

〔論 文〕

吸気と燃料の改質によるディーゼル機関の燃焼特性

山田 健太^{*1}・高山 敦好^{*2}・立道 悟^{*1}

Combustion Characteristics of Diesel Engine using Improvement of Air Intakes and Fuel

Kenta YAMADA^{*1}, Atsuyoshi TAKAYAMA^{*2}, Satoru TATEMICH^{*1}

Abstract

Diesel engines are used to propel ships and vehicles owing to their high fuel and thermal efficiencies; however, their exhaust gases contain pollutants such as NO_x, SO_x, and PM. Therefore, the use of diesel fuels requires before- as well as after-treatment technologies. Generally, common-rail and EGR systems, and SCR and DPF, are used for treatment as before- and after-treatment technologies, respectively. However, increasingly stringent environmental regulations necessitate the development of improved fuel and air intake technologies. The objective of this study was to improve combustion by introducing a gas mixture fuel and ozone into air intakes. The introduction of ozone into air intakes increased the combustion temperature and NO_x concentration of the exhaust gas. With the gas mixture fuel, the NO_x concentration and cylinder pressure decreased when ozone was introduced into the air intakes. The combination of a gas mixture fuel and ozone introduced into the air intakes decreased the NO_x concentration and improved fuel consumption.

Key Words : Diesel Engine, Air mixture fuel, Common Rail, Air intakes, Ozone

1. 緒 言

ディーゼルエンジンは燃費の良さや熱効率の高さから船舶や商用車などに利用されるが、排ガス中には、NO_x、SO_x、PMなどの有害物質が多く含まれている。国際海事機関（IMO：International Maritime Organization）にて船舶排ガス中の汚染物質の規制が敷かれており、2016年から2次規制値対しNO_xを80%低減するIMO3次規制が開始している。自動車においては、ポスト新長期規制やEURO VIがあり、厳しい規制のもとで、エンジン開発が行われている。

これらの規制をクリアするためには、前処理技術や後処理技術の設置が必須となる。自動車用ディーゼル機関は、前処理であるコモンレールやEGR、後処理であるSCRやDPFが搭載されるのが常態化している。しかしながら、ディーゼル機関の処理装置はほぼ完成形に達しており、大本の燃料や吸入空気の改善に取り組む必要がある。前処理技術である船舶EGRは、軽油よりも粗悪な燃料を使用することからスクラバ装置が一般的に用いられており、その処理技術を確立する必要がある。また、船舶等では、EGR、SCRが主流であるもののコモンレールは開発途上であるが、今後さらに厳しくなる環境規制に対応するためには、コモンレールの常態化がさらなる環境負荷低減技術の開発に寄与するものといえる。

以上から、ディーゼル機関においては、コモンレールシステムの導入が環境対策に大きく貢献するものであるといえるが、これは高圧噴射による燃料の微細化と、多段噴射による燃焼圧力、燃焼温度の操作が可能となることから非常に効果大きいと言える。ノッキングや燃焼機関の短縮により、排ガス中の汚染物質の低減と同時に燃費が改善できる。また、代替燃料であるバイオ燃料、気液混合燃料、水エマルジョン燃料等を使用した向上効果が報告されている。水エマルジョン燃料においては、時間経過による水の分離や装置の大型化、界面活性剤によるコスト上昇など問題点が多くあるのが現状である。また着火遅れの改善に、噴射圧や噴射時期を任意に変更するシステムが必要となる。そこで、気液混合燃料が注目されている。燃料油中の空気は、着火前に燃焼室内で膨張し、さらに燃料を微粒化させながら予混合が促進し、燃焼性が飛躍的に向上する。

