

機関番号：27101  
 研究種目：基盤研究（C）  
 研究期間：2008～2010  
 課題番号：20560166  
 研究課題名（和文） スクラムジェットエンジン分離部における擬似衝撃波の流動機構に関する研究  
 研究課題名（英文） Study on Flow Mechanism of Pseudo-Shock Waves in Scramjet Engine Isolators  
 研究代表者  
 宮里 義昭（YOSHIAKI MIYAZATO）  
 北九州市立大学・国際環境工学部・教授  
 研究者番号：30253537

## 研究成果の概要（和文）：

スクラムジェットエンジン内の分離部のような断面積一定の管内の垂直衝撃波は、壁面に沿って発達する境界層と干渉して擬似衝撃波となる。擬似衝撃波に及ぼす擬似衝撃波直前の境界層の影響が実験的及び理論的に明らかにされる。また、衝撃波を伴う超音速流れを定量的に測定することができる光学系を提案する。さらに曲り管内の圧縮流れを実験的に研究する。

## 研究成果の概要（英文）：

A normal shock wave in a constant area duct such as an isolator in a scram jet engine interacts with a wall boundary layer to form a pseudo-shock wave. Effects of the upstream boundary layer on a pseudo-shock wave are experimentally and theoretically clarified. Also, an optical system for measuring a complex shock containing supersonic flow quantitatively is presented. Further, compressible flow in curved ducts is experimentally studied.

## 交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2008年度	2,000,000	600,000	2,600,000
2009年度	900,000	270,000	1,170,000
2010年度	700,000	210,000	910,000
計	3,600,000	1080,000	4,680,000

研究分野：圧縮性流体力学

科研費の分科・細目：機械工学・流体工学

キーワード：分離部，ショックトレイン，擬似衝撃波，シュリーレン法，曲り管

## 1. 研究開始当初の背景

経済産業省は2005年6月に、日本とフランスの航空機業界が、東京とニューヨーク間の飛行時間を6時間に半減させることも可能な次

世代の超音速旅客機（Supersonic Transport：通称SST）開発に向け、共同研究することで合意したことを発表した。この将来のSSTに搭載されるエンジンとして、超音速燃焼ラムジ

ェット (Supersonic combustion ramjet, スクラムジェットと略称されている) エンジンの研究が世界各国で盛んに行われている。

スクラムジェットエンジンは、大別して、空気取入口、分離部、燃焼器、超音速ノズルから構成されており、特に非常に高いマッハ数において高効率で運転できる可能性をもっている。空気取入口から超音速でエンジンに入ってきた空気の流れは、分離部で衝撃波により減速され、燃焼器で加熱されて高温高圧状態になり、超音速ノズルで加速されて排出される。スクラムジェットエンジンの分離部には、構造が単純な断面積一定のダクトが用いられることも多く、その内部に発生する衝撃波とエンジンの壁面に沿って発達する境界層との干渉の結果生じるショックトレーンあるいはその下流の混合領域まで含めた擬似衝撃波は、エンジン性能に大きく影響を与えるため、その特性を調べるのが重要な研究テーマのひとつになっている。擬似衝撃波に関しては、国外では、アメリカのフロリダ大学、ワシントン大学、NASA、McDonnell Douglas 社、Rockwell International 社、国内では、JAXA、東北大学、室蘭工業大学、東京工業大学、九州大学などで盛んに研究が行われている。

## 2. 研究の目的

本研究では、スクラムジェットエンジンの分離部として断面積一定の直管を用い、この管内に発生するショックトレーンの形成機構と擬似衝撃波による圧力回復やその長さに及ぼす擬似衝撃波上流の境界層の影響を実験的および理論的に調べる。また、スクラムジェットエンジン内で曲りを伴う流路を通る流れを模擬するために、バンドとエルボを通る圧縮流れの実験的研究を行った。さらに、将来的に円管内のショックトレーンと擬似衝撃波の特性を定量的に調べるための光

