

水中衝撃波の反射に関する研究

灘光 陽*, 本田 隆志*, 伊東 繁**, 藤田 昌大**

A Study of Reflection of Underwater Shock Waves

Yoh NADAMITSU, Takashi HONDA, Shigeru ITOH and Masahiro FUJITA

We investigated the von Neumann reflection process of the underwater shock waves by experiments and by numerical calculation. In a case of an underwater shock wave, the strength of the underwater shock wave is very high but its Mach number is very low because of a high sound velocity of the water. Therefore when the underwater shock wave interacts with the solid wall, it easy reflects with the configuration of the von Neumann reflection. The experimental evidence of the von Neumann reflection is cleared by the visualization of the reflection process. The criterion of the transition from the Mach to the von Neumann reflection is also presented in this paper. This theory is constructed by an application of Whitham's Ray-Shock theory. This theory predicts the transition obtained in the experiments.

Key Words: Underwater Shock Wave, Mach Reflection, von Neumann Reflection, Numerical Calculation, Ray Shock Theory

1. 緒 言

平面衝撃波が静止気体中を伝播し、傾斜面に入射し反射現象を生じる場合、正常反射あるいは非正常反射の反射形態をとることがよく知られている。非正常反射はマッハ反射と von Neumann 反射に大別され、入射衝撃波のマッハ数と傾斜面の角度が小さい場合に von Neumann 反射が生じ気体中のこの現象に対しては実験、理論、数値シミュレーションによって研究がなされている。^{(1), (2)} 佐宗, 高山⁽¹⁾は弱い衝撃波現象を Whitham の ray-shock 理論および shock-shock 関係を用いて説明している。ところで、水中衝撃波の場合、衝撃波の圧力は非常に高いが、水の音速が大きいためマッハ数は低くなる。それゆえに、水中衝撃波が傾斜面に入射する場合、容易に von Neumann 反射形態を生じる。しかしながら、現在水中衝撃波の von Neumann 反射については、ほとんど言及されていない。この論文では、高性能爆薬の水中爆ごうによって発生した水中衝撃波の von Neumann 反射過程を実験および数値計算により明らかにする。また、マッハ反

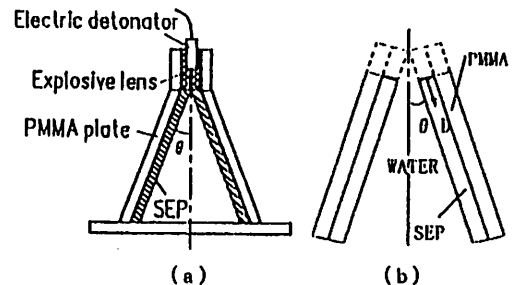


Fig.1 (a) Experimental apparatus.
(b) Physical field for a numerical calculation.

射および von Neumann 反射の遷移基準を Whitham の ray-shock 理論を用いて検討する。

2. 水中衝撃波の斜衝突実験

水中衝撃波の斜衝突実験に用いた装置の概略図を Fig.1 (a) に示す。同図のように、PMMA 板上に長さ 110 mm, 幅 50 mm, 厚さ 5 mm で平面に成形した 2 つの SEP (ペンスリット 65 %, パラフィン 35 % の高性能可塑性爆薬) を開き角 2θ で設置した。爆薬上部には平面な爆ごうを得るために爆薬レンズを取付けた。

* 機械工学科

** 熊本大学工学部知能生産システム工学科

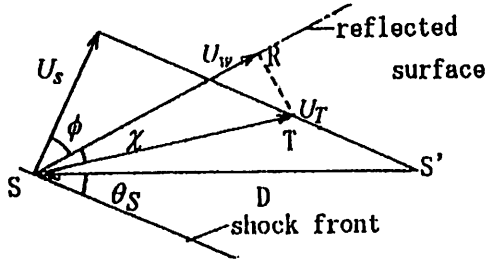


Fig. 2 (a) Velocity vector of Mach reflection.

