

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 5 月 29 日現在

機関番号：52501

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2012～2014

課題番号：24560173

研究課題名(和文) 籾殻由来の炭素粉体で強化された射出成形プラスチックねじ歯車の開発

研究課題名(英文) Development of injection molded plastic crossed herical gears reinforced with carbon powder made from rice hull

研究代表者

板垣 貴喜 (ITAGAKI, Takayoshi)

木更津工業高等専門学校・その他部局等・准教授

研究者番号：00290718

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 4,200,000円

研究成果の概要(和文)： 廃棄される籾殻の有効利用のため、籾殻由来の炭素粉体(RHSC粉体)をポリアセタール(POM)の添加剤として用いた複合樹脂材料で射出成形されたプラスチックねじ歯車を開発した。

POMに添加したRHSC粉体のメディアン径は5および60ミクロンで、添加量を3, 5, 7wt.%としたはずば歯車を用意し、ねじ歯車として寿命に至るまで連続運転した。運転時間の経過に伴う歯面温度の変化、寿命および損傷形態を調べ、RHSC粉体の及ぼす影響を明らかにした。

その結果、RHSC粉体のメディアン径は小さく、添加量が多いほど、長寿命・低発熱となることが明らかとなった。その効果は高回転数の運転条件でより顕著であった。

研究成果の概要(英文)： Recently, natural materials are utilized to focus on the ecological recycling. The rice hull is a residual product of rice and it contains natural silica about 20wt.%. The Rice-Hull-Silica-Carbon (RHSC) is a carbonized rice hull, and is a high strength porous carbon material. We try to used the RHSC as a reinforcing material in plastic crossed herical gears.

In this study, some median grain diameters and some dopant ratios of RHSC-powder were prepared for the strengthen-injection-molded plastic herical gear. Then, the fatigue test of crossed herical gears was carried out measuring the bulk temperature. Especially, the effects of RHSC powder on the friction properties were discussed to improve the fatigue strength of the injection-molded plastic crossed herical gears.

研究分野：設計工学・機械要素・トライボロジー

キーワード：歯面温度 摩耗 摩擦 籾殻 炭素材料 複合樹脂材料 ねじ歯車 プラスチック歯車

1. 研究開始当初の背景

1.1 初穀の有効利用

我が国では、米が年間約 1,000 万トン収穫され、脱穀の際に初穀が約 260 万トン発生している。このうち約 170 万トンは土壌改良材などとして利用されているが、残りの約 1/3 の 90 万トンが農業廃棄物として廃棄処分されている。初穀は天然のシリカを約 20wt% 含むため、工業資源と捉え、その有効利用を目的として初穀を焼成・粉碎することで得られる初穀焼成粉体と呼ばれる多孔質炭素粉体 (Rice-Hull Silica Carbon Powder, 以下 RHSC 粉体) の開発が取り組まれている。RHSC 粉体は多孔質構造を有する炭素材料であり、密度が高く高強度であるという特徴を有する。また、耐水性に優れ、動摩擦係数も約 0.08 と小さく、高耐水性の摩擦摺動部材としての利用が検討されている。

1.2 プラスチック歯車の需要

近年、グローバル化による競争の激化のため国内製造業は製品の低価格化に必至であり、コスト削減を目的としてプラスチック歯車の需要が増加している。さらに、従来から使用されている家電製品や OA 機器、自動車以外の産業 (精密機器、一般産業機械、医療・健康機器など) での利用も増加してきており、プラスチック歯車の利用の多様化が進んでいる。国内で使用されるプラスチック歯車はその約 80% がポリアセタール (以下、POM) を使用しており、価格や性能の面で優れているのがその理由である。今後は需要の増加および製品の多様化に伴い、低価格・高付加価値のプラスチック歯車の開発が期待されており、ますます精度や伝達トルク、耐熱性の向上および低騒音化などの要望が高いレベルで増加していくと考えられる。

2. 研究の目的

自動車の電動部品や介護機器などにはレイアウトの自由度を高めるために食い違い軸歯車 (金属ウォーム & プラスチックヘリカルギヤ) が広く使われている。しかし、軸角が 90° であるための設計自由度の制約が問題となっている。そこで、軸角を自由に選択できる「ねじ歯車」が注目されている。この「ねじ歯車」は摩擦による摩擦・発熱が大きく、これらが歯車強度・寿命や騒音に大きく影響を及ぼすことが知られている。そこで、本研究では摩擦および騒音の低下を目的としてプラスチックのフィラー (添加物) に RHSC 粉体を用いたプラスチック複合材料で射出成形された新しいタイプのプラスチックねじ歯車を開発する。

