

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 21 日現在

機関番号：56302

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2011～2015

課題番号：23760786

研究課題名(和文) 船用ディーゼル機関における廃食用油利用の可能性について

研究課題名(英文) Effect of Waste Cooking oil on Engine Performance of Marine Diesel Engine

研究代表者

秋葉 貞洋 (AKIBA, SADAHIRO)

弓削商船高等専門学校・その他部局等・准教授

研究者番号：60332079

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,600,000円

研究成果の概要(和文)：船用ディーゼル機関における廃食用油利用の可能性について研究を行った。高温蒸発皿になたねとなたねに水を混合したエマルジョン燃料およびA重油を滴下し、デポジットの生成割合を求めた。その結果、エマルジョン燃料を使用することでデポジット生成割合を低減するが、エマルジョン燃料のデポジット生成率はA重油に比べ高くなることがわかった。また、直噴ディーゼル機関においてA重油とA重油に水を混合したエマルジョン燃料を使用した場合の燃焼、排気特性を調べた。その結果、エマルジョン化により熱効率の低下とPMの増加を抑えながらNOXを低減することが確認できた。

研究成果の概要(英文)：Effects of waste cooking oil on engine performance of Marine diesel engine were investigated. Droplets of Rapeseed-oil (R-oil), R-oil-Water emulsified fuel (R-W fuel) and Marine diesel fuel (MDF) were fallen on high temperature evaporating plate. The rate of production of carbon deposit was measured. The rate of production of carbon deposit of R-W fuel was lower than that of R-oil, but the rate of production of carbon deposit of R-W fuel was higher than that of MDF. The emission and performance of a D.I. Diesel engine was measured, and MDF and MDF-Water emulsified fuel (M-W fuel) were used test fuels. NOX of R-W fuel was lower than that of MDF, and Brake thermal efficiency of R-W fuel was the same level as that of MDF, and PM of R-W fuel increased slightly.

研究分野：総合工学

キーワード：熱工学 船用機関・燃料 代替燃料 排気改善

1. 研究開始当初の背景

近年、世界各地で頻発する地球温暖化が原因と考えられる大規模災害が頻発していることから、全世界規模での環境の保全が求められている。特に地球温暖化に関する問題は深刻であり、その原因となる温室効果ガスのうち CO_2 (二酸化炭素) は工場等のプラントから排出されるほか、自動車や船舶などの原動機であるディーゼル機関からも大量に排出されている。また、ディーゼル機関から排出される有害燃焼生成物のうち NO_x (窒素酸化物) は酸性雨の原因となり、PM (微粒子状物質) は呼吸器系疾患の原因物質である。これらディーゼル機関から排出される有害燃焼生成物はトレードオフの関係にあり、同時に低減することは難しい。

有害燃焼生成物を低減するためには CO_2 、PM、 NO_x の生成過程を考える必要がある。 CO_2 は燃料中の主成分の炭素が燃焼することにより生成され、PM は燃焼場で酸素が不足した領域で燃料噴霧が完全燃焼できないため生成される。また、 NO_x は 1800K 以上の高温場で活発に生成される。つまり NO_x と CO_2 と PM を同時に低減するには燃焼温度を低く抑えながら完全燃焼をさせる燃焼方法を実現する必要がある。

まず、燃焼温度を低く抑える燃焼方法には稀薄予混合燃焼や燃料のエマルジョン化がある。特に燃料のエマルジョン化は混合した水の蒸発潜熱により燃焼温度を抑える方法であるため、既存の機関への適応が容易な技術である。また、燃料に水を添加した分だけ燃料噴霧の運動量が増えるので、燃料噴霧が起こす乱れによる燃焼状態の改善効果(図 1) が期待できる。次に、 CO_2 と PM を減らすためには高効率の機関を使用することがベストであり、これには現行の熱機関で最も効率の良いディーゼル機関が当てはまる。また、使用する機関の回転数が低いと燃焼に用いる時間を長く取れるため、機関回転数が低く、かつ一定回転数で運転される船用機関は理想的な機関であると考えられる。しかし、ディーゼル機関は熱効率が高いため、さらなる CO_2 、PM 対策(図 2) として燃料性状も考慮する必要がある。そこで CO_2 と PM を削減するために使用する燃料には成分中に酸素(O)を含むものが良いと考えられる。ディーゼル機関は噴霧燃焼を行うため、どうしても燃焼室内における燃料と空気の分布に濃淡が出来てしまい、この濃淡が未燃焼生成物(CO, PM 等)を生んでしまう原因となる。つまり燃料中に O を含有した燃料であれば酸素の不足する領域でも燃焼状態を改善する効果が期待できる。ただ、 CO_2 は燃料の主成分である炭素が燃焼して生成されるため、燃料を使用する限り排出量を減らすことは簡単にはできない。そこで、成分中に酸素を含み、かつ原料の植物が成長

