高応答遮熱壁面が急速圧縮膨張場の壁面熱伝達に及ぼす影響

原田 雄司^{*1}, 田中 達也^{*1}, 中尾 裕典^{*2}, 服平 次男^{*2}, 青木 理^{*2}, 山下 洋幸^{*2}

Effect of wall heat insulation on wall heat transfer mechanism in rapid compression and expansion environment

Yuji HARADA^{*1}, Tatsuya TANAKA^{*1}, Yusuke NAKAO^{*2}, Tugio FUKUBE^{*2}, Osamu AOKI^{*2}
and Hiroyuki YAMASHITA^{*2}^{*1,*2}Mazda Motor Corporation

3-1 Shinchi, Fuchu-cho, Aki-gun, Hiroshima 730-8670, Japan

Received: 17 October 2017; Revised: 20 December 2017; Accepted: 31 January 2018

Abstract

Heat insulation by a wall material which has low heat capacity and heat conductivity is one of the effective ways to reduce heat transfer. By the heat insulated coating, wall temperature is fluctuated following the behavior of in-cylinder gas temperature, which decreases the gap between gas and wall temperature. In order to suppress wall heat transfer in wide engine operation range, Model Based Development is required. In this study, wall heat transfer mechanism under wall temperature fluctuated condition by heat insulation was investigated by simultaneous measurement of wall heat flux and flow behavior in wall boundary layer in RCEM. As a result, it was clarified that turbulent energy was influenced by wall temperature behavior, which impact on heat transfer coefficient. In addition, non-dimensional velocity distribution in wall boundary layer was not changed drastically by wall temperature behavior. In terms of modeling under heat insulated condition, wall heat flux was able to be predicted well by wall heat transfer model taking into account of density change in wall boundary layer.

Keywords : ICEs, Heat insulated coating, Wall heat transfer, Modeling, Thin-film thermocouple, μ PIV

1. 緒 言

地球温暖化やエネルギーセキュリティ等の地球規模の課題に対応するため、内燃機関の熱効率向上が強く求められている。熱効率の飛躍的な向上に向けては、冷却損失を低減することが有効であり、そのための技術として、壁面温度とガス温度の差を小さくする機能を持つ、高応答壁温制御技術が提案されている。この技術は、低熱伝導かつ低比熱の遮熱材を燃焼室壁面へコーティングすることで、壁面温度のガス温追従を可能にするものである(Assanis and Badillo, 1987), (Fujimoto et al., 2011), (Yamashita et al., 2012), (Kosaka et al., 2013), (西川他, 2016)。遮熱コーティングを施した壁面(以下、遮熱壁面)における、壁面温度のガス温追従機能、壁面瞬時熱流束低減効果は、高応答壁面温度計測により実証されており(中尾他, 2015), (福井他, 2016), 熱効率改善効果も把握されている(脇坂他, 2016), (川口他, 2016)。エンジン内では、運転条件により温度・圧力そして流動が1サイクル中に大きく変化し、これらの物理量が互いに影響し合う環境である。このような環境において、遮熱壁面による冷却損失低減効果と燃焼制御性を広範なエンジン運転領域で両立するためには、運転領域全域に渡る遮熱効果と燃焼制御課題を迅速かつ的確に把握する必要があり、モデルを活用した技術開発が必須となる。そのためには、壁面温度がガス温度の変化に応じて大きく変化する(以下、高応答壁温制御)条件において、計算負荷の増大を招くことなく高精度に壁面熱流束を予測できる壁面熱伝達モデルが必要不可欠であり、壁面熱伝達現象を明らかにしなければ

No.17-00458 [DOI:10.1299/transjsme.17-00458], J-STAGE Advance Publication date : 9 February, 2018

^{*1} 正員, マツダ (株) (〒730-8670 広島県安芸郡府中町新地 3-1)^{*2} マツダ (株)

E-mail of corresponding author: harada.yuji1@mazda.co.jp

ならない。壁面熱伝達現象を考えるにあたり、壁面熱流束とその制御因子である壁面境界層内の温度・流速分布との関係を把握することが重要となる。まずエンジン燃焼室内と同様な環境における遮熱壁面の表面温度および壁面熱流束は、薄膜積層熱電対や燐光体寿命法を用いて(中尾他, 2015), (福井他, 2016)計測した結果が報告されている。薄膜積層熱電対は熱電対の熱容量を低減すること、燐光体寿命法は、燐光体の塗布厚さを適切に管理することや予想される計測温度域に適した燐光体を選定することが、高応答かつ高精度な計測を実現するために必要不可欠である。実験的なアプローチに加え、近年では、直接数値計算 (Direct Numerical Simulation) を活用して壁面温度の違いが壁面熱流束に及ぼす影響とそのメカニズムを解析した研究も報告されている(Yenerdag et al., 2017),(Kondo et al., 2017)。一方、壁面温度が変化する条件における壁面境界層内の物理量分布計測に関して、トルエンをトレーサとして用いたレーザ誘起蛍光法を用いることで、加熱壁上での壁面境界層内温度分布計測を実施した例が報告されている(Fuyuto et al., 2006)。また、小堀らは、抗線温度計を用いて定常的に壁面温度を変化させた急速圧縮膨張装置の燃焼室壁面近傍のガス温度を直接測定し、壁面温度が高い条件において壁面近傍の温度勾配が緩慢化することを報告している(小堀他, 2011)。壁面境界層内の流動計測に関しては、可視化エンジンに μ PIV 計測法を適用し、壁面から $50\mu\text{m}$ ~ $100\mu\text{m}$ の空間分解能で流速計測を行った研究が報告されている(Jainski et al., 2012),(田中他, 2016),(Shimura et al., 2017)。このような最先端の計測・数値解析技術を駆使した研究により、定常的な壁面温度変化が壁面熱伝達機構に及ぼす影響は明らかになりつつある。しかし、1 サイクル中に壁面温度が大きく変化する高応答壁温制御条件において壁面熱流束と壁面境界層内の物理量との関係は十分に整理されておらず、このような環境に適用した壁面熱伝達モデルの精度を検証した例はほとんど報告されていない。そのため、壁面熱伝達機構が十分に解明できていないと言える。

