

研究論文

ゲル化水による爆風圧低減効果

保前友高[†], 若林邦彦, 松村知治, 中山良男

独立行政法人 産業技術総合研究所 爆発安全研究センター 〒305-8565 茨城県つくば市東1-1-1 中央第5

[†]Corresponding address: to-homae@aist.go.jp

2006年8月3日 受付 2006年9月20日 受理

要旨

爆薬を緩衝材で覆った状態で点火し、周囲における爆風圧力の時間履歴を計測することにより、緩衝材の爆発影響を低減する効果の評価を行った。爆薬には100 gの球形ペントライトを用いた。緩衝材には、ゲル化水と発泡スチロール微小球の混合物を用いた。両者の混合比を変えることにより、かさ密度を $0.12 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ から $1.0 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ の範囲で変化させ、爆発影響低減効果のかさ密度依存性を調べた。また、直径100 mm, 200 mmの2種類の大きさの球形容器を用意し、爆風低減効果の緩衝材量依存性を調べた。換算距離3, 4, 5 $\text{m}\cdot\text{kg}^{1/3}$ の3点で爆風圧の計測を行った。ピーク圧力は、200 mm容器の時に低減効果が大きく、緩衝材の密度 $0.54 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ の時に低減効果が最大となった。この時のピーク圧力は、緩衝材がない場合に対して、45–53 %であった。一方、正相のインパルスに関しては、容器サイズによらず、最も低減効果が大きかった場合のインパルスは、緩衝材がない場合に対して70–80 %程度であった。ただし、容器サイズにより、低減効果が最大となる緩衝材密度は異なった。以上のように、爆風圧低減効果には、緩衝材量依存性があると共に、緩衝材密度依存性があり、ピーク圧力とインパルスでは挙動が異なることが明らかになった。

1. 緒論

爆発物を爆発させると、爆風や騒音が周囲に広がる。多くの場合、この爆風や騒音は周囲の人や建物に被害を及ぼすため、爆風・騒音を低減化する研究が行われている。このうち一つのアプローチとして、爆発物の周囲を様々な種類の物質で覆う方法が研究されている。この物質を本稿では緩衝材と呼ぶ。

これまでに報告された研究には、実験的な手法によるものと、計算によるものがある。前者の例としては、緩衝材として、パーミキュライト¹⁾、砂²⁻⁴⁾、水⁵⁾ (水柱⁶⁾)、泡⁷⁻¹¹⁾、雪¹²⁾、発泡スチロールとポリウレタン¹³⁾、その他の固体材料¹⁴⁾を用いたものがある。また、容器に“elastic shell”を用いる工夫⁵⁾をしたもの、空間的な配置に工夫¹⁵⁾をしたものもある。これらの研究の目的は、爆風・騒音低減の基礎データ収集、発破切断²⁾・解体作業³⁻⁴⁾における騒音防止、落球打撃感度試験時の騒音防止¹³⁾などである。また、計算による報告例としては、ピット中での爆発の爆風低減の報告¹⁶⁾、泡¹⁷⁾、水^{18), 19)}の効果についての報告がある。

昨今、人口密集地等で意図的に爆発物を爆発させて被害をおよぼすことにより、自らの主張を喧伝するテロ行為が国際的な問題となっている。このような爆発物を人口密集地等で発見した場合に、安全に処理を行うためには、比較的少量の緩衝材で爆発物から近い場所における爆発影響を低減する必要がある。しかし、先に述べたように、緩衝材

を用いた爆発影響低減化の研究は多数報告されているにもかかわらず、このような条件に合致した研究報告が公開されている例は、著者らの知る限りにおいて見あたらない。そこで、本研究は、比較的少量の緩衝材 (緩衝材の半径が爆薬の半径の4倍以下)を用いて、爆発物から近い場所における爆風をより効果的に低減化することを主眼に置き、基礎データの取得を行った。

