

高性能爆薬の水中爆轟により発生した水中衝撃波について (第2報)

— 平板状爆薬による水中衝撃波 —

伊東 繁*, 吉良章夫*, 長野司郎*, 藤田昌大*

著者らは金属平板に水中衝撃波を作用させ、それを飛翔板として利用する新しい金属加工法を開発している。この加工法では飛翔板に入射する水中衝撃波の入射角ならびにその強さを適正に制御することが重要となる。この技術開発の基礎的研究として、平板状に成形された爆薬から発生する水中衝撃波の挙動をストリーク写真とシャドウグラフ撮影の光学的観察によって調べた。また、Arbitrary Lagrangian-Eulerian (ALE) 法を用いて、二次元の水中爆轟過程の数値シミュレーションを行った。水中衝撃波の形状の変化および伝播過程について数値計算結果が実験結果と極めて良く一致した。このことより数値シミュレーションの有効性が確認された。また飛翔板に垂直に入射する水中衝撃波の速度は、爆薬表面からの距離にはあまり影響されないことが実験により明らかになった。

1. 緒言

著者らは前報¹⁾において、高性能爆薬の爆轟によって得られた爆轟ガスのJones-Wilkins-Lee (JWL) 状態方程式²⁾をシリンダー膨張試験で求めて、それを用いて高性能爆薬の爆轟過程ならびに水中爆轟によって生ずる水中衝撃波の伝播過程をArbitrary Lagrangian-Eulerian (ALE) 法³⁾を用いて数値計算した結果について報告した。また光学的写真観察実験を行い、1次元爆轟波が水に入射した場合に発生する水中衝撃波の速度をストリーク写真から求め、その結果と数値計算結果とが極めて良く一致することを明らかにした。これらのことより、シリンダー膨張試験から求めたJWL状態方程式を用いた数値解析法が1次元問題の解析に極めて有効であることを明らかにした。

著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金属円管側壁の孔あけ加工⁴⁾、爆発成形⁵⁾、粉末の衝撃固化⁶⁾等について研究を行ってきた。さらに、高性能爆薬を平板状に成形し、軟鋼板(反射板)に貼り付けて水中で爆轟させ、発生した水中衝撃波を利用して金属加工を行う方法を開発してきた。この方法においては、水中衝撃波は、

爆薬中の爆轟波の伝播をともなって伝播する。このような爆薬の水中爆轟現象、ならびに水中衝撃波の基本特性はまだ十分に明らかにされていない。また、被加工金属は爆薬に対して任意の角度で傾斜させて配置される場合もあり、爆薬に対し傾斜角 θ を持つ面における水中衝撃波の基本特性を知ることも重要となる。

高性能爆薬として、爆薬 safty explosives (SEP) を用いた。SEPは旭化成工業(株)製の可塑性爆薬で、pentaerithritoltetranitrate (PETN) を主成分とし、充填密度が 1310 kg/m^3 、爆轟速度が 6970 m/sec である。本報ではSEPを平板状に成形し、軟鋼板に貼り付け、水中で爆轟させ、その際に発生する水中衝撃波の強さや、その伝播過程を明らかにするために、光学的写真観察実験ならびに数値計算を行った。これらの結果より爆薬の水中爆轟によって発生した水中衝撃波の形状変化、その強さの減衰、傾斜角 θ の影響等の基本特性を明らかにする。

2. 水中衝撃波の光学的写真観察実験方法

板状に成形されたSEPの形状および寸法をFig. 1に示す。主爆薬の寸法は厚さ 5 mm、幅50mm、長さ150mmである。主爆薬内を伝播する爆轟波が平面になるようにするために、SEPとHABWで構成された爆薬レンズを主爆薬の前に配置した。なおHABWはPETNを主成分とした旭化成工業(株)製の線爆発圧接用爆薬の商品名で、充填密度が 2200 kg/m^3 、爆轟速度が 4750 m/sec である。成形した爆薬は厚さ19mmの軟鋼 (SS400)

