

〔論文〕

ウルトラファインバブルを混入させた気液混合燃料による ディーゼルエンジンの燃焼特性

高山 敦好^{*1}・田中 禎之^{*1}

Combustion Characteristics of Diesel Engine with Change in Ultrafine Bubble Diameter Mixed into Fuel

Atsuyoshi TAKAYAMA^{*1}, Tadayuki TANAKA^{*1}

Abstract

Environmental issues have become a global problem. Among them, environmental pollution due to exhaust gases is an important problems. Diesel engines used in marine applications are very large in size, and the heavy oil used as fuel is of extremely poor quality. Its exhaust gas discharge includes a large amount of harmful substances and is hence subject to environmental regulations. Currently, the Tier 2 Regulations in effect began in 2011, and the Tier 3 Regulations has become very strict from 2016 onward. As a result of more stringent regulations by the International Maritime Organization (IMO) regarding NOx emissions and sulfur concentration in fuel oil for vessels, pollutant-reducing technologies are being developed at a rapid pace both within and outside Japan. However, improving combustion efficiency is not easy. Owing to the trade-off between NOx and PM. The NOx content of the air-fuel ratio can be reduced to improve fuel consumption. This technology uses micro-bubble in the mixture. We study the air mixed into the fuel and the generated OH radical in the fuel due to the miniaturization of the micro bubble to the ultrafine bubble. Therefore, it studies the reduction of NOx and PM as well as an improvement in the fuel consumption by focusing attention on the mixture air particle diameter. As a result, ultrafine bubbles of air lead to improved combustion, it was reduced fuel consumption, 11.2% by boiler and 17.1% by diesel engine.

Key Words : Ultrafine bubble (UFB), Air mixed into fuel, Diesel engine, NOx, PM

1. 緒 論

エンジンやボイラに用いる石油系燃料は、燃焼に伴い発生する NOx, SOx, PM などの汚染物質が深刻な環境問題となっている。近年、陸上のみならず、海上における環境問題が問題視されている。特に船舶ディーゼル機関の排ガスによる環境汚染は極めて深刻である。船用に用いられるディーゼルエンジンは非常に大型であり、使用される燃料油は非常に粗悪なものである。そのため、排出される排ガスは有害物質を多量に含んでおり、環境規制の対象となっている。IMO（国際海事機関：International Maritime Organization）は、NOx や SOx および粒子状物質（PM：Particulate Matter）に対する段階的な規制を設けている。現在、2011年より始まった2次規制から段階を上げ、2016年より施行された3次規制は格段に厳しいものとなっている⁽¹⁾⁽²⁾。

これらから、後処理技術が広く開発され、アンモニアと NOx の反応による処理手法である選択還元触媒（SCR：Selective Catalytic Reduction）⁽³⁾⁽⁴⁾、燃焼排ガスを再度吸入空気として使用する排気再循環（EGR：Exhaust Gas Recirculation）により NOx の低減が容易に可能であり⁽⁵⁾⁽⁶⁾、触媒であるディーゼル粒子フィルタ（DPF：Diesel Particulate Filter）によって PM の処理が可能である。

燃料面の開発では、低硫黄燃料とすることで、SOx の低減において抜本的な対策が可能である。しかし、NOx と PM は燃焼時にトレードオフの関係があり、燃焼性において削減することが容易ではない。そこで、吸入空気の加湿や水エマルジョン燃料により、NOx および PM の同時低減が報告されている。しかしながら、油水分離や腐食の影響が考え

^{*1} エネルギーシステム工学専攻
平成28年11月1日受理

られることから、大きな普及には至っていない。

次に、従来のディーゼル機関においては、回転数や負荷に左右されず燃焼噴射時期が変化しないことから、燃料ポンプはクランク角度と同期したカムにより機械式のポンプ方式を採用されている。近年、コモンレールや高圧型噴射弁により燃料噴射をECUによる制御手法に変化しているが、高圧ポンプを使用する必要がある。また、燃料油中に空気を混入することでNOxやPMの低減や燃費の改善が報告されているが⁽⁷⁾、燃料ポンプ内でのキャビテーションが懸念される。

