

軸受の耐電食性を向上するグリース配合設計技術に関する研究

Study on grease composition design to improve electrical pitting resistance for bearings

ジェイテクト（正）*山下 侑里恵 ジェイテクト（正）津田 武志 ジェイテクト（正）三宅 一徳

Yurie Yamashita*, Takeshi Tsuda*, Kazunori Miyake*

*JTEKT CORPORATION

1. はじめに

自動車の電動化に伴いモータ近傍の軸受における耐電食性の向上が求められている。電食が発生した場合、軸受の転動体や軌道輪には、波板状電食（リッジマーク）が発生し、軸受の静粛性や軸受寿命に影響する。そのため、設計、材料および潤滑技術の観点から絶縁および導電技術の両方の対策が検討されている。導電化技術に関しては、電流をモータから軸受以外の導体にバイパスする導電ブラシや接地（アース）リングやカーボンブラック（CB）を用いたグリースが主流である^{1,2)}。ただし前者は追加の部材が必要であり、後者はCB粒子が経時的に凝集または偏析し絶縁してしまうなどの課題がある。一方、絶縁化技術には、高コストとなるが、絶縁体であるセラミックボールの使用や外輪表面の絶縁被膜処理などある³⁾。いずれにしても一長一短であり、単純な軸受構造のまま低コストで実現可能な新しい電食防止技術が求められている。

電食防止に関する潤滑技術は、古くから潤滑剤の電気特性評価が研究されており、1981年にはグリースの種類によって耐電食性が異なり、基油や添加剤の種類が耐電圧性に影響することが明らかとなっている⁴⁾。多くの場合、潤滑剤は絶縁性であり、絶縁による耐電食性が期待されるが、過酷な環境下においては、油膜の薄膜化による固体接触の増加、酸化劣化の促進および摩耗粉混入などにより絶縁破壊を引き起こし、耐電食性が低下する。この単純な軸受構造を維持したまま低コストで耐電食性を付与するためには、新規潤滑剤の検討が最も有効である。しかしながら、グリース組成が耐電食性に及ぼす影響は明らかになっておらず、添加剤などを活用して新しいグリースを検討する必要がある。

本報では、一般的なモータ用グリースとCB含有グリースを用いて、モータを想定した場合の軸受電食寿命における実力値把握を行った。次に、得られた結果を反映し、増ちょう剤および基油種を変更したグリースを試作し、比較評価を行った。なお、試作グリースは、モータ用の軸受に主に使用されるウレアグリースである。

2. 実験

2.1 グリース

試料グリースの組成および性状をTable 1に示す。市販グリースの実力値を把握するため、モータ用として汎用的に用いられているSample A、事務機器用の導電グリースとして用いられているSample Bを選定した。Sample AはCB非含有のウレアグリースであり、Sample BはCB含有グリースである。後述するように、Sample A、Bの比較から、CB含有グリースが必ずしも耐電食寿命に良好な結果とならない。このことから、ウレアグリースにおける組成の影響および、油膜厚さや体積抵抗率といった異なる性状を有するグリースの耐電食性を検討した。Sample HC-P、HC-C、HC-Rは、基油に同じ炭化水素油を用い、異なるアミン種によって得られたジウレアグリースである。また、Sample HC-P、ET-P、ES-Pは、増ちょう剤をジウレアとし、異なる基油を用いたジウレアグリースである。Sample ES-P+OPは、有機親和性フィロケイ酸塩(OP)を分散して利用し、凝集・偏析しにくく体積抵抗率低減を狙ったグリースである。本報では、グリースのちよう度の影響を小さくするため、いずれもちよう度を250±20に統一した。

