

高性能バイモルフ U 字型振動発電デバイスの実現に向けた 負の逆磁歪材料の振動発電特性の評価

角田 稜悟¹、杉山 太一¹、岡田 拓¹、藤枝 俊^{2,3}、清野 智史^{1,2}、中川 貴^{1,2}
(¹大阪大工、²大阪大 OTRI-SPIN、³島根大先端マテリアル研究開発共創機構)

Evaluation of vibration power generation properties of negative inverse magnetostrictive materials
for application to high-performance U-shaped bimorph devices.

R. Tsunoda¹, T. Sugiyama¹, T. Okada¹, S. Fujieda^{2,3}, S. Seino^{1,2}, T. Nakagawa^{1,2}

(¹Graduate School of Engineering, Osaka Univ., ²OTRI-SPIN, Osaka Univ., ³IAMR&D, Shimane Univ.)

はじめに

IoT の普及に伴い、メンテナンスフリーの電源としてエネルギーハーベスティングの活用が期待されている。様々な方式が検討されている中、磁性体の逆磁歪効果を利用した振動発電エネルギーハーベスティングは、高い耐久性および高い発電効率を有し、身近に頻発する低い周波数の振動にも対応できるため注目されている¹⁾。現在、振動発電用の材料として、正の飽和磁歪を持つ材料(正の逆磁歪材料)を U 字型フレームの表側だけに貼り付けたユニモルフ構造のデバイスが注目を集めている。正の逆磁歪材料に加え、フレームの裏側に負の飽和磁歪を持つ材料(負の逆磁歪材料)を貼り付けたバイモルフ構造では、さらなる高性能化が期待される²⁾。そこで、本研究では、バイモルフ U 字型デバイスの開発に向けて、負の逆磁歪材料候補の振動発電特性の評価を行った。

実験方法

Fig. 1(a)に示すように、厚さ 0.5 mm の鉄製の U 字型フレームの裏側に負の逆磁歪材料候補(約 $16 \times 4 \times 0.5 \text{ mm}^3$)を貼り付けたコアに、3638 巻の空芯コイルを取り付けてデバイスを製作した。本デバイスの固定端を加振機で強制的に 100 Hz で振動させた際にコイルに発生する交流の開回路電圧を測定し、そのゼロからピーク値 $V_{\text{op}}^{\text{op}}$ を評価した。この際、自由端に錘を取り付け、機械共振周波数が 100 Hz で自由端の変位が 2.0 mm となるように調整した。

実験結果

負の逆磁歪材料候補として、Ni 金属と $\text{Cu}_{0.5}\text{Co}_{0.5}\text{Fe}_2\text{O}_4$ (Cu-Co フェライト)に着目した。Ni 金属および Cu-Co フェライトの飽和磁歪は、それぞれ 37 ppm および 341 ppm である²⁾³⁾。これらを搭載したデバイスの $V_{\text{op}}^{\text{op}}$ のバイアス磁束依存性を Fig.1(b)に示す。 $V_{\text{op}}^{\text{op}}$ はバイアス磁束の増加に伴い増大し、ピークを示す。Ni デバイスおよび Cu-Co フェライトデバイスの $V_{\text{op}}^{\text{op}}$ の最大値は、それぞれ 1.04 V および 0.28 V であった。つまり、Cu-Co フェライトと比較して、Ni の飽和磁歪は小さいが、優れた振動発電特性を示すことが明らかになった。

参考文献

- 1) T. Ueno, *AIP Adv.*, **9** (2019) 035018.
- 2) T.Sugiyama *et al.*, *IEEE Tras. Magn.*, **59** (2023) 8000906.
- 3) S.Kosugi *et al.*, *Mater.Trans.*, **64** (2023) 2014.

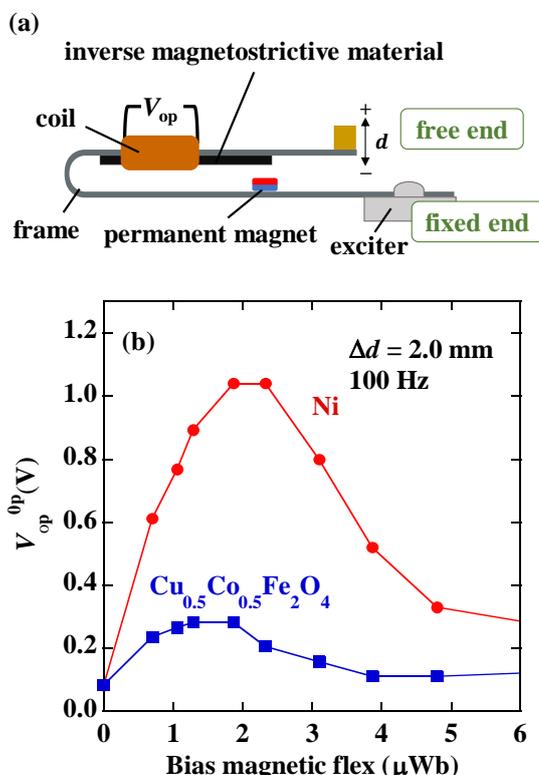


Fig. 1 (a) Schematic of test device and (b) bias magnetic flux dependence of maximum voltage $V_{\text{op}}^{\text{op}}$

拡張型ランダウ自由エネルギーモデルによる スキルミオン形成過程における DMI エネルギー密度解析

東理大先進工¹, 岡山大学², 京都大学³, 東京大学⁴

°(M1)町田 陽太郎¹, (M2)谷脇 三千輝¹, Foggiatto Lira Alexandre¹,
三俣 千春¹, 大林 一平², 平岡 裕章³, 石坂 香子⁴, 小嗣 真人¹

DMI Energy Density Analysis in the Formation Process of Skyrmions by Extended Landau Free Energy Model

Tokyo Univ. of Sci.¹, Okayama Univ.², Kyoto Univ.³, Univ. of Tokyo⁴,

°(M1)Yotaro Machida¹, Michiki Taniwaki¹, Alexandre Lira Foggiatto¹,

Chiharu Mitsumata¹, Ippei Obayashi², Yasuaki Hiraoka³, Kyoko Ishizaka⁴, Masato Kotsugi¹

E-mail: 8224566@ed.tus.ac.jp

「スキルミオン」は、渦状のナノ磁気構造を持つトポロジカル欠陥の一種であり、高性能のメモリ素子を実現する可能性があるとして、近年注目されている。スキルミオンの形成や消滅、安定性には、ジャロシンスキー・守谷相互作用(DMI)が関係しているが、スキルミオンの形成過程は未だ完全に理解されておらず、実デバイスの設計には課題が多く残っている^[1]。

我々はこれまでに、拡張型ランダウ自由エネルギーモデル(eX-GL)を開発し、トポロジーを活用した磁区構造の記述や、データ空間でエネルギー安定性を解析してきた^[2]。本研究では、スキルミオン形成過程に eX-GL モデルを展開し、スピントクスチャーの構造変化と DMI エネルギー密度の関係性をデータ空間上で描画し、スキルミオンの形成過程を解析した。

スキルミオンの形成過程は、Mumax³による LLG シミュレーションによりデータ生成した。DMI 定数は、1.25, 1.30, 1.40, 1.50, 1.60, 1.75 mJ/m³の計 6 種類設定し、外部磁場依存性を計算した。得られたスピントクスチャーにパーシステントホモロジー(PH)解析^[3]を適用し、特徴量を抽出した。また、DMI エネルギー密度およびスキルミオン形成にかかわる種々のエネルギー密度を算出した。機械学習では、説明能力の高い主成分分析(PCA)を用いて、構造変化とエネルギーの関係性を定量的に結び付けた。

eX-GL を用いてスキルミオンの形成過程をデータ空間で描画した(Fig.1)。本図により、スピントクスチャーの構造変化に必要なエネルギーコストを解析できる。スキルミオンの形成に伴って DMI エネルギー密度が急峻に増加し、閾値を超えるとストライプドメインが消失し始め、スキルミオン相が安定し始める振る舞いを捉えている。特徴量の物理的解釈を行ったところ、PC1 は磁化の良質な説明変数で、PC2 が DMI の説明変数であることが示唆された。これにより、スキルミオンの形成過程を定量的に解析できる。また、PC1 と DMI エネルギー密度の差分の関係を示す(Fig.2)。この結果をスピントクスチャー変化と結びつけることで、目視では確認が難しいわずかな構造変化を捉えることができる。

本研究では拡張型ランダウ自由エネルギーモデルをスキルミオンの形成過程に展開し、スピントクスチャーの構造変化と DMI エネルギー密度変化の関係をデータ空間で描画することに成功した。得られた特徴量は磁化および DMI とロバストに接続できることを明らかにした。

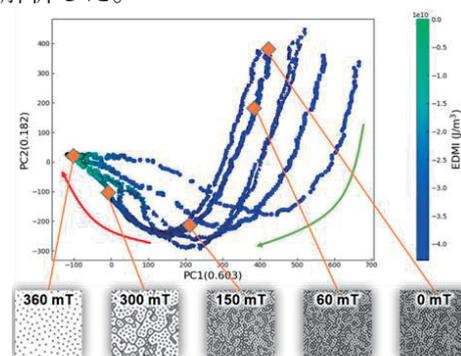


Fig.1 DMI energy costs using eX-GL

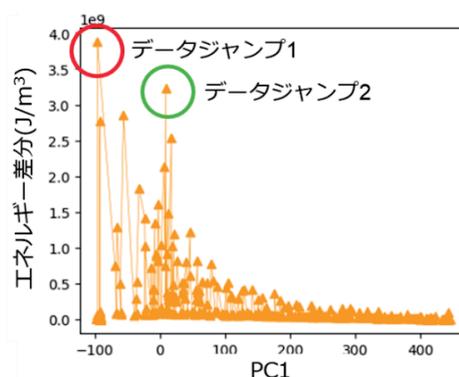


Fig.2 DMI energy costs using eX-GL

[1] Y. Tokura, N. Kanazawa, *Chem. Rev.* **121**, 2857-2897, (2021)

[2] S. Kunii, *et al.*, *Sci Rep*, **12**, 19892 (2022).

[3] I. Obayashi, T. Nakamura, and Y. Hiraoka, *J.Phys. Soc. Jpn.*, **91**, 091013 (2022)

機械学習によるスピントクスチャーの物理的解釈

清水 直人¹, 長岡 竜之輔¹, 町田 陽太郎¹, Lira Foggiatto Alexandre¹, 小嗣 真人¹
(東理大¹)

Physical interpretation of spin texture using machine learning

Naoto Shimizu, Ryunosuke Nagaoka, Yotaro Machida, Alexandre Lira Foggiatto, Masato Kotsugi
(Tokyo Univ. of Science)

はじめに 近年、情報化社会の急速な発展を背景に、スキルミオンと呼ばれるトポロジカルな磁気構造を情報担体として利用した、新規メモリデバイスの開発が期待されている^[1]。スキルミオンは形成する温度及び磁場の領域が狭く、制御が困難である。そのため、形成の安定化を図るためにスピントクスチャーと Dzyaloshinskii-Moriya 相互作用(DMI)等の物理パラメーターとの関係接続を行うことが大きな課題となっている。従来では畳み込みニューラルネットワークによるスピントクスチャーの DMI 推定が行われていたが、モデルの解釈は説明困難であった^[2]。本研究では、深層学習モデルに解釈性を付与する手法を適用することで、DMI 定数とスキルミオン形成の関係を解析することを目標とした。具体的には、シミュレーションで取得したスピントクスチャーに対して畳み込みニューラルネットワークを適用し、Gradient-weighted Class Activation Mapping(Grad-CAM)による特徴抽出とその物理的解釈を行った^[3]。

実験方法 mumax³を用い、Landau-Lifshitz-Gilbert(LLG)方程式に基づくマイクロマグネティックシミュレーションにより、外部磁場依存のスピントクスチャー画像を取得した。材料パラメーターとして DMI 定数を 7 種類に設定した。次に、生成した画像に対して畳み込みニューラルネットワークを適用し、DMI 定数の分類モデルを作成した。さらにモデルに対して Grad-CAM を適用し、画像分類の根拠部分をヒートマップで可視化した。また、隣接セルの磁気モーメントを用いて DMI エネルギー密度の算出を行い、そのマッピングを行った。これらのマッピング結果より、DMI 定数が構造に与える寄与因子の物理的解釈を考察した。

結果および考察 DMI 分類モデルに対して Grad-CAM を用いて判断根拠を可視化した画像(左)と DMI エネルギー密度をマッピングした画像(右)を Fig.1 に示す。Grad-CAM で示された画像分類の根拠と DMI エネルギー密度の低い領域が多くの箇所一致した。したがってモデルは DMI エネルギーの安定相に敏感に反応し、構造とエネルギー密度の因果関係を抽出できていると考えられる。解釈が困難とされている深層学習を用いて、スピントクスチャー形成に物理的解釈を与えることに成功した。本手法により、予測精度の高い深層学習による、データ駆動的な磁区画像に対する物理的解釈を行うことが可能になると期待される。

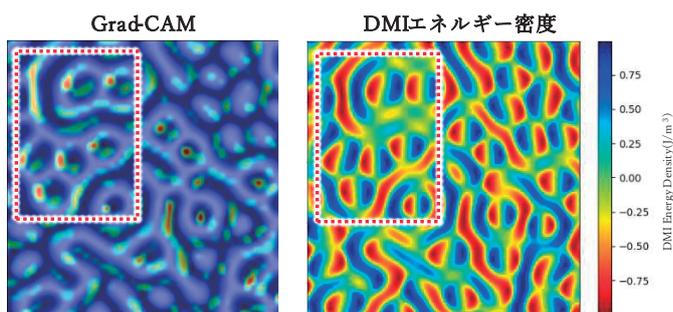


Fig.1 Contributing features visualized by Grad-CAM (left) and DMI energy density map (right)

参考文献

- [1] T. Yoshinori, K. Naoya, *Chem. Rev.* **121**, 2857-2897 (2021)
- [2] M. Kawaguchi, et al, *npj Computational Material*, **7**, 20 (2021)
- [3] R. R. Selvaraju, et al. *Proceedings of the IEEE international conference on computer vision*. 618-626 (2017)

偏極中性子小角散乱による Pt₃Fe 反強磁性体中の 強磁性ナノドメインの形態評価

三上翔也¹, 小林悟¹, 廣井孝介², 熊田高之², 元川竜平²
(¹岩手大学, ²JAEA)

Morphological characterization of ferromagnetic nanodomains for Pt₃Fe antiferromagnet by polarized small-angle neutron scattering

S. Mikami¹, S. Kobayashi¹, K. Hiroi², T. Kumada², R. Motokawa²
(¹Iwate Univ. ²JAEA)

はじめに

L1₂型規則合金である Pt₃Fe は T_N=170 K 以下に q_M=(1/2 1/2 0)型の反強磁性秩序相を持つが[1], 1.3%程度の僅かな塑性歪みを加えただけで室温でも強磁性を示すことが知られている[2]。塑性変形により, すべり面である FCC {111} 面上に逆位相境界が形成し, 最近接 Fe 原子対が生ずることから, この強磁性の出現は最近接強磁性交換相互作用による強磁性ナノドメイン形成によると考えられている。本研究では, 偏極中性子小角散乱 (SANS) 実験により, 塑性変形した Pt₃Fe 単結晶における強磁性ナノドメインの磁気的形態 (形, サイズ) を明らかにすることを目的とする。