1995年7月25日受理

*熊本大学工学部機械工学科
〒860 熊本市黒髪2-39-1
TEL 096-342-3741
FAX 096-342-3729

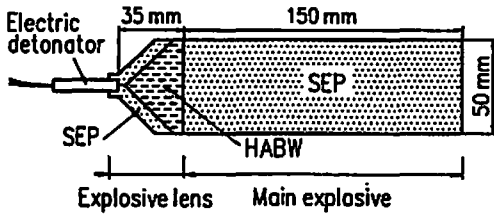


Fig. 1 A schematic of the formed high explosive.

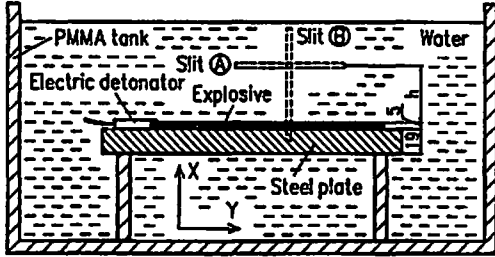


Fig. 2 Experimental illustration for the under-water explosion of the formed high explosive.

板に貼り付け、これらを水で満たした polymethylmethacrylate (PMMA) 製の水槽にいれ、電気雷管によって起爆させ、水中爆轟実験を行った。実験装置概略図を Fig. 2 に示す。図中、爆轟波は爆薬中を左から右へ伝播する。この爆轟波が伝播する方向を Y 方向、それと垂直な方向を X 方向とする。

光学的写真観察実験は、パルスレーザー（日本電気（株）製、ルビーレーザー、SLG2018、波長694nm、出力40MW）を光源として長焦点レンズ（焦点距離180mm）のカメラを使用したシャドウグラフ法、キセノンフラッシュライト（HADLAND PHOTONICS社製、HL20/50型フラッシュユニット、出力500J）を光源としてイメージコンバータカメラ（HADLAND PHOTONICS社製、IMACON790、最大駒撮り間隔2000万駒/sec、最高流し速度1nsec/mm）を使用したストリーク写真撮影法によって行った。

シャドウグラフ撮影は、任意の時間における水中衝撃波の形状を調べるために行った。光源として使用したパルスレーザーは閃光時間が20nsecである。爆轟現象とパルスレーザーの発光を同期させる必要があるため、起爆時間が安定している地震探鉱用の電気雷管（旭化成工業（株）製）を使用し、ディレイジェネレータ（HADLAND PHOTONICS社製、THREE CHANNEL DELAY GENERATOR, TYPE JH-3 CDG）によりSEPの起爆時間とパルスレーザーの発光開始時間の制御を行った。得られた写真の像にゆがみが出ないように、実験は十分注意深く行われた。その検証と

してPMMA板の表面に、格子間隔20mmの正方格子をけがき、それを水槽に入れ光軸に垂直に配し、あらかじめシャドウグラフ写真の撮影を行った。

ストリーク写真撮影は、Y方向への水中衝撃波の伝播過程を調べるために④の位置にスリットをきった場合と、X方向への水中衝撃波の伝播過程を調べるために③の位置にスリットをきった場合について行った。光源として使用したキセノンフラッシュライトは閃光時間が50μsecである。この撮影では6号電気雷管（旭化成工業（株）製）を使用し、ディレイジェネレータにより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。

3. 数値計算方法

本研究で対象とする計算場は水、爆薬（爆轟生成ガス）、軟鋼という3つの物質から成り、(I) 水と爆薬の界面、(II) 爆薬と軟鋼の界面、(III) 軟鋼と水の界面が存在する。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、その後方の爆轟生成ガスが膨張し、界面 (I)、(II) および (III) が移動する。このような移動界面をもつ場を数値計算するため、ALE法を用いた。

計算は以下に示す連続、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。連続の式は次式で与えられる。

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

X方向およびY方向の運動量の式はそれぞれ次式で与えられる。

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

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

エネルギーの式は次式となる。

$$\frac{\partial(\rho e)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho eu)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho ev)}{\partial y} = -(P+q)H \quad (4)$$

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

ここで、 u, v はそれぞれX、Y方向速度成分、 P, ρ, e はそれぞれ圧力、密度、単位質量あたりの内部エネルギーである。 q は人工粘性圧力で次式によって与えられる。

Table 1 Constants of JWL equation of state for SEP.

