

〔論文〕

ディーゼル機関を用いた空気混入水エマルジョン燃料の燃焼特性

室屋 佑成^{*1}・高山 敦好^{*2}・磯野 宏行^{*1}

Combustion Character by the Air-Fuel Mixture Comprising Water-Emulsified Fuel Using a Diesel Engine

Yusei MUROYA^{*1}, Atsuyoshi TAKAYAMA^{*2}, Hiroyuki ISONO^{*1}

Abstract

Diesel exhaust gas is usually accompanied by the expulsion of NO_x, SO_x, CO_x, and PM. Several companies and laboratories are conducting research on exhaust gas reduction technologies, including emulsified fuel, new fuel, and exhaust gas recirculation. This study focuses on the development of an emulsified fuel infused with ultra-fine bubbles for diesel engines. In particular, this study aims to develop an air-fuel mixture that comprises 500-nm of water and ~100 nm of air, which could reduce NO_x and PM and improve the fuel consumption efficiency.

Key Words : Air mixture fuel, Water emulsified fuel, Diesel engine, Pollutants (NO_x, SO_x, CO_x and PM)

1. 緒 言

1・1 背景ならびに研究目的

ディーゼルエンジンのメリットは、低燃費、耐久性、高トルク等が挙げられる。これは大動力になるため、主に船舶、トラック、トレーラ等の大型重機で使われている。ディーゼルエンジンは排気ガスにNO_x、SO_x、CO_xおよびPMが多く含まれており、環境汚染に影響する有害物質が排出されることから、環境規制が強化されており、排ガス低減技術の開発が急務となっている。この規制をクリアする対策として、排ガス排出前処理技術として水エマルジョン燃料などの新型燃料の使用、コモンレール等の電子噴射制御等が挙げられ、排ガス排出後処理技術としてスクラバ処理、ディーゼル微粒子捕集フィルタ（DPF：Diesel Particulate Filter）⁽¹⁾、排気再循環（EGR：Exhaust Gas Recirculation）^{(2)・(3)}、選択触媒還元（SCR：Selective Catalytic Reduction）^{(4)・(5)}、静電集塵⁽⁶⁾等が挙げられ、有害物質の低減技術の開発が盛んに行われている。

本研究は、前処理技術である水エマルジョン燃料を主体としたものである。また、気液混合燃料をベースとした水エマルジョン燃料により、従来の燃料より燃焼効率の向上と汚染物質の低減を目的としたものである。水エマルジョン燃料⁽⁷⁾は、燃料の中に水を混入したものであるが、油水分離の問題や不均等な混合により、燃焼を阻害することが懸念される。近年では、ウルトラファインバブル（UFB：Ultra-Fine Bubble）の研究が盛んに行われており、産業界では食品分野をはじめとして、化粧品、薬品、医療、半導体や植物育成等、幅広い分野での応用が考えられ、大きな期待が寄せられている。燃料中にUFBを混入させることで、この不均一な混合を向上させ、さらにUFB自体の膨張により、燃焼性を飛躍的に向上させると同時に、水エマルジョン燃料を使用した際に生じる着火遅れを改善できることを期待したものである。

2. 実験概要

2・1 水エマルジョン燃料

図1にエマルジョン燃料の形態を示す。エマルジョン燃料の形態は、油滴水中型 W/O（Water in Oil）型と水滴油

^{*1} 工学研究科 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29年10月31日受理

中型 O/W (Oil in Water) 型が存在する。O/W 型は燃料自体が水で覆われているため、ラインやポンプに腐食等の害を与える影響が懸念されることから、W/O 型が優位となる。

水エマルジョン燃料とは、溶質溶媒がともに液体である分散系溶液のことである。分離している二つの液体をエマルジョン、すなわち乳化したもので、一般的に乳化剤や添加剤などの界面活性剤を用いる。界面活性剤は500~1000円/Lと高価であり、最低でも1~2%混合が必要であり、燃料費が5~20円/L増加するため、現時点では普及に至っていないのが現状である。

