論文・報告

高速度赤外線カメラを用いたディーゼルエンジンピストン表面の時系列温度分布計測

Infrared High-Speed Thermography of Piston Surface on Diesel Engine

宮下　和也*　古川　伸哉*　石井　義範*　小澤　恒*
Kazuya Miyashita　Shinya Furukawa　Yoshinori Ishii　Hisashi Ozawa

要　旨

燃焼CFDでは、各現象を表現したモデルを組み合わせることによりシリンダ内の燃焼を再現している。しかし、その再現性には課題があり、特に壁面熱損失の精度検証が必要である。本報では、高速度赤外線カメラを用いてピストン表面の赤外放射を直接可視化し、検証に必要な実機エンジンにおける時系列壁面温度分布を計測した。

Abstract

Combustion CFD reproduces in-cylinder combustion by combining models representing each phenomenon. However, there are issues with the accuracy of these models, in particular, verification of wall heat loss is necessary. In this study, in order to verify the accuracy of wall heat loss model, measurement of wall surface temperature distribution was attempted in a top-view optical engine. Infrared radiation from the piston surface impinged diesel spray flame was directly visualized by using the high-speed infrared camera. The obtained infrared images showed the potential for high-speed measurement of wall surface temperature distribution.

1　はじめに

地球温暖化防止のため、我が国では2020年に2050年カーボンニュートラル(Carbon Neutral：以下、CN)が宣言されて以降、CN社会の実現に向けた取り組みが加速している。自動車業界においては温室効果ガスの排出削減を目的として電動化車両の導入が考えられるが、電動化のハードルが高い商用車においては、既存の内燃機関と合成燃料の利用によるCN化が重要な技術として位置付けられている。そのため内燃機関の高効率化は地球温暖化防止に対して引き続き重要な課題である。

熱効率を改善するためには壁面熱損失の低減が有効な手段であり、3次元燃焼CFD(Computational Fluid Dynamics)を活用した低熱損失燃焼コンセプトが提案されている[(1)]。一方で3次元燃焼CFDにおける壁面熱損失の予測精度には課題があり、ディーゼル噴霧火炎が壁面に衝突した際の熱伝達の影響を過大評価していることが確認されている[(2)]。そのため、現在も壁面熱伝達の現象把握やモデル化が進められており、熱伝達式[(3)]や壁関数[(4)]の改良による壁面熱損失の予測精度向上を目指した取り組みが行われているが、検証に不可欠な定量的実験データが不足しているのが現状である。壁面熱損失の予測精度を評価するためには、壁面温度や熱流束の実験結果が必要であり、特に温度や速度が時空間的に強く変動するディーゼル噴霧火炎が衝突する壁面の熱伝達現象を評価するためには、時系列分布計測結果が必要となる。

壁面温度及び熱流束計測手法としては、時間分解能及び定量性に優れ、エンジン筒内における計測も比較的容易な熱流束センサ[(5)]が従来より用いられている。しかし、点計測であるために熱損失現象の全容を把握することが困難である。分布計測の例としてはレーザ誘起燐光(りんこう)法、による計測[(6)]が挙げられるが、複雑な光学系を必要とするため、エンジン筒内における計測が困難である。またレーザ出力及び繰り返し周波数の制約により時系列計測は容易ではない。

時空間的に強い変動を伴うディーゼル噴霧火炎衝突壁面の温度及び熱流束分布を評価する計測手法としては金属膜を蒸着したガラス壁面への高速度赤外サーモグラフィの活用が近年注目されている[(7)(8)]。定容容器において噴射圧力、雰囲気酸素濃度、壁面

*(株)いすゞ中央研究所

Copyright© 2026 ISUZU MOTORS LIMITED.
All Rights Reserved. 無断転載・複製・配布禁止

粗さなどを変化させた場合の基礎的な研究が行われており、壁面熱伝達に関する現象把握と予測精度を評価するために必要な実験データの蓄積が進んでいる。しかし、この計測手法はディーゼル噴霧火炎の強烈な輝炎からの赤外放射を遮断するために金属膜を蒸着したガラスを用いて、ガラス背面より金属膜からの赤外放射を可視化する。このため、複雑な形状を有するディーゼルエンジンのピストン表面における計測が困難であり、定容容器またはエンジンヘッド面[9]における平面形状での計測に限られる。基礎的な検証を進めると同時に、ディーゼルエンジンにおいて壁面熱損失の割合が最も大きいピストン表面における熱伝達現象を把握することも重要な課題である。ガソリンエンジンの超希薄燃焼条件においては輝炎の発生が少ないため、金属膜を蒸着していない透明なガラスを用いて壁面からの赤外放射を直接可視化し、ピストン表面の温度分布を計測可能であることが確認されている[10]。ディーゼル噴霧火炎衝突壁面においても輝炎の発生を抑制して、ピストン表面からの赤外放射を直接高速度撮影することができれば、時系列の温度分布計測が可能となる。

