潤滑油によるトランクピストン型機関の燃費改善への挑戦*

守 田 洋 子**

竹 島 茂 樹**

有 本 直 純**

藤 井 仁***

石 田 達 郎***

Quest to Improve Fuel Efficiency in Trunk Piston Engines with Lubricants

By Yoko Morita, Shigeki Takeshima, Naozumi Arimoto,
Satoshi Fujii, Tatsuro Ishida

Fuel economy is one of the most important issues facing marine industries from the standpoint of both reducing greenhouse gas emissions and saving costs. Although engine manufacturers, ship builders, and ship owners have evaluated various means to improve the fuel efficiency of ships, there are only a few studies that deal with the contribution of marine engine lubricants to fuel efficiency. The authors investigated the influence of viscosity characteristics and additives (e.g. friction modifiers) in lubricants on the fuel efficiency of medium-speed trunk piston engines. Through laboratory tests, bench-and full-scale engine tests, it was found that optimized formulations with unprecedented low-viscosity improved fuel efficiency. The best formulation improved fuel efficiency by over 3% in full scale engine.

1. はじめに

船用燃料油の価格が上昇を続け、今後も高止まりが予想される中、船舶運航における省燃費のニーズは高い。さらにはIMOによる船舶からのCO₂排出規制が発効し、船舶の省燃費設計および省燃費運航が義務付けられるようになった。規制は今後も強化される予定であり、経済性、環境保全の両面で“省燃費”は船舶運航の最重要課題の一つとなっている。

船舶の省燃費策は、エンジンの高効率化を含む船舶全体の設計改良やウェザールーティング等の運航面での対策など様々に講じられているが、エンジン油による省燃費化の検討例はまだ少ない。

著者らは、船舶の主機や発電機として使用される中速トランクピストン型機関について、エンジン油(Trunk Piston Engine Oil ; TPEO)による省燃費化の可能性を検討している。本稿でその一端を紹介する。

2. エンジン油の潤滑機能と効率改善について

エンジン油の重要な機能には、エンジンの二面間のしゅう動抵抗の低減と、しゅう動部位の摩耗、焼付による損傷の防止がある。

二面間の潤滑状態の指標のひとつに、油膜厚さと固体面の表面粗さとの関係を表す膜厚比(Λ)¹⁾がある。

$$\Lambda = h/R, \quad R = (\sigma_1^2 + \sigma_2^2)^{1/2}$$

h : 油膜厚さ

R : 二面の合成表面粗さ

σ_1, σ_2 : 二面それぞれの二乗平均平方根粗さ

$\Lambda \geq 3$ ならば、しゅう動面が油膜で分離されて固体接触のない「流体潤滑」の状態となり、膜厚が薄くなって $\Lambda < 3$ の範囲になると、固体接触が生じ始める「混合潤滑」の状態へ、さらに薄くなれば常に固体接触のある「境界潤滑」となると判断される。

また一般的に、油膜厚さはエンジン油の粘度とすべり速度によって決まる。粘度が高いほど、またすべり速度が速いほど油膜が厚くなり、逆に粘度が低いほど、また、すべり速度が遅いほど油膜は薄くなる。

図1に粘度、すべり速度、荷重、油膜厚さと潤滑状態

図1 潤滑条件と潤滑状態

*原稿受付 平成26年2月20日。

**正会員 JX 日鉱日石エネルギー(株) (横浜市中区千鳥町8番地)

*** (株)船三井 (川崎市麻生区栗木2丁目2番9号)

態の関係を示す²⁾。

エンジンのしゅう動部はその場の条件によって様々な潤滑状態にあるといえる。

ところで、エンジンのエネルギー効率は熱損失と機械損失によって決まるが、機械損失はすなわち、しゅう動面の摩擦抵抗による摩擦損失である。

機関メーカーへのヒアリングによれば、現存の中速機関における摩擦損失は8~10%程度とのことであり、損失低減の余地はまだある。図2に中速機関の摩擦損失の部位による内訳例を示した。

