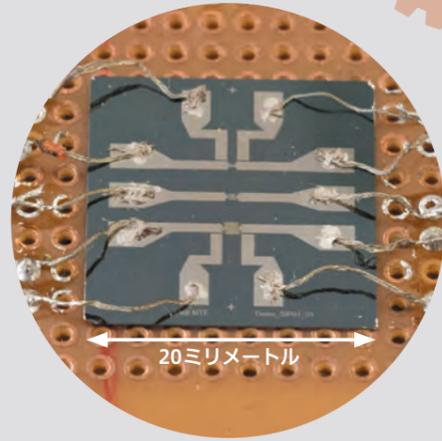


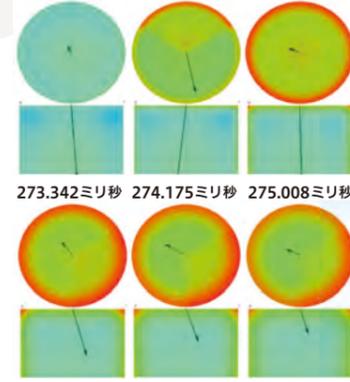
# はかる 第8回

なかべつ ぶ おさむ  
中別府 修

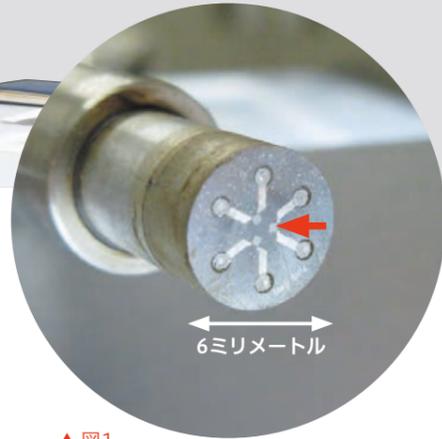
明治大学 理工学部機械工学科 教授  
1990年 東京工業大学大学院総合理工学研究科修士課程修了。96年同大学にて博士(工学)取得。90年東京工業大学工学部助手、2000年同助教授、01年 同大学院理工学研究科専任助教授、06年 明治大学理工学部専任助教授を経て、07年より現職。17年より、同大学研究企画推進本部本部長を兼任。



270.008ミリ秒 270.842ミリ秒 271.675ミリ秒



▲ 図2 燃焼時のセンサー温度分布と熱流束ベクトル  
MEMSセンサー端面を正面から見た場合(円形)と、断面を見た場合(長方形)の温度分布を色で示す。狭い範囲での温度差が詳細にわかるので、熱の流れの方向と大きさ(熱流束)がわかる。



▲ 図1 従来のMEMSセンサー(上)を、エンジン内部の過酷な環境で機能するように改良し、直径6ミリメートルのセンサー(下)が完成した。中央に正方形のMEMSセンサー(矢印)が3つ配置されている。

## エンジン内部の複雑な熱伝達を捉える

自動車のエンジンは、燃料を燃やして得られたエネルギーの40パーセント程度しか活用できていない。エンジンからの熱損失を減らし、熱効率を上げるには、内部の温度変化や熱流束を計測、分析することが必要だ。明治大学理工学部の中別府修教授は、エンジン内壁面の熱流束を多点で高精度に計測するセンサーを開発した。このセンサーによって、今までは捉えることができなかった現象が見えてきた。

の熱流束計測に生かそうと考えたのだ。こうして、わずかな変化の計測を得意とするMEMSセンサーを、エンジン内部のように空気や燃料が流動、拡散し、熱の状態が高速かつ複雑に変化する過酷な環境内で使用するという、中別府さんの挑戦が始まった。

### チームの要求を満たすセンサーとは

「ガソリンエンジン稼働時には、燃料が吹き込まれて燃焼する部分である燃焼室は約2,000度、壁面温度は約200度、燃焼中は内部圧力が間欠的におよそ100気圧まで上がります。さらに、点火時に発する火花がノイズとなり、センサーにとっては過酷な環境です。その環境内でもきちんと測る。それがいわば『土俵に立つ』ための条件でした」と中別府さん。

