

S11213

多孔質材料を用いた低電流用電気しゅう動接点のトライボロジー特性に及ぼす 潤滑油酸化の影響

Effects of Lubricating Oil Oxidation on Tribological Characteristics of Low-Current Electric Sliding Contacts Made of Porous Materials

○正 吉田 浩之^{*1}, 金子 覚^{*2}, 田浦 裕生^{*2}, 境野 恵理^{*1}
Hiroyuki YOSHIDA^{*1}, Satoru KANEKO^{*2}, Hiroo TAURA^{*2} and Eri SAKAINO^{*1}

^{*1} 株式会社ミツバ MITSUBA Corporation

^{*2} 長岡技術科学大学 Nagaoka University of Technology

In recent years, with the demand for lower electricity consumption and longer life of automobiles, it is required to reduce current consumption and improve the reliability for electric sliding contacts. In this study, for the purpose of lower current consumption and reliability improvement of the sliding contacts, the tribology characteristics (coefficient of friction and electrical conductivity) of the sliding contacts made of impregnated porous material were experimentally examined to determine the impact of oxidized lubricant in the impregnated porous material upon these characteristics. The experiment on the tribological characteristics was conducted using a pin-on-disk friction test machine and a surface analysis device. As a result, the following findings were obtained. The oxidation of the lubricant in the porous material increased the lubricant viscosity and enhanced generating the oxide film on the sliding surface, causing an increase in the friction coefficient of the sliding contacts. Besides, the addition of oxidation inhibitor and corrosion inhibitor to the lubricant decreased the amount of carboxylate on the sliding surface generated by the oxidation of the lubricant, contributing to the reduction of a deterioration in the electrical conductivity.

Key Words : Sliding contacts, Porous materials, Tribological characteristics, Oxidation, Lubricating oil, Additive

1. 結 言

相対運動する物体の間に電流を流す電気しゅう動接点は自動車用電装品に広く用いられている。最近の自動車の低燃費および長寿命化の要求にともない、電気しゅう動接点には低電流化や信頼性の向上が求められている。一般に、電気しゅう動接点の低電流化には高い通電性が必要となる一方、信頼性の向上には機能寿命を延ばすという特性が要求される。これは、しゅう動部には通電を低下させることになる厚い潤滑油膜を発生させずに機能寿命に関わる耐摩耗性を向上させるという、背反する性能向上を要求されていることを意味する。トライボロジーの視点から通電性と長寿命とを両立する潤滑状態には、しゅう動面に流体膜と境界潤滑膜および金属接触部が混在する混合潤滑が望ましく、この点で金子ら⁽¹⁾は、自己潤滑軸受の材料として多用されている多孔質材料をしゅう動接点に用い、トライボロジー特性および通電性を実験的、理論的に解析し、多孔質材料の透過率がそれら特性に及ぼす影響を明らかにしている。しかし、解析においては、しゅう動面は運転中に変化しないとしているが、実際は、しゅう動表面の状態は運転時間や放置時間とともに変化しており、その影響は考慮されていない。

そこで本研究では電気しゅう動接点に潤滑油（基油（PAO）および酸化防止剤、腐食防止剤添加油）が含浸された多孔質材料を用い恒温環境下に放置し、潤滑油の酸化による反応膜の状態と電気しゅう動接点のトライボロジー特性との関係を実験的に解析し、それらがトライボロジー特性に及ぼす影響を明らかにする。

2. 実験装置および実験方法

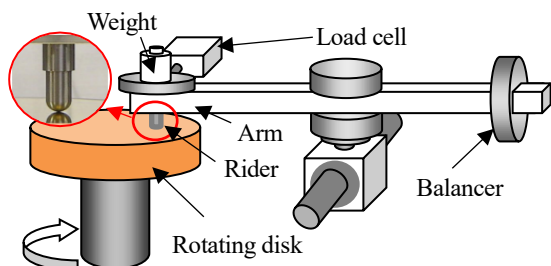


Fig.1 Schematic diagram of the experimental apparatus

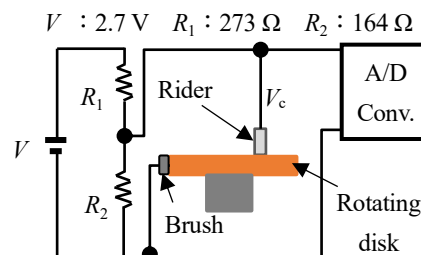


Fig.2 Measurement circuit

Table 1 Specifications of rider

Rider material	SUJ2
Curvature radius R [mm]	2.8
Length L [mm]	5.6
Width B [mm]	5.6
Roughness R_a [μm]	0.02
Vickers hardness HV	780

