

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中の酸化防止剤の影響

Effects of Antioxidants in Lubricating Oil 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^{*3}, 境野 恵理^{*1}

Hiroyuki YOSHIDA ^{*1}, Satoru KANEKO ^{*2},

Hiroo TAURA ^{*3} and Eri SAKAINO^{*1}

^{*1} 株式会社ミツバ MITSUBA Corporation

^{*2} 三条市立大学 Sanjo City University

^{*3} 近畿大学 KINDAI University

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. As one of the measures for such goals, in this study, a porous material was used for the electrical sliding contacts. Then, after leaving the porous material under conditions that promote the deterioration of the porous material, the relationship between the state of the lubricating oil impregnated in the porous material and the tribological characteristics of the electric sliding contact such as the coefficient of friction and the degree of separation was investigated. The experiment was conducted using a pin-on-disk friction test machine and a chemical analysis device. As a result, the following findings were obtained. The changes in viscosity and total acid number (TAN) of the lubricating oil in the porous material were suppressed due to the addition of an antioxidant. And the change in the deterioration of lubricating oil in the porous material depended on the difference in the molecular structure of the antioxidant, affecting the tribological characteristics.

Key Words : Sliding contacts, Porous materials, Tribological characteristics, Oxidation inhibitor, Solubility parameter

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。最近の車体側からの低電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⁾⁽²⁾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、しゅう動状態は運転中に変化しないとしているが、実際は、しゅう動（特に潤滑油）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が含浸された多孔質材料を用い、恒温環境下に一定時間放置し、潤滑油中の酸化防止剤を時間とともに劣化させ、その劣化の状態が電気しゅう動接点のトライボロジー特性に及ぼす影響を実験的に解析し明らかにする。

2. 実験装置および実験方法

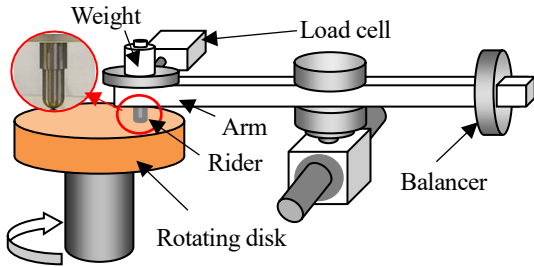


Fig.1 Schematic diagram of the experimental apparatus

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 Ra [μm]	0.02
Vickers hardness HV	780

Table 3 Experimental conditions

Applied load W	1.0 [N]
Disk rotating speed U	0.03 ~ 0.23 [m/s]
Lubricating oil	PAO (Base oil)
Viscosity η_0	0.44 [Pa · s] (@25°C)
Oil A	Base oil + (2.0mass%) Octylated diphenylamine
Oil B	Base oil + (2.0mass%) N-(1-Methylheptyl)-N'-phenyl-p-phenylenediamine
Oil C	Base oil + (2.0mass%) 4,4'-Bis(α,α' -dimethyl benzyl) diphenylamine

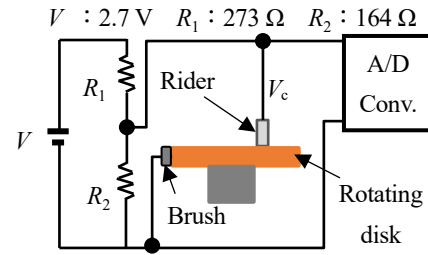


Fig.2 Measurement circuit

Table 2 Specifications of disks

Disk material	Brass Cu-Zn
Diameter [mm]	40
Thickness [mm]	8.0
Permeability k [m^2]	2.9×10^{-13}
Relative density [%]	76

Table 4 E_{coh} and volume values proposed by Fedors

molecule group	cohesive energy	molar volume
	[J/mol]	[cm^3/mol]
-CH ₃	4709	33.5
-CH ₂ -	4939	16.1
-CH<	3433	-1.0
>C<	1465	-19.2
	31939	71.4
	31939	52.4
>NH	8372	4.5
-COOH	27628	28.5
>N-	4186	-9.0
-O-	3349	3.8

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（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。回転ディスクは黄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 τ ($=V_c/V_d$) 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に実験条件および試験油中の酸化防止剤の成分と添加量を示す。本研究では各条件において $n=3$ 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、軸受特性数 S ($=\eta UL/W$) を用いて評価する。

実験は基油；PAO油，試験油A；基油に2mass%ジフェニルアミン（DPA）系酸化防止剤添加，試験油B；基油に2mass%パラフェニレンジアミン（PPD）系酸化防止剤添加，試験油C；基油に2mass%ジフェニルアミン（DPA）

