

高応答遮熱壁面における瞬時熱流束計測技術 Technology of Instantaneous Heat Flux Measurement on a High Response Heat Insulation Coating

中尾 裕典*¹ 青木 理*² 清末 涼*³
Yusuke Nakao Osamu Aoki Ryo Kiyosue
原田 雄司*⁴ 角島 信司*⁵ 小池 祐輔*⁶
Yuji Harada Shinji Kadoshima Yusuke Koike

要 約

内燃機関の冷却損失改善技術として、燃焼室壁面に低熱伝導、低比熱の遮熱材をコーティングする手法が検討されている。その際の遮熱材表面温度は、ガス温に追従して数百℃変化することが想定される。本研究では、遮熱壁温を高応答計測可能な壁温センサを開発し、これが内燃機関の燃焼室壁温の計測に十分な応答速度を有しているかを確認した。加えて、本センサをRCEM (Rapid Compression Expansion Machine) に適用して壁温計測と壁面熱流束算出を行い、この結果を用いて壁面熱伝達率算出方法を検討した。その結果、本遮熱壁は遮熱なしに比べ、 Re (Reynolds number) 変化が Nu (Nusselt number) に与える影響が小さいことが分かった。

Summary

To reduce the cooling loss of internal combustion engines, a method is currently being studied for applying heat insulation coating with low heat conductivity and low specific heat capacity onto the combustion chamber wall. With this technology used, the temperature of the coating surface is assumed to fluctuate in a range of several hundred degrees Celsius in accordance with the gas temperature. In this study, a highly-responsive wall temperature sensor was developed and its response speed was confirmed to be appropriate for measuring temperature of the combustion chamber wall of the internal combustion engine. In addition, this wall temperature sensor was applied to RCEM to measure the wall temperature and calculate the wall-surface heat flux. Besides, a study was conducted on a method for calculating wall-surface heat transfer coefficient, using the measurement and calculation results above. As a result, this coating confirmed that the influence that Re fluctuation gave Nu in comparison with noncoating is small.

1. はじめに

温暖化やエネルギーセキュリティの課題に対処するため、内燃機関の熱効率改善が求められている。この策として燃焼室壁へのセラミックス等の遮熱材適用による冷却損失低減⁽¹⁾が試みられてきたが、期待の効果は得られていない。伊藤ら⁽²⁾はセラミックス材では壁温上昇による圧縮仕事増加と排気損失増加により熱効率向上効果が得られないと報告している。一方、低熱伝導、低比熱の遮熱材を燃焼室壁面にコーティングし、壁温をガス温に追従して数百℃レベルで振幅させて冷却損失低減を図る方法がCAE検討結果で報告⁽³⁾⁽⁴⁾されている。また、熱効率予測のCAE手法である燃焼室内ガスの状態量0次元モデルと構造部分の熱伝導1次元モデルを連成計算するサイクルシミュレーション

にて、藤本ら⁽⁴⁾は壁面熱伝達率算出にWoschni式⁽⁵⁾を用いているが、遮熱壁適用時の予測精度は検証されていない。

本研究では、遮熱材コーティングの壁温を高応答計測可能なセンサを開発し、RCEMにて遮熱壁温がガス温に追従して数百℃レベルで変化する状態の計測、熱流束および遮熱壁の熱伝達率を算出し、熱流束低減効果を明確にする。

2. 遮熱壁温センサ

最近では燃焼室壁温の高応答計測に同軸型薄膜熱電対を用いた計測例⁽⁶⁾が報告されており、高応答壁温計測には同軸型熱電対の使用が一般的になりつつある。しかし、同軸型熱電対は熱接点を熱電対構成金属部材の表面に形成するため遮熱壁面上には形成できない。これに対し、Assanisら⁽⁷⁾はジルコニア溶射膜の壁温計測のために積層型薄膜熱

