

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成24年4月1日現在

機関番号：11301

研究種目：基盤研究（B）

研究期間：2009～2011

課題番号：21360068

研究課題名（和文）摩耗低減剤としてのRBセラミックス粒子活用による先進複合材料の開発

研究課題名（英文）Development of advanced composite materials using RB ceramics particles as wear-reduction filler

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

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炭素材料RBセラミックス粒子を熱可塑性樹脂材料及び銅合金と複合化することにより、新しい複合材料の開発に成功した。これらの複合材料は、低摩擦・優れた耐摩耗性を示すとともに、低相手攻撃性を示すことが判った。また、銅合金とRBセラミックス粒子の複合材料は、鉄道集電用次世代パンタグラフすり板材料として利用可能であることが明らかになった。

研究成果の概要（英文）：In the present study, new thermoplastic resin composite materials and copper alloy composite materials filled with RB ceramics particles, which are hard porous carbon materials RB Ceramics made from rice bran, were developed. The thermoplastic resin/RB ceramics composites and copper alloy/RB ceramics composites showed low friction and high wear resistance as well as low aggression against mating surfaces. It was demonstrated that the copper alloy/RB ceramics composites are available as new pantograph slider materials for current collector of railway.

交付決定額

（金額単位：円）

| | 直接経費 | 間接経費 | 合計 |
|--------|------------|-----------|------------|
| 2009年度 | 5,800,000 | 1,740,000 | 7,540,000 |
| 2010年度 | 5,200,000 | 1,560,000 | 6,760,000 |
| 2011年度 | 3,700,000 | 1,110,000 | 4,810,000 |
| 年度 | | | |
| 年度 | | | |
| 総計 | 14,700,000 | 4,410,000 | 19,110,000 |

研究分野：工学

科研費の分科・細目：設計工学・機械機能要素・トライボロジー

キーワード：RBセラミックス、摩耗、複合材料、トライボロジー、炭素

1. 研究開始当初の背景

脱脂ぬかを原料とする硬質多孔性炭素材料RBセラミックスは、低摩擦・低摩耗を示す新しいトライボマテリアルであり、無潤滑直動すべり軸受などに応用され、実用化されている。

一方、樹脂、金属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摩

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。主な固体潤滑剤は、軟質であり、自らの低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、耐摩耗性を付与することは難しい。一方、主な繊維強化材は、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塑性流動を十分には抑制

できず、接触面からの繊維の抜けにより、相手材料の摩耗を促進するなど悪影響を及ぼすこともあるため、飛躍的な耐摩耗性の向上は難しい。以上のことから、低摩擦のみならず、飛躍的な耐摩耗性の向上を同時に付与することが出来る充填剤は存在せず、開発が望まれている。

近年、申請者らは、粉末状のRBセラミックスの開発に成功している。RBセラミックス粒子は硬質多孔性かつ低摩擦であることから、低摩擦と優れた耐摩耗性を両立できる充填剤として利用可能と考えられる。

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RBセラミックス粒子を樹脂材料及び金属材料と複合化することにより、新しい低摩擦・耐摩耗複合材料を開発し、摺動材料として応用することである。

3. 研究の方法

(1) 熱可塑性樹脂/RBセラミックス複合材料の開発

PA66(polyamide66), PA11(polyamide11), POM(polyoxymethylene), PBT(polybutylene terephthalate), PP(polypropylene)の5種類の熱可塑性樹脂それぞれに平均粒径150 μm のRBセラミックス粒子(図1)を50mass.%以上充填した5種類の熱可塑性樹脂/RBセラミックス複合材料及び、平均粒径3 μm , 30 μm , 150 μm のRBセラミックス粒子を10~70mass%充填した9種類のPA66/RBセラミックス複合材料を作製した。比較材料として、ガラス繊維充填PA66複合材料も作製した。RBセラミックス粒子が樹脂材料とほぼ同等の低い比重を有するために、樹脂に対する分散性がよく、従来の固体潤滑剤や繊維強化材では20~30mass%しか充填できないのに対して、RB背染ミックス粒子は50mass%以上充填しても射出成型ができることが判った。

