

転がり滑り条件において硫黄系添加剤が初期なじみによる表面性状変化に及ぼす影響

Effect of Sulfur Additives on Surface Property Change by Initial Running-In under Rolling-Sliding Contact

名工大（院）*笠原 嘉人 名工大（正）劉 曉旭 名工大（正）前川 寛 名工大（正）糸魚川 文広

Yoshito Kasahara*, Ryosuke Mitsuoka*, Xiaoxu Liu*, Satoru Maegawa*, Fumihiro Itoigawa*

* Nagoya Institute of Technology

1. はじめに

リン系耐摩耗添加剤がピッチング寿命を向上させるメカニズム¹⁾⁸⁾⁹⁾に注目し、転がり滑り条件における疲労試験を実施してきた。その結果よりマイクロピッチングの起点となる表面欠陥は粗さ突起先端の接触負荷が高いなじみ時に、激しい塑性流動により導入されるが、リン系添加剤によるリン酸鉄被膜の生成は、その後の応力振幅を低減しマイクロピッチングに至るまでの時間を延ばすことで、その集積を防ぎ疲労寿命を延ばしていることを示した。

一方でリン系添加剤濃度を高めると、凸部のみならず凹部も反応が進行するため、面圧を下げる凸部の平坦化が阻害され、亀裂を進展させる応力振幅が減少し難くなり、マイクロピッチングの生成が促進されるという結果となった。歯車減速機の小型・軽量化傾向を考えると、高負荷環境でも耐疲労性能を発揮できる添加剤が必要である。一般的に硫黄系極圧添加剤は高温・高負荷で耐焼付き性を発揮する添加剤として知られているが、高負荷運転時のマイクロピッチングの発生とその集積に対する効果は不明である。しかし、局所的に高負荷接触環境と考えられるなじみ時の粗さ突起頂部で犠牲層生成による選択的摩耗と応力緩和が生じるのであれば、初期に導入されたき裂にかかる応力振幅が小さくなり耐マイクロピッチング性が向上すると考えられる。

ここでは代表的な硫黄系添加剤の一つである DBDS (Di-Benzyl Di-Sulfide) とリン系添加剤の一つである TCP (Tri-Cresyl phosphate) の単一処方油と DBDS と TCP の処方油を用いて、高負荷転がり滑り試験を行い、極なじみ初期の表面プロファイルや表面粗さのテクスチャが変化の様子を詳細に調べた。それら観察結果を比較することで、硫黄系極圧添加剤が初期なじみ時の表面性状変化に及ぼす影響を調べた。

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。本装置は試験途中の試験片脱着による観察・分析とその後の継続試験が容易に実施できることを特徴とする転がり滑り試験機である。観察対象である試験ローラは多くの化学分析装置試料室の寸法制限内となるサイズとし、試験途中での非破壊分析を可能とする小径（直径 10 mm）に設計されている。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は何れもサーボモータで速度制御されており、任意の滑り率が設定可能である。ここでは平均周速が 3.3 m/s、滑り率 10% と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 とした。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、支持ローラは幅中心位置に 3 mm の溝が設けられており、試験ローラと支持ローラの接触領域と接触領域が重ならないよう荷重を支持できる。

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。各ローラの表面はエメリー紙で周方向に研磨した。試験ローラの二乗平均平方根粗さは R_q で約 $0.08 \mu\text{m}$ 、駆動ローラおよび支持ローラの二乗平均平方根粗さは R_q で約 $0.20 \mu\text{m}$ となるよう調整した。

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。

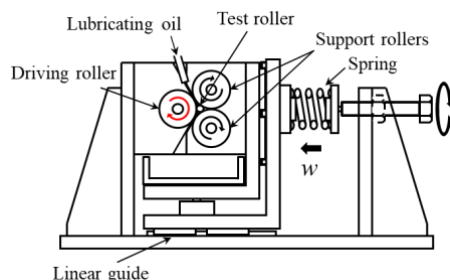


Fig. 1 Four-disk friction tester

Table 1 Experimental conditions

Base oil	PAO4
Surface roughness (R_q), μm	0.08
Minimum oil film thickness, μm	0.055
Slide-roll ratio, %	-10
Load, N	940
Oil temperature, $^{\circ}\text{C}$	80

3. 実験結果および考察

PAO4 に DBDS と TCP をそれぞれ 0.1 mass% 添加した複合処方油 S0.1P0.1 と、S 濃度は変えず TCP を 0.3 mass% 添加した複合処方油 S0.1P0.3、単体処方油 P0.1、P0.3 の試験を比較する。Figure 2 に触診式粗さ計を用いて測定した各試験片のプロファイル曲線の経時変化を示す。プロファイル曲線から粗さ突起を抽出し算出した平均曲率半径を R で示す。結果を比較すると、繰返し数 3×10^3 において S0.1P0.1 の曲率半径は $974 \mu\text{m}$ であり P0.1 の $628 \mu\text{m}$ と比べて 55% ほど大きい。さらに、S0.1P0.3 の曲率半径は $682 \mu\text{m}$ であり P0.3 の $439 \mu\text{m}$ と比べて 55% ほど大きい。すなわち TCP 単体処方油と DBDS 追添油を比較すると DBDS は摺動初期において曲率半径を 55% 程度大きくする効果がある。この効果より硫黄系添加剤が粗さ突起頂部をトランケートし、応力振幅を減少していると考えられる。

