

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 24 日現在

機関番号：82723

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2010～2013

課題番号：22560214

研究課題名(和文) 赤外線カメラを用いた非定常乱流熱伝達計測の新手法開発

研究課題名(英文) Development of a novel method to measure unsteady heat transfer caused by flow turbulence using infrared thermography

研究代表者

中村 元(Nakamura, Hajime)

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・教授)

研究者番号：80531996

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,200,000円、(間接経費) 0円

研究成果の概要(和文)：一般に、伝熱機器の内部や周囲では流体の流れが乱流であるため、流体を介した熱移動は時間的に複雑に変動する。伝熱機器の性能向上・信頼性向上のためには、この熱移動の変動を定量的に正しく評価する必要がある。本研究では、乱流に起因した壁面-流体間の複雑な熱移動現象を高速度赤外線カメラで測定する新手法を開発した。壁面の種類(熱慣性・熱拡散)に依存しない対流熱移動量(=熱伝達率)を測定する供試模型を考案すると共に、瞬時熱伝達率分布及びその時間変動を求めるデータ解析手法を開発した。その結果、平板乱流および円管内乱流について、定量的な評価が可能であることを実証した。

研究成果の概要(英文)：Convective heat transfer via turbulent flow fluctuates complicatedly in time and space, the phenomenon of which is generally seen inside and outside heat transfer equipments. To improve thermal performance and reliability of the equipments, it is necessary to evaluate the fluctuating heat transfer quantitatively. In this work, a novel method was developed to measure the complicated fluctuating heat transfer between a solid-wall and a fluid-flow caused by flow turbulence by using high-speed infrared thermography. A test model was devised to measure the heat transfer coefficient which excludes the effect of thermal inertia and thermal diffusion of a solid-wall. In addition, data analysis technique was developed to evaluate instantaneous distribution of the heat transfer coefficient and its temporal fluctuation. As a result, it was demonstrated that the quantitative evaluation was possible for turbulent flows on a flat plate and in a circular pipe.

研究分野：工学

科研費の分科・細目：機械工学・熱工学

キーワード：対流 乱流 非定常熱伝達 計測 赤外線カメラ

様式 C - 19、F - 19、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

(1) 一般に、伝熱機器の内部や周囲では流体の流れが乱流であるため、流体を介した熱移動 (= 熱伝達) は時空間的に複雑に変動する。伝熱機器の性能向上・信頼性向上のためには、この熱伝達変動を定量的に正しく評価する必要がある。しかし、従来のほとんどの研究では、時間平均的な熱伝達しか測定されておらず、乱流によって時空間的に複雑に変動する熱伝達現象はほとんど明らかにされていなかった。

(2) 中村 (研究代表者) は、赤外線カメラを用いた対流熱伝達の時空間変動測定を想定し、薄膜 (金属箔) で構成された伝熱面の熱伝導解析を行った。測定の時間・空間分解能に関する一般関係式を導出した結果、原理的には、本手法により乱流に伴う高速で複雑な熱伝達変動を測定可能であることを示した。

2. 研究の目的

乱流に起因した壁面-流体間の高速で複雑な熱伝達変動を、高速度赤外線カメラで定量的に測定する新手法を開発する。

3. 研究の方法

(1) 平板上の乱流熱伝達を測定可能な供試模型を設計・製作する。伝熱面には熱容量が非常に小さな金属箔を用い、通電加熱した時に現れる温度変動を高速度赤外線カメラで測定する。

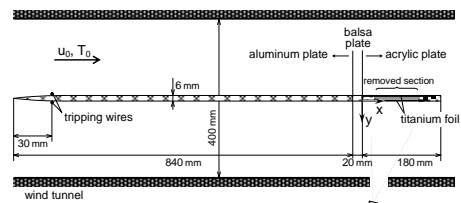
(2) (1) で得られた瞬時温度分布の時系列データを解析し、熱伝達率の時空間分布を定量的に評価する。得られた結果を統計解析し、熱伝達率の瞬時分布およびその変動が文献値と比較して妥当であることを検証する。

