

215 擬似衝撃波を伴う超音速内部流動に関する研究 (マッハ4 擬似衝撃波の構造と振動現象)

A Study on the Supersonic Internal Flows with Pseudo-Shock Waves (Structure and Oscillation Phenomena of the Mach 4 Pseudo-Shock Waves)

○ 学 貝原 陽平 (室蘭工大・院) 正 杉山 弘 (室蘭工大)
 正 溝端 一秀 (室蘭工大) 正 湊 亮二郎 (室蘭工大)
 学 東條 啓 (室蘭工大・院) 学 武藤 洋平 (室蘭工大・院)

Yohei KAIHARA, Muroran Institute of Technology, 27-1, Mizumoto, Muroran, 050-8585
 Hiromu SUGIYAMA, Muroran Institute of Technology
 Kazuhide MIZOBATA, Muroran Institute of Technology
 Ryojiro MINATO, Muroran Institute of Technology
 Akira TOJO, Muroran Institute of Technology
 Yohei MUTO, Muroran Institute of Technology

Key Words : Supersonic Internal Flow, Pseudo-Shock Wave, Shock Wave/Boundary Layer Interaction, Color Schlieren Photography, High Speed Video Camera, Oscillation Phenomena

1. 緒言

管路内において流れが超音速から亜音速に減速する際に発生する衝撃波は流路壁面の乱流境界層と干渉し、複雑な衝撃波システムを形成する。流れのマッハ数が大きい場合はその干渉が強くなり、複数の衝撃波、いわゆる衝撃波列 (shock train) ⁽¹⁾ が形成される。衝撃波列とその後方に続く静圧上昇部は全体で1つの垂直衝撃波と同様の役割を果たすと考えられ、擬似衝撃波 (pseudo-shock wave) ⁽¹⁾⁽²⁾ と呼ばれている。擬似衝撃波を伴う流れは、高圧ガス配管内の流れやスクラムジェットエンジンの分離部等で発生し、圧力変動を伴い、騒音や振動、流路の破壊等を引き起こす場合があるため、その構造や特性を解明することは工学上重要である。

そこで、本研究では超音速矩形ダクト内における衝撃波と乱流境界層の干渉現象、いわゆる擬似衝撃波現象の解明を目的とし、吹出し吸込み式超音速風洞を用いてマッハ4 擬似衝撃波を発生させ、カラーシュリーレン法による流れ場の可視化を行い、擬似衝撃波の構造について調べた。また、高速度ビデオカメラにより擬似衝撃波の発生位置変動を観察するとともに、壁面静圧変動を同時測定し、擬似衝撃波の振動現象について調べた。

2. 実験装置および実験方法

2.1 実験装置

本研究で使用した吹出し吸込み式超音速風洞の概要は以下の通りである。高圧槽より供給された圧縮空気は、調圧弁で所定の圧力に調整された後、ラバルノズルを通してマッハ4まで加速され、測定部へと流入し、その後真空槽へと吸い込まれる。Fig.1に測定部および測定系の概要を示す。測定部は、流路高さ $D=80\text{mm}$ 、幅 $W=80\text{mm}$ 、長さ $L=1500\text{mm}$ の正方形断面を有する直管路で、側壁には光学観察用ガラス窓を持つ。本研究で使用したラバルノズルは2次元ノズルであり、Fig.1のように設置している。

2.2 実験方法および実験条件

本研究では、マッハ4 擬似衝撃波の先頭衝撃波を測定部の中流位置に発生させ、カラーシュリーレン法による流れ場の可視化を行った。また、高速度ビデオカメラにより擬似衝撃波の発生位置変動を観察するとともに、壁面静圧変動を測定しスペクトル解析を行った。擬似衝撃波発生位置の調整は、測定部下流に設置した衝撃波発生装置 (shock generator) を前後させ、測定部下流部分の開口面積を変化させて行った。先頭衝撃波上流における主流のマッハ数と単位長さ当たりのレイノルズ数は、それぞれ $M_\infty = 3.98$ 、 $Re_\infty = 2.36 \times 10^7 \text{m}^{-1}$ である。

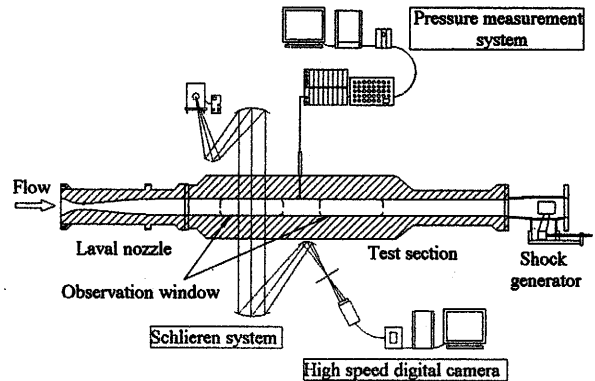


Fig.1 Schematic of the test section and measuring system

2.3 カラーシュリーレン法による流れ場の可視化

カラーシュリーレン法による流れ場の可視化において、光源にはナノスパークフラッシュ (閃光時間 30nsec) を使用し、カラースリットを使用した。カラーシュリーレン法による流れ場の可視化では、側壁側からの撮影を行った。

