

模擬地中式火薬庫の爆発影響評価(第2報)

— 数値シミュレーション —

羽場政明*, 松村知治*, 中山良男*, 吉田正典*

地中式火薬庫内の爆発による庫外爆風の爆発影響評価を行うため、爆発衝撃問題の解析で実績のある商用コードAUTODYN-2Dを用いた数値シミュレーションを行い、爆風現象の解明を試みた。

コードの検証を兼ねて実施したペントライト爆薬の空中爆発シミュレーションでは、爆源からの距離とピーク静水過圧、爆風の到達時間の関係はBakerのテーブル化された文献値とよい一致がみられ、このコードの爆発衝撃問題への有効性が示された。

また、その結果をふまえて行われた地中式火薬庫の爆風伝播シミュレーションでは、3種類の条件で計算が行われた。その3つの計算条件の中で、火薬庫内部での爆薬の配置を仮想的に円盤状に配置した計算条件を採用することにより実験結果と比較して爆風の到達時間は早めに見積もるものの、ピーク静水過圧に関しては良好に爆風現象を模擬できることが明らかになった。

1. はじめに

地中式火薬庫の庫内爆発に関しては、これまで多くの研究報告例がある。

実験的な研究例として、中山ら^{1),2)}は地中式火薬庫の爆発による爆風は薬量、薬室断面積に対する前室断面積の比の影響を受けること、庫外爆風圧は指向性を持ち火薬庫出口の正面方向がもっとも強く、方位角が増加するとピーク過圧が減衰することなどを明らかにした。

数値計算による研究例として、例えば田中³⁾は火薬庫と覆土を剛体と仮定した軸対称オイラー方程式によるシミュレーションを行っている。

また、藤本ら⁴⁾は爆発ガスと地中式火薬庫の構造体であるコンクリート及びその周囲を囲む岩盤の相互作用を商用コードのPISCES-2DELKで計算し、実験との対比を行っているが、数値計算の定量的な評価に関しては課題が残っていた。

同様の計算例として、Kennedyら⁵⁾はSHARCコードを用いて構造体と流体の連成問題のシミュレーションを行い実験結果と比較を行っている。しかしながら、得られたシミュレーション結果は圧力波形など実

験結果を再現できているとは言い難い。

このように数々の報告例があるものの、火薬庫の爆発による爆風現象には火薬庫の構造体の影響など数々の複雑な物理現象が包含されているため、数値計算によりその定量的な評価を行うこと、またその詳細なメカニズム解明までには至っていないのが現実である。

このような背景のもと、本研究では火薬庫の構造、配置を単純化させ、予め数値シミュレーションを念頭に置いて実施された模擬地中式火薬庫の庫内爆発実験²⁾に対応した数値シミュレーションを爆発衝撃問題の解析で実績のある商用コードのAUTODYN-2D⁶⁾を用いて行い、実験結果と比較検討を行った。なお、実験の詳細については、中山らによって火薬学会誌に発表された第1報²⁾をご参照されたい。

2. 数値計算方法

本研究で取り扱う流れ場は、2次元非定常軸対称流れで、流体の粘性、熱伝導はないものと仮定し、基礎方程式にはオイラー方程式を用いる。

爆発生成ガスの状態方程式として式(1)に示すJWL (Jones-Wilkins-Lee)式⁷⁾を使用した。

$$P = A \left(1 - \frac{\omega}{R_1 \eta} \right) \exp(-R_1 \eta) + B \left(1 - \frac{\omega}{R_2 \eta} \right) \exp(-R_2 \eta) + \frac{\omega \rho_0 e}{\eta} \quad (1)$$

ここで P , ρ , e , η はそれぞれ爆轟生成ガスの圧力、

1999年7月2日受理

*物質工学工業技術研究所 極限反応部高エネルギー化学研究室

〒305-8565 茨城県つくば市東1-1

TEL 0298-61-4793

FAX 0298-61-4783

Table 1 JWL parameters and explosive properties for pentolite calculated by Cheetah-BKWC

Explosives	A(KPa)	B(KPa)	R_1	R_2	ω	D(m/s)	P_{CJ} (GPa)	E_0 (J/m ³)	ρ_0 (kg/m ³)
Pentolite	5.859E+8	7.584E+6	4.661	1.082	0.359	7450	22.9	8.57E+09	1640

