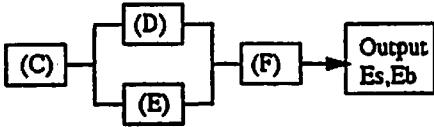


(a) Experimental arrangements



(b) Block diagram of measuring system

Fig. 1 Experimental arrangements and block diagram ;(A)Samples, (B)Tourmaline gage(PCB138A10), (C)Constant power unite, (D)(E)Digital storage oscilloscope(DC-200MHz), (F)Personal computer

充填し、M/C(M:金属重量, C:爆薬重量)を約10まで変化させ試料とした。爆薬はRDX(トリメチレントリニトロアミン)75Wt%, ポリウレタンバインダー25 Wt%の組成のもので、爆轟速度7900 m/sec, 密度1.64 g/cm³である。これら試料は、水中爆発試験場の中央、深さ4 mの位置にセットし、6号電気雷管で起爆した。

衝撃波圧力、バブルパルスはトルマリンゲージ(PCB type138A10)を試料より2.5 mの位置にセットし、Fig. 1に示す計測システムにより測定した。衝撃波圧力曲線はデジタルオシロスコープ(ニコレ社製モデル460で時間分解能は200~500nsec)、バブル周期は

はデジタルオシロスコープ(ニコレ社製モデル2090で時間分解能は0.2msec)で記録した。EsとEbは次式に従い計算した¹⁾⁷⁾：

$$E_s = (4\pi R^2 / \rho_w C_w W) \int_0^{\infty} P(t)^2 dt \quad (MJ/kg) \quad (1)$$

$$E_b = 6.84 \times 10 P_0^2 T_b^3 / W \quad (MJ/kg) \quad (2)$$

ここでRは爆薬とゲージ間の距離(m), ρ_w は水の密度(kg/m³), C_w は水の音速(km/sec), Wは爆薬の重量(kg), θ は特性時間(sec), P(t)は時間tにおける衝撃波圧力(Pa), P_0 は爆薬の水深における静水圧(Pa), T_b はバブル周期(sec)である。

2.1 LFEM 1 Dコード

LFEM 1 Dコードの計算アルゴリズムについて述べる。ラグランジュ座標系において次式に示す様に1)質量, 2)運動量, 3)エネルギー保存則が成立する¹⁶⁾。ここで、 $\rho, v_i, \sigma_{ij}, e, d_{ij}, b_i, j_i$ は各々、密度、速度ベクトル、cauchy応力、比内部エネルギー、変形速度テンソル(the rate of deformation tensor)、物体力ベクトル及び変形勾配の行列式(the determinant of the deformation gradient)を示す。又、記号()_i, $\dot{}$ ()_i, $\dot{}$ は各々、 $\partial() / \partial x_i, \partial() / \partial t$ を示す。

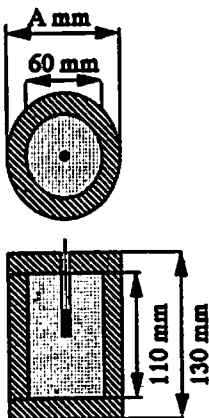
$$(a) (\dot{\rho} j) = 0 \quad (\text{Conservation of Mass})$$

$$(b) (\dot{\rho} v_i) = \sigma_{ij,j} + \rho b_i \quad (\text{Conservation of Momentum})$$

$$(c) (\dot{\rho} e) = \sigma_{ij} d_{ij} \quad (\text{Conservation of Energy})$$

式(c)は、物体内部より発生する熱及び熱流束を無視したものである。式(b)にGalerkinの重みつき残差法⁸⁾⁹⁾を適用すると次の式が得られる。

$$(d) \int_{\omega} \{ \delta v_i \rho (\dot{v}_i - f_i) + \delta v_{i,j} \sigma_{ij} \} dV - \int_{\partial \omega} \delta v_i T_i dS = 0$$