軸受やピストンリング/ライナー間では流体潤滑の比率が高いと考えられ、これらの部位ではエンジン油の粘度低減が摩擦損失低減に有効である。

一方、カム/タペット間やギヤ歯車間等の混合潤滑の状態と考えられる部位では、摩擦調整剤 (Friction Modifier : FM) が摩擦損失の低減効果を発揮する。

FM は、金属表面にせん断強度の低い吸着膜や反応膜を形成することにより、しゅう動面間の摩擦係数を下げる添加剤である。

図2 中速機関の摩擦損失割合とその内訳例

3. 省燃費 TPEO の開発

省燃費 TPEO 開発のための検討結果を紹介する。

3. 1 省燃費油の処方検討

3. 1. 1 省燃費油の粘度設計

エンジン油は基油に何種類かの添加剤を配合して必要な性能を持つように設計されている。

粘性抵抗を低減するためにエンジン油の粘度を下げる方法としては次の二つの方法が考えられる。

1)使用する基油の粘度を下げる

2)粘度調整剤 (Viscosity Modifier :VM) を使用する

基油には鉱油系と合成系があり、構成成分の分子量や化学構造によって温度・粘度特性や圧力・粘度特性が異なる。鉱油系であれば、蒸留性状や精製度合いの異なる基油を適当に組み合わせることにより、粘度の

コントロールがある程度可能である。

粘度調整剤(VM)とは高分子量化合物、いわゆるポリマーであり、車両や漁船の小型エンジン用のエンジン油ではすでに汎用的に使われている。

ポリマーには、基油への溶解状態が温度により変化する性質によって高温時の粘度低減や低温時の粘度上昇を抑制する効果(粘度指数向上)と、せん断を受けて形状が変化することにより一時的、局所的に粘度を下げる効果(図3)がある。

図3 粘度調整剤による粘度低下

著者らはベンチエンジン(リカルド WD300 ; 単気筒, ボア 135mm, 出力 54kW, 回転数 1,200 min⁻¹)を用いて、TPEO の粘度低減による燃費改善効果を検討した。燃費評価対象油は次の3種類である。

試作油 1 : SAE40 相当粘度(基準油)

試作油 2 : 基油の調整のみで SAE30 に下げたもの

試作油 3 : 基油の粘度を下げて VM を添加し、せん断粘度を SAE20 レベルに下げたもの

各油の粘度等を表1に示す。その他添加剤としては TPEO で一般的な処方系(金属系清浄剤, 酸化防止剤ほか)を配合した。

中速機関に推奨されているオイルの粘度は SAE40 または SAE30 であり、SAE20 は実績のない低粘度レベルである。

表1 燃費評価対象油の性状

	試作油1 SAE40 (基準)	試作油2 SAE30	試作油3 SAE20
処方 基油	鉱油系	鉱油系	鉱油系
粘度調整剤(VM)	未添加	未添加	添加
その他添加剤	共通		
性状 動粘度	40℃	141.5	84.6
	100℃	14.5	10.2
mm ² /s			9.6
粘度指数	100	101	165
高せん断粘度	100℃	12.3	9.2
	150℃	4.2	3.5
mPa・s(10 ³ /s)			2.8

エンジン油を低粘度化すれば粘性抵抗が下がることは確実なものの、前述のとおり、粘度が下がると油膜

厚さが小さくなって固体接触が増え、エンジン部品の摩耗が増大し、最悪の場合には軸受が焼付いてエンジン停止に至るリスクがある。低粘度化を試みるにあたって最も重要なのは信頼性の確保である。

本実験での粘度設計にあたっては、低粘度化の限界として下記の点を考慮した。

- 1) 油圧の確保：試験エンジンのオイルポンプ能力の範囲で油圧確保に必要な動粘度を確保した。
- 2) 主軸受の信頼性の確保：CIMAC の中速機関ガイドライン³⁾に示された粘度管理下限値を許容範囲の目安とした。具体的には、100℃動粘度の管理下限 7.0 mm²/s (SAE30 油 9.3 mm²/s -25%) に相当する高せん断粘度を 6mPa・s 程度 (7.0mm/s x 密度 0.9g/ml, @100℃) と概算し、同レベルまで低減した。

