

令和元年6月24日現在

機関番号：17601

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2016～2018

課題番号：16K06042

研究課題名(和文)ハイブリッドポリマー軸受の摩擦化学反応による自己潤滑膜の生成メカニズムの解明

研究課題名(英文) A study on self-lubrication film with tribo-chemical reaction in hybrid polymer bearing

研究代表者

古池 仁暢 (KOIKE, HITONOBU)

宮崎大学・工学部・助教

研究者番号：40603329

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,700,000円

研究成果の概要(和文)：ポリエーテルエーテルケトン(PEEK)などのプラスチックで構成されるポリマーベアリングの自己潤滑膜生成の機構を明らかにすることを目的として、深溝玉軸受を模擬した試験体を製作して転がり疲労テストを行い、自己潤滑膜の分析および効果を調査した。自己潤滑膜はセラミック球とPEEK内輪の繰返し接触により生成した。内輪軌道面に複数の自己潤滑膜ラインが形成され、その後繰返し数に伴って徐々に生長し、滑らかな軌道面を生成することがわかった。自己潤滑膜の生成により耐焼付き性や強度(限界ラジアル荷重)、疲労寿命延びなどベアリング性能の向上の成果が得られた。このことは特殊環境用の樹脂機械要素部品の長寿命に貢献する。

研究成果の学術的意義や社会的意義

極めて薄い層状の自己潤滑膜は、樹脂機械部品の高圧縮応力下での摩擦を伴う物理化学反応により接触面表層に生じる。潤滑膜の生成は摩擦や潤滑、しゅう動部の損傷や疲労寿命に大きく影響するといわれている。摩擦しゅう動に最適な接触表面状態をどう設計するかはトライボロジー分野の重要な技術的課題であり、材料寿命が延びれば材料損失が減り省資源化や破壊リスクの低下につながるので安全面からもその波及効果は大きい。金属やセラミックで対応できない領域を補完する樹脂を用いた軽量で高強度、低摩擦機能部品は将来の様々な開発分野の発展にも貢献すると予想される。

研究成果の概要(英文)：In order to explore the self-lubricating tribo-film formation in hybrid polymer bearing consisting premium plastic material such as Poly-ether-ether-ketone (PEEK), rolling contact fatigue tests were carried out by using hybrid polymer radial ball bearing. The PEEK composite film as self-lubricating tribo-film formed on the rolling track of the bearing due to cyclic rolling contact between a ceramic ball and a PEEK polymer inner ring. The film extended on the whole raceway of the inner ring along with number of cycles in the rolling contact with local high compressive stress and friction heat. This film formation influenced the smooth rotation of polymer bearings. Moreover, durability of thermal failure, capacity of applied load, and service life of the hybrid polymer bearing increased. The results of this work will be useful for improvement of polymer mechanical elements in special environment.

研究分野：工学

キーワード：樹脂軸受 転がり疲労 機械要素 PEEK構造・物性 自己潤滑膜 摩擦化学 高機能樹脂 長寿命化

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19、CK - 19 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

高性能エンジニアリングプラスチックは優れた耐食性や耐熱性、湿潤下での摺動性を有しているため、自然エネルギー生産設備などの特殊環境における機械要素材料への適用が大きく期待されている。これはクリーン環境や海洋環境、蒸気・化学物質浮遊環境などの潤滑油の使用ができない特殊環境下の機械部品では、鋼部品が安全の面から使用できないことや、また水で潤滑させ環境性能を問われる摺動部材料のニーズに対し、セラミックでは機械加工に難があり特殊形状といった多品種少量型のカスタムメイド生産に対応が難しいためである。このような背景のもと特殊環境用の樹脂機械要素の長寿命が求められている。

### 2. 研究の目的

本研究ではポリエーテルエーテルケトン (PEEK) / ポリテトラフルオロエチレン (PTFE) 複合材などのプラスチック材料で構成されるベアリングの自己潤滑膜生成の機構を明らかにすることを目的としている。腐食や錆びを促進させる蒸気ガス環境や特殊薬液中の製造ライン、クリーン工程や非磁性が要求される搬送機器等では潤滑油や金属製摺動部品を用いることが困難である。このような特殊環境下で使用する機械要素部品の寿命リスクの低減を目指し、深溝玉軸受を模擬したハイブリッドポリマーベアリング試験体を全機械加工により製作して転がり疲労テストを実施した。

