

# 舶用機関のピストンリングとシリンダライナ間のトライボロジー

## Tribology between Piston Rings and Cylinder Liners of Marine Diesel Engines

佐 分 茂 技術開発本部基盤技術研究所機械要素研究部 部長代理

齋 藤 吉 之 技術開発本部総合開発センター革シプロエンジン開発プロジェクトグループ 課長

山 田 敬 之 技術開発本部総合開発センター革シプロエンジン開発プロジェクトグループ

舶用機関のピストンリングとシリンダライナの潤滑条件は年々過酷になっているため、スカッティング、硫酸腐食摩耗などの問題が機関のバージョンアップごとに問題となり、これまでにさまざまな課題に取り組んできた。ここでは、これらの研究の一環として実施したリングとライナ間の油膜厚さの理論解析、ライナの表面形状がスカッティングに及ぼす影響に関する試験研究、および幾つかのスカッティング要因に関して実機関を用いて評価した試験結果を報告する。

Tribological problems such as scuffing or corrosive wear due to sulfuric acid tend to occur when marine diesel engines are upgraded because the conditions of operation for piston rings and the cylinder liner have become severer by upgrading. The conditions are exemplified by requirements for high power under low fuel consumption, low cylinder oil feed rate, etc. In order to overcome these problems, several studies and developments have been done. In this paper, an analytical study of the oil film thickness between the piston rings and cylinder liner, an experimental study to evaluate the influence of the surface shape of a cylinder liner on scuffing, and test results to evaluate several factors of scuffing in an actual diesel engine are reported.

### 1. 緒 言

舶用機関のピストンリングとシリンダライナ（以下、リングとライナと呼ぶ）の潤滑状態は、シリンダ内部で燃焼が周期的に行われるため、高温環境でシリンダ油が消耗・劣化されること、往復動ですべりしゅう動すること、変動荷重を受けることなどによって非常に複雑である。これらに加え、近年の機関では高効率、高出力化の要求、粗悪燃料油の使用ならびに潤滑油消費量の低減要求などのため、リングとライナ間の潤滑状態は年々過酷になっている。このため、スカッティング（激しい凝着摩耗）、燃料油中の硫黄分に起因した硫酸腐食摩耗などの損傷を防止することが機関のバージョンアップごとに重要な課題として挙げられ、これまでさまざまな視点からこれらの課題に関する研究に取り組んできた。

本稿ではこれらの研究の一環として実施した、リングとライナ間の油膜厚さの理論解析、ライナの表面形状がスカッティングに及ぼす試験研究、および幾つかのスカッティング要因に関して、実機関を用いて評価した試験結果を報告する。

### 2. リングとライナの油膜厚さの理論解析

#### 2.1 解析方法

リングとライナの油膜厚さを理論解析で求める場合は、リングとライナ間に形成される油膜に関するレイノルズ方程式とリングに関する運動方程式を連立して解けば求まる。計算手順は、ある時点（あるクランク角度）である厚さの油膜を仮定し、レイノルズ方程式を解くことによって油膜圧力分布を求め、これを積分し油膜力を求める。次に、この油膜力をリングに関する運動方程式に代入し、油膜厚さを求める。ここで得られた油膜厚さを再度レイノルズ方程式に代入し油膜力を求め、それを再度運動方程式に代入し油膜厚さを求める。

これらの計算を繰り返して、油膜厚さがある一定の値に収束すればある時点の油膜厚さが求まる。次に、次の時点（次のクランク角度）の油膜厚さを同様の手順で求める。これを、2ストローク機関の場合はピストン1往復分（4ストローク機関の場合は2往復分）、同じリング位置（同じクランク角度）で油膜厚さが一定の値に収束するまで繰り返し計算すれば、機関1サイクルに対する油膜厚さが求まる。この解析方法を用い、リングとライナのモデルで油

膜厚さに及ぼすリングとライナの形状の影響について評価した<sup>(1)</sup>。第1図にリングとライナの解析モデルを示す。

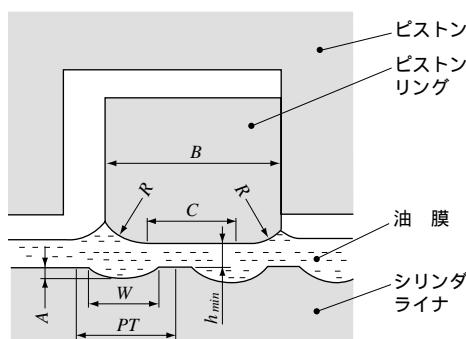
第1図に示すように、リングの動面の断面形状は一般に平たんではなく、全体または一部に曲面をもっている。本解析では、リング両コーナに半径  $R$  の曲面を、中央に長さ  $C$  の平たん部をもつリング形状を仮定した。一方、ライナには船用機関に特有なものとされているウェーブカットと称する波状の油溝が、螺旋状に加工されており、ウェーブカットのピッチを  $PT$ 、油溝幅を  $W$ 、油溝深さを  $A$  と定義した。

計算では、シリンダ内径 840 mm の 2 ストローク機関の 100% 負荷時における運転条件を用い、シリンダ油の粘度グレードは SAE50 とした。また、クランク角度 0, 360 度の位置をピストンの上死点位置、180 度を下死点位置と定義した。また、リング幅  $B$  は 20 mm とした。