2.4 擬似衝撃波の発生位置変動の観察

シュリーレン法によって流れ場を可視化し、高速度ビデオカメラ (Photron 製: FASTCAM-MAX) を用いて擬似衝撃波の振動の様子を撮影した。光源にはキセノンランプを使用し、ナイフエッジを使用した。この時、マッハ4 擬似衝撃波の先頭衝撃波を測定部の中流位置 ($X_f/D=7.6$) に発生させた。この位置における無次元境界層厚さ、いわゆる境界制限 (flow confinement) は、 $\delta_\infty/h = 0.39$ である。ここで、 X_f はノズル出口端から先頭衝撃波発生位置までの距離、 D は管路高さ、 δ_∞ は先頭衝撃波直前の境界層厚さ、 h は管路高さの半分である。撮影は通風開始より3秒後から、10,000コマ/秒で約0.1秒間行い、撮影画像から擬似衝撃波の発生位置変動を調べた。

2.5 壁面静圧変動測定

壁面静圧変動の測定は、半導体圧力変換器 (KULITE 製: XCQ-062-50A) を用いて行った。半導体圧力変換器は、Fig.1のように測定部上壁に設けられた静圧測定孔に設置し、測定結果はシグナルコンディショナ (KYOWA 製: CDV-700A) を介し、ログステーション (NEC 三栄製: DL2400AP) に記録した。測定は通風開始より3秒後からサンプリング速度 $100\mu\text{s}$ で1秒間行った。

3. 実験結果および考察

3.1 擬似衝撃波の発生位置変動

Fig.2 (a) にマッハ4 擬似衝撃波のシュリーレン写真を, Fig.2 (b) に先頭衝撃波の流れ方向の振動を表す発生位置の振動波形を示す. Fig.2 (a) の横軸および Fig.2 (b) の縦軸は, ラバルノズルの出口端を原点とした無次元流路方向距離 X/D であり, Fig.2 (b) の横軸は通風開始時刻からの経過時間 t (sec) である.

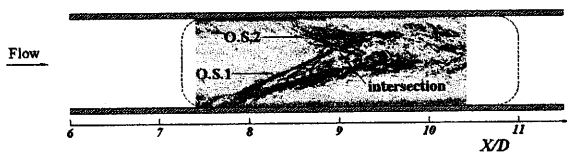
Fig.2 (a) より, マッハ4 擬似衝撃波の先頭衝撃波の形状は, 下壁側の境界層内から発生する斜め衝撃波 (O.S.1) と上壁側の境界層内から発生する斜め衝撃波 (O.S.2) より構成され, 中心に垂直部分を持たない上下非対称な X 型である. また, 先頭衝撃波直後には広範囲に渡ってはく離領域が存在している.

続いて Fig.2 (b) を調べると, O.S.1, O.S.2 およびその交点 (intersection) はいずれも徐々に上流側に移動しながら不規則な振動をしており, 流れ方向の振幅は約 $0.5D \sim 1.0D$ であることが分かる.

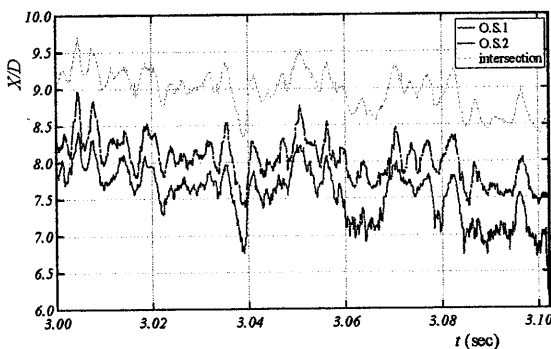
Fig.2 (c) に Fig.2 (b) の振動波形のパワースペクトルを示す. 図の横軸は周波数 f (Hz) で, 縦軸はパワースペクトル密度 $S(f)$ である. O.S.2 および交点の波形の縦軸の原点はずらしてある. Fig.2 (c) より先頭衝撃波の振動は, 200Hz 以下の低周波数成分を多く含んでいることが分かる. 特に 50Hz 程度の周波数成分および 150~200Hz の周波数成分が強いといえる. これらの成分は O.S.1, O.S.2 および交点の振動に同程度に含まれており, さらに Fig.2 (b) の振動波形にも類似性が見られることから, O.S.1 と O.S.2 は一体となり振動をしていると考えられる.

