船用ディーゼル重油の超音波処理効果 について*

南 正 巳**, 向 原 誠 也**
緒 方 一 彦**, 松 下 正**

概 要

船用ディーゼル重油の超音波処理について、特にこの目的のために開発された装置を用いて、その効果を実験的に調べた。

超音波処理油が受けている効果を知るためには、性状の明確な油について、周波数や照射強度を変えた実験が望まれるが、ここでは市販の重油を一定の装置で、照射時間や照射時の油温を種々変化して処理したものがもつ違いを、ディーゼル機関における噴霧・燃焼特性に関連して調べ、非照射油のそれと比較した。

適用した試験法は、比重、粘度および表面張力試験、示差熱分析試験、ガスクロマトグラフィー試験、遠心沈殿試験、スポット試験、単一油粒の蒸発・燃焼試験、および実機試験などかなり広範囲にわたっているが、これらの試験の結果、つぎのことが明らかとなった。

超音波処理は、スラッジを多く含む油に対し、スラッジを極微状に粉碎・分散して、油を均質化することにきわめて効果的である。また、この結果が僅少ながら液滴の蒸発・燃焼特性を助け、機関の燃焼に影響を与える。しかし、実験に使用した装置がもつ程度の超音波強度では、油全体を本質的に改善することは困難である。

On the Effects of Ultrasonic-Treatment on Marine Diesel Fuel Oil

by Masami Minami, Seiya Mukohara
Kazuhiko Ogata, Tadashi Matsushita

Abstract

Ultrasonic-treatment was seemed one of the most favorable treatment methods to be developed in addition to conventional centrifugal equipments for marine diesel fuel oil, so this experimental study was carried to make clear its effects upon physical and chemical properties of some kinds of heavy fuel oil. A special ultrasonic equipment, named K-7, was applied.

Viscosity, surface tension, gravity and specific heat of fuel were measured strictly and gaschromatography tests, spot tests, evaporation and combustion tests of single oil droplet, and engine firing tests were carried before and after the treatment in accordance with many expectant conditions on board.

The most effective result of the treatment is the fact that large floating sludges in oil are crushed and separated into very small particles by its cavitation effect then oil itself becomes so homogeneous.

Evaporation and combustion qualities of single oil droplet become slightly favorable and this affects on engine performance more or less, but other changes for substantial properties of oil as a whole hardly can be expected by the way of the treatment such as we used here.

1. ま え が き

最近の船用ディーゼル重油のなかには、混合や貯蔵

中に生ずる酸化重合の所産としてかなりのスラッジを含むものが多い。これがため使用に当たっては、従来と異なった飛躍的な前処理法の出現が強くのぞまれている。

考えられる方法には、

*原稿受付 昭和43年1月10日

**正会員, 神戸商船大学(神戸市東灘区本庄町深江)

(1) 燃焼を阻害している分子を溶解除去する化学的方法

(2) よりよく燃えるよう燃料分子を極微化する粉碎法

などがあるが、これに超音波を利用した事例⁽¹⁾は(2)に属する一つの具体的なあらわれである。

燃料に空洞現象を生ずるような強い超音波を照射すると、キャビテーション破壊によって燃料中に含まれているスラッジが極微状に粉碎されて分散すること、あるいは炭化水素の分子結合が切断されて低分子化すること、または照射時の分子間の摩擦のため表面帯電が起こり、生ずる反発力は霧化を助けることなどの可能性が予想される。しかし、その程度およびこれと燃焼との関連性については、すでに各方面で研究されているようであるが、いまだその結果を公表されたものは見あたらない。

この研究は、以上の見地より、実際超音波処理油が受ける諸現象とその効果を、特にディーゼル機関の噴霧の微粒化および燃焼特性に関係する項目について実験的に究明したものである。

実験は、一つの超音波処理装置において照射時間や照射時の油温などを変える方法で、いくつかの市販重油について実施された。

2. 試験装置

超音波を照射することによって期待される燃料の性状変化を知るためには、性状の明確な燃料油について周波数や照射強度を種々変化した試験を行なうことが望ましいが、ここでは市販の燃料油を一つの超音波装置で照射時間や照射時の油温を変えて処理し、主として燃料油の性状分析、単一油粒の蒸発燃焼試験および実機試験などを通じて調べることにした。

