低質油燃焼におよぼす加熱温度の影響

正員 瀬 尾 正 雄 稲 見 信 雄
渡 辺 和 夫 大 竹 和 夫

The Effect of Fuel Temperature on Combustion for Engines

By Masao Seo, Member Nobuo Inami

Kazuo Watanabe, Kazuo Otake

Summary

Multiple diesel engine systems combined with several medium-speed engines have been recently developed as a propulsion system for ocean-going vessels.

If bunker oil can be used satisfactorily as a fuel for these medium-speed engines, the operation cost of ships would be more reduced. However, the test of bunker oil as a fuel heated up to high temperature has not been examined yet for this type diesel engine by this time.

This paper describes experiments to investigate the effect of fuel temperature on combustion for diesel engines.

The results present that the fuel consumption and the exhaust temperature of the engine are increased with raising fuel temperature up, on the contrary of the authors expectation.

An analysis is also made of these results.

1 ま え が き

船舶主機関用ディーゼル機関は船舶の大形化に伴つて低速機関の力量増大がおこなわれ、1基出力 26,400 PS の機関が製造されるようになってきた¹⁾。この機関は運航の経済性を図るため低質重油の使用が研究され、実用化されている。しかし最近中速機関数基を組合せて主機関として使用する、いわゆるマルチプルエンジン方式が開発されてきた²⁾。この機関の経済性を向上させるためにも、大形機関と同様低質重油を使用することが必要であるが、低速機関の場合と異なり中高速機関は燃焼時間が短いため低質重油の使用は容易ではない。

低質重油の使用が難しいのは、粘度が高いこと、不良成分の含有が多いことなどのためであり、これによつて燃焼が不良になりやすく、悪質な燃焼生成物を生じやすいためである。低速機関においてはこの対策として、重油温度を引火点程度に加熱して流動や噴霧を良好にするとともに、油清浄機により不良成分を除去することがおこなわれている。しかし中速機関に対してはこれだけでは十分でなく、さらに一層の燃焼性向上を図る必要がある。このため燃焼装置の改善を図ることも有力な方法であるが、この方面の研究は多くおこなわれておりこれ以上の改善は容易ではない。

それゆえ筆者らは重油を高温に加熱することは、燃焼性能に良好な影響を与えるであろうと予想して低質重油(以下C重油という)の燃焼状態におよぼす重油温度の影響を調査した。試験には中速中形機関を使用する予定であるが、予備試験として小形予燃焼室式ディーゼル機関を用い、C重油を90°C~200°Cに加熱して試験した。試験の結果は予想に反し、加熱温度を上昇するにしたがつて燃費、排気温度が増加した。この現象を確認するためA重油を使用したところ、A重油でも同じ傾向を示した。C重油をある程度加熱すればA重油程度の粘度に低下して噴霧が良好になり、燃焼性能が改善されることは明らかであつたが、それ以上の加熱が重油の燃焼にいかなる影響があるかについての研究は見当らない。それゆえ、燃料の高温加熱をおこないディーゼル機関の燃焼性能におよぼす影響を明らかにするための実験をおこなうとともに、常温と高温加熱の場合の噴霧状況を高速度カ

メラを用いて撮影し、調査した。噴油は大気中と灯油中に噴射させ、噴霧の状況、噴霧の到達距離および噴射おくれを比較した。その結果、噴霧および噴霧の到達距離は大差なく、噴射おくれに差のあることがわかった。それらの結果について報告する。

2 試験方法

2.1 供試燃料

試験に用いた燃料油はC重油とA重油で、その性状は表・1に、また粘度—温度曲線は図・1に示すとおりである。なおC重油は清浄したものを使用した。

2.2 試験装置

試験機関は小形単筒予燃焼室式ディーゼル機関（ヤンマ—SS 4 4 PS×750rpm）を使用した。その要目を表・2に

表・1 供試燃料油

項目		C重油	A重油
比重	15°C	0.9497	0.8903
引火点	$^{\circ}\text{C}$	114	79
粘度	$\text{R\&W No.1 sec at } 50^{\circ}\text{C}$	560	38
	$\text{at } 98.9^{\circ}\text{C}$	85	31
残留炭素分	wt %	9.2	0.37
灰分	wt %	0.02	0.0
硫黄分	wt %	3.37	1.01
ヘプタン溶解分	wt %	4.2	0.17
セタン価(計算)		—	47
アニリン点	$^{\circ}\text{C}$	795	—
テネル指数		30.4	—
炭素含有量	wt %	84.6	85.9
水分含有量	wt %	11.2	12.5
真発熱量	kcal/kg	9780	10010
総発熱量		10350	10640

