

平成 30 年 5 月 18 日現在

機関番号：11301

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2015～2017

課題番号：15H03908

研究課題名(和文) 摩擦調整剤としてRBセラミックス粒子を活用した水中用先進ゴム複合材料の開発

研究課題名(英文) Development of advanced rubber composite materials used in water utilizing RB ceramics particles as friction modifier

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) 13,000,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、米ぬかを原料とする硬質多孔性の炭素材料RBセラミックスをエチレンプロピレンジエンゴム(EPDM)に配合した複合材料を開発し、幅広いすべり速度、垂直荷重条件下において、水中での摩擦摩耗特性を明らかにした。その結果、同複合材料の摩擦係数及び比摩耗量は幅広いすべり速度、荷重条件において、未充填のEPDMに比べ、低い値を示した。また、同複合材料を用いたすべり軸受を作製し、水中で良好な摩擦摩耗特性及びシール性を示すことを明らかにした。

研究成果の概要(英文)：In this study, ethylene propylene diene monomer (EPDM) rubber composites filled with rice bran (RB) ceramics particles were developed. The friction and wear properties of the composite materials were investigated under a wide range of sliding velocity and normal load conditions in water. The composite materials exhibited low friction and wear compared to monolithic EPDM rubber under a wide range of sliding velocities and normal loads. Sliding bearing using the composite materials was developed, and satisfactory friction, wear, and seal property were confirmed.

研究分野：トライボロジー

キーワード：RBセラミックス ゴム 摩擦 水中

1. 研究開始当初の背景

合成ゴムなどのエラストマーは、弾性に富み、また乾燥面に対しては1以上の極めて高い値を示すことから、自動車タイヤ、動力伝達用ベルト、靴底などの制振性、高摩擦を必要とする部材に用いられている。しかしながら、多くのエラストマーは、水や油などの液体が存在する場合には、低摩擦になりやすい。これは、エラストマーは弾性率が極めて低いことから真実接触圧力が極めて低くなり接触面に水膜や油膜などの液体膜が形成され、混合潤滑や流体潤滑状態となりやすいためである。このような特性によりエラストマー材料は、水力発電機用メカニカルシールや船舶用の船尾管軸受などに用いられている。しかしながら、エラストマー材料は、水膜が形成されにくい高荷重・低速条件下においては、高摩擦・高摩耗となりやすく、同条件での低摩擦化・耐摩耗性の向上が望まれている。

一方、研究代表者の堀切川は、脱脂ぬかにフェノール樹脂を混ぜプレス成形あるいは射出成形した後、窒素ガス雰囲気中で炭化焼成するという方法によって、新しい硬質多孔性炭素材料「RBセラミックス」の開発に成功している。RBセラミックスは、焼入鋼なみの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優れた特徴を有している。RBセラミックスは低摩擦・低摩耗を示すこと、相手材攻撃性が極めて低いことなどの特徴から、無潤滑直動すべり軸受のスライダなどに用いられており、製品化に至る成果も出始めている。近年では粉末状のRBセラミックスの製造も可能となっている(図1)。RBセラミックス(RBC)粒子は多孔質構造(図2)を有し、低比重($\sim 1\text{g/cm}^3$)であることから、エラストマー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填しても成形が可能と考えられる。また、RBC粒子は樹脂並みの低弾性率($\sim 10\text{GPa}$)を示すため、エラストマー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、RBC粒子表面の開気孔に母材エラストマーが入り込むことによるアンカー効果などにより、粒子の脱落が生じにくく、耐摩耗性の向上も期待できる。

以上のことから、硬質多孔性、低摩擦、幅広い充填率での成形が可能なるRBC粒子を配合することにより、水中におけるエラストマー材料のトライボロジー特性の飛躍的向上が期待される。

2. 研究の目的

本研究の目的は、米ぬかを原料とする硬質多孔性炭素材料RBC粒子を、エラストマー材料に様々な配合条件(平均粒径, 充てん率)で配合した複合材料を開発し、その水中における摩擦摩耗特性を明らかにするとともに、

