レーザ局所加熱による着磁技術を用いた鉄白金厚膜磁石マイクロアクチュエータの試作研究

東京科学大学　総合研究院　未来産業技術研究所
教授　進士　忠彦
（2022 年度 一般研究開発助成 AF-2022211-B2）

キーワード：鉄白金(FePt)磁石，厚膜磁石，レーザ局所加熱，着磁，マイクロアクチュエータ

１．研究の目的と背景

高性能磁石の代表例である焼結ネオジム磁石は，ハードディスクドライブのアーム・ヘッド，光ディスクの光ピックアップ，スマートフォンカメラの手振れ補正アクチュエータなどの情報機器の小形化，高密度化に多大な貢献をしている．しかしながら，従来の機械加工やパルス電源とコイルを利用した着磁法は，磁石の微細加工時の磁気劣化，さらに，パルス着磁に用いるコイルの小形化に伴う通電可能な電流の限界，すなわち，発生磁場の限界から，磁石を用いたデバイスの更なる小形化や集積化に対応できなくなっている．

この限界を打ち破るには，MEMS プロセスに適した堆積磁石の導入，磁石の新しい微細加工・微細着磁法，微細・多層コイルの製造技術の開発が不可欠である．著者らは，パルスレーザで高速・厚膜堆積した（PLD 法）ネオジム磁石に対して，半導体プロセスを用いた微細加工や，レーザ局所加熱することで磁石の保磁力を低下し，弱い外部磁場で微細・局所着磁を実現する，レーザを応用した新しいマイクロ磁石アクチュエータの製造技術 [1-2] を開拓し，各種マイクロアクチュエータ [3-4] を試作している．

一方，これらネオジム磁石をベースとしたマイクロ磁石デバイス試作においても，次の課題に直面している．MEMS デバイスの構造材料で一般的なシリコンと比較し，ネオジム磁石の機械強度は 10 分の 1 以下と小さいため，シリコンなどからなる構造材料に，ネオジム磁石を堆積または接着して，アクチュエータを構成する必要がある．また，シリコン基板などへのネオジム磁石の厚膜堆積においても，内部応力の発生，それに伴う残留変形，さらに，基板からの膜の剥離などの問題が発生する．

これに対して著者らは，ネオジム磁石と比べ，機械強度が極めて高く，磁気特性は大きく劣らず，機械および磁気材料の両面で優れた特性を有する FePt（鉄白金）磁石を用いるマイクロ磁気アクチュエータに着目している．例えば，パルスレーザで堆積した鉄白金磁石を，磁気アクチュエータの磁石材料だけでなく，構造材料として用いることで，シリコンなどによる磁石の補強が不要な，単純構造で，製造プロセスを簡略化可能なマイクロアクチュエータの実現が可能となる．

本研究では，高磁気特性，高耐食性，高い生体適合性に加え，高い引張強度，ヤング率の低さ（変形しやすさ）を兼ね備えた堆積鉄白金磁石を構造と永久磁石材料として用いたカンチレバー型電磁アクチュエータにおいて，動的特性が可変なアクチュエータを提案，試作，機能を実証した．FePt 厚膜は，パルスレーザ堆積(PLD)法で作製し，レーザ局所加熱法により磁化パターンを構成した．同一サイズの FePt カンチレバーを異なる着磁パターン状態で用いることで，同一の交流外部磁場下で異なる周波数応答の実現を目指した．

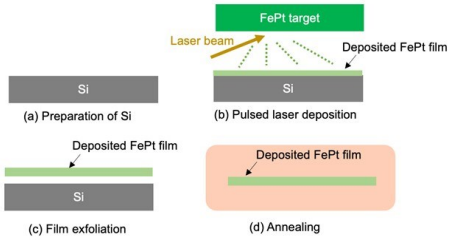


図 1　FePt 厚膜の成膜，基板剥離，熱処理

２．FePt 厚膜の成膜と特性評価

2.1　成膜・熱処理

図 1 に示すように，FePt 厚膜磁石は，シリコン基板上に，真空中にてパルスレーザで回転する FePt ターゲットをアブレーションすることで成膜する．実験で用いたレーザ源は Nd:YAG タイプで出力は 4W である．