(3) 本手法を、円管内水流の乱流熱伝達測定にも適用する。円管内の乱流熱伝達を測定可能な供試模型を設計・製作する。測定で得られた熱伝達率の時空間分布を統計解析し、文献値と比較して妥当であることを検証する。

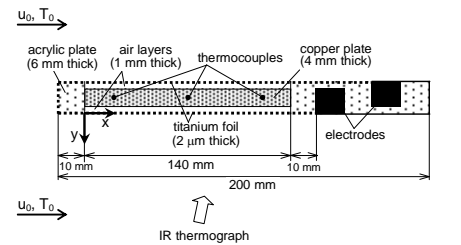
4. 研究成果

(1) 図 1 (a) に風洞実験装置を、図 1 (b), (c) に平板供試模型を示す。伝熱面には厚さ  $2 \mu\text{m}$  のチタン箔を用いた。チタン箔は熱容量が非常に小さいため、通電加熱すると、乱流熱伝達の非定常性に伴って温度が高速かつ複雑に変動する。これを高速度赤外線カメラで測定し、瞬時温度分布の時系列データを取得した。

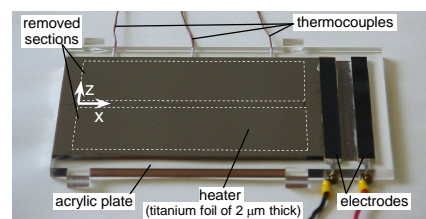
(2) 取得した温度データから、熱伝達率の時空間分布を算出した。その際、伝熱面内の非定常熱伝導解析を行い、伝熱面の熱容量および熱拡散に起因した時空間的な減衰を還元した。また、伝熱面裏面に存在する空気層への熱損失を正確に評価するため、空気層内の



(a) 風洞実験装置

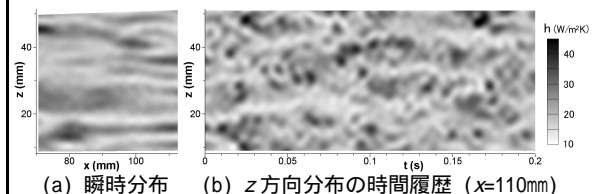


(b) 供試模型 (断面図)



(c) 供試模型 (写真)

図 1 平板乱流実験装置



(a) 瞬時分布 (b) z 方向分布の時間履歴 ( $x=110\text{mm}$ )

図 2 熱伝達率の時空間分布の一例 (平板境界層乱流,  $Re_0 = 685$ )

3 次元非定常熱伝導解析を行った。得られた熱伝達率の時空間分布の一例 (平板境界層乱流,  $Re_0 = 685$ ) を図 2 に示す。瞬時分布 (左図) には、流れ方向に伸びたストリーク構造が明瞭に現れている。この構造が下流に流れることにより、熱伝達率が時間的に高速に変動している (右図)。

(3) 得られた熱伝達率変動が妥当であることを検証するため、熱流束センサで測定した熱伝達率変動波形と比較・検討した。図 3 (a) に本手法で測定した結果を、図 3 (b) に熱流束センサで測定した結果を示す。熱的境界条件の相違により変動振幅に相違が見られるが、熱伝達率の変動パターン、スペクトル (pre-multiplied spectrum,  $f \cdot P_h(f)$ ) の特徴、自己相関 ( $R_h(t)$ ) の特徴がいずれも良く一致しており、本手法により、 $100 \sim 200 \text{ Hz}$  までの熱伝達変動を適切に測定できることを確認した。

(4) 図 4 に、スパン方向 (z 方向) の瞬時分布から評価した温度ストリークの平均間隔を

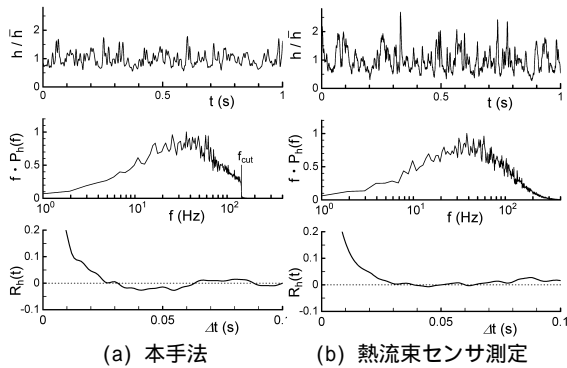


図3 局所熱伝達率変動 (平板境界層乱流)

