

## (32) 64ビットPCでの爆発現象の数値シミュレーション

Numerical simulations of explosion phenomena using a 64 bits PC

加藤 久敦  
Hisaatsu Kato

工博, 主幹, 日本工機株式会社 研究開発部 (〒969-0201 福島県西白河郡西郷村大字長坂字土生 2-1)

Key Words: explosive, fragment, blast, high velocity phenomena

キーワード: 爆薬、破片、爆風、高速現象

## 1. 序論

パーソナルコンピュータ (PC) の普及により, 高性能 PC が安価で入手できるようになり, PC の OS (オペレーションシステム) も主流であった 32 ビットから 64 ビットに移行しつつある。記憶容量の増大や並列計算による処理速度の向上が計られ, これを活用して数値計算分野においても大規模計算が可能な環境が整いつつある。

爆薬の爆発現象の数値シミュレーションについては, 2次元解析では不可能であった破片の飛散解析が3次元解析では可能になるなど, 数値解析の適用範囲を拡大することが期待できる。

しかし, 現状の 64 ビット機の能力は, メモリ容量の関係で3次元計算でのメッシュ間隔を粗くせざる得なく, 2次元計算の精度を確保することができないなど問題は多々ある。当社では, これらの問題は PC の更なる進歩で解決するものとして, 現状の計算環境で爆薬の爆発現象について数値シミュレーションによる検証を行っている。

本論では, その研究の概要を述べる。

## 2. 爆薬による金属材料の変形 (爆薬近傍の現象)

パイプ形状の鋼材が, 内部の爆薬により破片化する現象は, 弾頭などに応用されており, 製品設計に関わる破片の速度及び質量の算出等, 種々の研究が行われ実用化されている。

しかし, Mott の式に代表されるように, 弾殻材料, 爆薬の特性等が明記されていない (考慮されていない) など, 実績のある既存の材料しか設計計算できない等汎用性に乏しい。

そこで, 新規材料でも設計使用できるよう改良するため, 材料特性が知られている市販材料を利用して, 軸対

称性を有する鋼材が爆薬により破片化する現象について実験によるデータ収集を行いながら数値解析を行い, 設計ツールとして活用できる方法を模索している。

## 2.1 爆薬を内包する円筒形状の鋼材の破片化

## 2.1.1 実験方法

爆薬及び鋼材の特性を汎用化し, 設計データを取得するため, 形状 (内径) を 2 種, 爆薬を 2 種, 鉄鋼材材質を 2 種選定した。試料は, 図-1 に示すように軸対称形状の部品で構成され, 破片化する鋼材 (Steel case) の中に爆薬 (Explosive) を充填したものであり, 試験前にアルミニウム製の起爆装置 (Initiating device) を装着して起爆させる。また, 起爆装置は HMX (シクロテトラメチレンテトラニトラミン) を基剤とする  $\phi 6$  高さ 6 mm のペレット状の爆薬が装着されており, MDC (Mild Detonating Code) にて起爆する機構を有している。

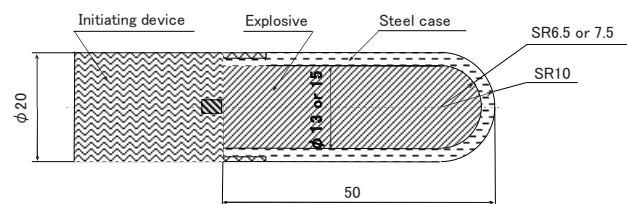


図-1 試料の形状・構造

爆薬は, 表-1 に示すような配合比で製造し, 試料に充填した際の質量を計測して密度を算出する。この時の密度に基づき, 爆速および爆轟圧力を KHT (木原-足田-田中: 爆発・解析コード)<sup>1)</sup> により計算すると共に, JWLL (Jones-Wilkins-Lee) 方程式のパラメータを決定する。この時の定常爆轟速度  $D_{c,j}$  および爆轟圧力  $P_{c,j}$  を同表に併記する。