そこで本研究では、ディーゼルエンジンのピストン表面における時系列温度分布を計測して、実機エンジンにおける熱伝達現象を把握することを目的とする。本報ではOME(Oxymethylene Dimethyl Ethers)を用いて輝炎の発生を抑制し、ディーゼル噴霧火炎衝突壁面における高速度赤外サーモグラフィの活用を試みた結果について報告する。

2　実験方法

2.1 上方可視化装置及び実験条件

ピストン表面からの赤外放射の可視化にはシリンダヘッド上方から光学アクセス可能な上方可視化装置を用いた。**図1**及び**表1**に可視化装置の概略図とエンジン諸元を示す。本エンジンは油圧駆動可変バルブ機構を搭載した単気筒ディーゼルエンジン[11]であり、各バルブの開弁、閉弁時期及びリフト量は独立かつ任意に制御可能となっている。上方可視化装置においては排気弁1ヶ所を直径36mm、厚さ40mmの可視化用サファイアガラス窓に置き換えている。**図2**に上方可視化装置の可視化領域を示す。ボア径115mmに対して、シリンダヘッドに設置された可視化用窓の有効最大視野径は30mmであり、燃焼室リップ部からスキッシュエリアにかけて可視化することができる。また点線で示すセクタ計算領域を概ねカバーしており、3次元燃焼CFDとの比較も可能である[9]。ピストン表面からの赤外放射は透明なサファイアガラスを通して、高速度赤外線カメラ(Telops製FAST M3k)により12,000fps、128×128pixelで撮影する。今回使用したピストンの材質はアルミ合金で赤外放射率が0.3程度と低く、赤外線カメラで温度変化を捉えられない可能性がある。そのため放射率を増加させることを目的に放射率0.92の塗料を厚さ20μmでピストン表面全体に塗布している。ここで、ピストン表面に形成した塗膜の熱拡散率は100℃で$0.190\times10^{-6}m^2/s$であり、同温度のアルミピストンの熱拡散率$49.2\times10^{-6}m^2/s$に比べて極めて低いため、塗膜付きピストンで計測される壁面温度上昇はアルミピストンに比べて大きくなることに留意する必要がある。塗膜の密着度は計測できていないが、塗膜付きピストンから試験片を切り出し、SEM観察した画像からは塗膜とピストンの間に隙間はなく、空気層は見られなかった。また可視化試験中に塗膜が剥がれることはなかった。

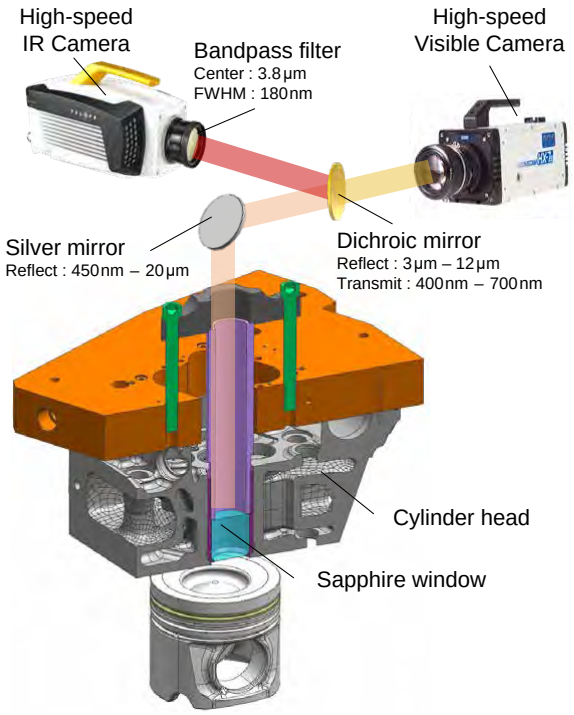


図1　上方可視化装置と赤外及び可視光同時撮影の光学系

表1　エンジン諸元

Engine type	4 stroke 1 cylinder engine
Bore x Stroke	φ115 mm x 125 mm
Displacement	1.298 L
Swirl ratio	1.29
Compression ratio	20
Chamber Shape	Re-entrant
Nozzle	φ0.122 mm x 8 holes
Valve train	Electro-hydraulic variable valve actuation system

