

水中爆発性能に及ぼす金属ケースの効果 (第4報)

— 銅及びアルミニウム製ケースの効果 —

高橋勝彦*, 鳥居彰夫*, 村田健司*, 加藤幸夫*

水中衝撃波エネルギー (E_s) 及びバブルエネルギー (E_b) に及ぼす金属ケースの材質の効果について検討した。金属ケースとしてスチールに加えて、銅、アルミニウムについて検討した。その結果、金属ケースの有無、種類にかかわらず最大衝撃波圧力はほぼ一定であるが、金属ケースは特性時間を長く、即ち衝撃波圧力の減衰速度を遅くし衝撃波圧力の継続時間を増加させるために E_s を向上させる。金属ケースの種類により E_s は異なり、これら E_s はインピーダンスマッチ法により求めた水中への最大入射衝撃波圧力あるいは静的引っ張り強度と相関関係が見られた。これは、金属ケースが水中への最大入射衝撃波圧力を低下させることで消失エネルギーを減少させ、且つケース内での多重反射の継続時間に影響し衝撃波圧力の減衰速度を低下させることで E_s を増加させるためである。又、同一の金属ケースを用いた場合、実験範囲内では M/C が増加しても、 E_s はほぼ一定であり、 E_s は厚さの効果を受けない。一方、 E_b はアルミニウム、スチール製ケースにより僅かに増加する。又、銅製ケースにより厚さの増加と共に E_b は増加する。これら E_b に及ぼす金属ケースの静的な機械的特性と E_b の間に相関関係はなかった。

1. 緒言

水中爆発性能評価試験は爆薬の有するエネルギーを衝撃波エネルギー (E_s) 及びバブルエネルギー (E_b) に分離し、定量的に評価できる利点がある。水中爆発現象に関する研究は古くは Cole¹⁾ によって体系化されており、その後も多くの研究者により評価方法、バブルの挙動等が研究されてきた^{2)~6)}。その一方、未だに未解決の問題が多く存在する^{7)~8)}。その問題の一つはこれらの研究の中で、通常爆薬は金属ケースに充填されそのその性能が評価されているにもかかわらず、水中爆発性能 (E_s 及び E_b) に及ぼす金属ケースの効果についてはほとんど研究されていないことである。そこで著者らは水中爆発性能に及ぼす金属ケースの効果を解明するために研究を行ってきた^{9)~11)}。

第3報¹¹⁾ では水中爆発性能に及ぼすスチール (SS400) ケースの効果を実験、数値計算より検討した。その結果、金属ケースは最大衝撃波圧力 (P_{max}) を変

化させないが、圧力の減衰速度を遅くし特性時間 (θ) を長くすることが示された。これは金属ケースの存在で爆薬の有するエネルギーの水中への伝達速度が低下すること、及び消失エネルギーを減衰させることに起因することが判明した。従ってこれら金属ケースの効果は材質により大きく異なることが推察される。このことは第2報¹⁰⁾ の材質の異なる金属に対して DYN2D コード¹²⁾ を用いた数値計算により予測した。

これまでの結果より E_s は金属ケースの材質により水中への最大入射衝撃波圧力及び爆轟生成ガスと金属ケース、金属ケースと水との界面におけるインピーダンスミスマッチによる多重反射の継続時間の影響を受け、この継続時間は金属ケースの破壊時間の影響を受ける。又、 E_b も金属ケースの破壊時間の影響を受けることが推察される。そこで今回、水中への最大入射衝撃波圧力及び材料の機械的特性 (静的引っ張り強度及びその時の歪) の効果を検討するために Hugoniot 及び機械的特性の異なる銅とアルミニウムを用いて、これら金属ケースの材質の相違による水中爆発性能に及ぼす効果を実験的に検討した。又、水中爆発性能に及ぼす金属ケースの効果の距離依存性についても検討し、知見を得たので報告する。

1995年8月7日受理

*日本油脂(株)愛知事業所武豊工場研究開発部
〒470-23 愛知県知多郡武豊町字北小松谷61-1
TEL 0569-72-0915
FAX 0569-73-7376

2. 実験

2.1 試料

水中爆発性能 (Es, Eb) を評価するために用いた爆薬は、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25wt.%の組成物であり、この爆薬の爆轟速度及び密度は、各々7900 m/s, 1.64 g/cm³である。この爆薬300 gを直径50mm, 高さ92mmの円柱状に成形し基準爆薬として用いた。さらに、金属ケースの材質の水中爆発性能への効果を検討するために、この爆薬をFig. 1に示す様な形状で、内径50mm, 高さ92mmの厚さの異なる銅(C1100)及びアルミニウム(A1050)製ケースに充填し、ケース重量(M)と爆薬重量(C)の比M/Cを変化させ試料とした。ケースの厚さは銅の場合で5及び10mmであり、アルミニウムの場合で5, 10及び15mmである。ここで上下の蓋とシリンダーはエポキシ系接着剤で固定した。

