

## 拡張型自由エネルギーモデルに基づく

### 強磁性形状記憶合金の磁氣的・力学的機構の解析

○佐藤 駿丞<sup>1</sup>、仙井 遼平<sup>1</sup>、Alexandre Lira Foggiatto<sup>1</sup>、増澤 賢<sup>1</sup>、三俣 千春<sup>2</sup>、小嗣 真人<sup>1</sup>

<sup>1</sup>東理大先進工、<sup>2</sup>物質・材料研究機構

#### Analysis of magnetic and mechanical mechanisms of ferromagnetic shape memory alloys based on extended free energy model

(M1)Shunsuke Sato<sup>1</sup>, (M2)Ryohei Sen<sup>1</sup>, (P)Alexandre Lira Foggiatto<sup>1</sup>, Ken Masuzawa<sup>1</sup>, Chiharu Mitsumata<sup>2</sup>, Masato Kotsugi<sup>1</sup>  
<sup>1</sup>Tokyo Univ. of Science, <sup>2</sup>NIMS

強磁性形状記憶合金(FSMA)は磁歪効果を利用したエネルギー変換材料であり、IoT 機器のセンサーやアクチュエーターを支える磁性材料として注目されている<sup>[1]</sup>。FSMA の磁歪効果は、応力・磁場によりマルテンサイト組織内で結晶学的再配向が促進される現象として知られている<sup>[1,2]</sup>。その一方で、磁歪効果の理解には、巨視的な歪みと磁化の関係性だけでなく、マルテンサイト双晶と磁区構造の微細組織の関係性が重要となるが、微細組織の解析は極めて定性的で、定量的な解析が十分でない。

そこで本研究では、拡張型自由エネルギーモデルを用いて微視的な磁区構造と巨視的な磁氣的エネルギーの双方向接続を試みた<sup>[3]</sup>。本モデルは情報空間上に自由エネルギーを描画するのが特徴であり、パーシステントホモロジー (PH) やフーリエ変換 (FFT) で抽出した形の特徴量を説明変数として用いる。研究では、特徴量と磁気弾性エネルギーの関係性を解析し、FSMA のメカニズム解析を試みた。

研究では代表的な FSMA の一つである Fe-31.2at%Pd を対象に、Landau-Lifshitz-Gilbert (LLG)方程式と時間依存の Ginzburg-Landau (TDGL)方程式を組み合わせ、磁気弾性エネルギーを共有しながら、磁区構造とマルテンサイト組織を計算した。条件として段階的に一軸応力を印加し、一連のデータセットを得た。機械学習では PH、FFT を用いた特徴量抽出の後、主成分分析で次元削減を行った。

Fig.1 に FSMA の磁区構造と磁気弾性エネルギーの関係を示す。磁区構造の磁壁が磁気弾性エネルギーの高い領域と対応しており、既往の磁歪現象を正しくシミュレートできていることがわかる<sup>[4]</sup>。

また主成分分析による次元削減結果を Fig.2 に示す。各点は双晶境界の数で 3 領域に分類され、双晶境界の数とよく対応することが確認できる。また応力の増加に伴い、PH の PC1 が減少し、FFT の PC1 が増大するように変化している。この結果は、PH で短距離秩序に相当する双晶境界の減少を、FFT で長距離のストライプ状の磁区相の変化を上手く捉えられていることを意味する。さらに磁気弾性エネルギーの変化ともよく対応している。

本研究では、PH、FFT 及び PCA を組み合わせた解析によって、FSMA の磁氣的・力学的機構における磁区構造と磁氣的エネルギーを対応付けたエネルギーモデルによる議論が可能となり、今後は、外部磁場印加や実材料を対象とした解析が期待される。

