

〔論文〕

窒素-気液混合燃料による燃料特性の改善

田中 遼太^{*1}・高山 敦好^{*2}・下伊倉 潤^{*1}・益本 広久^{*3}

Improvement of Fuel Characteristics Using Nitrogen Mixture Fuel

Ryota TANAKA^{*1}, Atsuyoshi TAKAYAMA^{*2}, Jun SHIMOIKURA^{*1} and Hirohisa MASUMOTO^{*3}

Abstract

Marine fuels contain residue oil. As the heavy oil approaches heavy fuel oil (HFO), the ratio of light oil decreases and the residual oil increases, resulting in a high kinematic viscosity even at room temperature. Biodiesel fuel, a substitute fuel for light oil produced by methyl esterification of waste cooking oil, also has a high kinematic viscosity caused by impurities in the oil and oxidation degradation. Impurities in residual C fuel oil and waste cooking oil or vegetable oil clog the fuel-injection valves. In common rail diesel engines, the kinematic viscosity of the fuel plays a significant role.

This study investigates the effect on the kinematic viscosity of gas mixture fuel by adding nitrogen to the fuel to effectively reduce nitrogen oxide during combustion. As a result, the kinematic viscosity of marine diesel oil and light oil was slightly reduced when converted to gas mixture fuel. However, the reduction in kinematic viscosity was pronounced when the fuel was a gas mixture, for HFO and straight vegetable oil that have high kinematic viscosities, and the difference in the amount of gas in the mixture was also apparent. The amount of gas in the mixture of 0.1 L/min was the most effective at reducing the kinematic viscosity for HFO, resulting in a 54.0% improvement in fuel characteristics.

Key Words : MDO (Marine Diesel Oil), Light oil, SVO (Straight Vegetable Oil), BDF, Nitrogen, Fuel Reforming

1. 緒 言

IMO（国際海事機構）は船舶の排気による海洋汚染を抑制するための条約により2011年以降の建造船のエンジンに対して規制が導入され、IMO 3次規制では2016年以降指定海域でのNO_x排出80%削減の厳しい目標が同意された。この規制では前排出ガス規制区域が大幅に拡大され、NO_x、SO_x、PMなどの有害物質を低減できる技術開発が急務となった。NO_xはIMO 1次規制に対して一般海域IMO 2次規制20%削減、ECA（Emission Control Area）海域IMO 3次規制0%削減（現状で米、加沿岸のみ）、SO_xおよびPMは燃料油硫黄分中に一般海域0.5%以下（2020年～）、ECA海域0.1%以下（2020年～）と規制される⁽¹⁾。また、世界的な人口増加の観点からもエネルギー資源の確保や開発が今後の課題である。船用機関は、排気量が大きくかつ回転数が低速な特性から、運転時に燃料消費量が増加する傾向から自動車のような高圧噴霧を維持することが難しく、中低圧下での制御となる。船用燃料は残渣油の含入率により、A重油、B重油、C重油と分けられ、重油中の軽油と残渣油の割合はC重油に近づくにつれて軽油の割合が減少し残渣油が増加するため動粘度が常温時の場合においても高くなる。

近年では廃食用油のメチルエステル化による軽油代替燃料とする研究開発・実用化などが進んでいる。二酸化炭素の排出抑制を担うことができるバイオマス利用方法のひとつとしてバイオディーゼル燃料（BDF：Biodiesel Fuel）がある。植物は、大気中の二酸化炭素を吸収して光合成を行うため植物性油脂を燃焼させた場合、もともと大気中に存在していた二酸化炭素に戻るだけであり、化石燃料を燃やしたときのように二酸化炭素が増加し続けることはない。このことから、廃食用油をバイオディーゼル燃料化しディーゼルエンジンの燃料の代替に用いることで、排気ガス中のSO_xが発生せず、CO₂や黒煙も軽油より少なく、植物起源の原料（バイオマス）であることからカーボンニュートラルに区分される燃料である。

現在、ディーゼル機関は燃料制御面においてコモンレールが開発されたことにより、従来の機械式噴射に比べ高圧噴

^{*1} エネルギーシステム工学専攻、^{*2} IR推進センター、^{*3} 機械システム工学科
令和3年11月4日受理

射となり、PMの低減、多段噴射によるNO_xの低減が期待できる。しかし、C重油中の残渣油や廃食用油中の不純物が燃料噴射弁を詰まらせる原因となる。コモンレール搭載のディーゼル機関においては燃料単体での利用は容易ではなく、これは燃料の粘度が大きく起因するものである。

