

フッ素系油潤滑下における転がり軸受の損傷メカニズムの解明

Damage mechanism in rolling bearing under fluorinated oil lubrication

福井大（正）*今 智彦 福井大（正）本田 知己 福井大（院）坂元 秀平

Tomohiko Kon*, Tomomi Honda *, Shuhei Sakamoto *

*University of Fukui

1. 緒言

転がり軸受は機械の回転運動を案内する機械要素であり、機械製品において重要な役割を担っている。しかし、転がり軸受は使用とともに劣化し、最終的に寿命に至る。PFPE 油は 1970 年代に登場し、極めて低い蒸気圧、高い粘度指数、化学安定性から人口衛星をはじめとする宇宙機器用や半導体製造装置用として広く使用されている。しかしながら、PFPE 油潤滑下で境界潤滑状態になると鉄と化学反応を起こし、油の劣化を引き起こすこと、および PFPE 油に溶ける蒸気圧が低い適切な添加剤が見つかっていないことが問題点として指摘されている⁽¹⁾。McMurtrey は真空・高温・低温環境などの過酷な環境下で作動する転がり軸受の軸受寿命試験を行っており、潤滑剤は PFPE グリースを始めとする 38 種類のグリースを使用し、1 年間の連続運転を行い、さらに 4 種類のグリースを 5 年間にわたって連続運転した。その結果、どの試験条件においても PFPE グリースが最良の潤滑性能を示したと報告している⁽²⁾。また、大野らは PFPE 油と PFPE グリースの大気中での転がり軸受寿命試験を行っており、PFPE 油はグリースと比べて短寿命となったと報告しており、基油の粘度変化に伴うフッ化水素の発生が原因としている⁽³⁾⁽⁴⁾。このように PFPE グリースを転がり軸受に適用した場合、PFPE 油と比較して良好な潤滑性能を示すことが報告されているが、PFPE 油では寿命が低下する報告もあり、PFPE 油が軸受の損傷に与える影響について不明な点が多い。また、実機環境下で故障した軸受の損傷面解析の報告例はなく、実機環境下で PFPE 油が軸受寿命に与える影響は明らかになっていない。そこで、本研究では PFPE 油潤滑下における転がり軸受の損傷メカニズムの解明を目的とし、PFPE 油潤滑下において使用され、早期に故障に至った転がり軸受の損傷面解を行い、PFPE 油が軸受寿命に与える影響について考察した。

2. 供試軸受

供試軸受はボール材質がセラミックスの深溝玉軸受（呼び番号：6209）である。Figure 1 に (a) 未使用の軸受、(b) フレーキングに至った軸受 No.1、(c) No.1 と同一環境下にあった軸受 No.2、(d) No.1, 2 とは別機械で使用された軸受 No.3、(e) No.3 と同一環境下にあった軸受 No.4 を示す。No.1 では半周にわたって大規模なフレーキングが発生しており、各軸受の表面は黄土色や黒色に変色していた。Table 1 に基本定格寿命と実機が故障に至った時点での運転時間、使用条件および荷重を示す。荷重 180 N、回転数 7700 rpm は 6209 深溝玉軸受の設計限度内であるが、基本定格寿命よりも早期に寿命に至っている。

