

新しい振動発電デバイス：垂直磁界アシスト式電磁誘導型振動発電デバイス

大竹充・中村優太・石川瑛士・川井哲郎・二本正昭
(横浜国大)

New Vibration Powered Generator: Perpendicular Magnetic Field Assisted Electromagnetic Vibration Powered Generator

Mitsuru Ohtake, Yuta Nakamura, Eishi Ishikawa, Tetsuroh Kawai, and Masaaki Futamoto

(Yokohama Nat. Univ.)

はじめに 環境発電デバイスは、IoTデバイスなどの自立型電源への適用に向けて注目されている。振動発電には、電磁誘導型に加え、圧電型や静電誘導型があるが、電磁誘導型は内部抵抗が小さく、高出力化が可能で、また、耐久性が高く、動作可能温度域が広いという特徴がある。本講演では、電磁誘導型の更なる高出力化を可能にさせ、また、使用できる磁性材料の選択幅を拡大させる新たな方式を開発したため、その基本原理とデバイス構造を説明する。

発電原理 本方式では、片持ち梁状の磁性材料を使用する。磁性材料は、梁長手方向に良好な軟磁気特性を持つことが好ましいが、結晶配向の有無は問わず、多結晶や非晶質材料でも使用できる。重要なことは、梁に垂直磁界を印加することである。振動前の梁に印加される磁界の面内成分はゼロであるが、振動による梁のたわみは Fig. 1 に示すように面内成分を発生させる。また、振動により、面内磁界は梁の長手方向に沿って正負で変化することになり、この磁界が磁性材料の磁化を反転させる。そして、梁の周りにコイルを設置することにより、磁束変化が検出され、出力が得られる。

出力特性 Fig. 2 は、梁として無方向性珪素鋼板 (50 mm × 10 mm × 350 μm) を用い、長手方向の端から 10 mm の部分までを固定することにより片持ちの状態にし、発電コイル (抵抗: 1.2 kΩ, 巻数: 8000 回, 最内径: 幅 12 mm × 高さ 16 mm, 全長: 40 mm) を挿入し、梁のみを振動試験機を用いて強制振動させたときの出力特性の例である。このときの振動の加速度は 1.5 G で一定とし、垂直磁界はヘルムホルツコイルを用いることにより印加した。印加磁界の増加に伴い、梁内の磁束変化速度も増加するため、より大きな出力が得られている。この実験条件では、450 Oe の垂直磁界で、13.6 V の出力となっている。

デバイス構造 本方式をデバイスとして構成する際の一例として、永久磁石の使用が考えられる。Fig. 3 は、永久磁石の設置場所 (Fig. 3(a)) による梁の長手方向の垂直磁界の強度分布 (Fig. 3(b)) と設置場所を変えた場合における出力特性 (Fig. 3(c)) の例である。自由端近傍に永久磁石を設置することにより、効率的に梁に面内磁界が印加され、大きな出力が得られていることが分かる。

1) 大竹充, 川井哲郎, 二本正昭「発電装置」特願 2022-086851 (2022年5月27日)。

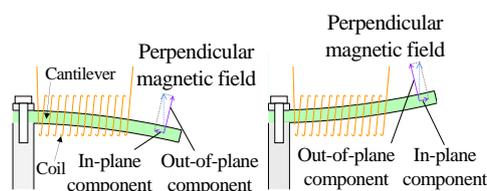


Fig. 1 Cross-sectional schematic diagram of a perpendicular magnetic field assisted electromagnetic vibration powered generator.

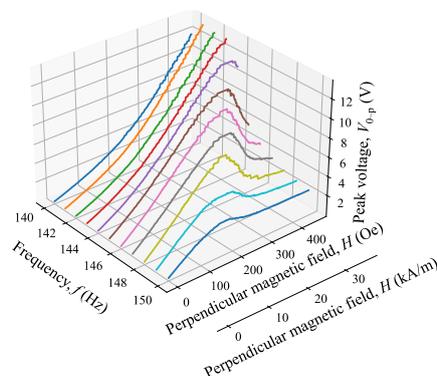


Fig. 2 Perpendicular magnetic field dependences of peak voltages of a powered generator vibrated at different frequencies.

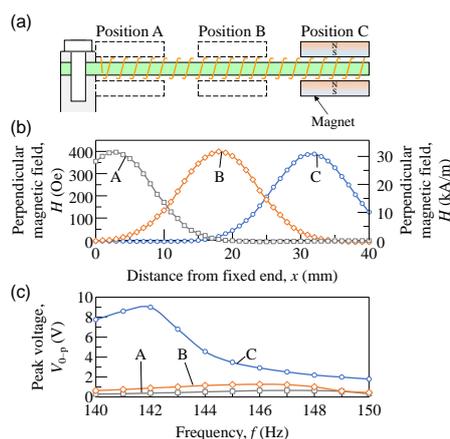


Fig. 3 (a) Cross-sectional schematic diagram of a perpendicular magnetic field assisted vibration powered generator using a pair of permanent magnets. (b) Distributions of perpendicular magnetic field and (c) frequency dependences of peak voltage of powered generators where permanent magnets are set at positions shown in (a).

垂直磁界アシスト式および逆磁歪式電磁誘導型振動発電デバイスの梁形状が衝撃による出力特性に及ぼす効果

神谷颯・石川瑛士・明田俊祐・中村優太・大竹充・川井哲郎・二本正昭
(横浜国大)

Effect of Beam shape on the Shock-Induced Output Characteristics of Perpendicular Magnetic Field Assisted and Inverse Magnetostrictive Electromagnetic Vibration Powered Generators

Soh Kamiya, Eishi Ishikawa, Shunsuke Aketa, Yuta Nakamura,

Mitsuru Ohtake, Tetsuroh Kawai, Masaaki Futamoto

(Yokohama Nat. Univ.)

はじめに 垂直磁界アシスト式¹⁾および逆磁歪式²⁻⁴⁾の電磁誘導型振動発電デバイスでは、磁性体梁材料が用いられる。通常、振動発電で効率的に出力を得るためには、振動と梁の共振周波数を合わせる必要がある。一方、衝撃により発電を行う場合、振動よりも共振周波数が高い梁材料も使用可能である。一般に、短い梁材料を用いると、周囲に設置するコイルの巻数が減少してしまうが、一方で、共振周波数が上昇するため、磁束の時間変化量が多くなるというメリットもある。本研究では、梁とコイルの長さを系統的に変化させ、衝撃による垂直磁界アシスト式および逆磁歪式の発電試験を行い、発電に適する梁形状の検討を行った。

実験方法 梁材料には無方向性珪素鋼板を用いた。幅と厚さはそれぞれ 10 mm と 350 μm で一定とし、長さを $L_{\text{beam}} = 28$ から 60 mm の間で変化させた。そして、長手方向の端から 10 mm の部分までを固定することにより片持ち梁の状態とした。発電コイルの最内径は幅 12 mm \times 高さ 16 mm、長さは $L_{\text{coil}} = L_{\text{beam}} - 20$ mm とし、単位長さ当たりの巻き数は 200 回/mm で一定とした。Fig. 1 にこれらの関係を纏めたものを示す。そして、コイルから僅かにはみ出た自由端の先端に変位を与えることで、衝撃による発電試験を行った。このとき、バイアス磁界を、垂直磁界アシスト式では垂直方向に、逆磁歪式では長手方向に、ヘルムホルツコイルを用いて印加した。

実験結果 Fig. 2(a)に長さ 60 mm の梁（振動部は 50 mm）に対して 6 mm の変位を与えることにより得られた垂直磁界アシスト式での出力波形を示す。瞬間的に 18.2 V の大きな出力が得られていることが分かる。また、梁の振動が共振周波数で減衰していくため、それに伴い出力電圧も減衰していくことが分かる。Fig. 2(b)に無方向性ケイ素鋼板の磁化曲線を示す。梁は減衰振動中、面内方向に正負の磁界が交互にかかり、磁化が反転されることで、磁束変化が検出され、出力が得られる。振幅の減衰に伴い、面内方向の磁界の変化域およびそれによる磁化の変化域が小さくなって、出力電圧が減少していることが考えられる。Fig. 3 に全長が 28 mm と 60 mm の試料に垂直磁界アシスト式で 400 Oe の磁界を印加したときの最大出力電圧の変位依存性を示す。変位の増加に伴い、最大出力電圧は増大している。一方、28 mm の試料では、磁性体の体積や検出コイルの巻数が 1/5 に減少しているにもかかわらず、60 mm の試料の 1/3 以上の出力が得られている。当日は、逆磁歪式の場合も含め、梁形状が振動と発電特性に与える効果について詳細に報告する。

- 1) I. Kanno: *J. Surf. Finish. Soc. Jpn.*, **67**, 16 (2016).
- 2) Z. Yang, K. Nakajima, R. Onodera, T. Tayama, D. Chiba, F. Narita: *Appl. Phys. Lett.*, **112**, 073902 (2018).
- 3) T. Ueno and S. Yamada: *IEEE Trans. Magn.*, **47**, 2407 (2011).

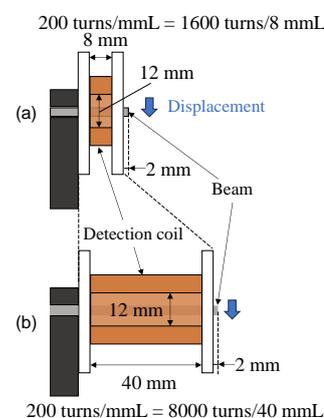


Fig. 1 Schematic diagrams showing positional relationships between beams and coils with different lengths.

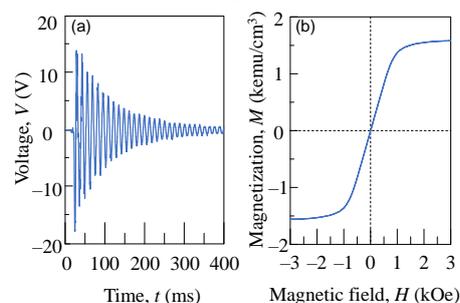


Fig. 2 (a) Output voltage waveform and (b) magnetization curve of non-oriented silicon steel plate.

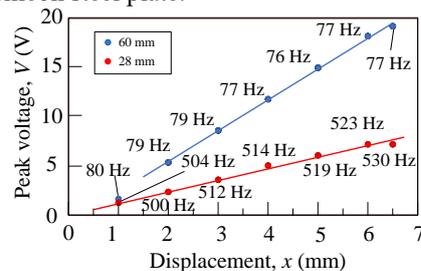


Fig. 3 Displacement dependences of peak voltages.

垂直磁界アシスト式および逆磁歪式電磁誘導型振動発電デバイスの磁性体梁中の磁束変化挙動の解析

石川瑛士・大竹充・中村優太・川井哲郎・二本正昭
(横浜国大)

Analysis of Magnetic Flux Variation Behavior in Magnetic Beams

of Perpendicular Magnetic Field Assisted and Inverse Magnetostrictive Electromagnetic Vibration Powered Generators

Eishi Ishikawa, Mitsuru Ohtake, Yuta Nakamura, Tetsuroh Kawai, and Masaaki Futamoto

(Yokohama Nat. Univ.)

はじめに 電磁誘導型振動発電の方式として、逆磁歪式¹⁻³⁾に加え、最近、著者らが開発した垂直磁界アシスト式⁴⁾がある。いずれの方式も、磁性体を含む梁を片持ち状態にし、磁性体内の磁束変化を梁周囲に設置したコイルにより検出し、出力を得る。また、梁に対して、垂直磁界アシスト式では垂直方向、逆磁歪式では長手方向にバイアス磁界を印加する。各方式で、磁化反転メカニズムは異なり、固定端（もしくは自由端）からの距離により磁性体内の磁束変化量も異なることが考えられる。本研究では、同一磁性体梁を用いて、垂直磁界アシスト式および逆磁歪式による振動発電試験を行い、固定端（もしくは自由端）からの距離による磁性体内の磁束変化の特徴を明らかにすることを目的とした。

実験方法 梁はCu板 (50 mm×10 mm×300 μm) にFe-B-Si系アモルファス薄帯 (日立金属製 SA1, 厚さ: 25 μm) をエポキシ接着材で貼り付けることにより作製した。梁は端部から10 mmの部分までを固定し、振動部の全長が40 mmとなるようにした。梁の場所ごとの磁束変化を検出するコイルとして、全長が8 mmで、最内径が12 mm×16 mm、巻数が1600回、抵抗が280 Ωのものを使用し、Fig. 1に示すように梁材料に挿入した。そして、梁のみを振動試験機を用いて強制振動させた。このときの加速度は1.5 Gとし、バイアス磁界はヘルムホルツ・コイルを用いて検出コイルを含めた全体に印加した。

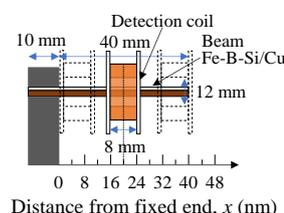


Fig. 1 Positional relationship between beam and coil.

