

令和2年度火薬類爆発影響低減化技術基準検討における
シミュレーション活用に係る調査報告書

2021 年 3 月

国立研究開発法人 産業技術総合研究所

目 次

1	目的	1
2.1	実在するシミュレーションソフトに係る調査	1
2.2	我が国におけるシミュレーション活用状況の調査	1
2.3	火薬類取締法の技術基準制定に係るシミュレーション活用可能性の調査	2
3	委員会	2
3.1	シミュレーション活用に係る調査委員会	2
3.2	調査委員会の審議状況	2
4	大規模爆発現象を評価可能なシミュレーションソフトに関する調査	3
4.1	シミュレーションによる爆発現象の模擬 ⁽¹⁾	3
4.2	大規模爆発現象を評価可能なシミュレーションソフト	5
5	シミュレーション活用状況	6
5.1	平成元年度以降シミュレーションを活用した事業の一覧	6
5.2	調査テーマ1: 隔壁による爆発圧力の減衰(H10)	12
5.3	調査テーマ2: 地中式火薬庫(H14-H16)	14
5.4	地中式火薬庫(H27-H30)	16
6	火薬類取締法の技術基準制定に係るシミュレーション活用可能性	19
6.1	大規模計算(計算コスト・時間)	19
6.2	爆風圧のシミュレーションによる評価	20
6.2.1	模擬地中式火薬庫	22
6.2.2	模擬地下式火薬庫	24
6.2.3	防爆壁(煙火)	26
6.2.4	シミュレーションの活用検討の際のフロー	26
6.3	地盤振動のシミュレーションによる評価	28
6.3.1	爆発源のモデル化	29
6.3.2	地質の影響評価	30
6.4	飛散物のシミュレーションによる評価	31
7	まとめ	33
	ANNEX A: 委員会議事録	35

1 目的

火薬類取締法は、火薬類(火薬、爆薬、火工品)の有する爆発・燃焼という危険性を踏まえ、製造、販売、貯蔵、運搬、消費その他の取扱いについて、技術上の基準を定め厳しく規制している。これら技術上の基準は、個々の火薬類の特性や施設等の爆発影響低減化効果を、実際に火薬類を爆発させる野外実験により評価・分析し、法令上に位置づけたものである。

他方、火薬類を爆発等させた際の周辺への影響や大がかりな実験の実施は場所や予算面等の制約があるところ、近年のシミュレーション技術の進展等を踏まえ、野外実験に代わる爆発影響の評価手法としてシミュレーションの活用可能性について調査を行い、火薬類の爆発影響低減化等に寄与する技術上の基準を効率的かつ信頼性あるデータを根拠に策定・見直するための体制を整備する。

2 事業内容

火薬類の爆発影響について評価可能なシミュレーションソフトの特徴や利用に際しての制約、国内の火薬類に係る法令整備にあたってのシミュレーションの活用状況を調査した上で、火薬類取締法の技術基準の策定又は見直しにあたって、野外実験に代わる新たな手法としてのシミュレーション活用可能性について評価・分析を行い、具体的な活用方法について提案する。

2.1 実在するシミュレーションソフトに係る調査

火薬類の爆発影響を評価可能なシミュレーションソフトについて調査を行う。具体的には、経済産業省の事業として活用可能なシミュレーションソフト(国内外の汎用シミュレーションソフト又はその他のシミュレーションソフト)を調査する。

2.2 我が国におけるシミュレーション活用状況の調査

過去に実施した爆発影響低減化技術基準検討事業(経済産業省委託事業)では、一部でシミュレーションを活用している。平成元年度以降シミュレーションを活用した事業の一覧を作成するとともに、3テーマ程度を対象に、以下の点について整理を行う。

- ①シミュレーションを活用した事業名
- ②活用したシミュレーションソフトの種類
- ③何を検討するにあたり、どのような段階でシミュレーションを活用したか。
- ④当該シミュレーションを行うにあたり、爆発を伴う野外実験データはどのように活用されたか。
活用されていない場合その理由。

2.3 火薬類取締法の技術基準制定に係るシミュレーション活用可能性の調査

経済産業省では、製造施設等の基準を定める際、また、火薬類の特性を評価し、当該特性を踏まえた法令上の取扱いを検討するにあたり、実際の施設等を模擬した縮尺スケールの野外実験を行い爆発影響を評価した上で技術的な基準を定めている。

今後、こうした野外実験に代わりシミュレーションを活用するにあたり、2.1 と 2.2 の調査結果を踏まえ、野外実験の代替としてシミュレーションを活用できる可能性の有無について調査・分析を行い、具体的な活用方法について提案する。

活用方法を提案するにあたっては、シミュレーションで代替可能な実験内容（またはシミュレーションで代替困難な実験内容）、シミュレーションで代替するにあたってのメリットや課題、より費用対効果が高い方法で適切な結果を導くための方向性について整理する。

また、平成 28 年度から 30 年度にかけて経済産業省にて実施した地中式火薬庫の爆発影響低減化事業においては、野外実験の結果、複数の課題が残っているが、当該課題の解決策に関し、シミュレーションの活用も含めて提案する。

3 委員会

学識経験者等 5 名の委員からなる委員会を設置し、2 回の委員会を開催し、シミュレーション活用に係る評価・検討結果を審議した。

3.1 シミュレーション活用に係る調査委員会

（敬称略、五十音順）

委員長	新井 充	東京大学 名誉教授、総合安全工学研究所
委員	阿部 淳	伊藤忠テクノソリューションズ株式会社 科学システム本部
		原子力・エンジニアリング第 1 部
	福田 大祐	北海道大学 大学院工学研究院 環境循環システム部門 助教
	松尾 亜紀子	慶應義塾大学 理工学部 機械工学科 教授
	水書 稔治	東海大学 工学部 航空宇宙学科 教授

3.2 調査委員会の審議状況

令和 3 年 2 月 19 日(金)	第 1 回調査委員会	（Web 会議）
令和 3 年 3 月 19 日(金)	第 2 回調査委員会	（八丁堀区民館及び Web 会議）

4 大規模爆発現象を評価可能なシミュレーションソフトに関する調査

4.1 シミュレーションによる爆発現象の模擬⁽¹⁾

火薬類の爆発現象を理解して、保安物件の距離に応じた爆発影響を評価する際に、爆発実験とシミュレーションを併用することは費用面での効率的な執行や評価精度の向上に資するものとなり得る。爆発現象のシミュレーションは多くの課題を残しているものの、評価制度の向上のために実験と組み合わせた評価手法の確立は重要である。まずは、爆発に伴う現象とシミュレーションによる現象の模擬について記述する。

爆発の物理現象は、一般には質量、運動量、エネルギー保存則を支配方程式とし、状態方程式等と組み合わせて表せる。支配方程式は座標系や適用対象に応じて選択・表現が変わる。例えば、構成方程式の導入には、偏差応力などを考慮するため変数が増え、純粋な流体より複雑になる。シミュレーションに持ち込むためには離散化が必要であり、有限差分法(FDM)や有限要素法(FEM)が代表的である。FDM を取り上げても、Euler 法、Lagrange 法、ならび ALE (An arbitrary Lagrangian -Eulerian method)法による離散化などが挙げられ、それぞれ特徴がある。汎用のシミュレーションソフトではこれらをソルバーと表現していることもある。破壊が著しい対象には粒子法(SPH; Smoothed Particle Hydrodynamics)⁽²⁾なども利用され、これらも同様にソルバーと表現される場合がある。以下は爆発に伴う現象と物質の特性を表すための状態方程式等の関係について記述する。

固体中の衝撃波や爆風、構造物の変形・破壊の根本原因は、火薬類の爆轟である。爆轟波は高温高圧の波頭を持つ衝撃波を伴う自己支持された燃焼波で爆轟速度は秒速で～8000 m にも及び、爆轟圧は～40 万気圧にも達するものもある。反応は瞬時に終わるため、古典的で現在も応用されている理論(C-J 仮説)でも、反応過程は無視される。すなわち、爆轟波が到達すると瞬時に反応が終了し、平衡状態が達成された爆轟生成ガスに変化すると考える。ただし、殉爆の評価では反応過程も考える必要がある。反応過程を無視できる場合は、爆轟生成ガスの状態方程式で爆轟波を模擬できる。幸い、現在では爆轟状態を表現できる二つのタイプの状態方程式が実用化されている。化学種を考慮して実在気体の状態方程式と化学平衡計算から構成するものと、シリンダー膨張試験と呼ばれる実験によって爆轟生成ガスの状態式パラメータを求めるものである。後者は、発案者の名前をもとの JWL (Jones-Wilkins-Lee) 状態式⁽³⁾と呼ばれ、火薬類の爆発現象の数値シミュレーションに最も多く利用されている。前者の結果を後者の JWL 状態式でフィッティングすることもある。現在では、多くの爆薬についてパラメータが求められている。しかしながら、同じ爆薬でも初期状態(例えば密度)が違えば、状態方程式のパラメータも変わる。そのため、同じ爆薬であっても米国で求められた状態方程式のパラメータを国内の爆薬に適用することが出来ないことが多い。そのため、国内で火薬類の種類を踏まえた爆発影響評価については、火薬類

の状態方程式を求める必要がある。さらに、軍用の高性能な爆薬のように理想的な爆轟を仮定できる火薬類には状態方程式が得られるが、薬径の違いによって爆轟速度が異なる非理想爆轟を呈する爆薬については研究レベルの課題が残っている。非理想爆轟や殉爆などの現象を評価対象とする場合は、スケール則の確認等も含んで、爆発実験とシミュレーションを組み合わせた詳細な評価が必要である。

火薬類に接するような近傍にある物質はたとえ金属であっても剛性を無視して、流体的にふるまうと考えてよい圧力領域がある(数万気圧以上の高圧領域)。よって近傍の構造物等に発生する衝撃波、あるいはその作用による高速変形をシミュレーションで精度よく模擬するためには状態方程式が重要である。土やコンクリートあるいは金属などで状態方程式のタイプが異なり、さらに、土の状態方程式一つ取り上げても、空隙率や含水率で異なり、土質にもよる。同じ物質でも、密度などの状態が違えば状態方程式のパラメータも変える必要があり、場合によっては現象を模擬できるパラメータが得られていない。状態方程式に関する多くの研究が存在し、様々な材料についてモデルとパラメータは求められているものの、評価にシミュレーションを用いる場合に状態方程式パラメータの検討は必須になる。構造物等が火薬類から離れるにつれて、高速で膨張する火薬類の爆轟生成ガスとの直接的な干渉(爆風はほとんど爆轟生成ガスに張り付いている)、その後、爆轟生成ガスから離脱した爆風との干渉が支配的になる。いずれの場合も、通常は爆風の作用として表現されているが、火薬類との距離によって様相は大きく異なる。例えば、距離を薬量の3乗根で除した換算距離 $K=1$ に特殊な防爆壁を設置した場合、作用する静水過圧は10気圧に近く、反射波なら50気圧程度にもなる。さらに近づけば、反射波では400気圧も超える。 $K=1$ であっても、爆風圧を面で受ける構造物は大変形を免れない(10気圧が 1m^2 の面に作用するとき100トンの力が加わる)。変形することで壁を越えて伝わる爆風圧が変化するため、遠方に伝わる爆風の評価であっても、高速変形(高ひずみ速度)過程を模擬できるシミュレーションでなければならない。これらの圧力領域で重要なのは構成方程式であり、材料に応じたモデルが多く提案されてきた。しかし、現象を模擬できるモデルやパラメータが得られていないことが多い。計測例が少ない、新しい研究テーマとなる圧力領域も存在する。

さらには破壊があり、シミュレーションでは破壊則が必要である。延性材料は弾性・塑性変形の後に、破壊が起こるのに対して、脆性材料は降伏応力に達し、顕著な塑性変形もなく破壊に至る場合も多い。動的な破壊についてはシミュレーションで亀裂一つを模擬するだけでも課題が多く残っている。一般に材料強度はひずみ速度に依存して変わる。

さらに変形でも破壊でも材料の強度分布などの不均質性の効果を模擬するのは容易ではない。爆発影響の中で爆風圧は、上述の壁の変形や破壊の影響を受ける。しかしながら、爆風圧の評価として構造物の剛体近似を適用することもある。計算精度が十分であれば、実際よりも爆風圧を高く見積もり、安全側の評価である。その場合は、シミュレーションが要求するのは爆轟生成ガ