燃料の粘度を下げる方法として、昇温手法が一般的である。通常、C重油などの難燃油は50℃での粘度で表示される。廃食用油などをベースとしたBDFにおいても同様であるといえる。加温による粘度の低減は容易である反面、高温状態になると火災を伴う危険性が考えられる。

近年微細気泡が混入したウルトラファインバブル（UFB：Ultrafine Bubble）が注目されている。通常水に気体を混入させる場合、ヘンリーの法則に基づき、溶媒に溶ける気体の物質量は圧力に比例することが知られている。したがって、溶存酸素濃度（DO：Dissolved Oxygen）が低減されると、脱酸素状態の水溶液の生成が可能となる。このため燃料油に窒素を混入させた場合でも脱酸素状態になると考えられ、酸化に伴う燃料性状の悪化の指標となる粘度や臭気が改善されるものと考えられる。

以上から、本研究は燃焼時のNO低減に効果を発揮するべく燃料への窒素添加による動粘度への影響を調査するものである。これは、ナノオーダーの微細気泡であるUFBを燃料中に混入させた気液混合燃料にすることで、発生するラジカルや窒素による改善効果を期待したものである。

2. 実験概要および実験方法

2・1 気液混合燃料

気液混合燃料とは、燃料の中に気体を微細混入させた燃料である。図1は気液混合燃料の概略図を示す。燃料中に微細な気体が混入していることで気体が燃焼室で周囲の空気を取り込み膨張するとともに、燃料を微細化することで予混合が促進される。これらのことから予混合の促進による燃焼性の改善と混入気体の膨張行程により着火遅れが生じ、サーマルNO_xの低減が可能となり、トレードオフの問題となるNO_xとPMが同時に低減できるものと期待される⁽²⁾。従来の技術では気泡径が10μm程度のもが多く、生成されてから一定時間経過すると溶存気泡が消えてしまうという懸念点が存在する。しかしながら、気泡径を1μm未満にすることで、長期間の気泡の保存ができるため、燃料タンクに貯蓄することが可能になる。本研究のUFB混入には微細気泡の混入が容易な加圧溶解攪拌型ミキサを用いる。図2に加圧溶解攪拌型ミキサの概略図を示す。この装置は加圧時に水と気体が混合した気液混相において、気体が中央部に集積する特徴を利用し、1stエレメントにて中央部の孔径を外側の孔径よりも小さくすること、2ndエレメントの穴孔径を調節することで、2流体に流速差を持たせたものである。したがって、2枚のエレメント間に強い渦流が発生し、高い攪拌力を有する装置である。気液混合燃料生成装置はタンク、NIKUNI製渦流タービンポンプおよび加圧溶解攪拌型ミキサの循環経路からなり、ポンプ入り口直前で空気を混入し、ポンプ出口に加圧溶解攪拌型ミキサを設置することで気液混相状態の燃料をポンプによる圧送、加圧溶解攪拌型ミキサによる微細攪拌により気液混合燃料の生成が可能である。実験対象とする燃料は、軽油、A重油、C重油、BDFおよび廃食用油である。

2・2 A重油・C重油

一般的に重油とは原油の蒸留によって得られる残油などを処理して得られる石油製品のことであり、A重油は低硫黄であるLSA（Low Sulfur A）重油、高硫黄であるHSA（High Sulfur A）重油に区分される。LSA重油は硫黄分が燃料油中に少ないことから、2020年1月より開始されたSO_x規制にも対応している燃料である。

C重油はA重油に比べ、高粘度であるため加熱させた上で燃料として用いられるのが一般的である。また、燃料油中に不純物が多く含まれることから船舶ディーゼル機関に用いる場合、油清浄機により不純物を取り除き用いられる。さらに、硫黄分が燃料油中に多いため、シリンダライナーの腐食、摩耗が懸念点である。しかしながら、A重油に比べ安価であり数年前まで多くの船舶機関で主流となっていた燃料である。