学系として、非接触定量的可視化法であるレインボーシュリーレン偏向法を開発する。

## 3. 研究の方法

本研究では、間欠式の大気吹出し式超音速風洞と連続式の大気吸込み式超音速風洞を用いて断面積一定の直管内の擬似衝撃波の流動機構に及ぼす擬似衝撃波直前の境界層厚さの影響をつぎのように実験的および理論的に調べる。ナイフエッジを用いたモノクロシュリーレン法と3色フィルターを用いたカラーシュリーレン法による光学的可視化を用いて、ショックトレーンの構造を定性的に調べる。擬似衝撃波領域の流路中心軸上の構造を定量的に測定するために、超小型高感度圧力センサーを内部に内蔵した二重管構造を持つ通しピトー管を製作する。擬似衝撃波領域の壁面静圧測定を詳細に行い、擬似衝撃波による圧力回復やその長さを定量的に調べる。擬似衝撃波による圧力上昇を理論的に予測するための物理モデルを提唱する。また、スクラムジェットエンジン内で曲りを伴う流路を通る圧縮流れを模擬するために、直角バンドと直角エルボによる曲り管を通る圧縮流れを曲り管前後の圧力測定と曲り管を通る流れのシュリーレン法による可視化および曲り管を通る流れの質量流量の測定により実験的に調べる。さらに、将来的に円管内のショックトレーンと擬似衝撃波の構造を非接触で定量的に可視化観察できるシュリーレン光学系を開発する。

## 4. 研究成果

本研究で得られた主な成果はつぎのとおりである。

(1) 断面積一定の管内における擬似衝撃波の流動機構に及ぼす擬似衝撃波直前の境界層厚さの影響を調べる実験研究と理論解析からつぎのことが明らかになった。

擬似衝撃波直前の主流マッハ数が一定のとき、擬似衝撃波直前の境界層相対厚さの増加にともない擬似衝撃波による圧力上昇が小さくなる。

擬似衝撃波の長さは、擬似衝撃波直前の境界層相対厚さの増加とともに増加する。

境界層を考慮した流れモデルを提案し、擬似衝撃波前後の圧力上昇を解析的に求めて本実験結果と比較検討した結果、解析結果は本実験結果と定性的に良く一致する。

境界層相対厚さが厚いとき、垂直衝撃波はその直前の主流マッハ数が 1.5 以下の場合でも境界層との干渉により、ショックトレインになる。

(2) 断面積一定の管内における擬似衝撃波領域の構造を調べるために、壁面静圧測定および流路中心軸上の静圧測定を行った。本実験における擬似衝撃波直前の主流マッハ数は約 1.3 でブロックage比  $B$  (管断面積に対する境界層の占める割合)は 6.9%~8.9%である。流れを光学観察するためにカラーシュリーレン法を用いた。光源には発光時間 20ns のキセノンフラッシュ光源を用いた。本実験によって得られた結論は以下の通りである。

流路中心軸上の静圧を測定するための通しピトー管を作製した。通しピトー管は二十管構造となっており、外径 2.2mm、内径 2.0mm の外管の中に外径 1.9mm、内径 1.7mm の内管を挿入している。内管には幅 1.7mm で長さ 200 のスリットが設けられ、スリットの中心には内管に設けた直径 0.5mm の静圧孔が位置する。内管の静圧孔の直後に半導体圧力センサーを取り付けた。この通しピトー管を用いれば、衝撃波が境界層と干渉しない領域を空間的および時間的にも詳細に測定できる。

衝撃波直前の主流マッハ数が 1.5 以下の場合でもブロックage比  $B$  が 0.078 を超えると、垂直衝撃波は壁面境界層との干渉の結果シ

ョックトレインとなる。

擬似衝撃波を構成するショックトレイン領域では、流路中心軸上の静圧は波状に変化する。なお、スルーチューブを挿入することで、ショックトレインの先頭衝撃波は垂直衝撃波に近くなる。

