

令和元年6月17日現在

機関番号：82723

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2016～2018

課題番号：16K06142

研究課題名（和文）赤外線高速イメージング定量測定法による円管内脈動流の伝熱機構解明

研究課題名（英文）Elucidation of heat transfer mechanism of pulsating flow in a pipe by quantitative infrared high-speed imaging

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学群）・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） 3,800,000円

研究成果の概要（和文）：管内流を急加速・急減速させた時の熱伝達変動を赤外線高速イメージングにより定量的に測定した。その結果、急加速に伴う層流化とその直後の乱流化現象、急減速に伴う斑状の伝熱促進構造の形成とその構造の拡散現象を明瞭に可視化することができた。また、流れ場の変動と熱伝達の変動を同時に測定することにより、熱伝達の変動は流れ場の変動に対して遅れること、この遅れは、急加速時、急減速時それぞれにおいてタイムラグ t と一時遅れ時定数 τ の組み合わせでモデル化できることが示された。さらに、 t は壁摩擦速度と動粘性係数を用いた無次元数で、 τ は壁摩擦速度と円管半径を用いた無次元数で定式化できる見込みが示された。

研究成果の学術的意義や社会的意義

これまで、管内乱流に脈動を与えた場合、どのような条件でどの程度の伝熱が促進（あるいは抑制）されるかについて統一的な見解が得られていなかった。本研究により、流れの加速時・減速時の熱伝達変動を定式化できる見込みが示されたため、任意の管径および流速（レイノルズ数）において、最も伝熱促進（あるいは抑制）される脈動条件（脈動振幅、脈動周期、デューティ比）とその時の伝熱促進率を予測できる可能性が示された。これにより、管内流を用いて熱交換するエネルギー変換機器や、管内流により熱輸送する機器において、流れに脈動を与えた時の熱交換・熱輸送効率向上を予測できる可能性が示された。

研究成果の概要（英文）：The heat transfer fluctuation when the pipe flow was accelerated and decelerated was measured quantitatively by infrared high-speed imaging. As a result, it was possible to clearly visualize the laminarization and turbulence phenomena with flow acceleration, and the formation of mottled heat transfer promoting structure and its diffusion phenomena with flow deceleration. Also, by simultaneously measuring the flow fluctuation, it was clarified that the heat transfer fluctuation is delayed with respect to the flow fluctuation, and this delay can be modeled by a combination of the time lag t and first-order time constant τ for flow acceleration and deceleration respectively. Furthermore, it was shown that t is likely to be formulated by a non-dimensional form using wall friction velocity and kinematic viscosity, and τ is likely to be formulated by a non-dimensional form using wall friction velocity and pipe radius.

研究分野：熱工学

キーワード：強制対流 伝熱促進 脈動流 非定常測定 赤外線カメラ

様式 C-19、F-19-1、Z-19、CK-19（共通）

1. 研究開始当初の背景

これまで、管内乱流に脈動を与えて伝熱促進する試みが数多くなされてきたが、どのような条件で伝熱が促進されるか、あるいは抑制されるかについて統一的な見解が得られていなかった。これは、これまで伝熱の非定常測定が困難であり、脈動の各位相における流動状態と伝熱機構との関連が実験的に明らかにされていなかったためと考えられる。

2. 研究の目的

管内乱流を加速・減速させた時の伝熱促進・抑制のメカニズムを明らかにするため、管内流を急加速・急減速させた時の流れ場の変動と熱伝達の変動を同時に測定し、急加速時、急減速時それぞれにおいて流れ場と熱伝達の対応関係を調査する。また、流れに矩形波状の脈動を与えた時の伝熱促進を予測することを目的として、熱伝達変動の定式化を試みる。

3. 研究の方法

熱伝達変動の測定には、申請者が開発した赤外線高速イメージング定量測定法を用いる。本手法を用いると、流れの乱れに伴う高速でかつ複雑な伝熱構造の変化をリアルタイムで可視化できるため、乱流化や再層流化といった流動形態の変化に対応した伝熱機構を明らかにできることが期待される。