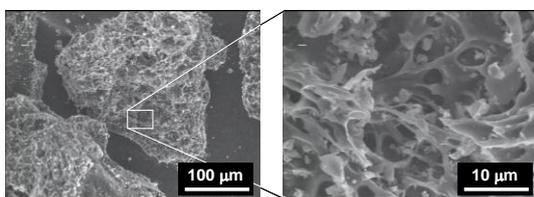


図1 RBセラミックス粒子のSEM像

(2) 銅/カーボン/RBセラミックス複合材料の開発

銅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 μm , 30.2 μm , 82.8 μm 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

熱可塑性樹脂/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、大気中無潤滑下、ジエステル油潤滑下における摩擦・摩耗特性を明らかにした。このとき、相手材料には軸受鋼(SUJ2)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。

4. 研究成果

(1) 各種複合材料の機械的性質

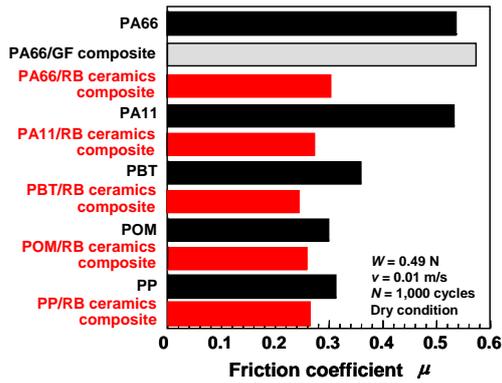
熱可塑性樹脂の種類によらず、RBセラミックス粒子を充填することで、引張強度や曲げ強度はわずかに低下するものの、弾性率、ビッカース硬度は増加することが判った。また、弾性率、ビッカース硬度はRBセラミックス粒子の平均粒径の減少、充填率の増加に伴い、増加することが判った。

Cu/C/RBC複合材料では、RBセラミックス粒子の平均粒径、配合率の減少に伴い、曲げ強度、硬さが増加することが判った。また、RBセラミックス粒子の平均粒径が4.9 μm 、配合率が5mass%の場合、最も高強度、高硬度を示すことが判った。

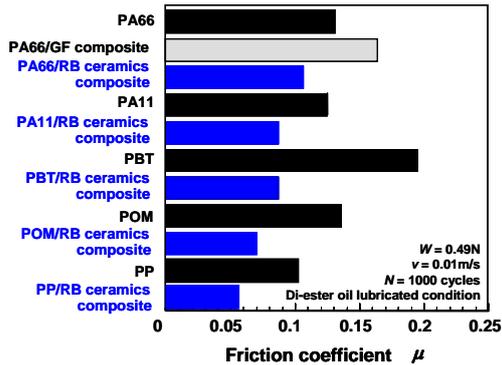
(2) 熱可塑性樹脂/RBセラミックス複合材料の摩擦・摩耗特性

大気中無潤滑下(図2(a)), 油潤滑下(図2(b))ともにRBセラミックス粒子を充填することにより熱可塑性樹脂の摩擦係数を低減することが可能であることが判った。図3(a), (b)示されるように、大気中無潤滑下、油潤滑下においてPA66単体ならびにガラス繊維充填PA66では摩擦係数がすべり速度の増加に伴い減少するのに対して、RBセラミックス粒子充填PA66ではすべり速度によらずほぼ一定の値を示す。このことから、RBセラミックス粒子充填PA66は摩擦による自励振動や騒音の原因となるスティックスリップが生じにくいといえる。

