

バイオディーゼル燃料の基礎的燃焼特性

千田 二郎 *1, 鈴木 哲平 *2

Fundamental Study of Combustion Characteristics of Biodiesel fuel

Jiro SENDA, Teppei SUZUKI

Recently, biodiesel fuels have been recognized as an environmental friendly alternative fuel for diesel engines. From the previous research, the authors have reported that NO_x emission of biodiesel fuels was slightly increased, but PM emission of biodiesel fuels was decreased than that of gas oil using a DI diesel engine. In order to clarify the soot formation process, it is necessary to get more information on the mechanisms of in-cylinder flame combustion process and soot formation process of biodiesel fuels. In this study, a rapid compression and expansion machine (RCEM) was applied to simulate DI diesel engine combustion process. The flame characteristics were investigated by two-color method, and detailed soot formation process was detected by using of laser-induced incandescence (LII). A DI diesel engine was applied to investigate emission characteristics.

Key Words: Alternative Fuel, Combustion, Diesel Engine / Biodiesel Fuel, Flame Temperature, Soot Formation, Emission

1. 緒言

代替エネルギーの適用に際して求められるキーワードには、「脱化石燃料エネルギー」、「環境調和型エネルギー」、「資源循環型エネルギー」などが挙げられ、植物由来のバイオディーゼル燃料 (BDF) が有望視されている。この BDF に関しては、古くは Dr. Rudolf Diesel が発明した圧縮点火機関の燃料として、近年は軽油代替燃料として活路が見出されている。

現在、軽油代替燃料として成り得る BDF の燃料性状は数多く存在し、規格が統一されていないのが現状である。このため最適な燃料性状の規格統一に向け、各種 BDF を既存のディーゼル機関に適用した際の機関性能および排出ガス特性に関する研究が数多く行なわれ、詳細に検討されている⁽¹⁾。しかし、さらなる環境負荷低減を目指した燃料選定を行なうには、機関内における BDF の噴霧および着火・燃焼機構に注目し、それらの挙動と排気特性との関連性を明らかにする必要がある。

本実験では、実際に各自治体のディーゼル車で使用されている製造方法の異なる二種類の廃食油 BDF を用いた。各燃料の着火・燃焼特性把握のため、急速圧縮膨張装置 (RCEM) 内で二色法およびレーザ誘起赤熱 (LII) 法を適用した。また、単気筒空冷式小型高速ディーゼル機関に供試燃料を適用することによって排気特性の把握を行なった。

2. 供試燃料

2-1. バイオディーゼル燃料の製造方法および過程

植物油および廃食油そのものは、粘度が軽油の 10 倍程度と高く、低セタン価特性よりディーゼル燃焼における着火性が悪く、既存のディーゼル機関での使用には適していない。そこで、京都市および和歌山市で使用しているバイオディーゼル燃料は、以下の各方法により燃料性状の改質を行なっている。

2-1-1. 京都市のバイオディーゼル燃料

京都市の清掃車や市バスで使用しているバイオディーゼル燃料 (B100, B20) は、図 1 に示す製造方法により燃料の改質を行なっている。市内のモデル地区の各家庭、レストラン等から回収した廃食油をエステル化し、この反応により得られるエステル化合物が実際に京都市で使用しているバイオディーゼル燃料 (B100) である⁽²⁾。

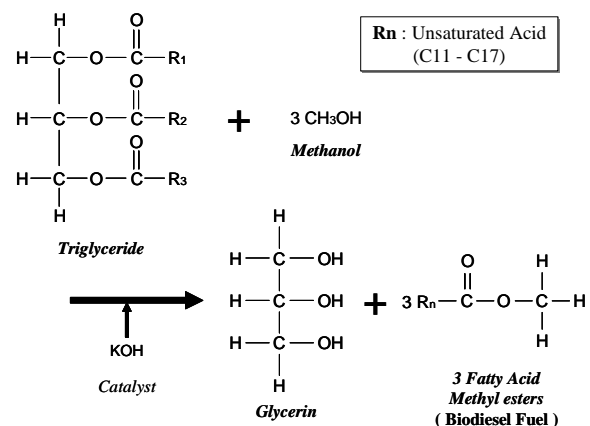


Fig.1 Transesterification of fatty acid

*原稿受付 2004年6月18日。

*1同志社大学 (〒610-0321 京都市京田辺市多々羅都谷 1-3)。

*2同志社大学大学院 (同上)。

本実験には、JIS 2号軽油 (Gas oil) とバイオディーゼル燃料 (B100) を混合体積分率で 80 対 20 の割合で混合した燃料 (B20) をあわせて使用した。

