

1304 擬似衝撃波を伴う超音速内部流動に関する研究

A Study on the Supersonic Internal Flows with Pseudo-Shock Waves

○ 学 武藤 洋平 (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 孫 立群 (室蘭工大・院) 学 東條 啓 (室蘭工大・院)
 学 王 東屏 (室蘭工大)

Yohei MUTO, 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

Liquin SUN, Muroran Institute of Technology

Akira TOJO, Muroran Institute of Technology

Dongping WANG, Muroran Institute of Technology

This paper describes an experimental study on the supersonic internal flows with Pseudo-Shock Waves (PSW) in a straight square duct with cross section of $80 \times 80 \text{ mm}^2$, using the pressure-vacuum type Mach 4 supersonic wind tunnel of Muroran Institute of Technology. The free stream Mach number and unit Reynolds number just upstream of the PSW were $M_\infty = 3.98$, $Re_\infty = 2.6 \times 10^7$. Flow structure of the Mach 4 PSW was clarified by color schlieren photographs and the wall surface shear stress was visualized qualitatively by Shear-Sensitive Liquid Crystal. It reveals that the turbulent boundary layer on the top or bottom wall of the duct separates in large just after the first shock wave of the PSW, and the internal flow of the PSW becomes asymmetric flow.

Key Words : Supersonic Internal Flow, Pseudo-Shock Wave, Shock Wave/Boundary Layer Interaction, Color Schlieren Photography, Shear-Sensitive Liquid Crystal

1. 緒言

流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。上流マッハ数が増加するにつれて両者の干渉が強くなり、複数の衝撃波より成る衝撃波列 (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な役割を果たすと考えられており、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、高圧ガス配管系やスクラムジェットエンジンの分離部などに現れ、圧力変動を伴い、騒音や振動、流路の疲労破壊などを引き起こすため、その構造と特性の解明を行うことは工学上重要である。

本研究では、超音速正方形ダクト内の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流れにおける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、およびせん断力感応液晶による定性的な壁面せん断応力の可視化を行い、調べた。

2. 実験装置および実験方法

2.1 実験装置

本研究では吹出し吸込み式超音速風洞を使用した。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、測定部へと流入する。測定部に流入した空気はその後下流の真空槽へと吸い込まれる。本研究で使用了内部流動用測定部およびシュリーレン測定系の概要をFig.1に示す。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あり、側壁には2つの光学観察用ガラス窓と2つの盲窓を持つ。

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およびせん断力感応液晶を用いた定性的な壁面せん断応力の可視化を行った。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) を前後させることにより後部の開口面

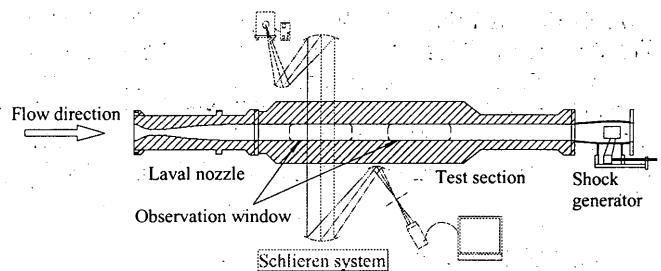


Fig.1 Schematic diagram of the test section and schlieren system

積を変化させることで行った。先頭衝撃波上流の主流のマッハ数と単位長さ当たりのレイノルズ数は $M_\infty = 3.98$, $Re_\infty = 2.36 \times 10^7$ である。カラーシュリーレン法による流れ場の可視化では、光源にナノスパークフラッシュ (閃光時間 30nsec) を使用し、カラーズリットを用いた。

