

高性能爆薬の爆ごうによって PMMA 中に発生した衝撃波の反射について

灘光 陽¹ 本田 隆志¹ 藤田 昌大² 伊東 繁³

Reflection of shock wave generated in PMMA by explosion of high explosives

By Yoh NADAMITSU Takashi HONDA Masahiro FUJITA Shigeru ITOH

In this paper the reflection process during the collision of two shock waves in PMMA (polymethylmethacrylate) produced by the detonation of explosive by optical photography and numerical analysis. It becomes clear that on the collision of shock waves propagating in PMMA, the transitions between the regular reflection in the case of small angle of incidence and the Mach reflection in relatively large angle of incidence, and more, the von Neumann reflection are similar to those in the occasion of water. Moreover, it is seen that at the same open angle condition the arrived pressure due to the reflection falls into the same amplitude range just like that in the case of water.

key words: Condensed Matter, Shock waves, Explosion, Mach Reflection, Von Neumann Reflection, Numerical Simulation

1. はじめに

筆者らは高性能爆薬を水中で爆ごうさせ、それによって発生した水中衝撃波を利用した各種の金属加工を行ってきた¹⁾。例えば高難度焼結粉末を衝撃固化させるために、水中衝撃波を压力容器の壁面に干渉させ、収束させ、高圧力を得る装置を開発してきた。その際粉末充填部に作用する圧力は、SEP (旭化成工業(株)製, PETN : 65%, Paraffine : 35%, 充填密度 $\rho_e=1310\text{kg/m}^3$, $D=6970\text{m/sec}$) を用いた場合、およそ 18 GPa 程度であり、SEP の C-J 圧のおよそ 1.2 倍程度であった²⁾。装置内の圧力媒体部分に発生した反射形態は、マッハ反射とは異なって、マッハステムが湾曲した結果³⁾を示した。このような反射形態は他の場合にも観察され、例えば円筒状の PMMA (polymethylmethacrylate) の外側に爆薬を配し、PMMA 中を伝播する衝撃波を円筒の先端から写真観

測することによって得られた衝撃波の形状は、マッハステムが湾曲した反射形態をとることが Adadurov 等によって明らかにされている⁴⁾。さらに円筒法による粉末の衝撃固化実験のフラッシュ X-線解析写真観測により、同じようにマッハステムの湾曲した反射形態が Stuiyinga 等⁵⁾によって報告されている。このように凝縮系圧力媒体中を伝播する衝撃波が斜め衝突や壁から反射すると、マッハステムが湾曲した反射形態になることはよく知られている。これは凝縮系媒体の音速が高いため、衝撃波マッハ数が相対的に低く、弱い衝撃波と見なされ、von Neumann 反射 (vNR) の生ずる可能性が大きいためである。筆者らは水中衝撃波の場合に発生するマッハ反射ならびに von Neumann 反射について光学的観察並びに数値計算法を用いて解明し、理論的な解析をおこない新しい知見を得た^{6, 7)}。

本論文では、高性能爆薬の爆轟によって発生した衝

1) 第一工業大学機械工学科

2) 崇城大学工学部

3) 熊本大学衝撃・極限環境研究センター

撃波がPMMA中で、斜め衝突し反射を起こす過程を、光学的観察実験ならびに数値解析によって解明し、水中衝撃波の場合と比較検討し、発生圧力の評価を行い、圧力媒体としてのPMMAならびに水の可能性をあわせて検討する。

