

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 13 日現在

機関番号：32613

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2011～2013

課題番号：23560134

研究課題名(和文) 局所パルス加熱法による磁性体の3次元形状・機能の制御に関する研究

研究課題名(英文) Study on control of the three-dimensional shape and the function of the magnet by a local pulse energy input machining

研究代表者

武澤 英樹 (TAKEZAWA, Hideki)

工学院大学・公私立大学の部局等・教授

研究者番号：40334148

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 4,100,000円、(間接経費) 1,230,000円

研究成果の概要(和文)：機能性材料の一つである永久磁石に対して、非接触熱エネルギー加工である放電加工やレーザー照射を用いて、磁石の「形状」ならびに「磁束密度」の制御を試みた。

放電突き当て加工により、放電条件で決まる磁石内部温度が、加工後の表面磁束密度と関係することが明らかとなり、各種手法で磁石内部温度を制御できれば表面磁束密度の制御が可能であることが予測された。磁石の一部に底付き穴加工を施すと、加工対向面の未加工面においても磁束密度変化が生じ、磁気パターンニングが可能であった。この場合も、磁石内部温度が影響すること、加工磁石自身からの磁界中で形状変化が生じることが重要であることが明らかとなった。

研究成果の概要(英文)：It is difficult to machine permanent magnets by traditional machining such as turning, milling and grinding, because of magnetic force. However, EDM has been used for shape machining of magnetic materials.

In this study, to clarify the relationship between magnetic flux density and temperature distributions in depth direction of permanent magnet by EDM. The magnetic flux density of a machined neodymium magnet was measured. The results showed that the average temperature inside of the magnet is determined by the input energy, depending on the discharge conditions. A decrease of surface magnetic flux density after EDM is affected by the magnitude of the area and the amount of decrease is due to the increase of the internal temperature of the magnet. Therefore, it isn't determined by the magnitude of the simply input energy.

研究分野：工学

科研費の分科・細目：生産工学・加工学

キーワード：放電加工 永久磁石 熱エネルギー加工 磁石内部温度 表面磁束密度

### 1. 研究開始当初の背景

近年の産業機器の発達により、各種モータや発電機、情報機器の生産が増大しており、それにともない、これらの重要な構成部品である永久磁石の利用量も増えている。永久磁石は、一般的に粉末状の素材を金型で圧縮成型した後に焼結して、最終工程で着磁を行う。着磁後の加工は、硬脆材料のための加工難に加え、磁力の影響による加工粉や工具の引きつけが発生するため、基本的には行われていない。ところが、永久磁石は導電性材料であるため、非接触熱エネルギー加工である放電加工は可能である。このとき、工具電極は銅などの非磁性材料であるため、磁力の影響も無いと考えられる。実際に角形磁石の一面中央に、4カ所の底付き穴加工が実際に可能であることが確かめられた。

加工後の磁石は、磁石の形状が変化するため表面磁束密度も影響を受けると考えられ、加工面反対面である未加工面全面の磁束密度分布をテスラメータで計測すると、中央部が転極したパターンニングが発現された(図1参照)。磁石材料は、キュリー点を有しある温度以上になると磁力が消失する。また、キュリー点以下でも温度上昇に伴い、磁力の低下が発生する。図1のような結果は、磁石形状が変化したことに加え、放電加工による熱入力の影響も含まれているのではないかと考えた。熱的な影響により磁束密度変化が発生するのであれば、局所的な熱入力であるレーザ照射においても磁束密度変化の可能性はある。

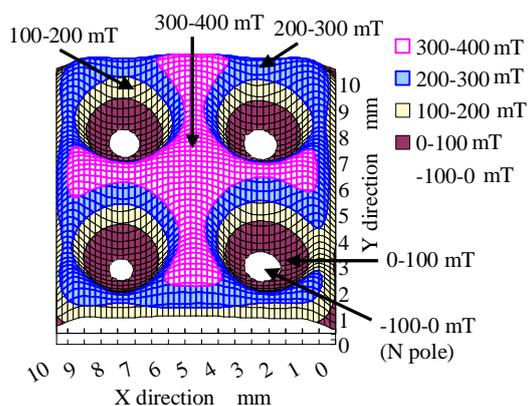


図1 底付き穴加工反対面の磁束密度分布

### 2. 研究の目的

本研究は、着磁後の永久磁石に対して放電やレーザ光を用いて局所的な加熱を行い、3次元的な形状の制御と磁化の制御とを「同時に」、あるいは「個別に」行うことのできる永久磁石の複合的な機能制御法の確立を目的としている。加工に用いる熱源として放電加工とレーザ照射を用いる。研究目的を達成

