

令和 6 年度産業保安等技術基準策定調査研究等事業
(火薬類爆発影響低減化技術基準検討事業)

報告書

令和 7 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	6
第4章 爆発影響低減化実験（野外実験）	7
総論	7
実験の目的	7
実験項目及び概要	8
実験期日及び日程	8
実験場所	9
気象状況	13
4.1 地形が爆発影響低減に及ぼす効果に関する実験	14
4.1.1 目的	14
4.1.2 実験方法	14
4.1.2.1 供試火薬類	14
4.1.2.2 模擬地形と爆点の配置	17
4.1.2.3 計測項目	19
4.1.3 実験結果	26
4.1.3.1 爆発後の爆点の様子	26
4.1.3.2 爆風圧計測結果	28
4.1.3.3 地盤振動計測結果	40
4.1.3.4 高速度カメラ撮影結果	51
4.1.3.5 騒音計測結果	63
4.2 総合考察	68
第5章 爆発影響低減化実験（室内実験）	69
5.1 目的	69
5.2 実験方法	69
5.3 実験結果	82
5.4 最大過圧	87
5.5 正圧相インパルス	91
5.6 まとめ	95

第 6 章 地中式火薬の保安距離	96
6.1 はじめに	96
6.2 爆風に対する保安距離の再検討	97
6.2.1 令和 3 年度報告書案 (R03 案)	97
6.2.2 令和 4 年度報告書案 (R04 案)	107
6.2.3 R04 修正案と R03 修正案の比較	114
6.2.4 まとめ	116
6.3 地中式火薬庫の保安距離改正案	117
6.3.1 地中式火薬庫の保安距離の考え方	117
6.3.2 地中式火薬庫の保安距離の規則改正案	118
 付録	 122
2.A.1 (付録 1) 委員会議事録	123
4.A.1 (付録 2) 実験関連事項	132
4.A.2 (付録 3) 野外実験記録写真	134
4.A.3 (付録 4) 高速度カメラ撮影画像	150
4.A.4 (付録 5) 地盤振動の発生要因の検討	158
4.A.5 (付録 6) 使用器材一覧	167
5.A.1 (付録 7) 室内実験参考資料 (爆風圧波形とその検討)	170

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な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

火薬類取締法において、火薬類製造施設、火薬庫等の火薬類を取り扱う施設は、万一火薬類が爆発した際の周囲への影響を低減させるため、構造基準への適合が求められるほか、周囲にある保護すべき家屋等の物件（保安物件）から一定の距離（保安距離）をとって設置しなければならないこととなっている。

この保安距離は、貯蔵する火薬類の薬量や、対象となる保安物件の種類・程度等に基づいて設定されているが、火薬庫の設置形態や周囲の地形などの環境によっては爆風の影響が低減されることも考えられる。このため、火薬庫等の火薬類製造施設の設置形態や周囲の地形が爆風圧の低減に及ぼす効果について検証し、その検証結果を適切な保安距離の設定に反映するために採りうる措置を検討する。

1.3 実施内容

（1）火薬類による爆発影響低減化措置の調査

火薬類関連施設における万一の爆発の際、その設置形態や周囲の地形が爆風圧の低減にどのような効果を及ぼすのかを検討する。具体的には、以下の 2 テーマについて、爆発実証実験、小規模室内実験及びシミュレーション等を行い、取得したデータを基に、技術的知見を取りまとめた。

① 爆風圧の減衰に及ぼす周辺地形の影響

万一の火薬類の爆発の際、自然の丘等の周囲の地形により爆風圧がどの程度低減されるのか、代表的な地形を検討してその低減効果を明らかにし、適切な保安距離の設定に反映する。

② 爆風圧の減衰に及ぼす火薬庫の設置場所の影響

覆土や岩盤等がある火薬庫は、万一の爆発の際、爆風圧が低減されることが期待されるが、こうした火薬庫の代表的な設置場所を検討してその低減効果を明らかにし、適切な保安距離の設定に反映する。

（2）爆発実証実験の実施

爆発実証実験は、含水爆薬 0.625 kg、5 kg、9.77 kg 及び 40 kg を用い、火薬庫等と保安物件との間に丘や山がある場合を想定して高さ 2.5 m、傾斜角 30 度の小スケールの模擬地形を構築し、模擬地形を超えてきた爆風圧の減衰状況を計測した。火薬庫等の実規模を 40 トンとすると、模擬地形の実高さは、含水爆薬の量に応じて、それぞれ 100 m、50 m、40 m、25 m となる。なお、爆風圧計測の他に、地盤振動、漏斗孔の大きさ、騒音等のデータ、並びに高速度及び常速度カメラによる爆発状況の映像データを取得した。

第2章 委員会

爆発衝撃等に関する学識経験者、土木、材料及び火薬に関する専門家等を含む 18 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 14 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爆風圧の減衰に及ぼす地形の影響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、公益財団法人 総合安全工学研究所
石井 良幸	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
伊藤 啓太	日本工機株式会社 白河製造所 研究開発部
大野 友則	大野防衛工学研究所
● 小川 輝繁	横浜国立大学 名誉教授、公益財団法人 総合安全工学研究所
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
佐藤 航	日油株式会社 化薬事業部 企画室
須山 恭三	一般社団法人 日本建設業連合会 建築・安全環境グループ
多田 達士	中国化薬株式会社 営業本部 化薬営業部
遠山 貴郎	防衛省 防衛装備庁 プロジェクト管理部 事業監理官付 宇宙・地上装備担当
畑中 修二	公益社団法人 日本煙火協会 技術部
林 晃	防衛省 整備計画局 施設整備官付 施設技術室 建築技術班
福田 光寿	株式会社カーリット 生産本部 赤城工場
松村 知治	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
三沢 慶祐	カヤク・ジャパン株式会社 環境安全品質保証本部
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 上席特別教授・名誉教授
山本 雅昭	日本火薬工業会 技術部

●：委員長

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)

石井 良幸	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
伊藤 啓太	日本工機株式会社 白河製造所 研究開発部
大野 友則	大野防衛工学研究所
● 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
佐藤 航	日油株式会社 化薬事業部 企画室
須山 恭三	一般社団法人 日本建設業連合会 建築・安全環境グループ
多田 達士	中国化薬株式会社 営業本部 化薬営業部
遠山 貴郎	防衛省 防衛装備庁 プロジェクト管理部 事業監理官付 宇宙・地上装備担当
畑中 修二	公益社団法人 日本煙火協会 技術部
林 晃	防衛省 整備計画局 施設整備官付 施設技術室 建築技術班
福田 光寿	株式会社カーリット 生産本部 赤城工場
松村 知治	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
三沢 慶祐	カヤク・ジャパン株式会社 環境安全品質保証本部
山本 雅昭	日本火薬工業会 技術部

● : 委員長

2.3 委員会開催実績

令和6年 9月 5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6年 10月 28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7年 1月 16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7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

火薬庫等の火薬類製造施設の設置形態や周囲の地形などの環境によっては、爆風の影響が低減されることが考えられる。本年度は、火薬庫等の周囲の地形が爆風圧の低減に及ぼす効果について検証するため、火薬庫等と保安物件との間に、丘や山がある場合を想定し、野外爆発実験において、高さ 2.5 m、傾斜角 30 度の小スケールの模擬地形を構築し、含水爆薬 0.625 kg、5 kg、9.77 kg 及び 40 kg を爆発させ、模擬地形を超えてきた爆風の減衰状況を計測した。火薬庫等の実規模を 40 トンとすると、爆薬 0.625 kg、5 kg、9.77 kg 及び 40 kg は、それぞれ 1/40、1/20、1/16 及び 1/10 スケールの実験となり、高さ 2.5 m の模擬地形の実高さは、それぞれ 100 m、50 m、40 m 及び 25 m となる。なお、爆風圧データの他に、地盤振動、漏斗孔の大きさ、騒音等のデータ、並びに高速度及び常速度カメラによる爆発状況の映像データを取得した。また、室内爆発実験において、PETN 1.0 g の爆薬量で、野外爆発実験と同様に実高さ 50 m 及び 25 m の模擬地形を設置して、爆風圧の減衰状況を計測した。

野外爆発実験における爆風圧測定結果から、模擬地形による爆風の低減効果が確認され、しかも模擬地形の実高さが高いほどその効果は大きかった。地形がない場合の基準爆風との比率で低減効果を表すと、実高さ（100 m、50 m、40 m、25 m）の模擬地形があると、換算距離 $16 \text{ m/kg}^{1/3}$ の位置においてピーク静水過圧は（52%、71%、78%、76%）に減衰し、正圧相インパルスは（66%、84%、89%、98%）に減衰した。正圧相インパルスの減衰率がピーク静水過圧の減衰率より低い、これは地形を降りてきた爆風（衝撃波）が地面に斜めに入射して、地面からの反射波が形成され、そのため正圧相の持続時間が長くなることが一因と考えられる。今後、模擬地形の傾斜角や保安物件と模擬地形との距離等を変えた実験あるいはシミュレーションを重ね、地形の傾斜角及び高さで減衰率との関係、地面からの反射波の影響の程度等を精査することが期待される。

室内爆発実験における爆風圧測定結果からも、同様に模擬地形による爆風の低減効果が確認された。野外爆発実験と同様に地形がない場合の基準爆風との比率で低減効果を表すと、換算距離 $16 \text{ m/kg}^{1/3}$ の位置において、実高さ（50 m、25 m）の模擬地形があると、ピーク静水過圧は（93%、87%）に減衰し、正圧相インパルスは（85%、90%）に減衰した。ピーク静水過圧の減衰率が野外実験よりかなり低い、これは室内実験の爆風圧センサは地面に埋め込まれており、地形を降りてきた爆風（衝撃波）が地面のセンサに斜めに入射して、反射圧成分を計測しているためと考えられる。正圧相インパルスの減衰率は野外実験と同等か高いが、センサが地面に埋め込まれているため、地面からの反射波の影響を受けないことが一因と考えられる。室内実験についても、今後、模擬地形の傾斜角や保安物件と模擬地形との距離等を変えた実験あるいはシミュレーションを重ね、地形の傾斜角及び高さで減衰率との関係、地面からの反射波の影響の程度、センサーの反射圧成分の大きさ等を精査することが望まれる。

爆風圧測定以外の計測結果について、地盤振動計測は降雨の影響で満足できる結果は得られなかったが、本実験で計測している地盤振動が、地表面又は地中を伝播してくる振動ではなく、伝播する爆風が地面を叩きつけることによって生じる振動である可能性が高いことを確認できたことの意義は大きい。また、高速度カメラ撮影では、爆薬量 0.625 kg～40 kg の範囲で、エマルジョン爆薬の爆轟生成ガスが爆発後 5 ms 程度で、垂直方向、水平方向ともに約 $2.6 \text{ m/kg}^{1/3}$ まで拡がってほぼ一定になることを確認できた。

以上、本年度の爆発実証実験により貴重なデータを取得でき、技術基準策定のための先駆的な資料を得ることができた。最後に、本実験にご協力いただいた爆発影響低減化技術基準検討委員各位、火薬関係団体、大学関係者、地元企業等及び陸上自衛隊の支援隊員に深く感謝し、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、全国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、省令や告示の改正、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、火薬庫の保安距離見直し等に資する爆発影響低減化の研究を行っている。平成16年度から平成18年度までは、隔壁付き火薬庫の技術基準に関する実験、平成19年度から平成22年度までは、地下式火薬庫の技術基準、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、内面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。また、平成27年度から平成28年度までは、火薬類の爆発威力定量化に関する実験を行った。

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、地中式火薬庫の保安距離に関する技術基準の検討を行った。令和元年度から令和3年度までは、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新型防爆壁の位置及び構造等の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た。また、令和4年度は、内面が垂直より緩傾斜の土堤に設ける擁壁の技術基準等に関する実験を、令和5年度は、爆発飛散物の影響評価、窓ガラスの破壊状況及びガラス飛散防止フィルムによる破壊防止効果に関する実験を行った。

本年度は、火薬庫等の火薬類製造施設の周囲の地形が爆風圧の低減に及ぼす効果について検証する。

実験項目及び概要

実験 No.1 地形が爆発影響低減に及ぼす効果に関する実験

火薬庫等の火薬類製造施設の設置形態や周囲の地形などの環境によっては爆風の影響が低減されることが考えられる。本年度は、火薬庫等の周囲の地形が爆風圧の低減に及ぼす効果について検証し、適切な保安距離の設定に資するデータを取得する。そのため、火薬庫等と保安物件との間に、丘や山がある場合を想定し、高さ 2.5 m、傾斜角 30 度の小スケールの模擬地形を構築し、含水爆薬 0.625 kg、5 kg、9.77 kg 及び 40 kg を爆発させ、爆風圧の減衰状況を計測する。火薬庫等の実規模を 40 トンとすると、模擬地形の実高さは、含水爆薬の量に応じて、それぞれ 100 m、50 m、40 m、25 m となる。

実験期日及び日程（実績）

実験期間 令和 6 年 11 月 23 日（土）～12 月 1 日（日）

月 日	実験 No.	爆点	点火時刻	実験内容	薬種・薬量
11 月 23 日（土）	準備(施設設置・爆点決定)				
11 月 24 日（日）	休日(計測班移動日)				
11 月 25 日（月）	準備(計測準備・設備設置)				
11 月 26 日（火）	準備／実験会議				
11 月 27 日（水）	1-1	L	12:03	地形影響に関する実験	EMX2 0.625 kg
11 月 28 日（木）	1-2	L	10:20	地形影響に関する実験	EMX2 5.00 kg
	1-3	L	13:23	地形影響に関する実験	EMX2 9.77 kg
11 月 29 日（金）	1-4	L	10:49	地形影響に関する実験	EMX2 40.0 kg
11 月 30 日（土）	撤収				
12 月 1 日（日）	予備日				

注）U：上爆点（今年度は上爆点のみ）

EMX2：含水爆薬（カヤクジャパン(株)砂川工場製アルテックス）

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。

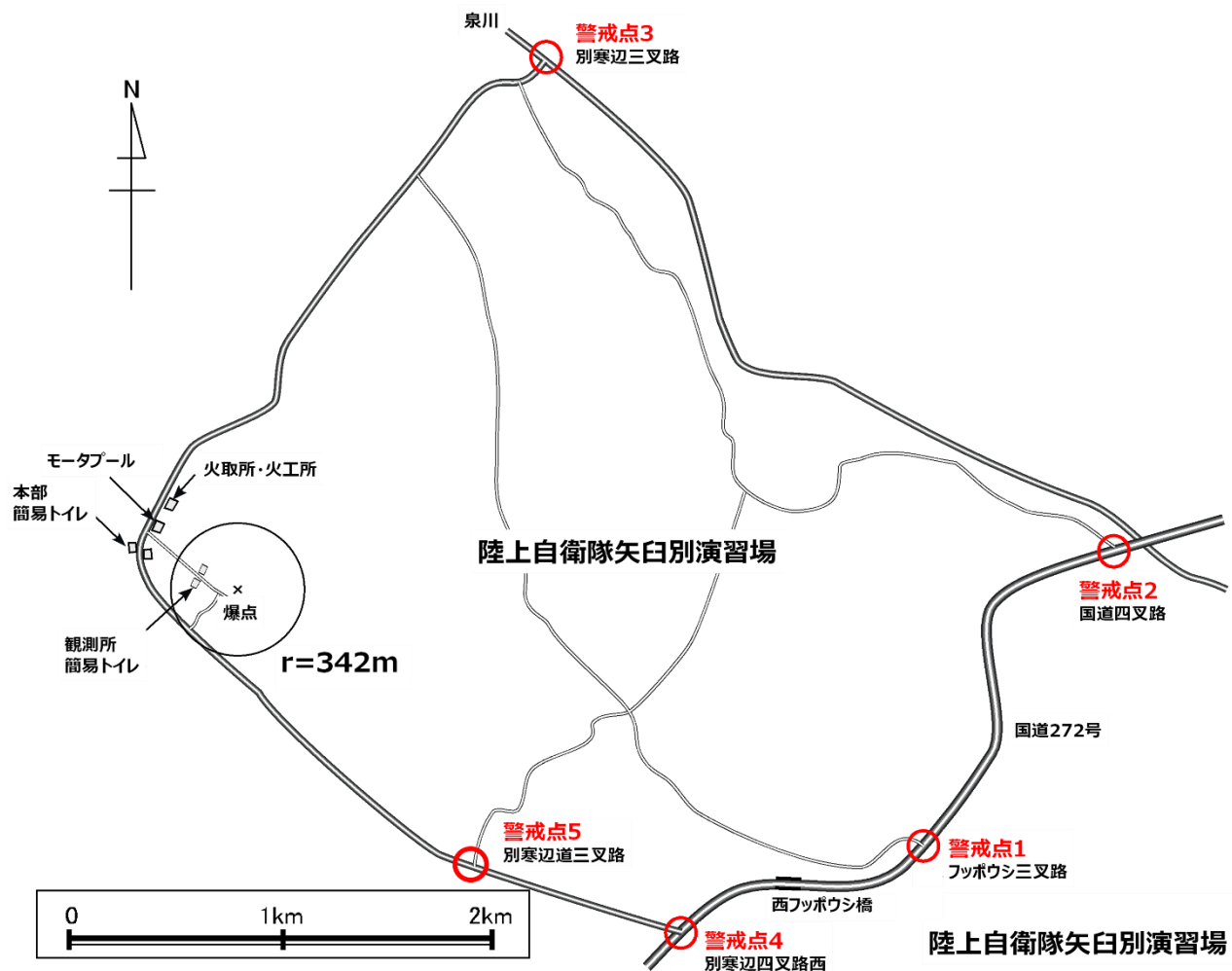


図 4.0-1 実験場広域図

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 $W=40$ （kg）なので、爆点からの保安距離は 342 m となる。図 4.0-1 に示された爆点を中心とする半径 $r=342$ （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 4.0-4 に本部、図 4.0-5 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 4.0-6 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）は危険区域の内側であるため、観測所プレハブの前面にはそれぞれ防護壁を設置した。防護壁は、図 4.0-2 に示すように、爆点からプレハブを見たときにプレハブが完全に隠れる位置及び大きさとした。

なお、観測所 1 の屋上には鉄板を敷き、高速度・常速度カメラ、風向風速計、放送設備等を設置した。

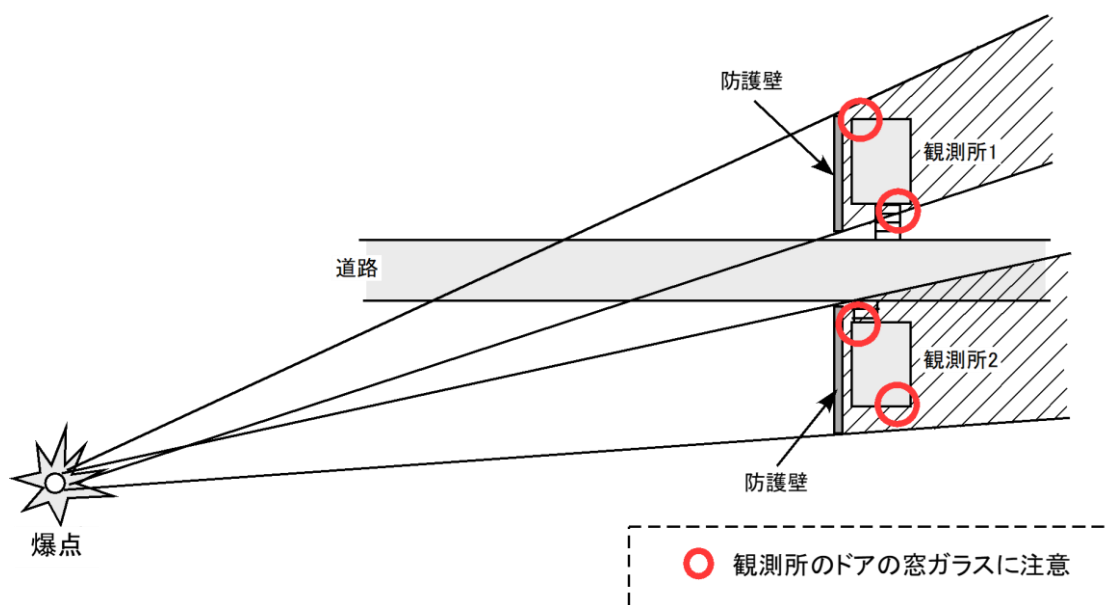


図 4.0-2 観測所の防護措置

実験レイアウト（全体）

図 4.0-3 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。

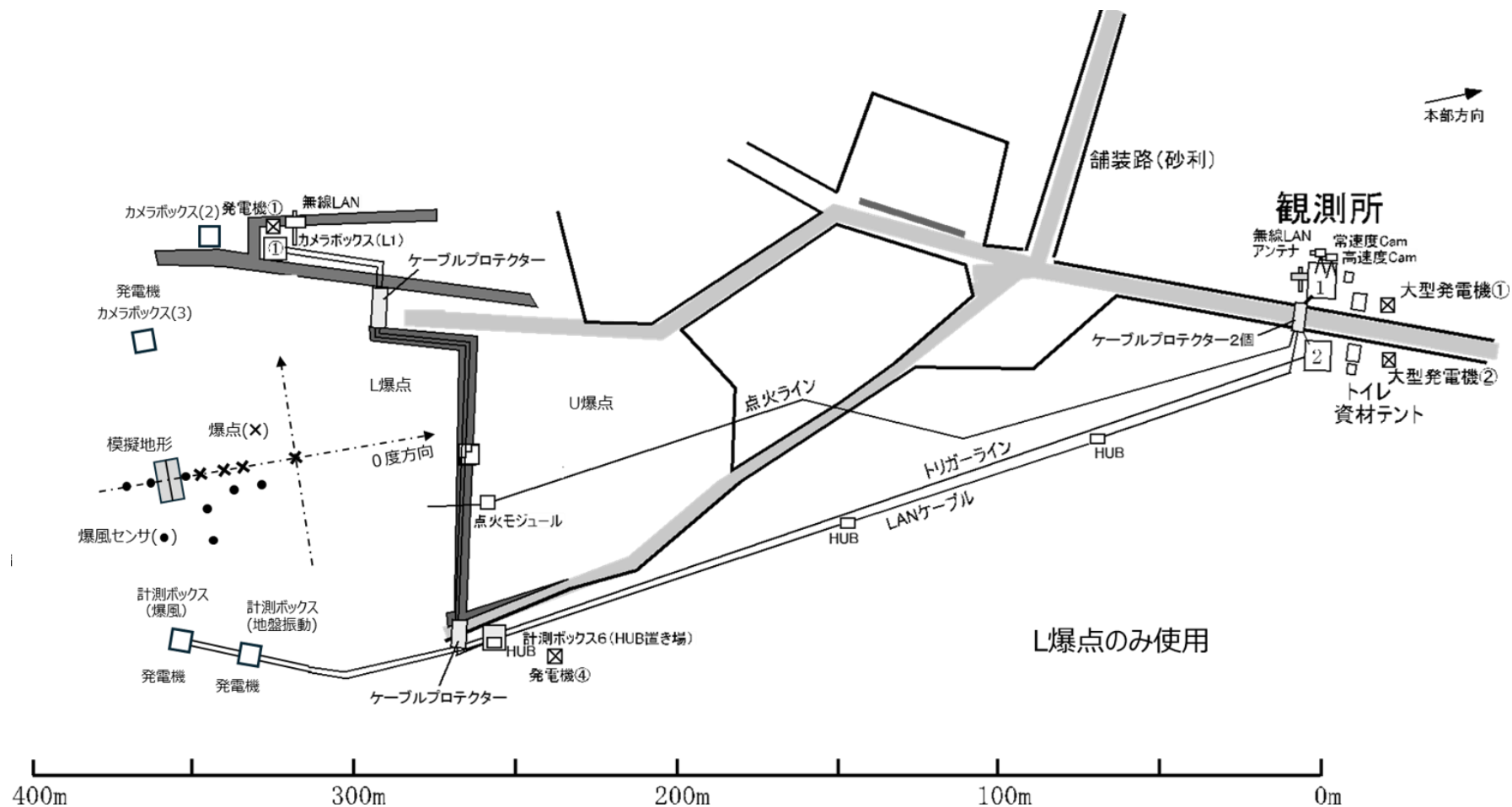


図 4.0-3 実験レイアウト (全体)



図 4.0-4 本部



図 4.0-5 観測所（左：第一観測所、右：第二観測所）



図 4.0-6 火薬類取扱所（左）と火工所（右）

气象状况

実験内容	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 地形影響	11/27	12:03	雨	9.7	100	995	南東・3.0
No.1-2 地形影響	11/28	10:20	曇	9.1	71	990	東南東・0.4
No.1-3 地形影響	11/28	13:23	雨	5.6	80	990	北北西・0.6
No.1-4 地形影響	11/29	10:49	晴	4.6	89	991	北西・2.1

4.1 地形が爆発影響低減に及ぼす効果に関する実験

4.1.1 目的

火薬庫等の周囲の地形が爆風圧の低減に及ぼす効果について検証し、適切な保安距離の設定に資するデータを取得する。そのため、火薬庫等と保安物件との間に、丘や山がある場合を想定し、高さ 2.5 m、傾斜角 30 度の小スケールの模擬地形を構築し、含水爆薬 0.625 kg、5 kg、9.77 kg 及び 40 kg を爆発させ、爆風圧の減衰状況を計測する。爆風圧、地盤振動、騒音、衝撃波伝播状況等を電氣的・光学的手法により計測する。

4.1.2 実験方法

4.1.2.1 供試火薬類

表 4.1.2.1-1 に供試火薬類を示す。使用爆薬は含水爆薬で、L/D（直径と高さの比）=1 を目標とした円柱形に装薬する。図 4.1.2.1-1 に例として実験 No.1-2 の爆薬の形状を示す。水平に整地した地表面の上に、表 4.1.2.1-1 に示す装薬台(板)を設置し、その中央に爆薬を設置する。装薬台(板)の厚みは、爆薬 40 トンの実規模の火薬庫の床高を 300 mm と想定し、これを使用爆薬量で換算（スケール化）した厚みとする。

爆薬は線爆発型の電気雷管 2 個と導爆線で起爆する。図 4.1.2.1-2 に導爆線と雷管の固定状況を示す。導爆線の先端から 30 mm 程度の位置に線爆発型の電気雷管 2 個を取り付け、反対側の端には短い導爆線を重ねる。導爆線を重ねた側を含水爆薬の内部に、実験 No.1-1 では約 40 mm、実験 No.1-2 から No.1-4 では約 70 mm 押し込み固定する（図 4.1.2.1-1 を参照）。図 4.1.2.1-3 に爆薬と模擬地形の設置方向を示す。また、図 4.1.2.1-4 に実際の装薬・爆装状況（実験 No.1-4 の例）を示す。

表 4.1.2.1-1 供試火薬類

実験 No.	薬種	薬量 (kg)	導爆線	電気雷管 (個)	火薬の形状 (検査成績書の値)		装薬台(板) 縦×横×厚み (mm)
					直径φ×高さ (mm)	密度 (kg/m ³)	
1-1	EMX2	0.625	100 mm×2 本 40 mm×2 本	2	φ 90×90	1,092	150×150×t 7.5
1-2	EMX2	5.00	100 mm×2 本 40 mm×2 本	2	φ 180×180	1,092	300×300×t 15
1-3	EMX2	9.77	100 mm×2 本 40 mm×2 本	2	φ 224.5×221	1,117	375×375×t 18
1-4	EMX2	40.0	100 mm×2 本 40 mm×2 本	2+2*)	φ 350×335	1,242	600×600×t 30
合計	—	55.395	100 mm×8 本 40 mm×8 本	10	—	—	—

*) 電気雷管の「+2」は万が一不爆があった場合の予備。

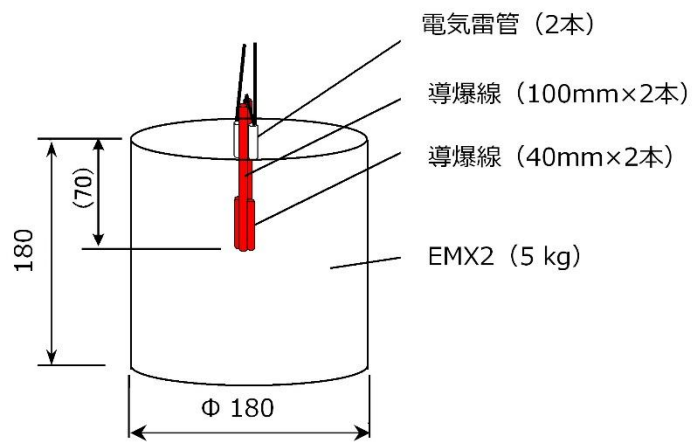


図 4.1.2.1-1 爆薬の形状（実験 No.1-2 の例）

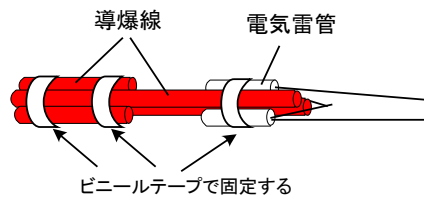


図 4.1.2.1-2 伝爆薬と雷管の固定方法

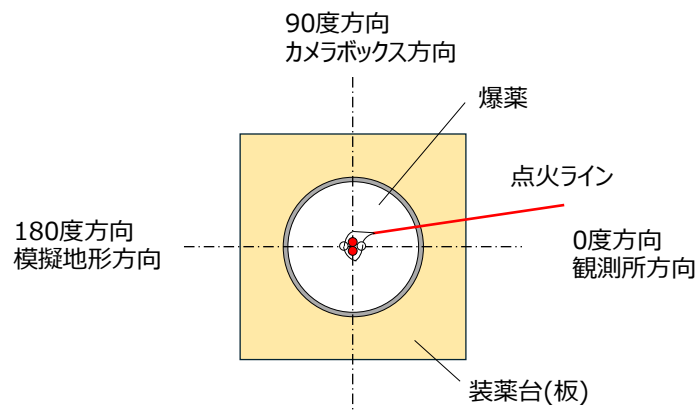


図 4.1.2.1-3 爆薬の設置方向



主爆薬	導爆線	電気雷管	主爆薬の形状 (直径×高さ、 mm)
EMX2 40 kg	280 mm (100 mm×2本 40 mm×2本)	2個	φ350×335 ※検査成績書 の値

導爆線の束に電気雷管(2個)
を接続した状況



図 4.1.2.1-4 装薬・爆装状況 (実験 No.1-4 の例)

4.1.2.2 模擬地形と爆点の配置

丘または山の地形断面を二等辺三角形で模擬し、高さ 2.5 m、傾斜角 30 度（底辺 8.66 m）、幅 15.0 m の模擬地形とする。爆薬 40 トンを実規模とすると、爆薬量 0.625、5.00、9.77、40.0 kg は、それぞれ 1/40、1/20、1/16、1/10（1/43.8、1/21.9、1/17.51、1/11.0）のスケールであり、模擬地形の実高さは、それぞれ 100、50、40、25 m（110、55、44、27 m）である（カッコ内は含水爆薬の TNT 換算率 76 %を考慮した場合）。図 4.1.2.2-1 に模擬地形の寸法を示す。模擬地形は、単管で組み上げた骨組みの上に、合板を張って構築する。

爆薬は、模擬地形の反対側（裏側）1.0 m の位置が、第一種保安物件の保安距離である換算距離 $16 \text{ m/kg}^{1/3}$ となるように、模擬地形の中央を通る直線上に配置する。爆薬量 0.625、5.00、9.77、40.0 kg の換算距離 $16 \text{ m/kg}^{1/3}$ は、それぞれ 13.68、27.36、34.20、54.72 m である。図 4.1.2.2-2 に模擬地形の位置と爆薬の配置（爆点）を示す。また、図 4.1.2.2-3 に模擬地形の設置状況を示す。

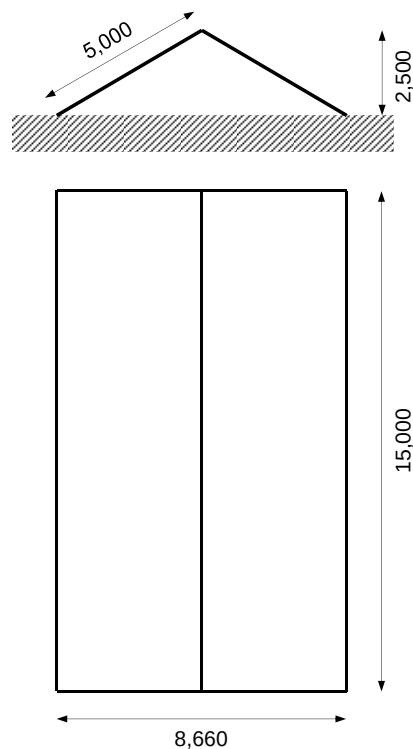


図 4.1.2.2-1 模擬地形

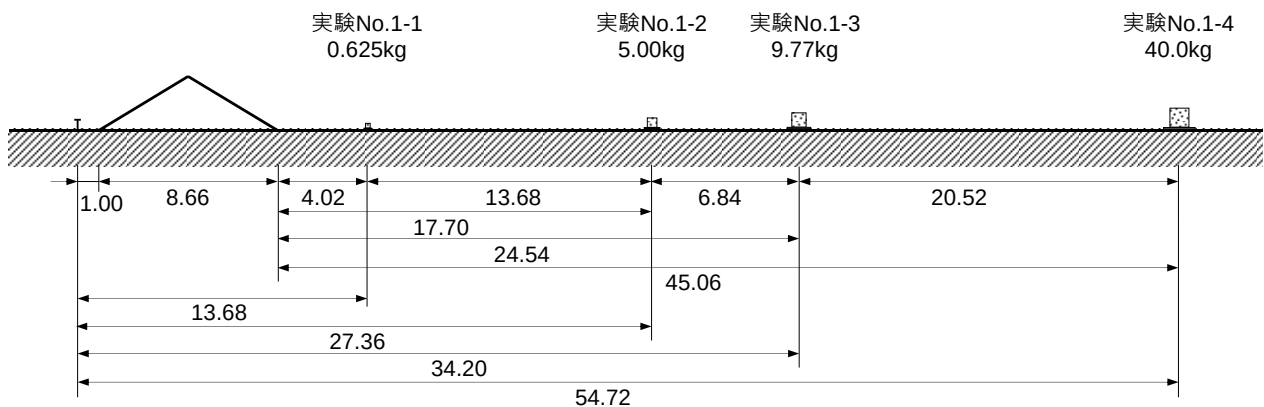


図 4.1.2.2-2 模擬地形と爆点の配置（単位: m）



図 4.1.2.2-3 実験場における模擬地形試験体設置状況

4.1.2.3 計測項目

爆風圧計測、地盤振動計測、常速度・高速度撮影、騒音計測を行う。

(1) 爆風圧計測

表 4.1.2.3-1 に爆風圧計の爆点との距離を示す。図 4.1.2.3-1 に爆風圧計の設置位置を示す。ショット毎に爆点位置を変化させるのに対して、爆風圧計はすべてのショットで同一に配置する。ch6 を模擬地形後方 1 m の位置に設置し、ここから換算距離が $16 \text{ m/kg}^{1/3}$ になる位置に爆点を設置する。爆風圧計は地面からの高さ 0.3 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。

表 4.1.2.3-1 爆風圧計の爆点からの距離

計測点	爆点との距離 [m] (換算距離 $[\text{m/kg}^{1/3}]$)			
	実験 No.1-1 0.625 kg	実験 No.1-2 5.00 kg	実験 No.1-3 9.77 kg	実験 No.1-4 40.0 kg
ch1	26.80 (31.35)	13.99 (8.18)	8.71 (4.07)	16.52 (4.83)
ch2	16.48 (19.28)	7.00 (4.09)	8.85 (4.14)	26.93 (7.88)
ch3	8.64 (10.11)	11.36 (6.64)	17.22 (8.05)	36.87 (10.78)
ch4	24.88 (29.10)	29.14 (17.04)	33.26 (15.56)	49.32 (14.42)
ch5	3.04 (3.56)	16.72 (9.78)	23.53 (11.01)	44.05 (12.88)
ch6	14.18 (16.59)	27.86 (16.29)	34.67 (16.22)	55.19 (16.14)
ch7	18.21 (21.30)	31.89 (18.65)	38.70 (18.10)	59.22 (17.32)

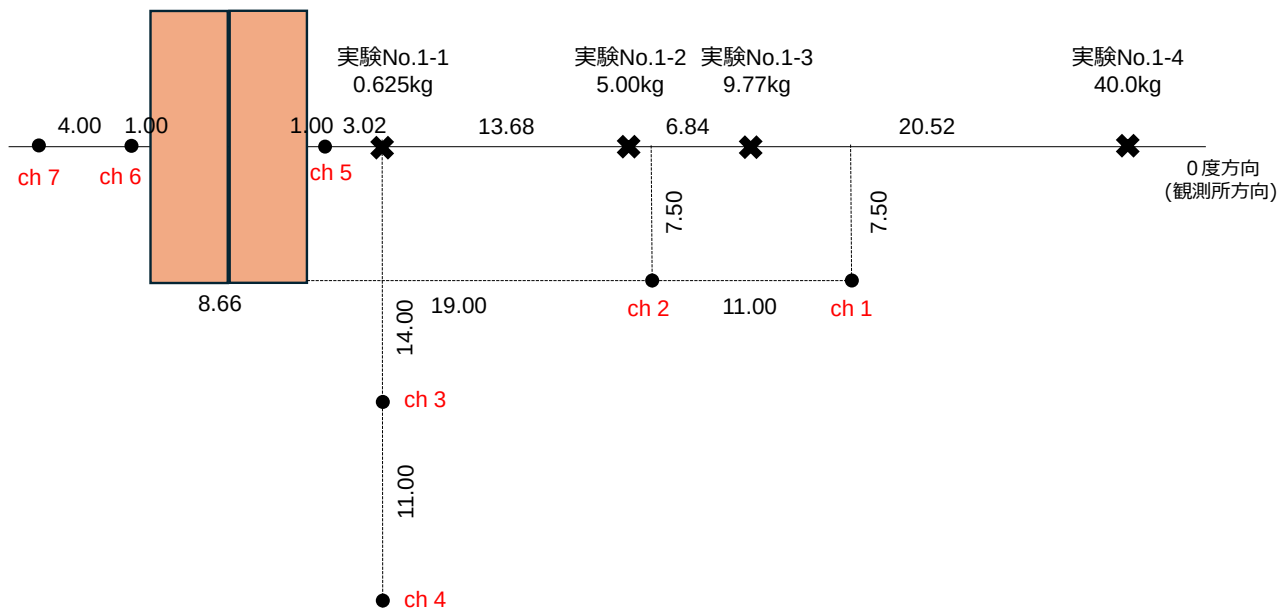


図 4.1.2.3-1 爆風圧計の設置位置 (単位: m)

(2) 地盤振動計測

爆薬量 0.625 kg、5.00 kg、9.77 kg、40.0 kg に対する地盤振動(加速度)を計測した。表 4.1.2.3-2 に地盤振動計の設置位置および実験毎の換算距離を、図. 4.1.2.3-2 に地盤振動計の設置位置を示す。なお、実験 No.1-1 について模擬地形の影響を受けない換算距離が 16 となる位置に ch5 を設置し、計測を行なった。実験毎に爆点の位置が変更されたが、センサー位置は変更しなかった。ただし計測軸方向については、実験毎に計測軸 Y 軸方向が爆点を向くように調整した。一例として、図. 4.1.2.3-3 に実験 No.1-4 における計測軸を示す。

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 0.16 pC/m/s²、周波数応答 fc -20 kHz) ならびに 731ZT(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. 4.1.2.3-4)。センサーからの出力は ch1~ch3 ではローノイズケーブル TEAC CL-601 (1.5 m)で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 0.2~30 kHz, 最大入力 100 kpC, ±10 V)(図. 4.1.2.3-5)に接続し、ch4 ではローノイズケーブル TEAC CL-730 B (3.3 m)で TEAC SA-630(最大振動数範囲 0.2~50 kHz, 最大入力 10 kpC, ±10 V) (図. 4.1.2.3-6)に接続し増幅した上で同軸ケーブルにより信号を計測 BOX まで伝送し、計測 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 0.5 MHz に設定) で電圧情報として記録した。

表 4.1.2.3-2 地盤振動計 (加速度計) の爆源から各 ch までの実距離 (測量結果) と換算距離

計測点	爆点との距離 [m] (換算距離 [m/kg ^{1/3}])			
	実験 No.1-1 0.625 kg	実験 No.1-2 5.00 kg	実験 No.1-3 9.77 kg	実験 No.1-4 40.0 kg
ch1	14.34 (16.77)	27.99 (16.37)	34.79 (16.27)	55.30 (16.17)
ch2	29.54 (34.55)	26.79 (15.66)	27.97 (13.08)	39.11 (11.44)
ch3	38.54 (45.07)	34.13 (19.96)	33.89 (15.85)	40.60 (11.87)
ch4	68.82 (71.14)	55.32 (32.35)	53.73 (25.13)	53.92 (15.77)
ch5	14.04 (16.42)	-	-	-

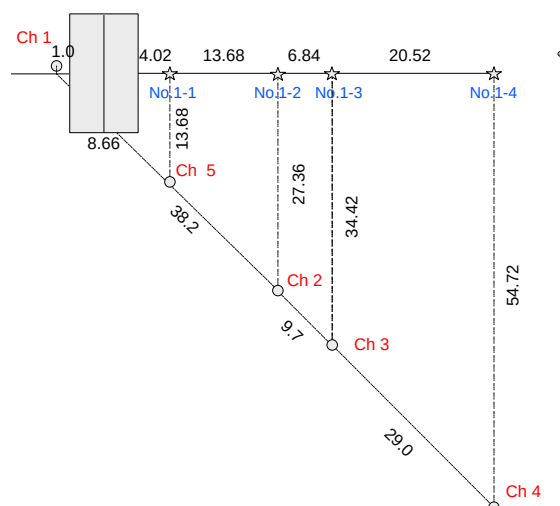


図. 4.1.2.3-2 地盤振動計の設置位置

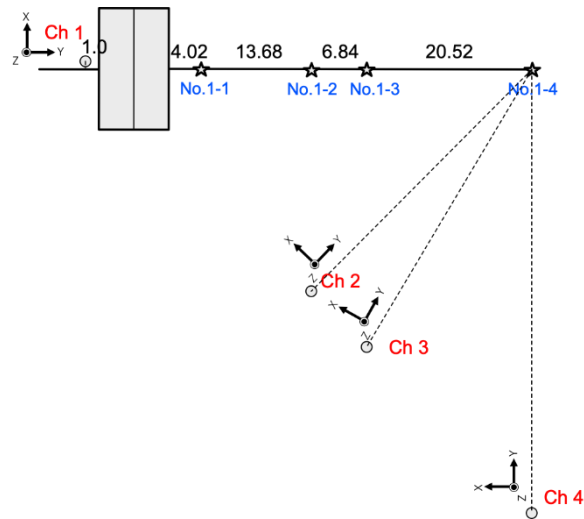


図. 4.1.2.3-3 地盤振動計の設置距離と計測軸方向の一例（実験 No.1-4 の場合）



図. 4.1.2.3-4 加速度センサー設置の様子



図. 4.1.2.3-5 加速度センサーのアンプ
TEAC SA-611



図. 4.1.2.3-6 加速度センサーのアンプ TEAC SA-630

(3)高速度・常速度撮影

爆発時の火球および爆風の伝播状況を観察するために高速度カメラによる撮影を行った。90 度方向の 2 棟のカメラボックスに加えて、模擬地形を真横から観察できる位置にもカメラボックスを配置したほか、観測所の屋上にも高速度カメラを設置した。カメラボックスの外観と観測所 1 の屋上（0 度方向）への高速度カメラの設置状況を図 4.1.2.3-7 に示す。



カメラボックス（90 度方向）外観



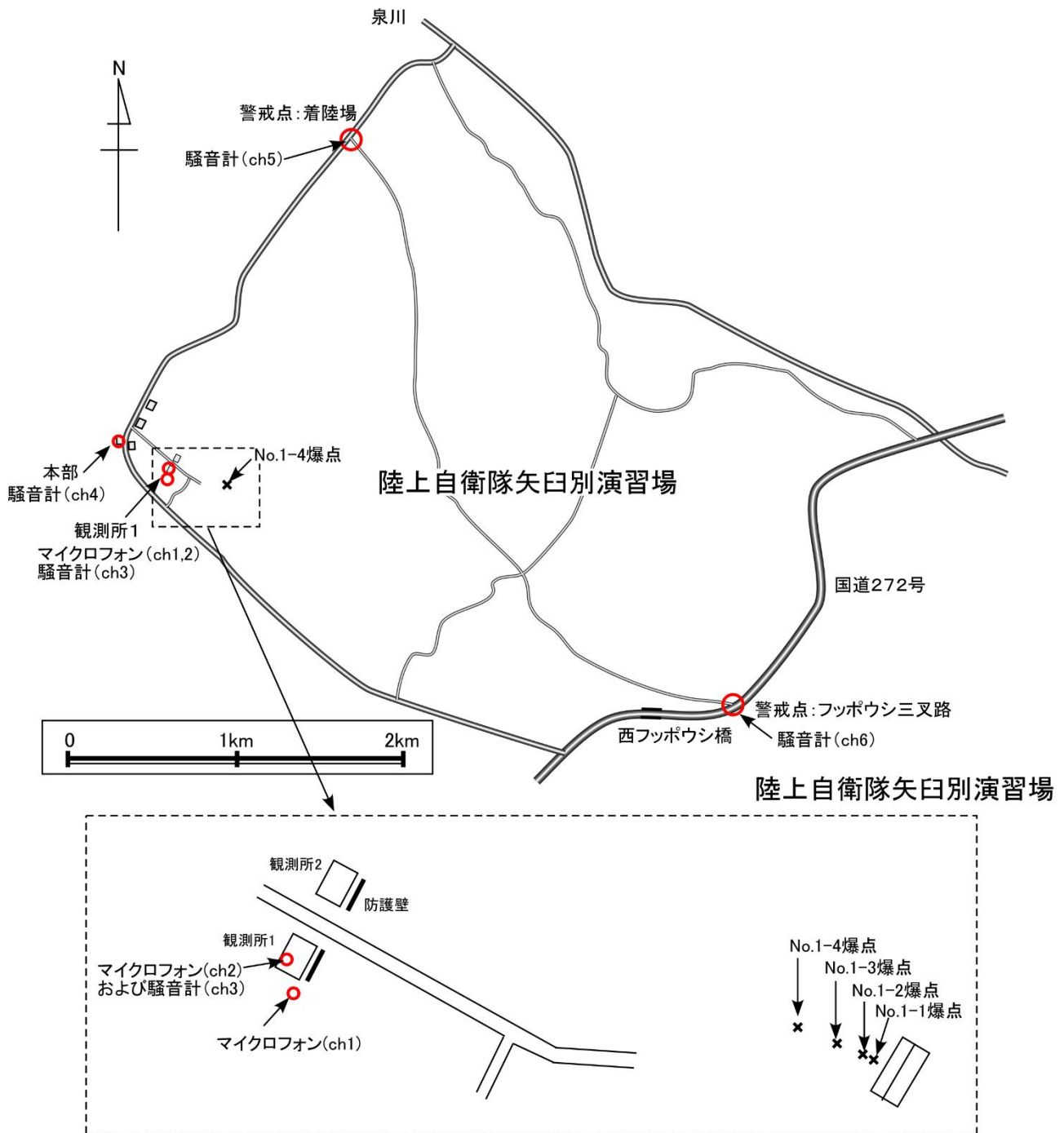
観測所 1 の屋上（0 度方向）に設置した高速度カメラ

図 4.1.2.3-7 高速度カメラの設置状況

また、爆点付近と、観測所にビデオカメラを設置し常速度撮影を行った。

(4) 騒音計測方法

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 4.1.2.3-8 に測定位置を示す。観測所 1 の内外にマイクロフォンを、観測所 1 室内、本部室内、2 か所の警戒点に騒音計を設置した。4.1.2.3-3 に爆点から計測位置までの距離を示す。



騒音計測で使用した機器はマイクロフォン（PCB 社 377C01）、精密騒音計（ブリュエル・ケアー社 BK2250）、普通騒音計（テスト社 TESTO816--1）である。マイクロフォンはリアルタイムアナライザ OROS に接続し、発破信号と同期させて音圧波形を取得した。騒音計についてはそれぞれ点火 1 分前からの手動録音である。

詳細な設置位置と距離について表 4.1.2.3-3 にまとめた。ch5 と ch6 については地図からの概算であるため、爆点の違いによる距離の違いをとらず統一した。

ch1 は観測所脇に三脚を立て、その頭部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 4.1.2.3-9、4.1.2.3-10 に使用したマイクロフォンと設置状況の写真を示す。ch2 と ch3 は観測所 1 の屋内の同じ位置にマイクロフォン（ch2）と精密騒音計（ch3）を設置した。図 4.1.2.3-11 に ch2,3 の写真を示す。

ch4 は本部の屋内窓際に精密騒音計を設置し、窓を開けた状態（雨天時を除く）で録音した。

ch5 は警戒点の着陸場にて、ch6 は警戒点のフッポウシ三叉路にて、普通騒音計（図 4.1.2.3-12）で録音した。

表 4.1.2.3-3 使用機器および爆点までの距離

ch 番号	計測場所	使用機器	機器型番	距離 (m)		K 換算距離 (m/kg ^{1/3})	
				No.1-1	No.1-2	No.1-3	No.1-4
ch1	観測所 1 外	マイクロフォン	377C01	342(K400)	328(K192)	321(K150)	301(K88)
ch2	観測所 1 屋内	マイクロフォン	377C01	↑	↑	↑	↑
ch3	観測所 1 屋内	精密騒音計	BK2250	↑	↑	↑	↑
ch4	本部	精密騒音計	BK2250	648(K758)	635(K371)	628(K294)	607(K178)
ch5	着陸場	騒音計	TESTO 816-1	2300 (K2690)			
ch6	フッポウシ三叉路	騒音計	TESTO 816-1	3280 (K3836)			



図 4.1.2.3-9 PCB 社製マイクロフォン



図 4.1.2.3-10 マイクロフォン設置状況



図 4.1.2.3-11 観測所屋内のマイクロフォン ch2 と騒音計 ch3



図 4.1.2.3-12 警戒点 ch5、ch6 で使用した騒音計

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

漏斗孔の直径、深さを計測した。表 4.1.3.1-1 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（模擬地形に直交する方向）、90 度と 270 度方向の地表面の漏斗孔直径を測定した。漏斗孔の深さは漏斗孔の最深部（＝爆点中心）と地表面までの距離（深さ）を測定した。例年は、同じ位置に爆点を設置することが多いのに対して、本年度は爆点が実験毎に異なるため、漏斗孔のサイズについては、少なくとも前のショットの影響を受けない。今年度と同様に火薬類を板の上に設置した条件で実験期間初日のショット、あるいは直に火薬類を地面に設置した条件であれば、過去のデータと直接比較も可能である。図 4.1.3.1-1 に漏斗孔の写真を、図 4.1.3.1-1 に漏斗孔の体積と薬量の関係を示す。今後は薬量と漏斗孔サイズの関係について、爆薬の底面から地表面までの距離も考慮した比較も重要である。

表 4.1.3.1-1 漏斗孔の大きさ

実験 No.	薬量 (kg)	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)	クレータ体積 (m ³)
1-1	0.625	770×850	108	0.019
1-2	5.00	1050×1140	200	0.063
1-3	9.77	1430×1330	230	0.115
1-4	40.0	2900×3050	730	1.691



No.1-1



No.1-2



No.1-3



No.1-4

図 4.1.3.1-1 漏斗孔の写真

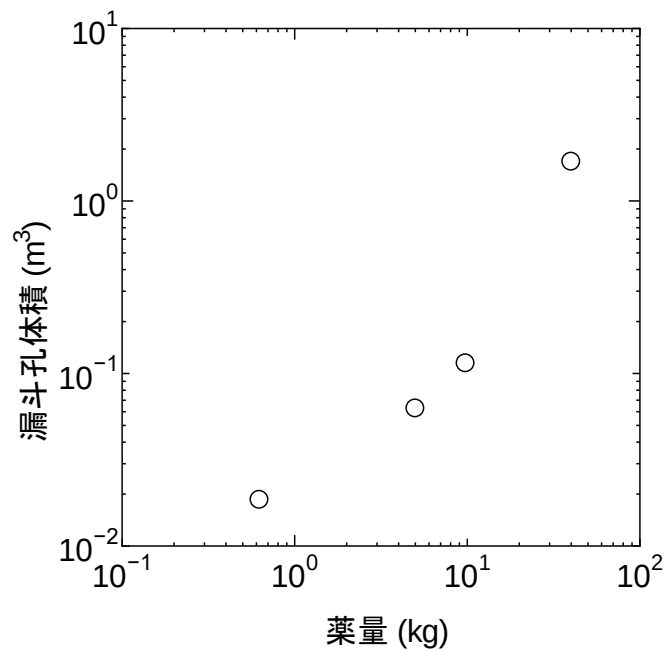


図 4.1.3.1-2 薬量と漏斗孔体積との関係

(2) 爆発後の模擬地形の様子

模擬地形の合板は爆風を受けて爆点側の複数枚が設置枠から数センチ程度浮き上がった。設置枠から外れて脱落・飛散することにはなかった。浮き上がり箇所は、ショットごとに取外して木ねじで止めなおした。例として図 4.1.3.1-3 に No.1-2 と No.1-4 の実験後の模擬地形の様子を示す。



No.1-2



No.1-4

図 4.1.3.1-3 実験後の模擬地形の様子

(3) まとめ

本年度は爆点が実験毎に異なるため、漏斗孔のサイズについては、少なくとも前のショットの影響を受けないクレータサイズのデータが得られた。火薬類は板の上に設置した条件であった。今後は薬量と漏斗孔サイズの関係について、爆薬の底面から地表面までの距離も考慮した比較も重要である。模擬地形については、合板は爆風を受けて爆点側の複数枚が設置枠からわずかに浮き上がった程度であり、設置枠から外れて脱落・飛散することにはなかった。

4.1.3.2 爆風圧計測結果

(1) 爆風の時間履歴

図 4.1.3.2-1 ~ 図 4.1.3.2-4 に実験ごとの爆風波形を示す。地形背後の ch6 と ch7 は入射波と地面からの反射波の 2 波を計測しており、ch1 から ch5 の典型的な爆風波形と異なる。

