

高性能爆薬の爆轟によって PMMA 中に発生した衝撃波の挙動について

灘光 陽¹, 本田隆志¹, 藤田昌大², 伊東 繁³

On Shock Waves Generated in PMMA by Explosion of High Explosives

By Yoh NADAMITSU, Takashi HONDA, Masahiro FUJITA and Shigeru ITOH

This paper presents the results of the investigation on the basic features of the shock propagation in PMMA (polymethylmethacrylate) by both optical observation and numerical analysis techniques. The selection of PMMA as the study object was based on the considerations that it is a kind of condensed matter with relatively easy acquirement and simple machinery processing. The study was conducted at the aim of the possibility of the utilization of PMMA as a high-pressure transmitting medium in the material processing field that employs the shock pressure from the detonation wave propagation occurred in condensed matter by the detonation of explosives. The properties of the shock propagation in PMMA were compared with those in water. It demonstrates that the shock propagation velocity in PMMA is faster than that in water even under the same explosive condition, and the decrease of shock velocity at the position apart from the explosive is also small compared to the case of water. The optical observation indicates a much discrepancy exists between the shock propagation configurations in PMMA and in water.

key words : Condensed Matter, Shock Waves, Explosion, Numerical Analysis

1 はじめに

爆薬を凝縮媒質の中で爆轟させることにより発生した衝撃波を、爆薬から離れて設置した被加工物に作用させて加工を行う各種加工法が、従来から研究・開発されてきた。これらの加工法は、媒質に生じた衝撃波によってかなり広い範囲に圧力を作用させることが可能である。また媒質に水等の液体を用いることにより被加工物に熱的影響を与えない等の利点がある。筆者らは従来媒質として水を用い、爆薬の水中爆轟によって発生した水中衝撃波を制御し、加工法への有効利用を図ってきた。例えば水中衝撃波の収束を用いて、粉末の衝撃固化実験を行ってきた⁽¹⁾⁽²⁾。この際には、爆薬の水中爆轟によって発生した水中衝撃波の挙動を

十分に理解することが極めて重要であり、筆者らは水中衝撃波の伝播・収束過程を、光学的観察並びに数値計算法を用いて解明してきた⁽³⁾⁽⁴⁾。さらに水中衝撃波を利用することによって、爆薬を直接利用するより圧力の作用時間を長くすることができることも明らかにした。また水中衝撃波が装置壁や、お互いに干渉することによって発生する反射過程の解明についても実験的、理論的な解明をおこない、発生するマッハ反射ならびに von Neumann 反射についての知見を得た⁽⁵⁾⁽⁶⁾。

ところで、PMMA (polymethylmethacrylate) は入手しやすく、比較的手頃な凝縮系物質であり、その加工性も高く、比較的安価に供給される。本論文では圧力媒質としての PMMA を用いる可能性を検討するため

¹⁾ 第一工業大学機械工学科

²⁾ 熊本工業大学機械工学科

³⁾ 熊本大学工学部知能生産システム工学科

に、爆薬の爆轟によって発生した衝撃波が、PMMA中をどのように伝播するかについて、光学的実験ならびに数値解析を行った結果を報告する。

2 PMMA 中を伝播する衝撃波の可視化実験

光学的写真観察実験は、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, せん光時間50 μ 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/s, 最高流し速度1 nsec/mm) を使用したシャドウグラフ法によって行った。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。

本実験に用いられた実験装置を図1に示す。実験装置は PMMA ブロック (厚さ50.0mm) に、厚さ5.0mm の可塑性爆薬 SEP (旭化成工業(株)製, 充填密度1310kg/m³, 爆轟速度6970m/sec) を貼りつけて製作した。主爆薬の前面に爆薬中を伝播する爆轟波が平面になるように、SEP と HABW (旭化成(株)製, 爆速5000m/sec からなる爆薬レンズを用いた⁽³⁾。装置全体を PMMA 製の水槽に沈め、実験を行った。SEP の起爆は、6号電気雷管 (旭化成工業(株)製) によった。爆薬の爆轟によって PMMA 中に衝撃波が発生し、伝播する。この衝撃波を光学的に観察した。撮影された PMMA 中を伝播する衝撃波のストリーク写真を画像処理ならびに関数近似処理し、衝撃波の基本特性を理解する定

