

—爆轟ガスの状態方程式と水中衝撃波—

長野司郎*, 藤田昌大*

1. はじめに

このような金属加工においては、目的とする加工を行うために最適な圧力分布を得ることが要求される。このために衝撃波の反射や、回折、収束といった物理現象を応用し、有効に水中衝撃波を制御しなければならない。そのためそれらの物理現象を十分に把握することが重要である。爆薬を水中で爆轟させた場合に発生した水中衝撃波の強さ、および伝播にともなう減衰過程は、Cole²⁾、鈴木、小川、福山、青木³⁾によって実験的に研究されているが、いずれも爆源から比較

ところで、近年の計算機の発達によって爆薬の爆轟を含むような流れの場をシミュレーションし、非定常性の強い爆轟現象や、爆轟によって媒質中に発生した衝撃波の諸現象を解明することが可能になってきている。これらの数値解析では、現象が極めて高速であるので、一般的には有限差分法がよく利用される。有限差分法では流れを支配する連続、運動量、エネルギーの保存則を離散化し、計算を行う。この場合、解析の対象となる物質の各々に対して状態方程式が必要となる。爆轟ガスに関しては、木原、正田、田中の提案によるKHT状態方程式⁵⁾、Becker-Kistiakowsky-Wilson(BKW)状態方程式⁶⁾、Lennard-Jones-Devonshire(LJD)状態方程式⁷⁾ならびにJones-Wilkins-Lee(JWL)状態方程式⁸⁾等、多くの状態方程式が提案されている。このうちJWL状態方程式はLawrence Livermore National Laboratoryで各種の

FAX 096-345-1598

爆薬に対して、シリンダー膨張試験が行なわれ、試行錯誤計算でそのパラメータが得られた。しかしながら、その計算が極めて複雑であるので、その後シリンダー膨張の理論的モデル解析と nonlinear curve fitting⁹⁾ の組み合わせでパラメータを求める方法が提案された^{10, 11)}。この方法を用いれば、組成がわかっていない爆薬でも、JWLパラメータを比較的簡単な実験で求めることが可能になってきた。

本論文ではJWL状態方程式を求めるためのシリンダー膨張試験方法、ならびに解析方法について簡単に記述し、SEPのJWLパラメータを求め報告する。この状態方程式を用い、SEPの銅管内の爆轟過程の数値解析を行い、その結果と試験結果とを比較検討し、試験で得たパラメータが数値解析に十分利用できることを示す。またSEPの水中爆轟によって発生した水中衝撃波の光学的写真観察実験ならびに数値解析を行った。これらによって、爆轟波が水に入射した後に発生する爆轟波近傍での水中衝撃波の加速過程、および爆轟ガスの膨張によって発生した膨張波が水中衝撃波を減速させる過程を明らかにする。

2. 実験方法および数値解析方法

2.1 シリンダー膨張試験ならびに水中爆轟実験

SEPの爆轟ガスに関するJWL状態方程式のパラメータを得るために用いたシリンダー膨張試験装置の概要をFig. 1に示す。同装置はSEPとHABW(充填密度 2200kg/m^3 、爆轟速度およそ 5000m/sec 、旭化成工業(株)製)で作られた、平面爆轟を得るための爆薬レンズと、SEPを装填した銅管から成り立っている。銅管の肉厚は 1.0mm で、外径は 25.4mm である。この銅管は真空中($2.67 \times 10^{-3}\text{Pa}$)で、温度 873K に30分間保持した後、炉冷し、残留応力を十分除去した。図中の爆薬レンズを6号電気雷管(旭化成工業(株)製)で起爆すると、同レンズ内に平面爆轟波が発生する。この平面爆轟波が銅管内を伝播するにつれて銅管が膨張する。この膨張過程を図中記号Aの場所にスリットをきり、半径方向変位から求める。この変位はイメージコンバータカメラ(最高2000万駒/秒、最高流し速度 1nsec/mm)を用いたストリーク写真で観測された。なお写真の光源としては閃光時間が $50\mu\text{sec}$ のキセノンフラッシュランプを採用した。光学系をFig. 2に示す。