系酸化防止剤添加のいずれか 1 種類が含浸された計 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 120°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, 96h, 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 (98vol%) とアセトン (2vol%) の混合液を用い、回転ディスク内の潤滑油を抽出した。抽出液から混合液を取り除いたのち、回転粘度計 (Brookfield 製 DV-III ULTRA) を用い抽出油の粘度測定を行った。本文中の S 値は抽出油の η 値を使用した。また、粘度測定後の抽出油を用いて全酸価分析を行った。

3. 結果及び考察

3・1 放置後の摩擦係数および分離度

図 3 に一定時間 (0h, 96h, 250h, 500h) 放置後の各回転ディスクを用いた実験の μ および τ と S との関係を示す。 μ は、測定した S の範囲内において試験油の種類に関わらず、放置時間 0h では S が高いと減少する傾向を示すが、放置すると逆に増加する傾向を示す。一方、 τ は、放置後 96h 経過までは試験油の種類に関わらず低い値 ($\tau \leq 0.1$) を示す。250h 経過では、試験油 A, B, C の τ の値は大幅な上昇 ($\tau \geq 0.15$) を示す。500h 経過では、基油の τ の値も大幅な上昇 ($\tau \geq 0.15$) を示す。次項では、この試験油 A, B, C の τ 値の大幅な上昇が基油よりも早い時間で発生することについて検討する。

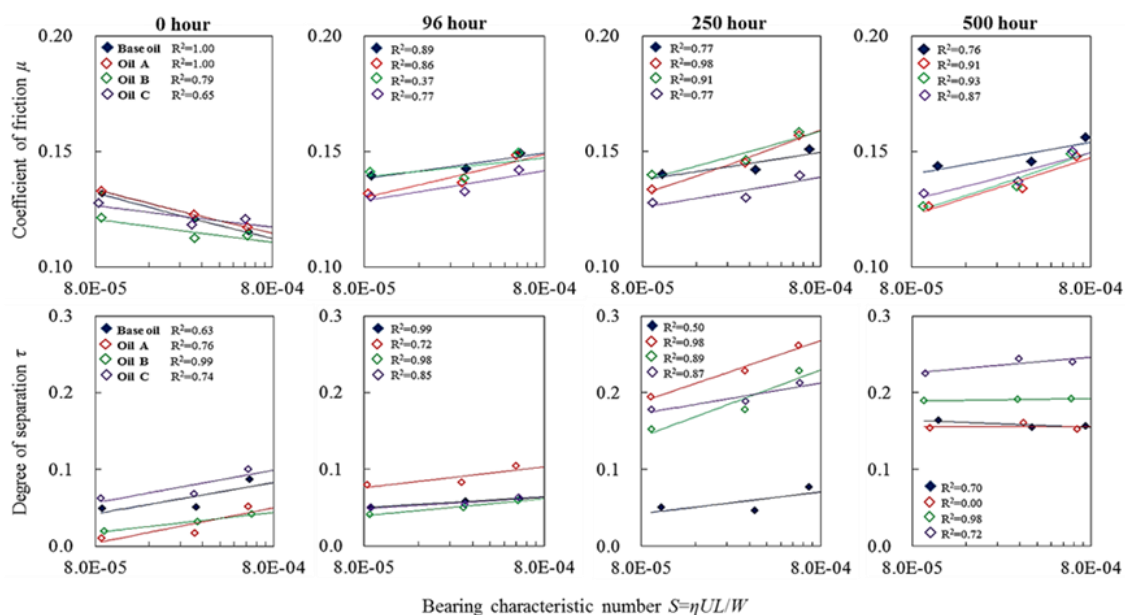


Fig.3 Coefficient of friction μ and degree of separation τ versus bearing characteristic number S

3・2 回転ディスクのしゅう動表面の状態

FT-IR (Thermo Scientific 製 Nicolet iS10 FT-IR, Ge プリズム, ATR 法) を用いて潤滑油抽出後の回転ディスクしゅう動表面の分析を行った。試験油 A の IR 分析結果の波形を図 4 に示す。900 cm^{-1} から 2000 cm^{-1} の範囲は、 $-\text{CH}_2$ 基 (主に基油由来), R-COO-基および R-NO-基 (劣化生成物由来) 等の有機化合物特有の振動スペクトル⁽³⁾を示す。IR 波形面積の広さは有機化合物の存在量に比例する。図 5 に各試験油の 950 cm^{-1} から 1800 cm^{-1} の範囲の波形面積と放置時間との関係を示す。酸化防止剤を含む試験油 A, B, C は基油よりも早い時間 (250h 経過) で波形面積の大幅な拡大を示す。このことから、試験油 A, B, C の早い時間でしゅう動表面への有機化合物の生成の多さが、基油よりも早い時間で τ 値を上昇させた要因と推測する。