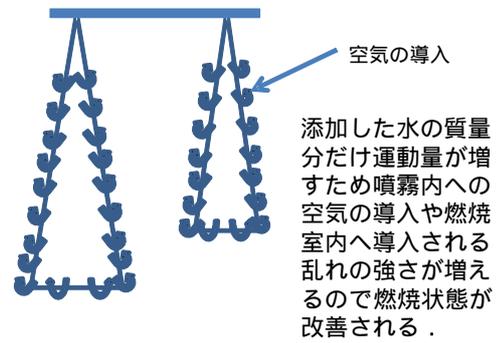


図1 エマルジョン化による燃焼改善モデル

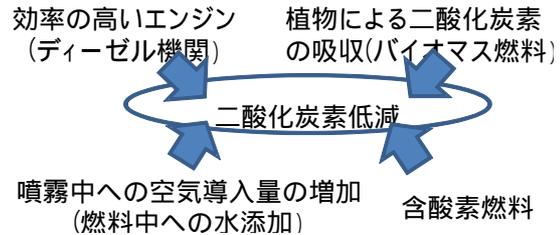


図2 CO_2 削減方法の考え方

時に CO_2 を吸収する菜種油などの植物油を使用すればトータルで CO_2 の増加を抑えられると考えられる。さらに使用する食用油を使用済の廃食用油とすることで世界の食糧需給バランスを崩さず、廃食用油を処理する手間やエネルギーを削減する効果が期待できる。しかし、廃食用油を用いる場合、廃食用油の粘度が高いこと、廃食用油中に 350 以上の高沸点成分が多いこと、高沸点成分が多いため燃焼室内へのカーボンデポジットが堆積しやすいことなどの問題があると考えられる。また、堆積したカーボンデポジットが燃焼に与える影響については不明な点が多く、それらの問題がディーゼル機関へ与える影響も詳しくは分かっていない。

2. 研究の目的

本研究では船用ディーゼル機関でエマルジョン化した廃食用油を用いた燃焼、排気性能試験を行い、船用ディーゼル機関における廃食用油・エマルジョン燃料利用の可能性についての指針を得ることを目的とする。本研究においては以下の項目について調査を行う。

(1) 廃食用油・エマルジョン燃料の燃料性状(含水率)が蒸発特性やカーボンデポジット(以降デポ)生成過程に与える影響について調査(カーボンの堆積が機関や潤滑油の汚損させる可能性についての調査)。

(2) 廃食用油・エマルジョン燃料の性状(含水率)が直噴ディーゼル機関(小型高速および中型中速機関)の燃焼、排気性能に与える影響についての調査。(廃食用油・エマルジ

ン燃料が機関性能に与える影響の調査, 低速機関の優位性の確認)。

3. 研究の方法

本研究課題では2章に示す(1),(2)についての調査, 実験を行った, 以下に(1)および(2)について実験装置および方法, 実験条件等について説明する。

(1)高温蒸発皿を用いたエマルジョン燃料の燃料性状(含水率)が蒸発特性やデポジット生成過程に与える影響について調査

高沸点成分の多い廃食用油(以降廃食用油)をディーゼル機関で使用する場合, 燃焼室内へ噴射した燃料噴霧は蒸発や燃焼しおえる前に燃焼室壁面に衝突すると考えられる。その結果, 壁面で燃料が蒸し焼きになり, デポが生成されることで機関内部や潤滑油の汚損する可能性が考えられる。そのため燃焼室壁面を模した高温蒸発皿に試料燃料を滴下して蒸発時間やデポの生成過程についての調査を行った。