本研究は、空気混入燃料の空気粒径を変化させ、キャビテーションを抑制できる粒径すなわちナノ粒径域とすることで、OHラジカル等の付加から効率の良い空気粒径を求めるものである。これは、水エマルジョン燃料においても空気混入が可能であり、さらなる効率上昇を目指したものである。

2. 実験手法

2・1 混合手法

エジェクタや攪拌装置を用い、空気をマイクロバブル化できることが報告されている⁽⁸⁾⁽⁹⁾。マイクロバブルは粒径によって浮上速度が異なるが、ミリバブルと比べれば上昇速度は遅い⁽¹⁰⁾⁽¹¹⁾。しかし、一定時間で液面上に浮上し消滅する⁽¹²⁾。よって貯蔵は難しく、使用と同時に生成する必要がある。ナノバブル燃料は長期保存が可能であり⁽¹¹⁾⁽¹²⁾、ナノレベルのウルトラファインバブル(UFB: Ultra Fine Bubble)化することでOHラジカルなどの燃焼を促進するラジカル種を生成できるものである。

2・2 実験概要

実験装置を図1に示す。高圧ポンプに加圧溶解型のミキサを組み合わせて、燃料中にUFBを生成させた。Nikuni製渦流ポンプの入り口直前で空気を混入し、渦流ポンプにて空気と燃料を混合させる。その後、1MPaの高圧でミキサを通過させることで、ナノ領域の空気を燃料に混入させた。また、混合時間によって空気混合率および粒径を操作した。空気は0.1L/min混合させた。

2・3 ディーゼルエンジン

エンジンの緒元を表1に示す。クボタ製直接噴射式4サイクルディーゼル機関で、1気筒624ccである。定格出力は、2600min⁻¹時に11.5PS(8.45kW)である。実験条件は負荷率75%、2600min⁻¹である。

2・4 燃料

燃料の性状を表2に示す。今回の実験ではLSAを用いた。硫黄分濃度は0.1%未満の低硫黄燃料であり、SOxの発生量が大幅に削減できるものである。

2・5 計測装置

排ガスの測定はtesto350XLを用いた。この装置は、O₂、NO、NO₂、CO、SO₂および排ガス温度の計測が可能である。測定点はエンジン排気直後である。気液混合燃料の混合性について、松電舎製GR-D8T2の電子顕微鏡を用い、接眼レンズ10倍、対物レンズ40倍、すなわち400倍で計測した。その画像をもとに、旭化成エンジニアリング製A像くんにて粒径分析を行った。また、Malvern製NanoSight LM20を用い、50nm~1000nmの粒径計測を行った。

Table 1 Engine Spec

Engine Name	Kubota EA14-NB
Ignition	Direct Ignition
Engine Pattern	4 cycle
Power	8.45kW/2600rpm
Bore × Stroke (mm)	94 × 90
Injection Point (°)	ATDC - 21°
Experimental load	75%

Table 2 Fuel Character

	LSA
Density (g/cm ³) (15°C)	0.8572
Flashing Temperature(°C)	71.0
Kinetic Viscosity (mm ² /S) (50°C)	2.361
Water Content (%)	0.00
Carbon Residue Content (%)	0.44
Ash Content (%)	0.001
Sulfur Content (%)	0.077
Nitrogen Content (%)	0.01
Low Heat Value (MJ/kg)	45.43

