船用大型2サイクル機関のシリンダ油ドレン挙動に基づく機関管理技術

羽根田 誠 永井 義和 森脇 利統
矢田部 孝 菅 原 広

Supervision of Marine 2-Stroke Diesel Engine based on Analysis of Cylinder Oil Drain.

By Makoto Haneda Yoshikazu Nagai Toshinori Moriwaki Takashi Yatabe Hiroshi Sugawara

As marine diesel engine output increases, the combustion chamber will be put under ever much strain. Recently, the contamination of Bunker Fuel Oil by FCC has seriously damaged moving parts and wear and tear of them have reportedly affected the safe navigation of ships. In order to know the wear and tear of moving parts within the combustion chamber, inspection and maintenance are carried out at anchor; if wear and tear could be studied on board at sea, such data could improve engine operation and help to prevent engine troubles. Let us introduce the skill of continuous monitoring and analysis of cylinder oil drain from large-output marine diesel engines. Consequently, a reduction in the amount of cylinder oil used will contribute to cutting costs.

1. はじめに

海運による大量輸送に伴い、1990年代は船舶の大型化が推進されると共に、推進機関の大型化が進んだ。しかしながら大型2サイクルディーゼル機関では、ストロークの長大化や単シリンダ当たりの高出力化、並びにシリンダ注油量の削減や使用する燃料油の粗悪化に伴う機関損傷事故も多発したが、機関損傷を未然に防止する手立ては皆無であった。

機関損傷を未然に防止する為にシリンダ油ドレンの挙動を調査し、ドレンとして排出される余剰シリンダ油を解析することにより、運転中の機関コンディションを推測、判断する手法について技術資料として参考に供する。

2. シリンダ油新油性状、及び脱硫黄化燃料対応

シリンダ油は、船用ディーゼル機関で消費される潤滑油の中で、全体の消費量/潤滑油費の8割以上を占める。また、近年における、1気筒当たりの出力増大に伴う高負荷機に対応する清浄性、酸中和性及び熱安定性の維持確保、油膜の保持性能が要求されている。

各油社共に、機関の大型化への対応として、シリンダ油の改良に取り組んでいると考えられるが、弊所の

分析結果では、添加剤として含有される金属量において僅かな差異が確認されている程度であり、その他の分析結果も1990年代の新油分析結果と大差が無いことから、添加剤に若干の変更が加えられた程度の改良に留まっているものとする。

傾斜熱板試験に於いて、従来、拡がり性を重視したシリンダ油が散見されたが、至近の試験結果では各社共に拡がり性が無く、むしろ油膜厚さを重視する傾向にある。

船用ディーゼル機関の潤滑油は、エンジン内部の摩擦を防ぐと同時に、燃料中の硫黄分を中和するなどの重要な役割を担っている。潤滑油の市場は世界の主要オイルメジャーを中心に国内石油各社が対応しているが、近年、国際海事機関（IMO）の海洋汚染防止条約（MARPOL）で大気汚染防止が規定される中、潤滑油が占める役割も大きく、特に国際航路に含まれる欧米の規制動向に船主をはじめ業界が注目している。

油社によっては2008年初旬、燃料油の広範囲な硫黄含有量に対応可能としたマルチ型シリンダ油（BN:57）を市場投入し、国内で初めて建造中の新造船に供給した。船舶からの大気汚染防止に向け燃料油の脱硫黄化が検討される中、欧州では2007年11月に地域的に厳しい規制を完全導入、船主は航行区域により、2種類の燃料油を併用するなどの対応も求められ

ており、シリンダ油もそれに対応した動きが求められている。大気汚染をめぐるのは、近年、対策の動きが加速し、窒素、硫黄化合物の抑制へ主機の技術開発は勿論のこと、燃料油や潤滑油も対策が課題となっており、今回潤滑油で先陣を切ったかたちとなった。

今回開発された製品は2ストロークエンジン用シリンダ油であり、燃料油に含まれる硫黄分に対する規制が強化されるなか、硫黄含有量 0.5 % ~ 4.5 % 間での範囲の船用燃料油に使用できるものである。^{*(1)}

シリンダ油については、機関の高出力化、高効率化、燃焼圧力の上昇、面圧・すべり速度の上昇、ピストン・シリンダライナー熱負荷の上昇など、過酷な条件が要求される上、環境問題に関わる NO_x、SO_x、PM 等排気ガスの規制への対応が必要となる中で、その機能を十分に発揮できるものでなければならない。

