

特集

爆発現象の数値解析法

片山 雅英 (伊藤忠テクノソリューションズ (株))

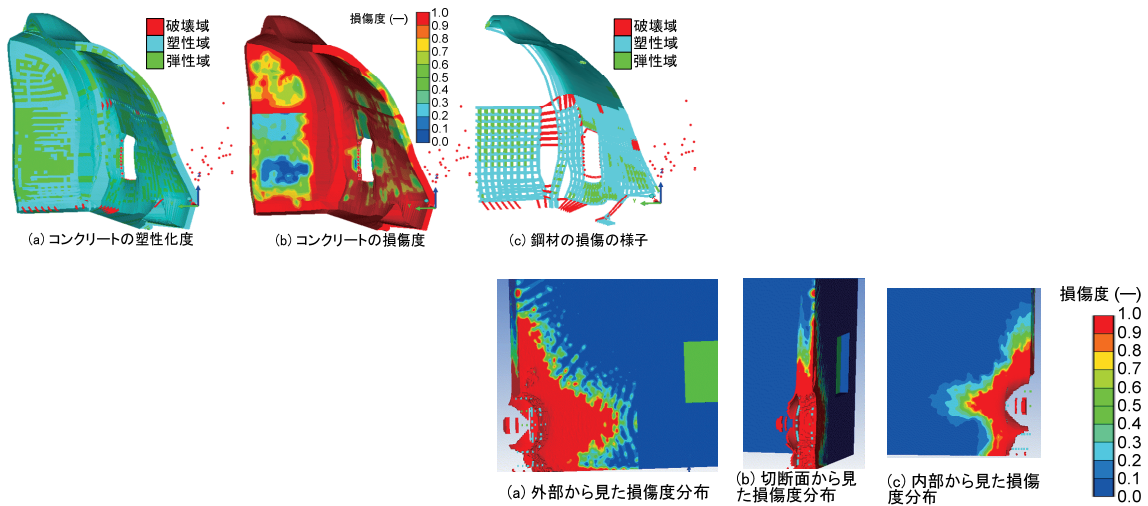
はじめに

低温及び高圧技術の普及と共に、水素や炭化水素ガスが空気中の酸素と爆発的に反応し、重大な事故に繋がる機会が増加している。

通常これらの装置や施設では、予め実際に爆発実験を行ってその安全性を確認することが困難な場合が多いため、数値シミュレーションによって安全性の確認をする手段を確立することは

重要な意義を持っている。

しかし、現実の非均質な混合気体が複雑な形状の構造物中で反応する現象は、極めて複雑な過程を経るものと考えられる。後に議論する爆ごう（轟）に至るか



否かを知るためには、例えば最も簡単な水素と酸素の混合気体を考えた場合でも、20種類以上の素反応を考慮しなければならず、それらの個々の式に対して Arrhenius の反応速度則を適用すると 20 個以上の連立常微分方程式を解かねばならない。これらの式を、流体の挙動を記述する 2 階の偏微分方程式と連立させ、乱流効果等も考慮し全方程式系を解くには、膨大な計算時間を要する。しかしながら、翻って安全解析という見地からすれば、想定される最も重大な事故を仮定して検証することが必要かつ十分な条件であり、予め一様に混合された気体が先験的（ア・プリオリ）に爆ごうするという保守側の仮定が妥当性を有している。

以上のような考察に基づき、ここでは予混合気が爆ごうを起こし、構造物と相互作用するということを前提として、この現象を数値シミュレーションによって解析するための定式化方法について述べる。一方、爆薬の場合には、固相もしくは液相から気相への相変化を伴うため、爆薬及び反応生成物の特性を記述するため状態方程式が複雑となるが、基本的には反応性気体の爆発と同様の議論が成り立つことが分かっている。後半では、以上の定式化を用いた適用例を示すことに

よってその有効性について議論することにする。

爆ごう現象の衝撃解析法における定式化方法

(1) 爆ごうと爆燃

爆発 (Explosion) という用語は、物理的には曖昧さを持っており、厳密には、爆ごう (Detonation) と爆燃 (Deflagration) に分類される。連続体力学では、質量、運動量、エネルギーの 3 つの基礎式と状態方程式が解かれる。この方程式系は双曲型の 2 階の偏微分方程式で記述されるが、簡単のため、図 1 のグラフ中に示したような、状態 1 から 2 への変化を伴う 1 次元定常流れを考える。また、連続体は気相で理想気体の状態方程式に従うものと仮定する。この系は連立 2 次方程式で記述される。グラフの縦軸は圧力、横軸は比容積 V で、 $V = 1/\rho$ の関係にある。質量保存と運動量保存の式を連立させて整理すると、 P と V は線形関係にあり、点 1 を通る負の傾きを持った直線になる。この直線は Rayleigh 線と呼ばれる。

一方、エネルギーの式を連立させ、理想気体の状態方程式を用いて整理すると双曲線が導かれる。この 2 次曲線は Rankine-Hugoniot の式と呼ばれる。気体の場合、圧力、比容積共に正の

値しか意味を持たないため、第 1 象限にしか解は存在しないことに注意する。1 から 2 への変化の間にエネルギー発生がない場合は、エネルギー式を連立させた Rankine-Hugoniot の式も点 1 を通る。それに対して、エネルギー発生 Q がある系に対する Rankine-Hugoniot の式は圧力が大きくなる方向に平行移動する。 $Q = 0$ のときの曲線を Inert Hugoniot と呼び、 $Q > 0$ のときの曲線を Reactive Hugoniot と呼ぶ。

状態 2 の解は、Rayleigh 線と Rankine-Hugoniot の式との交点として得られるはずである。ところが、Rayleigh 線は負の傾きを持った直線であるため、状態 2 の解の存在域は領域 I と領域 II に限定される。これら 2 つの領域は、物理的に異なった性質を持っていることが予測される。実際詳しく調べてみると、領域 I では流速が超音速となるのに対して、領域 II では亜音速となる。換言すれば、領域 I では圧縮波、すなわち衝撃波を形成して擾乱が伝播する。領域 I の現象を爆ごうと呼び、領域 II の解を爆燃と呼ぶ。そして、もっと重要なことは、「領域 I の解が生じるような現象では、Rayleigh 線と Reactive Hugoniot 曲線が重根を持つ点 A が安定で、この点に移行する。」という Chapman-

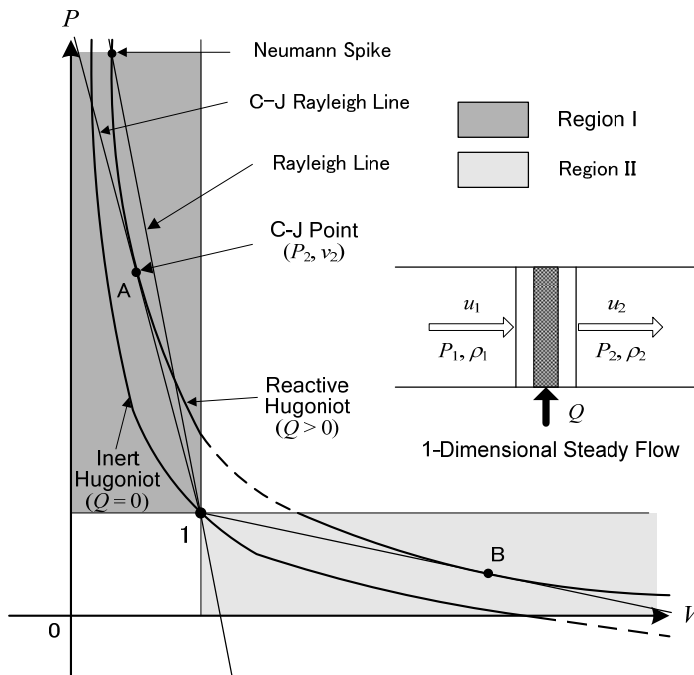


図1 爆ごとと爆燃の違い

領域 I：爆ごと

- ・ 流速が超音速
- ・ 圧縮波、すなわち衝撃波を形成して擾乱が伝播する

領域 II：爆燃

- ・ 流速が亜音速となる

Jouguet の仮説を多くの実験的事実が支持していることである。これは、取りも直さず、初期条件が決まり、爆ごとが生じるものと仮定すれば、2 の状態は一意的に決まってしまうことを意味している。それに対して、爆燃の場合には流れ場の途中で無限に多くの解を持つ。

