

# MEMS センサによるディーゼル噴霧火炎の衝突壁面熱流束の 離散的な計測

Heat flux measurements on a diesel-flame-impinging wall using a MEMS sensor

研究代表者 滋賀県立大学工学部 講師 出島一仁

Kazuhito Dejima

Diesel engines have excellent performance as reciprocating internal combustion engines, but recent environmental and energy issues have led to calls for further improvements in their thermal efficiency. In this study, we focused on the cooling loss caused by the heat transfer between the flame and the wall surface, and aimed to develop a measurement technique that contributes to the elucidation of the mechanism. An adjacent multi-point sensor, which has microscopic temperature sensors, was fabricated using MEMS technology. Heat conduction analysis was performed using the measured temperatures as boundary conditions, and the heat flux was calculated to evaluate the heat transfer occurring at the wall surface with higher resolution than with conventional sensors. Furthermore, to evaluate the flow near the wall surface, which has an important influence on heat transfer, the advection velocity was estimated from the phase difference of heat flux fluctuations obtained at adjacent points. The above methods enable the simultaneous capture of flow and heat transfer from wall-side measurements alone.

## 要旨

ディーゼルエンジンは往復動式内燃機関として優れた性能を有するが、近年の環境・エネルギー問題を背景として、その熱効率の更なる向上が求められている。本研究では火炎と壁面の間で生じる熱伝達に起因する冷却損失に着目し、そのメカニズム解明に資する計測技術の開発を目的とした。具体的には、MEMS 技術を用いて微細な温度センサを製作し、それを 17 点搭載した隣接多点センサを開発した。測定した温度を境界条件とした熱伝導解析を行い、熱流束を算出することで、壁面で生じる熱伝達を従来センサに比べて高い分解能で評価できるようにした。さらに、熱伝達に重要な影響を及ぼす壁面近傍の流動を評価するため、隣接点で得られた熱流束変動の位相差から、移流速度の推定を行った。以上の手法により、壁面側の測定のみから流動と熱伝達を同時に捉えることを可能とした。

## 1. まえがき

ディーゼルエンジンは往復動式内燃機関として高熱効率、高トルク、高耐久といった特長を持ち、自家用車のみならず、物流を支える大型トラック等の動力源として広く利用されている。近年では自動車の電動化が進められているものの、特に長距離を走行する大型トラック等の電動化は困難<sup>(1)</sup>とされており、ディーゼルエンジンの更なる高効率化は重要な

課題といえる。

ディーゼルエンジンでは高温高圧の燃焼室に燃料が高圧で噴射され、燃焼が生じる。このとき、火炎が燃焼室壁面に高速で衝突するため、局所的に MW/m<sup>2</sup> オーダーの高熱流束<sup>(2-4)</sup>が生じ、これが損失となって熱効率低下の一因となる。そこで、衝突する火炎と壁面間の熱伝達メカニズムを明らかにし、熱損失低減手法の開発指針を得ることが重要となる。

しかしながら、従来の熱流束センサのほとんどは単点測定であり、空間変動の激しいディーゼル噴霧火炎の熱伝達を調べることは難しかった。また、近年ではレーザーや赤外線カメラの進展により、燃焼場の熱伝達に対して光学手法を適用する研究<sup>(5, 6)</sup>が増加しているが、可視化エンジンでは実験条件への制約などが生じるため、稼働するエンジンへの光学手法の適用は依然として困難が大きい。そこで、本研究は光学的アクセスなしにディーゼル噴霧火炎の熱伝達を調査できる新たな計測技術の開発に取り組んだ。

本研究では、火炎衝突壁面における熱伝達を評価するための計測技術の開発を目的とした。ここで、一足飛びにディーゼルエンジン内での測定を行うのではなく、予混合火炎によってディーゼル噴霧火炎を模擬した系で実験を行うこととした。これは、装置製作や実験実施の容易さ、流れの可視化の容易さが理由である。計測技術開発の方針として①多点同

