210 衝撃波の回折と反射に関する可視化

高藤亮一*, 山中昭央*, 小原哲郎**, 大八木重治**

A Visualization on the Diffraction and Reflection Process of Shock Wave

Ryouichi TAKAFUJI, Akio YAMANAKA,
Tetsuro OBARA, Shigeharu OHYAGI

ABSTRACT

It is important to investigate a pressure profile when a shock wave interacts with a reflector from a safety point of view. In this study, experiments are carried out using a shock tube of 50mm diameter and 8m in total length with a cylindrical reflector of 50mm in the observation section. The behavior of reflection process of diffracted shock wave is visualized with the aid of Schlieren techniques. As a result, (i) a pressure histories on the reflector coincides between numerical and experimental results. (ii) The sequential flow-field behind the shock wave is clarified. (iii) An empirical formula of maximum pressure is obtained with a parameter of a energy pen unit area.

Keywords: Shock wave, Schlieren method, Numerical simulation

1 はじめに

火山の噴火による爆風や、ロケット打ち上げ施設での爆発事故などでは、球状に広がる衝撃波が発生し、周囲に甚大な被害を及ぼす。このような被害を最小限にするため、爆発物の周囲で建物が建てられる場所では、衝撃波が到達したときの被害予測に基づいた安全距離が設定されている。ところが、爆発点から被害を及ぼす建物までの地形などにより、圧力の履歴が変化するため、その挙動の予測は困難である [1]。

これまでに地形の変化による衝撃波の挙動予測が、3次元の数値シミュレーションなどにより行われてきた [2],[3]。また、渦輪と衝撃波の干渉により発生する散乱波は、音波となって騒音の原因となる。この挙動を調べるため、円形管から放出される衝撃波の背後に生ずる渦と、壁面で反射した衝撃波がその背後流れと干渉する様子が観察されている [4],[5]。

本研究では、開放端の前方に円筒形の反射体を設置し、回折した衝撃波を干渉させ、その際の挙動についてシュリーレン法により可視化した。また、反射体前面の圧力履歴を詳細に調べ、それを明らかにしたので報告する。

2 実験装置および方法

Fig.1に実験装置の概略を示す。実験に用いたのは無隔膜型衝撃波管で、衝撃波管の長さは4200mm、管の内径は50mmである。衝撃波管の管端には内径25mmの開放端が取り付けられている。開放端の駆動管側の端は、角を鋭角にしたクッキーカッター形状をしており、この部分で衝撃波面は切り取られる。また、観測部内には、

外径50mmの円筒形の反射体を開放端の中心軸上に設置した。この反射体前面中央には圧力変換器(PCB 113A24)が取り付けられている。これにより、反射体にかかる圧力を測定した。

Fig. 1: Schematic diagram of experimental set-up

貯気槽内の駆動気体は、MOバルブ [6] と呼ばれる2つのピストンを組み合わせた急速開口弁により、衝撃波管と隔てられている。また衝撃波管には、反射体に設置したものと同一圧力変換器が2つ取り付けられている。すべての圧力変換器からの信号はオシロスコープに取り込まれ、衝撃波のマッハ数は、衝撃波管に設置した2つの圧力変換器により求めた。衝撃波の可視化にはシュリーレン光学系を用いた。光源には発光時間が180nsのキセノン管を用いた。光源から出た光を点光源にするため、ピンホール2枚とコンデンサーレンズを組み合わせた光学系となっている。写真は、反射体に取り付けられた圧力変換器の立ち上がりをトリガ信号として、適当な遅れ時間を決め、衝撃波が反射

* 非会員 埼玉大学大学院

** 正会員 埼玉大学工学部

体入射後、任意の時間で撮影した。撮影に用いたフィルムは、ISO400 のモノクロフィルムである。

Table 1 に実験条件を示す。被駆動気体は空気であり、貯気槽には駆動気体である窒素またはヘリウムを充填する。開放端と反射体の距離は 50mm とし、衝撃波マッハ数を 1.3~2.2 の範囲で変化させた。ただし、マッハ数が 2 以上の条件では駆動気体にヘリウムを用いた。

Table. 1: Experimental conditions.

