

論文・解説

18

高応答遮熱壁面が速度境界層内現象に及ぼす影響 The influence of high-response heat insulation wall surface on the velocity boundary layer phenomena

田中 達也*¹ 原田 雄司*² 中尾 裕典*³
Tatsuya Tanaka Yuji Harada Yusuke Nakao
服平 次男*⁴ 山下 洋幸*⁵ 山本 寿英*⁶
Tsugio Fukube Hiroyuki Yamashita Toshihide Yamamoto

要 約

エンジンの熱効率向上が強く求められており、その向上策の一つとして、低熱伝導・低比熱の遮熱材を燃焼室壁へ塗布することで、壁温がガス温に追従して振幅し、冷却損失低減により熱効率の向上を図る方法が期待されている。ここでは遮熱材を最適化し、冷却損失の低減を最大化することを目指して、遮熱壁近傍の熱流体現象に起因する伝熱メカニズムを明らかにすることを目的としており、本報では、二次元流速計測法と薄膜積層熱電対を急速圧縮膨張装置に適用し、遮熱材を塗布した壁近傍の境界層内のガス速度と遮熱壁面温度を計測することで、各種乱流特性値が伝熱メカニズムへ及ぼす影響について明らかにした。

Summary

Improvement of thermal efficiency is strongly required for automotive engines. To reduce heat loss, heat insulation coating of low heat conductivity and capacity to combustion chamber walls is proved to be effective. To optimize the specifications of the heat insulation coating, it is necessary to find the heat transfer mechanism between gas and the wall surfaces as well as the wall temperatures. For that purpose, the heat loss process originated in thermal fluid near the wall was investigated. To clarify the effects of turbulent characteristics on heat transfer mechanism, a micro-particle image velocimetry method and a thin film thermocouple were applied to a rapid compression and expansion machine, and the gas velocity in the boundary layer near the heat insulated wall and the wall temperature were measured.

1. はじめに

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。その内燃機関の熱効率向上策の一つとして、低熱伝導かつ低比熱の遮熱材を燃焼室壁へ塗布することで、壁温がガス温に追従して振幅し、冷却損失低減により熱効率の向上が期待できる方法^{(1)~(6)}が知られている。そこでは、遮熱壁近傍の熱流体現象に起因する伝熱メカニズムを明らかにすることで、遮熱材の仕様を最適化し、冷却損失の低減を最大化する必要がある。

壁近傍の熱流体現象に関しては、トルエンのレーザー誘起蛍光法により加熱壁上での境界層内温度分布の詳細な計測を行った例⁽⁷⁾や、抵抗線温度計を用いて急速圧縮膨張装置の燃焼室壁近傍のガス温度を直接測定した研究⁽⁸⁾がある。しかしながら、遮熱壁近傍の伝熱メカニズムにおいて重要

になるのは、ガスと壁間の界面（壁面）の温度とその界面に対して熱エネルギーを輸送する流動の状態であり、ガス温度の情報だけでは不十分である。遮熱壁の壁面温度に関しては、薄膜積層熱電対によって遮熱材を塗布した急速圧縮膨張装置の燃焼室壁の表面温度の計測および熱流束の算出を行った研究^{(9),(10)}や、燐光体寿命法による可視化ディーゼルエンジン内のピストン遮熱壁の表面温度の計測を行った報告⁽¹¹⁾がある。薄膜積層熱電対は熱電対の熱容量を低減することで、遮熱材の温度振幅に追従した高応答計測ができるが、燐光体寿命法は、燐光体の塗布厚さおよび燐光体温度と遮熱材温度の関係が明確になっておらず定量的な壁温計測には更なる研究が必要である。一方、壁近傍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、壁から $50\mu\text{m}$ レベルの分解能でガス速度の計測を行った例⁽¹²⁾があるが、ガス速度分布を壁関数⁽¹³⁾の校正に適用するに留まり、壁近傍の乱流特性量と伝熱メカニズムと

