

Understanding the Effect of Fatty Acid Methyl Ester's Reformulation to Lighter Quality by Mixing Ethanol on Spray and Combustion Characteristics

Yuya IKUTA*, Shoi KOSHIKAWA, Eriko MATSUMURA, and Jiro SENDA

(Received March 8, 2024)

In recent years, Bio Diesel Fuel (BDF) has been used in diesel engines as an alternative fuel to gas oil. Fatty Acid Methyl Ester produced by esterification of vegetable oils has the properties of higher density, higher kinematic viscosity, and lower volatility than gas oil. Therefore, the atomization of its spray droplet seems to be inhibited, which results in problems such as combustion failure and deposit formation. In past studies, FAME is mixed with heptane or ethanol as a low-boiling fuel to improve its fuel properties. Ethanol has high solubility in FAME, can be produced from vegetable oils, and does not lose its carbon neutrality when mixed with FAME. In this report, considering the continued existence of diesel heavy-duty vehicles, the spray and combustion characteristics of FAME mixed with ethanol under high load conditions were understood.

Keywords: FAME, carbon neutral, Ethanol, spray and combustion characteristics, dilute and homogeneous spray

キーワード: FAME, カーボンニュートラル, エタノール, 噴霧・燃焼特性, 希薄均一な噴霧

エタノール混合による脂肪酸メチルエステルの軽質化が 噴霧・燃焼特性に与える影響の把握

生田 侑也, 越川 翔生, 松村 恵理子, 千田 二郎

1. 緒 言

近年, 化石系資源の大量消費に伴い, 地球温暖化や大気汚染等の環境問題が起きている。それに伴い, 運輸部門では電気自動車 (EV) 産業が促進されているが, 物流を支える大型トラックの EV 化は省エネ・CO₂ 削減効果が少なく, ディーゼル重量車は今後も存続すると考えられる¹⁾。

カーボンニュートラル実現に向けて, ディーゼル機関では軽油の代替燃料としてバイオディーゼル燃料 (BDF: Bio Diesel Fuel) が利用されている。植物油のエステル交換反応で製造される脂肪酸メチルエステル (FAME: Fatty Acid Methyl Ester) は, 軽油に

比べて高密度, 高動粘度, 低揮発性であるため噴霧液滴の微粒化が抑制され, 実機関への使用時に燃焼不全やデポジットの生成を招く懸念がある。そのため, 燃料設計手法に基づき FAME に低沸点成分として n-ヘプタンやエタノールを混合させて軽質化を図る研究が行われてきた^{2,3)}。特にエタノールは FAME への溶解性が高く, また植物から製造可能であり混合させてもカーボンニュートラル性を失わない特徴がある。しかし, 過去の FAME/エタノール混合燃料を用いた研究では噴射圧力 70 MPa, 雰囲気密度 16 kg/m³ と低負荷場で実験が行われており, ディーゼル重量車が今後も存続することを考慮すると, 高負

*Science and Engineering Research Institute, Doshisha University, Kyoto
Telephone: 0774-65-7742, E-mail: ctwh0519@mail4.doshisha.ac.jp

荷場での噴霧・燃焼特性を把握する必要がある。そこで本報では FAME/エタノール混合燃料を供試燃料、JIS2 号軽油をリファレンス燃料として、光学撮影および実機関を用いて高負荷場条件下における噴霧・燃焼特性の把握を行った結果を報告する。

2. 燃料設計手法

Figure 1 に低沸点燃料と高沸点燃料を混合させた場合の飽和蒸気圧曲線を示す。図に示されるように、沸点の異なる二成分を混合することで互いの飽和蒸気圧曲線が引き寄せ合い気液両相が混在する二相領域が形成される。混合燃料の状態が二相領域内に達することにより低沸点燃料から蒸発を開始するが、分子間の相互作用により高沸点燃料も少なからず蒸発する。つまり、低沸点燃料の混合により高沸点燃料単体では液相である雰囲気においても、高沸点燃料の蒸気化が可能となる。本研究では、この概念を高沸点燃料として FAME に、低沸点燃料としてエタノールに応用して FAME の軽質化を図る。