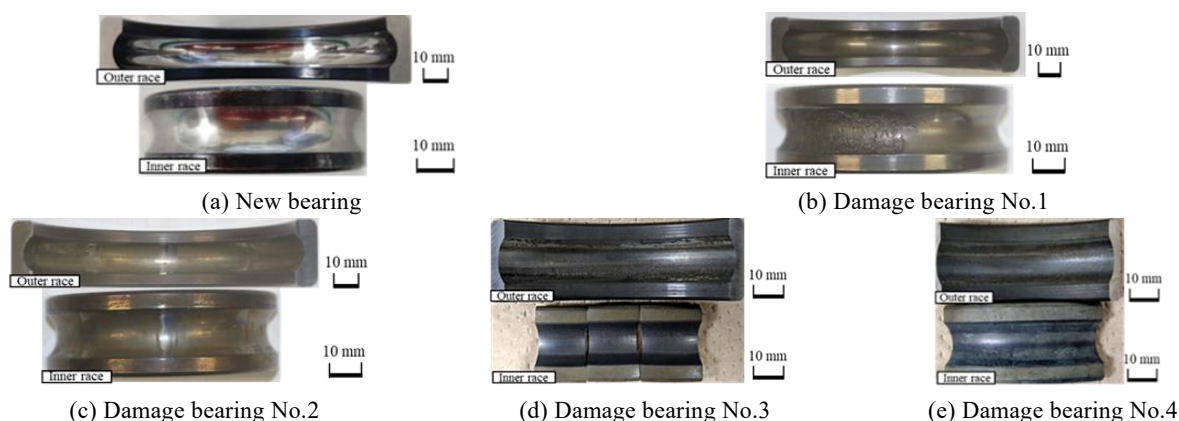


Fig.1 Schematic view of bearing specimens

Table 1 Operating conditions of each bearing

	No.1 and No.2 bearing	No.3 and No.4 bearing
Radial load, N	180	
Basic rating life, hours	1.44×10^7	
Operating time, hours	1.55×10^4	1.20×10^4
Temperature, °C	129	104
Rotational speed, rpm	7700	7000

3. 実機軸受の分析および考察

フレーキングは内輪軌道溝の半周にわたって発生しており、外輪軌道溝においてもマイクロピッチングが観察された、一方セラミックスボールにはフレーキングは観察されなかった。Figure 2 に No.3 内輪軌道面上の二次電子 (SE) 像を、Fig. 3 に No.3 外輪軌道面上の SE 像と元素マッピング像を示す。No.1-4 の軸受では Fig. 2 に示すような凹凸のある島状構造が観察された。島状構造形成部はフッ素の検出強度が強いことから、PFPE 油由来の生成物である可能性が考えられる。そこで、島状構造のより詳細な分析のため、XPS (X-ray Photoelectron Spectroscopy) による化学結合状態の分析を実施した。Figure 4 に No.3 内輪軌道面の最表面における XPS スペクトルを示す。Figure 4 の XPS スペクトルはフッ素由来のピーク範囲を拡大したものである。No.3 内輪軌道面では 689 eV 付近の炭素とフッ素の結合 (C-F) と 685 eV 付近の金属とフッ素の結合 (M-F) が検出された。金属とフッ素の結合が見られたことから、PFPE 油と金属が反応したと考えられる。また、イオンエッチングによる深さ方向の分析では、深さ方向に C-F のピーク強度が低下し、M-F のピーク強度が増加した。このことから、表層には PFPE 油由来の重合物、内部に金属フッ化物の層が形成されていると考えられる。

Figure 5 に島状構造の断面を示す。軌道面上に集束イオンビーム (FIB: Focused Ion Beam) 装置を用いて断面加工を行い、断面観察を行った。また、断面加工は回転方向に対して垂直な方向に行った。島状構造は厚みが約 1 μm であり、基材の上に島状構造が形成されていることがわかる。微小き裂は島状構造層を起点として基材内部へと進展している様子がわかる。このことから、島状構造の形成によって潤滑状態が過酷化することが、フレーキングに至る初期き裂の形成要因となった可能性が示唆される。

4. 結言

- (1) PFPE 油潤滑下において、PFPE 油由来の島状構造が軌道面上に形成されることを示した。
- (2) XPS 分析の結果、島状構造は PFPE 油と金属との反応によって形成された金属フッ化物であることを示した。
- (3) PFPE 油由来の島状構造から基材へと進展するき裂が観察されたことから、島状構造形成がフレーキングの起点となる可能性を示した。