Table 2 Specifications of disks

Disk material	Bronze Cu-Sn-(C)
Diameter [mm]	40
Thickness [mm]	8.0
Permeability k [m^2]	1.2×10^{-13}
Relative density [%]	76

Table 3 Experimental conditions

Applied load W [N]	1.0
Disk rotating speed U [m/s]	0.03 ~ 0.35
Lubricating oil (Base oil)	PAO
Viscosity η_0 [$\text{Pa} \cdot \text{s}$]	0.59 (@26°C)
Additive A (1.5mass%)	Octylated diphenylamine
B (1.5mass%)	2,6-Di-tert-butyl-4-methylphenol
C (1.5mass%)	Benzotriazole

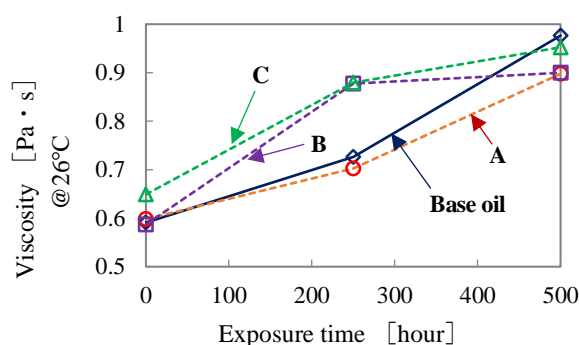


Fig.3 Extracted oil viscosity versus exposure time

図1に実験装置の概略を示す。自由に回転できるアーム先端に設置したライダー（固定面）を回転ディスク（運動面）に押し付けてしゅう動される構成である。ライダーは軸受鋼 SUJ2 製で、しゅう動面は半球面形状である。表1に仕様を示す。回転ディスクは青銅系の多孔質材料であり、潤滑油を真空中で含浸させた。表2に仕様を示す。アームは中間部に押し付け方向と、水平面方向に回転を可能とする支点がある。ピンと反対側の端に取り付けられたバランス重りで無荷重の状態にしたのち、ピンの上部より分銅を用いて静荷重を負荷した。またアーム側面に取り付けられたピンを介してロードセルにより回転方向のトルクを測定した。ライダーと回転ディスク間の電圧 V_c を図2の回路を用いて測定した。得られた V_c より、分離度 $\tau (=V_c/V_d)$ を計算した。ここで V_d ($\approx 1.0\text{V}$) は非接触時の二面間の電圧で、 $\tau=1$ で絶縁状態、 $\tau=0$ で常時通電状態である。

表3に実験条件および潤滑油中の添加剤成分と添加量を示す。本研究では各条件において、3回測定し、計測データの平均値を実験値として用いた。得られた結果は、無次元数 $S (= \eta UL/W)$ を用いて評価する。

実験は基油 (PAO) のみ、基油に添加剤 A: アミン系酸化防止剤 (添加剤 A), B: フェノール系酸化防止剤 (添加剤 B), C: 腐食防止剤 (添加剤 C) のいずれか1種類が添加された添加剤油に含浸された計4種類の回転ディスクで行った。4種類の回転ディスクを 140°C に設定した恒温槽内でしゅう動表面が露出されるように放置した。回転ディスクを各一定時間 (0h, 250h, 500h) 放置後に取り出し、摩擦係数 μ および分離度 τ と軸受特性数 S との関係求めた。その際 S の値を変化させるために、荷重 W 一定の下で回転速度 U を変化させた。この一連の実験は、 U の低い値から増加させる方法で行った。 μ および τ と S との関係求めたのち、ヘキサンを用い、回転ディスク内の潤滑油の抽出および回転ディスク表面の洗浄を行った。抽出液はヘキサンを取り除いたのち、回転