2・3 残渣油

残渣油は中東など輸入した原油を蒸留し、ナフサ、ガソリン、灯油および軽油などに分けた際の最も重質な留分のことであり、一般的に残渣油を希釈して発電や船用燃料、道路舗装用アスファルトの原料として用いられる。残渣油には常圧残渣油（AR）と減圧残渣油（VR）の2種類がある。VRは硫黄分や金属片など多くの不純物を含むため、使用する場合はこれらの不純物を除去し、環境にやさしい製品に変換する必要がある。不純物除去法として溶剤脱れき（SDA）装置があげられる。前処理を行った脱れき油（DAO）とARを混合し、残渣油脱硫（RDS）装置で不純物が除去される⁽³⁾。

2・4 廃食用油

家庭や事業系で用いられた使用済みの食用油のことを廃食用油という。京都市をはじめとした全国の市町村区で回収ルートの確立や再生手法が行われている。図3に油脂および油脂製品の割合を示す⁽⁴⁾。廃食用油は、事業系で年間32～35万tであり、そのうちの20%（6～8万t）が再生利用困難として廃棄されている。家庭系では年間9から11万tであり、そのうちの91%（9～10万t）が廃棄されている。事業系の廃食用油は、有機物として取引されることも多く、そのほとんどが飼料用（約70%）へリサイクルされており、外食産業にとって重要なリサイクル手法である。その一方で、家庭系の廃食用油は、リサイクルが進んでいないが、集団回収による廃食用油の分別収集を行うなど、全国の市町村でBDF化の取り組みが進みつつある。廃食用油の再生は、石鹼化、工業原料化・飼料化、燃料化など様々な手法が存在する。各地方でその差は大きく、全体で見ると、この廃食用油の廃棄量は年々増加傾向にある。近年では、輸出による需要が活発化していたが、内燃機関にコモンレールが普及していることから減少する傾向が見られている。日本ではこの廃食用油を用いてBDFが製造されるが、この廃食用油の空気接触や加水分解による酸化度・不飽和脂肪酸の差異により、BDFの性状が左右してしまうことも問題であり、これらを安定させることが重要である。

2・5 BDF (Biodiesel fuel)

BDFとは、生物由来油から作られるディーゼルエンジン用燃料の総称であり、バイオマスエネルギーの1つである。BDFの原料は欧州（特にドイツ、フランス、イタリア）では主に菜種油が利用されており、米国やブラジルでは主に大豆油が利用されている。これに対し日本ではほとんどが廃食用油を利用したBDFとなっている。これは日本国内で作付け・生産している植物油は非常に少なく、輸入に頼っていることが原因であり、欧州のように農作物から直接バイオディーゼル燃料を生産する可能性は極めて低いため、バイオディーゼル燃料の原料に食用油の廃食用油が使用されている。

図4にBDFの製造プロセスをまとめたものを示す。BDF製造方法として、メタノールを高温・高圧にしエステル交換を行う無触媒法、硫酸(H_2SO_4)やフッ素などを用いる酸触媒法、水酸化ナトリウム(NaOH)や水酸化カリウム(KOH)などを用いるアルカリ触媒法および酸化カルシウムなどの金属酸化物を用いる固体触媒法などが知られている⁽⁵⁾。BDF製造に関する研究・開発は多く存在するが、アルカリ触媒法がBDF製造手法として広く普及している。さらに、BDFは硫黄分酸化物をほとんど含まないため、軽油と比較して硫黄酸化物(SO_x)の排出する黒煙を1/2から1/3削減でき、ディーゼル車の排気ガス対策としても有効である。特に欧州では、政策的支援が導入され、ドイツを中心にBDFの利用が進んでいる。

