

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 24 日現在

機関番号：82723

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2013～2014

課題番号：25871222

研究課題名(和文)速度場と温度場の同時計測システムの構築と非定常熱流動現象の解明

研究課題名(英文)Study of unsteady thermal and flow fields by using simultaneous temperature and velocity measurements system

研究代表者

山田 俊輔 (Yamada, Shunsuke)

防衛大学校(総合教育学群、人文社会科学群、応用科学群、電気情報学群及びシステム工・システム工学群・講師)

研究者番号：90516220

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,300,000円

研究成果の概要(和文)：本研究は、強制対流熱伝達に現れる非定常熱流動現象の伝熱メカニズムを解明するため、高空間分解能で計測可能な速度場と温度場の同時計測システムを構築することを目的としている。後向きステップ流れで現れる非定常熱流動現象に着目し、高速赤外線カメラによる温度計測から時空間的に変動する熱伝達率を復元した。また、同一空間の3成分の速度分布を計測した。流れと熱伝達の空間変動は流れ方向や高さ方向速度と熱伝達率変動と高い相関があり、スパン方向速度と熱伝達率にはスパン方向の位相遅れがあることがわかった。空間的な周期構造が存在していることを実験的に示した。

研究成果の概要(英文)：In order to clarify the heat transfer mechanism of the unsteady thermal and flow phenomenon appeared in a forced convection heat transfer, the aim of the present study is simultaneously to measure the velocity and thermal fields in the high-spatial resolution over a backward facing step flow. The temporal and spatial fluctuations of the heat transfer coefficient were restored from the temperature measurement using a high-speed infrared thermograph. Also, the spatial distribution of three components of the velocity in this region was measured. These simultaneous measurements revealed that the local enhancement of the heat transfer on the heating foil corresponds to the increase in the streamwise and downward flow in the near-wall region. There were the spanwise phase delay between the spanwise velocity and the heat transfer coefficient fluctuations. The periodic structure of the flow and thermal fluctuations in the near-wall region was experimentally confirmed.

研究分野：熱流体計測

キーワード：はく離再付着流れ 強制対流熱伝達 ステレオPIV 高速赤外線カメラ 同時計測

1. 研究開始当初の背景

はく離・再付着流れによる非定常熱流動現象は、ガスタービン、電子機器、伝熱装置などの数多くの機械内部で観察され、装置の安全な稼働や駆動効率に大きく影響する。また、近年の高性能・高密度化した集積回路設計や高い駆動効率を有するガスタービンの開発が目標とされ、新たな熱流動設計指針が得られれば、機器のさらなる性能向上に活用される。従って、非定常熱流動現象の解明は工学的に重要な課題と考えられる。本研究では、はく離再付着流れで現れる強制対流による非定常熱流動現象を取り扱う。はく離再付着流れでは、スパン方向に軸を有する横渦と、流れ方向に軸を有する縦渦との相互干渉により非定常な流れ場を形成する。このような流れ場に熱的なエネルギー輸送が関与すると複雑な現象となり、これを非定常熱流動現象と呼ぶ。非定常熱流動現象の解明には、壁面近傍における瞬時の流体挙動による熱輸送量を時空間的に同時計測し、定量的に評価する必要がある。これまで流れ場と温度場の同時計測に関する様々な手法が提案されている。しかし、点計測の場合、高時間分解能で計測可能だが、多次元計測は難しく、高空間分解能での計測が課題である。そこで、二次元断面で、速度三成分(2 dimensions and 3 components, 以下2D-3C)を計測可能な2D-3C PIV計測システムと、温度場を計測可能な高速赤外線カメラを組み合わせ、高空間分解能で流れ場と温度場を同時計測可能な統合計測システムを構築し、非定常熱流動現象のメカニズムを解明する。

2. 研究の目的

本申請課題では、はく離再付着流れの代表的な後向きステップ下流の再付着点近傍に現れる非定常熱流動場の速度・温度の同時計測を実施した。通電加熱した壁面を熱流束一定の条件のもと、高速赤外線カメラで温度場を、並びに壁近傍の流れ場を2D-3C PIV計測システムで測定し、非定常熱流動現象におけるエネルギー輸送量を定量的に解析することにより現象を解明することを目的とする。

3. 研究の方法

(1) 現有する PIV カメラ・レーザと高速赤外線カメラによる統合型同時計測システムの構築にあたり、各カメラシャッタとレーザ照射の時間遅れを検証した。実験として、回転ファンを PIV カメラと高速赤外線カメラで同時に撮影し、画像解析からレーザ照射の時刻と赤外線カメラのシャッタの開放時間との時間差を測定した。