*1~6 技術研究所
Technical Research Center

の関係については踏み込んでいない。

本研究では、非接触な高速 μ PIV計測法と薄膜積層熱電対を急速圧縮膨張装置 (Rapid Compression and Expansion Machine 以下“RCEM”) に適用し、遮熱材を塗布した壁 (以下“遮熱壁”) 近傍の境界層内のガス速度と遮熱壁の表面温度の計測を行い、各種乱流特性値が伝熱メカニズムへ及ぼす影響について調査を行った。

2. 実験装置および実験解析手法

2.1 急速圧縮膨張装置

本研究で用いたRCEMは、エンジンと比較して構造が単純であるために内部の現象可視化が行いやすいこと、一回のみの圧縮膨張しか行わないために耐久性の低い新材料であっても評価が行えることなどの特徴をもつ。

Fig. 1にRCEMの全体図を示す。また、Table 1にRCEMの諸元及び実験条件を示す。

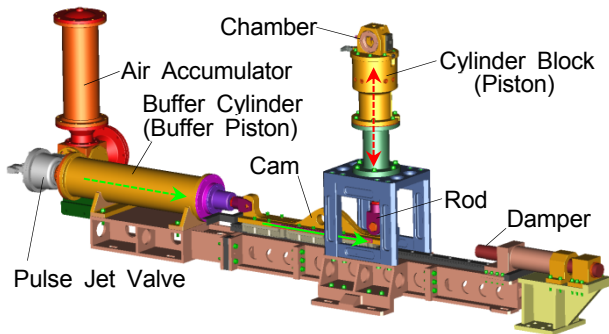


Fig. 1 Overview of Rapid Compression and Expansion Machine (RCEM)

Table 1 RCEM Specifications and Experimental Conditions

Bore x Stroke	89mm x 95mm
Compression Ratio	14.2:1
Compression / Expansion Time	98ms / 132ms
Infill Gas	Dry Air
Initial Gas Temperature	298K
Initial Wall Temperature	298K
Initial Gas Pressure	Atmospheric Pressure

RCEMは、主に空気蓄圧室、緩衝シリンダー、カム、ピストン・ロッド、シリンダーブロック、チャンバー、ダンパーから構成される。任意のタイミングでパルスジェットバルブ (CKD製 PDV3-80A) を開放することで、空気蓄圧室内の加圧された空気が緩衝シリンダー内に流入し、緩衝シリンダー内の緩衝ピストンを図の右方向に押す。緩衝シリンダー内の緩衝ピストンに連結されたカムが移動することで、このカムの形状に沿ってロッドに連結されたシ

リンダーブロック内のピストンが上昇下降し、チャンバー内の空気を加減圧する。ピストンが下死点の時点でフォトセンサーの信号をデジタルディレイパルスジェネレーター (Stanford Research製 DG645) に取り込み、この出力信号を計測用トリガー信号として、レーザー、高速度ビデオカメラおよびデータ記録用のADコンバーター等を同期させた。

