

解説 1

近年の船用エンジン油を取り巻く環境と対応技術

中央技術研究所 潤滑油研究所 エンジン油グループ **守田 洋子**



1. はじめに

グローバル経済の成長は物流の量とエリア両面の拡大をもたらし、海運の果たす役割は年々大きくなっている。そのため船舶による輸送のあり方は、経済性のみならず、環境負荷の観点からも注視されるようになった。そのような状況において、船舶の推進力の一端を担うエンジン油の果たす役割は大きい。本稿では近年の船用エンジン油を取り巻く環境の変化と対応技術について主な事例を紹介する。

2. 船用エンジン油の種類と要求性能

2.1 船用ディーゼルエンジンの構造とエンジン油の種類

2ストロークのクロスヘッド型機関は、燃焼室とクランク室が「スタフイングボックス」と呼ばれる機構で分離されており、潤滑油は「シリンダ油」と「システム油」の2種類に分かれる。2ストローク機関は低速回転で1シリンダあたりの出力が大きく、主に残渣油(C重油)を燃料としてタンカー、コンテナ船等の大型貨物船の主機関に使用される。

4ストロークのトランクピストン型機関には、留出油(軽油/A重油)を燃料とする小型高速機関と残渣油を燃料とする中型中速機関があり、漁船やフェリーなどの主機関または発電機用で使用される。トランクピストン型では、シリンダとクランクを1種類の兼用オイルで潤滑する(本稿では「トランクピストンエンジン油; TPEO」と呼ぶ)(図1)。

システム油とTPEOは清浄化処理をしながら循環式で使用し、劣化状態をみて補給または交換を行うが、シリンダ油は全損式で、連続的な新油の注入と排油を行いながら潤滑する。

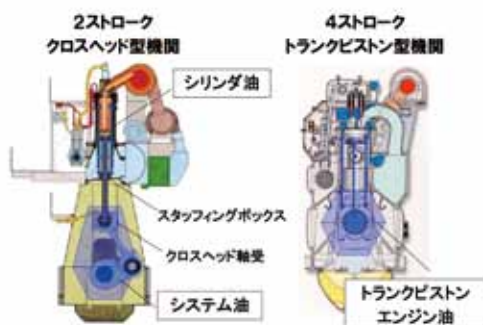


図1 船用ディーゼルエンジンの構造とエンジン油の種類

2.2 船用エンジン油の役割と要求性能

エンジン油の主な役割は、ライナ/ピストンリング間や軸受等の金属間摺動面を潤滑し焼付を防止すると同時にエンジン内の清浄性を保持することである。そのためには油自体の劣化を抑えて適正な粘度や添加剤の機能を維持するとともに、燃焼生成物等から発生するスラッジを分散させて凝集や部品への付着を防ぎ、デポジット(堆積物)の形成を抑える必要がある。船用エンジン油の役割と劣化機構を表1および図2に示す。

表1 船用エンジン油の役割と要求性能

機能部位	役割	要求性能	2ST	4ST
シリンダ部位	ライナ/ピストンリング間の潤滑	油膜形成能	シリンダ油	トランクピストンエンジン油
	ライナ/ピストンリング間の摩耗・焼付の防止	極圧性、酸化安定性		
	ライナ/ピストンリング間の燃焼ガスシール	シール性		
	リングやリング溝の清浄性維持	清浄分散性、酸化安定性		
	ライナ/ピストンリングの腐食防止	硫酸中和性		
ピストンクラウンの冷却	耐熱性			
クランク部位	軸受の潤滑	油膜形成能	システム油	システム油
	軸受の摩耗・焼付の防止	極圧性		
	軸受、クランクケース内の清浄性維持	清浄分散性、酸化安定性		
動弁系	カムの潤滑、摩耗防止	油膜形成能、極圧性		
補機	ポンプ圧の維持	油圧保持		
その他	清浄機による再生	耐水性、水分離性		
	低消費量	低蒸散性		

