

## 高性能爆薬の爆轟によってPMMA中に発生した衝撃波について(第2報)

## 衝撃波の反射

灘光 陽\*, 藤田昌大\*\*, 伊東 繁\*\*

凝縮媒体としてPMMA(polymethylmethacrylate)中ならびに水中を伝播する衝撃波が反射する過程の特性を, 光学的観察実験, 数値解析により調べた。第1報では, 爆薬の爆轟によってPMMA中に発生した衝撃波の基本特性を調べ, 水中に発生する水中衝撃波との比較検討を行い, 圧力媒体として発生圧力が高いこと, 爆薬の薬厚の10倍程度離れた所での圧力は, 水の場合の1.5倍程度あることを明らかにした。本報告では, 爆薬の爆轟によって発生した2つの衝撃波を媒体中に伝播させ, 衝突させて発生する反射過程を, 光学的観察実験ならびに数値計算によって調べた。PMMA中を伝播する衝撃波が衝突することによって, 入射角度が小さい場合は正常反射, 大きくなるにつれてマッハ反射さらには, von Neumann反射に移行することが, 水の場合と同様に明らかになった。また, 開き角度が同じ場合, 反射によって達成される圧力は水の場合に比べて1.4から2.8倍程度であることが明らかになった。

## 1. はじめに

筆者らは高性能爆薬を水中で爆轟させ, 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<sup>1)</sup>。例えば高難度焼結粉末を衝撃固化させるために, 水中衝撃波を圧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 $\rho_c = 1310 \text{ kg/m}^3$ ,  $D = 6970 \text{ m/s}$ )を用いた場合, およそ18GPa程度であり, SEPのC-J圧のおよそ1.2倍程度であった<sup>2)</sup>。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, マッハシステムが湾曲した結果<sup>3)</sup>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, マッハシステムが湾曲

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<sup>4)</sup>。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, 同じようにマッハシステムの湾曲した反射形態が, Stuiyinga等<sup>5)</sup>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, マッハシ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, 衝撃波の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ならびに数値計算法を用いて解明し, 理論的な解析を行い新しい知見を得た<sup>6, 7)</sup>。本論文では, 高性能爆薬の爆轟によって発生した衝撃波が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. 実験方法及び計算方法

## 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Fig. 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

1998年9月1日受理

\*第一工業大学機械工学科

〒899-4332 国分市中央1-10-2

TEL 0995-45-0640

FAX 0995-47-2083

\*\*熊本大学工学部知能生産システム工学科

〒860-8555 熊本市黒髪2-39-1

TEL 096-342-3741

FAX 096-342-3741

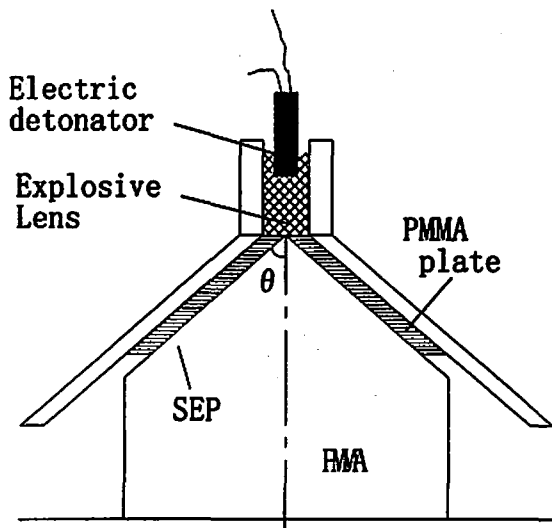


Fig. 1 An illustration of experimental setup

能爆薬SEP(旭化成工業(株)製, PETN 65%, Paraffine 35%, 充填密度 $\rho_c=1310\text{kg/m}^3$ ,  $D=6970\text{m/s}$ )