2. 実験方法および数値計算方法

2.1 衝撃波の光学的写真観察実験

PMMA中の衝撃波の斜衝突実験に用いた装置の概略図を図1に示す。同図のように、PMMAブロックの上に幅50mm、厚さ5mmで形成した2枚の高性能爆薬SEP(旭化成工業(株)製, PETN:65%, Paraffine:35%, 充填密度 $\rho_e=1310\text{kg/m}^3$, $D=6970\text{m/sec}$)を、開き角 2θ で設置した。実験に採用した開き角は $30^\circ\sim 90^\circ$ まで 30° おきである。爆薬上部には平面な爆ごうを得るため爆薬レンズを取り付けた。爆薬レンズは爆速が異なる2種類の爆薬を組み合わせる平面爆轟が得られるようにした⁸⁾。実験は、この装置を水で満たしたPMMA製の水槽の中に沈めて行った。爆薬の爆ごうによって発生した衝撃波は、傾斜面に対応する中心線上(以下反射面と呼ぶ)に入射し、斜め衝突を行い反射現象を生じる。この現象の光学的写真観察は、キセノンフラッシュライト(HADLAND PHOTONICS社製, HL 20/50型フラッシュユニット, 出力500J, 閃光時間 $50\mu\text{sec}$)を光源としてイメージコンバータカメラ(HADLAND PHOTONICS社製, IMACON 790, 最大駒撮り間隔2000万駒/sec, 最高流し速度 1ns/mm)を使用した駒とり写真撮影法によって行った。また反射衝撃波の足(マツハステム)の速度を調べる

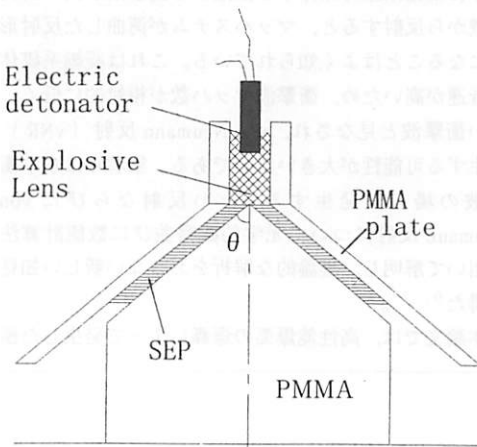


図1 実験装置

ために図中一点鎖線の方向にスリットをきってストリーク写真撮影を行った。起爆は6号電気雷管(旭化成工業(株)製)を使用した。ディレイジェネレータ(HADLAND PHOTONICS社製, THREE CHANNEL DELAY GENERATOR, TYPE JH-3CDG)によりSEPの起爆時間とキセノンフラッシュライトの発光開始時間の制御を行った。また、ブロックゲージを撮影して距離の校正を行い、ディレイジェネレータの付属機能による時間校正を行った。

2.2 数値計算方法

数値計算はArbitrary-Lagrangian-Eulerian法⁹⁾を用いて行った。計算は質量、運動量、エネルギーの保存則に状態方程式を組み合わせるで行った。水、PMMAについてはMie-Grüneisenの状態方程式¹⁰⁾を用いた。爆薬の爆ごう過程の数値シミュレーションの詳細は、前出論文³⁾を参照されたい。計算場は一辺を0.5mmの格子に分割し、格子数はX方向に240、Y方向に420とした。なお計算はGAIA 275 AXPで行った。代表的な計算では1回あたりの計算時間はおよそ1時間であった。

3. 結果および考察

図2にPMMA中に発生した衝撃波の斜衝突の様子のフレーミング撮影写真例を示す。同図には $\theta=15^\circ$, $\theta=30^\circ$ および $\theta=45^\circ$ の結果を示す。いずれの場合も、

