

硫黄系添加剤が転がり滑り条件下のなじみ過程に及ぼす影響

The effect of Sulfur Additives on Running-in Process under rolling-sliding contact

名工大（学）*笠原 嘉人 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

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⁾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²⁾。

一方でリン系添加剤の反応性を高めると、高面圧条件において凹凸の高さに拠らず穏やかな摩耗が進展するため、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、激しい塑性変形による欠陥導入は減少し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) の単一処方油を用いて、高負荷転がり滑り試験を行い、表面プロファイルや表面粗さのテクスチャが変化する様子を詳細に調べた。それら観察結果を無添加鉱油やリン系添加剤の場合と比較することで、硫黄系極圧添加剤がマイクロピッチングの起点となる欠陥導入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ー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 μm 、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 μm 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。

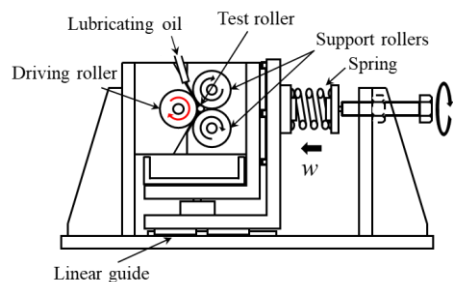


Fig. 1 Four-disk friction tester

Table 1 Experimental conditions

Lubricating oil	PAO4+DBDS (1 mass%)	PAO4
Surface roughness (R_q), μm	0.067	0.127
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 を 1 mass% 添加した潤滑油と、PAO4 単体での試験を比較する。Figure 2 に触針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。Figure 2 より DBDS の試験では、繰り返し数 0 から 10^4 までの

プロファイル変化が PAO に比べ小さい。この時点では初期に接触を開始する微細な粗さ突起はある程度残存しており、著しい塑性変形や摩耗が抑止されたことが分かる。一方、繰り返し数 10^4 以降は PAO に比べプロファイル変化の程度は大きいことが分かる。この時点で微細な粗さはほぼ見られなくなった。さらに、繰り返し数 10^5 から 10^6 においてもプロファイル変化は継続しており、 $100\text{ }\mu\text{m}$ 程度のうねりも除去された。この期間における PAO（リン系添加剤の場合も）のプロファイル変化は著しく小さく、 $100\text{ }\mu\text{m}$ 程度のうねりは繰り返し数 10^4 以降で大きく変化しない。

Figure 3 にレーザ顕微鏡を用いて観察した接触域の経時観察画像を示す。PAO の試験では繰り返し数 10^4 で僅かに酸化被膜が生成されはじめ、繰り返し数 10^5 で全体に青色の酸化鉄被膜が成長している。一方、DBDS の試験では繰り返し数 10^4 では黒みがかった色の被膜が生成されるが、その後繰り返し数 10^5 ではその黒い被膜は消失した。繰り返し数 10^6 では被膜が成長したものの PAO のように一様な緻密な膜とはならなかった。同時に測定した EDS による硫黄と酸素の原子数濃度の経時変化は、DBDS の試験では、繰り返し数 10^4 において硫黄と酸素の原子数濃度が高く、繰り返し数 10^5 では両者ともに低下し、その後再度増加した。また、この酸素原子数濃度は PAO4 の試験に比べて低い結果となった。

以上のことから、DBDS は繰り返し数 10^4 までの局所高負荷接触時に生成される耐摩耗性被膜は 10^5 以降に生成される被膜とは異なる組成であり、接触応力を局所的に緩和するが、容易に摩滅する被膜であると考えられる。初期の酸素原子数濃度が高いことと併せて考えると、繰り返し数 10^4 で生成された黒い被膜は硫酸鉄であると推察される。また、その後成長する一様でない被膜は硫化鉄と酸化鉄が混在したものと考えられる。これらの被膜生成と表面のプロファイル変化の関係は現時点で不明であるが、DBDS が高負荷条件で耐摩耗効果を発現し、その後も反応生成物の形態を変えながら表面の凹凸振幅を低下させるように作用している可能性が示唆された。この摩耗形態がマイクロピッチングの発生を抑止につながるかは、継続的に調査していく予定である。

4. おわりに

本研究では、DBDS 添加による高負荷接触時の摩耗特性を評価した。その結果 DBDS が高負荷条件で耐摩耗効果を発現し、その後も反応生成物の形態を変えながら表面の凹凸振幅を低下させるように作用している可能性が示唆された。この摩耗形態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。

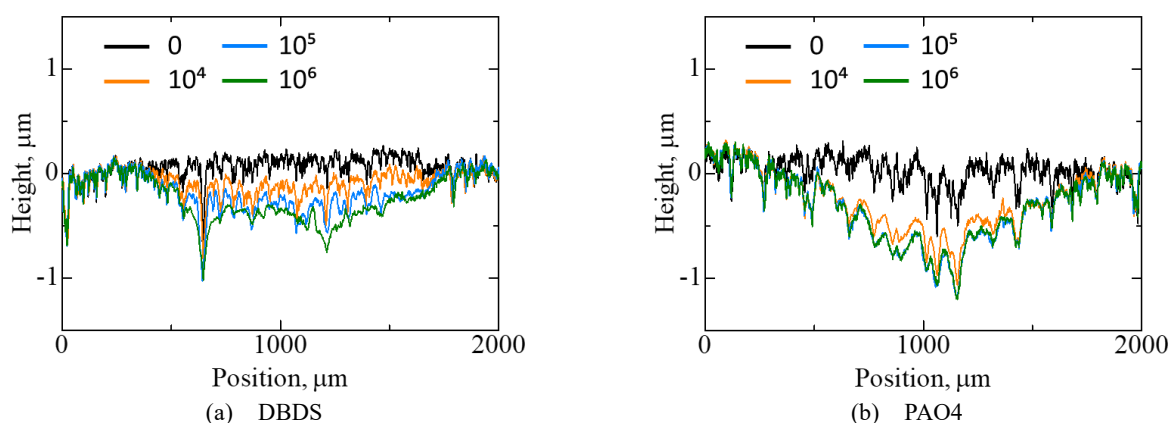


Fig. 2 Changes of surface profile

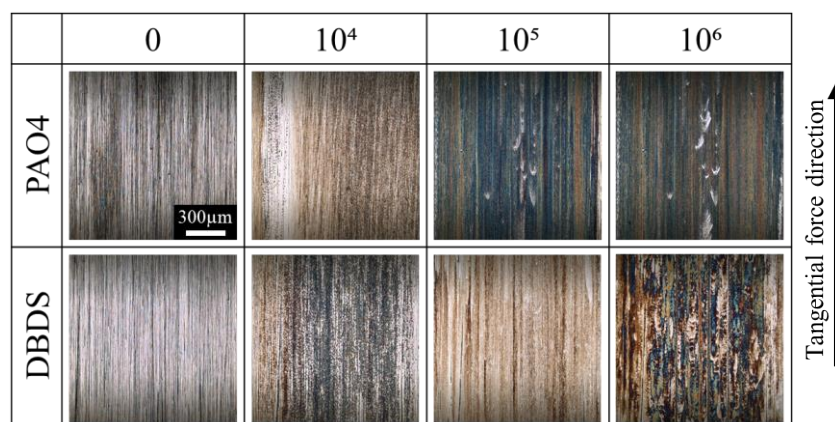


Fig. 3 Confocal laser microscope images

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) 高島弘希，糸魚川文広：転がり滑り接触面におけるなじみ現象の経時観察，日本機械学会年次大会原稿集 (2019)