そのため本研究では、遮熱壁面による高応答壁温制御がエンジン壁面熱伝達機構に及ぼす影響を明らかにし、このような環境において高精度に壁面熱流束を予測できる壁面熱伝達モデルを明確にすることを目的とした。本研究では、光学自由度の高い急速圧縮膨張装置を用いて、高応答壁温制御条件における壁面熱流束および壁面境界層内の流速分布・乱流特性値を計測した。

2. 計測手法および実験装置

2・1 計測システムおよび解析手法

壁面温度、壁面境界層内流速分布、乱流特性値を計測するための計測システムを図 1 に示す。ガス温度に追従して壁面温度が変化するという機能を有する遮熱壁を実現するためには、熱伝導率および体積比熱を最小化することが有効なため(Fujimoto et al., 2011)、低熱伝導率である材料中に空隙を設けることにより低熱伝導率かつ低体積比熱を実現する遮熱材を供試し、金属壁の表面にコーティングした。本研究では、金属壁の表面に遮熱材をコーティングした壁面を遮熱壁と定義した。エンジン内において、遮熱壁表面の温度は、非常に短時間で大幅に変化するため、数 kHz 以上の時間応答性が求められる。そのため、壁面温度計測には、薄膜積層熱電対(中尾他, 2015)を使用した。図 2 に薄膜積層熱電対の構造を示す。センサ母材は、燃焼室を形成するアルミ材の熱拡散率に近い素材とした。熱電対の構成金属として Ag-Ni を採用した。直径 0.5mm の熱電対素線を絶縁被覆し、母材の直径 0.9mm の穴に耐熱接着剤で固定して薄膜積層熱電対先端を研削加工によって仕上げた。熱電対の素線をセンサ先端に突出させて固定し、センサ端面を遮熱コーティング後に研削加工を実施した。なお、壁面の表面粗さは、壁面近傍の流動・熱伝達特性に影響すると考えられるため、遮熱壁面の表面粗さは、金属壁面と同等になるように研削加工を実施した。薄膜状の熱電対は、端面切削後に Ag と Ni をスパッタリングによって膜厚 400nm で成膜し、センサ中央で積層させて、直径 1.5mm の熱接点を形成した。これにより、高い時間分解能を実現することができ、エンジン圧縮膨張時の遮熱壁面の急峻な温度変化をとらえることができる(Aoki et al., 2015)。また、薄膜積層構造にすることにより、遮熱壁面に熱接点を構成することができるため、遮熱壁面の温度を直接計測することが可能である。なお、センサの表面から内部への熱流束次元性確保のため、センサ側面に低熱伝導性のアルミナ材(熱拡散率 $0.84 [\text{mm}^2/\text{s}]$)で製作したリングを設置した。薄膜積層熱電対からの信号は、アンプで増幅され、AD コンバータを介してデータロガーにて 10kHz のサンプリング周波数で記録する。壁面瞬時熱流束は、壁面温度の時系列計測結果を境界条件として、完全陰解法にて壁面内部の非定常熱伝導方程式を解き、壁面内部の温度勾配を算出することにより、求めた(Patanker, 1985)。次に壁面境界層内速度分布および乱流統計量は、

Fig.1 Schematics of experimental set-up

Fig.2 Configuration of the high response thin-film thermocouple

時系列 μ PIV 法にて計測した。

エンジン内のような高温高圧場においては、壁面境界層は、非常に薄くなると考えられ、壁面から数 $100\mu\text{m}$ 以内の領域で急激な速度勾配がみられている計測例もある(Jainski et al., 2012), (Shimura et al., 2017)。そのため、このような領域を高解像度かつ鮮明にとらえるためには、高倍率かつ明るい光学系が必須となる。本研究では、倍率と明るさを両立するために、開口数大きい長作動距離対物レンズ(Mitutoyo, M Plan Apo $\times 5$)を用いて、 μ PIV システムを構築した(田中他, 2016)。光源には、高繰り返しダブルパルス Nd:YAG レーザを使用し、レーザパルス間の時間は、 $7\mu\text{s}$ とした。レーザの繰り返し周波数は、 10kHz とし、 10kHz ごとに 1 組 2 枚の粒子画像を取得した。トレーサ粒子は、軽量かつ粒子径の小さいゴッドボール B-6C(平均粒径 $2\text{--}3\mu\text{m}$, かさ密度 180kg/m^3)を使用し、微細な渦運動に対する流体追従性を確保した。流速分布は、市販の PIV 解析ソフトウェア(西華デジタルイメージ, Koncerto)を用い、直接相互相関法にて算出した。検査窓は、 $24\text{pix} \times 32\text{pix}$ (オーバーラップ $66\% \times 50\%$)とした。図 3 に μ PIV により計測した、瞬時流速分布を示す。壁面に平行な方向を x 方向、垂直な方向を y 方向と定義し、左端の壁面を原点とした。 $x \times y = 2680 \times 32\mu\text{m}$ (壁面から第 1 層目のみ $x \times y = 2680 \times 64\mu\text{m}$)(赤枠部)の領域において瞬時流速を空間平均し、さらに空間平均した後の流速をその時刻から 3ms 間、時間平均して、平均流速とした。平均流速と瞬時流速を用いて、以下の式により、乱流運動エネルギーを検査窓ごとに算出した。そして、平均流速算出と同様に空間平均し、 3ms 間の時間平均処理を施すことで、平均乱流運動エネルギー分布を式(1)より算出した。

$$k = \frac{1}{2} \left(\overline{u'^2} + \overline{v'^2} \right) \quad (1)$$

$$\overline{u'^2} = \frac{1}{N} \sum (u - U)^2 \quad (2)$$

$$\overline{v'^2} = \frac{1}{N} \sum (v - V)^2$$

k : 平均乱流運動エネルギー, u : 壁面平行方向瞬時流速, v : 壁面法線方向瞬時流速, U : 壁面平行方向平均流速, V : 壁面法線方向平均流速, N : 平均化サンプル数(3ms の場合は 30 サンプル)

2・2 供試機関

長作動距離対物レンズは、観測位置から約 40mm のところにレンズ先端部を配置する必要があるため、光学的自由度が高い燃焼室形状が求められる。そのため、供試機関として、1 回のみの圧縮膨張が可能な急速圧縮膨張装置(Rapid Compression and Expansion Machine)を用いて実験を行った。図 4 に RCEM の全体図を、表 1 に RCEM の諸元および実験条件を示す。RCEM は、任意のタイミングでパルスジェットバルブ(CKD, PDV3-80A)駆動させることで、空気室に蓄圧された空気が空気緩衝室に流入し、緩衝室内のピストンが押される。それに連動して、緩衝室内のピストンと連結されたカムが急速に動く。カムとローラは常に接触しており、カムに沿ってローラが動く。そして、ローラに接続されたピストンが燃焼室内で動作し、圧縮膨張を行う。カムが動き出した後の圧縮開始直前に、フォトインタラプタを、カムに設置した遮断板が通過することで、デジタルディレイパルスジ