図4に示されるように、いずれの熱可塑性樹脂においても、RBセラミックス粒子充填

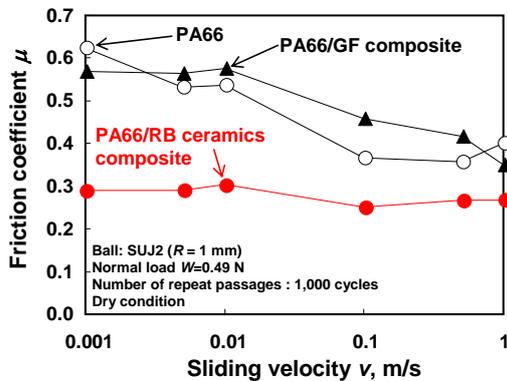


(a) 大気中無潤滑下

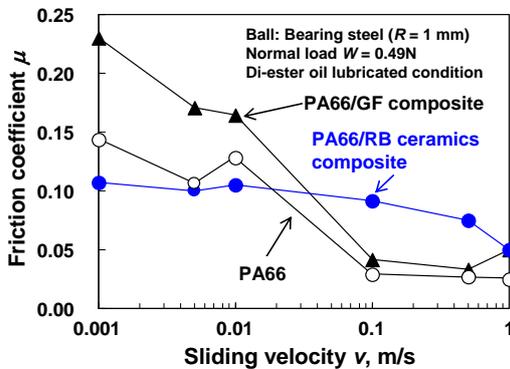


(b) 油潤滑下

図 2 RB セラミックス粒子充填熱可塑性樹脂の軸受鋼球に対する摩擦係数

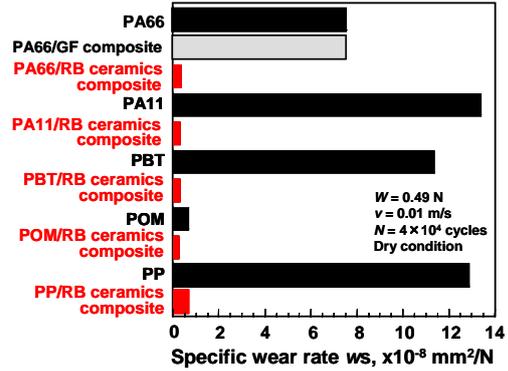


(a) 大気中無潤滑下

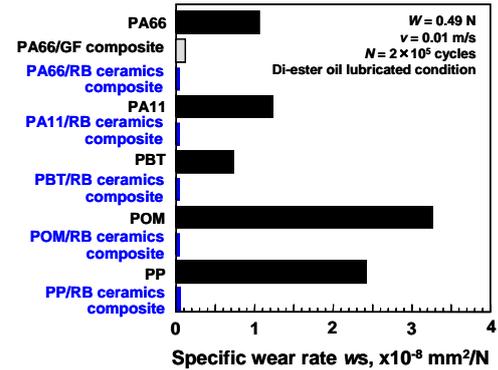


(b) 油潤滑下

図 3 RB セラミックス粒子充填 PA66 の摩擦係数とすべり速度の関係

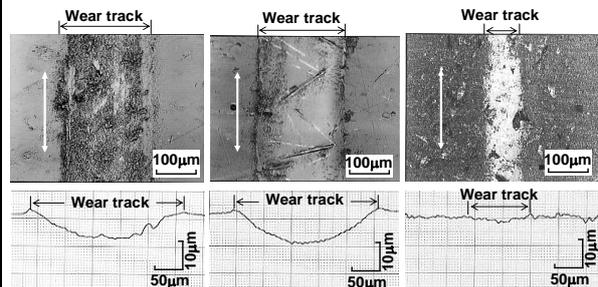


(a) 大気中無潤滑下



(b) 油潤滑下

図 4 RB セラミックス粒子充填熱可塑性樹脂の比摩耗量



(a) PA66 (b) PA66/GF (c) PA66/RB

図 5 摩耗痕のレーザー顕微鏡像及び断面曲線

により、大気中無潤滑下では67%から98%、油潤滑下では68%から99%、比摩耗量を低減することができる。また、RB セラミックス粒子を充填した PA66 は大気中無潤滑下、油潤滑下ともにガラス繊維充填 PA66 よりも低い比摩耗量を示す。

図 5(a)の断面曲線より、PA66 の摩耗痕端部には塑性流動痕が観察される。一方、ガラス繊維充填 PA66 (図 5 (b)) の摩耗痕には塑性流動痕が観察されるとともに、ガラス繊維の脱落が見られる。これらに対して、RB セラミックス粒子充填 PA66 では、そのような大規模な塑性流動や粒子の脱落は見られない。RB セラミックス粒子を充填した熱可塑性樹脂は、熱可塑性樹脂単体やガラス繊維を充填

したもの 비해、高硬度を示す。したがって、RB セラミックス粒子充填による熱可塑性樹脂の耐摩耗性の飛躍的向上は、硬さの増加による接触面近傍の塑性流動の抑制、樹脂材料がRB セラミックス粒子の開気孔に入り込むことによるアンカー効果による粒子脱落の抑制に起因すると考えられる。