今回の開発で苦労したのは、MEMSセンサーをエンジン内部に挿入するための設計だったという。測定対象である燃焼室の外周は吸排気バルブやスパークプラグに占められ、自由に使える面積はほとんどない。SIPの実験用エンジンは圧力センサーが2つ付けられているので、一方の圧力センサーを外し、そこにMEMSセンサーをはめ込んで使うことになった(図4)。

はめ込み口のサイズに合わせると、複数のセンサーを直径約6ミリメートルの円内に配置しなければならない。中別府さんらは、センサーの小型化に取り組み、先端に3点の薄膜抵抗体センサーを配置した直径6ミリメートルの円柱形ホルダーを開発した

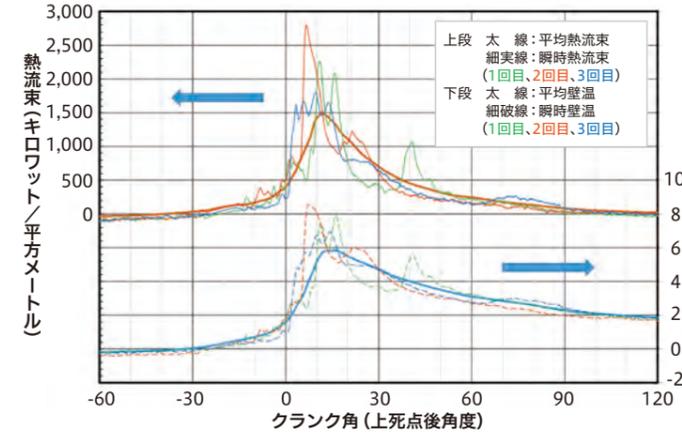
(図1下)。エンジン内部の複雑な熱伝達を調べるためには、センサー基板にエンジンと同じ材料の金属を採用し、薄膜センサーがエンジン内の高温高圧の環境に耐え、内部の流れが実際と変わらないように余計な凹凸のない設計が必要であった。これら複数の課題に応えるものとして、このセンサーは開発されたのだ。

「もう一つの苦労は、測れるセンサーを作るだけでなく、『どうしてその値になるのか』、『その値は本当に正しいのか』までが問われるということでした」と中別府さんは振り返る。

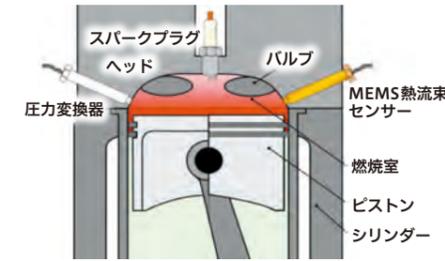
熱流束を測るには、センサー表面の温度を測った後で、正しいモデルでセンサー内部の熱の移動を解析する必要がある。従来の市販センサーは、内部構造の詳細が把握できず、計測結果の正しさを確認するのが難しかった。それに対し、中別府さんのセンサーは測定部に「测温抵抗体」という電気抵抗を用いており、センサー自体で計測の狂いを修正する機能を持つ。抵抗体は温度を測るセンサーの役割と流れる電流に応じて発熱を生むヒーターの役割を同時に果たすことができる。製作したセンサーの発熱と温度変化の関係を調べることで、解析モデルの正しさを確認できるのだ。「電気抵抗だと外側から抵抗体に電流を強制的に流して発熱させ、1ワットの熱量を入れた時に1ワットという計測結果が出てくるように修正できます。この自己発熱による修正機能により、計測値が正しいと考えることができるのです」。

### 今回の挑戦が示すMEMSの新たな可能性

測定した局所における温度変化を使い、センサー内部の熱の移動を解析することで、燃焼ガスからエンジン内壁面へ伝えられた熱流束が求められる。この原理は以前から用いられているが、開発した测温抵抗体方式のMEMSセンサーを用いるとノイズが格段に減り、1分間に2,000回転するエンジンの瞬時瞬時の壁面温度の変動、つまり熱流束の増減を鮮明に捉えることができた(図2)。これにより新たな知見も得られてきている。従来のセンサーではノイズと思われていた1サイクルごとのばらつきの中に、単なるノイズではない有意な変動が見られたのだ(図3)。「エンジン内で何が起きているのか、まだ、詳細にはわかっていません。今回の測定結果から、壁面から逃げる熱量の大き



