

水中爆発性能に及ぼす金属ケースの効果 (第2報)

— 数値計算によるアプローチ —

高橋勝彦*, 村田健司*, 加藤幸夫*

水中衝撃波エネルギー (E_s)に及ぼす金属ケースの効果を二次元ラグランジュ有限要素法流体力学コードDYNA2Dを用いて検討した。相対的衝撃波エネルギー (RSE)は金属ケースの材料特性値である降伏応力、厚さ及びショックインピーダンスの影響を受ける。降伏応力が大きくなると衝撃波特性時間 (θ) 及び最大衝撃波圧力 (P_{max})が減少し E_s は小さくなる。ケースの厚さが増大すると金属中に発生する多重反射の持続時間が長くなり、爆轟生成気体から水へのエネルギー伝達速度が遅くなることにより θ が増大し E_s が向上する。又、この持続時間はショックインピーダンスの大きい鉛、銅では長くなり E_s を向上させるが、ショックインピーダンスの小さいアルミニウム、マグネシウムでは E_s を向上させる程持続しない。

1. 緒言

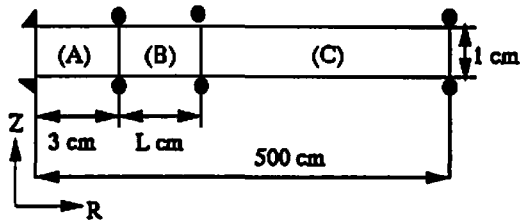
水中爆発性能評価試験は、その測定法の性質上、爆薬の有するエネルギーを衝撃波エネルギー (E_s)、バブルエネルギー (E_b)に分離し、かつ定量的に評価できる利点がある。このため、水中爆発性能は長年多岐にわたり多くの研究者により研究されてきた。そして、その理論的取扱はColeの著書¹⁾に詳細にまとめられており、現在の研究者の古典的バイブルとなっている。現在まで、爆薬の水中爆発性能に関する報告の多くは裸薬に関するものであり、金属ケース等、コンファイメントのない環境での測定であった。通常、爆薬は金属ケースに充填されていること又、Warrenら^{2) 3)}も指摘している様に、水中爆発性能に及ぼす金属ケースの効果はそのメカニズムについては理解されていないため魅力のある分野である。水中爆発現象に対する金属ケースの役割の理解には、爆薬、金属、水の物理、化学的特性を実験、数値計算の両面から系統的にアプローチする必要がある。即ち、1) 爆轟生成物の挙動、2) 金属の物性及び破壊挙動、3) 水の物性、4) 各物質間の境界を通しての物質移動、5) 金属と水の境界

で生じるRayleigh-Taylor Instability等である。

そこで、著者らはこれらの問題を解明するために実験及び数値計算の両面から検討することをスタートさせた⁴⁾。この中で非対称の金属ケースを用いた実験結果より、鉄製金属ケースに充填された爆薬は金属ケースのない爆薬に比較して水中爆発性能即ち、水中衝撃波エネルギー及びバブルエネルギーが向上すること及び銅をケース材質とした場合の数値計算結果より、この現象のメカニズムに関する報告をした。さらに軸対称の金属ケースを用いた実験結果を加え、より発展させた実験結果に関する報告を前報⁵⁾で行った。今回の報告は、金属ケースは水中爆発性能のうち水中衝撃波エネルギーへの寄与が著しく大きいことに着目し、このメカニズムを解明するために水中衝撃波エネルギーに及ぼす金属ケースの効果を数値計算により検討したものである。前報⁵⁾において金属ケースによる水中衝撃波エネルギーの向上は、金属ケース内に発生する多重反射及びこの持続時間が重要でありこのため、金属ケースの破壊挙動及びコンファイメントが重要であると予測した。今回はこれらのうち E_s に及ぼすコンファイメントの効果について実験に先駆け、数値計算により検討した。コンファイメントの要素としては1) 材料の慣性力、2) 材料強度及び3) ショックインピーダンスがある。これらの E_s に及ぼす効果を1) 金属ケースとして銅を選びその厚みを変数とした場合、2) 降

1993年3月9日受理

*日本油脂株式会社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 0569-72-0916
FAX 0569-73-7376



- (A) Composition B : Length in R-direction of one element is 0.15-0.30 cm.
 (B) Metal ($L=0-3$ cm) : Length in R-direction of one element is 0.10-0.20 cm.
 (C) Water : Length in R-direction of one element is 1.0 cm.

