

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 5 月 13 日現在

機関番号：11301

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2013～2014

課題番号：25820031

研究課題名(和文)低摩擦・超耐摩耗樹脂系複合材料の開発

研究課題名(英文)Development of low-frictional and super-high-wear-resistant resin composites

研究代表者

柴田 圭 (Shibata, Kei)

東北大学・工学(系)研究科(研究院)・助教

研究者番号：60612398

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,200,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、低摩擦と耐摩耗性を同時に付与する「摩擦・摩耗低減剤」として、米ぬかを原料とする硬質多孔性炭素材料RBセラミックスに着目し、熱可塑性樹脂材料との複合材料を開発した。また、同複合材料の摩擦・摩耗特性の体系的な解明を行った。その結果、他の充填剤に比べRBセラミックス粒子を充填した場合、特に低すべり速度、高荷重条件において、耐摩耗性を付与しながら極めてしゅう動相手材料への攻撃性が低く、高負荷条件においてしゅう動材料としての応用が可能であることが分かった。

研究成果の概要(英文)：In the present study, the thermoplastic resin composites were newly developed using a RB ceramics particle, which is made from rice bran, as a friction and wear reducer. According to the friction tests under a wide range of conditions, the RB ceramics can contribute to higher wear resistance and lower aggression to the mating material at low sliding velocity and high load, compared with the other fillers. The particle filled composite was expected to use as tribomaterials under high-load conditions.

研究分野：トライボロジー

キーワード：摩擦 摩耗 樹脂系複合材料 RBセラミックス 充填剤

### 1. 研究開始当初の背景

近年、省エネルギー、低環境負荷の観点から、しゅう動要素においては軽量化に加え、低摩擦かつ飛躍的な耐摩耗性の向上が強く望まれている。軽量化のため、金属材料の代替としてエンジニアリングプラスチックをはじめとする各種樹脂材料がしゅう動材料として注目されているが、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強化用繊維材料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、ポリテトラフルオロエチレン (PTFE) などの固体潤滑剤は、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、ガラス繊維、炭素繊維などの繊維強化材は、材料内部の強度向上を目指して複合化されるものの、しゅう動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、しゅう動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の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が難しく、また低摩擦を得ることも困難な場合が多い。

一方、Hokkirigawa によって開発された米ぬかを原料とする「RB セラミックス」は、低密度、高硬度、低ヤング率、低摩擦を示し、優れた耐摩耗性を有する多孔質の炭素材料である。この RB セラミックスの製造工程で用いられる粉末状の RB セラミックス粒子は、多孔質構造を有し、ビッカース硬さ 4.4GPa と高硬度を示す。この硬質多孔性かつ低摩擦を特徴とする RB セラミックスの粒子を各種材料に配合することにより、摩擦係数の低減と耐摩耗性の向上といった、しゅう動材料として優れた機能を付与できることが可能と考えられる。このような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できる添加剤は、従来にはない新しい概念の添加剤すなわち「摩擦・摩耗低減剤」として、その応用が大いに期待できる。

このような発想のもと、申請者はこれまでに、鉄道集電用すり板材料に用いられている銅及びコークス・ピッチを原料としたカーボンに、摩擦・摩耗低減剤として RB セラミックス粒子を混合・焼結した銅/カーボン/RB セラミックス複合材料を開発している。また、同複合材料が、大気中無潤滑下、水潤滑下、通電環境下において従来の鉄道集電用すり板材料に比べ、低摩擦、50 倍以上の極めて優れた耐摩耗性を示すことを明らかにしている。さらに、セラミックスの摩耗形態を表すウェアマップに基づいて、RB セラミックス粒子の配合による耐摩耗性向上発現メカニズムを明らかにするとともに、同複合材料の摩耗予測式を提案し、その妥当性を明らかにしている。このように、摩擦・摩耗低減剤として RB セラミックス粒子を配合することにより、鉄道集電用すり板材料の飛躍的な寿

