

## 研究論文

# 微小爆薬による大規模爆発模擬実験 (第1報)

## — 密閉複雑空間中での衝撃波の挙動 —

水書稔治\*, 三浦昭彦\*\*, 高山和喜\*\*\*

\*東北大学流体科学研究所 学際衝撃波研究センター

現在: 防衛庁技術研究本部 第1研究所 〒153-8630 東京都目黒区中目黒2-2-1

e-mail: mizukaki@jda-trdi.go.jp

\*\*核燃料サイクル開発機構 東海事業所 〒319-1194 茨城県那珂郡東海村村松4-33

e-mail: amiura@tokai.jnc.go.jp

\*\*\*東北大学流体科学研究所 学際衝撃波研究センター 〒980-8577 仙台市青葉区片平2-1

e-mail: takatama@ifs.tohoku.ac.jp

2004年4月12日 受付 2004年7月1日 受理

### 要旨

大規模爆発で発生する爆風および衝撃波の挙動を実験室内で安全, 低費用かつ効率的に模擬する実験手法の確立を目的とし, 密閉複雑構造を有する縮尺模型内部で微小爆薬 (アジ化銀, 10mg) による爆発で発生させた衝撃波の挙動について報告する。まず, 爆風圧測定実験から微小爆薬による爆風圧が大量の爆薬の爆風圧と相似性があることを見出し, 微量アジ化銀のTNT換算係数0.31を得た。この結果から, 密閉複雑構造建築物の1/50縮小模型を製作し, 有効径1mの放物面鏡を備えた二重露光ホログラフィ干渉計法を用いて, 微小爆薬起爆による衝撃波の模型内伝播様態を可視化計測した。可視化結果と模型内壁での過剰圧履歴から, 密閉構造を有する建物内では, 通常の10倍程度の圧力上昇が発生すること, 衝撃波の複雑な反射により壁面に繰り返し負荷が加わることなどを明らかにした。

### 1. 緒論

化学プラント等における爆発事故や宇宙機の指令破壊に伴う比較的低高度での爆発で生じる衝撃波の挙動や周囲に与える影響を事前に評価する技術は, 防災計画上, いわゆるハザードマップの作成にとって必要不可欠である。爆発事故の原因究明のため, あるいは爆発による構造物の破壊機構解明を目的とした再現実験は, 野外においてキログラムを超える爆薬で実施されることが多い。野外実験でのデータ収集は, 研究の最終段階で実施し, 理論と実際の現象との差異を検証することに役に立つ, 必要不可欠な検証である。しかし, 我が国では, 野外実験が可能な場所は自衛隊演習地など限局され, また地形干渉を無視できる理想的な場所の確保は容易ではない。さらに野外実験は多大の経費と準備期間を必要とし, 実施は容易でない。したがって, 実験室内で大規模爆発現象を模擬が可能であれば, 精密な実験条件の設定や費用, さらに実験の安全性の見地から, これは極めて好都合である。筆者らはアジ化銀を気中爆発させた際に発生する衝撃波を大規模爆発の模擬実験に活用することを目的に, アジ化銀10mgをレーザー起爆できるエ

ネルギーのしきい値を決定し二重露光ホログラフィ干渉計ならびに方向指標型カラーシュリーレン法を用いて爆発初期の衝撃波形成過程を明らかにしてきた<sup>1)</sup>。

本報は, 微小爆薬を用いた大規模爆発現象の模擬実験手法を提案し, 爆発による衝撃波の発生とその後の挙動の詳細な理解の手段として有効であることを示す。まず, 微小アジ化銀の爆発による爆風圧と大規模爆発による爆風圧との間に相似則が成立することを実証し, 微小アジ化銀のTNT換算係数を求める。次に, その結果を背景に実在する建築物の1/50縮小模型内部でアジ化銀をレーザー起爆させ, 模型中の衝撃波伝播様態を二重露光ホログラフィ干渉計で可視化した結果を報告する。

### 2. 実験装置および実験方法

#### 2.1 微小爆薬と起爆法

衝撃波発生源としてアジ化銀ペレット (質量10mg, 直径1.5mm, 長さ1.5mm, 密度 $3.8\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$ , アジ化銀含有率99.9%以上, 中国化薬社製) を用いる。本報の主旨は, 模擬実験手法の提案である。そのため, 可視化実験では, 入手

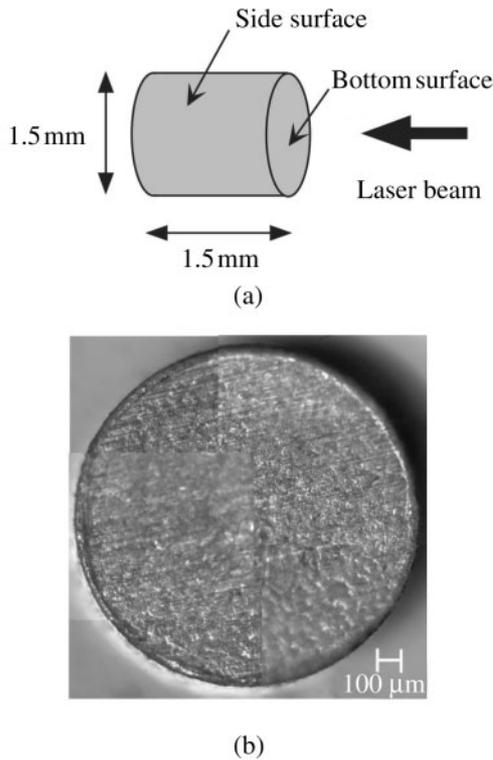


Fig. 1 (a) Dimension of Silver-azide pellet and (b) magnify image of the bottom surface.

