

船用ディーゼル機関におけるセラミック粒子流動層の燃費改善効果

三原伊文* 川原秀夫* 岩崎寛希* 藤谷親** 勝野陽介***

酒井隆利**** 五島寧***** 藤井信二*****

Effect of a Fuel Consumption Improvement of the Marine Diesel Engine by the Ceramic Particle Fluidized Bed

Yoshinori MIHARA, Hideo KAWAHARA, Hiroki IWASAKI, Chikashi FUJITANI,
Yosuke KATSUNO, Takanori SAKAI, Yasushi GOTOU and Shinji FUJII

Abstract

The ceramic particle fluidized bed is a cylindrical vessel in which many minute particles made from ceramics with a cavity in it, and is used for the improvement of water quality etc. The flow of the water passing upwards from a lower part makes the ceramic particles collide mutually. The difference of temperature between a surface and center side by surface partial frictional heat produces an electric charge on the surface of a minute part and electrolyzes the water.

The purpose of this study is that it applies this principle to the reforming of the fuel oil and clarifies the possibility of fuel consumption improvement of the diesel engine. In addition, we also examine effect of decreasing of exhaust gas emissions which come out of the engine.

Key words: Ceramic Particle Fluidized Bed, Frictional Heat, Electric Charge, Fuel Consumption

1. まえがき

1997年、先進国の温室効果ガスの削減を約束した京都議定書が採択され、我が国は、温室効果ガスの排出量を2008年から2012年までの第一約束期間に基準排出量に比べて6%削減することが定められている。この議定書が2005年2月16日に発効したが、2003年度には、温室効果ガスの約9割を占めるエネルギー起源二酸化炭素の排出量については、1990年度(基準年)と比べて13.3%増加しており、より一層の抑制が求められている。最終エネルギー消費についても民生・運輸部門では1990年度と比べてそれぞれ1.3倍、1.2倍となっており、最終エネルギー消費の約半分を占める産業部門に加えて、民生・運輸部門における省エネルギー対策の強化が求められている⁽¹⁾。船舶も例外では無い。

一方、船用燃料は一般に残渣油を基材としている

が、石油製品の需要が軽質を取るようになり、残渣油の比率が段々低下し、ここ数年、船用燃料油の低質下が著しい⁽²⁾。

筆者らは実績のある粒状セラミックスによる水の+の帯電効果を利用した活水性能に注目し、重油等の船用燃料油の改質を図ってきた。本報告ではディーゼル機関における改質油燃焼時の燃料消費量の節減効果とその原因及び燃料消費量とはトレードオフの関係にあるというNOxへの影響を検討する。

2. セラミック粒子流動層について

2.1 セラミック粒子流動層の原理

セラミック粒子流動層は内部に空洞のある微小なセラミック製粒子が多数入った容器で、水質の改善などに用いられている⁽³⁾。水が下方から上方へ通過する際の流速によりセラミック同士を衝突させ、表

*商船学科 **学生課 ***海洋交通システム学専攻 ****(有)東亜エンジニアリング *****東京メカトロサービス㈱
*****ヤンマーエネルギーシステム㈱

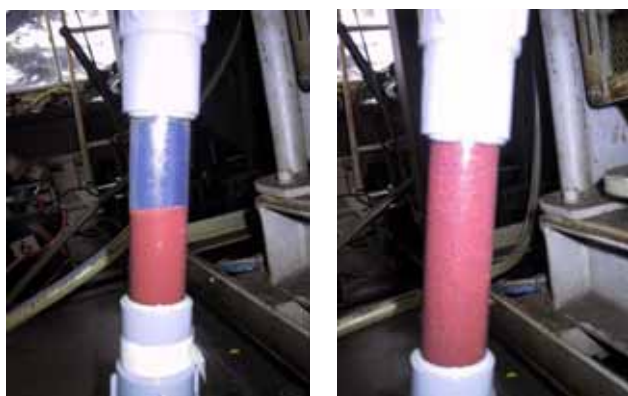
面の局所摩擦熱により表面側と中心側で温度差を生じ、セラミックの表面は微小な局部に電荷を生じて水を+に帯電する⁽⁴⁾。