を、開き角 $2\theta$ で設置した。実験に採用した開き角は、 $30^\circ\sim 90^\circ$ まで $30^\circ$ おきである。爆薬上部には平面な爆轟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ことで平面爆轟が得られるようにした<sup>8)</sup>。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。爆薬の爆轟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、反射現象が生じる。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 $50\mu\text{s}$ )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/s, 最高流し速度1 ns/mm)を使用した駒撮り写真撮影法によって行った。また反射衝撃波の足(マッハステム)の速度を調べるために、図中一点鎖線の方にスリットを

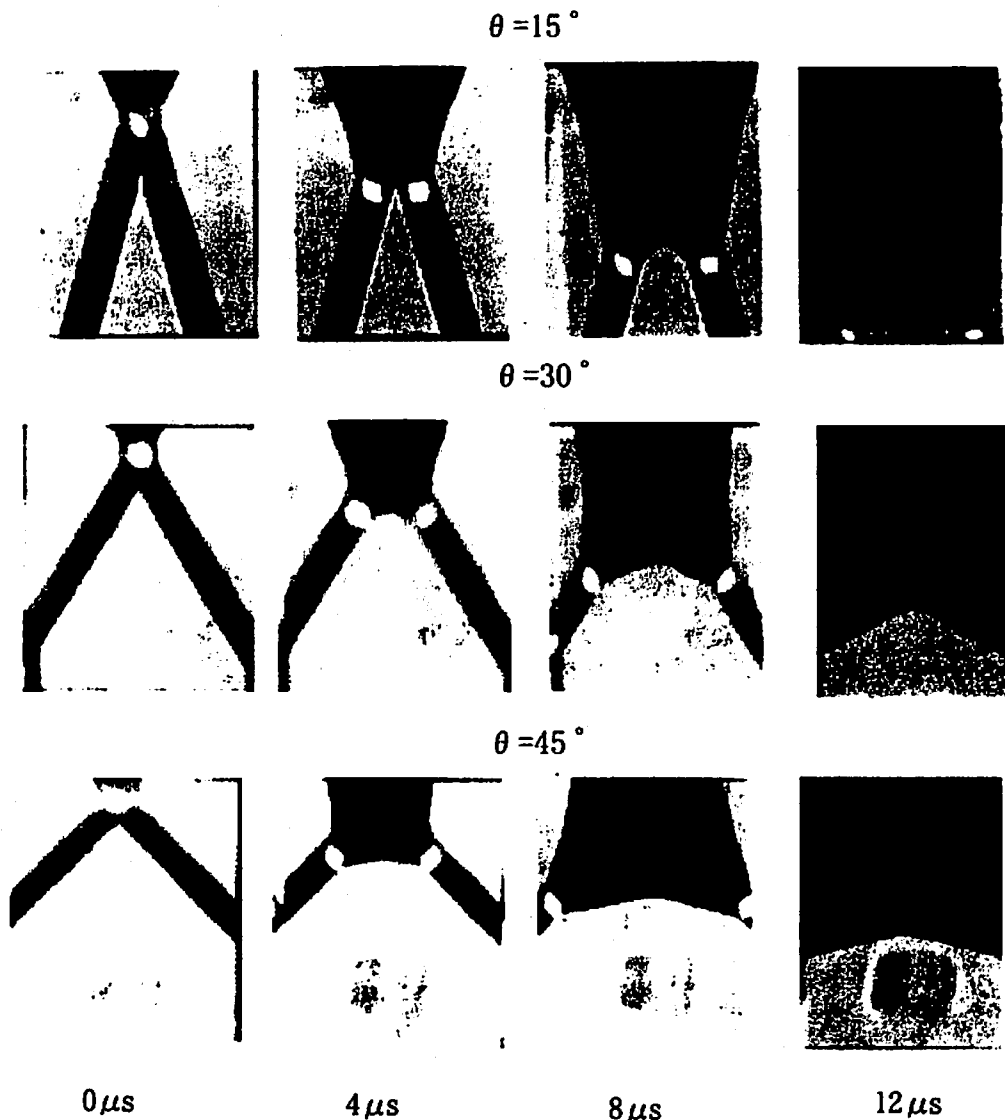


Fig. 2 Framing photographs of the shock reflection in PMMA

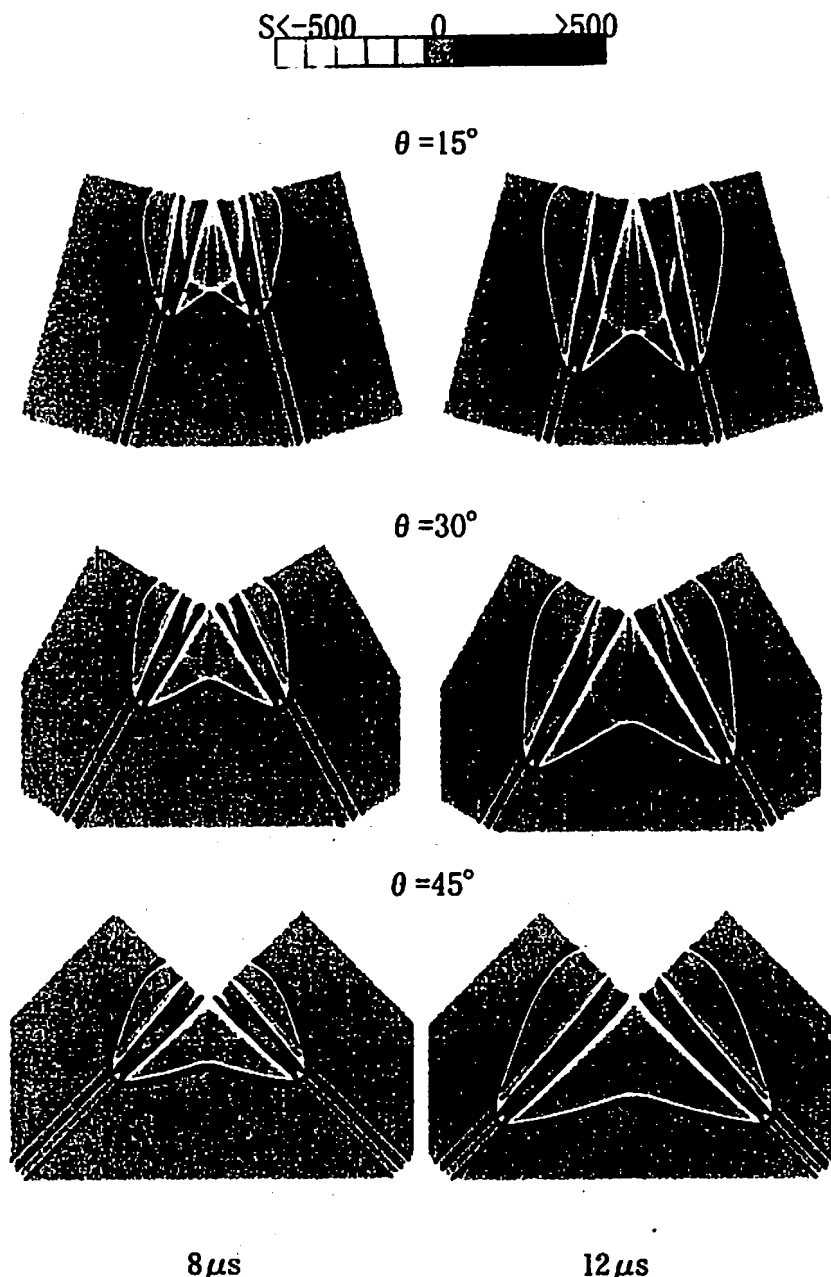


Fig. 3 Computer shadowgraphs of the shock reflection in PMMA

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り時間校正を行った。

## 2.2 数値計算方法

数値計算は, Arbitrary-Lagrangian-Eulerian法<sup>9)</sup>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で行った。水, PMMAについては前報<sup>8)</sup>と同様Mie-Grüneisenの状