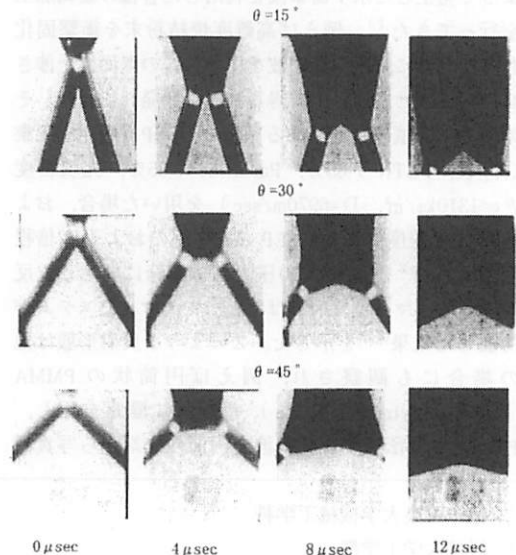


図2 フレーミング写真

時間は撮影開始時間を $0 \mu\text{sec}$ とし、 $4 \mu\text{sec}$ おきにとられた。同図から $\theta = 45^\circ$ の場合、衝突の比較的初期からマッハシステムが大きく湾曲したいわゆる $v\text{NR}$ が生じていることがわかる。これに比較して $\theta = 15^\circ$ の場合には、マッハシステムがほぼ直線的なマッハ反射をしていることが定性的にわかる。数値計算で得られた衝撃波の反射の形態を図 3 に示す。同図は数値計算結果をコンピュータシャドウグラフ表示している。同図は無次元化された密度の 2 階微分値 ($S = \partial^2 \rho / \partial x^2 + \partial^2 \rho / \partial y^2$) を表示したものである。作図方法は西田¹¹⁾等の方法によった。図中の IS は入射衝撃波, MS はマッハシステム, RS は反射衝撃波を示す。同図から θ が 15° の場合、明確な反射衝撃波が見られ、ほぼ直線的なマッハシステムが存在するマッハ反射形態であることがわかる。 θ が 45° の場合マッハシステムは大きく湾曲し、反射衝撃波も明確でない $v\text{NR}$ を呈していることがわかる。このように開き角が大きい場合、衝撃波が斜め衝突すると入射角が大きくなるため、比較的容易に $v\text{NR}$ を起こすことがわかる。