および実験時の取扱の容易な10mgアジ化銀ペレットを二次加工せず衝撃波源として起爆させる。ただし、10mgアジ化銀ペレットを細心の注意をもって切削することで、より微量な任意の質量のアジ化銀片を実験に供することが可能である。10mgアジ化銀ペレットの概略をFig. 1に示す。これを光ファイバの先端に貼りつけてパルスレーザー光を照射して遠隔起爆する。具体的には、アジ化銀ペレットの底部に光ファイバ(コア径0.6mm、フジクラ社製G.C-400/500)

をシアノアクリレートを主成分とする瞬間接着剤で接着する。この際、光ファイバ端面は、目の細かい紙ヤスリ(#2000)で丁寧に磨き、レーザー光を確実にアジ化銀底面に到達させた。光ファイバのもう一方の端からパルスNd:YAGレーザー光束(波長1064nm, 出力14.1mJ, パルス幅9.1ns, 光束径約3mm, Laser Photonics社製)を出射孔と正対する位置(距離約10mm)から入射する。アジ化銀ペレットが起爆に必要なパルスNd:YAGのレーザー光エネルギーは $3.57\text{mJ}\cdot\text{cm}^{-2}$ 程度であり<sup>2)</sup>、一方、使用するレーザー光強度は約 $200\text{mJ}\cdot\text{cm}^{-2}$ なので、光ファイバで入射したレーザー光エネルギーは種々の損失を考慮しても容易に起爆しきい値を超える。また、アジ化銀はレーザー光照射時間内で起爆し、遅れ時間は無視できる。

2.2 大規模爆発との相似性確認

微小爆薬と縮小模型を用いた模擬実験が大規模爆発による衝撃波の発生とその後の挙動の模擬手段として有効であることを実証するために、微小爆薬によって発生する爆風圧が、大規模爆発で発生するそれと相似性を有することを確認する。本報で用いた爆風圧測定装置をFig. 2に示す。一般に爆発実験での爆風圧測定には、ローポップ型圧力変換器(たとえばPCB社製113B)を用いた静水過剰圧を測定することが一般的であるが、本報では圧力変換器取付部を自作し反射過剰圧を測定した。反射過剰圧を測定したのは、第一に、爆点が微小なので静水压測定では圧力変換器の僅かな取付誤差が測定値に大きく影響すること、第二に、測定距離に伴い過剰圧の立ち上がりが急速に低くなるので、静水過剰圧測定ではS/N比が反射過剰圧測定に比べ低下することを考慮したためである。測定には、直径150mm, 厚さ20mmのアルミ盤中心に圧力変換器(Kistler 603B)を取り付けた反射圧測定盤(以下、測定盤)を用いた。なお、アルミ盤表面と圧力変換器センサ面がなめらかに同一面となるようダイヤルゲージ(最小目盛0.01mm)を用いて設置調整を行った。測定効率を向上するために測定盤を3組(CH1,

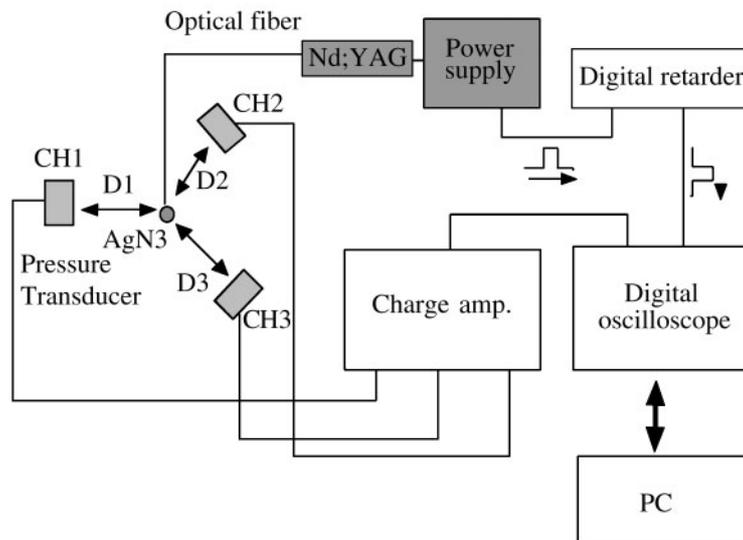


Fig. 2 Schematic of overpressure measurement system.

CH2, CH3)を用いてそれぞれ異なる距離(D1, D2, D3)での反射過剰圧を同時計測した。起爆トリガ信号がレーザを共振させると、レーザ光が光ファイバ内を伝播し、アジ化銀を起爆させる。発生した衝撃波が測定盤に到達し、反射過剰圧を発生させる。反射過剰圧は、専用増幅器(Kistler5000)を経由し、デジタルオシロスコープ(4MHz, 10MS・s<sup>-1</sup>, Yokogawa社製DL-716)に記録される。爆点から最短距離30mmから、最長距離4mまでの測定位置を設定した。また、同一距離での測定を各5回繰り返した。さらに、同様の測定を質量5mgのアジ化銀に対して実施した。質量5mgのアジ化銀は、10mgペレットの一方の底面を慎重に削り取った後、精密天秤を用いて秤量し、操作を繰り返して質量5mg(誤差±1%以内)に調整した。

### 2.3 伝播する衝撃波の可視化

縮小模型内での衝撃波伝播を二重露光ホログラフィ干渉計法で可視化した。二重露光ホログラフィ干渉計法は、透

明媒質中で発生した密度変化を屈折率変化に伴う位相変化として記録する。この手法では、得られた干渉縞は等密度(等圧力)線と等価となる<sup>3)</sup>。二次元現象を二重露光ホログラフィ干渉計法で測定した干渉縞の一次成分(干渉縞の明暗変化一回分)に相当する密度変化 $\Delta\rho$ は、光源のレーザ光波長 $\lambda$ 、測定領域のレーザ光路方向の光路長 $L$ 、測定領域の気体のグラッドストーン・デイル定数 $K$ (乾燥空気では、 $K=0.225 \times 10^9 \text{m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$ )を用いて、

$$\Delta\rho = \frac{\lambda}{K \cdot L}$$

で与えられる<sup>3)</sup>。光源にはパルスレーザを用いるので、時間分解能が高く、衝撃波や振動現象などの短時間現象の全視野的かつ定量的な測定ができる。Fig. 3に本実験での二重露光ホログラフィ干渉計法の光学系配置を示す。光源として、ダブルパルスレーザ(波長694.3nm, 出力3J, パルス幅20ns)を用いた。衝撃波伝播を縮小模型全域にわ

