

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2007～2009

課題番号：19560788

研究課題名（和文） 超音速境界層の乱流遷移機構の解明と制御に関する基礎研究

研究課題名（英文） A Fundamental Study on the Clarification and Control of Supersonic Boundary Layer Transition

研究代表者

坂上 昇史 (SAKAUE SHOJI)

大阪府立大学・工学研究科・助教

研究者番号：70244655

研究成果の概要（和文）：超音速境界層の乱流遷移機構の解明を目的とし、校正法を確立した定量化シュリーレン法やピトー管、熱線流速計等による実験計測と数値計算を用いて超音速境界層の遷移流れを調べた。その結果、遷移が、亜音速流と同様、縦渦やストリーク構造といった壁乱流構造に支配され、超音速境界層内でも乱流斑点が形成されることを明らかにし、さらに、遷移予測や層流維持制御などの応用上重要な乱流維持下限レイノルズ数に関する知見を得た。

研究成果の概要（英文）：In order to clarify the mechanism for supersonic boundary layer transition, we examine a supersonic boundary layer along a small tunnel nozzle wall with rectangular cross section using calibrated quantitative schlieren optical system, Pitot-tube, hot-wire and DNS with focusing efforts on finding non-linear disturbances governing the transition. The results clearly show that the transition examined in this study is the same as the subsonic case initially governed by low-speed streaks and streamwise vortices which can lead to the formation of turbulent spots. Also, we obtain useful numerical data and knowledge on the supersonic boundary layer transition, such as transition Reynolds number which is important not only for the transition prediction but for the laminar flow control.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2007年度	1,600,000	480,000	2,080,000
2008年度	1,100,000	330,000	1,430,000
2009年度	800,000	240,000	1,040,000
年度			
年度			
総計	3,500,000	1,050,000	4,550,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：総合工学・航空宇宙工学

キーワード：航空宇宙工学, 流体力学, 超音速境界層, 乱流遷移, 乱流制御

1. 研究開始当初の背景

超音速境界層が乱流に遷移すると壁面摩擦や熱伝達特性が劇的に変化する。このため、宇宙往還機に代表される超音速・極超音速機開発においては、抗力評価や熱防御設計のた

めに乱流遷移を高精度に予測することが求められている。乱流遷移を高精度に予測するためには、(1)主流乱れや壁面粗度等の外乱が遷移に及ぼす影響、(2)境界層遷移を支配する攪乱の生成・発達過程、(3)攪乱

の生成・発達を支配する不安定性、等の乱流遷移機構に関する知識が不可欠である。

亜音速流の場合、よく知られているように、平板境界層の乱流遷移は、主流乱れなどの外乱が弱い場合には線形不安定の臨界レイノルズ数（運動量厚さ θ に基づく値で $Re_\theta = 200$ ）より大きい超臨界レイノルズ数領域において、TS波（固有攪乱）の線形増幅から始まる。TS波の振幅がある一定のしきい値（主流速度の0.3~1%）に達すると、2次不安定により3次元攪乱（斜行波）が成長して高剪断層が形成され、さらに高周波2次不安定により高剪断層が崩壊しヘアピン渦が形成される段階になると、壁近傍にストリークや縦渦、壁剪断層が形成され、それらが発達・崩壊して局所的な壁乱流状態（乱流斑点）が生まれる¹⁾。この乱流斑点が成長・増加し流れ場全体を埋め尽くすと全域で発達した乱流状態となる。外乱が強い場合には、TS波の線形増幅過程がバイパスされて、外乱により直接ストリーク、縦渦、壁剪断層が形成され、それらが発達・崩壊する不安定性の連鎖によって乱流斑点が生じ、 $Re_\theta = 120$ の亜臨界レイノルズ数領域でも乱流へ遷移（亜臨界遷移）し、 $Re_\theta = 300$ 程度で発達した乱流状態となることが明らかにされている^{2,3)}。