### 3. 研究の方法

ベアリング試験体の材料には PEEK / PTFE 複合材のほか PPS / PTFE 複合材およびセラミック球を用いた。吉則工業式ラジアル軸受疲労試験機を用いてハイブリッドベアリング試験体の強度 (回転数 100 万回の繰返し圧縮荷重に耐える限界ラジアル荷重)・寿命及び摩耗の状態・運転温度等のデータを計測した (図 1)。さらにテスト後の PEEK 軸受軌道輪から表層部を切り出し、精密研磨により分析観察用薄片を作製した。PEEK 軸受軌道輪上の接触界面に生じた自己潤滑膜生成状況を X 線分析やフーリエ変換赤外分光分析により分析し、軌道輪の損傷状態および表面性状をレーザ顕微鏡により計測、また軌道輪表層部および表層直下の断面観察を実施した。

さらに効率的評価のため図 2 に示す様な玉軸受を模擬した樹脂シャフト試験体を製作し、2.5D レイヤー法による内部き裂生長プロセスの観察を行った。試験体の接触疲労損傷の状態を電子顕微鏡およびレーザ顕微鏡により調査した。続いて試験体の軌道輪から表層部を切り出し、精密研磨により分析観察用薄片を作製し、軌道輪表層部および表層直下の断面観察と内部応力分布の解析を実施した (図 3)。

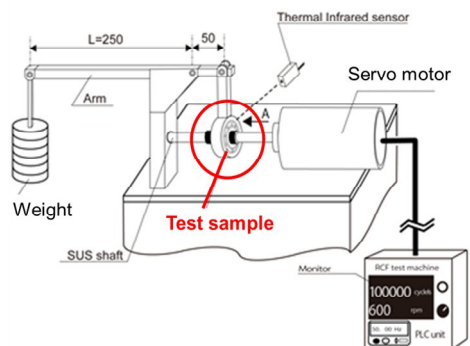


図 1 ラジアル軸受疲労試験機の模式図

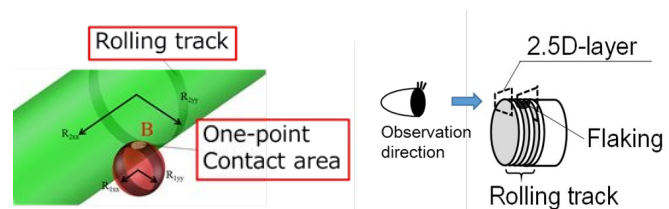


図 2 2.5D レイヤー法の模式図

#### 4. 研究成果

自己潤滑膜が PEEK 軸受軌道輪に生じたときの周速および負荷応力条件では運転中に軸受温度がガラス転位点を超えることなく 40 前後で安定した。軌道輪とセラミック球の間でヘルツ接触すると仮定した場合、初期の自己潤滑膜生成は軌道輪と球との接触楕円縁近傍で発生することが明らかとなった。

自己潤滑膜は繰返し数に伴って軌道輪全周にわたって徐々に生長し(図4)、軌道輪曲率形状が膜の生成や耐荷重性能に影響を与えることが明らかとなった(図5)。自己潤滑膜の効果により強度(限界ラジアル荷重)向上、疲労寿命延び、摩耗量の低減、耐焼付き性や摺動性向上が得られた。また、ベアリング試験体の軌道輪の接触界面に生じた自己潤滑膜生成状況と表層部近傍の分子結合状態を X 線やフーリエ変換赤外分光により分析し、疲労試験前後での結晶状態やカルボニル基その他の結合状態変化が明らかとなった。

事業期間全体を通じた研究の成果として、摩擦化学反応を利用した自己潤滑膜の生成挙動と延命化のポイントとなる知見が得られた。自己潤滑膜はセラミック球と PEEK 内輪の繰返し接触時の局所的な圧縮応力と摩擦熱・摩耗の相互作用により生じる。PEEK 軌道輪表面に褐色のダブルラインを形成した後、繰返し数に伴って軌道輪全周にわたって徐々に生長し、滑らかな摺動面を形成することが確認された。膜が軌道面に繰返し再生することで耐焼付き性や摺動性も向上し、強度(限界ラジアル荷重)向上、疲労寿命延び、摩耗量の低減が出来た。内部応力解析の結果、表層下近傍で転がり方向に対するせん断応力分布が得られた。この繰返し内部せん断応力が PEEK 内輪の分子結合状態や疲労損傷に影響を及ぼすことが示唆された。このことは樹脂機械要素部品のトライボロジー設計と寿命リスク低減に貢献する。

