爆薬の爆ごうを伴う物理的複雑系の数値解析法

片山雅英*，田中克己**

爆薬が空気中や水中で爆発し伝播する現象，及びそれに引き続いて発生する周辺の構造物に変形を及ぼす現象を数値シミュレーションによって模擬する方法について検討し，解析例を示すと共にその妥当性と有効性について議論する。数値解析手法としては，

1) 気相と凝縮相が混在する系の模擬に対して有用なmultiple material Euler法の，計算セル内の単一圧力の評価方法と物質境界決定法について記述・検討する。
2) 流体と構造物が混在する複雑な物理系の解析に有効な，Eulerの方法とLagrangeの方法の相互作用計算手法について記述・検討する。

1)の手法に対しては，地中式火薬庫の模擬実験について，火薬庫を模擬した剛なトンネル内での爆ごうとトンネル外への爆風圧の伝播過程を模擬した二次元軸対称系による解析を行い，その有効性を示すと共にその問題点についても議論する。

2)の手法に対しては，大気雰囲気中で，鋼製円筒容器内のTNT爆薬が爆ごうし，容器を変形させると共に，近くに設置された鉄筋コンクリート壁がその爆風圧によって変形，破壊する過程を三次元的にシミュレーションし，さらにその結果を可視化することによってその物理について議論する。

数値解析には，二次元，三次元解析共に衝撃解析コードAUTODYN®を適用した。

1. 緒　論

空気中で爆薬が爆発する現象を模擬するためには，衝撃解析コード(英語名，hydrocode)と通称される計算機プログラムが用いられる。衝撃解析コードは，その英語名が示すように，流体解析のためのEuler方程式を基礎にして定式化がなされている。しかし，連続体力学に基づき，流体だけではなく固体の挙動も記述できるように構成方程式を連立させ，固体物質の強度，すなわち偏差応力や偏差ひずみ成分も評価できる。したがって，空中爆発現象だけではなく，水中や土中爆発，さらに爆発生成物が構造物に変形を及ぼす現象に対しても適用することができる。これは，通常の数値流体解析(CFD)コードに比べて，より広く固体・液体・気体の三相に対して適用できるように，状態方程式に一般性を持たせた定式化がなされていることにより実現される。

一方，基礎式の立て方には，Euler の方法とLagrangeの方法という代表的な二方法が知られている[1]。計算メッシュが絶対空間に固定され，メッシュ間の物質の移流を評価することにより物質の動的挙動を記述するEulerの方法は，計算メッシュが物質の変化に従って変形するLagrangeの方法に比べ，爆発問題に対しては適用上有利である。特に，爆薬の爆発問題においては，(1) 初期に狭い領域に局在する爆薬が爆発後は極めて広い空間に広がるまで解析する必要があること，(2) 爆発後の生成気体が複雑な形状の構造物と相互作用しながら流動する現象を模擬しなければならないこと等のために，Lagrangeの方法の適用が計算精度上困難な場合が多い。ところが，Eulerの方法で多成分系の物質の挙動を記述するためには，単一の計算セルの中で複数の物質を模擬する，いわゆるmultiple material Eulerの方法を採用することが不可欠である。空気中における爆薬の爆発解析では，主

2001年11月12日受付
2001年11月16日受理
*株式会社 CRCソリューションズ　原子力技術部 流体衝撃チーム
〒136-8581 東京都江東区南砂２－７－５
TEL 03-5634-5774
FAX 03-5634-7340
E-mail m-kata@crc.co.jp
**独立行政法人 産業技術総合研究所　フッ素系等温暖化物質対策テクノロジー研究センター，計算科学研究部門(併)
〒305-8586 茨城県つくば市東１－１ 中央第５
TEL 0298-61-4697
FAX 0298-61-4697
E-mail tanaka-katsumi@aist.go.jp

に，このmultiple material Eulerの機能に起因する数値解析上の問題点がいくつか存在する。

また，爆薬に近接した固体材料の変形挙動や数km・s^{-1}を超えるような超高速衝突下の固体材料に対しては，Eulerの方法のみで複雑系の現象を解析することも可能であるが，ひずみ速度にすると$10^4 s^{-1}$以下の比較的変形速度の遅い固体物質の変形挙動の模擬には，しばしば解析精度上や経済上の困難が生じる。

本研究では，前半部分において，multiple material Eulerの問題点について概観し，中山ら[2]が実施した地中式火薬庫内での爆発現象の模擬実験を参照して，それに対して実施した数値解析結果[3),4)]を通じて考察・検討を加える。さらに，後半部分ではLagrangeとEulerの相互作用計算法について記述した後，爆薬と空気に対してはEulerの方法を，固体材料に対してはLagrangeの方法を適用し，それらの相互作用を考慮した三次元解析を示すことにより，それが表す物理について議論する。

2. Multiple Material Euler解析法

Euler座標系で多成分系の物質の挙動を模擬するためには，一つのEuler計算セル内で複数の物質を模擬する必要がある。この要件は，計算セル内の状態量を成分毎に評価することによって解決可能であるが，基礎方程式の力に関わる項を評価する点からは，計算セルとして単一の力を計算する必要がある。通常，衝撃解析法では，状態方程式に対し，密度と単位質量当りの内部エネルギーを独立変数として選び，圧力を計算する方法が採られるが，上記の要請から，$p_i = \Phi(\rho_i, e_i)$なる形の状態方程式を各物質i毎に立て，何らかの操作によってセルとして一意的な圧力$\bar{p}$を計算した後，他の基礎方程式と連立して解かれる。

このような数値解析的操作を行う上で二つの重要な問題点があり，それぞれに対していくつかの手法が提案されている。単一のセル圧力の評価方法，及び物質境界の決定方法である。以下，これら二つの方法について簡単に述べる。

2. 1 単一のセル圧力の評価方法

本方法は，上述のように，本来別々の物質を記述するための状態方程式から計算された圧力を，同じ計算セル内に存在するという理由から強制的に同一の圧力にするものであり，原理的に多くの問題を含んでいる。特に，密度の著しく異なる固体，液体，気体が混在するセルにおいては，この操作が少なからず問題となることが予想される。また，速度場や温度場に関しても各成分で同一であると仮定する場合が多く，物理的に必ずしも正しい仮定ではない。ここでは，紙数の関係上詳細な記述は割愛するが，通常，質量，運動量，エネルギーの各保存性を規範として，各成分物質のセル内に存在する体積割合を基準にし，各物質の密度を調節することにより，Newton-Raphson等の反復法を用いて各時刻における状態量が決定される。すなわち，計算セル内のミクロなレベルでは，必ずしも物理的に正しい計算方法とは言えないが，マクロに見た物理量の保存則という観点からは合理性を持った方法である。

これに対して，O. Yu Vorobievら[5]は，従来の反復法によるのではなく，物質の体積弾性率Kを基にして，セル内に存在する各物質の存在率f_iによって平均化する方法を提案した。すなわち，次式によってセルの圧力を計算する。

$$\Delta f_i \sim \frac{f_i K}{K_i},\quad K = \frac{1}{\sum f_i / K_i},\quad \bar{p} = K \sum p_i f_i / K_i \qquad (1)$$