実験方法

[001]方向に歪み 11.6%で引張変形した Pt₃Fe 単結晶試料を使用した。サイズ約 2×1×10 cm³に切り出した平板試料を 4 本, アルミニウムセルに並べて固定・封入した。[001]方向が磁場方向となるようにセルを冷凍機にマウントし, 温度 T=10K, 最大磁場 1T の条件で SANS 実験を行った。SANS 実験は日本原子力研究開発機構 JRR-3 に設置の集光型偏極中性子超小角散乱装置 SANS-J を用いた。中性子スピンの偏極方向が印加磁場に対して上向き (+), 下向き (-) の場合の散乱強度 I⁺(Q), I⁻(Q) を測定した。また, 磁場印加方向依存性を調べるため[110]方向でも測定を行った。

実験結果

図 1 に中性子偏極方向に依存した散乱強度 I_{diff}(Q)=I⁺(Q)-I⁻(Q) の磁場依存性 (磁場方向//[001]) を示す。I_{diff}(Q) は磁場方向に対して垂直方向 ±20° の角度範囲で取得した散乱強度であり, 磁場方向に向いた磁気成分の構造を反映している。Q<0.03 Å⁻¹ の領域で I_{diff}(Q) に有意な散乱強度が現れ, その傾きは Q<0.01 Å⁻¹ で緩やかになることが分かった。特に, 磁場 1T では傾きの変化は Q~0.005 Å⁻¹ 付近で起こるが, 磁場-0.2T では Q~0.008 Å⁻¹ 近傍で起こることが分かった。この結果は, 磁場 1T でサイズ約 130nm の強磁性ナノドメインが, 磁場を-0.2T まで減少させると約 80nm まで小さくなることを示唆している。

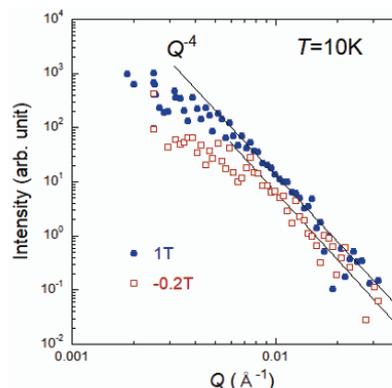


図 1. 磁場方向に垂直な Q 方向における I⁺(Q)-I⁻(Q)。温度は 10K, 磁場は 1T と -0.2T。

謝辞

本研究の中性子散乱実験は, JRR-3 施設共用研究課題 (課題番号: 2023A-A17, 2024A-A27) において実施した。

参考文献

- 1) G.E. Bacon and J. Crangle, Proc. Roy. Soc. (London) A272 (1963) 387.
- 2) S. Takahashi, Y. Umakoshi, J. Phys.: Condens. Matter 2 (1990) 2133

垂直磁界アシスト式電磁誘導型振動発電デバイスの 軟磁性梁中における磁束分布に及ぼす短冊梁形状の影響

中村優太・神谷颯・大竹充
(横浜国大)

Influence of Rectangular Beam Shape on the Magnetic Flux Distribution in Soft Magnetic Beam
of Perpendicular Magnetic Field Assisted Electromagnetic Vibration Powered Generator

Yuta Nakamura, Soh Kamiya, and Mitsuru Ohtake
(Yokohama Nat. Univ.)

はじめに 環境発電デバイスは、IoT デバイスなどのワイヤレス化とメンテナンスフリー化のために必要となる自立型電源の候補として期待されている。振動発電のひとつである電磁誘導型は、内部抵抗が低いため高出力化が可能で、脆性材料を振動部材に使用しないため耐久性が高く、また、強誘電材料に比べて強磁性材料は温度安定性が高いなどの優位性を持つ。電磁誘導型の方式として、磁石揺動式や逆磁歪式¹⁻³⁾が知られているが、最近著者らは更なる高出力化が可能な垂直磁界アシスト式を開発し⁴⁾、昨年度の学術講演会でその基本動作原理を報告した⁵⁾。この方式では、梁材料に軟磁性材料を用いるため、その形状が振動特性だけでなく、形状磁気異方性に起因して磁化特性にも影響を及ぼし、その結果、発電性能も変化することが考えられる。そこで、本研究では、長さや厚さを一定とし、幅のみを変化させることにより梁の固有周波数は変化させずに、形状磁気異方性による磁化特性のみを変化させた。そして、振動発電時の梁内の磁束分布を調べることで、梁形状に関するデバイスの設計指針を得ることを目的とした。

実験方法 梁材料には無方向性珪素鋼板 (JIS 規格: 35A270) を用い、長さや厚さはそれぞれ 50 mm と 350 μm で一定とし、幅のみを 10~50 mm の間で変化させた。そして、梁の長さ方向の端から 10 mm の部分までを固定することにより片持ち状態にし、加振機により梁のみを 1.5 G の加速度で共振させた。そして、450 Oe の一様垂直アシスト磁界をヘルムホルツコイルにより印加し、Fig. 1(a)に示すように検出コイルを長さ方向に対してトレースさせることにより、磁束の分布を測定した。

実験結果 幅が 10 mm と 20 mm の梁に対して、コイルの位置 (Fig. 1(a)) を変化させて測定したピーク電圧の分布を Fig. 1(b) に示す。どちらの幅の梁においても、梁の中央部付近でピーク電圧が最大となった。ファラデーの電磁誘導の法則により算出した磁束密度変化量 (ΔB) の分布を Fig. 1(c) に示す。梁の中央部付近で ΔB が最大となっているのに対して、端部に近づくにつれて ΔB は減少している。LLG シミュレーションと照らし合わせた結果、端部では磁極が形成されることで、磁束方向が一様にならなかったことが要因として考えられる。当日は、その他の幅の梁を用いて測定した結果も含めて、梁形状が磁束分布に及ぼす影響を報告する。

- 1) T. Ueno and S. Yamada: *IEEE Trans. Magn.*, **47**, 2407 (2011).
- 2) S. Fujieda, S. Suzuki, A. Minato, T. Fukuda, and T. Ueno: *IEEE Trans. Magn.*, **50**, 2505204 (2014).
- 3) 長内史也, 栢修一郎, 石山和志: 平成 31 年電気学会全国大会論文集, p. 146 (2019).
- 4) 大竹充, 川井哲郎, 二本正昭「発電装置」特願 2022-086851 / 特開 2023-174153 (2022).
- 5) 大竹充, 中村優太, 石川瑛士, 川井哲郎, 二本正昭: 第47回日本磁気学会学術講演概要集, p. 259 (2023).

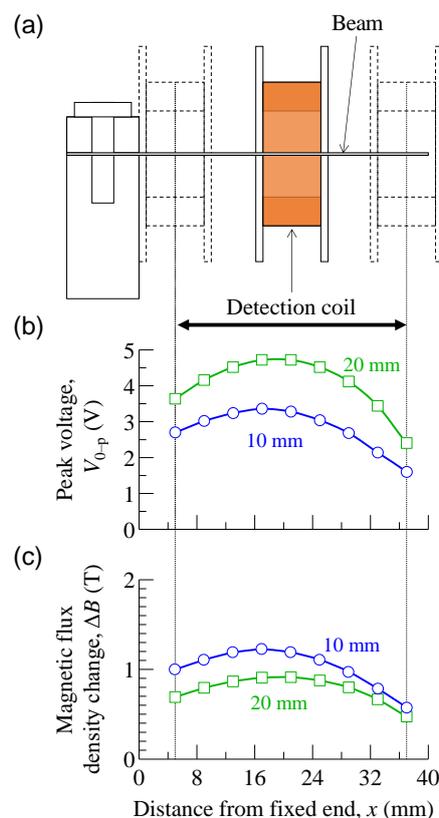


Fig. 1 (a) Cross-sectional schematic diagram of positional relationship between beam and coil. (b, c) Distributions of (b) peak voltage and (c) magnetic flux density change for beams of 10 mm and 20 mm width.

Pt/Fe/Pt を挿入した Nb/V/Ta 超格子における 超伝導特性の Pt 膜厚依存性

所風伍¹、成田秀樹¹、河原崎諒¹、飯島諒¹、久富隆佑^{1,2}、
 軽部修太郎^{1,2}、塩田陽一^{1,2}、小野輝男^{1,2}
 (京大化研¹, 京大 CSRN²)

Pt thickness dependence of superconductivity in Pt/Fe/Pt-inserted Nb/V/Ta superlattices
 Fugo Tokoro¹, Hideki Narita¹, Ryo Kawarazaki¹, Ryo Iijima¹, Ryusuke Hisatomi^{1,2},
 Shutaro Karube^{1,2}, Yoichi Shiota^{1,2}, Teruo Ono^{1,2}
 ICR, Kyoto Univ.¹, CSRN, Kyoto Univ.²

はじめに

近年、空間反転対称性が破れた超伝導体において、外部磁場を印加することで起こる超伝導ダイオード効果が注目されている [1]。超伝導ダイオード効果とは、超伝導体に流せる電流の最大値である臨界電流が電流の方向に対して非相反になることで生じる現象である。最近では、外部磁場の代わりに超伝導体に挿入した強磁性体の磁化によっても超伝導ダイオード効果が制御できることが報告されている[2,3]。また、Fe/Pt/Nb の強磁性/金属/超伝導薄膜において、Pt を厚くすると超伝導転移温度が上昇することが知られている[4]。

今回我々は、空間反転対称性の破れた Nb/V/Ta 超伝導超格子にスピン軌道相互作用の大きい Pt と強磁性体である Fe を挿入した Nb/V/Pt/Fe/Pt/V/Ta 超格子における超伝導特性の Pt 膜厚依存性について報告する。

実験方法

MgO(100)基板上に、DC スパッタ法によって Pt の厚さが 0~5 nm の範囲で変化する傾斜膜となるように Pt/Fe/Pt ユニットを挿入した空間反転対称性の破れた[[Nb(2 nm)/V(2 nm)/Ta(2 nm)]₃/Nb(2 nm)/V(1 nm)/Pt(0~5 nm)/Fe(1.2 nm)/Pt(0~5 nm)/V(1 nm)/Ta(2 nm)]₁₀ 超伝導超格子薄膜を作製した。

この試料をフォトリソグラフィと Ar ミリングによって微細加工した素子が Fig. 1 である。各試料に対して薄膜面内で電流と垂直方向に外部磁場(B)を印加し、Fe を電流と垂直方向に磁化させ、ゼロ磁場に戻した。その後、超伝導体の超伝導転移温度、(非相反)臨界電流の Pt 膜厚依存性を調べた。

実験結果

Fig. 2 に超伝導転移温度(T_c)の Pt 膜厚(t_{Pt})依存性を示す。先行研究[4]の結果と同様に、Pt の膜厚が厚くなるにつれて超伝導転移温度の上昇が観測された。臨界電流も同様の傾向がみられた。これは Pt によって超伝導と強磁性の界面での近接効果が抑制されていることによると考えられる。

本発表では非相反臨界電流の Pt の膜厚依存性についての議論も行う予定である。

参考文献

- 1) F. Ando *et al.*, Nature **584**, 373–376 (2020)
- 2) H. Narita *et al.*, Adv. Mater. **35**, 2304083 (2023)
- 3) KR. Jeon *et al.*, Nat. Mater. **21**, 1008–1013 (2022)
- 4) M. Vélez *et al.*, JMMM, **240**, 580-582 (2002)

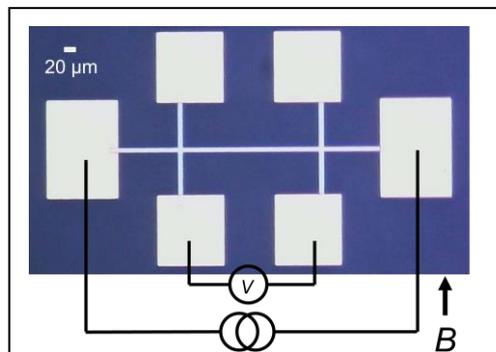


Fig. 1 Device and measurement configuration

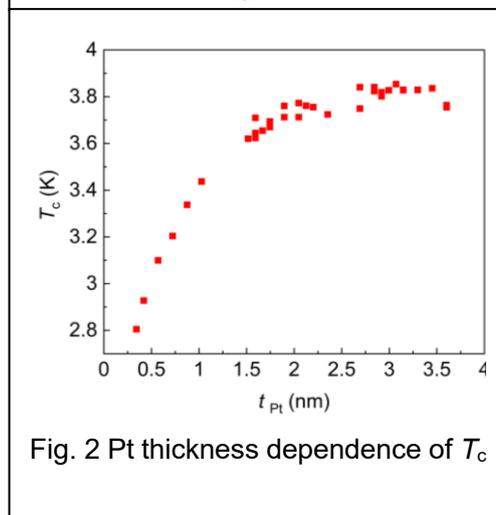


Fig. 2 Pt thickness dependence of T_c

ガーネット単結晶のファラデー回転測定

岩本真¹, 佐藤剛², 劉小晰¹

(¹信州大学, ²株式会社シリコンテクノロジー)

Faraday rotation of garnet single crystals

Shin Iwamoto¹, Tsuyoshi Sato², Xiaoxi Liu¹

(¹Shinshu University, ²Silicon Technology Cooperation)

はじめに

単結晶イットリウム・鉄・ガーネット($\text{Y}_3\text{Fe}_5\text{O}_{12}$, YIG)は 1300 nm 付近の光通信帯域において大きな磁気光学効果を示す、光アイソレータなどに応用されている単結晶である。その特性評価は主にファラデー回転測定、透過率測定である。本研究では、FZ(Floating Zone)法赤外線集光加熱装置を用いて育成した YIG 単結晶のファラデー回転角、透過率など特性を報告する。特に、Mn、Ce の添加によるファラデー回転角の可視から近赤外光における変化を報告する。

実験方法

本研究では、YIG 単結晶の(111)面に沿ってカット、研磨した厚さ 0.5mm 以下の円盤状単結晶を用いた。円盤の垂直方向に磁界を印加し、ファラデー回転角の磁界依存性を測定した。また、事前に透過率を測定し、ファラデー回転角測定ためのレーザー波長を決めた。

実験結果

Fig. 1 に厚さ 0.5 mm の単結晶の光波長 500 nm から 2000 nm までの透過率スペクトルを示す。単結晶は 1150 nm 以上の赤外線に対して、82%以上の透過率を示す。すなわち、低い光吸収特性を示す。光波長 1100 nm 以下では、急激な光吸収による透過率はほぼゼロと低い値を示す。なお、790 nm と中心約半値幅 75 nm の帯域では低い光吸収により光透過を観察された。波長 670 nm 以上の光吸収は八面体配位子遷移と考えるため¹⁾、この帯域は遷移禁止帯と考えられる。

Fig. 2 に 785 nm レーザーを用いた Ga 添加 YIG 単結晶のファラデー回転角の磁界依存性を示す。Ga 添加の単結晶では、わずか 300 Oe の磁界による飽和させことと共に、高いファラデー回転角を維持していることを確認できた。光アイソレータの応用に意味があると考えられる。

赤外レーザーを用いたファラデー回転角の測定や、他の添加元素によるファラデー回転角の影響に関して、学会で詳細に説明する。

参考文献

- 1) D.L.Wood and J.P. Remeika: J. Appl. Phys. 38, 1038 (1967).

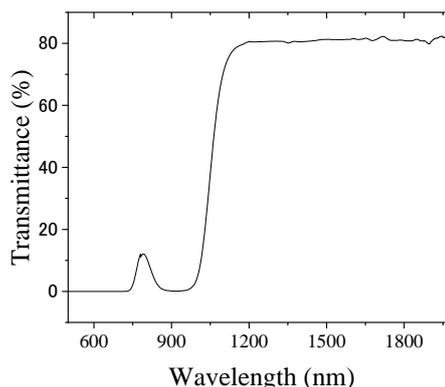


Fig. 1. The transmittance spectrum of YIG single crystal.