爆風を効果的に低減する方法として、本研究では、緩衝材の密度に着目した。爆発物 (例えば爆薬) が緩衝材で覆われた状態で爆発した場合、爆発のエネルギーの一部は、緩衝材の衝撃圧縮、加熱、相変化、緩衝材の運動エネルギーとして緩衝材に受け渡され、爆風として周囲に伝播する量が減少する。この緩衝材が気泡を含む等の低密度材料であった場合、気泡は小さな圧力でも簡単につぶれるため、緩衝材全体の衝撃圧縮される際に受ける力学的な仕事、すなわち (圧力 P) $\times$ (体積変化 ΔV) の ΔV が大きくなり、爆発のエネルギーの熱への変換量が多くなると期待される。このため、気泡の含有量が多い (かさ密度が小さい) 緩衝材を用いると、少量でより効果的に爆風を低減できると考えられる。一方で、極端にかさ密度が小さいと、運動エネルギーとして受け取れる量が減るため、低減効果が小さくなると考えられる。従って、緩衝材の体積が決められたとき、最も低減効果が高くなる密度が存在すると考えられる。

以上のことを念頭に置き、本研究では、ゲル化水と発泡

スチロール微小球の混合物を緩衝材として用い、その混合比を変えることで、かさ密度を変化させた。爆薬に接触させて周囲に緩衝材を設置して、爆薬に点火し、周囲で爆風圧の時間履歴を計測することにより、緩衝材の量・かさ密度と、爆風ピーク圧力・インパルス低減効果との関係を調べた。

2. 実験条件

球形の容器中に緩衝材と球形の爆薬を入れ実験を行った。得られた結果の解析を1次元で行うことができるようにするため、球対称に現象が起こるようにした。

爆薬は、球形のペントライト 100 g (中国化薬) を使用した。外径は 49.2 mm であった。雷管挿入のための孔 (直径 7.7 mm, 深さ 27.7 mm) を設けた。40 個の爆薬のうち 2 個の比重を計測したところ、1.65, 1.63 であった。起爆には、電気雷管 (Risi RP-501) 1 本を使用した。

緩衝材としては、緒論で述べたように、ゲル化水、発泡スチロール微小球、両者の混合物を用いた。ゲル化水は、

水に比べて形状をある程度保持できるため、低密度物質 (発泡スチロール微小球) との混合状態を維持できるという利点がある。ゲル化剤 (ポリアクリル酸ナトリウム, 日本純薬 レオジック QP-3) を水道水 1 リットルあたり 12 g 混合し、ゲル化水を作成した。緩衝材の密度を調節するために、上記のゲル化水に発泡スチロール微小球 (直径 1 mm, かさ密度 $0.035 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$) を混合した。混合比を変え、緩衝材の密度を変えた。Table 1 に混合比と密度をまとめた。

容器はアクリル製のものを使用した。外径が 100 mm または 200 mm の半球状のドーム (厚さ約 2 mm, 射出成型品) を 2 個組み合わせて球形とし、容器として用いた。薄手のアクリル容器は、形状を完全に保持できること、壊れやすく爆風への影響を最低限に抑えられると考えられること、透明で試料作成が容易となることから使用した。爆薬は容器の中心に固定した。その後、容器中を緩衝材で満たした。緩衝材を入れず、容器の中に爆薬のみを固定して点火する実験も各々の容器サイズに対して行った。これを各容

Table 1 Experimental conditions.

Number	Container diameter (mm)	Container weight (g)	Barrier materials	Volume ratio*	Barrier materials density ($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$)	Pentolite weight (g)	Gross weight (g)
3	100	x	None	—	0	100.60	x
7	100	x	None	—	0	100.55	x
9	100	66	Water gel	10 : 0	1	101.44	562
10	100	65	Water gel + foam polystyrene	5 : 5	0.55	99.90	394
11	None	—	None	—	—	100.21	—
12	100	x	Water gel + foam polystyrene	1 : 9	0.13	101.44	223
13	100	65	foam polystyrene	0 : 10	0.03	99.96	190
14	100	65	Water gel + foam polystyrene	8 : 2	0.81	99.67	497
16	200	402.8	None	—	0	101.17	512.9
17	200	x	Water gel	10 : 0	0.97	100.67	4254.3
19	200	402.2	Foam polystyrene	0 : 10	0.03	100.30	636.3
20	200	402.5	Water gel + foam polystyrene	1 : 9	0.12	100.86	974.8
21	200	402.7	Water gel + foam polystyrene	5 : 5	0.54	100.83	2645.9
22	200	403.2	Water gel + foam polystyrene	8 : 2	0.85	100.79	3627.9

“—” means that the value is not present, and “x” means that the value is not measured.

* “Volume ratio” corresponds to the mixed volume ratio of the water gel to the foam polystyrene.