表-1 爆薬の組成及び爆轟特性データ

Explosive	Component (%)			Density	Dc <sub>j</sub>	Pc <sub>j</sub>
	RDX	Binder	Aluminium	kg/m <sup>3</sup>	m/s	GPa
Comp. A-5	98.5	1.5		1650	8200	27.1
HEI	62	3	35	1850	7470	21.7

一方、鉄鋼材は市販品で材料特性が異なる材料としてSS400とNAK55(簡易金型材)を選定した。これらの材料特性を表-2、試料の組み合わせを表-3に示す。

表-2 鉄鋼材の材料特性

Material	Density	Tensility	Hardness
	kg/m <sup>3</sup>	MPa	Hv
NAK55	7770	1400	410
SS400	7840	440	140

表-3 試料の組み合わせ

Sample	Case		Explosive
	Material	In. Dia.	
NA-1	NAK55	13mm	Comp. A-5
NA-2	NAK55	15mm	Comp. A-5
SA-1	SS400	13mm	Comp. A-5
SA-2	SS400	15mm	Comp. A-5
NH-1	NAK55	13mm	HEI
NH-2	NAK55	15mm	HEI
SH-1	SS400	13mm	HEI
SH-2	SS400	15mm	HEI

これらの試料に起爆装置を組み、図-2に示すようにポリ容器に入れて密封し、回収網に取り付けて水中に沈め、試料を起爆させ、破片を回収後、破片の質量を計測する。なお、その際、起爆装置に使用したアルミニウム合金材料等の弾殻材料以外の異物を取り除く。

(水井戸試験：破片の回収率は、95%以上)

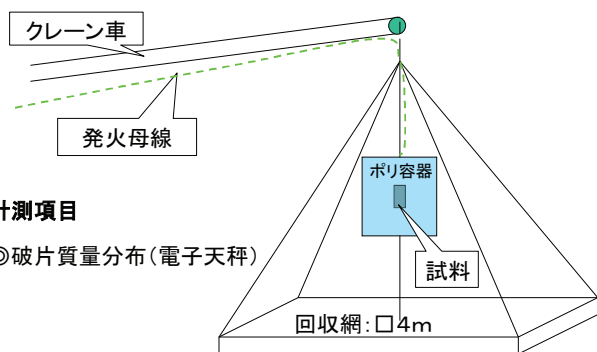


図-2 試験状況図

計測項目

◎破片質量分布(電子天秤)

2.1.2 実験結果

破片は、図-3に示すように、質量が大きいものから順番に質量区分毎に個数と区分毎の質量をカウントすると共に、大きい破片についてはその形状(寸法)を計測した。この結果、爆薬径の小さい方(鋼材の厚みが厚い方)のSA-1がSA-2よりも大きな破片が多いことが判る。これらの結果に基づき、質量順位と1個当たりの質量分布をプロットしたのが図-4であり、この分布を試料毎に対数近似することで総破片数を求め、平均破

片質量を算出する。

一方、これとは別にSA-1及びSA-2については破片の速度を箔的に計測した結果、各々500mmの破片速度は約1300m/s,約900m/sであった。

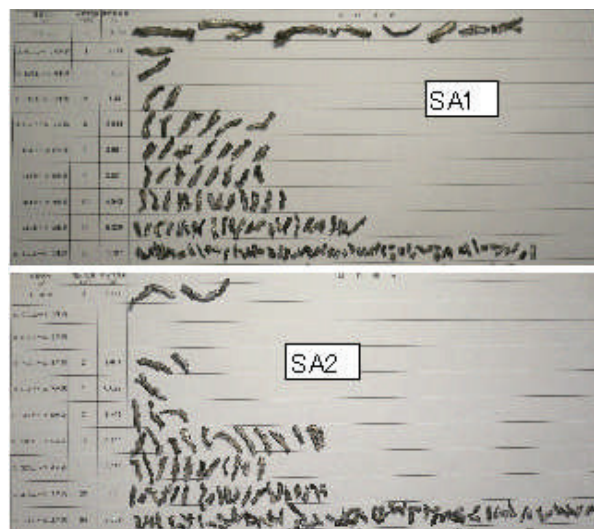


図-3 0.1g以上の破片(SA-1:上図, SA-2:下図)