評価対象油の動粘度、高せん断粘度を図 4, 5 に示す。

図 4 燃費評価対象油の動粘度

図 5 燃費評価対象油の高せん断粘度
(@せん断速度 10%/s)

エンジン試験での燃費は、負荷 80%での 3h 連続運転のうち、安定した最後の 1h の燃料流量を測定し、

燃料温度密度補正をして燃料消費率 (g/kWh) として算出した。結果を図 6 に示す。

図 6 TPEO の粘度と燃費(WD300 エンジン)

エンジン油の低粘度化によって明らかに燃費は改善した。

なおここで、試作油 2 と試作油 3 の燃費の差は動粘度の差では整理できない。試作油 3 では、VM の効果によるせん断場での粘度低下 (図 5 参照) が燃費改善に大きく寄与したと考えられる。

3. 1. 2 添加剤による省燃費効果の検討

硫黄分濃度の高い重油を使用する船舶のエンジン油には、硫酸中和能力を持たせるための金属系清浄剤が多量に添加されている (Ca : 4,000ppm 以上)。

先に述べた摩擦調整剤 (FM) の添加による摩擦抵抗の低減は車両用エンジン油では既に常套手段であるものの、添加剤の相互作用も考慮すると、船舶用と車両用とでは効果の現れ方が異なる可能性がある。

著者らは TPEO の処方系での添加剤効果を検討した。

a) FM による摩擦低減効果の検討

TE-77 往復動摩擦試験機による金属試験片を用いた摩擦試験において、オイルへ添加する FM の種類による摩擦低減効果の違いを調べた。

試験油の処方、FM 以外の添加剤 (金属系清浄剤、酸化防止剤ほか) と基油を共通にし、アルカリ価 (BN) を 20mgKOH/g とした。試験は次の 2 条件で行った

1) 動弁系を近似した条件：

試験片温度 100℃、しゅう動幅 15mm、しゅう動周期 20Hz、荷重 300N

2) ピストン上死点付近を近似した条件：

試験片温度 150℃、しゅう動幅 15mm、しゅう動周期 1Hz、荷重 100N

結果を図 7 に示す。

FM1 を添加すると FM 未添加油に比べて大きく摩擦係数が下がった。

図7 FM添加による摩擦低減効果
(TE-77 往復動摩擦試験機)

図8 清浄剤による摩擦特性への影響
(TE-77 往復動摩擦試験機)

これに種類の異なるFM2またはFM3を追加添加することで更なる摩擦低減を期待したところ、FMの種類によって低減効果がより向上する場合と阻害作用を示す場合のあることが判った。

FMの添加量によっても効果は異なり、FMの種類や量、組合せに最適化の余地がある。

b) 清浄剤の種類と摩擦特性

上述のとおり TPEO には多量の金属系清浄剤を使用することから、清浄剤の種類摩擦特性への影響を同じく TE-77 往復動摩擦試験機で検討した。

試験油に FM は添加せず、Ca 系清浄剤の種類のみを変え、アルカリ価 (BN) を 20mgKOH/g に揃えて比較した。結果を図 8 に示す。

動弁系近似条件でもピストン上死点近似条件でも、Ca-サリシレート (Ca-Sal.) < Ca-スルホネート (Ca-Sul.) < Ca-フェネート (Ca-Phe.) の順で摩擦係数が低くなり、清浄剤を構成する有機酸の種類によって摩擦特性が異なる結果となった。

特にピストン上死点付近では Ca-サリシレートの優位性が高い可能性がある。また、同じサリシレート系でも種類の違いによって摩擦特性が変わる可能性も示唆された。

Ca-サリシレート系の清浄剤は、そのアスファルテンに対する清浄性の高さから、C 重油焚き用の TPEO では主流となっており、また、機関の高出力化によって TPEO により厳しく求められるようになった高温清浄性や酸化安定性の観点でもサリシレート系が高い性能を示すことが知られている。

