

令和 4 年 6 月 14 日現在

機関番号：11301

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2019～2021

課題番号：19H02050

研究課題名(和文) 鋼より10倍以上耐摩耗性に優れた樹脂系複合材料の開発としゅう動システムへの応用

研究課題名(英文) Development of polymer composite materials having 10 times higher wear resistance than steel materials and those applications to tribo-system

研究代表者

堀切川 一男 (Hokkirigawa, Kazuo)

東北大学・工学研究科・教授

研究者番号：60173605

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 13,300,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、RBセラミックス(RBC)粒子を配合した樹脂系複合材料を開発し、その機械的特性を明らかにするとともに、水潤滑下における摩擦・摩耗特性を実験的に明らかにした。その結果、RBC粒子配合樹脂複合材料の硬度及び強度は、RBCの粒径が減少すると増加することが分かった。また、粒径5 μ m以下のRBC粒子を20vol%配合したPEEK樹脂及びPOM樹脂が、水中において、低摩擦及び 10^{-9} mm²/N以下の低い比摩耗量を示すことが分かった。この比摩耗量の値は、ステンレス鋼同士の油潤滑による境界潤滑状態の比摩耗量(10⁻⁸ mm²/N)の1/10以下であり、優れた耐摩耗性を有することが示された。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究は、樹脂材料において問題であった低い耐摩耗性を、米ぬかを原料とする硬質多孔性炭素材料RBセラミックス粒子との複合化により解決し、油潤滑下におけるステンレス鋼の10倍以上の耐摩耗性を有する樹脂系複合材料の開発に成功したものである。この研究成果は、従来のしゅう動材料に比べ軽量かつ水による潤滑を長期間可能にする点で学術的意義が高く、また、機械におけるしゅう動システムの環境負荷低減、省エネルギー化に大きく貢献するものであり、カーボンニュートラルの実現に寄与する点で社会的意義は非常に高いといえる。

研究成果の概要(英文)：In this study, polymer composites filled with RB ceramic (RBC) particles were developed and those mechanical properties and tribological properties under water lubrication were experimentally investigated. The hardness and strength of the composites increased with decreasing RBC particle diameter. The results of sliding friction tests under water lubrication indicated that PEEK and POM composites filled with 20 vol% RBC particles with a diameter less than 5 micro-meters exhibited low friction and low specific wear rate less than 10^{-9} mm²/N. The value of the specific wear rate is 1/10 of that for steel/steel contact under oil lubrication (10^{-8} mm²/N). The results indicated that the developed composite materials have 10 times higher wear resistance than steel materials under water lubrication.

研究分野：トライボロジー

キーワード：樹脂複合材料 超低摩耗 オイルレス

1. 研究開始当初の背景

これまで、エンジンのクランクシャフトや産業ロボットのアームリンク等の機械要素のすべり軸受においては、潤滑油による潤滑が行われている。水力発電機においても潤滑油による潤滑が行われているが、近年、潤滑油の河川への流出による環境汚染が問題となっており、電力会社などでは積極的に軸受のオイルレス化が進められている。また、台風やゲリラ豪雨の多発などにより、水中作業用ロボットや水中ポンプの需要も高まっており、環境中の作動流体(淡水や海水)と潤滑剤を同一にすることによる構造の簡略化・軽量化が可能となれば、これまで成し得なかった産業革新につながると期待できる。また、近年では、潤滑剤として水だけでなく、食品を消毒する消毒液などの水溶液中での使用も検討されている。このように、油潤滑によらない軸受を有する機械システムが、医療・福祉分野、食品加工分野などの機械油を回避すべき分野にも広く普及されれば、その波及効果は高いと考えられる。

しかしながら、軸受のオイルレス化が一般的に広く普及しているとは言い難い。この理由として、耐摩耗性の低さが挙げられる。鋼等の金属同士の摩擦では、乾燥状態であれば摩耗は大きいものの、油潤滑下であれば極端に摩耗が小さくなる。この耐摩耗性に匹敵しなければ、実用には耐え得ないと考えられる。水中において、従来の金属材料では腐食の問題が避けられないため、セラミックスや樹脂材料を用いることが考えられるが、セラミックスは脆性材料であるため信頼性に乏しい。従って、樹脂材料がしゅう動材料として有望である。

