10.56	4.16	9.51	4.00



(a) $L/D_2 = 3$

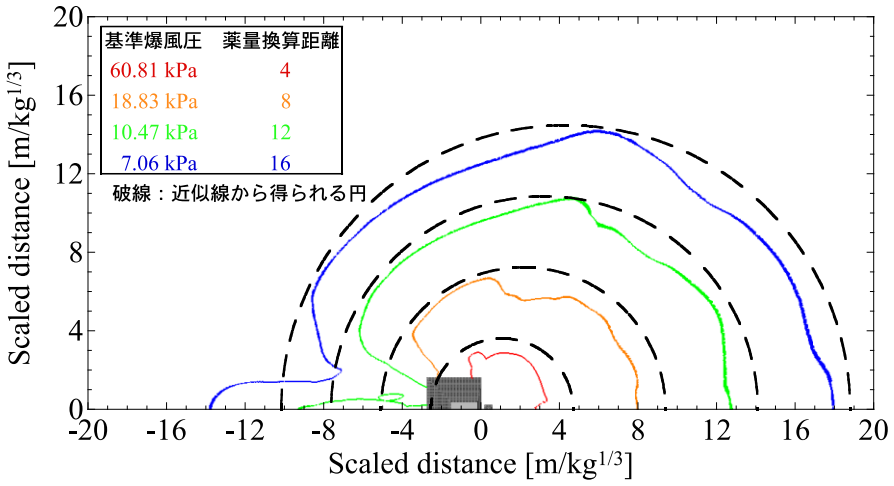


(b) $L/D_2 = 21$

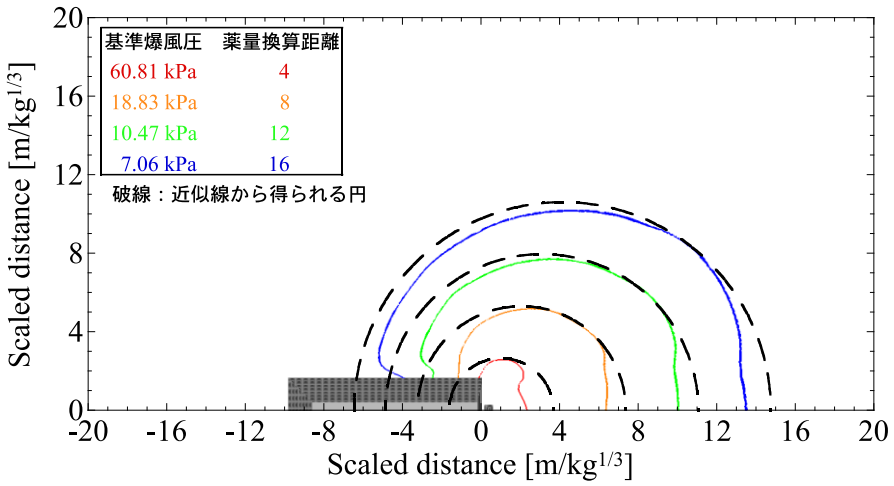


(c) $L/D_2 = 40$

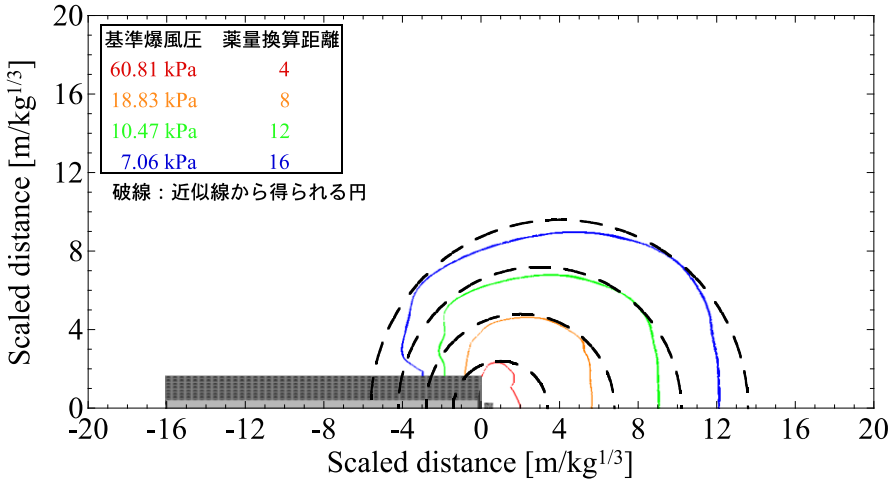
図 6-20　地中式火薬庫の等値線の半径 R と中心 C と基準爆風圧の換算距離 K の関係



(a) $L/D_2 = 3$

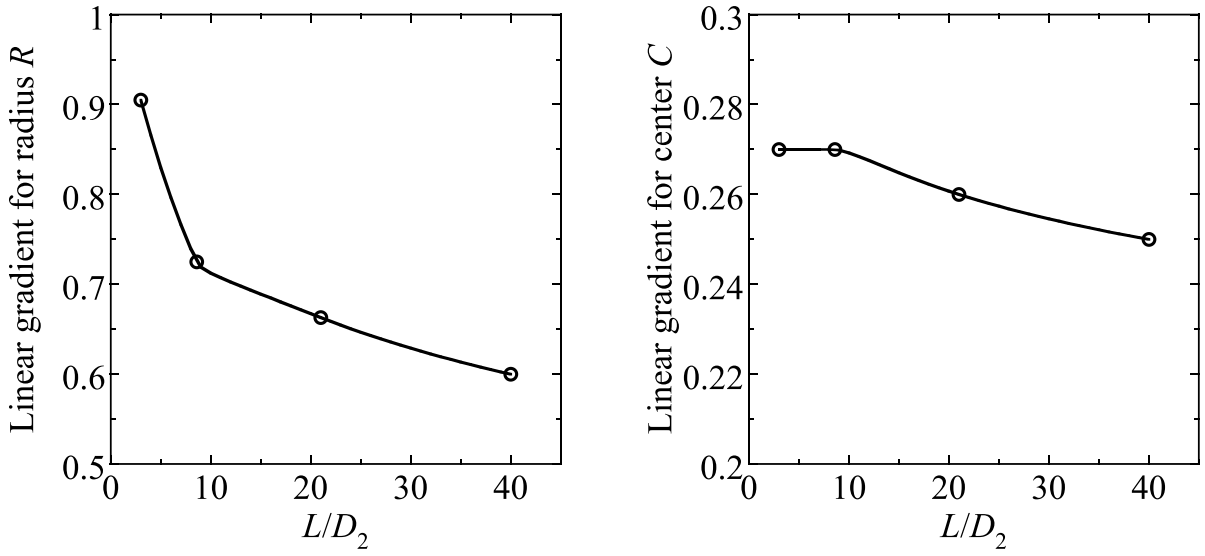


(b) $L/D_2 = 21$



(c) $L/D_2 = 40$

図 6-21　最大過圧の等値線と近似線から得られる円

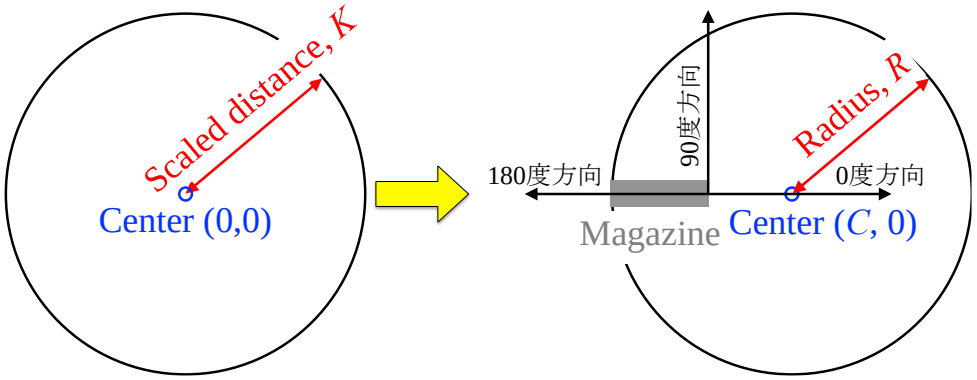


(a) 半径 R　　(b) 中心 C

図 6-22　近似線の勾配と L/D_2 の関係

6.4.2.3　L/D_2 を考慮した保安距離

等圧線を近似する円の半径 R と中心 C に対する L/D_2 の依存性を整理するため、図 6-15 と図 6-20 の近似線の勾配と L/D_2 の関係を図 6-22 に示した。こちらについて近似線を作成し表 6-5、表 6-6 にそれぞれ L/D_2 に対する半径 R、中心 C の近似線の勾配を数値データとして抽出した。表 6-5 と表 6-6 の数値に基準爆風圧の薬量換算距離 K を乗ずることによって、各 L/D_2 に対する等圧線の近似円の半径 R と中心 C を取得することができ、これが地中式火薬庫の保安距離を決定する円となる。図 6-23 のように地上式火薬庫の薬量換算距離 K を用いた第一種、第二種、第三種、第四種保安物件までの保安距離（K=16、14、8、5）を地中式火薬庫に置き換えた場合の $3 \leq L/D_2 \leq 40$ の保安距離を求める近似円の半径 R と中心 C は表 6-7 となる。



地上式火薬庫
（火薬庫を中心とした円）

地中式火薬庫
（中心が移動する円）

図 6-23　地上式火薬庫の薬量換算距離 K を用いた保安距離の地中式火薬庫への置き換え

表 6-5　図 6-22a の L/D_2 と半径 R の近似線の勾配

L/D_2	R の近似線の勾配		L/D_2	R の近似線の勾配		L/D_2	R の近似線の勾配
3	0.9050		16	0.6848		29	0.6323
4	0.8659		17	0.6804		30	0.6289
5	0.8299		18	0.6760		31	0.6257
6	0.7968		19	0.6717		32	0.6225
7	0.7668		20	0.6673		33	0.6194
8	0.7398		21	0.6630		34	0.6164
9	0.7191		22	0.6587		35	0.6135
10	0.7123		23	0.6546		36	0.6107
11	0.7072		24	0.6506		37	0.6079
12	0.7025		25	0.6467		38	0.6052
13	0.6980		26	0.6430		39	0.6026
14	0.6936		27	0.6393		40	0.6000
15	0.6891		28	0.6357			

表 6-6　図 6-22b の L/D_2 と中心 C の近似線の勾配

L/D_2	C の近似線の勾配		L/D_2	C の近似線の勾配		L/D_2	C の近似線の勾配
3	0.2700		16	0.2639		29	0.2551
4	0.2700		17	0.2631		30	0.2546
5	0.2700		18	0.2623		31	0.2541
6	0.2700		19	0.2615		32	0.2536
7	0.2700		20	0.2607		33	0.2531
8	0.2700		21	0.2600		34	0.2526
9	0.2699		22	0.2593		35	0.2521
10	0.2692		23	0.2587		36	0.2517
11	0.2684		24	0.2580		37	0.2512
12	0.2676		25	0.2574		38	0.2508
13	0.2666		26	0.2568		39	0.2504
14	0.2657		27	0.2562		40	0.2500
15	0.2648		28	0.2557			

表 6-7　L/D_2 に対する保安距離を決める近似円の半径 R と中心 C（単位は $m/kg^{1/3}$）

L/D_2	第一種保安物件（K=16）		第二種保安物件（K=14）		第三種保安物件（K=8）		第四種保安物件（K=5）	
	半径 R	中心 C	半径 R	中心 C	半径 R	中心 C	半径 R	中心 C
3	14.48	4.32	12.67	3.78	7.24	2.16	4.53	1.35
4	13.85	4.32	12.12	3.78	6.93	2.16	4.33	1.35
5	13.28	4.32	11.62	3.78	6.64	2.16	4.15	1.35
6	12.75	4.32	11.16	3.78	6.37	2.16	3.98	1.35
7	12.27	4.32	10.73	3.78	6.13	2.16	3.83	1.35
8	11.84	4.32	10.36	3.78	5.92	2.16	3.70	1.35
9	11.51	4.32	10.07	3.78	5.75	2.16	3.60	1.35
10	11.40	4.31	9.97	3.77	5.70	2.15	3.56	1.35
11	11.32	4.30	9.90	3.76	5.66	2.15	3.54	1.34
12	11.24	4.28	9.84	3.75	5.62	2.14	3.51	1.34
13	11.17	4.27	9.77	3.73	5.58	2.13	3.49	1.33
14	11.10	4.25	9.71	3.72	5.55	2.13	3.47	1.33
15	11.03	4.24	9.65	3.71	5.51	2.12	3.45	1.32
16	10.96	4.22	9.59	3.70	5.48	2.11	3.42	1.32
17	10.89	4.21	9.53	3.68	5.44	2.10	3.40	1.32
18	10.82	4.20	9.46	3.67	5.41	2.10	3.38	1.31
19	10.75	4.18	9.40	3.66	5.37	2.09	3.36	1.31
20	10.68	4.17	9.34	3.65	5.34	2.09	3.34	1.30
21	10.61	4.16	9.28	3.64	5.30	2.08	3.32	1.30

表 6-7（つづき）　L/D_2 に対する保安距離を決める近似円の半径 R と中心 C（単位は $m/kg^{1/3}$）

L/D_2	第一種保安物件（K=16）		第二種保安物件（K=14）		第三種保安物件（K=8）		第四種保安物件（K=5）	
	半径 R	中心 C	半径 R	中心 C	半径 R	中心 C	半径 R	中心 C
22	10.54	4.15	9.22	3.63	5.27	2.07	3.29	1.30
23	10.47	4.14	9.16	3.62	5.24	2.07	3.27	1.29
24	10.41	4.13	9.11	3.61	5.20	2.06	3.25	1.29
25	10.35	4.12	9.05	3.60	5.17	2.06	3.23	1.29
26	10.29	4.11	9.00	3.60	5.14	2.05	3.21	1.28
27	10.23	4.10	8.95	3.59	5.11	2.05	3.20	1.28
28	10.17	4.09	8.90	3.58	5.09	2.05	3.18	1.28
29	10.12	4.08	8.85	3.57	5.06	2.04	3.16	1.28
30	10.06	4.07	8.81	3.56	5.03	2.04	3.14	1.27
31	10.01	4.06	8.76	3.56	5.01	2.03	3.13	1.27
32	9.96	4.06	8.72	3.55	4.98	2.03	3.11	1.27
33	9.91	4.05	8.67	3.54	4.96	2.02	3.10	1.27
34	9.86	4.04	8.63	3.54	4.93	2.02	3.08	1.26
35	9.82	4.03	8.59	3.53	4.91	2.02	3.07	1.26
36	9.77	4.03	8.55	3.52	4.89	2.01	3.05	1.26
37	9.73	4.02	8.51	3.52	4.86	2.01	3.04	1.26
38	9.68	4.01	8.47	3.51	4.84	2.01	3.03	1.25
39	9.64	4.01	8.44	3.51	4.82	2.00	3.01	1.25
40	9.60	4.00	8.40	3.50	4.80	2.00	3.00	1.25

6.5　まとめ

薬室と前室で断面積変化（直径比 $D_1/D_2 = 0.492$）を有する地中式火薬庫の数値解析を行なった。過去の $L/D_2 = 8.6$ の野外実験と同等な最大過圧が得られた。ここでは L/D_2 をパラメータとした検討を行い、最大過圧に与える影響を調査した。L/D_2 増大によって爆風が低減され等圧線が小さくなった。等圧線を中心が移動する円で近似して半径 R と中心 C の特徴を検討した結果、基準爆風圧の薬量換算距離 K と線形関係があった。その勾配を L/D_2 の関数として図 6.22、表 6-5、表 6-6 のように近似し、図 6-23 のように地上式火薬庫の保安距離を地中式火薬庫に置き換えた場合の、第一種から第四種保安物件の保安距離を L/D_2 に対して表 6-7 のように得られた。

参考文献

[1] 平成 27 年度爆発影響低減化技術基準検討報告書

[2] 平成 28 年度爆発影響低減化技術基準検討報告書

[3] 平成 29 年度爆発影響低減化技術基準検討報告書

[4] 平成 30 年度爆発影響低減化技術基準検討報告書

[5] Y. Sugiyama, K. Wakabayashi, T. Matsumura, and Y. Nakayama, On the azimuth angle characteristics of the blast wave from an underground magazine model (II) -Numerical simulation of a magazine with a small internal length-to-diameter ratio, Sci. Tech. Energ. Mater. 78 (2017), 49-54.

[6] Y. Sugiyama, K. Wakabayashi, T. Matsumura, and Y. Nakayama, Numerical study of the effect of high-explosive storage facility shape on the azimuthal distribution of blast-wave pressures, Euro. J. Mech./B Fluids 79 (2020), 153-164.

[7] Y. Sugiyama, K. Wakabayashi, T. Matsumura, and Y. Nakayama, Numerical study of the blast mitigation effect of the shape of a partially confined geometry and scaling of the blast wave strength, J. Eng. Mech. 147 (2021), 04021032.

[8] G. Allaire, Clerc S., and Kokh S., A five-equation model for the simulation of interfaces between compressible fluids, J. Comput. Phys. 181 (2002), 577-616.

[9] E.F. Toro, M. Spruce, and W. Speares, Restoration of the contact surface in the HLL-Riemann solver, Shock Waves 4 (1994), 25-34.

[10] X. Zhang and C.-W. Shu, Maximum-principle-satisfying and positivity-preserving high-order schemes for conservation laws: survey and new developments, Proc. R. Soc. A 467 (2011), 2752-2776.

[11] C.-W. Shu and S. Osher, Efficient implementation of essentially non-oscillatory shock-capturing schemes, J. Comput. Phys. 77 (1988), 439-471.

[12] Y. Sugiyama, K. Wakabayashi, T. Matsumura, and Y. Nakayama, On the azimuth angle characteristics of the blast wave from an underground magazine model (IV) -Large-scale field experiments-, Sci. Tech. Energ. Mater. 78 (2017), 49-54.

[13] Y. Sugiyama, K. Wakabayashi, T. Matsumura, and Y. Nakayama, On the azimuth angle characteristics of the blast wave from an underground magazine model (VI) -The effect of the ratio between the internal diameters of the magazine chamber and passageway-, Sci. Tech. Energ. Mater. 81 (2020), 40-46.

第 7 章　煙火火薬庫等の新規防爆壁等に関する実験のまとめ

煙火火薬庫及び煙火製造施設（火薬類一時置場、爆発の危険のある工室等）の既存の防爆壁に新たな構造の防爆壁等の防護施設を追加した場合の爆発影響低減効果を確認するため、令和元年度から令和 3 年度まで 3 年にわたり、1/4～1/4.4 スケールの爆発実証実験を行った。以下、新規防爆壁等の防護施設の構造、位置、爆風低減効果、これらを踏まえた技術基準の案についてとりまとめる。

既存の防爆壁に加える新規防護施設として検討したのは、いずれも高さ 8 m の鉄板のコの字形壁、水（塩化ビニル製管入り）の壁、合板のコの字形壁、金網の壁、合成樹脂製網の壁、及び、火薬庫外壁と既存防爆壁との間の 1 面から 3 面にウレタンフォームを設置した場合である。

実験結果を総括すると、高さ 8 m の壁の材料については、爆風低減効果の大きさや施工の容易さから合板のコの字形壁が選択される。鉄板の壁は重量飛散物が発生するために不適、水の壁は合板の場合と同様の爆風低減効果があるが施工の容易さや維持管理に問題があり、金網の壁と合成樹脂製網の壁は爆風低減効果が合板の場合より劣るためである。また、合板壁の設置位置については、火薬庫外壁から 2 m（既存防爆壁に接して設置）、6 m、10.6 m（換算距離 1 m/kg$^{1/3}$）で実験した結果、2 m では合板壁の反対方向（火薬庫側）への反射圧による爆風増大、10.6 m では合板壁方向の遠方での爆風増大があるため、火薬庫外壁から 6 m が適切であるとの結論にいたった。

また、火薬庫外壁と既存防爆壁との間にウレタンフォームを設置する場合については、低密度（20±2 kg/m^3）や高密度（52±3 kg/m^3）であっても、ウレタンフォーム 1 面を設置した方向の爆風低減効果が確認され、さらに、3 面にウレタンフォームを設置した場合は、爆風低減効果が 1 面のみの場合よりも高く、ウレタンを設置しない方向も、つまり、全方向において爆風低減効果が確認された。

以上の結果から、煙火火薬庫等のある方向に存在する第三種及び第四種保安物件に対する保安距離の低減対策として、技術基準に採用するとすれば、保安物件の方向の火薬庫外壁から 6 m の位置へのコの字形合板壁の設置、及び、保安物件の方向の火薬庫外壁と既存防爆壁との間へのウレタンフォームの設置が妥当であろう。

火薬庫外壁と既存防爆壁との間の 3 面へのウレタンフォームの設置についても、実験から高い爆風低減効果があることが確認されているが、ある方向の保安物件に対する防護措置として定める施術基準には馴染まない。そのため、保安物件が火薬庫の入り口方向にあって保安物件の方向にはウレタンフォーム 1 面を設置できない場合やさらなる保安距離低減が必要なときなどに、個別に採用を検討するのが適当と考える。

なお、実験は煙火火薬庫を想定した実験であったが、煙火製造施設（火薬類一時置場、爆発の危険のある工室等）への新規防護施設の応用も可能である。しかし、技術基準とするための実験結果が十分とはいえず、これも個別に採用を検討するのが適当である。

技術基準に定める保安距離について、まず、煙火火薬庫の第三種及び第四種保安物件に対する保安距離は、換算距離で表すと、それぞれ 6 m/kg$^{1/3}$、3 m/kg$^{1/3}$ である。コの字形合板壁を設置する場合の保安距離は、実験結果から合板壁方向の 0 度から 45 度方向の爆風圧測定値の最大値をとって、合板壁方向の第三種及び第四種保安物件に対してそれぞれ 5.48 m/kg$^{1/3}$、1.65 m/kg$^{1/3}$ まで低減できる。また、ウ

レタンフォームを 1 面設置する場合の保安距離は、同様に実験結果からウレタンフォーム設置方向の 0 度から 45 度方向の爆風圧測定値の最大値をとって、ウレタンフォーム設置方向の第三種及び第四種保安物件に対してそれぞれ 5.70 m/kg$^{1/3}$、2.19 m/kg$^{1/3}$ まで低減できる。

なお、火薬庫外壁と既存防爆壁との間にウレタンフォームを 3 面設置する場合の保安距離は、あらゆる方向の第三種及び第四種保安物件に対してそれぞれ 5.06 m/kg$^{1/3}$、2.29 m/kg$^{1/3}$ とできる。

コの字形合板壁を設置する場合の技術基準としては、以下が考えられる。

- 壁は、その内面の壁脚から保安物件の方向の防爆壁の一面の外壁まで四メートルの距離に構築すること。
- 壁は、保安物件の方向の防爆壁の一面と平行になるように構築すること。
- 壁の両端には、防爆壁の方向にそれぞれ袖壁を設け、コの字形の壁となるようにすること。
- 壁及び袖壁の高さは八メートル以上、厚さは二十ミリメートル以上、幅は壁が十六メートル以上及び袖壁が八メートル以上とすること。
- 壁及び袖壁並びにそれらの補強材は、木製とすること。

火薬庫外壁と既存防爆壁との間にウレタンフォームを設置する場合の技術基準としては、以下が考えられる。

- 保安物件の方向の防爆壁の一面、これに接続する防爆壁の二面並びに煙火火薬庫の保安物件の方向の外壁及びその延長線で囲まれた空間を、防爆壁の高さまで難燃性のウレタンフォームで満たすこと。
- ウレタンフォームの密度は、十八キログラム毎立方メートル以上五十五キログラム毎立方メートル以下とすること。
- ウレタンフォームの頂部は、軽量の飛散物となる材料で覆い、できるだけ雨水の浸入のないようにすること。

なお、この技術基準どおりに実際に設置する際、コの字形合板壁の場合はすべてをスケールダウンした条件で実験を行っており、爆風のスケール効果から考えて実寸でも問題はないが、ウレタンフォームの場合は、ウレタンフォームの気泡のサイズまでスケールダウンした実験にはなっていない。実験の 1/4.4 スケールの場合と、実寸の 1/1 スケールの場合のウレタンフォームの気泡のサイズは同じとなる。同じウレタンフォームの気泡サイズなら、実寸のほうが 1/4.4 スケールの場合よりも爆風低減効果が高くなると想定されるが、もっと大きな実験サイズ、例えば 1/2 スケールの実験等で爆風低減効果が大きく変化するものかを確認することが望ましい。

第 8 章　地中式一級火薬庫の保安距離の考え方

地中式一級火薬庫の保安距離は、現在の火薬類取締法施行規則（以下「規則」）に定める技術基準では、地上式一級火薬庫と同様に、火薬庫（薬室）の外壁から全方向に爆薬量で決まる一様な距離をとることになっている。しかし、地中式火薬庫に貯蔵された火薬類が万一爆発した際の爆風圧は、前方（火薬庫に通ずるトンネル入口前方方向）が強く、後方が弱いことが、過去にも昭和 55 年～58 年の陸上自衛隊の野外爆発実験や平成元年、2 年、4 年、14 年及び 15 年の経済産業省の野外爆発実験で確認されている。これらの実験では、爆風圧の方向性をトンネル入口方向(0°)、側方(90°)及び後方(180°)等の限られた方向で確認したが、全方向の爆風減衰を定量化するには不十分であった。そこで、平成 27 年度から平成 30 年度の地中式火薬庫の小規模室内実験で 10°刻みで全方向の爆風減衰を定量化し、平成 28 年度から平成 30 年度の地中式火薬庫の大規模野外爆発実験でスケール則が成立することを確認した。さらに、本年度（令和 3 年度）には、火薬庫長／火薬庫径の影響を定量化するため、地中式火薬庫の爆風圧のシミュレーション（第 6 章を参照）を行った。この章では、これまでの実験及びシミュレーション結果を踏まえ、地中式火薬庫の保安距離の考え方を示す。

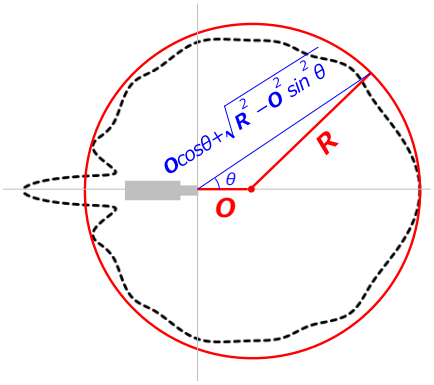
一般に火薬庫の保安距離を検討する際は、火薬庫内の全火薬類が万一爆発した時の周囲への影響として、爆風、地盤振動、飛散物、放射熱を考慮しなければならない。地中式火薬庫の場合は、放射熱は除外できるので、爆発影響として以下の 3 点について、それぞれに必要な保安距離を検討する。

・火薬庫の火薬類の爆発により、火薬庫に通ずるトンネル入口から吹き出す方向性をもった爆風
・火薬庫の火薬類の爆発により発生する主に火薬庫（薬室）上部の地盤振動
・火薬庫の火薬類の爆発による火薬庫（薬室）上部の地盤表面からの飛散物

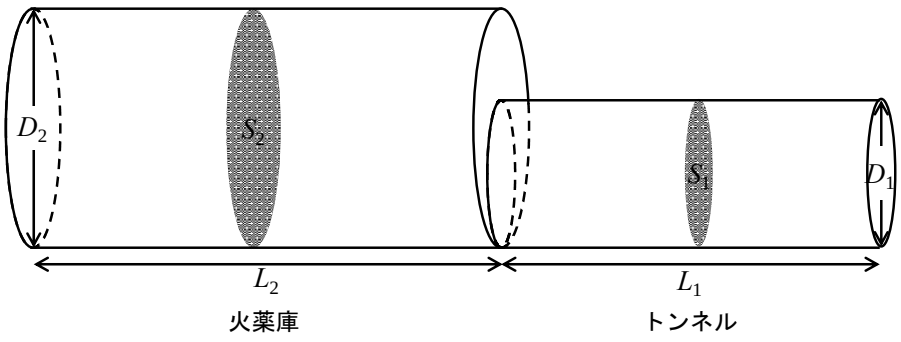
8.1　地中式一級火薬庫の爆風に対する保安距離

1) 爆風に対する保安距離の考え方

地中式火薬庫の爆風はトンネル入口前方に強く吹き出して周囲へ広がるため、爆風に対する保安距離は、右図のようにトンネル入口前方に中心がある円で表すことが可能である。



右図の黒点線は、実験で得られた爆風に対する保安距離（第一種保安物件では ***K***=16 相当の地表面爆発時の爆風圧と等しくなるトンネル入口中心からの距離）であり、右図の赤円は、上記の外接円で、安全側に、実験値の最大値をとった爆風に対する保安距離である（対称性の良い実験特有の後方の衝撃波衝突は無視する。）。右図のように、地中式火薬庫の爆風に対する保安距離は、トンネル入口から中心までの換算距離 ***O*** [m/kg$^{1/3}$]と半径の換算距離 ***R*** [m/kg$^{1/3}$]で指定できる。



2) トンネル断面積の火薬庫断面積に対する比 $\boldsymbol{S}$（$=S_1/S_2$）を変化させたときの保安距離

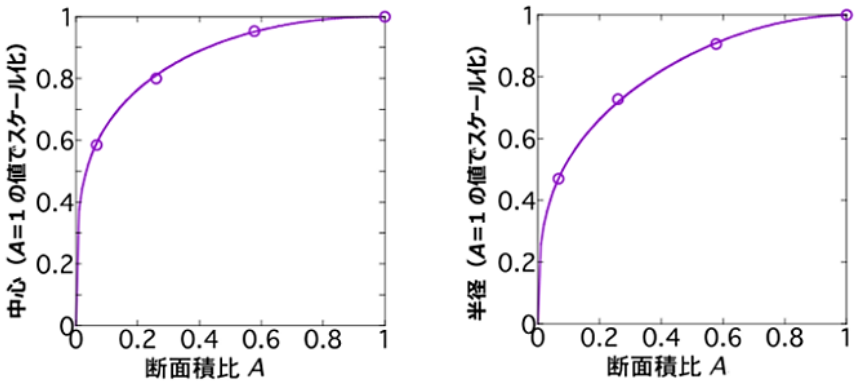
第一種から第四種保安物件（$\boldsymbol{K}$=16、14、8、5）それぞれについて、トンネル断面積の火薬庫断面積に対する比 $\boldsymbol{S}$ を 1.0、0.6、0.25、0.07 の 4 段階に変化させた実験で、トンネル入口から中心までの換算距離 $\boldsymbol{O}$ と半径の換算距離 $\boldsymbol{R}$ を求めた結果、$\boldsymbol{O}$ 及び $\boldsymbol{R}$ は相当する保安物件の換算距離 $\boldsymbol{K}$ に比例することがわかった。

その比例定数 $C_{O(S)}$、$C_{R(S)}$ は、下図のように最尤法を用いて $\boldsymbol{S}$ の関数とした。

$\boldsymbol{O} = C_{O(S)}\boldsymbol{K}$　　$C_{O(S)} = 0.3519\,\boldsymbol{S}^{0.244} - 0.0394\,\boldsymbol{S}^{2.18}$

$\boldsymbol{R} = C_{R(S)}\boldsymbol{K}$　　$C_{R(S)} = 1.0085\,\boldsymbol{S}^{0.315} - 0.0942\,\boldsymbol{S}^{3.36}$

これにより、ある $\boldsymbol{S}$ に対する保安距離（換算距離）は上式の中心 $\boldsymbol{O}$、半径 $\boldsymbol{R}$ の円で表すことができる。（ただし、火薬庫及びトンネル全長の火薬庫径に対する比 $\boldsymbol{L}=9$ の場合。）



3) 火薬庫及びトンネル全長の火薬庫径に対する比 $\boldsymbol{L}$（$=(L_1+L_2)/D_2$）を変化させたときの保安距離

$\boldsymbol{K}$=16、14、8、5 のそれぞれについて、火薬庫及びトンネル全長の火薬庫径に対する比 $\boldsymbol{L}$ を 3、9、21、40 の 4 段階に変化させたシミュレーションで、トンネル入口から中心までの換算距離 $\boldsymbol{O}$ と半径の換算距離 $\boldsymbol{R}$ を求めた結果、$\boldsymbol{O}$ 及び $\boldsymbol{R}$ は、トンネル断面積の火薬庫断面積に対する比 $\boldsymbol{S}$ の場合と同様に、相当する保安物件の換算距離 $\boldsymbol{K}$ に比例することがわかった。

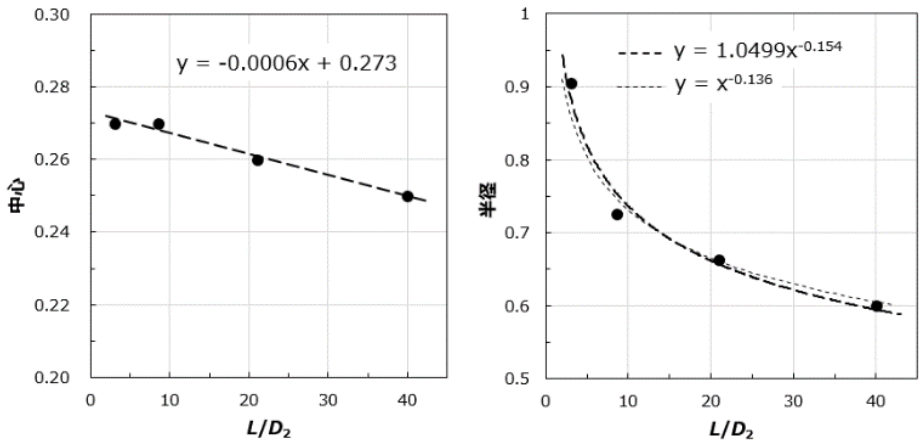
その比例定数 $C_{O(L)}$、$C_{R(L)}$は、下図のように、$C_{O(L)}$は直線近似、$C_{R(L)}$は両対数直線近似を用いて $\boldsymbol{L}$ の関数とした。

$\boldsymbol{O} = C_{O(L)}\boldsymbol{K}$　　$C_{O(L)} = -0.0006\,\boldsymbol{L} + 0.273$

$\boldsymbol{R} = C_{R(L)}\boldsymbol{K}$　　$C_{R(L)} = 1.050\,\boldsymbol{L}^{-0.154}$

これにより、ある $\boldsymbol{L}$ に対する保安距離（換算距離）は上式の中心 $\boldsymbol{O}$、半径 $\boldsymbol{R}$ の円で表すことができる。（ただし、トンネル断面積の火薬庫断面積に対する比 $\boldsymbol{S}=0.25$ の場合。）

なお、火薬庫径 D_2 は、火薬庫断面積の等価直径（同じ面積となる円の直径）とする。



4) *S* と *L* の両者を変化させたときの保安距離

保安距離は、比例係数 $C_{O(S,L)}$、$C_{R(S,L)}$を、トンネル断面積の火薬庫断面積に対する比 ***S*** と火薬庫及びトンネル全長の火薬庫径に対する比 ***L*** の両者の関数として、以下のように表記できる。

$\boldsymbol{O} = C_{O(S,L)}\,\boldsymbol{K}$

$\boldsymbol{R} = C_{R(S,L)}\,\boldsymbol{K}$

この比例係数の一部は、2)、3)の比例係数を用いて以下のように表記できる。

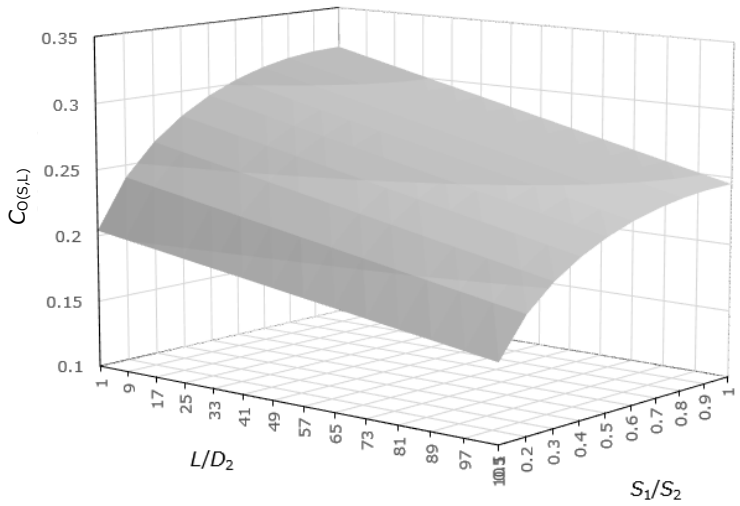
$\boldsymbol{L} = 9$ のとき $C_{O(S,9)} = C_{O(S)}$、$C_{R(S,9)} = C_{R(S)}$

$\boldsymbol{S} = 0.25$ のとき $C_{O(0.25,L)} = C_{O(L)}$、$C_{R(0.25,L)} = C_{R(L)}$

まず、中心の比例係数 $C_{O(S,L)}$について、基準点を $C_{O(0.25,9)} = C_{O_0}$ とし、***S*** と ***L*** の片方が一定の時に、もう片方は $C_{O(S,9)} = C_{O(S)}$または $C_{O(0.25,L)} = C_{O(L)}$に従い比率が変わらず変化するものとすると、

$$C_{O(S,L)} = C_{O(0.25,9)} \times (C_{O(S,9)} / C_{O(0.25,9)}) \times (C_{O(0.25,L)} / C_{O(0.25,9)})$$
$$= C_{O_0} \times (C_{O(S)} / C_{O_0}) \times (C_{O(L)} / C_{O_0})$$
$$= C_{O(S)} \times C_{O(L)} / C_{O_0}$$

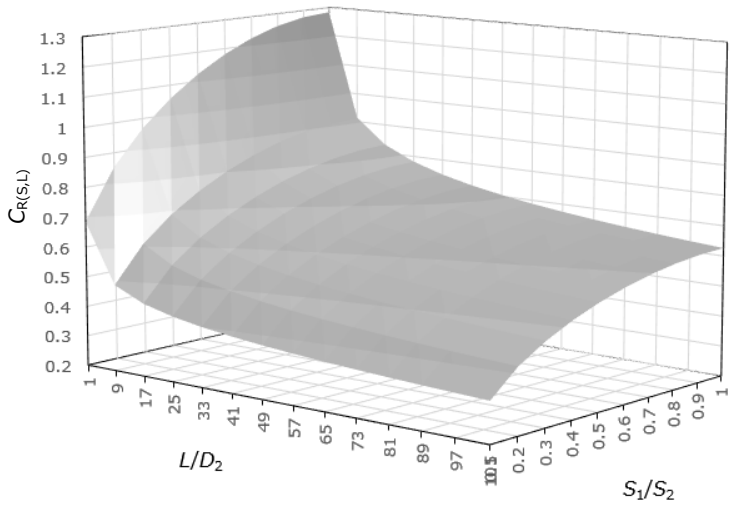
よって、***S*** と ***L*** の両者が変化するときの $C_{O(S,L)}$は、2)、3)の比例係数 $C_{O(S)}$と $C_{O(L)}$を用いて計算することができ、その結果を図示すると下図のようになる。



半径についても、中心の係数と同様に、基準点を $C_{R(0.25,9)} = C_{R_0}$ とすると、

$$C_{R(S,L)} = C_{R(S)} \times C_{R(L)} / C_{R_0}$$

となり、2)、3)の比例係数 $C_{R(S)}$と $C_{R(L)}$を用いて $C_{R(S,L)}$を求めると下図となる。



5) 爆風に対する保安距離の技術基準での表し方

以上より、爆風に対する保安距離（の換算距離）は、次の式で示されるトンネル入口から中心までの換算距離 $\boldsymbol{O}$ [m/kg1/3]と円の半径の換算距離 $\boldsymbol{R}$ [m/kg1/3]を用いて指定できる。

$\boldsymbol{O} = C_{O(S,L)}\,\boldsymbol{K}$

$\boldsymbol{R} = C_{R(S,L)}\,\boldsymbol{K}$

そこで、貯蔵爆薬量を W [kg]とすると、爆風に対する保安距離は、次の式で表されるトンネル入口から中心までの距離 D_O [m]と円の半径 D_R [m]で指定できる。

$D_O = \boldsymbol{O}\,W^{1/3} = C_{O(S,L)}\,\boldsymbol{K}\,W^{1/3}$

$D_R = \boldsymbol{R}\,W^{1/3} = C_{R(S,L)}\,\boldsymbol{K}\,W^{1/3}$

ここで、$\boldsymbol{K}\,W^{1/3}$ は各種保安物件、各薬量ごとの保安距離であって、規則第 23 条第 1 項の一級火薬庫等の保安距離表に示された保安距離である。したがって、$C_{O(S,L)}$と $C_{R(S,L)}$を示せば、D_O と D_R は、規則第 23 条第 1 項の表の保安物件と薬量に応じた保安距離にそれぞれ $C_{O(S,L)}$、$C_{R(S,L)}$を乗じて求めることができる。

以上より、技術基準においては、爆風に対する保安距離は、トンネル入口前方の距離 D_O の地点を中心とした半径 D_R の円で表されること、D_O と D_R は規則第 23 条第 1 項の表の保安物件と薬量に応じた保安距離にそれぞれ係数 $C_{O(S,L)}$、$C_{R(S,L)}$を乗じて求めることを規定し、係数 $C_{O(S,L)}$、$C_{R(S,L)}$をそれぞれ下表のように、離散化したトンネル断面積の火薬庫断面積に対する比 $\boldsymbol{S}$ と火薬庫及びトンネル全長の火薬庫径に対する比 $\boldsymbol{L}$ の 2 次元の表で示せばよいと考えられる。

上記のように保安距離を指定した場合の計算例を以下に示す。

a) 最大貯蔵量 30 トン、$\boldsymbol{S}$ が 0.5 で $\boldsymbol{L}$ が 30 の地中式一級火薬庫が、第一種保安物件に対してとらなければならない保安距離は…

b) 規則第 23 条第 1 項の保安距離表から、30 トンで第一種保安物件の保安距離は 500m

c) この 500m が、$D_O = C_{O(S,L)}\,\boldsymbol{K}\,W^{1/3}$、$D_R = C_{R(S,L)}\,\boldsymbol{K}\,W^{1/3}$ の両式の $\boldsymbol{K}\,W^{1/3}$ の値

d) 中心については $C_{O(S,L)}$表から、$\boldsymbol{S}$=0.5 で $\boldsymbol{L}$=30 のときの値を読んで、$C_{O(S,L)} = 0.275$

e) したがって、トンネル入口から円の中心までの距離 $D_O = C_{O(S,L)}\,\boldsymbol{K}\,W^{1/3} = 0.275 \times 500 = 138$ [m]

f) 半径については $C_{R(S,L)}$表から、$\boldsymbol{S}$=0.5 で $\boldsymbol{L}$=30 のときの値を読んで、$C_{R(S,L)} = 0.666$

g) したがって、半径 $D_R = C_{R(S,L)}\,\boldsymbol{K}\,W^{1/3} = 0.666 \times 500 = 333$ [m]

h) この場合、トンネル入口前方を 0 度とし、左回りに方位角 θ (0 度～360 度)をとったとき、方位角 θ の保安物件までのトンネル入口からの距離 D [m]は、$D = D_O \cdot \cos\theta + (D_R^2 - D_O^2 \sin^2\theta)^{1/2}$

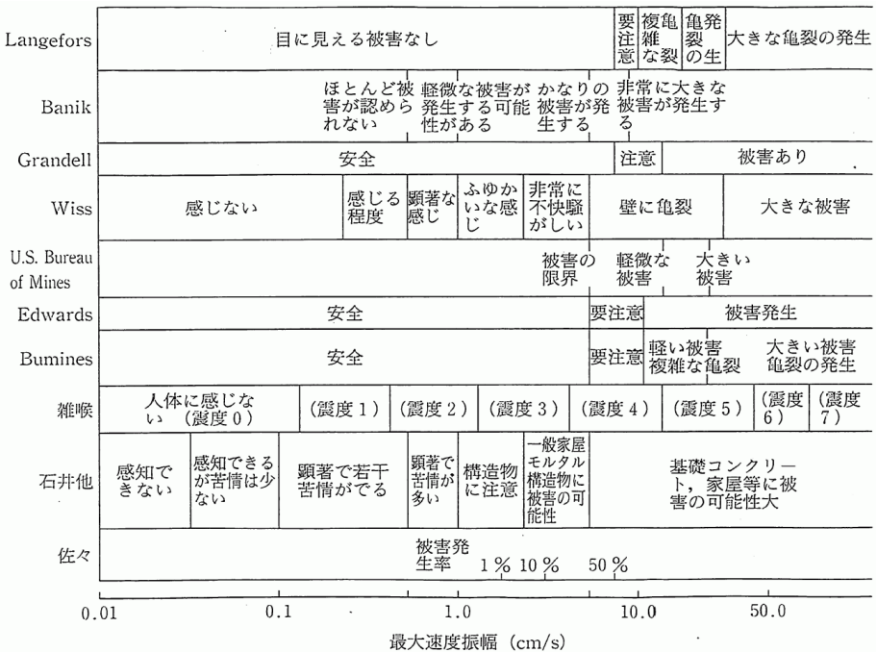
$C_{O(S,L)}$		$\boldsymbol{S}$（以下）									
		0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1
$\boldsymbol{L}$（以上）	1	0.204	0.241	0.264	0.281	0.294	0.303	0.310	0.315	0.317	0.318
	3	0.203	0.240	0.263	0.280	0.292	0.302	0.309	0.313	0.316	0.317
	5	0.202	0.239	0.262	0.279	0.291	0.300	0.307	0.312	0.314	0.315
	7	0.201	0.237	0.261	0.277	0.290	0.299	0.306	0.310	0.313	0.314
	9	0.200	0.236	0.259	0.276	0.288	0.298	0.304	0.309	0.312	0.313
	12	0.199	0.235	0.258	0.274	0.287	0.296	0.302	0.307	0.310	0.310
	15	0.198	0.233	0.256	0.272	0.285	0.294	0.300	0.305	0.307	0.308
	18	0.196	0.232	0.254	0.270	0.283	0.292	0.298	0.303	0.305	0.306
	21	0.195	0.230	0.252	0.269	0.281	0.290	0.296	0.301	0.303	0.304
	25	0.193	0.228	0.250	0.266	0.278	0.287	0.294	0.298	0.300	0.301
	30	0.191	0.225	0.247	0.263	0.275	0.284	0.290	0.294	0.297	0.298
	40	0.186	0.220	0.241	0.257	0.268	0.277	0.283	0.288	0.290	0.291
	60	0.177	0.209	0.230	0.244	0.255	0.264	0.270	0.274	0.276	0.277
	100	0.159	0.188	0.207	0.220	0.230	0.237	0.242	0.246	0.248	0.249

$C_{R(S,L)}$		***S*** (以下)									
		0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1
L (以上)	1	0.685	0.851	0.966	1.054	1.124	1.181	1.224	1.256	1.276	1.282
	3	0.578	0.719	0.815	0.890	0.949	0.997	1.034	1.061	1.077	1.083
	5	0.535	0.665	0.754	0.823	0.877	0.921	0.956	0.980	0.996	1.001
	7	0.508	0.631	0.716	0.781	0.833	0.875	0.907	0.931	0.945	0.950
	9	0.488	0.607	0.689	0.751	0.802	0.842	0.873	0.896	0.909	0.914
	12	0.467	0.581	0.659	0.719	0.767	0.805	0.835	0.857	0.870	0.875
	15	0.451	0.561	0.636	0.694	0.741	0.778	0.807	0.828	0.841	0.845
	18	0.439	0.546	0.619	0.675	0.720	0.756	0.785	0.805	0.817	0.822
	21	0.429	0.533	0.604	0.659	0.703	0.739	0.766	0.786	0.798	0.802
	25	0.417	0.519	0.588	0.642	0.685	0.719	0.746	0.765	0.777	0.781
	30	0.406	0.504	0.572	0.624	0.666	0.699	0.725	0.744	0.756	0.760
	40	0.388	0.482	0.547	0.597	0.637	0.669	0.694	0.712	0.723	0.727
	60	0.365	0.453	0.514	0.561	0.598	0.628	0.652	0.669	0.679	0.683
	100	0.337	0.419	0.475	0.519	0.553	0.581	0.602	0.618	0.628	0.631

8.2　地中式一級火薬庫の地盤振動に対する保安距離

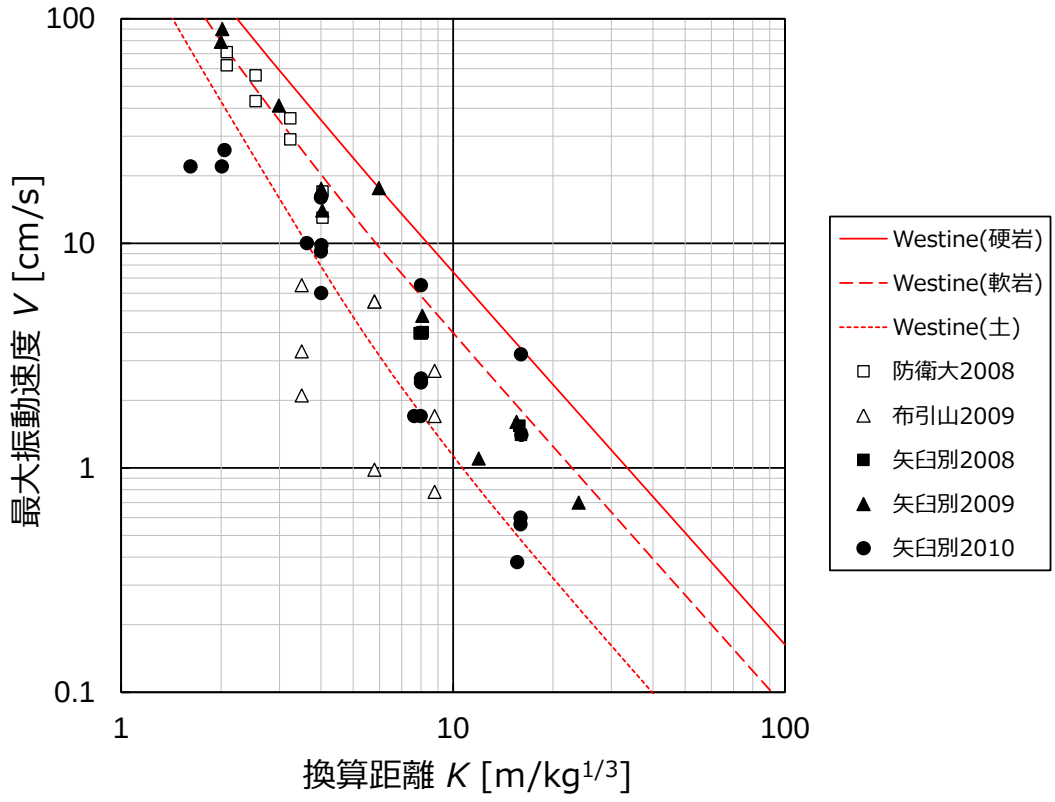
地中式火薬庫に貯蔵された火薬類が万一爆発すると、地盤振動が火薬庫（薬室）を中心として火薬庫周囲の岩盤に次第に減衰しながら伝播していく。地盤振動がある程度大きいと、建物の倒壊などの深刻な被害をもたらし、それに伴い人の被害も発生する。したがって、各種保安物件に対して、地盤振動が許容できる値まで減衰するのに必要な保安距離をとる必要がある。

どの程度の地盤振動のときに建物にどのような被害がでるかは、発破振動による建物の被害をまとめた下図が参考になる。この図は、火薬学会発破専門部会編「現場技術者のための発破工学ハンドブック」（共立出版、2001 年初版）の 450 ページから引用した図で、過去多くの研究者によりなされた発破振動の一般家屋及び建物への影響調査結果をまとめたものである。一般に、構造物への発破振動の影響を評価する尺度としては最大振動速度（最大変位速度、最大速度振幅ともいい、単位は kine = cm/s ）が適しているとされており、図も最大振動速度で建物被害がまとめられている。



どの程度の地盤振動被害まで許容できるかは、地上式一級火薬庫の各種保安物件に対する保安距離において、爆風被害がどの程度許容されているかを参考にする。保安物件のうち、第一種及び第二種保安物件には、市街地の家屋、村落の家屋等のほぼ常時人がいる場所が指定されており、爆風被害も鼓膜破損等の人への被害がほとんどない程度の保安距離が確保されている。相当する地盤振動の被害を考えると、第一種及び第二種保安物件には、人への被害がないように建物への深刻な被害がない程度の最大振動速度として、それぞれ 10 cm/s 以下（震度 4 強相当）及び 20 cm/s 以下（震度 5 弱相当）を閾値とすればよいと考えられる。次に、第三種及び第四種保安物件の場合は、単独の家屋、鉄道、国都道府県道、高圧電線等の人がいない場所あるいは常には人がいない場所が指定されており、爆風被害もある程度の建物の被害を許容している。相当する地盤振動の被害を考慮し、第三種及び第四種保安物件には、建物の倒壊等の深刻な被害が発生し始める最大振動速度として、それぞれ 30 cm/s 以下（震度 5 強相当）及び 40 cm/s 以下（震度 6 弱相当)に抑えればよいと考えられる。

各種保安物件に対して地盤振動の最大振動速度をどの程度まで抑えればよいのかを考察したが、地盤振動に対する保安距離を策定するためには、どの程度の距離をとれば最大振動速度がこれらの値まで減衰するかを決めるための発破振動の減衰式が必要となる。国内の火薬メーカや研究者らが爆薬量と爆源からの距離で整理した発破振動の最大振動速度の減衰式を提案しているが、ここでは爆薬量 10 g から約 20 キロトンまでの爆発の地盤振動を爆源のエネルギーや地盤のパラメータを入れた式で整理し、広く引用されている Westine の減衰式（Peter. S. Westine, “Ground Shock from the Detonation of Buried Explosives”, Journal of Terramechanics, Vol.15, No.2, pp.69-79 (1978) ）を用いて、地盤振動の減衰を評価する。下図に Westine の式による最大振動速度の予測値と、国内の野外実験で測定された最大振動速度を換算距離に対してプロットした図を示す。



図より、土と軟岩の間程度の地盤で実施された国内実験の最大振動速度測定値が、Westine の式とよく一致しているのがわかる。地中式火薬庫の地盤振動の減衰を評価するには、より安全側をとって最も地盤振動が大きくなる硬岩の場合の Westine の予測値を用いる。先述したように、第一種保安物件における人の被害を起こさないようにするためには、地盤振動の最大振動速度を 10 cm/s 以下に抑えなければならない。図の Westine（硬岩）の予測線から、これは換算距離で 8.3 m/kg1/3 以遠で満足できることがわかる。同様に、第二種、第三種及び第四種保安物件において、最大振動速度をそれぞれ 20、30、40 cm/s 以下に抑えるには、換算距離 5.5、4.4、3.6 m/kg$^{1/3}$ 以遠にすればよいと考えられる。

したがって、技術基準における地中式一級火薬庫の地盤振動に対する保安距離は、第一種から第四種保安物件について、爆薬量 40 トンから 0.1 トンまで、それぞれ、K=8.3、5.5、4.4、3.6 m/kg$^{1/3}$ で計算される保安距離の表を示せばよい。この保安距離は、爆風の場合と違って火薬庫（薬室）外壁が起点である。なお、下記のとおり飛散物に対する保安距離が 50 m なので、この表の保安距離の最小値は 50 m としなければならない。

8.3　地中式一級火薬庫の飛散物に対する保安距離

地中式火薬庫に貯蔵された火薬類が万一爆発すると、火薬庫（薬室）上部の地盤表面からの飛散物及びトンネル入口からの飛散物が発生すると考えられる。トンネル入口からの飛散物は、規則により衝動波を抑える土堤をトンネル入口前方に設置するので、この土堤により防ぐことができると考えられる。そこで、ここでは、地盤からの飛散物に対する保安距離を検討する。

地中式火薬庫の薬室上部の地盤厚は、薬室の火薬類の万一の爆発の際、地盤からの飛散物の飛散距離が最大でも 50 m 以下であるように規則で定められている（山本祐徳, 「一般火薬学」, p220, 一橋書房(1966) ）。この著書によれば、地中式火薬庫の地盤厚 D [m] は、貯蔵最大爆薬量を W [kg] とすると、

$$D = (4/3)\times(W/2)^{1/3} - 7.3 \;=\; 1.06\times W^{1/3} - 7.3$$

である。したがって、地盤厚にはスケール則が成り立たず、換算地盤厚 $D / W^{1/3}$ [m/kg$^{1/3}$] は一定ではなく、上式を変形して、

$$D / W^{1/3} = 1.06 - 7.3 / W^{1/3}$$

となる。爆薬量 1、5、10、40 トンの場合の換算地盤厚は、それぞれ 0.33、0.63、0.72、0.85 m/kg$^{1/3}$ である。つまり、式から明らかなように、爆薬量が少ないほど換算地盤厚は薄くなり、地盤からの飛散物が発生しやすくなるが、爆薬量が少ないため飛散距離が抑えられる。逆に、爆薬量が多いほど換算地盤厚は厚くなって飛散物は発生しにくくなるが飛散距離は薬量に応じて大きくなる。このような関係で、規則で定められている地盤厚であれば、爆薬量が変化しても飛散物は 50 m 以内に抑えられるものと考えられる。

したがって、地中式一級火薬庫の地盤からの飛散物の飛散距離は、規則で定められた地盤厚があれば最大で 50 m であり、飛散物に対する保安距離は、安全側にとって、火薬庫（薬室）の外壁から 50 m とすればよいと考えられる。

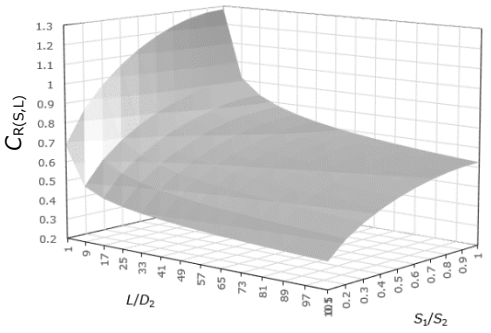
8.4 まとめ

地中式一級火薬庫に貯蔵された火薬類が万一爆発した際の爆風、地盤振動、飛散物の爆発影響についての検討の結果、地中式一級火薬庫の保安距離は、爆風に対するトンネル入口からの保安距離と、地盤振動及び飛散物に対する火薬庫（薬室）外壁からの保安距離の両者を満足するものとする必要があることがわかった。

爆風に対するトンネル入口からの保安距離は、トンネル入口前方の距離 D_O の地点を中心とした半径 D_R の円で表され、この D_O と D_R は規則第 23 条第 1 項の表の保安物件と貯蔵爆薬量に応じた保安距離にそれぞれ係数 $C_{O(S,L)}$、$C_{R(S,L)}$を乗じて求められる。技術基準には係数 $C_{O(S,L)}$、$C_{R(S,L)}$をそれぞれ離散化したトンネル断面積の火薬庫断面積に対する比 $\boldsymbol{S}$ と火薬庫及びトンネル全長の火薬庫径に対する比 $\boldsymbol{L}$ の 2 次元の表を示すことで指定できる。

また、地盤振動及び飛散物に対する火薬庫（薬室）外壁からの保安距離は、最小値を 50 m として、第一種、第二種、第三種及び第四種保安物件について、それぞれ換算距離 8.3、5.5、4.4、3.6 m/kg$^{1/3}$ で指定される。

以上、平成 27 年度から平成 30 年度の地中式火薬庫に関する実験結果及び令和 3 年度の地中式火薬庫の爆風シミュレーション結果から、地中式火薬庫の保安距離の考え方を示したが、今後検討すべき課題として以下が挙げられる。



・爆風について、半径の比例係数 $C_{R(S,L)}$を右図に示すが、基準点を $C_{R(0.25,9)} = C_{R0}$ とし、トンネル断面積の火薬庫断面積に対する比 $\boldsymbol{S}$ と火薬庫及びトンネル全長の火薬庫径に対する比 $\boldsymbol{L}$ の片方が一定の時に、もう片方は $C_{R(S,9)} = C_{R(S)}$または $C_{R(0.25,L)} = C_{R(L)}$に従い比率が変わらず変化するものとして、$C_{R(S,L)} = C_{R(S)} \times C_{R(L)} / C_{R0}$ とした。これが正しいかを、いくつかの（$\boldsymbol{S}$、$\boldsymbol{L}$）点における実験またはシミュレーションで確認する必要があると思われる。例えば、$\boldsymbol{S}$ が 1（直管）のとき、$\boldsymbol{L}$ が 0 に近づくと、半径比例係数は 1（地表面爆発と同じ）に近づくと考えられる。また、$\boldsymbol{L}$ が大きく $\boldsymbol{S}$ が小さいところはもっと 0 に近い値が本当ではないかと思われる。つまり、右上図の半径の比例係数 $C_{R(S,L)}$は、全体的に大きすぎる値になっていると思われ、これを確認することが望ましい。

・地盤振動について、地盤振動の減衰を Westine の硬岩の減衰式から推定して換算距離（保安距離）を検討したが、かなり安全側に偏っており、しかも、地中式火薬庫の薬室上部の地盤の厚さを考慮していない。通常、薬室は地下深くにあるため、地表の保安物件までの岩盤中の振動伝播距離は水平距離よりも長くなる。つまり、地盤振動の保安距離は大きすぎると思われ、これを確認することが望ましい。

・飛散物について、貯蔵爆薬量が少ない場合も飛散物の飛散距離を 50 m としたが、1 トン以下の貯蔵量でも飛散物が 50 m も飛ぶのかを確認する必要があると思われる。貯蔵量が多い場合は飛散物飛散範囲 50 m は地盤振動の保安距離より小さくなるので問題ないが、貯蔵量が少ない場合、特に 1 トン以下の貯蔵量の場合の飛散物飛散範囲 50 m は地盤振動の保安距離より大きくなり、50 m が薬室からの保安距離となる。1 トン以下の貯蔵量の場合の薬室からの保安距離は大きすぎると思われ、これを確認することが望ましい。

地中式火薬庫の保安距離を定めるにあたっては、これらの課題を解決することが望まれる。

付録

2.A.1 （付録１）委員会議事録

開催されたすべての委員会議事録を記す。

令和 3 年 6 月 25 日　　火薬類爆発影響低減化技術基準検討委員会　第 1 回本委員会
令和 3 年 8 月 27 日　　火薬類爆発影響低減化技術基準検討委員会　第 2 回本委員会
令和 4 年 1 月 13 日　　火薬類爆発影響低減化技術基準検討委員会　第 1 回小委員会
令和 4 年 1 月 31 日　　火薬類爆発影響低減化技術基準検討委員会　第 3 回本委員会

3.A.1.1 令和 3 年度　爆発影響低減化技術基準検討委員会（第 1 回本委員会） 議事録

爆発影響低減化技術基準検討委員会（第 1 回本委員会） 議事録

日　時：令和 3 年 6 月 25 日（火）14:05～16:00
場　所：中央区八丁堀区民館 6 号室
出席者：対面参加 8 名、書面参加 7 名、リモート参加 20 名（敬称略、順不同）
委　員：小川輝繁、新井 充**、三宅淳巳**、水書稔治**、大野友則*、高橋宏樹*、吐合育輝*、
浦川克也*、若林邦彦、久保田士郎**、須山恭三、後藤浩司**、畑中修二**、福田光寿**、
鈴木宏章*、多田達士*、黒木和弘**、藤原和彦*、奥永一郎
オブザーバ（経済産業省）：宮地佳子**、米山治介**、松下一徳**、武田理栄**
（産総研）　：松村知治**、杉山勇太**、丹波高裕***、佐分利 偵**、高橋良尭**
事務局（全火協）：川﨑勝樹、遠藤秀雄**、飯田光明、中塚漢二**、山口潤仁**、柳田一也、
廣崎義一
（注）＊：書面参加（事前送付した資料に対する意見、質問等の提出）
＊＊：リモート参加（テレビ会議システムによる参加）

【配付資料】
資料 1-1　本委員会 委員名簿
資料 1-2　小委員会 委員名簿（案）
資料 1-3　令和３年度爆発影響低減化技術基準検討事業 実施計画書
資料 1-4　実験計画書（案）
資料 1-5　室内実験について
資料 1-6　地中式火薬庫のシミュレーションを活用した保安距離案策定

１．開会
配布資料の確認後、事務局より当委員会の開会がなされた。

２．挨拶
全火協 川﨑専務理事より、「6 月 4 日付で経産省との契約が締結された。昨年に引き続き、煙火の製造施設等の保安距離に関する実験を行う計画である。委員会を通じて実験の中身の検討、準備を進めていきたい。」旨の挨拶があった。

３．ご挨拶
経済産業省商務流通保安グループ 鉱山・火薬類監理官付 宮地火薬専門職より、「今年度も無事に第１回目の委員会を迎えることができた。毎年予算獲得に苦労している。煙火製造所の防爆壁の検討は今年が 3 年目になる。コロナ禍の中だが実験が無事に実施できることを祈念している。」旨の挨拶があった。

4．本委員会委員紹介、委員長選出
リモート参加および対面参加の委員、オブザーバ、事務局からそれぞれ自己紹介があった。
小川委員が本委員会委員長として事務局から推薦され、全会一致で承認、選任された。「野外実験を安全に、目的とする成果を挙げるため、皆さんの智慧を拝借したい。」旨の挨拶があった。以後の司会進行は事務局から小川委員長に移された。

5．小委員会の設置及び委員長選出
資料 1-2 を案とする小委員会を設置することが承認され、産総研の若林委員を委員長とすることが承認された。

6．実施計画書（仕様書）について
資料 1-3 に基づいて事務局から事業概要が説明された。これまでと異なり、シミュレーションが追加された。具体的には資料 1-6 で説明がなされるが、野外実験は例年どおり実施され、地中式一級火薬庫の保安距離策定に必要なデータ取扱いとしてシミュレーションがなされる計画である。

7．野外実験計画（案）等について
資料 1-4 に基づいて産総研から野外実験（防爆壁）の案が説明され、以下のような質疑があった。

・今年は 3 年計画の最終年度と聞いたが、1 年目、2 年目の成果を踏まえての実験計画だと思う。今年から参加する委員のためにこれまでの経緯を説明してほしい。（委員）→　この実験の目的と経緯を簡単に説明すると次のとおり。煙火製造所の近くに保安物件が迫ってきて保安距離の確保が難しくなる例がある。新たに新型の防爆壁を追加することで保安距離を短くすることを検討している。初年度は高さ 8mの合板壁、8mの水の壁、8mの鉄板の壁を想定した実験を行った。水の壁の爆風圧低減効果は合板とほとんど変わらない、鉄板は重量飛散物になる、という結果であった。2 年目は合板壁を工室／火薬庫のすぐ近くに置いた場合や離しておいた場合を検討し、ある程度離すことにより目的に適うことがわかった。また、金網やウレタン壁も爆風圧低減に効果があることがわかったが、金網は重量飛散物になる。ウレタンは低密度品を使用したが、実際に用いる場合は高密度品になる。今年度はこの実験を行う。（事務局）
・実験ができなかった場合は経産省との相談になるのか。シミュレーションの精度が向上しており、それが有効に使えるのか。（委員）→　シミュレーションは地中式火薬庫の保安距離策定に活用される。煙火製造所の防爆壁に関しては、実験ができなかった場合にシミュレーション活用を検討することになると思われる。（事務局）
・実験 No.1-5 で新材料が提案されているが、爆風圧吸収（低減）には砂が一番よいのではないか。また、ウレタン 2 面の配置方向が 3 つあるが、爆風計のある方向の一番右の図がよいのではないか。（委員）→　ウレタンの方向はそのとおり。砂がよいというのは土堤が一番よいということになるが、高さ 8mの土堤（砂）は現実的ではない。一番良さそうなのは合板もしくは樹脂メッシュと思われる。（事務局）
・実験 No.1-5 についてはこれから材料を決めるのであろうが、後日でもよいので意見があれば事務局に出してほしい。（委員長）→　材料は本日の委員会で絞り込みたい。材料候補は事前打合せで挙がったものである。スチールウールは燃焼する問題がある。ウレタンは分解性があるが生分解性のものを探している。あまり見つからない。ロックウール（岩綿）は工室／火薬庫が爆発した際に石綿と同じくらい小さなサイズになると思われるので問題。軽石は効果が期待でき入手性もよい。（事務局）→　使えそうなのは軽石くらいで、他は問題がありそう。産総研の意見は？（委員長）→　軽石はポーラスでスカスカのため壊れやすく、空気抵抗で遠くに

は飛ばない。（産総研）→　樹脂メッシュのコの字型も案としてあるが、既存防爆壁の角に合板を置くことがよいのではないか。追加防爆壁を設けた場合、仮に対象になっている保安物件がその方向にあればよいが、角（45 度）方向に保安物件がある場合は問題。その場合は角の奥に合板（防爆壁）があれば効果的だと思われる。（事務局）

・合板のデータはあるので、それらをもとに既存防爆壁の角方向に合板を置くことを追加してはどうか。（委員長）→　それでよい。（産総研）

・ウレタンフォームの高密度品はどのくらいのものを使うか、実用的なものを検討した。その結果、硬質ウレタン（気泡が独立したもの）と軟質ウレタン（気泡が独立していないもの）がある。密度は 35 kg/m^3 がポピュラーで、現場施工用としては土木トンネルで用いられるものに 30、39、59、130 kg/m^3 がある。土壌改良に用いられるものは 36±4 kg/m^3 である。昨年度の実験に用いられたものは 20 kg/m^3 であったが、今年度は 40～50 kg/m^3 の範囲で入手可能なもので決めたい。（事務局）→　提案の範囲で進めてほしい。（委員長）