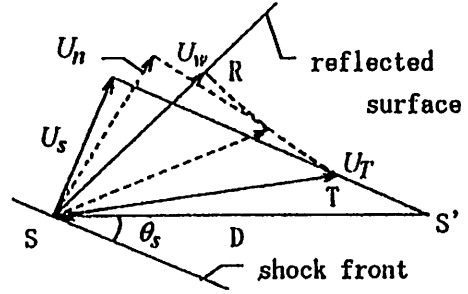


Fig. 2 (b) Illustration of von Neumann reflection.

実験はこの装置を水で満たした PMMA 製の水槽の中に沈めて行った。起爆には6月電気雷管を用いた。水中爆ごうによって発生した水中衝撃波は、傾斜面に対応する中心線上(以下反射面と呼ぶ)に入射し、斜め衝突を行い反射現象を生じる。この反射過程の観察は、光源として閃光時間が $50\mu\text{sec}$ のキセノンフラッシュランプを用い、イメージコンバートカメラ (HADLAND PHOTONICS 社, IMACON 790, 最高2000万駒/秒, 最高流し速度 1n sec/mm) によるフレーミング写真の撮影で行った。

3. 数値計算

Fig. 1 (b) は数値計算に対する物理場を示している。矢印は爆ごう波の伝ば方向を表している。また爆薬と反射面間には最小距離 4mm を取った。数値計算は ALE 法⁽³⁾を用いて行った。この方法の特徴は、異なった媒質が存在しているような物理場も比較的容易に解析できるところにある。さらに陰解法が容易に適用でき、解の安定性の条件が陽解法に比べて大きく緩和され計算時間が短縮できるという利点もある。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て行った。SEP の爆ごう生成ガスの状態方程式としては JWL の状態方程式⁽⁴⁾を用い、水の状態方程式としては Mie-Gruneisen の状態方程式⁽⁵⁾を適用した。

4. 理 論

衝撃波の反射形態は、衝突時における入射衝撃波の速度 U_s と入射衝撃波の速度ベクトルと反射面とのなす角度 ϕ に依存している。本報ではマッハ反射の理論として Ray Shock 理論を用いる。マッハ反射はの速度ベクトルの関係を Fig. 2 (a) に示す。入射衝撃波が反射面に入射すると角度 ϕ に対し、速度が U_s か

ら反射面での速度 U_w に変化させるじょう乱が発生し、そのじょう乱が衝撃波上を伝ばしマッハステムを形成する。その場合、三重点 T は一点に集中して、マッハステムは直線 (図中 TR) である。図中の χ はこの三重点軌跡角を示している。三重点の速度 U_T と U_w, U_s の関係はよく知られている $U_w = U_T \cos(\chi)$, $U_s = U_T \cos(\chi + \phi)$ となる。また衝撃波静止座標で爆速 D と U_s の間には D と衝撃波面の接線を挟む角度 θ_s に対し、 $U_s = D \times \sin\theta_s$ が成り立つと仮定する。⁽⁴⁾ その場合同図に示すように速度 D と U_T に対し線分 ST の相対速度が生じる。これは三重点が線分 ST 移動する間に、三重点の入射衝撃波は線分 S'T 変化する非定常現象を意味する。一方、von Neumann 反射は Fig. 2 (b) に示すように、マッハステム (図中 TR) はわん曲し、マッハステム背後は非一様で三重点も一点に集中できなく反射衝撃波も弱い。図中の U_n はマッハステムの法線速度ベクトルを示しマッハ反射の速度 U_w より低い値となる。次に単一波に対する Ray Shock 理論式を示す。 U_w と ϕ の関係は次式となる。

$$\phi = \int_{M_s}^{M_w} \frac{dM}{AC_r}$$

$$M_s = \frac{U_s}{C_0}, \quad M_w = \frac{U_w}{C_0}$$

Fig. 2 (a) の幾何学性から次式を得る。

$$\phi = 90 - (\theta + \theta_s)$$

ray に関する距離の変化の割合 AC_r は次式となる。

$$AC_r = \sqrt{\frac{-M}{\frac{1}{A} \frac{dA}{dM}}}$$

$$\frac{1}{A} \frac{dA}{dM} = \frac{C + U_p}{CU_p} \left\{ \frac{C_0}{S} + \frac{\rho_0 C_0^2}{\rho CS} (2M - 1) \right\}$$