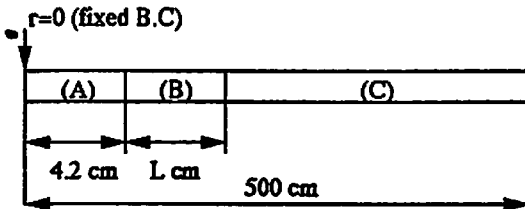


No. of Sample	A (mm)	Weight (kg)	M/C ratio
1	—	—	0.00
2	66.0	1.05	2.12
3	71.6	1.66	3.32
4	78.4	2.48	4.96
5	83.0	3.10	6.20
6	90.0	4.05	8.10
7	96.2	4.99	9.98

Fig. 2 Geometry of samples, dimension and case weight

- 1) Initialization (mass matrix M)
- 2) Compute force vector F^n , artificial viscosity q^n and time step increment Δt^n
- 3) $t = t + \Delta t^{n+1/2}$
- 4) $a^n = M^{-1} (F^n - P^n)$
 $v^{n+1/2} = v^{n-1/2} + a^n (\Delta t^n + \Delta t^{n-1}) / 2$
 $x^{n+1} = x^{n-1} + v^{n+1/2} \Delta t^n$
- 5) Deviatoric stress update
- 6) Energy update
- 7) Compute cauchy stress
- 8) $n = n + 1$
- 9) go to 2) unless done

Fig. 3 Calculation flow of LFEM1D



- (A) Composition B :30 elements
 (B) Metal ($L=0-3$ cm) :One element length = 0.1 cm
 (C) Water :One element length = 1.0 cm.

Fig. 4 Initial geometry for computer simulation

ここで、 δv_i , T_i , Ω_i , $\partial \Omega_i$ は各々仮想速度、表面力、領域及び表面力が作用する $\Omega(t)$ の境界を示す。位置ベクトル x と速度ベクトル v を各々、各要素の節点での値、 x_e , v_e と形状関数 $[N]$ で次の様に補関する。

$$(e) \quad x(t) = [N]x_e(t), \quad v(t) = [N]v_e(t)$$

式 (d), (e) と各要素に対して Gauss の一点積分を適用し組み立て (Assembling) を行うと運動方程式は次の様に表現される。

$$(f) \quad M \dot{a}(t) = F(t) - P(t)$$

ここで M は全質量マトリックス、 a は全加速度ベクトル、 F は外力ベクトル、 P は内部力ベクトルを示す。式 (f) において a を陽的に解くために要素質量間マトリックス M_e 及び全質量マトリックス M は集中マトリックスで表現した。変数のうち速度及び位置ベクトルは節点で又エネルギー、圧力、応力等は要素で定義した。LFEM1D の計算フローは式 (f) 及び質量、エネルギー保存則より Fig. 2 に示す様にした。ここで偏差応力の増分は von Mises の降伏条件を採用した。

2.2 計算条件

E_s に及ぼす金属ケースの役割を検討するために、LFEM1D コードを用い、一次元球対称問題として数値計算を実行した。各物質の計算格子は Fig. 4 に示す条件で実行した。爆薬、金属、水の長さは各々 4.2 cm, 0~3 cm, 492.8~495.8 cm でありかつ、金属、水の一要素の長さは各々 0.14 cm, 0.1 cm, 1.0 cm である。爆轟の進行に伴う金属ケースの破壊を表現するために、金属ケースの厚さが初期の厚さの 20% になった時、金属ケースは計算から除外し、計算上存在する物質の境界は爆薬-水のみとした。この金属が破壊する厚さは Peason¹⁰⁾ の実験結果より決定した。計算に用いた爆薬は実験に用いた爆轟特性に類似している Composition B を採用した。計算に用いた物質モデルと各々の特性値を Table 1 に示す^{6) 12)}。

状態方程式として、金属と水には Grüneisen 方程式 (式 (3))、Composition B には Jones-Wilkins-Lee (J. W. L) 状態方程式 (式 (4)) を用いた。

$$P = \frac{\rho_0 C^2 \omega [1 + (1 - 0.5\gamma)\mu]^2}{[1 - (S_1 - 1)\mu]^2} + \gamma E \quad (3)$$

$$P = A \left(1 - \frac{\omega}{R_1 V} \right) \exp\left(-\frac{R_1}{V}\right) + B \left(1 - \frac{\omega}{R_2 V} \right) \exp\left(-\frac{R_2}{V}\right) + \frac{\omega E}{V} \quad (4)$$