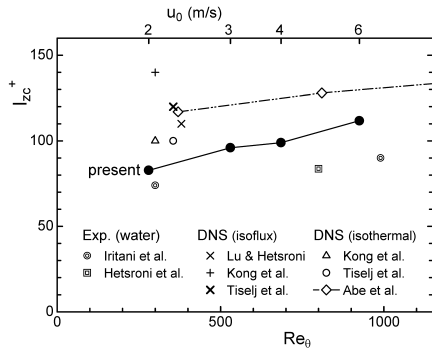


図4 温度ストリークの平均間隔 (平板境界層乱流)

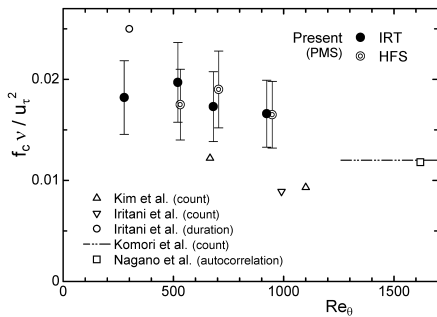
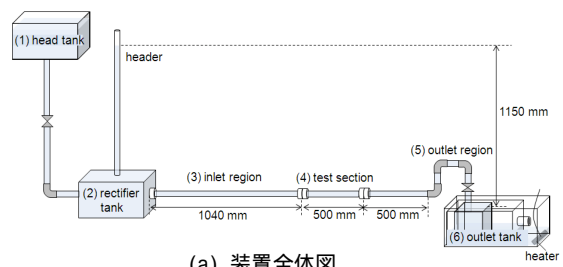


図5 特徴的な変動周波数 (平板境界層乱流)

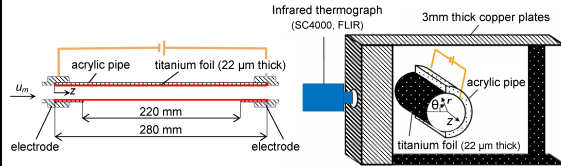
示す．従来の実験や直接数値計算(DNS)の結果によると，壁面せん断速度と流体の動粘性係数で無次元化された温度ストリーク間隔  $l_{zc}^+$  は 100 程度の値になることが知られている．本実験においても同程度の値が得られており，瞬時熱伝達率分布を適切に測定できることを確認した．

(5) 図5に，局所熱伝達率変動から評価した特徴的な変動周波数 ( $f_c$  は，図3の  $f \cdot P_h(f)$  が極大となる周波数)を示す．この周波数は，伝熱機器の壁温変動を予測する重要なパラメータであるにもかかわらず，これまで測定された例がなく，本研究で初めて明らかにした．比較のため，流れの可視化や速度変動測定から得られたバースト現象の平均周波数もプロットした．両者の周波数はほぼ同程度であり，平板境界層乱流の熱伝達変動は，バースト現象と密接に関連していることが示唆される．

(6) 本測定手法を円管内水流の乱流熱伝達



(a) 装置全体図



(b) 供試模型断面図

(c) 計測系のイメージ

図6 円管内水流実験装置

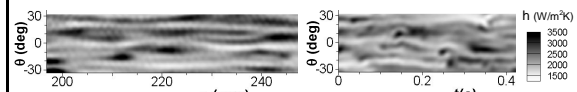


図7 熱伝達率の時空間分布の一例 (円管内乱流,  $Re_D = 10100$ )