水エマルジョン燃料は、重油、軽油、灯油等の燃料と他の溶液（燃料）を数%の界面活性剤を用いて生成できる。燃料油の中の水は、燃焼温度を低下できると同時に、水が爆発もしくは周辺の空気が膨張することで、燃料油がさらに微細化される。それにより、燃焼性が改善されることで、NO_x と PM が両方同時に低減することができる。

水エマルジョン燃料とは、一般的に燃料油と水と乳化剤を一定比率で攪拌させ生成する。これは、スターラを用いた攪拌手法が旧来使用されていたが、高圧でミキサに送り込み生成する圧送手法が開発され、飛躍的に混合性が向上した。しかしながら、燃料と水は直接均一な燃料とならないため、その安定性は低いことが現状である。

2・2 気液混合燃料⁸⁾

気液混合燃料とは、燃料の中に気体を混入させた燃料である。水エマルジョン燃料は、水の爆発が吸入空気自体を膨張させる役目を担っていたが、気液混合燃料は、燃料に含まれる空気自体が直接膨張することで燃料を微細化させる。それにより燃焼性を促進させることが可能である。その長所を組み合わせさせた空気混入型水エマルジョン燃料は、水エマルジョン生成の際に空気を混入し、均一に攪拌させた気液混合燃料となる。

従来の技術では、燃料に空気を混入させることが困難であった。これは、空気が微細化され容易にファインバブル状態にはなるものの浮上速度が速く、燃料油中に空気を混入することが困難である。本研究は、高圧溶解型ミキサを製作し、混入する気体を1μm以下のウルトラファインバブル(UFB: Ultra Fine Bubble)化に成功したものである。

2・3 UFB (Ultra Fine Bobble)

ウルトラファインバブルとはnm単位の極小の気泡のことである。気泡は極めて小さいため、目視で確認することは困難である。UFBは、水中に1μm未満の気体が混入し浮遊しており、このUFBは負のコロイドとしての側面があり、負に帯電をしていることから、UFB同士が反発し結合することは生じにくく、気泡数密度が低下しにくい。UFBに混入させる気体を変化させることにより、気体に応じた効果を得ることが可能である。気泡には水中のイオンが集まり、帯電することが知られているが、溶液中に分子が溶け出した気泡の圧力が高まり、消滅時には数千気圧の圧力により、大きなエネルギーが放出されることが確認されている。気泡には表面張力が働くことにより球体になろうとする。その界面で引き合う力は内部の圧力を高めることになる。表面張力による作用は気泡が小さいほど強力であり、圧力は気泡径に反比例して大きくなる(1マイクロの気泡で3気圧程度とされる)。気泡の圧力が高まれば、液体中に溶け込む気体溶解能力が高まる。このため気体の分子が少しずつ液中に溶け出し、縮小することで気泡内の圧力が高まる。

空気を混入させた場合、通常の水よりも多く空気が溶け込んだ燃料を生成することが可能である。UFB混合燃料の生成手法の主なものは加圧溶解方式と旋回流方式がある。加圧溶解方式は液中に圧縮した気体を一気に開放させることによりUFBを生成する方式である。高濃度のUFBを生成が可能であるが、50μm以上の泡が多く生成され、泡同士が結合し肥大化するため、上昇速度が速く、液中のUFB滞留時間が短い。旋回流方式は気体と液体を高速回転させ、その際に生じるせん断力によりUFBを生成する方式である。微小で均一な泡が生成されるが、生成効率が低い。