$$\tan m = \frac{AC_r}{Mw}$$

$$\tan\chi = \frac{1}{\tan\phi} \frac{Ms}{M_w \sin\phi}$$

U_s と U_p に経験的な線形関係を用いる。

$$U_s = C_0 + S U_p$$

C は次式であたえられる。

$$C = C_0(1-\eta) \frac{\sqrt{\{1+S\eta(1-\Gamma_0\eta)\}}}{(1-S\eta)^{1.5}}$$

$$\eta = 1 - \frac{\rho_0}{\rho}, \quad \rho = \frac{\rho_0 SM}{(S-1)M+1}$$

ここに、 C : 音速、 S : 媒質による定数、 U_p : 衝撃波背後の流体粒子速度、 ρ : 密度、 Γ_0 : Grüneisen 定数である。

Table 1 Constants of Grüneisen and shock adiabat.⁽⁶⁾

material	C_0 (m/s)	S	Γ_0
water	1489	1.786	1.65

次に Whitham の shock-shock の関係式による χ の式を示す。

$$\tan\phi = \frac{\frac{Mw}{Ms} \left[\left\{ 1 - \left(\frac{Ms}{Mw} \right)^2 \right\} \left\{ 1 - \left(\frac{Aw}{A_0} \right)^2 \right\} \right]^{1/2}}{\left(1 + \frac{Aw}{A_0} \frac{Mw}{Ms} \right)}$$

$$\tan\chi = \frac{Aw}{A_0} \left\{ \frac{1 - \left(\frac{Ms}{Mw} \right)^2}{1 - \left(\frac{Aw}{A_0} \right)^2} \right\}^{1/2}$$

$$Aw = A_0 \exp \left[- \int \frac{M_w}{M_s} \frac{C + U_p}{C U_p} \left\{ \frac{C_0}{S} + \frac{\rho_0 C_0^2}{\rho C S} (2M - 1) \right\} dM \right]$$

上式の Aw と A_0 は ray の面積である。Ray Shock 理論の適用を次に述べる。任意の時間でのマッハステムの位置は、実験結果から得られ、またその時間での入射衝撃波の形状は、水中衝撃波が爆ごう方向に爆速で移動することが知られているので⁽⁴⁾得ることができる。したがって、マッハステムを直線と仮定した場合の U_s と ϕ が得られ Ray Shock 理論で Uw を求めることが出来る。この Uw と実験結果の速度を比較することにより、その反射形態が、マッハ反射か von Neumann 反射かを定性的に知ることが出来る。

5. 結果および考察

Fig. 3 に水中衝撃波の斜衝突の様子を実験によるフレーミング撮影写真と数値計算結果による等圧線図で示している。等圧線の密な部分が衝撃波に相当する。

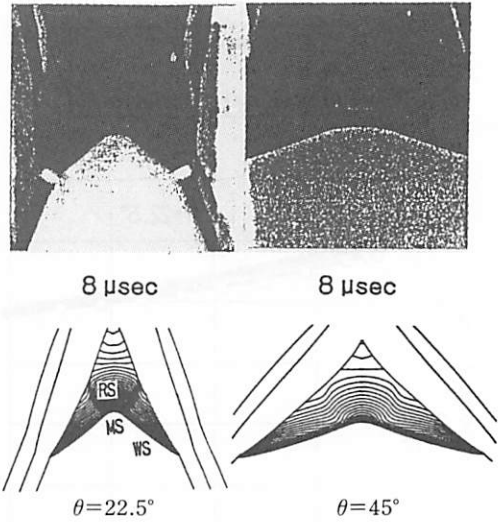


Fig. 3 An appearance of the collision on a reflected surface obtained by the framing photographs and the numerical calculation (isobar).