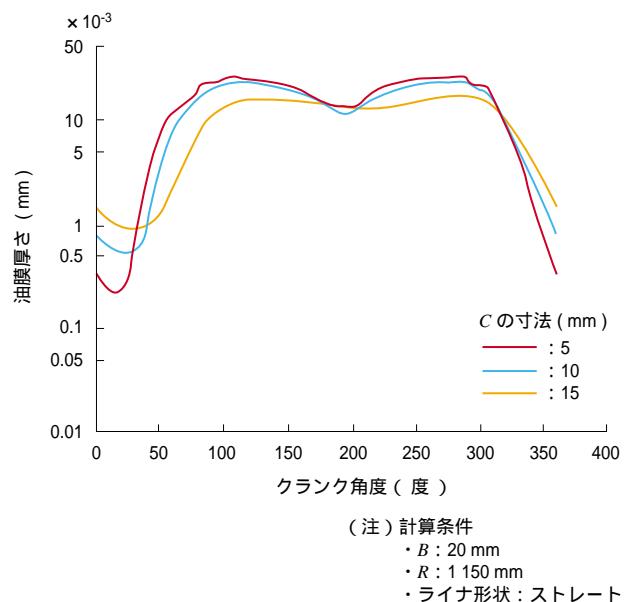
## 2.2 リング形状と油膜厚さの関係

第2図にリングの平たん部長さが油膜厚さに及ぼす影響を、第3図にリングのコーナの曲率半径が油膜厚さに及ぼす影響を示す。これらは、ストレートライナ（油溝のないライナ）の場合の油膜厚さに及ぼすリングの  $C$  と  $R$  の影響を示す計算結果である。第2図から、上死点近傍、下死点近傍では  $C$  が大きいほど油膜厚さは厚く、逆に、中間ストロークでは薄くなる傾向を示した。これは、しゅう動速度による油膜のくさび膜効果とスクイズ膜効果の影響の違いによるもので、しゅう動速度の遅い上下死点近傍では、大きな  $C$  の場合はスクイズ膜効果の影響を大きく受けて油膜厚さは厚くなるが、速度が速い中間ストロークでは、くさび膜効果の影響が大きくなり、 $C$  は小さいほど  $R$  部は大きくなることから油膜厚さは厚くなる。この傾向はウェーブカットライナでも同じ傾向が得られた。

$R$  に関しては、第3図に示すように、下降工程（クラン

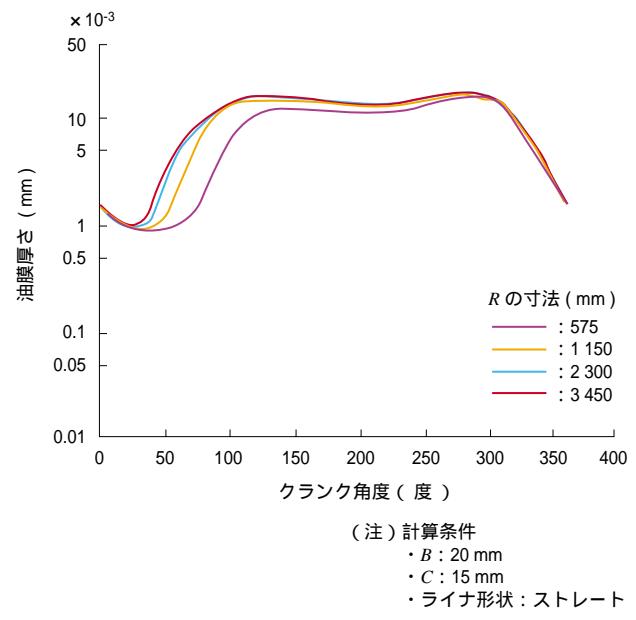


第1図 リングとライナの解析モデル  
Fig. 1 Geometry of the ring and the liner



第2図 リングの平たん部長さが油膜厚さに及ぼす影響  
(ストレートライナ)

Fig. 2 Effect of the length of the plane face on the oil film thickness



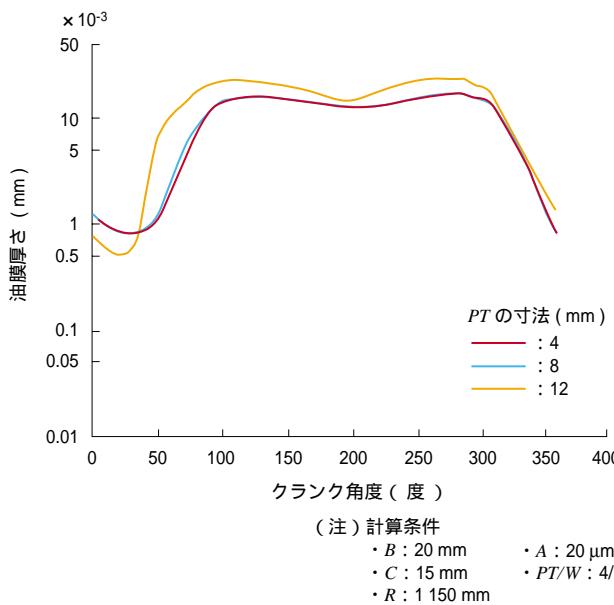
第3図 リングのコーナの曲率半径が油膜厚さに及ぼす影響  
(ストレートライナ)

Fig. 3 Effect of the curvature radius of the ring corner on the oil film thickness