2.4 定性的な壁面せん断応力の可視化

マッハ4擬似衝撃波を伴う流れに働く壁面せん断応力の定性的な可視化を、せん断力感応液晶を用いて行った。せん断力感応液晶は、非感温・感せん断応力のコレステリック液晶混合物である。本研究では、CN/R7 (Hallcrest 社製: 比重 0.9915; 30℃における粘度 $11.5 \text{ Pa}\cdot\text{s}$) を使用した。この液晶はらせん状の分子配列を有しており、この配列により異なる波長を特定の方向に散乱させる。また、色の散乱方向は液晶分子がなすらせん構造の傾斜の程度によって決定されるため、この液晶を観察部に塗布し、流れにさらすと、液晶分子がなすらせん構造が傾斜し、表面に働くせん断応力の大きさが液晶の色の变化として観察できる。このとき、液晶は、せん断応力が零、もしくは非常に小さい部分で赤色を示し、せん断応力が大きくなるにつれて緑色、青色へと変化していく。

液晶の塗布は背景として黒色塗料を薄く塗布した測定部の盲窓に行い、液晶を一度アセトンに重量比 15~20%で溶かした後に噴霧し、乾燥させることで一様な液晶コーティングを得た。盲窓対面にガラス窓を設置して、デジタルビデオカメラおよびデジタルカメラ

Table 1 Locations of the first shock wave and flow confinements

	Side wall	Top wall	Bottom wall
X_f/D	7.0	7.5	8.9
δ_∞/h	0.38	0.53	0.55

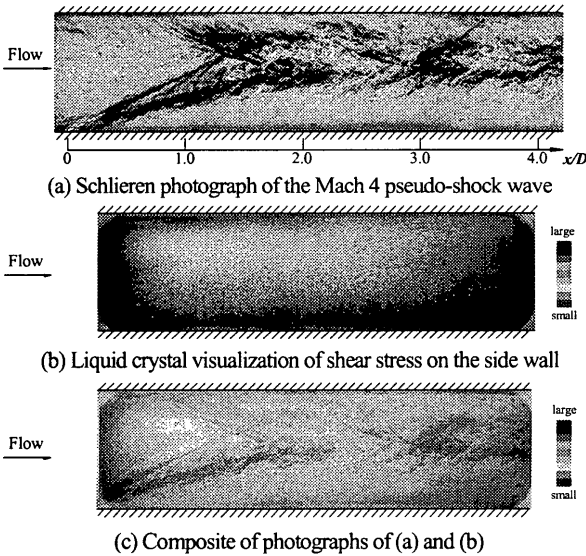


Fig.2 Schlieren photograph of the Mach 4 pseudo-shock wave and liquid crystal visualization of shear stress on the side wall

によって液晶の色の変化を記録した。

本研究では、せん断応力の可視化を測定部側壁、上壁、下壁の3箇所で行った。各実験条件での先頭衝撃波発生位置 X_f/D と境界制限 (flow confinement) δ_∞/h を Table.1 に示す。ここで、 X_f/D はノズル出口端を原点とした先頭衝撃波発生位置までの距離 X_f を管径 D で無次元化した無次元距離である。また、 δ_∞/h は、先頭衝撃波直前の境界層厚さ δ_∞ を管路高さの半分 h で無次元化した無次元境界層厚さである。

3. 実験結果および考察

3.1 側壁面に働く定性的なせん断応力の可視化

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) に液晶による側壁面に働く定性的な壁面せん断応力の可視化結果を示す。流れの方向は左から右である。Fig.2 (a) の横軸の座標は、

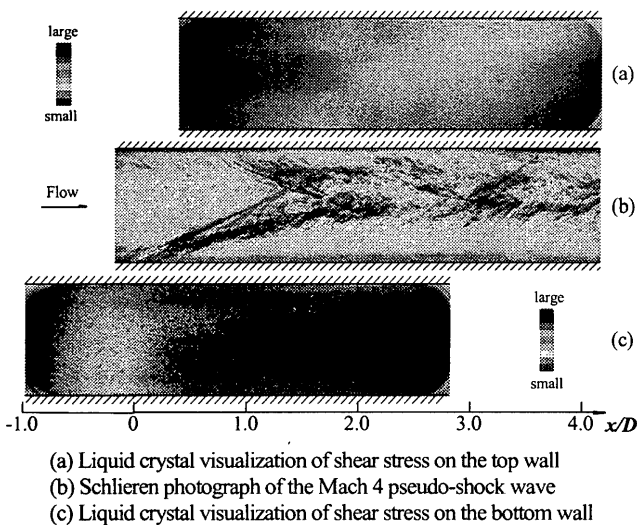


Fig.3 Schlieren photograph of the Mach 4 pseudo-shock wave and liquid crystal visualization of shear stress on the top and bottom walls.