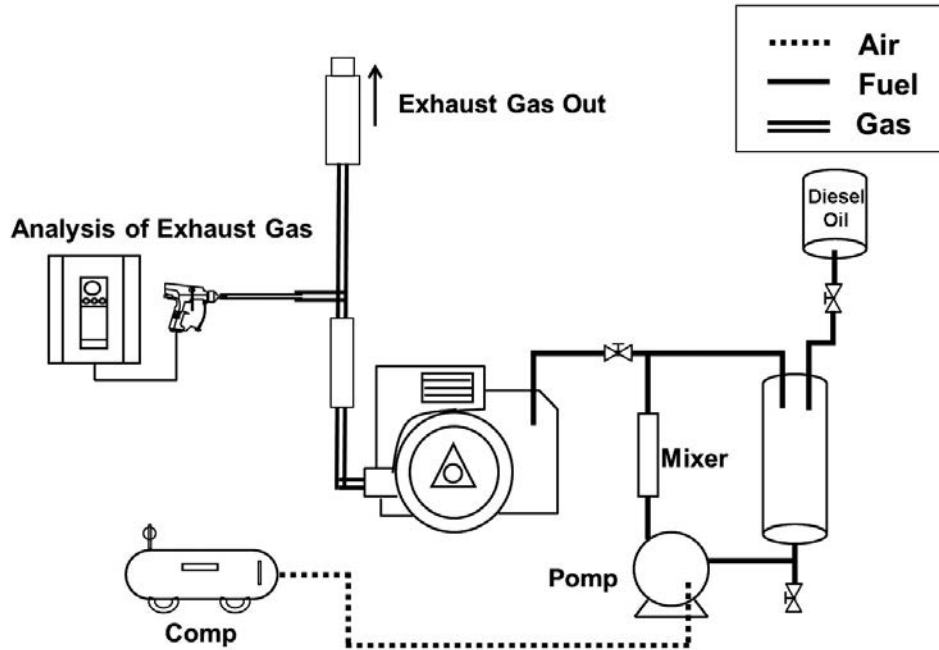


Fig. 1 Experimental Device

3. 実験結果

3・1 空気混入燃料の性状

図2に空気混入燃料の顕微鏡における観察結果を示す。混合時間5min経過後、空気の混入を止め、a)が0min、b)が0.5min、c)が1min攪拌した結果である。空気の混入を止めた後の空運転により、粒径が微細化されている様子が見られる。特にb)からc)にかけては、電子顕微鏡では1 μm 以下の測定が困難なため、NanoSightで確認したところ、空気の粒径が μm オーダーからnmオーダーに微細化されていることが分かった。A像くんの分析結果では、a)が3 μm 、b)が1 μm 、c)が0.3 μm と空気がさらに微細化されていることが明らかとなった。よって、一定時間の空気混合の後に、空運転によって燃料油中の空気をさらに微細混合させることが可能と言える。以上から、UFBスケールまで、空気を微細化できた。

3・2 燃焼炉による実験結果

燃焼炉における実験結果を図4に示す。a)がNO_x濃度、b)が燃費である。b)の棒グラフは燃料消費量(kg/h)で、折れ線グラフはLSA単独と比較した燃費低減率(%)である。LSA単独、混合時間5min+空運転0min、混合時間5min+空運転0.5min、混合時間5min+空運転1minを比較したものである。

NO_x濃度は、5min+0min、5min+0.5min、5min+1minともにほぼ変化が見られなかった。5min+1minのみ燃焼温度が約20-40 $^{\circ}\text{C}$ 上昇する傾向が見られ、CO濃度がLSA単独よりも減少できたことから、大幅な燃焼性が改善されたものと予測される。

燃料消費量は、5min+0minが1.24%、5min+0.5minが3.60%、5min+1minが11.02%改善できた。

これらから、5min+1minがNO_x濃度を低減できると同時に燃費が改善できることが分かった。また、空運転を1minより長く行った際には、空気粒径に大きな変化は見られなかった。