(2) 同期を確認し、2D-2C PIV 計測システムと赤外線カメラによる統合型同時計測システ

ムを活用し、乱流境界層流れと後向きステップ流れの同時計測を行った。乱流境界層における流れ場と温度場の時間変動を測定し、十分な精度で計測可能か検証した。その後、後向きステップ流れの再付着点付近の流れ場と温度場の同時計測から、伝熱現象メカニズムを検証した。

(3) 続いて、2D-3CPIV 計測システムへと計測システムを拡張し、計測した速度分布が十分精度で計測可能か検証した。時間平均速度分と速度の RMS 値を PTV で計測されたデータベースと比較し検証した。

(4) 最後に 2D-3C PIV 計測システムと高速赤外線カメラによる統合型計測システムを用いて、レイノルズ数 $Re_H = 2,500 \sim 7,400$ の範囲の後向きステップ流れにおける再付着点付近で現れる非定常熱流動現象を同時測定した。

4. 研究成果

(1) PIV 用カメラで撮影した画像にレーザ光が写る時刻は、PIV 用カメラによる撮影開始時刻とり、レーザの照射から IRT のカメラシャッタが開放するまでの時間 Δt を測定した。IRT の 1, 2 枚目とレーザ照射時刻が同期する時刻から、時間遅れが 3.74 ms 程度となる。この時間遅れを考慮し、レーザ照射と IRT のカメラシャッタの同期をファンクションジェネレータで設定可能な、統合型同時計測システムを構築した。

(2) 構築した統合型同時計測システムを用いてレイノルズ数 $Re_{\phi^*} = 630 \sim 1,000$ 程度の乱流境界層流れの同時計測を実施した。計測した温度の時空間情報を逆解析することにより、流体と固体との伝熱量を表す熱伝達率分布に復元し、速度との空間分布を比較した。壁近傍で現れる低速ストリークと温度ストリークの空間波長はおよそ同程度であり、図 1 の計測結果から、このレイノルズ数の範囲では、瞬時の熱伝達率分布 h と流れ方向速度 u の空間分布が良く対応し (u と h とは正の相関係合 I_p/I_n が高い)、これまでの報告結果に対応する結果が得られた。構築した統合型同時計

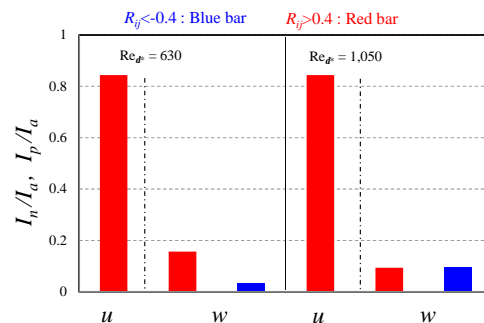


図 1 乱流境界層の空間相関

測システムの計測精度を検証した。

(3) 図 2 に示す後向きステップ流れに対し同時計測を実施した。再付着点下流域では、流れ方向及び高さ方向速度と熱伝達率とで高い空間相関が得られたが、瞬時の計測できなかった速度成分との空間的な対応関係が未解明であった。また、加熱模型表面に塗布した塗料厚みによる温度の時間遅れの要因が懸念された。

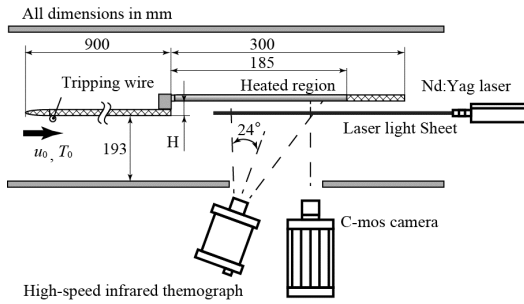


図 2 後向きステップ流れ実験装置

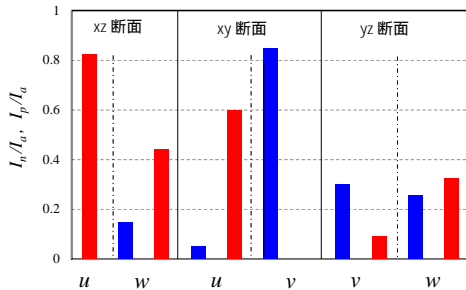


図 3 後向きステップ流れの空間相関 ($Re_H = 2,500$)