A (GPa)	B (GPa)	R ₁	R ₂	ω	E ₀ (J/m ³)
364.9937	2.309774	4.30	1.00	0.28	2.8794 × 10 ⁹

Table 2 Constants of equation of state.

Material	ρ ₀ (kg/m ³)	c (m/s)	s
Water	1000.0	1489.0	1.786
SS400	7850.0	3574.0	1.920

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

ここでλ₀は任意の定数で、過度の粘性の影響を避けるため0.25以下である。またAは各格子の面積である。状態方程式はSEPの爆轟生成ガスについては以下に示すJWL状態方程式を用いた。

$$P = A \left[1 - \frac{\omega}{R_1 V} \right] \exp(-R_1 V) + B \left[1 - \frac{\omega}{R_2 V} \right] \exp(-R_2 V) + \frac{\omega E}{V} \quad (7)$$

ここでPは圧力、Vは爆轟生成ガスの体積と未爆轟爆薬の体積との比、Eは内部エネルギーである。A、B、R₁、R₂、ωはシリンダー膨張試験により得ることができるパラメータで、著者等が求めたSEPの爆轟生成ガスについてのパラメータ¹⁾をTable 1に示す。水、軟鋼については次式を用いた。

$$P = \frac{\rho_0 c^2 \eta}{(1 - s\eta)^2} \quad (8)$$

ここでρは密度、ρ₀は初期密度、cは音速、ηは1 - (ρ₀/ρ)、sは物質によって決まる定数である。水、軟鋼の場合についての各定数をTable 2¹⁾に示す。

計算場はX方向に280格子、Y方向に340格子に区切った。格子間隔はΔx = Δy = 0.5mmとした。また爆薬は完全に定常爆轟を行うと仮定したため、計算の時間増分は格子間隔Δyと爆轟速度Dを用い、Δt = Δy/Dとした。この場合、Courant数が1を超えるため陰的方法を用いた。なお計算はパーソナルコンピュータ(日本DEC(株) DECpc LPv 466d2, CPU:i486DX2, 66MHz)で行い、使用言語はFORTRAN77、使用コンパイラはNDP FORTRAN 386 Ver. 4(米国 Micro Way)である。一回の計算時間はおよそ12時間であった。

4. 実験結果および考察

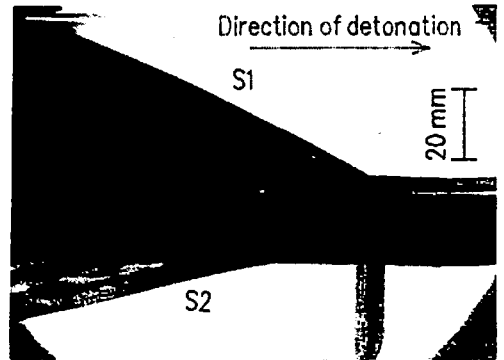


Fig. 3 Shadow graph obtained by the underwater explosion of SEP pasted on the steel plate. The notation S1 indicates the front of the underwater shock wave generated from the boundary between SEP and the water, and S2 shows that generated from the boundary between the mild steel plate and the water.