すなわち、乱流遷移機構の解明や遷移予測手法の精度向上を考える場合、固有攪乱の線形発達過程だけでなく、ストリーク、縦渦、壁剪断層といった壁乱流構造の生成やその発達・崩壊から乱流斑点の形成過程に関する知識が不可欠であるといえる。

一方、超音速流の場合、層流境界層中の微小振幅変動が熱線計測され^{4,6)}、変動の増幅率や振幅分布が線形安定性解析による固有攪乱のそれに一致する結果が得られている。しかし、この固有攪乱の発達からどのようにして遷移に至るかについては実験で明らかされていない。また、数値計算⁷⁻⁹⁾により超音速流の場合に支配的な固有攪乱である3次元攪乱（斜行波）がそれぞれ反対方向に伝播する場合に、それら斜行波対の相互干渉により縦渦を形成することが示されているが、彼らの計算結果に対応する実験データは従来から皆無である。また、超音速境界層遷移に関する従来の研究の多くは、遷移位置（遷移レイノルズ数）に主眼を置き、攪乱には注目していない。例えば、壁面摩擦応力を計測したColes¹⁰⁾は、主流マッハ数1.97の平板境界層の自然遷移は $Re_\theta = 940$ 付近から、前縁近傍に円柱列のトリップを置く場合の遷移は $Re_\theta = 390$ 付近から始まり、 $Re_\theta < 2000$ では発達した乱流境界層は得られないという結果を得ているが、遷移を支配する攪乱や遷移機構については未解明のままである。

超音速境界層の乱流遷移も上述の亜音速流と類似な現象であると考えられる。しかし、

超音速流の場合、乱流に導く攪乱を実験的に把握することが困難であり、それゆえに、知識がなかなか進んでいない¹¹⁾。困難の主たる原因としては、超音速風洞実験において流れの構造を可視化することが従来の風洞ではほとんど不可能に近い状況にあったことをあげることができる。

この状況を打破するため、研究代表者らは吸込式小型超音速風洞のノズル壁に沿う境界層に着目し、その遷移流の可視化・計測によって流れの構造を捉える努力を続けていた。その結果、(1) 亜音速境界層に比べて固有攪乱の増幅率が小さいにもかかわらず固有攪乱の1波長（境界層厚さの10倍）程度で層流から乱流への遷移が生じること、

(2) この遷移過程における変動構造は、従来から注目されていた発達した超音速乱流境界層中の組織構造と同様の構造であり、遷移初期ではそれが間欠的に現れることを明らかにした。さらに、(3) 壁乱流を特徴づけるストリークや縦渦の生成・崩壊、乱流斑点の形成を捉え、(4) 超音速境界層の乱流遷移が、TS波タイプの固有攪乱の線形増幅からではなく、亜音速境界層における亜臨界遷移のように、ストリーク・縦渦・壁剪断層といった壁乱流を特徴づける現象に支配されていることを示唆する結果を得ていた^{12,13)}。

引用文献：

- 1) 西岡, 「流体力学の世界」日本流体力学会編, 朝倉書店, 105-139 (1990).
- 2) M. Asai, M. Nishioka, J. Fluid Mech., 297, 101-122 (1995).
- 3) 西岡, 筆山, 濱岡, 日本流体力学会誌「ながれ」, 18, 402-405 (1999).
- 4) J. Laufer, T. Vrebalovich, J. Fluid Mech., 9, 257-299 (1960).
- 5) J. M. Kendall, AIAA J., 13, 290-299 (1975).
- 6) P. Graziosi, G. L. Brown, J. Fluid Mech., 472, 83-124 (2002).
- 7) A. Thumm, W. Wolz, H. Fasel, Laminar-Turbulent Transition (Springer), 303-308 (1990).
- 8) C-L. Chang, M. R. Malik, J. Fluid Mech., 273, 323-360 (1994).
- 9) N. A. Adams, L. Kleiser, J. Fluid Mech., 317, 301-335 (1996).
- 10) D. Coles, J. Aero. Sciences, 21, 433-448 (1954).
- 11) E. Rehotko, AIAA paper 94-0001 (1994).
- 12) 坂上, 西岡, 中村, 宮地, 日本流体力学会誌「ながれ」, 23 別冊, 146-147 (2004).
- 13) 坂上, 中村, 西岡, 日本流体力学会誌「ながれ」, 24 別冊, AM05-04-008 (2005).