Fig. 2にRCEMのチャンバー内の概略図を示す。

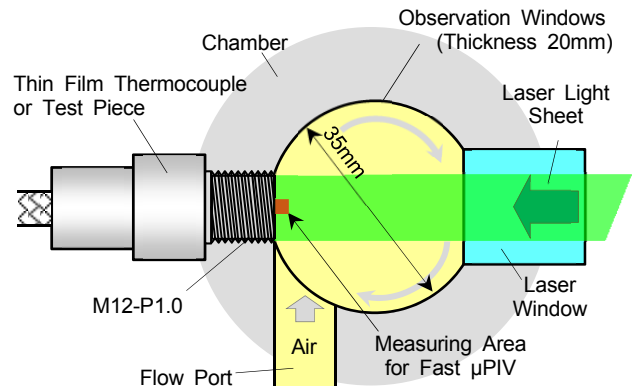


Fig. 2 Schematic of RCEM Chamber

チャンバーは、直径が約35mm、厚さが17mmの縦型の円筒形状である。ピストン上昇によって圧縮された空気が、フローポートを通してチャンバー内の平板部において壁乱流を形成するようにした。平板部にはM12の雌ネジを設置して、薄膜積層熱電対^{(9),(10)}、遮熱材付テストピース等の取り付けを可能とした。高速 μ PIV計測は、テストピースの表面の中央位置において実施した。レーザーシート光は、薄膜積層熱電対あるいはテストピースと対向した位置に設置したレーザー窓を介して入射した。チャンバー両側には、厚さ20mmのサファイアガラスの観察窓を取り付けている。他にチャンバーには、圧力変換器 (Kistler製 Type6125) を設置し、チャンバー内の平均ガス圧力の計測を行った。

Fig. 3に、Table 1の条件においてRCEMを動作させた時のチャンバー内の平均ガス圧力 P と平均ガス温度 T_g のカムの移動量 L_{cam} に対する履歴を示す。

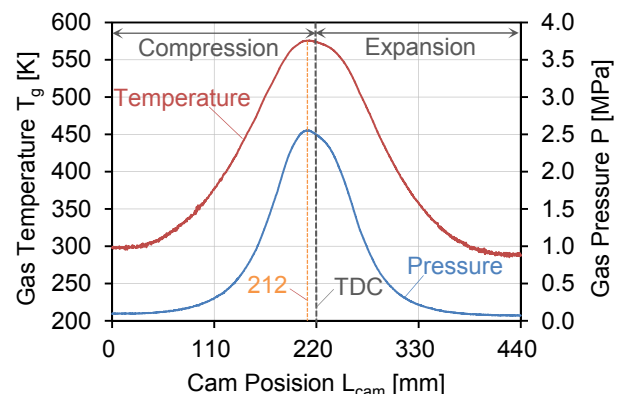


Fig. 3 In-Chamber Pressure and Temperature Traces

平均ガス温度 T_G は、圧力変換器から得られたチャンパー内の平均ガス圧力 P から気体の状態方程式により算出した。ピストンが $L_{cam} = 0$ (下死点) から圧縮を開始して、 $L_{cam} = 212mm$ において最高圧力2.55MPa、最高温度576Kに達する。その後、ピストンは $L_{cam} = 220mm$ において上死点 (TDC) に到達し、 $L_{cam} = 440mm$ において再び下死点に戻る。

2.2 高速 μ PIV計測システム

Fig. 4に、遮熱壁近傍のガス速度分布計測のための高速 μ PIV計測システムを示す。光源である532nmの発振波長をもつダブルパルス・半導体励起Nd:YAGレーザー (Lee Lasers製 LDP-100MQG) のレーザー光をシート状にして10kHzの繰り返し周波数でチャンパー内に導入した。計測エリア内の所定の流速範囲に対応できるように二つのパルス間の時間差を7 μ sとした。トレーサー粒子からの側方散乱光を明視野用対物レンズ (ミットヨ製 M Plan Apo 5 \times) を通して、高速度ビデオカメラ (フォトロン製 FASTCAM SA-X2) によって、壁から約3mmまでのエリア内において毎秒20,000フレームで撮影を行った。

トレーサー粒子には、多孔質中空シリカ粒子 (鈴木油脂工業製 ゴッドボールB-6C) を用いた。この粒子は、平均粒子径が2.0~2.5 μ m、かさ密度が180~450kg/m³と微小かつ軽量である。トレーサー粒子は、所定量をあらかじめRCEMのピストン頂部にセットした。

Fig. 5に、本計測システムで撮影したトレーサー粒子の典型的な散乱光画像を示す。レーザーシートの反射光が観察されている部分がチャンパーの壁位置に相当する。図より、壁の極近傍においてもトレーサー粒子が良く補足されている様子が分かる。このようにして得られたトレーサー粒子の散乱光画像に対して、汎用PIV解析プログラム (西華デジタルイメージ製 Koncerto II) を使い、 x 方向および y 方向の瞬時速度 u および v の分布を算出した。この時の検査領域のサイズは、縦24pixel \times 横16pixel、検査領域のオーバーラップは縦66% \times 横50%とした。