図 4 は PMMA 中で衝撃波が斜め衝突した場合の衝突点の移動を示すストリーク写真である。同図は代表

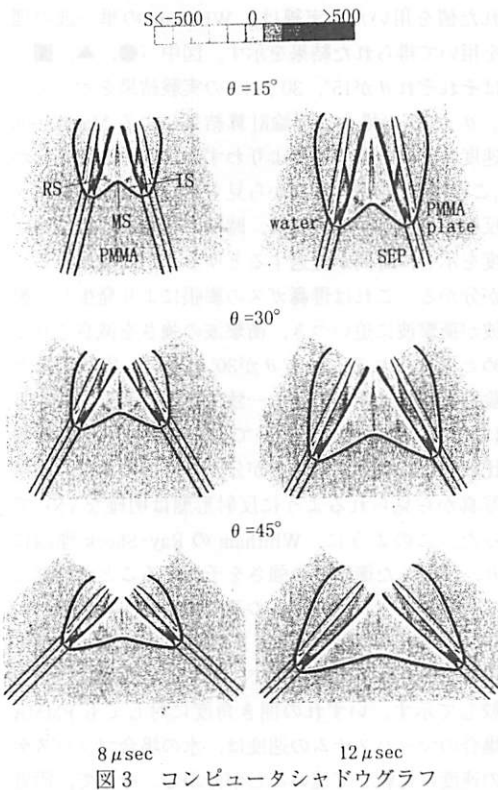


図 3 コンピュータシャドウグラフ

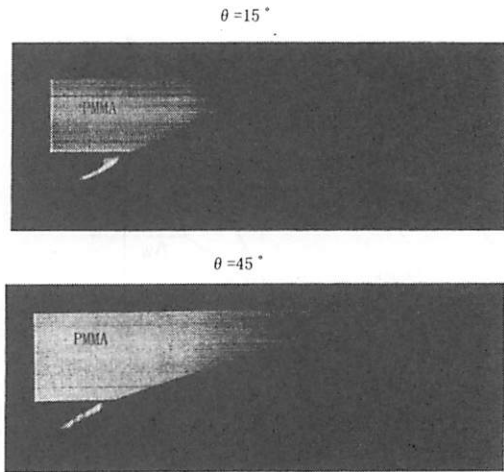


図 4 ストリーク写真

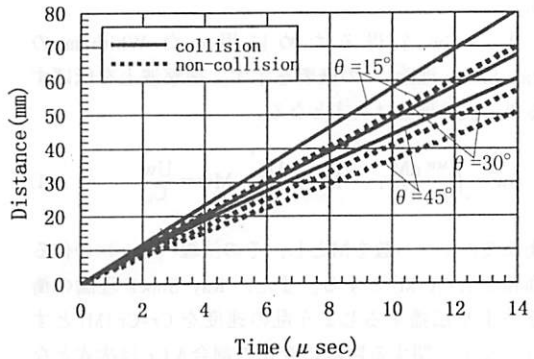


図 5 波動線図

例として $\theta = 15^\circ$ 及び 45° の結果をそれぞれ示している。図中白線は、爆薬の自発光を示す。ストリーク写真をもとに画像処理¹²⁾して得られた波動線図を図 5 に示す。図中の実線は斜め衝突する場合、破線は衝突しない場合の結果をそれぞれ示す。いずれの角度においても、衝突点の移動距離は、同一時間において、衝突しない場合に比べて、衝突する場合がより長いことがわかる。このことは非正常反射を起こしていることを示唆している。これらの場合におけるマッハシステムの理論速度を与える関係式を以下に述べる。図 6(a) にマッハ反射した場合の反射形態、同図(b)にその場合のマッハシステムの速度ベクトルを示す。図中 θ_s は衝撃波面と爆轟波の速度ベクトル D とのなす角、 U_s は入射衝撃波の法線方向の伝播速度で、 $U_s = D \times \sin \theta_s$ である。 ϕ_w は U_s と反射面とのなす角で、

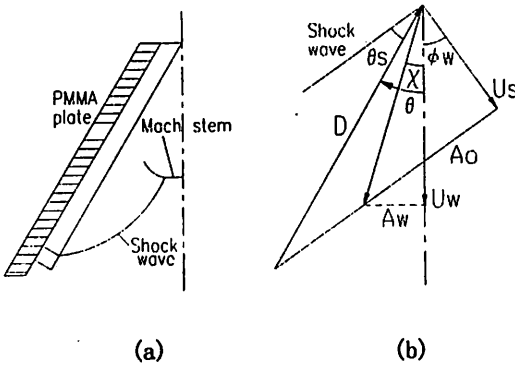


図6 反射形態と速度ベクトル

$\phi_w = 90^\circ - (\theta + \theta_s)$ である。
 χ は三重点の軌跡角で、 U_w はマッハステムの速度である。

次に U_w を得るために用いた Whitham の Ray-Shock 理論¹³⁾ の概要を示す。衝撃波上を伝ばする単一波の理論は次式となる。

$$\phi_w = \int_{M_s}^{M_w} \frac{dM}{AC_r}, \quad MS = \frac{U_s}{C_0}, \quad Mw = \frac{U_w}{C_0} \quad (1)$$

衝撃波のマッハ数を M とし、その法線 (ray) の作る面積を $A = A(M)$ とする。また、Ray-Shock 理論の衝撃波上を伝播するじょう乱の速度を $Cr = Cr(M)$ とする。Ray に関する距離の変化の割合 $A Cr$ は次式となる。

$$AC_r = \sqrt{\frac{-M}{\frac{1}{A} \frac{dA}{dM}}} \quad (2)$$

$$\frac{1}{A} \frac{dA}{dM} = -\frac{C + U_p}{CU_p} \left\{ \frac{C_0}{S} + \frac{\rho_0 C_0^2}{\rho CS} (2M - 1) \right\}$$

ここで音速 C は次式で与えられる。

$$C = C_0(1 - \eta) \frac{\sqrt{1 + S\eta(1 - I\eta)}}{(1 - S\eta)^{3/2}} \quad (3)$$

$$\eta = 1 - \frac{\rho_0}{\rho}, \quad \rho = \frac{\rho_0 S U_s}{(S - 1) U_s + C_0} \quad (4)$$