2. 研究の目的

本研究は、申請者らが注目し、実験的に追

跡しているこれらの構造の生成・発達過程を把握し、高精度遷移予測法の確立だけでなく、抵抗低減を目指した層流維持制御技術の開発や乱流制御、乱流の数値計算モデル構築等に直結する、超音速境界層の乱流遷移機構を解明することを目的とする。

3. 研究の方法

(1) 定量化シュリーレン法の校正法の確立

本研究では、超音速境界層遷移の計測に、流れ場を可視化するとともにその密度勾配場を非接触で計測可能なシュリーレン光学系を用いた定量計測法を適用するため、まず、その校正法を確立する。

シュリーレン光学系による定量計測の基本原則は、流れ場の密度勾配に比例して生じる光の屈折角を、光学系の焦平面における光源像の移動量として計測し、その結果を基に密度勾配を評価することであり、焦平面にナイフエッジを設置する通常のシュリーレン光学系を用いる場合、光源像の移動によって画像の輝度(明暗)が変化する。したがって、

- ① 光の屈折角が既知であるプリズム等を用い、画像の輝度変化と屈折角の関係を校正する。
- ② 校正された光学系を用いて密度勾配場が容易に推定できる流れ場(Prandtl-Meyer流)を計測する。
- ③ 以上の結果から、シュリーレン光学系を用いた定量計測法の問題点や計測精度を明らかにし、その校正法を確立する。

(2) 超音速境界層の乱流遷移を支配する攪乱の解明

ノズル壁境界層が測定部まで層流に維持され、その遷移過程を計測可能であるとともに、側壁がスロート上流から測定部下流までほぼ全域ガラス壁でノズル内流れ全体をシュリーレン光学系により可視化可能である小型超音速風洞を用い、超音速境界層の乱流遷移を支配する攪乱を解明し、乱流維持下限レイノルズ数を明らかにする。

- ① ノズル壁境界層の乱流遷移を定量化シュリーレン法、ピトー管、熱線流速計等によって計測する。
- ② 得られた結果から、遷移過程において観察される変動構造について、遷移機構解明において非常に重要な、次の点を明らかにする：(i) 攪乱のスケール(流れ方向の波長や壁垂直・スパン方向の空間分布)、(ii) 移流速度、(iii) 変動実効値、(iv) スペクトル(変動波形および攪乱の間欠性を含む)。このうち、(i)~(iii)は遷移抑制の観点から、(iii)、(iv)は遷移予測手法改善の観点からも重要である。
- ③ 超音速境界層の乱流遷移を支配する非線形攪乱の励起に関し、その機構を把握し、

励起に関わる外乱のタイプを調べて、遷移機構を解明するとともに、応用上重要である乱流維持下限レイノルズ数を明らかにする。また、これまでの実験で観察されている超音速境界層中におけるストリークや縦渦といった壁乱流を特徴づける構造の生成・崩壊過程や乱流斑点の内部構造を明らかにする。

- ④ 数値計算を併用して、実験だけでは十分に得られないノズル内流れの詳細を解析し、観察される現象や遷移を支配する不安定性のタイプや特性を明らかにする。

(3) 横流れ不安定による超音速境界層遷移機構の解明

超音速・極超音速機翼は後退角を有し、翼境界層には横流れが生じ、横流れ成分の速度分布に存在する変曲点に起因する横流れ不安定が遷移に及ぼす影響が無視できない。このような翼境界層の遷移は、層流制御という実用的要請により多くの研究が行われているが、超音速機翼境界層の遷移過程の詳細は明らかにされていない。一方、超音速ノズルの加速部における流れは、主流に向心力を与える圧力勾配がノズル壁の曲率中心方向に存在し、それが側壁境界層内の低速流体にも印加されるため、圧力勾配の方向に2次流れ(横流れ)が生じる。そこで、このノズル側壁境界層によって、超音速機翼境界層に生じる横流れ不安定による乱流遷移を模擬し、その遷移機構(遷移を支配する非線形攪乱)や遷移レイノルズ数、乱流維持下限レイノルズ数について明らかにする。