70 BN のような高塩基価シリンダ油で潤滑しているときに、低硫黄燃料を使用するとアルカリ脆化による腐食が発生しやすい事が報告されている。これはシリンダ油中の余剰な酸中和成分が炭酸カルシウムとなってピストンランドに硬いデポジットを形成し、シリンダライナー表面の油膜を破壊するためと考えられている。現在、燃料硫黄分が 1.5%以下の場合、40 BN クラス、それ以外の場合、70 BN クラスの使用が推奨されている。

弊所では、従来の BN 70 シリンダ油と、BN 40 の低硫黄燃料対応シリンダ油とを、熱安定性、清浄性、耐焼付性、酸中和速度、酸化安定性に関する性能の比較を行ったところ、以下の結果を得た。

- (1) 熱安定性 (耐熱性) ホットチューブテスト
 - * 市場低 (40) BN、及び市場 70 BN シリンダオイルはほぼ同等の耐熱性を有する。
 - * 金属系清浄剤フェネートと酸化防止剤が耐熱性を向上させる。
 - * 70 BN と低 BN シリンダオイルとの熱安定性に関する差は BN の差によるものではなく、その添加剤の組成にある。
- (2) 清浄性
 - * 市場低 BN シリンダオイルは市場 70 BN と同レベルの清浄性を示す。
 - * 金属系添加剤フェネートが清浄性を向上させる。
 - * 清浄性についても基本的には添加剤組成の差によるもので、アルカリ価の差によるものではない。

- (3) 耐焼付性試験 (四球磨耗試験) 市場 70、低 BN & 試験用 シリンダオイル

* 試験温度が室温の場合は市場低 BN と 70 BN シリンダオイルの耐スカuffing 性については殆ど差が見られない。試験温度が室温の試験法では、市場低 BN シリンダ油と 70 BN クラスシリンダ油の耐スカuffing 性の違いははっきりしない。しかし試験温度が 200℃の試験法では、70 BN クラスシリンダ油の方が 40 BN クラスシリンダ油よりも耐スカuffing 性が高い傾向にある。これは、塩基価を高める為に、金属系清浄剤に炭酸カルシウムが使用されているが、特に高温での耐焼付性を高めている為と考えられる。しかし、市場低 BN シリンダ油の耐焼付性に問題は発生していない。この試験においては市場低 BN シリンダ油の耐焼付性レベルがあれば実用上問題ないと考ええる。

- (4) 酸中和速度分析試験用

* 無灰分散剤の添加量が多い程、中和速度が速いと言われている。しかし、無灰分散剤の濃度が大きく異なるにも拘らず、相違は見られなかった。

* 酸中和速度はスルフォネートの炭酸カルシウム量に比例していることが確認できた。

* 無灰分散剤は耐熱性、清浄性に効果はない。

3. シリンダ油船上ブレンダーシステム

低硫黄燃料油の対応策として、船上で適正な塩基価のシリンダ油を製作する装置も開発されている。使用中の主機システム油の一部を抜き出し、この使用油に添加剤を調合することにより、要求される塩基価のシリンダ油を製作する装置である。使用する燃料油の硫黄含有量に適合する塩基価のシリンダ油をタイムリーに製作することにより、複数銘柄のシリンダ油を船上に保管することが不要となる。また、本ブレンダーシステムの導入により、主機システム油は定期的に更油されることになる為、システム油は良好な性状を維持し、クランクケース内も清浄な状態を維持することが出来る。更に、シリンダ油供給に関わるコストの削減効果が期待されており、これはシリンダ油とシステム油の値差が大きい程、その効果も大きくなる。

弊社で実施したブレンド装置の実機検証、及びブレンドしたシリンダ油の分析結果から、以下のことが言

える。

(1) ブレンド装置の構成、及び操作は非常にシンプルで、システム油と調整済み添加剤を容易にブレンドしてシリンダ油を製造することができることを確認した。タンクレベルを検出して自動発停する等複雑なコントロールも装備している。ブレンド装置、及び製造したシリンダ油を確認するための卓上型蛍光 X 線の操作には特別な訓練は必要なく、船上においても容易に取り扱えるものと考ええる。

