

# 強磁性超弾性合金を用いた振動発電の基礎検討

小澤海斗, 栢修一郎, 石山和志  
(東北大学 電気通信研究所)

Study of vibration power generation using ferromagnetic superelastic alloy

K. Ozawa, S. Hashi, K. Ishiyama  
(RIEC, Tohoku University)

## 1. はじめに

近年、環境に存在する希薄なエネルギーを収穫して電力に変換する、環境発電技術<sup>1)</sup>を利用した発電デバイスが開発されている。本研究では振動発電に着目し、超弾性合金の応力による相変態を発電に利用する新方式<sup>2)</sup>を提案してきた。Fe-Mn-Al-Ni系合金は母相が強磁性でマルテンサイト相が反強磁性<sup>3)</sup>であるため、応力による相変態で磁性・非磁性が変化する。この変化をコイルで検出すれば電力を取り出せる可能性がある。我々はこれまでにFe-Mn-Al-Ni系合金の磁気特性を測定した結果、応力印加時に磁化変化は得られた<sup>2)</sup>が、変態が誘起される臨界応力には及ばず、非磁性相を誘起できなかった。

そこで本報告では、応力誘起相変態を利用した振動発電の実現に向け、Fe-Mn-Al-Ni系合金の材料特性を検討した結果を述べる。

## 2. 実験方法

短冊形状にしたFe-Mn-Al-Ni単結晶合金の磁気特性は、強力な圧縮応力を印加できるように改良した治具を用いて、BHループトレサにより測定した。また、短冊状試料に対して圧縮応力印加により座屈変形させた箇所と、応力無印加の箇所をそれぞれナイタールで約2分間エッチングし、エタノールで約5分間超音波洗浄したのち組織観察を行った。

## 3. 実験結果

Fig. 1にFe-Mn-Al-Ni単結晶合金に対し、圧縮応力を印加した際のBH曲線を示す。約600 MPaの応力印加時では磁束密度が約0.1 Tとなり、完全に非磁性にはならなかったが、応力無印加時との磁束密度差を得た。さらに、除荷により磁化がおおよそ元に戻ることも確認し、応力誘起による磁化変化を示した。Fig. 2 (a) (b)にはFe-Mn-Al-Ni合金の光学顕微鏡写真を示す。Fig. 2 (a)は母相であるが、単結晶のため結晶粒界は観察されない。Fig. 2 (b)は座屈変形させた箇所の組織である。起伏と幅を持つプレートが見られ、組織の観点でも応力誘起マルテンサイトを確認

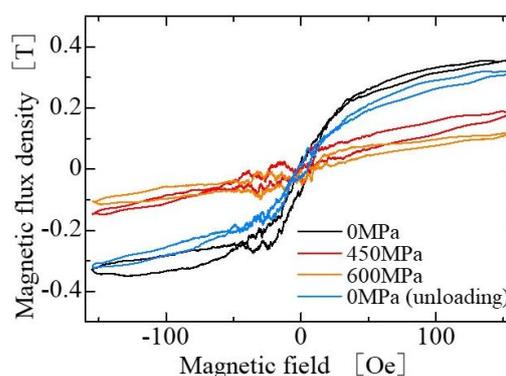
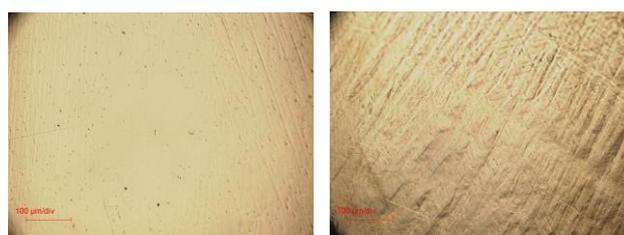


Fig. 1. Changes of B-H curve under applied compressive Stress



(a) Parent phase (b) Martensite phase

Fig. 2. Optical micrograph of Fe-Mn-Al-Ni alloy

した。今後は、相変態時の合金の磁気特性と組織、結晶構造などを関連付けて評価する予定である。

## 謝辞

試料提供ならびにご助言をいただいた東北大学大学院工学研究科金属フロンティア工学専攻、貝沼亮介教授、大森俊洋准教授、許焜助教に感謝する。

## 参考文献

- 1) K. Takeuchi: *J. Surf. Finish. Soc. Jpn.*, **67**, 334 (2016).
- 2) K. Ozawa, S. Hashi and K. Ishiyama: "Study of vibration power generation using ferromagnetic shape memory alloy," *Annual Meeting Record I.E.E. Japan.*, (2021.3), p.107.
- 3) T. Omori and R. Kainuma: *Materia Japan.*, **54**, 398 (2015).