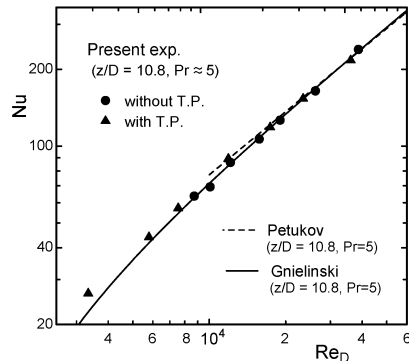


図8 円管内乱流の時間平均ヌッセルト数 (従来の経験式との比較)

測定に適用した．図6に，円管内水流の実験装置及び供試模型を示す．供試模型の伝熱面は，厚さ約  $20 \mu\text{m}$  のチタン箔で構成した．チタン箔を通電加熱し，その時に現れる温度変動を高速赤外線カメラで測定した．

得られた温度分布の時系列データを基に，熱伝達率の時空間分布を算出した．その際，伝熱面内の非定常熱伝導解析を行い，伝熱面の熱容量および熱拡散に起因した時空間的な減衰を復元した．得られた熱伝達率の時空間分布の一例 ( $Re_D = 10100$ ) を図7に示す．瞬時分布 (左図) には，平板境界層乱流と同様なストリーク構造が現れている．この構造が下流に流れることにより，熱伝達率が時間的に高速に変動している (右図)．

(7) 図8に，時間平均熱伝達 (ヌッセルト数) をレイノルズ数に対してプロットした．比較のため，従来の経験式 (Petukov および Gnielinski の式) を破線および実線で示し

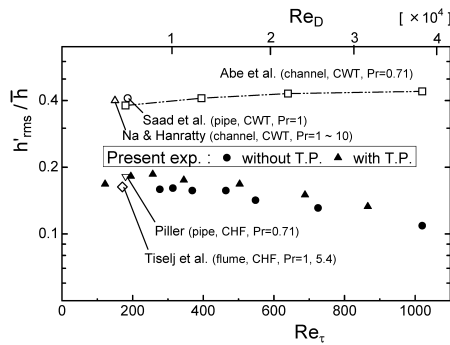


図9 熱伝達率変動 (円管内乱流)

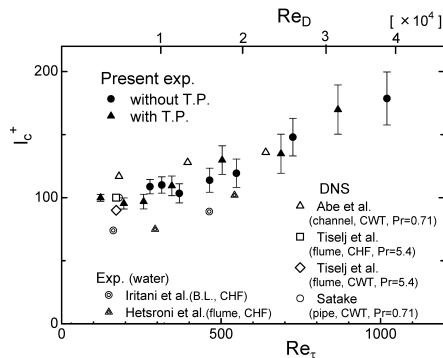


図10 温度ストリークの平均間隔 (円管内乱流)

た .レイノルズ数が5000以上ではGnielinskiの式と5%以内で一致しており、時間平均熱伝達を定量的に測定可能であることを確認した。

(8) 図9に、熱伝達率変動のrms値をレイノルズ数に対してプロットした。得られた値は  $h'_{rms}/h = 0.16 \sim 0.18$  ( $3000 < Re_D < 15000$ ) であり、同様な熱的境界条件における円管内乱流のDNS (Piller,  $Re_D = 5300$ ) の結果とほぼ同じ値であった。

図10に、温度ストリークの平均間隔をレイノルズ数に対してプロットした。本実験で得られた値 ( $l_c^+ = 90 \sim 130$  at  $Re_D < 20000$ ) は、円管内乱流のDNS (Satake & Kunugi,  $l_c^+ = 100$  at  $Re_D = 5300$ ) の結果と同程度であった。なお、平板境界層乱流やチャンネル乱流の値 ( $l_c^+ = 70 \sim 130$ ) とほぼ同程度であり、円管内乱流であっても、ストリーク間隔が平板乱流と同程度になることを確認した。

以上の結果より、円管内乱流の場合においても、本手法により熱伝達率の時空間的な変動特性を適切に測定できることを確認した。

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計3件)