(2) 各種試験結果を総合して、ブレンド装置で製造したシリンダ油は、市販シリンダ油の性状とほぼ同等の性能を有していると判断する。ホットチューブ試験においては耐熱性に問題の無い結果を示したが、動粘度が市販のものと比較して低い値を示していることと、パネルコーク付着量試験結果では、弊社シリンダ油管理基準値を超えており、使用する場合には注意が必要である。

動粘度に関しては市販のものと比較して明らかに低い値を示すが、実際の主機関で使用される雰囲気、ライナー壁温度は、計測動粘度の温度よりはるかに高い温度であり、実際の使用温度において動粘度の差は殆んどなくなるために、大きな影響を与えないと考えられる。

(3) 費用対効果

主機システム油の新陳代謝が促進されれば、システム油は常にクリーンな状態を保つことになり、良好な機関コンディションが維持され、燃費の削減にも繋がる可能性はあるが、現状のシリンダ油とシステム油の値差では、大きなメリットは期待できず、システム油と添加剤の値差が大きくなればコストメリットはより少なくなる。

(4) 今後の課題

- ① システム油中に顕在する夾雑物の除去（実際の使用油は金属粉や燃焼残渣物などの夾雑物が多く含まれている場合もあり、耐熱性能や耐荷重性能に影響を及ぼす可能性もある。船上で当該装置が継続して使用されればシステム油の汚れは殆んどなくなるため、汚れによる製造シリンダ油の性能低下は無いと思われるが、本船上で長期間使用されているシステム油に添加剤を混合して製造したシリンダ油の性状を確認、検証する必要があると考える）
- ② 性状が均一なシリンダ油製造の可否・安定供給
- ③ ブレンド油の耐熱性、清浄分散性
- ④ 添加剤、システム油の安定的な供給の可否

⑤ 低粘度に関するエンジンメーカーの補償

⑥ ブレンド装置、及び卓上蛍光 X 線分析装置故障時の対応

(5) 装置導入の可能性

当該ブレンド装置を開発した海運会社では既にコンテナ船4隻に搭載して4,000時間の実船検証中であり、2,000時間経過において問題は発生していないことが報告されている。更に検証を重ね、エンジンメーカーから補償が得られ、且つ、今後、コストメリットが確認できれば、本装置の普及も期待できる。

従来、各油社が供給するシリンダ油の動粘度 (@40℃) は 200 ~ 230 cSt 前後の範囲にあるが、ブレンドしたシリンダ油は 120 ~ 140 cSt となっている。シリンダ油に関わる適正粘度の見直しについても、業界の動向が注目されるところであるが、上記のコンテナ船4隻に於けるブレンド装置の検証結果如何では、今後、シリンダ油精製にも影響を与える可能性もあり、シリンダ油の販売価格に反映されることも期待できる。

4. 機関型式、注油方式の違いによるシリンダ油ドレンの挙動

4-1 各実験船における挙動

【A コンテナ船】主機型式 : MHI 9RTA 96C

サンプル : 往航(東京~Los Angeles)

復航(Oakland~東京)

注油方式 : SIP 注油方式

注 油 率 : 往航 1.06 g/ps/hr

復航 1.04 g/ps/hr

往航、復航に使用していた燃料油の硫黄分は 3.12%、で、残存 TBN は各シリンダ共にほぼ同じ値(約 40~50)を示しており、最低 37.2mgKOH/g、最高 50.9mgKOH/mg であった。

シリンダ油ドレンの分析による Fe 濃度については約 12ppm 以下の低い値で推移しているものの、各シリンダ共に復航のほうが、Fe 分が高い傾向にある。残存カルシウムにおいては往航、復航に差はなく約 20,000ppm でほぼ一定で推移している。

【B コンテナ船】主機型式 : DU 11RTA 96C

サンプル : 往航、復航

注油方式 : 従来注油方式

残存BNについて、往航、復航共に各シリンダにばらつきが見られ、またBNの値は20~30と低い。Fe濃度については往航については12~45ppmでシリンダによりばらつきがあるが、復航は各シリンダ共に10ppm前後で推移している。

【C油槽船】主機型式：Sulzer 7RTA84T

サンプル：往航(日本~PG)

復航(PG~日本)