Table 1 Compositions and properties of sample greases

Sample	A	B	HC-C	HC-R	HC-P	ET-P	ES-P	ES-P+OP
Thickener	Diurea	Carbon black	Diurea (Alicyclic)	Diurea (Aromatic)	Diurea (Aliphatic)	Diurea (Aliphatic)	Diurea (Aliphatic)	Diurea (Aliphatic) + Organophilic phyllosilicates
Base oil	Hydro-carbon +Ester	Hydro-carbon	Hydro-carbon	Hydro-carbon	Hydro-carbon	Ether	Ester	Ester
Kinematic viscosity (40 °C)	43 mm ² /s	31 mm ² /s	16 mm ² /s	47 mm ² /s	47 mm ² /s			
Penetration (60 W)	Around 250	Around 250	235	270	251	241	267	270

2.2 実験方法および条件

2.2.1 グリース体積抵抗率測定

体積抵抗率算出において精度よくグリース厚みを測定することが重要である。そのため、グリース塗布面が一定厚みとなる液体抵抗試料箱を選定し、体積抵抗率測定を実施した (Table 2)。本測定は、円筒状の金属容器 (対向電極) 中にグリースを 0.8 ml 入れた後に中央に円柱状の電極 (主電極) を押し込むことで、主電極と対向電極のすき間にグリースを充填させた測定サンプルを作製した。この電極間に電圧を印加 (10 V) し、静的な抵抗値をデジタル超高抵抗/微少電流計で測定した。体積抵抗率は JIS K 6911 に基づいて算出した。

2.2.2 グリース油膜厚さ測定

油膜厚さ測定は EHL 極薄膜厚計測システムを用いて実施した。ガラス回転板の下部に鋼球に押し付け、鋼球側から 20 N の荷重を印加しながらガラス回転板を回転させた。ガラス回転板はクロム膜とシリカ膜がコーティングされており、ガラス回転板と鋼球との間に介在する油膜厚さを光干渉法にて測定が可能である。グリースの油膜は、回転速度 2,000 mm/s から 2 mm/s まで減少させ、各速度での平均油膜厚さを測定した (Table 3)。

2.2.3 軸受通電試験

軸受通電試験の実験条件を Table 4 に、装置概略図を Fig.1 に示す。本装置は、シャフトのチャック部に絶縁材を用い試験軸受以外に電流が流れない構造とした。試験中の通電は、直流安定化電源を用い、軸受外輪側ハウジングおよび軸受内輪側シャフトに取り付けたスリップリング間に電源を接続し、定電流で電流を流した。回転試験は、通電下において、アキシャル荷重を 44 N とし、室温 (25 ± 2 °C) にて 1,800 r/min で内輪を回転させて試験を行った。電流印加時の軸受電食寿命は、振動加速度が初期値に対して 1.5 倍となった時点を判断基準とした⁵⁾。なお、本実験条件では、電流を流さない場合、軸受はほとんど摩耗せず振動加速度は変化しない。

2.2.4 共焦点レーザー蛍光顕微鏡

CB 含有グリース (Sample B) の CB の凝集・偏析状態を確認するため、グリースを脱脂せずに観察する手法として共焦点レーザー蛍光顕微鏡を用いた。対物レンズは 63 倍 (湿式)、電子ズーム倍率 (Zoom Factor) は 3 および 6、測定速度は 100 Hz とした。Sample B は増ちょう剤が CB であるため、共焦点レーザー蛍光顕微鏡にて観察されたグリース中の粒子は CB であると推定した。CB の 1 次粒子の大きさは、別途 Sample B を脱脂し走査型電子顕微鏡 (SEM) で観察した結果から 100 nm 程度であり、本手法で観察された粒子は複数の 1 次粒子が凝集し形成された 2 ~3 次粒子であると推定した。

2.2.5 高温高速遠心分離試験

後述のように軸受通電試験後の Sample B はグリース中で CB が凝集・偏析していることが分かったため、偏析のとして Sample ES-P+OP を検討し、Sample B および ES-P+OP における CB および OP の偏析しやすさを比較した。高温・高速での遠心分離試験条件を Table 5 に、概略図を Fig.2 に示す。試験後のサンプルを離油した部分を除いて遠心力が大きく発生した外側部分と、そうでない内側部分に分けて採取し比較した。CB 含有量は JIS K 6226-1 に基づき熱重量測定装置を用いて算出、OP 含有量は蛍光 X 線を用いて Si 含有量から算出した。