成膜に用いるシリコン基板のサイズは 5mm×5mm×0.725mm である．膜厚は，試料毎，成膜位置により分布があるが，成膜時間は 60 分以下で，8.7～62μmのものが成膜された．シリコンの線膨張係数は，FePt 磁石の 5 分の 1 程度であり，成膜時の温度上昇による内部応力の発生により，シリコン基板と FePt 厚膜の界面での剥離が自動的に発生する．図 2 に成膜後の試料例を示す．成膜後，磁気特性を改善するため真空電気炉で 600～700℃，30 分程度の熱処理を実施した．

2.2　磁気特性

成膜，熱処理後 7 T で着磁した FePt 磁石の磁気特性を振動試料型磁力計で測定した．図 3 に 1 例を示すように，試料によりばらつきがあったが，残留磁束密度は 0.28～0.79T で，保磁力は，121～347kA/m であった．この値は，

他の等方性希土類磁石である SmCo 磁石や NdFeB 磁石と比べて，残留磁束密度は同等，保磁力は，3 分の 1～13 分の 1 の範囲であった．

2.3　機械特性

図 4 の送りねじテーブルとロードセルからなる簡易的な引張試験機で FePt 厚膜の機械強度特性を測定した．図 2 で示した FePt 厚膜磁石を放電加工機でダンベル形状の試験片に加工している．両端を測定機に接着固定し，引張試験を行い測定した応力-ひずみ線図の測定例を図 5 に示す．

試料によりばらつきはあるものの，最小幅部が 2 ㎜程度の試料で得られたヤング率は 16～30GPa 程度であった．これは MEMS 構造材料として用いられるポリシリコンの 4～7 分の 1，破断ひずみは 2～10%で，ポリシリコンの 0.5～0.8%程度と比べて，柔らかく，非常に伸びやすい材料であることが確認された．さらに，NdFeB 磁石や SmCo 磁石の破断ひずみが 0.0026～0.0055%であることからも，FePt 磁石は磁石材料ながら，大変形に適する材料であることか確認できた．

3．レーザ局所加熱を用いた微細着磁

3.1　着磁・脱磁方法

本研究では，通常の空芯コイルとパルス電源を用いた着磁法ではなく，レーザ局所加熱を用いた微小領域の着磁方法を検討する．図 6 に概要を示す．レーザビームを走査することで，短時間に FePt 表面を加熱する．加熱と同時に，着磁したい方向に外部磁場を印加する．レーザ加熱により温度上昇した領域は，永久磁石の保磁力が低下するため，比較的弱い外部磁場でも着磁する．磁場を印加した状態で，室温まで冷却すると着磁方向が固定される．本実験で印加した磁場の強さは 0.5T 程度で，永久磁石で十分発生可能なレベルである．