3. 供試燃料

3.1 脂肪酸メチルエステル (FAME)

本研究では、植物性廃食油にメタノールおよびアルカリ触媒 (KOH) を加え、エステル交換反応によって製造された FAME を使用した。FAME は含酸素燃料であり、燃焼時に Smoke 排出量を抑制可能であるが、不飽和脂肪酸を主成分とするため酸化安定性や低温流動性が劣る。また、軽油に比べて高密度、高動粘度、低揮発性であるため噴霧液滴の微粒化が抑制され、実機関への使用時に燃焼不全やデポジット生成を招く懸念がある。

3.2 供試燃料物性値

Table 1 に本研究で使用する供試燃料の物性値を示す。供試燃料には廃食油由来の FAME とバイオエタノールが体積割で 100:0 (F100:E0), 80:20 (F80:E20), 60:40 (F60:E40) の混合燃料を用い、リファレンス燃料として JIS2 号軽油を用いた。以下、各混合燃料はエタノール混合割合で表す。なお、エ

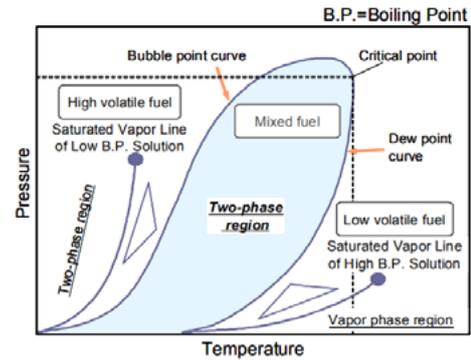


Fig. 1. Two-phase region of multi-component fuel.

Table 1. properties of test fuel.

| | | Gas oil (JIS No.2) | FAME (E0) | E20 | E40 |
|-------------------------------|----------------------|-----------------------|--------------|-------|-------|
| Mixing ratio FAME: Ethanol | [volume%] | - | 100:0 | 80:20 | 60:40 |
| Density(298K) | [kg/m ³] | 822 | 885 | 866 | 847 |
| Kinematic viscosity(298K) | [mm ² /s] | 3.54 | 4.57 | 3.93 | 3.29 |
| Surface tension(298K) | [mN/m] | 27.9 | 31.2 | 29.6 | 28.1 |
| Oxygen | [mass%] | 0 | 10.9 | 15.7 | 20.5 |
| Distillation T10 | [K] | 483 | 606 | 420 | 420 |
| Distillation T50 | [K] | 551 | 624 | 622 | 619 |
| Distillation T90 | [K] | 606 | 626 | 625 | 624 |
| Cetane index | [-] | 57.3 | 61.0 | - | - |

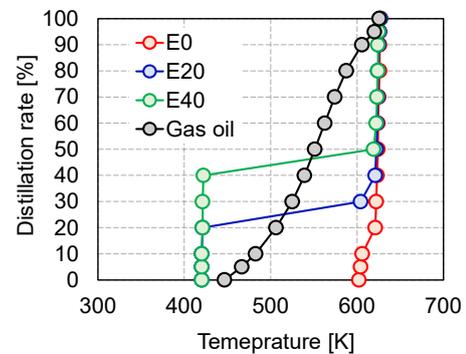


Fig. 2. Distillation curve for each fuel.