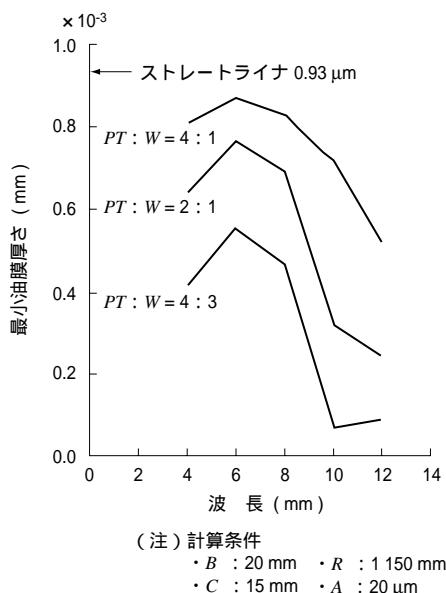
ク角度 0 ~ 180 度) の中間ストロークを除けば、油膜厚さの及ぼす  $R$  の影響は小さいことが分かる。この傾向は、 $C$  の場合と同様にウェーブカットライナでも同じ傾向が得られた。多くの計算結果から、全ストロークで厚い油膜を得るために  $C$  はリング幅の 70 ~ 80%,  $R$  は 1 000 ~ 2 500 mm が良いことが分かった。

## 2.3 ライナ形状と油膜厚さの関係

第4図に油溝のピッチが油膜厚さに及ぼす影響を示す。



ピッチ  $PT$  と溝幅  $W$  の比率を  $4:1$  とし  $PT$  を変えた場合の計算結果である。数多くの  $PT$  と  $W$  の組合せに関して計算を実施した結果、これらが油膜厚さに及ぼす影響は複雑であることが分かった。第 5 図に油溝のピッチと溝幅が最小油膜厚さに及ぼす影響を示す。 $PT$  と  $W$  の組合せと最小油膜厚さ  $h_{min}$  との関係を整理するとともに、同じ条件で計算したストレートライナの最小油膜厚さも示す。第 5 図から、ストレートライナの最小油膜厚さが最も厚いこと、また、ウェーブカットライナの場合は  $PT = 6 \text{ mm}$  の場合が最も厚く、 $W$  が小さくなるほど最小油膜厚さが厚くなること



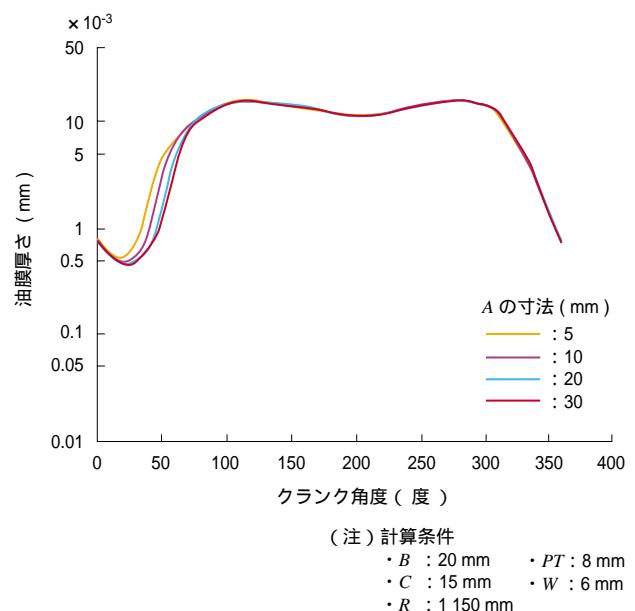
が分かった。第 6 図に油溝深さが油膜厚さに及ぼす影響を示す。油溝深さ  $A$  は油膜厚さに大きな影響を与えないことが分かった。

本解析結果の範囲では、ウェーブカットライナはストレートライナに比べ最小油膜厚さが薄くなることから、流体潤滑理論に基づいた油膜形成能力についてはストレートライナに比べ劣るといえる。しかし、潤滑条件の厳しい油膜厚さが  $1 \mu\text{m}$  を下回るような領域では、リングとライナ間は完全に油膜で分離される流体潤滑領域ではなく、部分的な直接接触を伴う混合潤滑領域と考えられる。この領域では、ウェーブカットライナの場合は油溝の保油効果による耐スカッティング性能の向上が期待され、流体潤滑理論を基にした本解析結果だけで、ライナの形状の優劣を判断することは早計である。このため、以下に示す試験で、ライナの表面形状がスカッティングに及ぼす影響を評価した。