密度，単位体積あたりの内部エネルギー，比体積 ρ_0/ρ を表す。また ρ_0 は，爆薬の初期密度を示す。さらに A, B, R_1, R_2, ω の各パラメータ(以下JWLパラメータと呼ぶ)はシリンダー膨脹試験により実験的に求められる定数である。第1報で報告されている実験では，使用したペントライト爆薬(PETN50/TNT50 wt.%, 密度1640kg/m³)のJWLパラメータの実測値がないので，今回はCheetah ver. 2.0⁹⁾の中で最もよく使われているBKWC(リバモアライブラリー)より理論的に求めた。それらの6個のJWLパラメータと爆薬の爆轟特性値をTable 1に記す。ここで，Table 1右側の爆轟特性値の D, P_{CJ}, E_0 はそれぞれ，爆薬の爆速，CJ圧，単位体積あたりの爆薬の爆発エネルギーを表す。

本研究において，AUTODYN-2Dで爆轟生成ガスの状態方程式にJWL式を用いた計算では，膨脹がかなり進んだ状態では計算が不安定(密度がきわめて希薄になる領域の発生，内部エネルギーの異常な上昇等)になる状況が発生した。そのため，それを回避する対策としてAUTODYN-2Dのマニュアルに推奨されている方法にならない，爆轟生成ガスが爆薬の初期体積の100倍程度に膨脹後は状態方程式を理想気体に切り替えて解析を行った。その場合，式(1)に示したJWL式の第1, 2項の指数関数部分はほとんど無視できるので，圧力は第3項の寄与によって決まる。第3項は式変形を行うと理想気体の状態方程式に帰着することができる。実際には，ペントライト爆薬の爆轟ガスには固体炭素などの微粒子が多数含まれており，厳密には理想気体として扱うことはできないが，本研究では爆轟生成ガスが爆薬の初期体積の100倍程度に膨脹後には理想気体の状態方程式が使用できるものと仮定する。

また，爆薬を取り囲む周囲の空気は比熱比1.4，初期圧力101.3kPa，初期密度1.225kg/m³の理想気体として取り扱う。

3. 結果と考察

3.1 ペントライト爆薬の空中爆発シミュレーション

3.1.1 計算条件

本研究では，模擬地中式火薬庫で発生する爆風伝播問題を扱う前段階として，解析が比較的容易で，過去

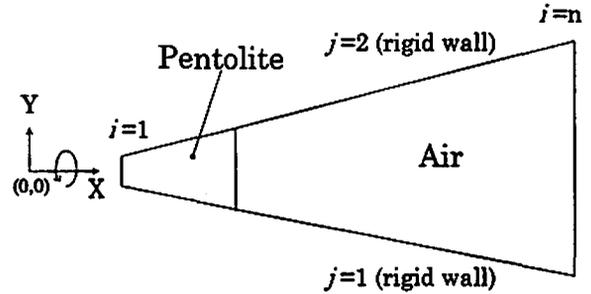


Fig. 1 Schematic illustration of the wedge shaped computational domain for 1D spherically symmetric calculation

の文献等で実験データが豊富にそろっている爆薬の空中爆発問題を取り上げ，AUTODYN-2Dの予備的な検証計算を行った。

AUTODYN-2Dでは1次元球対称問題を2次元軸対称コードで取り扱うため，Fig. 1に示すようなくさび形の格子を使用する。このくさび形の計算モデルでは爆薬中心の微小セル1個分を評価しないことになるため，無視する微小セルの体積が十分小さくなるように，この部分を爆薬の半径の1/10として計算領域を定義した。これは，爆薬の全質量の0.1%以下に相当する。この計算領域の指定方法はAUTODYN-2Dのマニュアルに沿った方法である。

ここでは，原点を爆薬の起爆点として設定した。初期状態として，シミュレーションを行う爆薬の薬量から求めた爆薬半径の内側部分(原点側)の計算領域に爆薬を配置し，その外側の計算領域には，前記の空気の初期条件を与えた。