以上の議論をもって実験計画案が承認された。

8．室内実験計画（案）について

室内実験計画について資料 1-5 に基づき産総研から説明がなされ、以下のような質疑があった。

・No. B-1（多孔質体 2 面、L 型）は低密度ウレタン（昨年のもの）だが、どこに置くかを決めるためか。（事務局）→　そのとおり。（産総研）

・高密度ウレタンの配置は 1 面、3 面、4 面の計画だが、1 面、2 面、3 面の方がよくないか。野外実験の結果と室内実験とでスケール的に比較することができるかどうかを検証することが室内実験の目的であるので。（事務局）→　了解。（産総研）

以上の議論をもって実験計画案が承認された。

9．地中式火薬庫保安距離案の策定計画について

資料 1-6 に基づいて産総研より説明がなされ、以下のような質疑があった。

・爆轟直後の生成ガス比熱比は 3 と言われているが、爆轟生成ガスの比熱比 1.4 は妥当か。（事務局）→　爆轟生成ガスが広がったときの比熱比は例えば PETN 等の爆薬は 1.25 といわれている。含水爆薬にはアルミニウムが入っているので、比熱比は大きくなると考えられ 1.25 ではなく 1.4 を仮に入れている。（産総研）

・説明は理解できる。オープンエアと違って拘束力のある状態での爆轟生成ガスの比熱比がどのくらいになるかは実験と合わせていくことになるとは思うが、煙火の場合はどう考えるか。（委員）→　拘束力のある空間の中での爆轟生成ガスの比熱比は、ある程度高密度の状態を保ったままになるので、ご指摘の通り、実験結果に合うようチューニングしていくことになる。過去の計算例では、比熱比が理想気体の 1.4 から 1.3 になると爆風圧が 10%程度弱くなることがわかっている。煙火についても同様だが、精密に計算するとなると、熱力学計算等から何らかの状態方程式を設定しなければならないと思われる。（産総研）→　研究成果が出るとよい。（委員）

以上の議論をもってシミュレーション計画案が承認された。

10. その他

(1) 書面参加の大野委員から本日送付されてきた質問に対しては、産総研／事務局が回答する。

(2) 昨年度は実験参加者に対し新型コロナウイルス感染症防止対策を策定したが、今年度も実験参加者に対して事前に PCR 検査や抗体検査を実施するのかどうかを含め、次回委員会で提示する（事務局）。

(3) 実験計画は固まっていないが、調達品の納期等を踏まえて発注を進めたい旨が事務局より提案され、委員長の承諾が得られた。
(4) 第 2 回本委員会は 8 月 27 日に開催を予定する。

以上

3.A.1.2　令和 3 年度　爆発影響低減化技術基準検討委員会（第 2 回本委員会） 議事録

爆発影響低減化技術基準検討委員会（第２回本委員会） 議事録

日　時：令和 3 年 8 月 27 日（金）13:30～15:00
場　所：中央区八丁堀区民館 6 号室
出席者：対面参加 7 名、書面参加 5 名、リモート参加 22 名（敬称略、順不同）
委　員：小川輝繁、新井 充**、三宅淳巳*、水書稔治**、大野友則*、海沼敏恭*、吐合育輝*、
浦川克也*、若林邦彦**、久保田士郎**、須山恭三、後藤浩司**、畑中修二**、
福田光寿**、矢野英治(鈴木宏章代理)**、多田達士**、黒木和弘**、藤原和彦、
奥永一郎**
オブザーバ（経済産業省）：宮地佳子**、松下一徳**
（産総研）　：松村知治**、杉山勇太**、丹波高裕**、佐分利 偵**、高橋良尭**
（現地建設会社）
事務局（全火協）：川﨑勝樹**、遠藤秀雄**、飯田光明、中塚漢二**、山口潤仁**、柳田一也、
廣崎義一
（注）＊：書面参加（事前送付した資料に対する意見、質問等の提出）
＊＊：リモート参加（テレビ会議システムによる参加）

【配付資料】
資料№2-1-1　火薬類保安技術実験計画書（案）
資料№2-1-2　室内実験について
資料№2-2　点火技術基準（案）
資料№2-3　危害予防規程（案）
資料№2-4　班別作業マニュアル（案）
資料№2-5　緊急連絡網（案）
資料№2-6　実験組織（案）
資料№2-7　新型コロナウイルス感染症対策について(案)

１．開会および出席者確認
配布資料の確認後、事務局より当委員会の開会がなされた。オンライン出席者もいるため、出席者各自の挨拶をもって出席確認がなされた。のちの議事は委員長によって進められた。

２．野外実験計画（案）等について
資料 2-1-1 に基づいて産総研から野外実験の計画について、第１回委員会からの変更点を中心に説明がなされ、以下のような質疑があった。
・実験 No.1-5 の図 1-12 において、防爆壁の厚みが 72mm となっているが、他の図は 67mm である。（委員）→　図 1-12 が間違っているので 67mm に修正する。（産総研）
・実験 No.1-5 の追加防爆壁（合板）の厚みが書かれていない。12mm×2 枚重ねではなかったか。（事務局）→　確認のうえ追記する。（産総研）
・厚さ 12mm の合板が入手できないかもしれない。オーダーは入れているが入荷しない。とくに 910×1820×12mm の入手が難しい。世界的なウッドショックの影響である。（現地建設業者）→　910×1820×6mm の合板があれば厚さ 9mm の合板と組み合わせて 6＋9×2＝24mm になる。6mm が入手できなければ 9mm×2 枚＝18mm でやるか。12mm よりも厚いものはあるのか。（事務局）→　12mm よりも厚いものは仕様としては存在する。12mm 合板の入手を優先して手配する。無理なら合計の厚さが 24mm くらいになるような組合せで調達することを

検討する。（現地建設業者）→　12mm の調達が難しい場合、9mm×2 枚としても爆風に影響しないのではないか。合板よりも入手が容易と思われるコンパネのサイズは 900×1800mm である。防爆壁の高さ 1820 と 1800 とで爆風圧はどのくらい違うか。（事務局）→　ほとんど影響はない。（産総研）→　最悪の場合、合板ではなくコンパネを用いる。（事務局）

・ウレタンフォームは密度 52kg/m³ で色が黒のものが入手可能になった。樹脂メッシュは 1.8mm ピッチのものが入手できないので 2.0mm ピッチとする。（事務局）→　材料の入手性の問題であるので了承する。（委員長）

・実験 No.1-5 は樹脂メッシュ 5 枚重ねとなっている。厚さ 1.4mm のメッシュを 5 枚重ねるときのメッシュの重なり具合はどのようにするのか。昨年の金網を用いた実験では 1.5mm の重なりを考えずにやったが、今年も位相のずれを考えないのか。（委員）→　今年も位相のずれは考えない。（事務局）

・実験 No.1-5 の目的を確認したい。（委員）→　実験 No.1-5 として新しい材料を用いる提案もあったが、合板でその方向が変わった場合に変更する。保安物件が既存防爆壁の 0 度または 90 度方向ならよいが、45 度方向にあった場合を想定し、爆風圧低減効果の方向に対する依存性があるかどうかの観点から変更した。（事務局）→　了解した。（委員）

・野外実験の計画書については、変更も含めて了承することにしたい。（委員長）

以上の議論をもって実験計画案の改訂版が承認された。

3．室内実験計画（案）について

室内実験計画について資料 2-1-2 に基づき産総研から説明がなされ、以下のような質疑があった。

・室内実験用のウレタンフォームの入手は早ければ早い方がよいとは思うが、野外実験時に受け取ることでよいか。（事務局）→　それで結構。（産総研）

・換算距離はどのようにして計算しているのか。煙火 2.37g はペンスリット 0.92g に相当するが、実際には 1.0g のペンスリットを用いることになっている。ペンスリット 1.0g に相当する煙火は 2.564g となるので、換算距離は煙火 2.564g で計算すべきではないか。昨年、野外実験と室内実験とで爆風圧の絶対値も合わなかったとすれば、この換算距離の計算法が影響しているのではないか。（事務局）→　換算距離を見直す。（産総研）

・室内実験についても、変更を含めて承認することとしたい。（委員長）

以上の議論をもって室内実験計画案の改訂版が承認された。

4．危害予防規程、班別作業マニュアル、緊急連絡網、実験組織等の確認について

資料 2-3～2-6 に基づいて事務局より説明がなされた。以下のような説明および質疑がなされた。

・実験組織図において、副総括責任者が経産省の下に記載されていたが、それを修正した。技術責任者のみ代理者があったが、副技術責任者を増やし、代理者をなくした。これらを危害予防規程に反映させた。（事務局）→　緊急連絡網において、消費の許可をした北海道庁（釧路振興局）や事故時の連絡先である警察署も連絡先に加えるべきではないか。（経産省）→　釧路振興局と警察署を追記し、修正版をメールで配信する。（事務局）

・産総研の連絡先（夜間休日）が変更になった。あとで連絡する。（産総研）

5．新型コロナウイルス感染症対策について

資料 No.2-7 に基づき、昨年度との違いを中心に事務局より説明がなされた。実験参加 10 日前（10/10 頃）までにワクチン接種を少なくとも 1 回済ませる見込みのない実験参加者については、PCR 検査を受けていただく。その費用は全火協が負担する。PCR 検査を受けていただけな

い方は参加を見合わせていただきたい旨の説明があった。

6．火薬類従事者の確認
火薬類取扱従事者名簿（班別作業マニュアル 10 ページ）は参加者が決まり次第整備する旨、事務局より説明された。

7．自衛隊支援内容について
昨年とほぼ同じ支援内容でお願いしているが、今年は高機動車（ジープ）を多めに、本部横のテントは周囲も幕のあるタイプを要望している旨の説明が事務局よりなされた。

8．作業スケジュール等報告
野外実験の作業予定日程の確認、野外実験参加（宿泊・見学）申込書の説明（9/6 締切）、航空券の予約における注意事項（コロナ禍のため減便が予想される）等が事務局よりなされた。

以上

3.A.1.3　令和 3 年度　爆発影響低減化技術基準検討委員会（第 1 回小委員会） 議事録

爆発影響低減化技術基準検討委員会（第 1 回小委員会） 議事録

日　時：令和 4 年 1 月 13 日（木）13:30～16:30
場　所：中央区八丁堀区民館 6 号室
出席者：対面参加 8 名、リモート参加（＊印）18 名（敬称略、順不同）
委　員：新井 充(本委員会委員)、水書稔治* (本委員会委員)、浦川克也、若林邦彦*、久保田士郎、
須山恭三、後藤浩司*、畑中修二*、福田光寿*、多田達士*、山本和彦*、藤原和彦*、
オブザーバ（経済産業省）：宮地佳子、松下一徳*、川邊真理*、有川　舞*
（産総研）　：杉山勇太*、佐分利 偵*、高橋良尭*
事務局（全火協）：川﨑勝樹、遠藤秀雄*、飯田光明、中塚漢二*、山口潤仁*、柳田一也、
廣崎義一*

【配付資料】
資料-１　令和３年度火薬類保安技術実験結果報告
資料-２　令和３年度室内実験結果報告
資料-３　野外実験で実証した新規防爆壁を追加する規則・告示改正案
資料-４　地中式火薬庫の爆風シミュレーション結果報告
資料-５　地中式火薬庫の保安距離改正案
資料６　令和４年度爆発影響低減化技術基準検討テーマ候補

１．開会
配布資料の確認後、事務局より当委員会の開会がなされたのち、若林委員長により議事進行がなされた。

２．令和３年度火薬類保安技術実験結果概要報告
資料-１に基づいて産総研から野外実験結果（カメラ撮影、飛散物、爆風圧、地盤振動等）の概要が説明され、以下のような質疑があった。
・地盤振動における今年の結果に対して、なぜ平成 28 年度の地中式火薬庫と比較したのか。（経産省）→　地盤振動に対する明確な基準がないので、PPV と被害の関係をもとに目標値を決めようと考えた。（産総研）→　平成 27 年度までは地盤振動のデータがなかったのか、あるいは使えるデータがなかったのか。（経産省）→　測定データはある。規則案を念頭に閾値を決めるにあたり地中式火薬庫の値を用いた。（事務局）→　地中式火薬庫に限るものではないということか。（産総研）→　そのとおり。（事務局）

３．令和３年度産総研室内実験結果概要報告
資料-２に基づき産総研から説明がなされ、以下のような質疑があった。
・室内実験の３方ウレタンでは遠方の爆風圧も低減されているが、爆風の回り込みが制限されるためか。（委員）→　ウレタンを爆風（衝撃波）が押してはね返ってくる（つぶしてはね返る）ときに圧力が低下するのではないか。（産総研）→　剛体壁では反射波があるが、ウレタンの場合は壁が柔らかいので、遠方も効く。爆源の近くで工夫すれば遠方も爆風圧低減効果が期待できると解釈してよいか。→　そう思う。（産総研）

４．新型防爆壁の技術基準案の検討
資料-３に基づいて事務局より説明がなされた。野外実験結果のうち、①コの字型防爆壁（合板）および②ウレタン１面 を採用し、45° 方向は採用しなかったこと、令和３年度のウレタン

１面での 45° 方向の K 値 5.89 は室内実験結果を踏まえて（小さく）見直すことができないかと考えていること、最悪の場合は第４種保安物件のみ低減することを考える旨の補足説明があった。以下のような質疑があった。

・コの字型防爆壁の「袖壁」が火薬庫と反対側に向くことも可能な規定になっていないか（委員）→　袖壁は「防爆壁の方向に」に設けると規定しているので大丈夫だと考える。（事務局）

・現状の保安距離の表において、火薬庫の大きさに相当する距離を差し引いたというのは数字をきれいにするためか。（委員）→　110m以上は 10m単位、100m以下は 5m単位に丸めるときに差し引いている。（事務局）

・次回の法令改正の際には、煙火協会の方に、保安距離が短くなるメリットがあることを前提に、ウレタンフォームを設置したりすることへのコメントをいただきたい。次回、案内してほしい。（経産省）→　承知した。（事務局）

・ウレタンフォームが「難燃性であること」は必要ないか。（委員）→　実験計画書には入れていたが。検討する。（事務局）

・壁厚「20mm 以上」で悩んだというが、なぜ 20mm にしたのか。（委員長）→　実験は 1/4 スケールで 12mm×2 枚とした。24mm を 4 倍すると 96mm（約 10cm）になってしまう。自立すればよいので 20mm くらいでよいのではないか。（事務局）

・ウレタンフォームの密度が、「18kg/m³以上 56kg/m³未満」となっているが、「55kg/m³以下」ではないのか。（委員長）→　いろいろな法令を調べたが「○以上○以下」の書き方は見あたらない。用例の多い「○以上○未満」に従った。（事務局）

・規則第 23 条第 7 項とする案だが、現行の第 7 項はどうなるのか。（委員）→　あと送りにする（第 8 項になる）。（事務局）

・追加防爆壁は 1 面だが、反対方向（180° 方向）はどうなるのか。圧力が高くなる場合があるのでは？（委員）→　令和３年度の野外実験結果ではウレタン１面の場合、180° 方向ではなく 0° 方向の K 値 12 は 13.48 と大きくなった。これをどう扱うか。室内実験では同等であった。令和２年度は 11.86 であった。（事務局）→　第３種では距離低減は期待できないのではないか。（産総研）→　資料１の 42 ページによれば K 値 12 は爆風圧が基準爆薬より大きくなっている。室内実験は同等の結果が得られているので、近似曲線を見直してはどうか。（委員）
ウレタン１面の K 値（K6）を見直すこと、ウレタンの難燃性を追加すること、としたうえで、この案で本委員会に報告することが結論された。

５．地中式火薬庫の爆風シミュレーション結果報告
資料-４に基づいて産総研より説明がなされ、とくに質疑はなかった。

６．地中式火薬庫の保安距離改正案の検討
資料-５に基づいて事務局より説明がなされ、以下のような質疑があった。

・2 ページの表は具体的にどのように計算するのか。（委員）→　たとえば断面積比 0.8、全長と薬室径比 30 の場合、現状の保安距離を仮に 500m とすると 0.309×0.953×500 が中心までの距離、0.896×0.831×500m が（中心が移動した先の）保安距離となる。中心の移動を考慮すると両方の和が前方の保安距離になる。

・この案のように保安距離を計算させる方がよいのか、すべてを網羅する表がよいのか。検討いただくために両方を本委員会で提案する。（事務局）

・地盤振動に対する保安距離の規則改正案については、本委員会では表で提示する。（事務局）

・爆風圧、地盤振動、飛散物の３つの中で保安距離が一番長く設定されるのはどれか。（経産省）→　爆風圧である。実際には保安距離の設定に地盤振動や飛散物は使われない可能性があ

る。しかしながら、場合によっては（前室が長い地中式火薬庫の場合）爆風圧と地盤振動の両方を満足する距離となる。（事務局）

・火薬庫の薬室の断面は円形ではない。L/D の D（薬室径）は薬室の断面積と同じ面積になる円の直径としている。（事務局）

7．令和４年度火薬類保安技術実験のテーマ検討

資料-６に基づいて事務局より簡潔に説明がなされた。以下のような質疑があった。

・テーマ候補１は経産省火薬班からの提案であり、実施する。候補 2～7 はこれまでに提案されたテーマで、関係先（煙火協会、火薬工業会等）に事前にテーマを伺っていなかったので、何かあれば本委員会で提案してほしい。（事務局）

・経産省の予算上、テーマを決める時期にある。候補１は行う。片側垂直土堤を法令に盛り込むよう続けていきたい。（経産省）

テーマ案については本委員会で議論することとする。

8．その他

第 3 回本委員会は 1 月 31 日に開催する。

以上

3.A.1.4　令和 3 年度　爆発影響低減化技術基準検討委員会（第 3 回本委員会） 議事録

爆発影響低減化技術基準検討委員会（第 3 回本委員会） 議事録

日　時：令和 4 年 1 月 31 日（月）13:30～15：00
場　所：全火協会議室
出席者：対面参加 6 名、リモート参加（＊印）22 名、書面参加（＊＊印）5 名（敬称略、順不同）
委　員：小川輝繁、新井 充、三宅淳巳**、水書稔治*、大野友則**、海沼敏恭**、吐合育輝**、
浦川克也、若林邦彦*、久保田士郎*、須山恭三、後藤浩司*、畑中修二*、福田光寿*、
山田隆宏**、多田達士*、山本和彦*、藤原和彦*、奥永一郎*
オブザーバ（経済産業省）：宮地佳子*、松下一徳*、川邊真理*、有川　舞*
（産総研）　：杉山勇太*、佐分利 偵*、高橋良尭*
事務局（全火協）：川﨑勝樹、遠藤秀雄*、飯田光明*、中塚漢二*、山口潤仁*、柳田一也、
廣崎義一*

【配付資料】
資料-1　令和 3 年度火薬類保安技術実験結果報告
資料-2　室内実験の結果
資料-3　野外実験で実証した新規防爆壁を追加する規則・告示改正案
資料-4　シミュレーションを活用した地中式一級火薬庫の保安距離策定に必要なデータの取得
資料-5　地中式火薬庫の保安距離改正案
資料-6　令和 4 年度爆発影響低減化技術基準検討テーマ候補
資料-7　実験関連事項（事業報告書用添付資料　案）

1．開会
配布資料の確認後、事務局（川﨑専務理事）より当委員会の開会がなされたのち、小川委員長により以後の議事進行がなされた。

2．令和 3 年度火薬類保安技術実験結果概要報告
資料-1 について、第 1 回小委員会の検討を踏まえた変更された点を中心に、産総研から説明がなされた。質疑はとくになかった。

3．令和 3 年度産総研室内実験結果概要報告
資料-2 について、第 1 回小委員会の検討を踏まえた変更された点を中心に、産総研から説明がなされた。質疑はとくになかった。

4．新型防爆壁の技術基準案の検討
資料-3 に基づいて事務局より説明がなされた。
資料 3 ページにある「第 3 種保安物件の K 値 5.89」は資料-1 の産総研からの報告で K 値 5.70 に修正できるとのことなので、そのように修正する旨の補足説明があった。以下のような質疑があった。
・実験で求めた K 値に対し、煙火火薬庫の大きさを考慮することによって、保安距離の法律案がそれよりも上になったり、下になったりするのは、感覚としては分かるが、もともとこのような考え方であったのか。（委員）→　一級火薬庫の場合も、火薬庫の大きさを考慮して、5m 単位または 10m 単位で丸めてある。（事務局）
・①第 3 種、第 4 種保安物件に対する改正案は出てきたが、第 1 種、第 2 種保安物件に対する保安距離は無視できるのか。また、②これらの案の利用に対して、煙火協会はどのように考えて

いるのか。（経産省）→　①については、実験の際に他の箇所への影響があったのかどうかが問題になる。壁が近い場合は、反射波の影響によって遠方で圧力が大きいという影響があった。壁が遠い場合は無視できると考えている。②については、煙火協会に事前に確認したところ、「選択肢が増えることはいいこと、歓迎する。」旨の意見があった。（事務局）→　0 度方向の懸念は一掃されていると考えてよいのか。産総研の反応を聞きたい。②について選択肢が増えることはよいことというのは了解した。（経産省）→　3 年間の成果として、コの字型の壁が爆点に近すぎると 180 度方向で爆風圧が増加することはあったが、距離をとれば 45 度方向も 180 度方向も問題ないことが確認された。事務局の案が適切と考える。（産総研）→　爆点遠方は考慮しないことで OK としたい。（委員長）

・先日の小委員会において、ウレタンフォームの密度について「18kg/m^3 以上 56kg/m^3 未満」とされていたが、実験では 55kg/m^3 のウレタンフォームが用いられていた。他の法令で「○○以上○○以下」という表現があったので、「55kg/m^{3}以下」が適切であるのであれば、それでもかまわない。（経産省）→　「18kg/m^3 以上 55kg/m^3 以下」に変えたい。（事務局）

委員長から、「委員会として、新規防爆壁を追加する規則・告示改正案を認めていただいた。」とのまとめがなされた。

5．地中式火薬庫の爆風シミュレーション結果報告

資料-4 に基づいて産総研より説明がなされ、とくに質疑はなかった。

6．地中式火薬庫の保安距離改正案の検討

資料-5 に基づいて事務局より説明がなされ、以下のような質疑があった。

・入口から距離を置いて円を描くことにより、保安距離を算出することは分かった。現在の保安距離に比べて影響があるのか。（委員）→　これまでの保安距離は、火薬庫の壁からとっていたので、前方にはかなり延びる。半径が小さくなれば、前方に延びる距離も小さくなる。（事務局）

・保安距離全体としては、火薬庫背面は短くなり、前面は延びるものの影響は大きくないということか。（委員長）→　そう考える。前方は厳しいものの、後方や横方向はかなり緩和される。（事務局）

委員長より、「委員会として、事務局案を承認し、案とする。」とのまとめがなされた。

7．令和 4 年度火薬類保安技術実験のテーマ検討

資料-6 に基づいて事務局より、「テーマ 1．片側垂直土堤」を来年度のテーマとしたい。余裕があればどれかひとつ加えることも可能かもしれないが、今年は余裕がなさそう、との説明がなされた。以下のような質疑があった。

・「片側垂直土堤」は、ニーズが高いことは承知している。技術基準の改正につなげたい。そのためにはデータの追加が必要で、協力をお願いしたい。（経産省）

・少しでも盛り込んでほしいテーマがあれば、この場で申し出てほしい。そうでなければ、テーマ 1 で進めたい。（事務局）→　他のテーマで要望はあるか。（委員長）

・本日午前に、陸幕から「テーマ 5．火工品の殉爆安全性」に興味を持っている旨の電話があった。（事務局）→　経産省は、これについてどのように判断するのか。（委員長）

・爆発実験に関しては、防衛省から支援いただいているので、その意向を酌んで進めていきたいが、実際の運用との関係も考えなければならない。殉爆安全性は、火薬庫の設計ではなく火薬庫内での火工品の置き方の問題だと思う。施設・設備の基準に落とし込みにくい。（経産省）

委員長から、「考え方を整理していただくこととして、テーマ 5 は今年はとりあえずペンディングとし、片側垂直土堤の実験を進めることにしたい。」とのまとめがなされた。

その他、次のような情報交換がなされた。

・陸幕からの情報によると、経産省の爆発実験を陸上自衛隊が支援できるのは、11 月 16 日～12 月 2 日のみとのこと。例年よりも 1 ヶ月ほど後ろ倒しとなる見込み。フルの計画は難しいかと思われる。（事務局）→　気候的にも厳しい時期の実験になる。（委員長）

・気候の関係で厳しいのはわかったが、土堤の材料の検討に支障はないか。（経産省）→　夜中に気温が氷点下に下がる場合は、前日に準備して翌朝に実験は難しいかもしれない。凍結するおそれがある。（事務局）→　トラブルを念頭において計画を立てる。基本的にできないことはない。以上を前提に計画を立ててほしい。（委員長）

8．書面参加の委員からの質問とその回答

大野委員から事前に提出された質問とその回答が、次のように紹介された。

・新規防爆壁の規則改正案で 23 条 7 項とあるが、元の 7 項はどうなるのか →　第 8 項に順送りする案である（事務局）

・同案で、ウレタンフォームの紫外線劣化についても注意が必要。→　雨水除けのカバーを規定しており、これが紫外線防護にも効果があるものと考える。（事務局）

・同案で、ウレタンフォームは成型品使用と流し込み成型では大きな違いがあるのでは？ →　調査した範囲では、どちらも今回決めた密度範囲に入るので問題ないと考えている。（事務局）

・地中式火薬庫の保安距離案で、表は「火薬庫」、「トンネル」の用語が使われているが、それぞれ「薬室」、「前室」に統一すべきでは？ →　規則では「薬室」、「前室」は使用されていないため、規則中の用語を使って表の案を示している。（事務局）

・同案で、基準点を Cs としているが、計算してみると、中心計算のときと半径計算のときでは Cs の値が異なる。どういうことか？ →　ご指摘のとおり。報告書では、中心、半径計算のときの Cs の表記を異なるものにする。（事務局）

9．その他

最終報告書の提出スケジュールについて、資料-7 に基づき事務局から説明がなされた。

・2 月中旬までに報告書を作成

・2 月 28 日に経産省に成果物（DVD）を提出

・2 月 21 日に産総研に対する確定検査を予定していたが、新型コロナウイルス感染症の拡大に伴い、書面審査に切り替え予定

委員長から、「報告書の内容については承認いただいた。報告書の体裁を整える作業については事務局に一任することで了解願いたい。」とのまとめがなされた。

経産省宮地専門職から、「爆発実験に関して、煙火防爆壁実験を 3 年間行ってきた。指導団の先生方、産総研、防衛省に多大な協力をいただいた。次年度は片側垂直土堤の実験に取り組みたい。」との挨拶がなされた。

以上をもって、委員会を終了した。

以上

4.A.1 （付録２）実験関連事項

4.A.1.1 実験宿舎

「ホテル　マルエー温泉」

住所 : 〒086-1121　北海道標津郡中標津町西１条北３丁目３番地

電話 : 0153-73-3815　FAX:0153-72-5088

4.A.1.2 実験要員の輸送

宿舎と実験場所間の実験要員の輸送は、全火協調達の大型バス及びレンタカーを使用した。

4.A.1.3 実験資材等の調達

構造の異なる防爆壁の設計は産総研、使用した資材は、主に全火協が調達した。

主な資材調達および実験支援等の契約相手方を次に示す。

島影建設株式会社	模擬防爆壁（合板、樹脂網、ウレタン）の加工・設置・組立、放送設備等のレンタルと設置および撤去、警戒・総務要員の派遣、カメラボックス、装薬台、掲示板等の製作・設置・撤去、各種機材のレンタルと盛土材、土嚢袋等消耗品の調達
共成レンテム株式会社	プレハブ、トイレのレンタルと設置および撤去
中国化薬株式会社	電気雷管（EBW RP-501）
カヤク・ジャパン株式会社	含水爆薬（アルテックス）、導爆線
ダイナテック株式会社	試験試料(含水爆薬、導爆線、雷管等火薬類の一時貯蔵、運搬および火工所、火薬類取扱所のレンタルおよび設置
株式会社レントシーバー	通信機器のレンタル（GDR3500 セット）
株式会社共和電業	風向風速計のレンタル
千代田測器株式会社	測量計（トータルステーション等）のレンタル
有限会社アルファ商事	各種燃料（重機、発電機、暖房及び車両燃料等）
株式会社旭観光バス	貸し切り送迎用バス
株式会社日産カーレンタルソリューション	移動用車両（ワゴン車）のレンタル

4.A.1.4 火薬類

実験に使用した火薬類は、次により調達、貯蔵及び運搬を行った。

(1) 電気雷管

電気雷管は中国化薬(株)より調達し、中国化薬（株）吉井工場（群馬県）よりダイナテック(株)釧路支店の火薬庫に一時貯蔵され、実験当日に使用する量がダイナテック(株)により実験場に搬入された。

(2) 含水爆薬、導爆線

含水爆薬（アルテックス）、導爆線は、カヤク・ジャパン(株)砂川工場から調達し、ダイナテック(株)釧路支店の火薬庫に一時貯蔵され、実験当日使用する量がダイナテック(株)により実験場に搬入された。

4.A.1.5　協　力

(1) 陸上自衛隊北部方面総監督部

陸上自衛隊北部方面総監部と北海道経済産業局との間で締結された「令和３年度経済産業省火薬類保安技術実験の協力に関する現地協定」に基づき、人員・機材の輸送、給電・給水、警戒及び消防、実験本部等の設営、実験環境の整備、実験装置の設営等の協力に対して支援部隊が編成され、積極的な支援が得られた。

(2) 地元官公庁等

地元役場等による住民への広報、各町のホームページ掲載等の協力が得られた。

(3) 火薬関係団体及び企業

火薬関係団体及び火薬類製造業社等の積極的な協力、また、地元企業等の協力が得られ、実験に必要な供試火薬類、試験体、プレハブ関係、放送設備、各種機材、重機、用役等の手配等、多方面にわたって協力が得られた。

4.A.1.6　実験打ち合せ会議等

保安技術実験に際し、火薬類爆発影響低減化委員会等を開催し、データ収集のための実験を安全かつ円滑に遂行するため、詳細検討を行った。また、9 月 1 日から 9 月 3 日にかけて、陸上自衛隊北部方面総監部をはじめ地元関係自治体等に保安技術実験実施に係る挨拶・事前説明を行った。

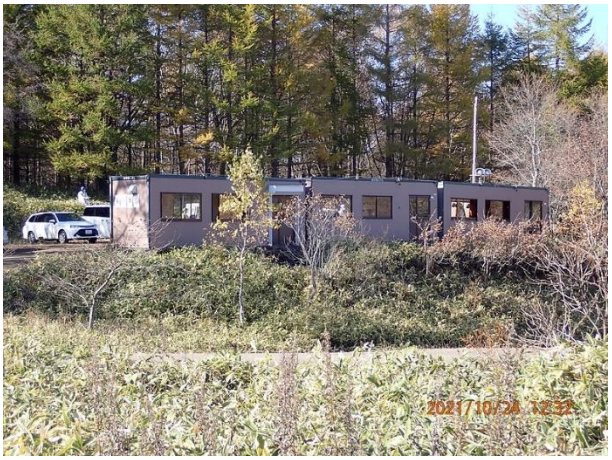
また、実験時の作業内容の調整のため、8 月 3 日に北部方面総監部 装備部装備課を通して別海駐屯地業務隊管理科を訪問し、担当者に支援内容の説明・調整等を行った。

4.A.1.7　実験参加者数

10 月 18 日～26 日の実験参加者は、延べ約 300 名（支援部隊、準備期間中の地元業者は除く。）であった。

4.A.2　（付録３）野外実験記録写真

実験場



本部

観測所

観測所１

観測所２

火取所

火工所

点火装置

放送設備

風向風速計

温湿度計・風向風速指示器

爆風計測架台

爆風センサー受圧面

爆風計測ボックス

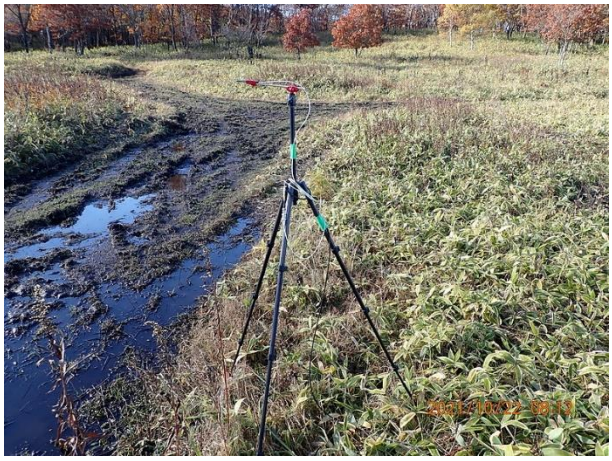
計測ボックス内の爆風計測機器

カメラボックス１（0 度方向）外観とボックス内の高速度カメラ

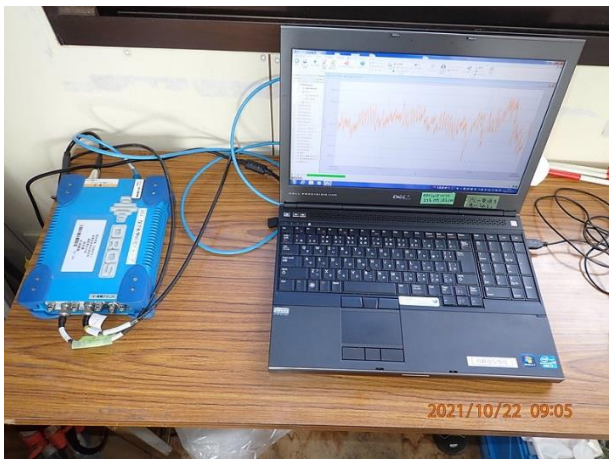
カメラボックス２（90 度方向）外観とボックス内の高速度カメラ

観測所１の屋上（270 度方向）に設置した高速度カメラ

地盤振動計とアンプボックス



騒音計測マイクロフォン



騒音計測の計測機器

No.1-1　試験体設置状況（１）

No.1-1　試験体設置状況（２）

模擬防爆壁内の砂の計量

砂を入れる前の重さ　21.40 kg
砂を入れた後の重さ　137.68 kg
よって、砂の重さは 116.28 kg
ちなみに合板（9t×910×1820）1 枚の重さは 8 kg であった

電気雷管(RP−501)2本 2021.10.21 1-1
2021/10/21 09:35

雷管(RP−501)2本 2021.10.21 1-1
2021/10/21 09:43

電気雷管(RP−501)2本 2021.10.21 1-1
2021/10/21 09:45

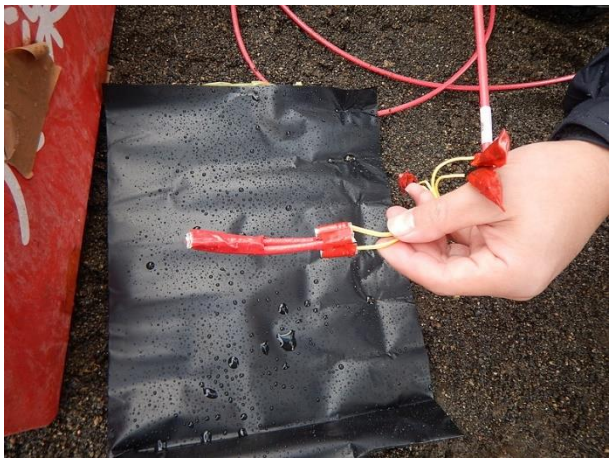
2021/10/21 09:46

2021/10/21 09:50

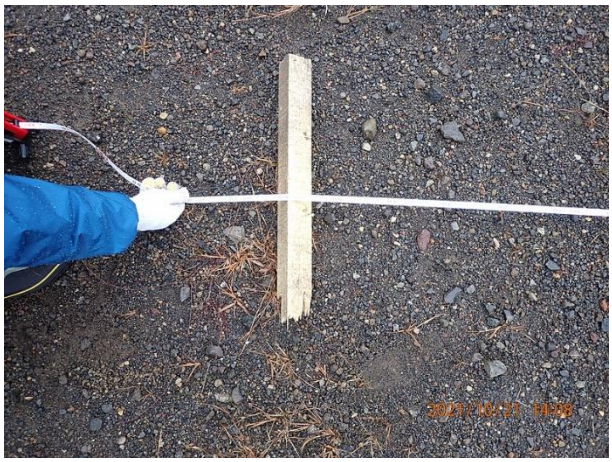
2021/10/21 09:52

No.1-1　装薬・爆装状況

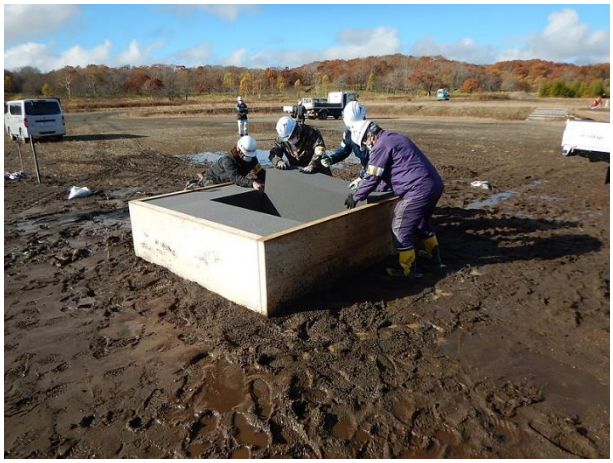
No.1-1　点火後の様子



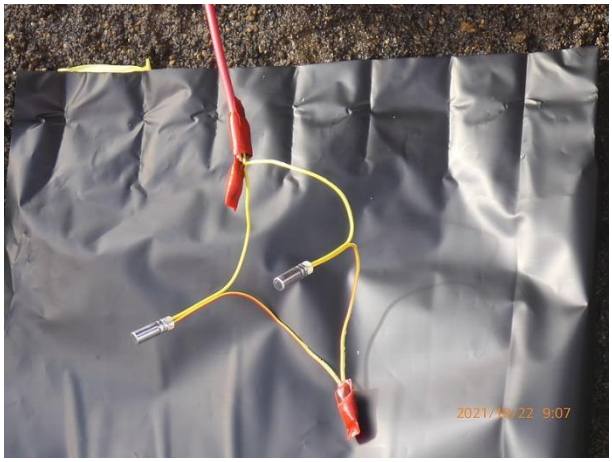
No.1-2　点火前の様子

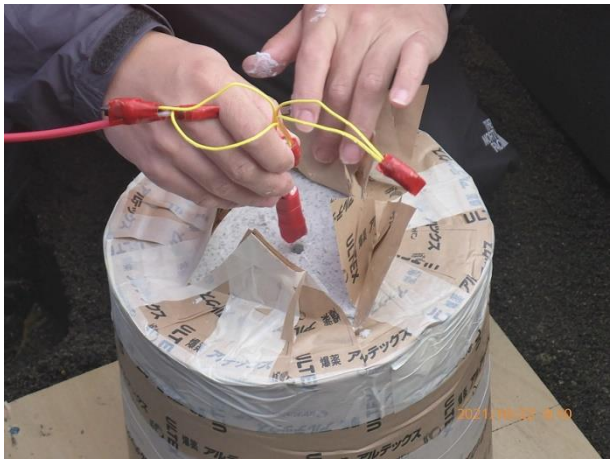


No.1-2　点火後の様子



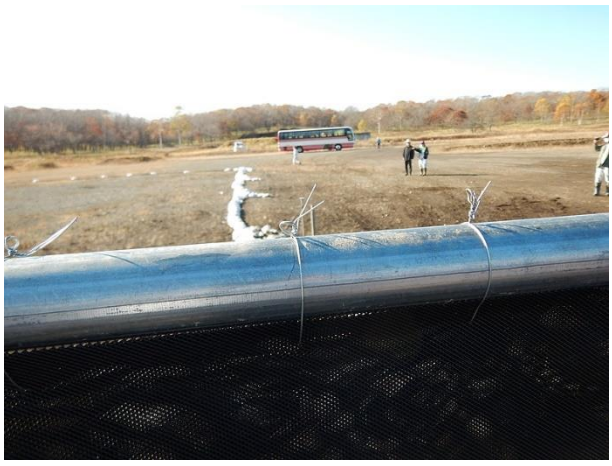
No.1-3　試験体設置状況





No.1-3　点火前の様子

No.1-3　点火後の様子



No.1-4　試験体設置状況

2021/10/24 9:12

2021/10/24 09:19

2021/10/24 09:23

2021/10/24 09:21

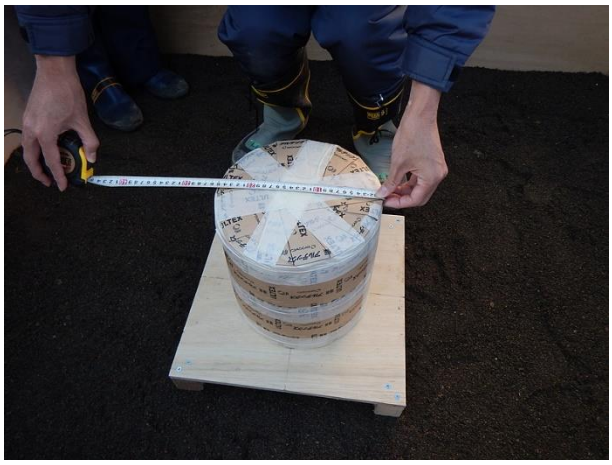
2021/10/24 9:23

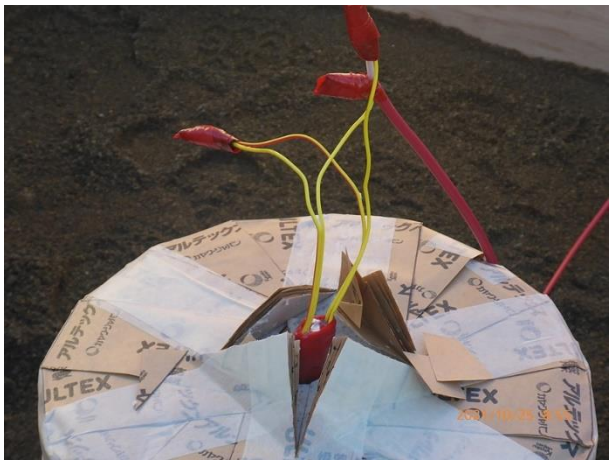
2021/10/24 09:24

No.1-4　点火前の様子

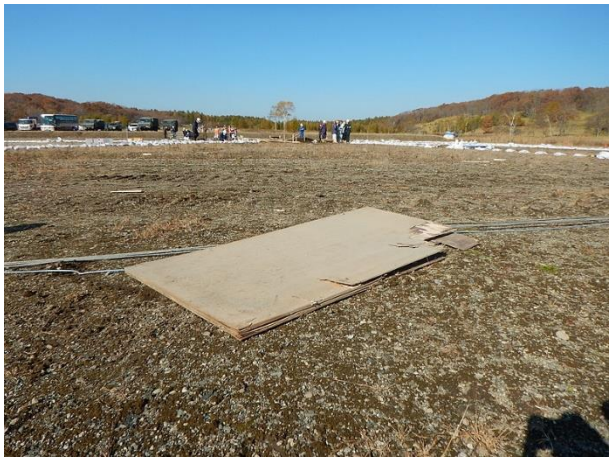
No.1-4　点火後の様子

No.1-5　試験体設置状況

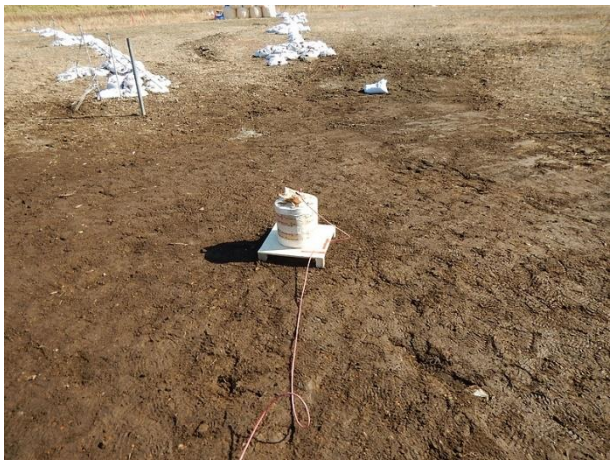




No.1-5　点火前の様子



No.1-5　点火後の様子



No.2-1　点火前の様子

No.2-1　点火後の様子

2021/10/22 10:36

2021/10/22 10:48

2021/10/22 10:54

2021/10/22 11:09

2021/10/22 12:37

2021/10/22 13:16

No.2-2　点火前の様子

No.2-2　点火後の様子

4.A.3　（付録４）高速度カメラ撮影画像

【資料集】

令和 3 年度　矢臼別野外実験

高速度カメラ撮影画像

実験 1-1　煙火防爆壁（高密度ウレタン 1 面）　MEMRECAM fx-K4（CB1）　10/21 実施

点火前（フレーム#-1）

点火後 2 ms（フレーム#2）

点火後 5 ms（フレーム#5）

点火後 10 ms（フレーム#10）

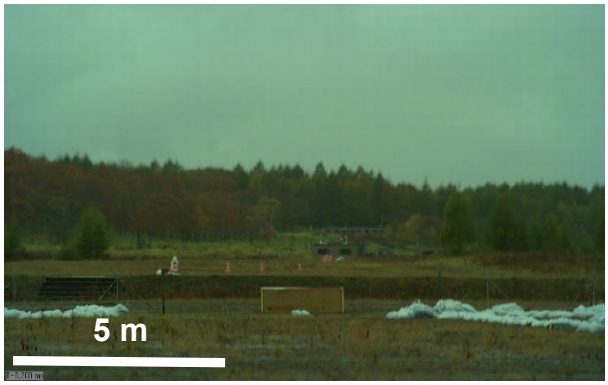
点火後 30 ms（フレーム#30）

点火後 100 ms（フレーム#100）

点火後 300 ms（フレーム#300）

点火後 1000 ms（フレーム#1000）

実験 1-1　煙火防爆壁（高密度ウレタン 1 面）　Phantom V1210（CB2）　10/21 実施



点火前（フレーム#-1）

点火後 2 ms（フレーム#10）

点火後 5 ms（フレーム#25）

点火後 10 ms（フレーム#50）

点火後 15 ms（フレーム#75）

点火後 20 ms（フレーム#100）

点火後 30 ms（フレーム#150）

点火後 100 ms（フレーム#500）

実験 1-1　煙火防爆壁（高密度ウレタン 1 面）　Phantom V640（観測所 1）　10/21 実施

点火前（フレーム#-1）

点火後 2 ms（フレーム#1）

点火後 5 ms（フレーム#4）

点火後 10 ms（フレーム#9）

点火後 30 ms（フレーム#29）

点火後 100 ms（フレーム#99）

点火後 300 ms（フレーム#299）

点火後 1000 ms（フレーム#999）

実験 1-2　煙火防爆壁（高密度ウレタン 2 面）　MEMRECAM fx-K4（CB1）　10/21 実施

点火前（フレーム#-1）

点火後 2 ms（フレーム#2）

点火後 5 ms（フレーム#5）

点火後 10 ms（フレーム#10）

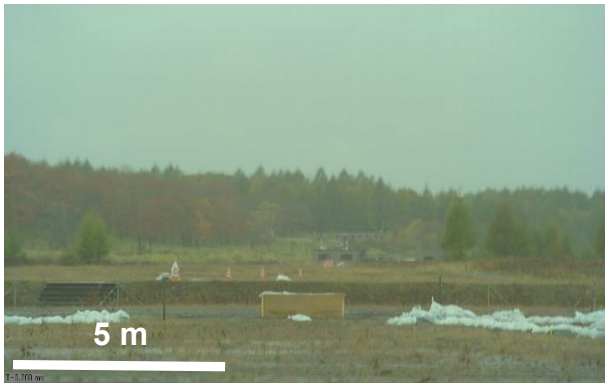
点火後 30 ms（フレーム#30）

点火後 100 ms（フレーム#100）

点火後 300 ms（フレーム#300）

点火後 1000 ms（フレーム#1000）

実験 1-2　煙火防爆壁（高密度ウレタン 2 面）　Phantom V1210（CB2）　10/21 実施



点火前（フレーム#-1）

点火後 2 ms（フレーム#10）

点火後 5 ms（フレーム#25）

点火後 10 ms（フレーム#50）

点火後 15 ms（フレーム#75）

点火後 20 ms（フレーム#100）

点火後 30 ms（フレーム#150）

点火後 100 ms（フレーム#500）

実験 1-2　煙火防爆壁（高密度ウレタン 2 面）　Phantom V640（観測所 1）　10/21 実施

点火前（フレーム#-1）

点火後 2 ms（フレーム#2）

点火後 5 ms（フレーム#5）

点火後 10 ms（フレーム#10）

点火後 30 ms（フレーム#30）

点火後 100 ms（フレーム#100）

点火後 300 ms（フレーム#300）

点火後 1000 ms（フレーム#1000）

実験 1-3　煙火防爆壁（高密度ウレタン 3 面）　MEMRECAM fx-K4（CB1）　10/22 実施

点火前（フレーム#-1）

点火後 2 ms（フレーム#2）

点火後 5 ms（フレーム#5）

点火後 10 ms（フレーム#10）

点火後 30 ms（フレーム#30）

点火後 100 ms（フレーム#100）

点火後 300 ms（フレーム#300）

点火後 1000 ms（フレーム#1000）

実験 1-3　煙火防爆壁（高密度ウレタン 3 面）　Phantom V1210（CB2）　10/22 実施

点火前（フレーム#-1）

点火後 2 ms（フレーム#10）

点火後 5 ms（フレーム#25）

点火後 10 ms（フレーム#50）

点火後 15 ms（フレーム#75）

点火後 20 ms（フレーム#100）

点火後 30 ms（フレーム#150）

点火後 100 ms（フレーム#500）

実験 1-3　煙火防爆壁（高密度ウレタン 3 面）　Phantom V640（観測所 1）　10/22 実施

点火前（フレーム#-1）

点火後 2 ms（フレーム#2）

点火後 5 ms（フレーム#5）

点火後 10 ms（フレーム#10）

点火後 30 ms（フレーム#30）

点火後 100 ms（フレーム#100）

点火後 300 ms（フレーム#300）

点火後 1000 ms（フレーム#1000）

実験 1-4　煙火防爆壁（樹脂メッシュ）　MEMRECAM fx-K4（CB1）　10/24 実施

点火前（フレーム#-1）

点火後 2 ms（フレーム#2）

点火後 5 ms（フレーム#5）

点火後 10 ms（フレーム#10）

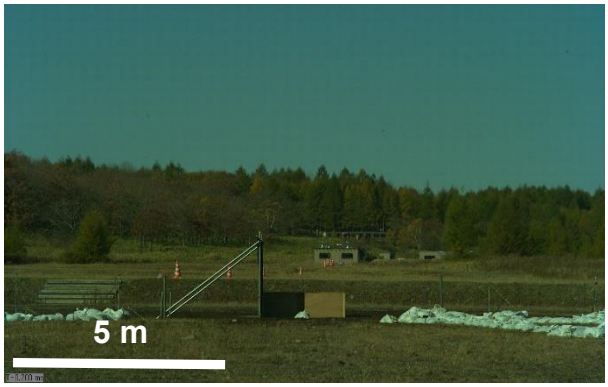
点火後 30 ms（フレーム#30）

点火後 100 ms（フレーム#100）

点火後 300 ms（フレーム#300）

点火後 1000 ms（フレーム#1000）

実験 1-4　煙火防爆壁（樹脂メッシュ）　Phantom V1210（CB2）　10/24 実施



点火前（フレーム#-1）

点火後 2 ms（フレーム#10）

点火後 5 ms（フレーム#25）

点火後 10 ms（フレーム#50）

点火後 15 ms（フレーム#75）

点火後 20 ms（フレーム#100）

点火後 30 ms（フレーム#150）

点火後 100 ms（フレーム#500）

実験 1-4　煙火防爆壁（樹脂メッシュ）　Phantom V640（観測所 1）　10/24 実施

点火前（フレーム#-1）

点火後 2 ms（フレーム#1）

点火後 5 ms（フレーム#4）

点火後 10 ms（フレーム#9）

点火後 30 ms（フレーム#29）

点火後 100 ms（フレーム#99）

点火後 300 ms（フレーム#299）

点火後 1000 ms（フレーム#999）

実験 1-5　煙火防爆壁（コの字型合板）　MEMRECAM fx-K4（CB1）　10/25 実施

点火前（フレーム#-1）

点火後 2 ms（フレーム#2）

点火後 5 ms（フレーム#5）

点火後 10 ms（フレーム#10）

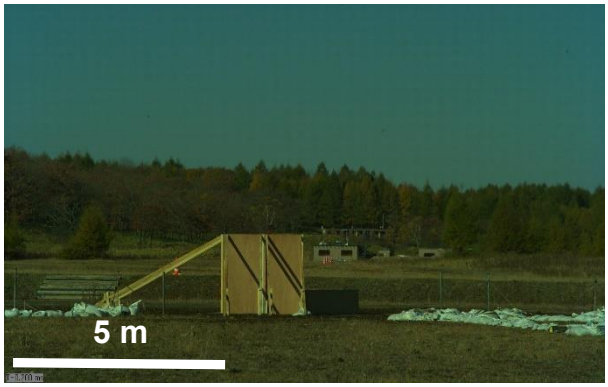
点火後 30 ms（フレーム#30）

点火後 100 ms（フレーム#100）

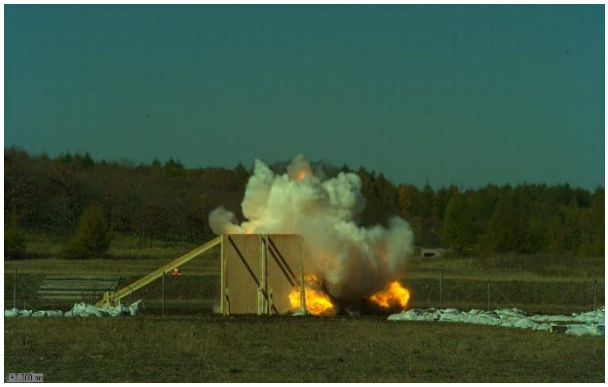
点火後 300 ms（フレーム#300）

点火後 1000 ms（フレーム#1000）

実験 1-5　煙火防爆壁（コの字型合板）　Phantom V1210（CB2）　10/25 実施



点火前（フレーム#-1）


点火後 2 ms（フレーム#10）

点火後 5 ms（フレーム#25）

点火後 10 ms（フレーム#50）

点火後 15 ms（フレーム#75）

点火後 20 ms（フレーム#100）

点火後 30 ms（フレーム#150）

点火後 100 ms（フレーム#500）

実験 1-5　煙火防爆壁（コの字型合板）　Phantom V640（観測所 1）　10/25 実施

点火前（フレーム#-1）

点火後 2 ms（フレーム#2）

点火後 5 ms（フレーム#5）

点火後 10 ms（フレーム#10）

点火後 30 ms（フレーム#30）

点火後 100 ms（フレーム#100）

点火後 300 ms（フレーム#300）

点火後 1000 ms（フレーム#1000）

実験 2-1　基準爆風圧（壁なし）　MEMRECAM fx-K4（CB1）　　10/24 実施

点火前（フレーム#-1）

点火後 2 ms（フレーム#2）

点火後 5 ms（フレーム#5）

点火後 10 ms（フレーム#10）

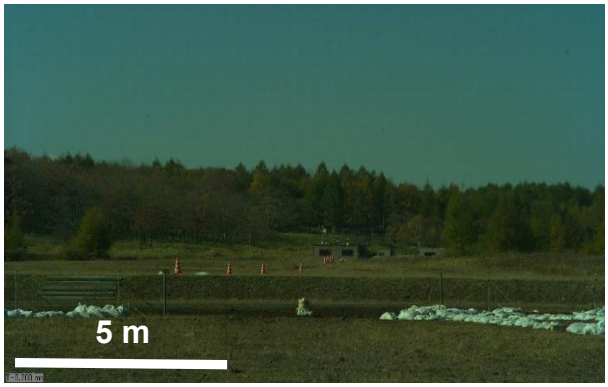
点火後 30 ms（フレーム#30）

点火後 100 ms（フレーム#100）

点火後 300 ms（フレーム#300）

点火後 1000 ms（フレーム#1000）

実験 2-1　基準爆風圧（壁なし）　Phantom V1210（CB2）　　10/24 実施



点火前（フレーム#-1）

点火後 2 ms（フレーム#10）

点火後 5 ms（フレーム#25）

点火後 10 ms（フレーム#50）

点火後 15 ms（フレーム#75）

点火後 20 ms（フレーム#100）

点火後 30 ms（フレーム#150）

点火後 100 ms（フレーム#500）

実験 2-1　基準爆風圧（壁なし）　Phantom V640（観測所 1）　10/24 実施

点火前（フレーム#-1）

点火後 2 ms（フレーム#1）

点火後 5 ms（フレーム#4）

点火後 10 ms（フレーム#9）

点火後 30 ms（フレーム#29）

点火後 100 ms（フレーム#99）

点火後 300 ms（フレーム#299）

点火後 1000 ms（フレーム#999）

実験 2-2　基準爆風圧（壁あり）　MEMRECAM fx-K4（CB1）　10/22 実施

点火前（フレーム#-1）

点火後 2 ms（フレーム#2）

点火後 5 ms（フレーム#5）

点火後 10 ms（フレーム#10）

点火後 30 ms（フレーム#30）

点火後 100 ms（フレーム#100）

点火後 300 ms（フレーム#300）

点火後 1000 ms（フレーム#1000）

実験 2-2　基準爆風圧（壁あり）　Phantom V1210（CB2）　10/22 実施

点火前（フレーム#-1）

点火後 2 ms（フレーム#10）

点火後 5 ms（フレーム#25）

点火後 10 ms（フレーム#50）

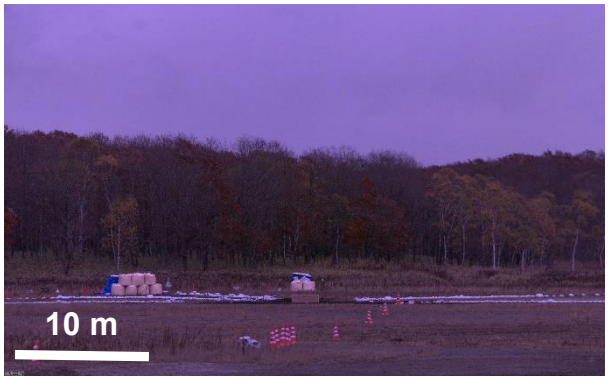
点火後 15 ms（フレーム#75）

点火後 20 ms（フレーム#100）

点火後 30 ms（フレーム#150）

点火後 100 ms（フレーム#500）

実験 2-2　基準爆風圧（壁あり）　Phantom V640（観測所 1）　10/22 実施



点火前（フレーム#-1）

点火後 2 ms（フレーム#1）

点火後 5 ms（フレーム#4）

点火後 10 ms（フレーム#9）

点火後 30 ms（フレーム#29）

点火後 100 ms（フレーム#99）

点火後 300 ms（フレーム#299）

点火後 1000 ms（フレーム#999）

4.A.4 （付録５）使用器材一覧

実験で使用した機器の一覧を表 4.A.4-1 から表 4.A.4-5 に示す。

表 4.A.4-1　使用機器類（観測所）

機器名称	メーカー	型番	仕様
発破器	TELEDYNE RISI	FS-43	使用電力(W)：100 充電電圧(V)：4000
パルス発生器	Berkeley Nucleonics	BNC575	Delay:0 to 99.999999999 seconds with 1 ns resolution Width:10 ns to 99.999999999 seconds with 1 ns resolution Accuracy:1 ns+0.0001xtime Timebase:10 MHS,25 ppm crystal oscillator RMS Jitter:1 ns Trig Delay:Ext.Trig to 0<250 ns
デジタルオシロスコープ	横河電機	DL750	形式:プラグインモジュール スロット数:8 ロジック入力:16（8bit*2） 最大レコード長 2.5 MW/Ch トータル 50 M Word 最高サンプルレート:10 MS/s
ウェザーステーション（温湿度、気圧計)	Technoline	WS9032	Indoor and outdoor temperature Pressure display Dew point Humidity:1% to 99% (resolution 1%)
風向風速計	大田計器	30-T	測定範囲 風速：0.4m/s ～ 70m/s 風向： 0～ 540° Shift 24 分割-16 方位 精度 風速：6m/s 以下のとき±0.3m/s、6m/s 超過のとき±5% （気象庁規格）

表 4.A.4-2　使用機器類（爆風計測）

機器名称	メーカー	型番	仕様
ピエゾ圧力素子	PCB	113B28	≦500kHz,100mV/psi
		102M256	≦250kHz,200mV/psi
ラインドライバー	H-TECH	Triple mode 30222	利得×0.5,×1,×2, ×5,×10
アンプレシーバー	H-TECH	mode 30310	Wide band low noise ultra-high isolation instrumentation receiver
波形記憶装置	Tasler	LTT184/8	方式：AD 変換によるデジタルデータ記憶 サンプリング間隔：最高 500 ns 以上 垂直分解能：16 bit チャンネル数：8 Ch(同時サンプリング) メモリ：128 MB 以上

表 4.A.4-3　使用機器類（高速度カメラ撮影）

機器名称	メーカー	型番	仕様（撮影時の設定）
高速度カメラ	ナックイメージテクノロジー社	MEMRECAM fx-K4	画素数：1280（横）×1024（縦）画素、撮影速度：1000 コマ/秒（フルフレーム撮影時）
高速度カメラ	Vision Research 社	Phantom v1210	画素数：1280（横）×800（縦）画素、撮影速度：12600 コマ/秒（フルフレーム撮影時）
高速度カメラ	Vision Research 社	Phantom v640	画素数：2560（横）×1600（縦）画素、撮影速度：1400 コマ/秒（フルフレーム撮影時）

表 4.A.4-4　使用機器類（地盤振動測定関係）

機器名	製造元	型番	仕様
圧電型加速度ピックアップ	TEAC	612ZS	感度（pC/m/s^2） 約 0.035±20% 横感度（max） 5% 静電容量 580pF±20%（ケーブル 3m 付） 補償温度範囲 -50℃～160℃ 周波数応答（±3dB） fc～20,000Hz 共振周波数 約 60kHz 使用最大加速度（m/s^2） ±100,000 耐衝撃性（peak）（m/s^2） 100,000
	TEAC	707Z	感度（mV/m/s^2） 約 10±10% 横感度（max） 5% 基底ノイズ(max) 20uVrms 補償温度範囲 -20℃～100℃ 周波数応答（±3dB） 3～5,000Hz 共振周波数 約 10kHz 使用最大加速度（m/s^2） ±150 耐衝撃性（peak）（m/s^2） 10,000
チャージアンプ	TEAC	SA-611	圧電型加速度トランスデューサ 入力(max) 10000pC（電荷入力）/ ±10V(電圧入力) 定電流 0.5 mA, 4mA, 24DVC 感度設定範囲 0.03-999(pC/m/s^2 or mV/m/s^2) 定格出力 1V±1.5% 周波数特性 0.2-30k Hz (H.M) 0.2-10k Hz(L)
	RION	UV-15	振動計ユニット入力(max) 100000pC（電荷入力）/ ±24V(電圧入力)感度設定範囲 0.1-99.9 (pC/m/s^2 or mV/m/s^2) 定格出力 1V±2% 周波数特性 1-15k Hz (ACC,±5%) 3-3k Hz(VEL,±5%)
データロガー	HIOKI	8861-50	メモリハイコーダ(高分解能ユニット 8957 使用時) 最高サンプリング速度 2MS/s 分解能 16bit 測定レンジ 5m-12 V/DIV 確度 DC±0.2% f.s. 周波数特性 DC-200kHz

表 4.A.4-5　使用機器類

名称	メーカー	台数	仕様、性能
NL-31	リオン（株）	2	A 特性（28～130dB） 、C 特性（33～130dB）、平坦特性（38～130dB）、演算（Lp ,Leq、Le、Lmax、Lmin、L_N）
377C10	PCB PIEZOTRONICS 社	3	Mic.Diameter 1/4inch, Sensitivity 1.0mV/Pa, Frequency <3Hz～60kHz, Dynamic range 28～165dB
BK 2250 Hand held analyzer	BK 社	2	ダイナミックレンジ：120dB 、最大：140dB、Z(平坦)特性(3～20kHz)、演算（L_{Aeq}、L_{Ceq}、L_{CE}、L_{AE}、L_{Zpeak}、L_{AFmax}、L_{ASmax}、L_{CFmax}、L_{CSmax} など 30 以上）
PC FFT アナライザ FP4/OR24J	OROS 社	2	入力チャンネル数：4, 入力電圧レンジ 1ｍV～31.6V、ダイナミックレンジ：90dB 、分析周波数レンジ：1～４０ｋHz、分析機能：ｸﾛｽｽﾍﾟｸﾄﾗﾑ、伝達関数、位相差、コヒーレンス関数、ボード、ベクトル表示、三次元分析

4.A.5 （付録６）野外実験関連検収資料

１．爆発影響低減実験に用いた火薬類の検査成績書
２．ウレタンフォームの品質証明書

2021年9月22日
カヤク・ジャパン株式会社
生産本部 砂川工場
環境安全品質管理課

検査成績書

製品名	含水爆薬（アルテックス） 254φ
Lot No.	KS1-1,KS1-2,KS1-3,KS1-4,KS1-5,KS2-1,KS2-2
製造年月日	2021年 9月22日
検査年月日	2021年 9月22日

検査項目	規格値	単位	測定結果						
			実験No.1-1	実験No.1-2	実験No.1-3	実験No.1-4	実験No.1-5	実験No.2-1	実験No.2-2
比重	1,150 ～ 1,230	kg/m3	1,190						
低温起爆感度	-15℃ 6号雷管完爆	－	完爆						
薬量	15.34 ～ 15.64 (15.49±1%)	kg	15.49	15.49	15.49	15.49	15.49	15.49	15.49
爆薬径	254 （目標値）	mmφ	254	254	254	254	254	255	254
			254	254	254	254	254	254	254
爆薬長さ(高さ)	254 （参考値）	mm	262	261	261	264	263	259	261

判定結果	品質管理担当者	検査員
合格	木田	中川

発行No.21-022

2021年 10月 1日

カヤク・ジャパン㈱厚狭工場

環境安全・品質管理課 品質管理担当

上 '21.10.01 田

試験成績書

製品名	50G導爆線
LotNo.	21151
製造年月日	2021年8月31日
検査年月日	2021年6月18日 （長さ測定日 2021年8月31日）

《検査結果》

検査項目	単位	規格値	測定値		
外 観	−	異常のないこと	異常なし		
線 径	mm	5.01～5.49	① 5.25	5.20	5.35
			5.28	5.23	5.27
			② 5.28	5.31	5.25
			5.31	5.29	5.26
爆 速	m/s	6,000以上	6,546		
薬 量	g/m	9.5～11.5	10.24		
塗布量 （被覆量）	g/m	5.2～5.8	5.79		
耐水度 （29.4kPa×3hrs） 起爆性	−	起爆	○		
耐水度 （29.4kPa×3hrs） 起爆性	−	起爆	○		

40mm品	測定値	40	40	40	40	40	40	40
		40	40	40	40	40	40	40
目標値 :40mm								
100mm品	測定値	100	100	100	100	100	100	100
		100	100	100	100	100	100	100
目標値 :100mm								

判 定 結 果
合格

島影建設株式会社　御中

出　荷　証　明　書

元請名：　島影建設株式会社

工事名：　R３年　爆破実験

品　名：　EMM　ウレタンフォーム　黒

寸　法・数　量：
４５５×５６９×１６８６（mm）　３個
４５５×５６９×１３６５（mm）　１個
４５０×４５０×４５０（mm）　１個

出荷日：　2021年　9月　24日

上記の商品は当社の製造規格に基づき、製造し納入した事を証明致します。

2021年　10月　4日

〒003-0021
札幌市白石区栄通３丁目５番４号
㈱ イノアックコーポレーション
札幌営業所 TEL 011-851-7171

年　　月　　日

島影建設株式会社　御中

〒003-0021
札幌市白石区栄通３丁目５番４号
㈱イノアックコーポレーション
札幌営業所 TEL 011-851-7171

品質証明書

ウレタンフォームは、下記の一般物性に基づき、製造された製品であることを証明致します。

＜ウレタンフォーム EMM＞

項　　目	単　位	規　格	試験方法
見掛け密度	kg／m³	52±3	J1S K 7222
反発弾性	%	45 以上	JIS K 6400-3
硬　さ	N	225±40	JIS K 6400-2
引張り強さ	Kpa	100 以上	JIS K 6400-5
伸　び	%	100 以上	JIS K 6400-5
引裂強さ	N/cm	5 以上	JIS K 6400-5
圧縮残留歪	%	3.5 以下	JIS K 6400-4
繰返し圧縮残留歪	%	2.5 以下	JIS K 6400-4

