

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

定量的に評価、理解するためには、系統的な実験と数値計算による両面からのアプローチが不可欠となる。本報告では水中爆発性能のうち、水中衝撃波エネルギー (Es) 及び、バブルエネルギー (Eb) に及ぼす金属ケースの効果を実定的に評価、理解するために、実験面より検討したものである。

2. 実験

2.1 水中爆発試験場

水中爆発性能 (Es, Eb) を評価するために用いた水中爆発試験場の形状は Fig. 1 に示す様に直径 36 m、最深部は 8 m でその直径は 10 m である。

2.2 試料

試料に用いた爆薬は RDX (トリメチレンニトロアミン) 75Wt%, ポリウレタンバインダー 25Wt% の組成のもので、爆高速度 7900 m/sec, 密度 1.64 g/cm³ である。爆薬の形状は直径 60 mm, 高さ 110 mm の円柱状で重さ 500 g である。この爆薬を Fig. 2 に示す様な 2 つのタイプの厚みの異なるスチール製ケース (SS41) に充填し、M/C (M: 金属重量, C: 爆薬重量) を約 10 m で変化させ試料とした。金属ケースは丸棒から削り出したもので、type 1 は底つき、type 2 に関しては上下の蓋はフリーであり固定されていない。

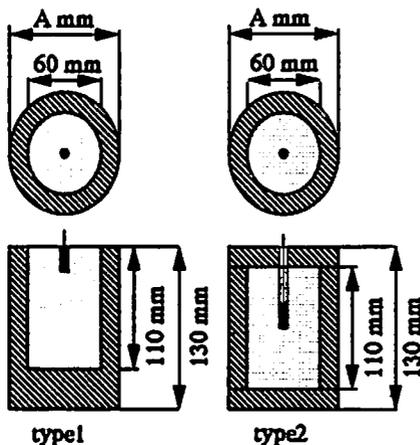
2.3 計測

試料は、6号電気雷管が水面側に位置する様に、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。尚、電気雷管のノイマン部は type 1 で上部より約 2 cm, type 2 では爆薬のほぼ中央に位置させた。衝撃波圧力、バブルパルスはトルマリンゲージ (PCB type 138A10) を試料より 3.0 m (type 1) 及び 2.5 m (type 2) 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 200~500 nsec), バブル周期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 0.2 msec) で記録した。Es と Eb は次式に従い計算した^{(1) (10)} :

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

$$E_b = 6.84 \times 10^{-3} P_{\text{avg}}^2 T_{\text{avg}}^3 / W \quad (\text{MJ/kg}) \quad (2)$$

ここで R は爆薬とゲージ間の距離 (2.5 m 及び 3 m), ρ_w は水の密度 (1000 kg/m³), C_w は水の音速 (1.5



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

(M=1 for type1, M=2 for type2)

Fig. 2 Geometry of samples, dimension and case weight

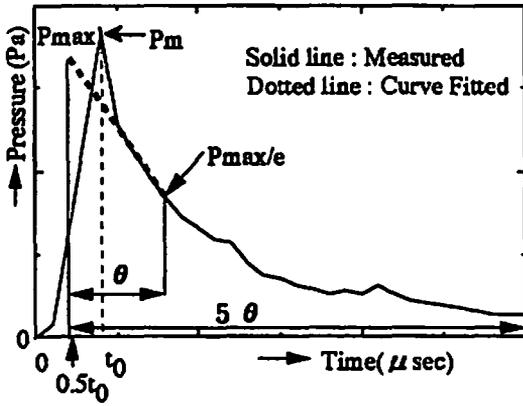


Fig. 3 Schematic diagram for calculating shock wave energy E_s

km/sec), W は爆薬の重量 (0.5 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 (0.14MPa), T_b はバブル周期 (sec)である。Fig. 3に示す衝撃波圧力曲線の模式例より E_s の計算式 (1)における積分項の求め方を説明する。まず図中に示す P_{max} 及び θ を次の様にして求める。測定された衝撃波圧力曲線における最大値 (P_m)より P_{max}/e (e :自然対数の定数)までの圧力範囲において最小自乗法により近似曲線を求める。又、 P_m までの立上り時間の1/2の時間を0 secとし、先に求めた近似曲線をこの時間まで外挿した時の圧力を P_{max} とした。又、 P_{max} から P_{max}/e の圧力となるまでの時間を θ とした。 P_{max} , θ を決定した後積分項は台形則による数値積分をコンピュータで行い E_s を求めた。ここで圧力項 $P(t)$ は時間0から θ までは近似曲線 ($P(t) = P_{max} \cdot \exp(-t/\theta)$)を、 θ から5 θ までは実測値を用いた。