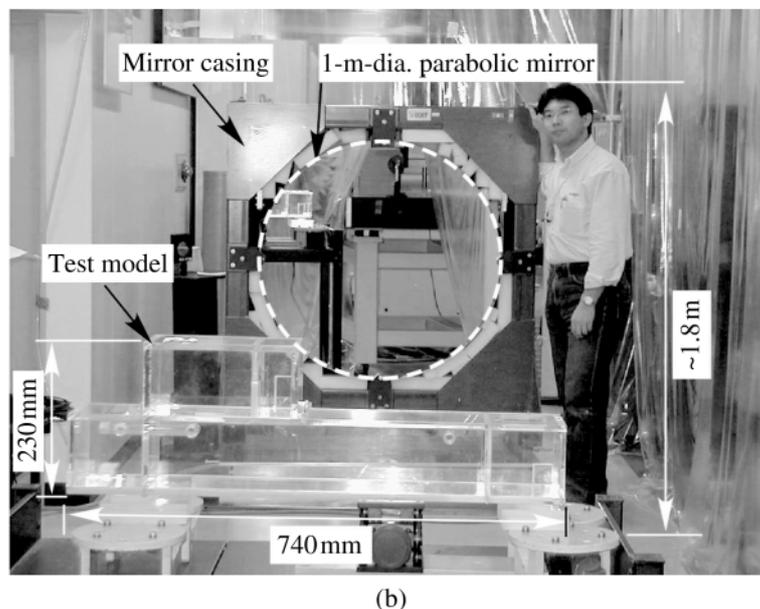
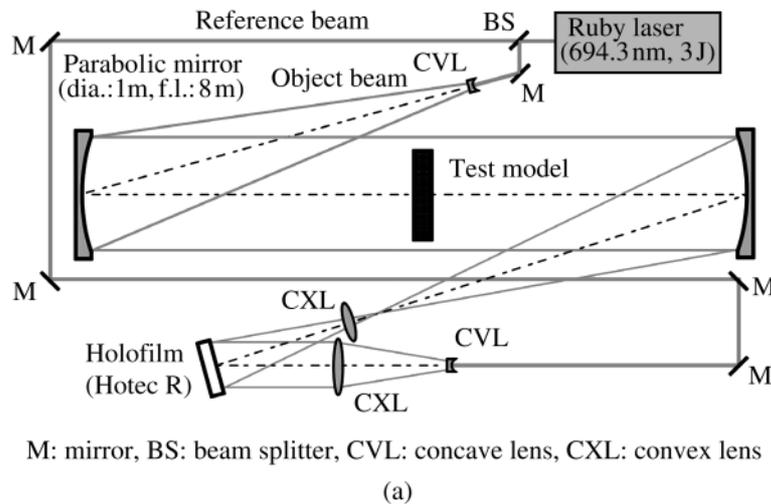


Fig. 3 (a) Schematic of double-exposure holographic interferometry and (b) a picture of the test model.

たり明りように可視化するため、大口径の凹面鏡(有効直径1m, 焦点距離8m)を用いた。なお、ホロフィルムは、英国ILFORD社製HOTEC R (101.6mm×127mm)および再生像記録はネオパン100 (101.6mm×127mm, ISO 100, 富士写真フィルム社製)である。

2.4 密閉複雑空間模型

模型の構造を原子力施設の核燃料再処理施設に想定した。原子力施設では、建家構造が放射性物質が通常想定するいかなる条件下においても外部に流出しない密閉複雑構造となっており、いわゆる「封じ込め構造」を持つ。そのため、内部構造は複雑で気密性が高い。特に、核燃料再処理施設では、再処理工程に溶媒抽出法の一つであるピューレックス法<sup>4)</sup>を用いるため、内部に相当量の可燃性物質(有機溶媒)が様々な安全措置と共に置かれている。処理工程では可燃性物質は閉鎖系配管を流通するため引火・爆発の可能性は皆無と考えられているが、1997年3月に発生した「動力炉・核燃料開発事業団(現・核燃料サイクル開発機構)東海事業所再処理施設における火災・爆発事故」<sup>5)</sup>のごとく施設内部での爆発事故の発生を完全に否定することはできない。そこで本報では、模型として現時点において我が国で唯一火災・爆発事故を経験した再処理施設(アスファ

ルト固化施設, ASP)の一部(爆発元と推定されている部屋と隣接する部屋)を単純化し、1/50に縮小した。縮小率は、前節で述べた可視化用大型凹面鏡(有効直径1m)を有効に利用した全模型的な可視化が可能な最大のものであるとともに鏡縁部近傍で発生する収差の影響を無視できる領域に収まることを念頭に決定した。Fig. 4に模型の概略を示す。実験模型は、厚さ10mmの亚克力板で構成され、最大長さ740mm, 最大高さ230mmの二層構造を持つ。二層構造のうち、下層は3室(大1室:R-II, 小2室:R-IおよびR-III), 上層は2室(小2室:R-IVおよびR-V)の全5室で構成される。また、隣接する室間の壁には開放部(OP-A, OP-B, OP-C, OP-D)があり、発生した爆風ないし衝撃波とその背後の流れが伝播できる。さらに、R-I・R-II間には、換気ダクトを模擬した円管(外径12mm, 内径10mm)が、R-IIには換気口を模した円孔が取り付けられている。換気ダクトおよび円孔は大気開放となっている。実験模型はASPのアスファルト充てん室(模型ではR-II)を中心としたセル(部屋)を再現している。また、模型内壁への過剰圧測定を、図4に示すAからGまでの7カ所に圧力変換器(Kistler 603B)を設置した。圧力変換器のセンサ面は、AからGまでの記号が記載された側の壁面となめらかに同一面となるようダイヤルゲージ(最小目盛0.01mm)を用いて設置調整を行った。内部圧力履歴測定と衝撃波可視化は、寸法・形状が同一の模型を複数製作し、実行した。

3. 結果と考察

3.1 爆風圧の相似性とTNT換算係数

圧力変換器により得られた反射圧の時間履歴曲線をもとに爆風減衰曲線を適用することでピーク反射圧を算出した。さらに、全測定点のピーク反射圧から過剰圧-換算距離の関係を整理した。得られた過剰圧-換算距離曲線から非線形最小自乗法によりTNT換算係数を求めた。