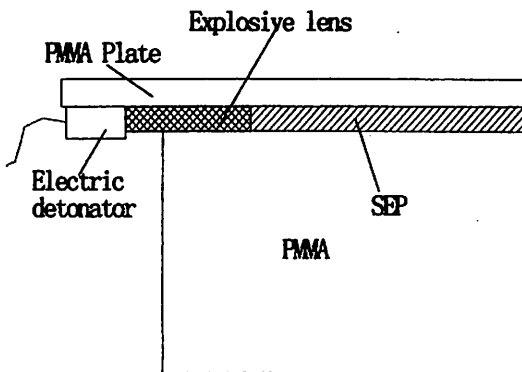


図1 実験装置

量的な結果を得る。このような流れの可視化法を用いて、水中衝撃波の基本特性を明らかにする手法を提案してきた⁽⁷⁾。

3 数値解析方法

本研究の対象となるような爆薬の水中爆轟現象では、爆薬中を爆轟波が伝播するにつれ、PMMA 中に衝撃波が発生し伝播する。その際爆轟波後方の爆轟ガスと PMMA との界面も移動する。このように界面が移動するような場を数値解析する場合、一般に任意の流体粒子に着目してその速度や加速度などの時々刻々の変化を観測する Lagrange の方法を用いるのが有効である。しかしながら、水中爆轟現象は一般に流体粒子の大きな変形を伴うため、上述の方法では解が破壊することがしばしば見られる。そこでこの方法と、速度や圧力などの変化を空間内の点の位置と時間の関数として取り扱う Euler の方法を組み合わせた方法 ALE 差分法⁽⁸⁾を用いて数値解析した。この方法の特徴は、異なった媒質が存在しているような場も比較的容易に解析できるところにある。さらに陰解法が容易に適用でき、この場合、解の安定性の条件が陽解法に比べて大きく緩和され、計算時間が短縮できるという利点もある。

2次元の質量保存式は、

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial \rho u}{\partial x} + \frac{\partial \rho v}{\partial y} = 0. \quad (1)$$

であり、 x および y 方向の運動量の式はそれぞれ次のようになる。

$$\frac{\partial \rho u}{\partial t} + \frac{\partial \rho u^2}{\partial x} + \frac{\partial \rho uv}{\partial y} + \frac{\partial (P+q)}{\partial x} = 0, \quad (2)$$

$$\frac{\partial \rho v}{\partial t} + \frac{\partial \rho uv}{\partial x} + \frac{\partial \rho v^2}{\partial y} + \frac{\partial (p+q)}{\partial y} = 0. \quad (3)$$

また、エネルギーの式は次のように与えられる。

$$\frac{\partial \rho e}{\partial t} + \frac{\partial \rho e u}{\partial x} + \frac{\partial \rho e v}{\partial y} + (p+q)D = 0, \quad (4)$$

ここで D は速度の発散で、

$$D = \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y}. \quad (5)$$

q は衝撃波計算に用いられる人工粘性圧力である。

$$q = \lambda_0 \rho A D \min(0, D), \quad (6)$$

ここで A は格子セルの面積である。

計算は上述の質量、運動量、エネルギーの保存則に状態方程式を組み合わせて行った。水および PMMA

については、次式で表される Mie-Grüneisen の状態方程式⁽⁹⁾を用いた。

$$P = \frac{\rho_0 C_0^2 \eta}{(1-s\eta)^2} \left(1 - \frac{\Gamma \eta}{2}\right) + \Gamma \rho_0 e \quad (7)$$

ここで C_0 , S は実験で求められる定数である。また, $\eta = 1 - \rho_0/\rho$ であり, ρ は密度, Γ は Grüneisen 係数である。これらの定数を表 1⁽⁹⁾ に示す。また爆薬の爆轟生成ガスには, 筆者らのシリンダー膨張試験によって得られた JWL 状態方程式⁽⁴⁾を用いた。次式に JWL 状態方程式を示す。

$$P = A \left(1 - \frac{\omega}{R_1 V}\right) \exp(-R_1 V) + B \left(1 - \frac{\omega}{R_2 V}\right) \exp(-R_2 V) + \frac{\omega \rho_0 e}{V} \quad (8)$$

ここで, A , B , R_1 , R_2 および ω は実験的に求められる定数 (JWL パラメータ) であり, V は爆薬の充てん密度と爆轟生成ガスの密度比 (ρ_e/ρ) である。爆薬の爆轟過程の数値シミュレーションは, 伊東⁽¹⁾と同様である。爆薬の爆轟ガスの JWL パラメータを表 2 に示す。