## 振動発電デバイスに搭載した方向性電磁鋼板の磁束密度変化

藤枝 俊\*、岡田 拓\*、栢 修一郎\*\*、石山和志\*\*\*、鈴木 茂\*\*\*\*、  
清野智史\*、中川 貴\*、山本孝夫\*

(\*阪大 工学研究科、\*\*東北学院大 工学部、\*\*\*東北大 通研、  
\*\*\*\*東北大 マイクロシステム融合研究開発センター<sup>4</sup>)

Magnetic flux density change of grain-oriented electromagnetic steel on vibration power generation device

S. Fujieda\*, T. Okada\*, S. Hashi\*\*, K. Ishiyama\*\*\*, S. Suzuki\*\*\*\*, S. Seino\*, T. Nakagawa\*, T. A. Yamamoto\*

(\*Graduate School of Engineering, Osaka Univ.\*, Faculty of Engineering, Tohoku Gakuin Univ.\*\*, RIEC, Tohoku Univ.\*\*\*,  $\mu$ SIC, Tohoku Univ.\*\*\*\*)

### はじめに

逆磁歪効果と呼ばれる磁歪の逆効果を利用した振動発電は、身近で発生する振動を電気エネルギーに変換するエナジーハーベスティング技術として注目されている。Fe-Ga 合金単結晶を搭載した振動発電デバイスは、逆磁歪効果による大きな磁束密度変化に起因して優れた発電特性を示す<sup>1)</sup>。用途拡大に向けてデバイスの大型化による発電特性の大幅な向上が期待されるが<sup>2)</sup>、Fe-Ga 合金単結晶の大型化は研究開発の段階である<sup>3)</sup>。このような状況で、最近、Fe-Si 合金単結晶でも逆磁歪効果により大きな磁束密度変化が得られることが報告された<sup>4)</sup>。本研究では、大型化に対応可能な方向性電磁鋼板と呼ばれる圧延方向に<100> 配向した Fe-Si 合金多結晶を振動発電デバイスに搭載して、その磁束密度変化を評価した。

### 実験方法

ユニモルフ U 字型の振動発電デバイスを用いて振動発電試験を行った (Fig. 1(a)参照)。圧延方向と長手方向が平行になるように長さ 16 mm および幅 4 mm の板状に切り出した厚さ 0.35mm の方向性電磁鋼板を鉄製の U 字型フレームに張り付けた後、巻き数 3638 ターンの空芯コイルを取り付けた。また、永久磁石を用いてバイアス磁場を印加した。

### 実験結果

Fig. 1(a)に振動発電試験の模式図を示す。この試験では、デバイスの片端を加振機に固定して機械共振周波数近傍の 108 Hz で強制的に振動させた。この際、他端の振幅 $\Delta d$ をレーザー変位計で計測し、 $\Delta d = 2$  mm となるように重りおよび加速度を調整した。バイアス磁場を変化させるために異なる表面磁束の永久磁石を用いて上述の振動発電試験を行った。開回路電圧の表面磁束依存性を Fig. 1(b)に示す。表面磁束の増大に伴い、開回路電圧は上昇し、約 3.5 V の極大値を示した。この最適化したバイアス磁場において、鉄製フレームの発電への影響を考慮して方向性電磁鋼板に生じる磁束密度変化を Faraday の法則に基づいて求めた結果、約 0.65 T に達することが明らかになった。従って、方向性電磁鋼板の大型デバイスへの応用が期待される。

### 参考文献

- 1) S. Fujieda et al., IEEE Trans. Magn., **50** (2014) 2505204.
- 2) 上野敏幸, 日本金属学会会報 あたりあ **59** (2020) 6.
- 3) 南部十輝 他, 日本金属学会会報 あたりあ **56** (2017) 27.
- 4) F. Osanai et al., Proc. 24th Soft Mag. Mater. Conf., (2019) P-071.