衝撃波背後の流体粒子速度 U_p と U_s に経験的な線形関係を用いる。

$$U_s = C_0 + S U_p \quad (5)$$

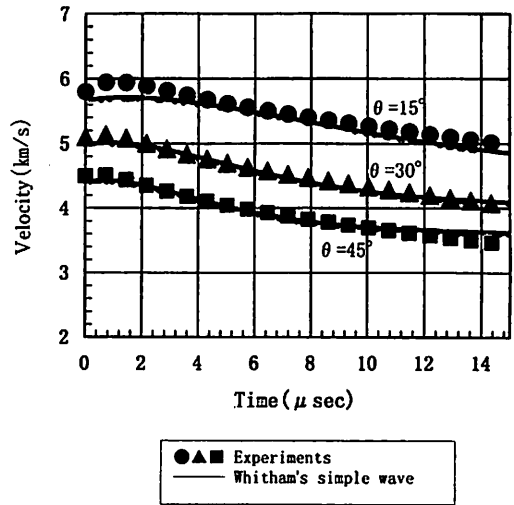


図7 マッハステムの移動速度

図7にこのようにして得られたマッハステムの移動速度の結果を示す。なお理論計算の各時間に対する θ_s と ϕ_w は、斜衝突しない場合の衝撃波形状から得られた値を用いた。実線は、Whitham の単一波の理論を用いて得られた結果を示す。図中 (●, ▲, ■) 印はそれぞれ θ が $15^\circ, 30^\circ, 45^\circ$ の実験結果を示している。 θ が 15° の場合、理論計算結果による Mach stem の速度は実験結果の速度よりわずかに遅いことが分かる。この場合、駒撮り写真から見られる反射形態はマッハ反射であった。実験値は、時間の初期において高い速度を示し、時間が経過するとゆるやかに減速することが分かる。これは爆轟ガスの膨張により発生した膨張波が衝撃波に追いつき、衝撃波の強さを減衰させるためと考えられる。一方 θ が 30° の場合、実験結果と理論計算結果は極めてよく一致することが分かる。さらに、 θ が 45° の場合においても、実験結果と理論値は比較的良好一致することが分かる。この場合、駒撮り写真から見られるように反射形態は明確な vNR であった。このように、Whitham の Ray-Shock 理論により、反射した衝撃波の強さを予測することが可能である。図8にマッハステムの速度を (●, ▲, ■) が PMMA の場合の実験結果、また (○, △, □) が水の場合に得られた実験結果で、同じ開き角度に対して比較して示す。いずれの開き角度に対しても PMMA の場合のマッハステムの速度は、水の場合マッハステムの速度に比較して速いことが分かる。そして、両者

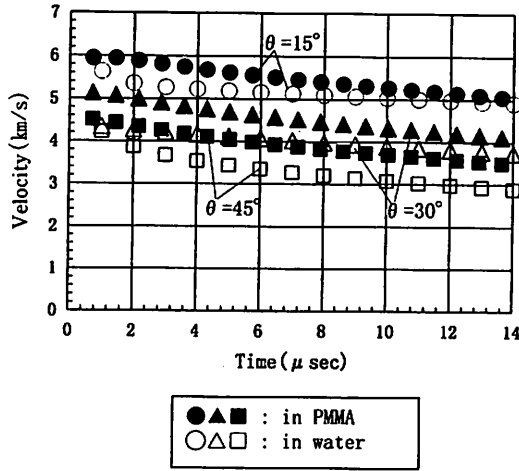


図8 マッハシステム速度の比較

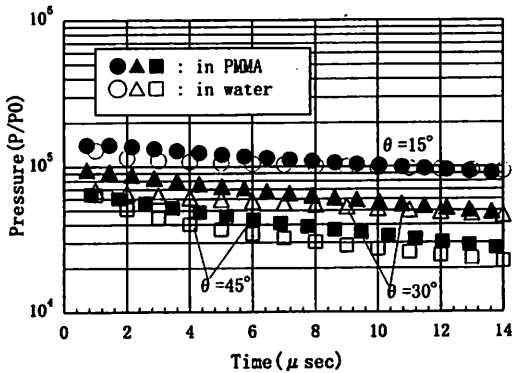


図9 マッハシステム圧力の比較

の速度の差は開き角度が大きくなるほど顕著になることが分かる。マッハシステムの速度が分かれば、それからマッハシステム後方の粒子速度は Rankine-Hugoniot の関係より求まる。それから後方の圧力 P が求まる。その結果を図9に示す。(●, ▲, ■) は PMMA の場合の実験結果, また (○, △, □) は水の場合に得られた実験結果で, 同じ開き角度で比較している。同図横軸は時間, また縦軸圧力は大気圧で無次元化した。いずれの θ においても PMMA 中に発生した衝撃波の後方の圧力は水の場合と同程度であることがわかる。文献(7)で述べた爆薬の爆轟ガスの膨張に JWL 状態方程式を用いて求めた爆轟ガス近傍の初期の衝撃波背後の圧力は媒体が PMMA の場合 $P/P_0 = 5.3 \times 10^4$, 水の場合 $P/P_0 = 4.3 \times 10^4$ であった。これらの値に対して, PMMA の場合で θ が 15° では2.8倍程度, θ が 45° で,