但し、状態 1 から状態 2 の爆ごと条件に直ちに移行するのではなく、図中 Neumann Spike と記した点などを経て非常に短い間に点 A に移行するという説が有力で実験的事実もそれを支持している。点 A を上 Chapman-Jouguet の点と呼び、この点の物理量を「C-J」もしくは、「C-J 爆ごと」を冠して呼ぶ。C-J 点、C-J 圧力、C-J 温度、C-J 爆ごと速

度等である。特に、爆ごと速度は燃焼波面の伝播速度を意味していることに注意する。また、上 C-J 点は熱力学的には自由エネルギーが極小になる点であるため、比較的簡単にその状態量を決定することができる。この一定速度で自らエネルギーを解放しながら伝播する「爆ごと現象」を Self-Sustained (自走的) と称する。

(2) 定常爆ごと波伝播とエネルギー解放過程の数値解析法

ア・プリアリに爆ごとが生じるものと仮定をすれば、原理的に上 Chapman-Jouguet 点における状態量を決定することができる。実際の反応性予混合気系は

複雑な素反応からなるので、上述に仮定したような単一の状態方程式では記述することはできないが、N 個の気体成分に対して各成分に対する JANNAF (Joint Army Navy NASA Air Force Journal) 熱化学データ¹⁾等を用いて化学平衡計算を行うことによって、定常爆ごと波の波面の状態を意味する、上 Chapman-Jouguet の点における状態量を決定することができる。これらの状態量は爆ごとパラメータと呼ばれ、上 C-J 点における圧力、温度、密度、内部エネルギー、流速、爆ごと速度、生成気体の平均比熱比 (これが決まれば、理想気体の状態方程式が決定できる。) 等の状態量を一意的に決定することができる。

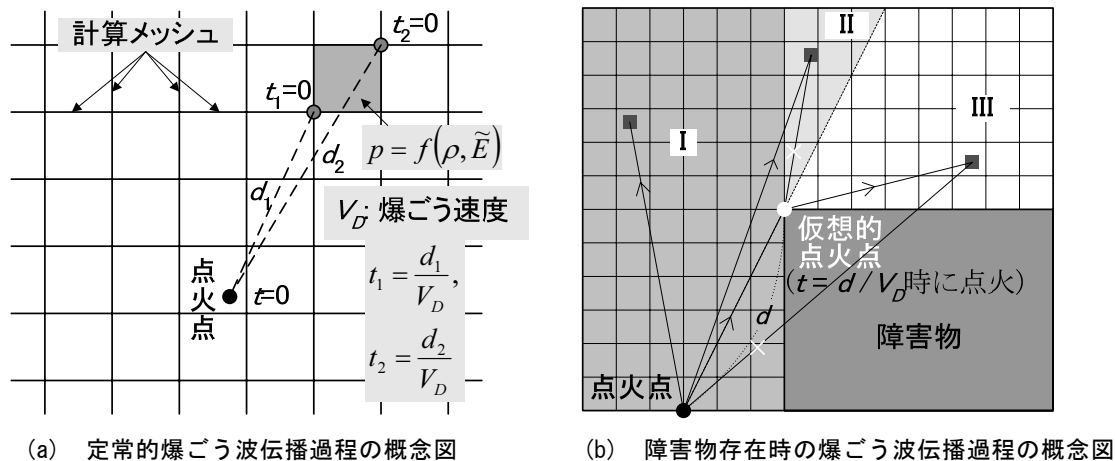


図2 各種定常的爆ごう波伝播の概念図

一方、爆薬に関しては、シリンダー膨張試験と呼ばれる爆発実験と数値解析に基づいて、様々な高性能爆薬に対して、上述の反応性予混合気と類似した爆ごうパラメータが決定され、公開されている。衝撃解析コードで最も良く用いられている爆薬の爆ごうパラメータは、米国のローレンスリバモア国立研究所 (LLNL) で開発され、発展してきたJWL (Jones-Wilkins-Lee) の状態方程式と呼ばれる状態方程式とそのためのデータ群²⁾である。

以上で述べた C-J 爆ごう状態は点火と同時に生じるのではなく、実際には点火後加速されながら成長した後定常状態が達成される。この過程を DDT (Deflagration to Detonation Transition)、点火点から爆ごう開始点までの距離を爆ごう誘導距離 (Detonation Induction Distance) と呼び、

後者は反応物質の爆ごうし易さを表わす特性の一つとされている。爆薬やロケット推進薬に対するこの過程に関しては、数値解析的手法としても米国ロスアラモス国立研究所 (LANL) の Forest Fire Model³⁾、LLNL の Lee-Tarver Model⁴⁾、産業技術総合研究所 (産総研) の田中克己氏による方法⁵⁾等が提案され適用が試みられている。

ここでは、これらの複雑な点火・成長 (Ignition and Growth) 過程は無視し、点火後直ちに定常的に爆ごう波が伝播すると仮定する最も簡単なモデルを紹介する。

図 2(a) に示すように、計算メッシュを爆ごう性物質が満たし、時刻 $t=0$ に点火点位置で爆ごうが開始される場合を考える。点火点から濃い灰色で塗りつぶした注目メッシュまでの最短距離 (d_1) と最長距離 (d_2) は、点火点の座標値とメッシュの全節点の座標値から

容易に計算することができる。一方、爆ごう波は一定の速度で伝播する ($V_D = const$) という仮定から、そのメッシュが燃え始める時刻 (t_1)、及び燃え終わる時刻 (t_2) を算出できる。この燃焼時間内に、前項で述べた、反応物質の密度と比内部エネルギー (共に、爆ごうパラメータの 1 つ) を用い、 $P = f(\rho, \tilde{E})$ という形の状態方程式に代入することによって圧力を評価する。これ以降は、通常衝撃解析法の基礎式を解くためのスキームに従って、力、速度場、ひずみ場等が計算され、次の時間積分ステップの計算に繋がる。従って、気体爆ごうの場合に、衝撃解析法の入力データとして準備すべき爆ごう計算関係のデータは、(i) 爆ごう速度 (V_D)、(ii) 反応気体の比内部エネルギー (\tilde{E})、(iii) 反応気体の密度 (ρ)、(iv) 状態方程式の 4 つである。(iv) については、気体爆ごうの場合は理想気体の状態方程式を仮定して爆

ごうパラメータの1つである生成気体の比熱比 (γ) が分かれば状態方程式の形が決定できる。一方、爆薬の場合には、前述のJWLの状態方程式と爆薬に応じて決定された物性値を用いることができる。次式にJWLの状態方程式を示す。

このようにして、本来、多くの化学反応が関係する極めて複雑な化学系で生じる現象を、もう少し簡単な物理系に置き換えて解くことが可能になる。

ここで注意すべきは、計算で用いられる空間メッシュ、時間メッシュ共に有限の大きさを持っており、現実の衝撃波厚さを模擬したものではないことである。従って、上述の燃焼時間内に理想的爆ごうを仮定した一定のC-J圧力を達成させてしまうと、過大なエネルギーを解放する結果になることである。この問題を回避するため、急峻な圧力変化を表現するに十分な計算メッシュが存在しない場合には、エネルギーが保存するように、C-J圧力よりも小さな圧力を評価するロジックが採用される。また、現実の爆ごう誘導距離と類似した数値的なC-J圧力のビル

ドアップ過程が存在することになる。これらのロジックにおいては、空間メッシュ幅や時間積分の刻み幅、内部エネルギーの大きさなどに依存してC-J圧力の達成のさせ方が変化する。

このような比較的単純な爆ごう波伝播ロジックによっても、モデル化に注意することによって十分な精度を持った解析を行うことができる。但し、爆発物の中に障害物が存在する場合には、別途、注意が必要であ

域IIのような部分が生じることがある。これらの部分は、仮想的な点火点からの爆ごう波伝播経路が最短時間ではなく、領域Iと同様、初めの点火点からの直接の伝播経路が最短時間となる。このような問題を回避するために、いくつかの最短経路を自動的に計算するアルゴリズムが提案されている。これらはかなり幾何学的に煩雑な操作で、コンピュータ処理上の効率化が重要になるが、ここではその詳細