計算はY方向(縦方向)セル数を1セルに固定し，X方向は第1段階では500mmの範囲を500セルで離散化(X方向の格子点間隔 $\Delta X = 1$ mm)した。第2段階として，ペントライトが初期体積の約100倍に膨脹した起爆後 $t = 26 \mu s$ 後に，ペントライトの状態方程式をJWL式から理想気体の式に切り替える。さらに $t = 229 \mu s$ 後に計算領域を5m ($\Delta X = 10$ mm)に拡大して計算を行った。

3.1.2 計算結果

以下にペントライト爆薬92gの場合の計算結果とBakerの文献値との比較結果を示す。本論文において

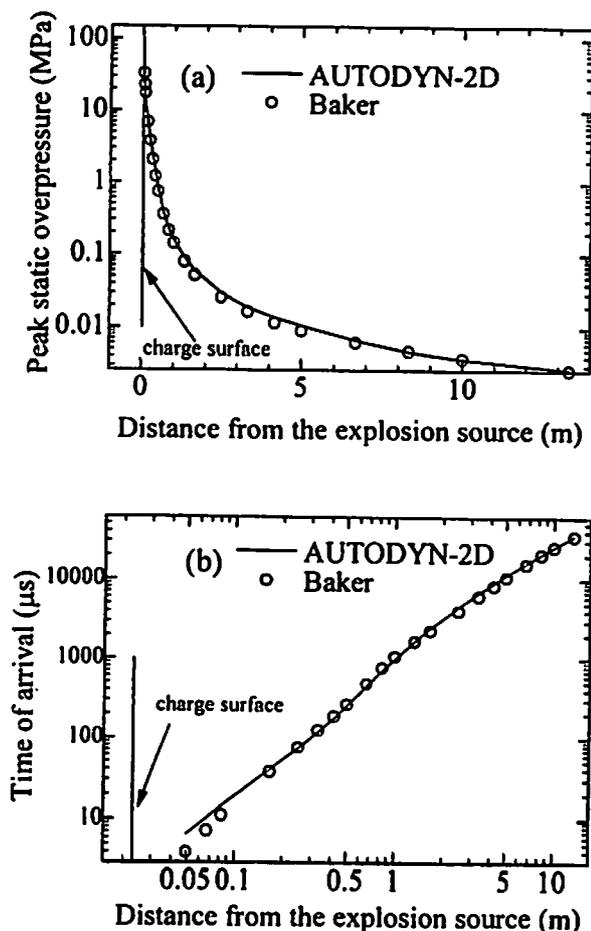


Fig. 2 Spherical explosion of pentolite in free air

Bakerの文献値とは、引用したBakerの文献⁹⁾のTable 6.1, 6.2, 6.3の無次元化された数値にペントライト爆薬92gに相当するエネルギーを代入して有次元化したものを指す。

Fig. 2 (a)は横軸に爆源中心からの距離、縦軸にピーク静水過圧を示したものである。またFig. 2 (b)は横軸に爆源中心からの距離、縦軸に対応する爆風の到達時間を示したものである。

これらの比較からAUTODYN-2Dによる計算結果はBakerの文献値と比較して、ピーク静水過圧、爆風の到達時間も定量的に良好な一致が見られた。したがって、この検証から、爆薬の爆発による爆風解析に関してAUTODYN-2Dの有効性を確認することができたので、これをもとに本論文の主テーマである地中式火薬庫で発生する爆風問題を次に解析することにした。

3. 2 模擬地中式火薬庫で発生する爆風のシミュレーション

3. 2. 1 計算条件

前節の結果を受けて、ここでは本論文の主テーマで

ある模擬地中式火薬庫(以下、模擬火薬庫と略記する)で発生する爆風のシミュレーションを行う。

本研究の計算条件は模擬火薬庫の実験条件²⁾に合わせて設定している。以後、本論文で実験とは特にことわりのない限り、中山ら²⁾の実験を表すものとする。

Fig. 3に模擬火薬庫の計算領域の模式図を示す。模擬火薬庫は内径200mm、肉厚30mm、長さ1000mmの円筒形であり、模擬火薬庫そのものは剛体として取り扱った。また計算はX軸を対称軸として軸対称の仮定を設定した。爆薬は実際に実験で使用した6号電気雷管の重量も考慮してペントライトの重量を92gとした。爆薬は実験と同じ条件になるように火薬庫の奥から50mm離して、さらに軸対称の仮定が成立するように模擬火薬庫の中心軸上に配置した。(Fig. 3 (a) : Case (1-1))

