

金属被覆導爆線により発生した水中衝撃波の可視化： 水中衝撃波の反射に関する研究

永易伸生*，小野寺収**，高山和喜**，橋詰隆亜*

金属被覆導爆線(MDF)の爆発で発生する水中衝撃波の挙動を光学可視化法により調べた。MDFの爆発は円錐水中衝撃波を駆動し、そのマッハ数は1.14であった。応用として、同じ長さのMDFを交差させ、その結果あらわれる二つの水中衝撃波の正常反射からマッハ反射への遷移臨界角度を実験的に求めた。その結果、 $M_s=1.14$ の水中衝撃波の遷移臨界角度 $\theta_w=30^\circ$ を得た。

1. 緒言

強い衝撃波は、気体中での爆発や衝撃波管を利用し容易に発生出来ることはよく知られている。しかし、液体中で乱れない衝撃波を発生させることは、衝撃波管を利用しても容易ではない¹⁾。なぜなら衝撃波管に液体を封入して強い衝撃波を駆動させるときには金属管中を先行する応力波が液中にあらわれ、液体中の衝撃波はその影響を受けて現象は単純ではなくなる。

一方、微小爆薬の爆発は、伝播にともない減衰するが、非常に限局された範囲では十分に強い衝撃波を発生するので有効である。高山ら²⁾は衝撃波発生源として水中微小爆発をもちいその有効性を論じている。その結果、微小火薬類を用いて、簡便に実験室規模で良い精度でさまざまな水中衝撃波の実験が行われるようになった^{3~7)}。

本報は、水中衝撃波の発生源に金属被覆導爆線(MDF; Mild Detonating Fuse)を使用する。MDFは爆薬を芯薬とし金属で被覆したものである。MDFの爆発で駆動された水中衝撃波の形状は円錐形で、二重露光ホログラフィ干渉計法を用いれば容易に定量的に可視化出来る。気体中ばかりでなく水中でも衝撃波の反射は正常反射と非正常反射に大別され、非正常反射はマッハ反射とフォン・ノイマン反射に大別される。円

錐衝撃波が金属壁で斜めに反射する場合、その反射の形態は正常反射かマッハ反射となるが、実際には、金属壁を伝わる応力波は斜め衝撃波より速く伝播するので、水中衝撃波に先行し、再び水中に波面を作り、水中衝撃波はその影響を受ける。従って、水中衝撃波の反射の研究では二つの同じ強さの衝撃波を反射させる以外に精密な実験法はない。そこで、2本のMDFの爆発で発生した二つの円錐衝撃波を相互にある角度で交わるように配置すれば、精度良く水中衝撃波の反射の研究が可能になる。その交わり角度を変えてその二つの衝撃波の反射を観察すれば、容易に水中衝撃波の正常反射からマッハ反射へ遷移する角度を知ることが出来、ここでは、その結果を報告する。

2. 実験

2.1 実験装置

Fig. 1に実験装置の概略を示す。実験は常温、大気圧、水道水で満たされたステンレス製の試験水槽(500mm×500mm×500mm)内で行う。試験水槽には、観測用の外径400mm、厚さ20mmの亚克力製の観測窓が二つある。爆発に伴う衝撃波が金属壁で繰り返し反射し、不快な金属音が発生した。これを防ぐために、試験水槽の内壁を厚さ60mmのポリウレタン製の発泡材で覆った。発泡材は、衝撃波の多重の反射を抑制し静かな実験を行うのに有効であった。

MDF(Ensign-Bichford Co.)は爆薬(ヘキサニトロスチルベン; HNS)を芯薬とし、厚さ約1.2mmの金属(アルミニウム; Al)で被覆したもので、その外径、填薬密度および爆速はそれぞれ2.0mm, 0.55g/m, 6.8km/sである。MDFの一端にアジ化銀ペレット10mg(中国化薬(株))を接着し、その爆発でMDFを起爆する。アジ化銀ペレットの直径、高さ、密度はそれぞ