2.1 超音波発生装置 本装置は磁性物質のジュール効果を利用した電気音響変換原理を応用して開発

図1 超音波発生装置概要

された燃料油の超音波処理装置である。図1に示すごとく発振器で発生した高周波電力は磁歪振動子で超音波に変換され、供給油管中を流れる燃料油に照射される。実際の装置は図1に示す系統のものを2個組み合わせたものよりなり、その振動子部は図示の要領でホルダーに固定している。

この装置の仕様の大要は下記のとおりである。

(1) 処理能力 公称毎時 100~150 l

(2) 発振器 形式：全シリコントランジスタ形 強制空冷式 (K-7)⁽¹⁾、電源電圧：单相 100V、60 c/s、最大電流：6A、出力：300W、発振周波数：26KC $\pm$ 10%

(3) 振動子 フェライトの粉末を圧縮成形した素子に特殊クロム処理ステンレス鋼製の振幅拡大用ホーンをこう着剤で結合して作っている。その周波数は約26KCである。なお、振動子の振動数はフィードバックコイルにより発振回路に帰還して周波数の安定をはかるようにしている。

2.2 単一油粒の蒸発燃焼試験装置 本装置は単一油粒の蒸発燃焼試験に際し、小林⁽²⁾の用いた方法と原理的には同じものである。実験に当たり特別に試作した本装置の概要を図2に示す。この装置は細い熔融石英の糸(0.2 ϕ mm使用)の先端につるされた油粒に、一定温度に保持した可動式電気炉を急速に近づけて、油粒を炉内に入れ、その姿を炉に設けた小窓を通してハイカム16mm高速度カメラで撮影する仕組みになっている。

図2 油粒の蒸発および燃焼試験装置

2.3 供試機関要目 形式：阪神単筒直接噴射式 四サイクルディーゼル機関、出力：25 PS、回転数：

380rpm, シリンダ直径: 220 mm, 行程: 350 mm,
圧縮比: 12.78

3. 試験方法

表1に示す性状の燃料を用い, 照射時間や照射時の油温を種々変化して試料を採取した. この場合, 照射時間は単位時間当たりの流量で規定し, 本装置の実用域の時間流量に近い 90l/h から極端に照射時間を長くした 0.44l/h までの範囲内で変化した. また, 超音波処理時の油温は実用範囲にとどめ, A重油以外の油について40°C, 60°Cおよび80°Cの三段階に加熱した.

表1 供試燃料油の性状

燃 料 油	A 重 油	C 重 油
項 目		
比 重 15/4°C	0.8510	0.9308
反 応 中 性	中 性	中 性
引 火 点 P M C ° C	80	96
粘 度 cSt	2.84	44.6
流 動 点 @ 50°C	-22.5	0
残留炭素 %	0.29	7.4
灰 分 %	0.00	0.01
水 泥 分 %	0.0	0.1
水 分 %	0.0	0.0
イオウ分 %	0.94	2.61

まず, 超音波照射油が受けている性状変化を知るため, 主として超音波照射A重油および非照射A重油について, 比重と粘度の測定, 表面張力試験, スポット試験, 遠心沈殿試験, 示差熱分析試験, およびガスクロマトグラフィー試験を行ない比較した. これらの試験に用いた主な試験機器はつぎのとおりである.

比重: 浮標式2形

粘度: キャノンフェンスケ動粘度計

表面張力: デュヌイの張力計

遠心沈殿試験: 国産式電気遠心沈殿器

示差熱分析試験: DT-10 形(島津製)

ガスクロマトグラフ: GC-1C 形,

水素イオン検出器, 多段式自動昇温装置および熱分解装置付(島津製)

単一油粒の蒸発および燃焼試験における炉内温度は前者の場合500°C, 後者の場合700°Cに保持し, その模様をカメラ速度 50コマ/秒に収めて解析した.

以上の各試験の試料の採取については超音波処理することにより, 発生する揮発性ガスの逃出による影響を防止するよ

う十分注意した.