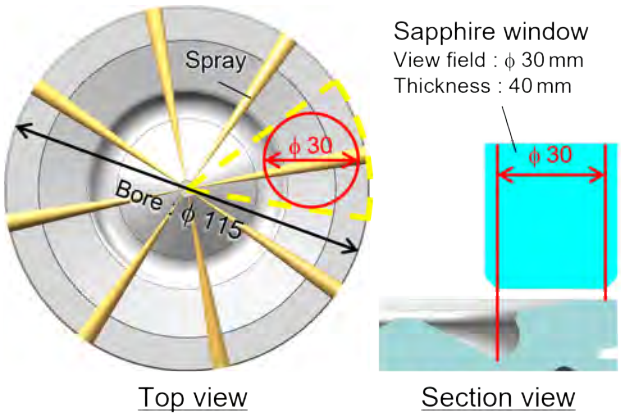


図2　上方可視化装置の視野範囲

表2に試験条件を示す。機関回転数は1,000rpmとして、排気再循環(EGR)及び過給は使用していない。シリンダブロック及びヘッドは温水により80℃に予熱されている。燃料は後述する輝炎の発生を抑制することを目的にOME3、OME4、OME5を主成分とする混合燃料を用いた。燃料噴射量は35.5mm^3/stでプレ噴射及びメイン噴射の2段噴射とした。噴射時期と噴射量は**表2**に示すとおりである。噴射圧力は90MPa、120MPa、150MPaの3段階で変化させて、噴霧火炎衝突時の壁面温度の変化を確認した。ノズル流量及び噴射量一定で噴射圧力を変化させているため、噴射圧力が増加するほど噴射期間が短くなる。可視化試験はモータリングで筒内圧力が安定したあとに20サイクル連続で燃料を噴射して撮影しているが、熱発生率が安定する6サイクル目以降を比較データとして使用している。カメラの露光開始時期はメイン噴射開始指示パルスに同期させており、6サイクル目以降の15サイクル間で撮影画像の平均化が可能である。

表2　実験条件

Fuel	OME
Engine speed	1,000 rpm
Intake pressure	Natural aspiration
EGR rate	0 %
Coolant temperature	80 °C
Injection pressure	90 MPa, 120 MPa, 150 MPa
Injection quantity	Pre : 1.1 mm^3 / st
	Main : 34.4 mm^3 / st
Injection timing	Pre : - 8.3° ATDC
	Main : - 0.5° ATDC

2.2 ピストン表面赤外放射の可視化

エンジン上方から赤外線カメラを用いてエンジン筒内を可視化する場合、撮影される赤外放射画像には① 噴霧火炎が衝突することによって生じるピストン表面からの赤外放射だけでなく、② 噴霧火炎からの赤外放射、③ 周囲ガスからの赤外放射、④ 運転前に温水で予熱されたエンジン全体からの赤外放射、⑤ 噴霧火炎が衝突することによって生じるサファイアガラスからの赤外放射が含まれる。本研究では①を計測対象とし、②～④の影響低減を図るとともに、⑤の影響について評価した。

②については燃料に含酸素燃料であるOMEを用いることで、燃焼によって生じる輝炎を抑制した。また、赤外放射画像中に含まれる輝炎を区別するために**図1**に示すようにダイクロイックミラーを用いて、輝炎を可視光カメラ(ナックイメージテクノロジー製MEMRECAM HX-7S)で同時に撮影した。**表3**にカメラの撮影条件を示す。可視光カメラは露光時間を長くして、OMEの燃焼で発生する極微弱の輝炎発光を観察する。③については赤外線カメラにバンドパスフィルタを取り付けることで除去した。今回使用している高速度赤外線カメラの検出波長帯は3.0μmから5.4μmであり、この帯域においてはCO_2、H_2O、C-H伸縮などによる赤外放射が生じる。これらの赤外放射を除去するために先行研究[12][13]を参考に中心波長3.8μm、半値幅180nmのバンドパスフィルタを選定した。④については運転前の赤外放射画像をバックグラウンドとして撮影画像から差し引いた。ピストンに埋め込んだ熱電対により、運転前のピストン表面温度が水温同等の80℃であること、可視化試験における燃焼前の吸気バルブ閉弁時期のピストン表面温度は80℃で変化がないことをあらかじめ確認している。

これらの撮影方法に対する工夫とバックグラウンド処理により、②～④の赤外放射の影響は低減させることができるが、⑤の影響は除去することができない。そのため撮影された赤外放射画像中に含まれる⑤の割合を先行研究[7]を参考にして推算した。**図3**に25℃におけるアルミピストン、ピストン表面塗膜、サファイアガラスの赤外放射率スペクトルを示す。放射率スペクトルは各材料の透過率と反射率スペクトルを計測し、キルヒホッフの法則より求めた。**図3**よりピストン表面塗膜の放射率はアルミピストンに比べて3倍以上となっており、バンドパスフィルタ透過帯における放射率はサファイアガラスに比べて十分に高いことがわかる。この時、サファイアガラスの表面温度がピストン表面温度と同等まで上昇したと仮定すると、撮影される赤外放射画像中に含ま