計算場格子数は爆薬長手方向に 440, その垂直方向に 280 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。

4 結果および考察

光学的観察実験で得られた代表的な PMMA 中の衝撃波の駒撮り写真を図 2 に示す。図中下部には数値計算によって得られた同一時刻における衝撃波の形状を示す。写真中扇型に広がっているのが衝撃波である。

表 1 Mie-Grüneisen 係数

Material	PMMA	Water
$\rho_0(\text{kg/m}^3)$	1181.0	1000.0
$c(\text{m/s})$	2260.0	1489.0
s	1.816	1.786
γ	0.75	1.65

表 2 JWL パラメータ

A (GPa)	B (GPa)	C (GPa)	Pcj (GPa)
364.99	2.3097	0.0928	15.910
R_1	R_2	ω	$E_0(\text{J/Kg})$
4.30	1.00	0.28	2.16×10^6

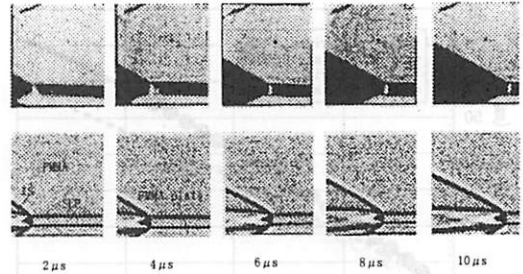


図 2 フレーミング写真とコンピュータシャドウグラフ

衝撃波は PMMA 中をほぼ定常的に伝播している様子が定性的に理解できる。計算結果は, 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⁽¹⁰⁾等の方法によった。図中, 線が濃く見えるところが衝撃波に対応している。計算結果中の IS は PMMA 中への入射衝撃波を表す。両図の比較により, 数値計算の妥当性が定性的に理解できる。得られたストリーク写真を図 3 に示す。図中横軸スケールは時間を, 縦軸スケールは距離を示す。図中白色で見えるのは爆薬中の爆轟波である。同図は衝撃波の伝播速度を示す。写真を画像解析することによって衝撃波の位置と時間の関係を得ることができる。その結果を図 4 に示す。図中の (●) は PMMA の場合の実験結果, 実線は同計算結果を示す。(○) は水の場合に得られた実験結果, 破線は同計算結果を示す。またいずれの媒質に対しても, 実験と計算結果は極めて良い一致を示すことが同図からわかる。PMMA 中を伝播する衝撃波は水中衝撃波に比べて, 同一時間に到達する距離が長いことがわかる。その距