実機の試験においては, A重油を用い, 各負荷ごとの燃料消費量, 最高圧力, 排気温度を非照射油および照射油運転の場合について測定し比較した. ただし, 超音波処理油の使用に当たっては, 30l/h の割合で連続2回照射処理したものを, さらに照射しながら供給する方法をとり, 不十分な照射処理で行なうことを極力避けるよう配慮した.

なお, 実機試験は, 負荷のみ変化する方法で, 回転数を 300rpm と 380rpm の二通りに設定した場合について行ない, 厳重に管理した.

表2 超音波照射A重油の粘度・比重・表面張力

超音波照射時	動粘度 50°C cSt	比 重 15/4°C	表面張力 dyne/cm
非 照 射	2.84	0.851	32.25
0.111 h/L	2.83	0.850	—
0.222 h/L	2.83	0.850	—
0.333 h/L	2.83	0.850	32.30
0.444 h/L	2.83	0.850	—

図3 示差熱分析試験結果 (DTA曲線)

(a) 超音波非照射A重油

図4-1 ガスクロマトグラフィー試験結果

(b) 超音波照射 A 重油

図 4-2 ガスクロマトグラフィー試験結果

4. 実験結果およびその考察

4.1 性状に及ぼす影響 超音波照射によるキャビテーション破壊によって、燃料が受ける性状の変化を明らかにする目的で、表 1 に示す A 重油について行なった試験結果を表 2 および図 3 ~ 図 6 に示す。

このうち、表 2 は噴霧特性に關係する主な燃料性状として、粘度および表面張力について調べた結果を比重とともに示したものであり、図 3 と図 4 は、その熱的特性および分子の変化に対する示差熱分析試験およびガスクロマトグラフィー試験の結果である。また、図 5 と図 6 は、油中のスラッジに対する破壊効果を示

図 5 遠心沈殿試験結果

試料番号	1	2	3	4	5
試料					
超音波照射時間 (sec/cc)	0 (非照射)	0.4	0.8	1.2	1.6
換算円の直径 (mm)	11.21	11.33	11.45	11.49	11.55

(注) 試料油 A 重油: 使用汚紙 No. 5C
比重 0.839: 滴下量 10 μ l 油温度 33°C

図 6 スポット試験結果

したものである。

これらは、いずれも超音波を照射しながら採取した試料に対する直後の試験結果であり、長時間放置したものに対する結果は異なるものがある。

表 2 にみるごとく、非照射油に対する照射油の粘度、比重および表面張力は、前二者で小さく、後者で大きくなる。しかし、その差はいずれも測定誤差程度のものである。なお照射時間に対するこれらの値は、極端に照射時間を増しても同じで、全く差が認められない。

示差熱分析試験 (DTA 法) は、元来固体の熱的特性を調べるものであるが、A 重油 (比熱 0.437kcal/kg °C at 20°C) およびこれより比熱の大きいグリセリン (比熱 0.570kcal/kg °C at 20°C) ならびに蒸留水 (比熱 0.999kcal/kg °C at 20°C) に対するこの試験結果は、図 3 のごとく示される。ただし、図の DTA 曲線

a 点: 炉に入る直前 b 点: 炉の窓に見えた瞬間 c 点: 着火 d 点: 燃焼終り

図 7 単一油粒の燃焼試験写真の一例 (照射 A 重油 700°C)

は、いずれも加熱炉内の空気温度に対する試料0.2774グラムの温度の示差を、前者を横軸、後者を縦軸として表わしている。この試験において試料は、加熱炉内の時間温度上昇に対し吸熱、蒸発、発熱の過程を経るため、その示差温度は図のように変化する。特にこの変化で吸熱を伴う低温期間に注目すると、各試料のそれは負の方向に比熱に比例して下る曲線となることがわかる。しかし、非照射A重油と照射A重油の比較においては、両者まったくといってよいほどよく一致しており、両者の間に比熱上の差が生じていないことが理解できる。

図4のガスクロマトグラフィーの比較においては、低沸点部分で、非照射油と照射油の間にやや差が認められるが、その他の部分では、両者完全に一致しており、主成分は何ら影響を受けていない。低沸点域で照射油に現われている細かい現象の相違は、超音波照射によって何らかの変化を受けている油中の狭雑物が、試料油の加熱時に熱分解したと思われるものであり、これより、A重油にこの程度のパワー（約10W/cm²）の超音波を照射しても、分子の結合が切れて低分子化することは、ほとんど起こらないものと判断される。