1998年 月 日受理

*中国化薬株式会社

〒737-2121 広島県安芸郡江田島町小用5-1-1

TEL 0823-44-1244

FAX 0823-44-1312

**東北大学流体科学研究所附属衝撃波研究センター

〒980-8577 宮城県仙台市青葉区片平2-1-1

TEL 022-217-5285

FAX 022-217-5324

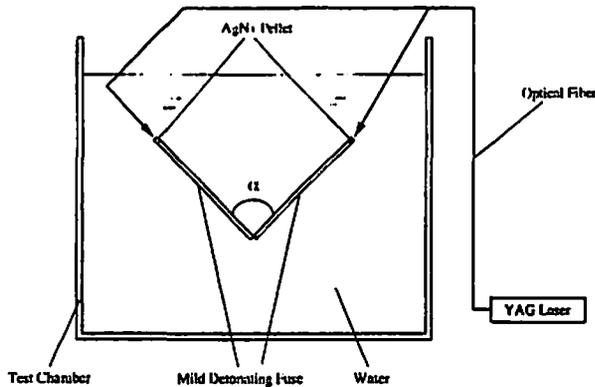


Fig. 1 Experimental set up

れ1.5mm, 1.5mm, 3.8g/cm³である。ペレットをコア径0.4mmのグラスファイバ(フジクラ(株))に酢酸セルロース・アセトン溶液で接着し、YAGレーザー光(Apollo Laser Inc.; パルス幅7ns, エネルギー25mJ)を照射するとペレットはnsオーダーの時間遅れで起爆し、ほとんど起爆遅れ時間はない。起爆にはレーザーの全エネルギーの約十分の一程度が使われたと推定される。アジ化銀ペレットの爆速は5.05km/s⁸⁾で、円錐衝撃波に影響をあたえない。高山ら²⁾はアジ化銀ペレットの爆轟特性を詳細に報告している。

Fig. 1のように、2本の長さ80mmのMDFの端を互いに密着させ、もう一方の両端にアジ化銀ペレットをとりつけて同時起爆した。MDFの交わり角度 α を様々変化させ反射衝撃波の形状を観察した。

2.2 光学可視化

Fig. 2に、可視化に用いたホログラフィ干渉計の光学系⁹⁾を示す。この光学系は影写真法に類似しているが定量測定が可能である。二重露光ホログラフィ干渉計では、二回の露光間に位相変化した部分の情報が干渉縞となって現れる。第一回目の露光は現象に先立って、第二回目の露光は現象と同期して行われる。光源

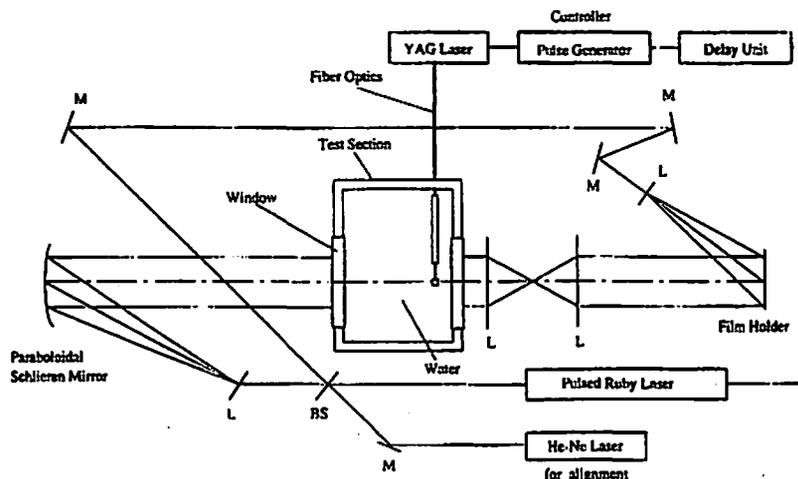


Fig. 2 Optical arrangement of double exposure holographic interferometry

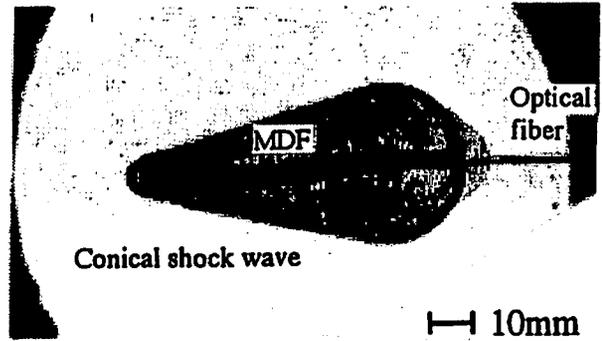


Fig. 3 Shock wave generated by MDF explosion. A 50mm long MDF was ignited in water.

