

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 10 日現在

機関番号：11301

研究種目：基盤研究(B)

研究期間：2012～2014

課題番号：24360058

研究課題名(和文) 摩擦・摩耗低減剤としてRBセラミックス粒子を活用した先進トライボマテリアルの開発

研究課題名(英文) Development of advanced tribomaterials using RB ceramics particles as filler for low friction and low wear

研究代表者

堀切川 一男(Hokkirigawa, Kazuo)

東北大学・工学(系)研究科(研究院)・教授

研究者番号：60173605

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 14,400,000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セラミックスの粒子を、低摩擦と飛躍的な耐摩耗性向上を同時に付与することが可能な「摩擦・摩耗低減剤」としてポリエーテルエーテルケトン(PEEK)樹脂及び銅合金に配合した、新しい複合材料の開発に成功した。これらの複合材料はともに優れたトライボロジー特性を示すことを明らかにした。PEEK樹脂とRBセラミックスの複合材料は、水中で低摩擦・優れた耐摩耗性を示すため、水中軸受材料として利用可能であることが明らかとなった。また、銅合金とRBセラミックス粒子の複合材料は、鉄道集電用パンタグラフのすり板として応用可能であることを明らかにした。

研究成果の概要(英文)：In the present study, we developed new composite materials using Rice bran ceramics (RBC) particles as a filler that can provide both low friction and high wear resistance. Polyetheretherketone (PEEK) resin/RBC composite and copper (Cu) alloy/RBC composite were developed. The PEEK/RBC composite showed low friction and low wear under water lubrication. This result indicates that the PEEK/RBC composite can be used as a sliding bearing material under water lubrication. The Cu alloy/RBC composite has been succeeded in practical use as high wear-resistant pantograph slider material for current collector of railway.

研究分野：トライボロジー

キーワード：RBセラミックス 複合材料 摩擦 摩耗 粒子

1. 研究開始当初の背景

樹脂材料、金属材料、セラミックス材料などの工業材料が摺動材料として用いられる場合、それら単独で用いられることは少なく、摩擦係数の低減や耐磨耗性の向上など、それぞれの目的に応じて固体潤滑剤や硬質繊維などの強化材と複合化されて用いられることが多い。二硫化モリブデン、黒鉛、PTFEなどの軟質な固体潤滑剤は、自らの低いせん断強度を利用することで、低摩擦を実現するものであるため、耐磨耗性を付与することは難しい。一方、ガラス繊維、炭素繊維などの硬質繊維系の強化材は、材料強度の向上を目指して複合化されるものの、接触面における樹脂や金属材料の摩耗を十分には抑制できず、さらに接触面上及び接触面から脱落した硬質繊維により相手材攻撃性が高く、また、飛躍的な耐磨耗性の向上、低摩擦を得ることは難しい。

以上のことから、新しい発想として、低摩擦のみならず、飛躍的な耐磨耗性の向上、飛躍的な相手材攻撃性の低下を同時に付与することが可能な全く新しい添加剤、即ち「摩擦・摩耗・相手材攻撃性低減剤」という新しい概念の添加剤の開発が、革新的なトライボマテリアルの実現のために不可欠である。

近年、研究代表者らが開発した粉末状のRBセラミックス(RBセラミックス粒子)は、図1に示されるように、米ぬかの細胞構造に由来するマイクロスケールの気孔を有する多孔質構造を示し、ビッカース硬度が4.4GPaと高硬度を有する。この硬質多孔性かつ低摩擦を特徴とするRBセラミックス粒子を各種材料に配合することによりトライボ材料として優れた機能を付与することが可能と考えられる。

以上のような経緯から、硬質かつ多孔性の新しい炭素粒子であるRBセラミックス粒子は、従来の添加剤では実現不可能な、低摩擦、優れた耐磨耗性、低い相手材攻撃性を同時に付与することのできる、独創的かつ先進的な複合材料の開発を可能にする、と考えられる。