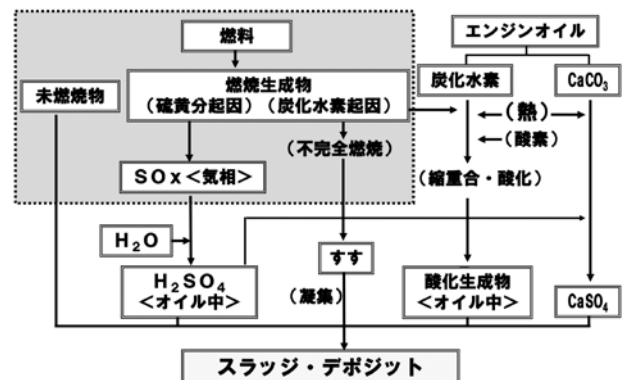


図2 船用エンジン油の劣化機構

特に、ライナ上部では燃焼の圧力や熱の影響を受けやすく、高圧・高温条件下での油膜保持性、清浄分散性が重要となる。また残渣油燃料を使用する場合は、燃料中

の硫黄分から生成した硫酸によるライナ/ピストンリングの腐食摩耗を防止するために酸中和能力が求められる。

酸中和は、スルホネート、サリシレート等の有機酸のカルシウム塩が炭酸カルシウムを取り囲みミセル構造をとった“金属系清浄剤”が担っており、炭酸カルシウムの量によって塩基価（アルカリ度）を調整する。特に、ストロークが長い2ストローク機関ではライナやピストンが燃焼ガスと接触する時間が長いいため酸中和能力は重要となる（図3）。

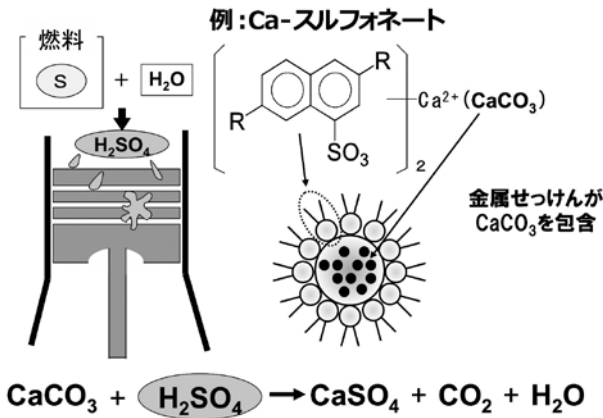


図3 金属系清浄剤による酸中和

船用エンジン油には共通規格がないため、汎用性の高い製品とするためには、エンジンのメーカーや型式による設計の違いや、使用する燃料の品質のバリエーション等に対応した幅のある性能が要求される。

3. 船舶輸送の効率・経済性の追及とエンジン潤滑環境の変化

3.1 エンジンの高出力化

国際物流の量とエリア両面の拡大は船舶の運搬効率の向上を求めてきた。1回の運搬量の増大と走行の高速化が必要となった結果、船は大型化し、エンジンは高出力化した。図4にシェア7割を占めるMAN Diesel & Turbo社の2ストローク機関の平均有効圧力の変遷を示す^{1) 2)}。

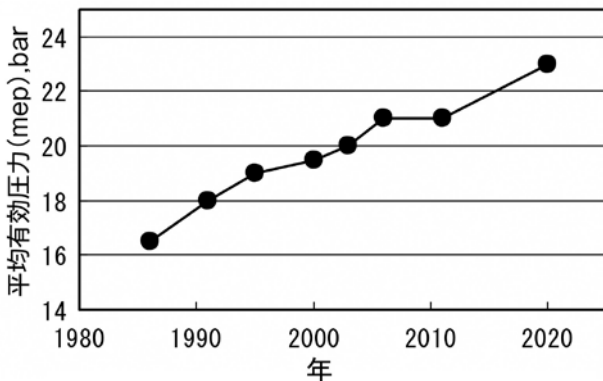


図4 MAN Diesel & Turbo社 2ストロークエンジンの平均有効圧力の変遷^{1) 2)}

平均有効圧力の上昇は燃焼温度の上昇に伴うライナ壁温の上昇やピストン/ライナ間の面圧の上昇を意味し、エンジン油はより厳しい高温高压にさらされることになる。

また、高出力化のためにストローク長/ピストン径の比率を高める“ロングストローク化”が近年のエンジンの特徴の一つであり、昨年MAN Diesel & Turbo社は比率4.65-5.0の超ロングストロークエンジンを市場投入した³⁾。ストロークが長くなると、潤滑面積が拡大し、オイルには十分な拡がり性が求められる。

