

令和 6 年 6 月 21 日現在

機関番号：32682

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2020～2023

課題番号：20K04316

研究課題名（和文）隣接多点薄膜温度センサによる局所熱伝達と壁面近傍移流速度の計測

研究課題名（英文）Measurement of local heat transfer and estimation of near wall advection velocity by multi-points thin film temperature sensor

研究代表者

中別府 修（Nakabeppu, Osamu）

明治大学・理工学部・専任教授

研究者番号：50227873

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,400,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では、隣接多点のMEMS薄膜熱流束センサを製作し、強制対流場において非定常な壁面熱流束を計測するとともに、隣接複数点の熱流束信号から、壁面近傍の移流速度を推定する手法の開発を行った。延長1年を含む4年間の研究において、シリコン基板、アルミ合金基板を用いた4点、5点、7点センサを試作し、空気の強制対流場での実験的研究を実施した。熱流束の相互相関解析から隣接点の遅れ時間を求め、4点センサでは4つの沿面速度ベクトルを、5点センサでは9つの沿面速度ベクトルを算出するアルゴリズムを開発し、算出ベクトルの標準偏差を用いた過誤ベクトルの除去を行うことで、信頼性の高い推定速度を得る方法を開発した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

エンジンやタービン、ボイラー等のエネルギー機器では、容器壁面と内部流体との熱伝達がエネルギー損失となるため、熱効率向上のためには、内平面近傍の流れと熱伝達特性を調べる事が重要である。本研究成果は、レーザーや画像計測ができない容器内の流動・伝熱特性を壁面に設置した隣接多点熱流束センサで調べることを可能にする点で学術的に重要な技術である。また、エンジンの高効率化研究では、筒内の流動制御や燃料濃度の成層化制御技術が研究されており、これらを実践する上で、本研究成果が貢献することが期待される。

研究成果の概要（英文）：In this study, we fabricated adjacent multi-point MEMS thin-film heat flux sensors and measured unsteady wall heat flux in a forced convection field. Additionally, we developed a method to estimate the advection velocity near the wall from the heat flux signals at multiple adjacent points. Over the course of four years, including a one-year extension, we prototyped four-point and five-point sensors using silicon and aluminum alloy substrates and conducted experimental studies in an air forced convection field. By analyzing the cross-correlation of heat flux, we determined the delay time between adjacent points. We developed an algorithm to calculate four surface velocity vectors for the four-point sensor and nine surface velocity vectors for the five-point sensor. By removing error vectors using the standard deviation of the calculated vectors, we established a method to obtain reliable estimated velocities.

研究分野：熱工学

キーワード：MEMS 熱流束 移流推定 乱流熱伝達 強制対流 非定常熱伝達

## 様式 C - 19、F - 19 - 1 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

エンジンやタービン、ボイラー等のエネルギー機器においては、容器壁面と内部流体との熱伝達がエネルギー損失となるため、熱効率向上のためには、内壁面近傍の流れと伝熱特性を調べることが重要である。レーザーや画像計測ができない容器内の流動・伝熱特性を調べる手段として、研究代表者らは壁面に設置する隣接多点の薄膜熱流束センサを提案し、隣接3点センサの瞬時局所熱流束情報から壁面近傍の流動に対して壁面に沿う流速ベクトルを推定しえることを示してきた。

### 2. 研究の目的

壁面設置の隣接多点熱流束センサにより、乱れを伴う流動・伝熱場における壁面近傍の流動情報と伝熱特性を調べる手法を開発し、推定される移流情報の物理的意味と伝熱特性との関係を調べることを目的とする。

### 3. 研究の方法

MEMS技術を用いて、隣接4点、5点、7点の薄膜熱流束センサを製作し、乱れを伴う流動・伝熱場における隣接多点での瞬時局所熱流束を計測する。隣接3点の熱流束からは、類似熱流束波形の相互相関解析から得られる遅れ時間に基づき、壁面近傍の移流に対応する沿面速度ベクトルが算出される。4点、5点、7点と隣接センサ点数を増やすと、得られる沿面速度ベクトルの数は図1のとおり、4ベクトル、9ベクトル、18ベクトルと増加する。また、提案するアルゴリズムによって隣接点の熱流束情報から得られる沿面ベクトルは、隣接センサ全体よりも大きな流体塊が壁面に平行に移動する場合に、正しい移流速度を与える。壁面に垂直な速度成分がある場合、センサ全体よりも小さな流体塊が渦を伴う運動をする場合には、複数の算出される沿面速度ベクトルに一貫性が無くなる。よって、複数の沿面速度ベクトルの標準偏差を求め、ある基準以上にばらつく結果を排除することで、信頼性のある移流速度推定とする。

