

平成 30 年 5 月 21 日現在

機関番号：11301

研究種目：基盤研究(A) (一般)

研究期間：2015～2017

課題番号：15H02255

研究課題名(和文)電気自動車モータ用磁性材料開発のための波長選択型磁界・磁区構造イメージング

研究課題名(英文)Magnetic field and magnetic domain structure imaging with spectroscopic probe for the development of magnetic material of electric car motors

研究代表者

齊藤 伸(Saito, Shin)

東北大学・工学研究科・教授

研究者番号：50344700

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 31,400,000円

研究成果の概要(和文)：環境負荷軽減のため高性能電気自動車用モータの迅速な開発が求められている社会背景を受け、永久磁石用材料や軟磁性箔帯材料の磁区構造や磁界分布を非接触で評価できる波長選択型イメージングシステムを開発した。本研究では、(1) 2台のアナログカメラを用いた偏光差動増幅法による傷つき試料の磁化ダイナミクス像の可視化、(2) 複数軸斜め入射光学系による局所領域の3次元磁化ベクトル解析、(3) 裏面照射型CMOSイメージセンサによる高感度撮像、(4) イメージングデバイスを用いた磁気光学効果の分光一括計測技術をそれぞれ確立し組み合わせた。

研究成果の概要(英文)：For development of high performance electric car motors consisting of permanent magnets and thin magnetic ribbons to reduce environment load, a spectroscopic imaging system with a magneto-optical probe for a magnetic domain structure and a spatial magnetic field distribution was successfully realized. Established and combined techniques were as follows; (1) visualization of the dynamics of magnetic domain structure for samples with scratches by real-time processing of differential-polarization images with two analogue cameras, (2) analysis of the three-dimensional local magnetization components due to imaging with the oblique incidence from the opposite directions, (3) high sensitivity imaging by a backside-illuminated CMOS camera, and (4) detection of magneto-optical spectra by using an imaging device.

研究分野：磁性薄膜工学、磁気光学材料

キーワード：磁気カー効果 磁区観察 磁界検出 磁気光学スペクトル CMOSイメージセンサ

## 1. 研究開始当初の背景

我が国の自動車メーカーは地球環境に優しい輸送手段として電気自動車(EV)およびハイブリッドカー(HEV)に注目し、世界に先駆けて技術開発・製品投入を進めてきた。EVやHEVの基幹部材である駆動用大型モータは軟磁性材料と永久磁石材料との組み合わせから成り立っており、これらの磁性材料の特性向上がモータの高効率・省エネルギー化に貢献している。軟磁性材料としては積層型の電磁鋼板材料が広く用いられる。損失を抑えつつ大振幅のトルクでモータを線形駆動させるためには異常渦電流損の低減が重要であり、鋼板を巻心化した状態での磁気異方性制御・磁区構造制御が鍵となる。一方永久磁石の性能指標である「最大エネルギー積:  $(BH)_{max}$ 」を高めるには、室温で大きな飽和磁化と大きな保磁力とを兼ね備える材料開発が急務である。現在市場に出荷されているNd-Fe-B磁石には、保磁力向上のためDyが添加されている。尖閣列島の領有に関わる政治問題で特にクローズアップされたように、Dyは鉱石中の含有量が少なく大部分が中国から採掘される資源リスクの高い元素である。したがって、低損失軟磁性材料ならびに省・脱希土類元素に基づく磁石材料の創製は、革新的省エネルギー効果が期待され、かつ資源戦略性に優れるため、国策として精力的に行われている材料開発研究である(元素戦略 Pro.: 文科省, 希少金属代替材料開発 Pro.: NEDO)。

