

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 5 月 18 日現在

機関番号：24403

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2012～2014

課題番号：24560976

研究課題名(和文) 新しい超音速乱流変動計測法の開発と超音速乱流機構の解明に関する研究

研究課題名(英文) Studies on the Developments of New Measurement Methods for Supersonic Turbulent Flow and the Clarifications of Mechanisms of Supersonic Turbulence

研究代表者

坂上 昇史 (Sakaue, Shoji)

大阪府立大学・工学(系)研究科(研究院)・助教

研究者番号：70244655

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 4,200,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、定量化シュリーレン法による変動計測法やPIV計測の校正法、新しい熱線流速計など超音速乱流変動計測法の開発を行い、これらを用いて超音速境界層乱流遷移や超音速乱流混合場を調べた。超音速境界層の乱流遷移については非圧縮流変換した遷移レイノルズ数が主流マッハ数によらずほぼ一定となること、超音速混合については主流マッハ数が大きくなると縦渦によって生じる小スケール変動は逆に小さくなること等を明らかにした。また、壁乱流の平均速度分布が対数分布かべき乗分布かを診断する新しい方法を提案し、平板乱流境界層の速度分布に適用してその有用性を示すとともに対数分布とべき乗分布の共存する現象を明らかにした。

研究成果の概要(英文)：In the present study, the measurement methods for supersonic turbulent flow that is the fluctuation measurements by the quantitative schlieren method, the calibration method for PIV measurement, and a new-type hot-wire anemometer, are developed. By using these methods, the turbulent transition of supersonic boundary layer and the supersonic turbulent mixing field are examined in detail. For the supersonic boundary layer transition, it is shown that the transition Reynolds number transferred into incompressible flow condition are almost constant irrespective of Mach number. For the supersonic mixing, it is also shown that the small-scale fluctuations generated by the streamwise vortices in supersonic mixing fields decrease as Mach number increase. In addition, a novel diagnostic means is devised to sharply distinguish log-law and power-law mean flow behavior of wall turbulence, and the coexisting phenomena of both distributions in flat plate turbulent boundary layer are clarified.

研究分野：航空宇宙流体力学

キーワード：航空宇宙流体力学 超音速乱流機構 超音速乱流境界層 超音速混合遷移 熱線流速計 定量化シュリーレン法 3次元PIV

1. 研究開始当初の背景

超音速境界層の乱流遷移や縦渦を用いた超音速乱流混合場など、超音速の乱流現象が絡む流れの解明には、超音速流中の変動場について定性的な情報だけでなく、(1)遷移の進行に伴う速度分布の変化、(2)攪乱の構造や強さ、(3)局所壁面摩擦などに関する定量データを得て理論と比較することが重要である。しかし、超音速境界層の場合、層流状態の厚さは通常 1 mm 以下であり、このような薄い層内の高速流動現象を実験的に把握することは極めて困難である。境界層に挿入するプローブは流れに悪影響が無いよう極微サイズのものが必要であるが、常に製作できるとは限らず、挿入したプローブによって生じる攪乱が遷移を支配してしまう可能性もある。熱線は点計測であり、変動の構造に関する情報を得ることは条件付き/周期的サンプリングが適用できない場合ほとんど不可能で、超音速流ではごく簡単な場合(壁から立ち上る斜め渦構造の傾きの計測¹⁾)を除いて実施例はほとんどない。低速流では煙で流れを容易に可視化できるが、超音速流では困難である。一方、超音速流ではシュリーレン法による可視化が有効であるが、層流境界層の厚さが薄いため流れの詳細を把握しようと挑戦する研究者は(この研究代表者を除いて)現れなかったと推測される。

研究代表者らは『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』(科学研究費補助金, 課題番号: 19560788)において、遷移を支配する渦構造の可視化と流速や壁面摩擦応力の計測を同時に行うことができる定量化可視化技術として、定量化シュリーレン法を導入するため、まず、その校正法の確立に力を注ぎ、屈折角が既知であるウェッジ状光学ガラス(ウェッジプリズム)を用いた校正法を提案し計測精度と有効性を確認した²⁾。次に、膨張波や超音速乱流境界層分布を計測し、非接触かつ断面一括で流れの時間平均データ(境界層分布や壁面摩擦応力など)の高精度な計測が可能であって、定量化シュリーレン法が極めて有効であることを明らかにした^{3,4)}。また、定量化シュリーレン法により遷移の進行に伴う境界層分布の変化に関する定量データを取得し⁵⁾乱流遷移を引き起こす攪乱(渦構造)を捉え、それが発達した乱流境界層中で観察される組織構造⁶⁾と類似の構造であることを明らかにした⁷⁾。さらに、横流れ不安定や横方向汚染で生じるストリーク構造や縦渦、ストリーク不安定を示唆するストリークの波打から下流につながる乱流状態、乱流斑点状の平面形状を持った乱流塊などを世界で初めて可視化で捉えることに成功し⁸⁾超音速境界層の乱流遷移が、亜音速流の場合と同様、ストリークや縦渦の生成・崩壊から乱流斑点の形成によって引き起こされることを示唆する結果を得ていた。