5.A.1　（付録 7）室内実験 爆風圧波形

室内実験で取得した爆風圧波形を記す。

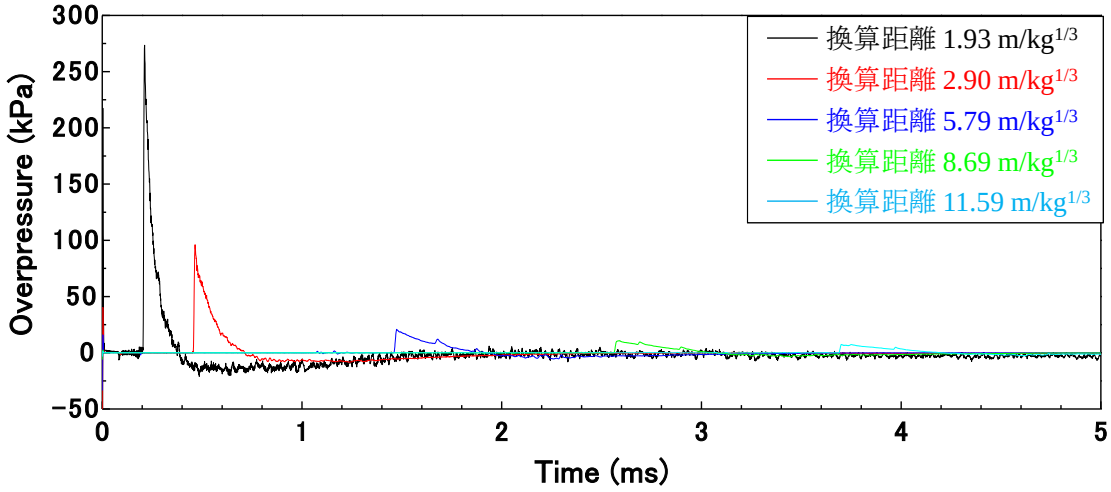


表 5.A.1-1a　No.O　-10°　（1 回目）

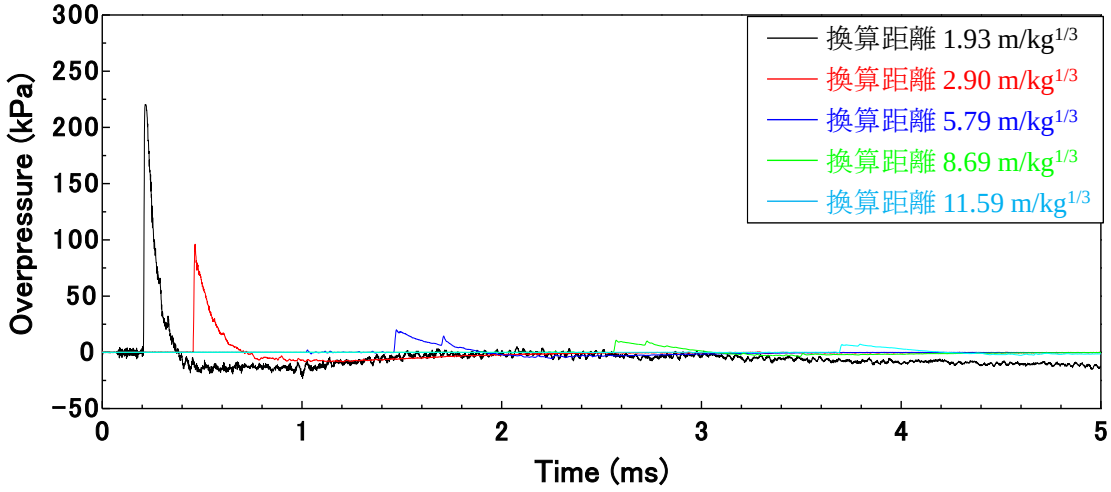


表 5.A.1-1b　No.O　0°　（1 回目）

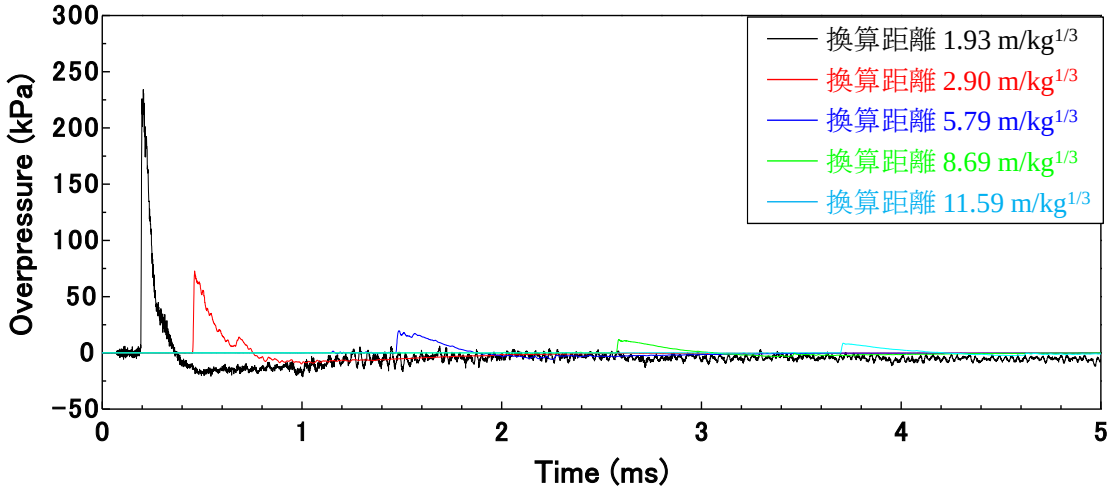


表 5.A.1-1c　No.O　10°　（1 回目）

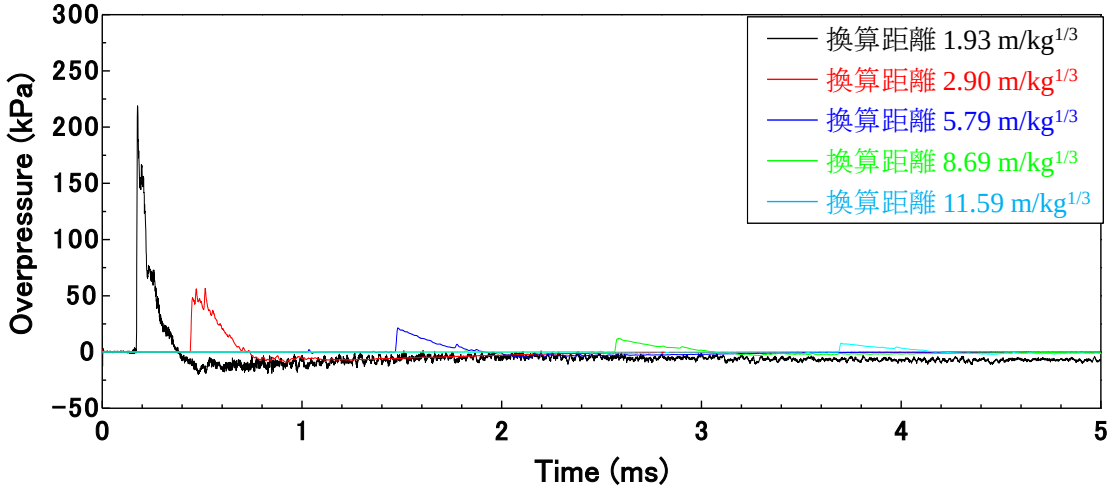


表 5.A.1-2a　No.O　-10°　（2 回目）

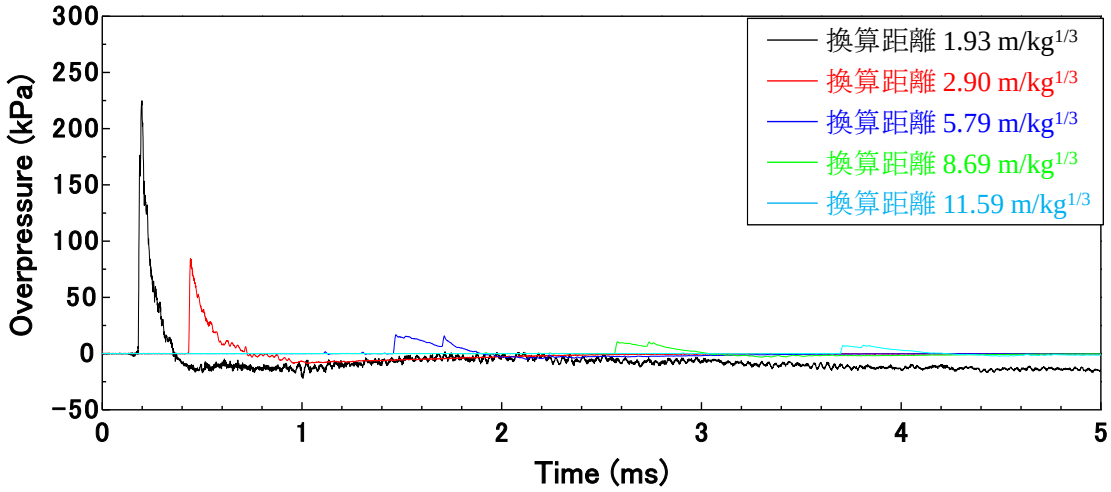


表 5.A.1-2b　No.O　0°　（2 回目）

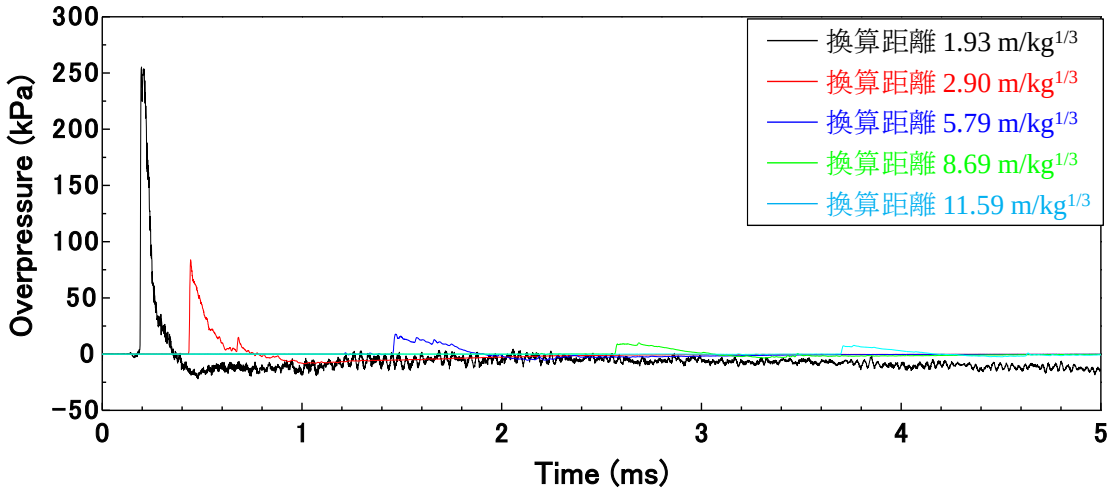


表 5.A.1-2c　No.O　10°　（2 回目）

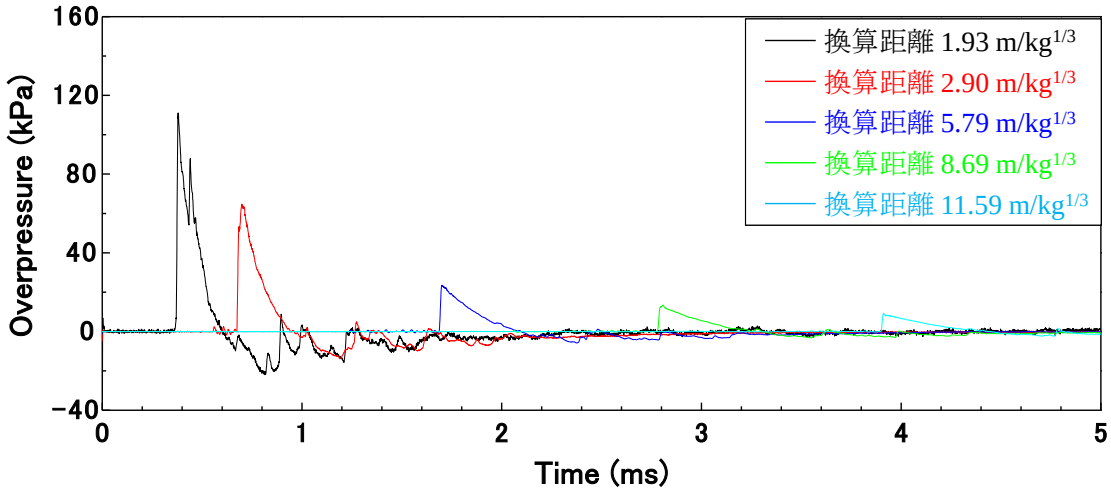


表 5.A.1-3a　No.O2　-10°　（1 回目）

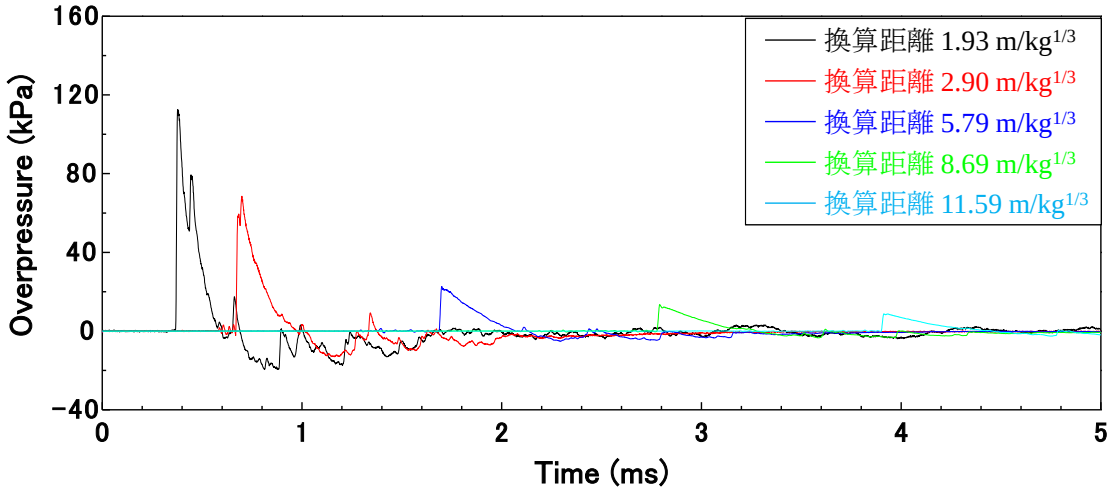


表 5.A.1-3b　No.O2　0°　（1 回目）

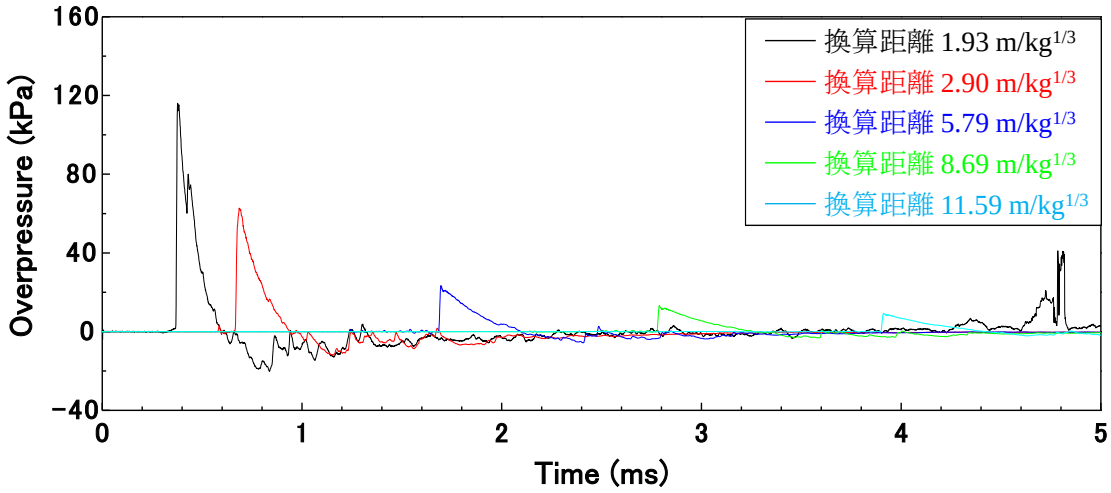


表 5.A.1-3c　No.O2　10°　（1 回目）

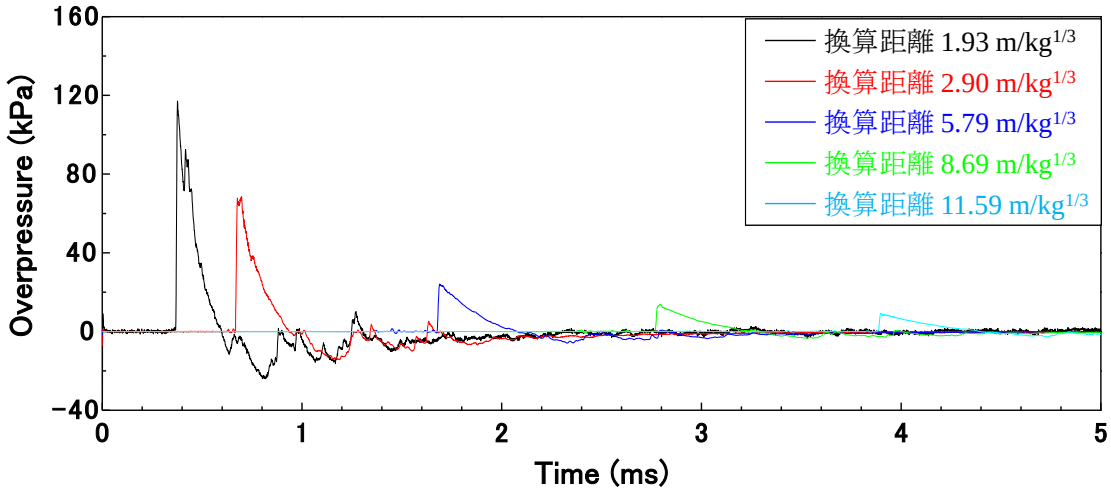


表 5.A.1-4a　No.O2　-10°　（2 回目）

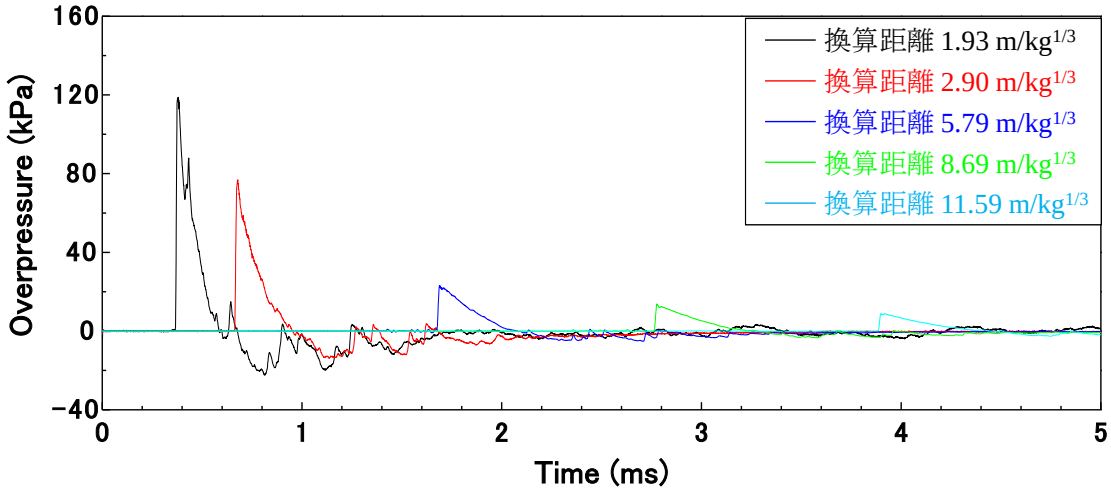


表 5.A.1-4b　No.O2　0°　（2 回目）

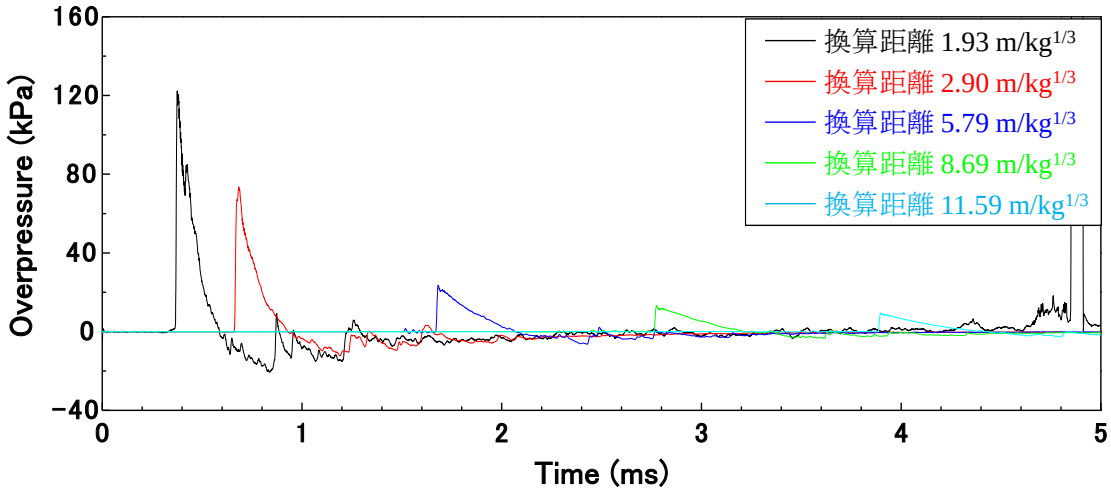


表 5.A.1-4c　No.O2　10°　（2 回目）

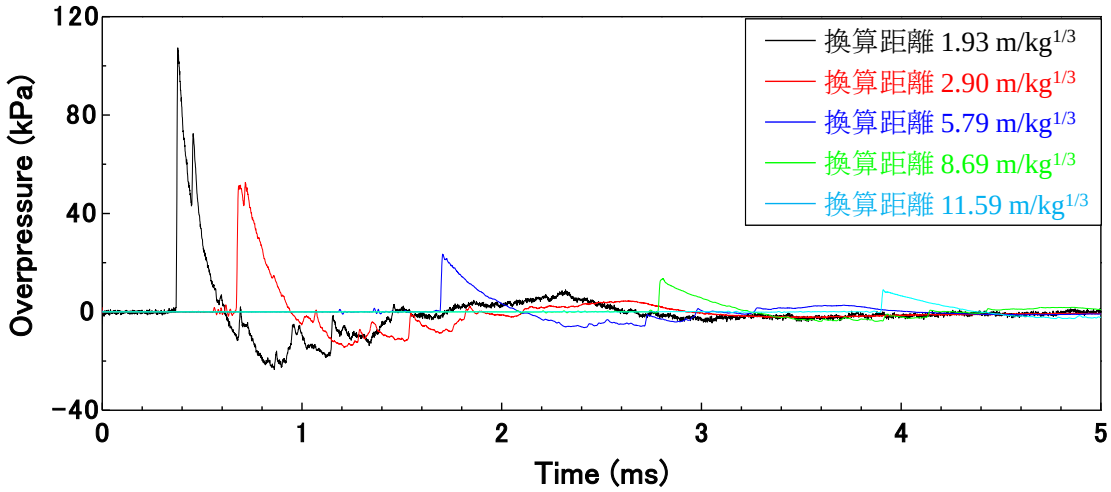


表 5.A.1-5a　No.A1　-10°　（1 回目）

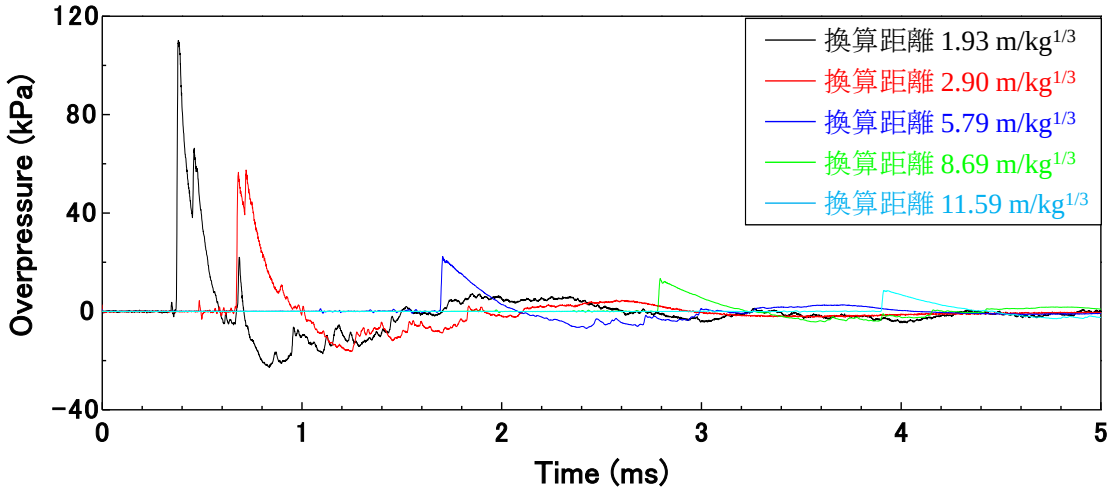


表 5.A.1-5b　No.A1　0°　（1 回目）

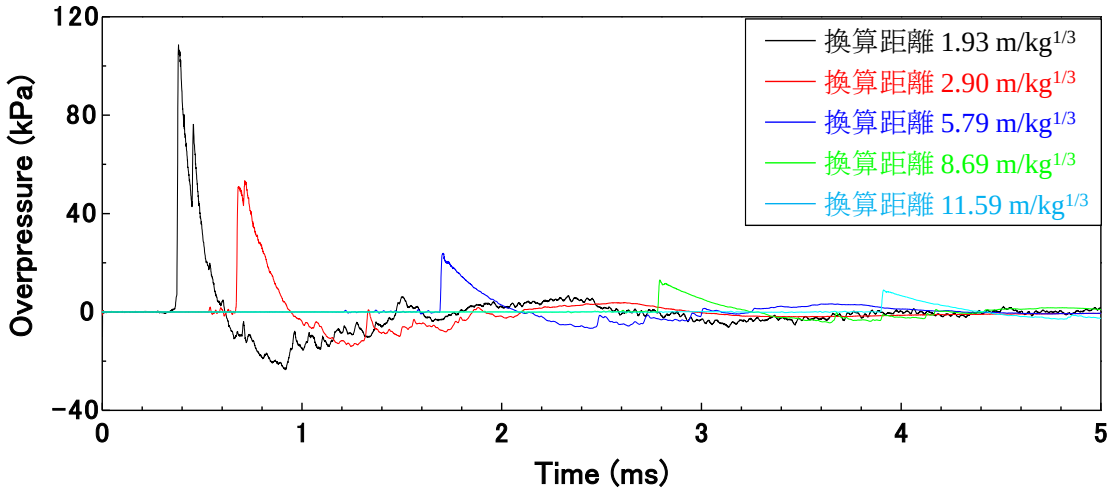


表 5.A.1-5c　No.A1　10°　（1 回目）

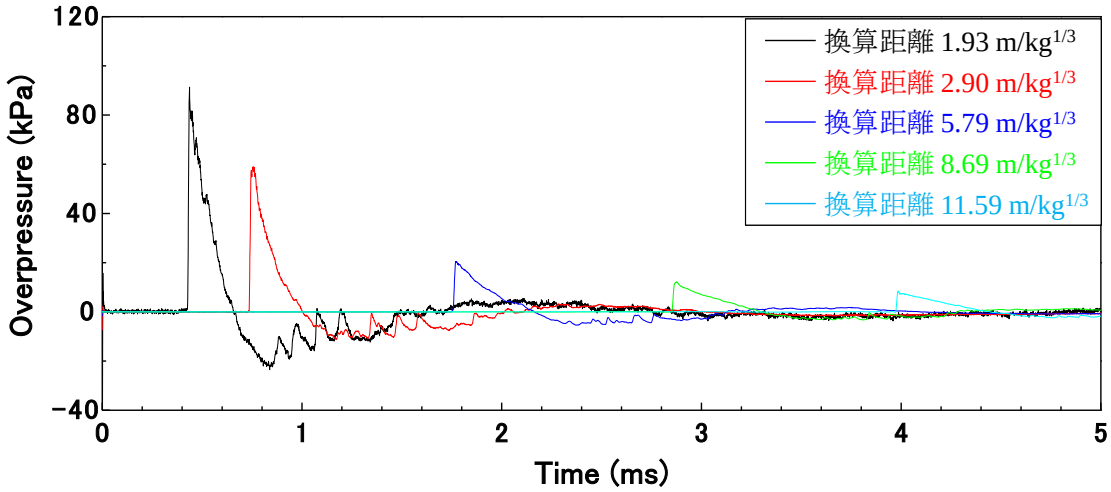


表 5.A.1-6a　No.A1　-10°　（2 回目）

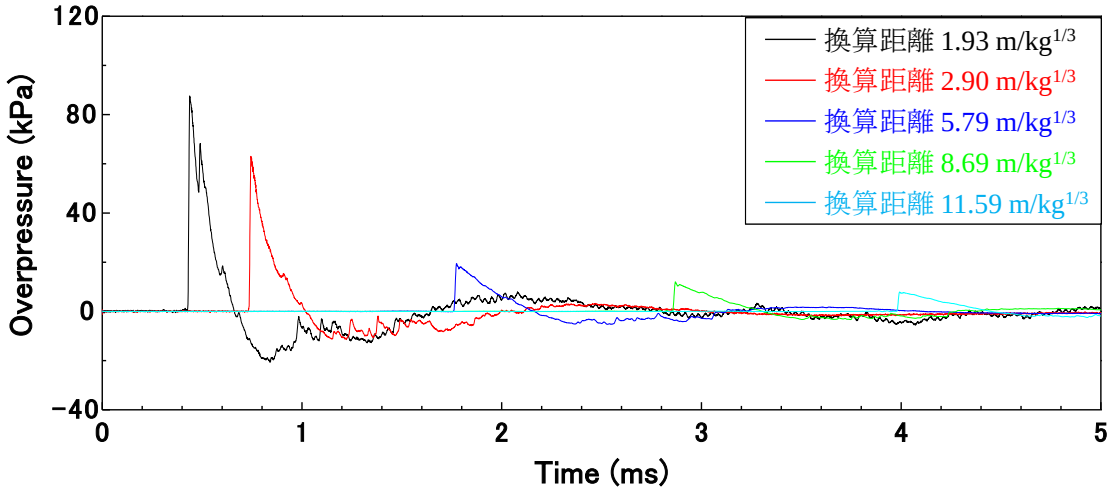


表 5.A.1-6b　No.A1　0°　（2 回目）

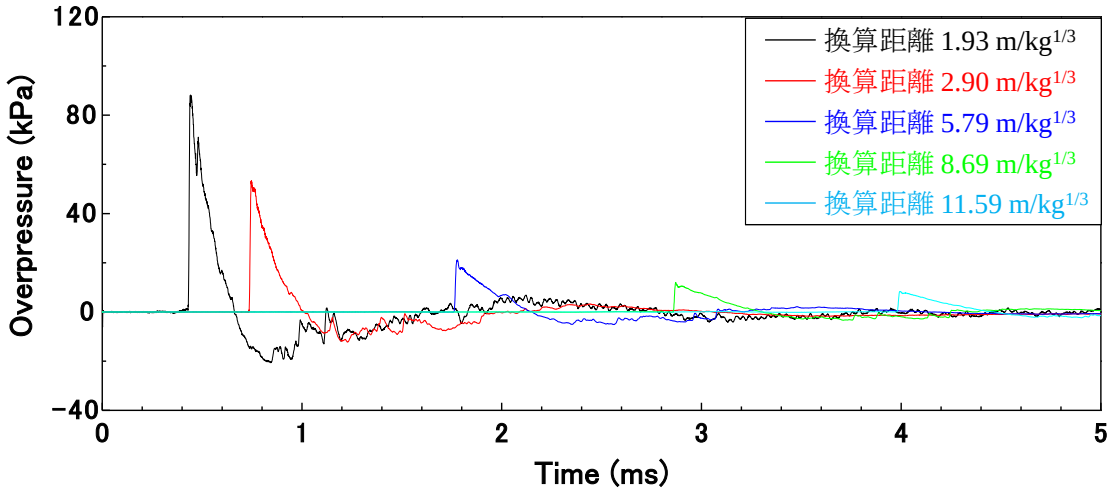


表 5.A.1-6c　No.A1　10°　（2 回目）

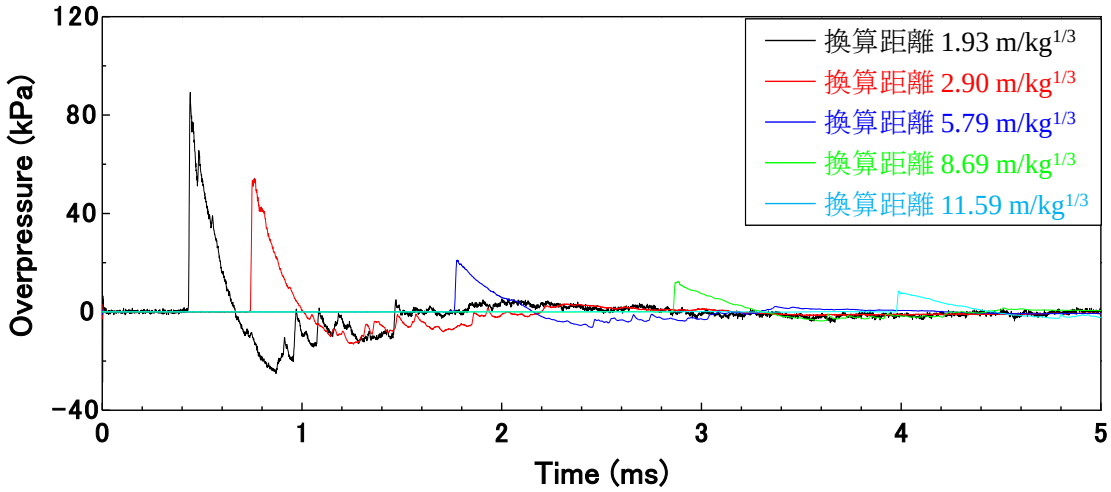


表 5.A.1-7a　No.A1　20°　（1 回目）

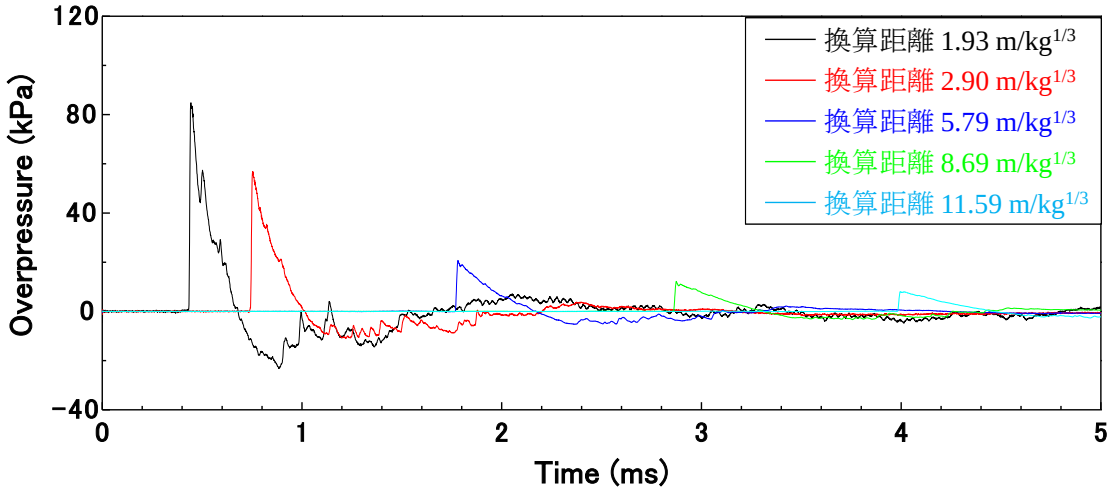


表 5.A.1-7b　No.A1　30°　（1 回目）

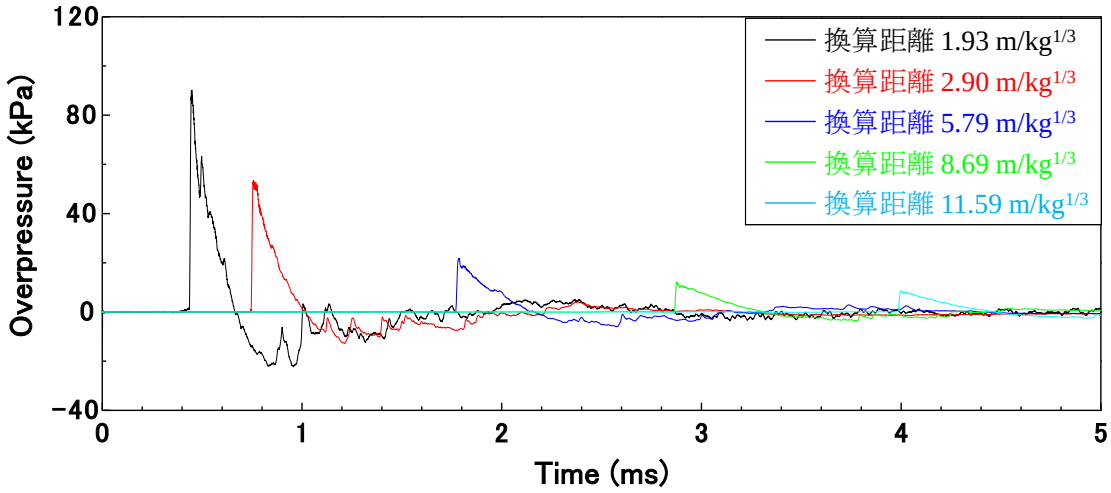


表 5.A.1-7c　No.A1　40°　（1 回目）

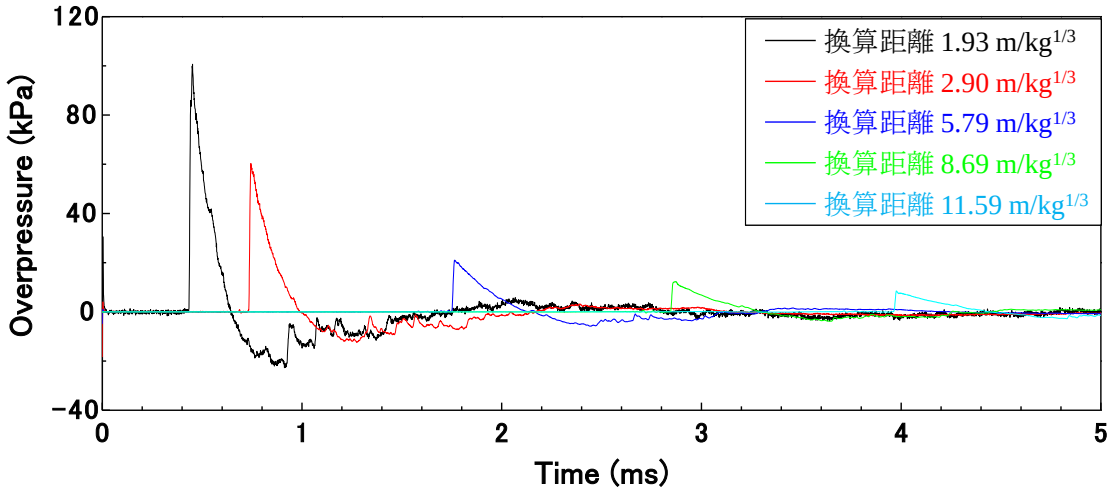


表 5.A.1-8a　No.A1　20°　（2 回目）

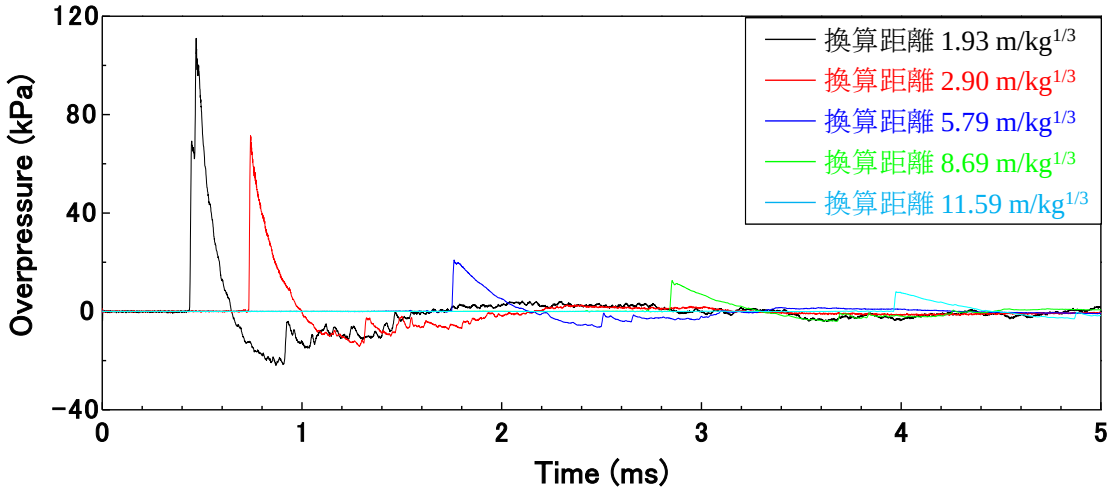


表 5.A.1-8b　No.A1　30°　（2 回目）

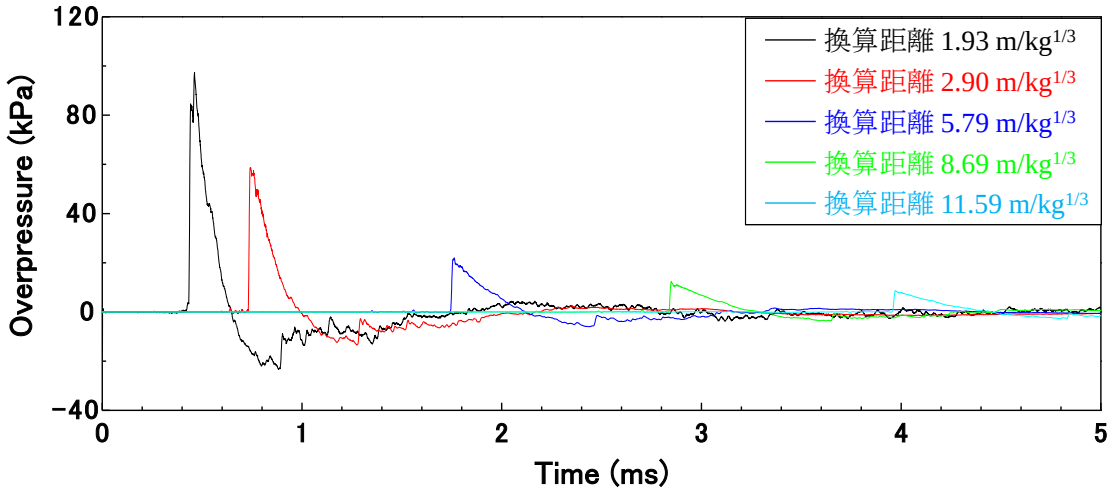


表 5.A.1-8c　No.A1　40°　（2 回目）

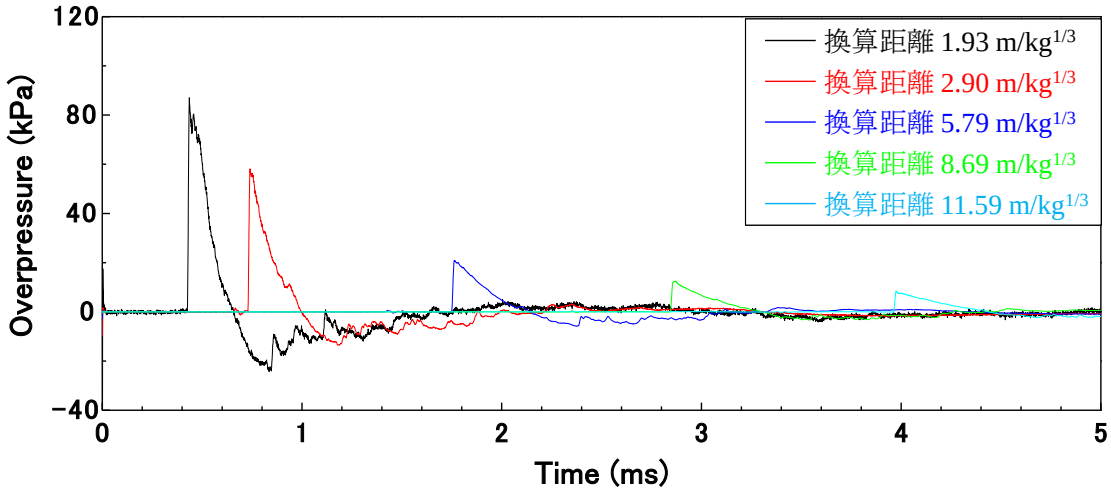


表 5.A.1-9a　No.A1　50°　（1 回目）

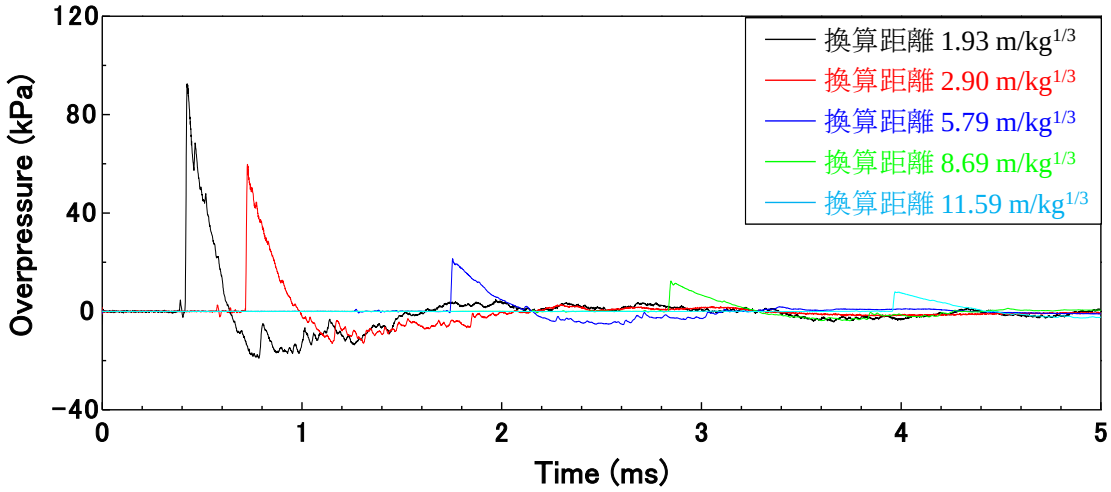


表 5.A.1-9b　No.A1　60°　（1 回目）

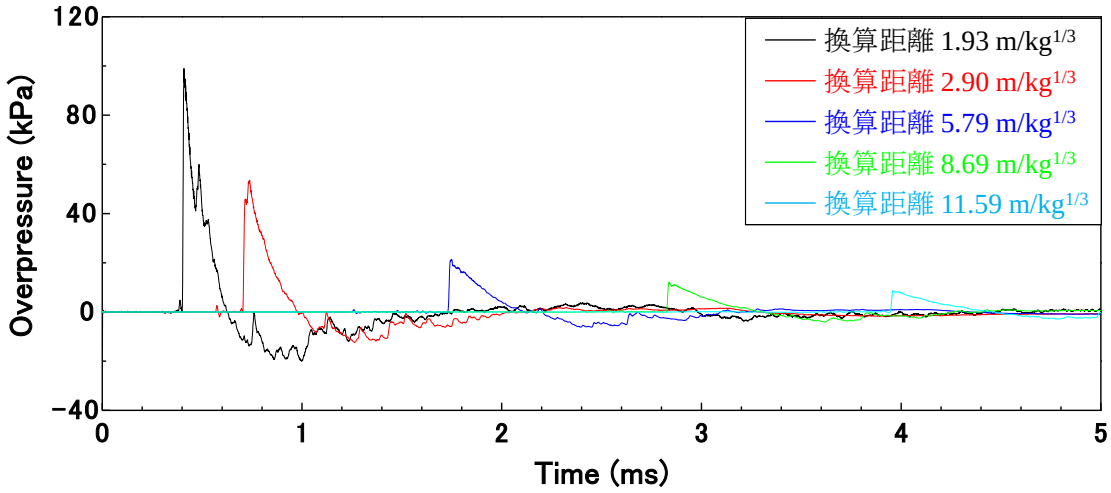


表 5.A.1-9c　No.A1　70°　（1 回目）

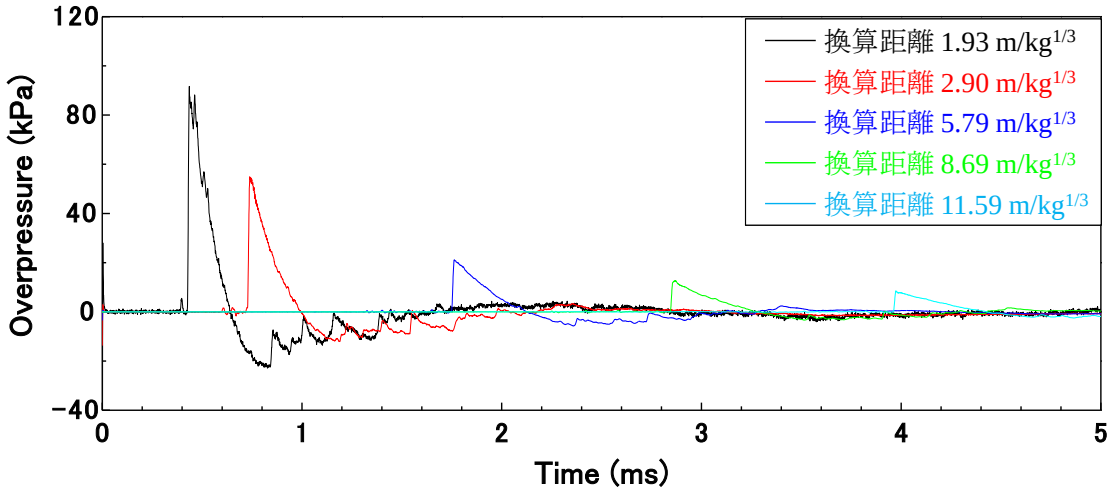


表 5.A.1-10a　No.A1　50°　（2 回目）

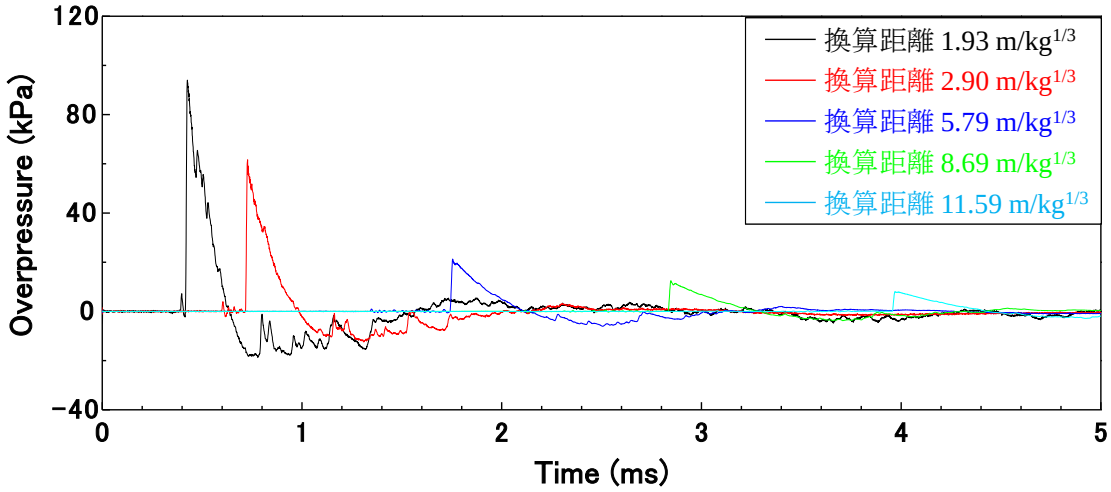


表 5.A.1-10b　No.A1　60°　（2 回目）

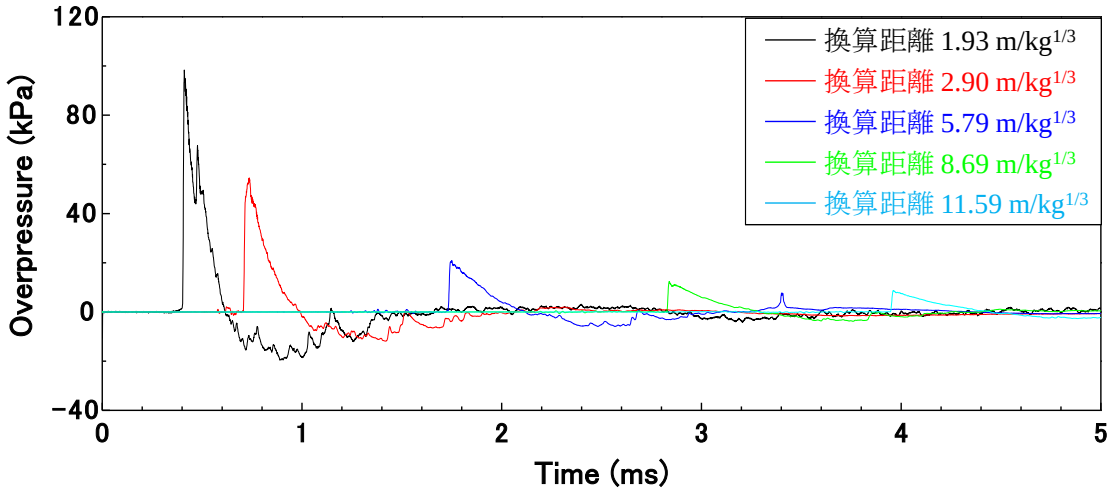


表 5.A.1-10c　No.A1　70°　（2 回目）

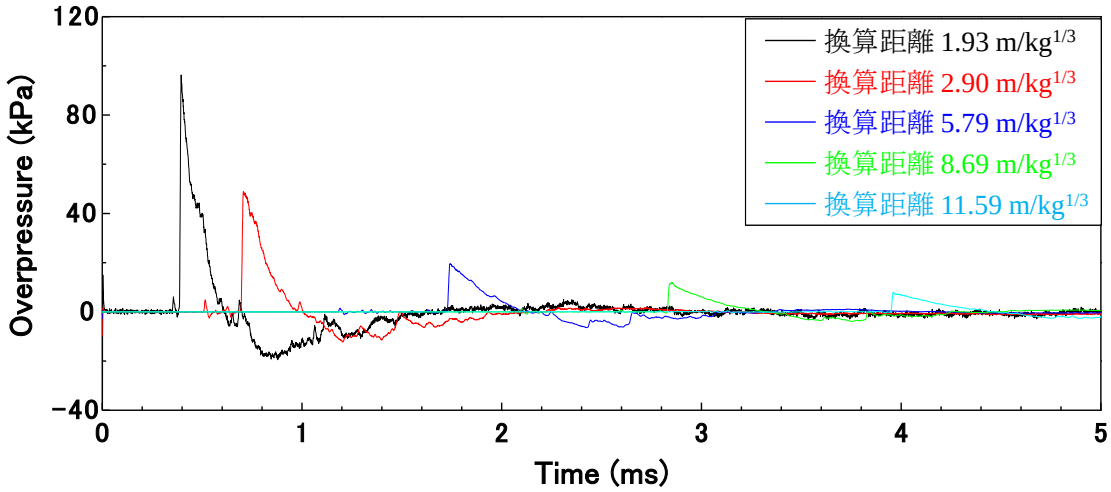


表 5.A.1-11a　No.A1　80°　（1 回目）

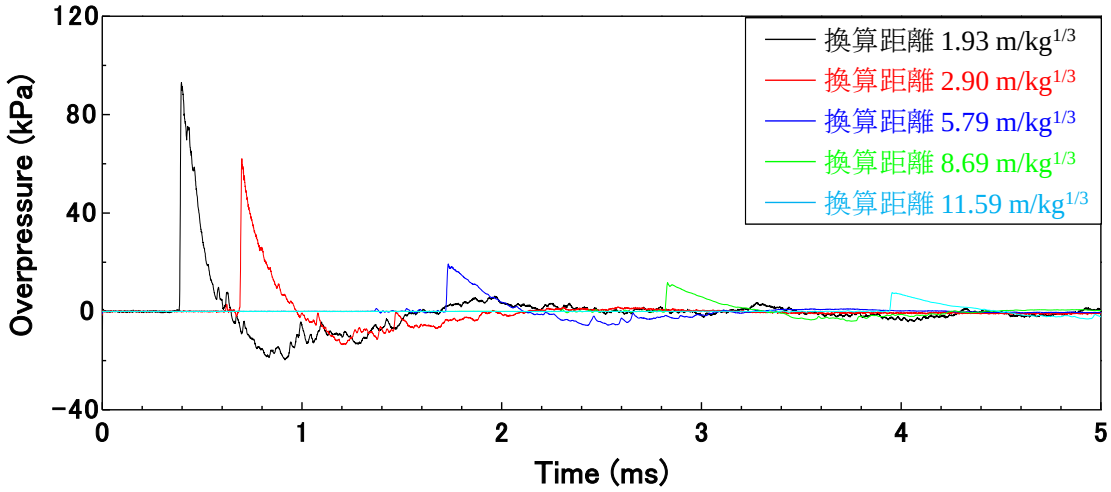


表 5.A.1-11b　No.A1　90°　（1 回目）

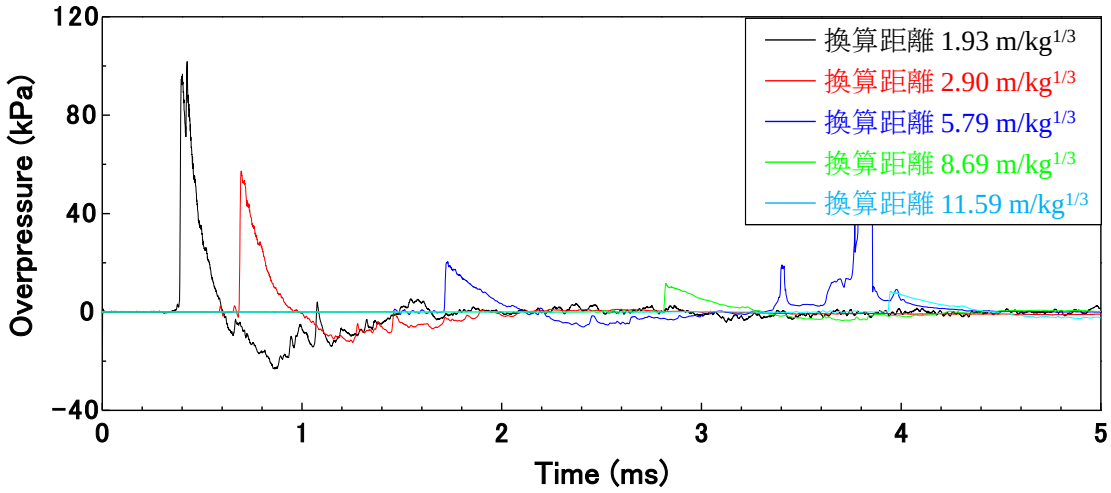


表 5.A.1-11c　No.A1　100°　（1 回目）

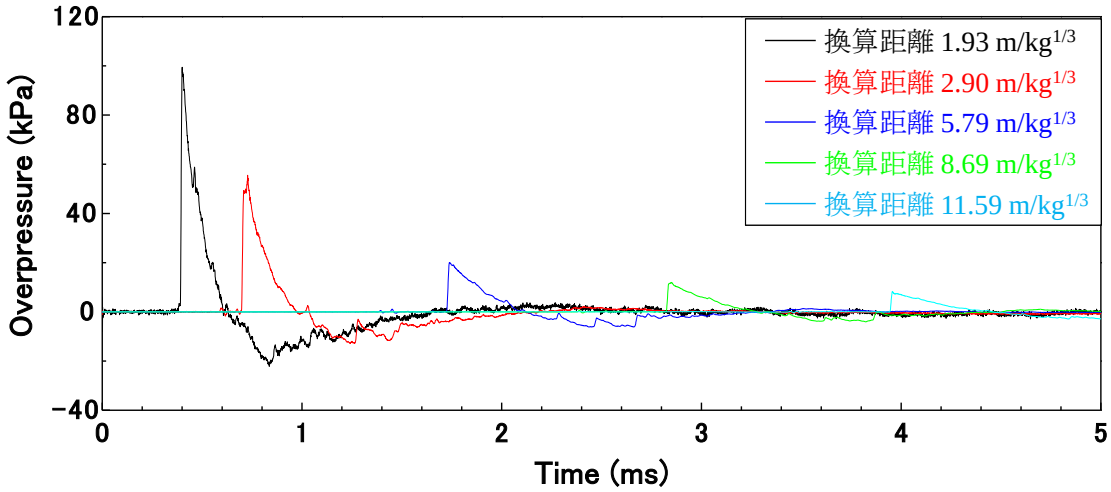


表 5.A.1-12a　No.A1　80°　（1 回目）

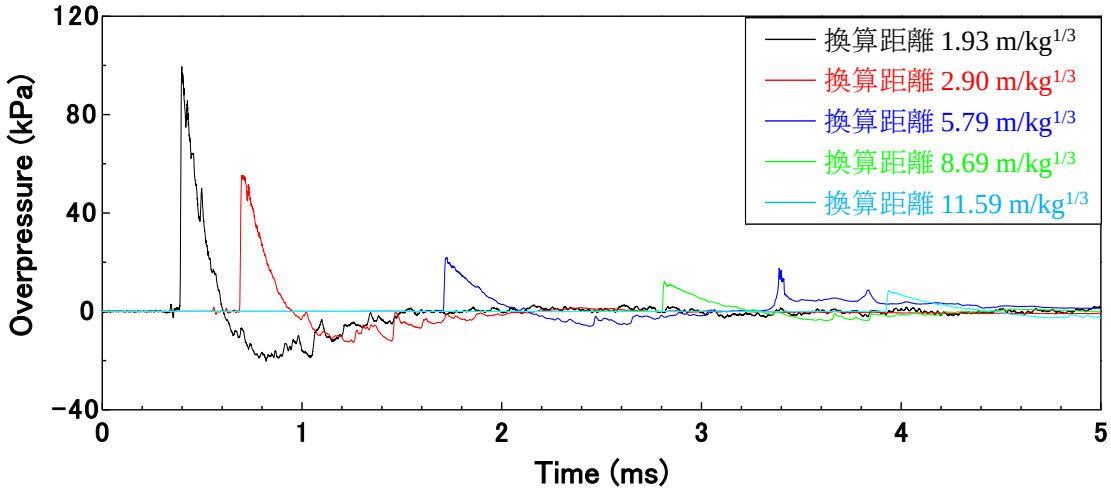


表 5.A.1-12b　No.A1　90°　（1 回目）

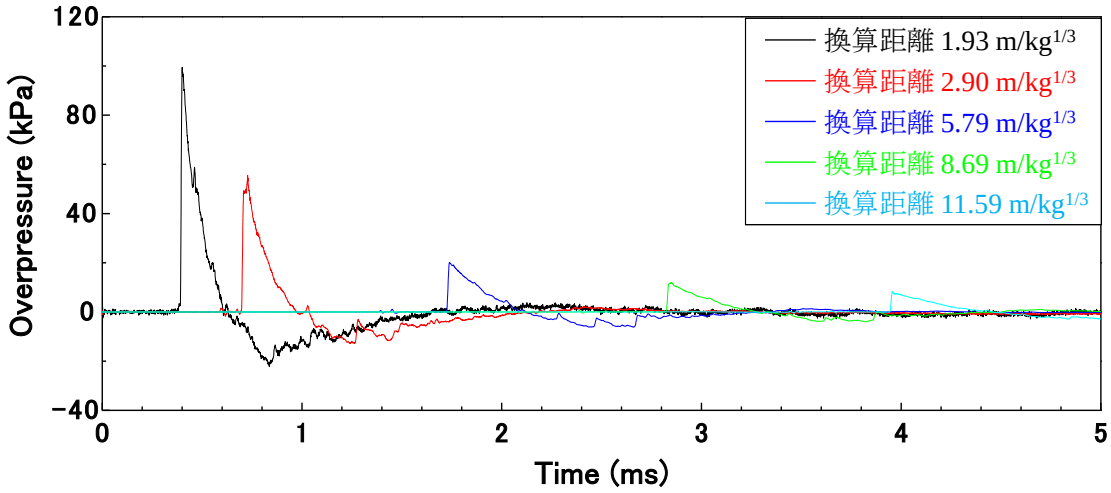


表 5.A.1-12c　No.A1　100°　（1 回目）

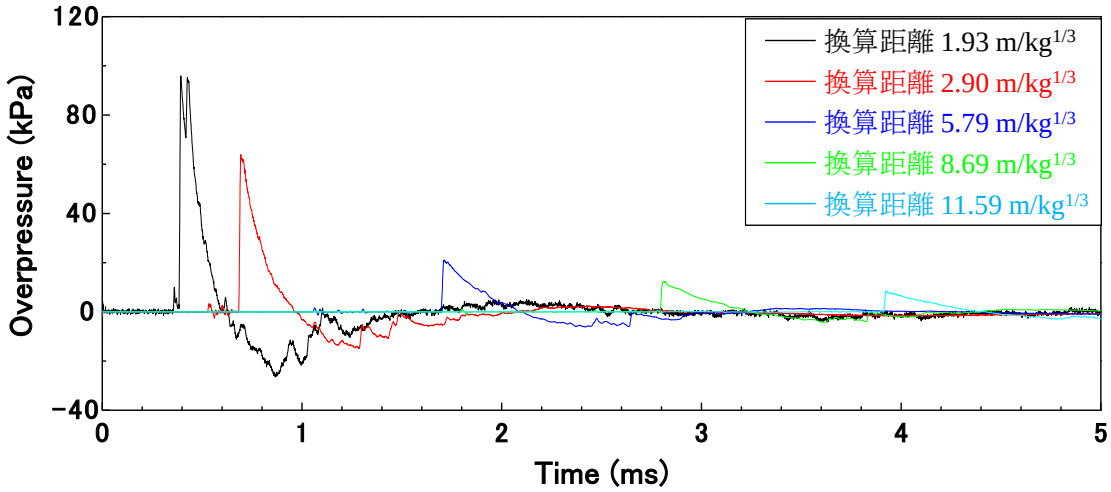


表 5.A.1-13a　No.A1　110°　（1 回目）

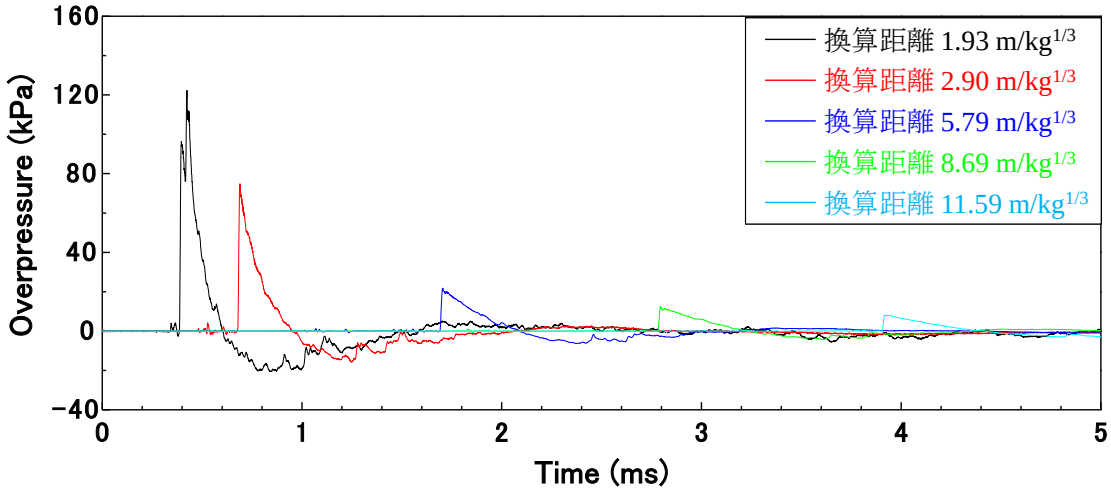


表 5.A.1-13b　No.A1　120°　（1 回目）

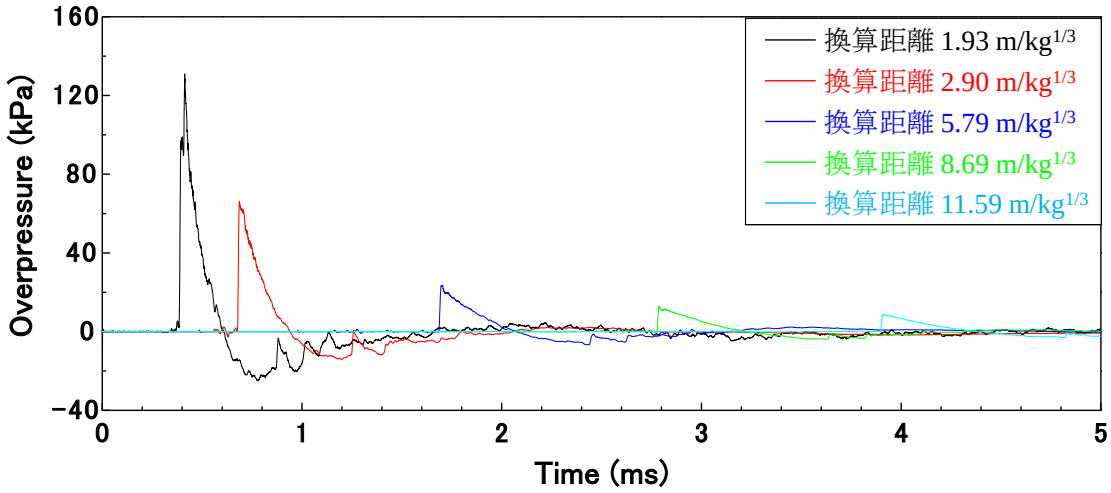


表 5.A.1-13c　No.A1　130°　（1 回目）

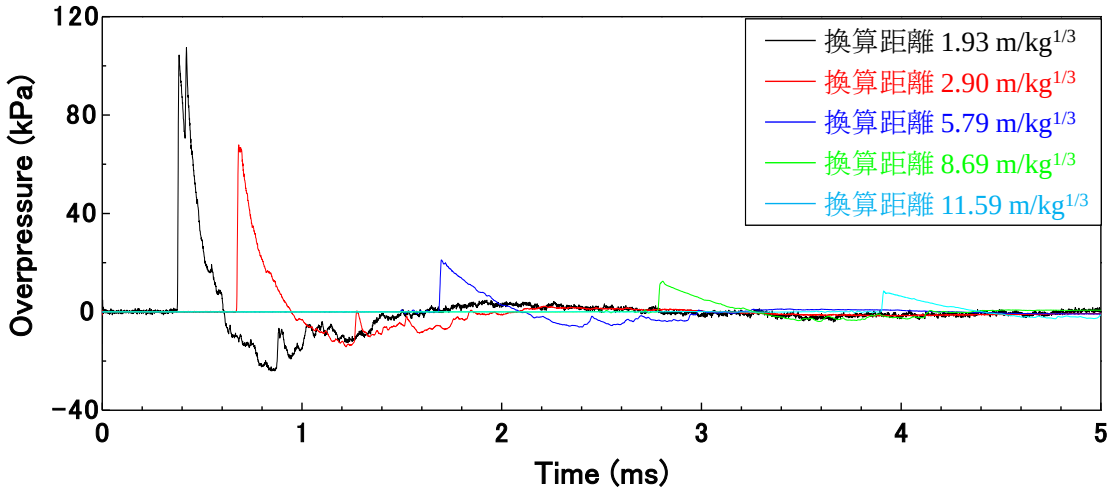


表 5.A.1-14a　No.A1　110°　（2 回目）

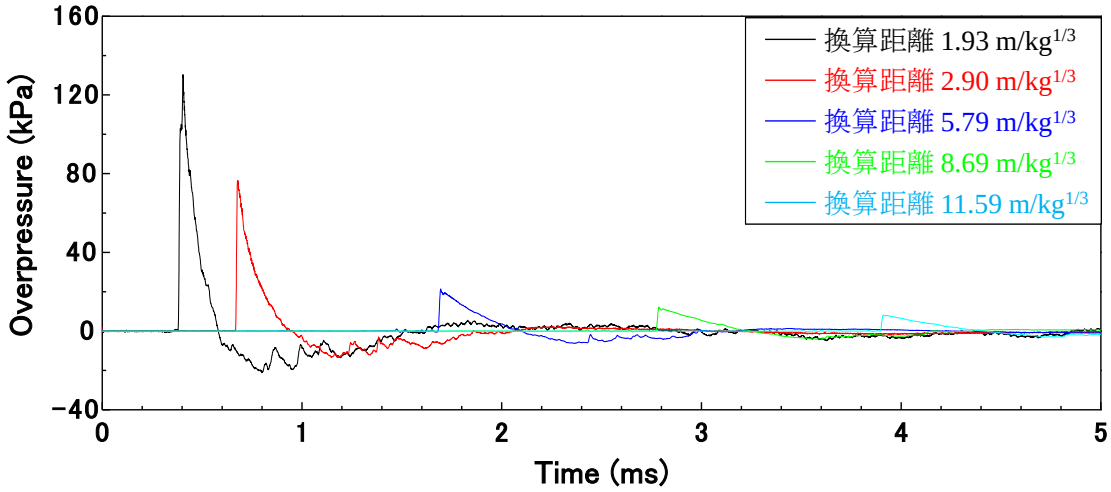