Fig. 5に測定された反射圧の時間履歴の一例を示す。図中の丸印は測定値、時間軸は衝撃波到着時刻からの経過時

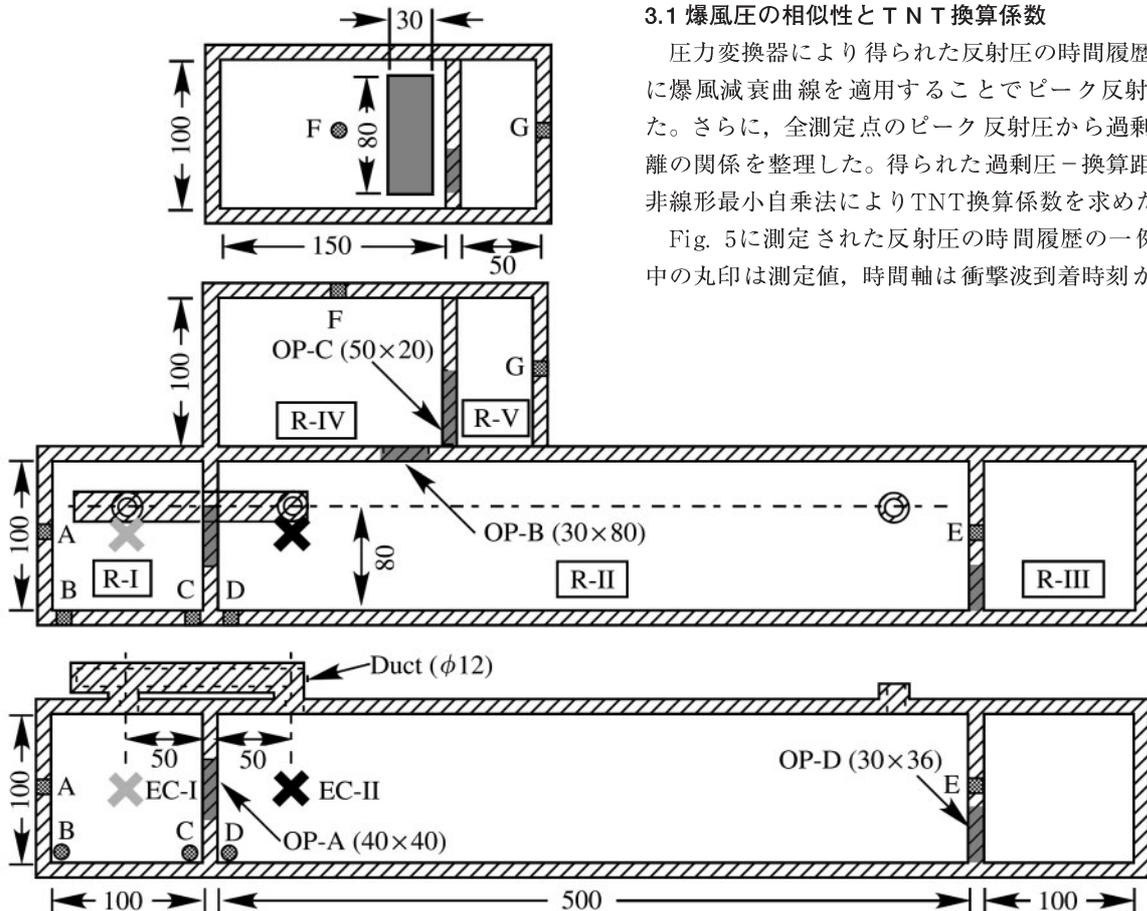


Fig. 4 Dimension of the test model (unit: mm).

間である。測定されたピーク値は圧力変換器の応答特性の影響を受けた値となるため、得られた衝撃波到達時に得られるピーク値を真のピーク反射圧と考えると誤差を含むこととなる。そこで、反射過剰圧 $P^{RO}$ を、次の手順で求めた。まず、圧力履歴のうち、衝撃波到達時点から圧力値が最小値となるまでを抽出する。次に、抽出した圧力履歴により式(1)に示す爆風圧減衰曲線<sup>6)</sup>に対する非線形最小乗フィッティングを実施し、 $P^{RO}$ を決定する。ここで、 $P_a$ は初期圧、 $t$ は衝撃波到達後の経過時間、 $T$ は過剰圧持続時間、 $b$ は減衰係数である。Fig. 5に得られた回帰曲線を実線で示す。このような手順で得られた過剰圧比を測定点の換算距離 $Z$ で整理した分布をFig. 6に示す。

$$P(t) = P_a + P^{RO} (1 - t/T) e^{-bt/T} \quad (1)$$

Kinneryら、はTNTによる過剰圧比 $P^o/P_a$ と換算距離 $Z$ の関係を、式(2)としている。ここで、 $P^o$ は静水過剰圧である。アジ化銀のTNT換算係数を $E_{AgN3}$ とすれば、アジ化銀による爆風圧測定時の換算距離 $Z_{AgN3}$ とTNT爆風圧曲線の換算距離 $Z_{TNT}$ との関係<sup>7)</sup>は、式(3)となる。さらに、大気中での垂直衝撃波による反射過剰圧比 $P^{RO}/P_a$ は式(4)となる<sup>7)</sup>。したがって、式(2)から式(4)の関係式を組み合わせることにより、実験により得られた反射過剰圧比 $P^{RO}/P_a$ と換算距離 $Z$ の関係からアジ化銀のTNT換算係数 $E_{AgN3}$ を評価できる。その結果、 $E_{AgN3}=0.31$ を得た。この値は、KHT方程式による理論計算に基づくC-J条件下でのアジ化銀( $4.0\text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ )の発生熱 $391.4\text{ cal}\cdot\text{g}^{-1}$ <sup>8)</sup>とTNT( $1.2\text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ )の発生熱 $1178.5\text{ cal}\cdot\text{g}^{-1}$ <sup>8)</sup>を基にしたアジ化銀のTNT換算係数 $0.332$ と約7%の誤差で一致している。したがって、本報の実験(1/50縮尺、アジ化銀10mg、完爆を仮定)は実際の建家内でTNT 387.5g(=10×10<sup>-6</sup>kg×50<sup>3</sup>×0.31)の爆発によって生じる空気力学的現象の模擬実験となる。

$$\frac{P^o}{P_a} = \frac{808 \left[ 1 + \left( \frac{Z_{TNT}}{4.5} \right)^2 \right]}{\sqrt{1 + \left( \frac{Z_{TNT}}{0.048} \right)^2} \sqrt{1 + \left( \frac{Z_{TNT}}{0.32} \right)^2} \sqrt{1 + \left( \frac{Z_{TNT}}{1.35} \right)^2}} \quad (2)$$

$$Z_{TNT} = (E_{AgN3})^{-\frac{1}{3}} \times Z_{AgN3} \quad (3)$$

$$\frac{P^{RO}}{P_a} = 2 \cdot \frac{7 + 4 \cdot \left( \frac{P^o}{P_a} \right)}{7 + \left( \frac{P^o}{P_a} \right)} \cdot \frac{P^o}{P_a} \quad (4)$$

TNT換算係数が理論値に対し7%程度低くなったのは、ペレット表面のコーティングの存在および微量の未反応爆薬量の存在と推定できる。ペレット表面には、成型および感度鈍化を目的としたコーティング(材質については公表