最近、重油中には、混合や貯蔵中に生ずる酸化重合の所産として、かなりのスラッジを含むものが多く、ここに用いたA重油も例外ではない。このような油に対する超音波の照射効果を示したものが、図5と図6の遠心沈殿試験とスポット試験の結果である。

図5の遠心沈殿試験結果は、試料100ccに、428Gal相当の遠心力を作用せしめた場合のものであり、非照射油に対する照射油の沈殿量は、照射時間とともに明らかに少なくなる。しかし、0.4h/l以上の長い照射時間ではほとんど変らない。この結果はスラッジを含む油に超音波を照射すると、キャビテーション破壊によって、スラッジが極微状態に粉碎されて拡散し、油がよりよく均質化することを表すものである。そしてこれはまた、超音波処理油にさらに遠心分離清浄や戸過を加える必要

のないことを示すものである。

このスラッジのある油に対していえる上記試験結果は、同じ油に対する図6のスポット試験結果にも明りように表われている。非照射油の場合は色の濃い丸い斑こんが内部に小さく残るが、照射油の場合はこれが薄く大きくなり、その程度は照射時間を増すとともに顕著となってしだいに判別し難くなる。

4.2 単一油粒の蒸発燃焼特性に及ぼす影響

超音波処理油の蒸発燃焼特性を調べるため、図2の試験装置で行なった単一油粒の蒸発および燃焼試験結果を、その特性を明らかにする形で整理し、非照射油に対する結果とともに図8～図12に示す。

図8および図9は、非照射A重油に対する照射A重油の蒸発および燃焼特性曲線であり、図10、図11および図12は照射時間、照射時の油温および照射後の放置

図8 油粒の蒸発試験結果

図9 油粒の燃焼試験結果（照射時間の影響）

時間の影響をC重油について調べた燃焼特性曲線である。

各図はいずれも、図7に一部例示した採取高速度写真より求めた油粒の換算直径の2乗の時間的变化を示している。図より原点を通る縦軸上の値が、炉内に入る直前の油粒の大きさを示すことから、一定の高温炉内で受ける油粒の変化状態が明らかとなる。ここに油粒の換算直径は、図7にみるごとく、一般にだ円体となる油粒の占める体積と等しい体積を有する球に対するもので、その換算はつぎの式による。

$$D = \sqrt[3]{ab^2}$$

ただし D : 換算球の直径 mm
a : だ円油粒の長径 mm
b : 同 上 短径 mm

図において、曲線の傾斜は蒸発または燃焼速度係数を与え、供試油に対するこれらの値は各図中に付記したとおりである。このうち、見掛値は、原点を通る縦軸上の点と蒸発または燃焼終わりの点を結んだ直線の傾斜に対するものであり、真値は蒸発または燃焼開始点（図中、または↓印で示す点）と、その終わりの点を結んだ直線の傾斜に関するものである。

炉内温度を500°C一定とした図8のA重油の結果によれば、油粒は時間とともにゆるやかに小さくなってゆく。これはこの温度で油粒が単に蒸発のみで支配されるためである。蒸発速度係数は真値も見掛値も極くわずかであるが、非照射油より照射油のほうが大きくなる。また同じ照射油でも、照射時間を長くしたほうが大きくなる傾向を示す。

非照射油に対する照射油のこの傾向は、同じA重油およびC重油に対する図9および図10の燃焼試験の結果についても同様である。しかし、照射油と非照射油の間の速度係数の開きは、上記蒸発試験結果よりも顕著なものがある。これらは炉内温度を700°Cに維持した場合の結果であるが、油粒の大きさの時間的变化状態は、A重油とC重油とではかなり異なっている。A重油の燃焼線はほ

ぼ直線的に変化するのに反し、C重油の場合は大きく変動する。しかし、この変動の様子は、同じ油に対してはまったく同じで、油粒の大きさに関係しない。したがって、この形より油の産地や混合の内容を知ることが可能となる。