この方法では，体積割合に加えて，圧縮率κ（$=1/K$）が大きな物質ほどセル圧力に対する寄与が大きくなることを意味しており，凝縮媒体が気体と同一セル内に混在する場合には，セル圧力に対する寄与は小さくなる。この仮定は物理的直感と矛盾しない。また，反復法による収束計算では，しばしば圧力値が振動する状況に遭遇するが，この方法では，一意的に各状態量を決定することができるため，計算時間の低減効果に加えて解の破綻を回避できる利点がある。

2. 2 物質境界

multiple material Euler法では，通常，“void”と呼ばれる真空状態を，擬似的な物質として扱うことによって物質境界を表現する。計算セル内の，voidを含む各物質に対して移流量を評価する際には，セル内における物質の空間的分布状況や隣の計算セル内の分布状況が問題となる。従って，移流項の計算と物質境界の評価はお互いに密接な関係にある。物質境界の決定方法は，VOF（Volume of Fraction）と総称される。

その最もプリミティブな方法はDonor Cell法もしくは風上差分法として知られている方法である。この方法は，隣のセルの情報がある程度反映されるが，セル内の物質の分布については考慮せず，存在率を計算するに留まるものである。

それに対し，W. F. Nohら[6]はセル内に存在する物質の数に応じて簡単な存在パターンを想定し，その空間的分布に応じて移流計算と物質境界の外形を確定する方法を提案した。この方法は，SLIC（Simple Line Interface Calculation）法と名付けられ，三次元空間

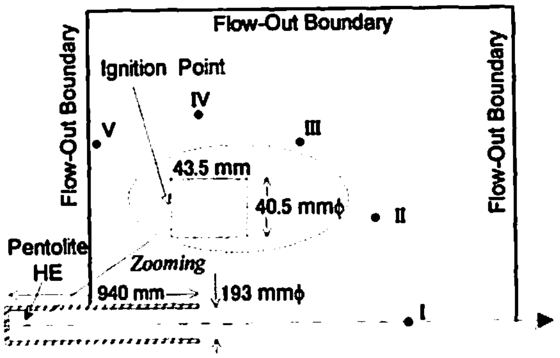


Fig. 1 Schematics of numerical analysis model.

に対しても比較的容易に適用することができる。

さらに，D. L. Young[7]は，セル内における各成分物質の空間的分布の傾きを考慮した，より高精度な方法を二次元軸対称系に対して提案し，後に三次元問題にも拡張している。

2. 3 爆薬の空中爆発解析

2. 3. 1 参照実験

中山ら[2]は，地中式火薬庫内での爆発現象とそれに伴う爆風圧の評価を目的とした実験を実施している。Fig. 1に示すような長さ940mm，内径193mmのほぼ剛な円筒容器内の中心軸上に置かれた約90gの円柱状ペントライトを左端中心軸上で点火し，円筒容器外に設置された圧力計によって爆風圧を計測している。尚，羽場ら[8]は，続報として別途実験解析も実施し報告している。

2. 3. 2 解析モデル

本解析には，二次元衝撃解析コードAUTODYN®-2D[1]を使用した。Fig. 1は，実験系と同時に解析系も表している。ペントライトと空気の領域にはmultiple material Eulerの方法を適用し，円筒容器はLagrangeではなく完全剛境界条件で模擬した。図に表示したEulerグリッド三辺に流出境界条件を適用した。計算に用いたEulerメッシュは，メッシュ依存性を検討するため，4，2，1 mmの三種類を基本として用いた。ペントライトにはJWLの状態方程式[8]を適用し，空気は理想気体を仮定した。解析条件の詳細については，紙数の関係上別[3]に譲る。

2. 3. 3 解析結果

(i) 円筒内圧力

羽場ら[8]の解析でも報告されているように，円筒内の圧力分布と生成ガス/空気界面形状に大きなメッシュ依存性が見られる。羽場らの解析では，セルの

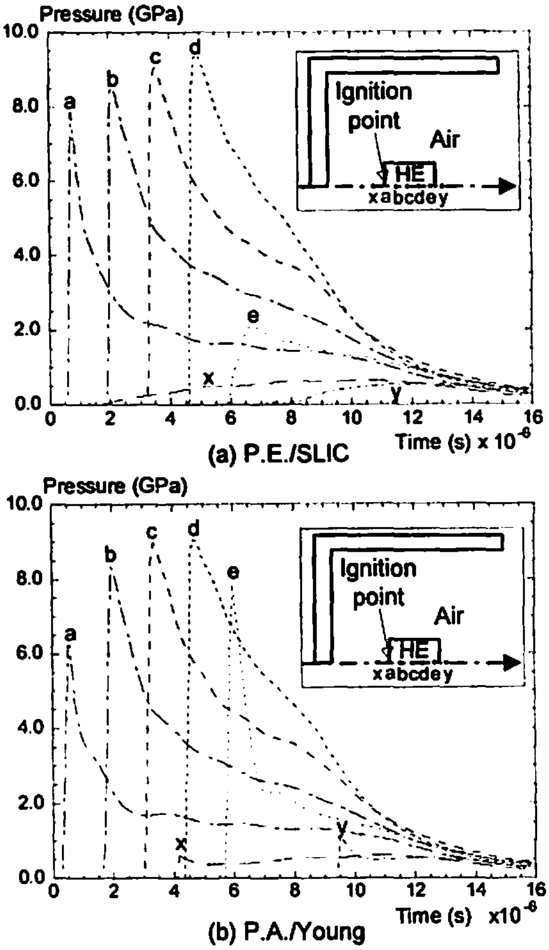


Fig. 2 Pressure histories along the axis in the vicinity of HE.

圧力評価法には第2. 1項の前半で述べた平衡計算法(以下，P.E.法と略記する。)を，物質境界決定法にはSLIC法を適用している。

筆者ら[3]は，別途，Vorobievらの圧力平均化法(以下，P.A.法と略記する。)やYoungの物質境界決定法等の計算を実施することにより，細かい計算メッシュを用いた際の異常な圧力分布や物質境界がP.E.法の適用によって生じることを示した。また，それらの結果から，同時に以下のような問題点も指摘できる。

Fig. 2に1 mmの計算メッシュによる爆薬近傍の圧力履歴を示す。a～eの出力点は初期の計算セル内に爆薬物質を含む位置であるのに対し，xとyは空気のみを含む位置である。上段に示す(a) P.E./SLIC法を適用した結果では，空気の領域の圧力形状に明確なピーク形状が存在しない。C-J圧力の空気領域への伝播による急激な減衰を考慮したとしても，明らかに数値的な原因による鈍りが生じているものと考えられる。それに対して，下段の(b) P.A./Youngの方法では，xとyの時刻歴もピーク形状を捉えている。また，計算初期に爆薬と空気が混在する計算セルである