3. 研究の方法

3.1 試験歯車

試験歯車の諸元を表 1 に示す。試験歯車は全て射出成形により製作されたものを用いた。試験歯車の材料は、標準グレードのポリ

アセタールコポリマ (POM) と、POM にメデイアン径 5.60 μ m の RHSC 粉体をそれぞれ 3, 5, 7wt.% 添加した複合樹脂材料 (R5, R60) を用意した。

3.2 試験装置

本研究では、歯面の摩耗が進行しても負荷を保ち、さらに構造が単純かつ操作も簡単となるという利点から、動力吸収方式の試験装置を用いた。図 1 に試験装置および測定機器の構成の模式図を示す。

本研究における試験装置は、軸角と軸間距離を任意に設定できる機構を有し、実験条件として負荷トルク、回転数を変化させることが可能である。歯面温度の測定には放射温度計、歯面温度分布の撮影にはサーモグラフィを用いた。

3.3 試験方法

試験歯車の材質の組合せは駆動歯車、被動歯車ともに POM 同士の組合せ (以下 P-P と記す。), R5 同士の組合せ (以下 R5-R5 と記す。), R60 同士の組合せ (以下 R60-R60 と記す。) の 3 種類とした。運転は無潤滑で行い、回転数は 500 および 1000min⁻¹ の 2 水準、負荷トルクは 0.2 ~ 0.8Nm の間で任意に設定した。バックラッシュは、プラスチックの熱膨張を考慮し 0.2mm と比較的大きな値とし、軸間距離の調整により与えた。

試験中の雰囲気温度は 23 \pm 2 に設定し、歯面温度の測定位置は、被動歯車で運転開始直後において最高温度を示す位置とした。運転中は、雰囲気温度、歯面温度を記録し、運転の経過に伴う歯面温度の変化、寿命および損傷形態を調べた。

表 1 歯車諸元

		Helical Gear
Module	m [mm]	1.0
Pressure angle	α_c [deg.]	20
Number of teeth	z	48
Addendum modification coefficient	x	0
Face width	b [mm]	8.0
Helix angle	β [deg.]	20

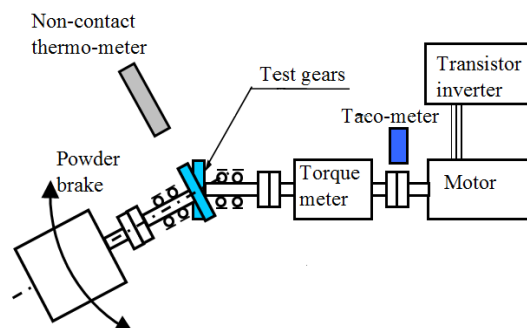


図 1 試験装置および測定機器

なお、本研究では、運転開始から歯車が破損し動力の伝達ができない状態に至るまでの積算回転数を寿命と定義した。

4. 研究成果

RHSC 粉体の添加量の影響については、添加量が多いほど、長寿命、低発熱となったため、ここでは最も多く添加した 7wt.% の場合の結果を示した。

4.1 損傷形態

光学顕微鏡で撮影した寿命後の歯車の例を図 2 に示す。寿命に至った歯車は POM, R60 とともに接触していた歯の左側面（かみ合い歯面）が摩耗し、運転時間の経過とともに歯丈が減少し、やがて動力伝達ができなくなる。歯車に割れ、き裂は見られず、本研究における試験歯車の主な損傷形態は駆動歯車、被動歯車ともに過大な摩耗であった。

光学顕微鏡で撮影した運転中に発生した摩耗粉の例を図 3 に示す。POM はフィルム状のものが集まったような大きな摩耗粉が形成された。一方、R60 は細長い針状の摩耗粉が多く形成された。R5 では R60 よりさらに細かい針状の摩耗粉が形成された。摩耗粉の大きさは RHSC 粉体の粒径に応じて異なる。このことから、RHSC 粉体を核として摩耗粉が形成されていることが考えられる。



