

研究論文

レイリー散乱法によるディーゼル噴霧における燃料濃度分布計測

A study on Fuel Concentration of Vaporizing Diesel Spray Measured by Rayleigh Scattering

三田 拓朗, 辻村 拓, 陳 之立, 後藤 新一
 (Takuro MITA) (Taku TSUJIMURA) (Zhili CHEN) (Shinichi GOTO)
 東海大学大学院 産業技術総合研究所 東海大学 産業技術総合研究所
 (Tokai Univ.) (AIST) (Tokai Univ.) (AIST)

It is important to understand developing and mixing characteristics of a diesel spray for development of engine devices in the future. The characteristics were investigated with changing fuels (n-heptane and n-hexadecane), injection and ambient gas conditions by planar laser Rayleigh scattering. Experiments were conducted in a constant-volume combustion chamber for simulating ambient conditions of a typical diesel engine. A 532 nm Nd:YAG laser was used as a light source and scattering lights of the fuel spray were acquired by an ICCD camera. The results obtained in this study show that vaporizing fuel is gradually mixed with ambient gas during the spray developing process. Fuel property and injection pressure influence fuel concentration in the spray downstream and those after the injection event. Furthermore, ambient temperature and density have effects on the development of liquid length and the vaporization of fuel droplets.

Keywords: Laser Diagnostics, Liquid Fuel, Spray, Diesel Engine, Rayleigh Scattering

1. はじめに

二酸化炭素等の温室効果ガスによる地球温暖化が危惧され、内燃機関の中で最も熱効率の高いディーゼル機関の重要性はますます高まると予想される。ディーゼル燃焼およびその排気性状は、主に火炎温度と当量比によって律速され、燃料と雰囲気気体との混合過程を把握することは燃焼制御の点から極めて重要である。近年、200 MPa以上の超高压燃料噴射、多段過給、無段階可変バルブ等の新たなデバイスが開発されており、その利用において、噴射圧力および雰囲気条件が及ぼす噴霧内部の濃度変化への影響を把握することは今後の開発指針を得る上で重要と考えられる。

非蒸発・蒸発ディーゼル噴霧の発達過程については噴霧液相長さや先端到達距離等、巨視的過程に関する多くの知見が示されている^{(例えば(1)~(3))}。一方、噴霧内部の燃料蒸気の濃度分布は、レーザ誘起蛍光法やエキサイプレックス蛍光法による濃度計測が試みられている^{(例えば(4)、(5))}が、濃度や温度による蛍光物質の消光作用によって定量性が阻害されることが課題とされている⁽⁶⁾。本研究では、蒸発噴霧内部の濃度計測法として蛍光剤を利用せず、燃料分子自身の散乱光から燃料の分子数密度が推算可能なレイリー(Rayleigh)散乱法に着目した。高温高压静止場に噴射された燃料蒸気の濃度計測を試み⁽⁷⁾、本報では噴霧内部構造および噴射・雰囲気条件、燃料性状との関係について考察を行った。

2. 実験装置および手法

2.1 ディーゼル雰囲気場の再現

本実験では、高温高压のディーゼル燃焼場を静的に再現するため、定容燃焼容器内(容積:約 750 cm³)に予め充填したC₂H₂/H₂/N₂/O₂混合気による予混合燃焼を利用した。ここで、予混合気組成は完全燃焼後に残留酸素が 0 vol.% となるよう調整した。図 1 に定容燃焼容器の概略図を示す。容器には石英ガラス窓(φ: 80 mm)を 3 面設け、レーザ光の入射、透過および観測に使用した。またレイリー散乱法では、入射光と計

測光が同波長であることから、不純物からの散乱を避けるため、ガスラインには 0.5 μm、燃料ラインには 5 μm の清浄フィルタを設置した。

図 2 に定容燃焼容器内の圧力履歴の例を示す。容器内に所定の圧力(密度)まで充填した予混合気を点火・燃焼させ、燃焼後の放熱過程において容器内が任意の温度(圧力)まで低下した後に燃料噴射を行った。燃料の昇圧および噴射には、市販の蓄圧式噴射ポンプを用い、市販のインジェクタを単孔ノズルチップに変更し使用した。図 3 に、モーメントム法⁽⁸⁾によって計測した n-heptane および n-hexadecane の噴射率波形を示す。各噴射圧力において、噴射率波形は矩形であり、噴射開始後、数十 μs で一定の噴射率に達する。駆動信号より開弁時は 0.3 ms、閉弁時は噴射圧力 120, 180 MPa で 0.7 ms、60 MPa で 0.8 ms の遅れを有す。なお燃料噴射期間中において、容器の放熱による温度降下は約 4 K/ms であり、燃料噴霧の混合過程や温度分布に及ぼす影響は小さいと考えられる。

