

ナノカーボンを分散させた導電性グリースによる 転がり軸受の電食防止効果

鈴木 淳一* 上東 直孝** 柿嶋 秀史***

Application of Electrically Conductive Grease with Nanocarbon for Preventive Measures
against Electrical Pitting on Rolling Bearings

Junichi SUZUMURA Naotaka UEHIGASHI Hideshi KAKISHIMA

This paper describes a fundamental study of the preventive measures against electrical pitting on rolling bearings by using electrically conductive lubricating grease. In order to evaluate the ability to prevent the electrical pitting on rolling bearings of several types of grease into which well conductive nanometer-scaled carbon particles (so-called “nanocarbon” such as carbon-blacks and carbon nano tubes) are dispersed, bearing rotation tests were conducted under the condition that an electric current is turned on. We concluded that the electrically conductive grease has an ability to prevent the generation of electrical pitting, so-called “ridge mark” if the electric current density at the points of rolling contact is lowered.

キーワード：軸受，軸受の電食，グリース，導電性グリース，ナノカーボン

1. はじめに

転がり軸受（以下「軸受」と記す）は一般に外輪，内輪，転動体および保持器で構成される機械要素である。軸受の電食は，軸受内に電気が流れ，潤滑油膜が破断することによって発生する軸受の表面損傷である。鉄道車両で使用される軸受においては，転がり接触面間で潤滑油膜を通じて発生した放電現象（スパークやアーク）により，内・外輪の軌道面や転動体の転動面にピット状や洗濯板状（リッジマーク）などの表面損傷（電食痕）が生成されることがある¹⁾。電食が発生すると，軌道面や転動面が荒れて軸受回転時の振動や騒音が増大するとともに，発生した鉄粉が潤滑剤中に混入することで軸受の摩耗や潤滑剤の劣化を促進させる。最終的には潤滑不良により軸受保持器の破損や焼付きに至る恐れがある。

鉄道車両における電食は，1980年代に電車の主電動機として誘導電動機を採用した車両が営業線に投入された際に，主電動機軸受の損傷が頻発したことを契機に注目され，電食防止対策として，軸受外輪を絶縁性のセラミックスやPPS（ポリフェニレンサルファイド）樹脂で被覆することで，軸受内部に電気が流れないようにした絶縁軸受が開発された^{2) 3)}。絶縁軸受は一般の軸受と比較して高価であるが，電食防止効果が大きく，主に誘導電動機軸受として広く採用されている。

一方，導電性を有する潤滑剤を使用して潤滑油膜の電

気抵抗を低減することで放電現象を防止する「軸受通電」の考え方を利用した電食防止対策が採用されている事例も存在する。軸受を通電経路として使用するレーザープリンタやコピー機の感光部や定着部の軸受には，潤滑剤としてグリースに金属粉やグラファイト，炭素系材料等の導電性物質を分散させ，体積抵抗率を $10^5 \Omega \cdot \text{cm}$ 以下とした導電性グリースが使用されている^{4) 5)}。鉄道車両の軸受においては，導電性グリースを使用した軸受通電による電食防止対策の検討は今までに行われていないが，特に主電動機軸受用潤滑グリースとして，電食防止効果を有する導電性グリースを適用することができれば，絶縁軸受を用いるよりもコストが低い電食対策となることが期待される。

本研究では，新たな主電動機軸受の電食対策となる可能性がある軸受通電および導電性グリースに関する知見を得ることを目的とし，導電性に優れたナノカーボン（ナノメートルスケールの炭素材料）を分散させた導電性グリースについて，小型軸受を用いた通電回転試験を実施し，電食防止性能を評価するとともに，導電性グリースの電食防止メカニズムを検討した。また，グリースの組成（基油の種類，ナノカーボンの種類や量）が電食発生に及ぼす影響についても調べた。グリースに添加したナノカーボンは，球形の炭素微粒子であるカーボンブラック（以下「CB」と記す）と，円筒形の炭素微粒子であるカーボンナノチューブ（以下「CNT」と記す）の2種類である。