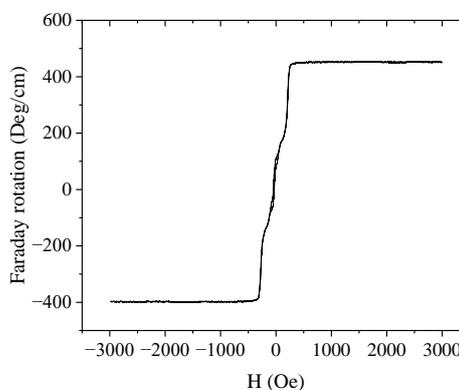


Fig. 2. The transmittance spectrum of YIG single crystal.

超短レーザーパルスによるフェリ磁性多層膜の磁化反転の観察

李 松田¹、高橋 龍之介²、和達 大樹²、杜 野¹、境 誠司¹

(¹量子科学技術研究開発機構; ²兵庫県立大学)

Observation of magnetization reversal induced by ultra-short laser pulse in ferrimagnetic multilayer films

Songtian Li¹, Ryunosuke Takahashi², Hiroki Wadati², Ye Du¹, Seiji Sakai¹

(¹National Institutes for Quantum Science and Technology; ² University of Hyogo)

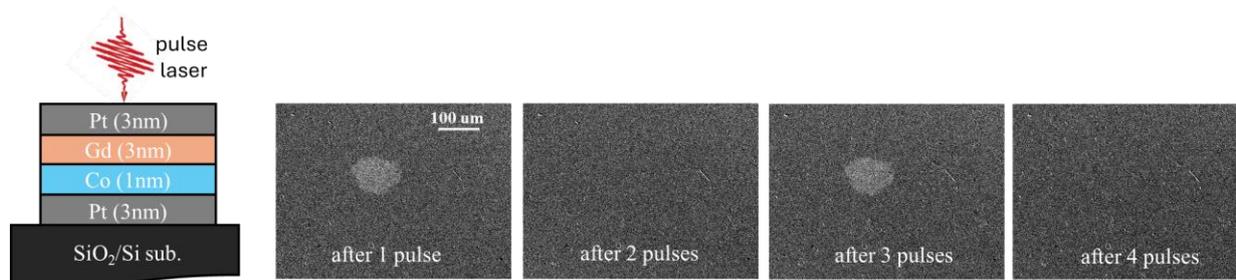
はじめに

不揮発性磁気メモリの更なる高速化や省エネ化には新たな高速磁化反転技術の開発が不可欠である。近年、超短パルスレーザーによる全光型磁化反転 (all optical switching, AOS) が、ピコ秒オーダーの超高速磁化反転の実現や低消費エネルギー化の可能性から注目されている¹⁾。これまで光磁化反転の研究は、フェリ磁性体 GdFeCo 合金²⁾を中心に行われてきたが、同合金は組成による AOS 特性の制御の難しさや低スピン偏極率等の問題を抱えており、AOS が可能な新奇材料の開発が期待されている。本研究では、そのような新奇候補材料として、人工格子 Gd/Co フェリ磁性多層膜の AOS 挙動の観察と特性制御を試みた。

実験方法と結果

磁気スパッタリング法により、熱酸化シリコン基板に Pt(3 nm)/Co(0.8~1.2 nm)/ Pt(3 nm)からなる人工格子フェリ磁性多層膜試料を作製した。波長 1030 nm、パルス幅 200 fs の超短パルスレーザーを用いて光磁化反転実験を行った。Kerr 効果顕微鏡により、光パルス照射による磁区構造の変化を観察した。

下図は Gd/Co フェリ磁性薄膜に単一光パルスを照射した後の磁区構造の Kerr 効果顕微像を示している。試料は外部磁場を印加して面直方向に磁化 (全体暗いコントラストが表わす) した後で光パルスの照射を行った。試料に対して光パルスを奇数回 (1, 3...) だけ照射した後は、照射領域の磁化方向は薄膜全体の磁化方向に反対となった (明るいコントラストが表わす)。一方、光パルスを偶数回 (2, 4...) だけ照射すると、照射領域の磁化方向は薄膜全体の磁化方向と一致した。このことから、Gd/Co 薄膜の AOS は単一光パルスにより決定論的に生じることが明らかになった。また、AOS はレーザーの偏光に依存しないことも判明した。



謝辞

本研究は JSPS 科研費(24K01335)、QST 理事長ファンドの支援のもと実施された。

参考文献

- 1) A. V. Kimel and Mo Li, Nat. Rev. Mater. **4**, 189 (2019)
- 2) C. D. Stanciu, F. Hansteen, A. V. Kimel, A. Kirilyuk, A. Tsukamoto, A. Itoh, and Th. Rasing, Phys. Rev. Lett. **99**, 047601 (2007)

TbFeCo 磁性薄膜に対する Gd ドープと磁気物性の相関

竹島 大智, 山根 治起*, 安川 雪子
(千葉工大, 秋田産技センタ*)

Correlation between Gd doping and magnetic properties in TbFeCo magnetic thin films

T. Takeshima, H. Yamane*, Y. Yasukawa
(Chiba Inst. Tech., Akita Ind. Tech. Center*)

はじめに

アモルファス希土類-遷移金属 (*RE-TM*) フェリ磁性薄膜である TbFeCo は、磁気光学 (MO) 効果を示し、MO ディスクなどの光磁気材料として広く実用されてきた[1]。また、現在データ通信量の増大化や省電力化に伴い、GdFeCo を利用したレーストラックメモリに関する研究[2]といった *RE-TM* 金属の研究は盛んになっている。そこで、我々の研究グループは Gd が TbFeCo 磁性薄膜の磁気特性に及ぼす影響にて検討を行った。Gd は 4f 軌道に不対電子が 7 つあり、大きな磁気モーメントを有していることから、Gd のドープによって TbFeCo 磁性薄膜の磁気物性に変化が見られるのではないかと考えた。

実験方法

試料作製にはマグネトロンスパッタ法を用いた。試料は [SiN(20 nm)/ (Gd,Tb)FeCo (50 nm)/Glass] の Tb チップ枚数を 12 枚とし、Gd チップ枚数を 0,4,6,8,10 に変化させて作製した。なおチップのサイズは 5 mm×5 mm である。Gd:TbFeCo 薄膜については、Gd チップと Tb チップを配置した“複合ターゲット方式”で作製した。なお SiN 層は酸化防止膜である。試料の物性については、振動資料型磁力計 (VSM) で磁気特性を評価した。また、MO 効果は分光式極 Kerr 装置を用いて測定した。

実験結果及び考察

Fig.1 は [SiN(20 nm) / (Gd,Tb)FeCo (50 nm)/Glass] の Gd チップ枚数が 0 および 10 枚の薄膜の磁気特性を示す。Gd をドープすると保磁力が増加していることが確認された。他方、磁化の値は減少しているのが確認でき、Gd ドープにより薄膜は硬磁性的な特性となることが明らかとなった (Table 1)。

極 Kerr 回転角 (θ) の極性は、Gd をドープしていない TbFeCo 薄膜の結果と比較すると、極性は反転していた。これは Gd をドープしたことでフェリ磁性の補償組成を過ぎ、3d 磁気モーメントと 4f 磁気モーメントの寄与に変化があったためであると考えている。従って今後は 3d 磁気モーメントと 4f 磁気モーメントそれぞれの寄与についても明らかにする。また、今回の実験ではチップの枚数で議論を行っているため磁性膜の正確な組成議論が出来ていない。したがって、今後は発光分光分析法 (ICP) で薄膜の組成の詳細に決定して議論していく。概要原稿では Gd チップ 0 と 10 のみしか記載していないが当日は他の枚数時のデータについても議論する。

参考文献

- [1]佐藤「光と磁気」朝倉書店, (2001)
[2] 野村 他 応用物理 2024 春季, 25a-P01-48

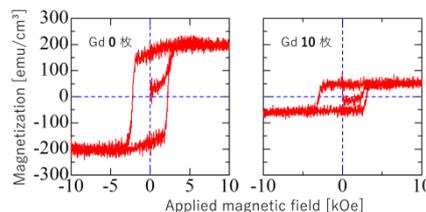


Fig1. VSM results with changes in number of Gd chips

Table 1. Changes in coercivity and magnetization as a function of the number of Gd chips

Gdチップ枚数	M_s (emu/cm ³)	$H_{C(\perp)}$ (kOe)
0	188.0	2.2
10	51.2	3.0

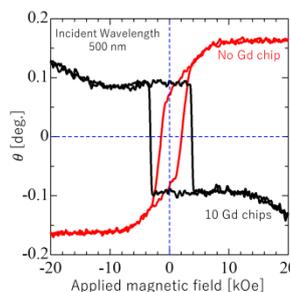


Fig2. Kerr loops with and without Gd chips

KEK PF における X 線強磁性共鳴分光装置の開発

上野哲朗, 武市泰男*, 水口将輝†, 岩澤英明, 大坪嘉之, 小野寛太*,
岡崎宏之, 李松田, 境誠司, 八巻徹也, 綿貫徹, 片山芳則
([†]QST, *阪大, †名大)

Development of an X-ray detected ferromagnetic resonance spectrometer at the Photon Factory, KEK

T. Ueno, Y. Takeichi*, M. Mizuguchi†, H. Iwasawa, Y. Ohtsubo, K. Ono*,
H. Okazaki, S. Li, S. Sakai, T. Yamaki, T. Watanuki, Y. Katayama
(QST, *Osaka Univ., †Nagoya Univ.)

はじめに

強磁性共鳴法と X 線分光法を組み合わせた X 線強磁性共鳴(X-ray detected ferromagnetic resonance: XFMR) 分光法は、元素選択的に磁化のダイナミクスを計測可能な手法として知られている[1]。XFMR 分光法では試料にマイクロ波磁場を印加して強磁性共鳴状態にし、スピンの歳差運動の射影成分に比例する X 線磁気円二色性(X-ray magnetic circular dichroism: XMCD)のシグナルを計測する。X 線のエネルギーを特定元素の内殻吸収端に合わせることで、化合物中の元素ごとのシグナルや多層膜中の層ごとのシグナルを個別に計測することができる。XFMR 分光法はこの元素選択性によって交流スピン流の検出法としても利用されている[2]。

実験方法と結果

我々はスピントロニクス材料や量子物質の磁気ダイナミクスの解析を目的として、高エネルギー加速器研究機構 物質構造科学研究所 放射光実験施設(KEK PF)の軟 X 線ビームライン BL-19B において XFMR 分光装置の開発を行ってきた。XFMR 分光装置は主にマイクロ波回路と X 線検出部で構成される。マイクロ波回路ではマイクロ波磁場と放射光 X 線パルスの同期、及び試料へのマイクロ波磁場印加のための増幅・フィルタリング等を行う。PF 電子蓄積リングのマスターオシレータ信号(約 500 MHz)をコムジェネレータに通して強磁性共鳴周波数(数 GHz)の信号を生成する。さらにフィルタ、アンプを通してコプレーナ型導波路(coplanar waveguide: CPW)に導入する。こうして CPW 上の試料にマイクロ波磁場が印加される。さらにディレイラインによってマイクロ波信号と放射光 X 線パルスとの間の時間遅れを制御することができる。

本装置では薄膜試料の基板(MgO 等)に X 線が照射された際に生じる可視発光(X-ray excited optical luminescence: XEOL)を検出する。そのため試料直下には集光レンズ系と可視光検出器が設置されている。なお可視光検出器は真空チャンバーの外側に設置されており、フォトダイオードや光電子増倍管、可視光分光器など様々な検出器を簡単に交換して実験することができる。また XFMR 測定を効率化するため、Cr イオン注入による MgO 基板の改質を行ったところ、XEOL 信号の増大に効果があることがわかった[3]。

XFMR 分光法の実証として、スパッタ成膜した MgO 基板上的パーマロイ薄膜 MgO(001)/Ni_{0.8}Fe_{0.2}(30 nm)/Cu(2 nm)の測定を行った。試料に 3.5 GHz のマイクロ波を印加した状態で、Fe L₃ 吸収端と Ni L₃ 吸収端においてディレイスキャンを行い、正弦波状の XFMR 信号を得ることができた。正弦波の周期は約 286 ps であり、スピンの歳差運動に対応する XFMR 信号であることを確認した。このようにパーマロイ薄膜の元素別磁気ダイナミクス信号を計測することができた。

謝辞

本研究は QST 未来ラボ、QST-東北大マッチング研究支援事業、JSPS 科研費(JP15K17458, JP18K13984, JP21H05016)、島津科学技術振興財団、ひょうご科学技術協会の支援のもと実施された。XFMR 実験は放射光共同利用実験審査委員会の承認のもと KEK PF で実施された(課題番号 2018MP001, 2022G072)。

参考文献

- 1) C. Klewe *et al.*, Synchrotron Radiation News **33**, 12 (2020).
- 2) J. Li *et al.*, Physical Review Letters **117**, 076602 (2016).
- 3) T. Ueno *et al.*, QST Takasaki Annual Report 2021, p. 42 (2023).

Ga を添加した単結晶イットリウム鉄ガーネットの特性の評価

宮崎湧太、*佐藤剛、劉小晰
(信州大、*株式会社シリコンテクノロジー)

Characterization of Ga substituted single crystal Yttrium iron garnet
Yuta Miyazaki, *Tsuyoshi Satoh, Xiaoxi Liu
(Shinshu Univ., *Silicon Technology Corporation)

はじめに

単結晶イットリウム鉄ガーネット (YIG ; $Y_3Fe_5O_{12}$) は高いマグノン品質係数と低い電力損失を特徴に持つ。量子ビットのコヒーレンス時間が長いことから、量子コンピュータを実現するために有力な候補物質として期待されている¹⁾。 $Y_3Fe_5O_{12}$ の化学式で表される 5 個の Fe^{3+} の内 3 個は四面体サイト、2 個は八面体サイトを表しておりそれぞれ Fig. 1 (a), (b) に示す。四面体サイトはスピナップ、八面体サイトはスピンドアウンを表す。今回 Fe^{3+} よりイオン半径の小さい Ga^{3+} の添加効果を調べた。 Ga^{3+} の添加量が異なる単結晶 $Y_3Fe_{5-x}Ga_xO_{12}$ ($x=0, 0.1, 0.5, 1$) を作成し磁気特性について報告する。

実験方法

本実験の単結晶は FZ (Floating Zone) 法赤外線集光加熱装置を用いて育成した。育成した棒状の単結晶を (111) 面に沿ってカット、研磨し、直径 5 mm、厚さ 1 mm のディスク状に加工した。ディスクの垂直方向と面内方向それぞれに磁界を印加し、振動試料型磁力計 (VSM) を用いて磁気特性を測定した。

実験結果

Fig. 2 に面内方向における $Y_3Fe_{5-x}Ga_xO_{12}$ ($x = 0, 0.1, 0.5, 1.0$) の時の飽和磁化を示す。 Ga^{3+} の添加量を増やすと単結晶イットリウム鉄ガーネットの飽和磁化は減少していくことが分かる。これは Ga^{3+} のイオン半径が小さいため、四面体サイトに優先的に占めることでスピナップのモーメントが減り全体の磁気モーメントが減少したからと考えられる。

$Ga = 1.0$ の時は Ga^{3+} が Fe^{3+} のイオン半径の小さい Fig. 1(a) の四面体サイトに入り、スピナップとスピンドアウンの数がそれぞれ 2 個で同じ数になり全体の磁気モーメントを持たないと予想できるが、Fig. 2 の $Ga = 1.0$ の飽和磁化を見ると値は 20 emu/cc を示した。この原因並びに異方性磁界の添加量依存性、磁気共鳴測定結果などは学会で詳細に報告する。

参考文献

1) Y. tabuchi, S. Ichino, A. Noguchi, T. Ishikawa, and R. Yamazaki: et al., science., **349**, 6246 (2015).