態方程式<sup>10)</sup>を用いた。爆薬の爆轟過程の数値シミュレーションの詳細は, 前出論文<sup>3)</sup>を参照されたい。計算場は1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 275AXP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

Fig. 2に, PMMA中に発生した衝撃波の斜衝突の様子を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, 時間は撮影開始時間を $0 \mu\text{s}$ とし,  $4 \mu\text{s}$ 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

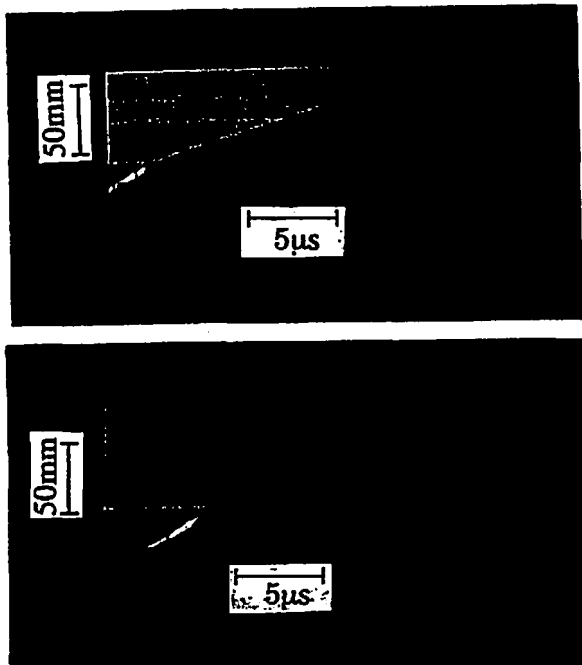


Fig. 4 Streak photographs of shock reflection in PMMA

vNR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Fig. 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する。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<sup>11)</sup>等の方法によった。図中のISは入射衝撃波、MSはマッハステム、RSは反射衝撃波を示す。同図から $\theta = 15^\circ$ の場合、明確な反射衝撃波が見られ、ほぼ直線的なマッハステムが存在するマッハ反射形態であることがわかる。 $\theta = 45^\circ$ の場合マッハステムは

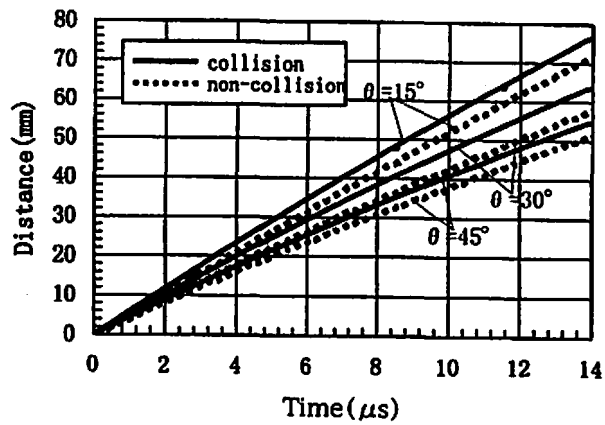


Fig. 5 X-t wave diagrams of the shock reflection in PMMA

大きく湾曲し、反射衝撃波も明確でないvNR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vNRを起こすことがわかる。

Fig. 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。同図は代表例として $\theta = 15^\circ$ 及び $45^\circ$ 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<sup>12)</sup>して得られた波動線図をFig. 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ステムの理論速度を与える関係式を以下に述べる。Fig. 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ステムの速度ベクトルを示す。図中 $\theta_s$ は