2.2 計測

水中爆発性能を評価するために用いた水中爆発試験場の形状は、直径36 m, 深さ8 mである (Fig. 2)。この試験場の中央、水深4 mの位置に試料をセットし、6号電気雷管で起爆した。

発生した衝撃波圧力曲線及びバブル周期を計測するため、トルマリンゲージ(PCB piezotronics社製type 138A10)は、試料より1.0, 2.0及び3.0 mの位置にセットし、Fig. 2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200ns), バブル周期はデジタルオシロスコープ(ニコレ社製PRO50で時間分解能は0.2ms)で記録した。Es, Eb及びエネルギー流量密度(Energy Flux Density=EFD)は次式に従い計算した^{1), 2)}。

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

$$Eb = 6.84 \times 10 P_0^{5/2} T_b^3 / W \quad (\text{MJ/kg}) \quad (2)$$

$$EFD = Es \cdot W / 4\pi R^2 \quad (\text{kJ/m}^2) \quad (3)$$

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 は水中の音速(km/s), Wは爆薬の重量(kg), θ は特性時間(s), 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(s)である。尚、測定された衝撃波圧力のピーク圧力までの立上り時間の1/2の時間を θ sとして衝撃波圧力曲線の近似曲線をこの時間まで外挿した時の圧力を最大衝撃波圧力(Pmax)とし、測定された衝撃波圧力がPmax/e(eは自然対数)となるまでの時間が θ であり、 θ が大きくなることは衝撃波圧力の減衰速度が低下することを意味する。又、Esの計

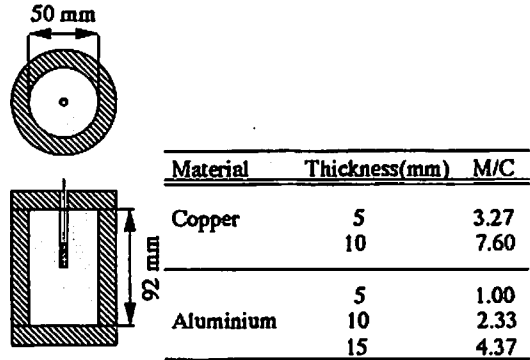
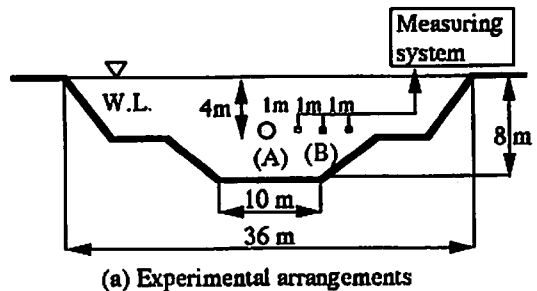
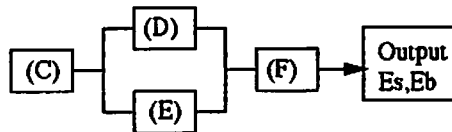


Fig. 1 Geometry, dimension and case weight of samples
(M: Weight of metal case, C: Charge weight)



(a) Experimental arrangements



(b) Block diagram of measuring System

Fig. 2 Experimental arrangement and block diagram; (A) Samples, (B) Tourmaline gages(PCB138A10), (C) Constant current power unit, (D) (E) Digital storage oscilloscopes(DC-200MHz), (F) Personal computer

算方法の詳細は第1報告⁹⁾に記載しているのでここでは省略する。

3. 結果及び考察

3.1 水中衝撃波測定結果

Fig. 3に測定された衝撃波圧力曲線の一例を示す。この測定例は、爆源からの距離が2 mの地点における結果であり、爆薬が銅製ケースに充填されたM/C=3.27の場合及びアルミニウム製ケースに充填されたM/C=4.37の場合の衝撃波圧力曲線が、金属ケースに充填されていないM/C=0の場合の結果と併せて示されている。これらの測定された衝撃波圧力曲線よ