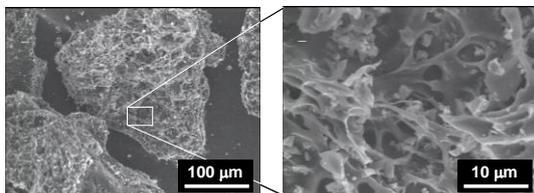


図1 RBセラミックス粒子のSEM像

2. 研究の目的

本研究の目的は、RBセラミックス粒子を樹脂材料および金属材料に配合することにより、新しい複合材料を開発し、トライボマテリアルとして応用することである。

3. 研究の方法

(1) PEEK樹脂/RBセラミックス複合材料の開発

平均粒径 $3\mu\text{m}$ のRBセラミックス粒子とPEEK樹脂を二軸押し出し機により混練し、ペレットを作製した。RBセラミックス粒子の充填率(α)は、10, 20, 30, 40mass%とした。これらのペレットを用いて、図2に示されるように直径64mm、厚さ4mmのディスク形状に射出成形し、PEEK/RBC複合材料試験片を作製した。4種類のPEEK/RBC複合材料に加え、比較材料としてPEEK樹脂、RBセラミックスを用いた。

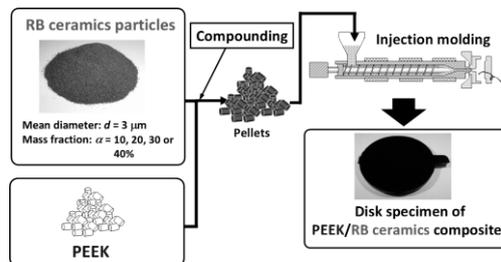


図2 PEEK/RBC複合材料の作製工程

(2)銅合金/カーボン/RBセラミックス複合材料の開発

銅合金粒子と従来のカーボン粒子及びRBセラミックス粒子を混合し、焼結することにより銅/カーボン/RBセラミックス(Cu/C/RBC)複合材料を作製した。RBセラミックス粒子の平均粒径は $4.9\mu\text{m}$ 、 $30.2\mu\text{m}$ 、 $82.8\mu\text{m}$ の3種類、配合率は、0mass%、5mass%、10mass%、20mass%の4水準とした。

(3)機械的性質の評価

万能試験機、ビッカース硬度計を用いて、弾性率、引張強度、曲げ強度、ビッカース硬度などを明らかにした。

(4)トライボロジー特性評価試験

PEEK/RBセラミックス複合材料については、ボールオンディスク型摩擦摩耗試験装置を用いて、水中における摩擦・摩耗特性を明らかにした。このとき、相手材料には直径8mmのオーステナイト系ステンレス鋼(JIS SUS304)研磨球を用いた。また、荷重、すべり速度ともに幅広い条件下で実験を行った。

Cu/C/RBC複合材料については、ピンオンディスク型すべり摩擦試験装置を用いて無通電・無潤滑条件での摩擦・摩耗特性を明らかにした。このとき、ピン試験片として銅合金製ピンを用いた。また、集電材摩耗試験装置を用いて、通電条件における摩擦・摩耗特性を明らかにした。

(5) Cu/C/RBC複合材料を用いた鉄道集電用パンタグラフすり板の開発

(4)のトライボロジー特性評価試験において優れた耐磨耗性を示した配合条件のCu/C/RBC複合材料からなるすり板を作製し、すり板と架線の離線のしやすさの評価試験

として、離線率測定試験と追従振幅特性試験を行った。さらに、現車走行試験により、実走行条件での耐摩耗性評価を行い、同複合材料の耐摩耗すり板材料としての実用可能性を検討した。

