DI ディーゼル機関の燃焼室壁面への輻射熱伝達に関する研究*

窪山 達也^{*1}, 小酒 英範^{*2}, 相澤 哲哉^{*2}A Study on Radiant Heat Transfer in Combustion Chamber
of DI Diesel EnginesTatsuya KUBOYAMA^{*3}, Hidenori KOSAKA and Tetsuya AIZAWA^{*3} Department of Mechano-Aerospace Systems Engineering, Tokyo Institute of Technology,
2-12-1 Ohokayama, Meguro-ku, Tokyo, 152-8552 Japan

In order to clarify the mechanism of radiant heat transfer in the combustion chamber of DI diesel engines, radiant heat fluxes at various points on the piston head of a rapid compression and expansion machine were measured by using thin-film thermocouples. The ambient oxygen volume fraction, the swirl ratio, and the diameter and the number of the fuel injection nozzle hole were varied as experimental parameters. Measured radiant heat fluxes were compared with the total heat fluxes measured at the similar measurement locations to the radiant heat fluxes, the flame temperature and KL-factor obtained by the two-color method. In addition, in order to investigate the effects of the flame distribution and the reflectivity of the wall on the spatial distribution of the radiant heat loss, numerical simulations of the radiant heat transfer between the luminous flame and the chamber wall were also carried out via Monte-Carlo method. The results showed that the magnitude of the radiant heat flux is smaller than that of the total heat flux by one order, regardless of the changes in the oxygen volume fraction, swirl ratio and fuel injection nozzles. It is also shown that the spatial distribution of the radiant heat loss inside the piston cavity is uniform due to high reflectivity of the chamber wall made of aluminum alloy.

Key Words: Diesel Engine, Heat Transfer, Thermal Efficiency, Radiation, Heat Loss

1. はじめに

一般に、ディーゼル噴霧火炎の輻射輝度は高く、燃焼室壁面熱損失における輻射熱伝達の割合は高い⁽¹⁾。著者らは、これまでに急速圧縮膨張装置を用いて、雰囲気条件、スワール比、燃料噴射ノズルを変化させ、噴霧火炎の燃焼特性と燃焼室内に誘起されるガス流動が壁面熱損失に与える影響を明らかにしてきたが⁽²⁾⁽³⁾、そこでは、対流と輻射の両熱伝達を一括して扱ってきた。壁面熱損失の機構解明と低減のためには、壁面への輻射熱伝達機構を明らかにし、輻射熱伝達と全熱損失の関係を調べることも重要である。

ディーゼル機関の壁面熱損失における輻射熱伝達の寄与度については、Ebersole ら⁽⁴⁾により報告されて以来、多くの研究者により報告されてきた。Yan ら⁽⁵⁾⁽⁷⁾は独

自に開発した検出角度の広い輻射熱流束計を用いて、シリンダヘッド上 1 点における輻射熱流束を測定し、対流熱伝達を含む全熱流束と比較し、全熱流束に対する輻射熱流束の割合は 5%~15% で、燃料噴射量とともに増加することなどを示した。しかし、従来の研究では、実機を用いた計測が多く、検出器の設置場所がシリンダヘッド上に制限され、測定点数が少ない。さらに、機関回転数や負荷の影響を調べた例は多いが、近年のディーゼル機関において必須の排気浄化技術である排気再循環 (EGR) や筒内ガス流動の影響を実験的に調べた研究は少ない。また、実験的なアプローチだけでなく、数値解析を行った研究もある。用いられる解析手法としては、Zone 法⁽⁸⁾⁽⁹⁾、Zone 法と Monte-Carlo 法の併用⁽¹⁰⁾、Discrete-Ordinate 法⁽¹¹⁾⁽¹³⁾などが挙げられる。Wiedenhoeft ら⁽¹³⁾は、多次元燃焼解析コードに輻射輸送方程式を直接解く Discrete-Ordinate 法を利用した輻射熱伝達モデルを組み込み、スワール、燃料噴射圧力、当量比が壁面への輻射熱伝達に与える影響を数値解析し、燃焼室壁面における輻射熱流束分布等を調べている。しかし、主な輻射源であるすすの生成と酸化を精度良く予測できるサブモデルが開発されおらず、