3・3 ディーゼルエンジンによる実験結果

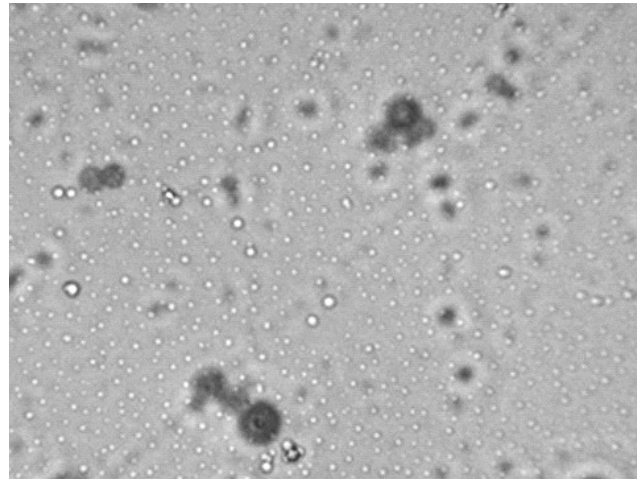
ディーゼルエンジンにおける実験結果を図5に示す。a)がNO_x濃度、b)が燃費である。b)の棒グラフは燃料消費量(kg/h)で、折れ線グラフはLSA単独と比較した燃費低減率(%)である。LSA単独、混合時間5min+空運転0min、混合時間5min+空運転0.5min、混合時間5min+空運転1minを比較したものである。

NO_x濃度は、5min+0minが11.4%、5min+0.5minが14.3%、5min+1minが17.1%低減できた。燃焼温度が約20 $^{\circ}\text{C}$ 上昇する傾向が見られ、CO濃度がLSA単独よりも減少できたことから、燃焼性が改善されたものと言える。

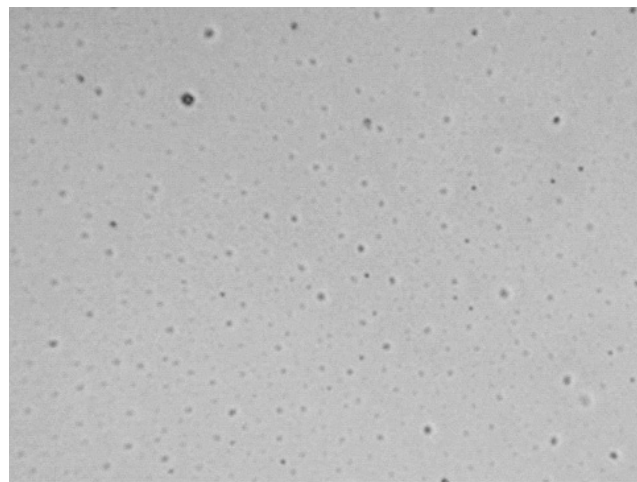
空気粒径が微細化することで燃焼性が向上することが読み取れ、NOx 低減手法として、空気混入燃料中の空気粒径を微細化させることが優位にあると言える。

燃料消費量は、5 min + 0 min が1.69%、5 min が4.49%、7.30%改善できた。これは、燃料が微細化されることで燃費が向上したものである。

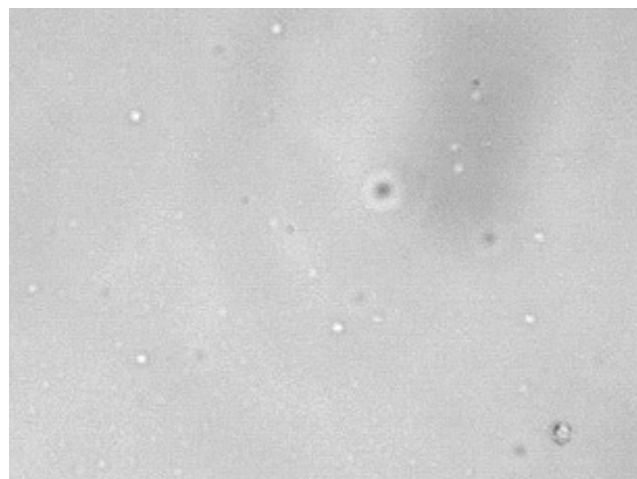
これらから、NOx 濃度を低減できると同時に燃費が改善でき、トレードオフの関係を生まないことが分かった。