3. 結果

測定された典型的な衝撃波圧力曲線をFig. 4に示す。この測定例はtype 2の金属ケースの場合で、図中において爆薬が金属ケースに充填されていない $M/C=0$ の場合と、金属ケースに充填された $M/C \sim 5$ の場合である。図より、金属ケースの存在は衝撃波のピーク圧力 (P_m)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とがわかる。測定された衝撃波圧力曲線より P_{max} , θ 及び E_s を又、 T_b より E_b を求め、これらの結果をTable 1にまとめた。水中爆発性能に及ぼす金属ケースの厚さの効果をより理解するためにTable 1に示す実験結果に基づき相対的の最大衝撃波圧力 (RMP), 相対的特性時間 (RCT), 相対的衝撃波エネルギー (RSE)及

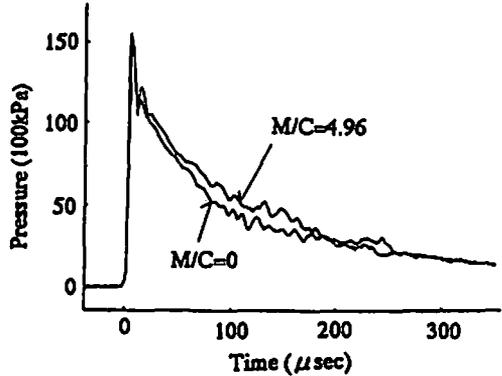


Fig. 4 Typical shock wave pressure profiles (M =Metal weight: C =Charge weight)

Table 1-a Experimental results of underwater performance (Case type: Type1)

No. of Sample	M/C	P_{max} 100kPa	θ μ sec	T_b msec	E_s MJ/kg	E_b MJ/kg
1-1	0.00	119.9	61.8	182.9	0.93	1.94
1-2	2.12	-	-	-	-	-
1-3	3.32	114.0	77.3	186.5	1.08	2.07
1-4	4.96	115.9	83.5	190.3	1.22	2.19
1-5	6.20	129.1	68.8	186.4	1.27	2.06
1-6	8.10	123.3	67.0	187.1	1.15	2.08
1-7	9.98	110.3	78.8	191.5	1.11	2.23

Table 1-b Experimental results of underwater performance (Case type: Type2)

No. of Sample	M/C	P_{max} 100kPa	θ μ sec	T_b msec	E_s MJ/kg	E_b MJ/kg
2-1	0.00	166.1	55.0	183.1	1.09	1.96
2-2	2.12	172.8	68.5	180.8	1.50	1.92
2-3	3.32	164.2	70.5	183.1	1.41	1.97
2-4	4.96	-	-	-	-	-
2-5	6.20	161.1	80.0	184.7	1.53	1.99
2-6	8.10	161.9	73.0	186.9	1.42	2.03
2-7	9.98	165.0	71.0	185.5	1.49	2.02

(M =Metal case weight; C =Charge weight; P_{max} =Maximum shock wave pressure; θ =Characteristic time of shock wave; T_b =Bubble period; E_s =Shock wave energy; E_b =Bubble energy)

び、相対的バブルエネルギー (RBE)と M/C の関係を各々、Fig. 5~8に示す。ここで、RMP, RCT, RSE及び、RBEは各々、金属ケースが存在しない場