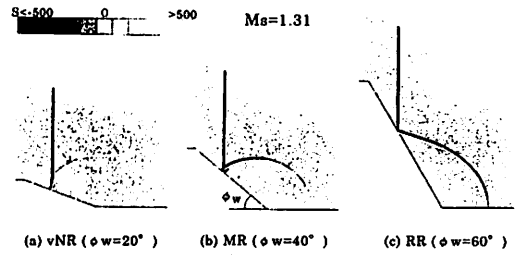
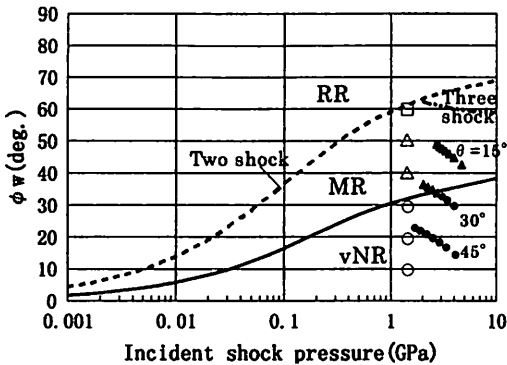


図10 衝撃波の反射形態

1.2倍程度の圧力上昇が得られている。このように同じ開き角度に対して, 媒体が PMMA の反射衝撃波は, 媒体が水の場合よりも速く, 水の場合と同程度の強さの衝撃波が得られる。しかしながら使用に際しては, 媒体が PMMA の場合, 音速が水に比較して大きいいため相対的にマッハ数が低くなり, また反射面に入射する角度が水に比較して大きいいため反射が弱くなることを考慮する必要があると思われる。次に図10は PMMA 中の一樣な強さの平面な衝撃波が反射面に入射する場合の反射形態を数値計算結果で示す。計算には TVD 法¹⁴⁾を用いた。現在のところこのように凝縮媒体中に平面な衝撃波を実験的に発生させることは極めて難しく, 数値シミュレーションに頼らざるを得ない。同図の入射衝撃波マッハ数は1.31で, 反射面の角度 ϕ_w は $20^\circ, 40^\circ, 60^\circ$ である。同図(a)は vNR の場合で, 入射衝撃波から連続的にマッハシステムにつながり, マッハシステムはゆるやかに湾曲している。そして, 反射衝撃波は極めて弱いことが定性的に分かる。同図(b)はマッハ反射を示し, マッハシステムは直線的で, 反射衝撃波も明確で, すべり線も観察できる。同図(c)は正常反射 (RR) の形態である。このように, PMMA 中においても異なる反射形態が存在することが分かる。これらの PMMA 中の反射過程を図11に示す。図11中の横軸は入射衝撃波の圧力, 縦軸は ϕ_w を示す。実線は音波を仮定した反射波とマッハシステムの軌跡角が Whitham の単一波の理論を用いて求めた三重点軌跡角度に等しいとした場合, MR と vNR 反射形態の境界である。二点鎖線は三衝撃波理論で反射波とすべり線のなす角度が 90° で, Colella, Henderson 提案した¹⁵⁾ MR と vNR の境界である。破線は二衝撃波理論による RR と非正常反射 (IR) の境界である。また, ▲ (MR) と ● (vNR) は実験値を示している。この実験値に対する入射衝撃波として衝突しない場合の衝撃波面と対称軸 (図6の中心線) との交点を採用