タノールの物性値は原料依存しないため、試験用エタノールをバイオエタノールとして模擬した。Table1 よりエタノール混合割合増加に伴い、密度、動粘度、表面張力が低下しており、燃料設計手法に基づいた FAME の軽質化が確認できる。続いて、Fig. 2 に減圧蒸留法 (JIS K 2254) で計測した各燃料の蒸留曲線を示す。FAME は高沸点成分で構成されており、625 K 付近で急激に蒸発するが、E20, E40 では蒸発性が改善され、420 K 付近で蒸発の開始が確認できる。

4. 実験条件

4.1 シュリーレン撮影

本実験では、定容容器内に噴射した燃料の蒸発特性を把握するためにシュリーレン法を用いて蒸発噴霧の可視化実験を行った。Table 2 に実験条件を示す。定容容器内は雰囲気温度 700 K，雰囲気密度 19.5 kg/m³，雰囲気圧力 4.0 MPa とし高密度場を想定した。また、燃料噴射量が 4.0 mg となるように噴射期間を設定し、噴射圧力は 100 MPa とした。

4.2 実機関

本研究では各燃料の燃焼特性の把握に直噴単気筒ディーゼルエンジン機関（ボア×ストローク：φ85×96.9mm，排気量：550cc，圧縮比：16.3）を用いた。続いて、Table 3 に実験条件を示す。エンジン回転数を 1500 rpm，噴射圧力を 100 MPa，過給圧力を 130 kPa で一定とし、パラメータとして図示平均有効圧力（BMEP：Break Mean Effective Pressure）を 0.25, 0.50, 0.75 MPa と変更させ、また EGR 率を 0, 10, 20, 30 % と変更させた。

Table 2. Experimental conditions for schlieren photography.

| | |
|--------------------------------------|-----------------------|
| Test fuel | Gas oil, E0, E20, E40 |
| Injection pressure [MPa] | 100 |
| Injection fuel amount [mg] | 4.0 |
| Ambient Gas | N ₂ |
| Ambient temperature [K] | 700 |
| Ambient density [kg/m ³] | 19.5 |
| Ambient pressure [MPa] | 4.0 |

Table 3. Experimental conditions for actual engine.

| | |
|-------------------------------------|-----------------------|
| Test fuel | Gas oil, E0, E20, E40 |
| Engine speed [rpm] | 1500 |
| Brake mean effective pressure [MPa] | 0.25, 0.50, 0.75 |
| Injection pressure [MPa] | 100 |
| Boost pressure [kPa] | 130 |
| EGR ratio [%] | 0, 10, 20, 30 |
| Injection timing [deg.ATDC] | -5.0 |

5. 蒸発噴霧解析結果

5.1 噴霧先端到達，噴霧角

Figure 3 にシュリーレン撮影により得られた各燃料の蒸発噴霧画像を示す。また、Fig. 4, 5 に各燃料の噴霧先端到達距離 (X) および噴霧角 (θ_{30}) の時間履歴グラフを示す。噴霧角は噴霧が準定常状態であるインジェクタ先端から 30mm 地点での解析結果である。図よりエタノール混合割合増加に伴い、噴霧先端到達距離の減少，噴霧角の増大が確認できる。これは、低密度・低動粘度・低表面張力となって噴霧の微粒化が促進されて噴霧軸方向への運動量が低下したこと，また周囲空気との運動量交換が活発となって蒸発性が向上し，噴霧半径方向へ拡散したことが要因と考えられる。

5.2 実験式を用いたザウタ平均粒径 (D_{32}) の推定

エタノール混合による燃料物性値変化が微粒化へ与える影響の把握を行うために Elktob の式⁴⁾を用いて D_{32} の算出を行った結果を Fig. 6 に示す。この時、 ν_f : 燃料動粘度 m²/s, σ : 表面張力 N/m, ρ_f : 燃