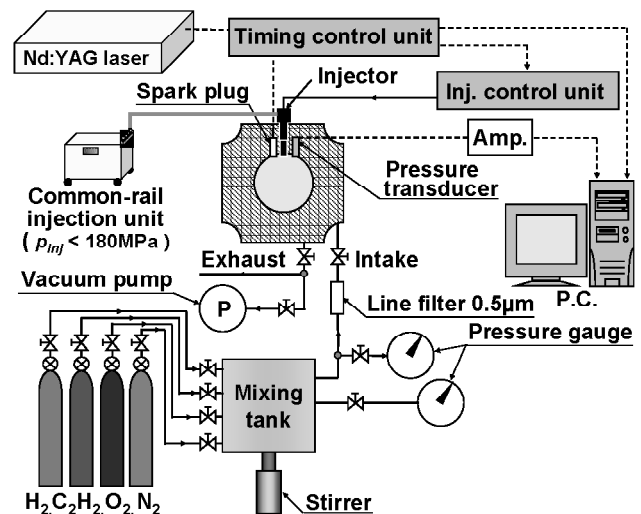


Fig. 1 Schematic of constant-volume combustion chamber and peripherals

本実験の噴射・雰囲気条件を表 1 に示す。燃料には n-heptane および n-hexadecane を使い、噴孔径 0.1 mm の単噴孔ノズルにより噴射圧力 60, 120, 180 MPa で噴射した。燃料温度はレール圧力および燃料、動作時間によって 327~357 K の範囲で変動した。また、容器内温度の算定には、熱力学的平衡温度および燃焼室内部の温度分布を考慮した実験式⁽⁹⁾を利用した。

2.2 レイリー散乱法の撮影光学系

レイリー散乱法に用いた撮影光学系を図 4 に示す。光源には Nd:YAG レーザ(Spectra-Physics PRO@230-10)第 2 高長波 (λ: 532 nm, 10 Hz) を使用し、発振強度を約 250 mJ/pulse に設定した。レーザ光は片凸レンズ(f: 1000 mm), 円筒レンズ (f: 25 mm, f: 250 mm) により高さ 40 mm, 厚さ約 0.3 mm のシート状に整形し、噴霧軸上断面に沿って入射した。レーザシートの照射により弾性散乱した燃料蒸気からの散乱光は、中心波長 532 nm のバンドパスフィルタ(半値幅: 10 nm) を介し、輝度増幅装置を取り付けた ICCD カメラ(浜松ホトニクス, M7971, C8484, ゲート幅: 50 ns)によりレーザ照射と同期して撮影した。予混合気の点火時期と撮影時期との時間間隔は、予備実験により求め、レーザ発振周期に合わせて調整した。

3. 測定原理

3.1 レイリー散乱法

レイリー散乱法では、入射光波長に比べて十分に小さい分子や微粒子からの弾性散乱を利用し、対象粒子から入射光と同波長の散乱光が放射される。粒径パラメータ α は粒子径 D と入射光波長 λ を用いて次式のように表される。

$$\alpha = \frac{\pi D}{\lambda} \tag{1}$$

燃料分子を散乱体とする場合、α は 0.4 より十分に小さく、分子からの散乱はレイリー散乱であるといえる⁽¹⁰⁾。測定対象が理想気体である仮定すると、入射光強度 $I_{R,i}$ は、レイリー散乱断面積を $\sigma_{R,i}$ とし次式のように与えられる⁽¹¹⁾。

$$I_{R,i} = CI_L N \sum_i X_i \sigma_{R,i} \tag{2}$$

N: 分子数密度, X_i: 分子 i のモル分率, C: 光学系定数
加えて、成分 i のレイリー散乱断面積は、次式によって表される⁽¹²⁾。

$$\sigma_{R,i} = \frac{4\pi^2}{\lambda^4} \left(\frac{n_i - 1}{N_0} \right)^2 \frac{3}{3 - 4\rho_v} \tag{3}$$

λ: 入射光波長, n_i: 分子 i の屈折率, ρ_v: 偏光解消度, N₀: ロシユミット数

また Lorenz-Lorentz 式より, n_i は以下のような関係にある⁽¹³⁾。

$$R_{L,i} = \frac{n_i^2 - 1}{n_i^2 + 2} \frac{1}{\rho} \tag{4}$$

R_{L,i}: 成分 i の分子屈折度, ρ: 標準モル密度

成分 amb および fuel からなる二成分の混合気 mix の散乱光強度 I_{R,mix} は、式(2)より、

$$I_{R,mix} = CI_L N_{mix} (X_{amb} \sigma_{R,amb} + X_{fuel} \sigma_{R,fuel}) \tag{5}$$

と表せる。ここで N_{mix} は成分 amb 及び fuel からなる混合気の数密度であり N_{mix} = N_{amb} + N_{fuel}, X_{amb} + X_{fuel} = 1 である。また理想気体である仮定すると、雰囲気温度 T_{amb} および混合気温度 T_{mix} を用いて、N_{mix}/N_{amb} = T_{amb}/T_{mix} となる。一方、成分 amb のみが存在するとき amb から散乱光強度 I_{R,amb} は、

$$I_{R,amb} = CI_L N_{amb} \sigma_{R,amb} \tag{6}$$

と表せ、式(5)を式(6)で除すると混合気からのレイリー散乱光強度 I_{R,mix} と雰囲気気体のレイリー散乱光強度 I_{R,amb} の比は次式のようになる。

Table 1 Experimental conditions

Fuel	n-heptane, n-hexadecane
T _{fuel} : Fuel temperature [K]	327 ~ 357
d: Nozzle hole diameter [mm]	0.1
ρ _{inj} : Injection pressure [MPa]	60, 120, 180
Chamber temperature [K]	363
Ambient gas	N ₂ / CO ₂ / H ₂ O mixture
T _{amb} : Temperature [K]	900, 1100
ρ _{amb} : Density [kg/m ³]	7, 15

