

〔論 文〕

SVO - 水エマルジョン燃料の燃焼特性

峯下 登夢^{*1}・高山 敦好^{*2}・立道 悟^{*1}
松尾 裕太^{*1}・下伊倉 潤^{*2}

Combustion Characteristics of Water-Emulsified Fuel Using SVO

Tom MINESHITA^{*1}, Atsuyoshi TAKAYAMA^{*2}, Satoru TATEMICH^{*1},
Yuta MATSUO^{*1} and Jun SHIMOIKURA^{*2}

Abstract

Recent research, development and practical application as an alternative to light oil by methyl esterification of waste food oil have been progressing. BDF (Bio Diesel Fuel) is one of biomass utilization method that is considered effective in reducing carbon dioxide emission. Here we attempt to generate SVO (Straight Vegetable Oil), which is the total amount of waste food oil, as a viable fuel for power generation systems. We developed a pressurization and dissolution mixer for the purpose of processing, SVO since waste food oil is unstable and contains impurities, and constructed a system that simultaneously performs impurity shearing disposal. The regeneration of waste food oil can only be achieved by shearing and high-temperature treatment, making it possible to improve SVO combustibility and the impurity treatment of contaminants via ionization and radical treatment by ionization of water with water-emulsified fuel using SVO.

Key Words : Waste Food Oil, SVO (Straight Vegetable Oil), Water-Emulsified Fuel, Bruner Reactor

1. 緒 言

近年は、廃食用油のメチルエステル化による軽油代替燃料としての研究開発・実用化などが進んでいる。二酸化炭素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：Bio Diesel Fuel）があげられる。エネルギー源としてバイオマスを用いる方法は、二酸化炭素排出抑制に向けて有効と考えられている方法のひとつである。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、植物性の油脂を燃焼させても、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。これらから、BDFは、ディーゼルエンジンの燃料の代替に用いることが可能であり、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）である事から、カーボンニュートラルとみなせる。そのため、地球温暖化対策としても注目されている。

図1にてバイオ燃料の年間生産量を示す。廃食用油は、事業系で年間32から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破棄されている。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、その殆どが飼料用（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。しかしながら、BDFの生成過程に副産物として、廃グリセリン、廃メタノール、廃水が生じてしまう。これらの副産物は燃焼処理されているが、取り扱いが難しく廃棄物として取り扱われている。

本研究は、廃食用油の全量利用としてストレートベジタブルオイル（SVO：Straight Vegetable Oil）の生成を試み、SVOを用いたその燃焼特性を明らかとするものである。廃食用油は性状が不安定であり、かつ不純物が混合している

^{*1} 久留米工業大学工学研究科エネルギーシステム工学専攻

^{*2} 久留米工業大学工学部機械システム工学科

令和元年10月31日受理

ことからその処理を目的として、加圧溶解攪拌型ミキサを開発し不純物のせん断処理も同時に行うシステムを構築した。また、廃食用油をSVO化する手段として、SVO-水エマルジョン燃料を採用し、水の微細化に伴うイオン化によるイオン分解やラジカル処理を期待したものである。

2. 実験概要

2・1 廃食用油

てんぷら油など食用油の使用後の油を廃食用油という。これを生活排水として公共用水域に排出すると水質が汚濁する。そこで水質浄化及び資源の業務再利用の面から、廃食用油を回収・再生し、飼料、塗料、石けん等の原料として有効利用されている。廃食用油からBDFを生成する基本反応はエステル交換でありされている。一般的によく知られている反応である。植物油のエステルを切断し、脂肪酸をメチルエステル化したものがBDFとして利用される。ただし、実際にBDFを製造する場合はいくつかの工程を経る必要がある。

廃食用油の問題点として、性状が不安定であり、かつ不純物が混合していることからその処理が必要である。またBDFとして再生する際にはメタノール等が必要であり、再生コストが30~60円/Lと高く副産物としてグリセリンを伴うことが問題点としてあげられる。