* 原稿受付 2007 年 10 月 3 日。

^{*1} 正員、東京工業大学大学院理工学研究科 [現：千葉大学大学院工学研究科 (〒263-8522 千葉市稲毛区弥生町 1-33)]。^{*2} 正員、東京工業大学大学院理工学研究科 (〒152-8552 東京都目黒区大岡山 2-12-1)。

E-mail : kuboyama@restaff.chiba-u.jp

数値解析結果のみを用いて燃焼室内の輻射熱伝達現象を考察することは難しい。しかし、様々なパラメータを変化させることが容易であるため、各種パラメータが壁面熱伝達に与える影響についての定性的な傾向や、実験では得難い熱流束の空間的な分布など、測定結果を考察する上で有用な情報を得ることが出来る。

本研究では、直接噴射式ディーゼル機関の燃焼室内輻射熱伝達機構を明らかにするため、燃焼室壁面における輻射熱流束の測定と数値解析を行う。まず、急速圧縮膨張装置を用いて、雰囲気酸素体積分率、スワール比、燃料噴射ノズルをそれぞれ独立に変化させ、既報⁽²⁾⁽³⁾の局所全熱流束と同一条件、同一測定点において輻射熱流束を多点計測し、噴霧火炎の燃焼特性が壁面への輻射熱伝達に与える影響を調べる。さらに、計測された輻射熱伝達に及ぼす火炎温度分布や壁面反射率の影響を考察するために、モンテカルロ法を用いて輻射熱流束の数値解析を行う。

2. 局所輻射熱流束の測定

2.1 実験装置と条件 実験には、ディーゼル燃焼を単発で実現し、各種実験条件を独立に制御することが出来る急速圧縮膨張装置⁽⁴⁾を用いた。使用した燃焼器はボアが 100 mm、ストロークが 100 mm、圧縮比が 19.6 で、図 1 に示すピストンヘッドを有する。表 1 に主な実験条件を示す。すべての実験において、燃焼室壁面温度、および吸气温度は 423 K、燃料噴射圧力は 100 MPa、燃料噴射時期は上死点で一定とした。近年のディーゼル機関では、排気浄化のために EGR、およびスワールや燃料噴霧流動を利用した混合促進技術により、燃焼特性が制御される。壁面熱損失の機構解明と低減のためには、これらのパラメータが壁面熱損失に与える影響を明らかにすることが重要である。本研究では、噴霧火炎の燃焼特性が壁面への輻射熱伝達に与える影響を調べるため、雰囲気酸素体積分率 21%、ス

ワール比 0 (SR=0)、燃料噴射ノズル $\phi 0.15\text{mm} \times 4$ 、当量比 0.8 を基準条件として、雰囲気酸素体積分率、スワール比、燃料噴射ノズルをそれぞれ独立に変化させた。実機における EGR を想定し、雰囲気酸素体積分率は 21% から 15% (EGR 率 0~30% 相当) まで 2 つの手法で変化させた。まず、充填ガスの初期圧力を自然吸气時相当の 0.1 MPa に固定し、酸素充填量を変化させた (Case.1)。この場合、酸素体積分率とともに当量比が変化する。次に、当量比を一定に保つため、酸素充填量を一定として、不活性ガスである窒素の充填量を増加させることで、酸素体積分率を変化させた (Case.2)。この場合、過給吸气時の EGR に相当し、雰囲気の密度と熱容量が変化する。スワールは、シリンダライナに

Fig.1 Piston head of RCEM and measurement locations of radiant fluxes

Fig.2 Sapphire window attached to the sensor head for radiant heat flux measurement

Table 1. Experimental conditions

	Volume frac. of O ₂						Swirl ratio	Fuel injection Nozzle
	Case 1			Case 2				
Volume frac. of O ₂ [%]	21	18	15	21	18	15	0.21	0.21
Intake gas press. [MPa]	0.10			0.10	0.12	0.14	0.10	0.1
Swirl ratio [-]	0			0			0, 5	0
Fuel injection Nozzle	φ 0.15mm×4			φ 0.15mm×4			φ 0.15mm×4	φ 0.15mm×4, φ 0.10mm×10
Injection amount [mg]	26			37			37	37
Equivalence ratio [-]	0.6	0.7	0.8	0.8			0.8	0.8
Wall temp. [K]							423	
Intake gas temp. [K]							423	
Injection pressure [MPa]							100	
Injection timing							TDC	
Fuel							0-Solvent (n-C ₁₂₋₁₄)	