スと理想気体の状態方程式である。評価の目的上、爆発源近傍の爆風圧が重要でなければ、爆轟過程を無視でき、理想気体の過程と爆発エネルギーを考慮したシミュレーションになる。この条件は、歴史的に衝撃波捕獲⁽⁴⁾のための流体力学的計算手法の議論が最も活発に行われた対象であり、様々な高解像度計算手法が提案されている。支配方程式、衝撃波捕獲スキームを的確に選定することで高精度なシミュレーションが可能となる。いずれの場合も、実現象に対する剛体近似の妥当性を見極める必要があり、過去の爆発影響評価実験を調査し利用できない場合は、野外実験の実施が必要である。爆発影響評価の目的と方針を明確にして、判断する必要がある。

以上、すべての爆発影響を一度に把握することは困難である。そこで、爆発影響の評価項目を大雑把に分類すると爆風圧、地盤振動、飛散物の影響評価のように分けられる。以下、大規模爆発現象の模擬計算を実施できるシミュレーションソフトについて記述する。

4.2 大規模爆発現象を評価可能なシミュレーションソフト

火薬類の爆発現象を解析対象とする汎用のソフトウェアで代表的なものとして Ansys 社の Ansys-AUTODYN と Ansys-LS-DYNA を挙げることが出来る。

前者は旧 Century Dynamics 社が開発した AUTODYN code がもとになっており、特に爆発現象を含む問題への応用例が多い。Euler 法、Lagrange 法、ALE 法、さらには SPH 法などのソルバーを搭載し、各手法間で相互作用機能を有する。これにより、各ソルバーの強みを生かしたモデル化が可能である。搭載している状態方程式や構成則は豊富であり、前者は Shock Hugoniot, Tillotson, SESAME, Ideal gas, JWL, Porous, $P-\alpha$ などがあり、後者は Elastic, Viscoelastic, von Mises, Johnson Cook, Steinberg Guinan, Drucker-Prager, などが例として挙げられる。破壊則は応力などに破壊強度などの閾値を設定して、破壊を表現するものが多いと思われる。破壊則は、Hydro, Plastic strain, Principal Stress, Principal strain, Grady Spall Model, Johnson Cook などがある。爆轟生成ガスの状態方程式として代表的な JWL 状態方程式を利用でき、数多くの爆薬のパラメータがデータベース化されている。国内の爆薬を模擬する場合は、実験や KHT コードなどでパラメータを求めて直接入力できる。同コードに搭載されていない材料モデルも、ユーザーサブルーチン機能により定義することが可能である。爆風の解析には Flux corrected transport アルゴリズムも用いることができ、各ソルバーとの相互作用も可能となってきた。並列計算機能を有するが、高速計算には若干の課題があり、そのために、格子幅を小さくして爆風計算の精度を上げると計算時間が長くなり、計算が困難な場合もある。豊富な材料モデルのデータベースを有しており、地盤振動や飛散物解析を実施する機能を有する。

Ansys-LS-DYNA も Ansys-AUTODYN とほぼ同等な計算が可能である。このコードは LLNL にて Dr. John O. Hallquist が 1976 年に DYNA3D を開発したことを起源とする。構造の大変形応答を解析するための有限要素解析プログラム、静的問題から衝撃問題まで塑性加工問題に適

用されている。陰解法と陽解法いずれも採用されており、ALE, EFG (Element-free Galerkin 法), SPH などのソルバーを利用できる。ナビエストークス方程式も搭載され、爆風についても Ansys-AUTODYN と同等である。並列計算の適用性は高く、大規模な計算が可能であるため、格子幅を小さくとした解像度の高い計算も期待できる。地盤振動や飛散物解析を実施する機能を有する。

妥当性の検証は必須であるが、二つのソフトは大規模爆発影響評価に利用できるシミュレーションソフトと位置付けることが出来る。

さらに、IMPETUS Afea Solver なるシミュレーションソフトについて調査した。ノルウェーの IMPETUS Afea 社が開発した非線形陽解法有限要素法プログラム⁽⁵⁾である。ソフトウェアが開発は 2008 年からであり、爆風影響を含み、構造物の大変形問題を解析可能な比較的新しいシミュレーションソフトである。そのため GPU に適合 (NVIDIA CUDA) し、高速計算を実現している。有限要素法をベースとし、SPH も選択できる。特徴は、爆轟生成ガス、空気、土、砂などに Discrete Particle method を用いており、爆轟生成ガスや空気については James Clerk Maxwell による気体の分子運動論をベースとして、粒子一つを多くの分子の集まりとしている。JWL 状態式と同等の結果が得られるようにチューニングされているものの、利点と欠点がある。ソルバー間での相互作用の取り扱いは容易であるが、爆薬と評価対象物とのスタンドオフが大きい場合に爆風の評価精度が低下する。金属、コンクリート、セラミックス、FRP、爆薬のみならず、ボルトや接着剤あるいは溶接部などの接続部の材料モデルも搭載している。地盤振動、飛散物の解析を実施する機能を有する。

5 シミュレーション活用状況

過去に実施した爆発影響低減化技術基準検討事業(経済産業省委託事業)のうち、平成元年度以降シミュレーションを活用した事業について調査した。その結果、平成 7 年度～平成 16 年度について、爆発影響評価のシミュレーションに関する記載があった。なお、平成 7 年度以降委員会の名称は以下のようなものである。

平成 07 年度以降:爆発影響評価委員会

平成 15 年度以降:爆発影響低減化委員会(平成 11 年度までは通商産業省委託事業)

平成 21 年度以降:爆発影響低減化技術基準検討

平成 24 年度以降:火薬類爆発影響低減化技術基準検討

5.1 平成元年度以降シミュレーションを活用した事業の一覧

平成 7 年度爆発影響評価委員会 ～ 平成 14 年度爆発影響評価委員会

平成 15 年度爆発影響低減化委員会と平成 16 年度爆発影響低減化委員会

表 5-1 に平成 7 年度～平成 16 年度に実施されたシミュレーションの活用状況について示す。

表 5-1 平成 7 年度～平成 16 年度についてシミュレーションの活用状況

平成	解析	既存データとの比較	室内・野外実験との比較
7	-	-	-
8	爆風	-	-
9	爆風	爆風	-
10	衝撃圧	-	圧力履歴（モルタル）（室内実験）
11	-	-	-
12	-	-	-
13	爆風	-	-
14	爆風	爆風	模擬地中式火薬庫（100 g TNT）
15	爆風	爆風	昨年度までの野外実験爆風圧実験との比較 対象は地中式火薬庫
16	爆風	爆風	昨年度までの野外実験爆風圧実験との比較 対象は地中式火薬庫

平成 7 年度～平成 14 年度 爆発影響評価事業

平成 15、16 年度 爆発影響低減化事業

表 5-1 では、年度ごとにどのような解析が実施されたか、既存データとの比較、室内・野外実験との比較について実績を示した。初年度である平成 7 年度では、活用の可能性について、次のように計画された。以下は報告書の抜粋である。

……保安距離を低減するためには、どのような条件が必要であるかを検討することとする。

(1) 火薬庫等の近傍に遮蔽物を設けた場合、あるいは保安物件の近傍に遮蔽物を設けた場合の影響

(2) 飛散物について

(3) 地中式火薬庫のように三方を山で囲まれているもの等、について検討する必要があると考えられる。

まず、第 1 段階として、既存の実験データ（爆風圧、飛石、騒音、振動等）、文献等を整理する。

第 2 段階として、

(1) 現状の保安距離の基準を数値化する。

(2) 現在あるデータをシミュレーションする。

(3) その他

第 3 段階として、火薬類の爆発の影響を多角的視点から評価しうるシステムができるか否かについて検討する。

ここではシミュレーションについても整理されており、起爆過程のシミュレーション手法の記載もあった。

平成 8 年度から平成 16 年度までに、火薬類の爆発の影響を多角的視点から評価しうるシステムができるか否かについて検討され、爆風について評価するという可能性が述べられている。

以下、平成 8 年度～16 年度まで実施されたシミュレーションについて概要をまとめる。

平成 8 年には流体計算コード(AUTODYN-2D)やシミュレーション手法(ALE 差分法、TVD 差分法、CIP(Cubic Interpolated propagation)法⁽⁶⁾)が取り上げられ、それぞれ特徴が整理された。特に CIP 法が従来とは異なる概念をもった手法であること、界面捕獲に適しており、様々な材料を考えなければならない爆発影響評価のシミュレーションに適していると考えられた。しかしながら、爆発問題への適用例が少なく、火薬類の爆発問題のように爆轟生成ガスと空気との初期の密度差が 3 桁、圧力で 5 桁も異なる問題の解析に適しているか、その検証の重要性が述べられた。

平成 9 年度から物質工学工業技術研究所(2001 年度から産業技術総合研究所)において CIP 法をベースとする 2 次元流体計算コード開発に取り組まれると同時に、爆発影響評価委員会にて、衝撃波伝播問題への適用性について評価検討結果が報告された。

平成 10 年度は前年度に続き、CIP 法ベースの 2 次元流体計算コードに対する衝撃問題のベンチマークテストが実施されるとともに、CIP 法ベース 3 次元流体コードの開発について報告された。

平成 11 年度は CIP 法アルゴリズムの 3 次元コードに対し、有理関数補間(有理関数 CIP)、当時新しい手法である局所補間微分オペレータ法(Interpolated differential operator scheme (IDO 法))を導入した 3 次元流体コードの開発が東京工業大学で取り組みられ、圧縮性・非圧縮性流体統一解法(C-CUP 法)の導入も検討された。プログラムの MPI(Message Passing Interface)を用いた並列化にも着手され報告された。

平成 12 年度～14 年度までは上述の 3 次元コードに対して、プログラムの並列化による高速化、あるいは AMR(Adaptive mesh refinement)の導入ならびに、シミュレーションの妥当性を検

証するためのベンチマーク計算結果の報告であった。なお、平成 14 年度は地中式火薬庫の検討として、軸対称のシミュレーションがペントライト 100g の爆発実験結果と比較されている。

平成 14 年度～平成 16 年度についてはシミュレーションと野外実験等との比較がある。これについては、調査テーマ 2 として「地中式火薬庫(H14-H16)」に後述する。

平成 7 年度～平成 16 年度に実施された室内および野外実験を表 5-2 に示す。

野外実験は平成 10 年度から再開された。同年度は室内実験ならびに旭化成工業株式会社あいばの試験場にて小規模な実験が再開され(最大薬量 1kg 程度)、隔壁による爆発圧力の低減に関する実験、及び地中式火薬庫内での爆発による庫外爆風圧に関する実験が実施された。

室内実験の評価には 1 次元シミュレーションが併用されたものであり、調査テーマ1として後述する。野外実験はシミュレーションの妥当性を検証するデータとして活用することも目的とし、実験系を二次元軸対称として実施された。平成 13 年度こそ野外実験が実施されていないが、平成 14 年度からは自衛隊演習場を借用した大規模野外実験が再開された。表 5-2 に示すとおり、種々の目的で大規模野外実験が実施されており、その中でシミュレーションと比較されたのは模擬火薬庫(地中式火薬庫)である。

その他、平成 26 年度ならびに平成 27 年度火薬類爆発影響低減化技術基準検討において、火薬庫及びその土堤の数値シミュレーションが報告書に記載があった。これは火薬庫建屋及びその土堤の大地震時の耐震性能を解析的に明らかにすることを目的としたもので、爆発影響評価ではないため調査対象外とした。この場合はある程度確立されたモデルの適用が可能である。

表 5-2 平成 7 年度～平成 16 年度の間に実施された室内および野外実験

平 成	室内実験	野外実験
7～9	-	-
10	モルタルの中の衝撃圧測定（マンガニン）	1.隔壁による爆発圧力の減衰、2.地中式火薬庫の庫外爆風圧（あいばの試験場）
11	モルタルの状態方程式に関する実験	1.隔壁による爆発圧力の減衰、2.地中式火薬庫の庫外爆風圧（あいばの試験場）
12	水中爆発により生成された水柱の上昇に関する実験	1.基準爆風圧実験 2.水カーテンによる爆風圧の減衰（旭化成筑紫野工場）
13	1.模擬火薬庫実験 2.水カーテンによる爆風減衰実験	-
14	1.地表面爆発の爆風 2.模擬火薬庫爆風	1.基準爆風圧 2.模擬火薬庫（地中式火薬庫） 3.可燃性容器（アルミ）に充填された火薬類の爆発 4.隔壁による爆発圧力の減衰（殉爆） 5.煙火の積み重ね試験 6.煙火の外部火災試験 7.含水爆薬中間体の通気管試験（5-7 は国連試験） （日出生台演習場）
15	1.鋼管試験体の変形および破壊試験 2.模擬火薬庫内爆発による爆風の伝播に関する実験	1.基準爆風圧 2.模擬火薬庫（地中式火薬庫） 3.含水爆薬中間体の通気管試験（国連試験） （王城寺原演習場）
16	1.ギャップ試験 2.ウェッジ試験	1. 模擬火薬庫殉爆実験 2. ギャップ試験 3. 基準爆薬の爆風圧 4. 爆発音に関する実験 （霧島演習場）

