

令和 5 年 10 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：2019～2022

課題番号：19K04150

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修復発現メカニズムの解明

研究課題名（英文）A study on self-lubrication film with tribo-chemical reaction for repairing process of surface damage 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） 3,400,000円

研究成果の概要（和文）：PEEK樹脂等を主材料としたラジアル軸受モデルを用いて、軌道面に生成するPEEK複合材の自己潤滑膜フィルムの影響とその再生挙動について研究を行った。特定の繰返し圧縮荷重および速度条件下で転がり疲労テストの結果、軌道輪の回転方向に沿って導入した人工傷は、圧縮や摩擦等の影響により生成した自己潤滑膜フィルムにより覆われたことで縮小した。本研究を通じて自己潤滑膜による樹脂機械要素の長寿命化が期待でき、自己潤滑膜のなじみ面形成と制御に繋がる知見を得た。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究成果では、PEEK樹脂機械要素の自己潤滑膜の制御と長寿命化に影響を及ぼす表面キズを無害化できる可能性を示した。微細溝を有する軸受軌道面にグラファイトのナノ粒子を含んだ自己潤滑膜が生成したことを発見した。自己修復機能を持つ樹脂機械要素として低摩擦と長寿命化が期待でき、材料損失や故障リスクが減り省資源化にも貢献できる。今後、気液潤滑下など特殊環境用としてハイブリッド樹脂機械要素の長寿命化技術に発展させ、エネルギー機器材料分野などに適用域を拡げ応用が期待される。

研究成果の概要（英文）：The objective of this study was to clarify the effect of the self-lubrication film and formation of the PEEK composite film. Rolling contact test was carried out by using Hybrid radial PEEK bearing with surface defects. It was found that the size of the surface defects was decreased by accumulation of the PEEK composite film. This result shows the possibility of suitable tribological contact surface and knowledge to control the self-lubrication film of PEEK composite for long life of polymer mechanical element.

研究分野：機械要素、トライボロジー

キーワード：樹脂軸受 ファイト 樹脂機械要素 PEEK構造・物性 自己潤滑膜 摩擦化学 高機能樹脂 長寿命化 グラ

1. 研究開始当初の背景

高機能プラスチックである PEEK (ポリエーテルエーテルケトン) は、絶縁性かつ非磁性であり優れた耐食性をもつ。また、生体親和性や良好な摩擦摩耗特性を有しているため、医療バイオ機器や自然エネルギー生産設備などの特殊環境などの機械要素材料への適用が大きく期待される。しかしプラスチックは強度面で金属に劣るため、長期使用や高強度化において様々な課題がある。このような課題を解決するために PEEK 高分子の自己修復技術による耐久性向上の可能性に着目した。高分子の特徴をいかした自己修復技術の研究が欧米を中心に拡がりつつあり、我が国の実現すべき課題として、予知保全の観点からも喫緊のテーマの一つといえる。本研究課題で注目する自己潤滑膜は、傷をカサブタの様に修復するパッチングフィルム機能を有し、繰返し接触する固体間での摩擦および圧縮などの相互作用により生じる。摩擦化学反応を利用した損傷修復挙動を確立することができれば、最適なトライボロジー設計に活かせる。

2. 研究の目的

本研究の目的は、摩擦化学反応を利用した自己潤滑膜再生挙動を明らかにして損傷修復機構を確立することである。腐食等が問題となる特殊環境下において、セラミックとプラスチックから成るハイブリッド軸受の検討を行う。稼働中に生じる自己潤滑膜による損傷修復機構を確立できれば稼働中に生成する自己潤滑膜により自己修復軸受として低摩擦化や高強度化を図ることが可能になる。

3. 研究の方法

(1) 本研究ではラジアル軸受を模擬した試験体を用いた研究を行った。図1に模擬試験体の模式図を示す。軸受材料として PEEK/PTFE/GraphiteCarbon を用い、9個のアルミナセラミック球を使用した。試験片内輪は PEEK 製である。図2に研究に用いたラジアル試験機(吉則工業製)の概略図を示す。試験片のシャフト穴に主軸を取り付け、ラジアル荷重を上向きに負荷させた状態でモータを回転させ試験片に繰返し荷重を与える。ラジアル荷重はアームを介して反対側に取り付けたおもりで設定することができる。タンクには水を循環させるポンプが取り付けられている。アルミナセラミック球と PEEK 内輪の軌道輪の間では転がり接触となる。この転がり疲労テストでは試験片の総回転数を100万回とし、軸受の破損または異常な温度上昇が起こった場合はその時点でテストを打ち切った。テスト中の自己潤滑膜や軌道輪の状態は、ラジアル試験機を途中止めて試験片を分解して観察を行った。