Fig. 1 Initial geometry for computer simulation

伏応力を変数とした場合及び、3) 銅の代わりにショックインピーダンスの異なるアルミニウム、マグネシウム及び鉛に置き換えて又、これらの厚みを変数とした場合について数値計算により検討した。尚、数値計算に用いた汎用コードは二次元ラグランジェ有限要素法流体力学コードDYNA2Dコード⁶⁾である。

2. 数値計算

2.1 DYNA2Dコード

数値計算に用いたDYNA2Dコードは、大変形問題を計算するための最も信頼性のあるコードの一つである。本コードはUPDATED LAGRANGIANコードであり、時間積分は中心差分に基づく陽解法を採用している。

2.2 計算条件

計算に用いたモデル形状をFig. 1に示す。DYNA2Dコードがラグランジェ問題を解くためのコードであること又、水中爆発現象において金属、水は大変形を生じ計算格子が異常に小さくなり計算ステップが増加し計算精度が落ち、計算時間が長くなる。このため計算を確実に終了させるためにはリゾニングの操作を行う必要があり多大な計算時間の割にはメリットが少ない。そこで、計算時間の短縮のため又、問題の単純化のために図に示す様にZ軸方向を一要素とし二次元コードを一次元軸対称問題として用いた。図中、R=

0の境界は拘束されており又、その他の部分はZ方向に拘束されている。各物質の計算格子の条件は次の通りである。爆薬、金属、水の部分のR方向の一要素の長さは、銅を材質とした場合の降伏応力の効果の検討の場合、各々0.3cm、0.2cm及び1.0cmとした。その他の場合で各々、0.15cm、0.1cm及び1.0cmとした。

計算に用いた爆薬はComposition Bとし、爆轟速度、爆轟圧、密度は各々、7.98km/s、29.4GPa、1.717 g/cm³を用い又、水の密度は0.998 g/cm³とした。計算に用いた物質モデルとして、金属のモデルには完全塑性流体 (Rigid-Perfect Plastic) モデルを、水、爆薬には偏差応力を無視した零 (Null) モデルを用いた。計算により検討した金属の銅、アルミニウム、マグネシウム及び鉛に関する各々の特性値はTable 1に示す^{7) 8)}。尚、これら金属及び水の物理特性は、温度、歪み速度、相変化の効果は無視した。金属の破壊準拠は全ての厚みにおいて同一 (プレッシャーカットオフ $P_c = 10$ kPa) とした。

状態方程式は、金属と水にはGrüneisen方程式 (式 (1))、Composition BにはJones-Wilkins-Lee (J.W.L) 状態方程式 (式 (2)) を用いた。

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

$$P = A \left(1 - \frac{\omega}{R_1 V}\right) \exp\left(-\frac{R_1}{V}\right) + B \left(1 - \frac{\omega}{R_2 V}\right) \exp\left(-\frac{R_2}{V}\right) + \frac{\omega E}{V} \quad (2)$$

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、 $\mu = 1 - V$ 、 γ はGrüneisen、 E は内部エネルギー、 A 、 B 、 R_1 、 R_2 及び ω は定数である。Grüneisen J.W.L状態方程式の定数^{7) 8) 9)}は各々Table 2-a、Table 2-bに示す。又、衝撃波速度 (U_s)と粒子速度 (U_p)には、 $U_s = C + S_1 U_p$ の関係が成立するとした。

計算に使用した計算機はSun Microsystems社製のSUN4/110ME-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

Table 1 Material properties of metal

Material	Yield stress (GPa)	Shear modulus (GPa)	Density (g/cm ³)
Copper	0.120	47.7	8.924
Aluminium	0.290	27.6	2.784
Magnesium	0.190	16.5	1.740
Lead	0.008	8.6	11.850

Table 2-a Constants of grüneisen equation of state
(C =Sound velocity; S_1 =Constant; γ =grüneisen gamma
; $\rho_0 C$ =Acoustic impedance;refer to eqs.(1))

Material	C(km/s)	S_1	γ	$\rho_0 C$ MPasm ⁻¹
Copper	3.91	1.489	1.99	34.89
Aluminium	5.37	1.290	1.97	7.83
Magnesium	4.50	1.260	1.54	5.67
Lead	2.05	1.460	2.71	24.29
Water	1.48	1.786	1.65	1.48