■ ; Base conditions

設けた吸気ポートから、燃焼室接線方向に充填ガスを注入することで生成し、スワール比 (SR) を 0 から高強度スワール条件の $SR=5$ まで変化させた。スワール比は噴霧火炎の高速度直接写真から火炎の回転角速度を測定して求めた。燃料噴射ノズルには、通常、実機で用いられる噴孔径、噴孔数を有する噴孔径 $\phi 0.15\text{mm}$ で噴孔数 4 のものと、それよりも小径、多噴孔化した噴孔径 $\phi 0.10\text{mm}$ で噴孔数 10 のノズル 2 種を用いた。以上により得られた輻射熱流束を、噴霧火炎の二色法解析結果⁽²⁾⁽³⁾と比較し、火炎温度と火炎内すす発生量が輻射熱伝達に与える影響を調べた。

2.2 輻射熱流束測定方法 輻射熱流束の測定には、薄膜型熱電対⁽¹⁵⁾⁽¹⁶⁾を用いた。本測定に用いた薄膜型熱電対の時定数は約 $3\mu\text{s}$ である。図 2 に示すように、熱電対の前面にサファイア窓を設置し、燃焼ガスからの対流熱伝達を遮断し、輻射熱伝達のみによる壁面の温度変化を測定した。測定した壁面温度を用いて、差分法⁽¹⁷⁾により輻射熱流束を算出した。検出角度 ($\theta_d = 61^\circ$) とサファイア窓による反射の影響を含めると、全方位から熱電対に入射する輻射熱流束のうち、検出可能な輻射熱流束は約 59% である。以下に示す輻射熱流束の測定結果は、この値を用いて補正している。また、本研究では、単発ディーゼル燃焼を対象としており、検出窓へのすすの付着が測定結果に及ぼす影響はほとんどないことを確認している。

図 1 には、丸印と矢印で輻射熱流束の測定位置を記した。図中の θ_s は燃料噴射方向 ($\theta_s=0^\circ$) を基準とした角度である。輝炎 (高温のすす粒子群) の分布と燃焼室壁面上の輻射熱流束分布の関係を調べるため、燃料噴霧の噴射軸に沿う $\theta_s=0^\circ$ と、2 本の燃料噴霧の間に位置する $\theta_s=36^\circ$ 方向のピストン中心、ピストン底面、ピストンキャビティ側壁に測定点を設けた。また、局所全熱流束における輻射熱流束の割合を求めるため、測定点は局所全熱流束⁽²⁾⁽³⁾の測定点と同一とした。また、測定した輻射熱流束を、撮影速度 10500 fps、露光時間 $2\mu\text{s}$ で撮影した噴霧火炎の高速度直接写真、および直接写真の二色法解析結果と比較し、噴霧火炎の燃焼特性と輻射熱伝達の関係性を調べている。

3. 結果と考察

3.1 燃焼室壁面上の局所輻射熱流束分布 図 3 に、基準条件において得られた噴霧火炎の高速度直接写真、見かけの熱発生率、および各測定位置における輻射熱流束を示す。直接写真中の丸印と矢印は、輻射熱流束の測定位置を表す。図より、輻射熱流束は、ピストンキャビティ内の位置によらず、同様の時間変化を示す

Fig.3 (a) Direct photograph of spray flame⁽²⁾⁽³⁾, (b) heat release rate⁽²⁾⁽³⁾, and (c) temporal variation of local radiant heat fluxes (at base condition)

ことがわかる。いずれの測定位置においても、拡散燃焼による熱発生が主となる燃料噴射開始後約 0.5 ms から上昇を始め、およそ燃料噴射終了時期に最大値に到達する。ピストンキャビティ壁上の輻射熱流束分布は、噴霧火炎の分布によらず、ほとんど均一となるのがわかる。