これを燃料油の改質に利用し、燃費の改善を図ると共に、エンジン起源の排出ガスを減少させ、環境負荷の低減を図る。

粒子の寸法・成分を表 1 に示す。なお、中心部付近には直径の 20～80 %の中空部がある。また流動層の静止時と流動時の写真を写真 1 に示す。

表 1 粒子の性状

粒形	1 mm
見掛け密度	1.6～3.5 kg/cm ³
主成分	シリカ
副主成分	アルミナ



(A) 静止時

(B) 流動時

写真 1 セラミック粒子流動層

(内径：28 mm、可視部長さ：240 mm)

2.2 粒子流動実験

粒子が層の内部で激しく流動する時の流量を求める。流動層内部の粒子は流量によって、次の 4 つの状況に分かれる。

下に沈んだまま動かない (写真 1 A)

上下 2 つの層に分かれる

上に浮いた上体で動かない

上下に激しく動き回る (写真 1 B)

流動層の原理より、最も効果があるのは の状態と思われる。そこで、粒子が激しく流動を開始する流量を以下のようにして求めた。

図 1 のような実験回路で燃料タンクの油を天秤 (嶋津製作所 UX6200H) 上の容器に落下させ、天秤の高さ h とバルブの開度を調節し、 の状態になったときの流量を計測する。

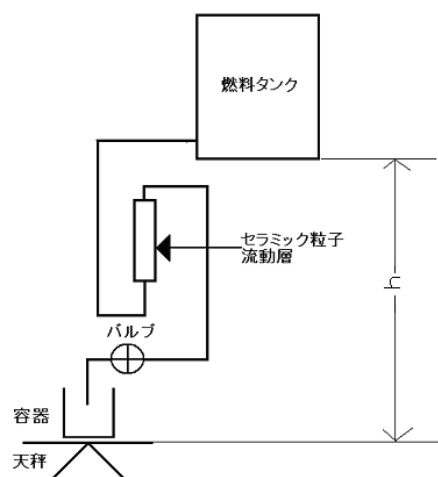


図 1 粒子の流動実験

流動層が激しく動き始める時の燃料タンクと天秤のヘッド差は 1 m70 cm で、1000 g 流れるのに平均 74 秒かかった。その結果、810 g/min 以上の流量が必要な事が明らかになった。

しかし、後述の中速機関 (定格出力：260 kW) における実験結果から、流量が更に多くなると、層が上下に二分化し、下層でのみ流動が生じたり、また、上層のみとなったりすることがわかっているので、予め機関に最適な流動層を用意する必要がある。

3. 中速ディーゼル機関による燃焼実験

3.1 実験方法

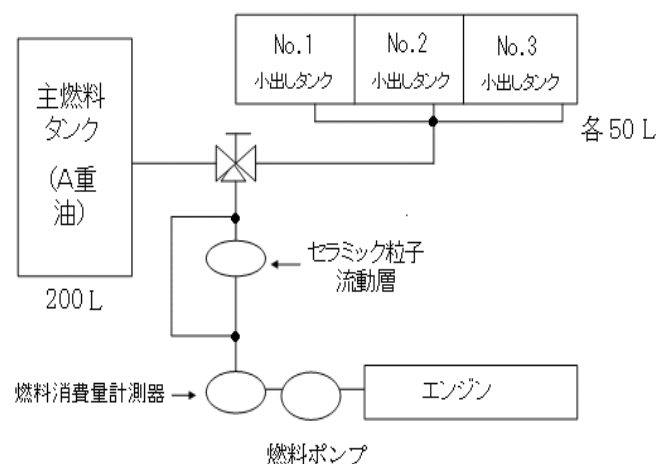


図 2 燃料供給ライン

図 2 のように、主燃料タンクまたは小出しタンクの後、切り替えコックを設け、その出口に流動層を置く。その後のビューレット式燃料消費量計測器 (写真 2 参照) で、流動層を通る油 (以下、処理油

