

表面粗さのある斜面上における衝撃波の動的遷移現象

Dynamic Transition Phenomenon of a Shock Wave over a Wedge with Surface Roughness

○小林 晋 (埼玉大工), 足立 孝 (埼玉大工)

Susumu KOBAYASHI and Takashi ADACHI

Dept. of Mech. Eng., Saitama Institute of Technology, Okabe, Saitama 369-0293, Japan

Although it has long been believed that the shock reflection over a plane wedge is a self-similar phenomenon, the recent experimental and numerical investigations revealed that it is not the case. The fundamental cause of non-self-similarity lies in the transport properties of the medium that introduce some length scales into the system. In realistic situations, the surface roughness of wedge also brings in a length scale. In the present paper, we have investigated the effect of surface roughness on the dynamic transition, which occurs during shock propagation, and the transition wedge angle.

1. 結論

平面衝撃波が傾斜面上に入射して起きる斜め反射現象については、従来から多数の研究が行われており、そのテーマで専門書¹⁾も出版されているほどである。

この現象には様々なヴァリエーションがあるが、最も基本的で単純なのは、滑らかな平面斜面上における斜め反射現象である。連続体とみなした時の媒質を非粘性・非熱伝導性と仮定すると、系に特性長がないため、この現象はこれまで自己相似性の成り立つものと考えられ、その仮定のもとで議論が進められてきた。

ところが、最近になって自己相似性が成り立たない現象が観察され²⁻⁵⁾、自己相似性は必ずしも自明に成り立っているわけではないことがわかってきた。非自己相似性は2つの形で顕著に現れる。すなわち、(1)入射波と反射波のなす角を詳細に測定すると、入射波の伝播とともに変化する^{4,6)}、(2)いわゆる遷移臨界角近傍の斜面傾斜角において、正常反射からマッハ反射への動的遷移現象が起きる^{2,3,5)}。

Henderson et al.²⁾の数値実験によれば、媒質の粘性および熱伝導性は反射面における境界条件を介して最も強く影響を及ぼし、媒質に粘性・熱伝導性を仮定しても、境界条件が滑り条件・断熱条件である場合には、非粘性・非熱伝導性の場合と大差ない。すなわち、固体境界における境界条件が現象に決定的な役割を果たしていることになる。数値計算では反射面は滑らかと仮定しているが、現実には有限の粗さを持っているため、境界条件に表面粗さがどのように関わってくるのか、大いに関心のあるところである。

そこで本研究では、反射面に表面粗さを与えて遷移臨界角近傍の斜面傾斜角における反射の挙動を調べた。

2. 実験装置および実験方法

実験に使用した衝撃波管は、長さ 1200mm の高圧部、長さ 3900mm の低圧部 (65×30mm の矩形断面) から成り、観測部の両側には 62×94 mm の石英ガラス製の観測窓ガラスがはめ込まれている。入射衝撃波前方の状態は大気圧・室温である。

使用したモデルは斜面傾斜角 θ_w を 29° から 43° まで、ほぼ 1° 刻みで変化させた楔モデルで、表面粗さを与えるために、斜面上に耐水ペーパー (#240, #60) を貼った。Ben-Dor⁷⁾による基準によれば、いずれも流体力学的に粗い面ということになる。実験は入射衝撃波マッハ数 $M_i = 1.10, 1.20, 1.30, 1.40$ について行った。斜面傾斜角は観測部に設置した状態であらためて正確に測定した。例えば 29° のモデルは、観測部に設置し入射衝撃波を基準として測定したところ斜面傾斜角 $\theta_w = 29.317^\circ$ だった。

波面の可視化には2枚の凹面鏡を用いたZ型配置のシュリーレン光学系を用いたが、ナイフエッジを使用しないので、実質的には影写真法になっている。光源は閃光時間 180ns のキセノン・ランプ (菅原研究所, NPL-5) を使用した。

三重点の座標および波面のなす角度は、万能投影機 (ニコン, V-12) を用いてネガフィルムを 50 倍に拡大して測定を行い、精度の向上を図った。

Fig.1 に記号および座標系の定義を示す。i, r, m はそれぞれ入射波、反射波、マッハシステムで、その交点 T は三重点と呼ばれる。三重点からは温度、密度、流速の大きさの不連続面である滑り面 s が発生する。光学測定の際には、モデル右肩を原点 O_m とし斜面に沿った方向に x_m 軸、垂直方向に y_m をとった。測定した座標はモデルの先端を原点 O とした座標系 (ξ, η) に変換した。この時、座標の測定値から実際の長さへの変換も行った。