2・2 水エマルジョン燃料

水エマルジョン燃料はO/W型とW/O型が生成可能である。O/W型は、水の中に燃料が混ざることから、配管・ポンプの腐食やポンプの潤滑性に悪影響を及ぼす可能性が高い。そこで、W/O型は、燃料の中に水が含まれることから、油水分離が生じない前提であれば、配管・ポンプへの影響を及ぼすことは懸念されない。

図2に水エマルジョン燃料の燃焼行程を示す。水エマルジョン燃料は、燃料油中に水が混入した燃料である。燃料油中の水は、燃料が噴射され高温場になると水が水蒸気化し周囲の空気を膨張させ、さらに燃料と膨張した空気の予混合が飛躍的に向上する。水の蒸発期間は燃焼温度の低下を生み、サーマルNO_xの抑制が可能となる⁽¹⁾。また燃料油中の気体は燃焼室内で周囲の空気を取り込みながら膨張し、同時に燃料を微細化しながら予混合が促進されることが期待される。これらから予混合の促進による燃焼改善と空気の膨張過程に生じる着火遅れによってサーマルNO_xの低減が可能となる⁽²⁾。よって、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と期待されている⁽³⁾。

2・3 バイオディーゼル燃料

BDFとは、生物由来の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一つである。菜種油や廃食用油などをメチルエステル化して製造され、ディーゼルエンジン用のバイオ燃料で地球温暖化対策が緊急の課題となっている。BDFとバイオエタノールは、化石燃料の代替燃料として期待されている⁽⁴⁾。

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1/2~1/3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。すでに国内外で利用されており、日本では廃食用油から、

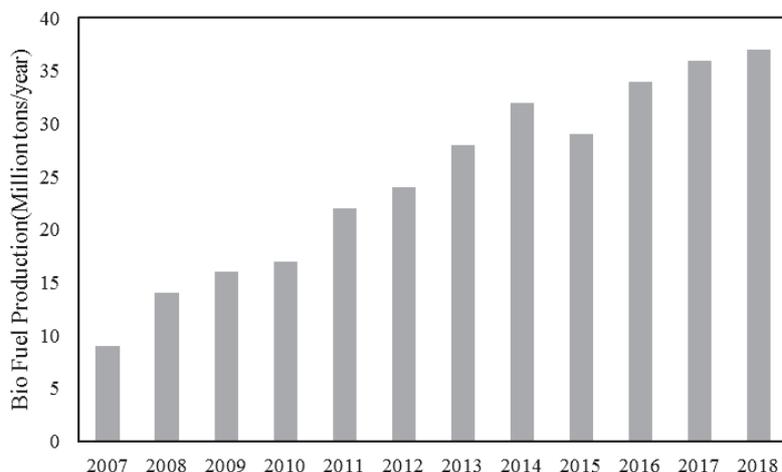


Fig. 1 Annual Production of BDF

欧州では菜種油から、米国やブラジルでは大豆油から製造されている。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。諸外国においてバイオディーゼルとして規格化がなされているのは脂肪酸メチルエステルのみであるが、厳密に化学的な定義はない。菜種油や廃食用油などをメチルエステル化して製造される。原料となる油脂からメタノールと触媒でエステル交換によりグリセリンを取り除く。動粘度を下げる等の化学処理を施し、燃料中の脂肪酸や不純物が水によって洗浄され、不純物の少ない燃料となり、ディーゼルエンジンに使用できるようにしている^{(5),(6)}。この廃グリセリンは水洗いを伴ったものであり、水分が多く含まれているのも特徴である。

2・4 廃食用油の再生

廃食用油は、グリセリンや脂肪酸が含まれていることから、未処理の廃食用油を使用することで、燃料噴射弁が詰まってしまうことから直接使用することが困難である^{(7),(8)}。そこで、グリセリンや脂肪酸を除去するために、エステル化が用いられている。その他の手法としては、ろ過やオゾン処理などが挙げられる。これらは、メンテナンスや副産物として廃棄物が生成されることから現実的には改善が必要であると言える。

本研究手法は、高温溶解と同時に廃食用油をせん断攪拌処理し、廃食用油全量を対象として超微細化する技術である。図3に示すように、加圧溶解攪拌型ミキサを採用し、2枚のプレート間に攪拌領域を設け段階的に圧力解放することで微細攪拌が可能である。