モータ用磁性材料の開発に際しては、金属材料の選定ならびに作製プロセスの最適化による微細組織制御技術の確立に加え、局所的な磁気異方性・磁区構造の厳密な制御が極めて重要である。また単に個々の材料特性の向上のみならず、モータとしての最終形態に近い状態での特性向上を計らねばならない。モータの動作原理に目を向けると、固定子-回転子間の漏洩磁界および磁界勾配が特性を左右するため、デバイス内では最適な漏洩磁界空間分布を作り出す必要がある。さらに動特性に注目するとモータの定常回転時での特性だけでなく負荷や励磁条件変化時等の過渡状態でも効率的にデバイスを制御することが今後益々必要となると考えられ、非接触での動的特性評価も重要な課題である。しかしながらこれらを実験できる分析システムは見あたらず開発が加速できていないのが実情である。

反射面内に磁化が配向している磁性材料の磁区構造は、原理的には縦カー効果を利用した偏光顕微鏡にて一括観察可能である。しかしながら研究代表者が関連研究を始めた当初(2001年)、偏光状態を維持しつつ試料を均一に照明する技術・装置設計指針ならびに、局所領域からの反射光に含有される極微量の偏光情報を高感度に検出する技術・装置設計指針が確立していなかったため、市販の偏光顕微鏡に対し研究者自らが改良を施して試行錯誤的に観察を行っているのが実状であった<sup>1,2)</sup>。

これに対し研究代表者は、高倍率化と高明暗比化との両立を図った光学系の設計を行い、高

明暗比縦カー効果顕微鏡を完成させた。特に有効であった点は照明法(ケーラー照明法)の応用である。この方法の本来の特徴の一つは開口絞りにより高次光の量を調整して視野の明るさを制御できることである。研究代表者はこの原理を偏光特性維持の用途に応用展開し、高明暗比磁区像の取得に成功した。すなわち、開口絞りを極端に小口径化することにより、対物レンズの後側焦点位置に結像される開口の像を極小化できる。このことにより、偏光特性を良好に維持できる「対物レンズの辺縁部」のみに白色光を入射させ得る結果、視野内の均一照明と良好な直線偏光性を実現できることを見出した<sup>3)</sup>。同時に研究代表者は、縦カー効果顕微鏡により得られる磁区履歴画像の動画から、CCDカメラ画素の輝度履歴を用いて局所領域の磁化過程を検出する方法も提案した。具体的には画素毎の暗電流および感度のばらつき、入射光学系の不完全性に伴う視野内の光量・偏光ムラ、光学素子上の異物に起因する光量ムラを補正する係数を算出し、補正輝度の合算により指定領域の輝度履歴曲線を得る手法を確立した。更に申請者は、直交する2方向から時分割法にて入射光を落斜させられる光学系を設計し各軸方向の磁気光学効果の方向余弦を検出することにより局所磁化方向を検出可能な縦カー効果顕微鏡を実現した<sup>4)</sup>。これらの顕微鏡拡大光学系の技術を縮小光学系に展開し、mmオーダーの広域視野にわたる磁区および磁化ベクトル方向観察装置も実現し、デバイス形状のままの深い焦点深度の磁区観察も可能とした<sup>5)</sup>。さらに磁性材料からの漏洩磁界の空間分布を可視化する技術をイメージングプレートを用いて磁区観察技術を展開することにより目処をつけた<sup>6)</sup>。磁気光学効果は非接触かつ高速の評価プローブであることに留意しつつ前述した社会背景を鑑みると、既得技術に加えて、磁性材料の局所領域からの漏洩磁界の検出、ならびに組織毎の磁気特性の抽出が可能となれば、モータ材料開発の総合評価システムを提案できることがわかる。

- 1) A. Hubert et al., "Magnetic Domains", Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg (1998).
- 2) 高城 他, 日本応用磁気学会誌, 19, 269 (1995).
- 3) 齊藤伸, 科研費 若手研究(A), No. 17686034
- 4) 齊藤伸, 科研費 基盤研究(B), No. 19360183
- 5) 齊藤伸, 科研費 若手研究(A), No. 21686037
- 6) 齊藤伸, 科研費 基盤研究(A), No. 23246074