Table 1 Measured shock wave parameters at 2m from explosion

Metal case	M(kg)	C(kg)	M/C	Pmax(MPa)	θ (μ s)	$\theta/C^{1/3}$ (μ s/kg ^{1/3})	Es(MJ/kg)
No metal case	0.00	0.298	0.00	16.4	66.4	99.3	1.11
	0.00	0.300	0.00	15.9	70.9	105.9	1.09
Copper	0.955	0.292	3.27	16.5	80.8	121.8	1.39
	0.948	0.290	3.27	16.4	83.3	125.8	1.41
	2.226	0.292	7.62	15.3	93.4	140.8	1.44
	2.218	0.293	7.58	15.5	93.1	140.2	1.42
Aluminium	0.293	0.293	1.00	16.9	72.5	109.2	1.26
	0.679	0.292	2.33	16.6	74.3	112.0	1.28
	1.273	0.292	4.37	16.6	73.7	111.1	1.28

(M=Metal case weight ; C=Charge weight ; Pmax=Maximum shock wave pressure ; θ =Characteristic time of shock wave ; Es=Shock wave energy)

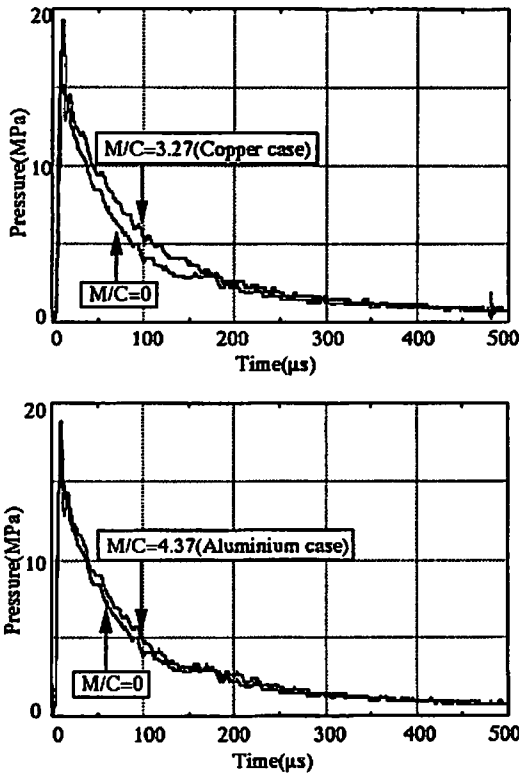


Fig. 3 Typical shock wave pressure profiles at 2m from explosion (M: Metal weight, C: Charge weight)

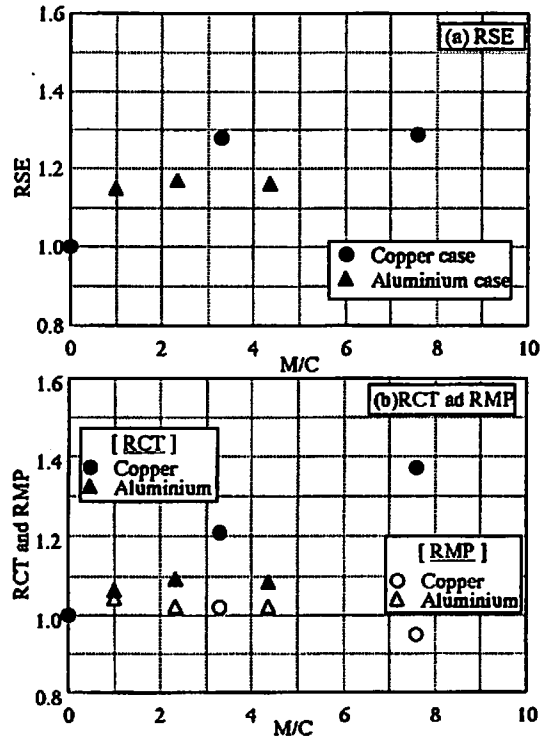


Fig. 4 Variations of relative shock wave energy (RSE) and relative reduced characteristic time (RCT) and relative maximum shock wave pressure (RMP) with M/C

り最大衝撃波圧力 (Pmax), 特性時間 (θ), 換算特性時間 ($\theta/C^{1/3}$) 及び Es を求め Table 1 にまとめた。Fig. 4 には相対的衝撃波エネルギー (Relative Shock wave Energy=RSE), 相対的換算特性時間 (Relative

reduced Characteristic Time=RCT) 及び相対的 最大衝撃波圧力 (Relative Maximum shock wave Pressure=RMP) と M/C の関係を示す。ここで RSE, RCT 及び RMP は金属ケースが存在しない場合に対す