命向上が期待されるとともに、さらなる耐摩耗性向上のための材料設計指針が得られている。

以上のような経緯から、RB セラミックスのような硬質多孔性の炭素粒子を「摩擦・摩耗低減剤」として充填することにより、これまでにない独創的かつ先進的な低摩擦・超耐摩耗樹脂系複合材料の開発を可能にする、と着想するに至った。

### 2. 研究の目的

本研究の目的は、「摩擦・摩耗低減剤」として RB セラミックス粒子を熱可塑性樹脂であるポリアミドに充填することにより、低摩擦と優れた耐摩耗性を同時に付与した新しい樹脂系複合材料を開発すること、また、同複合材料の幅広いすべり速度と垂直荷重の条件における摩擦・摩耗特性を明らかにすることで、すべり軸受、案内面などのしゅう動部材への応用の可能性を検討することである。

### 3. 研究の方法

#### (1) 試験片の作製

熱可塑性樹脂であるポリアミド 66 (PA66) 樹脂に、平均粒径 4.9  $\mu\text{m}$  の RB セラミックス粒子を 5 vol%、20 vol% 充填し、ペレットを作製した。さらに作製したペレットを用いて射出成形することにより、RB セラミックス粒子充填 PA66 樹脂 (PA66/RBC 複合材料) 製のディスク試験片を作製した。図 1 に、PA66/RBC 複合材料の製造工程を示す。また、比較材料として、PA66 樹脂単体、平均粒径 5.0  $\mu\text{m}$  のガラスビーズを 5 vol%、20 vol% 充填した複合材料 (PA66/GB 複合材料)、平均繊維径 7.0  $\mu\text{m}$  及び平均繊維長 40  $\mu\text{m}$  の炭素繊維を 20 vol% 充填した複合材料 (PA66/CF 複合材料)、平均繊維径 6.0  $\mu\text{m}$  及び平均繊維長 50  $\mu\text{m}$  のガラス繊維を 20 vol% 充填した複合材料 (PA66/GF 複合材料) を、同様の製造工程にて作製した。

これらの試験片について、弾性率、引張強度、ビッカース硬さ、ロックウェル硬さ等の機械的・熱的性質を明らかにした。

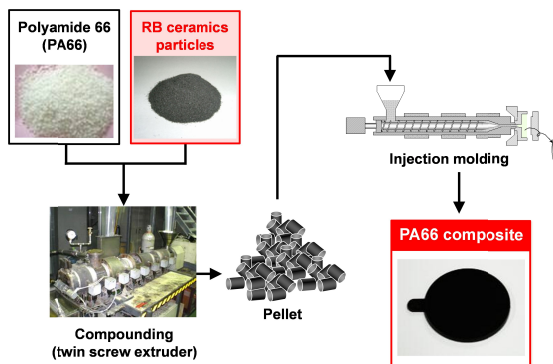


図 1 RB セラミックス粒子充填 PA66 樹脂の製造工程

## (2) 摩擦・摩耗試験方法

低すべり速度条件下(0.01 m/s)では直線往復型ボールオンディスク摩擦試験機を用いて、高すべり速度条件下(0.1 m/s, 1.0 m/s)では回転型ボールオンディスク摩擦試験を用いた。ディスク試験片として、前述の複合材料を用い、相手ボール試験片として、半径1 mmの軸受鋼(SUJ2)研磨球を用いた。すべり速度0.01 m/sでは、垂直荷重1.96, 9.8, 19.6, 29.4, 39.2 N, すべり速度0.1 m/s及び1.0 m/sでは、1.96, 9.8 Nのもとで実験は行われた。いずれの摩擦条件においても、大気中無潤滑下とし、摩擦繰返し数を $1 \times 10^4$ 回とした。

## 4. 研究成果

### (1) 硬質粒子を充填した熱可塑性樹脂の機械的・熱的性質

表1に、硬質充填剤を配合したPA66複合材料の機械的性質を示す。同表より、弾性率、ピッカース硬さ、ロックウェル硬さは、充填剤の配合により増加することが分かる。また、引張強度は、ガラスビーズの場合、未充填のPA66とほぼ同等であるものの、それ以外の充填剤においては配合により増加する。特に弾性率と引張強度においては、粒子径充填剤に比べ繊維系充填剤の向上効果が大いことが分かる。圧縮降伏応力においては、PA66/RBC 20 vol%複合材料が最も大きい値を示す。