3.2 燃焼室内輻射熱伝達の数値解析 均一な輻射熱流束分布の成因を調べるため、燃焼室内の輻射熱伝達の数値解析を行った。燃焼室内に任意に分布したすす粒子群から壁面への輻射熱伝達を解析するため、解析方法には、解析対象の形状に制限がなく、燃焼室内の温度や吸収係数の分布を考慮しやすいモンテカルロ法を採用した。モンテカルロ法では、各計算要素から多数のエネルギー粒子を放射することで熱輻射を模擬する。放射粒子の軌跡を追跡し、吸収位置を集計することで、輻射エネルギーの吸収量分布を確率論的に求める。解析方法の詳細は文献⁽¹⁸⁾等を参照されたい。本解析における放射粒子数は 20000 個/cell とした。解析領域は、実験に用いたピストンキャビティと等しい寸法 (半径 23.7 mm、深さ 20.8 mm) を有する円筒容器とし、これを半径方向に 6 分割、円周方向に 12 分割、深さ方向に 5 分割した計算格子を用いた。基準条件における輻射熱流束の上昇開始直後の燃料噴射開始後 0.9 ms、拡散燃焼期中盤の 1.3 ms、輻射熱流束が最大値に達する 2.2 ms の噴霧火炎を対象とした。図 4 左の二列に示すように、上記の各時刻において撮影した直接写

真により定められる輝炎の存在領域に、すす粒子群を配置した。ここでは、すす粒子群による輻射と吸収のみを取り扱い、すす粒子による散乱、および CO_2 、 H_2O 等の燃焼ガスによる輻射と吸収は考慮していない。また、すす粒子は灰色体として扱い、燃焼室壁面は反射率が波長によらない散乱面と仮定した。すす粒子群の温度には、噴霧火炎の二色法解析により得られる面積平均火炎温度を、吸収係数には、面積平均 KL 値から求められる波長平均吸収係数を、それぞれ用いた。

本実験で用いたピストンヘッドの材料は、アルミニウムの AC4C で 0.7~0.9 程度の反射率を有する⁽¹⁹⁾。一方、すす堆積層の複素屈折率の測定結果⁽²⁰⁾から推定したすす堆積層の反射率は 0.2 程度である。すすの壁面付着が輻射熱流束分布に与える影響を調べるため、壁面反射率を 0.1 から 0.9 まで変化させた。

図 4 左から三列目以降に、壁面反射率 ρ_w を 0.1~0.9 まで変化させた場合のピストン壁面における輻射熱流束分布の解析結果を示す。最大値で正規化している。まず、壁面反射率 ρ_w が実験で使ったピストンヘッド反射率相当の 0.7, 0.9 の場合を見る。これらの場合、すす粒子群の不均一な分布によらず、輻射熱流束はほとんど均一に分布している。次に、各時刻において、壁面反射率を変化させた場合の輻射熱流束分布を見る。壁面反射率が低下するに従い、高温のすす粒子群が近くに存在する壁面領域において、より高い輻射熱流束を示すようになることがわかる。しかし、高い輻射熱流束が測定された拡散燃焼中盤以降の燃料噴射開始後 1.3ms や、特に 2.2ms では、噴霧火炎が燃焼室内に広く分布するため、壁面反射率が低い場合でも、輻射熱流束分布が均一化している。ただし、燃焼室内を望む立体角が狭い燃焼室外周部における輻射熱流束は低い。

以上から、壁面反射率が壁面上の輻射熱流束分布に強く影響を与え、壁面がアルミニウム表面程度の反射率を有する場合、実機燃焼室内に実現される火炎の分布の範囲内では、輻射熱流束は均一に分布することがわかる。また、すすの壁面付着により壁面反射率が低下した場合、輝炎の存在領域が輻射熱流束分布に与える影響が強まるが、高い輻射熱流束を示す拡散燃焼中盤以降では、噴霧火炎は燃焼室内に広く分布し、ピストンキャビティ壁面上の輻射熱流束分布が均一化されることもわかる。

3.3 雰囲気酸素体積分率の影響（初期充填圧力一定の場合）

噴霧火炎の燃焼特性が壁面への輻射熱伝達に与える影響を調べるため、まず、実機 EGR を想定し、初期充填圧力を自然吸気時相当の 0.1MPa で一定とし、雰囲気酸素体積分率を 21%, 18%, 15% と変化させた。この場合、酸素体積分率が低下するに従い、当量比が 0.6, 0.7, 0.8 と増加している。

