

# 導爆線の水中爆ごうについて

灘光 陽<sup>1</sup> 本田 隆志<sup>1</sup> 藤田 昌大<sup>2</sup> 伊東 繁<sup>3</sup>

## Underwater Detonation of Detonating Cord

Yoh NADAMITSU, Takashi HONDA, Masahiro FUJITA and Shigeru ITOH

The phenomena on the propagation of underwater shock wave and the expansion of detonation products in underwater detonation of detonating cord have been investigated in detail by optical photography, theoretical analysis based on the characteristic-curve method, as well as numerical computation technique. The expansion process of detonation gases was analyzed by employing the characteristic-line theory. Based on this result, the equation of state for the detonation gases of detonating cord could be approximately obtained. The numerical calculations on the change of the configuration as well as the propagation process of underwater shock wave and the expansion process of detonation gases agree with the experimental results quite well. The effectiveness of the characteristic-line theory on the prediction of the expansion of detonation gases as well as the numerical simulation have been demonstrated.

**Key Words :** Shock Wave, Characteristic-line Theory, Underwater Detonation, Numerical Analysis, Expansion Wave

### 1. はじめに

導爆線は取り扱いが容易なためその利用範囲も広い。しかしながら、爆薬の水中爆ごうによって発生した水中衝撃波を各種の金属加工に適用する場合<sup>1), 2), 3)</sup>, 水中衝撃波を加工目的に応じて最適に制御しなければならない。そのためには水中衝撃波の基本特性を十分把握する必要がある。筆者らはシリンダー膨張試験によって得られた爆ごう生成ガスの状態方程式を用いて、平板状ならびに円筒形の高性能爆薬の水中爆ごう過程およびそれによって生じる水中衝撃波の伝播過程をArbitrary Lagrangian Eulerian (ALE) 法<sup>4)</sup>により数値計算し、水中衝撃波の減衰過程が爆ごう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ることを明らかにした。<sup>5), 6)</sup> これらの結果を特性理論に適用する理論解析を提案し、実験的に得られた水中衝撃波の形状から爆ごう生成ガスの膨張過程を明らかにした。<sup>7)</sup> しかしながら数値解析で爆轟現象を解明しようとする

場合、導爆線はその組成が明確にされていないものも多く、爆轟生成ガスの状態方程式が得られない可能性もある。そこで本報では、導爆線の水中爆ごう現象ならびに発生した水中衝撃波の基本特性を光学的写真撮影法で調べた。そして実験的に得られた水中衝撃波形状と特性理論から爆ごう生成ガスの膨張過程を予測する。そしてこの結果をもとに導爆線の爆ごう生成ガスの状態方程式を近似式で求める。数値計算の状態方程式は実用に対しては簡単に求められる方法が要求される。そのために数値計算に用いた爆ごう生成ガスの状態方程式は特性理論解から4次の近似式を求めた。この状態方程式を用いた数値計算結果ならびに光学的写真観察実験から、導爆線の水中爆ごう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、および爆ごう生成ガスの膨張過程などの基本特性を明らかにする。

### 2. 実験方法および数値計算方法

水中衝撃波の特性を調べるための光学的写真撮影実験の装置概略図を図1に示す。導爆線は直径5.4mm、(被服厚さ0.5mm)長さ200mmで、爆薬の充填密度は $\rho_0 = 1200$  (kg/m<sup>3</sup>)である。起爆は6号電気雷管によって行った。実験はすべて熊本大学工学部付属衝撃エネルギー

<sup>1)</sup> 第一工業大学機械工学科

<sup>2)</sup> 崇城大学工学部

<sup>3)</sup> 熊本大学衝撃・極限環境研究センター

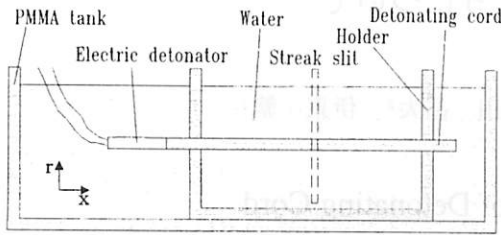


図1 導爆線の水中爆轟実験装置

ギー実験所で行った。

起爆により発生する水中衝撃波の特性を調べるためにイメージコンバータカメラによってフレーミング写真の撮影を行い、また導爆線の爆轟方向と垂直にスリットをきりストリーク撮影も行った。数値計算にはSALE法を用いた。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で行った。水についてはMie-Grüneisen状態方程式を用いた。また爆轟生成ガスの状態方程式は特性理論解から求めた4次近似式を用いた。計算場は一辺0.5mmの格子に分割し、代表的な計算で格子数は(540×200)とし、代表的な計算では一回あたりの計算時間はGAIA 275AXPを用いて約1.5時間であった。