本研究は、オゾン-軽油の気液混合燃料を生成し、吸気側にオゾンを混入させることで、吸気と燃料の改質を達成し、

^{*1} エネルギーシステム工学専攻、^{*2} 機械システム工学科
平成30年11月19日受理

環境負荷低減技術を構築するものである。コモンレールによる燃焼性の向上と燃焼圧力、燃焼温度をコントロールし、最適な燃焼を確立するものである。

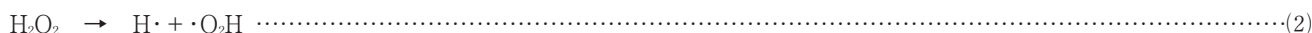
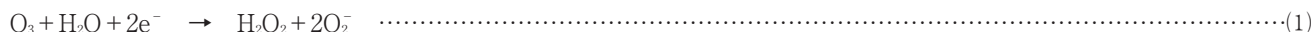
2. 実験概要

2・1 コモンレール

コモンレールシステムの概要図を図1に示す。コモンレールシステムは、サプライポンプを使用し、燃料タンクから輸送した燃料をサプライポンプで高圧にし、レールとよばれる耐圧性の配管に高圧で燃料を送り貯蓄することが可能である。これは、インジェクタの制御によって任意のタイミングで高圧の燃料を噴射できるものであり、燃料噴射の進角・遅角ができることから、オゾン混入による着火時期の変化にも対応可能である。

2・2 オゾンによる吸気改善^{(1), (2)}

コロナ放電について図2に示す。オゾンは、空気や酸素を起源とし、高圧放電下で生成できる。コロナ放電下では、6 kV 前後からオゾンの発生が確認されている。気中のオゾンは、式(1), (2), (3)のように、水蒸気と反応することで OH ラジカルが生じる特性がある。



オゾンは、空気や酸素を起源とし、高圧放電下で生成できる。コロナ放電下では、6 kV 前後からオゾンの発生が確認されている。気中のオゾンは、水蒸気と反応することで OH ラジカルが生じる特性がある。また、OH ラジカルは、低温燃焼化でも安定的な燃焼を行うことができること、ガソリン機関のプラグに採用されている技術の一つである。特に、低温燃焼下での燃焼性の改善は、水エマルジョン燃料や気液混合燃料など、着火遅れを伴う燃料においても有効であると考えられる。よって、燃焼性向上による PM の低減と同時に、サーマル NO_x の低減が期待できる。

コロナ放電の概要図を図2に示す。コロナ放電は、電極から電子放出やイオン生成が行われない場合でも、極板間に電圧を印加することで形成される電界より、大気中に電流が流れる状態である。電圧を加えていくことで火花放電を起こすが、コロナ放電とは火花放電の直前であり、その際にオゾンの発生を伴う特徴がある。これらから吸気に水蒸気を付加し、コロナ放電を用いることでオゾンが起源となった OH ラジカルの輸送が可能となり、NO_x を低減できると同時に燃費が改善できるものと推測する。本研究は、水蒸気霧気を追加し、オゾンの生成量や水素の発生を利用し燃焼性を向上させるものである。

2・3 気液混合燃料

吸気にオゾンを活用することで燃焼性が飛躍的に向上するが、NO_x が上昇する傾向にある。これは、オゾンの酸化性が高いことが要因にある。そこで、燃料にオゾン进行混入することで、OH ラジカルの発生を誘発し、低温燃焼下でも燃焼性が促進できることが期待できる。燃料と気体の混合は、気液混合燃料の生成となるが、一般的にはエジェクタを用いた生成があげられる^{(3), (4), (5), (6), (7)}。本研究は、加圧溶解攪拌型ミキサを採用し、1 μm 以下のウルトラファイバブル(UFB: Ultrafine Bubble) 燃料を生成するものである^{(5), (6), (7)}。

2・3 実験装置

実験装置を図3に示す。供試機関は、表1に示す。マツダ製 RF-CDT 直接噴射式4サイクルディーゼル機関であり、コモンレールが搭載されている。排気ガスは、testo 製 testo350XL を用いた。計測する成分は NO, NO₂, SO₂, CO(ppm) CO₂, O₂ (%) であり、排気ガスの一部(約0.9L/min)を排気直後で吸引させ計測を行った。実験条件は、表2に示す。IRS 製 ECS 制御装置により、メイン噴射とパイロット噴射の2段噴射とし、パイロット噴射 ATDC-24°, メイン噴射 ATDC-3°とし、回転数2000rpm, 負荷率25%の条件とした。