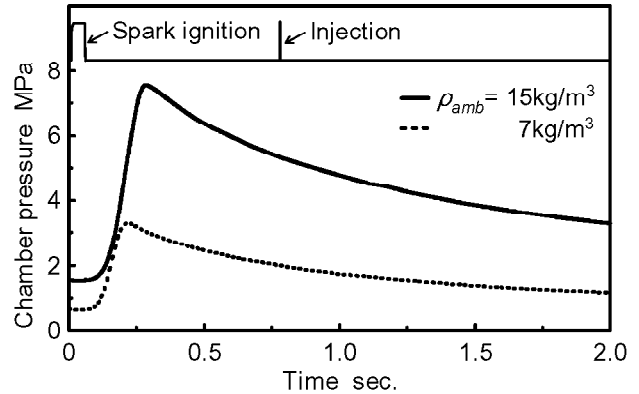


Fig. 2 Pressure history in the constant-volume combustion chamber

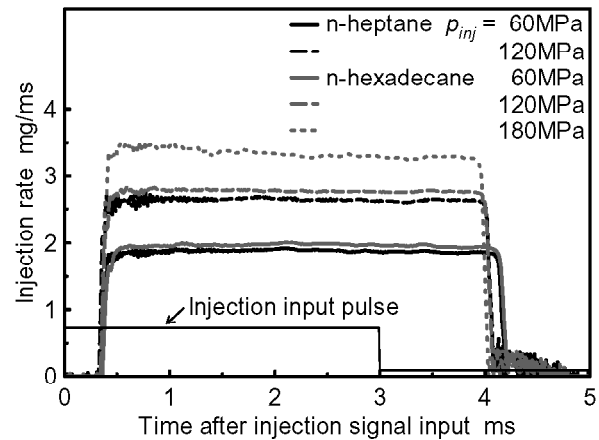


Fig. 3 Injection rate profiles measured by momentum method

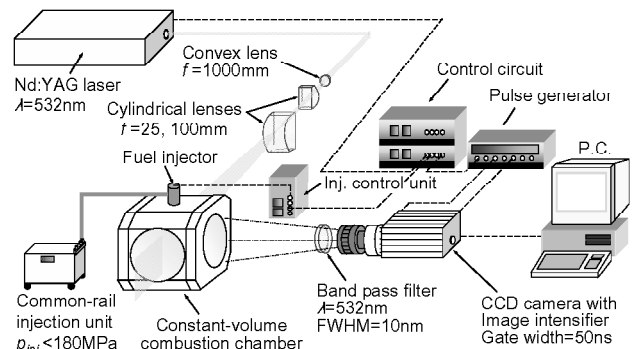


Fig. 4 Optical system for Rayleigh scattering method

Table 2 Ambient gas and fuel properties at STP and $\lambda=532\text{nm}$

Name	Ambient gas			n-heptane	n-hexadecane
Formula	N ₂	CO ₂	H ₂ O	C ₇ H ₁₆	C ₁₆ H ₃₄
Boiling point [K]	-	-	-	372	560
Density [kg/m ³]	-	-	-	684	773
M _i : Molecular weight [g/mol]	28.0	44.0	18.0	100.2	226.4
X _i ×100: Molar fraction	87.91	7.09	5.00	-	-
R _{L,i} ^{(11),(13)} : Molar refractivity	4.484	6.690	3.782	34.768	76.714
$\rho_v \times 10^2$ ⁽¹²⁾ : Depolarization ratio	1.12	3.49	-	-	-
(n _i -1)×10 ⁴ : Refractive index	3.001	4.477	2.531	23.277	51.383
$\sigma_{R,i} \times 10^{27}$: Rayleigh cross-section [cm ²]	0.624	1.435	0.437	36.987	180.239
$\sigma_{R,fuel} / \sigma_{R,amb}$	-	-	-	55.02	268.10

$$\frac{I_{R,mix}}{I_{R,amb}} = \left(\frac{\sigma_{R,fuel} / \sigma_{R,amb} + N_{amb} / N_{fuel}}{1 + N_{amb} / N_{fuel}} \right) \frac{T_{amb}}{T_{mix}} \quad (7)$$

混合気の数密度比 N_{fuel} / N_{amb} を用いて、雰囲気気体が酸素濃度 21 vol.% の空気であると仮定した場合の当量比 ϕ は以下のように求められる。

$$\phi = L_0 \frac{M_{fuel}}{M_{air}} \cdot \frac{N_{fuel}}{N_{amb}} \quad (8)$$

L_0 : 理論空燃比, M_{fuel} : 燃料分子量, M_{air} : 空気分子量
また混合気温度 T_{mix} は、燃料と雰囲気気体との混合割合による熱収支の関係より、以下の式によって求めた^{(11),(14)}。

$$\int_{T_{mix}}^{T_{amb,ini}} C_{p,amb} dT = \frac{F}{A} \left[\int_{T_{g,ini}}^{T_{mix}} C_{p,fuel} dT + h_{v,T_{mix}} + \int_{T_{g,ini}}^{T_{mix}} C_{p,fuelV} dT \right] \quad (9)$$

$T_{amb,ini}$: 雰囲気気体温度, T_{int} : 蒸発温度,
 $T_{fuel,ini}$: 燃料温度, $C_{p,amb}$: 雰囲気気体の定圧比熱,
 $h_{v,T_{int}}$: 蒸発潜熱, $C_{p,fuel}$: 燃料(液体)の定圧比熱,
 $C_{p,fuelV}$: 燃料(気体)の定圧比熱

表 2 に解析に用いた各種定数を、図 5 および図 6 に式(7)、(9)によって求めた各種燃料のレイリー散乱光強度比 $I_{R,mix} / I_{R,amb}$ と当量比 ϕ および混合気温度 T_{mix} の関係を示す。混合気と雰囲気気体からのレイリー散乱光強度 $I_{R,mix}$, $I_{R,amb}$ の比が大きくなるほど当量比は高くなり、混合気中に燃料が存在しない時には $I_{R,mix} / I_{R,amb} = 1$ となる。また混合気温度は断熱混合を仮定しているため、混合気中に燃料が多く含まれ、 $I_{R,mix} / I_{R,amb}$ が高くなるほど混合気温度が低下する。次章以降では燃料蒸気濃度について当量比で表すが、この当量比は雰囲気気体が酸素濃度 21 vol.% の空気と仮定し、上記の断熱混合を仮定して算定された当量比であることを申し添える。