任意な時間で得られた代表的なシャドウグラフ写真をFig. 3に示す。爆轟波は同図において左から右へ伝播する。図中、記号S1がSEPの爆轟により発生して水中に伝播する水中衝撃波を、記号S2が軟鋼板を介して水中に伝播する水中衝撃波をそれぞれ示す。

発生した水中衝撃波のY方向伝播速度を調べるため、Fig. 2の④の位置にスリットをきり、h = 10mm、30mmおよび50mmの場合についてストリーク写真撮影を行った。ストリーク写真から得られた水中衝撃波のY方向伝播距離と時間との関係をFig. 4に示す。図中縦軸はY方向伝播距離を、横軸は時間を示す。プロット点○印、△印および□印はそれぞれh = 10mm、30mmおよび50mmの場合に得られた結果を示し、実線はイオンギャップ法によって測定したSEPの爆轟速度6970 m/secに対応している。同図より、得られた結果の範囲内で、SEPを板状に成形して水中爆轟させた場合に発生する水中衝撃波はY方向には爆轟速度で伝播することがわ

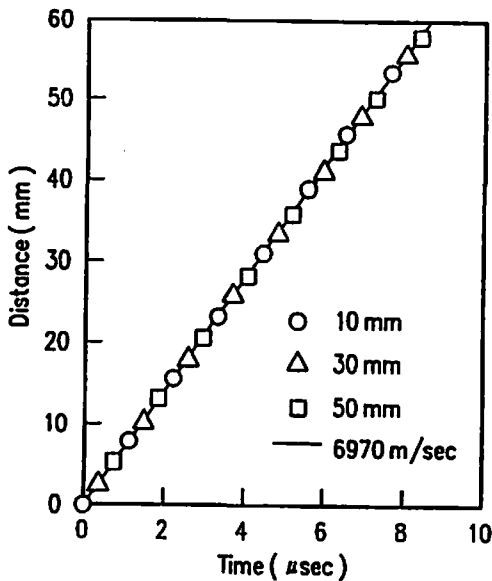


Fig. 4 Distance-time wave diagrams obtained by the streak photographs taken in Y-direction.

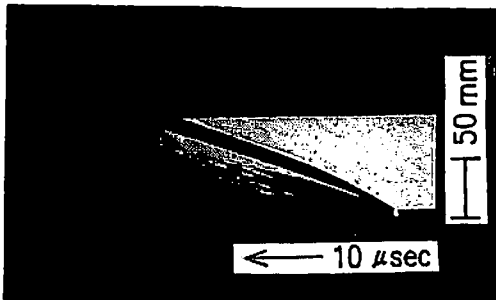


Fig. 5 A streak photograph obtained by the underwater explosion of SEP pasted on the steel plate. The streak speed is $2\text{cm}/\mu\text{s}$.

かる。

Fig. 2の③の位置にスリットをきって得られたストリーク写真をFig. 5に示す。図中に示した尺度は前述したブロックゲージの撮影と時間校正によって得られたものである。同図から水中衝撃波のX方向伝播距離 x と時間 t の関係を得ることができる。

ストリーク写真を光学顕微鏡で観察して得られた水中衝撃波のX方向伝播距離 x と時間 t の関係をFig. 6に示す。写真を観察した点の数は241点で、そのうちの任意の点を・印で示す。同図の傾きが水中衝撃波のX方向速度 dx/dt を示すことから、水中衝撃波の速度は、爆轟波の先頭で急激に加速され、爆薬近傍で大きく減衰し、爆薬から遠ざかるにつれて緩やかに減衰するこ

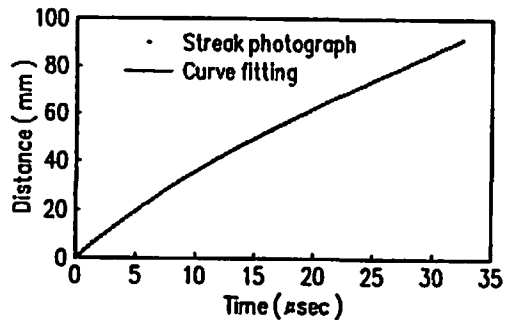


Fig. 6 Distance-time wave diagrams obtained by the streak photograph taken in X-direction.