表 5.A.1-14b　No.A1　120°　（2 回目）

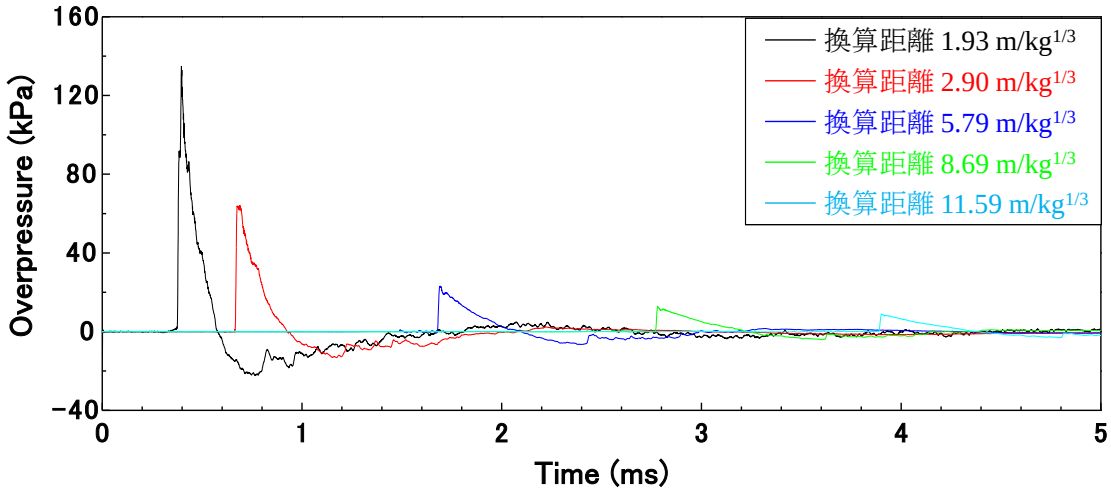


表 5.A.1-14c　No.A1　130°　（2 回目）

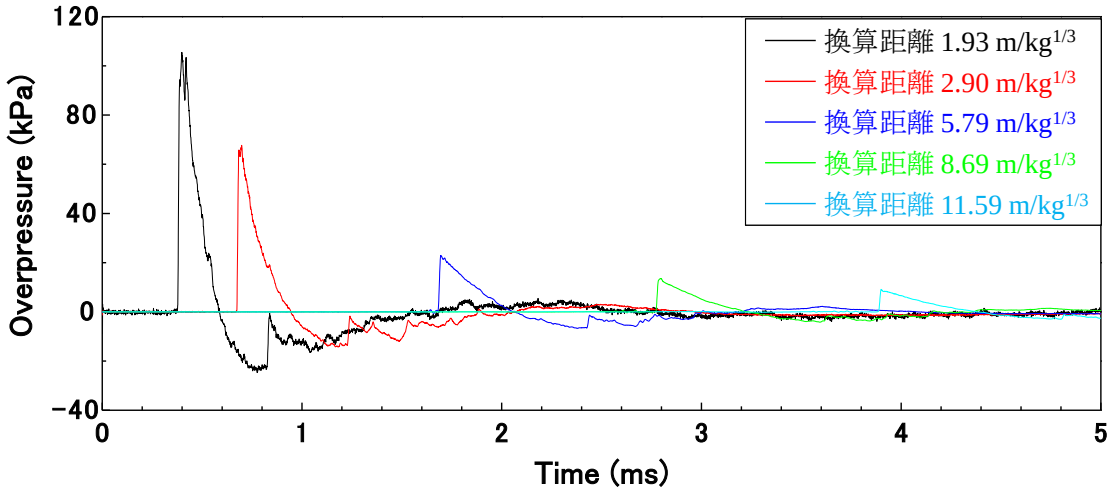


表 5.A.1-15a　No.A1　140°　（1 回目）

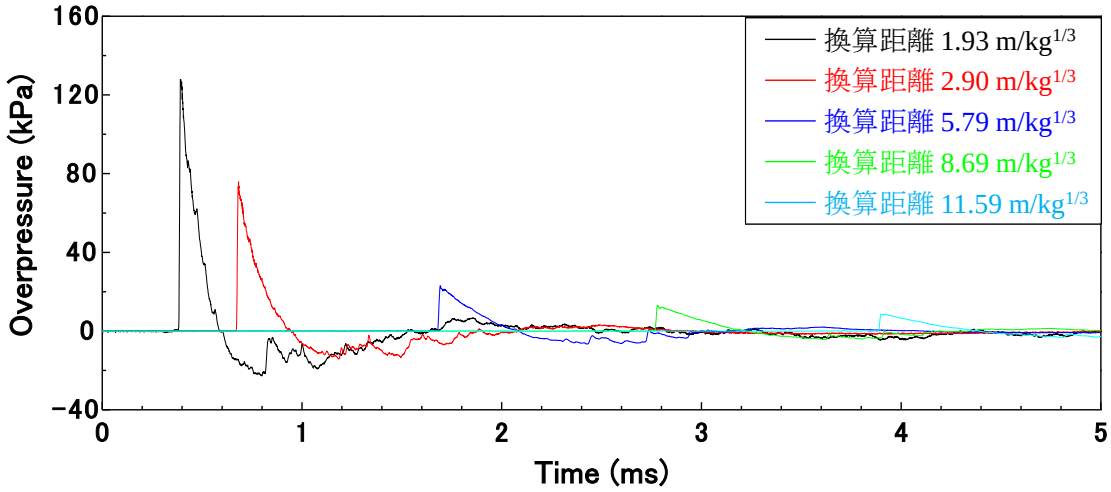


表 5.A.1-15b　No.A1　150°　（1 回目）

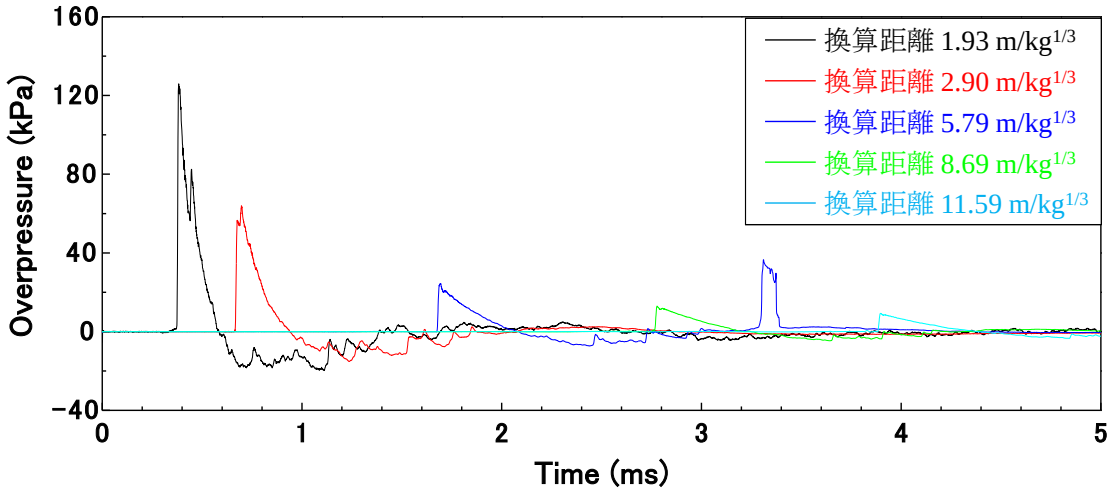


表 5.A.1-15c　No.A1　160°　（1 回目）

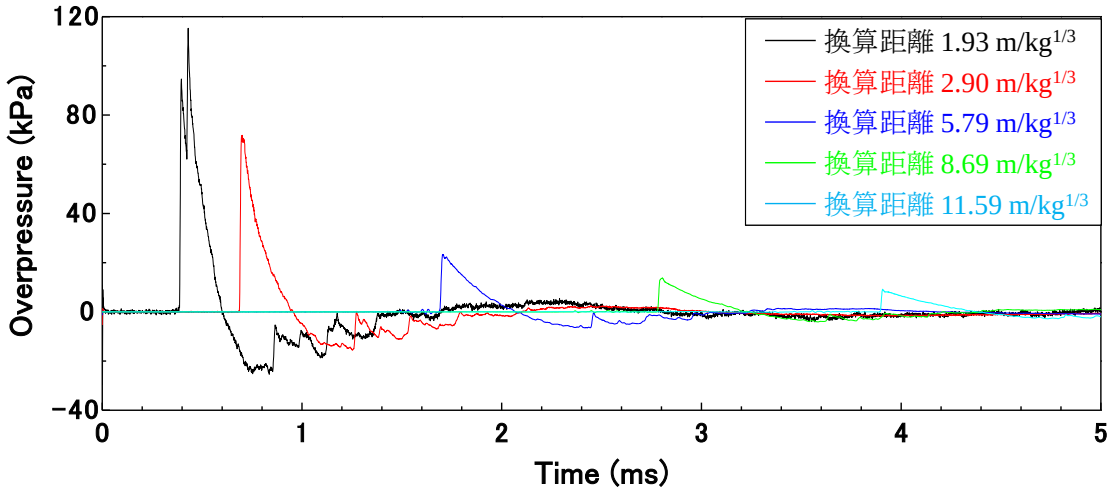


表 5.A.1-16a　No.A1　140°　（2 回目）

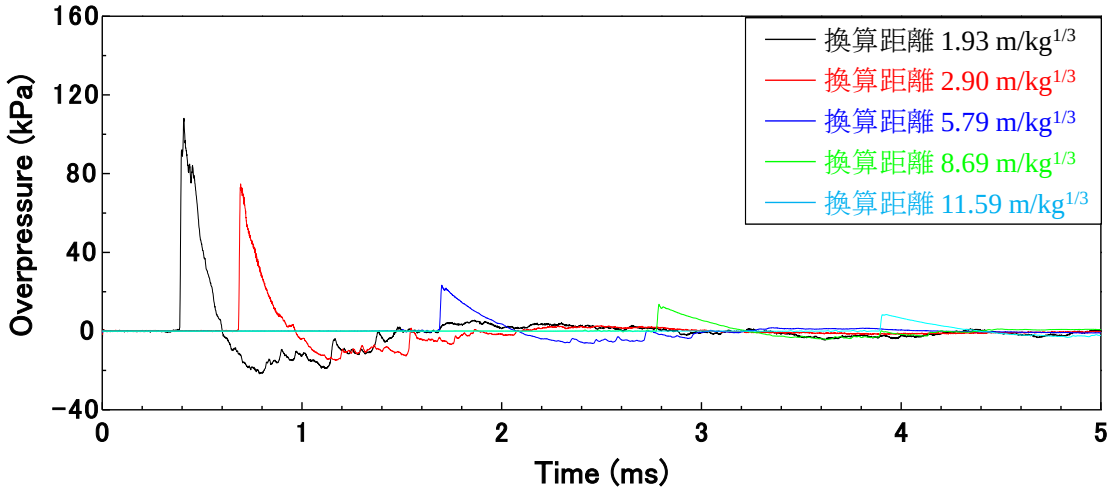


表 5.A.1-16b　No.A1　150°　（2 回目）

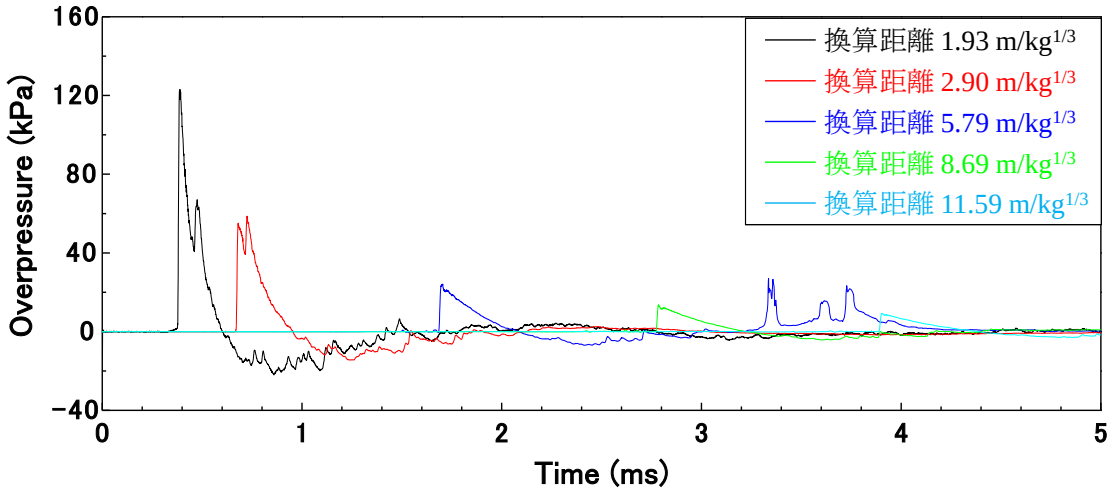


表 5.A.1-16c　No.A1　160°　（2 回目）

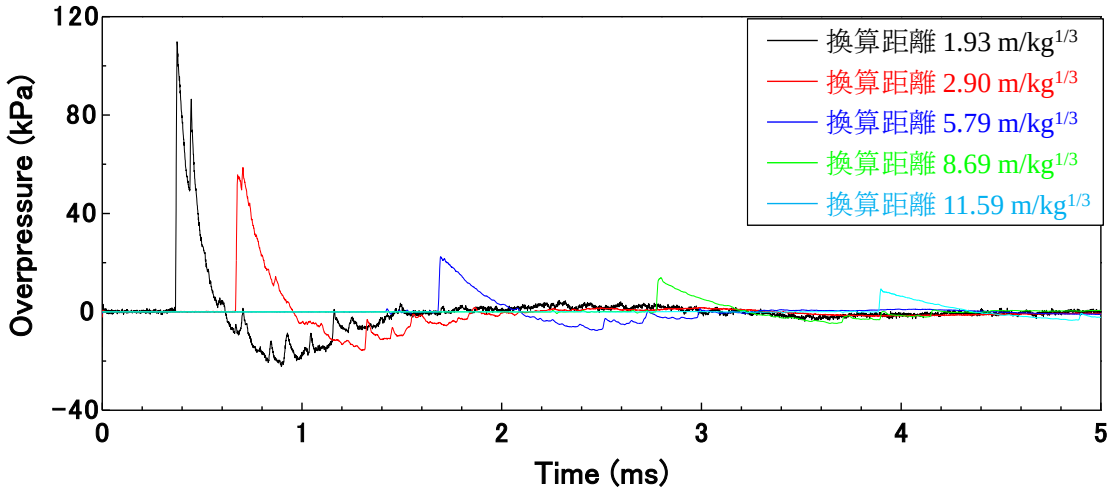


表 5.A.1-17a　No.A1　170°　（1 回目）

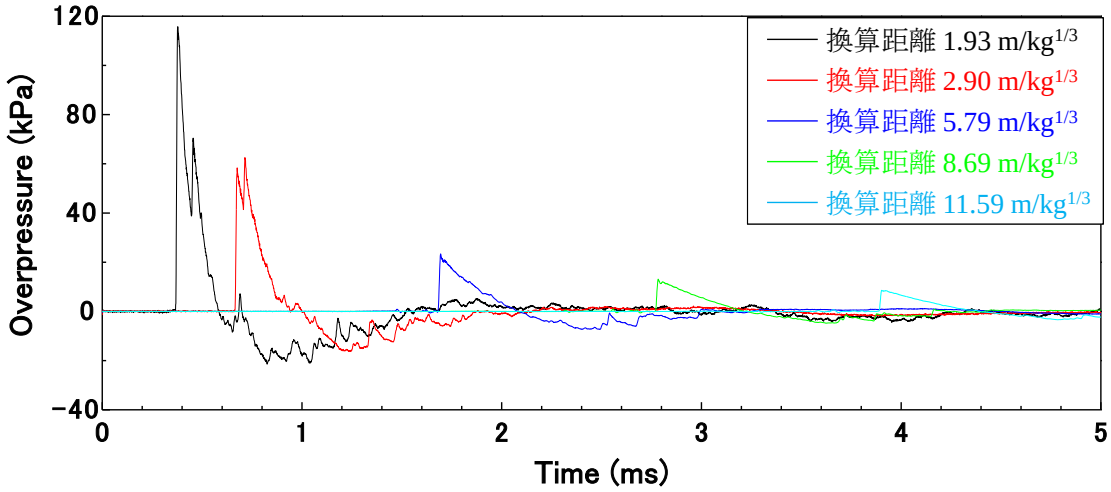


表 5.A.1-17b　No.A1　180°　（1 回目）

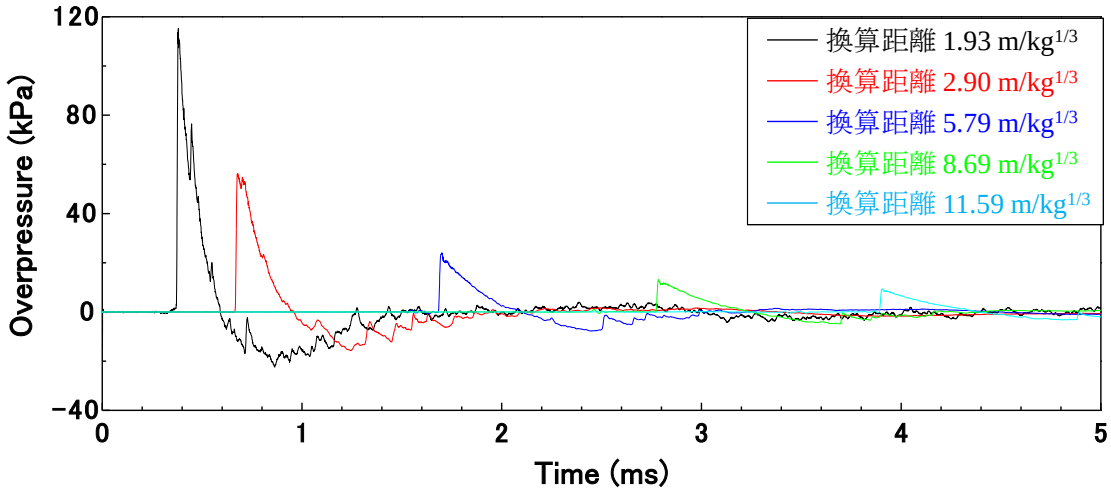


表 5.A.1-17c　No.A1　190°　（1 回目）

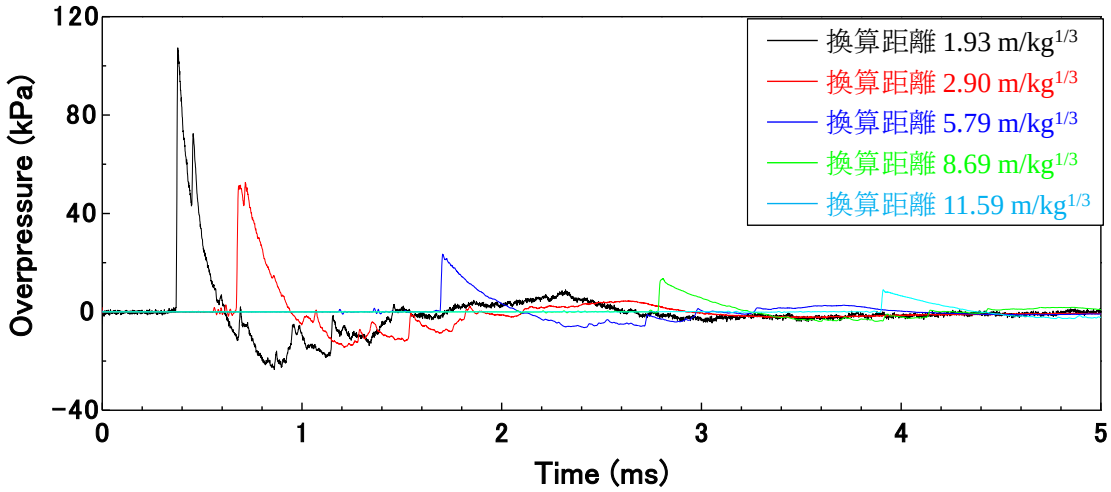


表 5.A.1-18a　No.A1　170°　（1 回目）

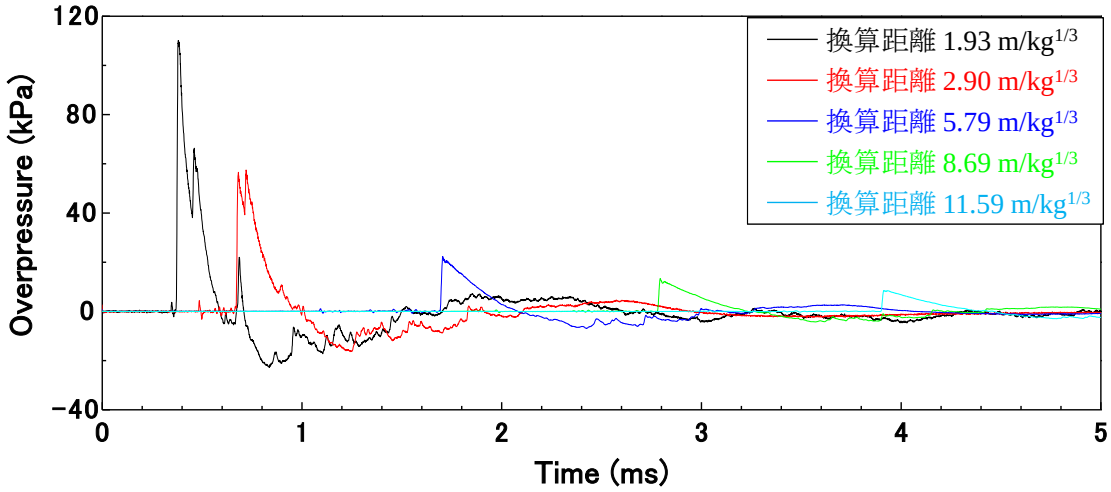


表 5.A.1-18b　No.A1　180°　（2 回目）

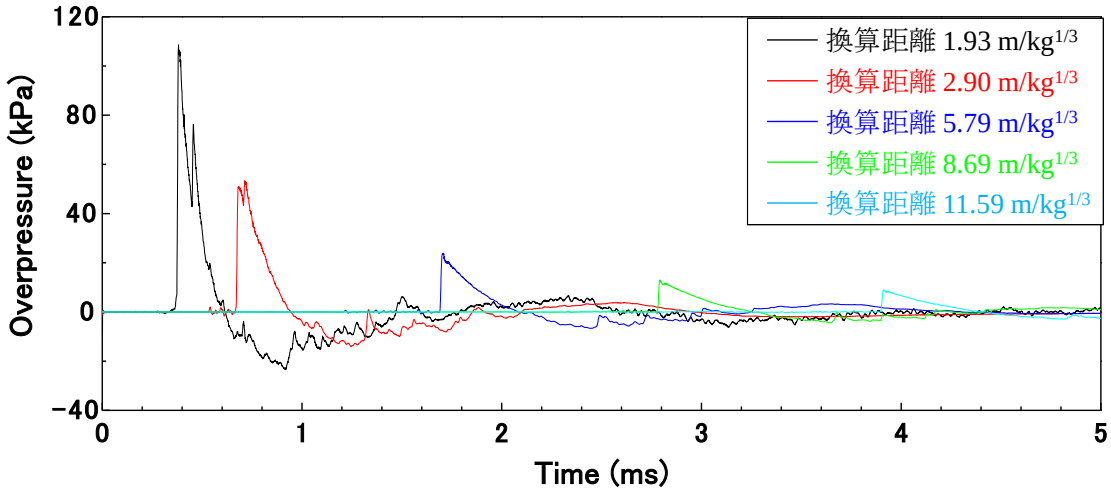


表 5.A.1-18c　No.A1　190°　（2 回目）

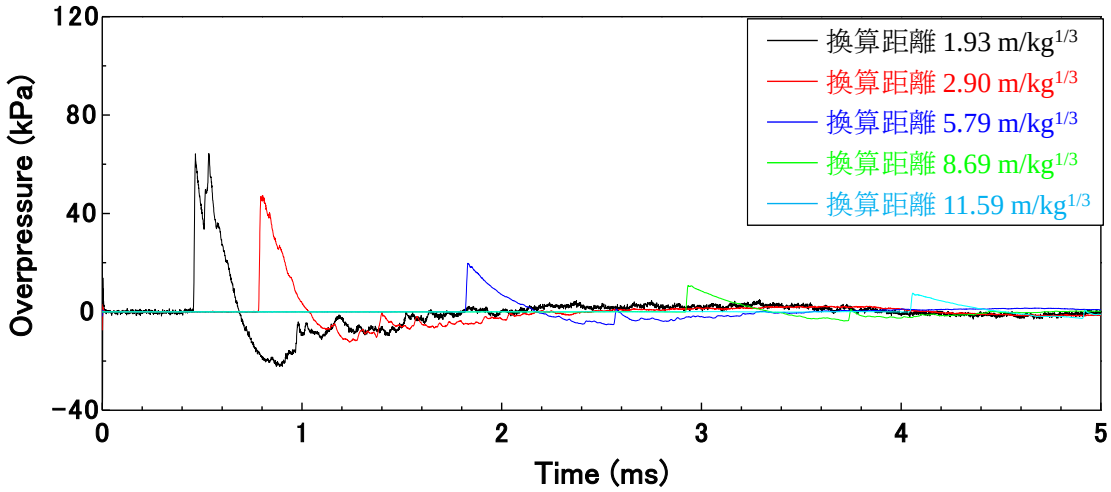


表 5.A.1-19a　No.A2　40°　（1 回目）

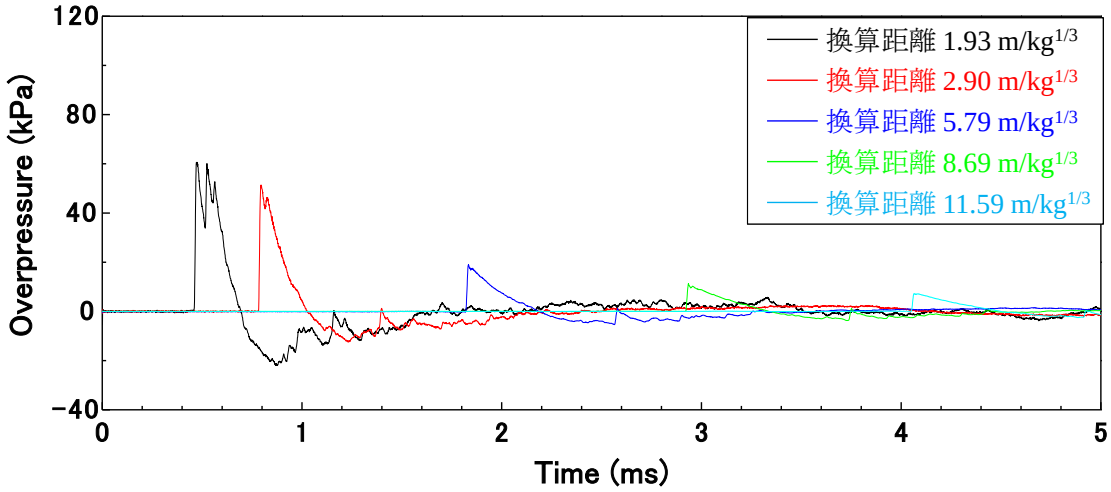


表 5.A.1-19b　No.A2　50°　（1 回目）

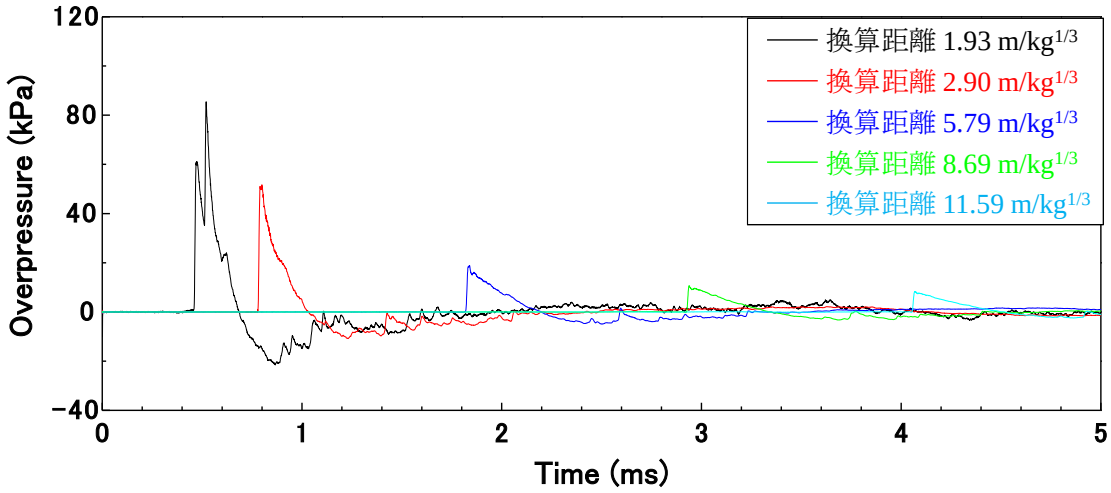


表 5.A.1-19c　No.A2　60°　（1 回目）

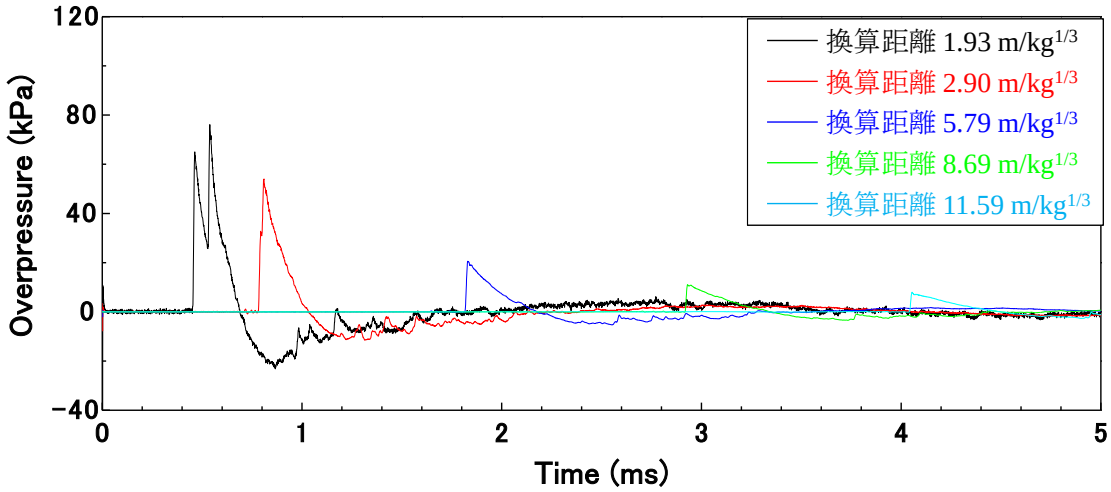


表 5.A.1-20a　No.A2　40°　（2 回目）

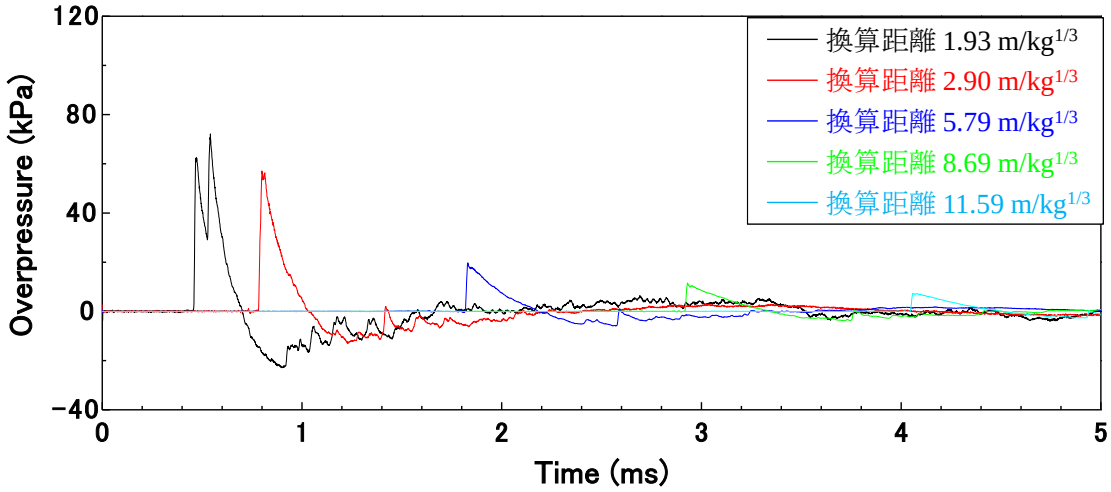


表 5.A.1-20b　No.A2　50°　（2 回目）

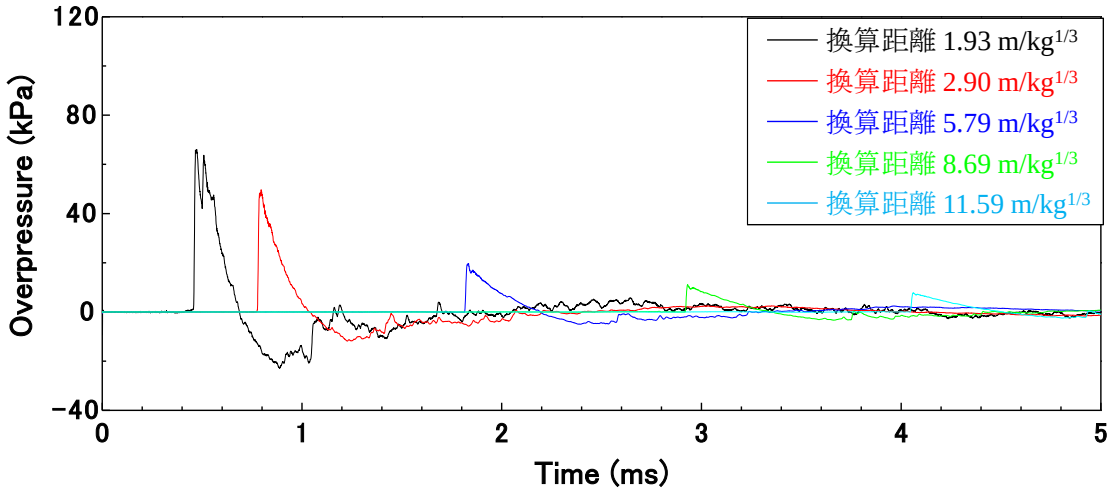


表 5.A.1-20c　No.A2　60°　（2 回目）

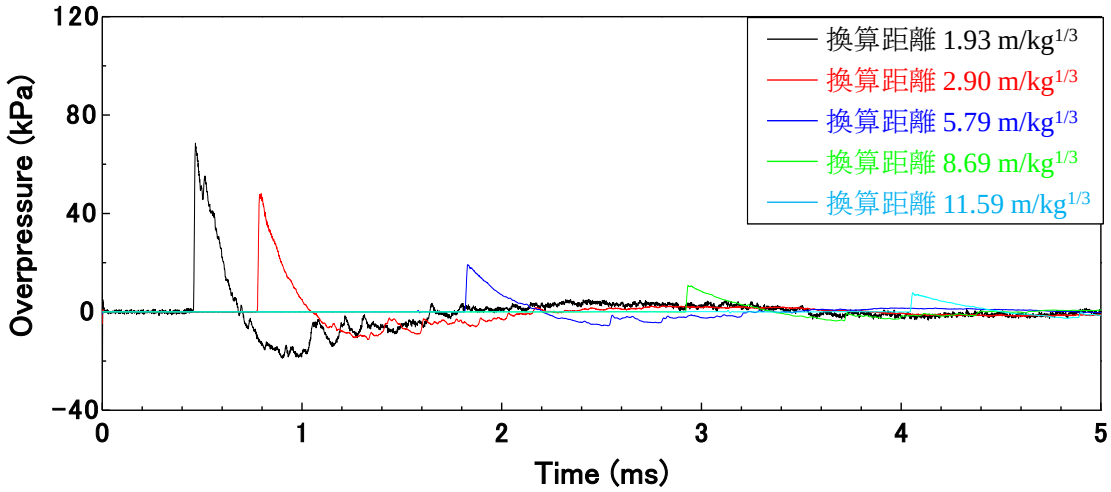


表 5.A.1-21a　No.A2　70°　（1 回目）

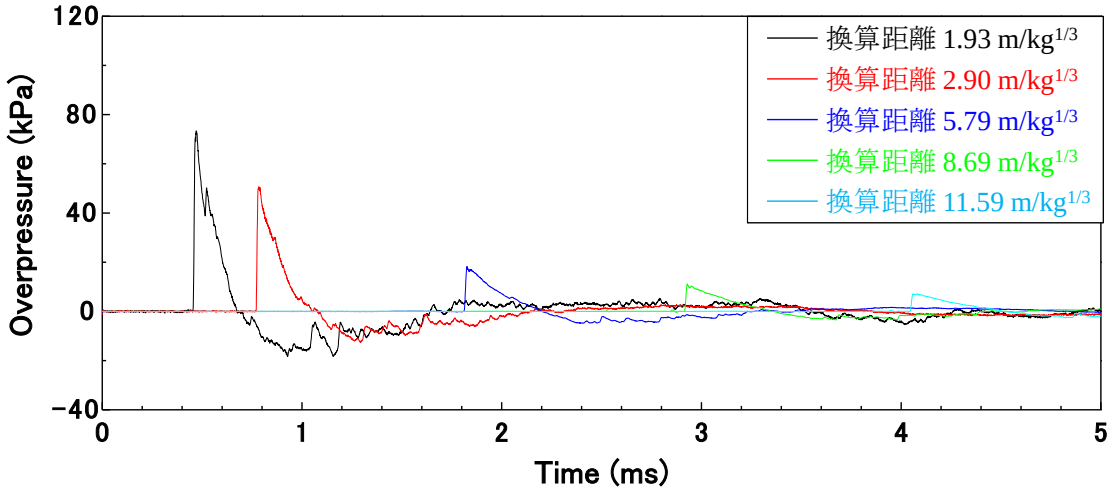


表 5.A.1-21b　No.A2　80°　（1 回目）

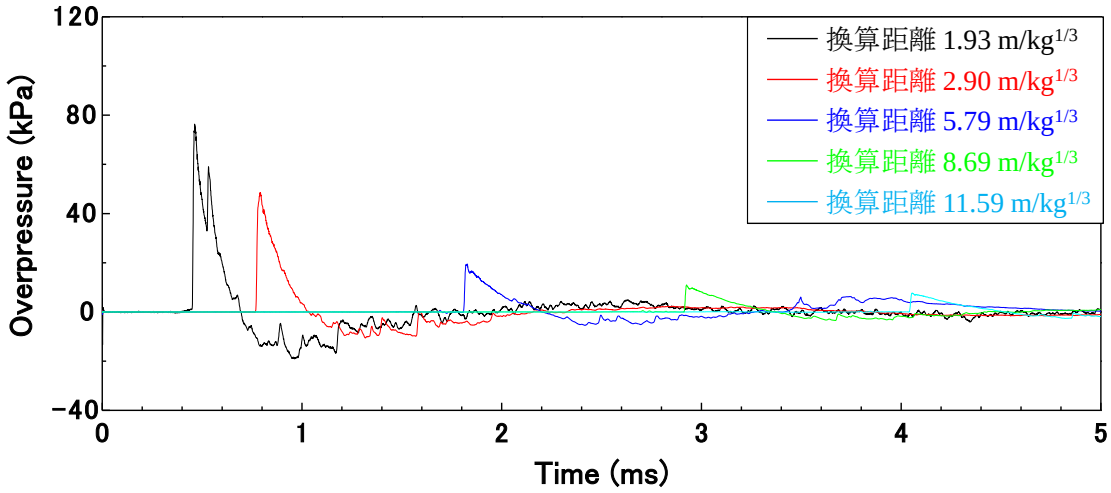


表 5.A.1-21c　No.A2　90°　（1 回目）

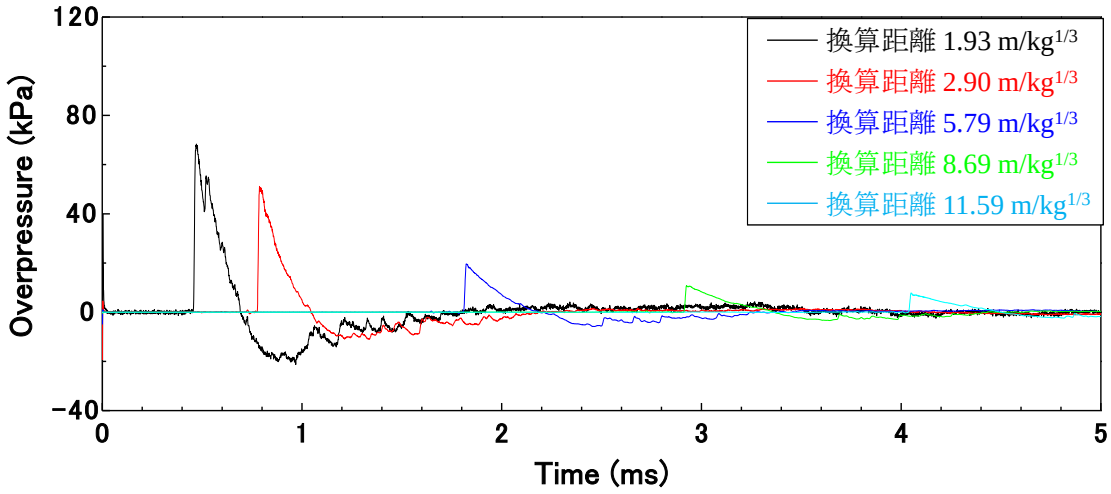


表 5.A.1-22a　No.A2　70°　（2 回目）

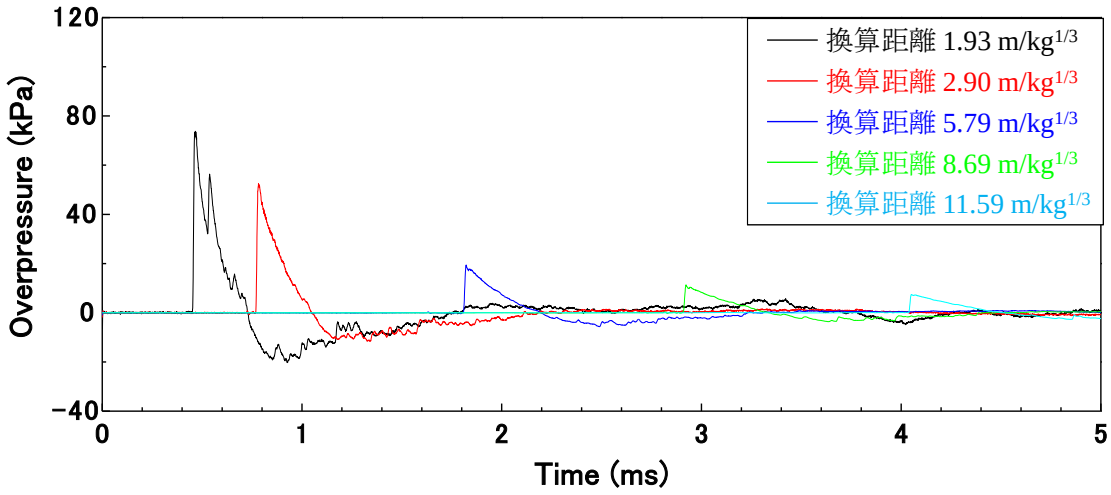


表 5.A.1-22b　No.A2　80°　（2 回目）

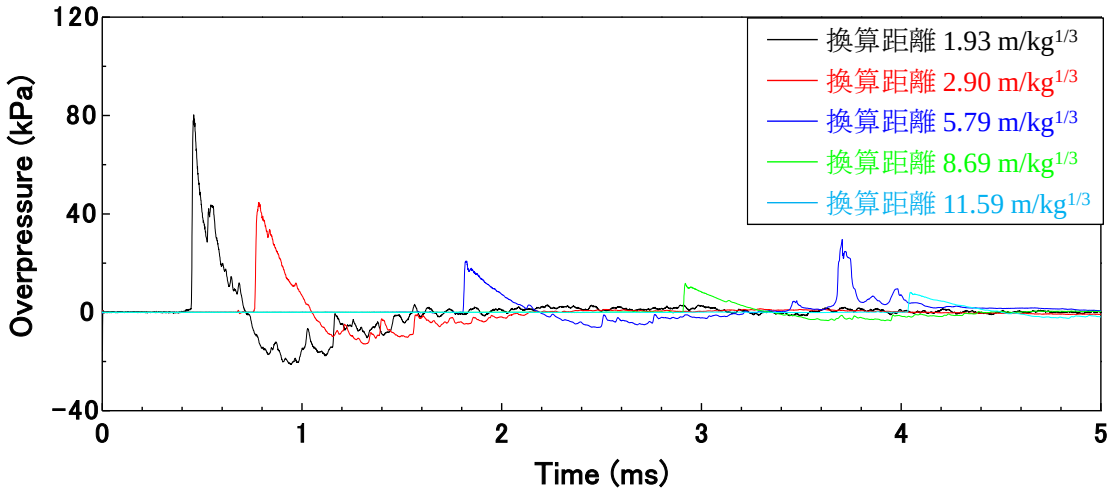


表 5.A.1-22c　No.A2　90°　（2 回目）

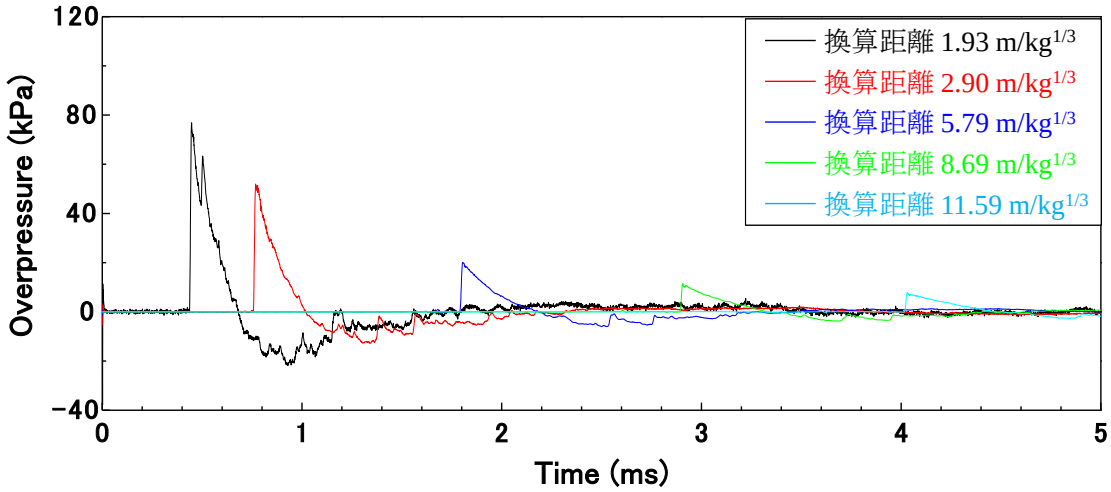


表 5.A.1-23a　No.A2　100°　（1 回目）

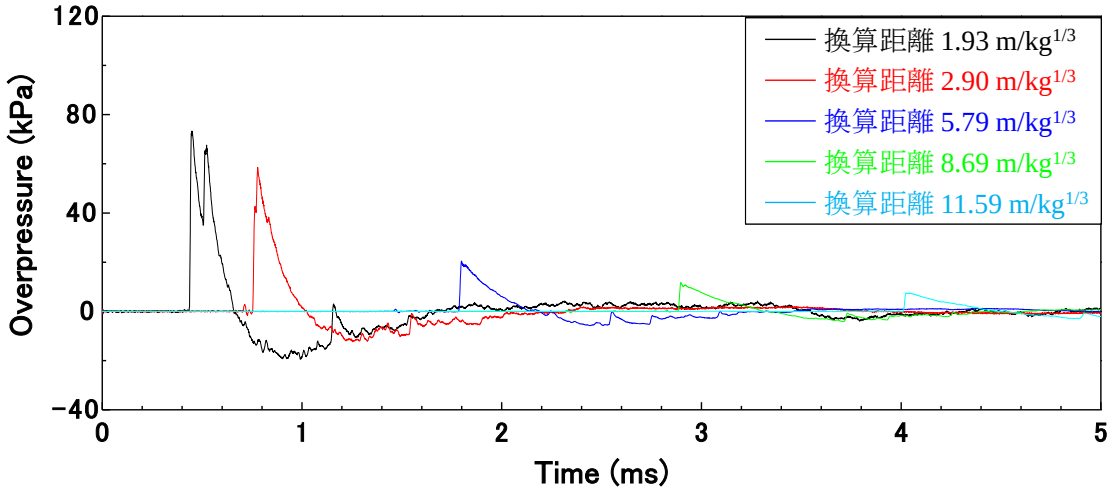


表 5.A.1-23b　No.A2　110°　（1 回目）

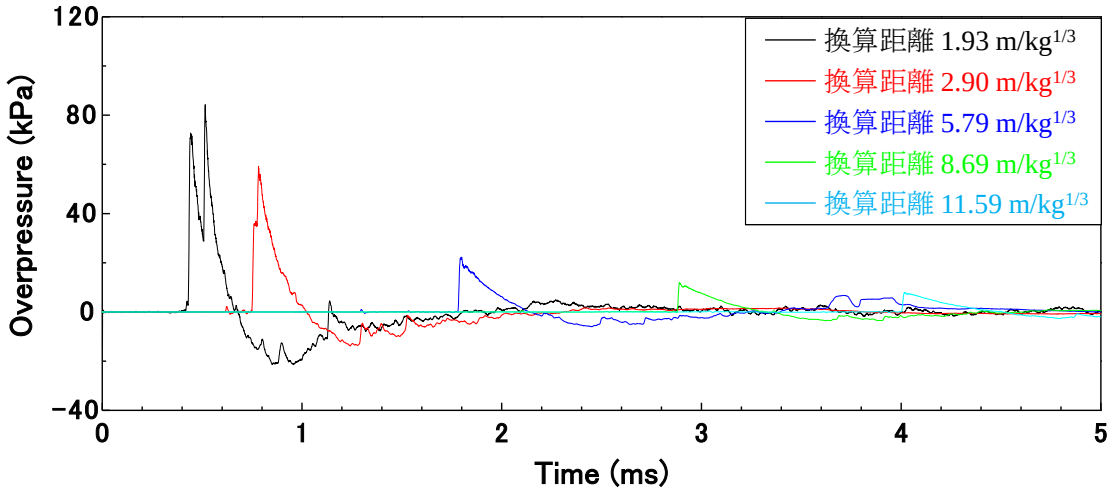


表 5.A.1-23c　No.A2　120°　（1 回目）

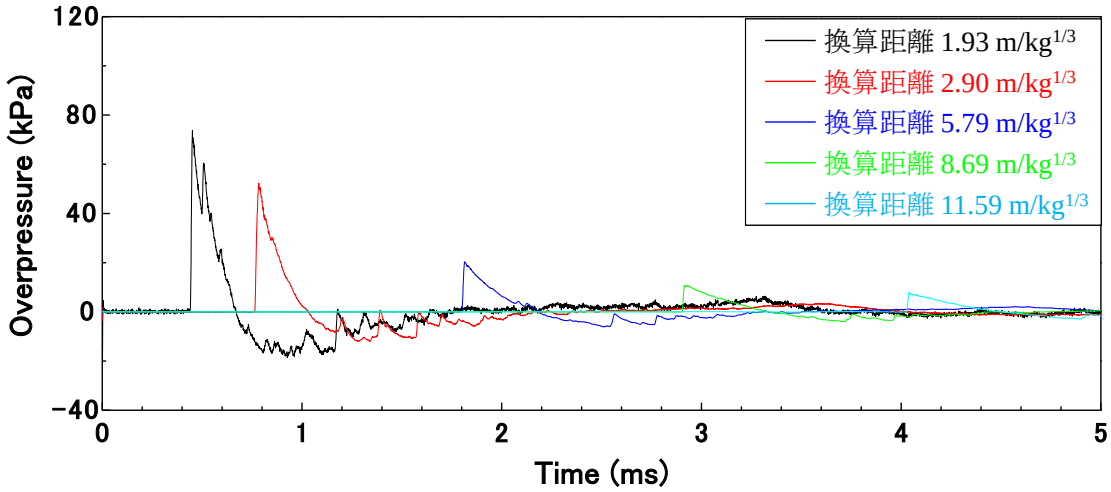


表 5.A.1-24a　No.A2　100°　（2 回目）

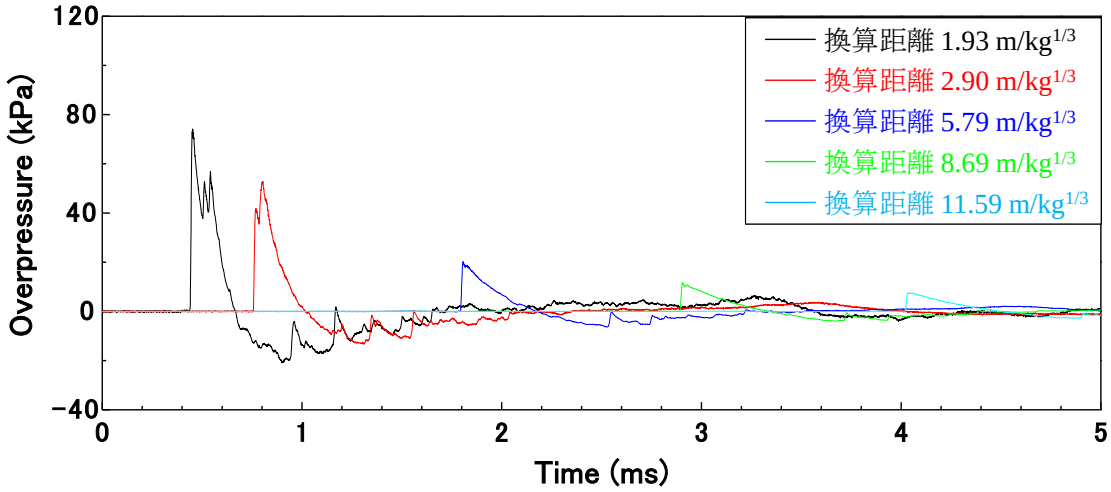


表 5.A.1-24b　No.A2　110°　（2 回目）

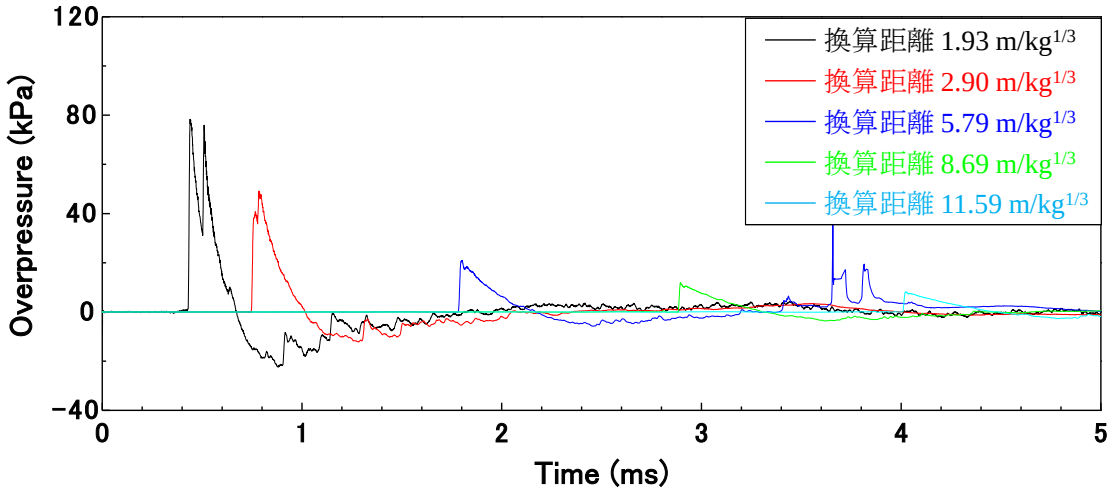


表 5.A.1-24c　No.A2　120°　（2 回目）

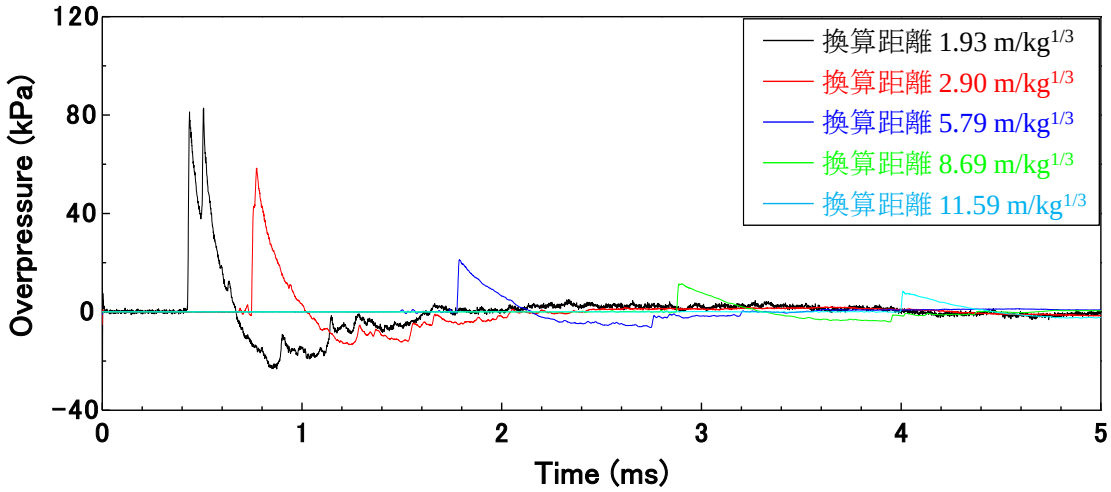


表 5.A.1-25a　No.A2　130°　（1 回目）

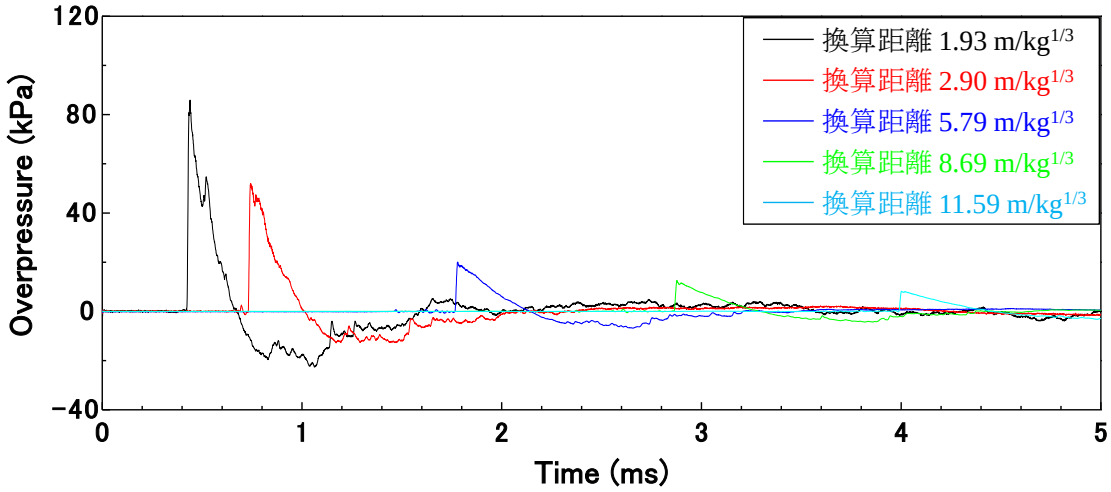


表 5.A.1-25b　No.A2　140°　（1 回目）

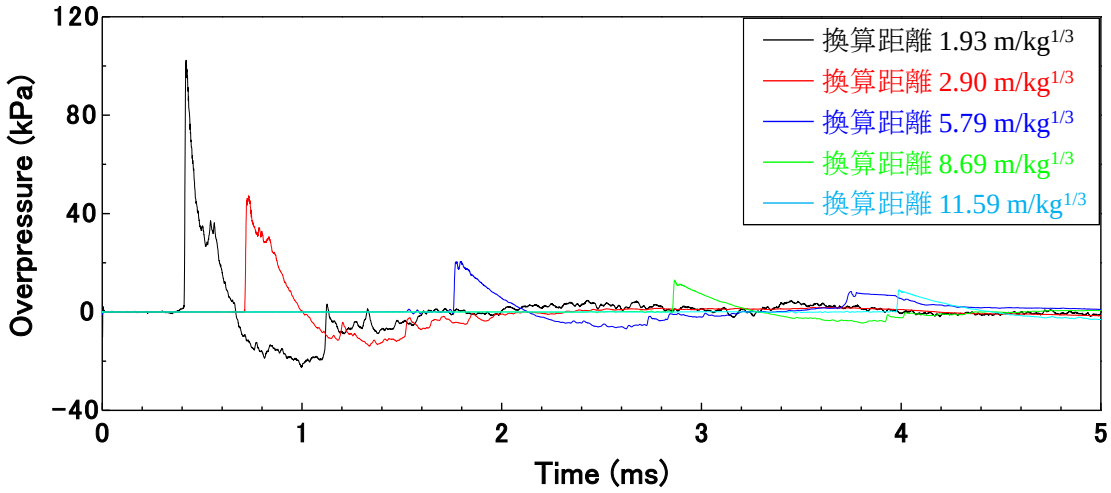


表 5.A.1-25c　No.A2　150°　（1 回目）

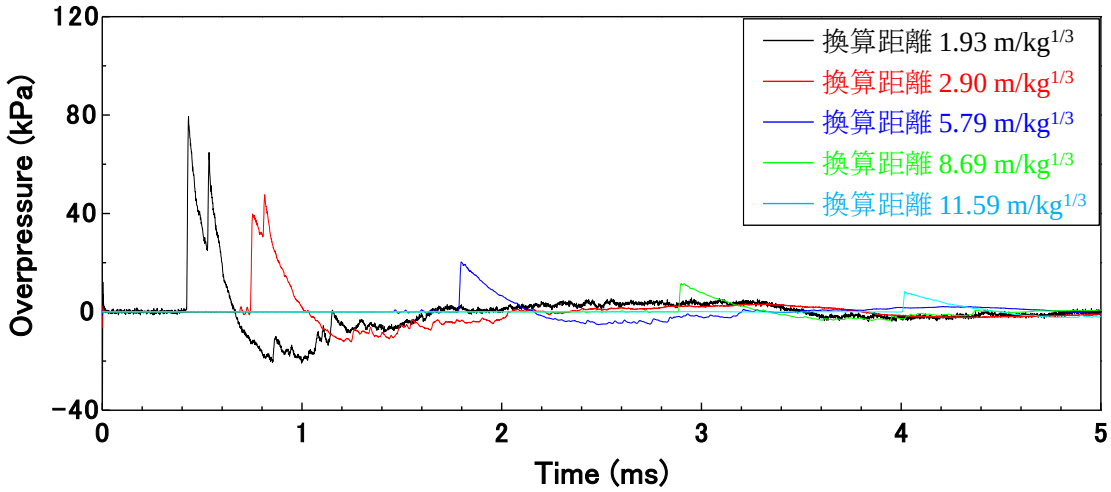


表 5.A.1-26a　No.A2　130°　（2 回目）

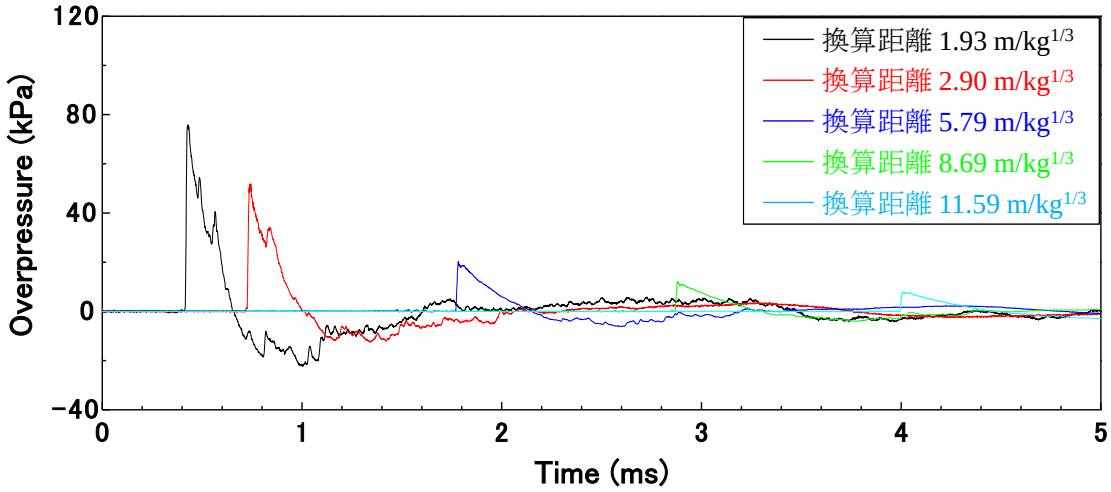


表 5.A.1-26b　No.A2　140°　（2 回目）

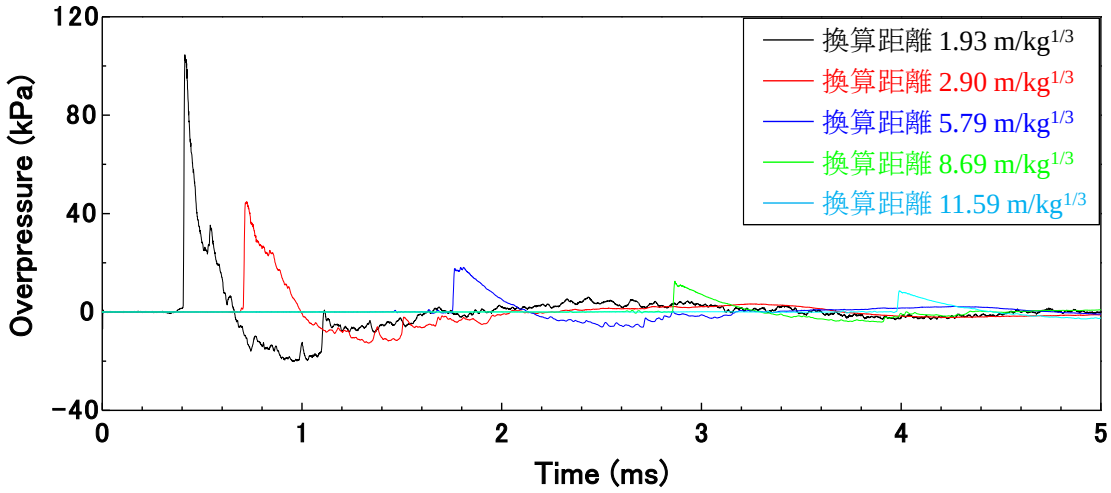


表 5.A.1-26c　No.A2　150°　（2 回目）

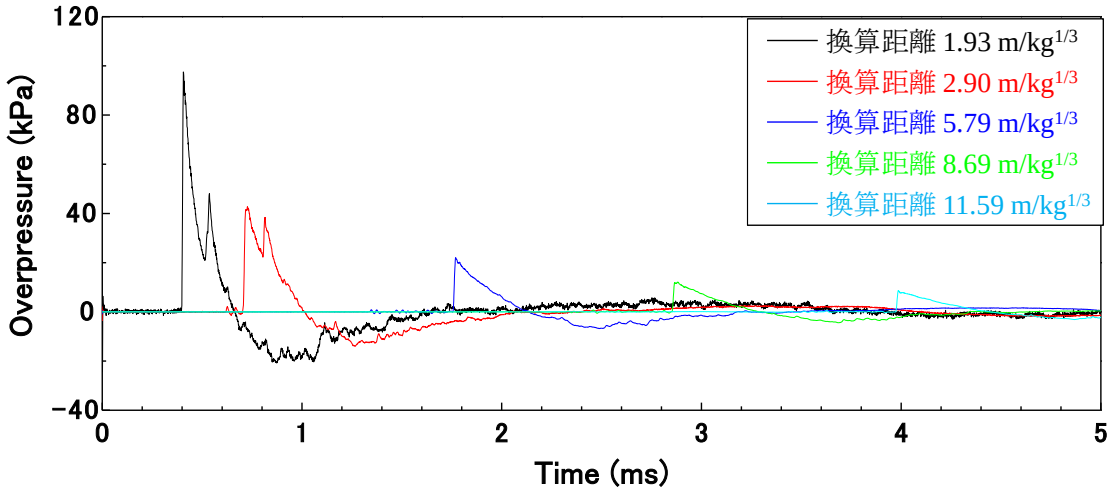


表 5.A.1-27a　No.A2　160°　（1 回目）

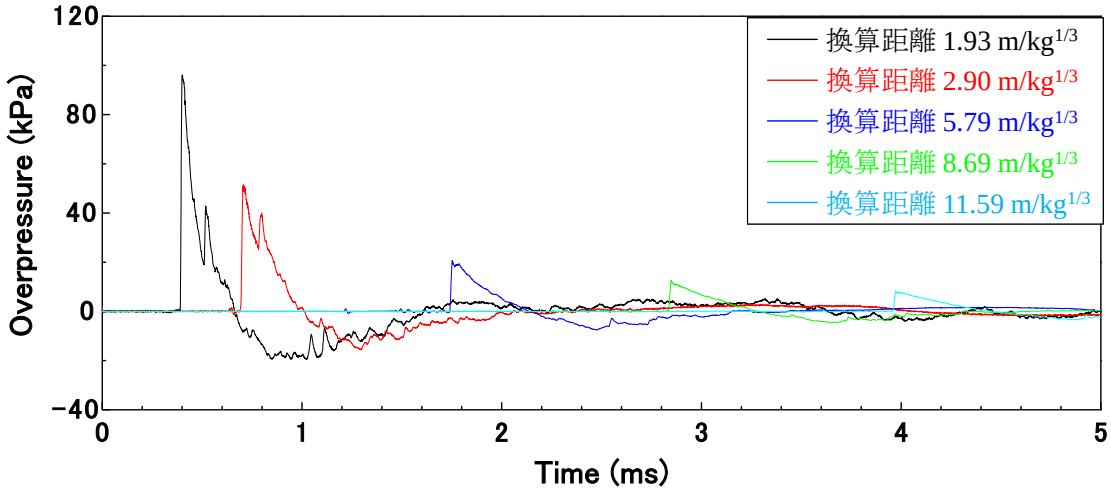


表 5.A.1-27b　No.A2　170°　（1 回目）

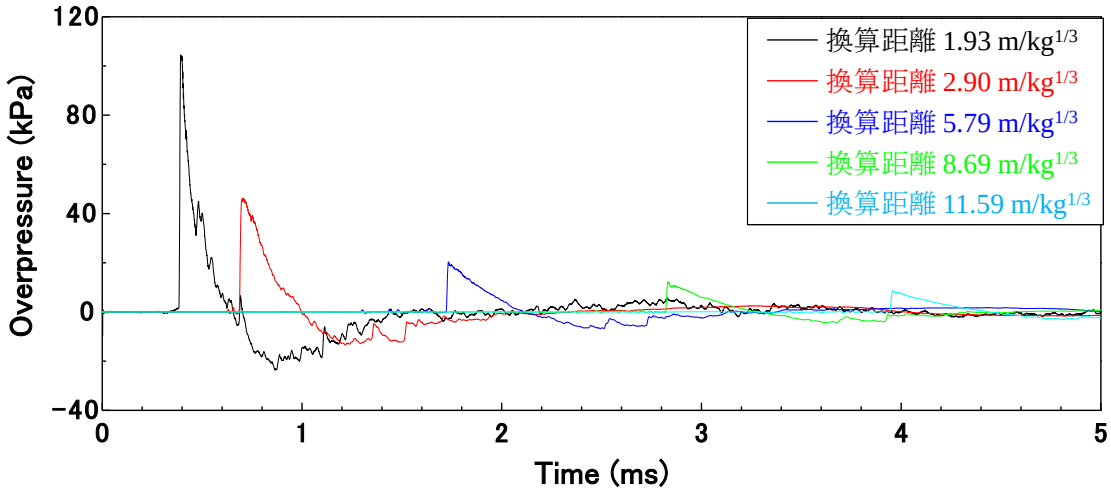


表 5.A.1-27c　No.A2　180°　（1 回目）

