

# 高負荷転がり滑り接触下における耐摩耗性被膜の安定性と疲労寿命の関係

## Relationship between tribo-film property and fatigue life under heavily-loaded rolling-sliding contact

名工大（学）\*野田 隆悟 名工大（学）光岡 良将 名工大（正）劉 曉旭

名工大（正）前川 寛 名工大（正）糸魚川 文広

Ryugo Noda\*, Ryosuke Mitsuoka\*, Xiaoxu Liu\*, Satoru Maegawa\*, Fumihiro Itoigawa\*

\* Nagoya Institute of Technology

### 1. はじめに

歯車や転がり軸受といった機械要素で生じる転がり滑り接触は過酷な接触状態となり得て、その際には著しい摩耗や疲労損傷が発生する。このような表面損傷を抑制するためにリン系耐摩耗添加剤が処方されることが一般的となっている。しかし、接触面内で生じるリン系耐摩耗添加剤の作用機構を実条件下のもとで明らかにするには in-situ 観察等により詳細なトライボ被膜の構造・組成変化を把握することが必要と考えられるが、未だ実現していない。

本研究は表面粗さオーダーのネジ状テクスチャ（モデル粗さ）を有する試験片を使い摺動面の同一点の形状観察と組成分析を行うことで、in-situ に近い状態での表面変化を観察してきた。ここでは、基油のみ及びリン系添加剤を添加した ATF の 2 油種で転がり滑り試験を実施し、耐摩耗性被膜の安定性と疲労寿命の関係を調査した。ここで、安定性とは被膜厚さの均質さを意味しており、被膜厚さにむらが無いほど安定であるとする。モデル粗さを用いるメリットは、表面損傷の進行にともなう接触状態の変化を粗さ突起毎に異なる接触面圧のランダム性を排除して取り扱うことができる点である。また、粗さの山部は常に接触し谷部は接触しないほど十分な突起高さを有していることから、谷部の被膜成長過程を観察することで、摩耗の影響のない環境温度における被膜の成長が取り出せる。

### 2. 実験装置および実験方法

Figure 1 に著者らが開発した円筒試験機の概略図を示す。本装置は容易に試験途中の試験片脱着による観察および分析を行うために設計した転がり滑り試験機である。観察対象である試験ローラは試料サイズに限界があるような分析装置でも非破壊分析が可能な小径（直径 10 mm）で設計されている。また、小径のローラでも試験荷重によるアライメントのずれが生じない四円筒方式を採用している。

実験は Table 1 に示す条件で行った。試験ローラと駆動ローラの平均周速が 3.3 m/s になるように試験ローラの回転数は 6000 rpm、駆動ローラの回転数は 1184 rpm でサーボモータにより制御されており、任意のすべりを与えることで転がり滑り接触を再現している。一方、二つの支持ローラは試験ローラに連れまわる純転がり接触である。また、支持ローラは幅 3 mm の溝を切り二股にすることで、試験ローラと支持ローラの接触領域が試験ローラと駆動ローラの接触領域と重ならないようにした。

試験ローラおよび駆動ローラは材質がそれぞれ SCM420, SUJ2 でありロックウェル硬さ HRC で 63, 61 である。駆動ローラの表面はエメリー紙で周方向に研磨して二乗平均平方根粗さ  $R_q$  で約  $0.20\text{ }\mu\text{m}$  になるように調整してある。試験ローラには、cBN の高精度切削工具を用いて切削速度 3.3 m/min、送り 0.18 mm/rev、切り込み量 0.01~0.02 mm で旋削加工することで、周期的かつ突起高さのそろったネジ状の加工目を創製した。

分析は任意の繰り返し数において試験を中断し試験ローラを取り外し、触針式粗さ計による断面曲線の測定、レーザ顕微鏡による表面の観察、EDS による原子数濃度の測定を行う。その後、試験ローラを付け直し試験を継続する。

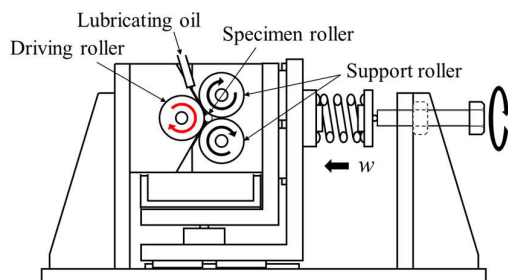


Fig. 1 Four-disk friction tester

Table 1 Experimental conditions

Lubricating oil	ATF	PAO4
Surface roughness ( $R_{zjs}$ ), $\mu\text{m}$	4.603	4.756
Minimum oil film thickness, $\mu\text{m}$	0.055	
Film parameter	0.04	
Slide-roll ratio, %	-10	
Load, N	940	
Oil temperature, $^{\circ}\text{C}$	80	

### 3. 実験結果および考察

巨視的なピッチングが発生し振動が大きくなったタイミングでの試験ローラと駆動ローラの累積接触回数（以下、繰り返し数）を疲労寿命とする。結果としては ATF では繰り返し数  $3.4 \times 10^7$ 、PAO4 では繰り返し数  $1.9 \times 10^7$  で疲労寿

命に至った。

触針式粗さ計によって測定した接触中心付近の粗さ突起 3 つの断面曲線の経時変化とその位置の繰り返し数  $3 \times 10^6$  におけるレーザ顕微鏡画像を Fig. 2 に示す。断面曲線から ATF では 3 つの突起において突起中央を中心として丸みを帯びていることが確認できる。一方で、PAO4 では突起中央に対して左右がへこんでいるような形状になっている。これはレーザ顕微鏡の観察画像中の白く被膜が確認できないような位置と対応している。つまり、酸化鉄被膜がはがれるように摩耗し取り去られることによってできた形状であると考えられる。

