

一般論文

電力機器におけるグリス劣化メカニズムの把握と劣化診断技術の開発

Clarification of the Grease Degradation Mechanism for Power Distribution Facilities and Development of Degradation Diagnosis Technologies

東 勇 吾* 松 本 均*
Y. Higashi H. Matsumoto
野 口 優 弥* 宇 都 宮 里 佐*
Y. Noguchi R. Utsunomiya

概要

電力機器用開閉器等の機構部には、潤滑性維持のためグリスが使用されている。グリスは、経年や摺動回数増加により潤滑性が低下するため適正なメンテナンスがなされていない場合、グリス固着で生じる機構部の開閉不良による停電等に発展する懸念がある。これらの事故を未然に防ぎ、適正なメンテナンスを行うために、グリス劣化メカニズムの把握と劣化診断技術の開発を行った。

Synopsis

In the mechanical section of power equipments, grease is used for lubricating maintenance. If proper maintenance is not required, lubrication of grease will decrease due to aging and sliding. And, in order to prevent accidents and to perform proper maintenance, we developed a technique to clarification of the grease degudation mechanism and degradation diagnosis technologies.

1. はじめに

電力機器用開閉器等の機構部には、潤滑性維持のためにグリスが使用されている。経年や摺動回数増加により生じる潤滑性の低下とグリス固着は、機構部の開閉不良による停電等に発展する懸念もある。今回は、当社で使用する二種類のグリスについて、グリスの化学的、物理的な劣化メカニズムの把握と、劣化要因把握に基づいた劣化診断技術の開発を行った。

2. グリスの構成成分劣化メカニズム推定

電力設備機構部には、機構部の潤滑性維持を目的として種々のグリスが用いられている。一般的にグリスは、基油（ベースオイル）、増ちょう剤、使用目的に応じて潤滑剤等のその他成分から構成されている。図1のグリス劣化メカニズム推定に示すとおり、経年劣化や摺動部開閉回数増加に伴い、①油分の減少、②潤滑剤／増ちょう剤の凝集、③油分の酸化等により潤滑性が低下し、最終的に摺動部の動作不良に至ると考えられる。

滑剤／増ちょう剤の凝集、③油分の酸化等により潤滑性が低下し、最終的に摺動部の動作不良に至ると考えられる。

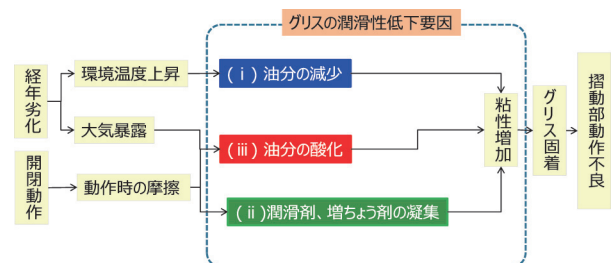


図1 グリスの劣化メカニズム推定

* 研究開発本部

以降では、当社で使用するグリスの各劣化要因による潤滑性低下のメカニズムについて調査した結果を報告する。

2. 1 二硫化モリブデン/鉱物油系グリスの各劣化要因による潤滑性の低下

①油分の減少

二硫化モリブデン/鉱物油系グリスでは、基油に鉱物油が使用されている。鉱物油は、蒸気圧が大きいため蒸発し易い傾向がある。図2に各種温度で加熱を行った場合の油分蒸発率と経過日数の関係を示す。図2に示すように、経過日数の増加とともに油分蒸発が進行しており、加熱温度の増加によりさらに油分蒸発率が大きくなることわかった。

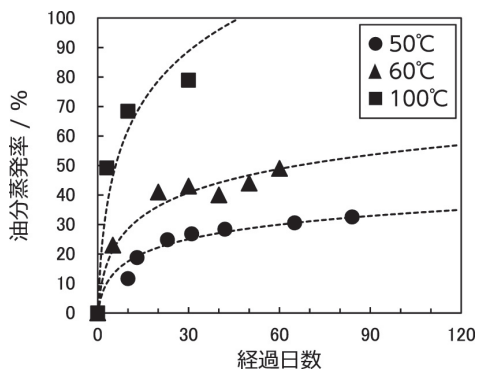


図2 油分蒸発率と経過日数の関係

②油分の酸化

基油に用いられる鉱物油は、環境温度や摺動摩擦熱により、大気中の酸素と反応して酸化が生じる。フィールド環境においては、経年により徐々に酸化が進行すると考えられるが、本検証では加速加熱を行い、酸化が顕著に進行した場合についての検討を行った。図3に示すように加熱処理時間の経過とともに酸化が進行していることがわかった。