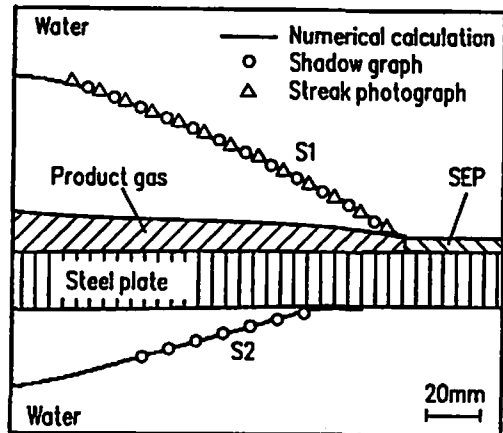


Fig. 7 A comparison of the profiles of the underwater shock wave obtained by the streak photograph, shadow graph and numerical calculation.

とがわかる。これは爆薬の表面で発生する膨張波が爆薬表面に近い部分ほど速く水中衝撃波に追いつきその強さを減衰させるためである。

前述したように発生する水中衝撃波はY方向には爆轟速度で伝播するため、ストリーク写真から得られた時間 t に爆轟速度 D を乗じることにより水中衝撃波のY方向伝播距離 y を $y = Dt$ で求めることができる。よって x と y を合成することにより水中衝撃波の形状を得ることができる。こうして得られた水中衝撃波の形状、シャドウグラフから得られた水中衝撃波の形状および数値計算結果をFig. 7に示す。図中、記号S1はSEPの爆轟により発生して水中に伝播する水中衝撃波を、記号S2は軟鋼板を介して水中に伝播する水中衝撃波をそれぞれ示す。プロット点○印はシャドウグラフから読みとられた実験値、プロット点△印はストリーク写真から合成して得られた結果、実線は数値計算結果をそれぞれ示す。3者は極めて良く一致してい

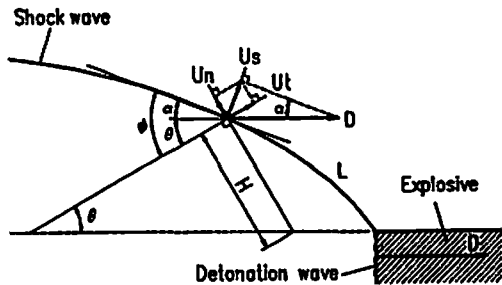


Fig. 8 A schematic illustration of the shock wave.

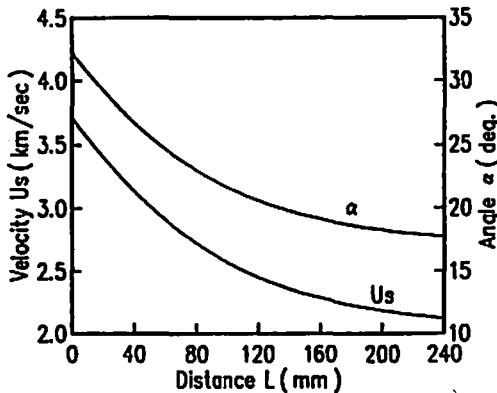


Fig. 9 The changes of the velocity and the tangential angle along the underwater shock wave.

ることがわかる。このことより、二次元の水中爆轟過程の数値シミュレーション方法が妥当であることがわかる。

任意な時間において実験的に得られた水中衝撃波の形状を図式的にFig. 8に示す。図中、Dは爆薬の爆轟速度、 U_s は傾斜角 θ を持つ面における水中衝撃波の速度で、 α を水中衝撃波がY軸となす角とすると、 $U_s = D \sin \alpha$ である。 $y' = -y$ とすると α は、 $\alpha = \tan^{-1}(dx'/dy')$ となる。水中衝撃波の形状はストリーク写真から合成して得られたデータ(y' , x)をnonlinear curve fitting法⁸⁾を用いて関数近似して与えた。近似式は次式である。

$$x = a_1(1 - \exp(a_2 y')) + a_3(1 - \exp(a_4 y')) + \frac{c}{D} y' \quad (9)$$

ここでcは水の音速、Dは爆轟速度、 $a_1 = 22.826$ 、 $a_2 = 1.4206 \times 10^{-2}$ 、 $a_3 = 1.4236 \times 10^6$ 、 $a_4 = 6.4767 \times 10^6$ である。(9)式を y' で微分すると α が求められ、それにより水中衝撃波の速度 U_s が得られる。図中、 U_t は U_s の傾斜角 θ を持つ面に沿った方向の速度成分、 U_n は U_s の傾斜角 θ を持つ面と垂直方向の速度成分を示す。