3.2 オイル消費量の低減

最近の2ストローク機関の多くにシリンダ油の高度な注油システムが導入されている。

エンジン油の費用は、例えば大型タンカーなら数千万円/年にのぼる場合もあり、注油量を最適化して不必要なオイル消費を避けることの利が大きいためである。

代表的な注油システムにはSIP (Swirl Injection Principle)⁴⁾、アルファ注油システム⁵⁾、パルスジェット注油システム等があり、高圧噴射でオイルをライナ表面に効率よく行き渡らせ、噴射弁の電子制御等により負荷変動等に応じた最適な量で注油ができる仕組みになっている。これらのシステムとエンジン設計の改良によって、シリンダ注油量は徐々に低減されてきている（図5）⁶⁾。

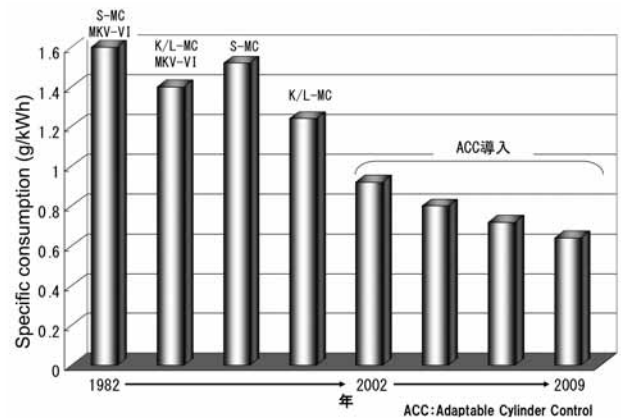


図5 MAN Diesel & Turbo社 MC-エンジンの潤滑ガイドラインの変遷⁶⁾

このようにシリンダへの注油量が低減されるとオイルに対する熱負荷が高まり、酸化による粘度上昇から耐焼付き性の低下が懸念される^{7) 8)}。また、未燃焼物、すすや硫酸の混入量もオイルに対して相対的に増加することとなり、オイルの劣化、すなわち清浄分散能力や中和能力の消耗が速くなる。

一方、4ストローク機関においては、ピストン上部への“アンチポリッシングリング”の装着によりオイルの掻き揚げ損失を防止してオイル消費を抑制することが標準となりつ

つある⁹⁾。ところが循環式で使用する TPEO の場合、オイル消費量の低減は補給の減少を意味し、やはりオイルの劣化が速くなる。

3.3 潤滑環境の苛酷化に対応したエンジン油の性能向上

上述のような潤滑環境の苛酷化に際してオイルへの負荷を緩和するために、エンジン側ではピストンのハイトトップランド化による熱負荷の低減やリングの材質の改良などの対策をとってきた^{10) 11)}。一方オイルに対しても、厳しい高压高温下に少油量で従来と同等以上の性能を発揮するべく大幅な改良が迫られた。

当社現行品の性能は 10 年前と比較して格段に向上しており、主要他社品においても同様の傾向が確認されている。シリンダ油の高温清浄性と高温酸化安定性のここ十数年での変化を先の報告¹²⁾に最新データを加えて図 6、7 に示した。

また当社は、TPEO においても清浄性やすす分散性を向上させた改良品を開発した。エンジン試験において改良品の優れたピストン清浄性が確認されており、市場でも問題なく使用されている (図 8)。

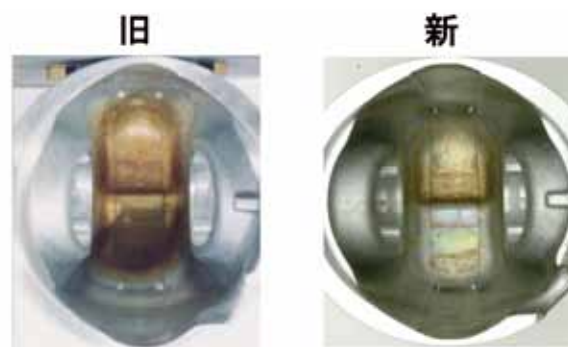


図 8 トランクピストンエンジン油 (社品) のピストンアンダークラウン清浄性

4. 排ガス規制の導入

4.1 燃料中の硫黄分規制への対応

(1) 規制の動向

国際海事機関 (IMO) の主導する「船舶による汚染防止のための国際条約: MARPOL 条約」の付属書 VI として、2005 年から「船舶の機関から発生する窒素・硫黄酸化物等 (NO_x, SO_x, PM) の排出規制」が発効している。中でも SO_x 規制は燃料の硫黄分濃度規制によるものであり、エンジン油に与える影響が大きい。

