

水中爆轟現象の光学的観測について

伊東 繁*, 吉良章夫*, 久保田士郎*, 長野司郎*
藤田昌大*, 高橋勝彦**, 村田健司**, 加藤幸夫**

高性能爆薬の水中爆轟によって発生した水中衝撃波を光学的写真撮影法を用いて調べた。実験には2種類の爆薬が用いられた。それらはPBX(充填密度1750kg/m³, 爆轟速度8400m/sec), およびSEP(充填密度1310kg/m³, 爆轟速度6970m/sec)である。爆薬を円柱状に成形し, それを水槽に沈めて実験を行った。発生した水中衝撃波はシャドウグラフ法によりストリーク写真撮影と駒撮写真撮影によって観察された。さらにALE法を用いて数値計算を行い, 実験結果と比較した。爆轟波が水に入射すると水中衝撃波が短時間で加速され最高速度に達し, それから徐々に減速していることがわかった。この最高速度からインピーダンスマッチング法を適用することにより爆轟生成ガスのChapman-Jouguet点での圧力を求めることができる。発生直後の水中衝撃波の先頭形状は平面であるが, 水中を伝播してゆくにつれて, 次第に丸みを帯びてくるようになることが駒撮写真からわかる。これは円柱の角から発生した膨張波が伝播し, 先頭衝撃波と干渉しその強さを減衰させると同時にその形状を変化させるためである。

1. 緒 言

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て各種の金属加工を行ってきた。高性能爆薬の水中爆轟によって発生した水中衝撃波を压力容器内で収束させ超高压を達成し, その圧力によって難焼結性金属粉末の衝撃硬化¹⁾を行ったり, 衝撃合成等, 工学的, 実用的な観点から研究を行ってきた。

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。このような衝撃現象は一般に高速現象であるため, それを解明するためには光学的観察方法が有効である。水中衝撃波の光学観察は気体中の衝撃波の光学的観測と比べて十分利用されてきたとは

思われない。これはひとつに高性能爆薬の水中爆轟が大規模に行われた場合が多く(例えばCole²⁾), 光学的写真観測実験とはなじまなかったことが考えられる。さらに爆薬の水中爆轟現象への興味は爆源からかなりの距離における水中衝撃波にあって, 光学的観察実験よりはむしろトルマリンゲージのような圧力ゲージによる圧力測定実験に主力がおかれていたためであると思われる。

ところで高性能爆薬の水中爆轟現象を理解しようとするれば爆源の極近傍における水中衝撃波の発生からその伝播過程において生ずる強さの減衰過程等の詳細な現象の把握が必要である。このために水中衝撃波の光学的観察実験は極めて有効であると考えられる。またこれらの実験結果の定量的な評価を行うため, 数値計算結果と比較検討する。

2. 実験方法および数値計算方法

2.1 水中爆轟実験

水中爆轟実験に採用した水中衝撃波法³⁾の実験装置概略図をFig. 1に示す。直径30mm, 長さ30mmの円柱状に成形された2種類の主爆薬plastic bonded explosives(PBX)およびsafety explosives(SEP)をpolymethylmethacrylate(PMMA)製の水槽下部に配置し, 水を充満させて光学的写真観察実験を行った。なお, PBXはcyclotetramethylenetetranitramine

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

**日本油脂株式会社愛知事業所武豊工場
TEL 0569-72-0915
FAX 0569-72-7330

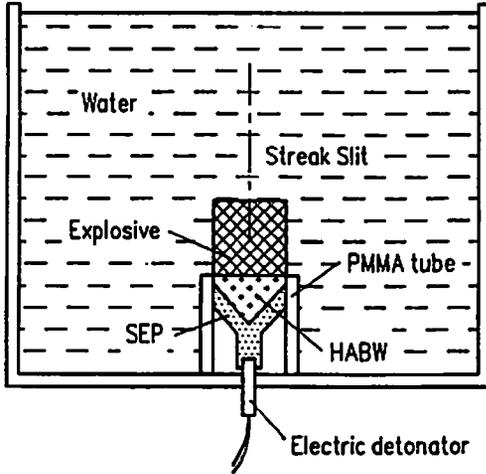


Fig. 1 A schematic illustration of aquarium technique.