オゾン発生器は商研製オゾンプレミアム10を使用し、最大10L 中に10000mg/h のオゾンを投入させることが可能であ

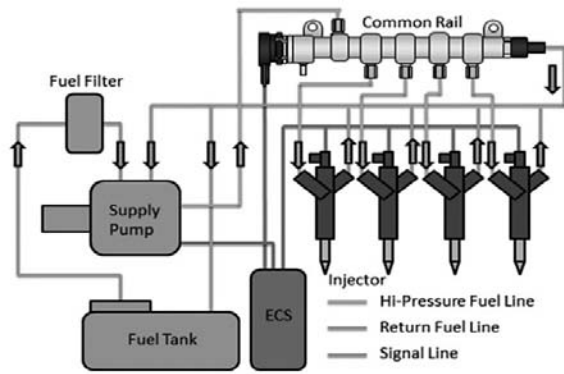


Fig. 1 Common Rail

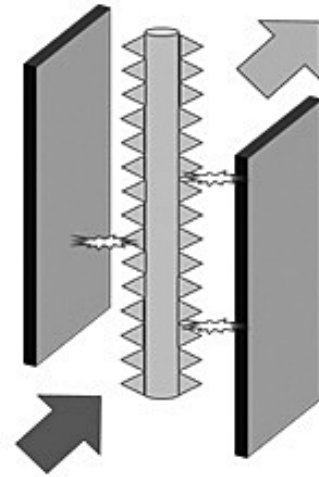


Fig. 2 Corona Discharge

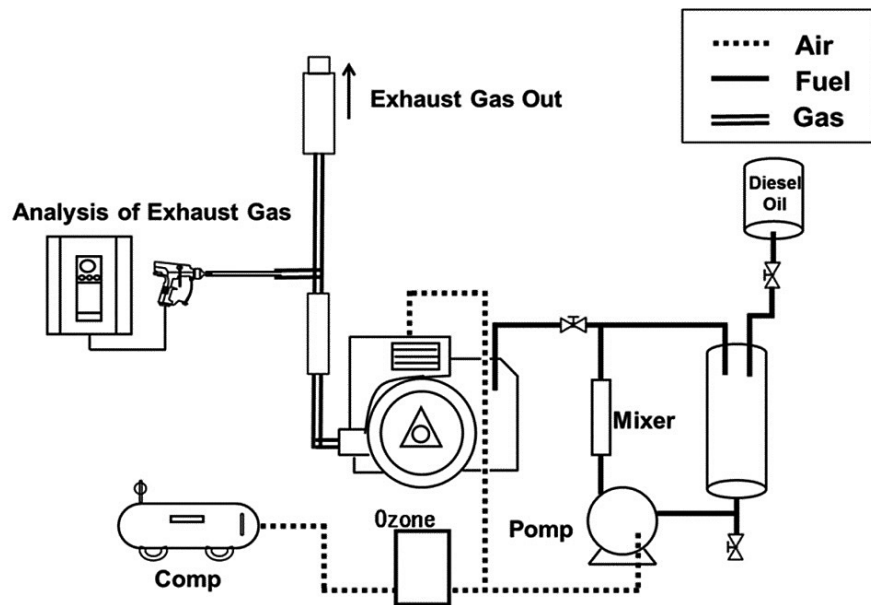


Fig. 3 Experimental Device

Table 1 Engine spec

Name	RF-CDT
Engine System	Direct-injection Four-stroke Engine with Turbocharger
Cylinder Number	4
Bore and stroke	86mm × 86mm
Compression Ratio	16.7
Max power	63.2kW/3500rpm
Max torque	178N·m/2000rpm
Displacement	1998cc
Injector System	Common Rail
Experimental Load	25% (2000rpm)