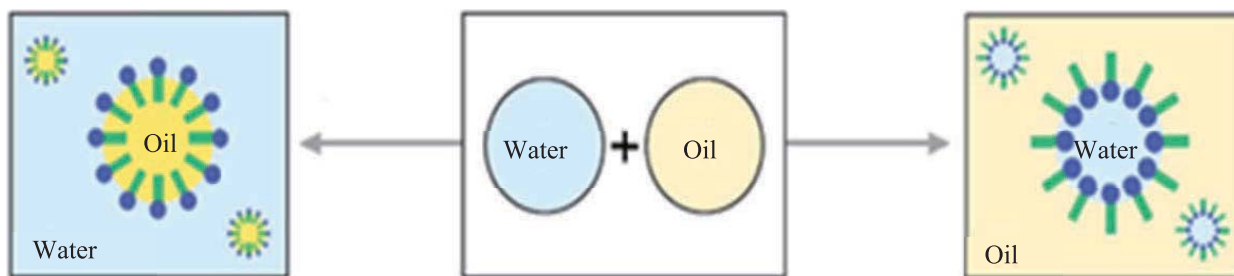


Fig.1 Water emulsified fuel

2・4 実験装置及び実験方法

図2に実験装置を示す。燃料70%と水30%の割合で総量10Lをタンクに投入し、高圧ポンプによって1MPaに加圧した混合油を、加圧溶解型のみキサに送入させ、水エマルジョン燃料を生成した。また、ポンプ1次側から空気を0.4L/min混入し、10minの循環により空気混入水エマルジョン燃料を生成した。生成した燃料をディーゼルエンジンに投入し、NO_x、COおよび燃費を計測した。表1にエンジンの緒元を示す。エンジンはクボタ製ディーゼルエンジンEA14-NBを用いた。実験条件は2600rpmで負荷率75%、すなわち6.34kWで行った。

表2に燃料の緒元を示す。燃料は低硫黄燃料であるLSAを用いた。硫黄分濃度は0.046w%、比重は0.85kg/Lである。排ガス測定は、テスト製 testo350XLを用い、O₂、CO₂、FT、NO、NO₂、SO₂を測定した。

燃料の測定は、松電舎製 GR-D 8 T 2 のデジタル顕微鏡を用い1000倍で撮影した画像を、旭化成エンジニアリング製 A像くんにて解析した。

3. 実験結果

3・1 空気水エマルジョン燃料の性状

図3にエマルジョン燃料の性状を示す。接眼レンズが10倍、対物レンズが100倍の1000倍の顕微鏡結果である。(a)が水エマルジョン燃料、(b)が空気混入水エマルジョン燃料である。

(a)は、水の平均粒径が800nmであり、均等に分散している様子がわかる。燃料油中に分散するW/O燃料であることが確認できた。

(b)は、水の平均粒径が500nmと(a)と比べて微粒化したことが分かった。また、水の中や燃料油中に小さな斑点が見られ、これが空気であると想定される。空気の平均的な大きさは測定できなかったため、図4にUFB水の実験結果を示す。UFB水では、空気が100nm以下まで微細化されており、同様の粒径になっているものと言える。また、ナノ密度は、10億個/mlである。

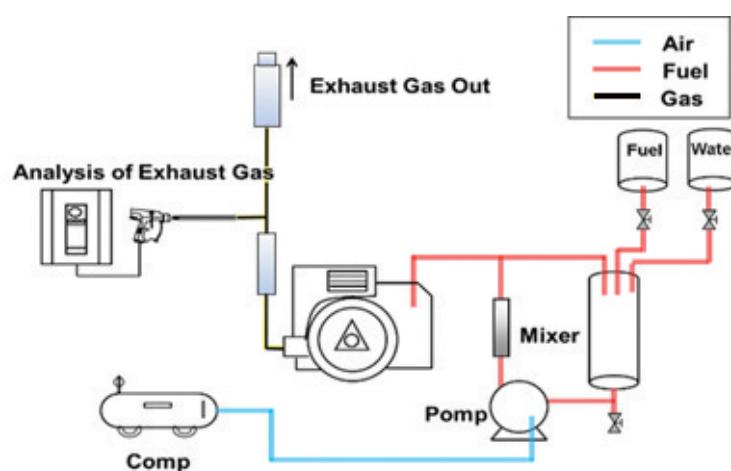


Fig.2 Experimental device

Table 1 Engine spec

Engine Name	Kubota EA14-NB
Cylinders	1
Injection type	Direct Injection
Engine Pattern	4 cycle
Power	11.5PS/2600rpm
Bore × Stroke (mm)	94 × 90
Compression ratio	18
Displacement	624cc
Injection pressure	21MPa
Injection Point	ATDC - 21°

Table 2 Fuel character

Fuel	LSA
Density (g/cm ³) (15°C)	0.85
Flashing Temperature (°C)	64.0
Kinetic Viscosity (cSt) (30°C)	2.32
Water Content (%)	0.05
Carbon Residue Content (%)	0.03
Ash Content (%)	0.001
Sulfur Content (%)	0.048
Nitrogen Content (%)	0.02
Total Heat Value (KJ/kg)	45,560