*1~6 技術研究所
Technical Research Center

電対を採用した。本研究では、積層型薄膜熱電対方式を採用し、遮熱壁温の高応答計測が可能なセンサを開発した。

2.1 センサ構造とセンサ設置が温度場に与える影響

Fig. 1に遮熱壁温センサの構造を示す。基材は薄膜熱電対の耐久性を考慮して窒化アルミとした。この熱拡散率は燃焼室材AC8Aアルミ合金の $48\text{mm}^2/\text{s}$ に近い $43\text{mm}^2/\text{s}$ である。熱電対金属は、耐熱性、耐酸化性で有利なAg-Niとした。Agは硫化や塩化が懸念されるため、燃焼実験に使用する燃料はイソオクタン (C_8H_{18}) とした。熱電対素線は基材に耐熱接着剤で固定後、遮熱なしセンサは先端を研削処理し、遮熱センサは遮熱コーティング後に研削処理を行った。薄膜熱電対の熱接点は、先端中央に $\phi 1.5\text{mm}$ 形状となるようスパッタリングにて成膜し、各膜厚 $0.4\mu\text{m}$ にて積層した。センサ表面から内部への熱流束一次元性は、センサ側面へ熱拡散率 $0.84\text{mm}^2/\text{s}$ のアルミナを配置して確保した。Fig. 2にセンサ表面写真を示す。薄膜熱電対は剥離や断線なく仕上がっている。

次に、センサ設置が温度場に与える影響を検証するため、燃焼室に遮熱なしセンサを設置した際のセンサ内温度分布と熱流束変化を、非定常熱伝導FEM解析で確認した。計算条件は後述の実験条件Case 1を設定し、その他条件である燃焼ガス温はRCEM燃焼圧力から気体の状態方程式で算出、壁面熱伝達率はWoschni式から算出した。Fig. 3に最大熱流束発生時のセンサ構造ありなしモデル中央縦断面温度分布、Fig. 4に表面熱流束を示す。図によると、温度差は表面で僅かであり、熱流束差も最大 1.72% と小さく、センサ設置の影響は無視できる。

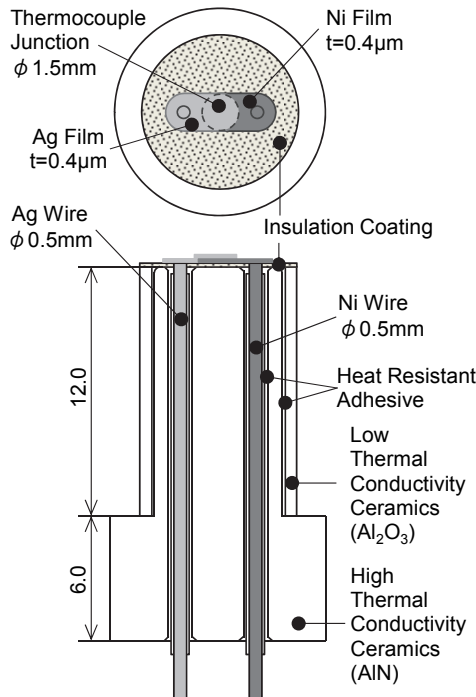


Fig. 1 Thin Film Thermocouple (with Insulation Coating)

2.2 遮熱壁温センサの応答速度評価

製作した遮熱壁温センサの応答速度評価を実施した。応答速度評価手順は、まず、出力既知のレーザーでセンサ表面を加熱してセンサ測温点の過渡温度を計測し、次に、同出力の熱エネルギーを遮熱壁へ照射した時の遮熱壁温の過渡変化を計算で求める。次に、これらと比較して、遮熱壁温変化に対する測温点温度変化の遅れで応答速度を評価する。なお、1次遅れ要素の時定数は、ステップ応答が定常値の 63.2% に達する時刻となるため、加熱開始から測温点が遮熱壁温の 63.2% となる時刻を応答速度として定義した。

(1) Ag-Ni熱電対の温度校正

JISクラス2K型熱電対を用いたAg-Ni熱電対の熱起電力測定結果をFig. 5に示す。この結果から各温度間を3次スプライン関数補完し、Ag-Ni熱電対温度換算を行った。

(2) レーザエネルギー立ち上がり出力

評価用レーザーは、照射時間、照射エネルギーを任意設定できる半導体レーザー(波長 532nm)を使用した。このレーザーについて、以下の方法でレーザー照射直後の出力を特定した。