## 2. 研究の目的

本研究の目的は、磁界については「磁性材料からの漏洩磁界の分布を可視化する技術」、磁区構造については「局所領域の磁気光学効果を短時間で分光検出する技術」ならびに「選択した波長を用いた磁性材料の磁化ベクトルの可視化技術」を確立し、かつそれらを両立させた分析磁気光学評価システムを3年の研究期間内に構築することにある。

### 3. 研究の方法

本研究では、白色光入射一検出側分光光学系を採用し、変調光を時間分解検出することによって 0.1 度以下の小さな偏光変化スペクトルを一括検出する手法を確立するとともに、選択波長による磁化ベクトルの可視化技術、偏光が乱れる傷つき試料の磁化ベクトルの可視化技術ならびにそのダイナミクス計測技術の確立に取り組み (平成 27 年度: 磁気光学効果の分光検出, 傷つき試料の磁区観察), 局在プラズモンを励起した貴金属ナノドット配列体薄膜を用いて局所空間磁界の「一括イメージング」法の適用を試みる (平成 28 年度: 空間磁界の可視化) とともに、これらを両立させた光学系を有する装置を開発することにより、モータ用磁性材料の多角的・総合的解析ツールを供して、材料開発を支援する (平成 29 年度)。

#### (1) 傷つき試料の磁化ダイナミクス像

カー効果顕微鏡による磁区観察像は試料表面の反射率の違い等による磁区以外の情報が含まれている。磁区以外の情報を除去し磁区像を強調するために観察画像から飽和磁場を印加した画像を減算する飽和磁界差分法を用いることが一般的である。しかしながらこの方法は大きな飽和磁場を持つ試料の観察ができないという問題があった。また、磁場印加や熱膨張等により試料位置のドリフトが発生すると差分画像が空間的な微分画像のようになり画像劣化を引き起こす課題があった。そこでアナログ CCD カメラを 2 台用いて同時に偏光差動検出する方法による磁区像の結像を試みた。図 1 に一括撮像型偏光差動カー顕微鏡の構成図を示す。試料からの反射光は対物レンズと結像レンズによって結像される。ここで結像レンズと CCD カメラとの間にグラントムソン偏光ビームスプリッタを挿入することにより直交した 2 つの偏光成分の像を分離して CCD1 および CCD2 に結像する。これらのアナログビデオ信号を差動増幅器により差動増幅する。この信号を輝度分解能 8bit の Frame Grabber で PC に取り込み PC の画面に表示する。この方法によれば、2 つのカメラ画像に含まれる反射率変化等による共通のバックグラウンド信号

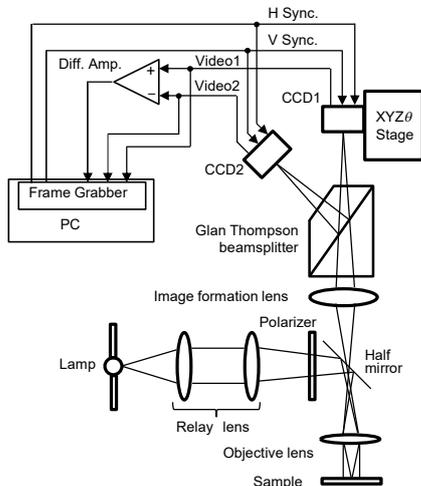


図1. 一括撮像型偏光差動カー顕微鏡の構成図。

は差動増幅により相殺され、カー効果信号は逆相となっているため差動増幅により強調されることとなる。この方式は、飽和磁場印加を必要とせずリアルタイムで磁化像を観察できるため、試料の位置ずれの影響を受けることなく、照明光を高い効率で利用できる観察手法である。

#### (2) 3次元磁化ベクトル像の可視化

カー効果顕微鏡では磁区構造のみならず磁区内の局所的な磁化方向も検出可能である。3次元の磁化方向検出について原理を説明する (図 2)。斜め入射カー効果では縦カー効果と極カー効果が発現するため、磁化が面内と面直の中間方向を向いている場合これらの効果が重畳してしまう。各成分を分離検出するためには工夫が必要となる。例えば、逆方向から斜め入射を行った場合、図 2(a) に示すように面内磁化ではカー回転が反転し面直磁化では反転しない。この性質を利用すれば、順方向/逆方向の斜め入射により得られる 2 枚の差分像をさらに減算および加算処理すれば、磁化の面内成分画像と面直成分画像とを分離できることがわかる。これを面内の直交方向にも拡張すれば 3 次元の磁化検出が可能となる。

