A 2 4 2 斜め衝撃波の動的遷移現象における表面粗さの影響

小林 晋[○] (埼玉工業大学), 足立 孝 (埼玉工業大学)

The Effect of Surface Roughness on the Dynamic Transition Phenomena of Oblique Shock Reflection

Susumu KOBAYASHI and Takashi ADACHI
Saitama Institute of Technology

ABSTRACT

Recently, Mach reflection, which has long been considered to be a self-similar phenomenon, turned out to exhibit non-self-similar characteristics by a series of detailed experiments with optical visualization technique. On the other hand, it is inferred by a numerical experiment, that the effect of transport properties (viscosity and thermal conductivity) on the solid boundary is the physical cause for such a non-self-similar and thus unsteady phenomenon. Usually, the solid boundary has surface roughness to some extent. In the present paper, we have investigated the effect of surface roughness on the dynamic transition, which occurs during shock propagation, and the behavior of wave angles.

Keywords: Shock waves, Dynamic transition phenomena, Surface roughness

1. はじめに

平面衝撃波のマッハ反射はこれまで長らく自己相似性の成り立つ現象と考えられ、それに基づいて理論も構築されてきた。すなわち、反射ウェッジ先端を原点として (x, y) 座標系を取り、入射衝撃波が原点を通過した瞬間を時刻 $t = 0$ としたとき、入射衝撃波の伝播速度 U は一定であるから、現象の2次元性が保たれる状況下では、 $t > 0$ における流れの物理量が x/t および y/t の関数と見なすことができるというのが自己相似性である。

Fig. 1 Self-similarity

入射衝撃波が伝播することからもわかるように、現実

の流れ場は非定常であるが、流れ場を $(x/t, y/t)$ 系に変換すると、時間 t に依存しないことになる。このことは、三重点 T 近傍の流れ場があたかも定常であるかのように取り扱うことができることを意味する（これを擬定常と称している）。このようにして構築されたのが、マッハ反射におけるノイマンの三衝撃波理論であった。自己相似性が成り立てば波面のなす角度（入射角 ω_i 、反射角 ω_r 、入射波と反射波のなす角 ω_{ir} ）は一定で、三重点は斜面に対して一定の角度 χ をなす直線上を運動する。もちろん、現実の流体は粘性および熱伝導性を持ち、そのために系に特性長さが導入されることから、厳密には自己相似性は成り立たないはずである。ところが、実験してみると確かに三重点はウェッジ先端を通る直線上を運動することが確かめられ（Fig. 1 参照）、衝撃波の斜め反射現象に関する限り、自己相似性は近似的に成り立つという認識が共有されてきた。

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報告されるようになった¹⁻³⁾。すなわち、平面衝撃波が傾斜面に入射すると、初めは正常反射(RR)の形態を取るが、やがてマッハ反射(MR)へ遷移する現象が見出されたのである。このような動的遷移現象とでも称すべき現象は、すでに Walenta⁴⁾や Dewey and van Netten⁵⁾による実験報告があったが、いずれも低圧下におけるもので、あくまでも特殊な条件下における特殊な現象であり、一般的に起きる現象とは考えられていなかった。ところが、入射衝撃波前方が常温常圧という条件においても、

明らかに非自己相似的な挙動をすることが著者らによって観測されたのである^{2,3)}。ただし、RRからMRへの遷移が起きただけであれば、MRへ遷移した後の挙動は自己相似的である可能性もあるので注意が必要である。これについては後述するが、自己相似か非自己相似かは、波面のなす角度を測定しなければ判断できない。

著者らは最初、ノイマン反射と呼ばれる反射形態について測定したところ、三重点の位置は近似的に斜面先端を通る直線であるにもかかわらず、波面のなす角度は伝播とともに変化していることを見出した²⁾。これはノイマン反射に限らず、マッハ反射一般に見られる現象であることを後に確かめ、さらに斜面上および滑り面上における粘性効果の影響を取り込むことによって現象を説明することができた⁶⁾。他方、非定常性の顕著な例として、いわゆる遷移臨界角近傍の斜面傾斜角に対しては、前述の動的遷移現象がある³⁾。Henderson et al.¹⁾の数値実験も、奇妙なことに波面のなす角度の変化にはまったく注意を払わず、むしろ動的遷移現象に関心があるようである。彼らの結果によれば、このような非定常性には固体境界におけるすべりなし条件および等温条件による拘束が重要な役割を演じているという。固体境界上の条件としては表面粗さの影響も考えられるので、本研究では表面粗さがどの程度非定常性に影響を与えるか調べた。特に、遷移臨界角近傍における斜面傾斜角に対して実験を行い、マッハ数に対する依存性などを検討した。