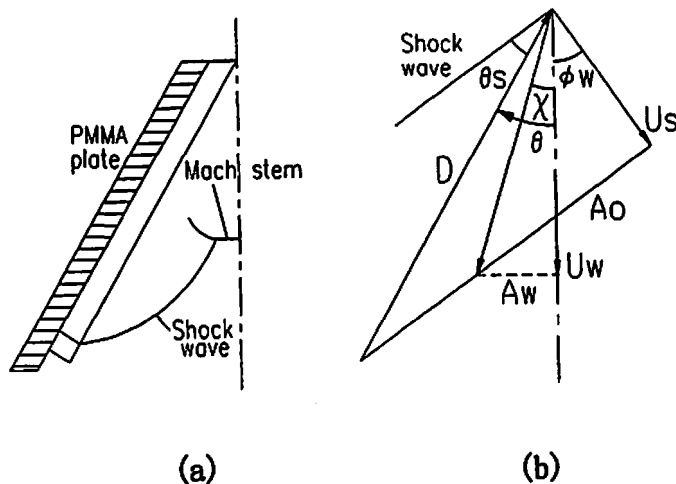


Fig. 6 A theory of the Mach stem velocity on the reflected shock surface

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、 $U_s = D \sin \theta$  である。 $\phi_w$  は  $U_s$  と反射面とのなす角で、 $\phi_w = 90 - (\theta + \theta_r)$  である。 $\chi$  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<sup>13)</sup> の概要を示す。衝撃波上を伝播する単一波の理論は次式となる。

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

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  $C_r = C_r(M)$  とする。Ray に関する距離の変化の割合  $AC_r$  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。

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

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

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。

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

Fig. 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  $U_s$  と  $\phi_w$  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  $\theta = 15^\circ, 30^\circ, 45^\circ$  の実験結果を示している。 $\theta = 15^\circ$  の場合、理論計算結果によるマッハステム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  $\theta = 30^\circ$  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

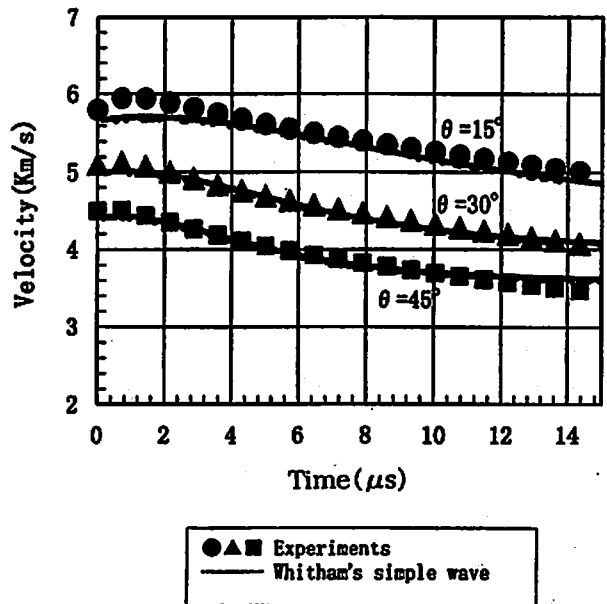


Fig. 7 The comparison of the Mach stem velocity of the reflected shock obtained in PMMA

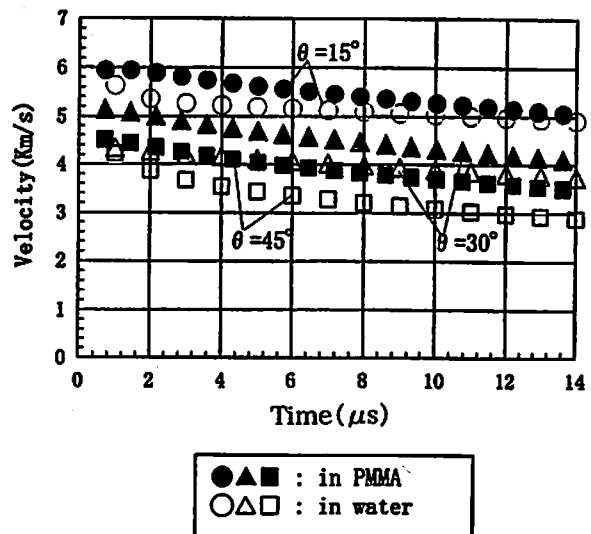


Fig. 8 The comparison of the Mach shock velocity caused in both PMMA and water

る。さらに、 $\theta = 45^\circ$  の場合においても、実験結果と理論値は比較的よく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。Fig. 8 にマッハステムの速度について、(●, ▲, ■) 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を示し、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、水の場合と比較して速いことが分かる。そして、両者の速