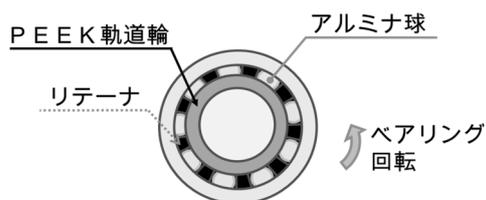


図1 軸受試験片

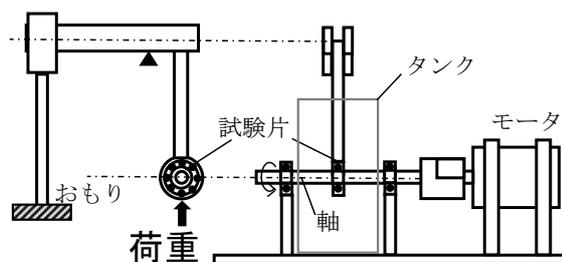


図2 試験機の概略図

(2) PEEK等を主材料としたラジアル軸受モデルを用いて、繰り返し荷重下で転がり接触する軌道面に生成する PEEK 由来の自己潤滑膜フィルムの影響とその再生挙動について調査した (図 3). このような自己潤滑膜フィルムを有する軸受のトライボロジー挙動の影響を調べるために、数 10 マイクロメートルサイズの微小な人工傷を軌道輪に導入して転がり接触テストを行い、転動体が人工傷の上を摩擦と圧縮を繰り返しながら通過するようにし人工傷の閉口過程を調べた. またテスト後に軸受軌道面に生成する自己潤滑膜フィルム (図 4) を TEM (透過型電子顕微鏡) および EDS (エネルギー拡散型 X 線計測装置) 等を用いて分析を行った.

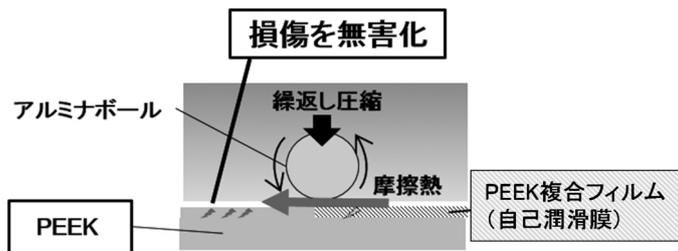


図 3 転がり接触下の自己潤滑膜の模式図

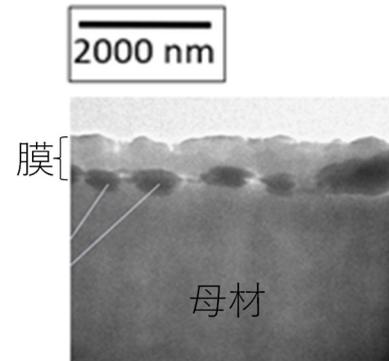


図 4 自己潤滑膜の断面画像

4. 研究成果

ポリエーテルエーテルケトン(PEEK)およびポリテトラフルオロエチレン複合材等を主材料としたラジアル軸受の転がり疲労テストを行った. 特定の繰り返し圧縮荷重および速度条件下でテストの結果, 軌道輪に回転方向に沿って導入した人工傷は, 繰り返し数が約 50 万回するとき堆積した PEEK 複合材フィルムで覆われたことにより縮小したことが確認された. このトライボロジー挙動は機械的な圧縮 (塑性流動) と局所的な摩擦熱 (融着) により生じたものと考察した.

マイクログルーブ (微細溝) を有する軸受軌道面に生成する PEEK/グラファイトフィルムを分析機器により調査した. この自己潤滑膜のフィルムは接触部表面から 500~5000 ナノメートルの深さ領域で確認でき, 球状のグラファイトのナノ粒子を含んだ PEEK/グラファイトフィルム堆積した薄層として形成されていたことを発見した. このようなフィルムはマイクログルーブの微細周期構造の突起部の近傍を起点に形成される傾向にあり, 転がり摩擦に伴ってフィルムが生長するとの結論に至った (図 5).