(HMX)を主成分とした日本油脂(株)製の爆薬で、充填密度が $1750\text{kg}/\text{m}^3$ 、爆轟速度が $8400\text{m}/\text{sec}$ である。SEPはpentaerthritoltetranitrate (PETN)を主成分とした旭化成工業(株)製の可塑性爆薬で、充填密度が $1310\text{kg}/\text{m}^3$ 、爆轟速度が $6970\text{m}/\text{sec}$ である。主爆薬下部には平面爆轟波を得るためにSEPとHABWで構成された爆薬レンズを取付け、6号電気雷管(旭化成工業(株)製)によって起爆した。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 $2200\text{kg}/\text{m}^3$ 、爆轟速度が $4750\text{m}/\text{sec}$ である。爆轟波は爆薬レンズ内を伝わる過程で平面波となり主爆薬内を伝播し、水中に入射する。爆轟波の入射によって発生した水中衝撃波の伝播過程を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 $1\text{mm}/\text{ns}$)を使用してストリーク撮影し、観測した。ストリーク撮影では、円柱状爆薬の中心軸とイメージコンバータカメラのスリットが一致するように実験装置を配置した。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イト(HADLAND PHOTONICS社製、HL20/50型フラッシュユニット、出力 500J)を使用した。爆轟現象とキセノンフラッシュライトの発光を同期させる必

要があるので、ディレイジェネレータ(HADLAND PHOTONICS社製、THREE CHANNEL DELAY GENERATOR, TYPE JH-3 CDG)により電気雷管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。

また水中衝撃波の伝播過程を調べるため駒撮写真撮影もあわせて行った。ストリーク撮影と同様に、撮影はイメージコンバータカメラで行った。なお光学系については既に報告してある⁴⁾のでその詳細はここでは省略する。

2.2 数値計算方法

数値計算には、Arbitrary Lagrangian-Eulerian (ALE)法⁵⁾を用いた(計算方法の詳細は前出文献4参照)。爆薬の爆轟生成ガスの状態方程式は以下に示すJones-Wilkins-Lee (JWL)状態方程式⁶⁾を用いた。

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

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 、 R_1 、 R_2 、 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SEP⁴⁾およびPBXの爆轟生成ガスについてのパラメータをTable 1に示す。なお、PBXについては近似的に文献⁶⁾の爆薬RX-08-AC (HMXを主成分とする爆薬)のJWLパラメータによった。水の状態方程式については次式を用いた。

$$P = \frac{\rho_0 c_0^2 \eta}{(1-s\eta)^2} \quad (2)$$

ここで ρ は密度、 ρ_0 は大気圧における密度で $1000\text{kg}/\text{m}^3$ 、 η は $1 - (\rho_0/\rho)$ 、 c_0 は音速で $1489\text{m}/\text{sec}$ 、 s は物質によって決まる定数で 1.786 ⁷⁾である。

3. 実験および計算結果

PBXおよびSEPの水中爆轟により発生した水中衝

Table 1 Constants of JWL equation of state.

	A(GPa)	B(GPa)	R_1	R_2	ω	$E_0(\text{J}/\text{m}^3)$
PBX	652.7	9.678	4.30	1.10	0.35	9.8001×10^9
SEP	364.9	2.310	4.30	1.00	0.28	2.879×10^9

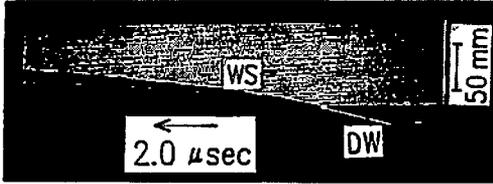


Fig. 2 A streak photograph obtained by the underwater explosion of PBX. The streak speed is $5\text{mm}/\mu\text{s}$. The notation WS and DW indicate the history of the propagation of the underwater shock wave and the detonation wave respectively.

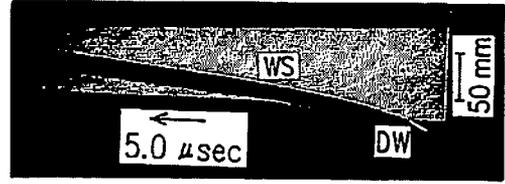


Fig. 3 A streak photograph obtained by the underwater explosion of SEP. The streak speed is $2\text{mm}/\mu\text{s}$. The notation WS and DW indicate the history of the propagation of the underwater shock wave and the detonation wave respectively.