JWL の状態方程式

$$P = A_{JWL} \left(1 - \frac{\omega\eta}{R_1} \right) \exp\left(-\frac{R_1}{\eta} \right) + B_{JWL} \left(1 - \frac{\omega\eta}{R_2} \right) \exp\left(-\frac{R_2}{\eta} \right) + \omega\eta\rho_0\tilde{E}$$

但し、 $\mu = \rho / \rho_0$ であり、 A_{JWL} , B_{JWL} , R_1 , R_2 , ω はシリンダー膨張試験と呼ばれる試験と数値解析によって決定される材料データである。

については省略する。但し、3次元問題では、このような自動認識のアルゴリズム

る。図2(b)にその状況を説明するための模式図を示す。薄い灰色で示した領域IIIの点が着火する時刻の算出を、図2(a)で用いたと同じ方法で行ったとすると、早く点火させ過ぎる結果となる。この時刻のより妥当な評価は、白抜き丸印で示した障害物のコーナー点で再点火させた爆ごう波が領域III内を同じ爆ごう速度 V_D で伝播すると仮定して達成される。しかし、実際の問題では、図2(b)のように、計算メッシュと爆ごう波伝播領域の境界面が一致しない場合が多いため、領

が不可欠であることを付言する。

図2(b)はもう一つの状況が存在する可能性を示している。上での議論においては、障害物によって爆ごうが阻止される場合を想定していたが、障害物も実際には有限の物理定数を持った連続体であり、この中を衝撃波が通過して再び爆発性物質に入射した際に再着火される可能性が存在する。このような状況や、機械的衝撃によって爆薬が自発火する問題などを解析するために、別の起爆ロジックもしばしば用いられる。上述

の LANL の Forest Fire Model、LLNL の Lee-Tarver Model、産総研の田中氏のモデル等がそれらのための方法であるが、これらだけで十分厚い書籍になり、筆者の力にも余るため詳細については省略する。

爆ごうに関する 数値解析例

(1) 爆ごう圧力と 圧力波伝播過程

解析モデル

先ず、非常に単純かつ基礎的な系の計算事例を示す。半径 1 m の完全に剛な球殻内で爆ごうが生じる問題を考える。図 3 に 3 種類の解析モデルと時刻歴の出力位置の一覧を示す。実際には、2次元軸対称の楔形の擬似的な 1次元球対称モデルを適用する。従って、半径方向のみに計算メッシュが存在する。計算には、1つの計算セル中に複数の物質を考慮することのできる、Multiple Material 対応の Euler ソルバーを使用する。起爆は時刻 0 に中心点で行

うものとする。

CASE-1 と CASE-2 の TNT 爆薬には LLNL の JWL の状態方程式を適用する。一方、CASE-3 の化学量論比の組成を持った、101.3 kPa (1 気圧)、300.15 K (27 °C) の水素と空気の予混合気の爆ごう問題に対しては、NASA Lewis 研究センターの Gordon-McBride らが開発した気体の爆ごう特性計算機能を有するプログラム⁶⁾を使用する。また、水に対しては Mie-Grüneisen 型の衝撃 Hugoniot の状態方程式を、空気に対しては理想気体の状態方程式を適用する。これらの状態方程式、物性値等の詳細に関しては紙数の関係上省略する。

TNT の爆ごう過程の解析

CASE-1~CASE-3 の計算結果を示す前に、CASE-1 と CASE-2 の中心に存在する TNT 爆薬のみを爆ごうさせた場合の圧力履歴を図 4 に示す。但し、中心から 10 cm のところで反射が生じないように、爆薬半径を

10 cm よりも余計に模擬して計算を実施した。TNT の C-J 爆ごう圧力は約 21 GPa であるが、計算では、起爆点から 10 cm の位置では 16 GPa 弱、最大でも 19 GPa 程度のピーク圧力に留まっている。プログラムの起爆ロジックにも依存するが、一般に、数値的に爆ごう圧力を達成させるためには、多くの計算メッシュを必要とする。この計算では、10 cm を 100 分割している。100 メッシュというのは、現在の計算機能力に照らせば、1次元計算では問題にならないが、2次元や3次元計算では、極めて深刻な問題となる。3次元問題で 1次元方向に 100 分割すると爆薬領域だけでも 100 万メッシュを必要とし、現在の通常の計算機能力の限界に匹敵することに注意する。図 4 に示したように起爆点からピーク圧力が上昇して行く過程を C-J 圧力の数値的ビルドアップと呼ぶ。尚、通常、爆発問題を扱うことを目的とするプログラムでは、C-J 圧力が達成されな

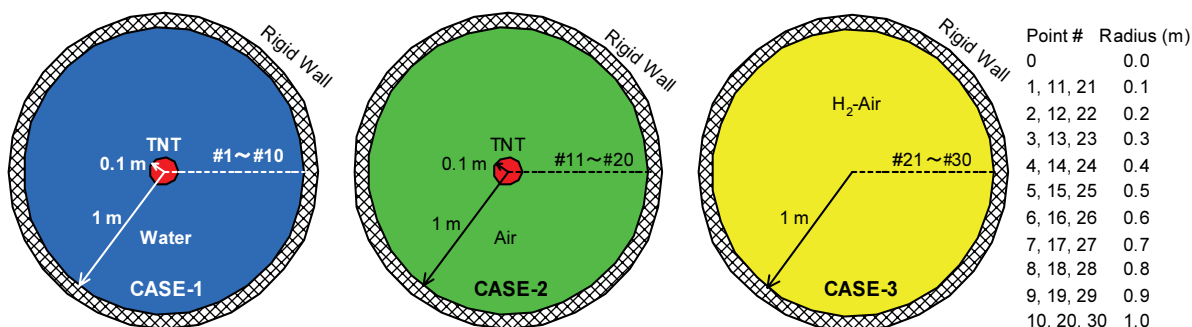


図 3 各ケースの解析モデルと時刻歴出力位置一覧

い場合にもエネルギー解放量が過小評価されないような圧力プロファイルになるようにプログラム化されている。また、接触爆発以外では、C-J 圧力が完全に達成されないとしても構造物の変形や破壊には重大な影響を与えないことが多い。爆薬の場合には、爆ごう圧力の空間減衰が著しいためである。ここでもう一つ注意すべきは、圧力の立ち上がりの急峻さと圧力の時間減衰の速さである、起爆点から遠くなるに従って減衰時間(裾野)は長くなるが、この程度の量の爆薬の場合には高々数 μs でピーク圧力は定常値に達してしまう。C-J 仮説の説明のところで述べたように、C-J 圧力は自走することによって、一定のピーク圧力を爆ごう波の最前面に生じるが、爆ごう波が進むに従って燃焼した部分が解放するエネルギーが大きくなってこのような裾の部分形成する結果となる。

TNT の水中・空中爆発と水素ガスの爆発解析

図5にTNTの水中爆発によって発生する圧力履歴を示す(図4のCASE-1参照)。但し、#2~#10までの出力点は水中であるのに対して、#1のみが爆薬中の点である。爆薬中の圧力履歴は図4で見たように、ピーク圧力が20 GPa 近くあり、図5

に重描きすると、他の点のピーク値がほとんど見られなくなってしまうためプロットしていない。

図6にはTNTの空中爆発によって発生する圧力履歴を示す。この場合も爆薬中の履歴はプロットしていない。前図の縦軸の単位がGPaであったのに対して、この図の場合はMPaであることに注意する。水中の圧力の減衰に比べて空中の減衰が著しいのが分かる。これは、媒質の密度と音速の積であるインピーダンスと呼ばれる物理量が、水と空気とでは大きく異なることに起因するものである。

空中爆発の#12の圧力履歴は他のプロファイルと異なり、ピーク圧力の後に15 MPa程度の圧力が50 μs 程度持続している。この点の圧力履歴の30~100 μs の間を拡大表示したグラフを図7に示す。図6では単一に見えたピークは、実際には、2つのピークからなっていたのである。この2つのピークの形成過程は非常に興味深く明確なメカニズムを持っているが、完全な説明のためにはかなりの紙面を必要とする。ここでは、爆ごう生成物と空気の界面の透過と反射、及び反射した圧力波が球の中心で収束し高圧が発生することに関係していることを述べるに留める。但し、この2つのピークは出力点#13ま