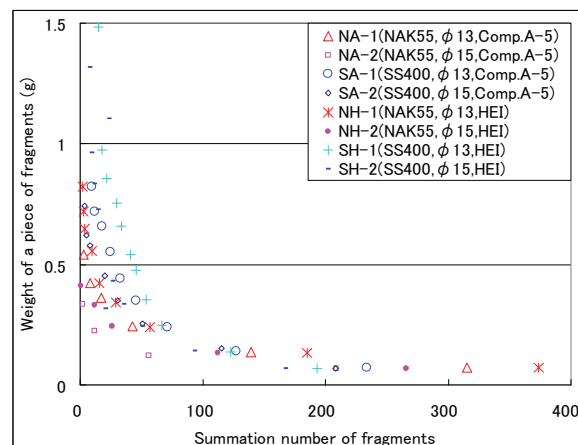


図-4 破片の質量分布

2.1.3 結果の解析(破片計算の汎用化)

破片の設計を行うためには、破片の質量を知る必要がある、この計算手法としては、Mottの式<sup>2)</sup>、松永の式が良く知られている。これらの式は、爆薬に関わる係数から破片質量を求めるものであり、爆薬の種類により係数化されている。本論ではMottの式を選定して比較する。Mottの式は、次式で表される。

$$\mu^{1/2} = B t^{5/6} d_i^{1/3} \left(1 + \frac{t}{d_i}\right) \dots (1)$$

(ただし、 $\mu$  : 平均破片質量の1/2, B : Mott 係数, t : 弾殻厚(in.),  $d_i$  : さく薬径(in.))

また、Mott 係数は、表-4に示すように使用する爆薬により一義的に決められている<sup>3)</sup>。

表-4 各種爆薬の Mott 係数

Explosives (Pressed)	Mott Const.:B
Comp.A-3	1.17
RDX/Wax95/5	1.13
RDX/Wax85/15	1.26
Tetryl	1.45
Explosives (Cast)	
Baratol	2.72
Comp.B	1.18
Cyclotol75/25	1.05
H-6	1.47
HBX-1	1.36
HBX-3	1.72
Pentolite50/50	1.32
PTX-2	1.21
TNT	1.66

表-4の爆薬について標準的な密度を調査し、この時の爆轟特性(爆轟圧力  $P_{cj}$ , 爆轟速度  $D_{cj}$ )をKHTコードにて算出し、Mott 係数と比較したところ、図-5に示すような関係が得られた。

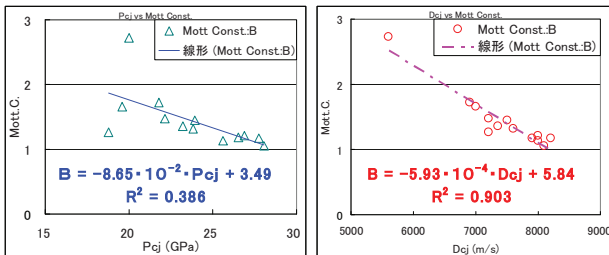


図-5 Mott 係数と爆薬の爆轟特性 (左図: 爆轟速度 vs Mott 係数, 右図: 爆轟圧力 vs Mott 係数)

双方の図を比較すると爆轟速度との相関性が強いことが判り、この関係を直線近似してBの1次式で表すと次式ようになる。

$$B = -5.93 \times 10^{-4} D_{cj} + 5.84 \quad \dots (2)$$

この式を使用することにより、未知の爆薬についても爆轟特性が知れば、Mott の式が使用でき、破片の算定をすることが可能になる。また、破片の大きさは、弾殻の材質にもよることが経験から判っており、当該試験結果から、弾殻に使用される鉄鋼材料の硬度(強度)を考慮した Mott 係数の定式化を検討する。SS400 と NAK55 の差異により Mott 係数が変わることが図-6 左図から判る。しかし、SS400 では爆薬の爆速と逆比例しているのに対し、NAK55 では変化していない。