研究代表者である堀切川は、脱脂ぬかにフェノール樹脂を混ぜ成形した後、窒素ガス雰囲気中で炭化焼成することによって、硬質多孔性炭素材料「RB セラミックス」を開発している(図1)¹⁾。RB セラミックスは、高硬度を示すとともに、多孔質構造(気孔率40%)により極めて軽量であること、原料・製造方法ともに環境に優しいエコマテリアルであることなどの特徴を有している。粉末状のRB セラミックスは多孔質構造を有し、低比重(～1 g/cm³)であることから、樹脂材料との比重差が小さく分散性及び流動性に優れるため、従来の充填剤に比べ多量に充てんしても成形が可能である。また、RB セラミックス粒子は高硬度でありながら樹脂並みの低弾性率(～20 GPa)を示すため、樹脂材料に充填しても荷重負荷時の母材とのひずみの差が小さく、また、RB セラミックス粒子表面の開気孔に母材樹脂材料が入り込むことによるアンカー効果により、粒子の脱落が生じにくく、耐摩耗性の向上も期待できる。樹脂材料における低い耐摩耗性の問題を、このRB セラミックス粒子を用いることにより解決し、さらには、油潤滑下におけるステンレス鋼に対して10倍以上と、これまでになく飛躍的に耐摩耗性に優れる樹脂系複合材料の開発が可能になると期待される。

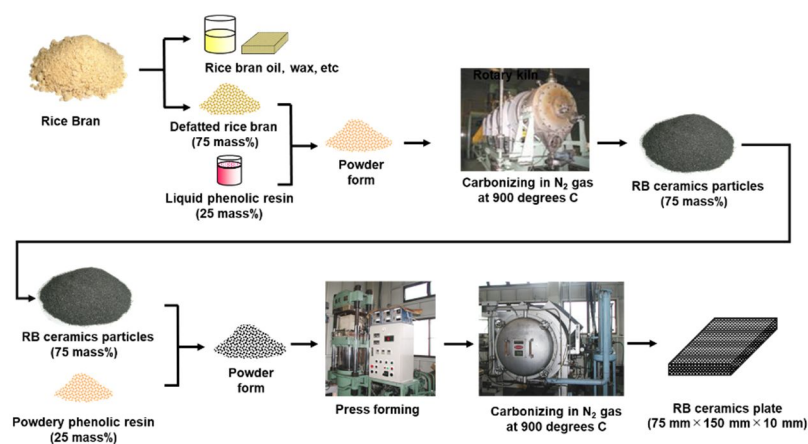


図1 米ぬかを原料とする硬質多孔性炭素材料RB セラミックス

2. 研究の目的

本研究では、粒子状の硬質多孔性材料(RB セラミックス粒子)を、スーパーエンジニアリングプラスチック材料であるポリエーテルエーテルケトン(PEEK)樹脂及び汎用プラスチックであるポリアセタール(POM)樹脂に対して、異なる粒径において同時配合することにより複合材料を開発し、その耐摩耗性を、乾燥状態あるいは水・水溶液潤滑下において、油潤滑下におけるステンレス鋼に対して10倍以上に飛躍的に向上させることを目指す。

3. 研究の方法

(1) RB セラミックス粒子を配合した樹脂系複合材の開発と機械的性質の解明

種々の粒径のRB セラミックス粒子をPEEK樹脂に配合した複合材料の開発を行い、それらの機械的性質に及ぼすRB セラミックス粒子の配合条件の影響を明らかにした。RB セラミックス粒

子の粒径を、5 ミクロン以下（小粒径）、30～50 ミクロン（中粒径）、150 ミクロン以上（大粒径）の3種類とした。PEEK 樹脂に対する各粒径のRB セラミックス粒子の配合率を変化させた。混練・射出成形にてダンベル形状の複合材料を作製し、機械的性質の調査に用いた。機械的性質として、引張強度とビッカース硬さを測定した。また、摩擦試験用にディスク上の試験片も同様の方法により作製した（図2）。