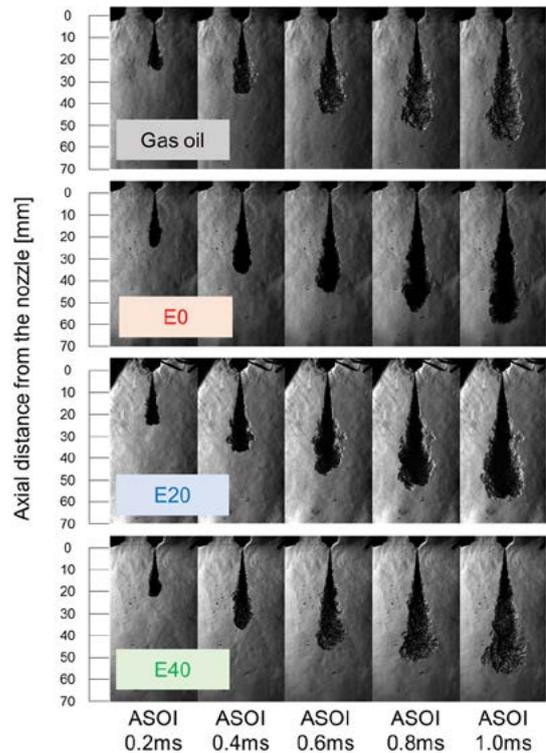


Fig. 3. Images of schlieren photography.

料密度 kg/m^3 , ρ_{amb} : 雰囲気密度 kg/m^3 , ΔP : 噴射差圧 Pa である. Fig. 6 より E20 は E0 に比べて 10.6 %低下, E40 は E20 に比べて 19.2 %低下している. また, E40 は軽油とほぼ同等の D_{32} が得られた.

噴霧形成において, 初期は燃料噴霧の運動量, 後期は液滴粒径が支配的要因である⁵⁾. そこで, D_{32} と噴霧先端到達距離の関係を算出したところ, 強い相関を示す結果 ($R^2=0.983$) が得られた. 続いて, 各燃料物性値と噴霧先端到達距離の関係を算出したところ, 動粘度, 表面張力と強い相関を示す結果 ($R^2=0.978$, $R^2=0.971$) が得られた. 以上より,

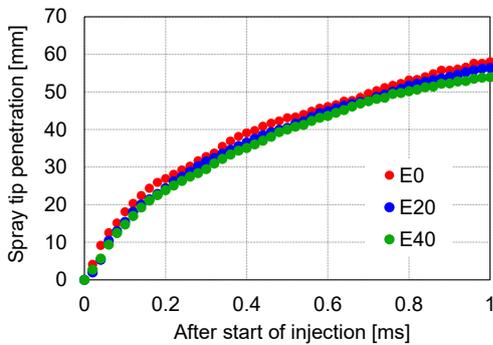


Fig. 4. Spray tip penetration (X) .

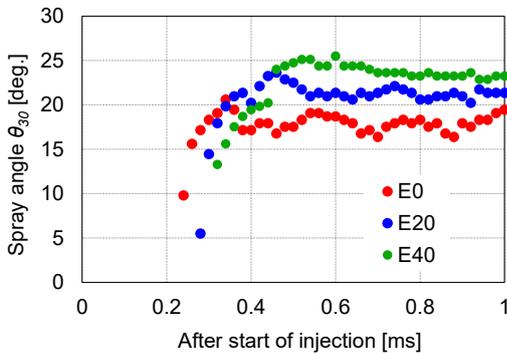


Fig. 5. Spray angle (θ_{30}) .

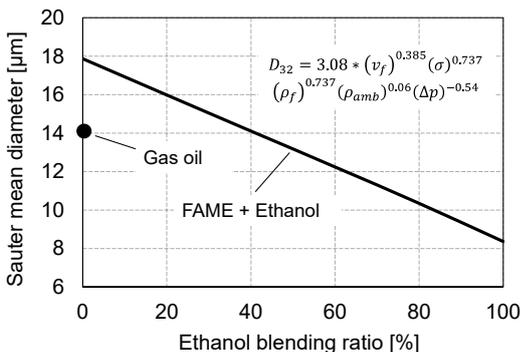


Fig. 6. Sauter mean diameter (D_{32}) .

FAME にエタノールを混合するほど燃料物性値が軽質化され, 特に動粘度・表面張力の低下が支配的となり噴霧液滴の微粒化が促進されて噴霧軸方向への運動量が低下し, 噴霧先端到達距離が減少すると考えられる.