硫黄分濃度規制は、上限を特に低く設定する沿岸部の指定海域 (ECA: Emission Control Area) と一般海域に区別して運用されており (2011 年現在で ECA は 1.0 mass%、一般海域は 3.5 mass%)、今後段階的に上限値が下げられる計画である。ECA は EU 諸国や北米、日本沿岸を中心に拡大される見込みであり、最終的に全海域で 0.5 mass% 以下となるまでは高硫黄域と低硫黄域が混在することになる (図 9)。

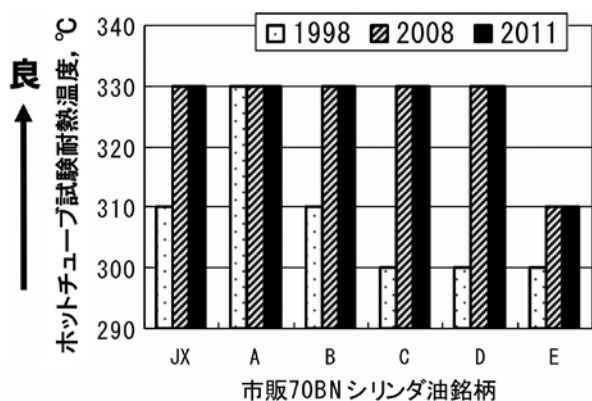


図 6 市販シリンダ油の高温清浄性評価

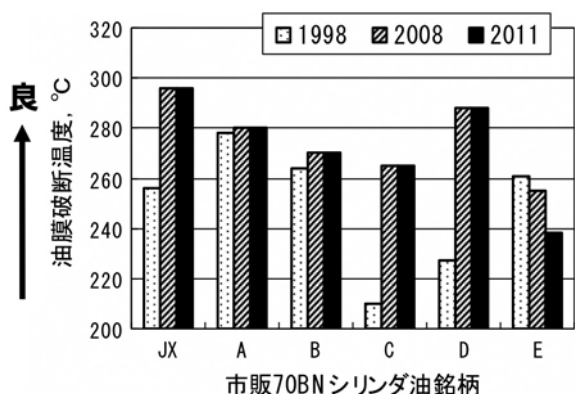


図 7 市販シリンダ油の高温酸化安定性評価

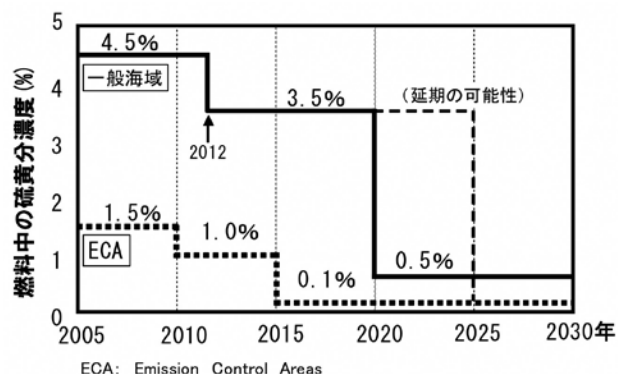


図 9 MARPOL 条約における船舶用燃料の硫黄分濃度規制

(2) 燃料の低硫黄化に対応したシリンダ油の開発

前述のとおりシリンダ油と TPEO には燃料中の硫黄分から生成した硫酸を中和する役割があるが、燃料硫黄分の高低によりエンジン油の適切な塩基価が異なる。

高硫黄に対してはオイルに十分な塩基価がなければピストン/ライナで酸腐食摩耗のリスクが高まり、一方、低硫黄に対して塩基価の高いオイルを適用すると余剰の炭酸カルシウムがピストンのトップランドやリング溝に堆積して硬化し、ライナポリッシングを発生させ、最悪は焼きつく場合もある (図 10)¹³⁾。