粘度計 (Brookfield 製 DV-III ULTRA) を用いて、抽出油の粘度測定に使用した。その結果を図 3 に示す。本文中の S 値は図 3 の η 値を使用した。回転ディスクは洗浄後の μ および τ の測定と表面状態の分析に使用した。

3. 結果及び考察

3・1 高温放置後の摩擦係数および分離度

図 4 に一定時間 (0h, 250h, 500h) 放置した各回転ディスクを用いた実験の摩擦係数 μ および分離度 τ と軸受特性数 S との関係を示す。 μ は、測定した S の範囲内では、放置時間にもない高い値を示す。また潤滑油種に関係なく同様の μ 曲線を示す。放置後の τ は 0h と比較高い値を示す。一方その傾向は基油と添加油 A, B, C とで異なる。基油の場合、放置後の時間に関係なく τ 値は概ね 0.3 と一定の値を示す。添加油 A, B, C の場合、 τ 値は 250h (0.2 から 0.3) > 500h (0.13 から 0.23) である。また添加油 A, B, C による特性差はほとんどない。以上のことから、基油に添加された添加剤 A, B, C は τ 値の上昇を抑える。

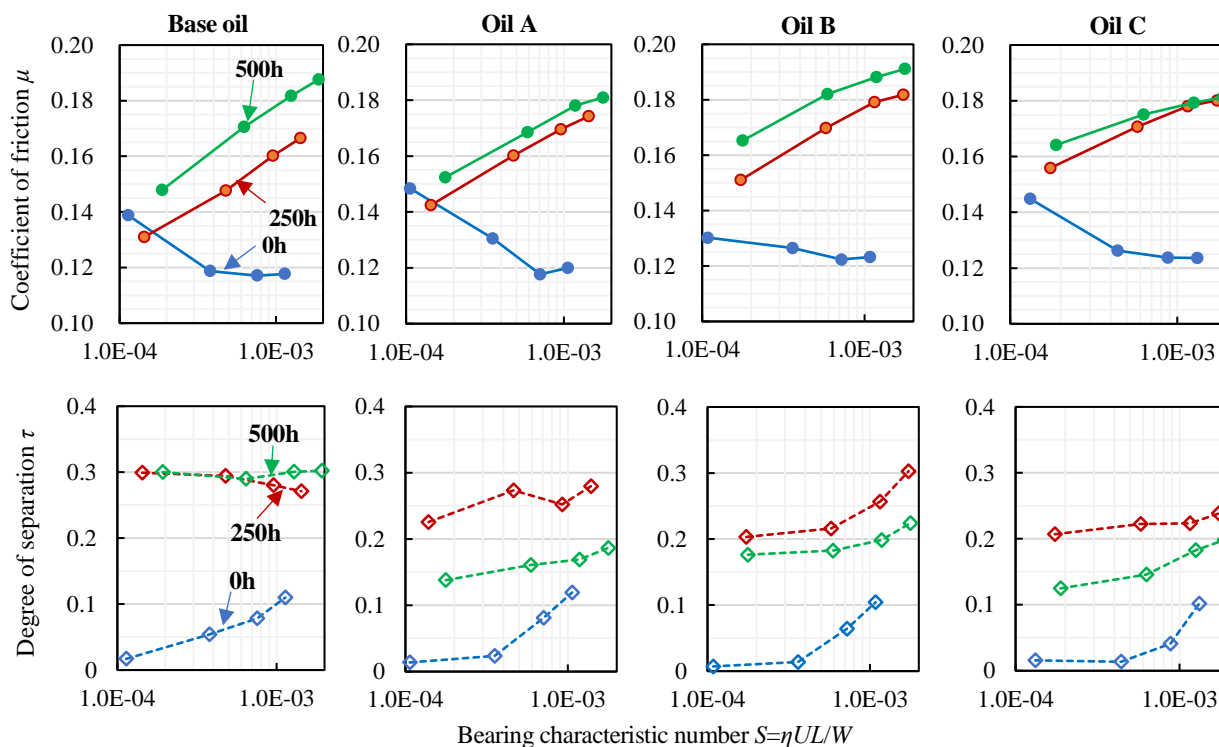


Fig.4 Coefficient of friction μ and degree of separation τ versus bearing characteristic number S