平成 16 年度までにシミュレーション関係で実施された項目を大雑把に分けると以下のとおり。

1.CFD 手法の調査・選定

2.コードの開発

3.検証…衝撃波管などの基本的ベンチマークテスト、空中爆発(Baker 等)、地中式火薬庫

シミュレーションによる爆風影響評価において障害物はすべて剛体近似された。隔壁による圧力減衰の評価が適用された 1 次元流体コードを除いて、材料変形、破壊、地盤振動、殉爆のシミュレーションの結果について報告書に記載はなかった。

以上の情報で、以下の二つの課題でシミュレーションが活用された実績を有する。

テーマ1. 隔壁による爆発圧力の減衰(H10)

テーマ2. 地中式火薬庫(H14-H16)

平成 17 年度から令和2年度までの間は、実質的に爆発影響評価のためのシミュレーションは実施されてこなかった。このことは 4.1 節の「シミュレーションによる爆発現象の模擬」で述べたように、大規模爆発現象の数値シミュレーションによる模擬には多くの課題を含んでいることによる。ある評価対象について、計測点を綿密に計画して大規模な爆発実験を実験すれば、実現象に即した爆風圧の減衰効果を定量的に理解することができ、技術上の基準策定・見直しするための信頼性ある根拠データとできる。現時点のシミュレーションには、爆発に伴う様々な現象を模擬できない対象も多い。また、一般には妥当性の検証が不可欠であるが、それが可能であったとしても、評価に必要な期間・コスト面から野外実験の方が評価に適している対象も多い。他方、常に過去の野外実験データを見直して、評価対象に対するシミュレーションの妥当性の検証に使えるかどうかを見極め、より適切な評価が可能、または、費用対効果が高い等の場合は、シミュレーションを併用していくことは重要である。例えば、産総研では、火薬類爆発影響低減化技術基準検討事業とは同時期に実施できなかったため事業外になるが、野外実験で得られた結果をシミュレーションで再現する試みを実施してきた。その結果をテーマ3: 地中式火薬庫(H27-H30)として取り上げ、シミュレーションの活用可能性について考える。

5.2 調査テーマ1:隔壁による爆発圧力の減衰(H10)

① シミュレーションを活用した事業名;

平成 10 年度爆発影響低減化委員会

旭化成工業株式会社あいばの試験場にて小規模爆発実験(最大薬量 1kg 程度)が実施された。

② 活用したシミュレーションソフトの種類

1 次元流体計算コード(自作コード MY1DL (ラグランジュ法)⁽⁷⁾);複数の状態方程式を搭載し、爆轟シミュレーション、高速衝突、粉体の衝撃圧縮の評価などに利用できる。開発者は吉田博士(現株式会社爆発研究所、当時;物質工学工業技術研究所)であり、平成 10 年度爆発影響低減化委員会の委員長である。MY1DL は衝撃現象の教育にも使用されており、Marc A. Meyers の教科書⁽⁸⁾でも紹介された。CIP ベースの圧縮性流体計算コードも候補であったが、状態方程式に関する計測は 1 次元の条件を満足するように設計される場合がほとんどであり、1 次元のラグランジュ法は評価に適しているため MY1DL を採用した。

③ 何を検討するにあたり、どのような段階でシミュレーションを活用したか。

隣接する火薬庫間の距離と殉爆の関係を調査することを目的として、爆発で壁の中に発生した衝撃波の減衰効果を定量的に評価するためにシミュレーションが活用された。野外実験では円筒形に成形された Composition B 爆薬を 1kg(直径 76mm、高さ 177mm)の下に円筒のモルタル資料等(代表的なもので厚さ 20mm 程度)を複数枚重ね、資料間の中心にマンガニンゲージを設置して、圧力履歴の取得を試みた。マンガニンゲージを利用した測定は、衝撃圧が作用した瞬間に外部電圧をゲージに印加するためにパワーサプライを用いるなど、計測系も複雑で、かつゲージの接着も空隙ができないように慎重に時間をかけて実施する必要があり、野外実験としては難易度の高い計測である。

原因は特定されなかったが、野外実験においてシミュレーションと比較するための圧力履歴データは取得できなかった。そのため物質工学工業技術研究所にて、追加の実験が実施された。液体爆薬により構成された直径 100mm の爆薬レンズの下に、直径 100mm で高さ 20mm のニトロメタンで満たされた円筒の容器を設置し、平面起爆した。ニトロメタン容器の下には厚さがそれぞれ、20mm、10mm、20mm の円筒のモルタル板を設置し、その間にマンガニンゲージを設置した。実験とシミュレーションでモルタルの状態方程式が検討された。図 5-1 は爆轟波が入射したモルタル中の圧力履歴について、室内実験とシミュレーションとの比較である。シミュレーションで使用された状態方程式は文献値を用いた。到達時刻とピーク圧は室内実験とシミュレーションの結果が、良い一致を示した。圧力の減衰傾向については両者に若干のずれがあるものの、同状態方程式を多次元のシミュレーションに応用した場合の有効性については評価が望まれる。爆薬が接する

ような隔壁による圧力減衰に着目してデータが取得され、殉爆防止の検討に資する重要なデータが得られた。

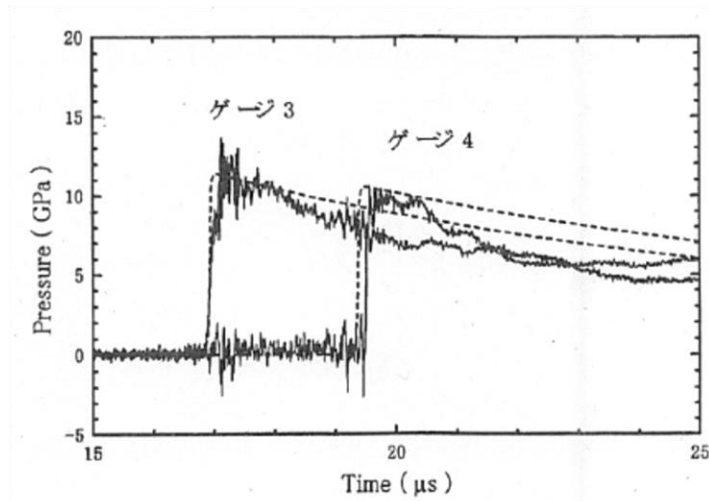


図 5-1 室内実験(実線)とシミュレーション(点線)との比較(モルタル中の圧力履歴)

(平成 10 年度爆発影響低減化委員会報告書より引用 図 5.32 物質研データ No.3)

④ 当該シミュレーションを行うにあたり、爆発を伴う野外実験データはどのように活用されたか。

爆発で壁の中に発生した衝撃波の減衰効果を定量的に評価するために、平成 10 年度の実験では Composition B 1kg を使用し、4 ショット実施された。平成 11 年度も同じく 4 ショット実施したが、両年ともノイズ等の影響で圧力履歴データが得られなかった。野外実験とは比較できなかったが、状態方程式を求める目的としては、室内実験のデータが活用された。なお、隔壁による殉爆防止に関する野外実験による検討が平成 14 年度は TNT、平成 16 年度はエマルジョン爆薬を使用して実施された。なお、殉爆に関するシミュレーションの記載は報告書にはなかった。

5.3 調査テーマ2:地中式火薬庫(H14-H16)

① シミュレーションを活用した事業名

平成 14、15 年度爆発影響低減化委員会、平成 16 年度爆発影響低減化委員会

② 活用したシミュレーションソフトの種類

CIP アルゴリズムの 3 次元圧縮性流体計算コード(自作コード、東京工業大学開発); 支配方程式は非保存系の圧縮性 Euler 方程式であり、CIP 法に基づいて移流相と非移流相に分離して計算する手法を用いており、移流相には有理関数 CIP 法、非移流相には局所補間微分オペレータ法(IDO 法)が採用された。プログラムの MPI(Message Passing Interface)を用いた並列化も整備され、産業技術総合研究所爆発安全研究センター所有の 64 台の並列計算機クラスター(Intel Xeon 2.8GHz ×128 CPU, 192 GB) が利用された。

③ 何を検討するにあたり、どのような段階でシミュレーションを活用したか。

平成 16 年度までに、火薬類の爆発の影響を多角的視点から評価しうるシステムができるか否かについて検討され、爆風評価についてシミュレーションの可能性について議論された。

シミュレーションの妥当性を検証するデータを取得するために平成 10 年 11 年度に実施された直円筒系の模擬火薬庫の野外実験(あいばの)の条件は以下のものであった。

H10 L/D;約5(薬室長さ(L)970mm 内径(D)194mm)ペントライト (90g(3),200g,500g)

H11 L/D;約5(長さ(L)940mm 内径(D)193mm)ペントライト(100g(2),200g,500g)+Comp.B (1kg)(L/D(薬室長さ/径))

H11 ヒューム管(長さ 1540mm 内径 400mm) ペントライト (100g(2))+Comp.B(3.6 kg)

平成 14 年度に 2 次元円筒座標系における地中式火薬庫からの爆風伝播シミュレーションが実施された。条件は薬室長さ 1m、半径 0.1m、ペントライト 100g であり、平成 11 年度の実験データと比較された。計算場は長さ方向に 3m、半径方向に 2m とし、格子幅 2.5mm で 1200×800 であった。コード開発を伴ったため、シミュレーションが実施されたのは実験データがとられて 3 年後である。コードが開発された直後に実施した平成 14 年のシミュレーションの結果は、野外実験で取得したデータと比較して、到達時間ならびに圧力のピーク値に違いがあり、最大で 1.5 倍程度であった。なお、計算場の長さは 3m であり、換算距離では K=6 程度の計算領域を高解像度で計算した結果である。以下、格子幅と計算場の関係について記述する。

平成 16 年度の報告書にて球形の TNT 1kg の爆風問題をもとに爆風計算が大規模計算になる理由と格子サイズ依存による計算精度への影響などが記述されている。第一種保安物件に必要

な保安距離は換算距離で 16 であるから、TNT 1kg に対しては 16m である。一方、ベンチマーク計算にて格子サイズ依存を検討し 5mm 間隔程度の格子分解能が必要との結果が得られている。5mm 間隔で火薬庫の前後左右に 16m を確保し、高さ方向にその半分の 8m を確保したとすると、 $6400 \times 6400 \times 3200$ の格子点が必要となる。3 次元は実施不可能と判断され、 6400×3200 の格子点を用いて、2次元円筒座標系でシミュレーションが実施された。

計算格子間隔を 5mm に設定しても、計算場が大きいと衝撃波が遠方に広がるにつれて数値拡散の影響で爆風のピーク過圧は低下する。そこで、事前に TNT 1kg の地表面爆発を 16m 以上まで計算し、得られた爆風圧を Baker の地表面爆発の爆風圧と換算距離 5, 8, 14, 16 で比較する。これにより、数値シミュレーションの数値拡散に原因する圧力低下の割合を把握して、実際の爆風評価の際には圧力低下の割合を加味して爆風影響評価を実施する方法が提案された。2次元円筒座標系の計算は $L/D=2, 4, 8$ の場合が実施され、すべて $L/D=3$ の実験結果と相対比較された。

④当該シミュレーションを行うにあたり、爆発を伴う野外実験データはどのように活用されたか。活用されていない場合その理由。

平成 16 年度の総括をまとめると以下のようなものである。爆源から遠方の爆風圧絶対値は実験と比較して小さい。このため、既存の地表面爆発による爆風圧のような基準的な計算結果をもとにし、数値拡散による圧力低下を把握した上で、相対的な爆風圧分布の比較を行なわねばならない。相対的な比較により、数値計算結果は $L/D=3$ の実験結果と一致した。

以上は、限られた時間で、高精度計算手法と大規模計算環境を構築し、実験結果との比較まで実施し、爆風評価についてシミュレーションの可能性を取りまとめた成果である。一方で、次のような課題も残っている。16 年までに開発された手法では計算精度が上がるたびに換算係数(地表面爆発計算による)が必要である。持続的なシミュレーションの活用としては適当と言い難い。さらに、 $L/D=3$ との相対比較で最終的な評価が行われていることは、実験値との直接的な比較が不足している。最近では計算機の能力向上とコストダウンは進んでおり、さらなる検証や新しい数値解析手法を導入する必要がある。

5.4 地中式火薬庫(H27-H30)