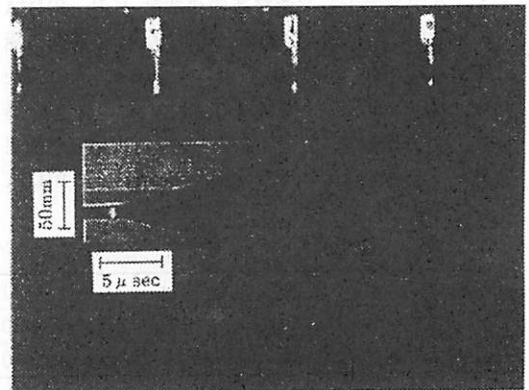


図 3 ストリーク写真

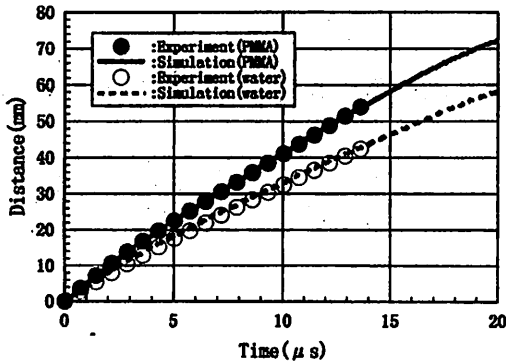


図4 爆薬近傍の媒質中を伝ばする衝撃波の位置

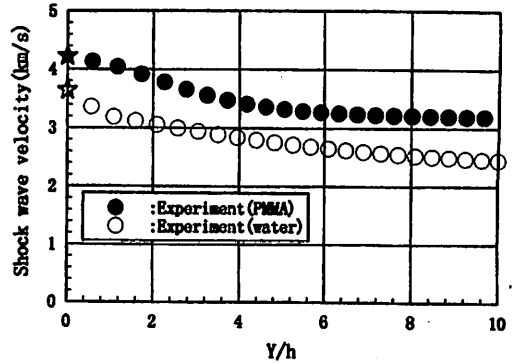


図5 媒質中の衝撃波速度

離の差は、時間が経つにつれて大きくなるのがわかる。このことはPMMA中を伝播する衝撃波の速度が大きいことを示す。発生した衝撃波速度を比較するために、衝撃波速度を求めた。同図より、衝撃波の距離と時間に関する関数を、nonlinear curve fitting法⁽¹¹⁾により次式のように関数近似した。

$$\frac{Y}{D} = A_1\{1 - \exp(-B_1 t)\} + A_2\{1 - \exp(-B_2 t)\} + A_3\{1 - \exp(-B_3 t)\} + \frac{C_0}{D}t \quad (9)$$

なお、 A_1, A_2, A_3 、および B_1, B_2, B_3 は定数である。水およびPMMAの場合の結果を表3に示す。式(9)は t に関して微分し、 t を大きくすると dY/dt は急激に C_0 に漸近する。これは、衝撃波の速度が時間の経過により音速にまで減衰すると仮定して近似式を決定したことによる。このようにして得られた衝撃波速度と時間との関係を図5に示す。同図の横軸は、爆薬からの垂直方向の距離を爆薬の厚さで無次元化した距離を示す。水中で発生した衝撃波の速度を(○)、PMMA中に発生した衝撃波の速度を(●)で示す。爆薬の極近傍では、PMMA中の衝撃波速度は約4230m/secであった。一方、水の場合は約3650/secである。爆薬面からの距離が大きくなるにつれて、衝撃波の速度は減少してゆくことが同図から明らかである。PMMA

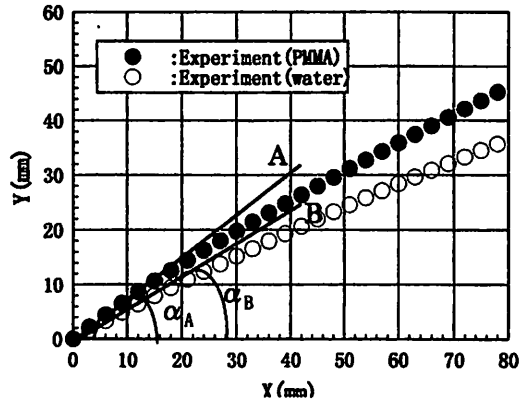


図6 衝撃波形状と初期衝撃波角度

中の衝撃波の減衰は、水のそれに比較して緩やかであることがわかる。発生した衝撃波の形状を図6に示す。

同図の横・縦軸は距離を示す。図中の角度 α_A は、PMMA中に発生した衝撃波と爆薬面のなす初期角度、同様に α_B は水中衝撃波と爆薬面のなす初期角度である。理論計算は、爆薬の爆轟ガスの状態方程式がJWL状態方程式の場合とポリトロップ気体の場合⁽¹²⁾の両者を考慮した。膨張と干渉の概念図を図7に示す。同図に示すように、高性能爆薬を凝縮媒体に爆発させ

表3 衝撃波形状に対するカーブフィッティングパラメータ

	$A_1(s)$	$A_2(s)$	$A_3(s)$	$B_1(s^{-1})$	$B_2(s^{-1})$	$B_3(s^{-1})$
PMMA	27.139	0.994	-0.370	1.103×10^{-3}	0.0849	0.153
water	21.99	2.908	4.780×10^{-2}	4.984×10^{-3}	0.1308	2.375

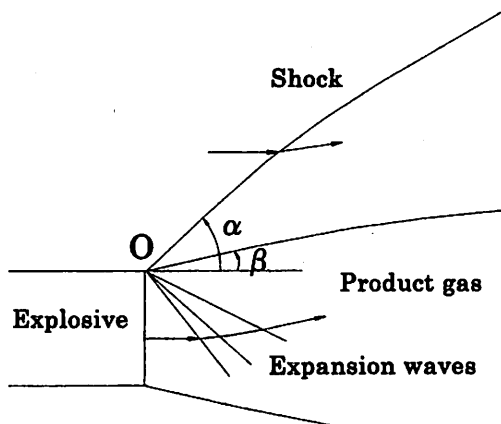


図7 衝撃波と爆轟ガスの模式図

ると、爆轟ガスが膨張すると同時に媒体中に衝撃波が発生する。衝撃波静止座標系（以下衝撃波静止座標系で理論式を導く）に対し、衝撃波を横切って流れが転向する角度を β とすると、図中点 O で、この角度は爆轟ガスと媒体との境界面の傾き角度に一致する。そして、爆轟ガス内に発生している膨張波を流体粒子が横切る場合の β と圧力の関係は流れ場に単一波の領域を仮定して特性式を用いて次式で示される。