### 3. ライナの表面形状がスカッティングに及ぼす影響

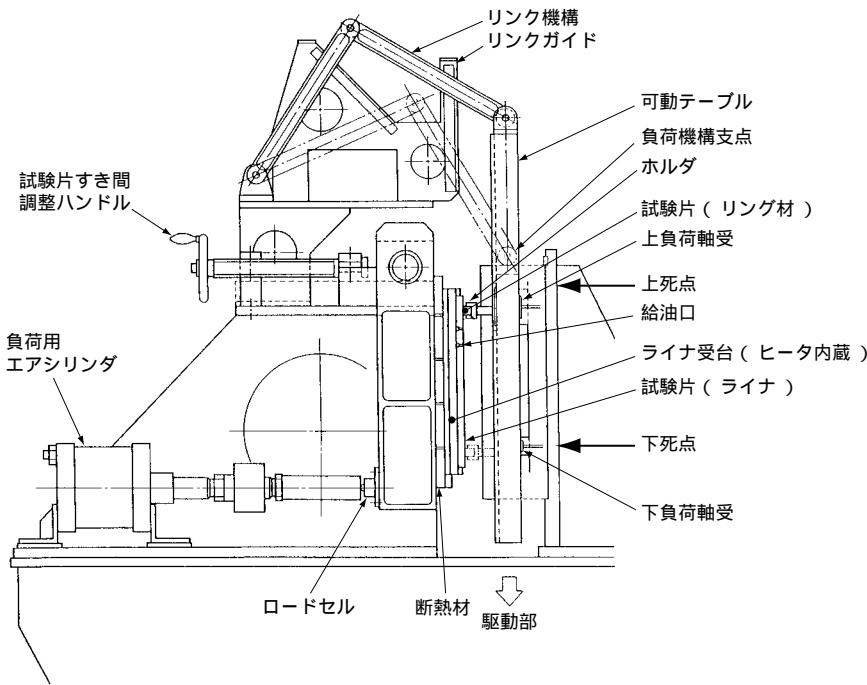
#### 3.1 試験方法

第 7 図に試験に使用したモータ駆動の往復しゅう動試験機の試験部を示す。試験では、実機リングを模擬したしゅう動面断面がバレル状の可動片と実機ライナを模擬した平板状のライナを組み合わせて試験を実施した<sup>(2)</sup>。試験片の材料は実機のリング材、ライナ材と同じものを使用した。シリンダ油は、ライナに上死点近傍に設けた注油穴から一



第 5 図 油溝のピッチと溝幅が最小油膜厚さに及ぼす影響

Fig. 5 Effect of the pitch and grooves width on the minimum oil film thickness



第7図 往復しゅう動試験機の試験部  
Fig. 7 Reciprocated sliding test rig

定量を給油した。試験ではなじみ運転を実施後、所定のライナ温度、速度に設定し、しゅう動面圧をステップ状に上昇させ、摩擦力、または可動片温度が急上昇した時点をスカッフィング発生と判定し、その時点の面圧をスカッフィング面圧と定義した。試験条件を以下に示す。

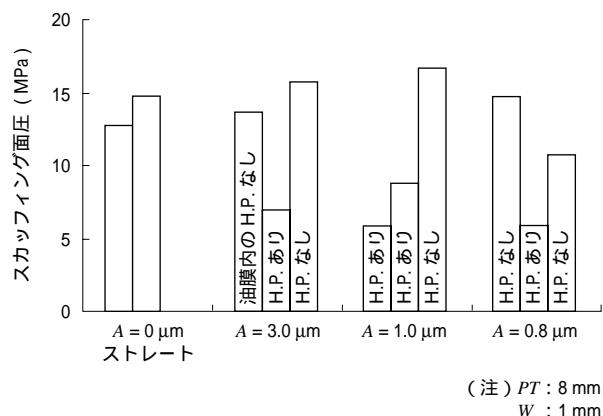
平均しゅう動速度	4 m/s
ライナ温度	225 (一定)
可動片形状	$B = 20 \text{ mm}$
	$C = 0 \text{ mm}$
	$R = 1150 \text{ mm}$
シリンダ油粘度グレード	SAE50
給油量	5 ml/min

### 3.2 ライナの表面形状とスカッフィングとの関係

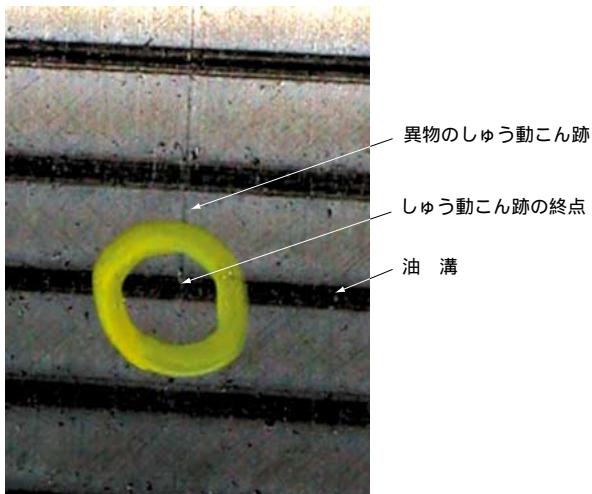
試験ではウェーブカットのないストレートライナとPTを8 mm, Wを1 mm一定とし、油溝深さAを3.0, 1.0, 0.8  $\mu\text{m}$ と変えた3種類のウェーブカットライナに関して試験を実施した。各種ライナのスカッフィング面圧の試験結果を第8図に示す。

試験当初、ウェーブカットライナのスカッフィング面圧に大きなばらつきが認められた。このため、スカッフィング面圧の低いライナ片を詳細に観察すると、油溝内にハドフェイズ(以下、H.P.と呼ぶ)の残存が数多く認められた。H.P.とは、パーライト基地に析出したステタイトと呼ばれるりん化合物とセメンタイトとの共晶組織であり、高