照射油に対する非照射油の油粒の大きさの時間的变化の様子をみると、後者はかなりの凹凸を示しながら小さくなってゆくが、前者は後者に比して凹凸も小さく、スムーズに変化する。これは、超音波の照射を受けて油中のスラッジが極微状に破碎、拡散して、よりよく均質化されるために現われる結果と思われる。

油温を変えて超音波処理した油の燃焼速度係数は、図11に示すごとく、60°C の場合がもっとも大きく、それより温度が低くても高くても小さくなる。特に

図10 油粒の燃焼試験結果（照射時間の影響）

図11 油粒の燃焼試験結果（照射時の油温の影響）

図12 油粒の燃焼試験結果（放置時間の影響）

を増して、気泡の破裂力を弱め、スラッジが十分破壊されないためと思われる。なお、この結果は Rosenberg らが、水、灯油、ベンゼンなどにおいてキャビテーション破壊と温度との関係を調べている結果⁽³⁾とも傾向的には類似している。

照射処理後の放置時間の影響については、図12に示すごとく、燃焼速度係数は処理直後の結果にくらべて減少し、24時間放置のその値は非照射の場合とほぼ同じくらいになる。これは照射処理後、油中のスラッジが徐々に元の状態にかえて行く結果と思われる⁽⁴⁾。

4.3 実機による使用試験結果

以上の結果と実際機関との関連性を求めるため、実機における使用試験を、照射A重油と非照射A重油について行ない、最高圧力、排気温度および燃料消費率をもって比較し、その結果を図13に示した。

僅少ではあるが、300rpm、380rpmとも、低負荷領域では、照射油使用の場合のほうが、最高圧力は高く、排気温度は低くなって、燃費は減少する。しかし、高負荷領域におけるこれらの関係はまったく逆の状態となる。

低負荷領域で照射油使用の場合に現われるこの有利な結果は、超音波処理することによって、油がいつそう均質化され、かつ、このような処理油においては、前述のごとく蒸発速度係数も燃焼速度係数も大きくなることおよびこの負荷は空気過剰率が大きいことから予想できる当然の帰結といえる。

これに対し、高負荷領域で超音波処理油が受ける不利な結果は、負荷の上昇に伴い、噴射期間、噴射量が増して空気過剰率が下がるため、上記速度係数の増加は、大きな空気のうず流れを期待できない開放燃焼室形においては、噴射後半の噴霧に対しては局所的にかえて過濃混合気を形成する傾向にあり、このような結果を招いたものと思われる。

5. まとめ

一つの超音波処理装置で、市販の重油を照射時間や照射時の油温を種々変化して処理した場合の効果について、実験的に調べた以上の結果は、つぎのごとく要約できる。

- (1) スラッジの多い油を超音波処理すれば、油中のスラッジは破碎、分散して油は均質化される。

図13 実機試験結果

80°C の場合は、非照射油の値と変わらない。これは超音波キャビテーションの破壊効果が処理時の油温の影響を受けて変わることを示すものであって、つぎのように解釈される。すなわち、60°C までの温度に対しては、温度の上昇とともにキャビテーション核の数が増し、溶解気体やその他の泡が発生して、スラッジがよく粉碎されるが、60°C 以上の温度では、温度の上昇につれて、油中の蒸気および溶解気体がキャビテーション気泡内に混入し、いつそうの高温で気体弾性

(2) 本装置がもつ程度の超音波を照射しても、燃料の比重、粘度、表面張力はほとんど変わらない。

また、炭化水素の分子間の結合が切断されて低分子化することも比熱の変化も見られない。

(3) 供試油の蒸発および燃焼速度係数は、超音波の照射によってやや大きくなる。試験範囲におけるその程度は照射時間を増すほど顕著となる。

(4) 照射処理後の放置時間の影響については、放置中に油は初めの状態にかえる傾向があるので、放置時間の長いほど燃焼速度係数は減少する。

(5) 照射時の油温の影響については、最大のキャピテーション破壊を示す最適油温が存在する。

(6) うず流れの小さい直接噴射機関では照射処理した油の低負荷領域における燃料消費率は非照射油

使用の場合に比し少なくなるが、高負荷領域ではかえって多くなる。しかし、これらの差はきわめて僅少である。

終わりに臨み、示差熱分析器の使用に際しては本学化学教室の青木教授、広井教官のご協力を得、ガスクロマトグラフの使用については島津製作所の研究所の厚意を受けた。また、器材などの一部は、栗林商船会社および旭興業会社の提供によった。記して感謝の意を表わす。