と称する)と通らない油(以下、通常油)について、75%負荷時の正味燃料消費率、NOx等を比較する。燃料油の性状は購入時によって若干異なるので、正確を期するため小出しタンクから新油を供給した。

実験手順を以下に述べる。

処理油の供給状態でエンジンを起動する。1時間かけて、定格回転数 420 rpm、負荷 75%に設定する。

負荷 75%で2時間運転する。

通常油に切替えて1.5時間運転する。

データの再現性を確認するため、再度処理油に切り替え、1時間運転する。

なお、荷重及び回転数はデジタルで計測して、読み取り誤差を少なくした。また、NOxは過給機前の排気管から排気ガスを取り出し、CLD法(堀場製作所 EXSA-240-CL)で計測した。

実験機関の主要目及び使用燃料の性状を表2に示す。また、写真3にその機関の概観を示す。



写真2 ビューレット式燃料消費量計測器 (小野測器 FC-140)

表2 実験機関主要目及び使用燃料の性状

メーカー及び型式	マツイ MU323DSC
名称	立形4サイクル過給機付きディーゼル機関
シリンダ数	3
シリンダ内径	230 mm
ピストン行程	380 mm
定格出力	257 kw
定格回転数	420 rpm
燃料油種	A重油
密度	0.8705 g/cm ³
総発熱量	44.98 MJ



写真3 実験機関

3.2 燃料消費率への効果

図3は処理油燃焼状態で負荷75%に設定し、それから約1時間後からの燃料消費率及び出力の変動を示す。図から明らかなように、この頃より消費率は減少し始め、やがて最小値になる。ここで燃料を通常油に切り替えると、消費率は短時間で最大値になる。約1.5時間後、処理油に切り替えると消費率は再度最小値を示す。

このように、処理油と通常油で燃料消費率はパルス波状に変化し、その変動幅は4~5%である。この結果は、2005年9月に行った実験結果とほぼ一致する⁽⁵⁾。なお、この間の出力の変動幅は1%以下でしかない。

今回の実験結果は負荷設定後約2時間してようやく処理油の効果が現れ始めた。即ち、この種の実験では、260kWクラスの実験機関で、燃焼室が完全に定常状態になるには負荷設定後約2時間かかるとの認識が必要と思われる。

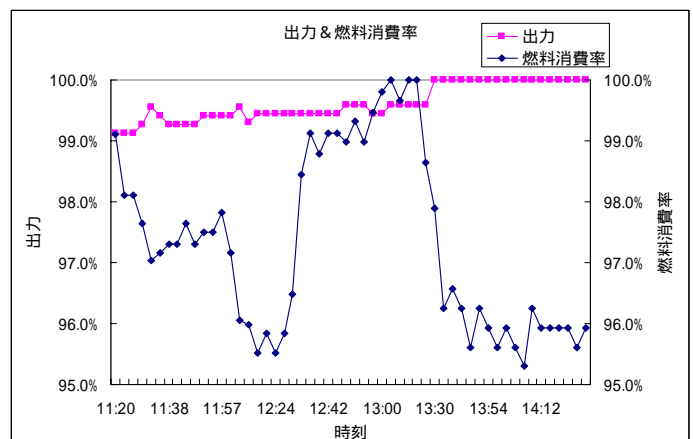


図3 燃料消費率の変化

3.3 NOx への効果

ディーゼル機関で生成される NOx は、その殆どが空気中の N₂ と O₂ が反応して生成される thermal NOx であり、燃焼温度が高く、酸素濃度が濃い場合に発生し易く、高温火炎中の滞留時間が長くなるほど濃度が高くなる傾向があるため、一般に燃料消費率とはトレードオフの関係にあると言われている。

図 4 に示すように、NOx はパルス波状には変化せず、時間の経過と共に減少傾向を示した。また、図 5 に示すように燃料消費率との相関はほとんどない。以上より、処理油の NOx に対する効果は殆どないと思われる。