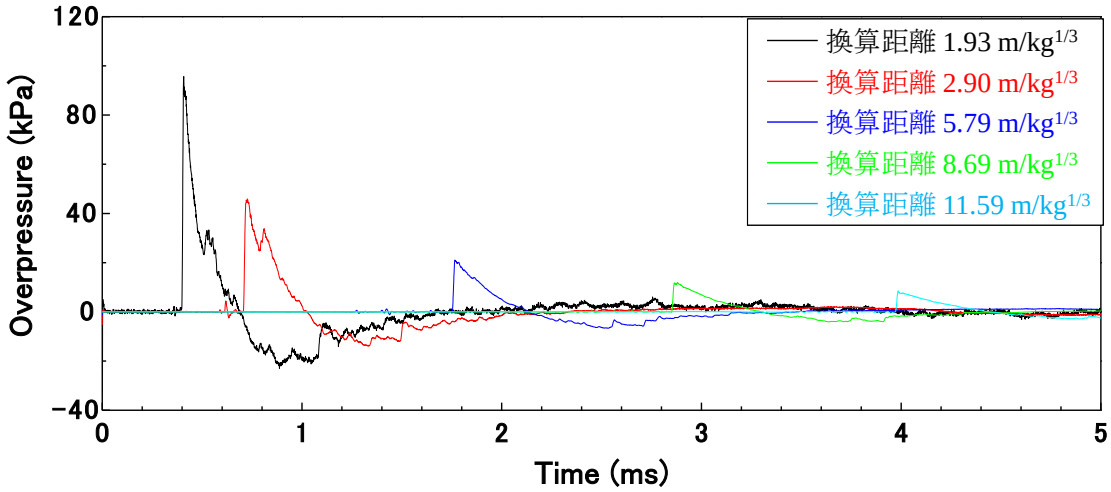


表 5.A.1-28a　No.A2　160°　（2 回目）

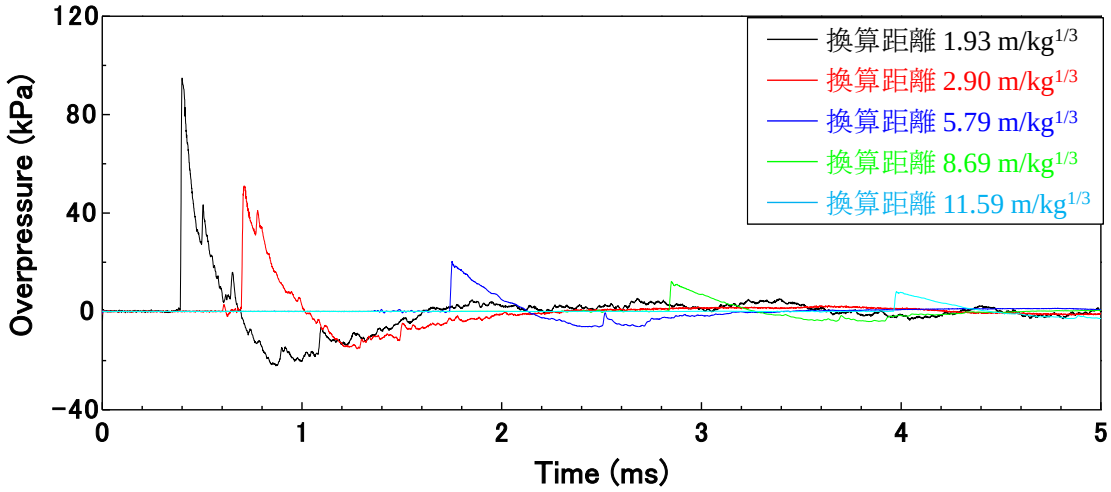


表 5.A.1-28b　No.A2　170°　（2 回目）

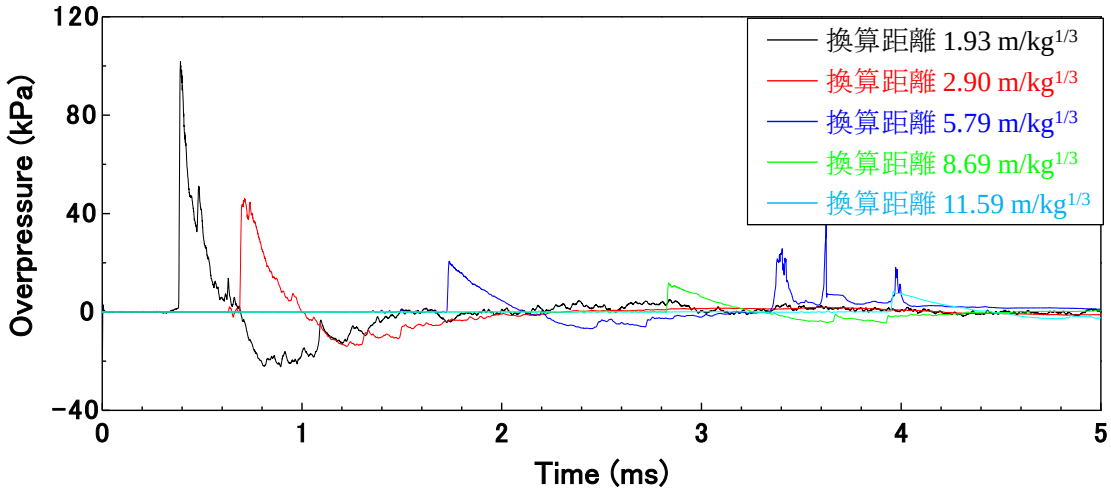


表 5.A.1-28c　No.A2　180°　（2 回目）

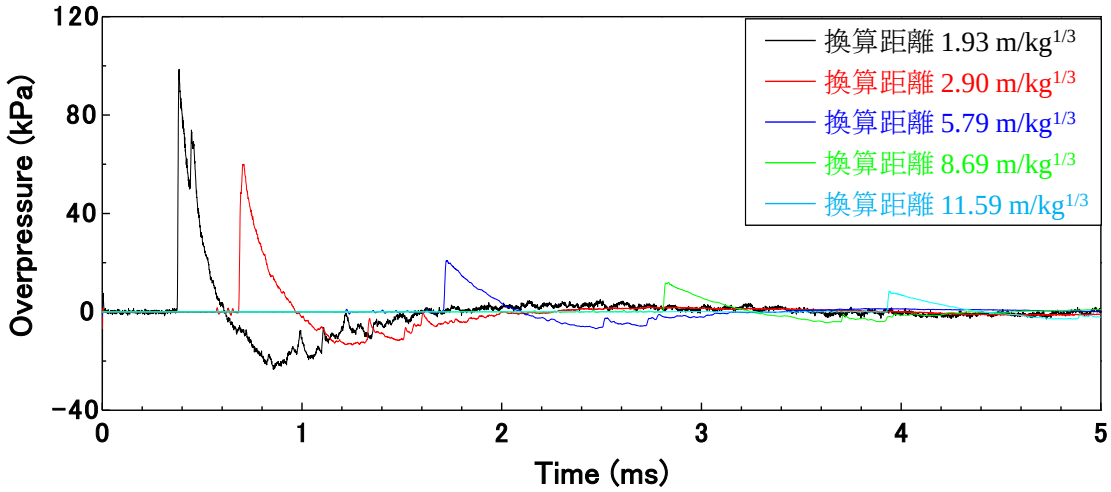


表 5.A.1-29a　No.A2　190°　（1 回目）

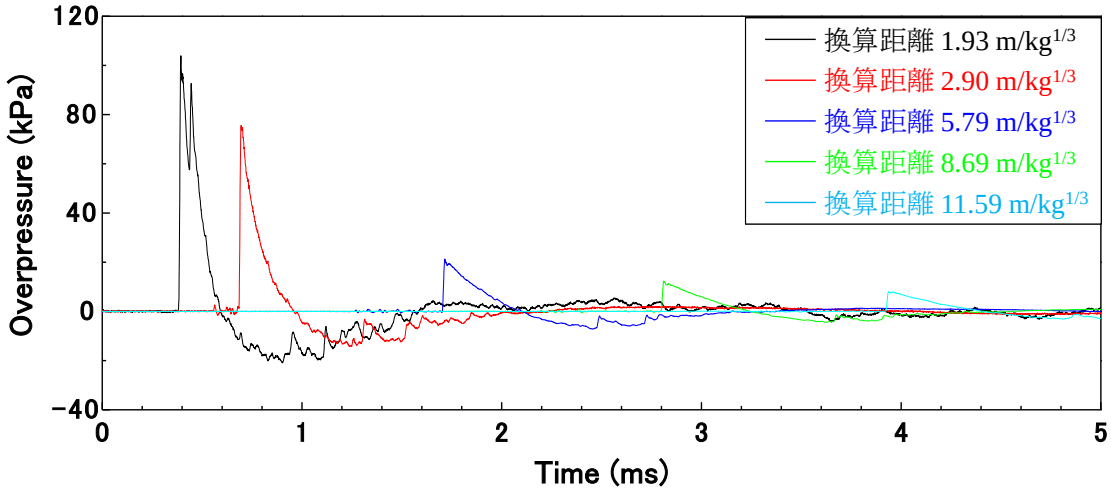


表 5.A.1-29b　No.A2　200°　（1 回目）

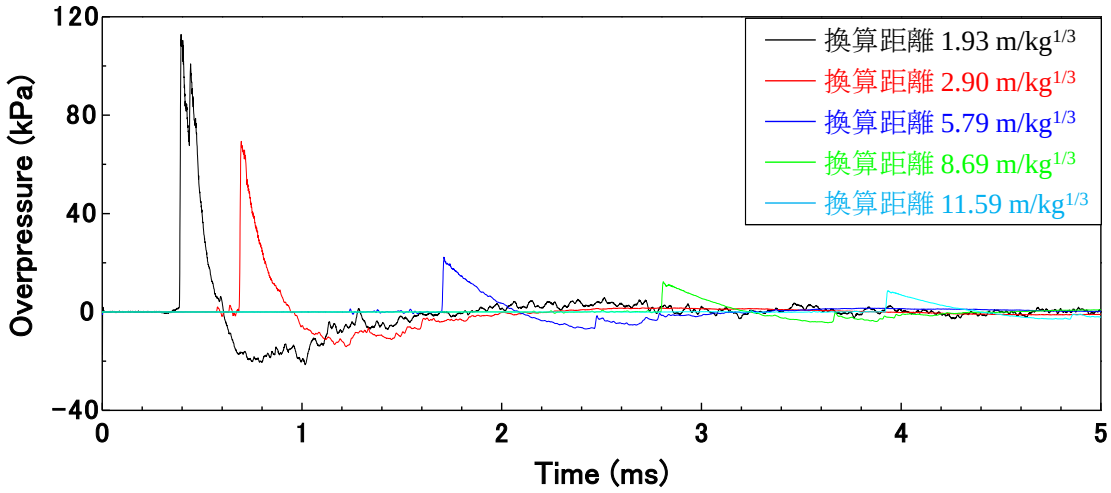


表 5.A.1-29c　No.A2　210°　（1 回目）

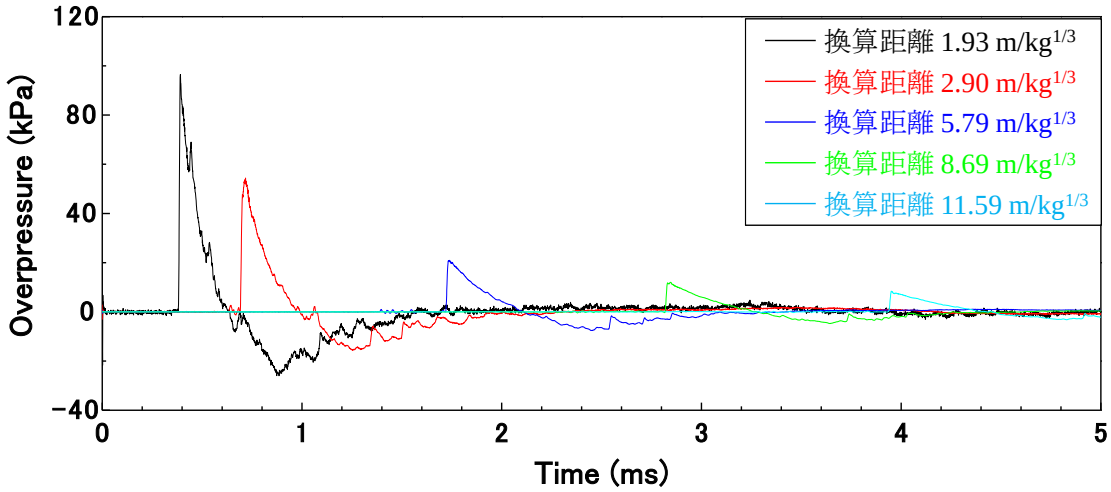


表 5.A.1-30a　No.A2　190°　（2 回目）

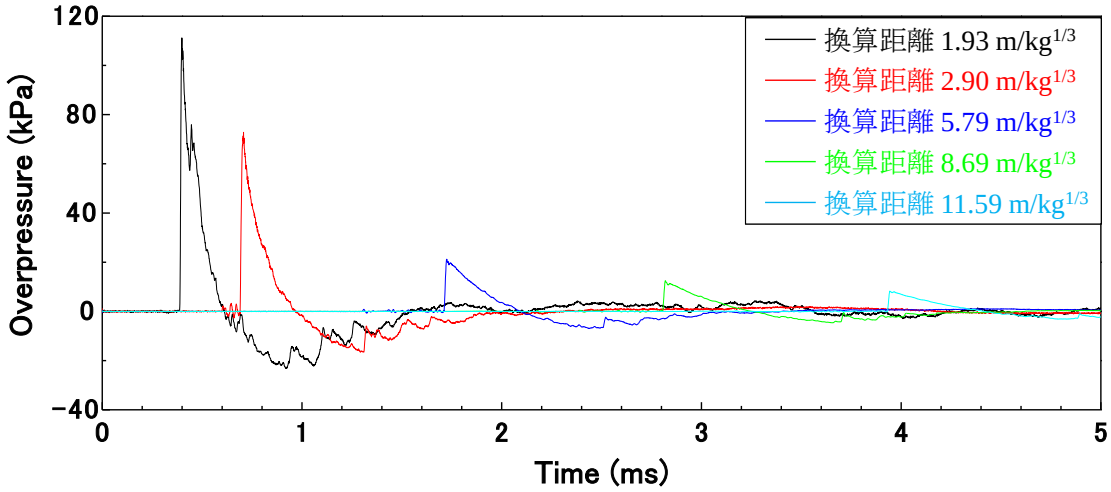


表 5.A.1-30b　No.A2　200°　（2 回目）

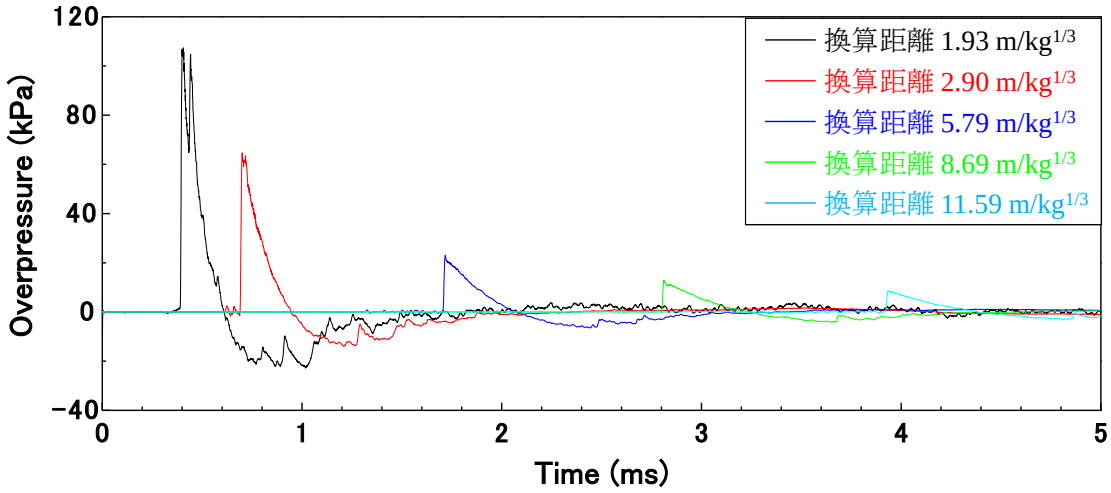


表 5.A.1-30c　No.A2　210°　（2 回目）

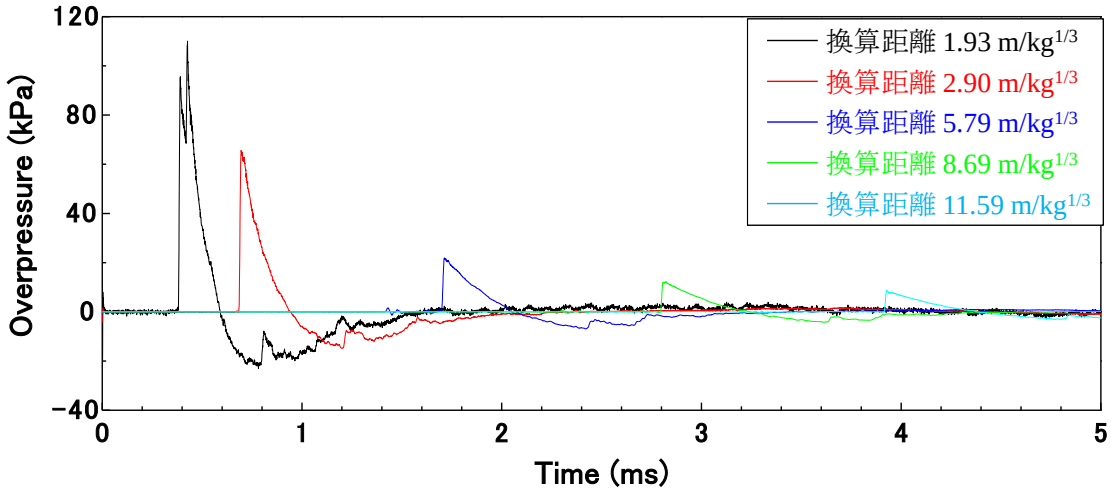


表 5.A.1-31a　No.A2　220°　（1 回目）

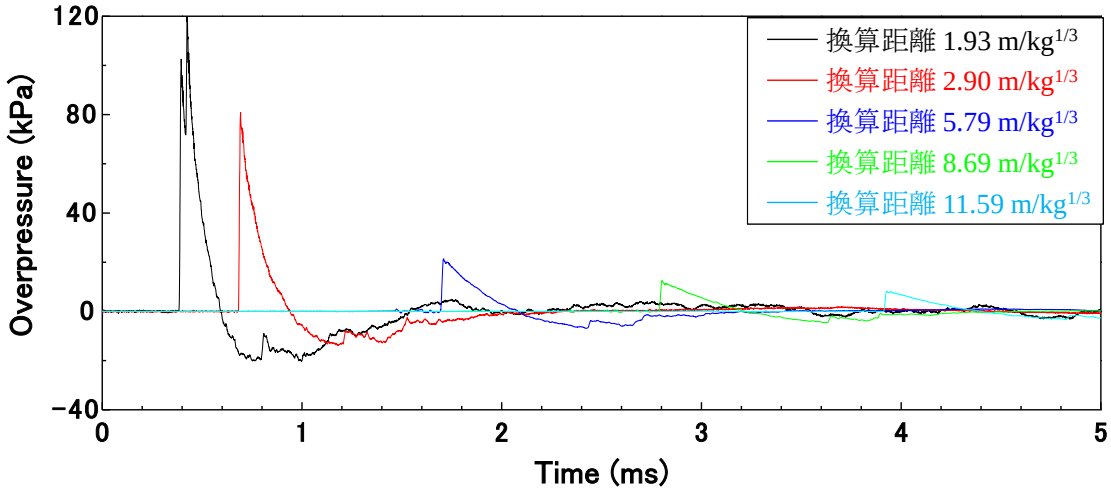


表 5.A.1-31b　No.A2　230°　（1 回目）

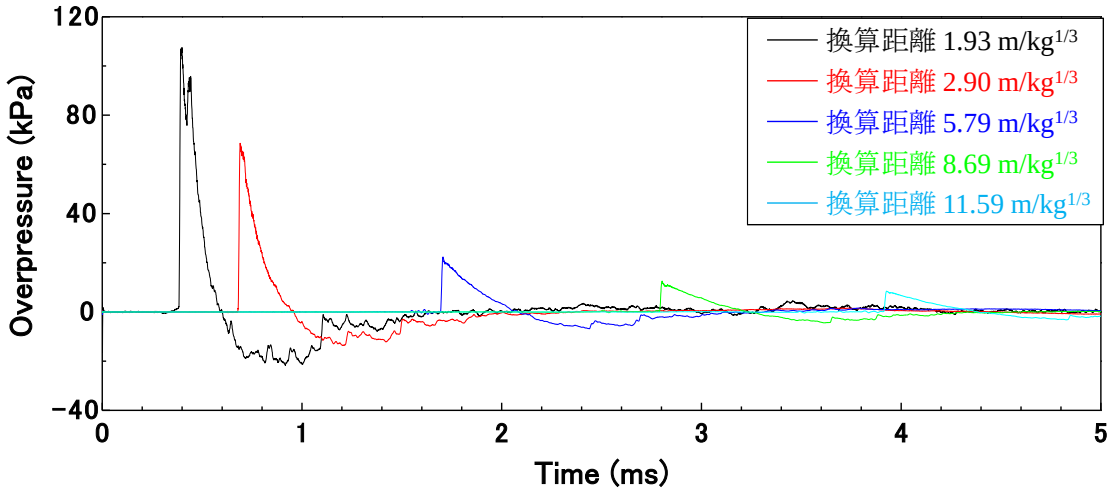


表 5.A.1-31c　No.A2　240°　（1 回目）

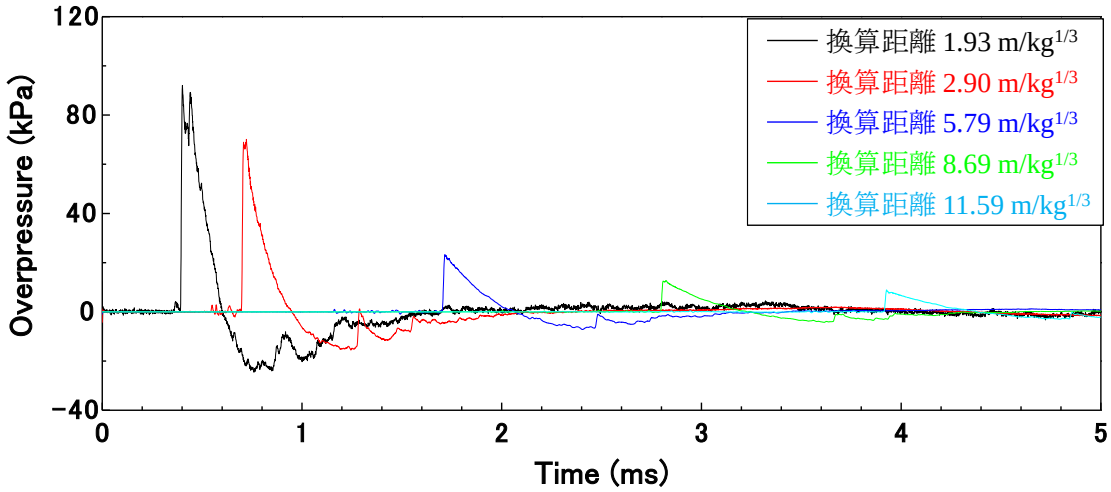


表 5.A.1-32a　No.A2　220°　（2 回目）

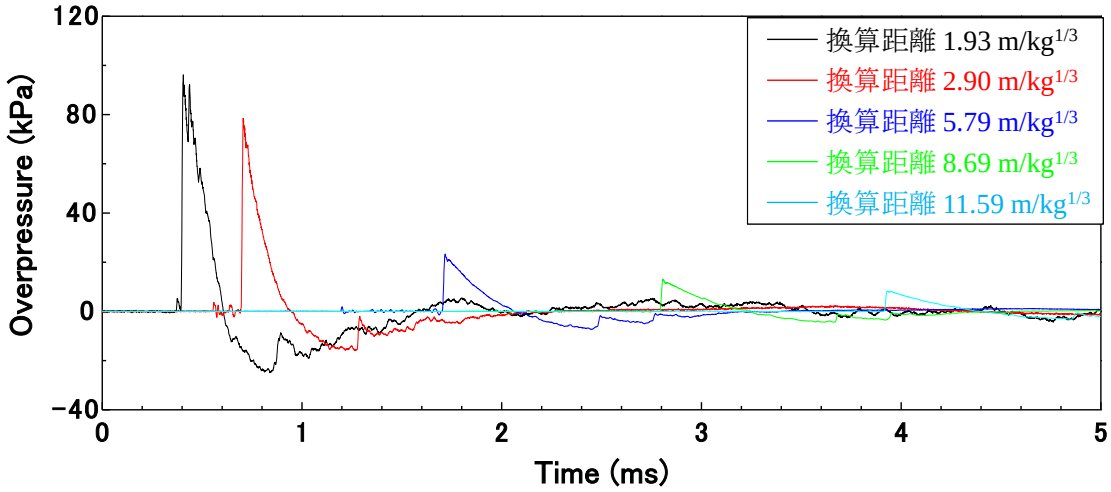


表 5.A.1-32b　No.A2　230°　（2 回目）

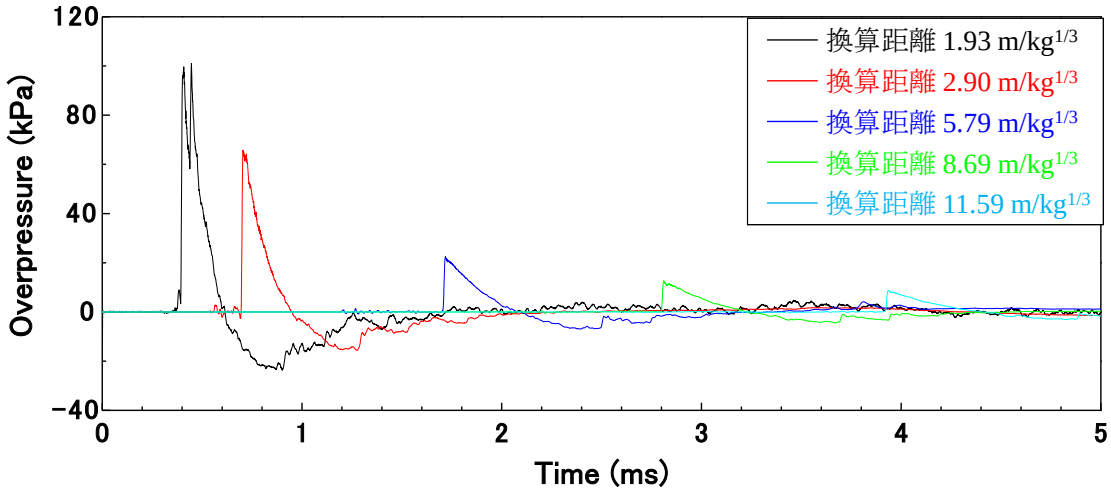


表 5.A.1-32c　No.A2　240°　（2 回目）

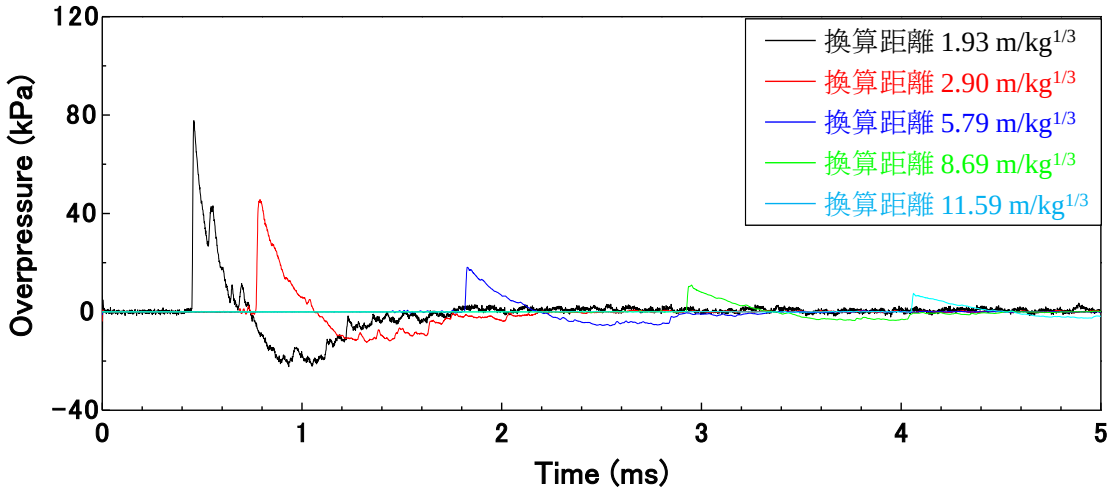


表 5.A.1-33a　No.A3　-10°　（1 回目）

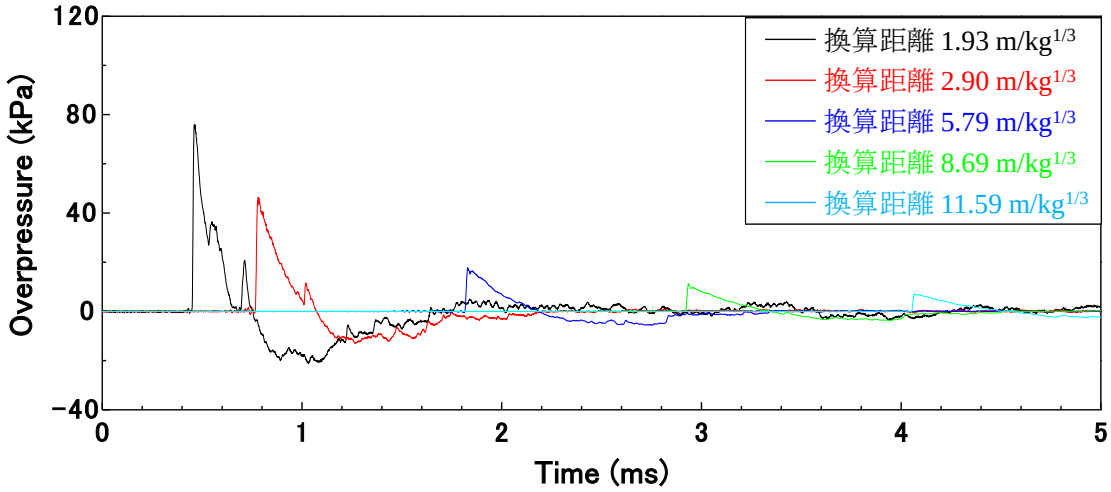


表 5.A.1-33b　No.A3　0°　（1 回目）

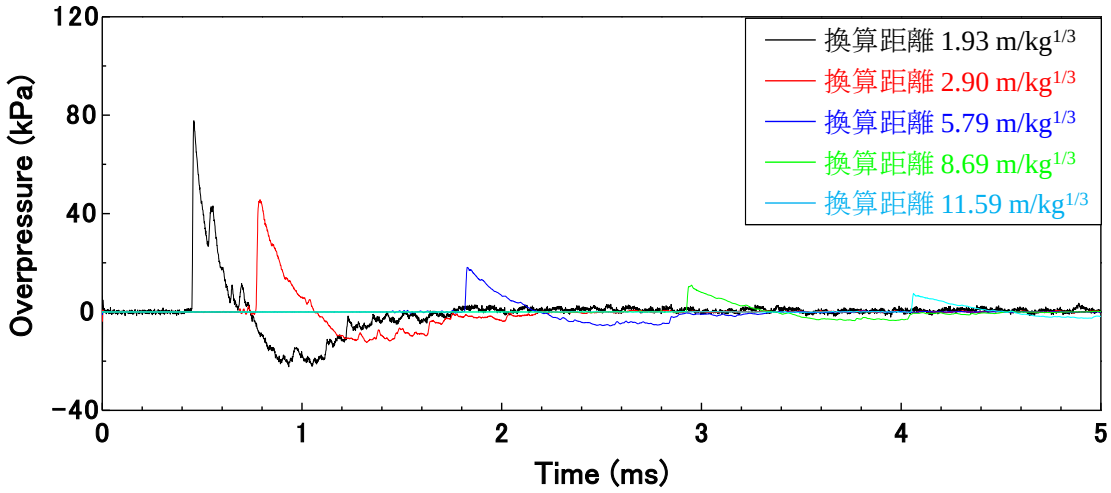


表 5.A.1-33c　No.A3　10°　（1 回目）

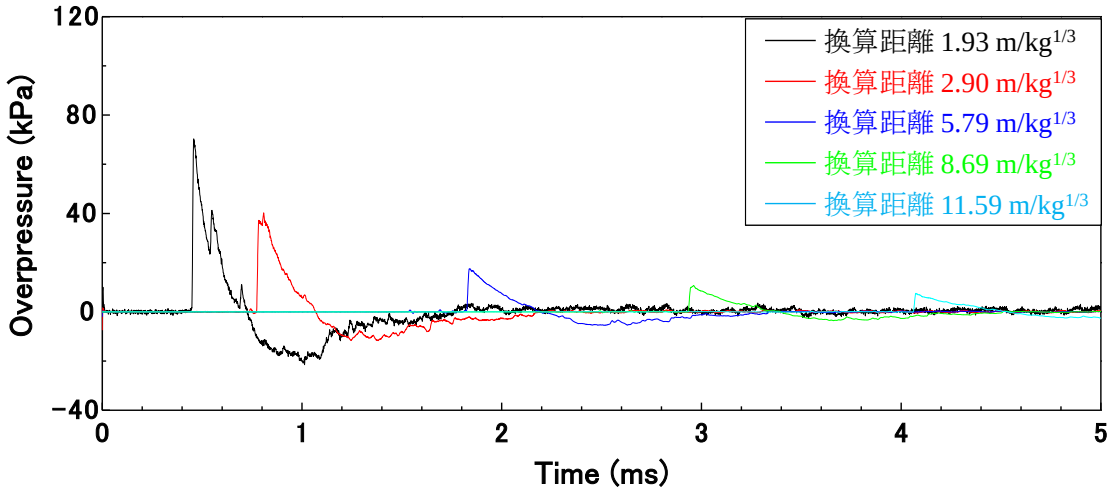


表 5.A.1-34a　No.A3　-10°　（2 回目）

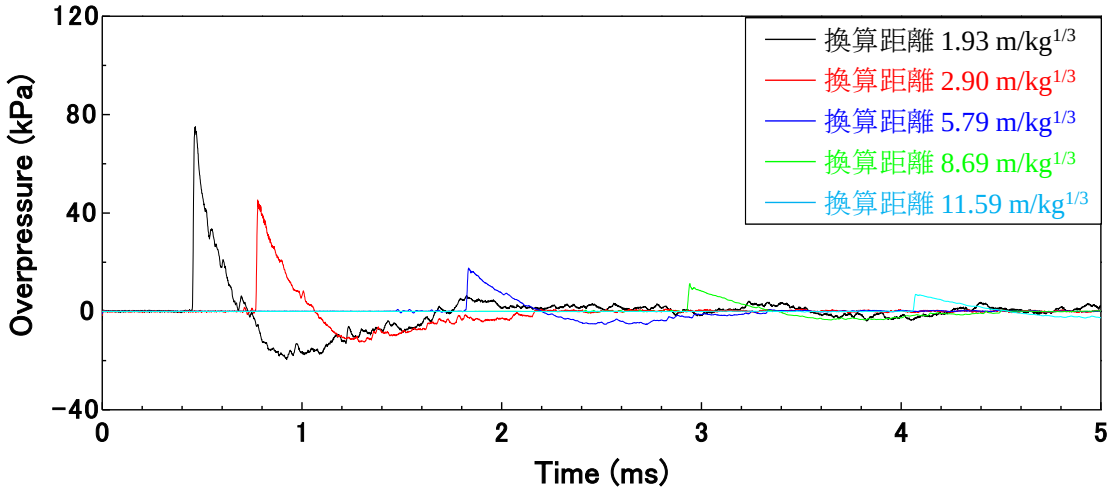


表 5.A.1-34b　No.A3　0°　（2 回目）

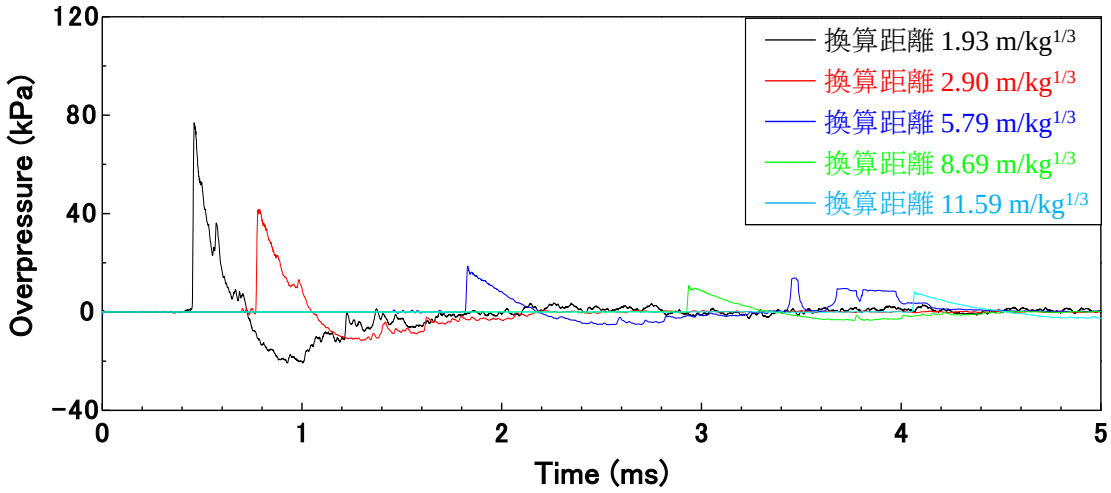


表 5.A.1-34c　No.A3　10°　（2 回目）

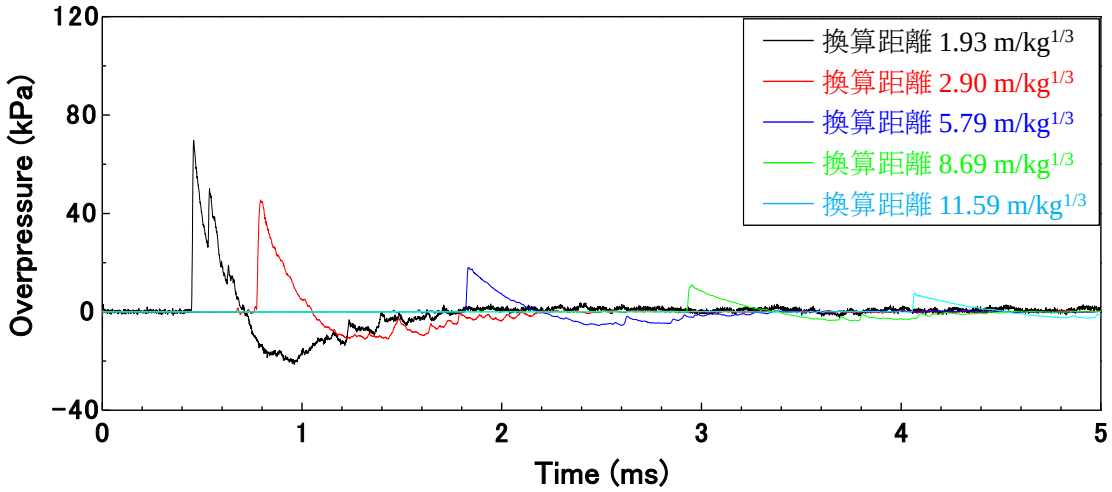


表 5.A.1-35a　No.A3　20°　（1 回目）

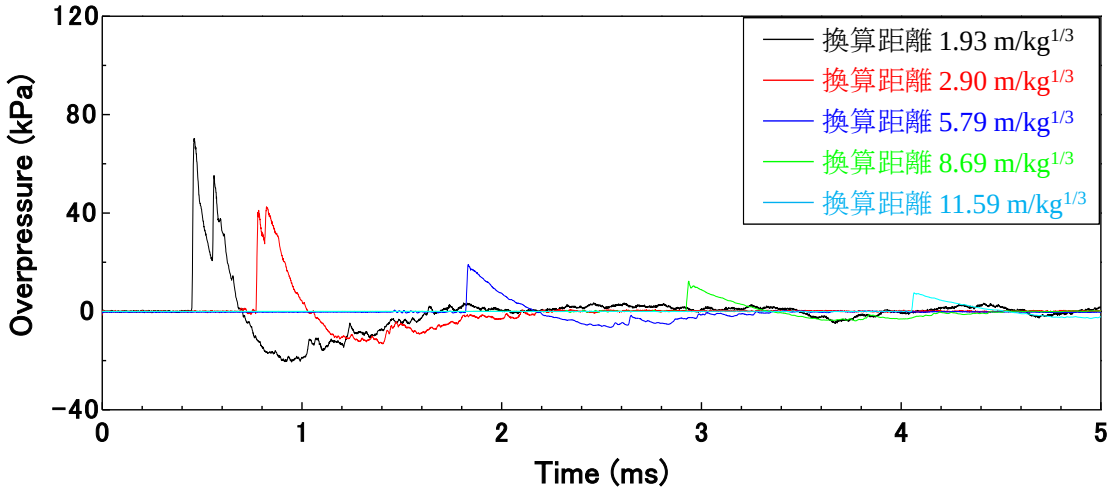


表 5.A.1-35b　No.A3　30°　（1 回目）

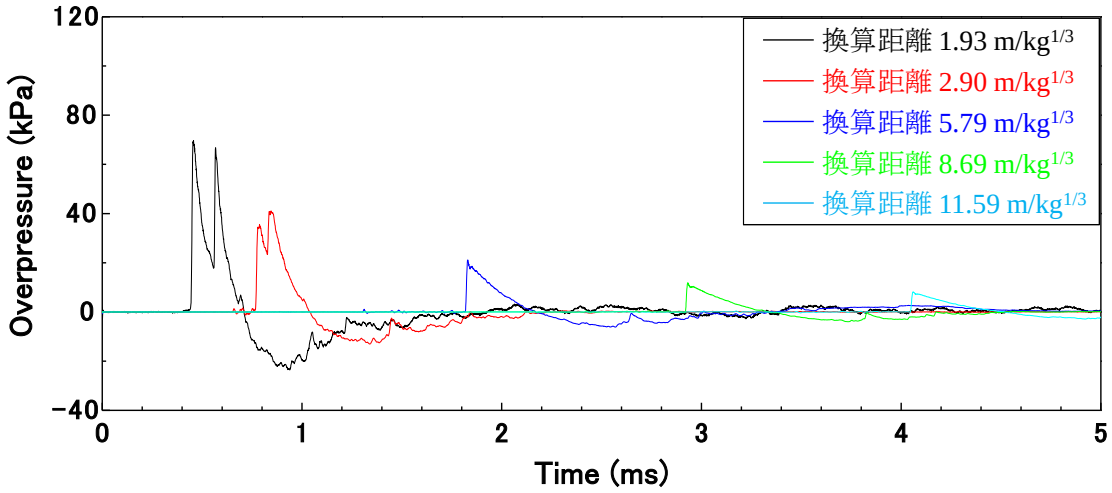


表 5.A.1-35c　No.A3　40°　（1 回目）

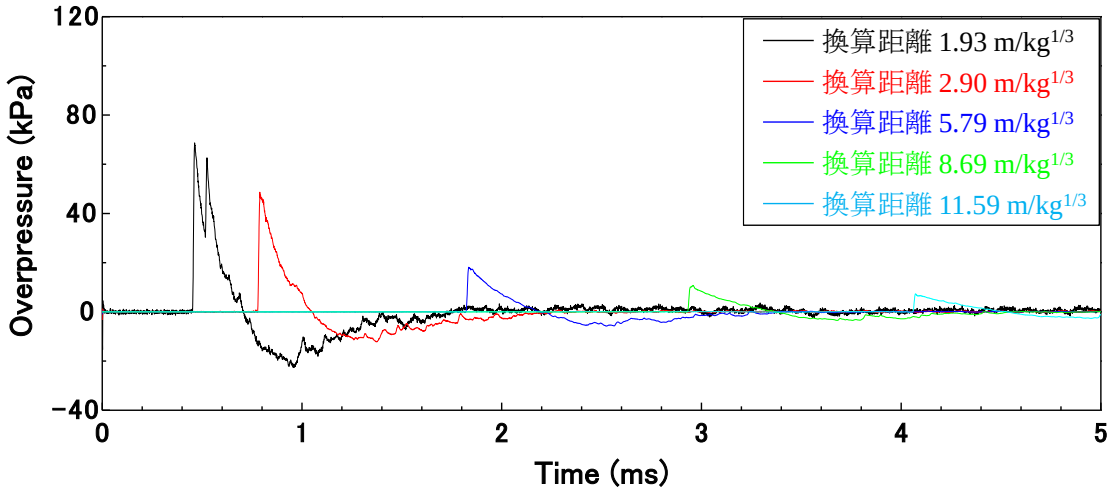


表 5.A.1-36a　No.A3　20°　（2 回目）

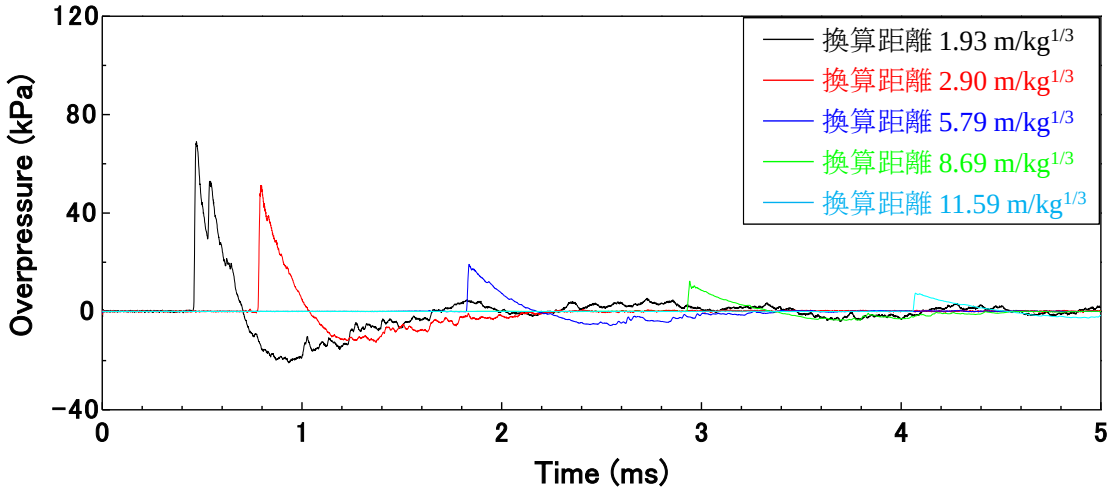


表 5.A.1-36b　No.A3　30°　（2 回目）

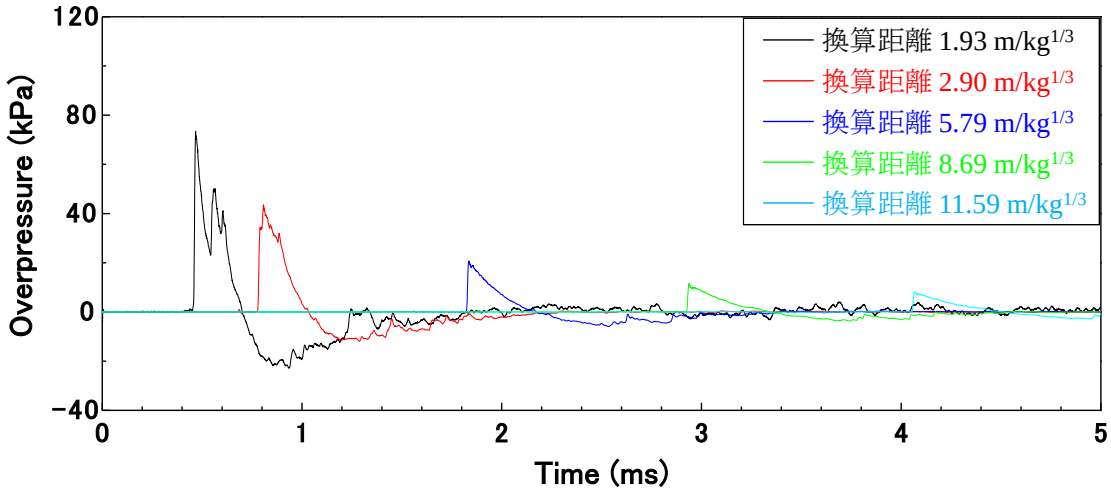


表 5.A.1-36c　No.A3　40°　（2 回目）

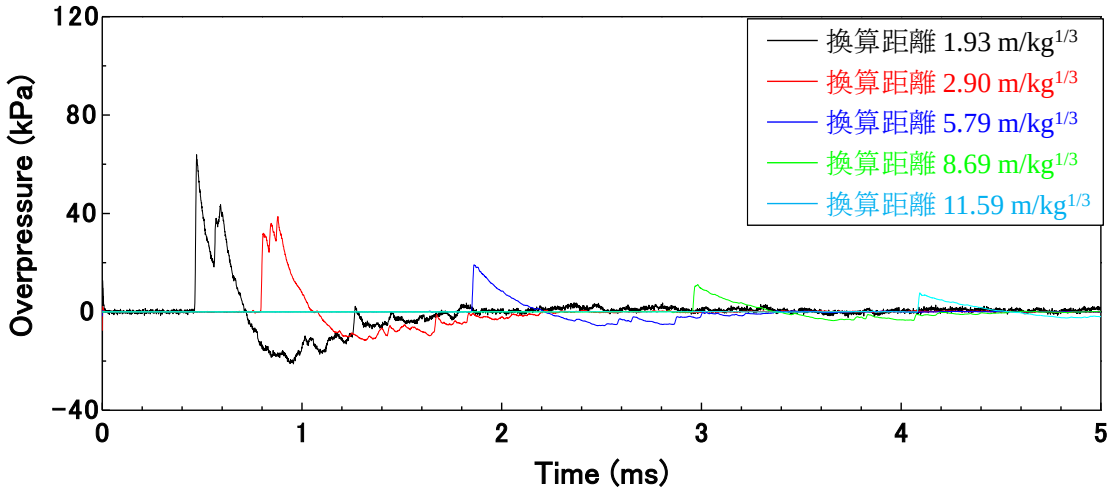


表 5.A.1-37a　No.A3　50°　（1 回目）

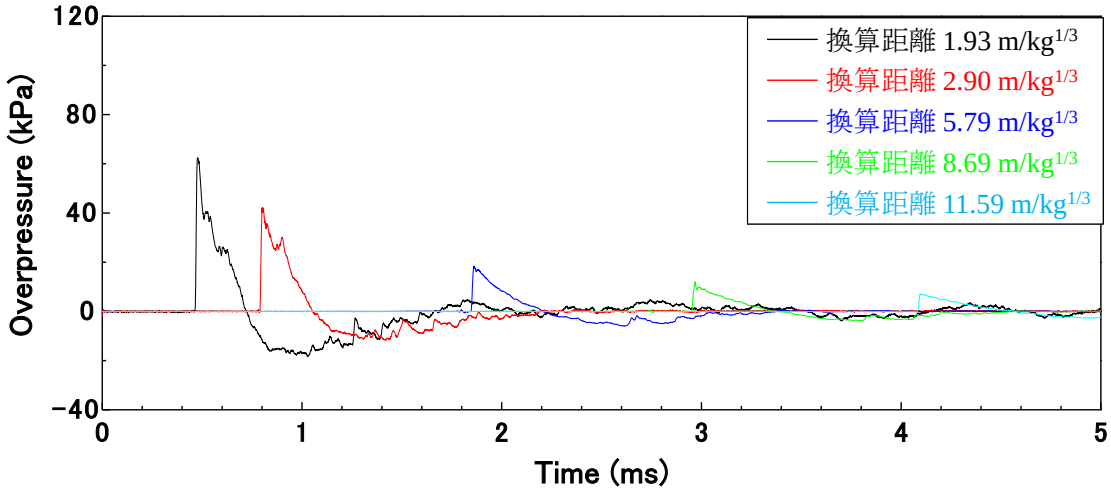


表 5.A.1-37b　No.A3　60°　（1 回目）

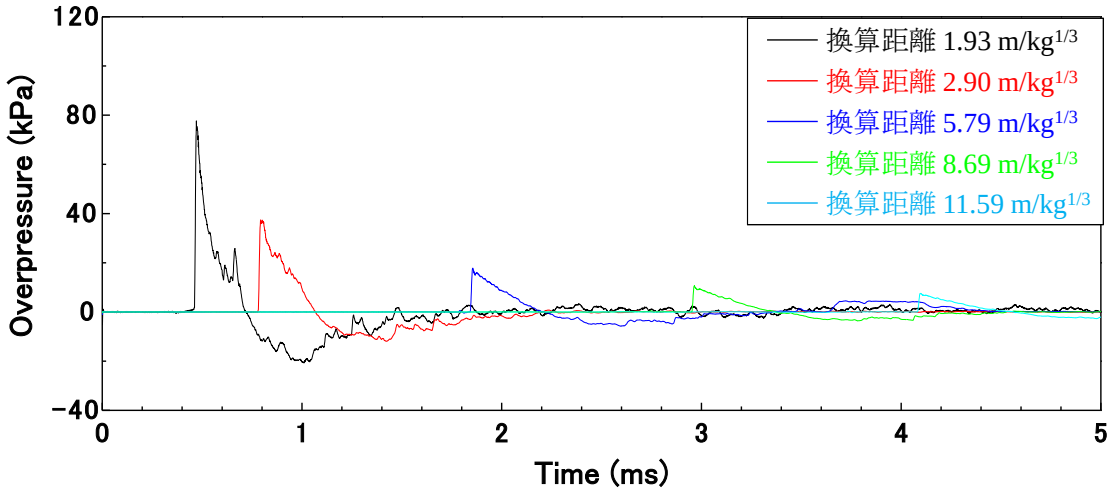


表 5.A.1-37c　No.A3　70°　（1 回目）

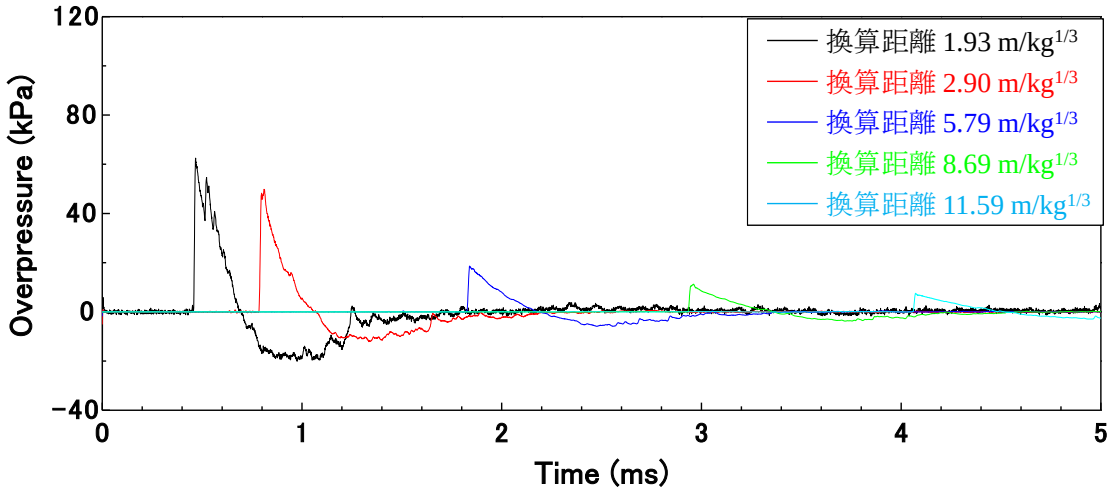


表 5.A.1-38a　No.A3　50°　（2 回目）

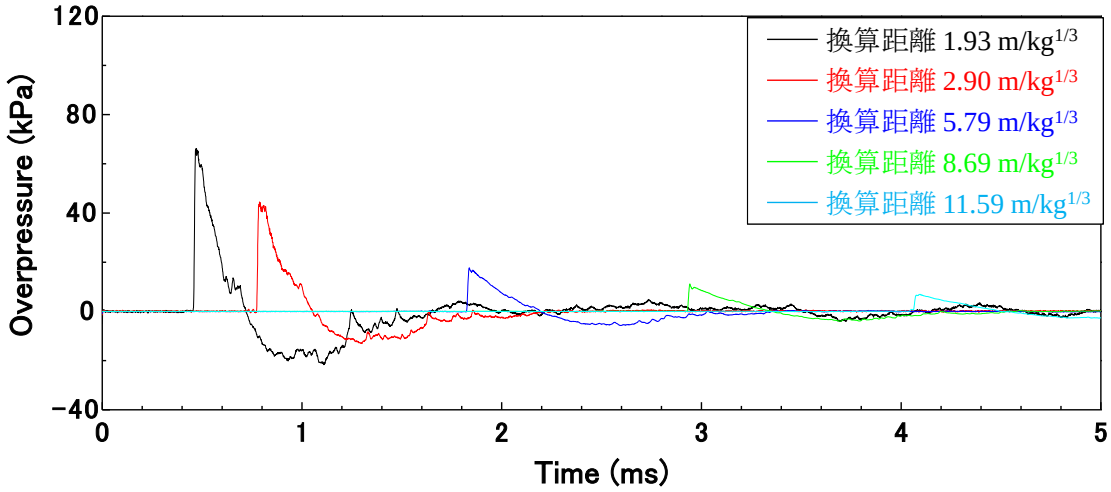


表 5.A.1-38b　No.A3　60°　（2 回目）

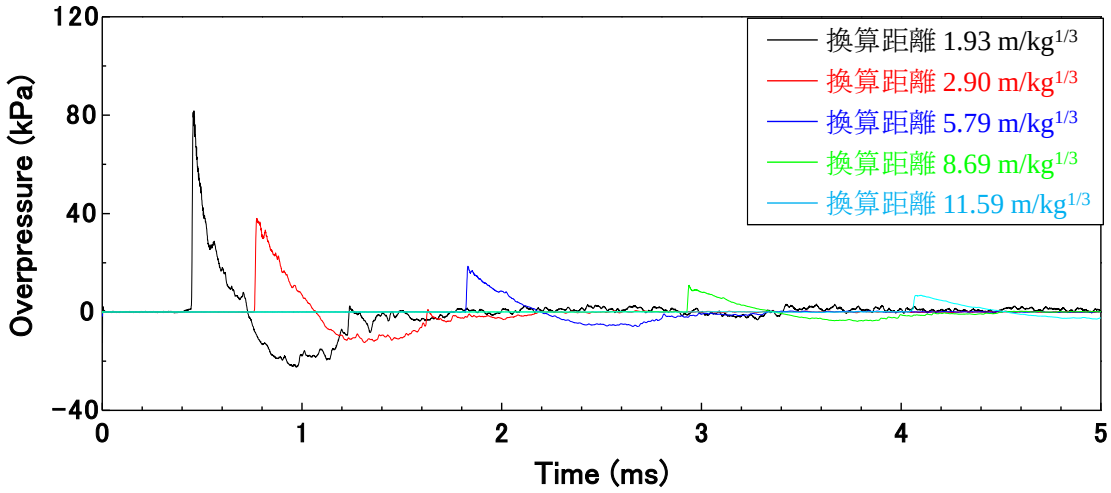


表 5.A.1-38c　No.A3　70°　（2 回目）

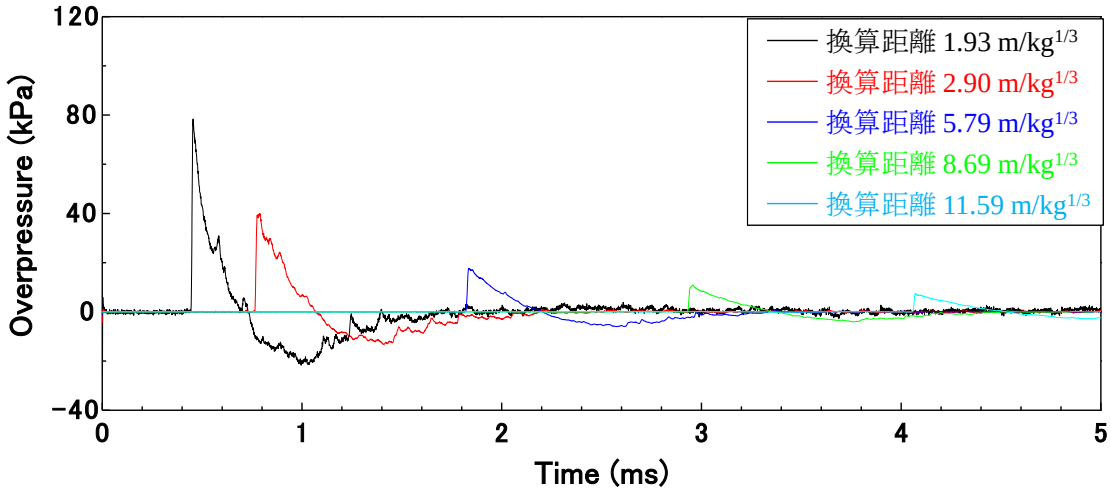


表 5.A.1-39a　No.A3　80°　（1 回目）

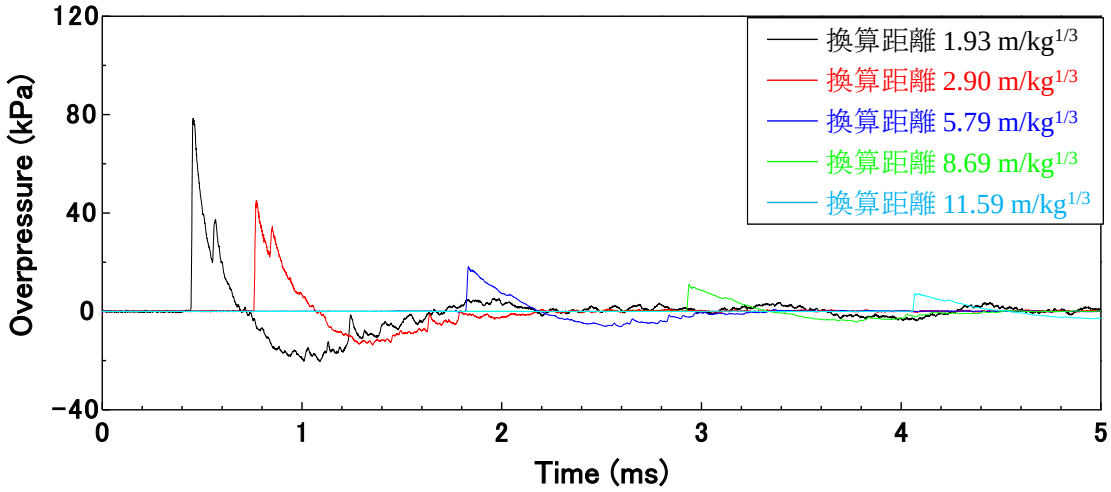


表 5.A.1-39b　No.A3　90°　（1 回目）

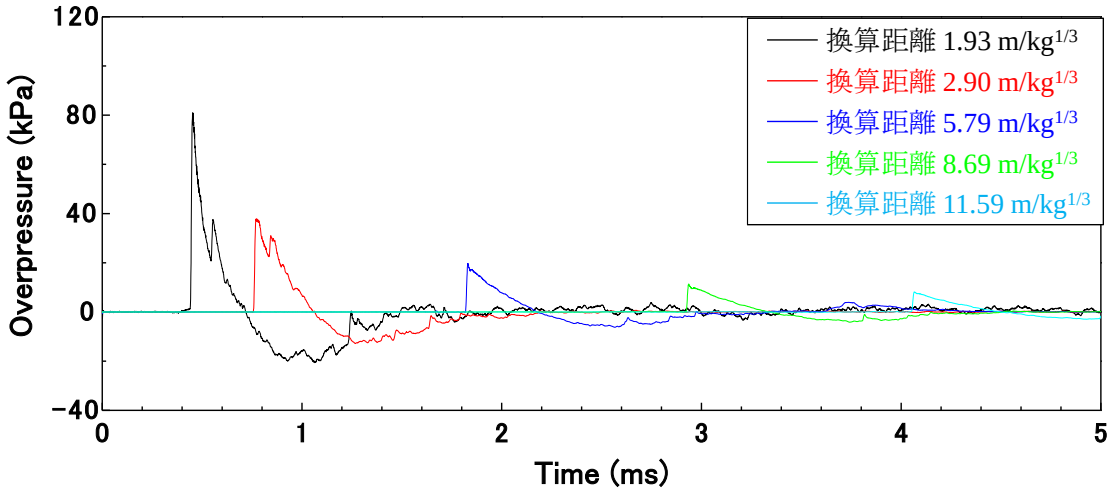


表 5.A.1-39c　No.A3　100°　（1 回目）

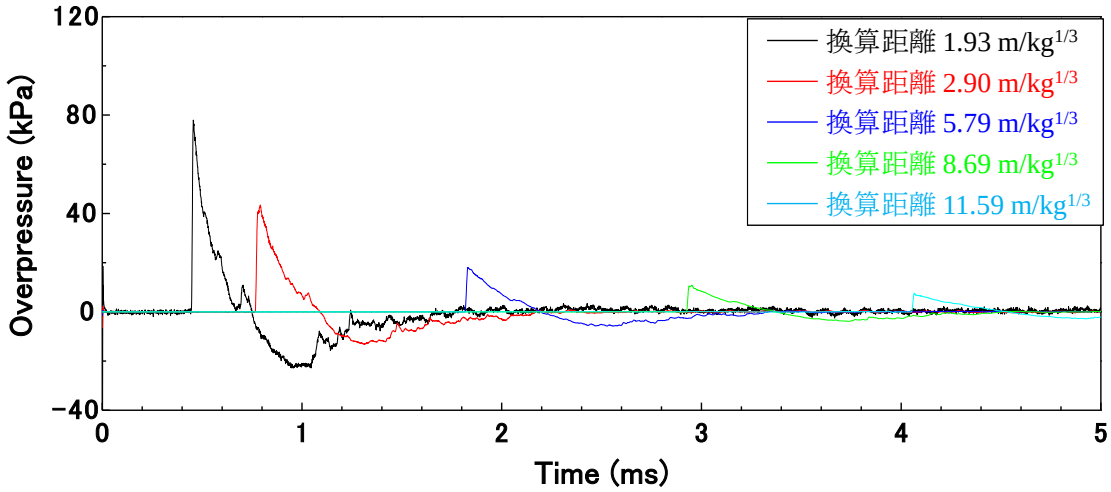


表 5.A.1-40a　No.A3　80°　（2 回目）

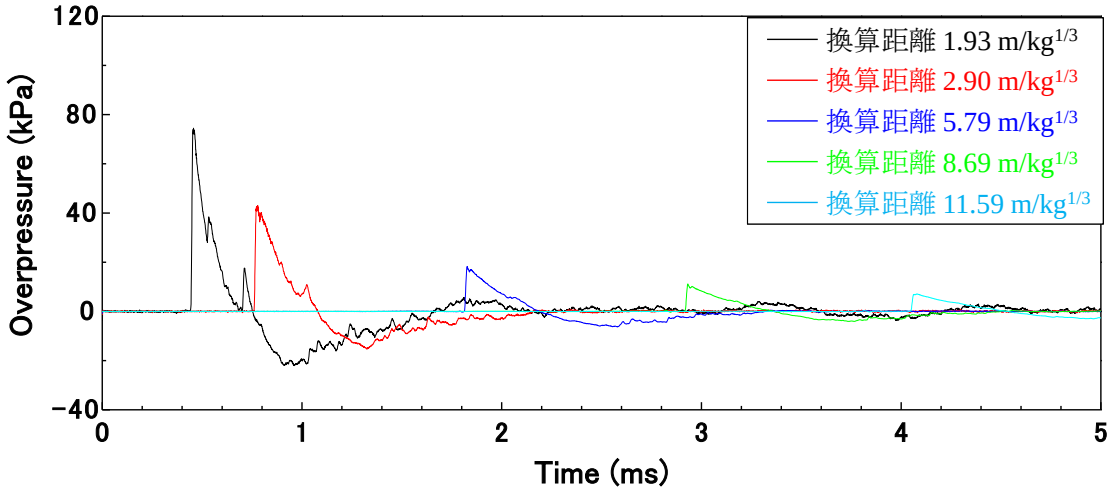


表 5.A.1-40b　No.A3　90°　（2 回目）

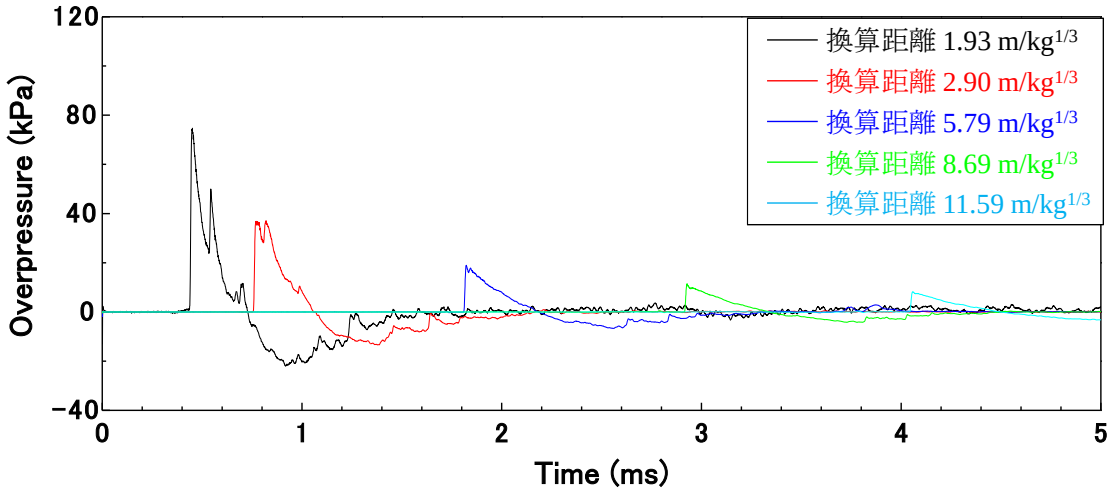


表 5.A.1-40c　No.A3　100°　（2 回目）

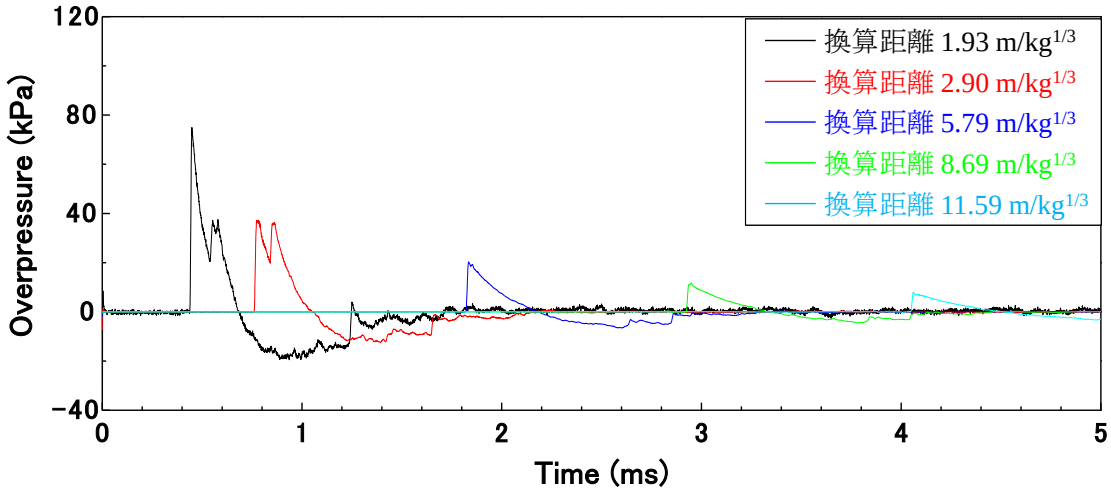


表 5.A.1-41a　No.A3　110°　（1 回目）

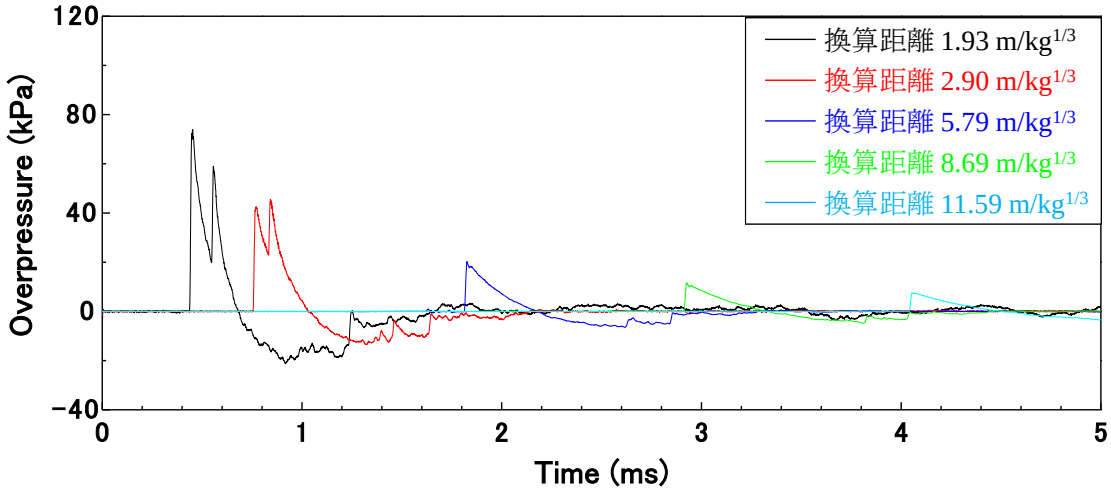