本実験では、ショックトレイン直後の混合領域の長さはほとんどない。

ブロックage比の増加に伴い、流路中心軸上のショックトレインによる静圧の波状の変化は小さくなる。

(3) スロート近くの垂直衝撃波と層流境界層の干渉の結果から以下のことがわかった。

衝撃波直前の主流マッハ数が 1.3 以下の場合でも、垂直衝撃波は層流境界層との干渉の結果ショックトレインになる。

擬似衝撃波前後の静圧比は、境界層相対厚さの増加にともない減少する。

(4) 軸対称ノズルからの超音速噴流の断面における密度を定量的に精度良く求める可視化法を開発した。以上の結果は、スクラムジェットエンジンを開発する際の重要な設計指針になることが考えられる。またこれらの研究結果は、将来的に円管内の擬似衝撃波の特性を定量的に調べるための光学系として非常に有効である。これらの研究によって得られた結論は以下の通りである。

幅 1.4mm の間で色相の値が  $0^\circ$  から  $314^\circ$  まで連続的に変化するレインボーフィルターを作製した。本実験の場合、空間分解能は  $18.5\mu\text{m}$  であるが、これは、ピンホールのおおきさ、集光レンズの焦点距離、レインボーフィルターの色相の解像度、デジタルカメラの解像度に依存する。

レインボーフィルターによるシュリーレン法は、従来の 3 色フィルターによるシュリーレン法に比べて、噴流の中心軸に対して垂直方向の密度こう配の変化をより詳細に観

察できる。また、ノズル出口から下流方向への噴流のせん断層の変化をとらえることができる。さらに、適正膨張超音速噴流のマッハ波を明瞭に観察することができる。

レインボーシュリーレン法による密度の計測値は、ポテンシャルコアから噴流の周囲までの急激な密度の減衰を示すことができる。

レインボーシュリーレン法によって計測された密度の値は、噴流の中心軸上では理論値に対して約6%の誤差をもつ。噴流の中心軸上を除けば、レインボーシュリーレン法による密度の計測値は、ピトー管による計測値と定量的に極めて良く一致する。

レインボーシュリーレン法は、マッハディスクを伴う過膨張噴流の流れ場全体の密度値を容易に取得することができる。

レインボーシュリーレン法によって得られた過膨張噴流内のマッハディスク前後の密度値は、非粘性理論による垂直衝撃波前後の密度値と定量的に良く一致する。

(5) スクラムジェットエンジンの分離部の一部は、曲り管となっている場合があるため、バンドやエルボ等の曲り管を通る圧縮流れの実験的研究を行った。その結果を要約すると以下の通りとなる。

風洞圧力比を増加させると、バンドを通る圧縮流れはバンド出口でチョークするが、エルボを通る圧縮流れはエルボ内部でチョークし、その背後にショックトレーンを伴う。

曲り管を通る圧縮流れを、損失を伴う一次元流れと仮定して解析を行い、直角バンドと直角エルボの損失係数を評価した。

## 5. 主な発表論文等

### 〔雑誌論文〕(計7件)

Miyazato, Y., Ishida, Y., Yamamoto, H., and Matsuo, K., Measurements in Overexpanded

Supersonic Jets by Rainbow Schlieren Deflectometry, 49th AIAA Aerospace Sciences Meeting, 査読あり, AIAA Paper, No. 2011-984, 2011, CD-ROM.

山本秀樹, 柳裕樹, 安信強, 宮里義昭, 松尾一泰, 曲り管内の圧縮流れに関する実験, 可視化情報, 査読あり, 30巻, 増刊2号, 2010, pp.183-184.

宮里義昭, 入江将之, 山本秀樹, 松尾一泰, レインボーシュリーレン偏向法による適正膨張超音速噴流の計測, 日本機械学会論文集, 査読あり, 76巻, 768号, 2010, pp.1129-1133.

Yamamoto, H., Irie, M., Miyazato, Y. and Matsuo, K., Application of Rainbow Schlieren Deflectometry for Axisymmetric Supersonic Jets (Comparison of Experiments with Numerical Analysis), J. of Thermal Science, 査読あり, Vol.19, No.3, 2010, pp.218-221.