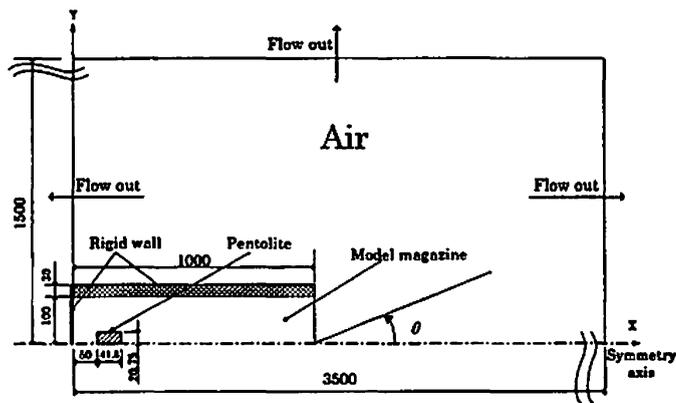
計算はAUTODYN-2Dのオイラープロセッサを用い(1)爆源近傍の計算($X=300\text{mm} \times Y=100\text{mm}$ を 301×101 分割)、(2)模擬火薬庫内部の計算($1000\text{mm} \times 100\text{mm}$ を 501×51 分割)、(3)模擬火薬庫内部+外部($3500\text{mm} \times 1500\text{mm}$ を 351×151 分割)の3段階に順次計算領域を拡張して実行した。実験において電気雷管が爆薬に接する所を模擬するため、爆薬の右端部分の鉛直方向4箇所(対称軸からの距離0.0, 1.0, 2.0, 3.0mm)に起爆点を設定した。

また、後述するように模擬火薬庫内部では、爆風はほぼ平面的に伝播すると仮定した計算を行うためにFig. 3 (b)に示すように爆薬を円盤状に配置したCase (2)の計算、さらに火薬庫内部における中心軸上での爆風の収束効果を検証するために格子点の数を少なくしたCase (1-2)の計算もあわせて行った。

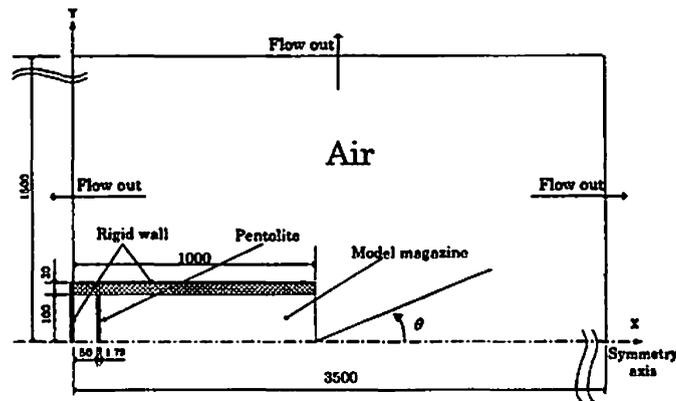
3. 2. 2 計算結果と考察

起爆直後、爆轟波は左方向(模擬火薬庫の奥)に進み約 $5\mu\text{s}$ で爆轟は終了する。そして爆発生成気体は $t=13\mu\text{s}$ 後に火薬庫の深奥部に相当する計算領域の左端の剛体壁で、また $t=23\mu\text{s}$ 後には上部の壁面で反射し、複雑な流れ場を形成しながら、爆風は全体として庫口に向かって伝播する。Fig. 4は起爆から $t=250\mu\text{s}$ 後の模擬火薬庫内部の等圧力線図である。ここでは、0~18MPaの圧力範囲を10等分して表示しており、Fig. 4 (a), (b)はそれぞれCase (1-1), Case (1-2)の結果を表す。

Fig. 4 (a)に示すCase (1-1)の計算結果では爆風の先頭波面は中心軸上で凸型形状となり、単純な平面波とはいえない形状を示す結果となった。これは、爆薬の配置と火薬庫の幾何的な形状に依存する物理的な因子に加え、軸対称計算で現れる中心軸上での数値的な集



(a) Case(1)