①シミュレーションを活用した事業名

平成 27~30 年度火薬類爆発影響低減化技術基準検討

平成 27 年度は、過去の調査研究によって取得したデータ及び文献等をもとに爆発影響低減化のための技術基準の策定に向けた課題を整理し、大規模実験を実施するためのデータ収集として小実験(1g の実験)を実施した。その結果、土堤の有無により爆風圧の方向依存性の傾向が変わることが判明し、土堤有の条件で野外実験の必要性が示された。また、事業外ではあるが、産業技術総合研究所では、翌年から 3 次元流体計算コード(自作コード)開発を開始し、小規模実験のシミュレーションによる模擬を目標とした。

また、野外実験では土堤の有無、L/D(3 と 9)、出口直径/薬室直径をパラメータとして、爆風圧の方向依存性について検討された。

②活用したシミュレーションソフトの種類

3 次元流体計算コード(自作コード); 任意の物質数を解析できる多種媒体 3 次元圧縮性 Euler 方程式を用い、TVD 差分法を考慮した数値流体解析コードである。近似リーマン解法の 1 つである HLLC (Harten, Lax and van Leer and Contact)スキーム⁽⁹⁾を用いた。これは衝撃波や接触面、物質界面を精度よく評価できることが知られている。MY1DL、CIP 法とは異なりオイラー法である。任意の状態方程式の導入が可能である。材料の弾塑性変形や破壊モデルは搭載されておらず、剛体壁を対象とした解析を行い、爆風評価を行った。3 次元空間において 0~180 度にわたって K 値 16 まで解析を行うため、最大で約 9 億点を用いた大規模解析を行った。

④ 何を検討するにあたり、どのような段階でシミュレーションを活用したか。

剛体壁を用いた室内実験(薬量 1 g)を検証対象とした。コード開発を伴ったために、室内実験を再現し、結果の検討に至るまで3年程度要した。地中式火薬庫(H14-H16)における CIP 法ベースのコード開発の時も、シミュレーションは野外実験等でデータが取得された後に、開発・整備の時間を要して遅れて実施されたが、開発が伴う場合は避けられない。

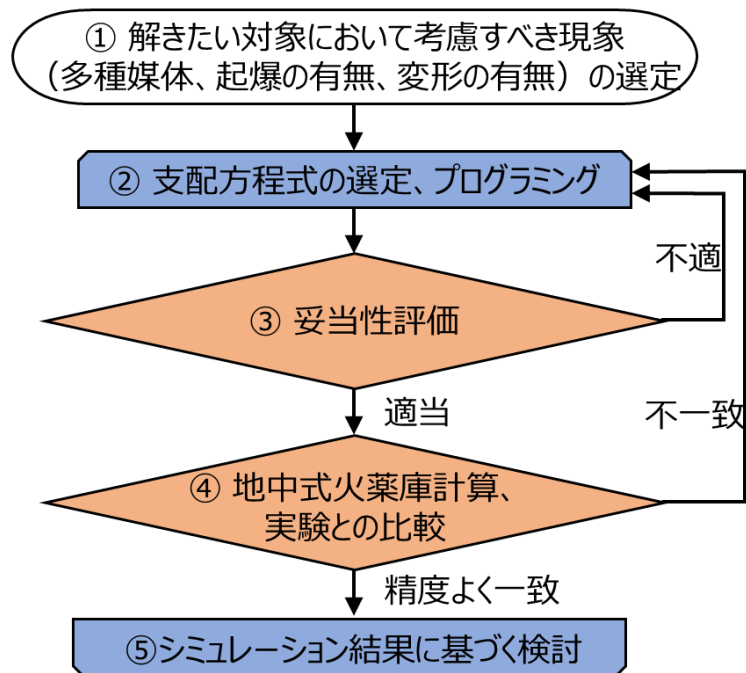


図 5-2 数値シミュレーションによる爆風圧評価のフロー(地中式火薬庫)

シミュレーションによる爆発影響評価には、コストも実施期間も念頭に置く必要がある。ここでは、この調査テーマで爆発影響評価を実施できるようになるまでのフローを実例で図 5-2 に示す。

- (①) 評価対象ごとに、考慮すべき現象を理解し、全体の計画を立てる(1 ヶ月)。
- (②) 支配方程式や衝撃波捕獲スキームさらには状態方程式などを選定し、プログラミングを実施する(6 ヶ月)。プログラミングは難易度に応じて、実施期間が変わる。プログラムの改良であっても同じくらい時間がかかることもある。状態方程式などがない場合は、実験的に求める場合もあり、時間を要する。
- (③) 衝撃波や希薄波に関するベンチマークテストを実施し、地表面爆発などで妥当性を検証する(3 か月)。評価対象に応じた妥当性の検証の工夫が必要である。不適なら②へ。
- (④) 爆発影響評価計算(地中式火薬庫)を実施し実験結果と比較する(6 ヶ月/ケース)。
実験と精度よく一致するまで②に戻り手法を改善し数値解析を繰り返す。
この過程は計算機の問題や問題の難易度で変わるが、特に新しい対象は時間を要する。
- (⑤) シミュレーション結果に基づく検討を実施する(4 ヶ月)。
原理的には計算場のあらゆる場所における情報を有しており、実験では得られない情報も検討対象となる。シミュレーションによる爆発影響評価は開発・整備の時間も含んで見積もる必要がある。特定の研究者あるいはその指導によるシミュレーションに限られる場合があることにも注意を有する。

④当該シミュレーションを行うにあたり、爆発を伴う野外実験データはどのように活用されたか。活用されていない場合その理由。

前述のようなスケジュールで進めたために、室内実験(薬量 1 g)との比較に止まった。図 5-3 は薬室と通路の内径比 (D_1/D_0) を変化させた場合の換算距離 16 における最大過圧を庫口前方を 0 度として、各方向について示した。同図は室内実験とシミュレーションとの比較であり、プロットが実験値で、実線がシミュレーション結果である。すべての計測点についてシミュレーションとの差異は±5%以下であり、高精度な爆風評価計算が実施された。図 5-4 は薬室と通路の内径比 1.00、換算距離 16、0 度における過圧履歴であり、時刻 0 は最大過圧を経験する時刻である。最大過圧だけでなくその後の圧力減衰もよく一致し、爆風特性を精度よく評価できることが確認できた。室内実験との比較であり、野外実験データの直接の活用はない。

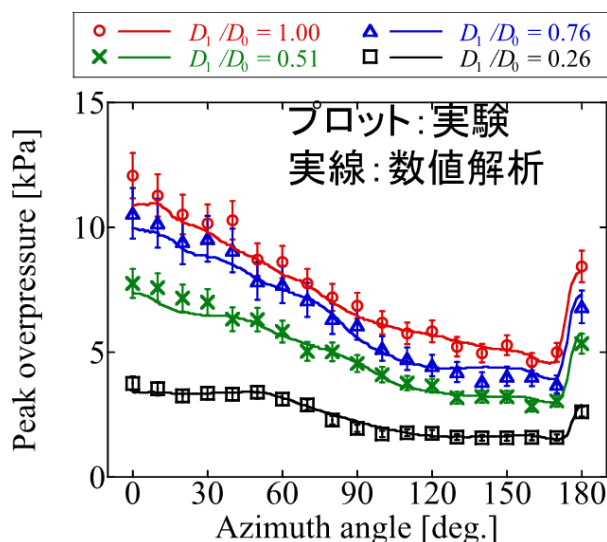


図 5-3 薬室と通路の内径比 (D_1/D_0) を変化させた場合の換算距離 16 における最大過圧分布

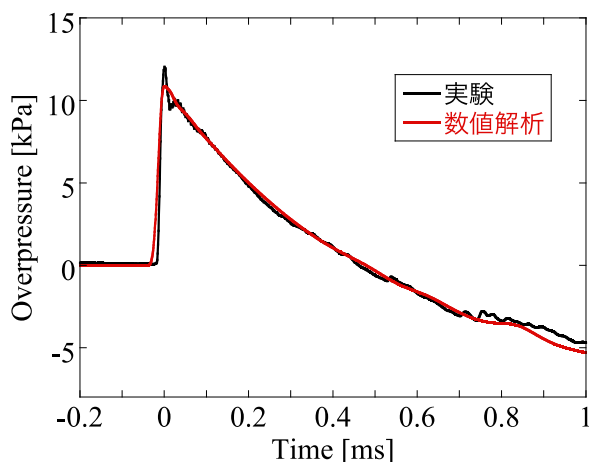


図 5-4 薬室と通路の内径比 1.00、換算距離 16、0 度における過圧履歴

6 火薬類取締法の技術基準制定に係るシミュレーション活用可能性

2月19日の委員会にて得られたコメントは次のようなものがあった。

爆風圧の予測であれば、種々の手法もあり、また経験や実績もあると思われるが、地盤振動や飛散物の数値解析は課題が多い。地盤振動や飛散物について、地質データの入力から大変である。破壊に関しても、コンクリート等のシミュレーション技術は成熟しているとは程遠い現状にあり、数値シミュレーションは補助として使うのは良いが、メインにするのは難しい。

上のコメントを踏まえ、爆風圧、地盤振動、飛散物に分けて爆発影響評価について活用可能性について検討する。すなわち、以下のように整理する。

・爆風圧のシミュレーションによる評価

シミュレーションを野外実験の代替として活用できる範囲の検討

・地盤振動のシミュレーションによる評価

課題の整理、可能性の検討

・飛散物のシミュレーションによる評価

課題の整理、可能性の検討

本報告書で検討している爆発影響評価については大前提がある。評価結果は、規制となる保安距離の見直し等に利用されるため、高精度の評価が要求される場合を対象としている。例としては、これまでに検討されたことがない新しい考え方などで爆発影響低減化の可能性があるか、あるいは爆発影響が不明な新型火薬庫等の評価が上げられる。ここで議論している対象としては、地中式火薬庫の爆風圧の方向依存の保安距離への反映も挙げられる。現在の火薬類取締法施行規則の保安距離は方向依存性は考慮されていない。新しい保安距離の考え方を適用するためには、精度の高い評価法をもとに各方向の爆風圧を保安距離ごとに求め、設定される新しい保安距離が用いられた際に、従来の火薬庫と比較して危険の虞の無いことを科学的に証明する必要がある。

6.1 大規模計算(計算コスト・時間)

シミュレーションによる爆発影響評価に対する共通の問題は大規模計算になることである。そのため、計算精度(時間節約も含めて高解像度スキームの適用など)、計算の高速化(計算機環境整備)が必要であり、プログラム開発の時間も考慮して設計しなければならない。プログラム開発を含む場合の実施期間の一考察は5.4 地中式火薬庫(H27-H30)の③で示した。なお、市販品を使った場合でも、検討テーマに沿った最適化の検討が必要である。

計算コストについて、市販のシミュレーションソフトを使用する場合を検討する。公的研究機関で実施されることを前提とした場合、常勤職員の人件費は一般に計上できないため、本報告書ではこれを考慮していない(本来はコスト計算すべきである)。この場合において要する費用項目は、

コードの借料(購入は高額のため検討外する。借料でも 500 万以上は必要である。)、計算場作成・実施補助、データ解析、文献検索・報告書等資料作成補助などの人件費が必要となる。大規模計算としては、妥当性の検証(3 次元;2 ケース)、影響評価計算(3 次元;2 ケース)を実施することを想定する。高速計算機 1 台は確保するとして、計算に要する上記費用項目だけで最低でも 1200 万円以上は必要となるであろう。

時間を確保できない場合は外注が必要となることが想定される。上記のようなケースで難易度に応じて、1000 万～3000 万は必要と考えられる。これはこれまでの経験に基づく予測であり、今後の状況次第では市販コード使用の価格も上がり、外注費もさらに高額になる可能性は否定できない。評価ケースが多くなればコスト増になる。シミュレーションによる爆発影響評価はコストの見積もりも重要である。