で伝播すると1つのピークに重なり識別できなくなってしまう。また、30~40 μs の間に爆ごう生成物と空気の界面が点#12を通過することを付言しておく。

水中爆発と空中爆発の圧力履歴でもう2つ大きく異なる点がある。1つは、起爆点から同じ距離に位置する出力点のピーク圧力出現時間の違いであり。さらにもう1つは、剛壁面に接した出力点である#10と#20の衝突圧力の静圧に対する比の違いである。この議論のためには、図8に示した、両ケースの流速(粒子速度)の時刻歴の比較が有効である。この図によれば、水中の流速は爆源近傍でも700 m/s程度で、徐々に減速し、剛境界付近では最大でも数10 m/sにしか過ぎない。それに対して、空中の流速は数1,000 m/sと桁違いに速い。空中爆発の場合には、音速ではなく、この流速によって衝撃波を形成し擾乱が伝播するため圧力ピークの立ち上がりが早くなる。尚、この速度履歴の場合には、爆薬中である#1と#11の出力点の速度もプロットしている。爆ごう生成物(まだ、凝縮相、すなわち、固相もしくは液相の状態にあるものと考えられる。)の流速が、2,000 m/s程度であることが分かる。

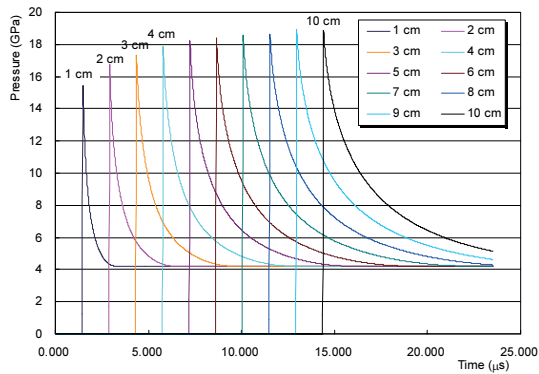


図4 TNT爆薬内の圧力履歴

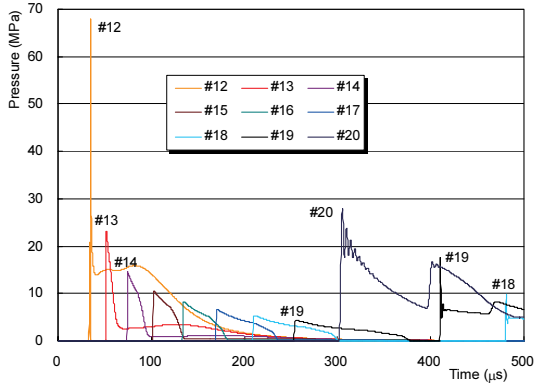


図6 TNTの空中爆発解析(CASE-2)の圧力履歴

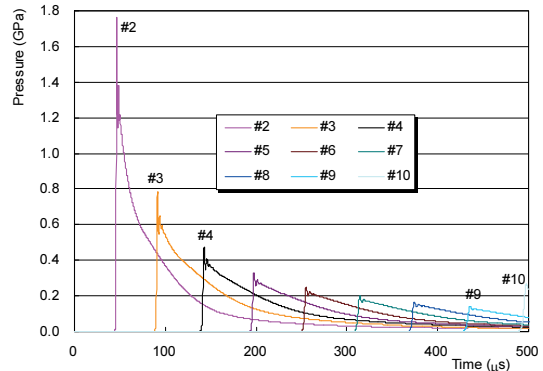


図5 TNTの水中爆発解析(CASE-1)の圧力履歴

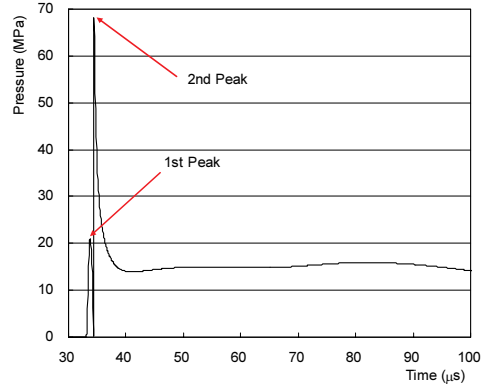


図7 #12の圧力履歴の拡大図

一方、水の場合には、静的な音速は約 1,500 m/s であるが、本問題の場合、一部の高压状態においては、約 1,800 m/s まで上昇する。水中の擾乱はこの動的な音速で衝撃波が伝播するが、空気の流速に比べると遅いため、空中爆発よりも擾乱の伝播速度が遅くなっているのである。衝突圧の違いの問題もこの流速の違いに原因がある。運動量保存則から、媒質が剛壁に衝突した時に生じる圧力は衝突速度に比例する。密度が小さく慣性が小さいため、加速されやすい空気の場合には剛壁に対して大きな速度でぶつかるため、静圧に対する

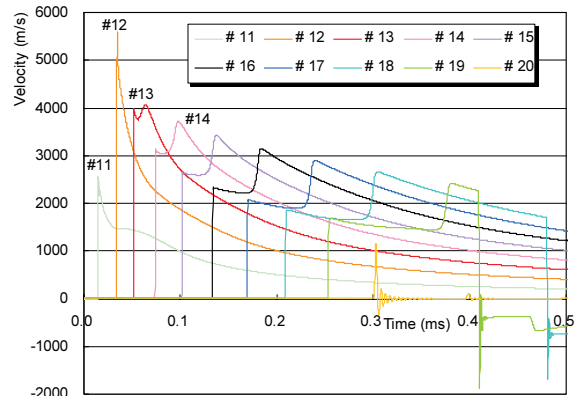
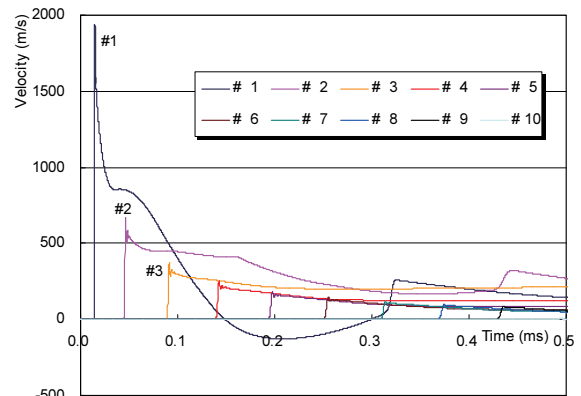


図8 水中爆発と空中爆発の流速の時刻歴

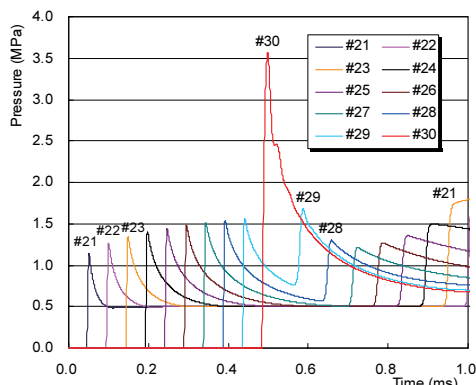


図9 水素爆発解析 (CASE-3) の圧力履歴

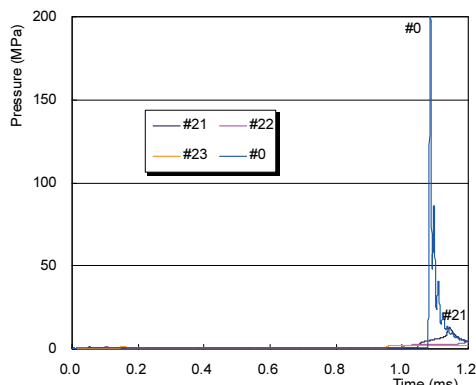


図10 水素爆発解析の中心近傍の圧力履歴

比が大きくなる。

次に、図9には、CASE-3の水素と空気の前混合気の爆発解析で得られた圧力時刻歴を示す。本予混合気のC-J圧力である1.67 MPaがほぼ達成されているのが分かる。剛壁面に接した出力点である#30において、C-J圧力の2倍以上の約3.6 MPaの衝突圧が生じている。

この高い衝突圧は、剛壁で流速が反転して中心に向かうに従って急速に減衰し、一旦はC-J圧よりも少し低めの圧力にまで減衰するが、球の中心に近づくに従って圧縮され、再びC-J圧力以上に上昇する。この現象はImplosionと呼ばれる。数学的には中心で示強変数が発散するが、実際の物理系では、少なくとも分子レベルにおいては対称性が崩れるため、発散することはない。しかしながら、爆縮はこの原理を利用して核反応を誘起するような高圧を生じる技術であり、メゾスコピックなスケールで対称性が成り立つような装