エネレータ (Stanford Research, DG645) に信号が入力され、この信号をトリガーとして、計測システムを同期させた。図 5 にシリンダヘッドの概略図を、図 6 に RCEM 燃焼室詳細形状と計測位置を示す。ピストンの上昇により圧縮された空気は、連通路を通して燃焼室内に流入する。燃焼室は、直径が約 35mm、厚さが 17mm の縦型の円筒形状をしている。燃焼室両側には、厚さ 20mm のサファイアガラスの窓が取り付けられており、燃焼室内部の可視化が可能である。燃焼室に流入した空気は、平板部に沿って流れるように燃焼室形状を設計した。燃焼室の平板部には M12 の雌ネジを設置し、薄膜積層熱電対の取り付けを可能とした。時系列 μ PIV 計測は、薄膜積層熱電対の中央位置において実施した。レーザシート光は、薄膜積層熱電対と対向した位置に設置したレーザ窓を介して入射した。燃焼室内の圧力は、シリンダヘッド部設置した圧力変換器 (Kistler, Type6125) により計測した。図 7,8 に 3 サイクル分の燃焼室内の平均圧力: P および壁面熱流束: q_w を示す。なお、両者とも遮熱壁条件における結果を示す。図 7 から、3 サイクルの燃焼室内平均圧力はほぼ一致しており、実験の再現性は確保できていると考えられる。また、すべてのサイクルの TDC 近傍において、燃焼室内平均圧力履歴に振動が確認できる。これは、急速圧縮膨張装置のカムとロッド部が連結されていないため、TDC 近傍においてカム上面からロッド部が離れたことに起因して生じたものと考えられる。また、図 8 に示す壁面熱流束の時間履歴が TDC 近傍で振動している要因も、同様であると考えている。壁面熱流束の計測ばらつきに関しては、TDC 近傍において最大 $\pm 15\%$ であることを確認した。また、過去の研究(中尾他, 2015)から、本実験で用いた薄膜積層熱電対の取り付け方法に起因する計測誤差は、1.7% 程度である。

Fig.3 Instantaneous velocity distribution and the way of averaging

Table 1 Operating condition of RCEM

Bore (mm)	89
Stroke (mm)	95
Compression time (ms)	95 (300rpm)
Compression ratio	14.2
Infill gas	Dry Air
Initial gas temperature (K)	298
Initial wall temperature (K)	298
Initial gas pressure	Atmospheric Pressure

Fig.4 Schematics of RCEM

Fig.5 Configuration of the combustion chamber

Fig.6 Detail of combustion chamber

Fig.7 Time-series history of in-cylinder pressure during 3 cycles operation

Fig.8 Time-series history of wall heat flux during 3 cycles operation

3. 壁面熱伝達モデル

エンジン開発に適用される流体数値計算(以下 CFD)では, 計算負荷の観点から壁面近傍に細かい計算メッシュを配置せず, 壁面境界層内の熱伝達をモデル化する壁面熱伝達モデルが一般的に用いられる(Launder and Spalding, 1974), (Huh et al., 1990), (Angelberger et al., 1997), (Han and Reitz, 1997), (Nijeweme et al., 2001), (Rakopoulos et al., 2010), (Wang et al., 2012) . 一般的な壁面熱伝達モデルでは, 壁面境界層内の熱伝達は, 式(3)に示すように 1 次元かつ準定常状態であると仮定する .

$$\frac{\partial}{\partial y} \left\{ (\lambda + \lambda_t) \frac{\partial T}{\partial y} \right\} = 0 \quad (3)$$

また、このように仮定した壁面境界層内では、温度場と速度場の類似性が成立すると考えることができ、乱流熱伝導率は、式(4)に示すように渦動粘性係数と乱流プラントル数で表現できる。この仮定に則ると、壁面熱流束は壁面せん断応力の関数として表現でき、壁面境界層内の流動特性を基に壁面熱流束を推定する。一般的な壁面熱伝達モデルでは、発達した乱流境界層を仮定し、壁面境界層内の流動特性を表現している。発達した乱流境界層では、壁面から十分に離れた乱流が支配的な領域において、乱流運動エネルギーの生成と散逸はつり合い、乱流粘性と分子粘性の関係は、式(5)に示すように摩擦速度で無次元化した壁面からの距離（以下、無次元距離： y^+ ）で決定される(Pope, 2000)。なお y^+ は式(6)で定義される。摩擦速度は、壁面せん断応力を速度の形で表現したものであり、式(7)で定義される。

$$\lambda_t = \frac{\rho \nu_t C_p}{Pr_t} \quad (4)$$

$$\frac{\nu_t}{\nu} = \kappa y^+ \quad (5)$$

$$y^+ = \frac{u_\tau y}{\nu} \quad (6)$$

$$u_\tau = \sqrt{\frac{\tau_w}{\rho}} = \sqrt{\nu \left. \frac{\partial U}{\partial y} \right|_{y=0}} \quad (7)$$

このような十分に発達した乱流境界層の特徴から、摩擦速度と壁面熱流束で無次元化した壁面境界層内の温度分布は、 y^+ の関数（以下、壁関数）として表現することができる。壁面熱流束は、壁関数を導入(式(8),(9)右辺の分母)して表現することができ、圧縮膨張に起因する壁面境界層内の密度変化を考慮するかどうかで、式(8)と式(9)となる(Han and Reitz, 1997)。

$$q_w = \frac{\rho c_p u_\tau T}{2.1 \ln y^+ + 2.5} \ln \left(\frac{T}{T_w} \right) : \text{壁面境界層内の密度は変化} \quad (8)$$

$$q_w = \frac{\rho c_p u_\tau}{2.1 \ln y^+ + 2.5} (T - T_w) : \text{壁面境界層内の密度は一定} \quad (9)$$