するための基礎データとして、これら加工法の特徴をふまえ、永久磁石に対する加工特性と加工後の磁化変化の関係を詳細に調べる。特にレーザ光は、デフォーカスにすると形状に影響を与えずに磁化制御のみが行なわれる特徴があり、照射条件による違いを把握する。一方、精密形状の加工には液中放電加工が有利であり、3次元的な複雑形状における磁化変化の詳細を把握する。そのためには、3次元的な形状計測と磁化分布の計測システムの構築が必要となる。形状測定では磁力の影響を考慮する必要がある。また、磁化分布の測定では穴の底のような凹部磁化変化を計測するための、微細な3次元磁気プローブの検討が重要である。一般的に永久磁石の性能は、磁気ヒステリシス曲線で説明されることが多い。磁石性能の指標の一つである保磁力も同図で説明されるが、温度に大きく影響を受け、ネオジウム磁石ではおよそ100℃程度から減少します。

放電およびレーザ光とも熱入力加工であるため、加工面の温度上昇を伴う。磁化の変化は温度による影響が大きいと考えられ、各種加工条件における磁石内部の温度変化の把握(実測)・予想(解析)が本研究達成には重要である。上記加工特性を明らかとして、目的とする永久磁石の形状および磁化性能を得るための加工方法の確立が最終的な目標となる。

### 3. 研究の方法

研究当初は、永久磁石の放電・レーザ加工特性の把握とそれにとまなう磁束密度変化の調査、ならびに磁石一面(平面)の磁束密度分布を計測するための計測システムを構築する。

(a) 永久磁石の放電・レーザ加工特性の把握および表面磁束密度変化との関係調査当

加工は、永久磁石の中でも保磁力の大きなネオジウム磁石を対象とする。放電加工およびレーザ加工の特性を考慮した加工条件を検討し、加工条件として比較する。素材であるネオジウム磁石の大きさ・形状も数種類検討する。放電加工は、既設のソディック製AM3Lを用いる。電極極性、電流値(～40A)、パルス幅(数十～数百μs)など基本的な加工条件を変化させ、加工時間、電極消耗量、総放電回数など各種放電加工特性の評価を行う。

一方レーザ加工は、既設のパルスYAGレーザ溶接装置(テクノコート製:TL-150S)を用いて入熱実験を行う。レーザ出力(定格最大150W)や繰り返し周波数(0.2～15Hz)、スポット径などの条件を変更し、形状変化の有無に注目し条件設定を行う。レーザ出力は、パルス出力の実測データが重要であるためパワーメータ(ネオアーク製PM-335)を用いて実測する。

(b) 加工後磁石の平面状磁束密度計測システムの構築

本研究では、磁石に対して微小穴や溝加工を施し、その加工精度や加工限界あるいは磁化変化を測定することが重要である。特に、加工面全面や、底付き穴加工の反対面全面の磁束密度分布の把握は重要と考えられ、 $x-y$ 平面状の磁束分布が計測できるシステムの構築を行う。

1軸のモータステージを2つ直角に設置し、PCからの出力により任意のピッチ、データ間隔で据え付けたテスラメータを移動できる装置と、各ポジションでテスラメータからの出力を自動取得するソフトの開発を行う。

(c) 未着磁磁石への形状加工と磁化計測

本研究では、着磁後の永久磁石への加工により形状と磁化の制御を行うことを目的としているが、従来法である未着磁磁石への形状加工後に着磁したサンプルとの磁化特性の比較を行う。未着磁磁石への加工は、放電やレーザー光を用いて行うが、着磁は着磁メカへ依頼する。

(d) 加工面直下の温度計測

形状に影響を与えないレーザー照射によっても転極現象が発現した事実から、磁束密度の変化には入熱作用による影響が大きいと推察できる。そこで、各種加工条件下での磁石内部の温度計測を行う。加工中の温度変化と磁石内部方向の計測結果から、磁石内部の温度状態を予測できることを目指す。