実験装置には、既存の円管内水流実験装置の下流部に電動弁を設置したものをを用いる。また、弁開時と閉時のレイノルズ数を任意に設定できるように分岐管を設け、レイノルズ数を系統的に変化させた実験を行う。

熱伝達変動の測定と同時に、電磁流量計による流量変動測定、熱膜流速計による速度変動測定、および差圧計による圧力損失変動測定を行い、流れを急加速・急減速させた時の流動状態と伝熱機構の関係を調査する。

4. 研究成果

(1) 計測システムの構築

① 赤外線高速イメージングにより熱伝達率変動の定量測定を行うため、チタン箔（厚さ $40\ \mu\text{m}$ ）を通電加熱して円管内壁を一樣に加熱する伝熱模型を製作した。また、応答の速い電磁流量計（時定数 $0.05\ \text{s}$ 、ムダ時間 $0.03\ \text{s}$ ）、熱膜流速計（K 熱電対で温度変動を補償）、および応答の速い差圧計を用いて、流れ場の変動と熱伝達の変動を同時に測定できるシステムを構築した。実験装置および計測システムの概略を図 1 に示す。

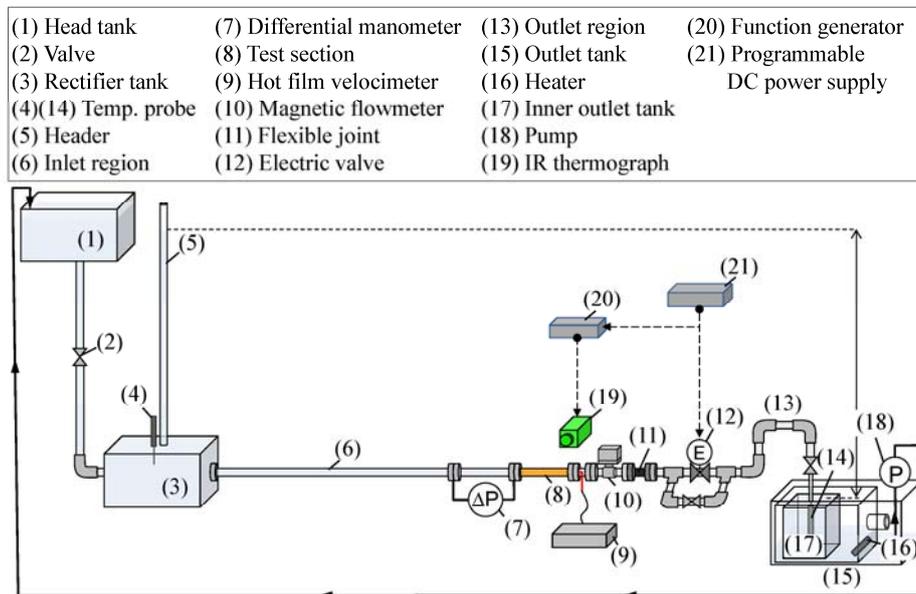


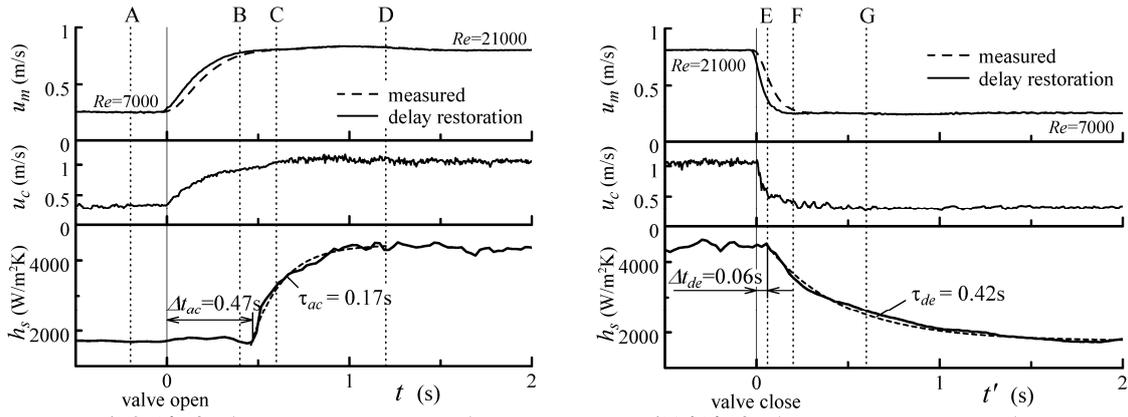
図 1 実験装置および計測システムの概略