2. 試験方法

図1に本研究で使用した小型軸受通電回転試験装置

* 材料技術研究部 潤滑材料研究室

** 材料技術研究部 摩擦材料研究室

*** 前 材料技術研究部 摩擦材料研究室

特集：材料技術

の概略を示す。試験軸受として深溝玉軸受（呼び番号：6206）を用いた。3章で述べる試験グリースを封入した試験軸受をハウジングに組み込み、180Nのラジアル荷重を負荷させ、回転数 1000min^{-1} で回転させる。ここで設定した荷重は、玉と軌道輪の最大接触面圧が実車の主電動機軸受とほぼ同じになる値である。封入グリース量は軸受の空間容積の33%に相当する量とした。

軸受内への通電は、外輪に接するハウジングと、内輪に接する回転軸に取り付けたロータリコネクタに直流電源の電極端子を接続することによって行った。直流の場合にはマイナス側の軌道面にリッジマーク状電食痕が発生するとの報告⁶⁾がある。本試験では試験後の評価対象部位を表面状態の観察等の際に取扱いが容易な内輪とするため、通電方向は外輪（プラス）から内輪（マイナス）とした。また、通電条件については、軸受の電食発生と転がり接触面の電流密度（単位接触面積あたりの電流値）には相関があり、電流密度が $1\text{A}/\text{mm}^2$ 未満の場合には電食は発生しないという知見が得られている⁷⁾⁸⁾⁹⁾。このことから、本試験では電流密度を一定値とするために定電流制御とした。電流値は、ロータリコネクタ等の許容電流を考慮しつつ、非導電性グリースで試験を行った際に比較的短時間で確実に電食を発生させることが可能な電流密度が与えられるように、6Aの定電流とした。

試験軸受に電食が発生すると軸受の振動が増大するため、ハウジングに取り付けた振動加速度ピックアップにより、垂直方向の振動加速度を測定した。また、本試験は定電流での通電であるため、電圧は軸受内部の電気抵抗の変化に応じて変動する。そこで、外輪と内輪の間に電圧計を取り付け、外輪／内輪間の電圧を測定した。試験終了後は軸受を分解し、外輪、玉、内輪の外観観察および内輪軌道面の表面粗さ測定により電食の発生状況を確認した。また、試験後の軸受からグリースを採取し、蛍光X線分析法により電食で発生する鉄分の含有率を測定した。

3. 試験を実施したグリース

表1に試験を実施した7種類のグリース（A～G）の

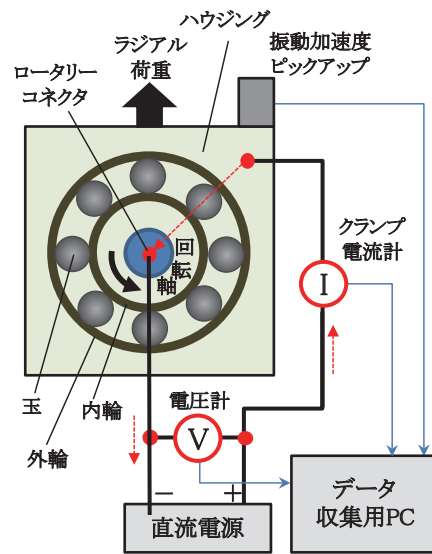


図1 小型軸受通電回転試験装置の概略

概要を示す。グリースAは鉄道車両の誘導電動機軸受グリースとして広く使用されているグリース（非導電性）である。グリースB、Cは事務機器軸受用として、基油にCBを配合したグリースである。CBは直径数nm～数百nmの炭素微粒子で、導電性グリースにおいては粒径が30～70nm程度のCBが10質量%程度、導電性付与材として添加されており、増ちょう剤（グリースを半固体状に保つために添加する成分）としての役割も果たしている¹⁰⁾。グリースDは、耐蒸発性に優れた合成フッ素油を基油とした導電性グリースで、高真空等特殊な条件下で使用されている。グリースE、FはそれぞれグリースB、Cに添加されているCBの量を半分に減らすことで体積抵抗率を大きくしたグリースである。グリースGはグリースAにカーボンナノチューブを分散させて導電性を付与したグリースである。CNTは図2に示すように、炭素原子が六角形の網目状に二次元的に結合したグラフェンシートが、ナノメートルオーダーの直径の円筒に丸まった中空の管状物質であり、優れた機械的特性および導電性を有する新材料として注目されている¹¹⁾。本研究ではCNT分散グリースの試作にあたり、数種類