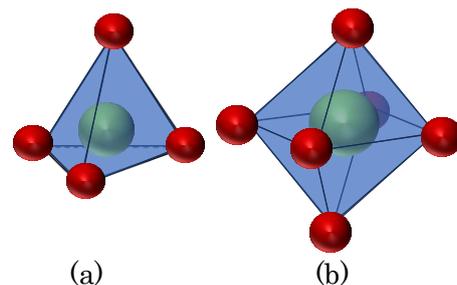


Fig.1. Tetrahedral (a) and octahedral (b) sites of the garnet structure

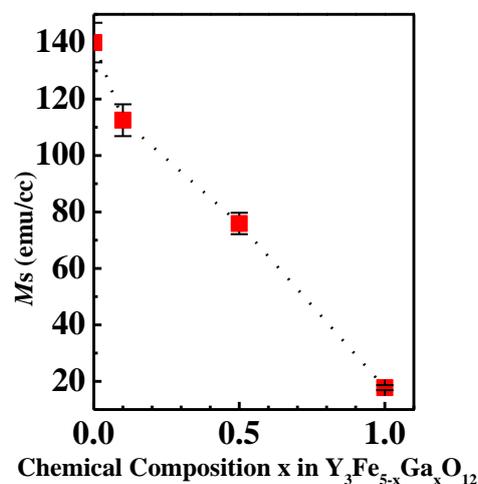


Fig.2. The dependance of saturation magnetization on x in $Y_3Fe_{5-x}Ga_xO_{12}$ ($x=0, 0.1, 0.5, 1$)

反強磁性 Cr における抵抗ひずみ感度の等方性に関する検討

小田 洋平¹・直江 正幸²・丹羽 英二²

(¹ 福島高専・² 電磁研)

Investigation of isotropy of strain sensitivity of resistance in antiferromagnetic Cr

Y. Kota¹, M. Naoe², and E. Niwa²

(¹Fukushima KOSEN, ²DENJIKEN – Research Institute for Electromagnetic Materials)

1 はじめに

ひずみゲージは、材料に加わる応力やひずみを電気信号として検出するセンサ素子であり、様々な分野で広く応用されている。ゲージ率 (GF) は一軸ひずみ ε に対する抵抗 R の相対的な変化を示す割合 ($GF \equiv (\Delta R/R)/\varepsilon$) で定義され、ひずみ感度を表す重要な指標の一つである。ひずみゲージの材料として我々は反強磁性 Cr および Cr-N に着目している。Cr および Cr-N は、半導体ゲージの GF~100 よりも小さいものの、他の金属ゲージと比較してかなり大きい 10 程度の GF を示し、さらに Cr-N においては抵抗温度係数をほぼゼロに制御可能という長所がある。また最近 Cr-N において GF の等方性に由来する大きな横感度応答が観測され、その性質の利用により力学量センサのさらなる小型化と高耐荷重化が期待されている^{1,2)}。我々のこれまでの研究では、反強磁性 Cr の大きな GF が、Cr で顕著に観測される磁気体積効果と関連があると考え、電子状態の第一原理計算により理論的な検討を行ってきた³⁾。その結果、一軸ひずみによって体積変化が生じると、静水圧を加える場合と同様に、磁性や電子状態の顕著な変化が観測されることが明らかとなった。電子状態の変化に伴ない電気伝導に関わるフェルミ準位の状態も影響され、近似的な方法で GF を見積もったところ 10 程度の大きさとなり、実験事実を半定量的に再現できることを示した。今回の研究では、反強磁性 Cr の GF の等方性について検討するために、ひずみの方向を変えた場合の GF の計算を行った。一軸ひずみを加える方向が結晶の [100] 方向の場合と [110] 方向の場合とを比較した結果について報告する。なお電子状態の第一原理計算には Vienna ab-initio Simulation Package (VASP) を使用した。

2 結果および考察

Fig. 1(a), (b) は、反強磁性 Cr のフェルミ準位 (E_F) 付近での状態密度 (DOS) の計算結果である。一軸ひずみの大きさを $\varepsilon = -1, 0, +1\%$ と変化させており、ひずみの方向が [100] 方向の場合と [110] 方向の場合の比較を示している。なお一軸ひずみに対する横方向については内部応力がゼロとなるように構造の最適化を行った。計算結果より $\pm 1\%$ のひずみにより E_F 近傍で DOS のシフトが生じており、 E_F 直上での DOS の大きさが変化していることがわかる。なお V あるいは Fe で同様の計算をしてもここまで顕著な変化は生じないことから Cr 特有のひずみ応答と言える。Fig. 1(c) は E_F 直上の DOS の変化割合をひずみ ε に対してプロットした結果である。ひずみ方向が [100] および [110] 方向のどちらの場合においても 1% のひずみに対して DOS が 10% 程度変化しており、近似的に $GF \approx (\Delta D/D_0)/\varepsilon$ とおくと 10 程度の値となる。ただ傾向や変化の大きさ自体はひずみの方向に依らずほとんど変わらないことから、用いた近似の範囲内では反強磁性 Cr のひずみ応答は等方的であり、実験事実と整合する結果となった。

References

- 1) E. Niwa, IEEJ Transactions on Sensors and Micromachines, **141**, 409 (2021).
- 2) E. Niwa, IEEJ Transactions on Sensors and Micromachines, **143**, 211 (2023).
- 3) Y. Kota, E. Niwa, and M. Naoe, J. Appl. Phys. **129**, 203901 (2021).

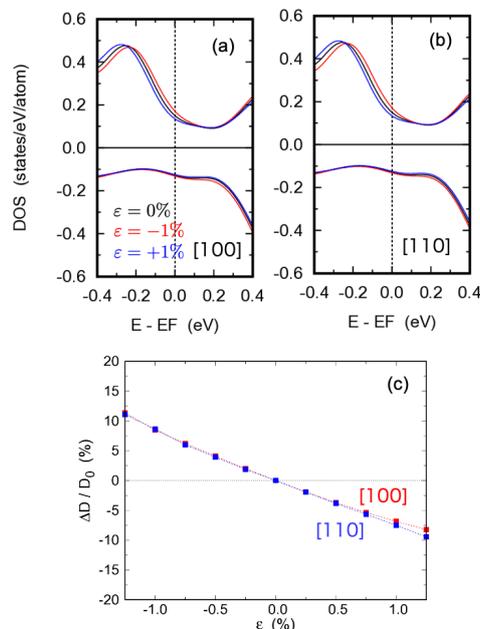


Fig. 1 (a), (b) Calculation result of DOS around E_F under the uniaxial strain (ε) along the [100] and [110] direction. (c) ε dependence of the DOS change at E_F .

柔軟なスピン状態を示すシアン化物イオン架橋 CoFe 錯体の創出

関根 良博、中尾 亮介、速水 真也
(熊本大学)

Development of Cyanide-bridged CoFe Complexes Exhibiting Flexible Spin States
Yoshihiro Sekine, Ryosuke Nakao, Shinya Hayami
(Kumamoto University)

はじめに

分子性化合物は、分子が有する固有の構造、電子状態及びスピン状態をもつ。外部刺激に応じて物質の電子状態・構造を可逆に変換可能な分子の開発は、温度や光などの外部刺激にตอบสนองして磁気特性が可逆にスイッチング可能な機能性分子材料への展開が期待できる。金属錯体は、任意の金属イオンと高い分子設計性を有する有機配位子からなる無機・有機複合体と見なすこともでき、配位子の分子設計・化学修飾に応じて錯体分子の軌道エネルギーや酸化還元電位を精密に制御することができる。

シアン化物イオンによって架橋された配位高分子であるプルシアンブルー及びその類縁体は、金属イオン間の電子的・磁氣的相互作用によって特異な電気・磁気特性を示すものがある。Co/Fe からなるプルシアンブルー骨格を有した金属錯体は、配位高分子とは異なり溶解性や電子状態の精密制御が可能な異なり、外部刺激に応じた金属イオン間電子移動の設計が容易である^[1]。本研究では、シアン化物イオン架橋からなる新規 CoFe 錯体の構築と化学修飾に基づく磁気スイッチング特性を解明した。

実験結果

有機溶媒中、Fe³⁺イオンと Co²⁺イオンを含む金属塩と有機配位子を混合させ、自己集積化させたのち、有機溶媒を自然濃縮させることで一義的に目的の錯体結晶を単離することに成功した。単結晶 X 線構造解析の結果、化合物 **1** はシアン化物イオンによって Fe イオンと Co イオンが架橋された環状四核コア構造を有し、四核コア構造から Fe イオンが 2 つ Co イオンへ配位することで六核骨格構造からなることが分かった。Co イオンの有機配位子を化学修飾することで得られた化合物 **2,3** も **1** と同型構造である。興味深いことに、化合物 **1,2** は温度変化によって金属イオン周りの配位結合長は変化しないが、化合物 **3** においてのみ温度変化によって顕著な結合長変化が観測できた。この結合長変化は、**3** における金属イオンの電子状態・スピン状態が変化したことが示唆される。そこで、スピン状態変化について明らかにするため、温度依存磁気測定を行った。その結果、**3** は $T_{1/2} = 197$ K において、急峻な $\chi_m T$ 値の変化を示した (図 1)。単結晶 X 線構造解析、メスバウアー分光および磁気測定の結果、この温度変化は $[\text{Co}^{\text{III}}_{\text{LS}}\text{-Fe}^{\text{II}}_{\text{LS}}] \leftrightarrow [\text{Co}^{\text{II}}_{\text{HS}}\text{-Fe}^{\text{III}}_{\text{LS}}]$ の電子状態変化に基づくものであることが分かった。さらに、低温において低温相における混合原子価電荷移動遷移に該当する波長の光を照射したところ、 $\chi_m T$ 値は急激に増加し、光誘起準安定状態を生成できることが明らかとなった。

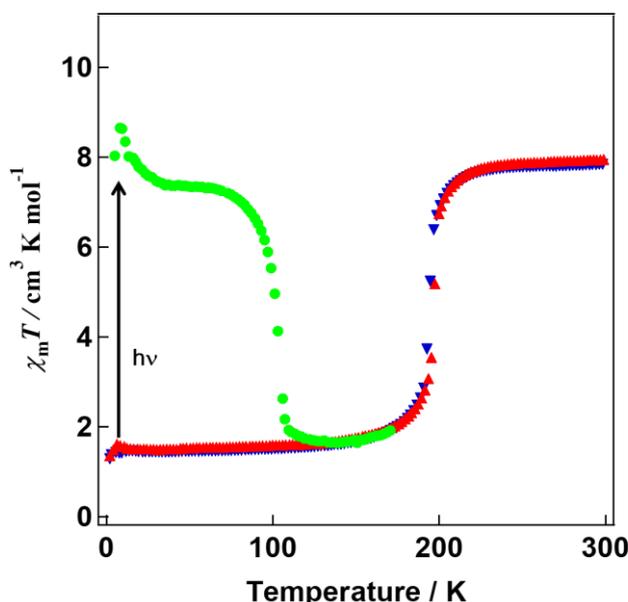


図 1. **3** における熱・光誘起磁気スイッチング

参考文献

- 1) Y. Sekine, M. Nihei, H. Oshio, *Chem. Eur. J.* **23**, 5193-5197 (2017).

リニアアクチュエータを用いた内燃機関エンジンの高性能化に関する検討 (推力向上のための磁石配置に関する基礎的検討)

小野竜太郎、木村海斗、黒田純平、小林一景、内野大悟*¹、小川和輝*²、池田圭吾*³、加藤太朗*⁴、遠藤文人*⁵、加藤英晃、成田正敬
(東海大学、*¹沼津工業高等専門学校、*²愛知工科大学、*³北海道科学大学、*⁴東京工科大学、*⁵福岡工業大学)

A study on improving performance of internal combustion engines using linear actuators
(Fundamental consideration on magnet arrangement to improve thrust)

R. Ono, K. kimura, J. Kuroda, I. Kobayashi, D. Uchino, K. Ogawa, T. Kato, K. Ikeda, A. Endo, H. Kato, M. Narita

(Tokai Univ., *¹NIT. Numazu, *²AUT, *³Tokyo Univ. Tech, *⁴Hokkaido Univ. Sci., *⁵FIT)

はじめに

近年、先進国の中で自動車の電動化および電気自動車の推進が進められているが、今後も特定の条件では内燃機関エンジンを使用していく状況であると予想される。そこで、エンジンの更なる高効率かつ高出力化を目指すために、リニアアクチュエータを用いてバルブを作動させるシステムが検討されている^{1,2)}。しかし、すべてのエンジン回転数に最適なバルブタイミング、バルブリフト量に変化させる方法は実現していない。そこで著者らは、リニアアクチュエータを用いた電磁駆動バルブシステムの開発を目指している。

本報告では、電磁界解析を利用しアクチュエータ内の永久磁石体積変更による推力変化について検討を行った。

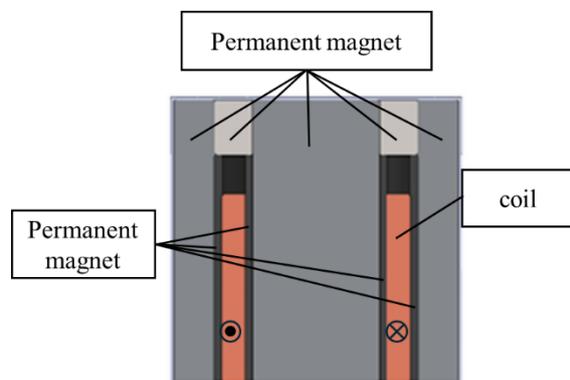


Fig. 1 Analysis model of linear actuator

永久磁石体積変更によるアクチュエータの推力変化に関する検討

Fig.1 に構築した新たなモデルの概略図を示す。同図のアクチュエータは永久磁石とソレノイドコイルで構成されている。コイルに電流を印加することでローレンツ力が発生し軸方向にコイルが動作する。解析条件は、電圧 5 V、コイルの巻き数 461 turns、コイルの動作範囲は 0 mm から 10 mm に設定した。用いた材料は、永久磁石はネオジウム磁石、コイルには銅を使用した。磁石体積を変更し、電磁界解析を行った。解析によって得られた磁束密度のベクトルプロット図を Fig.2 に示す。同図のモデルでは 63.2 N の推力が得られた。磁気回路が構築できたことにより、コイルでは磁束が半径方向に向き、ローレンツ力が効率的に発生できていることが確認できた。