れるサファイアガラスからの赤外放射の割合はアルミピストンを用いた場合は32%程度、塗膜付きピストンを用いた場合は8%程度と推算される。これらの検討結果より、噴霧火炎の衝突によるサファイアガラスからの赤外放射の影響は塗膜付きピストンを用いることで最小限に抑制できていることが確認できた。今回使用したサファイアガラスは3.5μm付近から放射率が増加(透過率が低下)しており、撮影された赤外放射画像中に含まれる噴霧火炎が衝突した際のガラス表面からの赤外放射の割合が比較的大きくなっている。この割合を更に低減させ、ピストン表面赤外放射の計測精度を改善させるためには、ガラスの材質の変更が必要である。材質を赤外透過性に優れたフッ化マグネシウムに変更することで、ガラスからの赤外放射の影響は2%以下に低減することが可能である。

表3　撮影条件

	Infrared camera	Visible Camera
Camera	Fast M3k	HX-7S
Frame rate	12,000 fps	12,000 fps
Exp. dur.	3 μs	82 μs
Pixels	128 x 128	384 x 384

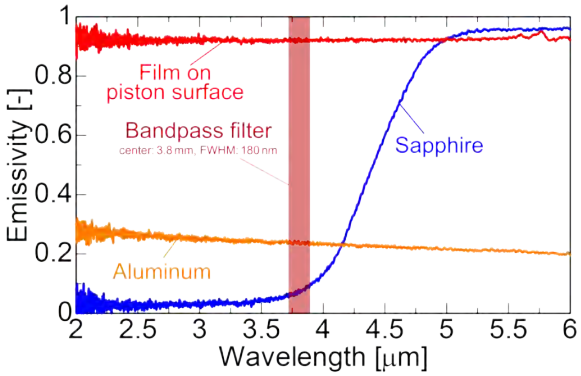


図3　アルミピストン、ピストン表面塗膜、サファイアガラスの赤外放射率スペクトル

2.3 赤外放射強度の温度検定

計測した赤外放射画像を温度画像に変換するため電気炉を用いた検定を実施した[7]。温度検定結果を**図4**に示す。プロットは加熱した塗膜付きピストンを可視化試験と同一の光学系で撮影した場合の赤外放射強度である。実線はプロットに最小2乗法を適用して作成した検定曲線である。赤外放射画像は検定曲線を用いて温度に変換した。

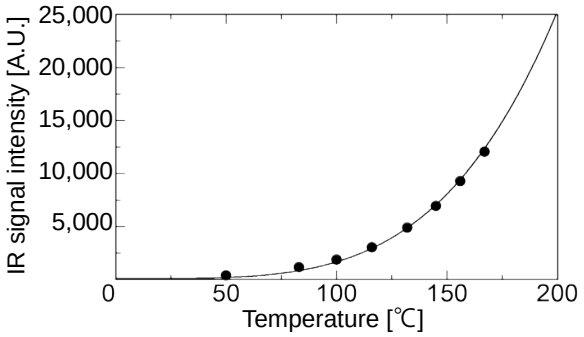


図4　赤外放射強度に対する温度検定結果

3　実験結果

図5に噴射圧力120MPaにおいて赤外及び可視光の同時撮影を実施した結果を示す。上段から順に可視光画像、赤外放射画像、赤外放射画像(赤色)上に可視光画像(緑)を重ね合わせた画像である。なお、**図5**に示した可視光及び赤外放射画像は、6サイクル目以降の結果から代表的なものを選択した。図中の白点線が**図2**に示す可視化視野領域であり、紙面左から右へディーゼル噴霧火炎が通過している様子である。また、黄点線で燃焼室リップ部の位置を示している。**図5**の1段目の可視光画像を見ると、クランク角(以下、CA:) 3.4°ATDC付近から、可視化視野範囲内に極微弱の輝炎が観察され始め、燃焼室リップ部に衝突した噴霧火炎がスキッシュエリアへと流され、CA:12.4°ATDCでは消失している様子が確認できる。CA:9.4°ATDC以降の画像下部から強い発光が観察されるが、可視化試験におけるメイン燃料噴射時期の筒内平均温度は710℃程度と低く、OME燃焼でのすす生成条件[14]を満たしていないと考えられることから、この発光は燃料由来の発光ではなく、潤滑油由来のものと思われる。一方、**図5**の2段目の赤外放射画像を見ると、可視光画像で噴霧火炎が観察され始める時刻と同時刻から赤外放射が観察される。その後、噴霧火炎がピストンに衝突すると、燃焼室リップ部からスキッシュエリアにかけて広い領域で赤外放射が確認できる。**図5**の3段目の赤外放射