5.3 燃料の蒸発性が混合気形成へ与える影響

各燃料の混合気希薄具合を示す指標として噴霧内平均当量比 (ϕ) を算出した結果を Fig. 7 に示す. 噴霧内平均当量比は理論空燃比を噴霧体積から算出した噴霧内空燃比で除した値とした. 図よりエタノール混合割合増加に伴い, 噴霧内平均当量比が減少しており噴霧の希薄化が確認できる. これは, 蒸発性向上により燃料液滴が早期に蒸発して, 周囲空気との運動量交換が活発に行われ噴霧内への空気導入量が増加したためだと考えられる. 以上より, エタノール混合割合が増加するほど希薄均一な噴霧が形成され燃焼特性の改善が可能であると考えられる.

6. 実機関を用いた燃焼特性把握結果

6.1 各燃料の熱発生率と筒内温度

Figure 8 に各燃料の熱発生率と筒内温度のクランク角度履歴を示す. この時, 熱発生率が負から正に転じる時点を着火開始時期とし, 噴射開始から着火開始までの期間を着火遅れ期間と定義した. Figure 8 より各燃料の着火遅れ期間は, E0 : 6.63 deg., E20 : 7.38 deg., E40 : 10.38 deg.であり, エタノール混合割合増加に伴って着火遅れ期間の長期化が確認できる. 混合燃料の着火性は高自着火成分に大きく依存するという知見があるが, E40 は E0 と比べて着

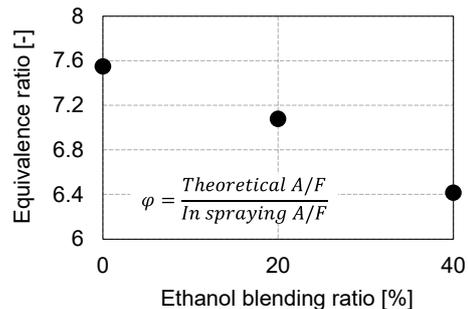
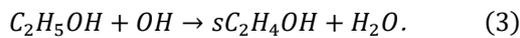
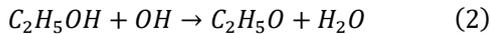
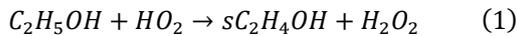


Fig. 7. Equivalence ratio (ϕ) .

火遅れ期間が大きく長期化している。これは、E20 では高自着火成分 (FAME) が着火性を律速しているのに対し、E40 では高自着火成分支配領域から逸脱していることが要因であると考えられる。

また、予混合ディーゼル燃焼では、燃料分子構造との相関が強い低温酸化反応が着火に強く影響する⁶⁾。そこで、低温酸化反応が支配的になる低温域 (950 K 以下) でのエタノールの化学反応に着目する⁷⁾。エタノールは次式に示す反応により分解が進む。



上記の反応で生成される sC_2H_4OH や C_2H_5O は低温反応で重要なアルキルペルオキシラジカルを生成しない。アルキルペルオキシラジカルを生成する反応も存在するが、生成されるラジカルはひずみエネルギーが大きいため反応速度が遅い。以上より、低温域でのエタノールはアルキルペルオキシラジカルを生成する反応がわずかであるため着火遅れ期間が長期化すると考えられる。

6.2 各燃料の排気特性

Figure 9 に各燃料の正味出力当たりの排ガス成分を示す。図より各負荷においてエタノール混合割合増加に伴い、 NO_x 増加、Smoke 減少の傾向が得られた。前節で述べたように着火遅れ期間が長期化するため、燃料と空気の予混合化が促進され、急峻な燃

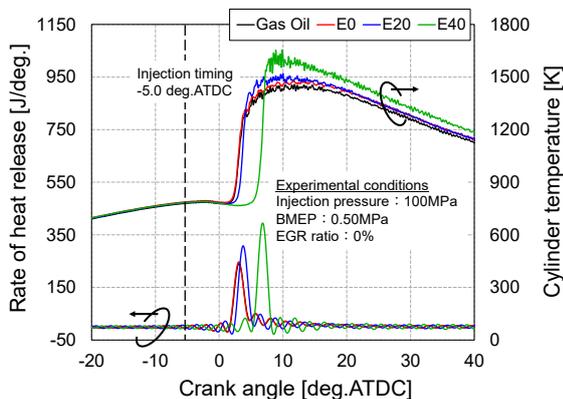


Fig. 8. Rate of heat release and cylinder temperature.