置を製作することができれば、原理的にはかなりの高圧を達成することが可能である。

図10は、球の中心付近の出力点の圧力履歴を示している。#0では、水素爆発であるにもかかわらず、200 MPaという鋼材の降伏応力に近い高圧を、数値的理想性のために生じている。しかしながら、このような高圧部分の質量は極めて微小であるため非常に急速に減衰する。上述の核爆弾の起爆装置のような特殊な場合を除いて、通常は大きな問題にはならない。図11には、水素爆発のケースの各出力点における流速の時刻歴を示す。500

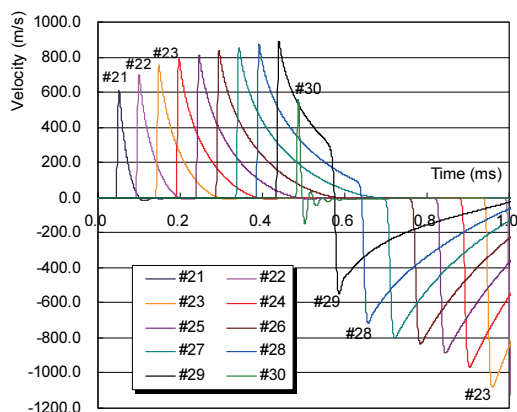


図11 水素ガスの爆発解析 (CASE-3) の速度履歴

～1,000 m/s程度であり、水素ガスの爆発速度の半分以下である。爆薬の場合には、逆に、爆発速度が、流速の2～3倍程度あったことに注意する。半径100 mmの球状のTNT爆薬、半径1,000 mmの球状の水素と空気の前混合気(化学量論比、標準状態)、さらに参考のため、半径1,000 mmの球状の水素と酸素の前混合気(化学量論比、標準状態)、及び半径1,000 mmの球状のメタンと空気の前混合気(化学量論比、標準状態)、が持っている化学的エネルギーの比較を表1に示す。

爆薬の建物内での爆発では、通常、建物の容積に比

表1 各反応物質の化学エネルギー一覧

| 物質 | TNT | 水素-空気 | 水素-酸素 | メタン-空気 |
|-------|----------|----------|----------|----------|
| エネルギー | 29.32 MJ | 22.21 MJ | 33.82 MJ | 23.38 MJ |

べて爆薬は局所的に存在する。それに対して、反応性ガスの内部爆発では、ガスが建物内全体に充満することが多い。以上で述べたCASE-2とCASE-3はこれらの状況と相似関係にあることを示唆しているが、系内で解放されるエネルギー

がほぼ同程度であることが把握できる。

(2) 構造物内外の爆発解析

ここでは、これまで述べた基礎的な手法を組み合わせ、より複雑な問題に対して適用した事例を示すこと

に主眼を置くものとする。図12に、以下で述べる3ケースの形状モデルの概要を示す程度に留め、解析条件の詳細な記述については省略するものとする。数値解析上のモデル化方法については、別の機会に書いた記事⁷⁾も参考にされたい。

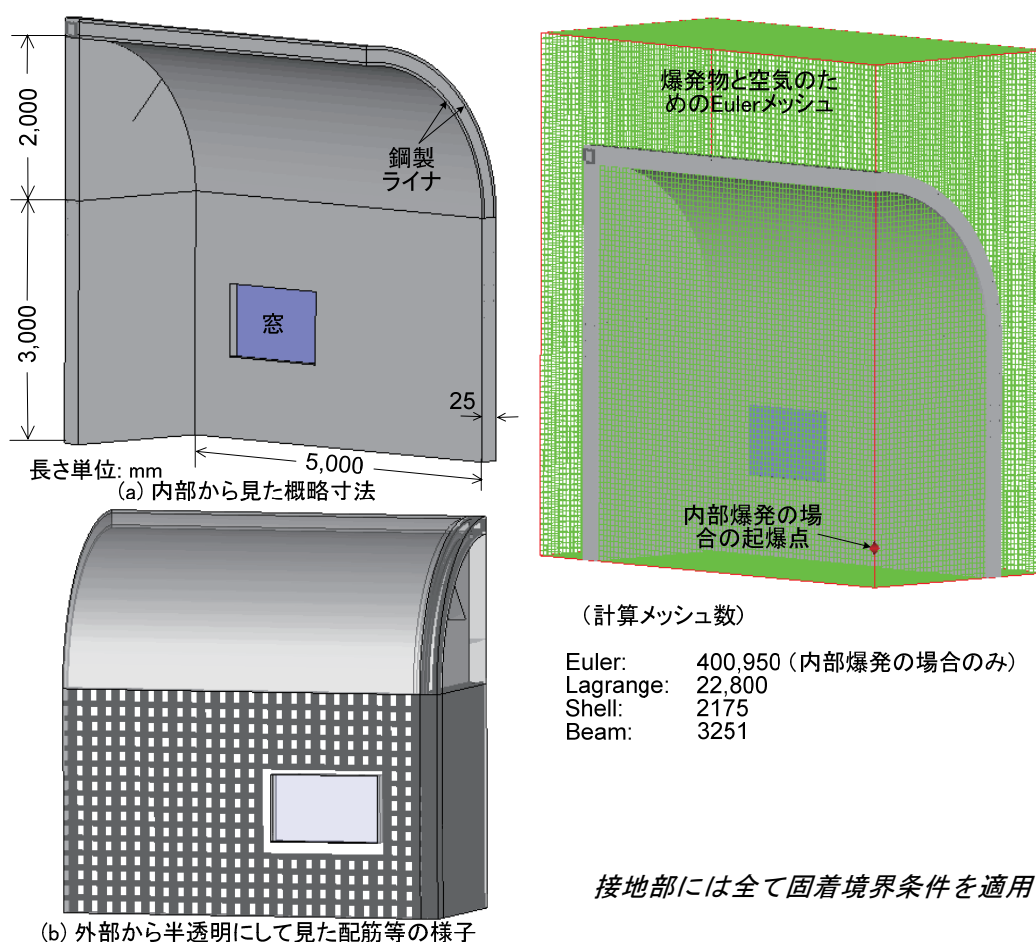


図12 構造物内外での爆発解析の解析形状モデル概要 (1/4モデル)

構造物内での気体

爆ごう解析

このケースでは、図 12 に示した構造物の中に、化学量論比の水素と空気の混合気が標準状態で一様に混合され、構造物の中央床部

から 50 cm の位置で着火し、定常爆ごうが開始されるものと仮定する。構造物内のみ混合気が充満しており、外部には標準状態の空気が存在している。

図 13 に 0.5 ms から 25 ms

に至る、半透明に混合気体中の圧力分布を表示したコンタ図を示す。1.0 ms では、中心から 2 m の位置に存在する壁に、2.0 ms では屋根に爆ごう波が衝突してこの混合気の C-J 圧である約