また、算出される沿面速度ベクトルが壁面からどれだけ離れた場所の移流速度に対応するかは不明であり、熱線流速計による壁面法線方向の速度分布計測を実施して、推定される移流速度の物理的意味を明確にする。

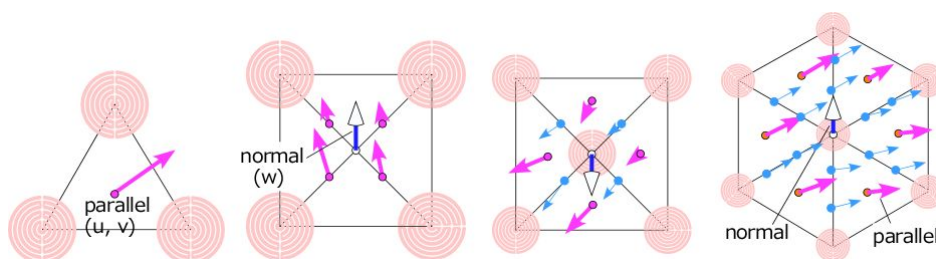


図1 隣接多点熱流束センサのセンサ数と算出される沿面速度ベクトル数

### 4. 研究成果

隣接4点、5点、7点センサをMEMS技術で製作し、乱れを伴う空気流に対して非定常熱流束計測を実施した。図2には試作した4点熱流束センサ(1辺0.5mmの正方形頂点上に、直径360 $\mu\text{m}$ の円形センサ)、5点熱流束センサ(1辺0.7mmの正方形頂点、及び中心に直径400 $\mu\text{m}$ の円形センサ)、7点熱流束センサ(外接円直径1.4mmの正六角形頂点上及び中心に直径400 $\mu\text{m}$ の円形センサ)を示す。

図3には、5点センサによる熱流束計測例を図4に相互相関解析の例を示す。瞬時熱流束は200Hzをカットオフとするローパス処理をしている。相互相関関数のピーク時刻は熱流束波形が移流の時間だけ遅れることを示し、遅れ時間が得られている。3点の熱流束信号を単位として3つの遅れ時間から3つの沿面速度ベクトルが得られるが、3ベクトルの変動係数が規定値以上な場合は、流動場が解析アルゴリズムに合わないものとして結果を棄却し、揃った3ベクトルが得られた場合に、データとして採用する(図5)。

5点センサでは、9個の沿面速度ベクトルが得られるが、アルゴリズムに合わない流動状態で得た熱流束データからは、9ベクトルの変動係数が大きな結果となる。変動係数を30%以下とすることで図6に示すような沿面ベクトルが得られる。変動係数が大きな結果を棄却することで信頼性のある推定に近づく一方、得られた熱流束データ列から切り出される部分データ列の総

数に対してデータの採択率は低下する。この例では、約 15%の採択率であり、流動場の瞬時の挙動を捉えることはできず、有効な使用方法としては、計測時間を延ばし、平均的な挙動と変動を調べることになる。