2・5 実験装置及び実験方法

図4に実験装置を示す。本実験で用いる廃油再生装置は、3つのタンクと過流タービンポンプで構成されている。1つ目のタンクで、廃食用油を投入し過流タービンポンプにて加圧し、加圧溶解攪拌型ミキサを通過させることによる循環処理により、物理的なせん断処理を行う。2つ目のタンクでは、微細化した廃食用油と水の混合を行い、水の微細化に伴うイオンやラジカルで混入物の科学的処理と燃焼性の向上が期待できる。以上から SVO-水エマルジョン燃料の生成が可能である。その後、3つ目のタンクに移送し、加温・循環を再度行うことで、油水分離の発生を防ぐと同時に SVO-水エマルジョン燃料を供給するためのバッファータンクに移送する。そこから燃焼装置へ供給するシステムである。

SVO-水エマルジョン燃料は、廃食用油70%、水30%の割合で混合したものである。界面活性剤は一切使用していない。水エマルジョン燃料の生成には、エマルジョン燃料生成装置を用いた。攪拌時間を5分とし、攪拌時の管内圧力

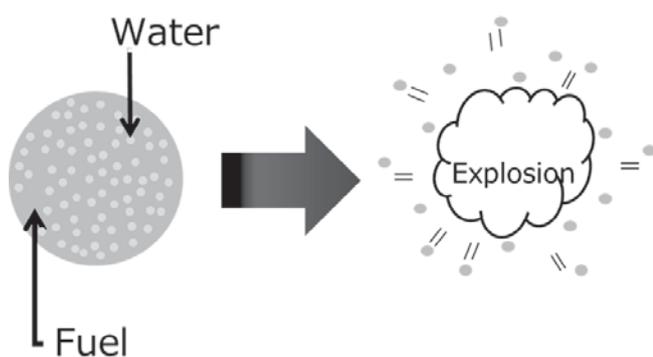


Fig. 2 Water Emulsified Fuel

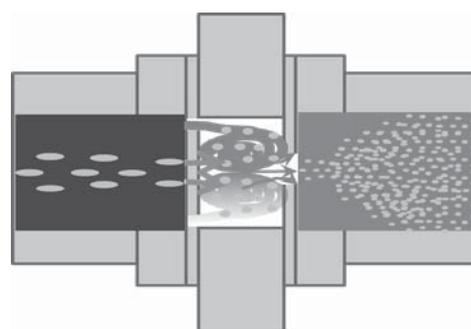


Fig. 3 Water Emulsified Fuel

Table 1 Bruner Reactor Information

Name	AR-H
Fuel Consumption (L/h)	10~20

Table 2 Trochoid Pump Information

Name	GFY-V2
Pressure (MPa)	0.7~1.4
Flow Rate (L/h)	25~100

を0.5MPaに固定し生成を行った。

表1, 表2に装置の緒言を示す。小型焼却炉のバーナには, 上根製 AR-H を使用し, 燃料消費量は10~20L/hである。バーナのトロコイドポンプは, NOP製 GFY-V2を使用しており, 噴射圧力は0.7~1.4MPa, 流量は25~100L/hである。

排ガス分析器には, testo製 testo350XLを使用した。本装置の計測項目は, 酸素濃度 (O_2), 一酸化炭素濃度 (CO), 燃焼排気ガス温度 (FT), 一酸化窒素濃度 (NO), 二酸化窒素濃度 (NO_2), 二酸化硫黄濃度 (SO_2) を計測可能である。

水エマルジョン燃料油中の水粒径計測には, 松電舎製 E8T2を用いて撮影を行い, この画像データを旭化成エンジニアリング製A像くんにて解析を行った。

3. 実験結果

3・1 廃食用油の性状

図5に, 廃食用油の性状を示す。燃料の粒径計測は, 松電舎製 GR-D8T2のデジタル顕微鏡を用い100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。