#### (3) 高感度観察

cm 寸法の広視野観察では広い視野からの極反射光に含まれる僅かな磁区情報をイメージインテンシファイア (I. I.) を用いて増幅して観察していた。しかしながら I. I. は高価であり、空間分解能および S/N が I. I. の性能に左右されることが難点であった。そこで高感度・大受光面の裏面照射型 (BSI: Backside-illuminated) CMOS センサーを採用した工業用カメラを用いることにより広視野磁区観察装置の高感度化、高分解能化および高 S/N 化を行った。図 3 に (a) 従来の I. I. を用いた光学系と (b) 開発した

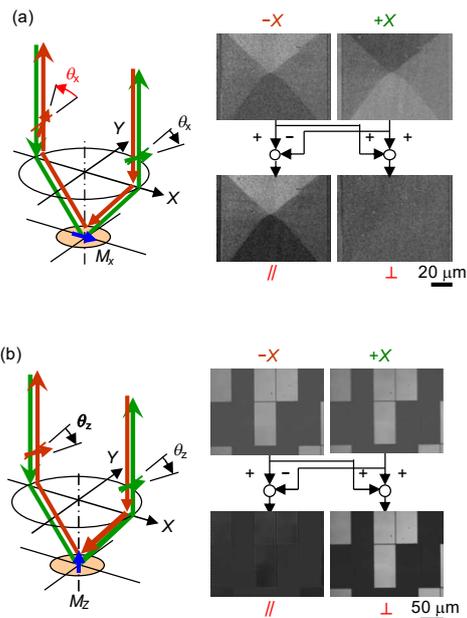


図2. 面内/面直磁化成分の分離結果。(a) 面内磁化膜 (NiFe薄膜), (b) 面直磁化膜 (GdFeCo薄膜) の観察および演算画像。

BSI-CMOS カメラによる光学系を示す。従来の光学系では CCD カメラの撮像面が 1/3 インチと小さいため、対物レンズおよび結像レンズ L2 によって 2/3 倍に縮小された像を I. I. の受光面に結像させ、出力像をリレーレンズ L3 によりさらに 2/3 倍に縮小し撮像していた。一方 (b) の今回開発した光学系では受光面 1/1.2 インチの BSI-CMOS カメラを採用することにより対物レンズおよび結像レンズ L2 によって形成された像を I. I. を用いることなく直接撮像した。このような高感度観察は、波長選択での照明光量減少を補填する技術として、重要である。

#### (4) イメージングデバイスを用いたスペクトル計測

強磁性材料の場合、相毎に磁気光学効果の波長依存性が異なるため、磁区観察を行いながらの磁気光学スペクトルの計測は強磁性材料と組織設計のキャラクタリゼーションの良いツールとなる。従来の磁気光学スペクトルの測定法は「白色光を単色化して試料に入射させ、磁界を掃引して磁気光学効果の履歴曲線を取得する」という操作を波長毎に反復する手法による (図 4(a))。測定時間は波長数に比例するため、高波長分解能化と測定時間の短縮化との両立が必須である。本研究では、研究代表者が過年度の科学研究費補助金で確立している方法、すなわち白色光を試料に入射し検出側で分光した後、CCD カメラを用いて波長情報を空間情報に変換してスペクトルを検出する手法 (図 4(b)) について波長校正を行った。

