シリンダライナ摺動面のレプリカ判定法*

出口明雄**・北川博敏***
光武章二****・大岡則隆*****

Investigation on Cylinder Liner Surface Conditions by Replica Technique

By Akio Deguchi, Hirotohi Kitagawa, Shohji Mitsutake, Noritaka Ōoka

Recently in the field of marine diesel engine, there is a remarkable trend to increase the P_{max} and the piston stroke in order to get higher efficiency. Therefore the cylinder liner and piston ring condition is getting more and more severe in the viewpoint of temperature, pressure and the exposure of the oil on the sliding surface. In addition, the effect of over cooling on the cylinder liner and the use of sulfur rich fuel have diversified the wear phenomena of rings and liners. With the situations above, it has become more important in the liner lubrication to reduce the wear rate with the minimum consumption of lubricating oil as possible. In order to solve these problems it is necessary to recognize the various conditions of wear on the liner surfaces.

In this study the replica observation method is investigated to evaluate those conditions in many vessels, and the following results are obtained.

1. Replica wear modes are classified into six patterns — abrasion, adhesion, polish, corrosion, etching and steady corrosion — according to their characteristic features. They can be grouped into two types in relation to the effect of corrosion.
2. These relative wear rates are clarified in the wear mode diagram taking into account the degrees of mechanical and chemical wear.
3. Since the steady corrosion seriously affects the liner wear, it is very important to restrain such corrosion to get the minimum wear.
4. The replica observation method is highly effective for judging the liner wear conditions and therefore, it can give us the fundamental approach to improve the liner wear.

1. ま え が き

近年の大形船用機関では、高出力化・高効率化のために筒内最高圧力 (P_{max}) の増大やロングストローク化が図られ、シリンダライナ・ピストンの摺動条件は、温度・圧力の高さ、摺動面積の広さおよび摺動時間の長さの点で、ますます厳しくなっている。加えて、過冷却による障害や硫黄 (S) 分を多く含むいわゆる粗悪油の燃料使用などは、リング・ライナの腐食・摩耗環境を多様化させている。このような状況下にあつて、潤滑油 (LO)

消費量が最小限の状態、リング・ライナ摩耗を抑制することが、ライナ潤滑上の大きな命題である。

上記の問題解決のためには、ライナ各部の摺動状況を的確に把握することが必要であるが、その手法の一つとして、ライナ表面のレプリカ観察法が知られている。^{1), 2)} 数多くの就航船のシリンダライナについて、レプリカ観察法を適用し、摺動状況の判定法として検討した結果を以下に報告する。

なお、前述した大形ディーゼル機関の最近の動向とライナ潤滑上の留意点を表1にまとめて示す。

2. レプリカ観察方法

ライナ摺動面の観察用レプリカには、フィルム状のアセチルセルロース (Bioden, 0.034mm厚さ) を使用した。酢酸メチルを溶剤として、ライナ表面をすばやく転写し、そのフィルム、すなわちレプリカを光学顕微鏡 (以下、光顕と略す) または走査型電子顕微鏡 (以下、電顕と略す) により観察した。光顕ではレプリカを直接観察し、電顕ではレプリカ表面を金またはカーボンにより真

* 原稿受付 昭和62年1月19日

昭和61年秋季学術講演 (昭和61年10月29日)

** 正会員 三菱重工業(株)横浜研究所 (横浜市中区錦町12番地)

*** 正会員 三菱重工業(株)ディーゼル開発センター (横浜市金沢区幸浦1-8-1)

**** 正会員 三菱重工業(株)長崎研究所 (長崎市飽の浦町1-1)

***** 正会員 MHIディーゼルスサービス(株) (神戸市兵庫区和田崎町1-1-1)

表 1. 大形ディーゼル機関の最近の動向と
ライナ潤滑上の留意点

動向	目的	ライナ潤滑上の留意点
ロングストローク化	プロペラ効率の改善	L.O注油、潤滑の多様化 ライナ壁温度分布
P...の増大	高出力化 燃料消費率の低減	面圧の増大 温度上昇
ボアクーリング冷却 方式の採用	燃焼室まわりの温度 上昇の抑制	ライナ壁温度分布 過冷却による露露点の形成
粗悪油使用	燃費低減	燃焼生成物による潤滑障害 腐食環境の悪化 硬質摩耗成分の混入
L.O消費量低減	ランニングコストの 低減	摩耗潤滑条件の過酷化 酸腐食中和効果の低下