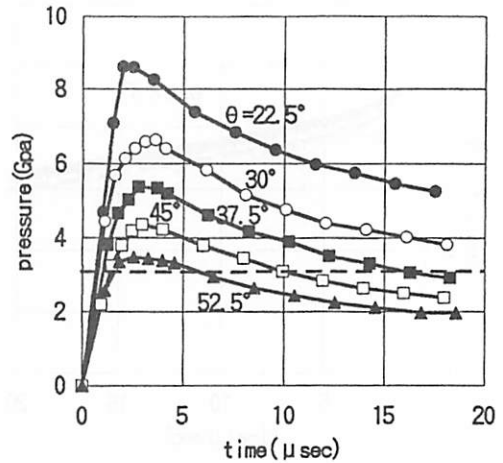


Fig. 4 Temporal change of pressure of Mach stem on a reflected surface obtained by the numerical calculation.

図中の WS は水中爆ごうによって発生した水中衝撃波を示す。また MS と RS は、この水中衝撃波が反射面で斜衝突することによって生じたマッハステムと反射衝撃を示している。同図から $\theta = 45^\circ$ は $\theta = 22.5^\circ$ に比較してマッハステムの曲率が小さく、また反射衝撃波も弱いことが安定的にわかる。次に Fig. 4 は、時

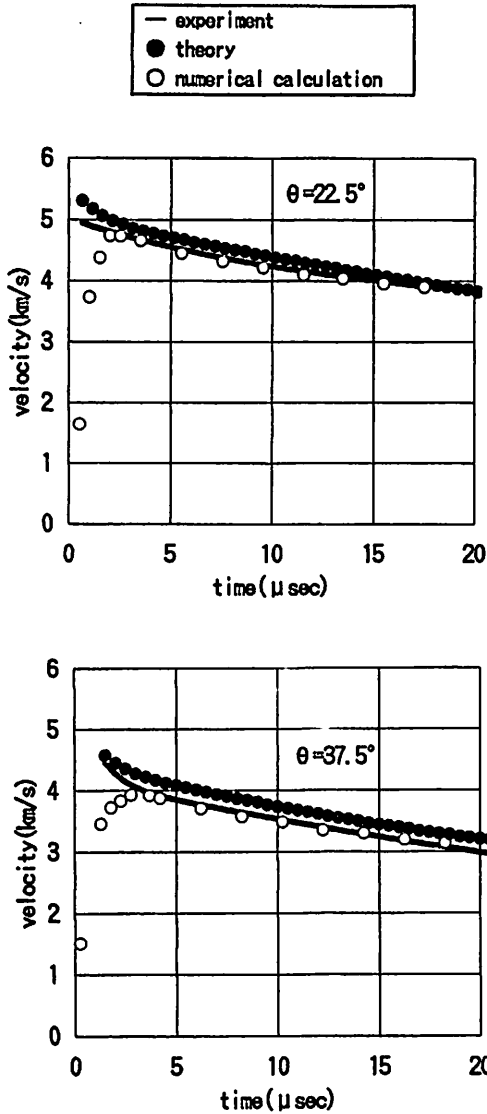


Fig. 5 A comparison of the velocity of Mach stem on a reflected surface obtained by the experimental results, the numerical calculation and the theoretical calculation.

間に対する反射面におけるマッハステムの圧力値を数値計算結果で示している。図中の破線は、実験により得られた水中衝撃波形状から算出される入射衝撃波強さを示し約 3.1 (Gpa) である。 θ が大きいほど圧力の最大値は低いことがわかる。これは θ が大きい場合、水中衝撃波が反射面に入射する際に Fig. 2 に示し

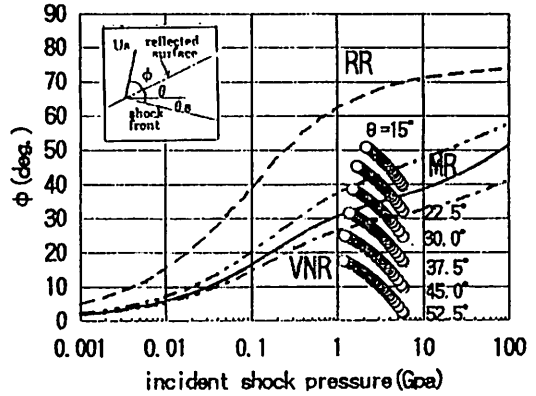


Fig. 6 Domains of shock reflection patterns.

