

高性能爆薬の水中爆ごう現象と爆ごう生成ガスの状態方程式*

伊東 繁^{*1}, 吉良章夫^{*2}, 灘光 陽^{*3}
長野司郎^{*1}, 藤田昌大^{*1}, 本田隆志^{*3}

Underwater Explosion and Equation of State for a Product Gas

Shigeru ITOH, Akio KIRA, You NADAMITSU,
Shiro NAGANO, Masahiro FUJITA and Takashi HONDA

An interaction between underwater shock waves and expansion waves occurred by the expansion of a product gas is investigated by both experimentally and by numerical simulation. Cylindrical high explosives are used in the experiments. Streak photographs and framing photographs are taken by a high-speed camera using a conventional shadowgraph system. When the cylindrical high explosive detonates in the water, an underwater shock wave is occurred and the product gas expands as the detonation wave propagates. Due to the expansion of the product gas, an expansion wave occurs and interacts with the underwater shock wave. The strength of the underwater shock wave is strongly effected by the expansion waves which changes its configuration. The attenuation process of the underwater shock wave is investigated theoretically using a method of characteristics. Using this theoretical work, it is possible to obtain the parameters of the Jones-Wilkins-Lee (JWL) equation of state for the product gas. The numerical results obtained by using the JWL parameters are compared with the experimental results. Good agreement between them is confirmed in the case of the underwater explosion of cylindrical high explosives.

Key Words: Shock Wave, Method of Characteristics, Equation of State, Detonation. Numerical Analysis, Expansion Wave, Shock Attenuation

1. 緒 言

著者らは爆薬を金属シリング内に充てんし、それを爆ごうさせて生じる爆ごう生成ガスの膨張過程をシリング膨張試験⁽¹⁾によって観察し、爆ごう生成ガスのJones-Wilkins-Lee(JWL)状態方程式⁽²⁾の定数(JWLパラメータ)を得た⁽³⁾。この状態方程式を用いて高性能爆薬の水中爆ごう現象をArbitrary Lagrangian-Eulerian(ALE)法⁽⁴⁾により数値計算し、得られた水中衝撃波が実験結果とよく一致することを明らかにした⁽⁵⁾。シリング膨張試験はLAWRENCE LIVERMORE LABORATORYで各種の爆薬について行われ、それぞれJWLパラメータが報告されている⁽⁶⁾。ところでシリング膨張試験では、試験の最終段階で爆ごう生成ガスの膨張によって金属パイプが破裂し、その破片が飛散する。この金属破片が観測部を損傷させるだけでなく、人的被災を招く可能性があり、危険な実験である。

爆薬の爆ごう生成ガスの状態方程式については木

原・疋田・田中(KHT)状態方程式⁽⁷⁾、Becker-Kistia-kowsky-Wilson(BKW)状態方程式⁽⁸⁾等によって与えられる場合も多い。特にKHT状態方程式は精度が高く、また解析コードがすでに市販されており、利用するのは非常に簡便である。しかし、これらの状態方程式を採用する場合、爆薬の組成が知られていなければならない。近年開発中の爆薬についてはその組成が明確にされていないものも多く、これらに対しては組成、初期密度、爆ごう波の速度等が似通った爆薬の状態方程式を利用して数値解析しなければならず、解の精度に欠ける。そのためこれらの爆薬に対してシリング膨張試験を行いJWLパラメータを得ることも要求される。

著者らは前報⁽⁹⁾において、PMMA板上に張られた高性能爆薬の水中爆ごう過程の光学的観測実験結果ならびに、ALE法による数値解析結果を報告し、発生した水中衝撃波は爆ごう生成ガスの膨張による膨張波の影響を大きく受け、その強さを変化させることを明らかにした。また特性曲線法を用いた理論解析を行い、水中衝撃波の形状変化から、爆ごう生成ガスの膨張過程を明らかにする方法を提案した。その際PMMA板の影響で実験結果と理論解析結果に多少の不一致があることを示した。

* 原稿受付 1996年10月21日。

^{*1} 正員, 熊本大学工学部 (☎862 熊本市黒髪2-39-1)。^{*2} 正員, 熊本大学大学院。^{*3} 正員, 第一工業大学工学部 (☎899-43 国分市中央1-10-2)。