実験装置: 図3に高温蒸発皿実験装置全体図を示す。実験装置は高温蒸発皿と皿温度を調整する温度調整装置, 燃料滴下装置から構成される。蒸発皿には50mm, 深さ10mmのくぼみが形成されており, そのくぼみに燃料を滴下した。蒸発皿は上下2段に分割できる構造で, その間に500Wの棒状伝熱ヒータを2本挟みこみボルトで固定した。さらに皿の周りの500Wの電熱線2本を巻き, 皿周囲を保温材で囲んだ。また, 皿の上面から10mmの場所に挿入した1.6mmのK型熱電対で計測した温度を皿温度とし, サイリスタ式温度調節器により皿温度を制御した。

燃料滴下装置はチューブポンプにL字型パイプを取り付け, 読取顕微鏡を用いて滴下距離がパイプ先端からくぼみまで10mmとなるように調整した。

試料燃料: 試料燃料にはなたね(新油), A重油, BDF(Bio Diesel Fuel), 廃食用油となたねに水を添加した水エマルジョン燃料(以降水エマ)を用いた。

水エマは水を質量分率で15%, 乳化剤は質量分率で水の10%としたものを特殊機化製高速ホモミキサで10分間攪拌し作成した。乳化剤はニッサンノニオン OP-80 と OT-211



図3 高温蒸発皿実験装置全体図

を混合し, HLB値を12としたものを使用した。実験方法: 実験は皿の上に滴下した各燃料において蒸発皿温度を変化させた場合における蒸発時間および皿上に堆積したデポ質量の計測を行った。

燃料の滴下間隔は水エマを30秒に1滴とし, それ以外の燃料は2分に1滴, 滴下時間は約3時間とした。ここで水エマの滴下間隔を30秒/滴としたのは, 燃料の通るステンレスパイプが装置の構造上どうしても皿からの熱に長時間晒されるため, 水エマが受ける熱の影響を最小限とするためである。

皿に堆積したデポはスプーン型の彫刻刀で削り取りシャーレに採取した。デポ質量は電子天秤を用いて計測した。デポは溶剤(ジクロロメタン)に可溶性成分と不溶性成分に分けることができる。そのため両成分を合わせたものをWet デポ, 不溶性成分をDry デポと定義した。Dry デポ質量の計測は, まず, Wet デポを溶剤で溶かしたものをろ過径0.1 μ mのメンブレンフィルタを取り付けた吸引ろ過器でろ過し, Dry デポをフィルタに捕集した。そしてフィルタを乾燥器(200 $^{\circ}$ C)で30分以上乾燥させた後, フィルタの質量を電子天秤で計測し, Dry デポ質量を求めた。また, 計測したデポ質量と滴下した燃料質量からWet およびDry デポの生成率を求めた。

(2)エマルジョン燃料の性状(含水率)が直噴ディーゼル機関の燃焼, 排気性能に与える影響についての調査。

直噴ディーゼル機関において含水率を変化させた機関性能試験を行い, 筒内圧を計測した。そして, 筒内圧解析を行い, 燃焼特性値を求めた。機関性能試験と同時に行った排ガス濃度とPMの計測結果と燃焼特性値と比較することで含水率が燃焼, 排気特性に与える影響について調査した。

実験装置: 試験機関は口径86mm, 行程84mmクボタ製単気筒4サイクル直噴ディーゼル機関を使用した。この機関を渦電流式電気動力計に接続して制動馬力を計測した。

筒内圧の計測にはピエゾ式圧力センサを用い, 横河電機製DL-716オシロスコープに筒内圧を記録した。筒内圧解析には横河電機製燃焼圧力解析パッケージを用いた。

排ガス濃度測定にはHORIBA製MEXA1600Dを用いてNO_x, CO, CO₂, O₂, THC(全炭化水素)を計測した。PMの計測には司測研製GSM200オパシメータを用いた。

実験方法: 実験はレシオ荷重3.00kgにおいて, 回転数を2400rpm, 2000rpm, 1600rpmと変化させた。実験は規定の回転数, 負荷に設定したのち, 排気温度が一定となり機関の運転状態が安定してから回転数, 制動負荷, 燃料消費時間, 筒内圧, 排ガス温度, 排ガス濃度, PM濃度を計測した。