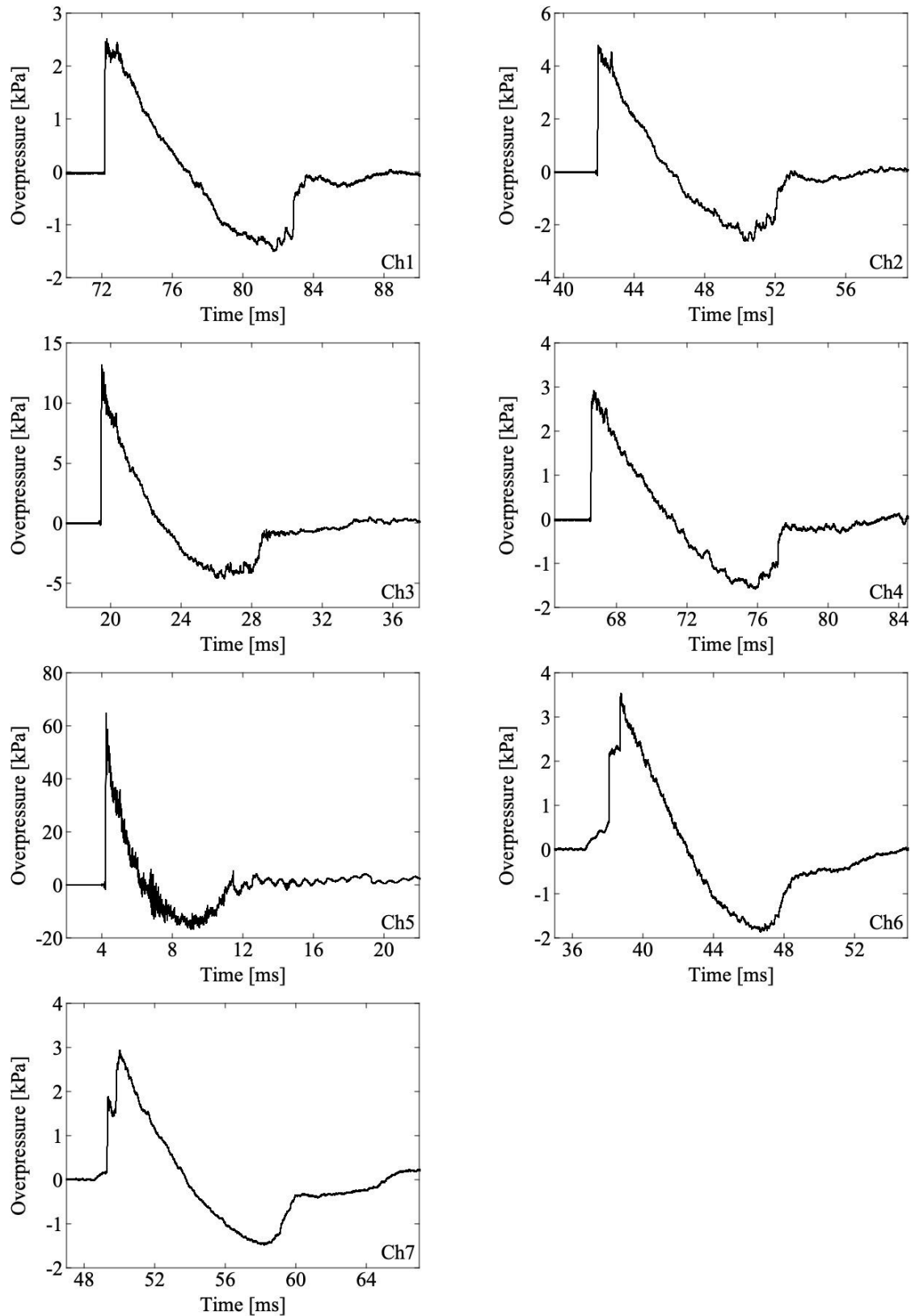


図 4.1.3.2-1 実験 No.1-1 爆風の時間履歴

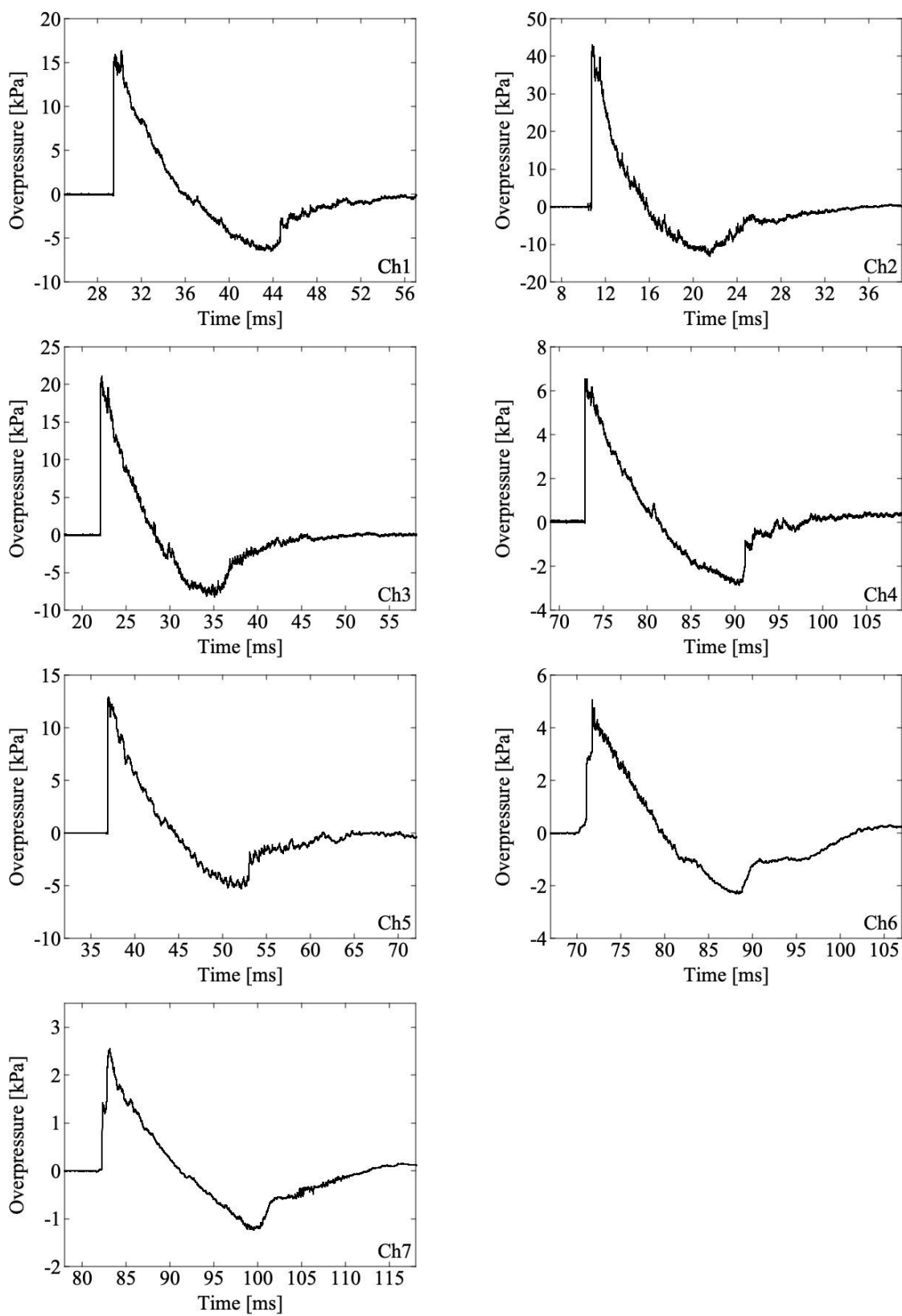


図 4.1.3.2-2 実験 No.1-2 爆風の時間履歴

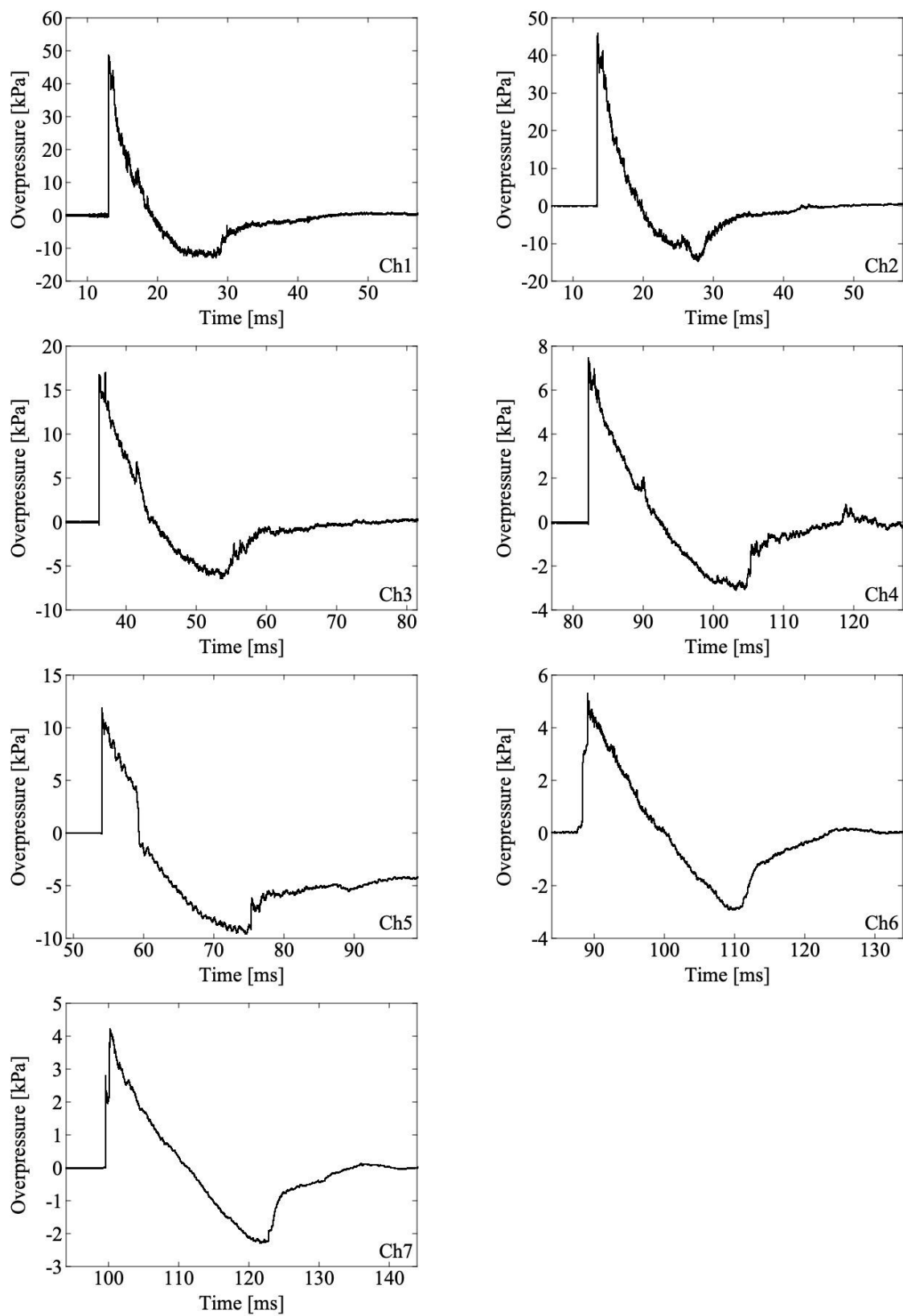


図 4.1.3.2-3 実験 No.1-3 爆風の時間履歴

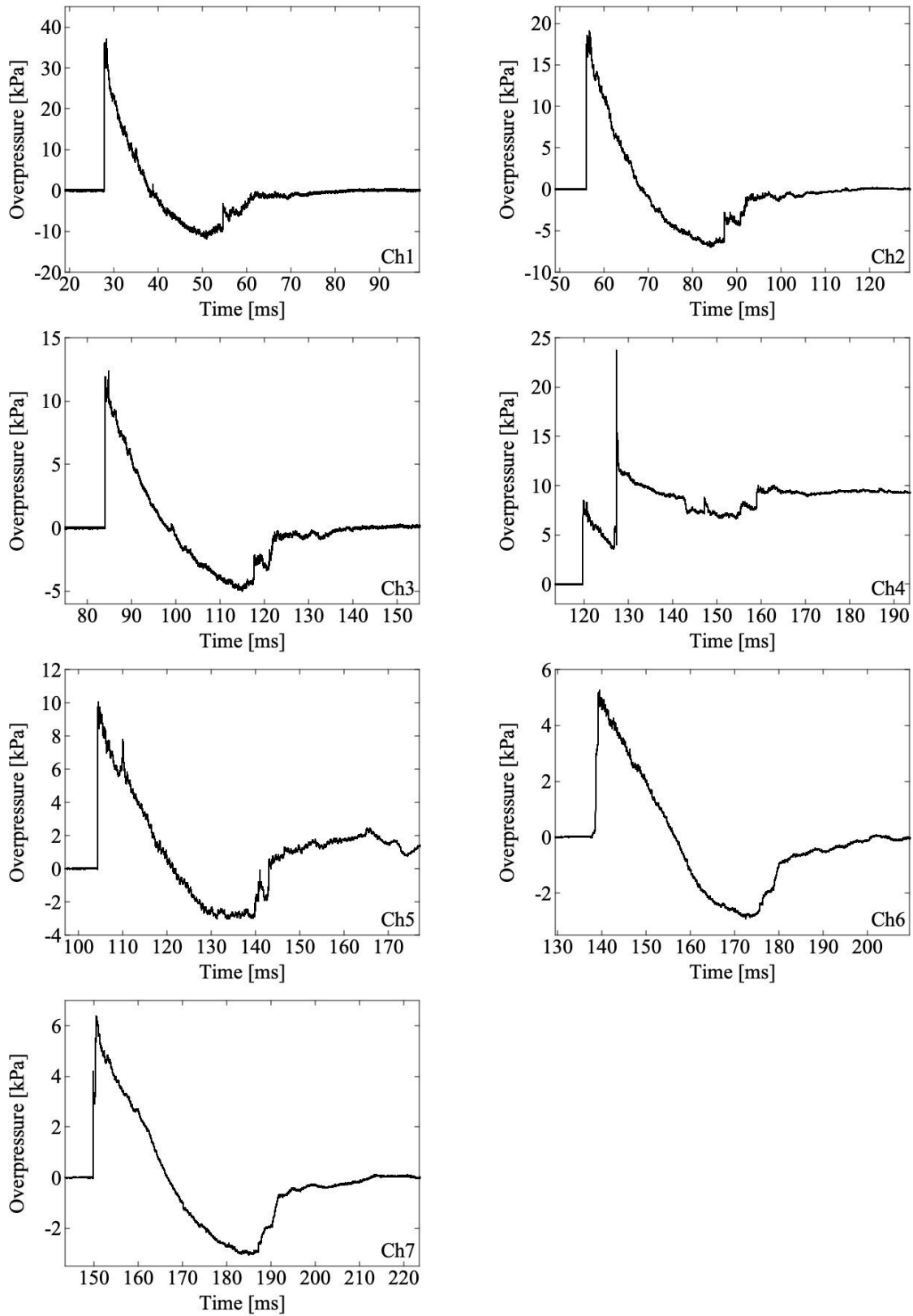


図 4.1.3.2-4 実験 No.1-4 爆風の時間履歴

(2) 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、および持続時間を表 4.1.3.2-1～表 4.1.3.2-4 に整理した。No1-3 の ch5 と No1-4 の ch4 は電氣的なノイズと思われる非物理的な圧力変動が観測されたため、それまでの時刻で取得できるピーク静水過圧と到達時刻のみを取得した。

表 4.1.3.2-1 No1-1 の爆風パラメータ

	薬量換算距離 $K [m/kg^{1/3}]$	ピーク静水過圧 $P [kPa]$	正圧相インパルス $I [Pa \cdot s]$	到達時刻 $t_{TOA} [ms]$	持続時間 $t_{duration} [ms]$
Ch1	31.35	2.48	5.48	72.20	4.67
Ch2	19.28	4.68	9.00	41.97	4.11
Ch3	10.11	11.53	16.92	19.49	3.28
Ch4	29.10	2.81	5.87	66.55	4.62
Ch5	3.56	58.42	46.25	4.24	2.21
Ch6	16.59	3.41	7.49	38.12	4.41
Ch7	21.30	2.92	6.20	49.31	4.47

表 4.1.3.2-2 No1-2 の爆風パラメータ

	薬量換算距離 $K [m/kg^{1/3}]$	ピーク静水過圧 $P [kPa]$	正圧相インパルス $I [Pa \cdot s]$	到達時刻 $t_{TOA} [ms]$	持続時間 $t_{duration} [ms]$
Ch1	8.18	16.19	44.70	29.50	6.36
Ch2	4.09	41.27	81.26	10.76	5.03
Ch3	6.64	20.99	56.28	22.10	6.21
Ch4	17.04	6.51	23.00	72.92	8.52
Ch5	9.78	12.72	38.73	36.94	7.65
Ch6	16.29	4.74	19.47	70.97	8.83
Ch7	18.65	2.53	9.36	82.31	8.83

表 4.1.3.2-3 No1-3 の爆風パラメータ

	薬量換算距離 $K [m/kg^{1/3}]$	ピーク静水過圧 $P [kPa]$	正圧相インパルス $I [Pa \cdot s]$	到達時刻 $t_{TOA} [ms]$	持続時間 $t_{duration} [ms]$
Ch1	4.07	48.01	105.17	13.07	6.01
Ch2	4.14	45.41	105.89	13.43	6.36
Ch3	8.05	16.11	58.00	36.17	7.70
Ch4	15.56	7.13	30.23	82.26	10.16
Ch5	11.01	10.80	-	54.08	-
Ch6	16.22	5.25	25.89	88.42	11.75
Ch7	18.10	4.22	19.41	99.66	11.75

表 4.1.3.2-4 No1-4 の爆風パラメータ

	薬量換算距離 $K [m/kg^{1/3}]$	ピーク静水過圧 $P [kPa]$	正圧相インパルス $I [Pa \cdot s]$	到達時刻 $t_{TOA} [ms]$	持続時間 $t_{duration} [ms]$
Ch1	4.83	36.57	145.45	27.80	10.21
Ch2	7.88	18.53	97.83	56.08	12.11
Ch3	10.78	12.25	69.57	83.95	14.22
Ch4	14.42	8.30	-	119.78	-
Ch5	12.88	9.73	72.31	104.38	16.94
Ch6	16.14	5.16	45.82	138.61	18.07
Ch7	17.32	6.36	48.77	149.85	16.68

(3) 爆風パラメータの距離減衰（地形の影響を受けない ch1～ch5）

まず No1-1～No1-4 において地形の影響を受けない ch1～ch5 のデータを整理する。表 4.1.3.2-5 は過去（H: 平成、R: 令和）に実施した薬量 W [kg] の基準爆風圧実験の条件も掲載した。すべてのデータを使って爆風パラメータを図 4.1.3.2-5 に整理した。

表 4.1.3.2-5 これまでに実施した EMX2 を使用した基準爆風圧実験（直円柱形状）

実施年度	実験No	薬量 W [kg]	爆薬中心までの地表面からの高さ	
			[m]	[m/kg ^{1/3}]
R06	1-1	0.625	0.0525	0.061
	1-2	5	0.105	0.061
	1-3	9.77	0.1305	0.061
	1-4	40	0.210	0.061
R05	1-1	1	0.200	0.20
	1-2	3.2	0.295	0.20
	1-3	10	0.431	0.20
	1-4	32	0.635	0.20
R03	2-1	15.49	0.195	0.078
R02	2-1	15.49	0.195	0.078
H30	2-1	5	0.308	0.18
H28	2-6	10.32	0.388	0.18
H27	2-2	40	0.616	0.18
H26	4-1	10	0.388	0.18
	4-2	80	0.776	0.18

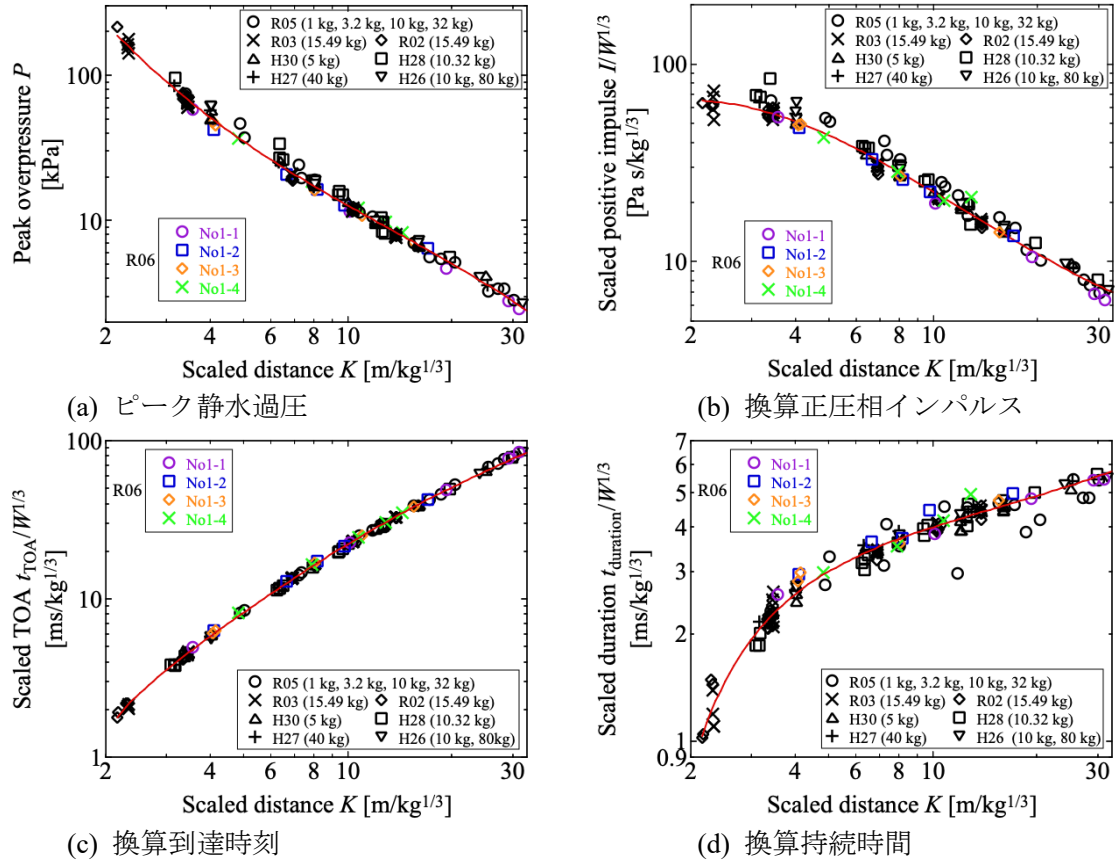


図 4.1.3.2-5 地形の影響を受けない ch1 ~ ch5 の爆風パラメータの距離減衰

R06 における地形の影響を受けない ch1 ~ ch5 の爆風パラメータは過去の実験データと同等であることが確認され、ピーク静水過圧 P [kPa]、換算正圧相インパルス $I/W^{1/3}$ [Pa s/kg $^{1/3}$]、換算到達時刻 $t_{TOA}/W^{1/3}$ [ms/kg $^{1/3}$]、換算持続時間 $t_{duration}/W^{1/3}$ [ms/kg $^{1/3}$]の近似線として、薬量換算距離 K [m/kg $^{1/3}$]と薬量 W [kg]を用いて $2.16 \leq K \leq 33$ の範囲内にて下記のとおり定義し、基準条件における爆風パラメータとして地形背後の ch6 と ch7 のデータを評価する。

$$X = \log_{10} K$$

$$\log_{10} P = 3.2790 - 3.6312X + 2.0771X^2 - 0.62102X^3 \quad (1)$$

$$\log_{10} \frac{I}{W^{1/3}} = 1.6802 + 0.95267X - 1.8360X^2 + 0.55738X^3 \quad (2)$$

$$\frac{t_{TOA}}{W^{1/3}} = -3.2303 + 22.946X - 36.966X^2 + 39.342X^3 \quad (3)$$

$$\frac{t_{duration}}{W^{1/3}} = -2.1318 + 12.016X - 8.5654X^2 + 2.6765X^3 \quad (4)$$

(4) 爆風パラメータの距離減衰（地形背後の ch6 と ch7）

No1-1 ~ No1-4 において地形の前面と後面の位置が異なるので、図 4.1.3.2-6 と図 4.1.3.2-7 にそれぞれ地形背後の ch6 と ch7 のピーク静水過圧と換算正圧相インパルス分布を実験ごとに示した。ch6 においてすべての条件で爆風低減効果は確認されたが、薬量の増大すなわち実規模地形高さの減少に伴って爆風低減効果が小さくなった。

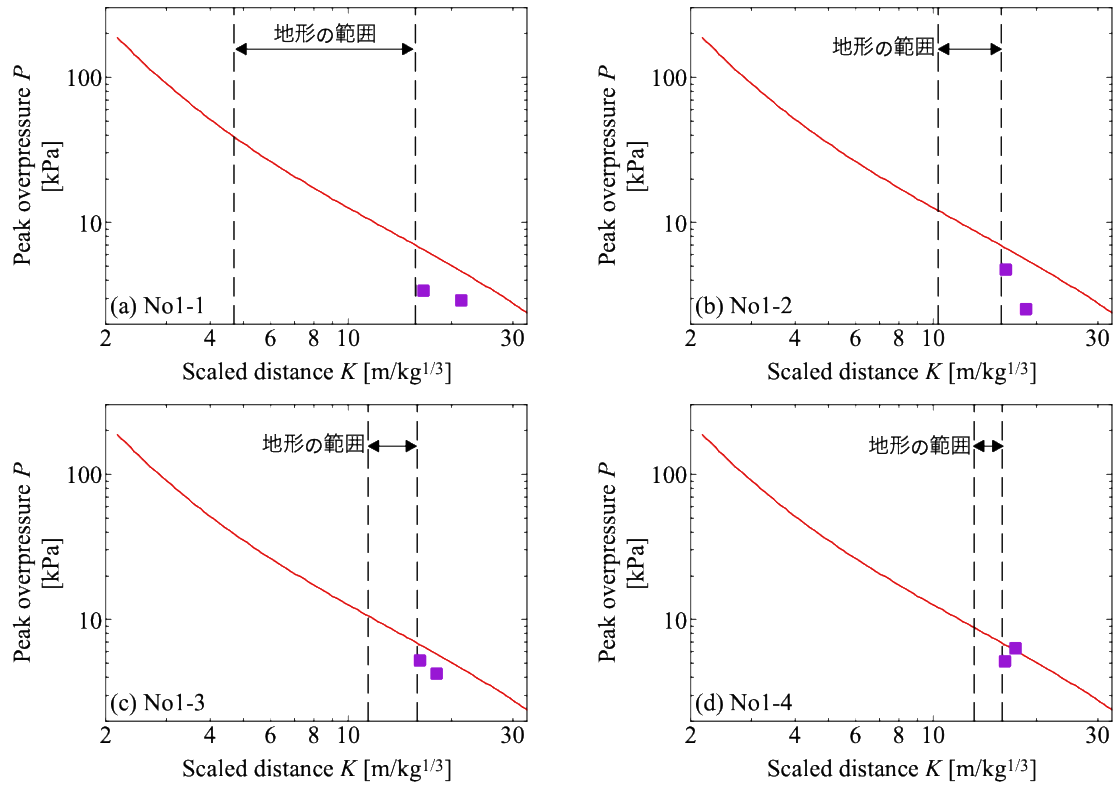


図 4.1.3.2-6 地形背後の ch6 と ch7 のピーク静水過圧分布

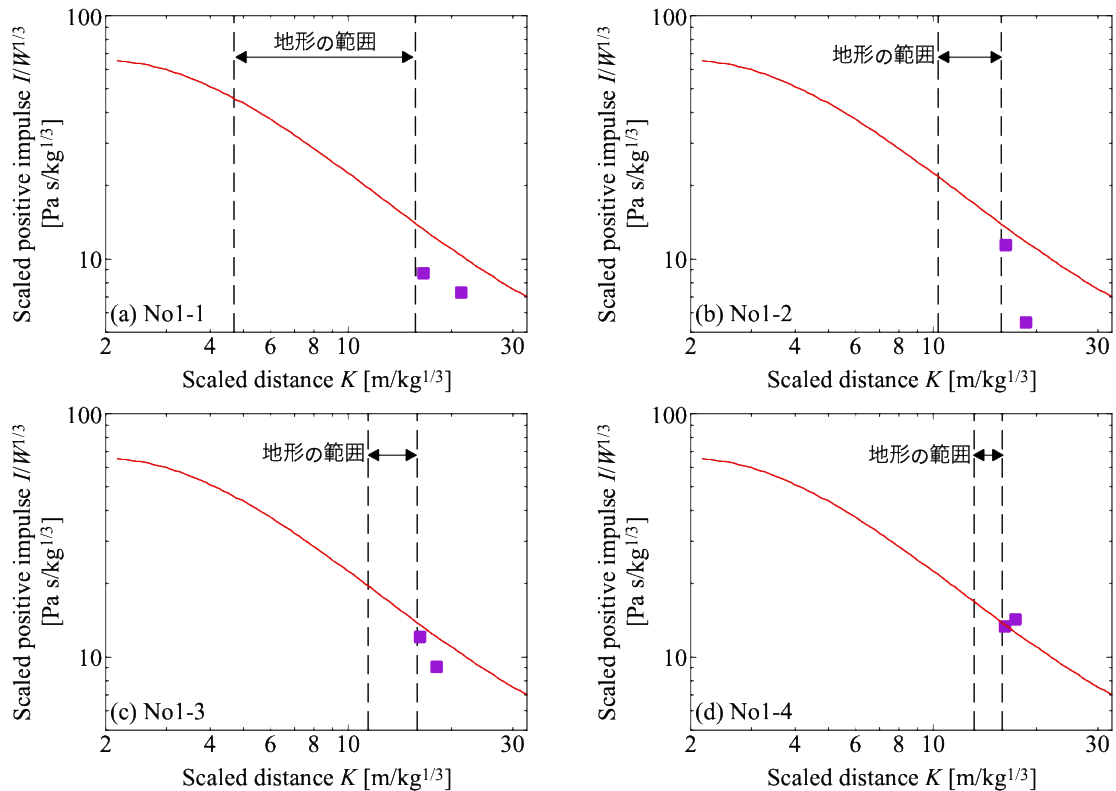


図 4.1.3.2-7 地形背後の ch6 と ch7 の換算正圧相インパルス分布

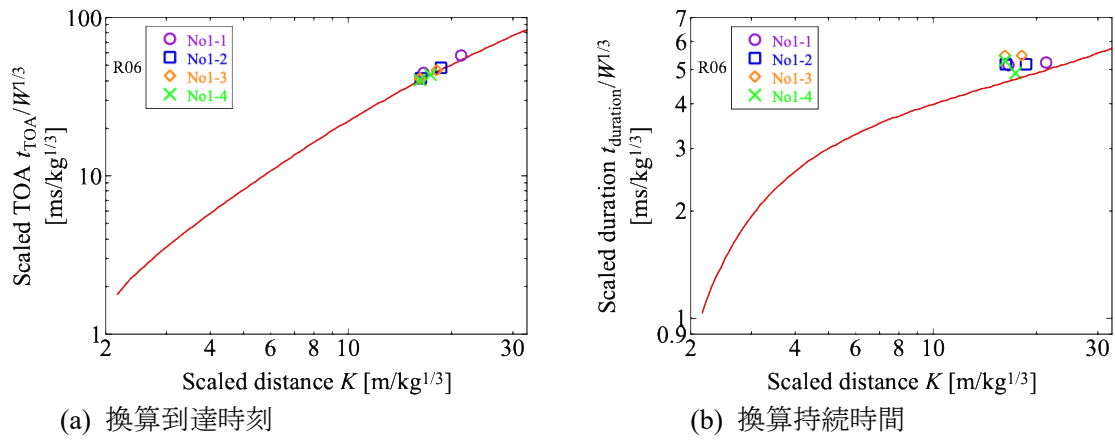


図 4.1.3.2-8 地形背後の ch6 と ch7 の換算到達時刻と換算持続時間

図 4.1.3.2-8 に ch6 と ch7 の換算到達時刻と換算持続時間を示した。換算到達時刻は近似式(3)とよく一致し、換算持続時間は近似式(4)に比べて若干長くなった。入射波のあとに反射波が到達することで過圧の持続時間が延長したことが要因と考えられる。

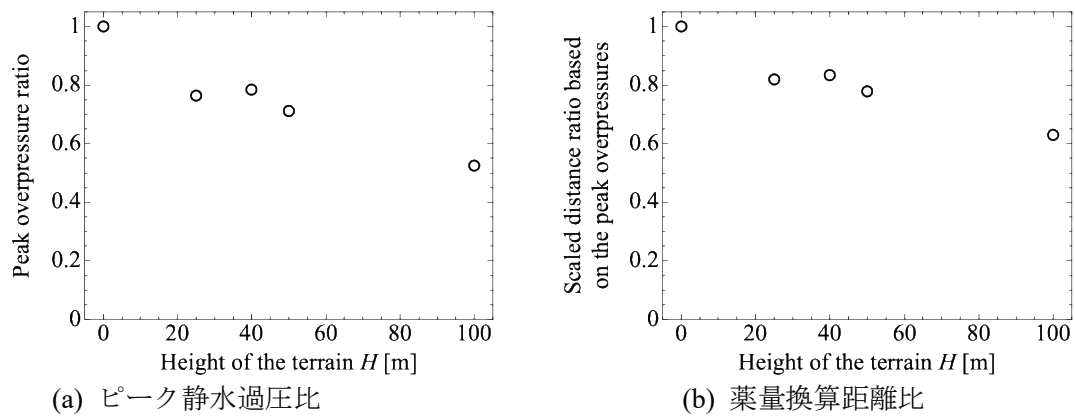


図 4.1.3.2-9 ピーク静水過圧分布における ch6 と近似線のピーク静水過圧比と薬量換算距離比に対する実規模高さ依存性

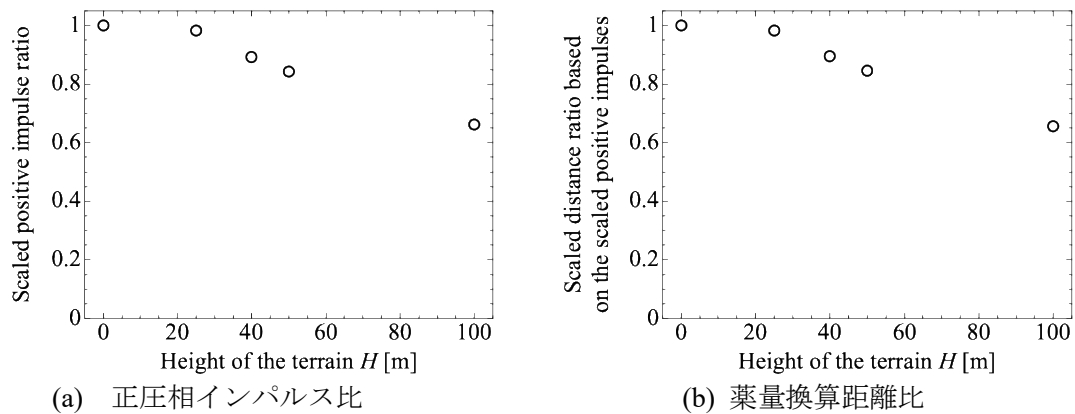
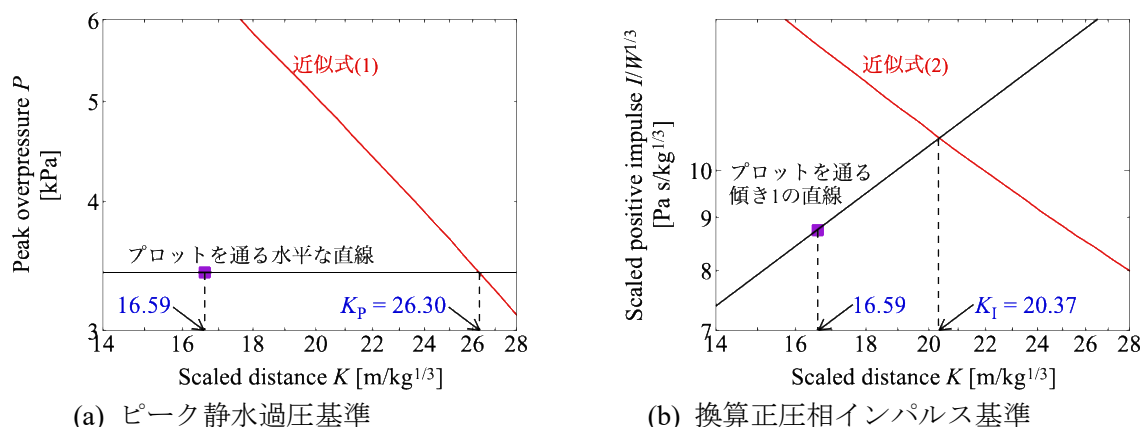


図 4.1.3.2-10 正圧相インパルス分布における ch6 と近似線の正圧相インパルス比と薬量換算距離比に対する実規模高さ依存性

図 4.1.3.2-6 と図 4.1.3.2-7 を使い、地形背後の ch6 における爆風低減効果を定量的に検討する。まず単純に近似式(1)-(2)と実験プロットの横軸の比（薬量換算距離比）と縦軸の比（ピーク静水過圧比または正圧相インパルス比）を図 4.1.3.2-9 と図 4.1.3.2-10 に示した。地形高さ 0 m と解釈できる基準条件を図中の(0, 1)にプロットした。地形が大きいほどピーク静水過圧比、正圧相インパルス比、薬量換算比が小さくなる、すなわち爆風低減効果が向上した。図 4.1.3.2-9 のピーク静水過圧比と薬量換算距離比は、実

規模高さ 25 m と 40 m においてともに 0.8 程度で収束したかのような結果が得られた。



(a) ピーク静水過圧基準

(b) 換算正圧相インパルス基準

図 4.1.3.2-11 No1-1 の ch6 を例にした場合の基準爆風パラメータが等価となる薬量換算距離の算出方法

次に薬量換算比を検討する。図 4.1.3.2-11 に No1-1 の ch6 を例にした場合の基準爆風パラメータが等価となる薬量換算距離の算出方法を示した。これは薬量を変化させることで実験のプロットを移動させて、近似式との交点を求める方法である。ピーク静水過圧基準の場合、横軸の薬量換算距離 K のみに薬量が含まれているため、図 4.1.3.2-11a における実験のプロットを通る水平な直線と近似式(1)が交わる位置が、基準条件のピーク静水過圧と等価となる薬量換算距離 K_P である。ここで横軸（薬量換算距離）の比は図 4.1.3.2-9b に相当する。一方、換算正圧相インパルスでは横軸の薬量換算距離 K に加えて縦軸の換算正圧相インパルス $I/W^{1/3}$ にも薬量が含まれているため、図 4.1.3.2-11b における実験のプロットを通る傾き 1 の直線と近似式(2)が交わる位置が、基準条件の換算正圧相インパルスと等価となる薬量換算距離 K_I である。ピーク静水過圧基準および換算正圧相インパルス基準の薬量換算比 E_P, E_I はそれぞれ下記の式によって算出する。

$$E_P = \left(\frac{K}{K_P} \right)^3 \quad (5)$$

$$E_I = \left(\frac{K}{K_I} \right)^3 \quad (6)$$

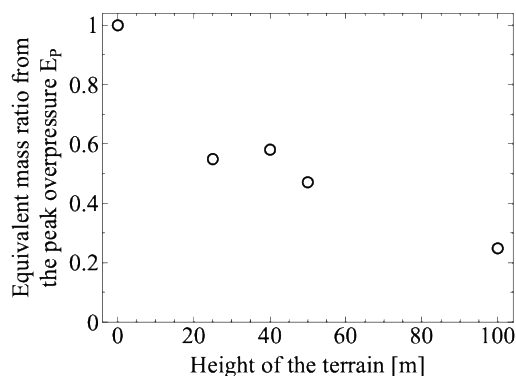
表 4.1.3.2-6 に近似式(1)と等価なピーク静水過圧が得られる薬量換算距離 K_P と薬量換算比 E_P 、表 4.1.3.2-7 に近似式(2)と等価な換算正圧相インパルスが得られる薬量換算距離 K_I と薬量換算比 E_I を整理した。No1-4 の ch7 以外、ピーク静水過圧および換算正圧相インパルスは計測位置よりも等価な爆風パラメータが得られる薬量換算距離が拡大し、爆風低減が達成されていることを確認した。

表 4.1.3.2-6 近似式(1)と等価なピーク静水過圧となる薬量換算距離と薬量換算比

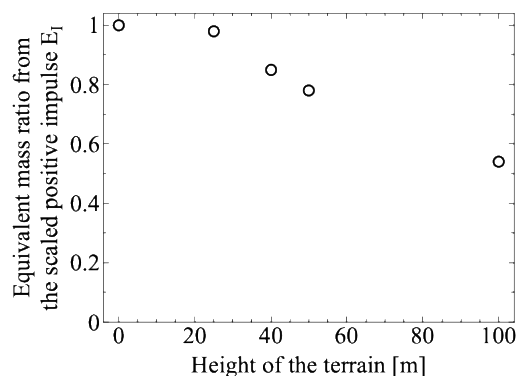
実験 No	計測位置 K [m/kg ^{1/3}]	ピーク静水過圧 P [kPa]	近似式(1)と等価なピーク静水過圧が得られる薬量換算距離 K_P [m/kg ^{1/3}]	薬量換算比 E_P
1-1	16.59	3.41	26.30	0.25
	21.30	2.92	29.14	0.39
1-2	16.29	4.74	20.92	0.47
	18.65	2.53	31.93	0.20
1-3	16.22	5.25	19.43	0.58
	18.10	4.22	22.72	0.51
1-4	16.14	5.16	19.68	0.55
	17.32	6.36	16.87	1.08

表 4.1.3.2-7 近似式(2)と等価な換算正圧相インパルスとなる薬量換算距離と薬量換算比

実験 No	計測位置 K [m/kg ^{1/3}]	換算正圧相インパ ルス $I/W^{1/3}$ [Pa s/kg ^{1/3}]	近似式(2)と等価な換算正圧相イン パルスが得られる薬量換算距離 K_I [m/kg ^{1/3}]	薬量換算比 E_I
1-1	16.59	8.76	20.37	0.54
	21.30	7.25	25.51	0.58
1-2	16.29	11.39	17.71	0.78
	18.65	5.474	27.60	0.31
1-3	16.22	12.11	17.14	0.85
	18.10	9.080	20.90	0.65
1-4	16.14	13.40	16.28	0.98
	17.32	14.26	16.34	1.19



(a) ピーク静水過圧基準



(b) 換算正圧相インパルス基準

図 4.1.3.2-12 ch6 の薬量換算比 E_P 、 E_I に対する実規模高さ依存性

図 4.1.3.2-12 に No1-1 ~ No1-4 における ch6 ($K=16$ 付近)の薬量換算比 E_P 、 E_I に対する実規模高さ依存性を示した。地形が大きいくほど薬量換算比が小さくなり、爆風低減効果が向上した。ピーク静水過圧 (図 4.1.3.2-12a) は、実規模高さ 25 m と 40 m において $E_P=0.55$ 程度で収束したかのような結果が得られた。しかし地形高さ 0 m と解釈できる基準条件が図中の (0, 1) にプロットされるため、あらゆる地形の高さを保安距離に反映させるためには、実規模高さ 25 m よりも低い地形を用いた検証実験が必要と考えられる。

換算正圧相インパルス (図 4.1.3.2-12b) は、図 4.1.3.2-8b に示す通り過圧の換算持続時間が基準条件の近似式(4)に比べて伸びたため、正圧相インパルス基準の薬量換算比 E_I はピーク静水過圧基準の薬量換算比 E_P に比べて高めになったと考えられる。実規模高さの減少に従って換算正圧相インパルスの低減効果は小さくなり、実規模高さ 25 m では基準条件と同等の薬量換算比 ($E_I=0.98$) となった。地形をさらに低くした際に滑らかに図中の (0, 1) に向かうのか、 $E_I=1$ を上回った後に (0, 1) に到達するのか、実規模高さに対する換算正圧相インパルスの低減効果を詳細に議論するためには、25 m よりも低い地形を用いた検証実験が必要と考えられる。

(5) 爆風圧まとめ

爆風が地形を越えた後の低減効果を検証するため、地形の影響を受けない ch1 ~ ch5 と過去に実施した基準爆風圧実験を基準条件の爆風パラメータとし、地形背後の ch6 と ch7 における爆風パラメータを検討した。

ピーク静水過圧基準に対する地形の高さ効果

地形における爆風の反射と回折に伴うピーク静水過圧の低減効果が得られ、地形が大きいほどその効果は高かった。図 4-1.3.2-12a に示すように実規模高さ 25 m と 40 m において同等の薬量換算比 E_P に収束したかのような結果となった。しかし実規模高さ 0 m と解釈できる基準条件は図 4-1.3.2-12a の(0, 1)にプロットされるため、実規模高さに対するピーク静水過圧の低減効果を詳細に議論するためには、25 m よりも低い地形を用いた検証実験が必要と考えられる。

換算正圧相インパルス基準に対する地形の高さ効果

地形における爆風の反射と回折に伴う換算正圧相インパルスの低減効果が得られ、地形が大きいほど爆風低減効果は高かった。図 4.1.3.2-8b に示す通り過圧の換算持続時間が伸びたため、実規模高さの減少に従って換算正圧相インパルスの低減効果(図 4-1.3.2-12b)が小さくなり、実規模高さ 25 m では基準条件と同等の薬量換算比となった。地形をさらに低くした際に滑らかに図中の(0, 1)に向かうのか、 $E_I = 1$ を上回った後に(0, 1)に到達するのか、実規模高さに対する換算正圧相インパルスの低減効果を詳細に議論するためには、25 m よりも低い地形を用いた検証実験が必要と考えられる。

爆風到達時刻に対する地形の高さ効果

基準データの近似式(3)とよく一致した。

換算持続時間に対する地形の高さ効果

入射波のあとに反射波が到達することで過圧の持続時間が伸び、基準データの近似式(4)よりも常に換算持続時間が長くなった。正圧相インパルス基準の薬量換算比 E_I がピーク静水過圧基準の薬量換算比 E_P に比べて高めになった原因と考えられる。

4.1.3.3 地盤振動計測結果

No.1-1 から No.1-4 における各計測点で計測した振動加速度の波形を図 4.1.3.3-1、図 4.1.3.3-2、図 4.1.3.3-3、図 4.1.3.3-4 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どと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 4.1.3.3-5、図 4.1.3.3-6、図 4.1.3.3-7、図 4.1.3.3-8 にそれぞれ示す。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-1¹⁾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。今回の解析では主に、PPV_{true} について議論を行う。

No.1-1 から No.1-4 それぞれについて、PPV_{true} を算出し、換算距離との関係を示したものを図 4.1.3.3-9 に示す。図中には地中爆発における地盤振動予測式ではあるが、参考に岩石・土壌における Westine の地盤振動減衰曲線⁴⁾を記載した。

今回の振動速度結果の一部の波形で、異常に大きな加速度・速度が認められた。特に模擬地形背後ではその傾向が顕著であった。例えば、No1-2 における ch1 における z 方向の計測結果などがその例であり、z 方向のピーク速度値は同時刻における x および y 軸の 10 倍以上の値を記録している。また、模擬地形の有無の違いによる差が生じる可能性があるものの、同じ換算距離 (No1-2 ch2) における振動速度の計測値と大きく異なっており、壁の有無のみで、このような結果になるとは考えにくい。以上の理由から、このように異常に大きな地盤振動加速度・速度は、実際の地盤振動影響を反映していない可能性も考えられる。特に 2 日目以降 ch1 の計測結果は異常に大きな振動が目立っている。今回の実験では、実験開始以降計測実施中は大雨の影響により、演習場内の地面は常にぬかるんだ状態であった。また、実験 2 日目以降は、模擬地形周辺では特にぬかるみがひどく、水たまりも多く存在していた。そのため、地面のぬかるみの影響もさることながら、降雨が計測系に影響を及ぼした可能性も十分に考えられる。そのため、本年の実験結果で模擬地形の影響について判断することは困難である。降雨の影響が比較的少ない ch について見てみると、実験ごとに各 ch の換算距離が異なるが、多くの結果は Westine の岩石と土壌における地盤振動減衰曲線の間に収まる結果となった。

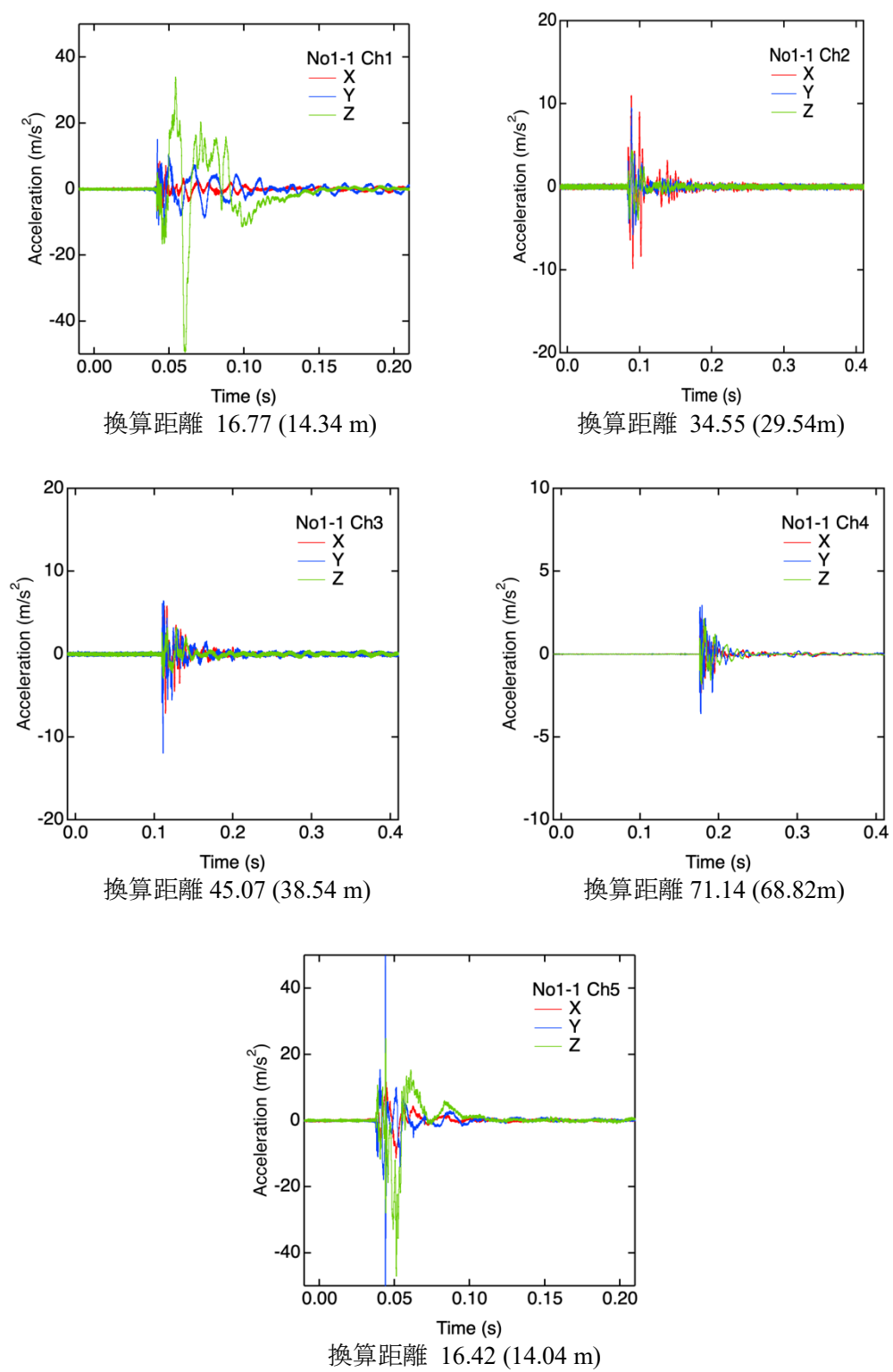
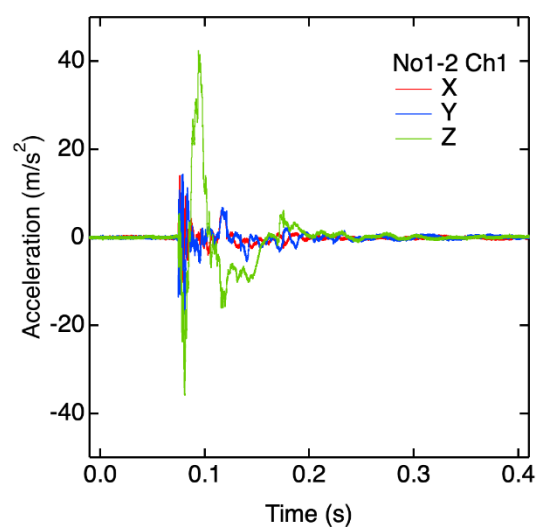
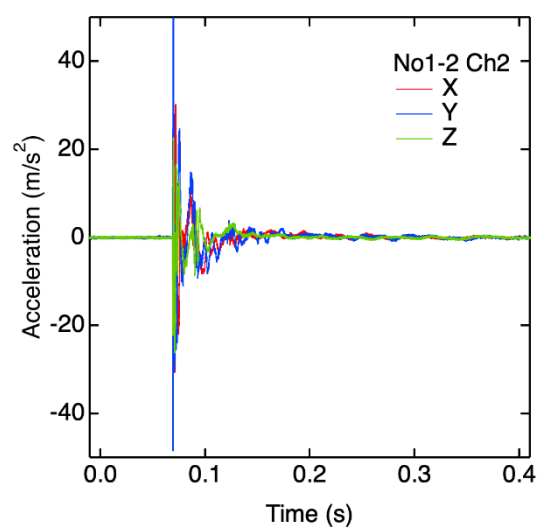


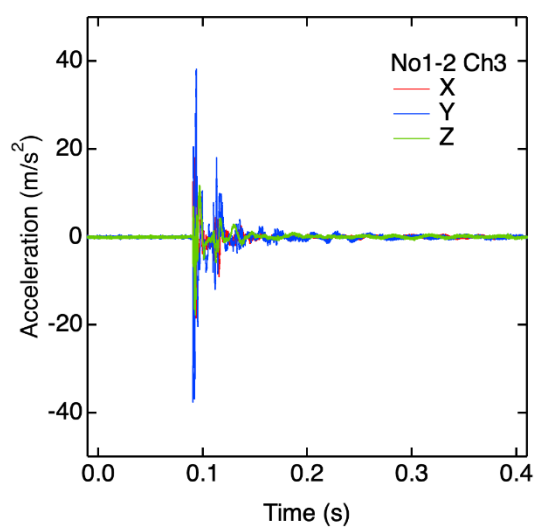
図 4.1.3.3-1 爆薬量 0.625 kg に対する地盤振動加速度(No1-1)



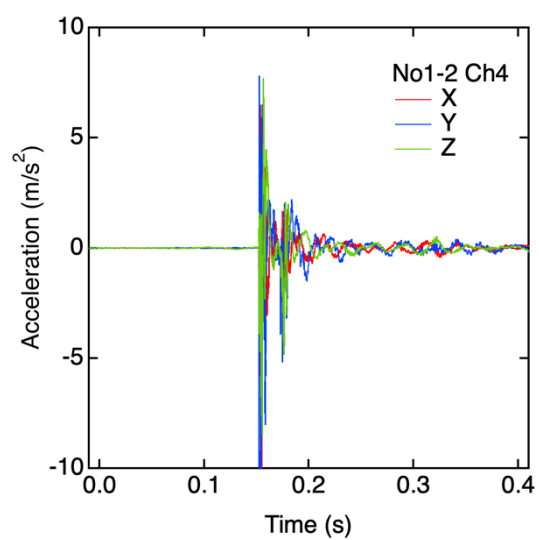
換算距離 16.37 (27.99 m)



換算距離 15.66 (26.79 m)



換算距離 19.96 (34.13 m)



換算距離 32.35 (55.32 m)

図 4.1.3.3-2 爆薬 5.00 kg に対する地盤振動加速度 (No1-2)

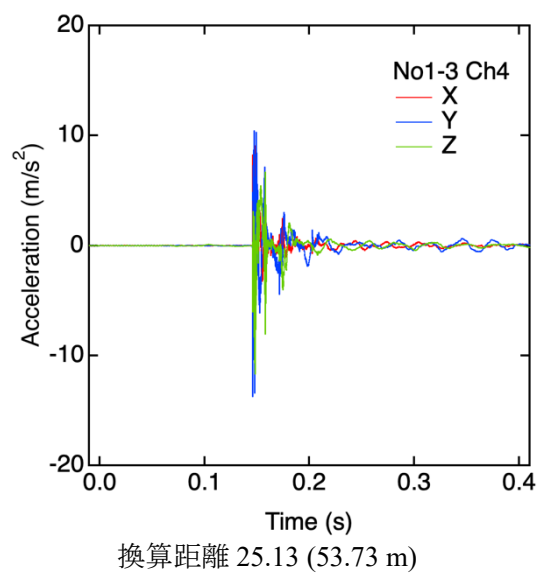
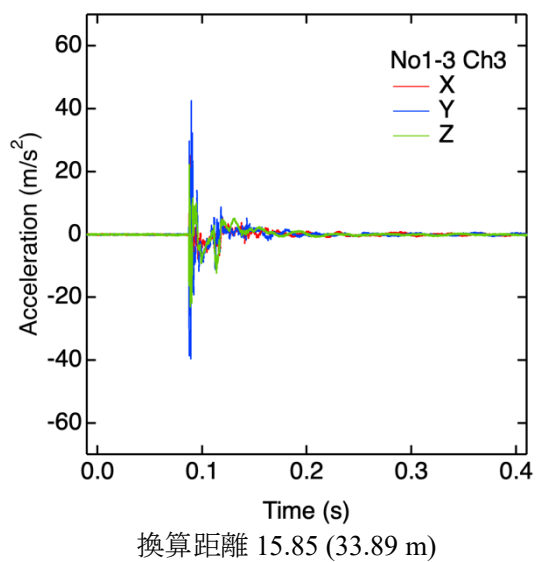
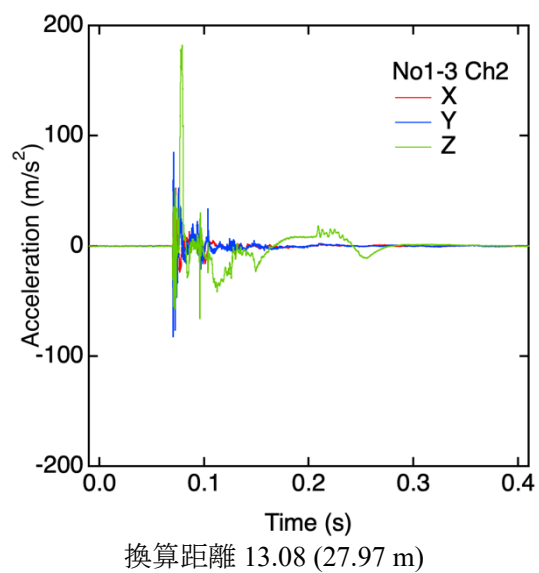
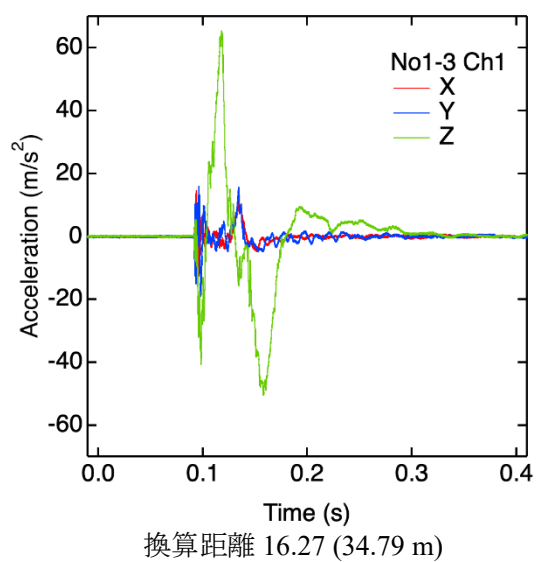


図 4.1.3.3-3 爆薬 9.77 kg に対する地盤振動加速度(No1-3)