#### (5) 波長選択型磁界・磁区構造イメージング

前述の偏光顕微鏡光学系と、磁界検出光学

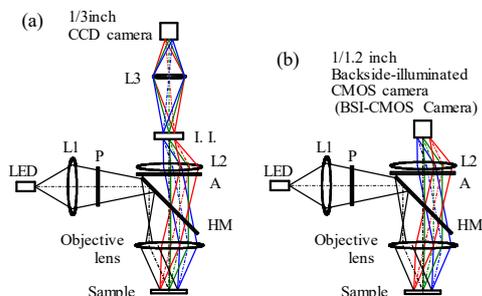


図3. (a) 従来のイメージングインテンシファイアを用いた広視野カー効果磁区観察装置と、(b) 背面照射型 CMOS イメージセンサを用いた磁区観察装置の光学系。

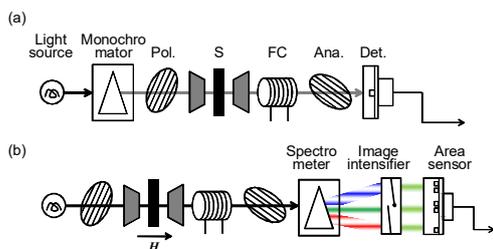


図 4. 磁気光学効果測定系 (ファラデーセル変調法) の模式図。(a) 従来法。単色化した光を試料に入射させている。(b) 提案した方法の一つ。試料には白色光を入射し、検出器の直前に分光器を配置してアレイセンサ (CCD カメラ) でスペクトルを一括取得する。

系、磁気光学スペクトル検出光学系を一つに組み込んだイメージングシステムを構築した。すなわち光源側へ分光器を挿入することで波長選択入射を行い、白色光入射かつ受光側分光でスペクトル計測を実現すると共に、観察の際のイメージングプレートの有無により、磁区ベクトルおよび磁界分布のイメージングが可能となった。

#### 4. 研究成果

##### (1) 傷つき試料の磁化ダイナミクス像

図 5 に  $45 \times 100 \mu\text{m}$  にパターンニングされた GdFeCo 薄膜の垂直磁化メイズ磁区を観察した結果を示す。(a) CCD1 の画像、(b) CCD2 の画像、(c) CCD1 と CCD2 の画像を差動増幅することにより得た偏光差動画像である。比較のために (d) に従来の消光法で観察した画像も示す。図 5(a) および (b) では磁区構造は見られない。これは磁区による輝度変化が Frame Grabber の輝度分解能未満になっていることによる。図 (c)、(d) ではメイズ状の磁区構造が観察されている。電子シャッターによる撮像時間は (c) では 1/2000 秒、(d) では 1/30 秒であるから、図 1 に示したシステムによる撮像は、従来の露光時間の 1/67 秒で撮像できていることがわかる。これらの結果より、開発した偏光差動方式カー効果顕微鏡は傷つき試料や磁化ダイナミクス観察に適していることが確かめられた。

##### (2) 3 次元磁化ベクトル像の可視化

図 6 は方向性電磁鋼板の研磨面を観察した結果である。(a) は演算により求めた面内磁化成

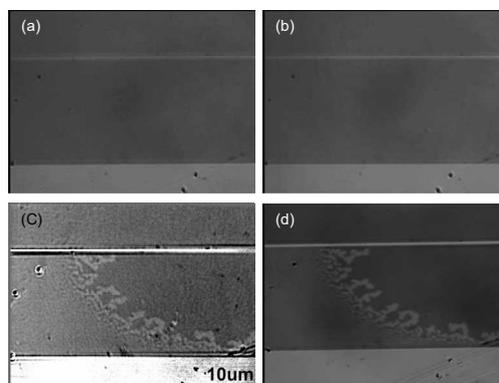


図5.  $45 \times 100 \mu\text{m}$  にパターンニングされた GdFeCo 垂直磁化薄膜の観察像。(a) CCD1 像。(b) CCD2 像。(c) 偏光差動像。(d) 従来の消光法による飽和差動像。

