A102 斜面上における反射衝撃波の画像解析

埼玉工大工学部 鈴木立之

埼玉工大工学部 足立 孝

埼玉工大工学部 小林 晋〇

IMAGE ANALYSIS OF OBLIQUE SHOCK REFLECTION OVER A MODEL WEDGE

Tateyuki SUZUKI^{*}, Takashi ADACHI^{*} and Susumu KOBAYASHI^{*}

The experiment on oblique shock reflection has been carried out by means of a shock tube and a model wedge. The incident shock Mach number M was about 1.42 and the working gas was air. Waves were visualized and analyzed by schlieren photography. Attention was focused on the quantitative analysis of the unsteady behavior of the triple point. The evolution of waves were discussed from the viewpoint of its effect on the behavior of the triple point. The rarefaction wave generated at each corner of bumps pulled the triple point down, and consequently the value of the angle of reflection γ_r increased abruptly.

1. 緒 言

平面衝撃波が斜面上を伝播すると、入射衝撃波は斜面で反射されて反射衝撃波が発生する。斜面が滑らかな場合には、反射の様子（反射形態）は一般に斜面傾斜角 θ_w と入射衝撃波マッハ数 M の2つのパラメータに依存し、それらの値によって2通りの反射形態（正常反射とマッハ反射）をとることが知られている⁽¹⁾。特にマッハ反射の場合（図1）には、入射衝撃波・反射衝撃波・マッハステムの交点として定義される三重点の軌跡は、ウェッジ先端を原点とした時に原点を通過する直線を描き、従って波面構造は自己相似であり、流れ場は擬定常とされている。この場合には、三重点近傍の流れ場は定常を仮定した単純なモデルによって理論的な解析が行われており（三衝撃波理論）、特殊な場合（弱い衝撃波や衝撃波前方圧が低い場合）を除いて理論と実験は良く一致している。また、理論と実験が一致しない場合のことを、ノイマンのパラドックスと呼んでいる。

一方、斜面に凹凸がある場合は入射波が凹部と凸部で反射されて複数の圧縮波と希薄波を生じ、それらが互いに干渉して複雑な波面構造を呈するようになる⁽²⁾。その結果として、

* Dept. of Mech. Eng., Saitama Inst. Tech., Okabe, Ohsato-gun, Saitama 369-02

滑らかな斜面の場合とは異なり, 現象の理論的なアプローチは極めて困難になっている。また, 波面構造も詳細に見れば斜面傾斜角によって異なり, 時間の経過とともに正常反射がマッハ反射に遷移するという著しい現象も観察されている⁽³⁾。すなわち, 凹凸のある斜面上における衝撃波の反射は本質的に非定常であり, そのために入射角と反射角の関係は三衝撃波理論から外れてくると考えられる。

このように, 凹凸のある斜面上における衝撃波の反射は理論と一致しないが, Ben-Dor⁽⁴⁾は最近のレビューでこれらの場合も含めてノイマンのパラドックスと呼んでいる。

本論文では, いわゆるノイマン・パラドックスに関する研究の手始めとして凹凸のある斜面上を運動する三重点の非定常な挙動を定量的に調べた結果について報告する。

2. 実験装置および実験方法

実験に使用した衝撃波管の被駆動部は $65 \times 30 \text{ mm}$ の長方形断面を持ち, その長さは約 4.0 m である。観測部視野は $62 \times 94 \text{ mm}$ である。波面構造を可視化するためにシュリーレン法を用いた。光源にはキセノンランプ (NP-1A, 閃光時間 180 ns , 菅原研究所製) を使用した。使用したモデル床の断面形状は正方形の溝と突起から成り, ピッチ $p = 16 \text{ mm}$, 溝幅(突起幅) $b = 8 \text{ mm}$, 溝深さ $d = 8 \text{ mm}$ である。モデル床は衝撃波管床面に対し一定の傾斜角 $\theta_w (35^\circ)$ を持つ台に固定した。衝撃波前方圧は大気圧, 室温の空気であり, 入射衝撃波マッハ数 M は約 1.42 である。