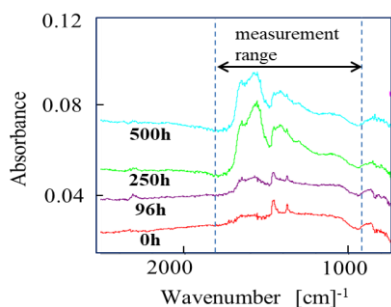


Fig.4 Infrared transmittance waveform of Oil A

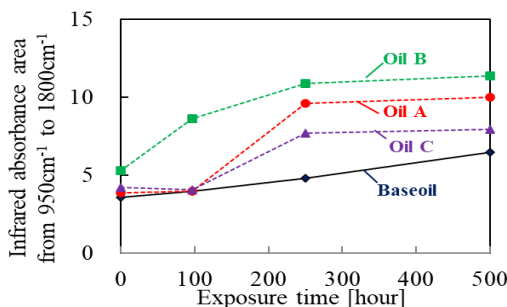


Fig.5 Ratio of infrared transmittance of 950cm⁻¹ to 1800cm⁻¹ versus exposure time

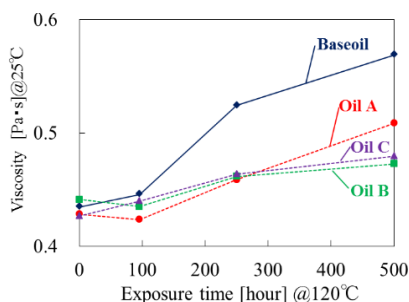


Fig.6 Extracted oil viscosity versus exposure time

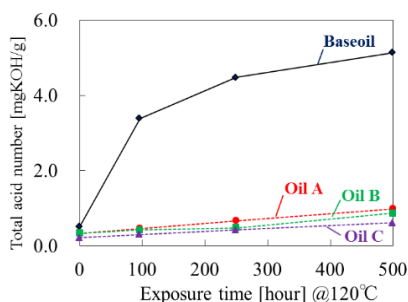


Fig.7 Extracted oil total acid number (TAN) versus exposure time

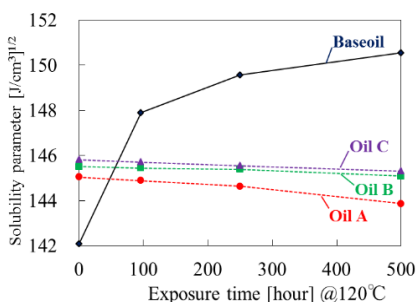


Fig.8 Extracted oil solubility parameter versus exposure time

3・3 回転ディスク抽出油の粘度、全酸価および溶解度パラメータ

放置後の回転ディスクの抽出油の粘度、全酸価 (JIS K2501 に準じる) および溶解度パラメータ (SP) の測定の結果を図 6, 図 7, 図 8 に示す。図 6 より, 経過にともなう基油の粘度変化は試験油 A, B, C と比べ大きい。特に, 96h (0.44Pa・s) から 250h (0.52Pa・s) の間で大幅な増加を示す。図 7 より, 経過にともなう基油の全酸価の変化は試験油 A, B, C と比べ大きい。特に, 0h (0.51mgKOH/g) から 96h (3.39mgKOH/g) の間で大幅な増加を示す。一方, 試験油 A, B, C の全酸価は 0h (0.21~0.33mgKOH/g) から 500h (0.61~0.98mgKOH/g) の間で小幅な増加を示す。

凝集エネルギー密度の平方根で定義される SP は酸化防止剤の物性 (密度, 沸点, 分子量, 酸価, 表面張力, SP など) の中で基油およびしゅう動表面の溶解性, 親和性のパラメータの一つとして重要である。本稿での SP は, 基油の劣化生成物をカルボン酸とし, DPA 系および PPD 系酸化防止剤の劣化生成物をアミノエーテル⁽⁴⁾として全酸価の測定値 (遊離水素量) から劣化生成物濃度を求め, その値を表 4⁽⁵⁾の各分子グループの凝集エネルギー密度 (Fedors の換算法⁽⁵⁾ $\delta = [\sum E_{coh} / \sum V]^{1/2}$) に代入し算出した。結果を図 8 に示す。基油の SP は 0h (142.0[J/cm³]^{1/2}) から 96h (147.9[J/cm³]^{1/2}) の間で大幅な増加を示す。一方, 試験油 A, B, C は 0h (145.0~145.8[J/cm³]^{1/2}) から 500h (143.9~145.3[J/cm³]^{1/2}) の間で小幅な減少を示す。