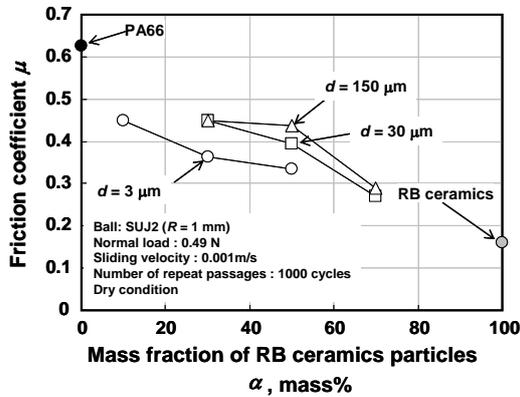


図6 RB セラミックス粒子充填 PA66 の摩擦係数と RB セラミックス粒子充填率の関係

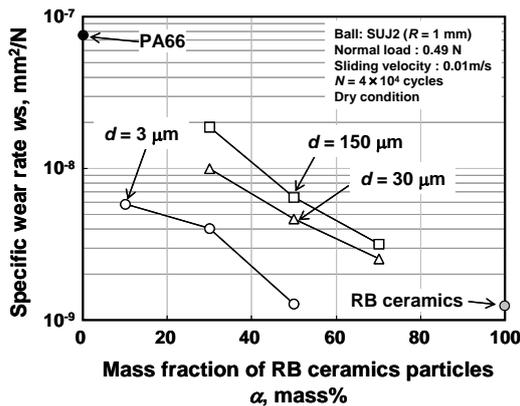


図7 RB セラミックス粒子充填 PA66 の比摩耗量と RB セラミックス粒子充填率の関係

図6は、大気中無潤滑下におけるRB セラミックス粒子充填 PA66 の軸受鋼球に対する摩擦係数とRB セラミックス粒子の充填率の関係である。同図より、RB セラミックス粒子の充填率の増加に伴い、摩擦係数は減少する傾向を示す。また、同じ充填率の場合、平均粒径が小さいほど低い摩擦係数を示す。同様に、図7に示されるように、RB セラミックス粒子充填 PA66 の比摩耗量は、充填されるRB セラミックス粒子の平均粒径が小さく、充填率が高いほど低い値を示す。また、平均粒径3 μm のRB セラミックス粒子をPA66に50 mass%充填することで、同条件におけるRB セラミックスの比摩耗量($1.2 \times 10^{-9} \text{ mm}^2/\text{N}$)とほぼ同等の低い値($1.3 \times 10^{-9} \text{ mm}^2/\text{N}$)が得られることが判った。

図8に示されるように、RB セラミックス粒子の平均粒径の減少と充填率の増加に伴い硬さが増加することで、軸受鋼球との接触面積が減少し、また接触面積内に存在するRB セラミックス粒子の数が増加することにより凝着が低減されることで摩擦係数が減少したと考えられる。同様に、RB セラミックス粒子の平均粒径の減少と充填率の増加に伴い、硬さが増加することで接触面近傍の塑性流動が抑制され、また、接触面での凝着が低減されることで、耐摩耗性が向上したと考えられる。

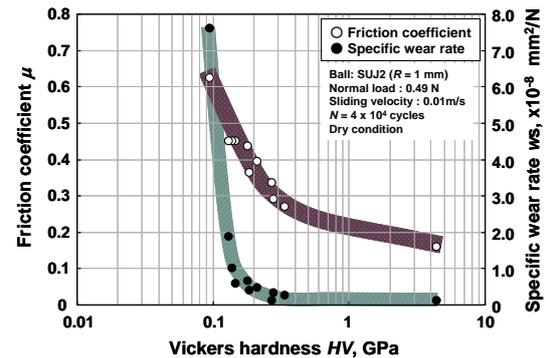


図8 ビッカース硬度と摩擦係数、比摩耗量の関係

(3) Cu/C/RBC 複合材料の摩擦・摩耗特性

図9に、最も優れたトライボロジー特性を示したCu/C/RBC複合材料($\alpha = 5\text{mass}\%$, $d_m = 4.9\mu\text{m}$)及びCu/C複合材料の無通電条件下における摩擦係数、ディスク比摩耗量、ピン比摩耗量の関係を示す。Cu/C/RBC複合材料の場合には、Cu/C複合材料に比べ、摩擦係数は約3/5、ディスク比摩耗量は約1/220、ピン比摩耗量は約1/150と、いずれも低い値を示すことが判った。また、図10に示されるように、Cu/C/RBC複合材料($\alpha = 5\text{mass}\%$, $d_m = 4.9\mu\text{m}$)は、Cu/C/RBC複合材料に比べ、耐アーク放電摩耗性は同等であり、すり板材料の比摩耗量は約1/50、模擬架線の摩耗率は約3/4の低い値を示すことが判った。