$$\beta = \int_{q_0}^q \sqrt{M^2 - 1} \frac{dq}{q} \quad (10)$$

ここに、 $M = q/C_s$ 、 q 、 C_s は流体粒子速度と音速である。そして C_s は次式で示される。

$$C_s^2 = \left(\frac{dp}{d\rho} \right)_s = -\nu^2 \left(\frac{d\nu}{d\rho} \right)_s, \quad \nu = \frac{1}{\rho} \quad (11)$$

爆轟ガスの膨張にポリトロブ気体の場合、すなわち、 $P\nu^\gamma = const$ (12)

を用いると、音速 C_s は次式で表示される。

$$C_s = C_{CJ} \left(\frac{p}{p_{CJ}} \right)^{\frac{\gamma+1}{2\gamma}} \quad (13)$$

ここで、 γ は断熱指数である。 C_{CJ} 、 p_{CJ} は γ と爆轟波の速度 D を用いて、次式で示される $C-J$ 圧力と音速である。

$$p_{CJ} = \frac{\rho_e D^2}{\gamma+1}, \quad C_{CJ} = \frac{\gamma D}{\gamma+1} \quad (14)$$

一方、爆轟ガスの膨張過程に次に示す JWL 状態方程式を用いる。

$$P = Ae^{-R_1 V} + Be^{-R_2 V} + CV^{-\omega-1} \quad (15)$$

音速 C_s は次式で与えられる。

$$C_s^2 = \frac{\rho_e}{\rho^2} (AR_1 e^{-R_1 V} + BR_2 e^{-R_2 V} + C(\omega+1)V^{-\omega-2}) \quad (16)$$

ここで $\nu_0 = 1/\rho_e$ 、 $V = \rho_e/\rho$ である。また、流線に沿って Bernoulli 方程式が成り立つと仮定する。

$$q dq + \frac{dp}{\rho} = 0 \quad (17)$$

式(17)から式(10)は次式となる。

$$\beta = \int_{p_0}^p \left\{ \sqrt{\frac{q_0^2 + 2 \int_{p_0}^p \frac{dq}{\rho}}{\frac{dp}{d\rho}} - 1} \frac{1}{q_0^2 2 \int_{p_0}^p \frac{dq}{\rho}} \right\} \frac{dp}{\rho} \quad (18)$$

ここで、 q_0 は C_{CJ} である。一方、媒体中に発生した衝撃波を横切る流れの転向角度は、斜め衝撃波の関係式を用いて次式で示される。

$$\tan \beta = \frac{\sqrt{(\nu_0 - \nu)p - (p\nu_0)^2/D^2}}{D - p\nu_0/D} \quad (19)$$

このようにして得られた結果を図8に示す。図中の横軸は転向角度を示し、縦軸は圧力である。図中の二点鎖線は媒質がPMMA に対する shock-polar、一点鎖線は水に対する shock-polar である。これらは式(19)ならびに $q - \nu$ に対する線形状態方程式を用いて得られる。また、図中の実線は爆轟ガスの膨張過程に JWL 状態方程式を使用した式(15)、(16)、(18)を用いた計算結果で、破線はポリトロブ気体の関係式を用いて、式(12)、(13)、(18)を使用した計算結果である。これらの曲線と shock-polar の交点が衝撃波の初期転向角度と圧力を示している。これらの交点での値を表4に示す。表中