本実験ではこれに加えて、摩擦特性の観点でも Ca-サリシレートが有利であることを確認できた。

c) ベンチエンジン試験による処方検討

上述の実験結果を参考に、燃費に対するオイル処方の影響を実際のエンジンで確認した。

金属系清浄剤と FM との組合せ、および粘度を変えた試作油 a~h を用い、前出の WD300 エンジンでの燃費を比較した。試験結果を図 9 に示す。

図9 試作油での燃費評価(WD300 エンジン)

試験油の処方は、FM と清浄剤以外の添加剤は共通にし、アルカリ価 (BN) を 20mgKOH/g に揃えた。FM1~3 は前出と同じものを表す。

粘度 SAE30 で比べた場合、清浄剤を Ca-サリシレートのみとし FM1 と組合せたもの (試作油 e) で最も高い燃費改善が得られた (基準の SAE40 試作油 a 対比 1.9%)。

一方 FM1 と FM3 の組合せ (試作油 f) では、TE-77 試験機での結果と異なり、FM1 単独 (試作油 e) より燃費が悪化した。

実際のエンジンでも金属系清浄剤を含めた添加剤処方が燃費に影響を与えることを確認した。

更に試作油 e の添加剤処方で VM を添加して低粘度化したところ (試作油 g)、更に燃費は改善した (基準油対比 2.2%)。

ところで試作油 b と試作油 g を比較してみると、VM による低粘度化効果 (試作油 b→試作油 h) と添加剤改良の効果 (試作油 b→試作油 e) が相加的には現れていない。

低粘度油では油膜厚さが薄くなるため、部位によっては金属接触が増大し、その摩擦損失がマイナスに寄与したためと推察される。

また、VM 添加油ではより低粘度の基油を使用するため、添加剤の挙動が変わり FM 効果の発現度合いに影響している可能性も考えられる。

基油との組み合わせも含めた添加剤処方による燃費の差異についてはメカニズム解析が課題となるが、一定の燃費改善効果が期待できる処方を見出したことから、省燃費候補油として中速機関での評価を実施した。結果を事項で紹介する。

4. 中速機関実機による省燃費 TPE0 候補の燃費改善効果の検証

2 つの実機での検証結果を紹介する。

4. 1 自家発電機関による候補油の燃費評価

前項の WD300 エンジンで評価したのと同じ、試作油 a (基準油 SAE40) と試作油 c (候補油 SAE30) を用いて、自家発電機関 (Niigata16V32CLX, ボア 320mm, 出力: 5,700kW, 回転数: 600 min⁻¹) にて約 2,000h 運転し、燃費を評価した。

燃料消費量は燃料流量で計測し、燃料温度密度補正を行って燃料消費率(g/kWh)を算出した。また、データ解析は次のとおり行った。

1)夏季 (6~9 月) のため、冷却清水 (工業用水) による給気温度の調整が不能だったことから、給気温度毎に燃費率をプロットして比較した。

2)負荷影響を排除するため、発電電力量 5,310~

5,330kWh の範囲内のデータに限定した。

結果を図 10 に示す。

本評価において、試作油 c (候補油 SAE30) では試作油 a (基準油 SAE40) に比べて約 1%の燃費改善が確認された。

図 10 自家発電機関による候補油の燃費評価
(発電電力量 5,310~5,330kWh)

4. 2 中速試験エンジンによる候補油の燃費評価

更なる粘度低減や添加剤の効果を検証するため、中速試験エンジンでの比較評価を実施した。

4. 2. 1 試験条件

ダイハツディーゼル 3DK-20 エンジン (3 気筒, ボア 200mm, 出力 353kW, 回転数 900min⁻¹) (図 11) を用い、運転条件は表 2 のとおりとした。

図 11 試験エンジン (ダイハツディーゼル 3DK-20)