Table 2 ECS spec

Computer Name	ECS made by IRS
Fuel Pressure	Max 4 cylinder
Common Rail Pressure	30~160MPa
Injection timing	Pilot - 40° ~ main before
	Main ATDC - 40° ~ 40°
	After main after ~ 40°
Experimental injection timing	Only main injection ATDC - 13°, - 15° - 17°
Experimental fuel pressure	40MPa 100MPa

る。燃料とオゾンの混合は、加圧溶解攪拌型ミキサを使用し、軽油 5 L に対しオゾンの流量を $0.5 \ell / \text{min}$ とし、圧力 0.6 MPa、攪拌時間 2 min の条件で気液混合燃料を生成した。シリンダ筒内圧および熱発生率はシチズンファインデバイス製 CAS-15K 筒内圧力センサと小野測器製クランク角センサによるクランク角度から横河製燃焼解析システムにて解析した。霧化器は M-JET 使用し水は加圧溶解攪拌型ミキサによる UFB 水を用いた。

3. 実験概要

3・1 燃料の性状

図 4 および図 5 に燃料の性状を示す。a) は実験に用いた燃料は軽油単体の結果である。軽油単体に着目すると黒い斑点や小さな気泡が見える。これは、元々入っていた空気や不純物であると考えられる。b), c) は加圧溶解攪拌型ミキサにより軽油 5 L に対し気体の流量を $0.5 \ell / \text{min}$ とし、圧力 0.6 MPa、攪拌時間 2 min 軽油と気体を混合させた結果である。b) の場合は軽油と空気を攪拌させた結果であり、山のピーク時が約 100 nm 付近まで生成していることが分かった。c) は軽油とオゾンを攪拌させた結果であり、山のピーク時が約 80 nm 付近まで生成することができた。

3・2 燃料の性状

排ガス中の汚染物質濃度と燃費の関係を図 6、シリンダ筒内圧および熱発生率を図 7 に示す。

吸気にコロナ放電を用いた場合、軽油単独燃焼と比較すると、 NO_x が約 5.96% 増加、燃費が約 2.5% 改善できた。また、コロナ放電 + 水蒸気霧化の場合は NO_x が約 10.48% 低減し、燃費は 6.25% 改善できた。気液混合燃料の場合は、コロナ放電と比較し NO_x 濃度が約 8.96% 低減、燃費が約 5.1% 改善できた。また、コロナ放電 + 霧化 + 気液混合燃料の場合は、 NO_x が約 16.1% 低減、燃費が約 12.3% 改善できた。

熱発生率に着目するとノーマルの軽油燃焼とコロナ放電下と比較すると、コロナ放電 + 水蒸気霧化において筒内圧力がやや低くなる傾向が見られた。気液混合燃料油燃焼とコロナ放電下と比較すると、コロナ放電 + 水蒸気霧化において最大筒内圧力が低下し、後燃え期間が短縮する傾向が見られた。

3・3 考察

軽油コロナ放電に着目するとサーマル NO_x が上昇する傾向がみられた。これは、オゾンと酸素が反応することで過酸化となり、燃焼が促進されることで熱発生率が増加したものと推測する。また、コロナ + 霧化ではサーマル NO_x の低減と燃費の改善を行うことができた。これは、OH ラジカルの輸送による燃焼温度の低下とともに、コロナ放電により燃焼性を維持できたものと推測する。次に、コロナ + 霧化の場合はサーマル NO_x の低減と燃費の改善を行うことができた。これは、OH ラジカルの輸送による燃焼温度の低下とともに、コロナ放電により燃焼性を維持できたものと推測する。

コロナ放電と気液燃料ではサーマル NO_x が低減した。これは、気液燃料油中で OH ラジカルもしくは OH イオンが形成され低温燃焼かつコロナ放電により NO_x と燃費が低減できたものと推測する。また、気液燃料ではサーマル NO_x が低減した。これは、気液燃料油中で OH ラジカルもしくは OH イオンが形成され低温燃焼かつコロナ放電により NO_x と燃費が低減できたものと推測する。次に、気液燃料ではサーマル NO_x が低減した。これは、気液燃料油中で OH ラジカルもしくは OH イオンが形成され低温燃焼かつコロナ放電により NO_x と燃費が低減できたものと推測する。次に