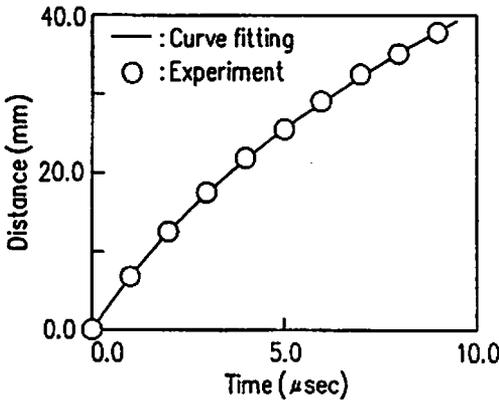


Fig. 4 A distance-time wave diagrams for PBX.

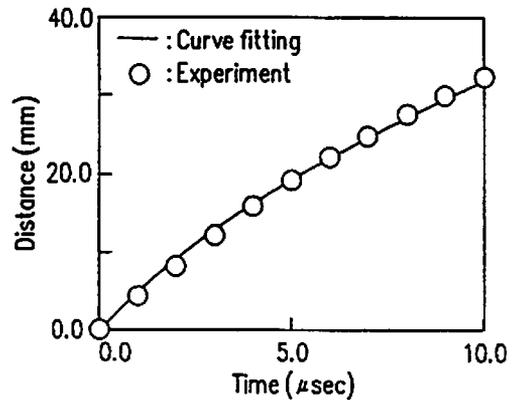


Fig. 5 A distance-time wave diagrams for SEP.

撃波のストリーク写真をそれぞれFig. 2 およびFig. 3 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。同図の縦方向が中心軸方向の変位、横方向が時間、矢印が時間の進行方向を示す。白く見えるラインDWは爆薬中を伝播する爆轟波であり、それが水中に入射することにより、直ちに水中衝撃波が発生する。同図のラインWSは爆薬の上端面から上方へ伝播する水中衝撃波の伝播の履歴を示している。

ストリーク写真を画像処理することによって爆薬の上端面からの距離 y と時間 t の関係を得る。PBX およびSEPの場合に得られた結果をそれぞれFig. 4 およびFig. 5 に示す。図中○印はストリーク写真を測定した点のうち代表的な点を示し、実線は、測定点を

non-linear curve fitting法⁸⁾により関数近似して得られた結果である。水中衝撃波の伝播速度は時間が十分に経過した後では音速に減速するという条件を満たすように近似関数を次式の様に定めた。

$$\frac{y}{D} = \sum_{j=1}^3 [A_j \{1 - \exp(-B_j t)\}] + c_0 \frac{t}{D} \quad (3)$$

また、初期伝播速度がゼロであることより、(3) 式は次式を満足しなければならない。

$$c_0 + DA_1 B_1 + DA_2 B_2 + DA_3 B_3 = 0 \quad (4)$$

ここで、 y は爆薬上端面からの距離、 t は時間、 D は爆薬の爆轟速度、 c_0 は水の音速、 $A_1, A_2, A_3, B_1, B_2, B_3$ はパラメータである。PBXおよびSEPについ

Table 2 Curve fitting parameters for the propagation of the underwater shock wave.

	$A_1(\text{sec})$	$A_2(\text{sec})$	$A_3(\text{sec})$	$B_1(\text{sec}^{-1})$	$B_2(\text{sec}^{-1})$	$B_3(\text{sec}^{-1})$
PBX	3.794×10^{-4}	2.233×10^{-6}	-2.53×10^{-8}	2.397×10^2	2.817×10^5	3.550×10^7
SEP	3.633×10^{-4}	1.744×10^{-6}	-2.68×10^{-8}	2.239×10^2	2.847×10^5	2.950×10^7

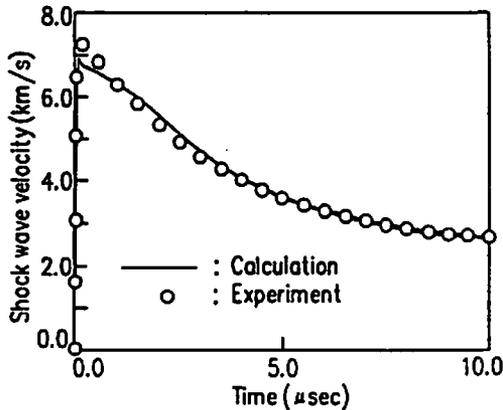


Fig. 6 The velocity change of the front of the underwater shock wave obtained by the underwater explosion of PBX.