4. 研究成果

(1) 定量化シュリーレン法の校正法の確立

密度勾配場を非接触で計測可能な定量化シュリーレン法を超音速境界層遷移の計測に適用するため、平行光束を一定角度だけ一様に屈折させる光学ガラス基盤を用いてシュリーレン光学系を校正し、屈折角計測上の誤差の程度を明らかにした。また、この光学ガラスを用いた光学系の再現性を確認する方法について、その精度と有効性を検討した。さらに、校正された光学系を用いて、Prandtl-Meyer流と超音速乱流境界層の密度勾配分布を計測し、数値計算結果やピトー管による計測結果と比較を行い、その計測精度を確認するとともに、超音速風洞通風時に生じる側壁ガラス歪みがシュリーレン光学系を用いた定量計測上問題となることを明らかにした。

(2) 超音速境界層の乱流遷移を支配する攪乱の解明

上記校正法によって校正されたシュリーレン光学系とピトー管を用いて超音速境界

層の乱流遷移過程を計測し、遷移過程の平均流を密度勾配分布で示した。その結果、遷移開始時に壁近傍の密度勾配が特徴的に増すことを明らかにした。また、この平均密度勾配分布の変化に伴って境界層外層の流体を壁近傍に、壁近傍流体を外層に運ぶ速度変動が生じていること、このような輸送を担う攪乱として、乱流境界層中で従来から注目されている組織構造に酷似した斜めに傾いた渦構造が観察されることを明らかにした。

次に、境界層遷移過程における渦度攪乱を瞬間シュリーレン画像から調べた。その結果、壁から立ち上がり流れ方向に $30^{\circ} \sim 70^{\circ}$ 傾いた渦構造が遷移初期段階から集団として現れ始め、これが境界層を埋め尽くすと発達した乱流境界層となること、その高さや間隔の平均値は境界層厚さのスケールを有することを明らかにした。また、渦構造の高さの累積度数分布、すなわち、高さに着目した渦構造の存在確率分布は乱流に近づくにつれて境界層外層の平均密度勾配分布と相似になること明らかにし、注目した斜め渦構造が境界層平均分布を支配し超音速境界層の遷移機構として中心的な役割を果たす非線形攪乱であるとの結論を得た。

さらに、矩形断面超音速風洞のノズル壁境界層の乱流遷移を引き起こすことが実験により示唆されている矩形断面超音速風洞角部流れを数値計算によって調べた。その結果、曲率中心方向に向かう圧力勾配により側壁境界層内に2次流れが生じ、この2次流れによって壁近傍に流れ方向の渦度をもつ流体の層が形成され、それが矩形断面の角部をまわるとともに集中して縦渦群が形成されること、この縦渦は低速ストリークを形成するとともに成長してその近傍に新たな縦渦を生成すること、この縦渦群を伴う不安定な流れの発生位置や空間スケールは実験で観察した結果と一致し、遷移の攪乱源となることを明らかにした。

(3) 横流れ不安定による超音速境界層遷移機構の解明

後退角を有する超音速機翼境界層の乱流遷移に及ぼす影響が無視できない横流れ不安定による乱流遷移機構について調べた。

まず、前述の数値計算によって得られた超音速ノズル壁の境界層分布をもとに横流れ不安定について安定性解析を行い、実験で観察されるストリーク構造の空間スケールが解析結果とほぼ一致することを確認した。

次に、このストリーク構造の不安定性によって壁乱流特有の攪乱が成長して乱流に遷移する一連の攪乱増幅過程をシュリーレン法による可視化で捉えたとともに、超音速境界層の遷移過程においても乱流斑点が形成されることをシュリーレン法による可視化