排ガス濃度の測定はサンプリング開始から3分経過したのち30秒毎に7回計測を行い, その値を平均値を排ガス濃度とした。ま

た PM の計測は 3 回 1 セットの計測を 5 回行い、その平均値を PM 濃度とした。ただし、1 セットごとにプローブを排気管より抜きだし、オパシメータの校正と排気管の清掃を行った。これにより排気管とオパシメータ内部に付着する PM の影響を最小限に抑えた。

試料燃料：試料燃料には A 重油と A 重油に水を添加した水エマを使用した。水エマは水を質量分率で 15% (15% エマ), 20% (20% エマ) とし、乳化剤は質量分率で水の 10% としたものを特殊機化製高速ホモミキサで 10 分間攪拌して作成した。乳化剤はニッサンノニオン OP-80 と OT-211 を混合し、HLB 値を 6 としたものを使用した。

4. 研究成果

(1) 高温蒸発皿を用いたエマルジョン燃料の燃料性状が蒸発特性やデポ生成過程に与える影響について調査

デポ生成率 Dp (%) の定義を式(1)に示す。

$$Dp(\%) = \frac{\text{デポジット質量}}{\text{滴下したなたね質量}} \times 100 \quad (1)$$

Wet デポ質量でデポ生成率を求めた場合のデポ生成率の表記を Dpw , Dry デポの質量で求めた場合の表記を Dpd とする。

図 4 になたねと水エマの Dpw と Dpd を示す。図より、なたねの Dpw は皿温度 300 において約 8 割と高い値を示すが、温度が高くなるにつれ減少し、皿温度が 500 でほとんど Wet デポを生成しないことがわかった。また、水エマの Dpw はなたねの約半分になることがわかった。しかし、400 以下での水エマ Dpw は 20% から 40% と高い値を示している。

皿温度 400 以下の条件では、なたねの Dpd は Dpw の約半分程度となる。また、水エマの Dpd は Dpw の半分程度となり、なたねに対して水エマの Dpd は半分程度となる。しかし、皿温度が 400 を超えるとなたね、水エマとも Dpw と Dpd に差はほとんどないことがわかった。

図 5 に 340 の、図 6 に 460 における Wet デポ堆積の様子を示す。図の上になたねの、下に水エマの様子を示す。また、左から右へ時間が経過している。図 5 よりなたねは滴下後くぼみの中を広がりデポとなる。それに対して水エマは滴下後、油滴内の水が急速膨張してはじけ飛ぶ。時間の経過とともにデポは