通常、レーザー出力測定には定常計測のパワーメータが使われるが、定常計測では立ち上がり出力は捉えられない。そこで、まず、レーザー光をパワーメータ受光部に照射して

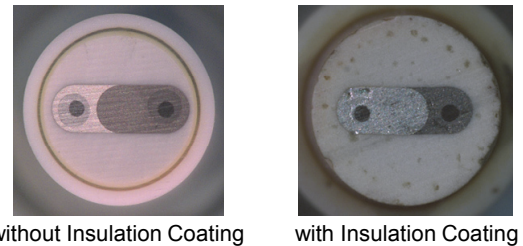


Fig. 2 Thin Film Thermocouple Surface

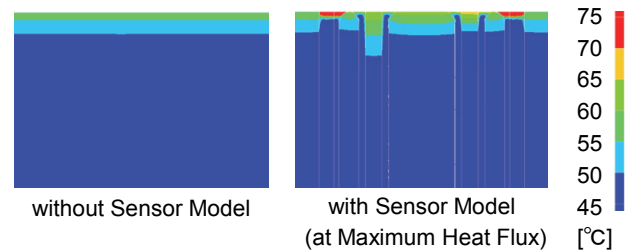


Fig. 3 Temperature Distribution of the Cross Section

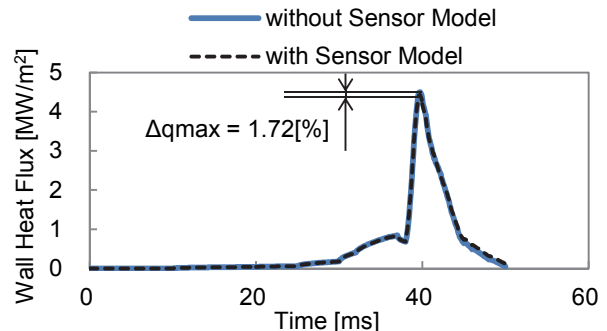


Fig. 4 Calculation Result of Wall Heat Flux

定常で出力計測し、次に、受光部の反射光を高速カメラ (5μs/1コマ) で撮影し、レーザ輝度を算出する。この結果からレーザ出力と輝度の関係を捉える。その後、この受光部に同レーザをパルス照射し、過渡状態での反射光の輝度を算出する。この輝度の過渡変化と、先程の出力と輝度の関係を用い、レーザ立ち上がり出力を特定する。

Fig. 6に出力調整したレーザのパワーメータ計測値と、その時の反射光の輝度を示す。この結果、出力と輝度は2次式で補完可能なことが判明した。Fig. 7に受光部へレーザをパルス照射し、反射光を高速カメラで撮影して算出した輝度を示す。これによると、レーザは起動後(時刻0μs)から50μsで照射が始まっている。また、レーザ出力が安定的ならば矩形波を示すはずだが、起動直後はスパイク状を示しており、その後、数百μsは出力が安定する。よって、このレーザは起動直後に出力がオーバーシュートする特性がある。しかし、輝度波形はオーバーレンジせず捕捉しており、レーザ立ち上がり出力は特定可能と判断した。

(3) レーザ吸収率の測定

レーザ光は照射面の吸収率に応じて吸収される。よって、遮熱材表面や測温部に照射される熱流束の特定には、測温部の吸収率が必要である。この確認のため、センサ測温部と同一構造のテストピースを製作し、分光光度計にて測温部の吸収率を測定した。その結果、遮熱膜センサ測温面 (Ag表面) は、波長532nmで吸収率7.78%であった。

(4) センサ測温部表面での横方向熱移動の影響

センサ測温部はφ1.5mmだが、測温部のみにレーザを照射することは困難であり、実際は測温部以外へもレーザが照射される。しかし、測温部以外に照射されたエネルギーが横移動して測温部に温度変化を与える可能性がある。この確認のため、レーザ出力をレーザ立ち上がり評価の出力に固定して500μs間パルス照射し、センサ測温部を中心とした同心円の複数スリットにて照射面積を変更させ、センサの出力変化を確認した。Fig. 8にその結果を示す。この図によると、φ2.0mmとφ3.0mmは同温度だが、φ1.5mmはこれらより低い。つまり、φ1.5mmではレーザ照射されない測温部があるが、φ2.0mm以上なら全測温部にレーザ照射されると推測する。また、懸念していた横方向への熱移動の影響はないと判断できる。