表 2 3DK-20 エンジンでの試験運転条件

負荷		85%	50%
燃料		A重油	
出力 (制御盤電力)	kW	280	163
機関回転数	min ⁻¹	891	896
潤滑油圧力	エンジン	0.5	
	過給機	0.48	
燃料油圧力	Mpa	0.25	0.28
燃料入口温度	°C	41	
給気温度	°C	50	41
潤滑油冷却器 出口温度	°C	54	

初めに負荷を 85% に上げ、運転が安定してから燃費を測定後、続けて負荷を 50% まで下げて再び安定後に燃費を測定した。各負荷で 10 分間 x7 回の燃料流量計測を実施し、平均の燃料流量から温度密度補正を行って燃料消費率(g/kWh)を算出した。

本試験にあたり留意・対策した点は次のとおり。

a) 試験の精度、再現性確保のための対策

- 1) 燃料の品質：全試験に同一ロット品を使用した。
- 2) 燃料流量測定：流量計は精度の高いポンプ式を採用した。また、外部要因による流量のばらつきを抑制する観点から、燃料配管の長さを短縮し、また燃料タンクの液面高さを一定範囲内に管理した。
- 3) 潤滑油の品質：配管のフラッシング不可部位を極力減らし、オイル交換時のフラッシングを 2 回実施して、前油コンタミ率を低減した (3% 未満)。
- 4) 環境変化の影響：1 日 1 試験で 20 日間以内に全試験 (8 回) を完了。毎試験同時刻に燃費計測した。
- 5) ピストン・ライナー等の部品：初期馴染みの燃費への影響を排除するため、新品への交換を避けた。

b) 低粘度化によるリスク回避のための対策

- 1) 油圧の確保：低粘度化による油圧低下レベルの推定が不確実だったため、プライミングポンプを大容量に交換し、機付ポンプのみで容量が不足した場合に補強できる体制とした。
- 2) 主軸受の焼き付き防止：油膜切れ発生による軸受での過熱検知のため、オイルミストディテクタを設置した。

4. 2. 2 試験対象油

本試験においても、前出の基準油 SAE40 (試作油 a) を基準とし、自家発電機関で評価した試作油 c と、その粘度を変えずに FM などの添加剤処方を改良した試作油 e、さらに VM を添加して SAE20 レベルまで低粘度化した試作油 g の 3 種類の候補油を評価した。評価油の粘度等を表 3 に示す。

表 3 3DK-20 エンジンでの燃費評価対象油

		試作油a SAE40 基準	試作油c SAE30	試作油e SAE30	試作油g SAE20
処方 基油		鉱油系			
粘度調整剤 (VM)		—	—	—	添加
添加剤		Ca-Sal. Ca-Phe. —	Ca-Sal. Ca-Phe. FM2	Ca-Sal. — FM1	Ca-Sal. — FM1
性状 動粘度	40℃	147.8	81.3	82.7	54.5
	mm ² /s 100℃	14.5	10.0	10.2	9.6
粘度指数		96	103	104	162
高せん断粘度	100℃	12.3	8.4	8.7	6.1
	mPa・s(10 ⁶ /s) 150℃	4.3	3.2	3.2	2.8

試験順序は、基準油①→基準油②→試作油 c→試作油 e→基準油③→試作油 g ①→試作油 g ②→基準油④とした (①～④は繰り返し回数を表す)。

4. 2. 3 試験結果

a) 試験の再現性

基準油での 4 回の燃費評価結果を表 4 に示す。

表 4 基準油での燃費結果 (再現性確認)

		1回目	2回目	3回目	4回目	平均
85% 負荷	燃料消費率(g/kWh)	231.1	230.1	230.3	229.3	230.2
	平均との差(%)	-0.40	0.03	-0.03	0.40	—
50% 負荷	燃料消費率(g/kWh)	255.5	255.0	256.0	255.4	255.5
	平均との差(%)	-0.02	0.19	-0.20	0.03	—

