

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 3 年 6 月 8 日現在

機関番号：24201

研究種目：研究活動スタート支援

研究期間：2019～2020

課題番号：19K23492

研究課題名(和文) MEMSセンサを用いた乱流燃焼壁面熱伝達の評価手法開発とメカニズム解明

研究課題名(英文) Development of turbulent heat transfer evaluation method and elucidation of its mechanism using a MEMS sensor

研究代表者

出島 一仁 (Dejima, Kazuhito)

滋賀県立大学・工学部・講師

研究者番号：20846810

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,200,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、乱流燃焼場における壁面熱伝達メカニズムの解明へ向けて、微細加工技術の一つであるMEMS技術を用いてサブミリメートルスケールの微小薄膜多点温度センサを製作し、高分解能な壁面温度・熱流束測定を実施した。さらに、隣接点で得られた温度または熱流束変動の位相差から、壁面近傍の流体塊の移流速度を推定し、熱伝達と流動を同時に捉える手法の開発に取り組んだ。また、移流速度の物理的意味を検証するため、壁面温度測定と同一条件下で粒子画像流速計による測定を行い、推定された移流速度が壁面からの温度境界層厚さと同程度の高さにおける壁面平行速度と良く一致することを確認した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

熱流体機器において壁面での熱伝達は重要な問題であり、特に燃焼を伴う場合には熱効率や壁面部材へのダメージだけでなく、燃焼効率や排気成分にも影響を与える。熱伝達特性を調べるためには熱輸送量の測定だけでなく、流動計測を行い、両者を比較検証することが求められるが、稼働中の機械で熱と流動を同時に捉えることは難しい。一方で、本研究で開発した技術では壁面温度・熱流束から移流速度を推定するため、熱と流動を同時に捉え、両者の関係性を探ることができる点で有用といえる。

研究成果の概要(英文)：To clarify turbulent heat transfer mechanisms, thin-film temperature sensors with a size of sub-millimeter were fabricated using MEMS (Micro-Electro-Mechanical Systems) technologies, and high-resolution wall temperature and heat flux measurements were performed. Additionally, advection velocity of a fluid body near the wall was estimated from the phase delay in the wall temperature or heat flux obtained at the adjacent points, which aims to detect the heat transfer and flow simultaneously. To verify the physical meaning of the advection velocity estimated from the wall temperature or heat flux, PIV (Particle Image Velocimetry) was performed in a flow channel under the same condition as the wall temperature measurement. As a result, it was confirmed that the advection velocity corresponded with the wall parallel velocity at the height of which corresponded to the thermal boundary layer thickness.

研究分野：熱工学

キーワード：熱流束測定 乱流熱伝達 相関解析 MEMS

### 1. 研究開始当初の背景

熱流体機器において、作動ガスと壁面間の熱伝達は機関の性能を左右する重要な問題である。例えば、自動車用エンジンでは燃料の持つエネルギーの 2-4 割が壁面との熱伝達によって失われ、さらに、壁面部材への熱的ダメージの原因となり、燃焼効率や排ガス成分へも影響を与える。

熱伝達の予測・制御技術の開発のためには、そのメカニズムを明らかにする必要がある。すなわち、気相がどのような状態のときに、どの程度の熱輸送が生じるかを調べる必要がある。そのためには、壁面温度や熱流束を測定すると同時に、壁面近傍の流動状態を知ることが求められる。しかしながら、気相計測で一般的なレーザ計測を稼働する機械へ適用することは容易ではなく、熱伝達と流動を同時に捉えられないことが問題であった。

### 2. 研究の目的

乱流燃焼場における熱伝達メカニズム解明へ向けて、稼働する機械など光学的アクセスが困難な場において、熱伝達と流動を同時に捉えるための壁面計測技術を開発する。

### 3. 研究の方法

微細加工技術の一つである MEMS (Micro-Electro-Mechanical Systems) 技術を用い、乱流渦と同等の空間スケールにて多点同時壁面温度測定を実施できるセンサを製作する。得られた壁面温度を境界条件とした非定常熱伝導解析を行うことで熱流束を算出し、熱伝達を評価する。さらに、隣接点で得られる壁面温度または熱流束の位相差から、壁面近傍における流体塊の移流速度を推定することで、流動情報を同時に捉える。