中村 元、後向きステップ下流における乱流熱伝達の時間・空間変動特性、日本機械学会論文集B、査読有、76巻771号、2010、1870-1878

H. Nakamura, S. Yamada, Quantitative Evaluation of Spatio-Temporal Heat

Transfer to a Turbulent Air Flow Using a Heated Thin-Foil, Int. J. Heat and Mass Transfer, 査読有, Vol. 64, 2013, 892-902

DOI: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2013.05.006

椎原尚輝、中村 元、山田俊輔、高速度赤外線カメラを用いた円管内水流熱伝達の非定常測定、Thermal Science & Engineering, 査読有, Vol. 21, 2013, 105-113

〔学会発表〕(計15件)

中村 元、高木明佳、はく離・再付着を伴う対流熱伝達の時間・空間変動特性、熱工学コンファレンス講演論文集、2010、pp.381-382

高木明佳、中村 元、山田俊輔、はく離・再付着を伴う対流熱伝達の時間・空間変動特性(再付着点近傍における特徴的な変動周波数)、第48回日本伝熱シンポジウム講演論文集、2011、pp.515-516

H. Nakamura, S. Takaki, S. Yamada, Spatio-Temporal Characteristics of Heat Transfer in Separated and Reattaching Flows, ASME-JSME-KSME Joint Fluids Engineering Conf., 2011, AJK2011-25020

中村 元、高木明佳、山田俊輔、強制対流平板乱流境界層における熱伝達の時空間分布測定、日本機械学会2011年度年次大会講演論文集、2011、J056033

高木明佳、中村 元、山田俊輔、はく離・再付着を伴う対流熱伝達の時間・空間変動特性(再付着点近傍における流れ場と熱伝達の対応)、熱工学コンファレンス講演論文集、2011、pp.51-52

H. Nakamura, S. Takaki, S. Yamada, Visualization of Spatio-Temporal Heat Transfer to a Turbulent Flow, 15th Int. Symp. on Flow Visualization, 2012, ISFV15-032

H. Nakamura, S. Takaki, S. Yamada, Spatio-Temporal Characteristics of Heat Transfer for a Backward-Facing Step Flow, 7th Int. Symp. on Turbulence, Heat and Mass Transfer, 2012, J029

中村 元、椎原尚輝、山田俊輔、高速度赤外線カメラを用いた円管内水流の熱伝達測定、熱工学コンファレンス講演論文集、2012、pp.147-148

椎原尚輝、中村 元、山田俊輔、高速度赤外線カメラを用いた円管内水流熱伝達の非定常特性、第50回日本伝熱シンポジウム講演論文集、2013、pp.472-473

椎原尚輝、中村 元、山田俊輔、高速度赤外線カメラを用いた円管内水流熱伝達の非定常特性、第41回可視化情報シンポジウム講演論文集、2013、

pp.179-184

N. Shiibara, H. Nakamura, S. Yamada, Visualization of Turbulent Heat Transfer to a Water Flow in a Circular Pipe Using High-Speed Infrared Thermography, 9th Pacific Symp. on Flow Visualization and Image Processing, 2013, pp.303-308

N. Shiibara, H. Nakamura, S. Yamada, Unsteady Measurement of Convective Heat Transfer to a Water Flow in a Circular Pipe Using High-Speed Infrared Thermograph, 4th Int. Conf. on Jets, Wakes and Separated Flows, 2013, ICJWSF2013-1047

椎原尚輝、中村 元、山田俊輔、円管内乱流熱伝達の時空間変動特性、熱工学コンファレンス講演論文集、2013、pp.445-446

中村 元、椎原尚輝、山田俊輔、乱流熱伝達に伴う壁温変動のモデル化の試み、熱工学コンファレンス講演論文集、2013、pp.447-448

椎原尚輝、中村 元、山田俊輔、円管内水流熱伝達測定への高速度赤外線カメラの応用、日本赤外線学会 第23回研究発表会、2013、pp.49-50

〔その他〕

ホームページ等

<http://www.nda.ac.jp/~nhajime/research1.html>

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

中村 元 (NAKAMURA, Hajime)

防衛大学校・システム工学群・教授

研究者番号：80531996