実験結果 コイルの位置 x を変化させた場合の垂直磁界アシスト式および逆磁歪式における出力ピーク電圧のバイアス磁界強度依存性を、それぞれ、Fig. 2(a)および(b)に示す。垂直磁界アシスト式では、バイアス磁界の増加に伴いピーク電圧もほぼ線形的に増加している。本研究で用いたヘルムホルツコイルの最大印加磁界が430 Oeであったため、その磁界でピーク電圧が最大となっているが、更に強い磁界を印加すればより大きな出力が得られることが考えられる。一方、逆磁歪式では、10 Oe 付近でピーク電圧が最大となり、その後、減少に転じた。Fig. 2(c)および(d)に、それぞれ、垂直磁界アシスト式と逆磁歪式における最大ピーク電圧のコイル位置依存性を示す。垂直磁界アシスト式では、自由端側で、より大きな面内成分が発生するため、コイル位置 x の増加にともない、最大ピーク電圧も増加することが予想されたが、梁中央部で最大ピーク電圧が極大となる結果になった。この理由として、梁端部では、磁極の形成に伴い、複雑な磁区構造が形成され、磁束の方向が一様に定まらないためであると考えられる。一方、逆磁歪式では、固定端側で最大ピーク電圧が最も高くなった。片持ち梁では固定端側で応力が最大になり、その結果、固定端でより大きな磁気弾性エネルギーが発生することになる。また、本実験における固定端は梁の端部から10 mmの位置となっているため、磁極形成の影響が小さいことが考えられる。そのため、固定端側で大きな磁束変化が生じたことが考えられる。

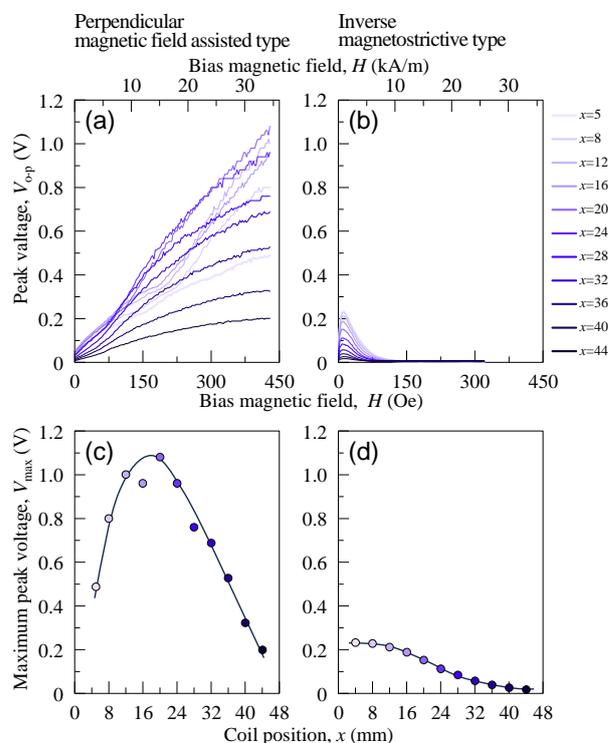


Fig. 2 (a, b) Bias magnetic field dependences of peak voltage and (c, d) coil position dependences of maximum peak voltage of (a, c) perpendicular magnetic field assisted and (b, d) inverse magnetostrictive vibration powered generators.

- 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, 杉修一郎, 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 (2022年5月27日), 謝辞 日立金属株式会社の備前嘉雄様にアモルファス薄帯をご提供頂きました。

磁歪材料を使った振動発電デバイスの発電コイルの性能指数

川井哲郎・石川瑛士・中村優太・大竹 充・二本正昭
(横浜国大)

Quality Factor of Power Generation Coil on the Vibration Power Generation using Magnetostriction Material

Tetsuroh Kawai, Eishi Ishikawa, Yuta Nakamura, Mitsuru Ohtake, and Masaaki Futamoto

(Yokohama Nat. Univ.)

はじめに 環境からエネルギーを取り込む、いわゆるエネルギーハーベスト型電源として磁歪材料を使った振動発電が有力視されている¹⁾。この振動発電ではファラデーの法則に従って発電するので発電コイルの巻き数を多くすると発電電圧が高くなるが、内部抵抗も大きくなる。そのため、負荷抵抗での発電電力を最大にする発電コイルの設計が必要である。本報告では発電コイルの1Ω当たりの発電電圧に着目して、片持ち梁を使った振動発電デバイスの発電コイルの性能指数(1Ω当たりの発電電圧)を解析的に求める。

解析方法 非磁性片持ち梁にはCu基板(長さ:40mm,幅:10mm,厚さ:0.3mm),磁歪材料にはFe-B-Si系アモルファスリボン(厚さ:25μm)を想定した。片持ち梁の自由端に集中荷重が加わって梁がたわむと仮定して、梁表面の曲げ応力および磁歪材料の磁気弾性エネルギーを求めた。そのエネルギーにより磁歪材料の磁化状態が変化すると仮定した。発電には寄与するのは梁の長手方向の磁化変化であり、大きな圧縮応力が印可されても零に近づくが負にはならないと仮定した²⁾。発電コイルの効率はコイルが作る磁場の大きさが効率に対応すると仮定して計算した。

解析結果と考察 自由端のたわみを1.86mmとすると、固定端の曲げ応力は61.2MPa,この曲げ応力により生じる磁気弾性エネルギーは2.48kJ/m³であり、固定端で最も大きく、自由端に向けて低下する。このエネルギーと等しくなる磁気エネルギーを持つように磁歪材料が磁化されると仮定すると、arctangent関数近似した磁化曲線($M_s=1.62$ T, $\mu_r=350$)では有効磁場として75.7 Oeが働いていることに相当する。コイル1ターン当たりの発電電圧は固定端から自由端に向けてFig. 1に示すように変化する。したがって、固定端近くに集中してコイルを巻くと効率が良いかのように見える。しかし、コイルの感度(コイルを積層すると外周のコイルは感度が低下)を考慮すると、コイルの性能指数のコイル幅依存性はFig. 2のようになる。いずれの巻き数においても固定端から梁の長さの1/2ないし2/3の長さにコイルを巻くと性能指数の高いデバイスが得られることがわかる。

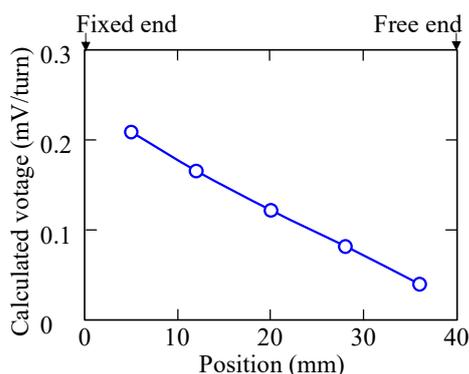


Fig. 1 Calculated generated voltage as a function of position.

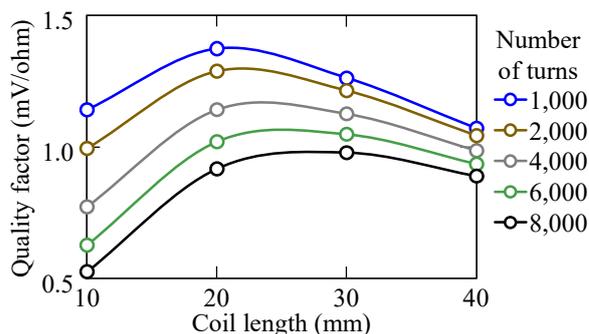


Fig. 2 Calculated quality factor as a function of coil length. The parameter is number of turns.

参考文献

- 1) 上野敏幸: 応用物理, **89**, 82-86 (2020).
- 2) T. Kawai, E. Ishikawa, Y. Nakamura, M. Ohtake, and M. Futamoto: to be published in INTERMAG 2023 Conference Paper.

垂直磁界アシスト式および逆磁歪式電磁誘導型振動発電デバイスの磁性体梁材料への電解めっき Fe-Co 合金厚膜の適用

中村優太¹・明田俊祐¹・大竹充¹・鴨川宏幸²・川井哲郎¹・二本正昭¹
(¹横浜国大, ²関東化成)

Application of Electroplated Fe-Co Alloy Thick Film to Magnetic Beam Material

in Perpendicular Magnetic Field Assisted and Inverse Magnetostrictive Electromagnetic Vibration Powered Generators

Yuta Nakamura¹, Shunsuke Aketa¹, Mitsuru Ohtake¹, Hiroyuki Kamogawa², Tetsuroh Kawai¹, Masaaki Futamoto¹

(¹Yokohama Nat. Univ., ²Kanto Kasei Co., Ltd.)

はじめに 垂直磁界アシスト¹⁾および逆磁歪²⁻⁴⁾のいずれの方式の電磁誘導型振動発電デバイスにおいても、磁性体を含む梁材料が用いられ、その磁気特性は発電性能に大きな影響を与える。Fe-Co 合金は最大の飽和磁束密度を持つ代表的な軟磁性材料であり、垂直磁界アシスト式において大きな磁束変化が得られることが期待される。また、Fe-Co 合金は大きな磁歪を示すことから逆磁歪式に対しても有効であると考えられる。昨年度の学術講演会では、Cu 薄板の片面上に Fe-Co 合金厚膜を電解めっきすることにより形成した梁材料を用いて、逆磁歪式振動発電を行った結果を報告した⁵⁾。本研究では、組成が異なる Fe-Co 合金厚膜をめっきした梁材料を用いて、垂直磁界アシスト式および逆磁歪式の振動発電試験を行い、材料特性が発電性能に及ぼす影響について調べることを目的とした。

実験方法 膜形成には、陽極を Fe 板、陰極を Cu 薄板 (50 mm × 10 mm × 0.3 mm) とした電解めっき装置を用いた。めっき浴中の Fe と Co のイオン比率を調整することで膜組成を変化させた。形成しためっき膜の厚さは $32 \pm 4 \mu\text{m}$ であった。膜の組成分析には EDS、結晶構造解析には XRD、磁気特性評価には VSM、磁歪測定には片持ち梁法を用いた。発電特性は、めっきした梁材料を片持ち状に固定し、検出コイル (抵抗: 1.2 k Ω , 巻数: 8000 回, 最内径: 12 mm × 16 mm, 全長: 40 mm) に挿入して、梁のみを強制振動させ、コイルの出力波形をオシロスコープで観察することにより評価した。このとき、垂直磁界アシスト式の試験では垂直方向に、逆磁歪式では長手方向にバイアス磁界をヘルムホルツコイルを用いて印加した。

実験結果 Fig. 1 に垂直磁界アシスト式および逆磁歪式における出力電圧のバイアス磁界依存性を示す。垂直磁界アシスト式では、磁界の増加に伴い、出力電圧が増大している。一方、逆磁歪式では、低いバイアス磁界で出力電圧が極大を迎え、以後は徐々に減少していく傾向となった。したがって、バイアス磁界が小さいデバイスでは逆磁歪式が有効であるが、強いバイアス磁界を用いることが出来る場合、垂直磁界アシスト式でより大きな出力が得られることが分かる。Fig. 2 には、垂直磁界アシスト式および逆磁歪式におけるピーク電圧の Co 組成依存性を示す。垂直磁界アシスト式では軟磁気特性が優れる Fe₇₀Co₃₀ の膜組成で、逆磁歪式では磁歪が大きくなる Fe₅₄Co₄₆ の膜組成で、それぞれ最大の出力電圧となった。当日は、めっき膜の物性に基づき、組成と出力特性の関係について議論する。

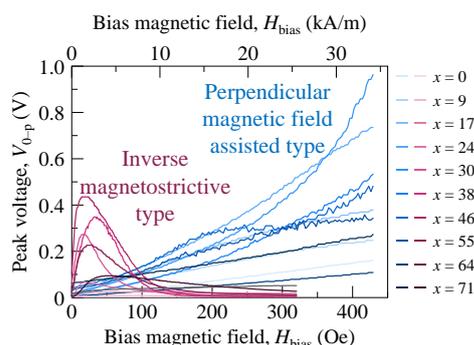


Fig. 1 Bias magnetic field dependences of peak voltages of perpendicular magnetic field assisted and inverse magnetostrictive vibration powered generators using Fe_{100-x}Co_x films with different compositions.

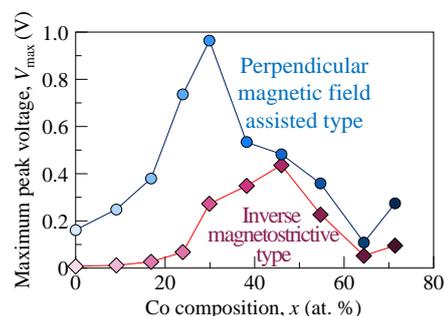


Fig. 2 Compositional dependences of maximum peak voltages of perpendicular magnetic field assisted and inverse magnetostrictive vibration powered generators using Fe_{100-x}Co_x films with different compositions.

- 1) 大竹充, 川井哲郎, 二本正昭「発電装置」特願 2022-086851 (2022 年 5 月 27 日).
- 2) T. Ueno and S. Yamada: *IEEE Trans. Magn.*, **47**, 2407 (2011).
- 3) S. Fujieda, S. Suzuki, A. Minato, T. Fukuda, and T. Ueno: *IEEE Trans. Magn.*, **50**, 2505204 (2014).
- 4) 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).
- 5) 明田俊祐, 石川瑛士, 中村優太, 大竹充, 川井哲郎, 二本正昭: 第 46 回日本磁気学会学術講演会概要集, p. 37 (2022).

垂直磁界アシスト式および逆磁歪式電磁誘導型振動発電デバイスの 磁性体梁材料への電解めっき Ni-Fe 合金厚膜の適用

明田俊祐¹・中村優太¹・大竹充¹・鴨川宏幸²・川井哲郎¹・二本正昭¹
(¹横浜国大, ²関東化成)

Application of Electroplated Ni-Fe Alloy Thick Film to Magnetic Beam Material

in Perpendicular Magnetic Field Assisted and Inverse Magnetostrictive Electromagnetic Vibration Powered Generators
Shunsuke Aketa¹, Yuta Nakamura¹, Mitsuru Ohtake¹, Hiroyuki Kamogawa², Tetsuroh Kawai¹, Masaaki Futamoto¹
(¹Yokohama Nat. Univ., ²Kanto Kasei Co., Ltd.)