図 5 に、各雰囲気酸素体積分率における見かけの熱発生率⁽²⁾、面積平均火炎温度⁽²⁾と火炎内積算 KL 値を示す。見かけの熱発生率は 5 回の測定結果の平均波形である。面積平均火炎温度は、噴霧火炎の高速直接写真を二色法解析し、得られた温度分布を用いて、1500 K 以上の火炎領域内の温度を面積平均して求めた。火炎内積算 KL 値は、二色法解析により得られる KL 値を 1500K 以上の火炎領域において面積積分した値であり、輻射輝度の高い火炎内のすす総量に対応する。本図を含め、以下に示す火炎内積算 KL 値は、燃料噴射終了後、熱発生がほぼ終了した後に最大値に達する波形を示している。これは、燃料噴射期間中よりも燃料噴射終了直後の方が、二色法解析が可能な領域が広いためである。高い熱発生率を示す燃料噴射期間中において

Fig.4 Radiant heat flux distribution on bottom of the piston cavity

は、石英の観察窓表面付近に、観察窓によって冷却された輝度の低いすす粒子群が分布し、観察窓から離れて分布する高温の輝炎からの輻射光を遮断する。その結果、高速度直接写真において、二色法解析が可能な輝度の高い火炎の像の面積が狭まるため、解析可能領域におけるKL値の面積積分値である火炎内積算KL値が低く見積もられていると考えられる。平均火炎温度、積算KL値は3回の測定結果の算術平均値をプロットし、標準偏差をエラーバーで記した。図より、酸素体積分率が15%まで低下すると熱発生率が低下し、面積平均火炎温度が低下すること、燃料噴射終了後の火炎内積算KL値が増加していることから、燃料噴射終了後の火炎内すす量が増加していることがわかる。

図6に、各酸素体積分率における面積平均輻射熱流束と面積平均全熱流束を示す。それぞれ、輻射熱流束と局所全熱流束⁽²⁾の測定値に、各測定点の代表面積を乗じ、加算した後に面積平均して求めたピストンキャビ

ティ壁面上の平均熱流束である。全熱流束は対流と輻射の両熱伝達を含む。輻射熱流束を示すグラフの縦軸は、全熱流束を示す縦軸に対して1/10のスケールで記した。すなわち、ピストンキャビティ壁面への全伝達熱量のうち、輻射熱伝達の割合は1割程度である。まず、図の輻射熱流束を見る。酸素体積分率が低下するに従い、燃料噴射期間中の輻射熱流束が低下し、その最大値が低下することがわかる。火炎温度が低下するためである。しかし、燃料噴射終了後の輻射熱流束は、酸素体積分率が15%の場合に最も大きい。これは、主な輻射源である火炎内すす量が最も多いためであると考えられる。

次に、輻射熱流束と全熱流束を比較する。雰囲気酸素体積分率を変化させた場合のピストン壁面への輻射熱流束の変化は、対流熱伝達を主とする全熱流束の変化と定性的に一致している。すなわち、雰囲気酸素体積分率を低下すると、火炎温度が低下し、輻射熱流束と

Fig.5 Effects of O₂ volume fraction on area integrated KL factor, area averaged flame temperature, and apparent heat release rate (Constant initial pressure; P₀).⁽²⁾

Fig.6 Effects of O₂ volume fraction on area averaged radiant heat flux and total heat flux (Constant initial pressure; P₀.)

Fig.7 Effects of O₂ volume fraction on area integrated KL factor, area averaged flame temperature, and apparent heat release rate (Constant O₂ amount).⁽²⁾

Fig.8 Effects of O₂ volume fraction on area averaged radiant heat flux and total heat flux (Constant O₂ amount.)