水中用トライボ材料として応用することである。

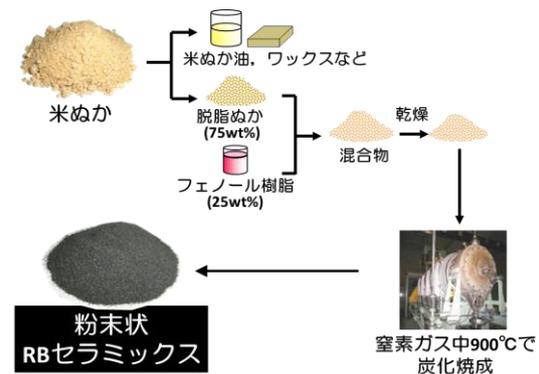


図1 粉末状RBセラミックスの製造方法

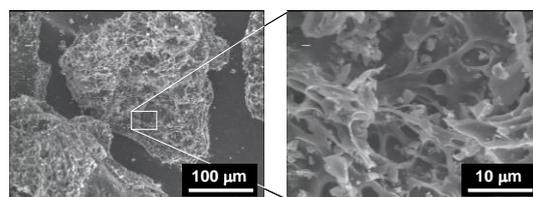


図2 RBセラミックス粒子の多孔質構造

3. 研究の方法

(1) EPDM/RBC 複合材料の開発

ショア硬度 60HS(A/15)のエチレン-プロピレン-ジエンゴム (EPDM) に加え、EPDMに平均粒径 $d = 35, 50, 100\ \mu\text{m}$ のRBC粒子をそれぞれ充てん率 $\alpha = 5, 10, 20, 40, 60\ \text{mass}\%$ のもとで充てんし、混練・加硫後、成形することにより15種類のEPDM/RBC複合材料を作製した(図3)。



図3 EPDM/RBC 複合材料の製造工程

(2) 機械的性質の評価試験

(1)で作製された15種類のEPDM/RBC複合材料について、圧縮試験、引張試験を行い10%圧縮モジュラス、引張強度を明らかにした。さらに、ショアA硬度をデュロメータにより、水に対する接触角を接触角計により測定した。また、各試験片の表面についてSEM、光学顕微鏡による観察を行った。

(3) 水中トライボロジー特性試験

ボールオンプレート型すべり摩擦試験装置 ($v = 0.01\ \text{m/s}$) とボールオンディスク型すべり摩擦試験装置 ($v = 0.1, 1.0\ \text{m/s}$) を用いて

水中におけるすべり摩擦試験を行った。プレートあるいはディスク試験片として EPDM, EPDM/RBC 複合材料を、ボール試験片として直径 8.0 mm のステンレス鋼 (SUS304) 研磨球を用いた。各試験装置のステージに水浴を取り付け、精製水中で摩擦試験を行った。垂直荷重は、0.98 N, 4.9 N, 9.8 N の 3 水準、すべり速度は、0.01 m/s, 0.1 m/s, 1.0 m/s の 3 水準とした。摩擦繰り返し数は 2000 回、同条件にて 5 回の実験を行った。

(4) すべり軸受の開発及び評価

(3)の摩擦試験において優れた摩擦摩耗特性を示す EPDM/RBC 複合材料を用いてすべり軸受材料を開発し、ステンレス鋼製のシャフトとの水中すべり摩擦試験を行い、摩擦係数、シール性の評価等を行った。

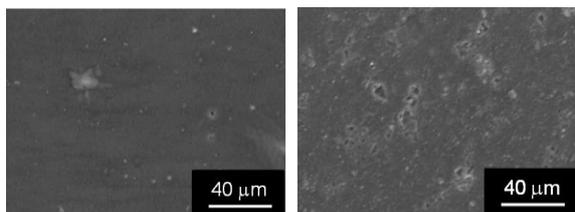
4. 研究成果

(1) 機械的性質

表 1 に、作成された EPDM, EPDM/RBC 複合材料の機械的性質ならびに水に対する接触角を示す。EPDM/RBC 複合材料は EPDM に比べ高い 10% 圧縮モジュラス、ショア硬度を示し、それらの値は、RBC 粒子の充てん率の増加に伴い増加する傾向を示した。また、引張強度については、RBC 粒子を充てんすることで低下すること、RBC 粒子の充てん率の増加に伴い低下する傾向を示すことが分かった。水に対する接触角については、EPDM, EPDM/RBC 複合材料ともに 100° を超えており、いずれも撥水性を示すことが分かった。また、SEM 及び光学顕微鏡による破断面観察の結果、EPDM/RBC 複合材料内部には成形の過程で生成したと思われる微小な気孔が存在し、その気孔の数は RB セラミックス粒子の充てん率の増加とともに増加する傾向が見られた (図 4)。