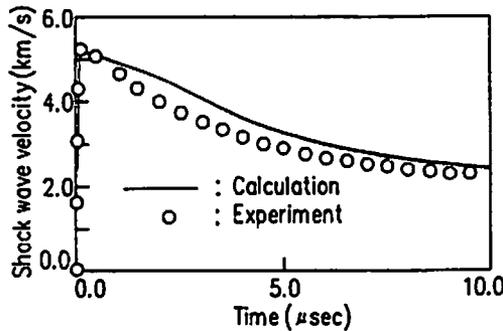


Fig. 7 The velocity change of the front of the underwater shock wave obtained by the underwater explosion of SEP.

て得られたパラメータをTable 2に示す。

(3) 式を時間 t で微分すると中心軸上を伝播する水中衝撃波の速度を得ることができる。PBXおよびSEPについて得られた速度と時間との関係をそれぞれFig. 6およびFig. 7に示す。図中縦軸は水中衝撃波の速度、横軸は爆轟波が界面に達した瞬間からの時間を示す。○印は(3)式を微分して得られた結果、実線は数値計算で得られた結果を示す。同図より爆轟波が界面に達した瞬間から水中衝撃波が短時間(約100 nsec)で加速され最高速度に達し、それから徐々に減速していることが分かる。PBXの場合に得られた最高速度は、(3)式を微分して得られた結果ではおよそ7200 m/sec、数値計算結果ではおよそ6900 m/secとなり若干異なることがFig. 6よりわかる。SEPの場合には、いずれの場合もおよそ5300 m/secであり両者は極めて良く一致する (Fig. 7 参照)。

爆薬中を伝播してきた爆轟波が水中に入射する際に発生する水中衝撃波の速度及び圧力を評価するために

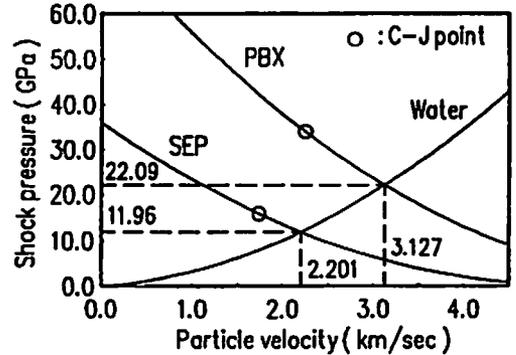


Fig. 8 Impedance matching method for PBX and SEP.

インピーダンス・マッチング法を適用した。その結果をFig. 8に示す。図中の3本の曲線はそれぞれPBXの等エントロピー膨張曲線、SEPの等エントロピー膨張曲線、水の衝撃特性曲線である。縦軸は圧力、横軸は粒子速度を示す。発生する水中衝撃波の粒子速度 u_p 及び圧力 P はそれぞれの膨張曲線と水の衝撃特性曲線の交点から求められる。PBXの場合には、 $u_p = 3127$ m/sec、 $P = 22.09$ GPaで、SEPの場合には、 $u_p = 2201$ m/sec、 $P = 11.96$ GPaであった。水中衝撃波の速度 U は次式から得られる。

$$U = c_0 + s u_p \quad (5)$$

これによりPBXの場合には、 $U = 7074$ m/secで、SEPの場合には、 $U = 5420$ m/secが得られた。また、(3)式を時間 t で微分して U を得れば、(5)式を用いて粒子速度を求め、それらを用いて次式により圧力が得られる。

$$P = \rho_0 U u_p \quad (6)$$

ストリーク写真より得られた近似関数から上述の方法で求められる水中衝撃波の速度と圧力、数値計算結果、およびインピーダンス・マッチング法から得られた結果をTable 3に示す。SEPの場合はいずれの場合も比較的良好一致が見られるが、PBXの場合はJWLパラメータを近似的に決定しているため、速度で約3%程度の違いが生じている。水中衝撃波法で水中衝撃波の速度 U と圧力 P が求めれば、次式から爆薬の爆轟生成ガスのChapman-Jouguet点における圧力 P_{CJ} を求めることができる。

$$P_{CJ} = \frac{\rho_0 U + \rho_s D}{2 \rho_0 U} P \quad (7)$$

ここで、 ρ_s は爆薬の充填密度である。これにより、

Table 3 The velocity and the pressure of the underwater shock wave.