はパルス・ルビー・レーザー(アポロレーザー社22HD, 最大出力: 2J/パルス, パルス幅25ns)である。レーザーを発振するトリガ信号をパルス遅延回路を用いて制御し、MDFの点火とパルス・ルビー・レーザーの照射の時間間隔を任意に調整した。

3. 結果および考察

Fig. 3に、水中で長さ50mmのMDFの爆発で発生した円錐衝撃波のホログラフィ干渉計写真を示す。MDFの爆発生成気体、駆動される円錐衝撃波がよくわかる。水中衝撃波は、速度 U_w で波面の法線方向に伝播する。MDFの爆轟速度 U_d は、予備実験により水中で6.8km/sと知られている。したがって、写真に認められる円錐衝撃波の半頂角 θ は次の式であらわされる。

$$\sin \theta = U_w / U_d \quad (1)$$

Fig. 3から、 θ は14.5°である。式(1)から $U_w = 1.7$ km/sで、水中で音速は1.5km/sなので、この衝撃波のマッハ数は $M_s = 1.14$ となる。円錐衝撃波面はほぼ直線と見なせるから、MDFの爆発で発生する衝撃波はこの観察時間内(起爆後4 μ s~15 μ s)では、衝撃波の伝播

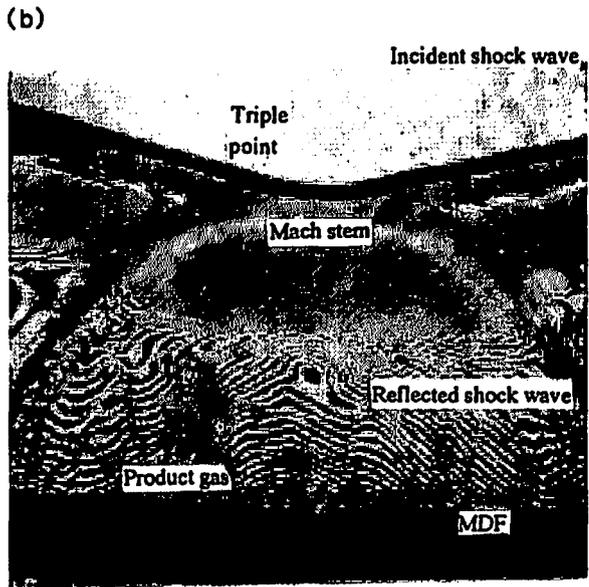
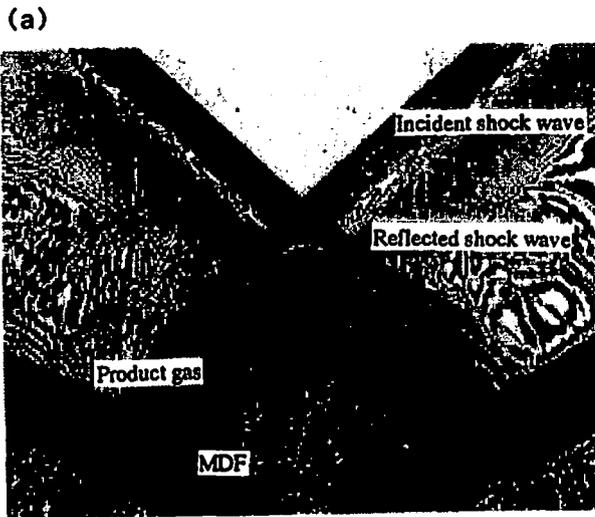


Fig. 4 Interaction of two conical underwater shock waves. The length of MDF is 80 mm. The shock wave Mach number, M_s is 1.14.
 (a) The incident angle, $\theta_i = 48^\circ$
 (b) The incident angle, $\theta_i = 76^\circ$

に伴って減衰しないと考えられる。伊東ら¹⁰⁾は水中で、円筒状に成型した可塑性爆薬SEP(ペンスリット65%, パラフィン35%, 旭化成工業(株)製)の爆発で発生した円錐衝撃波の局所的な傾き角度を測定した。衝撃波はSEPの爆発生成気体の膨張により駆動されるため、衝撃波速度は、その初期膨張の段階で最も速くなり、そしてSEPとの接触点から衝撃波面の距離が離れたとともに急速に減衰し、SEPから十分距離が離れた点でほぼ一定速度になると報告している。