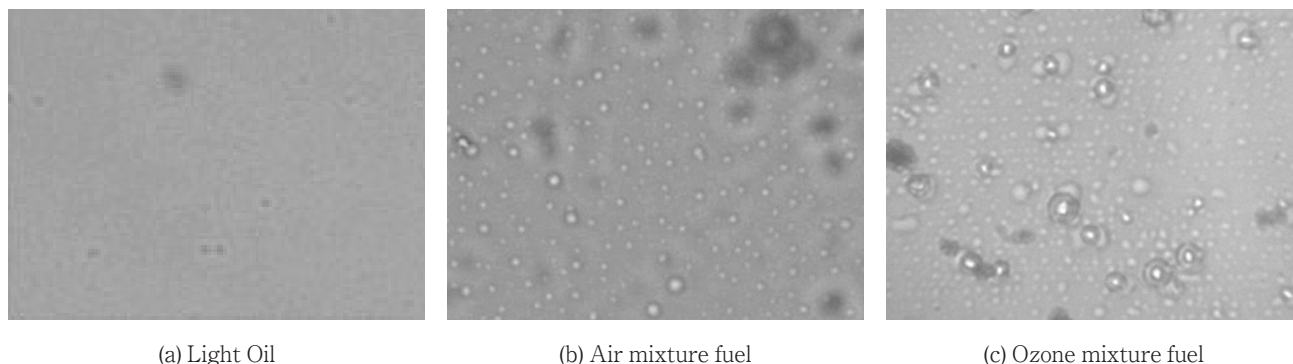
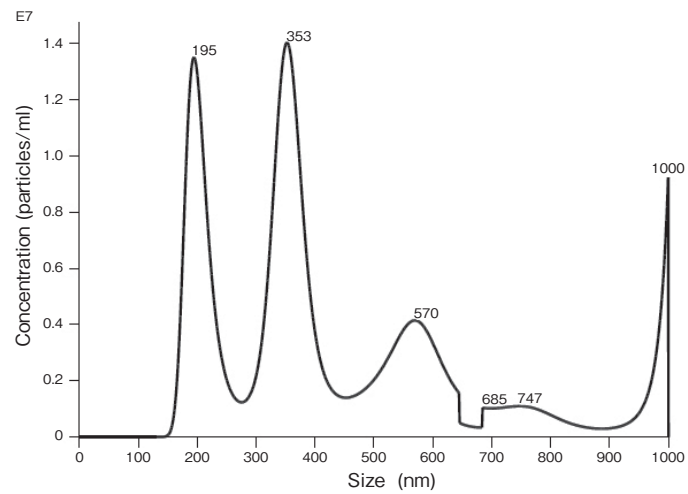
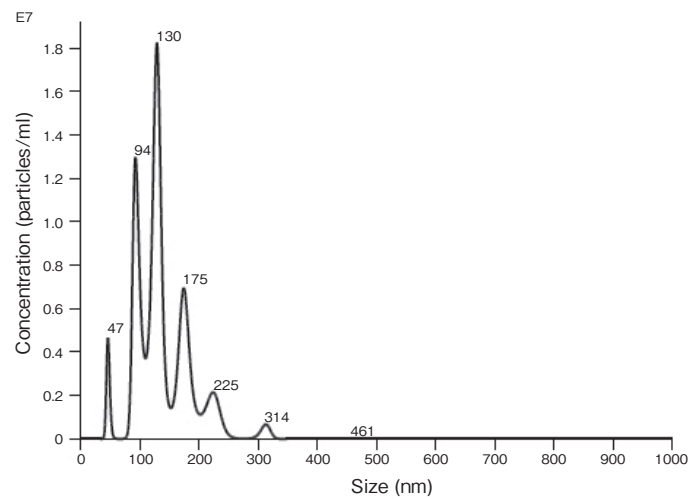