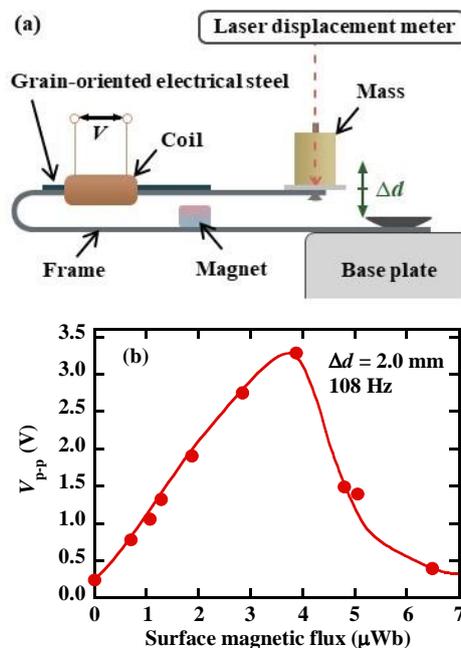


Fig. 1 (a) Schematic illustration of setup to measure vibration power generation properties. (b) Peak-to-peak value of open circuit voltage  $V_{p-p}$  as a function of surface magnetic flux of magnets.

## ナノ結晶軟磁性材料の高磁歪化に向けた合金設計

佐野光哉<sup>1)</sup>、富田龍也<sup>2)</sup>、岡智絵美<sup>1)</sup>、櫻井淳平<sup>1)</sup>、山崎貴大<sup>1)</sup>、秦誠一<sup>1)</sup>

(<sup>1)</sup>名古屋大、<sup>2)</sup>株式会社東北マグネットインスティテュート)

Design of nanocrystalline soft magnetic material with large magnetostriction

K. Sano<sup>1)</sup>, T. Tomita<sup>2)</sup>, C. Oka<sup>1)</sup>, J. Sakurai<sup>1)</sup>, T. Yamazaki<sup>1)</sup>, S. Hata<sup>1)</sup>

(<sup>1)</sup>Nagoya Univ., <sup>2)</sup>Tohoku Magnet Institute Co., Ltd.)

### はじめに

磁歪式振動ハーベスタは、Beyond 5G の IoT デバイスの自立電源として常時モニタリング、材料診断技術などへの応用が期待される。デバイスの小形化に向けて出力の向上が求められており、そのためには高磁歪と高磁化率を併せ持つ材料が必要であるが、これらの特性を両立する単相材料は存在しない。そこで本研究では、高磁化率を示す NANOMET<sup>®</sup> (Fe-Si-B-P-Cu-C) 軟磁性合金<sup>1)</sup>をベースにしたナノ結晶分散アモルファス磁歪合金を提案し、結晶構造、磁気、磁歪特性に対する Al 添加効果を紹介する。

### 実験方法

薄膜サンプルは、Fe-Si-B-P-Cu-C 合金と Al 単体の 2 つのターゲットを用いて、高周波マグネトロンスパッタリング法によって Si 基板の上に成膜した。サンプルの組成は、(Fe-Si-B-P-Cu-C)<sub>100-x</sub>Al<sub>x</sub> (x = 0, 3, 7 at%) であった。また成膜したサンプルは、赤外線ランプ加熱装置を用いて 250, 450, 650°C で 1 分間加熱した。さらに磁場中熱処理による影響<sup>2)</sup>を調べるため、熱処理時に磁場を印加したサンプルも作製した。磁歪は光てこ法を用いて測定し、磁化曲線は振動試料形磁力計を用いて測定した。

### 実験結果

Fig. 1 (a)に示すように、磁化率は熱処理温度の上昇に伴い減少し、磁場の印加に伴い急激に増加した。前者はアモルファス母相からの不純物相の析出に起因し、後者は磁場による  $\alpha$ -Fe ナノ結晶の配向によるものであると考えられる。Fig. 1 (b)に示すように、磁歪による変位量は 450°C 以上の熱処理によって減少し、磁場の印加によっても減少した。前者は X 線回折の結果からナノ結晶化によるものであり、後者は磁場中熱処理による残留伸びの存在による磁歪変位量の伸びしろの減少に起因すると考察した。また、250°C で磁場中で熱処理したサンプルで、比較的高い磁化率と磁歪が得られた。本研究は、新しい磁歪合金を用いた振動ハーベスタの開発に貢献するものであると考えている。