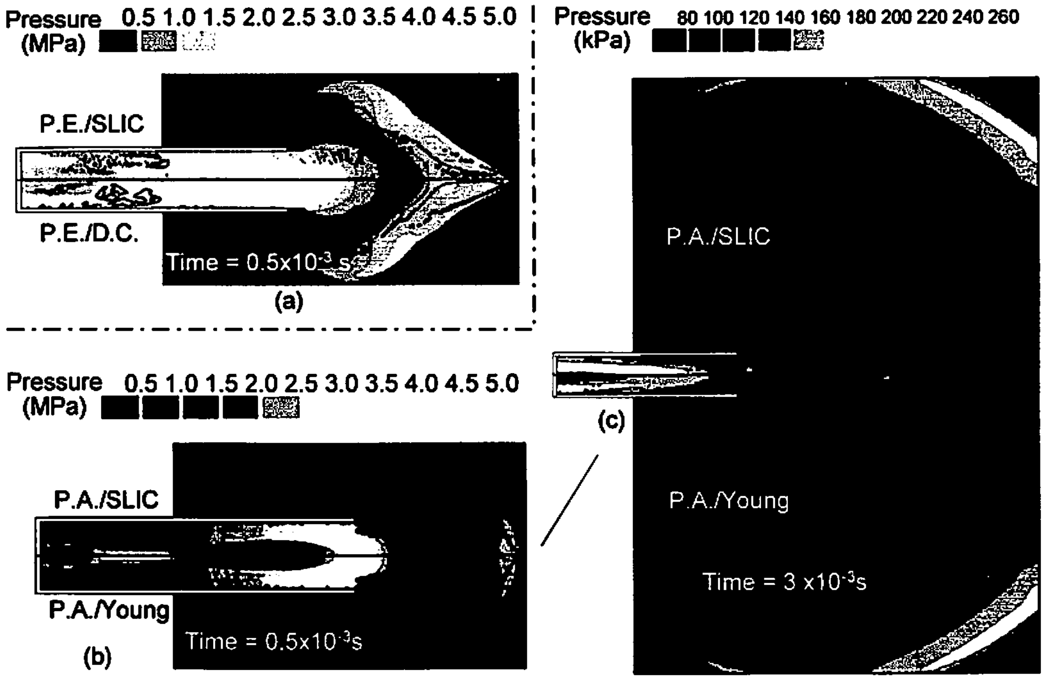


Fig. 3 Comparison of the pressure contours among different schemes.

eについても，前者の結果は同様の原因によって圧力ピークが鈍っているものと考えられる。

尚，文献[3]でこれらの結果の相違が，SLIC法とYoung法の違いによる物質境界決定法に起因するものではないことを確認している。

(ii) 円筒外圧力

Fig. 3に複数の計算条件による，0.5msと3msにおける圧力分布と物質境界を示す。(a)と(b)に示した，共に0.5msにおける二図を比較すると，衝撃波面付近における圧力分布と物質境界形状に大きな違いが見られる。(a)の結果では，先端が著しく先鋭な形状をしている。(a)の上下の結果は，圧力評価には共にP.E.法を用いているが，物質境界決定法には，上段はSLIC法を，下段はDonor Cell (D.C.)法を適用している。物質境界決定法の違いによる境界形状に差異は見られるが，先端形状の異常な突出には変わりなく，圧力分布はほとんど同一である。

一方，P.A.法を用いた(b)の結果では，衝撃波面付近の異常な突出は見られない。さらに同一の条件で3msまで計算を継続した(c)の結果でも，ほぼ球状に圧力波面が広がって行くことが確認できる。また，(b)，(c)の結果共に，SLIC法とYoungの方法の結果の間にはほとんど差異が見られない。

(i)，(ii)の解析共に，これまでに示した結果は全て1mmの最も細かい計算メッシュを基本とする結果である。しかし，本問題のような実験系で1mmの精度で軸対称性を保つことは極めて困難である。一方，このような衝撃波面付近の異常な形状は，例えmultiple material Euler圧力評価方法に起因するにしても，このような理想的な軸対称系で初めて生じることに注意する必要がある。計算機能力の十分でなかった時代には経験し得なかった現象である。羽場らは円筒内を一次元平面衝撃波として計算すると実験結果に近くなることを報告しているが，これは半径方向に計算メッシュを設けないことを意味しており，傾向としては筆者らの結果と整合する。

Fig. 4に4mmの計算メッシュを基本とした，P.A.，Youngの各方法によって計算したⅠ～Ⅴの出力点における圧力履歴を示す。但し，過剰圧ではなく絶対圧である。図中，プライム記号で示した対応する位置での

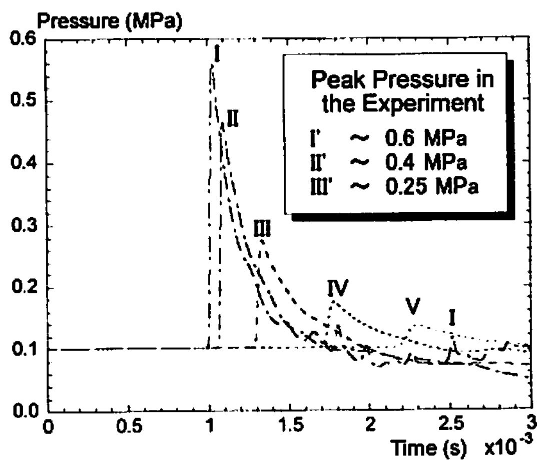


Fig. 4 Pressure histories outside the tunnel.

実験によるピーク圧力は，比較的計算結果と近似する。別途，筆者らが実施した1mmのメッシュによる計算では，位置Iのピーク圧が約0.7MPaとさらに高くなることも考慮すると，今後，実験における軸対称性の精度を十分に評価をした上で解析と比較することが重要であると考えられる。

3. 流体と構造物の相互作用解析法

緒論で述べたように，一般的には，流体の模擬にはEulerの方法が適しており，固体の模擬にはLagrangeの方法が適している。従って，一つの問題において，Eulerの方法とLagrangeの方法が同時に適用することができ，それらの間の相互作用を計算することができれば，多相媒体のより広範な問題に対して適用することができる。このような見地からEulerとLagrangeの相互作用計算法について記述した後，流体と構造物の相互作用を伴う三次元爆発問題解析モデルと解析結果を示し，その妥当性と有効性について議論する。

