

機関番号：11301  
 研究種目：若手研究（A）  
 研究期間：2009～2010  
 課題番号：21686037  
 研究課題名（和文） mm オーダーの広域視野磁化ベクトル履歴動画像を撮影可能な磁区観察装置の作製  
 研究課題名（英文） Development of Longitudinal Kerr Imaging System for mm-Order Domain Observation  
 研究代表者  
 齊藤 伸 (SAITO SHIN)  
 東北大学・大学院工学研究科・准教授  
 研究者番号：50344700

## 研究成果の概要（和文）：

我が国で戦略的に進められている永久磁石用材料や、環境負荷軽減のための軟磁性箔帯材料の迅速な開発に供するため、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の一括観察装置を作製した。広視野光学系では、焦点距離75 mm、有効径50 mm の対物レンズと焦点距離125 mmのリレーレンズを用い、ガルバノスキャナにより偏向角約8度、有効開口15 mmを実現した。これらの結果、トランス材を巻き磁芯形状のまま、高周波励磁して時間分解磁化ベクトル像観察を行うことなどに成功した。

## 研究成果の概要（英文）：

For the development of national strategy materials including permanent magnet and for that of thin magnetic ribbons to reduce environment load, a photographic imaging equipment for mm-order magnetic domain observation was successfully realized based on longitudinal Kerr effect. This system has an effective aperture dia. of 15 mm by using large relay lens with focal length of 125 mm (FL), objective lens with effective dia. of 50 mm and FL of 75 mm, and galvano-scanner with deflection angle of 8 deg. This system has enabled the time-resolved domain observation with magnetic moment direction for a power transformer with tape-wound core.

## 交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2009年度	10,700,000	3,210,000	13,910,000
2010年度	10,200,000	3,060,000	13,260,000
年度			
年度			
年度			
総計	20,900,000	6,270,000	27,170,000

## 研究分野：工学

科研費の分科・細目：電気電子工学・計測工学

キーワード：磁区観察、磁気カー効果、磁化ベクトル、時分割法、計測機器

## 1. 研究開始当初の背景

HDDヘッドやMRAMに代表される高密度磁気記録デバイスでは、1990年代後半からの飛躍的な微細加工技術の進展にともなって基幹部品となる磁性材料が数10～サブミクロンにパターン化され小型化されてきた。

これらの磁性材料では試料内各場所での磁気特性がその性能を左右することから、パターン試料内部の磁区構造観察に対する需要が高まっていた。反射面内に磁化が配向している試料の磁区構造は、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いため、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。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 カメラ画素の輝度ヒステリシス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。磁区履歴画像中の指定領域から輝度ヒステリシス曲線を得る場合、領域内の各画素について縦カー効果信号が等しく輝度出力値に反映されていることが保証されなければ、輝度の合算値は意味をなさない。研究代表者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および偏光ムラ、素子に付着したゴミなどに起因する光量ムラ等を補正する係数を算出し、補正した輝度の合算により指定領域の輝度ヒステリシス曲線を得る手法を確立した<sup>3)</sup>。

更に研究代表者は、磁化方向の検出可能な縦カー効果顕微鏡を実現した。ベレークプリズムを用いた磁区観察顕微鏡法では、試料の落斜方向と平行な磁化方向をもつ磁区にはコントラストを付せるものの、直交方向の磁区については磁化方向の情報得られないため、各磁区の磁化方向までは検出できない。そこで直交する 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、各軸方向の磁化の方向余弦を検出することにより局所磁化方向の決定を可能とした<sup>4)</sup>。