(b) Case(2)

Fig. 3 Schematic illustrations of computational domain

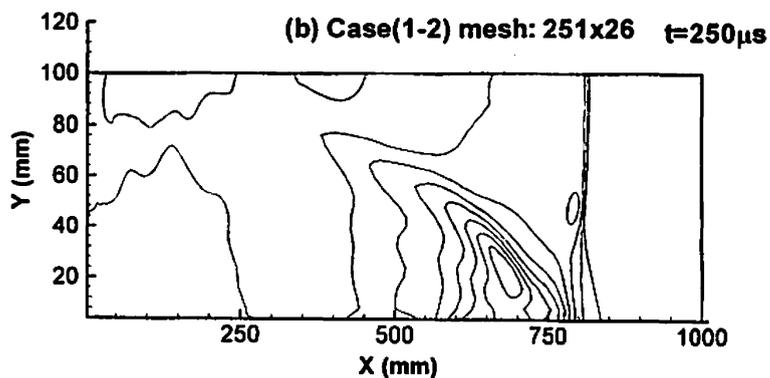
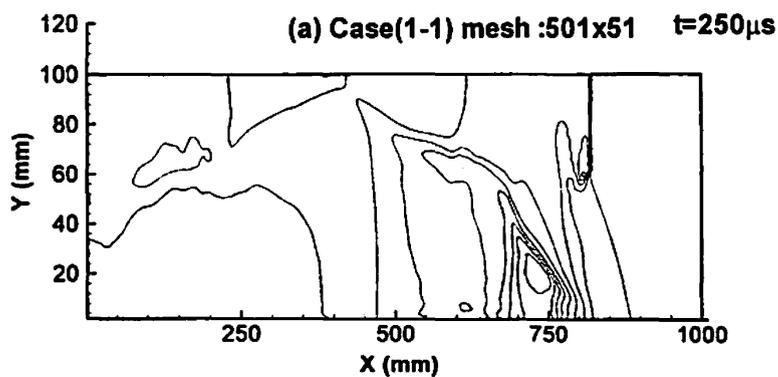