6.2 爆風圧のシミュレーションによる評価

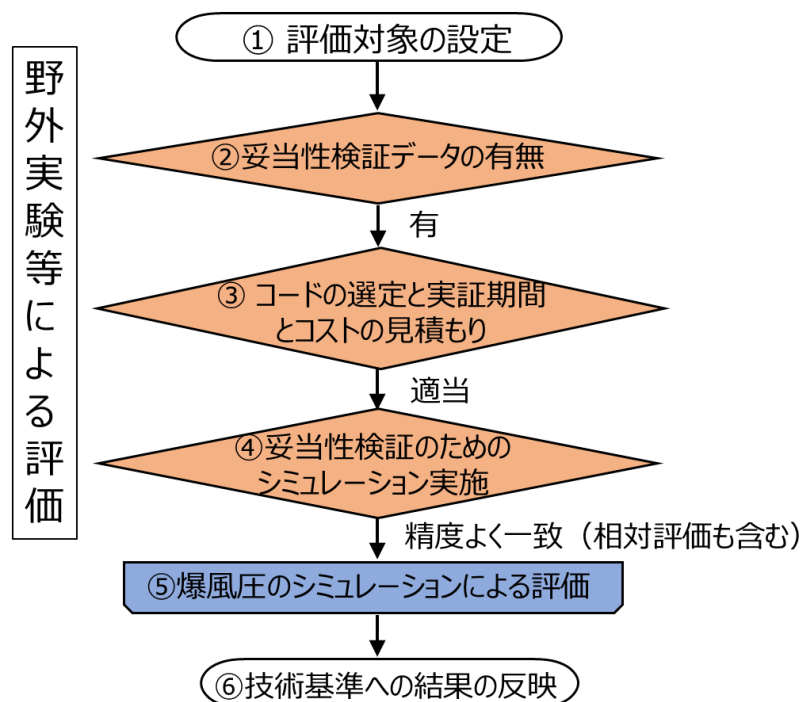


図 6-1 爆風圧のシミュレーションによる評価のためのフロー

図 6-1に爆風圧のシミュレーションによる評価のためのフローを示す。これは爆風圧に限らず、すべての影響評価に当てはめることが可能である。評価対象を決めた後、実施するシミュレーションの妥当性の検証に使用できるデータの有無を調査する。データが存在する場合は、コードの選

定実証期間を見積もる。その結果が野外実験よりも効率的であれば爆風圧のシミュレーションによる評価を実施し、技術基準への結果の反映について検討する流れになる。

評価対象毎にシミュレーションの妥当性を示せれば、そのシミュレーションによる爆発影響評価は妥当であり、安全を評価する科学的根拠データになり得る。採用されるシミュレーションコード毎に妥当性の検証が必須である。すなわち、シミュレーションで評価可能な対象は妥当性の検証に必要なデータが揃っている対象と言える。

具体的に、妥当性の検証に必要なデータの取得実績について、過去の野外実験を調査して検討する。以下に平成元年度以降の野外実験データを爆風圧が計測されたものを整理した。

平成元年度：ブラストメータとピエゾセンサーの比較が始まった。

平成 2 年度：ピエゾセンサーによる爆風圧の計測が本格化した。圧力履歴のような詳細なデータも得られるようになった。

平成 3 年度：は室内実験であった。

平成 4～5 年度：最大でも 2kg の少薬量で実験であった。

平成 6～9 年度：野外実験は実施されなかった。

平成 10、11 年度：軸対称実験（計算の妥当性検証データ）

平成 12 年度：水カーテン（30kg まで実施）非常に特殊な条件であり、検討対象から外す。

平成 13 年度：野外実験が実施されなかった。

平成 14 年度：自衛隊演習場を借用した大規模野外実験が再開された。

平成 14 年度からの野外実験データを参考とし、過去の野外実験を調査して検討する。以下のように分けられる。

・爆風圧がメインで計測されており、実験回数が多いテーマ

模擬火薬庫；地中式火薬庫、地下式火薬庫

防爆壁（煙火、従来型＋補強）

土堤（従来型、垂直型、各種新型など）

・実験回数が少ないテーマ

覆土式火薬庫、小規模処理工室実験

・シミュレーションに用いる爆発エネルギーが不明、あるいは爆風評価がメインではないテーマ

飛散物実験（L 型、1 面開放の箱型）、殉爆関連；隔壁による圧力減衰、

ギャップ試験、模擬火薬庫殉爆、煙火の積み重ね試験、煙火の外部火災試験

可燃性容器(アルミ)に充填された火薬類の爆発、弾火薬の金属片阻止、弾火薬の殉爆実験

火薬類の爆発威力(エマルジョン、ANFO、黒色、コンポジット)

以上の内、多くの実験条件でデータが取得され、爆風エネルギーを明確に定義できる対象である、地中式火薬庫、地下式火薬庫、防爆壁について調査・検討する。

6.2.1 模擬地中式火薬庫

地中式火薬庫の野外実験データは平成 14 年度、15 年度ならびに、平成 28 年度～30 年度に取得されている。図 6-2 に模擬地中式火薬庫(断面図)を示す。検討されたパラメータは以下のようである。表 6-1 に平成 14、15 年度に実施された地中式火薬庫の実験条件(土堤なし)を、表 6-2 に平成 28～30 年度に実施された地中式火薬庫の実験条件を示す。

- ・スケール
- ・薬室長(薬室径との比 L/D)
- ・前室長(前室径との比)
- ・出口径/薬室径比

注 意 薬室・前室とも RC コンクリート壁を鋼管で模擬している。

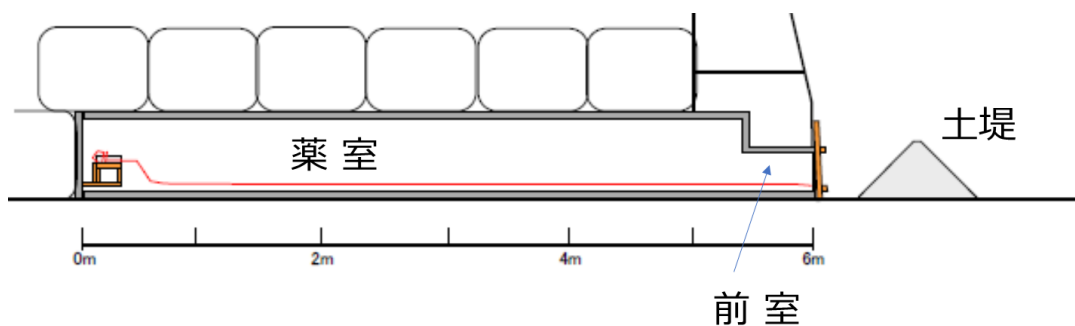


図 6-2 模擬地中式火薬庫(断面図)

平成 30 年度火薬類爆発影響低減化技術基準検討報告書より引用

表 6-1 平成 14、15 年度に実施された地中式火薬庫の実験条件(土堤なし)

年度	薬種	薬量 (kg)	L/D
H14	TNT	1.2、6.0、30.1	2.59
H15	C4	5、24、120	3

表 6-2 平成 28～30 年度に実施された地中式火薬庫の実験条件(薬量:5kg、土堤有、覆土有)

年度	L/D	出口径/薬室径	室内実験
H28	3	1.0	1g L/D=9,および 21
H29	9	1.0	1g L/D=3,および 9
H30	9	0.5	1g L/D=9、 出口面積/薬室面積(0.26、0.76 倍)

ただし、平成 27 年度は室内実験(1g)で土堤が与える爆風圧への影響を調査された。

平成 14 年～15 年度は土堤なしで実施された。薬量 3 水準でデータを取得し、爆風圧方向依存性のスケール則を確認した。L/D が 2 水準であるが、土堤がない場合について爆風圧方向依存性が整理された。

平成 28～30 年度において、薬室について L/D は 3 と 9 が、出口径/薬室径も 0.5 と 1.0 のデータが取られた。広い範囲でデータが取得されており、妥当性の検証に使用できるデータは揃っており、5.4 節「地中式火薬庫(H27-H30)」の産総研自作コードでも汎用コードでもシミュレーションでの評価が可能である。汎用コードを使用する場合の方がコストと期間は長くなると考えられる。

地中式火薬庫の保安距離に関する技術基準については、以上示した実験結果をもとに平成 30 年度に案が提出されたが、まだ以下の課題が残っていると報告されている。

- (1) 爆風圧について、出口径/薬室径を考慮した保安距離案としたが、L/D の影響も考慮すべき。
- (2) 地盤振動について、水平距離で規制する保安距離案としたが、上部岩盤厚も考慮すべき。
- (3) 飛散物について、全薬量で保安距離 50m としたが、1 トン以下でも 50m 必要か要検討。

このうち、(2)と(3)については、6.3 地盤振動と 6.4 飛散物で後述するように、現時点でシミュレーションを活用して解決することは非常に困難である。ただし、地盤振動と飛散物の保安距離は薬室壁からの距離であり、現行の爆風圧による保安距離は同じく薬室壁からの距離で、しかも地盤振動や飛散物の保安距離よりはるかに大きい。すなわち、(2)と(3)の課題は解決しなくても、現行の保安物件までの距離は十分に確保されており、問題にならないと考えられる。

一方、(1)については、シミュレーションで評価可能である。上述したように、種々の条件で実験データが取得されており、シミュレーションの妥当性検証に使用できるデータは揃っていると考えられる。5.4 節「地中式火薬庫(H27-H30)」で示した産業技術総合研究所で開発されたコードが使用できれば、図 5-3 や図 5-4 で示したように爆風特性を精度よく評価できると考えられ、 $L/D=3,9,21$ でシミュレーションの妥当性を再検証し、あと 1 点か 2 点 L/D を変えた条件でシミュレーションを実施し、それらの結果から L/D を考慮した保安距離に関する技術基準の策定が可能であると思われる。

6.2.2 模擬地下式火薬庫

地下式火薬庫は平成 19～22 年度に野外実験による検討が行われ、結果は技術基準に反映されている。地下に薬室を設置することで、地上に表れる爆風は放爆塔からのものが主となり、地上を伝わる爆風圧が減衰する。従来の基準と比較して、保安距離の緩和につながる。

模擬地下式火薬庫の側面図と上面図を図 6-3 に示す。野外実験で検討された主な実験条件は以下のようである。

- ・スケール
- ・薬室形状
- ・装薬密度(kg/m^3)
- ・土被り
- ・放爆塔の数

表 6-3 に平成 19～22 年度に実施された模擬地下式火薬庫の実験条件を示す。

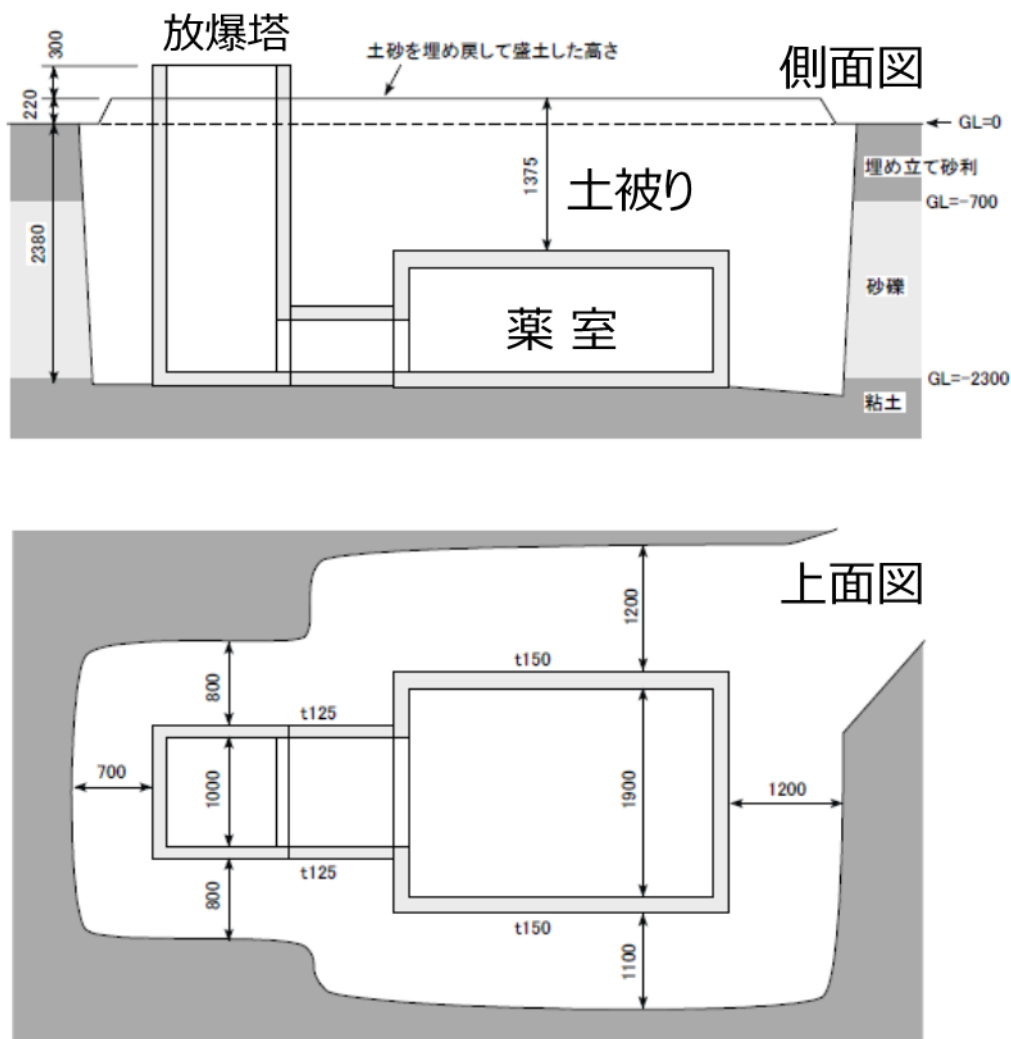


図 6-3 模擬地中式火薬庫の側面図および上面図

平成 22 年度爆発影響低減化技術基準検討報告書より引用

表 6-3 平成 19～22 年度に実施された模擬地下式火薬庫の実験条件，実規模 5 トンを想定

年度	スケール	薬量 (kg)	装薬密度 (kg/m ³)	形状	換算 かぶり厚さ
H19	1/16、1/8	1.22、9.77	20	ボックス	0.6
H20	1/8、1/6	9.6、21.9	20	ボックス	0.6
H21	1/7.5(2)、1/11	12.8、11.8、3.4	5、10	アーチ ボックス	0.29
H22	1/4(2) 1/6(3)	78(2)、23(3)	5(3)、10、20	アーチ	0.32