壁関数を壁面境界条件として用いることで壁面境界層内の温度分布や速度分布を計算する必要がなく、計算コストを抑えることができる。筆者らは、温度・圧力・流動が時々刻々と変化するエンジン燃焼室内環境において、以上のような仮定に基づき構築されたモデルの適用性を調査した。その結果、壁面境界層内の密度変化を考慮した場合、高応答熱電対で計測した壁面熱流束と本モデルで推定した壁面熱流束は定量的に一致することを検証した(Harada et al., 2017)。本研究では、式(8)で表現される壁面熱伝達モデルの適用性を高応答壁温制御条件において調査し、このような環境で高精度に壁面熱流束を予測できるモデルの明確化を試みた。

4. 実験結果と考察

4・1 高応答遮熱壁面による壁面熱流束低減効果検証

本章では、遮熱壁面による高応答壁温制御が壁面熱流束および熱伝達係数に及ぼす影響を述べる。図9に燃焼室内の平均ガス圧力: P および平均ガス温度: T を、図10に壁面温度履歴: T_w を示す。なお、比較のため、通常の金属壁面条件における結果も併せて示す。平均ガス温度は、圧力変換器から得られた燃焼室内の平均ガス圧力から理想気体の状態方程式により算出した。遮熱壁面では、平均ガス温度の上昇・下降に追従して、壁面温度が大きく変動することを確認した。これは、遮熱壁面の特徴である、低体積比熱かつ低熱伝導率な熱物性が起因している。図10,11に壁面熱流束: q_w および熱伝達係数: h を時系列に示す。なお、熱伝達係数は、壁面熱流束、壁面温度そして平均ガス温度から推定した。遮熱壁面の温度が金属壁面の温度に対して高くなる圧縮行程から膨張行程までの広範囲に渡って、熱伝達係数が低下している。このように遮熱壁面による高応答壁温制御条件におい

では、ガス温度と壁面温度との差の低減に加えて、壁面温度上昇による熱伝達率低減効果も壁面熱流束低減に寄与している。熱伝達率は、式(10)が表すように壁面に接する空気の熱伝導率および温度境界層厚さに支配される。空気の熱伝導率は、温度が高いほど大きいので、壁面温度が高い遮熱壁面を用いた条件(以下、遮熱壁面条件)では大きくなる。そのため、遮熱壁面条件において熱伝達率が低減した要因としては考えられない。したがって、高応答壁温制御による壁面温度上昇が温度境界層厚さに影響を及ぼし、これが熱伝達率低減の要因となっている可能性がある。温度境界層厚さを定性的に表現する指標: Δy を式(11)のように定義し、図 13 に示す。

$$h = \frac{\lambda}{\Delta y} \quad (10)$$

$$\Delta y = \lambda \frac{T - T_w}{q_w} \quad (11)$$

壁面に接する空気の温度はほぼ壁面温度と同等と仮定し、熱伝導率は、壁面温度と平均ガス圧力より熱物性値表を用い算出した Δy は、壁面温度が高い遮熱壁面条件では金属壁面を用いた条件(以下、金属壁面条件)に比べて、厚くなっていることがわかる。したがって、壁面温度が上昇することにより温度境界層が厚くなると言え、これが遮熱壁面条件において熱伝達率が低減する要因であると考えられる。壁面温度が上昇することにより温度境界層が厚くなる要因を考察するため、次項にて遮熱壁面による高応答壁温制御が壁面境界層内の流動に及ぼす影響を述べる。

Fig.9 Time-series history of in-cylinder pressure and temperature averaged in 3 cycles

Fig.10 Time-series history of wall temperature averaged in 3 cycles

Fig.11 Time-series history of wall heat flux averaged in 3 cycles

Fig.12 Time-series history of heat transfer coefficient averaged in 3 cycles

Fig.13 Time-series history of Δy at the wall averaged in 3 cycles

4・2 高応答壁温制御が壁面境界層内流動に及ぼす影響

壁面境界層内の温度勾配は、壁面境界層内の流速分布や乱流特性に強く影響を受けると考えられる。そのため、遮熱壁面による高応答壁温制御が壁面境界層内の流速分布・乱流特性値に与える影響を調査した。本研究では、高応答壁温制御の影響に焦点を当てるため、壁面に対して平行に流れる比較的シンプルな流動場形成を狙って、燃焼室を設計した。図 14 に遮熱壁面の温度が金属壁面に対して十分に高くなる TDC 直前および直後における壁面境界層内の平均流速分布を示す。壁面平行方向の平均流速を U 、法線方向の平均流速を V とした。図 14 から、壁面に近づくにつれて壁面に平行な方向の平均流速の急激な降下が見られる。また、遮熱壁面条件と金属壁面条件において最大流速に大きな変化は見られない。なお、壁面に垂直な方向の平均流速は、平行な方向の平均流速に比べて十分に小さいことが確認できるため、設計思想に基づく狙い通りの流動が形成できていると考えられる。壁面境界層内流動の特徴を考察するためには、摩擦速度で無次元化した壁面に平行な方向の平均流速（以下、無次元平均流速： u^+ ）と壁面からの距離を摩擦速度で無次元化した無次元距離（以下、無次元距離： y^+ ）との関係を調査する必要がある。発達した乱流境界層では、壁面から十分に離れている領域は乱流が支配的であり、 u^+ は y^+ の対数の関数で表現できる（以下、対数則域）(Pope, 2000)。本研究で使用した燃焼室では、壁面に対して平行な比較的単純な流動場形成を狙っており、対数則域に近い流速分布が得られるものと考えられる。そのため、この特徴を活用し、壁面から十分に離れた領域（壁面から約 1mm 以上離れた領域）の平均流速を用いて、式(12)で摩擦速度を推定した(西岡, 2015)。図 14 と同じタイミングの u^+ と y^+ との関係を図 15 に示す。なお、図 15 に関して、摩擦速度の推定および u^+ と y^+ の算出には、壁面温度かつ筒内平均ガス圧力の条件における熱物性（密度、動粘性係数）を適用した。図には発達した乱流境界層における u^+ を破線太線で併せて示す。これまでの研究により、発達した壁面乱流境界層では、式(12)中の κ と B は、それぞれ 0.41 および 5.2 程度となることが明らかにされている(Pope, 2000)。本研究で用いた燃焼室内では壁乱流が十分に発達していると仮定して、 κ と B は、それぞれ 0.41 および 5.2 とした。

$$\frac{1}{u_\tau} = \frac{1}{\kappa U_y} \left\{ \phi_m - \left(1 - \frac{0.993}{\phi_m} \right) \ln \phi_m \right\} \quad (12)$$

$$\phi_m = \phi \left(\frac{U_y y}{\nu} \right) = \ln \left(\frac{U_y y}{\nu} \right) + \kappa B + \ln \kappa$$