Miyazato, Y., Irie, M., Yamamoto, H., and Matsuo, K., Quantitative Flow Visualization of Correctly Expanded Supersonic Jets by Rainbow Schlieren Deflectometry, 48th AIAA Aerospace Sciences Meeting, 査読あり, AIAA Paper, No.2010-1218, 2010, CD-ROM. Miyazato, Y., and Matsuo, K., Experimental and Theoretical Investigations of Normal Shock Wave/Turbulent Boundary-Layer Interactions at Low Mach Numbers in a Square Straight Duct, 47th AIAA Aerospace Sciences Meeting, 査読あり, AIAA Paper, No.2009-925, 2009, CD-ROM.

宮里義昭, 吉村文, 入江将之, 山本秀樹, 松尾一泰, レインボーシュリーレン偏向法による軸対称超音速噴流の密度計測, 可視化情報, 査読あり, 29巻, 増刊2号, 2009, pp.185-186.

### 〔学会発表〕(計10件)

Miyazato, Y., Ishida, Y., Yamamoto, H., and Matsuo, K., Measurements in Overexpanded Supersonic Jets by Rainbow Schlieren Deflectometry, 49th AIAA Aerospace Sciences

Meeting , AIAA Paper, No. 2011-984 ,Florida, USA , 2011 , CD-ROM .

山本秀樹, 柳裕樹, 安信強, 宮里義昭, 松尾一泰, 曲り管内の圧縮流れに関する実験, 可視化情報 30巻 増刊2号 ,名古屋 2010 , pp.183-184 .

Miyazato,Y., Irie,M., Yamamoto,H., and Matsuo,K., Quantitative Flow Visualization of Correctly Expanded Supersonic Jets by Rainbow Schlieren Deflectometry, 48th AIAA Aerospace Sciences Meeting , AIAA Paper, No.2010-1218 , Florida, USA , 2010 , CD - ROM .

Miyazato,Y., and Matsuo,K., Experimental and Theoretical Investigations of Normal Shock Wave/Turbulent Boundary- Layer Interactions at Low Mach Numbers in a Square Straight Duct , 47th AIAA Aerospace Sciences Meeting , AIAA Paper , No.2009-925 , Florida, USA , 2009 , CD-ROM .

宮里義昭, 吉村文, 入江将之, 山本秀樹, 松尾一泰, レインボーシュリーレン偏向法による軸対称超音速噴流の密度計測, 可視化情報 , 29 巻, 増刊 2 号, 米沢, 2009 , pp.185-186 .

Yamamoto,H., Irie,M., Miyazato,Y., and Matsuo,K., Application of Rainbow Schlieren Deflectometry for Axisymmetric Supersonic Jets (Comparison of Experiments with Numerical Analysis), Proceedings of 9th International Symposium on Experimental and Computational Aerothermodynamics of Internal Flows, Gyeongju , Korea , 2009.

Miyazato,Y., Yamamoto,H., Yoshimura,A., and Matsuo, K., Application of Rainbow Schlieren Deflectometry for Axisymmetric Supersonic Jets (Experimental Investigations), Proceedings of 9th International Symposium on Experimental and Computational Aerothermodynamics of Internal Flows, Matsue, , Gyeongju , Korea , 2009.

宮里義昭, 吉村文, 入江将之, 松尾一泰, レインボーシュリーレン光学計測に関する

基礎実験, 平成 20 年度衝撃波シンポジウム講演論文集, 名古屋, 2009 .

宮里義昭, 笠田亮, 松尾一泰, 断面積一定の管内における低マッハ数の垂直衝撃波と乱流境界層の干渉, 日本機械学会流体工学部門講演論文集, 名古屋, 2009 .

Miyazato,Y., Yaji,H., and Matsuo,K., Investigation of Weak Normal Shock Wave/Laminar Boundary Layer Interactions in Ducts, Proceedings of 12th Asian Congress of Fluid Mechanics, Daejeon, Korea, , 2008 , CD - ROM .

〔図書〕(計 0 件)

〔産業財産権〕

出願状況 (計 0 件)

取得状況 (計 0 件)

## 6 . 研究組織

研究代表者

宮里 義昭 (MIYAZATO YOSHIKI)

北九州市立大学・国際環境工学部・教授

研究者番号 : 30253537