3・2 エンジンによる燃焼結果

図5に実験結果を示す。2600rpm時に負荷率75%、すなわち6.34kWで、LSA、水エマルジョン燃料、空気混合水エマルジョン燃料を比較した。(a)がNO_x濃度、(b)がCO濃度、(c)が燃費の比較である。

NO濃度はLSA単独が11.32g/kWhなのに対し、水エマルジョン燃料は5.38g/kWhとなり、約52.5%減少した。また、空気混入水エマルジョン燃料は4.17g/kWhとなり、約63.2%減少した。NO₂濃度はLSA単独が0.751g/kWhなのに対し、水エマルジョン燃料は0.283g/kWhとなり、約62.3%減少した。また、空気混入水エマルジョン燃料は0.188g/kWhとなり、約74.9%減少した。CO濃度はLSA単独が13.1g/kWhなのに対し、水エマルジョン燃料は12.1g/kWhとなり、約7.5%減少した。また、空気混入水エマルジョン燃料は5.76g/kWhとなり、約56.0%減少した。以上から、水エマルジョン燃料を使用することで燃焼性が向上し、さらに空気混入により大幅な改善が見られた。燃費はLSA単独が288.4g/kWhなのに対し、水エマルジョン燃料は261.3g/kWhとなり、約9.4%減少した。また、空気混入水エマルジョン燃料は229.9g/kWhとなり、約20.3%減少した。

また、水エマルジョン燃料と空気混入水エマルジョン燃料を進角させ、噴射した場合の燃料消費率を図6に示す。(a)は水エマルジョン燃料のみ、(b)は空気混入水エマルジョンの結果である。水エマルジョン燃料を使用することで着火遅れが起こり、トルクが低下することから燃料噴射量は増加すると考えられるが、進角噴射を行うことで着火遅れをなくし、燃料噴射量を抑えることができた。このことから、水エマルジョン燃料のみの燃料消費率は進角させることで低下