この現象から、鉄鋼材料の硬度(ビッカース)が Hv400 程度になると伸びが損なわれ、爆薬の威力による影響が一定値になるものと解することができる。一方、図-6 中図の結果から、爆薬の威力(爆速)が大きいほど、硬度による影響が少なくなることが判る。

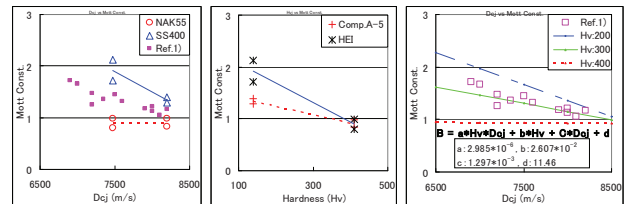


図-6 Mott 係数の定式化 (左図:  $D_{cj}$  に対する Mott 係数, 中図:  $H_v$  に対する Mott 係数, 右図:  $D_{cj}$  と  $H_v$  で Mott 係数を定式化した場合)

これらの結果から、 $D_{cj}$  と  $H_v$  が B と相関関係があるものと判断し、次式のように簡単な数式で B を算出する方法を考えた。

$$B = a \times HvD_{cj} + b \times Hv + c \times D_{cj} + d \quad \dots (3)$$

$$\left[ \begin{array}{ll} a = 2.99 \times 10^{-6} & , \quad b = 2.61 \times 10^{-2} \\ c = 1.30 \times 10^{-3} & , \quad d = 11.5 \end{array} \right]$$

$H_v200, 300, 400$  でプロットした結果と数式を図-6 右図に示す。この図から判るように、Mott 係数のデータは  $H_v300$  程度の鉄鋼材料を使用していることが推察され、実際、通常の弾殻材の硬度は推察値と同程度であり、定式化した値は妥当であると考えられる。

### 2.1.3 数値シミュレーション

これらの現象をコンピュータによる数値計算でシミュレーションするため、通常 Hydro-code (AUTODYN)<sup>4)</sup> のような有限差分法等を利用した解析コードが使用される。近年のパーソナルコンピュータの進歩により、より高度な計算が可能になってきているものの、入力作業等人力に頼る部分も大きく、3次元モデルが必要になることから、可能な限り省力化を計るため、CAD データの有効活用を推進している。これらのデータを自動で要素分割したテトラメッシュ(4面体要素)と比較のため従来通り手作業で作成したヘキサメッシュ(6面体要素)を作成して、3次元形状モデルのメッシュ分割の方向性が数値計算結果に影響するか否か確認する。

なお、要素分割は、6面体要素については一辺が 0.5mm に近くなるよう手動で設定し、4面体要素についても6面体と同様の寸法になるよう、CAD データを自動分割する際に注意して実施した。図-7にこれらのメッシュ分割状態を示す。両者を比較すると判るように、6面体要素の場合には軸及び軸と垂直方向にメッシュが分割されているのに対し、4面体要素の場合には軸方向によらずランダムに分割されている。

また、爆薬の状態方程式の JWL データについては KHT による計算により算出し、鋼材(SS400のみ)の材料特性等の材料モデルは、前回発表したデータを利用した。

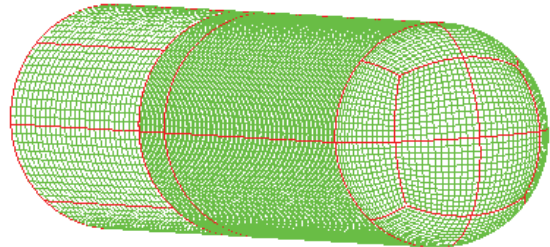
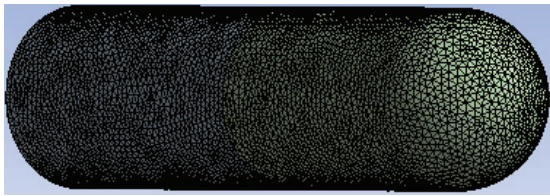


