

106 衝撃波の回折と反射に関する実験と数値解析

Experiments and Numerical Analysis on the Diffraction and Reflection of Shock Wave

○ 加藤 肇 (埼玉大・院) 星野 真 (埼玉大)
正 小原哲郎 (埼玉大・工) 正 大八木重治 (埼玉大・工)

Hajime KATOH, Makoto HOSHINO, Tetsuro OBARA, Shigeharu OHYAGI
Saitama University, 255 Shimo-Ohkubo, Saitama, 338-8570 Japan

A phenomenon of shock wave diffraction is often occurred by the explosions of combustible gases and cause serious damages around a source of the shock wave. Therefore it is important to investigate flow-fields behind diffracted shock wave. In this study, experiments are carried out to investigate the flow-field of shock wave diffraction in a Mach number ranged from 1.3 to 5.2. As a result, the behavior is agreed between experimental and numerical results and an empirical equation to evaluate maximum pressure produced by the reflection of diffracted shock wave is obtained.

Key Words: Shock wave reflection, Numerical simulation, Flow Compressible

1 はじめに

衝撃波が開放端から大気中に放出される現象は安全工学上の観点から重要である。特に、衝撃波が反射した際の物体表面上の最高圧力は、爆発源からの保安距離を設定する上で最も重要なパラメータである [1]。本研究では衝撃波の伝ばマッハ数が $Ms = 3.0 \sim 5.0$ の比較的高い条件において、回折する衝撃波が反射体と干渉した際の流れ場の様子をカラーシュリーレン法によって可視化し、数値計算結果と比較した。また $Ms = 1.3 \sim 5.0$ の広範囲に対して、最高圧力を予測するための実験式を導いたので報告する。

2 実験装置及び方法

図1に実験装置の概略図を示す。実験にはデトネーション駆動型衝撃波管を用い、駆動管内に酸素・水素混合気を充填した。点火は始動管上端で行いデトネーション波を発生させ、その背後の高温・高圧気体を駆動気体として衝撃波を発生させた。観測部内には反射体を設置する場合としない場合に分け、設置した場合には開放端出口から反射体までの距離 L を開放端の内径 D で除した無次元距離 L/D を 0.5, 1.0, 2.0 と変化させて実験を行なった。

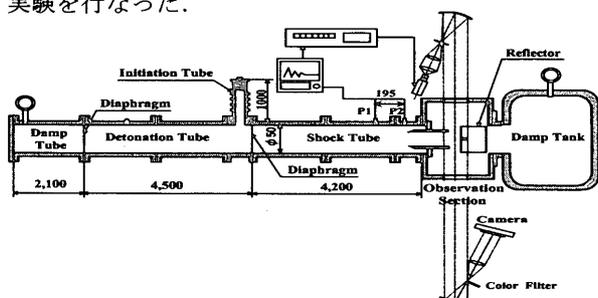


図1: 実験装置概略図

表1に実験条件を示す。駆動気体には酸素・水素混合気を用い、衝撃波の可視化にはカラーシュリーレン光学系を用いた。

表1: 実験条件

| | |
|-------------------------------|---------------------|
| Driver Gas | $2H_2 + O_2$ |
| Test Gas | Air |
| Mach Number | 3.0~5.2 |
| Driver Pressure | 303.0 kPa |
| Driven Pressure | 11.3~81.3 kPa |
| Diameter of Open End, D | ϕ 25 mm |
| Distance, L | 12.5, 25.0, 50.0 mm |
| Non-dimensional Distance, L/D | 0.5, 1.0, 2.0 |

3 数値解析

実験により可視化された衝撃波の回折現象を明らかにするため数値計算を行った。基礎方程式を定式化するため、次の仮定を置いた。

1. 流れ場は2次元軸対称とする。
2. 気体は比熱比一定の理想気体とする。
3. 粘性、熱伝導の影響は無視する。

計算には Explicit Predictor-Corrector TVD スキームを用いた。図2に計算領域を示す。計算領域は $150 \text{ mm} \times 100 \text{ mm}$ とし、計算格子は 750×500 の計 375,000 点である。開放端の長さは 25 mm で、その上流 5 mm の位置に Rankine-Hugoniot の関係式から導かれる状態量を設定した。境界条件は壁面及び中心軸上に反射条件を、その他には自由境界条件を用いた。

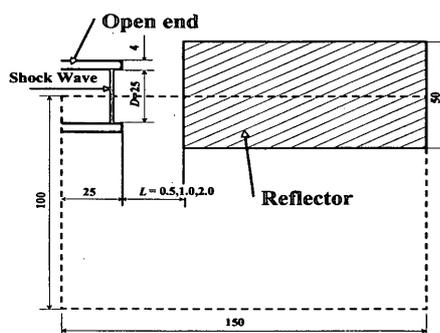


図2: 計算領域

4 結果及び考察

4.1 衝撃波の回折

図3はマッハ数 $M_s = 3.4$ の先頭衝撃波 S_1 が開放端管端から放出されて $45 \mu s$ 及び $115 \mu s$ 後の流れ場の様子を示す。先頭衝撃波 S_1 は開放端管端から放出された後、回折し中心軸上で凸形状に発達しているのが図3(a)から確認できる。 S_1 が通過した後の開放端出口付近では角部で膨張波が発生し、波面を減衰・回折させていく。衝撃波背後の流れ場は、超音速となるので膨張波波面先頭がマッハ円錐 MC となり、管出口で定在するため膨張波は管上流へは伝播しない。図3(b)では、(a)で発生していた2次衝撃波 S_2 が完全に形成され、その前方には管内の気体と管外の気体との境界である接触面 CS が形成されている。また、角部からは渦輪 VR が発生し、 S_2 の影響で大きく発達して、その回転によって新たな圧力波 (S_3) が生成されている。さらに膨張波と2次衝撃波とが接触して衝撃波3重点 TR が形成され、円管内の主流速度と外部流速との速度差によって剪断層 SL が生じている。