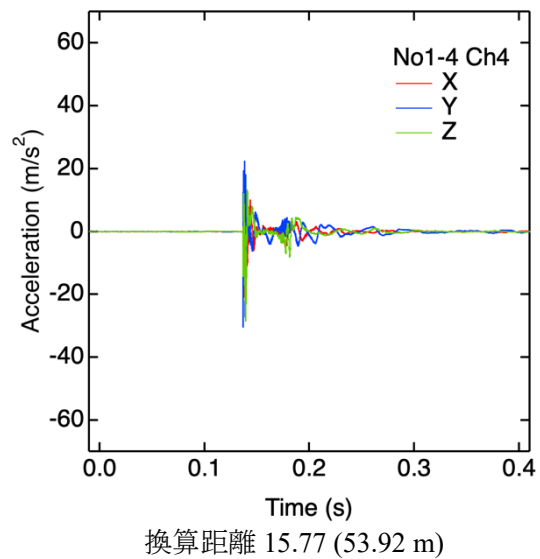
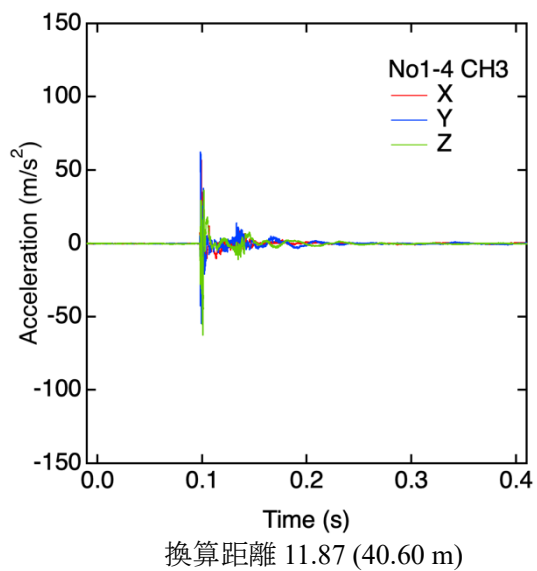
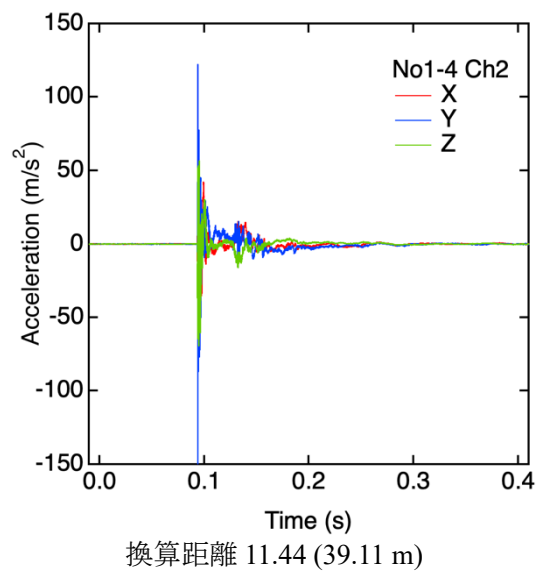
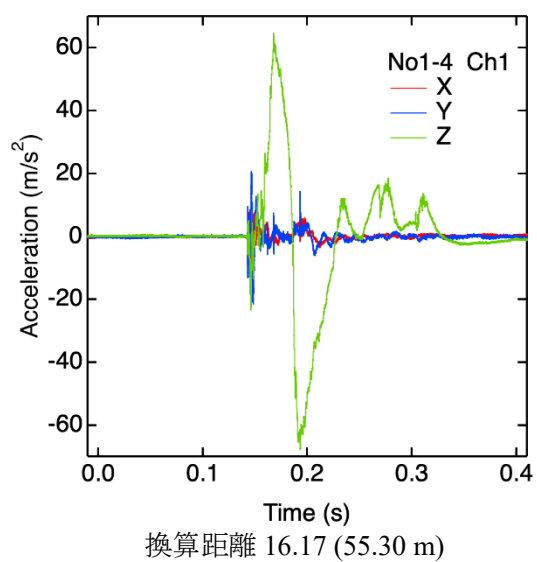
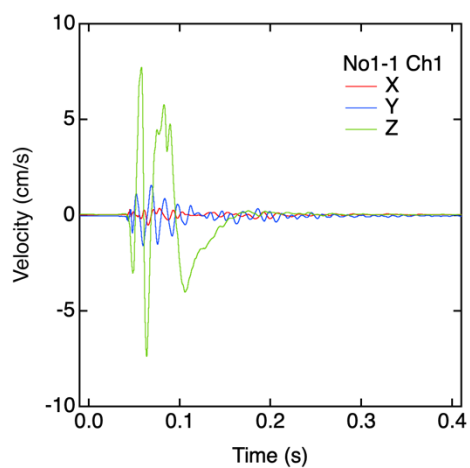
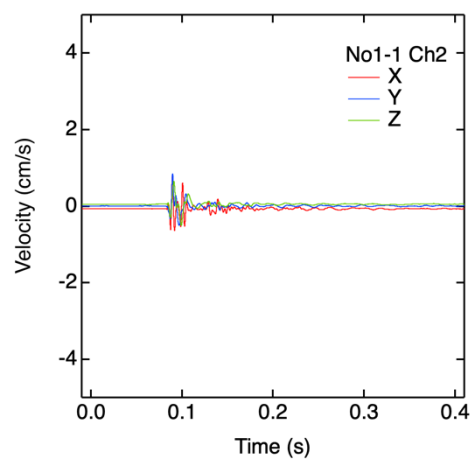


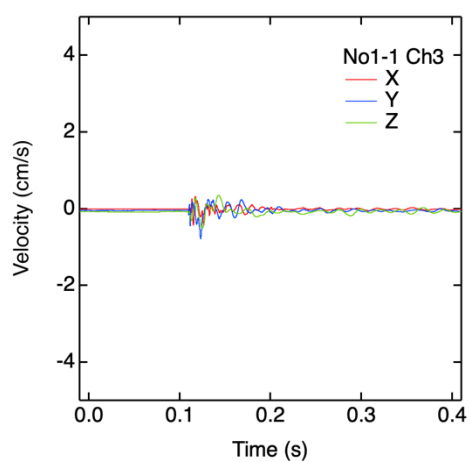
図 4.1.3.3-4 爆薬量 40.0 kg に対する地盤振動加速度(No1-4)



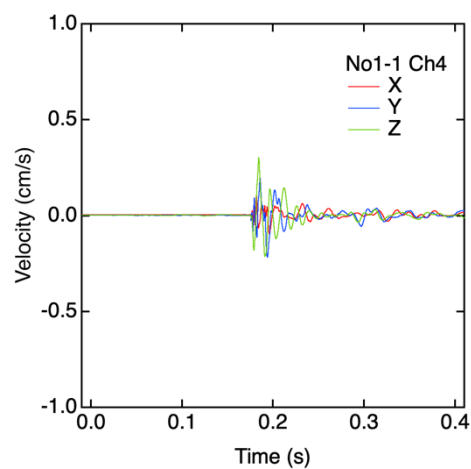
換算距離 16.77 (14.34 m)



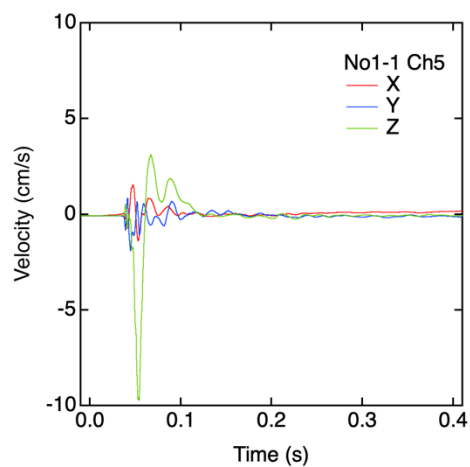
換算距離 34.55 (29.54m)



換算距離 38.54 (45.07 m)



換算距離 71.14 (68.82 m)



換算距離 16.42 (14.04 m)

図 4.1.3.3-5 爆薬量 0.625 kg に対する地盤振動速度(No1-1)

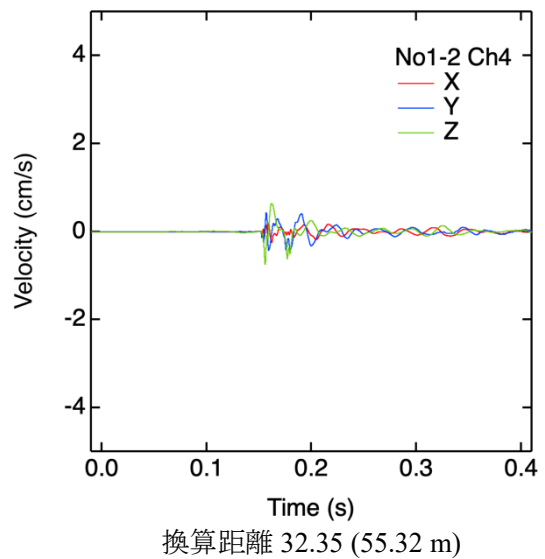
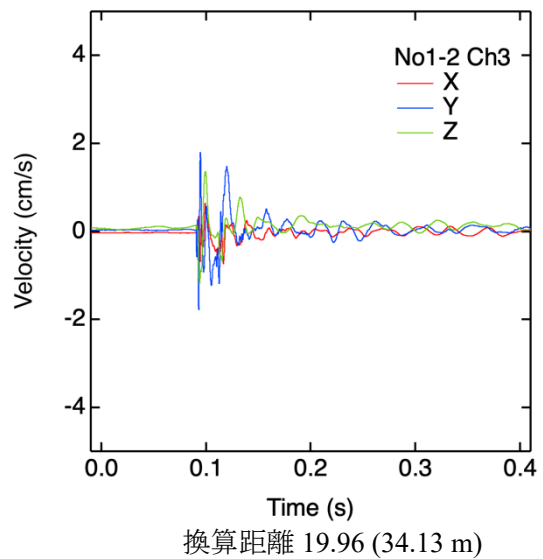
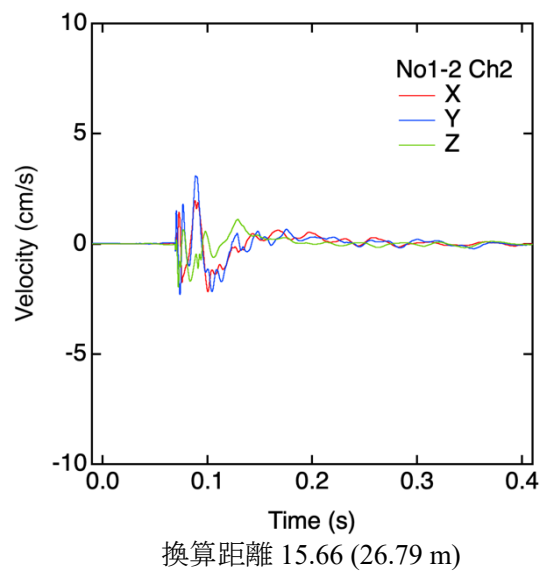
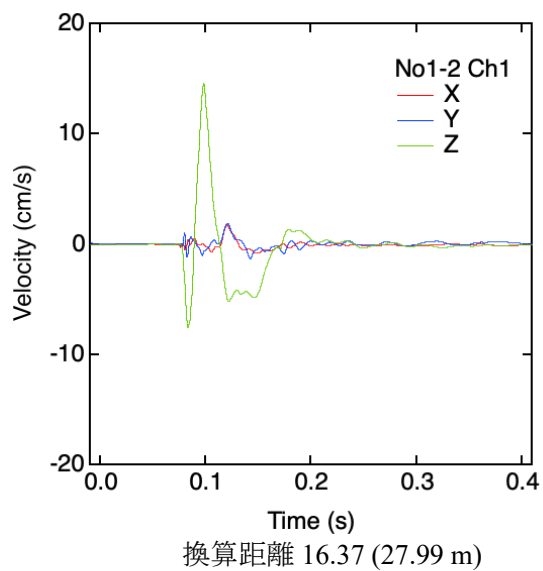


図 4.1.3.3-6 爆薬 5.00 kg に対する地盤振動速度 (No1-2)

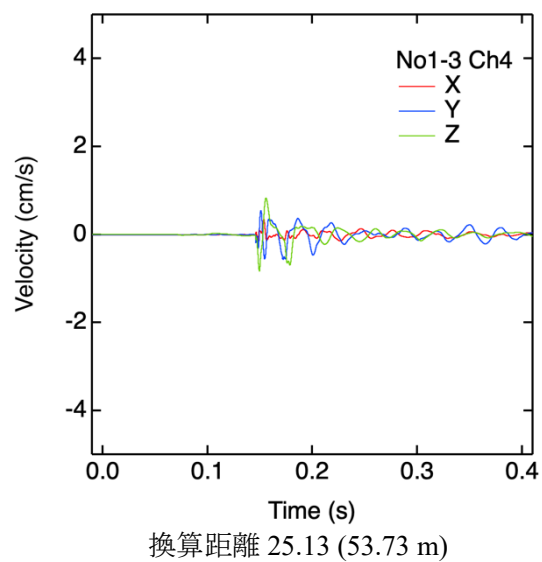
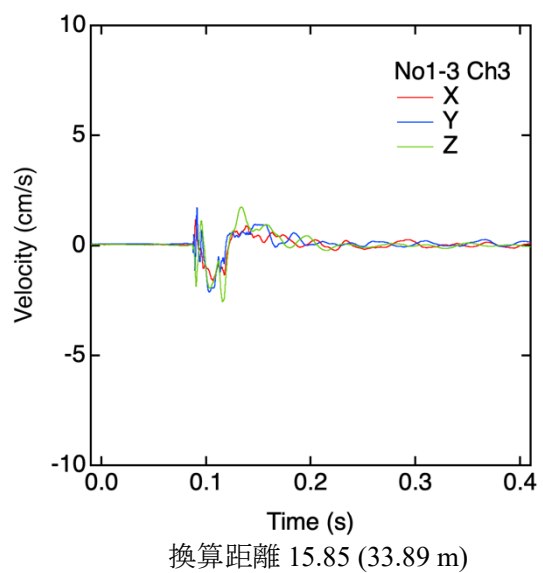
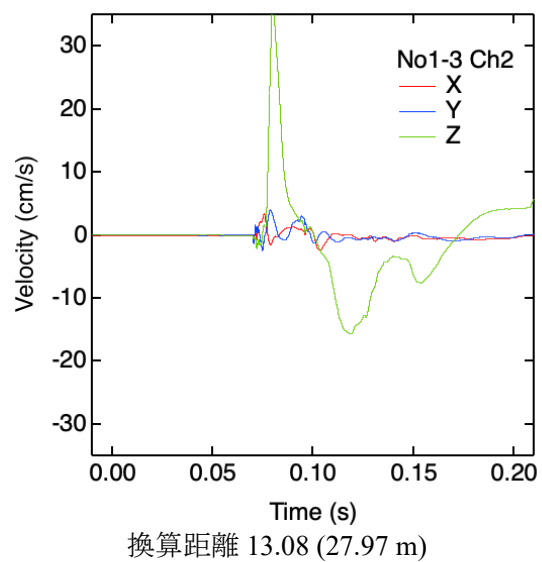
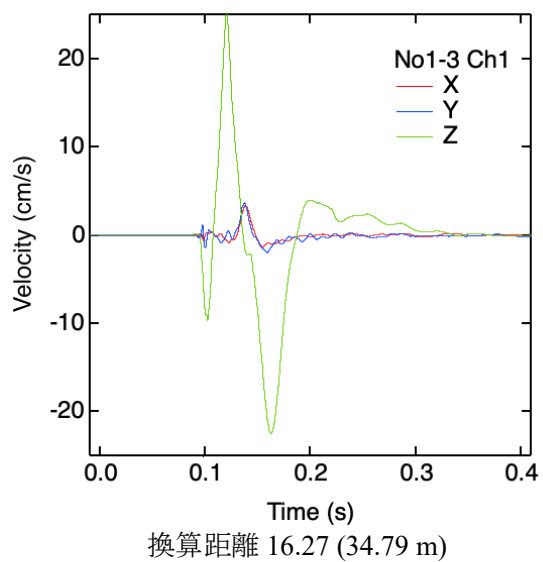


図 4.1.3.3-7 爆薬 9.77 kg に対する地盤振動速度(No1-3)

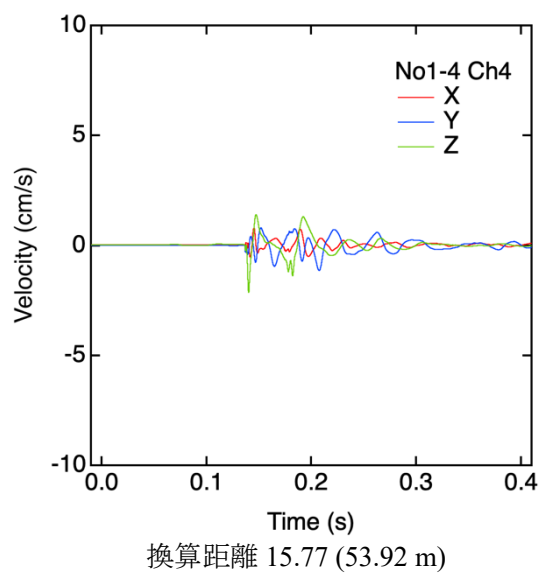
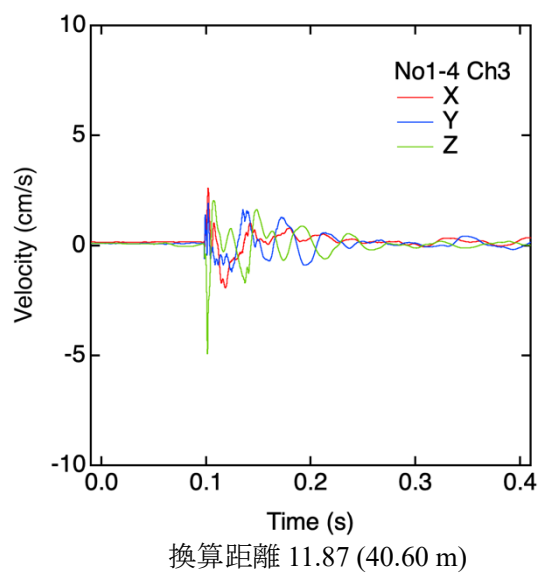
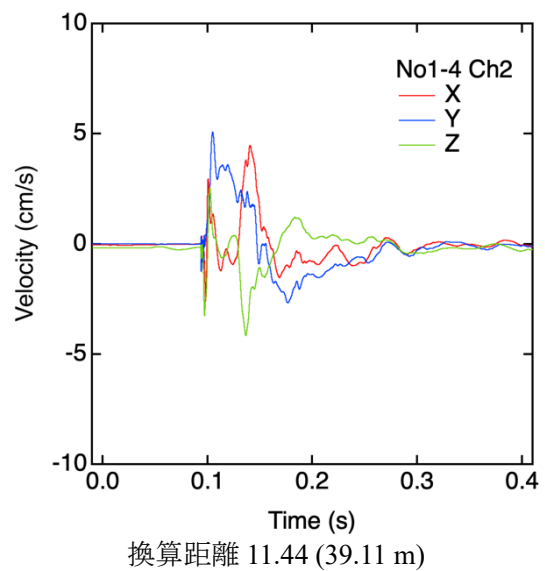
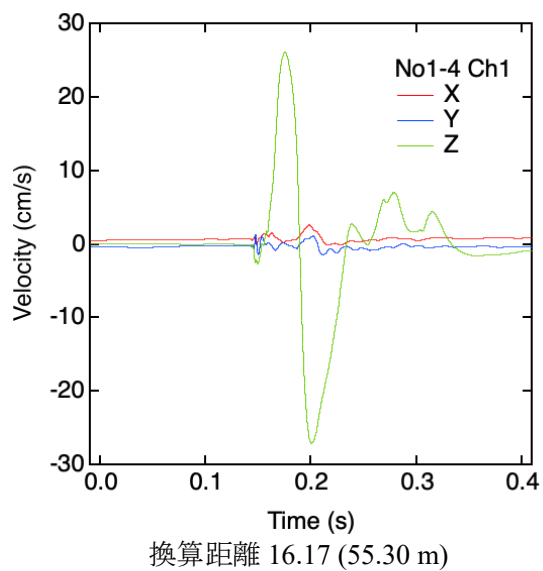


図 4.1.3.3-8 爆薬量 40.0 kg に対する地盤振動速度(No1-4)

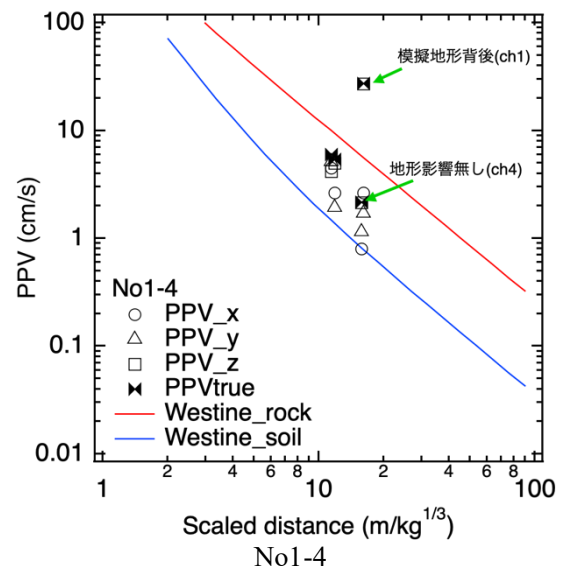
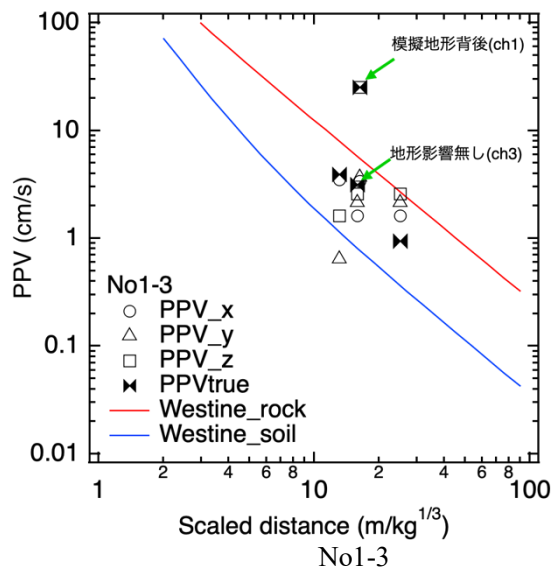
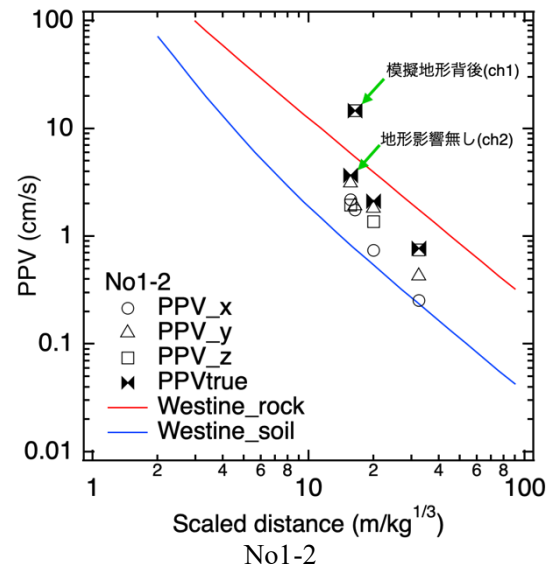
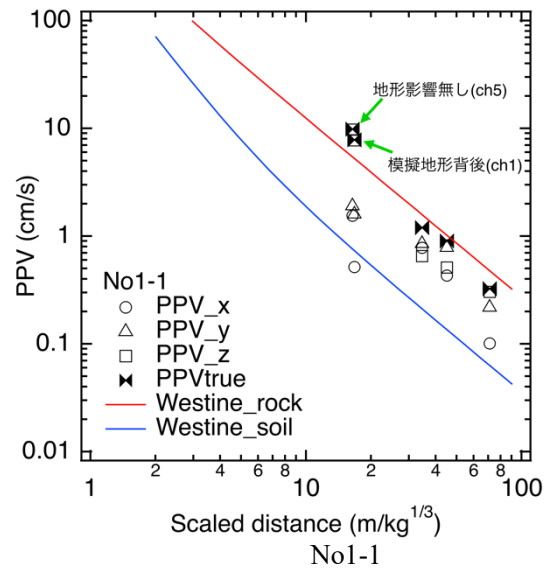


図 4.1.3.3-9 各実験における換算距離と最大変位速度(PPV)の関係 (No1-2～1-4)

地盤振動計測まとめ

爆薬量 0.625 kg、5.00 kg、9.77 kg、40.0 kg に対する地盤振動(加速度)を計測した。地形背後に設置した計測点においては特に実験 2 日目以降は降雨の影響を受け、妥当な計測結果を得られていない可能性が高く、本試験の範囲では模擬地形が地盤振動に及ぼす影響について結論づけることは困難である。

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] P. S. Westine, Journal of Terramechanica, Vol 15, No 2, pp 69-79, 1978

4.1.3.4 高速度カメラ撮影結果

(1)撮影条件概要

爆発によって発生した衝撃波の伝播状況を観察するために、高速度カメラによる撮影を行った。高速度カメラの配置状況を図 4.1.3.4-1 に示す。爆点から観測所方向を 0 度方向として、観測所の屋上からの撮影、ならびに 90 度方向にカメラボックス 3 個設置して撮影した。観測所の屋上は爆発状況の全景を、カメラボックス 1 (No.1-4 で使用) と 2 (No.1-4 以外で使用) は爆点を真横から爆轟ガスの膨張や爆風伝播を、カメラボックス 3 は地形を通過する爆風に焦点を定めて撮影した。カメラボックスから撮影する際には 20 mm 厚さの亚克力製窓を使用し、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、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 4.1.3.4-2 に観測所 1 の屋上、およびカメラボックスに設置した高速度カメラの写真を示す。表 4.1.2.4-1 に高速度撮影に使用した機材(カメラおよびレンズ)と撮影条件 (撮影画素サイズ、撮影速度、露光時間、レンズ絞り値) を示す。

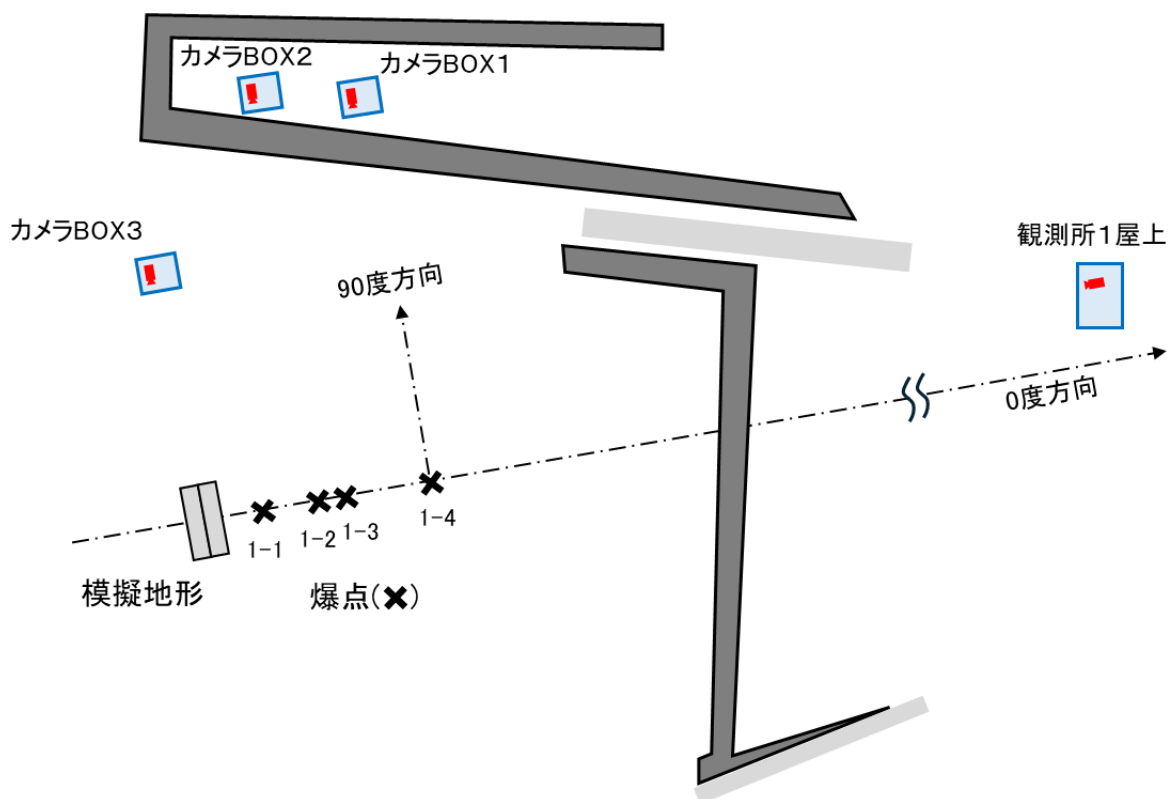


図 4.1.3.4-1 高速度カメラ配置と撮影方向



観測所 1 屋上



カメラボックス内

図 4.1.3.4-2 高速度カメラ配置状況

表 4.1.2.4-1 高速度撮影に使用した機材(カメラおよびレンズ)と撮影条件

観測位置	使用カメラ機材	撮影条件
観測所 1	Vision Research V640 Nikon AI Nikkor 180mm F2.8S	2560×1600 pix @ 1000 fps, 60-100 μ s 180mm/f2.8
カメラ Box1	Vision Research VEO640 Nikon AI Nikkor 50mm F1.4S	2560×1600 pix @ 1000 fps, 50 μ s 50mm / f8
カメラ Box2	Vision Research VEO640 Nikon AI Nikkor 85mm F1.4S	2560×1600 pix @ 1000 fps, 40-180 μ s 50mm / f1.8–f5.6
カメラ Box3	Vision Research V1210 Nikon AI Nikkor 50mm F1.4S	1280×800 pix @ 5000 fps, 40–180 μ s 50 mm / f1.8–f8

(2)爆発状況の概要

実験 No.1-1 から No.1-4 について、点火時刻から 1, 2, 5 ms 後の高速度撮影画像を図 4.1.3.4-3 と図 4.1.3.4-4 に示す。図 4.1.3.4-3 は観測所屋上からの撮影で、画角の中心付近に長さ 15 m の模擬地形が設置されており、その前方で爆轟ガスが膨張する様子が捉えられている。実験期間を通して概ね天候には恵まれなかった。ショット時刻のみ晴天になった実験 No.1-4 を除いて、特に遠方からの撮影である観測所屋上からの撮影は悪天候の影響を受けた。図 4.1.3.4-4 はカメラボックス 1 と 2 から撮影したものであり、実験 No.1-1 では模擬地形 (No.1-1 は 25 m 高さの山を想定) が爆点のすぐ右側に確認される。天候の影響もあること、ならびに爆点から 30 m 程度までの比較的近傍における爆轟ガスの膨張挙動と衝撃波伝播挙動については、カメラボックス 1 と 2 からの撮影の方が鮮明であるため、これらのデータを画像解析に用いた。

(3)爆轟生成ガスの膨張と衝撃波伝播の解析

図 4.1.3.4-5～図 4.1.3.4-8 は、高速度撮影の画像解析から得られた爆轟ガスの膨張と爆風の伝播挙動を示す。爆轟生成ガスと爆風ともに、高さと地表面に沿った水平方向の幅、さらには、爆点中心から地表面に沿った水平方向の半径について解析した。爆発の対称性が良好であれば、地表面に沿った水平方向の幅を 2 で除した値が地表面に沿った水平方向の半径になる。また、同図中には、4.1.3.2 爆風圧計測結果で示した近似式(3)をもとに、爆風の先頭位置も実線でプロットした。図 4.1.3.4-5 は実験 No.1-1 (EMX2 ; 0.625kg) の結果で、図 4.1.3.4-4 から分かるように、爆点近傍に模擬地形が存在するため、爆風について地表面に沿った水平方向の幅については、計測できないため●■について 10ms 以下の値しかない。爆点中心から地表面に沿った水平方向の半径については、模擬地形の反対側に伝播する爆風により計測した。15ms 以降の傾きから求めた伝播速度は 339.6m/s で音速 (湿度の影響を無視して概算で 9.7℃で 337.4 m/s) に近い状態で非常に緩慢に減衰していると考えられる。ショット時に大幅な天候の変化 (雨天も晴天もあった) があっても関わらず、爆風の伝播速度は近似式(3)とよく一致した。

これらの図は爆轟生成ガスと爆風挙動を示す。爆源の近傍 (時刻ゼロ付近) でいずれの図でも赤と青の凡例は重なっている。これは爆轟生成ガスの先頭に空気の圧縮された薄い層が生成している状態を示している。層幅は少しずつ拡大しながら伝播し、爆轟ガスから離脱していく。爆轟生成ガスは比較的爆源近傍で膨張がとまり (後述) 第一波の爆風生成過程を終える。さらに時間が経過し、遠くに伝播するに従い、爆轟ガスの先頭は空気と混合拡散するため、膨張から収縮への動きなど第 2 波へに影響を及ぼす過程までは高速度撮影で確認できない。なお、爆風圧測定においても大気圧を超える明確な第 2 波は確認されていない。

雨天でのショットであった実験 No.1-3 の高速度撮影結果を図 4.1.3.4-9 に示す。雨滴と爆風の干渉で半球状に広がる爆風を特別な画像処理なしで淡い白の分布で確認できる。同図(a)は爆風が爆轟生成ガスの極近傍で圧縮された状態であり、そのため爆風は確認されない。概ね同図(b)に垂直方向、水平方向ともに爆風の成長が始まる時刻である。垂直・水平方向以外では爆風と爆轟生成ガスはすでに離れており、この時刻では爆風先頭形状は半球ではない複雑な形状をしている。同図 (c) では爆風は爆轟生成ガスから完全に離脱して半球形状とる。なお、地表面では爆轟ガスよりも前方に広がる明確な白い領域が存在し、これは爆風と地表面水分との干渉による。この現象は爆風伝播計測のヒントになりうる。

図 4.1.3.4-10～図 4.1.3.4-14 に上記の解析結果をスケール化して示した。同図 10 と 11 は爆轟生成ガスに関するもので、概ね換算距離 $2.6 \text{ m/kg}^{1/3}$ でいずれの条件においても垂直方向、水平方向ともに一定になる。爆薬は板の上に置いただけで、地表面爆発に近い。EMX2 について同情報が整理された。同図 12 と 13 は爆風について整理した。いずれの実験条件も近似式(3) (スケール則) の結果と良好な一致を示していたことから予測はできたものの、スケール則が良く成立していることが確認できた。



実験 No.1-1 (EMX2 ; 0.625 kg)



実験 No.1-2 (EMX2 ; 5.00 kg)



実験 No.1-3 (EMX2 ; 9.77 kg)



実験 No.1-4 (EMX2 ; 40.0kg)

図 4.1.3.4-3 高速度撮影映像 0 度方向（観測所屋上から撮影）（左： $t=1$ ms、中： $t=2$ ms、右： $t=5$ ms）



実験 No.1-1 (EMX2 ; 0.625kg, カメラボックス 2 から撮影)



実験 No.1-2 (EMX2 ; 5.00 kg, カメラボックス 2 から撮影)



実験 No.1-3 (EMX2 ; 9.77 kg, カメラボックス 2 から撮影)



実験 No.1-4 (EMX2 ; 40.0kg, カメラボックス 1 から撮影)

図 4.1.3.4-4 高速度撮影映像 90 度方向から撮影 (左 : $t=1$ ms、中 : $t=2$ ms、右 : $t=5$ ms)

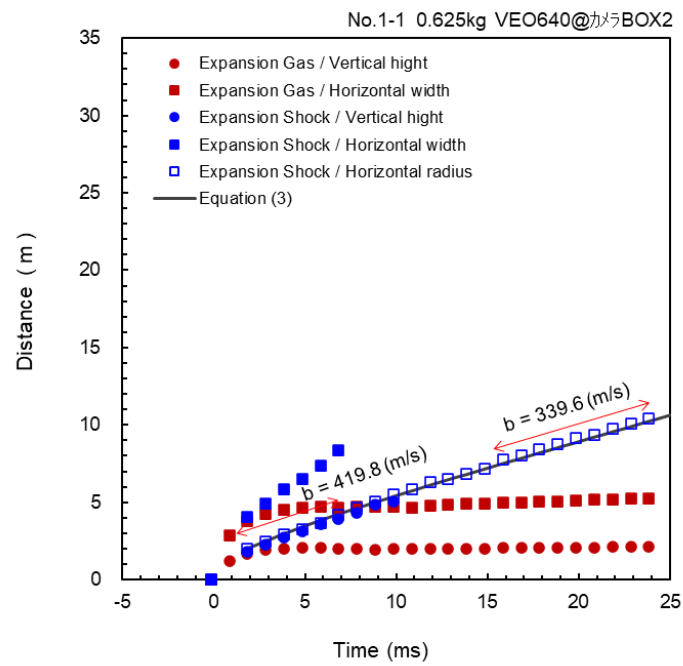


図 4.1.3.4-5 爆轟ガスの膨張と爆風の伝播挙動 (No.1-1 EMX2 ; 0.625kg)

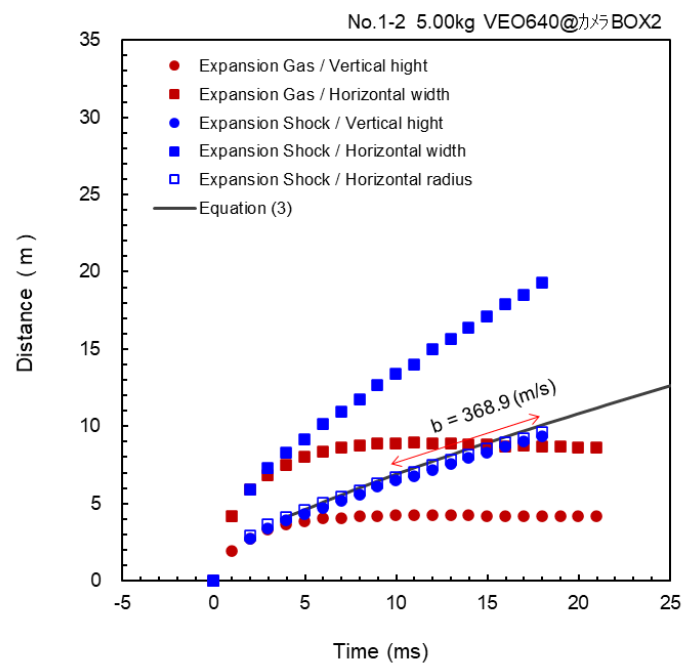


図 4.1.3.4-6 爆轟ガスの膨張と爆風の伝播挙動 (No.1-2 EMX2 ; 5.00 kg)

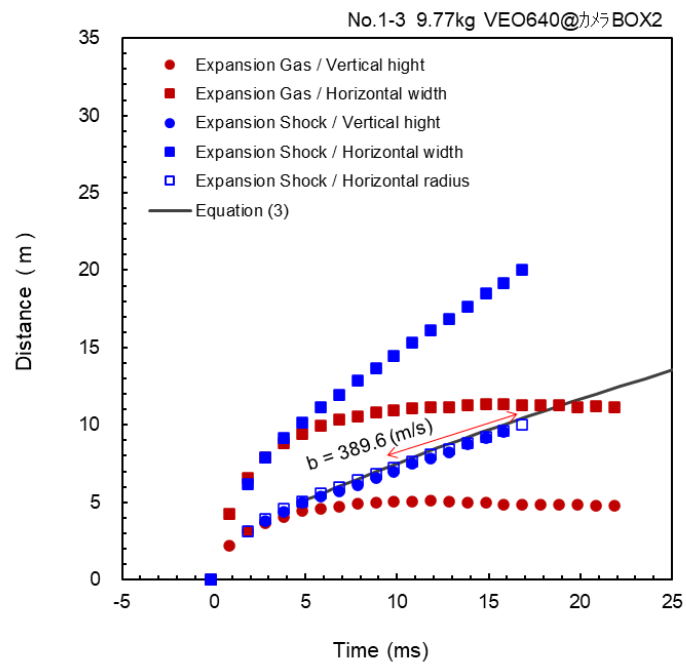


図 4.1.3.4-7 爆轟ガスの膨張と爆風の伝播挙動 (No.1-3 EMX2 ; 9.77 kg)

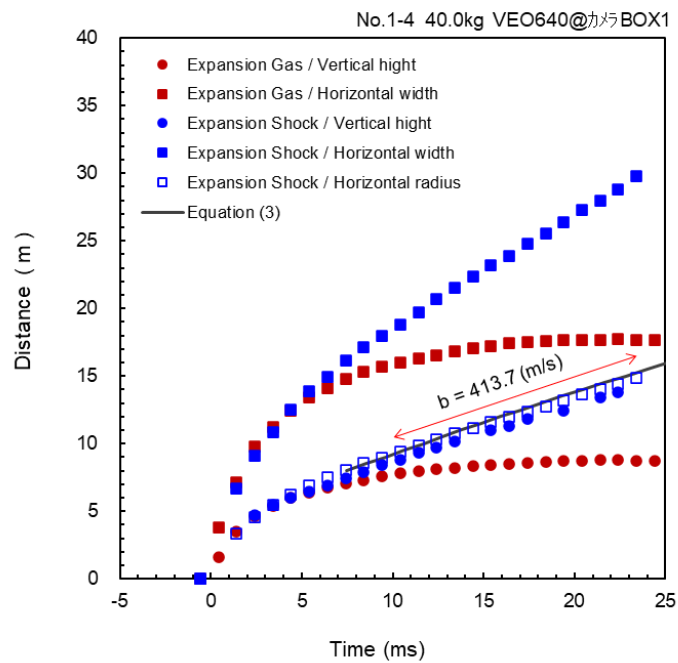


図 4.1.3.4-8 爆轟ガスの膨張と爆風の伝播挙動 (No.1-4 EMX2 ; 40.0 kg)



(a) 時刻 0.83 ms



(b) 時刻 2.83 ms



(c) 時刻 7.83ms

図 4.1.3.4-9 爆轟ガスの膨張と爆風の伝播挙動 (No.1-3 EMX2 ; 9.77 kg, 時刻 0.83, 2.83, 7.83 ms)

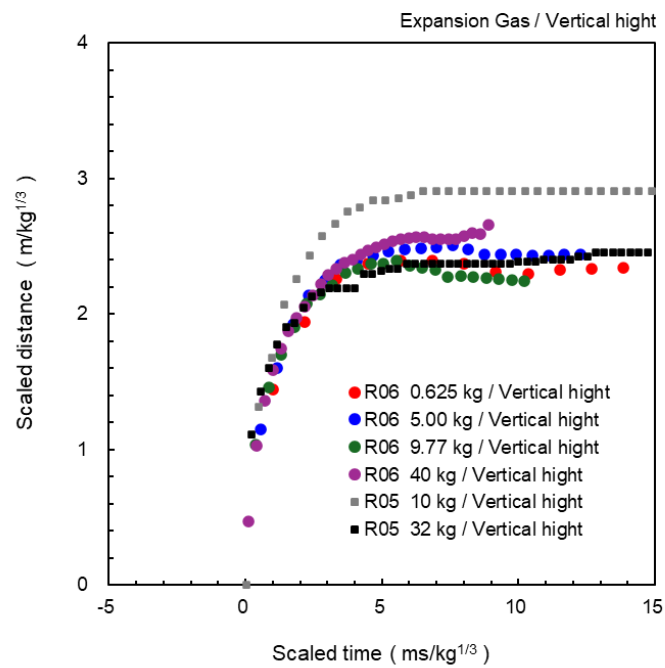


図 4.1.3.4-10 スケール化された垂直方向への爆轟ガスの膨張挙動 (No.1-1～No.1-4)

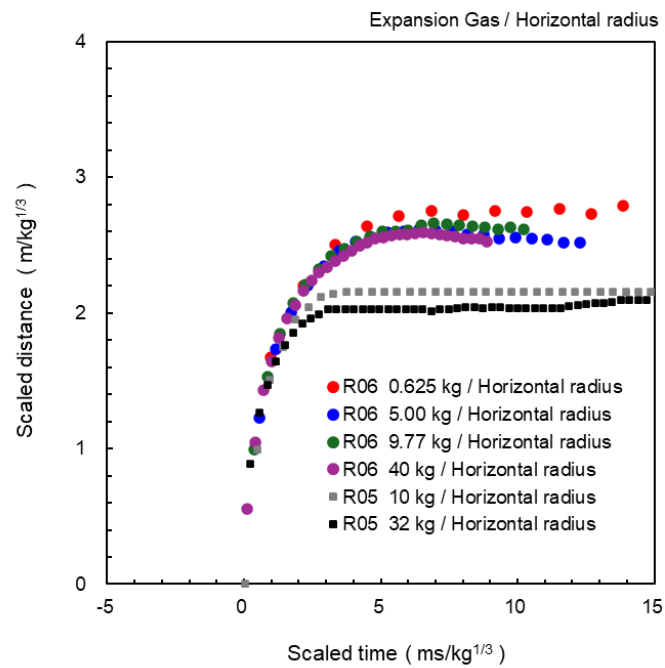


図 4.1.3.4-11 スケール化された水平方向への爆轟ガスの膨張挙動 (No.1-1～No.1-4)

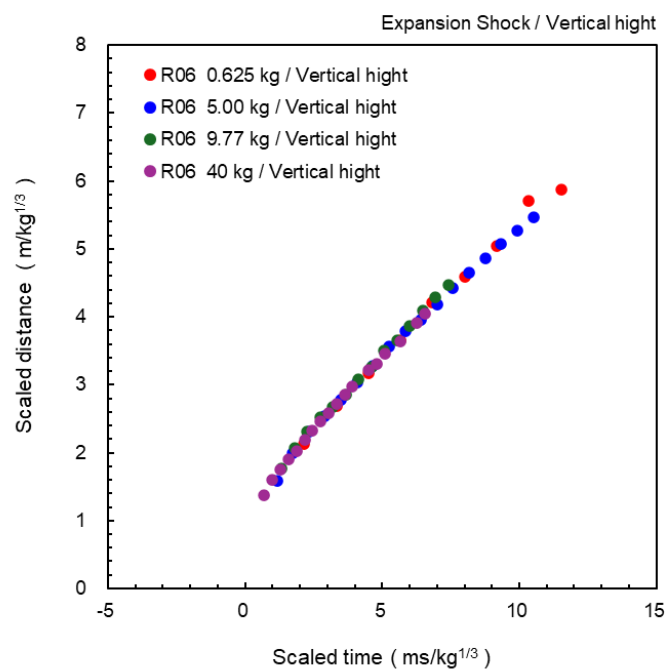


図 4.1.3.4-12 スケール化された垂直方向への爆風伝播挙動 (No.1-1～No.1-4)

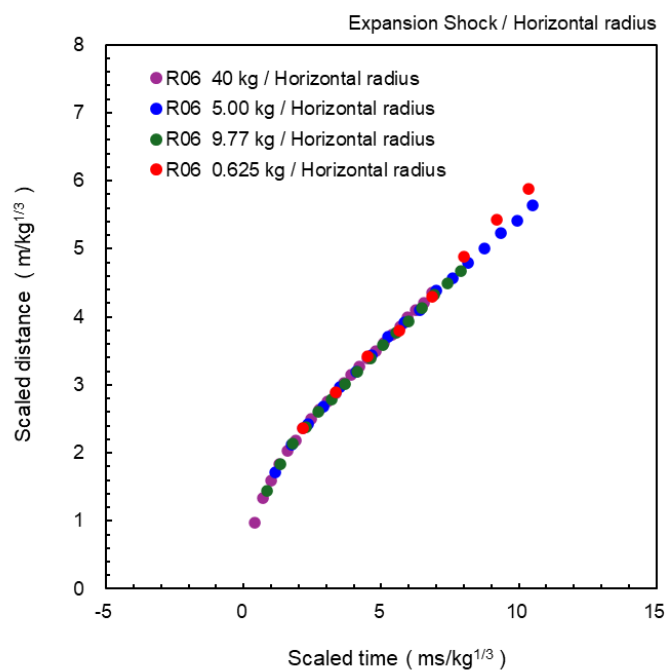


図 4.1.3.4-13 スケール化された水平方向への爆風伝播挙動 (No.1-1～No.1-4)

(4) 模擬地形を通過する爆風伝播の高速撮影

カメラボックス 3 (模擬地形からの距離は 47 m) は模擬地形を通過する爆風を撮影した。図 4.1.3.4-14 は模擬地形を通過する爆風の高速撮影結果を示す。唯一晴天下に実験ができた実験 No.1-4 の結果であり、模擬地形を通過する爆風の衝撃波面と斜面からの反射波を観測できた。図中に赤線で示すのは 70 ms から 10 ms 間隔で画像解析した結果である。模擬地形斜面に入射した爆風は頂点を通過した後に、疑似的に加速して見える。爆点は模擬地形から 45.6 m 離れた位置にあり、平面波に近い入射波で長さ 15 m の模擬地形と干渉する。その結果、爆点から 180 度方向 (伝播軸) に伝播する爆風は減速され、周囲の爆風の方が先に伝播するようになる。その結果、90 度方向に設置された高速カメラは伝播軸上になく衝撃波波面をとらえるため、疑似的に加速しているように見える。この影響は爆点が模擬地形に近いほど小さくなると考えられる。実験 No.1-1 について解析した結果を図 4.1.3.4-15 に示す。高速撮影からの解析では模擬地形に入射する爆風の伝播速度は 415.2 m/s、通過後は 383.2 m/s であった。一方、模擬地形背後に設置された爆風圧センサー (Ch.6 と Ch.7) の結果からの評価は 360.2 m/s で音波により近い値であった。爆風圧センサーを用いた評価の方が信頼性が高く、模擬地形に対して 90 度方向からの撮影で正確な伝播速度を求めるためには工夫が必要である。

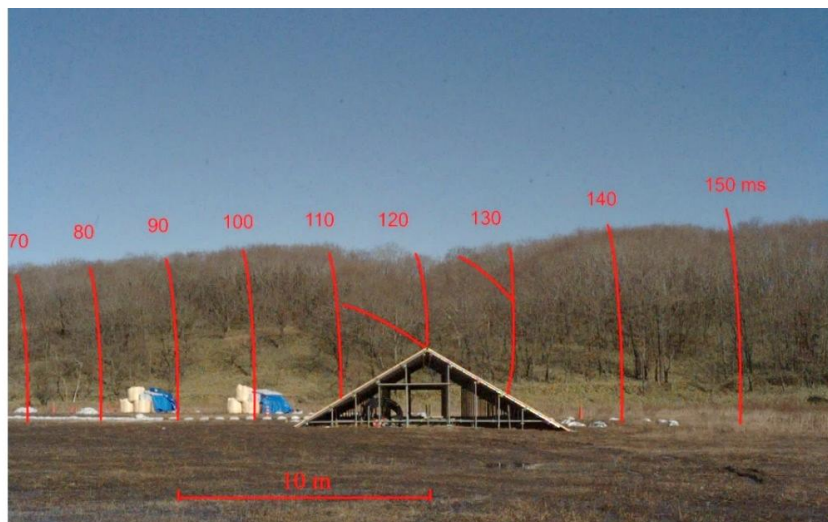


図 4.1.3.4-14 模擬地形を通過する爆風の高速撮影結果 (No.1-4 EMX2 ; 40.0 kg)

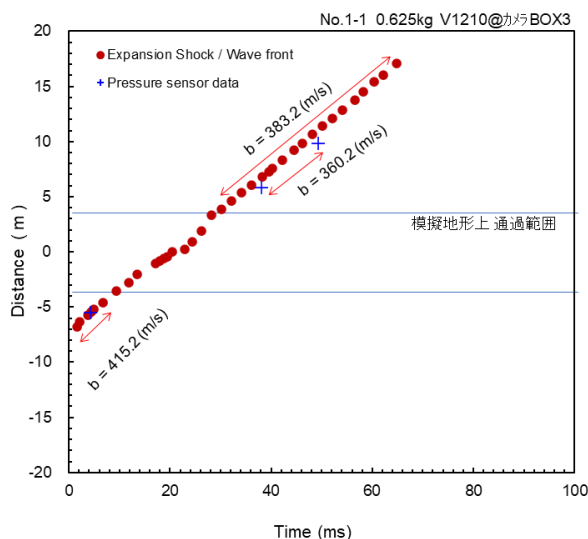


図 4.1.3.4-15 模擬地形を通過する爆風の伝播解析 (No.1-1 EMX2 ; 0.625kg)

高速度カメラ撮影まとめ

地表面爆発の条件で、爆轟生成ガスと爆風挙動はスケール則を良好に反映していた。具体的には、爆轟生成ガスの膨張については、爆源から概ね換算距離 $2.6 \text{ m/kg}^{1/3}$ でいずれの実験条件でも鉛直方向、水平方向ともに一定になる結果を確認した。模擬地形真横からの撮影では、模擬地形を通過した後の爆風伝播挙動を正確には捉えられなかった。一方、模擬地形上を伝播する爆風と斜面からの反射波の撮影に成功した。

4.1.3.5 騒音計測結果

騒音計測で使用した機器はマイクロフォン（PCB 社 377C01）、精密騒音計（ブリュエル・ケアー社 BK2250）、普通騒音計（テスト社 TESTO816-1）である。表 4.1.3.5-1 に観測所内外のマイクロフォンで計測した騒音計測結果を示す。図 4.1.3.5-1 にその音圧波形を示す。縦軸は音圧（Pa）、横軸はトリガーからの時間（秒）である。Ch1 は観測所脇の屋外で爆発音をそのまま記録し、Ch2 は観測所の中で防護壁や窓を通した爆発音を記録したものである。なお、マイクロフォンによる計測では点火トリガーで記録開始し、2 秒間記録した。室外に設置した Ch1 について No.1-1～1-3 の波形には波形先頭に急峻な立ち上がりが確認され爆風圧の性質が残っている。Ch2 はすべて緩慢な立ち上がりを持った圧力波である。

表 4.1.3.5-2 に Ch3～Ch6 で計測された爆発音のピーク騒音レベルを示す。Ch3 は観測所の脇の屋外（Ch2 と同じ場所）に設置し、Ch4 は本部に、Ch5 は警戒点・着陸場（爆点から約 2.3 km）、Ch6 は警戒点・フッポウシ三叉路（爆点から約 3.3 km）にそれぞれ計測器を設置した。Ch3 と Ch4 は精密騒音計を、Ch5 と Ch6 は普通騒音計を用いた。Ch3～Ch6 の記録は点火 1 分前から開始し、爆発音を確認して記録を終えた。図 4.1.3.5-2 から図 4.1.3.5-4 に騒音波形を示す。騒音のレベルに応じて、Ch3 と Ch4 の縦軸は音圧（Pa）とし、Ch5 と Ch6 の縦軸は A 特性騒音レベル（dB）で表示した。

Ch3 は Ch2 と同じ位置で計測したため、両結果は同様な音圧波形が得られた。ただし、No.1-4 は計測範囲をオーバーした。本部で計測した結果（Ch4）は Ch3 と同様な傾向をもって、全体的に半分程度以下に圧力が減衰した波形であった。

図 4.1.3.5-4 は警戒点（Ch5、Ch6）で計測した騒音レベル波形である。図中に赤矢印は爆発音が計測点に到達したと予想される時刻である（測定時間からの推測）。No.1-1 および 1-2 のグラフでは、爆発音小さいために、到達時刻が明確には分らない。薬量 5 kg 以下では爆発音と環境音（風雨の音や車の通行音など）以下となった。No.1-3 および No.1-4 では爆発音と判別できる測定結果が得られた。しかし、環境音が大きい Ch5 の No.1-4 の結果は到達時刻の判別が難しい。言い換えると爆発音が大きく減衰していると言える。Ch5 と Ch6 で遠いほうの Ch6 のほうが高い値になったのは、爆点から現地までの高低差や木々の量といった地形の影響を強く受けていると考えられる。

表 4.1.3.5-1 マイクロフォンによる騒音計測結果

実験 No.	距離 m	薬種	薬量 kg	換算薬量 $\text{m/kg}^{1/3}$	ch1 到達時間 ms	ch1 ピーク圧 Pa	ch2 ピーク圧 Pa
No.1-1	342	EMX2	0.625	400	1.001	122.4	54.1
No.1-2	328	EMX2	5.0	192	0.955	282.1	185.5
No.1-3	321	EMX2	9.77	150	0.944	301.7	208.9
No.1-4	301	EMX2	40.0	88	0.874	584.9	460.0

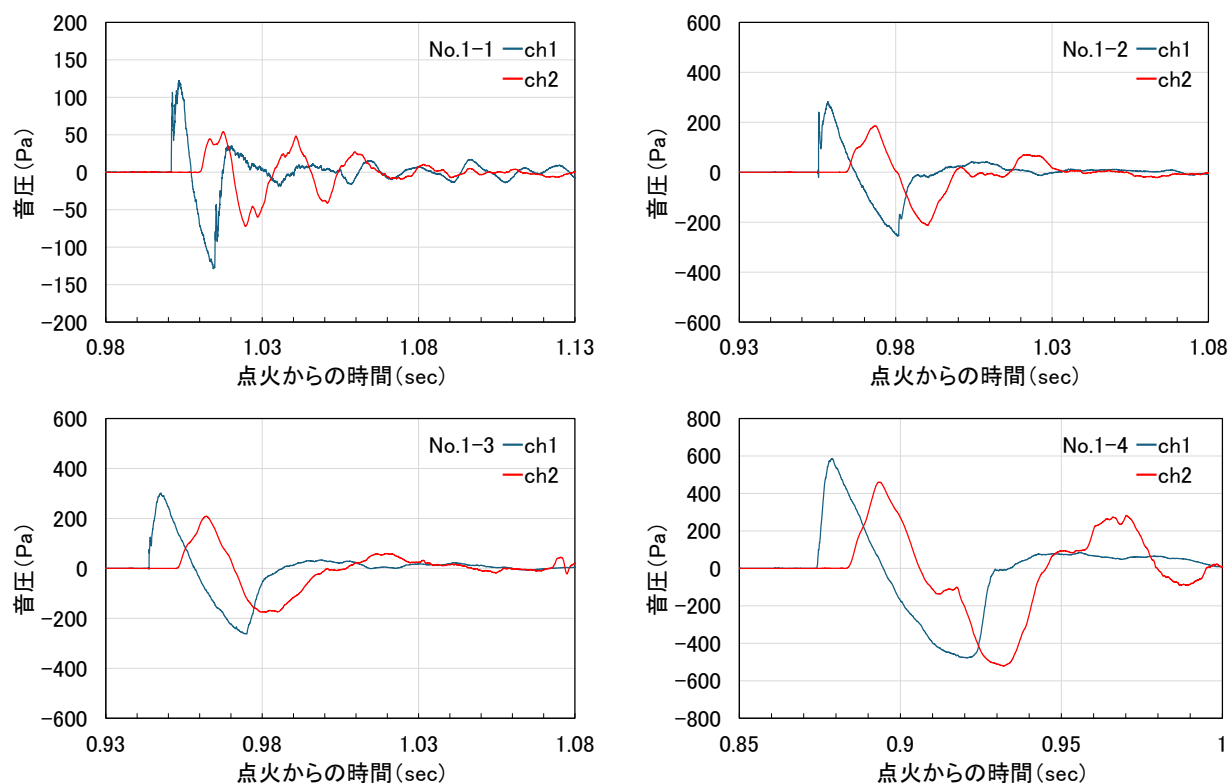


図 4.1.3.5-1 観測所で計測したマイクロフォン音圧波形

表 4.1.3.5-2 騒音計による計測結果

実験 No.	薬量 (kg)	ピーク騒音レベル (dB)			
		ch3	ch4	ch5	ch6
No.1-1	0.625	128.4	131.1	54.8	58.5
No.1-2	5.00	139.2	134.9	57.1	57.4
No.1-3	9.77	140.3	130.6	58.5	69.0
No.1-4	40.0	over 144*	138.5	62.1	73.2