4. 研究成果

(1) 各種複合材料の機械的性質

PEEK/RBC 複合材料では、RB セラミックス粒子の充填率の増加に伴い、密度、圧縮強度、弾性率、ビッカース硬度が増加する傾向を示すことが分かった。

Cu/C/RBC 複合材料では、RB セラミックス粒子の平均粒径、配合率が減少すると、曲げ強度、硬さが増加し、RB セラミックス粒子の平均粒径が $4.9\mu\text{m}$ 、配合率が $5\text{mass}\%$ の場合、鉄道集電用パンタグラフすり板材料として必要な電気特性を示しながら、最も高強度、高硬度となることが分かった。

(2) PEEK/RB セラミックス複合材料の水潤滑下における摩擦・摩耗特性

RB セラミックス粒子の充填率によらず、PEEK/RB セラミックス複合材料の摩擦係数、比摩耗量は PEEK 樹脂、RB セラミックスに比べ低い値を示した (図 3)。特に充填率が $40\text{mass}\%$ の PEEK/RB セラミックス複合材料の摩擦係数については、高すべり速度条件において、 0.02 程度の極めて低い値を示すことが分かった (図 4)。この低摩擦発現メカニズムをストライベック線図による潤滑状態の推定及び混合潤滑モデルを用いた数値解析により明らかにした。ストライベック線図により、PEEK 樹脂に比べ PEEK/RB セラミックス複合材料は、より小さな軸受特性数において境界潤滑から混合潤滑に移行することが分かった (図 5)。混合潤滑モデルによる数値計算により、摩擦係数の境界摩擦成分と流体摩擦成分を計算したところ、表面に存在する RB セラミックス粒子からなる微小突起により、水による流体動圧効果が発現し、その結果、混合潤滑状態となることが分かった。試験後に発生した摩耗粉の粒度分布を測定したところ、PEEK/RBC 複合材料における摩耗粉の平均粒径は $0.4\mu\text{m}$ であり、PEEK 樹脂に

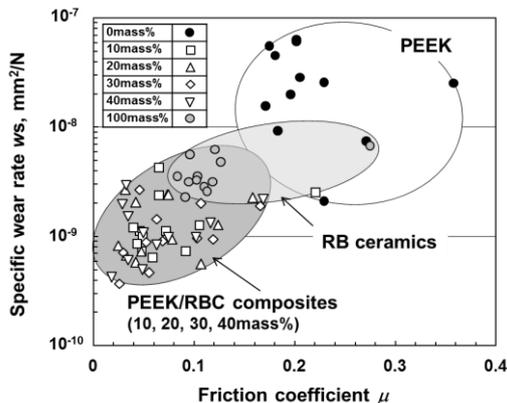


図 3 摩擦係数と比摩耗量の関係

おける摩耗粉の約 $1/70$ であった。これは、摩擦面に露出した RB セラミックス粒子が荷重の大部分を支持し、母材である PEEK 樹脂の流動摩擦が粒子間のみで生じるためであると考えられる。