文 献

- (1) KAYSEVEN NEWS, No. 1, No. 2 (昭 41—3, 5)
 - (2) 小林清志, 日本機械学会論文集, 20—100 (昭 29), 826~843.
 - (3) Rosenberg, 超音波入門 (上田光隆訳), 31, 東京図書
 - (4) 柳沢 亘, 日本船舶機関学会誌, 1—4 (昭41), 141
- その他, 超音波技術便覧, 改訂新版 (昭 41), 日刊工業新聞社

〔質 疑 応 答〕

質問者 東京商船大学 内海 博

〔質問1〕 超音波を照射した直後の試験結果と長時間放置したそれとはどう異なるか。また、それはどうしてか。

〔質問2〕 あまり変化がないと考えられた粘度、比重、表面張力、および比熱を調べ、かつガスクロマトグラフィーを行なった理由はなぜか。

〔質問3〕 図5において、スラッジの量は分散前後においても変化しないと思われるが、状態の変わっているのはなぜか。

〔質問4〕 一口にA重油、C重油といっても、その燃焼性は原油、精製法、混合基油によって大いに異なるものがある。この観点より図9および図10の説明は、やや一般的でないと思われるがどうか。

〔回答1〕 超音波照射による燃焼性の改善は、油中の阻害物質を取除く方法によるのではなく、存在せしめたまま極微状に粉碎拡散せしめて均質化し、燃えやすくすることであり、結果的には物理的破壊によっているから、長時間放置すれば元の状態にかえるものと考えてよい。その結果の一例は、図11に示すとおりである。

〔回答2〕 性状の異なる油を種々混合して作られている重油に超音波を照射した場合、そのキャピテーション破壊によって、もし炭化水素の分子間の結合が切断されて低分子化するようなことがあれば物性変化をきたすことが予想される。物性変化のうち比熱は発火遅れに関係し、粘度、表面張力は微粒化に影響するものであり、ディーゼル機関のシリンダ内における燃焼性能を取扱うためには一応調べてみる必要がある。も

とより、超音波の照射によって油全体に著しい変化が起こることは予想していなかったが、微少な変化でも起こる場合にはこれを正確に見出す必要があり、前述したような各種の実験を行なったのである。

〔回答3〕 スラッジの形成については、質問者が本学会誌 (第1巻, 1, 2号, 昭42) でのべている見解によりたい。しかし、形成されたスラッジには、超音波照射によって容易に粉碎される軟質、軟硬質のものもあれば、破壊困難な硬質のものもある。また、これが油中に存在する仕方には、重くて沈降するものもあれば、みかけ上比重が軽いため浮遊懸垂するものもある。このような油に超音波を照射すると、照射時間によって照射エネルギーの受け方が変わり粉碎拡散の程度が異なるので、一定条件の遠心沈殿試験のもとでは、図5のように沈殿スラッジ量に変化する。

〔回答4〕 区分名称上A重油、C重油といっても、その内容は原油、精製法、混合基油によって異なり燃焼性に影響することは指摘のとおりである。図9、図10の結果に対する見解は、広範囲のA重油、C重油に対するものでなく、試用した一つのA重油、C重油に超音波を照射した場合とそうでない場合の結果を述べているものである。

なお、われわれは別な実験目的で、各種の重油について単一液滴の燃焼実験を行なっているが、その結果によれば、発火から燃えつきるまでの曲線の形は、C重油の場合は図10のごとく、大きく凸出する山が始めと終りにくるものもあれば、始めに大きくなるもの、または終りのみ大きくでてくるものもある。しかし、一つの油に対するこの形は、油粒の大きさに関係なく相似である。このことはA重油についても同様にいえるが、C重油ほど顕著な形の変化はなく、いずれも図9に示す程度である。