2-1-2. 和歌山市のバイオディーゼル燃料

和歌山県内の運送業者やバス会社で使用しているバイオディーゼル燃料 (i-BDF) は、食品工場や飲食店などから回収した廃植物油から不純物を取り除き、オゾン処理を行なう。この処理により得られる精製植物油と灯油とを混合体積分率で約 30 対 70 の割合で混合した燃料が i-BDF である。

2-2. バイオディーゼル燃料の特徴

表 1 に Gas oil, B100 および i-BDF の性状を示す。各バイオディーゼル燃料は Gas oil に対し、動粘度が約 2 倍と高いが、セタン指数がほぼ同等で、硫黄分が非常に少なく、燃料中に酸素原子を有する含酸素燃料という特徴を有する。特に B100 は、図 2 に示すように、高沸点・低揮発性の燃料である。

3. 実験装置、実験条件および実験方法

3-1. 着火・燃焼特性

3-1-1. 実験装置

着火・燃焼実験には、急速圧縮膨張装置

(RCEM) を使用し、一回の噴霧・燃焼過程の把握を行なった。RCEM の bore × stroke は $f100 \times 450$ mm, 排気量は 3534 cc である。燃料噴射装置は電子制御方式を採用し、RCEM の遅延回路からの噴射信号により任意の噴射時期に燃料を噴射でき、さらに噴射期間も任意に設定できる。

3-1-2. 実験条件および方法

着火・燃焼実験の条件を表 2 に示す。

(1) 画像二色法

光学系を図 3 に示す。燃焼室内の現象はダイクロミックミラー (赤反射 50%, 反射波長 590 nm) により分光され、2 台のハイスピードビデオカメラにより撮影される。カメラの前には、透過中心波長 620 nm (半値幅 8 nm) および透過中心波長 482 nm (半値幅 18 nm) の光干渉フィルタを設置した。また、最適な輝炎発光値を得るため ND フィルタを用いた。画像二色法とは、燃料噴霧火炎中のすす粒子群からのふく射による連続スペクトルに着目し、すすの酸化や消滅に影響する火炎温度と光路上に存在するすすの総粒子数を示す指標である KL 値を算出³⁾する実験手法である。

Table 1 Fuel properties

	JIS No.2 Gas oil	Bio diesel fuel (B100)	i-Bio diesel fuel (i-BDF)
Density [kg/m ³]	832 - 838	887 - 889	825 - 830
Kinematic viscosity [mm ² /s]	2.8	5.5	3.2 - 4.5
Cetane Index	55 - 56	51 - 52	52 - 54
Flash point [K]	332 - 341	471 - 473	322 - 323
Distillation T10 [K]	488 - 498	606 - 616	451 - 463
Distillation T50 [K]	548 - 558	609 - 619	480 - 518
Distillation T90 [K]	605 - 618	628 - 641	581 - 598
Clog point [K]	264 - 271	267 - 270	231 - 232
Carbon [mass%]	86.7	77.1 - 77.9	
Hydrogen [mass%]	12.8	11.7 - 11.8	
Oxygen [mass%]	-	11.1 - 11.2	
Sulfur [mass%]	0.02 - 0.05	0.0001	0.002 - 0.020
Calorific value [MJ/kg]	44.5 - 45.5	37.7	44.0 - 45.0