焼が起きて最高筒内温度が上昇する。それに伴い、サーマル NO_x の生成量が増加するため、 NO_x が増加傾向であると考えられる。Smoke 減少に関しては、燃焼期間の短期化が要因だと考えられる。各燃料の燃焼期間はそれぞれ、E0 : 10 deg., E20 : 8.5 deg., E40 : 4.5 deg. であり、エタノール混合割合増加に伴って燃焼期間が短期化している。これは、着火遅れ期間の長期化に加えて、希薄均一な噴霧が形成されて、噴霧内部での燃焼が促進されたためだと考えられる。また、エステル結合を有する燃料に比べて、ヒドロキシ基を有する燃料の方が、すす抑制効果が高いことも要因だと考えられる⁸⁾。また、後燃え期間も短縮するため THC 減少が考えられるが、E40 では THC が増加した。特に BMEP=0.25 MPa 時は THC 大幅増加、 NO_x 大幅減少が確認できる。これは、供給熱量の減少に加えて燃料の自着火性の低下により不安定な燃焼 (燃焼効率 95%程度) となったことが要因と考えられる。以上より、E20 が広い負荷範囲で安定した燃焼を得ながら排気性能 (Smoke・THC) 向上が可能であると考えられる。次節では、E20 へ EGR を導入し、 NO_x 低減を図った結果を考察する。

6.3 E20 (EGR 導入時) と軽油の排気特性比較

Figure 10 より EGR 率増加に伴い、 NO_x が大幅に低減し、EGR30%では NO_x の排出はほとんど見られない。本実験は過給圧一定下で行ったため EGR 率増

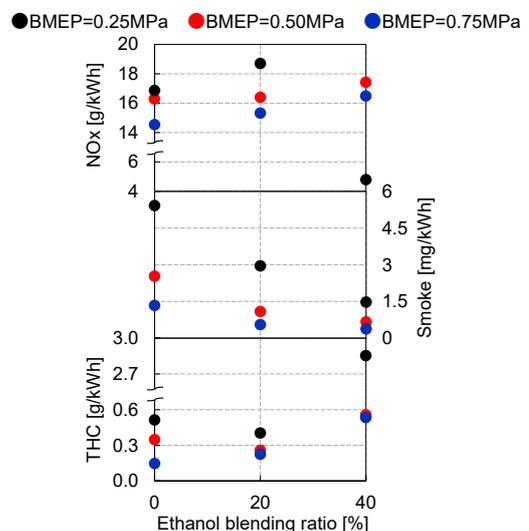


Fig. 9. Exhaust characteristics for each fuel.

加に伴い吸気酸素濃度が低下する。そのため、燃焼温度が低下し、サーマル NO_x が減少したことが要因と考えられる。同時に燃焼効率が低下するため、Smoke・THC 増加が懸念されるが、EGR20%までは各 BMEP において大幅な増加は見られなかった。しかし、EGR30 %、BMEP=0.75 MPa では、Smoke・THC の大幅増加が確認できる。これは、空燃比が大幅に低下し、燃焼効率が悪化したためだと考えられる。つまり、EGR20 %までが高い燃焼効率を得ながら排気性能向上が可能であると考えられる。E20 (EGR20 %) と軽油 (EGR 0%) を比較すると、各負荷で NO_x, Smoke, THC が低減されており、BMEP=0.50 MPa 時は、NO_x : 70.6 %, Smoke : 65.7 %, THC : 50.6 % 低減する結果が得られた。また、Fig. 11 に正味熱効率を示す。図より E20 へ EGR20 % 導入しても、軽油と比較して正味熱効率を維持したまま排気性能向上が可能である。