表1 硬質充填剤を配合したPA66複合材料の機械的性質

Disk specimen	Pure PA66	PA66/RBC	PA66/GB	PA66/CF	PA66/GF
Volume fraction of filler $\alpha$ , vol%	—	5, 20	5, 20	20	20
Elastic modulus $E$ , GPa	2.66	3.28, 4.02	3.44, 4.47	5.45	5.84
Tensile strength $\sigma_T$ , MPa	74.3	81.9, 84.6	79.3, 73.9	99.8	91.9
Vickers hardness $HV$ , GPa	0.146	0.156, 0.185	0.142, 0.171	0.191	0.187
Superficial Rockwell hardness $HR15X$	77.2	84.0, 86.3	78.4, 80.4	82.6	82.7
Compressive yield stress $\sigma_Y$ , MPa	101	98.2, 115	83.1, 96.4	103	97.2
Surface roughness $R_a$ , $\mu\text{m}$	0.10	0.10, 0.10	0.10, 0.10	0.10	0.10

### (2) 摩擦・摩耗特性

図2に、垂直荷重9.8 N, すべり速度0.1 m/sにおける摩擦繰返し数と摩擦係数の関係を示す。いずれの材料においても、摩擦初期に増加し、その後ほぼ一定の値を示す。摩擦繰返し数 $1 \times 10^4$ 回において、PA66/RBC複合材料の摩擦係数が最も低いことが分かる。また、炭素繊維もしくはガラス繊維を充填した複合材料では、未充填のPA66に比べ摩擦係数の値が高いことが分かる。

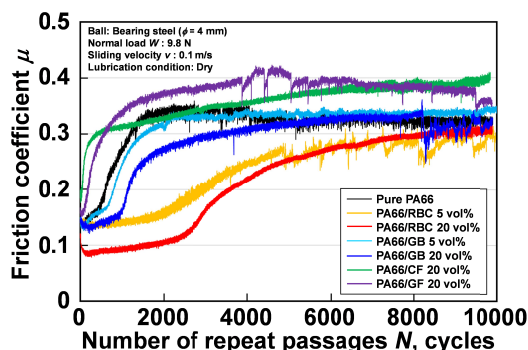


図2 垂直荷重9.8 N, すべり速度0.1 m/sにおける摩擦繰返し数と摩擦係数の関係

図3に、 $P_{\max}v$ 値と摩擦係数の関係を示す。ここで、 $P_{\max}$ はヘルツ最大接触圧力[MPa]、 $v$ はすべり速度[m/s]である。 $P_{\max}v$ 値は、ヘルツ最大接触圧力と、すべり速度の積で求められ、一般に負荷の過酷さを表すパラメータである。一般に、軸受の焼付きや歯車のスコアリングは、 $P_{\max}v$ 値が限界値に達した際に発生することから、軸受や歯車の安全限界を判定するための指標として用いられる。同図より、未充填のPA66, PA66/RBC複合材料, PA66/GB複合材料の摩擦係数は、 $P_{\max}v$ 値の増加に伴い緩やかに減少する傾向にあることが分かる。一方、PA66/CF複合材料, PA66/GF複合材料の摩擦係数は、 $P_{\max}v$ 値によらず、0.4付近の値を示すことが分かる。また、 $P_{\max}v$ 値が10 MPa・m/s未満の場合、材料によらず摩擦係数は0.3~0.5付近の値を示し、材料による傾向の違いは見られない。 $P_{\max}v$ 値が10 MPa・m/s以上の場合、PA66/RBC 20 vol%複合材料の摩擦係数は、未充填のPA66樹脂や他の複合材料と比べ0.1~0.2程度低い値を示す。このことから、 $P_{\max}v$ 値が10 MPa・m/s以上の条件における摩擦係数の低減効果は、PA66/RBC 20 vol%複合材料が最も大きいことが分かる。