図・1 供試燃料油温度粘度特性

表・2 試験機関要目

名称	ヤンマ—SS 4
形式	4サイクル単動立形無気噴油式
連続最大出力×回転速度	4 PS × 750 rpm
シリンダ数×径	1 × 95 mm
ピストン行程	150 mm
燃焼方式	予燃焼室式
注油および冷却方式	強制循環式、強制水冷式
燃料噴射弁	高圧密閉単孔式
孔径×数×噴射圧	0.25 mm × 1 × 150 kg/cm ²
吸気弁開閉	BTC 10° ATC 20°
排気弁開閉	BTC 45° ATC 18°
上死点スキマ	5.0 mm
正味平均有効圧	4.52 kg/cm ²
燃料ポンプ形式	ディッセル式

図・2 インジェクタ線図の解析

図・4 噴射管内油温度と燃焼性能 (C重油)

図・3 試験装置概要図 (ヤンマ SS-4, 4 PS)

表・3 試験の種類

油種	燃料油温度 °C ノズル入口	燃料油温度 °C BTC deg
C重油	93	22 29 32
	93	22 29
	93	22 29
	93	22 29
A重油	130	22 29 32
	130	19
	130	19
	130	19

図・5 燃料ポンプ突始めと燃焼性能 (C重油)

図・6 噴射管内油温度とインジェクタ線図の相連

図・7 噴射管内油温度と燃焼性能 (A重油)

示す。燃料タンク、給油管はヒーターを用いて予熱し、温度調節計で制御するようにした。また、さらに噴射油の加熱度を上げるため、噴射管にヒーターを巻いて加熱し、温度は電子式自動平衡形温度調節計で正確に制御した。燃料噴射管内圧および燃焼圧の計測は抵抗線式指圧計を用い、上死点位置および開弁時期は電磁石を用いて電磁オシロに同時記録をおこない 図・2 に示す方法で解析した。その他排気温度、冷却水温度、潤滑油温度は電子管式自動温度記録計を用いて測定し、排気ガス分析はオルザット式分析器を使用した。また煙り濃度は口紙上に採集し、光電池を用いて求めた。装置の概要図を図・3 に示す。

2.3 試験の種類

試験は機関毎分回転速度を 750 rpm, 正味平均有効圧 4.52 kg/cm² 一定とし、燃料油の加熱度、噴射時期を変化させて試験した。その種類を表・3 に示す。なお加熱による噴

霧、噴射時期の変化を高速度写真で調べ³⁾、また加熱による燃料の性状変化をも調査した。

3 試験結果

3.1 噴射管内油温度と燃焼性能

図・4～図・9 に C 重油と A 重油の燃焼性能およびインジケータ線図の一例を示す。C 重油については粘度を試験機関の適性粘度範囲 (RW No. 1 100～50 sec) を目標とし、93～150°C に加熱して試験をおこない、燃焼性能(燃費率、爆発圧、着火時圧縮圧、排気温度、煙り濃度、空気過剰率)の変化を求めたものである。図・4 の燃料ポンプ突始め BTC 22 deg. の場合における油温度 93°C と 150°C を比較すると、燃費率は 284 gr/ps/hr, 310 gr/ps/hr, 排気温度は 430°C, 478°C, 煙り濃度は 45%, 80% となつていずれも増加している。また爆発圧は 53.4 atg が 51.7 atg と低下している。これは図・6 のインジケータ線図に示すごとく、上死点後のピストン下降行程時に燃焼がはじまるためであり、加熱をおこなつたために燃焼おくれを生じていることが認められた。燃料ポンプ突始めを進めた時の性能は図・5 に示すとおりで、その場合の油温度 93°C で燃料ポンプ突始め BTC22 deg, 32 deg, 油温度 150°C で燃料ポンプ突始め BTC 22 deg, 32 deg を比較すると、燃費率の差は前者が 9 gr/ps/hr, 後者は 25 gr/ps/hr, 排気温度の差は前者が 26°C, 後者が 53°C となり、油温度 150°C の場合の方が良好であつた。なお燃料ポンプ突始めを進めることによる爆発圧の上昇は両者とも約 5 atg 程度であり、まだ本機関としては余裕があるので突始めを進めて使用し性能を向上させることができると思う。

A 重油については加熱温度の影響を比較するため油温度を常温～130°C(粘度 RW No. 1 で 62～29.5 sec) で試験した。その結果は図・7 の性能と図・8 のインジケータ線図に示すとおりで、加熱による燃焼おくれの傾向は大体 C 重油に似ているが、おくれを示す油温度には相違がある。それは図・9 に示したとおり C 重油では粘度/油温度 50 sec/130°C, A 重油では粘度/油温度 34 sec/70°C 程度であり、そ