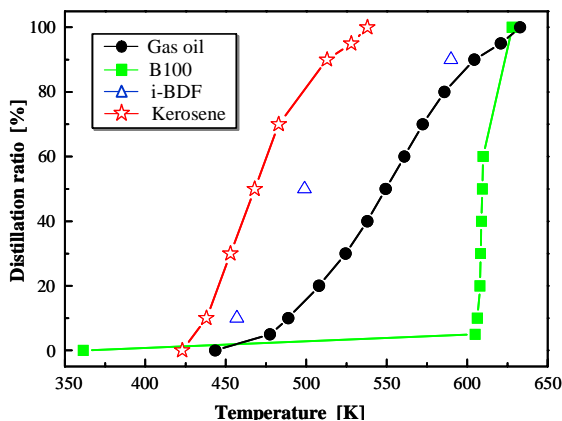


Fig.2 Distillation temperature of test fuels

Table 2 Experimental conditions

Equivalent crank speed	200 [rpm]
Water jacket temperature	353 [K]
Compression ratio	15
Injection nozzle dimension	$d_n = 0.18$ [mm], $l_n/d_n = 4.17$
Injection pressure	20 [MPa]
Injection quantity	10.0 ± 1.0 [mg]
Injection timing	5.0 ± 0.25 [deg. CA BTDC]
Excess - air ratio	25
Ambient temperature at injection	750 [K]
Ambient pressure at injection	3.2 [MPa]
Initial cylinder pressure	0.1 [MPa]
Fuel temperature	$T_{fuel} = 313$ [K]
Fuel	Gas oil, B20, B100, i-BDF

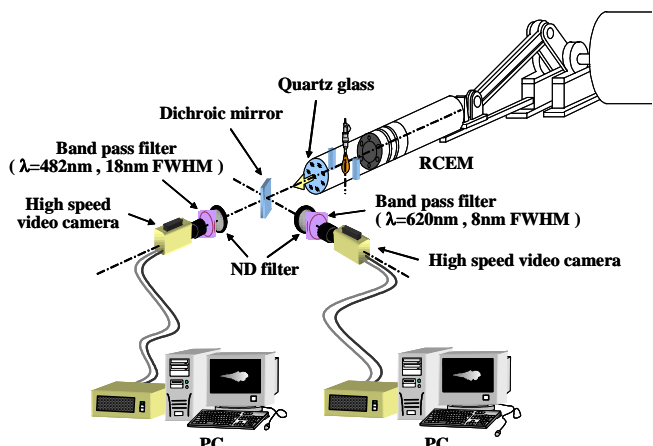


Fig.3 Optical system for two-color method

(2) レーザ誘起赤熱 (LII) 法

図4に光学系を示す。光源にはNd:YAG レーザの第二高調波 ($\lambda=532\text{ nm}$) を用い、各種シリンドリカルレンズにより高さ 38 mm、厚さ 0.25 mm のシート光を形成し、燃焼室内ノズル中心軸上に照射する。LII シグナルはレーザシート光の入射軸に対して直角方向から IL 付 CCD カメラ (IL のゲート幅 20 ns) により検出した。なお、IL 付 CCD カメラの手前に透過中心波長 450 nm (半値幅 3 nm) の光干渉フィルタと、弾性散乱光を除去するために中心波長 532 nm (半値幅 3 nm) のノッチフィルタを取り付けた。

LII の原理は、強力なレーザシートを噴霧火炎中のすす粒子に照射し、粒子の温度をすすの蒸発温度 (約 4500 K) まで瞬間的に上昇させ、このときすす粒子が放射する白熱光 (黒体放射) を超高速シャッターカメラで撮影することにより、レーザシート面内のすす粒子濃度を可視化するものである⁽⁴⁾。

3.2. 排気特性

3.2.1. 実験装置

供試機関には、強制空冷式 4 サイクル単気筒直噴式ディーゼル機関 (YANMER : L70A) を用いた。表 3 に機関諸元を示す。

排気測定には、延長された排気管から排気ガスを直接サンプリングし、各計測機器に導いた。ここで、空気過剰率はセンサ、 NO_x はジルコニアセンサ式 NO センサ、PM は光透過式スモークメータを用い、HC、CO および CO_2 は自動車排ガス測定器にて計測し、排気温度も同時に記録した。