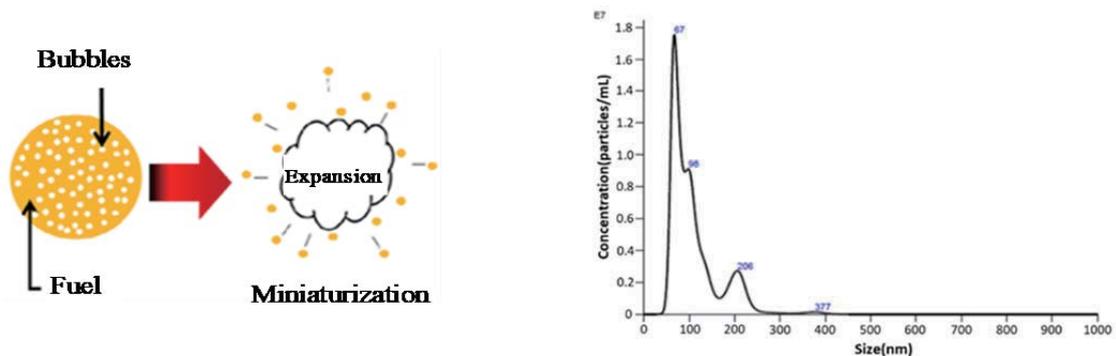


Fig. 1 Air mixture fuel

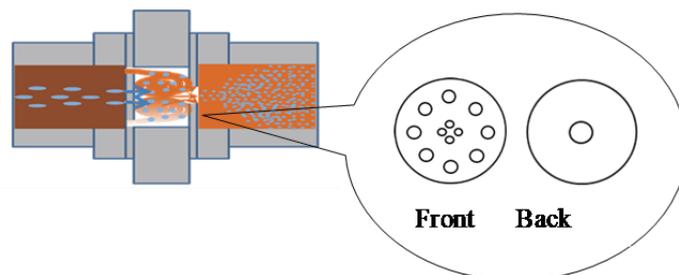


Fig. 2 Pressurized dissolution stirring type mixer

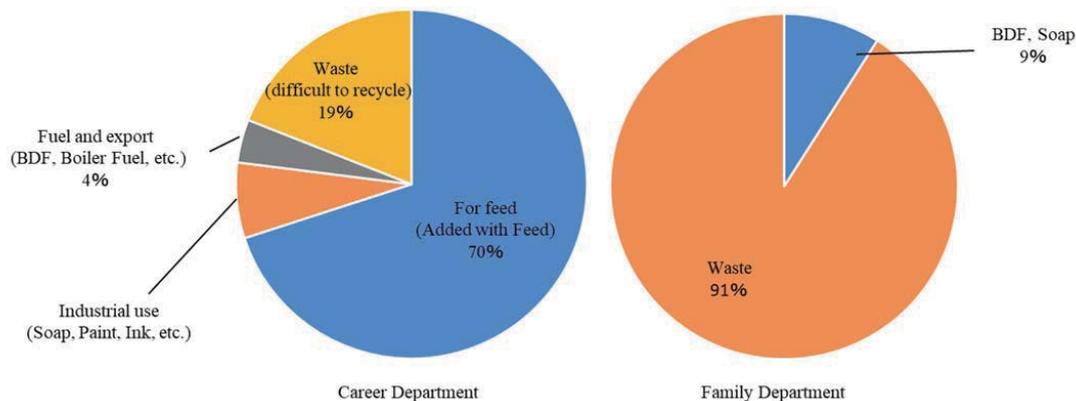


Fig. 3 Flow of oil and fat production

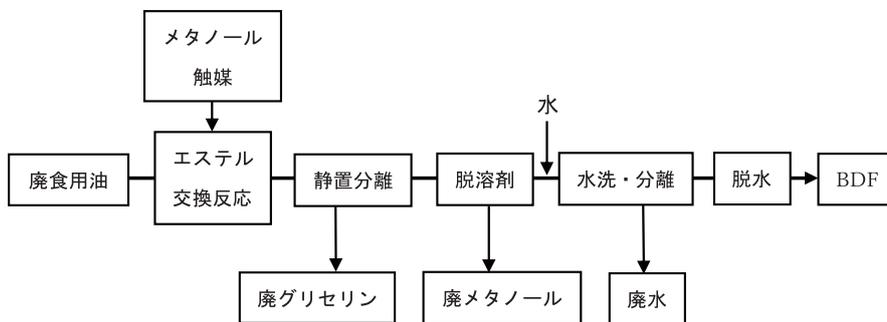


Fig. 4 BDF production process

2・5 実験装置および実験装置

燃料の動粘度測定には柴田科学製キャノンフェンスケを用いた。粘度測定にはキャノンフェンスケ (SO), キャノンフェンスケ逆流形 (不透明液用) (SF), ウペローデ (SU), オストワルドなどが存在する。本研究では柴田科学製キャノンフェンスケを用いた。これは一般に広く使用されていること、安価であることおよび測定が安易であるためである。