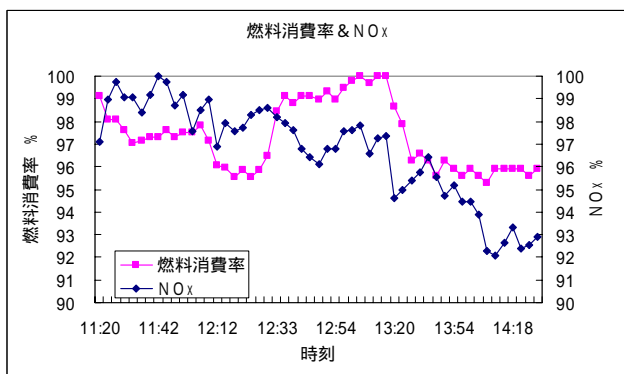


図 4 NOx の変化

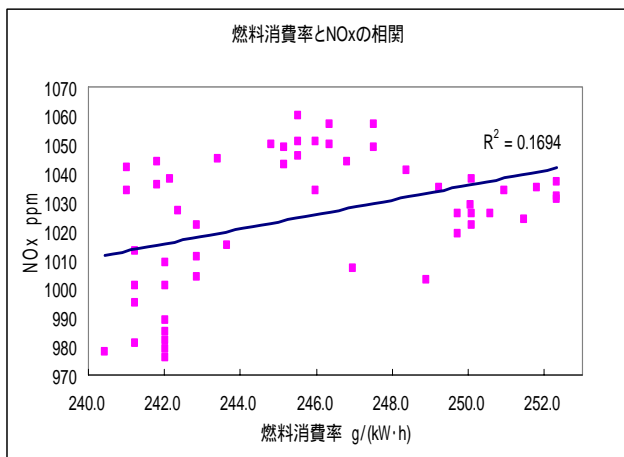
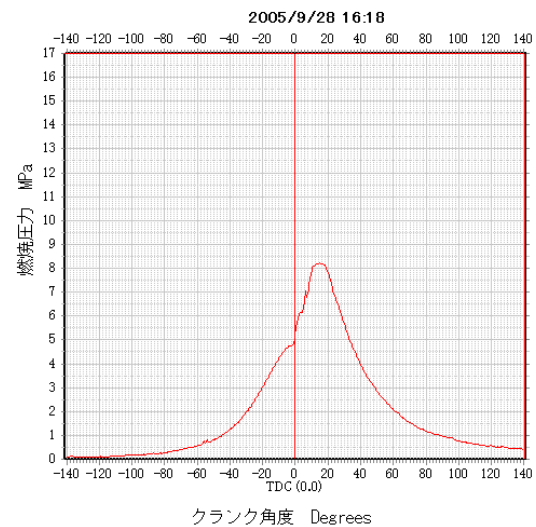


図 5 NOx と燃料消費率の相関

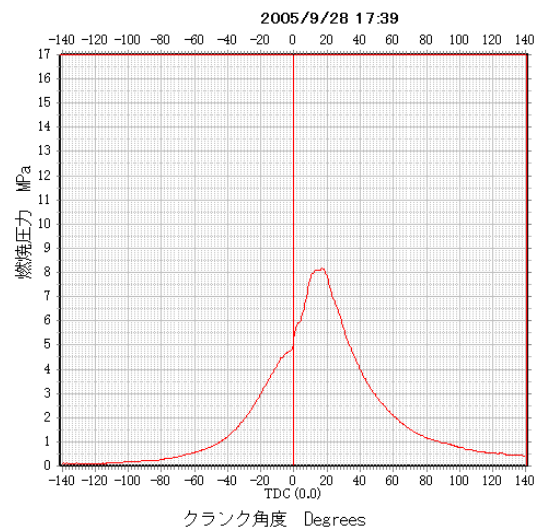
4. 燃費軽減の原因究明

4.1 指圧器線図による燃焼解析

図 6 (A)(B) はそれぞれ処理油及び通常油を負荷 75 % で燃焼させた時の、特定シリンダの圧力 - クランク角度線図である。一方、図 7 (A)(B) はその熱発生率線図である。これらの図を見る限り殆ど燃料の着火時期に差異はないように見える。なお、着火点は図 6 の上死点付近で圧力が急激に増加する点、または図 7 の上死点付近で熱発生率がマイナスからプラスに転じる点とする。