3.2.2. 実験条件および実験方法

実験条件を表 4 に示す。供試機関の回転数を 3600 rpm 一定で駆動させ、筒内指圧計測および排気ガス計測を同時に行なった。

4. 実験結果および考察

4.1. 筒内指圧線図解析

図 5 に、各供試燃料の着火実験から計測された筒

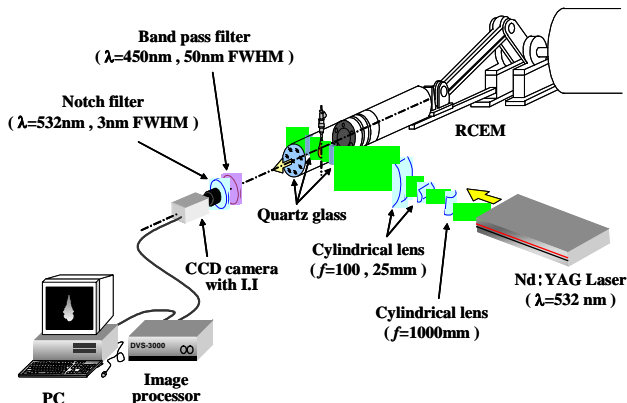


Fig.4 Optical system for LII method

内圧力をもとに算出した熱発生率を示す。

予混合的燃焼期間に着目すると、Gas oil, B20, B100, i-BDF の順に熱発生率は増大し、拡散的燃焼期間は Gas oil, B20, i-BDF, B100 の順に減少する。特に i-BDF に関しては、着火遅れおよび後燃え期間が他の燃料に比べ長期化している。主に高沸点成分から構成される B100 は、可燃混合気形成過程に十分な時間を要するため、着火遅れ期間は長期化する。さらに、B100 は含酸素燃料であることから量論空燃比の低下、つまり噴霧火炎内の平均当量比の低下につながる⁽⁵⁾。このため、全燃料における予混合的燃焼期間の熱発生率のピーク値が i-BDF に次いで

Table 3 Specification of test engine

Engine type	Air cooled 4cycle Diesel Engine
Injection pump type	Bosch type
Combustion system	Direct injection
Bore × stroke	$\phi 78 \times 62$ [mm]
Displacement volume	296 [cc]
Equivalent rated speed	3600 [rpm]
Engine output (standard)	4.4 [kW]
Injection timing (FID)	BTDC 14 [deg.CA] \pm 1 [deg.CA]
Injection duration	20 [deg.]
Injection quantity	17.5 [cc] / 1000 [ST]
Nozzle hole number / diameter	4 / 0.21 [mm]
Nozzle opening pressure	20.6 [MPa]

Table 4 Experimental condition

Displacement volume	296 [cc]
Bore × Stroke	$\phi 78 \times 62$ [mm]
Combustion chamber shape	Toroidal Type
Top clearance	0.6 [mm]
Compression ratio	19.0
Injection timing	14 [deg.CA BTDC]
Engine Load	11, 23, 43, 55, 66, 76, 88 [%]
Fuel	Gas oil, B20, B100, i-BDF

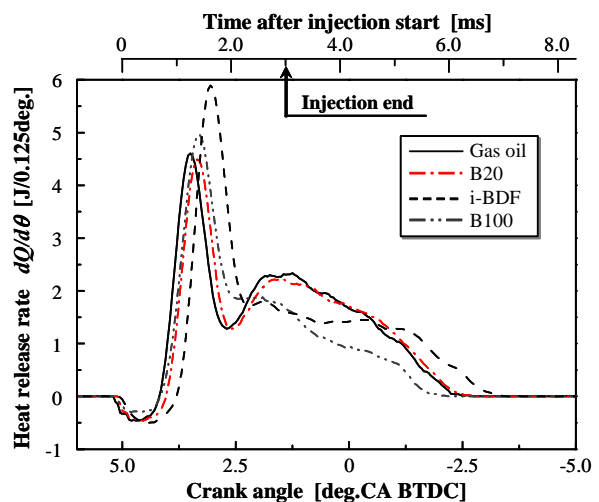


Fig.5 Comparison of combustion characteristics

大きく、その後の拡散的燃焼期間の熱発生率の減少傾向は、他の燃料に比べ顕著となると考えられる。

4.2. 画像二色法による噴霧火炎特性の把握

(1) 火炎温度分布画像およびKL値分布画像

各燃料に対する二次元火炎温度分布および噴霧火炎内におけるKL値分布の代表解析画像を時系列で図6に示す。

Gas oilの火炎温度は噴霧火炎中間領域で高く、その部分におけるすす濃度は高い。また、B20、B100の順に、ほぼ均一な火炎高温領域が噴霧火炎全体に分布し、噴霧火炎内に存在する高すす濃度領域は抑制され、総すす濃度の低下が確認できる。一方、i-BDFの噴霧火炎は高温領域の形成が遅れ、噴霧火炎全域において比較的低い火炎温度を示す。また、