Table 2 Measurement conditions of volume resistivity

Measurement device	Ultra high resistance meter
Amount of grease	0.8 ml
Sample thickness	1,000 μm
Voltage	10V

Table 3 Measurement conditions of oil film thickness

Test specimen	Coated glass disk/Steel disk
Load	20N
Speeds	2,000, 1,800, 1,600, 1,400, 1,200, 1,000, 800, 600, 400, 200, 2 mm/s
Temperature	100 °C

Table 4 Test conditions of electrical pitting test

Test bearing	62022RUCM
Input current and voltage	DC 6.0 A, Max 5.0 V
Axial load	44 N
Rotational speed	1,800 r/min
Ambient temperature	25 \pm 2 °C

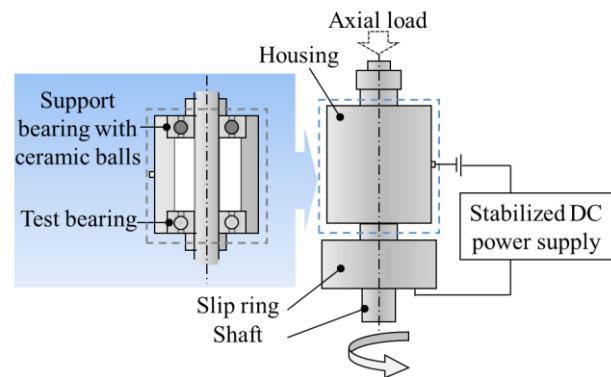


Fig. 1 Schematic view of electrical pitting test

Table 5 Test conditions of centrifugal test

Rotational speed	15,000 rpm
Centrifugation time	60 min.
Temperature	100 °C

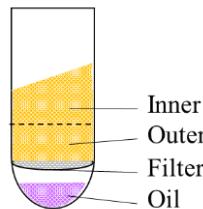


Fig. 2 Schematic view of correcting samples after the centrifugal tests

3. 結果

3.1 非導電グリースと導電グリースの電食寿命

Figure 3 に Sample A, B の体積抵抗率測定結果を示す。静的な場合、体積抵抗率は CB 非含有グリース (Sample A) と比較して、CB 含有グリース (Sample B) の方が小さく、導電性が良好であることが分かった。また、Fig.4 から油膜厚さは Sample A よりも Sample B の方が薄いことが分かった。これらのことから、接触面での導電しやすさは Sample B の方が有利であると考えられる。

これらのグリースを用いた軸受通電試験で得られた試験後の観察結果を Fig.5 および 6 に、電食寿命の結果を Fig.7 に示す。CB 非含有グリース (Sample A) を封入した軸受は、試験後に鋼球は黒色に変色し、内外輪には点状～波板状電食が発生していた (Fig.5)。この時、グリースは、軸受同様に新品の乳白色から黒く変色しており、電食で発生した摩耗粉が混入したと考える。また、CB 含有グリース (Sample B) を封入した軸受は、Sample A と同様に、内外輪には点状～波板状電食が発生していた (Fig.6)。グリースは CB を含有している黒色のグリースであるため、試験前後の変色の比較は出来ないが、鋼球表面は Sample A と同様に黒色に変色していた。

Figure 7 に示すように、電食寿命は Sample A が Sample B より優れていることが分かった。この結果は、電食寿命は、必ずしも体積抵抗率が小さく油膜厚さも薄いCB 含有グリースの電食寿命が優れているとは限らないことを示している。つまり、導電性のために分散した CB は利用中に電食寿命を低下する挙動を起こす可能性とウレアグリース自体が耐電食性に優れる可能性とがあることを示している。