* : 機器の計測範囲オーバー

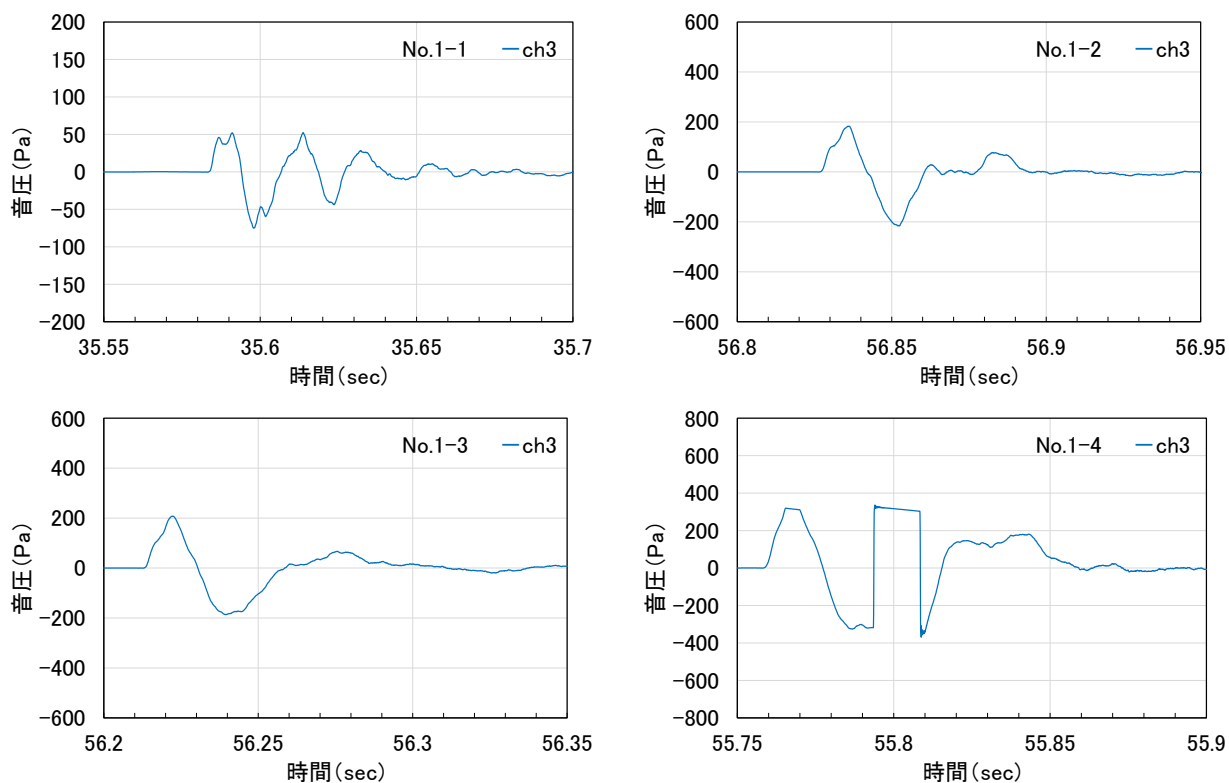


図 4.1.3.5-2 観測所の騒音計 BK2250 (Ch3) で計測した音圧波形

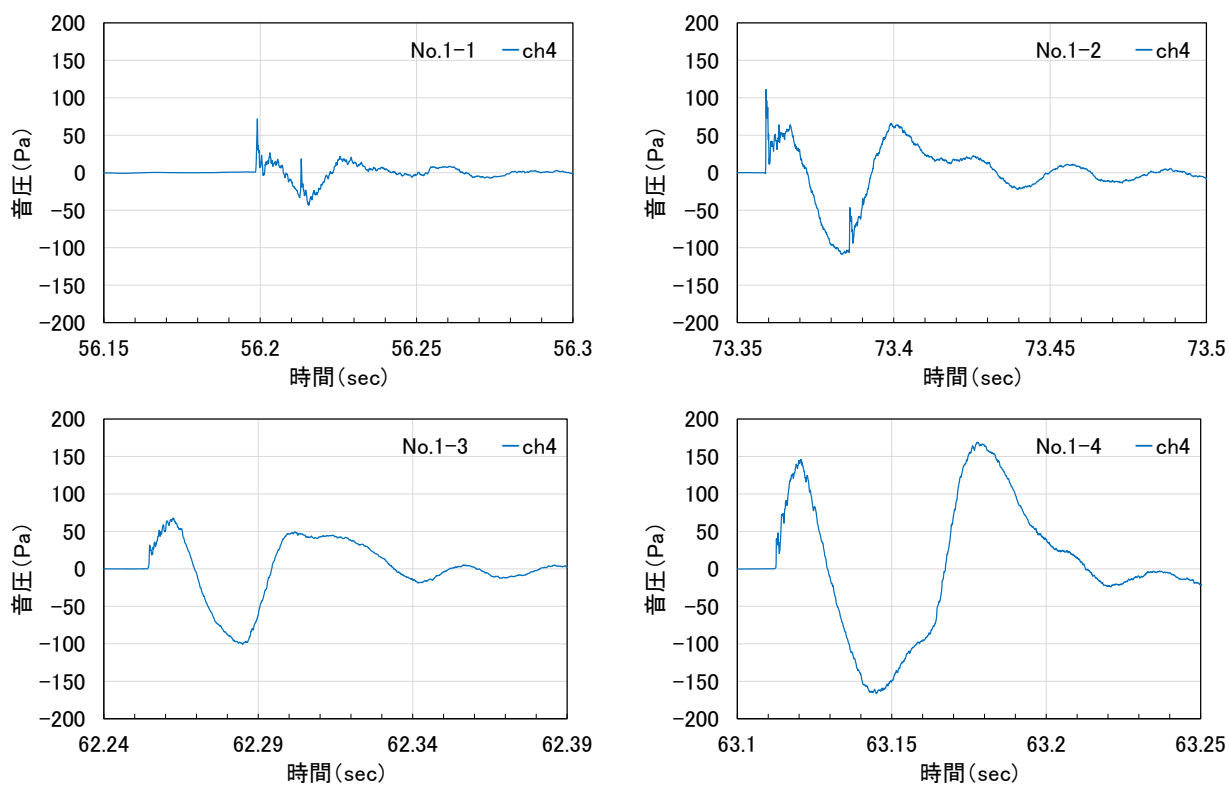


図 4.1.3.5-3 本部の騒音計 BK2250 (Ch4) で計測した音圧波形

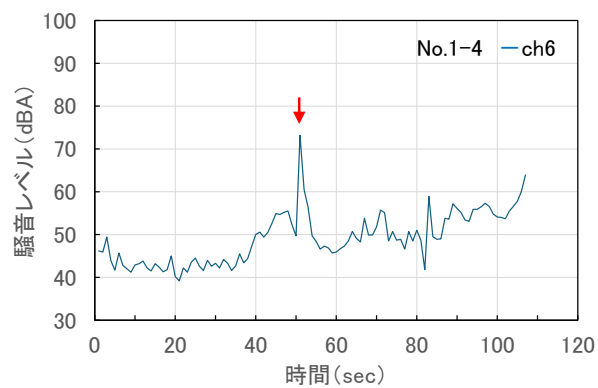
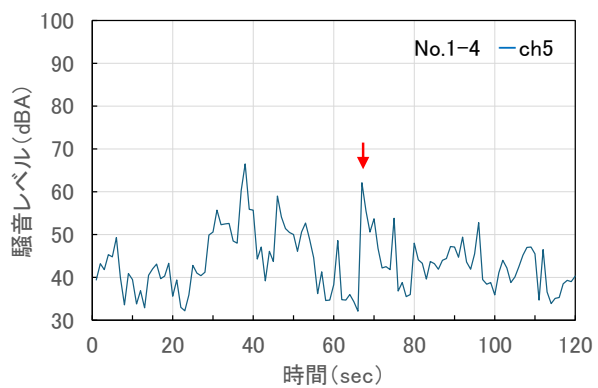
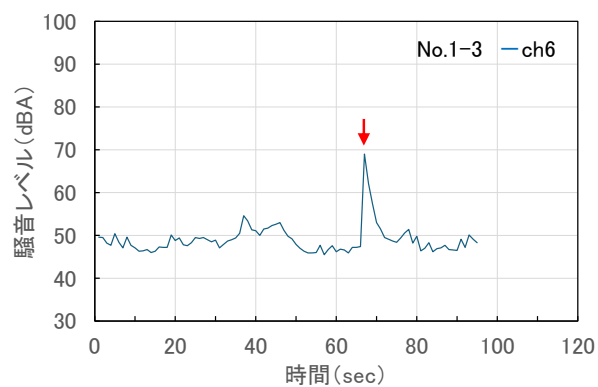
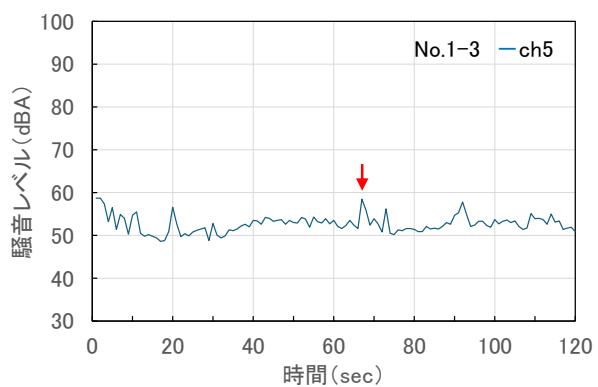
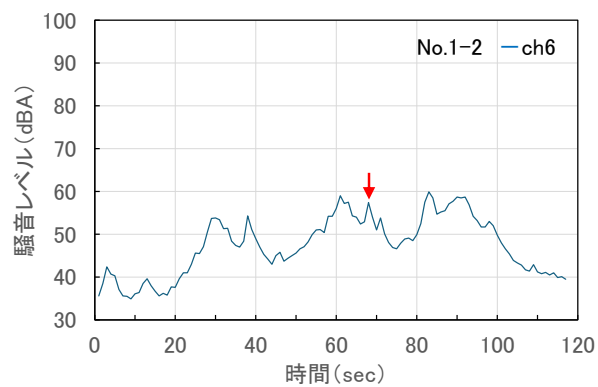
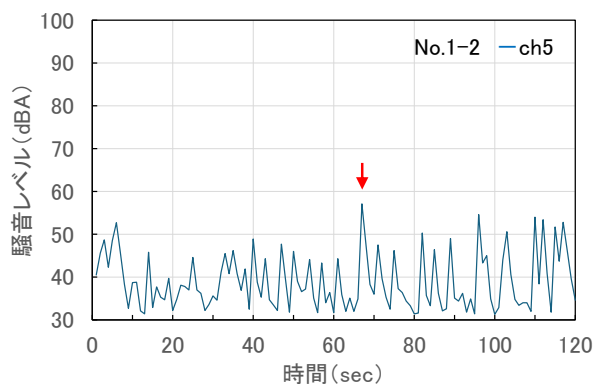
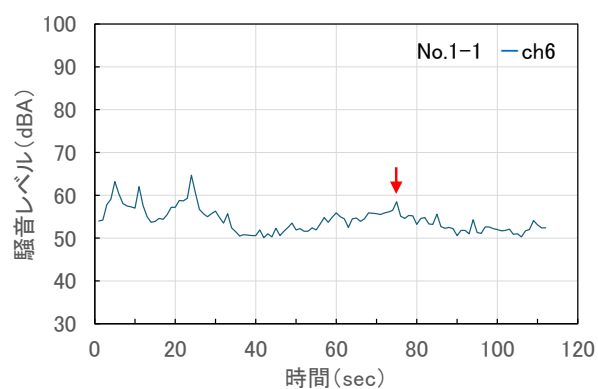
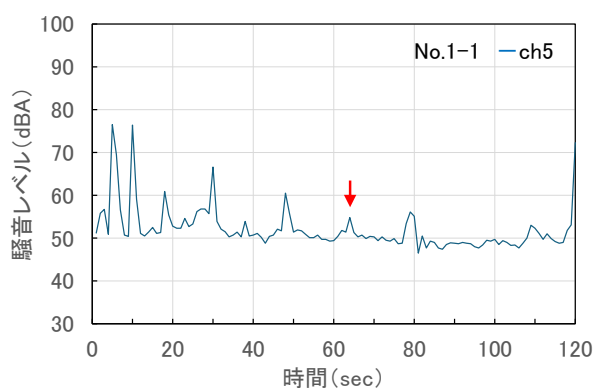


図 4.1.3.5-4 警戒点 ((Ch5、Ch6) で計測した騒音レベル波形

騒音計側まとめ

- ・観測所、本部にてマイクロフォンおよび精密騒音計を用いて騒音計測を行い、音圧波形を取得できた。
- ・遠方の警戒点（爆点から 2.3 km 地点および 3.3 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、計測結果も火薬学会が提唱している発破騒音の許容値 100 dB（A 特性、表 4.1.3.6-2 では LAeq）と比較して、騒音的に問題ない値であることが確認できた。

4.2 総合考察

実験 No.1 地形が爆発影響低減に及ぼす効果に関する実験

火薬庫等の周囲の地形が爆風圧の低減に及ぼす効果を確認し、適切な保安距離の設定に資するデータを取得するため、含水爆薬 0.625 kg、5 kg、9.77 kg 及び 40 kg を用いて全 4 回の実験を行い、高さ 2.5 m、傾斜角 30 度の小スケールの模擬地形による爆風圧の減衰状況の計測に加えて、地盤振動、衝撃波伝播状況等の爆発影響データを取得した。火薬庫等の実規模を 40 トンとすると、模擬地形の実高さは、含水爆薬の量に応じて、それぞれ 100 m, 50 m, 40 m, 25 m である。なお、模擬地形の直後が換算距離 $16 \text{ m/kg}^{1/3}$ となる位置にセンサーを配置した。

爆風圧計測の結果からは、地形の影響を受けない計測点（ch1～ch5）の爆風パラメータが EMX2 を用いた過去 7 年（11 ショット分）の実験データと同等であることが確認された。以下の知見が得られた。

1) ピーク静水過圧基準に対する地形の高さ効果

模擬地形における爆風の反射と回折に伴うピーク静水過圧の低減効果が得られ、地形が大きいほどその効果は高かった。具体的には、換算距離 $16 \text{ m/kg}^{1/3}$ の位置において、実高さ 100 m の地形では基準爆風圧の 52%、高さ 50 m の場合は 71% であった。実規模高さ 25 m と 40 m において同等の薬量換算比 EP に収束したかのような結果となり、ピーク静水過圧の低減効果を詳細に議論するためには、25 m よりも低い地形を用いた検証実験が必要と考えられる。

2) 換算正圧相インパルス基準に対する地形の高さ効果

地形における爆風の反射と回折に伴う換算正圧相インパルスの低減効果が得られ、地形が大きいほど爆風低減効果は高かった。具体的には、換算距離 $16 \text{ m/kg}^{1/3}$ の位置において、実高さ 100 m の地形では基準爆風の値に対して 60% 程度と大きい減衰を確認した。

地盤振動計測の結果は以下の通りであった。

地形背後では伝播する爆風が低減されることに伴い、地盤振動の減衰も期待されることから地形背後の換算距離 $16 \text{ m/kg}^{1/3}$ の位置において地盤振動を計測した。しかしながら同計測点の地盤振動は大幅に増加する結果であった。他計測点との比較により、降雨の影響によるセンサー異常の可能性が高く実際の地盤振動影響を反映していないと推定した。降雨の影響が比較的少ない計測点でのデータについては、多くの結果は Westine の岩石と土壌における地盤振動減衰曲線の間に収まった。

高速度撮影の結果からは、以下の知見が得られた。

地表面爆発の条件で、爆轟生成ガスと爆風挙動はスケール則を良好に反映していた。具体的には、爆轟生成ガスの膨張については、爆源から概ね換算距離 $2.6 \text{ m/kg}^{1/3}$ でいずれの実験条件でも垂直方向、水平方向ともに一定になる結果を確認した。模擬地形真横からの撮影では、模擬地形を通過した後の爆風伝播挙動を正確には捉えられなかった。一方、模擬地形上を伝播する爆風と斜面からの反射波の撮影に成功した。

以上のことから、模擬地形の影響がない計測点で得られた爆風パラメータは、基準爆発実験データとして使用可能と考える。今年度検討した形状の模擬地形について、一定程度の爆発影響低減効果は確認できた。地盤振動計測結果には一部課題を残した。高速度撮影は精密な計測であることを実証した。地形の影響を評価するにはさらなる実験条件の検討が必要である。

第 5 章 爆発影響低減化実験（室内実験）

5.1 目的

爆発影響低減化実験（野外実験）の補完を目的として、模擬地形が爆風の威力に与える影響を調査する室内実験を実施した。

5.2 実験方法

5.2.1 模擬地形試験体

地形は 2 次元形状とし、断面は斜面 30 度の二等辺三角形とした。地形の高さは 73 mm と 146 mm の 2 通り、地形の位置は K 値 5, 8, 13, 14, 16 の直前に設定する 5 通りの実験を行った。

実験は総数 20 ショットで、すべて産総研つくば中央事業所 5 群内 5-2C 棟（大ピット）で実施した。地上式火薬庫の近傍にある山状の地形について、地形の高さおよび位置が爆風低減に与える影響を検討した。縮小スケールは 400 分の 1 とし、PETN/C ペレット 1.00 g の爆発で生じた爆風の圧力履歴の波形を取得し、爆風の威力を測定した。

5.2.2 想定する施設と供試火薬、保安距離の考え方

地上式火薬庫に爆薬が 40 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。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 5, 8, 14, 16 である。火薬庫の近傍には山状の地形が存在しているものとする。地形は 2 次元形状であり、断面は斜面 30 度の二等辺三角形とする。地形の高さは 25 m と 50 m を想定する。また、地形が K 値 5, 8, 14, 16 の直前にあることを想定する。

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、室内実験では PETN/C ペレットを使用した。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/cm³、1 つあたりの重量は 0.50 ± 0.00 g であった。図 5-1 に示すように、ペレット 2 個（1.00 g）と小型電気雷管 2 型（昭和金属工業株式会社製）をエポキシ樹脂で接着することで使用した。

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。0.50 g の PETN/C ペレット 2 個を使用するとき、TNT 換算薬量は 1.33 g である。また、小型電気雷管 2 型は TNT 換算薬量は 0.10 g であるため、供試火薬全体の TNT 換算薬量は 1.43 g である。

5.2.3 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.0：爆薬のみで地形がない状態での爆風の測定）、地形の高さを変えた場合（No.1-1、No.1-2 それぞれ野外実験 No.1-2、No.1-4 の縮小実験）、地形の設置位置を変えた場合（No.2-1～2-5）を実施した。

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。

供試火薬であるペレットと雷管は、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0.5 mm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た。

表 5-1 実験項目

実験 番号	Shot 数	内容	想定する 地形の 高さ [m]	地形の高さ [mm]	爆点から 地形までの 距離 [mm]	備考
No. 0	3	基準	—	—	—	
No. 1-1	2	野外実験 No.1-2 の 縮小実験	50	146	1035	
No. 1-2	2	野外実験 No.1-4 の 縮小実験	25	73	1318	
No. 2-1	2	地形が K 値 5 の直前	25	73	218	奥行き拡大
No. 2-2	2	地形が K 値 8 の直前	25	73	518	奥行き拡大
No. 2-3	2	地形が K 値 13 の直前	25	73	1018	奥行き拡大
No. 2-4	2	地形が K 値 14 の直前	25	73	1118	奥行き拡大
No. 2-5	2	地形が K 値 16 の直前	25	73	1318	奥行き拡大
合計	16					

5.2.4 供試火薬類

図 5-1 に爆薬の寸法を、図 5-2 に装薬状況を示す。

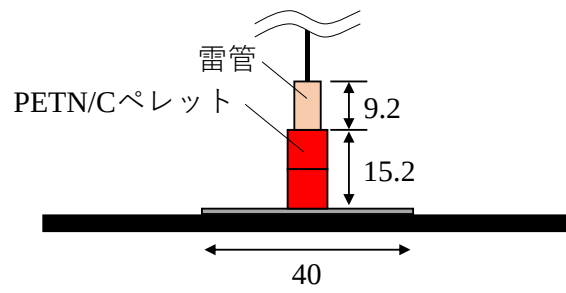


図 5-1 爆薬の寸法



図*-2 装薬状況

5.2.5 地形と実験台の配置

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 5-3 ~ 5-9 に実験台の平面図および地形の寸法を示す。爆薬から距離 $r = 0.400 \sim 1.600$ m の範囲に圧力センサーを配置した。この距離は薬量 1.00 g で換算すると $4.00 \sim 16.00 \text{ m/kg}^{1/3}$ となる。地形は傾斜角 30 度の 2 次元形状の山とした。想定山高さ 50 m (No. 1-1) および想定山高さ 25 m (No. 1-2) の地形が第 4 種保安物件である K 値 16 の直前にある場合、想定山高さ 25 m の地形が K 値 5 (No. 2-1)、K 値 8 (No. 2-2)、K 値 13 (No. 2-3)、K 値 14 (No. 2-4)、K 値 16 (No. 2-5) の直前にある場合について実験を実施した。実験シリーズ No. 2 については、爆風の回り込みの影響を除くため、地形の奥行きを 2000 mm とした。

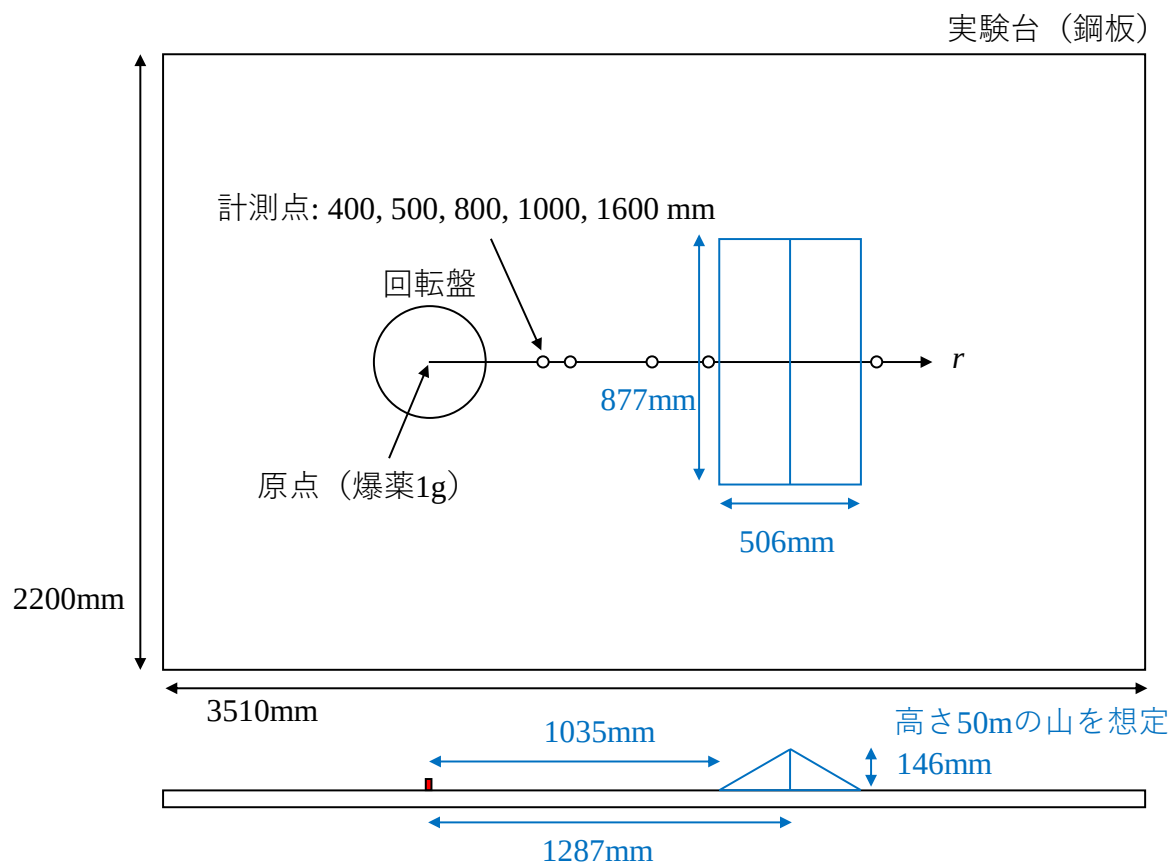


図 5-3a 実験台の配置 (No. 1-1)

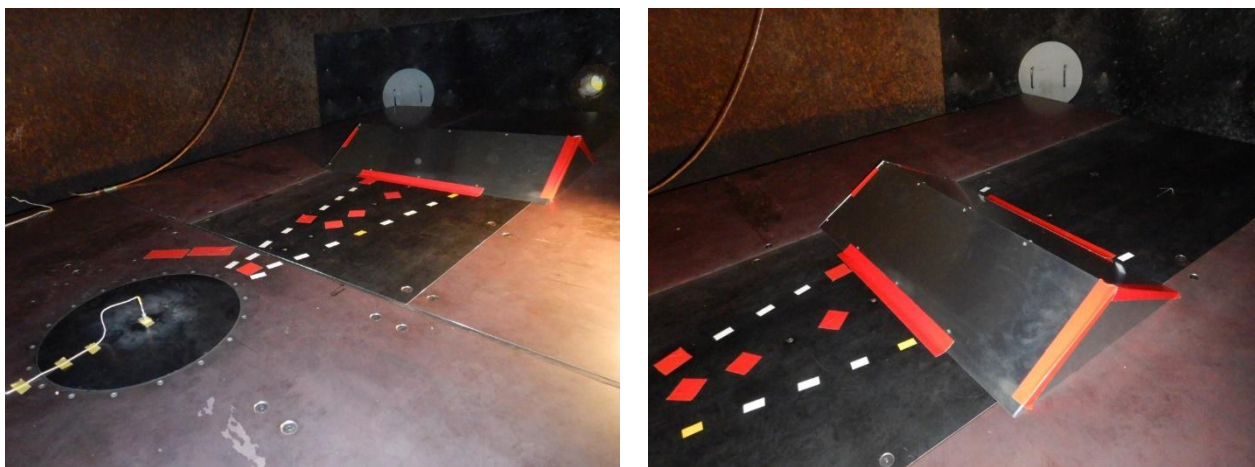


図 5-3b 実験台の写真 (No. 1-1)

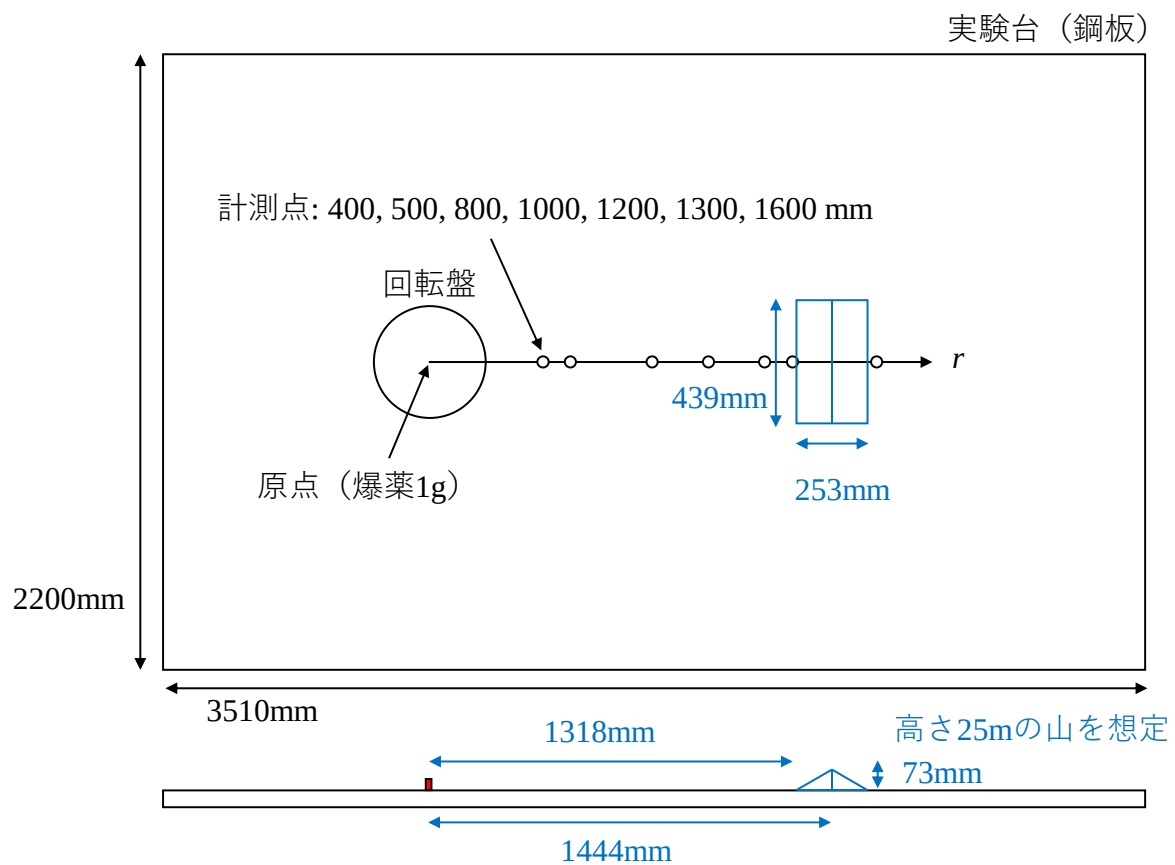


図 5-4a 実験台の配置 (No. 1-2)

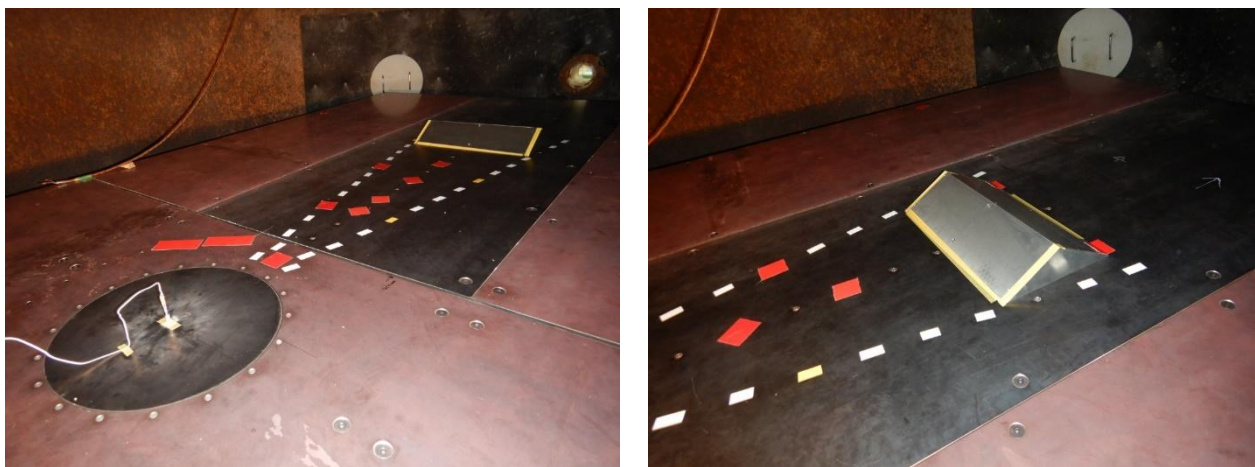


図 5-4b 実験台の写真 (No. 1-2)

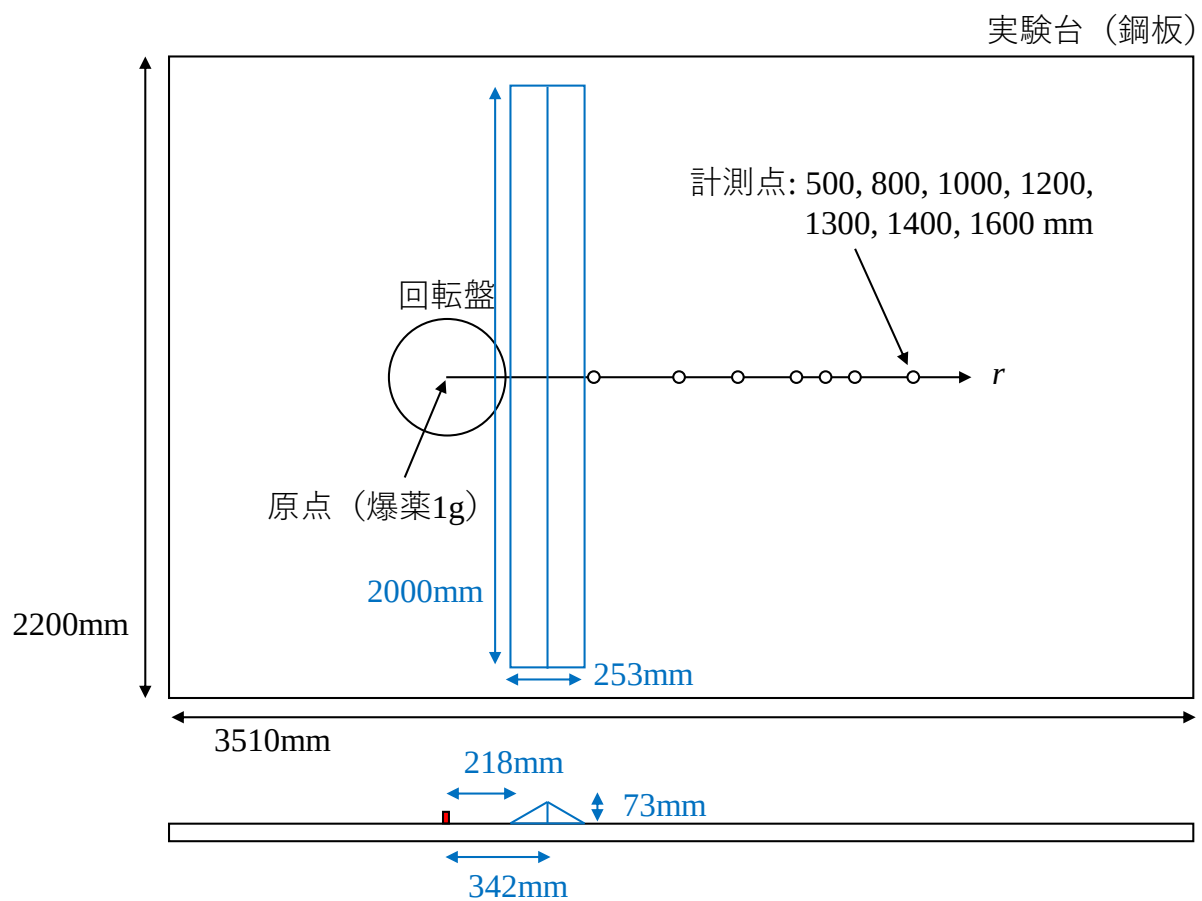


図 5-5a 実験台の配置 (No. 2-1)

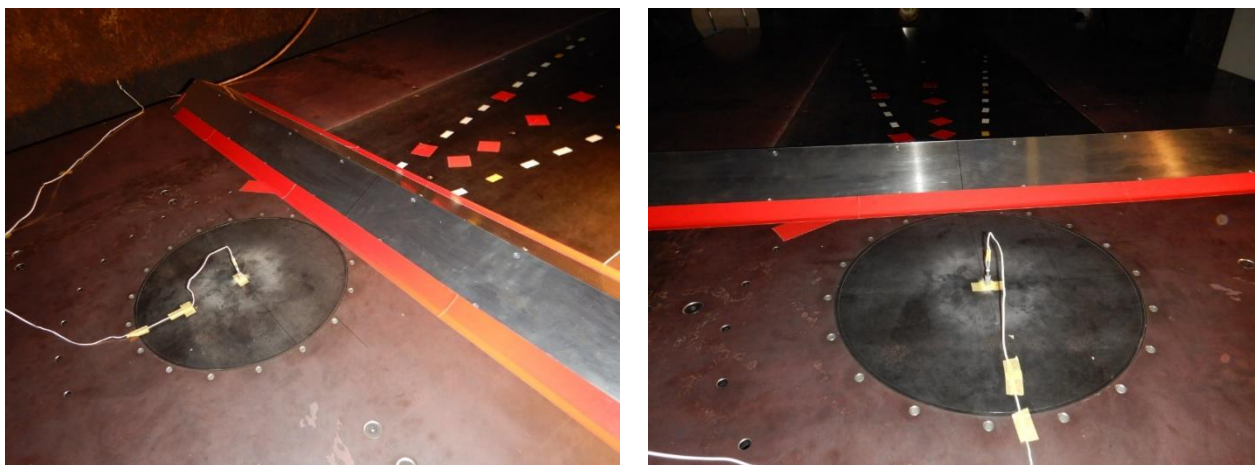


図 5-5b 実験台の写真 (No. 2-1)

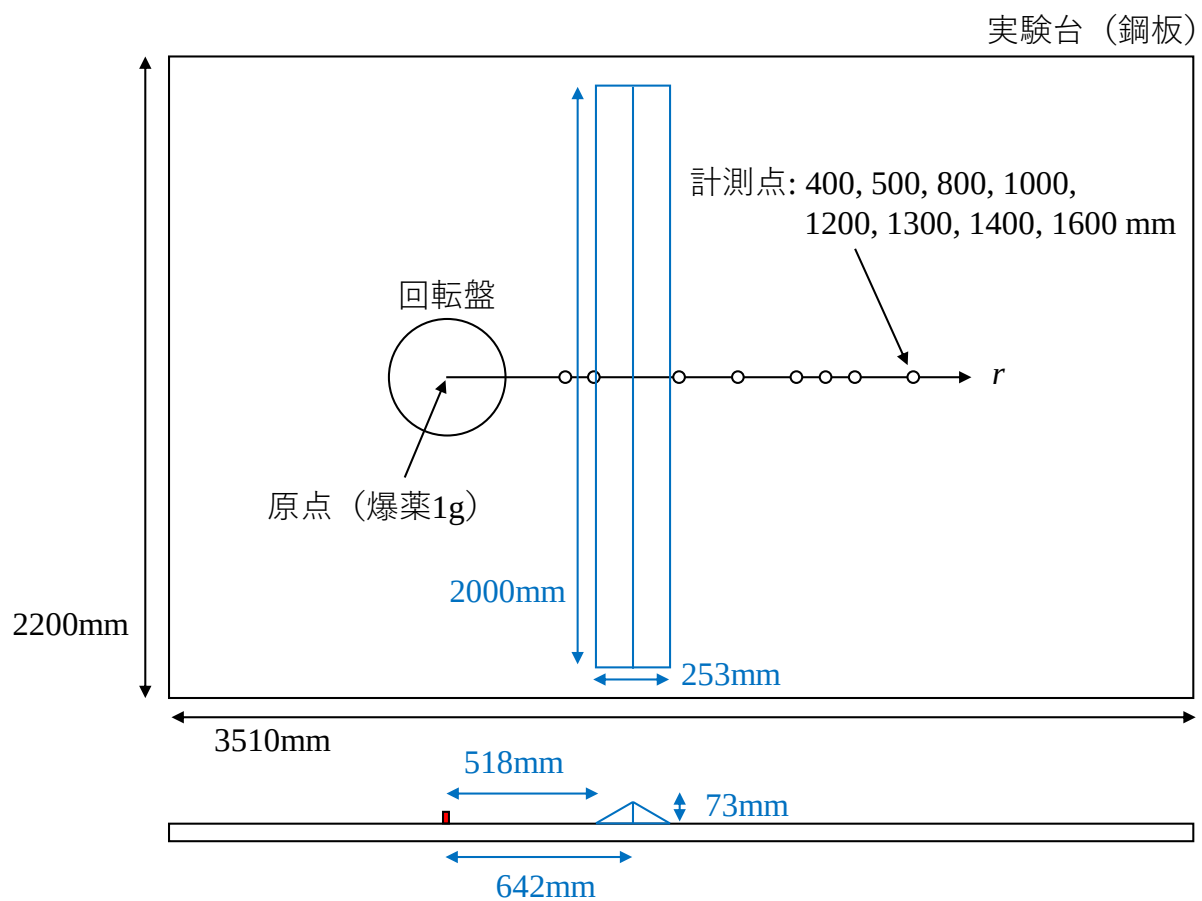


図 5-6a 実験台の配置 (No. 2-2)



図 5-6b 実験台の写真 (No. 2-2)

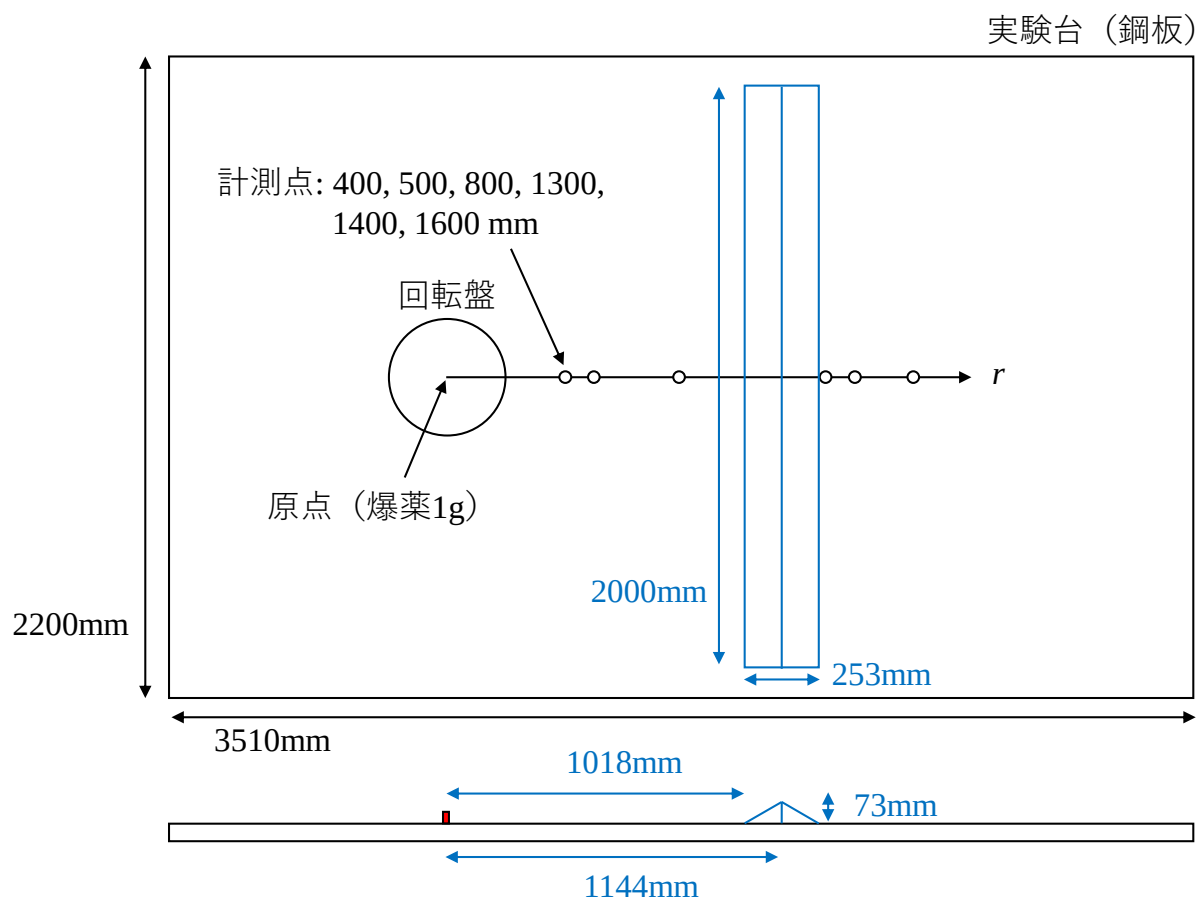


図 5-7a 実験台の配置 (No. 2-3)



図 5-7b 実験台の写真 (No. 2-3)

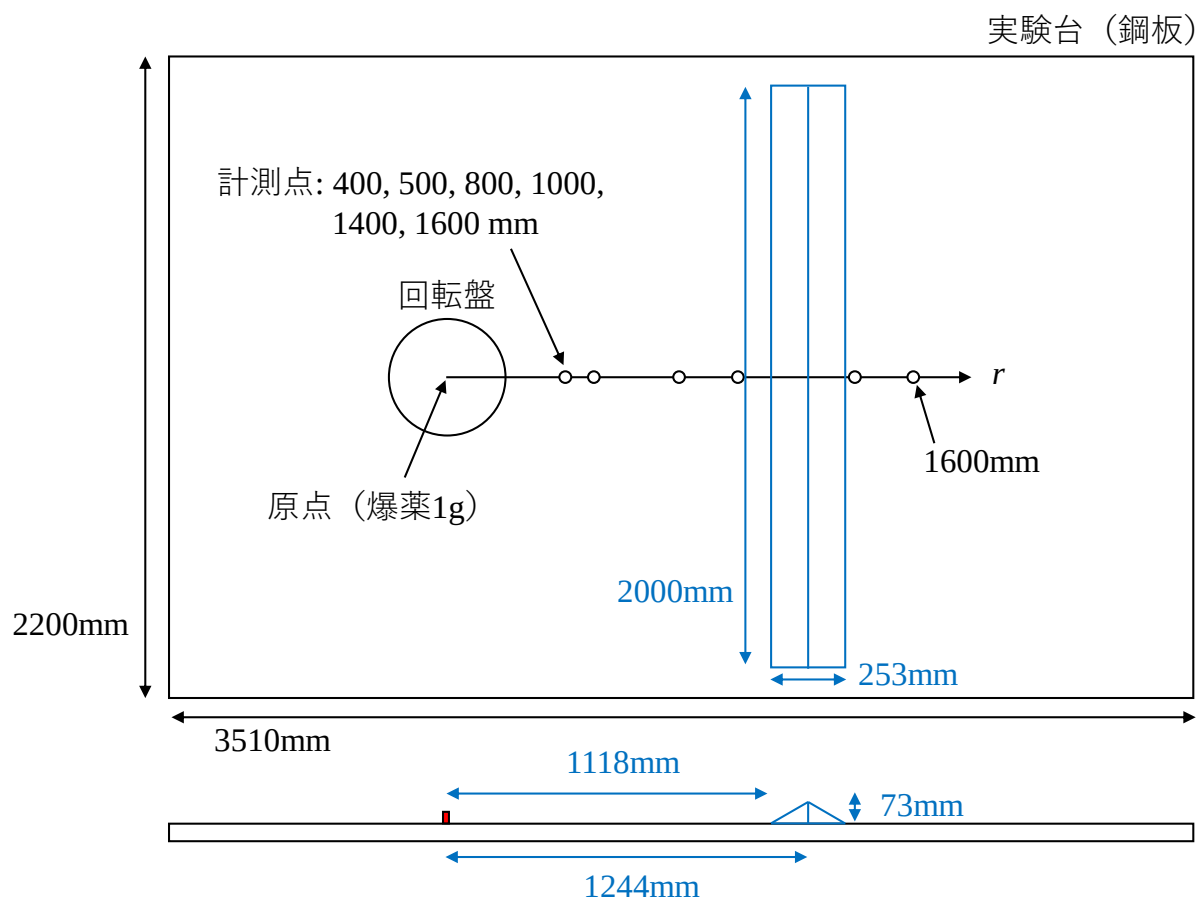


図 5-8a 実験台の配置 (No. 2-4)

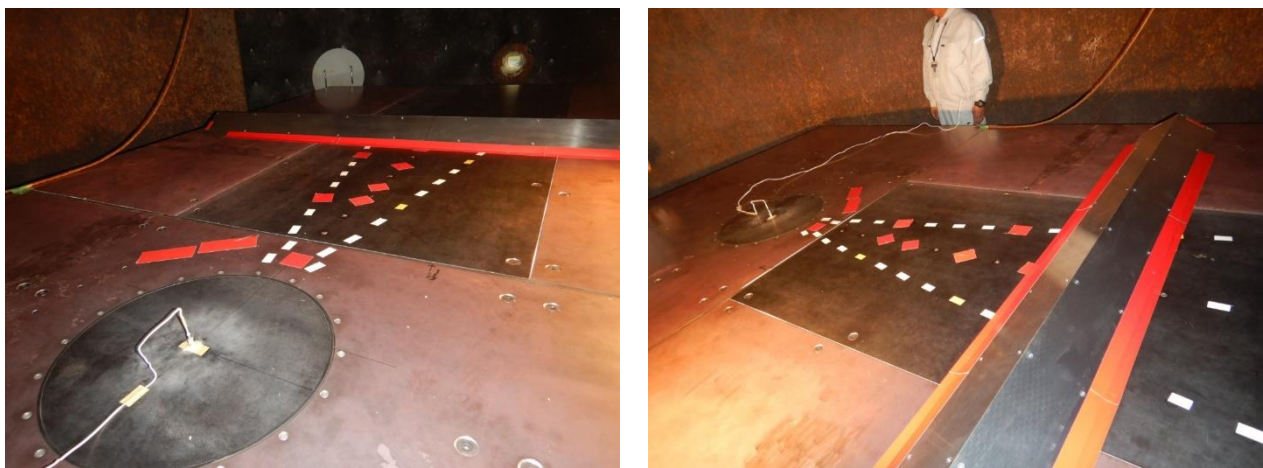


図 5-8b 実験台の写真 (No. 2-4)

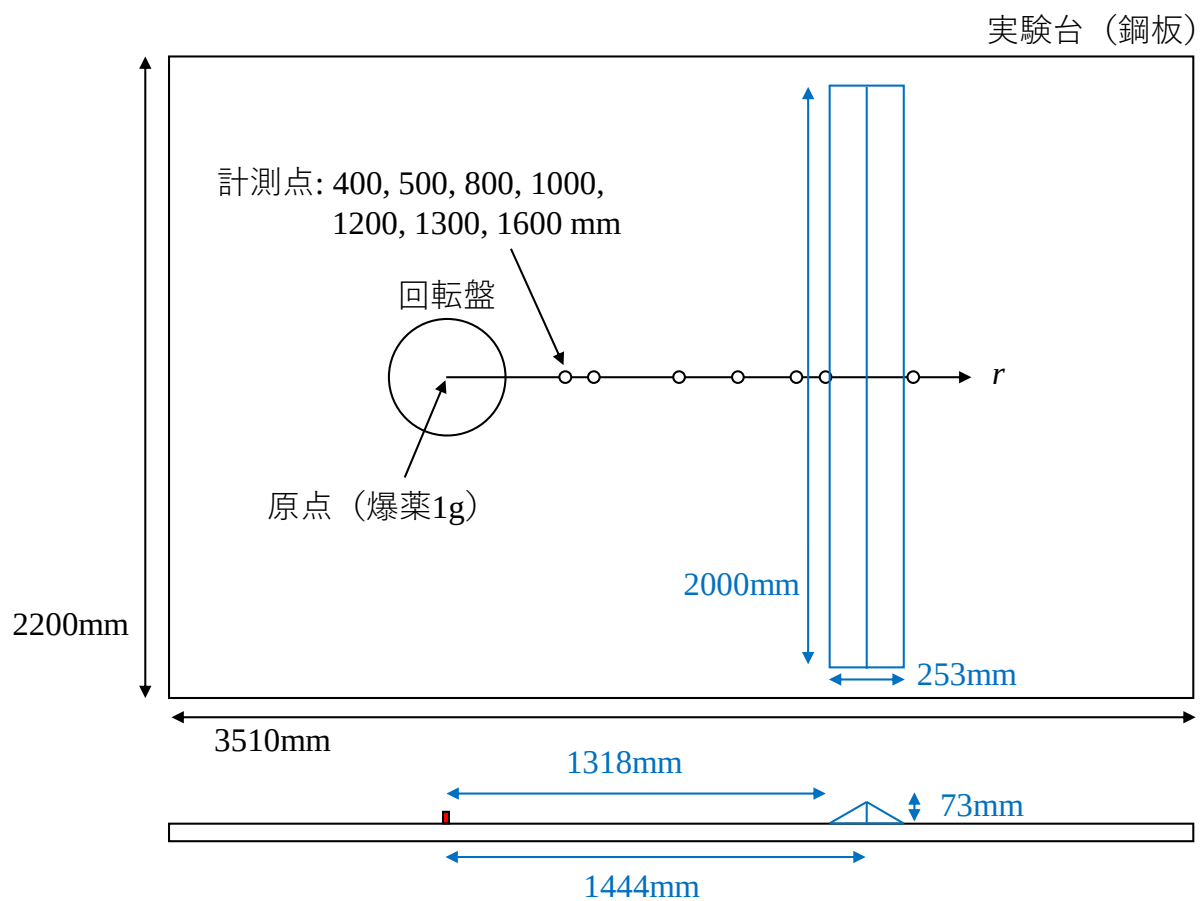


図 5-9a 実験台の配置 (No. 2-5)

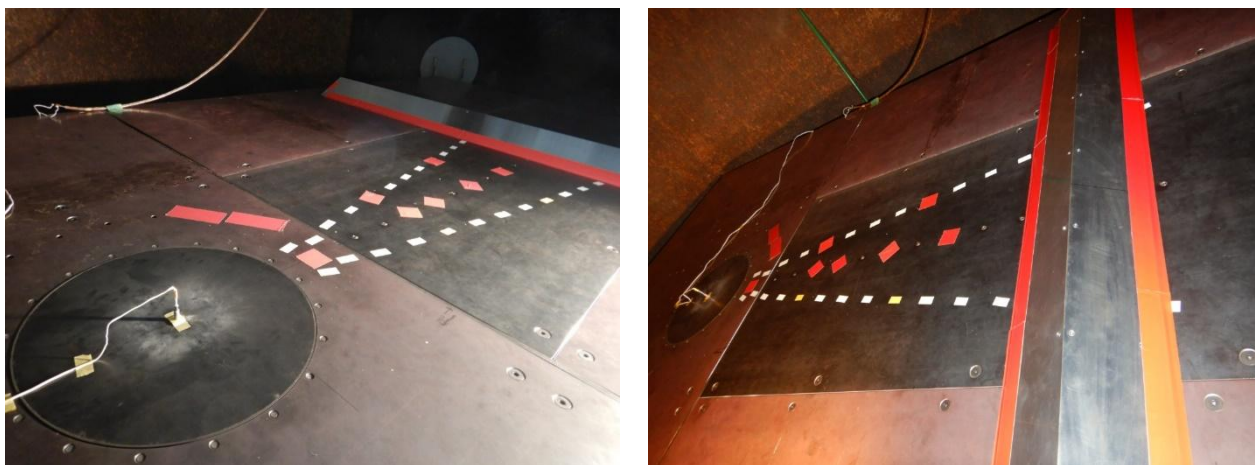


図 5-9b 実験台の写真 (No. 2-5)

5.2.6 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 0.50 μ s 毎に行い、出力信号はシグナルコンディショナ（PCB Piezotronics, Inc、482C05）を通して波形記憶装置（HIOKI, MR8845-52）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 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 5-10 実験台に固定した圧力センサー

5.2.7 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 5-11 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、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、到達時刻、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。

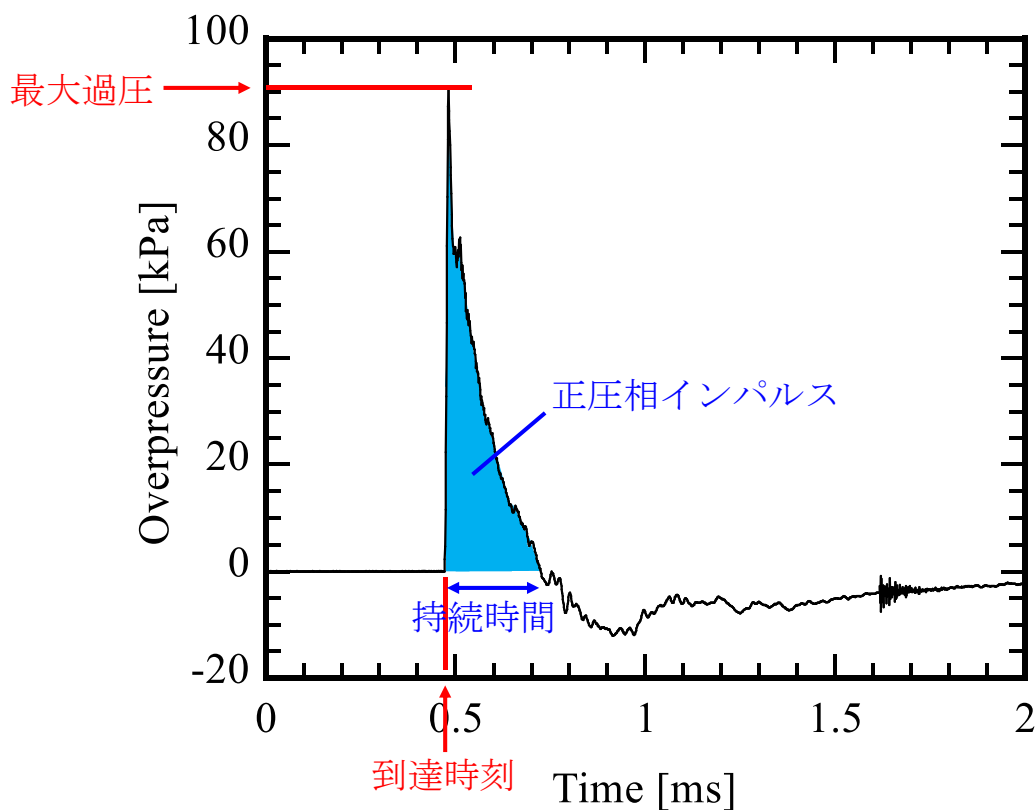


図 5-11 爆風パラメータの読み取り
(No. 0 (1 回目)、K 値 4 での波形)

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3回実施した（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5-2と、図5-12に示す。換算インパルスの算出には、TNT換算薬量1.43 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5-2の爆風パラメータを解析の基準とし、これを用いた2次の近似線を「基準爆発」と定義する。K値をKとしたとき、最大過圧の式はeq. 2、正圧相インパルスの式はeq. 3と表される。

$$X = \log_{10}(K) \quad \text{eq. 1}$$

$$\log_{10}(P) = 2.81795 - 1.58494 \cdot X \quad \text{eq. 2}$$

$$\log_{10}(I/W^{1/3}) = 2.36879 - 0.95373 \cdot X \quad \text{eq. 3}$$

表 5-2 No. 0 の爆風パラメータ（基準爆発）

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]
4	79.08	6.71	59.58	0.467	0.262
5	47.26	5.74	50.95	0.700	0.320
8	24.42	3.65	32.38	1.462	0.395
10	16.38	2.88	25.52	1.997	0.447
12	12.22	2.39	21.24	2.540	0.468
13	10.91	2.31	20.50	2.813	0.484
14	10.00	2.08	18.45	3.089	0.487
16	8.54	1.84	16.34	3.643	0.501