表1 試験を実施したグリースの概要

グリース	基油	増ちょう剤	導電性付与材	ちょう度 (25℃, 不混和)	体積抵抗率 ($\Omega \cdot \text{cm}$)	基油粘度 40℃ (mm^2/s)	備考・用途
A	鉱油	Li 複合石けん	なし	310	1.0×10^7 以上	101	誘導電動機用非導電性グリース
B	合成炭化水素油	CB	CB	259	6.7×10^1	30.5	事務機器軸受用グリース
C	合成エステル油	CB	CB	220	4.1×10^1	33.2	事務機器軸受用グリース
D	合成フッ素油	CB	CB	224	5.5×10^2	400	特殊導電性グリース
E	合成炭化水素油	CB	CB	430	1.7×10^3	30.5	CBの量がグリースBの1/2
F	合成エステル油	CB	CB	430	1.7×10^2	33.2	CBの量がグリースCの1/2
G	鉱油	Li 複合石けん	CNT	211	5.6×10^4	101	グリースAにCNTを分散

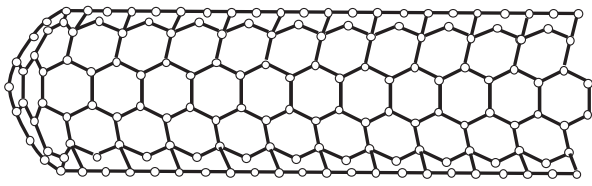


図2 代表的なCNTの分子構造

のCNTを分散させたグリースの体積抵抗率を測定した。グリースGは体積抵抗率が最も小さくなったNanocyl社製の複層CNT（平均直径9.5nm，平均長さ1.5 μ m）を分散させたものである。

4. 結果および考察

4.1 導電性グリースの電食防止メカニズム

グリースA（非導電性グリース）とグリースB（導電性グリース）について25, 50, 100時間の小型軸受通電回転試験を行い、グリースの導電性の有無が電食発生に

及ぼす影響について検討した。

4.1.1 軸受の外観観察および軸受振動測定

25, 50, 100時間試験後の軸受内輪軌道面の外観を図3に、50時間試験後の内輪軌道面の周方向の粗さ曲線を図4に、100時間の試験を行った際の軸受振動測定の結果を図5に示す。なお、グリースAについては軸受振動が増大したため試験開始約88時間後に試験を中止した。

非導電性グリースであるグリースAでは、25時間試験後には軸受内輪軌道面に着色が発生し、50時間および88時間試験後ではリッジマーク状電食痕が認められた。粗さ曲線に見られるうねりは電食痕の凹凸を示している。また、図5よりグリースAでは試験開始後約50時間後から軸受振動が著しく増大することがわかる。一方、導電性グリースであるグリースBでは、100時間試験後においても軸受内輪軌道面に電食痕は認められず、粗さ曲線にうねりは見られなかった。軸受振動が著しく増加する傾向もなかったことから、導電性グリースにはリッジマーク状電食痕の発生を防止する効果があることがわかった。