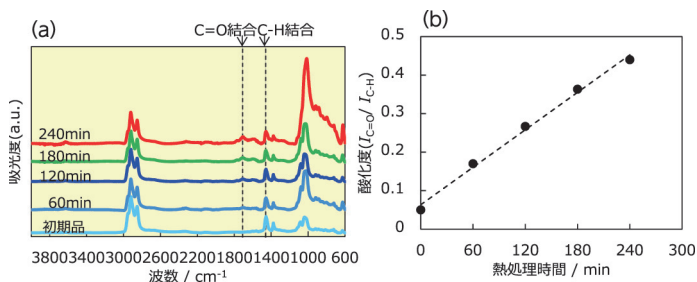


図3 種々の処理時間で大気加熱を行ったグリスの (a) 赤外吸収スペクトルと (b) 酸化度 (I_{C=O}/I_{C-H}比) と熱処理時間の関係

③潤滑剤/増ちょう剤の凝集

種々の条件で劣化させたグリスにおける潤滑剤/増ちょう剤の状態についてマイクロSCOPE観察を行った結果を図4に示す。図4において、(i)は、グリスに含まれる油分を加熱せずに減少させた場合、(ii)は窒素雰囲気中で加熱して油分を減少させた場合、(iii)は大気中で加熱を行い、油分を減少させた場合である。図4に示すとおり、(i)油分減少のみが生じた場合は、潤滑剤である二硫化モリブデン (図中丸内) の凝集はほとんど生じていないことがわかる。一方、(ii)窒素雰囲気中で加熱を行った場合、潤滑剤である二硫化モリブデンは、凝集していることが分かった。さらに (iii) 大気中で加熱を行った場合は、二硫化モリブデンの凝集に加えて、酸化によって変色が生じた鉱物油が、二硫化モリブデンを取り囲む構造となっていることがわかった。

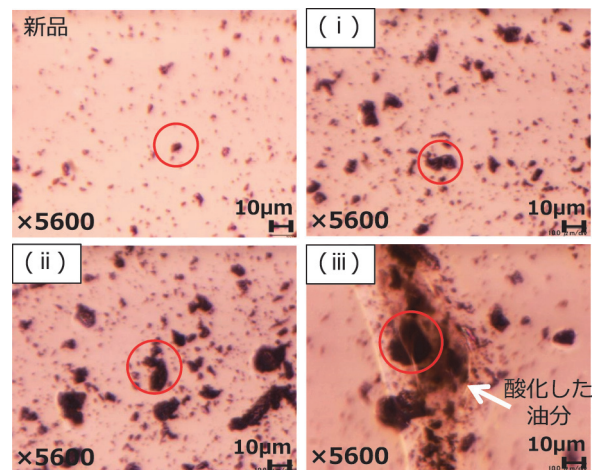


図4 各劣化状態におけるグリス (二硫化モリブデン/鉱物油系) のマイクロSCOPE観察写真 (i) 油分減少、(ii) 油分減少+凝集、(iii) 油分減少+凝集+油分酸化

④潤滑性の低下とグリス固着の再現

油分の減少、酸化や潤滑剤/増ちょう剤の凝集等によるグリスの潤滑性低下傾向について、摩擦摩耗試験機 (ピンオンディスク型) を用いた摩擦係数の評価を行った。

図5に各劣化状態におけるグリスの摩擦係数と油分率の関係を示す。図5に示すように、(i)～(iii)のいずれの劣化モードにおいても、油分率の低下とともに摩擦係数が増加する傾向が見られた。劣化モード(i)は、油分減少のみが生じた場合であり、油分率が60%以下の領域において、摩擦係数の立ち上がり顕著であった。

一方、劣化モード(ii)は油分減少と潤滑剤/増ちょう剤の凝集が生じた場合であり、(i)油分減

少のみが生じた場合よりも、摩擦係数の立ち上がりが顕著であることがわかった。劣化モード (iii) は油分減少と潤滑剤/増ちょう剤の凝集に加えて、油分の酸化も生じた場合であり、さらに摩擦係数の立ち上がりが顕著であった。以上の結果より、(i) から (iii) へとグリス劣化要因が加わることで、グリスの潤滑性低下は加速することがわかった。

