

令和元年6月19日現在

機関番号：12608

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2016～2018

課題番号：16H04254

研究課題名(和文) 微小着磁技術を活用したマイクロ多自由度磁気アクチュエータの創成

研究課題名(英文) Micro Multi-DOF Magnetic Actuators Using Micro Magnetization Technology

研究代表者

進士 忠彦 (SHINSHI, Tadahiko)

東京工業大学・科学技術創成研究院・教授

研究者番号：60272720

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 13,300,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、焼結磁石の低ダメージ薄板加工法、PLD(パルスレーザー堆積法)を用いた厚膜磁石堆積法を検討するとともに、それら磁石の微細加工、レーザー局所加熱を用いた微細着磁法の基礎研究を実施している。それら成果と、従来のMEMSプロセス技術を組み合わせることで、スマートフォンなどのモバイル機器に利用可能な多自由度駆動マイクロアクチュエータの提案、試作、評価を実施している。

研究成果の学術的意義や社会的意義

焼結ネオジム磁石は、自動車、家電、情報機器などのアクチュエータに多く使われている材料である。しかしながら、磁石サイズを1mm以下に加工しようとする、材料劣化の影響で十分な磁気特性が発現できない。また、MEMSプロセスで使われる磁石は扁平になるが、多極に着磁しないと十分な磁束を発生できない。これらの問題を解決するため、薄板(厚膜)磁石の製作方法や、レーザーを使った新しい微細着磁法を本研究で開発した。また、これらの技術を用いることで実現可能なマイクロアクチュエータを提案、試作、評価している。

研究成果の概要(英文)：In this project, we studied a thin plate machining method for sintered NdFeB magnet with small damage and a thick film magnet deposition method using PLD (pulsed laser deposition). Micro processing and micro magnetization utilizing laser assisted heating were also studied for the magnet. By combining these results with conventional MEMS technology, multi-degree-of-freedom micro actuators which can be used for mobile devices such as smart phones were proposed, fabricated and evaluated.

研究分野：精密工学，メカトロニクス

キーワード：磁石 微細加工 微細着磁 パルスレーザー堆積法 放電加工 レーザー局所加熱 マイクロアクチュエータ

様式 C-19、F-19-1、Z-19、CK-19（共通）

1. 研究開始当初の背景

高性能磁石の代表例である焼結ネオジム磁石は、産業、自動車、家電用モータをはじめとした分野で広く用いられている。また、スマートフォン内蔵カメラの手振れ補正レンズ駆動アクチュエータ、ハードディスクドライブのアーム・ヘッド駆動、光ディスクの光ピックアップアクチュエータに用いられ、情報機器の小型化、情報密度の向上に多大な貢献をしてきた。

一方、焼結ネオジム磁石は、厚さを1mm以下に機械加工すると磁気特性が大きく劣化することが知られている。現在、厚さ0.5mm程度の市販品が入手可能だが、申請者が振動試験機（VSM）を用いてBHカーブを実測したところ、カタログ値に比べ、4割程度残留磁束密度が低かった。また、磁気劣化の少ない薄板磁石が仮に成形されたとしても、パルス着磁時のジュール熱によるコイルの溶断の問題から、着磁コイルの小型化はすでに限界に達しており、薄板磁石を有効に使うためのサブミリオーダーピッチの微細着磁は困難である。

研究代表者は、焼結ネオジム磁石と同等以上の磁気特性を有するスパッタ成膜薄膜ネオジム磁石の微細加工、微細着磁技術に挑戦し、厚さ1~20 μ mのネオジム磁石を用いたマイクロポンプ、マイクロリニアモータを実現してきた。また、薄膜磁石を対象とした着磁コイルを必要としない、レーザアシスト加熱による微細着磁技術を研究開発している。