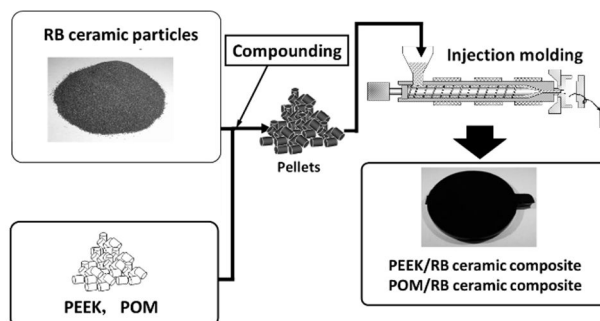


図2 樹脂複合材料ディスク試験片の製造工程

(2) 水中摩擦試験

ボールオンディスク摩擦試験

粒径 5 μm 以下のRB セラミックス粒子（平均粒径 3 μm 、図3）をPEEK 樹脂に20vol%配合した複合材料製ディスク試験片を用いて、直径 8 mm のステンレス鋼（SUS304）製ボールに対する水中でのすべり摩擦試験を行った（図4）。すべり速度は0.1～2.0m/s、垂直荷重 0.98～9.8N、摩擦繰り返し数 10000 回とした。比較のため未充填のPEEK 樹脂についても試験を行った。ボール試験片の表面粗さは $R_a = 0.14 \mu\text{m}$ 、ディスク試験片の表面粗さは $R_a = 0.20 \mu\text{m}$ であった。潤滑剤として精製水を用い、室温環境において実験を行った。摩擦係数及びディスク試験片の比摩耗量を計測し、RB セラミックス粒子配合の効果を明らかにした。

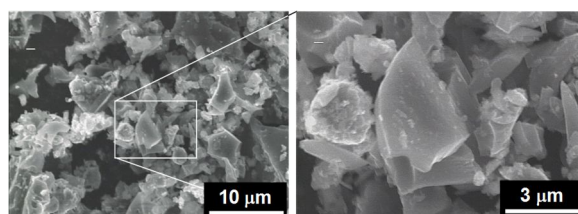


図3 RB セラミックス粒子のSEM 観察像

リング（シリンダ）オンディスク摩擦試験

より安価でかつ実用的な熱可塑性樹脂であるPOM 樹脂に粒径 5 μm 以下のRB セラミックス粒子を20vol%配合したPOM 複合材料からなるディスク試験片を作製し、ステンレス鋼（SUS304）鋼製のリング（シリンダ）試験片とのすべり摩擦試験を行った（図5）。また比較として、POM 単体、POM に対して炭素繊維（CF）（繊維長：40 μm 、繊維径：7 μm ）を20vol%配合したPOM 複合材料についてもディスク試験片を作製し、試験を行った。より過酷な潤滑条件を模擬するため、境界潤滑状態となるすべり速度 0.1m/s、垂直荷重 9.8N の条件下、精製水中ですべり摩擦試験を行った。

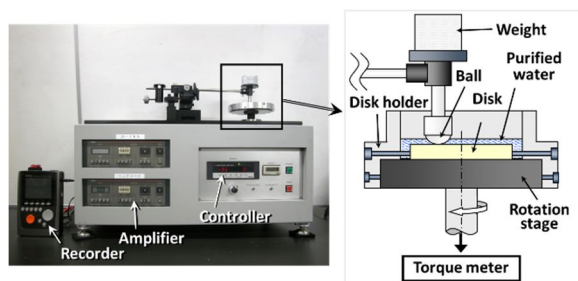


図4 ボールオンディスク摩擦試験

摩擦繰り返し数は 1.0×10^6 回とした。リング試験片の表面粗さは $R_a = 0.90 \mu\text{m}$ 、ディスク試験片の表面粗さは $R_a = 0.10 \mu\text{m}$ であった。潤滑剤として精製水を用い、室温環境において実験を行った。摩擦係数及びディスク試験片の比摩耗量を計測し、RB セラミックス粒子配合の効果を明らかにした。

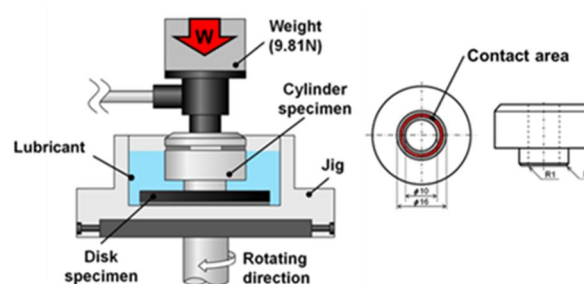


図5 リング（シリンダ）オンディスク摩擦試験

4. 研究成果

(1) RB セラミックス粒子を配合した樹脂系複合材の開発と機械的性質の解明

RB セラミックス粒子を配合した樹脂系複合材料の硬さ、強度とともに、配合されるRB セラミックス粒子の平均粒子径の減少とともに増加する傾向が見られた。また、RB セラミックス粒子の体積配合率の増加とともに、硬度、強度は増加する傾向が見られた。