- 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

## 2. 研究の目的

強磁性体の磁区構造は、観察試料の磁気異方性エネルギー、静磁エネルギー、交換結合エネルギーなどの種々の要因によって定まる系全体のエネルギーの極小状態により決定される。したがって、試料形状や材料物性に依存して、磁区構造は nm オーダーから cm オーダーまで著しく変化しうる。研究代表者は数 10 から数 100 ミクロンオーダーの磁区観察が可能な顕微鏡を実現したが、さらに大きな磁区構造については現状、試料を移動させて撮影した複数の磁区像を繋ぎ合わせて 1 枚の磁区像を合成せざるを得ず、非常に困難を伴っている。そこで本研究では、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を実現することを目標に掲げる。実現のためには、照明領域の拡張に付随する諸問題の解決、すなわち、視野の辺縁部でも直線偏光を維持し焦点を合わせられる入射光学系や単位面積あたりの照明光量が低くても十分な信号雑音比にて磁気光学信号を検出できる撮像光学系の設計が技術課題となる。2 年間の研究期間内にこれらに対して有効な拡大光学系を見出し、磁区観察装置を構築する。尚、作製される磁区観察装置は、環境負荷軽減のための軟磁性箔帯材料 (トランス材、時計用アンテナ材など) や、戦略的に進められている永久磁石用材料の開発に際し強力な評価装置となるため、実利用することも目的とする。

## 3. 研究の方法

視野内各領域の磁化方向を検出可能な縦カー効果顕微鏡を実現するためには、前述したように、A. 対物レンズの x, y 各軸の辺縁部に入射光を落斜させ、B. 観察に十分な強度の入射光量を確保して、各軸方向の磁化ベクトル成分に比例したコントラストを付すことが必要であった (Fig. 1)。この顕微 (縮小) 光学系の知見を拡大光学系に適用し、mm オーダーの広域視野に拡張する実験計画を下記に示す。

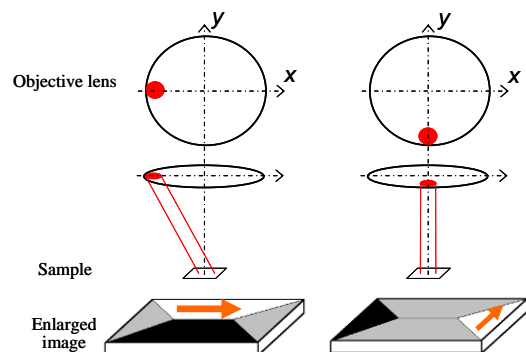


Fig. 1 Optical axis at objective lens and sample.

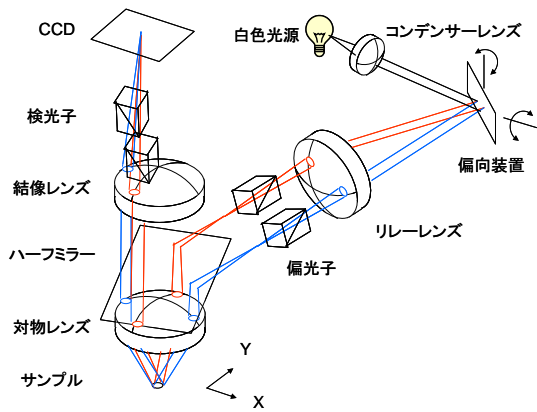


Fig. 2 広域視野磁化ベクトル撮像装置のアイデア

(1) 平成 21 年度

広域視野磁区観察を行うにあたっては、まずは、「十分な光量を得て高明暗比が図れるか」が鍵となる。白色光源を用いた場合、スペックルは生じない利点があるが単位面積あたりの光量の絶対強度が低くなるため、これを単に広域照射に拡張するだけでは、磁区像を高コントラスト化することは難しい。そこで、入射側の光学系の見直しを図り、極力光量ロスを伴う光学素子（開口絞り、視野絞り、フィルタ）を使用せず、有効にコリメートした光束全てを広域視野用対物レンズの偏光特性の良い部位に落斜させる光学系を採用・構築（一例として Fig. 2）する。これに伴い、撮像光学系としても撮像時間の制御、on chip 積算を可能とするイメージインテンシファイアユニットを用い、ケラレがないように検光子を結像レンズと撮像ユニットの間に光路毎に設置する工夫を加える。