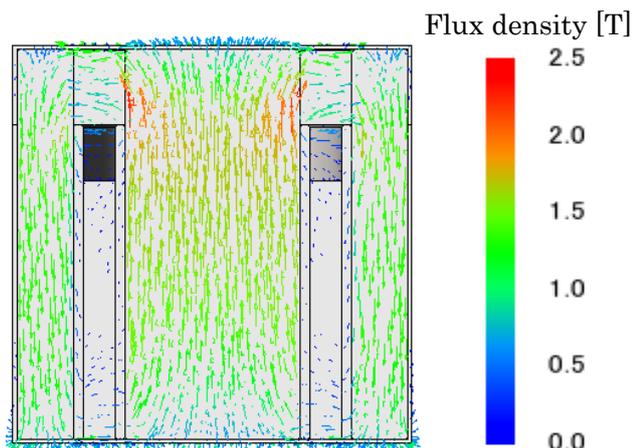


Fig.2 Vector plot diagram of magnetic flux density

参考文献

- 1) 宇野, 村口, 金野, 岡田, 「運動と振動の制御」シンポジウム講演論文集, Vol. 10, (2007), 177-180.
- 2) 柴崎, 岡崎, 小倉, 日本機械学会関東学生支部総会講演会論文集, Vol. 19, (2013), 451-452

磁石分割による磁束変調型磁気ギヤの磁石渦電流損低減

朝雛えみり, 中村健二
(東北大学)

Eddy Current Loss Reduction in Flux-Modulated-type Magnetic Gears by Splitting Magnets

E. Asahina, K. Nakamura
(Tohoku University)

はじめに

近年, 出力密度向上を目的に超高速モータの開発が盛んに行われているが, これを減速する機械ギヤには摩耗や発熱の問題が生じる。これに対して, 磁気ギヤは永久磁石の吸引反発力を利用して, 非接触で増減速ができるため, 摩耗や発塵が無く, 振動や騒音も小さいことから有効な解決策になり得る。今後, さらなる高速化が進むモータドライブシステムに対応するためには, 磁気ギヤの高効率化, すなわち低損失化が必須である。

そこで本稿では, 磁束変調型磁気ギヤにおいて永久磁石を周方向および軸方向に分割した際の磁石渦電流損の低減効果について検討したので報告する。

磁石分割による磁石渦電流損低減効果

Fig. 1 に, 検討に用いた磁束変調型磁気ギヤの諸元を示す。本磁気ギヤのギヤ比は 2.667 であり, 入力はい側回転子, 出力はポールピース回転子である。また, 入力の最高回転数は 30,000 rpm である。永久磁石の材料は Nd-Fe-B 焼結磁石であり, い側回転子鉄心, 外側固定子鉄心, およびポールピースの材質は無方向性ケイ素鋼板 (35A300) である。なお, 解析には JMAG-Designer Ver. 22. 0 を用いた。

3D-FEM で算定した結果, 最大トルクはい側およびポールピース回転子で, それぞれ 1.9 N・m, 4.7 N・m であった。次いで, Fig. 2 にこのときの磁石渦電流損の内訳を示す。この図を見ると, い側磁石の渦電流損 18.3 W に対して, 外側磁石の渦電流損はその 5 倍以上の 101.9 W であることがわかる。このように, 磁束変調型磁気ギヤにおいては, い側よりも外側磁石の渦電流損が大きいことから, 以降の検討では外側磁石に着目し, PM モータにおいて有効策として知られている磁石分割による渦電流損低減について, その効果を検証する。

Fig. 3 に, 3D-FEM を用いて算定した, 軸方向および周方向の磁石分割数を種々変えた際の磁石渦電流損を示す。なお, 分割数 1 は磁石を分割していない

ことを意味する。この図を見ると, 周方向分割の方が軸方向分割よりも磁石渦電流損の低減効果が大きいることがわかる。例えば, 軸方向 2 分割の低減率は 23%程度であるのに対して, 周方向 2 分割では 69%程度と約 3 倍の効果がある。

なお, 本研究の一部は東北大学 AIE 卓越大学院プログラムにより支援された。

参考文献

- 1) K. Yamazaki and Y. Fukushima, *IEEE Trans. IAS*, **47**, 779 (2009)

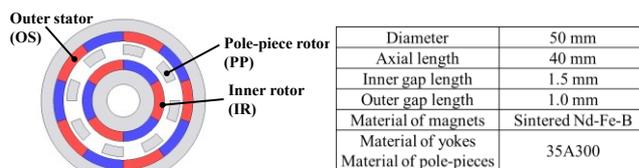


Fig. 1 Specifications of a flux-modulated-type magnetic gear used in this study.

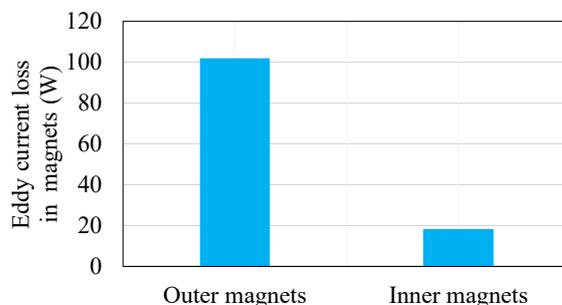


Fig. 2 Breakdown of eddy current loss in magnets at the maximum torque.

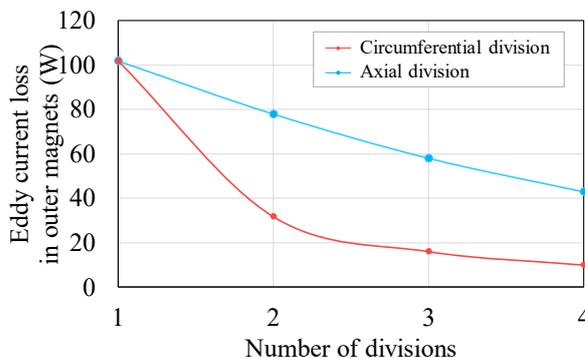


Fig. 3 Eddy current loss in outer magnets with respect to the direction and number of magnet divisions.

複合磁性材料を用いた漏れ磁束形可変磁束モータの可変特性

鷲岳 蓮, 高木 遼斗, 高沢 溪吾, 水野 勉, 佐藤 光秀, 楡井 雅巳*
 (信州大学, *長野工業高等専門学校)

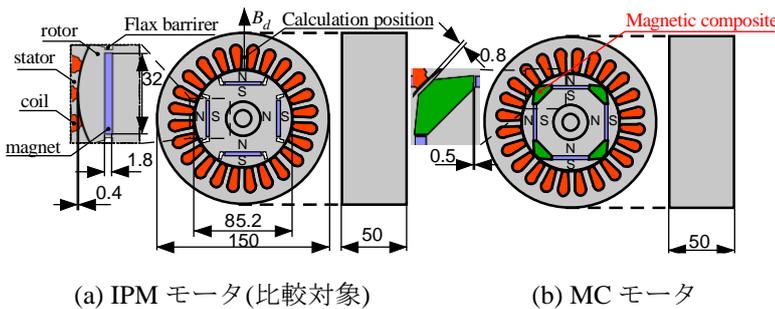
Variable characteristics of leakage flux type variable flux motors using magnetic composite materials
 Ren Washioka, Ryoto Takagi, Keigo Takazawa, Tsutomu Mizuno, Mitsuhide Sato, Masami Nirei
 (Shinshu Univ., *NIT, Nagano Coll.)

まえがき

自動車など幅広い分野での電動化が進み、モータ駆動領域の高効率領域の拡大が求められている。高効率領域拡大の手段としてロータに複合磁性材料を用いた漏れ磁束形可変磁束モータ(以下 MC モータ)が提案されている¹⁾。本論は FEM 解析による IPM モータと MC モータの d 軸方向磁束密度比較と実機検証による MC モータの $T-I$ 特性を報告する。

FEM 解析結果

図 1 にモータの寸法を示した。FEM 解析を行いステータの d 軸方向の磁束密度を比較した²⁾。図 2 に IPM モータと MC モータの d 軸方向磁束密度を示した。磁束密度の最大値と最小値の差が MC モータでは IPM モータと比較し 2 倍となった。MC モータはロータの磁石間に設置した複合磁性材料が磁石磁束を漏らし、電流の変化に応じて複合磁性材料が飽和し磁石磁束のステータ鎖交磁束をコントロールしている。



(a) IPM モータ(比較対象)

(b) MC モータ

図 1 モータの構造(単位: mm)

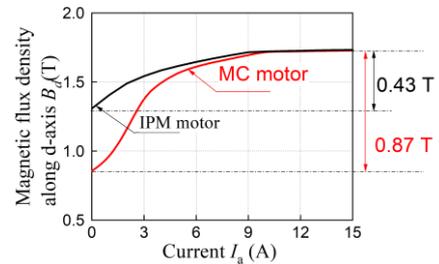


図 2 各モータの d 軸方向の磁束密度

Fig.1 Structure of motors(Unit : mm).

Fig.2 Magnetic flux density in d-axis direction of each motor.

実機検証

図 3 に MC モータの拘束試験での $T-I$ 特性を示した。図 4 に MC モータのトルク定数 K_T を示した。MC モータの $T-I$ 特性で曲率が変化することから FEM 解析から得られた可変特性を得ているという結果と一致する。

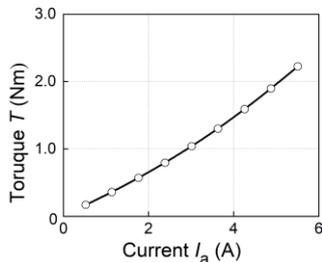


図 3 MC モータの $T-I$ 特性

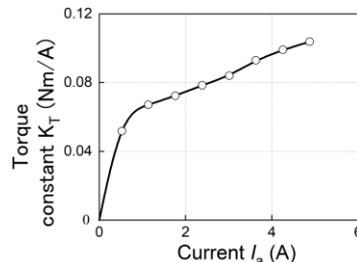


図 4 MC モータのトルク定数 K_T の遷移

Fig.3 $T-I$ characteristics of MC motor. Fig.4 Transition of torque constant K_T of MC motor.

参考文献

- 1) Mitsuhide Sato, Keigo Takazawa, Ryo Yoshida, Masami Nirei, Tsutomu Mizuno: "Expansion of Motor High-Efficiency Area by Inserting Magnetic Composite Material into Rotor" IEEE Access Vol.11 pp.34772-34482, 2023
- 2) Hiroki Hijikata, Kan Akatsu, Takashi Kato: "Experimental Studies of Variable Leakage Flux Type IPMSM" IEEJ Transactions on Industry Applications Vol.137 No9 pp.737-743, 2017

ボイスコイルモータを用いた超小型車両の乗り心地改善 (生体情報に基づく乗り心地評価に関する実験的検討)

落合真輝、勝間田龍翔、笠松忍、小林一景、黒田純平、内野大悟^{*1}、遠藤文人^{*2}、池田圭吾^{*3}、
加藤太郎^{*4}、小川和輝^{*5}、成田正敬、加藤英晃

(東海大、^{*1}沼津高専、^{*2}福岡工業大、^{*3}北海道科学大、^{*4}東京工科大、^{*5}愛知工科大)

Ride Comfort Improvement of Ultra-Compact Vehicles Using Voice Coil Motors
(Experimental Study on Ride Comfort Evaluation Based on Biometric Information)

M. Ochiai, R. Katsumata, S. Kasamatsu, I. Kobayashi, J. Kuroda, D. Uchino^{*1}, A. Endo^{*2}, K. Ikeda^{*3},
T. Kato^{*4}, K. Ogawa^{*5}, T. Narita, H. Kato

(Tokai Univ., ^{*1}NIT. Numazu., ^{*2}FIT, ^{*3}Hokkaido Univ. Sci., ^{*4}Tokyo Univ. Tech., ^{*5}AUT)

はじめに

近年、地球環境問題や超高齢化社会の観点から超小型車両の需要が増加している。一方で、コンパクトで軽量の車両であるため、機構搭載スペースが小さく、サスペンションだけでの乗り心地改善が困難である。また、普通車では通行出来ない細い道や、舗装されていない道路への進入が容易になるため、より一層乗り心地の劣化が懸念される。そこで著者らは、この問題を解決するために、生体情報を反映させたアクティブシートサスペンションによる乗員の乗り心地改善を提案している¹⁾³⁾。本報告では、アクティブシートサスペンションから発生させた疑似的な悪路走行時の外乱に対して、振幅、周波数を変化させた周波数をマスキングした際の生体情報を所得し、実験的検討を行った。



Fig. 1 Active seat suspension

アクティブシートサスペンションの加速度振幅変化による乗り心地評価

Fig. 1 に本報告で用いたアクティブシートサスペンションを示す。制御用アクチュエータにはボイスコイルモータ(VCM)を使用した。実験は Fig. 2 に示すように、シート下に設置したアクティブシートサスペンションによって乗員を加振させ、生体情報の所得を行った。なお、シートが振動を吸収してしまうことを防ぐため、シート素材はアクリル板を使用している。また、車体の固有振動数による共振を防ぐために、車体はジャッキアップさせている。実験では、最初の1分間に安静閉眼を行い、悪路走行時の外乱を模擬した4 Hz の加振周波数を1分間加えた。その後、4 Hz の外乱振動に周波数2~10 Hz、加速度振幅を1.0m/s²、1.5m/s²のいずれかの周波数を1分間マスキングした。その結果、マスキングさせる周波数の加速度振幅が小さい方が、リラックスしやすい傾向が確認できた。

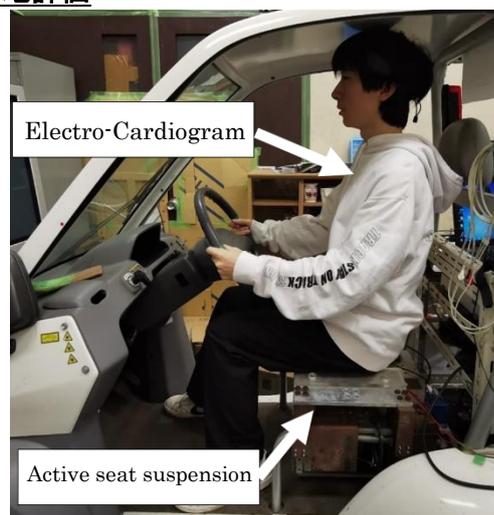


Fig. 2 Scene of experiment

参考文献

- 1) 阿部, 新井, 押野谷, 石橋, 日本機械学会 2002 年度年次大会講演会論文集, 2002, Vol. 7, No. 02-1, pp. 175-176.
- 2) 押野谷, 石橋, 新井, 日本 AEM 学会誌, 2003, Vol. 11-No. 4, pp. 209-215.
- 3) 新井, 阿部, 押野谷, 石橋, 第 45 回自動制御連合講演会, 2002, pp. 471-472.

