

論文 / 著書情報  
Article / Book Information

題目(和文)	MEMS用永久磁石への微細磁気パターンの着磁と一括転写に関する研究
Title(English)	
著者(和文)	永井慧大
Author(English)	Keita Nagai
出典(和文)	学位:博士(工学), 学位授与機関:東京工業大学, 報告番号:甲第12689号, 授与年月日:2024年3月26日, 学位の種別:課程博士, 審査員:進士 忠彦,岡村 哲至,吉田 和弘,石田 忠,土方 亘
Citation(English)	Degree:Doctor (Engineering), Conferring organization: Tokyo Institute of Technology, Report number:甲第12689号, Conferred date:2024/3/26, Degree Type:Course doctor, Examiner:,,,,
学位種別(和文)	博士論文
Category(English)	Doctoral Thesis
種別(和文)	論文要旨
Type(English)	Summary

# 論文要旨

## THESIS SUMMARY

系・コース： Department of, Graduate major in	機械 機械	系 コース	申請学位（専攻分野）： 博士 Academic Degree Requested Doctor of	(工学)
学生氏名： Student's Name	永井 慧大		指導教員（主）： Academic Supervisor(main)	進士 忠彦 教授
			指導教員（副）： Academic Supervisor(sub)	

### 要旨（和文 2000 字程度）

Thesis Summary (approx.2000 Japanese Characters )

本論文は、「MEMS 用永久磁石への微細磁気パターンの着磁と一括転写に関する研究」と題し、全6章で構成される。

第1章「緒論」では、MEMS デバイスにおいて、スマートフォン等への応用が期待されるバッテリー駆動可能な磁気 MEMS に焦点を当てた。磁気 MEMS はスケール効果から、代表寸法がサブミリメートルオーダー以下で、静電 MEMS と比較して出力が低い。さらに、デバイスに用いる磁石は平板形状で厚み方向に一樣着磁され、磁石内部の大きな反磁界により表面磁束密度が低下し、出力低下の一因となる。反磁界低減には、着磁幅と着磁厚さを近づけることが有効であるため、微細多極着磁法が検討されているが、着磁パターンの制限や、量産性、プロセス温度の問題があった。そこで、本研究では、サブミリ厚永久磁石に対する大量生産可能な微細多極着磁法の開発と、微細多極着磁磁石を用いた磁気 MEMS の実現を目的とした。

第2章「レーザアシスト局所加熱によるスリットレス微細多極着磁」では、1枚の磁石表面をレーザで局所加熱し、保磁力を低下させ、外部逆磁界と加熱領域の隣接部から発生する漏れ磁束によって磁化反転させる、スリットレスレーザアシスト局所加熱微細多極（LAH）着磁法を提案した。着磁条件や磁石の磁気特性の、表面磁束密度に対する影響の調査を行い、磁化反転を促進、熱減磁を低減する外部分布磁界を用いて、高い表面磁束密度 436.4 mT<sub>p-p</sub>を生じる、着磁幅 0.3 mm、16極の交番着磁を 5 mm × 5 mm × t0.3 mm の NdFeB 磁石に対して実現し、理想的な着磁状態をモデル化した三次元磁場解析結果と比較する着磁率は、81.7%となった。

第3章「加熱による磁気パターン一括転写法」では、LAH 着磁法で製作した磁気パターンを有するマスター磁石と転写対象となるターゲット磁石を重ね、MEMS プロセスに適用可能な 200℃以下で加熱し、保磁力を低下させ、磁気パターンをターゲット磁石に一括転写可能な手法（MPT 法）を提案した。原理検証として3種類の磁気パターン、ストライプ、チェッカーボード、同心円の磁気パターンを持つマスター磁石を 160℃でターゲット磁石に転写した。転写パターンは理想状態をモデル化した磁場解析結果と近いパターンとなったが、表面磁束密度の設計値と実測値の比として定義する転写率が 39.7%~66.1%となった。さらに、転写向上のために、磁気特性の異なるターゲット磁石を用いて、転写結果への磁気特性の影響を調査し、高い転写率を得るためには、ターゲット磁石の固有保磁力や残留磁束密度が十分に高い必要があることを明らかにした。また、転写手法の最適化に用いる、磁化曲線の温度特性と逆磁界特性、三次元磁場解析を組み合わせて、MPT 法で生じる磁化反転と不可逆減磁を簡易的に計算し、転写後の表面磁束密度分布を予測する手法を提案・検証した。予測精度の検証として、実験結果と比較した結果、加熱温度に対する表面磁束密度や転写率の傾向は一致した。

第4章「MEMS 応用を目指した等方性磁石に対する微細ハルバツハ配列着磁」では、磁気 MEMS への適用可能性が高い、高速堆積可能な厚膜 PLD 磁石が等方性磁石であるため、LAH 着磁法と MPT 法のそれぞれを用いた等方性 NdFeB リング磁石に対する周方向微細ハルバツハ配列着磁法を提案した。LAH 着磁法を用いる手法は、各領域に対して外部磁界の印加方向を面外、面内方向に変化させながらレーザ加熱することで磁化を回転させて、ハルバツハ配列着磁を実現した。MPT 法を用いる手法は、2枚のマスター磁石でターゲット磁石を挟み、加熱し面外方向に交番着磁、その後マスター磁石を1枚外し、ターゲット磁石内の面内方向磁界を増加させ、面内方向に着磁する。まず、等方性 NdFeB リング磁石 外径 = 9.6 mm、内径 = 7 mm、厚さ t0.3 mm に、40 極のハルバツハ配列を実現し、交番着磁と比較して、LAH 着磁法では 1.7 倍の表面磁束密度 226 mT<sub>p-p</sub>、MPT 法では 1.4 倍の表面磁束密度 113.6 mT<sub>p-p</sub>が発生した。