以上のことから、PEEK/RB セラミックス複合材料は水中でのしゅう動材料としての応用可能性が示された。

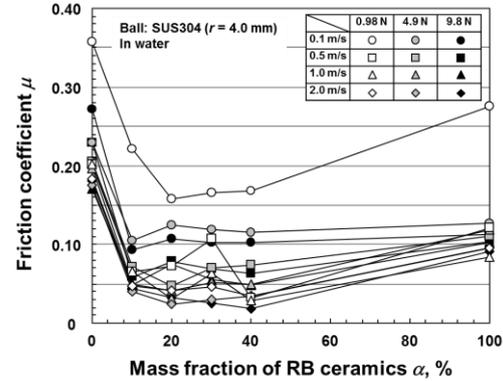


図 4 RB セラミックス粒子の充てん率と摩擦係数の関係

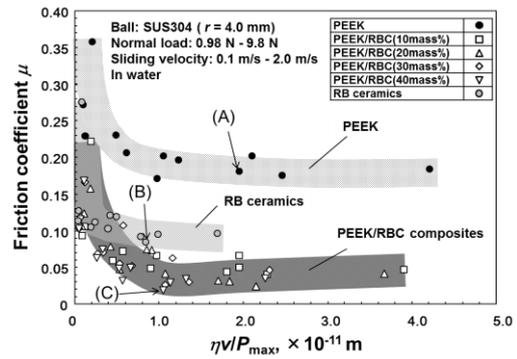


図 5 ストライベック線図

(3) Cu/C/RBC 複合材料の摩擦摩耗特性の解明

Cu/C/RBC 複合材料に対して無通電下における摩擦試験を行った結果、配合する RB セラミックス粒子の粒径が $10\mu\text{m}$ 以下、配合率が $5\text{mass}\%$ の場合に最も優れた耐摩耗性が得られ、機械摩耗を大幅に低減できることを明らかにした。また、通電下の摩擦試験を行った結果、従来のカーボン系すり板材料に比べ、耐アーク性 (強制的にアーク放電を起こした場合) は同程度であるものの、アーク放電が発生しない場合には自身及びトロリ線材料における電気摩耗を大幅に低減できることを明らかにした。

(4) Cu/C/RBC 複合材料を用いた鉄道集電用パンタグラフすり板の開発

RB セラミックスすり板は、従来カーボン系すり板材料として用いられる銅粉末と、(1)、(2)で明らかにされた好適な配合条件を基に、配合する RB セラミックス粒子の粒径を

10 μ m以下とし、銅合金粉末、カーボン粉末、RBセラミックス粒子の配合率をそれぞれ60mass%、35mass%、5mass%として作製された(図6)。また、比較すり板として、現行カーボン系すり板を用いた。追従振幅特性試験の結果、RBセラミックスすり板の追従振幅特性は、現行カーボンすり板と同等であることを明らかにした。また、離線率測定試験の欠陥、RBセラミックスすり板の離線率は、現行すり板に比べ低い値を示すことが分かった。さらに、現車走行試験後の平均摩耗率は、RBセラミックスすり板では2.44mm/104km、現行すり板では1.07mm/104kmとなり、実用上問題の無い値であることを確認するとともに、RBセラミックスすり板使用時のトロリ線摩耗率は、現行すり板と同様に営業路線の運行には影響を及ぼさない値を示すことが分かった。以上より、RBセラミックスすり板は、架線との離線が少ないことが確認された。また、実運用においても十分使用可能な性能を有していることを確認した。



図6 開発されたRBセラミックスすり板

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7件)

1. Kei Shibata, Takeshi Yamaguchi, Moeko Kishi and Kazuo Hokkirigawa, Friction and Wear Behavior of Polyamide 66 Composites Filled with Rice Bran Ceramics under a Wide Range of Pv Values, Tribology Online, 査読有, 10, 2, 2015, 213-219. doi.org/10.2474/trol.10.213
2. 三島潤一郎, 赤荻剛, 大瀧絃介, 柴田圭, 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を用いた電車用カーボン系すり板の性能評価, 電気学会論文誌D (産業応用部門誌), 査読有 135, 4, 2015, 426-431. doi.org/10.1541/ieejias.135.426
3. Kei Shibata, Takeshi Yamaguchi, Moeko Kishi, Kazuo Hokkirigawa, The role of frictional work in tribological behavior of

polyamide 66 composites containing rice bran ceramics particles or glass beads, TRIBOLOGIA – Finnish Journal of Tribology, 査読有, 1, 32, 2014, 33-40.

4. Kei Shibata, Takeshi Yamaguchi, Kazuo Hokkirigawa, Tribological behavior of polyamide 66/rice bran ceramics and polyamide 66/glass bead composites, 査読有, Wear, 317, 1-2, 2014, 1-7. doi:10.1016/j.wear.2014.04.019
5. Kei Shibata, Takeshi Yamaguchi, Kazuo Hokkirigawa, Improvement of Tribological Properties of Thermoplastic Resin by Using Rice Bran Ceramics Particulate as Wear-Resistant Fillers, Final Papers of 15th Nordic Symposium on Tribology, 査読有, 2012, USB memory.
6. 山口健, 堀切川一男, RBセラミックス粒子を充填したPEEK樹脂の水潤滑下における摩擦・摩耗特性, トライボロジスト, 査読有, 58, 7, 2013, 487-495.
7. Kei Shibata, Takeshi Yamaguchi, Tatsuhiro Urabe, Kazuo Hokkirigawa, Experimental study on microscopic wear mechanism of copper/carbon/rice bran ceramics composites, Wear, 査読有, 294-295, 2012, 270-276. doi:10.1016/j.wear.2012.07.004