Fig. 4 Pressure contour of the blast wave which propagates in the model magazine

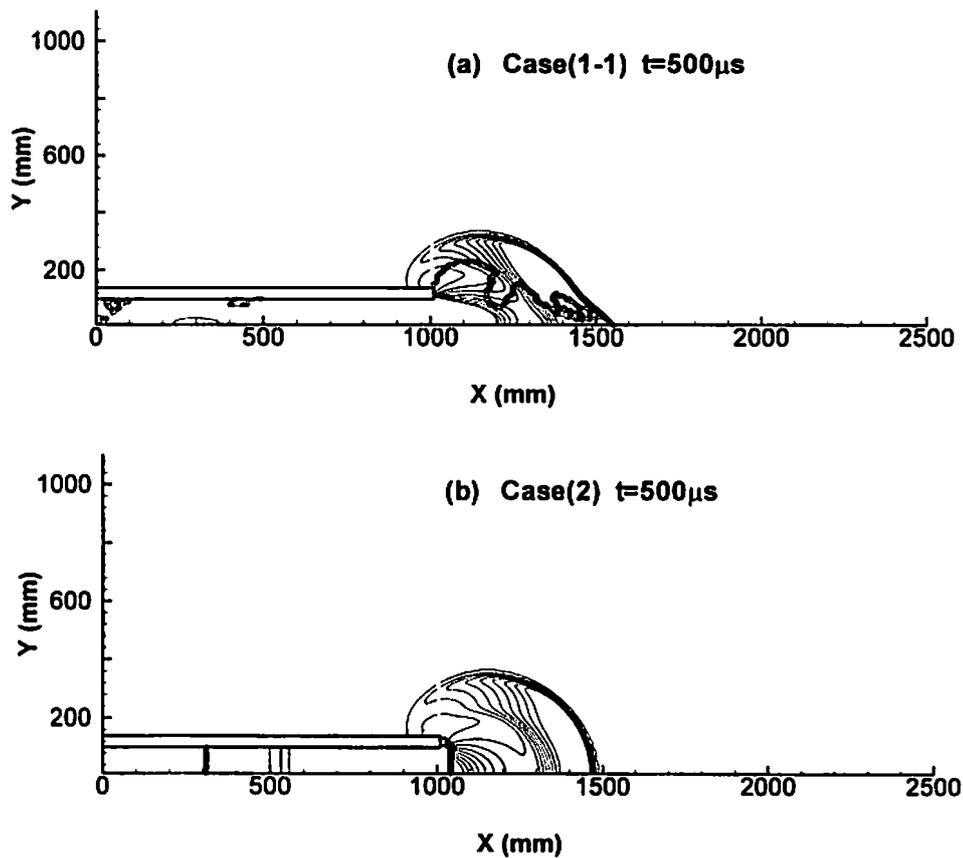


Fig 5 Pressure contour after the blast wave discharged from the magazine open end

束効果(focusing)の影響も考えられる。その軸対称計算による中心軸への数値的な集束効果を検討するため、Case(1-2)として計算格子間隔を粗くした計算を行った。計算条件としてはCase(1-1)の第2段階目の計算で対象とする模擬火薬庫内部の1000mm×100mmの計算領域を251×26に分割した。これは、Case(1-1)の格子間隔の2倍にあたる。その結果をFig. 4 (b)に示す。この比較により、中心軸上での集束効果は格子点間隔に依存していることがわかり、格子点間隔を広めにとると、集束効果は弱くなり爆風波面の凸型形状が目立たなくなる。また爆風の先頭波面と火薬庫上側が接している位置はCase(1-1)、(1-2)の間に著しい違いはみられず、軸対称計算による中心軸上の集束効果が両者の主な相違の原因であると考えられる。

さらに確認のためCase(1-1)の計算格子間隔で火薬庫の長さを5mまで延長してその内部を伝播する爆風の波面形状を確認したが、中央部の凸型形状に大きな変化は現れなかった。残念ながら現時点では、模擬火薬庫内部においては、衝撃波の可視化計測に多くの困難を伴うため数値計算と比較を行える定量的な実験データが得られていない。この点に関しては、今後の解決すべき課題として実験と数値計算の両面から引き

続き検討を進めていく予定である。

次に、爆風が火薬庫の庫口から放出された後の結果をFig. 5に示す。Fig. 5 (a), (b)はそれぞれ、 $t=550 \mu s$ のCase(1-1)とCase(2)の等圧力線図であり、0～1.2MPaを10等分して、さらに図中に爆薬と空気の接触面を太線で表示している。Fig. 5 (a)で先頭波面及び、接触面が特異的な凸型形状をしている主な原因はFig. 4 (a)で示したように模擬火薬庫内部の爆風伝播過程で中心軸上の先頭波面が凸型形状をしていた影響が強く残っているためである。

他の研究報告例(例えばAdachiら¹⁰⁾)をみると、火薬庫から放出された爆風はほぼ球形に伝播し、本ケースのように特異的な凸型形状を示す現象は考えにくい。このことから類推すると、模擬火薬庫内部では実験上、爆薬の配置に関するずれが±2mm程度はさげられないことなどから中心軸上への爆風の集束効果は実験の場合のごく僅かであり、爆源からある程度火薬庫中を伝播するとその波面形状はほぼ平面状になっていると推測することができる。したがって、本研究ではこれ以降、爆風波面形状が平面波であるという仮定のCase(2)の計算条件で解析を進め、実験結果と比較する事にする。