次に、有限角度で互いに交わる2本の長さ80mmの

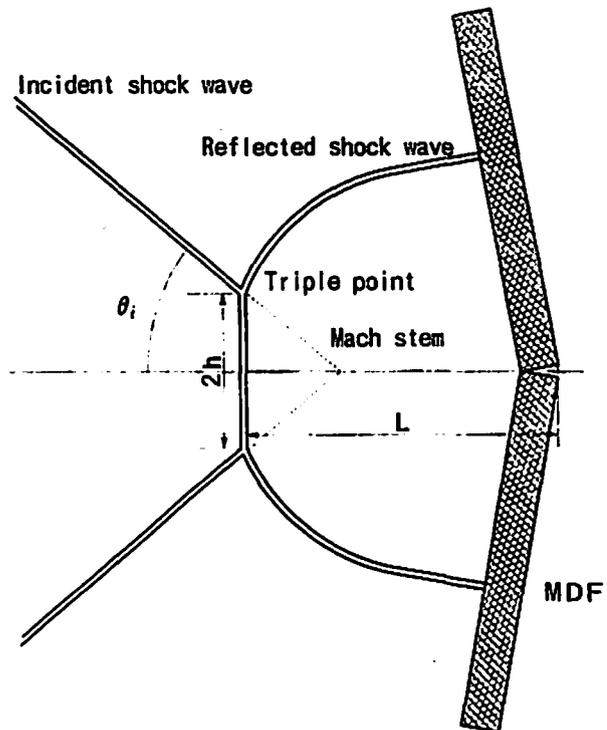


Fig. 5 Illustrating of the symmetrical configuration of the underwater shock waves

MDFを同時起爆し、その時あらわれる衝撃波をホログラフィ干渉計法で可視化した。MDFの交わり角 α に依存して、発生する二つの円錐水中衝撃波が交わる角度 $2\theta_i$ も変化し、ある交わり角 α に対して円錐衝撃波の反射は正常反射かマッハ反射になる。

Fig. 4(a)に、 $2\theta_i = \text{約}96^\circ$ で交わる二つの円錐衝撃波のホログラフィ干渉計写真を示す。これは静止媒体中を左から右へ伝播する入射衝撃波が、伝播方向に対し一定の角度 $\theta_w = 42^\circ$ だけ傾いた理想的な直線壁で反射する場合に相当する。ここで、 $\theta_w = 90^\circ - \theta_i$ である。この衝撃波の反射形態は、典型的な正常反射である。入射衝撃波のマッハ数と理想的な壁の傾き角度 θ_w が小さい場合にマッハ反射が生じる。Fig. 4(b)に、 $2\theta_i = \text{約}152^\circ$ で交わる二つの円錐衝撃波を示す。すなわち、壁の傾き角度は $\theta_w = 14^\circ$ で、衝撃波の反射形態はマッハ反射である。入射衝撃波は、3重点で湾曲した反射衝撃波およびマッハステムと合流する。マッハステムの形状は単純なマッハ反射¹¹⁾とは異なり直線でない。すなわち、この反射の形態はいわゆる気体中でのフォン・ノイマン反射に相当する。

Fig. 5にFig. 4(b)のスケッチを示す。二つの円錐衝撃波の交わり角度とマッハステムの高さをそれぞれ $2\theta_i$ および $2h$ とする。ここに、 L はマッハステムと2本のMDFの交点との距離を示す。2本のMDFの交わり角度 α の増加とともにマッハ反射があらわれ、 h が最初出現する θ_i の値は正常反射からマッハ反射への遷

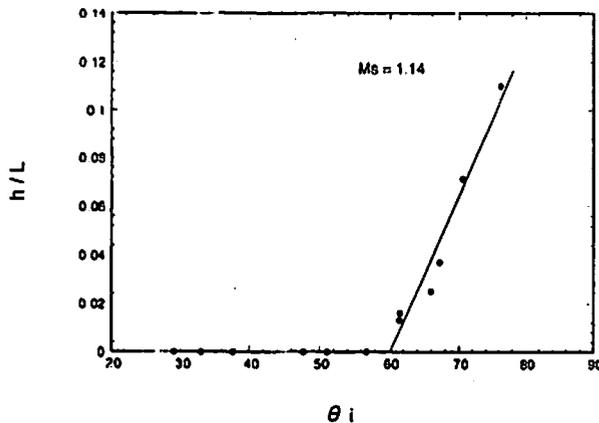


Fig. 6 Relation between the measured dimensionless mach stem length and the incident angle of the underwater shock wave. The straight line is least-squares fits to the experimental points.