(2) 平成 22 年度

広域視野化にともない、視野辺縁部での画像ぼけの対策が必要となるため、焦点深度に余裕の出来る入射光学系に設計改善してゆく。またスポット内の光量ムラが増加することが予想されるため、ダイナミックレンジの大きい CCD カメラを用いる。尚、この研究段階では条件出しが多くなるため、光路切り替え機構を自動化しかつ高速化するため、PC からの制御信号で光路を微動させる落斜位置制御機構（ガルバノスキャナ）を併せて試行する。

4. 研究成果

(1) 光学系

① 対物レンズの検討

一般に縦カー効果を用いる場合、広視野化は、顕微鏡光学系に単純に倍率の低い対物レンズを取り付けるだけでは実現できず、顕微鏡光学系とはコンセプトの異なる光学設計が必要となる。すなわち、A. 低倍率を実現しつつ入射角を大きくとること、ならびに付

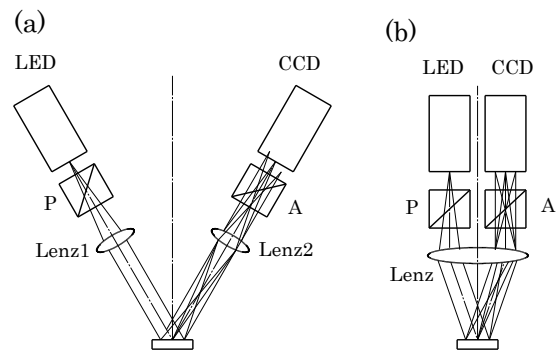


Fig. 3 広域視野縦Kerr効果 一括撮像装置の模式図 (a) 照射/分割分離型対物レンズ方式 (b) 共用型対物レンズ方式

随して、B. 有効径の十分大きな光路設計をすること、が重要な技術課題となる。A.の低倍率かつ高入射角化を具現化する光学系に関して研究代表者は、(a) 分離レンズ方式と、(b) 単一レンズ方式とを検討した (Fig. 3)。(a) 方式では光学素子の配置自由度は大きい、視野全域での焦点合わせや結像倍率の均一化が困難である。一方 (b) 方式は、視野内各所で焦点が合うことと、各所の結像倍率が一定となる点で優れる。研究代表者は2方向落射による磁化方向の検出への展開を前提に (b) 方式の光学系を採用した。本方式の場合対物レンズには、大口径で収差が少ないレンズが必須であるため、今回は焦点距離 80 mm、有効径 40 mm のレンズを設計・製作した。光学系全体は B.に配慮して等倍~1/3 倍の縮小光学系とした。結像レンズには倍率の調整を行うためズームレンズを用い、光源には発光量の安定性が期待できる 1W の高輝度 LED を用いた。偏光子および検光子の選定については、光路の分離距離により異なる。今回は液晶パネル用のフィルム偏光板（消光比:  $10^{-3}$ ）を用いた。尚、検討の結果、本偏光顕微鏡全体の消光比は、偏光子・検光子の消光比よりも対物レンズの入射位置による直線偏光維持性能に著しく強く影響されることを別途確かめた。

② 偏向方式の検討

磁化方向検出可能な Kerr 効果顕微鏡では、テレセントリック照明光学系を採用し、リレーレンズの像側焦点位置に光偏向素子を配置することにより観察方向の切替を実現した。顕微鏡光学系の場合、光偏向素子に要求される偏向角は1度前後であるが、広視野観察を実現するためには長焦点かつ高 NA (=大口径) の対物レンズが必須であり、偏向器に要求される偏向角が増大することになる。今回新たに設計した焦点距離 75 mm、有効径 50 mm の対物レンズと焦点距離 125 mm のリレーレンズを用いた場合、必要な偏向角は約 8 度となる。また、純粋なテレセントリック配置で照明光を偏向させる場合、平行光を偏向