a) 5 min + 0 min

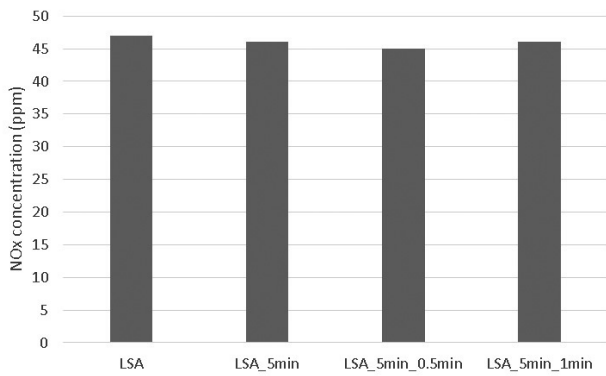


b) 5 min + 0.5 min

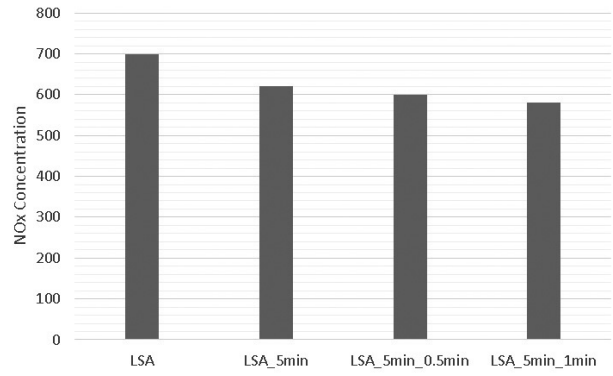


c) 5 min + 1 min

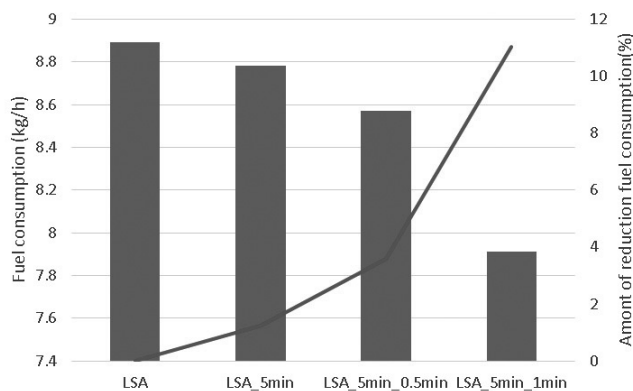
Fig.2 Fuel mixed 5 min air mixture



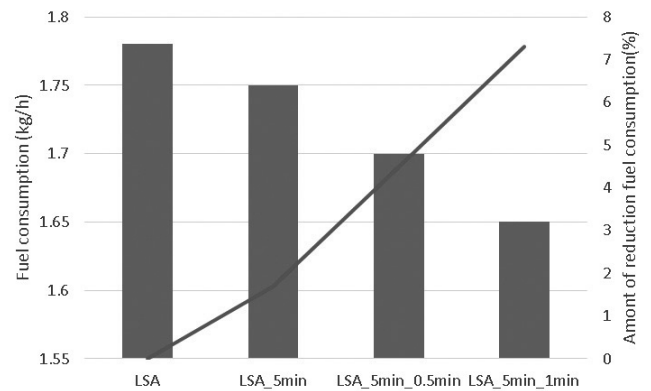
a) NOx



a) NOx



b) Fuel Consumption



b) Fuel Consumption

Fig.4 Result of fuel mixed 5 min air mixture in boiler

Fig.5 Result of fuel mixed 5 min air mixture in diesel engine

4. 考 察

気液混合燃料を生成するに当たり、一定時間空気を止めて空運転することで、燃料油中の空気をさらに微細混合させることが可能であり、最大0.3 μm に微細化できることが分かった。渦流タービンポンプやミキサにより、10 μm 以下のファインバブル化することで、燃料の浮上が著しく遅くなり、燃料油中に滞留する空気が増加する。空気が一定量混入する段階では、燃料油中の空気が再度混合される回数が少ないことから、微細化に限界があるものとする。空気混入を停止することで、燃料油中の空気が微細混合されることになり、空気がさらに微細化できるものと推測する。以上から、空気が微細混合された気液混合燃料によって、NOxの低減と同時に燃費が改善し、燃焼性が飛躍的に向上することが分かった。

粒径1 μm を下回る空気、すなわちUFB化された空気では、1週間後経過後に測定したところ、空気がさらに微細化される傾向が見られた。これは、ブラウン運動により壁面の影響や燃料自体の粘性によってさらに微細化される傾向があると推測され、今後の研究に応用する予定である。また、水エマルジョン燃料に空気を混入した空気混合水エマルジョン燃料による燃焼促進を行う予定である。水が水蒸気爆発することで周辺空気が膨張し、燃料自体がさらに微細化することが水エマルジョン燃料の特徴である。この燃料油中に空気が混入することは、水の水蒸気爆発と同時に空気が膨張し、水の水蒸気爆発自体を増大化すると同時に、周辺空気の膨張が加速し、燃料の微粒化がさらに促進するものと期待できる。今後、UFB領域の空気粒径について、さらに分解能を高め、理想的な空気粒径を報告する予定である。

5. 結 論

本研究は、以下の結論を得た。

1. 燃料油中にUFBを混入させることに成功した。
2. 気液混合燃料を生成するに当たり、一定時間空気を止めて空運転することで、燃料油中の空気をさらに微細混合さ