文献

- 1) 小原: 宇宙機器用グリースの技術動向, トライボロジスト, 57, 6 (2012) 398.
- 2) E.L. Mcmurtrey: An Evaluation of Grease-Type Ball Bearing Lubricants Operating in Various Environments (Final Status Report No.8), NASA Technical Memorandum, TM-86480 (1984).
- 3) 大野・土田・森田・塩見・小原: 真空中での宇宙用潤滑剤の転がり軸受寿命試験による性能評価, 機械材料・材料加工技術講演会講演論文集, 東京 2010, 18 (2010) 126.
- 4) Md. Z. Rahman, N. Ohno & H. Komiya: Effect of Perfluoropolyether (PFPE) Fluids on Life of Ball Bearings, Proceedings of the International Conference on Mechanical Engineering 2003 (ICME2003), Dhaka 2003, 1-5.

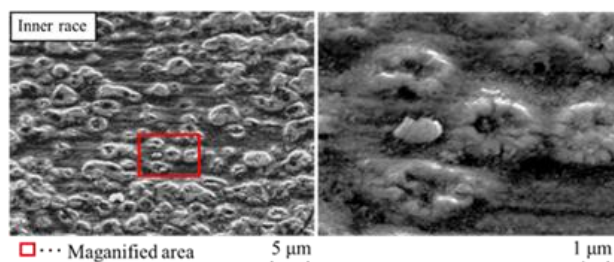


Fig.2 SE images of island structures on inner raceway surface of No.3

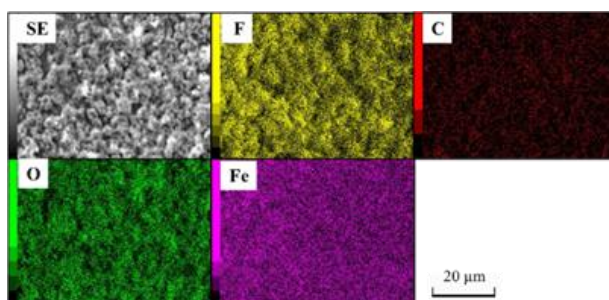


Fig.3 SE image and EDX mappings of island structure on outer raceway surface of No.3

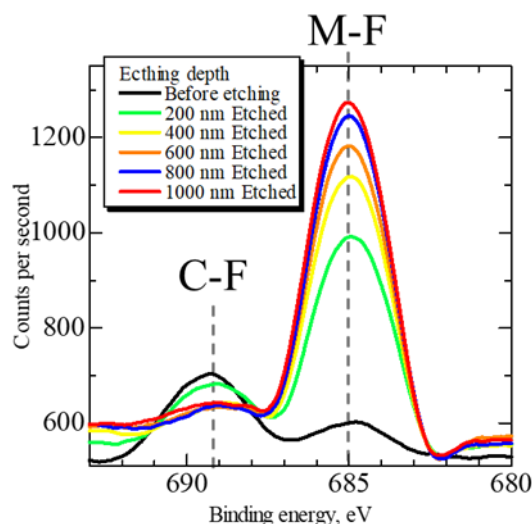


Fig. 4 XPS analysis on inner race surface of No. 3

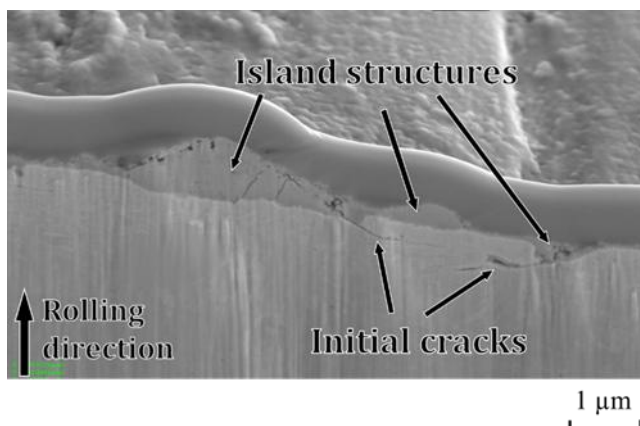


Fig. 5 SE image of micro cracks on the No.1