すす濃度は噴霧火炎外縁部に集中して存在することが確認できる。

(2) 噴霧火炎の火炎温度分布

図7は、各火炎温度の火炎温度占有面積を時間変化で表わしたものである。

火炎面積に占める高温領域の分布はB100が一番大きく、次いでGas oilおよびi-BDFとなる。特にB100の面積に関しては、燃料噴射開始後4.4ms付近を中心とした増加傾向が顕著である。これは、B100の特異な燃料性状が関与していると考えられる。高粘性・高沸点成分からなるB100の噴霧軸心部は、Gas oilに比べ大きな運動量を有する。このため、燃料噴射終了後からの燃料の蒸発促進効果により、火炎中心に巻き込む空気と混合気との反応が活

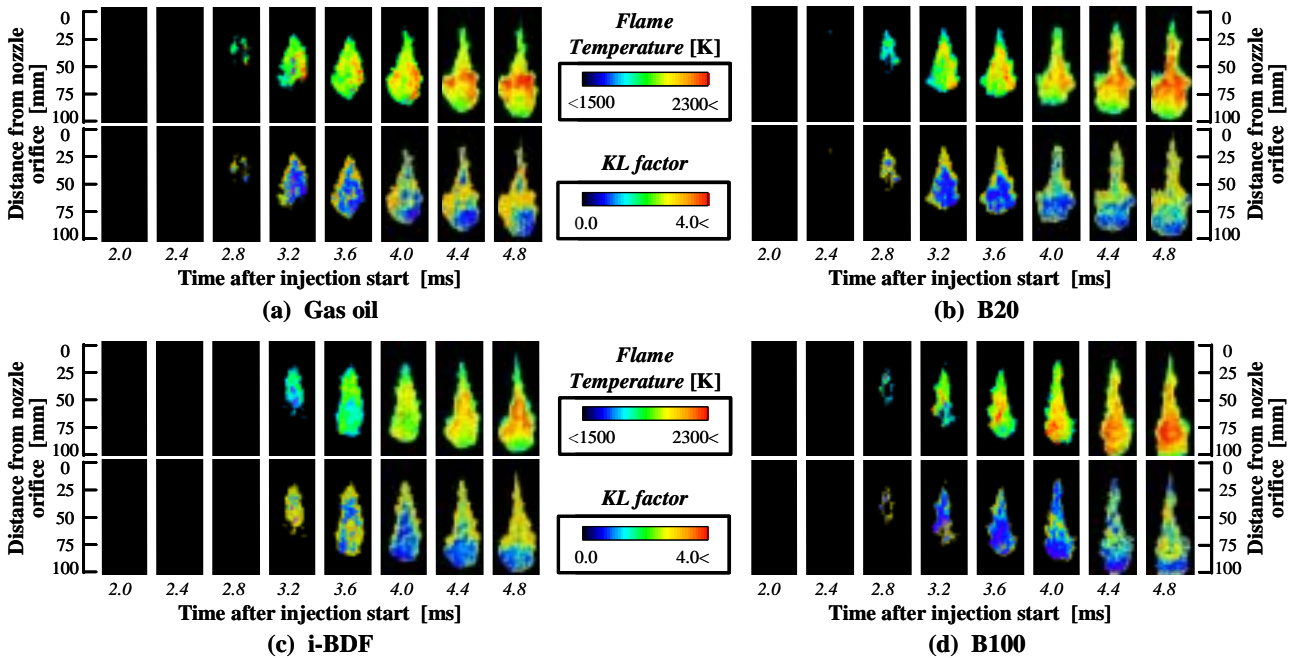


Fig.6 Temporal change in flame structure by two-color method

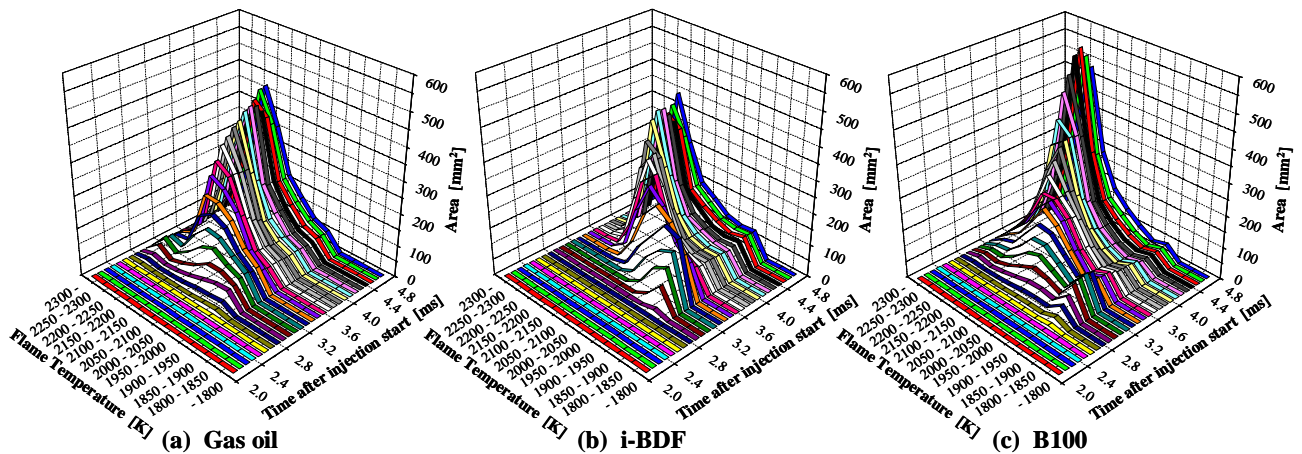


Fig.7 Temporal change in flame temperature

発化する．これに加え，B100は燃料構造中に酸素原子を有するため，量論空燃比の低下^⑥を引き起こすことも要因として挙げられる．

4.3. レーザ誘起赤熱法 (LII) によるすす生成特性の把握

(1) すず発光強度分布画像

図8に噴霧火炎根元部を撮影したすす発光強度分布の時系列画像を示す．