時測定を行えること、②熱伝達のみならず流動情報をも捉えることを目標として掲げた。この2点について、以下に述べる。

①多点同時測定を行えることに関しては、ディーゼルエンジンでは燃焼室内で不均一な燃焼が生じるため、壁面熱流束の空間的な変動が激しくなる。そのため、従来の単点測定式の熱流束センサでは熱伝達特性を正しく評価することは難しい。そこで、微細加工技術の一種であるMEMS (Micro-Electro-Mechanical Systems) 技術を用いて微細な温度センサを多数配置することで、熱流束の空間的な分布を捉えることを狙った。

②熱伝達のみならず流動情報をも捉えることに関しては、熱伝達メカニズムを議論するためには、熱輸送量のみならず壁面近傍での流動情報が必要になる。速度場の測定には一般にレーザー計測技術が利用されるが、燃焼場での速度測定は容易ではなく、特に内燃機関の内部への光学的アクセスは難しい。そこで、光学的アクセスなしに流動を捉え、壁面側のみの測定から、熱伝達と流動の関係性にまで踏み込んだ評価を可能とする技術の開発に挑んだ。

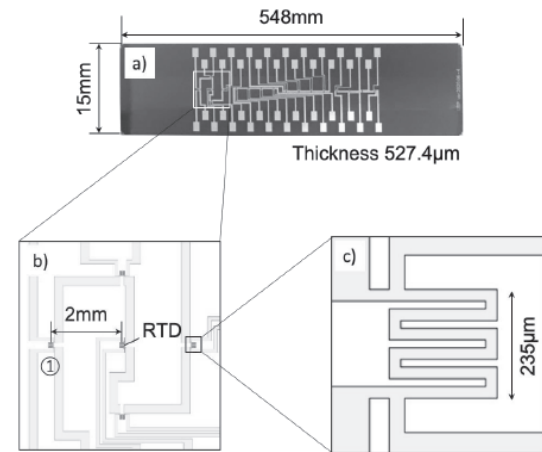


図1 MEMS センサ

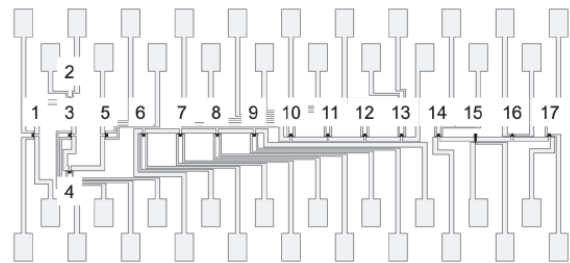


図2 測温抵抗体の配置

## 2. 実験装置および条件

### 2.1 MEMSセンサ

図1に開発したMEMSセンサを示す。ここで、温度センサには、抵抗値の温度依存性を利用して温度を測定する測温抵抗体を採用した。これは、測温抵抗体を用いることで、従来広く利用されている熱電対に比べて高感度な測定が可能になるためである。また、この測温抵抗体は一辺235ミクロン、互いの間隔は2mmであり、従来のエンジン用センサに比べて空間分解能の点でも優れている。

本センサは熱伝達の空間分布を捉えることを目的としている。図2は測温抵抗体の配置を示しており、測温抵抗体を等間隔に17個搭載した構造となっている。これらの隣接多点温度センサによる同時測定を行い、壁面熱伝達の瞬時の空間分布を捉える。ここで、多点化に際して配線数が増加し、取り回しが煩雑となる。そこで、測温抵抗体どうしを直列に接続し、駆動電流を共有することで、配線数の低減を図った。

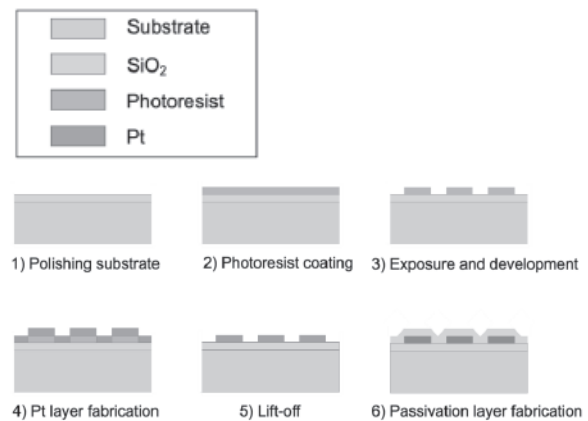


図3 MEMS センサの製作プロセス

本センサはMEMS技術を用いて製作した。図3に製作プロセスの概略を示す。熱酸化膜付きシリコンウエハ上にフォトレジストを塗布し、マスクレス露光装置を用いて露光を行った。その後、スパッタリングによって白金薄膜の測温抵抗体を形成し、リフトオフによって不要な薄膜を除去することで目的の薄膜形状を得た。さらにその上にスパッタリングによって二酸化ケイ素を成膜し、測温抵抗体を保護する