変動速度 u' および v' は、式(1)に示すように、 μ PIV計測による瞬時速度 u および v とカットオフ周波数以下の低周波速度成分である平均速度 U および V の各差分として定義した。ここでカットオフ周波数は、速度エネルギースペクトルが変曲点を示す周波数⁽¹⁴⁾である150Hzとした。

$$u' = u - U, \quad v' = v - V \quad (1)$$

壁面せん断応力のうちで乱流寄与項に相当するレイノルズ応力 $\overline{u'v'}$ は、式(1)を用いて以下の式(2)のように表せる。

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

N は平均区間内データ数であり、ここでは $N = 30$ である。また、乱流エネルギー k は、次の式(3)により算出した。

$$k = \overline{u'^2} + \overline{v'^2} \quad (3)$$

ここで、 $\overline{u'^2}$ および $\overline{v'^2}$ は、次の式(4)、式(5)でそれぞれ表すことができる。

$$\overline{u'^2} = \frac{1}{N} \sum \frac{1}{2} (u - U)^2 \quad (4)$$

$$\overline{v'^2} = \frac{1}{N} \sum \frac{1}{2} (v - V)^2 \quad (5)$$

以上の解析処理に当たっては、市販の数値解析ソフトウェア (MathWorks製 MATLAB) を使用した。

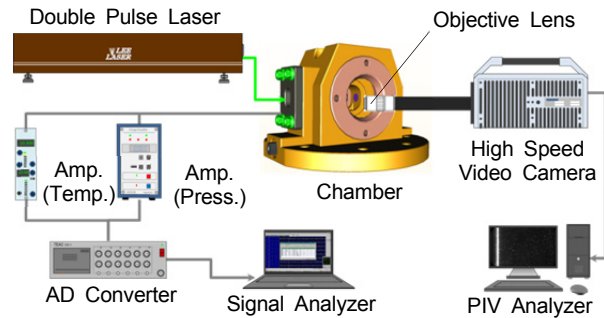


Fig. 4 Schematic Diagram of Fast Micro-PIV Measuring System

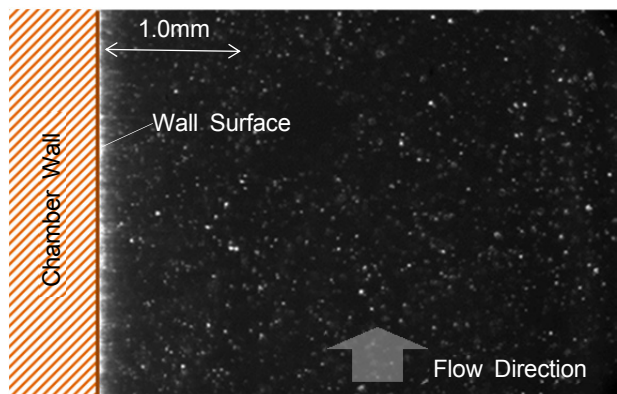


Fig. 5 Typical Scattering Light Image from Silica Particles

3. 実験結果および考察

3.1 遮熱壁における壁温計測結果

Fig. 6に、薄膜積層熱電対による壁温計測結果を示す。圧縮上死点である $L_{cam} = 220mm$ の位置では、金属壁の場合の壁温が303Kまでしか上昇していないのに対して、遮熱壁の場合の壁温が353Kとなっており、遮熱壁の場合が金属壁に対して50Kほど高い壁温上昇を示している。これは遮熱材が持つ低熱伝導かつ低比熱の効果が現れたためであり、この壁温上昇分だけ平均ガス温度との差が縮小するために熱損失の低減に有利であるといえる。

Fig. 7に壁温計測結果から求めた熱流束の算出結果を示す。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の完全陰解法に離散化方程式解法を用いて算出