(5) 遮熱材表面温度の計算方法

遮熱材表面温度の算出は、境界条件として、入射熱流束にレーザエネルギーの立ち上がり出力、背面温度にセンサ基材後端部に取り付けた熱電対で計測した値を設定し、非定常1次元熱伝導方程式をコントロールボリューム法で離散化し、完全陰解法を用いて行った。

(6) 遮熱壁温センサの応答速度評価結果

以上の結果から確認されたレーザエネルギーと照射条件にて実施した遮熱壁温センサ測温結果、遮熱材表面温度計算結果、遮熱壁面温度63.2%ラインをFig. 9に示す。

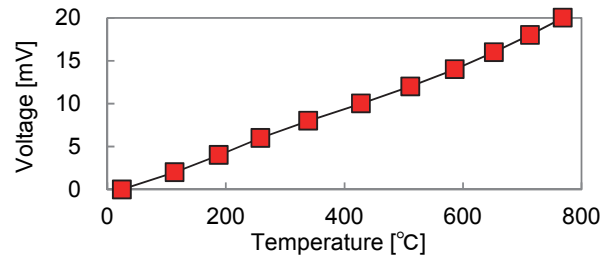


Fig.5 Ag-Ni Thermo Electromotive Force

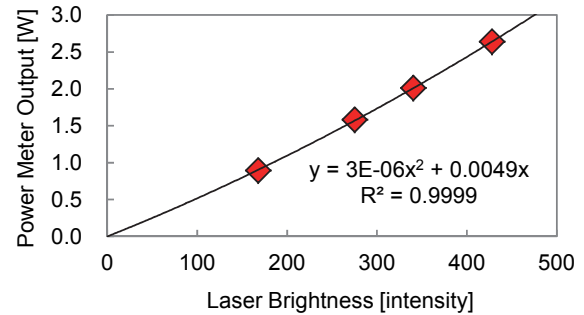


Fig. 6 Relationship between Laser Power and Brightness

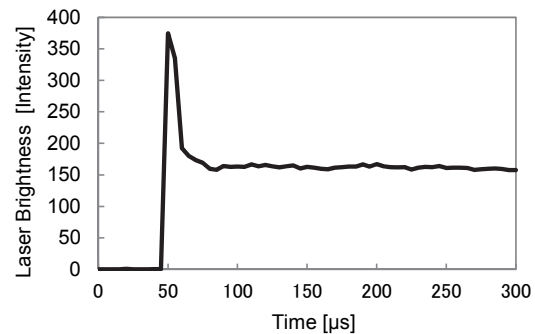


Fig. 7 Initial Rise Time and Laser Brightness

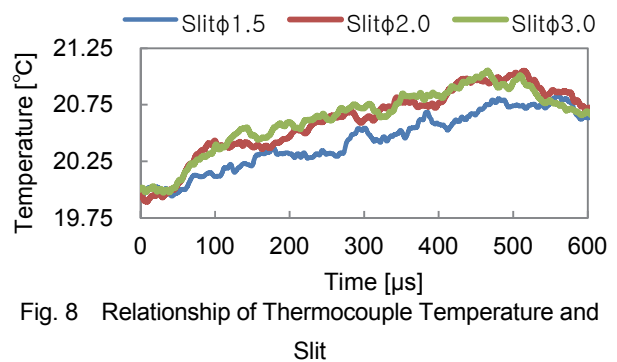


Fig. 8 Relationship of Thermocouple Temperature and Slit

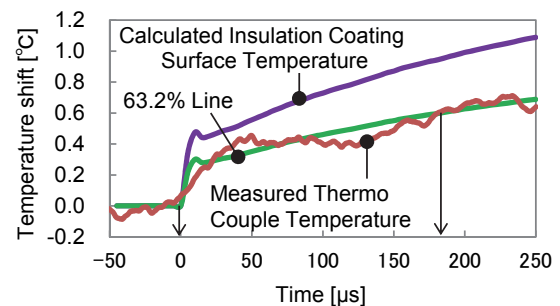


Fig. 9 Response Speed of Thin Film Thermocouple Sensor

図から明らかなように、遮熱壁温センサ出力は20 μ sで63.2%ラインと交差して50 μ sで低下し始める。120 μ sで再上昇し、180 μ sで63.2%ラインと再交差し、以後上昇が継続する。この初めの交差点はレーザによるオーバーシュートの反応と考え、センサ応答時刻ではないとし、後の交差点をセンサ応答時刻であると判断した。その結果、センサ応答速度は180 μ s=5.6kHzであることが分かった。これはエンジン回転速度926rpmでのクランクアングル1.0°相当の応答速度である。供試するRCEMの運転速度は高速運転時の圧縮・膨張行程平均で923rpm相当であり、センサ応答速度は壁温計測に十分な速度であると判断する。