	PBX		SEP	
	U (m/sec)	P (GPa)	U (m/sec)	P (GPa)
Experiment	7240	23.3	5320	11.4
Calculation	6920	21.7	5270	11.3
Impedance matching	7074	22.1	5420	11.9

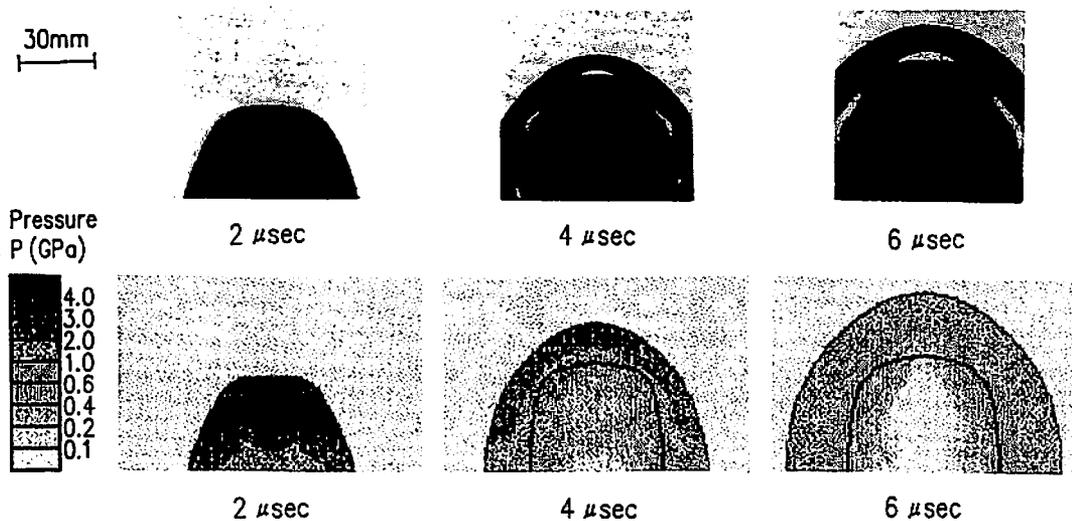


Fig. 9 Comparison of framing photographs and a pressure contour maps obtained by numerical calculation for PBX.

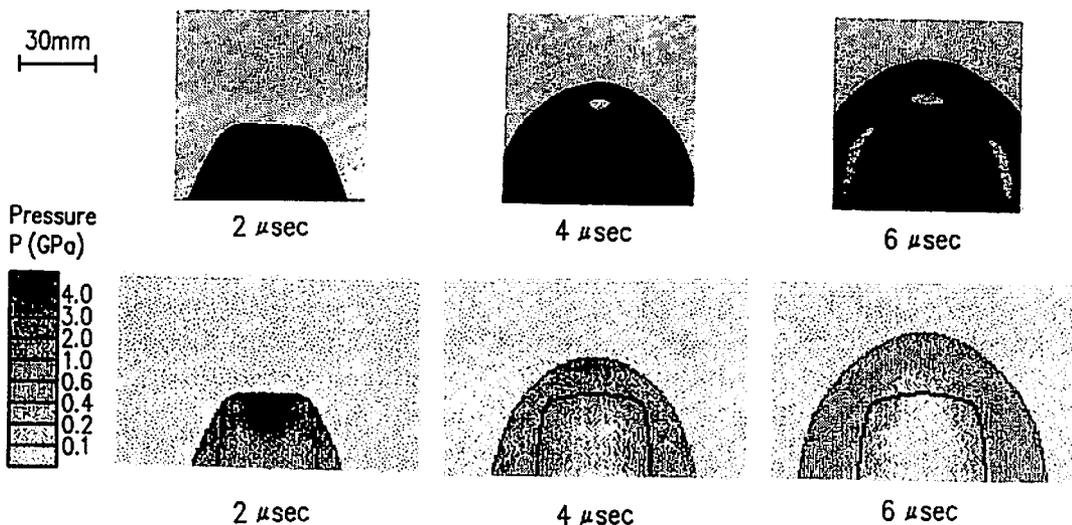


Fig. 10 Comparison of framing photographs and a pressure contour maps obtained by numerical calculation for SEP.

PBXの場合は、 $P_{CJ}=35.4\text{GPa}$ 、SEPの場合は、 $P_{CJ}=3$ としたとき、PBXの場合は、 $P_{CJ}=31.2\text{GPa}$ 、SEPの場合は、 $P_{CJ}=15.9\text{GPa}$ が得られる。なお、 $P_{CJ}=\rho D^2/(\gamma+1)$ で $\gamma=$

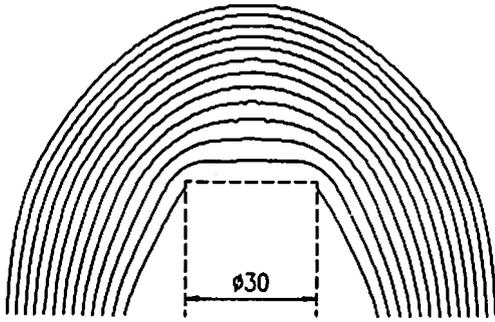


Fig. 11 The profile changes of the underwater shock wave obtained by the numerical calculation for SEP.