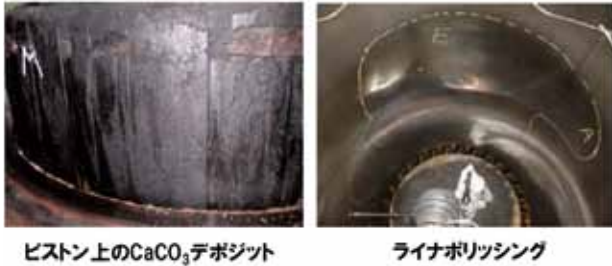


図 10 低硫黄燃料に対する高塩基価エンジン油使用時のトラブル例¹³⁾

このため、エンジンメーカーは燃料硫黄分濃度とオイル塩基価の組み合わせについて各々のガイドラインを提示している (表 2)¹⁴⁾。

表 2 エンジンメーカーのシリンダ油選定ガイドライン¹⁴⁾

Fuel sulphur level	MHI	Wärtsilä	MAN Diesel
< 1%	BN 70 Operation on optimised feed-rate as guided by MHI.	BN 40-50	BN 40-50
1.0 - 2.0 %		BN 40-50 or ensure feed-rate is optimised as guided by Wärtsilä	BN 40-50 or ensure feed-rate is optimised as guided by MAN Diesel
> 2 %		BN 70 Normal optimised feed rate operation	BN 70 Normal optimised feed rate operation

IMO による船用燃料中の硫黄分のモニタリング結果によれば、現在の硫黄分の平均は約 2.4% であり¹⁵⁾、約 3 割が 2% 以下となっている¹⁶⁾。低硫黄燃料に対応するため、既に複数メーカーが 40BN 油をラインアップしており、当社でも低塩基価油の開発に着手した^{17) 18)}。

酸中和を担う金属系清浄剤はデポジットの清浄分散など他の機能も担うため、単純に 70BN 油の清浄剤を減らして塩基価を下げると性能が不足する。そこで清浄剤の種類や配合量の最適化、酸化防止性の強化等の改良を行い、70BN 油と同等で既存 40BN 油のトップクラスの高温清浄性を保持するオイルを完成した (図 11)。同油は現在 (2011 年 12 月) 実船試験を実施中であり、近々市場へ提供できる見込みである。

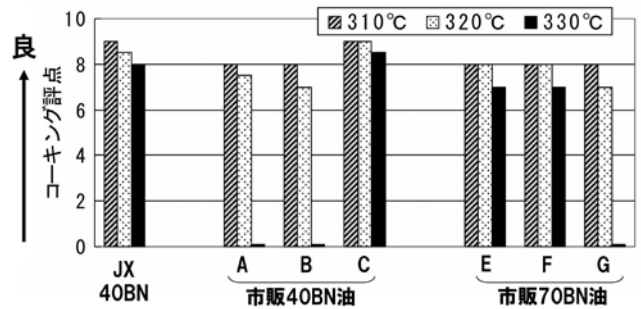


図 11 ホットチューブ試験によるシリンダ油の高温清浄性の比較

ところで一航海で燃料硫黄分の規制値が異なる海域を航行する場合、燃料とともにオイルの切替も必要となり、煩雑な手間に加え、タンクや供給ラインの複数確保など設備面でも負担が大きい¹³⁾。従って全海域が低硫黄化するまでの過渡期には、高硫黄低硫黄の両燃料に対応した「兼用シリンダ油」へのニーズが高まることが予想される。

当社では二通りのコンセプトで兼用油を試作検討中なのでここに紹介する。

ひとつは、塩基価を 55BN に低減して炭酸カルシウム量を抑えると同時に中和速度を高めて高硫黄にも適応させたものである。中和能力は新油に一定量の硫酸を加えて発生する CO₂ のガス圧を測定して評価した (図 12)。ガス圧の立ち上がり開始時間は中和の反応速度を示し、ガス圧の上限値は中和容量を示す。他社兼用油 (57BN)¹⁹⁾ も当社とは異なる方法で中和能力を高めたとされているが、この評価条件では当社品がより優れた中和能力を示した。