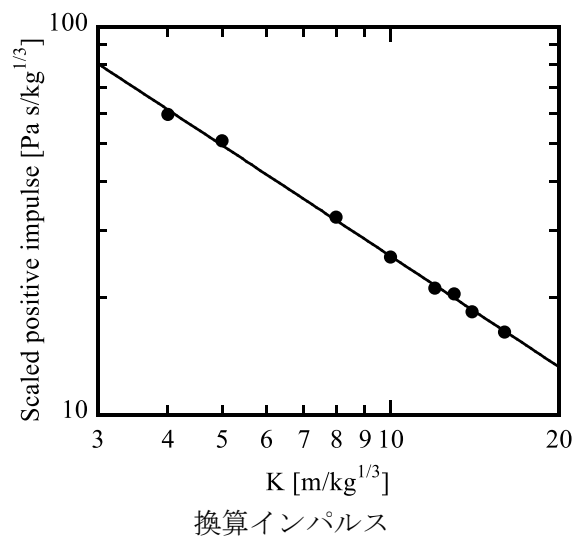
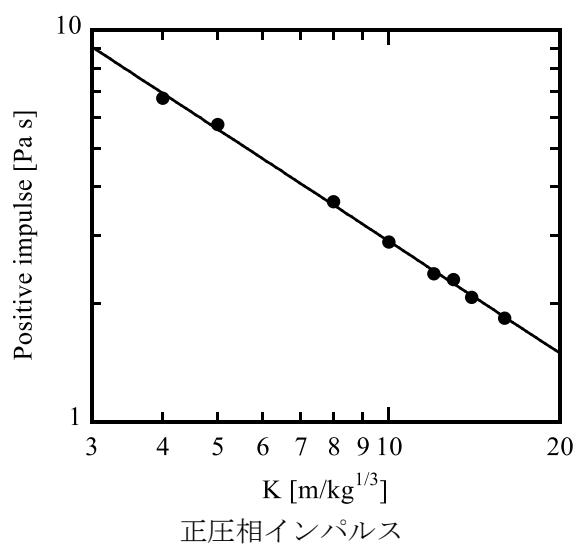
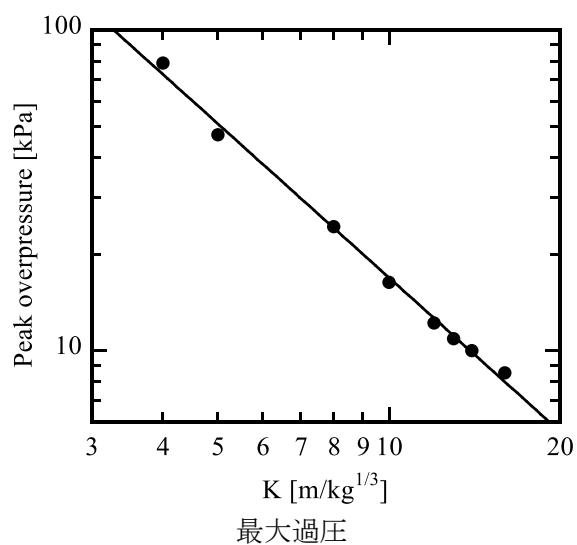


図 5-12 No. 0 の爆風パラメータ（基準爆発）

5.3.2 爆風の過圧履歴

実験で得られた爆風パラメータを表 5-3～5-9 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。波形は付録を参照のこと。

表 5-3 No. 1-1 の爆風パラメータ（赤字は地形通過後の数値）

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]
4	76.34	6.64	58.91	0.478	0.258
5	49.56	5.60	49.72	0.710	0.327
8	23.13	3.58	31.81	1.467	0.409
10	16.12	3.17	28.13	2.003	0.480
12	—	—	—	—	—
13	—	—	—	—	—
14	—	—	—	—	—
16	7.95	1.57	13.91	3.773	0.529

表 5-4 No. 1-2 の爆風パラメータ（赤字は地形通過後の数値）

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]
4	77.68	6.60	58.56	0.480	0.279
5	48.78	5.57	49.42	0.712	0.318
8	22.41	3.55	31.52	1.472	0.405
10	16.16	2.81	24.93	2.007	0.435
12	11.79	2.36	20.97	2.551	0.462
13	10.74	2.67	23.68	2.825	0.496
14	—	—	—	—	—
16	7.46	1.65	14.64	3.712	0.554

表 5-5 No. 2-1 の爆風パラメータ（赤字は地形通過後の数値）

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]
4	—	—	—	—	—
5	43.03	4.60	40.83	0.800	0.354
8	24.91	3.21	28.53	1.547	0.379
10	17.44	2.59	23.02	2.080	0.427
12	12.46	2.20	19.52	2.621	0.442
13	11.70	2.13	18.92	2.895	0.456
14	10.39	1.91	16.99	3.169	0.459
16	9.03	1.66	14.76	3.722	0.477

表 5-6 No. 2-2 の爆風パラメータ（赤字は地形通過後の数値）

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]
4	81.26	6.63	58.86	0.471	0.257
5	50.02	6.89	61.18	0.703	0.332
8	20.87	3.26	28.96	1.532	0.436
10	18.72	2.71	24.02	2.050	0.442
12	13.77	2.26	20.10	2.586	0.454
13	12.49	2.20	19.49	2.858	0.468
14	11.19	1.98	17.61	3.131	0.464
16	9.28	1.72	15.22	3.682	0.482

表 5-7 No. 2-3 の爆風パラメータ（赤字は地形通過後の数値）

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]
4	76.98	6.49	57.65	0.468	0.263
5	47.52	5.67	50.30	0.702	0.325
8	23.56	3.61	32.06	1.462	0.390
10	—	—	—	—	—
12	—	—	—	—	—
13	9.76	2.14	19.02	2.883	0.511
14	10.94	1.96	17.44	3.143	0.499
16	9.83	1.72	15.25	3.687	0.499

表 5-8 No. 2-4 の爆風パラメータ（赤字は地形通過後の数値）

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]
4	80.93	6.30	55.93	0.482	0.261
5	49.68	5.44	48.28	0.713	0.326
8	23.95	3.51	31.11	1.470	0.407
10	16.02	2.78	24.67	2.004	0.444
12	—	—	—	—	—
13	—	—	—	—	—
14	8.49	1.87	16.61	3.164	0.531
16	9.44	1.67	14.82	3.696	0.511

表 5-9 No. 2-5 の爆風パラメータ（赤字は地形通過後の数値）

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]
4	77.88	6.33	56.20	0.473	0.276
5	48.24	5.47	48.53	0.707	0.309
8	23.44	3.56	31.64	1.468	0.420
10	16.48	2.78	24.70	2.004	0.459
12	11.92	2.31	20.48	2.549	0.455
13	11.34	2.72	24.18	2.823	0.510
14	—	—	—	—	—
16	6.95	1.63	14.45	3.722	0.542

5.4 最大過圧

実験シリーズ No. 1、No. 2 の結果を基準爆発と比較することで、地形の高さおよび設置位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、 K 値に対する分布を図 5-13 に示した。表 5-10 に基準爆発の最大過圧の平均値 P_0 との比 (P/P_0) を示し、図 5-14 に図示した。 P は表 5-3 ~ 5-9 から、 P_0 は表 5-2 から抽出して用いた。地形よりも爆点に近い測定点における P/P_0 の平均値は 0.9944、標準偏差は 0.0348 であった。

各実験における最大過圧の特徴を、主に P/P_0 を参照して述べる。

地形の直後では、最大過圧が減少した。

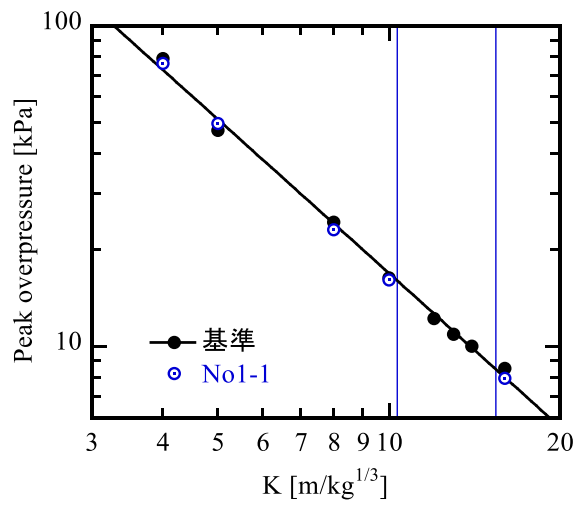
No. 1-2 と No. 2-5 は地形の奥行きだけが異なるが、爆風の回り込みの影響が無視できる地形の直後では、ほぼ同一の条件といえる。しかし、 K 値 16 における P/P_0 には約 0.06 の差があり、これは地形を通過する以前の標準偏差より十分に大きい。この原因として、爆風の反射が一因に挙げられる。地形の沿って下ってきた爆風は地表面に対して斜めに入射するため、反射成分をもつ。実際に、付録に示す圧力波形では爆風到達時にオーバーシュートが記録されている。測定した圧力波形に対して補間処理を行い爆風パラメータを得る手法では、反射の影響がある場合に十分な精度で解析できていないおそれがある。この反射の影響は、地形高さが大きい No. 1-1 のほうが No. 1-2 よりも最大過圧が大きいことの原因である可能性がある。

地形から離れると、最大過圧の低減効果は減少した。

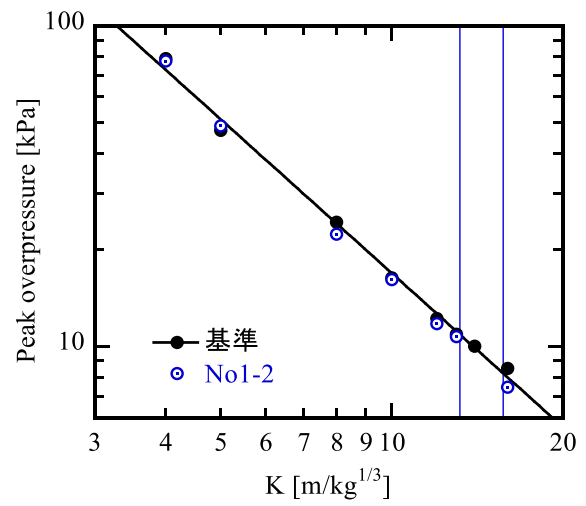
No. 2-1 ~ No. 2-5 において、地形の直後では最大過圧が顕著に減少しているものの、地形から離れると最大過圧は P_0 と同等か、わずかに上回った。遠方における P/P_0 の増分は、地形を通過する以前の標準偏差もしくは K 値 16 における No. 1-2 と No. 2-5 の P/P_0 の差よりも優位に大きい場合も複数あり、地形から離れた地点において爆風のピーク圧が高く評価される傾向が確認された。ただし、これについては、後述の正圧相インパルスでは基準と比してすべて下回っており爆風威力が低減化していた。ピーク圧についても波形も含めた検討が必要と考えられる。

表 5-10 P/P_0 (赤字は地形通過後の数値)

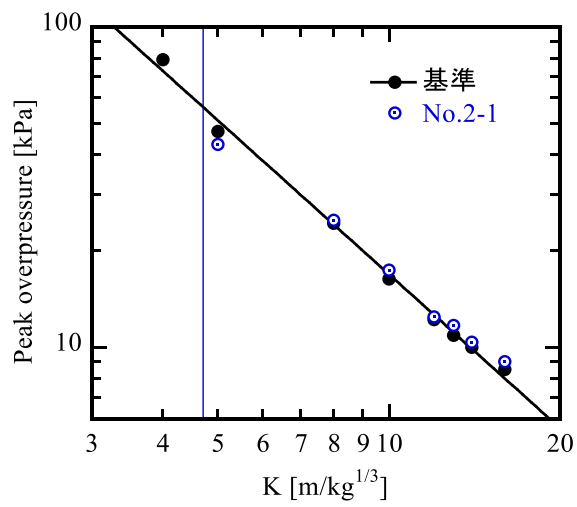
換算距離 [m/kg ^{1/3}]	No. 1-1	No. 1-2	No. 2-1	No. 2-2	No. 2-3	No. 2-4	No. 2-5
4	0.9654	0.9824	—	1.0275	0.9734	1.0234	0.9848
5	1.0485	1.0322	0.9104	1.0583	1.0055	1.0512	1.0207
8	0.9471	0.9176	1.0201	0.8543	0.9646	0.9807	0.9595
10	0.9838	0.9864	1.0645	1.1428	—	0.9777	1.0059
12	—	0.9645	1.0192	1.1265	—	—	0.9752
13	—	0.9845	1.0731	1.1455	0.8946	—	1.0397
14	—	—	1.0390	1.1183	1.0933	0.8484	—
16	0.9310	0.8733	1.0574	1.0872	1.1511	1.1062	0.8146



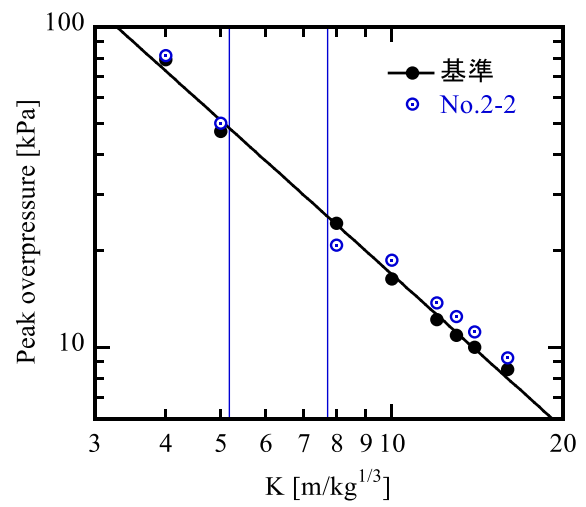
No. 1-1



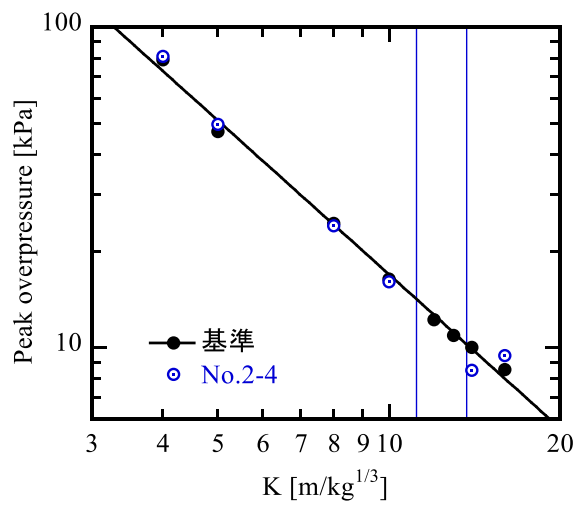
No. 1-2



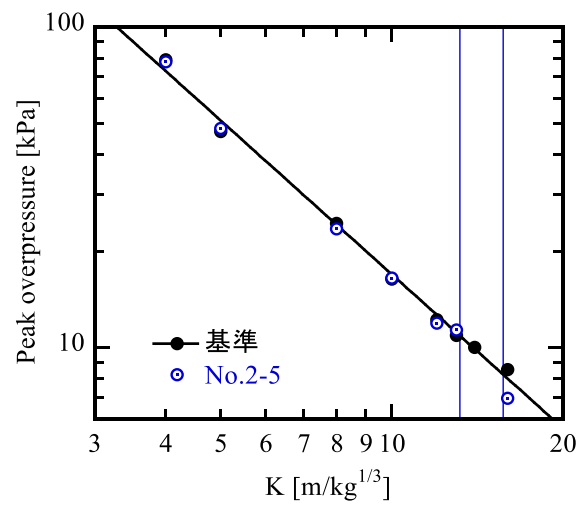
No. 2-1



No. 2-2

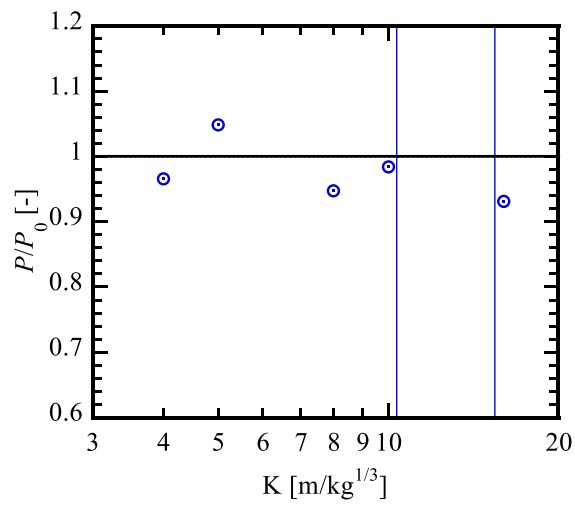


No. 2-4

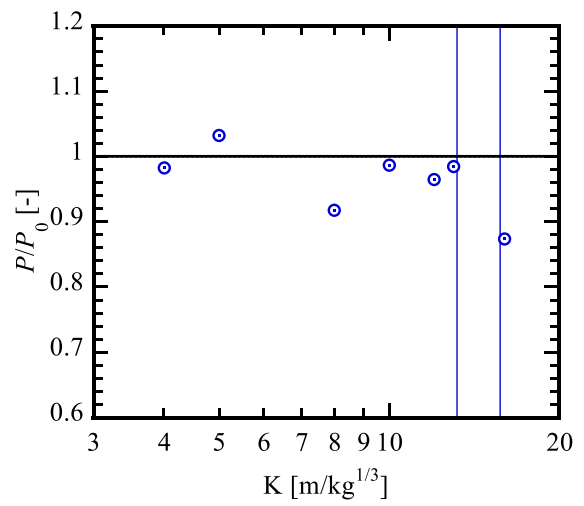


No. 2-5

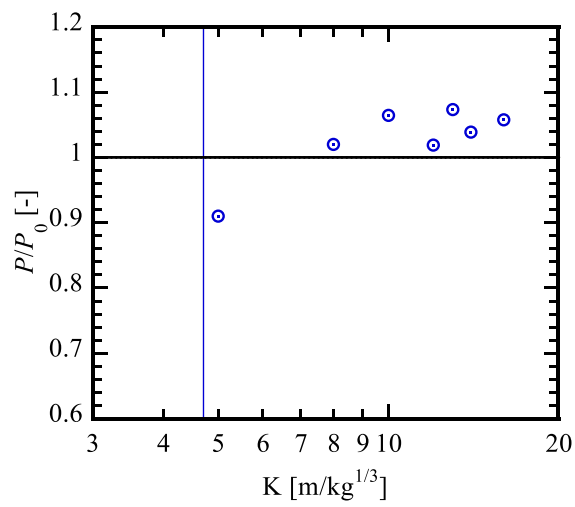
図 5-13 換算距離と P (青線の内側が地形)



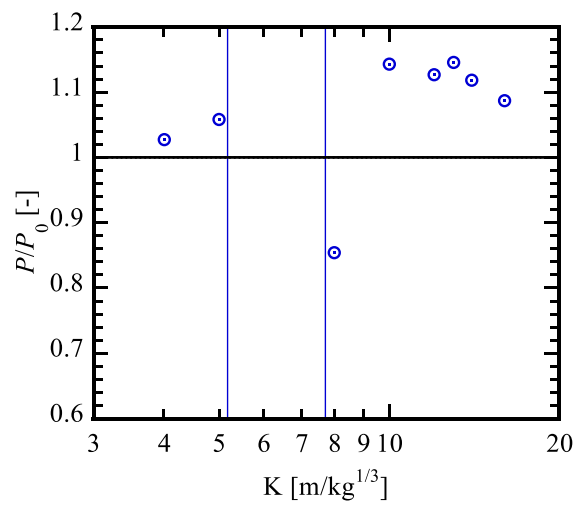
No. 1-1



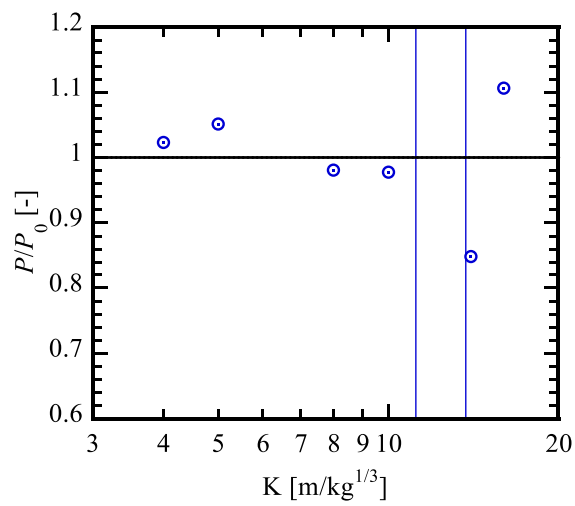
No. 1-2



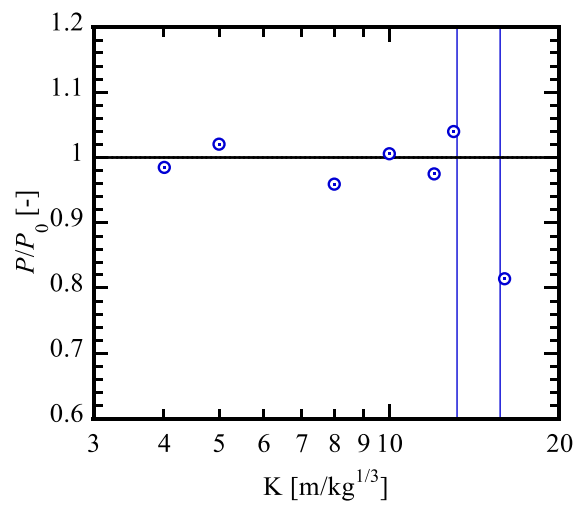
No. 2-1



No. 2-2



No. 2-4



No. 2-5

図 5-14 換算距離と P/P_0 (青線の内側が地形)

5.5 正圧相インパルス

最大過圧と同様に、実験シリーズ No. 1、No. 2 の結果を基準爆発と比較することで、地形の高さおよび設置位置の影響について検討する。これらの実験で得られた正圧相インパルス I について図 5-15 に、換算インパルス I_s について図 5-16 に、K 値に対する分布を示した。表 5-11 に基準爆発の正圧相インパルスの平均値 I_0 との比 (I/I_0) を示し、図 5-17 に図示した。 I は表 5-3～5-9 から、 I_0 は表 5-2 から抽出して用いた。地形よりも爆点に近い測定点における I/I_0 の平均値は 1.0011、標準偏差は 0.0720 であった。

各実験における最大過圧の特徴を、主に I/I_0 を参照して述べる。

地形の背後では、正圧相インパルスが減少した。

No. 1-2 と No. 2-5 は地形の奥行きだけが異なるが、爆風の回り込みの影響が無視できる地形の直後では、ほぼ同一の条件といえる。K 値 16 における I/I_0 はほぼ同等であった。地形高さが大きい No. 1-1 のほうが No. 1-2 よりも正圧相インパルスが減少した。

地形から離れても、正圧相インパルスの低減効果は持続した。

No. 2-1～No. 2-5 において、地形から離れると I/I_0 はわずかに増加の傾向にあるが、計測した範囲内では I_0 と同等以上になることはなく、遠方まで地形による低減効果が及んだ。

表 5-11 I/I_0 (赤字は地形通過後の数値)

換算距離 [m/kg ^{1/3}]	No. 1-1	No. 1-2	No. 2-1	No. 2-2	No. 2-3	No. 2-4	No. 2-5
4	0.9888	0.9830	—	0.9879	0.9677	0.9389	0.9433
5	0.9757	0.9699	0.8013	1.2007	0.9871	0.9475	0.9524
8	0.9824	0.9732	0.8810	0.8943	0.9902	0.9608	0.9772
10	1.1022	0.9769	0.9021	0.9413	—	0.9667	0.9680
12	—	0.9876	0.9189	0.9464	—	—	0.9642
13	—	1.1555	0.9232	0.9506	0.9279	—	1.1797
14	—	—	0.9212	0.9545	0.9454	0.9006	—
16	0.8515	0.8963	0.9034	0.9319	0.9334	0.9074	0.8847

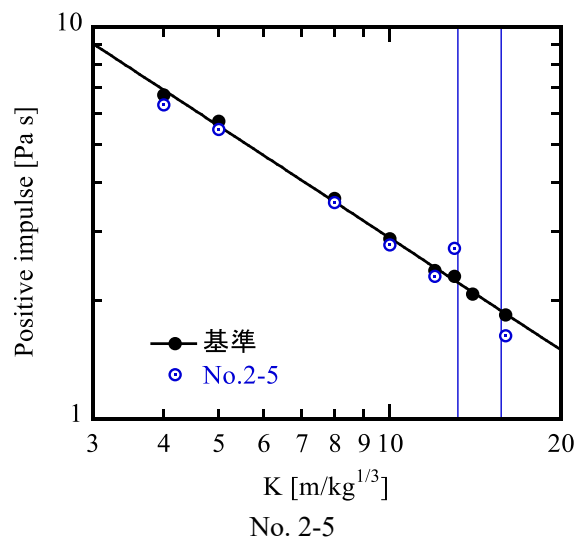
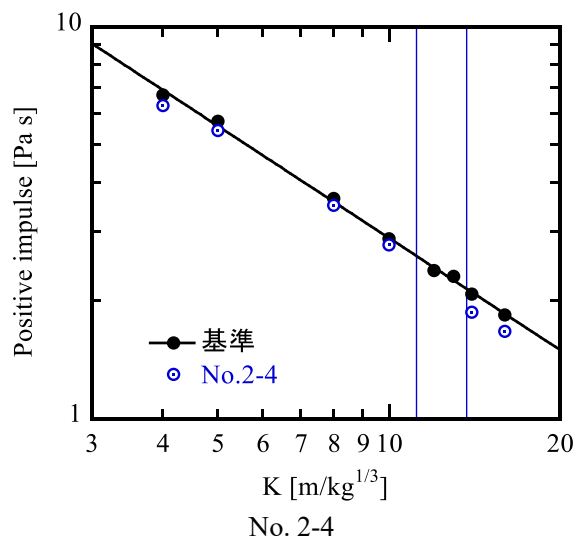
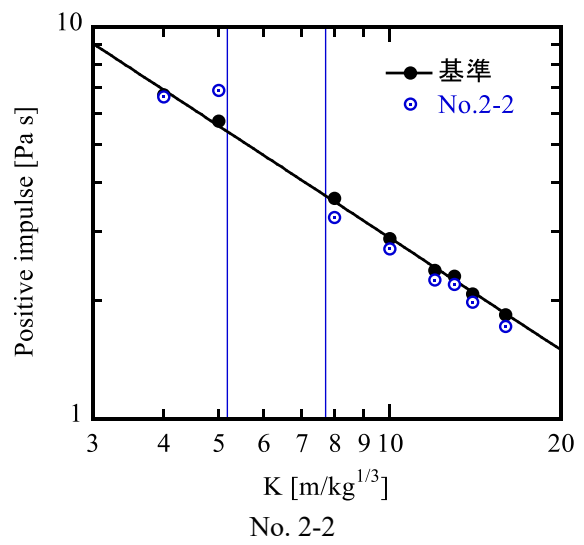
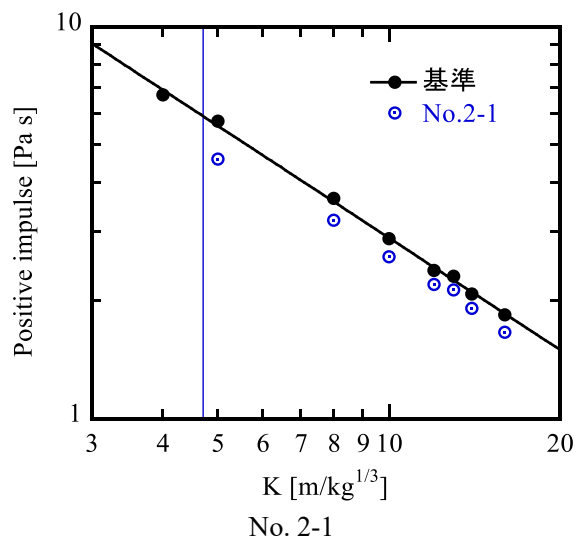
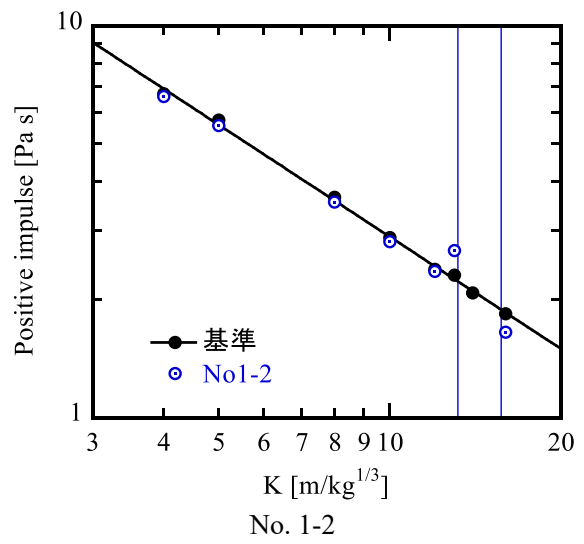
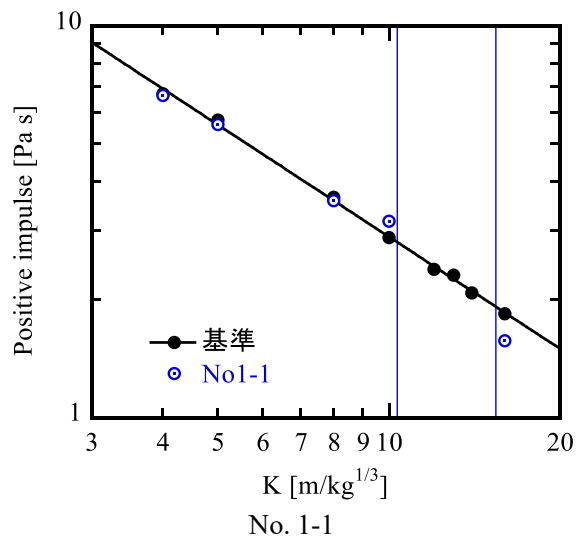
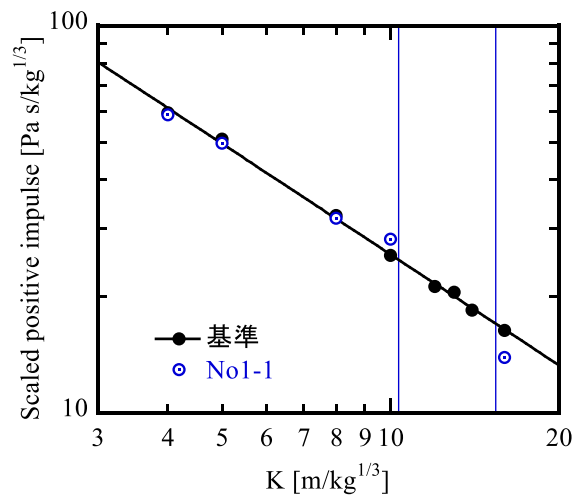
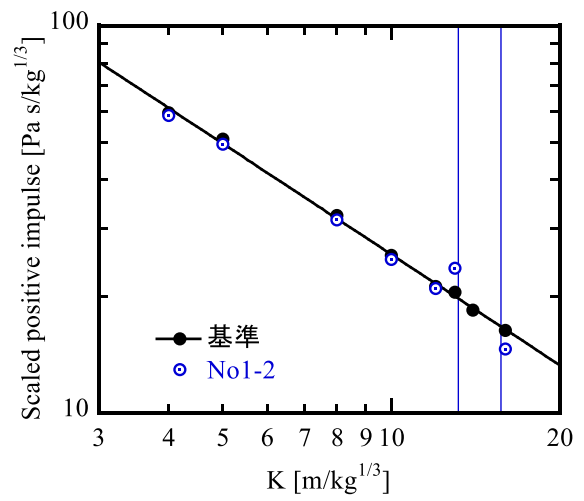


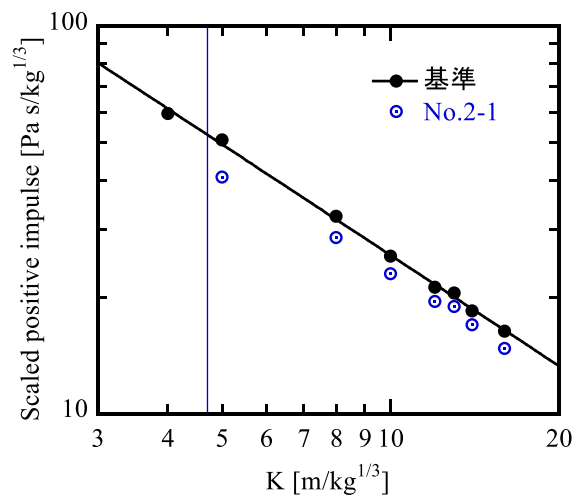
図 5-15 換算距離と I (青線の内側が地形)



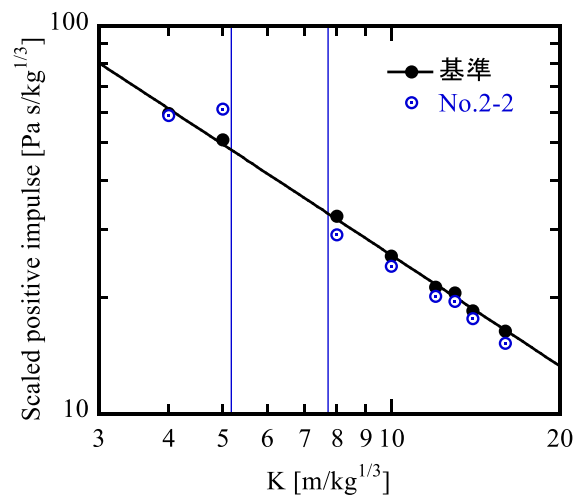
No. 1-1



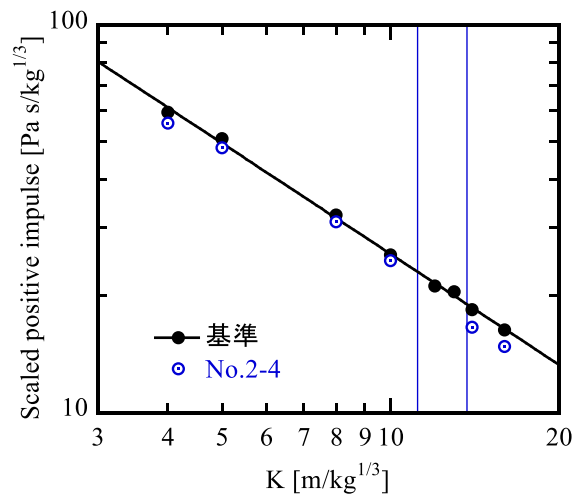
No. 1-2



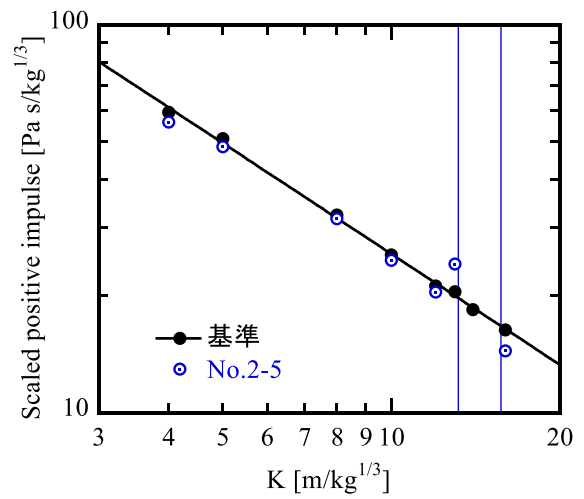
No. 2-1



No. 2-2



No. 2-4



No. 2-5

図 5-16 換算距離と I_s (青線の内側が地形)

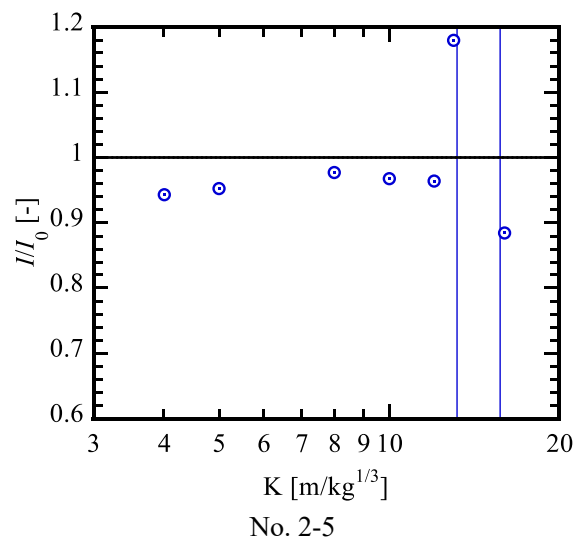
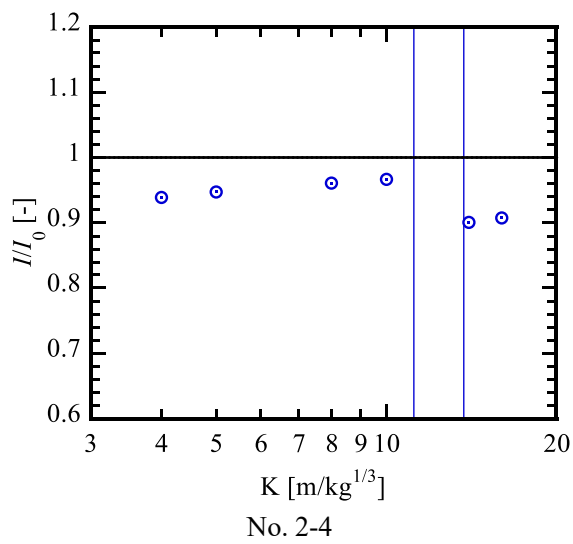
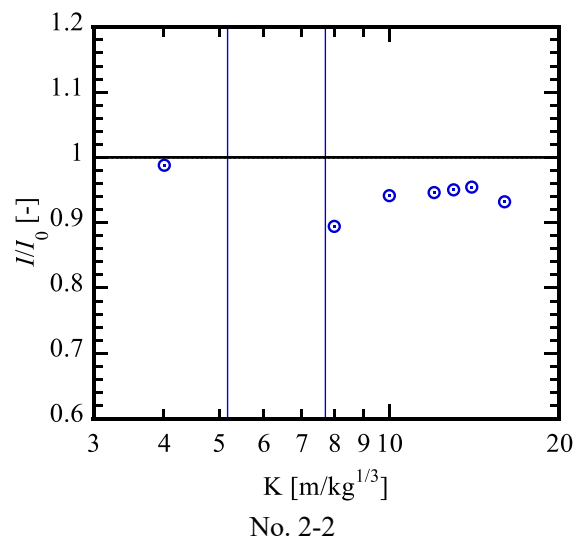
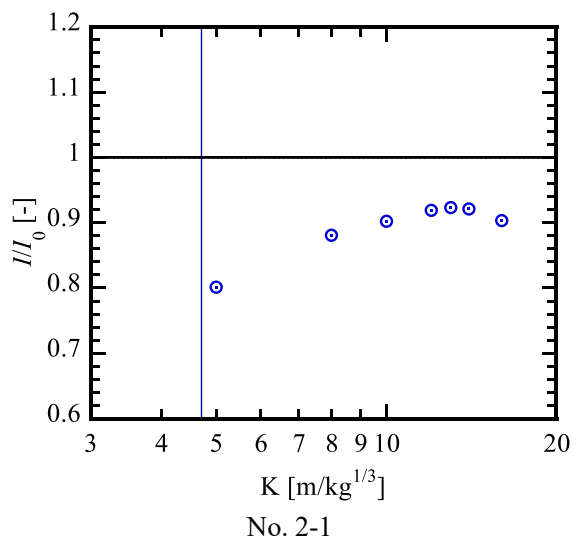
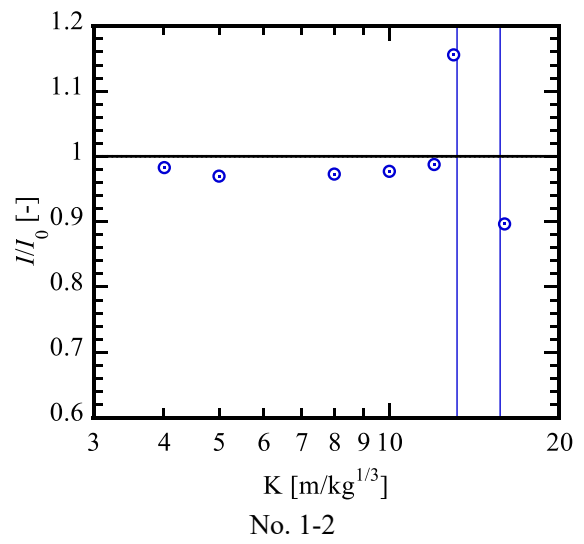
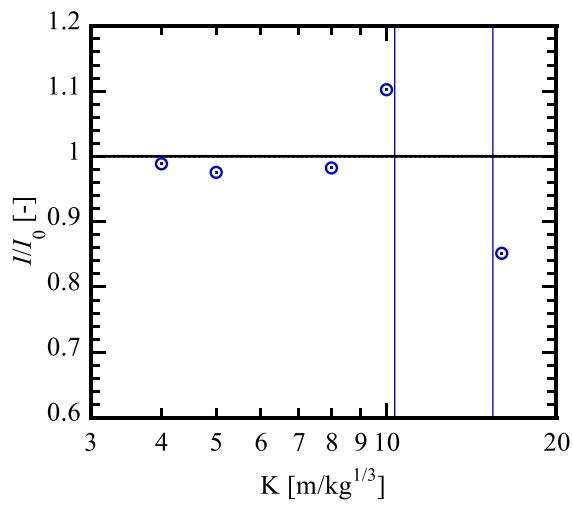


図 5-17 換算距離と I/I_0 (青線の内側が地形)

5.6 まとめ

地上式火薬庫の近傍にある山状の地形について、地形の高さおよび位置が爆風低減に与える影響を検討した。地形は2次元形状とし、断面は斜面30度の二等辺三角形とした。地形の高さは73 mmと146 mmの2通り、地形の位置はK値5, 8, 13, 14, 16の直前に設定する5通りの実験を行った。PETN/Cペレット1.00 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を測定した。

- No. 1-1：地形高さ146 mm、K値16の直前に設置
- No. 1-2：地形高さ73 mm、K値16の直前に設置
- No. 2-1：地形高さ73 mm、奥行き拡大、K値5の直前に設置
- No. 2-2：地形高さ73 mm、奥行き拡大、K値8の直前に設置
- No. 2-3：地形高さ73 mm、奥行き拡大、K値13の直前に設置
- No. 2-4：地形高さ73 mm、奥行き拡大、K値14の直前に設置
- No. 2-5：地形高さ73 mm、奥行き拡大、K値16の直前に設置

最大過圧と正圧相インパルスについて、地形による影響をまとめる。

最大過圧：地形の直後では減少したが、地形から離れると低減効果は減少した。
正圧相インパルス：地形の背後で減少し、地形から離れても低減効果は持続した。

第6章 地中式火薬庫の保安距離

6.1 はじめに

爆発影響低減化技術基準検討事業では、平成27年度（以下、平成**年度をH**と記載）から地中式火薬庫の保安距離策定に資するデータを得るための実験を行ってきた。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、地中式一級火薬庫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一律な保安距離をとらなければならない。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、後方が弱いことが確認されている。そこで、H27からH30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、H28からH30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。地中式火薬庫の形状によって爆風圧が大きく変化することから、図6-1のように薬室（下添え字2）と前室（下添え字1）に分けた形でパラメータスタディすることが望ましいことがわかり、爆風圧に大きく影響を与えるパラメータは次の2つである。

A : ($=A_1/A_2$)、薬室断面積に対する前室断面積の比、および

LD : ($= (L_1+L_2)/D_2$)、薬室直径に対する全長の比

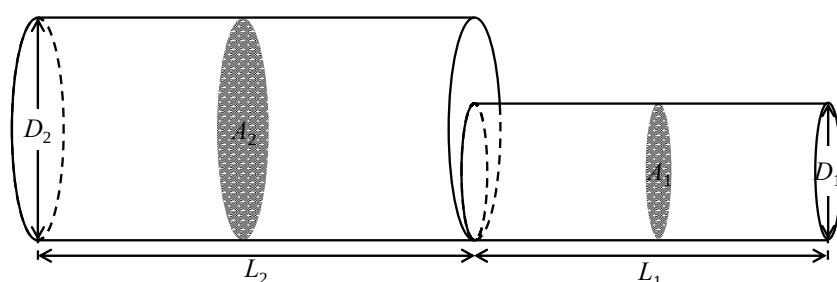


図 6-1 断面積変化を伴う地中式火薬庫モデルの模式図

令和3年度（以下、令和**年度をR**と記載）とR04では、大規模野外爆発実験の薬種と薬量を用いて複数の条件において数値解析を行なった。これまでの野外実験（含水爆薬（EMX2）5.32 kg）、室内実験（ペンスリット（PETN）1 g）、数値解析で行った条件は図6-2の通りである。

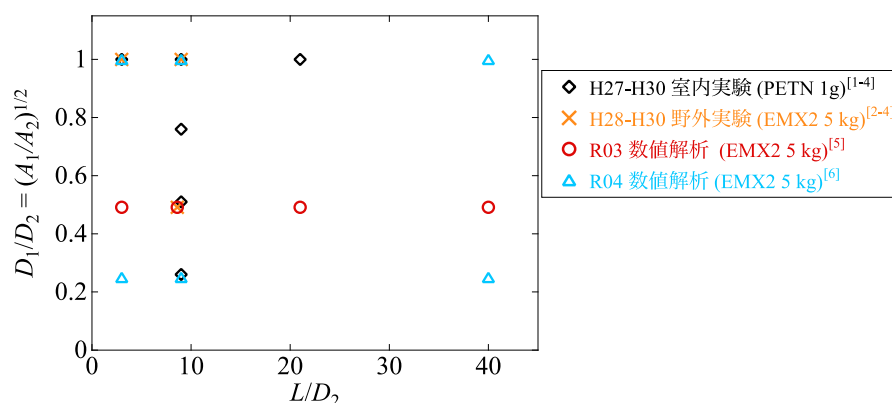


図 6-2 H27 以降に実施した地中式火薬庫の条件

R03 と R04 の産業保安等技術基準策定研究開発等事業（火薬類爆発影響低減化技術基準検討事業）報告書（以下、それぞれ R03 報告書、R04 報告書）で示された、爆風圧によって評価された保安距離の2案に差があったことから、ここでは両者の再評価を行う。

6.2 爆風に対する保安距離の再検討

過去の研究^[1-6]より、地上式火薬庫の換算距離 K (16: 第一種保安物件、14: 第二種保安物件、8: 第三種保安物件、5: 第四種保安物件) で得られる最大過圧の等値線を地中式火薬庫の保安距離に置き換えた場合、図 6-3 に示す通り出口 (0 度) 方向に中心が移動する円 (中心 C と半径 R を持つ円) として保安距離を表現できることが確認されており、図 6-1 に示すパラメータ (前室薬室断面積比 A および全長薬室直径比 LD) において中心 C と半径 R を評価できることが望ましい。

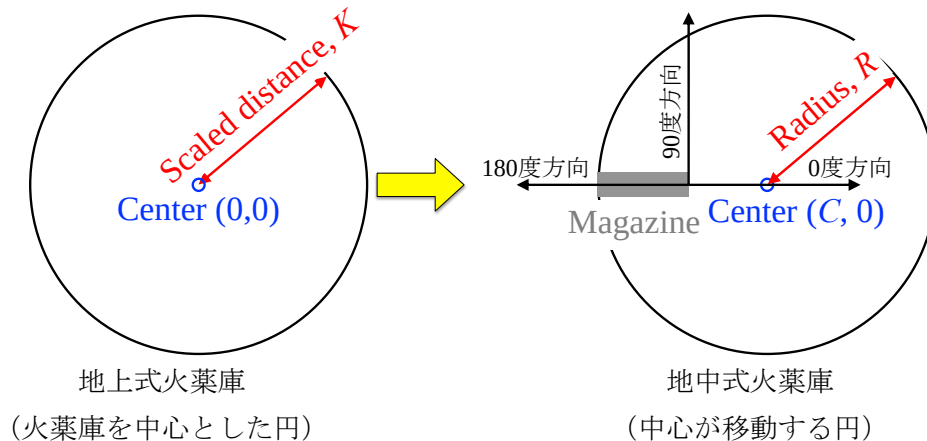


図 6-3 地上式火薬庫の薬量換算距離 K を用いた保安距離の地中式火薬庫への置き換え

6.2.1 令和 3 年度報告書案 (R03 案) ^[5]

R03 案では $LD=9$ の室内実験 (PETN 1 g) と $A=0.26$ の数値解析 (EMX2 5.32 kg) の結果を用いて検討された。

- ・ A の影響を室内実験で評価
- ・ LD の影響を数値解析で評価

具体的には上記の通り、別条件の研究から爆風圧に対する A と LD の影響を独立に評価して、両方が変化した場合はそれぞれの影響を掛け合わせる形となっている。例えば、基準を $LD=9$ 、 $A=0.26$ の中心 $C_{(9, 0.26)}$ と半径 $R_{(9, 0.26)}$ を基準として $LD=LD_1$ 、 $A=A_1$ の地中式火薬庫の保安距離を求める場合、

- ・ 室内実験結果の評価から A の変化に伴って中心が a 倍、半径が a 倍
- ・ 数値解析結果の評価から LD の変化に伴って半径が β 倍、半径が b 倍

が得られたとする。その場合、 LD_1 、 A_1 の地中式火薬庫の保安距離を表現する円の中心と半径はそれぞれの影響を乗じた $a\beta C_{(9, 0.26)}$ と $abR_{(9, 0.26)}$ となる。この方法を維持して次節にて実験結果の再検討を行う。

6.2.1.1 室内実験データの再整理

地上式火薬庫の換算距離 K で得られる最大過圧の等値線を地中式火薬庫の保安距離に置き換える際、地上式火薬庫の最大過圧分布の評価が必要である。ここでは地上式火薬庫の保安距離を決定する地表面爆発実験の結果を再評価する。R03 案では H30 の室内実験（PETN 1 g の地表面爆発実験）を用いて最大過圧を検討した。H27 から R03 にて PETN 1 g の地表面爆発実験を継続して行なっており、データが充実してきたことでデータの再整理を行う。図 6-4 に最大過圧分布を示した。プロットは過去数年で取得した実験結果、実線は TNT の数値解析で得られた最大過圧分布に対し、換算距離を 1.08 倍したデータである。プロットと実線がよく一致していることから、PETN は TNT 換算比 1.26 ($=1.08^3$) であることが確認できる。

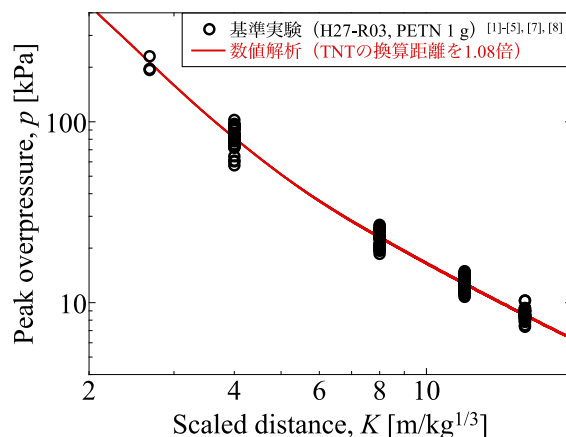


図 6-4 地表面爆発実験の最大過圧分布

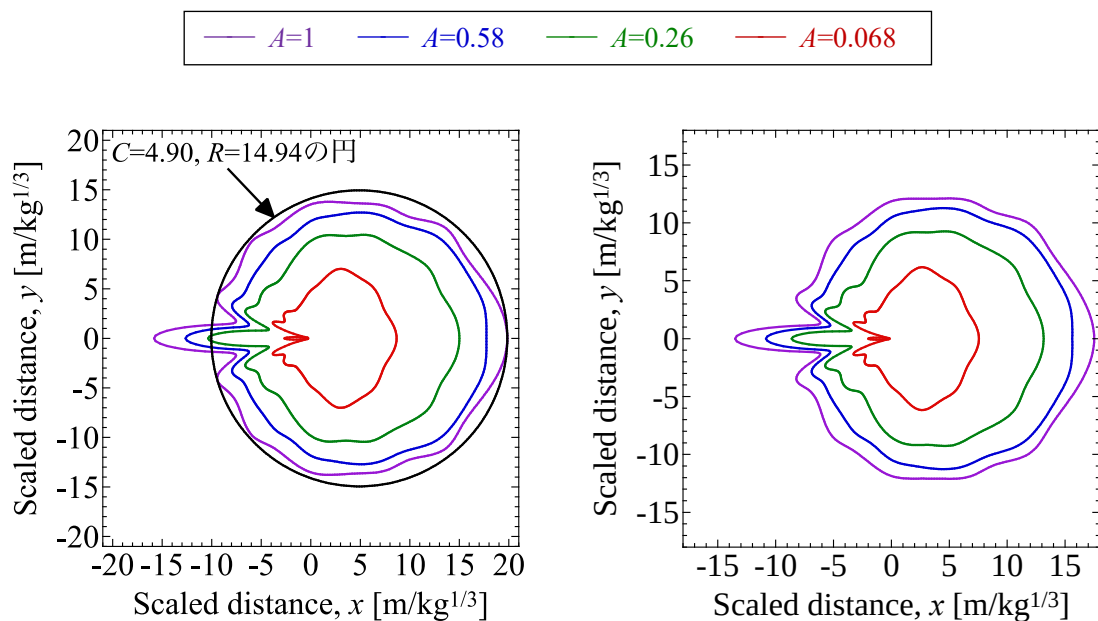
表 6-1 最大過圧の再検討結果

換算距離 K [m/kg ^{1/3}]	最大過圧 (H30 の近似線) [kPa]	最大過圧 (図 4 の実線) [kPa]
5	53.93	51.13
8	24.80	22.90
14	10.70	10.25
16	9.00	8.55

表 6-1 は地表面爆発実験の最大過圧分布の比較である。R03 案で使用した最大過圧は H30 のみのデータ（表 6-1 中央）を用いた検討であったが、本報では図 6-4 の実線の値（表 6-1 右）を用いて、爆風圧の観点における保安距離を決定する地中式火薬庫の最大過圧の等値線を再評価する。

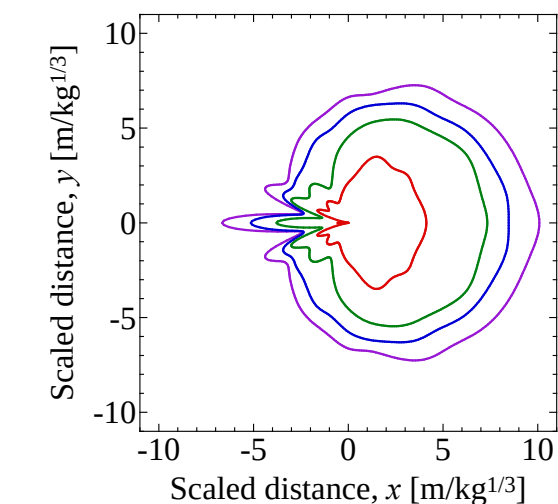
6.2.1.2 保安距離実験結果の数値化

図 6-5 は PETN 1 g 室内実験で得られた、 $LD = 9, A = 1, 0.58, 0.26, 0.068$ で得られた等圧線分布である（原点が火薬庫出口）。等圧線（保安距離）はトンネル入口前方の中心からある距離の半径を持つ円で表し、各種保安物件に対する等圧線に外接する円を爆風に対する保安距離とする（外接円は常に実験データの外側に描画されるため、安全側の評価となる）。具体例として、図 6-5a に $LD = 9, A = 1$ の第一種保安物件相当の保安距離として中心 $C = 4.90 \text{ m/kg}^{1/3}$ 、半径 $R = 14.94 \text{ m/kg}^{1/3}$ の外接円を示す。このように、中心 C と半径 R を全ての条件で選定し表 6-2 にまとめた。

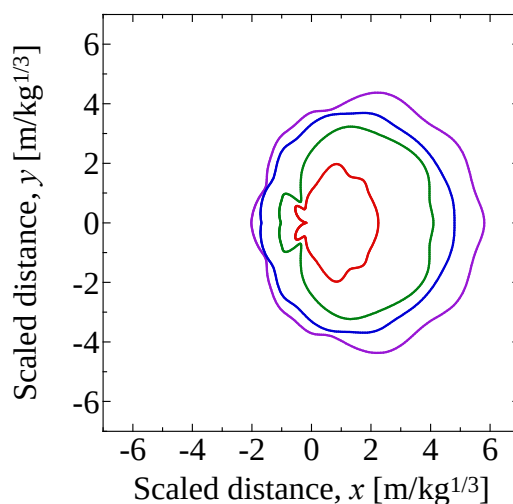


(a) 第一種保安物件相当（地表面爆発 $K = 16$ ）

(b) 第二種保安物件相当（地表面爆発 $K = 14$ ）



(c) 第三種保安物件相当（地表面爆発 $K = 8$ ）



(d) 第四種保安物件相当（地表面爆発 $K = 5$ ）

図 6-5 実験で得られた各種保安物件に対する保安距離（等圧線図）

表 6-2 保安距離の中心 C と半径 R (単位は $\text{m/kg}^{1/3}$)

	$A = 1$		$A = 0.58$		$A = 0.26$		$A = 0.068$	
	C	R	C	R	C	R	C	R
第一種 $K = 16$ 相当	4.90	14.94	4.76	13.14	4.02	10.99	2.98	7.02
第二種 $K = 14$ 相当	4.42	13.11	4.26	11.59	3.56	9.59	2.68	6.21
第三種 $K = 8$ 相当	2.50	7.54	2.44	6.33	2.02	5.58	1.52	3.49
第四種 $K = 5$ 相当	1.44	4.51	1.44	3.71	1.16	3.26	0.80	1.98