3. 1 LagrangeとEulerの相互作用計算法

LagrangeとEulerの方法の基本的な違いは，前者の場合には，物質の変形と共に座標系(計算メッシュ)が動いて行くのに対して，後者の場合には，座標系は空間に固定でその上を物質が動くことである。従って，Lagrangeの方法の場合には，計算メッシュの表面自身が物体の表面を意味するのに対して，Eulerの方法の場合には，物質の全く存在しない"void"領域が存在し得るため，物体の表面がどこに存在するかは必ずしも自明ではない。一方，相互作用は物体の表面を介して行われる力の交換であることを考えると，Lagrangeメッシュの表面に相互作用を行わせる面を設定し，その面を通じて空間的に隣接するEuler座標系の計算メッシュ内に存在する物質と力の釣り合いを計算するのが妥当であろう。このように，Lagrangeの方法でモデル化した物体とEulerの方法でモデル化した物体を相互作用させるためには，力学的計算をする以前に，相互作用させるべき領域を含む領域にEulerメッシュを切って，各メッシュを空間的に重なりを持つように設定し，Lagrangeメッシュの表面に設定した相互作用面の内部にEuler物質が入り込むことを抑止する必要がある。Fig. 5 (a)にその様子を表す模式図を示す。このLagrangeメッシュとEulerメッシュ(物質)との間の力の平衡条件は，以下のように計算される。

EulerとCauchyの応力原理は，「閉曲面Sの上で応力ベクトルを定義し，Sの内部の空間を占める連続体へのその作用が，外部の連続体の面に対する作用に等

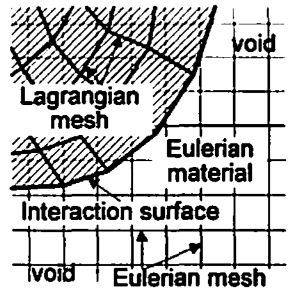


Fig. 5(a) Schematics depicting the Euler/Lagrange interaction.

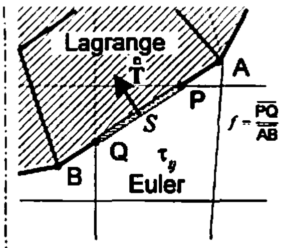


Fig. 5(b) Calculation method of Euler/Lagrange interaction based on Cauchy's formula.

しい。」と表現される。これはNewtonの「作用反作用の法則」の発展であるが，さらに，「連続体内部の応力テンソルτ_{ij}を知れば，外向きの単位法線ベクトルnを持つ任意の面に作用する応力ベクトルを求めることができる。」ことを意味するCauchyの公式を導くことができる。

$$\overset{n}{T}_i = n_j \tau_{ji} \tag{2}$$

この公式をFig. 5 (a)に対して適用し，LagrangeメッシュとEulerメッシュ間の相互作用計算を行う。すなわち，Fig. 5 (b)に示すように，ある時点でLagrange座標系とは独立に定まる，相互作用させるべきEulerメッシュ内の応力テンソル，及びそのEulerメッシュを横切るLagrangeメッシュ(相互作用面)の法線ベクトルからその面に働く応力ベクトルを求める。その力をLagrangeメッシュの隣接ノード点AとBに与える。逆にその反力をEuler物質に作用させる。例えば，点Aが注目するEulerメッシュの内部にある場合には，点Aが点Pに一致すると共に，点Bと反対側のLagrangeメッシュに対しても同様の計算を実施し，Lagrangeノード点とEulerメッシュに対する力の寄与分を加算する。このような計算を行うため，LagrangeとEulerの相互作用計算では，一つのEulerメッシュの中に複数のLagrangeノードが存在するようなメッシュを設定すると，その細かさに相当するだけの計算精度が期待できないだけではなく，不安定性の原因ともなることに注意する。

3. 2 三次元の爆発による構造物応答解析

藤本ら[10]は，地中式火薬庫内での爆発問題を二次元衝撃解析コードPISCES™-2DELK[11]を用い，LagrangeとEulerの相互作用による流体構造物連成解析として実施している。コンクリートと岩盤層・表土の変形をも考慮した解析である。実際の系とは異なり二次元軸対称系による解析というモデル化上の制約は

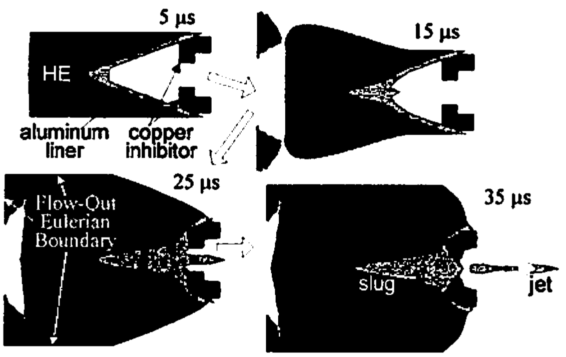


Fig. 6 Trapping process of the slug by the inhibitor simulated numerically.

存在するが，1980年代前半の解析としてはかなり先進的な解析であるといえる。爆風圧や，表土の速度履歴等も実験結果とかなり良く一致している。

また，片山ら[12]は，AUTODYN®-2Dコードを用いて，成形爆薬(shaped charge)の解析を行っている。この場合にも，爆薬とライナーはEulerの方法で模擬し，ケーシング，ブロック等の構造材はLagrangeの方法で模擬している。Fig. 6に解析結果の一部を示す。インヒビターの変形によってジェットが短く切断され，一部，中空のジェットが発生している様子がわかる。解析では，さらに前方に存在する防護板(アニュラー形状)を通過した後，標的板に衝突するまでの解析を実施している。防護板はLagrange法，標的板はEuler法によって模擬しているが，標的の貫通口形状は実験結果と比較的良く一致している。

このように，二次元においては第3. 1項で述べたLagrangeとEulerの相互作用計算法は，既にかなり良く検証されていると考えられる。しかし，三次元計算ではコードのアルゴリズムの複雑さに加えて，計算機の膨大な記憶容量と高速処理能力を必要とするため，これまでほとんど試みられることがなかった。しかし，近年の計算機能力の驚異的，かつ持続的な進歩は，漸くこのような解析を可能にしつつある。以下，そのような計算例を示す。

3. 2. 1 想定問題

本項で述べる問題は，現実の問題を模擬したものではなく，空中で爆薬が爆発しその爆風が鋼鉄容器と鉄筋コンクリートを変形させるという観点から机上で設定したものである。Fig. 7に解析モデルと代表的な寸法を示す。図中に表示した座標系で，y方向は対称性を仮定し半体系のみを計算領域とした。片端面に開口部を持った鋼製円筒容器の中で，標準状態の空気中に配置された50kgの球状TNT爆薬が，中心で点起爆され，その円筒容器及び開口部方向前面に設置された鉄筋コンクリート壁に変形を及ぼす問題である。床面は完全に剛であるものとし，円筒容器は半体系分二本の鋼材(0. 1×0. 1m，肉厚0. 02mの中空断面，Fig. 7では破線で表示。)で床面に拘束されるが，容器と床面は自由すべり境界条件にあるものとしている。鉄筋コンクリート壁も縦鉄筋の下部で床面に拘束されているがコンクリート(配筋状態を示すため，図中，半透明表示。)は拘束されないものとする。鉄筋(0. 008mφ)は前面と背面共に0. 025mのかぶりで配筋されているものとしている。