ここで、 V は比体積 (爆轟生成気体の体積/未反応爆薬の体積)、 ρ_0 は初期密度、 C は音速、 μ は $1 - V$ 、 γ は Grüneisen ガンマ、 E は内部エネルギー、 A , B , R_1 , R_2 , ω は定数である。Grüneisen 及び J. W. L 状態方程式

Table 1 Material model and its properties for computer simulation

Material	Model	Properties
Steel	Elastic plastic with hydrodynamic	Density : 7.89 g/cm ³
		Yield stress : 0.34 GPa
		Shear modulus : 77 GPa
Water	Null	Density : 0.998 g/cm ³

Table 2-a Constants of grüneisen equation of state

Material	C(km/sec)	S ₁	γ
Steel	4.58	1.49	1.93
Water	1.48	1.79	1.65

Table 2-b J. W. L constants of comp. B

A(MPa)	B(MPa)	R1	R2	ω	E(kJ/g)
524.23	76.78	4.2	1.1	0.34	4.95

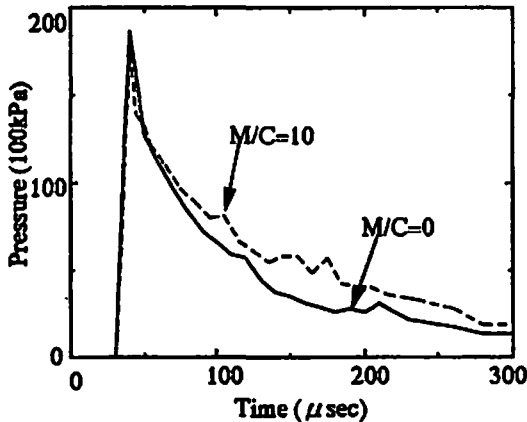


Fig. 5 Typical shock wave pressure-time curves (Measured results at 2.5 m from explosion)

の定数^{11) 12) 13)}はTable 2に示す。

計算に使用した計算機はSun Microsystems社製のSUN 4/110ME-8-P14 (8MB)を用いた。又、計算を実行した際の代表的な要素数、要素の長さ、計算時間は次の通りであった。爆薬を30要素x0.14cm/要素、水を496要素x1cm/要素とした場合の計算時間は55分であった。又、爆薬を30要素x0.14cm/要素、金属を10要素x0.1cm/要素、水を495要素x1cm/要素とした場合の計算時間は67.2分であった。

3. 結果及び考察

測定された典型的な衝撃波圧力曲線をFig. 5に示す。図中において、実線は爆薬が金属ケースに充填されていないM/C=0の場合であり、破線はM/C~10の場合である。図より、金属ケースの存在は最大衝撃波圧力(P_{max})を変化させることはないが、衝撃波減衰速度を低下させ衝撃波持続時間を増加させている。このため、金属ケースの存在はEsを増加させる。RSE及びRBEに及ぼす金属ケースの厚さの効果を理解するために、M/Cを変数として、相対的衝撃波エネルギー (RSE)、相対的パブルエネルギー (RBE)、

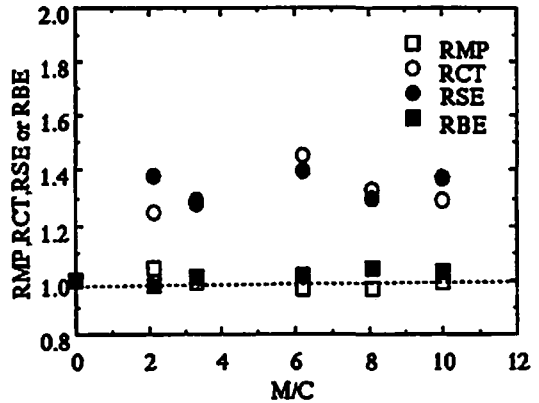


Fig. 6 Variation of relative maximum pressure(RMP), relative characteristic time(RCT), relative shock wave energy (RSE), relative bubble energy(RBE)with M/C ratio (Measured results at 2.5 m from explosion)