注油方式：蓄圧注油方式

注油率：往航 1.18 g/ps/hr

復航 1.20 g/ps/hr

他船と比較すると最も残存BNが低い(25~30)ものの、シリンダドレン中のFe濃度は15~20ppm、Ca分は25,000ppm前後で推移している。

【D油槽船】主機型式：MHI 7UEC85LS II

サンプル：往航(日本~PG)

復航(PG~日本)

注油方式：蓄圧注油方式

注油率：往航 1.51 g/ps/hr

復航 1.29 g/ps/hr

残存BNは往航、復航に差は見られず、共に新油BN70に対し50前後を維持しており高い値を示している。清浄分散剤として添加されているCaの残存量も他船と比較して高い値を示しており、CaSO₄、CaCO₃の発生が危惧された。なお、使用されている燃料油の硫黄分は往航3.13%、復航3.14%でありCCAIについては約830であり燃焼性、着火性等特に問題ない燃料油である。

4-2 シリンダ油ドレンに含まれるFe濃度と残存アルカリ価の関係

シリンダ油ドレン中に含まれる夾雑物としては、主に燃焼残渣物(硫酸カルシウム、炭酸カルシウム等)やシリンダ油の変質、劣化したレジン質、燃料油の未燃分(触媒粒子を含む燃料成分)、並びにピストンリング・シリンダライナの摩耗粉(Fe、Cr等)が挙げられる。特にFe粉は機関運転中にピストンリングとシリンダライナの摺動面から絶えず発生しており、両者の摩耗状況を推測する要素のひとつである事は言うまでも無い。更に、潤滑油性状について捉えるならば、シリンダ油ドレンとして排出される潤滑油は強酸であってはならず、摺動面全体にわたりアルカリ性が保たれている事を保証する為にシリンダ油ドレンの残存アルカリ価が30mg/KOH/g以上を示す事が望ましいと言われているが、実船を対象とした計測においては30mg/KOH/g以下となった場合においても異常を認めた

事例は無い。データから見る限り、シリンダ油ドレン中のFe濃度と残存アルカリ価の関係は、初期馴染み運転終了後の通常運転状態では、残存アルカリ価が低下するとFe濃度が増加する傾向にある事が明確に示されている。一般的にはピストンリング折損やシリンダライナの異常摩耗時にブローバイ気味となり、シリンダ油が燃焼残ガスと激しく接触する状況により、酸中和の為にアルカリ成分がより消耗される為シリンダ油ドレン中の残存アルカリ価が低下するものと推測される。尚、機関使用状況、機関メーカー、型式、並びに使用シリンダ油の性能により、若干の差は生じる事が予想される。

実船を対象とした定期的なシリンダ油ドレン分析において、ピストンリング、及びシリンダライナの目視点検等を実施した際の摩耗状況とFe濃度の分析結果を照らし合わせると、金属分析においてFe濃度が0~100ppmの範囲で推移する場合はシリンダライナが適正な摩耗状況にあると考えられ、適正濃度である0~100ppmの範囲で推移している状況下でFe濃度が200ppm以上に増加した場合にはピストンリングの切損やシリンダライナの異常摩耗等の摺動面状態が悪化した場合を示唆するものとなっている。更に、ピストンリング・シリンダライナの新替え等に伴う初期摩耗時における適正Fe濃度は100~300ppmで推移する事や、比較的短時間で適正摩耗範囲となる事も採取データから推察出来る。

初期馴染み運転終了後の定常運転状態では残存アルカリ価が低下すると、Fe濃度が増加する傾向が見られる事、アルカリ価の低下限度(略30mg/KOH/g)の目安が出来る事、尚、同じ摩耗量であっても注油率(量)や機関負荷など使用状況によりFe濃度や残存アルカリ価は当然変わるものである事、及び濃度表示ゆえにサンプリング方法(構造)の相違による影響も見られ、各船の事情により、レベルが若干異なる事を認識しておく必要があることを述べておきたい。

5. シリンダ油ドレン中の摩耗鉄粉計測技術

機関摺動部の監視を行うに当たってはシリンダライナとピストンの摩耗状況を探る航海中の情報が少なく、短時間の停泊期間中の点検作業に委ねている現状から、機関運転中に状態監視が可能な手法があることが機関損傷防止の上からも有効打となり得る。ディーゼル機関の燃焼室内では、シリンダ油の特性(アルカリ価⁽¹⁾、酸中和速度、粘度等)、シリンダライナの材質、