Fig. 3はSEPの水中爆轟の実験装置の概略を示す。同装置は爆薬レンズ、SEPを充填したPMMA管(肉厚 5mm 、外径 30mm)および水で満たされたPMMA管から成り立っている。図中の電気雷管で起爆すると、爆薬レンズ内で平面爆轟波が得られる。この平面爆轟波が爆薬内を伝播し、水に入射した際に水中衝撃波が発生する。この発生した衝撃波の伝播過程を上述のス

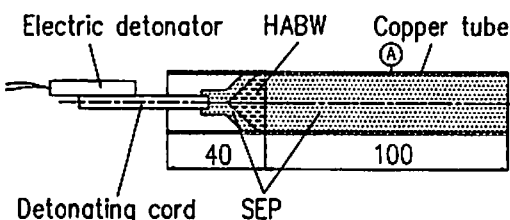


Fig. 1 A copper tube filled with high explosives for cylinder expansion test.

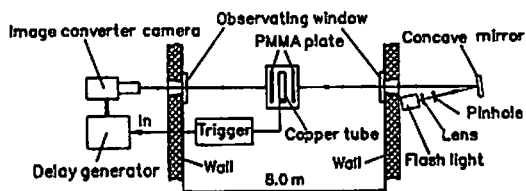


Fig. 2 A schematic diagram of the optical measurement system.

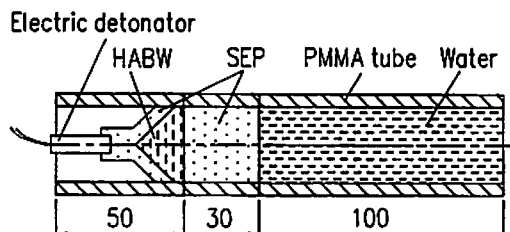


Fig. 3 Experimental illustration for the underwater explosion of high explosives.

トリーク写真で観察する。

2.2 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、爆薬中に爆轟波が伝播するにつれ、その後方の爆轟ガスが膨張し、それに接する水、PMMA、銅の界面も移動する。このように界面が移動するような場を数値計算する場合、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、水中爆轟現象は流れ場の大きな変形をとともうため、上述の方法ではしばしば解が破壊する。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の方法とを組み合わせ、Arbitrary Lagrangian-Eulerian(ALE)法¹²⁾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物理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。

Table 1 Constants of Mie-Grüneisen equation of state
(ρ_0 = Initial density; c = Sound velocity;
 s = Constant; γ = Grüneisen gamma)

Material	ρ_0 (kg/m ³)	c (m/s)	s	γ
Copper	8930.0	3940.0	1.489	1.96
PMMA	1181.0	2260.0	1.816	0.75
Water	1000.0	1489.0	1.786	1.65

る。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て行った。水、PMMA、銅については次のMie-Grüneisen状態方程式を用いた。

$$P = \frac{\rho_0 c^2 \gamma}{(1 - s\gamma)^2} \left[1 - \frac{\gamma \gamma_0}{2\rho_0} \right] + \gamma E \quad (1)$$

ここで ρ_0 は初期密度、 c は音速、 $\gamma_0 = 1 - \rho_0/\rho$ 、 E は内部エネルギー、 γ はMie-Grüneisen定数、 s は物質によって決まる定数である。水、PMMAおよび銅についての各定数をTable 1に示す。また爆轟ガスの状態方程式は後述する試験によって得られたJWL状態方程式を用いた。