3. 実験結果および考察

図2に実験結果の解析に用いた座標系および記号の定義を示す。モデル先端を原点 O とし, モデル上面に沿って x 軸を, それに垂直に y 軸をとった。複数の反射波のうち, 最初の反射波により形成される三重点(第1三重点) T の座標を (x_t, y_t) とおく。直線 OT と入射衝撃波面のなす角を入射角, 三重点 T における反射波の接線と直線 OT のなす角を反射角と呼び, それぞれ γ_i, γ_r で表す。

図3は衝撃波の反射の様子をシュリーレン法によって可視化した写真である。入射衝撃波は第1番目の凸部表面で反射されて反射波(圧縮波) C_1 を発生し, 図3-(1)~(3)に見られる反射形態は通常の滑らかな床面上における斜め反射と同様で, マッハ反射になっていることが観察される。しかし, 三重点が凹部上方を通過すると, 凸部の角から発生した

Fig. 1. Mach reflection over a smooth wedge.
($M=1.43, \theta_w=30^\circ$)

Fig. 2. Coordinate system.

Fig. 3. Evolution of wave structure. ($M=1.42$, $\theta_w=35^\circ$, flash pulse width 180ns)

希薄波 R_1 (図 3-(4)) が三重点に追いつき (図 3-(5), (6); 合体した波面を図中に $C_1 + R_1$ で表示), その結果として三重点が下方に引き下げられている。このことは、三重点の座標を溝深さ d で無次元化して描いた図 4 を見れば明らかである。図 4 のデータ x_t/d の増加する順番に図 3 の写真と対応している。また、希薄波が三重点に追いついたことに対応して、反射角 γ_r も急激に増加していることも分かる (図 4)。やがて入射衝撃波は第 2 の凸部に衝突するが (図 3-(8)), 若干の時間遅れの後に三重点の y 座標 y_t は増加し始め (図 3-(10)), 図 3-(14) ではピークに達する。この時の波面構造の

詳細を見てみると、第 2 の凸部で発生した反射波 C_2 が三重点ならびに三重点近傍の C_1 に追いつき (図 3-(10)), 三重点の位置を押し上げ、それと同時に反射角を急減させている。反射角が急減することは、例えば図 3-(12) の C_1 の波面と C_1 と C_2 が合体してできた波面 (図中に $C_1 + C_2$ と表示) の接線の勾配を考えれば明らかであろう。三重点が第 2 の凸部を通過すると、再び角から第 2 の希薄波 R_2 が生じ (図 3-(13)), 第 1 の凸部を通過した時と同様に、この希薄波が三重点に追いつくことによって三重点の y 座標が減少し反射角が増加する (図 3-(14)~(17))。このように三重点の挙動は、凸部から発生する圧縮波と入射波が凹部を通過する際に発生する希薄波が交互に三重点に追いつくことによって顕著な影響を受けている。

4. 結 論

凹凸のあるモデル床面上 (傾斜角 $\theta_w = 35^\circ$) を伝播する衝撃波の反射をシュリーレン法によって可視化し、波面構造と三重点の挙動を詳細に調べた結果、以下のことが分かった。

- (1) 三重点は凹凸のある斜面上を非定常に運動する。
- (2) モデル床面上における複数の反射波 (圧縮波) と、入射衝撃波が凹部を通過する際に発生する希薄波が三重点の運動と反射角に大きな影響を与える。

参考文献

- (1) 生井武文・松尾一泰 衝撃波の力学 (コロナ社), 1983年。
- (2) Adachi, T., Kobayashi, S. and Suzuki, T., Theoret. Appl. Mech., **37**, pp. 23-30 (1989).
- (3) Suzuki, T., Adachi, T. and Kobayashi, S., Proc. Int. Shock Tube Symp., **17** (1990) (to appear)
- (4) Ben-Dor, G., Prog. Aerospace Sci., **25**, pp. 329-412 (1988).

Fig. 4. Triple point trajectory and angle of reflection.
 (○ triple point, ● angle of reflection)