した。熱流束は、遮熱壁および金属壁の双方で、圧縮上死点前付近でピークを取り、その後、膨張にともなって減少する。圧縮上死点前付近で熱流束がピークをとるのは、対流熱伝達に強い影響を及ぼすピストン速度の影響が強いと思われる。遮熱壁と金属壁の熱流束の値に最も差が生じているのは、 L_{cam} が198mm付近である。この時、遮熱壁の場合の熱流束が0.13MW/m²、金属壁の場合が0.23MW/m²となっており、遮熱壁の場合は金属壁の場合の約56%の熱流束に留まっている。以降の高速 μ PIV計測では、遮熱壁と金属壁の間で熱流束値に最も差が生じる $L_{cam} = 198mm$ における流れの現象について説明を行う。

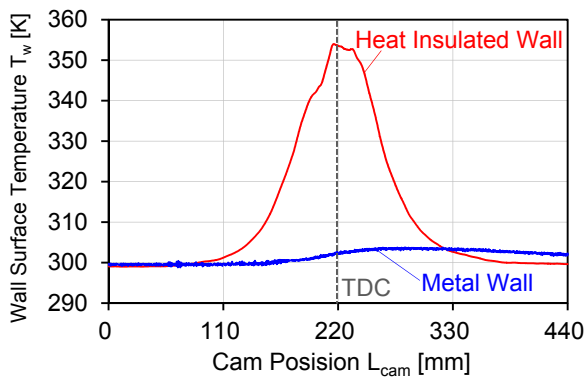


Fig. 6 Wall Surface Temperature via Thin Film Layered Thermocouple

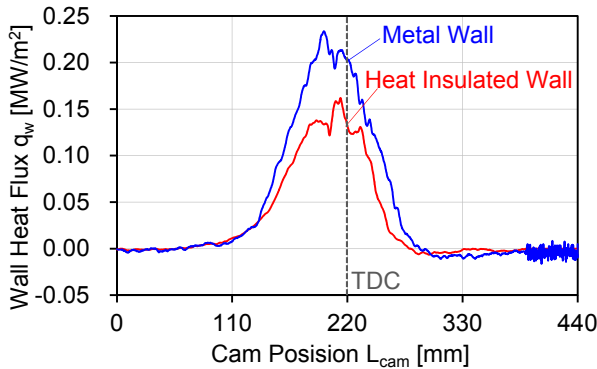


Fig. 7 Wall Heat Flux Calculated from Wall Surface Temperature

3.2 遮熱壁近傍の流動場の計測結果

(1) 遮熱壁近傍の乱流境界層

Fig. 8に高速 μ PIV計測システムにより得られた、 $L_{cam} = 198mm$ における遮熱壁近傍の一次元ガス速度分布を示す。壁に近づくにつれて速度の急激な降下が見られる。この速度の降下領域は、速度境界層に相当するものであり、本計測システムによって、壁近傍の境界層内の速度分布を十分に捉えられていることが分かる。

Fig. 9に、Fig. 8のガス速度を摩擦速度で無次元化した一次元ガス速度 u^+ の分布を示す。横軸は、摩擦速度と動

粘性係数によって無次元化した距離 y^+ に変換している。壁から $y^+ = 5$ 付近までは、 $u^+ = y^+$ の線形関係が成立する粘性低層に相当し、 $y^+ = 5$ 付近から $y^+ = 30$ 付近までは対数則をとる遷移的なバッファ域、 $y^+ = 30$ 以降は乱流域であるといわれている⁽¹⁵⁾。今回の計測では、 $y^+ = 10$ 以降のデータしか得られていないものの、典型的な壁乱流境界層内の現象を示していることが分かった。