Figure 3 に同時に EDS を用いてリン原子数濃度と硫黄原子数濃度を測定した結果を示す。なじみ後の S0.1P0.3 は S0.1P0.1 よりリン原子数濃度が約 1.6 倍の値が高く、硫黄原子数濃度が約 0.58 倍の値で低い。これよりリン酸鉄被膜がより成長していることがわかる。加えてなじみ時に両者 S の作用が見られ、その後の被膜成長においては TCP の分圧差によるリン原子数濃度の差が見られた。

以上のことから局所的に高負荷接触環境と考えられるなじみ時の粗さ突起頂部で硫黄系添加剤により犠牲層生成による選択的摩耗と応力緩和が生じたと考えられる。しかし繰返し数 3×10^3 以降では DBDS の腐食性により谷部を広げるような摩耗が見られた。そして、S0.1P0.3 の TCP 濃度を高めた場合では、繰返し数 3×10^3 において DBDS の応力緩和効果を示しつつ、繰返し数 3×10^3 以降の硫黄系添加剤による犠牲層が除去された部分ではリン酸鉄被膜が硫黄系皮膜よりも優先的に生成され、その後の応力振幅を低減していると考えられる。この初期なじみによる表面形状変化がマイクロピッチングの発生の抑止につながるかは、継続的に調査していく予定である。

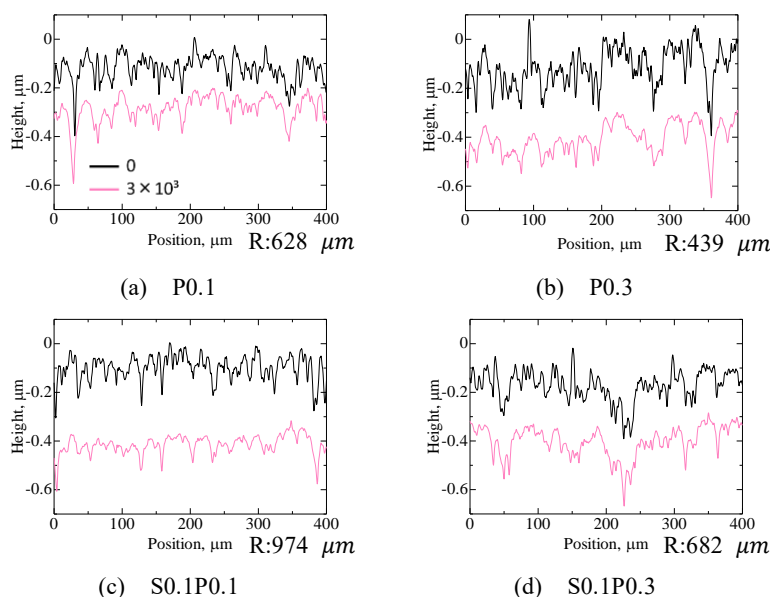


Fig. 2 Cross-sectional profiles

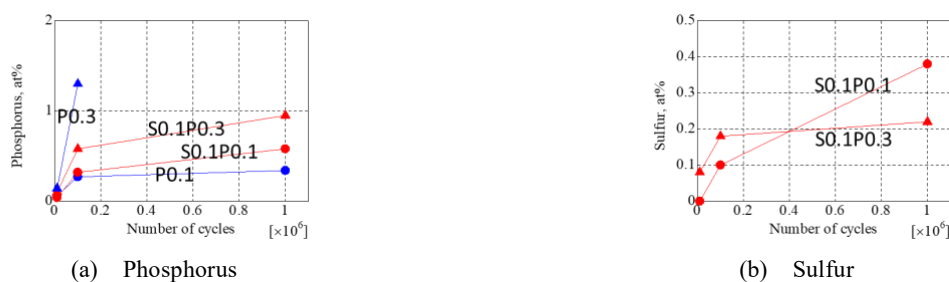


Fig. 3 Atomic Concentration

4. おわりに

本研究では、DBDS 添加による高負荷接触時の応力緩和効果を評価した。その結果 DBDS が初期なじみ時に応力振幅を低減する形状を生成し、なじみ後に谷部を広げる摩耗を促進している可能性が示唆された。なお TCP 分圧を高くすると初期なじみ効果を示しつつなじみ後のリン酸鉄被膜の成長が促進された。この初期なじみによる表面形状変化とマイクロピッチングの発生との関係性は継続的に調査していく予定である。

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，46，7 (2001) 564-570。
- 2) G.E. Morales-Espejel, P. Rycerz, A. Kadiric, Prediction of micropitting damage in gear teeth contacts considering the concurrent effects of surface fatigue and mild wear, Wear, 398-399, (2018), pp.99-115
- 3) Mao Ueda, Hugh Spikes, Amir Kadiric, In-situ observations of the effect of the ZDDP tribofilm growth on micropitting, Tribology International, 138, (2019), pp.342-352