本報告では爆ごう生成ガスの膨張過程を得るために円筒形爆薬を水中爆ごうさせ、光学的写真観察実験を行い、水中衝撃波の形状変化から特性理論を用いて爆ごう生成ガスの膨張過程を明らかにする。ここで提案する特性理論解を用いる方法は、従来のシリンダ膨張試験の結果を用いることなく爆ごう生成ガスの圧力と密度を求めることができるため、これを用い、JWLパラメータを得ることができる⁽¹⁰⁾。得られたJWLパラメータを用いた数値計算結果と光学的観察実験結果を比較検討し、両者が極めてよく一致することを報告する。

2. おもな記号

- X: 軸に沿った座標
- r: 半径
- P: 圧力
- ρ: 密度
- e: 比内部エネルギー
- D: 爆ごう波の速度
- U_s: 水中衝撃波先頭の速度
- u_p: 粒子速度
- v: 定置座標系での粒子速度
- C: 音速
- M: マッハ数
- μ: マッハ角
- ν: Prandtl-Meyer 関数
- δ: 流れの転向角
- θ: 水中衝撃波の接線角
- Γ: Grüneisen 係数

下添字 0 は大気圧、常温における状態を表す。その他の記号は文章中で定義する。

3. 理論解析

図1は爆ごう波を固定した定置座標系で示した水中衝撃波系を示す。爆薬の爆ごう特性ならびに水中衝撃

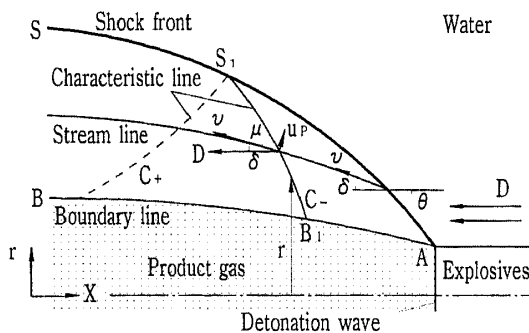


Fig. 1 An illustration of the fixed coordinates

波の伝ば過程については前報⁽⁹⁾と同様な仮定を行った。その概要は次のとおりである。爆ごう波は一定速度 D で爆薬中を伝ばし、定常理想爆ごうを行う。水中衝撃波は同一形状を保ち爆ごう波とともに図1中 X 方向に一定速度 D で移動する。そのため流れ場全体に X 方向と逆向きに速度 D を加えることによって爆ごう波ならびに水中衝撃波を静止させることができる。

U_s と D に対して次の関係が成り立つ⁽¹¹⁾。

$$U_s = D \sin \theta \dots\dots\dots (1)$$

定置座標系で爆ごう生成ガスと水との界面を曲線 AB で示す。この界面と水中衝撃波 AS との間に特性曲線 S₁B₁を描くことができる。仮定よりこの特性曲線 C₋に沿って次式が成り立つ。

$$d\delta - dv = \frac{\sin \mu \sin \delta}{\sin(\mu + \delta)} \frac{dr}{r}$$

$$dv = \sqrt{M^2 - 1} \frac{dv}{v}, M = \frac{v}{C} \dots\dots\dots (2)$$

C₋に沿った圧力 P の変化は次式となる。

$$dP = \frac{-\rho v^2}{\sqrt{M^2 - 1}} \left[d\delta + \frac{\sin \mu \sin \delta}{\sin(\mu + \delta)} \frac{dr}{r} \right] \dots\dots (3)$$

同様に特性曲線 C₊に沿って次式が成り立つ。

$$d\delta + dv = \frac{\sin \mu \sin \delta}{\sin(\mu - \delta)} \frac{dr}{r}$$

$$dP = \frac{\rho v^2}{\sqrt{M^2 - 1}} \left[d\delta - \frac{\sin \mu \sin \delta}{\sin(\mu - \delta)} \frac{dr}{r} \right] \dots\dots\dots (4)$$