空蒸着した後に加速電圧10kV以下で観察した。

3. 摩耗形態とその分類

数多くの就航船のシリンダライナについて摺動面のレプリカ状況を観察した結果、類型分類することが可能であることが明らかとなった。シリンダライナ摺動面の摩耗形態から6種類に分類した結果を表2に示す。表中には、それぞれの代表的な光顕および電顕によるレプリカ状況を示した。各摩耗形態の摺動状況とその特徴は、次

のように表わすことができる。

- (A) アブレシブ摩耗 (Abrasion) は、明瞭な摺動痕を特徴とし、良好な摺動状況である。しかし、多量の摩耗粉が生成したり、高硬度成分の粒子などが混入する場合には、摩耗量が増大する。
- (B) 凝着摩耗 (Adhesion) は、摺動面表面層のマトリックスに塑性変形が観察され、その重なりによりグラファイト形状が不鮮明となる。この状態から推移の過程で、境界潤滑限界すなわち焼付きに達する場合もある。
- (C) 金属光沢 (Polish) 摩耗は、肉眼でも金属光沢として観察され、鏡面状に研磨された状態である。硬質の溶射リング材と組合された場合に認められており、摩耗量の増加があった。
- (D) 腐食 (Corrosion) 摩耗は、摺動痕に孔食による肌荒れが生じているのが特徴である。パーライトで構成されるマトリックスが腐食されるため、ステダイトが明瞭に観察される。また、腐食生成物の発生も認められる。これらはいずれも硫酸露点腐食がその主要原因であり、腐食の発生と腐食生成物の機械的な除去との繰返しによって摩耗が促進される。
- (E) エッチング (Etching) 状摩耗は、前述した金属光沢摩耗の近傍で観察されたもので、ステダイトやマトリックスのパーライトが明瞭に認められる。研磨要因に加えて腐食摩耗(D)と同様に硫酸による腐食が関与している。
- (F) ステダイト腐食 (Steadite Corrosion) 摩耗は、腐食要因と強度上の要因とが関与していると考

表 2. 摩耗形態とその分類

分類	機械的作用による摩耗			機械的および化学的作用による摩耗		
	(A) アブレシブ摩耗 (Abrasion)	(B) 凝着摩耗 (Adhesion)	(C) 金属光沢摩耗 (Polish)	(D) 腐食摩耗 (Corrosion)	(E) エッチング状摩耗 (Etching)	(F) ステダイト腐食 (Steadite corr.)
光学顕微鏡 レプリカ 50 μ m						
走査型電子顕微鏡 観察形態 5 μ m						
特徴	・明瞭な摺動痕 ・通常摩耗 ・高硬度粒子混入	・塑性変形によるマトリックスの重なり ・グラファイト形状不鮮明 ・限界摺動状態	・金属光沢 ・リング材硬度過大 ・摩耗量大	・孔食による肌荒れ ・燃料中のS分による腐食摩耗	・パーライトが明瞭 ・同左 ・リング材硬度過大	・ステダイトの脱落 ・摩耗量大

えられ、摺動面上のステダイトがマトリックスから脱落しているのが特徴である。特に摩耗量が多い。

前三者は機械的な作用による摩耗、後三者は機械的な作用と化学的な腐食作用が重畳した摩耗と大別することができる。

4. シリンダライナにおける摩耗形態分布

前章にて示した摩耗形態分類のシリンダライナ表面における分布例として、ライナ内壁縦方向のレプリカ電顕観察状況を図1に示す。また、図中には摩耗量分布も示した。シリンダ上部の非摺動部Aは、燃焼時の生成物な

図1 ライナ内壁縦方向レプリカ状況と摩耗分布

図2 油量分布とレプリカ状況

どに覆われている。摩耗量の多いTDC近傍であるB部では、ステダイトの脱落が観察され、マトリックスも摺動痕が不鮮明になるなど、いずれも腐食の影響を大きく受けた腐食摩耗およびステダイト腐食摩耗状態である。摩耗量の少ないライナ下部であるCおよびD部へ行くに従い、この腐食摩耗傾向は減少・消滅し、明瞭な摺動痕が認められるアブレシブ摩耗へと移行している。

図2には、摺動方向の油量分布とレプリカの状況を示す。これは、同一シリンダ内の腐食環境下にある位置の光顕観察例であり、油量の多少は注油孔からの距離に対応している。下段の写真に示す油量が比較的多い部分においても、既に若干のマトリックスの腐食傾向が見られているが、油量が少なくなるとともにその傾向が顕著となる。中段の写真では、腐食されたマトリックス部と健全なステダイト部が明瞭に対比して観察される。更に油量の少ない上段では、摺動面への腐食生成物などの付着によりグラファイト形状が不鮮明となっている。