3・2 しゅう動表面洗浄状態での高温放置後の摩擦係数および分離度

ライダと回転ディスク間の潤滑が流体膜を主とするものであれば、放置時間に関係なく μ および τ は S の一価関数として表せる。一方 3・1 項では、ライダと高温放置された回転ディスク間の μ および τ は S の一価関数として表すことができず流体膜以外の潤滑膜の存在が示唆された。そこで、流体膜が排除されたヘキサン洗浄後の回転ディスクを用い (ドライ環境下) μ および τ の測定値より、流体膜以外の潤滑膜の状態を検討する。図 5 に μ および τ と軸受特性数 $S' = \eta_1 UL/W$ (η_1 : 気体粘度 $1.8 \times 10^{-5} [\text{Pa} \cdot \text{s}]$) との関係を示す。添加油 A の μ は 0.22~0.25 と放置時間に関わらず概ね同じ値を示す。その他の潤滑油の μ は放置時間に関わらず、測定した S' の範囲内で 0h よりも低い値を示す。また、0h からの低下は基油が最も大きく、添加油 B と C は小さい。一方 τ 曲線の挙動は、すべての潤滑油で 0h が低く 250h と 500h では概ね同じ値を示す。また、250h と 500h の値は、添加油 C が 0.13 から 0.2 と最も低く、添加油 A と B は 0.2 から 0.3 の値を示し、基油は 0.3 から 0.35 と高い値を示す。これらのことから、 140°C で放置された回転ディスクのしゅう動表面には潤滑油の酸化による反応膜 (トライボフィルム)