3. 計測装置および計測条件

3.1 RCEM概要

本実験はRCEMを用いて行った。Fig. 10にRCEM概観、Table 1に燃焼室諸元、Table 2に運転条件を示す。RCEMの燃焼室形状は周方向の温度分布を均一とするため軸対称形とし、燃焼室表面は、アルミ合金燃焼室と、ヘッドとピストンの表面に遮熱コーティングした燃焼室の2仕様を用意した。なお評価時の燃焼形態はHCCI (Homogeneous Charge Compression Ignition) 燃焼とし、ピストン上昇開始直後に燃料噴射時期を設定して燃焼室内の均一混合気形成を行い、初期ガス温安定のため初期壁温管理を実施した。

3.2 壁温計測点

計測点は燃焼室全体の熱損失を求めるため多点とし、ヘッド5点、ピストン4点を各中心から半径方向へ位置を変えて設置した。Fig. 11に各壁温計測点を示す。

4. 計測結果

4.1 燃焼室内圧力

上記条件、装置にて、壁温と燃焼室内圧力を計測し、熱流束算出を行った。Fig. 12に筒内圧計測結果を示す。横軸の0msはピストン動作開始時刻である。図によると、遮熱ありの燃焼中の圧力は高くなっている。これは、壁面熱損失低減に伴い燃焼開始時期が早期化したためと推測する。

4.2 局所壁面熱流束分布

Fig. 13にCase 1での代表6点（ヘッド3点、ピストン3点）の壁面熱流束を示す。測定点はFig. 11と対応する。なお、熱流束は非定常1次元熱伝導方程式をコントロールボリューム法により離散化し、完全陰解放を用いて算出した。

図によると、遮熱なしは、ありに比べて測定点によるピーク値ばらつきが大きい。Fig. 12の圧力立ち上がりで読み取れる熱発生と同時に始まる熱流束発生時期は0.5ms程度に収まっている。よって、燃焼室全体で同時に燃焼が