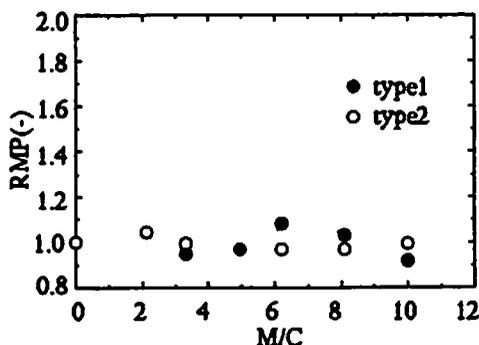


Fig. 5 Variation of relative maximum pressure RMP with M/C ratio

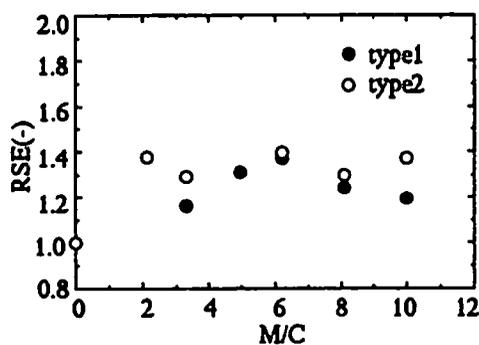


Fig. 7 Variation of relative shock wave energy RSE with M/C ratio

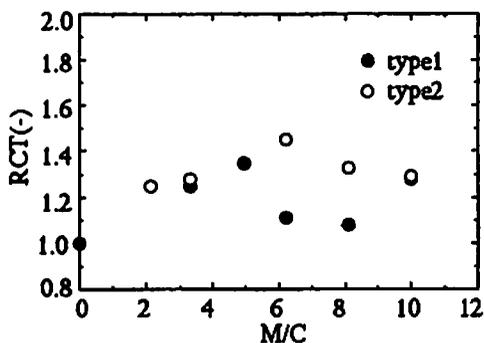


Fig. 6 Variation of relative characteristic time RCT with M/C ratio

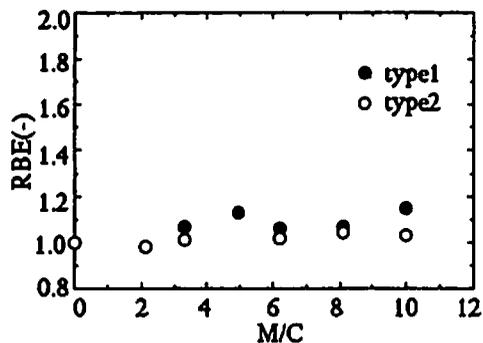


Fig. 8 Variation of relative bubble energy RBE with M/C ratio

合に対する P_{max} , θ , E_s 及び E_b の比率として定義した。

結果より金属ケースはRSE, RBEいずれも増加させる効果があり, 特にRSEに対する効果が著しく大きいことがわかる (Fig. 7, 8)。RMPはM/Cの増加に伴いほとんど変化していないがRCTの変化はRSEの変化に極めて類似している (Fig. 5, 6)。このことよりRCTはRSEに及ぼす金属ケースの効果を理解する上で重要なパラメータと言える。これらの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即ち, 衝撃波圧力の減衰速度を遅くする効果があり, このため E_s が増大したと言える。

ケースの形状についてはtype 1及びtype 2の金属ケースにおいて, M/Cの増加に伴うRSEの増加のパターンが異なる。type 1においてはM/Cの増加に伴いRSEは増加しM/Cが約6でRSEは約1.4の最大値となりその後, 減少する。一方, type 2ではRSEはM/Cの増加と共に増加しM/Cが約3でRSEは約1.4となり, その後M/Cが増加してもRSEの値はほとんど変化していない。

RBEについてはtype 2の金属ケースの方がtype 1に比較し僅かに大きくなる傾向がある。

4. 考 察

これまでの実験結果が示す様な金属ケースによる水中爆発性能の向上のメカニズムは次の様に説明できる。

4.1 金属ケースのRSEへの寄与

爆薬が金属ケースに充填された場合, Fig. 9に示す様に爆薬とケース, 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。図中, 点Aは爆薬が反応しないとした時の水中への最終到達入射圧を示し金属ケースの有無にかかわらず一定となる。水中衝撃波圧力の距離減衰が金属ケースの有無にかかわらず一定であるならば, 爆薬より遠方における衝撃波圧力も金属ケースの有無にかかわらず一定となることが予想されM/CとRMPの関係を示すFig. 5の実験結果と見かけ上一致する。しかし, この考え方は時間軸を考慮していないため金属ケースのRCT, RSE及びRBEへの効果を説明できない。さらに, 実際には爆薬の反応生成

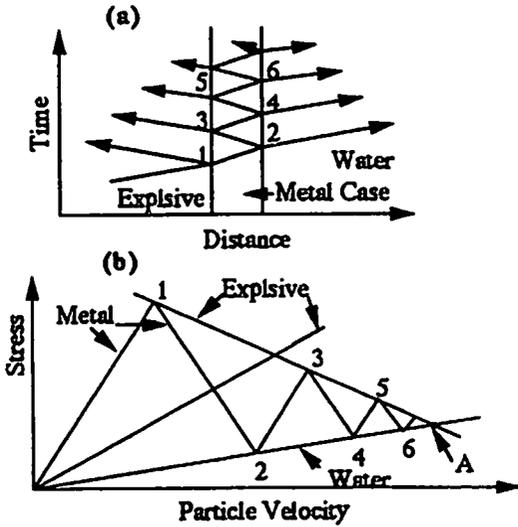


Fig. 9 Idealized interaction of a detonation wave front with metal case backed by water ; (a) The shock interacting (b) The stress-particle velocity plan (Number 1 to 6 represent the states at various times in the ring-up process between the explosive and the water Hugoniot) (From Ref. 13)