図-7 要素分割図（上図：4面体要素，下図：6面体要素）

### 2.1.3.1 SPH法による計算と実験による速度計測結果

SPH法によりSA-1及びSA-2を計算し、30 $\mu$ s後の鋼材の破片化の状況を速度の絶対値のコンター図として図-8に示す。（スケール：0～1300m/s, 100m/s毎）

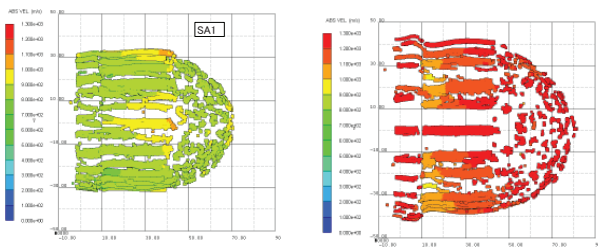


図-8 30 $\mu$ s後の鋼材速度の絶対値コンター図（左図：SA-1，右図：SA-2）

図-8から、SA-1及びSA-2の鋼材の側方（軸と垂直方向）の速度は各々900 m/s, 1300 m/sとなり、実験と計算は同等になることが判明した。また、破片の形状も1/4分割モデルでの計算で見られた境界での異常値（分割面で異常と思われる結果になる）が見られず、SPH法の欠点である境界面の問題は、境界がなければ発生しないことが確認できた。

### 2.1.3.2 ラグランジュ法+SPH法による結果

ラグランジュ法は、メモリや計算時間の圧縮が期待できるため、3次元解析では最も使用したい方法であるが、現状では全てをラグランジュ法で実施することがプログラム上困難であるため、爆薬などにはオイラー法やSPH法を使用して、破片についてはラグランジュ法を採用するなどの手法を利用している。図-9に6面体要素で鋼材を作成してラグランジュ法で計算した場合の30 $\mu$ s後の鋼材速度の絶対値のコンター図を示す。

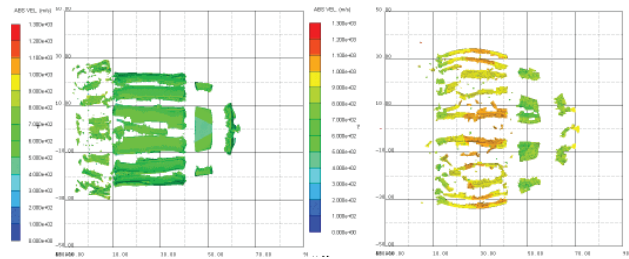


図-9 6面体要素の鋼材速度の絶対値コンター図（左図：SA-1，右図：SA-2）

図-9は、図-8と比較すると鋼材前部の球状部が大きな破片になっていることが判る。これは、図-7の6面体要素の図から判るように、球を分割する際に生ずる繋ぎ面から破壊していることを示しており、プログラム上の問題に起因する。中央部については、図-8と同様な破片形状をしているが、破片速度を比較すると200m/s以上遅くなっており、火薬学会報告<sup>5)</sup>の結果と同様に解析方法に問題があることが判明した。一方、CADデータに基づき作成した4面体要素によりラグランジュ法でSA-1を計算した場合、図-10左図に示すように破片の形状が大きくなる。エロージョンのパラメータを改良して計算すると図-10右図のようになり、破片の形状が細分化し、実測と同様な破片形状になることが判明した。

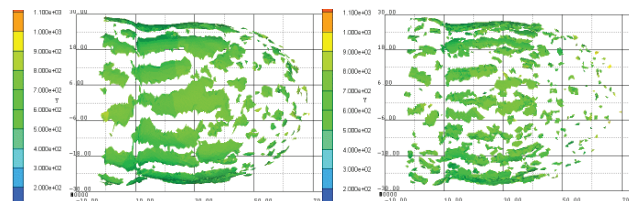


図-10 6面体要素の鋼材速度の絶対値コンター図（左図：元データ，右図：データ改良）

破片化に関する現象を数値計算するための方法は多種あり、それぞれ特徴がある。設計に活かすためには、これらの特長を把握し、費用対効果を考えて実行することが必要である。当社では、廉価な64ビットパーソナルコンピュータ(PC)を利用して、3次元数値シミュレーションの設計への応用を計っているが、入力作業等に多大な時間を費やすため、CADデータの活用等入力作業の効率化を含め、計算コストの削減も念頭に置いた研究を推進しているが、3次元計算に必要なメモリ及び計算時間は共に莫大なものであり、本論で示しているように、定量化できる段階にはまだ至っていない。