表 5.A.1-41b　No.A3　120°　（1 回目）

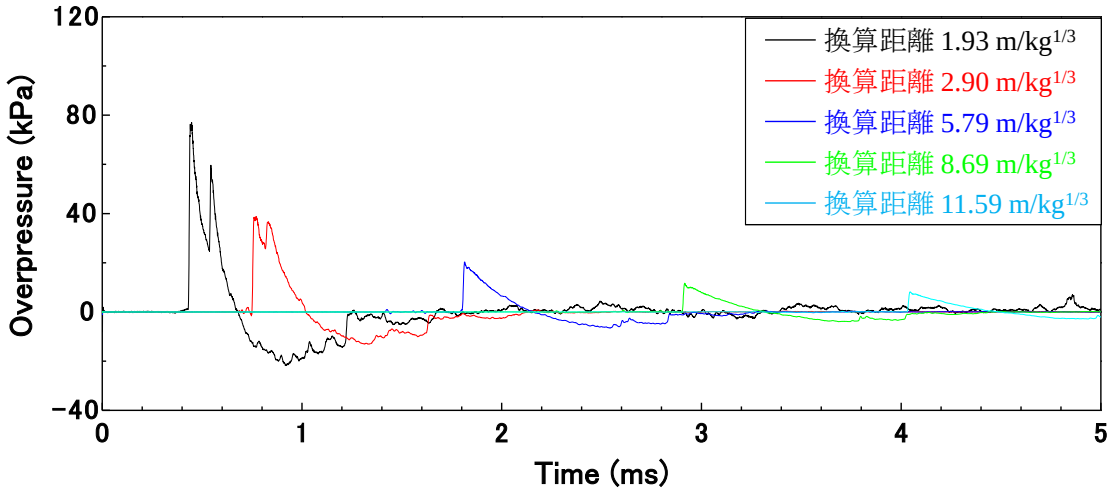


表 5.A.1-41c　No.A3　130°　（1 回目）

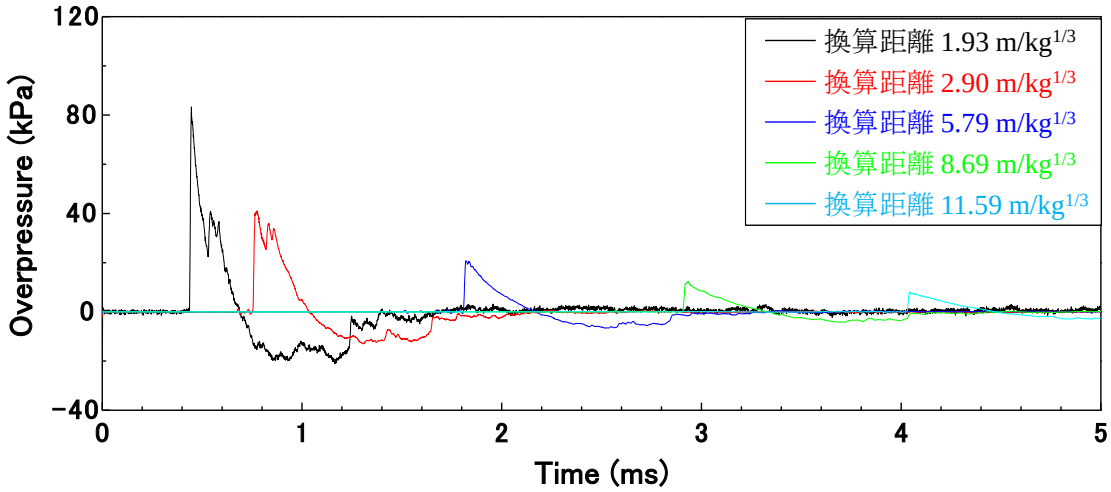


表 5.A.1-42a　No.A3　110°　（2 回目）

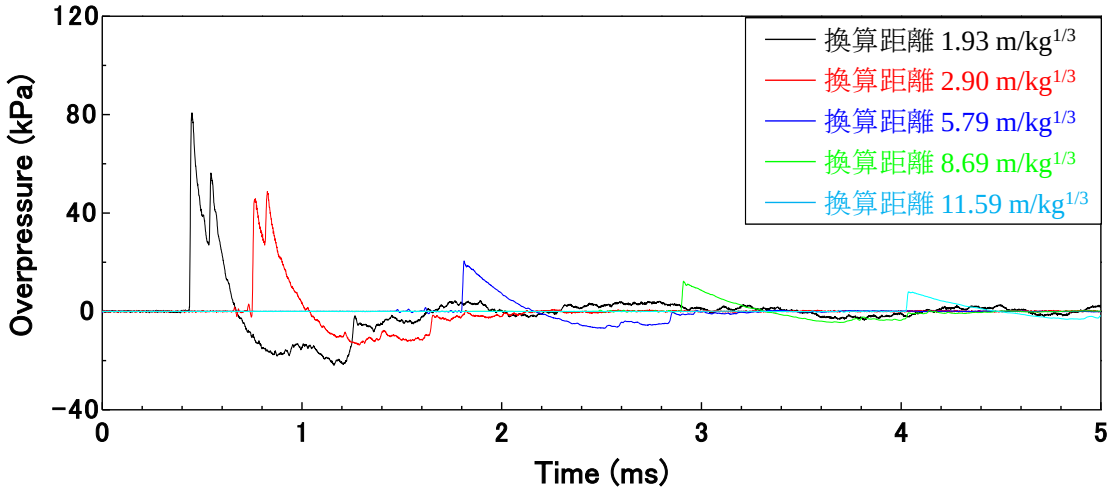


表 5.A.1-42b　No.A3　120°　（2 回目）

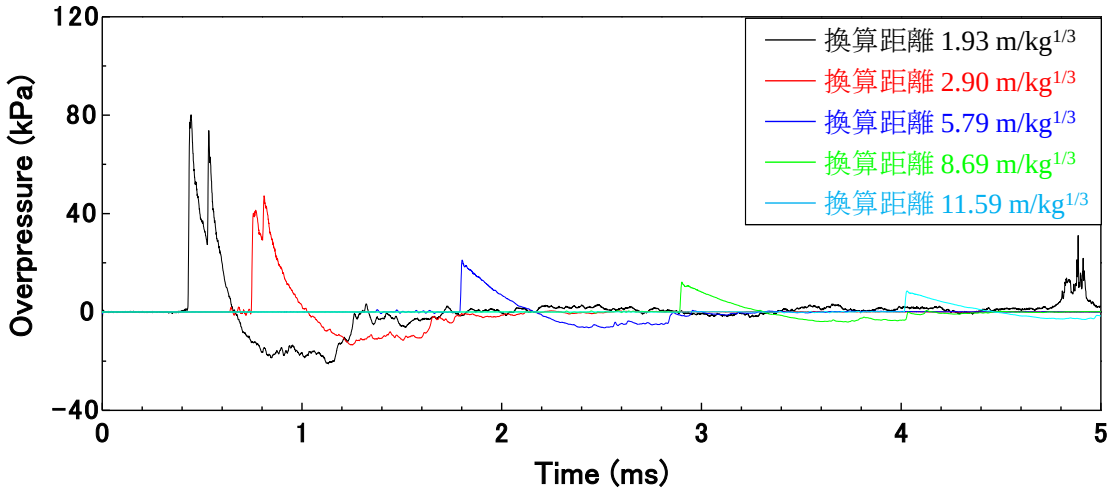


表 5.A.1-42c　No.A3　130°　（2 回目）

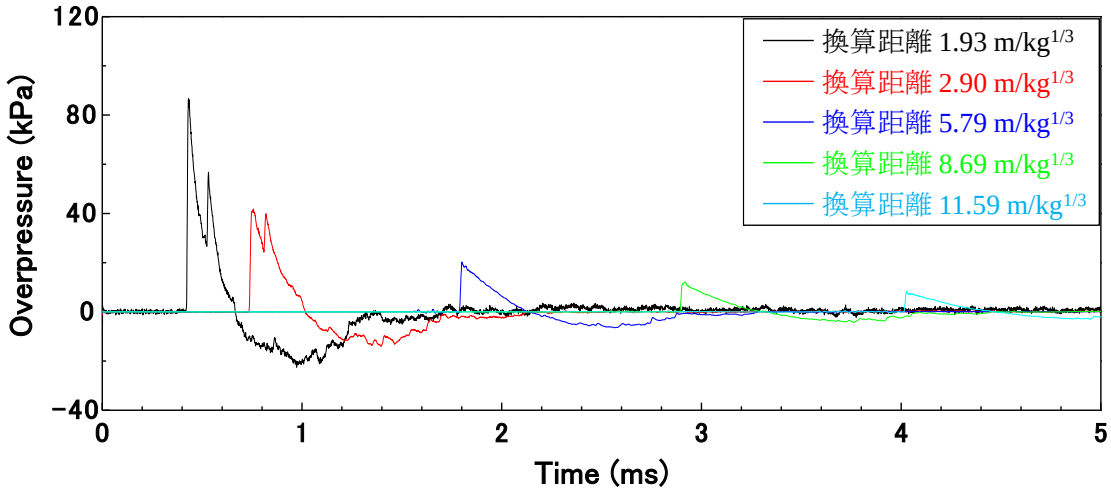


表 5.A.1-43a　No.A3　140°　（1 回目）

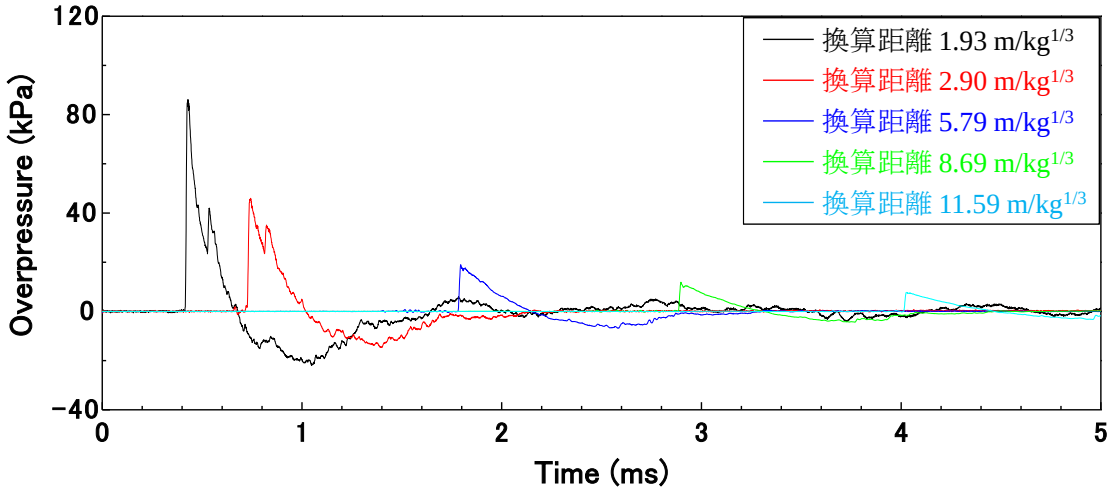


表 5.A.1-43b　No.A3　150°　（1 回目）

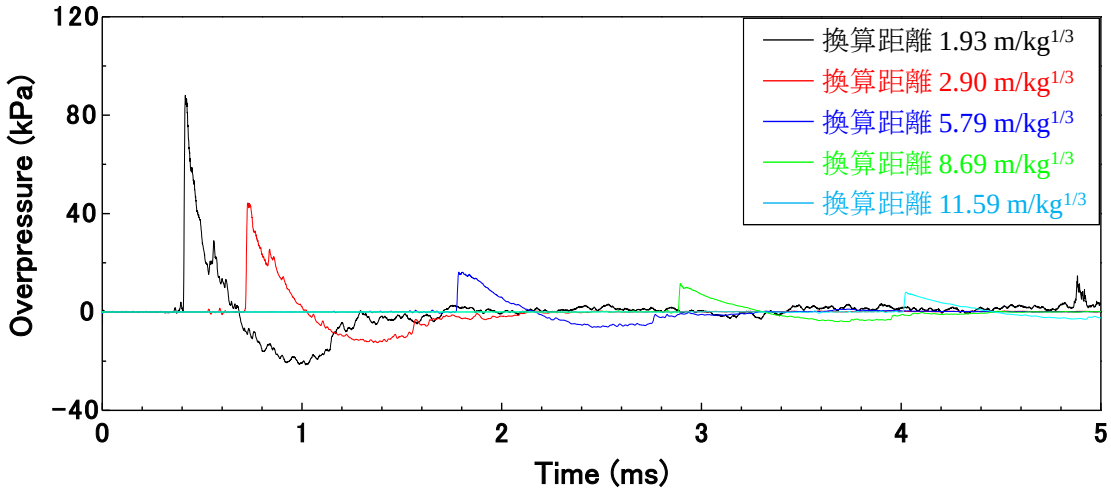


表 5.A.1-43c　No.A3　160°　（1 回目）

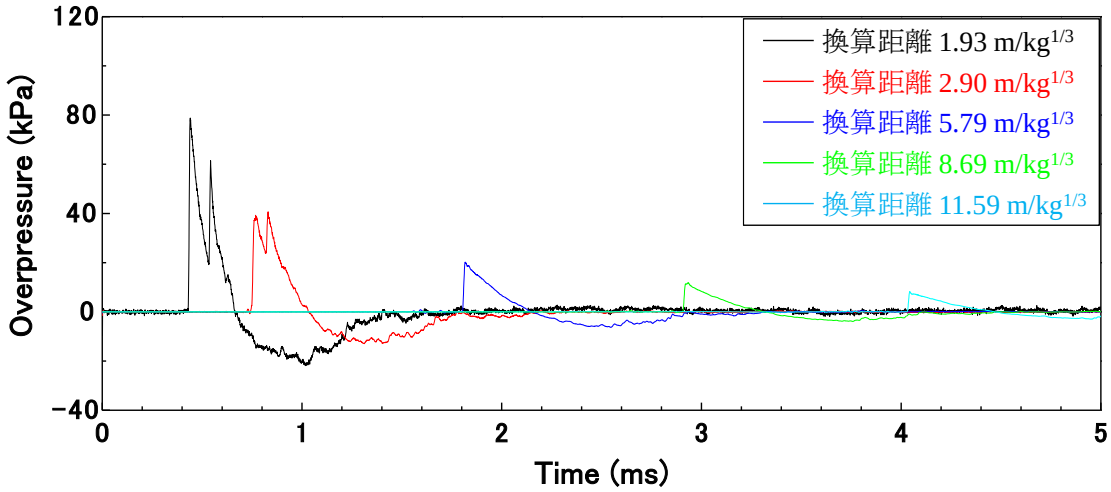


表 5.A.1-44a　No.A3　140°　（2 回目）

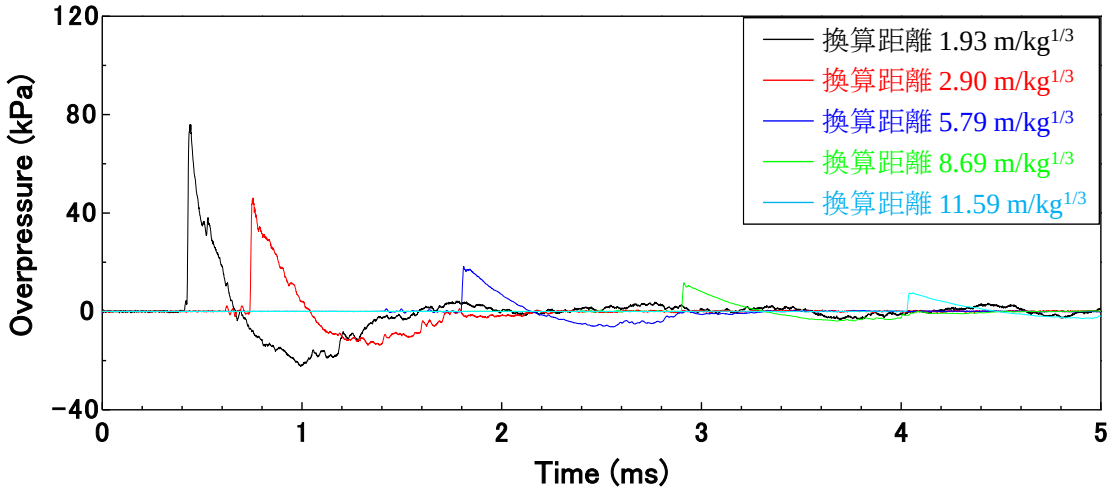


表 5.A.1-44b　No.A3　150°　（2 回目）

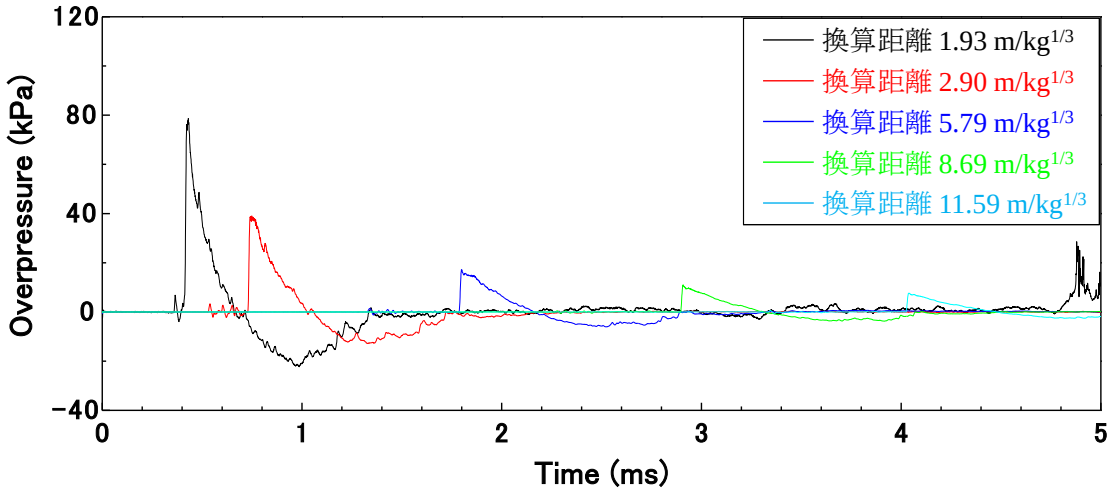


表 5.A.1-44c　No.A3　160°　（2 回目）

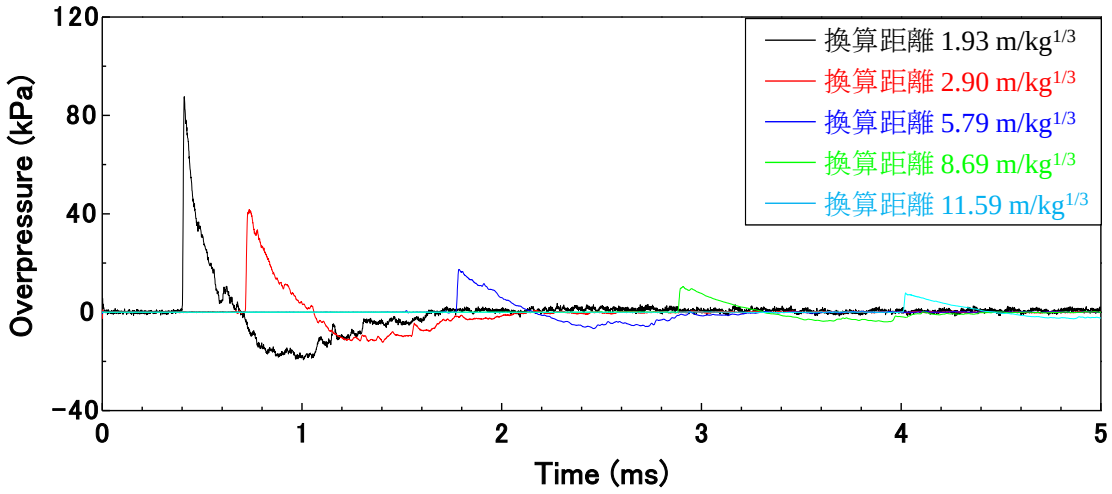


表 5.A.1-45a　No.A3　170°　（1 回目）

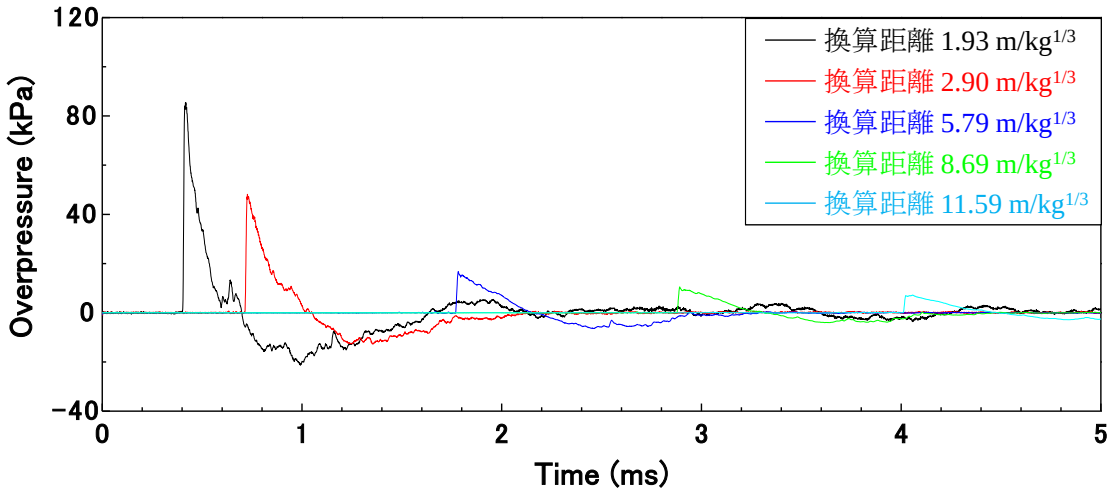


表 5.A.1-45b　No.A3　180°　（1 回目）

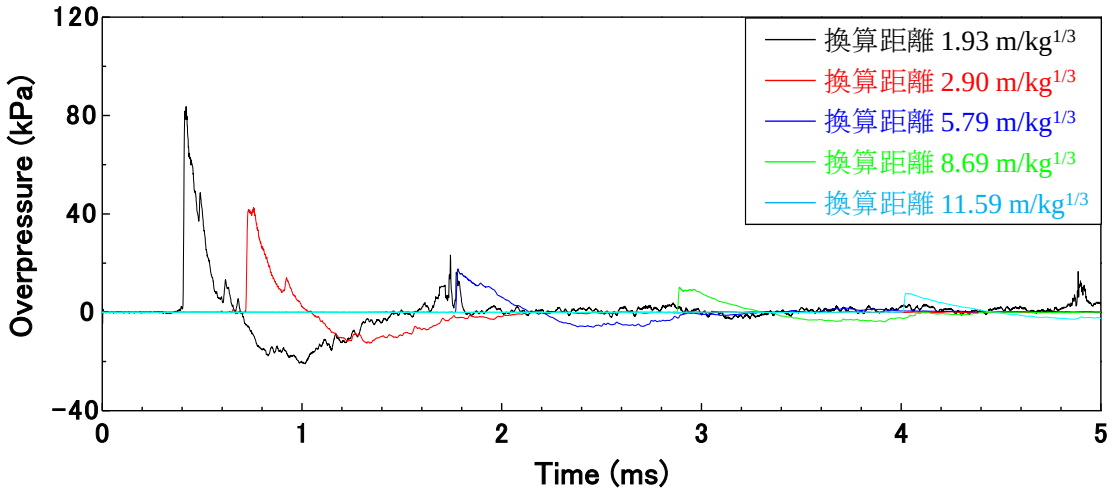


表 5.A.1-45c　No.A3　190°　（1 回目）

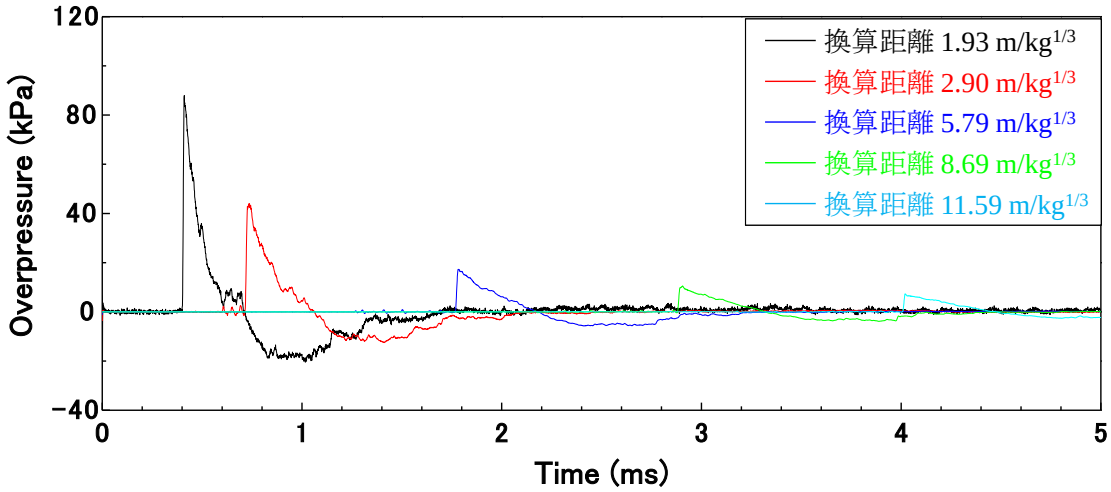


表 5.A.1-46a　No.A3　170°　（2 回目）

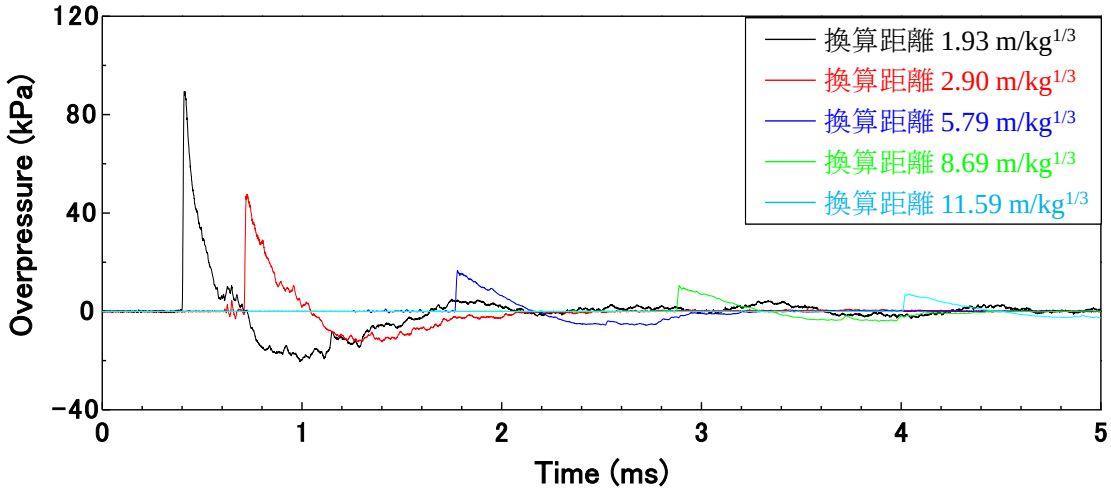


表 5.A.1-46b　No.A3　180°　（2 回目）

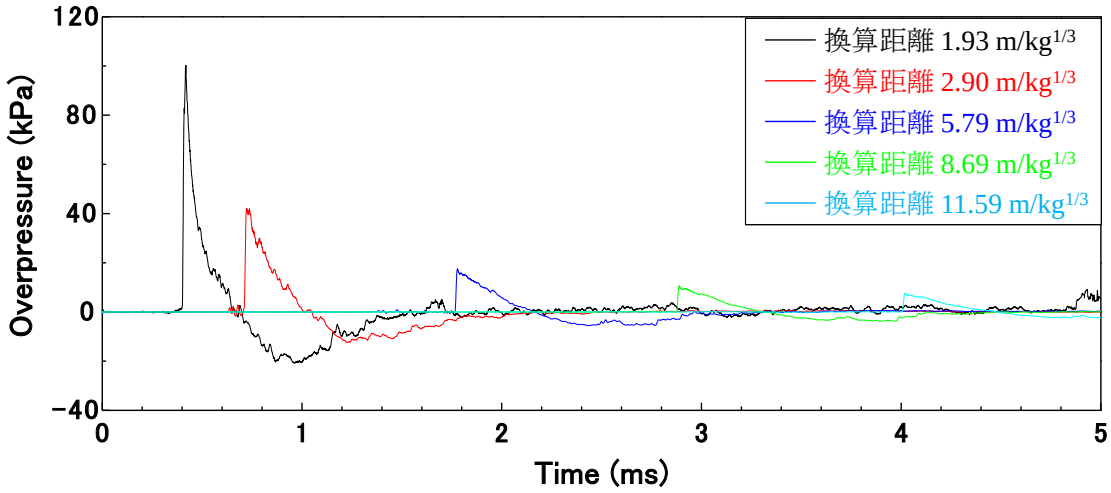


表 5.A.1-46c　No.A3　190°　（2 回目）

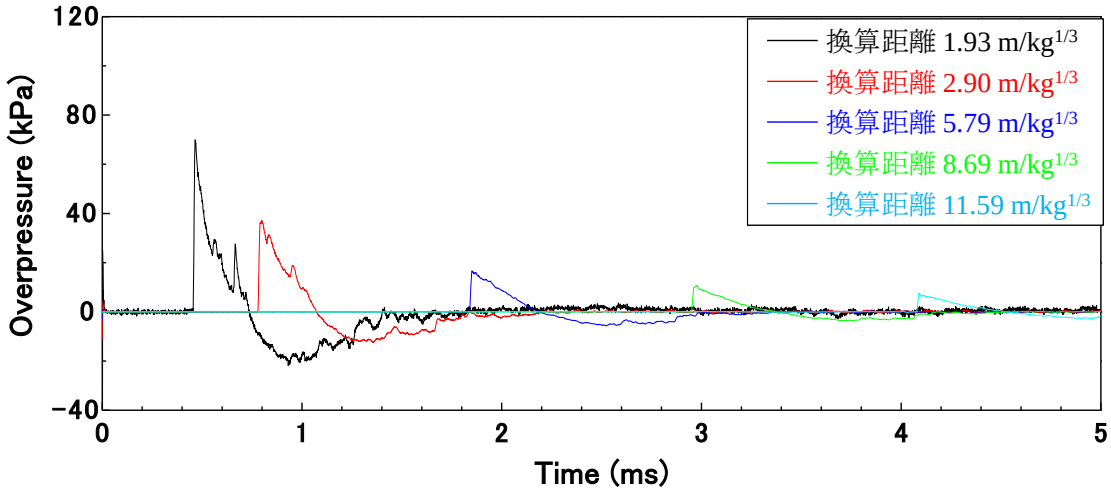


表 5.A.1-47a　No.A4　-10°　（1 回目）

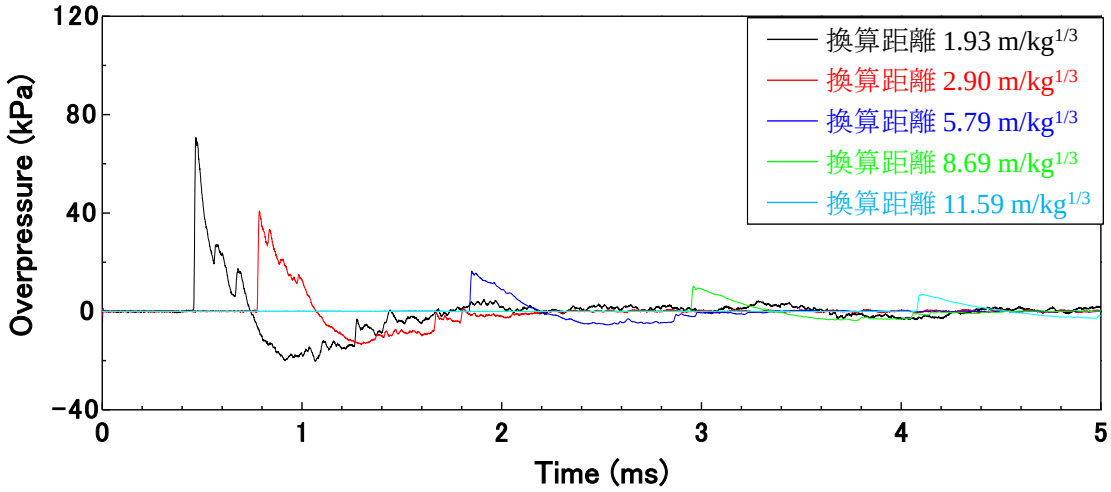


表 5.A.1-47b　No.A4　0°　（1 回目）

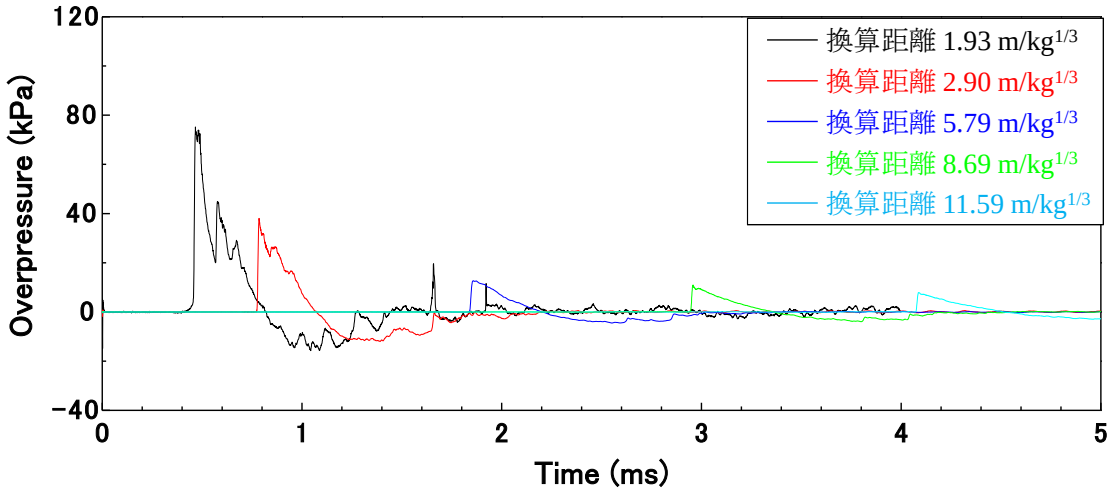


表 5.A.1-47c　No.A4　10°　（1 回目）

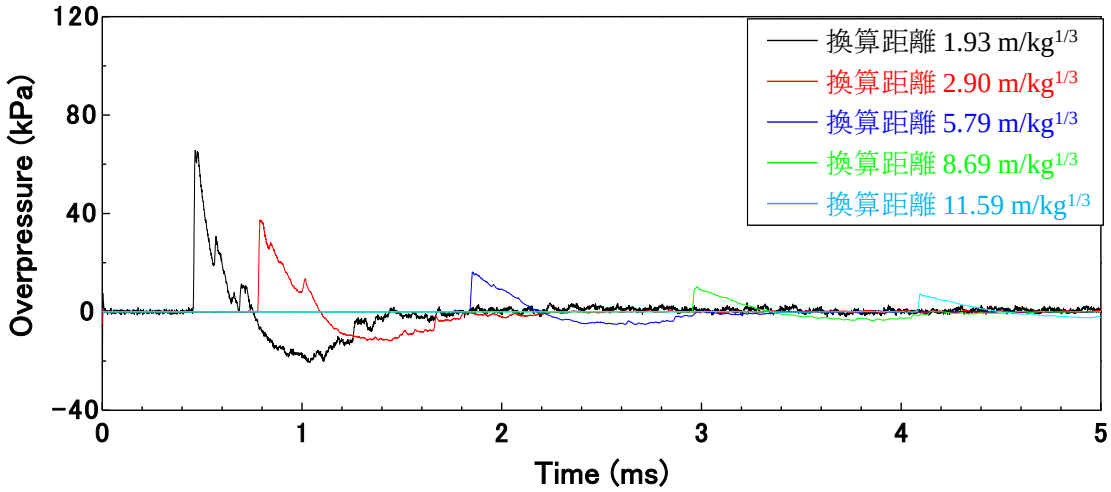


表 5.A.1-48a　No.A4　-10°　（2 回目）

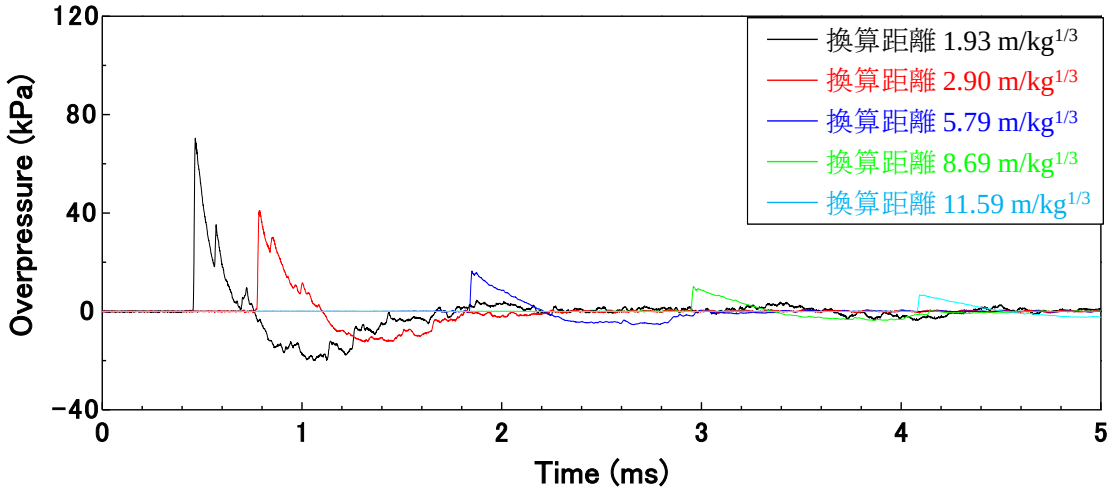


表 5.A.1-48b　No.A4　0°　（2 回目）

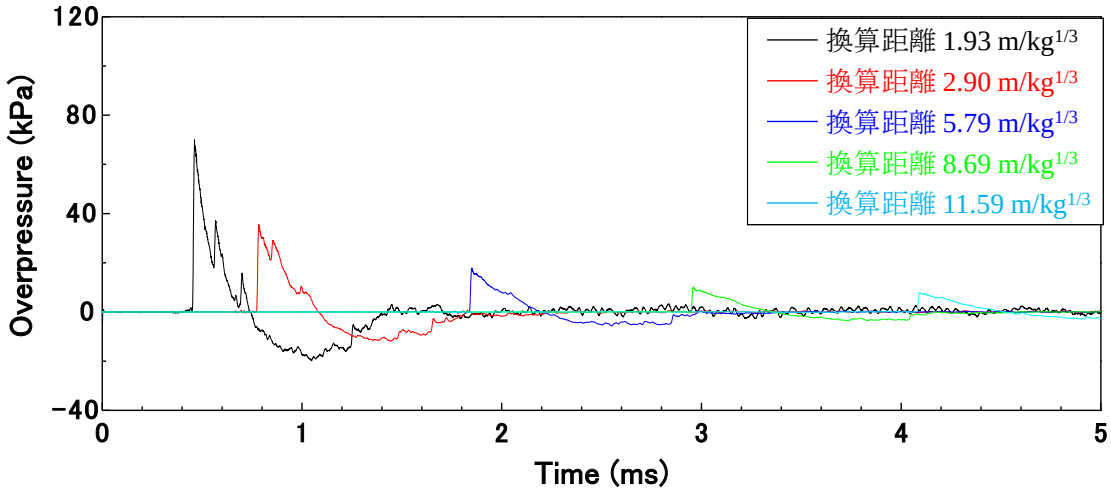


表 5.A.1-48c　No.A4　10°　（2 回目）

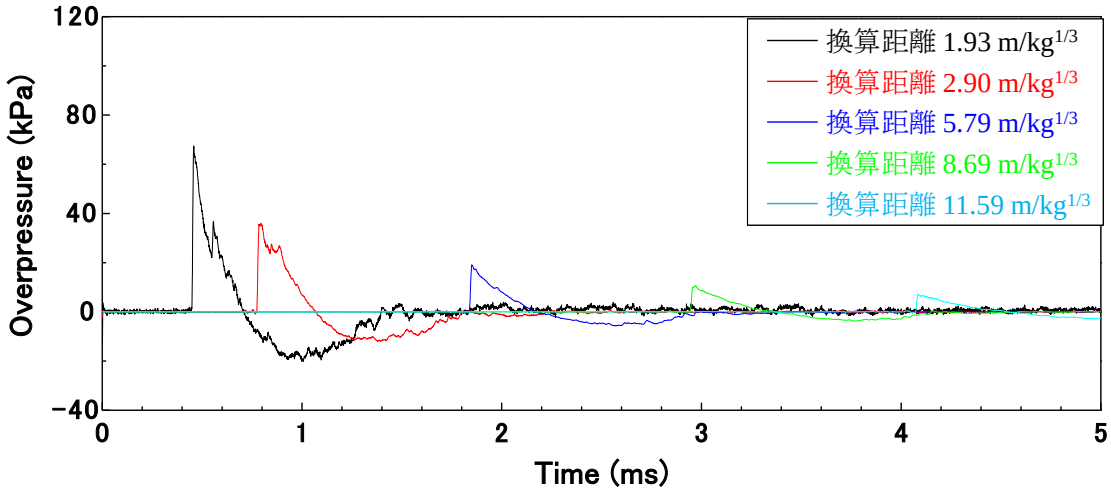


表 5.A.1-49a　No.A4　20°　（1 回目）

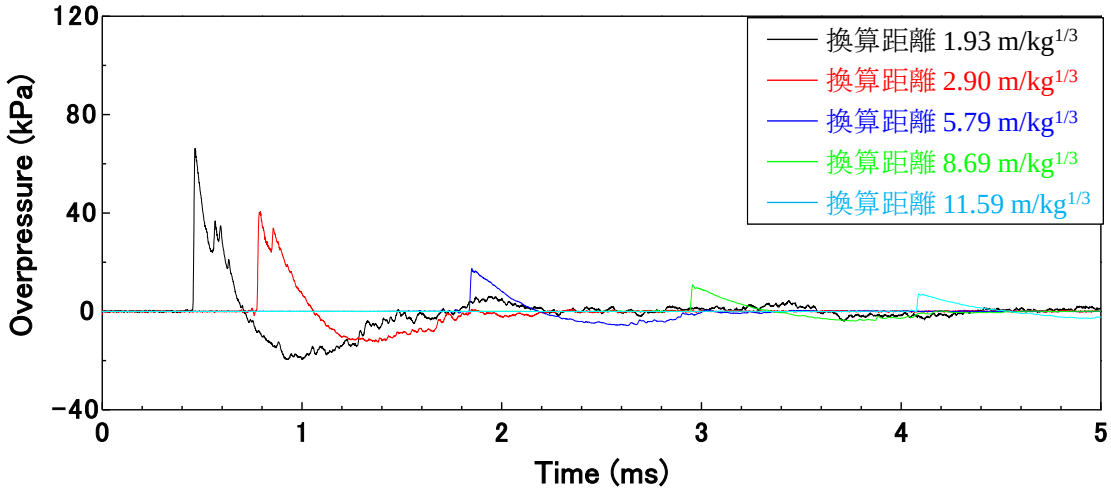


表 5.A.1-49b　No.A4　30°　（1 回目）

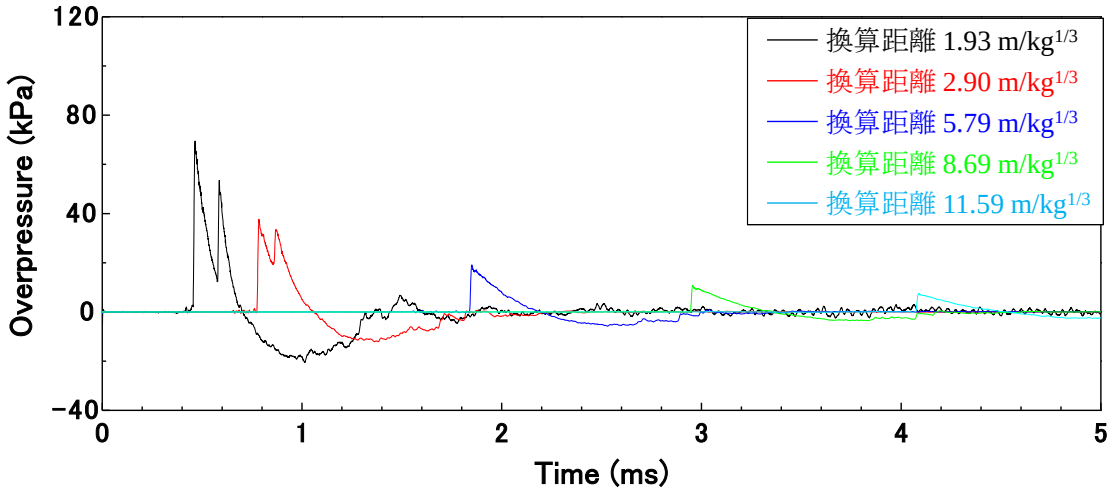


表 5.A.1-49c　No.A4　40°　（1 回目）

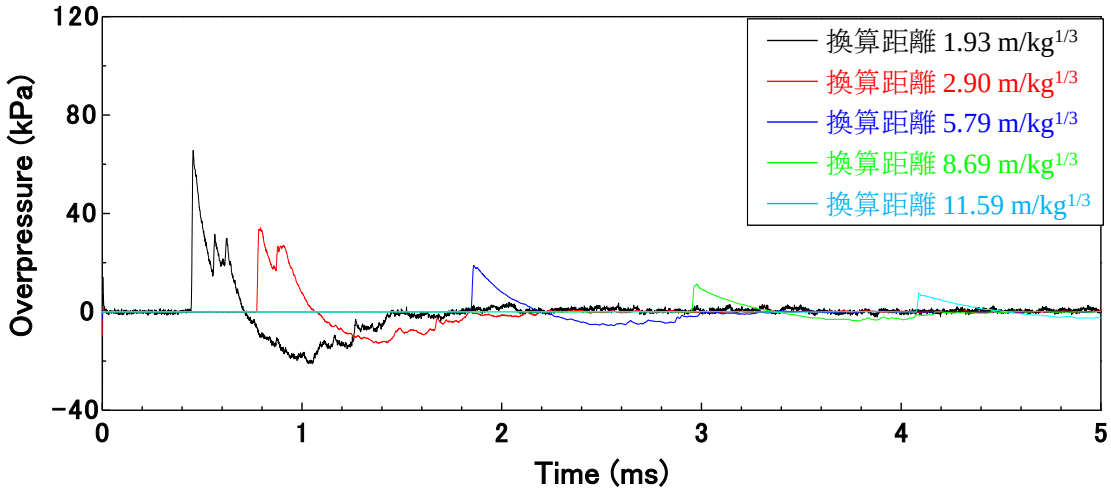


表 5.A.1-50a　No.A4　20°　（2 回目）

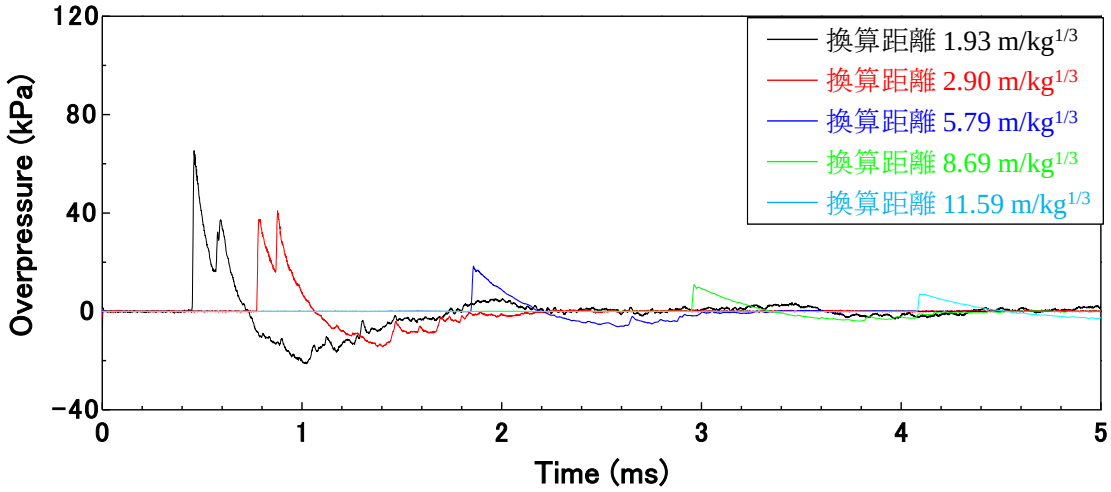


表 5.A.1-50b　No.A4　30°　（2 回目）

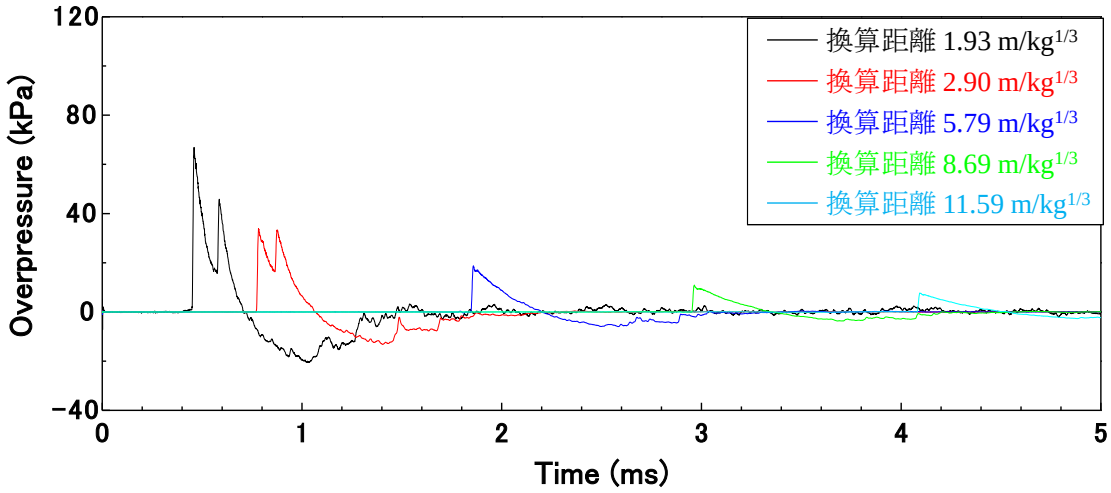


表 5.A.1-50c　No.A4　40°　（2 回目）

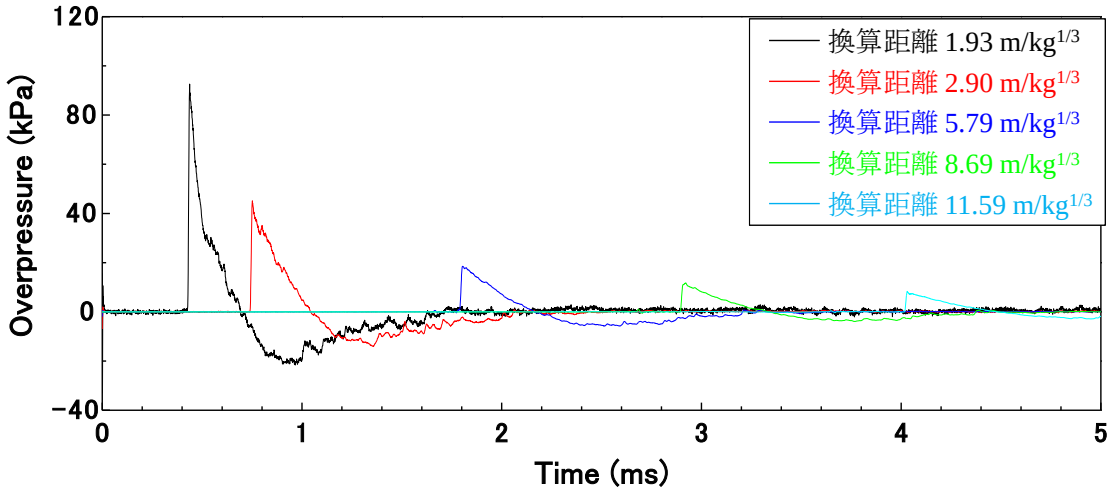


表 5.A.1-51a　No.A5　-10°　（1 回目）

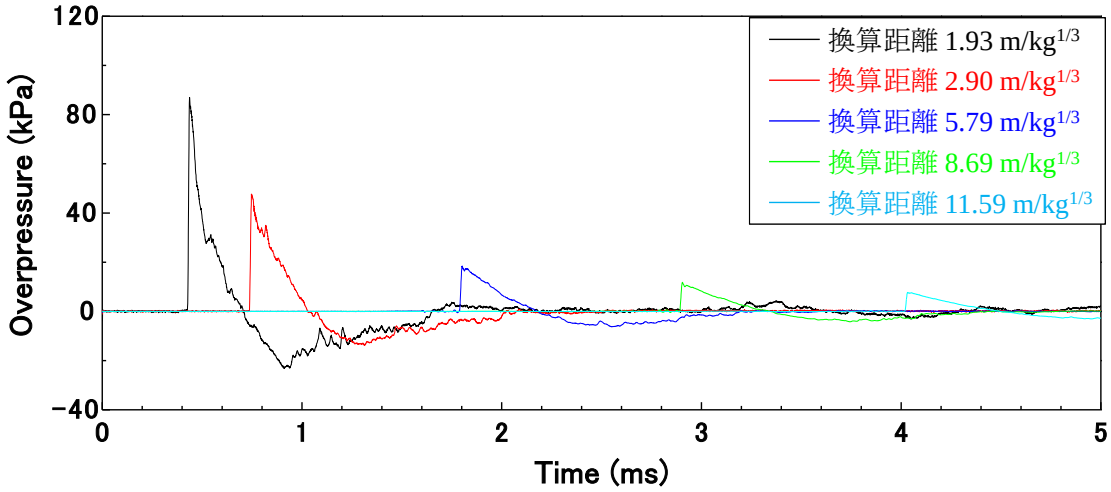


表 5.A.1-51b　No.A5　0°　（1 回目）

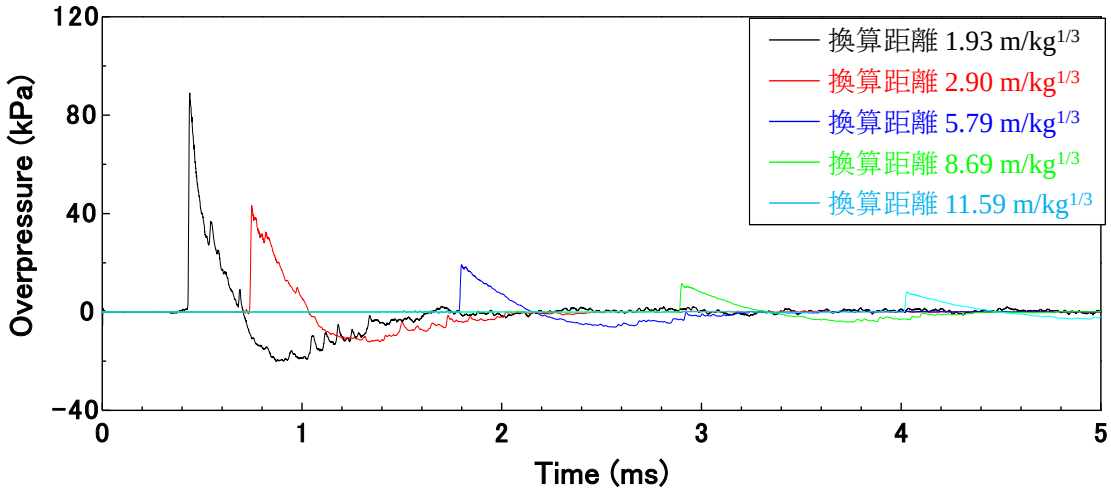


表 5.A.1-51c　No.A5　10°　（1 回目）

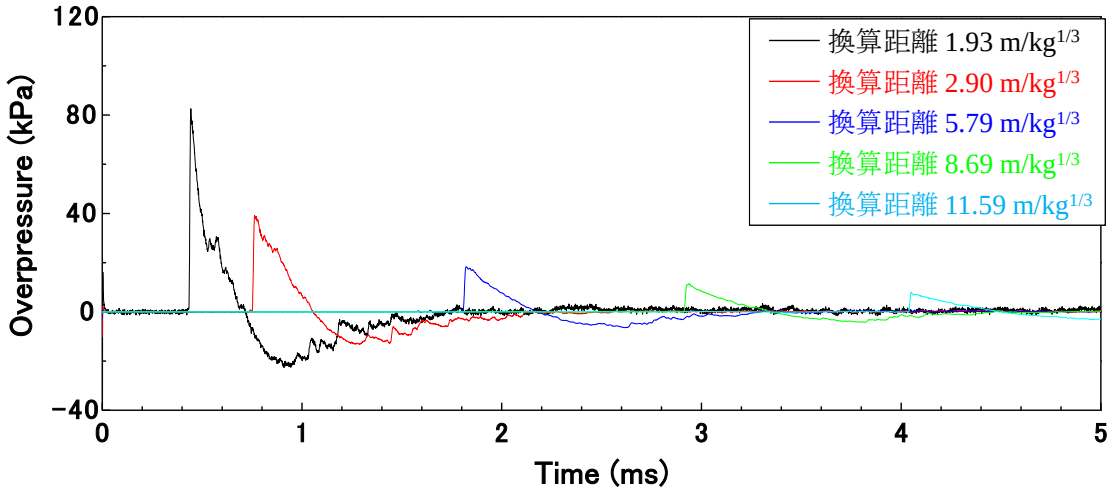


表 5.A.1-52a　No.A5　-10°　（2 回目）

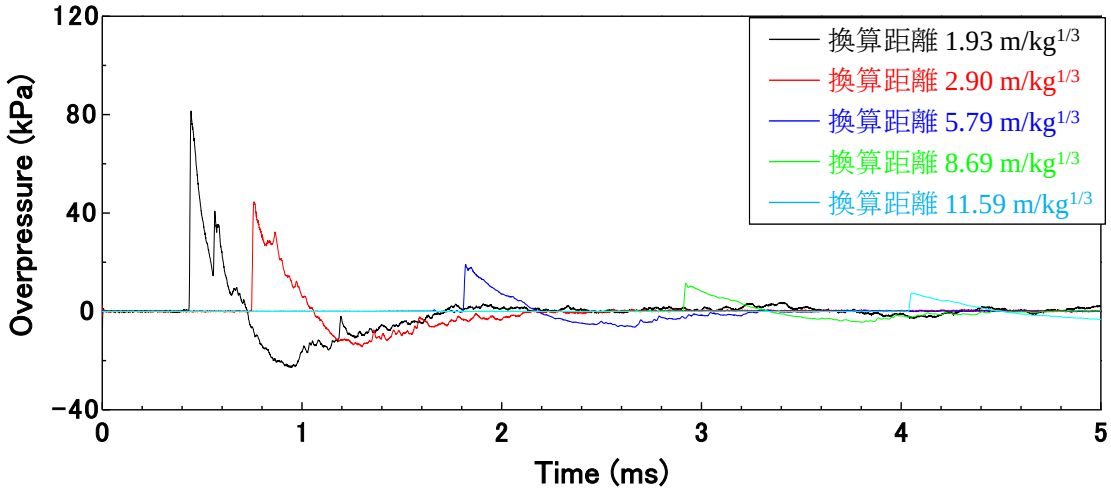


表 5.A.1-52b　No.A5　0°　（2 回目）

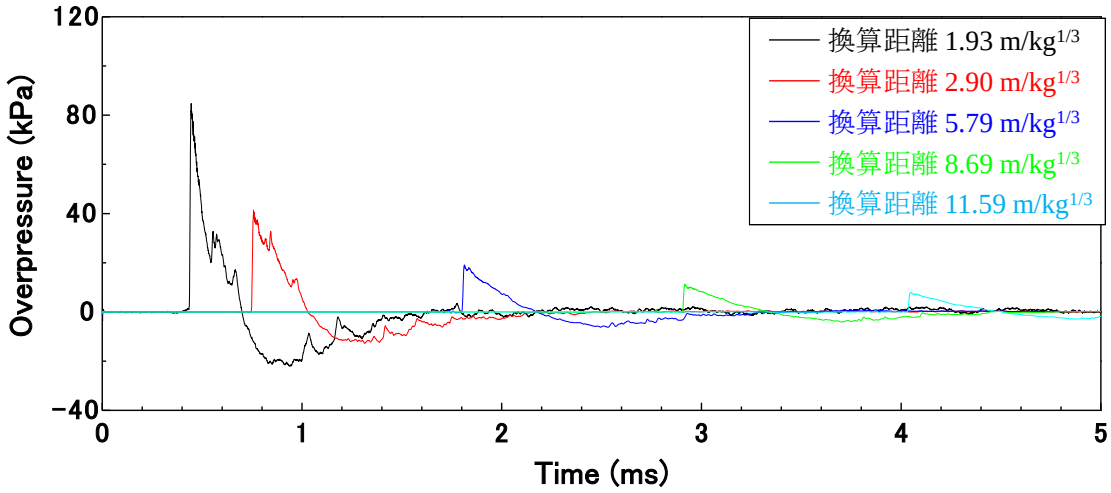


表 5.A.1-52c　No.A5　10°　（2 回目）

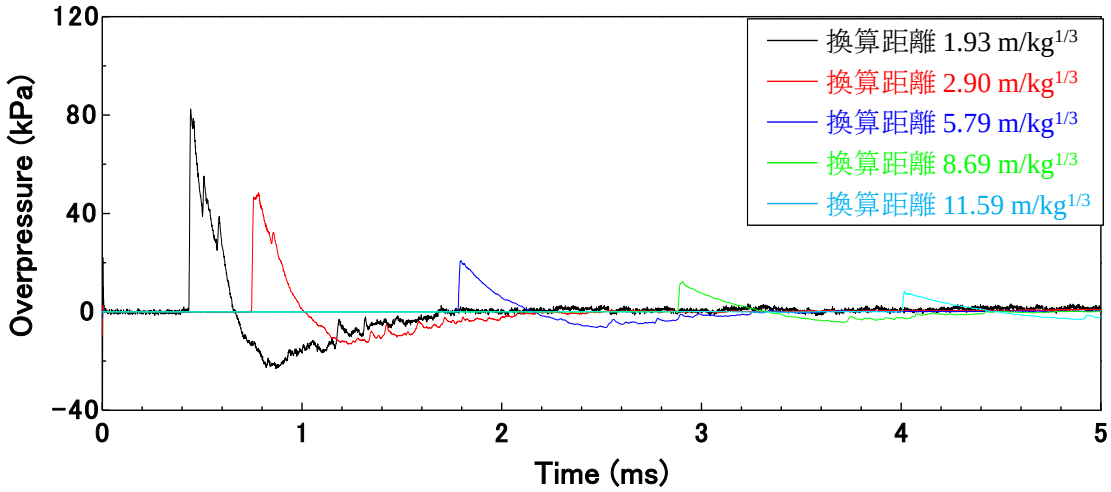


表 5.A.1-53a　No.A5　20°　（1 回目）

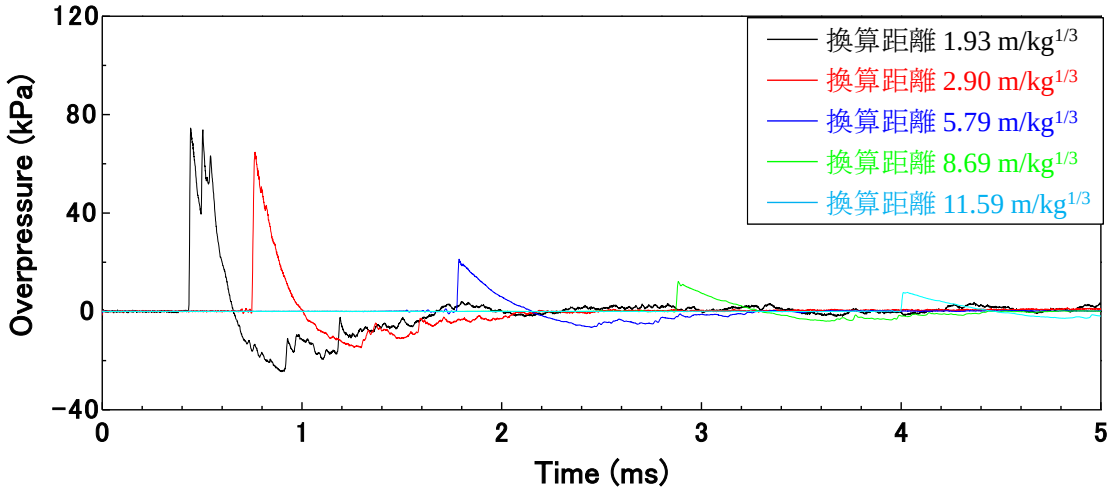


表 5.A.1-53b　No.A5　30°　（1 回目）

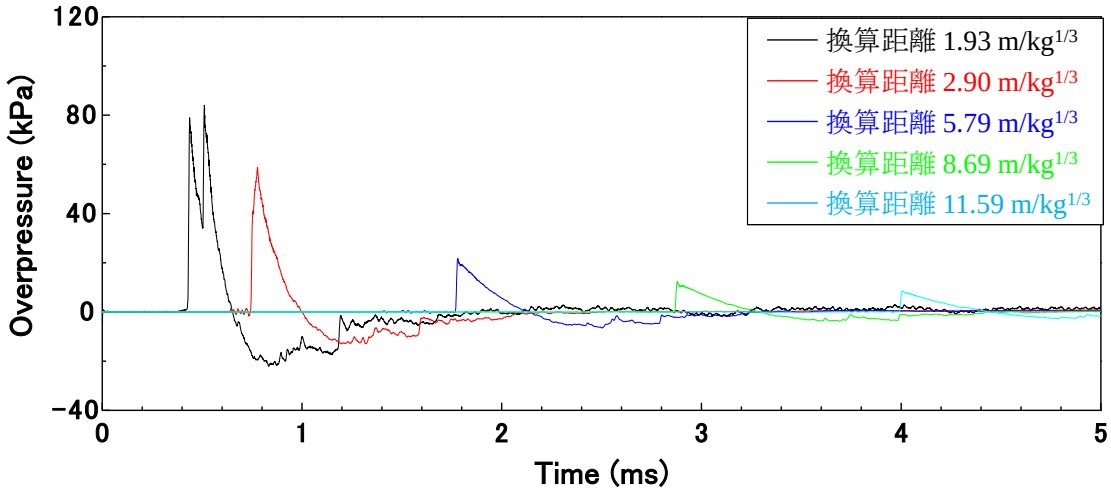


表 5.A.1-53c　No.A5　40°　（1 回目）

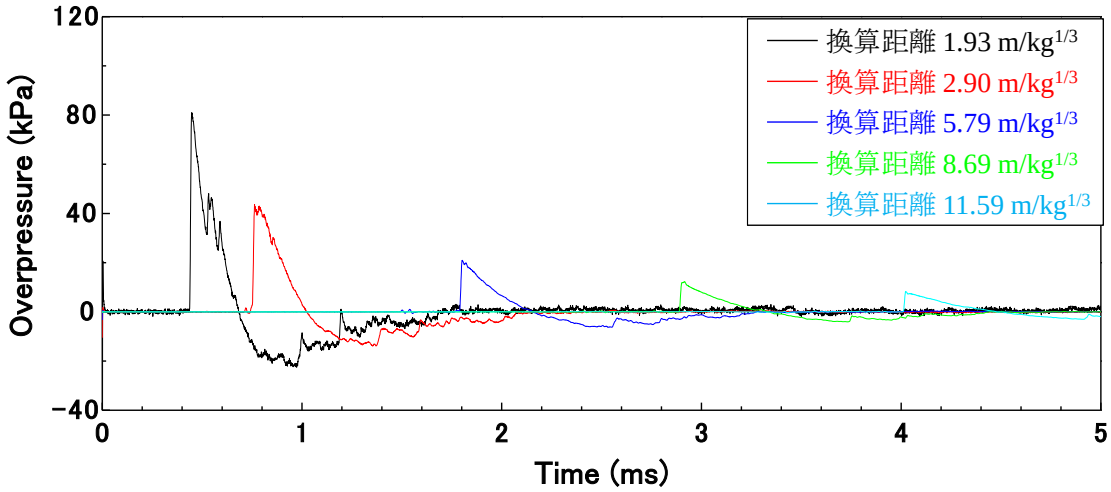


表 5.A.1-54a　No.A5　20°　（2 回目）

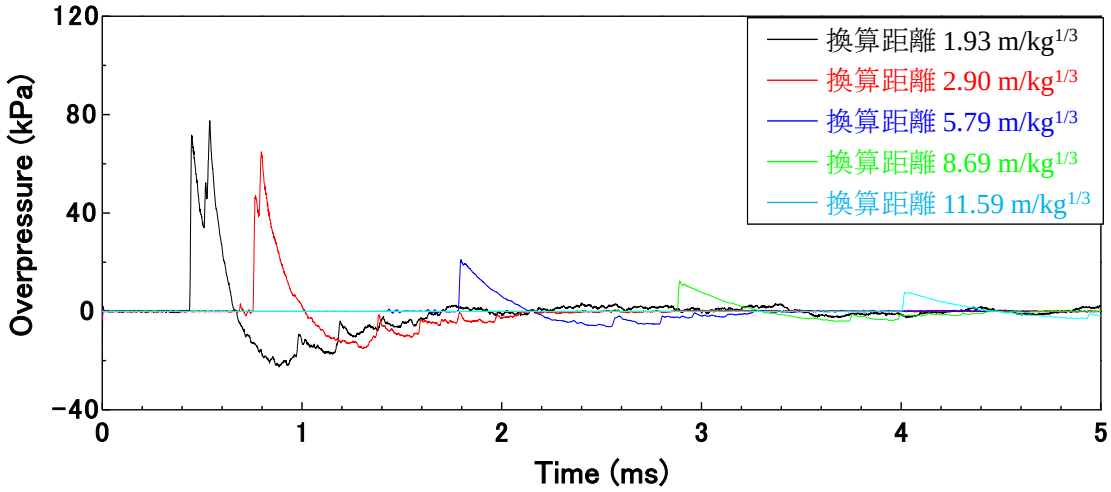


表 5.A.1-54b　No.A5　30°　（2 回目）

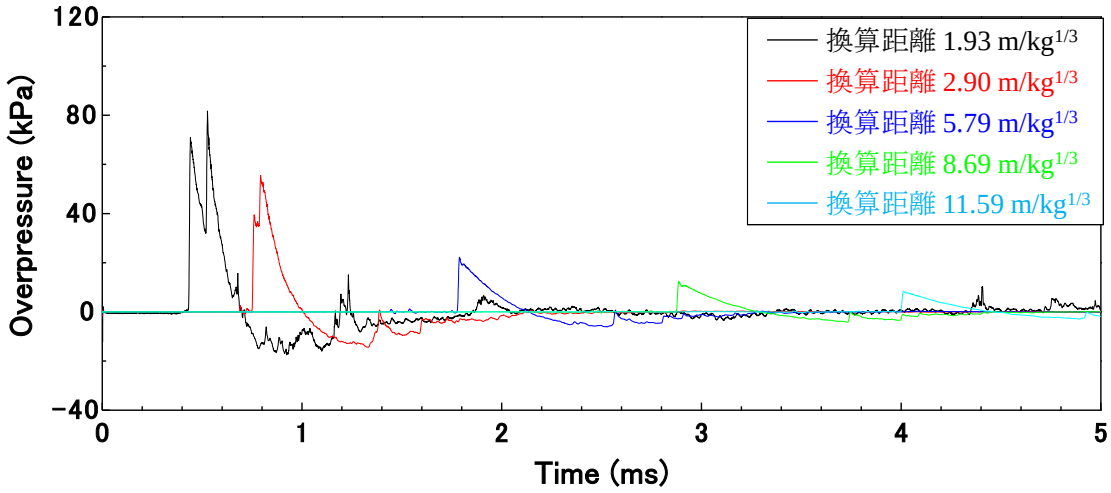


表 5.A.1-54c　No.A5　40°　（2 回目）

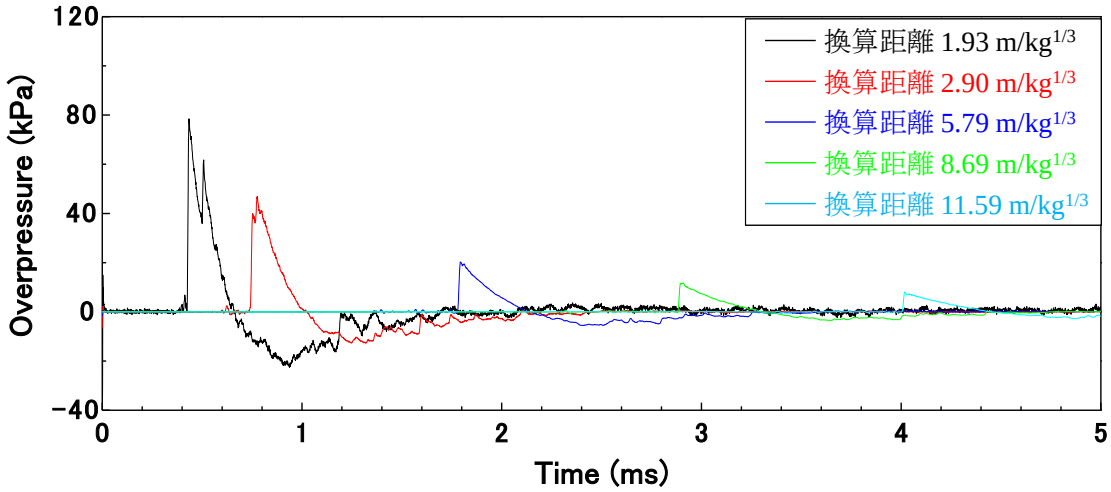