物のHugoniot, 金属ケースの破壊を考慮すると金属ケースは水中への最大入射圧を低下させRMPの実験結果も説明できない。従って実験結果を理解するにはこの多重反射の持続時間を考慮する必要がある。即ち、金属ケースは水中への入射衝撃波圧力を低下させるが、境界での多重反射及びその持続により水中衝撃波圧力の減衰速度を遅くする。特に金属との境界における水中への入射圧は金属ケースが破壊されるまで持続される。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。RSEへ及ぼす金属ケースの厚さの効果は金属ケースの破壊、即ち厚さの変化に伴う多重反射の持続時間を考慮する必要がある。水中における金属ケースの破壊時間を実験的に求めるのは困難なので、空中における結果より予測する。Xiaoqingら¹¹⁾は鉄製円筒ケースが爆薬により膨張し破壊する時の半径を理論及び実験より検討している。彼らは軸対称一次元で質量保存則及び運動方程式より破壊する際の半径を解析的に求めた。この際、金属の破壊は円周 (θ) 方向の引っ張りにより生じるとし又、金属の破壊強度の歪み速度依存性も考慮した。彼らの結果によればケースの破壊時における半径 R_f と初期半径 R_0 の関係は次のようになる。

$$\frac{R_f}{R_0} = \dot{\epsilon}_\theta^{(m/2\gamma - m)} \left[\frac{P_0}{A(1-K)} \right]^{(1/2\gamma - m)} \quad (3)$$

Table 2 Calculated fracture properties of cylindrical steel tube (These values are calculated by eqs. (3) and (4).)

M/C	H_0 (mm)	e_θ $\times 10^4$	R_f/R_0	H_f (mm)	V m/sec	RFT
2.12	3.0	13.52	1.73	1.49	1668	1.00
3.32	5.8	8.79	1.57	3.89	1228	1.22
4.96	9.2	7.72	1.45	6.79	1028	1.36
6.20	11.5	6.90	1.38	8.96	927	1.43
8.10	15.0	6.05	1.30	12.40	818	1.52
9.98	18.1	5.50	1.23	15.78	741	1.59

(H_0 =Initial thickness of metal case; e_θ =Hoop strain rate; R_f =Internal fracture radius; R_0 =Initial internal radius; H_f =Thickness of metal case at fractured; V =Initial velocity of metal cas; RFT=Relative fractured time)

$$\dot{\epsilon}_\theta = \frac{1}{R_0} \left[\frac{R_0 P_0}{\rho H_0 (\gamma - 1)} \right]^{1/2} \quad (4)$$

ここで $\dot{\epsilon}_\theta$ は歪み速度, m , γ , A , K は定数として P_0 , H_0 , ρ は各々CJ(Chapman-Jouguet)爆轟圧力, ケースの初期厚さ及びケースの密度である。これらを本実験に適用し、まとめたものをTable 2に示す。表中で H_0 , H_f は各々ケースの初期及び破壊時におけるケースの厚さを示し、 V は次式に示すGurneyの式¹²⁾より求めた空中におけるケースの破片の初期速度である。

$$V = \sqrt{2E} \left[\frac{M}{C} + \frac{1}{2} \right]^{-1/2} \quad (5)$$

ここで M , C , $(2E)^{1/2}$ は各々ケース重量, 爆薬重量及びGurney定数であり実験に用いた爆薬の特性がComposition Bに類似していることよりこの定数はComposition Bの値2.7 (km/sec)を用いた。 M/C の増加による V の低下の割合と水中におけるケースの膨張速度の低下の割合が等しいと仮定する。このとき $H_0 = 3$ mmのケースが破壊するまでの時間を1とし、これに対する相対的破壊時間 (RFT)を併せてTable 2に示した。結果より M/C の増加によりRFTは単調増加即ち多重反射の持続時間が増加傾向であることがわかる。水中衝撃波の対称性の優れた起爆方法及びケース形状であるtype 2について考察する。type 2の場合、RSEは M/C の増加と共に増加し M/C が約3でRSEは約1.4となり、その後 M/C が増加してもRSEの値はほとんど変化しておらずRFTの傾向と一致していない。本実験に用いた金属ケースのない爆薬の最大バブル半径は約1 mであり、これから求めたケース ($M/C=9.98$ の場合) が破壊する時の半径になるまで要する時間は約5.2msecである。金属ケースが存在すると M/C の