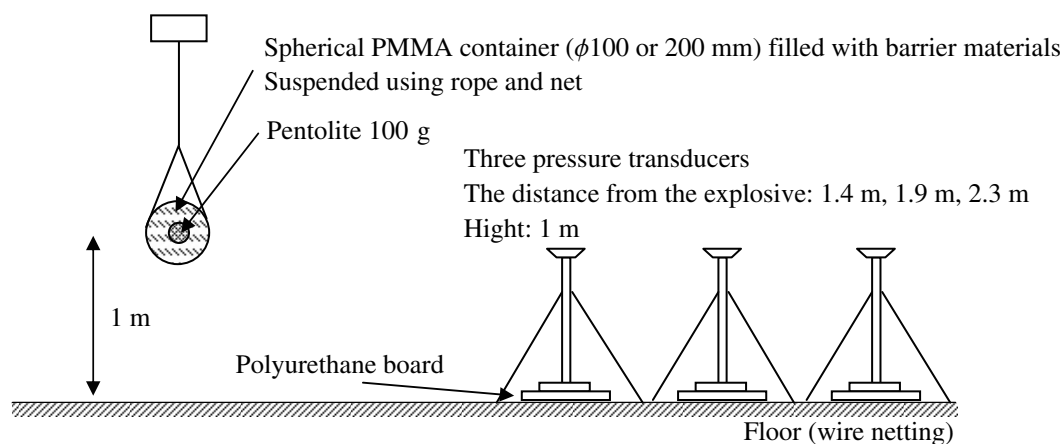


Fig. 1 Experimental setup.

器サイズの基準実験と呼ぶ。この場合の緩衝材の密度は $0 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ と考える。これらとは別に、容器の影響や計測系の妥当性を確かめるために、爆薬のみ（容器無し）を空中に吊して点火する実験も行った（Table 1 実験番号11）。これを裸薬実験と呼ぶ。

実験は、内径 5 m の円筒形の実験室（爆発ピット）内で行った。爆点は床面（金網製）から 1 m の高さに設定した。爆点が設定した高さになるように、爆発ピット上部の梁からロープをおろし、その先端にネットを取り付け、そのネットの中に容器を入れて吊した。床面は金網であるため、爆風波の反射等の影響は軽微であると考えられる。従って、この実験では、壁面で反射した波面が爆風圧計測部に戻ってくるまでの間は、自由空中爆発実験の条件に近いと言える。

爆風圧計測には、ピエゾ型圧力変換器（PCB 102A12 および 102A07）を使用した。爆点から 1.4 m, 1.9 m, 2.3 m の地点に架台を立て、床面から 1 m の高さに床面に平行な整流板付きの変換器を設置した。相互の影響をなくするため、1 直線上には配置しなかった。爆薬量が 100 g なので換算距離 $R_s \text{ (m} \cdot \text{kg}^{-1/3})$ 、単位は以下省略）は各々 3, 4, 5 である。配置状況を Fig. 1 に示す。また、その他の実験条件を Table 1 にまとめた。

3. 実験結果および考察

実験で得られた爆風圧時間履歴データは、破片化した容器に起因すると見られる振動が重畳したデータもあったが、大多数は、良好なデータであった。典型的な爆風圧時間履歴の例を Fig. 2 (a) – (c) に示す。時刻のゼロは点火信号を発した時刻である。基準実験 (a) に比べて、緩衝材が存在する場合 (b), (c) はピーク圧力が低下していることが見て取れる。

これらのデータに対して、3 次のスプライン関数を用いてフィッティングを行い、到達時刻、ピーク圧力、正相の持続時間（本稿では以下、単に持続時間と呼ぶ）、正相のインパルス（本稿では以下、単にインパルスと呼ぶ）を決定した。

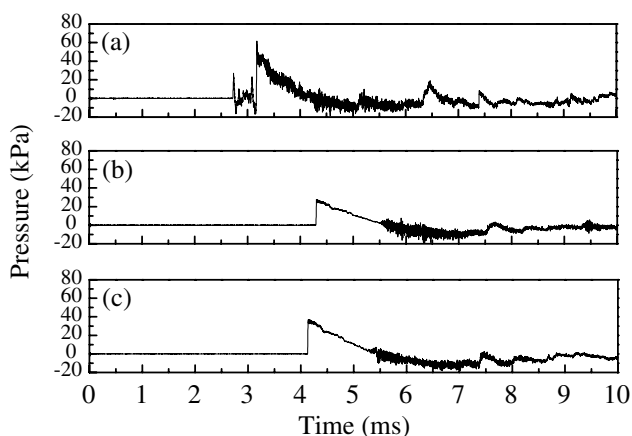


Fig. 2 Pressure profiles of $\phi 200$ mm-container experiments. The distance from the charge was $R_s = 4$. Time zero corresponds to the ignition. (a) “Standard”, container only, without barrier materials (density of $0 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$). (b) Surrounded by water gel and foam polystyrene mixture, volume ratio of 1 to 1 ($0.54 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$). (c) Surrounded by water gel ($0.97 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$).