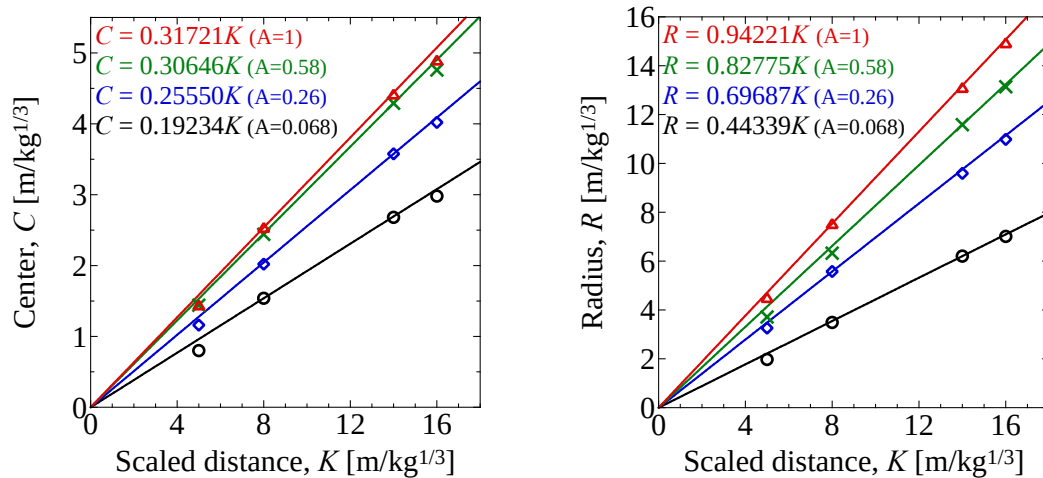
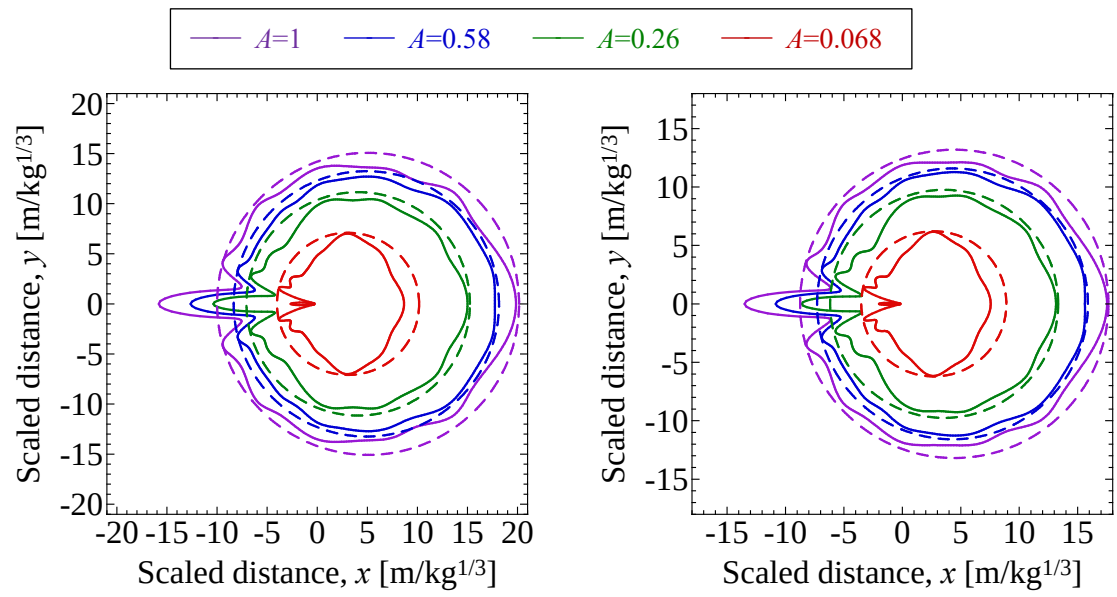


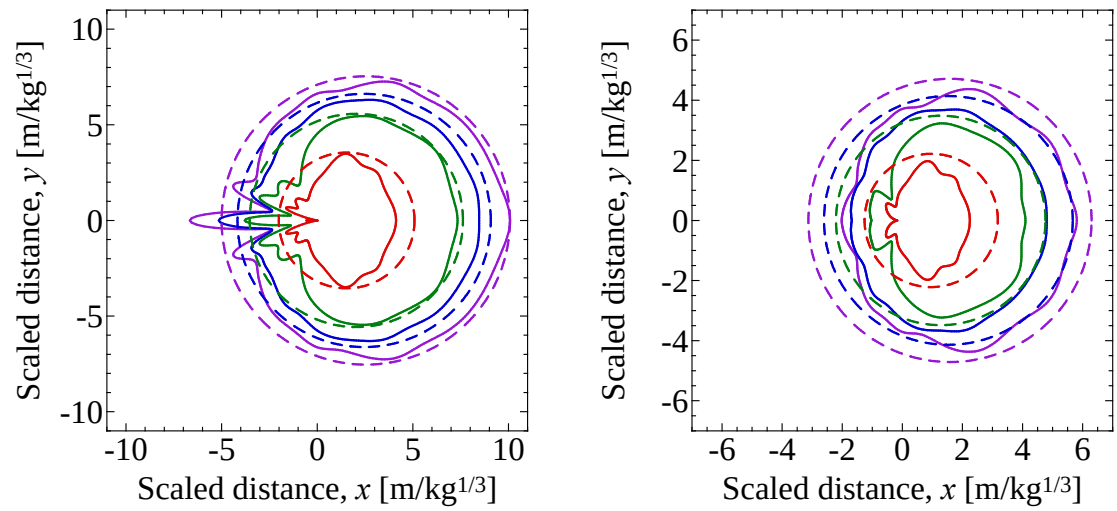
図 6-6 保安距離の中心 C 及び半径 R と換算距離 K との関係

表 6-2 の中心と半径は実験値であり、普遍的な値にするため、これを換算距離（地表面爆発の保安距離） K に対して図示すると図 6-6 のように直線近似可能である。そこで、原点を通り、かつ各実験で得られたプロットを常に上回る条件で最小の勾配を持つ近似線（安全側に評価するためにプロットが常に近似線以下となるようにした近似線）を求めた。そこで得られた保安距離の中心 C と半径 R を持つ円を実験で得られた等圧線に重ね合わせた結果が図 6-7 の破線である。破線が常に実験で得られた等圧線と同等もしくは外側に位置されることから、様々な前室薬室断面積比 A に対応する保安距離として採用できると考えられる。ただし、保安距離を安全側に評価したため、前室薬室断面積比 A が小さくなるにつれて（特に赤で示した $A=0.068$ ）、爆風が遠方に達する前（特に第四種保安物件）の保安距離は過大評価される。



(a) 第一種保安物件相当（地表面爆発 $K = 16$ ）

(b) 第二種保安物件相当（地表面爆発 $K = 14$ ）



(c) 第三種保安物件相当（地表面爆発 $K = 8$ ）

(d) 第四種保安物件相当（地表面爆発 $K = 5$ ）

図 6-7 所内実験で得られた等圧線（実線）と図 6 の近似線から得られる保安距離（破線）

6.2.1.3 前室薬室断面積比 A の影響の数式化

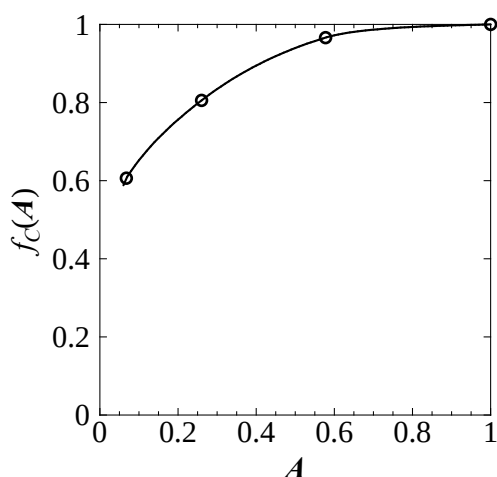
以上で地中式火薬庫の保安距離を、図 6-6 から得られる中心 C と半径 R を持つ円として決定できた。しかし、実験で実施した 4 点の前室薬室断面積比 A の場合の保安距離が示されているだけであり、あらゆる A に対しても保安距離が求められる方法を検討する。

そこで、 $A=1$ の場合の半径と中心を R_0 と C_0 としたときに、ある A の場合の半径 $R=f_R(A) \cdot R_0$ 、中心 $C=f_C(A) \cdot C_0$ と表せる関数 $f_R(A)$ 、 $f_C(A)$ を考える。表 6-2 に示す前室薬室断面積比 $A=1$ における中心 $C_0(=0.31721)$ と半径 $R_0(=0.94221)$ で、その他の A の場合の中心 C と半径 R をそれぞれ除して無次元化した値、すなわち関数 $f_C(A)$ と $f_R(A)$ の値を表 6-3、図 6-8 に示す。

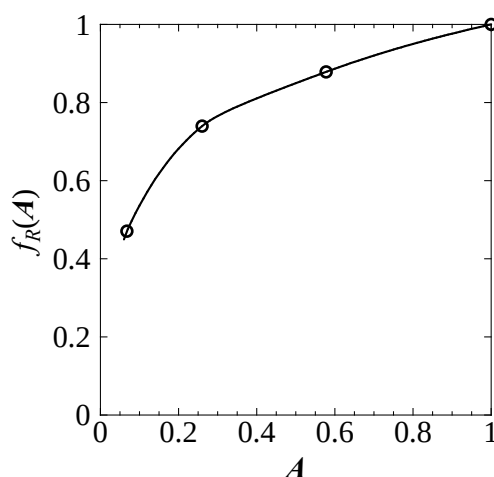
図 6-8 の近似曲線は原点 $(0, 0)$ を通るようにして求めた。 A を 0.1 刻みとした数値を表 6-4 に示した。

表 6-3 前室薬室断面積比 A に対する $f_C(A)$ と $f_R(A)$

A	$f_C(A)$	$f_R(A)$
1	1	1
0.58	0.96611	0.87852
0.26	0.80546	0.73961
0.068	0.60635	0.47059



(a) 中心 C



(b) 半径 R

図 6-8 前室薬室断面積比 A に対する $f_C(A)$ と $f_R(A)$

表 6-4 $f_C(A)$ と $f_R(A)$ 分布

A	$f_C(A)$	$f_R(A)$
1	1	1
0.9	0.99740	0.97638
0.8	0.99342	0.94999
0.7	0.98656	0.92031
0.6	0.97194	0.88668
0.5	0.93959	0.84955
0.4	0.89462	0.81066
0.3	0.83454	0.76551
0.2	0.75626	0.68179
0.1	0.65216	0.53627

6.2.1.4 全長薬室直径比 $LD (= (L_1 + L_2) / D_2)$ を変化させたときの保安距離

R03 報告書では、野外実験 (EMX2, 5.32 kg) における $A = 0.241$ の条件において LD を変化させた数値解析を行い、保安距離にどのような影響があるかを検討した。ここでは R03 にて報告した数値解析結果に対して野外実験との誤差を評価して、保安距離の再検討を行う。

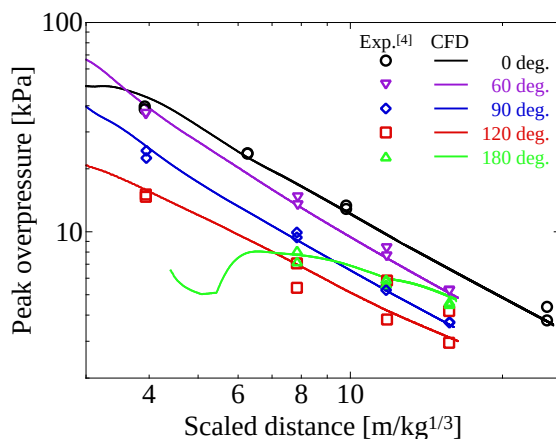


図 6-9 野外実験と数値解析の最大過圧の比較 (EMX2 5.32 kg, $A = 0.241$, $LD = 8.6$)

図 6-9 は $A = 0.241$, $LD = 8.6$ における野外実験と数値解析の最大過圧の比較であり、プロットが実験、実線が数値解析結果である。数値解析結果は全ての角度において実験と数値解析がよく一致していることを再確認した。そのため、ここでは R03 報告書で示した中心 C と半径 R に対する近似線の勾配と LD の関係を採用し、 $LD = 8.6$ の値 (0.726 と 0.27) でそれぞれスケール化を行ない、図 10 の通り $g_R(LD)$ 、 $g_C(LD)$ と定義した。具体的な数値は表 6-5 と表 6-6 の通りである。

なお、R03 案では図 6-8 と図 6-10 のデータについて近似線を直線や指数関数近似を行っていた (プロットを通るとは限らない) が、本報では全てのプロットを通過し、それらのポイントの勾配に一致する曲線^[9]を作成した。

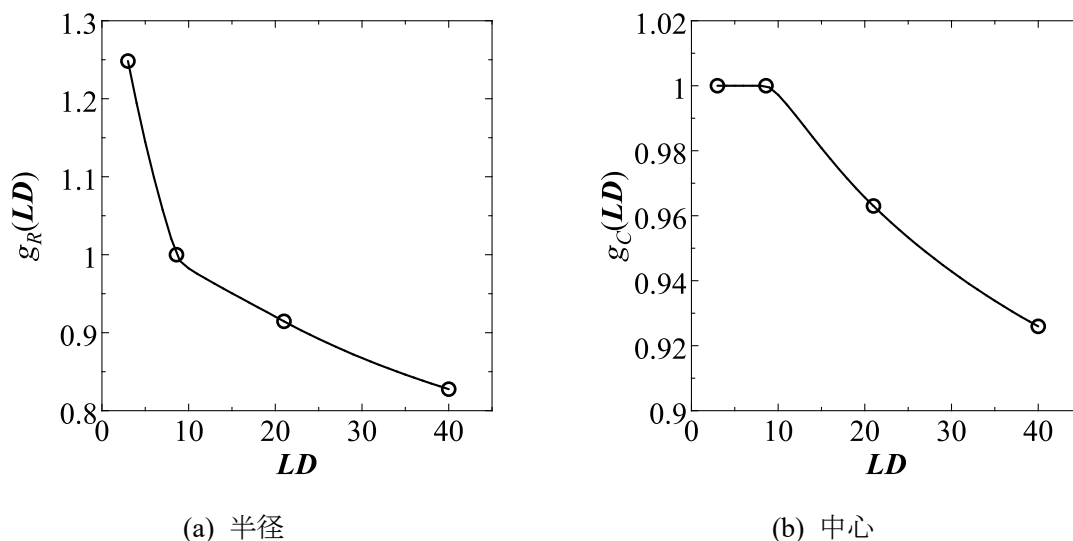


図 6-10 $LD = 8.6$ の値 (0.726 と 0.27) でそれぞれスケール化した場合の $g_R(LD)$ 、 $g_C(LD)$

表 6-5 図 6-10a の $LD = 8.6$ の値 (0.726) でスケール化した際の $g_R(LD)$

LD	$g_R(LD)$		LD	$g_R(LD)$		LD	$g_R(LD)$
3	1.2483		16	0.94449		29	0.87213
4	1.1944		17	0.93846		30	0.86751
5	1.1446		18	0.93245		31	0.86302
6	1.0990		19	0.92645		32	0.85865
7	1.0576		20	0.92046		33	0.85440
8	1.0204		21	0.91448		34	0.85026
9	0.99192		22	0.90860		35	0.84623
10	0.98246		23	0.90290		36	0.84231
11	0.97546		24	0.89738		37	0.83849
12	0.96901		25	0.89202		38	0.83476
13	0.96276		26	0.88682		39	0.83113
14	0.95662		27	0.88178		40	0.82759
15	0.95054		28	0.87689			

表 6-6 図 6-10b の $LD = 8.6$ の値 (0.270) でスケール化した際の $g_C(LD)$

LD	$g_C(LD)$		LD	$g_C(LD)$		LD	$g_C(LD)$
3	1.0000		16	0.97755		29	0.94481
4	1.0000		17	0.97438		30	0.94284
5	1.0000		18	0.97133		31	0.94093
6	1.0000		19	0.96840		32	0.93907
7	1.0000		20	0.96561		33	0.93726
8	1.0000		21	0.96296		34	0.93551
9	0.99946		22	0.96043		35	0.93380
10	0.99718		23	0.95798		36	0.93214
11	0.99420		24	0.95561		37	0.93053
12	0.99094		25	0.95331		38	0.92895
13	0.98756		26	0.95108		39	0.92742
14	0.98417		27	0.94893		40	0.92593
15	0.98082		28	0.94684			

6.2.1.5 保安距離の数式化

前項までで、地中式火薬庫の爆風に対する保安距離を示す円の中心 C と半径 R に対して A の影響として $f_C(A)$ と $f_R(A)$ 、 LD の影響として $g_C(LD)$ 、 $g_R(LD)$ が得られた。6.2.1 節で示した通り、地上式火薬庫の保安距離 K に対し A と LD が互いに影響を与えず変化する場合、任意の A と LD に対する中心 C と半径 R は以下のようになる。

$$C = 0.31721 \cdot f_C(A) \cdot g_C(LD) \cdot K = C_{R03}(A, LD) \cdot K \quad (1)$$

$$R = 0.94221 \cdot f_R(A) \cdot g_R(LD) \cdot K = R_{R03}(A, LD) \cdot K \quad (2)$$

さらに、これらの中心 C と半径 R の値は薬量の 3 乗根で除した換算距離であるから、貯蔵爆薬量を W [kg] とすると、保安距離の中心位置を示すトンネル入口から中心までの距離 D_C [m] と、その中心から全方向にとるべき保安距離となる半径 D_R [m] は、以下の式で求められる。

$$D_C = C_{R03}(A, LD) \cdot K \cdot W^{1/3} \quad (3)$$

$$D_R = R_{R03}(A, LD) \cdot K \cdot W^{1/3} \quad (4)$$

ここで、各種保安物件、各薬量ごとの $K \cdot W^{1/3}$ の値は、規則第 23 条第 1 項の一級火薬庫の保安距離表 そのものである。したがって各種保安物件、各薬量ごとの D_C と D_R の値は、規則第 23 条第 1 項の表の保安物件と薬量に応じた一級火薬庫の値にそれぞれ $C_{R03}(A, LD)$ 、 $R_{R03}(A, LD)$ を乗じて求めることができる。

以上の考え方で地中式火薬庫の保安距離を新しく規則で定める場合、規則第 23 条第 1 項の表を利用すれば、 $C_{R03}(A, LD)$ 、 $R_{R03}(A, LD)$ の値を数式ではなく、表 6-7 のように前室薬室断面積比 A の例えば 0.1 刻みのときの値を表で指定するだけでよいと考えられる。

表 6-7 R03 修正案まとめ

$C_{R03}(A, LD)$		A (以下)									
		0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1
LD (以上)	3	0.2069	0.2399	0.2647	0.2838	0.2980	0.3083	0.3129	0.3151	0.3164	0.3172
	5	0.2069	0.2399	0.2647	0.2838	0.2980	0.3083	0.3129	0.3151	0.3164	0.3172
	7	0.2069	0.2399	0.2647	0.2838	0.2980	0.3083	0.3129	0.3151	0.3164	0.3172
	9	0.2068	0.2398	0.2646	0.2836	0.2979	0.3081	0.3128	0.3150	0.3162	0.3170
	12	0.2050	0.2377	0.2623	0.2812	0.2953	0.3055	0.3101	0.3123	0.3135	0.3143
	15	0.2029	0.2353	0.2596	0.2783	0.2923	0.3024	0.3069	0.3091	0.3103	0.3111
	18	0.2009	0.2330	0.2571	0.2756	0.2895	0.2995	0.3040	0.3061	0.3073	0.3081
	21	0.1992	0.2310	0.2549	0.2733	0.2870	0.2969	0.3014	0.3035	0.3047	0.3055
	25	0.1972	0.2287	0.2524	0.2705	0.2841	0.2939	0.2983	0.3004	0.3016	0.3024
	30	0.1950	0.2262	0.2496	0.2676	0.2810	0.2907	0.2951	0.2971	0.2983	0.2991
	35	0.1932	0.2240	0.2472	0.2650	0.2783	0.2879	0.2922	0.2943	0.2954	0.2962
	40	0.1915	0.2221	0.2451	0.2628	0.2760	0.2855	0.2898	0.2918	0.2930	0.2937

$R_{R03}(A, LD)$		A (以下)									
		0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1
LD (以上)	3	0.6307	0.8019	0.9004	0.9535	0.9992	1.0429	1.0824	1.1173	1.1484	1.1762
	5	0.5783	0.7353	0.8256	0.8743	0.9162	0.9562	0.9925	1.0245	1.0530	1.0785
	7	0.5344	0.6794	0.7628	0.8078	0.8466	0.8836	0.9171	0.9466	0.9729	0.9965
	9	0.5012	0.6372	0.7154	0.7576	0.7940	0.8287	0.8601	0.8879	0.9125	0.9346
	12	0.4896	0.6225	0.6989	0.7401	0.7756	0.8095	0.8403	0.8674	0.8914	0.9130
	15	0.4803	0.6106	0.6856	0.7260	0.7609	0.7941	0.8242	0.8508	0.8745	0.8956
	18	0.4711	0.5990	0.6725	0.7122	0.7464	0.7790	0.8086	0.8346	0.8578	0.8786
	21	0.4621	0.5875	0.6596	0.6985	0.7320	0.7640	0.7930	0.8185	0.8413	0.8616
	25	0.4507	0.5730	0.6434	0.6813	0.7140	0.7452	0.7735	0.7984	0.8206	0.8405
	30	0.4383	0.5573	0.6257	0.6626	0.6944	0.7248	0.7522	0.7765	0.7981	0.8174
	35	0.4276	0.5436	0.6104	0.6464	0.6774	0.7070	0.7338	0.7575	0.7785	0.7973
	40	0.4182	0.5316	0.5969	0.6321	0.6624	0.6914	0.7176	0.7408	0.7613	0.7798

(注) A : 薬室断面積に対する前室断面積の比、 LD : 薬室直径に対する全長の比

6.2.2 令和4年度報告書案（R04 案）^[6]

R04 案では図 6-1 に示す全ての数値解析結果を用いて検討された。6.2.1 節と同様に、最大過圧から求める保安距離を中心が移動する円（中心 C と半径 R を持つ円）として検討を行った。R04 報告書で報告した数値解析結果に対して野外実験との誤差を評価して、保安距離の再検討を行う。

6.2.2.1 野外実験と数値解析と比較

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 6-11 に(a) $LD = 3$, (b) $LD = 8.6$ における数値解析と野外実験の比較 ($A = 1$) として 0° 、 60° 、 90° 、 120° 、 180° 方向の最大過圧分布を示した。数値解析において図 6-11b の 180° 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。

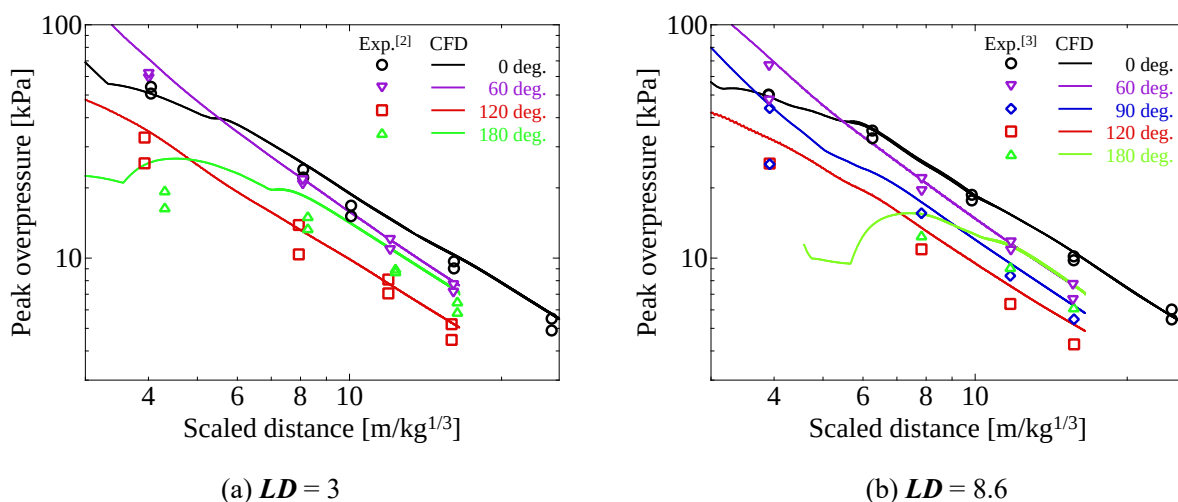


図 6-11 野外実験と数値解析の最大過圧の比較 ($A = 1$)

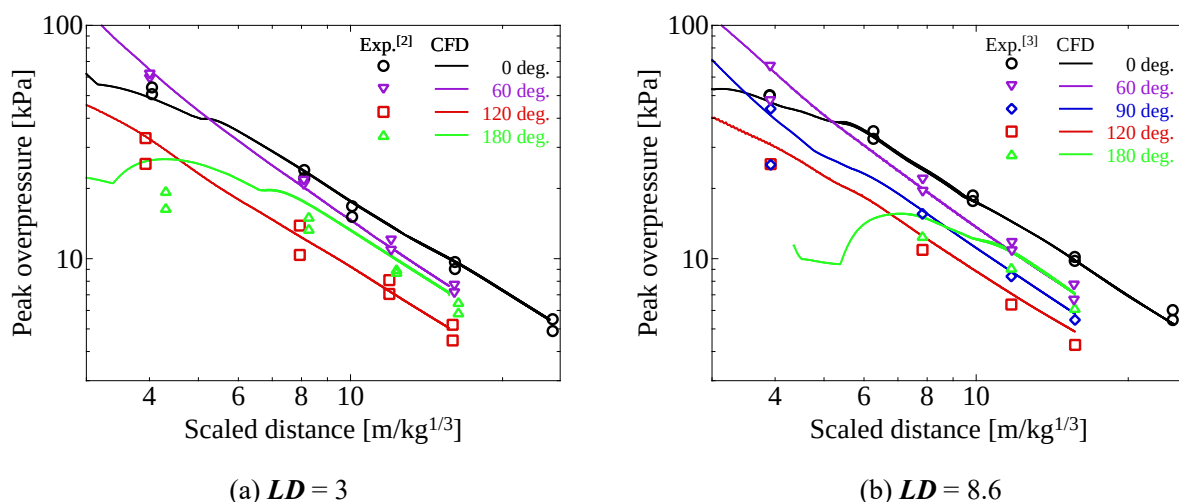


図 6-12 野外実験と補正した数値解析の最大過圧の比較 ($A = 1$)

(数値解析における最大過圧分布において換算距離を 0.95 倍に補正)

図 6-11 は $A=1$ における野外実験と数値解析の最大過圧の比較であり、プロットが実験、実線が数値解析結果である。これより $A=1$ の数値解析結果は全体的に実験結果を過大評価しており、安全側であるとは言え保安距離の過大評価につながると考えられる。そこで、適切な保安距離を提案するために、図 6-12 では数値解析における最大過圧分布について換算距離を 0.95 倍に補正した。これにより全ての角度に対して、実験結果の過小評価に至らない範囲で、過大評価を抑えることができた。 $A=0.241$ については図 6-9 の通り実験と数値解析はよく一致していることから補正を行わない。

また図 6-1 の通り $A=0.0625$ の条件でも数値解析を行なっているが、野外実験が行われていないため、誤差の評価ができていない。ここでは $A=1$ では換算距離を 0.95 倍に補正、図 6-9 の通り $A \leq 0.241$ では換算距離を補正せず、R04 報告書と同じ方法で整理する。

6.2.2.2 LD と A を考慮した保安距離

R03 修正案と同様に、中心 C と半径 R を地上式火薬庫の保安距離 K からの変換係数 $C_{R04}(A, LD)$ と $R_{R04}(A, LD)$ を求める (R04 報告書では直径比 D_1/D_2 であったが、ここでは統一のため面積比 A に置き換える)。

$$C = C_{R04}(A, LD) \cdot K \quad (5)$$

$$R = R_{R04}(A, LD) \cdot K \quad (6)$$

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 $K=16, 14, 8, 5$ を上式に代入することで保安距離を示す円の中心 C と半径 R を求めることができる。

6.2.2.3 $C_{R04}(A, LD)$

R04 報告書のデータに対し、 $A = 1$ における $C_{R04}(1, LD)$ の値を 0.95 倍に補正する。R04 報告書の図 6-13 以降において、補正の影響を含めた図表を示す。

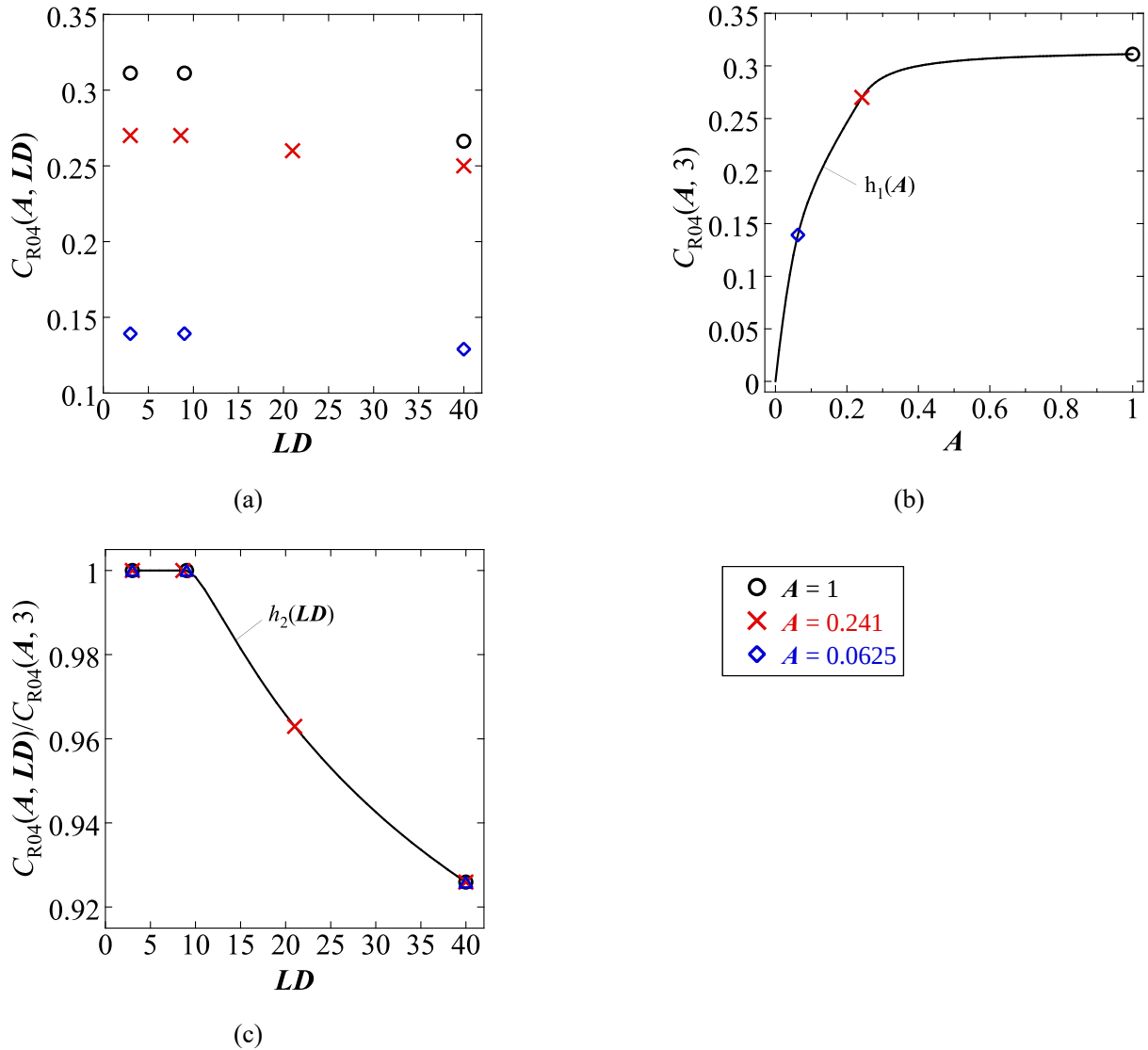


図 6-13 $C_{R04}(A, LD)$ の A と LD 依存性

図 6-13a に $A = 1, 0.241, 0.0625$ の $C_{R04}(A, LD)$ を整理した。図 6-13b は $LD = 3$ における $C_{R04}(A, 3)$ であり、 A の減少に伴って小さくなり、 $A = 0$ では爆風は火薬庫から外に放出されない（理想的には保安距離は零になる）と仮定した際の LD に依存しない近似線 $h_1(A)$ を示した。また図 6-13c は $C_{R04}(A, LD)/C_{R04}(A, 3)$ であり、 A に依存しない近似線 $h_2(LD)$ を示した。表 6-8、表 6-9 に $h_1(A)$ と $h_2(LD)$ の具体的な値を示す。

表 6-8 $h_1(\mathbf{A})$ 分布

$\mathbf{A}$	$h_1(\mathbf{A})$
1	0.31118
0.9	0.30906
0.8	0.30600
0.7	0.30121
0.6	0.29263
0.5	0.27278
0.4	0.22141
0.3	0.16665
0.2	0.11172
0.1	0.05620

表 6-9 $h_2(\mathbf{LD})$ 分布

$\mathbf{LD}$	$h_2(\mathbf{LD})$	$\mathbf{LD}$	$h_2(\mathbf{LD})$	$\mathbf{LD}$	$h_2(\mathbf{LD})$
3	1.0000	16	0.97806	29	0.94456
4	1.0000	17	0.97476	30	0.94260
5	1.0000	18	0.97159	31	0.94069
6	1.0000	19	0.96857	32	0.93885
7	1.0000	20	0.96569	33	0.93706
8	1.0000	21	0.96296	34	0.93532
9	1.0000	22	0.96037	35	0.93364
10	0.99845	23	0.95786	36	0.93201
11	0.99552	24	0.95545	37	0.93042
12	0.99211	25	0.95312	38	0.92888
13	0.98856	26	0.95087	39	0.92738
14	0.98499	27	0.94870	40	0.92593
15	0.98148	28	0.94660		

図 6-13b と図 6-13c の関係から、広範な $\mathbf{A}$ 、 $\mathbf{LD}$ における中心 $C_{R04}(\mathbf{A}, \mathbf{LD})$ は次式によって整理できる。

$$C_{R04}(\mathbf{A}, \mathbf{LD}) = h_1(\mathbf{A}) \cdot h_2(\mathbf{LD}) \quad (7)$$

6.2.2.4 $R_{R04}(\mathbf{A}, \mathbf{LD})$

$\mathbf{A} = 1, 0.241, 0.0625$ における $R_{R04}(\mathbf{A}, \mathbf{LD})$ を図 6-14a に整理した。図 6-14b は無次元勾配 $R_{R04}(\mathbf{A}, \mathbf{LD})/R_{R04}(\mathbf{A}, 3)$ を示しているが、図 6-13c に示す中心 C とは異なり $\mathbf{A}$ に依存した分布となっており単純化が難しい。そこで半径 R は図 6-14a に示す関数 $R_{R04}(\mathbf{A}, \mathbf{LD})$ において $\mathbf{A} = 1, 0.241, 0.0625$ の値を表 6-10 に示す通りに取得し、 $0.241 \leq \mathbf{A} \leq 1$ と $0.0625 \leq \mathbf{A} \leq 0.241$ の 2 領域に分けて内挿することで求める。

$$R_{R04}(\mathbf{A}, \mathbf{LD}) = \begin{cases} \frac{\mathbf{A}-0.241}{0.759} R_{R04}(1, \mathbf{LD}) + \frac{1-\mathbf{A}}{0.759} R_{R04}(0.241, \mathbf{LD}) & 0.241 \leq \mathbf{A} \leq 1 \\ \frac{\mathbf{A}-0.0625}{0.1785} R_{R04}(0.241, \mathbf{LD}) + \frac{0.241-\mathbf{A}}{0.1785} R_{R04}(0.0625, \mathbf{LD}) & 0.0625 \leq \mathbf{A} \leq 0.241 \end{cases} \quad (8)$$

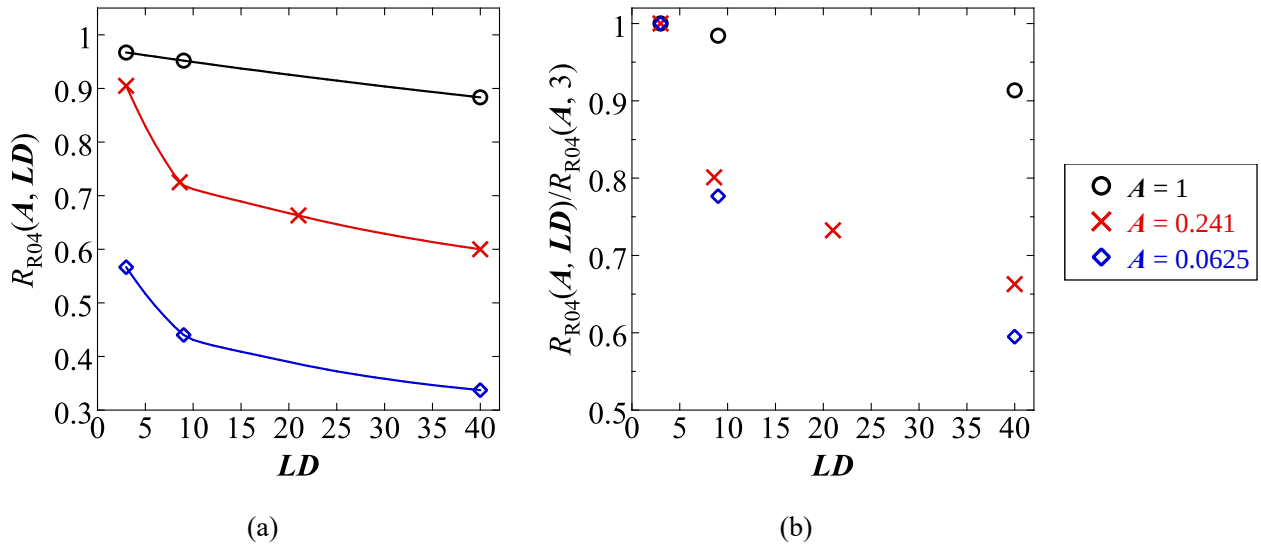


図 6-14 $R_{R04}(A, LD)$ の近似線の勾配 F_R の A と LD 依存性

表 6-10 図 6-14 の $R_{R04}(A, LD)$ 分布

LD	$R_{R04}(A, LD)$		
	$A = 1$	$A = 0.241$	$A = 0.0625$
3	0.96710	0.90500	0.56675
4	0.96452	0.86592	0.54104
5	0.96196	0.82985	0.51717
6	0.95942	0.79680	0.49515
7	0.95690	0.76677	0.47497
8	0.95439	0.73976	0.45664
9	0.95190	0.71914	0.44015
10	0.94943	0.71228	0.43094
11	0.94698	0.70721	0.42558
12	0.94455	0.70253	0.42107
13	0.94214	0.69800	0.41690
14	0.93974	0.69355	0.41288
15	0.93737	0.68914	0.40896
16	0.93501	0.68475	0.40509
17	0.93267	0.68038	0.40126
18	0.93035	0.67603	0.39746
19	0.92805	0.67168	0.39367
20	0.92577	0.66734	0.38990
21	0.92350	0.66300	0.38614

LD	$R_{R04}(A, LD)$		
	$A = 1$	$A = 0.241$	$A = 0.0625$
22	0.92125	0.65873	0.38247
23	0.91902	0.65460	0.37897
24	0.91680	0.65060	0.37563
25	0.91460	0.64671	0.37243
26	0.91242	0.64295	0.36938
27	0.91026	0.63929	0.36645
28	0.90811	0.63574	0.36364
29	0.90597	0.63229	0.36094
30	0.90385	0.62894	0.35835
31	0.90175	0.62569	0.35587
32	0.89966	0.62252	0.35347
33	0.89759	0.61944	0.35117
34	0.89553	0.61644	0.34895
35	0.89349	0.61352	0.34681
36	0.89146	0.61067	0.34474
37	0.88945	0.60790	0.34275
38	0.88745	0.60520	0.34083
39	0.88547	0.60257	0.33897
40	0.88350	0.60000	0.33717

6.2.2.5 保安距離の数式化

前項までで、地中式火薬庫の爆風に対する保安距離を示す円の中心 C と半径 R として地上式火薬庫の保安距離 K に対して任意の A と LD に対する中心 C と半径 R は以下のようになる。

$$C = C_{R04}(A, LD) \cdot K \quad (9)$$

$$R = R_{R04}(A, LD) \cdot K \quad (10)$$

さらに、これらの中心 C と半径 R の値は薬量の 3 乗根で除した換算距離であるから、貯蔵爆薬量を W [kg] とすると、保安距離の中心位置を示すトンネル入口から中心までの距離 D_C [m] と、その中心から全方向にとるべき保安距離となる半径 D_R [m] は、以下の式で求められる。

$$D_C = C_{R04}(A, LD) \cdot K \cdot W^{1/3} \quad (11)$$

$$D_R = R_{R04}(A, LD) \cdot K \cdot W^{1/3} \quad (12)$$

ここで、各種保安物件、各薬量ごとの $K \cdot W^{1/3}$ の値は、規則第 23 条第 1 項の一級火薬庫の保安距離表 そのものである。したがって各種保安物件、各薬量ごとの D_C と D_R の値は、規則第 23 条第 1 項の表の保安物件と薬量に応じた一級火薬庫の値にそれぞれ $C_{R04}(A, LD)$ 、 $R_{R04}(A, LD)$ を乗じて求めることができる。

以上の考え方で地中式火薬庫の保安距離を新しく規則で定める場合、規則第 23 条第 1 項の表を利用すれば、 $C_{R04}(A, LD)$ 、 $R_{R04}(A, LD)$ の値を数式ではなく、表 6-11 のように前室薬室断面積比 A の例えば 0.1 刻みのときの値を表で指定するだけでよいと考えられる。

表 6-11 R04 修正案まとめ

$C_{R04}(A, LD)$		A (以下)									
		0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1
LD (以上)	3	0.1789	0.2463	0.2888	0.2999	0.3046	0.3071	0.3087	0.3098	0.3106	0.3112
	5	0.1789	0.2463	0.2888	0.2999	0.3046	0.3071	0.3087	0.3098	0.3106	0.3112
	7	0.1789	0.2463	0.2888	0.2999	0.3046	0.3071	0.3087	0.3098	0.3106	0.3112
	9	0.1789	0.2463	0.2888	0.2999	0.3046	0.3071	0.3087	0.3098	0.3106	0.3112
	12	0.1774	0.2444	0.2865	0.2976	0.3022	0.3047	0.3062	0.3073	0.3081	0.3087
	15	0.1755	0.2417	0.2834	0.2944	0.2989	0.3014	0.3030	0.3040	0.3048	0.3054
	18	0.1738	0.2393	0.2806	0.2914	0.2959	0.2984	0.2999	0.3010	0.3017	0.3023
	21	0.1722	0.2372	0.2781	0.2888	0.2933	0.2957	0.2972	0.2983	0.2991	0.2997
	25	0.1705	0.2348	0.2752	0.2859	0.2903	0.2927	0.2942	0.2952	0.2960	0.2966
	30	0.1686	0.2322	0.2722	0.2827	0.2871	0.2895	0.2910	0.2920	0.2927	0.2933
	35	0.1670	0.2300	0.2696	0.2800	0.2843	0.2867	0.2882	0.2892	0.2900	0.2905
	40	0.1656	0.2281	0.2674	0.2777	0.2820	0.2843	0.2858	0.2868	0.2876	0.2881

$R_{R04}(A, LD)$		A (以下)									
		0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1
LD (以上)	3	0.6378	0.8272	0.9098	0.9180	0.9262	0.9344	0.9426	0.9507	0.9589	0.9671
	5	0.5828	0.7579	0.8401	0.8575	0.8749	0.8923	0.9097	0.9271	0.9446	0.9620
	7	0.5362	0.6996	0.7815	0.8066	0.8316	0.8567	0.8817	0.9068	0.9318	0.9569
	9	0.4987	0.6550	0.7372	0.7679	0.7986	0.8292	0.8599	0.8906	0.9212	0.9519
	12	0.4802	0.6378	0.7213	0.7532	0.7851	0.8170	0.8489	0.8808	0.9127	0.9446
	15	0.4678	0.6247	0.7084	0.7411	0.7738	0.8065	0.8392	0.8720	0.9047	0.9374
	18	0.4560	0.6119	0.6958	0.7293	0.7628	0.7963	0.8298	0.8633	0.8968	0.9304
	21	0.4443	0.5993	0.6832	0.7175	0.7519	0.7862	0.8205	0.8548	0.8892	0.9235
	25	0.4300	0.5836	0.6675	0.7028	0.7381	0.7734	0.8087	0.8440	0.8793	0.9146
	30	0.4152	0.5667	0.6503	0.6865	0.7227	0.7590	0.7952	0.8314	0.8676	0.9039
	35	0.4028	0.5522	0.6353	0.6721	0.7090	0.7459	0.7828	0.8197	0.8566	0.8935
	40	0.3924	0.5395	0.6220	0.6594	0.6967	0.7341	0.7714	0.8088	0.8461	0.8835

(注) A : 薬室断面積に対する前室断面積の比、 LD : 薬室直径に対する全長の比

6.2.3 R04 修正案と R03 修正案の比較

ここで表 6-7 と表 6-11 の比較のため差分を表 6-12 に示す。

表 6-12 R04 修正案と R03 修正案の差（赤字: R03 のほうが大きい。橙: 誤差の絶対値が最大。）

$C_{R04}(A, LD)$		A (以下)									
$- C_{R03}(A, LD)$		0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1
LD (以上)	3	-0.0281	0.0064	0.0241	0.0161	0.0066	-0.0012	-0.0042	-0.0053	-0.0058	-0.0060
	5	-0.0281	0.0064	0.0241	0.0161	0.0066	-0.0012	-0.0042	-0.0053	-0.0058	-0.0060
	7	-0.0281	0.0064	0.0241	0.0161	0.0066	-0.0012	-0.0042	-0.0053	-0.0058	-0.0060
	9	-0.0280	0.0065	0.0242	0.0163	0.0067	-0.0010	-0.0041	-0.0052	-0.0056	-0.0058
	12	-0.0276	0.0067	0.0242	0.0164	0.0069	-0.0008	-0.0039	-0.0050	-0.0054	-0.0056
	15	-0.0274	0.0064	0.0238	0.0161	0.0066	-0.0010	-0.0039	-0.0051	-0.0055	-0.0057
	18	-0.0271	0.0063	0.0235	0.0158	0.0064	-0.0011	-0.0041	-0.0051	-0.0056	-0.0058
	21	-0.0270	0.0062	0.0232	0.0155	0.0063	-0.0012	-0.0042	-0.0052	-0.0056	-0.0058
	25	-0.0267	0.0061	0.0228	0.0154	0.0062	-0.0012	-0.0041	-0.0052	-0.0056	-0.0058
	30	-0.0264	0.0060	0.0226	0.0151	0.0061	-0.0012	-0.0041	-0.0051	-0.0056	-0.0058
	35	-0.0262	0.0060	0.0224	0.0150	0.0060	-0.0012	-0.0040	-0.0051	-0.0054	-0.0057
	40	-0.0259	0.0060	0.0223	0.0149	0.0060	-0.0012	-0.0040	-0.0050	-0.0054	-0.0056

$R_{R04}(A, LD)$		A (以下)									
$- R_{R03}(A, LD)$		0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1
LD (以上)	3	0.0070	0.0253	0.0095	-0.0355	-0.0730	-0.1085	-0.1399	-0.1666	-0.1895	-0.2091
	5	0.0045	0.0226	0.0145	-0.0167	-0.0413	-0.0639	-0.0828	-0.0974	-0.1084	-0.1165
	7	0.0019	0.0203	0.0187	-0.0012	-0.0149	-0.0269	-0.0353	-0.0399	-0.0411	-0.0396
	9	-0.0025	0.0178	0.0218	0.0102	0.0046	0.0005	-0.0002	0.0027	0.0087	0.0173
	12	-0.0094	0.0153	0.0224	0.0131	0.0095	0.0074	0.0086	0.0134	0.0212	0.0315
	15	-0.0125	0.0141	0.0228	0.0151	0.0130	0.0124	0.0150	0.0211	0.0302	0.0418
	18	-0.0152	0.0130	0.0232	0.0171	0.0164	0.0173	0.0213	0.0287	0.0390	0.0518
	21	-0.0178	0.0119	0.0236	0.0191	0.0199	0.0222	0.0276	0.0363	0.0479	0.0619
	25	-0.0207	0.0106	0.0241	0.0215	0.0241	0.0282	0.0352	0.0456	0.0587	0.0741
	30	-0.0232	0.0094	0.0246	0.0239	0.0283	0.0342	0.0429	0.0549	0.0696	0.0865
	35	-0.0248	0.0086	0.0249	0.0258	0.0317	0.0390	0.0490	0.0623	0.0781	0.0962
	40	-0.0258	0.0079	0.0251	0.0272	0.0343	0.0427	0.0538	0.0680	0.0848	0.1037

表 6-12 において、誤差の絶対値が最も大きい場所を橙で示した。中心 C の誤差は非常に小さく、最大でも絶対値 0.0281 の範囲に収まった。その一方で半径 R は、 A が大きい領域にて特に誤差が大きくなり、 LD が小さいほど R03 修正案の方が保安距離が大きく、 LD が大きいほど R03 修正案の方が保安距離が小さくなった。R03 修正案と R04 修正案において半径 ($LD=8.6$ の値でスケール化) を示すと図 6-15 のようになる。R03 では実験データの不足により任意の A において LD の影響は黒線 (図 6-10a) で整理できると仮定したが、数値解析では $A=1$ や 0.0625 において $LD=3, 9, 40$ の計算を行っており、図 6-15 の黒線と一致しなかった。図 6-15 では $A=1$ において LD が小さいほど $R_{R03}(1, LD)$ が過大評価、 LD が大きいほど $R_{R03}(1, LD)$ が過小評価することが確認された。このことから R03 において用いた仮定である半径 $R_{R03}(A, LD)$ に対する A と LD の影響をそれぞれ独立に評価する方法 (式 1、式 2) については注意が必要である。

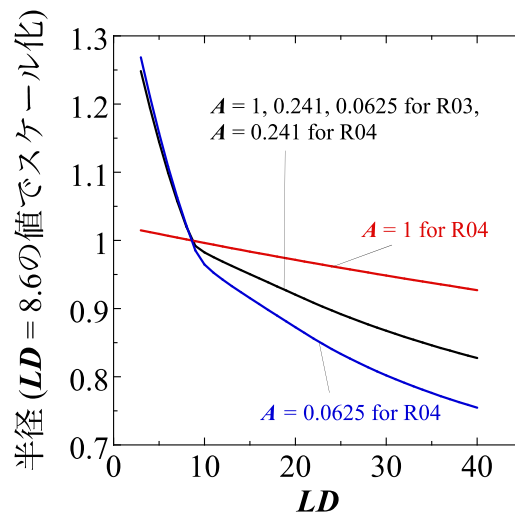


図 6-15 $LD=8.6$ の値でスケール化した際の、R03 修正案と R04 修正案の半径の A 依存性

6.2.4 まとめ

地上式火薬庫の換算距離 K (16: 第一種保安物件、14: 第二種保安物件、8: 第三種保安物件、5: 第四種保安物件) で得られる最大過圧の等値線を地中式火薬庫の保安距離に置き換えた場合、中心が移動する円 (中心 C と半径 R を持つ円) として表現することができる。R03 と R04 の産業保安等技術基準策定研究開発等事業 (火薬類爆発影響低減化技術基準検討事業) 報告書で示された、爆風圧によって評価された保安距離の再評価を行った。

R03 では基準となる地表面爆発の最大過圧を再評価し、R03 報告書と同じ方法を取って表 6-7 に示す中心 $C_{R03}(A, LD)$ と半径 $R_{R03}(A, LD)$ を取得した。R04 では野外実験と数値解析の誤差を検討し、 $A = 1$ において数値解析における換算距離に対して 0.95 倍の補正を行い、R04 報告書と同じ方法を取って表 6-11 に示す中心 $C_{R04}(A, LD)$ と半径 $R_{R04}(A, LD)$ を取得した。中心については両者の誤差はほとんどなくなったが、半径については実験データの足りない箇所において、R03 修正案で採用した仮定が適用できない範囲において誤差が大きくなった。

以上により、R03 修正案では採用した仮定が適用できない範囲があることから、規則に採用するのは R04 修正案が適切であると考ええる。すなわち、中心 $C_{R04}(A, LD)$ と半径 $R_{R04}(A, LD)$ に対して換算距離 $K = 16, 14, 8, 5$ と薬量の $1/3$ 乗の値を乗ずることによって、地中式火薬庫について最大過圧基準の第一種から第四種保安物件の保安距離 [m] を算出することができる。

参考文献

- [1] 平成 27 年度火薬類爆発影響低減化技術基準検討報告書
- [2] 平成 28 年度火薬類爆発影響低減化技術基準検討報告書
- [3] 平成 29 年度火薬類爆発影響低減化技術基準検討報告書
- [4] 平成 30 年度火薬類爆発影響低減化技術基準検討報告書
- [5] 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
- [6] 令和 4 年度産業保安等技術基準策定研究開発等事業 (火薬類爆発影響低減化技術基準検討事業) 報告書
- [7] 令和元年度火薬類爆発影響低減化技術基準検討報告書
- [8] 令和 2 年度火薬類爆発影響低減化技術基準検討報告書
- [9] KaleidaGraph バージョン 5.0 ユーザーガイド

6.3 地中式火薬庫の保安距離改正案

6.3.1 地中式火薬庫の保安距離の考え方

6.3.1.1 爆風に対する保安距離

地中式火薬庫の爆風に対する保安距離は、前室（トンネル）入口方向に中心が移動する円（中心 C と半径 R を持つ円）として表現できることが確認されている。その大きさを数式化する方法は、6.2 節で結論づけたように令和 4 年度報告書修正案（R04 修正案）を採用し、

$$D_C = C_{R04}(A, LD) \cdot K \cdot W^{1/3} \quad , \quad D_R = R_{R04}(A, LD) \cdot K \cdot W^{1/3}$$

と表される。 D_C [m]は保安距離の中心位置を示す前室入口から中心までの距離、 D_R [m]はその中心から全方向にとるべき保安距離、 K [m/kg^{1/3}]は各種保安物件に対する地上式一級火薬庫の保安距離の換算距離、 W [kg]は貯蔵爆薬量、 $C_{R04}(A, LD)$ 及び $R_{R04}(A, LD)$ はそれぞれ中心までの距離及び半径についての無次元の係数で、（前室断面積／薬室断面積） A と{全長（薬室＋前室）／薬室直径} LD に依存する。

ここで、 $K \cdot W^{1/3}$ の値は、各種保安物件、各薬量ごとの地上式一級火薬庫の保安距離であり、規則第 23 条第 1 項の保安距離表そのものである。したがって、各種保安物件、各薬量ごとの D_C と D_R の値は、規則第 23 条第 1 項の表の保安物件と薬量に応じた地上式一級火薬庫の値にそれぞれ $C_{R04}(A, LD)$ 、 $R_{R04}(A, LD)$ を乗じて求めることができる。よって、規則においては、第 23 条第 1 項の表を利用し、前節表 6-11 に示す $C_{R04}(A, LD)$ 、 $R_{R04}(A, LD)$ の値を示すこととする（次項 6.3.2 規則改正案の第 23 条第 6 項の表）。

6.3.1.2 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す、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。

発破振動による建物被害の経験値から、第一種、第二種、第三種及び第四種保安物件には、人への被害がないように、最大振動速度を、それぞれ、建物にほぼ被害がない 10cm/s 以下（震度 4 強相当）、壁や梁に軽微なひび割れ・亀裂が入ることがある 20cm/s 以下（震度 5 弱相当）、壁や梁にひび割れ・亀裂が入ることがある 30cm/s 以下（震度 5 強相当）、壁や梁にひび割れ・亀裂が多くなり耐震性の低い建物は傾くことがある 40cm/s 以下（震度 6 弱相当）を閾値と考える。万一の爆発による地盤振動がこれらの閾値となる換算距離 K を、野外実験で得た地盤振動計測値の最大値より大きい Westine の硬岩の発破振動減衰式を用いて求める。その結果、第一種、第二種、第三種及び第四種保安物件で、それぞれ、換算距離 $K=8.3$ 、 5.5 、 4.4 、 3.6 m/kg^{1/3} となった。（詳細は、令和 3 年度火薬類爆発影響低減化技術基準検討事業報告書を参照されたい。）

規則には、第一種から第四種保安物件について、それぞれ、換算距離 $K=8.3$ 、 5.5 、 4.4 、 3.6 m/kg^{1/3} で計算される爆薬量 40 トンから 0.1 トンまでの保安距離の表を示す（次項 6.3.2 規則改正案の第 23 条第 5 項の第 2 表）。数値は、100m 未満は 5m 単位、100m 以上は 10m 単位で切り上げる。ただし、下記のとおり飛散物の保安距離が 50m なので、保安距離の最小値は 50m とする。なお、この地盤振動の保安距離の起点は、薬室の外壁である。

6.3.1.3 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が発生すると考えられる。地中式火薬庫直上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 50m であり、飛散物に対する保安距離はすべて 50m とする。なお、飛散物の保安距離の起点は、薬室の外壁である。（詳細は、令和 3 年度火薬類爆発影響低減化技術基準検討事業報告書を参照されたい。）

6.3.2 地中式火薬庫の保安距離の規則改正案

地中式一級火薬庫の保安距離の規則改正案を以下に示す。規則第 23 条に、新たに第 6 項を設ける案とした。なお、第 5 項の地下式一級火薬庫の保安距離における火薬庫外壁からとる保安距離は明らかに地盤振動と飛散物に対する保安距離であるが、極端に安全をみて爆風に対する保安距離をとることとなっている。今回、地中式一級火薬庫の保安距離の一つに地盤振動及び飛散物に対する保安距離を採用するにあたり、これを地下式一級火薬庫の地盤振動及び飛散物に対する保安距離にも採用する案とした。