(2) 水中摩擦試験

ボールオンディスク摩擦試験の結果

図6に、PEEK 樹脂、PEEK/RB セラミックス複合材料における摩擦係数の時系列変化を示す。同図より、PEEK 樹脂における摩擦係数は、摩擦繰り返し数によらず 0.1～0.2 の値を示すことが分かる。一方、PEEK/RB セラミックス複合材料の摩擦係数は、試験開始直後から 0.1 以下の値を示し、摩擦繰り返し数の増加とともに緩やかに減少する傾向が見られた。そして、

摩擦繰り返し数 10,000 回では 0.015 の極めて低い値を示すことが分かった。また、PEEK/RB セラミックス複合材料の比摩耗量は $10^{-9} \text{mm}^2/\text{N}$ 以下の低い値を示すことが分かった。未充填の PEEK と比較すると、摩擦係数において最大で 87%、比摩耗量において 93% 低減できることも分かった。そして、この PEEK/RB セラミックス複合材料の比摩耗量は、鉄鋼材料同士の油潤滑による境界潤滑状態の比摩耗量 ($10^{-8} \text{mm}^2/\text{N}$) の 1/10 以下である。

リングオンディスク摩擦試験の結果

図 7 に、POM, POM/CF 複合材料, POM/RB セラミックス複合材料における摩擦係数と摩擦繰り返し数の関係を示す。同図より、POM, POM/CF 複合材料における摩擦係数は摩擦繰り返し数の増加とともに増加し、最終的に 0.2 以上の高い値を示したのに対して、POM/RB セラミックス複合材料はすべり摩擦試験全期間において、安定して 0.15 の低い摩擦係数を示した。

図 8 に、ディスク試験片の摩耗体積と摩擦繰り返し数の関係を示す。同図より、POM, POM/CF 複合材料における摩耗体積は摩擦繰り返し数の増加とともに増加し、両者の値はほぼ同等であることが分かる。一方、POM/RB セラミックス複合材料における摩耗体積は、摩擦繰り返し数によらず、低い値を維持していることが分かる。 1.0×10^6 回における摩耗体積を比較すると、POM/CF 複合材料は、POM とほぼ同等の摩耗体積を示し、CF を充てんすることによる摩耗低減効果がほぼないことが分かる。一方で、RBC 粒子を充てんすることによって摩耗体積が減少し、POM と比較して摩耗体積が 82.9% 減少した。また、 1.0×10^6 回における POM/RB セラミックス複合材料の比摩耗量は $1.43 \times 10^{-9} \text{mm}^2/\text{N}$ であった。以上のことから、POM/RB セラミックス複合材料においても水中において、鉄鋼材料同士の油潤滑下における境界潤滑下の比摩耗量 ($10^{-8} \text{mm}^2/\text{N}$) に比べおよそ 10 倍の耐摩耗性が得られることが分かった。以上の結果から POM/RB セラミックス複合材料の水中用しゅう動材料として実用可能性が示された。

< 引用文献 >

- 1) 山口健, 堀切川一男, 米ぬかを原料とする硬質多孔性炭素材料「RB セラミックス」, セラミックス誌, 41 巻 2 号, 2006, 89-93.

