フェログラフィによる低速ディーゼル 軸受の潤滑状態観察*

橋 本 高 明** 馬 場 宣 裕**
青 木 秀 男***

Ferrograph Analysis on Bearing Metal Lubricating Condition of Low Speed Diesel

By Takaaki Hashimoto, Nobuhiro Baba, Hideo Aoki

The bearing metal of a marine diesel engine is basically disassembled every five years as a part of a special survey. However, this disassembling and assembling works require a large amount of manpower and time. Moreover, it is also dangerous. The classification society to which the authors belong has dedicated considerable time and efforts to examining whether used oil analysis can be applied as an alternative to the aforementioned periodic survey.

This paper reports on the correlation between the used oil analysis results by ferrography and the inspection results of 2 stroke diesel bearing metal obtained at special surveys.

As a result, the authors believe that the continuous engine system oil ferrograph analysis can be effective as one form of a condition monitoring based survey.

1. ま え が き

船舶のディーゼルエンジン軸受は原則的に5年毎に開放検査を受けて来た。それに伴う、時間・労力・船舶の経済性等を考えると、特に、予防保全の見知からの管理方法の検討は有意義であろう。それらの事を考慮に入れて、2ストロークディーゼル機関の使用潤滑油の分析から軸・軸受の潤滑状態を推定する研究を実施し、その結果開放検査結果と使用システム油分析結果との間に、一つの枠付けを成し得る可能性がある事が判った。使用システム油中の金属磨耗粒子量を主にフェログラフ分析法(以下、フェログラフィと称する)にて数値化して軸受メタルの潤滑状態をほぼ推定し得る事を報告し参考に供したい。

2. 供試エンジン

当研究の開始時は、3船主・3エンジンでスタートしたが、途中で内1隻が売船となったため、本報告は2基の2ストロークエンジンの検討結果について述べる。供試エンジンの要目を表1に示した。

表1 供試エンジン要目

エンジンコード	A	B
ボア/ストローク、mm	840/2400	600/2292
出力/回転数、kW/rpm	19858/90	7460/89
システム油、SAE No./TBN	30/7	
システム油循環量、kl	22	17
シリンダ油、SAE No./TBN	50/70	50/70
燃料油、ISO-F-	RMG35	RMG35
平均的負荷率、%	70	83
船種	コンテナ	バルク/コンテナ
サイズ、GT/就航年	40354/1986	36591/1986
分析終了時の総使用時間 hr	57771	51047

3. 使用油分析項目

システム油試料は機関運転中に常に同一箇所から採取し、出来る限り毎航分析を行った。試料油の採取は就航直後より行った。分析回数は、エン

* 原稿受付 平成10年3月9日

第59回学術講演会(平成9年10月22日)

** 正会員 財団法人 日本海事協会(千葉市緑区大野台1-8-3)

*** 正会員 財団法人 日本海事協会(千代田区紀尾井町4-7)

ジンA；54回，エンジンB；76回であった。

分析項目は，必要最小限と考えられる項目に限定し，目的に応じ次のものを選択した。

- 1) 基油の劣化度の判定：FT-IRによる赤外酸化度，Abs. unit/cm @5.85um
備考；参考値として，動粘度(mm²/s @40℃)及び全塩基価(TBN mgKOH/g，HClO₄法)も間欠的に分析した。
- 2) 水分含有量：(主にFT-IRによる)%v
- 3) 金属磨耗粒子量の内，数ミクロン以上の金属量：フェログラフィDR法，WPC/ml
- 4) 判定の一方法として試用したメンバーシップグレード値：フェログラムの顕微鏡観察による磨耗粒子量のメンバーシップグレード化(0≤MG≤1)
備考；フェログラフィによる金属磨耗粒子量との比較の意味から，SOAP(ICP)による金属元素分析(ppm)を間欠的に行った。

4. 分析結果

船主にたいする報告は，試みとして，フェログラフィDR(Direct Reading)値，WPC/ml(Wear Particle Concentration/ml，粒径約5ミクロン以上の金属磨耗粒子量DL/ml+粒径2～3ミクロンの金属磨耗粒子量DS/ml=WPC/ml)及びフェログラム上の金属磨耗粒子(Fe，Cu，白色系等)量を形状，サイズ毎に識別の上カウントし，下記の経験式(メンバーシップ関数)に代入してグレード化した数値でもって報告した。

$$\text{Feグレード} = \text{Sfw} + \text{Sfi} + \text{Sfl} + \text{Sfs} + \text{Sfc} + \text{Sfd} \\ (0.0 \leq \text{Feグレード} \leq 1.0)$$

Sfw——上述のDRから得られたWPC/mlのコントリビューションファクタ(CF)