(4) 瞬時の速度三成分と熱伝達率の空間分布の対応を検証するため、2D-3C PIV 計測システムへと拡張し、図 4 に示す統合型計測システムを構築した。構築した 2D-3C PIV 計測システムにより得られた平均速度分布を乱流熱伝達データベースで掲載されている FC_BC007(Kasagi, et al)のデータと比較した (<http://www.ted-jsme.jp/HTDB/>)。その結果、平均速度分布とは、流れ方向では $0.1u_0$ 程度であり、高さ方向及びスパン方向では、 $0.03u_0$ 程度の偏差で計測可能であり、空間的な速度測定には十分と考えた。

(5) 統合型同時計測システムによる測定結果から、流れ方向及びスパン方向速度分布と熱伝達率の極大・極小値の空間分布はあまり対応しないが、図 5 に示す高さ方向速度と熱伝達率の極大・極小値の分布は空間的に対応することがわかった。そして、図 6 に示す各速度分布と熱伝達率分布の相互相関係数の平均値から、高さ方向速度と熱伝達率は負の相関を示し、また流れ方向速度では、正の相関を示すことがわかった。そして、スパン方向速

度と熱伝達率の相関係数は、原点を中心に点対称な分布となり、正と負の相関係数の極大・極小値との距離が、およそ $0.7H$ 程度であり、レイノルズ数依存性は見られなかった。このスパン方向速度との相関間隔が流体の輸送と熱輸送の周期構造を示している。

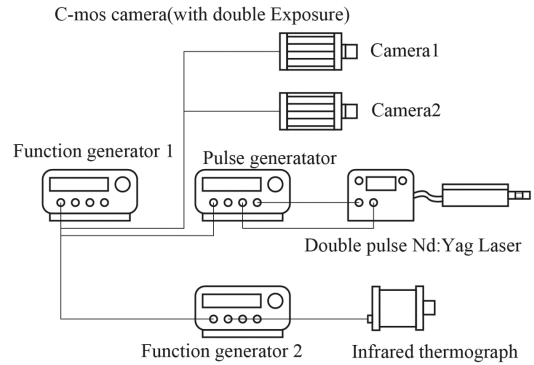


図 4 統合型計測同時計測システム

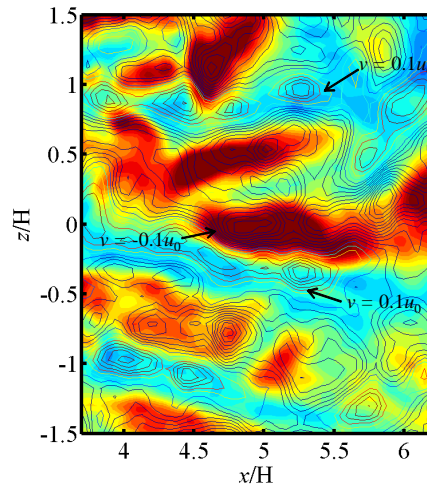


図 5 $y/H=0.05$ の高さ方向速度(等値線図)と熱伝達率(コンター)の空間分布 ($Re_H = 2,500$)

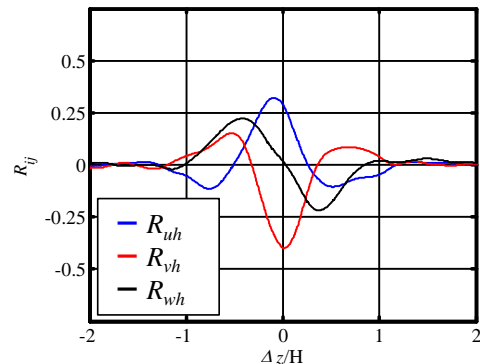


図 6 後向きステップ流れの空間相関 ($Re_H = 5,200, x/H=4.5$)

(8) 最後に、研究を総括し、本手法を活用することによりはく離・再付着流れの壁近傍に現れる非定常熱流動現象に対し、高速な速度と熱伝達率変動の空間的な対応関係を解析可能であることを示した。

[国内外における位置づけと研究意義]

現在、非定常熱流動場に現れる伝熱メカニズムを実験的に解明する研究では、高速に変動する三成分の速度と熱伝達率分布の空間計測が可能な手法は、国内外を探しても全く存在しない。また、同時刻の熱伝達率と流れ方向、及び高さ方向速度に関する相関を定量的に示した報告例は多いが、熱伝達率とスパン方向速度との統計量に関する報告はほとんどなく、新たな知見と言える。