計測した画像は, (a)が廃食用油処理前, (b)が廃食用油処理後である。加圧溶解攪拌型ミキサーを用いて廃食用油中に混入している油脂の塊等の混入物を加圧溶解攪拌型ミキサーによる加温による溶解と微細化することで, バーナでの使用が可能になった。混入物のせん断処理, 廃食用油の微細化は, 水エマルジョン燃料油中の水粒径の微細化を促したと推測する。

3・2 SVO-水エマルジョン燃料の性状

図6に水エマルジョン燃料の性状, 図7に廃食用油の温度と動粘度の関係, 図8に加水率と動粘度の関係を示す。燃料の粒径計測は, 前述と同様の解析方法を用いて解析し1000倍で撮影した画像を解析した。加水率と動粘度の関係では, 温度60°Cの条件で固定し, 柴田科学製キャノンフェンスケ SO-8Y08を用いて計測を行った。

計測した画像から水が微細混合したことが確認できた。これは, 廃食用油を微細化したことで水エマルジョン燃料の生成がしたと推測される。1000倍のレベルでは, 粒径計測することが困難であり, 旭化成エンジニアリング製A像くんにて平均粒径が800nmであることを確認した。

図6の計測結果から性状の異なる廃食用油も加温して動粘度を低下することで一定の動粘度を得られることが分かった。また水エマルジョン燃料の水含有率の増加に伴い, 動粘度の上昇がみられた。これらから, 水エマルジョン燃料の水含有率に応じて変化することから, 燃焼条件に適した加水率の水エマルジョン燃料の生成が可能であると考えられる。

3・3 燃焼結果

図9に燃焼結果を示す。使用する水エマルジョン燃料は, SVO70%, 水30%で混合したものを使用し, 界面活性剤は一切使用していない。 O_2 濃度3.5%, 燃焼排気ガス温度370°Cで固定し, 燃焼実験を行った。

廃食用油の単独燃焼では, CO濃度が約86.3ppm, NO濃度が約50ppm, NO_2 濃度が約0.5ppm, SO_2 濃度が約1.0ppmであった。LSA燃料は, CO濃度が約65ppm, NO濃度が約58ppm, NO_2 濃度が約0ppm, SO_2 濃度が約0ppmであった。以上から, 廃食用油のCO濃度が増加し, NO_x 濃度が低下していることからLSAに比べ, 廃食用油は燃焼性が悪