第5章「微細多極磁石マイクロキシャルフラックスモータ」では、LAH 着磁法で微細多極着磁されたリング磁石を有する、マイクロモータの設計、製作を行った。製作したモータは、ロータとして微細多極リング磁石、ステータは、Si 基板上に製作される2相平面マイクロミアンダコイル、リング磁石の潤滑と厚み方向支持として機能する磁性流体で構成される。外径 9.6 mm、内径 7 mm、厚さ t0.3 mm のリング磁石に対して、80 極に交番着磁した。2相平面マイクロミアンダコイルは、Si 基板上に Deep-RIE で加工した蛇行状の溝を、銅メッキで埋め込むことで製作した。これらを用いて、マイクロフラットモータを試作した。コイル基板下部に設置した、2つのホール素子信号を用いて、回転角度のフィードバック制御を実施した。目標値 9° のステップ応答は、整定時間 0.18 sec となった。最後にこのモータの適用例として、外形 15 mm 角、開閉径 Φ7~Φ0.8 mm、厚さ 0.8mm のスマートフォンカメラ用絞り機構を試作し、絞りの開閉駆動を実現した。

第6章「結論」では、本論文で得られた結果を総括し、今後の課題を述べる。

備考：論文要旨は、和文 2000 字と英文 300 語を1部ずつ提出するか、もしくは英文 800 語を1部提出してください。

Note : Thesis Summary should be submitted in either a copy of 2000 Japanese Characters and 300 Words (English) or 1copy of 800 Words (English).

注意：論文要旨は、東工大リサーチリポジトリ(T2R2)にてインターネット公表されますので、公表可能な範囲の内容で作成してください。

Attention: Thesis Summary will be published on Tokyo Tech Research Repository Website (T2R2).

## 論文要旨

THESIS SUMMARY

系・コース： Department of, Graduate major in	機械 機械	系 コース	申請学位（専攻分野）： 博士 Academic Degree Requested Doctor of (工学)
学生氏名： Student's Name	永井 慧大		指導教員（主）： Academic Supervisor(main) 進士 忠彦 教授
			指導教員（副）： Academic Supervisor(sub)

### 要旨（英文 300 語程度）

Thesis Summary (approx.300 English Words )

Chapter 1 introduced magnetic MEMS, which were expected to be used in smartphones and other battery-powered devices. The magnets used in these devices are flat and uniformly magnetized in the thickness direction. The large self-demagnetization field inside the magnet caused the surface magnetic flux density to decrease, which resulted in reduced power output. Therefore, this study aimed to develop a mass-producible fine multi-pole magnetization method for sub-millimeter-thick permanent magnets and to realize magnetic MEMS using fine multi-pole magnetized magnets.

Chapter 2 proposed a slitless laser-assisted local heating fine multi-pole (LAH) magnetization method in which a laser locally heats the surface of a magnet, the coercivity was lowered, and magnetization was reversed by an external reverse magnetic field and leakage flux generated from adjacent parts of the heated area. The effects of magnetization conditions and magnetic properties of the magnet on magnetization were investigated, and high surface magnetic flux density was obtained by using an external distributed magnetic field that promotes magnetization reversal and reduces thermal demagnetization.

Chapter 3 proposed an MPT method in which a master magnet with a magnetic pattern fabricated by the LAH magnetization method and a target magnet to be transferred were stacked and heated, and the coercivity was lowered so that the magnetic pattern can be transferred to the target magnet in a batch. As a verification of principle, a master magnet with three different magnetic patterns was transferred to a target magnet. The effects of magnetic properties on the transfer results were also investigated using target magnets with different magnetic properties. Furthermore, a prediction method for the transfer state of the MPT method was proposed by combining the measured magnetization curves and three-dimensional magnetic field analysis.

Chapter 4 proposed a circular fine Halbach array magnetization method for isotropic NdFeB ring magnets using the LAH magnetization method and the MPT method, respectively, because thick-film PLD magnets were isotropic magnets that can be deposited at high speed and had high potential for application in magnetic MEMS.

Chapter 5 described the design and fabrication of a micromotor with fine multi-pole magnetized ring magnets. The stator consists of a two-phase planar micro meander coil fabricated by Deep-RIE and copper plating on a Si substrate and a magnetic fluid that served as lubrication and thickness direction support for the ring magnet. Finally, as an example of the application of this motor, a prototype aperture mechanism for a thin smartphone camera was fabricated to drive the opening and closing of the aperture.

Chapter 6 described the summary and future issues.

備考：論文要旨は、和文 2000 字と英文 300 語を 1 部ずつ提出するか、もしくは英文 800 語を 1 部提出してください。

Note：Thesis Summary should be submitted in either a copy of 2000 Japanese Characters and 300 Words (English) or 1copy of 800 Words (English).

注意：論文要旨は、東工大リサーチリポジトリ(T2R2)にてインターネット公表されますので、公表可能な範囲の内容で作成してください。  
Attention: Thesis Summary will be published on Tokyo Tech Research Repository Website (T2R2).