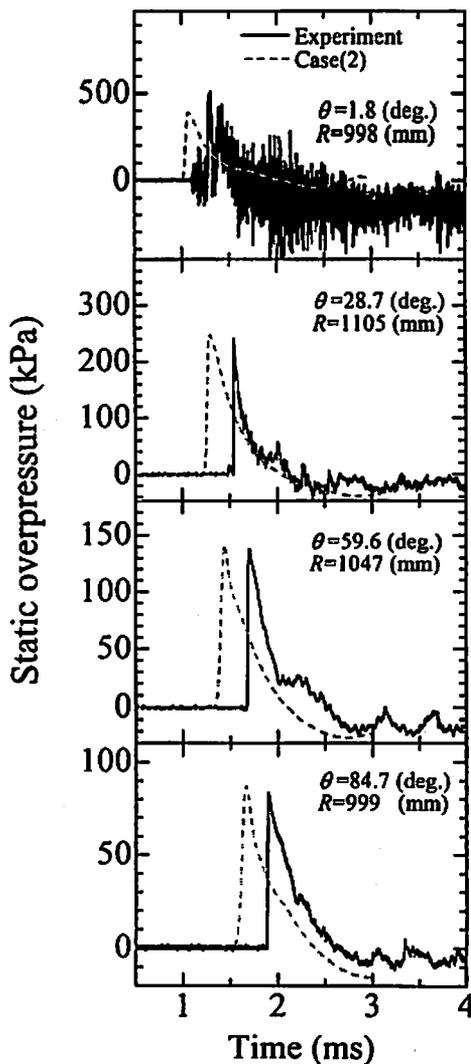


Fig. 6 Pressure history at $R=1.0\text{m}$

次に模擬火薬庫庫口から約1m地点での爆風の圧力履歴を実験結果²⁾と比較する。Fig. 6は横軸に時間、縦軸に静水過圧を示したものである。図中の実線が実験結果、破線は爆薬を仮想的に円盤状に配置したCase(2)の場合の計算結果である。Fig. 6から、シミュレーション結果は爆風の到達時間に関しては実験より早くに見積もることがわかった。これは地表面爆発に関して、支配方程式にラグランジュ方程式を用いて解析が行われた田中のシミュレーション結果³⁾でも同様の傾向が示されているが、その原因は本研究では特定できていない。一方、ピーク静水過圧に関してはCase(2)では実験とよく一致する結果となった。

次に爆風伝播の指向性を検討するために、火薬庫庫口から半径0.9m(換算距離 $1.99\text{m}/\text{kg}^{1/3}$)の地点でのピーク静水過圧の比較を行う。Fig. 7は横軸に方位角、縦軸にピーク静水過圧をとり、Case(2)の計算結果と実験結果をプロットしたものである。ここで、実

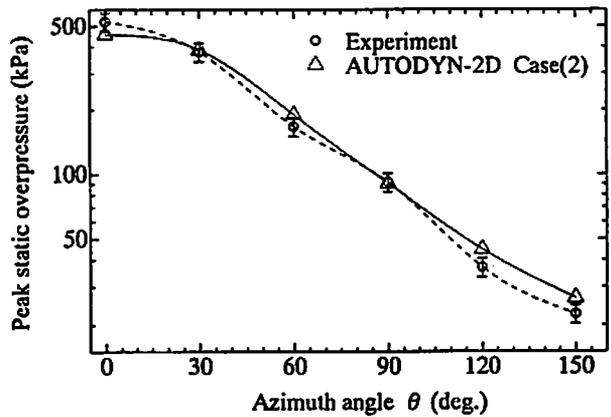


Fig. 7 Relations between azimuth angle and peak static overpressure ($R=0.9\text{m}$ from the model magazine open end)

験結果は庫口からの距離を一定にそろえるために、第1報²⁾で求めた換算距離 $1.99\text{m}/\text{kg}^{1/3}$ におけるピーク静水過圧を用いる。また、実験では圧力ゲージの寸法に依存する計測誤差が存在し、それにより実際の圧力を約3%低めに計測することが第1報²⁾により指摘されている。そのため、ここではその3%の圧力の補正分を予め実験値に加え比較を行う。さらに、ここで比較している実験値は同薬量で行われた3回の爆発実験の平均値として算出されている。その実験値の分散は3回の実験の平均で $\pm 10\%$ であり、図中にその誤差範囲をエラーバーで表示している。

Fig. 7に示す比較では、各方位角において実験値と計算結果の差を実験値で除したものを百分率で表すと、その最大値は17%、6方向の平均では5%であった。この比較結果から、実験誤差などの影響を考慮すると、本研究のシミュレーション結果は模擬火薬庫の爆発現象を十分定量的に議論できるレベルで良好に模擬できていると考えられる。

ここで、着目すべき点は、Case(2)では方位角0度方向のピーク静水過圧が実験データより低めに、90度方向を除いてその他の角度では高めに計算されていることである。したがって、実験においてもCase(1-1)で計算されている程大きくはないが、物理的に中心軸上への収束効果が僅かながら存在すると推定される。