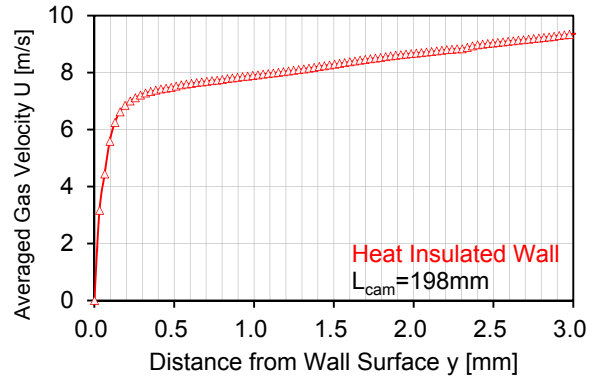


Fig. 8 Averaged Gas Velocity Distribution near Heat Insulated Wall ($L_{cam}=198mm$)

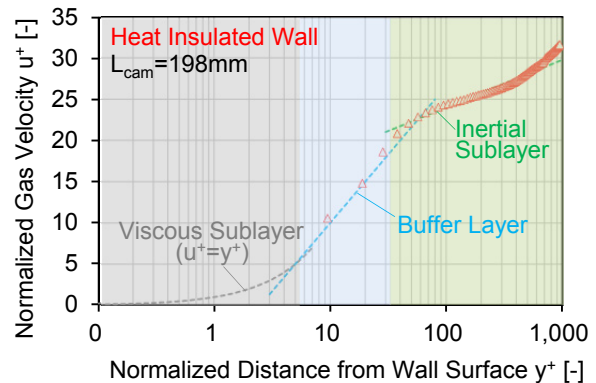


Fig. 9 Normalized Gas Velocity Distribution near Heat Insulated Wall ($L_{cam}=198mm$)

Fig. 10に壁近傍の境界層内におけるガスの流動状態を可視化した結果を示す。あわせて壁近傍を更に拡大した結果も示す。計測には μ シャドウグラフ法を用いた。計測点は、高速 μ PIV計測の場合と同じく、 $L_{cam} = 198mm$ である。これから、複数の筋状の模様（密度の二回微分値）が壁の極近傍まで分布している様子が見取れる。このような筋構造は、低速および高速域の流れが筋状に並んだ乱流渦の微細構造によるものであり、このことは、壁近傍では乱流の影響が無視できるとしていた従来の考え方に対して、乱流によるエネルギー輸送の観点で壁近傍の伝熱メカニズムの考察を行う必要性を示唆している。

(2) 遮熱壁近傍の乱流エネルギー分布

Fig. 11に、 $L_{cam} = 198mm$ における無次元化した乱流エネルギー k^+ の壁からの分布を示す。無次元化した乱流エ

エネルギーは、壁近傍の粘性の影響を排除して乱流起因の乱れの影響について考察するために、式(3)に示す乱流エネルギーを摩擦速度の二乗で除したものである。遮熱壁の場合の k^+ は、金属壁の場合のそれと比較して、粘性低層外縁部からバッファ域、乱流域にかけてその値が低いことが分かる。加熱壁上における壁乱流境界層の実験結果⁽¹⁶⁾、⁽¹⁷⁾では、壁温度の上昇によって周囲の流体の密度の減少と動粘性係数の増加が同時に起こるが、密度の減少は速度の乱れ強さを増加させる方向に働き、逆に動粘性係数の増加は乱れ強さを減少させる要因として働くとしている。したがって、遮熱壁の近傍で無次元化した乱流エネルギーが減少したことから、壁温度の上昇に伴う壁近傍のガス密度の低下よりも動粘性係数の増加の寄与が大きいことが推察される。