実験結果の検討に先立ち、基準実験と裸薬実験、自由空中爆発の文献値²⁰⁾のピーク圧力を比較し、計測系の妥当性を評価した。3回の基準実験を相互に比較した場合、1例を除いて、差はすべて10 %以内であった。また、基準実験は、文献値に比べて、Ch3が最大で25 %高い値を示した以外は、10 %以内の差違であった。さらに、基準実験は、裸薬実験に比べてCh1が最大で18 %低い値を示した以外は、10 %以内の差違であった。本実験の結果は、Ch3の値は高めである可能性もあるが、総じて、調和的であると言える。

ピーク圧力を Fig. 3 (a), (b) に整理した。(a) は、縦軸にピーク圧力を取り、横軸に緩衝材密度をとった。(b) では、縦軸を基準実験のピーク圧力で割り規格化した値とした。外径 100 mm 容器の場合は、ピーク圧力が最も減衰する場合でも基準の76 %程度にとどまっている。緩衝材密度の影響は明確ではなかった。一方、外径 200 mm 容器の場合は、密度 $0.54 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ でピーク圧力が極小になった。この時、基準の45 %から53 %程度に低減された。いずれの場合もおおむね爆点に近いほど低減の効果が大きかった。

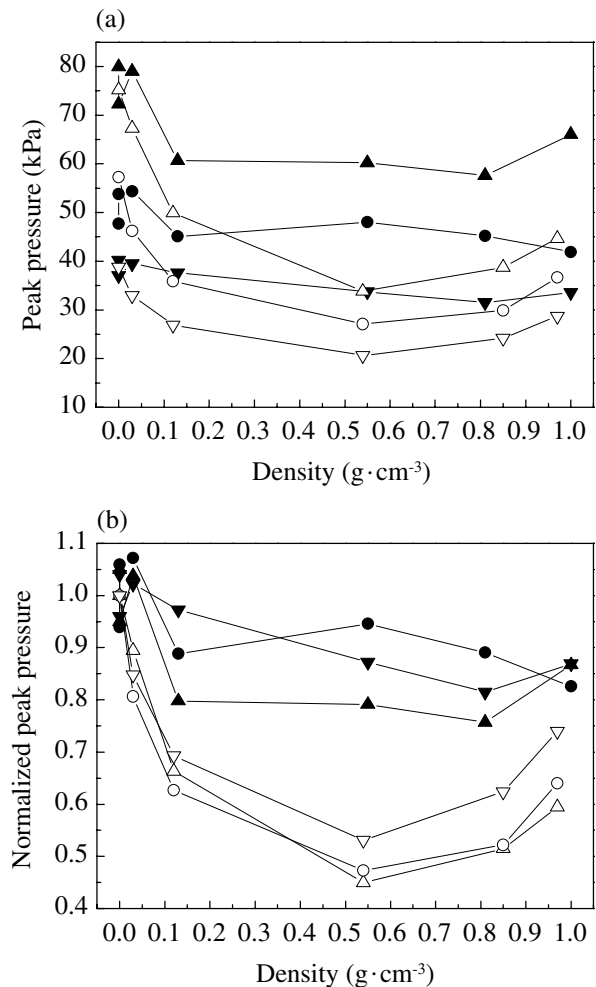


Fig. 3 (a) Relation between the peak pressure and density of the barrier materials. (b) Relation between the peak pressures divided by that of “standard” and the density of the barrier materials. The symbols in the figures correspond to following conditions; $\blacktriangle$: $\phi 100$, $R_s = 3$, $\bullet$: $\phi 100$, $R_s = 4$, $\blacktriangledown$: $\phi 100$, $R_s = 5$, $\triangle$: $\phi 200$, $R_s = 3$, $\circ$: $\phi 200$, $R_s = 4$, ∇ : $\phi 200$, $R_s = 5$.