(e) 各種形状磁石に対する定常磁場解析

(d)項では熱影響による磁束密度変化に注目したが、形状が変化することでも影響を受ける。そこで、各種形状で決まる定常磁場解析を市販のCOMSOL解析ソフトにて行い、(c)項で得られた従来法形状磁石の実測データと比較検討する。さらに、(a)項の着磁後に放電、レーザー光で形状加工を行った磁束密度データと比較することにより、入熱作用の影響度合いを推察する。

#### 4. 研究成果

はじめに、放電加工による高さ10mmの円筒形磁石の突き当て加工を各種放電条件で行い、加工後の表面磁束密度の変化を中央一断面に対して比較した。放電条件を表1に示す。

図2に、加工前および表1中No.1, No.2の条件で加工後、さらに高さ9mmの未加工

表1 放電条件 (No.1仕上げ, No.2荒加工)

	Discharge current (A)	On time ( $\mu$ s)	Off time ( $\mu$ s)	D.F (%)	Input Energy (W=J/s)
No.1	5	32	32	50	50
No.2	20	128	128	50	200

磁石の表面磁束密度の比較を示す。表面磁束密度は、全てN極面を測定した。高さ10mmの加工前磁石の磁束密度は、実測で480mT程度であった。一方、No.1の条件で1mm除去加工を行い、高さ9mmになった磁石表面の磁束密度は、460mT程度とわずかに減少する。ただしこの値は、高さ9mmの未加工磁石の磁束密度とほぼ同等であり、磁石高さが1mm減少した影響であることがわかる。ところが、同じ高さ1mmの除去加工であるにも関わらず、No.2の放電条件で加工すると、加工後の磁束密度は270mT程度にまで減少する。これより、No.2の高速加工の条件で加工すると、磁石高さの低減に加え、放電加工されたことによる影響で磁束密度が大きく低減することがわかった。No.1の条件では、磁石高さが低減したことによる変化のみで、放電加工による影響で磁束密度は低減しない。これより、No.2の条件で表面磁束密度が大きく低減したのは、放電加工による磁石内部温度の上昇に起因する磁束密度の低下か、あるいは比較的大きなパルス電流が磁石に流れることで生じる磁界の影響によるものではないかと考えられる。

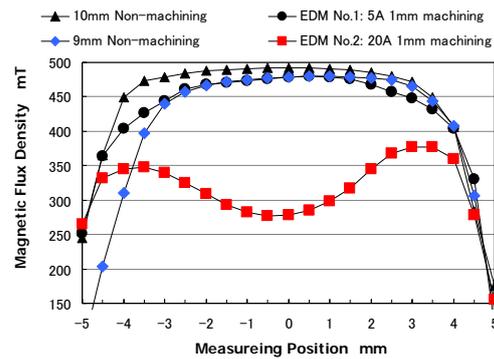


図2 放電条件の違いによる表面磁束密度変化

放電条件の違いにより、加工中の磁石内部温度に違いがあるかを確認するために、先端径約0.5mmのK熱電対を用いて実測した。図3に計測位置の概略を示す。いずれの放電条件においても、深さ方向の温度変化を調べるために、磁石の上端から2, 3, 4, 5mm下の側面に対し直径1mm、深さ5mmの穴を細穴放電加工機で加工し、熱電対を埋め込んだ。穴内部を放熱用シリコン(熱伝導率 $0.84\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ )で充填して熱電対の先端が穴の先端に配置されるように押し込んだ。ただし、横穴加工を多数施した磁石では熱の伝導性に影響が生じることを懸念して、磁石1個に対し各高さ1個の横穴を空け、4回の実験に分けて深さ方向の温度変化を取得した。