相対的衝撃波圧力 (RMP)及び、相対的特性時間 (RCT)の変化の様子をFig. 6に示す。ここで、RSE, RBE, RMP及びRCTは各々、金属ケースが存在しない場合に対するEs, Eb, P_{max}及びθの比率として定義した。図より、RSEはM/Cの増加と共に増加しM/Cが3付近で約1.4となり、M/Cが3以上ではM/Cが増加してもRSEはほぼ一定となっている。一方、RBEは金属ケースの存在により僅かに増加しているが、M/Cが増加してもほぼ一定である。このことより、金属ケースはRSE, RBEのいずれも増大させる効果があり、特にRSEを増大させる効果が著しく大きいことがわかる。RMPはM/Cの増加と共にほとんど変化していない。一方、RCTのM/Cに対する変化はRSEとM/Cの関係に極めて類似している。従ってRCTはRSEに及ぼす金属ケースの役割を理解する上で重要なパラメータと首える。

実験結果より金属ケースには衝撃波圧力の持続時間を増加させる効果があり、このためEsが増大することが示唆された。このメカニズムをより詳細に検討するため有限要素法流体力学コードLFEM1Dコードにより数値計算を実行した。この計算においては、簡単のため各物質の相変化、温度、歪み速度の効果は無視した。これらの効果の検討は今後の課題とする。

Fig. 7に、爆源より2.5m離れた位置における衝撃波圧力曲線の実験及び計算結果の代表例を示す。ここで、実線及び破線は各々実験及び計算結果を示す。計算結果ではP_{max}に到達するライズタイムは、実験結果より遅い。しかしながら、全般的に計算により得られた衝

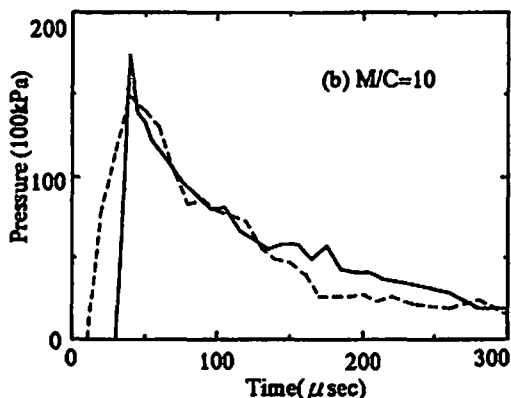
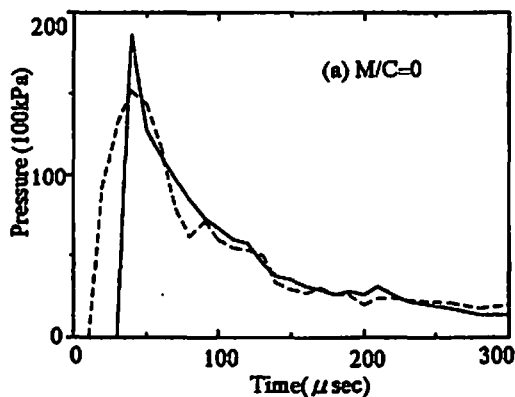


Fig. 7 Calculated and measured shock wave pressure time curve (solid line for measured, Dotted line for calculated)

