

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 27 日現在

機関番号：12608

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2014～2015

課題番号：26630036

研究課題名(和文)ネオジム磁石膜のレーザアシスト加熱による高アスペクト・微細着磁法の研究

研究課題名(英文)High aspect and micro magnetization of NdFeBr magnet utilizing laser assist heating

研究代表者

進士 忠彦 (SHISNHI, TADAHIKO)

東京工業大学・精密工学研究所・教授

研究者番号：60272720

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,000,000円

研究成果の概要(和文)：例えば、スマートフォンの内蔵カメラには、手振れ補正のため、レンズを駆動する永久磁石を用いたマイクロ電磁アクチュエータが用いられている。現在、産業界では、上記のような電磁アクチュエータの小型化の限界に直面している。本研究では、電磁アクチュエータの小型化のボトルネックであるネオジム磁石の微細着磁について検討している。具体的には、従来のパルス着磁ではなく、レーザを用いた磁石の局所加熱によって、微小領域のみ任意の方向に着磁する技術を開発している。

研究成果の概要(英文)：In built-in cameras for smartphones, electromagnetic actuators with permanent magnets are used to drive the lens for image stabilization. The miniaturization of the electromagnetic actuators is required to minimize the built-in cameras. However, such actuators have reached the limit of miniaturization due to the limitation of micro magnetization of neodymium magnet. To solve this problem, in this study, micro magnetization method using laser assist heat for neodymium micro magnet as an alternative to pulse magnetization is developed.

研究分野：精密工学

キーワード：MEMS ネオジム永久磁石 着磁 PLD スパッタ

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、厚さ 1mm 以下に機械加工すると、磁気特性が大きく劣化するため、磁気デバイス小型化のボトルネックとなっている。一方、近年、日立金属、長崎大学、フランス国立研究所などが、スパッタ法やパルスレーザ堆積法で、焼結ネオジム磁石に匹敵する性能の、厚さ数～数百  $\mu\text{m}$  のネオジム磁石膜を実現しつつある。

申請者は、このネオジム磁石膜に磁気 MEMS 用材料としての将来性を強く感じ、H23～24 年度の挑戦的萌芽研究「ネオジム磁石薄膜のマイクロ多極着磁とその MEMS への応用」で、微小コイルによるパルス着磁法を検討し、厚み約 6  $\mu\text{m}$  の薄膜磁石を 500  $\mu\text{m}$  ピッチで多極着磁し、スライダ部が 4 × 4 mm のマイクロリニアモータの試作に成功した。

しかしながら、直径が数百  $\mu\text{m}$  程度のコイルに、数  $\mu\text{s}$  とはいえ数千 A の電流を通電するマイクロパルス着磁では、しばしばコイルが焼き切れた。この問題解決のため、厚み数  $\mu\text{m}$  の磁石膜に、100  $\mu\text{m}$  ピッチでのレーザアシスト加熱による着磁も試みたが、着磁条件の詳細な探索、現象の解明（加熱・冷却時の保磁力と逆磁界の影響など）、着磁の定量的な評価には至っていない。また、従来の研究で実現した着磁ピッチ、厚みでは、磁気回路設計上、いまだ磁石膜を有効活用できておらず、マイクロリニアモータなどアクチュエータの更なる高出力密度化、高効率駆動化のためには、より厚い磁石膜を、より深く、狭いピッチで着磁することが不可欠である。

2. 研究の目的

本研究では、ネオジム磁石膜（膜厚数  $\mu\text{m}$  ～ 100  $\mu\text{m}$ ）のマイクロ着磁（着磁深さ）/（着磁幅）> 0.5 の実現を目的とする。コイルを用いたパルス着磁は、着磁ピッチの狭小化、コイル断面の微小化に伴う電流密度の増加により、コイルが焼き切れ、高保磁力を有するネオジム膜への適用に限界があった。このため、磁石の保磁力が低下する高温状態（キュリー温度以下）でのマイクロ着磁技術の実現を目指す。本提案では、特に、磁石膜を深く着磁するための、高アスペクトなレーザアシスト加熱法および微細着磁パターンの定量的な着磁量評価法を中心に研究を推進する。

3. 研究の方法

3.1 基本原理

提案、検討するレーザアシスト微細着磁法の基本原理である、熱アシスト磁化反転のプロセスを図 1 に示す。まず、パルス着磁などの一般的な着磁方法で、一方向（図中では上向き）に永久磁石材料を着磁し、その永久磁石を、外部から与える一様な静磁場中に配置する。静磁場は、永久磁石の着磁とは逆向きとする（図中では下向き）。この状態で、着