PBXの水中爆轟により発生した水中衝撃波の駒撮写真をFig. 9に示す。またSEPの場合に同様に得られた駒撮写真をFig. 10に示す。両図は2 μsec 間隔で得られた写真で、数値計算によって得られた同時間での圧力分布をあわせて示す。圧力分布は色の濃い部分が高い圧力を示し、図中の実線は爆轟生成ガスと水との界面を示す。爆轟中を伝播してきた爆轟波が水中に入射すると、水中衝撃波が直ちに発生する。発生直後の水中衝撃波の先頭形状は平面であるが、水中を伝播してゆくにつれて、次第に丸みを帯びてくるようになることが同図からわかる。これは円柱の角から発生した膨張波が伝播し、先頭衝撃波と干渉しその強さを減衰させると同時にその形状を変化させるためである。水中衝撃波が通過した後の水中では圧力や温度が上昇しているため、その領域を伝播する音速も早くなり、膨張波が先頭衝撃波に直ちに追いつくようになる。SEPの場合について数値計算によって得られた水中衝撃波の先頭形状の時間的な変化をFig. 11に示す。同図は爆轟波が水に入射した瞬間から1 μsec おきに得られた結果で、破線は、爆薬と水の初期界面を示す。同図から水中衝撃波は水中を伝播するにつれて急激にその形状を変化させることがわかり、入射後4 μsec ではほとんどその形状が球面となる。その時水中衝撃波の強さは約4.5GPaまで急速に低下している。このように爆薬の水中爆轟によって発生した水中衝撃波は、爆薬の爆轟生成ガスの膨張によって生じる膨張波の影響を大きく受け、発生後急激にその強さを減衰させる性

質を持っていることがわかる。

4. 結 論

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解析を行った。光学的写真観察実験より、爆薬中を伝播してきた爆轟波が水中に入射して発生する水中衝撃波の先頭形状は、発生直後平面で、水中を伝播してゆくにつれ次第に丸みを帯びることがわかった。この形状変化は数値計算結果と良く一致した。数値計算結果によると、SEPの場合、爆轟波の入射後4 μsec で水中衝撃波の形状がほとんど球面となり、そのとき水中衝撃波の強さは約4.5 GPaであった。

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小島正樹君の尽力があった。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", (1948), Princeton University Press
- 3) 佐々宏一, 伊藤一郎, 工業火薬, 27, 4, 228 (1966)
- 4) 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)
- 5) A. A. Amsden, H. M. Ruppel, C. W. Hirt, LA-8095, UC-32 (1980)
- 6) E. L. Lee, M. Finger, W. Collins, Lawrence Livermore National Laboratory, Rept-UCID-16189 (1973)
- 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

Optical study of underwater explosion of high explosive

by Shigeru ITOH*, Akio KIRA*, Shiro KUBOTA*, Shiro NAGANO*
Masahiro FUJITA*, Katsuhiko TAKAHASHI**, Kenji MURATA**
and Yukio KATOH**

Phenomena of the underwater explosion of high explosives are investigated by optical measurements. Two kinds of explosives are used in the experiments. One is a plastic bonded explosives (PBX) whose detonation wave velocity is 8400 m/sec and density is 1750 kg/m³, the other is a safety explosives (SEP) with a detonation wave velocity of 6970 m/sec and density of 1310 kg/m³. Cylindrical configurations of the explosives are tested in a water tank. A common shadow graph system is used to take streak and framing photographs. We also simulate these underwater explosions using the Arbitrary Lagrangian-Eulerian (ALE) method to compare with the experimental results. When the detonation wave impinges on the water, the velocity of the underwater shock wave reaches its peak value, then it immediately decays exponentially. Using this peak value of the velocity, we can calculate the pressure at the Chapman-Jouguet point by the impedance matching method. The framing photographs confirm that the configuration of the underwater shock wave becomes spherically immediately, owing to the effects of the expansion wave occurred by the expansion of the product gas.

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

**NOF Corporation, Aichi Works, Taketoyo Plant, Kitakomatsudai, Taketoyo-cho, Aichi 470-23, Japan)