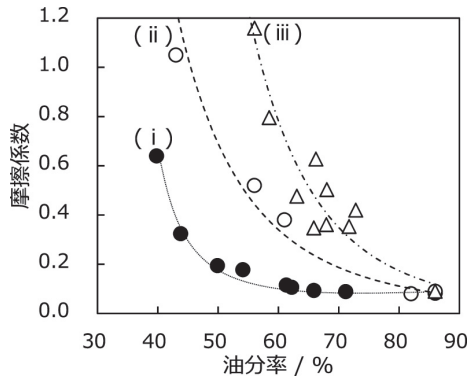


図5 各劣化状態におけるグリス摩擦係数と油分率の関係 (i) 油分減少、(ii) 油分減少+潤滑剤/増ちょう剤凝集、(iii) 油分減少と酸化+潤滑剤/増ちょう剤凝

次に摺動面間での供試グリスの劣化状態の把握を目的として、JISK7218に記載のスラストシリンダー式や、摩耗試験方法として一般的な、ディスクオンディスク試験等を参考に、(i) 油分減少、(iii) 油分減少と酸化+潤滑剤/増ちょう剤凝集が生じた各劣化グリスの回転摺動試験を実施した結果を図6に示す。

図6に示すように、新品のグリスを塗布して摺動させた場合は、一定回転速度で回転し続けるのに対し、(i) 油分減少が生じたグリス (油分率: 約60%) においては、約1万回の積算回転数まで一定の回転速度で継続回転した後、急激に回転速度が減少し最終的にグリス固着によって摺動試験機が停止することがわかった。また (iii) の油分減少と酸化+潤滑剤/増ちょう剤凝集が生じたグリス (油分率: 約60%) においては、積算回転数がさらに少ない領域でグリス固着が生じることがわかった。

(iv) の油分減少と潤滑剤/増ちょう剤が凝集後に注油を行ったグリスにおいては、約8,000回の積算回転

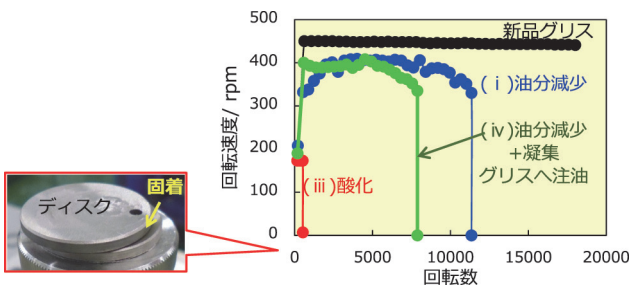


図6 回転摺動試験における積算回転数毎の回転速度

数まで一定の回転速度で回転した後、急激に回転速度が低下し、グリス固着によって摺動試験機が停止した。(iv) のグリスは、増ちょう剤等の凝集が既に生じており、油分が保持できず摺動面から油の滲み出しが発生し、初期品より速く油分が減少して固着するため、注油でのグリス潤滑性回復には限界があることもわかった。

図6 (iii) では、潤滑剤である二硫化モリブデンの凝集と、酸化した鉱物油が潤滑剤を取り囲む構造であった。また回転摺動試験において固着現象が確認されたため、当該部分における増ちょう剤について、顕微赤外吸収スペクトルによる分析を行った。

図7に新品、及び固着したグリスの赤外吸収スペクトルを示す。固着グリスに含まれる増ちょう剤成分であるベントンを示す1100cm⁻¹付近のSi-O-Si結合に帰属される吸収ピーク強度 ($I_{Si-O-Si}$) と、鉱物油を示す2900cm⁻¹付近のC-H結合に帰属される吸収ピーク強度 (I_{C-H}) の比 ($I_{Si-O-Si}/I_{C-H}$) は、新品グリスよりも大きい値を示し、二硫化モリブデンの凝集と酸化した鉱物油が取り囲んだ部分において、増ちょう剤 (ベントン) の凝集が生じていることがわかった。