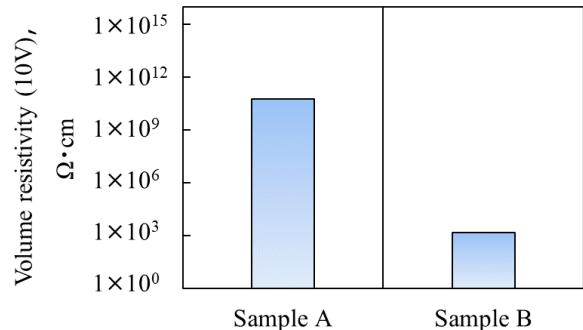


Fig. 3 Volume resistivity of grease sample A, B

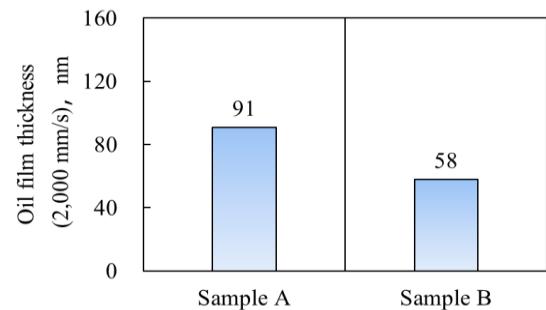


Fig. 4 Oil film thickness of grease sample A, B

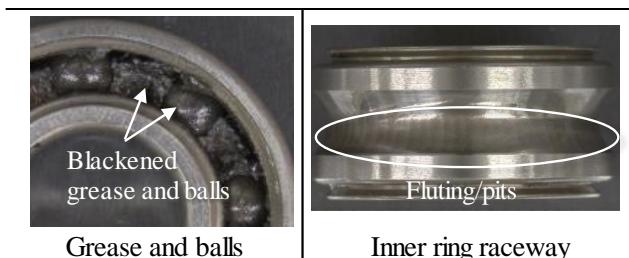


Fig. 5 Observation results of a bearing after the test using sample A

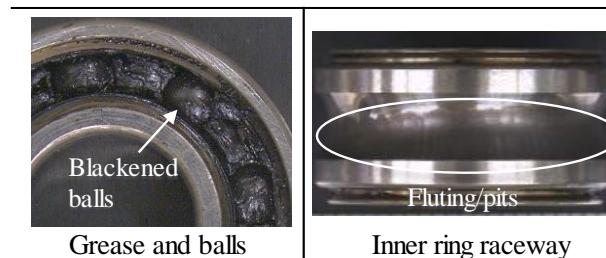


Fig. 6 Observation results of a bearing after the test using sample B

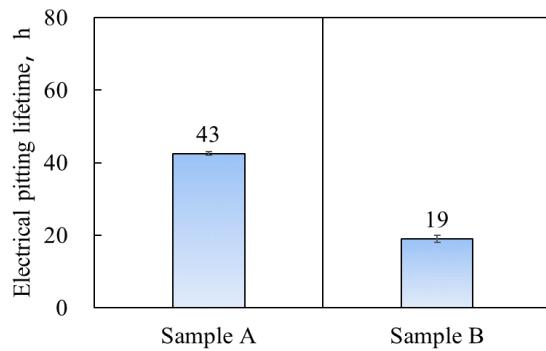


Fig. 7 Electrical pitting lifespan of bearings with sample A, B

3.2 CB 含有グリースの耐電食性低下要因

CB 含有グリース (Sample B) に分散された CB が試験中に偏析や凝集を起こすことにより耐電食性が低下することを確認するため、共焦点レーザー蛍光顕微鏡によるグリース中の CB 分散状態の観察を行った。試験前の Sample B は、 $0.5 \sim 1 \mu\text{m}$ の CB 粒子が一様に分散していた (Fig.8)。一方、試験後では、 $3 \sim 5 \mu\text{m}$ 程度の大きな凝集体の形成が確認された (Fig.9)。このことから、Sample B は試験中に偏析や凝集が発生し、軸受の内外輪軌道と転動体の間の接触面に CB の凝集体が挟みこまれることで、凝集体を介して大電流が流れ、その上下の軌道や転動体にスパークが起り電食発生したと考える。