図・8 噴射管内油温度とインジケータ線図の相違

図・9 噴射管内油粘度と燃焼性能

図・11 噴射管内油温度と噴射特性 (A重油)

図・10 噴射管内油温度と噴射特性 (C重油)

れぞれの油がガスを発生する引火点付近の温度に関係があるようである。

3.2 噴射管内油温度と噴射特性

油を加熱して噴射すると燃焼がおくれ、性能が悪くなることが認められた。その原因を探求するため、噴射管内の油圧と噴射弁の開弁状況をオシログラフの記録から解析して調査した。図・10, 11 は噴射管内油温度と噴射特性および図・12 は噴射管内油粘度と噴射特性を示す。図・10 のC重油の場合、噴射管内圧上昇始めは燃料ポンプ突始め BTC 22 deg, 29 deg. と油の加熱による影響はなく、大体一定時期で開始している。開弁時期は油加熱によりパラツキはあるが、93°C~130°C までは変化は少なく、それ以上の温度でおくれがでている。その傾向は燃料ポンプ突始め BTC 22 deg, 29 deg. でそれぞれ6~9 deg, 9~11 deg となり、油温度 93°C と 150°C では約 3 deg. のおくれを示している。開弁圧の設定は 150 atg としたが、測定した開弁圧はかなりバラツキがあつた。しかし噴射管内圧上昇始めにはほとんど変化が認められず、開弁時期は油温度の上昇にしたがつておくれる傾向にあることを併せ考えると開弁圧も上昇するものと思う。

噴射管内圧上昇始めから噴射弁の開弁までの期間を噴射おくれとしたが、図・10 に示すごとく油温度 93°C から 150°C に至る範囲内でその値は角度で 2~4 deg, 時間で $0.6 \sim 0.8 \times 10^{-3}$ sec おくれていることがわかる。また着火おくれは開弁から着火までの期間に相当する角度と時間で求めた。供試C重油の場合、油温度の変化（粘度変化）によつて噴霧状況が改善されると考えたが、燃料ポンプ突始め BTC 22, 29 deg と油温度 93~150°C までの着火おくれ角はいずれも約 8 deg で、時間にして約 $1.6 \sim 2.0 \times 10^{-3}$ sec であり、油温度の影響はなく大体同じであつた。

A重油の場合は図・11 に示したとおり、加熱による噴射特性の変化は大体C重油に似ているがおくれを示す油温度の相違は図・12 で示すとおりで、前記の燃焼性能の場合と同様である。噴射おくれは開弁時期が常温で BTC 9 deg, 130°C で BTC 3 deg であり、加熱により角度で 6 deg, 時間にして 1.2×10^{-3} sec おくれている。着火おくれは角度で 8~10 deg, 時間にして $1.6 \sim 2.2 \times 10^{-3}$ sec であつた。以上C重油およびA重油の場合とも加熱により噴射おくれが増加していることがわかりこれが燃焼性能を悪化させる一原因となつている。

表・4 燃焼波形の対数線図解析

燃 料	C 重 油						A 重 油	
	1	2	3	4	5	6	7	8
燃料 No								
燃料温度								
燃料ポンプ突始め BTC deg								
機関回転速度 rpm								
燃焼始角 (最大時期) deg								
燃焼終り deg								
燃焼期間 deg								
燃焼時間 msec

図・12 噴射管内油粘度と噴射特性

3.3 対数線図による燃焼解析

燃焼性能の悪化には噴射おくれ、着火おくれのほかに燃焼のおくれが考えられる。その燃焼のおくれにおよぼす加熱温度の影響を調べるため、インジケータ線図を対数線図に書き直し、燃焼終り点を推定し燃焼推定時間を求めて比較した。その一例を表・4 に示す。C重油については燃料ポンプ突始め BTC 22 deg, 29 deg および 32 deg の

油温度 93°C, 150°Cを示した。燃焼終りの推定は油温度の変化については大差なく, 燃料ポンプ突始めを進めると早くなっている。すなわち 燃焼推定時間で BTC 22 deg の場合で約 $13 \times 10^{-3} \text{sec}$, BTC 29 deg の場合で約 $12 \times 10^{-3} \text{sec}$, BTC 32 deg で約 $11 \times 10^{-3} \text{sec}$ となる。A 重油の場合は C 重油と異なり, 油温度 93°C と 130°C で約 $1 \times 10^{-3} \text{sec}$ の差を示している。

3.4 燃料の加熱の影響

表・5 C 重油の加熱化による性状変化

加熱温度	°C	清淨度	93	130
比重	15/4°C	0.9497	0.9477	0.9477
粘度 $\frac{KW}{NOI}$ at 50°C	Sec	560	570	568
残留炭素分	wt %	9.2	9.5	9.3
ヘプタン不溶分	wt %	4.2	4.2	4.3