反射形態の領域
 実験 ●:vNR ▲:MR ■:RR
 数値計算(TVD) ○:vNR △:MR □:RR

図11 反射形態の領域

している。ストリーク写真撮影結果から得られた衝撃波形状を用いて、対称軸上の衝撃波の接線角度 θ_s を得ることができる。そして、 $U_s = D \times \sin \theta_s$ から入射衝撃波の速度 U_s を算出し、衝撃波の関係式を用いて入射衝撃波の圧力を求めた。その他の記号は、一様な強さの平面な衝撃波が反斜面に入射する場合の数値計算結果(図10参照)である(○:vNR, △:MR, □:RR)。図11からRRとIRの境界は二衝撃波理論が数値計算結果とよく一致することが分かる。また、MRとvNRの境界は、三衝撃波理論よりも、Ray-Shock理論が実験結果ならびに数値計算結果とよく一致することが分かる。

4. まとめ

高性能爆薬の爆轟によって発生した2つの衝撃波がPMMAに入射し、反射を起こす過程を光学的観察実験ならびに数値解析およびWhithamのRay-Shock理論をもとに解析した。2つの衝撃波の開き角 θ が15°の場合正常反射に近い形状が得られ、30°の場合にはマッハ反射が観測された。また45°の場合にはマッハステムが大きく湾曲したvNRが観察された。PMMAの場合に得られたマッハ反射した場合のマッハステム後方の圧力は水のそれに比して同程度であるが、その速度が水の場合よりも速いことが分かった。そして衝突の初期では衝突しない場合の理論値に対して、PMMAの場合で θ が15°では2.8倍程度、 θ が45°で、1.2倍程度の圧力上昇が得られている。このように凝

縮媒体中に発生する衝撃波の反射を用い、爆薬のエネルギーを有効に利用して各種金属加工に用いる装置の圧力媒質としてPMMAの有効性が明らかになった。

謝辞

本研究は工業火薬協会補助を得て行われた研究の一部である。ここに感謝の意を表します。実験は熊本大学工学部付置衝撃エネルギー実験所で行われた。実験に際しては同実験所の石谷氏に負うところが多い、ここに合わせて謝意を表します。

参考文献

- (1) 外本和幸, 藤田昌大, 伊東繁, 千葉昂, 鉄と鋼, 80 (1994), pp125
- (2) S.Itoh, S.Kubota, S.Nagano, M.Fujita, Journal of Pressure Vessel Technology, vol.120, pp51-55, Transactions of ASME, (1995)
- (3) 伊東繁, 久保田士郎, 長野司郎, 外本和幸, 藤田昌大, 千葉昂, 機論, 61-588, B (1995), pp2981-2986
- (4) Adadurov G.A., Dremine A.N., Kanyel G.I., Zhurm., Prikl., Mekh., Tekhn., Phys., 2(1969), pp126
- (5) Carton E.P., Stuivinga M., Verbeek R., Explomet'95 (1996), pp29-36
- (6) 灘光 陽, 藤田昌大, 伊東 繁, 機論, 64-621, B (1998), pp1379-1384
- (7) 灘光 陽, 藤田昌大, 伊東 繁, 火薬学会誌, 59-6 (1998), pp294-301
- (8) 伊東繁, 久保田士郎, 吉良章夫, 長野司郎, 藤田昌大, 火薬学会誌55-5, (1994), pp202-208
- (9) A.A.Amesden, H.M.Ruppel and C.W.Hirt, "Sale : A simplified ALE computer program for fluid flow at all speeds," LA-8095, UC-32(1980)
- (10) C.L.Mader etc. "LASL DATA CENTER FOR DYNAMIC MATERIAL PROPERTIES" Univ. California Press (1980)
- (11) T.Minota, M.Nishida, M.G.Lee, Shock Waves, Edited by B.Sturtevant, J.E.Shepherd and H.G.Hornung, World Scientific, vol.1, (1996) pp545-550
- (12) Bervington P.R., Data Reduction and Error Analysis for Physical Sciences, McGraw Hill, New York, Ch. 11, (1969)
- (13) Whitham G.B, J. of Fluid Mechanics, vol.2 (1957), pp145-171

- (14) Yee, H.C. and Harten, A., AIAA J., 25 (1987), pp266-274
- (15) Colella, P. and Henderson, L. F., J. Fluid Mech., 213(1990), pp71-94