[学会発表] (計11件)

1. Kei Shibata, Wear mode transition of polyamide 66 resins filled with hard particulate or fibrous filler, The 6th Interantional Conference on Manufacturing, Machine Design and Tribology, ICMDT2015, April 23, 2015, Okinawa Convention Center (Ginowan City, Okinawa)
2. Kei Shibata, The role of frictional work in tribological behavior of polyamide 66 composites containing hard particles, The 16th Nordic Symposium on Tribology -NORDTRIB2014, June 12, 2014, Aarhus (Denmark)
3. 柴田圭, ポリアミド66樹脂/RBセラミックス複合材料の大気中無潤滑下における摩擦・摩耗特性, 日本トライボロジー学会トライボロジー会議 2013秋 福岡, 2013年10月24日, アクロス福岡(福岡市, 福岡県)
4. Takeshi Yamaguchi, Tribological Properties of PEEK Resin Filled with RB Ceramics Particles under Water Lubrication, World Tribology Congress 2013, Torino, September 11, 2013, Torino (Italy).
5. Kei Shibata, Friction and Wear Behavior of Polyamide 66 Composites Filled with Rice Bran Ceramics Slid against Stainless Steel, World Tribology Congress 2013, Torino, September 11, 2013, Torino (Italy).
6. 柴田圭, 硬質粒子の充填によるポリアミド66樹脂の耐摩耗性向上に関する研究, 日

本トライボロジー学会トライボロジー会議 2013 春 東京, 2013 年 5 月 21 日, 国立オリンピック記念青少年総合センター (東京都)

7. Kei Shibata, Development of Railway Power Collecting Materials by Using Rice Bran Ceramics as Wear-Resistant Particles, IUMRS-International Conference on Electric Materials (IUMRS-ICEM 2012), September 26, 2012, Pacifico Yokohama (Kanagawa, Yokohama).
8. 山口健, RB セラミックス粒子を充填した PEEK 樹脂の水潤滑下及び油潤滑下における摩擦・摩耗特性, 日本機械学会東北支部第 48 期秋季講演会, 2012 年 9 月 22 日, 八戸工業高等専門学校 (八戸市, 青森県)
9. Kei Shibata, Improvement of tribological properties of thermoplastic resin by using rice bran ceramics particulate as wear-resistant fillers, NORDTRIB 2012, June 13, 2012, Trondheim (Norway).
10. 山口健, RB セラミックス粒子を充填した PEEK 樹脂の水潤滑下における摩擦・摩耗特性, 日本トライボロジー学会トライボロジー会議 2012 春 東京, 2012 年 5 月 15 日, 国立オリンピック記念青少年総合センター (東京都) .
11. 柴田圭, RB セラミックス粒子の充填によるポリアミド 66 樹脂の耐摩耗発現機構の解明, 日本トライボロジー学会トライボロジー会議 2012 春 東京, 2012 年 5 月 14 日, 国立オリンピック記念青少年総合センター (東京都)

[図書] (計 0 件)

[産業財産権]

○出願状況 (計 0 件)

名称：
発明者：
権利者：
種類：
番号：
出願年月日：
国内外の別：

○取得状況 (計 0 件)

名称：
発明者：
権利者：
種類：
番号：
出願年月日：
取得年月日：
国内外の別：

[その他]

ホームページ等

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

(3) 連携研究者

()

研究者番号：