た ϕ は小さくなり、反射面から生じる攪乱は弱く von Neumann 反射が生じるものと思われる。またマッハステムの強さは、時間の経過とともに減衰することがわかる。そして、 θ が小さい程大きく減衰している。次に Fig. 5 は時間に対する反射面でのマッハステムの速度を示している。実線が実験結果、シンボル記号○印が数値計算結果である。実験は Fig. 1 (a) に示される装置の中心線にスリットをきり、ストリーク撮影した写真から得られた点を non linear curve fitting 法⁽⁷⁾により近似した曲線である。またシンボル記号●印は実験結果をもとに前述の Ray shock 理論式を用いて算出した結果である。同図から $\theta = 22.5^\circ$ では、Ray Shock 理論による結果と実験値は比較的一致し、マッハ反射であると言える。一方 $\theta = 37.5^\circ$ では、実験結果のマッハステム速度は Ray Shock 理論値よりも低く、反射形態は von Neumann 反射であると思われる。

次に Fig. 6 は衝撃波の反射形態を示している。横軸は入射衝撃波の圧力 (Gpa) で縦軸 ϕ は入射衝撃波面に垂直な向きと反射面とのなす角度である。図中の一点鎖線は文献(1)と同様に音波を仮定した反射波とマッハステムの交点の軌跡角が Whitham の shock-shock 関係を用いて算出した三重点軌跡角に等しいとした場合の Mach 反射 (MR) と von Neumann 反射 (VNR) の遷移基準である。実線は同様に Whitham の単一波の関係を三重点軌跡角に用いた Mach 反射と von Neumann 反射の遷移基準を示している。同じく二点鎖線は Mach 反射と正常反射 (RR) の遷移基準を表している。破線は Krehl⁽⁸⁾による Mach 反射と正常反射の遷移基準である。また○印は本報の実験値を示し

ている。同図と前図から ray shock 理論が Mach 反射と von Neumann 反射の遷移を予測することがわかる。

6. 結 言

高性能爆薬の水中爆ごうによって発生した水中衝撃波が反射面に入射して生じる von Neumann 反射現象に対し実験、数値計算および Ray Shock 理論計算により次のことがわかった。爆ごう波伝播方向に対し反射面の傾斜角度 θ が大きい場合、水中衝撃波が大きな入射角で反射面に入射するため、マッハステムは弱く von Neumann 反射が生じ、その強さは伝播過程で減衰する。ray shock 理論は実験で得られた Mach 反射と von Neumann 反射の遷移を予測する。なお、実験は熊本大学工学部附属衝撃エネルギー実験所で行われた。実験に際し実験所の石谷氏に負うところが大きい。ここに謝意を表します。

文 献

- (1) A. Sasoh, K. Takayama, J. Fluid Mech, vol. 277, (1994), 331
- (2) P. Collera, L.F. Henderson, J. Fluid Mech, vol. 213, (1990), 71
- (3) Amsden, A.A., Ruppel, H.M. and Hirt, C.W., LA-8095, UC-32 (1980)
- (4) 伊東・久保田・吉良・長野・藤田, 火薬学会誌, 55-5 (1994), 202
- (5) C.L. Mader; "LASL Shock Hugoniot Data", University of California Press, (1980)
- (6) 高橋・村田・加藤, 工業火薬, 54-4, (1993), 190
- (7) "Data resuction and Error analysis", Least-Squares fit to an arbitrary function, 204-242
- (8) P. Krehl, U. Hornemann and W. Heiling, Shock Tube and Shock Wave Research, (1977), 303