全熱流束の最大値がともに低下する。

3.4 雰囲気酸素体積分率の影響（酸素充填量一定の場合） 次に、酸素充填量を一定とし、窒素充填量を増加させることで、雰囲気酸素体積分率を15%まで低下させた。当量比は0.8で一定である。この場合、酸素体積分率が低いほど充填ガス量が多く、雰囲気気体の密度と熱容量が大きい。

図7は、当量比を一定に保ち、雰囲気酸素体積分率を低下させた場合の見かけの熱発生率⁽²⁾、面積平均火炎温度⁽²⁾、火炎内積算 KL 値である。酸素体積分率が低下した場合、見かけの熱発生率は大きく変化しないが、面積平均火炎温度が低下している。充填ガスの熱容量が増大するためである。また、酸素体積分率が変化しても、火炎内積算 KL 値に大きな差異は見られない。

図8に、ピストンキャビティ内の面積平均輻射熱流束と面積平均全熱流束⁽²⁾を示す。酸素体積分率によらず、全熱流束に対する輻射熱流束の割合は1割程度である。面積平均輻射熱流束は、雰囲気酸素体積分率が低いほど低いことがわかる。火炎温度が低下するためである。面積平均全熱流束も輻射熱流束と同様に、酸素体積分率の低下に伴い、低下している。酸素充填量を一定とした場合、雰囲気酸素体積分率が低下すると、火炎温度が低下し、輻射熱流束と全熱流束がともに低下する。

3.5 スワールの影響 次に、スワールが輻射熱伝達に与える影響を観察する。図9にスワール比 SR が0と5の場合における見かけの熱発生率⁽³⁾、面積平均火炎温度⁽³⁾、火炎内積算 KL 値を示す。図より、見かけの熱発生率は大差がないことがわかる。また、SR=5の場合の方が、燃料噴射期間中の面積平均火炎温度が高いこと、燃料噴射終了後の火炎内積算 KL 値が低いこと

がわかる。

図10に、SR=0, 5の場合の面積平均輻射熱流束と面積平均全熱流束を示す。スワール比によらず、全熱流束に対する輻射熱流束の割合は1割程度である。輻射熱流束については、SR=5の場合の方が、その最大値が大きいことがわかる。平均火炎温度が高いためであると考えられる。しかし、燃料噴射終了後においては、SR=5の方が高温の火炎内すす量が少ないため、輻射熱流束が小さい。一方、面積平均全熱流束については、スワール比を5まで増加すると、輻射熱流束の最大値は上昇するのに対して、全熱流束は低下している。ここで、図11に二色法解析により求めた火炎温度分布を示す。図より、スワール比を5まで増加すると、壁面から離れた燃焼室中央部寄りの火炎領域が高温化し、ピストンキャビティ外周部付近には1500K以下の低温領域が分布することがわかる。壁面から離れた火炎の高温化は、壁面における輻射熱流束の増加因子となるため、SR=5とした場合、輻射熱流束の最大値が上昇するが、壁面付近のガス温度は低く、対流熱伝達を主とする全熱流束は低下したものと考えられる。

3.6 燃料噴射ノズルの噴孔径と噴孔数の影響 図12に $\phi 0.15\text{mm} \times 4$ 、 $\phi 0.10\text{mm} \times 10$ のノズルを用いた場合の見かけの熱発生率⁽³⁾、面積平均火炎温度⁽³⁾、面積積算 KL 値を示す。図より、 $\phi 0.10\text{mm} \times 10$ のノズルの方が、初期燃焼、拡散燃焼期間の熱発生率のピークが

Fig.9 Effects of swirl ratio on area integrated KL factor, area averaged flame temperature, and apparent heat release rate⁽³⁾

Fig.10 Effects of swirl ratio fraction on area averaged radiant heat flux and total heat flux

Fig.11 Effects of swirl ratio on flame temperature distribution⁽³⁾ (at 1.3ms after start of injection)

高いことがわかる。面積平均火炎温度は、 $\phi 0.10\text{mm} \times 10$ の方が、燃料噴射期間の前半においてはわずかに高く、逆に燃料噴射終了後にはわずかに低い。火炎内積算KL値は、燃料噴射終了直後において、 $\phi 0.10\text{mm} \times 10$ の方が低い。図13に、面積平均輻射熱流束と面積平均全熱流束⁽³⁾を示す。燃料噴射ノズルによらず、全熱損失における輻射熱伝達の割合は1割程度である。面積平均輻射熱流束については、 $\phi 0.10\text{mm} \times 10$ のノズルを用いた場合の方が、燃料噴射期間中の輻射熱流束がわずかに大きい。火炎温度が高いためであると考えられる。また、燃料噴射終了直後においては、 $\phi 0.10\text{mm} \times 10$ を用いた場合の方が、火炎温度が低く、火炎内すす量が少いため、輻射熱流束が低いこともわかる。図の下段、面積平均全熱流束については、 $\phi 0.10 \times 10$ ノズルを用いた場合の方が、全熱流束の立ち上がり時期が遅い。噴孔の小径化に伴い、噴霧火炎の壁面到達が遅れるためである。全熱流束の立ち上がり直後の面積平均全熱流束は $\phi 0.10 \times 10$ の方が大きい。燃料噴射終了後の平均全熱流束は、 $\phi 0.10 \times 10$ の方がわずかに低い。燃料噴射ノズルを変化させた場合の燃焼期間中の輻射熱流束と全熱流束は、ともに類似した変化を示しているといえる。