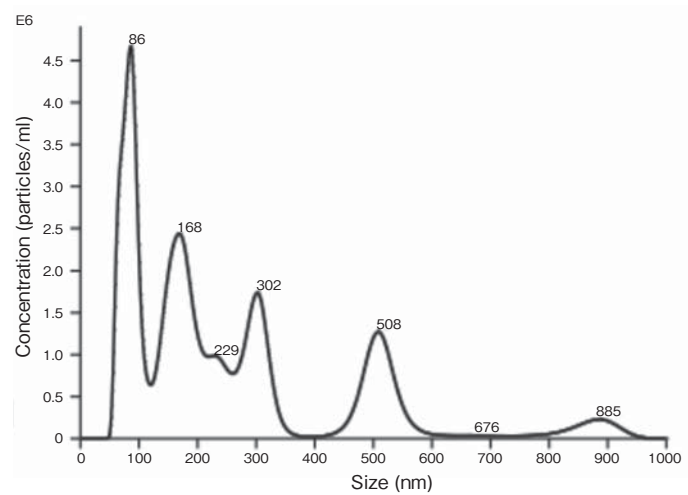
Fig. 4 Microphotograph of gas mixture fuel



(a) Light Oil



(b) Air mixture fuel



(c) Ozone mixture fuel

Fig. 5 Analysis result of gas mixture fuel

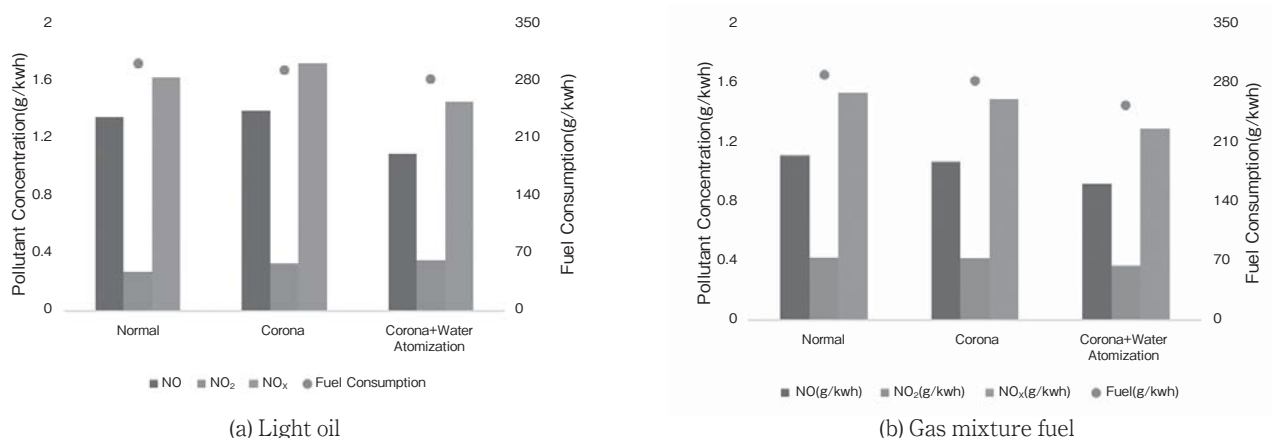


Fig. 6 Analysis of pollutant from exhaust gas

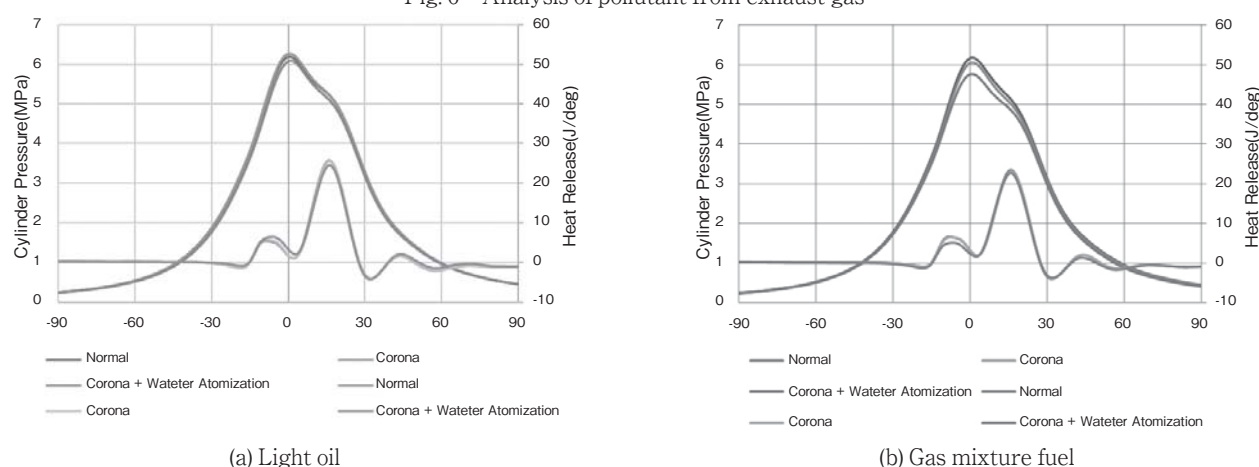


Fig. 7 Analysis of cylinder pressure

コロナ+霧化では、コロナ放電下において水を噴霧することでさらに良い結果を得ることができた。これは軽油の場合と同様であり、さらに軽油と比べNO_xの低減及び燃費の改善が行えたため、その優位性が得られたものと推測する。

以上から、混合ガスと気液燃料を組み合わせ、さらに後処理技術としてスクラバ装置やEGR装置を使用することで、今後予定される規制に対応でき、排ガスや燃費がさらに良くなることが期待できる。

4. ま と め

本研究は、吸気と燃料を改質することで、以下の結論を得た。

1. 吸気にコロナ放電を用いることで、軽油単独燃焼と比較するとNO_xが約5.96%増加、燃費が約2.5%改善できた。また、コロナ放電+水蒸気霧化はNO_xが約10.48%低減し、燃費は6.25%改善できた。よって、吸気へのオゾン混入は、軽油単独では燃焼性が向上するが燃焼温度が上昇することでNO_x濃度が上昇し、気液混合燃料ではNO_x濃度が減少する傾向が見られた。