超小型モビリティのアクティブシートサスペンション (マスキング手法を用いた乗り心地改善に関する基礎研究)

勝間田龍翔、落合真輝、笠松忍、小林一景、黒田純平、内野大悟^{*1}、遠藤文人^{*2}、池田圭吾^{*3}、
加藤太郎^{*4}、小川和輝^{*5}、成田正敬、加藤英晃
(東海大、^{*1}沼津高専、^{*2}福岡工業大、^{*3}北海道科学大、^{*4}東京工科大、^{*5}愛知工科大)

Active Seat Suspension for Ultra-Compact Mobility

(Fundamental Research on Ride Comfort Improvement Using Masking Techniques)

R. Katsumata, M. Ochiai, S. Kasamatsu, I. Kobayashi, J. Kuroda, D. Uchino^{*1}, A. Endo^{*2}, K. Ikeda^{*3},
T. Kato^{*4}, K. Ogawa^{*5}, T. Narita, H. Kato

(Tokai Univ., ^{*1}NIT. Numazu., ^{*2}FIT, ^{*3}Hokkaido Univ. Sci., ^{*4}Tokyo Univ. Tech., ^{*5}AUT)

はじめに

近年超高齢社会問題やコロナ禍が明けたことによる観光客増加の影響により、超小型車両の需要が高まりを見せている。超小型車両は非常にコンパクトであるためにあまり大掛かりな装置の改良は行えないという制限がある。超小型車両は、一般的な乗用車に比べて小回りが利くことから細い道などへの乗り入れが安易だと考えられる。しかし、細い道や舗装されていない道には細かな段差や凹凸が多数路面上にあり、このような道での走行を考慮すると車両の乗り心地劣化や心理状態の悪化が予想される。そこで著者らは、この問題を解決するために超小型車両を用いたアクティブシートサスペンションを提案し、乗員の乗り心地感覚やその時の心理状態を反映させることを目的としている^{2,3)}。本報告では悪路走行時の外乱を模擬した振動にアクティブシートサスペンションにより発生させた振動を重畳し、その際の乗員の乗り心地について脳血流を測定して評価を行い、これらの実現性の確認をしている。

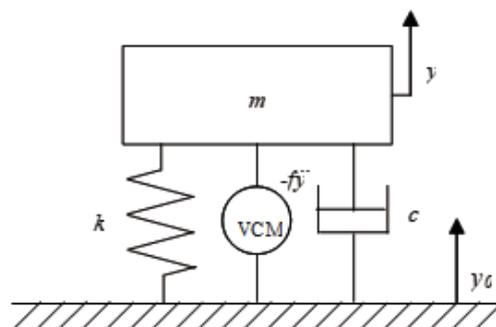


Fig. 1 Model of active seat suspension

アクティブシートサスペンションの制御モデルと制御システム

報告で使用したアクティブシートサスペンションのモデルを Fig. 1 に示す。アクチュエータにはボイスコイルモータ(VCM)を使用した。実験は Fig. 2 に示すようにアクティブシートサスペンションが設置された超小型車両に実験協力者が着座して外乱を模擬した 4 Hz の振動を 1 分間加えた。その後、4 Hz の振動に 2~10 Hz の異なる周波数を重畳した条件で加振を 1 分間行い、脳血流の計測を行った。アクティブシートサスペンションは車両の座席部に設置し、車体の固有振動数による共振を防ぐためにジャッキアップした状態でアクティブシートサスペンションを動作させた。その結果 4 Hz よりも小さい周波数でマスキングを行っても変化は見られず、4 Hz よりも高い周波数でマスキングを行うとリラックスする傾向が得られた。

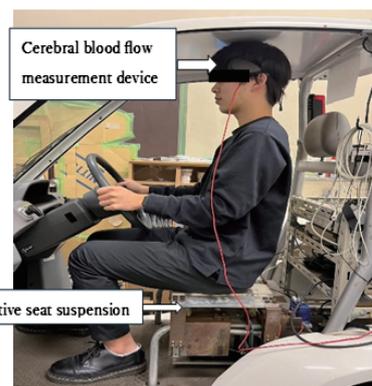


Fig. 2 Experimental Scene

参考文献

- 1) 阿部, 新井, 押野谷, 石橋, 日本機械学会 2002 年度年次大会講演会論文集, 2002, Vol. 7, No. 02-1, pp. 175-176.
- 2) 押野谷, 石橋, 新井, 日本 AEM 学会誌, 2003, Vol. 11-No. 4, pp. 209-215.
- 3) 新井, 阿部, 押野谷, 石橋, 第 45 回自動制御連合講演会, 2002, pp. 471-472.

電磁石と永久磁石を用いた薄板鋼板の浮上システムの開発 (永久磁石の最適配置に及ぼす張力の作用位置の影響に関する基礎的検討)

市川優介、長吉竜也、小川和輝*¹、小林一景、黒田純平、内野大悟*²、池田圭吾*³、加藤太朗*⁴、
遠藤文人*⁵、成田正敬、加藤英晃

(東海大、*¹愛知工科大学、*²沼津高専、*³北海道科学大、*⁴東京工科大、*⁵福工大)

Development of levitation system for thin steel plates using electromagnets and permanent magnets
(Fundamental study on the effect of the position of tension action on the optimum arrangement of permanent magnets)

Y.Ichikawa, T.Nagayoshi, K.Ogawa, I.Kobayashi, J.Kuroda, D.Uchino, K.Ikeda, T.Kato, A.Endo, T.Narita,
H.Kato

(Tokai Univ., *¹Aichi Univ. Tech., *²NIT. Numazu., *³Hokkaido Univ. Sci., *⁴Tokyo Univ. Tech., *⁵FIT)

はじめに

薄鋼板の製造ラインでは、ローラによる接触搬送が行われており、薄鋼板のめっきの傷や剥がれなど表面品質の劣化が問題視されている。そこで長方形薄鋼板の磁気浮上装置を用いた非接触磁気浮上搬送制御の検討が行われている¹⁾。しかし、鋼板の板厚が非常に薄い場合、鋼板のたわみや弾性振動が大きくなるため、限られた数の電磁石では生じるたわみを抑制することができず、薄鋼板の落下の原因となる。そこで、浮上する鋼板の上方に永久磁石を多数設置し、永久磁石の静的吸引力を浮上補助利用する電磁石と永久磁石を併用した磁気浮上システムを提案している。これまでに、安定した浮上のために最適な永久磁石の配置の検討を、遺伝的アルゴリズム (GA) を用いて静的な鋼板のたわみを抑制する配置を探索し、浮上安定性を向上することを確認している²⁾。本報告では、磁気浮上システムについて永久磁石表面と鋼板の距離、水平方向電磁石の中心間距離を変化させて検討を行った。

磁気浮上装置

Fig.1 に浮上装置の概略図を示す。浮上対象は長さ 800 mm、幅 600 mm の長方形亜鉛めっき鋼板 (SS400) を使用する。浮上した鋼板のエッジに対して水平方向電磁石ユニットによる吸引力を加え、鋼板の相対する 2 辺に沿って電磁石を 2 個ずつ設置している。水平方向位置決め制御は各電磁石表面から鋼板エッジまでの距離を 5 mm になるように制御を行う。Fig.2 に GA による永久磁石と鋼板の各ギャップでの評価値 J を示す。GA による探索を行った結果、GAP が大きいほど減少する傾向を示した。

参考文献

- 1) 石井他, 日本 AEM 学会誌, vol. 24, no. 3, pp.149-154, 2016.
- 2) 嘉山他, 日本磁気学会論文特集号, vol. 6, no. 1 pp.93-99, 2022.

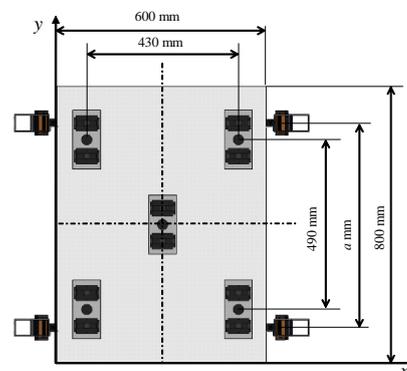
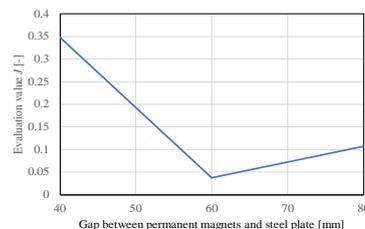
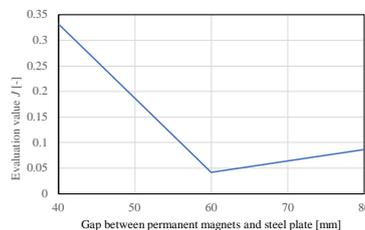


Fig.1 Electromagnetic levitation system



(a) 340mm



(b) 380mm

Fig.2 Evaluation value J at each gap between permanent magnets and steel plate

Fe-Co-V 合金の応力印加に伴う磁気特性の変化についての基礎研究

西倉温弘, 渡邊騎通, 齊藤伸*, 中山明芳
(神奈川大学, * 東北大学)

Fundamental study on the change in magnetic properties of Fe-Co-V alloys
associated with application of internal stress

A. Nishikura, N. Watanabe, S. Saito*, A. Nakayama
(Kanagawa Univ., *Tohoku Univ.)

Fe-Co-V 合金は Vicalloy と呼ばれ、これをワイヤ状に加工した Vicalloy 線は、ひねり処理を加えて内部応力を与えることで大バルクハウゼンジャンプという現象を示す [1]。大バルクハウゼンジャンプを発現する試料は、ある閾値となる磁場が与えらると、その磁化が急峻に変化する。これまで我々は、強磁性線や強磁性薄膜における大バルクハウゼンジャンプを応用した新たなデバイスの創造のための基礎研究に取り組んできた。そして、それらのデバイスは 10 Hz 以下の低周波の磁場にも応答するセンサとして活用される [2]。これは、従来より利用されている磁気センサと比較して次のような利点がある。すなわち、1) 外部磁場の変化速度に依存しない; 2) 広い動作温度領域をもち経年変化が少ない; 3) 永久磁石駆動により無電源で動作する といった点である。

先行研究では、Vicalloy 線の一端を固定し、他端に張力とひねりを加えることで大バルクハウゼンジャンプを発生させていた。Fig. 1 に、直径 0.25 mm、長さ 15 mm の Vicalloy 線に張力を加えた状態でひねり処理を施した試料の磁化特性を示す。Fig. 1 には、閾値となる磁場で大バルクハウゼンジャンプによる急激な磁化の変化が示されている。このような、ひねり処理による大バルクハウゼンジャンプの発現については先行研究で多く報告されているが、Vicalloy 線の磁化特性がひねり処理に対して変化していく様相については多く検討されてきていない。

これに対し本研究は、Vicalloy 線にひねり応力を加えながら磁化特性を in-situ に測定した。また、Vicalloy 線の両端からひねりを加えることで内部応力分布を変化させ、それらの交流磁場に対する応答について検討した。講演では、ひねり処理に対する Vicalloy 線の磁化特性の履歴および、履歴による励磁磁場に対する応答性の変化を系統的に評価したことについて報告する。

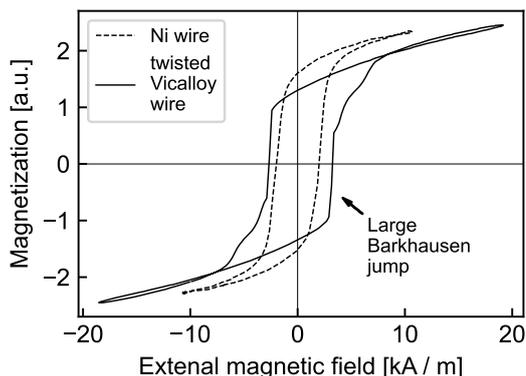


Fig.1: Magnetization properties of twisted Vicalloy wire compared with Ni wire

参考文献

- [1] KJ Sixtus and L Tonks, "Propagation of large Barkhausen discontinuities," **Physical Review**, vol. 37, no. 8, p. 930, 1931.
- [2] S. Abe and A. Matsushita, "Construction of electromagnetic rotation sensor using compound magnetic wire and measurement at extremely low frequency rotations," **IEEE Transactions on Magnetics**, vol. 30, no. 6, pp. 4635–4637, 1994.

微細薄膜素子における磁気インピーダンスの特性制御

王子越*, 菊池 弘昭
(岩手大学)

Controlling magnetoimpedance properties of micromachined thin film element

Ziyue Wang*, Hiroaki Kikuchi
(Iwate University)

はじめに

外部磁界が印加された時の材料の透磁率変化に起因する表皮効果、インダクタンス変化、および強磁性共鳴を利用する磁気インピーダンスは、高感度な磁界センサを比較的簡単な構造で実現できる。センサ用途には主にワイヤトリボン構成が使用されているが、薄膜構成は小型化と検出および駆動回路との集積化にとって都合がよいことから我々は薄膜による検討を継続している。ただし、素子の小型化に際して、素子長を短くすると反磁界の影響により感度低下や異方性制御が難しくなる。本研究では、長さ 0.1 mm 以下の微細素子を作製し、ジュール加熱を適用して薄膜素子の磁気インピーダンス特性の変化について検討した。

実験方法

フォトリソグラフィおよび高周波マグネトロンスパッタリングを利用して、厚さ 1.2 μm の Co85Nb12Zr3 アモルファス膜をガラス基板上にパターンニングした。パターンの幅は 5 μm , 10 μm 、長さは 300 ~ 50 μm の間で変化させた。その後、一部のセンサ素子は FIB (Focused Ion Beam) により、幅 1 μm , 2 μm に微細加工した。続いて Cu 電極を作製し、長手方向に磁界を印加しながらインピーダンスを評価した。電極内で電流を流す素子部分の長さは 100 μm , 50 μm , 30 μm とした。一方、ジュール加熱の際はウェハプローブを使用して、DC 電流を素子の長手方向に印加することで行った。

実験結果

Fig.1 は周波数 1 GHz におけるインピーダンスの外部磁界依存性である。異なるサイズの矩形素子のジュール加熱前後の特性を示す。幅 5 μm 、厚さ 2 μm 、素子全長はそれぞれ 120 μm , 300 μm の場合を示している。いずれも通電部分は 100 μm 長である。素子長さ 120 μm においてはインピーダンスの外部磁界による変化は、外部磁界の増加に対して一度増加して減少する双峰特性に示し、素子長さ 300 μm においては外部磁界の増加に対して減少する単峰特性に示す。単峰特性については形状異方性によって、素子の寸法が長いほど、幅方向の反磁界が大きくなり、容易軸が素子長手方向に向くことによる。ジュール加熱で異方性制御した長さ 300 μm 素子においてはインピーダンスの外部磁界による変化は、双峰特性に示す。長さ 120 μm 素子においては、インピーダンスの変化が増加し、インピーダンスが最大値を示す磁界は 50 Oe になる。いずれの場合でも、ジュール加熱後に双峰特性に変化しており、すなわち、素子幅方向が磁化容易軸を持つような特性に変化している。インピーダンスがピークを取る磁界強度には違いがみられるが、これは、素子長手方向の反磁界の影響によるものと考えている。また、本研究では、ジュール加熱時に磁界は印加しておらず、ジュール加熱のために印加する電流による磁界である程度異方性を変化できているものと考えている。

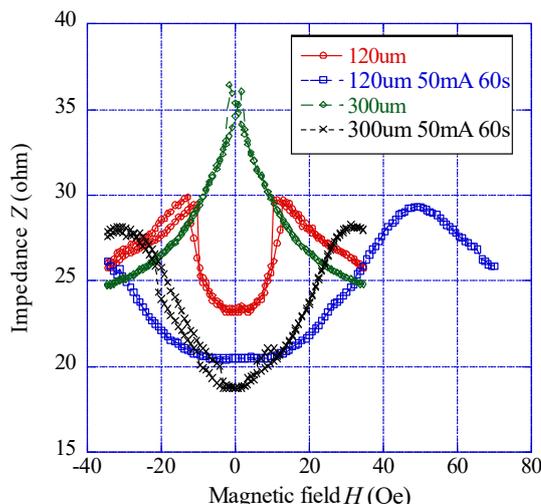


Fig.1 Magnetic impedance characteristics of elements of different sizes before and after heating

磁束漏洩法を用いた鋼材表面・内部の微小欠陥検知の検討

小野寺翔汰, 浦崎光史, 菊池 弘昭 (岩手大学)

Possibility of Detection by MFLT for Small Sized Defect in Steel

Shota Onodera, Kohshi Urazaki, Hiroaki Kikuchi
(Iwate University)