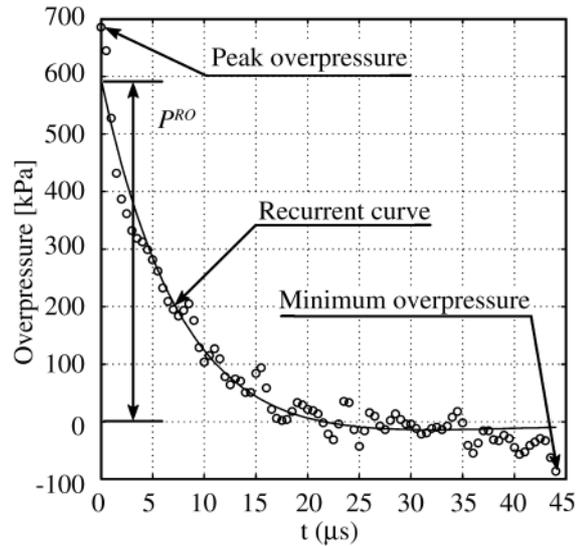


Fig. 5 Representative overpressure profile produced by Silver-azide explosion.

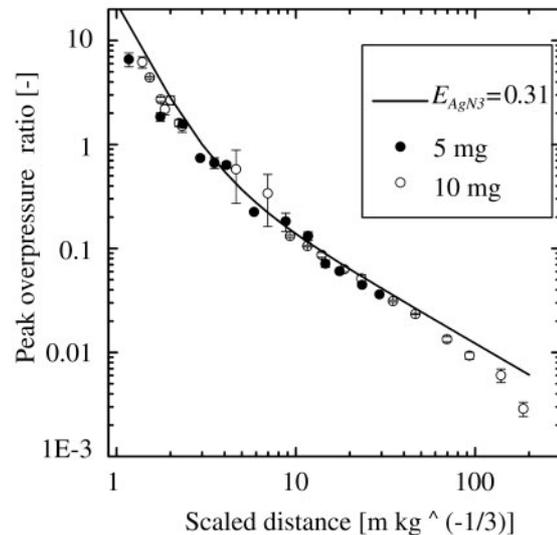


Fig. 6 Peak overpressure as a function of scaled distance for Silver-azide.

されていない)が製造工程の最終段階で施される。そのため、微量に注目した本報では、微量のコーティング材でも測定値に影響したと考える。さらに、アジ化銀ペレットの全質量が爆轟せず、僅かではあるが未反応のまま飛散していることも推察される。次節で示す可視化画像によっても未反応量発生が示されている。すなわち、ペレットの一部が爆発によって発生した球状の初期衝撃波を追い越

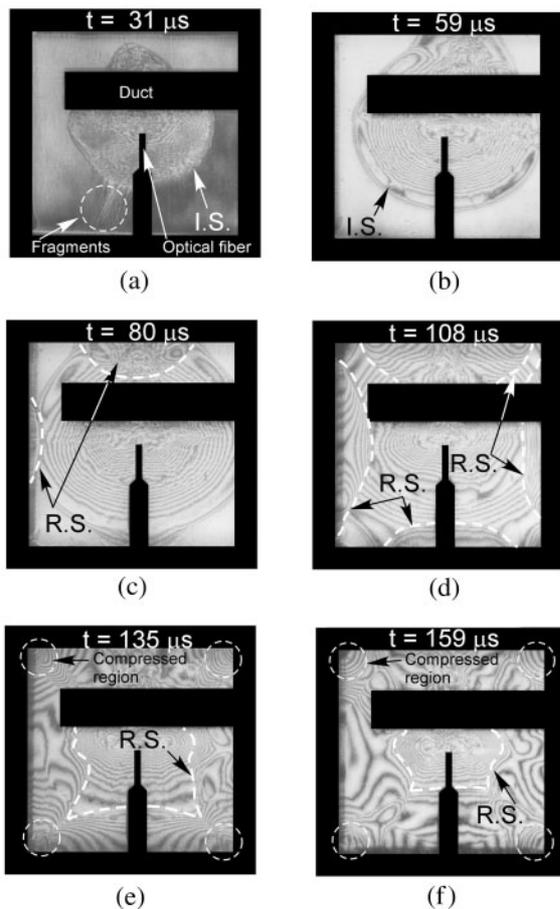


Fig. 7 Interferograms of shock waves propagation in R-I.

し、円錐衝撃波を伴って飛行する。しかし、この飛散した薬量の比率については本報からは推測できなかった。また、近距離と遠距離場でTNTによる爆風圧分布からのずれが認められた。

### 3.2 衝撃波の伝播様態

Fig. 7 に密閉されたR-I中央 (EC-I, 各壁面から50mmの位置) で発生させた衝撃波および誘起される流れを、Fig. 8 にR-II内 (EC-II, R-Iとの境界壁から距離50mm, 床面から高さ50mm, 奥行き方向距離50mm) で発生させた衝撃波伝播を示す。いずれの画像でも衝撃波、衝撃波の干渉と誘起された流れが干渉縞分布に明りょうに示されている。現象は、三次元構造を有し、二次元分布の干渉縞と異なり、干渉縞は等密度線に対応しないが、干渉縞分布の疎密は密度変化の緩急を反映している。著者らの研究<sup>1)</sup>から、起爆直後の衝撃波初期形状は球形ではなく、アジ化銀ペレット内を伝播する爆轟波の進行方向に影響を受ける。しかし、衝撃波伝播距離が120mm以上で形状は球状となり、再現性のよい衝撃波と見なせる。また、微量の不爆量発生が認められる場合もあるが、その爆風圧への影響は、測定誤差程度である。本報では同一条件で各5回の実験を実施したが、す

べての条件において顕著な差異は認められなかった。そのため、衝撃波初期形状のばらつきの影響を無視する。以下に可視化画像が示す特徴的な現象について述べる。

Fig. 7(a) : アジ化銀ペレットがレーザー照射により起爆し、初期衝撃波ISが形成されつつあるが衝撃波面はいびつな形状となっている。一方、アジ化銀ペレットの一部が未燃のまま飛散し、円錐衝撃波を伴いながら初期衝撃波ISを追い越している。

Fig. 7(b) : 天井面にISの一部が到達した。

Fig. 7(c) : ISが壁面に到達し、反射衝撃波RSが形成される。

Fig. 7(d) : 隔壁面から発生したRSが成長する。

Fig. 7(e) : RS波面が爆発生成気体と干渉し、複雑な形状となる (Fig. 7(e)点曲線)。R-Iの角部では、隣接する壁面からの各RSが相互に干渉し、周囲と比較して急峻な圧力変化 (圧縮部, Fig. 7(e)点円) を示している。