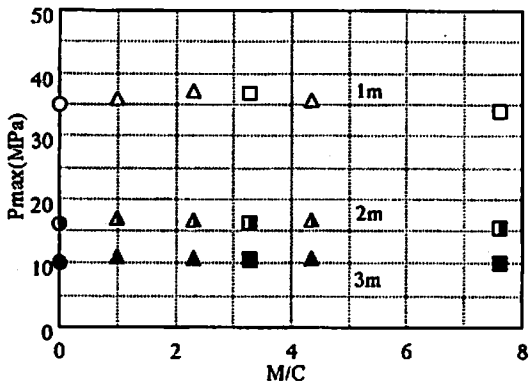


Fig. 5 Variations of maximum shock wave pressure (P_{max}) with M/C at several measured positions (Circle, triangle and square symbols represent P_{max} of explosive without metal case and that with aluminium and copper case, respectively. Open, semi-black and black symbols represent P_{max} at 1, 2 and 3 m from explosion, respectively)

る金属ケースが存在する場合の E_s , $\theta/C^{1/3}$ 及び P_{max} の比率を示す。RSE と M/C の結果より金属ケースは E_s を増加させるが、同一の種類の金属ケースでは厚さが増加しても E_s はほぼ一定である。アルミニウム及び銅製ケースは各々 E_s を約15%及び27%増加させており、銅製ケースの方がアルミニウム製ケースより E_s を増加させる効果の大きいことがわかる。RMP と M/C の結果より P_{max} は金属ケースの有無、種類によりほとんど変化していない。一方、RCT と M/C の結果よりアルミニウム及び銅製ケースは各々換算特性時間を約8%及び20~37%増加させている。このことより金属ケースの存在により E_s が増加するのは P_{max} より θ による効果の大きいことがわかる。即ち、金属ケースにより E_s が増加するのは金属ケースの衝撃波圧力の減衰速度を低下させ衝撃波圧力の持続時間を増加させる効果に起因していると考えられる。この衝撃波圧力の減衰速度を低下させる効果はアルミニウムより銅の方が大きいことがわかる。

Fig. 5 及び Fig. 6 には最大衝撃波圧力 (P_{max})、換算エネルギー流量密度 (Reduced Energy Flux Density = REFD) と換算距離との関係を示した。Table 2 には Fig. 6 より得られる近似式 (4) の定数 k および α をまとめた。

$$\text{Log}(\text{REFD}) = k + \alpha \text{Log}(R/W^{1/3}) \quad (4)$$

ここで REFD は EFD を爆薬重量の3乗根 (kg) で除した値である。Fig. 5 から実験した全ての測定距離において、金属ケースの存在の有無、金属ケースの種類に

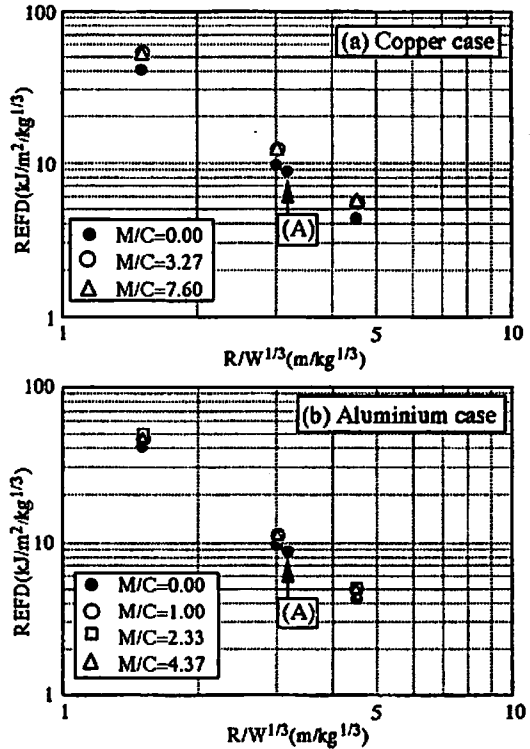


Fig. 6 Variations of reduced energy flux density (REFD) of explosive with copper and aluminium case with reduced distance (Subscript (A) represents REFD of explosive without metal case at $R/W^{1/3} = 3.15$ in the previous work²⁾.)

Table 2 Least squares fit constants of reduced energy flux density ($\text{Log}(\text{REFD}) = k + \alpha \text{Log}(R/W^{1/3})$)

Metal case	M/C	k	α	r^2
No metal case	0.00	1.98	-2.07	1.00
Copper	3.27	2.10	-2.09	1.00
	7.60	2.08	-2.03	1.00
Aluminium	1.00	2.04	-2.05	1.00
	2.33	2.07	-2.10	1.00
	4.37	2.03	-2.04	1.00

(REFD = Reduced energy flux density; R = Distance between explosive and gauge; M = Metal case weight; C = Charge weight; k, α = Least squares fit constants; r = Correlation factor)

かかわらず P_{max} はほとんど変化していないことがわかる。又、Table 2 に示される様に実験範囲内において傾き α は金属ケースの存在の有無にかかわらずほぼ