3.2 画像処理方法

定容燃焼容器を用いたレイリー散乱計測において、混合気の撮影画像 $I_{raw,mix}$ には、燃料蒸気および雰囲気気体からのレイリー散乱光だけでなく、容器からの散乱光 I_{ev} 、燃焼ガスの自発光 I_{thm} 、撮影系の暗電流 I_{dck} が含まれる。併せて、燃料噴射時にはレーザーシート光が噴霧内部を通過する際に屈折することで生じると考えられる散乱光 I_s が含まれる⁽¹²⁾。

I_{thm} はレーザーシート光を入射せずに雰囲気気体からの発光のみを撮影した際、十分に小さな輝度値であったため無視した。また I_{dck} は予め光を遮断して撮影し、全ての撮影毎に差し引いた。その他の I_{ev} , I_s は、図 7 に示すような処理過程を経て撮影画像を補正した。すなわち、混合気からのレイリー散乱光 $I_{R,mix}$ は、 $I_{raw,mix}$ から I_s および I_{ev} を差し引いた。 I_s は、空間分布を有するために噴霧内部の当量比を再現できるように、燃料噴射時における噴霧近傍の雰囲気気体領域(噴霧軸より入射光側約 10 mm と設定し、横 21 ピクセルを算術平均した)の散乱光 $I_{raw,mixS}$ と雰囲気気体だけの同領域 $I_{raw,ambS}$ との差と