はじめに 垂直磁界アシスト式¹⁾および逆磁歪式²⁻⁴⁾の電磁誘導型振動発電の出力特性は、用いる磁性体梁材料における磁束変化の容易性に影響を受けるため、磁気異方性エネルギーが小さい材料を用いることが有効であると考えられる。Ni-Fe合金は代表的な高透磁率材料であり、バルク状態では組成により 10^3 J/m^3 オーダーの低い結晶磁気異方性エネルギーを示す⁵⁾。これまで、著者らは、Cu薄板の片面にNi-Fe合金厚膜を電解めっきし、磁歪式デバイスの梁材料として用いることが出来ることを報告してきた⁶⁾。本研究では、組成の異なるNi-Fe合金膜をめっきした梁材料を用いて、垂直磁界アシスト式および磁歪式の発電評価を行い、材料特性が発電特性に及ぼす影響を系統的に調べた。

実験方法 膜形成には陽極がNi板、陰極がCu薄板(50 mm × 10 mm × 300 μm)の電解めっき装置を使用した。浴中のNiとFeイオンの比率を変えることで膜組成を変化させた。膜厚は $31 \pm 4 \mu\text{m}$ であった。構造解析にはXRD、磁気特性評価にはVSM、磁歪測定には片持ち梁法を用いた。発電性能の評価には、ヘルムホルツ・コイルにより外部からバイアス磁界を印加できる試験装置を用いた。めっきした梁材料の端から長手方向に10 mmの部分までを固定し、片持ちの状態とし、検出コイル(抵抗: 1223 Ω, 巻数: 8000回, 最内径: 16 mm × 12 mm, 全長: 40 mm)に挿入した。このとき、コイルは振動させず、梁のみを振動させた。また、梁に対して、垂直磁界アシスト式では垂直方向に、磁歪式では長手方向にバイアス磁界を印加した。

実験結果 Fig. 1にNi₃₉Fe₆₁(at.%)膜をめっきした梁を約110 Hzで共振させたときにおける、垂直磁界アシスト式および逆磁歪式のピーク電圧のバイアス磁界依存性を示す。垂直磁界アシスト式では、バイアス磁界の増加に伴い、ピーク電圧が増加し、バイアス磁界が430 Oe時点で7.2 Vの出力が得られている。一方で、磁歪式では、バイアス磁界が4 Oeまではピーク電圧が増加していき、最大値となる0.9 Vの電圧が観測され、それ以降は減少していった。Ni-Feめっき膜の場合、垂直磁界アシスト式では磁歪式を大きく上回る出力が得られることが分かった。Fig. 2に最大ピーク電圧の組成依存性を示す。両方式においても最大ピーク電圧は組成に強く影響を受けていることが分かる。当日は、この因果関係をめっき膜の磁気・磁歪特性に基づいて詳細に議論する。

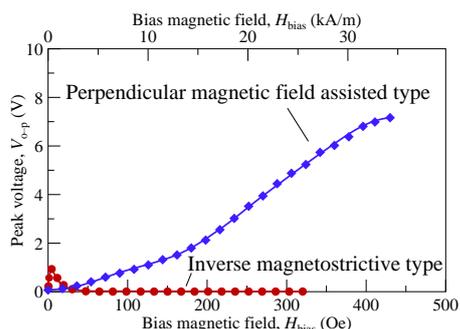


Fig. 1 Bias magnetic field dependences of peak voltages of perpendicular magnetic field assisted and inverse magnetostrictive vibration powered generators using a Ni₃₉Fe₆₁ film.

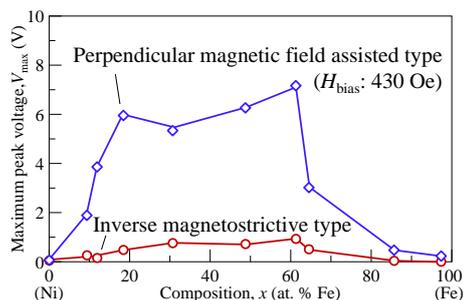


Fig. 2 Compositional dependences of maximum peak voltages of perpendicular magnetic field assisted and inverse magnetostrictive vibration powered generators using Ni_{100-x}Fe_x films with different compositions.

- 1) 大竹充, 川井哲郎, 二本正昭「発電装置」特願 2022-086851 (2022年5月27日).
- 2) T. Ueno and S. Yamada: *IEEE Trans. Magn.*, **47**, 2407 (2011).
- 3) S. Fujieda, S. Suzuki, A. Minato, T. Fukuda, and T. Ueno: *IEEE Trans. Magn.*, **50**, 2505204 (2014).
- 4) 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).
- 5) A. Chikazumi, *Physics of magnetism*, p. 145 (Wiley, Van Nostrand, New York, 1964).
- 6) S. Aketa, M. Ohtake, E. Ishikawa, Y. Nakamura, T. Kawai, and M. Futamoto: *AIP Adv.*, **13**, 035201 (2023).

複合アモルファスリボンを用いた振動発電

上倉 拓郎^{1,2*}, 後藤 太一², 石山 和志²

(¹東北大学大学院 工学研究科,²東北大学 電気通信研究所)

Vibration energy harvesting using composite amorphous ribbon

Takuo Kamikura^{1,2*}, Taichi Goto², Kazushi Ishiyama²

(¹Graduate School of Engineering, Tohoku Univ.,²RIEC, Tohoku Univ.)

はじめに

近年、IoT デバイスの動力源である電池の交換や廃棄に関する諸問題がネットワーク社会に対する大きな課題とされている¹⁾。そこで電池の代替として注目されているのが環境発電である。本研究では特に、磁歪材料であるアモルファスリボンが持つ逆磁歪効果を利用した振動発電に注目してきた²⁾。また、これまで同種の研究で行われていた片持ち梁構造に代えて発電可能な振動の周波数帯域が広く、バイアス磁界の均一性にも優れた筒状にアモルファスリボンを成形した構造を提案した³⁾。本報告では、酸化防止や耐久性の向上を目的として紫外線硬化樹脂を用いて筒状アモルファスリボンを複合材料化し、応力印加時のBHループの測定・振動実験を行った。

実験方法

短冊状のアモルファスリボン(日立金属製 2605HB1M、20 mm × 100 mm × 25 μm)を筒状に丸め、軸方向に直流磁界を印加して磁場中熱処理を施し、残留応力の除去と磁気異方性の誘導を行った。そのアモルファスリボンを紫外線硬化樹脂に埋めることで複合材料化した。圧力印加下での磁気特性はBHループトレーサー³⁾を用いて測定した。Fig. 1は振動実験の概略図である。作製した試料にコイル(60 μm φ、3840 turn、880 Ω)を巻き、固定治具と加振機に挟むよう設置することで振動(軸方向の寸法変化)を与えた。このとき逆磁歪効果によりアモルファスリボン内の磁束が時間変化し、ピックアップコイルに電圧が誘起される。寸法変化量はレーザードップラー変位計(LDV)を用いて計測し、理論的な磁化変化量と発生電力を算出した。

結果・考察

Fig. 2にBHループの結果から算出した試料の静的な寸法変化量と磁化変化量の関係を示す。寸法変化量の増加に伴って磁化は減少した。Fig. 3に試料を700 Hzで振動させた際の、試料の寸法変化量の測定結果を示す。175 ppm程度の寸法変化量を持つことがわかり、Fig. 2から160 mT程度の磁化変化量があると推定できる。これらの測定値から算出される発電量は1.62 mWとなった。

参考文献

- 1) T. Ueno: *J. Insy. Elect. Engr. Jpn.*, 139, 22-25, (2019).
- 2) 長内史也, 栢修一郎, 石山和志, 平成31年電気学会全国大会講演論文集, 146, (2019).
- 3) 上倉拓郎, 後藤太一, 石山和志, 令和5年電気学会全国大会講演論文集, 119, (2023).

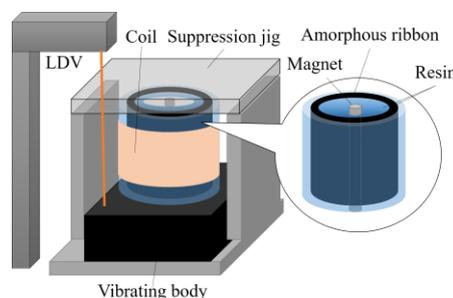


Fig. 1. Schematic diagram of the constructed setup of vibration power generation system.

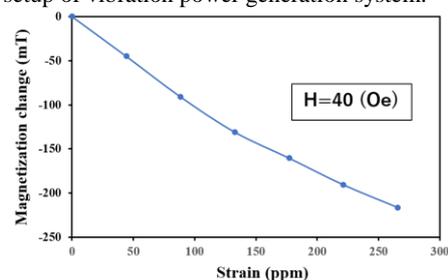


Fig. 2. Relationship between amount of strain and magnetization change.

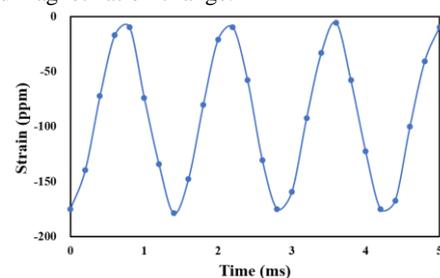


Fig. 3. Sample displacement at a frequency of 700 Hz.

バイモルフ型振動発電を想定した 負磁歪軟磁性材料の開発に関する基礎検討

阿部宏恒^{*,**}, 後藤太一^{**}, 直江正幸^{***}, 荒井賢一^{***}, 石山和志^{**}
(*東北大院 工学研究科, **東北大 通研, ***電磁研)

Study on Development of Negative Magnetostrictive Soft Magnetic Material
for Bimorph Vibration Power Generation

Hirohisa Abe^{*,**}, Taichi Goto^{**}, Masayuki Naoe^{***}, Ken Ichi Arai^{***}, Kazushi Ishiyama^{**}
(*Graduate school of engineering, Tohoku Univ., **RIEC, Tohoku Univ., ***Res. Inst. for EM Mater.)

はじめに

近年、環境振動を電力に変換する振動発電が注目を集めている。中でも、強磁性材料の逆磁歪効果を用いた発電デバイスが注目されている。現在検討されている逆磁歪式振動発電デバイスは、正磁歪材料を用いたユニモルフ型カンチレバーが主流である²⁾。しかし、正磁歪材料の裏面に負磁歪材料を接合したバイモルフ型カンチレバーにすることで、より多くの磁化変化量が得られると考える。ところが、多くの材料開発が進められている正磁歪材料に比べて、負磁歪材料の応用へ向けた検討は少ない。そこで、我々は負磁歪材料の中でも -10^3 ppmを超える大きな磁歪量と比較的大きな電気機械結合係数を有するSmFe³⁾非晶質薄膜に着目している。非晶質化により軟磁気特性を改善し磁化回転を容易にすることで、高透磁率バイモルフ型発電デバイスの実現を目指している。本報告では、負磁歪軟磁性材料の保磁力・磁歪定数・磁化回転に着目しバイモルフ型発電デバイスへの応用を検討した結果を述べる。

実験方法

SmFeの成膜には、高周波マグネトロンスパッタ装置を使用した。Feターゲット上にSmチップを配置した複合ターゲットのSmチップ数を変え、Sm組成を7~67 at.%の範囲で変化させた。膜の結晶構造をXRDで保磁力 H_c をVSMにより計測した磁化曲線から評価した。また、Sm組成が13および20 at.%の試料の磁歪量 λ を、強度が最大3 kOeの回転磁界中で光てこ法を用いて計測した。

実験結果

Fig. 1に H_c の組成依存性を示す。XRDで結晶ピークの観測されたSm組成が8 at.%以外の組成で、150 Oe以下の低保磁力化に成功した。Fig. 2に特に保磁力の小さいSm組成近傍である13および20 at.%の試料の λ と磁界強度 H_{ex} の関係を示す。 H_{ex} を3 kOeにすると、 λ はSm組成が13 at.%の時よりもSm組成が20 at.%の時の方が大きくなったが、曲線はSm組成が20 at.%の時よりもSm組成が13 at.%の時の方が弱い磁界で立ち上がった。誘導起電力の増加には磁歪量よりも磁化回転の容易さが重要であり、Sm組成が13~14 at.%の試料が発電デバイスへの応用に最適である。

当日はSm組成が13~14 at.%の試料を用いたデバイスの発電特性についても議論する。

参考文献

- 1) I. Kanno: *J. Surf. Finish. Soc. Jpn.*, **67**, pp. 348-352 (2016).
- 2) T. Ueno: *Materia Japan.*, **59**, pp. 6-9 (2020).
- 3) A. E. Clark and H. Eda: "Giant magnetostrictive material", pp. 262-264 (1995)

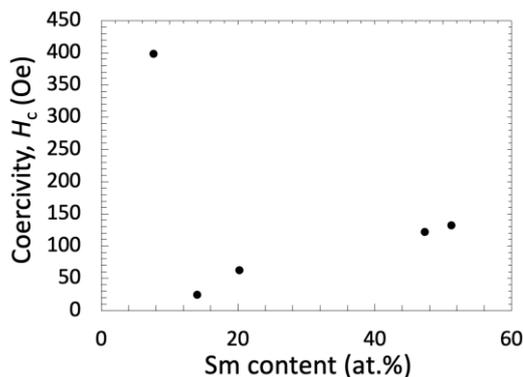


Fig. 1 Composition dependence of coercivity.

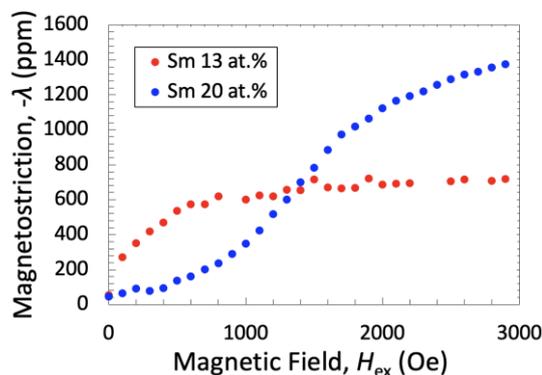


Fig. 2 Relationship between magnetostriction and rotating magnetic field strength when Sm content is 13 and 20 at. %.