Table 2-b Constants of J.W.L of Comp.B
(refer to eqs.(2))

A (MPa)	B (MPa)	R_1	R_2	ω	E (KJ/ g)
524.23	76.78	4.2	1.1	0.34	4.95

Table 3 Material parameters of copper

Run No.	Yield stress (GPa)	Shear modulus (GPa)	Density (g/cm ³)
Run1	0.12	47.7	8.924
Run2	1.0		
Run3	2.0		
Run4	3.0		
Run5	4.0		

間及び計算サイクルは次の通りであった。爆薬を20要素x0.15cm/要素, 水を497要素x1cm/要素とした場合の計算時間及び計算サイクルは各々26分, 3415サイクルであった。又, 金属材質を銅とし, 爆薬を20要素x0.15cm/要素, 金属を10要素x0.1cm/要素, 水を496要素x1cm/要素とした場合の計算時間及び計算サイクルは各々312分, 4910サイクルであった。

3. 計算結果

3.1 降伏応力の効果

金属ケースを銅 (RUN1) とし, 降伏応力を Table 3 に示す様に変化させ水中衝撃波に及ぼす金属ケースの降伏応力の効果を検討した。尚, 金属ケースの存在しない場合の計算結果をRUN0とした。これらの物性値は文献値⁷⁾を参考にし, 実際のデータと矛盾しない範囲に収め, 計算に用いたモデル形状において (Fig. 1) 金属ケースの厚さを2cmと固定した。

金属の降伏応力を変化させた場合の爆源近傍の水中衝撃波圧力の履歴曲線を Fig. 2 に示す。図に示した衝撃波圧力曲線は, 金属ケースの存在する場合は金属と水の境界又, 存在しない場合は爆薬生成気体と水の境界に位置する水の要素についての結果である。金属の降伏応力の増加により最大衝撃波圧力 (P_{max}) の低下, 衝撃波圧力の減衰速度の増加即ち, 水中衝撃波エネルギー (E_s) が低下する。金属ケースの存在しない場合の P_{max} は存在する場合の約3倍高いが, 衝撃波圧力の減衰速度が極めて大きいため RUN1 の場合力積にはほとんど差は見られず, 降伏応力が大きくなるに従って P_{max} 及び圧力の持続時間が減少する。

爆源遠方 (1m, 2m, 3m) における衝撃波圧力の履歴曲線を Fig. 3 に示す。3m の位置でさえ P_{max} は実測値⁵⁾ より大きな値を示しているが, これは実際の物理現象が三次元問題であるのに対し計算では一次元軸対称問

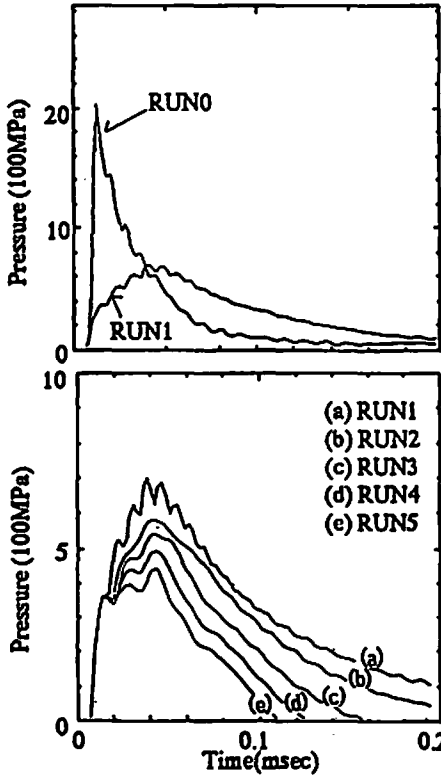


Fig. 2 Shock wave pressure profiles with various yield stress at the near field from explosion (RUN0=Interface between water and detonation products; RUN1~5=Interface between metal case and water)