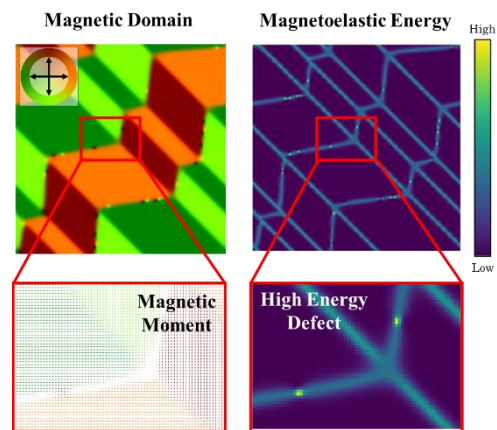


Fig.1 Relationship between Magnetic domain and Magnetoelastic energy

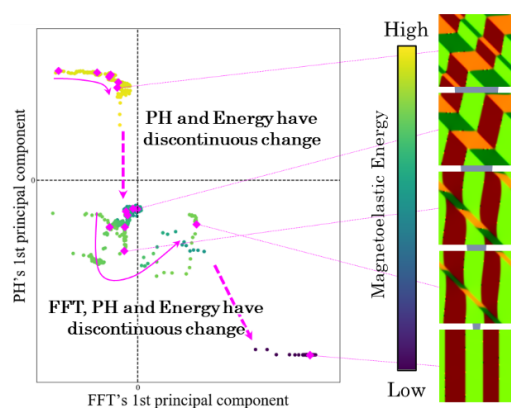


Fig.2 Dimensional reduction results by principal component analysis  
(Each axis of the plot is 1<sup>st</sup> principal components of PH and FFT, colormap is magnetoelastic energy)

- [1] A. Sozinov et al, Appl. Phys. Lett, 102(2013), 021902
- [2] Medha Veligatla et al, Acta Materialia, 193(2020), 221-228
- [3] T.Yamada et al., Vac. Surf. Sci. 62, (2019) 15
- [4] Y. Ge et al, Journal of Applied Physics, 2159(2004), 96

# 拡張型ランダウ自由エネルギーモデルを用いた

## YIG の保磁力メカニズム解析

増澤 賢, 國井創太郎, 佐藤駿丞 Alexandre Lira Foggiatto, 三俣 千春, 小嗣真人  
(東理大基礎工、物質・材料研究機構)

Analysis of the coercivity mechanism of YIG based on the extended Landau free energy model  
Masuzawa Ken, Sotaro Kunii, Syunsuke Sato, Alexandre Lira Foggiatto, Chiharu Mitsumata, Masato Kotsugi  
(Tokyo Univ. of Science, NIMS)

### はじめに

電気自動車の急速な普及を背景に、モーターのエネルギー変換効率を決定付ける保磁力メカニズムの理解が求められている。保磁力は磁化反転におけるエネルギー地形の鞍点と関係づけられるが、従来のランダウ理論は平均場を前提としているため、実材料の保磁力を説明することが困難だった。特に、微視的な磁区構造と巨視的な磁気ヒステリシスの関係性が未構築であることが原因で、保磁力メカニズムは未だ完全に理解されていない。そこで本研究では、磁区構造の不均一性を取り扱いながらも磁化反転現象を説明可能な、「拡張型ランダウ自由エネルギーモデル」の設計を試みた。開発では実材料への応用を踏まえ、磁区構造からの磁気自由エネルギー推定、さらにパーシステントホモロジー (PH) による特徴抽出と主成分分析 (PCA) による大規模データの次元削減を行い<sup>[1]</sup>、エネルギー地形を描画した。

### 実験方法

実験は、異なる膜厚を持つ単結晶 Bi 置換鉄ガーネット (YIG) を対象に、Kerr 顕微鏡を用いて磁区構造の垂直磁場依存性のデータを取得した。各々の磁区構造画像から、交換エネルギーに加え静磁エネルギーの 2 種類を算出した。また PH 解析と PCA を用いて特徴量を 2 次元に削減することで、磁区構造と磁化反転過程と各種エネルギーの対応関係を可視化した。

### 実験結果

Fig.1 は、3 種類の YIG の磁区構造データから得られた交換エネルギー地形である。PC1 と PC2 は互いに直交する基底であり磁区構造の微細組織の特徴を表している。いずれの試料でも飽和、核生成、保磁力の磁化反転に伴い連続的なデータ分布となり、保磁力は主に PC1 の関数として表現される。また静磁エネルギー地形および交換エネルギー地形を詳細解析した結果、保磁力近傍において微細なエネルギー障壁を確認することができた。さらに各エネルギー項は相互に関係しており、磁区形状変化に応じてエネルギーの授受が行われていることが明らかとなった。本手法は保磁力メカニズムの理解に貢献できると期待される。