Fig. 7(f) : RS波面と爆発生成気体との干渉が進行し、さらに複雑形状となる (Fig. 7(e)点曲線)。爆発生成気体は、隔壁面から発達するRSにより爆点に向け圧縮される (圧縮部, Fig. 7(e)点円)。角部の高圧領域が特徴的に発生し、持続する。

以上、密閉空間 (立方体) 内で発生した衝撃波は、壁面で反射を繰り返し、特に角部で圧縮部が形成される。

Fig. 8(a) : アジ化銀ペレットがレーザー照射により起爆し、球状の初期衝撃波ISが形成される。天井面にISが到達しているが、Fig. 7と同様、アジ化銀ペレットの軸方向に特異的に爆発生成ガスのジェットが発生するため、ISは天井方向にゆがむ。ところで、可視化画像には、衝撃波が伝播していない部分にも濃淡が発生している。これは、シュリーレン鏡間距離が大きいため、二鏡面間の実験室雰囲気揺らぎを記録した結果である。以後の画像中にも同様の擾乱が記録されているが、現象と無関係である。

Fig. 8(b) : ISがR-Iに開口部OP-Aから進入する。開口部を通過する際にISが回折する。また、R-II側の角部 (C-IIおよびIIb) が圧縮を受け、密な干渉縞分布となる。

Fig. 8(c) : ISが開口部OP-BからR-IVに進入する。R-I内のISはさらに伝播し、R-Iの天井および壁面に到達し、反射衝撃波 (破線) を発生する。そのため、R-Iの角部C-IcおよびC-Idに圧縮部が発生している。一方、R-IIを画面右側に伝播するISは、波面の湾曲が小さくなる。また、後方には、R-II壁面から発生した反射衝撃波が追従している。

Fig. 8(d) : ISの先端が開口部OP-Cを通過し、R-Vに進入する。R-IV内部では、ISが伝播すると共にOP-B近傍の壁面で発生した反射衝撃波RS (破線) が発生する。R-I内を伝播するISは、その背後にRSを伴い、R-I左壁に到達する。一方、R-II内を右方へ伝播するISは、背後にRSによる圧力上昇のため、波面の曲率が小さくなりつつ、右方に伝播する。

Fig. 8(e) : R-I内部では、ISが左壁で反射する (破線)。それに伴いR-I内の角部C-IbおよびC-Iaにおいて、角部を構成する壁面間でISの多重反射がおこる。R-II内では、右方に伝播するIS背後に、反射衝撃波の重なりのためのセル構造を有する圧力分布が発生している。また、ISがR-IとR-II間の壁面に到達し、反射衝撃波PNSとなりIS後方を右方へ伝播する。一方、R-IVおよびR-V内部では、ISが全域に伝

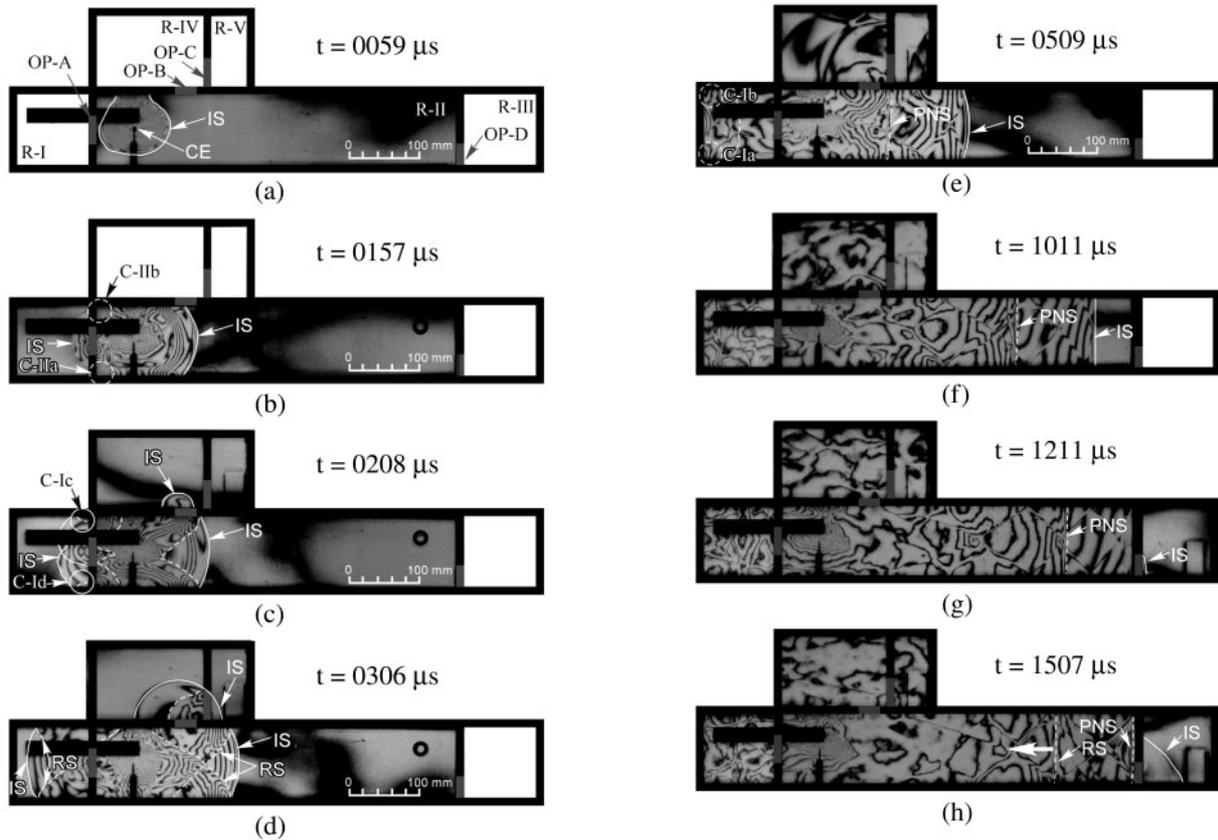


Fig. 8 Interferograms of shock waves propagation in the test model .