画像(赤色)上に可視光画像(緑)を重ね合わせた画像では、赤外放射は可視光画像で噴霧火炎の輝炎が消失するCA: 12.4° ATDC以降においても長い間観察され続けている。更に、可視光画像のCA:9.4° ATDC以降で見られた潤滑油由来の発光は赤外放射画像では観察されない。噴霧火炎存在領域と燃焼室衝突面以外からの赤外放射は観察されず、バンドパスフィルタによりCO_2、H_2Oなどのガス成分からの赤外放射は選択的に除去できていると考えられる。赤外放射画像と可視光画像が異なる挙動を示していることから、同時撮影において赤外放射は存在するが噴霧火炎の輝炎が存在しない領域はピストン表面からの赤外放射と推測され、本手法により輝炎及びガス成分の影響を排除したピストン表面からの赤外放射を観察できることを示唆する結果を得た。

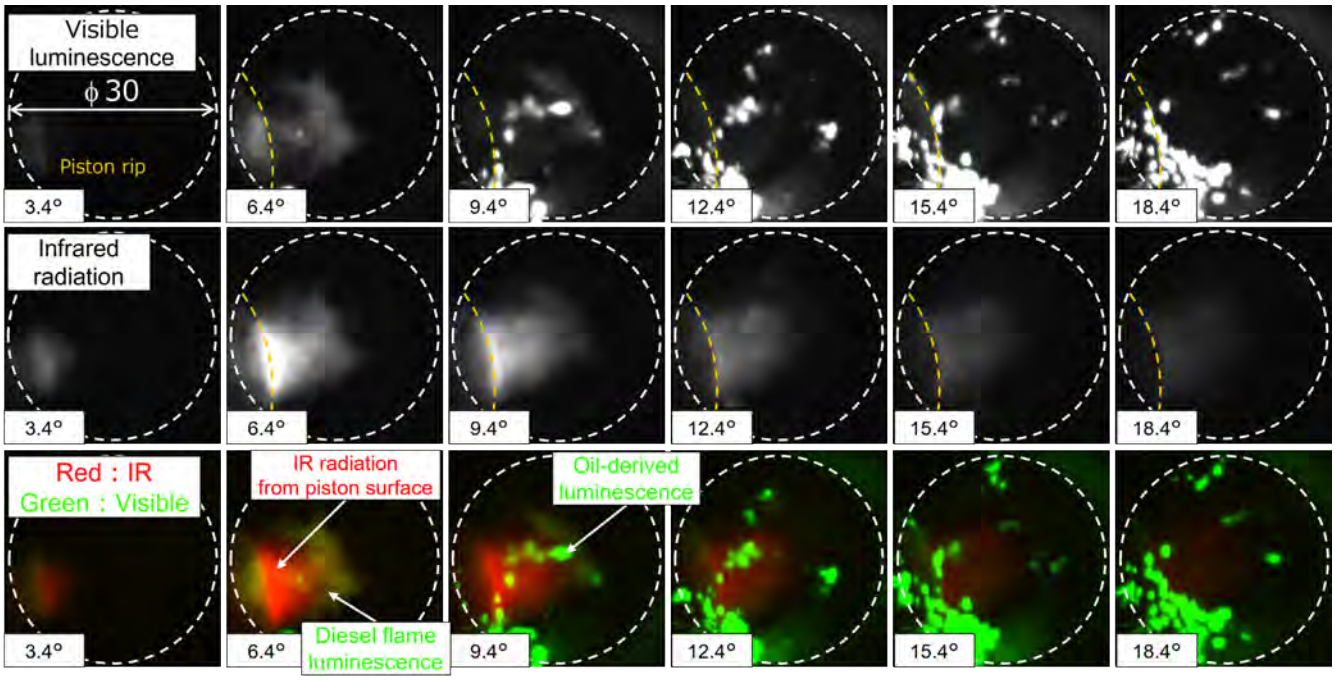


図5　赤外及び可視光の同時撮影結果

図6上段にCA:9.4°ATDCにおける単発及び15発平均した赤外放射画像の拡大図を示す。単発でのピストン表面からの赤外放射は先行研究[7]で見られるような筋状パターンを呈しているが、この筋状パターンは噴霧火炎の衝突により生じた壁面近傍の流体の乱れに起因するものと考えられている。噴霧火炎衝突により見られた筋状パターンが平均した赤外放射画像では観察されないことは、壁面近傍の流体の乱れ成分の影響が小さくなり、平均的な流れの成分が強調されたためと考えられ、上述の推測と整合性がある。**図6下段**に拡大画像中の赤線9mm上の赤外放射強度をプロットして比較した結果を示す。平均画像では線の中央付近で赤外放射が最も高く、左右に広がるにつれて低下しているが、単発画像では平均画像に比べて赤外放射が線上で大きく変化していることが確認できる。単発画像の赤外放射強度の変化を**図4**の検定結果を適用して温度差に変換すると約20℃となっており、先行研究[7]と近い値を示していることが確認できる。