Gas oil, B20とともにすす発光の高強度領域が常に観察できる．つまり，すす生成が活発であると考えられる．しかし，噴射開始後5.2msのB100, i-BDFのすす発光強度は弱く，その時期におけるすす発光分布も小さいことが観察できる．

(2) すず散乱光強度値の分布および変化

図9に時系列変化に対する面積積算すす発光強度値の分布を燃料ごとに示す．

燃焼期間中における Gas oil の各すす発光強度値分布は常に大きい．特に，燃料噴射終了の影響で噴

霧の運動量が減少する燃料噴射開始後4.4ms以降の面積積算すす発光強度値の増大が顕著である．

B100, i-BDFは燃料噴射開始後2.4–2.8msに面積積算すす発光強度値のピークを示し，その後はリアに減少する．ここで，燃焼後期の噴霧根元領域におけるB100, i-BDFの火炎温度分布はGas oilに比べ高い．つまり火炎高温領域の分布により，すす生成が活発化することよりもすす酸化の促進が勝り^⑦，火炎内すす濃度低下につながったと考えられる．

4.4. エンジン排ガス特性

機関性能および排気特性を図10に示す．ここで本実験では，PM濃度の計測に光透過式スモークメータを用いたため，主にDry-soot成分が検出されていると思われる．NO_x濃度に関しては，全燃料とも排出傾向は類似しており，各濃度値の差もほとんど見られない．PM濃度は，全負荷条件においてB20およびi-BDFは，ほぼ同様の排出傾向を示す．また，中負荷程度まで排出濃度はGas oilに比べ少ないが，