潤滑油中に添加された酸化防止剤は, 放置とともに変化する潤滑油の粘度, 全酸価, SP の変化を抑える。

3・4 溶解度パラメータとトライボロジー特性

図 9 に試験油 A, B, C の SP と μ (図 3 で使用した各放置時間の 3 つの値の平均値) との関係を示す。試験油の種類に関わらず SP の増加にともない μ の値は低下の傾向を示す。また, 試験油 A, C (DPA 系酸化防止剤) は試験油 B (PPD 系酸化防止剤) に比べ, μ 近似線の傾きは小さい。

図10に試験油 A, B, C の SP と τ (図3で使用した各放置時間の3つの値の平均値) との関係を示す。 τ の値も μ と同様に試験油の種類に関わらず SP の増加にともない低下の傾向を示す。また、試験油 A, C は試験油 B に比べ、 τ 近似線の傾きは小さい。

よって、試験油 A, C (DPA 系酸化防止剤) は試験油 B (PPD 系酸化防止剤) に比べ、SP の値の変化に対する μ , τ の値の変化を抑える。

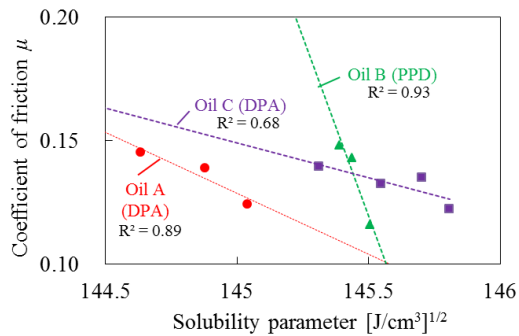


Fig.9 Solubility parameter versus coefficient of friction

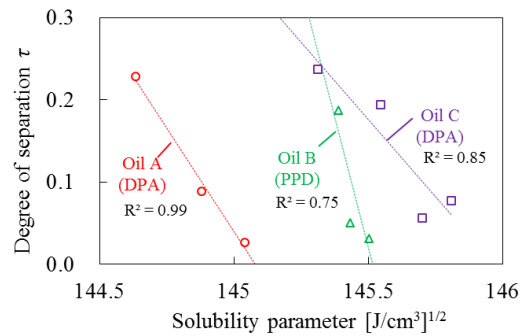


Fig.10 Solubility parameter versus degree of separation

4. 結 言

電気しゅう動接点に潤滑油が含浸された多孔質材料を用い 120℃の恒温環境下に一定時間放置し、潤滑油中の酸化防止剤を時間とともに劣化させ、その劣化の状態が電気しゅう動接点のトライボロジー特性に及ぼす影響を実験的に調べた結果、以下の知見が得られた。

1. 酸化防止剤の添加に関係なくライダと回転ディスク間の μ は放置時間 0h では S が高いと減少する傾向を示すが、放置すると逆に増加する傾向を示す。
2. 酸化防止剤を含む試験油は基油に比べ、放置時間の早い段階で τ 値の上昇を示す。
3. 潤滑油中に添加された酸化防止剤は、放置とともに変化する潤滑油の粘度、全酸価、SP の変化を抑える。
4. 潤滑油中に添加された DPA 系酸化防止剤は PPD 系酸化防止剤に比べ、潤滑油の SP の値の変化に対する μ , τ の値の変化を抑える。

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) Kaneko, S, Taura, H., Taira, M., and Luu Van Manh, “Frictional Characteristics and Electrical Conductivity of Electrical Sliding Contacts With Circular Grooved Porous Disk Under Lubricated Conditions,” Trans. ASME Journal of Tribology, Vol.142, No.1 (2020), p.011803.
- (3) 吉田浩之, 金子覚, 田浦裕生, 境野恵理, “多孔質含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]
- (4) 大勝靖一, “酸化防止剤”, トライボロジスト, 第 40 巻, 第 4 号(1995), pp332-336.
- (5) 上田伸一, 山田共男, 杉島正見, “添加剤の溶解性パラメータに関する考察”, 塗料の研究, No.152 (2010), pp. 41-46.