本数値解析では爆轟の数値シミュレーションを次のような仮定で行った。(a)爆薬は均質である。(b)爆薬は完全に定常的爆轟を行う。(c)爆轟波が到達した爆薬部は直ちに爆轟ガスに変化する。(d)爆轟波のすぐ後方はChapman-Jougetの圧力、密度、エネルギーを有する。上述の仮定は厳密には成り立たないが理想爆轟としては考えうるものである。これらの仮定について数値計算結果と実験結果との比較検討により、現在考えている高性能爆薬の場合についての検証も合わせて行う。計算はDECpc LPv 466d2で行った。

3. 実験および数値解析結果

Fig. 4はSEPのシリンダー膨張試験で得られたストリーク写真である。同図の縦方向が半径方向変位、横方向(長手方向)が時間を示す。半径方向変位はブロックゲージを用いて検定した。また時間に関しては、あらかじめわかった周波数を用いて検定を行なった。この写真から得られた変位と時間との関係をFig. 5にプロット点(○印)で示す。縦軸は半径方向変位、横軸は時間を示す。この試験結果を用いて nonlinear curve fitting法で処理し、得られた近似曲線を図中実線で示す。それを次式で与える。

$$r_m - r_{m0} = \sum_{j=1}^2 a_j (b_j(t - t_0) - (1 - \exp(-b_j(t - t_0)))) \quad (2)$$

ここで r_m は銅管の板厚中心の半径で、 r_{m0} はその初期値である。得られた定数は、 $a_1 = 3.7653$ 、 $b_1 =$

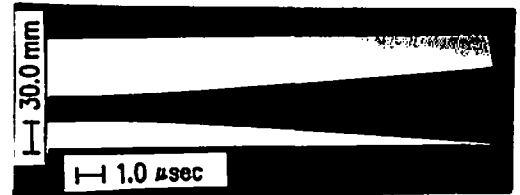


Fig. 4 A streak photograph obtained by the cylinder expansion test.

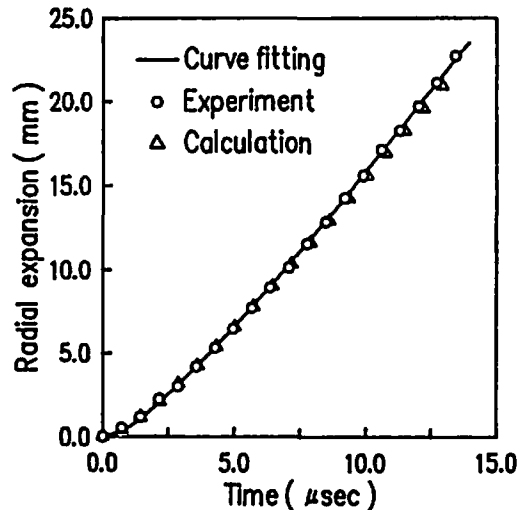


Fig. 5 Comparison of experimental data of expansion tube test(○)and numerical results(△) and curve fitting deduced by this paper.

0.2136, $a_2 = 0.9979$, $b_2 = 1.2149$, $t_0 = 0.3330$ であった。なお、図中のプロット点(△印)は後述のJWLパラメータを用いて数値計算して得られた銅管の膨張による半径方向変位である。数値計算結果、試験結果ならびにnonlinear curve fitting法で得られた結果の三者に極めて良い一致が見られる。

シリンダー膨張試験結果からJWLパラメータを得るために、次のような仮定でモデル解析を行う。(a)爆轟波は1次元である。(b)爆薬は直ちに爆轟生成物に変化する。(c)銅管は非圧縮性である。(d)銅管内の衝撃波は反射しない。(e)圧力は1次元流れに対

するベルヌーイの定理から求められる。この解析より圧力ならびに体積と半径方向変位についてそれぞれ次の関係を得る。

$$P = \frac{Ma}{2\pi r_i} + \frac{\sigma(r_i - r_o)^2}{2\pi r_i} \quad (3)$$

$$V = \frac{D - w}{D} \left(\frac{r_i}{r_o} \right)^2 \quad (4)$$

なお上式では銅の応力とひずみの関係を考慮した。ここで P は圧力で、 M は単位長さあたりの銅管の質量を示す。 a は変形する銅管の加速度を示す。 V は未爆薬と爆薬ガスとの密度比 (ρ_o/ρ) であり、 ρ_o は爆薬の充填密度、 ρ は爆薬ガスの密度である。また D は爆薬速度、 w は粒子速度、 σ は半径方向応力である。 r_i は銅管の外径、 r_o はその内径、また r_{o0} はその初期値である。