表 5.A.1-55a　No.A5　50°　（1 回目）

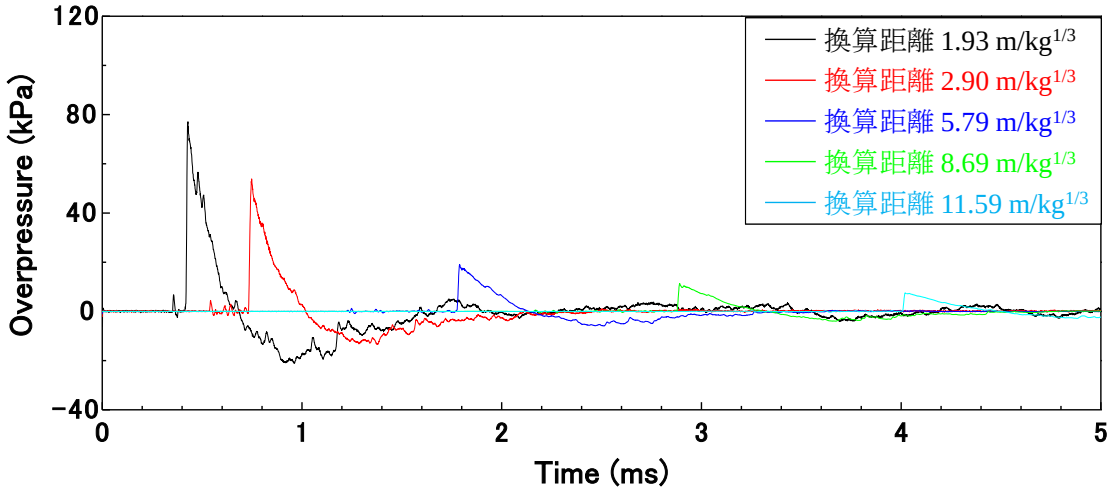


表 5.A.1-55b　No.A5　60°　（1 回目）

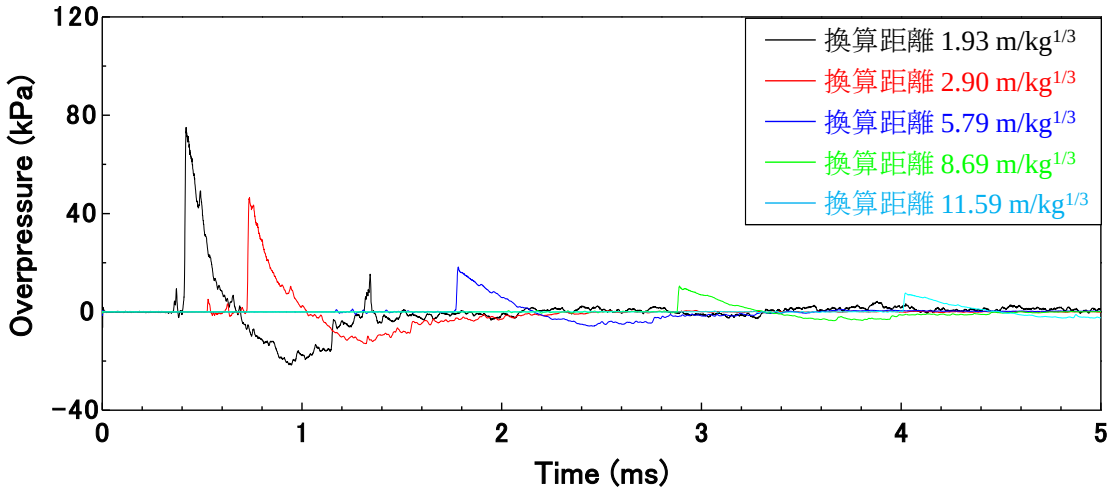


表 5.A.1-55c　No.A5　70°　（1 回目）

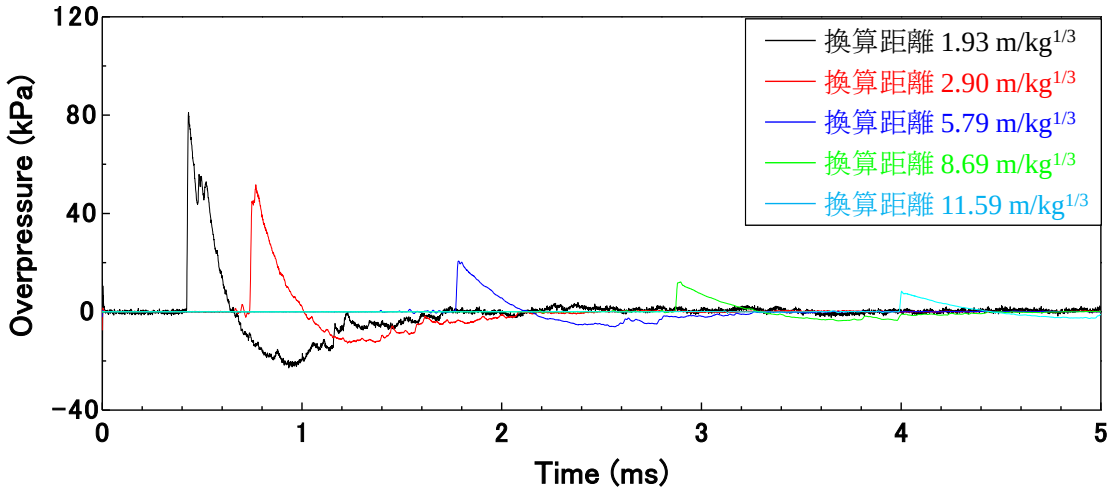


表 5.A.1-56a　No.A5　50°　（2 回目）

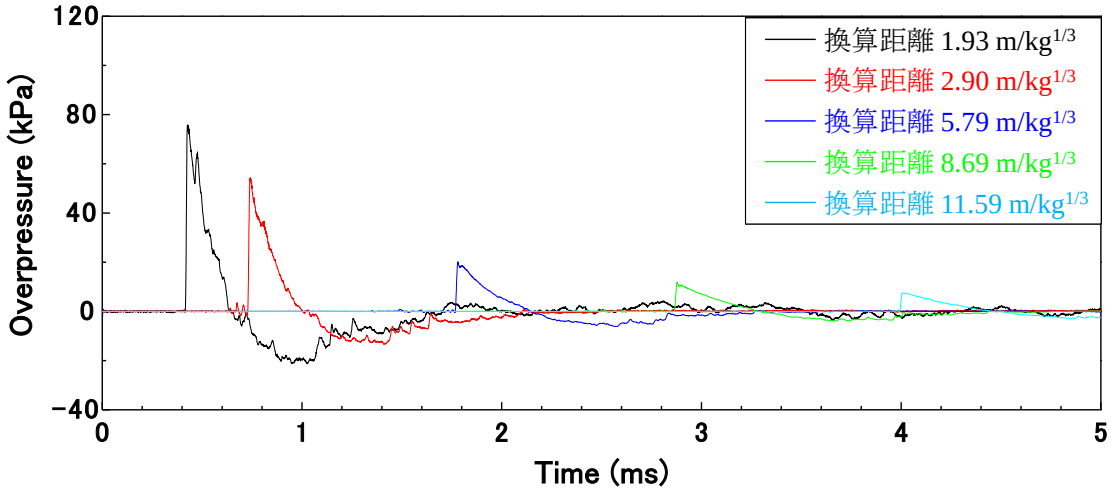


表 5.A.1-56b　No.A5　60°　（2 回目）

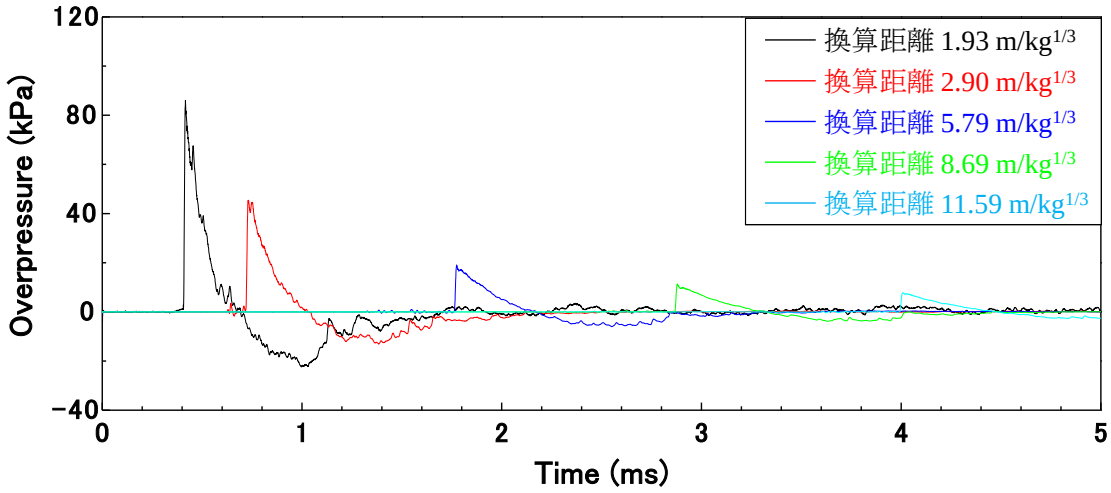


表 5.A.1-56c　No.A5　70°　（2 回目）

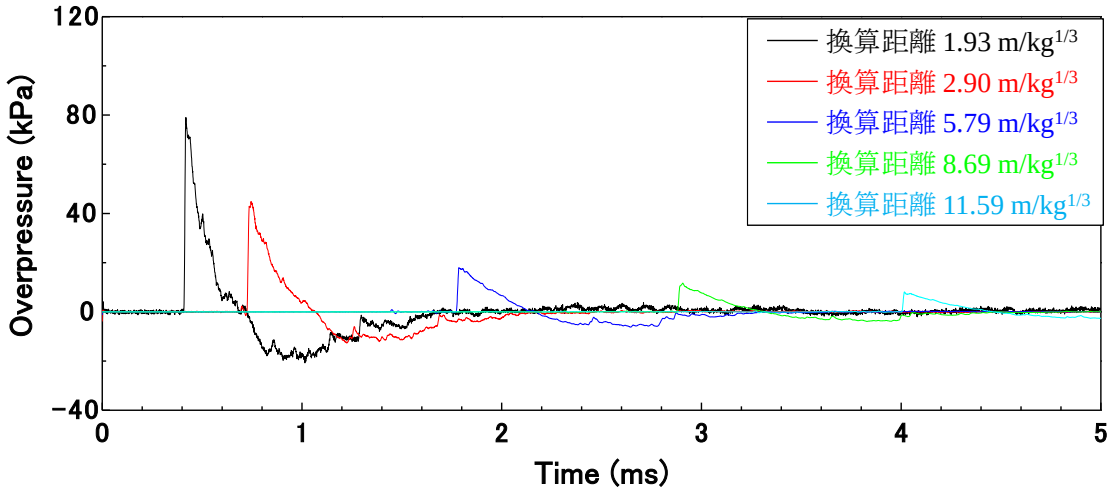


表 5.A.1-57a　No.A5　80°　（1 回目）

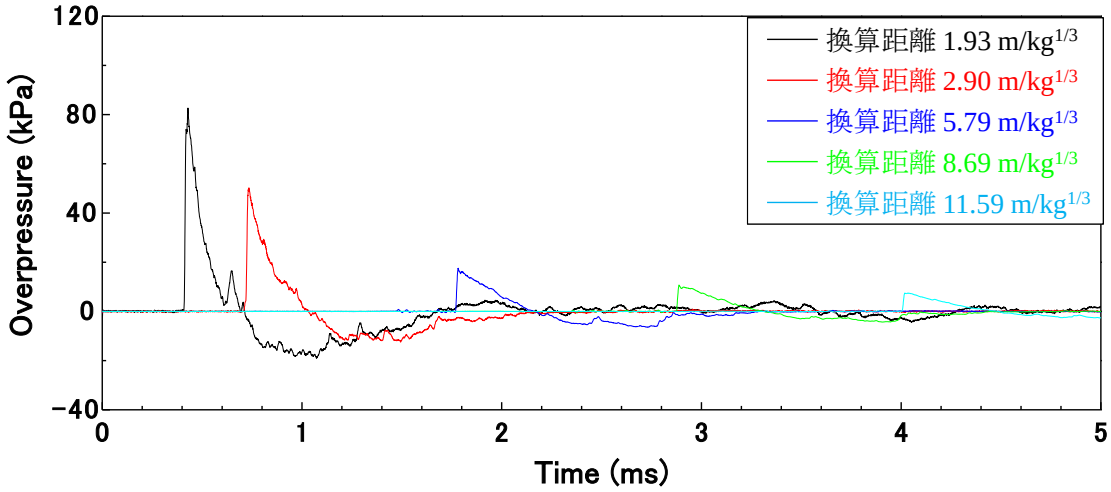


表 5.A.1-57b　No.A5　90°　（1 回目）

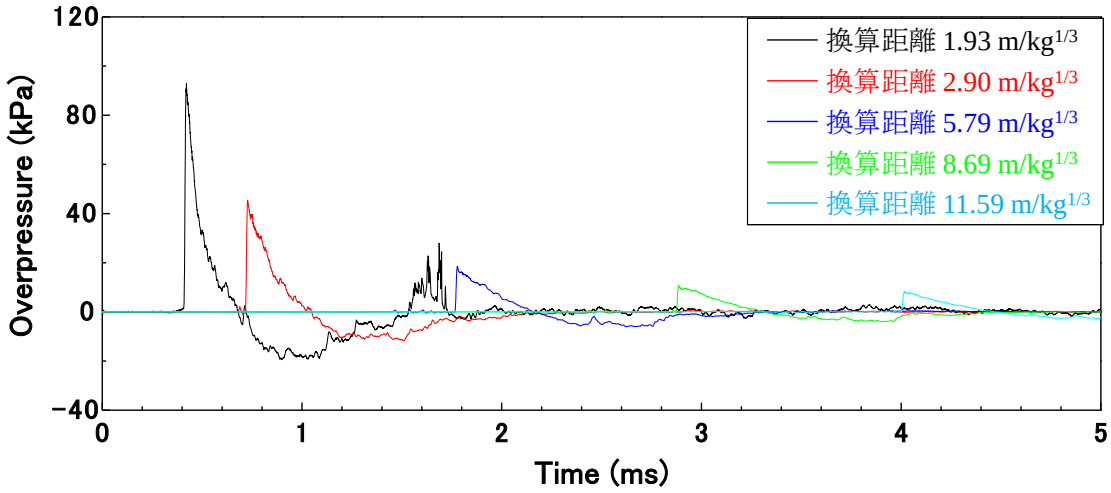


表 5.A.1-57c　No.A5　100°　（1 回目）

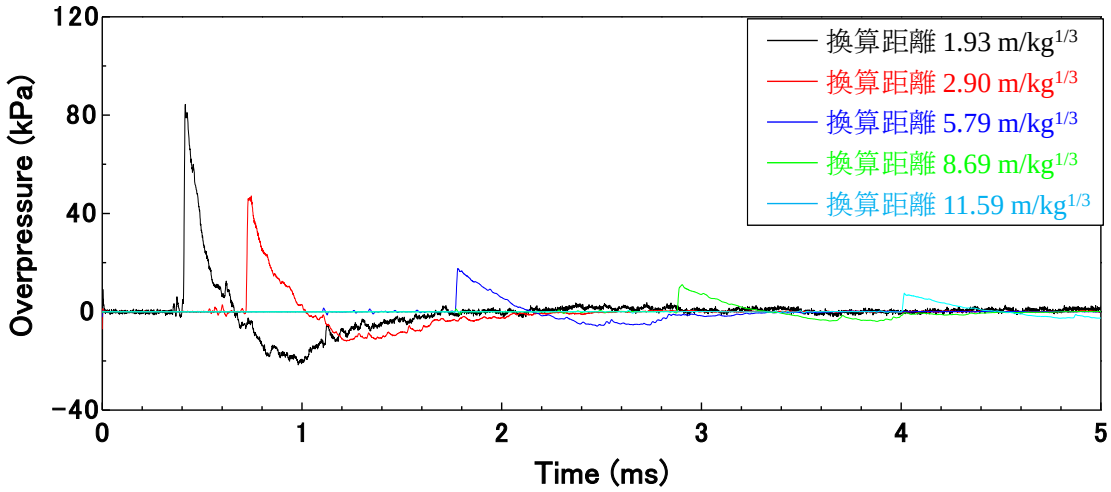


表 5.A.1-58a　No.A5　80°　（2 回目）

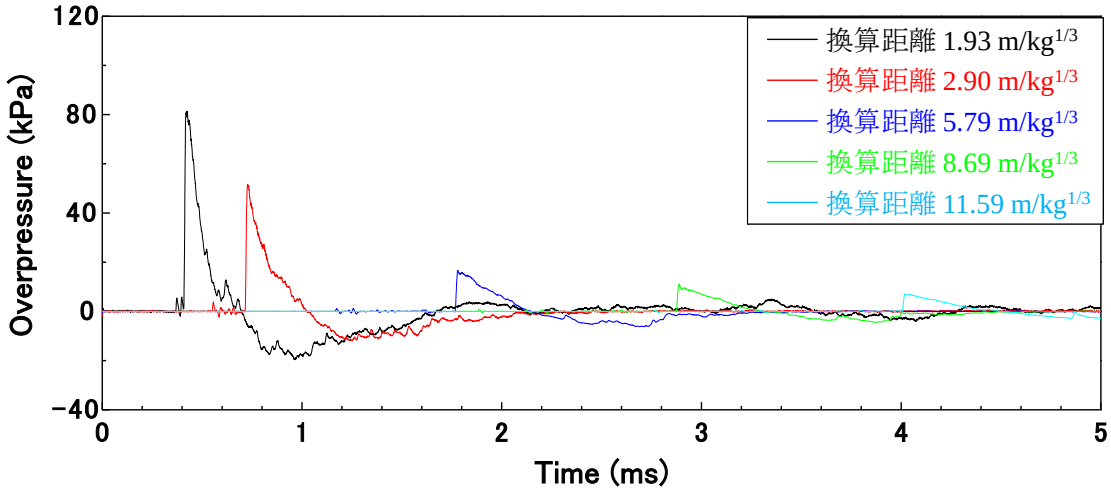


表 5.A.1-58b　No.A5　90°　（2 回目）

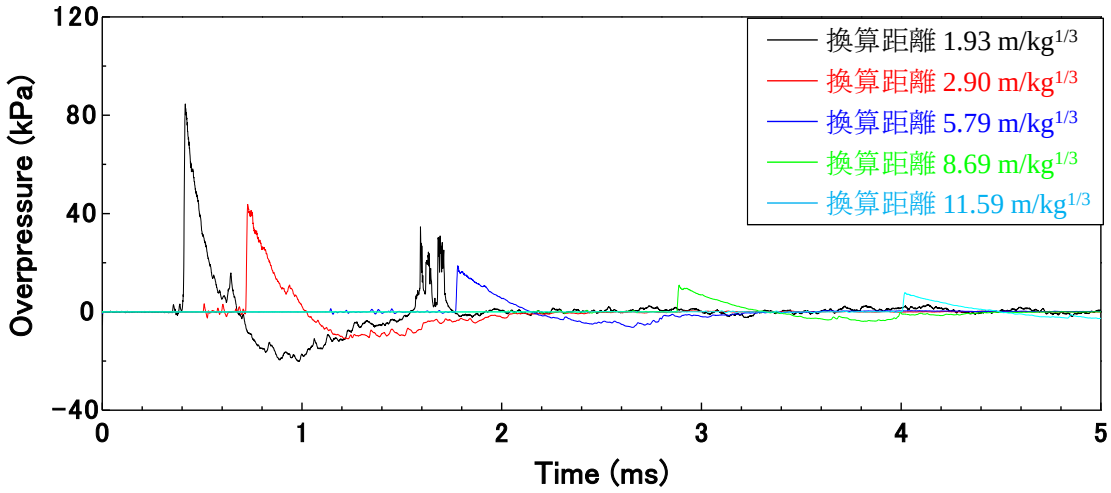


表 5.A.1-58c　No.A5　100°　（2 回目）

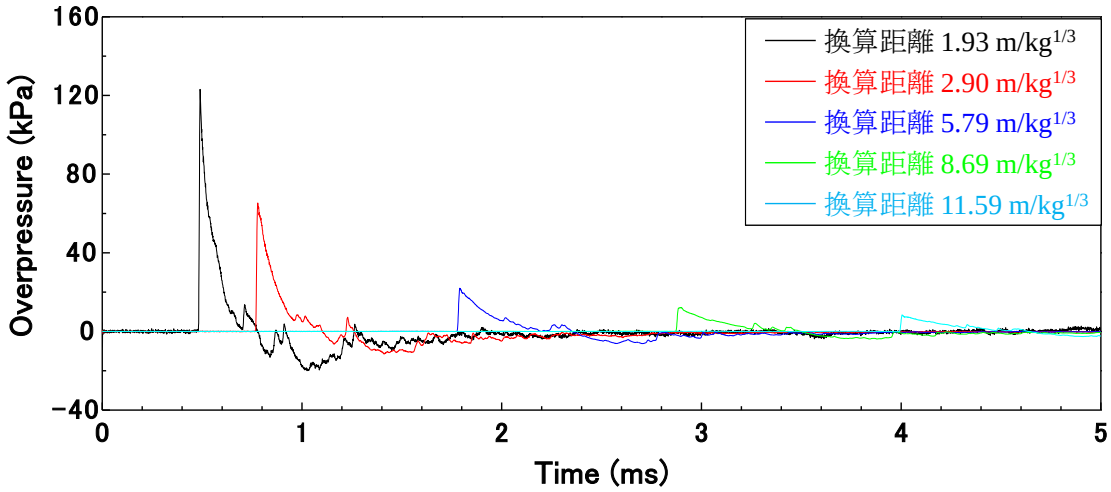


表 5.A.1-59a　No.B　-10°　（1 回目）

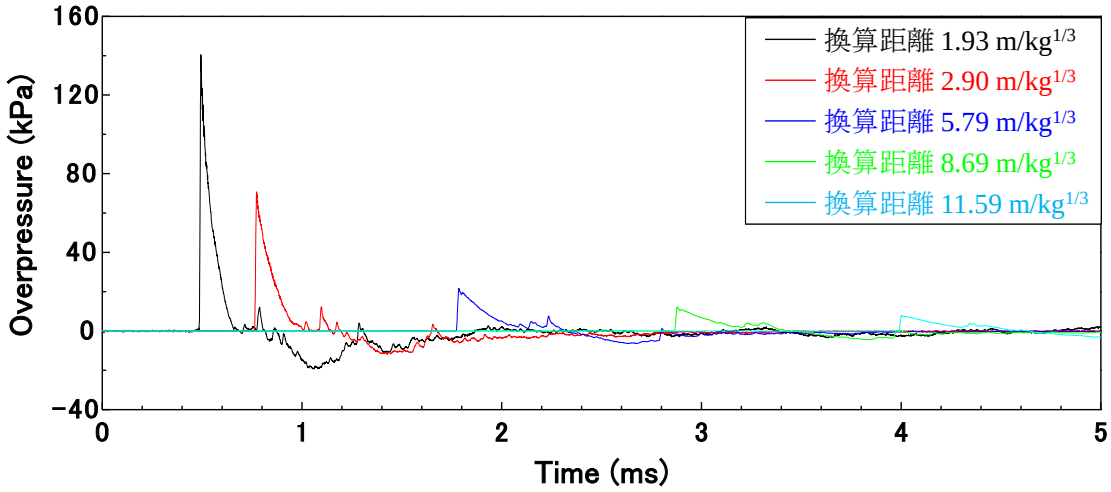


表 5.A.1-59b　No.B　0°　（1 回目）

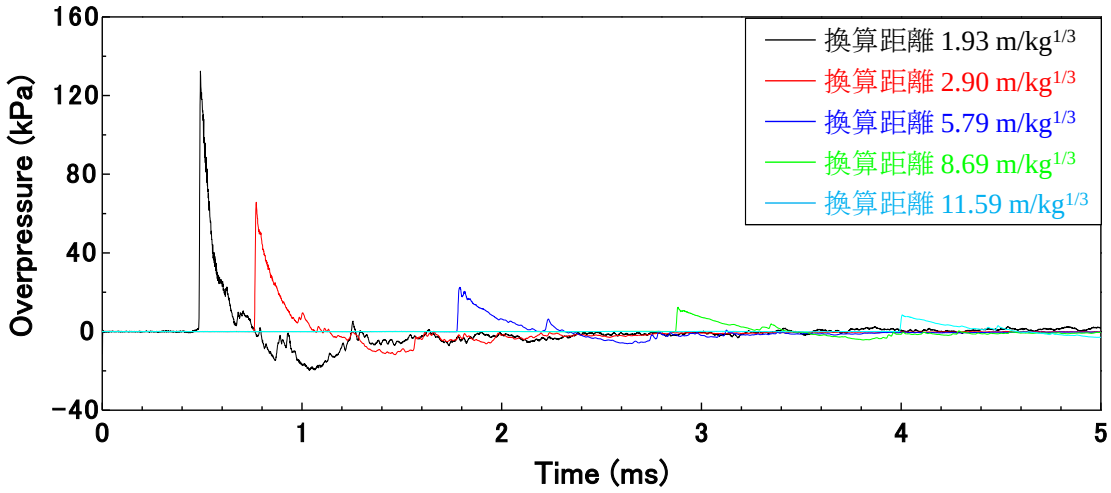


表 5.A.1-59c　No.B　10°　（1 回目）

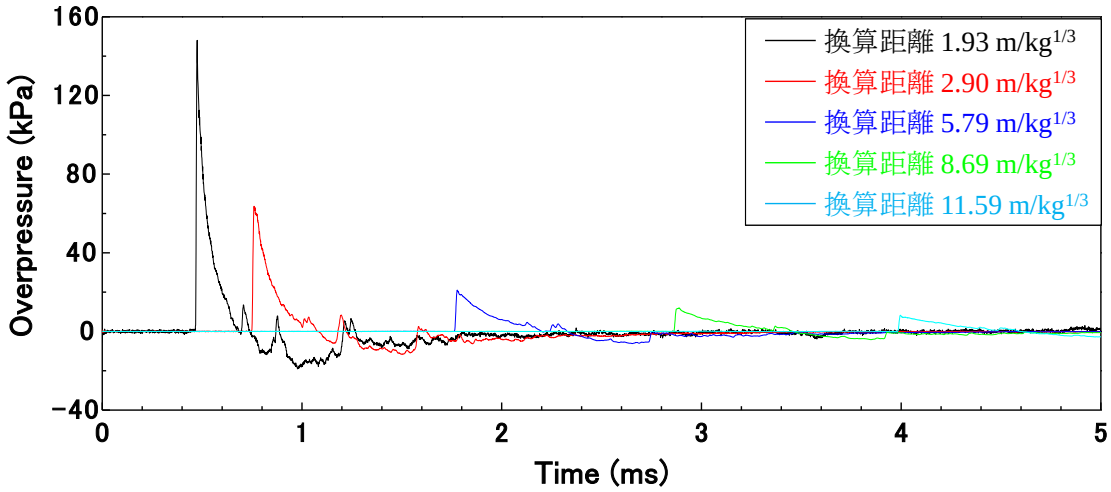


表 5.A.1-60a　No.B　-10°　（2 回目）

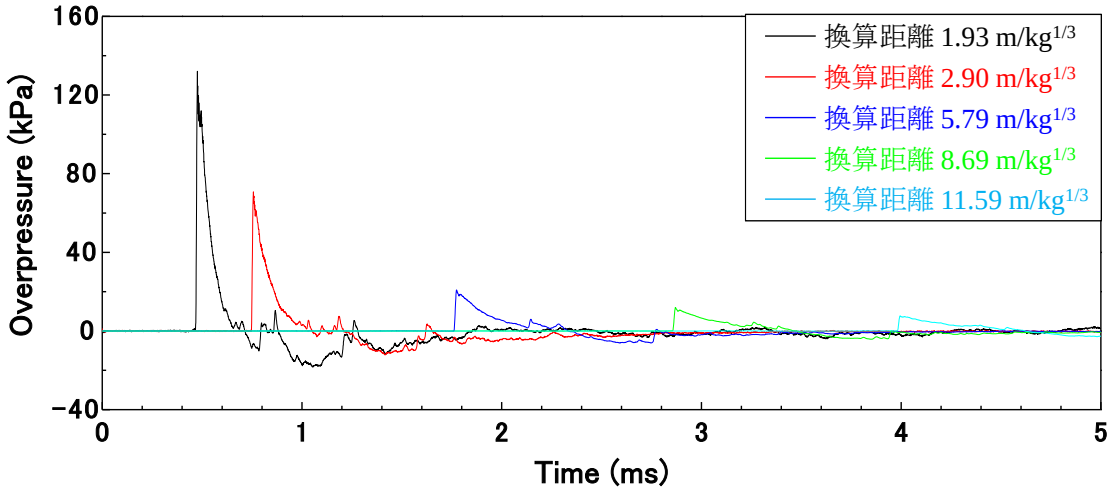


表 5.A.1-60b　No.B　0°　（2 回目）

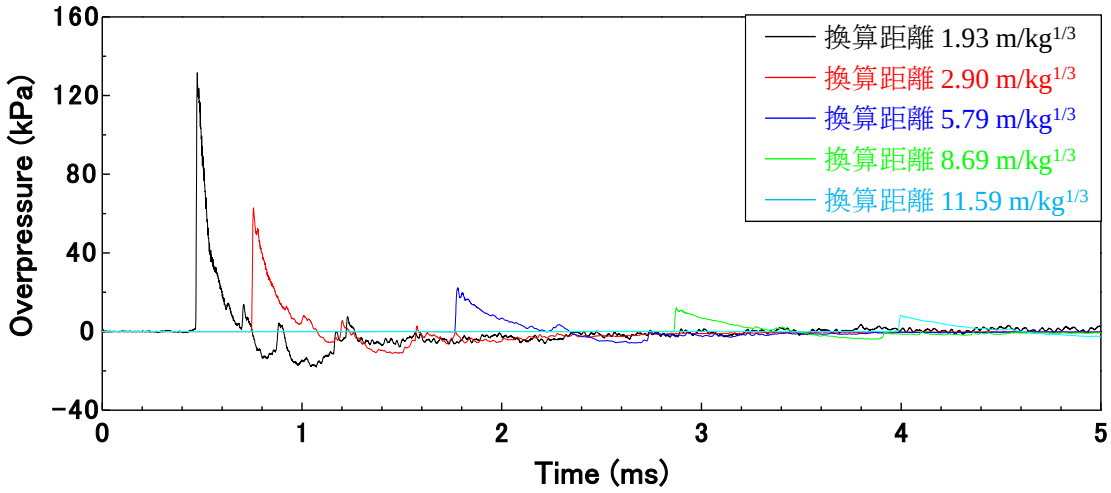


表 5.A.1-60c　No.B　10°　（2 回目）

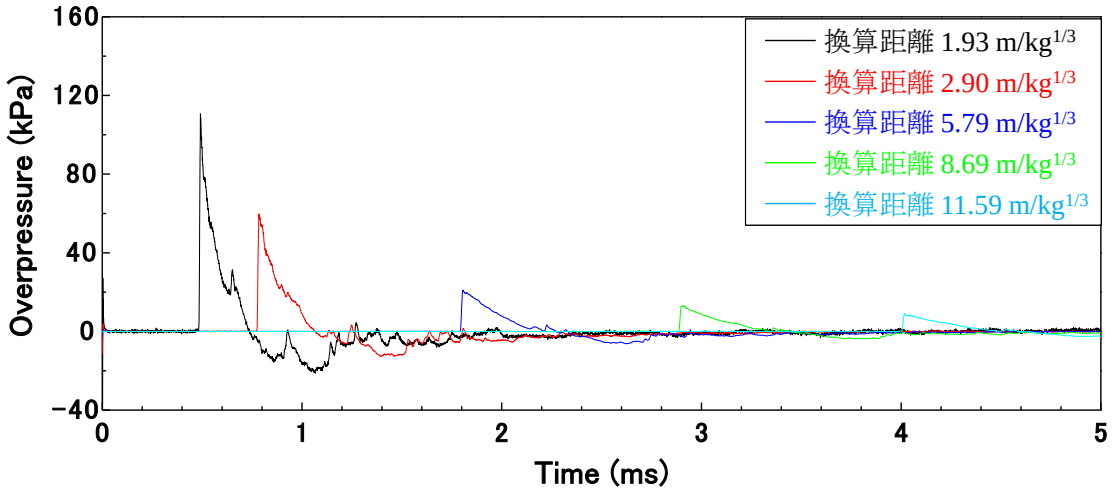


表 5.A.1-61a　No.B　20°　（1 回目）

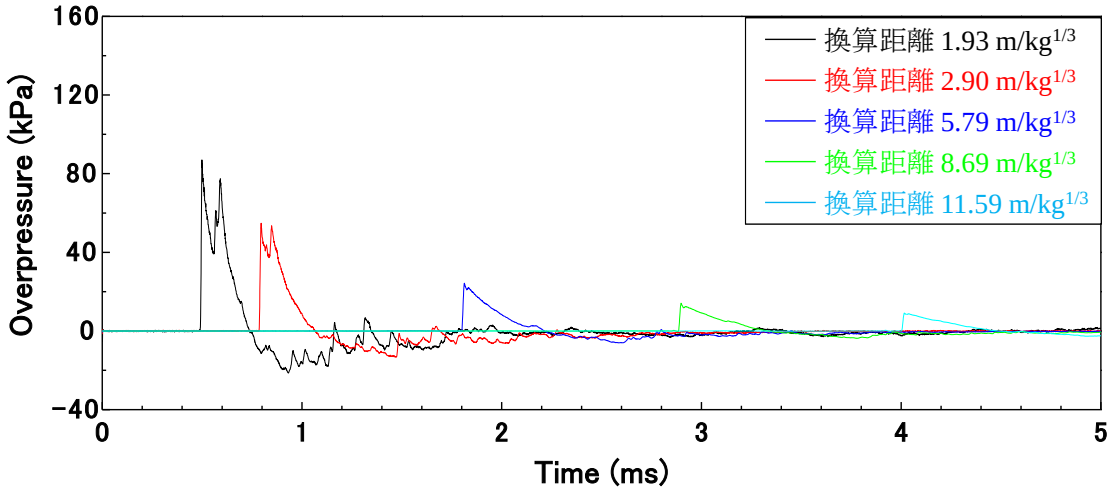


表 5.A.1-61b　No.B　30°　（1 回目）

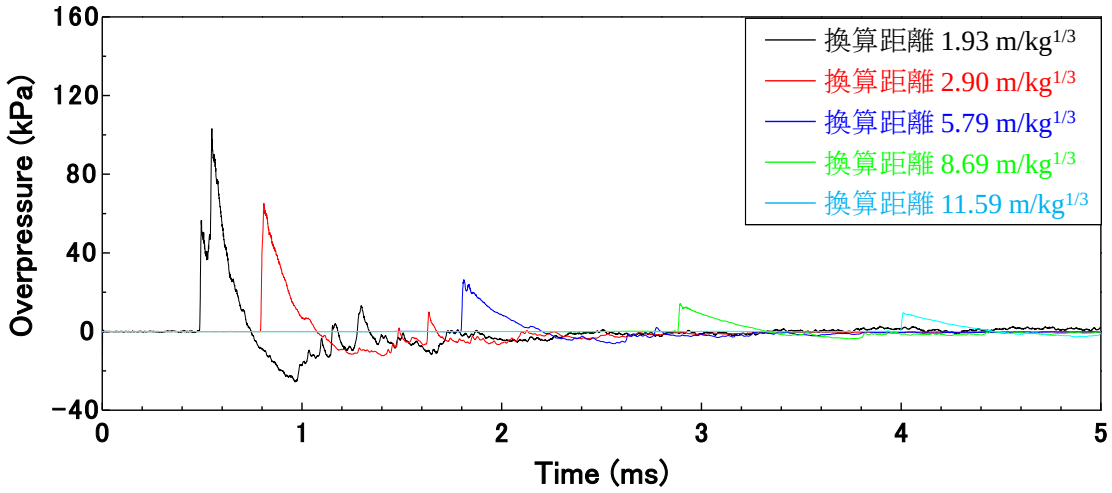


表 5.A.1-61c　No.B　40°　（1 回目）

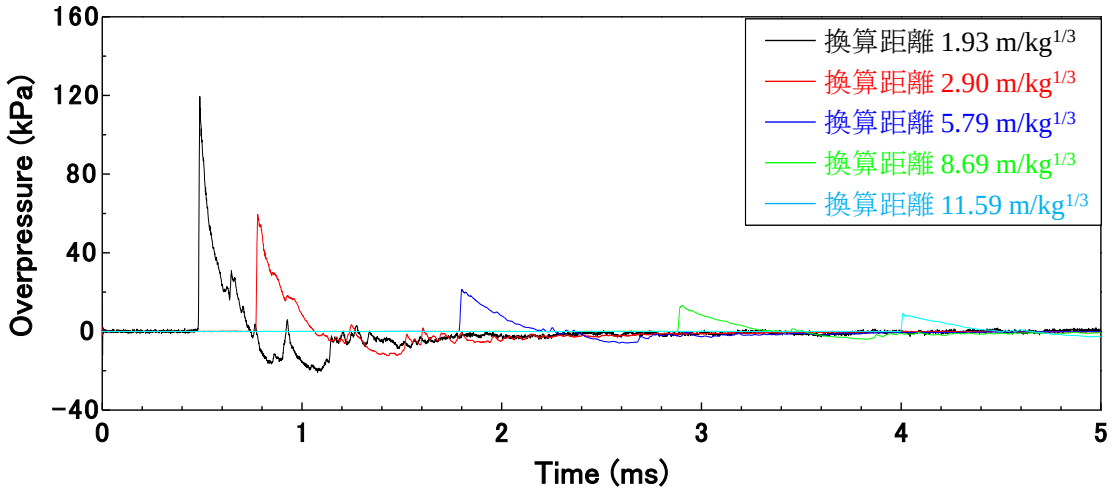


表 5.A.1-62a　No.B　20°　（2 回目）

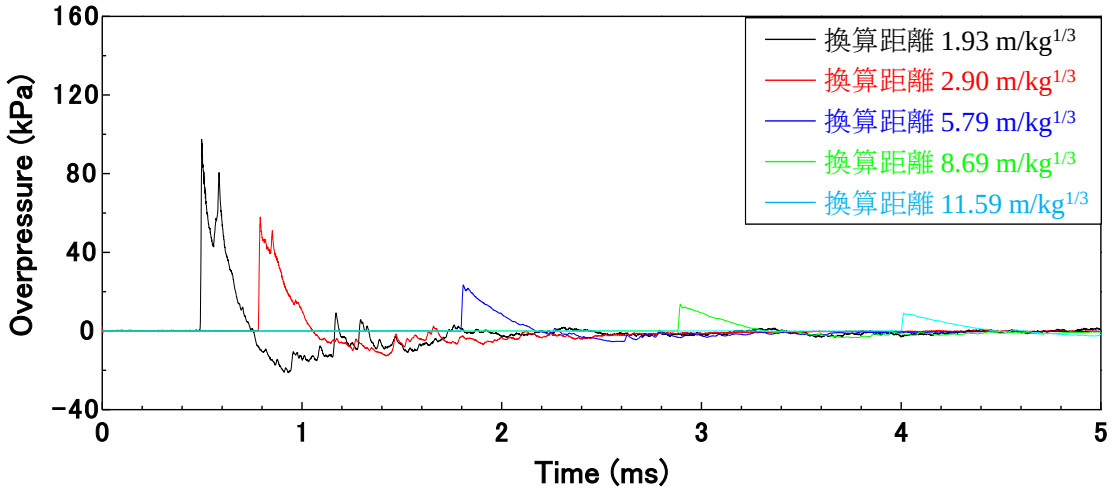


表 5.A.1-62b　No.B　30°　（2 回目）

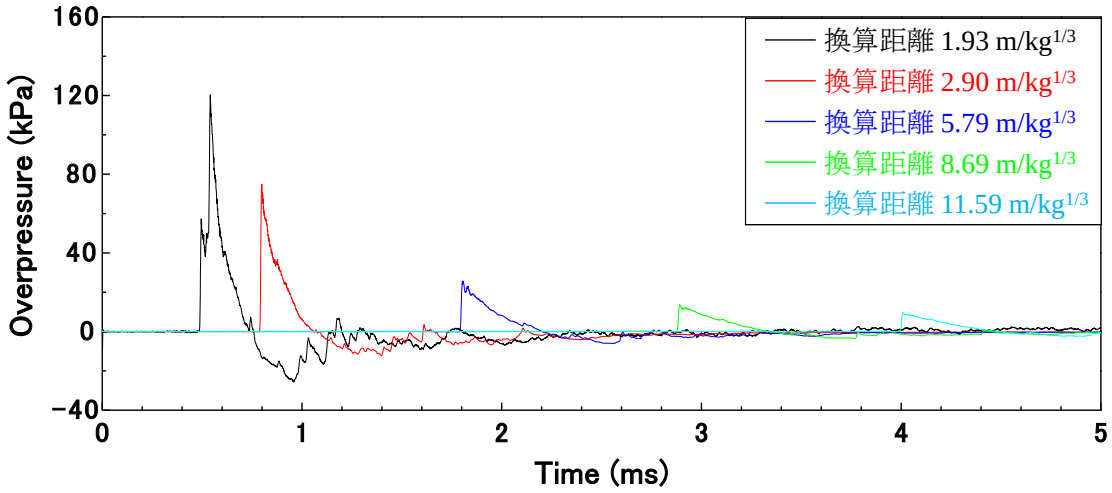


表 5.A.1-62c　No.B　40°　（2 回目）

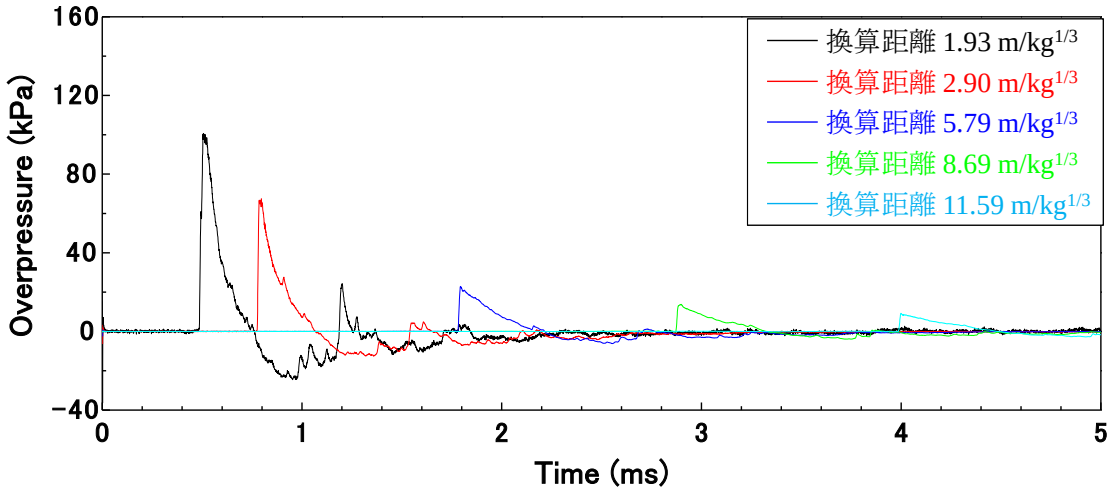


表 5.A.1-63a　No.B　50°　（1 回目）

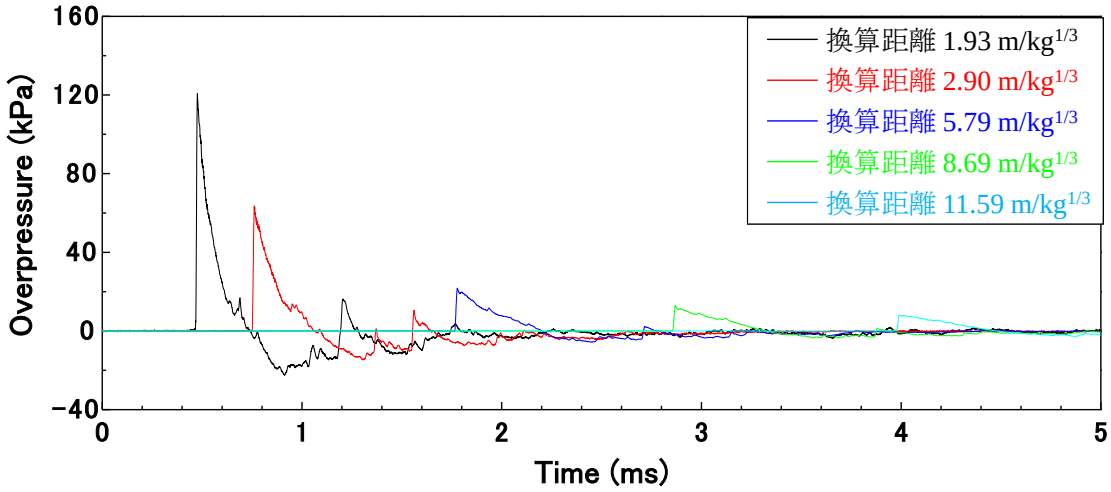


表 5.A.1-63b　No.B　60°　（1 回目）

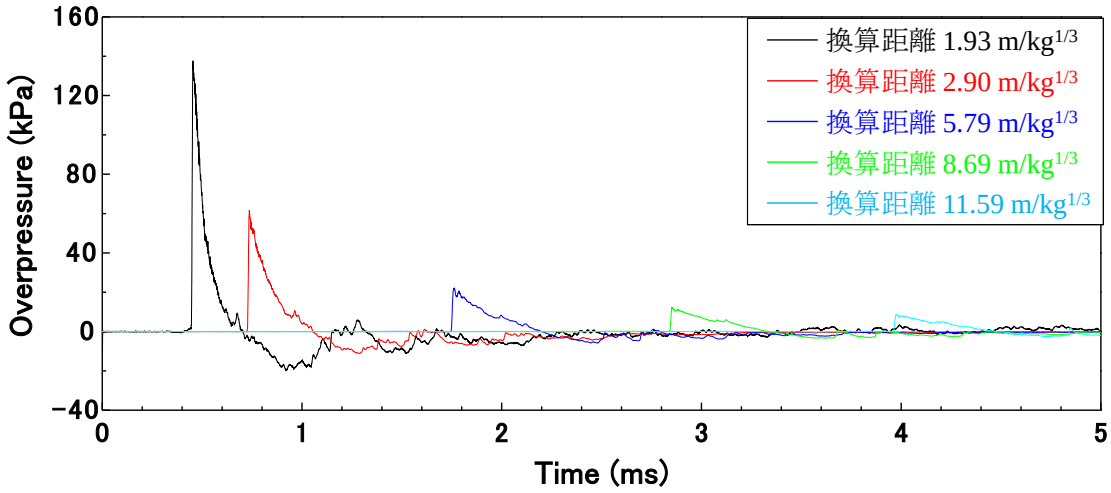


表 5.A.1-63c　No.B　70°　（1 回目）

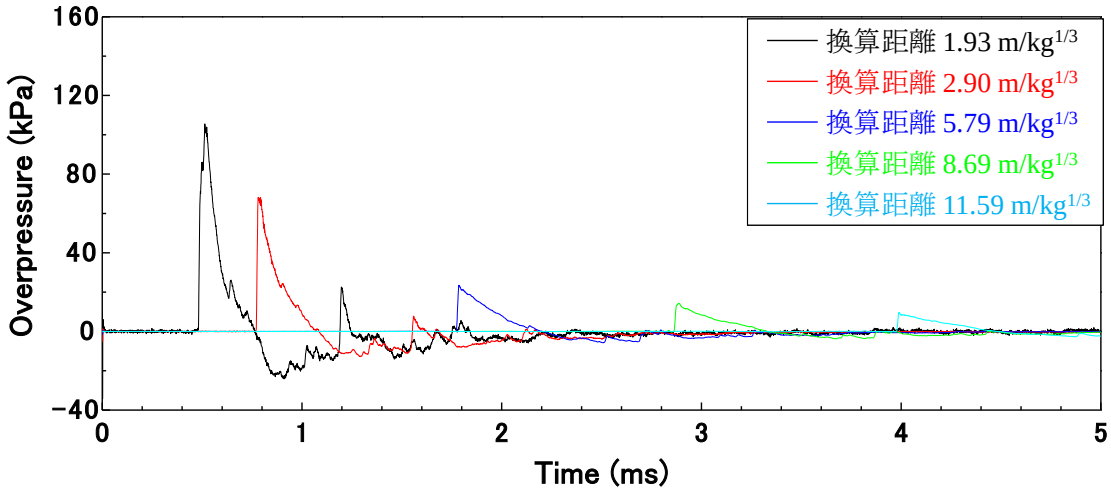


表 5.A.1-64a　No.B　50°　（2 回目）

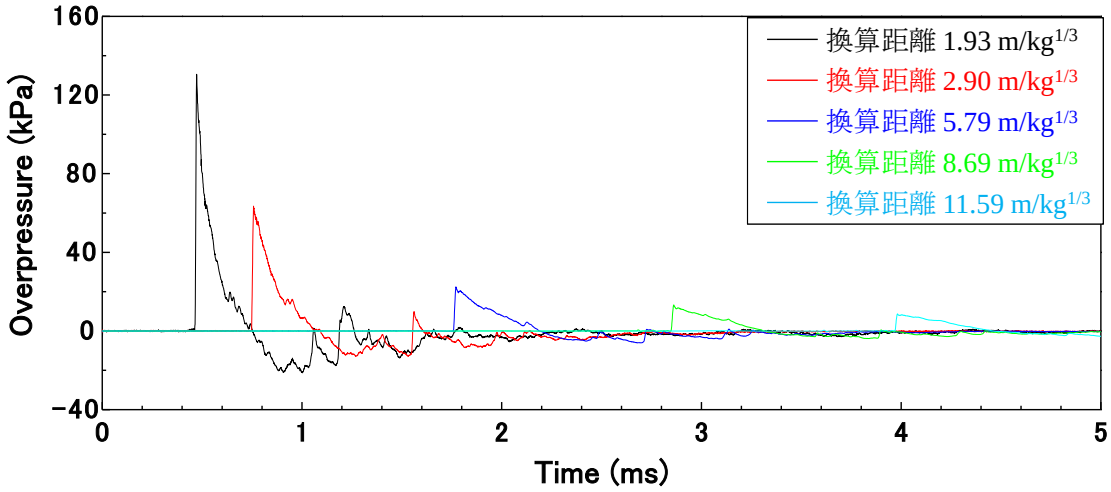


表 5.A.1-64b　No.B　60°　（2 回目）

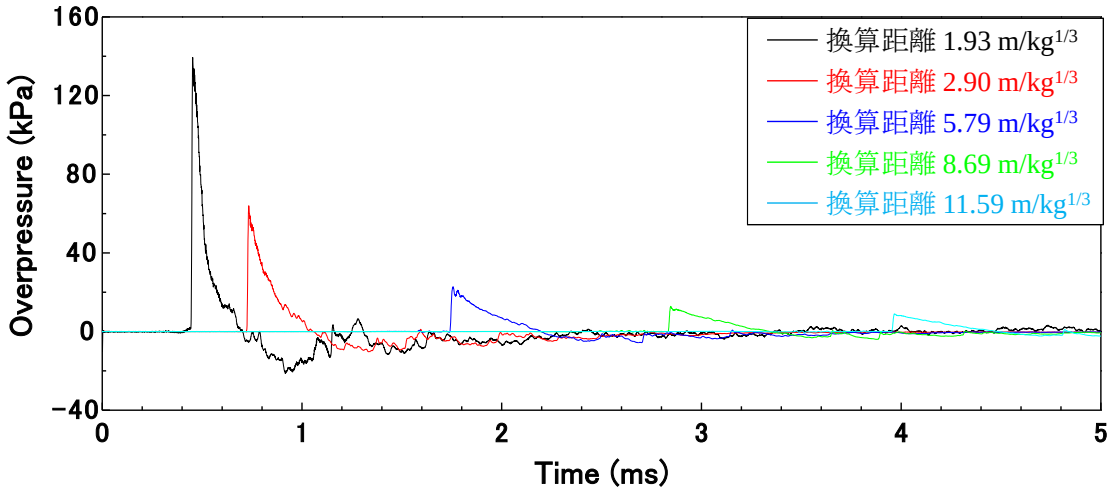


表 5.A.1-64c　No.B　70°　（2 回目）

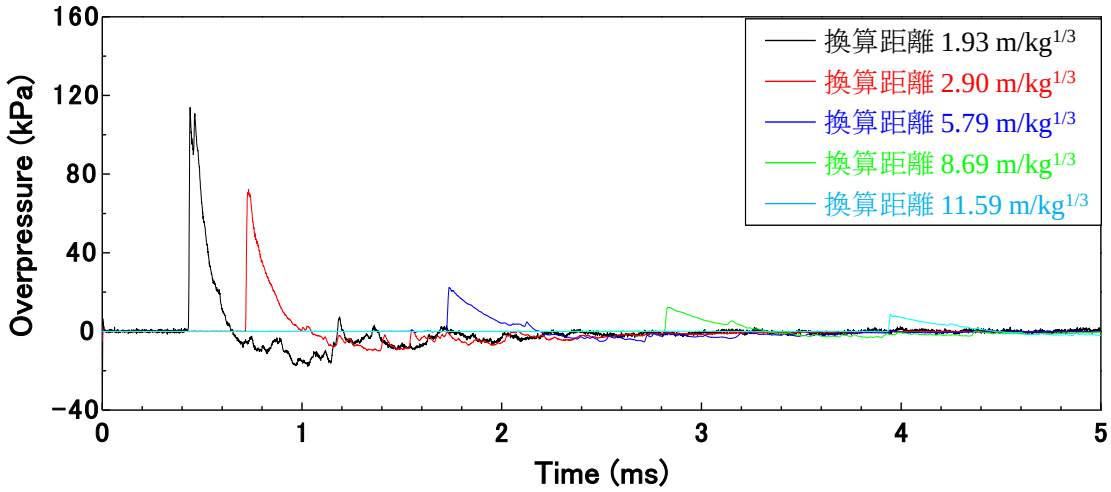


表 5.A.1-65a　No.B　80°　（1 回目）

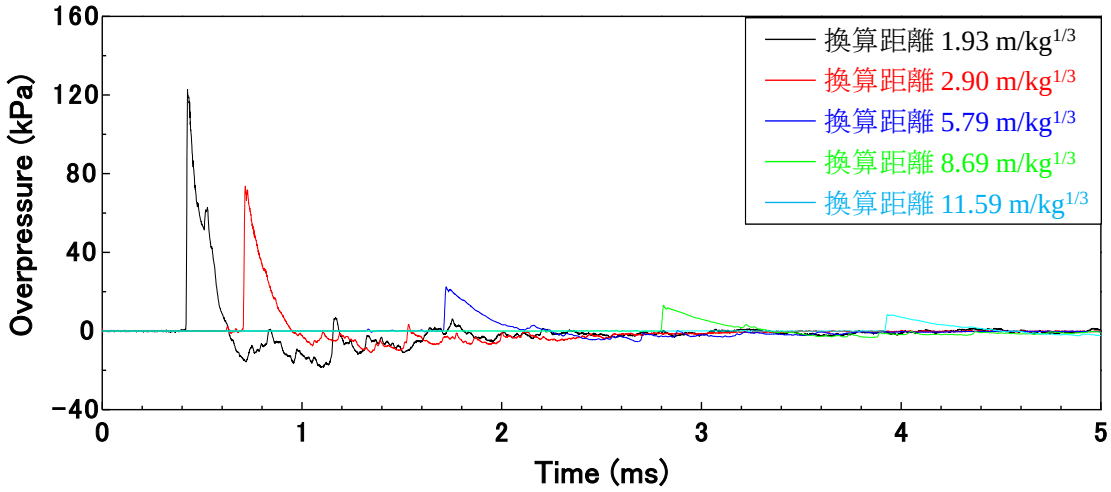


表 5.A.1-65b　No.B　90°　（1 回目）

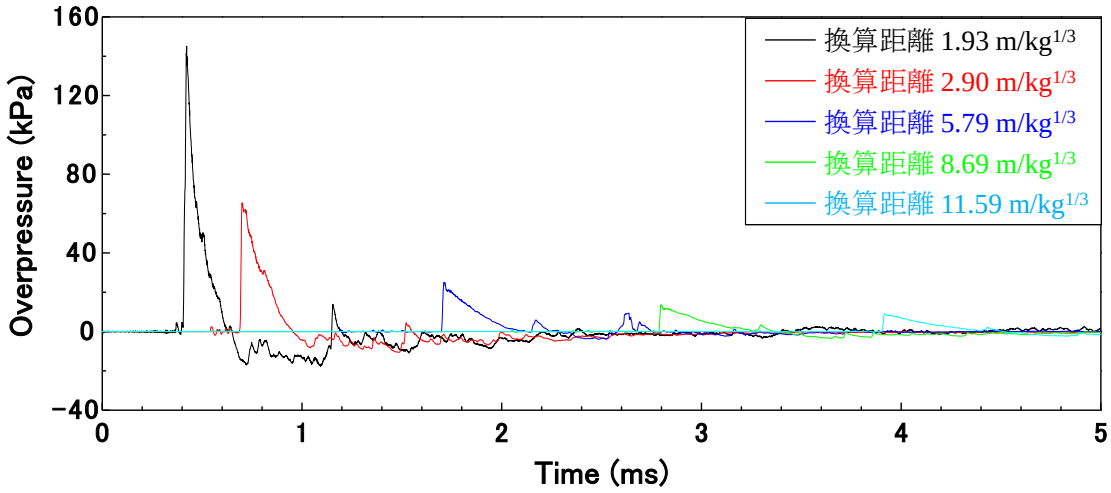


表 5.A.1-65c　No.B　100°　（1 回目）

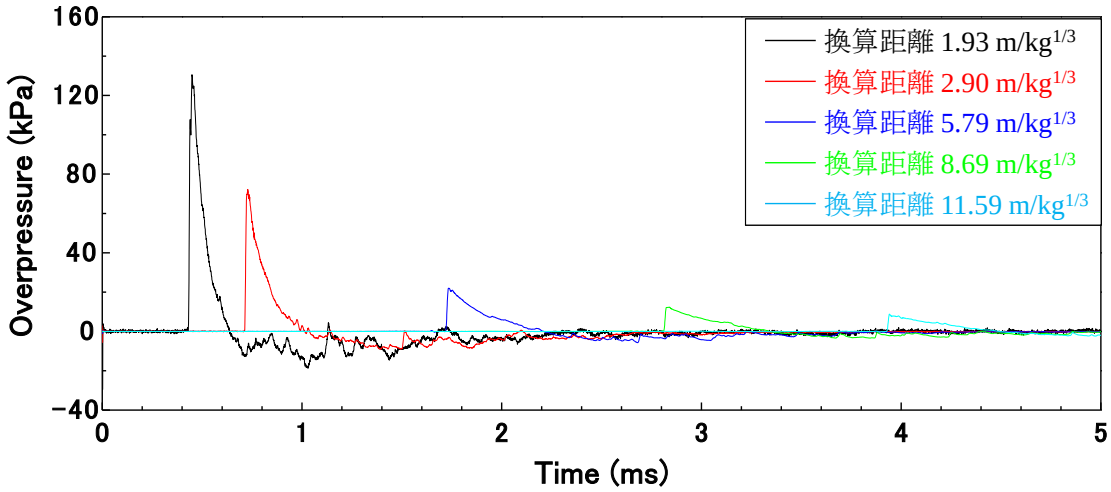


表 5.A.1-66a　No.B　80°　（2 回目）

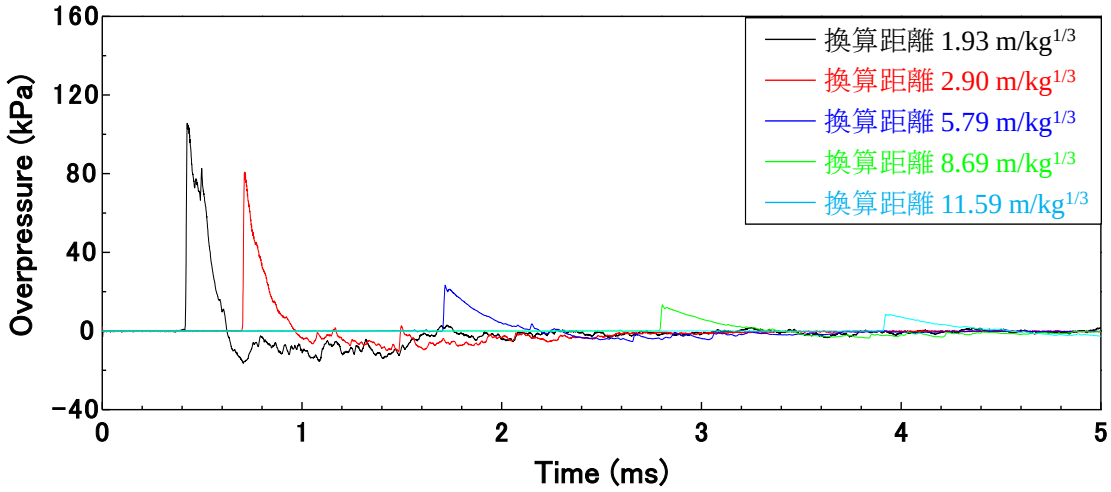


表 5.A.1-66b　No.B　90°　（2 回目）

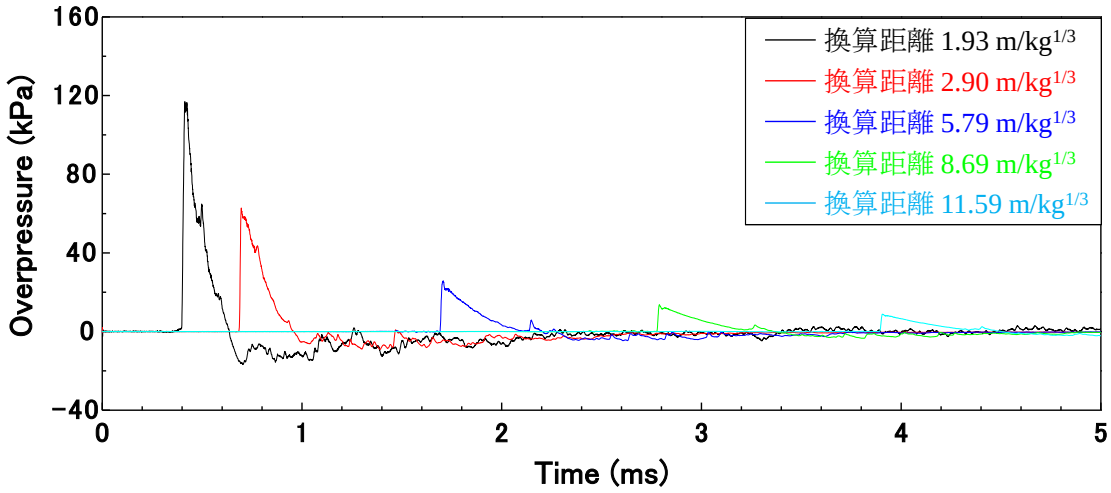


表 5.A.1-66c　No.B　100°　（2 回目）

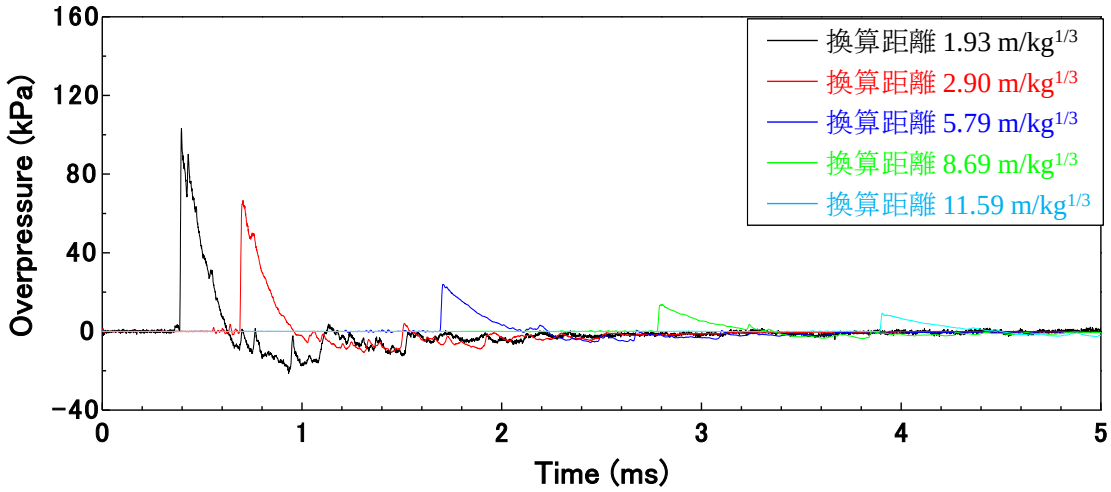


表 5.A.1-67a　No.B　110°　（1 回目）

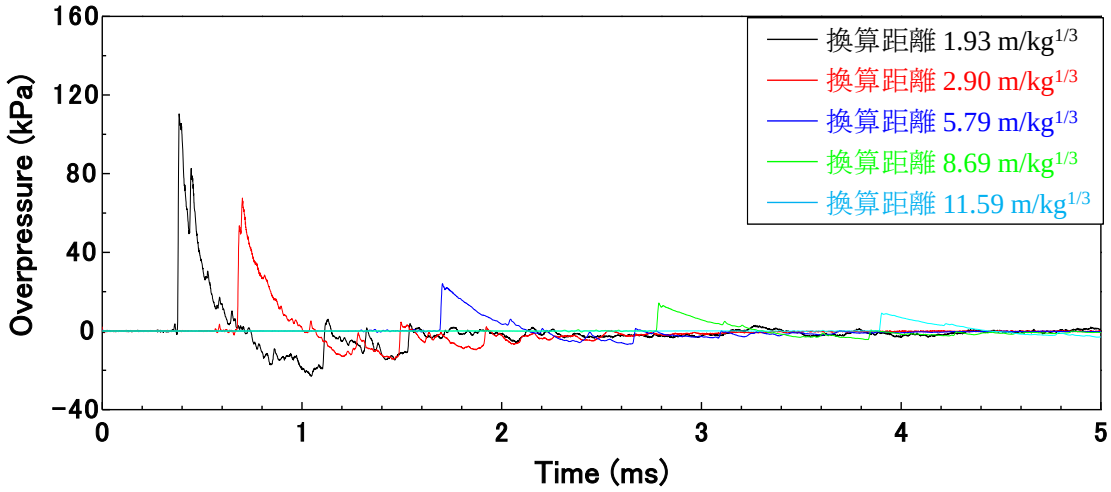


表 5.A.1-67b　No.B　120°　（1 回目）

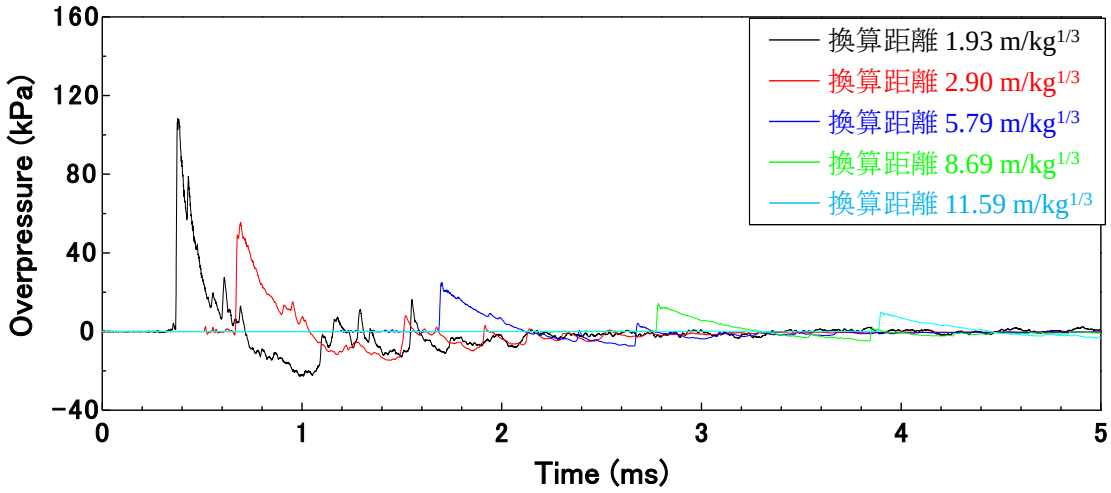


表 5.A.1-67c　No.B　130°　（1 回目）

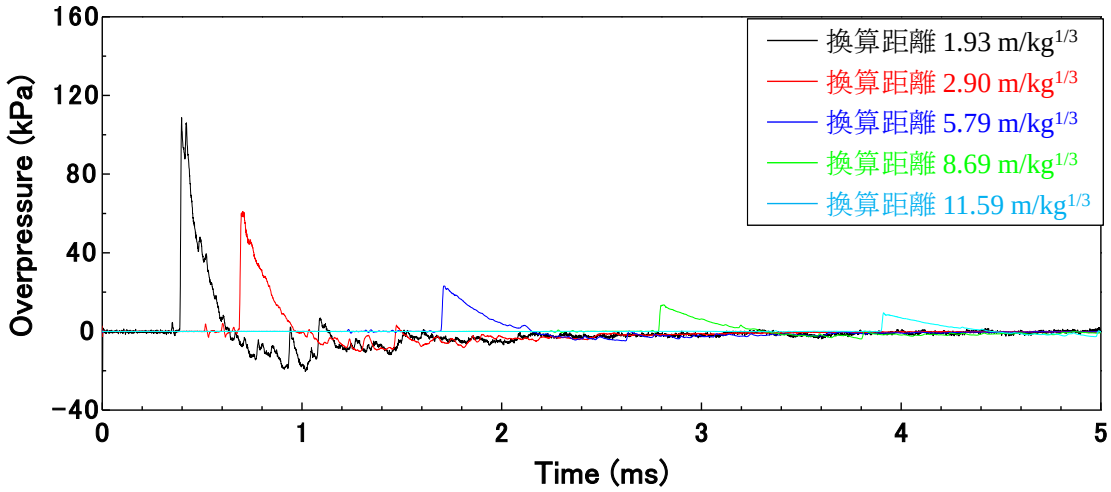


表 5.A.1-68a　No.B　110°　（2 回目）

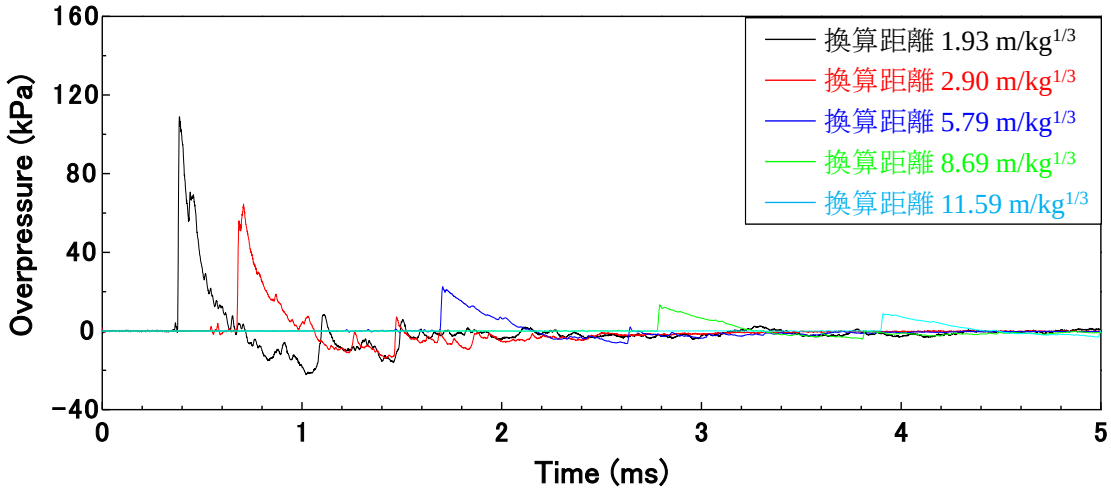


表 5.A.68b　No.B　120°　（2 回目）

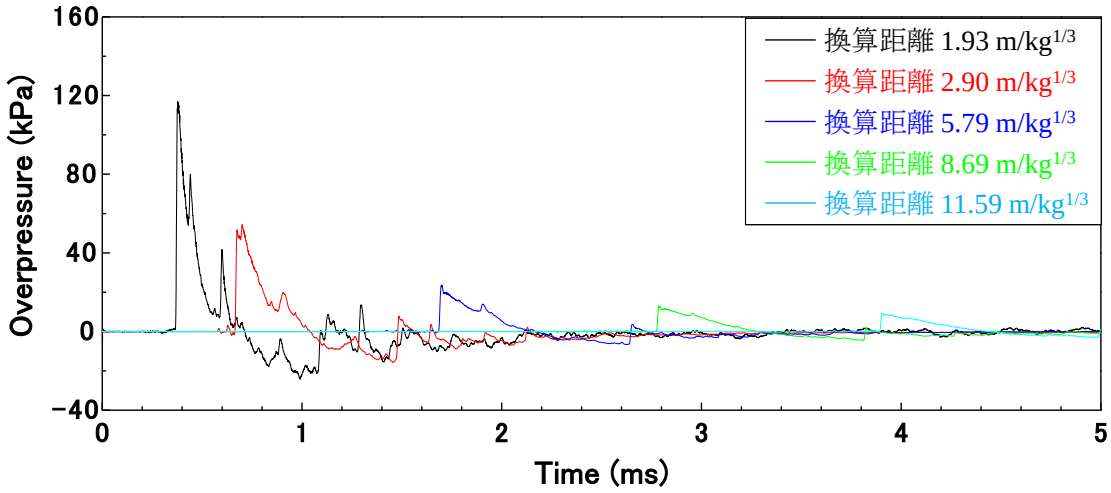


