

薄型・高感度熱流センサによるエンジン 表面放熱計測*

Engine Surface Heat Radiation Analysis with New Film Type Heat Flux Sensor

飯塚 基正
Motomasa IIZUKA

松井 啓仁
Hirohito MATSUI

矢崎 芳太郎
Yoshitaro YAZAKI

Thin and Highly Sensitive Heat Flux Sensor was developed with PALAP (Patterned Prepreg Lay-up Process) technique. The sensor achieves 0.15mm thickness, high sensibility by $360V/(W/m^2)/m^3$ and heat durability up to 150 deg. C. Therefore, this sensor has the small heat resistance and high bendability based on thinness, which are suitable for heat radiation analysis by mounting on a rounded surface. Heat radiation behaviors under some vehicle test modes are analyzed with the sensors, and shown which part radiates heat. The sensor had enough responsibility and accuracy to quantify the heat radiation behavior from engine surface. These analyses will achieve state of art heat management.

Key words :

Heat Flux, Engine Surface, Radiation, Vehicle Test, Patterned Prepreg Lay-up Process (PALAP), Heat Management

1. まえがき

近年の燃費規制から、高効率エンジンの開発が各メーカー、各研究機関で盛んに行われており、最大正味熱効率が40%前後のエンジンが現在量産されるまでに至っている。

エンジン高効率化に伴い、エンジンから損失として排出される熱量は減少することから、エンジン暖機や暖房時の熱量確保のために熱を有効利用するヒートマネジメントについても、その重要性が増してきており、エンジンの燃焼室壁面からの冷却損失を低減する検討がなされ、その効果を検証するためのエンジン壁面への熱流束計測技術¹⁾²⁾が報告されている。

また、エンジンコンパートメント内の電装部品に対

する熱害の観点から、エンジンコンパートメント内をモデル化し、内部の熱流れをシミュレーションで明らかにする取り組みが報告³⁾されているが、実際にエンジンコンパートメント内で構成部品の表面放熱を実測した事例は報告されていない。

筆者らは、エンジン熱の更なる有効利用、およびエンジンコンパートメント内の熱流れシミュレーションの精度向上のため、独自の製造技術を用いて薄型・高感度の熱流センサを新たに開発し、エンジン表面からの放熱を実測可能とした。

開発した熱流センサは、通常熱流センサに用いられるサーモパイルを採用し、その製造に熱可塑性樹脂フィルムを適用した一括積層技術 (PALAP: Patterned Prepreg Lay-up Process)⁴⁾⁵⁾を応用することで、エンジ

* (公社)自動車技術会の了解を得て、「2015年秋季大会 学術講演会 講演予稿集」No.2-15A より一部加筆して転載

ン表面の任意の凹凸部に搭載可能な厚さ 0.15mm の薄型で、かつ高感度 ($360 \text{ V}/(\text{W}/\text{m}^2)/\text{m}^3$) を実現した。

本熱流センサを車載されたエンジンの表面に多点搭載して車両モード走行試験を行い、各部のエンジン表面放熱を定量化した。その結果について紹介する。

2. 試験方法

2.1 熱流センサ開発

熱流センサは、エンジン表面の任意の凹凸部に搭載可能であり、且つセンサ自体の熱抵抗を極力抑制できる薄型のセンサを狙って開発した。

開発した熱流センサの構造を Fig. 1 に示す。本センサは、通常熱流センサに用いられるサーモパイルを採用しており、複数の熱電対を直列に接続して温接点群を形成し、表裏の微小な温度差を検出する構造としている。尚、熱電対を構成する材料には、P 型、N 型半導体を用いた。

センサの製造には、多層基板の製造技術である熱可塑性樹脂フィルムを適用した一括積層技術 (PALAP: Patterned Prepreg Lay-up Process) を応用した。その製造方法を Fig. 2 に示す。本製造方法により、前述のセンサ構造を一括成形できたため、サーモパイルの高密度化による感度向上とセンサの薄型化が可能である。