増加によりさらに時間を要すると考えられる。衝撃波の特性を考慮するとRSEに有効な衝撃波の伝播は起爆後数msec以前に終了していると見なすのが妥当である。従って、type 2では本実験に用いたケースの厚さではM/Cが増加してもRSEが一定となったと考えられるが破壊に関する知見をさらに得る必要がある。

一方、type 1においてはM/Cの増加に伴いRSEは増加しM/Cが約6でRSEは約1.4の最大値となりその後、減少する。type 1では起爆点が上部であること又、ケースの底部と側部の厚さの比がM/Cにより異なり金属ケースの破壊の様相が異なることが予想される。このため水中衝撃波の方向性がM/Cにより影響を受けたことが考えられるが、このことについてはさらに検討する必要がある。

4.2 金属ケースのRBEへの寄与

RBEへの金属ケースの効果については、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。この際、RBEの増加に寄与するのは、type 2よりtype 1の金属ケースの方が大きい。これは、type 1がtype 2の金属ケースに比較してコンファイメントの効果が大きいこと、爆轟生成物がより高温、高圧の状態により長時間維持されているためである。即ち、測定されたパブル周期(Tb)の増加は金属ケースの存在により数msecから長くとも10msec程度であること、type 1, type 2にかかわらずTbはM/Cの増加に伴い増加していることより、Tbの増加はケースの破壊に要した時間であると予測される。この点に関しても水中におけるケースの破壊時間を計測することにより解明できると考える。

5. 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パ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。これは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、爆薬から水中へのエネルギー伝達速度を低下させるが、衝撃圧力の減衰速度を遅くする。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、そして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) 田中一三, "水中爆発におけるガス球の挙動 (第1報) 電導度プローブによる測定", 工業火薬, 36, p11-p19 (1975)
- 3) 田中一三, "水中爆発におけるガス球の挙動 (第2報) 水槽壁の効果とガス球の沈下", 工業火薬, 40, p306-p312 (1979)
- 4) 田中克己, 吉田正典, 米田昭昭, 水島容二郎, "水中爆発による爆薬とエネルギーの精密測定", 工業火薬, 42, p239-p247 (1981)
- 5) 中山良男, 飯田光明, 松永猛裕, 生沼仙三, 田中克己, 田中一三, "薬長薬径比の大きい円柱形爆薬の水中爆発", 工業火薬, 52, p329-p335 (1991)
- 6) 中山良男, 生沼仙三, 田中一三, "水中爆発ガス球の高速度撮影", 工業火薬, 50, p179-p183 (1989)
- 7) Warren, C. S. (ed.), "Conventional Weapons Underwater Explosions", Georgia Institute Technology, AD-A201 814 (1988)
- 8) Warren, C. S., "Investigation of Research Needs for Underwater Explosions", Georgia Institute Technology, AD-A230 840 (1990)
- 9) Jonson, J. N., Mader, C. L. and Goldstein, S., "Performance Profiles of Commercial Explosives", Propellants, Explosives, Pyrotechnics, 8, p8-p18 (1983)
- 10) Roth, J., "Underwater Explosives" in Encyclopedia of Explosives and Related Items, Vol. 10, pp. U38-U81, US Army Research and Development Command. Dover, New Jersey (1983)
- 11) Xiaouqig, 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)
- 12) Kenedy, J. E., "Gurney Energy of Explosives : Estimation of the Velocity and Impulse Imparted to Driven Metal", Sandia National Laboratories, SC-RR-70-790, December (1970)
- 13) Sheffield, S. A. and Bloomquist, D. D., "Sub-nanosecond Measurement of Detonation fronts in

Effect of metal confinement on underwater explosion performance (I)

by Kenji MURATA* Katsuhiko TAKAHASHI* and Yukio KATO*

Effect of metal confinement on underwater explosion performance was experimentally studied by using steel (SS41) as a metal case. From experimental results, it is shown that the metal case enhances both the relative shock wave energy (RSE) and the relative bubble energy (RBE). RSE is enhanced since the metal case does not change the peak pressure and increases the shock duration. Detonation products with the metal case are maintained at higher pressure and temperature for longer time by multiple reflections than those without the metal case, which enhance RBE.

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