以上、雰囲気酸素体積分率、スワール、燃料噴射ノズルが輻射熱流束と全熱流束に与える影響をまとめると、直接噴射式ディーゼル機関においては、火炎温度が輻射と対流の両熱伝達の大きさに対する強い影響因子であることがわかる。さらに、輻射熱流束が均一な分布を示すことを合わせると、すすの排出量や燃焼ガスの温度分布の変化に留意する必要があるが、各種パラメータの変化が燃焼期間中の壁面全熱損失に与える影響の定性的な傾向は、一点の壁面上代表点における局所的な輻射熱流束の観察結果から推定し得ることが示唆される。

4. ま と め

ディーゼル噴霧火炎から壁面への輻射熱伝達機構を明らかにするため、急速圧縮膨張装置を用いて、雰囲気酸素体積分率、スワール比、燃料噴射ノズルを独立に変化させ、ピストン壁面上5点において局所輻射熱流束を測定した。測定した輻射熱流束を、同一の実験条件で得られた噴霧火炎の二色法解析結果、全熱流束の測定結果と比較し、噴霧火炎の温度と火炎内すす量が壁面への輻射熱伝達に与える影響、および壁面熱損失と輻射熱伝達との関係を調べた。さらに、モンテカルロ法を用いて、燃焼室内の輻射熱伝達を数値解析し、燃焼室内の噴霧火炎存在領域および壁面反射率が輻射

Fig.12 Effects of fuel injection nozzle on area integrated KL factor, area averaged flame temperature, and apparent heat release rate⁽³⁾

Fig.13 Effects of Fuel injection nozzle on area averaged radiant heat flux and total heat flux

熱流束分布に及ぼす影響を調べた。得られた知見を以下にまとめる。

モンテカルロ法による輻射熱伝達の数値解析より以下の知見を得た。

1. ピストン壁面における輻射熱流束分布は、壁面反射率に強く影響を受け、壁面がアルミ合金表面程度の反射率を有する場合、火炎の不均一な分布によらず、輻射熱流束は均一に分布する。
2. 堆積物の付着等により、壁面反射率が低下すると、噴霧火炎の不均一な分布が輻射熱流束分布に与える影響が強くなる。高い輻射熱流束を示す拡散燃焼期中盤以降では、噴霧火炎が燃焼室内に広く分布し、壁面上の輻射熱流束分布が均一化される。

燃焼室壁面における局所輻射熱流束と局所全熱流束の計測により以下の知見を得た。

3. 直接噴射式ディーゼル機関の壁面における輻射熱流束の大きさは、全熱流束の1割程度である。また、

噴霧火炎の温度と火炎内すす量に強く影響を受ける。本研究の範囲内で、雰囲気酸素体積分率、燃料噴射ノズルの噴孔径と噴孔数を変化させると、ピストンキャビティ内の平均輻射熱流束と平均全熱流束は類似した変化を示し、平均火炎温度が低下すると、平均輻射熱流束と平均全熱流束がともに低下する。

4. スワール比を 0 から 5 まで増加させた場合、壁面から離れた燃焼室中央部寄りの燃焼ガス温度が高温化し、壁面付近のガス温度が低下する。これにより、輻射熱流束の最大値は増加するが、対流熱伝達を含めた全熱流束の最大値は減少する。

謝 辞

薄膜型熱電対の製作ならびに熱流束計測においては、武蔵工業大学の榎本良輝教授と当時熱流体システム研究室に在籍した学生諸氏に協力して頂いた。また、東京工業大学の神本武征名誉教授からは貴重なご意見を頂いた。ここに記し、謝意を表す。