着磁箇所を消磁する場合は，着磁時よりもレーザパワーやレーザ照射時間を増加し，磁石をキュリー温度以上に加熱する．その場合は，着磁と異なり外部磁場は与えない．

図 2　成膜後の FePt 厚膜磁石

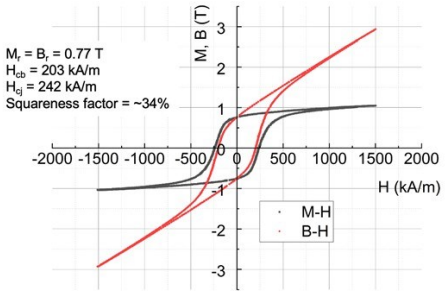


図 3　磁化測定結果の一例

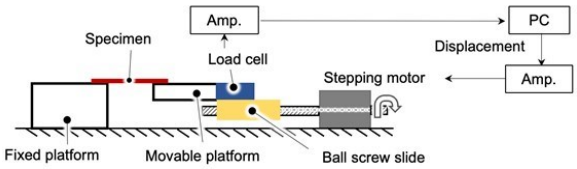


図 4　機械強度測定

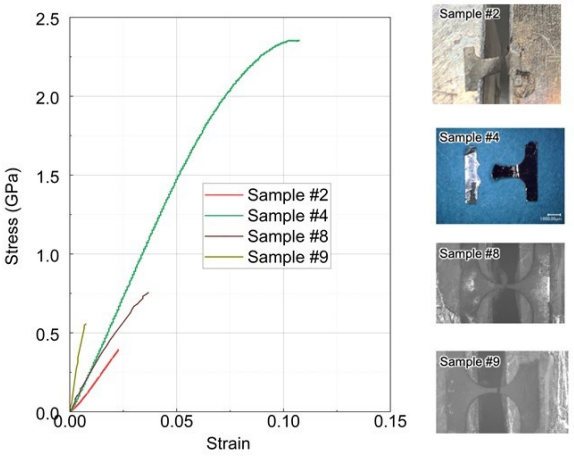


図 5　応力・ひずみ線図

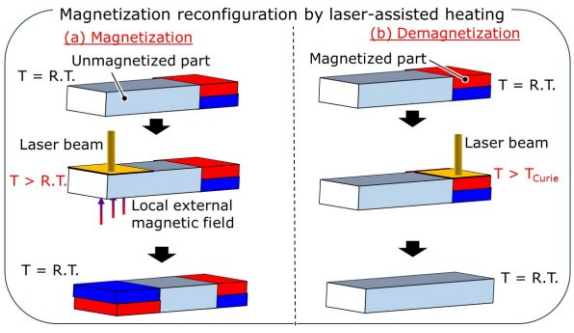


図 6　レーザ局所加熱による着磁・脱磁方法

3.2　着磁実験結果

図 7 に着磁実験に用いる FePt 試料の一例，図 8 に着磁パターンと表面磁束密度のシミュレーション結果と測定結果の比較を示す．試験片は，5×5mm の平均膜厚 23 μ m の FePt 厚膜を，幅 0.8mm 程度にハサミで切断したものを利用した．厚膜の磁気特性は，振動型磁力計で測定した結果，残留磁束密度は 0.36T，保磁力は 122kA/m であった．この値は，有限要素法を用いた静磁場解析を用い，表面磁束密度を計算するために用いる．レーザ局所加熱に用いるレーザは，YVO4 レーザで，出力は 6W，スポットサイズは φ0.1mm，レーザの走査スピードは 170 mm/s で，試料表面を加熱する．

図 8 の左図は先端のみ 1 極を，右図は先端と中央部を 2 か所幅 1mm で着磁した結果である．試料下部に永久磁石を配置し，垂直方向磁場を与え，レーザ局所加熱を行うことで着磁した．ホール素子を試料 0.1mm 上で中心線に沿って走査し，Z 軸方向の磁束密度成分を計測した結果を図に示している．計算値と実験値は，着磁形状のずれは多少あるが，発生磁場の大きさはほぼ一致しており，レーザ局所加熱により，予想通りの着磁が実現できることが確認できる．

4．片持ち梁アクチュエータの可変着磁による動特性の切り替え

4.1　動特性切り替え原理

図 9 に同一形状を有する片持ち梁アクチュエータの駆動原理を示す．本アクチュエータの特徴の第一は，構造材料としても優れ，また磁石としても機能する FePt 厚膜のみを材料とし，通常のマイクロアクチュエータと異なり磁石材料と構造材料の接着・接合が不要で，磁石・案内の一体構造に大きな特徴がある．これは，MEMS プロセスなどの微細加工で製作する場合に，プロセスが単純となる特長を有している．