実験的に得られた半径方向変位と時間との関係および (3)、(4) 式から膨張ガスの圧力と体積の関係を得る。これをもとにJWLパラメータを算出する^{10, 11)}。以下にJWL状態方程式を示す。

$$P = A \left[1 - \frac{\omega}{R_1 V} \right] \exp(-R_1 V) + B \left[1 - \frac{\omega}{R_2 V} \right] \exp(-R_2 V) + \frac{\omega \rho_o e}{V} \quad (5)$$

等エントロピーの関係を上式に適用し、次の関係を得る¹⁰⁾。

$$P = A e^{-R_1 V} + B e^{-R_2 V} + C/V^{\omega+1} \quad (6)$$

ここで A 、 B 、 C 、 R_1 、 R_2 、 ω はいずれも実験的に求められる定数である。 e は単位質量あたりの内部エネルギーである。なおSEPのChapman-Jouget圧力は、 $P_o \approx \rho_o D^2/4$ から求め、15.9GPaである。

Fig. 6にシリンダー膨張試験から得られたSEPの圧力と密度の関係をプロット点 (○印) で示す。これらのプロット点をもとに得られたJWLパラメータをTable 2に示す。このパラメータを用いて得られる爆薬ガスの圧力と密度との関係を図中に実線で示す。両者は極めて良く一致することがわかる。

JWLパラメータの検証のために、銅管内のSEPの爆薬過程をシミュレーションした。爆薬波が銅管内を伝播する場合の数値計算から得られた銅管の変形過程

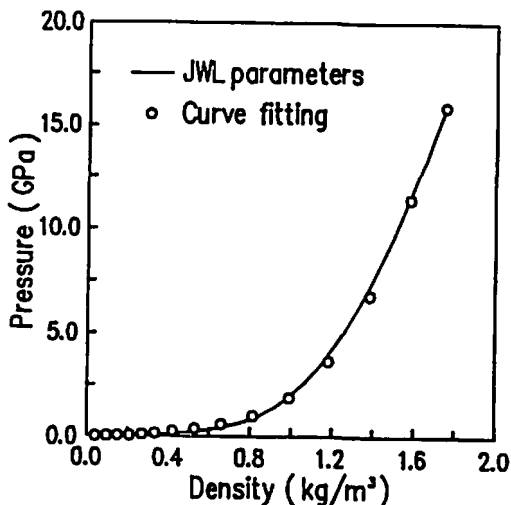


Fig. 6 Comparison of P - ρ data for SEP obtained by the cylinder expansion test and curve fitting deduced by this paper.

の例をFig. 7に示す。図中 τ は爆薬の初めからの時間を示す。この計算では、軸方向の空間格子 Δx を0.5mmとした。爆薬は定常爆薬すると仮定し、爆薬波は、時間 Δt の間に1格子間隔を進むとして爆薬波の伝播シミュレーションを行った。また爆薬波が到達した爆薬のすぐ後方の生成ガスは前述のようにChapman-Jougetの圧力、密度になると仮定し、生成ガスはJWLの状態方程式にもとづいて膨張するとした。この計算結果から半径方向変位を得る。その結果を示したのが前出Fig. 5のプロット点 (△印) であり、計算およびJWLパラメータの有効性を明らかにした。