磁対象の永久磁石のみを加熱し、その温度を上昇させる。高温になった永久磁石は、固有保磁力  $H_{cj}$  の低下により脱磁され、そのまま外部から与えている静磁場の向き（図中では下向き）に着磁される。そのまま永久磁石の温度を低下させ、十分に温度が低下した後に静磁場を取り除くことで、磁化反転は完了する。

この磁化反転は永久磁石の温度上昇による固有保磁力  $H_{cj}$  の低下を利用している。固有保磁力  $H_{cj}$  の低下した永久磁石は、比較的小さな外部磁場によって着磁することができる。Nd-Fe-B 系の磁石は、温度上昇による固有保磁力  $H_{cj}$  の低下が比較的大きく、今回使用する磁石は、300 程度に加熱することで固有保磁力  $H_{cj}$  はほぼ零になる。

3.2 高アスペクト着磁への工夫

厚みが大きい磁石に対するレーザアシスト微細着磁においては、磁石内熱伝導の制限が重要である。これは、磁石厚みが大きいために、加熱時間が長くなり、磁石内熱伝導による加熱部以外の昇温が大きくなるためである。そこで、本研究では、主に、2 種類の断熱法を用いたレーザアシスト微細着磁を、厚みが約 500  $\mu\text{m}$  の焼結磁石と、厚みが約 50  $\mu\text{m}$  の PLD 磁石に対して検討する。微細パターンのサイズに応じて、適切な断熱法を選定する必要がある。今回、PLD 磁石に対しては低熱伝導率材料の挿入を、焼結磁石に対してはスリット加工を検討する。

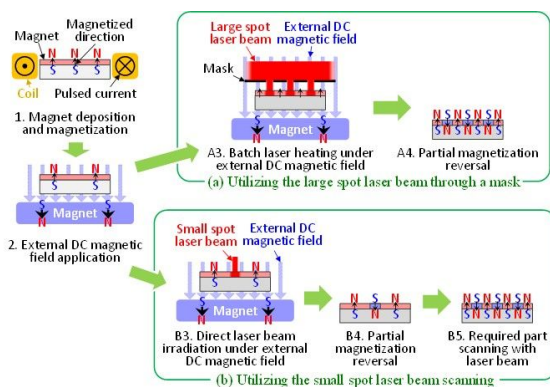


図 1 レーザアシスト加熱を利用したマイクロ着磁

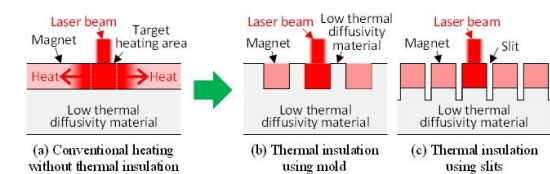


図 2 高アスペクト・マイクロ着磁のための工夫

#### 4. 研究成果

##### 4.1 微細着磁パターンの着磁量評価法

5  $\mu\text{m}$  程度の厚みのスパッタ堆積されたネオジウム磁石膜に、図1のレーザアシスト加熱法を適用し、微細着磁を試みた。レーザ軌跡を変更することで、より微細なパターンや、文字等の複雑な形状の着磁を検討した。まず、前述の微細着磁により、幅70  $\mu\text{m}$  が着磁可能な最小幅と考え、140  $\mu\text{m}$  ピッチでレーザを直線走査する。また、100  $\mu\text{m}$  幅のドットパターン、および、文字状の着磁も検討する。詳細な着磁条件等は、以下に記載した発表論文を参照頂きたい。実験で得た試料の着磁パターンを、磁場観察により定性的に評価する。磁場観察には、磁気光学効果の一つであるフレアデー効果を利用した。

観察結果を図3に示す。目標とした磁場分布になっており、パルス着磁では実現困難な複雑な着磁をレーザアシスト微細着磁で実現できることを確認した。

また、茨城大学の木村孝之先生の開発した感磁面2.7  $\mu\text{m}$  角の集積ホール素子アレイを用いて磁場測定した結果を図4に示す。概ね70  $\mu\text{m}$  間隔でN極とS極が繰り返す短冊状の微細着磁が実現したことを確認した。