負の磁歪材料のユニモルフ U 字型デバイスへの応用

杉山 太一、岡田 拓、清野 智史、中川 貴、大石 佑治、牟田 浩明、藤枝 俊
(大阪大学 大学院 工学研究科)

Application of negative magnetostrictive materials to unimorph U-shaped device
T. Sugiyama, T. Okada, S. Seino, T. Nakagawa, Y. Ohishi, H. Muta, S. Fujieda
(Graduate School of Engineering, Osaka Univ.)

はじめに

様々なモノがインターネットを通じて繋がる社会の実現に向けて、IoT デバイスの普及が年々進んでいる。これらの電源として、従来、圧電式やエレクトレット式などの振動エネルギーハーベスティングが盛んに研究されており、近年開発された逆磁歪効果を用いた方式が注目を集めている。様々なデバイスが開発されているなか、ユニモルフ U 字型デバイスは高い耐久性と大きな電圧を示す¹⁾。本デバイスを用いた発電方法において、正の飽和磁歪を持つ材料の研究は多く行われているが²⁾³⁾、負の飽和磁歪を持つ材料の研究はほとんど行われていない。そこで、振動発電に用いる材料の選択肢を広げるため、負の飽和磁歪を持つ Ni、Fe および Co をユニモルフ U 字型デバイスに応用し、振動発電特性を評価した。

実験方法

本研究ではユニモルフ U 字型デバイス¹⁾ (0.5 mm 厚の鉄フレーム、コイル 3638 巻) に Ni、Fe および Co を逆磁歪材料 (寸法 16 × 4 × 0.5 mm³) として貼り付け、共振周波数 $f = 100$ Hz で短足側の変位 d が 2.0 mm になるように強制振動させ (Fig. 1(a)および(b)参照)、その際にコイルに発生する電圧 V_{op} を測定した。

実験結果

Ni (飽和磁歪 $\lambda_s = -37$ ppm) をフレームの表側 (Fig. 1(a)) に貼り付けて行った振動発電試験の結果を Fig. 1(c) (Ni front) に示す。発生電圧は、比較のために行ったフレームのみの値 (frame only) よりも小さい。一方、Ni をフレームの裏側 (Fig. 1(b)) に貼り付け、同様の条件で振動発電試験を行った結果、Fig. 1(c) (Ni back) に示すようにフレームのみの値よりも大きな電圧が得られた。また、得られた電圧の大きさから、以下のファラデーの法則を用いて、Ni の磁束密度変 ΔB を評価した。

$$V_{op} = -N(d\Phi/dt) = -NS(dB/dt)$$

ここで、 N はコイルの巻き数、 Φ は磁束、 S は試料の断面積である。その結果、Ni の ΔB の最大値は、表側および裏側貼り付けの場合でそれぞれ 0.09 T および 0.24 T であった。つまり、負の飽和磁歪を持つ Ni はフレームの裏側貼り付けにより、大きな ΔB を示す。また、Fe および Co を用いた振動発電試験においても、Ni の場合と同様の結果が得られた。したがって、ユニモルフ U 字型デバイスを用いた振動発電において、負の磁歪材料は裏側貼り付けが効果的である。

参考文献

- 1) T. Ueno, AIP Adv., **9** (2019) 035018.
- 2) S. Fujieda et al., IEEE Trans. Magn., **50** (2014) 2505204.
- 3) T. Okada et al., Mater. Trans., **62** (2021) 1798.

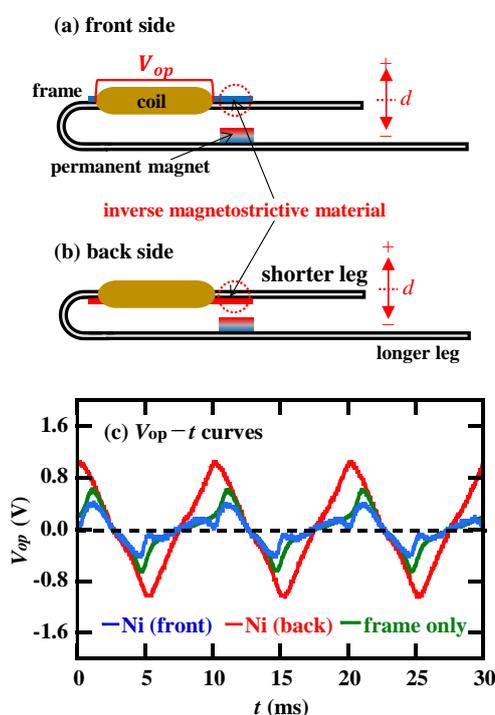


Fig. 1 Schematics of the unimorph U-shaped devices of (a) the front side and (b) the back side setting. (c) Time t response of open-circuit voltage V_{op} of the Ni unimorph core. The date of the frame without sample are also shown.

Cu_{0.5}Co_{0.5}Fe₂O₄ の磁歪特性に及ぼす Cu の Zn 部分置換の影響

藤枝 俊、藤原康太、小杉静花、清野智史、中川 貴
(阪大 工学研究科)

Influence of partial substitution of Zn for Cu on magnetostrictive properties of Cu_{0.5}Co_{0.5}Fe₂O₄

S. Fujieda, K. Fujiwara, S. Kosugi, S. Seino, T. Nakagawa
(Graduate School of Engineering, Osaka Univ.)

はじめに

CoFe₂O₄ 系フェライトは、室温において立方晶スピネルフェライトの中でも特異的に大きな負の磁歪を示す。最近、我々は CoFe₂O₄ の Co を Cu で部分置換することにより、磁歪特性が飛躍的に向上することを見出した¹⁾。Cu_{0.6}Co_{0.4}Fe₂O₄ の磁歪特性は、比較的高印加磁場では市販の磁歪材料である Galfenol よりも優れているが、比較的低印加磁場では同程度以下である¹⁾。本研究では、比較的低印加磁場での磁歪特性の向上に向けて、Zn_xCu_{0.5-x}Co_{0.5}Fe₂O₄ の磁歪特性を調べた。

実験方法

ZnO、Cu₂O、CoO および α-Fe₂O₃ を出発原料として用い、それらを混合してペレット化した後、大気中において 950 °C で 20 時間の熱処理を施して立方晶スピネル構造の Zn_xCu_{0.5-x}Co_{0.5}Fe₂O₄ の単相試料を作製した。その円盤状ペレットの上面に歪みゲージを貼り付け、面内に磁場を印加して磁歪特性を評価した。

実験結果

Zn_xCu_{0.5-x}Co_{0.5}Fe₂O₄ 試料の $x = 0.0$ および 0.1 の室温における磁化曲線を Fig. 1 に示す。Cu の Zn 部分置換により、飽和磁化は増加する。5 K においても、同様の傾向が観察された。立方晶スピネル構造において、8 個の四面体サイトと 16 個の八面体サイトの磁気モーメントは反強磁性結合する。2 価の Cu および Co は主に八面体サイトを占有し、3 価の Fe が残りの八面体サイトと四面体サイトを占有しているとすると、磁気モーメントを持たない 2 価の Zn は四面体サイトを占有すると推察される。室温における歪みの磁場依存性を Fig. 2 に示す。縦軸は、測定方向に対し平行および垂直に磁場を印加して測定した歪みの差の絶対値 $|\Delta L/L_{\parallel} - \Delta L/L_{\perp}|$ を示す。磁場印加により、 $|\Delta L/L_{\parallel} - \Delta L/L_{\perp}|$ は極大を示した後、徐々に減少して飽和傾向を示す。Zn 部分置換により、最大印加磁場での値は減少する。しかし、 $|\Delta L/L_{\parallel} - \Delta L/L_{\perp}|$ が極大に達する印加磁場は減少し、約 2.7 kOe 以下の比較的低磁場では Zn 部分置換前よりも大きな値を示す。つまり、Cu の Zn 部分置換により、低磁場印加での磁歪特性は向上する。

参考文献

- 1) S. Kosugi, M. Hisamatsu, Y. Ohishi, H. Muta, S. Seino, T. Nakagawa, S. Fujieda, Mater. Trans. (2023) in press.

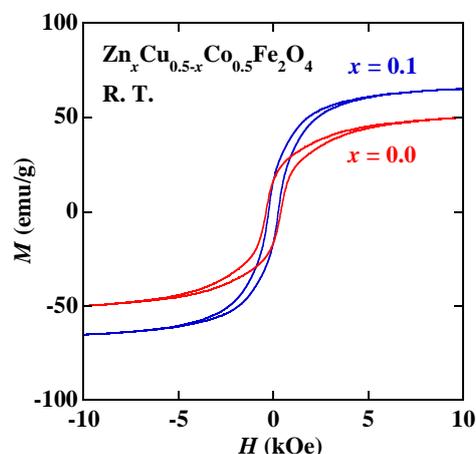


Fig. 1 Magnetization curves at room temperature of Zn_xCu_{0.5-x}Co_{0.5}Fe₂O₄ with $x = 0.0$ and 0.1 .

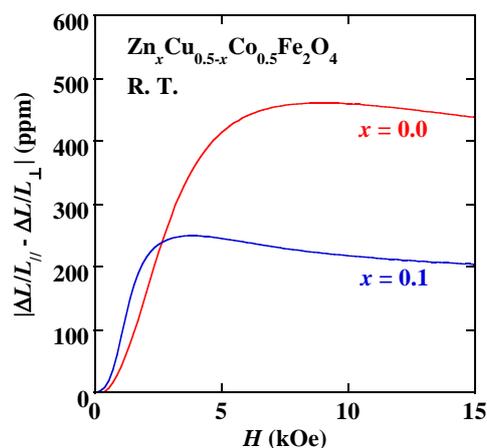


Fig. 2 Magnetic field dependence of strain $|\Delta L/L_{\parallel} - \Delta L/L_{\perp}|$ at room temperature of Zn_xCu_{0.5-x}Co_{0.5}Fe₂O₄ with $x = 0.0$ and 0.1 .

磁性窒化物薄膜における磁歪と磁気ダンピングの相関

伊藤啓太¹、Ivan Kurniawan²、三浦良雄²、遠藤恭³、関剛斎¹

(東北大金研¹、物材機構²、東北大工³)

Correlation between magnetostriction and magnetic damping in magnetic nitride films

Keita Ito¹, Ivan Kurniawan², Yoshio Miura², Yasushi Endo³, Takeshi Seki¹

(IMR, Tohoku Univ.¹, NIMS², Grad. Sch. Eng. Tohoku Univ.³)

【背景】磁歪材料は、振動発電素子やトルクセンサに応用され、近年のフレキシブルスピントロニクスへの展開でも注目されているが、大きな磁歪を示す強磁性材料は Fe-Ga 合金や Tb-Dy-Fe 合金など希少金属や希土類元素を含むものが多い。ごく最近、資源が豊富な元素のみで構成される強磁性窒化鉄の Fe₄N が、Co や Ni 等の典型的な単体強磁性金属よりも数倍大きい磁歪定数($\lambda_{100} = -75$ ppm)を示すことが報告された¹⁾。したがって、強磁性窒化物は希少金属・希土類フリー高磁歪材料として期待できるが、更なる高磁歪化に向けた材料設計指針は明らかになっていない。本研究では、第三元素として Mn および Co を添加した Fe₄N 薄膜における磁歪を調べた。第三元素の添加量を系統的に変えて試料を作製し、 λ_{100} 、飽和磁化(M_s)、磁気異方性定数(K_1)、ダンピング定数(α)、フェルミ準位における電子の状態密度(D)の大きさとの相関関係を調べることで、 λ_{100} の大きさを決める物理量を明らかにし、高磁歪材料を得るための指導原理の確立を試みた。

【実験方法】分子線エピタキシー法により、SrTiO₃(001)基板上に、Fe₄N、Fe_{4-x}Mn_xN($x = 0.1, 0.4, 1.0$)、Fe_{4-y}Co_yN($y = 0.2, 0.5, 0.8, 1.7, 2.2$)薄膜を作製した。成膜温度は 450 °C を基本としたが、Fe_{4-y}Co_yN($y = 1.7, 2.2$)薄膜については窒素の脱離が生じたため、温度を 400 °C に下げた。試料の構造は X 線回折測定と反射高速電子回折により評価した。 λ_{100} は光てこ法により測定した。窒化物薄膜の膜面内方向に最大 175 Oe の回転外部磁場を印加し、反射レーザー光の変位量を測定することで λ_{100} を測定した。 M_s および K_1 は振動試料型磁力計により、膜面内 [100] 方向および [110] 方向に外部磁場を印加し、磁化曲線を測定することで測定した。 α は 1 ポート型のコプレーナウェーブガイドとベクトルネットワークアナライザを用いた強磁性共鳴法により測定した。1 ~ 25 GHz の高周波および膜面内 [100] 方向に 200 ~ 2400 Oe の外部磁場を印加し、得られた共鳴ピークの線幅の外部磁場依存性から α を算出した。いずれの測定も、室温において実施した。

【結果】構造評価の結果、Fe₄N、Fe_{4-x}Mn_xN、Fe_{4-y}Co_yN 薄膜のエピタキシャル成長を確認できた。 λ_{100} は Fe₄N において報告値を超える -110 ppm を示したが、Mn または Co を添加することで絶対値が減少した。 $|\lambda_{100}|$ 、 M_s 、 $|K_1|$ 、 α の添加元素濃度依存性を比較したところ、 $|\lambda_{100}|$ と α の間に明瞭な正の相関関係が見られた。 α には resistivity-like 項と conductivity-like 項があり²⁾、理論式によれば³⁾、前者は $\alpha \propto \xi^2 D / \tau M_s$ 、後者は $\alpha \propto \xi^2 D \tau / M_s$ で表される。 ξ はスピン軌道結合定数、 τ は電子散乱の緩和時間である。 $|\lambda_{100}|$ と α の共通項として ξ が大きく寄与している場合は、 $|\lambda_{100}|$ と α に加えて $|K_1|$ との間にも正の相関関係が見られるはずであるが、そのような相関は得られなかったことから、 ξ の寄与だけでは $|\lambda_{100}|$ と α の正の相関を説明できない。また M_s の変化も α の変化とは違う傾向を示した。 $|\lambda_{100}|$ と α の共通項として τ が大きく寄与していると仮定した場合、 α の機構が resistivity-like が主であれば、 $|\lambda_{100}|$ と α とともに $1/\tau$ の依存性が想定される。格子系とスピン系の結合の強い材料では、 τ は短く、 $|\lambda_{100}|$ は大きく、 α は大きくなることを意味している。講演では、 D の添加元素濃度依存性および α における conductivity-like 項の寄与について第一原理計算を用いて調べることで上記の仮定を検証し、より大きな磁歪定数を実現するための材料設計指針を議論する。

【参考文献】1) Y. Maeda *et al.*, 信学技報 **121**, MRIS2021-7, 6 (2021). 2) S. M. Bhagat and P. Lubitz, Phys. Rev. B **10**, 179 (1974). 3) V. Kamberský, Can. J. Phys. **48**, 2906 (1970).