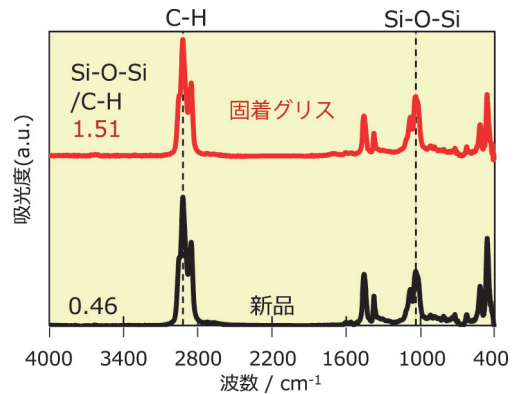


図7 グリスのFT-IRスペクトル

2. 2 バリウム石鹼/合成油系グリスの各劣化要因

①油分の減少

基油に用いられる合成油は、鉱物油等と比較した場合、蒸気圧が低い蒸発は進行し難い。図8に各種温度で加熱を行った場合の油分蒸発率と経過日数の関係を示す。図8に示すように、経過日数や加熱温度増加により、油分減少が進行しているが、どの温度域においても、二硫化モリブデン/鉱物油系グリスよりも油分蒸発が生じ難いことがわかった。

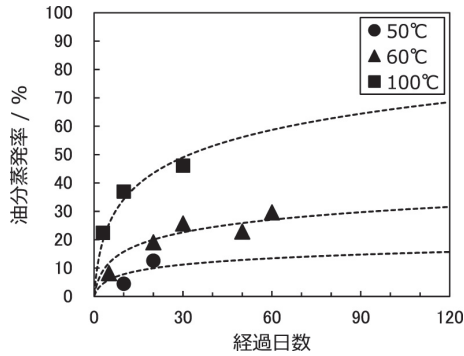


図8 油分蒸発率と経過日数の関係

②油分の酸化

基油に用いられる合成油は、鉱物油等と比較した場合、酸化が生じ難いが、環境温度や摩擦熱等の熱影響により酸化は進行する。図9に示すように大気中で加熱を行った場合には、加熱処理時間の経過とともに酸化が進行していることがわかった。

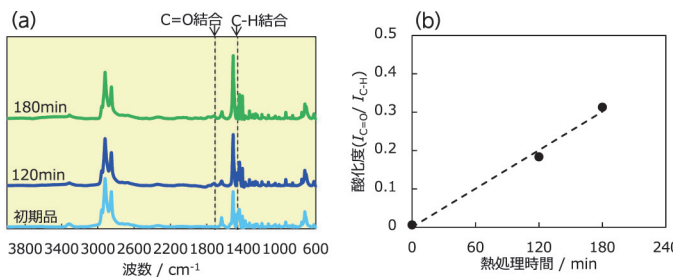


図9 種々の処理時間で大気加熱を行ったグリスの (a) 赤外吸収スペクトルと (b) 酸化度 ($I_{C=O}/I_{C-H}$ 比) と熱処理時間の関係

③潤滑剤/増ちょう剤の凝集

種々の条件で劣化させたグリスにおける増ちょう剤の状態についてSEM（走査型電子顕微鏡）観察を行った結果を図10に示す。図10において、(i)は、グリスに含まれる油分を加熱せずに減少させた場合、(ii)は窒素雰囲気中で加熱して油分を減少させた場合、(iii)は大気中で加熱を行い、油分を減少させた場合である。図9に示されるとおり、(i)油分減少のみが生じた場合は、増ちょう剤であるバリウム石鹼繊維が、互いに絡み合い、隙間の少ない密な構造となっていることがわかった。一方、(ii)窒素雰囲気中で加熱を行った場合、さらに増ちょう剤繊維が絡み合い、増ちょう剤繊維間の隙間が、(i)よりも減少し、密な構造となっていることがわかった。さらに(iii)大気中で加熱を行った場合は、増ちょう剤繊維の切断と凝集により、二次粒子を形成していた。

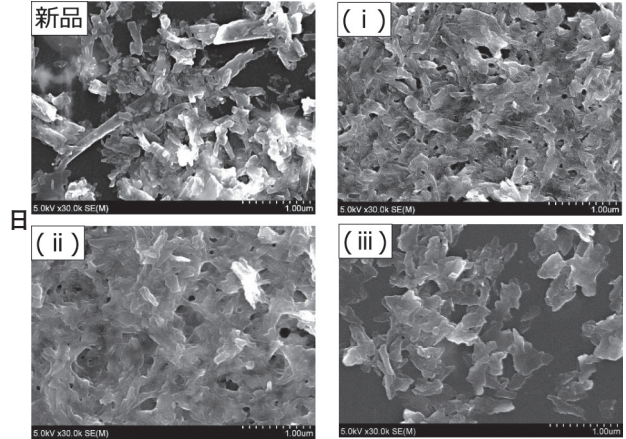


図10 各劣化状態におけるグリス（バリウム石鹼/合成油系）のマイクロスコブ観察写真 (i) 油分減少、(ii) 油分減少+凝集、(iii) 油分減少+凝集+油分酸化