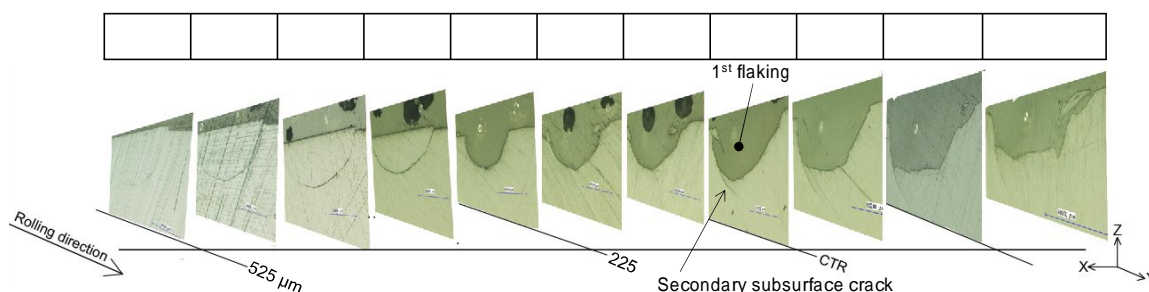


図3 軌道輪断面(内部き裂の2.5D画像)

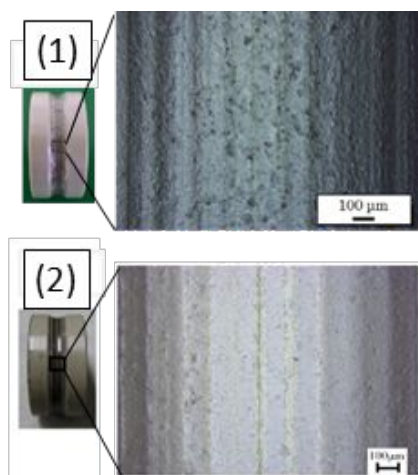


図4 軌道輪に生成した自己潤滑膜(例)

(1)  $10^6$  回, 333 N, 1200 rpm.

(2)  $10^6$  回, 88 N, 3000 rpm.

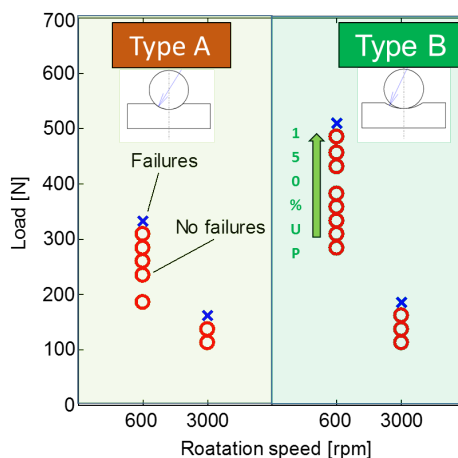


図5 限界ラジアル荷重の比較

## 5 . 主な発表論文等

### [ 雑誌論文 ] ( 計 6 件 )

Hitonobu KOIKE, Shuta YAMADA, Gang DENG, Koshiro MIZOBE, Takuto YAMADA, and Katsuyuki KIDA, Observation of Tribological Fatigue Fracture on PEEK Shaft with Artificial Defect under One-point Rolling Contact by using 2.5D Layer Method, *Key Engineering Materials*, 査読有, (2019 in press)

Hitonobu KOIKE, Genya YAMAGUCHI, Koshiro MIZOBE, and Katsuyuki KIDA, Flaking of PEEK under one-point rolling contact fatigue using Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ball, *MATEC Web of Conferences*, 査読有, 264, 01004, (2019).

DOI: <https://doi.org/10.1051/mateconf/201926401004>

Hitonobu KOIKE, Genya YAMAGUCHI, Koshiro MIZOBE, Yuji KASHIMA, and Katsuyuki KIDA, Investigation of subsurface fatigue crack in PEEK shaft under one-point rolling contact by using 2.5D layer observation method, *MATEC Web of Conferences*, 査読有, 130, 09001. 1-41, (2017).