(a) POM



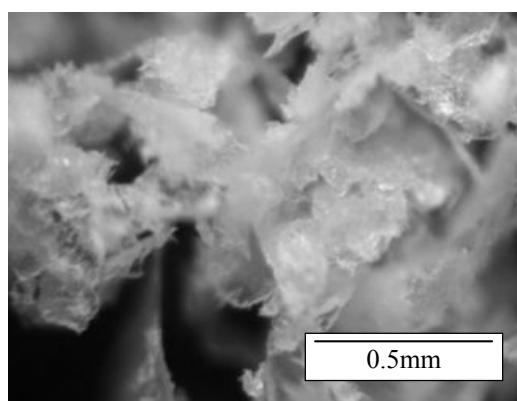
(b) R60 - 7wt.%

図 2 損傷形態（被動歯車，倍率 6.7 倍， 500min^{-1} ， 0.6Nm ）

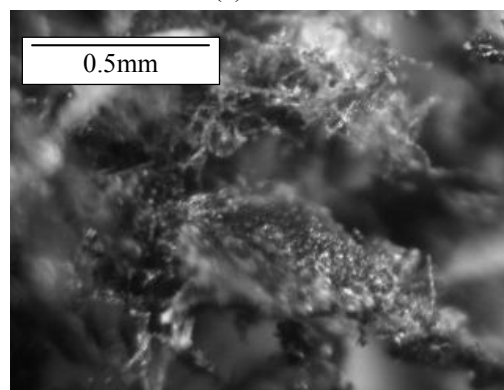
4.2 歯面温度と温度分布

運転の経過に伴う歯面温度を図 4 に示す。図中の(a)(b)(c)の各点は図 5 のサーモグラフィによる温度分布の撮影時期を示す。歯面温度は試験開始直後に急上昇し、平衡温度ではほぼ一定となった後、不安定となり損傷し、寿命に至った。

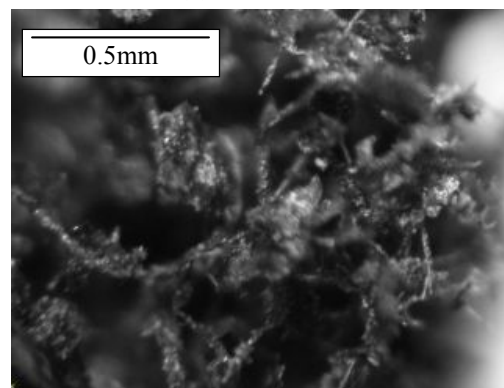
運転中の被動歯車の温度分布を図 5 に示す。図中の は歯車表面の最高温度の箇所を示す。図 5(a)の運転開始直後では、温度は歯幅の右側が最高温度を示しており、この部分で歯車がかみ合っている。図 5(b)では、実験の経過とともに歯面の摩耗により、十分に歯面のなじみが進行して、歯幅全体で接触している。このように、プラスチックねじ歯車は、運転初期には局所的なかみ合いであるが、



(a) POM



(b) R5 - 7wt.%



(c) R60 - 7wt.%

図 3 摩耗粉(倍率 45 倍， 500min^{-1} ， 0.4Nm)

繰返し数の増加に伴い、歯面全体が接触するようになる。そして、図 5(c)の破損前では、歯車の損傷が激しく、歯車の温度分布は円周方向にまばらな状態となり損傷に至った。プラスチックは金属に比べ熱伝導率が低く、無潤滑ではグリース潤滑に比べ摩擦係数が大きくなり、接触部分に蓄熱しやすい。また、プラスチック歯車から軸への熱伝導も小さいため、接触で高温となっている部分は局所的に強度が低く、摩耗が生じやすいと考えられる。

4.3 負荷トルクと歯面温度上昇量の関係

歯車の寿命に影響を及ぼす運転中の歯車温度を評価するため、運転中の歯面温度から雰囲気温度を差し引いた歯面温度上昇量を求めて、その歯面温度上昇量の運転中の平均値を求め、負荷トルクとの関係を調べた。その結果を図 6 に示す。凡例の括弧内に回転速度を表記した。回転数 500min⁻¹ では材質による歯面温度上昇量の変化はあまり見られない。一方、回転数 1000min⁻¹ では RHSC 粉体を添加することで歯面温度上昇量が、約 30% 低下している。歯面温度上昇量の低下は、RHSC 粉体の摺動性が良いためであると考えられ、特に高回転数で摺動性の効果が現れやすいことが確認できた。