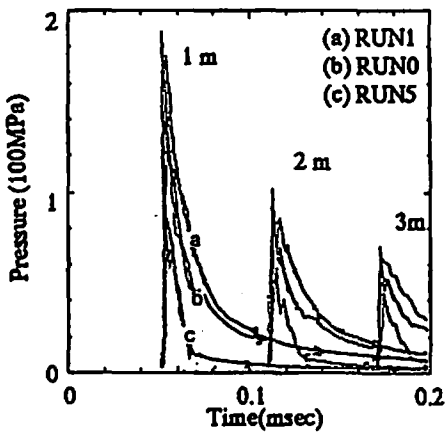


Fig. 3 Shock wave pressure profiles with various yield stress at the far field from explosion

題として取り扱っているためである。金属と水の境界での衝撃波圧力履歴がRUN5の様に金属ケースの存在しないもの (RUN0) に比較し P_{max} が低く、かつ衝撃波圧力の減衰速度が大きい場合は爆源遠方においても

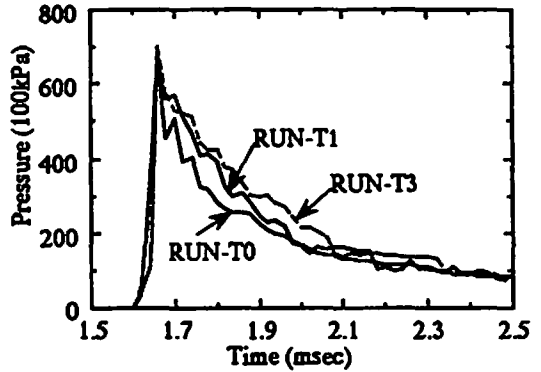


Fig. 4 Effect of thickness of metal case on shock wave pressure profiles at 3 m from explosion

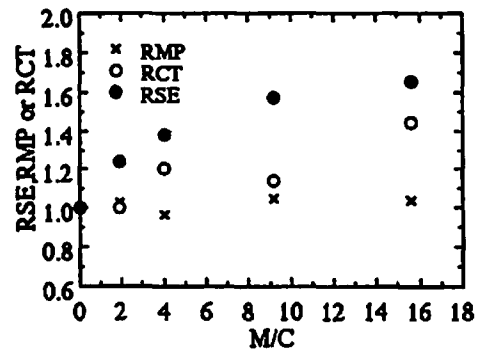


Fig. 5 Variations of relative shock wave energy (RSE), relative maximum pressure (RMP) and relative characteristic time (RCT) with M/C at the 3 m from explosion (Metal=Copper)

E_s は小さい。しかし、RUN1の様に P_{max} が低くても減衰速度が小さい場合には金属ケースの存在により E_s を大きくし、実験結果の傾向と一致する。従って、金属の降伏応力は P_{max} 、 E_s へ寄与する。

3.2 金属ケースの厚さの効果

水中衝撃波に及ぼす金属ケースの厚さの効果を検討するために金属を銅とし、ケースの厚さは0, 0.5, 1.0, 2.0及び3.0cmと変化させ、これらの計算結果は各々、RUN-T0, RUN-T05, RUN-T1, RUN-T2及びRUN-T3とした。

Fig. 4に、金属ケースの厚さを変化させた場合の、爆源から3mの位置での衝撃波圧力曲線を示す。結果より、ケースの厚さの増加により P_{max} はほとんど変化していないが、衝撃波圧力の減衰速度は低下しており、このため E_s が増大している。 E_s に及ぼすケースの厚さの効果の全体像を捕らえるため M/C (M : 金属重量, C : 爆薬重量) を変数として、相対的衝撃波エネルギー