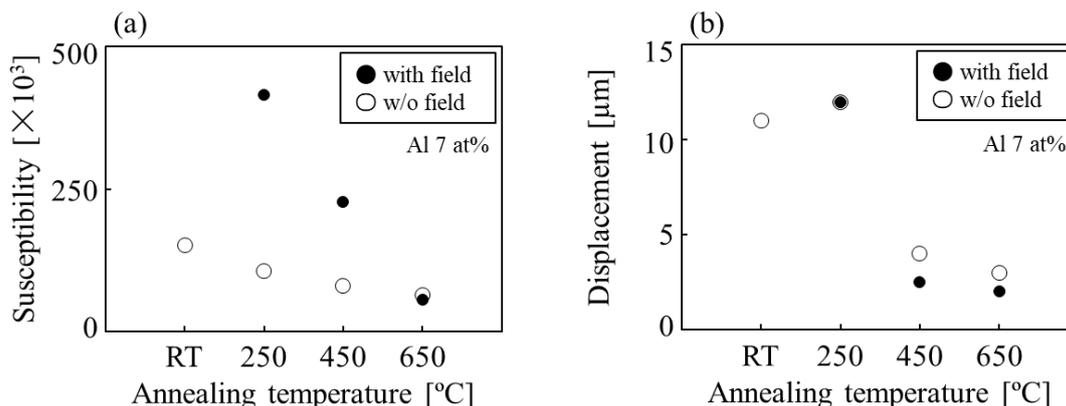


Fig. 1 (a) Magnetic susceptibility and (b) magnetostrictive cantilever displacement dependence on annealing temperature and magnetic field for an (Fe-Si-B-P-Cu-C)<sub>100-x</sub>Al<sub>x</sub> (x = 7 at%) thin films.

### 参考文献

- 1) A. Makino, H. Men, T. Kubota, K. Yubuta, and A. Inoue: IEEE Trans. Magn. **45**, 10 (2009)
- 2) Ming Liu, Zhi Wang, Yan-chao Xu, Ming Yue, J. Appl. Phys. **117**, 17B729 (2015)

## ナノ結晶磁性体における局所的磁歪効果

塚原宙<sup>1,2</sup>、今村裕志<sup>2</sup>、三俣千春<sup>3</sup>、鈴木清策<sup>4</sup>、小野寛太<sup>1,5</sup>  
 (<sup>1</sup>高エネ研, <sup>2</sup>産総研, <sup>3</sup>物材機構, <sup>4</sup>モナッシュ大学, <sup>5</sup>大阪大学)

### Effects of local magnetostriction in nanocrystalline soft magnetic materials

H. Tsukahara<sup>1,2</sup>, H. Imamura<sup>2</sup>, C. Mitsumata<sup>3</sup>, K. Suzuki<sup>4</sup>, K. Ono<sup>1,5</sup>

<sup>1</sup>High Energy Accelerator Research Organization (KEK), Tsukuba, Ibaraki 305-0801, Japan

<sup>2</sup>National Institute of Advanced Industrial Science and Technology (AIST), Tsukuba, Ibaraki, 305-8568, Japan

<sup>3</sup>National Institute for Materials Science (NIMS), Tsukuba 305-0047, Japan

<sup>4</sup>Monash University, Clayton, VIC 3800, Australia

<sup>5</sup>Osaka University, Osaka 565-0871, Japan

#### はじめに

軟磁性材料はモーターやインダクタなどのデバイスに必要な不可欠な部品である。デバイス内では交流磁場が発生し、軟磁性材料の磁化応答が遅延するとエネルギー損失が発生するため、デバイスの性能を低下させる。高周波領域ではエネルギー損失は古典渦損および異常渦損に支配される。ナノ結晶軟磁性体は結晶粒径を 10 nm 程度まで減少させる事により低保磁力を実現した優れた軟磁性材料であり、また電気抵抗が高いために古典渦損も小さい。よって、さらなる高エネルギー効率化には異常渦損の減少が必要となる。我々は異常渦損の原因として磁歪に着目し、ナノ結晶磁性体における磁歪分布を明らかにし、磁歪が磁壁移動に及ぼす影響を明らかにした。