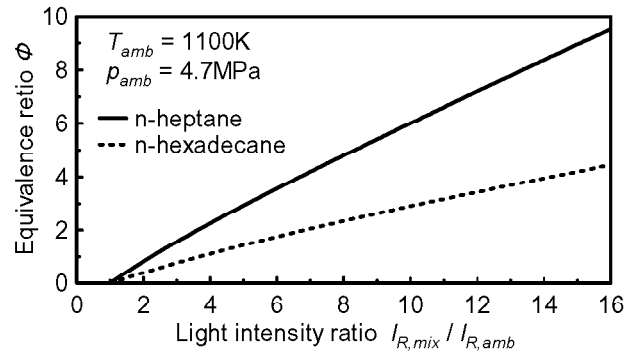


Fig. 5 Relation between light intensity ratio and equivalence ratio

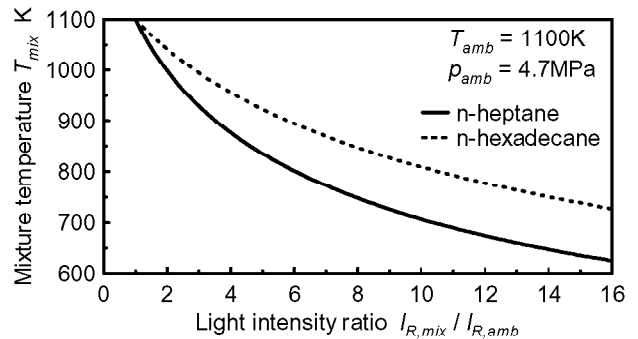


Fig. 6 Relation between light intensity ratio and mixture temperature

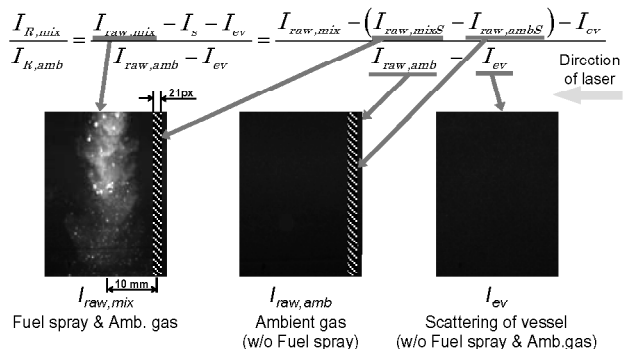


Fig. 7 Analysis of Rayleigh scattering images

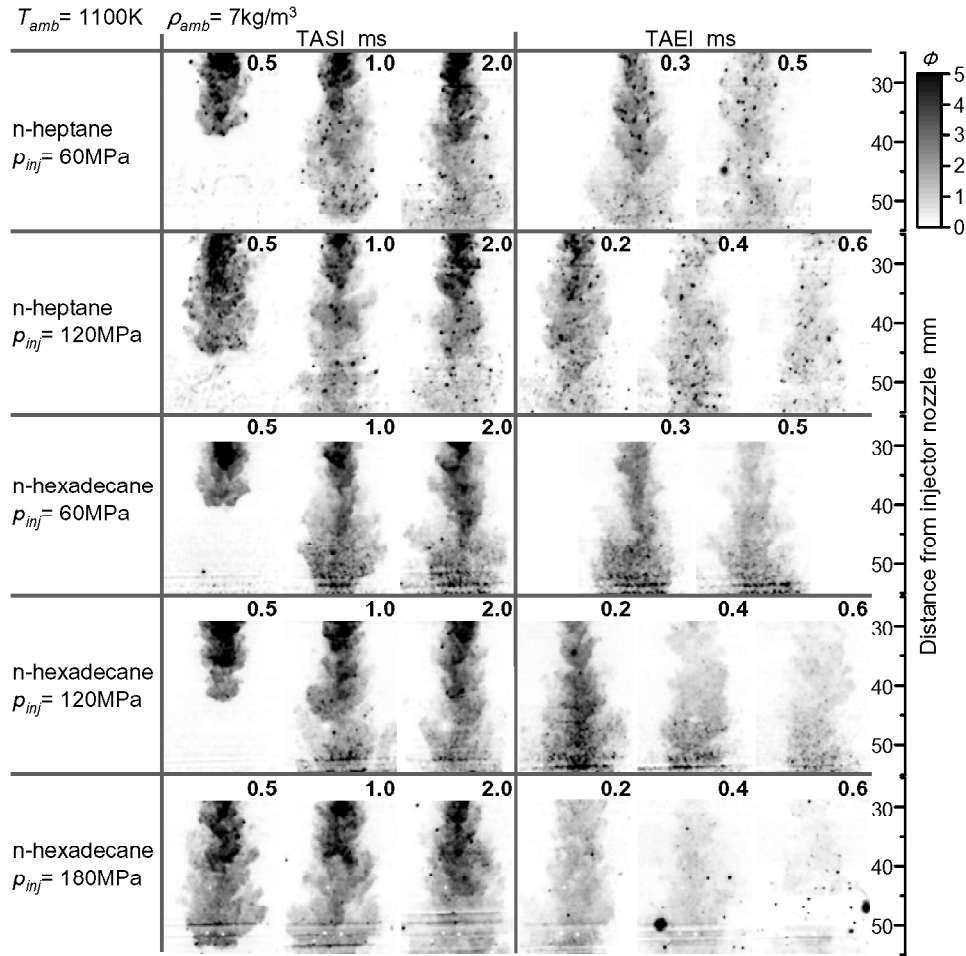


Fig. 8 Equivalence ratio images of the diesel spray

して求めた。加えて容器内および燃料からの不純物や液滴と思われる発光が見られた。画像ノイズ除去のため、ピクセル数 13×13 の Median フィルタ処理⁽¹²⁾を暗電流 I_{dark} を差し引いた後の全ての画像について行い、上記画像処理を実施した。

4. 結果および考察

4.1 噴霧発達過程における濃度分布の変化

図 8 に、雰囲気気密度 7 kg/m^3 、雰囲気気温度 1100 K 、各燃料、各噴射圧力での噴射過程および噴射終了後の当量比計算結果を示す。当量比の高低を色の濃淡で表し、各画像の上部に噴射開始後(TASI)および噴射終了後(TAEI)からの時間経過を示す。また図 3 で示した通り、噴射圧力 60 MPa の条件の場合 $120, 180 \text{ MPa}$ と比べ噴射終了時が約 0.1 ms 遅れるため、TAEI の表記は 0.1 ms 遅れた表記とした。ここで、一度の噴射で複数枚の撮影が困難であるため、各画像はそれぞれ異なる噴霧である。

n-heptane の噴射圧力 120 MPa の条件について、その噴射過程および噴射終了後に注目する。TASI 0.5 ms では、当量比 3 以上の高濃度の燃料蒸気が噴霧の大部分を占めた。また、時間経過と共に噴霧が下流部へと拡がりながら発達し、下流部の外縁領域において雰囲気気体との混合が進み、徐々に低当量比の領域が拡がる。ただし噴霧軸中心部付近において、ノズルチップ下 40 mm 程度まで、当量比 4 以上の燃料過濃な領域が継続した。この噴霧軸中心部の過濃領域は、噴霧発達過程における TASI 0.5 ms および 1.0 ms 、準定常噴流と想定される TASI 2.0 ms の場合でも存在した。一方、噴射終了後には噴霧全体において濃度の濃淡が小さく、低当量比の混合気が

分布した。噴霧軸中心部の過濃領域は消滅し、噴霧全体の当量比が低下、徐々に希薄、均一化される。

図 9 には図 8 の n-heptane、噴射圧力 120 MPa の解析結果を用いて、噴孔出口より $30\text{--}55 \text{ mm}$ の範囲における混合気を対象とした当量比の確率密度関数(Probability Density Function: 以下 PDF)を示す。以下 PDF の図は同範囲とした。ここで確率密度関数は、頻度分布より求めた頻度を各当量比で掛け、全ピクセル数で除した値である。TASI 0.5 ms では当量比 2 以上の過濃混合気の頻度が高いが、時間経過と共に高濃度混合気の頻度が低下し、当量比 1 以下の希薄混合気は時間経過に伴い増加する。さらに噴射終了後では、当量比 2 以上の混合気は減少し、希薄化された混合気が分布した。

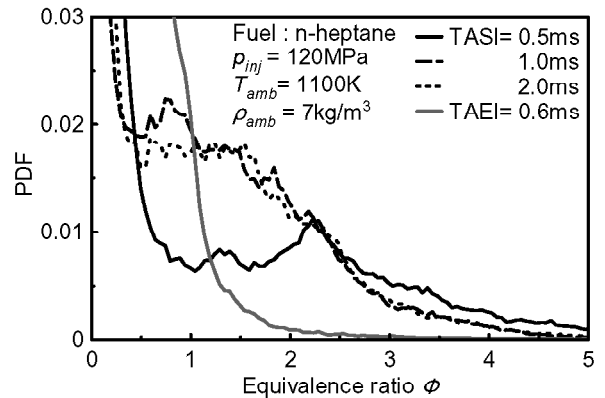


Fig. 9 PDF of equivalence ratio in spray process

4.2 雰囲気温度および密度が濃度分布に及ぼす影響

雰囲気温度および密度が濃度分布与える影響を考察するに先立ち、噴孔出口近傍から発達すると考えられる数密度の高い液滴群により形成される液相長さ x_{liq} について、下式の Siebers, Higgins らが導出した半実験式^{(15),(16)}により推算した。

$$\frac{x_{liq}}{d} = kA^\alpha B^\beta$$

$$A = \frac{\rho_{fuel}}{\rho_{amb}}, \quad B = \frac{C_{p,fuel}(T_{boil} - T_{fuel}) + h_{vap}}{C_{p,amb}(T_{amb} - T_{boil})} \quad (10)$$