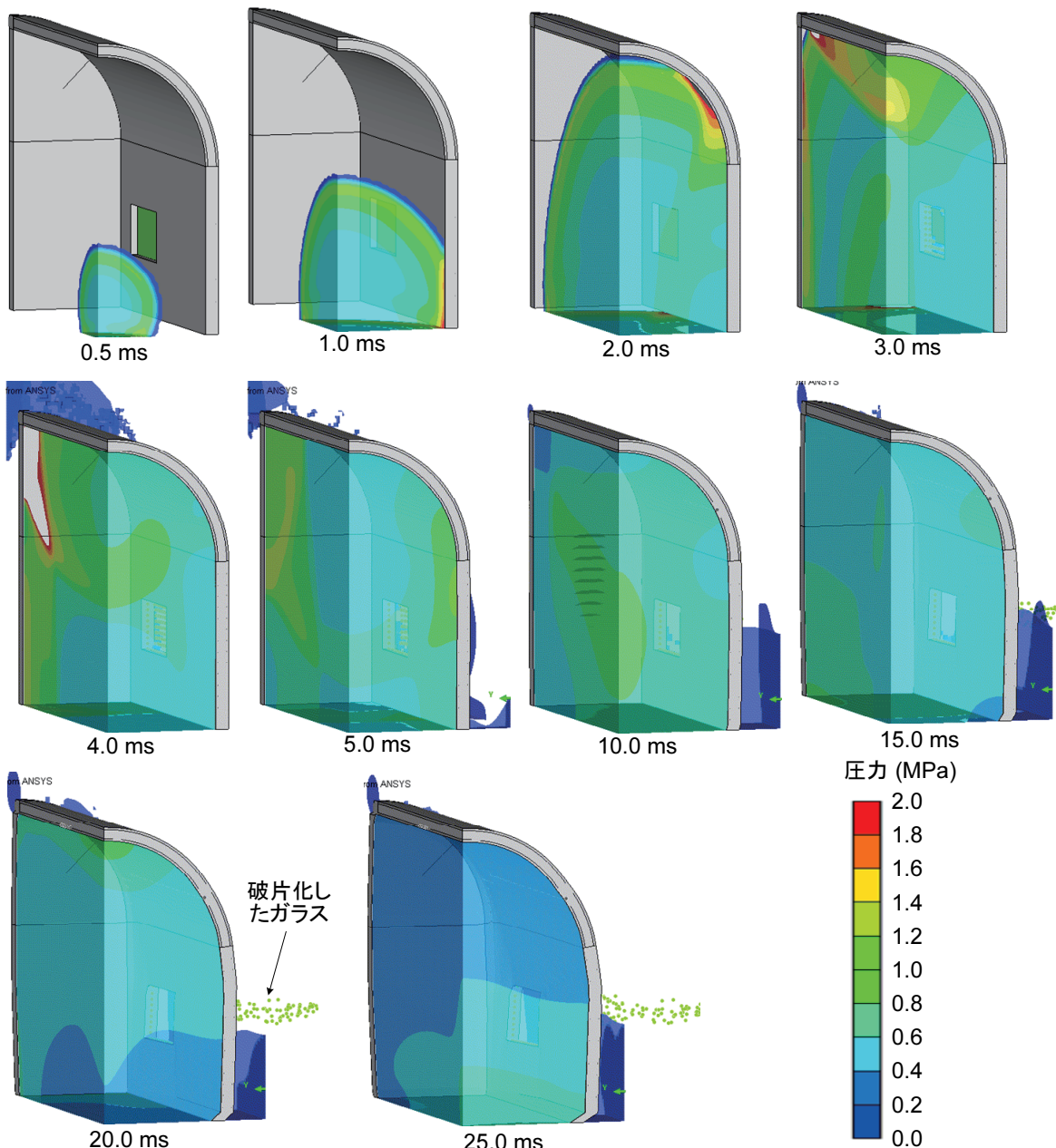


図 13 水素/空気混合気の爆ごうに伴う圧力上昇と構造物の変形の様子

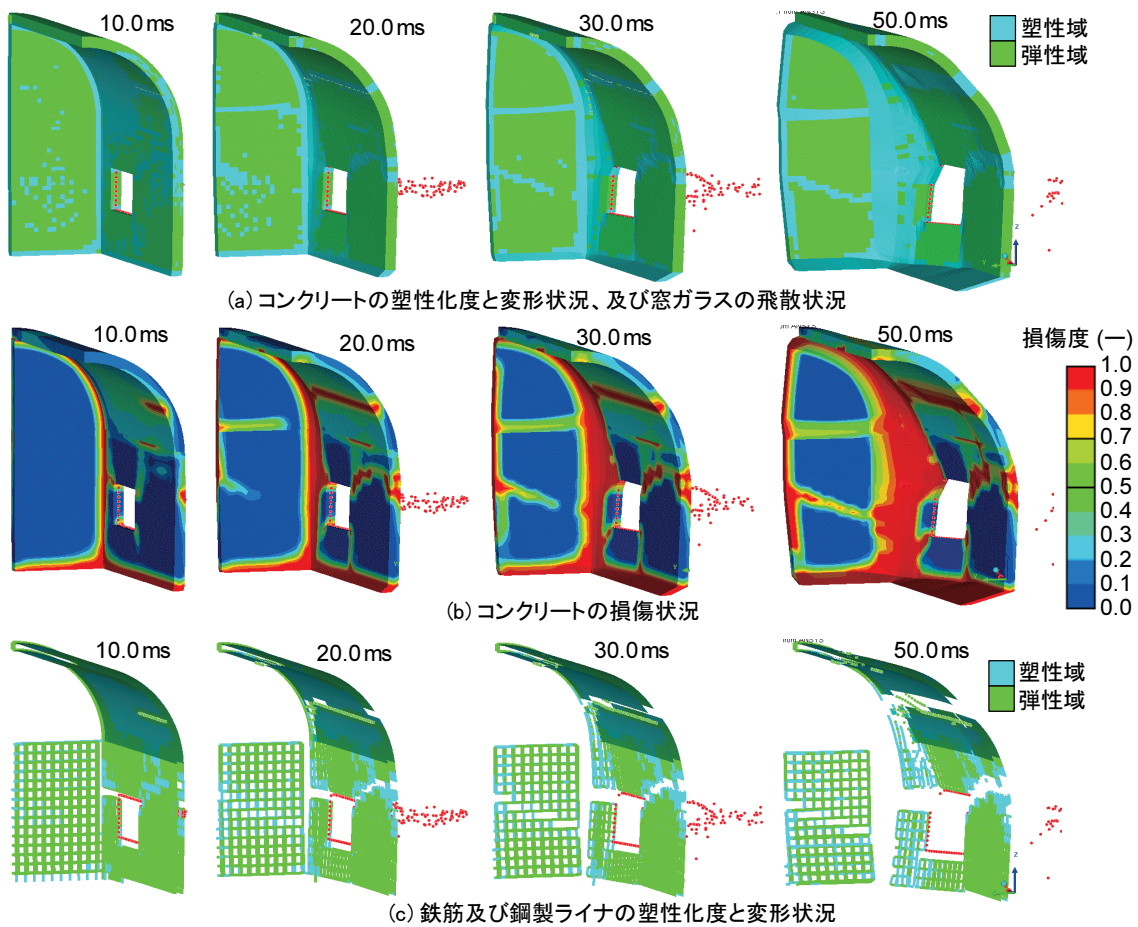


図 14 構造物内気体爆ごう解析における構造系の変形・損傷の様子

1.6 MPa を大きく上回る力が評価されていることが確認できる。4.0 ms 以降では、コンクリートと窓ガラスの破壊によって起こったと考えられる、混合気の構造物外への噴出が生じているのが分かる。少し確認し辛いが 3.0 ms 時には窓ガラスが破壊して破片化（数値モデル上、球状破片に置き換えて表示している）し始め、20 ms の時点ではそれらの破片が明確に確認できる。

実際の解析は、図 13 に示した 25 ms の時点の 2 倍の 50 ms まで実施した。図 14 に主に構造系の変形、塑性化、破損・破壊の様子を概観するための図を示す。図 14(b)に示した、コンクリートの損傷度は、ドイツのエルンスト・マッハ研究所の W. Riedel らが提案している、コンクリートの構成則・破壊則である R-H-T のモデルにおける、損傷度という変数のコンタ図で、この変

数の値が 0 の場合は損傷なし、1 の場合は完全に損傷し破壊状態にあることを意味している。但し、図 14(a)-(c)のガラスの破片の色が損傷度が 1 の時（赤）と同じなのは、R-H-T のモデルの損傷度を意味しているものではなく単に破壊状態にあることを意味している。