平成 22 年度は放爆塔 2 塔の場合も実施

構造や土被り等の若干の変更があった場合に、変形・破壊が放爆塔からの爆風に及ぼす影響の評価が必要である。表 6-3 に示されているように、シミュレーションの妥当性の検証に使用できるデータは広く取得されている。そのため、シミュレーションによる評価は可能である。ただし、壁の変形の影響も考慮する必要があるため、現時点では様々な構成則や破壊則等の材料モデル、及び複数のソルバーを選択できる汎用コードの使用を想定する必要がある。この場合は計算場が大きいことに起因して発生する数値拡散による影響を明確にする。メッシュサイズなど評価計算を実施する条件に合わせて数値拡散の影響を確認する必要がある。その上で、これまでに実施された野外実験を再現するシミュレーションを行い妥当性を検証するとともに、新たに提案された条件でのシミュレーションを実施し評価する。以上のように本シミュレーションの実施は難易度が高いため、大規模実験と比較したコスト・期間の見積もりは重要である。

6.2.3 防爆壁(煙火)

防爆壁(煙火)は令和元年から爆発源近傍での爆風圧低減を目的として、従来型と異なった特殊な防爆壁の爆発影響低減化について検討中である。防爆壁の変形・破壊過程が爆風に及ぼす影響を把握する必要がある、データがそろっていない現状では、まずは野外実験による実証データの収集が必要である。

6.2.4 シミュレーションの活用検討の際のフロー

上述した、地中式火薬庫、地下式火薬庫、防爆壁(煙火)について、シミュレーションの活用範囲を表 6-4 に整理した。評価対象について、自作コード・汎用コードのいずれについても、計算結果の妥当性の検証が不可欠であることから、パラメータを変化させた野外実験データが広くとられている対象については、シミュレーションの評価が可能である。そうでない場合は、実験データを収集する必要がある。評価の際、構造物に対して剛体近似を適用しても現実には即した結果が得られる場合は、一般的に野外実験の回数を減らして、シミュレーションによる評価を導入することは費用削減につながり効率的である。剛体近似が許容されない対象は、シミュレーションの難易度も上り、コスト面・期間の検討が必要になる。

表 6-4 シミュレーションの活用範囲の例 適用性 ○; 広く対応可能。△; 高難易度、×; 適用不可

評価対象	野外実験データ	剛体近似	適用性	備考
地中式火薬庫	○	○	○	左記は一般的に剛体近似が適用できる場合
地下式火薬庫	○	×	△	難易度が高い可能性あり
防爆壁（煙火）	△	×	×	野外実験データを取得中

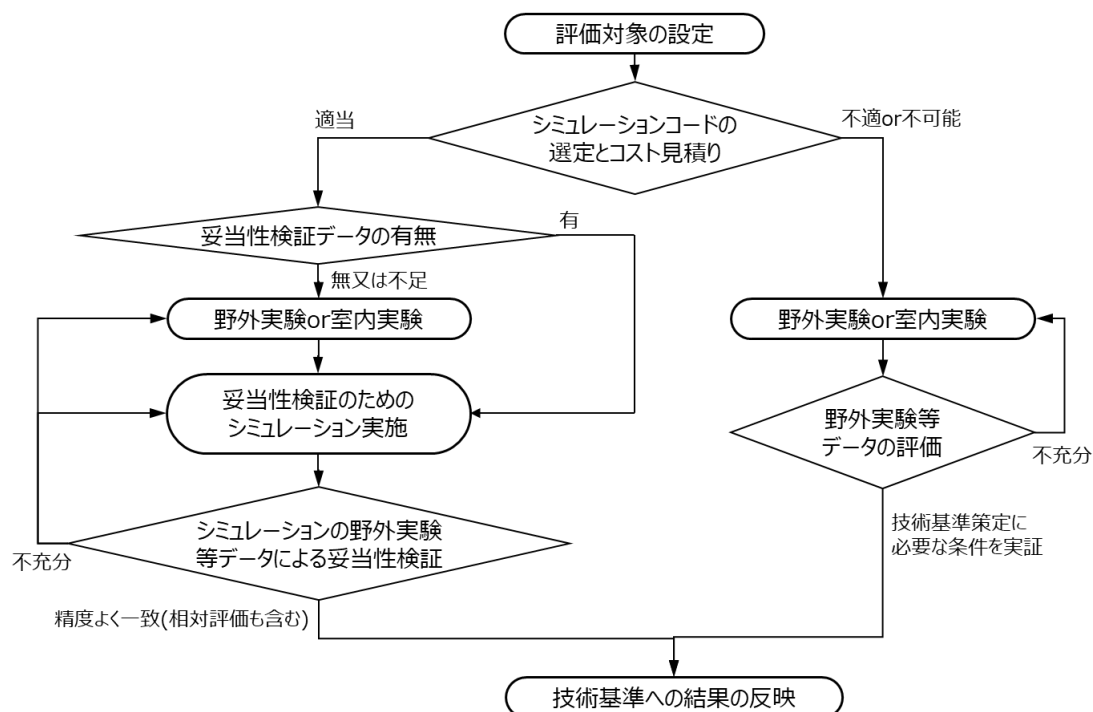


図 6-4 シミュレーションの活用検討の際のフロー

以上の考察をもとに、シミュレーションの活用検討の際のフローを図 6-4 に提案する。評価対象が設定されれば、適用するシミュレーション手法の検討とコスト・実施期間を見積もる。適当と判断できれば、妥当性検証データを調査し、データがあれば、使用するコードや評価対象に応じた妥当性の検証を実施する。これは開発段階のコードでは必須で、解像度が及ぼす数値拡散のチェックを含む。信頼性が確保された上で、野外実験データをもとにシミュレーションの妥当性を確保し、シミュレーションによる爆発影響評価を実施する。

野外実験データが無又は不足の場合は、実験データを取得した上で、シミュレーションに対する上述のステップを踏む。

野外実験データを用いて、妥当性が検証できない場合は、シミュレーション手法の再検討あるいは、適当な実験データを取得し、妥当性検証のシミュレーションを経て、野外実験データによる妥当性検証に戻る。

シミュレーション実施に際して、予算や実施期間の不足があれば、野外実験あるいは室内実験の活用を主にする。

野外実験データが豊富に存在する対象であっても、条件が大きく異なる場合、あるいはこれまでと異なる考え方で保安距離の見直しが行われる場合は野外実験が必要な場合がある。前者は、例えば、図 6-5 のように火薬庫の前方などに丘などが存在する場合には、新たにデータは取得が必要である。さらに、従前は地中式火薬庫を鋼管で模擬して野外実験を実施したが、これは剛体に近い条件であり、コンクリート製の火薬庫とすることで、取得データによるシミュレーションよりもさらなる爆風圧低減効果が得られると考えられ、これは後者に当てはまる。

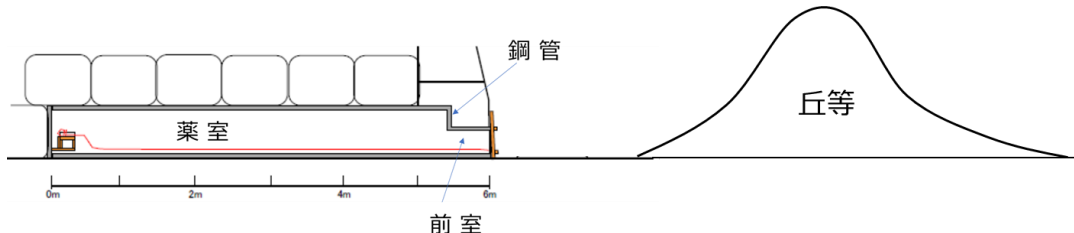


図 6-5 地中式火薬庫の前に丘が存在する場合の野外実験系

6.3 地盤振動のシミュレーションによる評価

火薬類爆発影響低減化委員会における野外実験では、地下式火薬庫を除いて、火薬類と地面との位置関係から考えると、地表面爆発に近い条件での実験が多い。そのため、ばらつきはあるものの、実験条件によらず、同じ換算距離で地盤振動は顕著には変化しない。計測される地盤振動も、例えば、NATO のマニュアル⁽¹⁰⁾に示されている実験式に Soft rock (Soil と Hard Rock の中間) 程度の値を代入して整理できる場合が多い。そのため、野外実験を実施している地盤の地質は平均的な性質で整理できる可能性はある。模擬地下式火薬庫の実験の際に、砂礫、粘土、灰土、赤土、黄色土の存在は確認されているが、地盤振動評価のために地下空間の地質のマッ

ピングは行われていない。そのため、地質データは実質不明であり、さらに、不均質な状態も存在すると思われる。シミュレーションによる評価の課題として、1)爆発源のモデル化、および2)地質の影響評価が挙げられる。以下に課題について整理する。

6.3.1 爆発源のモデル化

爆発現象では、地上では爆風が伝播し、地下空間には応力波が伝播する。爆風と地盤振動を同じシミュレーションで同時に評価する場合は、地上・地下空間の両方に格子点を設定するために爆風評価シミュレーションよりもさらに大規模なシミュレーションになる。計算場の大きさをイメージするために TNT1kg の爆発現象を換算距離 16(第一種保安物件の保安距離)まで計算する場合について図 6-6 をもとに検討する。TNT1kg の直径は約 10cm であり、図中の小さな点になる。これを地面をイメージした概念図の左端において、右を火薬庫の前方と考える。16m までの評価であるから、火薬庫の前方だけでも 16m よりも遠方まで考慮する必要がある。火薬に多くの格子点を設定して、爆轟過程まで評価する計算は、現実的ではない。幸い、格子点を減らして、爆轟生成ガスの膨張と地面との干渉を解析するだけでも、爆源近傍以外の地盤振動の評価には支障はない。しかしながら、火薬の位置から 3 次元的に広がる爆発影響を解析するにはまだ、工夫が必要である。以下、まず地質は均質として、爆源のモデル化について、2 つのケースを検討する。この場合、計算場を軸対称(円筒)と考えることが出来る。

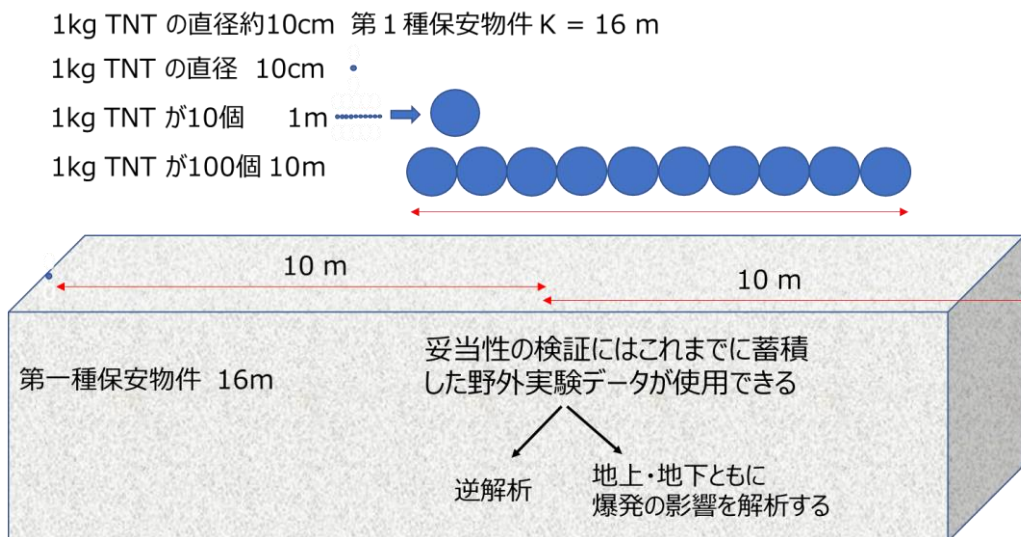


図 6-6 爆源と計算場の大きさとの関係のイメージ

A) 境界条件による爆源の表現(軸対称モデル)