一方、スマートフォンなどのレンズ駆動アクチュエータでは、アップル社からの特許出願に見られるように、手振れ補正に加え、ズーム機能も備えた、5自由度駆動の電磁型が提案されている。これは、中央のレンズ部を除いた10 \times 10 \times 5mm以下のわずかなスペースに、レンズの5自由度運動制御を実現するため、複数のコイル、微小磁石、弾性ヒンジを組み合わせた極めて複雑な機構となっている。このような機構に対して、国内の技術者から、すでに小型化の限界に到達していることが指摘されている。その大きな理由として、ネオジム磁石の薄板化の限界、および、多自由度化、磁束高密度化に必要な磁気回路設計を可能とする狭ピッチ多極着磁技術が未開発であることも挙げられている。上記のアプリケーションに対応するためには、厚さ0.1~0.5mm程度の高性能磁石の薄板または厚膜成形、微細加工、微細着磁技術が不可欠であるが、これらの要素研究が行われていないのが現状である。

2. 研究の目的

高性能磁石の代表例である焼結ネオジム磁石は、焼結体から機械加工により1mm以下の薄板に加工する場合、磁気特性劣化が顕著である。また、厚さ1mm以下の磁石を有効に使うためのサブミリオーダーピッチのパルス着磁は、着磁コイルの細線化とジュール発熱によるコイルの溶断から、不可能である。これらの制限は、ネオジム磁石を用いるスマートフォンのレンズ駆動アクチュエータや情報記憶装置用アクチュエータなどの小型化や多自由度化の大きなボトルネックとなっている。本研究では、焼結磁石の低ダメージ薄板加工法、PLD（パルスレーザ堆積法）磁石の厚膜成形法を検討するとともに、磁石の微細加工、微細着磁パターンを形成する手法の研究開発、また、それらの技術を組合せたマイクロ多自由度アクチュエータの実現を目的とした総合的な研究を実施する。

3. 研究の方法

本研究では、上記の目的の実現のため、

- 1) バルクネオジム磁石から低ダメージ薄板成形
- 2) パルスレーザ堆積法（PLD）を用いた厚膜磁石の堆積と成形
- 3) レーザ局所加熱を用いた微細着磁
- 4) 1)~3)の技術を用いたマイクロ多自由度電磁アクチュエータの試作、などを実施した。

4. 研究成果

紙面の都合から、3. 研究の方法で示した一部の結果概略を示す。詳細な内容は、5. 主な発表論文等で示す公表物を参照して頂きたい。

1) バルクネオジム磁石から低ダメージ薄板成形

被加工物に対する加工応力が小さい放電加工は、微細組織の破壊低減が期待できる。微細加工に特化したワイヤ放電加工機（W21PA05-2、三菱電機）を用い、加工時に印加する電圧と電流条件を探索することで、磁気的特性に対する加工ダメージの低減を狙う。本実験では、厚み2mmの焼結ネオジム磁石（NEOREC 38UH、TDK）から、縦横10mm、厚み100~200 μ mの試料を切り出す。磁化容易軸は厚み方向である。加工には直径0.2mmの黄銅ワイヤ（HBZ-MU 20、日立電線）を用いる。

母材、および、薄形試料に対し、それぞれ、パルスBHカーブトレーサー、および、VSMを用いて計測した減磁曲線を図1に示す。薄形化に伴い、磁気特性が低下するものの、厚

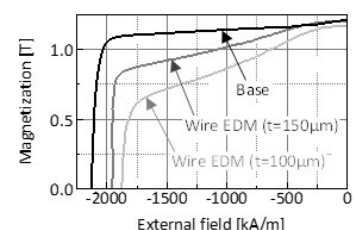


図1 減磁曲線

み $100\mu\text{m}$ において最大エネルギー積 $240\text{kJ}/\text{m}^3$ と母材から 11%の低減にとどまっており、先行研究よりも磁気特性低減を抑制できた。また、固有保磁力は $1,880\text{kA}/\text{m}$ と母材に対し 12%の低下にとどまる結果となった。しかしながら、1 試料の切り出しに約 70 分要しており、今後、加工速度の向上が必要である。