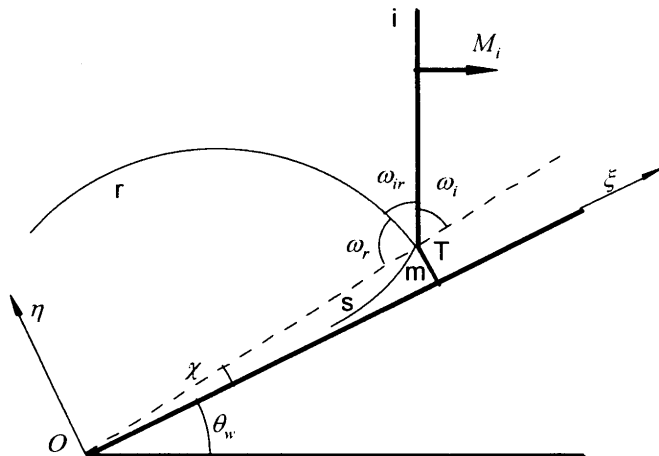


Fig.1 Symbols and definition of coordinates.

3. 実験結果

3. 1 可視化写真

Fig. 2 に $M_i = 1.30$, $\theta_w = 38^\circ$ の場合における可視化写真を示す。Fig. 2(a) は正常反射 (RR), Fig. 2(c) はマッハ反射 (MR) で、Fig. 2(b) はちょうど RR から MR への遷移が起きたと考えられる位置付近における波面形態である。波面に厚みがあるのでわかりづらいが、Fig. 2(a) では入射波および反射波の上流側の交点は斜面上にある。Fig. 2(b) では、それがやや浮き上がり、Fig. 2(c) になると明確なマッハシステムと滑り面が観測される。反射波後方の微細な波は表面粗さによる擾乱である。

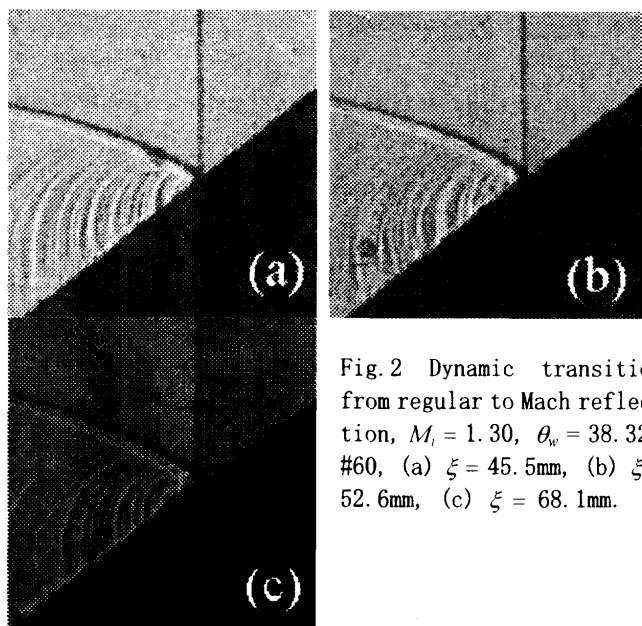


Fig.2 Dynamic transition from regular to Mach reflection, $M_i = 1.30$, $\theta_w = 38.32^\circ$, #60, (a) $\xi = 45.5\text{mm}$, (b) $\xi = 52.6\text{mm}$, (c) $\xi = 68.1\text{mm}$.

3.2 反射点および三重点の位置, 離陸距離

可視化写真から, RR の場合は反射点, MR の場合は三重点の座標を測定した. その結果を Fig. 3 に示した. 衝撃波が斜面上を伝播している間に遷移し, 遷移の起きる位置は斜面傾斜角が大きいほど後退している. なお, 反射点・三重点は入射波の下流側と反射波の上流側の交点として測定したため, 本来ならば斜面上にあるはずの反射点においても $\eta > 0$ となっていることを付記する.

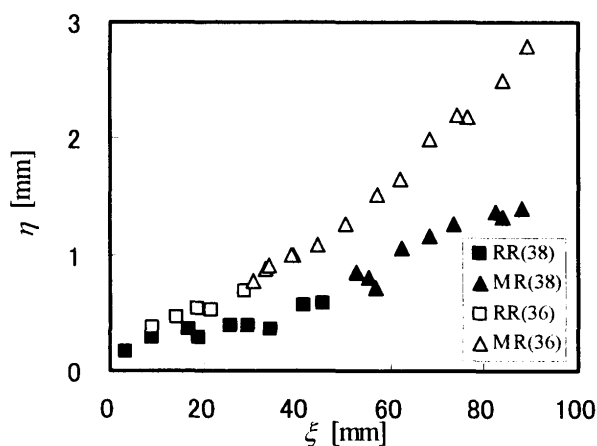


Fig.3 Location of reflection and triple points.