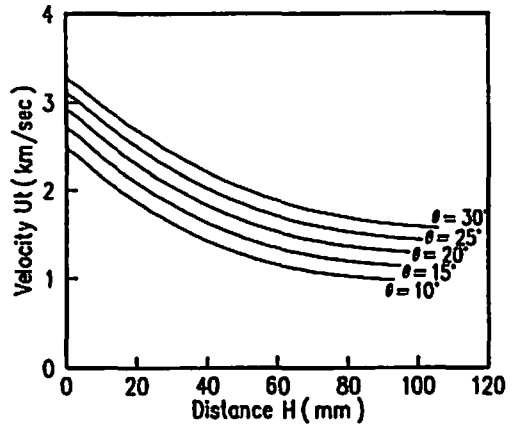


Fig. 10 The changes of the tangential velocity of the underwater shock wave.

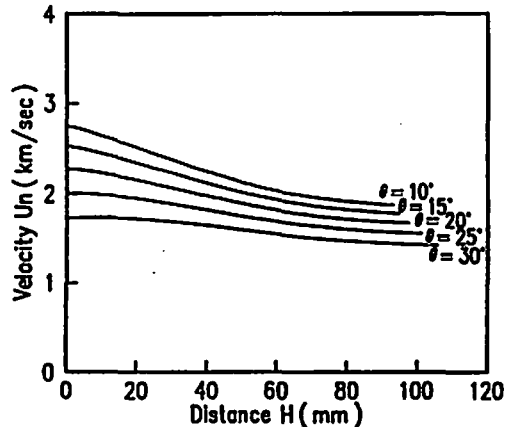


Fig. 11 The changes of the normal velocity of the underwater shock wave.

ϕ は水中衝撃波が傾斜角 θ を持つ面となす角、Hは爆薬面から傾斜角 θ を持つ面におろした垂線の長さ、Lは爆薬から任意の点までの水中衝撃波に沿った長さを示す。

水中衝撃波に沿った長さLと、水中衝撃波がY軸となす角 α および水中衝撃波の速度 U_s との関係をFig. 9に示す。爆薬近傍で速度 U_s はおよそ3.7km/secであるが、爆薬から離れるにつれて減衰し、200mmではおよそ2.2km/secにまで低下することがわかる。

傾斜角 θ が 10° から 5° おきに 30° までの場合について、Hと、 U_t および U_n の関係をそれぞれFig. 10, Fig. 11に示す。Fig. 10から U_t の値はHが増加するにつれ大きく減衰するが、 $H > 40$ mmではほとんど減衰しないことがわかる。このことから傾斜角 θ を任意に変化させることによって、金属加工に要求される最適な水中衝撃波の速度を得ることが可能である。また、Fig. 11か

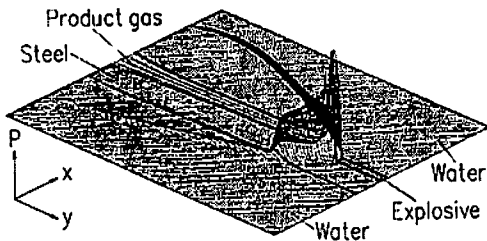


Fig. 12 Pressure distribution obtained by numerical calculation.