図5の (a) および (b) にそれぞれ動粘度測定器の外観写真を示す。(a) 動粘度20~100cSt (026110-01 NO.200) および (b) 動粘度7~35cSt (026110-0035 NO.150) と異なる形状の測定器を用いた。この装置は一定の試料が毛細管を流出する時間を測定して動粘度を求めるものであり、特に少量の試料の動粘度測定に適している。常温で使用する軽油, A 重油は, 動粘度の測定条件を統一するため, C 重油および BDF, 廃食用油と同様に昇温 (50℃) で動粘度測定を行った。全試料において, 3回平均の値とする。次式にて動粘度を求める。

$$\nu = Ct$$

$$C = 0.1463 \text{ (NO.200)}, 0.03740 \text{ (NO.150)}$$

$$\nu = \text{動粘度 (cSt)}$$

$$C = \text{粘度計定数 (cSt/s)}$$

$$t = \text{液体が細管を通過して測時球の標線を通過する時間 (sec)}$$

図6に気液混合燃料生成装置を示す。気液混合燃料生成装置の第1, 第2タンクの循環経路配管には加圧溶解攪拌型ミキサを搭載しており, 各タンクのポンプ圧により, せん断処理が行われることで気液混相の燃料の攪拌が可能である。第1タンクにて各燃料を投入し加圧溶解攪拌型ミキサによる不純物の溶解を行った後に, 第2タンクにおいて, 窒素を混入させ気液混合燃料の生成を行う。生成条件は, 第1, 2タンクの圧力0.6MPa, 気体混入量0.1, 1.0L/min, 攪拌時間は10minとした。



a) 026110-01 NO. 200 b) 26110-0035 NO. 150
Fig. 5 Exterior photo of viscomer

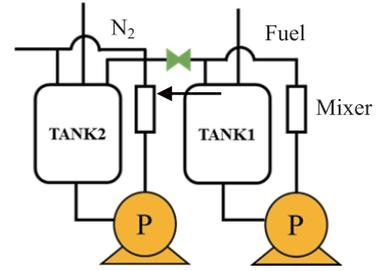


Fig. 6 Experimental device

3. 実験結果

3・1 性状分析

図7に廃食用油をSVOとしたときの燃料の顕微鏡観察結果を示す。撮像は松電舎製GR-D 8 T 2 デジタル生物顕微鏡を用いて行った。処理前には不純物が含まれていたが、加圧溶解攪拌型ミキサを通過させることで不純物の細分化が確認できた。C重油も同様な観察ができた。本方法は、C重油中の残渣油・不純物などにも適用が可能と考えられる。

3・2 気液混合燃料の動粘度

動粘度数値の大きさが異なることから、図8(a)に軽油、A重油およびBDF、(b)にC重油およびSVOの動粘度の値を示す。測定値は、昇温時の気液混合燃料(0.1L/min)および気液混合燃料(1.0L/min)である。軽油は、0.1L/minのとき8.12%、1.0L/minのとき4.27%動粘度が低減した。A重油は、0.1L/minのとき28.0%、1.0L/minのとき28.3%動粘度が低減した。BDFは、0.1L/minのとき11.6%、1.0L/minのとき5.65%動粘度が低減した。C重油は、0.1L/minのとき54.0%、1.0L/minのとき35.6%動粘度が低減した。SVOは、0.1L/minのとき3.40%、1.0L/minのとき0.45%動粘度が低減した。まず、常温時で動粘度が低いA軽油、A重油では気液混合燃料にしたとき、動粘度が低減しているが、その差は僅ものである。一方で、動粘度が高いC重油、SVOでは気液混合燃料にすることで動粘度低減が大きく表れる結果となり、気体混入量における差は大きく見られ、ほぼ同等の結果となった。C重油は気体混入量0.1L/minが最も動粘度を低減でき、UFBとMBのバランスや溶存が動粘度に寄与するものと考えられる。

4. 考 察

本研究は気液混合燃料の混入気体に窒素を採用し、各燃料の動粘度に与える影響を考察するものである。各燃料ともに気液混合燃料化することで、動粘度を低減することができたのは燃料油中に微細気泡を混入したことで燃料が脱酸素状態になり粘度が低減したことによるものと推測する。