3. 光学的写真観察実験および計算結果

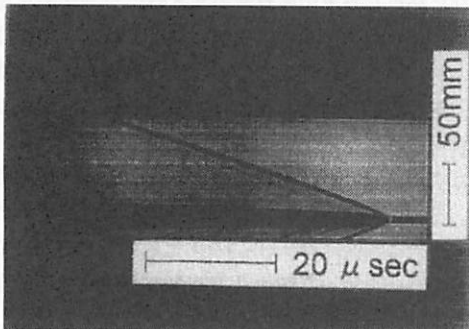


図2 導爆線の水中爆轟に対するストリーク写真

図2に、水中で導爆線を爆轟させ導爆線の半径r方向にスリットをきって撮影した場合のストリーク写真の代表例を示す。図中右下の水平な黒い線の部分は未爆轟の導爆線、その左の白い点は爆轟波が到達して自発光している部分、その点の上下よりそれぞれ左上と右下に伸びている黒い線の上線は水中衝撃波の先頭部分のストリークを示している。図中縦方向が距

離を、横方向が時間を示している。この写真を画像処理し、水中衝撃波のr方向への伝播距離と時間のデータを得た。それらを nonlinear curve fitting 法により次式のように関数近似した。

$$\frac{Y}{D} = A_1 |1 - \exp(-B_1 \cdot t)| + A_2 |1 - \exp(-B_2 \cdot t)| + \left(\frac{C_0}{D}\right) t \quad (1)$$

上式の定数 $A_1, A_2$ , および $B_1, B_2$ を表1に示す。

表1 導爆線の水中爆轟に対する水中衝撃波のフィティングパラメータ

$A_1(\text{sec})$	$A_2(\text{sec})$	$B_1(\text{sec}^{-1})$	$B_2(\text{sec}^{-1})$
15.150	1.920	$4.711 \times 10^{-3}$	0.102

この近似式と爆轟波が速度Dで伝はすことを組み合わせると水中衝撃波の形状を得ることができる<sup>8)</sup>。図3は爆轟生成ガスの密度と圧力の関係を示す。図中(●)は特性理論から得られた結果を示す。図中の実線は得られた結果をもとに求めた4次近似式(後述の式(2))の結果を示す。

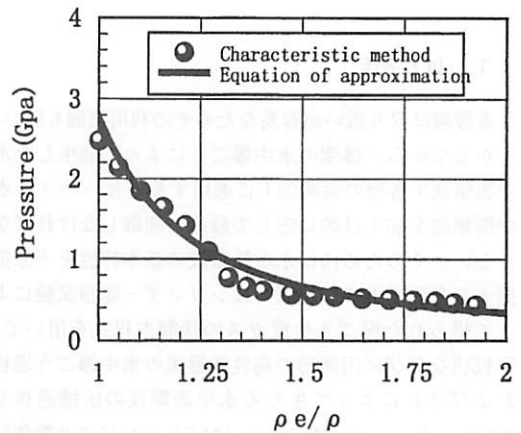


図3 特性理論による導爆線の爆轟生成ガスの圧力と密度比

表2 爆轟生成ガス状態式に用いた4次近似式の各係数

$A_1$	$A_2$	$A_3$	$A_4$
-0.5008	3.574	2.02	0.659
$A_5$	D(m/s)	$P_G(\text{GPa})$	$\rho_G(\text{kg/m}^3)$
$8.69 \times 10^3$	6308	11.937	1600