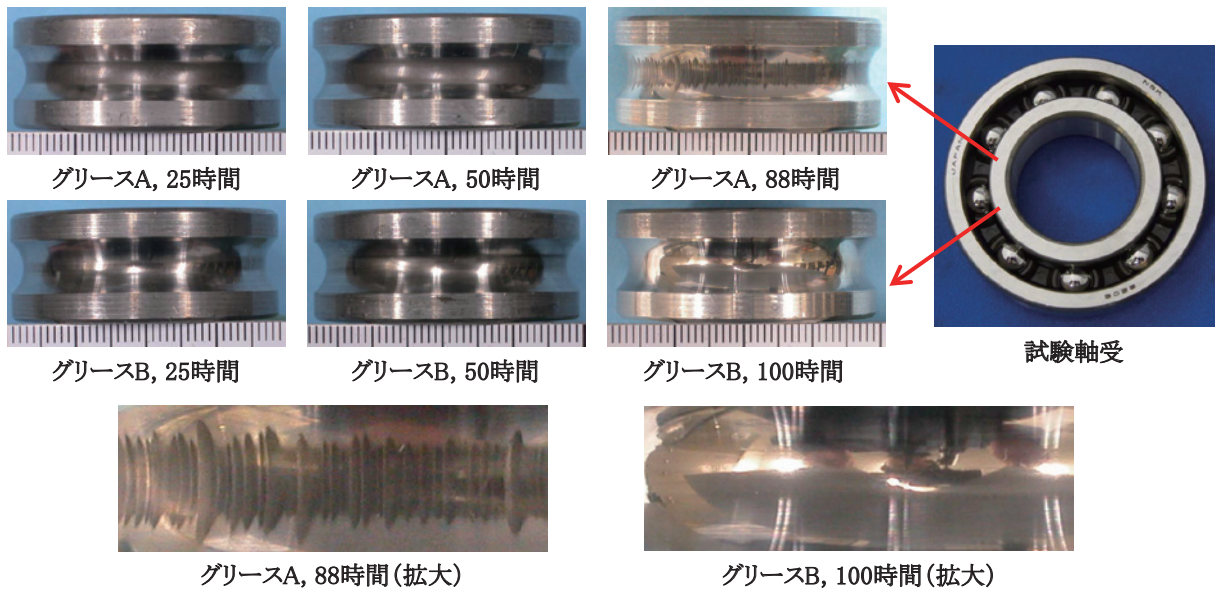


図3 試験後の軸受内輪軌道面の外観（グリースA, B）

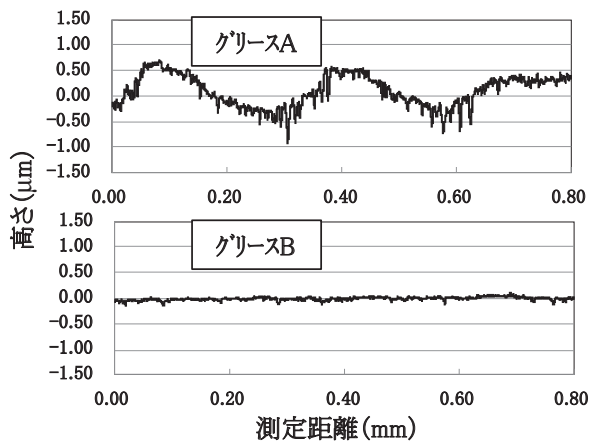


図4 50時間試験後の内輪軌道面の粗さ曲線

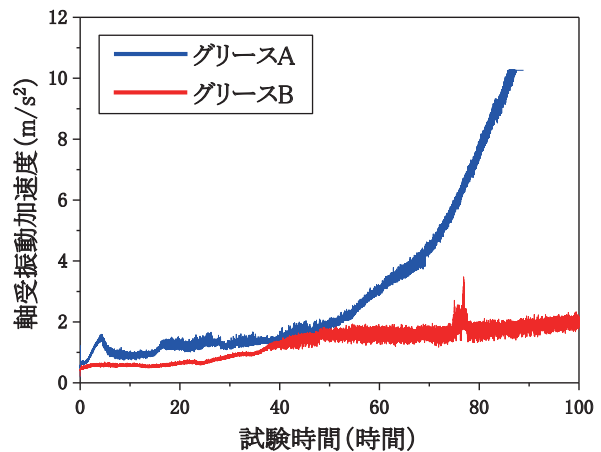


図5 100時間試験時の軸受振動測定結果

特集：材料技術

4. 1. 2 電圧変動波形の解析による電食防止メカニズムの検討

100時間の試験を行った際の電圧変動波形を図6に示す。グリースAでは電圧変動波形の振幅がグリースBよりも大きく、試験時間の増加に伴い、波形の振幅が増大する傾向がみられる。一方、グリースBでは試験時間が増加しても波形の振幅はほぼ一定である。前述の通り、本試験ではグリースの種別に関係なく常に6Aの電流が軸受に流れている状態であり、電圧変動波形は軸受内部の電気抵抗や通電経路の影響を受ける。すなわち、電圧変動波形の違いは導電性グリースと非導電性グリースでは軸受内部の通電状態が異なることを示している。そこで、電圧変動波形のFFT（高速フーリエ変換）解析により求めた各波形の周波数成分を、軸受の回転に起因する周波数（保持器や内輪の回転周波数、玉の自転・公転周波数）と比較することにより、軸受内部の通電状態について考察した。