せることが可能であり、空気粒径を $0.3\mu\text{m}$ まで微細化できた。

3. 燃料油中の空気粒径を $1\mu\text{m}$ 以下とすることで、 NO_x の低減および燃料消費量の改善が見られた。ただし、 $0.1\mu\text{m}$ を下回ることで、良好な燃焼への干渉が見られた。

文 献

- (1) 国土交通省, “船舶からの大気汚染物質放出規制海域 (ECA) に関する技術検討委員会取りまとめ”, (2013), pp. 1-31.
- (2) 松本友宏, “ NO_x 3次規制に関する国際的動向-IMOにおける議論”, 日本マリンエンジニアリング学会誌, 第48巻, 第6号 (2013), pp. 2-4.
- (3) 柴田正仁, “船用ディーゼル機関の排気後処理について-IMO 3次規制に対応する SCR 技術”, 日本マリンエンジニアリング学会誌, 第45巻, 第2号 (2010), pp. 100-105.
- (4) 村上雅明, 中尾徹, “船用 SCR システムを搭載した大型ディーゼル機関の就航試験結果”, 日本マリンエンジニアリング学会誌, 第50巻, 第1号 (2015), pp. 107-112.
- (5) 吉川英夫, 黒河雅俊, “EGR 脱硝装置付ディーゼルエンジンの性能向上の研究”, 日本機械学会論文集 (B 編), 60巻, 572号 (1994-4), pp. 415-420.
- (6) 古東文哉, “船舶機関における EGR (排ガス再循環) による NO_x 低減技術”, 日本マリンエンジニアリング学会誌, 第46巻, 第6号 (2011), pp. 6-11.
- (7) 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.
- (8) Serizawa, A., Inui, T., Yahiro, T. and Kawara, Z., Laminarization of micro-bubble containing milky bubbly flow in a pipe, 3rd European Japanese Two-Phase Flow Meeting, (2003), pp. 21-27.
- (9) 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.
- (10) 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.
- (11) 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.
- (12) 柘植秀樹, “マイクロバブル・ナノバブルの基礎”, Bull. Soc. Sea Water Sci., Jpn., 64, 4-10 (2010), pp. 4-10.