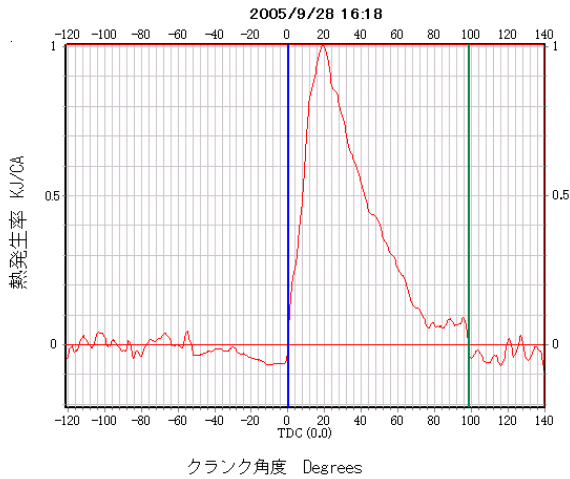
(A) 処理油



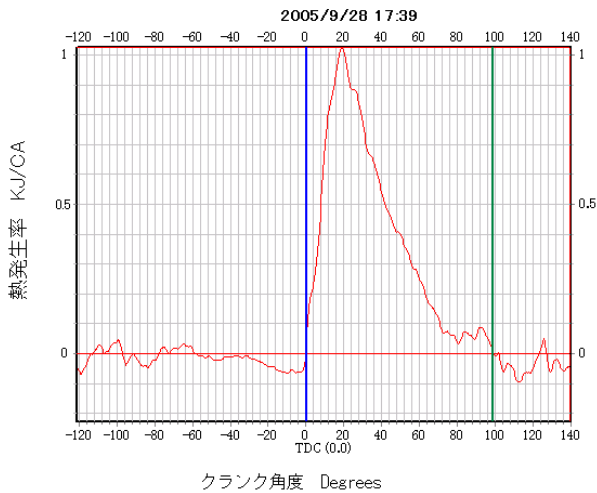
(B) 通常油

図 6 圧力 - クランク角度線図
(No.3 シリンダ、負荷 75 %)

の結果が若干の総発生熱量増加として現れていると思われる。



(A) 処理油



(B) 通常油

図7 熱発生率線図
(No.3 シリンダ、負荷 75%)

表3は全シリンダの線図を詳細に検討した結果である。着火時期は殆ど同じであるが、(B)の通常油に比べて、(A)の処理油の方がシリンダ内最高圧力Pmaxがやや高く、熱発生率から求めた総発生熱量もシリンダにより多少のばらつきはあるものの増加傾向にある。

使用機関の理論サイクルであるサバテサイクルでは圧縮比及び爆発度が増大するほど理論熱効率は大きくなることがわかっている⁽⁶⁾。使用機関は同じなので、圧縮比は等しいが、Pmaxが大きくなっていることは爆発度が大きくなっていることであり、そ

表3 指圧器線図の詳細比較

(A) 処理油 (負荷 75%)

	No.1 シリンダ	No.2 シリンダ	No.3 シリンダ	平均
シリンダ内最高圧力 [MPa]	8.59	8.72	8.21	8.51
総発生熱量 [kJ]	82.30	77.10	78.60	79.33
最高点 [deg、上死点后]	17.0	14.0	15.0	15.3
着火点 [deg、上死点前]	2.5	2.5	2.5	2.5

(B) 通常油 (負荷 75%)

	No.1 シリンダ	No.2 シリンダ	No.3 シリンダ	平均
シリンダ内最高圧力 [MPa]	8.49	8.69	8.19	8.46
総発生熱量 [kJ]	80.20	78.10	78.10	78.80
最高点 [deg、上死点后]	17.0	17.0	17.0	17.0
着火点 [deg、上死点前]	2.5	2.5	2.5	2.5