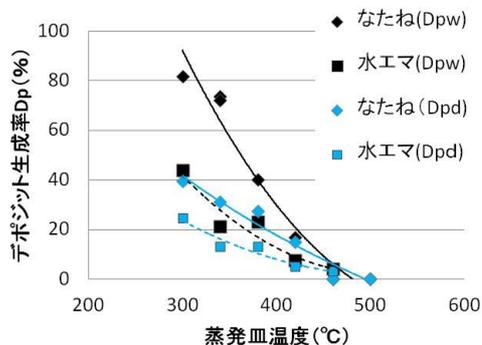


図 4 デポジット生成率

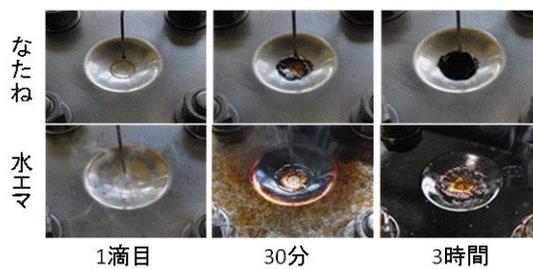


図 5 340 におけるデポ生成の様子

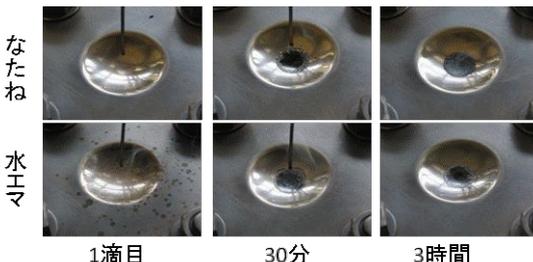


図 6 460 におけるデポ生成の様子

成長して、なたねはくぼみの中央に、水エマはくぼみの中心以外にデポが堆積する。これはなたねでは中央に油滴がたまるのに対し、水エマでは水がはじける際、中心の燃料を外へ飛ばすためである。その結果、なたねでは落下してきた油滴に皿から伝わる熱がデポにより阻害されるのに対し、広い範囲に飛び散る水エマは皿から多くの熱量を受けること可能となり、デポ生成率が抑制されたと考えられる。また、図 6 より図 5 に見られるような多くのデポの堆積はなたね、水エマとも確認できない。これは皿が高温であるため、なたねの多くの成分が速やかに蒸発し、長時間皿の上に残らないためだと考えられる。その結果、なたねが皿の熱で炭化して堆積することが抑えられたのではないかと考えられる。

図 7 に皿温度 380 における試料別の Wet デポ生成率の比較を示す。図より、なたねと廃食用油の Dpw は同程度の生成率であることがわかる。このことから廃食用油を水エマ化した場合にはなたねと水エマと同程度の Dpw , Dpd となると予測できる。ただし、水エマの Dpw は 20% 程度であるのに対し、A 重油やなたねを原料とした BDF ではほとんど Wet デポが生成されていない。以上の結果より、廃食用油をエマルジョン化してディーゼル機関で使用した場合、燃料噴霧が壁面に衝突したときに付着する油滴に水が含まれた場合には水の

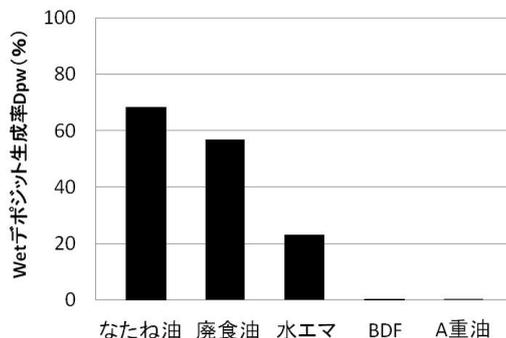


図 7 試料別の Dpw の比較

効果でデポの生成が抑えられる可能性がある。しかし、A重油に比べ水エマのDpwは高く、特に燃焼室内の温度の低い場所でのデポ堆積とデポ堆積による潤滑油汚損について注意が必要であることがわかった。

(2) 含水率が直噴ディーゼル機関の燃焼，排気性能に与える影響についての調査

機関性能：図8に15%及び20%エマの正味熱効率を示す。15%と20%エマでは計測時期が異なるため直接比較は行えない。そのため、今後はA重油に対する15%と20%エマの傾向について議論する。図に示すようにA重油に対し15%、20%エマとも熱効率は同程度でありエマルジョン化しても熱効率の低下は最小限に抑えられていることがわかった。

排気特性：図9に15%と20%エマの排気特性を示す。左にA重油と15%エマの、右にA重油と20%エマの排気特性を、上からNO_x、THC、PMの排出濃度を示す。また、熱効率と同様にA重油に対するエマの排出傾向を比較する。

図より、NO_xの低減傾向は15%エマに対して20%エマのほうが大きくなっている。この結果より含水率を大きくすることはNO_x低減に有効であることがわかった。

THC排出傾向は15%エマ、20%エマともA重油に対して同じような傾向にある。THCは燃料噴霧が蒸発、燃焼により分子が低級化し、燃焼室の温度の低い所で反応が凍結することで生成されると考えられる。この結果は、熱効率の低下として表れないが、水を添加することである程度は燃焼が阻害されている可能性があることを示していると考えられる。

図より、PMの排出傾向は15%と20%では大きく異なっている。また、A重油の排出傾向が大きく異なっている。図10に排ガスサンプリング部の写真を示す。PM計測に使用したオパシメータは自吸式ではなく、排ガスの背圧を利用して装置内にガスを送り込むため、図に示すようなできるだけ径の細い排気管を採用した。また、この機関は横型であるため標準の排気管は90°のエルボを介してシリンダヘッドに取り付けられており、排気管の向きは地面に対して垂直方向となる。そのため、オパシメータのプロープを挿入するには不向きであるので、挿入しやすいように再び90°曲げて横向きの長い計測用排気管を取り付けた。その結果、排気管は非常に細長くPMが堆積しやすい構造となった。