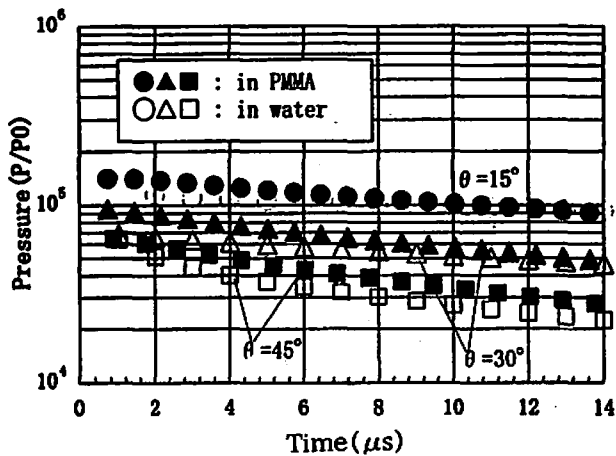


Fig. 9 The pressure along the Mach stem in both PMMA and water

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。マッハステムの速度がわかれば、それからマッハステム後方の粒子速度はRankine-Hugoniotの関係より求める。それから後方の圧力 $P$ が求まる。その結果をFig. 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、縦軸に示す圧力は大気圧で無次元化した。いずれの $\theta$ 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比べて高いことがわかる。前出論文<sup>6)</sup>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の場合の無次元圧力 $P/P_0$ は $5.3 \times 10^4$ 、水の場合で $P/P_0 = 4.3 \times 10^4$ であった。これらの値に比較して、PMMAの場合で $\theta$ が $15^\circ$ では最高で2.8倍程度、 $\theta$ が $45^\circ$ でも最高で1.2倍程度の圧力上昇が得られた。しかしながらいずれの開き角度に対し

ても、時間が進行するにつれて、両者の圧力差が小さくなる傾向が明らかになった。しかも $\theta$ が小さい場合にその傾向が大きいことが分かった。これは、媒体がPMMAの場合、音速が水に比べて早いため、爆薬後方部からの爆轟生成ガスの膨張の影響も大きく受けるからである。得られた結果の範囲内で、PMMAを圧力媒体として用いる場合は、水に比較して高い圧力得られることが分かった。

Fig. 10は、各 $\theta$ に対して、二つの衝撃波が衝突し、マッハ反射あるいは $\nu$ NRした場合には、PMMA中に発生した圧力の3次元表示を示す。図中MSはマッハステムを示し、括弧( )の数値は、その位置における圧力値を示す。時間は $12 \mu s$ である。反射面でのマッハステムの足における圧力は $\theta = 15^\circ$ で8.6 GPaであるが、 $\theta$ が大きくなるにつれて減少していることが分かる。 $\theta = 45^\circ$ では前述のように $\nu$ NRであり、圧力も3.3 GPaと低くなっている。

#### 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、数値解析ならびにWhithamのRay-Shock理論をもとに解析した。2つの衝撃波の開き角 $\theta$ が $15^\circ$ の場合正常反射に近い形状が得られ、 $30^\circ$ の場合にはマッハ反射が観測された。また $45^\circ$ の場合にはマッハステムが大きく湾曲した $\nu$ NR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比して、PMMAの場合、 $\theta$ が $15^\circ$ では2.8倍程度、 $\theta$ が $45^\circ$ 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