移臨界角度と定義される。Fig. 6に、一連のホログラフィ干渉計写真から測定した無次元マッハステム高さ h/L と θ_i との関係を示す。したがって、 θ_i が 60° より小さい場合、正常反射が現れマッハステム高さ $h=0$ に対応する。マッハ反射は $\theta_i = \text{約}60^\circ$ であらわれ始める。すなわち、 $M_s=1.14$ の水中衝撃波の遷移臨界角度は $\theta_w=30^\circ$ となる。

4. 結論

得られた結果を以下に要約する。

- (1) ホログラフィ干渉計法を用い、1本のMDFの爆発で発生する水中衝撃波を可視化した。ホログラフィ干渉計写真から、衝撃波の傾き角を求めそのマッハ数を推定し、 $M_s=1.14$ を得た。
- (2) 2本のMDFを同時起爆したとき、生じる二つの衝撃波の反射形態はMDFの交わり角度に依存し、このような小規模爆発でも水中衝撃波のマッハ反射の発生を確認出来た。
- (3) 二つの入射衝撃波の交わる角度を増加させると、マッハ反射が入射衝撃波角 $\theta_i=60^\circ$ であらわれ、

$M_s=1.14$ の水中衝撃波の正常反射からマッハ反射への遷移臨界角度は $\theta_w=30^\circ$ となった。今後は、衝撃波極線を用いた解析を行い、この実験結果と比較する。

謝 辞

本研究は中国化薬(株)、程野修二氏、坂田直己氏および東北大学・流体科学研究所・衝撃波研究センター、小島英則氏、小川俊広氏の助力を受けた。ここに付記し、それぞれ謝意を表する。

文 献

- 1) W. Tepper, In: R. D. Archer and B. E. Milton, eds., "Proc. 14th Int. Symp. Shock Tubes and Shock Waves", New South Wales, Australia, p. 397(1983)
- 2) K. Takayama, H. Esashi, S. Sanada, In: R.D. Archer and B.E. Milton, eds., "Proc. 14th Int. Symp. Shock Tubes and Shock Waves", New South Wales, Australia, p. 553(1983)
- 3) 高山和喜, 小野寺収, 小原哲郎, 桑原正明, 北山修, 日本機械学会論文集, B57, 2285(1991)
- 4) K. Takayama, Jpn. Appl. Phys. 32, 2192(1993)
- 5) 小玉哲也, 永易伸生, 高山和喜, 吉田昌弘, 火薬学会誌, 56(5), 195(1995)
- 6) 小玉哲也, 永易伸生, 高山和喜, 火薬学会誌, 56(5), 201(1995)
- 7) 永易伸生, 小玉哲也, 高山和喜, 上之原広司, 火薬学会誌, 57(6), 263(1996)
- 8) 田中克己, 「爆薬の爆轟特性解析」, 化学技術研究所, p. 278(1983)
- 9) K. Takayama, "Proc. of SPIE Int. Soc. Optical Engineering", Geneva, Switzerland, p. 174(1983)
- 10) 伊東繁, 久保田士郎, 吉良章夫, 長野司郎, 藤田晶大, 火薬学会誌, 55(5), 202(1994)
- 11) G. Ben-Dor, "Shock wave reflection phenomena", Springer-Verlag, New York, USA(1991)

Holographic interferometric visualization of shock waves generated by mild detonating fuse : A study on reflection of underwater shock waves

by Nobuo NAGAYASU*, Osamu ONODERA**, Kazuyoshi TAKAYAMA**
and Takatsugu HASHIZUME*

The paper deals with the generation of underwater shock waves by means of the explosion of mild detonating fuses (MDF). The explosion of MDF could generate conical underwater shock waves whose Mach number was estimated approximately 1.14. As their application, in intersecting two conical shock waves with identical strength, the critical transition angle between regular reflection and Mach reflection of underwater shock wave was obtained. These underwater shock waves were successfully observed using double exposure holographic interferometry. The critical transition angle of underwater shock waves at $M_s = 1.14$ was found to be approximately $\theta_w = 30^\circ$.

(* Chugoku Kayaku Co., Ltd., 5-1-1 Koyou, Etajima-cho, Aki-gun, Hiroshima 737-2121, Japan

** Shock Wave Research Center, Institute of Fluid Science, Tohoku University, 2-1-1 Katahira, Aoba-ku, Sendai 980-8577, Japan)