実験ではプロープが長い排気管にこすれて排気管に付着したPMが影響しないよう実験前に排気管直線部を毎回清掃した。計測時も付着物をブラシで清掃し、排ガスでブローしてから濃度測定を行った。しかし、20%エマ計測前のA重油予備実験においてPM計測値が不安定であった。そのため、排気管直線部手前の排気管立ち上がり部に付着したPMやノズルの汚れが影響した可能性があるかと考

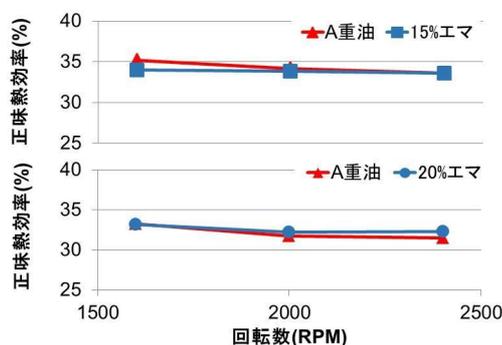


図8 正味熱効率の比較

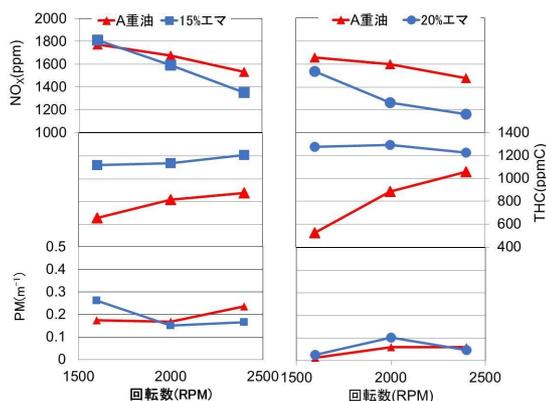


図9 排気特性



図10 排ガスサンプリング部

え、実験前の清掃にこの部分も加えた。その結果、15%と20%の実験でPM排出傾向が変化したと推測される。また、20%エマの2000rpmでPMはやや高い値となるものの自動車排ガス規制⁽¹⁾の黒煙濃度25%のスクリーニング値(m⁻¹)が0.80であることを考慮すると、その増加は最小限に抑えられたと考えられる。

筒内圧解析：図11に2400rpmにおけるA重油と20%エマの筒内圧力を示す。図より、A重油に対し20%エマの燃焼による筒内圧の立ち上がりの時期が遅れ、最高圧力が高くなっていることがわかった。当初の予想では添加した水の蒸発によりTDC付近のシリンダ内温度が抑えられることで初期の燃焼が緩慢になり、筒内温度が抑えられるためNO_xの生成が抑えられると考えていた。しかし、筒内圧履歴を見る限りでは燃焼圧の立ち上がり時期がかなり遅れているにもかかわらず20°ATDC以降には明らかな筒内圧履歴の差は見られない。このような結果になったのは、水を添加することで実燃料噴射率が抑えられて着火可能な濃度になるために必要な燃料が噴射されるまでに時間がかかること、見かけの噴射率は低下しないので着火までに

均質な混合気の形成が進むこと,そして添加した水のみだけ噴霧の運動量が増加するため燃焼状態が改善されるためだと考えられる。

図 12 に 2400rpm における A 重油と 20%エマの熱発生率を示す。図より,A 重油に対し 20%エマは熱発生率が最大値となる角度が遅れるが熱発生率の最大値は高くなり,15 ° ATDC 以降では熱発生履歴に違いは見られないことがわかった。この結果は水エマの燃焼改善効果を示すものであると考えられる。この効果により水エマの熱効率の低下が最小限に抑えられて,A 重油と同程度の熱効率になったと考えられる。

