

**Polyimide 基板上 GdFeCo 磁性合金薄膜における機械的変形に対する
磁気特性の可逆応答性と基板内不均質**

**Reversible response of magnetic properties to mechanical deformation and
in-substrate heterogeneous of GdFeCo magnetic alloy thin film stacked on polyimide substrate**

○藤井 優樹¹, 吉川 大貴³, 笠谷 雄一², 塚本 新³

*Yuki Fujii¹, Hiroki Yoshikawa³, Yuichi Kasatani², Arata Tsukamoto³

Abstract : This study proposes and verifies a novel mechanical deformation detection method utilizing the magnetic and electrical response characteristics of magnetic thin films. We have previously reported that not only does the anomalous Hall voltage change in response to sample deformation, but it can also exhibit a reversible response. This report investigates the mechanism behind the reversible anomalous Hall voltage response induced by mechanical deformation of flexible GdFeCo ferrimagnetic alloy thin films from the perspective of magnetic order.

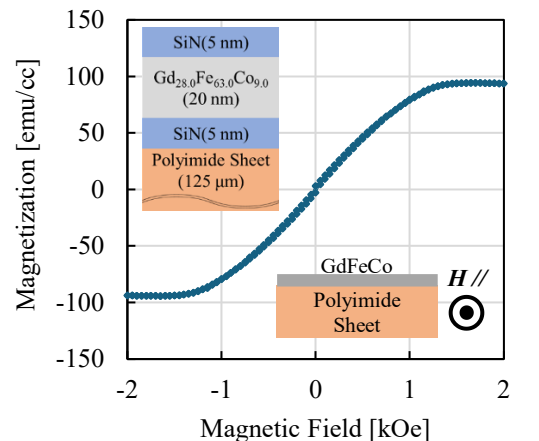
1. はじめに

近年, Virtual Reality / Augmented Reality (仮想現実/拡張現実) 技術の進展に伴い, 種々のセンシング技術を用いた身体動作の信号検出が求められている^[1]. このうち, 身体表面に装着可能なサイズのデバイスとして一般的な変形検出に用いられるひずみゲージを曲率半径数 mm 程度の小さな曲げ変形へ応用するには高感度検出が課題となる. 我々は逆磁歪効果^[2]を想定した小さな曲げ変形も検出可能な磁性薄膜における異常ホール効果を活用したフレキシブルな機械的変形検出素子による実現可能性を曲げ変形有無での電圧変化を実験検討し, 変形に応じた電圧変化のみならず可逆応答を生じ得ることを報告した^[3]. この異常ホール効果を介した出力電圧の可逆応答性に対しこれまで, 機械的変形に伴い磁気異方性成分に変化が生じることを確認してきたものの, その起源については十分な理解には至っていない. そこで本検討では, 機械的変形印加時の磁気異方性成分の混在を, 磁気光学イメージングと光学顕微鏡像により確認した不均一構造に対し, 表面形状計測を用いて検討する.

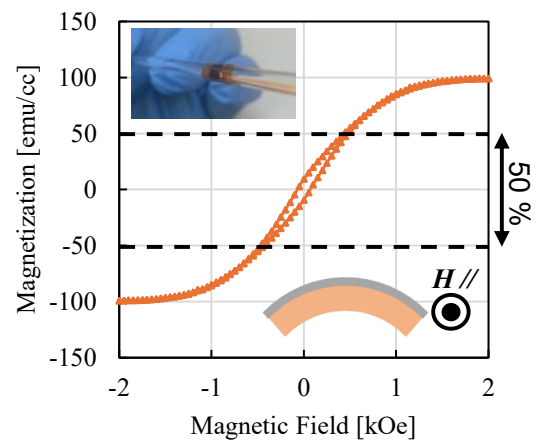
2. 実験方法

試料は DC / RF マグネトロンスパッタリング法により SiN (5 nm) / Gd_{28.0}Fe_{63.0}Co_{9.0} (20 nm) / SiN (5 nm) / Polyimide sheet (125 μm) を作製した. 磁気異方性成分の変化に対し, 振動試料型磁力計 (SQUID - VSM) により, 扁平状態と機械的変形状態でそれぞれ膜面内方向に磁場を掃引し, 磁化特性を計測・評価した. 変形状態は曲率半径が約 2.7 mm の半楕円柱形状の試料治具に固定することで実現した.

磁気異方性成分の混在状況に対しては, 中心波長 617 nm の LED 光源を用い, 約 40 Oe の外部磁場印加中における磁気光学極 Kerr 効果イメージングから磁区像と光学顕微鏡像の観察を行った. さらに, 走査型プローブ顕微鏡 (DFM) を用いて試料の表面形状を計測・観察した.



(a) Flat



(b) Bend

Fig. 1 Magnetic properties in each state due to mechanical deformation.