(保安距離)

第 23 条 火薬庫は、第 2 項から第 6 項第 7 項までに規定する場合を除き、その貯蔵量に応じ火薬庫の外壁から保安物件に対し次の表の保安距離をとらなければならない。

2 から 4 [略]

5 地下に設置する 1 級火薬庫については、第 1 項の規定にかかわらず、その貯蔵量に応じ火薬庫の外壁及び放爆用トンネルからの保安物件に対する保安距離は、第 1 項の規定にかかわらず、次の表第 1 表の距離とし、かつ、その貯蔵量に応じ火薬庫の外壁からの保安物件に対する保安距離は、次の第 2 表の距離とする。

6 地中に設置する 1 級火薬庫については、第 1 項の規定にかかわらず、火薬庫に通ずるトンネルの入口前方にその貯蔵量に応じた第 1 項に規定する 1 級火薬庫の保安距離に次の表の火薬庫断面積に対するトンネル断面積の比並びに火薬庫断面積と同じ面積をもつ円の直径に対する火薬庫及びトンネルの全長の比に応じた欄の上段の値を乗じた距離をとり、この起点からの保安物件に対する保安距離は、その貯蔵量に応じた第 1 項に規定する 1 級火薬庫の保安距離に次の表の火薬庫断面積に対するトンネル断面積の比並びに火薬庫断面積と同じ面積をもつ円の直径に対する火薬庫及びトンネルの全長の比に応じた欄の下段の値を乗じた距離とし、かつ、その貯蔵量に応じ火薬庫の外壁からの保安物件に対する保安距離は、前項第 2 表の距離とする。

7 地上に設置する 2 級火薬庫で周囲に土堤を設けないものは、第 1 項に規定する保安距離の 2 倍の保安距離をとらなければならない。

8 保安物件がもつばら当該火薬庫の所属する事業所の事業の用に供する施設であるときは、第 1 項から前項までの規定にかかわらず、当該保安物件に対し経済産業大臣が告示で定める保安距離をとらなければならない。

(第 23 条第 5 項の表第 1 表)

[略]

(第 23 条第 5 項の第 2 表)

貯蔵火薬類の 数量	保安物件の種類及び保安距離				区分
	第四種 保安物件	第三種 保安物件	第二種 保安物件	第一種 保安物件	
	(以上) m	(以上) m	(以上) m	(以上) m	単位
爆薬 40 トン (以下)	130	160	190	290	貯蔵量に 応ずる 保安距離
35	120	150	180	280	
30	120	140	180	260	
25	110	130	170	250	
20	100	120	150	230	
19	100	120	150	230	
18	95	120	150	220	
17	95	120	150	220	
16	95	120	140	210	
15	90	110	140	210	
14	90	110	140	210	
13	85	110	130	200	
12	85	110	130	200	
11	85	100	130	190	
10	80	95	120	180	
9	75	95	120	180	
8	75	90	110	170	
7	70	85	110	160	
6	70	80	100	160	
5	65	80	95	150	
4	60	70	90	140	
3	55	65	80	120	
2	50	60	70	110	
1	50	50	55	85	
0.7	50	50	50	75	
0.5	50	50	50	70	
0.3	50	50	50	60	
0.2	50	50	50	50	
0.1	50	50	50	50	

(第 23 条第 6 項の表)

火薬庫断面 面積と同じ面積を もつ円の 直径に対 する火薬 庫及びト ンネルの 全長の比 (以上)	火薬庫断面積に対するトンネル断面積の比 (以下)									
	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1
3	0.180	0.246	0.289	0.300	0.305	0.307	0.309	0.310	0.311	0.311
	0.638	0.827	0.910	0.918	0.926	0.934	0.943	0.951	0.959	0.967
5	0.179	0.246	0.289	0.300	0.305	0.307	0.309	0.310	0.311	0.311
	0.583	0.758	0.840	0.858	0.875	0.892	0.910	0.927	0.945	0.962
7	0.179	0.246	0.289	0.300	0.305	0.307	0.309	0.310	0.311	0.311
	0.536	0.700	0.782	0.807	0.832	0.857	0.882	0.907	0.932	0.957
9	0.179	0.246	0.289	0.300	0.305	0.307	0.309	0.310	0.311	0.311
	0.499	0.655	0.737	0.768	0.799	0.829	0.860	0.891	0.921	0.952
12	0.177	0.244	0.287	0.298	0.302	0.305	0.306	0.307	0.308	0.309
	0.480	0.638	0.721	0.753	0.785	0.817	0.849	0.881	0.913	0.945
15	0.176	0.242	0.283	0.294	0.299	0.301	0.303	0.304	0.305	0.305
	0.468	0.625	0.708	0.741	0.774	0.807	0.839	0.872	0.905	0.937
18	0.174	0.239	0.281	0.291	0.296	0.298	0.300	0.301	0.302	0.302
	0.456	0.612	0.696	0.729	0.763	0.796	0.830	0.863	0.897	0.930
21	0.172	0.237	0.278	0.289	0.293	0.296	0.297	0.298	0.299	0.300
	0.444	0.599	0.683	0.718	0.752	0.786	0.821	0.855	0.889	0.924
25	0.171	0.235	0.275	0.286	0.290	0.293	0.294	0.295	0.296	0.297
	0.430	0.584	0.668	0.703	0.738	0.773	0.809	0.844	0.879	0.915
30	0.169	0.232	0.272	0.283	0.287	0.290	0.291	0.292	0.293	0.293
	0.415	0.567	0.650	0.687	0.723	0.759	0.795	0.831	0.868	0.904
40	0.166	0.228	0.267	0.278	0.282	0.284	0.286	0.287	0.288	0.288
	0.392	0.540	0.622	0.659	0.697	0.734	0.771	0.809	0.846	0.884

[有効数字の桁数を増やした別案]

(第23条第6項の表)

火薬庫断面 面積と同じ面積を もつ円の 直径に対 する火薬 庫及びト ンネルの 全長の比 (以上)	火薬庫断面積に対するトンネル断面積の比 (以下)									
	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1
3	0.1789	0.2463	0.2888	0.2999	0.3046	0.3071	0.3087	0.3098	0.3106	0.3112
	0.6378	0.8272	0.9098	0.9180	0.9262	0.9344	0.9426	0.9507	0.9589	0.9671
5	0.1789	0.2463	0.2888	0.2999	0.3046	0.3071	0.3087	0.3098	0.3106	0.3112
	0.5828	0.7579	0.8401	0.8575	0.8749	0.8923	0.9097	0.9271	0.9446	0.9620
7	0.1789	0.2463	0.2888	0.2999	0.3046	0.3071	0.3087	0.3098	0.3106	0.3112
	0.5362	0.6996	0.7815	0.8066	0.8316	0.8567	0.8817	0.9068	0.9318	0.9569
9	0.1789	0.2463	0.2888	0.2999	0.3046	0.3071	0.3087	0.3098	0.3106	0.3112
	0.4987	0.6550	0.7372	0.7679	0.7986	0.8292	0.8599	0.8906	0.9212	0.9519
12	0.1774	0.2444	0.2865	0.2976	0.3022	0.3047	0.3062	0.3073	0.3081	0.3087
	0.4802	0.6378	0.7213	0.7532	0.7851	0.8170	0.8489	0.8808	0.9127	0.9446
15	0.1755	0.2417	0.2834	0.2944	0.2989	0.3014	0.3030	0.3040	0.3048	0.3054
	0.4678	0.6247	0.7084	0.7411	0.7738	0.8065	0.8392	0.8720	0.9047	0.9374
18	0.1738	0.2393	0.2806	0.2914	0.2959	0.2984	0.2999	0.3010	0.3017	0.3023
	0.4560	0.6119	0.6958	0.7293	0.7628	0.7963	0.8298	0.8633	0.8968	0.9304
21	0.1722	0.2372	0.2781	0.2888	0.2933	0.2957	0.2972	0.2983	0.2991	0.2997
	0.4443	0.5993	0.6832	0.7175	0.7519	0.7862	0.8205	0.8548	0.8892	0.9235
25	0.1705	0.2348	0.2752	0.2859	0.2903	0.2927	0.2942	0.2952	0.2960	0.2966
	0.4300	0.5836	0.6675	0.7028	0.7381	0.7734	0.8087	0.8440	0.8793	0.9146
30	0.1686	0.2322	0.2722	0.2827	0.2871	0.2895	0.2910	0.2920	0.2927	0.2933
	0.4152	0.5667	0.6503	0.6865	0.7227	0.7590	0.7952	0.8314	0.8676	0.9039
40	0.1656	0.2281	0.2674	0.2777	0.2820	0.2843	0.2858	0.2868	0.2876	0.2881
	0.3924	0.5395	0.6220	0.6594	0.6967	0.7341	0.7714	0.8088	0.8461	0.8835

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 6 年 9 月 5 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 6 年 10 月 28 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 7 年 1 月 16 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 7 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

2.A.1.1 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） 議事録

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） 議事録

日 時：令和 6 年 9 月 5 日（木）13:30～14:50

場 所：中央区新川区民館 5 号室

出席者：対面参加 13 名、リモート参加 12 名、書面参加 3 名、計 28 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、石井良幸、遠山貴郎**、
久保田士郎、須山恭三、山本雅昭**、畑中修二*、福田光寿*、伊藤啓太**、多田達士*、
三沢慶祐、佐藤 航*

オブザーバ（経済産業省）：矢野 寿

（産総研）：岡田 賢*、丹波高裕*、高橋良堯*、緒方雄二*

事務局（全火協）：川崎勝樹、重村健二、飯田光明、中塚漢二*、尾田博幸、柳田一也、廣崎義一

（注） *：リモート参加（テレビ会議システムによる参加）

**：書面参加（事前送付した資料に対する意見、質問等の提出）

【配付資料】

資料 1-1 委員会 委員名簿

資料 1-2 令和 6 年度火薬類爆発影響低減化技術基準検討事業 実施計画書（仕様書）

資料 1-3 令和 6 年度 火薬類保安技術実験計画書（案）

資料 1-4 今後の作業スケジュール

（追加配付）令和 6 年度 室内実験について（案）

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 川崎専務理事から「本日の第 1 回委員会で試験計画を審議いただき、北海道での実験に臨みたい」旨の挨拶があった。

3. ご挨拶

経済産業省大臣官房産業保安・安全グループ鉦山・火薬類監理官付矢野係長から「今年度は新しいテーマでの実験である。新たな知見が得られることを期待している」旨の挨拶があった。

4. 令和 6 年度委員紹介、委員長選出

リモート参加の委員およびオブザーバを含め、それぞれ自己紹介があった。

本委員会の委員長として小川委員を、小委員会の委員長として久保田委員（産総研）を、それぞれ推薦したい旨の提案が事務局からなされ、全会一致で承認、選任された。

小川委員長から「野外実験の計画を審議いただき、よりよい実験ができるよう議論いただきたい。」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. 実施計画書（仕様書）について

資料 1-2 に基づいて事務局から事業概要が説明された。質疑は特になかった。

6. 野外実験計画（案）等について

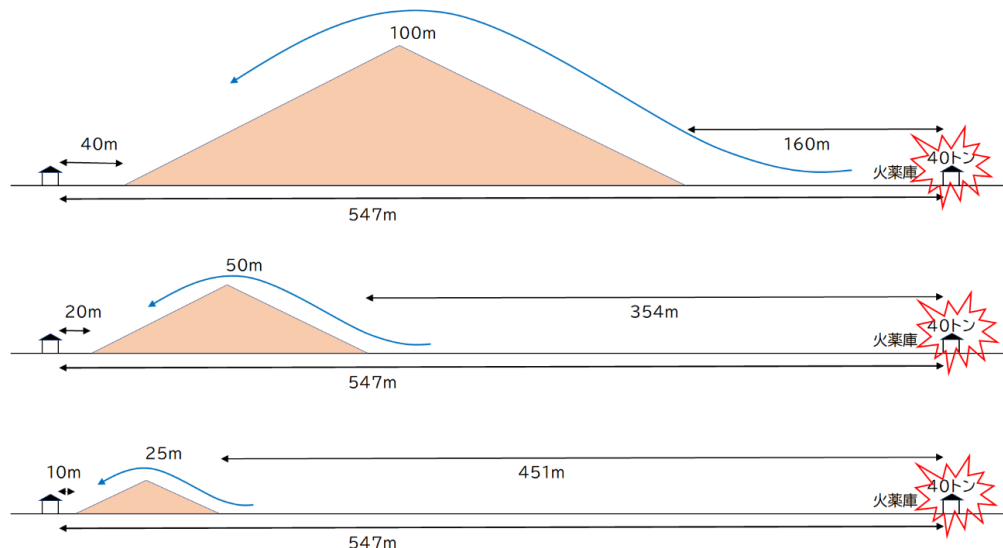
資料 1-3 に基づいて久保田委員から野外実験計画の案が説明された。

途中、経産省から『実験 No.2 窓ガラスの破壊に関する実験』は今年度の仕様書に記載されていないので、実施することはできない旨の説明があった。委員および事務局から「地形の影響のない位置にある窓ガラスの破壊を検討することで理解を得られないか」「爆風の建物への影響の

代表例として窓ガラスを用いるという説明はできないか」などの意見が出された。事務局から「窓ガラスの破壊に係る実験 No.2 の説明は本日の委員会では省略し、全火協と経産省との間で別途、実施可能性を検討する」旨の発言があり、了承された。

資料 1-3 についての主な質疑は以下のとおり。

- ・ 地盤振動計は x 方向、y 方向と垂直な z 方向の 3 方向を計測するが、x と y 方向の向きを考えなくてよいか。例えば ch2 のセンサーの x 方向は実験 No.1-2 においては爆点に対して垂直になるが、実験 No.1-1 においては斜めになる。(事務局) → センサーは取り外しできるので、実験ごとに向きをそれぞれ変えることにする。1 日 1 回の実験であればそれは可能。(産総研)
- ・ 本日書面参加の山本委員から事前質問がある。(小川委員長) → 1. の共振特性については爆風には関係ない。地盤振動には影響がある可能性があるものの、今回の実験目的からすれば、検討する必要はない。2. の爆薬高さについては、実際の火薬庫の高さをスケール化する。山の斜面には木があるが、その影響はありそう。(久保田委員) → 1. については影響はないと考える。2. の爆薬の高さは、火薬庫の床の高さ 30cm をスケール化する。すなわち、実験 No.1-3 (薬量 40kg) では厚さ 30mm の板になる。また、久保田委員の見解のとおり、山には凸凹があり、木が生えている。その場合、減衰特性は明らかに強くなる。来年度以降のテーマにできないか検討したい。(事務局)
- ・ 参考までに、図 6-1-5 をもとに、実際の薬量とした場合の山の高さや位置のイメージがどうなるかを図示すると以下ようになる。(事務局)
- ・ 資材の検討中だが、若干寸法の変更があり得る。窓ガラスの固定において、爆風に対する固定を木の枠とする計画だが、単管(鉄パイプ)を 1m 以上地面に打ちつけて固定する方法に変更する可能性がある。今週、現地事前調査で調整する。(事務局からの補足)



- ・ 地形の影響による爆風圧低減効果は、山の距離と高さに応じた効果を見るのか。(大野委員) → そのとおり。(事務局) → 今回は 30 度の勾配だが、その程度の斜面の角度はあまり効かないのではないかと。(大野委員) → 傾斜が 30 度よりも緩い場合は効果はあまり期待できない。傾斜が急なほど減衰効果が大きくなるはず。来年度以降に確かめたい。(事務局)
- ・ 図 6-1-6 において、山の影響を受けないところにセンサーをおくべきではないか。(大野委員) → ch1~ch4 は山の影響を受けない位置に設置されるセンサーで、換算距離を考慮してその位置を決めている。(事務局)
- ・ 薬量 40kg の実験 (No.1-3) のように遠くに山があってもそれほどの減衰効果は期待できないのではないかと。(大野委員) → 室内実験(小規模実験)によって、山が近い場合等の種々の補完を行う計画にしている。(事務局)
- ・ 爆点に対して 0 度方向に山があることを考えているが、90 度方向にもう一つ山を作って実験することはできないか。(新井委員) → 地形的に計測ができないのではないかと。(事務局) → 一つでもやってみてはどうか。(新井委員) → 山を作るのに 2.5 日、撤去に 1.5 日かかる見込み。興味はあるが現実的ではなく、無理がある。(事務局) → 了解した。(新井委員)

小川委員長から、「野外実験の計画は認めていただいた」とのまとめがなされた。

7. 室内実験計画について

室内実験計画について追加資料に基づき産総研から説明がなされた。主な質疑は次のとおり。

- ・ 山の幅(大きさ)を $1:\sqrt{3}$ にしたのは、爆風の回り込みがないようにしたためだが、実験 No.1-3 縮小実験でさらに幅を大きくした理由は何か。(事務局) → 山を爆点側にずらした場合、山の背後の計測点に爆風が回り込むことが考えられたので、それを回避するためである。(産総研) → 了解した。(事務局)

小川委員長から、「室内実験の計画は認めていただいた」とのまとめがなされた。

8. その他

今後のスケジュールについて、事務局から説明がなされた。主な内容は次のとおり。

- ・ 9月9日以降、保安技術実験への協力依頼を出す(火薬メーカー等)。
- ・ 実験参加者(宿泊希望者)の申込手続きを行う。
- ・ 9月11、12日に保安技術実験の事前説明および事前調査を行う(北海道札幌他)。
- ・ 10月下旬に第2回本委員会を開催する。具体的な日程は追って調整する。
- ・ 11月23日～12月1日 保安技術実験を実施する(北海道野付郡別海町)。

以上

2.A.1.2 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) 議事録

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) 議事録

日 時：令和6年10月28日(月) 13:30～14:30

場 所：中央区立男女平等センター ブーケ21

出席者：対面参加15名、リモート参加12名、書面参加3名、計30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、久保田士郎、松村知治、
須山恭三、山本雅昭、畑中修二*、福田光寿*、伊藤啓太**、多田達士、三沢慶祐**、
佐藤 航*

オブザーバ(経済産業省)：矢野 寿、池田秀俊*

(産総研)：岡田 賢*、杉山勇太*、丹波高裕*、高橋良堯*

(現地建設会社) 吉川克義

事務局(全火協)：川崎勝樹、重村健二*、飯田光明、中塚漢二*、山口潤仁*、尾田博幸、柳田一也、
廣崎義一

(注) *：リモート参加(web会議システムによる参加)

**：書面参加(事前送付した資料に対する意見、質問等の提出)

【配付資料】

資料2-1 火薬類保安技術実験計画書(案)

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)

(追加配付) 室内実験結果(速報)

職務分担表

1. 開会

出席者の確認後、事務局より当委員会の開会がなされた。以後の議事は小川委員長により進められた。

2. 実験計画書(案)等の変更案の説明および検討

資料2-1に基づいて久保田委員から実験計画書(案)が説明された。主な質疑は次のとおり。

- ・ 図6-1-5において、薬量40kgの場合は爆点(火薬庫)から約450m離れた位置に高さ25mの

山が存在する。一方、薬量 0.625kg の場合は、約 160m 離れた位置に高さ 250m の山が存在する。山の位置と高さの関係が異なるが、今回の実験で何が言えるのか。(大野委員) → 野外実験で山の高さを変えるのは難しく、室内実験の結果と合わせて考える必要がある。室内実験と野外実験とが同等であることを証明した後、室内実験のデータを用いて整理する予定。山の傾斜角は 30 度に固定しているが、この条件下で山の位置が火薬庫側にずれた場合に爆風圧が変わることを室内実験で計測する予定である。(久保田委員) → スケールが変わっても ch6 における K 値は 16 に揃えてあるが、これらの実験で何が言えるのかよくわからない。(大野委員) → 傾向があることまでは言えると思う。(久保田委員)

- ・ 図 6-1-6 における ch5 と ch6 の相対比較では何が言えそうか。(山本委員) → 山の位置がずれると山の手前での入射圧も変わる。室内実験では ch5 と ch6 の位置を動かすことができる。(久保田委員) → 補足すると、爆風が山に入ったときの減衰率は入射する爆風圧の大きさによって変わると考えている。野外実験の結果と室内実験の結果を合わせて考察すれば、山がどこにあるか、つまり爆風圧の大きさによる爆風圧低減効果の傾向を整理できることが期待される。特則承認に資するデータが得られるのではないか、(事務局)

以上を踏まえ、実験計画書が承認された。

3. 室内実験結果 (速報)

追加配布の資料に基づき産総研から説明がなされた。主な質疑は次のとおり。

- ・ 山の位置をずらす実験はやっていないのか。(大野委員) → まだで、これから行う。(久保田委員)

4. 点火技術基準、危害予防規程、班別作業マニュアル、職務分担表、緊急連絡網等の確認

資料 2-2 に基づき、点火技術基準の昨年度からの変更点 (爆点の位置等) について、産総研から説明がなされた。

資料 2-3～資料 2.6 および追加配布資料に基づき、危害予防規程の修正点 (保安距離)、班別作業マニュアルの変更点 (火薬類を取り扱う者)、職務分担表、緊急連絡網、実験組織等について、事務局から説明がなされた。

5. その他

経済産業省からの要請もあり、防衛省の林 晃氏 (整備計画局 施設整備官付 施設技術室 建築技術班調整係長) を委員に追加し、次回委員会 (小委員会) から参画いただきたい旨の提案が事務局よりなされ、承認された。

以上

2.A.1.3 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) 議事録

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) 議事録

日 時 : 令和 7 年 1 月 16 日 (木) 13:30～15:25

場 所 : 中央区新富区民館

出席者 : 対面参加 11 名、リモート参加 11 名、計 22 名 (敬称略、順不同)

委 員 : 大野友則、久保田士郎○、松村知治、山本雅昭、畑中修二*、福田光寿*、伊藤啓太*、佐藤 航* (○ : 委員長)

オブザーバ (経済産業省) : 池田秀俊*、矢野 寿

(産総研) : 岡田 賢*、佐分利禎*、高橋良堯*、杉山勇太*、緒方雄二*

事務局 (全火協) : 川崎勝樹、重村健二、飯田光明、中塚漢二*、尾田博幸、柳田一也、廣崎義一

(注) * : リモート参加 (web 会議システムによる参加)

【配付資料】

資料-1 令和 6 年度火薬類保安技術実験結果報告 (速報)

資料-2 爆発影響低減化実験 (室内実験)

資料-3 爆発影響低減化技術基準検討事業の残された課題

1. 開会

出席者確認ののち、事務局より当委員会の開会がなされた。

2. 令和6年度火薬類保安技術実験結果概要（中間）報告

資料-1に基づいて、久保田委員長はじめ産総研メンバー（松村氏、岡田氏、高橋氏）から実験結果の説明がなされた。主な質疑は以下のとおり。

- ・地盤振動の結果（p41, 42）は、予想と反対の結果か。模擬地形がない方が振動が大きく、模擬地形のある方が小さいという予測ではなかったか。（事務局）→ 爆風が地面をたたく方向にセンサーがなかった（ch2～ch5）ことから地盤振動は小さかったのではないか。（久保田委員長）→ 爆風が地面をたたいているのが主成分とすれば、模擬地形があった方が地盤振動は小さくなるのではないか。高橋氏の説明では、地形がない方（ch5）が振動が小さくなるのはそこに水たまりがあったことによる影響と捉えているのか。（事務局）→ Z 方向は変わる可能性がある。（久保田委員長）→ 振動の伝播速度を調べると、地形があると若干遅くなっており、やはり爆風が地面をたたいているのが主成分だと思われる。（高橋氏）
- ・p36 の図を見ると、地形の高さの影響はあるが、距離の影響は入っていない。距離の影響については室内実験の結果と合わせて考察するとのことであったが、整理できそうか。40 トン火薬庫は第1種保安物件に対して 550m の保安距離をとらなければならないが、途中に山があれば保安距離が短くなるという結果になるのか。距離の関数が入るのか。（大野委員）→ 25m という低い山の場合になるが、室内実験で地形までの距離を変えて実験しているので、それらの結果と合わせて考えたい。（久保田委員長）
- ・p32, p33 の図において、地形背後の ch6 と ch7 が逆転している理由は何か。（山本委員）→ 地形からより遠い ch7 の方が圧力が高くなった理由のことか。入射波と地面からの反射波の重なりで、あり得る。山が低いと回折が強い。したがって、実際の静水圧を計っているとは言えない。反射波と重ね合わさった圧力が計測されている。（久保田委員長）
- ・ch6 をきちんと評価すれば ch7 は気にする必要がない、ということであればそれでよいと思う。（山本委員）→ p32 の図でわかるように、ch7 は基準爆風圧のラインよりも低いので問題ないのではないか。（杉山氏）
- ・ch6 はセンサーの受圧面が垂直だが、ch7 は水平か。そうであれば計っているものが違うことになる。（大野委員）→ 角度をもった成分を計っている可能性もある。（久保田委員長）
- ・ch6 だけセンサーの受圧面の向きを垂直にする理由は何か。（大野委員）→ 衝撃波（入射波）が斜めに入ってくるので、センサーが反射圧を計測するのを防ぐために受圧面を垂直にした。ch7 はセンサーの受圧面が水平なので、斜めに入ってくる衝撃波の反射圧を計測して、ピーク過圧が大きくなっていると思われる。（事務局）
- ・赤で示された線は含水爆薬数年間のデータか。（事務局）→ そのとおり。（杉山氏）
- ・EMX2 の基準線を引くことができたが、TNT の基準線と比べた場合、TNT の何%になるか、計算したか。Kingery と比べた場合はどうか。（事務局）→ Kingery で比較した場合、TNT 換算 0.7 くらいになったので、薬量換算比をもう少し緩和できるのかとも思っている。（杉山氏）→ 従来は基準爆風圧が Kingery よりも若干低い METI87 で比較して TNT 比 76% と計算していたと思うが、どちらになりそうか。（事務局）→ 計算してみるが、もう少し緩和できるかどうかだと感じている。（杉山氏）
- ・p35 では、減衰率を換算距離の比を 3 乗して薬量換算比（ E_p や E_d ）で整理しているが、3 乗していない場合（単なる換算距離の比）も見てみたい。その方がわかりやすい。（久保田委員長）→ 報告書に記載する方向で検討する。（杉山氏）
- ・高速度カメラの画像を、衝撃波面の界面が明確になるよう、画像処理か何らかの手法でもう少しわかりやすいようにできないか。（事務局）→ 報告書には輪郭を線で引くことを考えている。（久保田委員長）→ 画像の差分をとることで明確化できないか、と思う。（杉山氏）
- ・地盤振動は、空洞の山（模擬地形）で計測されているが、実際の山で計測した場合にはどうなるのか。（経産省）→ 山を越えた爆風が地面をたたくことにより地盤振動に影響を及ぼすと仮定した。したがって、実際の山でも同じ現象になると考えている。（久保田委員長）
- ・地盤振動の計測は加速度計である。爆風の計測と感度が違うのではないか。爆風の圧力で地面をたたくことによる影響もあるが。縦波と横波、何を計っているのか。（大野委員）→ 小さい波（周波数の高くない波）が重要ではないかと考えている。（久保田委員長）
- ・加速度計は何を計測しているのか、経験上よくわからない。（大野委員）→ 縦波でないことはわかっている。伝播速度は 340m/s くらいなので、土中の横波だと遅すぎるので、爆風の速

度を計測していると思う。爆風が到達した時刻を図にプロットしてみる。(高橋氏) → p30
の式が使えるのではないか。(久保田委員長)

3. 令和6年度産総研所内実験概要(中間)報告

資料-2に基づいて、久保田委員長から室内実験の結果が説明された。主な質疑は以下のとおり。

- ・ p12 の図において、K5 直前に山がある場合、K8 直前に山がある場合とも、K16 のピーク圧力は減衰していない。550mにある第1種保安物件に対して、近くの山の影響はないことになるのか。(大野委員) → 山が低い場合は、遠方の爆風圧は山がない場合とほぼ同じという結論になりそうだ。(久保田委員長) → 今後、山の高さをパラメータにして整理してほしい。(大野委員)
- ・ p9 のピーク過圧比 0.87 と、p12 のピーク過圧比 0.81 は、山の幅だけが異なる。減衰率に差があるが意味があるのか。(事務局) → ないと思う。p12 の実験は、山を長くして爆風の回り込みによる影響を無視できるようにしたもの。実際には圧力計測のセンサ(皿)が受けている反射波が計測されたと思われる。(久保田委員長)
- ・ 野外実験は K16 の減衰率を薬量換算比で整理している。室内実験の K16 のピーク過圧比データのみ、野外実験と室内実験を薬量換算比で比較したグラフを示した方がよいかもしれない。ただ、減衰率は薬量換算比ではなく、換算距離の比としてはどうかと考えている。(久保田委員長) → 杉山氏の野外実験データ(図)をピーク過圧の比にしてもよい。そういう図を増やすことでもよい。室内実験はそのまま。(事務局) → 以上の議論を踏まえ、野外実験と室内実験の減衰率の表し方を揃える方向でまとめていく。(久保田委員長)

4. 爆発影響低減化技術基準検討事業の残された課題

資料-3に基づいて、事務局から残された課題(次回以降のテーマにつながる)の説明がなされた。主な質疑は以下のとおり。

- ・ 工業会としては、粉状爆薬のテーマが優先されるべきと考えている。(山本委員)
- ・ 実験の実施日数としては4日は確保したい(去年は3日)。(事務局)
- ・ No.11 のアンカブロックの形状のイメージはどのようなものか。大きなコンクリートか。(経産省) → 土堤の頂部または内部に、安全ロープをかけるフックを固定するためのコンクリートブロックを埋め込むことを考えている。(事務局)
- ・ 委員会としての課題の重要性は、(1)爆風圧の減衰に及ぼす地形の影響がメインで、(2)爆風と危険度の関係の整理、(12)粉状爆薬の爆薬換算量の見直し、としたい。(事務局)

5. その他

事務局から次のような説明があった。

- ① 防衛省整備計画局 林氏が新たに委員として次回委員会から参加される予定。
- ② 今後のスケジュール
 - ・ 1月31日午後1時30分から第3回本委員会を開催する。会場は新富区民館を予定。
 - ・ 2月19日に産総研との共同研究契約満了。
 - ・ 2月20日に産総研確定検査(リモートにて実施。)
 - ・ 2月28日に委託業務契約完了、完了報告書提出。
 - ・ 3月10日は実績報告書提出期限。
 - ・ 3月中旬に経産省による確定検査実施。
 - ・ 3月10日に実績報告を経産省に提出予定。

以上

3.A.1.4 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) 議事録

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) 議事録

日 時: 令和7年1月31日(金) 13:30~15:15

場 所: 中央区新富区民館

出席者: 対面参加14名、リモート参加13名、書面参加1名、計28名(敬称略、順不同)

委 員: 小川輝繁、新井 充、三宅淳巳、水書稔治*、久保田士郎、松村知治、須山恭三、山本雅昭*、畑中修二*、福田光寿*、伊藤啓太**、三沢慶祐*、佐藤 航*、林 晃

オブザーバ（経済産業省）：池田秀俊

（産総研）：岡田 賢*、佐分利 慎*、高橋良堯*、杉山勇太*、緒方雄二*

事務局（全火協）：川崎勝樹、重村健二、飯田光明、中塚漢二*、山口潤仁*、尾田博幸、柳田一也、
廣崎義一

（注） *：リモート参加（web 会議システムによる参加）

**：書面参加（事前送付した資料に対する意見、質問等の提出）

【配付資料】

資料 3-1 令和 6 年度火薬類保安技術実験の結果報告

資料 3-2 爆発影響低減化実験（室内実験）

資料 3-3 爆発影響低減化技術基準検討事業の残された課題

1. 開会

出席者確認ののち、事務局より当委員会の開会がなされた。以後の議事は、小川委員長によって進行された。

2. 令和 6 年度火薬類保安技術実験結果報告

資料 3-1 に基づいて、久保田委員はじめ産総研メンバー（松村委員、杉山、岡田、高橋の各氏）から実験結果の説明がなされた。主な質疑は以下のとおり。

- ・ 貴重な結果が得られたと思う。ピーク過圧は波形から見て反射波が重なっている。持続時間は正圧部分で見ればよいが、入射波と反射波が重なっていることを考慮しても持続時間には影響がないと理解してよいのか。（三宅委員）→ 持続時間は延びている。（事務局）→ 反射波の影響があるということだが、従来と同じように正圧部分を取り扱えばよいのか。（三宅委員）→ 持続時間が延びたためにインパルスは大きくなっている。（事務局）→ インパルスは基準に比べれば下がっている。持続時間が延びているので、最大過圧ほどは下がっていない。（杉山氏）
- ・ 模擬地形を爆風が乗り越えてくると距離は長くなる。2 次元の距離よりも伝播の距離は長くなる。それは考慮しているのか。（三宅委員）→ 換算距離の観点では考慮していない。（久保田委員）→ それが今後の詳細な解析を行う上で効いてくるのか、あるいは無視できる程度なのか。（三宅委員）→ 減衰の一つの要因として、考慮したい。（久保田委員）
- ・ 実験としては、現象を押さえたうえで、リスクアセスメントに活かせるよう、爆風の効果や構造物のダメージに展開できる解析にしてもらいたい。地形や気象、地面の影響それぞれのパラメータが絡まっているので、今回のデータだけでは確定的なことが言えないという印象。少なくとも過去と違うデータが出てきたことは興味深い。ぜひ実験を継続してほしい。（三宅委員）→ 今後どのように進めるかは難しい。今回は地形の傾斜角 30 度で行ったが、実際の地形を考えるとかなりの傾斜でやらなければならない。ただし、反射波の影響を見るのであれば、もっと大きな角度でやってみたい。（事務局）→ 距離を延ばすのは 1 次元だが、爆風は半球で 3 次元的に広がっていく。将来数値解析を行うためのパラメータを決めるデータを今後とっていかなければならない。（三宅委員）
- ・ 地盤振動の大きなケースである実験 No.1-2 では、爆風が来て約 15ms 後に加速度が大きくなっているが、これは山（模擬地形）が動いたことによる振動の影響ではないか。（事務局）→ 物が動く際の振動がどのくらい大きいのかはわからない。（高橋氏）
- ・ 実験 No.1-2 のときのセンサーの状況はどうだったのか。（久保田委員）→ 水に浸かるまではなかったが、周辺は水が多かった。前日から雨が降り続き、実験中も雨だったので、2 日目以降はかなりひどい状況であった。（高橋氏）→ 衝撃波が z 方向にたたく成分を持つとすると、水があれば水中衝撃波も発生する。そうすると少し大きめに地面をたたくことが起こりえる。加えてセンサーが正常に作動していなかったかもしれない。そのため、今回の実験ではよくわからない結果が出ているという解釈でよいのか。（久保田委員）→ 影響を及ぼし得る要因が多過ぎるので、晴天のデータがあれば違う議論もできる。（高橋氏）→ No.1-4 の実験は晴れていたのではなかったか。（事務局）→ 当日の朝は雹も降り、地面は乾いてはいなかった。かなり濡れていた。（高橋氏）
- ・ 水中衝撃波ならもっと早く地面をたたいているのではないか。爆風でたたいた後 15ms もからない。（事務局）→ センサーのセッティングに問題はないか。（小川委員長）→ あるか

もしれない。No.1-1のときは水に浸かり、怪しい動きをしていた。(事務局)

- ・ No.1-2の漏斗孔は従来よりも小さい(爆点が毎回違うので埋め戻しがないため。)という説明だったが、今回は爆薬が地面に直置きなので、本来は大きくないといけない。それを考慮しても小さかった。これまでの実験での薬量と漏斗孔の体積をプロットして考察し、報告書に入れることを検討してほしい。(事務局)
- ・ 地形背後のピーク静水過圧分布の図(p31)において、ch6とch7のプロットがNo.1-4のみ大きさの順番が違う。その理由は何か。(新井委員)→ 反射衝撃波を考慮すると入射圧のおよそ2倍以上になり得る。圧力が入射波よりも大きくなり得るが、薬量が大きい場合にそれが顕著になったのではないかと考えている。(杉山氏)
- ・ 三宅委員のコメントにあるように、今回の実験の目的に合致するように、どこに焦点を当てて考察をするのか、よく検討してほしい。(小川委員長)
- ・ 報告書の作成までに時間的余裕がないので、精力的に進めてほしい。(小川委員長)→ 衝撃波の波面の進行の様子を解析して、報告書に載せるようにする。(事務局)

3. 令和6年度産総研室内実験結果報告

資料3-2および追加資料(事務局注:時間的制約から当日配布せず。本議事録案とともに送付。)に基づいて、久保田委員から室内実験の結果が説明された。主な質疑は以下のとおり。

- ・ 最初のピークが高いのは地面からの反射波のためとの説明であったが、違うのではないか。センサーを入射波が斜めからたたいていないからではないのか。(事務局)→ 地面からの反射波ではなく、静水圧を測っていないという意味である。(久保田委員)→ センサーに斜めから入射波が入って、その反射圧を計測しているから圧力が高いのだと思う。地面からの反射波ではない。(事務局)→ そのとおり。(久保田委員)
- ・ PETN 1gを起爆する「昭金2型電気雷管」はどういうものか。(三宅委員)→ アジ化鉛 100mgである。(久保田委員)→ アジ化鉛 100mgの分は、実験での爆風圧計測においてその影響はキャンセルされているのか。(三宅委員)→ 室内実験でクローズする場合は考慮する必要がない。野外実験のデータと比較する場合は、アジ化鉛の影響を考慮する必要がある。(久保田委員)→ アジ化鉛 100mgはPETN 25mgに相当する。すなわちPETN 1.025gにしかならない。(杉山氏)→ 爆風圧計測の最初のピーク圧において、起爆薬であるアジ化鉛の影響が反映されていることはないのか。(三宅委員)→ 瞬間でエネルギーが解放された後の空気中の衝撃波には関係しないと思われる。(事務局)
- ・ 反射波の波形についてだが、山を越えてきて地面に反射した場合の反射波と、ch7のようにセンサーディスクの上での反射波とで、3段で圧力が形成されているはずだが、ディスクの上での反射波は時間が短く計測上は分離できないので見かけ上2つに見える、との解釈でよいか。(水書委員)→ ディスクの上は反射波、波ではなく、センサーに反射圧が入ってくる。(事務局)→ ch7のディスクに斜めに入ってくる入射波によって生ずる、ディスクの上での反射波の影響は無視できる、という解釈でよいか。(水書委員)→ そのとおり。(事務局)→ 地形を伝わってくる道のりと反射波ができる角度(地形の角度)との相関でいろいろなトレードオフの関係があるように思われる。今回は数少ない条件での実験だったので、今後さらに条件を増やして現象を見ないといけない。(水書委員)→ いろいろなパターンでトレードオフがあるのはそうであろうが、対象となる保安物件は、今回の実験の縮尺スケールにおけるセンサーの高さよりもかなり低い位置にあるはず。したがって、必ず反射波の影響を受けた中で評価しないといけない。(事務局)→ 了解した。(水書委員)

4. 爆発影響低減化技術基準検討事業の残された課題

資料3-3にまとめられた課題について、事務局から以下のような補足説明があった。

- ・ 小委員会でも検討した結果、(1)地形の影響、(12)粉状爆薬の爆薬換算量見直し、(3)TNTの基準爆風圧を優先する。(4)地盤振動評価法は随時実施する。
- ・ 伊藤委員から事前にメールで提出された意見が紹介された。(以下に趣旨を転載)
- ・ 残された課題のうち、(1)爆風圧の減衰に及ぼす地形の影響については第一回本委員会でも触れられたが、特に丘陵地帯の植生、なかでも立ち木による爆風圧の減衰効果が気になる。火薬庫の多くは周囲が森林に囲まれていると考えられる。
- ・ また、今回の試験では三角形の単純形状で丘陵を模擬しているが、実際の山岳地形によっては爆風の反射や回折により、特定の方向へ爆風が集中する可能性もある。そのため、地形によっては爆風

の影響が逆に増大する場合もあるのではないか。例えば、崖など急傾斜地を背にして建つ建造物がその典型だが、村落の家屋がこのような地形に位置するケースも少なくない。このような地形の影響を再現できる試験が実施できれば、大変興味深いと考える。

5. 最終報告書の提出について

今後のスケジュールについて、事務局から以下のような説明があった。

2月19日	産総研との共同研究契約満了
2月20日	産総研確定検査（リモートにて実施）
2月28日	経産省との委託業務契約完了、報告書の提出期限
3月10日	経費を中心とした実績報告書の経産省への提出期限
3月中旬	経産省による確定検査

主な質疑は以下のとおり。

- ・委員会としての報告書の確認が必要ではないか。報告書案がある程度できた時点で委員に案を送付し、内容を確認してもらってはどうか。（小川委員長）→ 画像解析を除いてほぼ完成している。（久保田委員）→ 画像を含めるとファイル容量が大きい。（事務局）→ 文章のみでよい。画像は委員会で確認済み。（小川委員長）→ 報告書案（文章のみ）を委員に送付して内容を確認していただく。（事務局）

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 マルエー温泉本館」

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

宿舎と実験場間の実験要員の輸送には、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

模擬地形の設計は全火協、製作は現地建設会社（島影建設）が担い、使用する火薬類や資材は、主に全火協が調達した。

主な資材調達及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	模擬地形の製作・撤去、放送設備等のレンタル（設置及び撤去含む）、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、各種建設機材のレンタルとブルーシート、土嚢袋等消耗品の調達
共成レンテム株式会社	プレハブ棟、トイレのレンタル（設置及び撤去含む）
中国化薬株式会社	電気雷管（EBW RP-501）の供給
カヤク・ジャパン株式会社	含水爆薬（アルテックス）、導爆線の供給
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）の一時貯蔵及び実験場までの運搬、並びに火工所及び火薬類取扱所のレンタル（設置及び撤去含む）
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（自衛隊車両、重機、発電機、暖房等）の給油
株式会社旭観光バス	送迎用バスの貸し切り
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）より調達した。同社吉井工場（群馬県）からダイナテック（株）釧路支店の火薬庫に運搬されたのち一時貯蔵され、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）及び導爆線は、カヤク・ジャパン（株）より調達した。同社砂川工場からダイナテック（株）釧路支店の火薬庫に運搬されたのち一時貯蔵され、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部

陸上自衛隊北部方面総監部と経済産業省北海道産業保安監督部との間で締結された「令和 6 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、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（日本火薬工業会）、火薬類製造会社及び地元企業等からの積極的な協力が得られ、その結果、実験に必要な火薬類、試験体、プレハブ施設、放送設備、各種機材、重機、用役等の手配等が計画通りなされた。

4.A.1.6 実験計画検討会議等

保安技術実験に際し、火薬類爆発影響低減化技術基準検討委員会等を開催し、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の詳細な検討がなされた。また、9 月 11 日から 9 月 12 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、地元警察等に対し、保安技術実験実施に係る挨拶及び事前説明を行った。

また、実験時の作業内容の調整のため、9 月 11 日に陸上自衛隊北部方面総監部装備部装備課を通じ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

11 月 23 日～12 月 1 日の実験参加者は、延べ約 250 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（本部高台から観測所や爆点方向を眺めた様子）



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



風向風速指示器



トータルステーション



実験機器搬入作業



計測ボックス設置作業



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



カメラボックス外観



カメラボックス内の高速度カメラ



観測所1の屋上に設置して爆点を撮影する高速度カメラ



地盤振動計とアンプボックス



計測ボックス内の地盤振動計測機器



騒音計測マイクロフォン



試験体設置状況



No.1-1 装薬・爆装状況



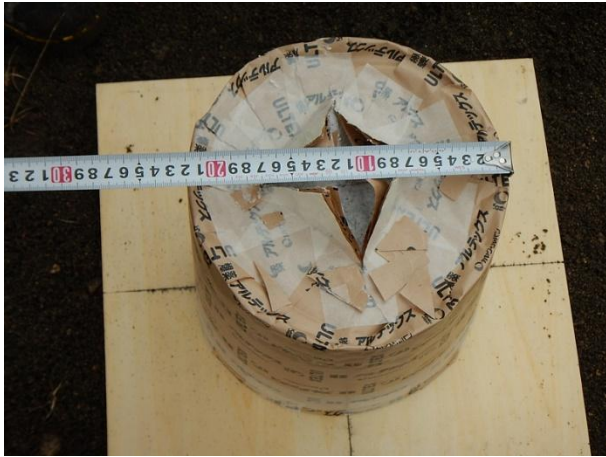
No.1-1 点火後の様子



No.1-2 装薬・爆装状況



No.1-2 点火後の様子



No.1-3 装薬・爆装状況



No.1-3 点火後の様子



No.1-4 装薬・爆装状況



No.1-4 点火後の様子

4.A.3（付録 4）高速度カメラ撮影画像

実験 No.1-1（カメラボックス 2、VEO640）



点火前キャリブレーション



0.847 ms



4.85 ms



9.85 ms



49.8 ms



99.8 ms



499.8 ms



999.8 ms

実験 No.1-2 (カメラボックス 2、VEO640)



点火前キャリブレーション



0.973 ms



4.97 ms



9.97 ms



50.0 ms



100.0 ms



500.0 ms



1000.0 ms

実験 No.1-3 (カメラボックス 2、VEO640)



点火前キャリブレーション



0.833 ms



4.83 ms



9.83 ms



49.8 ms



99.8 ms



499.8 ms

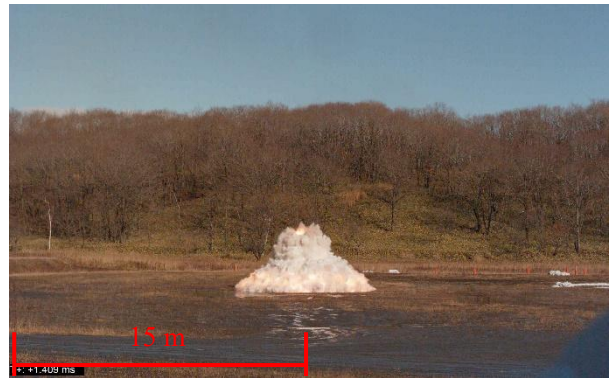


999.8 ms

実験 No.1-4 (カメラボックス 1、VEO640)



点火前キャリブレーション



1.409 ms



5.41 ms



10.41 ms



50.4 ms



100.4 ms



500.4 ms



1000.4 ms

実験 No.1-1 (観測所、V640)



点火前キャリブレーション



1.211 ms



5.21 ms



10.21 ms



50.2 ms



100.2 ms



500.2 ms



1000.2 ms

実験 No.1-2 (観測所、V640)



点火前キャリブレーション



0.683 ms



4.68 ms



9.68 ms



49.7ms



99.7 ms



499.7 ms



999.7 ms

実験 No.1-3 (観測所、V640)



点火前キャリブレーション



1.326 ms



5.33 ms



10.33 ms



50.3 ms



100.3 ms



500.3 ms

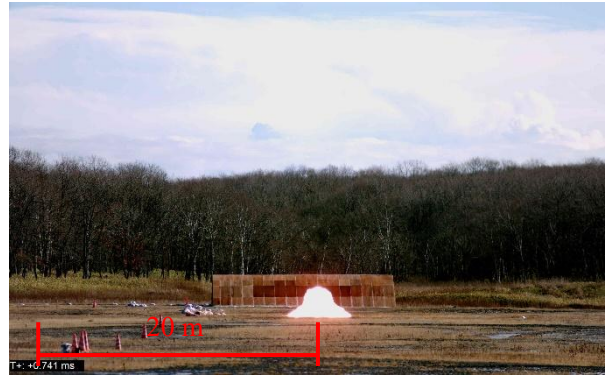


1000.3 ms

実験 No.1-4 (観測所、V640)



点火前キャリブレーション



0.741 ms



4.74 ms



9.74 ms



49.7 ms



99.7 ms



499.7 ms



999.7 ms

4.A.4（付録 5）地盤振動の発生要因の検討

NATO AASTP-1 によれば、爆発に伴う地盤振動の発生形態としては、Direct-Induced (DI) Ground Shock と呼ばれる爆発にともない直接的に発生、あるいはクレーターの形成に伴い発生する地盤振動と、伝播する爆風が地表面を叩きつけることによって引き起こされる Airblast-Induced (AI) Ground Shock の二つに大別される¹⁾。本試験において計測された地盤振動が、どちらが主要因であるか検討するために、爆風の到達時間(t_{TOA})、持続時間($t_{duration}$)を加速度・速度プロファイルに重ねて記載した。地形影響がない点における地盤振動計測地点における爆風の到達時間および持続時間については、4 章の爆風計測で得られた以下の式を使用して求めた。

$$X = \log_{10} K$$

$$\frac{t_{TOA}}{W^{1/3}} = -3.2303 + 22.946X - 36.966X^2 + 39.342X^3 \quad (1)$$

$$\frac{t_{duration}}{W^{1/3}} = -2.1318 + 12.016X - 8.5654X^2 + 2.6765X^3 \quad (2)$$

上式は換算到達時刻 $t_{TOA}/W^{1/3}$ [ms/kg^{1/3}]、換算持続時間 $t_{duration}/W^{1/3}$ [ms/kg^{1/3}]の近似線として、薬量換算距離 K [m/kg^{1/3}]と薬量 W [kg]であり、本式は $2.16 \leq K \leq 33$ の範囲内にて定義された近似式である。そのため、実験 No1-1 の ch2、ch3、ch4 および実験 No1-2 の ch4 については上記近似式の適用範囲外となり外挿となっている。また、各実験の ch1 すなわち地形影響がある計測点については上記近似式が使用できないため、爆風計測点 ch6 における到達時間および持続時間をプロットしている。No.1-1 から No.1-4 における各計測点で計測した振動加速度の波形に爆風の到達・持続時間をプロットしたものを図 4.A.4-1、図 4.A.4-2、図 4.A.4-3、図 4.A.4-4 にそれぞれ示す。また、同様に振動速度波形に爆風の到達・持続時間をプロットしたものを図 4.A.4-5、図 4.A.4-6、図 4.A.4-7、図 4.A.4-8 に示す。これらの図を見ると、上述の予測式が定義されている $2.16 \leq K \leq 33$ 、また、地形背後でもほぼ同様の傾向を示しており、爆風が到達後に振動が発生している。ch1 を除く $2.16 \leq K \leq 33$ の計測点における、爆風到達～地盤振動発生までに要する時間は平均で約 4.0 ms であった。本試験においては、爆風由来の振動が主な振動の発生要因である可能性が高いことが示唆される。また、「4.1.3.3 地盤振動計測結果」で述べた異常に大きな加速度・速度については爆風通過後に記録されていることもわかった。

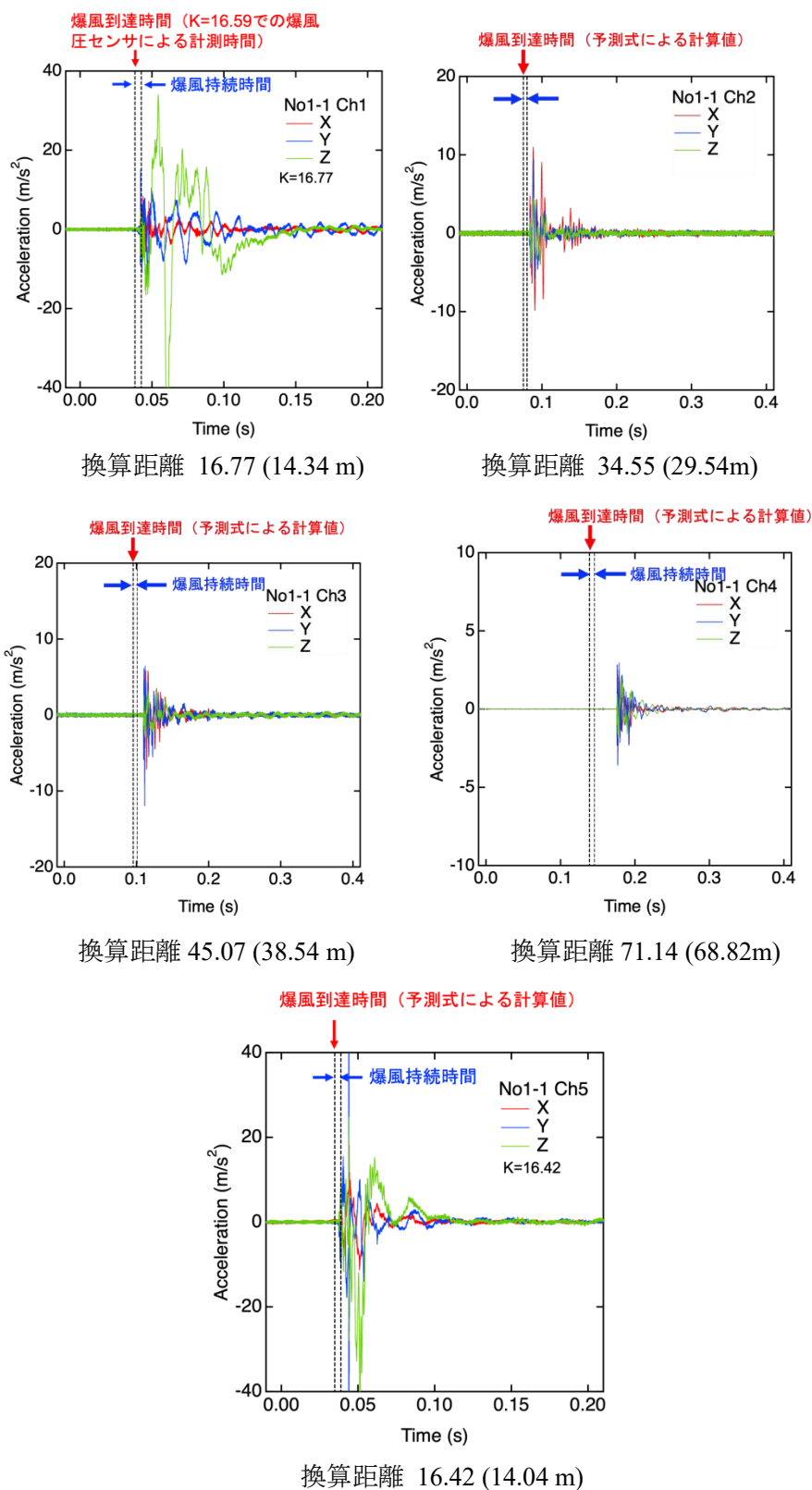


図 4.A.4-1 爆薬量 0.625 kg に対する地盤振動加速度と爆風の到達・持続時間(No1-1)

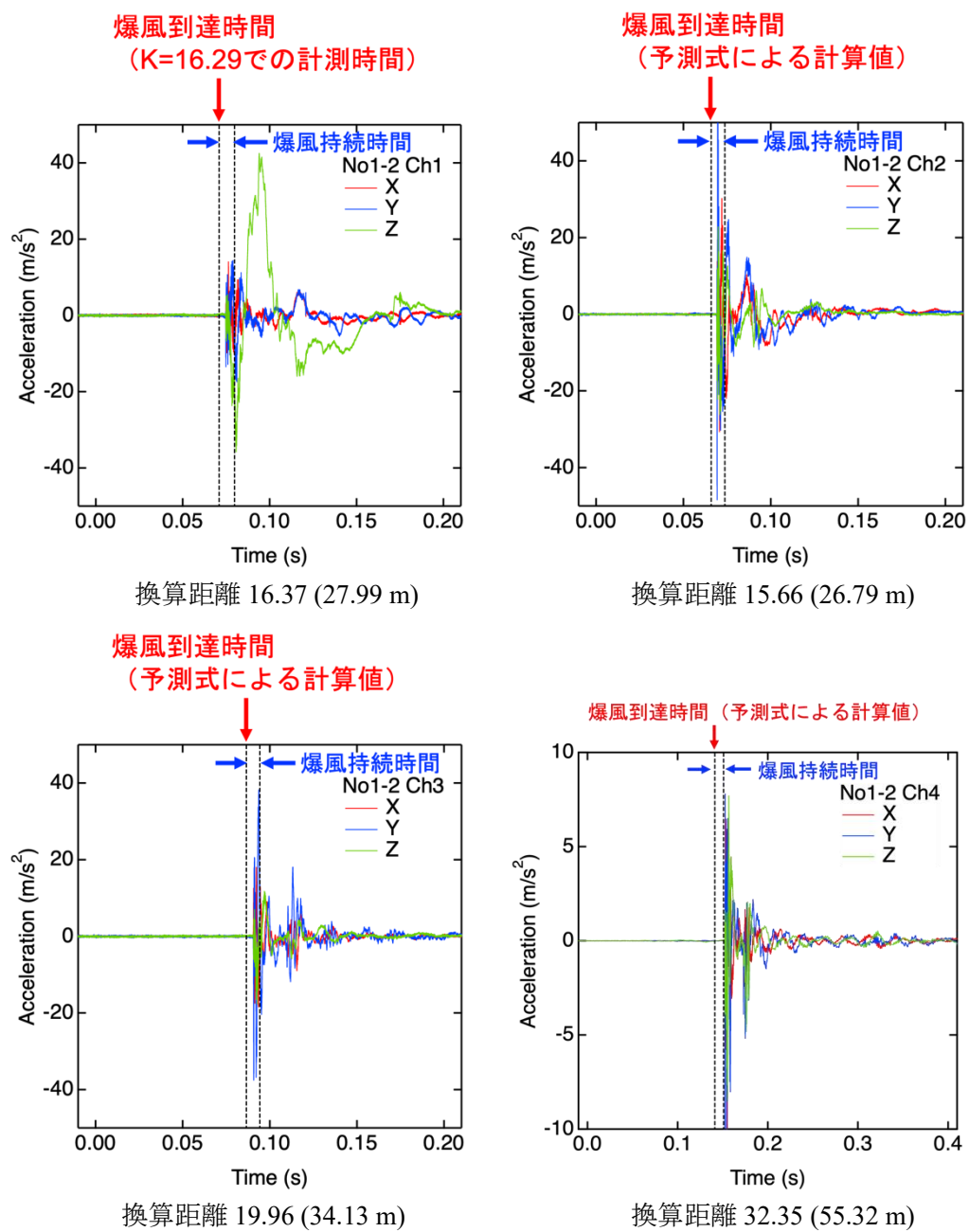


図 4.A.4-2 爆薬 5.00 kg に対する地盤振動加速度と爆風の到達・持続時間 (No1-2)