Driver Gas	N ₂	He
Mach Number	1.3, 1.6	2.2
Pressure Ratio	22.6~100	40
Driver Pressure (kPa)	648.5~1347.6	851.1
Driven Pressure (kPa)	41.3~11.3	8.4

3 計算方法

計算を行うにあたり、以下の仮定をおいた。

1. 流れ場は軸対称とする。
2. 気体は比熱比一定の理想気体とする。
3. 粘性、熱伝導、拡散は無視する。

これらの仮定のもとに定式化される基礎方程式を、Explicit Predictor-Corrector TVD スキームを用いて計算した [7]。計算格子は正方形で格子点数は 500×500 である。試験気体は空気、被駆動側圧力を実験条件と同じにした。

初期衝撃波マッハ数は $M_S = 1.3, 1.6, 2.2$ の 3 条件である。衝撃波は、開放端から 5mm 上流側に置いた。計算領域の大きさは 100mm×100mm である。境界条件は、壁面および中心軸に反射条件、その他は、自由境界条件を用いた。

計算にはワークステーション (DEC, Alpha Station 500/500) を使い、出力された結果をパソコン上で画像やグラフにした。

4 結果および考察

4.1 衝撃波マッハ数 $M_S=1.3$ の場合

Fig.2 に、マッハ数 $M_S=1.3$ の場合に得られた反射体前面の圧力履歴の実験の結果と数値計算の結果を示す。実線は実験で得られた圧力波形であり、破線は数値計算結果である。横軸は衝撃波が反射体と干渉してからの経過時間である。また Fig.3 は、Fig.2 上の点 a~d における現象の可視化の結果である。写真上側は、数値計算によるシュリーレン画像に速度ベクトル線図を重ねたもので、下側は、実験で得られたシュリーレン写真である。回折した衝撃波が反射体で反射すると、反射衝撃波は、反射体角部で再び回折する (Fig.3a)。Fig.2a~b にかけて、この反射衝撃波の波面を回折させる膨張波領域は、次第に中心軸方向へ広がり、中心軸へ達すると膨張波が反射体に接するまでわずかに圧力が上昇し、その後、圧力の減少を引き起こす (Fig.3b)。

反射した衝撃波が、開放端角部より発生する渦輪に当たると、衝撃波は大きく回折し、再び反射体の方向

へ伝播する。この衝撃波が反射体と干渉すると、b 点前後における圧力の立ち上がりを生じる。その後、衝撃波は中心軸上で互いに反射し減衰する (Fig.3c)。

渦輪が反射体に接近するにつれ、渦輪内部の膨張波領域により反射体方向への流れが加速され、次第に圧力が上昇し、c 点を過ぎると、圧力波形の最初の立ち上がり、開放端からの衝撃波が反射した際の圧力の 2 倍近くの値になる (Fig.3d)。さらに渦輪が反射体に接近すると、渦輪の流れに沿って、反射体から離れる方向の速度が加速され、反射体前面の中央付近での流れは減速し、流れがよどむ範囲が広がり、圧力は下がり始める。

4.2 衝撃波マッハ数 $M_S=1.6$ の場合

Fig.4 に、マッハ数 $M_S=1.6$ の場合に得られた反射体前面の圧力波形を示す。マッハ数が $M_S=1.3$ の場合と異なり、渦輪はその中心から発生している 2 次衝撃波を伴って反射体へ接近する。渦輪が反射体に接近するにつれ、渦輪内部の膨張波領域により反射体方向への流れが加速され、圧力が上昇している。

渦輪付近では、渦を取り巻く流れに沿ってすべり線が発生する。Fig.4 の a 点での圧力の減少は、このすべり線が反射体に接近したところで起こっており、反射体方向に進む流れが、すべり線に沿う流れにより反射体から離れる方へ、流れの方向が変えられたことによると考えられる (Fig.5a)。その後さらに渦輪が反射体に接近すると、再び圧力は上昇する。渦輪が反射体のわきへ流れ出すと、その流れと反射体前面の流れ場の境界は滑り線となり、大きな渦が発生する。これにより、反射体方向への速度は減少し、Fig.4 の b 点を過ぎると反射体前面の圧力は減少する (Fig.5b)。