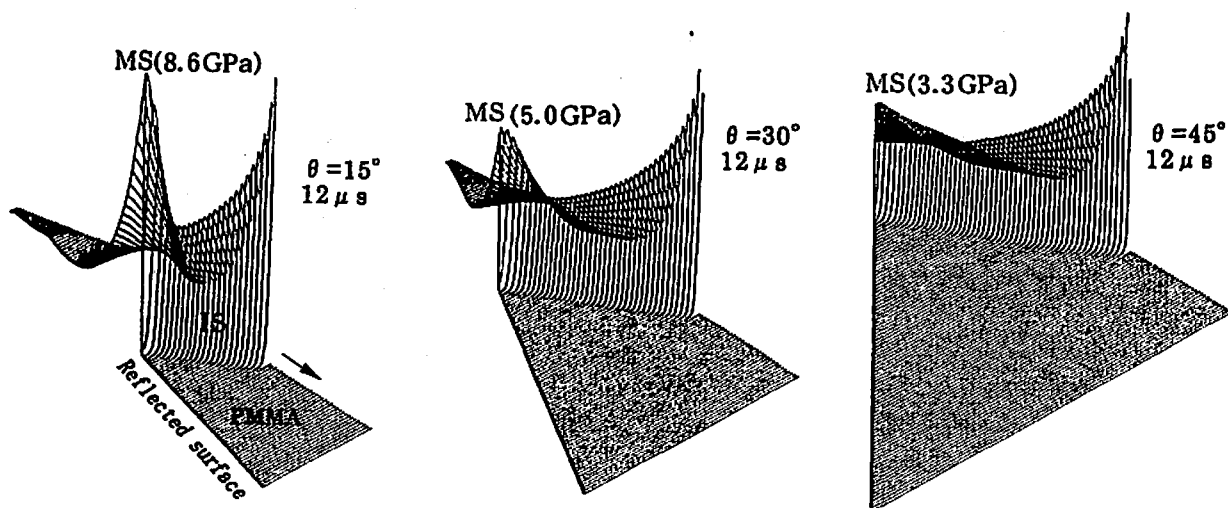


Fig. 10 Three dimensional pressure distributions in PMMA at  $12 \mu s$  at each open angle

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附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。

#### 文 献

- 1) 外本和幸, 藤田昌大, 伊東繁, 千葉昂, 鉄と鋼, 80, 125(1994)
- 2) S. Itoh, S. Kubota, S. Nagano and 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, 2981-2986 (1995)
- 4) Adadurov G. A., Dremin A. N., Kanyel G. I., Zhurm., Prikl., Mekh., Tekhn., Phys., 2, 126 (1969)
- 5) E. P. Carton, M. Stuiyinga and R. Verbeek, Explomet'95, 29-36(1996)
- 6) 瀧光陽, 藤田昌大, 伊東繁, 機論, 64-621, B, 1379-1384(1998)
- 7) 瀧光陽, 藤田昌大, 伊東繁, 機論, 64-622, B, 1713-1719(1998)
- 8) 瀧光陽, 藤田昌大, 伊東繁, 火薬学会論文集投稿中, 1998年
- 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 et al., "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, 545-550(1996)
- 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, 145-171(1957)

# On shock waves generated in PMMA by explosion of high explosives (II)

## Shock wave reflection

by Yoh NADAMITSU\*, Masahiro FUJITA\*\* and Shigeru ITOH\*\*

The characteristics of the reflection process of the shock wave propagating in two condensed matter, PMMA (polymethylmethacrylate) and water, were investigated by optical observation and numerical simulation. In our first report on this subject the investigation of the basic features of shock wave generated in PMMA by the detonation of high efficient explosive was carried out and the comparison with the occasion of the shock wave generated in water was performed. It is also known that as one pressure-transmitting- medium, PMMA can provide higher shock pressure and at the position of 10 times explosive thickness apart from the original explosive location the pressure in the case of PMMA is 1.5 times greatness compared with it in water. In this paper the reflection process during the collision of two shock waves in PMMA 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.

(\*Department of Mechanical Engineering, Daiichi College of Industry,  
Chuo 1-10-2, Kokubu, Kagoshima 899-4332, Japan

\*\*Department of Mechanical Engineering & Materials Science,  
Kumamoto University, Kurokami 2-39-1, Kumamoto 860-8555, Japan)