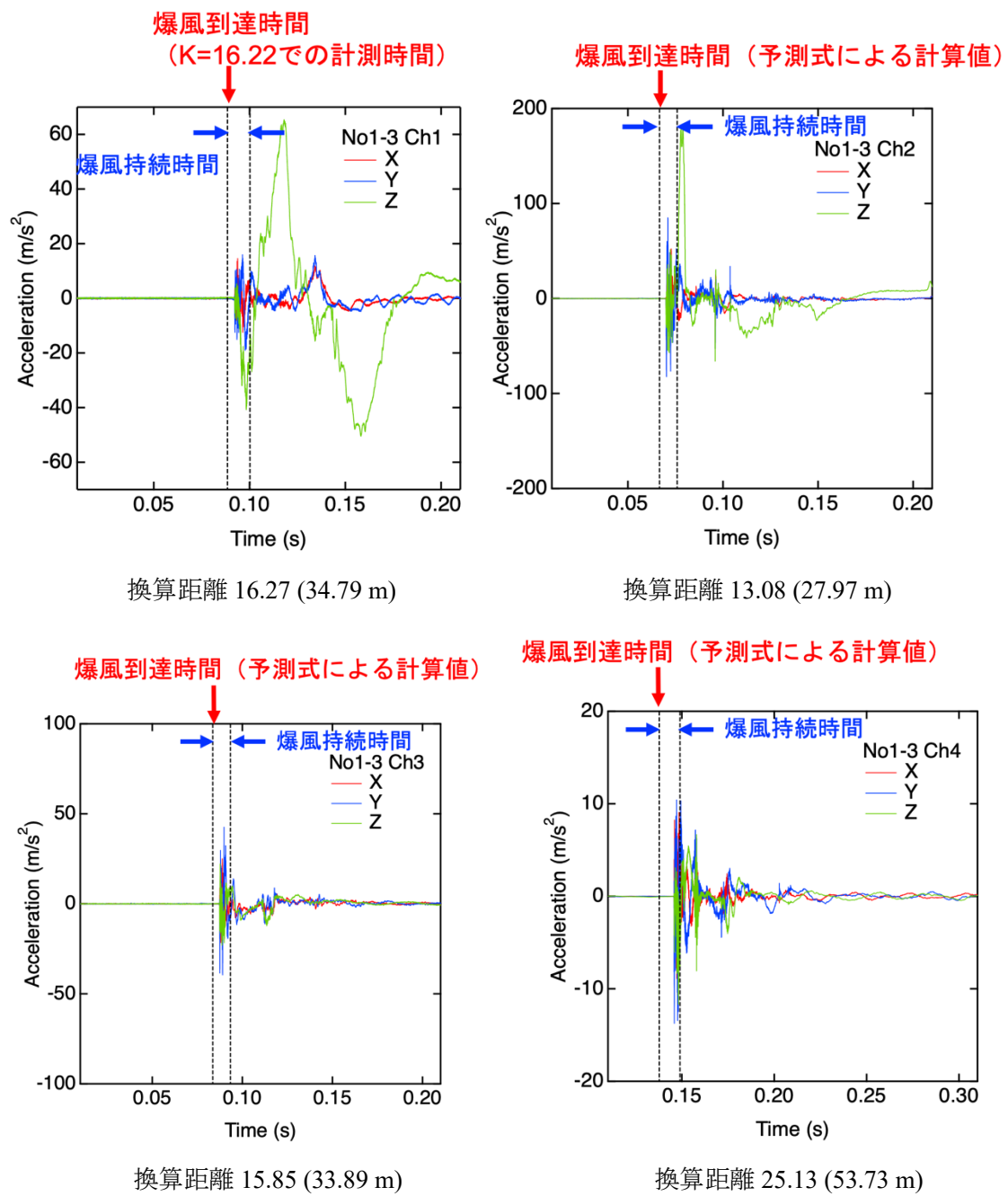


図 4.A.4-3 爆薬 9.77 kg に対する地盤振動加速度と爆風の到達・持続時間(No1-3)

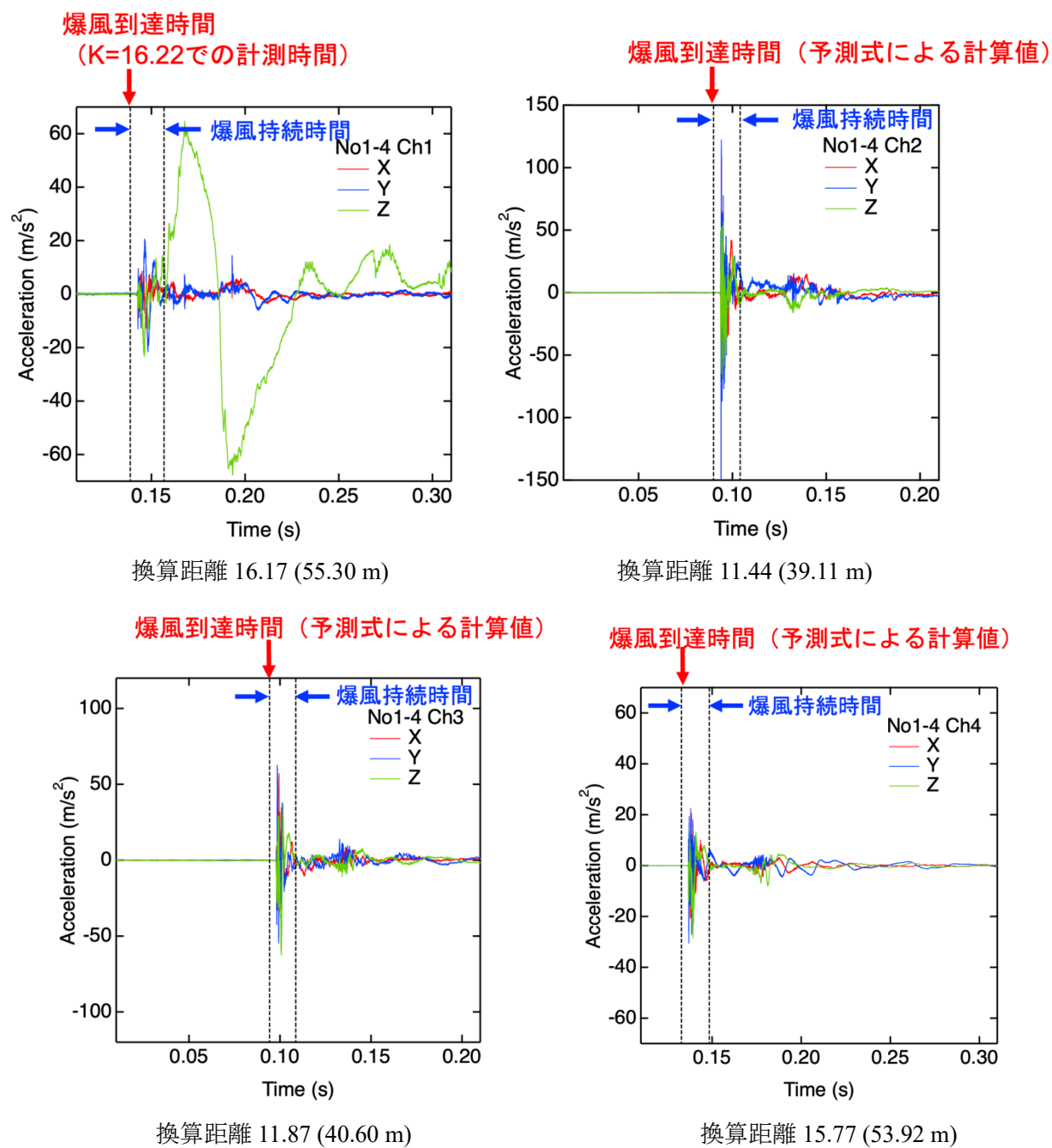


図 4.A.4-4 爆薬量 40.0 kg に対する地盤振動加速度と爆風の到達・持続時間(No1-4)

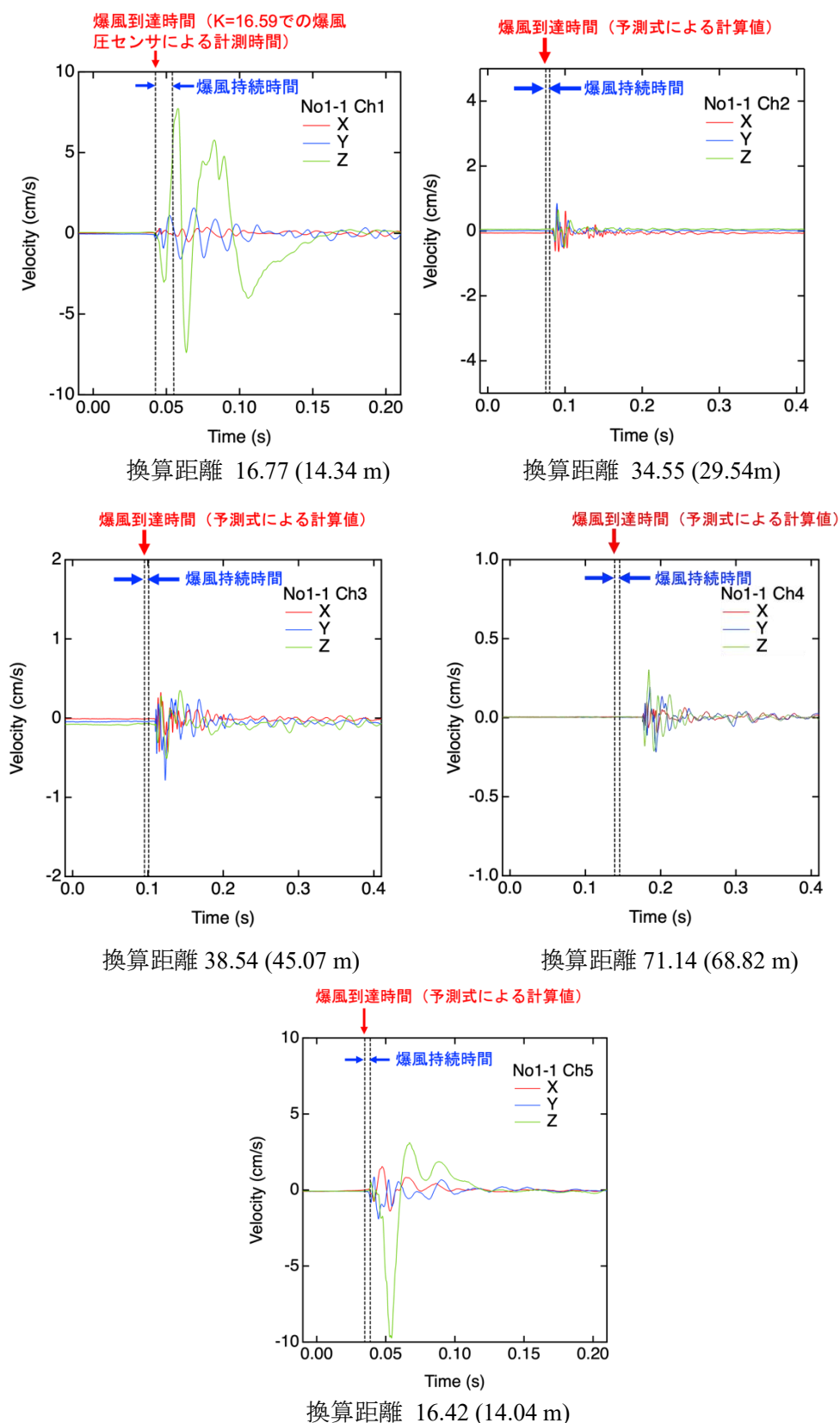


図 4.A.4-5 爆薬量 0.625 kg に対する地盤振動速度と爆風の到達・持続時間(No1-1)

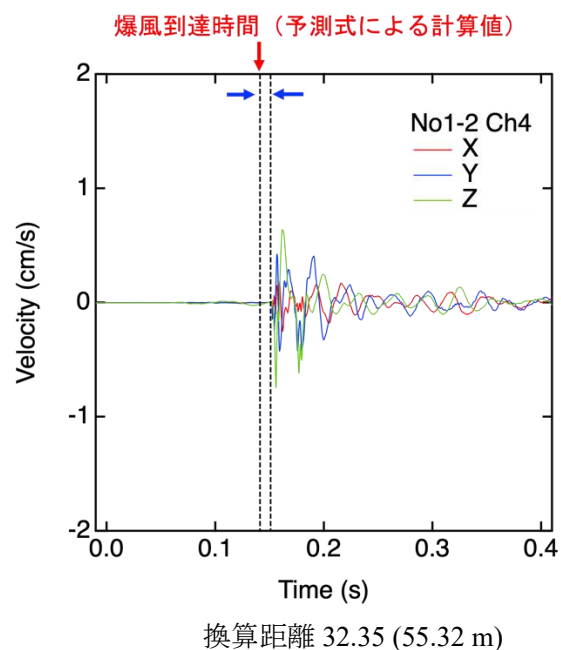
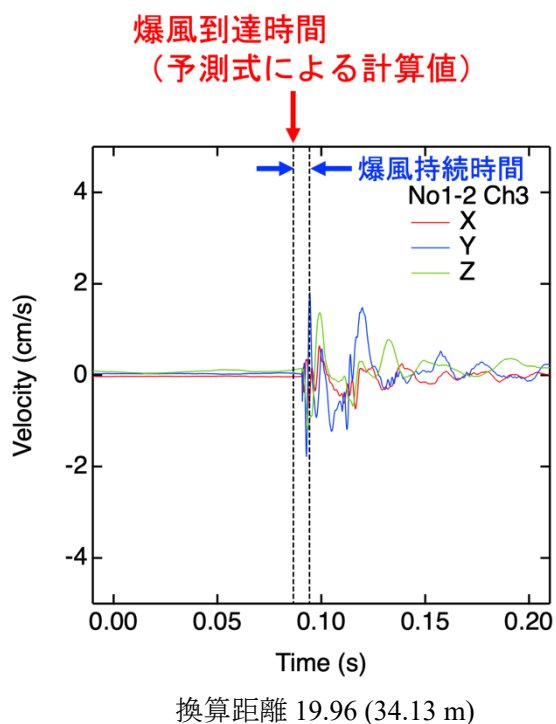
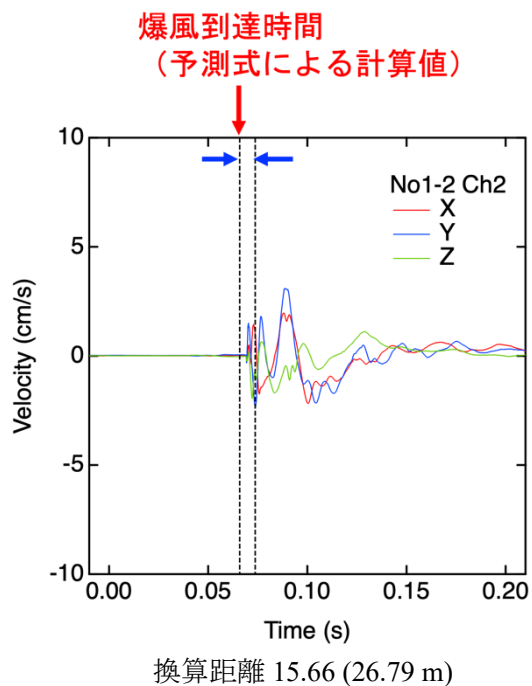
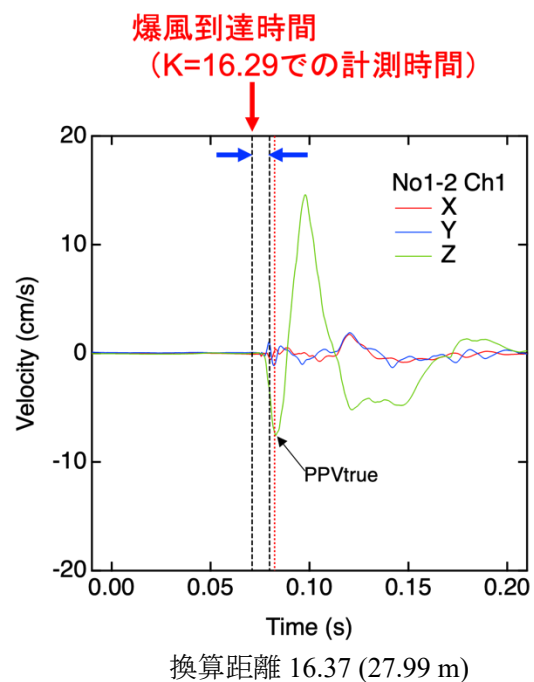
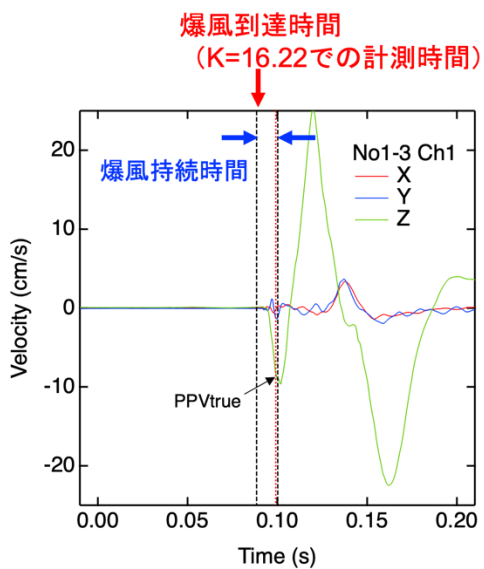
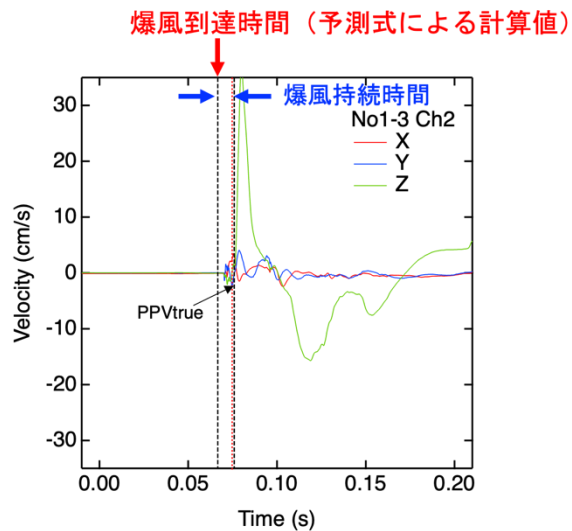


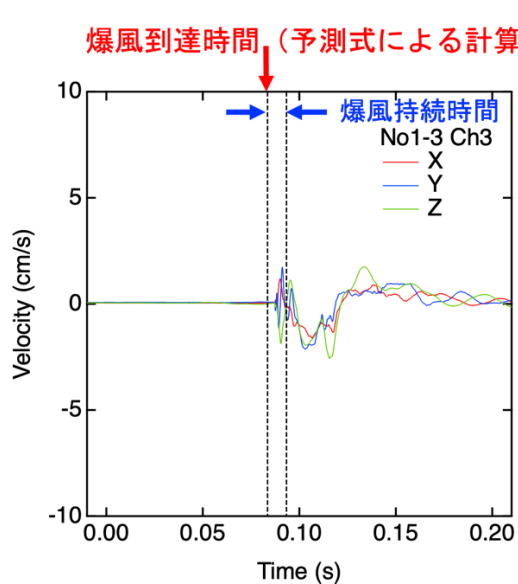
図 4.A.4-6 爆薬 5.00 kg に対する地盤振動速度と爆風の到達・持続時間 (No1-2)



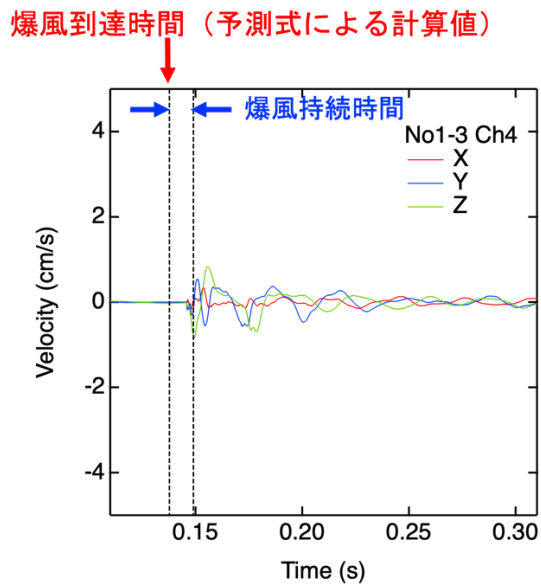
換算距離 16.27 (34.79 m)



換算距離 13.08 (27.97 m)



換算距離 15.85 (33.89 m)



換算距離 25.13 (53.73 m)

図 4.A.4-7 爆薬 9.77 kg に対する地盤振動速度と爆風の到達・持続時間(No1-3)

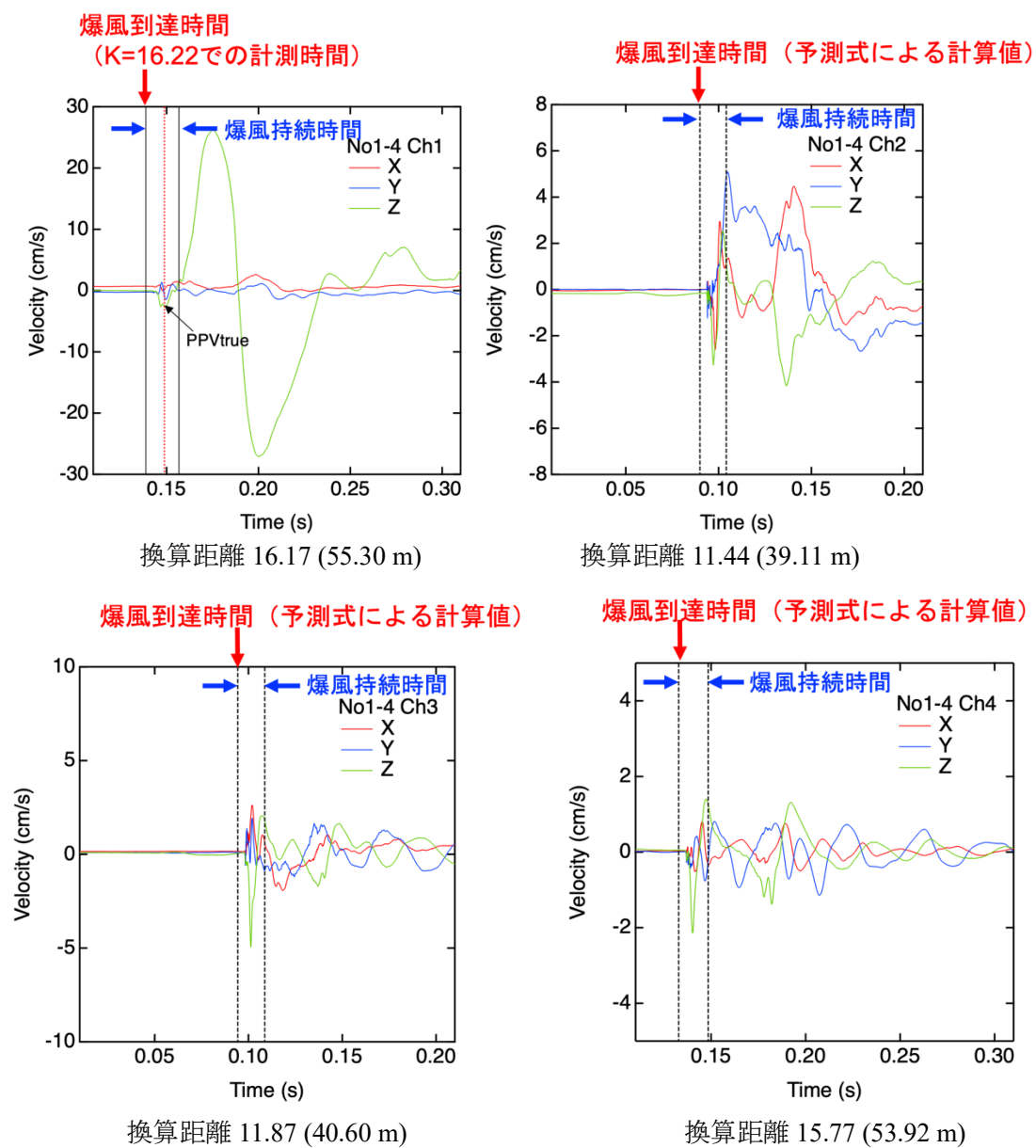


図 4.A.4-8 爆薬量 40.0 kg に対する地盤振動速度と爆風の到達・持続時間(No1-4)

4.A.5（付録 6）使用器材一覧

実験で使用した機器の一覧を表 4.A.5-1 から表 4.A.5-5 に示す。

表 4.A.5-1 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（温度、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.5-2 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	H-TECH	Triple mode 30222	利得×0.5,×1,×2, ×5,×10
アンプレシーバ	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
データロガー	HIOKI	8847A	メモリハイコード(高分解能ユニット 8968 使用時) 最高サンプリング速度 1MS/s 分解能 16bit 測定レンジ 5m-12 V/DIV 確度 DC±0.3% f.s. 周波数特性 DC-100kHz

表 4.A.5-3 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	Vision Research 社	Phantom VEO640	画素数：1920（横）×1080（縦）画素、撮影速度：1000 コマ/秒
高速度カメラ	Vision Research 社	Phantom v1210	画素数：1280（横）×800（縦）画素、撮影速度：5000 コマ/秒
高速度カメラ	Vision Research 社	Phantom v640	画素数：2560（横）×1600（縦）画素、撮影速度：1000 コマ/秒

表 4.A.5-4 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	731ZT	感度 (mV/m/s ²) 約 10.0±10% 横感度 (max) 5%以下 基底ノイズ (max) 40uVrms 補償温度範囲 -50℃～110℃ 周波数応答 (±3dB) 0.5Hz～10kHz (X, Y 軸) 0.5Hz～18kHz (Z 軸) 共振周波数 55kHz 以上 (Z 軸) 使用最大加速度 (m/s ²) ±450 耐衝撃性 (peak) (m/s ²) 30,000 以上
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)
	TEAC	SA-630	振動計ユニット入力(max) 100000pC (電荷入力) / ±10Vp(電圧入力)感度設定範囲 0.03-99.9 (pC/m/s ² or mV/m/s ²) 定格出力 ±1Vp/FS 周波数特性 0.2-50k Hz+0.5/-3dB
データロガー	HIOKI	MR8847A	メモリハイコード(高分解能ユニット 8968 使用時) 最高サンプリング速度 1MS/s 分解能 16bit 測定レンジ 5mV-20 V/DIV 確度 ±0.3% f.s. 周波数特性 DC-100kHz -3dB

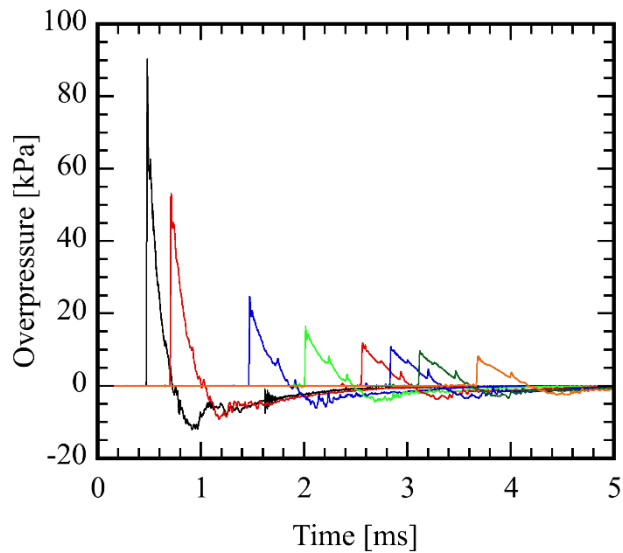
表 4.A.5-5 使用機器類

名称	メーカー	台数	仕様、性能
377C10	PCB PIEZOTRONICS 社	2	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：1~40 kHz、分析機能：クロススペクトラム、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
TESTO 816-1	TESTO 社	2	測定範囲：30 ~ 130 dB、周波数範囲：20 Hz ~ 8 kHz、精度：±1.4 dB (under reference conditions: 94 dB, 1 kHz)、分解能：0.1 dB、測定間隔：0.5 秒

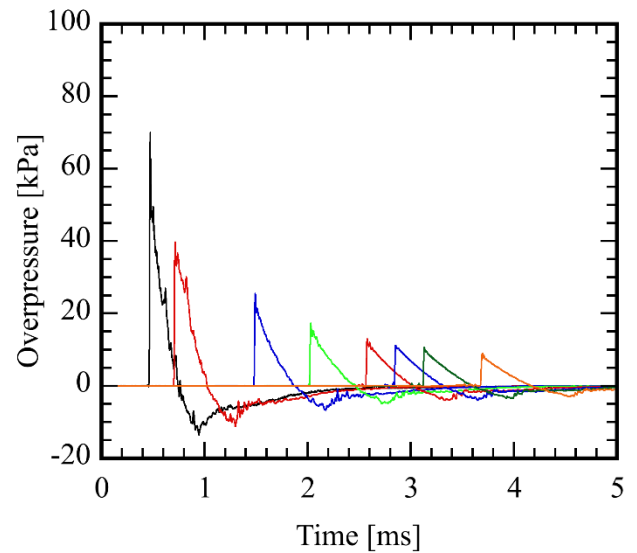
5.A.1（付録 7）室内実験 参考資料（爆風圧波形とその検討）

5.A.1-1 室内実験で取得した爆風圧波形

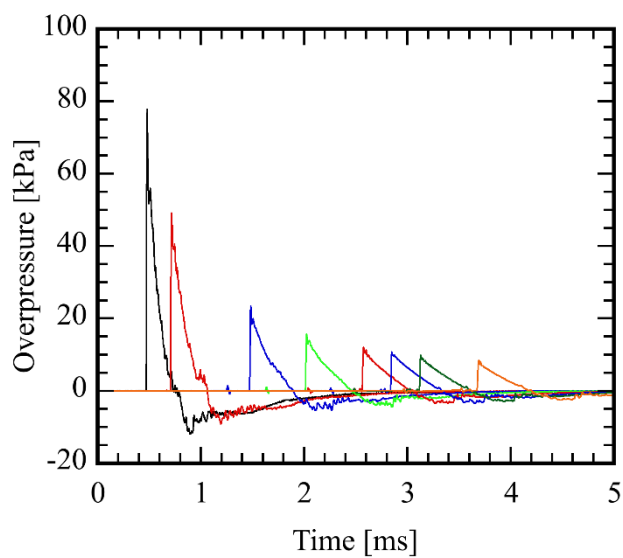
室内実験で取得した爆風圧波形を記す。



1 回目

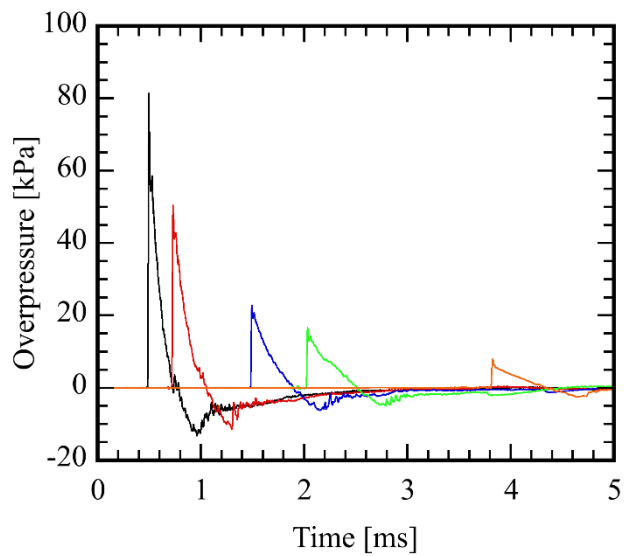


2 回目

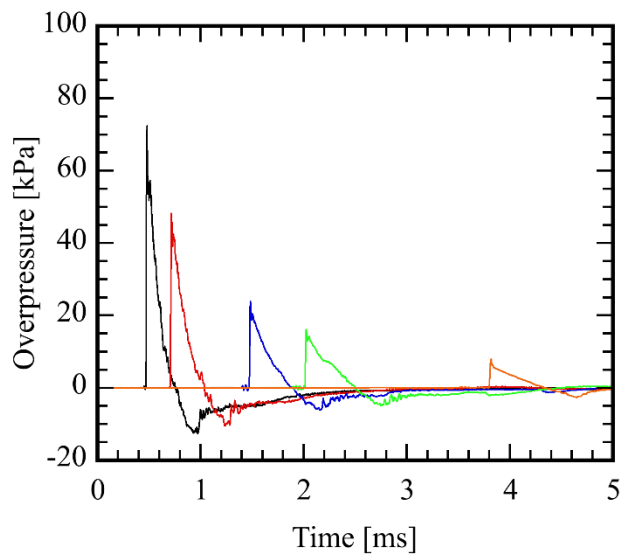


3 回目

図 5.A.1-1 No. 0（順に 400, 500, 800, 1000, 1200, 1300, 1400, 1600 mm で計測）

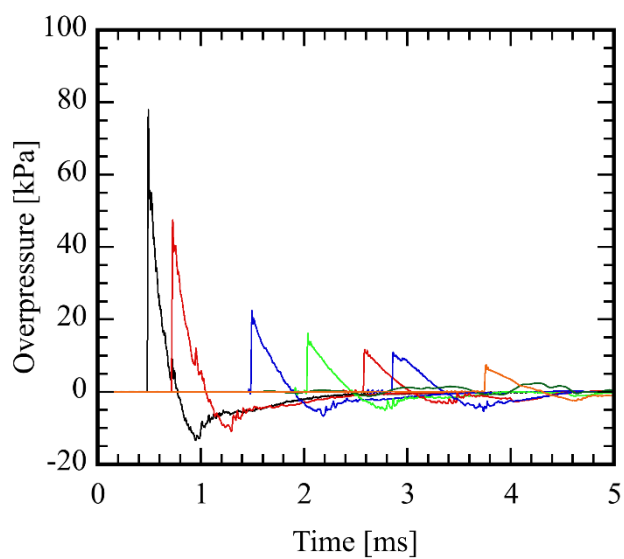


1 回目

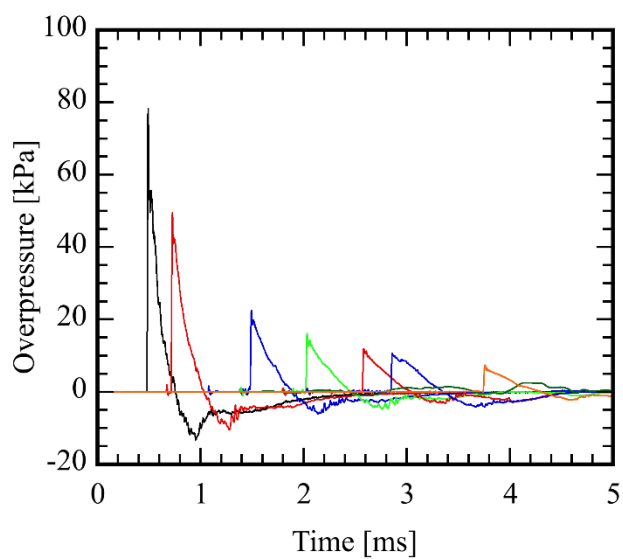


2 回目

図 5.A.1-2 No. 1-1 (順に 400, 500, 800, 1000, 1600 mm で計測)

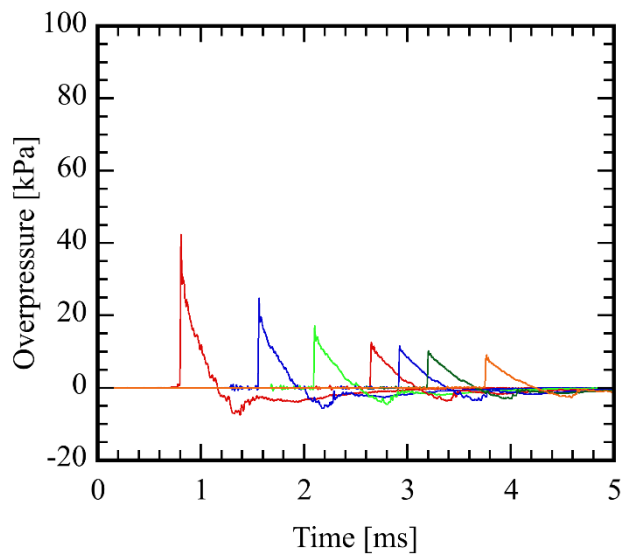


1 回目

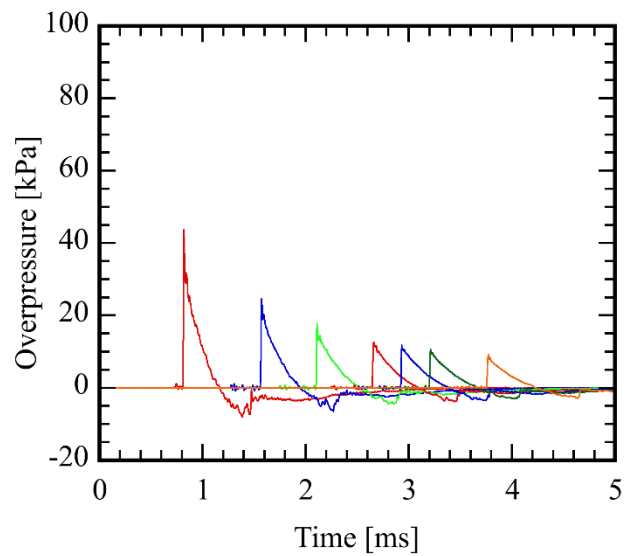


2 回目

図 5.A.1-3 No. 1-1 (順に 400, 500, 800, 1000, 1200, 1300, 1600 mm で計測)

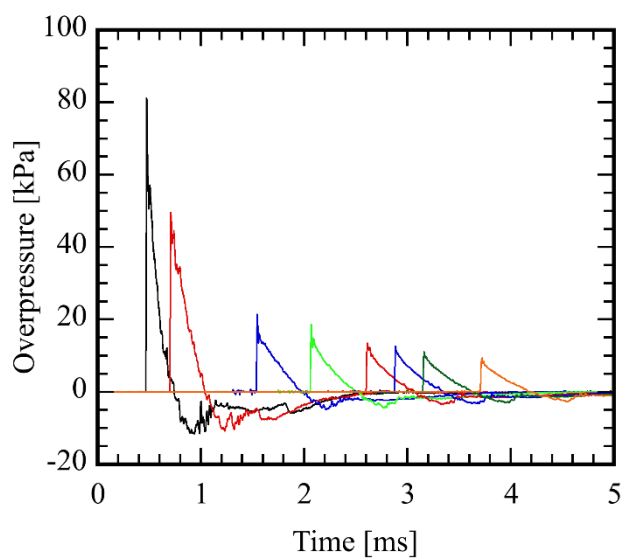


1 回目

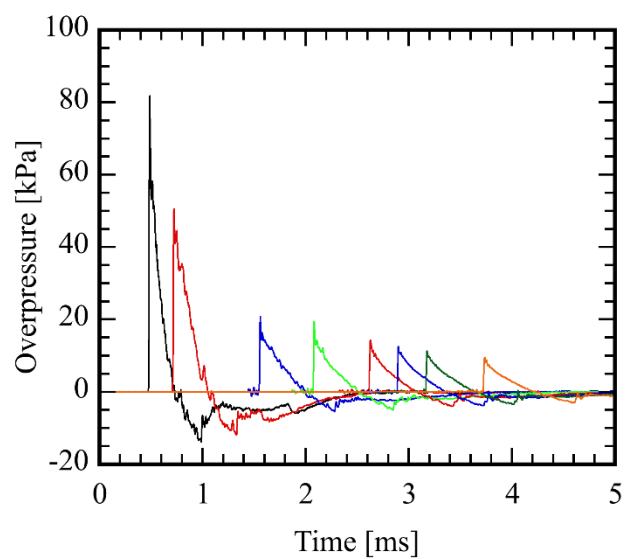


2 回目

図 5.A.1-4 No. 2-1 (順に 500, 800, 1000, 1200, 1300, 1400, 1600 mm で計測)

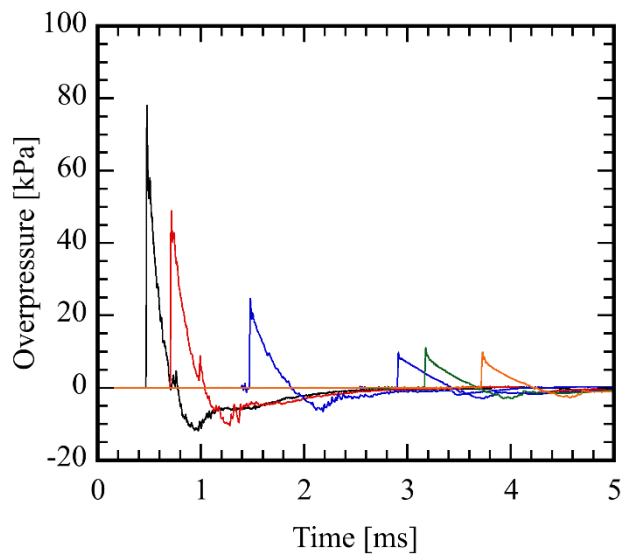


1 回目

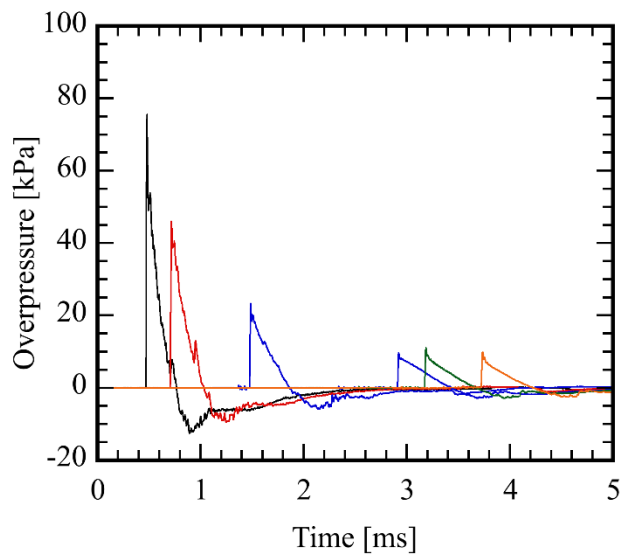


2 回目

図 5.A.1-5 No. 2-2 (順に 400, 500, 800, 1000, 1200, 1300, 1400, 1600 mm で計測)

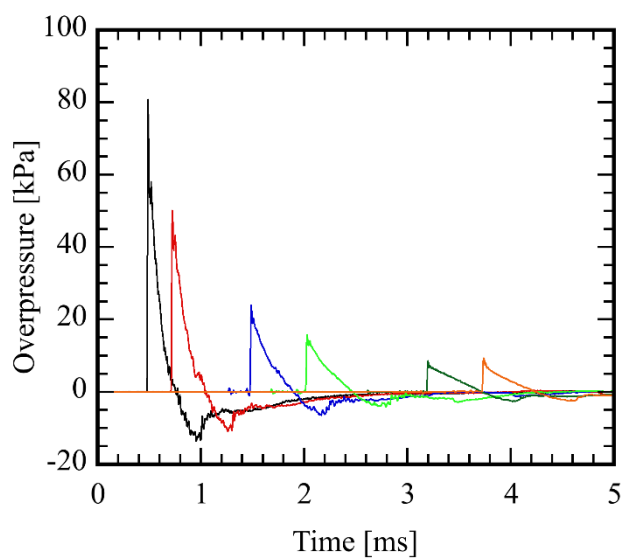


1 回目

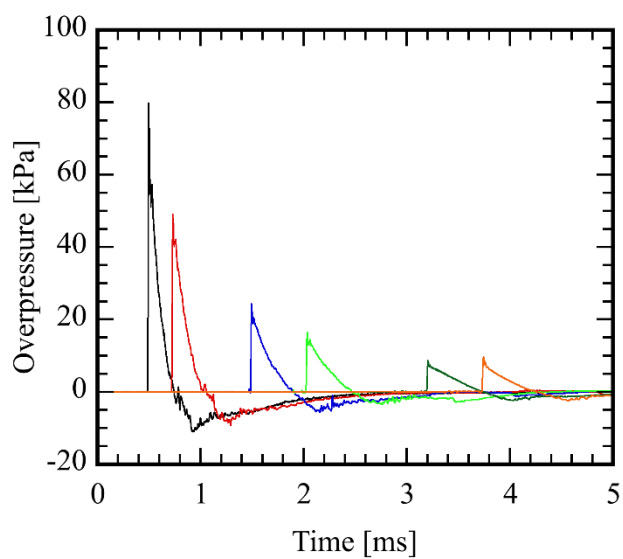


2 回目

図 5.A.1-6 No. 2-3 (順に 400, 500, 800, 1300, 1400, 1600 mm で計測)

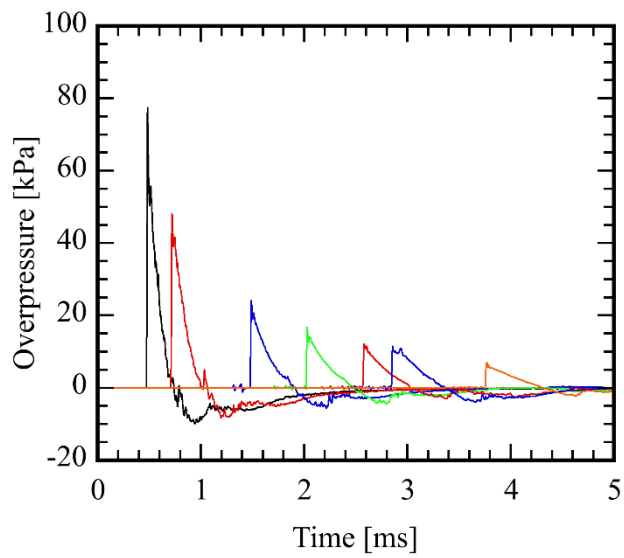


1 回目

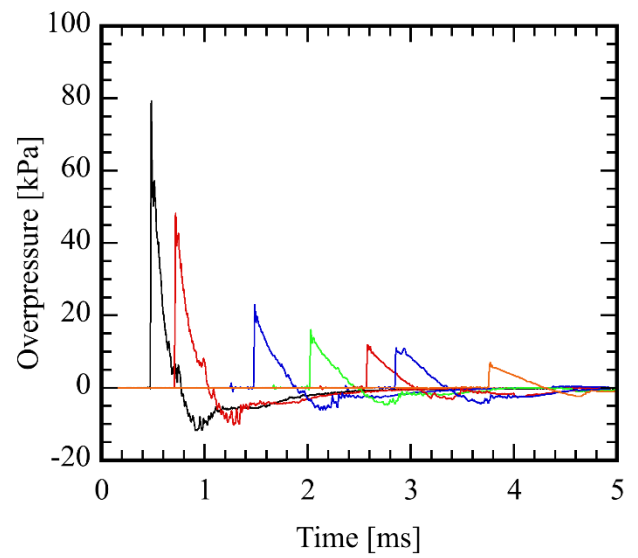


2 回目

図 5.A.1-7 No. 2-4 (順に 400, 500, 800, 1000, 1400, 1600 mm で計測)



1 回目



2 回目

図 5.A.1-8 No. 2-5 (順に 400, 500, 800, 1000, 1200, 1300, 1600 mm で計測)

5.A.1-2 爆風圧波形の検討

模擬地形として、傾斜角 30 度の勾配を持った断面が三角形のアルミ製の試験体を使用した。模擬地形に入射した爆風は地形斜面上を伝播し、頂点で回折し反対の斜面に沿って伝播する。そのため地形のすぐ後方では、傾斜角に近い角度をもって地面との反射が起こる。地面からの反射の影響を受けた爆風圧の静水過圧を計測する際には注意が必要である。

図 5.A.1-9 に爆風圧計測系の概略を示す。センサーの受圧面は表面を円とする皿状の整流板の中心に設置される。図 5.A.1-10 爆風の静水過圧測定の場合に示すように、整流板は爆風の進行方向に並行に設置され、受圧面に到達する爆風を乱さずにセンサーの受圧面に導入することで静水過圧履歴を測定する。そのピーク値が爆風の威力評価の指標となるのが一般的である。

図 5.A.1-11 に模擬地形斜面を下って伝播する爆風と地面における反射波のイメージを示す。爆風は頂点で回折し、斜面では若干の曲率をもって下方に伝播する。地表面に到達すると地面との干渉により反射波が発生し、爆風の一部となる。この地表面からの反射波成分を含む爆風の静水過圧を測定するには、図 5.A.1-11 の右図のようにセンサーを設置すれば、爆風の流れを乱すことなく測定できる。野外実験では概ねそのように設置できた。しかし、室内実験ではセンサーの受圧面が地表面（鉄板）と並行で面一になるように設置されるため、受圧面は静水過圧ではなくセンサー受圧面での反射圧を直接測定する。この影響は爆風波先頭の近傍で顕著であると予測される。

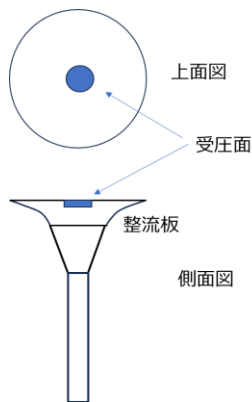


図 5.A.1-9 爆風圧計測系の概略（一例）

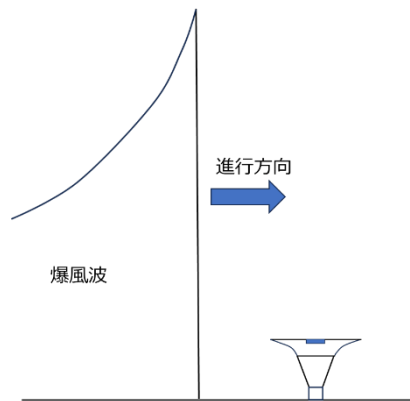


図 5.A.1-10 爆風の静水圧測定の場合

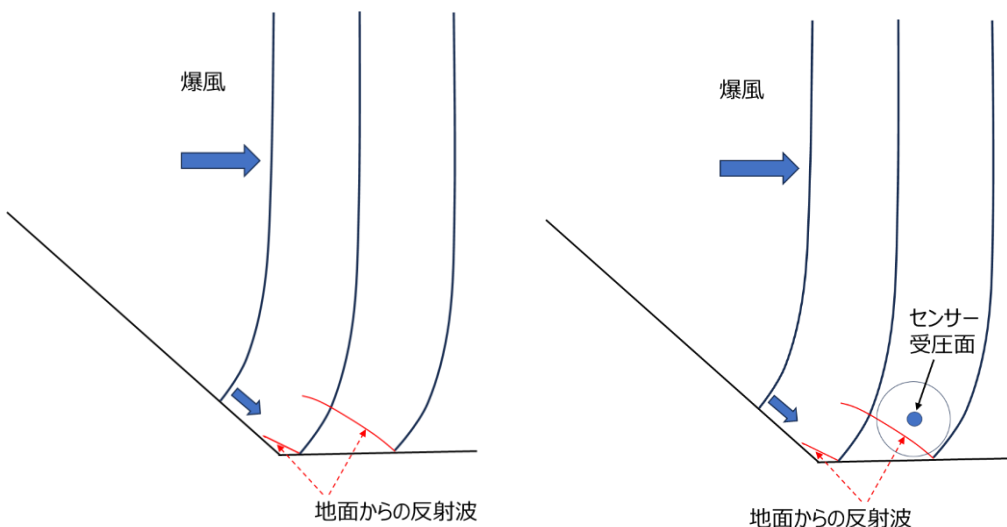


図 5.A.1-11 模擬地形斜面を下って伝播する爆風と地面における反射波のイメージ
(右図は爆風の静水過圧を測定する場合のセンサーの配置)

室内実験では地形背後で換算距離 $16 \text{ m/kg}^{1/3}$ の位置での爆風圧について、地形の実高さ 50 m を想定した実験 No.1-1 で得られたピーク圧が、実高さ 25 m を想定した実験 No.1-2 で得られたピーク圧の方が大きい結果になった。実高さが高い方が高いピーク圧となっており、この現象は直観に反する。受圧面が直接反射波を測定することに関係すると考えられ、簡単な検討をおこなった。

室内実験では同一条件で複数のショットを行った。いずれも条件も比較的再現性が良かったため、各条件について平均的な爆風圧履歴をもとめ、比較することにした。ただし、正確なピーク値の比較では到達時刻を完全に一致させて平均的な波形を求める必要があり、ここで実施したのは完全な解析ではない。

図 5.A.1-12 に室内実験で得られた基準、実高さ 50 m (室内 No.1-1) 実高さ 25 m (室内 No.1-2) の爆風圧履歴を示す。爆源はすべて 1 g の PETN ペレットである。横軸は起爆信号からの時刻である。到達時刻は基準、実高さ 25 m 、実高さ 50 m の順番で遅くなっており、地形高さの影響で爆点から各計測点までの距離が長くなった分遅れている。しかしながら、ピーク圧については、最も距離の長い実高さ 50 m の結果が 25 m の結果より大きい矛盾がある。受圧面が静水過圧ではなくセンサー受圧面での反射圧を直接測定することに関係していると考えられる。反射波理論等を用いたさらなる検討が必要である。具体的には、頂点で回折した爆風の湾曲の範囲が関係している可能性があり、回折した後の距離が長い方が湾曲の程度は大きくなるなどの詳細な検討である。

室内・野外実験とも地形背後では基準爆風圧と比して、正圧相インパルス減衰おり、爆風のエネルギーが地形によって減衰している。そこで、図 5.A.1-12 の 3 つの波形の到達時刻をそろえて図 5.A.1-13 に比較した。実高さ 50 m と 25 m の結果は特に、爆風先頭近傍の $50 \mu \text{s}$ のみで高い圧力変化が確認された。これはセンサー受圧面での反射圧を直接測定することに起因するであろう。爆風先頭近傍の $50 \mu \text{s}$ 程度以降はいずれの波形も線形的な減衰傾向がある。線形的な減衰領域を到達時刻まで延長して圧力を比較したところ、相対的な圧力値の比較には矛盾は無くなった。それらの値は、野外実験で確認された基準爆風圧に対する減衰率と非常に良い相関を示した (図 5.A.1-14)。

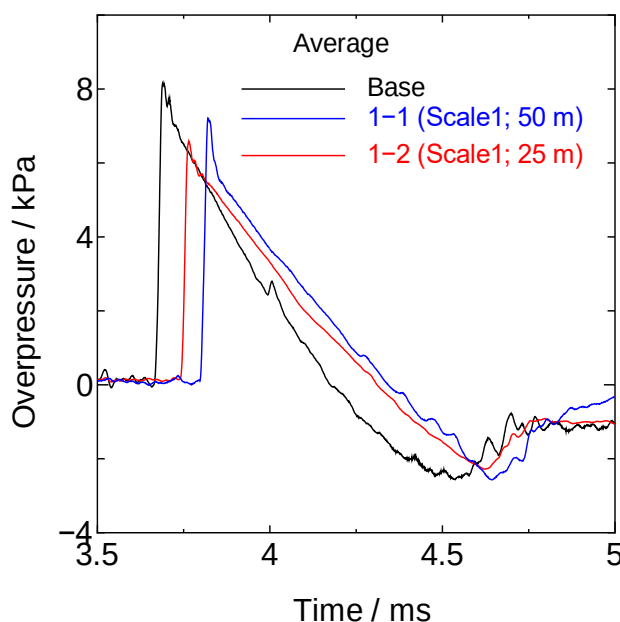


図 5.A.1-12 基準 (室内 No.0)、実高さ 50 m (室内 No.1-1) 実高さ 25 m (室内 No.1-2) の爆風圧履歴

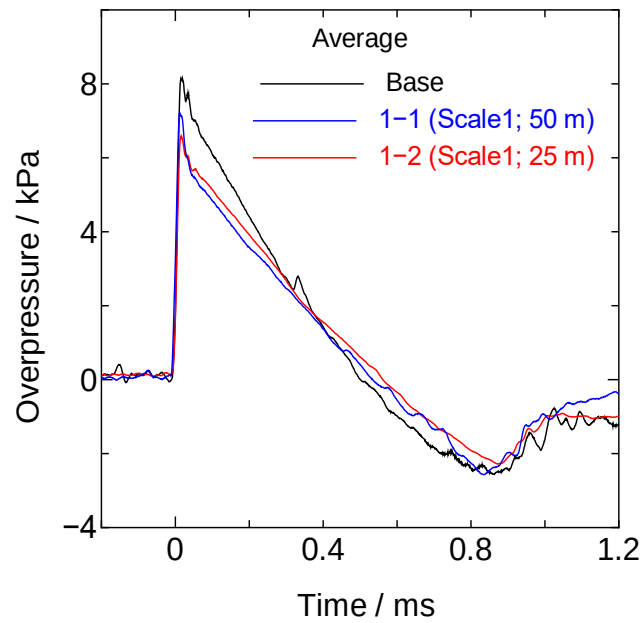


図 5.A.1-13 基準（室内 No.0）、実高さ 50m（室内 No.1-1）実高さ 25m（室内 No.1-2）の爆風圧履歴
（到達時刻を揃えて表示）

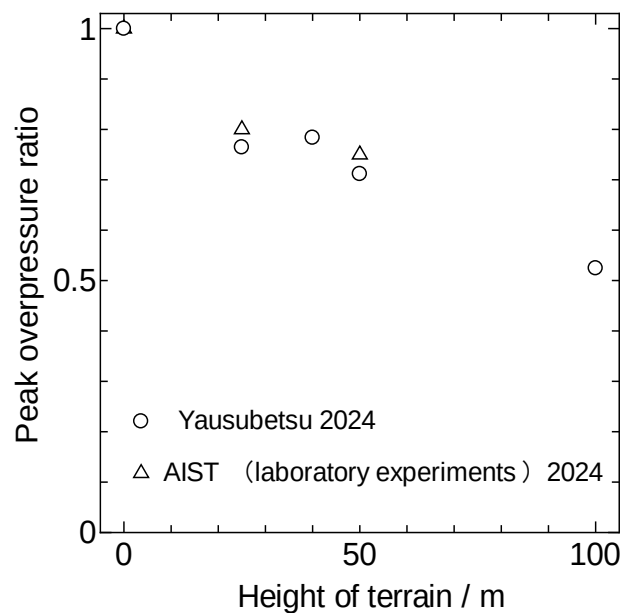


図 5.A.1-14 ピーク静水過圧比と実規模高との関係