② 脈動を付与しない定常乱流において流れ場および熱伝達の測定を行い、圧力損失およびヌッセルト数が既存の実験式と一致することを確認した。

(2) 熱伝達率の時空間変動測定

赤外線高速イメージングにより得られた熱画像から、① 流れを急加速した直後は一旦流れが層流化するものの（図 2, 3: Time B）、少し間をおいて急激に乱流化してストリーク状の熱伝達構造が形成されること（図 2, 3: Time C, D）、② 流れを急減速した直後にストリーク状の構造が流れ方向に押し潰されて斑状の伝熱促進構造が形成されること（図 2, 3: Time E）、そしてその構造は徐々に拡散しながらしばらく持続すること（図 2, 3: Time F, G）が明らかとなり、③ そ

の結果、熱伝達率の変動は流れ場の変動と比べて遅れることが明らかになった。



(a) 急加速時 (Re = 7,000 → 21,000)

(b) 急減速時 (Re = 21,000 → 7,000)

図2 管内平均流速 u_m , 円管中心速度 u_c , 面平均熱伝達率 h_s の変動波形

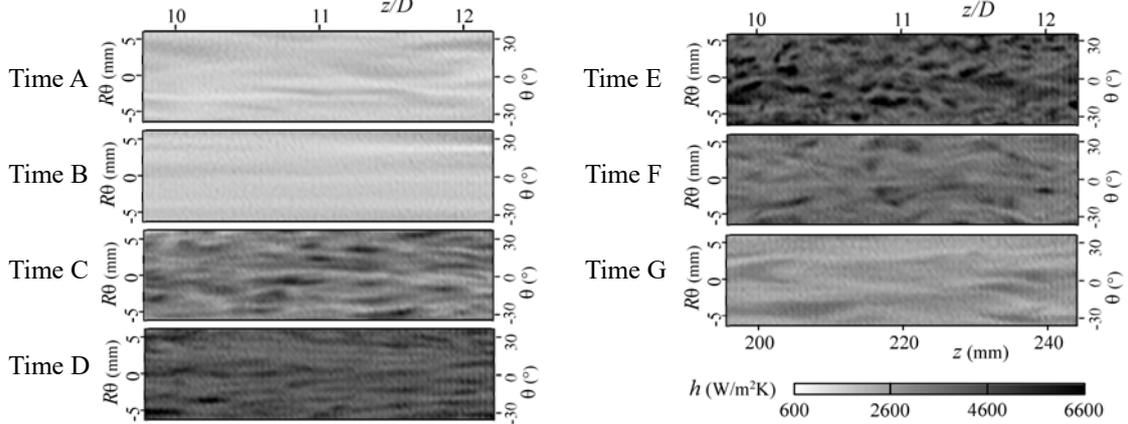
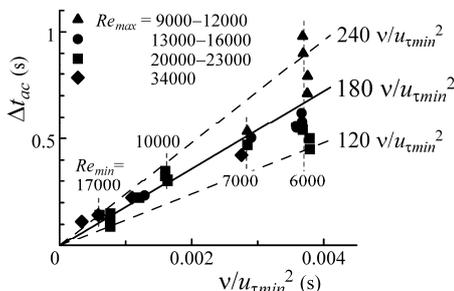