はじめに

磁束漏洩法を用いた鋼材中のより小さな欠陥や介在物などの微小欠陥検知において、先行研究で $30\ \mu\text{m}$ までの欠陥が検知可能なことを明らかにしてきた。実験的には、欠陥に起因する信号以外の信号により、 $30\ \mu\text{m}$ 以下の欠陥判別が難しい状況にあるが、本研究では、磁場解析を通して $10\ \mu\text{m}$ 程度の試料表面にある微小欠陥検出の可能性について検討した。また、試料に介在物を埋め込んだ場合についてもその可能性を検討した。合わせて、 $30\ \mu\text{m}$ 以下の欠陥判別を困難にしているバックグラウンドノイズの原因についても検討する。

実験方法

試験体は幅 10mm 、長さ 50mm 、厚さ 1mm の寸法を持つ低炭素鋼 S15C 用いて、ケイ素鋼板製の磁気ヨーク上に設置し、試料長さ方向に磁化させる。ここで磁気抵抗素子(GMR)を用いたグラジオメータの動作をするセンサ(NVE 社 ABL006)を走査させ、試料長さ方向の漏れ磁場を検出する。3次元磁場解析には有限要素法 (ムラタソフトウェア, FEMTET)を用い、実験と同等のモデルにより、表面及び試料内部に半径 $1\text{mm}\sim 10\ \mu\text{m}$ の径を有する穴、球体を設け磁場分布を解析した。また、磁場分布の結果を用いブリッジ回路で構成されたグラジオメータとしての出力シミュレーションも行った。その際、センサ間隔やリフトオフを変化させた場合についても検討した。

実験結果

Fig.1は欠陥サイズ $10\ \mu\text{m}$ 、リフトオフ $0.1\ \text{mm}$ の場合のセンサ出力シミュレーションの結果である。黒線が磁束密度 B で、色分けされているのがセンサ間隔を $0.1\sim 1\text{mm}$ とそれぞれ変えた場合のセンサ出力 V_s となっている。センサ間隔の違いで出力される最大値に変化はない一方、ピーク位置に変動が生じた。変化は小さいが $10\ \mu\text{m}$ の微小欠陥による漏れ磁場分布の変化は得られる。

Fig.2は試料表面から $150\ \mu\text{m}$ 内側の位置に、 $50\ \mu\text{m}$ の球を介在物として埋め込んだときのシミュレーション結果である。結果から表面欠陥 $30\ \mu\text{m}$ の時の出力と同程度の出力が得られた。リフトオフを限りなく近づければ試料内部の介在物の検知も可能であることがシミュレーションからは確認できた。バックグラウンドの影響については、学会にて発表する。

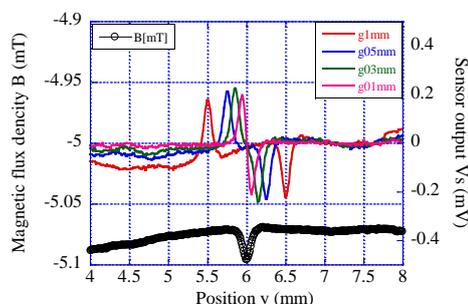


Fig.1 Simulation results for defect size $10\ \mu\text{m}$.

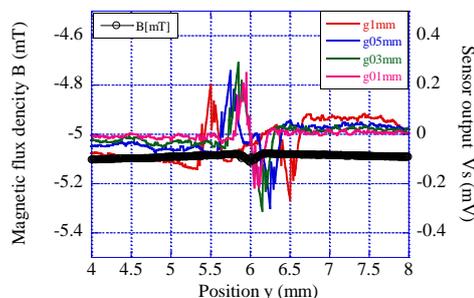


Fig.2 Simulation results for sphere size $10\ \mu\text{m}$.

機械学習を用いた撮像スケールの異なる磁区画像からの 磁気パラメータ推定

橋本 周¹, 渡辺 章斗¹, 仲谷 栄伸², 粟野 博之¹, 田辺 賢士¹
(豊田工大¹, 電気通信大²)

Estimating parameters from magnetic domain images with different imaging scales using machine learning
S. Hashimoto¹, A. Watanabe¹, Y. Nakatani², H. Awano¹, and K. Tanabe¹
(Toyota Tech Insti.¹, Univ. of Electro-Comm.²)

磁性分野では、成膜した薄膜の磁気特性を評価するために、磁気パラメータの測定実験が行われる。それらの中には、ジャロシンスキー守谷相互作用 (DMI) 定数のような、測定が難しかったり、測定に時間が掛かったりするパラメータも存在する。そこで、我々はより簡便なパラメータ測定法を確立するために、薄膜に現れる迷路状の磁区構造に注目した[1,2]。先行研究では、機械学習を用いた磁区画像からのパラメータ推定が報告されている[1-3]。昨年度の応用物理学会において、我々は教師画像とテスト画像の撮像スケールが異なる場合の DMI 定数の推定結果について報告した[4]。DMI 定数の推定では撮像スケールが近い場合のみ、推定に成功した。しかし、推定パラメータを変更しても同様の結果が得られるかは明らかでない。そこで、教師画像とテスト画像のスケールが異なる場合において、異方性分散 σ の推定可能性を検証した。

マイクロマグ計算を用いて、 σ を 0.05 から 0.20 の間のランダムな値に設定し、合計 10,000 枚の画像 (2.0 μm 角) を作製した。その後、画像スケールがそれぞれ 0.5 μm 角、1.0 μm 角、1.5 μm 角となるように切り抜いた (Fig. 1)。各スケールの画像群を学習した各ネットワークに対して、2.0 μm 角の画像群でのパラメータ推定を行った。その結果、DMI の場合 (Fig. 2(a)) と同様に、 σ の推定に関しても、テスト画像と教師画像のスケールが近い場合 (1.5 μm) では推定がうまくいくものの、スケールが離れている場合 (0.5 μm) ではうまく推定できなかった (Fig. 2(b))。1.0 μm の結果に注目すると、DMI の推定に比べ比較的うまく推定できており、パラメータごとにスケール違いの許容度に差があることが明らかになった。

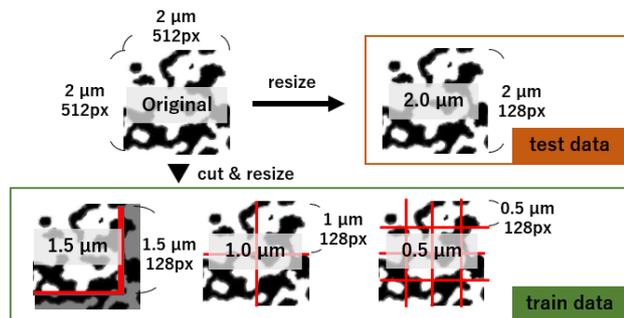


Fig. 1 Process of producing training and test data from original magnetic domain images.

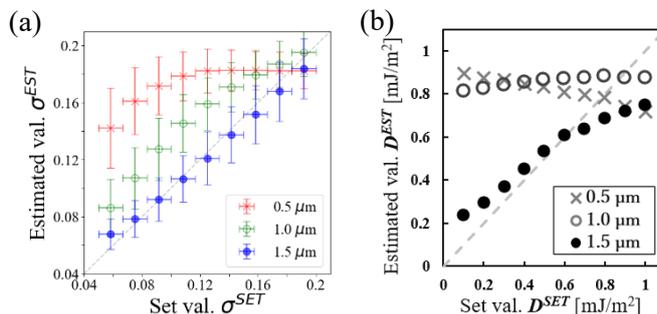


Fig. 2 Estimated σ (a) and DMI constants(b) for different sizes of training images (0.5, 1.0, 1.5 μm) and test images (2.0 μm) [4].

- [1] M. Kawaguchi et al., npj Computational Materials 7, 20 (2021).
[2] S. Kuno et al., APL Machine Learning 1, 046111 (2023).
[3] H. Y. Kwon et al., Science Advances 6, eabb0872 (2020).
[4] 渡辺ら、第 71 回応用物理学会春季学術講演会 2024 年 3 月

バルクハウゼンノイズ測定における試料曲面形状の影響

千葉遥斗, 菊池弘昭, 松村慶一*
(岩手大学, *インフィテックエム)

Effect of sample curvature on Barkhausen noise measurements

Haruto Chiba, Hiroaki Kikuchi, Keiichi Matsumura*

(Iwate University, *INFITECHM)

研究背景

磁気バルクハウゼンノイズ(Magnetic Barkhausen Noise, MBN) は応力に敏感であり、残留応力の非破壊評価応用への期待がある。MBNは強磁性体を磁化する際に磁壁の動きに起因して発生する電気的信号であり、試料の品質判別や非破壊評価などに利用される。しかし、MBNは非常に小さな信号で外部からのノイズや、ヨーク、空芯コイル設置位置の微小なずれなどの影響を大きく受ける。特に試料が曲面をもつ場合ではヨークや空芯コイルを安定して接触させることが難しく、測定に誤差が生じる可能性がある。そこで本研究では試料が様々な曲面を持つ場合でも安定したMBN測定を実現可能な方法について検討するために、ヨークと試料との位置関係を意図的に変更した場合や、補助ヨークの曲がり具合を変更した場合の試料内磁束量について磁場解析を利用して検討し、実験値との照合することを目的とする。

実験方法

MBNを測定する試料は幅30mm、奥行き50mm、高さ10mmの直方体を用いる。試料の材料はSUS420Jである。また、試料はそれぞれ曲面を持ち、曲率半径がそれぞれ24mm、60mm、115mm、平面の4パターンを使用する。励磁コイルに1A、1Hzの三角波を供給し、ヨークを通して試料に磁束を供給する。ヨークは先端が平面になっている平面ヨークと、先端が二山の形状の補助ヨークを用いた。ヨークからの磁束で試験体を磁化し、その際に発生するMBNを試料表面に置かれた空芯コイルで測定する。また、本研究では試料内の磁束密度の分布を調べるために、静磁場シミュレーションの検討も行う。その際、ヨークの曲がり具合の影響を調べるために標準の補助ヨーク及びそれを高さ方向に0.5倍した縮めた補助ヨークを検討した。シミュレーションでの構成は、実験とほぼ同様としたが試料の曲率を変えた際の定性的な変化を検討することに重点を置いたため実験の場合と完全には一致していない。

実験結果

Fig.1はそれぞれの曲率の試料を二つのヨークで5回ずつ測り、そのピーク値について最大値、平均値、最小値の曲率依存性を示したものである。平面ヨークで測った場合にはピーク値は試料の曲率が大きくなるにつれて減少したのに対し、補助ヨークで測った場合にはR115でピークが見られた。Fig.2はヨークの大きさを変更した場合について、試料中央部の磁束密度の曲率依存性を示した図である。また、点は磁気ヨーク脚部の磁束密度の実測値である。曲率が0~0.025あたりまでは平面ヨークを用いた場合が試料に最も磁束を供給出来ていたのに対して、曲率が0.025より大きい試料になると縮めたヨークを用いた場合が最も試料に磁束を供給できることを確認できた。しかし、MBNで見られたR115でのピークの要因は補助ヨークの曲がり具合を変えてのシミュレーションや実験で測った磁束密度の結果からは得られなかった。補助ヨークの曲がり具合を通常ヨークよりも大きくして計算を行うことで、試料内部の磁束密度がR115でピークをとるような結果が得られる可能性がある。詳細は学会にて発表する。

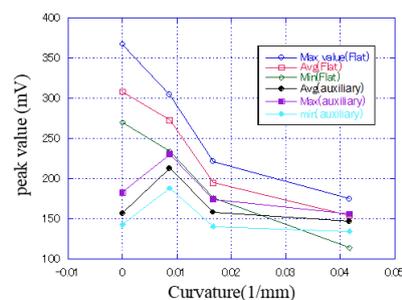


Fig.1 MBN peak value signals at different sample curvatures and yokes.

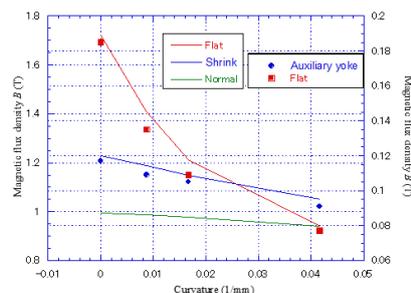


Fig.2 Curvature dependence of magnetic flux density obtained from experiments and simulations.

種々の BiFeO₃ 系強磁性・強誘電薄膜の高感度ドメイン観察に適した探針の磁気特性の特定 - 最適探針特性早見表の作成 -

島山佳琳, 細谷亮太, 江川元太, 吉村 哲

(秋田大)

Identify of the magnetic properties of a tip suitable for high-sensitivity domain observation of various BiFeO₃-based multiferroic thin films: Creating a quick reference map for optimal tip properties

K. Hatakeyama, R. Hosoya, G. Egawa, S. Yoshimura

(Akita Univ.)

はじめに BiFeO₃は室温で反強磁性・強誘電性を示すが, Bi³⁺や Fe³⁺の一部を適当なイオンで置換することによって強磁性を発現することが報告されている. 強磁性・強誘電性材料を利用した次世代の磁気記録デバイスへの BiFeO₃系薄膜の適用性を検証するには, 記録ビットに相当する薄膜の微細な磁区・分域の高感度観察が必要となる. 観察自体は, 走査型プローブ顕微鏡(SPM)の磁気力顕微鏡(MFM)と静電気力顕微鏡(EFM)の機能を用いることで可能であるが, 磁区・分域の両方を高感度に観察するには MFM 用磁性探針と BiFeO₃系薄膜との間の磁氣的相互作用の観点から飽和磁化(M_s)の適切な組み合わせが求められる. しかし, 市販の磁性探針は種類が少なく, また, 未だ「 M_s の適切な組み合わせ」の指針もない. 本研究では, 組成制御により M_s を変化させることが可能な CoCr 系金属磁性薄膜を用いて, 様々な M_s を有する磁性探針を自ら作製すると共に, それらの探針を用いて種々の BiFeO₃系薄膜の磁区と分域の両方を高感度に観察できる探針の磁気特性を検討することで, 「適切な組み合わせ」の指針を得ることを目的とした.

方法 CoCr系薄膜(膜厚 30 nm)をスパッタリング法により Si 探針母材に成膜し, 導電性磁性探針を作製した. この時, 探針に成膜した CoCr 系薄膜の磁気特性を測定するため, Si 探針母材と同時に平面基板にも成膜を行った. 成膜条件は, 室温または基板加熱(200–500 °C), 成膜電源 DC50 W とした. ターゲットには Co₈₀Cr₂₀(at%), Co₉₀Cr₁₀を選択的に用い, そのエロージョン部に Co, Cr, Pt シートを様々に配置することで組成を変化させ, 種々の M_s となるように制御した. 薄膜の磁気特性の評価には, 振動試料型磁力計を用いた. そして, 作製した探針を用いて BiFeO₃系薄膜の磁区・分域観察を行った. 本研究では, 観察試料に(Bi,Nd)(Fe,Co)O₃(M_s :140 emu/cm³, 膜厚 t :200 nm)薄膜を用いた. また, 使用した探針の M_s はそれぞれ(a)380, (b)440, (c)600, (d)750, (e)1070 emu/cm³程度である. まず, 探針先端を N 極に磁化させた後, SPM のコンタクトモードにより観察試料に走査範囲 3×3 μm で電界を印加し書き込みを行った. その後, MFM, EFM により電界書き込み範囲が中心となるような走査範囲 6×6 μm で磁区・分域の観察を行った. なお, 電界書き込み時には-10 V, EFM 観察時には-1 V の電圧を印加した.