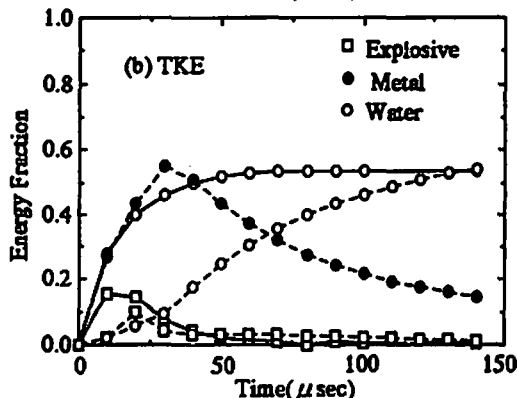
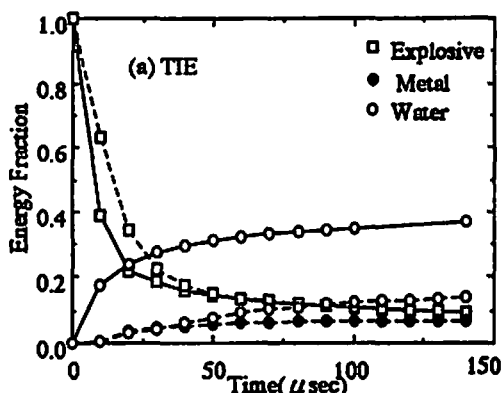


Fig. 9 TIE-time and TKE-time curves (solid line for $M/C=0$, dashed line for $M/C=10$)

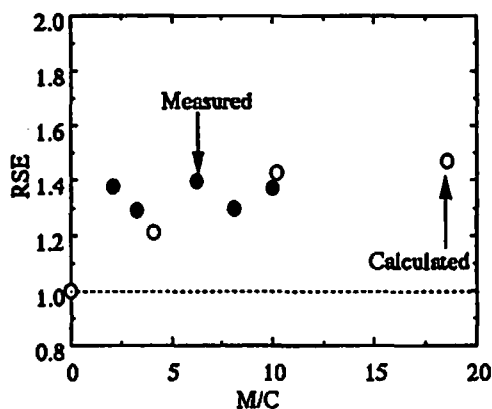


Fig. 8 Variation of calculated and measured RSE with M/C ratio

撃波圧力曲線は実験結果をよく再現している。ここで計算により得られた衝撃波圧力曲線から E_s を計算し RSE を求め、 M/C と RSE の関係を実験結果と併せて Fig. 8 に示す。結果より、RSE の計算結果も実験結果を良く再現していることがわかる。RSE の計算結

果と実験結果を比較すると、 M/C が約 5 以下において計算結果の方が実験結果より低くなっている。これは計算において金属ケースの破壊はケースの厚さにより一定としたが、実際には M/C の増加に伴いケースの歪み速度が小さくなり、降伏応力、強度が小さくなる傾向がある¹⁵⁾。従って、計算に用いる材料モデルとして歪み速度依存性を考慮したモデル、又金属ケースの破壊に関する情報をより詳細に得る必要がある。衝撃波圧力曲線と RSE と M/C の計算結果は実験結果と同じ傾向を示した。即ち、金属ケースは P_{max} を変化させないが衝撃波圧力の持続時間を増加させる。

数値計算により実験結果を再現することができたので、数値計算の結果を用い、 E_s に及ぼす金属ケースの役割をエネルギーバランスの面から検討する。即ち、爆薬の持つエネルギーの水中への伝達について検討する。各物質の持つ全内部エネルギー (TIE) と全運動エネルギー (TKE) の時間履歴曲線を各々 Fig. 9-a、Fig. 9-b に示す。ここで、TIE、TKE は各々、ある時間 t における系の持つ全エネルギー (TE) に対する各物質の持つ内部エネルギー、運動エネルギーの比率

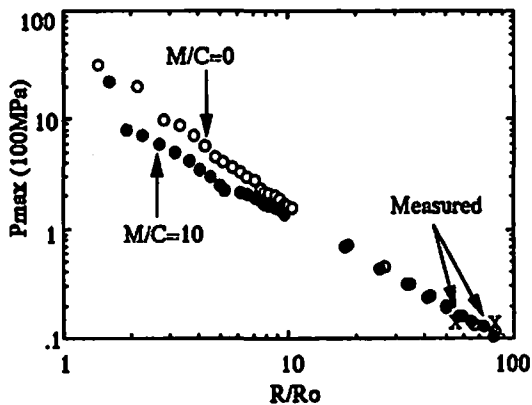


Fig. 10 Variation of the maximum shock wave pressure with the reduced distance (R =the shock wave position; R_0 =the initial radius of explosive (4.2cm))