硬度の組織である。このH.P.がしゅう動によって脱落し、可動片とライナ間に介在すれば、局所的な3元アブレシブ摩耗を発生させ、局所的なライナ温度上昇によって油膜が破断され、低面圧下でもスカッフィングを発生させたと推定できる。このため、サンドペーパーを用いてH.P.を除去した後、試験を実施したところ、第8図に示すようにスカッフィング面圧は増大した。この結果から、油溝内に残存するH.P.はスカッフィングを誘発させる原因となり、これを除去することが重要であることが分かった。また、ストレートライナとウェーブカットライナとの耐スカッフィング性能を比較すれば、ウェーブカットライナはストレートライナとほぼ同等の耐スカッフィング性能であり、本試験からはウェーブカットライナの優位性を示す結果は得られなかった。しかし、シリンダ油の拡がり性や保油性については、ウェーブカットライナがストレートライナに比べて優れるという報告<sup>(3), (4)</sup>がある。また、実機のライナにおいて油溝は異物を捕集する効果も認められる。第9図に異物が満足に捕そくされたこん跡を示す。ウェーブカットライナを支持する見解は多い。しかし、現在のところ、ストレートライナが良いのか、ウェーブカットライナが良いのかという問題については決着がついておらず、今後も継続して検討する必要がある。



第8図 各種ライナのスカッフィング面圧  
Fig. 8 Scuffing durability of several types of liners



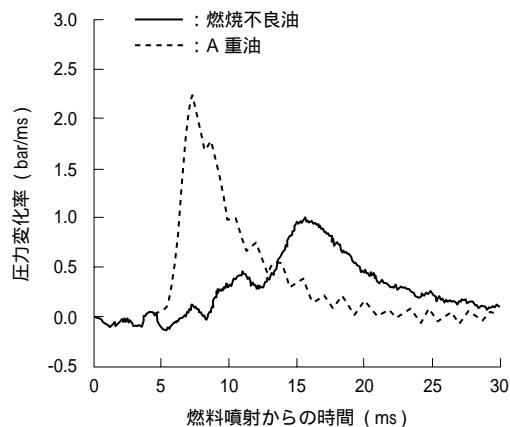
第 9 図 異物が油溝に捕そくされたこん跡  
Fig. 9 Trace of a trapped foreign particle in the oil groove

#### 4. スカッフィング要因の実機関試験による評価

スカッフィングの要因と考えられる因子について RTA96C 機関による陸上運転でリング、ライナへの影響を試験・調査<sup>(5)</sup>した。

##### 4.1 燃焼不良燃料油の影響

着火遅れと燃焼期間が長い、燃焼性の悪い燃料油は噴霧火炎が伸び（いわゆるロングフレーム）、ライナ表面の潤滑性を損なうと考えられている。そこで、着火・燃焼性の悪い燃料油（燃焼不良油）と A 重油運転時の瞬時ライナ表面温度を比較した。燃焼不良油は A 重油に燃焼性の悪い FCC スラリー油を混合し調製した。FCC スラリー油は、石油精製プラントの流動接触分解装置（Fluid Catalytic Cracking : FCC）の廃油で、実際のバンカー油に粘度調整等の理由で混合されているものである。第 10 図に供試燃



第 10 図 供試燃料油の着火・燃焼性の FIA 試験結果  
Fig. 10 Ignition and combustion properties of tested fuel oil

料油の着火・燃焼性の FIA (Fuel Ignition Analyzer) 試験<sup>(6)</sup>結果を示す。FIA 試験とは、高温高圧（450, 45 bar）の定容器に燃料油を噴射し容器内の圧力を計測することによって、燃料油の着火遅れや燃焼期間などの燃焼特性を評価する試験方法である。

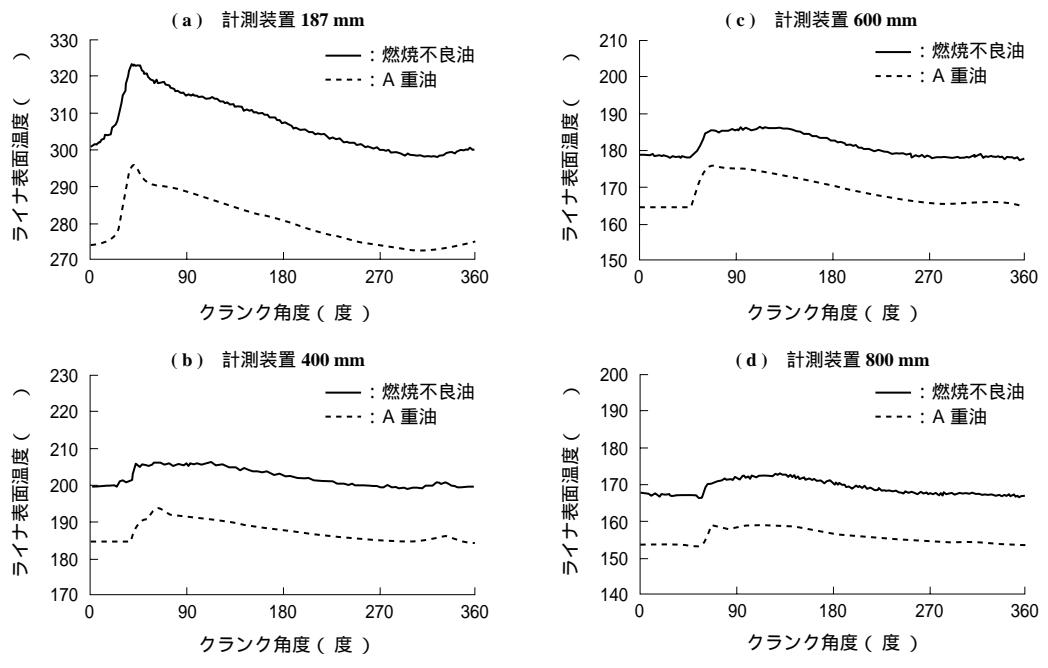
瞬時ライナ表面温度を計測するため高応答薄膜熱電対を使用した。燃料油の着火・燃焼性のライナ表面温度への影響を第 11 図に示す。ライナ表面温度は A 重油より燃焼不良油の方が 10 ~ 30 度程度高くなった。特にライナシール面から 700 ~ 900 mm の位置では、燃焼開始後、A 重油では温度が低下する時期でも燃焼不良油では温度上昇傾向にある場合が多く、燃焼不良油はライナ近傍で燃焼し、高温の燃焼ガスが滞留していると考えられる。ただし、試験後のライナ表面ミクロ組織観察では、特に問題となる所見はなかった。以上の結果から、本試験の範囲では、燃焼不良油の影響としてライナ表面温度の上昇は認められたが、顕著にしゅう動環境を悪化させることはないと考えられる。