3.2 壁面静圧変動のパワースペクトル

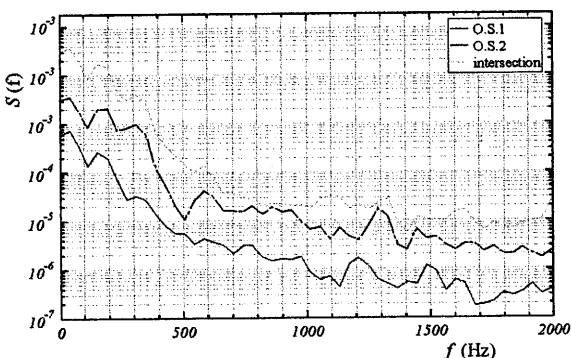
Fig.3 にマッハ4 擬似衝撃波を伴う流れ場の上壁面に沿う壁面静圧変動のパワースペクトルを示す. グラフの横軸は周波数



(a) Schlieren photograph of the Mach 4 pseudo-shock wave



(b) Oscillation of the Mach 4 pseudo-shock wave



(c) Power spectrum

Fig.2 Oscillation phenomena of the Mach 4 pseudo-shock wave

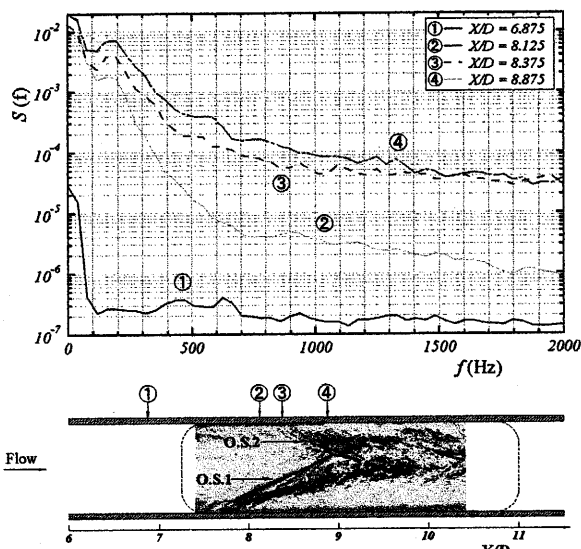


Fig.3 Power spectrum of wall pressure oscillation on the top wall

f (Hz) で, 縦軸はパワースペクトル密度 $S(f)$ である. また, Fig.3 の下側には, 流路の中流位置に発生させたマッハ4 擬似衝撃波の発生位置と壁面静圧変動の測定位置の関係を表す図を示している. この図の横軸は無次元流路方向距離 X/D である. 図に示した①~④が壁面静圧変動の測定位置であり, グラフ波形の番号と対応させてある. ①は先頭衝撃波より上流側, ②と③は O.S.2 の足元付近, ④は O.S.1 と O.S.2 の交点付近である.

波形①より, 先頭衝撃波の上流では擬似衝撃波の振動の影響を受けていないため, 全ての周波数において低いパワースペクトル密度を示している. 次に②と③の波形に注目する. この2つは O.S.2 の足元が振動している付近のパワースペクトルである. いずれも同様の傾向を示し, 200Hz 以下の低周波数成分を多く含んでおり, 特に 50Hz 程度の周波数成分および 150~200Hz の周波数成分が強いことが分かる. 続いて O.S.1 と O.S.2 の交点付近の④の波形を見ると, ②と③の波形と同様の傾向を示し, 200Hz 以下の低周波数成分を多く含んでいるが, パワースペクトル密度は全体的に小さくなっている.

4. 結言

マッハ4 擬似衝撃波の構造と特性を明らかにするため, 超音速風洞を用いて矩形ダクト内にマッハ4 擬似衝撃波を発生させ, カラーシュリーレン法による流れ場の可視化を行った. また, 高速度ビデオカメラにより擬似衝撃波の発生位置変動を観察するとともに, 壁面静圧変動を同時測定し擬似衝撃波の振動現象について調べた. 結果を要約すると以下のようになる.

- (1) シュリーレン写真より, マッハ4 擬似衝撃波の先頭衝撃波は中心に垂直部分を持たない上下非対称な X 型となり, 先頭衝撃波後方には大きなはく離領域が存在する.
- (2) 高速度ビデオカメラによる擬似衝撃波の発生位置変動の観察より, マッハ4 擬似衝撃波は徐々に上流に移動しながら不規則な振動をしており, 流れ方向の振幅は約 $0.5D \sim 1.0D$ である.
- (3) 擬似衝撃波の発生位置変動および壁面静圧変動のパワースペクトルより, マッハ4 擬似衝撃波の先頭衝撃波の振動は, 200Hz 以下の低周波数成分を多く含んでおり, 特に 50Hz 程度の周波数成分および 150~200Hz の周波数成分が強い.

参考文献

- (1) Matsuo, K, Miyazato, Y, and H.D. Kim, Shock train and pseudo-shock phenomena in internal gas flows, Progress in Aerospace Science, 35, (1999), pp.33-100.
- (2) 杉山・福田・溝端・遠藤・孫・新井, 衝撃波を伴う超音速内部流動に関する研究, 日本機械学会論文集(B 編), 68-676 (2002, 12), pp.3295-3301.