### 4. 研究成果

図 1 に製作した温度センサを示す。ここでは、一辺 235  $\mu\text{m}$  の薄膜測温抵抗体を  $3 \times 3$  個搭載したセンサを製作した。各抵抗体に定電流を印加し、電圧降下を測定することで抵抗値を得る。事前に較正実験によって得た抵抗値と温度の関係式より、温度を求める。

本センサの試験として、加熱空気噴流を間欠的に吹き付けた際の壁面温度測定を行った。コンプレッサによって空気を圧縮し、電磁弁を周期的に開閉することで間欠噴流を生じさせた。ここで、流路にヒータを設け、温度コントローラを用いて所定の温度になるよう加熱した。本実験では、空気温度 80  $^{\circ}\text{C}$ 、噴射周波数 7 Hz、サンプリング周波数 50 kHz とした。

図 2 に測定された温度変化を示す。ここでは代表として RTD\_2 と RTD\_5 で測定された温度のみ示すが、本実験では 9 点同時温度測定に成功している。間欠噴流がセンサに衝突した時刻を 0 s としている。壁面温度は高温の空気噴流が衝突すると急激に上昇し、その後は噴射周波数 7 Hz に一致する変動を示しながら緩やかに上昇している。ここで、RTD\_2 は RTD\_5 に比べて噴流衝突位置に近いので、温度が 1  $^{\circ}\text{C}$  程度高くなっていることがわかる。

得られた壁面温度を境界条件とした非定常 3 次元熱伝導解析を行い、壁面熱流束を算出した。得られた熱流束を図 3 に示す。熱流束は噴流が衝突して急激に上昇し、衝突位置に近い RTD\_2 では約 300  $\text{kW}/\text{m}^2$  のピークを取った。一方で衝突位置から遠い RTD\_5 のピーク値は約 150  $\text{kW}/\text{m}^2$  で、RTD\_2 に比べて半分程度となった。これは、噴流が衝突するよどみ点付近では、壁面垂直方向の流れが支配的なため温度境界層が圧縮され、熱抵抗が小さくなることが原因である。また、熱流束にも噴射周波数と一致する周期的な変動が現れていることがわかる。

次に、壁面近傍の移流速度を求めた。ここでは、熱流束の測定ノイズが大きくなってしまったため、温度変動の位相差から移流速度を算出した。まず、RTD\_2 と RTD\_5 で得られた温度変化から高周波数成分 (7 Hz 成分) のみを抽出し、相互相関解析によって位相差を求めた。その結果、位相差は 1.2 ms と求められた。RTD\_2 と RTD\_5 の間の距離は 1 mm であるので、これを位相差で除することで、移流速度は 0.83 m/s と求められた。