グリースAおよびグリースBについて、25, 50, 100(グリースAでは88)時間試験終了直前の電圧変動波形の

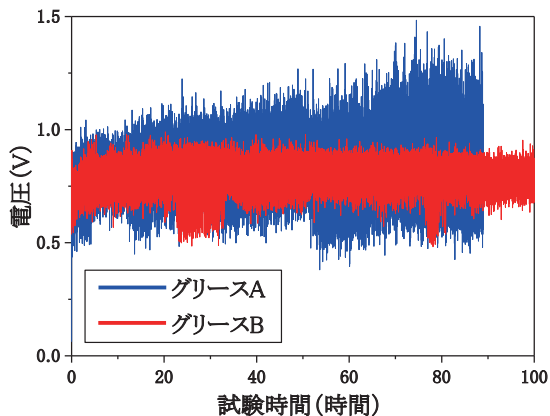


図6 100時間試験時の電圧変動波形

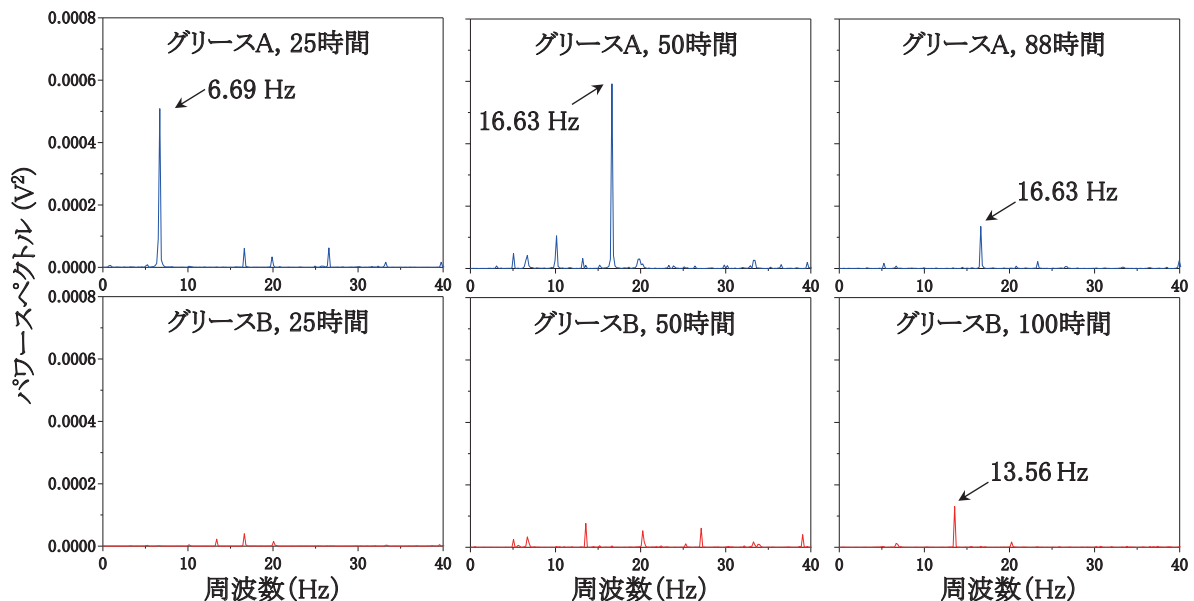


図7 電圧変動波形のFFT解析結果（グリースA, B）

FFT解析を行った結果を図7に示す。

グリースAの電圧変動波形は、試験開始後25時間では6.69Hzの周波数に、試験開始後50, 88時間では16.63Hzの周波数に大きいピークが認められた。これらの周波数は、前述の試験条件で軸受が回転する際の玉の公転周波数（保持器の回転数）6.61Hzおよび内輪回転数16.67Hzにそれぞれほぼ一致する。グリースAでは、いずれの試験時間においても、軸受の回転運動に起因する周波数に従った周期で外輪と内輪間の通電が行われていると考えられる。試験開始25時間では、内輪軌道面に変色（リッジマーク状電食痕生成の前段階）が発生し、玉の公転運動に従って通電している。試験開始50, 88時間では、内輪の回転運動に従って通電している。通電経路が玉から内輪に変化したのは、内輪軌道面全体にリッジマーク状電食痕が発生したことが影響していると考えられる。以上の結果から、非導電性グリースでは、転がり接触部（玉と内輪）の油膜が絶縁破壊されることで通電経路が形成されると考えられる。

一方、導電性グリースであるグリースBでは、試験開始25時間および50時間では、軸受の回転運動に起因する特定の周波数に大きいピークは認められなかった。試験開始100時間では13.56Hzの周波数にやや大きいピークが認められたが、この周波数は軸受の回転運動に起因する周波数には一致しない。この結果は、通電経路は軸受の回転に影響されず、転がり接触部以外にも複数の通電経路が存在していることを示唆している。