SEPの水中爆薬で得られた水中衝撃波の伝播過程をFig. 8のストリーク写真に示す。図中DWはSEPの自発光で得られた爆薬波である。WSは水中衝撃波を、PSはPMMA中を伝播する衝撃波をそれぞれ示す。DWの速度は写真観測から、 7000 ± 50 m/secであり、イオンギャップ法で求めた爆薬速度 (6970 m/sec) とほとんど一致した。発生した衝撃波は爆薬波の入射の後で大きく加速され (写真の傾きが大きい)、その後時間の進行につれて減速され (傾きが小さくなる)、PMMA内を伝播する衝撃波 (PS) に追い越されてしまうことが同図からわかる。これは爆薬ガスの膨張により発生した膨張波が与える影響が水中および

Table 2 Constants of JWL of SEP

A (GPa)	B (GPa)	C (GPa)	R1	R2	ω	E_o (J/kg)
364.9937	2.309774	0.092861	4.30	1.00	0.28	1.099×10^6

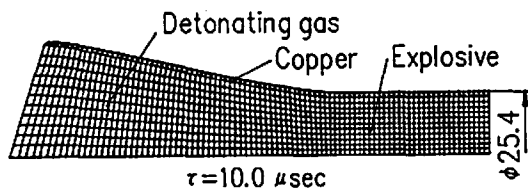


Fig. 7 Expansion of copper tube obtained by numerical calculation.

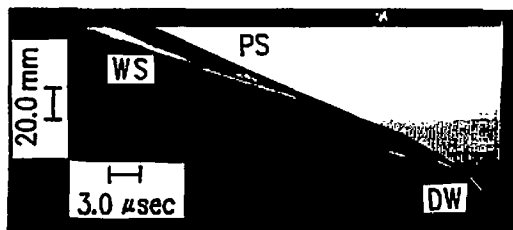


Fig. 8 A streak photograph obtained in underwater explosion of high explosive.

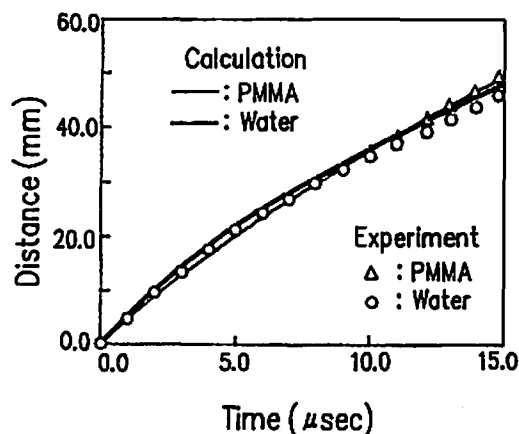


Fig. 9 Comparison of wave diagrams obtained by the explosion of high explosive in PMMA tube filled with water.

PMMA中の衝撃波に対して異なるためである。高圧のもとでは水中を伝わる音波の速度がPMMA中の音速より速いため、膨張波の影響は水中の方が大きく、水中衝撃波の減衰が大きい。

Fig. 9はストリーク写真から得られた水中衝撃波の伝播距離と時間の関係を示す。図中のプロット点(○印)は、水中衝撃波の場合を、プロット点(△印)はPMMA中を伝播する衝撃波の場合を示す。図中の太線は水中衝撃波、細線はPMMA中を伝播する衝撃波のそれぞれ数値計算結果である。同図から水中衝撃波の加速、減速過程が十分よく理解できる。また水中、PMMA中いずれの場合でも衝撃波の伝播過程に関す

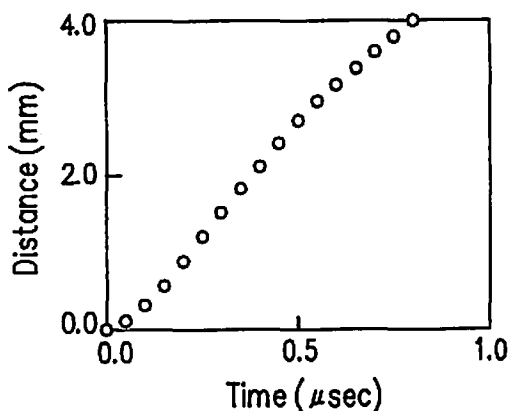


Fig. 10 An experimental wave diagram obtained in water at the instance when the detonating gas impinges on water.