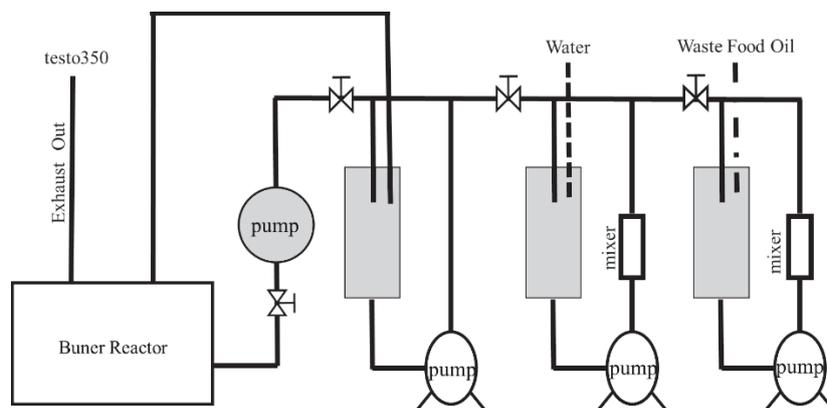


Fig. 4 Experimental Device

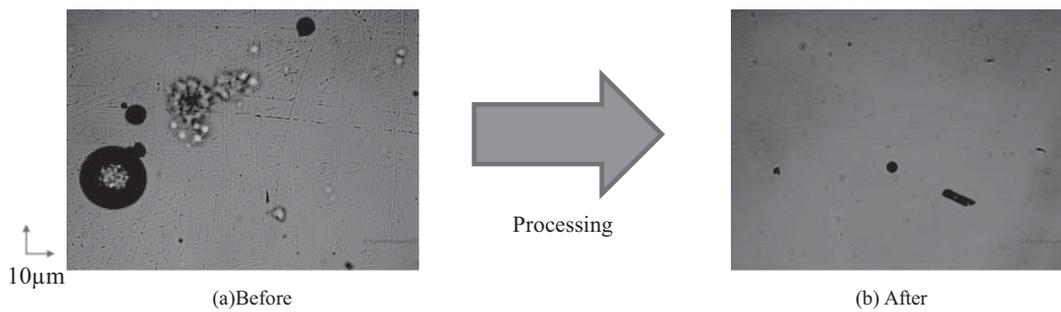


Fig. 5 Waste Food Oil Treatment



Fig. 6 Water Particle Size

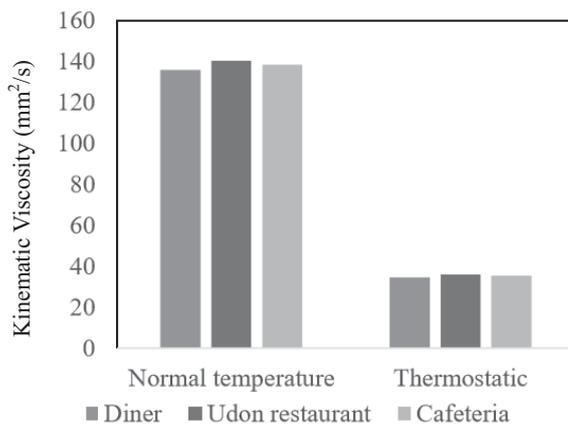


Fig. 7 Relationship between Temperature and Kinematic Viscosity of Waste Food Oil

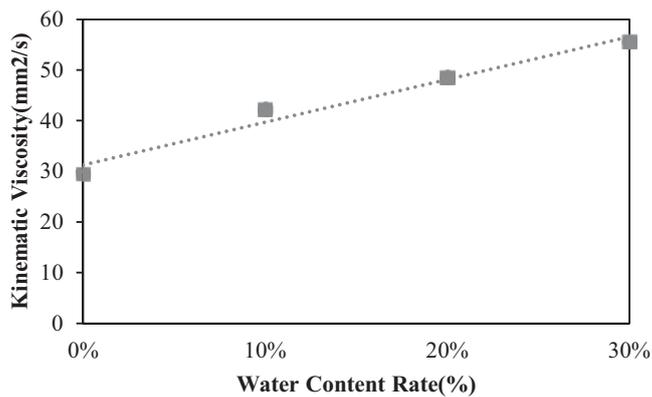


Fig. 8 Relation of Kinematic Viscosity and Water Content Rate

化する傾向があるといえる。これは、燃費を見ても明らかであり、廃食用油が11.1kg/h、LSAが8.0kg/hとなった。これは、廃食用油の場合、LSAよりも燃焼カロリーが約10%劣ることが要因と言える。

SVO-水エマルジョン燃料では、CO濃度が約23.4ppm、NO濃度が約36.6ppm、NO₂濃度が約0ppm、SO₂濃度が約0ppmであった。水エマルジョン燃料を使用することでCO濃度は約73%、NO濃度は約27%低減ができ、NO₂濃度とSO₂濃度は0ppmであることが分かった。

次に、廃食用油の単独燃焼と比較する。廃食用油が約11.1kg/h、廃食用油-水エマルジョン燃料が約9.1kg/hであり、約18.2%改善することができた。

4. 考 察

加圧溶解攪拌型ミキサを用いることで、廃食用油の再生と水エマルジョン燃料の生成に成功した。廃食用油は、加圧溶解攪拌型ミキサを通過することによるせん断処理と加温によって混入物の処理が可能であり、同時に燃料油の微細化も促進したと推測される。水エマルジョン燃料の有効性として、実験から排気ガス濃度・燃費の結果から一定の結果が得ることができた。これは、水エマルジョン燃料を生成後すぐにバーナに移送したことで油水分離は発生せず、燃料自体に含まれる有害物質を低減できたと推測される。水エマルジョン燃料の燃焼時に、水が膨張することで予混合性が向上し、燃焼性の改善がされたため排ガスの低減と燃費の改善が促進したと推測される。また、廃食用油を約60℃まで加温し混入物の一部を溶解させ粘度の低下を促したことで、水エマルジョン燃料を生成する際の水粒径の微細化に影響を与えた推測される。