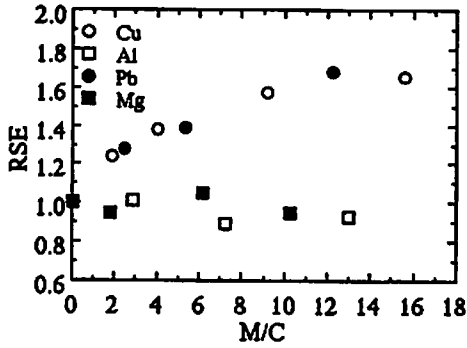


Fig. 6 Variations of relative shock wave energy (RSE) with M/C

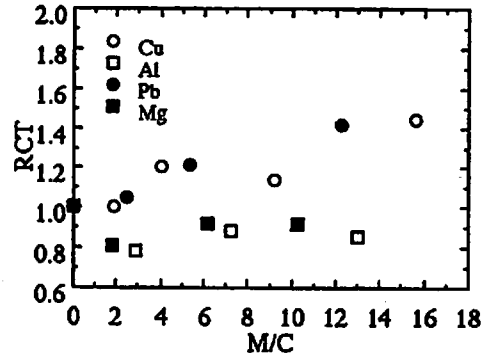


Fig. 8 Variations of relative characteristic time (RCT) with M/C

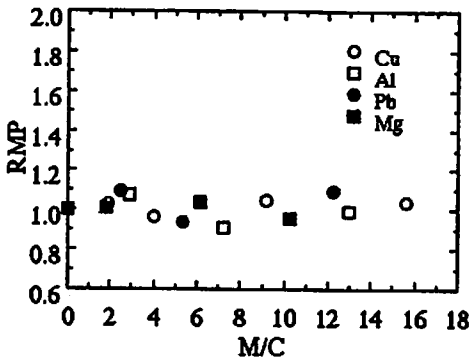


Fig. 7 Variations of relative maximum pressure (RMP) with M/C

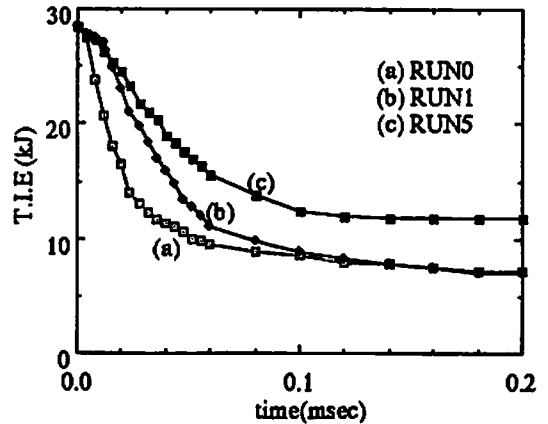


Fig. 9 Total internal energy (T. I. E)-time curves of detonation products

(Relative Shock Wave Energy=RSE), 相対的最大の衝撃波圧力 (Relative Maximum Pressure=RMP) 及び、相対的特性時間 (Relative Characteristic Time=RCT) の変化の様子を Fig. 5 に示す。ここで、RSE、RMP 及び RCT は各々、金属ケースが存在しない場合に対する E_s 、 P_{max} 及び特性時間 (θ) の比率として定義し又、 P_{max} から P_{max}/e (e は自然対数の定数) の圧力となるまでの時間を θ とした。 E_s は計算より得られた衝撃波圧力曲線より次式 (3) により求めた。

$$E_s = (4\pi R^2 / \rho_w C_w W) \int_0^{\infty} P(t)^2 dt \quad (MJ/kg) \quad (3)$$

ここで R は爆薬と衝撃波圧力を観察する位置間の距離、 ρ_w は水の密度、 C_w は水の音速及び、 W は爆薬の重量である。結果より、ケースの厚さの増加 (M/C の増加) に伴い RMP はほとんど変化しないが RCT が増加することにより RSE が増加する。又、 M/C が約 10 までは RSE は単調増加し、 M/C が約 10 (厚さ 2cm) 以上ではほぼ 1.6 と一定になる。

3.3 アルミニウム、マグネシウム及び鉛の効果

水中衝撃波に及ぼす各種金属ケースの効果を検討するために、金属として銅 (Cu) の他にアルミニウム (Al)、マグネシウム (Mg) 及び鉛 (Pb) を用い又、厚さの効果も併せて検討した。厚さは Al で、2.0 ($M/C=2.9$)、4.0 ($M/C=7.2$) 及び 6.0cm ($M/C=13.0$)、Mg で 2.0 ($M/C=1.8$)、5.0 ($M/C=6.2$) 及び 7.0cm ($M/C=10.3$)、Pb で 0.5 ($M/C=2.5$)、1.0 ($M/C=5.4$) 及び 2.0cm ($M/C=12.3$) とした。

各々の場合について衝撃波圧力の履歴曲線を計算し、3.2 項で用いた方法で RSE、RMP 及び RCT を計算しその結果を各々、Cu の結果と併せて Fig. 6 ~ Fig. 8 に示す。結果より、RMP はいずれの金属でも M/C の増大によりほとんど変化することがなく、RSE への寄与はほとんどない。しかし、Cu、Pb の様にショックインピーダンスの大きな金属は RCT の増加により RSE が増大している。これに対し、Mg、Al の様にショックインピーダンスの小さい金属は RCT に寄与す