図 15 から、本研究で使用した燃焼室では、壁面から十分に離れた領域において対数則域が観察でき、発達した乱流境界層に近い無次元流速分布が形成されていることを確認できる。図 15 から、 $y^+ 10$ の粘性底層内の流速分布は計測ができていないが、 $y^+ 40$ 付近の遷移領域までの流速は捉えることができおり、壁面境界層内の乱れが壁面境界層内流動に影響する領域における流動特性は可視化できていると言える。そのため、壁面温度の 1 サイクル中の変化が壁面境界層内の流動特性に与える影響は考察できると考える。対数則域の流速分布は、TDC 以前においては大きな差異は見られないが、TDC 後の膨張行程において、遮熱壁における u^+ が金属壁よりも小さくなる。 $y^+ > 100$ の領域において差異が見られることから、主流の流動特性の差が影響していると考えられる。また、

$y^+ < 100$ の領域においても TDC 前後の両時期においても違いが見られている．次に，壁面境界層内の流速分布がどの熱物性に大きく影響を受けるかを調査するため，筒内平均ガス温度とガス圧力の条件における熱物性を用いて，金属壁面および遮熱壁面の両条件における摩擦速度および u^+ と y^+ を算出し，図 15 の結果と比較した．図 16 に金属壁面および遮熱壁面条件における u^+ と y^+ の関係を示す．図 15 と図 16 を比較すると，図 16 の方が両条件における u^+ と y^+ との関係は一致する方向に近づいており，両条件ともに壁面境界層内の平均流速分布は，壁面から離れた主流における気体の状態（平均流速と熱物性）に強く影響を受けると言える．しかし，両条件における u^+ と y^+ との関係は完全には一致しておらず，特に壁面の粘性の影響が大きくなる $10 < y^+ < 40$ 付近の遷移領域においても差異がみられ，遮熱壁面条件の方が u^+ が大きくなっている．この領域における流動特性の差異は，壁面の特性差に起因していると考えられ，壁面熱伝達に影響を及ぼすと予想できる．

Fig.14 Mean velocity distribution in wall boundary layer

Fig.15 Non-dimensional velocity distribution in wall boundary layer
(Heat property: wall temperature and mean gas pressure)

Fig.16 Non-dimensional velocity distribution in wall boundary layer
(Heat property: mean gas temperature and pressure)

そのため、遷移領域($10 < y^+ < 40$)における流動場の違いを詳細に評価する目的で、壁面境界層内の乱流運動エネルギー分布を比較した。図 17 に壁面境界層内の乱流運動エネルギー k 分布を示す。TDC 直前および直後の両タイミングともに、壁面近傍で乱流運動エネルギーが大きくなり、極値を持つことが分かる。壁面の最近傍領域では、流体と壁面との干渉により、平均流速成分が持つ運動エネルギーが大きく減衰すると考えられる。減衰した運動エネルギーは乱流成分の運動エネルギー生成に寄与するため、壁面最近傍領域では、乱流運動エネルギーが大きくなるものと考えられる。遮熱壁面および金属壁面条件での結果を比較すると、TDC 直前・直後ともに、壁面温度が高い遮熱壁面条件の方が、乱流運動エネルギーのピークが小さいことが分かる。そのため、平均流速成分が減衰しにくいと考えられるため、前述のように、遮熱壁面条件の方が遷移領域($10 < y^+ < 40$)において金属壁面条件よりも u^+ が大きくなったものと考えられる。では、両条件において壁面境界層内の乱流運動エネルギーに違いが生じる要因を考察するために、図 18 に壁面温度と燃焼室内圧力を熱物性値表に適用して推定した空気動粘性係数 ν を時系列的に示す。遮熱壁面条件では、金属壁面条件と比べて TDC 近傍の壁面温度が高くなるため、動粘性係数が大きくなる。この両条件における動粘性係数の差異が乱流運動エネルギーのピーク差の要因であると考えられる。壁面近傍の温度場と流速場の相関関係を仮定すると、この領域における乱流運動エネルギーの違いが壁面最近傍領域の温度勾配に影響を及ぼすと考えられる。そのため、壁面温度が金属壁面より高い遮熱壁面条件において、壁面近傍の乱流運動エネルギー抑制が温度境界層厚さを代表する指標である Δy の増大に寄与したと考えられる(図 13 参照)。

以上より、遮熱壁面の温度上昇による熱伝達抑制効果を CFD で予測するためには、壁面境界層内の流速、乱流運動エネルギーおよび温度分布を正確に予測する必要がある。そのためには、壁面境界層内の低レイノルズ数効果を考慮した、低レイノルズ数型乱流モデルを用いることが有効であると考えられる。これまでの研究から、応力歪み相関式を仮定する渦粘性モデル(Launder and Sharma, 1974), (Abe et al., 1994)や流れが物体に衝突する場所においても高精度な予測が可能な非線形渦粘性モデル(Craft et al., 1997)が提案されており、エンジン燃焼室内で観察できる様々な流れに適用できる可能性が高いと思われる。しかしながら、燃焼室の壁面境界層内を十分に解像できる細かな計算格子を配置する必要があるため、計算コストが飛躍的に増大してしまう。したがって、計算コストの観点から、一般的なエンジン燃焼開発で用いられる、比較的粗い計算格子を壁面近傍に配置し、壁面境界層内の流動・温度分布をモデル化(壁面熱伝達モデル)する高レイノルズ数型乱流モデルを用いて、いかに精度良く壁面境界層内の物理量挙動および壁面熱流束を予測できるかということが、エンジン燃焼開発においては重要になる。そのため、次項にて、高レイノルズ数型乱流モデルにおいて用いられる壁面熱伝達モデル(3章、式(8))の精度検証を実施した。

4・3 高応答壁温制御条件における壁面熱伝達モデル

本項では、壁面温度が1サイクル中に大きく変化する高応答壁温制御条件における壁面熱伝達モデルに関して述べる。既報(Harada et al., 2017)にて、式(8)で表現される壁面熱伝達モデル(壁面境界層内の密度分布考慮)をCFD