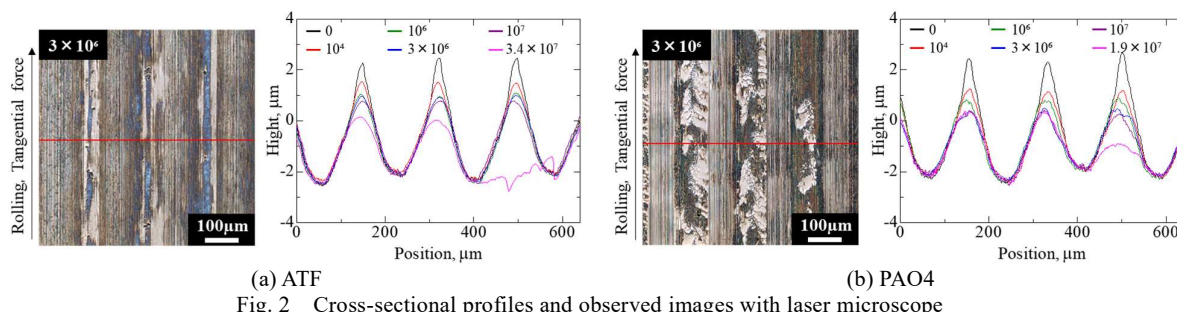


Fig. 2 Cross-sectional profiles and observed images with laser microscope

次に、Fig. 3 に EDS を用いて測定した酸素原子数濃度の時間変化を示す。白抜きのグラフが接触していない谷部の原子数濃度の変化であるが、被膜の成長が穏やかになったと考えられる繰り返し数  $5 \times 10^6$  以降から疲労寿命に至る前の範囲において原子数濃度が同程度であることがわかる。このことから、今回の試験条件においては、摩耗が関与せず入熱量のみが影響する場合では酸素原子数濃度が同程度であるといえ、同様の摩耗であれば原子数濃度が同程度になると考えることができる。次に山部に着目すると、ATF では繰り返し数  $3 \times 10^6$  まで原子数濃度が上昇する。そして、少しオーバーシュートした後繰り返し数  $5 \times 10^6$  から定常になっていることがわかる。一方で、PAO4 では初期において原子数濃度が急上昇し、繰り返し数  $1 \times 10^6$  において急激に低下している。この低下は酸化鉄被膜がはがれるように摩耗したタイミングと等しい。また、減少したときの原子数濃度は ATF の原子数濃度と同程度であることがわかる。そして、繰り返し数  $7 \times 10^6$  から原子数濃度が上昇している。これは摩耗が進行し、応力が緩和したことで再度、被膜が厚く成長したためだと考えられる。以上のことから、ATF では被膜の成長と摩耗により被膜が取り去られるサイクルが非常に短い周期かつ小さい規模で発生しており、PAO4 では周期が長く大きな規模で繰り返され、表面が変化していることが示唆される。PAO4 におけるこの長周期の剥離サイクルが表面の被膜むらを生じさせている。

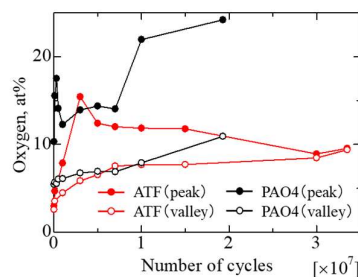


Fig. 3 Atomic number concentration of oxygen

Figure 4 に PAO4 におけるピッチングの起点となったき裂周辺の観察画像を示す。観察画像からき裂が発生している位置は上述の被膜むらの境界部であることがわかる。長周期の被膜剥離は深い凹部を作り出すため、被膜むら境界部は応力集中により負荷振幅が大きくなる。そのため、PAO4 では疲労寿命が短くなったと考えられる。

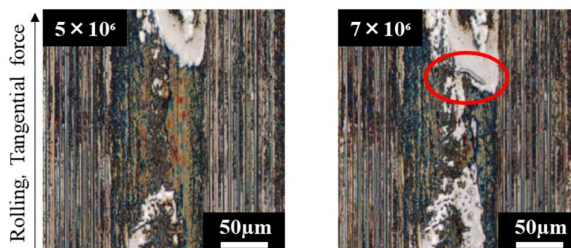


Fig. 4 Observed images with laser microscope (PAO4)

#### 4. おわりに

本研究では、基油のみ及びリン系添加剤を添加した ATF を用いた場合の 2 種類において転がり滑り試験を実施し、耐摩耗性被膜の安定性と疲労寿命の関係に着目した。結果としては被膜の成長と被膜が取り去られるサイクルの周期が長く、規模が大きい PAO4 の寿命が短くなった。これは、PAO4 では被膜にむらが生じ被膜が厚い場所と薄い場所の境目において高い応力が加えられることによって生じた結果であると考えられる。また、PAO4 と ATF において被膜の安定性に差が生じた理由として、ATF ではリンが反応しリン系の被膜を生成することで金属内部への酸素の拡散が阻害され、マトリックスである鋼とは機械的性質の異なる含酸素被膜の成長が穏やかで酸化鉄被膜に比べ薄いこと、リン酸鉄被膜が摩擦係数を低減し摩擦発熱量が小さく被膜成長が穏やかであることの 2 つが考えられる。以上のことから、リン系添加剤では被膜の機械的性質のみならず、表面に生成する被膜の成長/摩耗の平衡状態変化が穏やかで安定であることが疲労寿命向上に寄与していると考えられる。

#### 文献

- 1) 白濱・宮島・岡村：転がり疲れに及ぼすリン系添加剤の影響，トライボロジスト (2001)