熱流センサの外観を Fig. 3 に示す。センサは、センシング部と配線部から成り、センシング部は 10mm 角、全体の厚さは 0.15mm である。

Table 1 はその性能一覧である。開発した熱流センサは、単位面積・厚さ当たりの感度係数が $360 \text{ V}/(\text{W}/\text{m}^2)/\text{m}^3$ と一般に市販されている代表的な熱流センサに比べて約 10 倍高く、また厚さ 0.15mm の実現により、熱抵抗も 1/10 まで低減した。本センサの熱抵抗 ($6 \times 10^{-4} \text{ K} \cdot \text{m}^2/\text{W}$) は、放熱がエンジン表面と空気の強制対流と想定した場合の熱抵抗 $1 \times 10^{-2} \text{ K} \cdot \text{m}^2/\text{W}$ (熱伝達率: $100 \text{ W}/\text{m}^2 \cdot \text{K}$ で想定) に対して十分小さく、センサ搭載によりエンジン表面の熱環境に影響を与えないレベルであると言える。また、耐熱温度も 150°C までは保証でき、エンジン表面やエンジンコンパートメント内の構成部品における熱流束計測が可能な性能を確保している。

Table 1 Specifications of Developed Sensor

| | Developed sensor | Typical sensor |
|---|------------------------------|--------------------|
| Sensitivity (per unit area and thickness) ($\text{V}/(\text{W}/\text{m}^2)/\text{m}^3$) | 360 | 33 |
| Thickness (mm) | 0.15 (0.13 Actual survey) | 0.6 |
| Thermal Resistance ($\text{K} \cdot \text{m}^2/\text{W}$) | 6×10^{-4} | 6×10^{-2} |
| Heat resistance (degree-C) | ≤ 150 | - |

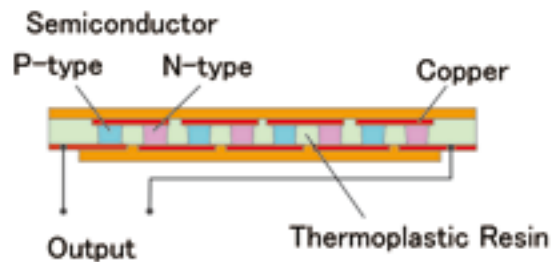


Fig. 1 Structure of Heat Flux Sensor

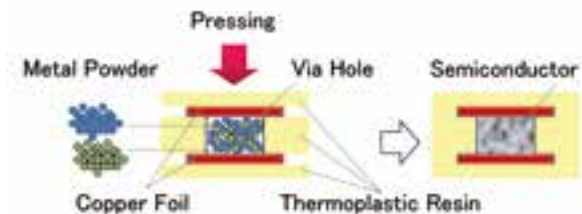


Fig. 2 Patterned Prepreg Lay-up Process (PALAP)

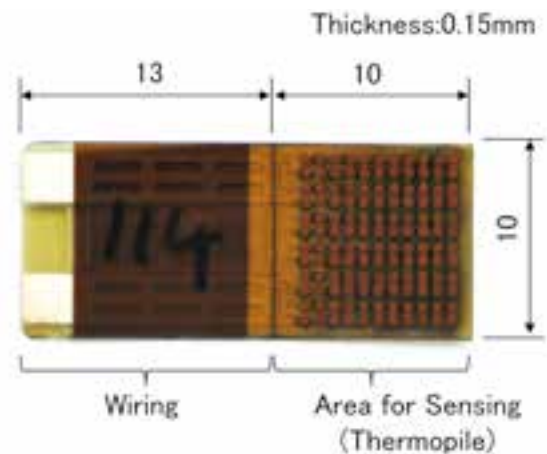


Fig. 3 Appearance of Developed Sensor

2.2 車両試験

開発した熱流センサをエンジン表面に多点搭載し、車両試験にてエンジンの表面放熱が走行条件でどのように変化するのかを調査した。

2.2.1. 試験方法

車両試験は、Fig. 4 に示す様にシャシーダイナモを用い、車速に応じた走行風を送風機から導入し、走行抵抗はシャシーローラにて再現させて実施した。尚、ボンネットは試験の際は閉じ、エンジンコンパートメント内のカバー類等も再現させた状態で試験を実施した。

試験条件を Table 2 に示す。車両にはプリウスを用い、走行パターンは新 EC モード (NEDC) のコールドスタート (外気温・スタート時エンジン出口水温：25°C) で行った。

参考として、Fig. 5 に供試車両のエンジンコンパートメント内のレイアウトを示す。エンジンは向かって左側 (運転席側) に位置し、走行風が導入されるフロント側に吸気系、後方に排気系が位置したレイアウトである。

Table 2 Test Condition

| | |
|--------------|--|
| Test Vehicle | Prius (2009model) Engine: 1.8L In-line-4 |
| Test Mode | New European Driving Cycle (NEDC) Cold Start Environmental Temperature :25degree-C Engine Temperature (at start) :25degree-C |