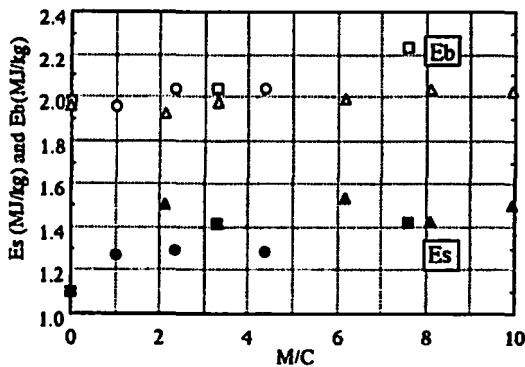


Fig. 7 Variations of shock wave energy (E_s) and bubble energy (E_b) with M/C (Circle, square and triangle symbols represent E_s or E_b of explosive with copper, aluminium and steel case, respectively. Open and black symbols represent E_b and E_s , respectively)

一定である。

Fig. 6 の中の A 点は以前に報告した⁹⁾ 基準爆薬の実験結果であり、今回の直線上にある。従って、以前の水中爆発性能に及ぼすスチール製ケース (SS400) の実験結果も併せて評価できる。これらの結果を総合的に評価するために E_s 及び E_b と M/C の関係を Fig. 7 にまとめた。

3.2 金属ケースの E_s への寄与

金属ケースの材質の E_s へ及ぼす効果を確認するため、銅、アルミニウム及びスチールの Hugoniot 曲線を考慮した水中への最大入射衝撃波圧力及び静的引張強度と E_s の関係について考察する。

水中への最大入射衝撃波圧力をインピーダンスマッチング法により求めるため、各物質の衝撃波圧力と粒子速度の関係を Fig. 8 に示した。図中には金属ケースとして用いた銅、アルミニウム及び水の Hugoniot 曲線と本実験に用いた爆薬の爆轟特性に類似している Composition B の CJ 点 (Chapman-Jouguet point)

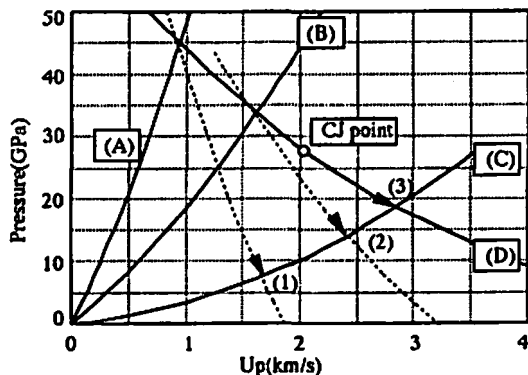


Fig. 8 Pressure-particle velocity (U_p) plane of various materials (A, B, C and D represent Hugoniot curve of copper, aluminium, water and isentrope of detonation products of composition B through CJ point, respectively)

を通る Isentrope を示した。又、銅とスチールの Hugoniot 曲線が近似しているため図中ではスチールの Hugoniot 曲線は省略した。ここで用いた金属及び水の Hugoniot パラメータ^{13)~14)} 及び金属の静的引張り強度¹⁵⁾ を Table 3 に示した。Composition B の爆轟生成ガスの Isentrope は KHT 式による計算値を用いた¹⁶⁾。図中の破線は反射波の Hugoniot 曲線を示す。これと水の Hugoniot 曲線との交点が求める水中への最大入射衝撃波圧力となり、図中の (1)、(2) 及び (3) が各々金属ケースとして銅、アルミニウム及び金属ケースを用いない場合の水中への最大入射衝撃波圧力となる。その結果、水中への最大入射衝撃波圧力は金属ケースが存在しない場合、アルミニウム、銅及びスチールの場合で各々 19.2 GPa、14.2 GPa、7.5 及び 7.5 GPa となる。

Fig. 9 に最大入射衝撃波圧力 (Maximum Incident Shock wave Pressure = MISIP) 及び静的引張り強度 (Tensile Strength = TS) と E_s の関係を示した。爆

Table 3 Material properties ($U_s = C + S U_p$)

Material	C (km/s)	S	ρ (g/cm ³)	TS (MPa)	ϵ (%)
Aluminium	5.37	1.290	2.78	129	19.0
Copper	3.91	1.489	8.94	239	40.8
Steel	4.58	1.490	7.89	450	>20
Composition B	1.20	2.81	1.71	—	—
Water	1.48	1.79	1.0	—	—

(U_s = Shock wave velocity ; U_p = Particle velocity ; C = Sound velocity ; S = Constant ; ρ = Density ; TS = Tensile strength ; ϵ = Elongation)