$k = 10.5, \alpha = 0.58, \beta = 0.59$

d : 噴孔径, ρ_{fuel} : 燃料密度, ρ_{amb} : 雰囲気密度, h_{vap} : 蒸発潜熱, T_{boil} : 沸点, T_{fuel} : 燃料温度, T_{amb} : 雰囲気温度, $C_{p,fuel}$: 燃料の定圧比熱, $C_{p,amb}$: 雰囲気体の定圧比熱

図 10 に雰囲気密度 7, 15 kg/m³ における雰囲気温度による液相長さの変化を示す。雰囲気密度は液相長さに対する影響が大きく、雰囲気密度の増加によって液相長さが短縮される。高温高圧場に噴射された燃料は噴孔出口付近から雰囲気体とのせん断作用によって微粒化され、接触した雰囲気体から蒸発と温度上昇に要する熱量の供給を受ける。雰囲気密度の増加はせん断作用の増加、燃料の蒸発および温度上昇に資する熱容量の増加を伴うため、雰囲気密度の影響を強く受けて液相長さが変化したと考えられる。ただし、式(10)には噴射圧力や噴孔出口速度に関する項がない。これは Siebers らが測定した広範な噴射圧力条件における液相長さが、噴射圧力の影響をほとんど受けなかった⁽¹⁶⁾ ことに由来する。すなわち、噴射圧力の増加によって噴射率が増加するが、噴射速度の上昇によるせん断作用も増すため、それらが相殺して見かけ上、液相長さは噴射圧力の影響を受けなかったように観察されたと考えられる。

図 11 に燃料に n-heptane を用い、雰囲気密度 7, 15 kg/m³, 雰囲気温度 900, 1100 K とした各雰囲気条件の結果を示す。レイリー-散乱法より求めた画像上部に式(10)より求めた液相長さを模式的に示した。雰囲気密度が高くなるに従い全体的に希薄になった。また温度が低下することにより高濃度領域が増加した。図 12 に各密度・温度条件での確率密度関数を示す。密度 15 kg/m³ で 1100 K の条件が顕著に希薄化されており、密度変化による液相長さの短縮が当量比低下に及ぼす影響が大きい。

4.3 噴射圧力が濃度分布に及ぼす影響

図 8 の n-hexadecane における噴射圧力 60, 180 MPa との画像を比較すると、準定常噴流の TASI 2.0 ms において、噴射圧力 180 MPa では、下流部で希薄化されている。加えて、噴射終了後の当量比変化は、準定常噴流よりも顕著であり、噴射圧力の増加に従い希薄化の進行が早い。

図 13 に確率密度関数を示す。TASI 2.0 ms では高圧化に伴い希薄化しており、噴射終了後ではその変化がより顕著である。噴射圧力の増加によって、準定常噴流の TASI 2.0 ms の場合、前節の通り液相長さは噴射圧力によって変化しないが、噴霧の微粒化および運動量増加による乱流混合の促進により、計測範囲での混合気濃度分布が希薄化したと考える。

4.4 燃料性状が濃度分布に及ぼす影響

図 8 において、同噴射圧力条件の各種燃料による当量比の違いについて、噴霧下流部における混合気の当量比の低下は、揮発性の高い n-heptane の方が顕著であった。また、噴射終了後についても、噴射圧力ほどの影響はないが、n-heptane ではより短時間で希薄化した。