次に，この構造では，全体が FePt 厚膜でできているため，本文でも紹介したレーザ局所加熱を外部磁場中で行えば，様々な磁気パターンの形成が可能となる．図 9 中の左図は，FePt 片持ち梁の先端のみを着磁した場合，右図は，先端部と中央部を磁極が反対になるように着磁した例になる．この着磁パターンは，図 6 で説明した着磁と消磁プロセスを行うことで，左のパターンから右に，右から左に自由に何度でも変更することが可能となる．

図 9 の着磁パターンの場合，片持ち梁下部の同一位置に空芯コイルを配置して交流電流を作用しても，着磁パターンの切り替えにより，周波数特性は変化することが予想される．すなわち，パターン 1 は，梁の 1 次振動モードが大きくなり，パターン 2 では，2 次振動モードが大きく発生する振動が期待できる．

4.2　動特性試験装置

図 10 に片持ち梁アクチュエータの試験装置を示す．(a) は実際の試験装置，(b) はその概要である．片持ち梁アクチュエータが垂直方向固定されるようにステンレスのジグで指示する．前方からは．空芯コイルで交流磁場を与え，後方から三角測量方式を採用したレーザ式測長センサで，梁先端の変位を計測する．

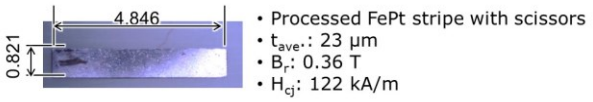


図 7　FePt レーザ着磁試料例

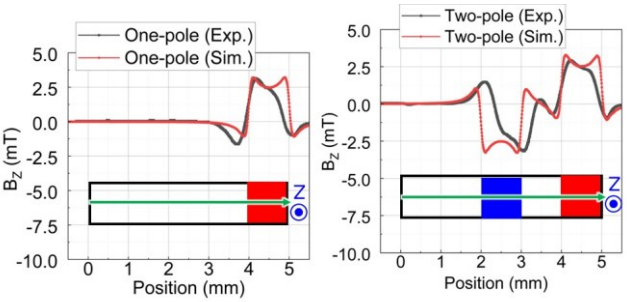


図 8　FePt レーザ着磁結果例

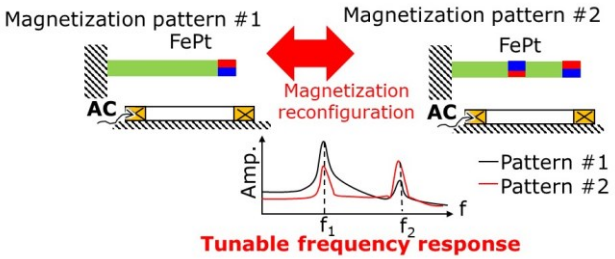
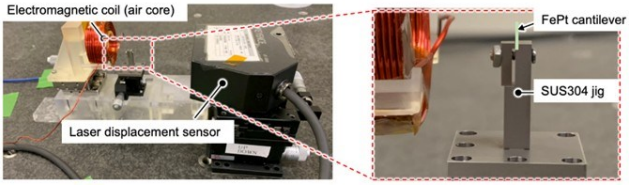
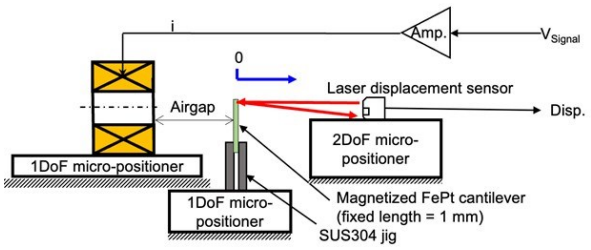