3. 2. 2 解析モデルと解析手順

本解析には，三次元衝撃解析コードAUTODYN®-3D[1]を適用した。流体構造連成解析を実施するに先立ち，一次元球対称系でmultiple material Euler法による爆ごう計算を実施した。すなわち，全解析領域は半径0. 44mで，中心から0. 19mまではTNT爆薬が，残りの領域には標準状態の空気が詰まっているものとし，半径方向には全部で300の等間隔メッシュを設けた。爆ごうが終了し，空気中に伝播した衝撃波が半径0. 44mの位置に到達する直前(0. 07ms)に一次元予備解析を終了させた。TNTにはJWLの状態方程式[9]を適用し，空気は理想気体を仮定した。

AUTODYN®-3D の Version 4 では Godunov 型の multiple material Euler 法[13]が利用できるが，Lagrange法との相互作用を考慮できない。一方，FCT(Flux Corrected Transport)[14] Euler法も利用可能であり，この場合にはLagrange系と相互作用させることができる。但し，FCT Eulerの定式化では，a) 単一物質のみを考慮，b) 材料強度は非評価，c) 理想気体の状態方程式のみ利用可能，という制約がある。そのため，本解析では，一次元予備解析で求まった計算終了時のTNTと空気の状態量の空間分布を，Fig. 7のような三次元空間にRemap(旧メッシュから新メッシュに，質量，運動量，エネルギーの保存性を考慮して物質を再配分する操作)すると同時に，TNTの状態方程式を空気と同じ理想気体の状態方程式に切り替える操作を行った。TNTのJWLの状態方程式のうち，理想気体の比熱比に相当する第三項に含まれる数値は1. 35であり，空気の比熱比である1. 4に比較的近い。しかし，予備解析の終了時点で，TNTの半径は約0. 40mまで広がっているが，その平均密度は初期の約1/10に過ぎず，JWLの状態方程式の凝縮相の圧力評価項である第一項と第二項を無視することによる誤差を評価する必要がある。圧縮率0. 1という平均密度で評価すると，第三項の圧力寄与は，第一項，第二項の，それぞれ約10^{15}，10^{3}倍もあり，第一項と第

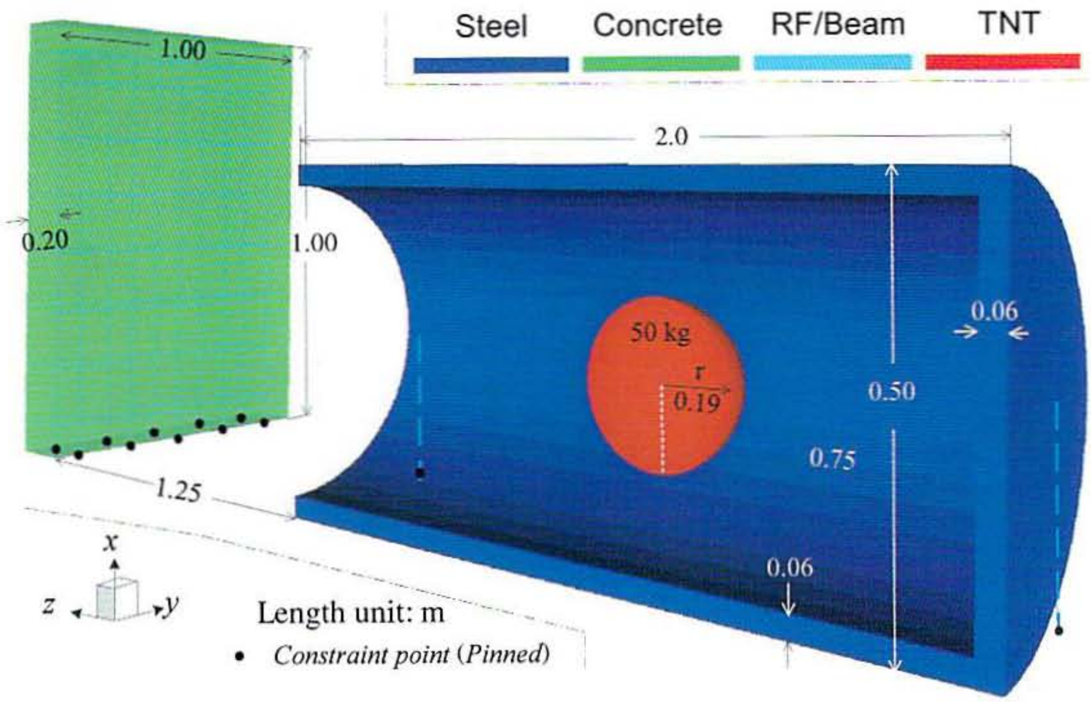


Fig. 7 Numerical analysis model and its geometrical dimensions.

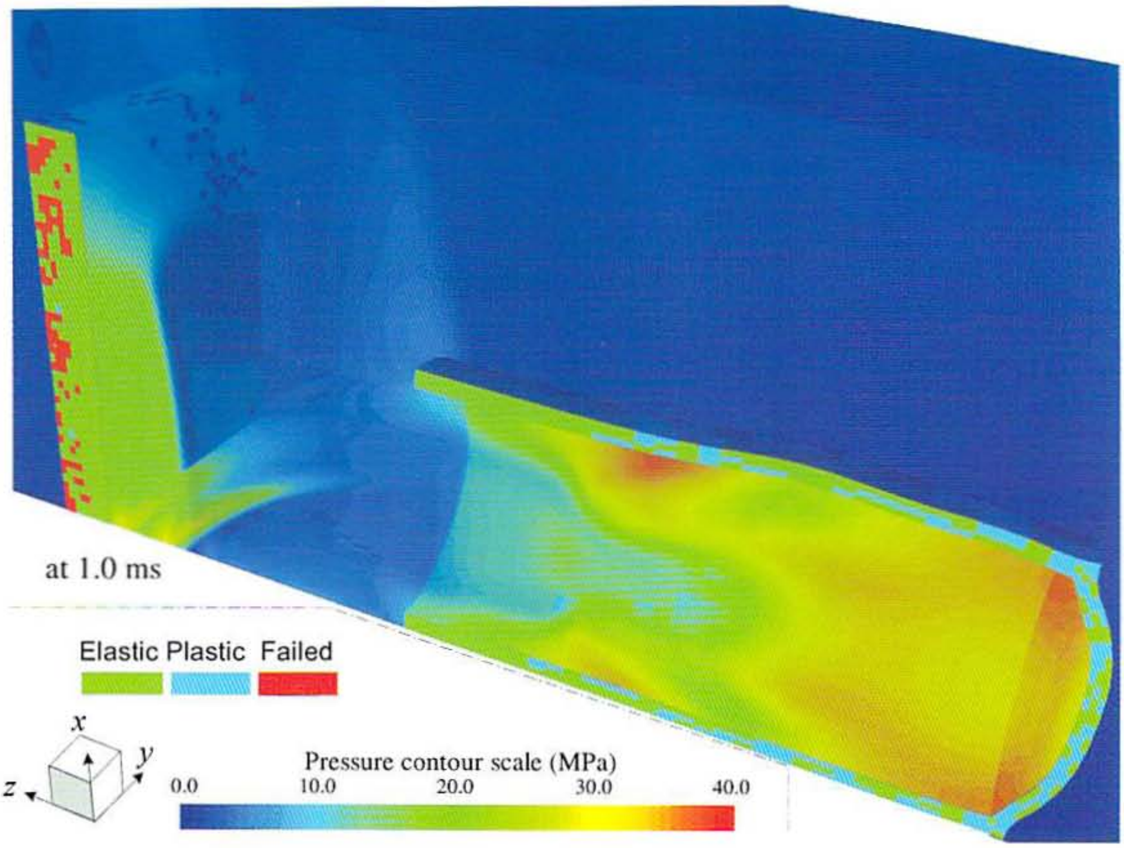


Fig. 8 Transparent pressure contour in the fluid and material status map in the structures.