4.3 衝撃波マッハ数 $M_S=2.2$ の場合

Fig.6 に、マッハ数 $M_S=2.2$ の場合に得られた反射体前面の圧力波形を示す。Fig.6 の a 点前後で圧力波形は他の条件とは異なり、圧力がなだらかに減少している (Fig.7a)。これは、開放端からの衝撃波の背後の流れの速度が高く反射体前面でよどむためと考えられる。その後、Fig.6 の b 点で、2 次衝撃波を伴う渦輪が反射体へ衝突するが、反射体前面での圧力の降下は小さく、その後ほぼ一定の値となる (Fig.7b)。

4.4 最高圧力とマッハ数の関係

開放端から放出された衝撃波が反射した際の反射衝撃波背後の圧力 P_{max} は保安距離を設定する上で最も重要なパラメータであると考えられる。しかしながら、 P_{max} は衝撃波マッハ数 M 、開放端から反射体までの距離 L 、開放端の口径 D 、初期圧 P_0 の関数であり複雑である。これらの初期条件の違いによらず P_{max} を予測することは安全工学上において重要である。Fig.8 は横軸に衝撃波マッハ数 M 、縦軸に $P_{max}L$ を P_0D で無次元化した値 ε を示す。無次元量 ε の物理的意味は単位面積あたりのエネルギー量である。これより ε は、開放端から反射体までの距離によらずにマッハ数の一次関数で表されることが分かる。従って P_{max} は衝撃波マッハ

数が 1.3 ~ 2.8 の範囲において次式で与えられる。

$$P_{max} = \alpha \frac{DP_0}{L} (M - 1)$$

P_{max} は反射衝撃波背後の圧力であるため、反射体の形状には依存しない。係数 α は Fig.8 より $\alpha \simeq 7.1$ と見積もられる。上式より垂直衝撃波が 3 次元空間へ開放された場合の最高圧力 P_{max} を精度約 95% で見積もることができる。

5 まとめ

開放端から回折した際の衝撃波の挙動について調べ以下の知見を得た。

1. 反射体前面における圧力波形について実験と数値計算結果で比較し良好な一致を得た。
2. 衝撃波マッハ数の違いによる流れ場の差異について数値シュリーレン画像および速度ベクトル線図を用いて明らかにした。
3. 単位面積あたりのエネルギー量はマッハ数の一次関数で表されることが明らかにされ、この結果は保安距離を設定する上で重要な基礎データとなりうる。

今後は、開放端内部に溝を設けることにより衝撃波を減衰させ、溝の数や大きさと、衝撃波の減衰の度合いの関係を調べる予定である。

参考文献

- [1] 平野敏右: ガス爆発予防技術, 海文堂, 昭和 58 年。
- [2] 清水, 藤井, 東野: 地表面上を伝播する爆風の爆風強さと地形の関係, 衝撃波シンポジウム, 平成 7 年。
- [3] 早川, 斎藤, H.Babinsky, 高山: 火山噴火における爆風伝播の数値シミュレーション, 衝撃波シンポジウム, 平成 7 年。
- [4] T.Minota, M.Nishida, M.G.Lee: Vortex-ring impingement on a wall with shock formation, presented at the 20th Int. Symp. Shock Waves, Pasadena, 1995.
- [5] 高山, 神部, 滝, 桜井: 衝撃波と渦輪干涉による散乱波, 衝撃波シンポジウム, 平成 7 年。
- [6] 小口, 船曳, 佐藤, 前野: CO₂ ガスダイナミック・レーザーに関する衝撃波管の実験, 東大宇宙航空研究所報告, 第 14 巻, 第 2 号 (B)(1978), pp.332-333.
- [7] H.C.Yee: Upwind and Symmetric Shock-Capturing Schemes, NASA Technical Memorandum 89464, 1987.

Fig.2 Pressure Profile

Fig.3 Numerical velocity vector and calculated and experimental Schlieren photograph ($M_s=1.3$ $L/D=2$)

Fig.4 Pressure profile ($Ms=1.6$ $L/D=2$)

a) $140 \mu s$

b) $300 \mu s$

Fig.5 Numerical velocity vector and calculated and experimental Schlieren photograph ($Ms=1.6$ $L/D=2$)

Fig.6 Pressure profile ($Ms=2.2$ $L/D=2$)

a) $30 \mu s$

b) $100 \mu s$

Fig.7 Numerical velocity vector and calculated and experimental Schlieren photograph ($Ms=2.2$ $L/D=2$)

Fig.8 Relationship between ϵ and Mach number