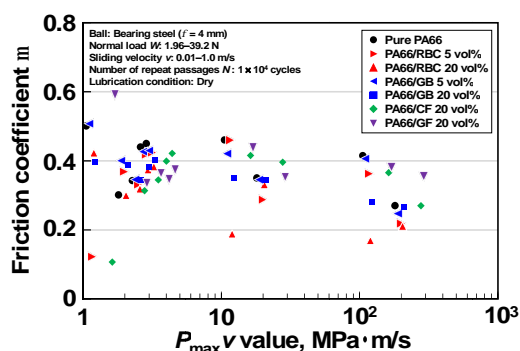


図3  $P_{\max}v$ 値と摩擦係数の関係

図4に、 $P_{\max}v$ 値とディスク試験片の比摩耗量の関係を示す。同図より、 $P_{\max}v$ 値が10 MPa・m/s未満の場合、いずれの材料においても、 $P_{\max}v$ 値の増加に伴い比摩耗量は急激に増加し、 $P_{\max}v$ 値が10 MPa・m/s以上の場合、いずれの材料においても、比摩耗量は



$P_{max}v$  値によらず、ほぼ一定の値を示すことが分かる。また、 $P_{max}v$  値によらず、充填剤の充填により耐摩耗性が向上し、充填率の増加に伴いさらに耐摩耗性が向上することが分かる。

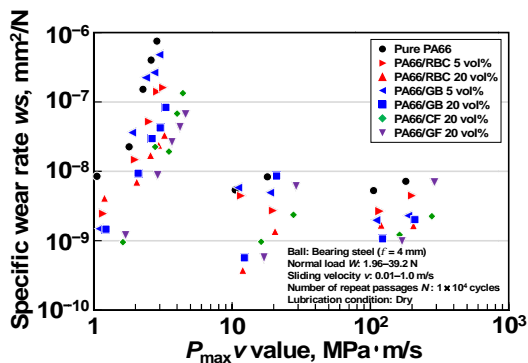


図4  $P_{max}v$  値と比摩耗量の関係

図5に、すべり速度 0.1 m/s、荷重 1.96 N における、未充填の PA66 と各種複合材料に対する、摩擦試験後のボール試験片の摩擦面の光学顕微鏡像と断面曲線を示す。同図より、材料によらず、摩擦試験後のボール試験片の摩耗痕には、線状痕が見られることが分かる。未充填の PA66 樹脂に対するボール試験片では、線状痕の規模は小規模である。また、PA66/GB 20 vol% 複合材料、PA66/CF 20 vol% 複合材料、PA66/GF 20 vol% 複合材料に対するボール試験片では、未充填の PA66 に比べ、大規模な線状痕が見られる。一方、PA66/RBC 20 vol% 複合材料に対するボール試験片では、未充填の PA66 樹脂と同等の小規模な線状痕が見られる。また、断面曲線より、ボール試験片は、未充填の PA66、PA66/RBC 20 vol% 複合材料との摩擦試験では摩耗していないことが分かる。一方、

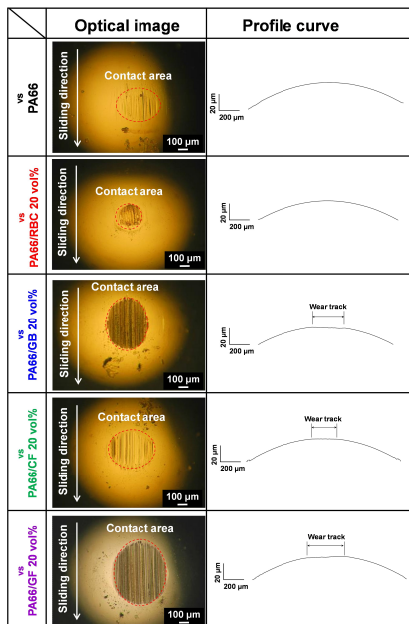


図5 すべり速度 0.1 m/s、荷重 1.96 N における、ボール試験片の摩擦面の光学顕微鏡像と断面曲線

PA66/GB 20 vol% 複合材料、PA66/CF 20 vol% 複合材料、PA66/GF 20 vol% 複合材料との摩擦試験において、ボール試験片は摩耗していることが分かる。このことから、光学顕微鏡像において、未充填の PA66 と PA66/RBC 20 vol% 複合材料に対するボール試験片摩擦面で見られた線状痕は、摩擦面において部分的に PA66 樹脂の極めて薄い移着膜が形成されたことによるものと考えられる。