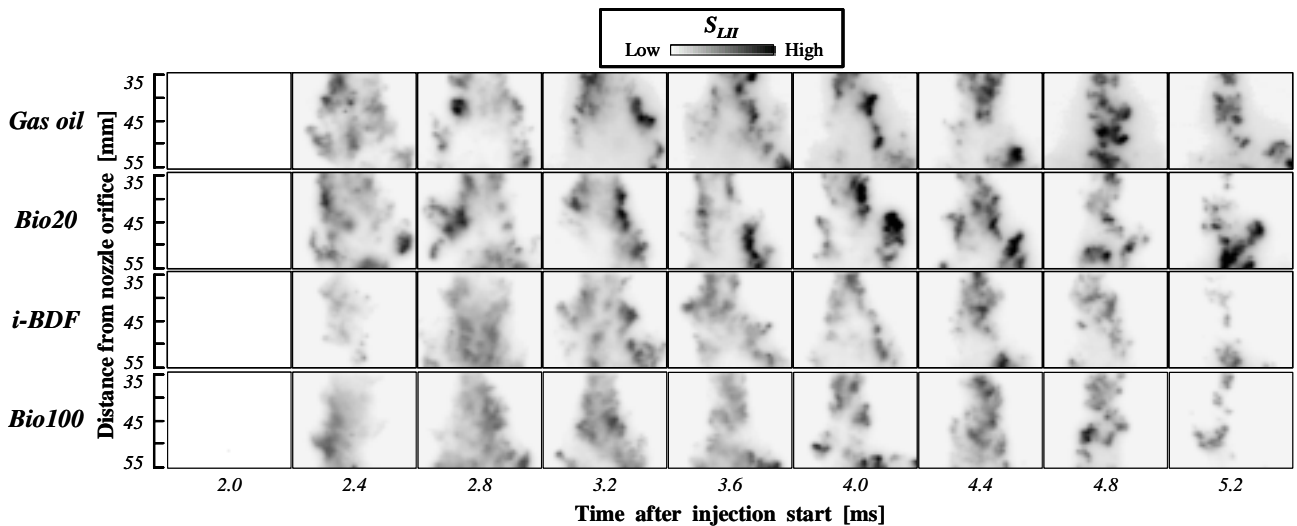


Fig.8 Temporal change in soot distribution by LII

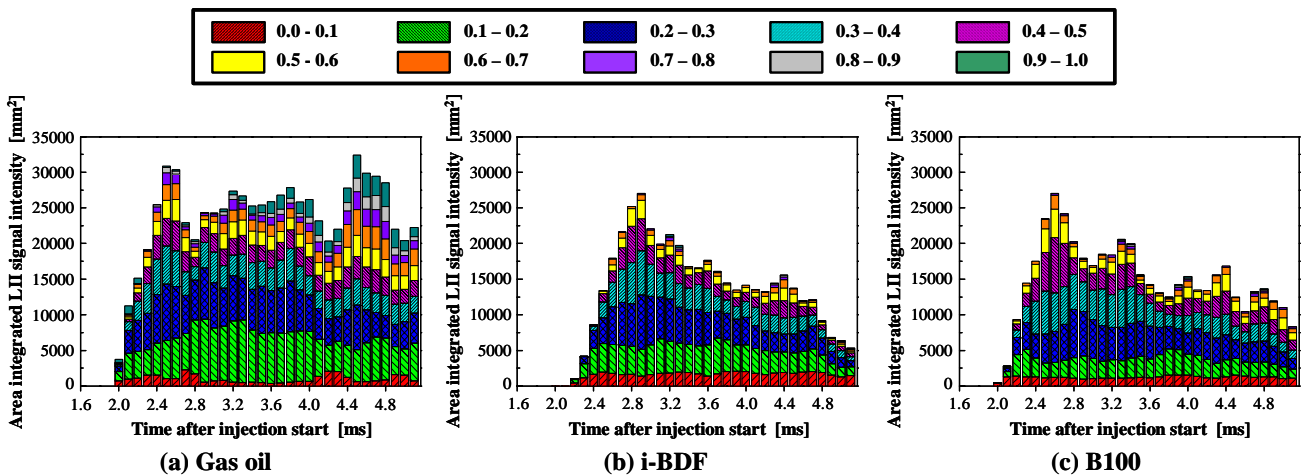


Fig.9 Temporal change in area integrated LII signal intensity

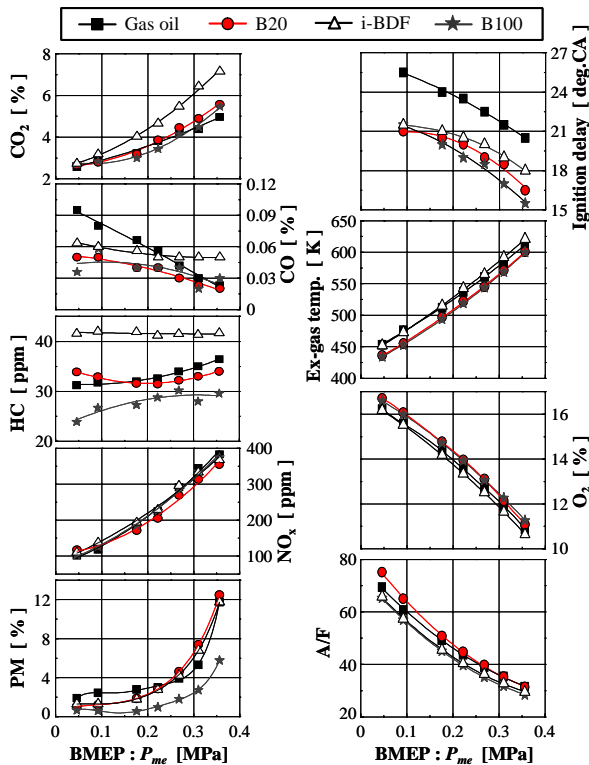


Fig.10 Combustion and emission characteristics with engine load in engine experiments