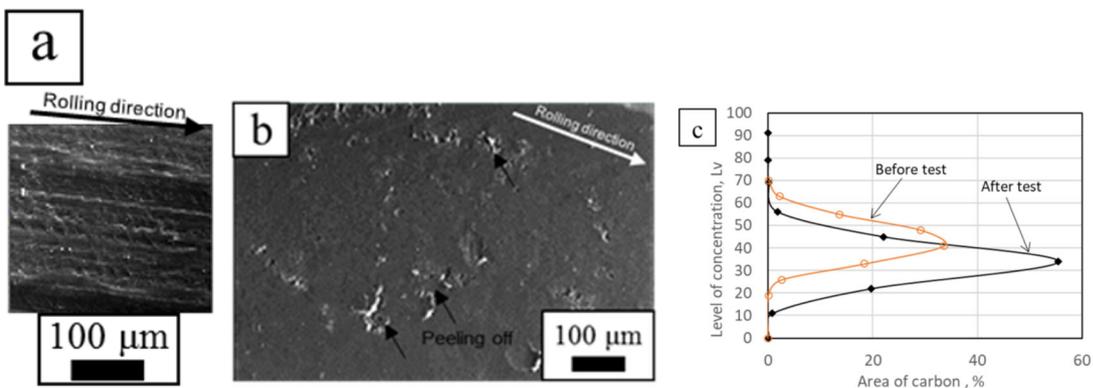


図 5 軸受軌道面 (a) テスト前、(b) テスト後 (膜有り)、(c) テスト前後のカーボン比較

このフィルムの形成プロセスは、軸受の運転開始後なじみ期間内に PEEK 内輪軌道輪のマイクログルーブの突起が削れたときの摩耗片とリテーナのボールポケットからの摩耗粉が、アルミナボールと軌道輪との間で繰り返し押しつぶされて‘餅の様に’小さな PEEK 複合材フィルムが形成されると考えられる。小さな PEEK 複合材フィルムの多くは図6の模式図に示すようなダブルラインと名づけたボールの転がり領域に多く集積する傾向が見られた。

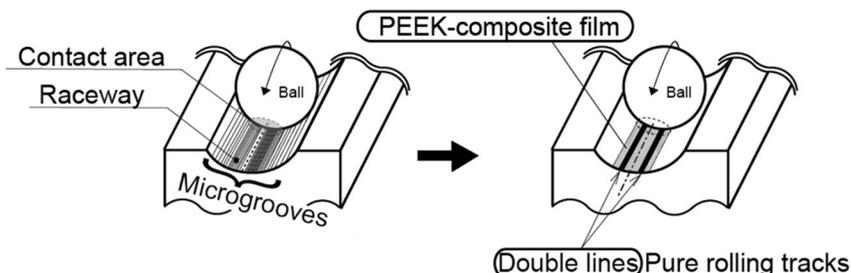


図6 軌道輪のマイクログルーブとフィルム形成（模式図）

ドライ環境下の PEEK 内輪の凹溝とアルミナ球の間で起こる転がり接触では、接触領域内の純転がり域の近傍に PEEK/グラファイトフィルムの堆積層（レイヤー）が生成し、その後フィルムは軌道輪全体を覆うことが分かった。テスト前後の PEEK 内輪軌道輪を赤外分析法（ATR法）で分析したところ、ヘルツ接触下で繰り返し荷重を受けると PEEK 軌道輪表面および表層直下 300 μm で結晶度（分子の状態）が変化したことが分かった。このような軌道輪の最表面に PEEK/グラファイトフィルムの堆積層（自己潤滑膜の薄層のレイヤー）が生成することが明らかになった。