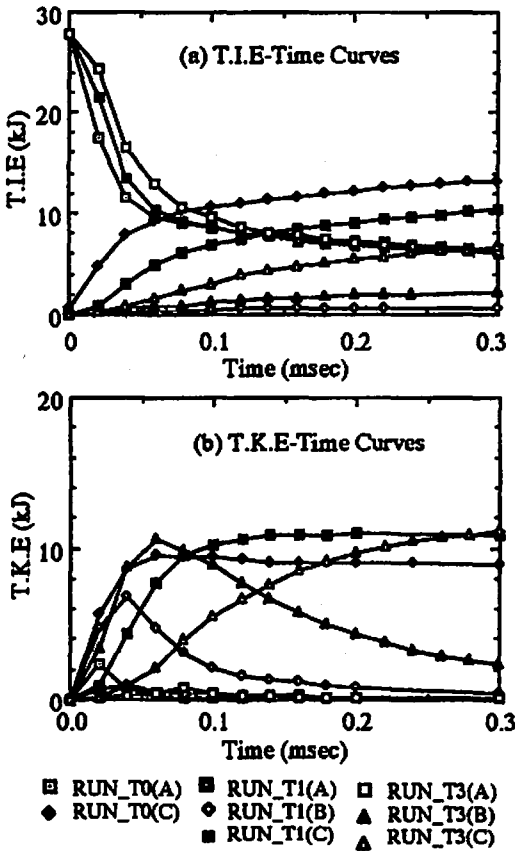


Fig. 10 Total internal energy(T. I. E)and Total kinetic energy(T. K. E)-time curves (A=detonation products;B=Metal(Copper);C=Water)

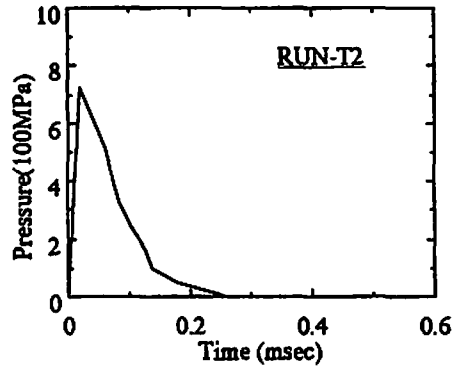


Fig. 11 Example of Pressure-time curve of the element of metal case at the interface between metal case and water(Metal=Cu; Thickness of metal case=2cm)

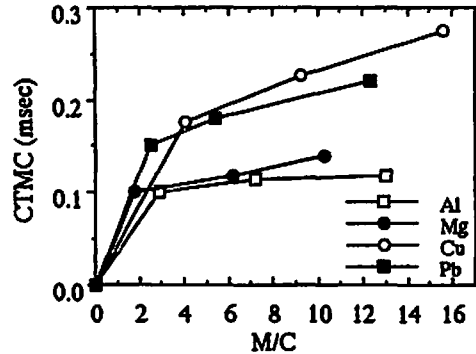


Fig. 12 Compression time of metal case(CTMC) with M/C

ることがなくRSEの増加もない。

4. 考察

金属ケースによるRSEの増加のメカニズムは爆轟生成気体からのエネルギー放出速度に関する情報を得ることにより説明できる。

Fig. 9に降伏応力の相違による爆轟生成気体の全内部エネルギー(Total Internal Energy=T. I. E)の履歴曲線を示す。図から明らかな様に金属ケースが存在すると爆轟生成気体からのエネルギー放出速度が低下する。金属の降伏応力が増加するとコンファイメントが大きくなりさらにエネルギー放出速度は低下するが、放出されるエネルギー量が少なくなりこのことが爆源遠方において P_{max} 、衝撃波持続時間の低下に寄与していると考えられる。