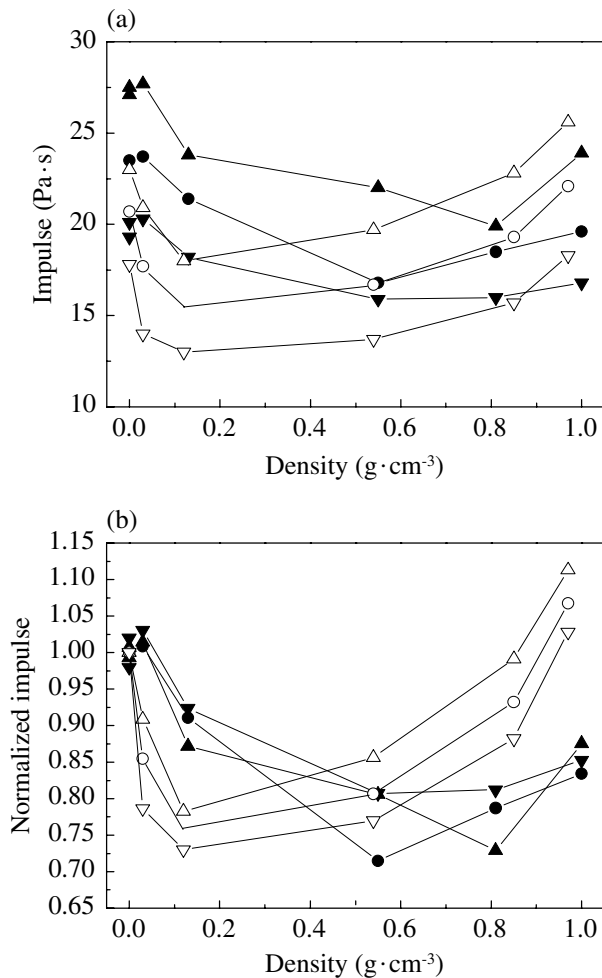


Fig. 4 (a) Relation between the impulse and the density of barrier materials. (b) Relation between the impulse divided by that of “standard” and the density of the barrier materials. The symbols in the figures are used in the same manner as Fig. 3.

インパルスを図. 4 (a), (b) に整理した。(a) は、縦軸にインパルスを取り、横軸に緩衝材密度をとった。(b) では、縦軸を、各インパルス値を基準実験のインパルスで割り規格化した値とした。外径 100 mm 容器の場合は、密度 0.55–0.81 $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$ でインパルスが極小となり、基準の 72–81 % 程度に低減された。おおむね、爆点からの距離が近いほど、低減の効果が大きかった。一方、外径 200 mm 容器の場合は、密度 0.12 $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$ でインパルスが極小となり、基準の 73–78 % 程度に低減された。外径 100 mm 容器の場合とは反対に、おおむね、爆点からの距離が近いほど、低減の効果が小さかった。ピーク圧力は、容器外径が大きい方が低減されたが、インパルスは、極小値をとる密度が異なるものの、最も低減された場合の基準に対する強度は、容器の大きさには依らなかった。ゲル化水のみ時(密度 0.97 $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)は、基準よりも数%大きくなった。これは、ピーク圧力は基準よりも小さかったものの、持続時間が長かったためである。

緩衝材密度と爆風の到達時刻(点火時刻をゼロとした場合)、持続時間との関係を Fig. 5 (a), (b) にまとめた。緩衝材の量が多い場合は、爆風の到達時刻が遅くなった。また、