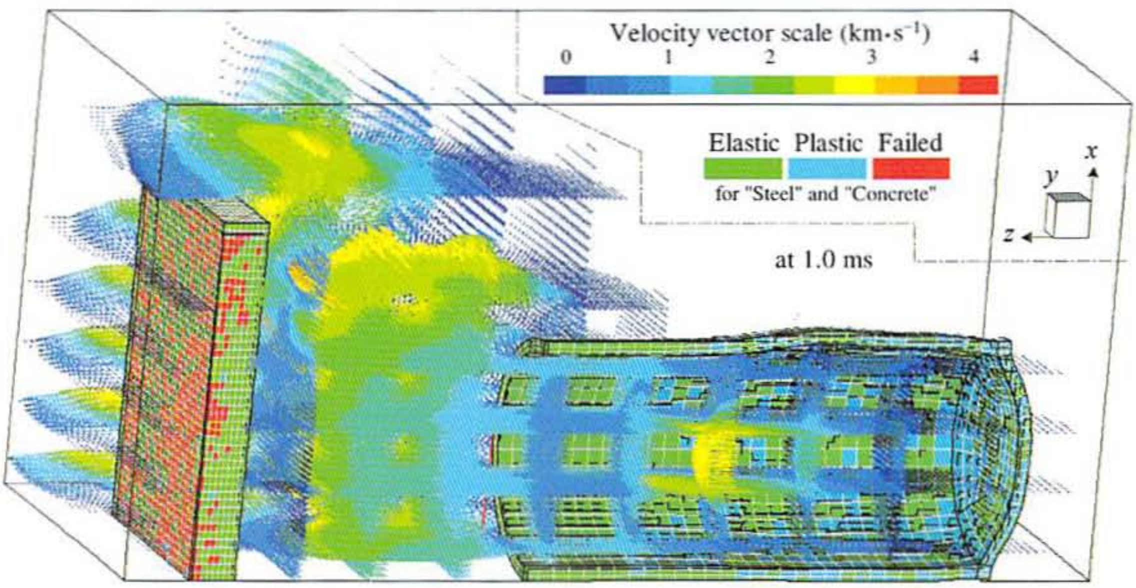


Fig. 9 Velocity vector distribution in the fluid and material status map in the structures.

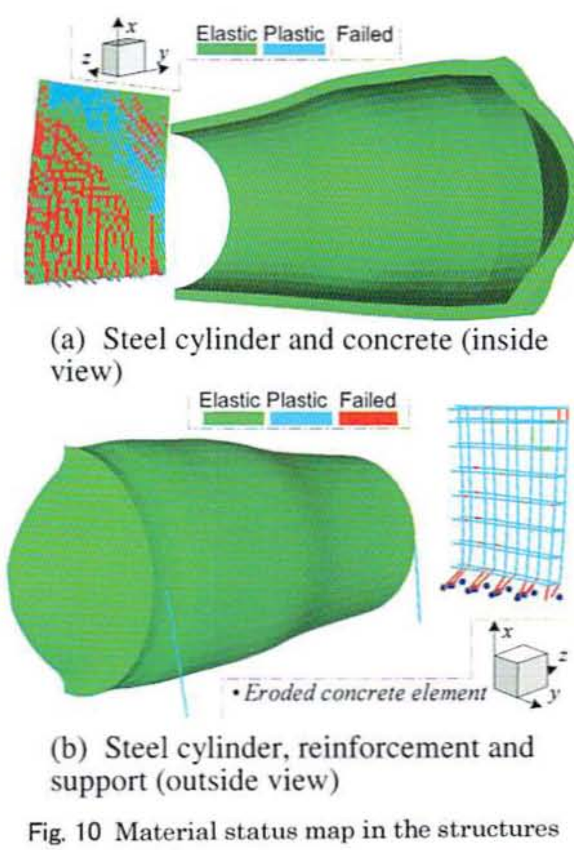


Fig. 10 Material status map in the structures at 5. 0 ms.

二項を無視することによる誤差はかなり小さい。しかし，TNTの中心部分では予備解析の計算終了時点でも$1\times10^3 kg\cdot m^{-3}$程度の密度を保持している点に注意する。

以上でも述べたように，TNTの爆ごう生成物と空気に対してはFCT Euler法を，鋼製容器とコンクリートに対してはLagrangeの方法を，鉄筋と容器支持材にはLagraneの方法の一種であるビーム要素を適用した。ビーム要素とLagrange要素の座標値を同じくする各ノード点は結合境界とした。また，FCT EulerとLagrange表面には自動的に相互作用境界条件が適用される。

鋼製容器に対しては1006 Steelに対する，Mie-Grüneisen型Hugoniotの状態方程式とJohnson-Cookの構成則[15]を適用した。また，-1.2GPaの静水圧でスポール破壊が生じるものと仮定した。コンクリートには動的CAP則[16]を適用し，そのスポール強度には-2.5 MPaを用いた。鉄筋と容器支持材は弾完全塑性体とし，降伏応力0.2GPa，限界ひずみ20%を仮定した。尚，これらの物理的材料条件の他に鋼製容器は200%，コンクリートは50%の幾何学的ひずみにより初期のLagrangeグリッドからは切り離され(数値的エロージョン)，それ以降，その時点の慣性力を保持したノード点として扱われる条件を適用した。

3.2.3 解析結果

Fig.8に，三次元解析開始から1.0ms経過後，従って起爆から1.07ms後のFCT Euler領域(空気とTNT爆ごう生成物)の圧力分布と各構造材の状態を表す鳥瞰図を示す。圧力分布は，計算領域全体ができる限り見通せるように半透明に表示している。鋼製容器内に40 MPa程度の圧力が評価されているのに対し，コンクリート前面下部にも30MPa程度の反射圧が評価されている。鋼製容器は爆源付近を中心に大きな変形を示し，広域で塑性に達している。コンクリート背面ではスポール破壊が生じており，この時点よりもかなり早い時点に衝撃波が通過していることが覗える。

Fig.9は，同じく1.0msのFig.8とは視点を変えた鳥瞰図で，FCT Eulerの領域の速度ベクトル分布と構造材の状態を表している。この場合には，Eulerグリッドのxとz軸に垂直な平面における速度場を間欠的に表示することによりある程度全体像が見えるように工夫している。コンクリート背面はかなりの部分で破壊に至っているが，顕著な全体的変形は見られない。