##### 4.2 水滴流入の影響

掃気ラインのエアクラークで生じた凝縮水はドレンセパレータで捕集、分離されるが、高温多湿条件ではドレン水除去が不十分となり、掃気とともに水滴がシリンダ内に流入しライナ表面の潤滑状況を悪化させることが考えられる。高出力機関では掃気圧が高くなり凝縮水量が多くなり、ドレン水流入の危険性が高くなる。そこで、運転中の機関のシリンダ内に水を流入させ、ライナへの影響などを評価した。

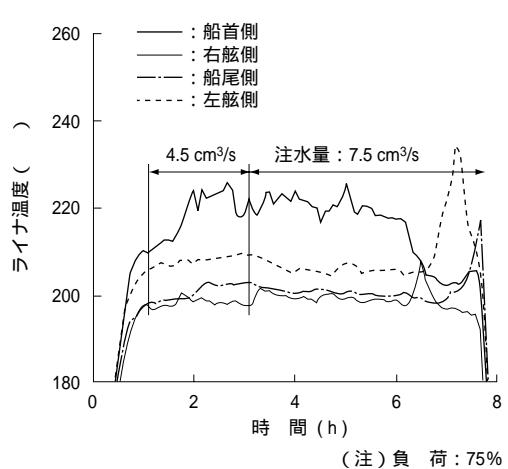
高温多湿域のシンガポール付近の就航船データから 1 シリンダ当たり最大で約 3.6 t/d の凝縮水が発生している。ドレンセパレータの捕集効率を 90% と仮定すると約 4.2 cm<sup>3</sup>/s のドレン水がシリンダに流入することになる。そこで、注水量は 4.0 cm<sup>3</sup>/s と 7.5 cm<sup>3</sup>/s とし、掃気ポート上部のライナ外面に噴霧ノズルで注水し、水滴を掃気流とともにシリンダ内に流入させる方式とした。

第 12 図に水滴流入試験時のライナ温度計測結果を示す。局所的に温度が高い計測位置はリング合口部が温度センサ付近にあったためと考えられる。注水量 7.5 cm<sup>3</sup>/s においても異常な温度上昇は認められなかった。試験終了後のライナ、リングの調査でも特に異常は観察されなかった。第 13 図に水滴流入試験前後のライナ表面ミクロ組織比較を示す。試験前（- (a)）、試験後（- (b)）のライナ表面の顕微鏡観察においても差は認められなかった。これらのことから、7 時間程度の水滴流入ではスカッフィングは生じないと考えられる。



(注) 計測位置はライナ上端からの距離を示す。

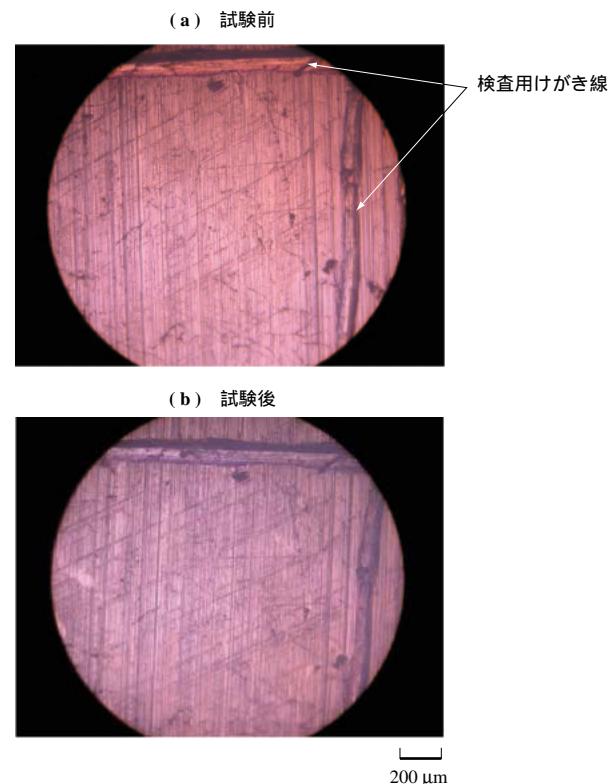
第 11 図 燃料油の着火・燃焼性のライナ表面温度への影響  
Fig. 11 Effect of ignition and combustion properties of fuel oil on liner surface temperature



第 12 図 水滴流入試験時のライナ温度計測結果  
Fig. 12 Measurement results of liner temperature on water inflow test