表 1 各試験片の機械的性質及び接触角

Particle size d , μm	Mass fraction α , mass%	10% compression modulus E_{10} , MPa	Tensile strength T_s , MPa	Shore A hardness H_s (A/15), °	Contact angle θ , °
	0 (EPDM)	3.3	14.9	62	104.8
35	5	4.3	13.9	66	104.3
	10	4.6	11.9	68	104.6
	20	5.3	10.1	72	104.1
	40	9.9	5.7	82	104.5
	60	17.0	4.7	91	106.9
50	5	6.0	12.5	65	104.6
	10	6.0	11.2	67	105.7
	20	7.6	9.2	73	103.3
	40	12.3	5.0	83	105.1
	60	22.0	5.2	91	107.7
100	5	6.8	11.0	65	105.3
	10	7.1	9.2	67	107.7
	20	8.5	7.6	74	106.2
	40	13.8	4.5	83	106.5
	60	24.0	5.4	91	108.1



(a) $\alpha = 0\%$ (EPDM) (b) $d = 100\mu\text{m}$, $\alpha = 60\text{mass}\%$

図 4 試験片表面の SEM 像

(2) 水中における摩擦摩耗特性

EPDM/RBC 複合材料の摩擦係数は、RBC 粒子の平均粒径によらず、充てん率の増加に伴い減少することが分かった。特に、流体動圧効果による水膜形成が難しい低すべり速度 (0.01 m/s) において、RBC 粒子未充填の EPDM の摩擦係数が 1.9 と高い値であったのに対して、平均粒径 35 μm の RBC 粒子を 40 mas% 以上充填した EPDM/RBC 複合材料の摩擦係数は 0.05 以下であり、飛躍的な摩擦係数の低減が見られた (図 5)。一方、EPDM/RBC 複合材料において、摩擦係数に及ぼす RBC 粒子の平均粒径の影響はあまり見られず、充てん率の影響に比べて著しく低いことも分かった。

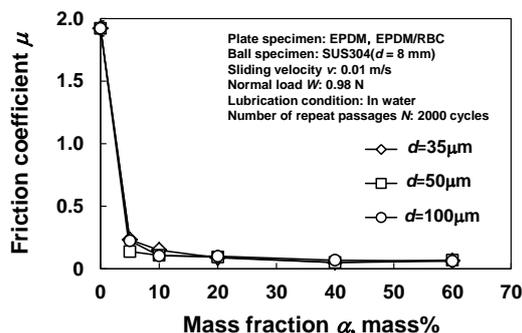
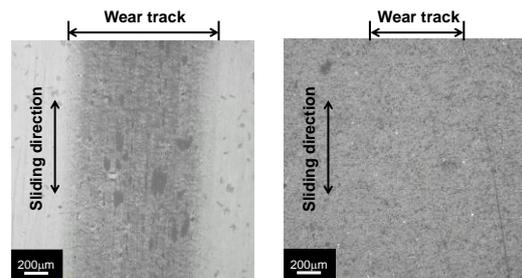


図 5 摩擦係数に及ぼす RBC 粒子の充てん率の影響

SEM による摩擦試験後の EPDM, EPDM/RBC 複合材料の摩擦面を観察したところ、低すべり速度条件では、RBC 粒子未充填の EPDM の摩擦面は摩擦試験前よりも表面粗さが増加しており、摩耗している様子が確認された (図 6(a))。一方、同条件における EPDM/RBC 複合材料の摩擦面は摩擦試験前後で表面粗さの変化が見られなかったことから、摩耗は極めて少なく、良好な水膜が形成されていること、それにより低摩擦が発現したことが示唆された (図 6(b))。また、図 7 に示されるストライバック線図より、EPDM/RBC 複合材料は、RBC 粒子を充てんすることで、流体動圧効果による水膜発現が難しい低軸受特性数条件においても低摩擦が得られることが分かる。これは、RBC 粒子を充てんすることにより、複合材料表面の油溜まり深さ及び表面に存在する気孔が増加したためと考えられる。