4.4 負荷トルクと寿命の関係

疲労寿命を評価するため、負荷トルクと寿命の関係を図 7 に示す。凡例の括弧内に回転速度を表記した。同一の負荷トルクで比較すると、R5-R5、R60-R60 は P-P より寿命が向上している。RHSC 粉体を添加することで耐摩耗性が向上し、寿命が向上したと考えられる。回転数の影響をみると、P-P (1000) の寿命は、P-P (500) と比較し寿命が短い。回転数を考慮すると、各材質での一律な寿命の評価ができない。そのため、寿命の評価として負荷トルクを用いることは適切ではないことが分かる。これは、プラスチックが温度依存性の大きい機械的性質を有しており、プラ

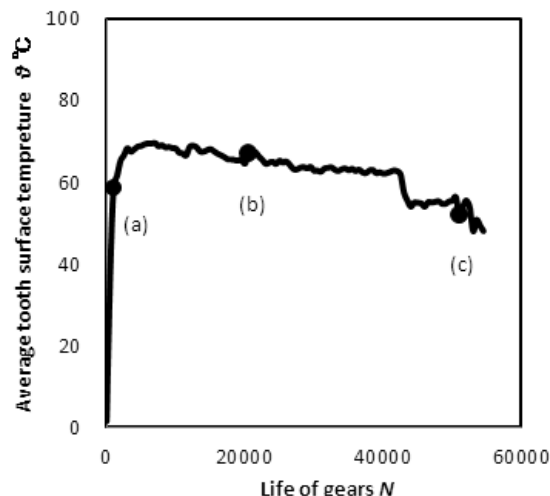
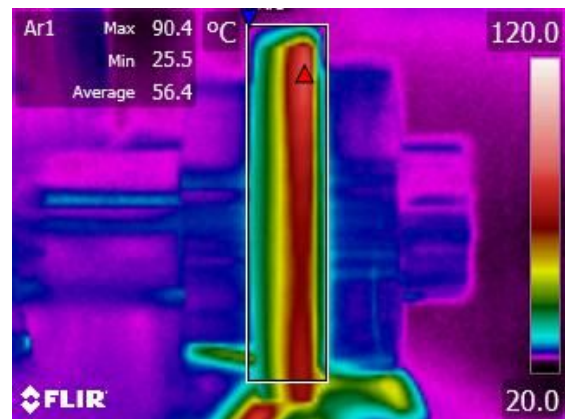


図 4 歯面温度 (POM, 500min⁻¹, 0.8Nm)

スチック歯車は回転数の違いによって摩擦発熱が異なるため、負荷の大きさのみでは寿命の整理が難しい。

4.5 歯面温度と寿命の関係

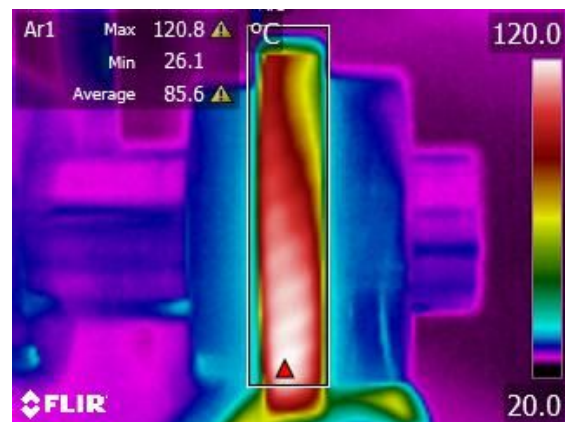
上の 5.4 節で述べたように、運転時の疲労繰返し中に歯車本体に負荷される仕事量を反映した運転中の歯面温度の平均値 (平均歯面温度) を疲労寿命の評価指標として用い、これと疲労寿命の関係を調べた。平均歯面温度と寿命の関係を図 8 に示す。RHSC 粉体の粒径の違いによる寿命の変化は明確には認



(a) 運転開始直後



(b) 平衡状態



(c) 破損前

図 5 歯面温度分布 (POM, 500min⁻¹, 0.8Nm)

