分解軽油を混合したバイオディーゼル燃料の軽質化に関する研究*

(第2報, 着火, 燃焼およびすす生成特性の把握)

井上 泰宏^{*1}, 久米 秀典^{*2}, 川辺 研^{*3}
神田 俊久^{*3}, 千田 二郎^{*4}

Research of Biodeisel Fuel to Lighter Quality by Mixing Light Cycle Oil (2nd Report, Analysis of Ignition, Combustion and Soot Formation Characteristics)

Yasuhiro INOUE, Syusuke KUME, Ken KAWABE,
Toshihisa KANDA and Jiro SENDA^{*5}

^{*5} Department of Mechanical Engineering, Doshisha University,
1-3 Tataramiyakodani, Kyotanabe-shi, Kyoto, 610-0321 Japan

In this study, Fatty acid methyl ester (FAME) becomes light quality by mixed with light cycle oil (LCO). This method has the effect that physical characteristic of FAME is improved. This paper describes the ignition, combustion and soot formation characteristics in the mixed fuel of FAME and LCO. The soot formation characteristics of the mixing fuels is investigated by Laser Induced Incandescence (LII) in the constant volume combustion vessel. The result of this experiment shows the ignition characteristics of the fuel and amount of soot formation is controlled by changing the mixed ratio of FAME and LCO. In other word, the ignition delay is shortened and the soot formation characteristic decreases as mixing ration of FAME increase.

Key Words: Biodiesel Fuel, Fatty Acid Methyl Ester, Light Cycle Oil, Ignition Characteristic, Soot Formation

1. 結 言

資源循環型社会の形成や低炭素化社会の実現が叫ばれる中, 再生可能かつカーボンニュートラルな特性を持つバイオディーゼル燃料(Fatty Acid Methyl Ester; FAME)が注目されている⁽¹⁾。また, FAMEは軽油に比べすす(PM)の低減効果を有するため⁽²⁾, 環境への負荷は少ない。一方で, FAMEは多種の高沸点成分で構成されるため, 低負荷時に燃焼室内に未燃成分が残り, エンジントラブルを引き起こすといった問題を抱えている⁽³⁾。そこで筆者らはFAMEの物理的特性を改善するため, 千田らの提案する燃料設計手法⁽⁴⁾に基づき低沸点燃料として, 炭化水素系燃料を混合し様々な研究を行ってきた⁽⁵⁾⁻⁽⁷⁾。本研究では, FAMEの軽質化だけではなく資源の有効利用も視野に入れ, 原油精製過程で余剰傾向にある分解軽油(Light Cycle Oil; LCO)を低沸点燃料としてFAMEに混合する。FAMEとLCO

は沸点および動粘度だけでなく, セタン価, 酸素含有率および芳香族分といった種々の物性値が大幅に異なる。そのため, 混合燃料における噴霧構造の把握に加え, これらの諸因子が着火, 燃焼および排気特性に及ぼす影響を調査する必要がある。前報にて著者らは, FAMEにLCOを混合することで噴霧特性が改善されるとの知見を得ており, 希薄な混合気の形成が期待できる結果を提示している。

本報ではLCOの混合によるFAMEの軽質化が着火, 燃焼およびすす生成特性に及ぼす影響を把握することを目的としている。実験では, 定容燃焼容器にてレーザ誘起赤熱法を適用しすす生成特性を評価した。その結果, FAMEとLCOの混合割合を変化させることにより燃料の着火性およびすす生成量を制御することが可能になるとの知見を得た。

2. 供試燃料

2・1 燃料設計手法

本手法は燃料設計手法⁽⁴⁾に基づくものであり, 低沸点燃料と高沸点燃料を混合した場合の飽和蒸気圧曲線の概念図を図1に示す。沸点の異なる燃料を混合することで, 互いの飽和蒸気圧曲

* 原稿受付 2009年11月26日。

^{*1} 学生員, 同志社大学大学院工学研究科機械工学専攻(〒610-0321 京田辺市多々羅都谷1-3)。

^{*2} 同志社大学大学院工学研究科機械工学専攻。

^{*3} ヤンマー(株)(〒521-0013 米原市梅ヶ原1600-4)。

^{*4} 正員, フェロー, 同志社大学理工学部。

E-mail: jsenda@mail.doshisha.ac.jp

線が引き寄せ合い、各々の飽和蒸気圧曲線の間に気液が混在する二相領域が形成される。つまり、高沸点成分に低沸点成分を混合することにより、高沸点成分の蒸発性を向上させることが可能となる。本研究では、高沸点成分として FAME、低沸点成分として LCO を用い、これらの概念を応用することで FAME の軽質化を図った。