#### 4.3 燃料油残留触媒粒子の影響

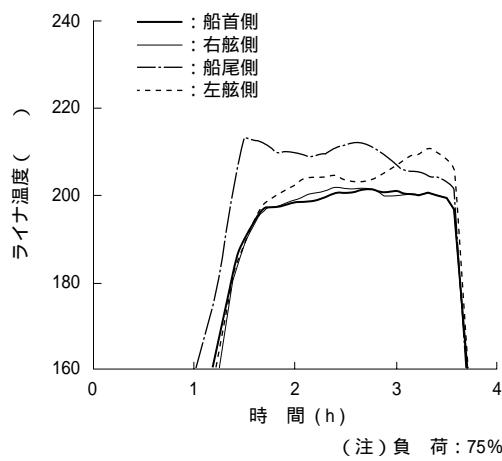
就航船においてシリンダドレン油の鉄分含有量を長期間にわたってモニタした結果、残留触媒粒子が多い燃料油を使用している期間にドレン油中の鉄分含有量が高くなる現象が観察された。これは残留触媒粒子によってリング、ライナの摩耗量が増加したことが考えられる。そこで、残留触媒粒子のリング、ライナへの影響を調査するため、アルミニナ粒子を燃料油に添加し試験を行った。アルミニナ粒子は就航船使用燃料油の調査結果から最大粒径 15  $\mu\text{m}$ 、平均粒径 2.4  $\mu\text{m}$  のものを使用し、アルミニナ混合濃度は 26 ppm



第 13 図 水滴流入試験前後のライナ表面ミクロ組織比較  
Fig. 13 Comparison of liner microscopic surface before and after water inflow test

とした。

第 14 図にアルミニナ添加燃料油のライナ温度への影響を示す。ライナ温度について変化は見られなかった。しかし、

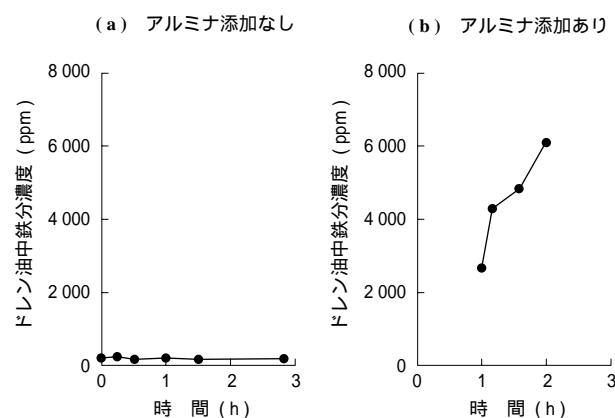


第 14 図 アルミナ添加燃料油のライナ温度への影響  
Fig. 14 Effect of alumina particles in fuel on liner temperature

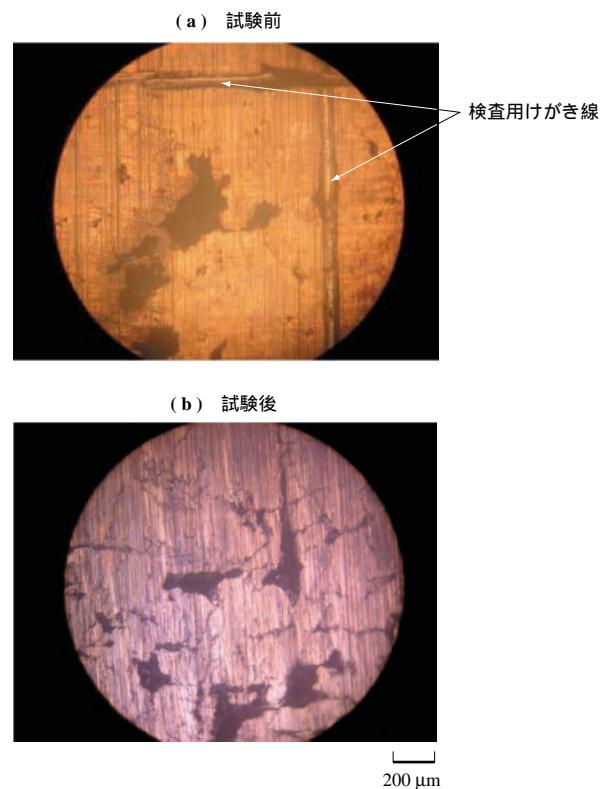
残留触媒粒子がほとんど含まれない A 重油使用時と比べアルミナ添加燃料油使用時にはシリンダドレン油中の鉄分含有量が顕著に増加した。第 15 図にドレン油中鉄分含有量の計測結果を示す。このことからアルミナ添加燃料油使用時にはライナの摩耗が著しく促進したと思われる。試験後のリング、ライナ調査から局所的なハードコンタクトが観察された。第 16 図にハードコンタクトが発生した付近のアルミナ添加燃料油試験前後のライナ表面ミクロ組織比較を示す。試験後 ( - ( b ) ) ではヒートクラックが観察され、局所的ではあるがスカッフィングが生じはじめていたと考えられる。これらのことから燃料油中の残留触媒粒子はライナの摩耗を加速し、局所的ではあるがスカッフィングの要因になることが確認できた。

#### 4.4 シリンダ注油遮断の影響

何らかの原因でシリンダ注油が行われなかった場合を想定し、機関運転中にシリンダ注油を停止し、ライナへの影響を調査した。



第 15 図 ドレン油中鉄分含有量の計測結果  
Fig. 15 Measurement results of iron content in cylinder drain oil