下壁側から発生した斜め衝撃波を延長した線と下壁面との交点を原点とした、衝撃波列領域の無次元距離 x/D を用いている。Fig.2 (c) は、Fig.2 (a), (b) を重ね合わせたものである。それぞれの写真は位置関係に対応させてある。

Fig.2 (a) の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の形状は、中心に垂直部分を持たない上下非対称な X 型となっている。また先頭衝撃波直後には、特に下壁面上では広範囲にわたるはく離領域 (separation region) が存在していると考えられる。Fig.2 (b) および (c) とシュリーレン写真との比較により、上壁側と下壁側にそれぞれ存在する赤色の領域がはく離領域に対応していると考えられる。これにより、上壁側に存在するわずかなはく離領域、および下壁側に存在する大きなはく離領域では小さなせん断応力が生じていることがわかる。また、シュリーレン写真における高速流領域に対応する領域は青色で示され、はく離せん断層に対応する部分は緑色で示されており、それぞれ大きなせん断応力、やや小さなせん断応力が生じていることがわかる。また、青色で示された大きなせん断応力が生じている領域は、先頭衝撃波通過後に上壁側に偏った形となり、そのまま下流方向に続いている。

3.2 上・下壁面に働く定性的なせん断応力の可視化

Fig.3 (a) および Fig.3 (c) に、上壁面および下壁面に働く定性的なせん断応力の可視化結果を、Fig.3 (b) にマッハ4 擬似衝撃波のシュリーレン写真を示す。流れの方向は左から右である。横軸には衝撃波列領域の無次元距離 x/D を用いており、それぞれの写真は位置関係に対応させてある。

Fig.3 (a) の上壁面におけるせん断応力の可視化結果とシュリーレン写真を比較すると、上壁側から発生している斜め衝撃波の足元付近が赤色で示されていることから、この領域がはく離領域に対応していると考えられる。また、この赤色の領域は、ある程度下流に向かうと緑色、青色へと変化する。この赤色から緑色へと変化する領域で再付着が起きていると考えられる。再付着後は中央部が最も青色が強く表れており、せん断応力が最も大きい領域であることがわかる。さらに、この中央部のせん断応力の大きい領域を囲む緑色の領域、すなわちせん断応力のやや小さい領域が存在している。

Fig.3 (c) の下壁面に働くせん断応力の可視化結果より、先頭衝撃波以降に大きく赤色の領域 (せん断応力の小さい領域) が確認できる。シュリーレン写真との比較により、この赤色の領域は、はく離領域に対応していると考えられる。この下壁面に生じるはく離領域は上壁面に生じるはく離領域と比較すると非常に広範囲にわたっている。また、はく離領域は流路下流まで及んでいるため、この写真では再付着の様子を観察することはできない。

4. 結言

マッハ4 擬似衝撃波の流れ構造と特性を明らかにするために、超音速風洞を用いて正方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、およびせん断応力感応液晶による定性的な壁面せん断応力の可視化を行った。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) 側壁面に生じるせん断応力は、高速流領域に対応する領域で大きく、はく離領域に対応する領域では小さい。
- (3) 上壁面に働くせん断応力は、はく離領域に対応する領域では小さい。また、下流側では、中央部のせん断応力の大きな領域を囲むせん断応力のやや小さな領域が存在する。
- (4) 下壁面に働くせん断応力は、広範囲にわたって存在するはく離領域に対応する領域で小さい。

参考文献

- (1) Matsuo, K., Miyazato, Y., and H.D. Kim: 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.