構造とした。ここで、測温抵抗体の厚さは 200 nm であり、100 kHz を超える高速な温度変動に対しても十分な応答性を有している。<sup>(7)</sup>

## 2.2 火炎噴射装置および実験条件

本研究では、ディーゼルエンジン内の熱伝達調査の第一段階として、ディーゼル噴霧火炎を予混合火炎で模擬した系で実験を行った。

図4に、使用した予混合火炎噴射装置を示す。容量約 1.5 L のシリンダ部の一端に直径 20 mm の開口を設け、反対側に点火プラグを有する構造となっている。当量比が 1 になるよう計量したブタンをシリンダ部に注入し、点火プラグで点火することで、開口部から火炎が噴射する仕組みとなっている。

図5は火炎噴射装置と MEMS センサの位置関係を示している。センサに対し斜め上方から火炎を噴射し、壁面に沿って火炎が移流する際の壁面温度を測定した。得られた温度変化から、センサの厚さ方向の一次元非定常熱伝導解析を行い、壁面熱流束を算出した。同時に、火炎伝播の様子をハイスピードカメラで撮影した。なお、MEMS センサのサンプリング周波数は 100 kHz で、ハイスピードカメラの撮影速度は 4000 fps とした。

表1に実験条件を示す。

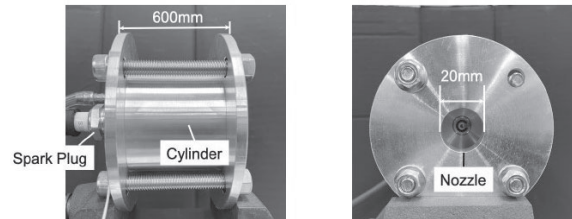


図4 火炎噴射装置

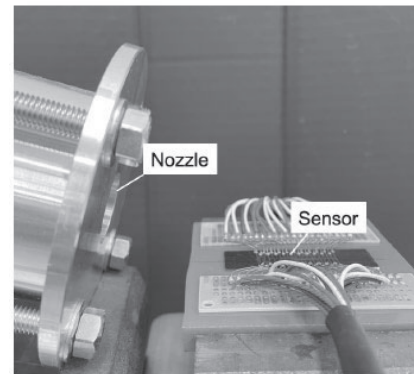


図5 火炎噴射装置と MEMS センサの位置関係

表1 実験条件

Fuel	Butane
Equivalent ratio	1.0
Sampling frequency for MEMS sensor	100 kHz
Recording speed for high-speed camera	4000 fps