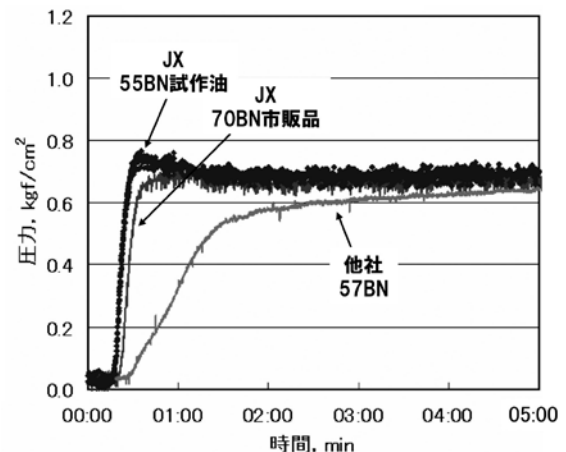


図 12 高硫黄低硫黄燃料兼用シリンダ油 (55BN) の中和速度比較

もうひとつは、高塩基価 70BN を確保したままで、低硫黄燃料に対して炭酸カルシウムが余剰となる場合に生成するデポジットを軟質化し、堆積を抑制することによりライナポリッシングのリスクを低減するものである。

同試作油について硫黄分 10ppm の軽油焼きエンジン試験を行い、ピストンへのデポジット堆積レベルを評価した結果を図 13 に示す。70BN 試作油は 40BN 油と同等に堆積が抑えられた。

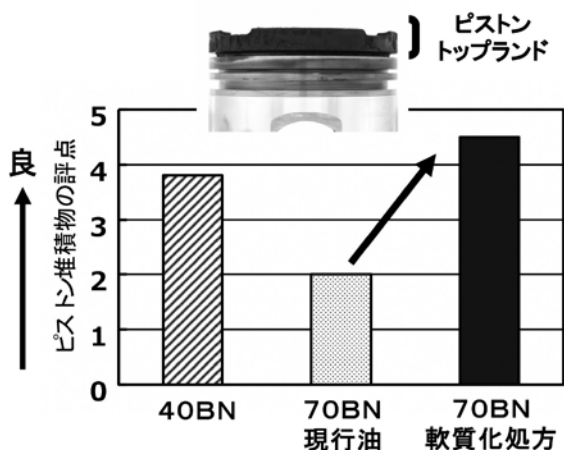


図 13 70BN 兼用油の堆積物評価結果：軽油焼き (S:10ppm)

4. 2 CO₂ 排出規制への対応

(1) 規制の動向

船舶運送は今後も増加を続け、その CO₂ の排出量は年率 3% の割合での増加が予想されている (図 14)。

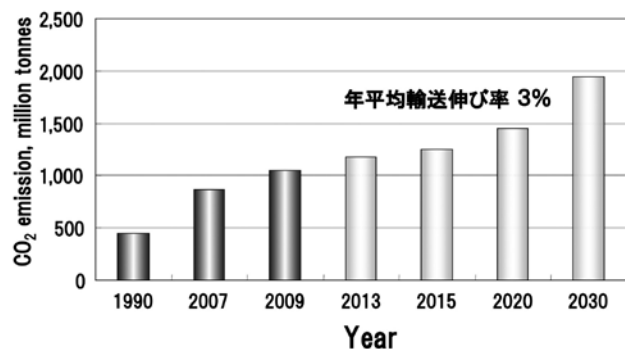


図 14 国際海運からの CO₂ 排出量

2011 年 7 月、MARPOL 条約は船舶からの CO₂ 排出規制を盛り込む改正を採択し 2013 年からの規制導入が決定した。

具体的には、燃費から算出する CO₂ 排出量を「エネルギー効率設計指標 (EEDI: energy efficiency design index)」として、その基準値を設けて新造船を規制するとともに、運行者に対しては「エネルギー効率マネジメントプラン (SEEMP: ship energy efficiency management plan)」の策定を義務付けるものである。図 15 に EEDI 規制の例を示す。

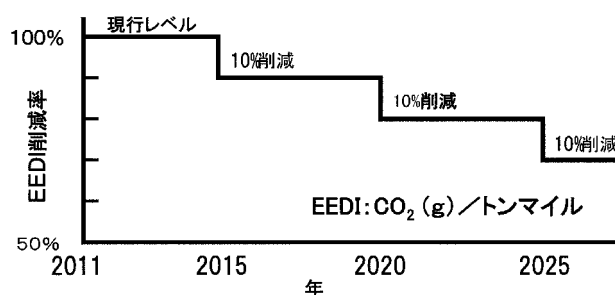


図 15 新造タンカー (20,000DWT 以上) に対する EEDI 規制

(2) 省燃費油の開発

船舶輸送の省燃費化には、エンジンの改良、プロペラや船体デザインの最適化などの様々な側面からエンジンメーカー、造船会社、船主がそれぞれに取り組んできたが²⁰⁾、エンジン油の改良による燃費改善はこれまでほとんど検討されてこなかった。