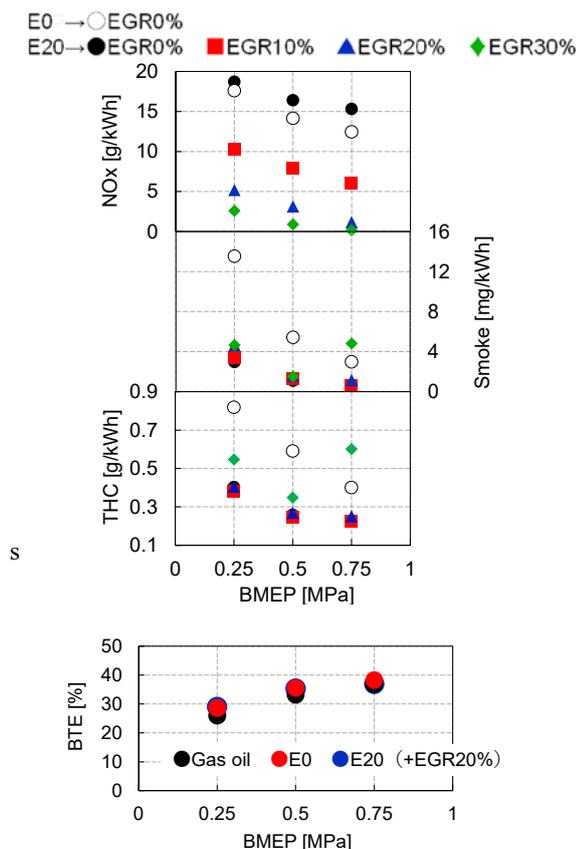


Fig. 11. Brake thermal efficiency (BTE) .

7. 結言

本報では、FAME/エタノール混合燃料の噴霧・燃焼特性の把握を行った。以下に得られた知見を示す。

1. エタノール混合割合増加に伴い、蒸発性が向上して周囲空気との運動量交換が活発になり、噴霧内への空気導入量が増加して希薄均一な噴霧が形成される。
2. FAME へエタノールを 20% 混合し、更に EGR を 20% 導入することで、軽油と比較して正味熱効率を維持したまま NO_x が 70.6 % 低減、Smoke が 65.7 % 低減する。

参考文献

- (1) 佐々木正和, “大型トラックの xEV 化可能性検討 (第 1 報)” 自動車技術会論文集, **52**[4], 750-755 (2021)
- (2) 千田二郎, 藤本元, “燃料設計手法による噴霧・燃焼過程の制御, 自動車技術会論文集”, **54**[5], 69-75 (2000)
- (3) 羽原輝晃, 池田智樹, 千田二郎, “低沸点燃料の混合によるバイオディーゼルの軽質化に関する研究”, 自動車技術会論文集, **38**[2], 481-486 (2007)
- (4) M.M.Elkothb, “Fuel Atomization for Spray Modeling”, *Energy Combust Sci*, **8**, 61-91 (1982)
- (5) 佐藤豪, 国吉光, 藤本元, “ディーゼル噴霧の性状に関する研究, 日本船用機関学会誌”, **13**[5], 39-45 (1978)
- (6) 酒井康行, 浅野悠介, 安東弘光, 桑原一成, “アルカン燃料の分子構造と着火遅れ時間の関係 (第 2 報)”, 自動車技術会論文集, **44**[2], 363-368 (2013)
- (7) 中間健二郎, 吉村佳, 草鹿仁, 大聖泰弘, “エタノール添加がガソリン予混合圧縮着火エンジンの着火特性に及ぼす影響”, 自動車技術会論文集, **41**[2], 313-320 (2010)
- (8) 松浦貴, 小橋好充, 桑原一成, 千田二郎, “各種アルコール燃料の混合がバイオディーゼル燃料の燃焼特性に及ぼす影響”, 自動車技術会論文集, **43**[2], 455-460 (2012)