充填剤の充填による相手攻撃性の増加要因として、充填剤の硬さや弾性率が挙げられる。充填剤の硬さが相手材料より大きい場合、摩擦中に相手材料が充填剤と接触することで、相手材料表面にアブレシブ摩耗が生じる。また、充填剤の弾性率が高い場合、垂直荷重に対する充填剤の変形量が小さく、接触圧力が充填剤との接触部で局所的に増加し、相手材料への攻撃性が増加するものと考えられる。図6に、各充填剤の弾性率と、ボール試験片の比摩耗量の関係を示す。同図より、充填剤の弾性率の増加に伴い、ボール試験片の比摩耗量の値は増加することが分かる。また、RB セラミックス粒子は、他の充填剤と比べて低い弾性率の値を有しており、このため、相手攻撃性が極めて低いと考えられる。軸受や歯車等のしゅう動部分において、相手攻撃性が高い場合、摩耗粉の発生により性能安定性や寿命等に劣ることとなる。よって、複合材料のしゅう動材料への応用に際して、摩擦係数の低減や比摩耗量の低減に加え、低弾性率を有する充填剤の充填が好ましいといえる。

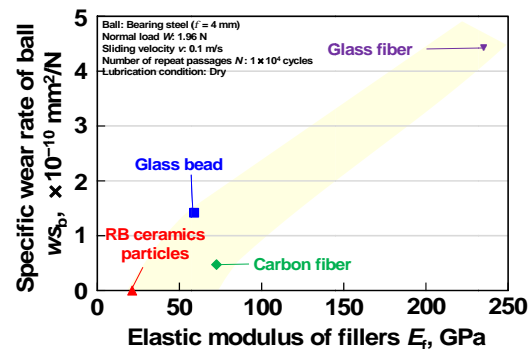
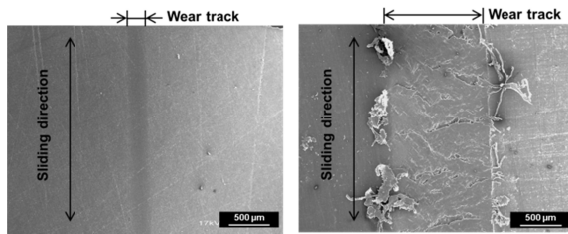


図6 各充填剤の弾性率と、ボール試験片の比摩耗量の関係

低すべり速度、高荷重条件下においては、同じ材料の中でも比摩耗量に数十倍の違いが生じた。この条件における代表例として、図7に、すべり速度 0.01 m/s における PA66/RBC 20 vol% 複合材料の摩擦面の SEM 像を示す。同図より、低荷重では摩耗痕が滑らかであるのに対し、高荷重においては、摩耗痕全域にわたり塑性流動が見られる。このような摩耗痕全域にわたるような塑性流動が発生すると比摩耗量が大きくなると思われる。