開始すると考えられ、以降は、各計測点が代表する燃焼室壁の面積Aで重み付けした燃焼室全体平均値を対象とする。

4.3 燃焼室全体平均の壁温と熱流束

各計測点の局所壁温計測値に対して、式(1)から、燃焼室全体の平均壁温 T_{wall} を算出した。iは計測点番号である。

$$T_{wall} = \Sigma(T_{wall,i} \cdot A_i) / \Sigma A_i \quad (1)$$

遮熱ありなしの壁温比較結果をFig. 14に示す。これによると、遮熱コーティングにて壁温振幅は数百℃レベルになることが確認できる。

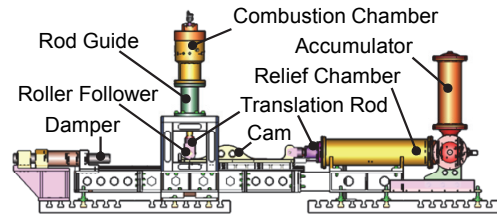


Fig. 10 RCEM External View

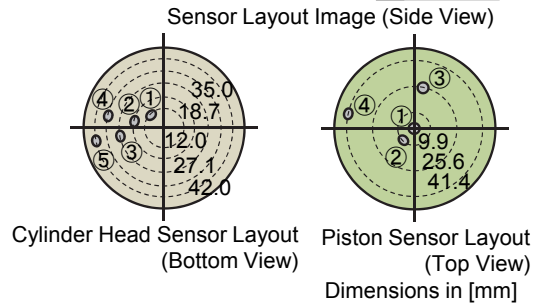
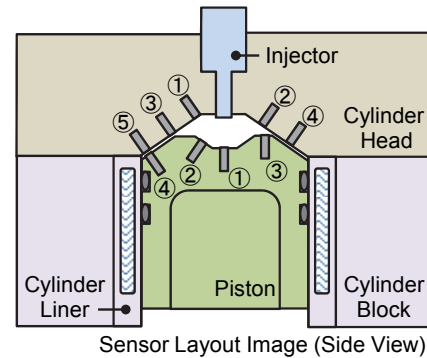


Fig. 11 Wall Temperature Measuring Point

Table 1 RCEM Specification

Bore [mm]	89
Stroke [mm]	95
Compression Ratio	23.4

Table 2 RCEM Operating Condition

	Case 1	Case 2
Fuel	iso-Octane	
Fuel pressure [MPa]	20	
Combustion system	HCCI	
Equivalence Ratio	0.48	
Initial gas & wall temperature [°C]	45	25
Piston speed average [m/s]	2.9	1.7
corresponding engine speed [rpm]	923	545

壁面熱流束 q_{ave} も同様に燃焼室全体平均値を算出した。

$$q_{ave} = \Sigma(q_i \cdot A_i) / \Sigma A_i \quad (2)$$

結果をFig. 15に示す。この結果から、遮熱コーティングによる壁面熱流束の大幅な低減が確認できる。

5. 熱伝達率評価

サイクルシミュレーションで用いる熱伝達率としては、Woschni式⁽⁵⁾が知られており、この式はヌセルト数Nuとレイノルズ数Reの関係を表す実験式⁽⁵⁾に基づいている。

$$Nu = C \cdot Re^{0.8} \quad (3)$$

そこで本研究では、ヌセルト数とレイノルズ数の関係を、遮熱材有無で比較することとし、ヌセルト数の計算に必要な熱伝達率 h は、RCEMで計測した燃焼室壁面全体の平均熱流束 q_{ave} 、及び平均壁温 T_{wall} から、次式にて算出した。

$$h = q_{ave} / (T_{gas} - T_{wall}) \quad (4)$$

ここで、燃焼室内ガス温 T_{gas} は、気体の状態方程式から算出した。なお、遮熱なしの場合、圧縮行程（燃焼開始前）、及び、膨張行程後半では、壁温変化が小さく、壁面熱流束のS/N比が低いため、熱伝達率 h の誤差が大きい。そこで今回は、膨張行程前半（Case 1：40～50ms、Case 2：65～75ms）を解析対象とした。

ヌセルト数とレイノルズ数を算出する際の代表長さは、Woschni式と同様に、燃焼室ボア径とした。レイノルズ数の代表速度 v は、Woschni式では次式で定義されている。

$$v = C_1 S_p + C_2 (V_d T_r) / (P_r V_r) (P - P_{motoring}) \quad (5)$$

この式の記号は、 C_1, C_2 は行程ごとの定数、 S_p は平均ピストン速度、 P はガス圧、 $P_{motoring}$ はモータリング時ガス圧、 V_d はシリンダ容積、 P_r, V_r, T_r は初期状態を示す。右辺第1項の S_p は主にエンジン回転速度に比例した吸気流動を表していると考えられる。しかし、供試したRCEMは吸気流動がなく静止状態から圧縮行程が始まる。そこで、ピストン頂面で直接駆動されるガス流速を正確に表現できるよう、平均ピストン速度に替えて瞬時ピストン速度を使用した。その上で、まず、遮熱なしのCase 1で、式(3)の係数 C_1 を調整した。その結果をFig. 16に示す。この時の C_1 は、Woschni式で採用している値の約1/10となった。また、この値を用いて算出したCase 2の関係もFig.15にプロットしたが、Case 1と同様に、式(3)を表す直線に沿っていることが分かる。

次に、遮熱ありの結果をFig.17に示す。代表長さや代表速度の定義は、 C_1 の値も含めて上述の遮熱なしと同じにした。また、比較のため式(3)の関係を破線で示す。遮熱ありではプロット点の傾きが小さくなり、レイノルズ数変化がヌセルト数に及ぼす影響が小さい傾向を表している。