で捉えることに成功し、壁近傍のストリーク構造の特徴から判断して、それが亜音速境界層の遷移過程であられるものと類似であることを初めて明らかにした。

さらに、横流れ不安定によるストリーク構造の崩壊や乱流斑点の発達から乱流遷移する位置が非圧縮流の場合の横流れレイノルズ数に基づく遷移レイノルズ数に対応することを確認し、横流れ不安定による乱流遷移の下限レイノルズ数を明らかにした。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計16件)

- ① 坂上昇史, 西岡通男, シュリーレン光学系による流れの定量計測: 1. 光学系の校正, 日本流体力学会誌「ながれ」, 査読有, vol.28, 2009, 139-147.
- ② 坂上昇史, 西岡通男, シュリーレン光学系による流れの定量計測: 2. 膨張波を用いた精度評価, 日本流体力学会誌「ながれ」, 査読有, 28, 2009, 241-248.
- ③ 坂上昇史, 西岡通男, 定量化シュリーレン法による超音速乱流境界層の計測と壁近傍誤差要因の考察, 日本流体力学会誌「ながれ」, 査読有, 28, 2009, 249-256.
- ④ 坂上昇史, 西岡通男, 超音速境界層遷移における平均流特性, 日本流体力学会誌「ながれ」, 査読有, 28, 2009, 315-325.
- ⑤ 坂上昇史, 西岡通男, 超音速境界層遷移を支配する非線形攪乱, 日本流体力学会誌「ながれ」, 査読有, 28, 2009, 327-335.
- ⑥ 坂上昇史, 西岡通男, 超音速角部流れの数値的研究, 日本流体力学会誌「ながれ」, 査読有, 28, 2009, 337-345.
- ⑦ M. Nishioka, Rotta skin friction law and Schoenherr formula, Fluid Dynamics Research, 査読有, vol.41, 2009, 045509.
- ⑧ 坂上昇史, 堀井真吾, 新井隆景, 西岡通男, 超音速ノズル境界層に生じる横流れ不安定性, 第58回理論応用力学講演会講演論文集, 査読無, 2009, 131-132.
- ⑨ 西岡通男, 乱流境界層オーバーラップ領域の解析, 日本流体力学会誌「ながれ」, 査読無, 28別, 2009, 162.
- ⑩ 樋上恵介, 坂上昇史, 新井隆景, 西岡通男, 横方向汚染による超音速境界層の乱流遷移, 日本流体力学会誌「ながれ」, 査読無, 28別, 2009, 167.
- ⑪ 坂上昇史, 堀井真吾, 新井隆景, 西岡通男, 超音速ノズル境界層に生じるストリーク構造と横流れ不安定性, 日本流体力学会誌「ながれ」, 査読無, 28別, 2009, 285.
- ⑫ A.Kondo, S.Sakaue, T.Arai, Fluctuation of Mass Flux and Concentration on Supersonic