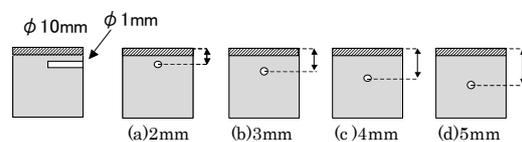


図3 磁石内部温度の測定位置

ここで、磁石は 1mm の除去加工が行われるため、加工終了直前では、加工面から設置した熱電対までの距離はそれぞれ 1mm ずつ接近している。熱電対からの出力はデータロガー（キーエンス製 NR-1000）を用いてサンプリング間隔 0.1s にて加工終了まで取得した。図 4 に、No.1 および No.2 の条件で高さ 1mm の除去加工を行った際の磁石内部温度の履歴を示す。(a) ~ (d) までは、それぞれ別々の加工実験になる。多少のばらつきはあるが、高さ 1mm を除去するのに No.1 の低速加工条件では約 50 分、No.2 の高速加工条件では、約 5 分の加工時間であった。同図 (a) より、No.1 の条件では上端より 2mm の位置（加工終了直前加工面との距離：1mm）における磁石内部温度は 80°C 程度を示していた。一方、同一測定部位で放電条件を No.2 とすると、加工初期の 130°C 程度から加工終了直前では 180°C 程度まで上昇した。このように温度上昇する理由の 1 つは、加工面と熱電対の距離が 2mm から 1mm へと縮まるためである。磁石上面からの深さが 1mm ずつ深くなると、それぞれの条件による内部温度は、No.1 の条件で約 65°C（上面から 3mm）、約 55°C（上面から 4mm）、約 50°C（上面から 5mm）と低下する。一方、No.2 の条件では、約 130°C（上面から 3mm）、約 110°C（上面から 4mm）、約 70°C（上面から 5mm）と変化する。これより、図 2 に示すように No.2 条件で磁束密度が大きく低減するのは、加工面直下においては少なくとも 180°C 程度以上に温度上昇するため磁力の低下が生じたと推察できる。一方、No.1 条件では加工面より 1mm 下で 80°C 程度であり、温度上昇に起因する磁力の低下は小さく、磁石高さが変化した影響のみが現れたと考えられる。

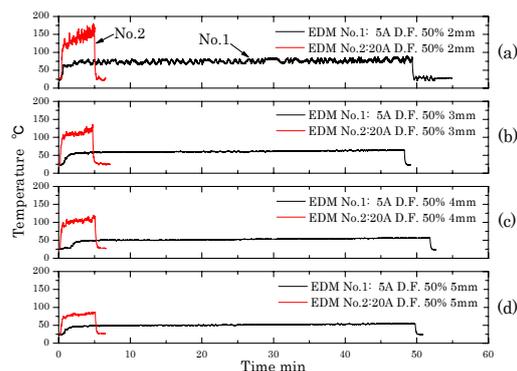


図 4 放電加工中の磁石内部温度の変化

図 2 に示すように、No.2 の条件で高さ 1mm の除去加工を行えば、加工後の表面磁束密度は大きく低減する。これは、磁石内部温度の上昇に起因する磁力の低下によるものと考えられる。磁石内部の温度は、加工面直下ほど高く、加工面より離れると低くなる。よって、磁力の低下の度合いも加工面に近いほど大きいと推察される。そこで、磁石内部方向の磁束密度の変化を調べるために、No.2 の条

件で高さ 1mm の除去加工を行った後、No.1 の放電加工による磁束密度低減の少ない条件で 1mm の除去加工を繰り返した。その都度、加工機上で表面磁束密度の測定を行い、その変化を調べた。

図 5 に、直径 10mm、高さ 10mm のネオジム磁石を No.1 の条件で 1mm ずつ除去加工を繰り返した際の、加工面磁石中央部の磁束密度の変化と、初期 1mm を No.2 の条件で除去し、その後は No.1 の条件で 1mm ずつの除去加工を繰り返した際の、加工面磁石中央部の磁束密度の変化を示す。図には各磁石高さの市販品磁石（未加工品）の実測磁束密度もあわせて示す。

図より、No.1 の条件で除去加工を繰り返すと、各磁石高さの未加工磁石とほぼ同等の磁束密度を示すことがわかる。この結果からも、No.1 の条件では放電加工の影響はほとんど無く、磁石高さが変化したことによる磁束密度の低下が生じていることがわかる。一方、初期 1mm の除去を No.2 の条件で加工すると、高さ 9mm では 270mT 程度まで磁束密度は低下する。その後、No.1 の条件で 1mm ずつの除去加工を繰り返すと、磁石高さ 6mm までは磁束密度の値は上昇し、磁石高さ 5mm において減少に転じ、未加工磁石とほぼ同等の値を示した。磁石高さが減少しているにも関わらず、磁束密度の値が上昇する理由は、次のように考えられる。初期 1mm の除去加工を No.2 の条件で行うと、磁石内部の温度は、加工面より下 3mm 程度でも 100°C 以上を示す。磁石の推奨使用温度が 80°C 以下であることを考慮すると、加工面より 3mm 程度下までは磁力の低下が発生していることが推察される。つまり、加工面より下 3mm 程度の領域で磁束密度の低下が生じている。ただし、この領域にあってもより加工面に近い方が高温になるため磁力の低下は大きいと予想できる。