(a) $\alpha = 0\%$ (EPDM) (b) $d = 35\mu\text{m}$, $\alpha = 60\text{mass}\%$

図 6 摩擦試験後の試験片表面の光学顕微鏡像

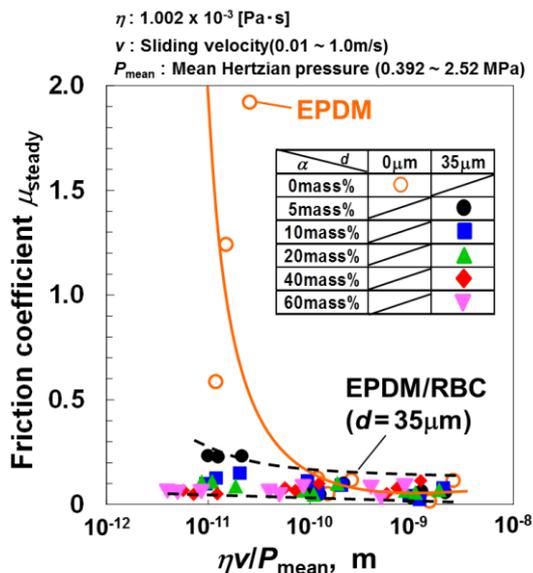


図7 ストライベック線図

(3) 水中すべり軸受の特性評価

(2)で明らかとなった好適な RBC 粒子配合条件の EPDM/RBC 複合材料を用いて、すべり軸受を開発した。このすべり軸受とステンレス鋼製シャフトとの水中すべり摩擦試験を行った。その結果、回転開始時の水膜形成が難しい条件では摩擦係数が比較的高い値を示したものの、定常すべり時では良好な水膜形成が行われた結果、低摩擦を示した。耐久性評価については今後さらなる研究が必要であるが、得られた結果から、開発された EPDM/RBC 複合材料は、水力発電機の封水用すべり軸受や、船舶用の船尾管軸受などへの応用が可能であることが示された。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 2 件)

1. 山口健, 柴田圭, 堀切川一男, RB セラミックス粒子の充てんによる樹脂材料の低摩擦・低摩耗化, プラスチックス, 査読無, 9, 2017, 1-5.
2. Kei Shibata, Takeshi Ii, Takeshi Yamaguchi, Kazuo Hokkirigawa, Tribological Behavior of Polyacetal Composite Filled with Rice Bran Ceramics Particles under Water Lubrication, Journal of Composite Materials, 査読有, 2017, Web 掲載.

[学会発表] (計 5 件)

1. 伊井武, 目黒広夢, 柴田圭, 山口健, 堀切川一男, RB セラミックス粒子とガラス繊維を充てんしたポリアセタールの水中における摩擦摩耗特性, 日本トライボロジー会議 2017 秋高松, 2017 年 11 月 15~18 日, サンポートホール高松 (香川県高松市)

2. 鳥谷部慧悟, 荒木亮太, 山口健, 柴田圭, 高橋桂, 川畑雅彦, 堀切川一男, 米由来の炭素材料を充てんした樹脂複合材料の次亜塩素酸ナトリウム水溶液中における摩擦摩耗特性, 日本トライボロジー会議 2017 秋高松, 2017 年 11 月 15~18 日, サンポートホール高松 (香川県高松市)
3. 鳥谷部慧悟, 関悠介, 柴田圭, 山口健, 林美佳, 清水政之, 村上修, 堀切川一男, RB セラミックス粒子を充てんしたゴム複合材料の水中における摩擦特性, 第 7 回トライボロジー秋の学校, 2016 年 12 月 8 日, あいち健康プラザ (愛知県知多郡)
4. 関悠介, 鳥谷部慧悟, 柴田圭, 山口健, 林美佳, 清水政之, 村上修, 堀切川一男, RB セラミックス粒子を充填したゴム複合材料の水中におけるトライボロジー特性, 日本設計工学会 2016 年度秋季研究発表講演会, 2016 年 10 月 8 日, 北九州国際会議場 (福岡県北九州市)
5. Kei Shibata, Riku Kitamura, Takeshi Ii, Takeshi Yamaguchi, Kazuo Hokkirigawa, Tribological behavior of polyacetal filled with particulate or fibrous filler under water lubrication, The 17th Nordic Symposium on Tribology – NORDTRIB 2016, (Aulanko, Finland)

[図書] (計 2 件)

1. Kei Shibata, Takeshi Yamaguchi, Kazuo Hokkirigawa, Spherical and Fibrous Filler Composites (Polymer Nano-, Micro- and Macrocomposites), Willey VCH, 2016 (総ページ数 296 ページ).
2. 山口健, 柴田圭, 堀切川一男, バイオマス由来の高機能材料, エヌ・ティー・エス, 2016 (総ページ数 312 ページ)

[産業財産権]

○出願状況 (計 1 件)

名称: 複合材料及びこれを用いた摺動部材
 発明者: 堀切川一男, 山口健, 柴田圭, 高橋桂, 川畑雅彦
 権利者: トライボテックス株式会社
 種類: 特許
 番号: 特願 2016-245870
 出願年月日: 2016 年 12 月 19 日
 国内外の別: 国内

○取得状況 (計 0 件)

[その他]

6. 研究組織

(1) 研究代表者

堀切川 一男 (HOKKIRIGAWA, Kazuo)
 東北大学・大学院工学研究科・教授

研究者番号：60173605

(2) 研究分担者

山口 健 (YAMAGUCHI, Takeshi)

東北大学・大学院工学研究科・准教授

研究者番号：50332515

柴田 圭 (SHIBATA, Kei)

東北大学・大学院工学研究科・助教

研究者番号：60612398