以上の比較より、含酸素燃料を用いて輝炎の発生を抑制すること、可視光カメラとの同時撮影により赤外放射画像中に含まれる輝炎を区別すること、ガス成分の赤外放射をバンドパスフィルタで除去することでディーゼルエンジンの場合でもピストン表面における高速度赤外サーモグラフィの活用が可能であることが示された。

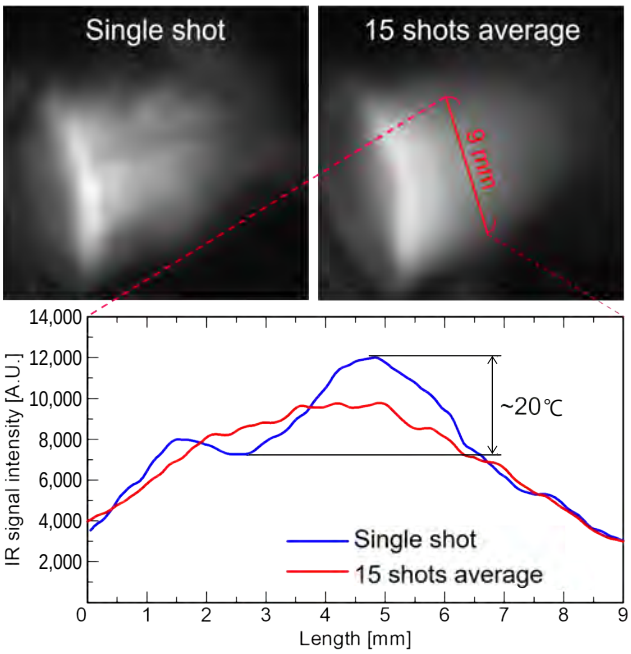


図6　単発及び平均画像の比較

図7に赤外放射の平均画像に**図4**の温度検定結果を適用して作成した壁面温度分布画像を示す。上段から噴射圧力90MPa、120MPa、150MPaの結果である。点線で**図2**に示す可視化視野領域、一点鎖線で噴霧軸を示している。壁面温度は噴霧火炎衝突点の燃焼室リップ部で温度が最も高く、スキッシュエリアに向かうにつれて低下していく分布が鮮明に可視化できている。噴射圧力による差を比較すると、噴射圧力の増加により燃焼室リップ部の温度上昇が観察され始める時期が早くなり、高温領域も増加するが、噴射期間が短くなるために温度が低下し始める時期は早まっていることがわかる。また、どの噴射圧力においても、燃焼室リップ部付近では噴霧軸に対して対称な温度分布となっているのに対して、スキッシュエリアではスワールに流されて、非対称な分布となっていることが確認できる。これらの結果により、運転条件を変化させた場合の温度分布の変化や実機エンジン特有の現象に関しても計測可能であることが示された。一方で、噴霧火炎の衝突によりピストン表面温度は100℃程度上昇しているが、これは従来センサを用いたアルミピストンの表面温度計測結果[5]に比べて温度の変化量が大きい。今回の赤外放射可視化試験ではピストン表面に放射率を増加させるための塗膜を形成しており、熱拡散率がアルミと比べて低くなったことによって、温度スイング幅が大きくなっていると推察される。本計測結果を用いて3次元燃焼CFDの熱損失予測精度を評価する場合には、ピストン表面塗膜の物性値を考慮した評価が必要である。

図8は**図7**に示すピストン温度分布画像の噴霧軸上のスキッシュエリアにおける赤丸径3mm内の平均温度履歴を噴射圧力別に比較した結果である。噴射圧力が増加することによって、ピストン表面温度上昇の開始時期や壁面温度が最大値を迎える時期が進角している様子が定量的に確認できる。一方で、赤外放射可視化試験では温度がピークに達するまでの期間とピーク値から噴霧火炎衝突前のピストン表面温度に戻るまでの期間がアルミピストンの表面温度計測結果[5]に比べて極めて短い。これはピストン表面塗膜の熱物性値と厚みによる影響と考えられるが、塗膜なしアルミピストンでの赤外放射計測ができておらず、詳細把握は今後の課題である。