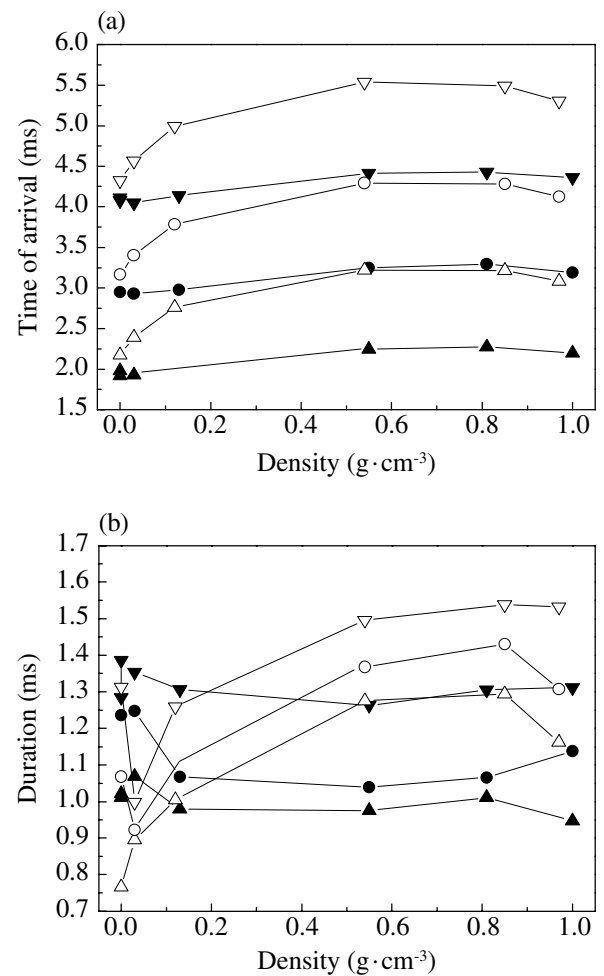


Fig. 5 (a) Relation between the time of arrival and the density of the barrier materials. Time zero corresponds to the ignition. (b) Relation between the duration and the density of barrier materials. The symbols in the figures are used in the same manner as Fig. 3.

到達時刻の緩衝材の密度依存性も見られ、0.54–0.85 $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$ の時に、最も遅くなった。持続時間は、外径 100 mm 容器では、あまり変化がなかったが、200 mm 容器では、密度が高いほど持続時間が長くなる傾向があった。

Fig. 3 および 4 に示した通り、ピーク圧力、インパルス共に、低減効果が最大となる緩衝材の密度が存在することが明らかになった。ゲル化水中の発泡スチロール微小球の割合が増すと、気泡の割合が増し、緩衝材の圧縮率が大きくなる。このため、単位体積あたりの衝撃圧縮による熱エネルギーへの変換量が大きくなる。一方、同時に密度が低下して質量が小さくなるため、爆発のエネルギーが緩衝材の運動エネルギーに変換される割合も減少すると考えられる。発泡スチロール微小球の割合が過剰になると、爆発エネルギーが緩衝材の運動エネルギーに変換される量が減少し、低減の効果が低下すると推測される。緩衝材を用いて、より効率的に爆風圧を低減するためには、今後、緩衝材中の圧力履歴を計測し、爆風低減のメカニズムをより詳しく調べるのが重要であると考えられる。また、薬種が異なる場合についても緩衝材の低減効果のデータを集めることも重要であると考えられる。

4. 結論

本研究の成果として、緩衝材を用いたペントライトの爆風低減効果について、次の知見を得た。

- ① ゲル化水 and/or 発泡スチロール微小球を緩衝材として用いた場合、緩衝材の厚さは厚い方がピーク圧力の低減効果が大きかった。インパルスについては、低減効果の厚さ依存性は明確ではなかった。
- ② ピーク圧力に関しては、外径 200 mm 容器の緩衝材密度 $0.54 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ で、最も爆風ピーク圧力の低減効果が大きくなり、基準の 45–53 % 程度まで低減された。インパルスに関しては、外径 100 mm 容器の場合は、密度 $0.55\text{--}0.81 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ で低減効果が最大となり、基準の 72–81 % 程度に低減された。一方、外径 200 mm 容器の場合は、密度 $0.12 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ でインパルスの低減効果が最大となり、基準の 73–78 % 程度に低減された。低減効果については、緩衝材の質量が大きいほど効果が大きいというわけではなく、かさ密度 (空孔率) も重要なパラメータであることが明らかになった。
- ③ 緩衝材を用いた場合、ピーク圧力は、おおむね爆点に近いほど低減効果が大きかった。インパルスに関しては、緩衝材の厚さにより異なった。