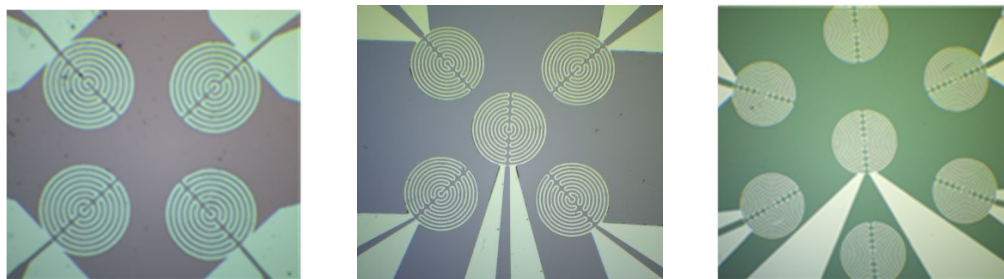


図2 センサ試作例（4点，5点，7点）

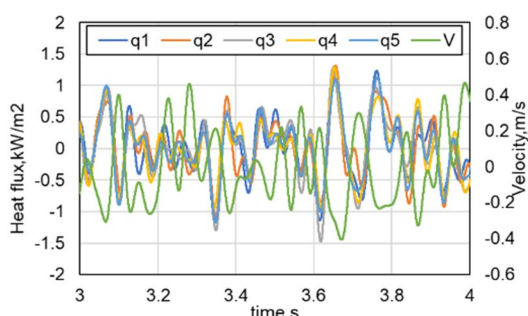


図3 5点の熱流束と熱線流速計の計測例

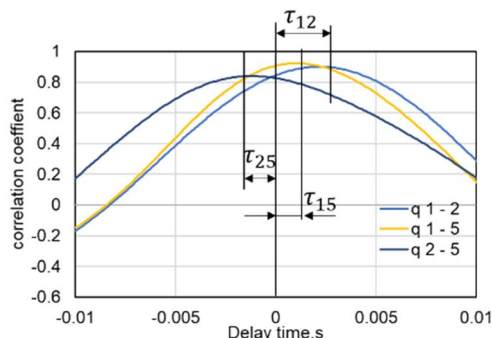


図4 相互相関解析例

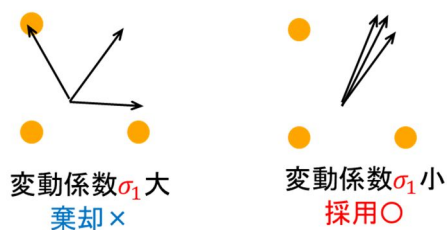


図5 3点熱流束から得られる3つの沿面速度ベクトルの棄却・採用判定

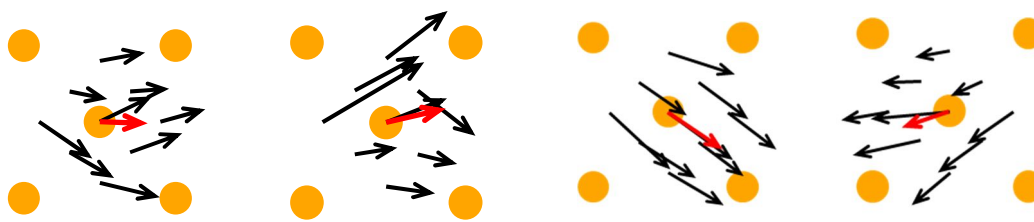


図6 沿面速度の算出例（黒矢印：速度要素，赤矢印：平均速度）

得られた沿面速度が流動場のどのような情報を反映するかを調べるために、図7に示すように、熱線流速計による速度絶対値計測と隣接5点熱流束センサによる同時計測を実施し、速度データと熱流束データの相関強度を図8にマッピングした。赤が高相関、青が低相関であり、熱流束センサの直上1mmの距離で最も高い相関が得られており、熱流束センサ直上の情報が強く反映することを確認した。

また、沿面速度の平均値は0.19m/sと得られており、熱線流速計で測った境界層内の速度分布で該当する高さは0.5mmと得られた。主流速度は4m/s程度であり、推定される移流速度は境界層内の変動が移流する速度を示し、この条件では、壁面から0.5mm程度の高さの情報を示していると言える。今後、壁面近傍の速度場をLDVやPIV等の手法で計測し、壁面熱流束の変動との対応を調べることで、熱流束からの移流推定が与える移流速度の意味を明確にする必要がある。

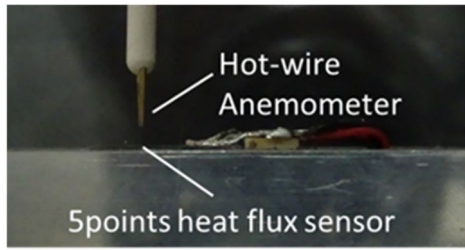


図7 多点熱流束センサと熱線流速計の同時計測

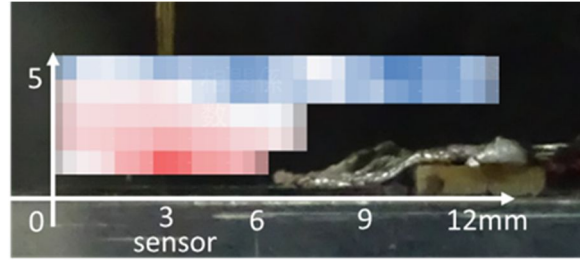


図8 速度と壁面熱流束の相関マップ

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計3件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 鋤柄文也, 長洞舜樹, 中別府修, 鎌田慎
2. 発表標題 隣接4点熱流束センサによる強制対流熱流束計測
3. 学会等名 第60回日本伝熱シンポジウム
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 山口泰尚, 中別府修
2. 発表標題 渦輪衝突時の壁面近傍流速と瞬時熱流束の関係
3. 学会等名 日本機械学会熱工学コンファレンス2021
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 山口泰尚, 中別府修
2. 発表標題 隣接4点壁面熱流束を用いた壁面近傍移流速度の推定
3. 学会等名 日本機械学会熱工学コンファレンス2020
4. 発表年 2020年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8 . 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------