流線方向の δ の流線 S に沿った変化と流線間の v の変化の関係は次式となる。

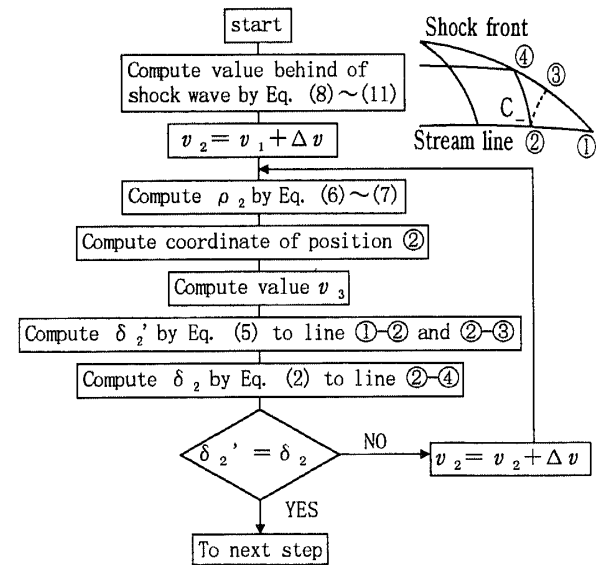


Fig. 2 Flow chart of calculation of the method of characteristics

$$\frac{\partial \delta}{\partial S} = \frac{1}{v} \frac{\partial v}{\partial \eta} \dots\dots\dots (5)$$

また、流線に沿って次式が成り立つ。

$$v^2 - D^2 = -2 \int_{\rho_0}^{\rho} \frac{C^2}{\rho} d\rho \dots\dots\dots (6)$$

音速 C は次式で与えられる。

$$C = C_0(1 - \eta) \frac{\sqrt{1 + s\eta(1 - \Gamma\eta)}}{(1 - s\eta)^{1.5}} \dots\dots\dots (7)$$

ここで $\eta = 1 - \rho_0/\rho$ である。次に経験的に知られる関係式 $U_s = C_0 + su_p$ を斜め衝撃波の関係式に適用すると水中衝撃波面に関して次の式を得る。なお s は体積弾性率の圧力微分 K'_0 を用いて $s = (K'_0 + 1)/4$ で表される。

$$P = \rho_0 U_s u_p \dots\dots\dots (8)$$

$$\rho = \rho_0 U_s / (U_s - u_p) \dots\dots\dots (9)$$

$$v^2 = \frac{[U_s(s-1) + C_0]^2}{s^2} + D^2 - U_s^2 \dots\dots\dots (10)$$

$$\tan \delta = \frac{(U_s - C_0)\sqrt{D^2 - U_s^2}}{sD^2 - U_s(U_s - C_0)} \dots\dots\dots (11)$$

また衝撃波面の ν は次のようになる。

$$\frac{d\nu}{dU_s} = \frac{\sqrt{M^2 - 1}[U_s(1 - 2s) + C_0(s - 1)]}{U_s^2(1 - 2s) + 2U_s C_0(s - 1) + C_0^2 + s^2 D^2} \dots\dots\dots (12)$$

水中衝撃波背後の物理量は式(8)~(11)から与えられる。水中衝撃波の形状が与えられると以上の関係式から、AS と AB 間の領域の物理量が繰返し計算で得られる。計算手法の概要を図2に示す。

4. 実験方法および数値計算方法

4・1 水中衝撃波の光学的写真観察実験 高性能爆薬 SEP [旭化成工業(株)製, PETN: 65%, Paraffine: 35%, 充てん密度 $\rho_e = 1.310 \text{ kg/m}^3$, $D = 6970 \text{ m/s}$] を円筒形(直径 $d = 10 \text{ mm}$, 長さ $L = 250 \text{ mm}$)に成形し、実験を行った。この爆薬を水で満たした PMMA 製の容器に入れて6号電気雷管 [旭化成工業(株)製] によって起爆させ、水中爆ごう実験を行った。実験装置を図3に示す。さらに得られた JWL パラメータの精度を確認するために直径 $d = 30 \text{ mm}$