燃料は加熱温度と加熱時間により酸化して噴霧および燃焼に悪影響をおよぼすスラッジが析出することがある。本試験の燃焼性能の悪化も加熱による酸化生成物が原因となつたものではないかと考え, 各温度で運転した場合と同様, 噴射管を通過させた燃料を採集して分析をおこなつた。結果を表-5 に示す。表によると粘度, 残留炭素分, ヘプタン不溶分とも大差なく, この程度の加熱温度, 時間では燃

料の酸化はなく, 燃焼性能に影響することは少ないと考えられる。

3.5 直接燃焼式機関による試験

予燃焼室式機関による試験の結果, 燃料の加熱は燃焼性能の悪化をきたし, その主因は噴射おくれであることがわかつた。この現象を確認するために直接燃焼式中形単筒機関 80 PS×500 rpm で試験した。試験の結果は予燃焼式機関の傾向と同じで燃焼性能は悪化する傾向があつた。

4 試験結果に対する考察

本試験の結果, 燃料油の加熱は噴霧の形状に影響は少ないが噴射おくれが増加し, 燃焼性能が悪化した。浜部⁴⁾, 長尾氏⁴⁾は噴射おくれを次の 3 つに分けて考えている。それによると噴射おくれ t_l は (1) 式で導かれている。

$$t_l = t_1 + t_2 + t_3 \quad (1)$$

ここに t_1 : 燃料ポンププランジャーが油を押し始めてから送出弁が開くまでの時間

t_2 : 管内の油圧が伝わるに要する時間

t_3 : 圧力が噴射弁に達してから弁が開くまでの時間,

本試験で認められた噴射おくれと試験状況から考え,

(1) 式により加熱の影響を考察すると次のことがいえる。

- インジケータ線図より求めた噴射管内圧上昇始めの角度の差が少ないことから考え, t_1 は影響していない。
- $t_2 = l/a$ であり, 噴射管の長さ l に比例し, 油の圧力波の伝播速度 a に逆比例する。本試験では l は一定であり, a は加熱による油の密度の減少により大きくなるので t_2 の場合の噴射おくれもない。
- 残りは t_3 であり, t_3 は (2) 式で導かれる。

$$t_3 = (b_2 + R - p_r) V_2 \alpha / f_2 v_{2m} \quad (2)$$

ただし b_2 : 噴射弁バネの初圧

R : 噴射弁内ニードル弁の摩擦

p_r : 管内残留圧

V_2 : 噴射弁内の油容積

α : 油の圧縮率

f_2 : 管の面積

v_{2m} : 管内の油速度

試験状況から考え f_2 は一定であり, v_{2m} は大きくなる。したがってこれらにより噴射おくれは増加しない。 b_2 および V_2 は一定であるから R , α および p_r につき考察する。本試験のごとく燃料を加熱した場合, R は燃料の潤滑性能低下のため, また α は密度の減少のためいずれも増加する傾向がうかがわれる。次に p_r は R の増加に起因する開弁圧および最高圧の増大のためか, 温度上昇につれ高まる傾向を示したが, 以上の考察と実験結果を総合して (2) 式中の R および α が噴射おくれの主因となつたものと考えられる。

5 結 論

中速ディーゼル機関においてC重油を使用する場合は燃焼サイクル完結の時間が低速ディーゼル機関のそれより短いため、燃焼性能を向上させる必要があり、そのために燃料を従来よりさらに加熱してみた。その結果は次のとおりであつた。

- i C重油を従来より加熱して使用した場合、燃焼性能は悪化する。
- ii 燃焼性能が悪化する原因は、加熱による噴射おくれが主因と考えられる。
- iii 噴射おくれが増加する温度は、燃料の引火点付近である。
- iv 今後直接燃焼式機関で高温加熱された燃料油の着火性の良否、および噴射時期が燃焼性能におよぼす影響を調査する予定である

参 考 文 献

- 1) 機械工学年鑑：昭和 39 年（船舶）日本機械学会
 - 2) 山本，船用機関高速化の動向：日本機械学会誌 Vol. 67, No. 545, June. 1964
 - 3) 広安，ほかディーゼル機関用燃料噴射弁の噴射特性の測定 日本機械学会第 42 期全国大会前刷 昭和 39 年 10. 1～2
 - 4) 浜部 長尾燃料噴射および燃料ポンプ共立社，昭和 13 年 4 月，pp. 191～193
 - 5) 長尾 内燃機関講義（上巻）養賢堂，昭和 31 年 7 月，pp. 248～256
-