の生成⁽²⁾が推測され、その生成量は基油と添加油とで異なると考えられる。次項では、トライボフィルムの生成状態の詳細を検討する。

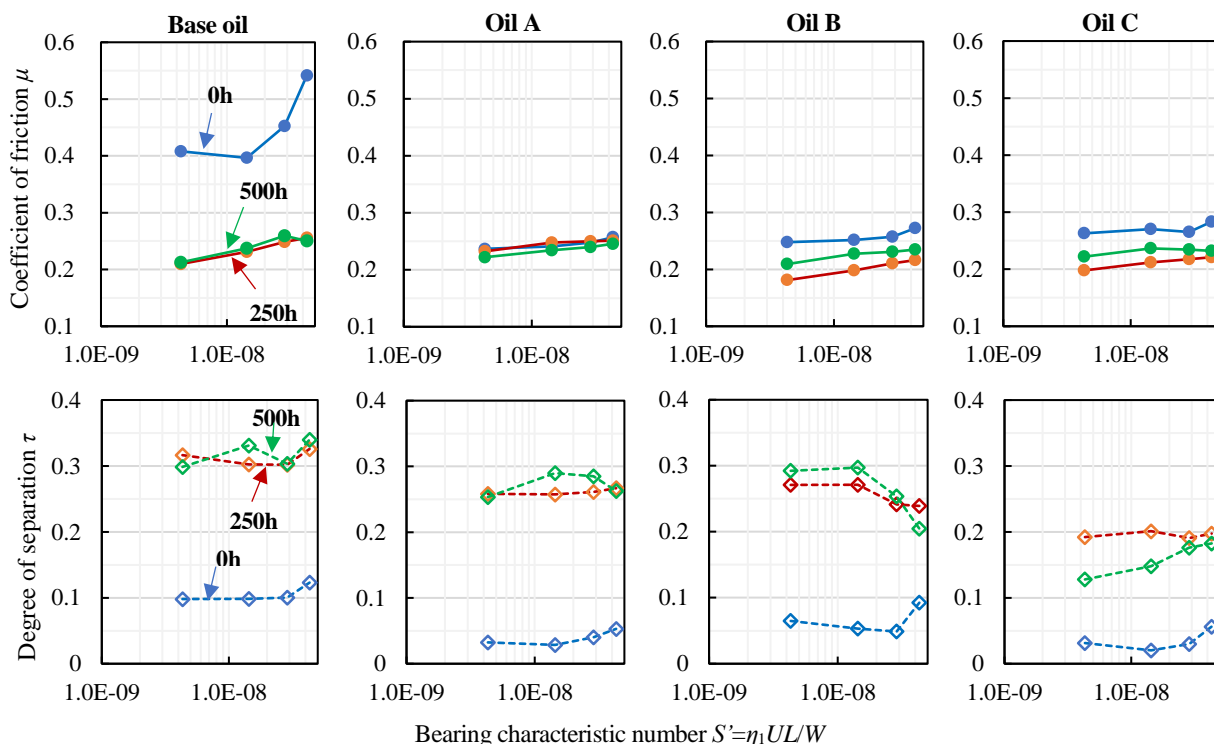


Fig.5 Coefficient of friction μ and degree of separation τ versus bearing characteristic number S

3・3 回転ディスクのしゅう動表面状態

ヘキサン洗浄後の回転ディスクのしゅう動表面のトライボフィルムの生成量を走査型電子顕微鏡 SEM (日立製 S-3400N, 加速電圧 15kV, 測定範囲 $100 \times 100 \mu\text{m}$) およびエネルギー分散型 X 線分析装置 EDS (オックスフォード・インストルメンツ製) を用い、しゅう動表面に存在するトライボフィルム (潤滑油の酸化物) の主元素である酸素および炭素の質量濃度から分析した。図 6 に回転ディスクのしゅう動表面の酸素および炭素の質量濃度と放置時間との関係を示す。酸素の質量濃度は、基油が最も高い。また放置時間とともに増加する (酸化の促進)。添加油 A, B は概ね同じある。また 250h から 500h では微増する (酸化の鈍化)。添加油 C は 250h までは添加油 A, B と同等で、以降 500h までは概ね一定の値を示す (酸化平衡)。一方、炭素の質量濃度は、基油、添加油 B および C では 250h をピークに以降 500h まで微減する。添加油 A では 250h から 500h まで概ね一定の値を示す。また基油の炭素の質量濃度は添加油 A, B, C と比較して高い値を示す。以上の結果から、添加油 A, B, C のしゅう動表面のトライボフィルムの生成量は基油と比較して少ない。

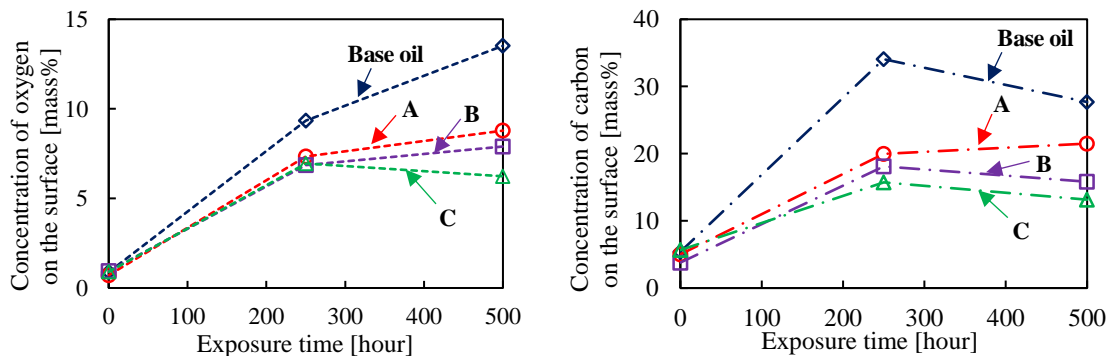


Fig.6 Concentration of oxygen and carbon on the surface versus Exposure time

3・4 回転ディスクのしゅう動表面状態とトライボロジー特性

図7に、図5に示した各潤滑油の放置時間ごとに求めた測定値（4点）の平均値の摩擦係数 μ' および分離度 τ' と酸素と炭素の総質量濃度との関係を示す。 μ' は図中左上 Δ （基油 0h）のシンボルを除き酸素と炭素の総質量濃度に関わらず概ね0.25の一定値を示す。一方 τ' は酸素および炭素の総質量濃度とともに変化し、酸素および炭素の総質量濃度に概ね比例している。図中右上 Δ のシンボルは基油の放置後（250h, 500h）の値である。