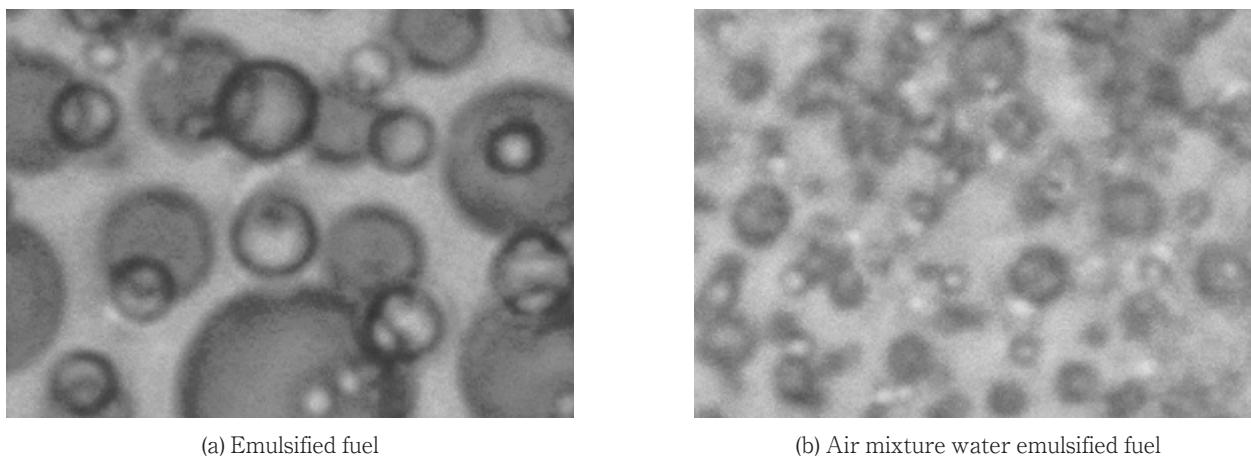


Fig. 3 Emulsified fuel

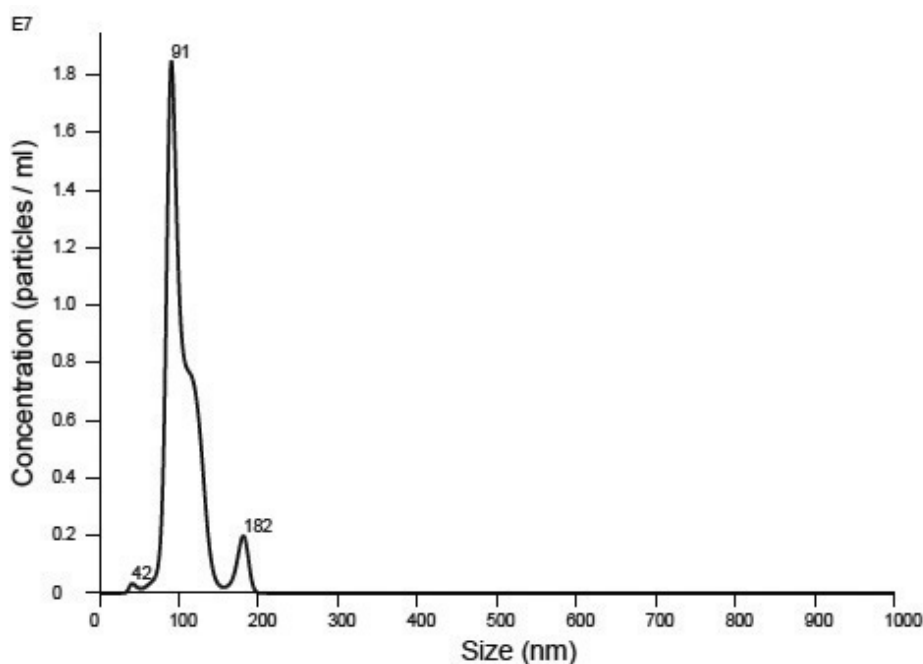


Fig. 4 Analysis of UFB water

した。次に、空気混入水エマルジョン燃料は ATDC-21°では燃料消費率が低下したが、ATDC-24°では増加した。これは空気を混入することで着火遅れが改善されていたため、ATDC-24°では噴射が筒内圧力のピーク時よりさらに前に行われたことから、燃料消費率が悪化したと考えられる。このことから、空気混入水エマルジョン燃料は水エマルジョン燃料により引き起こされる着火遅れを解消することができたと考えられる。

3・3 考察

添加剤を用いた水エマルジョン燃料は、平均水粒径が2～5μm、燃費改善率が約5%と報告されている。本研究では、水粒径が800nmと微細化できており、燃料消費率も約10%に改善できた。さらに、空気混入水エマルジョン燃料では、水粒径が500nmと更なる微細化に成功し、燃料消費率は20%以上の改善が見られた。空気の混入は、水のマイクロ爆発による吸気の膨張と同時に、燃料油中の空気が膨張され、燃料が大幅に微細化および予混合性が向上したものと推測する。また水エマルジョン燃料による着火遅れを空気の微細爆発により抑制することができたと推測する。以上から、NO_xは水エマルジョン燃料が53.1%、空気混入水エマルジョン燃料が63.9%減少できた。

4. 結 言

本研究は、空気混合水エマルジョン燃料により、以下の結論を得た。

1. 加圧溶解型ミキサにて、空気混入水エマルジョン燃料の生成に成功した。
2. 水エマルジョン燃料では水粒径が800nm、空気を混入した水エマルジョン燃料では水粒径が500nmと微細化に成功した。
3. 水エマルジョン燃料に空気を混入することで、LSA に対しCOが56.0%減少し、NO_xが63.9%低減できた。また、燃費が20.3%改善できた。
4. 空気の微細混入によって、水エマルジョン燃料の着火遅れを改善することができた。