図 9　片持ち梁アクチュエータの動特性切り替え原理



(a) 試験装置写真



(b) 試験装置概要

図 10　片持ち梁試験装置

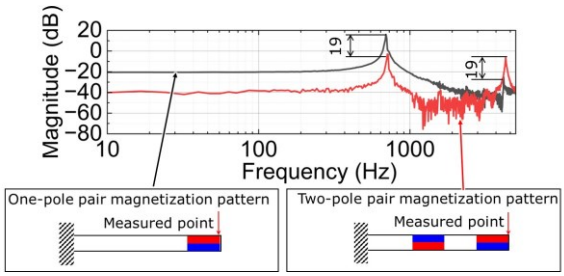


図 11　周波数応答特性（左：先端着磁，右：先端，中央逆着磁）

4.3　周波数応答特性測定結果

図 11 に空芯コイルへの入力電圧から先端変位までの伝達特性を計測した結果を示す. 片持ち梁は図 7 と同じものを用い，異なる着磁を施した後，それぞれの場合の伝達特性を計測した. 左の着磁パターンでは，片持ち梁の 1 次モードの振動を励振しやすい力分布が梁に働き, 右の着磁パターンでは先端部と中央部の力が逆相となる 2 次の振動モードが励振しやすい力の分布が発生している. 固定方法の再現性の精度が低いため多少のずれは発生しているが, ほぼ, いずれの場合も 1 次と 2 次の固有振動数の違いは少なく，それぞれ，694 Hz と 709 Hz，4170Hz と 4290 Hz となっている.

一方，同じ励振用の磁場が発生しているにも関わらず，先端着磁の片持ち梁の先端変位は，1 次の振動モードが 2 極着磁とくらべ約 10 倍大きく発生し，逆に，2 次の振動モードは，2 極着磁のほうが，先端のみ着磁と比べ，同様に振幅は約 10 倍大きく発生している．すなわち，レーザ局所加熱で着磁状態を切り替えれば, 片持ち梁振動の周波数応答特性を，外部磁場を変化することなく，大きく変化させることが出来ることを示している.

５．おわりに

本研究では，FePt 厚膜の機械特性を明らかにし，ヤング率が小さく，伸び率が大きい点から，弾性変形を生み出す MEMS 用構造材料として有望であることを示した. また, レーザ局所加熱による着磁や消磁が一つのサンプルに対して可能であり, 様々な着磁の書き換えが可能であることを示した．更に，FePt 厚膜の片持ち梁を製作し，着磁パターンをレーザ局所加熱で変更することで, 外部磁場を変更することなく, 動特性を変化することが可能なことを示した.

今後の課題は，FePt 厚膜の膜厚をできるだけ均一に堆積すること，また，可変着磁をすることでマイクロデバイスの高機能化や多機能化につながるアプリケーションを考案することである.

謝　辞

本研究の実施に当たり，FePt 厚膜の成膜，熱処理，磁気特性の計測において, 長崎大学　中野正基教授の全面的なご協力を頂いた．さらに，厚膜の引張試験を用いた機械特性評価においては, 東京科学大学　佐藤千明教授のご指導を頂いた．ここに謝意を示す.

参考文献

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, (2016) 219-224.

2）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 Transactions on Magnetics*, Vol. 53, No. 4 (2017) 2100104.

3）Dong Han, Tadahiko Shinshi, Makoto Kine, Energy Scavenging from Low Frequency Vibrations through a Multi-Pole Thin Magnet and a High-Aspect-Ratio Array Coil, *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing-Green Technology*, Vol. 8, (2020)139-150.

4）Dong Han, Tadahiko Shinshi, Noriei Azuma, Shogo Kadota. An in-plane, large-stroke, multipole electromagnetic microactuator realized by guideways stacking mechanism, *Sensors and Actuators A: Physical*, 298, (2019) 11563.

5）Keita Nagai, Riku Fukazawa, Yu Okawara, Haruhiro Komura, Tadahiko Shinshi, Ultra-thin Variable Aperture Mechanism Utilizing a Micro Flat Motor with a Multipole Ring Magnet, *IEEE Access*, Vol. 13, (2025) 7672 - 7682.