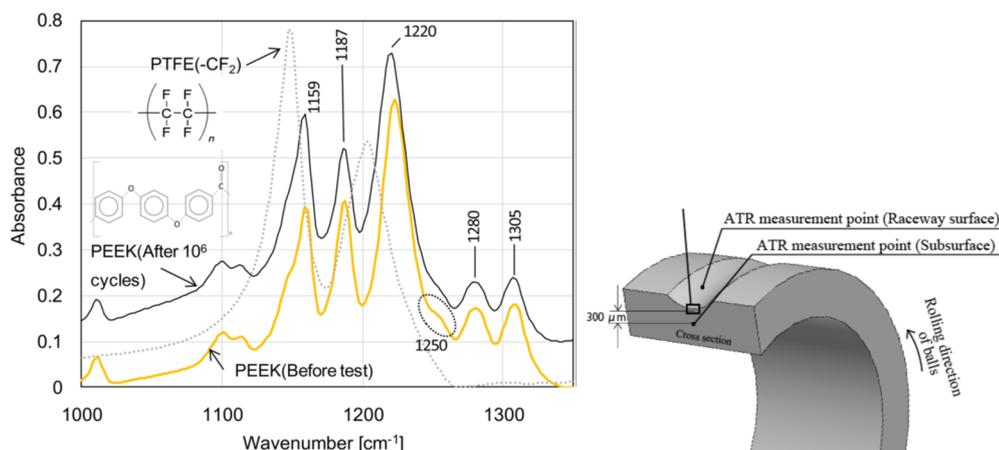


図7 赤外分析法（ATR法）による PEEK 内輪軌道輪の計測

本研究の総括として、人工傷の周囲に自己潤滑膜が生成したことを見出し、スムーズな回転運動を維持しながら PEEK 軸受試験片の人工傷の表面層が塞がったことが確認された。このことは転がり接触部での温度圧力上昇により様々な反応が促進され、接触応力下での膜の積層や摩擦による試験体表面の物理的変化（塑性流動と融着）によるものと考察した。また、自己潤滑膜として機能する PEEK/グラファイトフィルムの成長は軸受の滑らかな回転に寄与するとともに焼付き抑制にも効果がある。そして軌道輪に加工されたマイクログルーブ（微小溝）がフィルムの形成に影響することを明らかにした。自己潤滑膜の制御と長寿命化に影響を及ぼす表面キズ無害化の可能性が得られ、PEEK 樹脂機械要素の寿命を延ばせる道筋を示すことが出来た。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計4件（うち査読付論文 4件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Koike Hitonobu, Mizobe Koshiro, Kida Katsuyuki	4. 巻 904
2. 論文標題 Influence on Tribological Behavior of PEEK Composite Film Layer on PEEK-PTFE Bearings with Artificial Defect in Dry Condition	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Key Engineering Materials	6. 最初と最後の頁 243 ~ 249
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.4028/www.scientific.net/KEM.904.243	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Koike Hitonobu, Kida Katsuyuki, Mizobe Koshiro, Matsumura Toshihiko, Inagaki Masahiro	4. 巻 172
2. 論文標題 PEEK/graphite film formation on microgrooves of PEEK- hybrid radial Al2O3 ball bearings under rolling contact in dry condition	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Tribology International	6. 最初と最後の頁 107583 ~ 107583
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.triboint.2022.107583	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Koike Hitonobu, Haruta Junki, Deng Gang, Mizobe Koshiro, Kida Katsuyuki	4. 巻 858
2. 論文標題 Observation of Tribological Wear on PEEK Shaft with Artificial Defect under Radial Rolling Sliding Point Contact	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Key Engineering Materials	6. 最初と最後の頁 95 ~ 100
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.4028/www.scientific.net/KEM.858.95	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Koike Hitonobu, Yamada Shuta, Deng Gang, Mizobe Koshiro, Yamada Takuto, Kida Katsuyuki	4. 巻 814
2. 論文標題 Observation of Tribological Fatigue Fracture on PEEK Shaft with Artificial Defect under One-Point Rolling Contact by Using 2.5D Layer Method	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Key Engineering Materials	6. 最初と最後の頁 314 ~ 319
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.4028/www.scientific.net/KEM.814.314	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計4件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 4件）

1. 発表者名 Hitonobu KOIKE, Wataru NAKAIKE, Koshiro MIZOBE, Katuyuki KIDA
2. 発表標題 Observation of PEEK/graphite film on raceway surface of PEEK-hybrid ball bearing with microgrooves
3. 学会等名 ITC Fukuoka 2023 (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Hitonobu KOIKE
2. 発表標題 Influence on tribological behavior of PEEK composite film layer on PEEK-PTFE bearings with artificial defect in dry condition
3. 学会等名 10th International Conference on Advanced Materials and Engineering Materials (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Hitonobu KOIKE, Junki HARUTA, Gang DENG, Koshiro MIZOBE, Katsuyuki KIDA
2. 発表標題 Observation of Tribological Wear on PEEK Shaft with Artificial Defect under Radial Rolling Sliding Point Contact
3. 学会等名 CMPSE2019 (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Hitonobu KOIKE, Shuta YAMADA, Gang DENG, Koshiro MIZOBE, Takuto YAMADA, and Katsuyuki KIDA
2. 発表標題 Observation of tribological fatigue fracture on PEEK shaft with artificial defect under one-point rolling contact by using 2.5D layer method
3. 学会等名 ICAMEM2019 (国際学会)
4. 発表年 2019年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究協力者	とう 鋼 (Den Gan)	宮崎大学・工学部・教授	
研究協力者	木田 勝之 (KIDA KATSUYUKI) (00271031)	富山大学・学術研究部工学系・教授 (13201)	
研究協力者	溝部 浩志郎 (MIZOBE KOSHIRO) (70727718)	富山大学・学術研究部工学系・准教授 (13201)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------