させることになるため、光学系に必要な開口は 25 mm 径と大口径の偏向素子が必要となる。大偏向角かつ大口径を実現できる偏向器としてガルバノスキャナが存在するが、このような 2 軸を別々に偏向させるデバイスの場合、大口径化は 2 軸の偏向点の位置ずれを大きくすることになり、照明光のケラレや入射角の制限が発生するなどの問題が発生する。そこで光学系を工夫し、発散光を偏向する照明光学系を新たに設計し、有効開口 15 mm のガルバノスキャナを偏向素子として採用することによりこれらの問題を最小限に抑えた光学系を構築した。

## (2) 観察結果

Fig. 4 に試作した広視野縦 Kerr 効果ベクトル磁区観察装置による零磁界下でのアモルファスリボン軟磁性材料の磁区像を示す。(a) は X 方向観察磁区像、(b) は Y 方向観察磁区像、(c) は (a)、(b) の画像と X 方向および Y 方向それぞれの観察方向の逆方向の飽和像の輝度を用いて規格化、演算により磁化方向検出を行い矢印で磁化方向を表現したベクトル表示磁区像である。有効観察エリアは  $14 \times 10.5$  mm である。アモルファスリボンでは表面状態が悪いにもかかわらず明瞭に 1.5mm もの幅広の磁区構造を観察できていることがわかる。

Fig. 5 には、2.5 インチガラスディスク上に作製された FeTaN 薄膜の 2 方向落斜時間分解磁化ベクトル像を示す。撮像条件は、50 Hz 励磁、ゲート時間 0.5 msec、印加磁界方向 X 方向、画像積算回数 100 回である。反転磁区

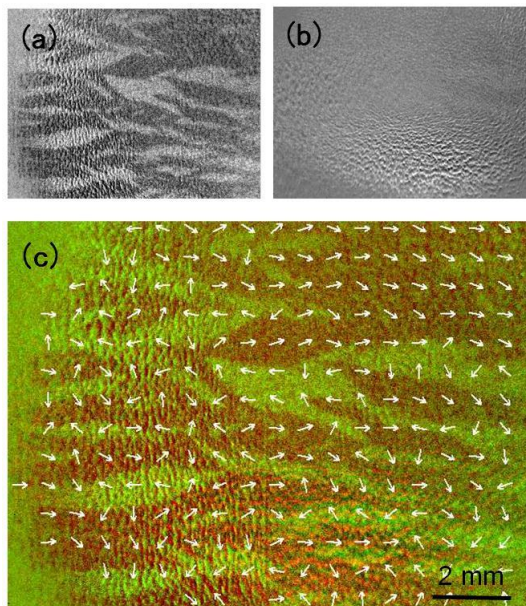


Fig. 4 アモルファスリボンの零磁界下での磁区像。(a) X方向落斜の磁区コントラスト (b) Y方向落斜の磁区コントラスト (c) (a)(b)を合成して得た磁化ベクトル方向を付した磁区像。

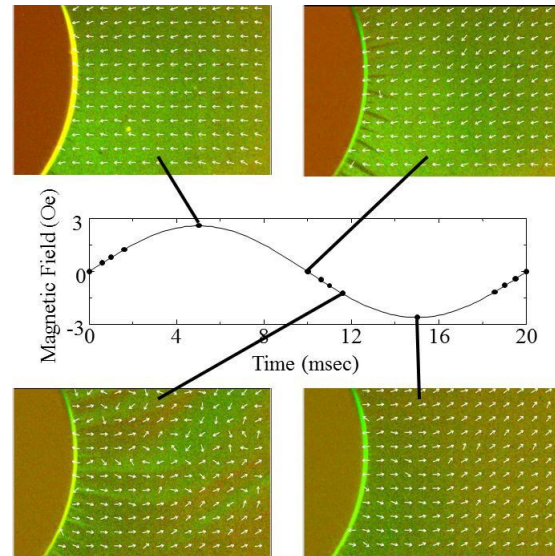


Fig. 5 熱アシスト磁気記録媒体用FeTaN軟磁性裏打層の2方向落斜時間分解磁化ベクトル像。50 Hz励磁、ゲート時間 0.5 msec、印加磁界方向X方向、画像積算回数 100回 の条件にて取得。左側の円弧は 2.5インチガラスディスクの内周端である。