表 5.A.1-68c　No.B　130°　（2 回目）

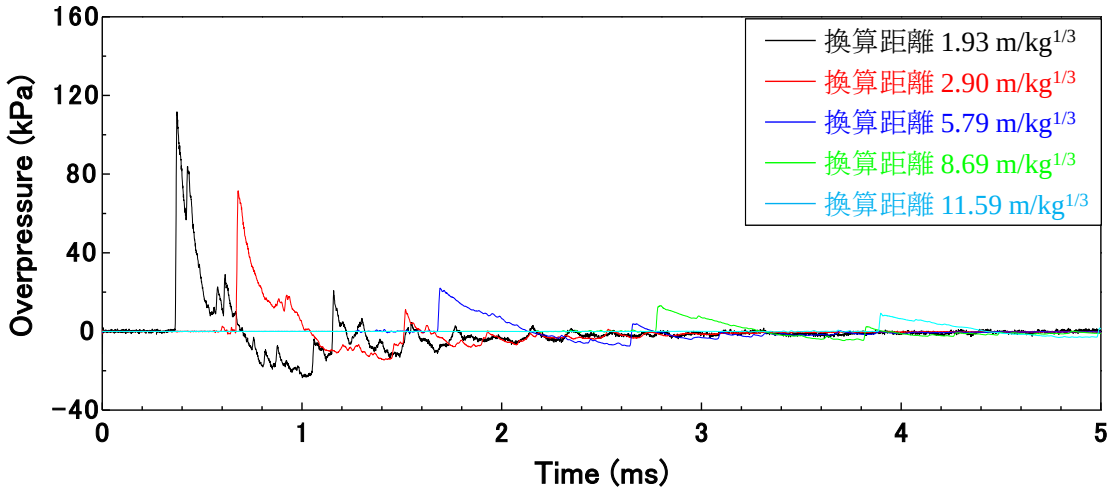


表 5.A.1-69a　No.B　140°　（1 回目）

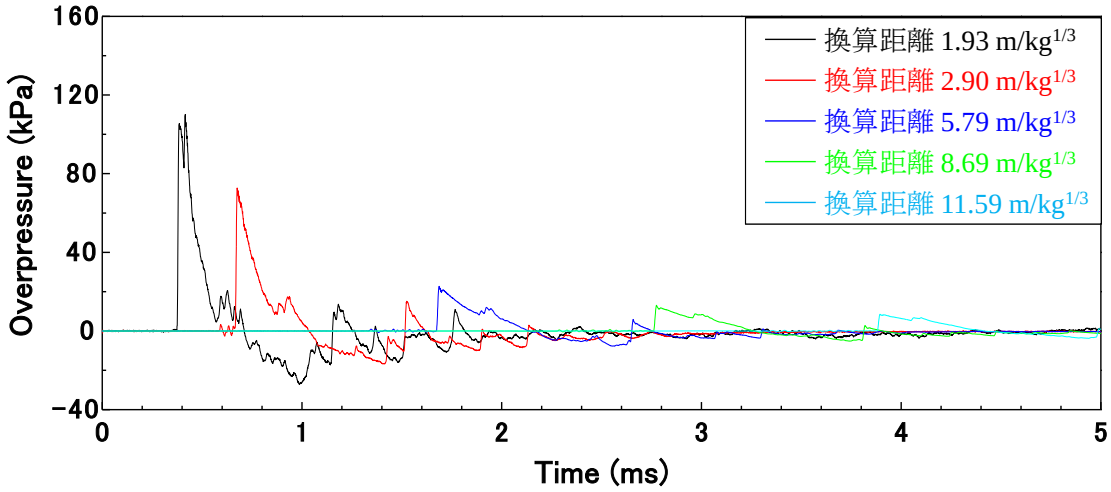


表 5.A.1-69b　No.B　150°　（1 回目）

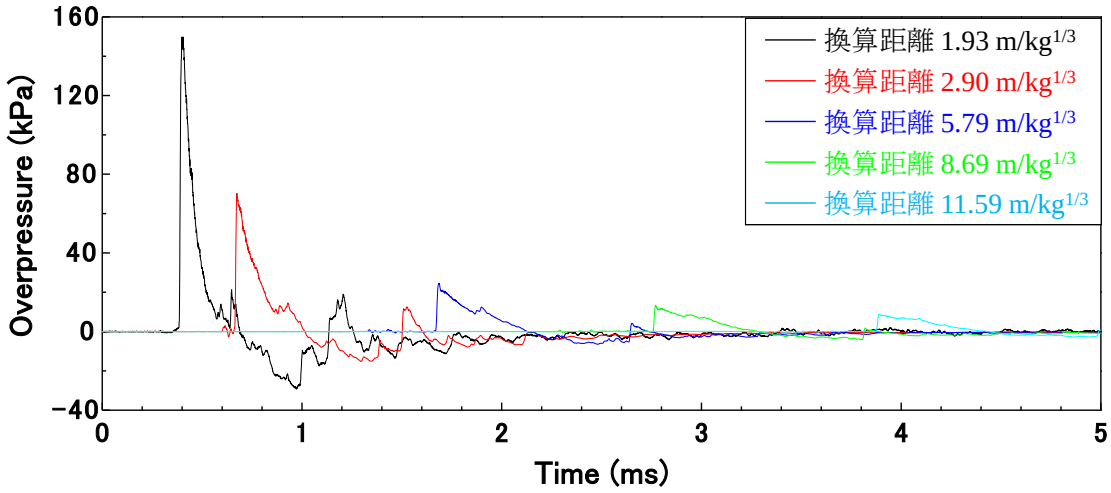


表 5.A.1-69c　No.B　160°　（1 回目）

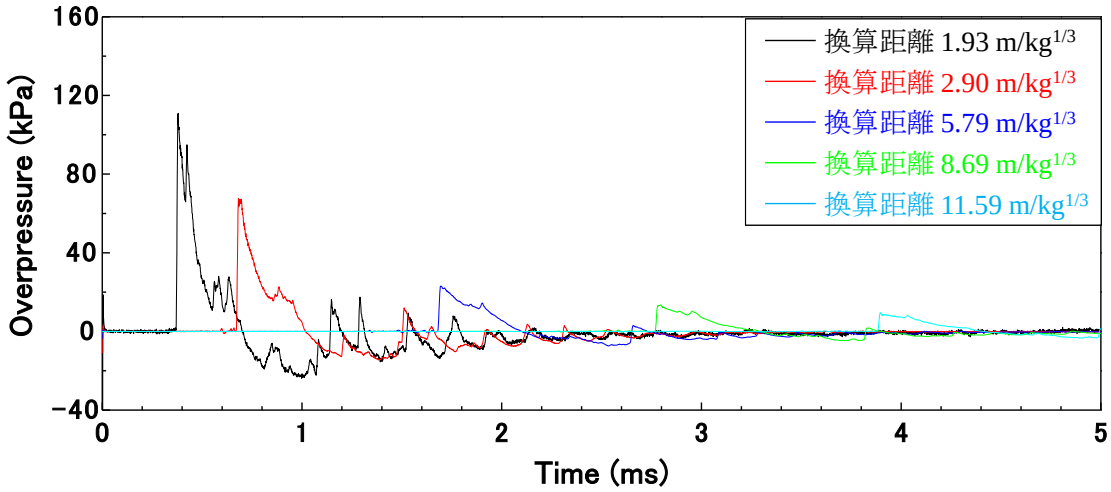


表 5.A.1-70a　No.B　140°　（2 回目）

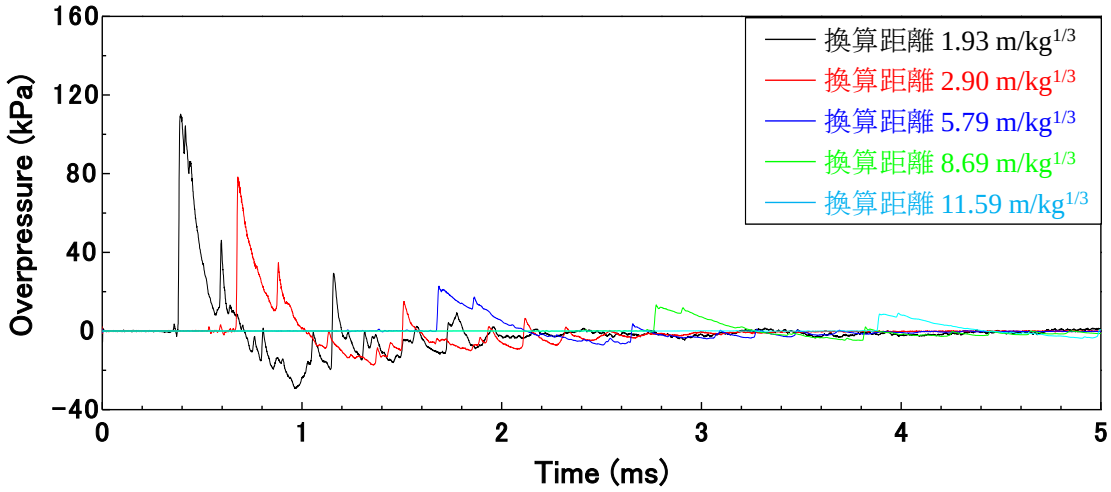


表 5.A.1-70b　No.B　150°　（2 回目）

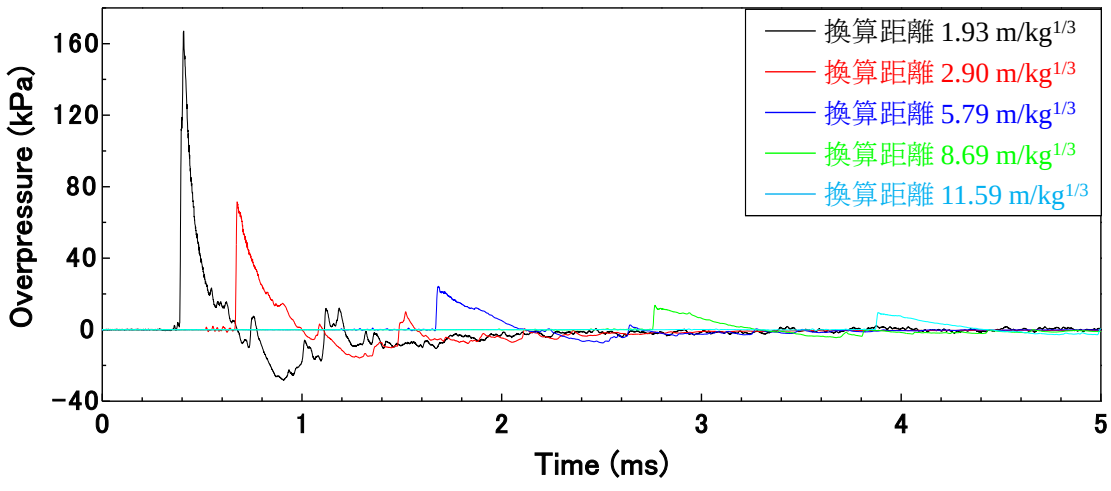


表 5.A.1-70c　No.B　160°　（2 回目）

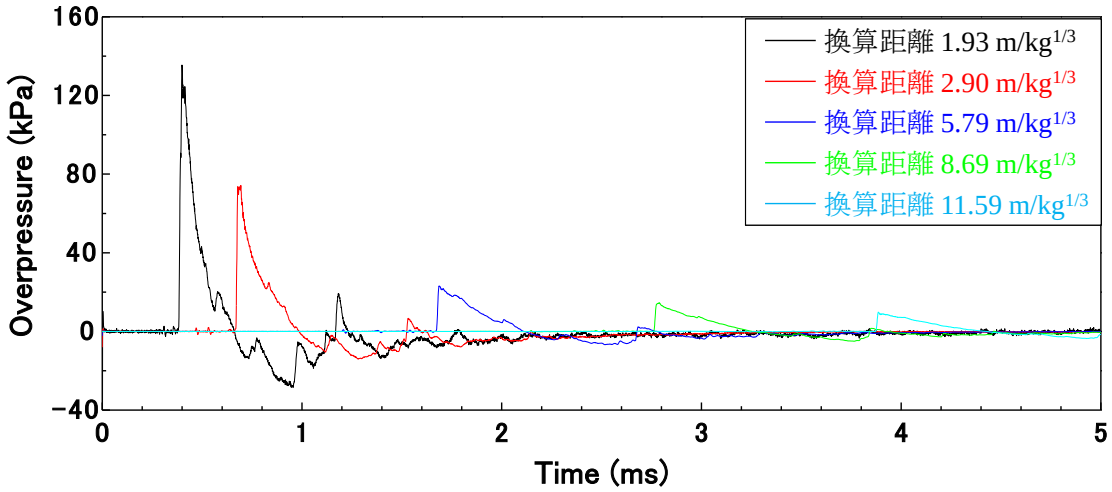


表 5.A.1-71a　No.B　170°　（1 回目）

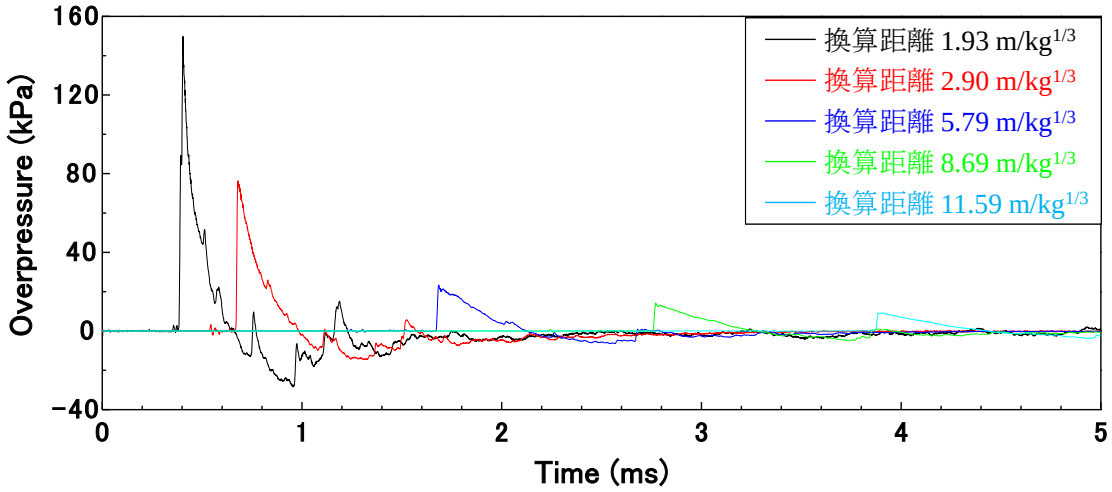


表 5.A.1-71b　No.B　180°　（1 回目）

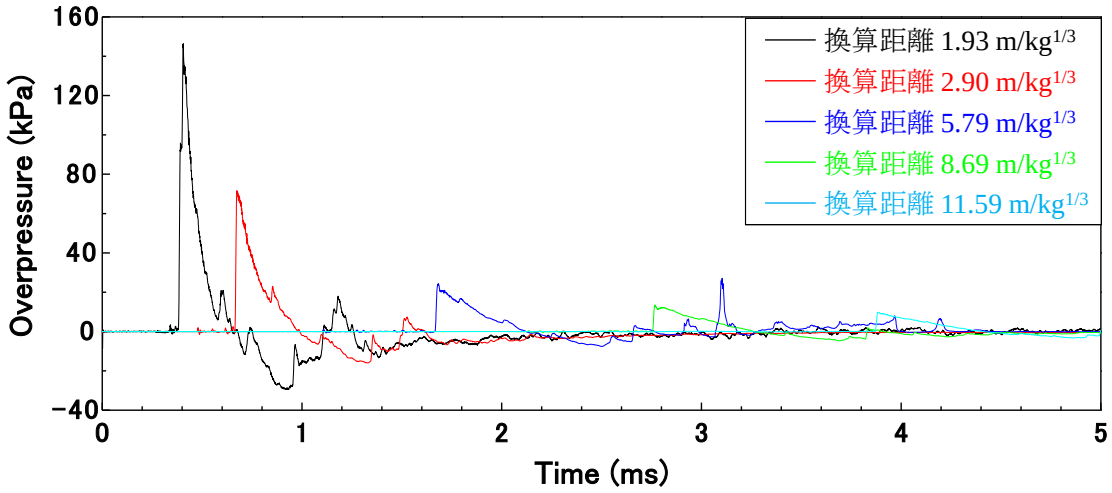


表 5.A.1-71c　No.B　190°　（1 回目）

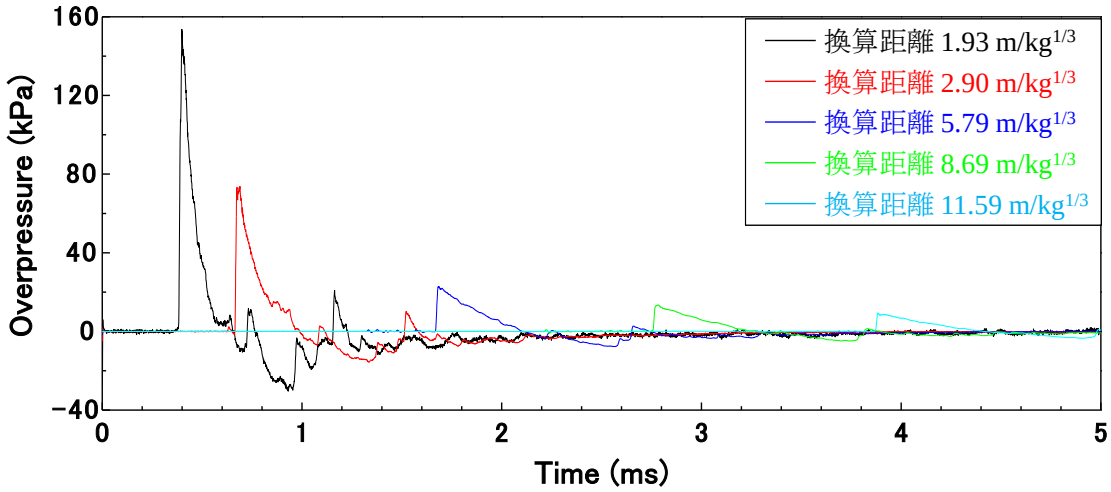


表 5.A.1-72a　No.B　170°　（1 回目）

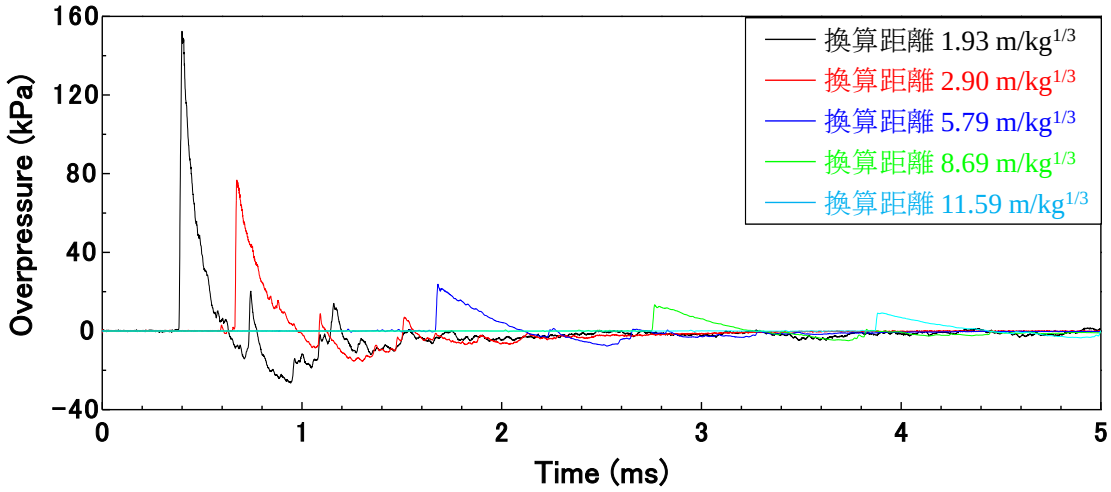


表 5.A.1-72b　No.B　180°　（2 回目）

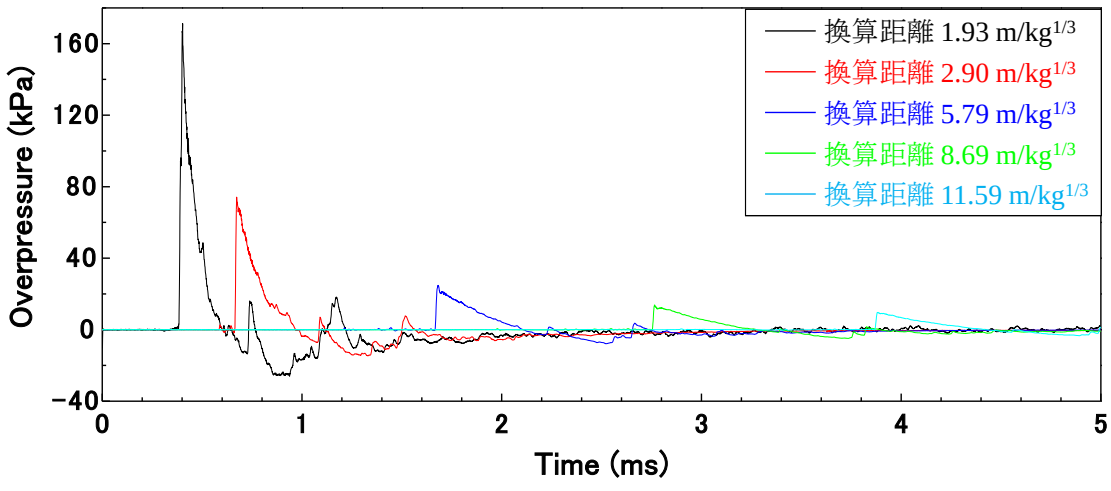


表 5.A.1-72c　No.B　190°　（2 回目）

6.A.1　（付録 8）シミュレーション参考資料

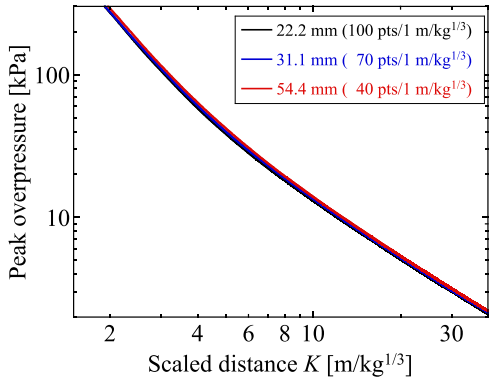


図 6.A.1-1 数値解析の解像度検証（基準爆風圧の最大過圧比較）

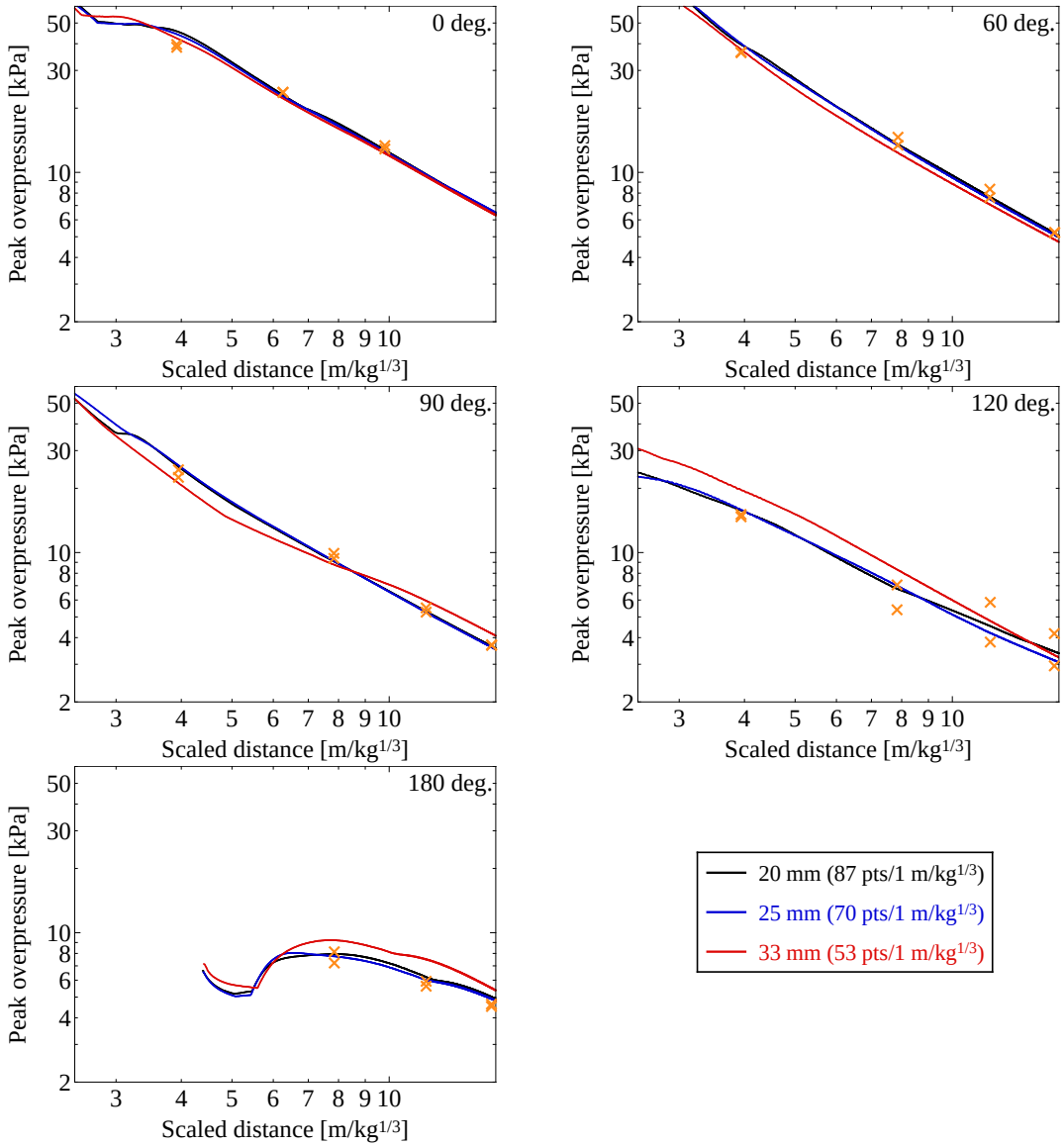


図 6.A.1-2 数値解析の解像度検証（地中式火薬庫の最大過圧比較）

基準爆風圧では薬量換算距離に 40 点あれば十分な解像度であるが、地中式火薬庫の場合は火薬庫形状や地形モデルは解像度が細かいほど精度が良くなると考えられる。70 点と 87 点で広い範囲で一致することから、地中式火薬庫では薬量換算距離に 40 点では足りない。報告書は全て 70 点の解析結果を用

いる。

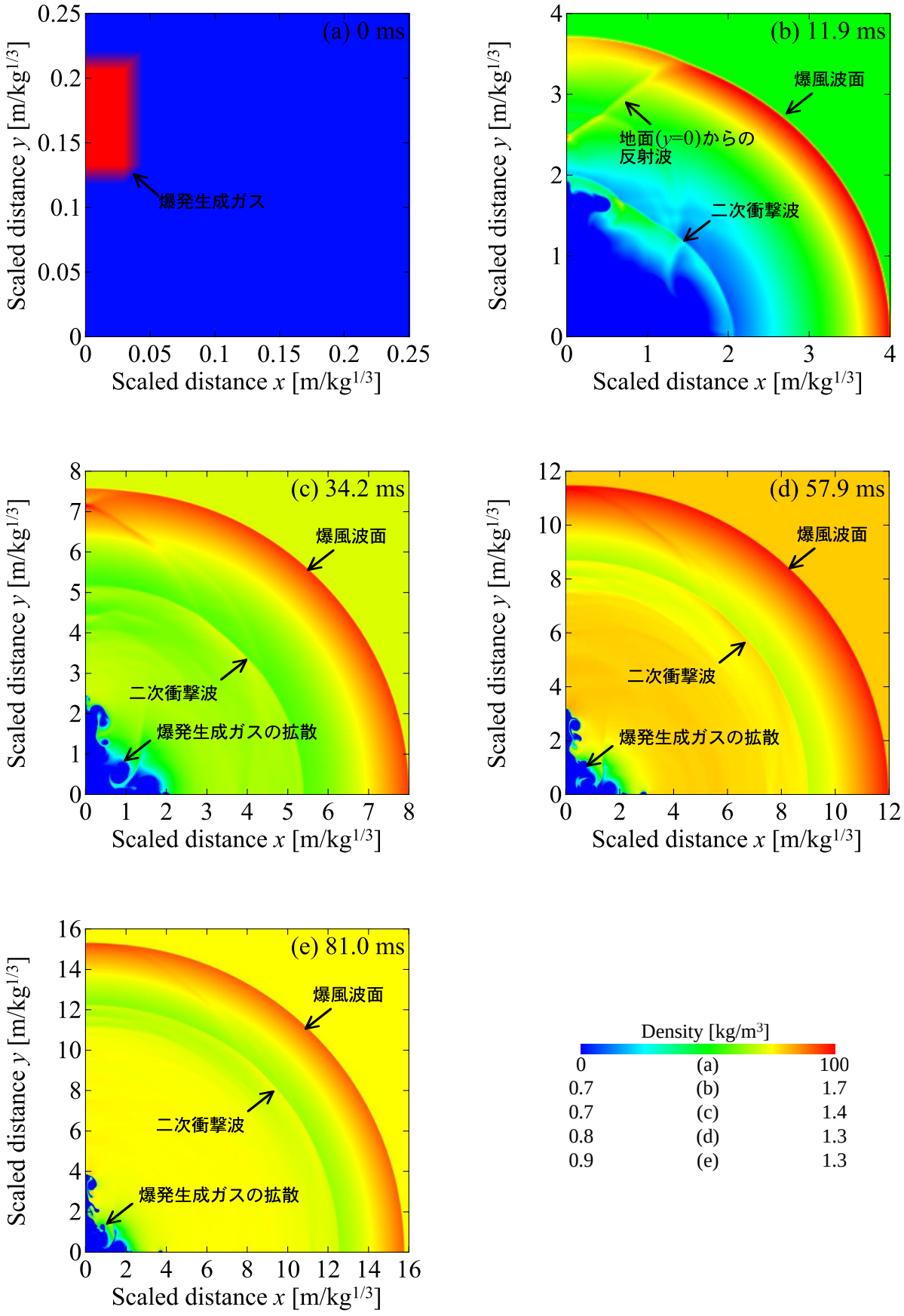


図 6.A.1-3　　基準爆風圧数値解析における爆風伝播の様子

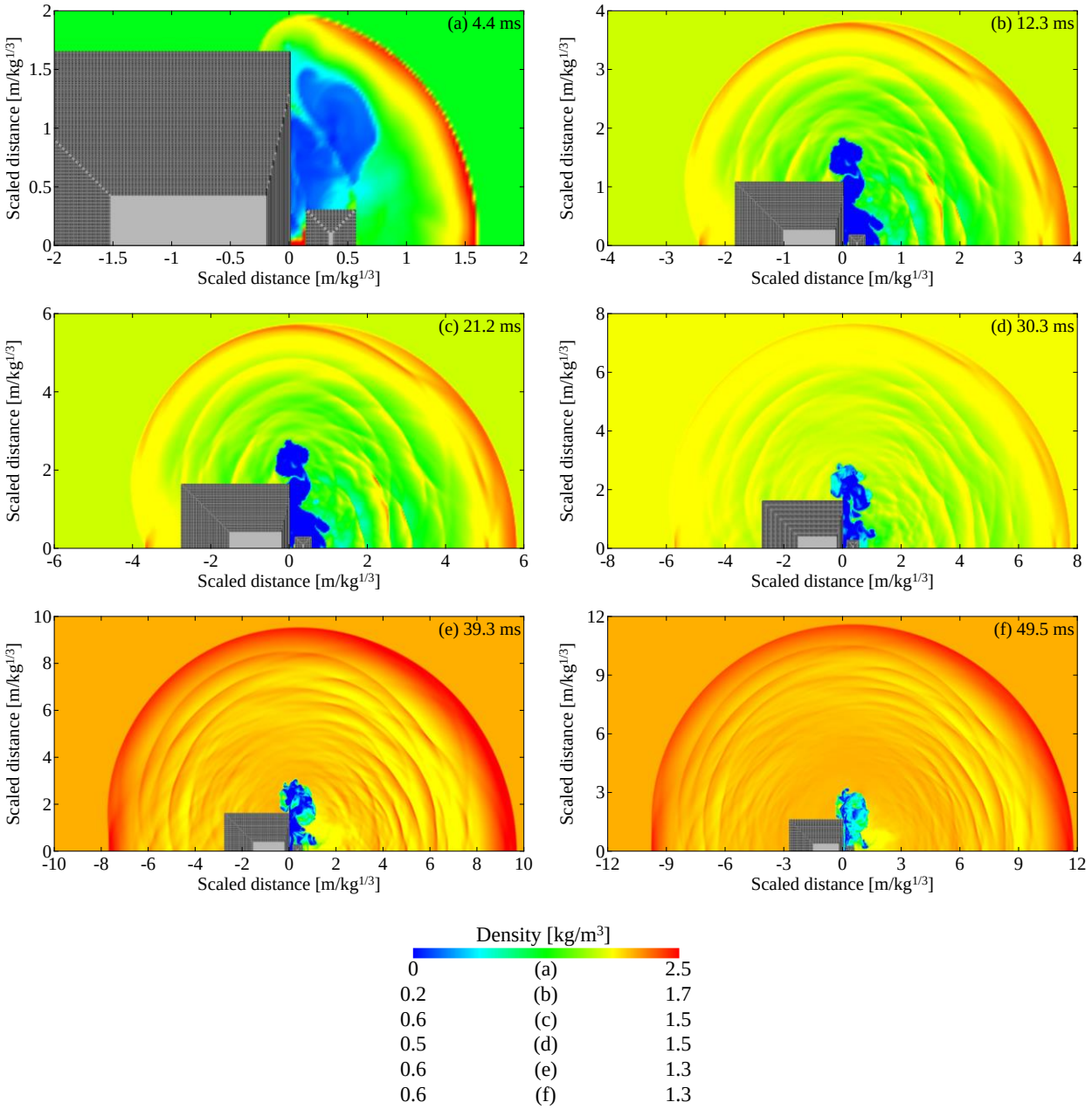


図 6.A.1-4　　L/D_2=3 における爆風伝播の様子（地表面の密度分布）
（庫口近傍の低密度領域は爆発生成ガス）

断面積縮小部（薬室と前室の境目）が存在する場合、爆風は出口側に向かう成分（通過分）と薬室に戻る成分（反射分）に分割される。反射分が薬室を往復するたびに断面積縮小部にて通過分と反射分が形成され、庫口から間欠的に爆風が放出される。そのため、L/D_2 が小さいほど庫口から放出される爆風の間隔が短くなる。L/D_2=3 の場合はその回数が非常に多いため、先頭衝撃波面より内側の流れ場は非常に複雑になる。

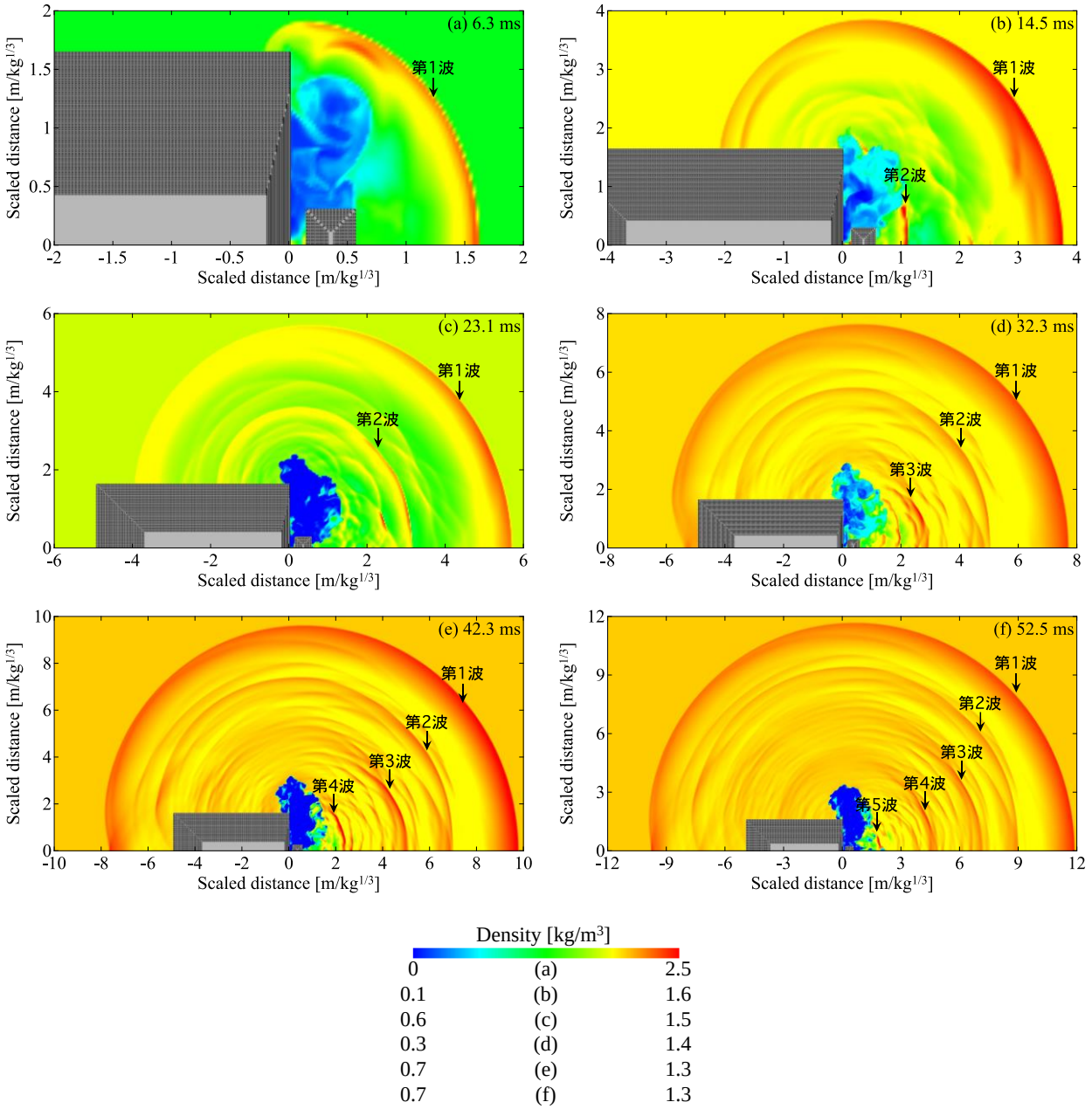


図 6.A.1-5　　L/D_2=8.6 における爆風伝播の様子（地表面の密度分布）
（庫口近傍の低密度領域は爆発生成ガス）

L/D_2=8.6 では断面積縮小部で形成される反射分が薬室を往復するまでの時間が長くなり、庫口から放出される爆風が間欠的に放出されるまでの時間差が大きくなる。先頭衝撃波面（第 1 波）以降は周期的に第 2 波、第 3 波と形成され、換算距離 12 まで伝播した際に第 5 波まで観測される。波の間隔は薬室長さ程度となる。

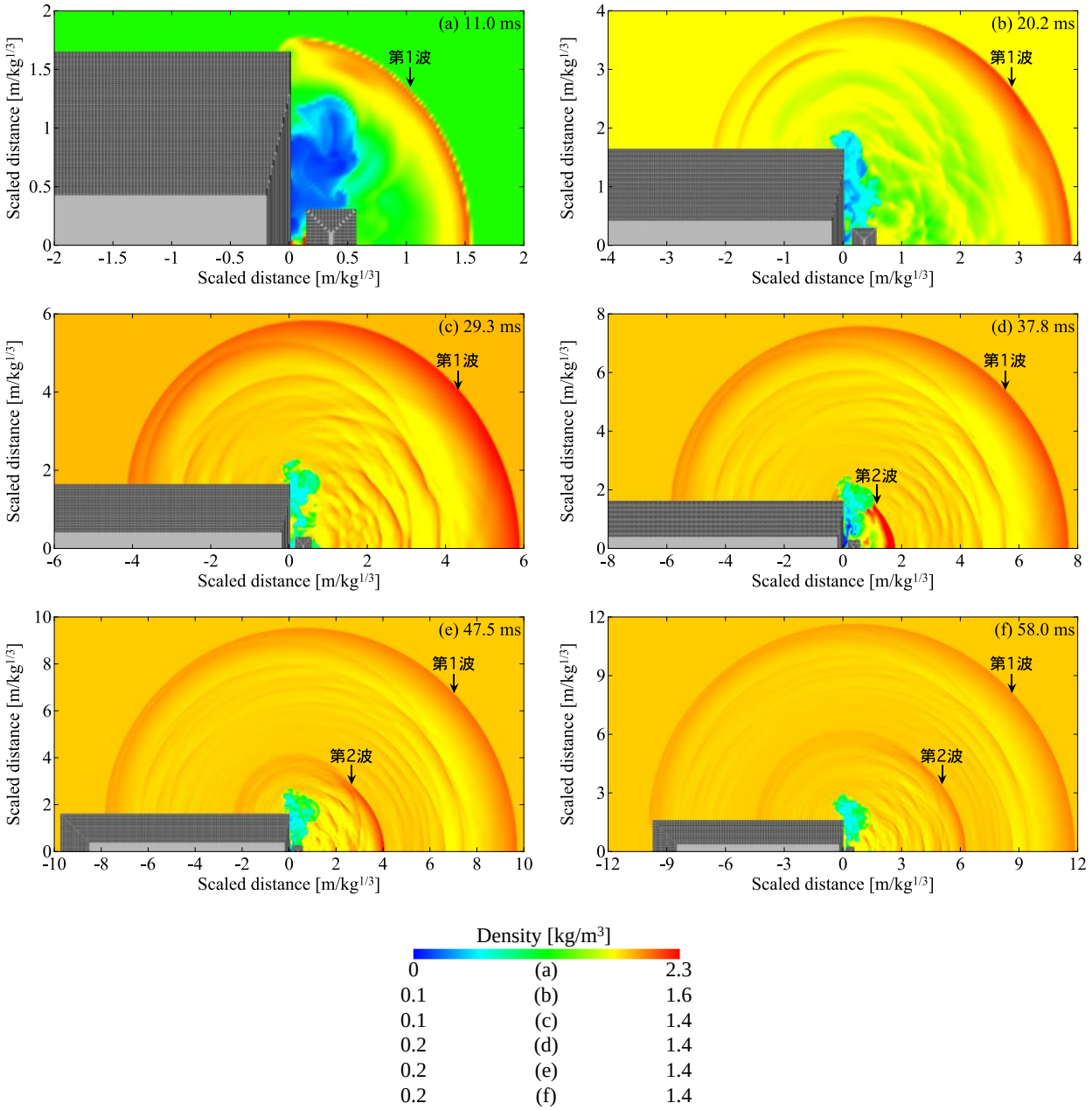


図 6.A.1-4　　L/D_2=21 における爆風伝播の様子（地表面の密度分布）
（庫口近傍の低密度領域は爆発生成ガス）

L/D_2=21 では庫口から放出される爆風の間隔が伸び、爆風が換算距離 12 まで伝播した際には第 2 波まで観測される。波の間隔は薬室長さ程度となる。

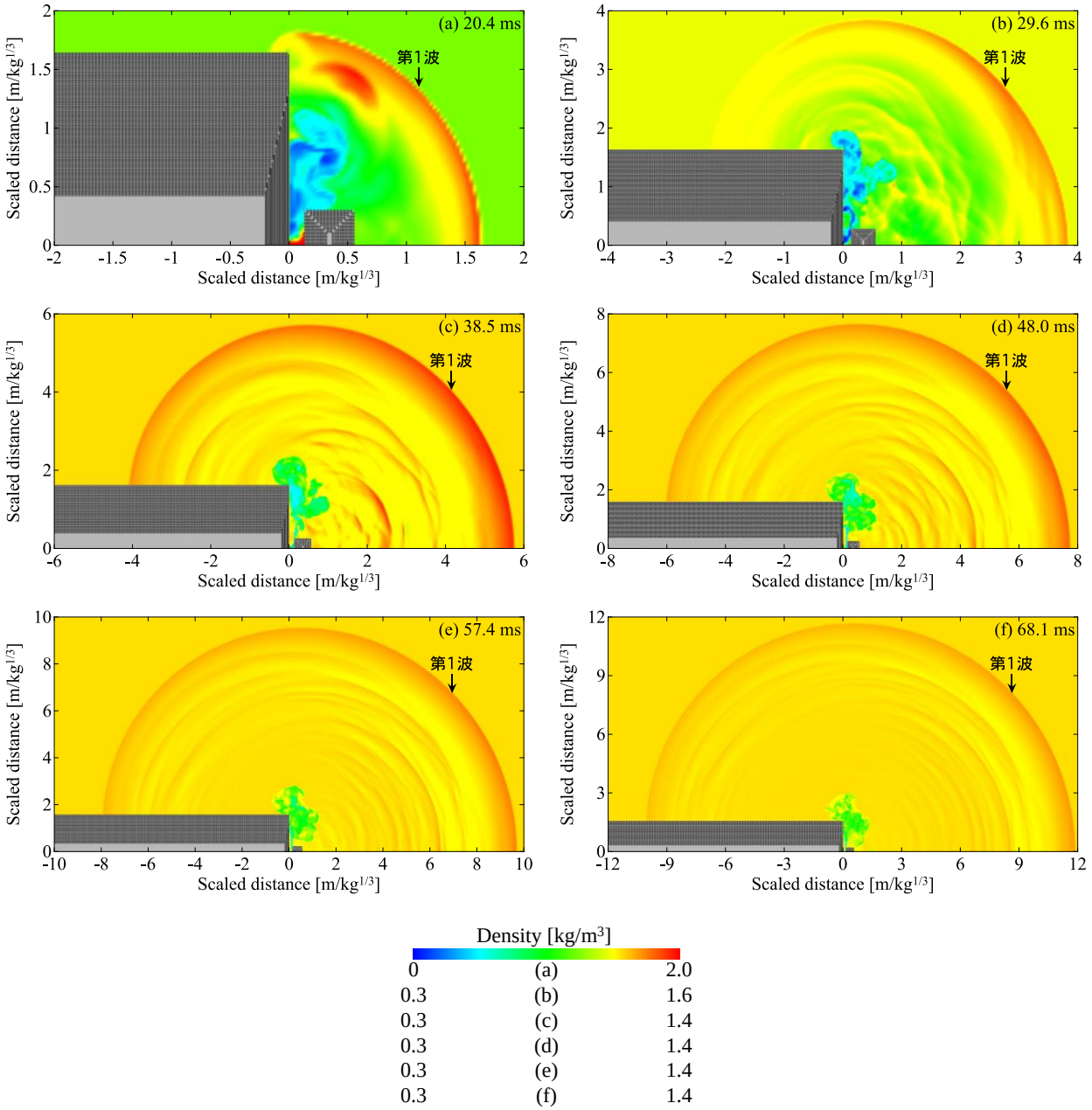


図 6.A.1-4　　L/D_2=40 における爆風伝播の様子（地表面の密度分布）
（庫口近傍の低密度領域は爆発生成ガス）

L/D_2=40 では爆風が換算距離 12 まで伝播した際に第 1 波しか形成されていない。（薬室長さは換算距離 12 よりも大きいため、まだ第 2 波が出口に到達していない。）

令和 3 年度火薬類爆発影響低減化技術基準検討報告書　執筆者一覧

第 4 章　爆発影響低減化実験（野外実験）

総論	
4.1　防爆壁に関する実験	松村知治、若林邦彦、杉山勇太、丹波高裕、久保田士郎
4.1.1　目的	〃
4.1.2　実験方法	〃
4.1.3　実験結果	
4.1.3.1　爆発後の爆点の様子	松村知治
4.1.3.2　爆風圧計測結果	杉山勇太
4.1.3.3　地盤振動計測結果	高橋良尭、佐分利禎、久保田士郎
4.1.3.4　高速度カメラ撮影結果	若林邦彦
4.1.3.5　騒音測定結果	松村知治
4.1.4　まとめ	松村知治
4.2　基準爆風圧実験	松村知治、若林邦彦、杉山勇太、丹波高裕、久保田士郎
4.2.1　目的	〃
4.2.2　実験方法	〃
4.2.3　実験結果	
4.2.3.1　爆発後の爆点の様子	松村知治
4.2.3.2　爆風圧計測結果	杉山勇太
4.2.3.3　地盤振動計測結果	高橋良尭、佐分利禎、久保田士郎
4.2.3.4　高速度カメラ撮影結果	若林邦彦
4.2.3.5　騒音測定結果	松村知治
4.2.4　まとめ	松村知治
4.3　総合考察	松村知治、若林邦彦、杉山勇太、丹波高裕、久保田士郎
第 5 章　爆発影響低減化実験（室内実験）	丹波高裕
第 6 章　地中式一級火薬庫の保安距離策定に関するシミュレーション	杉山勇太

付録

4.A.2（付録 3）　野外実験記録写真	松村知治
4.A.3（付録 4）　高速度カメラ撮影画像	若林邦彦
5.A.1（付録 7）　室内実験　圧力波形	丹波高裕
6.A.1（付録 8）　シミュレーション参考資料	杉山勇太