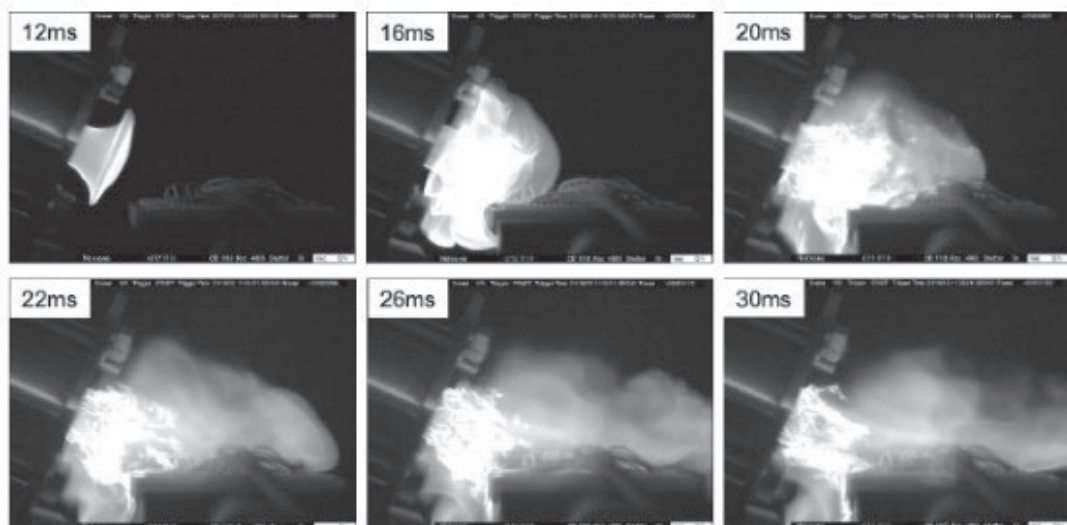


図6 火炎噴射の様子

### 3. 実験結果および考察

#### 3.1 壁面温度の測定

図6に、ハイスピードカメラで撮影した火炎噴射の様子を示す。ここで、点火プラグへの信号入力タイミングを時刻0としている。開口部から噴出した火炎は16~20ms程度でセンサ設置壁面へと到達し、その後壁面に沿って伝播していくことがわかる。この火炎が衝突する際の壁面温度を開発したMEMSセンサによって測定した。

図7に、MEMSセンサによって測定した壁面温度変化を示す。ここでは17点ある測定点のうちの2点のデータ(RTD\_6およびRTD\_10)を代表として示している。図中にはセンサの各測温点位置が示されており、RTD\_6は赤丸、RTD\_10は紺丸で表示している。RTD\_6は噴射口に近い位置であり、図6中では左側にあるため、火炎は先にRTD\_6に到達し、その後RTD\_10に到達することとなる。実際に、図7ではRTD\_6の温度が先に上昇を始め、RTD\_10の温度上昇はわずかであるが遅れている。

RTD\_6では最大温度上昇量が約10Kである一方で、RTD\_10では約9Kとなっている。すなわち、火炎が先に到達するRTD\_6の方が、最大温度上昇量が大きいという結果が得られた。これは、平板に沿う熱伝達と同様に、上流側で温度境界層がより薄くなり、それによって熱伝達率が高くなることで、熱輸送量が増加したものと考えられる。壁面温度はピークを取った後にわずかに減少するが、その変化は緩やかである。

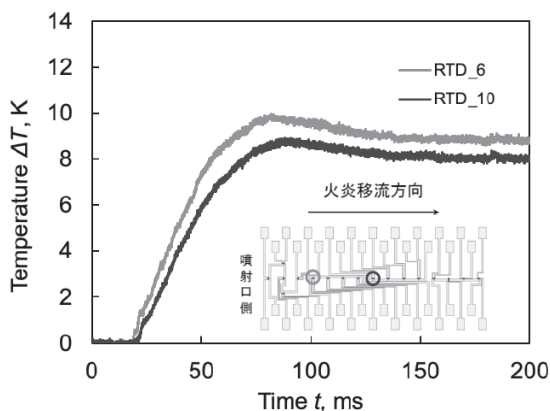


図7 壁面温度変化

#### 3.2 壁面熱流束の算出

測定した壁面温度を境界条件として用い、以下の一次元非定常熱伝導方程式を解くことで、壁面熱流束を算出する。

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left( k \frac{\partial T}{\partial x} \right)$$

ここで、 $T$ は温度、 $t$ は時間、 $x$ はセンサ厚さ方向の距離、 $\rho$ は密度、 $c$ は比熱、 $k$ は熱伝導率を表す。本研究では、コントロールボリューム法による離散化と完全陰解法による時間発展を行い、数値的に熱伝導方程式を解いた。得られたセンサ内の温度分布から壁面における温度勾配を求め、熱流束を算出した。

図8に、熱伝導解析によって算出したRTD\_6およびRTD\_10における壁面熱流束を示す。熱流束の立ち上がりは、火炎噴射口に近いRTD\_6の方が早く、その後わずかに遅れてRTD\_10で熱流束が立ち上がる。ピーク値はRTD\_6で約300 kW/m<sup>2</sup>、RTD\_10で約200 kW/m<sup>2</sup>となり、わずか8 mmの距離の差で熱流束値に2/3倍の違いが生じている。これは前述の通り、上流側では温度境界層が薄いため熱伝達率が高くなったことが原因であると考えられる。