高負荷時ではその関係が逆転する．多量に燃料を必要とする高負荷時において，高粘性・低揮発性の廃食油（BDF）混合燃料は，燃焼室壁面に多くの燃料が付着し堆積すると考えられるが，揮発性の高い Gas oil は壁面に接触，付着しても速やかに蒸発，燃焼してしまう．つまり，壁面衝突後における燃焼挙動の違いにより，以上の排出結果が得られたと考えられる．しかし，B100 の PM 濃度は，全負荷条件において小さいことがわかる．このときも，燃料の一部は壁面に付着すると考えられるが，含酸素効果による燃焼の改善が大きいと考えられる．つまり，燃料構造中に酸素原子を有する廃食油（BDF）混合燃料は，量論空燃比を低下させ⁸⁾，PM 濃度の低下に寄与したと考えられる．ここで，排出される PM，特にすすに関しては，高温火炎内の酸素不足により生じたすす前駆物質を核として，これが凝集し成長・合体を繰り返し生成したものである⁹⁾．このことから，あと燃え期間の影響で燃焼が悪化することよりも，拡散的燃焼期間での PM 生成の改善が，結果的に PM 濃度を減少させたと考えられる．

CO は燃焼の中間生成物であり，燃焼反応が完結しない状態で多量に排出され，HC との関係が大きい¹⁰⁾と考えられる．HC 濃度に関しては，i-BDF 以外の燃料において，廃食油（BDF）混合割合の増加に

ともない減少するが，i-BDF に関しては全負荷条件に対して濃度が高く，ほぼ 42 ppm 一定で推移している．また，CO 濃度は，BMEP が増加するにつれ Gas oil はリニアに減少するが，廃食油（BDF）混合割合が増加するほどその減少率は緩やかとなる．特に，i-BDF に関してはその減少傾向は非常に緩やかなものであり，HC 濃度と同様，他の燃料に比べ排出傾向が顕著に異なる．また，CO₂ 濃度に関しては，i-BDF の排出濃度が他の燃料に比べ高濃度を示すことがわかる．さらに，空燃比 A/F に関しては，B100 および i-BDF の傾向は類似しており，他の燃料よりも小さな値を示すことから，燃焼室内でリーンな燃焼をしていると考えられる．

以上の結果から i-BDF に関しては，燃焼反応は活発に行なわれると考えられるが，実際には運転維持に必要な多量の燃料を燃焼室内に供給している．そのため，i-BDF を主に構成する灯油成分，つまり自着火性の低い低沸点成分の存在¹¹⁾により燃焼室内は過濃となり，供給される全燃料が十分に燃焼を行なうことなく，燃料の多くが HC として排気されたと考えられる．

5. 結言

RCEM 内における各種廃食油 BDF の着火・燃焼特性，すす生成特性および実機関内における排気特性の把握を行なった．以下に，本実験から得られた知見を記す．

- 1) Gas oil の高火炎温度は噴霧火炎中間点付近に存在するが，B100 の高火炎温度は噴霧火炎全体に均一に存在し，KL 値分布は著しく減少する．一方，i-BDF の高火炎温度領域の形成は遅い．
- 2) Gas oil の LII シグナル強度分布は，各測定範囲内および各時間帯において常に高い．しかし，廃食油（BDF）混合割合の増加により，各測定範囲内での LII シグナル強度の減少に加え，時間経過にともなう顕著な減少傾向が確認できる．
- 3) 含酸素燃料である廃食油（BDF）混合燃料の PM 濃度は，Gas oil に比べ減少傾向が顕著であり，NO_x 濃度に関しては，燃料性状の違いによらず，ほぼ同等の排出特性を示す．また，非メチルエステル化燃料である i-BDF の HC 排出濃度は非常に高く，機関運転条件の影響を受けやすい．

参考文献略