引用文献

- 1) E. F. Spina, A. J. Smits, J. Fluid Mech., 182, 86-109 (1987).
- 2) 坂上, 西岡, 日本流体力学会誌「ながれ」, 28, 139-147 (2009).
- 3) 坂上, 西岡, 日本流体力学会誌「ながれ」, 28, 241-248 (2009).
- 4) 坂上, 西岡, 日本流体力学会誌「ながれ」, 28, 249-256 (2009).
- 5) 坂上, 西岡, 日本流体力学会誌「ながれ」, 28, 315-325 (2009).
- 6) M. W. Smith, A. J. Smits, Experiments in Fluids, 18, 288-302 (1995).
- 7) 坂上, 西岡, 日本流体力学会誌「ながれ」, 28, 327-335 (2009).
- 8) 坂上, 西岡, 日本流体力学会誌「ながれ」, 28, 337-345 (2009).

2. 研究の目的

前述のように、研究代表者らは、超音速境界層の乱流遷移に関する実験的研究で、境界層の時間平均分布や局所壁面摩擦およびそれらの流れ方向変化などを定量化シュリーレン法により非侵入・非接触で断面一括計測する手法を開発し、その有効性を確認している。

本研究では、この定量化シュリーレン法を発展させた超音速流れの変動(構造や強度など)を非接触・断面一括で定量計測する新しい手法、3次元 PIV 計測の校正法、および、乱流混合場など超音速流中における大振幅の非線形変動の計測に適した新しい熱線流速計を開発・確立する。そして、これらの計測法を用いて、超音速境界層遷移や縦渦を用いた超音速混合場における混合遷移の機構などを計測し、基礎と応用の両面から重要な超音速乱流現象の解明を目指す。

3. 研究の方法

(1) 超音速乱流変動計測法の開発

定量化シュリーレン法を用いた変動計測
研究代表者らは、シュリーレン光学系を用いて定量計測を行うときに必須の校正法について、研究目的の項で述べたように、ウェッジプリズムを用いる校正法を提案し、その計測精度と有効性を確認している。また、超音速境界層の平均速度分布や壁面摩擦応力の流れ方向変化など、平均量について高精度な計測が可能であり、定量化シュリーレン法が極めて有効であることを明らかにしている。この定量化シュリーレン法を変動計測に適用するため、変動計測における校正法を考案し、計測精度や問題点を明らかにして、計測法を確立する。

3次元 PIV 計測における校正法

ステレオカメラを用いた3次元 PIV 法は、流れに非接触で計測断面内の3次元速度ベクトル場を一度に得ることができるという利点があり、乱流混合などの3次元流れの構造解明に非常に有用な計測手法である。しかし、

(1)光学系設定, (2)ダイレクトマッピングのためのターゲットデータ, (3)取得画像, および(4)トレーサ粒子の追従性による誤差を含む。例えば, 粒子の時定数が十分小さくない場合, 流速の過去の履歴が粒子速度に影響し誤差の原因となる。特に超音速流の場合には膨張波などの定常現象であっても, 加速度の大きさによって粒子は流れに追従しない。すなわち乱流場の計測にPIV法を用いる場合, あらかじめ同様の乱れのある既知の流れ場で計測精度を検証する必要がある。

本研究では, そのような精度検証法として, 時間平均場がほぼ2次元となる超音速乱流境界層を計測対象とし, PIV法の計測断面を主流に対して傾けたときに見かけ上生じるスパン方向の速度分布を指標とする方法を提案し, その有効性を確認する。