熱流束はピーク値を取った後、約50 msまで200 kW/m<sup>2</sup>程度を維持しつつ、その後減少していく。ハイスピードカメラによる火炎の撮影(図9)から、点火開始から50 ms程度まで火炎が噴射されており、その後火炎の消失に伴って熱流束も減衰している様子が観察された。すなわち、熱流束ピーク後しばらくは火炎/壁面間の温度差および熱伝達率が概ね一定な準定常状態であり、その後、燃焼終了によるガス温度低下によって熱流束が低下したものと考えられる。

また、瞬時熱流束は非定常な変動を示している。特に、噴射口に近いRTD\_6ではRTD\_10に比べて熱流束変動が大きいことがわかる。この原因の一つとして、上流側の方が流れ中に強い乱れが生じている可能性が考えられる。

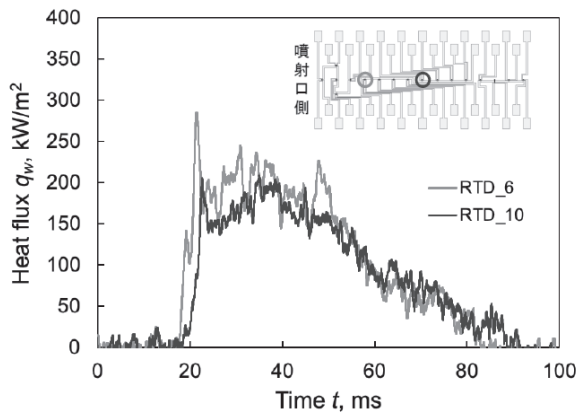


図8 壁面熱流束

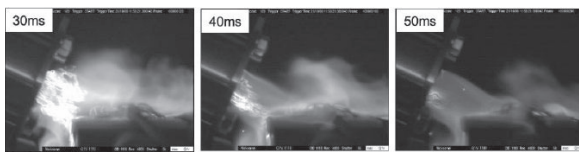


図9 壁面熱流束

### 3.3 火炎の移流速度の推定

次に、壁面近傍の流動について考える。図10は、RTD\_6とその2 mm 隣のRTD\_7における熱流束を示しており、特に火炎到達直後を拡大して表示している。両者は良く似た波形を示していることがわかるが、これは前述のRTD\_10はRTD\_6から8 mm 離れているのに対し、RTD\_7は2 mm しか離れていないためである。ここで、RTD\_6は火炎噴射口に近い上流側であるため、熱流束の立ち上がりおよびピーク値がわずかに早い時刻にあり、RTD\_7はRTD\_6に対して位相が遅れていることが読み取れる。この位相遅れは、2 mm という距離を火炎が伝播する際にかかった時間を表していると考えれば、測温点間距離を位相遅れ時間で除することで、火炎の移動する速度(=移流速度)を求めることができる。

熱流束波形の位相遅れを求めるため、本研究では相互相関解析を利用した。相互相関解析とは、二つの波形がどれだけ似ているかを評価する手法であり、以下の相互相関関数を用いる。

$$R(\tau) = \frac{\int f(t) \cdot g(t + \tau) dt}{\sqrt{\int f(t)^2 dt \cdot \int g(t)^2 dt}}$$

ここで、 $f(t)$ および $g(t)$ は、RTD\_6およびRTD\_7の

熱流束変動を示す。なお、熱流束変動としては、図10で示した熱流束から0.6 ms 分の移動平均を差し引いたものを利用した。

図11に相互相関関数を示す。縦軸は相互相関関数、横軸は位相遅れを示している。図11では、位相差が-0.26 ms のときに相互相関関数がほぼ1となっていることがわかる。二つの波形が完全に一致している場合に相互相関関数は1となるため、RTD\_6とRTD\_7の波形は位相が0.26 ms 遅れた時刻において、ほぼ一致していることがわかった。なお、位相差が負の値になっているのは、相関関数の式からわかる通り、RTD\_7がRTD\_6に対して遅れていることを意味している。