このほど当社では 2 ストローク機関でシリンダ油、およびシステム油によって燃費を低減させる方法について検討したので紹介する²¹⁾。

シリンダ油での省燃費は、図 16 に示すようなシリンダの潤滑環境の特徴を考慮し、粘度指数向上剤 (VII) として機能するポリマーの使用によってピストン/ライナ間の摩擦損失を低減するものである。すなわち、ピストン中心部の摺動速度が速くなる部分ではポリマーが高せん断を受け一時的に粘度が低下して摩擦抵抗が減り (図 17)、一方、高温高圧環境で油膜が薄く金属接触が起りやすい上死点付近では、高めの粘度を確保して金属摩擦を抑えるという粘度設計を特徴としている。

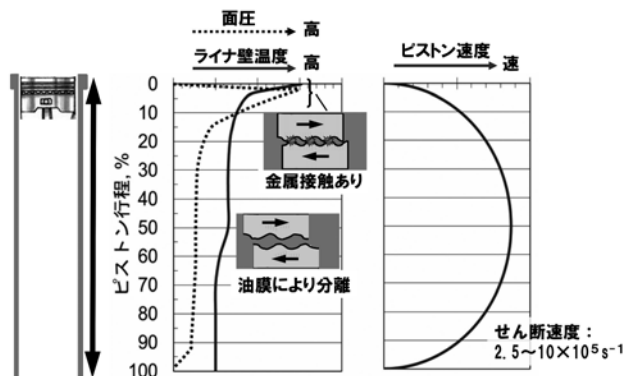


図 16 シリンダにおける潤滑環境の特徴

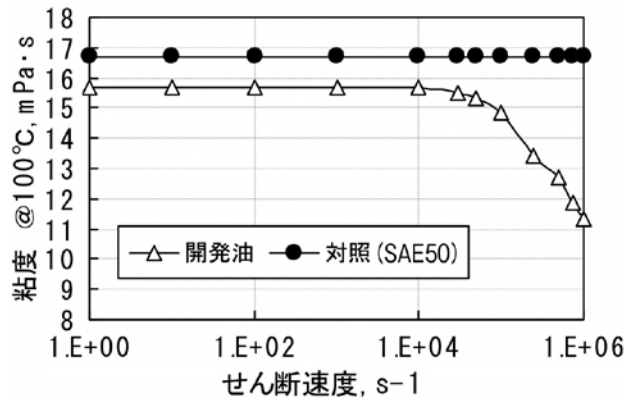


図 17 省燃費シリンダ油のVIIによる粘度低減

さらに、システム油でも粘度指数向上剤により低粘度化を図った。ただし、軸受の潤滑に必要な油膜厚さを維持できる粘度に調整して信頼性を確保している。

両油の省燃費性能をベンチディーゼルエンジン(赤阪-MHI-3UEC37LA)で評価したところ、改良シリンダ油では一般的な粘度SAE50のオイルに対し約0.5%、改良システム油では一般的な粘度SAE30のオイルに対し約0.8%の燃費低減がそれぞれ確認できた。改良シリンダ油については現在(2011年12月)実船試験中であり、改良システム油についても実船での試験を予定している。

5. 基油の需給変化への対応

エンジン油に使用する鉱油系基油は精製度によって表3のとおり分類されるが、船用エンジン油ではグループIタイプを使用するのが一般的である。多量に添加する清浄剤の溶解に加え、燃料から混入する未燃アスファルテンや燃焼生成樹脂等の溶解も必要なため、芳香族分を比較的多く含むグループIでなければ溶解性が不足することが主な理由である。

表3 アメリカ石油協会(API)基油カテゴリー

分類	硫黄分%		飽和分%	粘度指数	芳香族分
グループI	>0.03	and/or	<90	80-90	↓ 低
グループII	≤0.03	and	≥90	80-119	
グループIII	≤0.03	and	≥90	≥120	
グループIV	ポリ-α-オレフィン (PAO)				0
グループV	以上以外 (エステルなど)				0

ところが、基油のマーケットにおいて将来的にグループIが不足することが予測されている。基油需要の約4割を占める自動車用エンジン油でグループII以上の高度精製油が使われることや、新設プラントではコスト不利のためグループIを製造しないといった事情で供給がグループII以上にシフトするためであり、具体的な試算例もある²³⁾。