で長さがそれぞれ $L = 30 \text{ mm}$ と $L = 100 \text{ mm}$ の SEP 円筒の水中爆ごう実験を行った。光学的写真観察実験は、キセノンフラッシュライト (HADLAND PHOTONICS 製, HL 20/50 形フラッシュユニット, 出力 500 J , せん光時間 $50 \mu\text{s}$) を光源としてイメージコンバータカメラ (HADLAND PHOTONICS 製, IMACON 790, 最大コマ撮り間隔 $20\,000\,000$ こま/s, 最高流し速度 1 ns/mm) を使用したシャドウグラフ法によって行った。r 方向への水中衝撃波の伝播過程を調べるために図3中破線の方向にスリットをきってストリーク写真撮影を行った。SEP の起爆時間とライトの発光開始時間の制御はディレイジェネレータ (HADLAND PHOTONICS 製, THREE CHANNEL DELAY GENERATOR, TYPE JH-3 CDG) により行った。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。

4・2 数値計算方法

数値計算には ALE 法を用いた。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。また陰解法の適用により解の安定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。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合せて行った⁽¹²⁾。水については次式で表される Mie-Grüneisen 状態方程式⁽¹³⁾を用いた。

$$P = \frac{\rho_0 C_0^2 \eta}{(1 - s\eta)^2} \left(1 - \frac{\Gamma\eta}{2}\right) + \Gamma\rho_0 e \dots\dots\dots (13)$$

また爆ごう生成ガスの状態方程式は次式で表される JWL 状態方程式を用いた。

$$P = A \left(1 - \frac{\omega}{R_1 V}\right) \exp(-R_1 V) + B \left(1 - \frac{\omega}{R_2 V}\right) \exp(-R_2 V) + \frac{\omega \rho_e e}{V} \dots\dots (14)$$

ここで A, B, R_1, R_2, ω は実験的に求められる定数 (JWL パラメータ) で、 V は爆薬の充てん密度と爆ごう生成ガスの密度との比 ρ_e/ρ である。爆薬の爆ごう

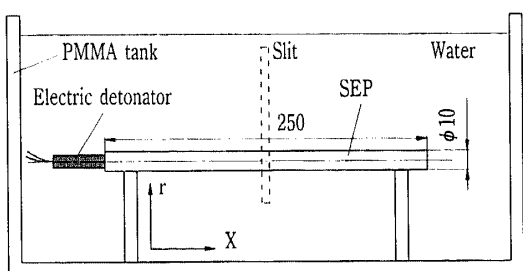


Fig. 3 An illustration of experimental apparatus

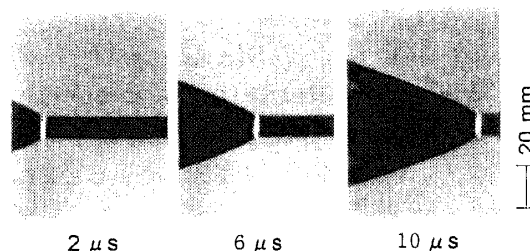


Fig. 4 A series of framing photographs

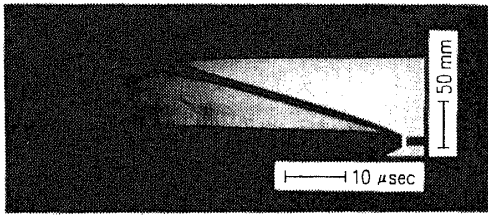


Fig. 5 An example of a streak photograph

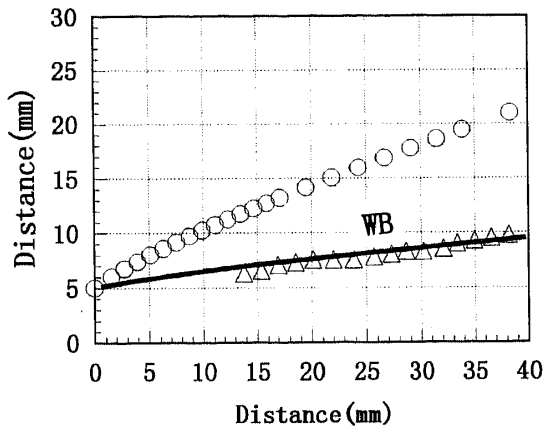


Fig. 6 Configurations of the underwater shock wave and the boundary between the product gas and the water near the front of detonation wave