直接および間接測定による逆磁歪効果に起因した磁束密度変化の比較

岡田 拓、藤枝 俊、清野智史、中川 貴
(阪大工)

Comparison of magnetic flux density change due to inverse magnetostrictive effect between direct and indirect measurements

T. Okada, S. Fujieda, S. Seino, T. Nakagawa
(Graduate School of Engineering, Osaka Univ.)

はじめに

逆磁歪効果を利用した振動発電は、IoT デバイスの次世代電力源として注目されている¹⁾。優れた発電特性を実現するには、一定磁場中での応力印加により、逆磁歪効果に起因して大きな磁束密度変化を示す材料が求められる。新規材料開発のためには適切な材料評価が必要だが、従来は一定応力中での磁場印加により測定した磁化曲線の応力依存性から、間接的に磁束密度変化が評価されている²⁾。そこで本研究では、一定磁場中での応力印加による磁束密度変化の直接測定を実施し、従来法の間接測定から得た値と比較した。

実験方法

試料には $50 \times 5 \times 0.5 \text{ mm}^3$ の圧延まま Fe-70 at.% Co 合金 (東北特殊鋼 (株) 提供) を用いた。試料にピックアップコイルを取り付け、Fig.1 (a) に示すように、引張試験機により動的または静的な引張応力を印加した。また、試料の外側に設置したソレノイドコイルにより交流または直流磁場を印加した。間接測定では静的応力印加中に交流磁場を印加し、直接測定では直流磁場印加中に動的応力を印加することで磁束密度変化を評価した。

実験結果

間接測定では、無印加応力状態と 160 MPa の引張応力を印加した状態で磁化曲線を測定し、磁束密度変化 ΔB を求めた。間接測定により得た磁場増加過程と減少過程における ΔB の磁場依存性を Fig.1 (b) に示す。間接測定により求めた ΔB は、磁場の増加に伴い 0.43 T のピークを示し、その後減少する。磁場が 0 から 40 mT の範囲では、磁場増加過程と減少過程で ΔB 値が異なり、ヒステリシスの影響を示す。直接測定では、一定磁場を印加した状態で、160 MPa の引張応力を印加した際に発生する電圧から ΔB を求めた。Fig.1 (c) に示すように、直接測定により得た ΔB のピーク値は 0.31 T であり、間接測定により得た値より小さい。また、直接測定により求めた ΔB においても磁場増加過程と減少過程で差が表れるが、間接測定と比べるとその差はわずかであり、ヒステリシスの影響は小さい。このような逆磁歪効果に起因した ΔB の違いは、間接測定と直接測定における磁壁移動の違いに起因すると推察される。

参考文献

- 1) T. Ueno *et al.*, IEEE Trans. Magn., **47** (2011) 2407.
- 2) S. Inoue *et al.*, AIP Adv., **11** (2021) 069901.

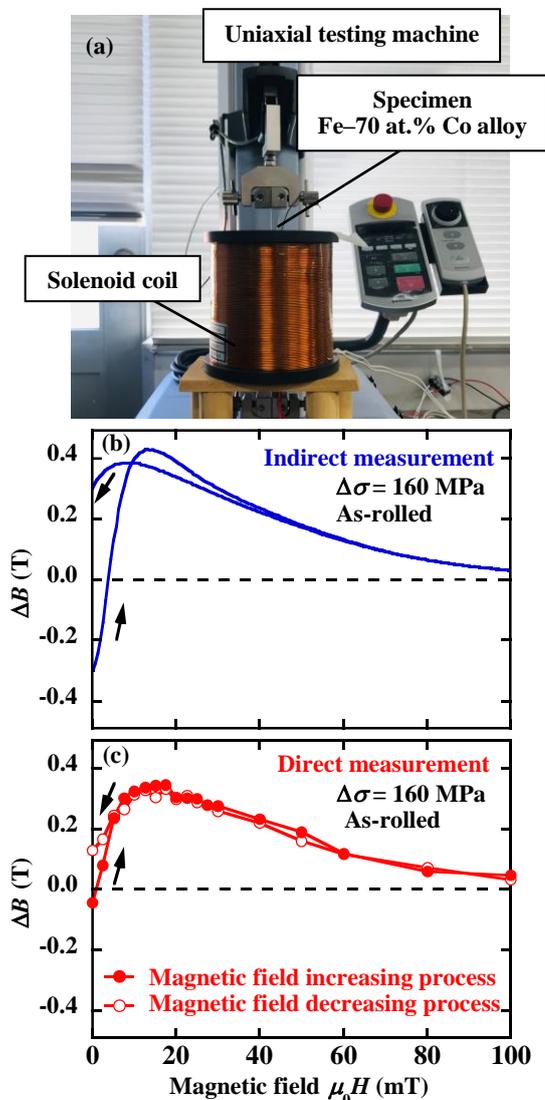


Fig.1 (a) Photograph of setup to evaluate the magnetic flux density change, ΔB , in indirect and direct measurements. Magnetic field, $\mu_0 H$, dependence of ΔB obtained by (b) indirect and (c) direct measurements.

時間変調メタマテリアルに向けたスピン注入透磁率制御

児玉俊之¹, 清水蓮也², 菊池伸明³, 岡本聡^{3,4}, 大野誠吾², 富田知志^{1,2}

(¹東北大学教機構、²東北大理、³東北大多元研、⁴東北大 CSIS)

Spin-injection Induced Permeability Control for Time-varying Metamaterials

Toshiyuki Kodama¹, Renya Shimizu², Nobuaki Kikuchi³, Satoshi Okamoto^{3,4}, Seigo Ohno²,
Satoshi Tomita^{1,2}

(¹IEHE, ²Dept. of Physics, ³IMRAM and ⁴CSIS, Tohoku Univ.)

はじめに

人工物質であるメタマテリアルでは、誘電率や透磁率(μ)を空間的に制御することで、天然物質では実現困難な負の屈折率や隠れ蓑を生み出してきた。一方近年では時間領域で屈折率を制御する時間変調メタマテリアルが注目されている。我々は磁性体を用いて、 μ を高周波で時間変調するメタマテリアルの実現を目指している。これによってマイクロ波をミリ波~サブ THz 光に周波数変換する新たな無線通信光源が実現される。前回の報告では、 μ が時間変化する媒質を電磁波が通過すると、その周波数が変換されることを数値計算で示した[1]。今回は実験的に、スピントルク強磁性共鳴 (ST-FMR) を起こした NiFe 合金細線の μ が、スピン注入によって制御できることを示す[2]。

試料作製とスピントルク強磁性共鳴

ノンドーパ Si 基板にシード層として Ta(3 nm)を成膜し、その上に NiFe (2 nm)/Pt(5 nm)をスパッタリング成膜した。その後、電子線描画とエッチングで $5 \mu\text{m} \times 25 \mu\text{m}$ の細線に加工し、両端に金電極を作製した (図 1 挿入図)。電極から NiFe 細線に 6 GHz の交流電流を流し磁化の一斉歳差運動である ST-FMR を励起する。このとき異方性磁気抵抗 (AMR) 効果により電極間に直流電圧 V_{AMR} が生じる。

結果と考察

V_{AMR} の H_{ext} 依存性を図 1 に示す。直流電流無しでは、黒線で示すように 60 mT 付近に ST-FMR が観測できる。ここに直流電流 I_{dc} を印加し、Pt 層からの直流スピン流を NiFe 層に注入した。すると赤線 (青線) で示すように、 $I_{\text{dc}} > 0$ (< 0) の場合には信号線幅が狭く (広く) なり、信号ピーク位置が高磁場側 (低磁場側) にシフトした。実験的に得られた ST-FMR 信号線幅とピーク位置の I_{dc} による変化量を用いて、 I_{dc} が +20 mA から -20 mA における NiFe 細線の比透磁率の実部 (μ'_r) を計算した。周波数と I_{dc} に対して計算された μ'_r を図 2(a) に表示する。破線で示すように μ'_r の共鳴周波数が、 I_{dc} の増加とともに高周波シフトし、強度も増大している。図 2(a) から $I_{\text{dc}} = \pm 20$ mA における μ'_r を抜き出し、図 2(b) に示す。5.74 GHz に着目すると、 I_{dc} を ± 20 mA で切り替えることで、 μ'_r が 0.4 と 17.8 の間で切り替え可能であることが分かる。したがって I_{dc} を高周波で変調することで、 μ の高周波時間変調の実現が期待される。講演では、 μ の変調媒質を用いた周波数変換の数値計算についても紹介する。

謝辞 有益な議論を交わした金森義明博士に、数値計算で助言を頂いた黒澤裕之博士に感謝致します。本研究は JST-CREST (JPMJCR2102) によって支援されています。

[1] 第 46 回日本磁気学会学術講演会 06pC-8, [2] T. Kodama et al., PRAppI. 19, 044080 (2023).

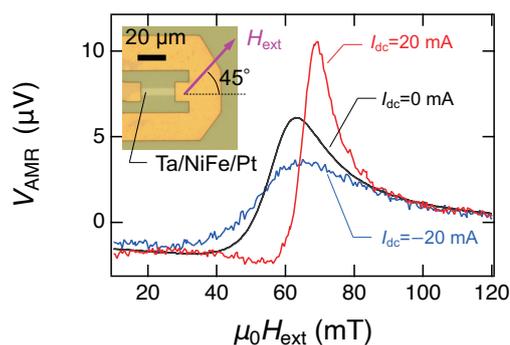


Fig. 1 : ST-FMR signals with $I_{\text{dc}} = 0, \pm 20$ mA. Inset: sample photograph.

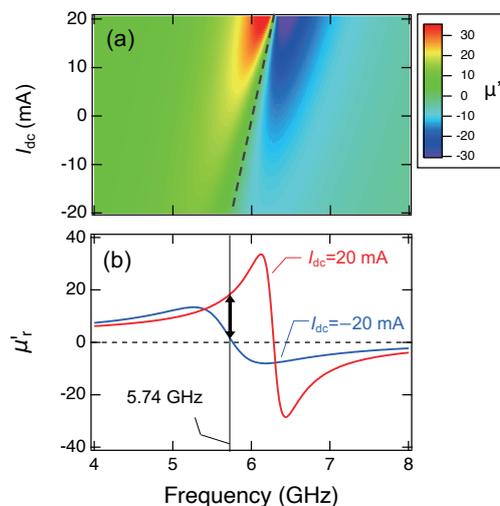


Fig. 2 : (a) 2D plot of real part of magnetic permeability (μ'_r) under dc magnetic field of 58.4 mT. (b) μ'_r spectra with $I_{\text{dc}} = \pm 20$ mA.

らせん磁性体中の磁化構造に対する数値的研究

金田純、大江純一郎、美藤正樹^{*1}、大隈理央^{*2}

(東邦大、^{*1}九工大、^{*2}物材機構)

Numerical study of magnetization structure in helical magnetic materials

J. Kaneta, J. Ohe, M. Mito, M. Okuma

(Toho Univ., Kyushu Institute of Technology univ., NIMS.)

はじめに

強磁性結合と 1 軸 Dzyaloshinskii-Moriya 相互作用が共存する磁性体中では、螺旋磁化構造が形成される。さらに、螺旋軸に垂直な磁場を印加することによって、カイラルソリトン格子と呼ばれる磁化構造ができる。そこでは、ねじれた磁化構造がソリトンとしてふるまいトポロジカルに安定のため、磁化曲線はヒステリシスを示す。微少薄膜試料を用いた実験ではヒステリシスが観測されているが、バルク試料ではヒステリシスは観測されていない[1]。この違いを明らかにするため、今回は磁化配置を 3 次元系にし、磁化構造の磁場掃引による変化を数値シミュレーションを用いて解析した。

解析方法

古典ハイゼンベルグ模型を用いて、磁化のダイナミクスを表す Landau-Lifshitz-Gilbert 方程式を数値的に解いた。最近接相互作用と DM 相互作用、磁気異方性効果を用いて螺旋軸に対して垂直方向に磁場を印加し、磁化曲線の計算を行った。また、有限温度の効果として、揺動散逸定理から求められるランダム磁場を印加した。3 次元系のモデルはスピンを六方細密構造のように配置し、ab 平面を三角格子、c 軸を三角格子に対し垂直方向にとり計算を行った。(Fig.1)

解析結果

薄膜試料を再現した 2 次元正方格子のモデルでは、増磁過程において、トポロジカルに安定なねじれた磁化構造は解消されず、ある閾磁場において、強制強磁性状態になる。減磁過程においては、ねじれた磁化構造は系の端からしか生成することができず、ゼロ磁場近くの閾磁場において螺旋磁化構造になる。このため磁化曲線はヒステリシス構造になる。2 次元正方格子のモデルを層状に重ねた 3 次元モデルでも同様に磁化曲線にヒステリシス構造が見られた。一方、六方細密構造のようにスピンを配置したモデルではヒステリシス構造を小さくすることができた。この違いは薄膜とバルク結晶を用いた実験結果の違いを説明できる可能性がある。発表では、らせん構造の出入りの仕方、相互作用の大きさを変化させた場合の結果などを報告する。

参考文献

1) M. Mito et al., Phys. Rev. B 97, 024408 (2018).