④潤滑性の低下とグリス固着の再現

油分の減少、酸化や潤滑剤/増ちょう剤の凝集等によるグリスの潤滑性低下傾向について、摩擦摩耗試験機を用いた摩擦係数の評価を行った。図11に各劣化状態におけるグリスの摩擦係数と油分率の関係を示す。劣化モード(i)は、油分減少のみが生じた場合であり、油分率が40%以下の領域において、摩擦係数の立ち上がりが顕著であった。一方、劣化モード(ii)、(iii)は、油分減少に加えて(ii)増ちょう剤繊維の凝集、(iii)油分の酸化等の劣化因子がさらに加わっているが、摩擦係数の増加傾向は、劣化モード(i)と同程度であった。また、バリウム石鹼/合成油系グリスは、二硫化モリブデン/鉱物油系グリスよりも油分率減少による摩擦係数の立ち上がりが小さく、潤滑性を維持し易いことがわかった。

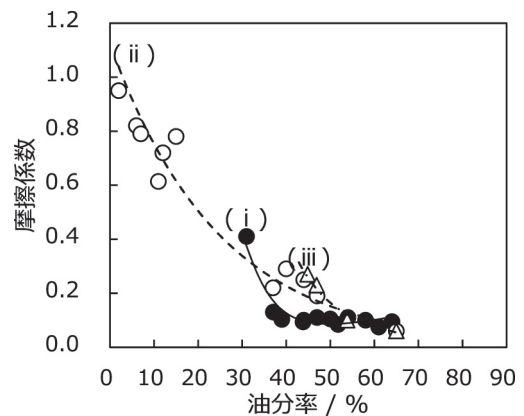


図11 各劣化状態におけるグリス摩擦係数と油分率の関係 (i) 油分減少、(ii) 油分減少+潤滑剤/増ちょう剤凝集、(iii) 油分減少と酸化+潤滑剤/増ちょう剤凝集

図12に回転摺動試験結果を示す。図12に示すように新品グリス及び、(iii)増ちょう剤凝集、油分酸化が生じた場合のいずれにおいても一定回転速度で回転し続けており、劣化が生じた場合でもバリウム石鹼/合成油系グリスは、潤滑性を維持し易いことがわかった。

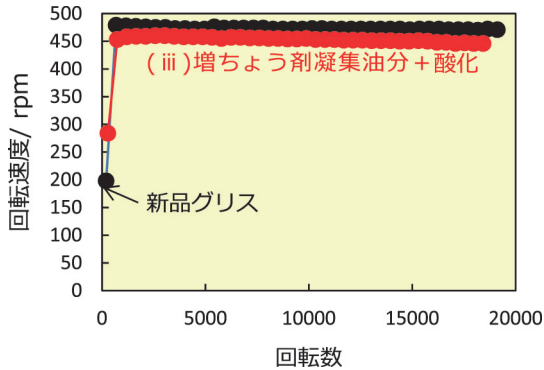


図12 回転摺動試験における積算回転数毎の回転速度

3. フィールド採取品の評価

3.1 二硫化モリブデン/鋳物油系グリス

当社電力機器機構部において実際にフィールドで使用されたグリス（二硫化モリブデン/鋳物油系）を機器から採取し、調査を行った結果を図13、14に示す。図13に示すとおり、経年数とともに、採取したいずれのグリスにおいても油分の減少が見られた。また採取フィールド環境によっては、各種劣化試験で得られた各(i)～(iii)の劣化メカニズムによってグリス劣化が生じていることがわかった。