に適用することで、急速圧縮膨張場の壁面熱流束を高精度で予測できることを明らかにした。本研究では、遮熱壁面を想定した高応答壁温制御条件における当該モデル(式(8))の適用性を検証した。本実験で得られた計測結果を式(8)に代入することで壁面熱流束を算出し、薄膜積層熱電対で得られた結果と比較することで検証を進めた。なお、摩擦速度は、壁面境界層内の流速結果を式(12)に代入し、推定した。また、薄膜積層熱電対により計測した壁面温度を式(8)に代入した。式(8)中の密度および定圧比熱は、壁面温度かつ筒内平均ガス圧力の条件における値を適用した。比較を進める際には、壁面境界層内のガス温度分布を決める必要がある。一般的に、壁関数を用いた壁面熱流束予測モデルでは、壁面第1層目の計算メッシュは対数則域に位置することを前提としている。図15から、本実験においては、壁乱流に近い流速分布を形成することが確認できるため、 $y^+ = 100$ 付近以降で y^+ に対する無次元平均速度が対数の関係になっているように見える。そのため、式(8)から計算する壁面熱流束は $y^+ = 150, 200, 250, 300$ における値を求めた。このような領域では、ガス温度は、燃焼室内の平均温度に近いと考えられるため、燃焼室内圧力より算出した燃焼室内の平均温度を用いた。

図19に式(8)で算出した壁面熱流束と薄膜積層熱電対で計測した壁面熱流束を比較した結果を示す。両者の比較から、式(8)で表現されるモデルは、壁面熱流束の時系列変化を予測することができている。TDC 近傍において式(8)は、壁面熱流束を約 20% 過大評価する結果となった。薄膜積層熱電対による壁面熱流束計測ばらつきは、約 $\pm 16\%$ (サイクル間ばらつき: $\pm 15\%$, センサ取り付け位置によるばらつき: 1.7%) であることを考慮すると、薄膜積層熱電対による計測ばらつきが、式(8)により壁面熱流束予測結果と薄膜熱電対による計測結果との間に乖離が生じた主要な要因であると考えられる。

Fig.17 Turbulent kinetic energy distribution in wall boundary layer

Fig.18 Time-series history of kinetic viscosity just close to the wall

Fig.19 Results of wall heat transfer model validation in terms of wall heat flux

5. 結 言

本研究では、遮熱壁面を用いた高応答壁温制御がエンジン壁面熱伝達機構に及ぼす影響を明らかにし、このような環境において高精度に壁面熱流束を予測できる壁面熱伝達モデルを明確にすることを目的として、高応答壁温制御条件における壁面熱流束および壁面境界層内流速・乱流特性値を計測した。以下に得られた結果をまとめる。なお、本研究で得られた結果は、反応を伴わない非燃焼条件において得られたものである。

- ・壁面温度が金属壁面に対して高くなる遮熱壁面条件では、熱伝達係数が金属壁面条件よりも小さくなる。
- ・壁面温度が高くなることで、壁面最近傍領域に分布するガスの動粘性係数が大きくなり、その結果、壁面境界層内の流動・乱流特性に影響を与え、温度境界層厚さが厚くなる。これが、遮熱壁面条件において、金属壁面条件よりも熱伝達係数が小さくなる要因であると考えられる。
- ・遮熱壁面による高応答壁温制御条件において、壁面境界層内の密度変化を考慮した壁面熱伝達モデルにより壁面熱流束の時系列変化を予測することができる。TDC 近傍にて約 20% 壁面熱流束を過大評価する結果となったが、これは薄膜積層熱電対の計測ばらつき(サイクル間ばらつき: $\pm 15\%$, センサ取り付け位置によるばらつき: 1.7%) が主な要因であると考えられる。

謝 辞

実験結果の考察・解釈を進めるうえで、東京工業大学工学院の店橋護教授に多大なるご助言・ご指導を賜った。ここに感謝の意を表する。

文 献

- Abe, K. Kondoh, T. and Nagano Y., A new turbulence model for predicting fluid flow and heat transfer in separating and reattaching flows-I. Flow field calculations, International Journal of Heat and Mass Transfer, Vol.37, No.1 (1994), pp. 139-151.
- Angelberger, C., Poinsot, T. and Delhay, B., Improving near-wall combustion and wall heat transfer modeling in SI engine computations, SAE Paper, No.972881 (1997).
- Aoki, O., Nakao, A., Tanaka, T., Koike, Y., Kiyosue, R., Harada, Y. and Yamamoto, H., Analysis of heat transfer phenomena on high response heat insulation coatings by instantaneous heat flux measurement and boundary layer visualization, SAE Paper, No. 2015-01-1996 (2015).
- Assanis, D.A. and Badillo, E., Transient heat conduction in low-heat-rejection engine combustion chambers, SAE Paper, No. 870156 (1987).
- Craft, T.J. Launder, B.E. and Suga, K., Prediction of turbulent transitional phenomena with a nonlinear eddy-viscosity model, International Journal of Heat and Fluid Flow, Vol.18, No.1 (1997), pp.15-28.
- Fujimoto, H., Yamamoto, H., Fujimoto, M. and Yamashita, H., A study on improvement of indicated thermal efficiency of ICE using high compression ratio and reduction of cooling loss, SAE Paper, No. 2011-01-1872 (2011).
- 福井健二, 脇坂佳史, 西川一明, 服部義昭, 小坂英雅, 川口暁生, レーザ誘起熾光法を用いた高応答温度計測技術 壁温スイング遮熱膜への応用, 自動車技術会論文集, Vol.47, No.1 (2016), pp.61-66.
- Fuyuto, T., Kronmayer, H., Lewerich, B., Koban, W., Akihama, K. and Schulz, C., Laser-based temperature imaging close to surfaces with toluene and NO-LIF, Journal of Physics, Conference Series 45 (2006), pp. 69-76.
- Han, Z. and Reitz, R.D., A temperature wall function formulation for variable-density turbulent flows with application to engine convective heat transfer modeling, International Journal of Heat and Mass Transfer, Vol.40, No.3 (1997), pp.613-625.
- Harada, Y., Uchida, K., Tanaka, T., Sato, K., Qianjin, Z., Fujimoto, H., Yamashita, H. and Tanahashi, M., Wall heat transfer of undeveloped turbulent flow in internal combustion engines, COMODIA2017 (2017), A204.