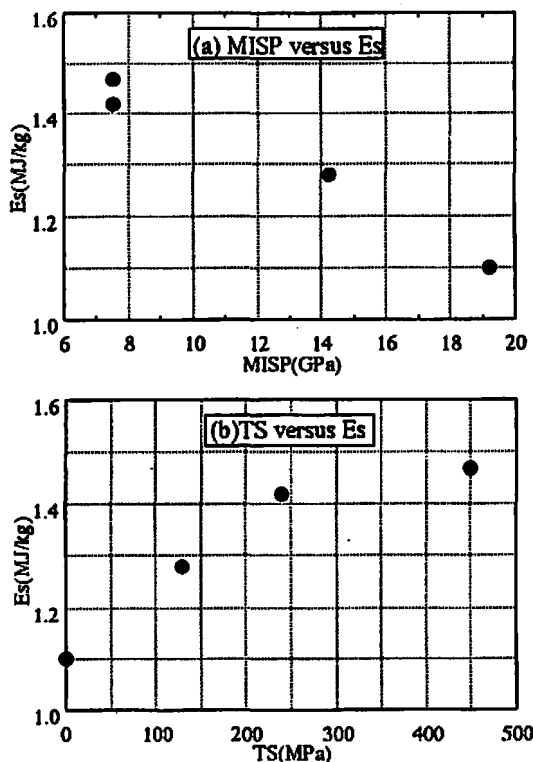


Fig. 9 Effects of maximum incident shock wave pressure (MISP) into water and tensile strength (TS) of case on shock wave energy (Es)

発に伴い金属は高速変形を生ずるため動的引っ張り強度が必要となるがここでは静的引っ張り強度を参考値として用いた。金属ケースのショックインピーダンスの増加によるMISPの低下に伴いEsは増加する傾向にあり、TSが大きくなるに従ってもEsが増加していることが示された。さらに、銅とスチールのHugoniotが近似しているためMISPはほぼ同じであり、これら両者のMISPが同等であるにもかかわらずEsはスチール製ケースを用いた場合で1.47MJ/kgであり銅製ケースの1.42MJ/kgより大きくなっている。このことは材質の静的引っ張り強度もEsに寄与していることを示唆する。しかし、どちらのパラメータが支配的であるかは種々な材質についての実験データの取得が必要であり今後の課題としたい。いずれにしても、これらの実験事実は金属ケースは水中への最大入射衝撃波圧力を低下させることで消失エネルギーを減少させ、且つ金属ケースの機械的特性はケース内での多重反射の継続時間に影響することで衝撃波圧力の減衰速度を低下させるためEsを増加させるメカニズムを示している。

Table 4 Measured bubble parameters

Metal case	M/C	Tb(ms)	Eb(MJ/kg)
No metal case	0.00	155.3	1.98
		155.7	1.97
Copper	3.27	155.7	2.03
		155.3	2.04
	7.60	160.6	2.23
		160.9	2.24
Aluminium	1.00	154.0	1.96
	2.33	155.6	2.04
	4.37	155.8	2.04

(M=Weight of metal case, C=Charge weight, Tb=Bubble period, Eb=Bubble energy)

3.3 金属ケースのEbへの寄与

Table 4には測定されたバブル周期(Tb)とEbをまとめた。Fig. 7にはEbとM/Cの関係を以前報告したスチール製ケースを用いた場合の結果⁹⁾とあわせて示されている。これらの結果は上下の蓋の拘束が周方向の拘束より弱い場合の結果である。さらに相対的バブル周期(Relative Bubble Period = RBP)及び相対的バブルエネルギー(Relative Bubble Energy = RBE)とM/Cの関係をFig.10に示す。RBP及びRBEは各々金属ケースが存在しない場合に対する金属ケースが存在する場合のバブル周期及びEbの比率である。図中のスチール製ケースの場合のタイプ1及びタイプ2は各々、上部の蓋が存在せず上部の拘束がない場合及び上下の蓋は存在するがこの部分の拘束が周方向の拘束に比較して弱い場合のケースの実験結果を示す。Fig. 7よりアルミニウム及びスチール製ケースを用いた場合ではEbは金属ケースが存在しない場合に比較して僅かに増加する傾向にある。金属ケースが存在しない場合のEbは1.98MJ/kgでありアルミニウム製ケースの場合、M/C=4.37の時Ebは2.02MJ/kg、スチール製ケースの場合M/C=9.98の時Ebは2.04MJ/kgとなる。銅製ケースを用いた場合、M/Cが増加するとEbは増加し、その増加の割合はアルミニウム及びスチール製ケースに比較して大きく、銅の厚さが10mm(M/C=7.60)になると、Ebは2.24MJ/kgとなる。