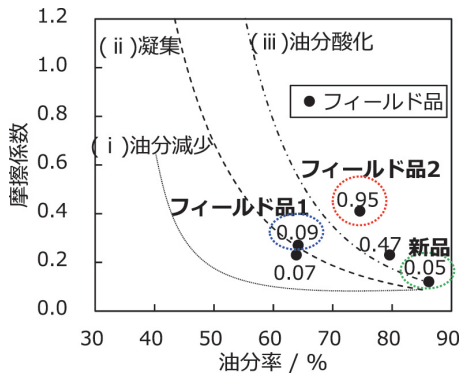


図13 フィールド品における摩擦係数と油分率の評価結果
* グラフ内記載数値は酸化度を示す。

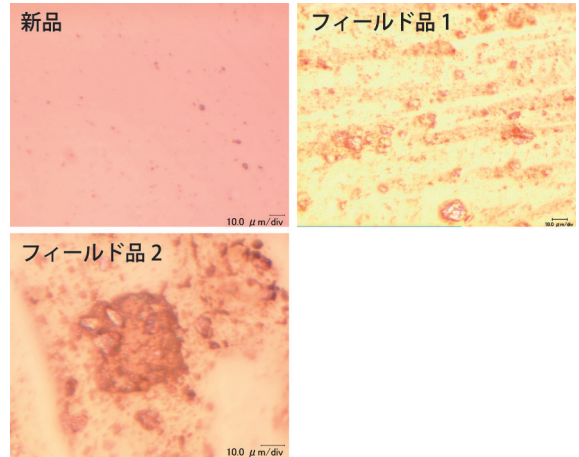


図14 フィールド品グリス（二硫化モリブデン/鋳物油系）のマイクロスコープ観察写真

3.2 バリウム石鹼/合成油系グリス

バリウム石鹼/合成油系グリスにおけるフィールド採取品の調査結果を図15、16に示す。

図15に示すとおり、加速劣化検証結果と同様にフィールド採取品においても、油分率の減少による摩擦係数の若干の増加傾向は見られた。

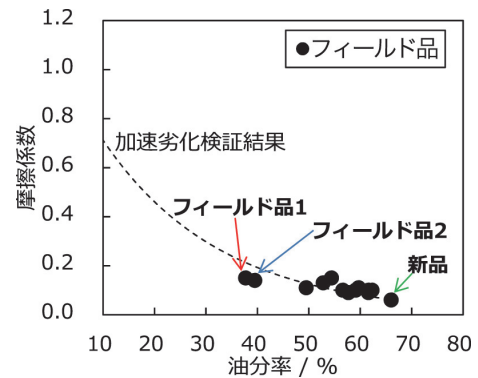


図15 フィールド品における摩擦係数と油分率の評価結果

一方、図16に示すバリウム石鹼/合成油系グリスのSEM観察写真に示すとおり、新品では、増ちょう剤の長繊維構造が確認されるが、油分率の低下と摩擦係数の増加が最も大きいフィールド品1,2では、増ちょう剤繊維が短くなり、凝集構造となっていることがわかった。

今回、調査を行ったフィールド品1,2は、電力機器機構部において約14年間使用されたものであり、経年や摺動回数増加による油分率の低下や、増ちょう剤繊維の切断と凝集構造は確認されるものの、潤滑性の増加は僅かであることから、二硫化モリブデン/鋳物油系グリスよりも劣化が進行し難いグリスであることが確認された。

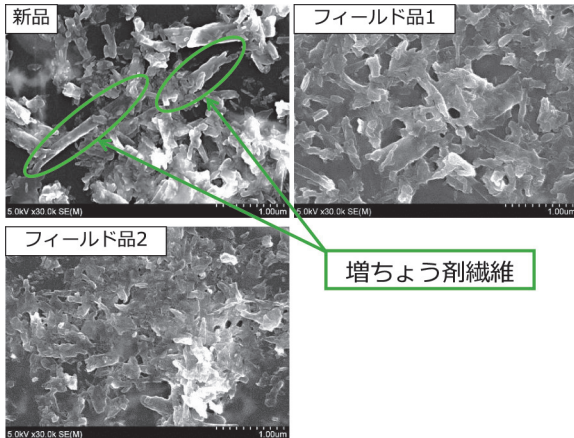


図16 フィールド品グリス（Ba石鹼/合成油系）のSEM観察写真

4. グリスの劣化診断

4.1 グリスの総合劣化診断手法

二硫化モリブデン/鉱物油系グリスは、油分率の低下や酸化の進行が顕著に認められていること、また、グリス内に含まれる二硫化モリブデン等の潤滑剤、ベントンの増ちょう剤が凝集し、グリス固着に至っていることがわかった。