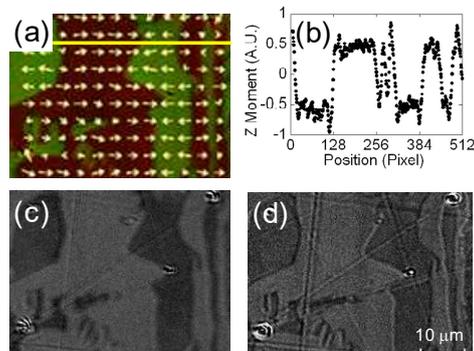


図 6. 方向性電磁鋼板の磁区像。(a) 面内ベクトル像。(b) Z成分ラインプロファイル (黄線)。(c) 斜め入射計測から演算した面直磁区像。(d) 垂直入射磁区像。

分のベクトル画像, (b) は (a) のライン上の面直成分 (Z 成分) をプロットしたグラフである. (c) は演算により求めた面直成分による磁区像であり, 極 Kerr 効果による磁区像 (d) と一致していることがわかる.

### (3) 高感度観察

図 7 に観察用試料として表面状態の影響を排除するため 2.5 インチガラスディスクに成膜した微結晶 FeTaN 薄膜を用いた磁区観察結果を示す. 図 7 (a) は従来の光学系 (図 3 (a)), 図 7 (b) は背面入射型 CMOS イメージセンサを用いて構築した光学系 (図 3 (b)) により撮像した磁区像である. いずれも同一の磁区を観察しており, それぞれ, 100 枚の画像積算によりノイズ低減を図り, 飽和磁界印加像との差分処理によって磁区以外の情報の除去を行っている. 従来装置の視野が  $14 \times 10.5 \text{ mm}$  であるのに対し, 開発装置の視野は  $16.5 \times 10.3 \text{ mm}$  であり面積比で 17% 広視野化されている. また, 空間分解能は約 2 倍, S/N は約 4 倍向上していることが確かめられた.

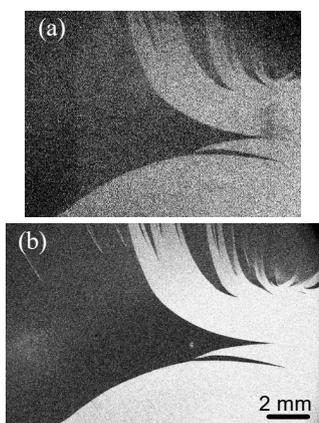


図 7. FeTaN 薄膜の磁区像. (a) 従来のイメージインテンシファイアを用いた広視野像と, (b) 背面照射型 CMOS イメージセンサを用いた広視野像.

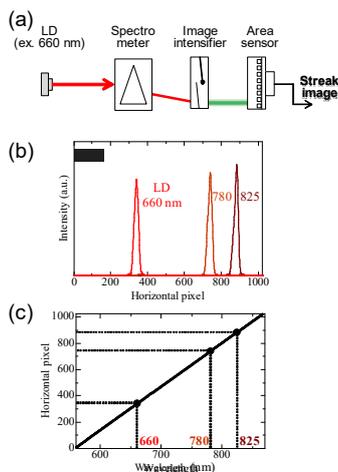


図 8. イメージングデバイスを用いた波長校正の説明図. (a) 校正に用いた光学系. 波長既知の LD 光を分光器に入射した. (b) イメージインテンシファイアの蛍光のアレイセンサでのストリーク像の積分スペクトル. (c) ピークピクセルと波長との相関.

### (4) イメージングデバイスを用いたスペクトル計測

図 8 にイメージングデバイスをスペクトル計測に用いた場合の波長の校正法を示す. 波長既知の半導体レーザーダイオードを用い, 強度を弱めて分光器を通してイメージインテンシファイアに入射する. イメージインテンシファイアから出射した蛍光ストリークがイメージセンサに結像することとなる. レーザダイオードには, 波長 660, 780, 825 nm の 3 種を用い, ストリークの強度積分をしてイメージセンサの横軸ピクセルと波長との対応を調べ, 波長校正線とした.

### (5) 波長選択型磁界・磁区構造イメージング

既得の「磁化ベクトル可視化」技術と, 確立した「空間磁界の可視化」技術を組み合わせ, 高感度化した顕微鏡光学系を確立し, 分光光学系を入射側・出射側に入れ替え挿入できるようにすることで, 波長選択型のイメージングシステムを確立した.