Fig. 4 Vehicle Test using Chassis Dynamometer

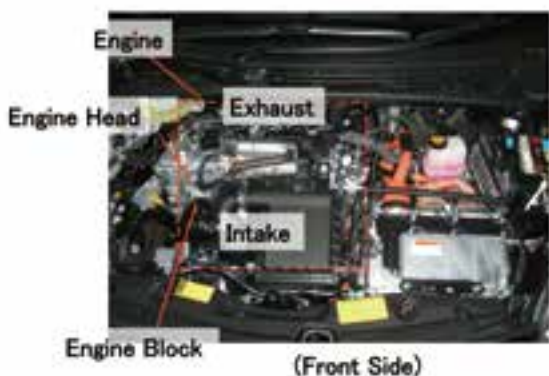


Fig. 5 Engine Layout in the Engine Compartment

2.2.2. 熱流センサのエンジン搭載

供試車両のエンジン各部の表面放熱は、開発した熱流センサをエンジン表面に多点搭載し、各部の熱流束を計測することで評価した。

センサ搭載位置を Fig. 6 に示す。センサは、エンジンヘッド部 10 点、エンジンブロック部 8 点、フロントカバー部 9 点、ヘッドカバー部 3 点、オイルパン部 6 点、に加えてインテークマニホールド 2 点、トランスアクスル (HV モータ内蔵) 2 点の計 40 点に設置した。尚、設置には耐熱用瞬間接着剤 (耐熱 120°C) を用いた。

Fig. 7 はセンサの搭載例である。本センサは、0.15mm の厚さのため自由に曲げることができ、実際に図示する様にエンジン曲面にも搭載することが可能である。

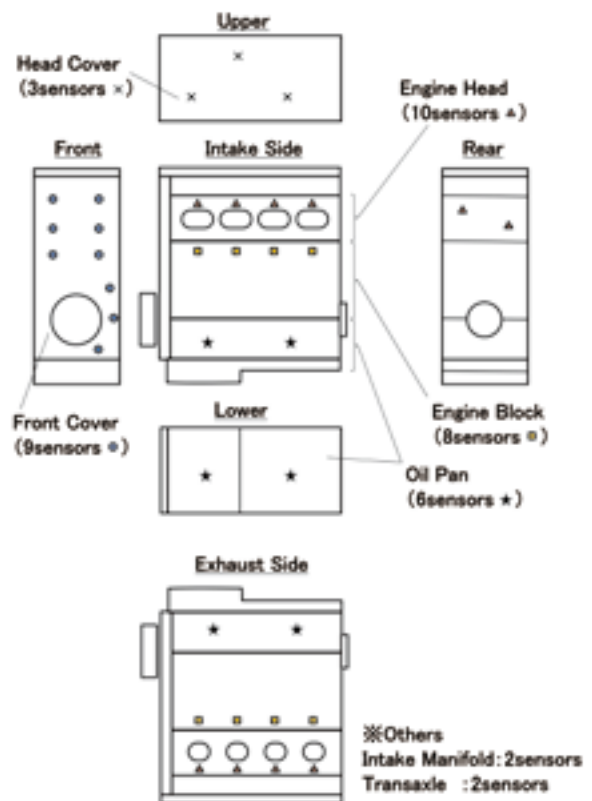


Fig. 6 Measuring Point in the Engine



Fig. 7 Sensor Installation to the Engine (Sample)

3. 結果

3.1 エンジン各部の表面放熱

Fig. 6 の計測点において、新 EC モード走行時のエンジン表面各部位での熱流束を時系列で計測し、表面放熱を評価した。結果を Fig. 8 に示す。尚、熱流束は各部位の平均値で示しており、エンジンヘッド及びエンジンブロックについては、各方向（吸気側・排気側・リア側）を層別して示している。

各部位の熱流束（表面放熱）は、車速に追従して増減する挙動が見られた。放熱量が大きい部位は、エンジンブロックの吸気側・フロントカバー・オイルパンであり、これら部位では高速走行のドライビングサイクルである EUDC (Extra-Urban Driving Cycle) で $1000\text{W}/\text{m}^2$ を超えることを確認した。