播する。

Fig. 8(f) : R-II内を右方へ伝播するISは、曲率が失われほぼ垂直衝撃波となる。R-IVおよびR-V内部の干渉縞が不規則分布を示しているのに対し、IS背後では伝播方向に垂直な干渉縞分布が明りょうであり、圧力勾配が認められる。また、壁面との干渉でPNS背後にも同様の圧力勾配が認められ、両者が圧力上昇を誘起する。

Fig. 8(g) : ISが最右端のR-IIIに進入する。PNSが後続する。R-IIIに進入したISが回折し、拡散する。

Fig. 8(h) : ISのR-IIとR-III間の壁面で反射で発生したRSが左方に伝播する。PNSが壁面に到達直前である。

以上の様に、密閉複雑建築物模型内部で点爆発で発生した衝撃波は、回折・反射を繰り返し、模型内部に伝播する。干渉縞画像から得た特徴をまとめると、

- (1) 各部屋の角部では、壁面から発生する反射衝撃波の重ね合わせにより、圧縮部が発生する。
- (2) アスペクト比が大きい空間（細長い部屋）の内部で発生した球状の初期衝撃波波面は、伝播に伴い、垂直衝撃波様になる。これは、部屋の長手方向以外の壁面で初期衝撃波が反射することにより衝撃波背後の圧力上昇が発生するためである。

- (3) 建築物模型壁面には、初期衝撃波および反射衝撃波などが連続的に到達するため開放空間での爆発と比較し、圧力が繰り返し負荷される。

### 3.3 模型壁面における過剰圧

Fig. 9に、密閉されたR-I中心（EC-I）でアジ化銀を起爆した際の壁面での圧力履歴を示す。横軸は、起爆時点を $t=0$ とした経過時刻、縦軸は過剰圧比（初期圧 $P_a=101.3\text{kPa}$ ）である。図中、圧力履歴は爆心EC-Iからの換算距離 $Z$ の昇順に並べ、括弧内にFig. 4中の測定点名を示す。圧力履歴の特徴として：

- (1) 角（BおよびC）では、初期衝撃波ISに比べ、反射衝撃波RSが高い圧力上昇を発生する。これは、衝撃波の多重反射による効果である。
- (2) 初期衝撃波ISおよび正対する壁面で発生した反射衝撃波RSが測定点に到達した後も、ISと同等の過剰圧比の多重反射衝撃波が $200\mu\text{s}$ 程度の間隔で繰り返し到達する。
- (3) 密閉空間で発生した衝撃波は、開放空間で発生したものにして減衰せず、多重反射衝撃波となり、パルス状の負荷を比較的長時間にわたり壁面に負荷する。

Fig. 10に、R-IIで（爆心はEC-II）発生した衝撃波が実験

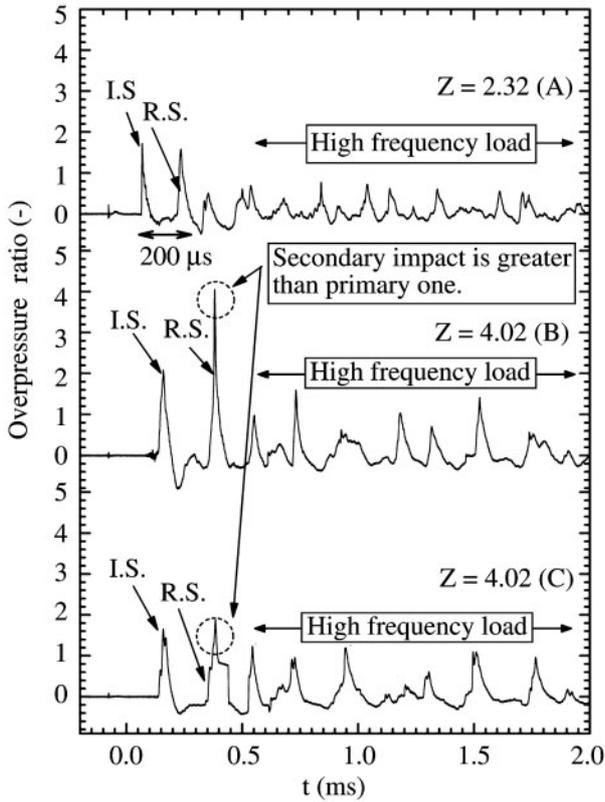


Fig. 9 Overpressure profile over the walls in R-I.

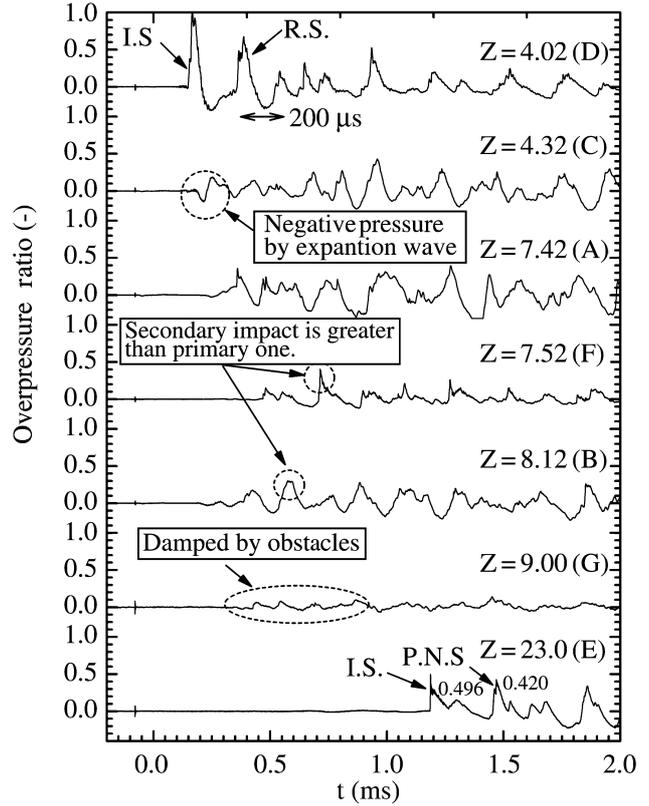


Fig. 10 Overpressure profile over the walls in the test model.