図 13 に 2400rpm における A 重油と 20%エマの筒内ガス温度を示す。A 重油に対し 20%エマは最高温度が高くなりサーマル NO が生成されるとされる 1500 以上の期間も長くなっていることがわかる。しかし,図 9 の結果は A 重油に対し 20%エマの方が NO_x 濃度が低く,水を添加することで燃焼温度が抑えられることで NO_x 濃度が低減したのではないことがわかった。表 1 に 15%エマおよび 20%エマと A 重油の最高筒内温度と 1500 以上の高温期間(ms)をまとめたものを示す。1500 以上の高温期間を示したのは NO_x 生成反応は高温期間が長ければそれだけ NO_x を生成すると考えられるからである。表より,A 重油に比べ温度も高く,高温期間が長いのに NO_x が低減しているのは 2400rpm の 20%エマである。また,1600rpm の 15%エマでは温度も高く,高温期間も長くなっているにも NO_x はそれほど増加していない。そして,最高温度が低減していても温度差が数十度程しかなく,温度依存性の高いサーマル NO であったとしてもこの差が NO_x の低減につながるのかという点について疑問が残る。以上の事から,この研究で用いた実験装置においては水の添加が燃焼室内温度を抑制することで NO_x 生成を低減するのではなく,別の理由で NO_x 低減に寄与している可能性は拭い去れないと考えられる。

以上の結果をまとめると,(1)の結果より,エマルジョン化した廃食油の使用は燃料噴霧が燃焼室壁面に衝突し,デポジットを生成すると機関および潤滑油の汚損の可能性があるがわかった。(2)の結果から燃料のエマルジョン化により燃焼状態が改善され熱効率と PM の増大を抑えながら NO_x 低減が可能であることがわかった。

<引用文献>

株式会社バンザイ技術サービス課,GMS-200 オパシメータ取扱説明書,2010,12

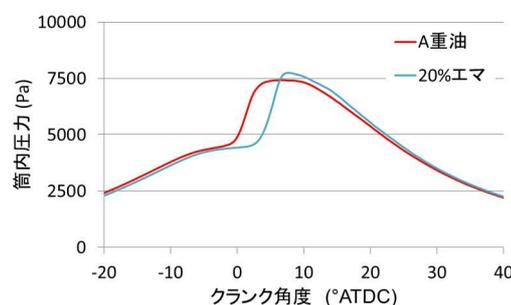


図 11 筒内圧力

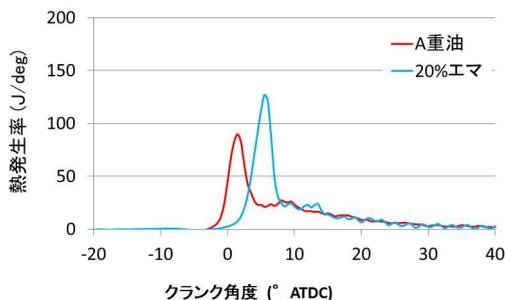


図 12 熱発生率

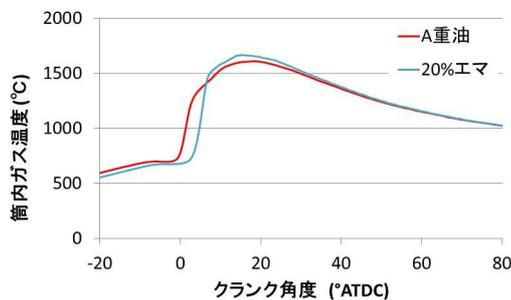


図 13 筒内ガス温度

表 1 筒内最高温度と 1500 以上となる期間

回転数	油種	最高温度(°C)	1500°C以上となる期間(ms)
1600	A重油	1599.86	1.35
	15%エマ	1572.10	1.51
2000	A重油	1594.58	1.50
	15%エマ	1590.02	1.46
2400	A重油	1583.64	1.25
	15%エマ	1579.37	1.11
1600	A重油	1593.55	1.88
	20%エマ	1596.90	1.98
2000	A重油	1628.98	1.83
	20%エマ	1611.77	1.67
2400	A重油	1609.82	1.46
	20%エマ	1665.76	1.67

5. 主な発表論文等

- [雑誌論文](計0件)
- [学会発表](計0件)
- [図書](計0件)
- [産業財産権]
- 出願状況(計0件)
- 取得状況(計0件)
- [その他]
- ホームページ等

6. 研究組織

(1)研究代表者

秋葉 貞洋 (AKIBA, Sadahiro)
弓削商船高等専門学校・その他部局等・
准教授
研究者番号: 60332079