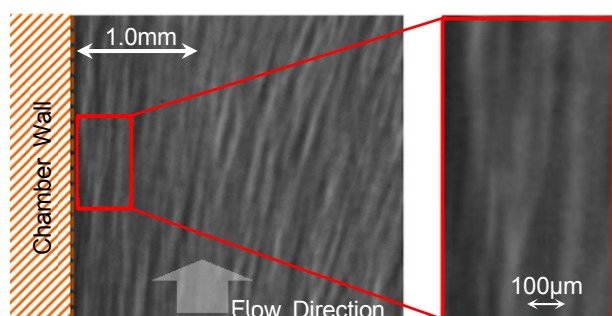


Fig. 10 Micro Shadowgraph Image near Wall

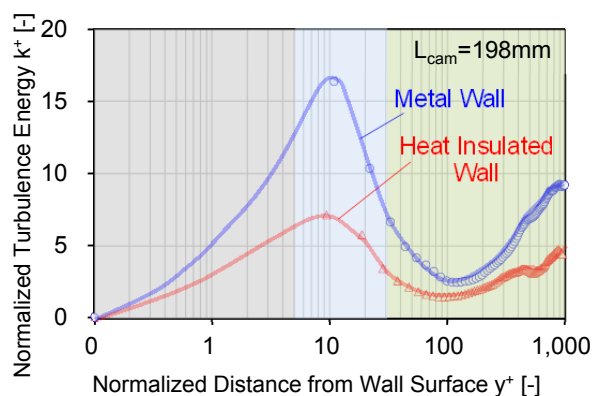


Fig. 11 Normalized Turbulence Energy Distribution near Wall ($L_{cam}=198mm$)

(3) 遮熱壁近傍のレイノルズ応力分布

前項において、壁近傍の境界層内においても乱れの影響があること、そして遮熱壁の場合は壁近傍の乱流エネルギー k^+ が抑制されることを示した。最終的にガスから壁へ熱が伝わる際には、ガスと壁の界面に生じる壁面せん断応力が重要な因子となる⁽¹⁸⁾。壁面せん断応力は、層流寄与項と乱流寄与項から構成され、乱流寄与項に相当するのが、式(2)に示すレイノルズ応力である。レイノルズ応力は、壁からの距離の重みづけ積分により、壁面せん断応力への寄与を表すことができる⁽¹⁹⁾。

Fig. 12に、 $L_{cam} = 198mm$ におけるレイノルズ応力の壁からの分布を示す。これから、粘性低層外縁部からバッファ域にかけては、遮熱壁及び金属壁とではレイノルズ応力に差は見られないが、乱流域では遮熱壁の場合が金属壁に比較して低い値を示している。粘性低層からバッファ域にかけては、壁の摩擦の影響が強いため粘性によるせん断応力の影響が支配的となり、遮熱壁と金属壁の双方でレイノルズ応力に差が現れなかったものと思われる。しかしながら乱流域に入ったところから、粘性によるせん断応力の影響が相対的に低下するため、乱流起因のレイノルズ応力分布に差が出たものと思われる。前述のように、レイノルズ応力は壁からの距離の重みづけ積分により壁面せん断応力へ寄与するために、遮熱壁上の壁面せん断応力は金属壁上のそれに対して低下すると推測される。その結果、遮熱壁の場合は金属壁に比較して熱伝達率が低下し、壁温上昇も付加されることで熱流束が低減されたと考えられる。

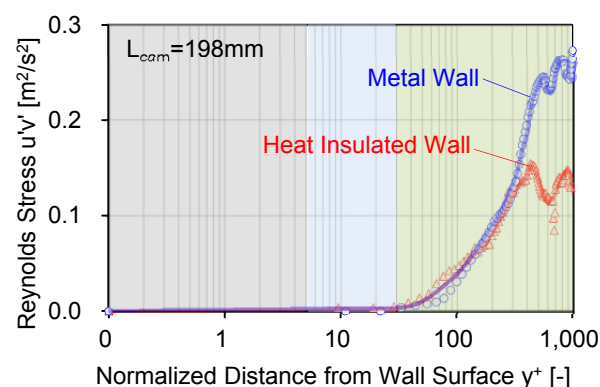


Fig. 12 Reynolds Stress Distribution near Wall ($L_{cam}=198mm$)

4. おわりに

遮熱壁近傍の境界層内のガス速度の計測を行い、ガス速度から各種乱流特性値の算出を行うことで遮熱壁近傍の乱流構造が伝熱プロセスへ及ぼす影響について調査した。以下に得られた結果をまとめる。