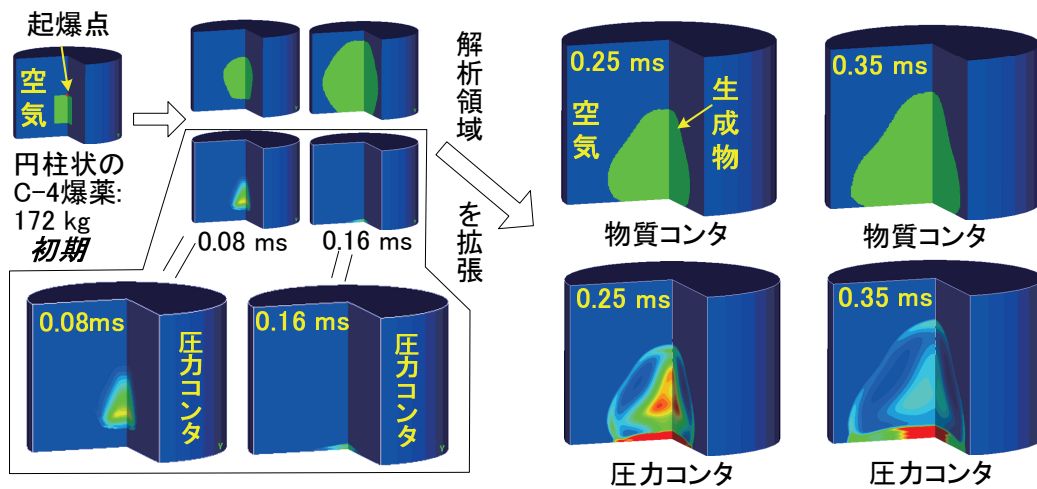


図 15 構造物内爆薬爆ごう予備解析の手順と概要

構造物内での爆薬の

爆ごう解析

このケースでは、図 12 に示した構造物内の大気雰囲気中で、172 kg のコンポジション C-4 爆薬（直径、高さ共に 51.5 cm の直円柱形状の裸薬で、エネルギー的には前項に示した水素と空気の混合気とほぼ同等である。）が、構造物の中央床部に置かれ中心上部で点火され、定常爆ごうが生じるものと仮定する。構造物外部にも標準状態の空気が存

在している。このケースでは、本解析の予備解析として、爆薬の爆ごう過程、及びその後、圧力波が構造物内をある程度まで伝播する過程の計算を実施した。これは、初期段階の爆源で生じる現象を、本解析よりも十分に細かい計算メッシュで精度良く模擬することを目的としている。図 15 にその手順と概要を示す。0.08 と 0.16 ms 時の上段は、爆ごう（燃焼）生成物が膨張し空気の領域を圧縮して行

く過程を示しており、下段は圧力分布を示すコンタ図である。かなり判別し辛いですが、0.16 ms の時点では完全に爆ごうが終了し、空気の界面で反射してきた圧力波が床底面に衝突し、生成気体を圧縮することによって床面近傍に高圧域を生じている。約 0.2 ms 時に、最初の直径、高さ共に 3 m の直円柱の Multiple Material Euler 領域を、直径、高さ共に 2 倍の領域に拡張すると同時に、2 倍の粗さのメッ

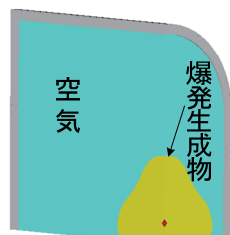


図 16 構造物内爆薬爆ごう本解析の初期モデル

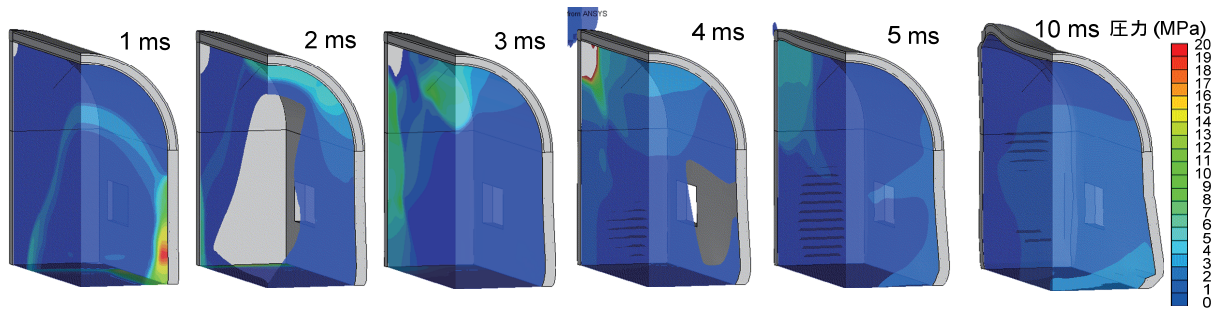


図 17 構造物内爆薬爆ごう本解析の構造物内圧力伝播と構造物の変形（10 ms まで）

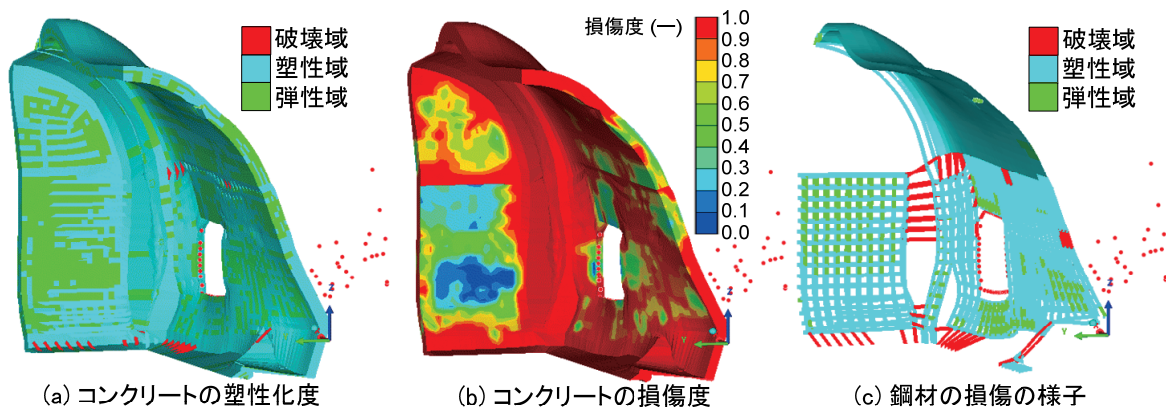


図 18 構造物内爆薬爆ごう本解析の 30 ms 時の構造物の変形と破損の様子

シュに切り直し、そのメッシュに物理量を Remapping している。

図 15 の拡張後のモデルによる計算を 0.4 ms まで実施し、その状態を図 12 右上に示した Euler メッシュに Remapping すると同時に、構造系の計算メッシュを追加した。その結果得られた本計算の初期モデルを図 16 に示す。図中の赤い点は

予備解析の起爆点の位置を示している。

図 16 の計算モデルを用いて、爆ごう生成物が構造物内の空気を圧縮し、構造物を変形させて行く様子を図 17 に示す。4 ms 時に上部コーナ部分から気体が噴出している様子が見える。この図では、10 ms までしか表示していないが、計算は 30 ms まで実施した。

図 18 に 30 ms における構造物の変形と損傷・破壊の様子を概観する図を示す。凄まじい変形の様子を呈している。この状態に重力が掛かれば、構造物は完全に崩壊するものと考えられる。図 14 の各図と比較すると、このケースの方が早い時点でより深刻な被害を被っていることが分かる。

構造物外での爆薬の

爆ごう解析

このケースでは、図 12 に示した構造物の壁の外に設置された、102 kg のコンポジション C-4 爆薬（一辺 40 cm の直方体形状の裸薬）が起爆され、定常爆ごうが生じるものと仮定する。図 19 に本解析の計算モデル図を示す。この場合には、爆薬は Lagrange 座標系で模擬し、その関係で構造物外部の空気は無視した。

図 20 には、100 μ s に至る爆薬の爆ごう過程とコンクリート壁の変形の様子を示す圧力分布のコンタ図を

示す。爆ごう波がコンクリートに衝突する時点では数 10 GPa の圧力が発生し、その結果、25 cm の厚さの鉄筋コンクリートの半分程度まで 5 GPa を超える高圧領域を生じさせている状況が確認できる。

図 21 に、500 μ s に至る鉄筋コンクリート壁の変形の様子を概観する圧力分布のコンタ図を示す。この図では爆薬物質（爆発性生物）は非表示とした。また、多少確認し辛いですが、球状に表示された粒子はコンクリートもしくは鉄筋が著しい変

形を被った結果、数値的のエロージョンが生じ、Lagrange 要素やビーム要素が質点に置き換えられたものである。内部爆発の両ケースのシェルで模擬された窓ガラスと同様である。これらの図では、先程に比べて 1/1,000 程度の圧力まで減衰していることが分かるが、この時点でもなお、コンクリートの場合には十分にスポール破壊（負の静水圧による破壊）が生じ得る絶対値が MPa オーダ以上の圧力レベルを保持してい