と定義する。即ち、ある時間 t における各物質のTIEとTKEの総和は常に1.0となる。爆轟生成ガスからのTIEの放出速度は M/C の増加に伴い減少している。一方、水のTIEとTKEの増加速度は爆轟生成ガスからのTIEの放出速度より遅い。このため、爆源から遠方において衝撃波圧力の持続時間は金属ケースの存在により長くなる。注目すべきことは金属のTKEの最大値は、金属ケースの厚さが増大するにつれて増大しており、TKEが最大値に到達した後の金属のTKEの放出速度は金属ケースの厚さの増加に伴い減少している。これらのことより、金属ケースは爆轟生成ガスから水へのエネルギー伝達速度を遅くする効果があり、その結果RCT, RSEを増加する。

数値計算の結果より金属ケースは爆轟生成ガスより水中へのエネルギー伝達速度を遅くすることが判明した。金属ケースのこの役割のため衝撃波が水中を伝播する際の消失エネルギーは金属ケースが存在する場合の方が存在しない場合より小さいことが予測される。このことを確かめるために、換算距離に伴う P_{max} の変化をFig. 10に示す。図において R と R_0 は各々ある時間における P_{max} の爆源からの距離、爆薬の初期半径である。計算結果は爆源近傍における P_{max} は金属ケースの存在する場合の方が存在しない場合より小さい値を示した。又、この金属ケースの有無による P_{max} の差は、換算距離が大きくなるにつれて小さくなる。Steinberg¹⁴⁾の結果によれば、消失エネルギーは初期条件、水の状態方程式にのみ依存することより、衝撃波圧力が小さい程消失エネルギーはより小さくなる。水中での消失エネルギーは金属ケースが存在する場合の方が存在しない場合より小さい。このため、金属ケースは E_s を

増加させるためのエネルギー比率を増加させる結果となる。この傾向は特に爆源近傍において顕著である。

これまでの実験及び計算結果より金属ケースによる水中爆発性能の向上のメカニズムを説明できる。爆薬が金属ケースに充填された場合、爆薬とケース、ケースと水の境界でのインピーダンスミスマッチにより、これら境界で多重反射が発生することが予想される。この多重反射は水中への入射衝撃波圧力を低下させ、衝撃波圧力の減衰速度を遅くし、かつ金属ケースをゆっくりと加速し、この加速は金属ケースの厚さの効果を受ける。この結果、爆源遠方において金属ケースの有無にかかわらず P_{max} はほぼ一定であり、又金属ケースは衝撃波持続時間を増加させRSEを増大させる。金属ケースが存在すると、各物質の境界における多重反射及び金属ケースの破壊に所定の時間を必要とする。このため、爆轟生成物は高温、高圧の状態により長時間維持されることとなりRBEも大きくなる。

4. 結論

水中爆発性能に及ぼす金属ケースの効果について、そのメカニズムを解明するために実験、数値計算の両面から検討した。実験結果より、金属ケースの存在は水中衝撃波エネルギー及びバブルエネルギーのいずれも増大する効果があり特に、水中衝撃波エネルギーへの寄与が著しく大きい。これは、最大衝撃波圧力はほぼ一定であり、特性時間 θ を長くするためであることが判明した。この事実を詳細に検討するため一次ラグランジェ有限要素法流体力学コード (LFEM 1D) による数値計算を実行した。その結果、実験結果を再現することができ、金属ケースの役割に関する知見を得ることができた。即ち、爆薬が金属ケースに充填された場合、各物質の境界でインピーダンスミスマッチによる多重反射が生じる。この多重反射は水中への入射衝撃波圧力を低下させ、爆轟生成ガスから水中へのエネルギー伝達速度を低下させ、爆源遠方における E_s に寄与するエネルギー比率を増加させ、衝撃波圧力の減衰を遅らせる。その結果、爆源遠方において、金属ケースの有無にかかわらず P_{max} はほぼ一定となり、金属ケースの存在により水中衝撃波エネルギーは増大する。又、多重反射及び金属ケースの破壊に所定の時間を必要とするため、爆轟生成物は高温、高圧の状態により長時間維持されることとなりRBEも大きくなる。