図 14 に n-heptane および n-hexadecane について、ノズルチップ先端からの距離に対する平均当量比を示す。ここで平

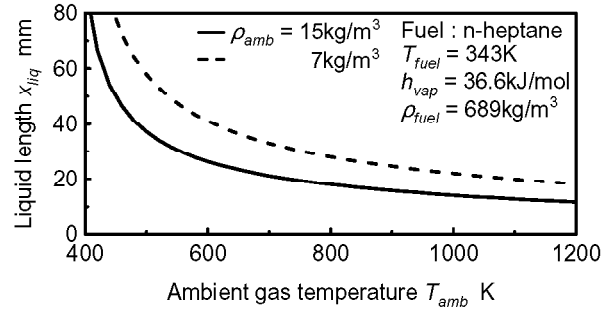


Fig. 10 Liquid length under each ambient conditions

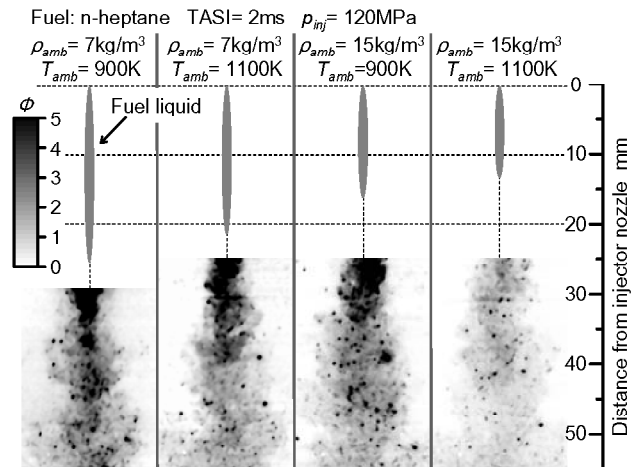


Fig. 11 Equivalence ratio images in each ambient density and temperature

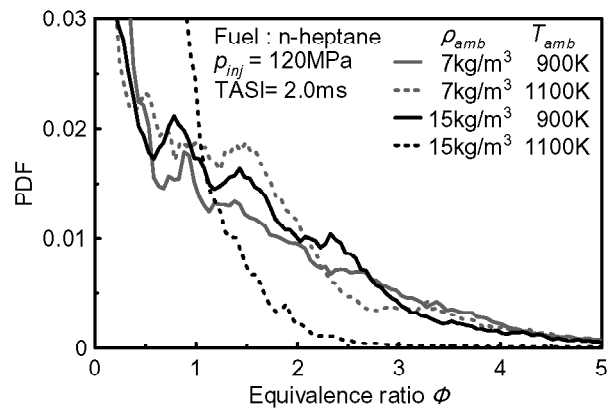


Fig. 12 PDF of equivalence ratio in each ambient conditions

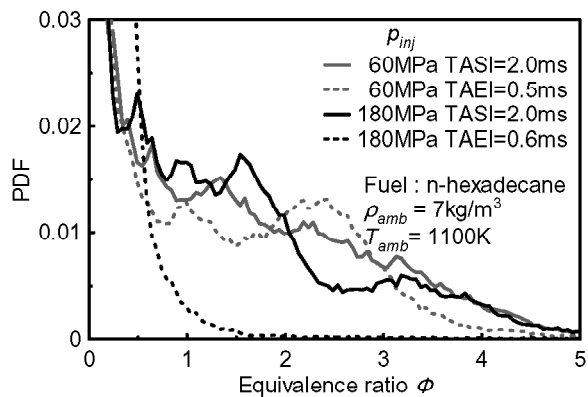


Fig. 13 PDF of equivalence ratio in each injection pressure

均当量比は、ノズルチップ先端からの各軸方向距離に対して±2.5 mmの領域を対象として算術平均した結果である。実線および破線は運動量理論⁽¹⁾より求めた当量比であり、実験値と理論曲線とが大差ないことがわかる。また噴霧上流部の当量比については燃料毎の差異は少ないが、下流部になるに従いその差は大きくなった。加えて下流部では、n-heptaneの当量比はn-hexadecaneと比べて低下した。運動量理論では、燃料の違いによる差は少ないが、下流部になるに従い、燃料の揮発性による蒸発、拡散の影響が現れたと考える。

図15にn-heptaneおよびn-hexadecaneの各噴射圧力での確率密度関数を示す。噴射圧力60 MPaで両燃料の当量比分布を比較すると、揮発性の高いn-heptaneが希薄化されている。またn-hexadecaneは、噴射圧力の増加に伴い希薄化し、噴射圧力180 MPaではn-heptaneの分布と同様の分布を示している。n-heptaneとn-hexadecaneとでは、液相長さはn-hexadecaneの方が長い。しかし、噴射圧力の増加による微粒化の促進、空気導入量の増加、乱流混合の促進等により、液相下流部での燃料の蒸発および空気との混合が促進され、確率密度関数の計算領域である噴孔出口より30~55 mmの範囲では、希薄化が現れたと考える。n-heptaneの燃料揮発性向上による希薄化と同様に、n-hexadecaneでも高压噴射化することにより、同程度の希薄化が可能である。

5. 結言

本研究では、ディーゼル燃焼場を模擬した高温高压静止場に噴射された燃料噴霧について、レイリー散乱法により混合気濃度の測定を試みた。以下に本研究で得た知見を示す。

- (1) レイリー散乱法により高温高压場におけるn-heptaneおよびn-hexadecaneの噴霧内部における混合気濃度分布が計測された。
- (2) 準定常噴流に達するまでの発達過程において、噴射開始後の時間経過と共に、噴霧内部の混合気濃度は希薄化する。
- (3) 雰囲気気密度および温度の増加は、噴霧液相部が短縮され混合気が希薄化する。
- (4) 噴射圧力の増加は、準定常噴流の混合気濃度を希薄化すると共に、噴射終了後における希薄化は顕著に現れる。
- (5) n-hexadecaneよりもn-heptaneの混合気濃度は、準定常噴流の噴霧下流部および噴射終了後の燃料濃度分布において希薄化する。

謝辞

本研究はNEDO「革新的次世代低公害車総合技術開発事業」の一環として推進していることを申し添える。また実験の遂行に際し、(独)産業技術総合研究所 佐藤謙一氏の協力を得たことをここに記し、謝意を表す。