過程の数値シミュレーションは、前報⁽⁹⁾と同様である。

計算場は一辺 0.5 mm の格子に分割し、代表的な計算では格子数を X , r 方向にそれぞれ 700, 220 とし、計算時間は GATEWAY 2000 (P 5-133) を用いて約 6 h であった。

5. 結果および考察

5.1 水中衝撃波の伝ば過程 $d=10$ mm, $L=250$ mm の円筒形爆薬の水中爆ごう現象のこま撮り写真の代表例を図 4 に示す。図 4 は 4.0 μs おきに撮影された。爆薬の半径方向にスリットをきって得られたストリーク写真の代表例を図 5 に示す。図 5 中白く見えるのは爆薬の発光によるものである。この写真を画像処理し、水中衝撃波の r 方向への伝ば距離と時間のデータを得た。それらを nonlinear curve fitting 法⁽¹⁴⁾ により次式のように関数近似した。

$$Y/D = A_1[1 - \exp(-B_1 t)] + A_2[1 - \exp(-B_2 t)] + A_3[1 - \exp(-B_3 t)] + (C_0/D)t \dots\dots(15)$$

なお A_1, A_2, A_3 および B_1, B_2, B_3 は定数である。式(15)を 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。これは水中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。この近似式と爆ごう波が速

Table 1 JWL parameters of high explosive

TYPE	A (GPa)	B (GPa)	R_1	R_2	ω
old	365.0	2.31	4.3	1.00	0.28
new	376.4	2.15	4.4	1.00	0.28

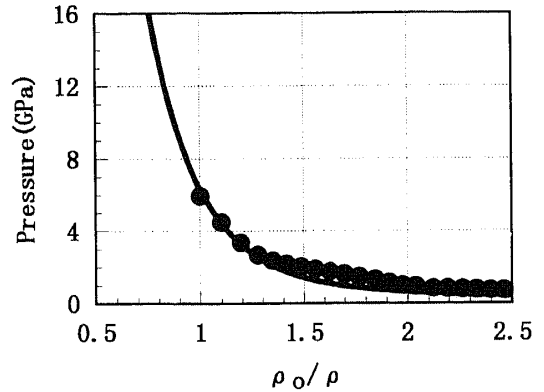


Fig. 7 Pressure and density in the product gas

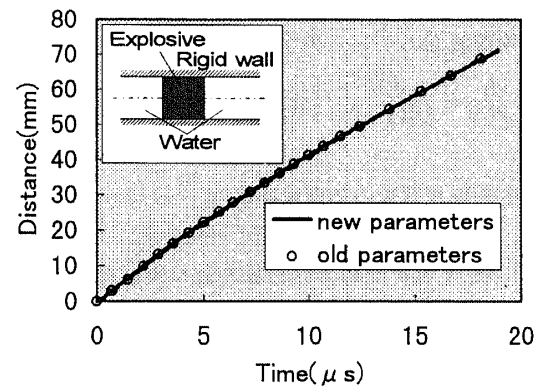


Fig. 8 Underwater shock wave configurations obtained by both a new and an old JWL parameters

度 D で伝ばすることを組合せると水中衝撃波の形状を得ることができる⁽¹²⁾。結果を図 6 に示す。図 6 の横軸は爆ごう波先端を零としてそれから下流方向にとった距離を示す。縦軸は爆薬中心からの半径方向距離を示す。図 6 中(○)は水中衝撃波の形状の実験結果を示す。これをもとに特性理論から得た爆ごう生成ガスと水との界面を実線 WB で示す。(△)は実験的に得られた両者の界面であるが、爆ごう波先端から 13 mm 程度までプロット点がないのは、その付近までは水中衝撃波が強くストリーク写真において界面が認識できないためである。水中衝撃波の形状から特性曲線法を用いて得た爆ごう生成ガスの界面の形状は実験結果を極めてよく予測することがわかる。