以上, 本科研費にて開発できたシステムは, 磁気デバイスの迅速な開発ツールとして極めて有用である.

## 5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 5 件)

- ① 【解説】 目黒 栄, 齊藤 伸, 「局所磁化方向検出可能なカー効果顕微鏡の開発と空間磁場検出への応用」, 顕微鏡 (日本顕微鏡学会機関誌), 52 巻, 2017 年, 119-123, 査読有 [http://microscopy.or.jp/jsm/wp-content/uploads/publication/kenbikyo/52\\_3/52\\_3j05sm.html](http://microscopy.or.jp/jsm/wp-content/uploads/publication/kenbikyo/52_3/52_3j05sm.html)  
※ 本号表紙には研究成果が採用されている. [http://microscopy.or.jp/jsm/wp-content/uploads/publication/kenbikyo/52\\_3/cover.html](http://microscopy.or.jp/jsm/wp-content/uploads/publication/kenbikyo/52_3/cover.html)
- ② 【解説】 目黒 栄, 齊藤 伸, 「磁気光学効果を用いた磁区観察装置の開発と応力解析への応用」, 非破壊検査 (日本非破壊検査協会機関誌), 66 巻, 2017 年, 22-28, 査読有 [http://www.jsndi.jp/bulletin/J\\_01\\_Jan17.html](http://www.jsndi.jp/bulletin/J_01_Jan17.html)
- ③ Sakae Meguro, Koichi Akahane and Shin Saito, “Photographic observation of magnetic domain structure with three-dimensional local magnetization direction”, Japanese Journal of Applied Physics, Vol. 55, 2016, 07MF04-1 – 07MF04-5, 査読有  
DOI: 10.7567/JJAP.55.07MF04
- ④ Sakae Meguro, Shin Saito, and Koichi Akahane, “Centimeter-order view for magnetic domain imaging with local magnetization direction by longitudinal Kerr effect”, AIP Advances, Vol. 6, 2016, 056504-1 – 056504-5, 査読有  
DOI: 10.1063/1.4948256
- ⑤ 佐藤 春彦, 齊藤 伸, 水野 翔太, 赤羽 浩一, 内田 裕久, 「反強磁性的層間結合を有する Co/Ru 多層膜のマグネトリフラクティブ効果」, 電気学会論文誌 A (基礎・材料・共通部門誌), 136 巻, 2016 年, 174-179, 査読有  
DOI: 10.1541/ieejfms.136.174

[学会発表] (計 14 件)