爆源直下の地面に速度(圧力)境界を与えて計算し、その結果が野外実験の地盤振動の距離減衰傾向を満足するまで試行錯誤計算を実施する。爆発条件の異なる複数の結果を再現できれば、ある程度妥当なシミュレーションと位置付けることが出来る。地下空間のみを計算対象とし、火薬の大きさに格子サイズが影響されないため、大幅に計算規模を縮小可能である。

B) 爆轟生成ガスの膨張と面の干渉を解析する(軸対称モデル)

火薬類が瞬時に反応して、元の火薬類の容積と同じ高温高圧の爆轟生成ガスに変化した状態をシミュレーションの初期状態とする。等容爆発と呼ばれる爆発源の設定方法であり、爆轟生成ガスには JWL あるいは理想気体の状態方程式が利用可能である。初期状態の火薬の中にも格子を設定する必要があるが、地上は上空ほど格子間隔を広くとるなどの工夫が可能である。地上の一部分だけを Euler 法などで設定し、地面との干渉を解く方法もあるが、使用するソフトの機能に依存する。自作の場合には開発期間を要する。

いずれの解析でも、均質地質条件としてシミュレーションし、複数の野外実験を再現できるかなど、検討が望まれる。ただし、一定の検討期間と人員が必要である。次に、必要に応じて第二ステップは実験場を地質調査して計算に反映させる。時間は要するが将来的に重要である。

6.3.2 地質の影響評価

評価対象毎の地質条件をシミュレーションすることは、野外実験の代替の範囲をこえる。ここでは、計算場に地質をどう取り入れるかを検討する。

ステップ1; 地質条件(岩質、密度、分布)を調査する。既存のデータの調査、ボーリングによる調査が挙げられる。

ステップ2; 上記データに基づく、地下空間地質の補間など、地下空間モデルの作成が必要である。現在では、ボーリングによる調査の結果から、2次元、3次元の地質の分布を構成するソフトも存在する。⁽¹¹⁾図 6-7 は国土交通省から公開されているボーリングデータをもとに、地下空間をモデル化したものである。ボーリングの位置を増やすことで3次元的な地下空間をモデル化可能である。

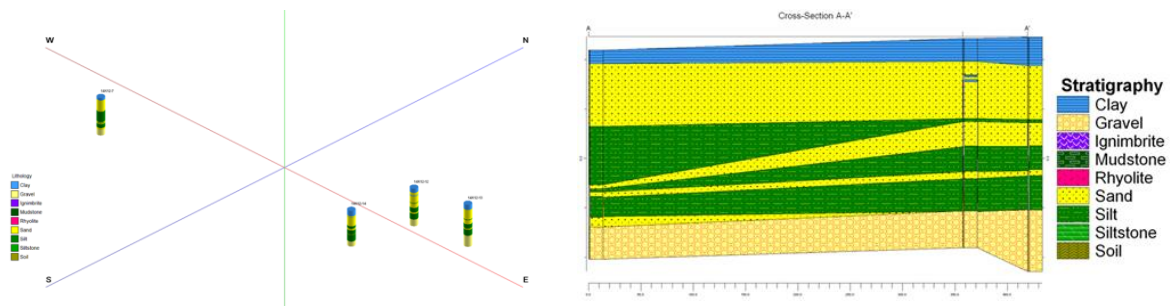


図 6-7 ボーリングデータから地下空間モデルの作成(2次元)

ステップ3; 地質や場所に応じた材料モデルを決める。地盤振動に最も影響を及ぼすのは、構成方程式と考えられる。爆源近傍は状態方程式の影響も考慮する必要があるため、両モデルについて検討を要する。適当なモデルがない場合は、新たに構築する必要がある。

地盤振動に関する文献調査を進め、既存の評価法とシミュレーションを組み合わせるなど、評価方法の持続的な進展は不可欠である。

6.4 飛散物のシミュレーションによる評価

飛散物はコンクリート構造物などへの爆風などの作用により、亀裂が生成・成長し、他の亀裂ともつながり、元々は連続体的表現が適した一つのコンクリートブロックであったものが、切り離されて飛散する破片などである。有限差分法や有限要素法など連続体力学をベースとしたシミュレーション手法では、厳密に亀裂生成に即したモデル化は困難である。しかし、材料強度を超えた力が要素間に作用した時、格子の連結を切り離し、新しい境界条件を課すなど工夫をすることで、実現象で見られる亀裂の模擬に成功している例もある。その際、格子を細かくし、強度分布を考慮するなど計算負荷は大きい。一方で、個別要素法(Distinct Element Method、DEM)など、不連続体の挙動を表現するために優れた解析手法は亀裂の模擬に向いている。しかし、亀裂進展の物理現象を模擬するかどうかは粒子要素の細かさ等に依存する。

亀裂の生成・成長には材料強度分布が存在することもシミュレーションの破壊の模擬を困難にしている。例えば、構造材料として代表的なコンクリートは、砂、砂利、セメントなどから構成される。ひずみ速度が大きくなると壊れ方が変わってきて、材料強度も変わる。有限要素法と個別要素法の連成解析などの試みもあるが、破壊の解析は課題が多い。シミュレーションによる飛散物の評価を困難としているのは、

- 1) 亀裂の発生を正確に表現するのは困難である。(メッシュ依存もある)

2)材料強度(骨材界面なども含んで)の分布が存在する。

3)鉄筋などの存在

などであり、以上で、飛散物の大きさなどが決まる。さらに

4)飛散距離などを考える場合は、初期速度、角度、空気抵抗の評価が必要

5)特に様々な形状・挙動で飛散する物体の空気減速の評価は容易ではない。

が挙げられる。

野外実験で実験データは取られた経緯はあるため、構造体の形状と飛散物の距離との関係などの実験式の整理が先決と考えられる。図 6-8 は平成 22 年度に実施された飛散物評価実験であり、実験セットアップと飛散距離を示した。一面が開放の構造体で、構造体の各面にはあらかじめ色を塗り、どの壁がどの方向に飛散したか識別できるようした。表 6-6 には平成19年度～23 年度で実施された飛散物実験の条件を示した。



No.2-4 20kg

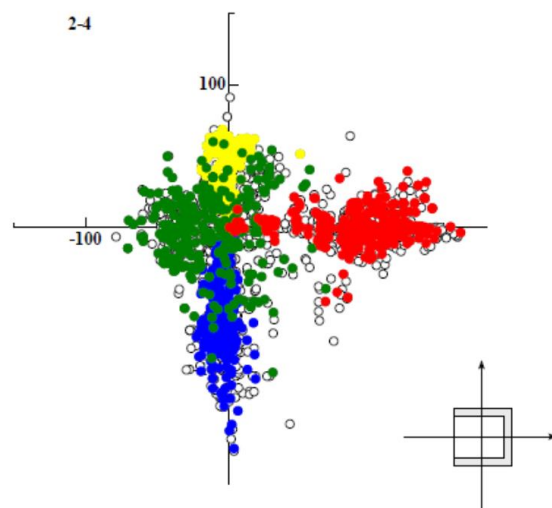


図 5.2-24 飛散物の平面分布

図 6-8 平成 22 年度に実施された飛散物実験
(平成 22 年度爆発影響低減化技術基準検討報告書より引用)

表 6-5 平成19年度～23 年度で実施された飛散物実験の条件

年度	薬量	試験体	パラメータ	備考
H19	C4 20 (4)	L 字擁壁 (2)	スタンドオフ	金属飛散実験(2)
H20	C4 20 (40)	金属飛翔体	L/D、スタンドオフ	屋内実験
H21	EMX、0.57,4.5、36	L 字擁壁	スケール	工室の壁を想定
H22	EMX、2、4,10,20	1 面開放構造体 鉄筋入り	スケール	薬量容積比 8.79kg/m ³ 固定
H23	EMX、1、2,3、4	1 面開放構造体	薬量容積比 2.2,4.4、6.6、8.8	形状は同じ

現存するシミュレーションが、上記の野外実験結果をどこまで再現できるか調査することで、問題点を明確にして、シミュレーションの適用範囲を広げることになる。シミュレーションによる評価の難易度は高いが、持続的に評価精度を向上される努力が必要である。

7 まとめ

爆風圧のシミュレーションによる評価

爆風圧評価については、シミュレーション活用方法のフローを図 6-4 として提案した。妥当性の検証に使用できる野外実験のデータが存在する場合は、それを用いて妥当性を検証すれば、爆風影響評価をシミュレーションで代替可能である。ただし、シミュレーションの実施期間やコストを見積もり、野外実験にかかる費用の見積もりと比較し、費用対効果を評価することが必要である。

地盤振動と飛散物の評価については現時点での課題を整理し、活用可能性を検討した。

地盤振動のシミュレーションによる評価

地盤振動に関する文献調査を進め、既存の評価法とシミュレーションを組み合わせるなど、評価方法の持続的な進展は不可欠である。

飛散物のシミュレーションによる評価

飛散物のシミュレーションは、既存のソフトウェアでは困難である。今後、飛散物をシミュレーションで代替するためには、既に実施した野外実験の結果をどこまで再現できるか継続して調査・評価することで、現存するシミュレーションの問題点を明確にすることが必要である。

参考文献

- 1) 編・田村 昌三監修,エネルギー物質ハンドブック 第 2 版 (1.4 爆発のシミュレーション), 社団法人火薬学会 (2010)
- 2) J.W.Swegle, et.al., "An Analysis of Smoothed Particle Hydrodynamics" SANDIA Report SAND93-2513 (1994)
- 3) E. L. Lee, H. C. Hornig and J.W. Kury, Adiabatic expansion of high explosive detonation products, Lawrence Radiation Laboratory Report No. UCRL-50422 (1968)
- 4) A. Harten, "High Resolution Schemes for hyperbolic conservation laws", J. Computational physics, 49, 357-393 (1983)
- 5) <https://www.impetus-afea.com/>
- 6) T. Yabe, "A universal cubic interpolation solver for compressible and incompressible fluids." Shock Waves 261-268, (1985)
- 7) M. Yoshida, Program MY1DL, CETR report (1986)
- 8) M.A. Meyers, Dynamic Behavior of Materials, University of California, San Diego, JOHN WILEY & SONS, INC (1994).
- 9) E.F. Toro, M. Spruce, W. Speares, "Restoration of the contact surface in the HLL-Riemann solver," Shock Waves, 4, 25-34 (1994)
- 10) Manual of NATO Safety Principles for the Storage of Military Ammunition and Explosives, MAY 2006, Part I, Chapter 4, page 22.
- 11) <https://www.rockware.com/product/rockworks/>

ANNEX A: 委員会議事録

令和2年度火薬類爆発影響低減化技術基準検討における シミュレーション活用に係る調査事業

火薬類爆発影響低減化技術基準検討におけるシミュレーション活用に係る調査委員会 第1回委員会 議事録

日 時：令和3年2月19日(金)10:00～11:40

出席者：全員リモート参加(Microsoft Teams 使用)15名(敬称略、順不同)

委員 新井 充*、阿部 淳、福田 大祐、松尾 亜紀子、水書 稔治(*委員長)

オブザーバ (経済産業省)宮地 佳子、奥本 奈美、米山 治介

(産総研)久保田 士郎、佐分利 慎、杉山 勇太、高橋 良堯、緒方 雄二

事務局 (全火協)飯田 光明、中塚 漢二

【配付資料】

資料1 委員会の委員等名簿

資料2 事業目的、調査・評価内容の説明及び検討用資料

1. 開会

全員のリモート参加の確認後、産総研久保田氏より委員会の開会がなされた。

2. 委員長、委員紹介

産総研久保田氏より委員長、委員及び経産省参加者の紹介があり、それぞれ挨拶があった。

3. 事業目的、調査・評価内容の説明及び検討

資料2に基づいて、産総研久保田氏より、本事業の目的、実施内容の説明の後、実施内容3項目のうち(1)実在するシミュレーションソフトに係る調査、(2)我が国におけるシミュレーション活用状況の調査の調査・評価結果、及び、次回委員会に向けて(3)火薬類取締法の技術基準制定に係るシミュレーション活用可能性の調査の概要と委員の意見を聞きたい点の説明がなされた。以下のような質疑がなされた。