また爆ごう生成ガスの密度と圧力の関係を図 7 に示す。爆ごう生成ガスの圧力は、水との界面における圧力が水の圧力に等しいことから得られ、密度は界面の

形状から得られる。得られた結果を図7中(●)で示す。これを nonlinear curve fitting 法によって JWL 状態方程式に近似すると JWL パラメータが得られる。図7中の実線は得られたパラメータにより描いたものである。得られた JWL パラメータを表1に示す。表1中 old は従来のシリング膨張試験から得られた JWL パラメータを, new は本解析から得られた結果を示す。両者にはほとんど差がないことがわかる。爆薬の水中爆ごう現象の簡単な計算結果を図8に示す。計算は図8中に示すように剛体の円筒内に爆薬を充てんし, その前後を水で満たして爆薬を左端から起爆した場合について行った。図8は爆薬の右側に発生する水中衝撃波の伝ば距離と時間の関係を示す。図8中実線が新しい JWL パラメータ, (○)がシリング膨張試験から得られた JWL パラメータを用いて計算した結果を示す。得られた結果の範囲内では両者に差は見られないことが図8からわかる。

5.2 JWL パラメータの評価と水中衝撃波の形状と強さ さらに詳細なパラメータの評価を行うために, $d=30$ mm, $L=30$ mm の円筒形の SEP を水中爆ごうさせることによって得られた水中衝撃波の形状について, 数値計算と光学的観察実験との比較を行う。水中衝撃波の形状を図9に示す。図9(a)はこま撮り写真, (b)は新しい JWL パラメータを用いて ALE 法で数値計算した同一時刻における密度の2階微分値の分布を示す。図9(b)の線状に見える部分(SW)が水中衝撃波の形状を示す。図9(a), (b)を比較することにより数値計算結果が実験結果と比較的によく一致していることが定性的にわかる。2 μ s では爆ごうが終了して時間があまり経過していないため, 発生した水

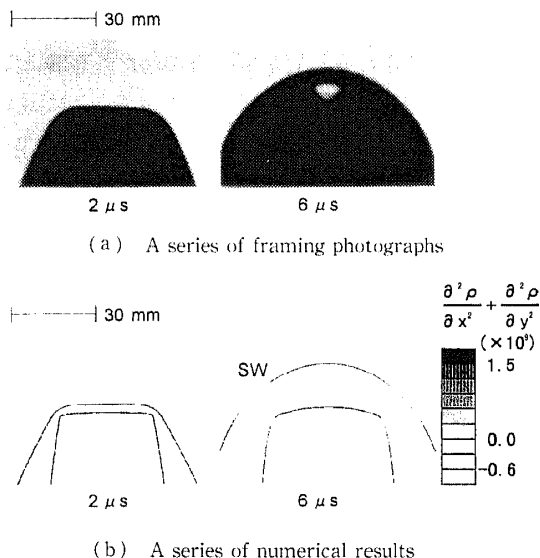


Fig. 9 Configurations of the underwater shock wave

中衝撃波の先頭形状は進行方向(図の上方向)に水平部分が観測されるが, 6 μ s 後では水中衝撃波は, ほぼ球形形状になっていることがわかる。これは爆ごう生成ガスの膨張によって発生した膨張波が水中衝撃波に直ちに追いつきその形状を変化させるためである。このように長さや直径の比があまり大きくない場合($L/d=1.0$ 程度), 発生した水中衝撃波は, 爆ごう後直ちに球形形状の水中衝撃波に変形することがわかる。同形状の爆薬の中心軸上に沿ってスリットをきって得られた水中衝撃波の波動線図を図10に示す。図10中(○)は実験結果, 実線は数値計算結果を示す。両者はよく一致することがわかる。

$d=30$ mm, $L=100$ mm の爆薬の半径方向にスリットをきって撮影したストリーク写真を画像解析し, 得られた水中衝撃波の半径方向伝ば距離と時間の関係を図11に示す。図11中縦軸は半径方向伝ば距離, 横軸は時間を示す。実線は数値計算結果を示す。(○)はストリーク写真から得られた結果を示す。数値計算結果が実験結果とよく一致することがわかる。