### 参考文献

1) T. Yamada and M. Kotsugi et al., Vac. Surf. Sci. 62, (2019) 15

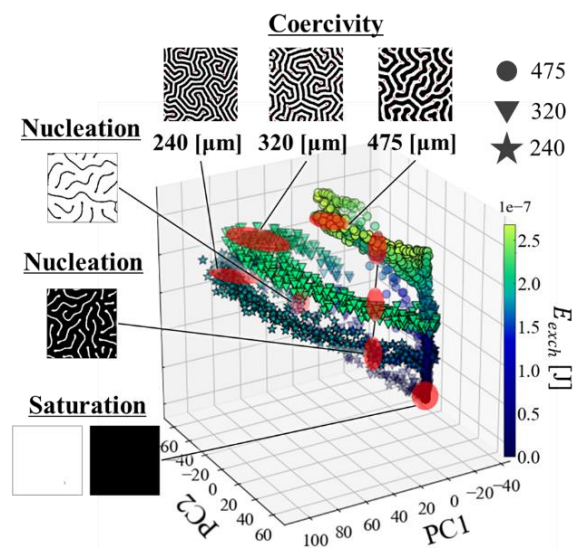


Fig1. Expanded Landau Free Energy model

## 位相的データ解析を用いた

### 磁化反転過程の分類と hidden parameter の抽出

國井創太郎、Alexandre Lira Fogiatto、三俣千春、小嗣真人  
(東理大先進工、物質・材料研究機構)

Classification of magnetization reversal process

and extraction of hidden parameter using persistent homology

Sotaro Kunii, Alexandre Lira Fogiatto, Chiharu Mitsumata, Masato Kotsugi  
(Tokyo Univ. of Science, NIMS)

#### はじめに

持続可能社会の実現に向けて、スピントロニクスを利用した高速高密度デバイスや、電気自動車のモータの高効率化が社会的に求められている。磁化反転現象は、情報読み書き精度や鉄損の抑制において重要であり、ミクロな磁区構造とマクロな磁化反転現象の関係性の理解は、これらの機能の設計上で必要不可欠である。しかし、磁区構造の複雑な微細組織や、急峻な外部磁場応答の定量化が困難なため、現在まで磁化反転メカニズムは完全に解明されていなかった。

そこで本研究では「位相的データ解析(TDA)」に着目し、説明可能な磁化反転解析手法の開発を試みた。TDAは位相幾何学における新規概念「パーシステントホモロジー(PH)」に基づいてミクロ構造を定量化し、得られた記述子を用いてマクロな物性との関係性を機械学習によって構築する、データ解析手法である。開発では複雑な磁区構造変化に対してPHを用いて定量化し、教師なし機械学習を用いて磁化反転過程の分類を試みた。

#### 実験

実験のワークフローを Figure.1 に示す。まず、代表的な軟磁性材料であるパーマロイ(Py)を対象に、LLG 方程式を用いて2種類の磁化反転過程のシミュレーションを行い、磁区画像を出力した。得られた画像は前処理後にPHによる解析を行い、Persistence Diagram(PD)を出力し磁壁形状の特徴抽出を行った。得られたPDに対して教師なし機械学習の一種である主成分分析(PCA)を行い、2次元に次元削減を行った。

#### 実験結果

Figure.2 に、PCA で得られた第一主成分と第二主成分の固有値で表される散布図を示す。本手法より、磁化反転過程が保磁力領域で分離することを可視化できた。さらに、Branch(赤丸)における僅かな磁区構造の差異が、保磁力条件で形成される磁区構造の形状を決定づける分岐であることが判明した。当日はPHから抽出された hidden parameter の物理的な解釈に関する議論を行う。

#### 参考文献

- 1) T. Yamada, *et al.*, Vac. Surf. Sci. **62**, (2019) 153.
- 2) I. Obayashi, *et al.*, J. Appl. Comp. Topo. **1**, 421 (2018).