文献

- 1) Cole, R. H., 'Underwater Explosions', Dover Publications, New York (1948)
- 2) Warren, C. S. (ed.), 'Conventional Weapons Underwater Explosions', Georgia Institute Technology, AD-A201 814 (1988)

- 3) Warren, C. S., 'Investigation of Research Needs for Underwater Explosions', Georgia Institute Technology, AD-A230 840 (1990)
- 4) 村田健司, 高橋勝彦, 加藤幸夫, 水中爆発性能に及ぼす金属ケースの効果 (I), 工業火薬, 投稿中
- 5) 高橋勝彦, 村田健司, 加藤幸夫, 水中爆発性能に及ぼす金属ケースの効果 (II), 工業火薬, 投稿中
- 6) Hallquist, J. O., 'User's Manual for DYNA 2D... An Explicit Two-Dimensional Hydrodynamic Finite Element Code with Interactive Rezoning', Lawrence Livermore National Laboratory, Rept-UCID-1856 (1985)
- 7) Roth, J., 'Underwater Explosives' in Encyclopedia of Explosives and Related Items, Vol. 10, pp. U38-U81, US Army Research and Development Command, Dover Publications, New Jersey (1983)
- 8) Hughes, J. R. T., 'The Finite Element Method', Prentice-Hall, Inc., Englewood Cliffs, New Jersey (1987)
- 9) Bathe, K. J., 'Finite Element Procedures in Engineering Analysis', Prentice-Hall, Inc., Englewood Cliffs, New Jersey (1982)
- 10) Pearson, J., 'A Fragmentation Model for cylindrical Warheads', Naval Weapon Center, Rept-NWC-TP-7214 (1990)
- 11) Lee et. al., 'J. W. L. Equation of State Coefficients for High Explosives', Lawrence Livermore National Laboratory, Rept-UCID-16189 (1973)
- 12) Marsh, S. P., 'LASL Shock Hugoniot Data', University of California Press (1980)
- 13) Steinberg, D. J., Cochran, S. G. and Guinan, M. W., 'A Constitutive model for metals applicable at high-strain rate', Journal of Applied Physics, Vol 51, p1498-1504 (1980)
- 14) Steinberg, H. M. and Walker, W. A., 'Calculated Flow and Energy Distribution Following Underwater Detonation of a Pentolite Sphere', The Physics of Fluids, Vol. 14, pp. 2869-1878 (1971)
- 15) Xiaoquig, M., Meiling, C. and Lanting, Z., 'Theoretical and Experimental Studies on Fragmentation of Thin-Wall Cylinder Under Internal Explosive Loading', Proc. Int. Pyrotech. Semi., 17th (v. 2), p793-p799 (1991)
- 16) Malvern, L. E., 'Introduction to the Mechanics of a Continuous Medium', Prentice Hall, NJ. (1969)



Effect of metal confinement on underwater explosion performance(III)

by Katsuhiko TAKAHASHI* Kenji MURATA* and Yukio KATO*

The effect of metal confinement on underwater explosion phenomena of explosives was experimentally and numerically studied by using steel (SS41) as a metal case. Experimentally, it is shown that the metal case enhances both the relative shock wave energy (RSE) and the relative bubble energy (RBE). The shock wave pressure-time curves calculated by using one dimensional lagrangian finite element code (LFEM1D) presents that the metal case enhances RSE and the metal case does not change the peak pressure and increases the shock duration at the far field from explosion.

The mechanism of underwater shock enhancement by metal case is shown from experimental and numerical results. When explosive has metal case, impedance mismatches at the explosive-case and case-water interface will produce the multiple reflections. The multiple reflections lower the incident pressure to water, decrease the rate of energy transfer from explosive to water, increases the energy fraction to increase the shock wave energy(E_s) and attenuates shock wave decay at the near field from explosion. In consequence, the peak pressure is almost constant and shock duration is increased, which contributes to enhance RSE at the far field from explosion.

(*NOF Corporation, Aichi works, Taketoyo plant, Kitakomatsudani,
Taketoyo-cho, Aichi 470-23)