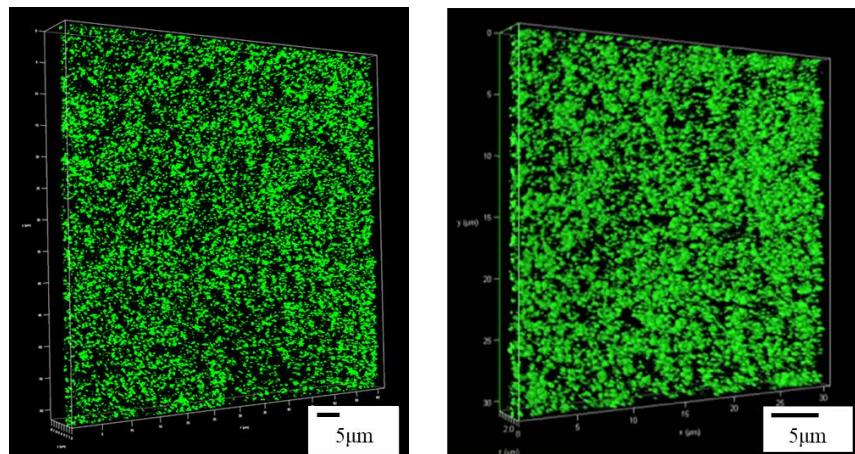


Fig. 8 Observation result of CB particles in sample B before the test using confocal laser fluorescence microscopy
(Left : Zoom Factor 3, Right : Zoom Factor 6)

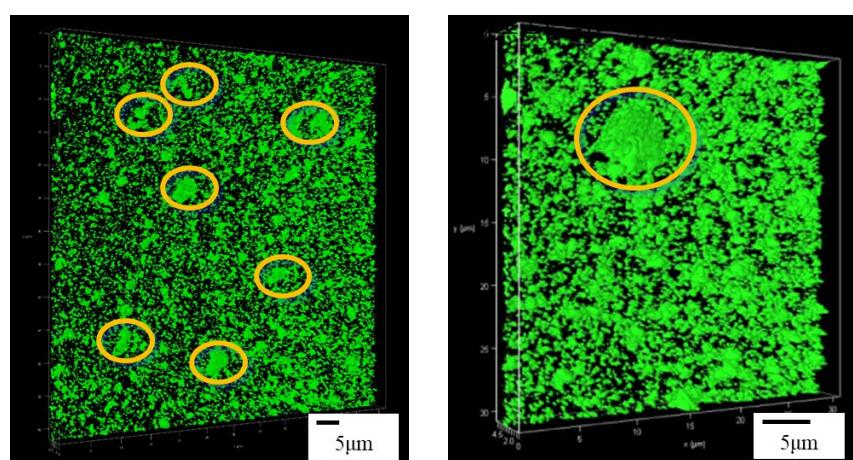


Fig. 9 Observation result of CB particles in sample B after the test using confocal laser fluorescence microscopy
(Left : Zoom Factor 3, Right : Zoom Factor 6)

3.3 ウレアグリースの耐電食性

CB 非含有のウレアグリースを用いて、基油種および増ちょう剤種を変更した場合の体積抵抗率、油膜厚さを評価し、電食寿命との関係を調査した。Fig.10 にそれぞれのグリースの体積抵抗率測定結果を示す。増ちょう剤種のみを変更した Sample HC-C, HC-R, HC-P は、いずれも体積抵抗率に大きな差異は認められなかつた。一方、基油種のみを変更した Sample HC-P, ET-P, ES-P は、炭化水素油、エーテル油、エステル油の順で体積抵抗率が小さく、電気特性に基油種の影響が大きいことが明らかとなつた。この理由として、炭化水素油は分子構造中に極性基を持たない一方、エーテル油やエステル油は極性基を持つことに起因する。また、エステル油を用いた ES-P に OP を加えた ES-P+OP は、ES-P よりも体積抵抗率が小さく、OP によって導電性が向上した結果となつた。これら試作ウレアグリースの中では Sample ES-P+OP が最も体積抵抗率が小さく電気が流れやすく、この組合せが導電方策に優れていると推測した。