金属ケースの厚さの増加即ち、M/Cの増加に伴うRSEの増加のメカニズムを考察するためにM/Cの相違による爆薬、金属、水の各々のT. I. E及び全運動

エネルギー (Total Kinetic Energy=T. K. E)の履歴曲線の計算結果をFig. 10に示す。図中の(A),(B),(C)の記号は各々爆轟生成気体、金属、水を示す。その結果、爆轟生成気体からのエネルギー放出速度はM/Cの増加に伴い遅くなっている。又、水のT. I. E及びT. K. Eの増加速度はさらに遅くなっておりこのことが爆源遠方における特性時間 θ の増加に寄与していることが考えられる。注目すべきことは金属ケースのT. K. Eの履歴曲線である。金属ケースの厚さの増加に伴いT. K. Eの最大値は大きくなりその減少速度が低下する。このため金属ケースの厚さの増加により水のT. I. E及びT. K. Eの増加速度が低下し、その結果RCT及びRSEが増加したと考える。これらは、前報で指摘した様に金属ケース中における衝撃波の多重反射に起因すると考える。この多重反射により金属はゆっくり加速され、この加速は金属ケースの厚さの効果及びケースのコンファイメントの効果

を受けRCTの増加へ寄与する。金属ケースの材質を銅とした場合における金属と水の境界に位置する金属の要素についての衝撃波圧力履歴曲線の一例をFig. 11に示す。これはRUN-T2（ケースの厚さは2cm）の場合である。ここで圧力が10kPaになるまでの時間（破壊が生じるまでの時間）を金属ケースが圧縮状態にある時間（Compression Time of Metal Case=CTMC）と定義し、CTMCとM/Cの関係をFig. 12に示す。事実、結果が示すようにショックインピーダンスの大きい金属はケースが厚くなるに従いCTMCは長くなりRSEが増加する。

5. 結 論

水中衝撃波エネルギー（Es）に及ぼす金属ケースのコンファイメント効果を二次元ラグランジェ有限要素法流体力学コードDYNA2Dを用いて検討した。コンファイメントの変数としては1) 材料の慣性力、2) 材料強度及び3) ショックインピーダンスを考慮した。その結果、RSEは金属ケースの材料特性値である降伏応力、厚さ及びショックインピーダンスの影響を受ける。降伏応力が大きくなると衝撃波特性時間（ θ ）及び最大衝撃波圧力（ P_{max} ）が減少しEsは小さくなる。ケースの厚さが増大すると金属中に発生する多重反射の持続時間が長くなり、爆轟生成気体から水へのエネルギー伝達速度が遅くなることにより θ が増大しEsが向上する。又、この持続時間はショックインピーダンスの大きい鉛、銅では長くなりEsを向上させるが、ショックインピーダンスの小さいアルミニウム、マグネシウムではEsを向上させる程持続しない。

今回、数値計算により種々の金属材質による水中衝撃波エネルギーに及ぼす効果を検討、予測したが今後実験的にこれらを確認、検討していきたい。

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) Murata, K, Takahashi, K. and Kato, Y., 'Effect of Metal Confinement on Underwater Explosion of Explosives', Proceeding of the 18th International Symposium on Shock Wave, p947 (1991)
- 5) 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)', 工業火薬協会誌, 投稿中
- 6) Hallquist, J. O., 'User's Manual for DYNA2D... An Explicit Two-Dimensional Hydrodynamic Finite Element Code with Interactive Rezoning', Lawrence Livermore National Laboratory, Rept-UCID-1856 (1985)
- 7) 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, pp1498 - 1504 (1980)
- 8) Marsh, S. P., 'LASL Shock Hugoniot Data', University of California Press (1980)
- 9) Lee et. al., 'J. W. L. Equation of State Coefficients for High Explosives', Lawrence Livermore National Laboratory, Rept-UCID-16189 (1973)

Effect of metal confinement on underwater explosion performance (II)

— Approach by using numerical simulation —

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

In order to discuss effect of metal confinement on shock wave energy (E_s), computer simulation by using DYNA2D code was performed with various metals (copper, aluminum, magnesium and lead).

It is shown that yield stress, thickness of metal case and shock impedance of materials affect relative shock wave energy (RSE) as follows.

1) RSE is decreased, since both of characteristic time (θ) and maximum shock wave pressure (P_{max}) are decreased with increasing yield stress of material. 2) With increasing thickness of metal case, the duration time of the multiple reflection produced by impedance mismatch in metal case, become longer. Therefore, RSE is enhanced at the far field from explosion. 3) Metals with the high shock impedance such as copper and lead enhance RSE, since compression time of metal case (CTMC) becomes longer in the case of those metals. In the case of metals with the low shock impedance such as aluminum and magnesium, CTMC is too short to increase RSE.

It is shown that the mechanism of the above effects is due to the role of metal which decreases the rate of energy transfer from detonation products to water.

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