結果 Fig.1に, (a)–(e)の探針で観察したMFM・EFM位相像を示す. 小さな M_s を有する探針(a)では, 探針 M_s が試料に対して小さ過ぎたことにより, 試料の磁化を検出しにくかった. 逆に, 大きな M_s を有する探針(c), (d), (e)では, 電界書き込みで誘起する試料磁化の方向と着磁させた探針先端の磁化の方向とが逆であるため, 探針 M_s が試料に対して大き過ぎたことにより, 電界書き込み自体を阻害してしまったと考えられる. 探針(b)では適した位相差(MFM:+4.9 deg, EFM:-8.0 deg)が得られたことから, (Bi,Nd)(Fe,Co)O₃薄膜の場合, 約450 emu/cm³の M_s を持つものが探針用材料として良いと判明した. この結果と (Bi,Ln)(Fe,Co)O₃ (M_s :60 emu/cm³, t :260 nm)薄膜のMFM観察結果¹⁾(α), (β), (γ)から, MFM位相差のマップを作成した(Fig.2). 縦軸(探針)と横軸(薄膜)は, M_s と t を掛け合わせて体積効果も含めた磁氣的な量とした. 橙色で囲まれた領域は, MFM位相差が約+5 deg から+10 degの範囲を表しており, これを仮の高感度観察可能領域とした(+15 degを超えるとEFM位相像が取得できなくなる). 今後の更なる実験によりこの領域が確定すると, 種々の磁気特性を有するBiFeO₃系薄膜のMFM・EFM観察に適した探針 M_s が一目で判ることになるであろう.

参考文献 1) S. Yoshimura et al., Proceeding s of 2022 IET Inter. Conf. on Eng. Tech. and Appl., 22363628 (2022)

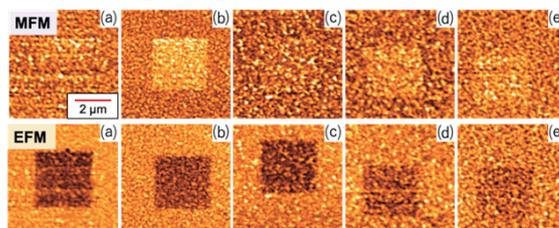


Fig. 1 MFM and EFM images of (Bi,Nd)(Fe,Co)O₃ thin film measured by using tips with different M_s .

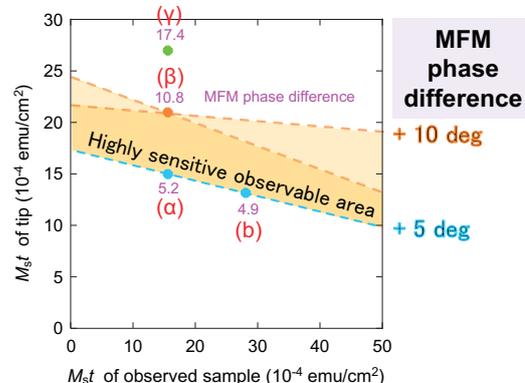


Fig. 2 Map of MFM phase difference against M_{st} (multiplication of M_s and thickness) of observed BiFeO₃-based thin films and used tips.

磁気粒子イメージング用酸化鉄ナノ粒子の熱分解法による合成

瀧源裕仁、山下詩織、清野智史、中川貴
(大阪大学)

Synthesis of Iron Oxide Nanoparticles for Magnetic Particle Imaging via Thermal Decomposition Method
H. Takimoto, S. Yamashita, S. Seino, T. Nakagawa
(Osaka Univ.)

はじめに

磁気粒子イメージング (Magnetic Particle Imaging : MPI) では磁性ナノ粒子に磁場を印加することで発現する磁化の変化を直接シグナルとして検出し、その存在部位を可視化する。MPI を医療分野へ応用する場合、生体適合性の観点から、投与される磁性ナノ粒子は酸化鉄に限定される。良好な磁気シグナルを得るためには、高い磁化率、高い飽和磁化、速い磁気緩和が求められることから、粒子径分布が狭く、かつ大きな粒子径の超常磁性粒子が望ましい⁽¹⁾。このような物性を示す酸化鉄ナノ粒子を得るための合成法として、熱分解法が有望とされている⁽²⁾。本研究では、熱分解法を用いて酸化鉄ナノ粒子の合成を行った。得られた試料の磁化データから MPI シグナル強度を試算することで、より好ましい粒子合成条件を探索した。

実験方法

オレイン酸鉄、オレイン酸、1-オクタデセンを混合し、アルゴン雰囲気下で高温に加熱した。原料割合、反応温度、反応時間を合成条件とした。得られた粒子は、メタノールとアセトンの混合溶液を用いて洗浄を行った後、トルエンに再分散させた。得られた粒子の評価は VSM および TEM で行った。さらに、得られた磁化データに Langevin 関数をフィッティングし、交流磁場を印加した際に予想される MPI シグナル強度の計算値を算出した。

結果・考察

一例として、オレイン酸鉄とオレイン酸の比率が 1:6、反応温度が 300 °C、反応時間が 24 時間で合成した粒子の TEM 像を図 1 に示す。平均粒子径は約 14.7 nm であり、多くが球状の粒子であった。VSM 測定より、10 kOe での磁化の値はマグネタイトの飽和磁化に近い値を示した。得られた磁場磁化曲線と Langevin 関数をフィッティングした曲線を図 2 に示す。MPI シグナル強度を試算したところ (交流磁場周波数 : 1.2 kHz、交流磁場振幅 : 0.1 kOe の条件で算出)、市販の医療用酸化鉄ナノ粒子として知られる Resovist® よりも高いシグナル強度が期待できることが示唆された。

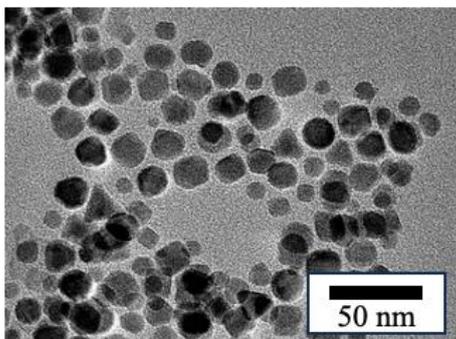


図 1 合成した粒子の TEM 像の例

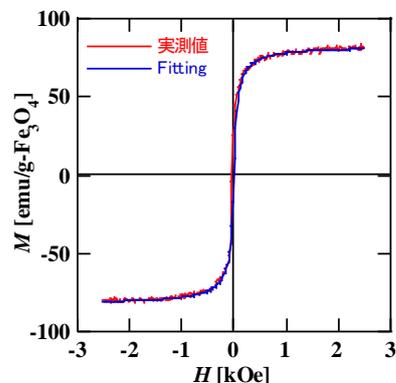


図 2 磁場磁化曲線とフィッティング曲線

参考文献

- 1) 吉田敬 et al., まぐね, **13** (2018), 2) R.M. Ferguson et al., *Med. Phys.*, **38** (2011), p.1619-1626

磁気粒子イメージング装置の省電力化に関する研究

藤井雄大、飯塚森人、清野智史、中川貴
(大阪大)

Study on power saving of magnetic particle imaging system

Y.Fujii, M.Iduka, S.Seino, T.Nakagawa

(Osaka Univ.)

はじめに

近年、医療用画像診断技術として磁気粒子を画像化する磁気粒子イメージング (MPI) 法が注目されており、研究が盛んに行われている¹⁾²⁾。磁場を発生させるために大電力が必要であることが課題の一つとされており、電力量を可能な限り低減することが求められている。MPI では、直流磁場と交流磁場を平行に印加する方法と、垂直に印加する方法がある。磁場の印加方法により電力消費量がどの程度異なるのかを評価する。電力低減の手段として交流磁場の周波数を低下させることも検討する。従来は 25 kHz 程度の高周波が用いられてきた³⁾が、100 Hz 程度の周波数において画像化可能かどうか検証する。

手法

本研究では、MPI システムの省電力化を実現するために、2 点の施策を行った。1. 周波数の低減、2. 電源を使用せずにネオジム磁石とフェライトコアを用いることである。一般的に直流磁場発生に電源を使用するところを、ネオジム磁石を使用し、これにより FFL (無磁場線) を生成して電力を消費せずに直流磁場を作り出した。また、FFL を移動させるためフェライトコアを E 字型に組み合わせた。また、本研究における平行型 MPI 装置では直流磁場と交流磁場を同一のコイルで発生させていたが、磁路の飽和が問題となっていた。そこで、直流磁場と交流磁場をそれぞれ別のコイルで発生させる垂直型 MPI 装置を採用した。Fig. 1 に平行磁場印加の配置を Fig. 2 に垂直磁場印加の配置を示す。

結果

xy 平面の 2 次元画像を取得する際の消費電力について述べる。磁場平行型 MPI 装置の場合、交流磁場発生コイルには最大 2.6A の電流を流しており、交流磁場強度は 7.5 kA/m である。全体の最大消費電力は 214 W である。磁場直行型 MPI

装置の場合、交流磁場発生コイルには最大 12.0A の電流を流しており交流磁場強度は 6.6kA/m である。全体の最大消費電力は 102W となる。以上の結果から、磁場印加を直交配置にすることにより MPI システムの省電力化できることがわかった。また、Fig. 3 に直交配置で取得された画像を示す。図中の点線部分に Resovist の原液を 52.7 μ L 配置している。その部分にのみ強いシグナルが検出されていることがわかる。このことより周波数が 100Hz 程度でも画像化が可能であることが示された。

参考文献

- 1) S. Choi *et al. Sci. rep.* **10**, 11833 (2020).
- 2) Zheng, B. *et al. Theranostics* **6**(3), 291 (2016).
- 3) B. Gleich *et al. Nature* **435**(7046), (2005).

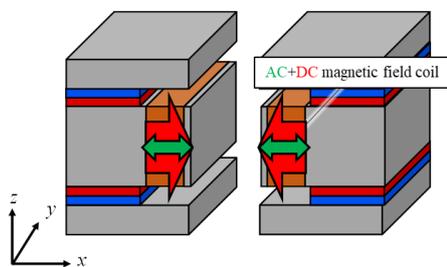


Fig. 1 Parallel magnetic field application

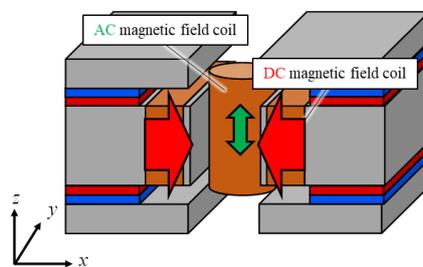


Fig. 2 Vertical magnetic field application

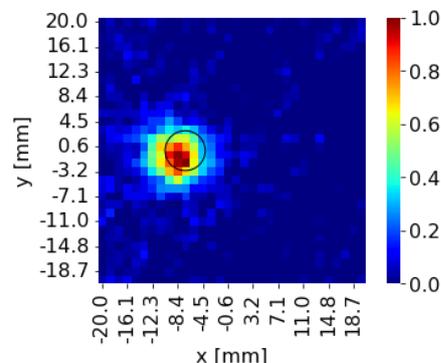


Fig. 3 Acquired magnetic particle image

偏極中性子小角散乱による中空 Fe_3O_4 粒子の磁化分布評価

山田凌平、小林悟、廣井孝介¹、河村幸彦²、高田 慎一¹、元川竜平¹、熊田高之¹

(岩手大理工,¹JAEA,²CROSS)

Magnetization analysis of hollow Fe_3O_4 particles by polarized small-angle neutron scattering

R. Yamada, S. Kobayashi, K. Hiroi, S. Takada, R. Motokawa, T. Kumada

(Iwate Univ.,¹JAEA,²CROSS)

はじめに

近年、磁気ハイパーサーミアの新たな発熱体として、スピン・ボルテックス(SV)を形成する磁性サブミクロン粒子が注目されている¹。特に、中空構造により発熱効率の向上が報告されているが²、SV 構造の詳細と粒子形態(粒子サイズ、表面状態など)との相関は明らかになっていない。本研究では、中空 Fe_3O_4 サブミクロン粒子において偏極中性子小角散乱実験を行い、中空粒子内部の磁化分布評価を行った。

実験方法

中空 Fe_3O_4 サブミクロン粒子(平均粒径: $359\pm 38\text{nm}$ 、平均孔径: $200\pm 20\text{nm}$)について、大強度陽子加速器施設(J-PARC)の中性子小角・広角散乱装置 TAIKAN を用いて、印加磁場 $B = 1\text{T}\sim 0\text{T}$ の条件で偏極中性子小角散乱実験を行った。中性子スピンの偏極方向が印加磁場方向に対して上向き(+), 下向き(-)の場合の散乱強度 $I^+(\mathbf{Q}), I^-(\mathbf{Q})$ から核散乱長密度のフーリエ変換 $\tilde{N}(\mathbf{Q})$ 、磁場方向(z 方向)の磁化成分のフーリエ変換 $\tilde{M}_z(\mathbf{Q})$ を決定した。

実験結果

Fig. 1 に $|\tilde{N}(\mathbf{Q})|^2$ と $|\tilde{M}_z(\mathbf{Q})|^2$ の磁場変化(1, 0.09, 0.03T)を示す。 $|\tilde{N}(\mathbf{Q})|^2$ は $Q < \sim 0.01\text{\AA}^{-1}$ において $I \propto Q^{-4}$ に従って減少するが、 $|\tilde{M}_z(\mathbf{Q})|^2$ は、より大きな傾きを持つ。これは、中空粒子表面では磁場方向の磁化成分が空間分布を持つことを示唆している³。また $|\tilde{N}(\mathbf{Q})|^2$ は、 $Q > \sim 0.01\text{\AA}^{-1}$ で傾きが緩やかになる一方、 $|\tilde{M}_z(\mathbf{Q})|^2$ は $Q > \sim 0.02\text{\AA}^{-1}$ で傾きが変化している。これは中空粒子表面での核散乱長密度と磁化の空間分布の表面粗さの違いを反映していると考えられる。なお $|\tilde{M}_z(\mathbf{Q})|^2$ の値は、飽和状態の $B=1\text{T}$ で最大となり、中空粒子への外部磁場の大きさに比例することが分かった。

謝辞

本研究の中性子散乱実験は、JRR-3 施設供用研究課題(課題番号: 2023A-A15)、および J-PARC 物質・生命科学実験施設における共同研究(課題番号:2024I0015)において実施した。

参考文献

- 1) N.A. Usov et al., Scientific Reports, vol.8 (2018) 1224.
- 2) T. Tsuji et al., AIP Adv. vol.14 (2024) 015235.
- 3) Xiaoi Guo et al., J Nanopart Res., vol.15 (2013) 2058.

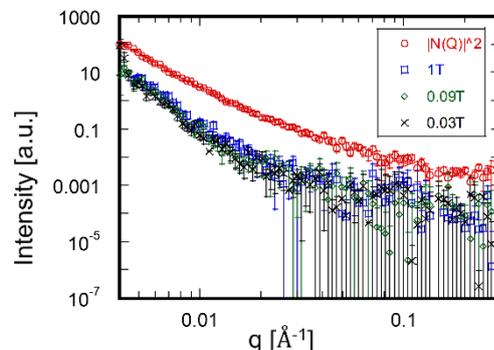


Fig. 1 Scattering vector dependence of $|\tilde{N}(\mathbf{Q})|^2$ and $|\tilde{M}_z(\mathbf{Q})|^2$ at R.T.