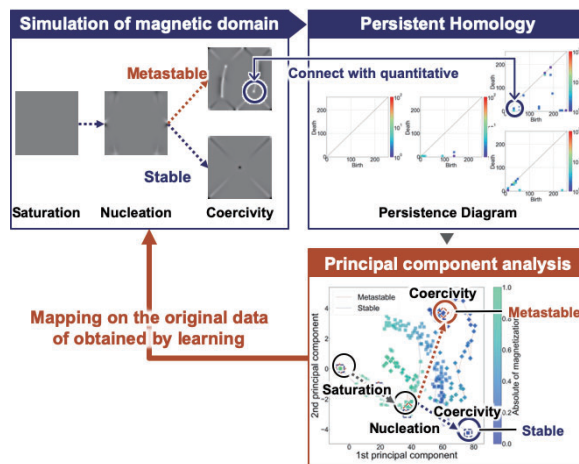


Figure.1 Workflow of this research

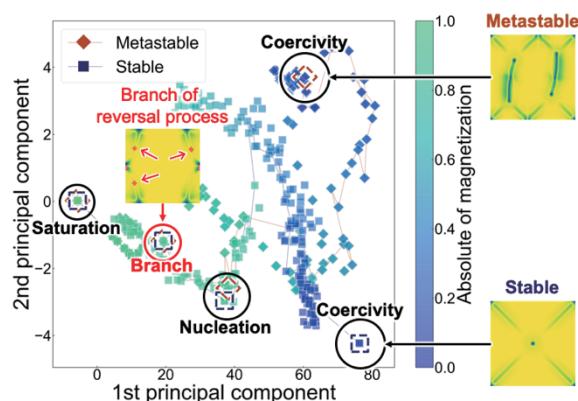


Figure.2 Dimensionally reduction result of domain structure change. Magnetization reversal process branches due to slight difference in domain structure in pre-nucleation.

# 磁気光学測定によるコバルトフェライト薄膜の評価

王 世浩、西川 雅美、柳原 英人\*、石橋 隆幸  
(長岡技科大、\*筑波大)

Characterization of cobalt ferrite thin films by magneto-optical spectroscopy  
Shihao Wang, Masami Nishikawa, \*Hideto Yanagihara, Takayuki Ishibashi  
(Nagaoka Univ. of Tech., \*Tsukuba Univ.)

## 背景

コバルトフェライト薄膜は、基板との格子不整合により生じる正方歪みにより、大きな垂直磁気異方性を示す<sup>1)</sup>。このような歪による磁気異方性増大のメカニズムは、これまで理論的に予想されている<sup>2)</sup>が、実験的に検証する必要がある。そこで今回、MgO(001)基板上に作製された異なる膜厚の2つ Co<sub>0.75</sub>Fe<sub>2.25</sub>O<sub>4</sub> (CFO) 薄膜について、誘電率テンソルの導出を行い、四面体サイトにある Co<sup>2+</sup>(Td)と八面体サイトにある Co<sup>2+</sup>(Oh)に関する光学遷移について評価した。

## 実験方法

CFO 薄膜は、反応性 RF マグネトロンスパッタリング法を用いて、MgO (001)基板上に作製した。CFO 薄膜の結晶構造と磁気特性は、X線回折測定装置 (Rigaku, SmartLab)と SQUID-VSM (Quantum Design, MPMS)を用いて評価した。磁気光学スペクトルの測定は、円偏光変調法を用いたマルチチャンネル磁気光学スペクトロメータ<sup>3)</sup>を使用した。測定波長範囲は 0.59~3.5 eV とした。誘電率テンソルの対角成分は、分光型エリプソメータ (M-2000DI-YK, J.A.Woollam)による測定と、Complete-EASE を用いた解析によって得た。さらに、誘電率テンソルの非対角成分は、得られた対角成分とファラデー回転角スペクトルおよび楕円率スペクトルから求めた。得られたスペクトルをガウス関数でフィッティングを行なった。

## 実験結果と考察

Fig.1 に 1.0~3.5 eV の範囲における CFO 薄膜の誘電率テンソル非対角項の実部  $\epsilon'_{xy}$  スペクトルの実験値とフィッティング曲線を示す。フィッティング曲線では、3つの光学遷移を考えることで、実験値とよく一致した値が得られた。フィッティングに用いたパラメータ及びピークの帰属を、Table.1 にまとめた。1.77 eV と 1.86 eV のピークは結晶場(d-d)遷移 (Co<sup>2+</sup>(Td) <sup>4</sup>A<sub>2</sub>-<sup>4</sup>T<sub>1</sub>(P))、2.02 eV のピークは電荷移動(CT)遷移 (Co<sup>2+</sup>(Oh) - Fe<sup>3+</sup>(Oh)) によるものと考えられる。詳細については当日報告する予定である。