2・2 供試燃料の組成および性状 表1に供試燃料の組成および性状を示す。供試燃料として FAME, LCO およびこれらを質量割合で 20%ずつ変化させた混合燃料を用いた。なお、リファレンスとして JIS1 号軽油を使用した。供試燃料の性状について FAME は軽油と比べ、動粘度が高いが、セタン指数は同等の値を示す。また、アロマフリーであることに加え、燃料中に 11.2%の酸素を含む。一方、LCO は軽油とほぼ同等の動粘度・蒸発性を有する反面、セタン指数が明らかに低く、アロマ分を多量に含む。混合燃料に関して、混合する燃料の割合を変化させることで、燃料の物性値を自在に制御することが可能となる。ここで、図2に各燃料の蒸留曲線を示す。FAME は多種の高沸点成分から構成されており、625K 付近で急激に蒸発する。LCO は 500K 付近から徐々に蒸発し、50%蒸留温度以

降では、軽油とほぼ同等の蒸発性を示す。一方、FAME に LCO を混合すると蒸留曲線は低温側に移り、その割合が増加するほど、より低温側へ移行する。

3. 実験内容

3・1 実験装置および方法

3・1・1 定容燃焼容器 図3に本実験に用いた定容燃焼容器の概略を示す。本容器の燃焼室容積は約 1000cc であり、容器側面に取り付けた直径 80mm の石英窓より燃焼室内を可視化する。また、インジェクタを設置した容器上面の蓋の形状を変化させることで目的に応じた噴霧火炎領域を観察できる。本実験では自由噴霧火炎の下流域を撮影するため、噴射ノズルを

Fig.2 Distillation curve of test fuels

Fig.1 Schematic of phase change process in mixed fuel on pressure-temperature diagram

Fig.3 Schematic cross-section diagram of constant volume combustion vessel

Table 1 Properties of test fuels

F;FAME, L;LCO	FAME	F80:L20	F60:L40	F40:L60	F20:L80	LCO	Gas oil (JIS No.1)
FAME:LCO (mass ratio)	100:0	80:20	60:40	40:60	20:80	0:100	-
Density(288K) [kg/m ³]	886	897	906	917	927	939	822
Kinetic viscosity(313K) [mm ² /s]	4.762	4.372	4.102	3.646	3.413	3.056	2.852* ¹
10% distillation ratio T ₁₀ [K]	626	581	539	529	527	521	460
50% distillation ratio T ₅₀ [K]	626	624	620	605	574	556	535
90% distillation ratio T ₉₀ [K]	632	631	629	629	626	610	614
Cetane Index* ²	60.2	46.7	36.2	31.2	29.7	26.4	55.0
Aromatic content [mass%]	0.0	14.9	29.9	44.8	59.8	74.7	20.8
Oxygen content [mass%]	11.2	9.0	6.7	4.5	2.2	0.0	0.0
Low calorific value [MJ/kg]	39.9	40.6	41.4	42.1	42.9	43.6	43.1

*¹ 303K *² JIS K2280

観測領域上端部から 20mm 上方に設置した。

3・1・2 実験手順 図4に本実験システムの概略を示す。これらは大別すると、定容燃焼容器、可燃混合気を作成する混合容器、燃料噴射装置および周辺装置によって構成される。周辺装置としては、パルスタイミング制御装置およびデータ処理装置等がある。本実験では、混合容器にてアセチレン、酸素および窒素から成る可燃ガスを作成し、その混合気を定容燃焼容器内に充填する。そして、スパークプラグにより火花点火することで、燃焼室内を高温・高圧の状態にする。その後、壁面への熱損失により次第に燃焼室内の圧力・温度が降下する。この圧力・温度降下過程において目的の圧力・温度に到達した時刻に、燃料をノズルより単発噴射することでディーゼル機関の上死点近傍に相当する噴霧燃焼過程を実現する。燃料噴射装置には電子制御式コモンレールシステム (DENSO: ECD-U2 システム) を用いた。また、容器内の圧力履歴はピエゾ式圧力センサ (KISTLER: 6125B) を用いて測定し、その信号をチャージアンプ (KISTLER: type 6011) を介して CPU に取り込んだ。