#### 計算方法

図 1(a) に示されるシミュレーションモデルを使用した。シミュレーションモデルの大きさは  $2048 \times 2048 \times 2 \text{ nm}^3$  であり、平均粒径 12.7 nm の結晶粒で分割されている。結晶粒の結晶軸はランダムに配向しており、立方対称を考えた。磁区構造は単純なストライプ構造を仮定し、ナノ結晶磁性体における磁歪分布を計算した。ナノ結晶では磁歪定数および異方性定数以外は  $\alpha\text{-Fe}$  のパラメータを使用した。シミュレーションでは磁歪定数を  $\lambda_{100} = 20.0 \times 10^{-5}$ ,  $\lambda_{111} = -7.22 \times 10^{-5}$  と  $\alpha\text{-Fe}$  よりも大きくし、磁壁移動に対する磁歪の効果を顕著化した。また結晶磁気異方性を無視した。

#### 計算結果

結晶粒毎に結晶軸の向きが異なるため、磁化が同じ向きを向いていても磁歪は異なる。そのため結晶粒界面では応力が発生し、更に結晶粒を歪ませる。完全に磁化が配向した場合、 $\alpha\text{-Fe}$  の磁歪定数を使用すると、計算された磁化の方向の平均磁歪は  $-9.9 \times 10^{-6}$  であり、結晶粒毎に独立した磁歪の足し合わせである  $-4.4 \times 10^{-6} (2/5\lambda_{100} + 3/5\lambda_{111})$  よりも実験値  $-8.9 \times 10^{-6}$  に近くなる。このナノ結晶磁性体における内部応力の存在は磁歪分布を不均一にする。図 1(b) にストライプ磁区構造における歪分布を記載する。歪は不均一であり結晶粒内部においても変化する。この局所的に大きな歪は磁壁運動に影響を与え異常渦損を上昇させる。本発表では平均磁歪が消失する条件や磁歪定数による磁壁移動の変化について議論する。

#### 謝辞

本研究はトヨタ自動車との共同研究で実施され、シミュレーションは東北大学のスーパーコンピューター MASAMUNE-IMR を使用して行われた。

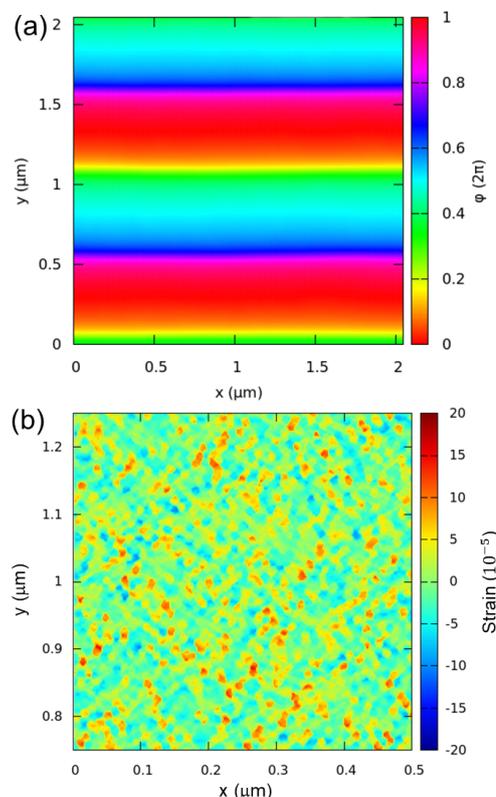


Fig 1: (a) Simulation model of this study. (b) Color map of strain in NSMM.

# 電解めっき法により形成した Fe-Co 合金膜の構造と磁気・磁歪特性

中村優太<sup>1</sup>・明田俊祐<sup>1</sup>・近藤輝<sup>1</sup>・大竹充<sup>1</sup>・川井哲郎<sup>1</sup>・二本正昭<sup>1</sup>・桐野文良<sup>2</sup>・稲葉信幸<sup>3</sup>  
(<sup>1</sup>横浜国大, <sup>2</sup>東京藝大, <sup>3</sup>山形大)

Structural, Magnetic, and Magnetostrictive Properties of Fe-Co Alloy Films Prepared by Electroplating

Yuta Nakamura<sup>1</sup>, Shunsuke Aketa<sup>1</sup>, Hikaru Kondo<sup>1</sup>, Mitsuru Ohtake<sup>1</sup>,  
Tetsuroh Kawai<sup>1</sup>, Masaaki Futamoto<sup>1</sup>, Fumiyoshi Kirino<sup>2</sup>, Nobuyuki Inaba<sup>3</sup>  
(<sup>1</sup>Yokohama Nat. Univ., <sup>2</sup>Tokyo Univ. Arts, <sup>3</sup>Yamagata Univ.)