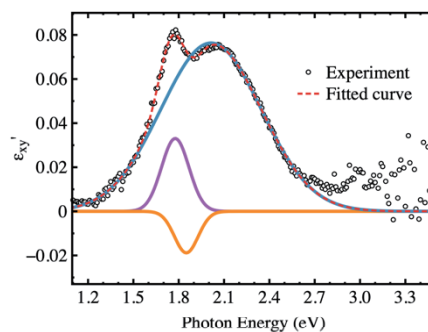


Fig.1  $\epsilon'_{xy}$  of CFO film and fitting curves

Table.1 The fitted results for  $\epsilon'_{xy}$  of CFO film.

	$\omega$ (eV)	$\sigma$ ( $\times 10^{-2}$ eV)	Amp. ( $\times 10^{-2}$ )	Transition assignment
1	1.77	10.70	2.82	Co <sup>2+</sup> (Td) <sup>4</sup> A <sub>2</sub> - <sup>4</sup> T <sub>1</sub> (P)
2	1.86	8.20	1.34	
3	2.02	39.38	7.54	Co <sup>2+</sup> (Oh)-Fe <sup>3+</sup> (Oh)

## 謝辞

本研究の一部は、JST 委託研究「電子論に基づいたフェライト磁石の高磁気異方性化指針の確立」の助成を受けて行われた。また、エリプソメータによる光学測定は、山口大学微細加工プラットフォームにより実施した。

## 参考文献

- 1) T. Niizeki et al., Appl. Phys. Lett., 103(16), 2013, 162407.
- 2) J. Inoue, H. Yanagihara, E. Kita, Mat. Res. Exp., 1(4), 2014, 046106.
- 3) S. Wang et al., Jpn. J. Appl. Phys., 59(SE), 2019, SEEA02.

# イプシロンニアゼロ材料をマトリックスとした ナノグラニューラー薄膜の磁気光学効果

池田 賢司<sup>1</sup>, 刘 天際<sup>2</sup>, 太田 泰友<sup>3</sup>, 岩本 敏<sup>2,4</sup>, 小林 伸聖<sup>1</sup>  
(電磁研<sup>1</sup>, 東大先端研<sup>2</sup>, 慶応大学<sup>3</sup>, 東大生研<sup>4</sup>)

Magneto-optical effect in nanogranular films with epsilon near zero matrix  
Kenji Ikeda<sup>1</sup>, Tianji Liu<sup>2</sup>, Yasutomo Ota<sup>3</sup>, Satoshi Iwamoto<sup>2,4</sup>, Nobukiyo Kobayashi<sup>1</sup>  
(Denjiken<sup>1</sup>, RCAST, Univ. of Tokyo<sup>2</sup>, Keio Univ.<sup>3</sup>, IIS, Univ. of Tokyo<sup>4</sup>)

## はじめに

ナノグラニューラー薄膜は、絶縁体のマトリックス中に磁性金属ナノ粒子を分散させた構造を有しており、多様な物性を示すことで知られている。我々のグループはフッ化物系ナノグラニューラー膜が光透過性を示し<sup>1)</sup>、巨大なファラデー効果を示すことを見出した<sup>2)</sup>。ナノグラニューラー薄膜における大きな磁気光学効果は、マトリックス界面近傍の磁性原子の磁気モーメントがエンハンスされることに起因すると考えられる<sup>2)</sup>。ナノグラニューラー構造では、マトリックスおよびナノ粒子に任意の材料を用いることができるため、マトリックス材料に誘電率が実効的にほぼゼロになるイプシロンニアゼロ (Epsilon-Near-Zero : ENZ) 材料を適用し、誘電率の対角成分の値を実質的にゼロとすることで磁気光学効果が増強される可能性があるかと推測できる。本研究では、赤外通信波長帯に ENZ 特性を有するナノグラニューラー薄膜の作製を目的として、ENZ 材料である ITO をマトリックスとしたナノグラニューラー薄膜の作製を検討した。本報告では、Co-ITO ナノグラニューラー膜の、誘電率とファラデー効果の関係などについて報告する。