- Harada, Tanaka, Nakao, Fukube, Aoki and Yamashita, Transactions of the JSME (in Japanese), Vol.84, No.858 (2018)
- Huh, K.Y., Chang, I.P. and Martin, J.K., A comparison of boundary layer treatments for heat transfer in IC engines, SAE Paper, No.900252 (1990).
- Jainski, C., Lu, L., Dreizler, A. and Sick, V., High-speed micro particle image velocimetry studies of boundary-layer flows in a direct-injection engine, International Journal of Engine Research, Vol.14, No.3 (2012), pp. 247-259.
- 川口暁生, 立野学, 山下英男, 猪熊洋希, 山下晃, 高田倫行, 山下親典, 小山石直人, 脇坂佳史, 壁温スイング遮熱法によるエンジンの熱損失低減(第3報)列型過給直噴ディーゼルエンジンへの適用, 自動車技術会論文集, Vol.47, No.1 (2016), pp.47-54.
- 小堀繁治, 大森剛茂, 内燃機関の燃焼室壁面近傍における境界層温度分布と消炎距離の測定, 日本機械学会論文集 B 編, Vol.77, No.784, (2011) pp. 250-259.
- Kondo, Y., Minamoto, Y., Harada, Y., Shimura, M. and Tanahashi, M., Flame-wall interaction of n-heptane-air combustion in a HCCI configuration, Tenth Mediterranean Combustion Symposium (2017).
- Kosaka, H., Wakisaka, Y., Nomura, Y., Hotta, Koike, M., Nakakita, K. and Kawaguchi, A., Concept of “temperature swing heat insulation” in combustion chamber walls and appropriate thermo-physical properties for heat insulation coat, SAE Paper, No. 2013-01-0274 (2013).
- Launder, B.E. and Spalding, D.B., The numerical computation of turbulent flows, Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, Vol.3 (1974), pp.269-289.
- Launder, B.E. and Sharma, B.I., Application of the energy dissipation model of turbulence to the calculation of flow near a spinning disc, Letters in Heat and Mass Transfer, Vol. 1, No. 2 (1974), pp. 131-138.
- 中尾裕典, 青木理, 清末涼, 原田雄司, 角島信司, 小池祐輔, 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 (2015), pp. 222-227.
- Nijeweme, D., Kok, J., Stone, C. and Wyszynski, L., Unsteady in-cylinder heat transfer in a spark ignition engine, experiments and modeling, Proceedings of Institution of Mechanical Engineers, Part D, Journal of Automotive Engineering, Vol.215 (2001), pp.747-760.
- 西川直樹, 高岸れおな, 清水富美男, 堀江俊男, 壁温スイング遮熱法によるエンジンの熱損失低減(第4報)スイング遮熱膜の材料, 自動車技術会論文集, Vol.47, No.1 (2016), pp.55-60.
- 西岡通男, 乱流境界層の摩擦速度を推定する新しい方法, ながれ, Vol.34, No.6 (2015), pp.397-402.
- Pope, S.B., Turbulent flows, Cambridge University Press (2000).
- Rakopoulos, C.D., Kosmadakis, G.M. and Pariotis, E.G., Critical evaluation of current heat transfer models used in CFD in-cylinder engine simulations and establishment of a comprehensive wall-function formulation, Applied Energy, Vol.87, No.5 (2010), pp.1612-1630.
- Shimura, M., Yoshida, S., Minamoto, Y., Yokomori, T., Iwamoto, K., Tanahashi, M. and Kosaka, H., Micro PIV investigation of near wall behaviors of tumble enhanced flow in an IC engine, COMODIA2017 (2017), A205.
- 田中達也, 原田雄司, 服平次男, 山下洋幸, 山本寿英, 高応答遮熱壁面が速度境界層内現象に及ぼす影響, マツダ技報, No.33 (2016), pp.100-105.
- 脇坂佳史, 稲吉三七二, 福井健二, 小坂英雅, 堀田義博, 川口暁生, 壁温スイング遮熱法によるエンジンの熱損失低減(第2報)単筒エンジンによる遮熱効果の先行検討, 自動車技術会論文集, Vol.47, No.1 (2016), pp.39-46.
- Wang, Z., Wang, Y. and Reitz, R.D., Pressure oscillation and chemical kinetics coupling during knock processes in gasoline engine combustion, Energy Fuels, Vol.26, No.12 (2012), pp. 7107-7119.
- Yamashita, H., Fujimoto, H., Fujimoto, M., Tanaka, T. and Yamamoto, H., Thermal efficiency improvement by increasing compression ratio and reducing cooling loss, COMODIA 2012 (2012), pp. 36-42.
- Yenerdag, B., Minamoto, Y., Aoki, K., Shimura, M., Nada, Y. and Tanahashi, M., Flame-wall interactions of lean premixed flames under elevated, rising pressure conditions, Fuel, Vol.189 (2017), pp.8-14.