参 考 文 献

- (1) G. L. Borman and K. Nishiwaki, "Internal Combustion Engine Heat Transfer", Prog. Energy Comb. Sci., vol.13, pp. 1-46, 1987.
- (2) T. Kuboyama et al., "A Study on Heat Loss in DI Diesel Engines by Using a Rapid Compression and Expansion Machine (1st Report, The Effects of Oxygen Volume Fraction and Density of Ambient Gas on Heat Loss)", Transaction of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series B, vol.72, No.721, pp.2315-2322, 2006. (In Japanese)
- (3) T. Kuboyama et al., "A Study on Heat Loss in DI Diesel Engines by Using a Rapid Compression and Expansion Machine (1st report, the effects of oxygen volume fraction and density of the ambient gas)", Transaction of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series B, vol.72, No.721, pp.2315-2322, 2006. (In Japanese)
- (4) G. D. Ebersole, et al., "The Radiant and Convective Components of Diesel Engine Heat Transfer", SAE Paper No. 701C, 1963.
- (5) J. Yan and G. L. Borman, "Analysis and In-Cylinder Measurement of Particulate Radiant Emissions and Temperature in a Direct Injection Diesel Engine", SAE Paper No.881315, 1988.
- (6) J. Yan and G. Borman, "A New Instrument For Radiation Flux Measurement in Diesel Engines", SAE Paper No. 891901, 1989.
- (7) F. J. Struwe and D. E. Foster, "In-Cylinder Measurement of Particulate Radiant Heat Transfer in a Direct Injection Diesel Engine", SAE Paper No.2003-01-0072, 2003.
- (8) S. L. Chang and K. T. Rhee, "Computation of Radiation Heat Transfer in Diesel Combustion", SAE Paper No. 831332, 1983.
- (9) T. Morel, et al., "Heat Radiation in D.I. Diesel Engines", SAE Paper No. 860445, 1986.
- (10) S. Chen, et al., "Multidimensional numerical simulation of heat radiation in direct injection diesel engines", Porc. Instrn. Mech. Engrs, Vol. 204, Part D, pp.453 - 466, 2000.
- (11) Abraham and V. Magi, "Modeling Radiant Heat Loss Characteristics in a Diesel Engine", SAE Paper No. 970888, 1997.
- (12) C. A. Blunsdon, et al., "Application of the Discrete Transfer Model of Thermal Radiation in a CFD Simulation of Diesel Engine Combustion and Heat Transfer", SAE Paper No. 922305, 1992.
- (13) J. F. Wiedenhofer and R.D. Reitz, "Multidimensional Modeling of Thermal Radiation and Soot deposition in Heavy-duty Diesel Engines", SAE Paper No. 2003-01-0560, 2003.
- (14) S. Kobori and T. Kamimoto, "Development of a Rapid Compression-Expansion Machine Simulating Diesel Combustion", Transaction of JSME, vol.62B, No.593, pp.392-397, 1996. (In Japanese)
- (15) Y. Enomoto and S. Furuhashi, Transaction of JSME, vol.50B, No.453, pp.1353-1362, 1984. (In Japanese)
- (16) Y. Enomoto and S. Furuhashi, Transaction of JSME, vol.52B, No.474, pp.680-687, 1986. (In Japanese)
- (17) Y. Enomoto, T. Ohya, M. Ishii, K. Enomoto and N. Kitahara, "Study on analysis of Instantaneous Heat Flux Flowing into the Combustion Chamber wall of an Internal Combustion Engine (Examination in the Case of Consideration of Heat Storage Term and the Temperature Dependency of the Thermocouple's Thermophysical Properties)", JSME int. J. vol.35- II, No.4, pp.608-615, 1992. (In Japanese)
- (18) H. Kawamura and K. Hijikata, "Simulation on heat and flow", pp. 255 - 276, Maruzen, 1997. (In Japanese)
- (19) L. F. Mondolfo, "Aluminum alloys: structure and properties", Butterworths, pp. 108, 1976.
- (20) W. H. Dalzell and A.F. Sarofim, "Optical Constants of Soot and Their Application to Heat-Flux calculations", Trans. ASME, Journal of Heat Transfer, vol.91, pp.100-104, 1961.