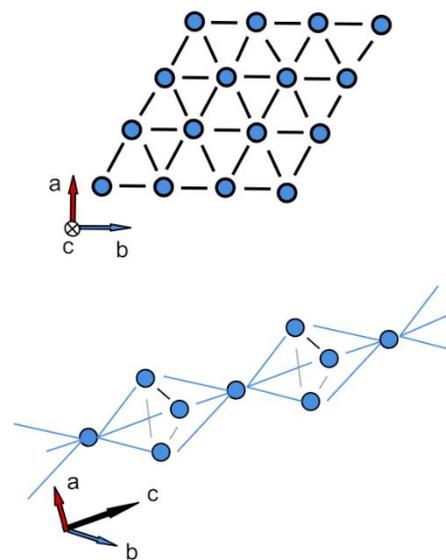


Fig.1 Schematic diagram of the calculation model. Spins arranged like a hexagonal miniature structure.

単一磁区に対する反転磁区の確率的生成

Fangfei Luo¹, 豊木研太郎^{1,2,3}, 三俣千春⁴, 中谷亮一^{1,2,3}, 白土 優^{1,2,3}

(1 大阪大学大学院工学研究科, 2 大阪大学 CSRN

3 大阪大学先導的学際研究機構, 4 東京理科大先進工学部)

Direct observation and stochastic analysis on thermally activated nucleation of individual magnetic domain

Fangfei Luo¹, Kentaro Toyoki^{1,2,3}, Chiharu Mitsumata⁴, Ryoichi Nakatani^{1,2,3} and Yu Shiratsuchi^{1,2,3}

(1 Grad. Sch. Eng., Osaka Univ., 2 CSRN, Osaka Univ., 3. OTRI, Osaka Univ., Tokyo Univ. Of Sci.)

緒言 有限温度における磁化反転は、熱活性過程による確率的なプロセスであり、有限温度における保磁力メカニズムの理解を困難にしている一つの原因となっている。また、磁性材料の磁化反転プロセスが一斉回転を示す一部の系を除いて反転磁区生成と磁壁移動によることは周知の事実である。これまでに、反転磁区生成と磁壁移動の確率的生成過程については、ナノ磁性薄膜や永久磁石において、様々な研究が進められているが、多くの研究では、主として磁化反転体の集合体からの磁気シグナルを統計的に解析する手法が用いられており、単一の磁化反転体に対する確率的反転磁区生成などを直接的に観察した例は極めて限られている。これは、磁化反転プロセスにおける反転磁区生成箇所や磁壁移動がトライアルによって、必ずしも同一にならないことが一因であると考えられる。我々は、Pt/Co/Au/Cr₂O₃/Pt 積層膜において生成される磁区構造が外部磁場の印加・除去に対してロバストであり、また、外部磁場強度を一定に保持した際に反転磁区生成が時間的に遅れて生成することを報告してきた。[1] 本研究では、この知見を利用して、単一の磁区に対するタイムラプス磁区観察により、反転磁区生成の潜伏時間を直接観測し、確率過程に基づいて解析した結果について報告する。

実験方法 マグネトロンスパッタリング法を用いて、Pt(2 nm)/Co(0.6 nm)/Au(1.0 nm)/Cr₂O₃(130 nm)/Pt(20 nm)を作製した。基板には、 α -Al₂O₃(0001)単結晶基板を用いた。紙面の都合上、各層の作製条件の詳細は、既報[1]などを参照されたい。各層の結晶配向性は、反射高速電子回折と X 線回折によって評価し、交換バイアスを生成させるための反強磁性 Cr₂O₃ 層が[11*0]双晶界面を持つ(0001)薄膜を形成していることを確認しており、この結晶配向では Cr スピン方向は膜面垂直方向であることが予測される。磁気特性評価には、振動試料型磁力計 (VSM)、磁気光学 Kerr 効果 (MOKE) 測定装置、MOKE 顕微鏡を用いた。特に、反転磁区生成過程のタイムラプス測定 (測定間隔 1/60 秒) については、MOKE 顕微鏡内に DC 磁場印加用の永久磁石とパルス磁場印加用のコイルを設置することで、磁化を飽和させた後の磁気緩和過程を観察できるシステムを構築した。DC 磁場強度は、永久磁石の種類と試料との距離によって、60 - 190 Oe で変化させた。DC 磁場に重畳させたパルス磁場は、パルス幅 1/60 秒、パルス高さ約 500 Oe とした。測定温度は、ペルチェ素子によって 278 - 281 K の範囲で制御した。

実験結果 磁化曲線測定により、作製した薄膜は垂直磁気異方性を示し、また、284 K 以下で垂直交換バイアスを示す。室温 (~295 K) で交流消磁した後、ゼロ磁場冷却することで、磁区毎に交換バイアスの符号が異なる双方向の交換バイアスが現れる。この状態での磁区構造は、磁場の印加前後でロバストであり、磁化を飽和させた後も、磁場を除荷することで初期状態の磁区構造が再現される。磁化飽和後の磁区構造の回復過程を MOKE 顕微鏡によるタイムラプス観察した結果、磁区構造の回復過程は反転磁区生成と磁壁移動によって生じることが分かった。また、反転磁区の生成においては、DC 磁場と温度に依存した潜伏時間が観測された。この結果は、反転磁区の核生成活性過程によって確率的に生成していることを示している。講演では、各温度での潜伏時間の磁場依存性をもとに、反転磁区の確率的生成過程、反転磁区形成のエネルギー障壁について議論する。

参考文献 1) Y. Shiratsuchi *et al.*, J. Appl. Phys. 127, 153920 (2020).

機械学習を用いた準安定状態からのパラメータ推定

田辺賢士、久野菜、出口慎治、栗野博之

(豊田工業大学)

Estimation of a parameter from a metastable magnetic image by machine learning

Kenji Tanabe, Shiori Kuno, Shinji Deguchi, and Hiroyuki Awano

(Toyota Technological Institute)

材料科学分野において、作製した材料の物質パラメータを決めることは、最も重要な実験である。磁気工学分野では、成膜した薄膜を評価するために、磁気パラメータの測定実験が行われている。しかし、ジャロシンスキー守谷相互作用(DMI)定数のように、測定が難しいパラメータや計測に時間が掛かるパラメータも存在する。そこで、より簡便なパラメータの測定法を確立するために、機械学習によって磁区画像からパラメータを推定する研究が進められている¹⁾⁻³⁾。一般に、強磁性体はM-H曲線においてヒステリシスを持つ。つまり、磁区状態は必ずしも、最安定状態になっているわけではなく、準安定状態になっていることも多い。これまでの先行研究¹⁾⁻³⁾では、磁区状態が最安定状態になっている状態で、あるいは最安定か準安定か特に制御されずに、実験が行われてきた。本研究では、人工的に準安定状態を複数作成し、その画像からのTbCo合金膜のTb濃度の推定実験を行った⁴⁾。

スパッタリング法によって $\text{Si}_3\text{N}_4(10\text{ nm})/\text{Tb}_x\text{Co}_{1-x}(t)/\text{Si}_3\text{N}_4(10\text{ nm})$ の多層膜をSi基板上に作製した。組成は垂直磁化膜になる条件を選択し、9種類の組成膜を作製した。磁区構造の作製には、交流消磁法を用いた。交流磁場の振幅の減衰率を変調することによって、複数の準安定状態である磁区構造を作製した(図(a))。図(b)に、実験的に測定されたTb濃度と機械学習によって推定された値の関係を示した。推定値は測定値にほぼ比例しており、準安定状態の画像からTb濃度を推定できることを示唆している。

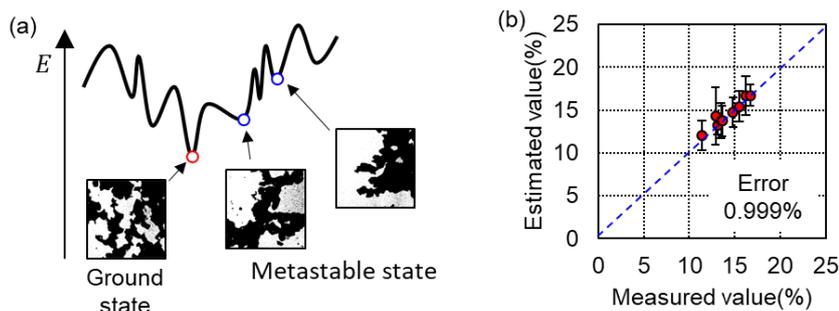


図. (a) 最安定状態と局所安定状態のイメージ図。ヒステリシスを持つ磁性体ではポテンシャルの形が多谷構造をしている。(b) 実験的に測定された値と、機械学習によって推定された値の関係図。点線が傾き1の直線であり、この直線に近いほど測定値と推定値が一致していることを表す。

参考文献

- 1) D. Wang et al., *Advanced Science* **7**, 2000566 (2020).
- 2) H. Y. Kwon et al., *Science Advances* **6**, eabb0872 (2020).
- 3) M. Kawaguchi, K. Tanabe et al., *npj Computational Materials* **7**, 20 (2021).
- 4) S. Kuno, K. Tanabe et al., submitted.

ランダウ理論から見た磁化状態の熱安定性と反転磁場

三保千春、小嗣真人、*岡本聡

(東京理科大、*東北大)

Thermal stability of magnetization states and reversal fields from the perspective of Landau theory

C. Mitsumata, M. Kotsugi and *S. Okamoto

(Tokyo Univ. of Science, *Tohoku Univ.)

1 はじめに

磁化状態を情報信号として利用する場合、その熱安定性と書き込み性能の間には磁気異方性エネルギー $K_u V$ を対象としてジレンマにあると考えられている ($K_u V$ は異方性定数と体積の積)。このような背景の下、熱安定性を損なうことなく磁気記録媒体における記録性能の向上のために、交換結合するソフト相 / ハード相の接合技術が提案されており^{1,2)}、媒体材料構成の探索や効果のシミュレーションが行われている³⁻⁵⁾。ここではランダウ理論の視点から⁶⁾、磁気信号の熱安定性と提案された磁化反転磁場低減の原理を解釈する。

2 結果および考察

ランダウ理論では秩序変数の関数として自由エネルギーを記述し、エネルギー極小状態を実現する秩序変数が系の状態を決定する。磁性材料の場合、系の磁化が秩序変数となるので、磁化反転などの現象にランダウ理論を利用することが可能である。系の自由エネルギー $F = U - k_B T S$ について、内部エネルギー U とエントロピー S が以下の関数で与えられるとする。ここでは簡単のため、全磁気モーメント m の関数として二重極小ポテンシャルを表現する U と磁気状態の乱雑性を表現する尤度がガウス分布で近似されると仮定した。

$$U(m) = \frac{K_u V}{\sigma^4 m_s^4} m^4 - 2 \frac{K_u V}{\sigma^2 m_s^2} m^2 + K_u V, \quad S(m) = \eta \left(1 - \frac{m^2}{m_s^2} \right) \quad (1)$$

ここで、 $m_s, k_B, T, \sigma, \eta$ はそれぞれ飽和全磁気モーメント、ボルツマン定数、温度、磁気ヒステリシス曲線の角型比、磁化反転体積によって決定される比例定数 ($\eta > 0$) である。Eq.(1) から求められる磁気安定条件は $m_r = \sigma m_s$ である残留磁化状態であり、これを基準として温度 $T = 0$ の場合のエネルギー障壁高さは $K_u V$ である。この自由エネルギー地形において障壁高さは T の上昇と共に低下し、 $2/\eta\sigma^2 < k_B T / K_u V$ の条件で超常磁性状態となることが分かる。この条件は関数 F が $|m/m_s| \leq 1$ の全ての状態に対して下に凸となっていることに対応する。

一方、磁化反転磁場 H_{sw} は $|\partial F / \partial m|$ の最大値によって決定される⁶⁾。Eq.(1) の具体例を用いて計算すると、

$$H_{sw} = \left. \frac{\partial F}{\partial m} \right|_{m=m_c} \quad \text{at} \quad m_c = \pm \sigma m_s \sqrt{\frac{2K_u V - k_B T \eta \sigma^2}{3K_u V}} \quad (2)$$

のように求められる。Suess³⁾ の計算結果では、記録磁場の低減は磁壁移動に対するピン止めサイトが同時性をもって大域的に作用することが理由とされた。これをランダウ理論から解釈すると、Eq.(2) で計算されるエネルギー地形の斜面が凹凸無く直線的となることが H_{sw} を小さくする条件と分かった。この条件はエネルギー地形の傾斜を最少とする命題をも満足している。したがって、例えば $T = 0$ の条件では、Eq.(1) において $U = K_u V |1 - |m/\sigma m_s||$ と変形することで、障壁高さを変更することなく、 $H_{sw} = 4H_k / \sqrt{27}\sigma \rightarrow H_k / 2\sigma$ と反転磁場の低減が可能である。

謝辞 本研究の一部は科研費基盤 A (21H04656) の支援を受けて実施した。

References

- 1) R. H. Victora, and X. Shen; *IEEE Trans. Magn.*, **41**, 517 (2005).
- 2) Y. Inaba, et.al. ; *IEEE Trans. Magn.*, **41**, 3136 (2005).
- 3) D. Suess; *Appl. Phys. Lett.*, **89**, 113105 (2006)
- 4) T. Shimatsu, et.al. ; *IEEE Trans. Magn.*, **43**, 2103 (2007)
- 5) T. Shimatsu, et.al. ; *J. Magn. Magn. Mater.*, **320**, 3088 (2008).
- 6) C. Mitsumata and M. Kotsugi; *J. Magn. Soc. Jpn.*, **46**, 90 (2022)..