シリンダ油で添加剤系を変えずに基油をグループIIに

変更すると高温清浄性は明らかに低下した(図18)。またTPEOのグループII化については、混入したアスファルテンが溶解されずに凝集しブラックスラッジとなってオイルフィルターを閉塞したり、ピストンに固着して冷却を阻害し破損を引き起こすといった重大な不具合が懸念されている。

グループII化に対応した新たな添加剤処方などの報告も複数あるが^{22) 23) 24)}、グループII船用エンジン油の実用実績はまだ限られたものと推測され、様々な運転条件下での清浄分散性は未検証な段階である。基油のグループII化は対処が必要となる可能性のある今後の課題のひとつである。

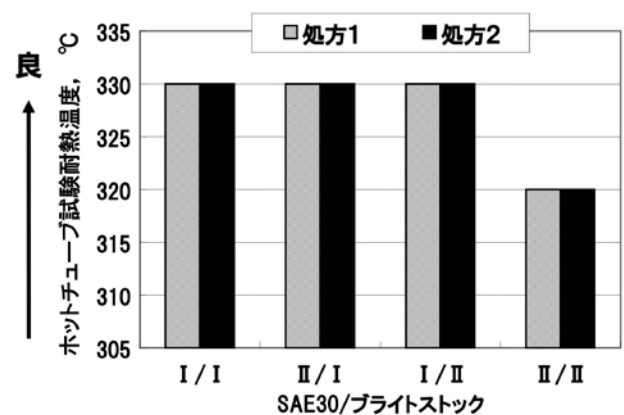


図 18 シリンダ油の高温清浄性への基油の影響

6. おわりに

以上にご紹介したとおり、近年の船用エンジン油を取り巻く環境は様々な要因で大きく変化し、それにつれてオイルへの要求性能も変化している。

燃料の硫黄分規制について補足すれば、最終的に全海域で低硫黄(0.5%以下)に規制されるのか、あるいはスクラバー等による排ガス処理で対応が可能となって高硫黄燃料も併用され続けるのかは、今後の国際的な協議や技術進歩次第で流動的な状況である。また、CO₂排出削減の施策として新規燃料(LNG/LPG、バイオ燃料等)の採用の動きもあるなど、エンジン油の使用環境はますます複雑に多様化することが予想される。

船用エンジン油において常に汎用性の高い性能レベルを維持し続けるためには、広い視野を持って開発研究に臨んでいく必要がある。

— 引用文献 —

- 1) MAN Diesel 社技術資料「Large Marine Diesels in Challenging Times」
- 2) HERCULES Project ホームページ
- 3) Motorship July/August 2011

- 4) T. Jensen, 日マリ学誌, 37-2 (2002), 41-50
- 5) 田中, 日マリ学誌, 37-2 (2002), 32-40
- 6) Henrik ROLSTED ら, ISME 2011, Kobe
- 7) Lancon ら ISME 2009, Busan
- 8) Arimoto ら ISME 2009, Busan
- 9) ニュースアカサカ No.108、2006.7 技術解説
- 10) Aeberli ら CIMAC Congress 2001
- 11) Egeberg ら CIMAC Congress 2001
- 12) 竹島茂樹ら, 日マリ学誌, 44 (2009), 86-92
- 13) Operation on Low-Sulphur Fuels MAN B&W Two-stroke Engines
- 14) Guidelines for diesel engine lubrication NO.26 2007
Impact of low sulphur fuel on lubrication of marine engines
- 15) Motorship May 2011
- 16) ClassNK 2008年6月 船用燃料重油の低質化対策指針
- 17) 有本直純 ENEOS Technical Review 第49巻 第3号, 2007
- 18) T.Sasaki,T.Moriwaki,T.Noge,S.Shirahama,N.Arimoto, 25th CIMAC congress Vienna, (2007), Paper No.161
- 19) Lancon ら CIMAC Congress 2010 Paper No.98
- 20) 第2回 省エネ船シンポジウム資料 2011.7
- 21) Takeshima ら ISME 2011, Kobe
- 22) Boons ら CIMAC Congress 2007 Paper No.91
- 23) Watts ら CIMAC Congress 2007 Paper No.144
- 24) Mayhew ら CIMAC Congress 2010 Paper No.76