4.2 衝撃波の回折と反射

図4は S_1 が開放端管端から放出されて反射体と干渉してから $30 \mu s$, $50 \mu s$ 後の流れ場の様子をそれぞれシュリーレン写真(上)と数値計算画像(下)で示している。開放端から放出されて回折した衝撃波 S_1 が反射体と干渉している様子を示す。(a)では S_1 背後において反射衝撃波 RS と S_2 が干渉し始めている。また衝撃波背後の流れ場は、超音速となるので膨張波波面先頭がマッハ円錐 MC を形成するのがはっきりと確認できる。(b)では膨張波と2次衝撃波とが接触して衝撃波3重点 TR を形成している。また、開放端角部から渦輪 VR_1 が、反射体角部からは渦輪 VR_2 が発生し干渉しており、 VR_1 の回転の影響で圧力波 S_3 が発生している。さらに VR_1 と VR_2 の回転の影響で圧縮波 S_4 が発生し、その外側には剪断層 SL が生じている。さらに反射体角部において発達した VR_2 の回転の影響で新たな圧縮波 S_5 が生成されるのを確認した。

4.3 最高圧力に対する実験式

開放端から放出された衝撃波が反射体で反射した際の最高圧力 p_{max} [kPa] を表す実験式を導くため、 p_{max} を初期圧力 p_1 [kPa]、マッハ数 M_s 、開放端内径 D [mm]、開放端から反射体までの距離 L [mm] を用いて次元解析を行なうと、以下の関係式で表せる。

$$\frac{p_{max} - p_1}{p_1} = \alpha \left(\frac{L}{D} \right)^\beta (M_s)^\zeta \quad (1)$$

実験で得られた M_s , p_{max} , L , D の値を(1)式に代入し最小2乗法を用いて計算を行なった結果、 $\alpha=0.50$, $\beta=-0.96$, $\zeta=3.57$ の値が得られた。図5に最高圧力とマッハ数の関係を示す。縦軸には $\varepsilon = (p_{max} - p_1)/p_1$

$(L/D)^{0.96}$ の値、横軸はマッハ数 M_s を示している。また $M_s=1.3 \sim 2.8$ については過去に行なわれた実験によるデータ [1] を用いている。この図から、対数グラフ上において開放端からの無次元距離 L/D の違いによらず一本の直線として表されることがわかる。したがって、衝撃波マッハ数 $M_s=1.3 \sim 5.2$ の比較的広い条件において回折した衝撃波が反射した際の最高圧力は次式により見積もることが可能である。

$$p_{max} = p_1 \left\{ 1 + 0.50 \left(\frac{D}{L} \right)^{0.96} M_s^{3.57} \right\} \quad (2)$$

5 まとめ

- $M_s=3.4$ の先頭衝撃波が回折し反射する際の流れ場の様子を明らかにした。その結果、実験により得られたシュリーレン写真は、数値解析結果と比較的よく一致した。
- 最高圧力とマッハ数の関係について、実験式がマッハ数のべき関数で表されることが明らかにされた。

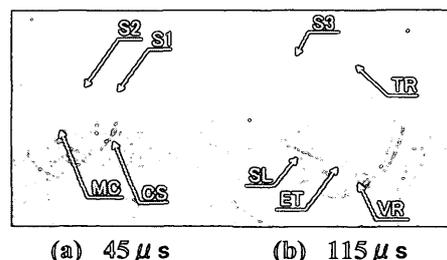


図3: $M_s=3.4$ におけるシュリーレン写真(上)と数値計算画像(下)

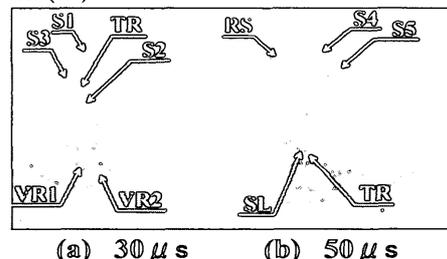


図4: $M_s=3.4$, $L/D=1.0$ におけるシュリーレン写真(上)と数値計算画像(下)

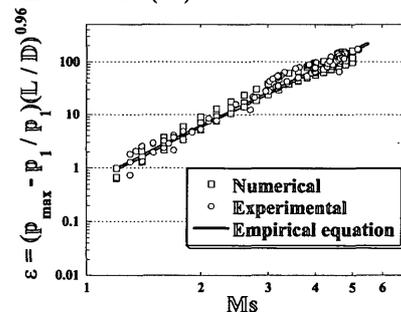


図5: 最高圧力とマッハ数関係図 ($M_s = 1.3 \sim 5.2$)

参考文献

- 高藤・ほか3名：回折した衝撃波の反射に関する研究，平成9年度衝撃波シンポジウム講演論文集，pp.119-122，(1998)。