3・1・3 レーザ誘起赤熱法 (Laser Induced Incandescence; LII) における光学系 図5に LII における光学系の概略を示す。LII とは高強度のレーザ光

Fig.4 Schematic diagram of experimental setup

Fig.5 Schematic diagram of optical set up for LII

をすす粒子に照射し、すすを瞬時に昇華温度付近まで加熱させ、その際にすすが放射する赤熱光を検出する計測法である⁹⁾。光源には Nd-YAG レーザ (Spectra physics: Quanta Ray PIV400) の第2高調波 ($\lambda=532\text{nm}$) を用いた。レーザ光をピンホールによって点光源とした後、シリンドリカルレンズ ($f=100\text{mm}$) および両凸レンズ ($f=800\text{mm}$) を通過させることで高さ約 80mm、厚さ約 0.3mm のシート光を作成し、噴霧中心軸を含む噴霧火炎の断面に照射する。そして、シート光を照射された火炎内のすす粒子が放射する連続スペクトル (LII シグナル) をシート光に対して直角に設置したイメージインテンシファイア (Image Intensifier; I.I., 浜松ホトニクス: C4078-01) 付き CCD カメラ (浜松ホトニクス: C4742-95-10NR) によって撮影する。露光時間、撮影視野および画像解像度はそれぞれ 20ns, $1024 \times 1344\text{pixels}$ および 12.5pixel/mm である。カメラレンズの前方には、S/N 比向上のためのショートパスフィルタ (カットオフ波長 450nm) および弾性散乱光を除去するためのノッチフィルタ (中心波長 532nm, 半値幅 3nm) を設置した。なお、噴霧火炎先端のすす生成特性を可視化するため、噴孔出口から噴霧軸方向距離に 40-120mm までの領域を撮影する。

3・2 実験条件 表2に実験条件を示す。燃料噴射開始時の雰囲気温度、密度および酸素濃度をそれぞれ 900K, 16.2kg/m^3 , 21% とした。燃料噴射差圧を 70MPa とし、全ての燃料で噴射量が 20mg 一定となるように噴射期間 (t_{inj}) を設定した。なお、初期燃料温度を 293K に保った。

4. 結果および考察

4・1 熱発生率解析

4・1・1 熱発生率履歴および着火遅れ期間 図6, 7 に着火遅れ期間とセタン指数の関係および各燃料の熱発生率履歴をそれぞれ示す。ここで、FAME は蒸留割合に対する蒸留温度が狭い範囲にあるため、その着火性をセタン指数で表すことは本来適切ではない。し

Table 2 Experimental conditions

Ambient temperature at injection [K]	900
Ambient density [kg/m^3]	16.2
O ₂ concentration [mol.%]	21
Injection pressure drop [MPa]	70
Injection quantity [mg]	20
Injection period [ms]	FAME 1.998 L20:F80 2.026 L40:F60 2.038 L60:F40 2.049 L80:F20 2.023 LCO 1.998 Gas oil(#1) 2.038
Fuel temperature [K]	293
Injection equipment	Common-rail type
Injection nozzle configuration	$d_n=0.20\text{ [mm]}$, $L_n/d_n=4$

かし、本実験ではFAMEと軽油のセタン指数および着火遅れ期間が同程度の値を示すことから、FAME・LCO混合燃料の着火性をセタン指数で表記することは可能であると考えられる。なお、着火遅れ期間は燃料噴射開始時から熱発生率が負から正に転じるまでの期間とした。図6に関してセタン指数の低いLCOは着火遅れ期間が最も長期化し、その変動も大きい。しかし、LCOにFAMEを混合することで着火遅れ期間が短期化することに加え、着火の変動も小さくなる。これは高自着火燃料であるFAMEをLCOに混合することにより、LCOの着火性が向上し燃料噴霧が速やかに着火に至るためと考えられる。

熱発生率履歴について、予混合的燃焼の熱発生率履歴は着火遅れ期間に依存した結果となる。すなわち、着火遅れ期間が短い燃料ほど着火に至るまでに形成される可燃混合気量が減少するため、予混合的燃焼のピーク時期は早期化しその値も減少する。