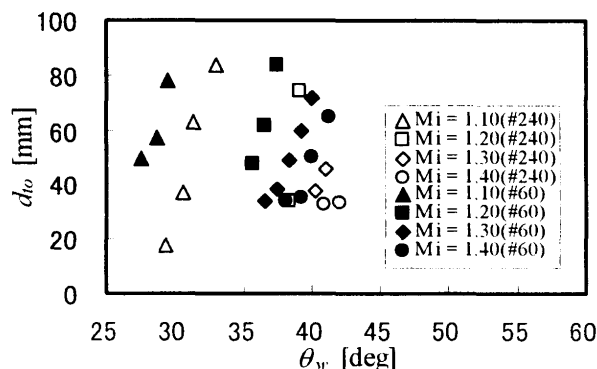


Fig.4 Take-off distance.

斜面先端から遷移の起きる位置までの距離を離陸距離と呼ぶことにして, d_o で表し, その斜面傾斜角および入射衝撃波マッハ数依存性について調べた. その結果は Fig. 5 にまとめられている. 同じマッハ数および斜面傾斜角で表面粗さによる

違いを比較すると, 粗さの大きい場合(#60)の方が粗さの小さい場合(#240)よりも離陸距離が大きいことがわかる.

3.3 遷移臨界角

動的遷移現象が起きる場合, 斜面傾斜角を増加させると, いずれは最後まで RR が保たれるようになる. 斜面傾斜角を約 1° ずつ増加させて, 初めて遷移が起きなかった傾斜角をもって遷移臨界角と定義した. 結果を Fig. 5 に示す. 実線は離脱基準と呼ばれる理論曲線, ○は滑らかな斜面における実験結果, □と▲はそれぞれ#240 および#60 の表面粗さにおける実験値である. ここで, モデルのサイズによって実験結果が異なる可能性があることに注意しなければならない.

粗さが大きいほど, 同じマッハ数に対する遷移臨界角は小さくなる. これは粗さによる, いわゆる遷移遅れ⁸⁾と呼ばれる現象である.

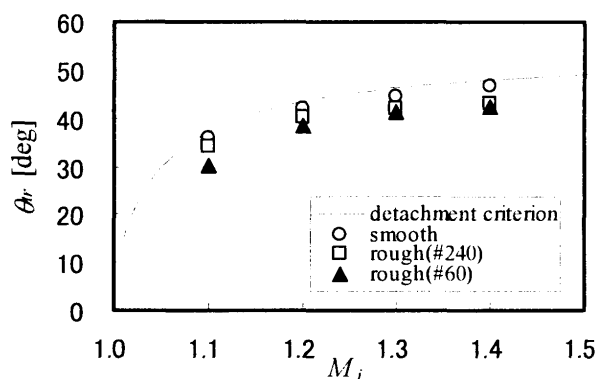


Fig.5 Transition wedge angle.

4. 結論

反射面に耐水ペーパーを貼った粗面モデルを用いて衝撃波の反射実験を行い, いわゆる離陸距離を測定し, 遷移臨界角を求めることができた. 表面粗さにより RR から MR への遷移臨界角が減少する遷移遅れが確認できた.

引用文献

- 1) Ben-Dor, G.: *Shock Wave Reflection Phenomena* (Springer, 1992).
- 2) Henderson, L. F., Crutchfield, W. Y. & Virgona, R. J.: The effect of thermal conductivity and viscosity of argon on shock waves diffracting over rigid ramps, *J. Fluid Mech.*, 331 (1997) 1-36.
- 3) Itabashi, S., Henderson, L. F., Crutchfield, W. Y. & Takayama, K.: Effects of viscous and thermal dissipation on the eruption of Mach reflection on rigid steel ramps, *Proc. Int. Symp. on Shock Waves*, 21 (1997) 887-891.
- 4) Kobayashi, S., Adachi, T., Satoh, M. & Suzuki, T.: On the formation mechanism of von Neumann reflection, *Proc. Int. Symp. on Shock Waves*, 21 (1997) 881-885.
- 5) 小林, 足立: 衝撃波の反射の遷移現象における非定常性, *ながれ*, 18 (1999) 387-390.
- 6) Kobayashi, S., Debatin, K., Oertel Jr., H. & Adachi, T.: Non-selfsimilar nature of Mach reflection over a flat smooth surface, *Proc. Int. Symp. on Shock Waves*, 23 (2001) 1262-1267.
- 7) Ben-Dor, G., Mazon, G., Takayama, K. & Igra, O.: Influence of surface roughness on the transition from regular to Mach reflection in pseudo-steady flows, *J. Fluid Mech.*, 176 (1987) 333-356.
- 8) 高山, 小野寺, 後藤: 粗面を有するくさび及び曲面を過ぎる衝撃波の反射, *東北大学速研報告*, 48 (1982) 1-21.