このことは、高温遮熱壁面の近傍ではガス温も高くなり、壁面近傍の粘性係数が増加して境界層が厚くなり、その結果、熱伝達率が燃焼室内の平均的な流動の影響を受け難くなったためと考えられる。過去の研究では、高温壁面では消炎距離が減少し、熱流束が増える例が報告されている⁽⁸⁾が、本実験範囲では上述の境界層が厚くなる効果が強く出たと思われる。

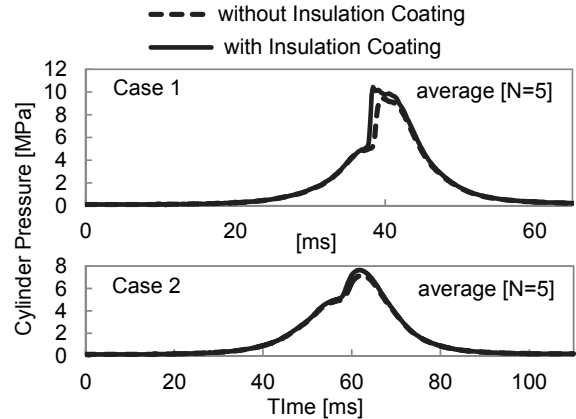


Fig. 12 Cylinder Pressure

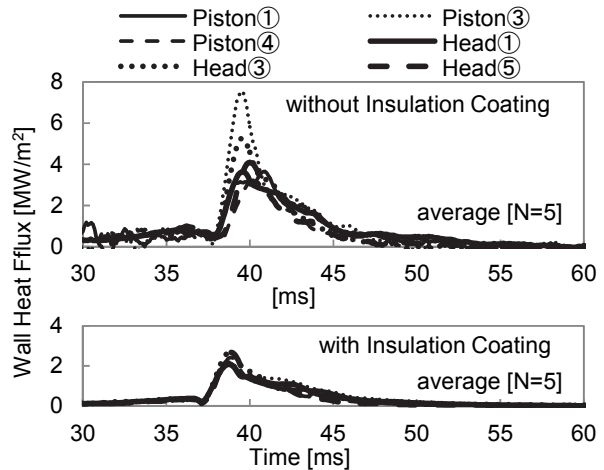


Fig. 13 Instantaneous Local Wall Heat Flux (Case 1)

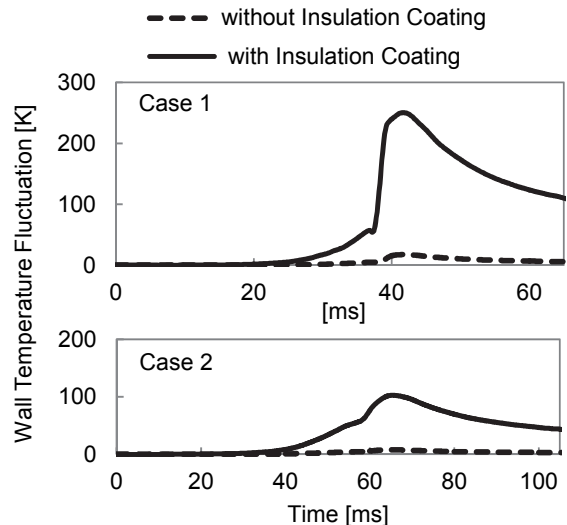


Fig. 14 Instantaneous Wall Temperature

6. おわりに

高応答遮熱壁温センサを開発し、RCEMによる遮熱壁温計測、および、熱流束算出を行い、以下の結論を得た。

- (1) 開発した遮熱壁温センサは、燃焼室内遮熱壁温計測に十分な応答速度を持つことを実験にて確認した。
- (2) 燃焼室へ遮熱壁を設置した場合の壁温計測において、数百℃の壁温振幅が得られること、および、遮熱壁設置により熱流束が大幅に低減することを確認した。
- (3) 本研究の範囲にて、遮熱壁のヌセルト数は、通常の遮熱なし壁面に比べ、レイノルズ数変化の影響が小さい傾向がある。