Fig. 7の考察により、まだ計算精度の面で改善すべき点はあるものの、Case(2)で検討したように爆薬の配置を仮想的に円盤状に置き換えることによって、数値計算で求めたピーク静水過圧の方位角依存性に関しては実験結果を良好に模擬できることがわかった。

4. 結 論

本研究では爆風現象の解明のためAUTODYN-2Dを

用いた数値計算によるシミュレーションを実施し、その結果を実験結果と比較・検討を行った。

まず、空気中におけるペントライト爆薬92gの1次元球対称の爆発問題では、ピーク静水過圧と爆風の到達時間に関してBakerの文献値と比較をした。その結果、シミュレーション結果は文献値と定量的によく一致し、AUTODYN-2Dが爆風問題に対して有効な数値計算コードであることを確認した。

次に模擬地中式火薬庫内部で発生する爆風問題への適用に関しては、爆薬の配置を実験条件に合わせて忠実に模擬した計算(Case(1-1))では、中心軸上での爆風の収束効果をかかなり高めに評価するシミュレーション結果となった。そのため、爆薬を仮想的に円盤状に配置したシミュレーション(Case(2))を行い、得られた結果は、庫外の爆風の到達時間は速めに見積もる傾向はあるものの、ピーク静水過圧に関しては実験結果の測定誤差を考慮に入れると良好な一致が見られた。このことから、まだ色々と改善の余地はあるものの、本研究の目的の一つである“物理現象を議論できるレベルでの模擬地中式火薬庫の爆発問題における実験と数値計算の定量的な比較”が行えるようになり、本研究で取り扱った手法によるシミュレーションの妥当性が裏付けられた。したがって、このシミュレーション手法及びその結果は、今後地中式火薬庫の爆風解析を行う際の1つの指針として意義深いものであると考えている。

今後、さらにシミュレーションの解析精度をあげるためには、粘性や熱伝導、空気の電離、解離などの効

果を含めた計算を行う必要があると思われる。

文 献

- 1) 中山良男, 松永猛裕, 飯田光明, 田中克己, 火薬学会誌, 59, 275(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, 60, 293(1999)
- 3) 田中克己, 化学技術研究所報告, 85, 6, 210(1990)
- 4) 藤本一男, 倉持二郎, 高根澤吉男, 吉岡巖, 美濃口俊生, 山口弘, 工業火薬協会誌, 46, 4, 237(1985)
- 5) L. W. Kennedy, K. D. Schneider, 17th ISSWST, 879(1990)
- 6) N. J. Robertson, C. J. Hayhurst and G. E. Fairlie, Int. J. of Computer Applications in Technology, Vol. 7. No. 3-6, 316(1994)
- 7) E. L. Lee, M. Finger, W. Collins, Lawrence Livermore National Laboratory, Rept-UCID-16189(1973)
- 8) L. E. Fried, W. M. Howard, P. C. Souers, Cheetah 2.0 User's Manual, Lawrence Livermore National Laboratory, UCRL-MA-117541 Rev. 5(1998)
- 9) W. E. Baker, Explosions in Air, Univ. Texas Press, P. 150-156(1973)
- 10) T. Adachi, K. Munemasa, K. Hasue and S. Nakahara, Propellants, Explosives, Pyrotechnics, 16, 1(1991)

Evaluation of explosion effect for a model underground magazine (II)

— Numerical simulation —

Masaaki HABA*, Tomoharu MATSUMURA*, Yoshio NAKAYAMA*,
and Masatake YOSHIDA*

In order to investigate the effect of blast wave due to the explosion in the underground magazine, numerical simulations were carried out by AUTODYN-2D.

In the preliminary simulation for the explosion of spherical pentolite in air, which has the role of code validation, the peak static overpressure and the time of arrival of the blast wave agreed well with Baker's results.

The simulations for the blast wave of pentolite in the underground model magazine were performed with three cases.

In this study, reasonable results, which are well coincided with experimental data, were obtained by modeling the explosive as thin disk form.

Though the calculated time of arrival data of the blast wave were earlier than experimental data, peak static overpressures agreed well with experimental data.

(Dept. of Advanced Chemical Technology, National Institute of Materials and Chemical Research, 1-1 Higashi, Tsukuba, Ibaraki 305-8565, JAPAN)