4・1・2 燃焼期間 図8に各燃料の燃焼期間とセタン指数の関係を示す。なお、燃焼期間は着火開始から熱発生率履歴が0になるまでの期間とする。LCOは他の燃料に比べ、燃焼期間が最も短い。これはLCOの着火遅れ期間が最も長く急峻な熱発生率履歴とな

り、燃えきりが良好になったためと考えられる。一方で、FAMEは着火性に優れるが、高動粘度・低揮発性であるため燃料噴霧の微粒化が抑制され、拡散的燃焼において燃焼が緩慢になったと考えられる。以上のことから、FAME・LCO混合ではFAMEの割合が高い燃料ほど燃焼期間が長期化したと推察できる。

4・1・3 燃焼効率 図9に各燃料の燃焼効率を示す。なお、燃焼効率は熱発生率履歴から算出した累積発熱量を燃料の低位発熱量で除した値である。図より燃焼効率はいずれの燃料においてもほぼ同等となる。このことから、FAMEとLCOの混合割合を変化させても燃焼効率に影響を及ぼさないことがわかる。

4・2 すず生成特性の把握

4・2・1 すず濃度分布画像 図10にLIIにより得られた各燃料のすず濃度分布画像を時系列で示す。なお、画像の下段には燃料噴射開始後の時刻(TAS)を燃料噴射期間(t_{inj})で除した無次元時間(TAS/t_{inj})を示している。加えて、レーザシートは各画像の右側から入射されている。 $TAS/t_{inj}=0.4$ においてLCO以外の燃料はすずの生成が確認できるが、LCOはすずの生成が確認できない。これは、LCOは他の燃料に比べ、着火遅

Fig.6 Effect of cetane index on ignition delay

Fig.8 Effect of cetane index on combustion period

Fig.7 Time history of apparent heat release rate

Fig.9 Combustion efficiency on each fuel

れ期間の長期化により $TASI/t_{inj}=0.4$ では着火に至っていない、あるいは着火直後であるためと考えられる。その後、いずれの燃料も時間の経過とともに、噴霧火炎は成長し、すすは観察領域全体に広がる。ここで、噴霧中心軸からレーザ出射側で LII シグナルが検出されない領域が存在する。これは、噴霧火炎内に分布するすす粒子群によりレーザ強度が減衰することに加え、レーザシートとカメラとの間に存在するすす粒子群により LII シグナルが減衰するためである⁽⁸⁾。特に、噴霧火炎下流部において、LII シグナルの検出されない領域が多く存在する。これは、この位置ですすの生成が活発であるため⁽⁹⁾と考えられる。燃料間で比較すると、LCO の割合が高い燃料では入射側の噴霧外縁で高強度の LII シグナルが検出され、FAME の割合が高い燃料では低強度の LII シグナルが噴霧火炎全体で検出される傾向にある。

4・2・2 面積平均 LII シグナル 図 11 に式(5.1)で定義した面積平均 LII シグナル(I_{ave})の時系列変化を示す。なお、レーザの減衰による影響を軽減するために、各画像の噴霧軸よりレーザ入射側の領域において解析を行う。

Fig.10 Temporal change in soot concentration distribution by LII

$$I_{ave} = \frac{\sum_i I_i A_i}{\sum_i A_i} \dots\dots\dots (4.1)$$

ここで、 I_i はピクセル*i*における LII シグナルの強度、 A_i はピクセル*i*の面積である。いずれの燃料も、 I_{ave} は燃料噴射初期において低い値を示し、時間の経過と共に増加する。そして、 $TASI/t_{inj}=1.0$ にて最大値を示した後、減少傾向を示す。これは、 $TASI/t_{inj}=1.2$ 以降において、噴霧火炎全体が可視域内におさまらないためである。LCO は、着火遅れ期間が長期化するため、 $TASI/t_{inj}=0.6$ の I_{ave} は低い値を示すが、その後急激に I_{ave} が増加する。これは、LCO がすすの前駆物質とされるアロマ成分を多量に含むため、燃料が着火に至った後、急速にすすの生成が行なわれたと考えられる。一方、含酸素燃料である FAME を混合することで、噴射終了($TASI/t_{inj}=1.0$)付近における I_{ave} は減少する。しかし、FAME を混合することで着火遅れ期間が短縮し、早期に拡散的燃焼期間に移行するため、燃料噴射初期($TASI/t_{inj}=0.0-0.4$)においては比較的 I_{ave} が高い傾向を示す。