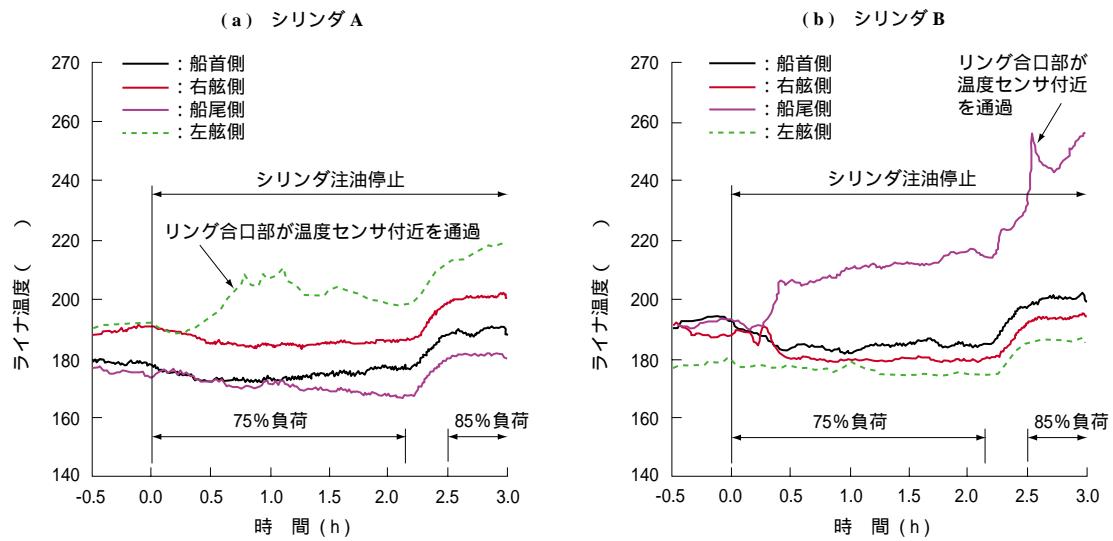


第 16 図 アルミナ添加燃料油試験前後のライナ表面ミクロ組織比較  
Fig. 16 Comparison of liner microscopic surface before and after test

第 17 図にシリンダ注油停止試験時のライナ温度計測結果を示す。シリンダ A ( - ( a ) ) はリング合口部が温度センサー付近を通過したときにライナ温度上昇が見られたが、異常な温度上昇はなかった。シリンダ B ( - ( b ) ) については機関負荷を 75% から 85% に上昇中において、注油を停止してから約 2 時間後に 1 方向のライナ温度が上昇傾向を示した。しかし、試験後のライナ調査ではライナ温度が上昇傾向を示した方向にスクラッチ ( 縦傷 ) が生じていた以外は特に異常は観察されなかった。シリンダ注油を停止してもリング溝などにたまっていたシリンダ油で潤滑されていたものと思われる。以上の結果から、シリンダ注油が一時的に遮断しても直ちにスカッフィングが発生することはないと考えられる。

#### 5. 結 言

舶用機関のピストンリングとシリンダライナのトライボロジー性能の改善は長年にわたって取り組んできた重要課題であり、悪戦苦闘の歴史もあるが、いまだ問題を完全に解決できるレベルには至っていない。本稿ではこれらの研究の一例を紹介した。このほかに、ピストンリングとシリンダライナの材料開発、新しい注油システムの開発、最



第 17 図 シリンダ注油停止試験時のライナ温度計測結果  
Fig. 17 Measurement results of liner temperature on oil interruption test

適なライナ温度の選定、各種シリンダ油の評価、異常監視システムの開発などの研究にも取り組んでおり、これらの研究をねばり強く継続することが問題の解決を図る最も近道であると信じている。

### 謝 辞

実機開陸上試験の実施に当たっては九州大学 高崎教授から貴重なご助言をいただきました。また、本研究全般に関して、株式会社ディーゼルユナイテッドと株式会社アイ・エイチ・アイ マリンユナイテッドの関係各位に多大なご協力とご支援をいただきました。ここに記し、深く感謝の意を表します。

### 参考文献

- (1) S. Saburi, D. Dowson and C. M. Taylor : An Analytical Study of Oil Film Thickness between Piston Rings and a Cylinder Liner of a Long Stroke and Low-Speed Marine Diesel Engine Proc. International Tribology Conference ( 1995.11 )

- pp.1 435 - 1 440  
 (2) 佐分 茂, 只石保弘 : シリンダライナの波状油溝形状とスカッフィングとの関係 トライボロジー会議予稿集 1997 年 11 月 pp.339 - 401  
 (3) 佐分 茂, 岩松久保, 大場隆夫 : ピストンリングとシリンダライナ間ににおける潤滑油膜の挙動解析 日本潤滑学会第 31 回全国大会予稿集 1986 年 11 月 pp.26 - 32  
 (4) 前川和彦, 秋月幸男, 松本 将, 本村 収, 市丸和徳 : シリンダライナ表面の潤滑油挙動評価試験 船用機関学会誌 第 35 卷 第 4 号 2000 年 4 月 pp.238 - 244  
 (5) T. Yamada et al. : Monitoring of Cylinder Liner and Piston Ring on Low-Speed Diesel Engines CIMAC ( 2004 )  
 (6) K. Shiode et al. : Ignition Properties for Marine Fuels Established on the Fuel Ignition Analyzer FIA 100/2 CIMAC ( 1998 )