図 19 構造物外爆薬の爆ごう解析の計算モデル図

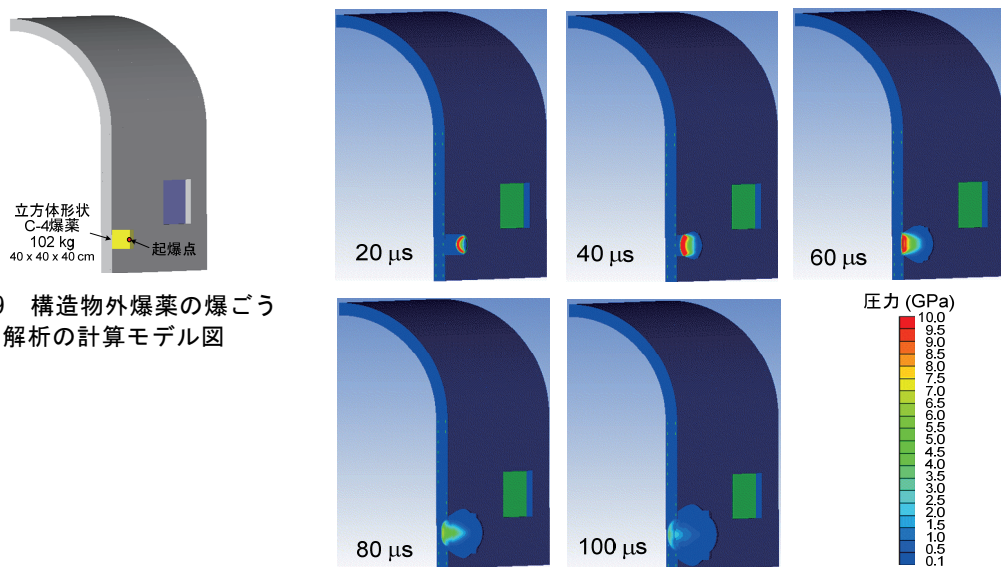


図 20 構造物外爆薬の爆ごう解析の 100 ms までの爆ごうに伴う圧力分布のコンタ図

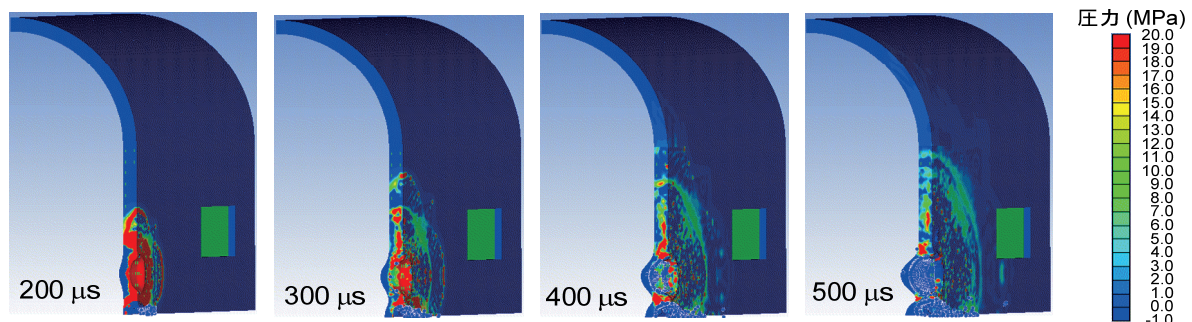


図 21 構造物外爆薬爆ごう解析における RC 壁の圧力コンタ図 (200~500 μ s)

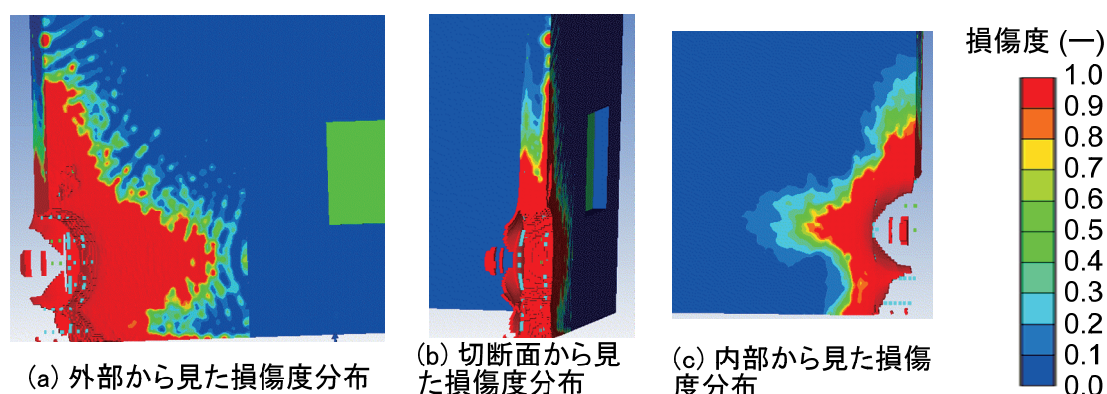


図 22 構造物外爆薬爆ごう解析における RC 壁の損傷度コンタ拡大図 (550 μ s)

ることが分かる。

図 22 に、550 μ s における、爆破部分近傍の鉄筋コンクリート壁の損傷度分布を 3 つの視点から見たコンタの拡大図を示す。500 μ s の時点からは多量の数値的エロージョンが生じて、幅・高さ共に 1 m 以上の穴が開いているが、損傷度を加味すると実質上、1.5 m 以上の穴が開いているものと見

なすことができる。

おわりに

以上の解析事例では、全て爆ごうすることをア・プリアリに仮定して議論を進めた。雷管等の起爆装置を用いた高性能爆薬の場合には、ほとんど問題のない仮定であるが、特に、気体爆発の場合には必ずしも蓋然

性のある仮定ではない。爆燃を模擬した解析事例として、爆源が爆燃に終わる低爆速の火薬の例⁸⁾や 2007 年に東京都渋谷区の温泉施設で起きた天然ガスを爆源とする事故を模擬した例⁹⁾があることを参考までに付言しておく。尚、本記事で示した解析事例は、全て ANSYS AUTODYN を用いて解析した事例である。

参考文献

- 1) Chase, M. W. Jr., (ed.), "NIST JANNAF Thermochemical Tables," *Journal of Physical and Chemical Reference Data*, Monograph, No. 199, National Inst. of Standards and Technology U.S., (1998).
- 2) B. M. Dobratz and P. C. Crawford, "LLNL Explosives Handbook: Properties of Chemical Explosives and Explosive Simulants," UCRL-52997-Chg.2, Lawrence Livermore National Laboratory, (1985).
- 3) C. L. Mader and C. Forrest, "Two-Dimensional Homogeneous and Heterogeneous Detonation Wave Propagation", LA-6259, Los Alamos National Laboratory, (1976).
- 4) E. L. Lee and C. M. Tarver, "Phenomenological Model of Shock Initiation in Heterogeneous Explosives," *Physics of Fluids*, Vol. 23, No. 12, pp.2362-2372, (1980).
- 5) K. Tanaka, K. Noda, Y. Hyodo, H. Nakamura, K. Kosaka, T. Nakayama, M. Katayama and A. Takeba, "XDT IN SOLID ROCKET PROPELLANT BY LARGE STEEL FLYER PLATE," 11th APS (American Physical Society) Topical Group Meeting on Shock Compression of Condensed Matter, Snowbird, Utah, pp.667-670, (1999).
- 6) B. J. McBride, S. Gordon and M. A. Reno, NASA Technical Memorandum 4557, NASA Lewis Research Center, (1993).
- 7) 片山雅英、「衝撃荷重を受ける構造物の破壊シミュレーションの現状—爆発を中心とした衝撃問題の数値解析法—」, 防衛施設学会誌、創刊 (第 1) 号、pp.31-41、2005 年 3 月。
- 8) 片山雅英、相澤龍彦、「流体—構造物相互作用解析とその映像化」、構造工学における数値解析法シポジウム論文集、第 14 巻、pp.173-178、平成 2 年 7 月。
- 9) 片山雅英、吉田正典、林静雄、「渋谷温泉施設におけるガス爆発の数値解析」、平成 19 年度衝撃波シポジウム論文集、pp.385-388、東京工業大学、大岡山キャンパス、2008 年 3 月 17 日～19 日。