(委員) シミュレーション評価の趣旨について、いくつかの候補があって、爆風・飛散物・地盤振動を統括的に解析するシミュレーション法を選択するのか、それとも爆風ならこれ、飛散物ならこれというように個別に適しているシミュレーション法を評価するのか？

→ (産総研) 後者である。飛散物や地盤振動は野外実験の評価まで結びつくかどうか困難だと思うが、爆風に関してはこの委員会である程度の結論が出せると考えている。

→ (委員) 爆風の予測だと、いろいろな手法もあり、経験や実績もあると思うが、地盤振動や飛散物の数値解析は課題がたくさんあると思う。

(委員) 空間分解能 5mm が必要とあったが、これは圧力センサの大きさが理由なのか？ この理由は？

→ (産総研) 当時のコードで解像度検証をした結果、解像度が 5mm 以下でないと収束しなかったものと思われる。

(委員) 爆風とかの解析において、K 値を考える上では、遠方場の解析精度を重視するのか？

→ (産総研) 第一種保安物件の保安距離 K 値 16 が重要なので、ここまでは精度が必要になる。

(委員) 調査テーマ 2 で、数値解析の結果と実験値が倍近く違うが、その考察はなかったのか？

→ (産総研) 当時の CIP のコードの計算手法はいろいろ工夫されていたが、何故精度が落ちるのかという議論はなかったと思う。当時は爆風だけではなくて、いろいろな項目も評価可能な手法として、CIP ベースのシミュレーションコードが選ばれた。ただ、非保存系の圧縮性オイラー方程式を支配方程式とするのに問題はないのかという議論はあった。

→ (委員) CIP の利点は言われる通り。ただ、爆風とかで流体だけでの評価としては、精度よく解析しようとする、CIP とかは考えずに TVD などの別の方法がいいと思う。そもそも数値解析結果についてどの程度の精度まで求めるのかにもよると思う。何でも解いてしまおうとすると、界面とかで値のオーダーが違って難しいところもあったりするので、コードに手を加えて工夫して精度を高くする必要があると思う。

→ (産総研) はい。当時の考え方で、多種物質の問題を解くために、ある程度精度は落ちてでも容認するというような考えがあったものと思われる。

(委員) 調査テーマ 3 の地中式火薬庫において、数値解析結果と実験値がよく合っている。精度は十分と思われるが、いかがか？

→ (産総研) まさにそのあたりを次回委員会で議論していただきたいと考えている。剛体近似であればかなり精度が良くなってきている。一方で剛体近似では対応できない場合、例え

ば近くの構造物が破壊されるような場合に、この計算で適切に評価できるのかということを次回委員会で議論していただきたい。

(委員) 調査テーマ 3 は比較的最近のデータと思うが、他のコードで解析したことはあるか？

→ (産総研) 自作コード以外で解析したことはない。

→ (委員) この問題を他の計算コードで解いてみて、要した時間や結果等を見比べてみると、比較評価ができると思う。

(委員) 調査テーマ 3 の計算の解像度は、調査テーマ 2 の 5mm と比べるとどうなのか？

→ (産総研) 調査テーマ 3 では格子幅 1mm だが、爆薬量 1g なので 6 億点ぐらいの計算。調査テーマ 2 は薬量が大きいので、その計算と比べると 4 倍ぐらい粗い。

→ (委員) 粗いけれども、実験とよく一致しているということか？

→ (産総研) はい、そのとおりです。

(委員) LS-DYNA を使って、爆風の計算をしているのか？

→ (産総研) 爆風の解析をしたことはない。流体コードの連成という観点から行った経験しかない。

→ (委員) LS-DYNA と AUTODYN は同じ計算をすることができると考えている。優劣はつけられない。ただ、サポートする側が AUTODYN の場合は爆発や衝撃に詳しいだけで、LS-DYNA でも爆風の計算はできる。

(委員) 爆薬 1kg で解像度 5mm という話があったが、細かすぎて商用コードでは難しい。K 値が 5 とか 8 ぐらいは大丈夫と思うが、それ以遠はメッシュサイズを大きくせざるを得ず、爆風圧は鈍って低い値しか出ないと思う。結局、実験結果から補正しないといけないと思う。

→ (産総研) AUTODYN だとリマッピングでメッシュを切りなおすと精度は上がらないか？

→ (委員) リマッピングはメモリ節約のための手法で、精度が良くなるわけではない。リマッピングしていくと、メッシュサイズはどんどん大きくなっていく。

(委員) 地盤振動や飛散物について、数値解析でどこまでやりたいのか、とても難しい。地質データひとつの入力から大変である。破壊に関しても、コンクリート等の固体の破壊のシミュレーション技術はまだまだ成熟しているとは程遠い現状にある。地盤振動や飛散物の数値シミュレーションは補助として使うのは OK と思うが、メインにするのは難しい。

(委員) 第 2 回委員会はどうに行き、どのようにまとめるのか？

→ (産総研) 今回を踏まえて、次回は爆風圧、地盤振動、飛散物に対して数値解析でどこまでできるかを議論していただき、まとめていく。地盤振動と飛散物は、数値解析だけではかな

り難しいと思われ、今回そういうご意見をいただいたので、課題を整理し、どういう活用方法が考えられるかを議論いただきたい。

(経産省) 方向性としては、議論の通り。本事業の背景には、野外爆発実験を続けてきたけれども、もっとシミュレーションを活用するべきではないか、極端に言えばシミュレーションに替えられないかという議論があったことが挙げられる。この事業の中で、シミュレーションと、必要であれば爆発実験を行って、どのように効率的に技術基準策定に必要なデータをとっていくのかというところについて見解を示していただきたい。

4. その他

第2回委員会は、3月19日(金)14時からで、八丁堀区民館を予定。ただし、コロナ禍の状況により、今回のようにWeb会議になる可能性もある。

以上

令和2年度火薬類爆発影響低減化技術基準検討における
シミュレーション活用に係る調査事業

火薬類爆発影響低減化技術基準検討におけるシミュレーション活用に係る調査委員会
第2回委員会 議事録

日 時：令和3年3月19日(金)14:00～15:20

場 所：東京都中央区八丁堀区民館

出席者：14名(敬称略、順不同、◇は Microsoft Teams によるリモート参加)

委員 新井 充*、阿部 淳◇、福田 大祐◇、松尾 亜紀子◇、水書 稔治(*委員長)

オブザーバ (経済産業省)宮地 佳子◇、奥本 奈美◇、米山 治介◇

(産総研)久保田 士郎、若林 邦彦◇、杉山 勇太◇、丹波 高裕◇

事務局 (全火協)飯田 光明、廣崎 義一

【配付資料】

資料1 第1回委員会議事録(案)

資料2 シミュレーション活用に係る調査・評価内容の説明及び検討用資料

1. 開会

全員のリモート参加の確認後、産総研久保田氏より委員会の開会がなされた。

2. 前回議事録の確認

事務局からメールで配信された第1回委員会議事録(案)について、委員から何も意見がなかったことが報告され、議事録は承認された。

3. シミュレーション活用に係る調査・評価内容の説明及び検討

資料2に基づいて、産総研久保田氏より、本事業の実施内容3項目のうち(1)実在するシミュレーションソフトに係る調査、(2)我が国におけるシミュレーション活用状況の調査の前回委員会のまとめと新規追加事項、及び、(3)火薬類取締法の技術基準制定に係るシミュレーション活用可能性の調査の検討結果の説明がなされた。以下のような質疑がなされた。

(委員) 地下式火薬庫の爆風評価について、剛体近似が許されないため、計算精度による爆風減衰と構造物変形による爆風減衰を切り分けて評価するとあるが、どういうことか？

→ (産総研) 大規模計算であるため精度を上げるのにも限界があり、精度が落ちることによる爆風減衰をきちんと評価しなければいけない。構造物が破壊されることによる爆風減衰を確実に評価できているかは、この精度による爆風減衰と切り分けて判断しなければならない。

(委員) 実在シミュレーションソフトの調査で追加で説明のあった IMPETUS とは、そもそどのような分野で使用されているコードなのか？

→ (産総研) 軍用や爆発安全の分野で用いられていると思われる。計算例として、FRP への弾丸入射、地雷の作動や構造物近くでの爆薬の爆発などが紹介されている。少し使ってみた感じでは、AUTODYN などと同様の使い勝手だが、粒子法による爆風計算では遠方で精度が落ちるのが気になった。

(委員) シミュレーションを活用して技術基準を策定しようとの議論と理解するが、全体的な費用の面での検討はどうなっているのか？ 現在は野外実験を行って技術基準を決めているようだが、その費用との比較とかはあるか？

→ (産総研) 野外実験の費用は 2 千万から 2 千5百万であり、シミュレーションは資料に示したとおりケースによって 1 千万から 3 千万である。費用の比較は、爆風のシミュレーション評価フローシートに示したとおり、一番最初に、シミュレーションが適用可能か、野外実験を実施した場合よりコスト的に有利か等を判断することになる。具体的には、技術基準策定までの全体的な費用は、シミュレーションを活用することにより野外実験の回数を減らすことができ、その分、有利になるのではないかと考えている。

(委員) シミュレーションをメインにした場合、対象によっては余計に費用がかかることにならないか。例えば、工業製品とかだと精度よく評価することが可能になっていると思うが、爆発現象、特に破壊や飛散物等だと、シミュレーションはコードや設定によって結果が揺れてしまうと思われ、精度良く評価しようとするとう費用が嵩むことになる。このあたりのことも十分考慮したうえでシミュレーション活用を考えていただきたい。

→ (産総研) ご指摘のとおりで、そのためにも、先ほどのフローシートの一番最初の段階で、シミュレーションにより技術基準策定に要求される精度を確保できるのかを十分吟味したうえで、シミュレーションを活用するのかを判断するようにしたい。

(委員) シミュレーションに関する今回の発表内容は、私の考えていることとほぼ同じであり、賛成である。補足として、商用コードの現状をお伝えしたい。爆発解析や衝撃解析は、利用頻度が非常に少なく先細りが現状。商用コードの存続も予想がつかない。したがって、今

後は大学や研究機関が中心となってシミュレーションの研究を続けていかざるを得なくなると思われる。

→ (産総研) 商用コードの危機感をもった情報に感謝する。産総研も、商用コードを利用しながら、一方で自前のコード開発に力を入れていきたいと考えている。

(委員) シミュレーションで法規を策定しようとする場合、根本的な考え方として、フランスの原発プロジェクトのオープンソースでの開発の例に見られるように、シミュレーションコードの透明性が重要だと思われる。コメントでもあるが、この点、どう考えるか？

→ (産総研) 使用するコードごとに、実験データが存在する評価対象と類似の問題を解いて、妥当性を示すことになると思う。オープンソースコードによる解析は大学主導で、我々も連携して進められることを期待する。

(委員) 本委員会のシミュレーション活用調査の後、実際にシミュレーションを行う場合、商用コードを使うのか？それとも自前開発のコードを使うのか？

→ (産総研) 併用していくと考えている。先ほどの商用コードの危機的状況を考慮すると、自前コードの開発も進めていかなければならない。

(委員) シミュレーションを活用するとして、その妥当性はどう保証するのか？ 商用コードであれば、メーカーが保証するのか？

→ (産総研) メーカーの保証はないと考える。妥当性の検証は、適切な実験の結果を再現できているかどうかで判断することになる。

→ (委員) 一般的には妥当性の保証はメーカー側の責任。公開された実験データ等で検証する。その費用もコストに反映されるため、さらに利用料は高額になり、さきほどの危機感につながることになる。

(経産省) 本事業の背景には、シミュレーションを活用することで野外実験の費用を抑えられないかという観点がある。委員会が進む中で、シミュレーションだけだと無理で、野外実験を併用しながら行わなければならないことや、シミュレーションも商用のものや独自開発のものがあって選定が難しいということが見えてきた。技術基準策定のテーマは数年ごとに大きく変わるため、さらにシミュレーションコードの選定は困難になると思われる。法適用可能な高精度のシミュレーションコードの開発については、膨大な量のデータ収集も必要であろうし、予算をつけるのは難しい。今後は、本委員会の委員をはじめ、シミュレーションに造詣の深い方々のご意見を聞きながら、その時点で使えるコードの中で技術基準テーマに最適なコードを選定して、シミュレーションを活用していきたいと考えている。

4. その他

報告書の提出について、3 月 25 日までに報告書案を委員に送付し、3 月 29 日まで委員の意見を求め、委員意見を反映させる修正後、3 月 31 日までに経産省に提出することとした。

以上