- Mixing using Streamwise Vortices, 査読有, 2008, AIAA Paper AIAA-2008-2535.
- ⑬ M. Asai, Y. Konishi, Y. Oizumi, M. Nishioka, Growth and breakdown of low-speed streaks leading to wall turbulence, Journal of Fluid Mechanics, 査読有, vol.586, 2007, 371-396.
- ⑭ S. Goto, N. Ishii, S. Kida, M. Nishioka, Turbulence generator using a precessing sphere, Physics of Fluids, 査読有, vol.19, 2007, 061705.
- ⑮ 西岡通男, 高レイノルズ数における平板境界層の乱流摩擦, 日本流体力学会誌「ながれ」, 査読無, 27 別, 2008, 40.
- ⑯ 近藤暁, 坂上昇史, 新井隆景, 縦渦が導入された超音速混合場の濃度・質量流束変動測定, 日本流体力学会誌「ながれ」, 査読無, 27 別, 2008, 80.
- [学会発表] (計 17 件)
- ① H. Hayase, A. Kondo, S. Sakaue, T. Arai, Effect of Incoming Boundary Layer Characteristics on Breakdown of Supersonic Streamwise Vortices for Supersonic Mixing, Asian Joint Conference on Propulsion and Power 2010, 2010/3/4-6, 宮崎.
- ② 林勇太, 坂上昇史, 新井隆景, 低速ストリークによって生じる攪乱の横方向汚染, 第 46 回日本航空宇宙学会関西・中部支部合同秋期大会, 2009/11/27, 京都.
- ③ A. Kondo, H. Hayase, S. Sakaue, T. Arai, Effect of Expansion Ramp Angle on Supersonic Mixing using Streamwise Vortices, 16th AIAA/DLR/DGLR International Space Planes and Hypersonic Systems and Technologies Conference, 2009/10/19-22, Bremen, Germany.
- ④ 西岡通男, 乱流境界層オーバーラップ領域の解析, 日本流体力学会年会 2009, 2009/9/2-4, 東京.
- ⑤ 樋上恵亮, 坂上昇史, 新井隆景, 西岡通男, 横方向汚染による超音速境界層の乱流遷移, 日本流体力学会年会 2009, 2009/9/2-4, 東京.
- ⑥ 坂上昇史, 堀井真吾, 新井隆景, 西岡通男, 超音速ノズル境界層に生じるストリーク構造と横流れ不安定性, 日本流体力学会年会 2009, 2009/9/2-4, 東京.
- ⑦ 坂上昇史, 堀井真吾, 新井隆景, 西岡通男, 超音速ノズル境界層に生じる横流れ不安定性, 第 58 回理論応用力学講演会, 2009/6/9-11, 東京.
- ⑧ 西岡通男, 壁乱流のオーバーラップ層, 第 43 回「境界層遷移の解明と制御」研究会, 2008/10/2-3, 東京.
- ⑨ 西岡通男, 高レイノルズ数における平板境界層の乱流摩擦, 日本流体力学会年会 2008, 2008/9/4-7, 神戸.

- ⑩ 近藤暁, 坂上昇史, 新井隆景, 縦渦が導入された超音速混合場の濃度・質量流束変動測定, 日本流体力学会年会 2008, 2008/9/4-7, 神戸.
- ⑪ 氏家正喜, 坂上昇史, 新井隆景, 境界層に導入された縦渦対による乱流遷移に関する実験的研究, 第 44 回日本航空宇宙学会関西・中部支部合同秋季大会, 2007/11/30, 大阪.
- ⑫ 森岡朋大, 坂上昇史, 新井隆景, 超音速キャビティ流の受動制御に関する研究, 第 44 回日本航空宇宙学会関西・中部支部合同秋季大会, 2007/11/30, 大阪.
- ⑬ 近藤暁, 高橋寛隆, 坂上昇史, 新井隆景, 縦渦が導入された超音速混合場における燃料噴射の影響, 第 44 回日本航空宇宙学会関西・中部支部合同秋季大会, 2007/11/30, 大阪.
- ⑭ 西岡通男, 乱流境界層の速度分布に関する考察, 第 41 回「境界層遷移の解明と制御」研究会, 2007/10/4-5, 東京.
- ⑮ 坂上昇史, 五十川康司, 新井隆景, 西岡通男, 超音速境界層遷移の熱線計測, 日本流体力学会年会 2007, 2007/8/6-8, 東京.
- ⑯ 近藤暁, 坂上昇史, 新井隆景, 二線式平行熱線流速計による空気・He超音速混合場の濃度・質量流束変動計測, 日本流体力学会年会 2007, 2007/8/6-8, 東京.
- ⑰ 楠亀拓也, 久保良介, 坂上昇史, 新井隆景, 超音速流中に置かれた楔翼面上の境界層剥離, 第 39 回流体力学講演会, 2007/6/14-15, 東京.

6. 研究組織

(1) 研究代表者

坂上 昇史 (SAKAUE SHOJI)

大阪府立大学・工学研究科・助教

研究者番号：70244655

(2) 研究分担者

新井 隆景 (ARAI TAKAKAGE)

大阪府立大学・工学研究科・教授

研究者番号：10175945

(3) 連携研究者

西岡 通男 (NISHIOKA MICHIO)

大阪府立大学・工学研究科・客員研究員

研究者番号：60081444