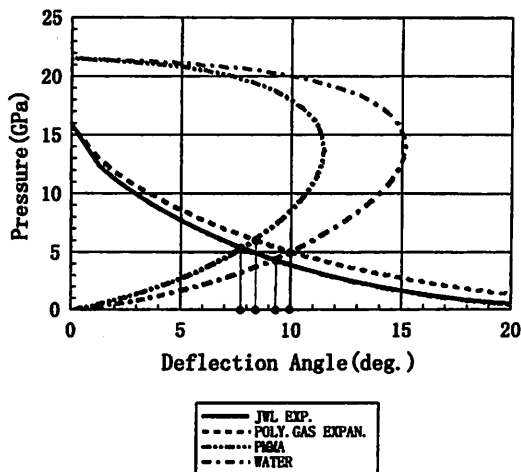


図8 shock polar

表4 初期衝撃波角度 α ならびに転向角度 β

	α (deg.) (PMMA)	β (deg.) (PMMA)	P(GPa) (PMMA)	α (deg.) (water)	β (deg.) (water)	P(GPa) (water)
JWL EXP.	37.3	7.7	5.4	31.5	9.2	4.4
POL. GAS EXP.	38.9	8.3	6.0	33.3	9.9	5.0
IMPEDENCE	40.2	8.7	6.6	35.4	10.7	5.8

には参考としてインピーダンス・マッチング法によって得られる値も表示している。爆轟生成ガスの膨張にJWL状態方程式を用いると、ポリトロップ気体を用いた場合に比し β がPMMA および水の場合におよそ 0.7° 小さくなることが分かった。衝撃波角度 α は、

$$\sin \alpha = \frac{\nu_0}{D} \sqrt{\frac{P}{\nu_0 - \nu}} \quad (20)$$

から得られる。本論文では爆轟生成ガスの膨張にJWL状態方程式を用いた結果を採用した。それが前出図6中の α_A と α_B である。

衝撃波の速度が得られれば、この速度に運動量の関係式を考慮して衝撃波前後の圧力がわかる⁽¹³⁾。その結果を図9に示す。(●)は、PMMAの場合の実験結果、実線は同数値計算結果を示す。また(○)は、水の場合に得られた実験結果、破線は数値計算結果を示す。同図横軸は爆薬の高さ h で無次元化された距離を示す。また縦軸圧力は大気圧で無次元化した。さらに、図中の(★)は、爆轟ガスの膨張にJWL状態方程式を仮定した理論計算結果でPMMAの場合を示し、(☆)は、同計算結果で、媒体が水の場合である。爆薬近傍では水中、PMMA中いずれも衝撃波の強さはほぼ同じであるが、無次元距離が5.0である場合において、PMMA中では、およそ2.3 GPaで、水では1.9 GPaである。それが10倍の距離では、PMMA中では1.9 GPaであるが、水では1.3 GPa程度に減衰する。これは爆

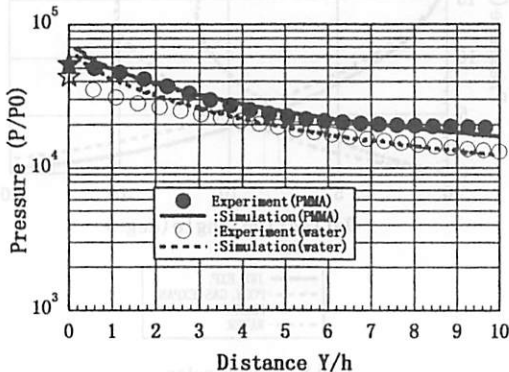


図9 衝撃波面に沿った圧力分布

薬を凝縮系媒体中で爆轟させた場合、爆薬の爆轟によって発生した爆轟生成物が膨張する際に、膨張波を発生させ、この発生した膨張波と衝撃波との強い干渉によって衝撃波が減衰する⁽¹⁴⁾ためである。得られた結果では、衝撃波の減衰が水に比べてPMMAの場合には小さいことが分かる。このことは爆薬を用いた各種金属加工において、PMMAを圧力媒質とした場合、水に比して、同一爆薬の場合、利用できる圧力が高いことを示す。数値計算によって得られたPMMA中の圧力分布を、等圧線で図10に示す。等圧線が密な所が衝撃波に対応している。同図には、比較のため水中衝