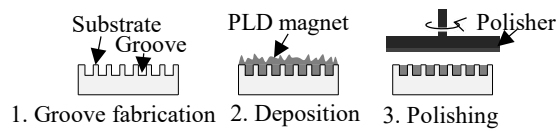


図2 PLD磁石の成膜と成形

2) パルスレーザー堆積法を用いた磁石の厚膜堆積と成形

PLD 磁石の微細形状加工法を図2に示す。溝加工を施した基板に PLD 磁石を堆積させ、余剰部を除去する。使用する基板は、 $5\text{mm}\times 5\text{mm}\times 0.7\text{mm}$ のガラス (TEMPAX Float, Schott AG) とし、ダイシング装置 (DAD321, Disco Corp.) により幅 $100\mu\text{m}$ 、深さ $50\mu\text{m}$ の溝加工を $200\mu\text{m}$ ピッチで施す。ターゲットに

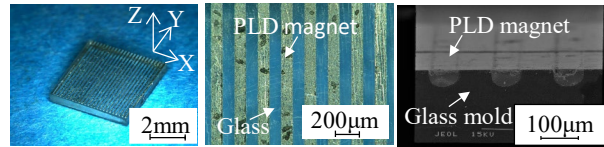


図3 堆積・形成結果

$\text{Pr}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$ 合金を用い、レーザー出力 4W で 3 時間 PLD 磁石膜の堆積を行う。溝以外に堆積された余剰磁石部は、研磨装置 (IM-P2, IMT Corp.) で除去する。砥粒には粒径 $9\mu\text{m}$ のダイヤモンドスラリー (S10SG-P05-9AS, IMT Corp.) を用いた。加工後の磁石が埋め込まれた基板の外観、拡大写真、断面の SEM 画像を図3に示す。なお、断面観察は着磁実験後に行った。溝に磁石が埋め込まれ、磁石とガラスによるライン&スペースが確認できる。作成試料および従来の無加工試料に対して VSM で測定した減磁曲線の比較を行い、一連の加工が磁気特性に与える影響は小さいことを確認した。

3) レーザ局所加熱を用いた微細着磁

PLD 磁石の基板成膜、着磁方法を図4に示す。 5mm 角、厚み $725\mu\text{m}$ の Si 基板に Nd-YAG パルスレーザーを用いる PLD 成膜装置にて、断熱層としての厚み数十 μm の酸化シリコン層を成膜し、その上に、同程度の厚みの磁石層を成膜する。成膜した磁石は、等方性である。

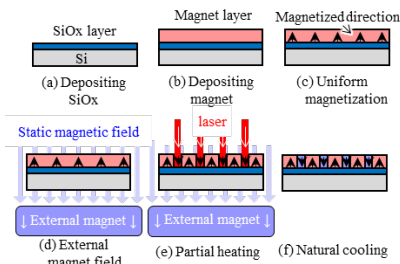


図4 PLD磁石の堆積とレーザー着磁

表1に、本報で着磁を目指す2枚の試料の酸化シリコンと磁石の厚みと磁気特性を示す。磁石膜全体に対して、 4.7T のパルス着磁を行う。

レーザー局所加熱時に、 0.32T の逆磁場を印加するため、厚み方向に着磁した $30\text{mm}\times 30\text{mm}\times 10\text{mm}$ の焼結ネオジウム磁石の上に、レーザー加熱する試料を設置する。長さ 3mm 、ピッチ 1mm のストライプ状にレーザーを走査し、磁化反転を行う。基板を十分に自然冷却した後、外部磁場を取り除き、磁化反転が完了する。

表1 堆積磁石の性質

Sample	A	B
Magnet thickness (μm)	53	50
SiOx thickness (μm)	15	44
Jr (T)	0.75	0.71
Hcb (kA/m)	-350	-403

レーザー出力を変化させ、試料の表面磁束密度を計測する。レーザー出力は、試料Aの直線①から④は $0.72, 0.90, 1.08, 1.26\text{W}$ の4段階、試料Bの⑤から⑧は $1.26, 1.44, 1.62, 1.80\text{W}$ の4段階とする。レーザー加熱条件として、YVO レーザ波長 532nm 、レーザー走査速度 $20\text{mm}/\text{s}$ 、スポット直径 $100\mu\text{m}$ 、パルス繰返し周波数 30kHz とする。