磁性体の高性能な記述子の研究：磁気構造の精密な識別

鈴木 通人¹、野本 拓也²、Eiaki V. Morooka³、柳 有起⁴、楠瀬 博明⁵

(¹東北大、²東大、³Aalto Univ., ⁴富山県立大、⁵明治大)

Study of high-performance descriptor of magnetic materials: Accurate discrimination of magnetic structure

M.-T. Suzuki¹, T. Nomoto², E. V. Morooka³, Y. Yanagi⁴, H. Kusunose⁵

¹Tohoku Univ., ²Univ. of Tokyo, ³Aalto Univ., ⁴Toyama. Pref. Univ., ⁵Meiji Univ.

はじめに

Mn₃Sn の反強磁性秩序相で発現する異常ホール効果の発見を機に、強磁性体に特有の現象とされてきた様々な物性現象が磁化のない磁性体で報告され、注目を集めている[1]。このような磁化のない磁気秩序下での物性の発現は、磁気秩序に伴う対称性の破れに由来することがわかっており[2]、漏れ磁場による干渉や外場に対する反応速度の速さといった観点から、高集積回路などへの応用が期待されている。機能性磁性体の開拓をさらに押し進めるには、系統かつ効率的な磁性体の解析が必要であり、第一原理計算と機械学習手法を組み合わせた物質探索の枠組みが有力な候補となるが、磁性現象の解析に機械学習を適用するには、磁性体における物性の発現と密接に関わる磁気構造の違いを正確に識別できる記述子が必要となる。本研究ではこのような磁性体の記述子の理論を構築し、記述子の基本的なパラメータ依存性や磁気構造の識別性能を検証している[3]。

理論手法

磁性体の物性を機械学習によって系統的に解析するには、その発現と密接な関わりを持つ磁気構造の情報を、機械学習の記述子として適切な形で与える必要がある。空間座標とベクトル成分を用いた通常の磁気構造の表現では、座標軸や原点の取り方で値が変わってしまうため、座標軸や原点の選択などに依存しない、磁気構造の表現手法が必要である。本研究では原子配置を多次元ベクトルとして表現する理論手法である Smooth Overlap of Atomic Positions (SOAP)の理論[4]を磁気構造に拡張することで、磁気配列の特徴を捉えた部分スペクトルという多次元ベクトル量を定義し、相関係数によって磁気構造の類似性・相違性を定量的に評価することが可能な記述子を構築する。

検証結果

はじめに単純な磁気構造として、1次元結晶や体心立方格子上の強磁性・反強磁性構造の類似性について本手法による検証を行い、理論のパラメータ依存性などの基本的な性質を明らかにした。この検証により、磁気異方性の正確な判別には、高次の類似関数から導出される部分スペクトル(trispectrum)が必要になることがわかった。図は対称性によって分類された磁気構造(図1)の類似性を定量的に評価して得られる相関表であり(図2)、磁気構造の類似性・相違性を正しく表現していることがわかる[3]。

参考文献

- 1) S. Nakatsuji, N. Kiyohara, and T. Higo, *Nature* **527**, 212 (2015).
- 2) M.-T. Suzuki, T. Koretsune, M. Ochi, and R. Arita, *Phys. Rev. B* **95**, 094406 (2017).
- 3) M.-T. Suzuki, T. Nomoto, E. V. Morooka, Y. Yanagi, and H. Kusunose, *Phys. Rev. B*, Accepted.
- 4) A. P. Bartók, R. Kondor, G. Csányi, *Phys. Rev. B* **87**, 184115(2013).

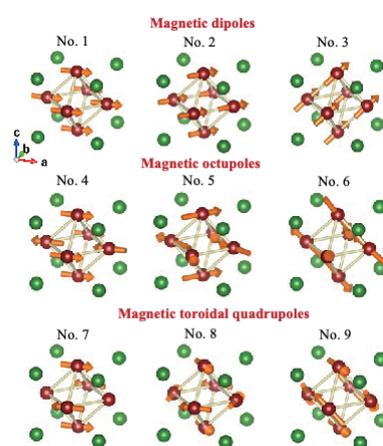


Fig. 1 Magnetic structures classified by symmetry on the Mn₃Ir crystal

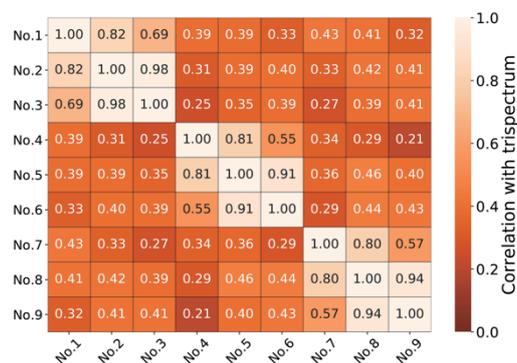


Fig. 2 Correlation table of the magnetic structures in Fig. 1

高勾配磁気分離における粒子堆積過程のその場観察

廣田憲之、高野 豪*、安藤 努*
(NIMS、*日大)

In-situ observation of particles deposition process during High Gradient Magnetic Separation

Noriyuki Hirota, Gou Takano*, Tsutomu Ando*
(NIMS, *Nihon Univ.)

高勾配磁気分離は、磁性フィルターを用い、外部磁場を印加した際に磁性ワイヤー周囲に形成される高勾配磁場を利用して流体中に分散した磁性粒子を分離する手法である。粒子は磁気力によりフィルターワイヤー上に捕集されるので、サイズ分離とは異なり、フィルターの目開きを粒子サイズよりも格段に大きく取ることが出来るため、目詰まりしにくく、高速な分離が実現するほか、磁場を取り去ると堆積粒子がフィルターから脱着するので、フィルターの再利用が可能で環境にも優しい。しかし、その分離過程における粒子堆積過程はよく理解されていないため、実際にはオーバースペックな条件による分離が行われていることが多い。十分な最適化が出来れば、この技術の普及にも寄与できると考え、本研究では、高勾配磁気分離における粒子堆積過程をその場観察し、理解を深めることを目指した。

実験で用いた磁性フィルターは外径 25 mm で SUS430 の線径 0.22 mm のワイヤーで構成された 30 メッシュのものである。平均粒径 5 μm のフェライト粒子を水中に分散させたものを試料とした。超伝導磁石内に設置した流路中に 1~2 枚のフィルターを設置し、気泡が入らないように流路を純水で満たしたのち、所定の磁場を印加し、チューブポンプにより流量を一定として流体試料を流した。この時、フィルター真横と流路中の上流側に設置した CCD カメラにより粒子堆積過程を観測した。図にフィルター真横から観察した粒子堆積過程の一例を示す。このケースではフィルターを 2 枚使用しているが、1 枚目のフィルターの上流側に粒子がチェーン状の構造を作って堆積してゆく様子が観測された。印加磁場や流体中の粒子濃度、流速やフィルター相互の配置に依存して粒子堆積過程に違いがあることが分かった。これらの詳細については当日報告する。

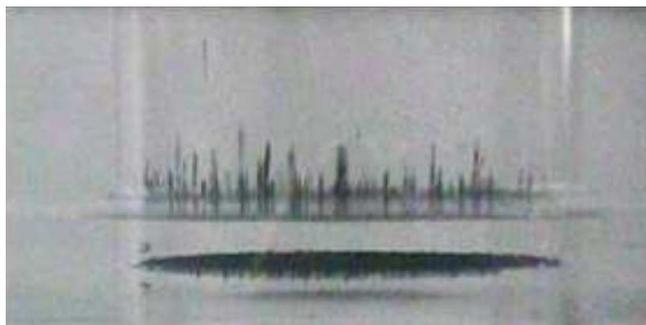


図 高勾配磁気分離における粒子堆積過程のその場観察結果

印加磁場 0.2 T、粒子濃度 $4 \times 10^{-2} \text{ kg/m}^3$ 、

カイラル充填 β -Mn 構造を有する強磁性スキルミオンにおける D/J 制御

D/J Control in the Chiral Filled β -Mn-type Ferromagnetic Skyrmions

強 博文、富樫 正孝、桑原 真人、伊藤 孝寛、浅野 秀文

名大院工

B.W. Qiang, N. Togashi, M. Kuwahara, T. Ito and H. Asano
(Graduate School of Engineering, Nagoya Univ.)

【はじめに】 充填 β -Mn 構造カイラル磁性体 $\text{Fe}_{2-x}\text{Pd}_x\text{Mo}_3\text{N}$ (FPMN) における重金属 Pd ドープにより、Dzyaloshinskii-Moriya 相互作用 (DMI) が増強され、磁気スキルミオンが生成されることが報告された[1]。FPMN において Lorentz-TEM 顕微鏡法とトポロジカルホール効果 (THE) からスキルミオンの生成が検証され、Pd ドープの少ない領域 ($x < 0.5$) において高い T_C (600 K) を有する微小サイズスキルミオンを実現した。本研究は XMCD 法を用いて FPMN スキルミオン生成磁場領域における Fe 磁気モーメントの変化を解析し、スキルミオン生成の鍵となる DMI と強磁性交換相互作用のバランス制御の観点から $\text{Fe}_{2-x}\text{Pd}_x\text{Mo}_3\text{N}$ におけるスキルミオン生成のメカニズムを解析した。

【実験及び結果】 エピタキシャル薄膜 $\text{Fe}_{2-x}\text{Pd}_x\text{Mo}_3\text{N}$ はマグネトロンスパッタ法により c -サファイヤ基板上に成長させた。FPMN ($x = 0.32$) 薄膜サンプルにおける Fe L_3 XMCD スペクトルの薄膜面直磁場依存性を Fig. 1 に示す。青いラインで示しているのは強磁性状態のスペクトルであり、 -0.5 T から 1 T へと磁場を変化させると、 0.15 T から 0.5 T の磁場領域においては Fe L_3 端の立ち上がりが観測される励起エネルギーが高エネルギー側にシフトすることを見出した。シフトが観測される磁場領域は、Lorentz-TEM 法により磁気スキルミオンが観察される領域に対応することから、スキルミオン生成に伴う Fe の磁気状態の変化によるシフトであると考えている。Fig. 2 に T_C 及びスキルミオンサイズ λ から算出した J 及び D の Pd 置換量依存性をこれまでに報告されているスキルミオンにおけるもの[2-5]と比較して示す。本研究で得られた FPMN ($x = 0.32$) における最大値 $D = 25.4 \times 10^{-4} \text{ J/m}^2$ は、これまでにカイラル磁性体で報告されている D が全て $5 \times 10^{-4} \text{ J/m}^2$ 以下であるのに対して、10倍程度大きく見積もられていることが分かる。この結果は、カイラル強磁性体において重金属 Pd ドープによる D/J 制御により、 J と D の最適化を実現することにより、高い動作温度 ($T_C = 600$ K) と微小サイズスキルミオン ($\lambda \sim 60$ nm) が両立されることを示した結果であると考えている。講演では、 $\text{Fe}_{2-x}\text{Pd}_x\text{Mo}_3\text{N}$ における D/J 制御のメカニズムについて詳細に議論する予定である。

[1] Bowen Qiang, *et al.* Appl. Phys. Lett., **117**, 142401 (2020). [2] L. Kautzsch, *et al.*, Phys. Rev. B **4**, 024412 (2020). [3] T. Nakajima, *et al.*, Sci. Adv. **3**, e1602562 (2017). [4] S. Seki, *et al.*, Phys. Rev. B **85**, 220406(R) (2012). [5] Y. Tokunaga, *et al.*, Nat. Communi. **6**, 7638 (2015).

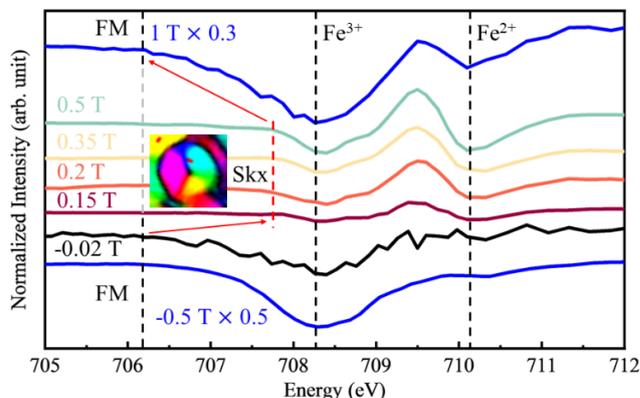


Figure 1 A series of Fe L_3 XMCD spectra with magnetic field applied perpendicular to the film plane from -0.5 T to 1 T. The black and red dashed lines show the peak position and edge shift.

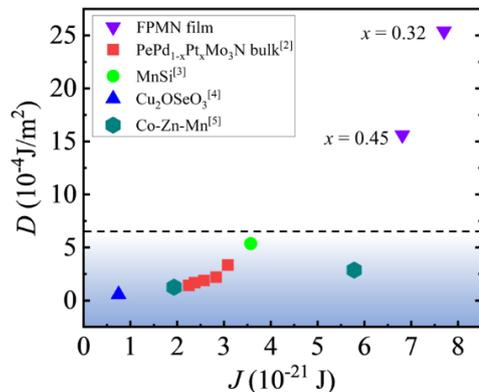


Figure 2 Comparison of magnetic exchange interactions (J) and Dzyaloshinskii-Moriya interactions (D) of skyrmion between host chiral magnets.