る計算結果は実験結果と極めて良く一致することがわかった。さらに水中衝撃波の伝播速度を実験的に得るためには、伝播距離の時間に対する傾きを求める必要がある。

Fig. 10は、爆轟波が水に入射した初期における水中衝撃波の伝播過程を示す。水中衝撃波の伝播速度は時間の初期には小さく(伝播過程を表すプロット点間の傾きが小さいことから推察される)、その後急激に伝播距離が大きくなることが同図からわかる。さらに時間が経てば、前述のように爆轟ガスの膨張によって生じる膨張波の影響で減速される。これらの現象の詳細な観察から、水中衝撃波の伝播距離 y と時間 t に関して次のような関係式を与えた。

$$y/D = A_1 \{1 - \exp(-B_1 t)\} + A_2 \{1 - \exp(-B_2 t)\} + A_3 \{1 - \exp(-B_3 t)\} + ct/D \quad (7)$$

ここで A_1 , A_2 , A_3 , B_1 , B_2 , B_3 は定数であり、 c は水中の音速(1489 m/sec)である。また B_1 , B_2 , B_3 は正である。(7)式を時間に関して微分すると次式を得る。

$$dy/dt = DA_1 B_1 \exp(-B_1 t) + DA_2 B_2 \exp(-B_2 t) + DA_3 B_3 \exp(-B_3 t) + c \quad (8)$$

(8)式より、 t が大きくなると、右辺第1項、第2項、第3項は急激に0に近づき、水中衝撃波の伝播速度は音速にまで減速する。また $t=0$ で、 $dy/dt=0$ であるので、各係数間には次の関係を満足させる。

$$c + DA_1 B_1 + DA_2 B_2 + DA_3 B_3 = 0 \quad (9)$$

それぞれの係数をTable 3に示す。

爆轟波が水に入射する際に発生する水中衝撃波の速

Table 3 Curve fitting parameters for the propagating of underwater shock wave

$A_1(\text{sec})$	$A_2(\text{sec})$	$A_3(\text{sec})$	$B_1(\text{sec}^{-1})$	$B_2(\text{sec}^{-1})$	$B_3(\text{sec}^{-1})$
1.329×10^{-4}	2.347×10^{-6}	-2.63×10^{-8}	5.8187×10^2	2.1472×10^3	3.0176×10^7

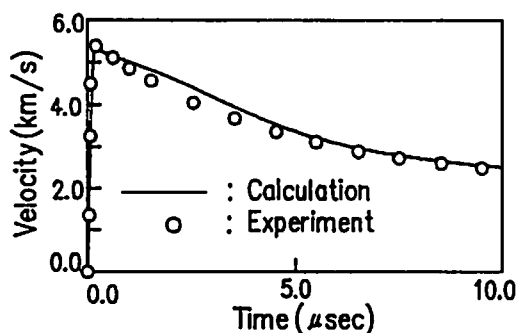


Fig. 11 The changes of the underwater shock wave velocity since the detonating gas impinges on water.

度の時間的な変化をFig. 11に示す。図中プロット点(○印)は(8)式から得られた速度を示す。また実線は数値計算から求められた圧力値をもとにRankine-Hugoniotの関係を用いて得られた速度を示す。爆轟波が水に入射すると、ただちに水中衝撃波が発生し、約200nsecで水中衝撃波は、最高速度5380 m/secまで加速されることが同図からわかる。この場合の圧力は計算では約11.5GPaであった。同図から水中衝撃波の加速、減速に関して計算と実験結果の両者には極めて良い一致が見られる。これらのことはJWL状態方程式および定常爆轟の仮定を用いた高性能爆薬の水中爆轟過程の数値解析が十分有効であることを示している。さらに水中衝撃波の伝播過程の実験結果を(7)式で表現することが十分正しかったことを示している。