(a) 1.96 N (b) 39.2 N

図7 すべり速度 0.01 m/s における、PA66/RBC 20 vol% 複合材料の摩耗面の SEM 像

一般に、材料のせん断降伏強度にせん断応力が達すると、材料が降伏することが知られている。摩耗面全域にわたり塑性流動が発生するという事は、接触面全域にわたりせん断降伏応力にせん断応力が達し降伏している状態であると推察される。そこで、接触面における最小のせん断応力を算出し、材料のせん断降伏強度との比を用いて、すべり摩擦における接触の過酷さを表す無次元数  $S_{sc}$  を提案した。図8は、無次元数  $S_{sc}$  と比摩耗量の関係を表したものである。同図より、無次元パラメータ  $S_{sc}$  の増加に伴い、比摩耗量の値は指数関数的に増加することが分かる。無次元パラメータ  $S_{sc}$  が 1.0 未満の場合、無次元パラメータ  $S_{sc}$  の増加に伴い、摩擦面は弾性接触から部分的に塑性変形の生じる弾塑性接触へ遷移し、さらに無次元パラメータ  $S_{sc}$  が増加するに従い、摩擦面内での塑性変形域が拡大するものと考えられる。特に、PA66/RBC 複合材料は、充填率によらず PA66 樹脂より低い無次元パラメータ  $S_{sc}$  の値を示しており、RB セラミックス粒子の充填により、PA66 樹脂に対し無次元パラメータ  $S_{sc}$  の増加抑制効果、すなわち、塑性流動の発生抑制効果を付与することができるといえる。

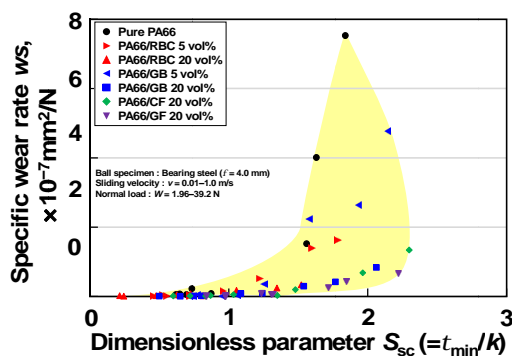


図8 無次元数  $S_{sc}$  と比摩耗量の関係

これらの結果をまとめると、PA66 樹脂に硬質粒子、及び、硬質繊維を充填することにより、特に低すべり速度、高荷重条件において、PA66 樹脂に耐摩耗性を付与することができることが分かった。さらに、充填率の増加によりさらなる低摩擦化、耐摩耗性の向上が可能であると考えられ、過酷な摩擦条件でのしゅう動材料への応用が期待される。さらに、RB セラミックス粒子は、低弾性率を有するこ

とから極めて相手材料への攻撃性が低く、摩耗粉の発生により機能安定性や寿命が損なわれる軸受等の高負荷条件におけるしゅう動材料への応用が期待される。

## 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1件)

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, Vol.10, 2015, pp.213-219. (DOI 10.247/troll.10.213)

〔学会発表〕(計5件)

貴志萌子, 福田芽衣, 柴田圭, 山口健, 堀切川一男, 粒子系または繊維系充填剤を充填した熱可塑性樹脂の摩耗に関する研究, 日本トライボロジー学会トライボロジー会議 2014 秋 盛岡, 2014 年 11 月 05 日 ~ 11 月 07 日, アイーナいわて県民情報交流センター (岩手県・盛岡市).

K. Shibata, T. Yamaguchi, M. Kishi, K. Hokkirigawa, The Role of Frictional Work in Tribological Behavior of Polyamide 66 Composites Containing Hard Particles, The 16th Nordic Symposium on Tribology, 2014 年 06 月 11 日 ~ 06 月 13 日, Aarhus (Denmark).

柴田圭, 貴志萌子, 山口健, 堀切川一男, 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 23 日 ~ 2013 年 10 月 25 日, アクロス福岡 (福岡県・福岡市).

Kei Shibata, Takeshi Yamaguchi, Ryota Ifuku, Moeko Kishi and Kazuo Hokkirigawa, Friction and Wear Behavior of Polyamide 66 Composites Filled with Rice Bran Ceramics Slid against Stainless Steel, World Tribology Congress 2013, 2013 年 09 月 08 日 ~ 13 日, Torino (Italy).

柴田圭, 山口健, 伊福遼太, 貴志萌子, 堀切川一男, 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 05 月 20 日 ~ 2013 年 05 月 22 日, 国立オリンピック記念青少年総合センター (東京都).

## 6. 研究組織

(1) 研究代表者

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