電圧変動波形のFFT解析結果から推定される導電性グリースと非導電性グリースの通電経路の模式図を図8に示す。電食の原因となる放電が発生する転がり接触部の電流密度は、同じ電流が軸受内に流れた場合、導電性グリースを使用した軸受では通電経路が分散されるた

め、非導電性グリースを使用した軸受に比べて小さくなり、本試験条件ではリッジマーク状電食痕の発生が防止できたと考えられる。

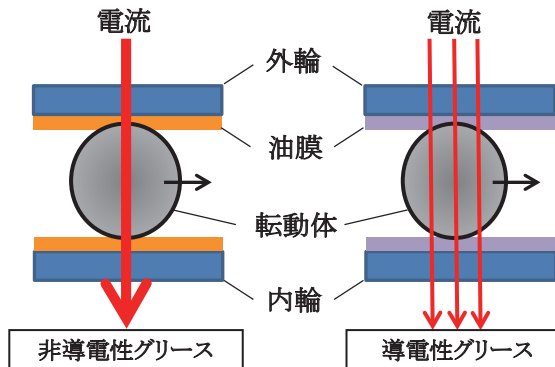


図8 通電経路

4.2 グリースの組成が電食発生に及ぼす影響

導電性グリースの組成（基油の種類、ナノカーボンの種類や量）が電食発生におよぼす影響を調べるために、前述のグリース A, B に加えて表 1 に示すグリース C ~ G についても 50 時間の小型軸受通電回転試験を行い、軸受内輪の外観観察と試験後の軸受から採取したグリースの鉄分測定により電食の発生状況を確認した。

試験後の軸受内輪軌道面の外観を図 9 に、グリースの鉄分測定結果を表 2 に示す。試験した導電性グリースのうち、グリース D, G ではリッジマーク状電食痕が認められた。なお、グリース D では軸受振動が増大したため、試験開始約 23 時間後に試験を中止した。

グリース B, C, D はいずれも CB を導電性付与材としたグリースであり、基油の種類が異なる。これらのグリースのうちグリース D のみリッジマーク状電食痕が発生した。グリース D は合成フッ素油を基油としたグリースであり、基油粘度と体積抵抗率が、グリース B, C の基油である合成炭化水素油および合成エステル油よりも大きいことがリッジマーク状電食痕の発生に影響を及ぼしている可能性がある。グリース B, C ではいずれもリッジマーク状電食痕は発生していないが、グリースの鉄分はグリース B の方が大きい。