Sfi——DR値から計算した過酷度指数のCF

Sfl——DRのDL値から得られた比較的大きい粒子の割合から得たCF

Sfs——フェログラムの顕微鏡観察から得たシビア磨耗粒子のCF

Sfc——フェログラムの顕微鏡観察から得た切削磨耗粒子のCF

Sfd——フェログラムの顕微鏡観察から得た黒色磨耗粒子のCF

尚，非鉄金属も下記の経験式でグレード化した，

CFの説明は省略する。

$$\text{非鉄金属グレード} = \text{Sns} + \text{Snc} + \text{Snn} + \text{Snw} + \text{Sni} + \text{Snl} \quad (0.0 \leq \text{非鉄金属グレード} \leq 1.0)$$

上記の計算式で得たFe，Cu及び白色系(主にホワイトメタル)のグレードを図1のコメントを付して船主に報告した。

図1 報告書でのコメント

4.1 エンジンA エンジンAの使用油分析値を10,000時間(初期は5,000時間)毎の平均値として表2-1に示した。また，定期検査時(@57,771hrs)の検査結果例を表2-2に纏めた。

表2-1 エンジンAのシステム油分析値

使用時間	0～5000	～10000	～20000	～30000	～40000	～50000	～60000	最終
WPC/ml 平均 min/max	1.4 3/50	5.4 22/125	3.4 17/54	3.3 16/76	1.3 8/19	3.6 23/49	5.6 42/66	5.8
グレード 平均	—	—	0.06	0.04	0.01	0.05	0.06	0.06
Fe	—	—	0	0	0.003	0.04	0.07	0
Cu	—	—	0.12	0.06	0.25	0.01	0.18	0.02
白色系	—	—	—	—	—	—	—	—
金属元素 Fe/Cu/Sn IR酸化度 粘度 TBN	Fe: Min. 11～Max. 23, 平均 1.8 ppm Cu: Min. 2～Max. 4, 平均 3 ppm Sn/Pb: Min. 0～Max. 2, 平均 1 ppm Min. 6～Max. 10, 平均 9 Abs./cm (新油値: 104.5) Min. 106.2(+1.6%)～Max. 144.6(+38.2%) mm ² /s (新油値: 7.68) Min. 7.6(-1.0%)～Max. 23.4(+205%) mgKOH/g							Fe 18 Sn 0 8 124.7 15.4

表2-2 定期検査結果の概要

主機総使用時間	57,771 hrs
クロスヘッドピン	良好なるも軽度の摩耗・条痕を認む
クロスヘッドピン軸受	爪先で磨ける程度の非常に軽度の摩耗・条痕を認む(写真1)
クロスヘッドガイド/シュウ	良好なるも数条のざらつき摩耗を認む(深さ約0.3mm)
クランクピン	良好なるも軽度の摩耗・条痕を認む
クランクピン軸受	部分的に光沢及び滑らかさが消失している
主軸	良好(写真2)
主軸受	良好

4.2 エンジンB 同じくエンジンBの使用油分析値を表3-1に，またその定期検査時(@51,047hrs)の検査結果例を表3-2に纏めた。

4.3 予備調査 供試エンジンの連続分析を進めると共に，並行してランダムサンプリングに

表3-1 エンジンBのシステム油分析値

使用時間	0~5000	~10000	~20000	~30000	~40000	~50000	~60000	最終
WPC/ml 平均 min/max	6 2/15	6 3/9	6 3/9	5 2/20	3 2/5	4 2/10	6 4/8	8
グレード 平均 Fe Cu 白色系	— — —	— — —	0.06 0.001 0.001	0.04 0.005 0.07	0.01 0.007 0.05	0.01 0.007 0.05	0 0 0	0 0 0
金属元素 Fe/Cu/Sn IR酸化度 粘度 T B N	Fe : Min.1~Max.24, 平均12 ppm Cu : Min.0~Max.13, 平均6 ppm Sn/Pb : Min.0~Max.24, 平均3ppm Min.2~Max.7 平均5 Abs./cm (新油値: 90.8) Min.89.0(-2%)~Max.104.6(+15.2%) (新油値: 6.66) Min.1.3(-81%)~Max.11.2(+69%) mgKOH/g							Fe 3 Sn 0 7 104.4 7.25

表3-2 定期検査結果の概要

主機総使用時間	51,047 hrs
クロスヘッドピン	良好
クロスヘッドピン軸受	良好
クランクピン	良好
クランクピン軸受	良好 (写真3)
主軸	良好
主軸受	良好なるも部分的に光沢が消失している (スパーク)
チェーンドライブ歯車	良好 (写真4) エロージョン?
チェーンローラ	良好