レーザー加熱前後の磁石表面に対して、 0.1mm の距離を保ち、感磁面が $50\mu\text{m}$ 角のホール素子を走査し、基板に垂直方向の磁束密度を測定した。図5にレーザー加熱後の測定結果を示す。NS 極が繰り返す交替着磁が実現し、レーザー加熱前に比べ、同じ試料の同じ位置では、表面磁束密度の絶対値が最大で 6 倍程度向上した。赤線で示す静磁場シミュレーション結果と傾向は一致している。

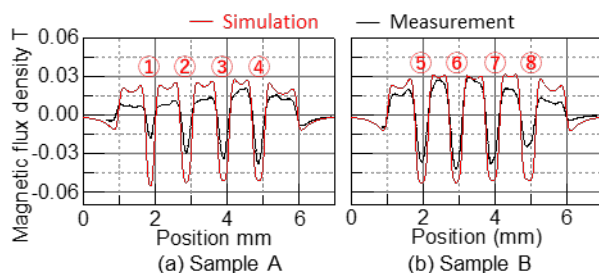


図5 PLD磁石のレーザー局所加熱による着磁結果

4) マイクロ多自由度電磁アクチュエータの試作

試作を目指す面内2自由度マイクロアクチュエータの構成を図6に示す。本アクチュエータは可動磁石型で、MEMSプロセスによるシリコン製弾性案内によって支持された、一枚の多極着磁された磁石基板が、下部に配置された2層の蛇行形状コイルによって、2自由度駆動を行う。

可動磁石型は、反磁界の影響を低減するため、基盤の目状に多極着磁し、表面磁束密度を向上している。薄形の焼結磁石にレーザ走査による局所加熱を発生させる。これにより、局所的な保磁力低下を生み出し、磁化反転を行う。また、レーザ加熱時の熱の広がりを抑え、局所加熱を実現するため、磁石下面には、熱伝導率の低いガラス基板を接着し、磁石およびガラス層の一部には格子状のスリットを設け、熱の流れを制限する。

図7に2自由度面内駆動型マイクロアクチュエータの試作機の可動部の上面、下面の写真と、側面の概略図を示す。

図8(a)に2軸同時駆動実験の結果を示す。各方向の電流・変位の関係を考慮して、1層目に0.16 A(p-p)、2層目に0.2 A(p-p)の1.0 Hzの位相を90°ずらした電流を通電し、直径200 μm の円軌道駆動を目指した結果を示す。円軌道からの追従誤差の原因としては、弾性案内の剛性の位置による変動に加え、アライメント誤差により、発生力の干渉が発生した可能性がある。次に、PID制御を適用し、0.01Hzで駆動した結果を図7(b)に示す。非制御と比べ、誤差が大きく減少することが確認できる。紙面の都合上、省略するが、案内として転がり機構を適用したもの、同様な技術を用いたマイクロモータの研究を実施している。

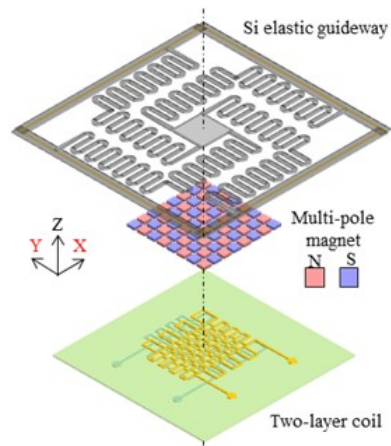
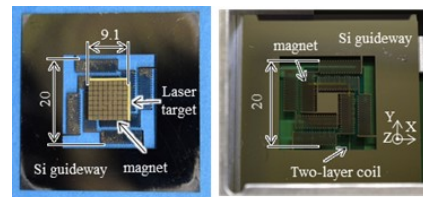
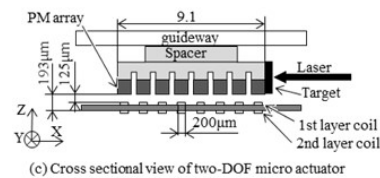