- ① Shin Saito, Keisuke Ooki, Haruhiko Sato, Shiho Kinno, Koichi Akahane, Hironaga Uchida, “INFLUENCE OF CRISTALLINITY OF FERROMAGNETIC LAYER ON MAGNETO- REFRACTIVE EFFECT FOR  $\text{Co}_{100-x}\text{B}_x$  ( $x = 0, 12, 20$ )/Ru MULTILAYER FILM IN REFLECTION CONFIGURATION”, Magnetism and Optics Research International Symposium 2018, 2018 年 1 月 8 日, アメリカ・ニューヨーク
- ② Yusuke ODAGIRI, Eiji YANAGISAWA, Sakae MEGURO, Shin SAITO, “Compact MOKE microscopes for a combination use with probing apparatus”, The 4th International Symposium on Advanced Magnetic Materials and Applications, 2017 年 12 月 12 日, ベトナム・フーコック
- ③ Shin Saito and Tatsuaki Sasaki, “Au/MnSb/Au magneto-plasmonic nanostructure for the challenge of controlling self-temperature device”, The 4th International Symposium on Advanced Magnetic Materials and Applications, 2017 年 12 月 11 日, ベトナム・フーコック
- ④ Shin Saito, Haruhiko Sato, Keisuke Ooki and Hironaga Uchida, “Near infrared magneto-optical properties for antiferro-magnetically exchange coupled Co/Ru multilayer film”, 62nd Annual Conference on Magnetism and Magnetic Materials, 2017 年 11 月 10 日, アメリカ・ピッツバーグ
- ⑤ 小田切 雄介, 柳沢 栄二, 目黒 栄, 齊藤 伸, 「 $\mu\text{m}$  スポットレーザ光による局所磁気履歴計測が可能な磁区観察顕微鏡」, 第 41 回日本磁気学会学術講演会, 2017 年 9 月 22 日, 九州大学, 福岡
- ⑥ 目黒 栄, 齊藤 伸, 「裏面照射型 CMOS カメラによる広視野磁区観察装置の高性能化」, 第 41 回日本磁気学会学術講演会, 2017 年 9 月 21 日, 九州大学, 福岡
- ⑦ 大木 敬介, 佐藤 春彦, 赤羽 浩一, 内田 裕久, 齊藤 伸, 「透過型配置における Co/Ru 多層膜のマグネトリフラクティブ効果の近赤外波長依存性」, 第 41 回日本磁気学会学術講演会, 2017 年 9 月 19 日, 九州大学, 福岡
- ⑧ 齊藤 伸, 佐藤 春彦, 大木 敬介, 赤羽 浩一, 内田 裕久, 「反射型配置における Co/Ru 多層膜の近赤外磁気カー効果とマグネトリフラクティブ効果」, 第 41 回日本磁気学会学術講演会, 2017 年 9 月 19 日, 九州大学, 福岡
- ⑨ Yusuke ODAGIRI, Eiji YANAGISAWA, Sakae MEGURO and Shin SAITO, “SIMULTANEOUS ACQUISITION OF MAGNETIC DOMAIN STRUCTURE AND LOCAL MAGNETIZATION CHARACTERISTICS DURING FIELD SWEEPING”, The 28th Magnetic Recording Conference (TMRC 2017), 2017 年 8 月 2 日, 筑波国際会議場, つくば

- ⑩ 【シンポジウム講演】 S. Meguro, S. Saito, “Challenge to magnetization dynamics observation by Kerr microscope with real-time processing of differential-polarization images”, 第 40 回日本磁気学会学術講演会, 2016 年 9 月 6 日, 金沢大学, 金沢
- ⑪ S. Meguro, K. Akahane, and S. Saito, “Centimeter-order view for magnetic domain imaging with local magnetization direction by longitudinal Kerr effect”, 13<sup>th</sup> Joint MMM-INTERMAG Conference, 2016 年 1 月 14 日, アメリカ・サンディエゴ
- ⑫ S. Meguro, K. Akahane, and S. Saito, “MAGNETIC DOMAIN OBSERVATION SYSTEM WITH DETERMINATION OF THE THREE-DIMENSIONAL LOCAL MAGNETIZATION DIRECTION”, 15<sup>th</sup> Magnetism and Optics Research International Symposium 2015, 2015 年 11 月 30 日, マレーシア・ペナン
- ⑬ 佐藤 春彦, 齊藤 伸, 水野 翔太, 赤羽 浩一, 内田 裕久, 「RKKY 的層間結合膜の光学特性に現れるスピン依存散乱の効果」, 平成 27 年 電気学会基礎・材料・共通部門大会, 2015 年 9 月 18 日, 金沢大学, 金沢
- ⑭ 佐藤 春彦, 水野 翔太, 赤羽 浩一, 内田 裕久, 齊藤 伸, 「Co/Ru 多層膜におけるマグネトリフラクティブ効果の近赤外域での波長依存性」, 第 39 回日本磁気学会学術講演会, 2015 年 9 月 8 日, 名古屋大学, 名古屋

[その他]

ホームページ等

<http://www.takahashi.ecei.tohoku.ac.jp/>

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

齊藤 伸 (SAITO SHIN)  
東北大学・大学院工学研究科・教授  
研究者番号：50344700

### (2) 研究分担者

なし

### (3) 連携研究者

なし

### (4) 研究協力者

目黒 栄 (MEGURO SAKAE)  
ネオアーク株式会社・部長代理