表4 ランダムサンプリングによる摺動面の潤滑状態とDR値の比較

WPC/ml	件数 (%)	摺動面の潤滑状態良好	問題有り
0-9	66 (34)	100%	0%
10-59	106 (55)	92%	8%
60-	21 (11)	0%	100%
	計193 (100)		

よる軸受金属の開放検査結果とシステム油の分析結果との相関性も検討し、2ストロークディーゼルシステム油に関しては、205件のフェログラフィDR値(WPC/ml)を報告した(MESJ24巻, 9号, 78頁, 図15)。その205件のケースから、ブレイクインの試料油を除いた193件のケースを検討すると表4の結果となった。

5. 考察

5.1 エンジンA 機関(システム油)使用時間とフェログラフィDR値(WPC/ml)との関係を図2に示した。数値は10,000時間毎の平均値であるが、大きな振れの中にそれでもゆるい右上がりの勾配を示しており、経験式としては次のように表される。

$$Y = 0.0002X + 27.1$$

DR値の全平均は30WPC/mlであるが、10,000時間当たりの平均値の振れ値(標準偏差20)が比較的大きいのが特徴であると言える。ICPによる金属元

図2 エンジンAのDR値の変化

素量(ppm)はおしなべて低い値であった。基油の酸化度も、通常良好な状態と判断されている10 Abs./cm以下の低い値であった。

メンバーシップ関数から求めたグレードはエンジン使用時間10,000時間を越えてから計算を開始したが、Feに関しては、0~0.15であった。また、主にホワイトメタルと思われる白色系に関しては、0~0.47であった。

Cuに関しては、0~0.05であった。グレードは暫定的に0.3以下を正常としたが、その意味からはFeで0.3を越えたケースは無かった。しかしながら、白色系金属のそれは0.3を越えたケースが6回記録された。

5.2 エンジンB 機関(システム油)使用時間とフェログラフィDR値(WPC/ml)との関係を図3に示した。そのWPC/mlは10以下で横這い状態

図3 エンジンBのDR値の変化

である。DR値の全平均値は5WPC/ml(標準偏差3)であった。

ICP値はエンジンAと大差なく低い値であった。基油の酸化度も十分に低かった。メンバーシップグレードは、Feに関しては0~0.39とエンジンAよりもまたまた広い範囲でばらつきがあり、0.3を越えたケースも1件あった。白色系メタルに関しては、0~0.39の範囲であったが、0.3を越えたのは1件であった。Cuに関しては、0~0.07であった。

5.3 予備調査 この調査は特定のエンジンの継続分析でないため前出2エンジンとは解析の意味が異なる。しかしながら、エンジンの型式、航路、稼働の仕方が異なっても、使用油のDR値が9WPC/ml以下であれば、検査された全機の摺動面の潤滑状態は良好と判断されており、前出エンジンBと同じ結果を得ている。この良好なケースの全船舶に対する比率は約34パーセントである可能性が高い。逆に、そのDR値が60WPC/ml以上であるケースの場合は、全船舶において摺動面の潤滑状態は問題が有る可能性が高いと考えられる。また、その可能性は全船舶の11パーセントに達する可能性が有ることが知れる。DR値がその中間であるケースの場合は、状態診断が出来る他のセンサの併用や他のパラメータの応用を検討出来れば、状態監視が出来る可能性が有りそうである。

5.4 メンバーシップグレード 各パラメータのCFを多少修正すればより効果的に使用出来ると判断される。

6. 結 び

機器類の潤滑状態の診断に関しては、種々の方法がある中で、使用潤滑油中の金属磨耗粒子量を数値化する事でも或程度の状態診断を行い得る事が判った。船用2ストロークディーゼルに関しては次のことが言える。

- 1) フェログラフィDR値がトレンドとして、10WPC/ml以下の場合はその系の軸受メタルの潤滑状態は極めて良好である可能性が高い。
- 2) フェログラフィDR値が、60WPC/ml以上の場合はその系の軸受メタルは損傷している可能性が高い。

以上の経験をふまえ、振動音センサー等とフェログラフィDRとの複合の状態監視によって、無開放運転時間を延ばす検証実験を行ってみる価値は十分に有ると考えられる。

このフェログラフィ分析を試みるに当たっては実に多くの方々のご協力とご支援を頂いた。とりわけ、実務上大変お世話になった、大阪商船三井船舶(株)、北日本大井海運(株)、昭和海運(株)の関係各位に深く御礼を申し上げる。

写真1 クロスヘッドピン軸受例

写真2 メインジャーナル例

写真3 クランクピン軸受例

写真4 チェーンドライブ歯車例