4.2 燃料油の表面張力

文献(3)によれば、セラミック粒子流動層で処理された水は表面張力が低下するという。この表面張力は油粒の大きさに影響を及ぼし、ディーゼル機関の燃料噴霧に関わり、ひいては燃焼に関係する。そこでデュヌイ表面張力器を用いて計測した。この方法は白金環を水平に試料液面に接触させ、この白金を垂直に持ち上げる力を計測するものであるが校正に時間がかかる。そのため、予め表面張力が分かっている蒸留水を計ってこれを基準とし、A重油を算出する間接測定法を用いた。3回の平均値を表4に示す。通常油と処理油で違いはなかった。

表4 表面張力

A重油(通常油)	44.4 mN/m
A重油(処理油)	44.5 mN/m

4.3 燃料油の粘度

粘度が変化すれば、空気との摩擦が変化し、燃料の霧化や貫通に影響を及ぼし、燃料の着火やその後の燃焼にも関係する。そこで、振動を利用した簡便な粘度計(山一電機工業 ビスコマイト VM-1)を使用し、通常油と処理油の粘度を計測した。計測は5回行いその平均値を求めた。表5に示すように、通常油と処理油で、粘度の差異はなかった。

表 5 粘度

A 重油(通常油)	5 mPa・S
A 重油(処理油)	5 mPa・S

5. 燃料油の静電電荷量

5.1 目的

中速機関における A 重油の処理油燃焼によって、4 ~ 5 %の燃費節減効果があり、前章でその理由を明らかにしようとしたが、今一つ判然としない。

流動層の原理は、水が下方から上方へ通過する際の流速によりセラミック同士を衝突させると、表面の局所摩擦熱により表面側と中心側で温度差を生じる。その結果、セラミック粒子の表面は電荷を生じて、水を + に帯電させることである。

油の場合も同様に + に帯電するのか、また、帯電したとして、何故帯電すると燃料節減が可能なのか、疑問なことが多い。

しかしながら、セラミック流動層を通過することで、帯電した燃料の電荷量を計測し、その値と燃料消費量の相関が求めれば、実験機関を運転する事なく、事前に試料油の節減効果を予測出来る。

5.2 実験装置

ファラデーケージは静電界を遮蔽する金属の容器であり、図 8 のように、大地から絶縁された内筒と、これを取り囲む接地された外筒で構成される。

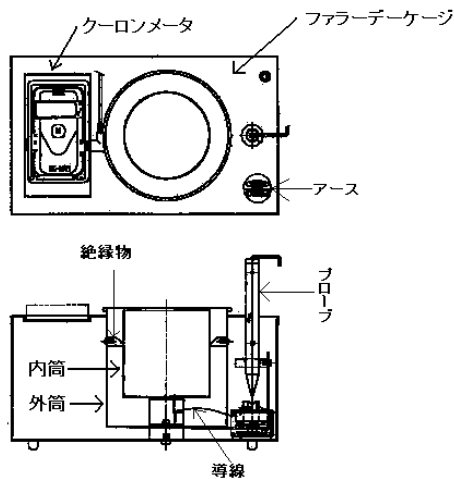


図 8 ファラデーケージとクーロンメータ

計測時は内筒の中に液体や粉体を入れて、その物体内部に帯電した電荷を、クーロンメータのプローブに放電させることで、直接電荷量を測る。内筒は導線でクーロンメータに接続されている。このクーロンメータは従来の表面電位を測る方法より、精度

が高いと言われるコンデンサ充電法(春日電機 NK - 101、表示範囲 $\pm 0.01 \sim \pm 99.99 \text{ nC}$)を採用している。なお、計るときはアースにより内筒を放電してから計測する。