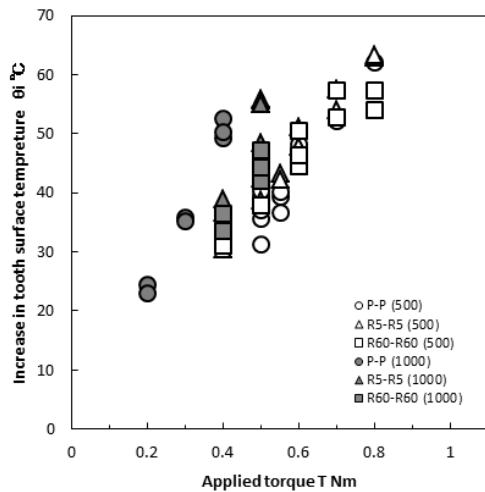


図 6 負荷トルクと歯面温度上昇量の関係

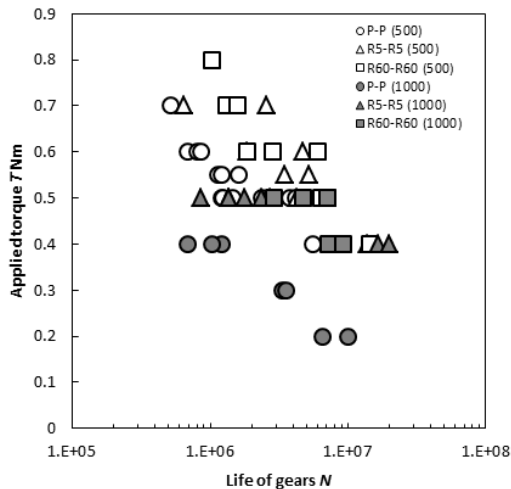


図 7 負荷トルクと寿命の関係

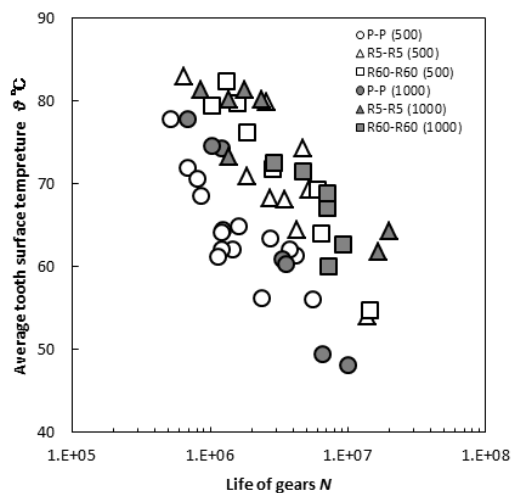


図 8 歯面温度と寿命の関係

められないが、同一の平均歯面温度で比較すると R5-R5, R60-R60 は P-P より寿命が向上している。RHSC 粉体を添加することで、耐摩耗性が向上し、寿命が向上したと考えられる。また、摺動性の向上により、母材である POM の温度上昇を抑え、樹脂母材の強度低下を抑えることができたと考えられる。

なお、寿命における回転数の影響を見ると、それぞれ各材質でバラツキは小さい。このため、歯面温度での寿命評価は、回転数の影響が少なく、寿命推定に適していると考えられる。

4.6 結言

POM に RHSC 粉体を添加したプラスチックねじ歯車を作製し、運転試験を行い運転時間の経過に伴う歯面温度の変化、寿命および損傷形態を調べた。その結果、以下の知見が得られた。

- (1) POM に RHSC 粉体を添加することで、摺動性が向上し歯面温度上昇量が抑えられ寿命の向上が図れる。
また、その効果は RHSC 粉体の粒径が小さく、高添加量のものほど高くなり、さらに高回転数の運転条件でより顕著であった。
- (2) プラスチックねじ歯車の場合、運転中の平均歯面温度を疲労寿命の評価指標とすることで、回転数の影響を排除でき寿命推定できることが期待できる。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 2 件)

板垣貴喜, 高橋秀雄, 飯塚博, 初穀由来の炭素粉体を添加した射出成形プラスチック平歯車(運転中の騒音および疲労寿命に及ぼす炭素粉体添加物の影響), 設計工学, 査読有, 第 49 巻, 第 5 号, 2014, pp.265-272.