燃費は 85%, 50% 負荷ともに平均値±0.4% の範囲内となり、再現性は良好であった。また、本試験期間を通じ安定した状態で燃費評価ができたと考えられる。

b) 燃費評価結果

図 12 候補油での燃費評価 (3DK-20 エンジン) (85% 負荷時)

図 13 候補油での燃費評価 (3DK-20 エンジン) (50% 負荷時)

85%負荷, 50%負荷での燃費評価結果をそれぞれ図12, 13に示す。

試作油 c では Niigata16V32CLX での試験と同程度の改善率(85%負荷で1.4%)が得られ, 異なる機関での同等の燃費改善効果を確認できた。

試作油 e では試作油 c よりも改善傾向だったものの, 同一油の再現精度レベルの差異であり, 添加剤改良の効果は不明瞭である。試験機関の動弁系が転がりタイプであるため, FM 効果の寄与が小さい可能性も考えられる。

一方, 試作油 g (VM 添加 SAE20 油) では基準油対比で 85%負荷時に 3%以上, 50%負荷時には 5%以上もの燃費改善が得られた。

本試験機関では流体潤滑域での摩擦損失が大きく, 粘性抵抗の低減が効率改善に寄与したと考えられる。

注目されるのは, 負荷 85%時に比べ, 負荷 50%時の改善率が高くなったことである。これは負荷による摩擦損失の変化が小さく, かつ, 摩擦低減効果は負荷によらず維持されるため低負荷の方が省燃費寄与率が高くなるためと推察される。

c)その他の特記事項

オイルの低粘度化によって主軸受温度の低下傾向が認められた(赤外線放射温度計により簡易測定。データ省略)。クランクケース内のオイルミスト濃度の検知レベルも下がりこれを裏付けていた。Tellier ら⁴⁾もガス焚き機関で同様の報告をしている。これは, 熱損失や軸受への熱負荷の低減の観点からプラスの効果と考えられる。

また本試験では, SAE20 レベルの低粘度油を使用しても結果として機付ポンプのみで必要な油圧が確保でき, 総計 13h の運転の限りにおいては, 軸受, カム等に異常摩耗の兆候は認められなかった。

6. 終わりに

本稿では, TPEO の粘度特性や添加剤処方機関燃費への影響について, 著者らが実施した検討の結果を紹介した。

特に実機運転での検討においては, オイルの低粘度化による 3%以上の燃費改善を実証し, 中速機関でのエンジン油による燃費改善の可能性を示した。

船舶用エンジン油の低粘度化は航海中の機関の信頼性の観点から慎重を要する試みではあるが, 最近と同様の検討報告も散見されるようになっており^{4) 5)}, コスト削減, CO₂排出削減策として考慮しうるアプローチとして, 中長期的視野で取り組む価値のあるテーマと考える。

今後は耐久性を考慮した粘度設計や添加剤処方の検

討により, 実用化に向けた開発を進めていきたい。

参考文献

- 1) T.E.Tallian, ASLE Trans., 10, 4(1967)
- 2) トライボロジーハンドブック (2001) 養賢堂
- 3) CIMAC Guidelines for Lubrication of Medium Speed Diesel Engine 2nd. Ver. (2008)
- 4) Kathleen Tellier et al., 27th CIMAC Shanghai Paper No. 118, (2013)
- 5) Catherine AMBLARD et al., ISME Kobe 2011, D3-4

著者紹介

守田 洋子

- ・ JX 日鉱日石エネルギー株式会社
- ・ 中央技術研究所 滑油研究所

竹島 茂樹

- ・ JX 日鉱日石エネルギー株式会社
- ・ 中央技術研究所 滑油研究所

有本直純

- ・ JX 日鉱日石エネルギー株式会社
- ・ 中央技術研究所 滑油研究所

藤井 仁

- ・ 株式会社商船三井
- ・ 技術研究所 主任研究員

石田達郎

- ・ 株式会社商船三井
- ・ 技術研究所 研究員