導爆線の水中爆ごうについて

同図から4次近似式は実験結果を比較的的良好に予測することがわかる。なお得られた4次近似式の係数を表2に示す。

$$P^* = \exp(A_1 + A_2 \cdot R + A_3 \cdot R^2 + A_4 \cdot R^3 + A_5 \cdot R^4) \quad (2)$$

$$R = \ell \cdot n \cdot \frac{\rho}{\rho_0}, \quad P^* = \frac{P}{\rho_0 C_0^2}$$

ここで、 $\rho_0, C_0$ はそれぞれ水の初期密度と音速である。また、爆薬の爆ごう生成ガスの Chapman-Jouguet 点における圧力  $P_{cj}$  と密度  $\rho_{cj}$  は  $P_{cj} = \rho_{cj} D^2 / (\gamma + 1)$ ,  $\rho_{cj} = \rho_0$ 。

$(\gamma + 1) / \gamma$  から求めることができる。表2は  $\gamma = 3$  とした時の値を示している。図4は水中で導爆線を爆ごうさせ、イメージコンバータカメラを用いて得られたフレーミング写真の代表例である。同図は任意の時刻  $t = 0 \mu\text{sec}$  から  $2 \mu\text{sec}$  間隔に撮影されたものである。図5に同時間における数値計算結果をシャドウグラフで表示している。同図より爆ごう波の伝播過程、爆ごう生成ガスの膨張過程、水中衝撃波の伝播過程がわかる。両図の結果より、水中における導爆線の爆ごうによって発生