構造、燃料噴射装置、メンテナンス、燃料油の特性等、各種要素がピストンリング、シリンダライナの異常摩耗に影響しており、多方面の情報を見ながら管理することが必要となる。効率的、経済的適性注油率を選定するには、シリンダライナ、ピストンリング等の摩耗状況を確認することが重要となることは言うまでも無い。これまでに摩耗状況を把握することを目的に機関無開放での状態監視手法が探られている。例えばフェログラフィーによる金属粒子の測定やシリンダライナの壁温監視等であり、それら情報収集技術が注目されてきていることにその意義が切実に表れていると言える。

5-1 シリンダ油ドレンの分析と簡易測定装置の開発

当社では、機関摺動部の状態を把握する方法として、シリンダ油ドレンに注目し、1995年1月より新造船5隻を対象に、シリンダ油ドレンの分析、解析を実施してきた。その結果、前述のように、シリンダ油ドレン中のFe濃度や残存アルカリ価の挙動とピストンリング、シリンダライナの摩耗状況との間に一定の関係が認められ、ピストンリング、シリンダライナの状態監視に対する有効性を見極めることが出来た。また、本調査の中から、船上で容易にシリンダ油ドレンの鉄分濃度の把握が可能な「シリンダ油ドレン簡易測定装置」を開発した。機関未開放での状態監視手法として有効に利用されており、当該装置は甲板機などの油圧作動油中の鉄分濃度の簡易的現状把握にも利用可能である。

【図1 シリンダ油ドレン簡易測定装置】

【図2 顕微鏡観察例】

5-2 卓上蛍光X線金属分析装置

先に述べたシリンダ油船上ブレンドシステム実験の際に、昨年、4ヶ月間に渉りメーカーより本装置を借用し、弊社に於いてその有用性、精度などを徹底検証したところ、高精度、且つスピーディーな分析が可能であることが確認できた。業務の合理化などに応用が可能であり、機関損傷発生時のサポート装置として船上に持ち込みが可能である。当該卓上蛍光X線分析装置は船上で製造したシリンダ油分析以外にも燃料油中のAl, S, Siやシリンダドレン中の金属分析を行うことができ、船上での使用も考慮した設計となっている。潤滑油に留まることなく、燃料油中に含まれる、硫黄、触媒などの金属元素を短時間で測定することが可能であることから、船上に於いても活用幅は広い。

5-3 主機シリンダ油ドレン連続モニタリングシステム開発の動向

船会社や造船所、或いは機器メーカーなど、連続モニタリングシステムの開発に着手し、既に実用化されているものもあるが、何らかの問題を抱えており、今後、更にシステムの改善が必要となっている。

機関損傷を未然に防止する観点から、更に深度化させたシリンダドレンの連続モニタリングシステムの研究・開発を行う必要がある。

6. おわりに

ディーゼル機関を使用している船会社にとっては、

シリンダ油の適性注油率を選定、維持することにより、機関摺動部のスカuffing等による機関事故を回避し、安全運航に貢献すること、並びに過剰なシリンダ注油を避け、コスト節減を図ること、即ち効率的、経済的に機関のパフォーマンスを引き出すことが不可欠であり、商船としての機関管理技術の中でも重要課題と言えるものである。

先に述べた様に、燃焼室内摺動部材の摩耗状況を把握するには、主に停泊中の点検、保全作業に頼ることになるが、船舶の航走中に船上で容易にシリンダライナの摩耗状況を把握できれば、運航阻害を回避する為の有効な情報となり、主機摺り合わせの状態監視の際など、シリンダ油減少時の判断目安と出来るなど、機関運転・保守管理に反映させる事が出来る。

以上の現状を踏まえ、船舶管理会社は勿論のこと、各機器メーカー、造船所や油社においては、環境・省エネ対応を初め、安全性、高効率、経済性に向けた、より一層の技術革新への取り組みが求められる。

参考文献

- 1) 日刊海事通信

著者紹介

菅 原 広

- ・日本マリンエンジニアリング学会正会員
- ・1957年生
- ・株式会社 商船三井
- ・技術研究所主任研究員

羽根田 誠 正会員 (株)商船三井・技術研究所所長
永井 義和 正会員 (株)商船三井・技術研究所所長代理
森脇 利統 正会員 (株)商船三井・海上 (機関長)
矢田部 孝 正会員 (株)商船三井・海上 (機関長)