C重油およびSVOは、脱酸素状態に加え加圧溶解攪拌型ミキサの異なる穴径・穴配置を有した2枚のエレメントを

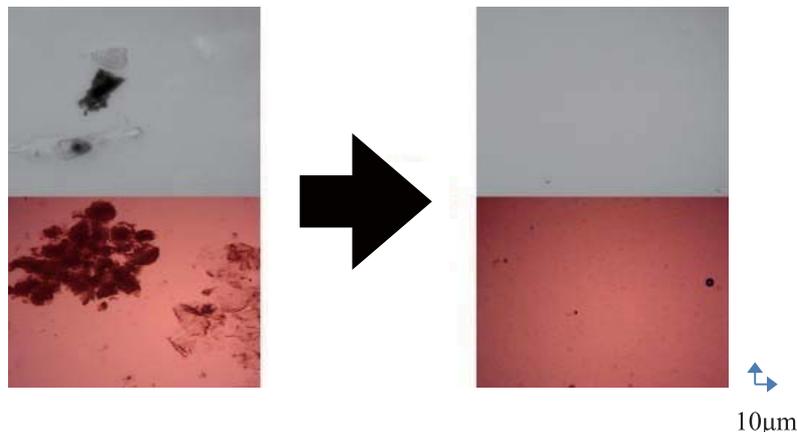


Fig. 7 Properties of waste food oil

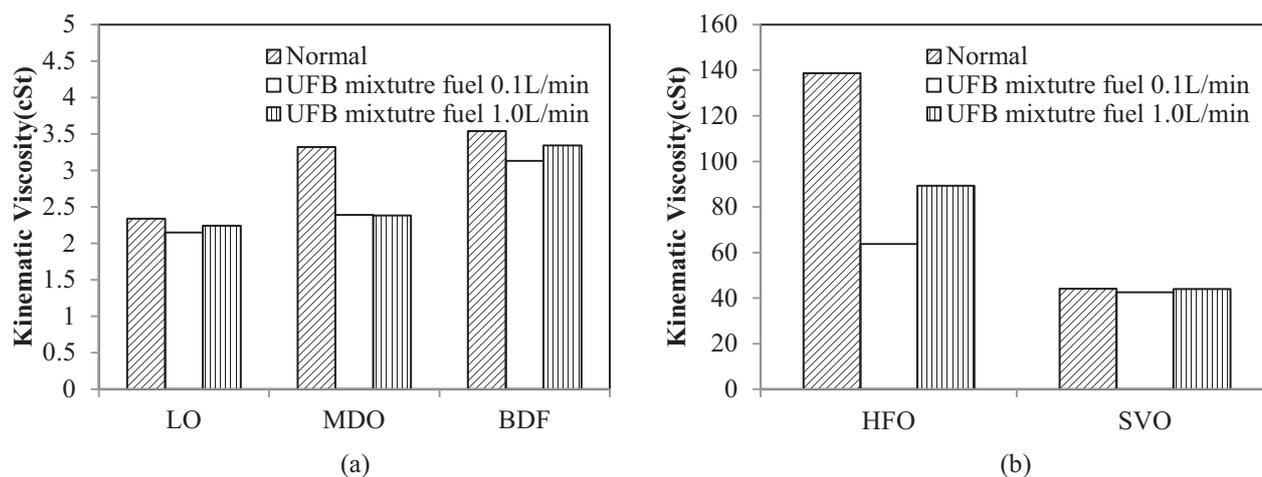


Fig. 8 Experimental results of kinematic viscosity

通過することでエレメント間の高い攪拌力により残渣油およびSVO油中の不純物が細分化され、せん断処理にて動粘度の低減が行われたと推測する。このことによりC重油およびSVOの動粘度の低減が最も大きくみられたと考えられる。

5. 結 語

本研究は各燃料油中に窒素を混入し気液混合燃料化することで以下の結論を得た。

1. 各燃料の N_2 -気液混合燃料の生成に成功した。
2. 気液混合燃料にすることで、すべての燃料において動粘度低減を確認した。
3. 攪拌時間が同じ場合、気体混入量と動粘度低減の間に比例関係が認められた。
4. C重油を気液混合燃料化することで脱酸素状態と加圧溶解攪拌型ミキサによるせん断処理により、最も動粘度を低減することとなった。

文 献

- (1) 国土交通省, <http://www.mlit.go.jp/common/001176509.pdf> (参照日2021年10月31日)
- (2) 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, Vol. 46, No. 6 (2011), pp. 77-88.
- (3) ENEOS, <https://www.eneos.co.jp/company/rd/intro/fuel/rds.html> (参照日2021年10月31日)
- (4) 農林水産省, https://www.maff.go.jp/j/council/seisaku/syokusan/recycle/h24_01/pdf/doc2_rev.pdf (参照日2021年10月31日)
- (5) 山根浩二, “バイオディーゼル-天ぷらから燃料タンクへ”, 東京図書出版会, (2006), pp. 37-43.