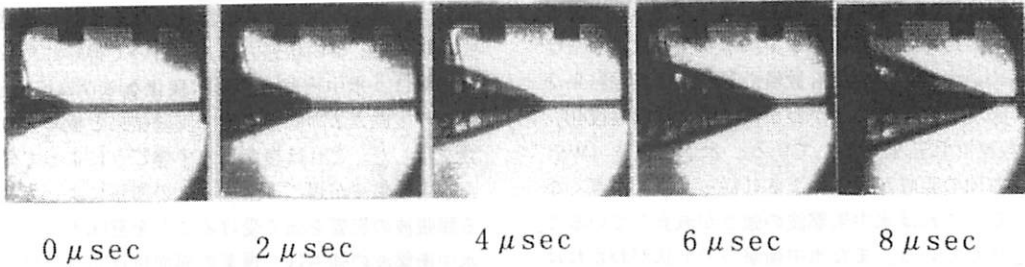


図4導爆線の水中爆轟に対するフレーミング写真

$S < -500$       0       $> 500$

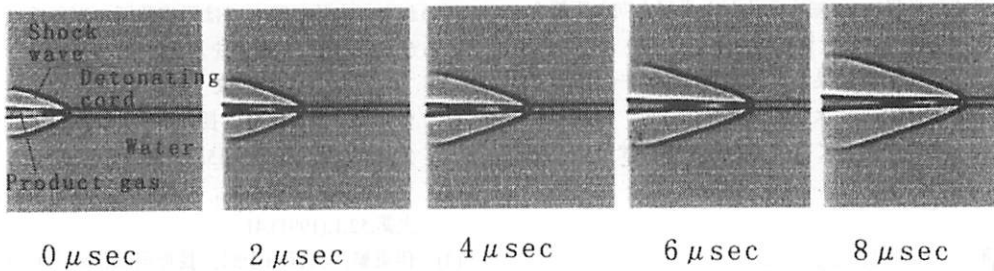


図5 導爆線の水中爆轟に対する数値計算結果をコンピュータシャドウグラフ表示

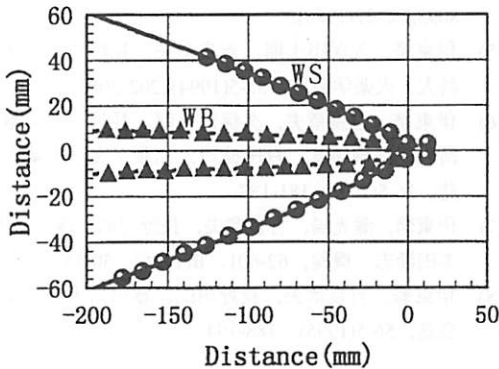


図6 水中衝撃波ならびに境界の形状比較

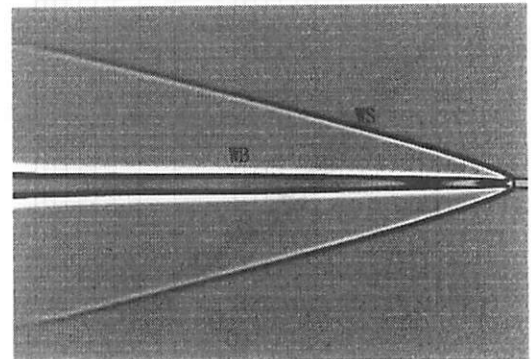


図7 起爆後40 $\mu\text{sec}$ でのコンピュータシャドウグラフ表示

した水中衝撃波はほぼ時間的に定常に伝播することが認められる。また数値計算の結果がフレーミング写真とよく一致することがわかる。導爆線の水中爆ごうによって得られた水中衝撃波の形状ならびに爆ごう生成ガ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6に示す。図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。図中の記号WSを付けた実線は数値計算で得られた水中衝撃波の形状、記号WBを付けた破線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数値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。図7は起爆後40 $\mu$ secの数値計算結果を示している。水中衝撃波(WS)は半径方向の距離が大きくなるに従って濃淡が薄くなっている。これは水中衝撃波の強さが減衰していることを意味している。また水中衝撃波の形状がわかればその接線角 $\theta_s$ より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。得られた結果を図8に示す。図の縦軸は衝撃波前後の圧力比、横軸は爆薬の半径 $r_0$ で無次元化した半径方向の距離を示す。図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。同図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(-1.05)である。

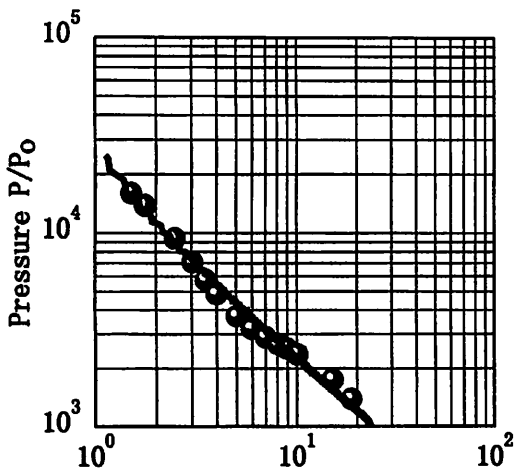


図8 水中衝撃波の圧力減衰

#### 4. まとめ

導爆線の水中爆ごう現象ならびに発生した水中衝撃波の基本特性を調べるために光学的写真観察実験および数値計算を行なった。数値計算の状態方程式は実用に対しては簡単に求められる方法が要求される。そのために数値計算に用いた爆ごう生成ガスの状態方程式は特性理論から4次の近似式を求めた。この方法はストリーク写真から得られた水中衝撃波形状を nonlinear curve fitting 法で関数近似し、この結果を特性理論に適用して、爆ごう生成ガスの膨張過程を予測し状態方程式を求めた。この状態方程式を用いて得られた数値計算結果は、水中衝撃波の形状変化ならびに伝播過程、爆ごう生成ガスの膨張過程で実験結果と極めて良い一致を示した。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。さらに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し、その指数は約(-1.05)であった。

#### 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, 蒲原清隆, 長野司郎, 藤田昌大, 火薬学会, 54, 3, (1993),115.
- (2) 芋阪浩男, 藤田昌大, 花崎紘一, 藤中雄三, 工業火薬,52,1,(1991),41.
- (3) 伊東繁, 久保田士郎, 長野司郎, 外本和幸, 藤田昌大, 千葉昴, 機論, 61-588,B(1995),217-222.
- (4) A. A. Amsden , H. M. Ruppel and C. W. Hirt,LA-8095,UC-32(1980).
- (5) 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, 55-5(1994),202-208.
- (6) 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, 火薬学会誌, 56-5(1995),181-187.
- (7) 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), 50-55.
- (8) 伊東繁, 吉良章夫, 長野司郎, 藤田昌大, 火薬学会誌, 56-5(1995), 188-194.