References

- Abe, K. Kondoh, T. and Nagano Y., A new turbulence model for predicting fluid flow and heat transfer in separating and reattaching flows-I. Flow field calculations, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol.37, No.1 (1994), pp. 139-151.
- Angelberger, C., Poinso, T. and Delhay, B., Improving near-wall combustion and wall heat transfer modeling in SI engine computations, SAE Paper, No.972881 (1997).
- Aoki, O., Nakao, A., Tanaka, T., Koike, Y., Kiyosue, R., Harada, Y. and Yamamoto, H., Analysis of heat transfer phenomena on high response heat insulation coatings by instantaneous heat flux measurement and boundary layer visualization, SAE Paper, No. 2015-01-1996 (2015).
- Assanis, D.A. and Badillo, E., Transient heat conduction in low-heat-rejection engine combustion chambers, SAE Paper, No. 870156 (1987).
- Craft, T.J. Launder, B.E. and Suga, K., Prediction of turbulent transitional phenomena with a nonlinear eddy-viscosity model, *International Journal of Heat and Fluid Flow*, Vol.18, No.1 (1997), pp.15-28.
- Fujimoto, H., Yamamoto, H., Fujimoto, M. and Yamashita, H., A study on improvement of indicated thermal efficiency of ICE using high compression ratio and reduction of cooling loss, SAE Paper, No. 2011-01-1872 (2011).
- Fukui, K., Wakisaka, Y., Nishikawa, K., Hattori, Y., Kosaka, H. and Kawaguchi, A., High response surface temperature measurement by laser-induced phosphorescence: application to a wall temperature swing heat insulation coat, *Transactions of Society of Automotive Engineers of Japan*, Vol.47, No.1 (2016), pp.61-66, (in Japanese).
- Fuyuto, T., Kronmayer, H., Lewerich, B., Koban, W., Akihama, K. and Schulz, C., Laser-based temperature imaging close to surfaces with toluene and NO-LIF, *Journal of Physics, Conference Series* 45 (2006), pp. 69–76.
- Han, Z. and Reitz, R.D., A temperature wall function formulation for variable-density turbulent flows with application to engine convective heat transfer modeling, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol.40, No.3 (1997), pp.613-625.
- Harada, Y., Uchida, K., Tanaka, T., Sato, K., Qianjin, Z., Fujimoto, H., Yamashita, H. and Tanahashi, M., Wall heat transfer of undeveloped turbulent flow in internal combustion engines, COMODIA2017 (2017), A204.
- Huh, K.Y., Chang, I.P. and Martin, J.K., A comparison of boundary layer treatments for heat transfer in IC engines, SAE Paper, No.900252 (1990).
- Jainski, C., Lu, L., Dreizler, A. and Sick, V., High-speed micro particle image velocimetry studies of boundary-layer flows in a direct-injection engine, *International Journal of Engine Research*, Vol.14, No.3 (2012), pp. 247-259.
- Kawaguchi, A., Tateno, M., Yamashita, H., Iguma, H., Yamashita, A., Takada, N., Yamashita, C., Koishiyama, N. and Wakisaka, Y., Heat insulation by "temperature swing" in combustion chamber walls (third report) application for multi cylinder turbo charged direct injection diesel engines, *Transactions of Society of Automotive engineers of Japan*, Vol.47, No.1 (2016), pp.47-54, (in Japanese).
- Kobori, S. and Ohmori, T., Measurements of temperature distribution in thermal boundary layer and quenching distance at combustion chamber of internal combustion engine, *Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series B*, Vol.77, No.784 (2011), pp. 250-259, (in Japanese).
- Kondo, Y., Minamoto, Y., Harada, Y., Shimura, M. and Tanahashi, M., Flame-wall interaction of n-heptane-air combustion in a HCCI configuration, Tenth Mediterranean Combustion Symposium (2017).
- Kosaka, H., Wakisaka, Y., Nomura, Y., Hotta, Y., Koike, M., Nakakita, K. and Kawaguchi, A., Concept of "temperature swing heat insulation" in combustion chamber walls and appropriate thermo-physical properties for heat insulation coat, SAE Paper, No. 2013-01-0274 (2013).
- Launder, B.E. and Spalding, D.B., The numerical computation of turbulent flows, *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, Vol.3 (1974), pp.269-289.
- Launder, B.E. and Sharma, B.I., Application of the energy dissipation model of turbulence to the calculation of flow near a spinning disc, *Letters in Heat and Mass Transfer*, Vol. 1, No. 2 (1974), pp. 131-138.

- Harada, Tanaka, Nakao, Fukube, Aoki and Yamashita, Transactions of the JSME (in Japanese), Vol.84, No.858 (2018)
- Nakao, Y., Aoki, O., Kiyosue, R., Harada, Y., Kadoshima, S. and Koike, Y., Technology of instantaneous heat flux measurement on a high response heat insulation coating, Mazda Technical Review, No.32 (2015), pp. 222-227 (in Japanese).
- Nijeweme, D., Kok, J., Stone, C. and Wyszynski, L., Unsteady in-cylinder heat transfer in a spark ignition engine, experiments and modeling, Proceedings of Institution of Mechanical Engineers, Part D, Journal of Automotive Engineering, Vol.215 (2001), pp.747-760.
- Nishikawa, N., Takagishi, R., Shimizu, F. and Horie, T., Heat insulation by "temperature swing" in combustion chamber walls (fourth report) film for temperature swing heat insulation, Transactions of Society of Automotive engineers of Japan, Vol.47, No.1 (2016), pp.55-60, (in Japanese).
- Nishioka, M., A new method for estimating friction velocity in turbulent boundary layers, NAGARE, Vol.34, No.6 (2015), pp.397-402, (in Japanese).
- Pope, S.B., Turbulent flows, Cambridge University Press (2000).
- Rakopoulos, C.D., Kosmadakis, G.M. and Pariotis, E.G., Critical evaluation of current heat transfer models used in CFD in-cylinder engine simulations and establishment of a comprehensive wall-function formulation, Applied Energy, Vol.87, No.5 (2010), pp.1612-1630.
- Shimura, M., Yoshida, S., Minamoto, Y., Yokomori, T., Iwamoto, K., Tanahashi, M. and Kosaka, H., Micro PIV investigation of near wall behaviors of tumble enhanced flow in an IC engine, COMODIA2017 (2017), A205.
- Tanaka, T., Harada, Y., Fukube, T., Yamashita, H. and Yamamoto, T., The influence of high-response heat insulation wall surface on the velocity boundary layer phenomena, Mazda Technical Review, No.33 (2016), pp.100-105 (in Japanese).
- Wakisaka, Y., Inayoshi, M., Fukui, K., Kosaka, H. and Hotta, Y., A. Kawaguchi, Heat insulation by "temperature swing" in combustion chamber walls -2nd report: basic research of heat insulation applied to a single cylinder DI diesel engine-, Transactions of Society of Automotive Engineers of Japan, Vol.47, No.1 (2016), pp.39-46, (in Japanese).
- Wang, Z., Wang, Y. and Reitz, R.D., Pressure oscillation and chemical kinetics coupling during knock processes in gasoline engine combustion, Energy Fuels, Vol.26, No.12 (2012), pp. 7107-7119.
- Yamashita, H., Fujimoto, H., Fujimoto, M., Tanaka, T. and Yamamoto, H., Thermal efficiency improvement by increasing compression ratio and reducing cooling loss, COMODIA 2012 (2012), pp. 36-42.
- Yenerdag, B., Minamoto, Y., Aoki, K., Shimura, M., Nada, Y. and Tanahashi, M., Flame-wall interactions of lean premixed flames under elevated, rising pressure conditions, Fuel, Vol.189 (2017), pp.8-14.