4. まとめ

比較的簡単なシリンダー膨張試験と、nonlinear curve fitting法を用い、高性能爆薬の爆轟ガスのJWL状態方程式のパラメータを得た。このパラメータを用い銅管内の爆薬の爆轟特性を数値解析し、シリンダー膨張試験結果との比較検討により解析結果が十分正しく試験結果を説明することを明らかにした。

高性能爆薬の水中爆轟ならびに爆薬のごく近傍に発生する水中衝撃波の伝播過程について光学的写真観察実験ならびに数値解析を行った。爆轟波が水に入射すると、水中衝撃波が直ちに発生する。入射後、約200 nsecまでの間で水中衝撃波は急激に加速され、最高速度(5380 m/sec)に到達する。さらに時間が進むと、爆轟ガスの膨張によって発生した膨張波が水中衝撃波

と干渉し、その強さを急激に減衰させることがわかった。また爆薬の爆轟過程に関する定常爆轟仮定、ならびにJWL状態方程式を用いた数値解析法は水中爆轟現象のシミュレーションに極めて有効であることを明らかにした。

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森田敦君の尽力があった。ここに合わせて謝意を表します。

文 献

- 1) 外本和幸, 伊東 繁, 藤田昌大, 千葉 昂, 日本鉄鋼協会誌, 80, 125 (1994)
- 2) R. H. Cole, "Underwater Explosions", Princeton University Press (1948)
- 3) 鈴木明人, 小川御繁, 福山郁生, 青木章哲, 工業火薬, 46, 285 (1985)
- 4) S. R. Brinkley, Jr., J. G. Kirkwood, OSRD Report 5649 (1945)
- 5) 田中克己, 「爆薬の爆轟特性解析」, 化学技術研究所報告 (1983)
- 6) C. L. Mader, LA-2900, UC-4, TID-4500 (1963)
- 7) C. L. Mader, "NUMERICAL MODELING OF DETONATION", University of California Press (1979)
- 8) E. L. Lee, H. C. Hornig and J. W. Kury, UCRL-50422 (1968)
- 9) P. R. Bervington, "Data Reduction and Error Analysis for the Physical Sciences", McGraw Hill, New York, Ch. 11 (1969)
- 10) H. Hornberg, Propellants, Explosives, Pyrotechnics, 11, 23-31 (1986)
- 11) I. F. Lan, S. C. Hung, W. M. Lin, C. Y. Chen, Y. M. Niu and J. H. Shiuan, 工業火薬, 53, 149 (1992)
- 12) A. A. Amsden, H. M. Ruppel, C. W. Hirt, LA-8095, UC-32 (1980)
- 13) S. P. Marsh "LASL Shock Hugoniot Data", University of California Press, (1980)

14) 高橋勝彦, 村田健司, 加藤幸夫, 工業火薬, 54, 190

(1993)

Livermore National Laboratory, Rept. UCID-

16189 (1973)

15) E. L. Lee, M. Finger, W. Collins, Lawrence

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

Equation of state of detonating products and underwater shock wave

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

When we apply underwater shock waves for various metal processing, as an explosive forming, punching of metal plates, a suitable controlling of the underwater shock wave is necessary. In order to achieve this controlling, the characteristics of the underwater shock wave have to be fully cleared. The behaviors of the underwater shock wave occurred by the underwater explosion of the high explosive are investigated by a high speed phototechnique and by a numerical method. We obtained the JWL parameter through a simple cylinder expansion test for the high explosive. We simulated the copper tube expansion test of high explosive using this JWL parameter. The numerical results quite well agree with the experimental results. The underwater explosion of the high explosives in PMMA tube are also carried out. The numerical results of the underwater explosion are compared with the experimental results. The fine agreement between the experimental and the calculational results are also obtained.

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