図7で見られる噴霧火炎衝突点近傍で温度上昇が最大になり、高温領域が拡大する傾向や、**図8**で見られる噴射圧力が増加することで壁面温度上昇が確認され始める時期や最大温度を迎えるクランク角が進角する傾向は従来の熱流束センサによる計測結果[5]や感熱燐光体による温度分布の計測結果[6]、金属膜付きガラスを用いた高速度赤外サーモグラフィの結果[7]と傾向が一致しており、今回の計測結果の妥当性を示すものと考えられる。実機エンジンピストン表面における温度分布の計測例は少なく、高速度赤外サーモグラフィの活用により得られたディーゼルエンジンのピストン表面の時系列温度分布は時空間的に強い変動を伴うディーゼル噴霧火炎衝突壁面の熱損失予測精度を評価するために必要な極めて有用な定量的実験データである。

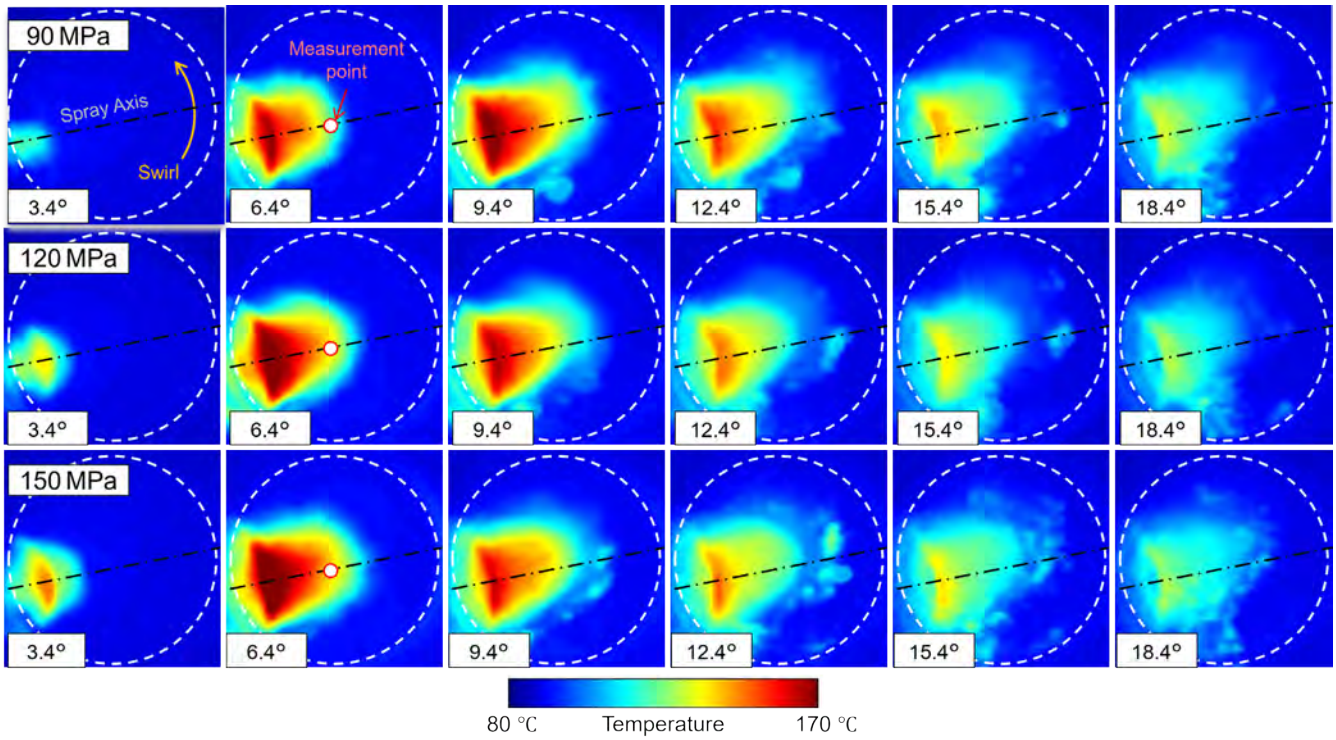


図7　噴射圧力を変化させた場合のピストン表面温度分布

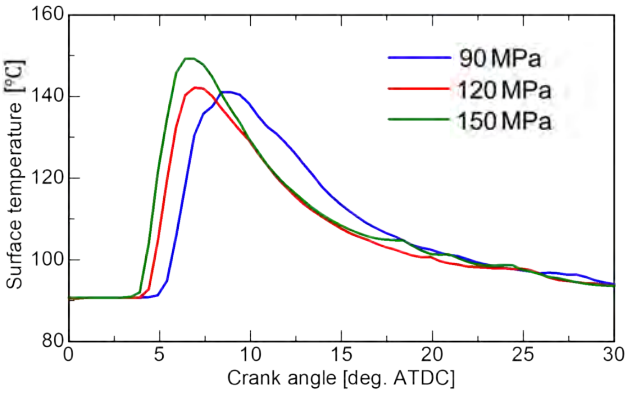


図8　噴射圧力を変化させた場合の温度履歴

4　おわりに

ディーゼルエンジンにおける時系列のピストン表面温度分布を計測して、実機エンジンにおける熱伝達現象を把握することを目的に、ディーゼル噴霧火炎が衝突することによって生じるピストン表面からの赤外放射を高速度赤外カメラで直接可視化した。得られた結論は以下のとおりである。