5.3 計測結果

図 9 はファラデーケージの内筒にピーカーから直接 A 重油 200 cc を注いだ場合の静電電荷量で、+0.5 ~ +5.5 nC の変動があった。

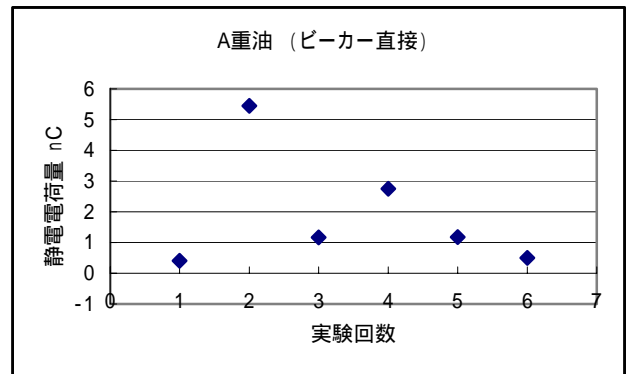


図 9 A 重油直接注入時の静電電荷量

従って、A 重油の静電電荷量の計測には、ピーカーよりカップに直接試料を注ぐのではなく、いつでも誰でも一定時間で注ぐことが必要と考え、その対策を講じた。

写真 4 は茶缶にコックを取り付けただけの簡便な装置であるが、同一燃料ならば一定量の油を一定時間で注ぐ事が出来るようになった。

滴定器と名づけた缶に 200 cc の A 重油を入れ、2 分間でカップに注入した場合の電荷量を図 10 に示す。測定値は +0.1 ~ - 0.25 nC の範囲で、図 9 に比べて安定した結果が得られた。

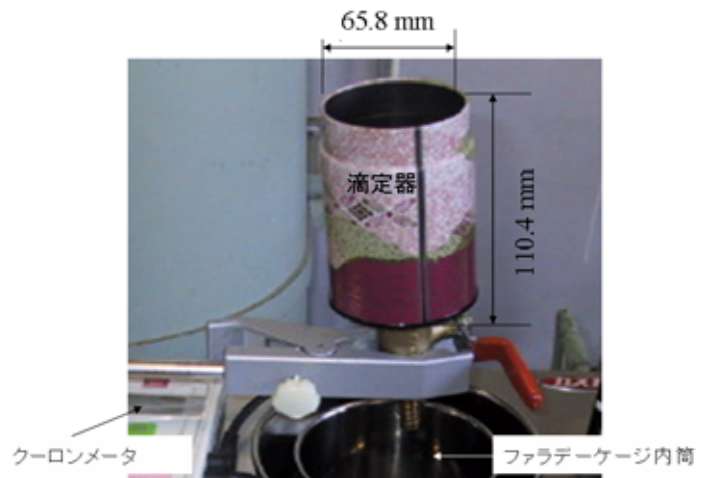


写真 4 手作り滴定器

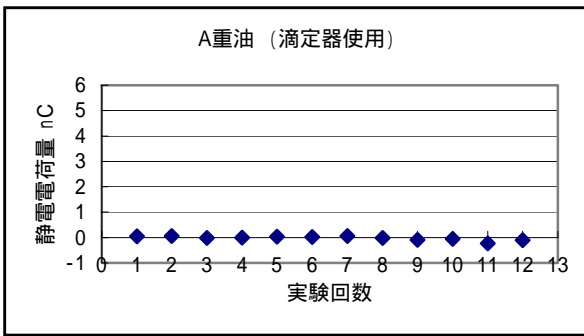


図 10 滴定器による注入時のA重油の静電電荷量

図 11 及び図 12 は、日を改めて、A 重油の通常油と処理油の静電電荷量を計測した結果である。縦軸を拡大して示している。その結果、通常油がほぼ 0 nC であるのに対し、処理油はほぼ 0.2 nC であった。