4・2・3 燃料性状がすす生成に及ぼす影響 図 12 に $TASI/t_{inj}=0.6$ および $TASI/t_{inj}=1.0$ における I_{ave} と燃料の酸素含有量の関係を示す。 $TASI/t_{inj}=1.0$ では、燃料

Fig.11 Time history of area averaged LII intensity

Fig.12 Effect of oxygen content in fuel on soot formation

酸素含有量が高い燃料ほどすすの生成は抑制される⁽¹⁰⁾。一方、 $TASI/t_{inj}=0.6$ では燃料の酸素含有量に変化してもすすの生成はいずれの燃料もほぼ同等となる。これは、燃料の着火性に起因する。すなわち、LCOの混合割合が高くなると燃料の酸素含有量は低下するが、着火遅れ期間が長期化するため、予混合的燃焼割合が高くなり、すすの生成が抑制されたと考えられる。

5. 結 言

本報では、定容燃焼容器を用いてLCOの混合によるFAMEの軽質化が着火、燃焼およびすす生成特性に及ぼす影響を把握した。得られた知見を以下に示す。

- (1) 混合燃料の着火遅れ期間はFAMEの割合が高い燃料ほど短縮し、その変動も小さくなる。
- (2) FAMEとLCOの混合割合を変化させることで、すすの生成量を制御することが可能になる。すなわち、燃料噴射中期($TASI/t_{inj}=0.6$)ではいずれの燃料もすす生成は同等であり、燃料噴射終了時はFAMEの割合が高い燃料ほどすすの生成は抑制される。

謝 辞

本研究は、財団法人石油産業活性化センターの補助事業の一環として実施された。本研究を行うにあたり、多大なるご協力およびご指導をいただいた関係各位に厚く謝意を表する。

文 献

- (1) Yoshimoto, Y., Kaneko, K., Onodera, M., Influence of Fatty Acid Methyl Ester Composition on the Combustion Characteristics of Biodiesel Fuels, *Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series B*, Vol.75, No.752 (2009), pp.279-286.
- (2) Saka, S., ALL ABOUT BIODIESEL, *icp*, (2006), pp.241-242.
- (3) Aoki, Y., The Proof Examination of the Cogeneration System with the Biodiesel Fuel (in Japanese), *Inst.Energy*, Vol.88, No.4 (2009), pp.257-260.
- (4) Senda, J., Fujimoto, H., Fuel Design Concept to Control Spray Evaporation and Combustion Process, *Journal of Society of Automotive Engineers of Japan*, Vol.54, No.5 (2000), pp.69-75.
- (5) Haibara, T., Ikeda, T., Senda, J., Reformulation of Biodeisel Fuel to Lighter Quality by Mixing Low Boiling Point Fuel (First Report)-Fundamental Analysis of Combustion Characteristics-, *Transactions of Automotive Engineers of Japan*, Vol.38, No.2 (2007), pp.101-106.
- (6) Haibara, T., Ikeda, T., Senda, J., Reformulation of Biodeisel Fuel to Lighter Quality by Mixing Low Boiling Point Fuel (Second Report)-Basic Analysis of Spray and Combustion Structure-, *Transactions of Society of Automotive Engineers of Japan*, Vol.38, No.2, pp.107-112, (2007).
- (7) Kume, S., Ikeda, T., Sakurai, T., Senda, J., Reformulation of Biodeisel Fuel to Lighter Quality by Mixing Low Boiling Point Fuel (Third Report)-Analysis of Soot Formation and Exhaust Characteristic-, *Transactions of Society of Automotive Engineers of Japan*, Vol.40, No.2, pp.481-486, (2009).
- (8) Inagaki, K., Miura, S., Nakakita, K., Watabe, T., The Development for Quantitative Measurement Method of Soot Concentration Using LII, *Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series B*, Vol.63, No.615 (1997), pp.316-323.
- (9) Yokota, K., Kamimoto, T., Kobayashi, H., A Study of Diesel Spray and Flame by an Image Processing Technique, *Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series B*, Vol.54, No.499 (1985), pp.741-746.
- (10) Kitamura, T., Ito, T., Senda, J., Fujimoto, H., A Study on Soot Suppression Effects of Oxygenated Fuel Using a Detailed Chemical Kinetic Modeling, *Transactions of Society of Automotive Engineers of Japan*, Vol.32, No.2 (2001), pp.37-42.