超音速流中の大振幅非線形乱流変動計測に適した熱線流速計の開発

熱線流速計を用いた変動計測では熱線の熱慣性が問題となる。非定常流中でも熱線温度を一定に保つ定温度型熱線回路を用いる場合, この熱慣性の影響を無視することができる。しかし, プローブのリード線のごくわずかなインダクタンスによって回路が発振するという難点があり, 微小振幅攪乱であっても100kHz以上の周波数域を測ることは困難である。また, 振幅の大きい非線形変動の熱線計測には誤差がつきものであり, 大振幅変動の場合の応答帯域は微小振幅の場合よりも低下する。応答周波数が高い定電圧型熱線回路(周波数帯域500kHz)は, 超音速流での変動計測に有望であるが, 周波数帯域を広げるために熱線の熱慣性を補正する位相補償回路を付加する必要がある。熱線抵抗と熱線回路の出力の関係が非線形となるため, 大振幅変動の場合には低次の統計量である時間平均値にも変動成分が絡み誤差の原因となる。

そこで, 超音速乱流混合場への適用を考慮した大振幅非線形変動の計測に適した定温度型(非定常流中で熱線の熱慣性を無視できる)と定電圧型(高周波数帯域)の特徴を併せ持つ新規の熱線回路を開発する。

(2) 超音速乱流機構の解明

上記の計測法を用いて, 下記の超音速境界層遷移や縦渦を用いた超音速混合場における混合遷移などを計測し, 超音速乱流機構の解明を目指す。

超音速境界層の乱流遷移に対するマッハ数依存性

前述のように, 研究代表者らは, 超音速境界層の乱流遷移を引き起こす攪乱(渦構造)を捉え, それが発達した乱流境界層中で観察される組織構造と類似の構造であること, 横流れ不安定や横方向汚染で生じるストリーク構造や縦渦, ストリーク不安定を示唆するストリークの波打から下流につながる乱流状態,

乱流斑点状の平面形状を持った乱流塊などを捉え, 超音速境界層の乱流遷移が, 亜音速流の場合と同様, ストリークや縦渦の生成・崩壊から乱流斑点の形成によって引き起こされることを示唆する結果を得ている。

本研究では, 種々の主流マッハ数条件で超音速境界層の乱流遷移を計測し, 乱流遷移機構や遷移レイノルズ数のマッハ数依存性について調べる。ここで得られる具体的なデータは, 超音速境界層の乱流遷移予測に必須である。

縦渦を用いた超音速混合場における縦渦の崩壊過程と混合遷移機構

超音速混合場における縦渦の役割は, まず, その大規模な渦運動により主流の空気を縦渦内に取り込み, 次に, その崩壊に伴って生じる小スケールの乱流渦により異種流体間の接触面積を飛躍的に増加させる乱流混合状態(混合遷移: Mixing Transition)に導くことであり, その不安定性や崩壊特性に関する知識が不可欠である。なかでも混合遷移の下限レイノルズ数近傍の流れの機構を把握することが重要である。

そこで, 超音速風洞中に設置した縦渦導入デバイスによって縦渦を形成し, その崩壊過程を定量化シュリーレン法, 3次元PIV法, さらに熱線流速計により計測し, 超音速縦渦の崩壊過程を調べる。特に, スクラムジェットエンジンの燃料である水素を模擬したヘリウムと超音速空気流の混合過程に着目し, シュリーレン法で定量計測した乱流変動・渦構造に関するデータのスペクトル解析や, 熱線流速計を用いた濃度変動計測を行うことによって混合促進の鍵である混合遷移(Mixing Transition)の機構を明らかにする。

4. 研究成果

(1) PIV計測の校正法

PIVは非接触で計測断面内の3次元速度ベクトル場を一度に得られるという利点があり, 乱流混合場などの構造解析に有用な計測手法である。しかし, トレーサ粒子の時定数が十分小さくない場合, 特に超音速流では膨張波などの定常現象であっても加速度の大きさによっては粒子が流れに追従せず誤差の原因となる。本研究では, 乱れを含む既知の流れ場を用いた簡便な精度検証法として超音速乱流境界層を用いる方法を提案し, その有効性を確認し, 平均流だけでなく変動計測の精度について明らかにした。

(2) 縦渦を用いた超音速乱流混合場の計測

縦渦の不安定性や崩壊特性に関する知識を得るため, 超音速風洞中に設置した縦渦導入デバイスによって縦渦を形成し, 種々の主流マッハ数における超音速縦渦の崩壊過程を定量化シュリーレン法によってスペクトル計測し, 縦渦の導入によって生じる小スケール変動のマッハ数依存性を明らかにした。また, 壁面設置型の縦渦導入デバイスに流入する境

界層が縦渦対による超音速混合層に及ぼす影響を明らかにするため、種々の条件でシュリーレン法による可視化計測とステレオ PIV 計測により流れ場を詳細に調べた。その結果、流入境界層が乱流から層流になるとデバイス斜面で境界層が剥離し導入される縦渦の循環が小さくなること、境界層を乱流化することで剥離を抑制すると循環が増加することを明らかにした。