Fig.10は，5.0msの構造系のみの状態を表す図である。上段(a)は鋼製容器内側から，下段(b)は外側から鳥瞰した図であるが，(a)ではコンクリートの状態を表示，(b)では非表示にして鉄筋の状態が見えるようにしている。但し，床面の鉄筋コンクリート付近に散在する点は，数値的エロージョンによってコンクリートのLagrangeグリッドから切り離されたノード点である。鋼製容器は1.0msでは広域で塑性に達していたのに対し，この時点では全領域で応力緩和のため弾性戻りが生じている。構造材の場合，一旦破壊が生じるとその領域は回復しない条件を適用しているため，鋼製容器は破壊には至っていないと判断できるが，1.0 msの時点に比べてさらに変形が進んでいる。コンクリートに関しては，下部領域で対称面(y=0)を中心にz方向に大きなずれが生じている。それに対して鉄筋は床面で拘束されているため，下部で破壊し大きな伸びを生じている。

Fig.11は，一次元予備解析時の圧力履歴であり，中心からA，B，…の順に位置しており，DはTNT表面に位置する。点Aは起爆点近傍でC-J圧力が十分には達成されず，かつ中心での衝撃波収束効果による圧力上昇の影響を受けるため振動を繰り返している。TNTのC-J圧力は約21GPaであると考えられるが，計算では約15GPaが評価されている。

Fig.12に，FCT Euler内の圧力と鋼製容器内の速度履歴を示す。#1～8はFCT Euler内，#9～12は鋼製容器内の点である。(b)の鋼製容器内の速度履歴を見ると，#9～11のx方向に関しては全て約1.5ms以降は0付近で振動しており，Fig.8，9に示した1.0msの少し後で半径方向の塑性変形が終了し，弾性振動を続けることがわかる。それに対して，z(軸)方向の速度履歴は，約2ms以降振動を続けるが負の速度を保持して変位が大きくなることを示している。これは，容器の拘束条件が支持構造物で固定されてはいるが爆風圧

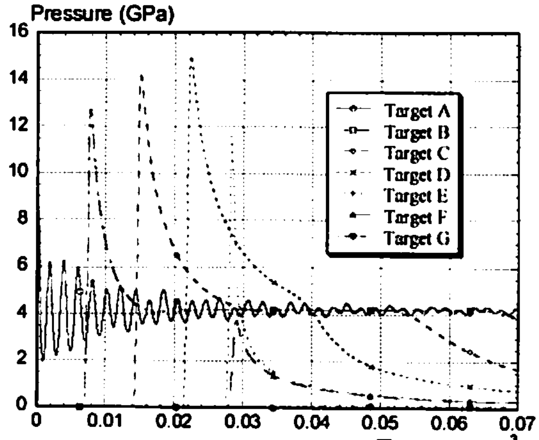
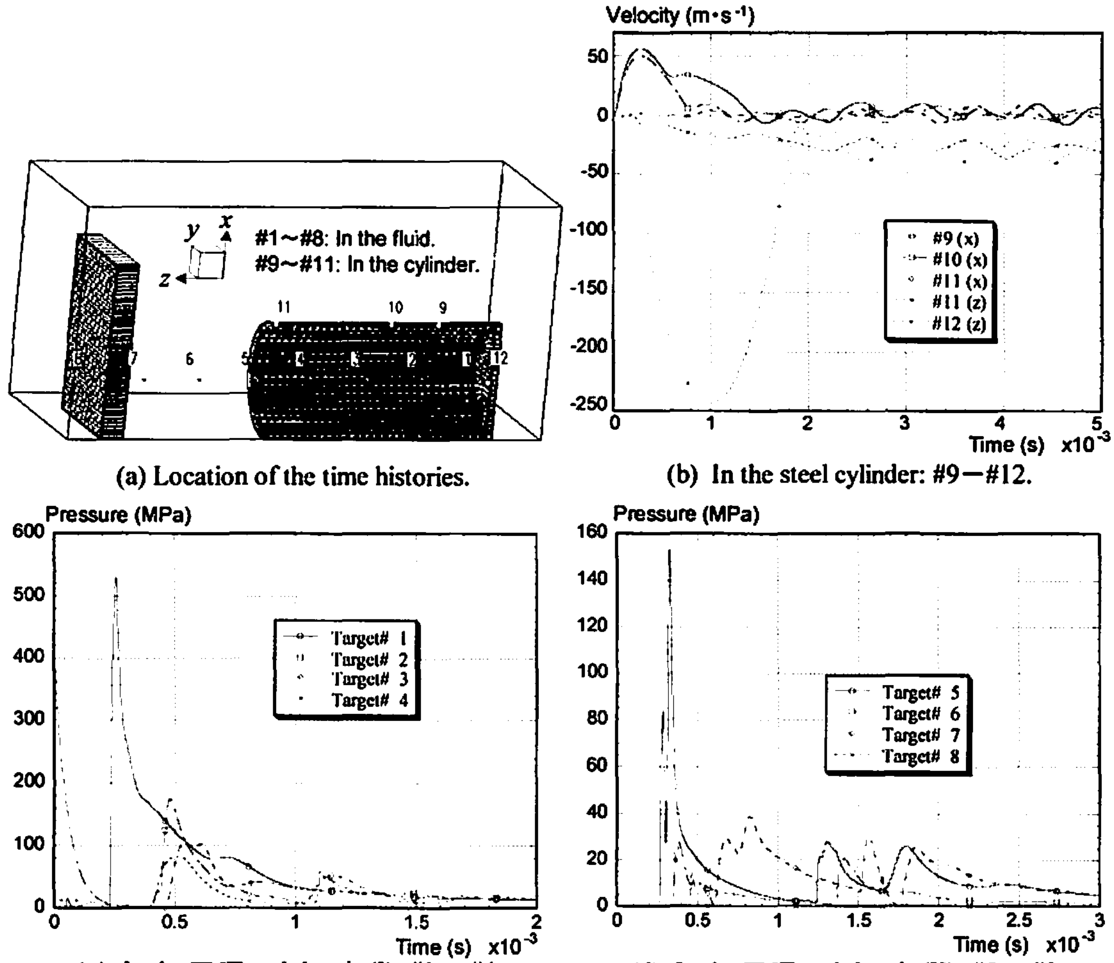


Fig. 11 Pressure histories in the TNT during one-dimensional preliminary analysis.



(a) Location of the time histories.　(b) In the steel cylinder: #9−#12.

(c) In the TNT and the air (I): #1 −#4.　(d) In the TNT and the air (II): #5 −#8.

Fig. 12 Velocity and pressure histories at selected points.