以上から、廃食用油の再生手法としてせん断処理と高温処理のみによる再生が達成できたと言えるが、従来のBDF生成時には、廃グリセリンを多く含んだ副産物が生成される。この燃料は、廃棄物とみなされており、一部のアスファルト等の燃焼で使用されているものの、噴射ノズルが詰まる傾向があり、使用するためには問題点が多い。この廃グリセリンの処理方法として、本装置の製造過程において、水の投入時に廃グリセリンを投入することで、廃グリセリンの処理が可能である。

5. 結 語

本研究は、SVO-水エマルジョン燃料の生成を行い、その燃焼実験から以下の結論を得た。

1. 廃食用油の再生において加圧溶解攪拌型ミキサを用いたSVOの生成が可能であった。
2. 界面活性剤不要の水エマルジョン燃料の生成により、800nmまで水粒径を微細化することに成功した。
3. 廃食用油単独燃焼時の排ガスに比べ、SVO-水エマルジョン燃料を用いることで、CO濃度は約73%低減、NO濃度は約27%低減、NO₂濃度とSO₂濃度はほぼ無害化でき、燃費は約18.2%改善できた。

文 献

- (1) 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, 日本マリンエンジニアリング学会誌, 第46巻, 第6号 (2011), pp. 831-836.

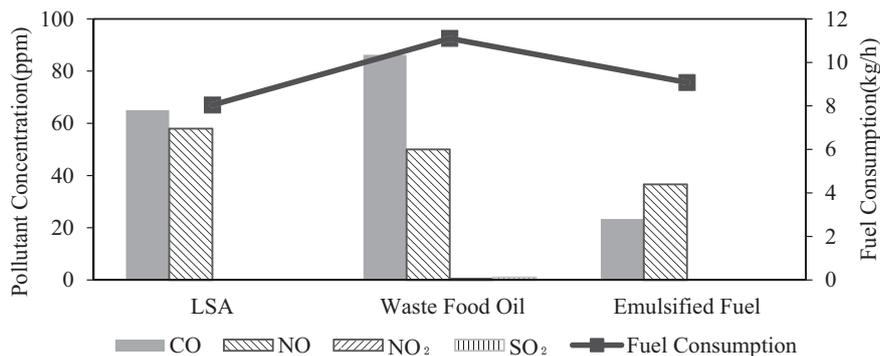


Fig.9 Experimental Result

- (2) Choesnul JAQIN, 浜崎和則, 木下英二, 亀田昭雄, 乳化剤無添加の乳化バイオディーゼルのディーゼル燃焼, 日本機械学会論文集 (B編), 70巻, 695号 (2004-7), pp. 228-233
- (3) 段智久, エマルジョンの基本特性とその燃焼における効果, 日本マリンエンジニアリング学会誌, 第51巻, 第3号 (2016), pp. 49-56.
- (4) 瀧寛則, 鈴木伸之, 高橋秀行, 廃食用油のバイオディーゼル燃料化, 大成建設技術センター報, 第38号, (2005), pp (23-1) - (23-5)
- (5) 橋本翔伍, 古市徹, 谷川昇, 石井一英, 廃食用油を原料としたバイオディーゼル燃料製造・利用システムの現状分析, 第19回廃棄物学会研究発表会, 廃棄物学会研究発表会講演論文集, 2008
- (6) 笠原正剛, 馬淵悠樹, 野村正幸, 加藤純雄, 中田一, BDF 製造時に排出される含グリセリン副生成物の燃料油への利用に関する基礎的研究, Vol. 24, No. 4, pp. 63-69, 2013
- (7) 野中章久, 金井源太, 小野洋, 燃料向け廃食用油の品質差と新しい利用方策, 東北農業研究, 66号, (2013), pp. 169-170
- (8) 段智久, バイオ燃料の燃焼特性 - ディーゼルエンジンにおける植物油の利用, 日本マリンエンジニアリング学会誌, 第47巻, 第1号 (2012), pp. 51-58