40 炭酸ガス中の弱い衝撃波の反射の観測と数値計算

千葉大学 工学部 ○板橋 正弘 本間 弘樹

Observation and numerical simulation for oblique reflection
of weak shock wave in carbon dioxide

M Itabashi, H Honma Department of Mechanical Engineering, Chiba University

A b s t r a c t

Experimental and numerical results of oblique reflections from ramp surfaces are shown for weak shock waves in carbon dioxide. The results are shown for several combinations of the shock Mach number M_s and the ramp angle θ . Density contour fringes is photographed by using a Mach-Zehnder Interferometer. Numerical simulation is carried out by using the MacCormack-FCT combined method. There is good agreement between experimental results and numerical ones.

I 初めに

多原子分子気体中の弱い衝撃波は、分子の振動非平衡によりその波面厚さが著しく増大し、その波面付近で滑らかな密度変化が見られる。この分散波と呼ばれる衝撃波の斜め壁からの反射形態も、通常の衝撃波の反射とは異なってくる〔1〕〔2〕。

本研究では、常温・大気圧付近で分散効果の著しい炭酸ガスをテストガスとして用いて、実験及び数値計算を行った。今回は、可視化によりとらえた分散波の等密度干渉縞写真と等密度線図について、報告する。また研究の対象としたのは、衝撃マッハ数 M_s が 1.027 から 1.133 の範囲で、斜面角度 θ が 10° 、 20° 、 30° の3つの場合を組み合わせ、いくつかのケースを対象とした。

II 実験及びデータ解析

実験装置には、本研究室に設置してある無隔膜の衝撃波管を用いた。この衝撃波管の中央に位置する部分に、弱い衝撃波を作り出すための多孔板を設置した。斜面の模型は 10° 、 20° 、 30° の3つの種類があり、全て真鍮製である。

マッハ数の測定は、圧力計（ピエゾ型圧力計 PCB 製）により測定された圧力波形を用いて、比熱比 γ が平衡比熱比 1.29 として、衝撃波前後の圧力比 P_2/P_1 より計測した。光学測定には、マッハ・ツェンダー干渉計を用いて、観測部（ $\Phi 60$ ）内の分散波の等密度干渉縞写真を撮影した。光源には、窒素パルスレーザー（Moelectron 製）を用いた。レーザーのパルス幅は、1 ns、また波長は、337 nm である。

III 数値計算

数値計算を行うにあたり以下のような仮定を設けた。

（1）流れは、非粘性、非熱伝導、圧縮性であり、2次元非定常である。（2）調和振動子モデルが成り立ち、気体の振動非平衡効果のみを考慮する。（3）炭酸ガス分子の振動比熱、振動緩和時間は衝撃波を通じて一定で衝撃波前方の値をとる。（4）気体は熱的に

完全であるとし、理想気体の状態方程式が常に成り立つとする。

基礎方程式には、2次元のオイラー方程式に炭酸ガスの振動緩和方程式を加えたものを使用する。

この基礎方程式を、衝撃波前方の各物理量で無次元化を行い、更に物理面から計算面へと一般座標変換を行った。また基礎方程式を空間分割したそれぞれの演算子をMacCormack-FCT法を用いて解いた〔3〕。

計算格子は、Tohmpsonらによる方法を用いて、格子を作成した〔4〕。

初期条件は、斜面の手前に1次元の分散波の解析解を与えた。この解析解には、JohannensenとHodgsonによる定常分散波の速度分布から、数値的に求めた解を使用した〔5〕。

IV 結果及び考察

分散波の斜面上での位置に関する定義を、Fig. 1に示す。ここで波面厚さの定義は、入射衝撃波前後の密度変化の上下それぞれ10%を差し引いた距離を波面厚さ δ とした。後に示す結果では、この波面厚さによって無次元化された量を用いて示す。

Fig. 2に、マッハ・ツェンダー干渉計を用いて撮影した、等密度干渉縞写真と数値計算によって得られた等密度線図を示す。図の下に表されている値 $\bar{s}$ は、衝撃波の進行距離を波面厚さで無次元化した値である。IからIIIのケースは、衝撃波の全体が連続的に変化する完全分散波のケースであり、IVからVIでは、波面の一部に不連続面を持つ部分分散波のケースである。部分分散波のケースにおいて実験結果では見られないステムらしきものが計算においては見られるが、その他の大まかな形状は、全てのケースにおいてよく一致している。

IV. まとめ

分散波の斜め反射に対して、実験と数値計算を行った。両者の可視化の結果である等密度干渉縞写真と等密度線図は、よく一致した。

Reference

- [1] Honma H, Henderson L F.
Phys. Fluids A 1;597(1989)
- [2] Honma H, Iimura M, Maekawa H,
Institute of physics, New York,
pp222(1990)
- [3] Boris, J.P. NRL Memorandum
Report, 3237(1976)
- [4] Tompson, J, F., Warsi, Z, U, A. and
Mastin, C, W. Numerical grid
generation, North-Holland(1985)
- [5] Johannesen, N, H. and Hodgson, J, P.
Report on Progress in Physics,
vol. 42, pp. 629-679(1979)

Fig. 1 分散波の斜面上の位置の定義

Fig. 2 等密度干渉縞写真と等密度線図

次ページへ続く

IV $M_s = 1.047$, $\theta = 10^\circ$, $P_1 = 1500 \text{ mmHg}$

V $M_s = 1.070$, $\theta = 20^\circ$, $P_1 = 1500 \text{ mmHg}$

VI $M_s = 1.133$, $\theta = 30^\circ$, $P_1 = 770 \text{ mmHg}$

F i g . 2 等密度干涉縞写真と等密度線図