## 実験方法

ナノグラニューラー薄膜は、ITO ターゲットに Co チップを配置した複合ターゲットを用い、Ar 雰囲気において作製した。成膜は 400°C の加熱雰囲気で行い、膜厚が約 700 nm の薄膜を作製した。結晶構造は XRD で解析し、磁化曲線は VSM で測定した。ファラデー効果は、分光式ファラデー効果測定装置 (NEOARK, BH-501F-SVI) を用いて評価した。薄膜の光透過率は、分光光度計 (Shimadzu, UV-3150) を用いて測定した。光学定数はエリプソメータ (Horiba, UVISEL-Plus) による解析により求めた。

## 実験結果

Co-ITO ナノグラニューラー薄膜の誘電率の波長依存性を Fig.1 に示す。誘電率の対角成分(実数)が 1300nm 付近でゼロとなっており、赤外通信波長帯に ENZ 特性を有するナノグラニューラー膜が作製されたことが確認できる。Fig.2 に Co-ITO ナノグラニューラー薄膜のファラデー回転角の波長依存性を示す。ENZ 波長近傍において微弱なピークを示す結果が得られたが、ENZ 波長における Faraday 効果の顕著な増強は確認されなかった。今回の結果は、ENZ 波長における誘電損失が大きいこと (Fig.1 参照)、誘電率の非対角成分が小さいこと、の 2 要因が影響していると推測できる。

## 謝辞

本研究は JST-CREST、JPMJCR19T1 および JSPS 科研費 20K03843, 20H02468, 19K21959 の助成を受けたものです。

## Reference

- 1) N. Kobayashi, H. Masumoto, S. Takahashi and S. Maekawa, Sci. Rep., 6, 34227 (2016).
- 2) N. Kobayashi, K. Ikeda, B. Gu, S. Takahashi, H. Masumoto and S. Maekawa, Sci. Rep., 8, 4978 (2018).

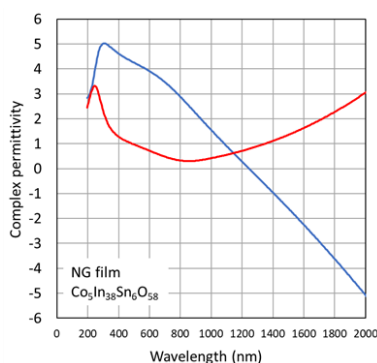


Fig.1 Wavelength dependence of permittivity of Co-ITO films.

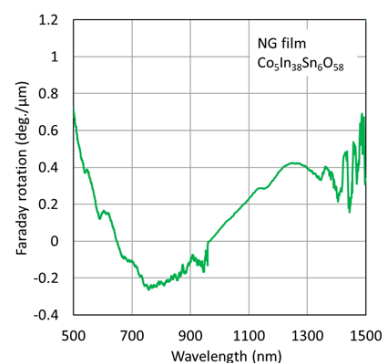


Fig.2 Wavelength dependence of Faraday rotation of Co-ITO films.

# CoPt 垂直磁化膜における表面プラズモン共鳴と極 Kerr 効果

山根治起、梁瀬智、小林政信\*、安川雪子\*  
(秋田県産業技術センター、\*千葉工業大学)

Polar Kerr activities on surface plasmon system consisting of CoPt perpendicular magnetic films

H. Yamane, S. Yanase, M. Kobayashi\*, Y. Yasukawa\*

(Akita Industrial Technology Center, \*Chiba Institute of Technology)

## はじめに

表面プラズモン共鳴による磁気光学効果の増強が注目されている。大きな磁気光学応答は、光情報通信やプラズモンセンサなど光機能デバイスの高性能化に繋がると期待されている。我々は、プラズモン共鳴による磁気光学効果の増強/変調を利用することで、水素ガスセンサなどバイオ化学センサの高性能化について検討を進めている[1], [2]。本研究では、hcp(001)-Co<sub>80</sub>Pt<sub>20</sub>垂直磁化膜において、表面プラズモン共鳴が磁気光学特性(極 Kerr 効果)に与える影響について検討を行った。