本研究に供試したRCEM装置の設計、導入には、九州大学大学院工学研究院機械工学部門の村瀬英一教授に多大なご協力をいただいた。ここに謝意を表す。

また、本研究の一部は、独立行政法人新エネルギー・産業技術総合開発機構（NEDO）の支援を受け、戦略的省エネルギー技術革新プログラムの一環で実施したものである。

参考文献

- (1) 松岡ほか：セラミック遮熱エンジンの構造と遮熱性，自動車技術会学術講演会前刷集，912-1，pp.53-56（1991）
- (2) 伊藤ほか：エンジン断熱化による冷却損失低減に関する一考察，日産技法 Vol. 18，pp.13-21（1983）
- (3) D. N. Assanis, et al. : Transient Heat Conduction in Low-Heat-Rejection Engine Combustion Chambers, SAE Paper 870156（1987）
- (4) Fujimoto H., et al. : A Study on Improvement of Indicated Thermal Efficiency of ICE Using High Compression Ratio and Reduction of Cooling Loss, SAE Paper 2011-01-1872（2011）
- (5) G. Woschni : A Universally Applicable Equation for the Instantaneous Heat Transfer Coefficient in the Internal Combustion Engine, SAE Paper 670931（1967）
- (6) G. Orgun, et al. : Thermal Characterization of Combustion Chamber Deposits on the HCCI Engine Piston and Cylinder Head Using Instantaneous Temperature Measurements, SAE Paper 2009-01-0668（2009）
- (7) D. N. Assanis, et al. : Heat Transfer Measurement in Ceramic-Coated Combustion Chambers, SAE Paper 900691（1990）
- (8) J. Yang, et al. : Predictions of the Effects of High Temperature Walls, Combustion, and Knock on Heat Transfer in Engine-Type Flows, SAE Paper 900690（1990）

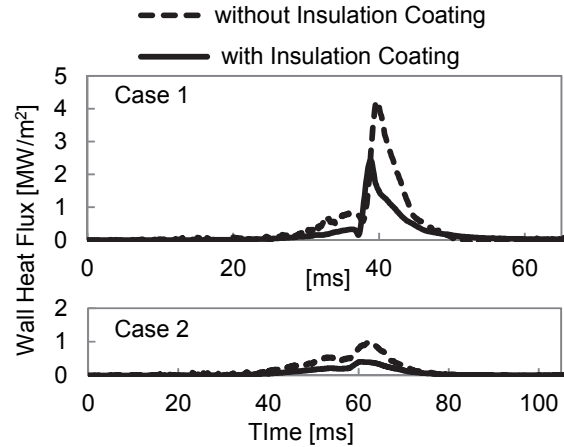


Fig. 15 Instantaneous Wall Heat Flux

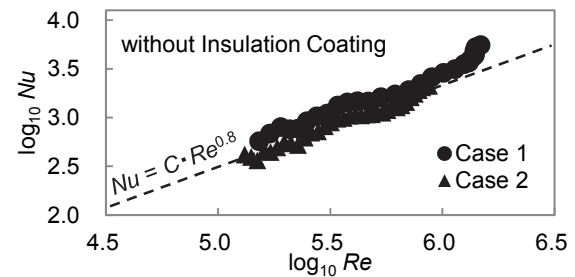


Fig. 16 Re and Nu w/o Insulation Coating

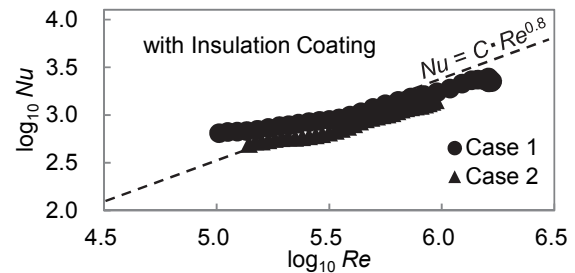


Fig. 17 Re and Nu with Insulation Coating

■ 著 者 ■



中尾 裕典



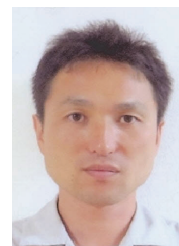
青木 理



清末 涼



原田 雄司



角島 信司



小池 祐輔