ライナ下部の観察例を図3に示す。レプリカ状況を光顕および電顕観察で示しているが、アブレシブ摩耗が主体である。低倍率の光顕写真では、上下の摺動方向に対して直角にライナコルゲート加工痕が帯状の縞模様として認められる。高倍率の写真では、明瞭な摺動痕に直角に鋭い加工痕が認められている。摩耗量が少ない場合の観察例である。

5. 摩耗形態と摩耗量

ライナ摩耗促進要因として腐食作用が挙げられるため、前述の摩耗形態の中からステダイトおよびマトリックスの腐食度に着目し、ライナ摩耗率との関係を整理した。その結果を図4に示す。図より明らかなように、マトリックスの腐食度よりステダイトの腐食度の方が摩耗率との相関が強い。更に、ステダイト腐食度を損傷部の面積率で細分表示し、ライナ摩耗率との関係を図5に示す。ステダイト損傷率が大きいと摩耗率が急激に増大していることが分かる。これは、通常、ステダイトが耐摩耗性に優れていることと関連があり、その欠落が摩耗を促進するものと考えられる。

ステダイト腐食の挙動に着目すると、損傷の初期段階

図3 ライナ下部のレプリカ状況

図4 ステダイトおよびマトリックスの腐食度とライナ摩耗率

図5 ステダイト損傷率とライナ摩耗率

図6 ステダイトの初期損傷形態

として、図6に示すステダイトエッチングおよびステダイト亀裂の二つのパターンが認められている。前者は、ステダイトの一部である、 $\text{Fe}_3\text{P} \cdot \text{Fe}_3\text{C} \cdot \alpha\text{-Fe}$ の三元共晶部が食刻（エッチング）されたものであり、腐食要因が大きい。後者は、まだ腐食されていないステダイトが割れたもので、強度上の要因があると考えられる。これらのステダイト損傷を抑制することがライナ摩耗対策上、重要なポイントである。

以上の結果より、摩耗形態分類とその分布に基づいてライナ摩耗模式図を作成した。図7に示す。ここでは、摩耗時の機械的および化学的作用を、それぞれ摩耗度および腐食度として、摩耗量との関係を相対的に対比した。通常の良好な摩耗状況である軽微なアブレシブ摩耗は、腐食度の増大すなわちマトリックスの腐食程度が大となるにつれて腐食摩耗へ移行し、摩耗度の増大すなわち機

図7 ライナ摩耗模式図

械的作用が大きくなるにつれて凝着摩耗もしくは金属光沢摩耗へと遷移する。また、金属光沢摩耗は、摩耗度と腐食度とのバランスによってはエッチング状摩耗へと遷移する。ステダイト腐食摩耗に関しては、前述のように摩耗量が大きいことから、ここでは摩耗度も腐食度も大として位置づけている。

各摩耗形態の位置付けが明らかになると、それぞれの基本的な摩耗改善が可能である。図7中に、その改善策を矢印で示した。すなわち、機械的な作用による摩耗の場合には、摺動面圧の低減・リングとの材質組合せの適正化などが有効であり、腐食作用が強い摩耗の場合に

は、使用燃料の選定・ライナ表面温度管理・潤滑油中和能力の増大などが有効である。また、両者が関連する摩耗の場合には、注油量および注油位置の適正化などの対策が必要となる。

6. まとめ

大形ディーゼル機関におけるシリンダライナ・ピストンの摺動状況を把握する手法として、ライナ表面のレプリカ観察法を検討し、次の結論を得た。

- (1) 数多くの就航船のライナ表面レプリカを観察した結果、レプリカ摩耗形態は、その特徴から、アブレシブ摩耗・凝着摩耗・金属光沢摩耗・腐食摩耗・エッチング状摩耗・ステダイト腐食摩耗の6種に類型分類することができる。また、腐食作用の有無によって、前三者と後三者の2種類に大別することができる。
- (2) 摩耗度および腐食度をパラメータとして、上述の各摩耗形態と摩耗量に関する相対的な位置関係を明らかにした。
- (3) ライナ摩耗に対してステダイト腐食が与える影響は大きく、その抑制が摩耗対策上重要である。
- (4) レプリカ観察法は、ライナの摺動状況を判断する手法として有効であり、基本的な摩耗対策への指針を得ることができる。

文 献

- 1) Nabel, J. and Eyre, T. S., Tribology (1978), 267
- 2) Eberle, M. K., 13th International Congress on Combustion Engines, D6 (1978)