[今後の展望]

本研究では、後向きステップ流れにおける再付着点付近に着目して実験を実施した。IRT カメラ及び PIV カメラの画像解像度とレンズの関係から計測領域が制限されたが、高解像度カメラを用いれば、より微細な構造解析が可能である。また、高レイノルズ領域での計測には、時間分解能を向上させる必要がある。これらを両立することで、今後は非定常熱流動場の時空間構造から伝熱メカニズムの解明へと発展させることが可能である。

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 1 件)

山田俊輔, 中村元, 赤外線カメラと PIV を用いた非定常熱流動場の壁近傍における同時計測システムの構築, 日本機械学会論文集 B 編, No. 79, pp. 2497-2508, (2013)査読有

[学会発表](計 13 件)

山田俊輔, 中村元, 高速赤外線カメラと PIV による非定常熱流動場の同時計測, 第 50 回日本伝熱シンポジウム, 2013 年 5 月 31 日, 仙台

山田俊輔, 中村元, 非定常熱流動場の壁近傍における温度と速度の同時計測に関する研究, 日本機械学会熱工学カンファレンス, 2013 年 10 月 20 日, 弘前

S. YAMADA, H. NAKAMURA, SIMULTANEOUS MEASUREMENTS OF UNSTEADY THERMAL AND FLOW FIELDS IN TURBULENT BOUNDARY LAYER USING HIGH-SPEED INFRARED THERMOGRAPH AND PIV, The 24th International Symposium on Transport Phenomena, 2013 年 11 月 5 日, 山口
Shunsuke Yamada, Hajime Nakamura, Simultaneous Thermal and Flow Measurement in a Boundary Layer by Using

High-speed Infrared Thermograph and PIV Combined system, The 15th International Heat Transfer Conference, 2014 年 8 月 10 日, 京都

Hajime Nakamura, Shunsuke Yamada, Experimental Investigate on Unsteady Conjugate Heat Transfer Caused by Flow Turbulent, The 15th International Heat Transfer Conference, 2014 年 8 月 12 日, 京都

Shunsuke Yamada, Hajime Nakamura, SPATIAL CORRELATION OF VELOCITY AND HEAT TRANSFER DOWNSTREAM OF A BACKWARD FACING STREPT USING 2D-3C PIV AND IR THERMOGRAPHY, The 9th Symposium on Turbulence and Shear Flow phenomena, 2015 年 6 月 30 日, Melbourne(Australia)

N. Shiibara, H. Nakamura, S. Yamada, Visualization of Turbulent Heat Transfer around an Orifice Plate in a Water Pipe Flow Using High-speed Infrared Thermography, The 16th International Symposium on Flow Visualization, 2014 年 7 月 25 日, 沖縄

山田俊輔, 小笠原永久, 山田浩之, 中村元, 赤外線放射温度計測精度向上のための塗料の垂直分光放射率測定, 第 51 回日本伝熱シンポジウム, 2014 年 5 月 23 日, 浜松

椎原尚輝, 中村元, 山田俊輔, 円管内オリフィス下流において複雑に変動する熱伝達の時空間分布測定, 第 51 回日本伝熱シンポジウム, 2014 年 5 月 21 日, 浜松

山田俊輔, 中村元, ステレオ PIV と高速赤外線カメラを用いた非定常熱流動場の同時計測に関する研究, 日本機械学会熱工学カンファレンス, 2014 年 11 月 9 日, 東京

椎原尚輝, 中村元, 山田俊輔, オリフィス板を設置した円管内の非定常熱伝達特性, 日本機械学会熱工学カンファレンス, 2014 年 11 月 8 日, 東京

山田俊輔, 小笠原永久, 山田浩之, 中村元, FT-IR を用いた塗料の垂直分光放射率測定の試み, 赤外線サーモグラフィ部門ミニシンポジウム, 2014 年 9 月 30 日, 東京

山田俊輔, 中村元, 球形リングによる円柱後流の制御に関する研究, 日本機械学会流体工学部門講演会, 2014 年 10 月 26 日, 富山

[図書](計 0 件)

[産業財産権]

出願状況(計 0 件)

取得状況(計 0 件)

[その他]

特になし

6. 研究組織

(1)研究代表者

山田俊輔 (YAMADA SHUNSUKE)

防衛大学校・システム工学群・講師

研究者番号：90516220

(2)研究分担者

なし

(3)連携研究者

なし