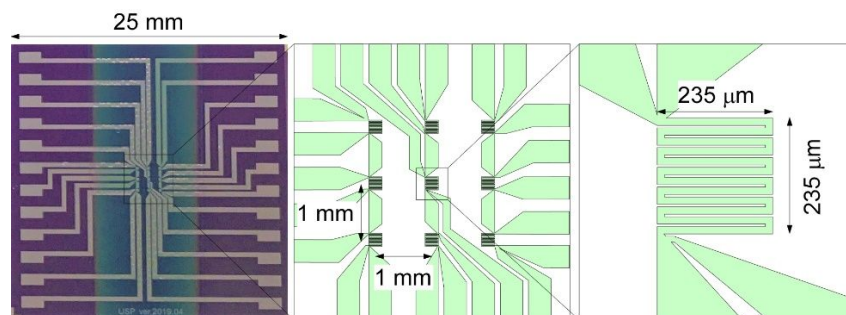


図 1 MEMS 技術を用いて製作した隣接 9 点温度センサ

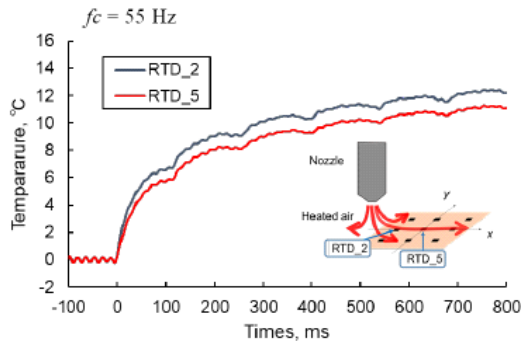


図2 間欠噴流衝突時の壁面温度変化

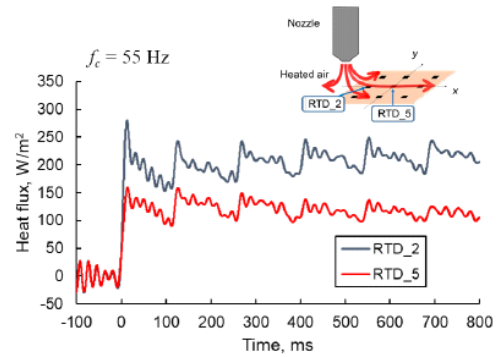


図3 間欠噴流衝突時の熱流束変化

上述のように、隣接点で得られる温度変動の位相差から移流速度を推定する手法を開発したが、それが壁面からどの高さの速度に対応するかは明確ではない。そこで、PIV (Particle Image Velocimetry) によって得た速度場と比較し、移流速度の物理的意味を検証した。

図4に実験に使用した小型風洞とPIVのレイアウトを示す。ここでは乱れを生じさせるために高さ16mmのステップを設置し、その下流側を測定領域とした。また、ここでは壁面温度の測定はMEMSセンサではなく、赤外線サーモグラフィによって実施することで、広域の温度分布を取得した。ステップ下流の再付着点付近にチタン箔を設置し、電圧印加によって45度程度に加熱し、上部から赤外線カメラで撮影を行った。なお、今回はPIVとサーモグラフィは同時ではなく別々に実施しており、撮影速度はPIVでは4000Hz、サーモグラフィでは125Hzとした。

図5にサーモグラフィで得られた壁面温度の時間変化の一例を示す。測定位置は $x/H = 2.5$ であり、位置aと位置bの距離は $\Delta x = 3$ mmである。再付着点距離は $x/H = 7$ 程度であるため、今回の測定位置では、再付着点からステップ側への逆流が生じている範囲である。位置aと位置bでは、互いに似ているが位相の遅れが見られ、その遅れ時間は3.9msであったため、移流速度は0.78m/sと見積もられた。

得られた移流速度をPIVで取得した速度と比較したところ、本条件では壁面から1.2mmの高さにおける壁面平行速度と一致した。ここで、チタン箔でのジュール発熱量をもとに壁面近傍における温度境界層厚さを見積もったところ、1.3mmとなり、移流速度に対応する壁面平行速度の高さと良く一致した。すなわち、温度変動から求められる移流速度は、温度境界層外縁における壁面平行速度に対応することが示唆された。

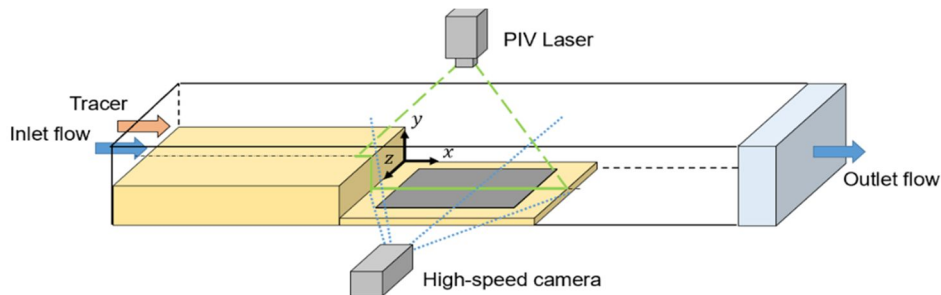


図4 移流速度検証のための小型風洞

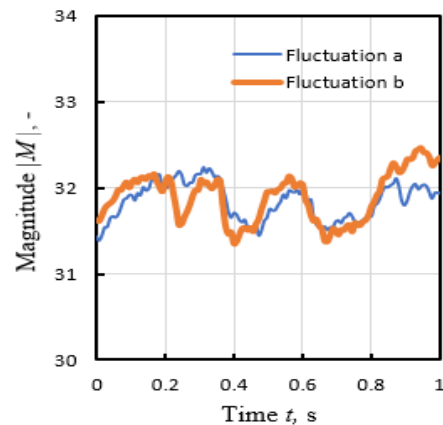


図5 赤外線カメラによって得られた壁面温度変動

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計1件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 畑中速人, 出島一仁, 山根浩二, 河崎澄
2. 発表標題 薄膜アレイ温度センサを用いた乱流熱伝達の評価手法に関する研究
3. 学会等名 第57回日本伝熱シンポジウム
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
---------	---------