以上の結果より、火炎はRTD\_6からRTD\_7まで移流するのに0.26 ms の時間がかかったと解釈できる。したがって、RTD\_6とRTD\_7の間の距離2 mm を0.26 ms で除すことで、移流速度は7.7 m/s と求められる。

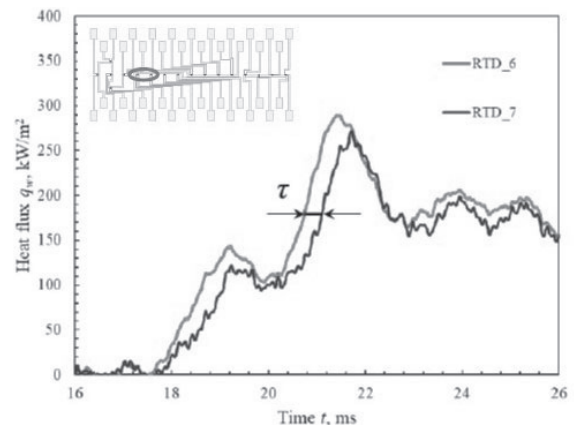


図10 熱流束変動と位相遅れ

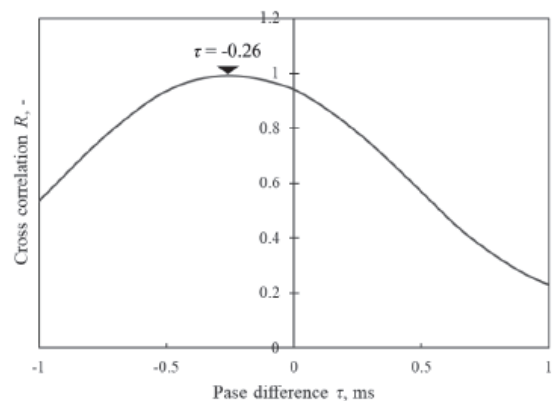


図11 相互相関解析による位相遅れの抽出

隣接点で測定された熱流束をもとに推定された移流速度の妥当性を検証した。ここでは比較対象として、ハイスピードカメラで得られた火炎先端速度を用いた。図12に火炎先端速度の定義を示す。壁面に沿った方向に座標  $r$  を設定し、 $r$  方向に進行する火炎先端の速度を  $V$  とした。各時刻で撮影された画像から火炎先端の移動量を求め、撮影時間間隔で除すことにより、速度を求めた。なお、熱流束から推定される移流速度は壁面近傍のものであると予想されるが、今回の実験系ではセンサに接続した配線の影響で壁面近傍の可視化ができなかったため、壁から離れた位置の火炎速度との比較となっていることに注意されたい。

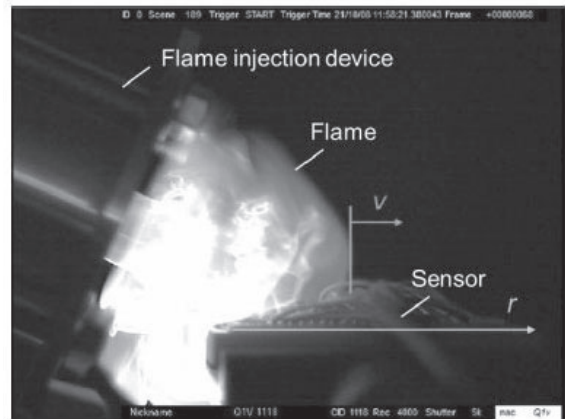


図12 火炎先端速度

図13にハイスピードカメラから得られた火炎先端速度と、熱流束から推定された移流速度の比較を示す。火炎先端速度は各位置において求めており、移流速度はRTD\_6とRTD\_7の中間位置の値となる。火炎先端速度は上流側ほど高く、火炎が進行するにつれて低下する傾向が見られた。移流速度測定位置における火炎先端速度は概ね6 m/sであり、熱流束から推定された移流速度(7.7 m/s)は火炎先端速度の約1.3倍の大きい値となった。壁面近傍では火炎速度はさらに低いことが予想されるため、本実験で得られた移流速度は実際の火炎速度よりも高い傾向にあると考えられる。