## 3. 爆薬による爆風（爆薬から遠方の現象）

爆風現象の数値シミュレーションは、解析対象のスケール（距離及び時間）が大きく、膨大な時間、メモリを

要し、あまり費用対効果も期待できないため、1次元解析を主として計算していた。しかし、PC性能の向上により、安価に解析できる目処が立ってきた。

### 3.1 従来の数値計算（1次元計算）

#### 3.1.1 1次元オイラー法による計算方法

図-1 1に示すように、1次元オイラー法にて1mmの等間隔でメッシュを作成した。爆薬は、実験データ及びJWLデータのあるTNTを1kgで設定し、空気には理想ガスの状態方程式を使用した。また、圧力履歴等を観測するため、表-5に示す位置に観測点を置く。

空気は標準大気圧（1気圧：100 kPa）の初期条件を与え、10m点で大気圧になる物質の出入り自由な境界条件を設定している。

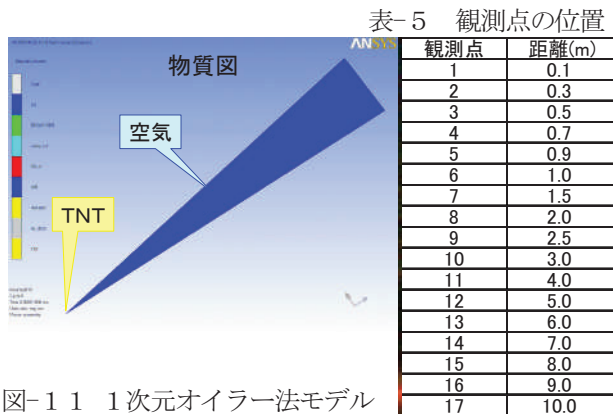


図-1 1 1次元オイラー法モデル

#### 3.1.2 1次元オイラー法による計算結果

観測点で観測された圧力（過圧）履歴を図-1 2、観測点間の距離を観測点のピーク圧点間の時間差で除した値を衝撃波速度とし、観測点間の中間点でこれを表示した図を図-1 3に示す。

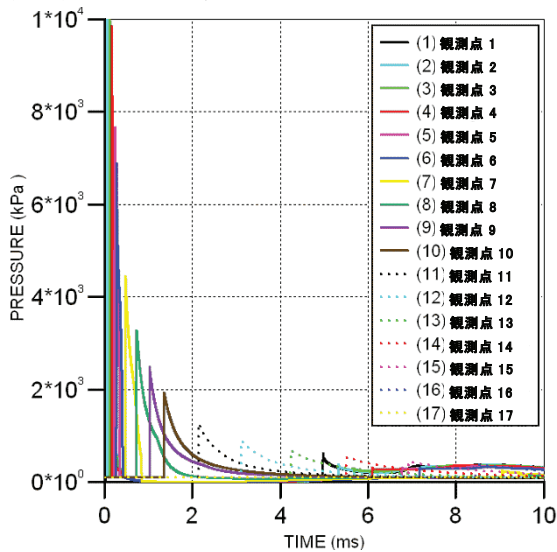


図-1 2 各観測点での圧力履歴図

文献<sup>6)</sup>からKingery及びMITI87のデータ、文献<sup>7)</sup>からNSC(Naval Surface Center)及びBRL(U. S. Army GRL)