謝辞

本研究は、文部科学省の科学技術振興調整費による受託研究の成果であり、関係各所に謝意を表します。

References

- 1) J. Wadsworth, *Nature*, 204, 673 (1964).
- 2) T. Saito, K. Futase, E. Kuroda, Y. Wada, K. Koide, M. Hayashi, N. Kobayashi, and T. Yoshida, *Kogyo kayaku (Sci. Tech. Energetic Materials)*, 50, 168 (1989).
- 3) M. Maeda and T. Shindo, *Kogyo kayaku (Sci. Tech. Energetic Materials)*, 54, 14 (1993).
- 4) S. Kobayashi, H. Yoichi, Y. Ikeda, and K. Nakagawa, *Kogyo kayaku (Sci. Tech. Energetic Materials)*, 54, 130 (1993).
- 5) B.E. Gel'fand, M.V. Sil'nikov, A. I. Mikhailin, and A. V. Orlov, *Comb. Expl. Shock Waves*, 37, 607 (2001).
- 6) D. Kim, Y. Nakayama, T. Matsumura, K. Okada, A. Miyake, T. Ogawa, and M. Yoshida, *Kayaku Gakkaishi (Sci. Tech. Energetic Materials)*, 63, 83 (2002).
- 7) R. Raspet and S. K. Griffiths, *J. Acoust. Soc. Am.*, 74, 1757 (1983).
- 8) R. Raspet, P. B. Butler, and F. Jahani, *Applied Acoustics*, 22, 35 (1987).
- 9) T. D. Panczak, H. Krier, and P. B. Butler, *J. Haz. Mat.*, 14, 321 (1987).
- 10) Y. Wada, K. Koide, M. Tamura, N. Kobayashi, A. Kunikawa, M. Ohashi, and T. Yoshida, *Kogyo kayaku (Sci. Tech. Energetic Materials)*, 50, 174 (1989).
- 11) Y. Wada, M. Ohashi, A. Kunikawa, K. Hashizume, R. Liu, N. Kobayashi, T. Saito, and T. Yoshida, *Kogyo kayaku (Sci. Tech. Energetic Materials)*, 51, 22 (1990).
- 12) Y. Wada, E. Kuroda, S. Kakuta, M. Tamura, M. Hayashi, N. Kobayashi, and T. Yoshida, *Kogyo kayaku (Sci. Tech. Energetic Materials)*, 49, 375 (1988).
- 13) Y. Kaneko, Y. Wada, R. Liu, M. Tamura, and T. Yoshida, *Kogyo kayaku (Sci. Tech. Energetic Materials)*, 50, 119 (1989).
- 14) R. Raspet, P. B. Butler, and F. Jahani, *Applied Acoustics*, 22, 243 (1987).
- 15) B. E. Gel'fand and M. V. Sil'nikov, *Doklady Physics*, 47, 37 (2002).
- 16) J. M. Powers and H. Krier, *J. Haz. Mat.*, 13, 121 (1986).
- 17) T. D. Panczak, H. Krier, and P. B. Butler, *J. Haz. Mat.*, 14, 321 (1987).
- 18) M. B. Liu, G. R. Liu, and K. Y. Lam, *Shock Waves*, 12, 181 (2002).
- 19) M. Cheng, K. C. Hung, and O. Y. Chong, *Shock Waves*, 14, 217 (2005).
- 20) W. E. Baker, "Explosions in Air", p. 148 (1973), University of Texas Press, Austin and London.

Attenuation of blast wave using water gel

Tomotaka Homae[†], Kunihiro Wakabayashi, Tomoharu Matsumura, and Yoshio Nakayama

Attenuation effect of mixture of water gel and foam polystyrene on blast wave was studied. Two sizes of spherical PMMA container, of which diameter were 100 mm and 200 mm, respectively, were prepared. The density of the mixture was varied from $0.12 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ to $1.0 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ by changing the mixed volume ratio. The containers were filled with the mixture. Spherical pentolite (0.1 kg) was ignited at the center of the each container. Three pressure transducers were placed around the container and the blast pressure was measured. The scaled distance from the charge to the three transducers were 3, 4, and $5 \text{ m}\cdot\text{kg}^{-1/3}$, respectively. The relation between the density of the surrounded materials and the attenuation effect on the blast wave was discussed. In regard of the peak pressure, 200 mm-diameter container was much effective. The attenuation effect was maximum at the density of $0.54 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$. The peak pressure in such a case decreased to 45–53 % of that in case without the surrounded materials. On the contrary, in regard of the positive impulse, the maximum attenuation effect of two sizes of the containers was comparable, although the most effective density was different. The impulses in such cases were about 70 % of that without the mixture. This result shows that not only the mass of the surrounded barrier materials but also the porosity of the surrounded materials plays an important role for attenuation of the blast waves.

Keywords: Blast wave, Attenuation, Water gel, Foam polystyrene.

Research Center for Explosion Safety, National Institute of Advanced Industrial Science and Technology (AIST), Central 5, 1-1-1 Higashi, Tsukuba, Ibaraki 305-8565, JAPAN

[†]Corresponding address: to-homae@aist.go.jp