以上のことから、本研究で開発されたCu/C/RBC複合材料($\alpha = 5\text{mass}\%$, $d_m = 4.9\mu\text{m}$)は、鉄道集電用パンタグラフすり板材料に用いられているCu/C複合材料に比べ、飛躍的に耐摩耗性に優れることから、摩擦仕事によるエネルギーロスを低減し、相手架線の摩耗を低減した上で長寿命を実現できるパンタグラフすり板材としての応用が十分期待できるといえる。

また、摩擦試験後の摩耗面のSEM観察により、Cu/C/RBC複合材料の耐摩耗性発現メカニズムを明らかにするとともに、無次元パラメータ S_w の増加に伴い同複合材料の比摩耗量が増加すること(図11)を明らかにした。

さらに、ヘルツ最大接触圧力、最大高さ粗さ、破壊靱性値及び摩擦係数を用いた同複合材料の比摩擦耗量の予測式の導出に成功した。

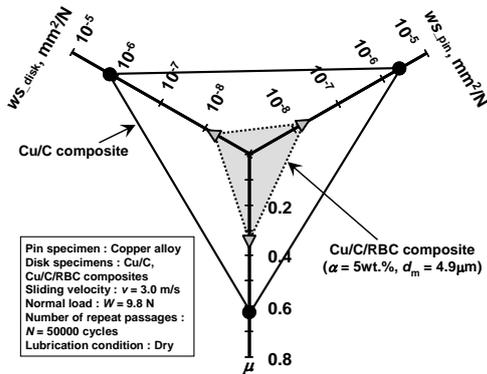


図9 Cu/C/RBC 複合材料及び Cu/C 複合材料の無通電条件下における摩擦係数及びディスク比摩擦耗量、ピン比摩擦耗量の関係

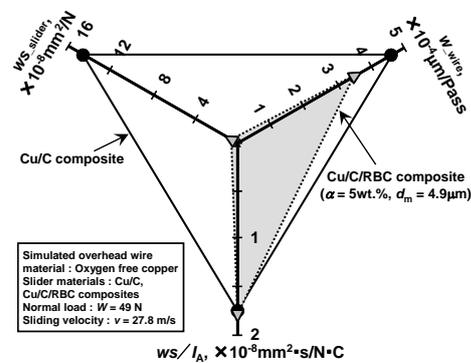


図10 Cu/C/RBC 複合材料及び Cu/C 複合材料製すり板材料の通電条件における摩擦係数および比摩擦耗量、耐アーク放電摩耗性の関係

| Cu/C | $d_m = 4.9$ | | $d_m = 30.2$ | | $d_m = 82.8$ | | Classification of ws_c (mm ³ /N) |
|------|-------------|----------|--------------|----------|--------------|----------|---|
| | $a = 5$ | $a = 10$ | $a = 5$ | $a = 10$ | $a = 5$ | $a = 10$ | |
| ○ | □ | △ | ○ | △ | ○ | △ | $ws_c \leq 10^{-7}$ |
| ◐ | ◑ | ◒ | ◐ | ◑ | ◐ | ◑ | $10^{-7} < ws_c \leq 10^{-6}$ |
| ● | ■ | ▲ | ● | ▲ | ● | ▲ | $10^{-6} < ws_c$ |

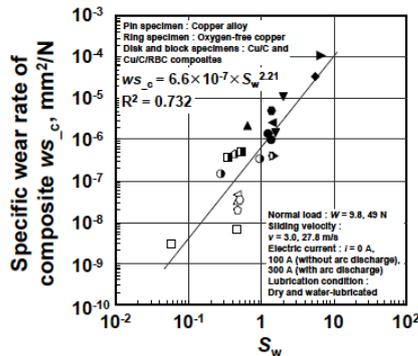


図11 無次元パラメータ S_w と比摩擦耗量の関係

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8件)