## 実験方法

試料の膜構造は、[Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>(5 nm)/CoPt(5-15 nm)/Al-ZnO(30 nm)]/ガラス基板とし、マグネトロンスパッタ法によって作製した。垂直磁気特性の向上を図るため Al-ZnO 下地層、および、Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 表面保護層を形成した。イメージジョンオイルを用いて直角プリズムと光学結合し、p 偏光(半導体レーザ:  $\lambda = 658 \text{ nm}$ )を基板裏面から照射して表面プラズモンを励起した。磁気光学特性は、膜面垂直方向に磁場を印加する極 Kerr 配置にて測定した。分光エリプソメータ(日本セミラボ社)および分光式磁気特性評価装置(ネオアーク社)を用いて各層の誘電率を導出し、マトリックス法による磁気光学シミュレーションを行った。

## 実験結果

Fig. 1 に、CoPt 垂直磁化膜の磁化飽和状態における、Kerr 回転角:  $\theta_K$  および反射光強度:  $I_R$  の CoPt 膜厚依存性を示す。表面プラズモン共鳴による反射率の減少にともなって、 $\theta_K$  の大幅な増強および極性反転が観測される。特に、CoPt 膜厚: 10.6 nm では、上限に近い偏光角( $\theta_K = 88.9^\circ$ )が得られている。本試料について、極 Kerr 効果(偏光角:  $\theta_K$  および楕円率:  $\eta_K$ )の測定光の入射角依存性を Fig. 2 に示す。 $\theta_K$  の極性が反転するプラズモン共鳴角の近傍では、約  $\pm 90^\circ$  の偏光角とともに楕円率はゼロであり、p 偏光から s 偏光への変換が行われる。磁気光学効果に関する本現象については、誘電率の非対角項を考慮した理論計算においても定性的に確認された。さらに本試料では、反射光強度:  $I_R$  が、印加磁場に依存して大きく変化する様子も観測された。Fig. 3 に示すように、反射光強度は、保磁力:  $\pm H_C$  で最小となり、磁化の増加にともなって増加する。DC 消磁状態では、周期長: 約 360 nm の磁区構造が形成されており、反射率の減少は、サブ波長領域での磁気光学的な干渉が原因と推測している。本研究は、科研費(20K05375)の助成を受けて実施した。

## 参考文献

- [1] H. Yamane *et al.*, J. Appl. Phys. **124**, 083901 (2018)  
[2] H. Yamane, Jpn. J. Appl. Phys. **60**, SCCG01 (2021)

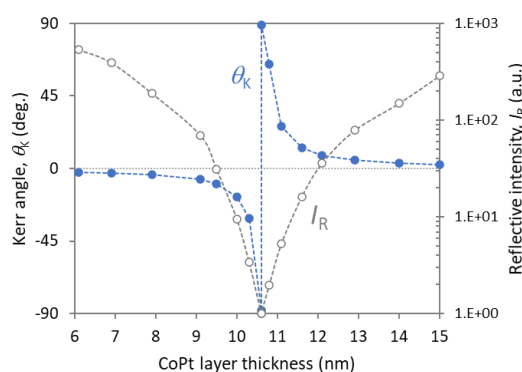


Fig. 1 Dependence of CoPt layer thickness on Kerr rotation angle and reflectivity.

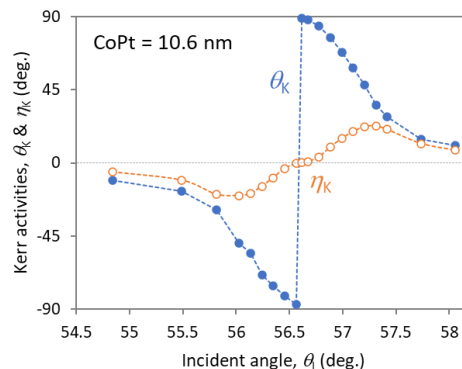


Fig. 2 Influence of SPRs on polar Kerr activities;  $\theta_K$  and  $\eta_K$ .

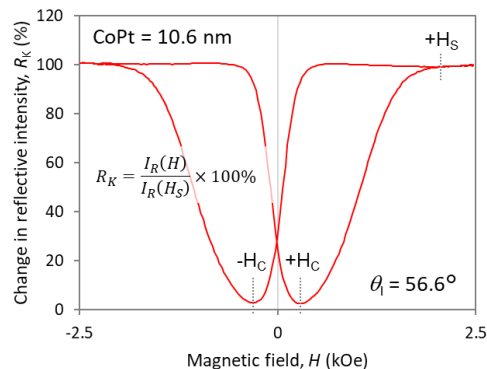


Fig. 3 Change in reflective intensity by magnetic applied field.