1: 日大理工・博士課程前期・電子 2:日大理工・研究所研究員 3: 日大理工・教員・電子

3. 実験結果

Fig. 1 に各形状状態における磁気特性を示す。扁平状態においては、垂直磁気異方性を有する磁性体の磁化容易軸と垂直方向へ磁場を掃引した際に期待される回転磁化特性を示した。これに対し変形状態では、全体の約 50 %で磁化変化率がより急峻なヒステリシスを伴う成分を生じていることを確認した。磁気光学極 Kerr 効果イメージングから、等粒状組織構造を持つ核形成磁化反転パターンが観察された。この時、Fig. 2 に示す光学顕微鏡像から輝度分布を確認したため、DFM により表面形状を計測した。結果を Fig. 3 に示す。数十 μm 四辺の範囲に対し、高さ数十 nm から数百 nm の凸形状が複数存在し、構造が試料全体に分布していることを確認した。

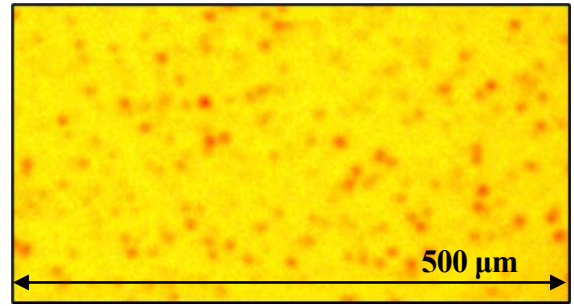


Fig. 2 Optical microscope image of the sample

4. 考察

4.1 符号反転を伴わない可逆応答性を生じ得る磁化挙動

機械的変形に伴うひずみにより磁気異方性軸が、基準の垂直磁気異方性軸から一部変化することを確かめた。一方で全体的な磁気特性は扁平状態と同等の回転磁化特性が支配的であることから、垂直磁気異方性成分と垂直から変化した磁気異方性成分が同一試料内に混在していることを明らかにした。この混在の内、機械的変形に伴うひずみにより磁気異方性が膜面垂直方向から変化した領域を生じたことから残留磁化状態における異常ホール電圧は減少したと考えられる。このとき、全体の磁気特性は完全な膜面内磁気異方性には至っていないと言える。その後、機械的変形を取り除いた際に変化していた磁気異方性成分の回復は、維持されていた垂直磁気異方性軸との相互作用により、符号反転を伴わない異常ホール電圧の可逆応答性を示したと考えられる。

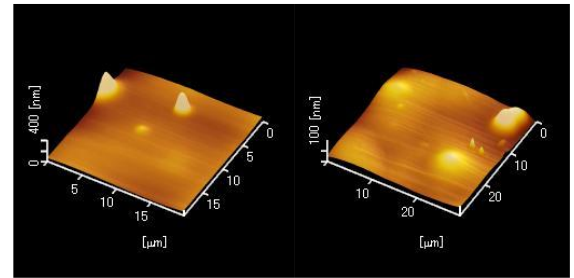


Fig. 3 Surface roughness measurements of sample by scanning probe microscopy

4.2 変形状態における磁気異方性成分の混在

今回の検討により、この磁気異方性成分の混在が生じ得る要因として考えられる物質内部の不均一な磁気構造に対し、磁区像観察から数十 μm スケールでの構造が存在することが分かった。また DFM による表面形状計測により直径が数十 μm 、高さが数十 ~ 数百 nm の凸形状が存在することが確認されたが、本試料と同時製膜した高い平滑性を持つ Si 基板と磁気・異常ホール電圧特性を比較しても大きな変化は見られず同等の特性を示したことから、膜面内方向に不均一な構造を有するも磁気構造に大きな寄与はないと言える。これらのことから、磁性薄膜ではなく Polyimide sheet に不均一な構造がある可能性を強く示した。

5. まとめ

本検討では、フレキシブルな磁性薄膜の異常ホール効果を利用した機械的変形検出素子の形成検討で確認した異常ホール電圧の可逆応答性に対し磁化特性計測・評価から磁気異方性の混在を明らかにした。この混在に対し、試料の不均一構造による磁気特性への寄与を検討した結果、光学顕微鏡像観察から数十 μm スケールの構造が存在すること、粒状の組織構造が存在することが明らかになった。この組織構造が磁気構造に寄与しうるかを DFM により検証した所、試料表面全体に非常になだらかな凸形状が分布していることが分かった。しかし、試料の磁気秩序に対する微小な凸形状による影響は小さく、直接的に可逆応答性を生じた要因と考えられる磁気異方性成分の混在を誘起した可能性は低いと考えられる。したがって、磁性薄膜部位ではなくフレキシブル基板に不均一構造を有する可能性を示した。

6. 参考文献

- [1] Z. Zhang, et al. : *Adv. Intell. Syst.* Vol. 4, 2100228 (2022).
- [2] D. Wang, et al. : *J. Appl. Phys.* Vol. 97, 10C906 (2005).
- [3] Y. Fujii, et al. : *The Papers of, Technical Meeting on "Magnetics", IEE Japan.* MAG-25-013 (2025).