実験に用いた爆薬は理想爆薬に近い挙動を示すことから、金属ケースが存在することで爆薬の爆轟生成ガス量の増加、爆轟温度、爆轟圧等が高くなりEbが増加したとは考え難い。金属ケースの存在によるEbの増加は金属ケースが存在することでバブルの形状ある

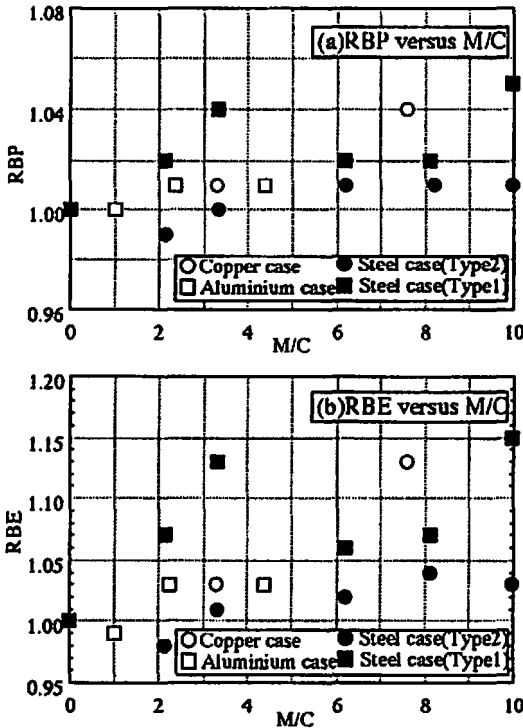


Fig. 10 Variations of relative bubble period (RBP) and relative bubble energy (RBE) [Open circle, open square, black circle and black square symbols represent RBP or RBE of explosive with copper, aluminium, steel (type2) and steel (type1) case]

いはケースの破壊時間がバブル周期へ影響を与えているためと考えられる。Fig.10よりスチール製ケースの場合、M/Cが9.98の場合で試料の上部に蓋がなく拘束のない場合(タイプ1)のRBEは1.15であり、上下の蓋はあるが周方向に比較して拘束が弱い場合(タイプ2)のRBEは1.03である。この時のRBPは前者で1.05、後者で1.01である。このことは上部に拘束のない場合はバブルは水面に近い方が大きく又、上下の拘束のない場合は軸方向の拘束(上下の蓋の部分)が周方向の拘束に比較して弱いためバブルは鉛直方向に長くなると予測される。又、通常バブル周期は水深が浅い程長くなることからバブル周期は金属ケースの存在しない場合、上下の拘束が周方向に比較して弱い場合及び上部の拘束のみが弱い場合の順に見かけ上長くなると考えられる。さらに、金属ケースの拘束力の強いタイプ1の方がタイプ2に比較して金属ケースが破壊するまでにより時間を必要とすると予測されるために見かけ上バブル周期が長くなると考えられる。この結果、Ebは金属ケースの存在しない場合、タイプ2及びタイプ1の順番に見かけ上Ebが大きくなったと

考えられる。

金属ケースが破壊されるまでの時間はケースの動的破壊強度及びその時の伸びが問題となる。これらの参考値として静的引っ張り強度及びそのときの伸びをTable 3に示した。アルミニウムの静的引っ張り強度がスチールのその約半分であるにもかかわらずEbへ及ぼす効果はほぼ同等であること又、銅の静的引っ張り強度がスチールより弱いにもかかわらずEbへ及ぼす効果は銅の方が大きいことより静的引っ張り強度からはバブル周期へ及ぼす材質の影響の度合を説明できない。一方、銅製ケースの場合には、伸びがスチール及びアルミニウムに比較して約2倍と大きいためスチール、アルミニウムに比較して銅製ケースが破壊されず爆轟生成ガスと水面との境界に長時間維持されるために見かけ上バブル周期が長くなりM/Cが7.60の時、Ebが13%も増加したとも考えられる。

金属ケースの存在によりEbが増加するのはバブル周期が見かけ上増加するためであるが今までの結果からは十分に説明できない。今後、バブルの形状、金属ケースに爆轟生成ガスが維持されている時間等の知見を実験、数値計算より得る必要がある。