▲ 図3 実験用エンジンでの熱流束計測(平均値と連続3サイクルの瞬時値) 従来のセンサーは詳細な熱流束の変化を検出できず、平均化されたただらかな曲線が提供されてきたが、MEMSセンサーは乱流による細かい熱流束変化を詳細に捉え、凹凸の激しい曲線になっている。



▲ 図4 エンジンの断面図。圧力センサーの取り付け口(右上のオレンジ色の部分)にMEMSセンサーを押し込む。

さや方向などが1サイクルごとに変化しており、ばらつきの原因はノイズだけではないことが示されました。SIPでは熱効率50パーセントという目標値を達成するだけではなく、その中に含まれている現象を解き明かしていくことが目標の1つですから、乱流の特徴や温度の分布、熱流束の変化の様子、さらにはそれがなぜ起こるのかといった、科学的な視点からもエンジン内部の現象に光を当てたいと考えています」と中別府さん。

さらに、非常に近い3点のセンサーで熱流束を計測した結果、各点の熱流束変動に類似した波形がわずかにずれた状態で計測されていることがわかってきた。これは、エンジン内の乱流を捉えた信号であり、さらに解析を進めることで、熱伝達の実像を捉え、冷却損失を低減させることが期待できる。

このSIPプロジェクトでは燃焼科学、流体科学、数値解析など多様な分野の研究者が参画し、多様な分野の科学技術力を結集することによって、先進的な技術を組み込み、エンジンの燃焼を解析できるソフトウェア「HINOCA(火神)」の研究開発も行っている。高精度の3次元解析が可能で企業での製品開発やアカデミアでの研究開発など産学双方における活用が期待される技術だ。MEMSセンサーの計測結果は、「HINOCA」の高精度化に大きく貢献するデータとして活用されているという。

エンジンは未知の世界だった中別府さんにとって、SIPの異分野混成チームへの参加はとても新鮮な経験だった。

「MEMSの主流はシリコンベースの技術ですが、今回の経験から、それを一般的な機械に適応する技術へ拡張できると実感しました。SIPの研究環境は大学の一研究室で完結する研究とはまったく違いました。エンジンという異分野で用いられるセンサーの開発には戸惑いもありましたが、それ以上に得られたことが大きかったです」。

このプロジェクトによって、中別府さんは従来のMEMS技術の枠を超えた新たな展開の可能性を感じ、ロボティクスへの応用など次なる挑戦を模索し始めている。

### 普段の研究とは対極のプロジェクトに参加

エンジンの高効率化により、燃料消費、二酸化炭素排出の削減が期待できる。「熱効率50パーセントの達成」に向け、戦略的イノベーション創造プログラム(SIP)「革新的燃焼技術」ガソリン燃焼チームが取り組む課題の1つが、エンジンからの熱損失の低減だ。

目標達成にはエンジン内部の状況を正確に把握し、それに対応する新たな技術の開発が必要だ。その前段階として求められるのが、燃焼ガスからエンジン壁面へ熱がどのように伝わるのかを複数の点で測る技術だ。熱の移動は、熱流束といって単位時間あたりに単位面積を流れる熱エネルギー量で表されるが、従来のセンサーは計測感度が高いとはいえ、ノイズが多い。革新的な技術開発のためには、より精度の高いデータが求められていた。そこで、ガソリン燃焼チームの研究責任者らが注目したのが、明治大学理工学部の中別府修教授だった。

中別府さんは、熱流体工学を専門にMEMS(微小電気機械システム: Micro Electro Mechanical Systems)センサーを用いた研究をしている。MEMSとは半導体の集積に用いられていた微細加工技術を、小さな機械(マイクロマシン)やセンサーに応用したものだ。小型化が可能で、非常に速い変化やわずかな変化を捉えられるというMEMSセンサーの特徴を、エンジン内部