Mn(Nb_{1-x}Ta_x)₂O₆ 反強磁性体における スピンプラストラーションの混晶効果

後藤颯樹¹, 北條大輝¹, 小林悟¹, 寺田典樹²
(¹岩手大, ²物材機構)

Mixed effects on spin frustration in Mn(Nb_{1-x}Ta_x)₂O₆ antiferromagnets

S. Goto¹, H. Hojo¹, S. Kobayashi¹, N. Terada²

(¹Iwate Univ., ²NIMS)

はじめに

Mn(Nb_{1-x}Ta_x)₂O₆はコロンバイト構造を持つ化合物である。Mn スピンが c 軸に沿った反強磁性 1 次元鎖を形成し、これらの鎖が a-b 面内に二等辺三角格子状に配列し、幾何学的フラストラーションを生み出す。MnNb₂O₆ と MnTa₂O₆ は同一の結晶構造を持つにも関わらず、異なる磁気構造[1]や、磁気相図と交換相互作用定数の著しい変化が報告されている [2,3]。これら観測結果は Nb と Ta のイオン半径の違いによる二等辺三角格子内のスピンプラストラーション状態の変化に起因すると考えられるが、その様相の系統的变化は明らかになっていない。本研究では、Mn(Nb_{1-x}Ta_x)₂O₆ において x を系統的に変化させたときの磁気特性変化を調査したので報告する。

実験方法

MnO₂, Nb₂O₅, Ta₂O₅ を混合・ペレット化し、1200°C24h で焼結した。粉碎後、再度、混合・ペレット化し、1250°C36h で焼成し Mn(Nb_{1-x}Ta_x)₂O₆ を得た。本研究では、x = 0, 0.25, 0.5, 0.75, 1 の 5 試料を作製した。粉末 X 線回折(XRD)により結晶相同定、格子定数を決定した。SQUID 磁力計(MPMS)を用いて T = 2~350 K, H = ±50 kOe の範囲で磁化測定、物理特性測定システム(PPMS)を用いて零磁場中、T = 2~300 K の範囲で比熱測定を行った。

実験結果

XRD により焼結試料が単相であること、x の増加に伴い格子定数が増加することを確認した。磁化率の温度依存性 (Fig. 1) から、x の増加に伴い磁化率が低下し、ネール温度 T_N が単調増加 (Fig. 1 挿入図) することが分かった。また、T_N 以下の磁化曲線で 20 kOe 近傍で磁化の傾きの変化が観測された (Fig. 2 挿入図)。Fig. 2 に示す微分磁化率の磁場依存性から、x = 0, 1 ではピークが一つであるのに対し、x = 0.25, 0.5, 0.75 では 2 つのピークが観測された。x の増加とともに、低磁場側ピークは減少する一方、高磁場側ピークは増加すること、ピーク間の磁場範囲が拡大することが分かった。これは混晶系において、新たな磁場誘起スピンプラストラーション相の発現を示唆している。

参考文献

- 1) W. Scharf, H. Weitzel, *Solid State Commun*, **18**, 249-252 (1976)
- 2) R. Maruthi et, al. *J. Phys.: Condens. Matter* **33**, 345801 (2021)
- 3) R. Maruthi et, al. *J. Phys.: Condens. Matter* **34**, 155801 (2022)

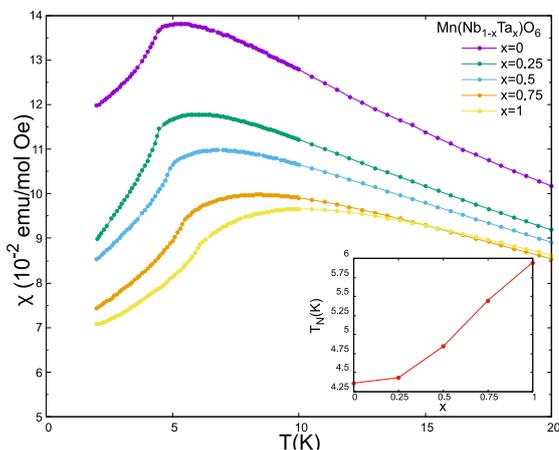


Fig.1 Temperature dependence of magnetic susceptibility (χ). Inset shows T_N vs x , calculated from χ vs T .

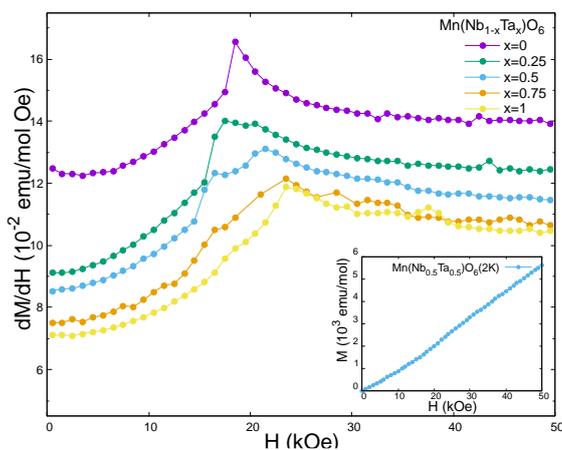


Fig.2 dM/dH vs H determined from $M-H$ curves. Inset shows $M-H$ curve at 2 K for $x = 0.5$.

マグネシウムフェライト薄膜における磁気特性の結晶化温度依存性

安達信泰・近藤達也 (名古屋工業大学)

Crystalized Temperature Dependence of Magnetic Properties for Mg Ferrite Films

N. Adachi, T. Kondo (Nagoya Institute of Technology)

1. 緒言

我々は、有機金属分解(MOD)法を用いて、反強磁性体 ZnFe_2O_4 を部分的に逆スピネル構造にしてフェリ磁性化し、500 nm 付近の短波長領域で、大きな磁気光学効果を示すことを報告した[1]。しかしながら、キュリー点が $T_c=190$ K 程度と低温でのみ強磁性を示し、スパッタ法等による研究報告[2]にあるような室温強磁性を示すまでにはいたっていない。本研究では、室温強磁性を示すことで知られる MgFe_2O_4 に関して MOD 法による合成を試み、合成条件による磁気特性の違いについて評価を行った。この物質系も不完全な逆スピネル構造によりフェリ磁性が生じることから、室温強磁性の知見を得られると考えた。

2. 実験方法

薄膜は、有機金属溶液(高純度化学)をシリカガラス基板上にスピコーティングし作製した。溶液滴下後は、 100°C で乾燥し、 300°C で仮熱処理を行った。必要な膜厚までこの工程を繰り返した後、熱処理結晶化させた。焼成温度は焼成温度を 500°C から 900°C 、焼成時間は2時間として行った。作製した試料に対し、XRD(RIGAKU: MiniFlex)による結晶の評価、FE-SEM(JEOL:JES7000F)による微構造観察、SQUID(Quantum Design: MPMS-7 & X7)による磁化測定、強磁性共鳴(FMR)の測定を行った。

3. 結果と考察

焼成温度 500°C 以上でスピネル構造に由来する XRD 回折ピークが得られ、 900°C で鋭い回折ピークが観測された。飽和磁化 M_s と保磁力 H_c は、焼成条件に強く依存する。Fig.1 に示すように 4K の温度において、 500°C 付近の焼成温度で作製した膜では、 M_s が小さいものの H_c が 2 kOe を超える大きな値を示した。逆に 900°C 付近の焼成温度で作製した膜では、 M_s が 40 emu/g と増大したが、 H_c は 200 Oe と減少した。また、 M_s が大きくなるにつれて、FMR の共鳴磁界は、常磁性共鳴の共鳴磁界付近から低磁界側にシフトし、異方性磁界の増大が認められた。8 面体配位の B サイトにある Fe^{3+} のみの存在では、反強磁性を示すはずだが、 ZnFe_2O_4 と同様に一部が 4 面体配位の A サイト位置することにより強磁性成分が現れ、焼成温度が高いほど A サイトの占める割合が大きくなると考えられる。また、zero-field cooling と field-cooling の磁化の温度依存性を測定すると、低温側で焼結した試料に関して、 150 K 以下で異なる挙動が観測され、何らかの磁気転移が生じていることが示唆された。

謝辞：本研究の一部は文部科学省ナノテクノロジープラットホーム事業<分子・物質合成>[課題番号] JPMXP1222MS1057 の支援により自然科学研究機構 分子化学研究所で実施された。

参考文献

[1]N.Adachi et.al. 02PC1 日本磁気学会第 45 回学術講演会予稿集

[2] K. Tanaka et.al. J. Phys. Condens. Matter. 15L469 (2003)

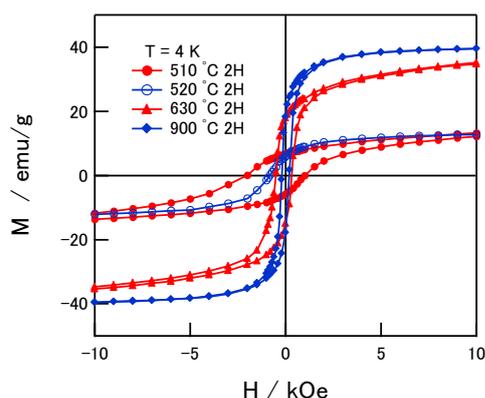


Fig.1 Magnetization curves of MgFe_2O_4 annealed at different temperatures.

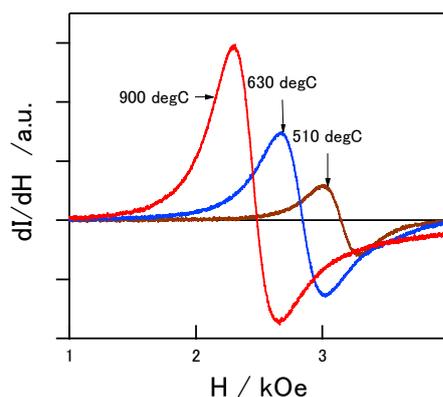


Fig. 2 FMR spectra of MgFe_2O_4 annealed at different temperatures.

桂皮酸誘導体有機層を含む層状金属水酸化物の磁性

本多善太郎、安田有智、木田孝則*、萩原政幸*
(埼玉大院理工、*阪大強磁場)

Magnetic properties of layered metal hydroxides incorporating cinnamate derivative organic layers

Z. Honda, A. Yasuta, T. Kida*, and M. Hagiwara*
(Saitama Univ. *AHMF Osaka Univ.)

はじめに

層状金属水酸化物の層間に有機層が貫入した構造の有機無機層状物質は有機化合物と金属の多様な組み合わせが可能であり、遷移金属上に局在した磁気モーメントと有機分子上の電気双極子による磁性、誘電性の発現が期待される。特に有機層が桂皮酸(CA)の化合物の場合 (Fig. 1)、無機層が水酸化銅の場合強磁性が、水酸化コバルトの場合、巨大保磁力を伴うフェリ磁性を示すことが明らかにされており興味もたれる。そこで我々は桂皮酸層状水酸化物の層間距離と磁気特性との関連を明らかにすることを目的に、有機層を各種桂皮酸誘導体(X-CA)で置換した一連の化合物 TM(X-CA)(OH), TM = Co, Cu 合成し、その磁性を調べた。

実験方法

金属源に硝酸コバルト及び硝酸銅、水酸化剤に水酸化ナトリウム、有機層原料に各種桂皮酸誘導体 (X = CH₃, Cl, OH 等) を用い、それらを所定の比で混合した後テフロン容器に密閉し、100 °Cから 130 °Cで加熱することにより各種層状物質を合成した。熱重量分析により化学式を同定し、粉末 X 線回折法により層間距離を調査した。また、磁気測定には SQUID 磁束計 (Quantum Design 社 MPMS-XL) を用いた。

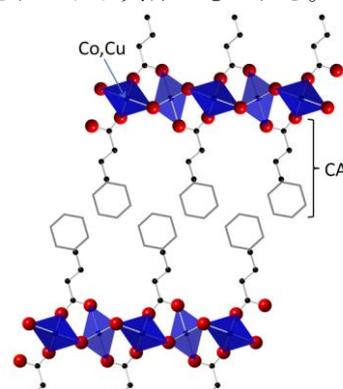


Fig. 1. Sheet structure of the Co(CA)(OH) .

実験結果

各種層状物質の粉末 X 線回折パターンには層状構造を示唆する高次反射が見られ、回折角から無機層間隔を算出したところ、最短 15.7 Å (有機層 : スチリル酢酸)、最長 22.5 Å (有機層 : 4-トリフルオロメチル桂皮酸) と広く分布していることが分かった。水酸化物層間には桂皮酸分子 2 層で構成された有機層が挟まれており、その間隔は各種桂皮酸誘導体の分子長を反映しているものと思われる。一連の層状水酸化銅はいずれも強磁性を示し、層間距離のちがいに問わず、キュリー温度は 15 K 程度であった(Fig. 2)。また、キュリー温度以下の磁気モーメントの温度依存性には 3 次元磁性体の特徴 ($T^{3/2}$ 則及び臨界指数 $\beta = 0.347$) がみられ、水酸化物間の弱い磁気相互作用が磁気秩序形成に寄与することを示唆するものであった。一方、一連の層状水酸化コバルトはキュリー温度以下で自発磁化を生じたが(Fig. 3)、磁化率を解析したところ、いずれもワイズ温度は負であった。また、銅化合物同様、層間距離のちがいにも関わらずキュリー温度は狭い温度範囲 (44.0 K から 57.0K) に分布していた。

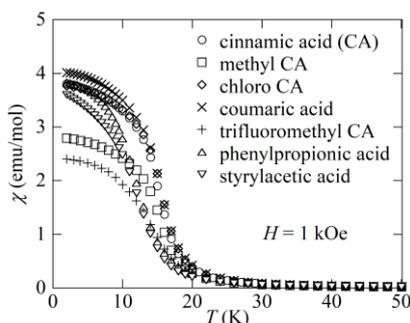


Fig. 2. Magnetic susceptibilities vs. temperature curves of the Cu(X-CA)(OH).

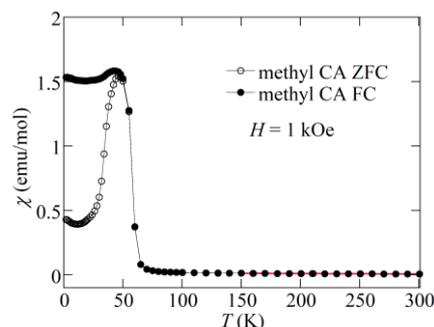


Fig. 3. Magnetic susceptibilities vs. temperature curves of the Co(CH₃-CA)(OH).