図6 2自由度アクチュエータの構造



(a) Assembled magnet and guideway

(b) Assembled two-DOF micro actuator



(c) Cross sectional view of two-DOF micro actuator

図7 試作2自由度平面アクチュエータ

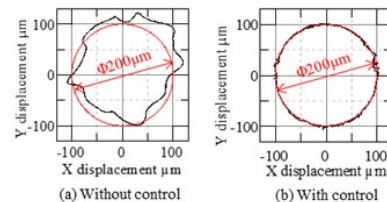


図8 2自由度駆動実験結果

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計5件)

- 1) Ryogen Fujiwara, Shunya Tanaka, Wataru Hijikata, Tadahiko Shinshi, Keishi Hirotaki, Akihiro Yamashita, Masaki Nakano, Micromachining and micro-magnetization of Pr-Fe-B magnets fabricated using pulsed laser deposition for MEMS applications, Sensors and Actuators A: Physical, No. 251, pp. 219-224, 2016. (査読有)
- 2) Ryogen Fujiwara, Shunya Tanaka, Wataru Hijikata, Tadahiko Shinshi, Sub-Millimeter Pitch Multipole Magnetization in a Sintered Nd-Fe-B Magnet Utilizing Laser Heating, IEEE MAGNETICS LETTERS, IEEE, Volume 7, 2016. (査読有)
- 3) A. Yamashita, K. Hirotaki, A. Kurosaki, T. Yanai, H. Fukunaga, R. Fujiwara, T. Shinshi, M. Nakano. PLD-Fabricated Isotropic Pr-Fe-B Film Magnets Deposited on Glass Substrates, IEEE Transaction on Magnetics, IEEE, Vol. 53, No. 4, 2017. (査読有)
- 4) 中野 正基, 山下 昂洋, 柳井 武志, 板倉 賢, 藤原 良元, 進士 忠彦, 福永 博俊. レーザ蒸着法による硬磁性膜の作成, まぐね/Magnetics Jpn., 日本磁気学会, Vol. 12, No. 1, pp. 26-30, 2017. (査読有)
- 5) 吾妻 範栄, 田中 駿也, 藤原 良元, 進士 忠彦, 鈴木 健一, 微小多極着磁磁石を用いた2自由度マイクロ電磁アクチュエータの試作, 精密工学会誌, Vol. 84, No. 3, pp. 289-294, 2018. (査読有) (精密工学会論文賞受賞, 2019.3)

〔学会発表〕(計11件)

- 1) 田中 駿也, 藤原 良元, 進士 忠彦, 鈴木 健一, 門田 祥悟, サマコバ磁石を用いたネオジウム磁石基板の微細多極着磁, 第25回 MAGDA コンファレンス in 桐生 講演論文集, pp. 466-467, Nov. 2016.
- 2) 藤原 良元, 田中 駿也, 土方 亘, 進士 忠彦, 鈴木 健一, 門田 祥悟, MEMS 応用を目指した焼結ネオジウム磁石の薄形化, 第28回「電磁力関連のダイナミクス」シンポジウム講演論文集, No. 16-13, pp. 46-47, 2016.