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 の光学観測用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。

反射形態の可視化にはZ型のシュリーレン光学系を採用し、閃光時間 180ns のキセノン光源(菅原研究所, NPL-5)を使用した。ただし、ナイフエッジは設けなかったため、得られた像は影写真である。三重点の座標測定には、万能投影機(ニコン, V-12)を用いてネガフィルムを 50 倍に拡大して精度の向上を図った。

観測部前方に 2 箇所、約 300mm 間隔で圧力ゲージが設置され、両者からの出力波形の立ち上がり時間差から入射衝撃波伝播速度 U_s を測定した。室内の照明を落とし、カメラのシャッターを開放にした後に、衝撃波管の破膜装置を作動させた。発生した圧縮波は、観測部に向かって進行するうちに衝撃波となる。観測部に近い圧力ゲージからの信号をトリガーとして、遅延装置を介して発光装置を作動させた。遅延時間を設定することにより、所要の位置における反射形態を撮影することができる。

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)を貼った。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。

Fig. 2 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. 2 Nomenclature and Definition of Coordinate

3. 実験結果

3.1 可視化写真

Fig. 3 は可視化した反射形態の一例である($M_i = 1.40$, $\theta_w = 40.917^\circ$)。Fig. 3(a)においては正常反射と判断されるが、Fig. 3(b)では滑り面をともなったマッハ反射になっている。このことは反射点あるいは三重点近傍を拡大した Fig. 4 を見ればはっきりする。反射面から表面粗さによる弱い波が出ていることもわかる。

3.2 反射点および三重点の位置

得られた可視化写真から、正常反射(RR)の場合は反射点、マッハ反射(MR)の場合は三重点の位置を計測し、その結果を整理したのが Fig. 5 である。Fig. 5(a)は $M_i = 1.20$ の場合で、横軸は斜面先端を原点として斜面方向に取った座標 ξ 、縦軸はそれに垂直方向の座標 η である。反射点および三重点の位置は入射波の高圧(下流)側と反射波の低圧(上流)側の交点として定義したことで、波面が有限な厚みを持つことから、たとえ正常反射であっても $\eta > 0$ となることを注意しておく。図中の凡例で ( ) 内の数値は斜面傾斜角に対応している。例えば、39°モデルの場合、RR から MR への遷移はおよそ $46 < \xi < 57$ で起きていることになる。斜面傾斜角が増えると、遷移位置がモデル後方に移る傾向を示している。このことは

$M_i = 1.30$ の Fig. 5(b)についても言える。

Fig. 3 Visualized Wave Configuration (a) regular reflection ($\xi = 25.75\text{mm}$), (b) Mach reflection ($\xi = 39.85\text{mm}$); $M_i = 1.40$, $\theta_w = 40.917^\circ$

Fig. 4 Corresponding Enlarged Wave Configurations around the Reflection and Triple Points

3.3 離陸距離

RR から MR への遷移が観測されれば、遷移が起きる位置を或る範囲でとらえることができる。実験では入射衝撃波マッハ数が ± 0.005 の範囲でばらつき、それによる誤差が含まれる。反射点と三重点の挙動を航空機が離陸する様子にたとえて、モデル先端から遷移位置までの距離を離陸距離(take-off distance)と呼び、 d_{to} で表す(Fig. 6)。 d_{to} は斜面傾斜角 θ_w と入射衝撃波マッハ数 M_i の関数 $d_{to}(\theta_w, M_i)$ であると考えられる。前節の結果からもわかるように、 d_{to} は θ_w とともに単調に増加する。

Fig. 7 に入射衝撃波マッハ数をパラメータとして、斜面傾斜角に対する離陸距離の変化を示す。図中の一点鎖線は対応するモデルの斜面長さ L を表す。観測部の制約から、斜面傾斜角に対するモデル斜面長さ L はおのずと限界がある。一般に傾斜角が大きいと斜面長さは大きく