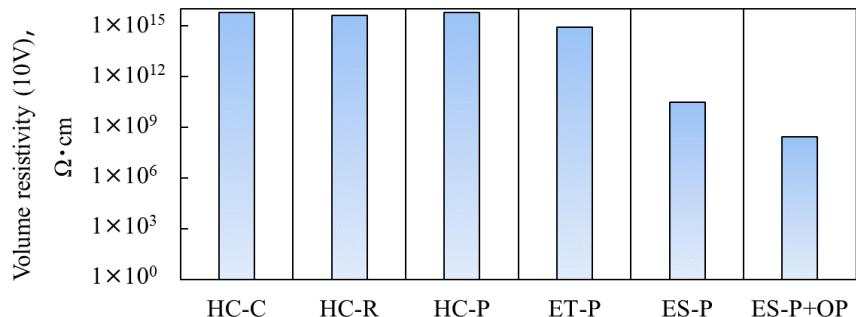


Fig. 10 Volume resistivity of synthesized urea greases

Figure 11 に回転速度 2,000 mm/s の時のそれぞれのグリースの油膜厚さを示す。炭化水素油を用いたグリース (HC-系)において、油膜厚さは増ちょう剤種類の影響が大きく、脂環式アミンおよび芳香族アミンを用いた Sample HC-C, HC-R の油膜厚さが厚かった。これは脂環式アミンや芳香族アミンを用いた増ちょう剤は摺動中に回転板表面へ増ちょう剤が堆積し、増ちょう剤を含む油膜 (グリース膜) が厚膜化したためであると考えられる⁶⁾。このことより、油膜厚さを厚くし、固体接触を抑制することにより電気を流れにくくする方策においては、芳香もしくは脂環族を用いることが良いと推測する。

また、エステル油を用いたグリース (ES-系) では、OP を併用することによりグリースの油膜が厚くなつた。ES-P+OP は体積抵抗率が小さいものの、油膜厚さが厚いため、OP の利用は導電性を悪化させる可能性が示唆された。

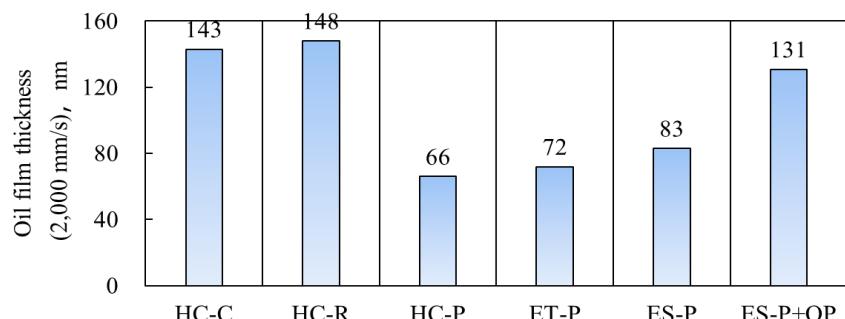


Fig. 11 Oil film thickness of synthesized urea greases

Figure 12 に軸受通電試験による電食寿命の評価結果を示す。いずれのグリースを用いた実験でも試験後のグリースは部分的に黒く変色が認められ、鋼球も黒色に変色し、内外輪には波板状電食痕が認められた。基油のみを変更した