のデータを引用し、TNTを1kg設置するものとして起爆点からの距離に対する圧力と本計算結果をプロット(AUTODYN-1D)した結果を図-1 4に示す。

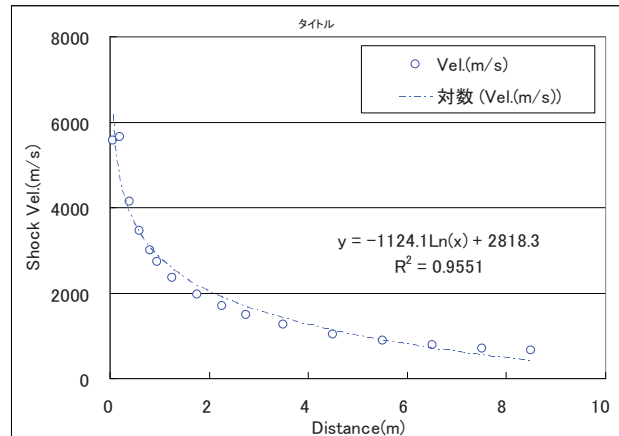


図-1 3 起爆点からの距離に対する衝撃波速度

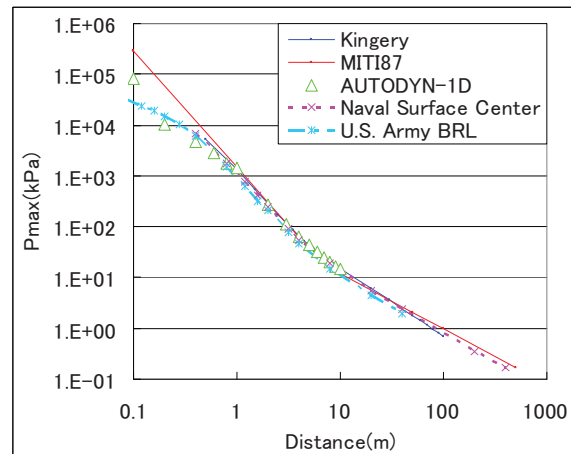


図-1 4 起爆点からの距離 Vs 圧力（過圧）

図-1 4より、1m以上の点では文献データと計算結果が同等になり、0.2から1mでもNSCと同等になることが判明した。

### 3.2 2次元計算

#### 3.2.1 2次元オイラー法による計算方法

2次元軸対称のオイラー法にて10mmを最小間隔とするメッシュを作成した。爆薬及び空気は、3.1項と同様の状態式を使用し、TNTの質量を10kgとなるよう円筒形状(R100×L200)で設定した。図-1 5のように地上500mmに爆薬を設置し、観測点を設定する。オイラー座標の地表面にあたる面は完全反射、その他の面は自由境界（物質が自由に出入りする境界）を設定した。

また、比較のため他の条件は全て同一として、地上から1000mm及び、150mmに中心点を設置したモデル及び、地面を自由境界としたモデル（1次元モデルと同義）も作成し、同一条件で計算している。