DOI: <https://doi.org/10.1051/mateconf/201713009001>

Hitonobu KOIKE, Katsuyuki KIDA, Toshihiko MATSUMURA, Koshiro MIZOBE, and Yuji KASHIMA, Investigation of wear, groove shape and load capacity of PPS-PTFE hybrid radial ball bearings, *MATEC Web of Conferences*, 査読有, Vol. 130, 09002. 1-4, (2017). DOI: <https://doi.org/10.1051/mateconf/201713009002>

Hitonobu KOIKE, Toshihiko MATSUMURA, Koshiro MIZOBE, Yuji KASHIMA, and Katsuyuki KIDA, Evaluation of Tribological Thermal Failure on PEEK-PTFE Hybrid Alumina Ball Bearings, *Materials Science Forum*, 査読有, 878, 142-147, (2016).

DOI: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.878.142>

Hitonobu KOIKE, Genya YAMAGUCHI, Koshiro MIZOBE, Yuji KASHIMA, and Katsuyuki KIDA, Observation of Fatigue Fracture on PEEK Shaft Against Alumina Bearing's Ball Under One-Point Rolling Contact, *Materials Science Forum*, 査読有, Vol. 878, 137-141, (2016). DOI: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.878.137>

### [ 学会発表 ] ( 計 8 件 )

Hitonobu KOIKE, Observation of Tribological Fatigue Fracture on PEEK Shaft with Artificial Defect under One-point Rolling Contact by using 2.5D Layer Method, 2019 8th International Conference on Advanced Materials and Engineering Materials (8th ICAMEM2019), April 18-19, 2019.

古池, 一点荷重式転がり疲労試験機を用いた PEEK シャフトのはく離損傷プロセスに関する研究 ( 予傷材の影響 ), 日本機械学会九州支部第 72 期総会講演会, 2019.3.14.

Hitonobu KOIKE, Flaking of PEEK under one-point rolling contact fatigue using Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ball, The International Conference on Composite Material, Polymer Science and Engineering (CMPSE2018), Sept.21-22, 2018.

Hitonobu KOIKE, Investigation of subsurface fatigue crack in PEEK shaft under

one-point rolling contact by using 2.5D layer observation method, The International Conference on Composite Material, Polymer Science and Engineering ( CMPSE2017 ) , June 24-25, 2017.

Hitonobu KOIKE, Investigation of rolling contact surface in the machined PEEK polymer- alumina ball bearings under water-lubricated and dry conditions, 5<sup>th</sup> International Symposium & Exhibition on Aqua Science and Water Resources (ISASWR'17), 2017.

Hitonobu KOIKE, Investigation of wear, groove shape and load capacity of PPS-PTFE hybrid radial ball bearings, The International Conference on Composite Material, Polymer Science and Engineering ( CMPSE2017 ) , June 24-25, 2017.

Hitonobu KOIKE, Evaluation of tribological thermal failure on PEEK-PTFE hybrid alumina ball bearings 4<sup>th</sup> International Conference on Advanced Materials Design and Mechanics (ICAMDM2016), August 20-21st, 2016.

Hitonobu KOIKE, Observation of fatigue fracture on PEEK shaft against alumina bearing's ball under one-point rolling contact, 4<sup>th</sup> International Conference on Advanced Materials Design and Mechanics (ICAMDM2016), August 20-21st, 2016.

〔その他〕

ホームページ等

[http://www3.u-toyama.ac.jp/kotai/1\\_research\\_e\\_toyama.htm](http://www3.u-toyama.ac.jp/kotai/1_research_e_toyama.htm)

## 6 . 研究組織

### (1)研究分担者

研究分担者氏名：木田勝之

ローマ字氏名：KIDA Katsuyuki

所属研究機関名：富山大学

部局名：大学院理工学研究部（工学）

職名：教授

研究者番号（8桁）：00271031

研究分担者氏名：溝部浩志郎

ローマ字氏名：MIZOBE Koshiro

所属研究機関名：富山大学

部局名：大学院理工学研究部（工学）

職名：助教

研究者番号（8桁）：70727718

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。