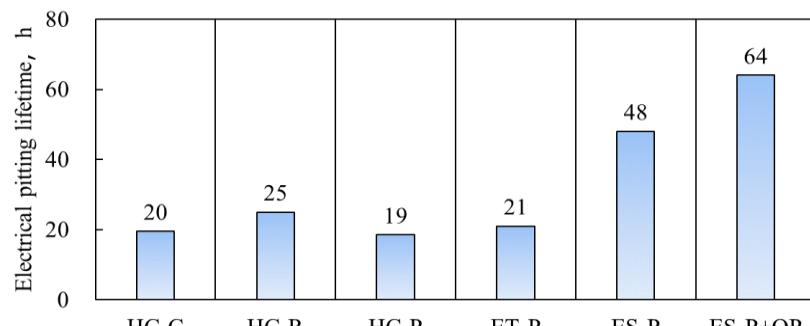


Fig. 12 Electrical pitting lifetime of synthesized urea greases

グリースの電食寿命は、ES-P に OP を併用した Sample ES-P+OP が最も長く、基油種の影響が大きかった。

電食寿命と体積抵抗率の関係を Fig. 13 に、電食寿命と油膜厚さの関係を Fig. 14 に示す。電食寿命は体積抵抗率に大きく依存し、体積抵抗率が小さい、すなわち導電しやすいほど電食寿命が長い。また、組成の観点では、OP を用いない場合、基油種の影響が支配的となり、エステル油を用いることで体積抵抗率が低減し、電食寿命も長くなった。一方、電食寿命と油膜厚さの相関は認められず、本検討範囲においては厚膜化による絶縁の方策は効果が認められなかった。また、OP を併用した、ES-P+OP は、他のグリースとは異なり、油膜厚さが厚いものの、体積抵抗率が小さく、電食寿命が向上した。この理由は、OP の偏析性にあると推定する。

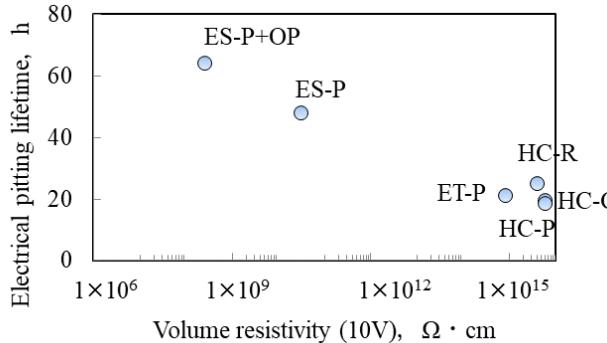


Fig. 13 Correlation between electrical pitting lifetime and volume resistivity

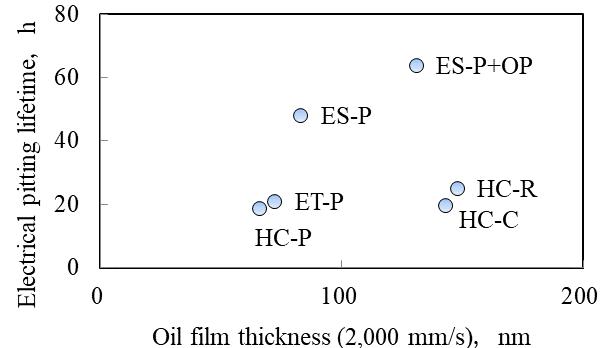


Fig. 14 Correlation between electrical pitting lifetime and oil film thickness (2,000 mm/s)

3.4 CB および OP の偏析性の比較

ES-P+OP が粉体の導電性向上剤を用いているにも関わらず、CB 含有グリース (Sample B) と異なり電食寿命が向上した。この要因の一つに偏析性があると推定し、遠心分離試験による偏析性を比較した結果を Fig.15 に示す。Sample B は遠心管の内側と外側で CB 濃度が異なっており遠心力によってグリース中の CB が偏析した。一方、Sample ES-P+OP は OP の濃度変化が認められず、偏析が認められなかった。このことから、軸受回転時においても OP は、偏析し難く、導電パスを長時間維持できるため、電食寿命に優れていると考える。

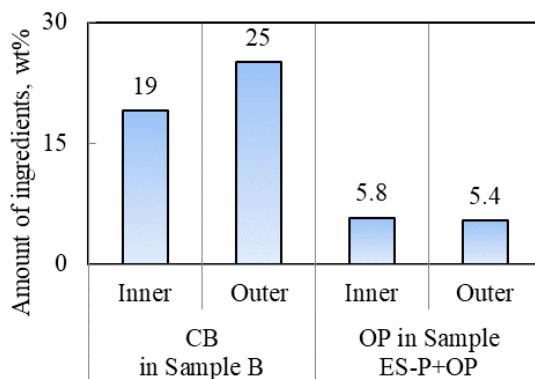


Fig. 15 The amount of CB or organophilic phyllosilicates in sample CB, ES-P+OP after the centrifugal tests