(3) 超音速境界層の乱流遷移に対するマッハ数依存性

矩形断面を有する小型超音速風洞を設計製作し、風洞ノズル壁に発達する境界層のピトー管計測とシュリーレン法による可視化計測により超音速境界層遷移のマッハ数依存性を調べた。その結果、境界層遷移は風洞角部に生じた乱流域の横方向汚染により広がり、その広がり角はマッハ数が大きくなるに従って小さくなって遷移領域が下流へ移動することを確認した。また、Van Driest 変換により非圧縮流変換した遷移レイノルズ数は主流マッハ数によらずほぼ一定となることを明らかにした。

(4) 乱流境界層の挙動に関する研究

乱流境界層の平均速度分布は対数分布が成り立つことが広く認められているが、零圧力勾配の乱流境界層は対数分布ではなくベキ乗分布で記述されるべきといった主張がでて、意見の対立が続いている。

本研究では、平板乱流境界層のオーバーラップ層について非平行性を考慮に入れた解析を行い、一般的なベキ乗分布の解に加えて対数分布の解も得られることを示し、高レイノルズ数の平板乱流境界層では、ベキ乗分布よりも対数分布の方が実験結果を精度よく表現することを確認した。また、この解を用いた壁乱流の平均速度分布が対数分布かベキ乗分布かを診断する新しい方法を提案し、平板乱流境界層の速度分布に適用してその有用性を示すとともに、乱流境界層の平均流の特徴的な挙動として対数分布とベキ乗分布の共存する現象を明らかにした。

(5) 新しい定電流型熱線流速計の開発

本研究では、熱線の瞬間熱損失を計測可能な全く新しい定電流型熱線流速計を提案している。これは非定常流中で熱慣性の影響を補正する位相補償回路を必要としない定温度型熱線回路の特徴と定電圧型熱線回路に匹敵する高周波数帯域を併せ持ち、非線形大振幅変動の計測に適用可能なことから、超音速混合場の熱線計測法として精度的に最も期待されるものである。この定電流熱線の瞬間熱損失に基づく乱流計測の原理と有効性について確認するため、定電流型熱線流速計を用いて亜音速乱流境界層を計測し、提案手法が乱流計測に適用可能であることを確認した。

(6) 熱線時定数の計測

熱線を定電圧・定電流状態で動作させた場合、前述のように、熱慣性によって生じる応答遅れを補償する必要がある。定電圧型熱線流速計は位相補償回路を付加することで熱慣性の影響を補償するが、変動計測時に熱線時定数を計測し回路時定数とのずれを補正する必要がある。本研究で提案している定電流型熱線流速計では動作状態における熱線の熱容量因子を求める必要がある。熱線時定数は、熱線の熱容量因子、加熱度および加熱電流で表され、加熱度と加熱電流は変動計測時に得られる。本研究では、種々の条件で計測した熱線時定数から熱容量因子を求め、その温度依存性について調べた。その結果、熱容量因子は熱線温度のみの関数として表され、加熱度の関数として近似することで熱線時定数を推定できることを明らかにした。

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2件)

S. Takagi, S. Sakaue, Y. Hirata, T. Uemura, K. Takada, Observation of Cross-Flow Instability Mode over a Yawed Cylinder at Mach 2, AIAA Journal, 査読有, vol.53, 2015, 260-265, ODI:10.2514/1.J052928

西岡通男, 坂上昇史, 壁乱流の対数速度分布とベキ乗分布を峻別する診断法の提案, 日本流体力学会誌「ながれ」, 査読有, vol.32, 2013, 421-426.

[学会発表](計19件)

菅野創介, 新井隆景, 坂上昇史, 超音速キャビティ振動と縦渦の干渉, 第51回日本航空宇宙学会中部・関西支部合同秋期大会, 2014/11/21, 名城大学 天白キャンパス.

足田裕之, 新井隆景, 坂上昇史, 金炯哲, 一樣流中に置かれた回転ディンプル球の剥離点近傍の速度計測, 第51回日本航空宇宙学会中部・関西支部合同秋期大会, 2014/11/21, 名城大学 天白キャンパス.

坂上昇史, 西岡通男, 定電流熱線の瞬間熱損失計測法, 日本流体力学会年会 2014, 2014/09/15 ~ 2014/09/17, 東北大学 川内北キャンパス.