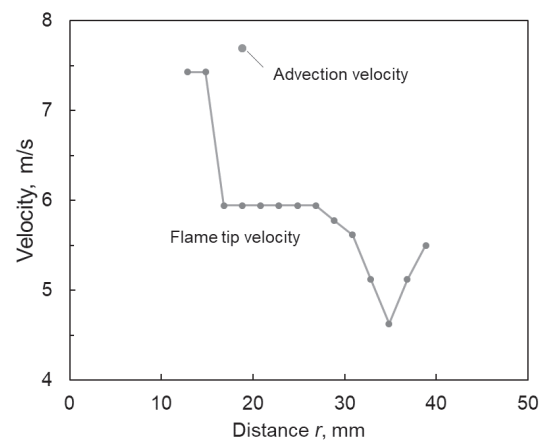


図13 火炎先端速度と移流速度の比較

#### 4. まとめ

MEMS 技術を用いて測温点を17点持つ隣接多点温度センサを開発し、ディーゼル噴霧火炎を模擬した噴射する予混合火炎と壁面間の熱伝達の調査をおこなった。

測定した壁面温度を境界条件とした非定常熱伝導解析を行い、壁面熱流束を算出した。開発したMEMSセンサは局所瞬時の熱流束を明瞭に捉えており、燃焼場の熱伝達特性調査に適用できる見込みが得られた。また、ミリメートルオーダーの空間分解能で熱流束を測定し、その空間的な分布を捉えることができた。

また、隣接点で得られた熱流束が互いに似ているが位相のずれた波形を示すことに着目し、その位相遅れ時間と測温点間距離から、移流速度の推定を行った。推定された移流速度とハイスピードカメラで得た火炎先端速度を比較し、妥当性の検証を行った。

その結果、移流速度は火炎先端速度の 1.3 倍程度大きい値となっていることがわかった。ただし、壁面近傍の速度との比較はできていないので、今後より詳細な検証が必要となる。一方で、光学手法を使用せず壁面側の測定のみである程度の精度で流動情報を得られることが確かめられ、本手法に一定の有用性があると判断できる。

## 謝辞

本研究の実施にあたり、滋賀県立大学大学院の畑中速人氏に多大なご協力をいただいた。また、センサ製作において、文部科学省ナノテクノロジープラットフォーム事業(京都大学微細加工プラットフォーム)の支援を受けた。ここに記し、感謝の意を表す。

## 発表論文

なし

## 口頭発表、受賞等

なし

## 参考文献

- (1) 畑村耕一, 電気自動車の普及と自動車の Well to Wheel の CO2 排出量低減の施策, *Engine Review*, 2019.
- (2) Gary Borman and Kazuie Nishiwaki, Internal-combustion engine heat transfer, *Progress in Energy Combustion Science*, 13(1), 1987, 1-46.
- (3) 巽健, 前田篤志, 宮田哲次, 小橋好充, 桑原一成, 松村恵理子, 千田二郎, ディーゼル噴霧火炎における壁面熱損失に関する研究-噴射圧力が熱流束に及ぼす影響-, *自動車技術会論文集*, 47(6), 2016, 20164622.
- (4) Kazuhito Dejima, Osamu Nakabeppu, Julien Moussou and Guillaume Pilla, Application of a MEMS heat flux sensor to heat transfer research on an impinging diesel jet, *International Journal of Engine Research*, 23(3), 2022, 497-511.
- (5) Satoshi Someya, Yasuhiro Okura, Tetsuo Munakata, Koji Okamoto, Instantaneous 2D imaging of temperature in an engine cylinder with flame combustion, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 62, 2013, 382-390.
- (6) Tetsuya Aizawa, Tomoki Kinoshita, Shinobu Akiyama, Kouya Shinohara and Yuusei Miyagawa, Infrared high-speed thermography of combustion chamber wall impinged by diesel spray flame, *International Journal of Engine Research*, 2021 (online first).
- (7) Kazuhito Dejima, Osamu Nakabeppu, Yuto Nakamura, Tomohiro Tsuchiya, Keisuke Nagasaka, Three-point MEMS heat flux sensor for turbulent heat transfer measurement in internal combustion engines, *International Journal of Engine Research*, 20(7), 2019, 696-705.