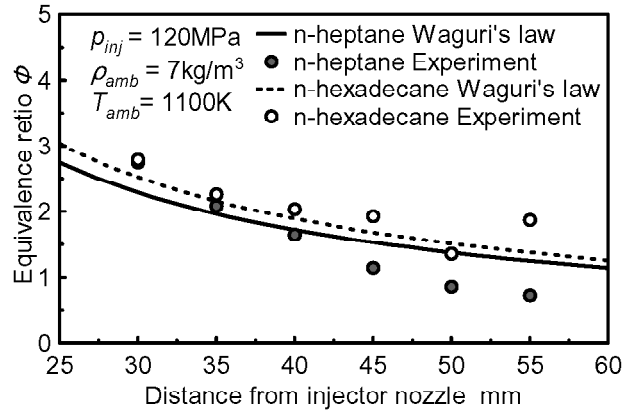


Fig. 14 Average equivalence ratio in distance from injector nozzle

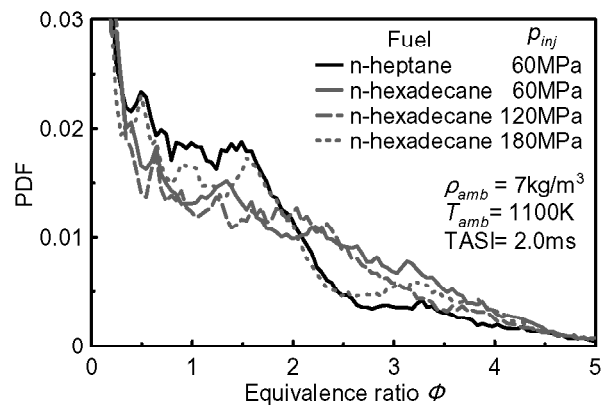


Fig. 15 PDF of equivalence ratio in two fuels

文献

- (1) 廣安博之, 角田敏一 他: ディーゼル噴霧の到達距離に関する研究, 機論, 44-385 (1978), 3208~3219
- (2) 小林治樹, 神本武征 他: 急速圧縮装置によるディーゼル燃焼に関する研究 第1報 噴霧と火炎との比較, 機論, 48-426 (1982), 389~397
- (3) J. D. Naber, D. L. Siebers: Effects of Gas Density and Vaporization on Penetration and Dispersion of Diesel Sprays, SAE Transaction, 105-3 (1996), 82~111
- (4) J. Senda, Y. Fukami, et al.: Visualization of Evaporative Diesel Spray Impinging Upon Wall Surface By Exciplex Fluorescence Method, SAE Paper, No.920578 (1992)
- (5) D. Choi, Y. Shima, et al.: The Effect of Fuel-Vapor Concentration on the Process of Initial Combustion and Soot Formation in a Di Diesel Engine Using LII and LIEF, SAE Paper, No.2001-01-1255 (2001)
- (6) 葉啓南, 神本武征 他: エキサイブレックス蛍光法によるディーゼル噴霧内の燃料蒸気濃度分布の画像計測, 機論, 60-569 (1994), 321~326
- (7) 辻村拓, 三田拓朗 他: レーザ診断法によるディーゼル噴霧特性に関する実験解析, 第77回マリンエンジニアリング学術講演会講演論文集 (2007), 89~90
- (8) 松岡信, 神本武征 他: ディーゼル機関の燃料噴射率の測定に関する研究, 内燃機関, Vol.12 No.133 (1973), 11~17
- (9) J. D. Naber, D. L. Siebers, et al., Natural Gas Autoignition Under Diesel Conditions: Experiments and Chemical Kinetic Modeling, SAE Paper, No.942034 (1994)


- (10) レーザ計測ハンドブック編集委員会: レーザ計測ハンドブック, 丸善 (1993), 84~85
- (11) C. Espey, J. E. Dec, et al.: Planar Laser Rayleigh Scattering for Quantitative Vapor-Fuel Imaging in a Diesel Jet, *Combustion and Flame*, 109 (1997), 65~86
- (12) C. A. Idicheria, L. Pickett: Quantitative Mixing Measurements in a Vaporizing Diesel Spray by Rayleigh Imaging, SAE Paper, No.2007-01-0647 (2007)
- (13) W.C. Gardiner, Y. Hidaka, et al.: Refractivity of Combustion Gases, *Combustion and Flame*, 40 (1981), 213~219
- (14) M.M. El-Wakil, P. S. Myers, et al.: Fuel Vaporization and Ignition Lag in Diesel Combustion, SAE Transaction, 64 (1956), 712~726
- (15) B. S. Higgins, C. J. Mueller, et al.: Measurements of Fuel Effects on Liquid-Phase Penetration in DI Sprays, SAE Paper, No.1999-01-0519 (1999)
- (16) D. Siebers: Liquid-Phase Fuel Penetration in Diesel Sprays, SAE Paper, No.980809 (1998)
- (17) 和栗雄太郎, 藤井勝 他: ディーゼル機関燃料噴霧の到達距離に関する研究, *機論*, 25-156 (1959), 820~826




三田 拓朗
 東海大学大学院
 工学研究科 機械工学専攻 (当時)
 〒257-0003
 神奈川県平塚市北金目 1117
 略歴: 2008 年東海大学工学研究科修士課程修了, 同年(株)いすゞ中央研究所に入社. 主としてディーゼル機関に関する研究に従事.



辻村 拓
 (独)産業技術総合研究所
 新燃料自動車技術研究センター
 新燃料燃焼チーム
 〒305-8564
 茨城県つくば市並木 1-2-1
 略歴: 2004 年同志社大学工学研究科博士課程修了, 同年より現職. 光学計測を用いた噴霧計測および新燃料および新燃焼法に関する研究に従事



陳 之立
 東海大学 動力機械工学科
 准教授
 〒257-0003
 神奈川県平塚市北金目 1117
 略歴: 中国西安交通大学卒, 茨城大学助手を経て 2004 年より現職. ディーゼル機関の新燃料, 新燃焼法に関する研究, 燃料電池に関する研究に従事



後藤 新一
 (独)産業技術総合研究所
 新燃料自動車技術研究センター
 センター長
 〒305-8564
 茨城県つくば市並木 1-2-1
 略歴: 北海道大学博士課程修了.
 新燃料利用システムの研究開発に従事