# ファラデー効果を用いた Bi:YIG 薄膜の動的磁化過程の測定

吉田真悟、高瀬つぎ子、山口克彦  
(福島大学)

The dynamic magnetization of Bi:YIG thin film by measurement of Faraday effect

S.Yoshida, T.Takase, K.Yamaguchi  
(Fukushima Univ.)

## はじめに

非破壊検査の磁気的手法の一つとして強磁性体の動的磁化過程で観測されるバルクハウゼンノイズによる評価方法がある。このバルクハウゼンノイズは通常ピックアップコイルを用いて測定されるが、測定範囲がピックアップコイルの大きさに依存するために微細構造や微小な欠陥を持つサンプルの評価には適さない。この問題に対して磁気光学効果を用いたバルクハウゼンノイズの測定方法<sup>1)</sup>が提案されているが、従来の測定方法で確認されているバルクハウゼンノイズと結晶粒や欠陥等との関係性についてはまだ報告されていない。そこで、本研究ではファラデー効果を用いて Bi:YIG 薄膜の動的磁化過程を測定し、磁気光学効果を利用したバルクハウゼンノイズの測定法の有用性及びその結晶組織依存性について検討した。

## 実験方法・結果

試料となる Bi:YIG 薄膜には、有機金属分解法を用いて石英ガラス基板上に成膜した組成  $\text{Bi}_{0.5}\text{Y}_{2.5}\text{Fe}_5\text{O}_{12}$ 、厚さ約 400nm の多結晶膜を用いた。

Fig.1 に測定系の構成を示す。この測定系において、波長 408nm の半導体レーザー光源から出た光は偏光子により直線偏光になったのち、磁場中の試料を透過する。その後、偏光子とクロスニコル状態にある検光子を通過し光電子増倍管に入射する。電磁石により磁場を掃引することにより、試料のファラデー回転角が変化し、それが光強度変化として測定される。バルクハウゼンノイズが存在する場合、ファラデー回転角に急激な変化をきたし、光強度にノイズとして現れる可能性がある。

Fig.2 に 1.0Hz の三角波 (図中緑) により磁場を掃引したときの光電子増倍管からの出力信号 (図中赤) を示す。光電子増倍管の出力信号からはノイズを確認することが出来なかったが、出力信号のデータをファラデー回転角に変換したところ、その変化率 (図中青) からファラデー回転角が急激に変化していることが確認された。磁場の極性が切り替わる際にノイズが最大となることから、今回測定されたファラデー回転角の急激な変化はバルクハウゼンノイズである可能性が高いと考えられる。

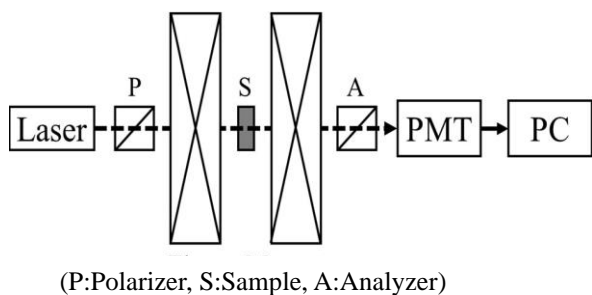


Fig.1 Measurement system

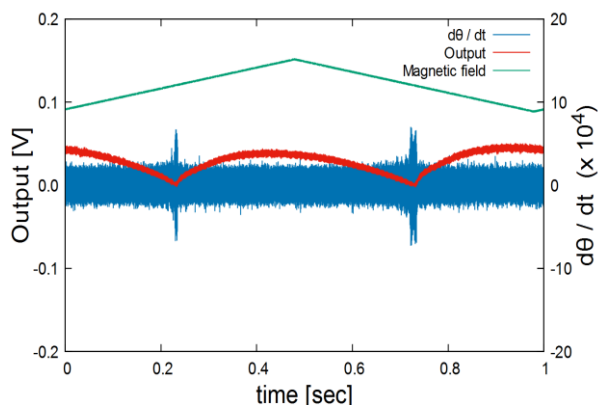


Fig.2 Magnetic field dependence of light power signal

## 参考文献

- 1) E.Pinotti, M.Zani, and E.Puppin: *Rev.Sci.Instrum.*, **11**, 1-14(2005).