よって、基油に添加された添加剤 A, B, C は、高温放置前（0h）の μ 値を低減させ、回転ディスクのしゅう動表面のトライボフィルムの生成量を抑制（境界潤滑膜の抑制）することで τ の増加を抑える。

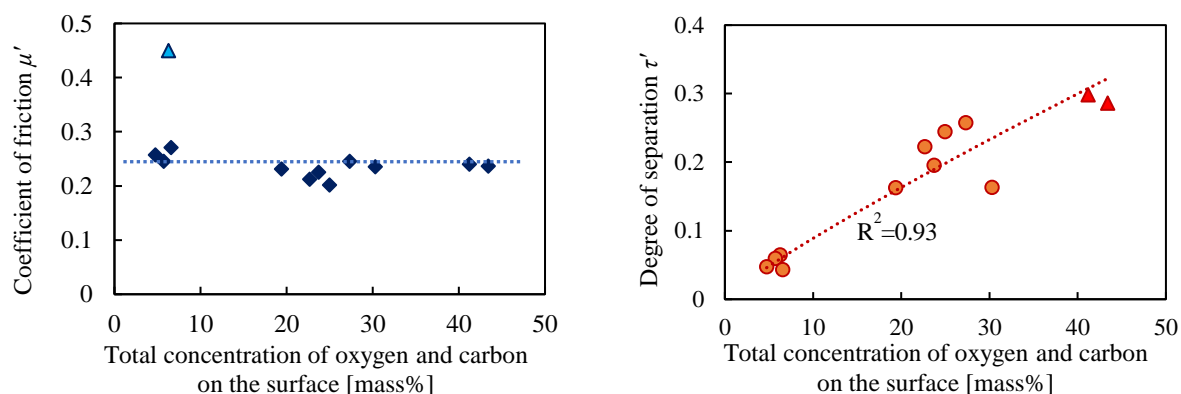


Fig.7 Total concentration of oxygen and carbon on the surface versus tribological characteristics

4. 結 言

電気しゅう動接点に潤滑油（基油（PAO）および酸化防止剤，腐食防止剤添加油）が含浸された多孔質ディスクを用い，140℃の高温に一定時間放置し，その後の多孔質ディスクしゅう動表面（回転側）の潤滑油の酸化による反応膜の状態と電気しゅう動接点のトライボロジー特性との関係を実験的に調べた結果，以下の知見が得られた。

1. 高温に放置されていない（放置時間 0h）のディスクと比較して一定時間放置されたディスクを用いた場合は，含浸したいずれの潤滑油に対しても，ライダと回転ディスク間の摩擦係数 μ は増加する。また，いずれの含浸油に対しても，各放置時間における μ の S 値に対する変化は概ね同じ傾向を示す。
2. 高温に放置されていない（放置時間 0h）のディスクと比較して一定時間放置されたディスクを用いた場合は，含浸したいずれの潤滑油に対しても，ライダと回転ディスク間の分離度 τ は高い値を示す。またその傾向は，基油と添加油 A, B, C とで異なり，添加剤 A, B, C を加えることで回転ディスクのしゅう動表面の潤滑油の酸化は抑えられ， τ 値の上昇は低減する。

文 献

- (1) 金子覚，田浦裕生，“多孔質含油軸受材料を用いた電気しゅう動接点のトライボロジー特性”，日本機械学会論文集 C 編，Vol. 78, No. 791 (2012), pp. 259-269.
- (2) 吉田浩之，金子覚，田浦裕生，境野恵理，“多孔質含油材料を用いた低電流用電気しゅう動接点のトライボロジー特性”，[No.19-1] 日本機械学会 2019 年度年次大会 DVD-ROM 論文集 [2019.9.8-11, 秋田]