が過大なため，右側に30m・s^{-1}程度の速度で吹き飛ばされていることを意味している。また，容器端部中心の#12の場合，約2msまでの間に極めて大きな変形を被ることを表している。(c)，(d)は，空気と爆ごう生成物中の圧力履歴であるが，#1は三次元解析開始時に一次元解析からRemapした領域内にあるため，計算初期から400MPa程度の圧力を評価している。#5等の時刻歴で，最初のピーク圧の直後にさらに大きなピークを評価しているのは，爆源から直接伝播した第一波の圧力よりも，容器右端部で反射した圧力の方がより多くの領域で解放されたエネルギーが集積された後に伝播してくるためピーク値，作用時間共に大きくなることを意味している。また，(d)の時刻歴は，#7，8の位置ではこれら二つのピーク圧力が1.0ms以前に通過することを示しており，Fig.8，9で述べた1.0msにおけるコンクリート背面のスポール破壊についても首肯できる。

4. 結　言

以上において，気相と凝縮相を含む複雑な物理系における爆ごう現象，それに引き続いて生じる衝撃波伝播，さらには構造物の過渡応答現象を数値解析によってシミュレートする方法を示し，その方法が物理現象の解明と理解にとって極めて有用であることを示した。

2.で見たように，二次元軸対称系による解析は，モデル化手順や計算が簡便なだけではなく結果の見方も簡単で非常に有効な手段であり，計算機とソフトウェアの能力が向上した今後も活用すべきである。しかし，軸中心上における収束効果という原理的に避けがたい問題を含んでおり，メッシュ依存性との関係において特に注意が必要である。さらに，解析者の立場からは，実験者に対し，実験では理想的な軸対称系が実現し得ないという認識に立った上で，より理想的な軸対称系での実験を実施・公開されることを期待して止まない。2.で示した二次元計算も，近年の計算機の驚異的進歩なくしては考えがたい計算であるが，3.で示した三次元計算はさらに大規模な計算である。全ノード数は50万を超え，時間積分回数も13,000に及ぶ。しかし，Euler領域にすると170×70×50程度の計算メッ

シュに過ぎず，この間に複雑な三次元構造物を包含することは解析精度上困難である。2. で示した二次元計算は，軸方向に約1,000のメッシュを設けているが，この場合にも決して十分とはいえない。今仮に，今回示した三次元計算を各方向に10倍のEulerメッシュを設けて計算すると単純計算では記憶容量，処理時間共に1,000倍を必要とする。現実には，相互作用や時間積分刻み幅の問題等があり，さらに大きな処理能力を必要とするものと予測される。しかし，現在の状況は，決して悲観するにはあたらない。3. でも触れたように，僅か15年程前までは，ここで示した1/100以下の計算量の問題を当時数十億円のスーパーコンピュータを用いて計算していたのに対して，現在では数十万円のパーソナルコンピュータで実施できるからである。

今後の計算機とソフトウェアの持続的進歩に期待する。また，モデル化方法を工夫することによって漸く現実的な三次元解析が実施できる時代に突入しつつあるということができる。

最後に，3. で示した三次元計算は，AMD Athlon™ 1.3GHz，主記憶640MB，OS：Windows Meで約60時間を要したことを付言する。

文　献

1) 片山雅英，高圧力学会誌『高圧力の科学と技術』，Vol. 8，No. 4，pp. 251-259(1998).
2) 中山良男，松村知治，宮本健一，飯田光明，吉田正典，火薬学会誌，Vol. 60，No. 6，pp. 293-299(1999).
3) 片山雅英，田中克己，平成12年度衝撃波シンポジウム講演論文集，pp. 617-620(2001)，衝撃波研究会・宇宙科学研究所・流体科学研究所.
4) 田中克己，片山雅英，火薬学会2001年度年会講演要旨集，pp. 21-24(2001)，中央大学駿河台記念館，火薬学会.
5) O. Y. Vorobiev and I. N. Lomov, Advances in Computational Engineering & Sciences Vol. 1, pp. 922-927(2000), Tech Science Press.
6) W. F. Noh and P. Woodward, UCRL-52111(1976), Lawrence Livermore Laboratory.
7) D. L. Young, "Numerical Methods for Fluid Dynamics," AWRE/44/92/35, pp. 273-285(1987), Atomic Weapons Research Establishment.
8) 羽場政明，松村知治，中山良男，吉田正典，火薬学会誌，Vol. 61，No. 4，pp. 184-191(2000).
9) B. M. Dobratz, UCRL-52997(1981), Lawrence Livermore National Laboratory.
10) 藤本一男，倉持二郎，高根澤吉夫，吉岡巌，美濃口俊生，山口弘，工業火薬協会誌，Vol. 46，No. 4，pp. 237-244(1985).
11) M. Katayama, S. Kibe and T. Yamamoto, Acta Astronautica, Vol. 48, No. 5-12, pp. 363-372(2001).
12) 片山雅英，　オペレーションズ・リサーチ，Vol. 28，No. 3，pp. 121-125(1983).
13) B. Van Leer, J. Comp. Phys. Vol. 23, pp. 276-299(1977).
14) J. P. Boris and D. L. Book, J. Comp. Phys., Vol. 11, pp. 38-69(1973).
15) G. R. Johnson and W. H. Cook, Proc. 7th Int. Symp. on Ballistics, pp. 541-547(1983), The Hague, The Netherlands.
16) M. Itoh, M. Katayama, S. Mitake, N. Niwa, M. Beppu and N. Ishikawa, "Structures Under Shock and Impact", pp. 569-578(2000), WIT Press.

Numerical simulation method for the complex physical system accompanied by the detonation of the high explosive

Masahide KATAYAMA*, and Katsumi TANAKA**

This paper investigates the numerical analysis methods to simulate the propagation process of the shock wave and pressure wave in the gas and/or liquid media accompanied by the detonation of the high explosive, moreover to simulate the deformation of the structures caused by their interaction with the media. These two methods are discussed in their propriety and effectiveness over the numerical examples. The methods are as follows:

1) The multiple-material Eulerian method, which is effective not only for the multiple-material but also for the multiple-phase medium (both gaseous and condensed material). This part consists of the descriptions on the unique pressure determination method in the multiple-material Eulerian cell, and the material boundary determination method.
2) The coupling method between the Eulerian and Lagrangian methods, which is effective for the complex physical system containing both fluid and structural materials.

For the method 1), we carried out a series of two-dimensional axisymmetric analyses to simulate the detonation of the high explosive in the rigid tunnel and the propagation process of the blast wave outside the tunnel. These analyses, modeling the underground magazine, are discussed about both their effectiveness and existing problems.

For the method 2), we also performed three-dimensional analysis to simulate the detonation of the TNT explosive in the steel cylinder (single open-ended) in the atmosphere, and the deformation and fracture processes of the cylinder and the reinforced concrete wall placed near the cylinder. The numerical results are discussed in their physics over the visualization of the analysis.

The coupled hydrocode AUTODYN® was applied to both the two-dimensional and three-dimensional analyses.

(*CRC Solutions Corp., 2－7－5 Minamisuna, Koto-ku, Tokyo 136-8581, JAPAN
**National Institute of Advanced Industrial Science and Technology, 1－1 Higashi, Tsukuba, Ibaraki 305-8586, JAPAN)