現在、二硫化モリブデン/鉱物油系グリスを対象としたグリス劣化診断技術の開発に取り組んでいる。具体的には、機器から採取したグリスについて、油分率、酸化度、潤滑剤/増ちょう剤の凝集程度を劣化判定値に基づき総合評価を行い、劣化モードを推定することにより、余寿命診断することを試みている（図17）。

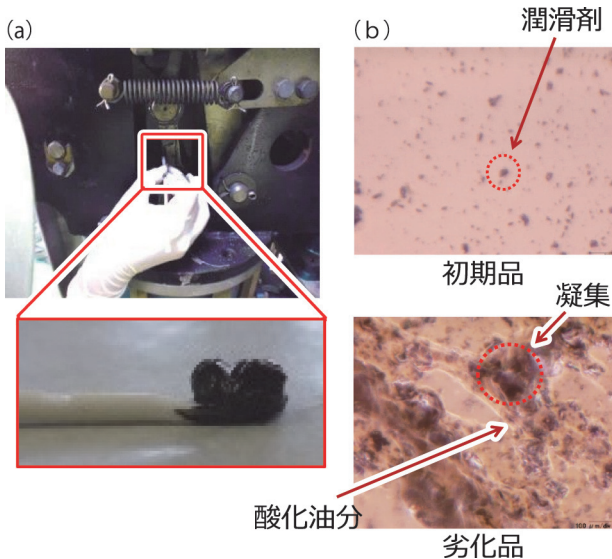


図17 (a) グリス採取、(b) グリス内部構造観察等によるグリス総合劣化診断

4.2 環境データによるグリスの劣化診断

特定グリスにおいて油分蒸発率の温度と暴露時間に対する依存性があることから、複合環境センサを用いた設置地点の温度変化測定結果からグリスのメンテナンス必要時期を推定できる可能性がある。また、複合環境センサと試験グリスを、フィールド設置し、環境温度計測とグリスの油分減少程度を計測し、実験結果とフィールド試験結果を比較することにより、推定アルゴリズムの妥当性検証や精度向上を目指した取り組みを実施中である（図18）。

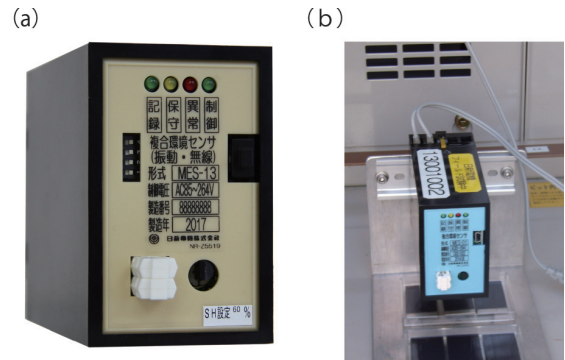


図18 複合環境センサ (a) とグリスフィールド設置試験及び複合環境センサを用いた環境温度計測例 (b)

5. まとめ

①二硫化モリブデン/鉱物油系グリス

基油成分である鉱物油は、油分蒸発や酸化が進行し易いことがわかった。さらに、加熱や摺動により潤滑剤である二硫化モリブデンや増ちょう剤であるベントンの凝集することで、劣化が進行し、最終的に固着することがわかった。

一方、増ちょう剤凝集や油分酸化が生じたグリスに注油を行っても、油分が保持できず、摺動面から油のしみ出しが早期に発生し、初期品より速く油分が減少してしまうため、注油によるメンテナンスに限界があることもわかった。

②バリウム石鹼系グリス

基油成分である合成油は、油分蒸発や酸化が、二硫化モリブデン/鉱物油系グリスと比較して、進行し難いことがわかった。さらに、油分減少や加熱により、増ちょう剤繊維の絡み合いが生じ、密な構造を形成することもわかったが、油分率低下による潤滑性低下は、二硫化モリブデン/鉱物油系グリスと比較して少なく、フィールド採取品評価においても潤滑性の顕著な低下傾向は認められなかった。

執筆者紹介



東 勇吾 Yugo Higashi
研究開発本部
技術開発推進センター 主任



松本 均 Hitoshi Matsumoto
研究開発本部
技術開発推進センター



野口 優弥 Yuya Noguchi
研究開発本部
技術開発推進センター



宇都宮 里佐 Risa Utsunomiya
研究開発本部
技術開発推進センター 主幹