グリース B で鉄分が多くなるのが通電に起因する現象であるかを調べるために、グリース B, C について無通電条件下で 50 時間の軸受回転試験を実施し、グリース中の鉄分を測定した。その結果を表 2 に示す。いずれのグリース中にも鉄分はほとんど含まれないことから、鉄分の発生は通電に起因するものであり、グリース B では軸受通電時にリッジマーク状電食痕の生成とは異なる表面損傷が起きていると推定される。そこで、グリース B, C について、軸受内輪軌道面の拡大観察を行った。その結果を図 10 に示す。グリース B では軌道面に局所的な摩耗の痕跡（図中の白破線枠内）が認められたが、グリー

ス C では摩耗痕は見られなかった。グリース B で通電時に摩耗が発生するメカニズムは現在のところ不明であるが、グリースの潤滑性能が影響している可能性が考えられる。

グリース E, F はそれぞれグリース B, C に添加されている CB の量を半分に減らすことで体積抵抗率を大きくしたグリースである。CB は増ちょう剤としても作用しているため、表 1 に示すようにグリース E, F ではグリース B, C よりもちょう度が大きく（軟らかく）なっている。これらのグリースではいずれもリッジマーク状電食痕は発生しなかった。このことから、グリース B, C では体積抵抗率をそれぞれグリース E, F と同程度の $1700\Omega \cdot \text{cm}$, $170\Omega \cdot \text{cm}$ 程度に上昇させた場合でもリッジマーク状電食痕の発生は防止できると考えられる。ただし、グリース中の鉄分はグリース B, C よりも大きくなっていったことから、体積抵抗率の上昇やグリースの軟化（ちょう度の上昇）が前述の通電摩耗を促進させた可能性がある。

グリース G は導電性付与材として CNT を分散させたグリースであるが、リッジマーク状電食痕の発生が確認された。グリース G は体積抵抗率が他の導電性グリースと比較して大きいため、リッジマーク状電食痕の発生を防止できなかったと考えられる。

以上より、基油の種類がリッジマーク状電食痕の発生に影響するという結果が得られ、試験を実施したグリースの中では、エステル系合成油を使用したグリースがリッジマーク状電食痕の発生を防止でき、通電時の摩耗も小さいことがわかった。また、グリースの種類によっては体積抵抗率を $1700\Omega \cdot \text{cm}$ まで上昇させた場合でもリッジマーク状電食痕の発生を防止できることがわかった。

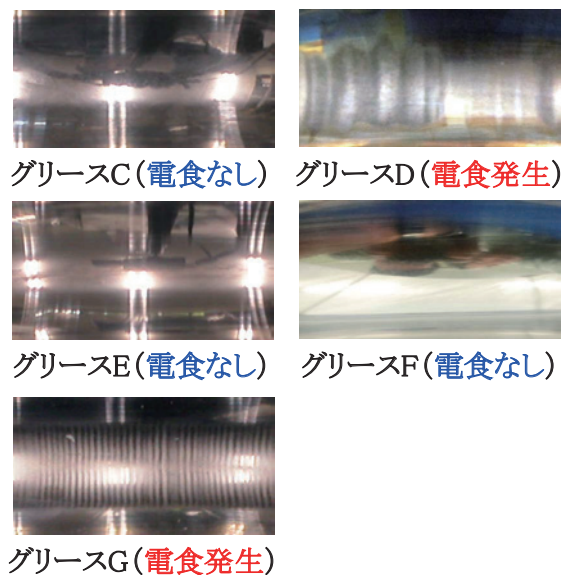


図9 50 時間試験後の軸受内輪軌道面の外観
（拡大写真、グリース C ~ G）

表2 50時間試験後のグリース鉄分測定結果

グリース	通電条件	鉄分 (質量%)
A	通電	0.10
B	通電	0.42
C	通電	0.08
D	通電	0.09
E	通電	0.89
F	通電	0.53
G	通電	0.31
B	無通電	0.00
C	無通電	0.00

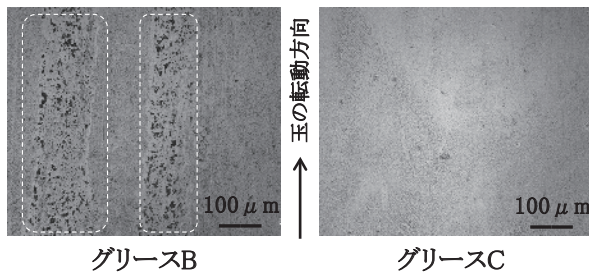


図10 50時間試験後の軸受内輪軌道面の拡大観察
(グリース B, C)