1. 堀切川一男, 東日本大震災被災地域のものでつくり産業の復興を目指して — 短期間に多数の成功事例を生み出す新しい地域産学官連携スタイル「仙台堀切川モデル」の概要 —, 静岡アジア・太平洋学術フォーラム報告書 (論文集), 査読無, 2012, 122-149
2. 山口健, RB セラミックス粉体を用いた複合材料の開発と応用, 日本機械学会誌, 査読無, 8, 2011, 472
3. Kei Shibata, Takeshi Yamaguchi and Kazuo Hokkirigawa, Friction and Wear Properties of Copper/Carbon/Rice Bran Ceramics Composite under Water-Lubricated Condition, Tribology online, 査読有, 6, 2011, 180-184
4. 山口健, 堀切川一男, 秋山元治, 松本邦裕, RB セラミックス粒子を充填した熱可塑性樹脂のトライボロジー特性, 月刊トライボロジー, 査読無, 8, 2010, 44-47
5. Mothoharu Akiyama, Takeshi Yamaguchi, Kunihiro Matsumoto and Kazuo Hokkirigawa, Friction and Wear of Polyamide 66 Composites Filled with RB Ceramics Particles under Dry Condition, Tribology online, 査読有, 5, 2010, 87-91
6. Mothoharu Akiyama, Takeshi Yamaguchi, Kunihiro Matsumoto and Kazuo Hokkirigawa, Polymer composites filled with RB ceramics particles as low friction and high wear resistant filler, Tribology online, 査読有, 5, 2010, 19-26
7. Kei Shibata, Takeshi Yamaguchi, Yuta Yao, Nobuyuki Yokoyama, Junichiro Mishima and Kazuo Hokkirigawa, Friction and wear properties of copper/carbon/RB ceramics composite under electrical current, Tribology online, 査読有, 4, 2009, 131-134
8. 山口健, 堀切川一男, RB セラミックス粉体を用いた低摩擦および高摩擦複合材料の開発と応用, 粉体技術, 査読無, 1, 2009, 80-85

[学会発表] (計9件)

1. 山口健, RB セラミックス及びその複合材料の開発と応用, 第52回高分子材料のトライボロジー研究会, 2011年11月15日, 東京
2. Takeshi Yamaguchi, Sohei Nishio, Wataru Haryu and Kazuo Hokkirigawa, Friction and wear properties of PEEK composites filled with RB ceramics particles, International Tribology Conference Hiroshima 2011, 2011年11月2日, 広島
3. Kei Shibata, Takeshi Yamaguchi, Tatsuhiko Urabe, Ryota Ifuku and Kazuo

Hokkirigawa, Analysis of microscopic wear mechanism of copper/carbon/rice bran ceramics composites, International Tribology Conference Hiroshima 2011, 2011年10月31日, 広島

4. 山口健, 針生渉, 堀切川一男, RB セラミックス粒子を充填したポリエーテルエーテルケトン樹脂の摩擦・摩耗特性, 日本機械学会東北支部第47期秋季講演会, 2011年9月22日, 米沢
5. 柴田圭, 浦部達広, 山口健, 堀切川一男, RB セラミックス粒子充填による熱可塑性樹脂の耐摩耗性発現メカニズムに関する研究, 日本機械学会東北支部第47期秋季講演会, 2011年9月22日, 米沢
6. 柴田圭, 山口健, 浦部達広, 伊福遼太, 堀切川一男, 微視的摩耗機構の解析に基づく銅/カーボン/RB セラミックス複合材料の摩耗予測式の提案, 日本トライボロジー学会トライボロジー会議 2011春 東京, 2011年5月25日, 東京
7. 伊福遼太, 山口健, 柴田圭, 堀切川一男, 銅/カーボン/RB セラミックス複合材料の摩擦・摩耗に及ぼすRB セラミックス 粒子の粒径及び配合率の影響, 東北学生会第41回学生員卒業研究発表講演会, 2011年3月3日, 岩手
8. 柴田圭, 山口健, 浦部達広, 横山信行, 堀切川一男, 銅/炭素/RB セラミックス複合材料の摩擦・摩耗に及ぼす接触圧力の影響, トライボロジー会議 2010秋 福井, 2010年9月15日, 福井
9. 山口健, 西尾壮平, 松本邦裕, 秋山元治, 堀切川一男, RB セラミックス粒子を充填したPEEKの大気中無潤滑下における摩擦・摩耗特性, トライボロジー会議 2010秋 福井, 2010年9月14日, 福井

[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：
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

(3) 連携研究者

()

研究者番号：