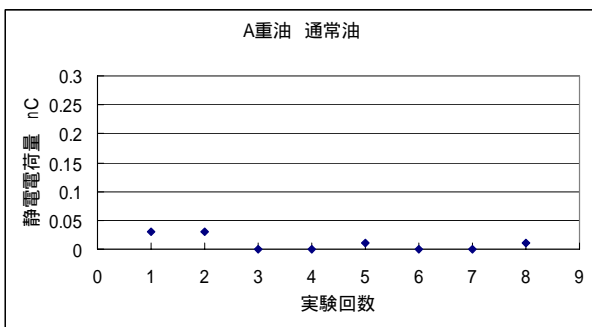


図 11 通常油の静電電荷量

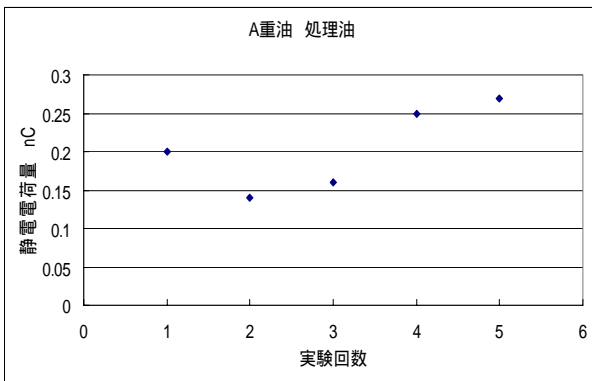


図 12 処理油の静電電荷量

6. あとがき

この種の研究では実験方法が常に問題となる。そのため、セラミック粒子流動層を通過させた A 重油（処理油）供給状態で、船用中速ディーゼル機関（定格出力 257 kW）を起動し、負荷 75 % に設定し、その状態を約 2 時間継続した。回転数及び負荷一定のまま、通常油に切り替えて約 1.5 時間運転後、再現性を確認するため、再び処理油に切り替えて約 1 時間運転した。その結果、通常油に比べて処理油は正味燃料消費率が 4～5 % 減少した。燃料消費量計

測器は多くの研究機関で利用されている(株)小野測器の FC - 140 であり、信頼性のある結果と思われる。

NOx は燃料消費率のようにパルス波状には変化せず、時間の経過と共に減少傾向を示した。また、燃料消費率との相関はほとんどなく、処理油の NOx に対する効果は殆どないと思われる。

何故、燃料消費率が減少するのか、原因究明を試みた。圧縮点火のディーゼル機関では燃料の着火時期がその後の燃焼に、ひいては機関の性能に大きく関与する。従って、燃料の改質により着火時期が変化したのではないかと思われたが、指圧器線図による燃焼解析の結果、着火時期は殆ど変動していなかった。

指圧器線図を更に詳細に検討したところ、処理油ではシリンダ内最高圧力がやや高くなっており、全燃焼期間における総発生熱量も増加傾向にあることが明らかになった。

燃料の着火に影響すると思われる表面張力及び粘度も計測したが、処理油と通常油で変化は見られなかった。

通常油と処理油で静電電荷量に相違があることも明らかになったが、0.2 nC 程度の違いが常に燃料消費率の差として現れるかどうかについては、もっと多くのデータの蓄積が必要である。

参考文献

- (1) 経済産業省資源エネルギー庁 省エネルギー・新エネルギー部 省エネルギー対策課：エネルギーの使用の合理化に関する法律の一部を改正する法律について、日本マリンエンジニアリング学会誌、Vol.41、No3、2006-5、pp.2-3
- (2) 竹田充志、塩出敬二郎：船用燃料の現状と問題点、日本船用機関学会誌、Vol.34、No.2、1999-2、pp.155-162
- (3) 松木義和、河合将史、宮脇淳一、佐藤一石、岡島邦彦：特定セラミックス処理水による配管内の清浄化、配管技術、2006-4、pp.60-63
- (4) 特許広報：粒状セラミックス及びその製造法、特許願 整理番号 = X1020961
- (5) 川原秀夫、三原伊文、岩崎寛希、藤谷親、酒井隆利、五島寧、藤井信二：セラミック粒子流動層による船用ディーゼル機関の燃費改善、第 74 回マリンエンジニアリング学術講演会論文集、平成 18 年 5 月、pp.25-26
- (6) 長尾不二夫：内燃機関講義(上巻)、pp.20-21、1994-2、(株)養賢堂