- 3) 田中 駿也, 藤原 良元, 土方 亘, 進士 忠彦, 廣瀧 敬士, 山下 昂洋, 柳井 武志, 中野 正基, 福永 博俊, 鈴木 健一, 門田 祥悟, MEMS 応用を目指した PLD 磁石膜の微細形状加工および微細着磁, 第 28 回「電磁力関連のダイナミクス」シンポジウム講演論文集, No. 16-13, pp. 56-57, 2016.
- 4) Noriei AZUMA, Shunya TANAKA, Ryogen FUJIWARA, Tadahiko SHINSHI, Kenichi Suzuki, A Two-DOF MEMS Actuator Utilizing a Multi-pole Magnetized Permanent Magnet, Abstract of 21th International Conference on Mechatronics Technology, pp. 150-154, 2017. (査読有)
- 5) 吾妻 範栄, 田中 駿也, 藤原 良元, 進士 忠彦, 清水 大, 近藤 秀俊, 山口 雄太, 山下 昂洋, 柳井 武志, 福永 博俊, 中野 正基, 酸化シリコン膜上に PDL で堆積された厚膜永久磁石のレーザ局所加熱による微細着磁, 日本機械学会第 8 回マイクロ・ナノ工学シンポジウム講演論文集, No. 17-3, 31am3-PN-15, 2017.
- 6) 吾妻 範栄, 田中 駿也, 藤原 良元, 進士 忠彦, 鈴木 健一, 門田 祥悟. 市松模様微細着磁磁石を用いた 2 自由度マイクロ電磁アクチュエータ, 第 29 回「電磁力関連のダイナミクス」シンポジウム講演論文集, pp. 411-414, 2017.
- 7) 田中 駿也, 吾妻 範栄, 藤原 良元, 進士 忠彦, 鈴木 健一, 門田 祥悟, 多極微小磁石を用いた 2 自由度マイクロアクチュエータ, 2017 年度精密工学会春季大会学術講演会 講演論文集, pp. 309-310, 2017.
- 8) Dong HAN, Noriei AZUMA, Tadahiko SHINSHI, Kenichi SUZUKI. Two-DOF MEMS Actuator Employing Microball-bearings and a Multi-Pole Permanent Magnet, Proceedings of The 22nd International Conference on Mechatronics Technology, pp. ID 23, 2018. (Best Paper Award, 2018.10) (査読有)
- 9) 木根 諒, 韓 冬, 進士 忠彦, 門田 祥悟, 2 自由度シリコン案内で支持された多極磁石を用いた 低周波振動マイクロ発電デバイス, 日本機械学会第 9 回マイクロ・ナノ工学シンポジウム講演論文集, 31pm2-PN-98, 2018.
- 10) 永井 慧大, 韓 冬, 進士 忠彦, 微細ピッチ・多極着磁リング磁石を用いた高トルクマイクロフラットモータ, 日本機械学会第 9 回マイクロ・ナノ工学シンポジウム講演論文集, 31pm2-PN-96, 2018.
- 11) 吾妻 範栄, 進士 忠彦, 鈴木 健一, レーザアシスト加熱による多極着磁磁石を用いた 2 自由度電磁マイクロアクチュエータ, 2018 年度精密工学会春季大会学術講演会講演論文集, pp. 679-680, 2018.

〔産業財産権〕

○出願状況 (計 2 件)

1) 名称: アクチュエータ

発明者: 鈴木 健一, 鈴木 輝, 一橋 秀輔, 進士 忠彦, 吾妻 範栄

権利者: 東京工業大学, TDK 株式会社

種類: 特許出願, PCT

番号: 特願 2017-140787/PCT/JP2018/026911

出願年: 2017/2018

国内外の別: 国内および PCT

2) 名称: アクチュエータ (トランジューサ並びにこれを用いたアクチュエータ及びエネルギーハーベスタ)

発明者: 鈴木 健一, 進士 忠彦, 吾妻 範栄

権利者: 東京工業大学, TDK 株式会社

種類: 特許出願, PCT

番号: 特願 2018-034551/PCT/JP2019/007193

出願年: 2018/2019

国内外の別: 国内および PCT

〔その他〕

研究室ホームページ: <http://www.nano.pi.titech.ac.jp/>

研究室 FACEBOOK (試作デバイスの動画): <https://www.facebook.com/shinshilab/>

6. 研究組織

(1) 研究分担者

なし

(2) 研究協力者

研究協力者氏名: 中野 正基

ローマ字氏名: (NAKANNO, Masaki)

研究協力者氏名: 土方 亘

ローマ字氏名: (HIJIKATA, Wataru)

研究協力者氏名: 長峯 靖之

ローマ字氏名：(NAGAMINE, Yasuyuki)

研究協力者氏名：松谷 晃宏

ローマ字氏名：(MATSUTANI, Akihiro)

研究協力者氏名：韓 冬

ローマ字氏名：(HAN, Dong)

研究協力者氏名：鈴木 健一

ローマ字氏名：(SUZUKI, Kenichi)

研究協力者氏名：門田 祥吾

ローマ字氏名：(KADOTA, Shogo)