$d=10$ mm, $L=250$ mm の爆薬の水中爆ごうによって発生した水中衝撃波の形状ならびに爆ごう生成ガ

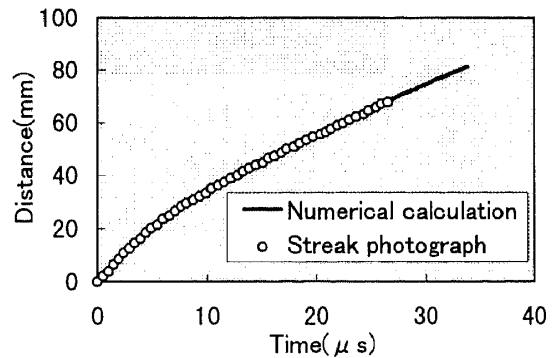


Fig. 10 An $X-t$ wave diagram obtained in short SEP cylinder ($d=30$ mm, $L=30$ mm)

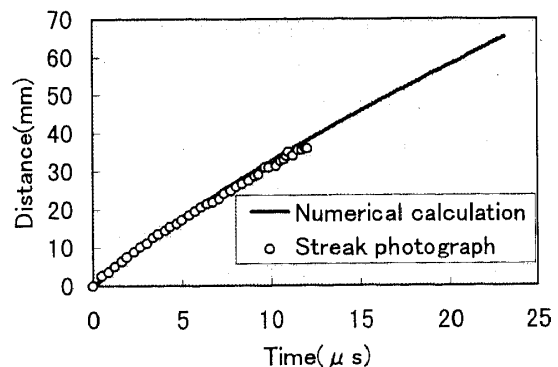


Fig. 11 An $r-t$ wave diagram obtained in long SEP cylinder ($d=30$ mm, $L=100$ mm)

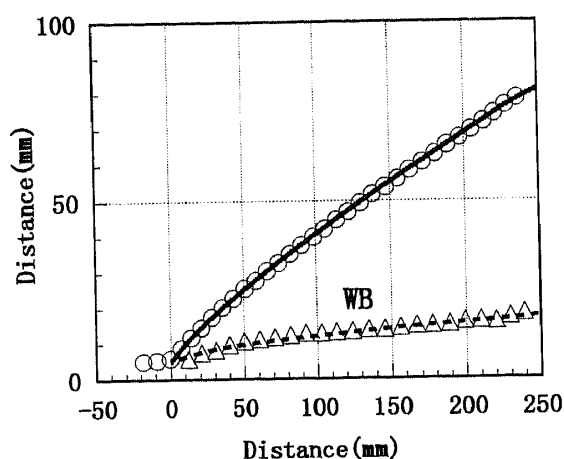


Fig. 12 Configurations of the underwater shock wave and the boundary between the water and the product gas

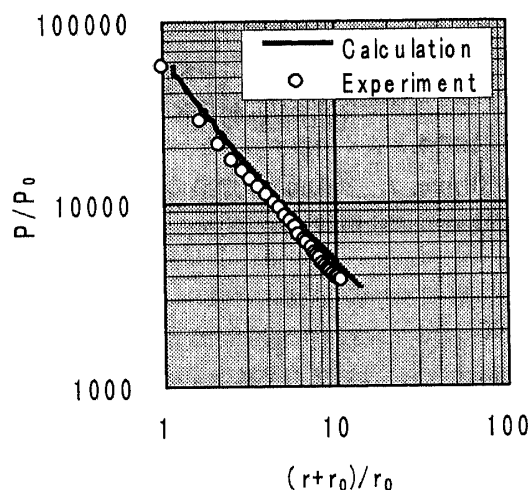


Fig. 13 Pressure distribution of underwater shock wave

スと水との界面に関する実験結果と数値計算結果との比較を図 12 に示す。図 12 中縦軸は半径方向距離、横軸は爆ごう波の先頭から測られた距離を示す。図 12 中実線は数値計算で得られた水中衝撃波の形状、破線 WB は爆ごう生成ガスと水との界面を示す。(○)は実験によって得られた水中衝撃波の形状、(△)は同じく実験によって得られた爆ごう生成ガスと水との界面を示す。水中衝撃波、ならびに界面のいずれについても計算結果と実験結果は極めてよく一致することがわかる。