また、エンジンヘッドおよびエンジンブロックの排気側では、熱流束がマイナスとなる挙動を示しており、排気管から受熱している挙動が見て取れた。更にその受熱挙動は、エンジンヘッドとエンジンブロックで異なり、エンジンブロックでは車速の増減に応じて受熱量が増減するのに対して、エンジンヘッドでは約 $30\text{km}/\text{h}$ 以下の車速では受熱するが、それ以上の車速では放熱するといった挙動を示すことが分かった。これは車速に対する表面付近の流速と風向が、排気管の上部に計測が位置するエンジンヘッドと下部に位置するエンジンブロックで異なること、また走行風の下流に位置する排気管からの影響が車速によって異なるためと推察する。

3.2 各ドライビングサイクルの表面放熱

Fig. 8 の計測結果より、各部位の熱流束を、各ドライビングサイクルの平均値でまとめた。結果を Fig. 9 に示す。

モードトータルでは、エンジンブロック、フロントカバー、オイルパン、エンジンヘッド吸気側、エンジンヘッドリア側、ヘッドカバーの順で熱流束は大きく、エンジン表面放熱が走行風の上流側に位置するエンジン吸気側、エンジン下部、及び近傍に空間が存在するエンジン側面（フロントカバー側）で大きいことが分かる。その平均値は、放熱量の多い部位で約 $200\text{W}/$

m^2 であった。

UDC (Urban Driving Cycle) では、エンジン水温が UDC1 から UDC4 へと上昇していくのに従い、放熱するエンジン表面部位では放熱量が増大し、受熱する部位では受熱量が減少することを確認した。

EUDC での放熱、受熱量は、エンジンヘッド排気側を除く全てのエンジン表面部位で UDC に比べて 2~4 倍多かった。これはエンジン水温が高くエンジン表面と周辺空気との温度差が大きくなったこと、高速走行によりエンジン表面付近が高流速となったためと考える。

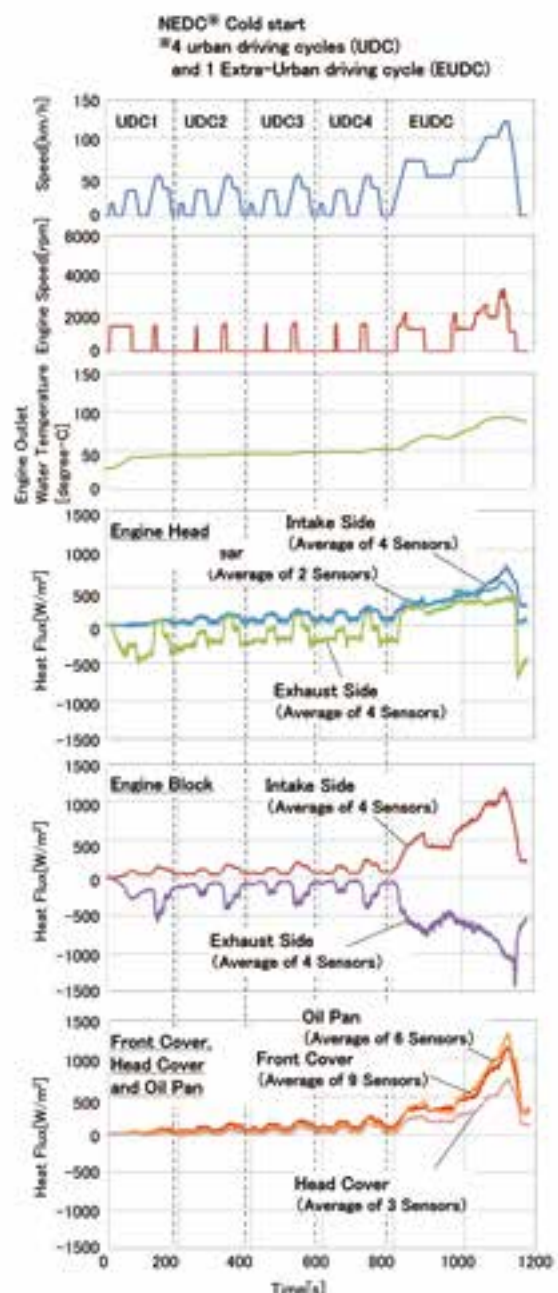


Fig. 8 Heat Flux Behavior of Engine Surface

尚、エンジンヘッド排気側は、UDCとEUDCで傾向が異なり、UDCでは受熱するが、EUDCでは放熱することが分かった。これは前述Fig. 8で説明した通り、エンジンヘッド排気側は車速約30km/h以下では受熱、それ以上では放熱する挙動であるため、EUDCの高速走行でその傾向がより顕著となった結果と考える。

以上、開発した熱流センサは、エンジン表面各部位の熱流束（放熱・受熱）が定量化でき、各部位の熱流束が車速に追従して増減する挙動が認識できるだけの応答性を有していることを確認した。