図3 図2の時刻AからGにおける瞬時熱伝達率分布

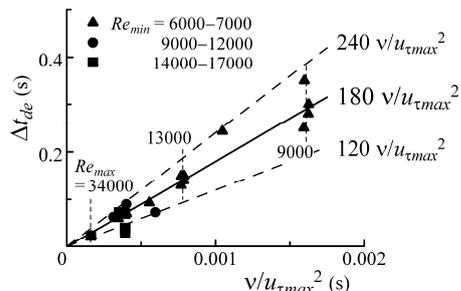
(3) 熱伝達の時間遅れの定式化

① 電動弁開時及び閉時のレイノルズ数を系統的に変化させて測定を行った。その結果、いずれの条件においても熱伝達率の変動は流れ場の変動と比べて遅れること、この遅れは、急加速時、急減速時それぞれにおいてタイムラグ Δt (図3(a), (b)参照) と一時遅れ時定数 τ (図3(a), (b)参照) の組み合わせによってモデル化できることが示された。

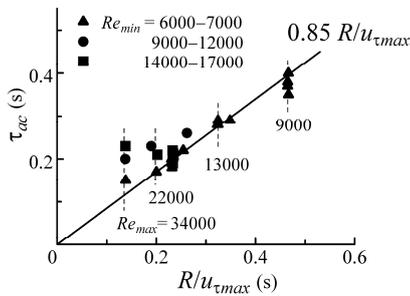
② 流れの急加速時、急減速時に見られるタイムラグ Δt は壁摩擦速度 u_τ と動粘性係数 ν を用いた無次元数により、一次遅れ時定数 τ は壁摩擦速度 u_τ と円管半径 R を用いた無次元数により定式化できる見込みが示された。図4に、乱流から乱流への加減速の場合のタイムラグ Δt と一次遅れ時定数 τ を示す。この定式化により、流れの急加速と急減速で構成される脈動流 (図5参照) の場合、任意のレイノルズ数 (弁開時のレイノルズ数 Re_{max} と弁閉時のレイノルズ数 Re_{min}) の組み合わせにおいて熱伝達率変動を定量的に予測することが可能となる。つまり、任意の管径および流速 (レイノルズ数) において、最も伝熱促進 (あるいは抑制) される脈動条件 (脈動振幅、脈動周期、デューティ比) とその時の伝熱促進率を予測できる可能性が示された。



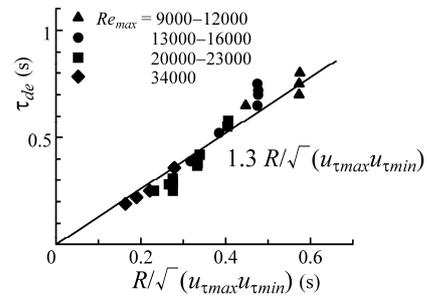
(a) 急加速時のタイムラグ Δt_{ac}



(b) 急減速時のタイムラグ Δt_{de}



(c) 急加速時の一時遅れ時定数 τ_{ac}



(d) 急減速時の一時遅れ時定数 τ_{de}

図4 熱伝達率変動の遅れの定式化 (乱流から乱流への加減速の場合)