- (1) 高速 μ PIV計測法により、壁近傍の粘性低層外縁からバッファ層、乱流層におけるガス速度分布の計測が可能となった。
- (2) 固体摩擦の影響が強い壁近傍でも微細な乱流構造が見られ、乱流起因の伝熱プロセスを検討する必要がある。
- (3) 遮熱壁の近傍では、遮熱効果による壁温度の上昇に伴って壁近傍のガス温度が上昇し、壁近傍のガスの密度の低下よりも動粘性係数の増加の寄与が大きくなることで壁近傍の乱流エネルギーが低下する。
- (4) 金属壁に対する遮熱壁近傍の乱流エネルギーの低下

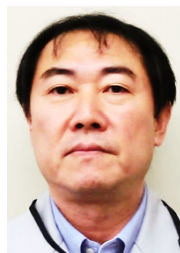
分は、乱流域のレイノルズ応力分布の低下に起因する。この結果、遮熱壁近傍の壁面せん断応力が減少することで熱流束が低減される。

最後に、本研究で使用したRCEMの設計製作および運用では、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。また本研究の一部は、2012年～2015年に新エネルギー・産業技術総合開発機構の支援を受け、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。ここに記して謝意を表す。

参考文献

- (1) D. A. Assanis et al.: Transient Heat Conduction in Low-Heat-Rejection Engine Combustion Chambers”, SAE Paper, No. 870156 (1987)
- (2) H. Yamashita et al.: Thermal Efficiency Improvement by Increasing Compression Ratio and Reducing Cooling Loss”, COMODIA 2012, pp.36-42. (2012)
- (3) H. Kosaka et al.: 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)
- (4) 脇坂ほか：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，自動車技術会春季大会学術講演会講演予稿集，No. 20155027, pp.154-159 (2015)
- (5) 川口ほか：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，自動車技術会春季大会学術講演会講演予稿集，No. 20155028, pp.160-165 (2015)
- (6) 西川ほか：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，自動車技術会春季大会学術講演会講演予稿集，No. 20155029, pp.166-171 (2015)
- (7) T. Fuyuto et al.: Laser-based temperature imaging close to surfaces with toluene and NO-LIF, Journal of Physics, Conference Series 45, pp.69-76 (2006)
- (8) 小堀ほか：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)，77巻 784号，pp. 250-259 (2011)
- (9) 中尾ほか：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, pp. 222-227 (2015)
- (10) O. Aoki et al.: 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)
- (11) 福井ほか：レーザー誘起燐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，自動車技術会春季大会学術講演会講演予稿集，No. 20155232, pp.1195-1200 (2015)
- (12) C. Jainski et al.: High-speed micro particle image velocimetry studies of boundary-layer flows in a direct-injection engine, International Journal of Engine Research, 14 (3), pp. 247-259 (2012)
- (13) B. E. Launder et al.: The numerical computation of turbulent flows, Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, Vol. 3, Issue 2, pp. 269-289 (1974)
- (14) 大倉ほか：高速 PIV によるエンジン燃焼室内の乱流計測，日本機械学会論文集 (B編)，79巻 806号 pp. 2193-2206 (2013)
- (15) 笠木ほか：乱流工学ハンドブック，朝倉書店，pp. 193-194 (2009)
- (16) 松島ほか：高熱負荷を受ける平板乱流境界層の構造，日本機械学会論文集 (B編)，49巻 439号，pp. 646-655 (1983)
- (17) 繁富ほか：平板上に発達する温度境界層内の乱れの挙動および乱流プラントル数，日本機械学会論文集，39巻 323号，pp. 2137-2150 (1973)
- (18) 斎藤ほか：例題演習 伝熱工学，産業図書 (1985)
- (19) K. Fukagata et al.: Contribution of Reynolds stress distribution to the skin friction in wall-bounded flows, Physics of Fluids, vol.14, L73-76 (2002)

■ 著 者 ■



田中 達也



原田 雄司



中尾 裕典



服平 次男



山下 洋幸



山本 寿英