本センサは、今後のエンジンコンパートメント内の熱流れの改善やヒートマネジメント開発の有用なツールとして活用できると考える。

4. むすび

エンジン熱の更なる有効利用、およびエンジンコンパートメント内の熱流れシミュレーションの精度向上のため、エンジン表面からの放熱が実測可能な熱流センサを開発した。

熱流センサは、製造方法に熱可塑性樹脂フィルムを適用した一括積層技術（PALAP：Patterned Prepreg Lay-up Process）を用い、サーモパイルを形成することで、厚さ0.15mm、 $360 \text{ V}/(\text{W}/\text{m}^2)/\text{m}^3$ の薄型、かつ高感度を実現した。

センサの熱抵抗は $6 \times 10^{-4} \text{ K} \cdot \text{m}^2/\text{W}$ で空気の強制対

流の熱抵抗（ $1 \times 10^{-2} \text{ K} \cdot \text{m}^2/\text{W}$ ）に対して十分小さく、エンジン表面放熱の計測に対して適用可能な性能を持つことを確認した。

開発した熱流センサを用いて新ECモード走行時のエンジン表面各部位での熱流束を時系列で計測した結果、エンジン表面各部位の熱流束（放熱・受熱）が定量化でき、各部位の熱流束が車速に追従して増減する挙動が認識できるだけの応答性を有していることを確認した。

以上より、本センサは、今後のエンジンコンパートメント内の熱流れの改善やヒートマネジメント開発の有用なツールとして活用できると考える。

参考文献

- 1) 中尾裕典 他：高応答遮熱壁面における瞬時熱流束計測技術、マツダ技報、No.32、p222-227（2015）
- 2) 河野正顕 他：高分散噴霧と筒内低流動を利用したディーゼル燃焼における冷却損失の改善、自動車技術会学術講演会前刷集、No.22-11、p1-6（2011）
- 3) 田中義輝 他：キーオフ時のエンジンルーム内部品温度予測技術の開発、自動車技術会学術講演会前刷集、No.135-12、p1-6（2012）
- 4) 片岡良平 他：PALAP基板による半導体パッケージ技術の開発、デンソーテクニカルレビュー、Vol.10 No.2、p77-84（2005）
- 5) 神谷博輝 他：PALAP基板へのLSI内蔵技術開発、デンソーテクニカルレビュー、Vol.11 No.2、p103-107（2006）

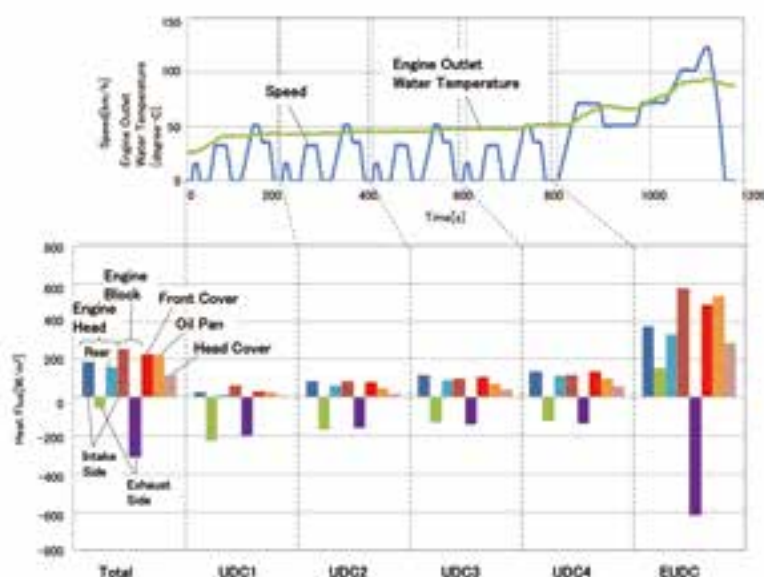


Fig. 9 Average of Heat Flux at Each Driving Cycle

著者



飯塚 基正

いづか もとまさ

(株) SOKEN SP-SES 室
次期型車両のエネルギー管理シス
テムの研究・開発に従事



松井 啓仁

まつい ひろひと

(株) SOKEN 研究 3 部
電動車両のモータ、インバータ、電池の
冷却技術開発に従事



矢崎 芳太郎

やざき よしたろう

センサ&セミコンダクタ事業部 センサ
戦略室
熱流センサの開発に従事