模型内部に伝播した場合の圧力履歴を示す。縦軸および横軸ならびに圧力履歴の配置はFig. 9と同様である。圧力履歴の特徴として、

- (1) 換算距離が最も大きい観測点E ( $Z=23.0$ )での初期衝撃波ISおよび反射衝撃波PNSによる過剰圧比(それぞれ0.496, 0.420)は、開放空間における過剰圧比約0.05の約10倍であり、急峻な圧力変化を示した。すなわち、密閉され、かつ衝撃波伝播方向に特異性を有する空間では、爆心から遠距離場でも強い衝撃波が到達する。
- (2) 爆心に近い観測点(D)で、初期衝撃波ISおよび反射衝撃波RSによる圧力上昇が明りょうに認められる。
- (3) 測定点Cで衝撃波の到達に先んじて負圧が認められる。これは、R-IとR-II間の開口部でISが回折した際の、膨張波である。
- (4) 測定点Gでは、同程度の換算距離の観測点(B)と比べて圧力比変化が小さくかつ穏やかである。これは、ISが到達する過程で、2カ所の開口部を通過し、衝撃波が減衰したからである。

#### 4. まとめ

本報では、爆発現象の安全で経済的かつ効率的な実験法として、アジ化銀ペレットと縮小模型を用いる手法を提案した。まず、微小アジ化銀の起爆による爆風圧計測結果から、大規模爆発との相似性を有することを示すと同時に、微小アジ化銀のTNT換算係数を実験的に示した。つぎに、

爆発現象の模擬を行う対象として建築物内部での爆発事故に着目し、特に密閉複雑空間を有する原子力施設を想定し、1/50縮小模型を製作した。模型内部でアジ化銀をレーザー光を用いて遠隔起爆させ、発生した衝撃波の伝播を二重露光ホログラフィ干渉計法を用いて可視化するとともに、模型内壁に設置した圧力変換器で圧力履歴を測定した。これらにより得られた結果をまとめると、

- (1) 実験的に求めたアジ化銀のTNT換算係数は、0.31となり、この値は、理論計算から求めた値0.332とよく一致した。すなわち、ミリグラム程度の微小爆薬の爆発がキログラム以上の爆薬の爆発と相似である。
- (2) 密閉構造空間での爆発は、開放空間と比較し、衝撃波による過剰圧比が大きくなる。本報では最大10倍程度(Fig.4測定点E)を示した。
- (3) アスペクト比の大きな直方体空間では、発生した衝撃波は長軸方向に伝播するにつれ垂直衝撃波となる。また、密閉空間では、減衰の程度が小さい。
- (4) 角では、初期衝撃波による負荷よりも、壁面での多重反射による過剰圧比が高くなり、初期衝撃波の2倍程度となる。
- (5) 衝撃波の多重反射が、壁面に高繰り返しのパルス状の負荷を発生し、比較的長時間持続する。
- (6) 本報での実験条件にしたがった数値解析を実施し、比較することで、より詳細な知見を得ることが可能である。

## 5. 結 論

本報では、ホログラフィ干渉計による可視化と高速応答圧力変換器を併用する計測法により複雑密閉構造を有する構造物の縮小模型内を伝播する衝撃波とその背後の空気力学的現象を定量的かつ全視野的に詳細に把握し、衝撃波挙動の特性を明らかにした。このことは、本手法が複雑空間中での大規模爆発による空気力学的現象を定性的に把握可能であることを示す。しかし、大規模爆発による建家構造に対する影響および複雑空間中での規模効果については不明であり、今後の課題である。

## 謝 辞

本研究は、核燃料サイクル開発機構との共同研究「先進基礎工学研究」の助成を得て実施したものである。実験模型は核燃料サイクル開発機構より提供を受けた。可視化実験においては博士後期課程学生(当時)の阿部 淳および博士前期課程学生(当時)宇都宮 剛 両君の協力を得た。ここに付記し、感謝の意を表する。

## 文 献

- 1) 水書稔治, ハラルド クライネ, 片山雅英, 高山和喜; アジ化銀ペレットのレーザー起爆で発生する衝撃波の初期形状, 可視化情報学会論文集, 22, 10, pp. 79-86 (2002).
- 2) 水書稔治, H. Kleine, 高山和喜; アジ化銀ペレット起爆に用いるパルスNd:YAGレーザーのしきい値に関する研究, 火薬学会誌, 63, 2, pp. 58-64 (2002).
- 3) 可視化情報学会編, 「光学的可視化法」, pp. 63-91 (2001), 朝倉書店.
- 4) たとえば, 藤家洋一, 石井保; 「核燃料サイクル」, pp. 134-138 (2003), ERC出版.
- 5) 動力炉・核燃料開発事業団アスファルト固化処理施設火災・爆発事故原因究明・再発防止対策班; アスファルト固化処理施設の火災爆発事故に関する検討, 日本原子力学会誌, 40, 10, pp. 740-766 (1998).
- 6) W. E. Baker, "Explosions in Air", p. 5 (1973), University of Texas Press.
- 7) G. Kimmery and K. Graham; "Explosive Shocks in Air", p. 94 (1985), Springer-Verlag.
- 8) 田中克己; 爆薬の爆轟特性解析, 化学技術研究所(1983).

---



---

# Experimental simulation of large-scale explosion using a micro-charge explosion (I) — Behavior of shock waves in a complicated closed-space —

Toshiharu Mizukaki\*, Akihiko Miura\*\*, and Kazuyoshi Takayama\*\*\*

In order to establish safe, inexpensive, and effective laboratory experimental technique for simulating the behavior of shock waves generated by large-scale explosion, an experimental investigation of shock waves propagation created by the explosion of a micro-charge, Silver-azide with 10-mg of mass, inside the 50th-scaled model with complicated closed-cell structure is reported. Comparing the relationship between overpressure and scaled-distance by the micro-charge with by TNT, we have evaluated that the scaled-law is also established for the micro-charge explosion as same as for large-scale explosion. The TNT equivalence ratio for the micro-charge has been estimated to be 0.31. Visualization of shock waves propagation inside the model have been carried out using double-exposure holographic interferometry equipped with a pair of 1-m-diameter parabolic mirror. Both overpressure measurements over walls inside the model and visualization results indicate that overpressure inside closed-space values more than 10 times as large as at open-space. The fact that multi-reflection of shock waves inside the model gives high-frequent overload to the structure has been shown.

\*Interdisciplinary Shock Wave Research Center, Institute of Fluid Science, Tohoku University.

Current affiliation: The First Research Center, Technical Research and Development Institute, Japan Defense Agency, 2-2-1, Nakameguro, Meguro, Tokyo 153-8630, JAPAN  
e-mail: mizukaki@jda-trdi.go.jp

\*\*Japan Nuclear Cycle Institute, 4-33, Muramatsu, Tokai, Naka, Ibaraki 319-1194, JAPAN  
e-mail: amiura@tokai.jnc.go.jp

\*\*\*Interdisciplinary Shock Wave Research Center, Institute of Fluid Science, Tohoku University, 2-1, Katahira, Aoba, Sendai 980-8577, JAPAN  
e-mail: takatama@ifs.tohoku.ac.jp