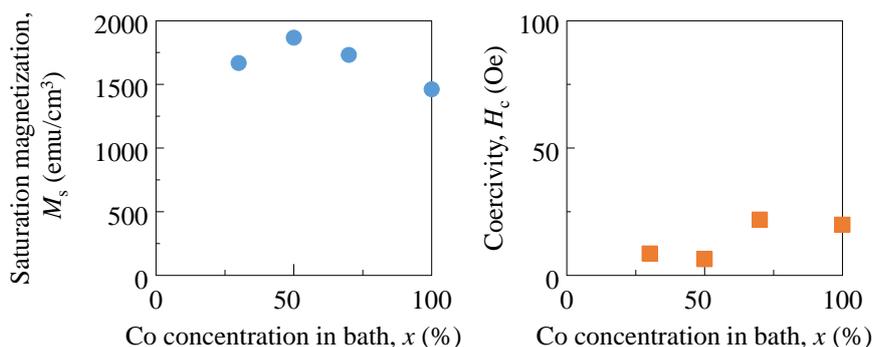
**はじめに** Fe-Co 合金は大きな飽和磁化を示す代表的な軟磁性材料であり, その膜は磁気センサや磁気ヘッドなどのデバイスで用いられている. また, Fe-Co 合金は  $10^{-4}$  オーダーの比較的大きな磁歪を持つことが知られており, 近年, 磁歪材料としても注目されつつある. 応用目的によってはマイクロメートルオーダーの膜厚が要求され, そのような場合, めっき法による膜形成が有効である. これまで, 種々のめっき条件が構造や磁気特性に及ぼす影響が調べられている<sup>1-2)</sup>. 本研究では, 電解めっき法により, 浴組成, 浴温度, 電流密度などの条件を系統的に変化させて, Fe-Co 膜を形成し, 構造, 磁気, 磁歪特性を調べた.

**実験方法** パドルによる攪拌機能を備えた電解めっき装置を用いた. 定電流源を用い, 陽極は Fe 板, 陰極は Cu 基板とすることにより, Cu 基板の上に膜形成を行った. めっき浴の典型的な成分と濃度を Table 1 に示す. クエン酸 ( $C_6H_8O_7 \cdot H_2O$ ) をベースとした浴に, 硫酸鉄(II)七水和物 ( $FeSO_4 \cdot 7H_2O$ ) と硫酸コバルト(II)七水和物 ( $CoSO_4 \cdot 7H_2O$ ) を加え, 比率を変えることにより, 膜組成を変化させた. 構造解析には X 線回折装置, 磁化曲線測定には試料振動型磁力計を用いた. 磁歪特性は片持ち梁状にした試料に面内磁界を印加し, その時のそり量を干渉計で測定することにより評価した.

**Table 1** Bath compositions.

Chemicals	Concentration (mol/L)
$FeSO_4 \cdot 7H_2O$	0.2 (1-x)
$CoSO_4 \cdot 7H_2O$	0.2 x
NaCl	0.85
$C_6H_8O_7 \cdot H_2O$	0.05
$C_7H_4NNaO_3S \cdot 2H_2O$	0.02

**実験結果** Fig. 1 に浴温度を  $50^\circ C$ , 電流密度を  $9.5 \text{ mA/mm}^2$  とし, 浴中の  $FeSO_4 \cdot 7H_2O$  と  $CoSO_4 \cdot 7H_2O$  の濃度比  $x$  を変化させることにより形成した Fe-Co 膜の飽和磁化 ( $M_s$ ) と保磁力 ( $H_c$ ) を示す. Fe と Co の合金の状態最大の  $M_s$  を示しており, バルク材料と同様な傾向を確認できる. また,  $H_c$  は Co 組成の増加に伴い, 増加していることが分かる. 当日は, 磁歪特性やめっき条件を系統的に変化させた場合の膜特性を詳細に議論する.



**Fig. 1** Dependences of Co concentration in bath on saturation magnetization and coercivity of electroplated Fe-Co film.

- 1) T. Yokoshima, K. Imai, T. Hiraiwa and T. Osaka: *IEEE Trans. Magn.*, **40**, 2332 (2004).
- 2) T. Yanai, K. Mieda, J. Kaji, R. Tanaka, A. Yamashita, T. Morimura, M. Nakano, and H. Fukunaga: *AIP Adv.*, **10**, 055001 (2020).