取りにくくなる。 $M_i = 1.10$ に対しては4つのデータが得られたが、それ以外のマッハ数に対してはそれぞれ2つのデータしか得られなかったのは、このような実験上の制約も関与している。Henderson et al.¹⁾によれば、離陸距離は遷移臨界角付近で急速に増加するので、 $M_i = 1.10$ 以外の場合は容易に L を越えて観測できなくなったものと考えられる。

Fig. 5 Location of Reflection and Triple Points (a) $M_i = 1.20$, (b) $M_i = 1.30$

Fig. 6 Definition of Take-off Distance

3.4 遷移前後の入射波と反射波のなす角 ω_r の変化

緒言で触れたが、マッハ反射の非自己相似性に言及す

る研究者はいても、波面のなす角度の変化についてまで言及する研究者は少ない。繰り返しになるが、非自己相似性を言う場合、波面のなす角度が変化することが必要充分であって、三重点の軌跡がモデル先端を通らないということは必ずしも非自己相似性を意味するものではないことを強調しておく。すなわち、たとえ三重点の軌跡がモデル先端を通らなくても、マッハ反射に遷移してからの軌跡が直線であれば、その軌跡と斜面との交点を新しい原点とすれば自己相似性が成り立っている可能性もあるのである。

Fig. 8に入射波と反射波が三重点においてなす角 ω_r の変化を示す($M_i = 1.30$)。入射角 ω_i 、反射角 ω_r は三重点の軌跡に依存するが、 ω_r は三重点の挙動に依存しないので、評価が容易であるという利点がある。 $M_i = 1.30$ の場合、RRからMRへの遷移の前後では特に大きな変化はなく、全体としてなだらかに減少している。しかし、 $M_i = 1.20$ では遷移前後で新しい波が発生して不連続的に減少する場合も認められ、一概に結論は出せない。

Fig. 7 Take-off Distance vs. Wedge Angle

Fig. 8 Variation of the Angle between Incident and Reflected Shocks ($M_i = 1.30$)

3.5 遷移臨界角

概念的には、或るマッハ数 M_i に対して $d_0 \rightarrow \infty$ となる θ_w の下限を遷移臨界角 θ_r と定義するのが妥当だろう。実用上は、モデルサイズの制限から遷移臨界角を正確に求

めるのは難しい。Fig. 9に遷移臨界角のマッハ数依存性を示す。実線は離脱基準と呼ばれる理論曲線、○は滑らかな斜面の場合の実験結果、□は今回の実験結果である。いずれのマッハ数に対しても、理論>滑面>粗面の関係が成り立ち、いわゆる遷移遅れが確認された。ただし、動的遷移現象であることを考えると、使用モデルのスケールを大きくすることができれば、モデル表面の粗さ如何に関わらずさらに理論値に近づくと思われ。

Fig. 9 Transition Wedge Angle vs. Mach Number

4. 結論

表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、特に動的遷移現象について調べた。離脱距離の斜面傾斜角依存性を、マッハ数をパラメータとして求めた。入射波と反射波が三重点においてなす角 ω_r についてはほぼ単調に減少し、場合によっては遷移前後で著しい変化が認められることもあるが、これについてはさらに調べる必要がある。遷移臨界角のマッハ数依存性については、いわゆる遷移遅れが確認できた。

参考文献

- 1) Henderson, L. F., Crutchfield, W. Y., Virgona, R. J.: The effects of thermal conductivity and viscosity of argon on shock waves diffracting over rigid ramps, J. Fluid Mech., Vol. 331 (1997) pp. 1-36.
- 2) Kobayashi, S., Adachi, T., Suzuki, T.: Non-self-similar behavior of the von Neumann reflection, Phys. Fluids, Vol. 12 (2000) pp. 1869-1877.
- 3) Kobayashi, S., Adachi, T., Suzuki, T.: On the unsteady transition phenomenon of weak shock waves, Theoret. Appl. Mech., Vol. 49 (2000) pp. 271-278.
- 4) Walenta, Z. A.: Microscopic structure of the Mach-type reflexion of the shock wave, Arch. Mech., Vol. 32, No. 5 (1980) pp. 819-825.
- 5) Dewey, J. M., van Netten, A. A.: Non-self-similarity of the initial stages of Mach reflection, Proc. Int. Symp. on Shock Waves, Vol. 20 (1996) pp. 399-404.
- 6) 足立孝, 小林晋: 強い衝撃波の反射における波面構造の非定常性, 平成14年度衝撃波シンポジウム講演論文集, pp. 433-434.