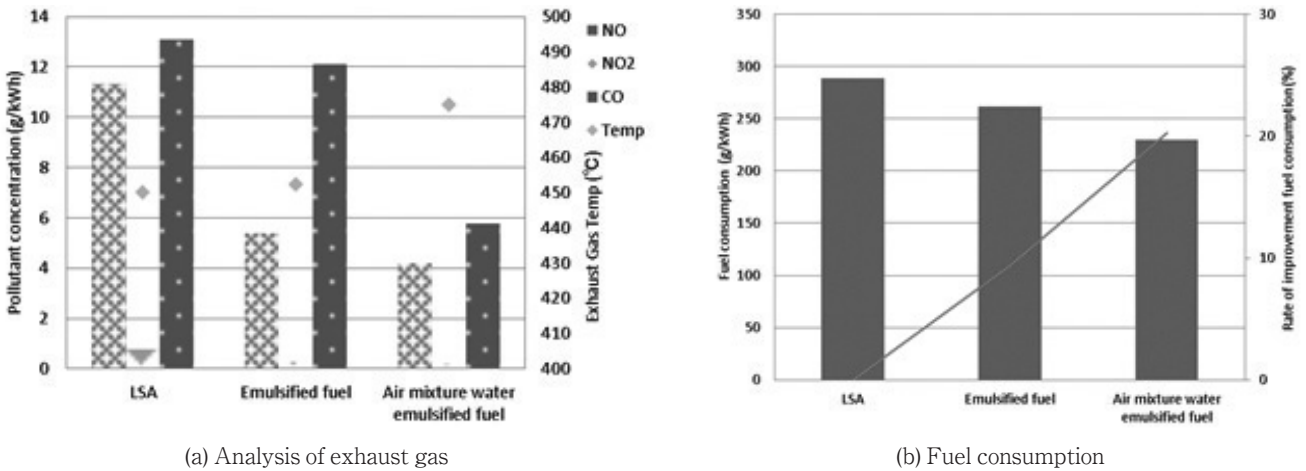


Fig. 5 Experimental result by diesel engine

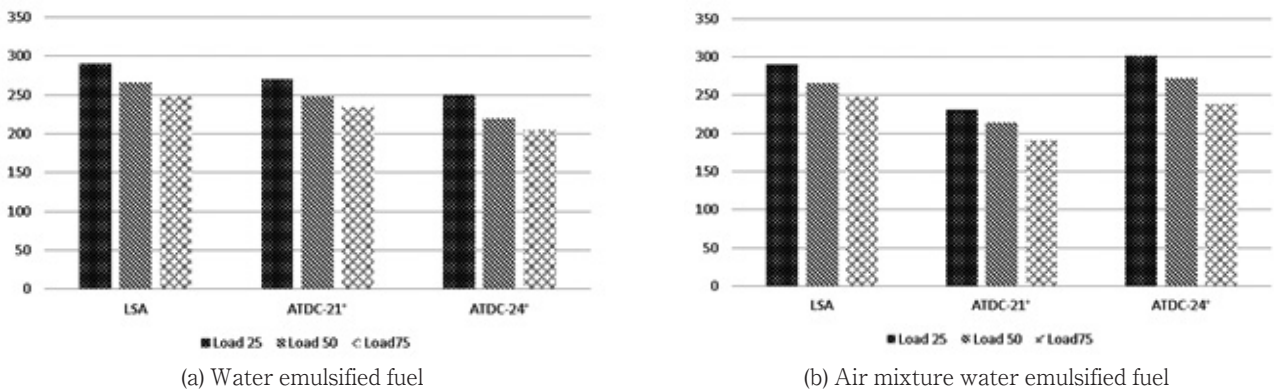


Fig. 6 Result of fuel consumption

文 献

- (1) 中島 徹, 佐々木左字介, 河合昭宏, 坂本和彦, “ディーゼルパーティキュレートフィルタ (DPF) による排出ガス性状の改善”, エアロゾル学会誌, 第15巻, 4号 (2000), pp.344-352.
- (2) 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.
- (3) 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.
- (4) 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.
- (5) 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.
- (6) 高山敦好, 影山朋久, 藤田浩嗣, 原野 亘 “PM 充電器と静電水スクラバによる NO_x, PM の低減”, 環境技術学会誌, 第41巻, 第2号 (2012), pp.90-96.
- (7) 島田一孝, “水技術 (水エマルジョン, 水噴射, 吸気加湿等) による NO_x 低減技術”, マリンエンジニアリング学会誌, 第46巻, 第6号 (2011), pp.831-836.
- (8) 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.