4. 考察

4.1 耐電食性によばすグリースの組成と性状

Figure 3,7 および 13 に示した通り、導電性向上剤を用いないグリース Sample A および HC-C, HC-R, HC-P, ET-P, ES-P は、体積抵抗率の大小により電食寿命が異なり、体積抵抗率が小さいグリースほど電食寿命は長かった。これは、体積抵抗率が小さい場合、油膜を介して電気が少量ずつ流れ、大きなスパークが生じずに損傷が抑制されるためと考える。また導電性向上剤を用いない組成では、グリース中で大きな割合を占める基油種類の影響が大きく、特にエステル油は極性基を持ち、有機化合物の中でも物質の電荷の重心のずれが電界の方向に引かれて配向するために誘電的性質を与えていると考えられる。

一方、導電性向上剤 CB を含んだグリース (Sample B) は、体積抵抗率が小さいにも関わらず電食寿命が短かった。これは固体の導電性向上剤を用いる場合、Fig.9 および 15 に示されるように、試験中に CB が凝集・偏析したことによるものである。CB の凝集・偏析により、軸受回転中に内外輪軌道と転動体の間の接触面に凝集体が挟みこまれ、凝集体を介して大電流が流れ、その上下の軌道や転動体にスパークが起こり電食を引き起こすと考える。

4.2 耐電食性向上に貢献するグリース処方

軸受の耐電食性を向上させるためには、グリースの体積抵抗率を低減し、かつ導電性向上剤が偏析・凝集しにくいことが重要である。そこで試作グリースの中で、体積抵抗率が小さく、導電性向上剤が偏析・凝集し難い Sample ES-P+OP を用い軸受通電試験を行った (Fig.13)。その結果、エステル油および OP を含有することで体積抵抗率が低減し、さらに OP が偏析しにくいため、電気が少量ずつ流れ、内外輪-玉間においてスパークが生じ難く、電食を抑制したと考える。このようなグリース処方が電食寿命向上のための一つの方向性と考える。

5. おわりに

軸受の電食対策の観点から、グリース組成および性状が電食寿命におよぼす影響について検討した。その結果、導電性向上剤 CB を含有するグリース組成では体積抵抗率が低いものの、CB の偏析、凝集等により軸受電食寿命が必ずしも向上しなかった。一方、CB 非含有の場合、体積抵抗率の低いグリースが電食寿命に優れていた。特に、有機親和性フィロケイ酸塩 (OP) を用いた場合、体積抵抗率を低減すると共に偏析しにくく、優れた電食寿命を示した。基油として電気を流しやすいエステル油を用いて、さらに棒状および板状の粒子で 3 次元ネットワークを形成し長期使用でも偏析しにくい有機親和性フィロケイ酸塩を用いたグリースとすることにより、電食寿命の向上が可能である。

文献

- 1) 傳寶, 中: 導電性グリース封入軸受の性能評価 (第 2 報), 日本トライボロジー学会トライボロジー会議予稿集 2003-5 (2003) 235.
- 2) 横内: 転がり軸受用のグリース潤滑技術, トライボロジスト, 56, 5 (2011) 302.
- 3) 野口・柿沼・和知・是永: 小型玉軸受の電食に関する研究 (第 3 報) —電食が発生する直流電圧の測定—, トライボロジスト, 55, 6 (2010) 413.
- 4) 小松崎・上松・伊藤: 潤滑グリースの耐電食性の組成面からの検討, 潤滑, 28, 1 (1983) 54.
- 5) 野口・赤松・是永: 小型玉軸受の電食に関する研究 (第 1 報) —直流電圧印加時の玉軸受 608 の電食発生限界電流密度—, トライボロジスト, 52, 8 (2007) 622.
- 6) 吉崎・高原: 転がり軸受の早期はく離対策に寄与するグリース技術, トライボロジスト, 66, 9 (2021) 699.