5. まとめ

鉄道車両の軸受ではこれまでに取り組まれていなかった軸受通電の考え方に基づいて、導電性グリースによる電食防止対策を検討した。導電性に優れたナノカーボン分散させた数種類の導電性グリースについて、小型軸受通電回転試験を実施し、それらの電食防止性能を評価した。以下にその結果を要約する。

- (1) 適切な組成の導電性グリースを使用することによりリッジマーク状電食痕の発生を防止できる。
- (2) 導電性グリースを使用した軸受では軸受到電流が流れる際、転がり接触部以外にも通電経路が形成されることで、転がり接触部における電流密度が低減することが電食防止に寄与している。
- (3) グリースの基油の種類がリッジマーク状電食痕の発生と通電時の摩耗に影響を及ぼす可能性がある。
- (4) 試験を実施したグリースの中では、エステル系合成油を使用したグリースがリッジマーク状電食痕の発生を防止でき、通電時の摩耗も小さい。
- (5) グリースの種類によっては体積抵抗率が $1700\Omega \cdot \text{cm}$ まで上昇させた場合でもリッジマーク状電食痕の発生を防止できる。
- (6) CNTを分散させたグリースについては、本研究で使用したCNTの種類、添加量および分散方法ではリッジマーク状電食痕の発生を防止することができなかった。

6. おわりに

組成や体積抵抗率が異なるグリースの小型軸受通電回転試験により、リッジマーク状電食痕発生メカニズムやグリースの組成が電食発生におよぼす影響についての基礎的な知見を得ることができた。一方、鉄道車両における電食対策として導電性グリースを適用する際には、グリースの組成と潤滑性能および電食防止性能についてさらなる検討が必要である。例えば、CBを導電性付与材として配合したグリースでは、軸受の回転に伴いグリース中のCBが転がり接触面から排除されることにより、内輪と外輪の間の電気抵抗が回転時間の経過とともに上昇する事象が報告されている^{12) 13)}。今後は小型軸受通電回転試験に加え、導電耐久性試験や実物の軸受を使用した潤滑性能試験等により、最適な導電性グリースの組成に関する検討を進めたいと考えている。

文献

- 1) 日本トライボロジー学会編：トライボロジーハンドブック，養賢堂，pp.795-796，2001
- 2) 渡邊朝紀：鉄道車両の軸受と電食，鉄道車両と技術，No.12，pp.3-10，1995
- 3) 渡邊朝紀：ころがり軸受の電食，トライボロジスト，Vol.41，No.7，pp.570-575，1996
- 4) 中村浩之，正田亨：事務機器用導電性軸受，NSK Technical Journal，No.674，pp.24-26，2002
- 5) 傳實功哲，外尾道太：事務機軸受用導電性グリースの研究，NSK Technical Journal，No.683，pp.42-47，2009
- 6) 池田博志，柿嶋秀史，伊東伸剛：転がり軸受の電食再現試験，トライボロジー会議予稿集，大阪1997-11，pp.483-485，1997
- 7) O. Haus：ETZ-A，Vol.85，No.4，pp.106，1964.
- 8) H. Pithoff：Elektrische Bahnen，Vol.39，No.3，1968.
- 9) 野口昭治，赤松洋孝，是永敦：小型玉軸受の電食に関する研究（第1報），トライボロジスト，Vol.52，No.8，pp.622-628，2007
- 10) 社団法人日本トライボロジー学会 グリース研究会編：潤滑グリースの基礎と応用，pp.142-144，2007
- 11) 例えば 齊藤理一郎，篠原久典：カーボンナノチューブの基礎と応用，2004
- 12) 傳實功哲，中道治，小川隆司：導電性グリース封入軸受の性能評価，トライボロジー会議予稿集，仙台2002-10，pp.385-386，2002
- 13) 傳實功哲，中道治：導電性グリース封入軸受の性能評価（第2報），トライボロジー会議予稿集，東京2003-5，pp.235-236，2003