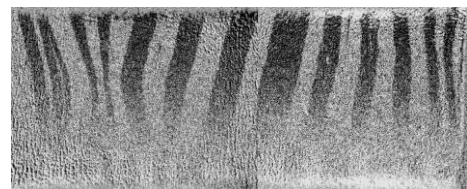
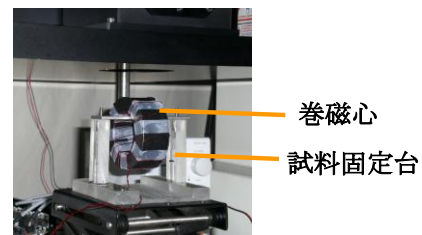


Fig. 6 巻心形状でのテストコア材の広域磁区像。下側の1/3は、観察面が湾曲しているため、結像できない部位。観察した巻心の最外層の外径は、 $67 \text{ mm}^{\phi}$ 、幅25.4 mmである。

の芽はディスク内周部から、静磁エネルギーを下げるように均等幅で現れ、磁壁移動型の磁化反転が進むことがみてとれる。

Fig. 6 下図に、トランス用テストコア材を巻き磁心形状のまま励磁して観察した広域磁区像を示す。上図には実際に実験を行った際の試料のセッティングの状況を示している。対物レンズの焦点距離が長いいため、全ての光学系を、写真上部の黒色の光学シャーシ上にレイアウトできており、試料空間を広くとることができる。本装置が、鋼鉄を積層巻心化した場合の異常渦電流損失の低減の鍵となる、磁気異方性制御・磁区構造制御といったデバイス開発に有力な評

価ツールとなることは明白である。トランス材を一例として示したが、電波時計のアンテナ材やモータ用鉄心材等にも同様の観察が適用できる。

以上のように、本研究にて開発した広域磁区観察装置により、実際の磁気デバイスの実用周波数での動的磁化過程を、デバイス形状のまま、直接可視化することが可能となった。広域視野の磁区観察を行うことにより、デバイスの性能向上を妨げる磁化過程の不均質性が、強磁性試料の形状・傷・膜組織・加工ムラ等の如何なる要因によってもたらされているのか、瞬時に判断することができるため、本装置は、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と言える。

## 5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計1件)

1. 目黒栄、齊藤伸、赤羽浩一、高橋研、「局所磁化方向の検出が可能な mm オーダーの広視野磁区観察装置の開発」、電子情報通信学会技術報告、MR2010-15 巻、2010-7号、2010年、17-24、査読無

[学会発表] (計3件)

1. 目黒栄、齊藤伸、赤羽浩一、高橋研、「局所磁化方向の検出が可能な mm オーダーの広視野磁区観察装置の開発」、第34回日本磁気学会学術講演会、2010年9月7日、つくば国際会議場、つくば。
2. 目黒栄、齊藤伸、赤羽浩一、高橋研、「局所磁化方向の検出が可能な mm オーダーの広視野磁区観察装置の開発」、電子情報通信学会磁気記録・情報ストレージ研究会、映像情報メディア学会 マルチメディアストレージ研究会共催研究会、2010年7月8日、茨城大学工学部、日立。
3. 目黒栄、齊藤伸、小林昌博、赤羽浩一、高橋研、「mm オーダーの磁区観察可能な広視野縦 Kerr 効果磁区観察装置の開発」、第33回日本磁気学会学術講演会、2009年9月14日、長崎大学文教キャンパス、長崎。

[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・准教授

研究者番号：50344700

### (2) 研究分担者

なし

(3) 連携研究者  
なし