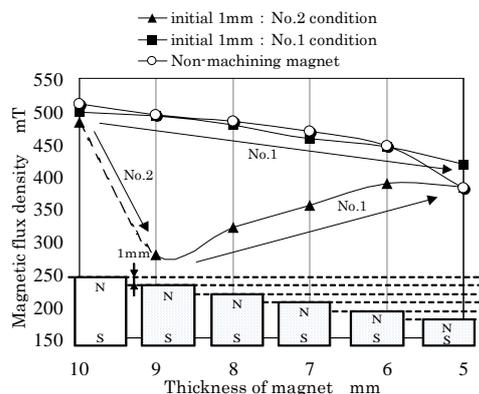


図 5 磁石深さ方向の磁束密度変化

以上の実験より、突き当て放電加工における放電条件と加工後の磁束密度変化ならびに磁石内部温度の変化を把握することができた。

次に、角形磁石の中央に底付き穴加工を行

い、加工対向面の磁束密度を全面測定するための平面磁束密度測定システムを構築した。図6に、2軸モータステージに取り付けたテスラメータと、ステージ駆動アンプの写真を示す。ステージの駆動信号は、パソコンより任意に出力でき、測定ピッチ、テスラメータの出力値も自動で保存する。N極面中央に3mmの底付き穴加工を行った際の、対向面（S極面）の磁束密度測定結果を図7に示す。測定ピッチ0.5mmの結果である。

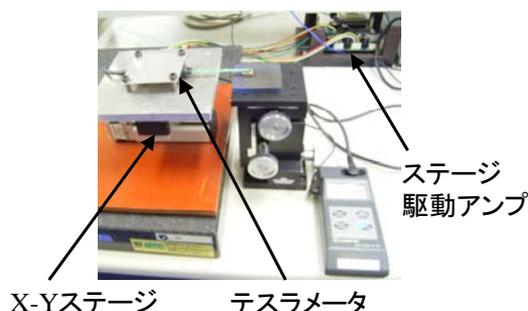


図6 平面磁束密度分布測定システム

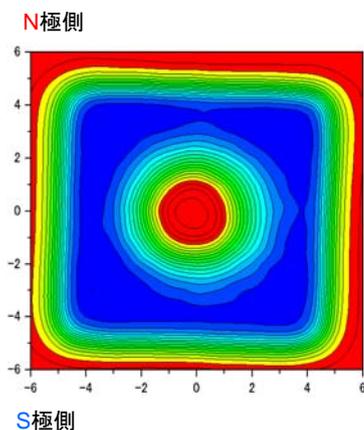


図7 平面磁束密度分布計測結果例

最後に、汎用解析ソフト COMSOL を用いて永久磁石の形状加工における磁場解析を行った。当初は熱入力を伴わずに磁石形状が変化したときの表面磁束密度を解析し、実加工後の測定結果との比較検討を進めた。図8に解析モデルを示す。穴加工、突き当て加工など各種条件において解析を行った結果、形状変化のみにおける定常磁場解析の結果は、着磁前の磁石素材に形状加工を行い、その後着

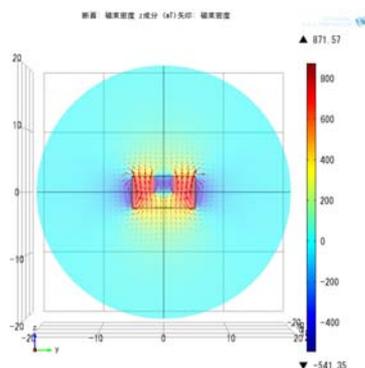


図8 COMSOL 解析におけるモデル図

磁した磁石とほぼ同一の結果が得られ、定常磁場解析における各種条件、手法が妥当であることが確認された。次に、熱入力による形状の変化と磁石内部温度の上昇を加味した錬成解析を進めたが、錬成解析がうまくいかず解析条件の検討を続けている。