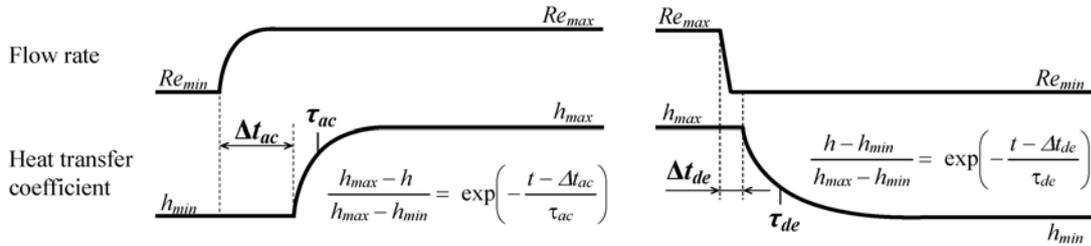


図5 流れの急加速・急減速に対する熱伝達率変動のモデル化

(4) 矩形波状脈動流における熱伝達変動のモデル化

電動弁の開閉により脈動流を発生させる場合において、弁の開時間、閉時間を系統的に変化させた実験を行った。その結果、レイノルズ数と同じであれば、タイムラグ Δt と一時遅れ時定数 τ は開時間と閉時間にほとんど依存せず、一定値として扱うことが可能であることが示された。また、本実験条件 (弁開時のレイノルズ数 $Re_{max} = 20,500$ 、弁閉時のレイノルズ数 $Re_{min} = 5,400$) では、図6に示すように、弁の開時間が短いほど伝熱促進率が高くなることが示された。

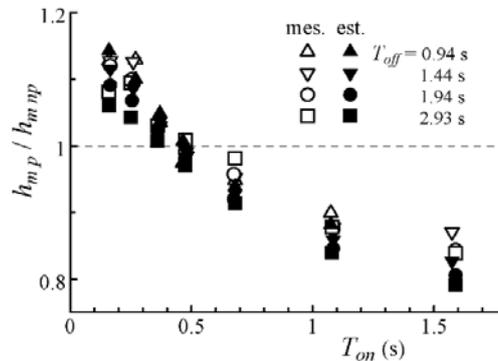


図6 バルブ開時間 T_{on} に対する伝熱促進率 h_{mp}/h_{mnp} ($Re_{max} = 20,500$, $Re_{min} = 5,400$)

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計1件)

- ① N. Shiibara, H. Nakamura, S. Yamada, International Journal of Heat and Mass Transfer, 査読有, Vol. 113, 2017, pp.490-501
DOI: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2017.05.077

[学会発表] (計9件)

- ① H. Nakamura, R. Saitoh, S. Yamada, 11th International Symposium on Turbulence and Shear Flow Phenomena, 査読有, 2019.7, 掲載予定
- ② 齊藤 陸, 椎原 尚輝, 中村 元, 山田 俊輔, 第56回日本伝熱シンポジウム, D221, 2019.5
- ③ 齊藤 陸, 椎原 尚輝, 中村 元, 山田 俊輔, 日本機械学会熱工学コンファレンス, G124, 2018.10
- ④ 中村 元, 椎原 尚輝, 山田 俊輔, 日本冷凍空調学会年次大会, F113, 2018.9
- ⑤ H. Nakamura, S. Yamada, 16th International Heat Transfer Conference, 査読有, IHTC16-22949, 2018.8
- ⑥ H. Nakamura, S. Yamada, 9th Int. Symp. on Turbulence, Heat and Mass Transfer, 査読有, S14.2, 2018.7
- ⑦ 中村 元, 山田 俊輔, 第55回日本伝熱シンポジウム, J123, 2018.5
- ⑧ H. Nakamura, N. Shiibara, S. Yamada, 9th JSME-KSME Thermal and Fluids Engineering Conference, TFEC9-1545, 2017.10

⑨ 椎原尚輝, 中村 元, 山田 俊輔, 第 54 回日本伝熱シンポジウム, E232, 2017.5

[その他]

ホームページ等

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

6. 研究組織

(1) 研究分担者

研究分担者氏名：山田 俊輔

ローマ字氏名：(YAMADA, Shunsuke)

所属研究機関名：防衛大学校

部局名：システム工学群

職名：准教授

研究者番号 (8 桁)：90516220

(2) 研究協力者

研究協力者氏名：椎原 尚輝

ローマ字氏名：(SHIIBARA, Naoki)

※科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。