水中衝撃波の形状がわかればその接線角より式(1)を用いて、水中衝撃波の法線方向速度がわかる。これを用いて斜め衝撃波に関する運動量の関係式より、水中衝撃波前後の強さが計算できる。 $d=10\text{ mm}$ 、 $L=250\text{ mm}$ の場合に得られた結果を図 13 に示す。図 13 の縦軸は衝撃波前後の圧力比、横軸は爆薬の半径 $r_0=$

$d/2$ で無次元化された半径方向距離を示す。図 13 中実線が数値計算結果を示し、(○)が実験結果を示す。数値計算結果と実験結果はよく一致することがわかる。図 13 より水中衝撃波の強さは、爆薬の界面付近から半径に比してほぼ指数的に減少することがわかり、その指数は約 -1.1 である。

6. ま と め

高性能爆薬の水中爆ごうにより発生した水中衝撃波の基本特性を光学的写真観察実験ならびに数値計算によって調べた。爆ごう波を固定した座標系について特性式を応用し、水中衝撃波ならびに爆ごう生成ガスの膨張に関する理論的な解析方法を提案した。また爆薬の爆ごう生成ガスの膨張に関して JWL 状態方程式のパラメータを求める方法を提案した。得られた JWL パラメータを用いて爆薬の水中爆ごう現象を数値計算した。直径が 30 mm の円筒形爆薬の水中爆ごうによって生じた水中衝撃波の形状について数値計算結果と光学的観察実験結果は極めてよく一致することがわかった。また長さや直径の比が小さい爆薬の水中爆ごうによって発生した水中衝撃波は時間の経過とともに急速に球形になることが実験結果より明らかになり、数値計算結果も定性的によく一致した。これは爆薬の水中爆ごうによって発生した水中衝撃波が爆ごう生成ガスの膨張によって発生する膨張波の影響を強く受けることを意味する。長さや直径の比が大きい円筒形爆薬の水中爆ごうによって発生した水中衝撃波の場合、数値計算で得られた爆ごう生成ガスと水との界面が実験結果を極めてうまく予測することも明らかにした。この場合の水中衝撃波の強さは、爆薬の界面付近から半径に比してほぼ指数的に減少することがわかり、その指数は約 -1.1 であった。なお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。実験に際し実験所の石谷氏に負うところが大きい。ここに謝意を表す。

文 献

- (1) Kury, J. W., Hornig, H. C., Lee, E. L., McDonnel, J. L., Ornellas, D. L., Finger, M., Strange, F. M. and Wilkins, M. L., *Proc. 4th Symp. Detonat.*, Office of Naval Research, (1965), 109-120.
- (2) Lee, E. L., Hornig, H. C. and Kury, J. W., UCRL-50422 (1968).
- (3) 伊東繁・ほか 4 名, 火薬学会誌, 55-5(1994), 202-208.
- (4) Amsden, A. A., Ruppel, H. M. and Hirt, C. W., LA-8095, UC-32(1980).
- (5) 伊東繁・ほか 7 名, 火薬学会誌, 56-5(1995), 181-187.
- (6) Lee, E., Finger, M. and Collins, W., UCID-16189(1973).
- (7) 田中克己, 爆薬の爆ごう特性解析, (1983), 1-46, 化学技術

- 研究所.
- (8) Mader, C. L., *Detonation Properties of Equation of State of Becker-Kistiakowsky-Wilson*, (1979), 412-448, University of California Press.
- (9) 伊東繁・ほか5名, *機論*, 62-601, B(1996), 50-55.
- (10) Hornberg, H., *Propell., Explos., Pyrotech.*, 11 (1968), 23-31.
- (11) Krehl, P., Hornemann, U. and Heilig, W., *Shock Tube and Shock Wave Research*, (1977), 303-312, University of Washington Press.
- (12) 伊東繁・ほか3名, *火薬学会誌*, 56-5(1995), 188-194.
- (13) 高橋勝彦・村田健司・加藤幸夫, *工業火薬*, 54-4(1993), 190-197.
- (14) Berventon, P. R., *Data Reduction and Error Analysis for the Physical Sciences*, (1969), 204-246, McGraw Hill, New York.
-