#### 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3件)

- ① Hideki TAKEZAWA, Yoshihiro ICHIMURA, Nobuhiro YOKOTE, Naotake MOHRI : Change in Surface Magnetic Flux Density in EDM of Permanent Magnets, Procedia CIRP, Volume 6, 2013, 112-116
- ② Yoshihiro ICHIMURA, Hideki TAKEZAWA and Naotake MOHRI : Relationship between Magnetic Flux Density and Temperature Distributions of Permanent Magnets by EDM, Key Engineering Materials Vol.523-524, 2012, 322-327
- ③ Hideki TAKEZAWA, Yoshihiro ICHIMURA, Tatsuya SUZUKI, Tamao MURAMATSU and Naotake MOHRI : Relationship between Thermal Influence and Magnetic Characteristics in Electrical Discharge Machining of Magnetic Materials, Key Engineering Materials Vol.516, 2012, 575-579

[学会発表] (計12件)

- ① 横手暢弘, 武沢英樹, 毛利尚武, 放電加工における永久磁石の外部磁場制御の影響, 2013年度電気加工学会全国大会, 2013, 37-38
- ② 市村佳大, 武沢英樹, 横手暢彦, 毛利尚武, 永久磁石の放電加工における外部磁場付与の影響, 2013年精密工学会学術講演会春季大会講演論文集, 2013, 509-510
- ③ 市村佳大, 武沢英樹, 毛利尚武, 永久磁石へのビーム照射による磁石内部温度と表面磁束密度の変化, 2012年度電気加工学会全国大会, 2012, 57-58
- ④ 武沢英樹, 市村佳大, 横手暢弘, 毛利尚武, 永久磁石の放電加工における表面磁束密度の変化—内部温度と磁石形状による影響—, 2012年精密工学会学術講演会秋季大会講演論文集, 2012, 365-366
- ⑤ 市村佳大, 鈴木達也, 武沢英樹, 毛利尚武, 永久磁石の熱加工における磁石内部温度と磁束密度変化, 2012年精密工学会学術講演会春季大会講演論文集, 2012, 119-120
- ⑥ 鈴木達也, 市村佳大, 武沢英樹, 毛利尚武, 熱加工による永久磁石の表面磁束密度パターンニング, 2011年度電気加工学会全国大会, 2011, 67-68

- ⑦ 市村佳大, 鈴木達也, 黒田洋平, 武沢英樹, 毛利尚武, 永久磁石に対する放電加工で形成される熱的影響層, 2011 年度電気加工学会全国大会, 2011, 69-70
- ⑧ 市村佳大, 鈴木達也, 武沢英樹, 平尾篤利, 毛利尚武, 永久磁石の熱加工における磁気特性の変化, 2011 年精密工学会学術講演会秋季大会講演論文集, 2011, 723-724
- ⑨ 武沢英樹, 鈴木達也, 村松玉緒, 桑原吉英, 青嶋松寿, 毛利尚武, 熱エネルギー加工による永久磁石の形状および磁気特性の制御, 2010 年度電気加工学会全国大会, 2010, 17-18
- ⑩ 武沢英樹, 村松玉緒, 鈴木達也, 毛利尚武, 放電加工による永久磁石の着磁パターンの制御, 2010 年精密工学会学術講演会秋季大会講演論文集, 2010, 241-242
- ⑪ 鈴木達也, 村松玉緒, 武沢英樹, 毛利尚武, 永久磁石に対する精密放電加工, 2010 年度日本機械学会年次大会講演論文集, 2010, 211-212
- ⑫ 村松玉緒, 鈴木達也, 武沢英樹, 毛利尚武, 永久磁石の放電加工における熱的影響と磁気特性の関係, 2010 年度日本機械学会年次大会講演論文集, 2010, 209-210

[その他]

ホームページ等

<http://www.ns.kogakuin.ac.jp/~wwa1035/>

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

武澤 英樹 (TAKEZAWA Hideki)

工学院大学・グローバルエンジニアリング  
学部・機械創造工学科・教授

研究者番号：4 0 3 3 4 1 4 8

### (2) 研究分担者

毛利 尚武 (MOHRI Naotake)

独立行政法人大学評価・学位授与機構・学  
位審査研究部

研究者番号：9 0 1 2 6 1 8 6