ら U_n は H が増加してもあまり減衰しないことがわかる。このことは被加工金属板に作用する圧力が一定となることを意味する。また、傾斜角 θ が大きくなるにつれて U_n は大きくなるのに対し、 U_t は小さくなることわかる。

数値計算によって得られた圧力分布をFig.12に示す。同図で縦方向が圧力を示す。爆轟波後方における爆轟生成ガスの圧力は非常に高いが、発生する水中衝撃波の圧力は急激に減衰し、その後水中を伝播するにつれ緩やかに減衰することがわかる。一方、軟鋼板を介して水中に発生する水中衝撃波の圧力は非常に低いことがわかる。

5. 結 論

高性能爆薬を板状に成形し、軟鋼板に貼り、水中爆轟させた場合に、爆薬の爆轟波先頭から発生する水中衝撃波の基本特性を調べるため光学写真観察実験および数値計算を行った。ストリーク写真から水中衝撃波の形状を求め、シャドウグラフおよび数値計算結果と比較した。3者に良い一致が見られ、二次元の水中爆轟過程の数値シミュレーション方法が妥当であることが確認された。ストリーク写真から合成して得られた結果を解析し、被加工金属板に対し爆薬を任意の角度で傾斜させて爆轟させた場合の、爆薬と傾斜角 θ を持つ面における水中衝撃波の入射角、速度等を求めた。 U_t は、 H が増加するにつれて大きく減衰するが、 $H > 40$

mmではほとんど減衰しないことがわかる。このことから傾斜角 θ を任意に変化させることによって、金属加工に要求される最適な水中衝撃波の速度を得ることが可能である。また U_n は H が増加してもあまり減衰せず、被加工金属板に作用する圧力が H の変化によらずほぼ一定となることがわかった。

謝 辞

本研究の一部は(財)火薬工業技術奨励会の助成により行われました。ここに謝意を表します。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。さらに実験ならびにデータ解析には熊本大学大学院生鈴木修(当時)、森田政両君の尽力があった。ここに合せて謝意を表します。

文 献

- 1) 伊東繁, 久保田士郎, 吉良章夫, 長野司郎, 藤田昌大, 火薬学会 55, 5, 202 (1994)
- 2) E. L. Lee, M. Finger, W. Collins, Lawrence Livermore National Laboratory, Rept-UCID-16189 (1973)
- 3) A. A. Amsden, H. M. Ruppel, C. W. Hirt, LA-8095, UC-32 (1980)
- 4) 伊東繁, 浦原清隆, 長野司郎, 藤田昌大, 火薬学会 54, 3, 115 (1993)
- 5) 芋阪浩男, 藤田昌大, 花崎紘一, 藤中雄三, 工業火薬 52, 1, 41 (1991)
- 6) S. Itoh, S. Kubota, S. Nagano, I. Morita, A. Chiba and M. Fujita, Proceedings of the First Asian CFD Conference, Vol.2, 723 (1995)
- 7) S. P. Marsh, "LASL Shock Hugoniot Data", (1980), University of California Press
- 8) P. R. Bervington, "Data Reduction and Error Analysis for the Physical Sciences", Ch.11 (1969), McGraw Hill, New York

**On underwater shock wave generated by underwater explosion
of high explosives (II)**

— Underwater shock wave generated by slab explosive —

**by Shigeru ITOH*, Akio KIRA*, Shiro NAGANO*
and Masahiro FUJITA***

A new metal processing method applying a flying plate driven by an underwater shock wave has been developing. In this method, it is very important to control both an angle of incident and a strength of the underwater shock wave which acts on the plate. As the basic research of this technological development, the behavior of the underwater shock wave generated by the underwater explosion of the slab explosives are investigated using optical observations, such as a streak and a shadow photograph. We also simulate the 2-dimensional underwater explosion by Arbitrary Lagrangian-Eulerian (ALE) method. Concerning the configurations of the underwater shock wave, good agreements between the numerical and the experimental results are obtained. It clears that the normal velocity component of the underwater shock wave impinging on the flying plate have little effects of the distance from the surface of the slab explosive.

(*Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Kumamoto University 2-39-1 Kurokami, Kumamoto, 860, Japan)