板垣貴喜, 高橋秀雄, 飯塚博, 初穀由来の炭素粉体を添加した射出成形プラスチック平歯車の強度特性, 設計工学, 査読有, 設計工学, 第 48 巻, 第 11 号, 2013, pp.523-530.

〔学会発表〕(計 11 件)

Takayoshi ITAGAKI, Hideo TAKAHASHI, Hiroshi IIZUKA, Mikio TAKAHASHI, Ryozo NEMOTO, Injection Molded Plastic Crossed Helical Gears filled with Carbon Powder made from Rice Hull, International Conference of High Performance Plastic Gears 2015 (Munich, GERMANY), 2015 年 10 月発表決定.

Takayoshi ITAGAKI, Hideo TAKAHASHI, Hiroshi IIZUKA, Mikio TAKAHASHI, Ryozo NEMOTO, Evaluating Fatigue Life of Injection Molded Plastic Gear added with Carbon Particle made from Rice Hull, The 3rd International Conference on Design

Engineering and Science 2014 (Pilsen, CZECH), Proceedings of ICDES 2014, Vol.3, pp.44-45.

Mikio Takahashi, Takayoshi Itagaki, Hideo Takahashi, Takao Koide, Lifetime and meshing teeth temperature of plastic crossed helical gear: case of grease lubrication, International Gear Conference 2014 (Lyon,FRANCE), Proceedings of IGC2014, pp.148-157.

Takayoshi ITAGAKI, Hideo TAKAHASHI, Hiroshi IIZUKA, Research and Development of Injection Molded Plastic Gear filled with Carbon Powder made from Rice Hull, International Conference on Gears 2013 (Munich, GERMANY), VDI-Berichte 2199.2, pp.1165-1175.

板垣貴喜, 高橋秀雄, 飯塚博, 高橋美喜男, 粉殻由来の炭素粉体を添加した射出成形プラスチック歯車の寿命と騒音評価, 第24回日本MRS年次大会2014, Abstract,C-P11-028.

板垣貴喜, 高橋秀雄, 飯塚博, 高橋美喜男, 粉殻由来の炭素粉体を添加した射出成形プラスチック歯車(はずば歯車対とねじ歯車における炭素粉体の効果), 2014年度精密工学会秋季大会学術講演会講演論文集, pp.497-498.

平野雅弥, 高橋秀雄, 板垣貴喜, 高橋美喜男, 飯塚博, 粉殻焼成粉体を配合したプラスチックねじ歯車の寿命に及ぼす歯面温度の影響, 日本機械学会関東支部第20期総会講演会論文集, 2014, DVD-No.20406.

北見友朗, 高橋秀雄, 高橋美喜男, 板垣貴喜, 飯塚博, 粉殻焼成粉体を配合した射出成形プラスチック歯車の寿命に及ぼす負荷トルクの影響, 日本機械学会関東支部第19期総会講演会論文集, 2013, No.20310.

高柳佑平, 板垣貴喜, 高橋秀雄, 飯塚博, 粉殻焼成粉体を配合した射出成形プラスチック歯車の摩耗と騒音, 日本機械学会関東支部関東学生会第52回学生員卒業研究発表講演会, 2013, 講演前刷集, No.1306.

板垣貴喜, 高橋秀雄, 飯塚博, 高橋美喜男, 高柳佑平, 北見友朗, 粉殻焼成粉体を配合した射出成形プラスチック歯車の疲労と騒音, 日本機械学会2012年度年次大会講演論文集, CD-ROM-S111022.

板垣貴喜, 高橋秀雄, 飯塚博, 粉殻焼成粉体を配合した射出成形プラスチック歯車の疲労寿命, 日本設計工学会研究発表講演会講演論文集, 2012, pp.45-48.

6. 研究組織

(1) 研究代表者

板垣貴喜 (ITAGAKI, Takayoshi)

木更津工業高等専門学校・機械工学科・准教授

研究者番号：00290718

(2) 研究分担者

高橋秀雄 (TAKAHASHI, Hideo)

木更津工業高等専門学校・機械工学科・教授

研究者番号：50179511

(3) 連携研究者

飯塚博 (IIZUKA, Hiroshi)

山形大学・理工学研究科・教授

研究者番号：90142215

(4) 研究協力者

高橋武志 (TAKAHASHI Takeshi)

三和油脂株式会社・東根事業所