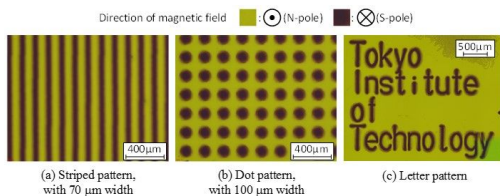


図3 光磁気効果を用いた着磁範囲観察

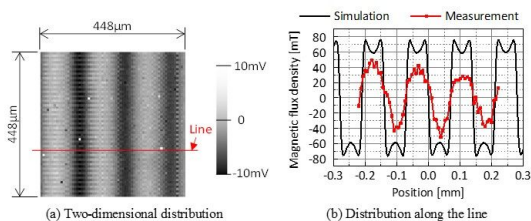


図4 集積ホール素子アレイによる磁場観測結果

##### 4.2 PLD磁石を用いた微細着磁

###### 着磁試料の準備

溝加工を施したガラス基板上にPLD磁石材料を堆積し、その後、溝外部の余剰部を研磨により除去する。研磨により、PLD磁石の表面粗さ、および、膜厚むらの低下も期待できる。加工後の磁石が埋め込まれた基板の外観、拡大写真、および、断面のSEM画像を図5に示す。直径約100  $\mu\text{m}$  程度の半円状の断面の溝にPLD磁石の充填が実現されている。

得られた磁気特性は、無加工の基板に堆積したものと遜色ない値であり、一連の加工が磁気特性に与える影響が小さいことを確認した。

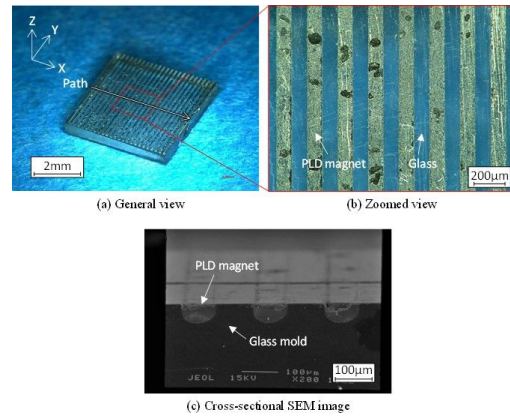


図5 微細溝に充填されたPLD法で充填されたネオジウム磁石

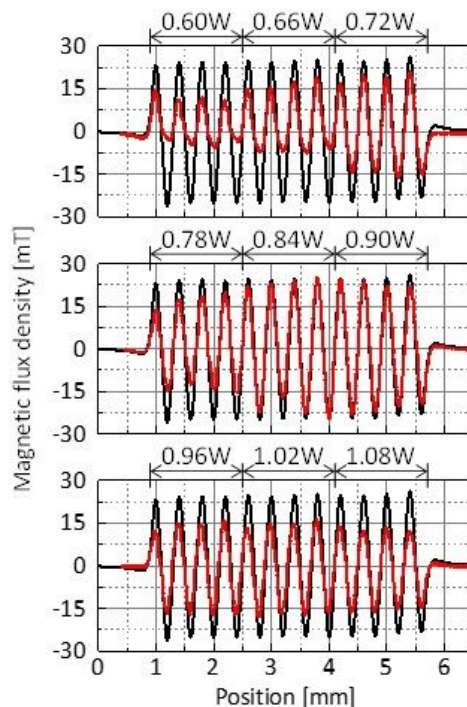


図6 PLD微細磁石のNS着磁

###### 微細着磁実験結果

一様に着磁したPLD磁石を、着磁とは逆向きの外部静磁場中に配置し、部分的にレーザで局所加熱することで、固有保磁力 $H_{cj}$ を低減させ、局所的に磁化反転させる。加熱部と非加熱部を、熱伝導率の低いガラスで分離することで、磁石間の熱伝導を抑制しつつ、加熱部のみを選択的に昇温させる。レーザパワーを変化されながら着磁した結果を図6に示す。黒線が、完全着磁を仮定したシミュレーション結果、赤線が測定結果である。0.84Wで、計算値の88%の着磁に成功している。

##### 4.3 焼結ネオジウム磁石の微細着磁

基板に接着した焼結磁石材料にスリットを加工し、一様着磁した後に、分割された磁石一つおきに、レーザで局所加熱する。薄膜のレーザアシスト微細着磁と原理は同一であるが、1)スリット加工を行う点、2)こ



れに伴い基板への接着が必要な点、および、  
3) 外部磁場を印加しない点、が異なる。

スリット加工は磁石間の断熱に必要であり、基板への接着はスリット加工後の個々の磁石部の固定のため必要である。接着剤には、レーザ加熱時の耐熱性を有することが求められる。また、外部磁場の代替として、加熱部周囲の非加熱磁石からの漏洩磁場を利用する。今回使用する焼結磁石は厚みが大きく、漏洩磁場が比較的大きくなる。狭ピッチで、周期的に磁化方向が反転する着磁には、外部磁石を配置不要とすることができ、システムを単純化できる可能性がある。