2. 気液混合燃料の場合は、コロナ放電と比較しNO_x濃度が約8.96%低減、燃費が約5.1%改善できた。また、コロナ放電+霧化+気液混合燃料の場合は、NO_xが約16.1%低減、燃費が約12.3%改善できた。よって、気液混合燃料を用いることで、コロナ放電のみでもNO_x濃度が低下し、水蒸気霧化によりさらに効果が向上することがわかった。

参考文献

- (1) 高山敦好, 藤田浩嗣, “コロナ放電とCa(OH)₂による船舶排ガス低減技術の開発”, 日本マリンエンジニアリング学会誌, Vol. 48, No. 2 (2013), pp. 119-125.

-
- (2) 天野航介, 吉本隆光, “船用ディーゼルエンジンでの吸気条件による燃焼・排ガス特性”, 神戸高専研究紀要, 第51号 (2013), pp. 19-24.
 - (3) 中武靖仁, 渡邊孝司, 江口俊彦, “エジェクタ式マイクロバブル混入燃料によるディーゼル機関の燃焼改善”, 日本機械学会論文集 (B 編), 73巻, 735号 (2007-11), pp. 196-202.
 - (4) 中武靖仁, “超微細気泡混入軽油によるディーゼル機関の環境負荷低減”, 日本マリンエンジニアリング学会誌, 第46巻, 第6号 (2011), pp. 75-80.
 - (5) 高山敦好, 田中禎之, “ウルトラファインバブルを混入した気液混合燃料の燃焼特性”, 久留米工業大学研究報告, 第39号, pp. 1 - 7, 2016.
 - (6) 高木周, “マイクロバブルの基礎と最近の進展”, オレオサイエンス, 第10巻, 第9号 (2010), pp. 3 - 8.
 - (7) 芹澤昭示, “マイクロ／ナノバブルの基礎”, 日本マリンエンジニアリング学会誌, 第46巻, 第6号 (2011), pp. 56-61.