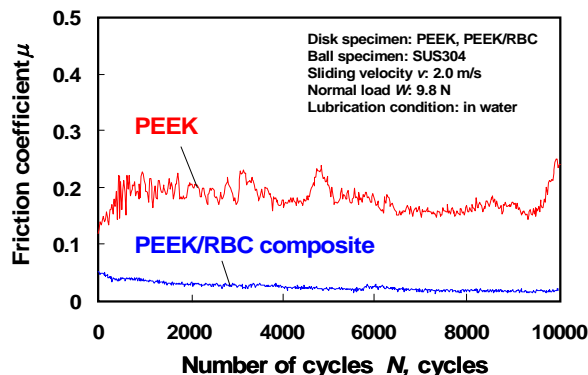


図 6 PEEK/RB セラミックス複合材料の水中における摩擦係数と摩擦繰り返し数の関係

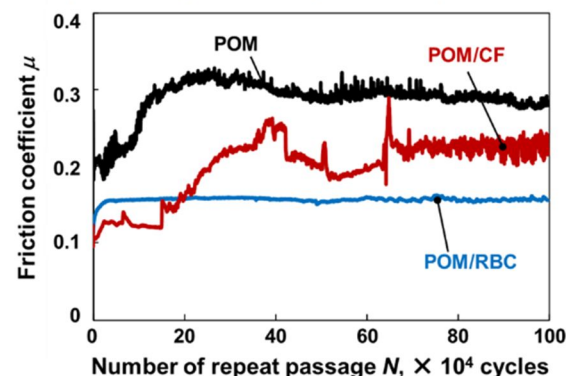


図 7 POM/RB セラミックス複合材料の水中における摩擦係数と摩擦繰り返し数の関係

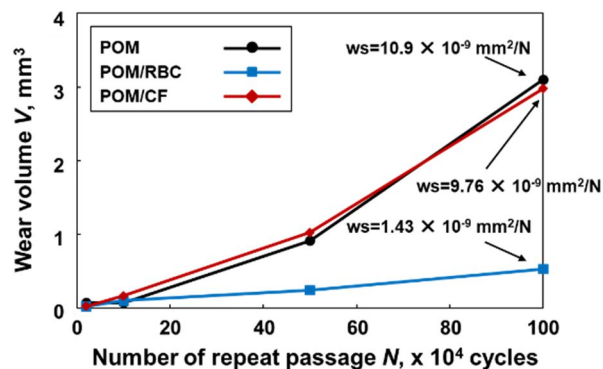


図 8 POM/RB セラミックス複合材料の水中における摩耗体積と摩擦繰り返し数の関係

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計3件（うち査読付論文 2件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 Shibata Kei, Yamaguchi Takeshi, Hokkirigawa Kazuo	4. 巻 32
2. 論文標題 Tribology of Resin Composites Filled with RB Ceramics	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Seikei-Kakou	6. 最初と最後の頁 408 ~ 412
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.4325/seikeikakou.32.408	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Shibata Kei, Toyabe Keigo, Araki Ryota, Yamaguchi Takeshi, Kawabata Masahiko, Hokkirigawa Kazuo	4. 巻 428-429
2. 論文標題 Tribological behavior of polyacetal composite lubricated in sodium hypochlorite solution	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Wear	6. 最初と最後の頁 272 ~ 278
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.wear.2019.03.021	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 Yoshida Hiroaki, Shibata Kei, Yamaguchi Takeshi, Hokkirigawa Kazuo	4. 巻 14
2. 論文標題 Effects of Particulate and Fibrous Carbon Filler Combinations on the Tribological Behavior of a Polyacetal Composite under Water Lubrication	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Tribology Online	6. 最初と最後の頁 321 ~ 326
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.2474/trol.14.321	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 1件 / うち国際学会 2件）

1. 発表者名 柴田圭
2. 発表標題 長期水中摩擦におけるRBセラミックス粒子配合樹脂複合材料のトライボロジー挙動
3. 学会等名 日本トライボロジー会議2020秋別府
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 廣瀬智樹
2. 発表標題 RBセラミックス粒子を充てんしたポリアセタール樹脂の長期水中摩擦におけるトライボロジー特性
3. 学会等名 2020年度日本機械学会年次大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Hiroaki Yoshida
2. 発表標題 Effect of Sodium Hypochlorite on Tribological Behaviors in Water Solution of Polyacetal Composites
3. 学会等名 International Tribology Conference (ITC) Sendai 2019 (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Kei Shibata
2. 発表標題 Tribological Behavior in Water of Polyacetal Filled with Hard Porous Carbon Made from Rice Bra
3. 学会等名 International Tribology Conference (ITC) Sendai 2019 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

〔図書〕 計2件

1. 著者名 柴田圭, 山口健, 堀切川一男	4. 発行年 2020年
2. 出版社 技術情報学会	5. 総ページ数 550
3. 書名 高分子材料のトライボロジー制御	

1. 著者名 山口健, 堀切川一男	4. 発行年 2022年
2. 出版社 テクノシステム	5. 総ページ数 772
3. 書名 米の機能性食品化と高度加工・利用技術	

〔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
研究分担者	山口 健 (Yamaguchi Takeshi) (50332515)	東北大学・工学研究科・准教授 (11301)	
研究分担者	柴田 圭 (Shibata Kei) (60612398)	東北大学・工学研究科・助教 (11301)	

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
---------	---------