4. 結論

水中爆発性能に及ぼす金属ケースの材質の効果を検討するため、前報^{9),11)}のスチール製金属ケースに加えて材質の異なる銅及びアルミニウム製ケースを用いて実験を行った。その結果、金属ケースの有無、種類にかかわらず最大衝撃波圧力はほぼ一定であるが、金属ケースは特性時間を長く、即ち衝撃波圧力の減衰速度を遅くし衝撃波圧力の継続時間を増加させるためにEsを向上させる。その増加の割合はアルミニウム、銅、スチールの順番で大きくなる。これら衝撃波エネルギーはインピーダンスマッチ法により求めた水中への最大入射衝撃波圧力あるいは静的引っ張り強度と相関関係が見られた。このことより金属ケースのショックインピーダンスが大きくなると水中への最大入射衝撃波圧力が低くなる。この入射衝撃波圧力の低下は消失エネルギーを減少させ、さらに金属ケース内での多重反射は衝撃波圧力の減衰速度を低下させ持続時間を増加させる。この多重反射の継続時間は材質の破壊特性の影響を受けEsを増加させる。又、同一の金属ケースを用いた場合、実験範囲内ではM/Cが増加しても、Esはほぼ一定であり、Esは厚さの効果を受けない。

Esは爆薬の拘束条件の影響を強く受ける。バブル周期は見かけ上、金属ケースの存在しない場合、上下の蓋の拘束が周方向に比較して弱い場合及び上部の蓋の拘束のみが弱い場合の順に長くなりEbはこの順番で見かけ上大きくなる。上下の蓋が周方向の拘束に比

較して弱い場合の実験ではEbはアルミニウム、スチール製ケースの場合、僅かに増加する傾向にある。銅製ケースは厚さが増加するに従いEbを増加させ、厚さ10mm (M/C=7.60) では約13%増加した。

金属ケースの存在によるEbの増加は金属ケースの破壊に要する時間に起因すると予測したが、Ebへ及ぼす金属ケースの静的な機械的特性とEbとの間に相関関係は見られなかった。

謝 辞

本研究を実行するに当たり実験ならびにデータ解析に尽力した研究開発部の虎田英之君、鈴木真哉君、須田一也君に謝意を表します。

文 献

- 1) Cole, R.H., 'Underwater Explosions', Dover Publications, New York (1948)
- 2) Roth, J., 'Underwater Explosives' in Encyclopedia of Explosives and Related Items, 10, U38, US Army Research and Development Command, Dover Publications, New Jersey (1983)
- 3) Bijarnholt, G., Propellants and Explosives, 8, 67 (1980)
- 4) 田中一三, 工業火薬協会誌, 36, 11 (1975)
- 5) 田中克己ら, 工業火薬協会誌, 42, 239 (1981)
- 6) 中山良男ら, 工業火薬協会誌, 52, 329 (1991)
- 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) 村田健可ら, 工業火薬協会誌, 54, 123 (1993)
- 10) 高橋勝彦ら, 工業火薬協会誌, 54, 190 (1993)
- 11) 高橋勝彦ら, 工業火薬協会誌, 54, 198 (1993)
- 12) Hallquist, J.O., 'User's Manual for DYNA2D', Lawrence Livermore National Laboratory, Rept-UCID-1856 (1985)
- 13) Marsh, S.P., 'LASL Shock Hugoniot Data', University of California Press (1980)
- 14) Steinberg, D.J., Journal of Applied Physics, 51, 1498 (1980)
- 15) 日本工業規格, JIS ハンドブック 鉄鋼, 495 (1993)
- 16) 田中克己, 爆薬の爆轟特性解析, 化学技術研究所, 149 (1983)

Effect of metal confinement on underwater explosion performance (4)
—Effects of aluminium and copper cases—

by Katsuhiko TAKAHASHI*, Akio TORII*, Kenji MURATA*
and Yukio KATO*

The effects of aluminium, copper cases on underwater explosion performance of explosives was discussed with results of steel case in our previous work. Experimental results represent that metal case does not change the maximum shock wave pressure and makes longer the characteristic time of shock wave. These results indicate that metal case has the effect attenuating shock duration, therefore shock wave energy is enhanced. It is found that shock wave energy of explosive with various metal cases is correlative to the maximum incident shock wave pressure into water, which is calculated by the method of shock impedance match, and static tensile strength of metal. This result suggests that dissipated energy decreases due to metal case because metal case with high shock impedance produces a low maximum incident shock wave pressure and the multiple reflection within metal case, which duration is affected by the fracture process, attenuates shock wave decay. Therefore, shock impedance and tensile strength affects shock wave energy. And also, in the range of experiments with the same metal case, shock wave energy does not change with increase of thickness of metal case. On the other hand, aluminium and steel cases slightly enhances bubble energy. When explosive is in a copper case, bubble energy increases with increase of thickness of metal case. These bubble energy of explosive with various metal cases are not correlative to static mechanical properties of metal.

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