1. 含酸素燃料による輝炎抑制、可視光カメラとの同時撮影及びバンドパスフィルタの適用により、ディーゼルエンジンのピストン表面においても高速度赤外サーモグラフィの活用が可能である。
2. ピストン表面温度は噴霧火炎衝突点の燃焼室リップ部で温度上昇が最大となり、スキッシュエリアに向かうにつれて低くなる分布となっていること、噴射圧力が増加すると温度上昇が観察され始める時期が早くなり、高温領域も増加することが確認できた。
3. ピストン表面温度分布は燃焼室リップ部付近では噴霧軸に対して対称な分布となっているのに対して、スキッシュエリアではスワールに流されて、非対称な分布となることが確認できた。
4. 赤外高速度サーモグラフィで計測したピストン表面温度の変化量は従来センサを用いたアルミピストンの表面温度計測結果に比べて大きいことがわかった。これは放射率を増加させるために使用したピストン表面塗膜の熱拡散率が低いために、温度スイング幅が大きくなっていると推察される。

本文献は、自動車技術会論文集Vol.56, No.5に掲載された論文を加筆修正の上報告するものである。

参考文献

(1) K.Arato et al. : A Study on Reduction5 of Heat Loss by Optimizing Combustion Chamber Shape, SAE Int. J. Engines,Vol.8, No.2(2015), p.596-608

(2) 古川伸哉 ほか：噴霧の干渉がディーゼルエンジン燃焼に及ぼす影響(第2報)，自動車技術会論文集，Vol.56，No.4 (2025)

(3) 稲垣和久 ほか：ディーゼルエンジンの噴霧－壁面衝突場に適用できる新しい壁面熱伝達率式の提案―噴霧相似理論を用いた壁面熱伝達率式の同定―，自動車技術会論文集，Vol.49，No.6 (2018)，p.1120-1125

(4) 堀司 ほか：解析的壁関数による壁面に衝突するディーゼル噴霧火炎の解析，第28回内燃機関シンポジウム講演論文集，No. 12 (2017)

(5) 青木勇太 他：自然吸気DIディーゼル機関の燃焼室壁面における熱伝達率に関する研究，自動車技術会論文集，Vol.41，No.2(2010)，p.365-370

(6) T.Aizawa et al. : Laser-Induced Phosphorescence Thermography of Combustion Chamber Wall of Diesel Engine, SAE Int. J. Fuels Lubr., Vol.1, No.1(2009), p.549-558

(7) T.Aizawa et al. : Infrared high-speed thermography of combustion chamber wall impinged by diesel spray flame, Int J Engine Res, Vol.23, No.7(2022), p1116-1130

(8) R.Mahmud et al. : Infrared High-Speed Thermography of Combustion Chamber Wall Impinged by Diesel Spray Flame: Imaging Velocimetry of the Radially Striped Infrared Radiation Pattern, SAE Int. J. Adv. & Curr. Prac. in Mobility, Vol.6, No.3(2024), p.1399-1413

(9) 宮下和也 ほか：高速度赤外線カメラを用いたエンジン筒内熱損失低減に関する研究，自動車技術会論文集，Vol.52，No.2 (2021)，p.238-243

(10) 後藤雄一 ほか：超希薄燃焼における火炎速度と燃焼室壁面二次元温度分布測定法の研究，日本機械学会論文集(B編)，Vol.57，No.539(1991)，p.238-243

(11) R.Kitabatake et al. : Simultaneous Improvement of Fuel Consumption and Exhaust Emissions on a Multi-Cylinder Camless Engine, SAE Int. J. Engines, Vol.4, No.1(2011), p.1225-1234

(12) M Jansons, et al.: Infrared spectral analysis of engine preflame emission, Int J Engine Res, Vol.9, No.3(2008), p.215-237

(13) G.Roberts et al. : RCCI Combustion Regime Transitions in a Single-Cylinder Optical Engine and a Multi-Cylinder Metal Engine, SAE Int. J. Engines,Vol.10, No.5(2017), p.2392-2413

(14) 冬頭孝之 ほか：オキシメチレンジメチルエーテル(OME)筒内燃焼でのsoot 生成条件，自動車技術会2023年秋季大会学術講演会講演予稿集，No.20236046 (2023)