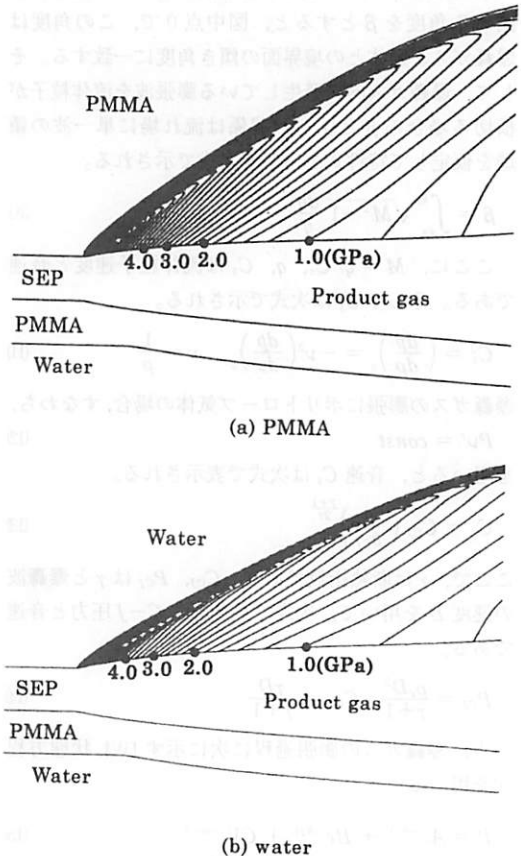


図10 等圧線図

撃波の先頭が PMMA 中の衝撃波の先頭が同じ場所に到達した同時刻において得られた等圧線を示す。図中の数字は圧力の等高値を示す。両図の比較から、PMMA の方が高圧力の範囲 (1.0 GPa 以上) が広いことが明瞭である。このことは爆薬から被加工物までの距離が水の場合に比して大きく取れることを意味する。以上のように、PMMA を圧力媒体として利用した場合、発生圧力が高いこと、またその減衰が小さいこと、さらに発生圧力の範囲が広いことが明らかになった。

このように PMMA を圧力媒体として利用することの有効性が明らかになった。今後は発生した衝撃波が PMMA 中で干渉することによって、どのように圧力を制御すべきか、また有効な利用について検討する。

5 まとめ

高性能爆薬の爆轟によって発生した衝撃波が PMMA に入射した際の衝撃波の挙動ならびに伝播を、光学的観察、数値解析法によって検討した。爆薬の近傍に発生した衝撃波は、PMMA 中を伝播するにつれてその形状を変化させ、湾曲していくことが光学的写真観察実験ならびに数値解析によって明らかになった。衝撃波の形状は、水の場合に比べて余り湾曲せず、爆薬から離れた位置での水の場合の衝撃波に比し減衰は小さい。爆薬の薬厚の10倍での距離で、圧力は1.9 GPaであり、水のそれの1.6倍であった。そのため爆薬から被加工物までの距離が長く取れ、その結果爆薬を有効に利用できることが明らかになった。

6 謝辞

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。ここに謝意を表す。

文献

- 1) 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), 2981-2986
- 2) S. Itoh, S. Kubota, S. Nagano, M. Fujita, *Journal of Pressure Vessel Technology, Transactions of ASME*, vol. 120, (1998), 51-55.
- 3) 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, Vol. 55, No.5, (1994), 202-208.
- 4) 伊東 繁, 吉良章夫, 長野司郎, 藤田昌大, 火薬学会誌, Vol. 56, No.5, (1995), 188-194.
- 5) 灘光 陽, 藤田昌大, 伊東 繁, 機論, 64-621, B(1998), 1379-1384
- 6) 灘光 陽, 藤田昌大, 伊東 繁, 機論, 64-622, B(1998), 1713-1719
- 7) S. Itoh, Z. Liu, Y. Nadamitsu, *Journal of Pressure Vessel Technology, Transactions of ASME*, vol. 119, (1997), 498-502.
- 8) 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).
- 9) C. L. Marders et al., "LASL DATA CENTER FOR DYNAMIC MATERIAL PROPERTIES" Univ. California Press (1980).
- 10) 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) 545-550
- 11) Berventon P. R., *Data Reduction and Error Analysis for Physical Sciences*, McGraw Hill, New York, Ch. 11, (1969).
- 12) H. Eyring, R. E. Powell, G. E. Duffy and P. B. Parlin, "The stability of detonation", *Chemical Rev.* [210], 45 : 69-181, (1949).
- 13) S. Itoh, O. Suzuki, S. Nagano, M. Fujita, "Investigation on fundamental properties of underwater shock waves by high speed photography", 21st ICHSPP' 94, Vol. 2513, (1995), 916-927.
- 14) 伊東 繁・灘光 陽・吉良章夫・長野司郎・藤田昌大・本田隆志, 機論, 62-601, B (1996), 3278-3283