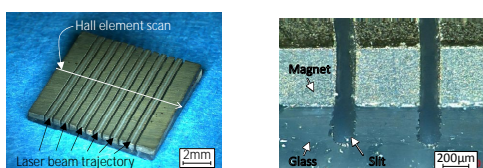


図7 スリット加工した厚み 0.5mm の焼結磁石

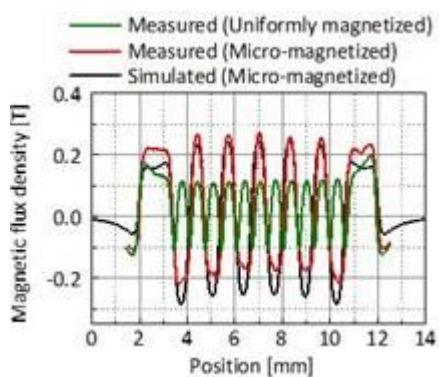


図8 一様着磁およびNS 微細着磁結果

図7に、厚み 0.5mm の焼結ネオジウム磁石を 0.5mm ピッチでスリット加工した結果を示す。磁石は、レーザアシスト加熱時の下面からの放熱をさけるため、ガラス基板に接着している。

図8に、パルス着磁による一様着磁と、レーザアシスト加熱による NS 微細着磁の結果を、計算結果と比較している。NS 微細着磁により発生磁場の絶対値が大きくなっていることが確認できる。これは、反磁界低減の効果と考えられる。また、微細着磁した試料からの測定磁場は約 0.48T (p-p) であり、理想条件での計算値として着磁率は 90% であった。概ね、目標とした着磁が実現したことが確認できる。

## 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)

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, Vol. 7, Feb. 2016. 10.1109/LMAG.2015.2508004 (査読あり)

Ryogen Fujiwara, Tadahiko Shinshi, Elito Kazawa, Micromagnetization patterning of sputtered NdFeB/Ta multilayered films utilizing laser assisted heating, Sensors and Actuators A: Physical, Vol. 220, pp. 298-304, Oct. 2014. 10.1016/j.sna.2014.10.011 (査読あり)

進土忠彦, 薄膜磁石を用いた磁気 MEMS デバイス, まぐね/Magnetics Jpn., Vol. 9, No. 5, pp. 204-210, Oct. 2014(査読なし)

[学会発表](計6件)

田中駿也, 藤原良元, 土方亘, 進土忠彦, 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, pp. 56-57, 2016.5.18-5.20, 慶応義塾大学 (査読なし)

藤原良元, 田中駿也, 土方亘, 進土忠彦, 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, pp. 46-47, 2016.5.18-20, 慶応義塾大学 (査読なし)

Ryogen Fujiwara, Wataru Hijikata, Tadahiko Shinshi, MICROMETER SCALE MAGNETIZATION OF NEODYMIUM MAGNET FOR INTEGRATED MAGNETIC MEMS, The 29th IEEE International Conference on Micro Electro Mechanical Systems, pp. 643-646, Jan. 24<sup>th</sup>-28<sup>th</sup>, 2016, 上海, 中国 (査読あり)

藤原良元, 土方亘, 進土忠彦, MEMS 応用を目指した焼結ネオジウム磁石の微細加工, 日本機械学会第 7 回マイクロ・ナノ工学シンポジウム講演論文集, 2015.10.28-30, 朱鷺メッセ. (査読なし)

神谷龍彦, 藤原良元, 土方亘, 進土忠彦, 押領司学, 山下昂洋, 中野正基. PLD ネオジウム磁石膜の MEMS 応用を目指した特性評価, 第 27 回「電磁力関連のダイナミクス」シンポジウム講演論文集, 電気学会, pp. 471-472, 2015.5.14-15, ハウステンボス. (査読なし)

Ryogen FUJIWARA, Wataru HIJIKATA, Tadahiko SHINSHI, Micro-pitch and Multi-pole Magnetization of Sintered Bulk Nd-Fe-B Magnet for MEMS Devices, Abstract of The 19th International

Conference on Mechatronics Technology,  
Nov. 27<sup>th</sup>-30<sup>th</sup>, 2015, 東京工業大学.( 査読  
有り)

〔産業財産権〕

出願状況(計1件)

名称: アクチュエータ

発明者: 鈴木健一, 進士忠彦, 藤原良元

権利者: TDK(株), 東京工業大学

種類: 特許

番号: 特願 2016-010322

出願年月日: 2016.1.22

〔その他〕

ホームページ等

<http://www.nano.pi.titech.ac.jp/>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

進士 忠彦 (SHINSHI TADAHIKO)

東京工業大学・精密工学研究所・教授

研究者番号: 60272720