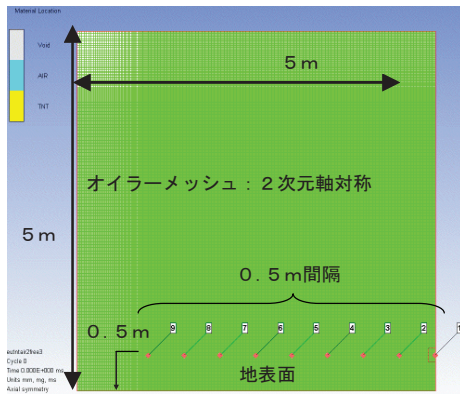


図-15 計算モデル

### 3.2.2 2次元オイラー法による計算結果

地上から500mmの水平面上に設置した観測点での圧力履歴と、地表面から3条件の高さで爆薬を設置した場合の衝撃波速度と距離の関係を図-16に示す。

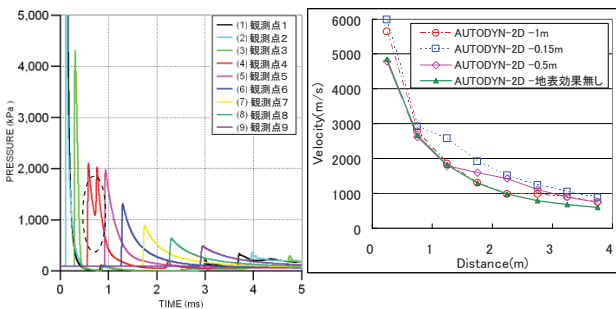


図-16 圧力履歴（左図）、衝撃波速度（右図）

図-16の圧力履歴を見ると、観測点4で圧力ピークが2山あることが判る。これは、地面からの反射によるものと考えられ、それ以降の観測点は直接的な衝撃波と反射波の複合された衝撃波（マッハシステム）となり、地面がない場合よりも圧力が増大している。一方、衝撃波速度のラインを見ると、TNTの設置位置が0.15mの高さでは1m、0.5mの高さでは1.5m、1mの高さでは1m以上起爆点から離れた位置で衝撃波速度の減衰量が小さくなっており、衝撃波速度も地表面の影響により増大していることが判る。

1次元計算及び実験と比較するため、横軸に換算距離を設定し、前項と同様に観測点での最大圧力を描画したグラフを図-17に示す。図-17から判るようにTNTの設置高によって換算距離が1.2程度までは圧力減衰曲線は異なる。しかし、換算距離が1.2以上になると全て同等の値となる。また、換算距離1.6で比較するとAUTODYN-1Dと地表面効果なしの圧力は、各々約400、300kPaとなり、地表面効果ありの計算は約550kPaである。これは、マッハシステムの理論値（2倍）に近い値であり、妥当な値であると考えられる。また、MITI87及びBRLのデータは、約500、300kPaとなっており、上記の計算値と近い値である。

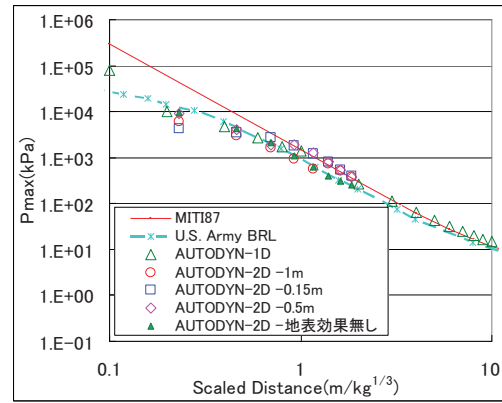


図-17 起爆点からの換算距離に対する衝撃圧力

## 4. まとめ

当研究では、爆薬を使用した製品についての設計ツールとして数値計算の適用範囲を拡大するため、3次元計算等今まで解析対象とはしていなかった複雑な現象についてスポットを当て実験と計算を比較検証した。

この結果、数値計算と実験が良く一致することが確認でき、数値シミュレーションの妥当性が検証できた。

しかし、破片化の解析でもわかるように、3次元計算には莫大な容量を必要とし、現時点でのシステムでは定量化のためには計算精度が不十分と考えている。また、CADデータ等を活用することにより入力作業の効率化は可能になったが、計算時間は2次元計算に比べ桁違いに大きくなり、設計で使用するには疑問がある。

これに対応し、3次元計算での並列化も2CPUで1.4倍に高速化できたものの、プログラム上の制限もあり、全ての計算に適用できるものではない。

今後のPCのハード及びソフトの発展に期待したいが、現状のシステムでも改善すべきものもあるので、各種解析方法を検討し、精度及びコストに優れた数値計算方法を研究したいと考える。

### 参考文献

- 1) 田中克己他, 「KHT2003 使用説明書」, 2003.
- 2) 弾道学研究会編: 火器弾薬技術ハンドブック, (財)防衛技術協会, 2003.
- 3) Ordnance Engineering Design Handbook Artillery Ammunition Series section2 Design for Terminal Effects, ORDP 20-245, 1957.
- 4) ANSYS Inc.: AUTODYN Users Manual Ver 12.1, 2010.
- 5) 爆発により形成される金属体に関する数値研究; 加藤他; 火薬学会春季研究発表講演集, 2010年5月
- 6) (社)火薬学会編, 「エネルギー物質ハンドブック」, 共立出版, 1999年
- 7) Headquarters, Department of the Army, "Fundamentals of protective design for conventional weapons", TM 5-855-1, 1986