坂上昇史, 西岡通男, 定電流熱線の瞬間熱損失に基づく乱流計測, 日本流体力学会年会 2014, 2014/09/15 ~ 2014/09/17, 東北大学 川内北キャンパス.

高島耕司, 宮地徳蔵, 野崎功次郎, 坂上昇史, 新井隆景, 弱い圧縮波に誘起される非定常流れの熱線計測に関する一考察, 日本流体力学会年会 2014, 2014/09/15 ~ 2014/09/17, 東北大学 川内北キャンパス.

宮地徳蔵, 高島耕司, 谷川大貴, 野崎功次郎, 福田傑, 坂上昇史, 新井隆景, 複数の小型電磁弁を用いたトンネル圧縮波ジェ

ネレータの開発, 日本流体力学会年会 2014, 2014/09/15 ~ 2014/09/17, 東北大学川内北キャンパス.

T. Arai, Y. Yamauchi, S. Sakaue, S. Sugano, Effect of Incoming Boundary Layer on Supersonic Mixing Layer Generated by Wall-Mounted Ramp Injector, 19th AIAA International Space Planes and Hypersonic Systems and Technologies Conference, 2014/06/16 ~ 2014/06/20, Atlanta, GA.

西田佳生, 坂上昇史, 新井隆景, 超音速風洞壁境界層の乱流遷移, 日本航空宇宙学会第 50 回 関西・中部支部合同秋季大会, 2013/10/25, 大阪大学 吹田キャンパス.

西出純平, 坂上昇史, 新井隆景, 超音速インテークにおける境界層と衝撃波の干渉, 日本航空宇宙学会 第 50 回 関西・中部支部合同秋季大会, 2013/10/25, 大阪大学 吹田キャンパス.

疋田裕之, 坂上昇史, 新井隆景, 金炯哲, 回転球の剥離に及ぼすデインブルの効果, 日本航空宇宙学会 第 50 回 関西・中部支部合同秋季大会, 2013/10/25, 大阪大学 吹田キャンパス.

山内雄記, 坂上昇史, 新井隆景, 縦渦対による超音速混合層に及ぼす流入境界層の影響, 日本流体力学会年会 2013, 2013/09/12 ~ 2013/09/14, 東京農工大学 小金井キャンパス.

西岡通男, 坂上昇史, 壁乱流の対数速度分布とベキ乗分布を峻別する診断法の提案, 日本流体力学会年会 2013, 2013/09/12 ~ 2013/09/14, 東京農工大学 小金井キャンパス.

西岡通男, 乱流境界層の外層速度分布に関する理論, 日本流体力学会年会 2013, 2013/09/12 ~ 2013/09/14, 東京農工大学 小金井キャンパス.

M. Yumiyama, S. Sakaue, T. Arai, Validation of PIV measurements Using Supersonic Turbulent Boundary Layer, 18th AIAA International Space Planes and Hypersonic Systems and Technologies Conference, 2012/09/24 ~ 2012/09/28, Tours, France.

S. Araki, S. Sakaue, T. Arai, Wake Flow Control on the Afterburner behind Fuel Injection and Flame Holding Strut for Hypersonic Vehicle, 18th AIAA International Space Planes and Hypersonic Systems and Technologies Conference, 2012/09/24 ~ 2012/09/28, Tours, France.

Y. Yamauchi, S. Sakaue, T. Arai, Effect of Mach Number on Supersonic Mixing by Hyper-Mixer Injector, 18th AIAA International Space Planes and Hypersonic Systems and Technologies Conference, 2012/09/24 ~ 2012/09/28, Tours, France.

坂上昇史, 西岡通男, 熱線時定数の計測, 日本流体力学会年会 2012, 2012/09/16 ~ 2012/09/18, 高知大学.

山内雄記, 児玉善顕, 坂上昇史, 新井隆景, 縦渦による超音速乱流混合層のマッハ数依存性, 日本流体力学会年会 2012, 2012/09/16 ~ 2012/09/18, 高知大学.

荒木俊輔, 坂上昇史, 新井隆景, 2次元ストラット後流の3次元化について, 日本流体力学会年会 2012, 2012/09/16 ~ 2012/09/18, 高知大学.

6. 研究組織

(1) 研究代表者

坂上 昇史 (SAKAUE, Shoji)

大阪府立大学・大学院工学研究科・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・大学院工学研究科・教授

研究者番号: 10175945

西岡 通男 (NISHIOKA, Michio)

大阪府立大学・大学院工学研究科・客員研究員

研究者番号: 60081444