

# 磁気光学カー顕微鏡による磁気渦の計測

Measurement of the magnetic vortex using magneto-optical Kerr microscope



立崎 武弘 (Takehiro TACHIZAKI, Dr. Eng.)

東海大学 工学部 講師

(Lecturer, School of Engineering, Tokai University)

レーザー学会 応用物理学会

受賞：The 25th Symposium on Ultrasonic Electronics : Young Scientist Award (2005年度) 2011 R&D100 Picometer-Resolution Quantitative Metrology Atomic Force Microscope (2011年度) 2014 R&D100 Plasmon-Excitation Optical Scanning Probe Microscope (Optical SPM) (2014年度)

研究専門分野：光計測 走査プローブ顕微鏡 光物性物理学

あらまし レーザーを光源とする磁気光学カー顕微鏡を構築し、磁性体薄膜円盤における磁気渦を非破壊・非接触・非侵襲で可視化した。外部から磁場を印加することで変位する磁気渦中心位置の磁場強度依存性を調べ、磁気渦がその中心を円盤中心に一致させようとする復元力の渦中心位置依存性から、磁気渦のポテンシャルを導いた。ポテンシャルの位置依存性や非対称性から磁気渦と磁性体薄膜円盤に関する光学的には見えない磁性情報が得られるようになると期待される。

## 1. 研究の背景と目的

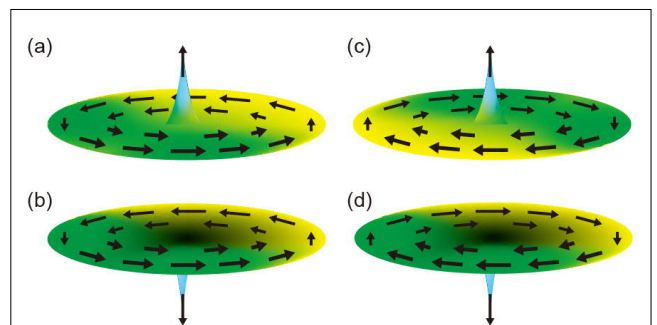
数多の電子機器がネットワークに接続され、各種センサーの情報が取得した膨大な情報が自動的に収集・蓄積される社会が到来してきた。このような情報化社会においては、得られる情報が極めて膨大であるため、現状では多くの情報が利用されることなく消失しているといわれている。しかしながら、有用な情報をみすみす失うことは非常に勿体無いので、いかに情報を記録し処理するかの研究開発がますます重要となっている。情報記録デバイスには、記録速度の向上と記録密度の向上がますます望まれている。

記録媒体には、なんらエネルギーを必要とせずに長期間情報を保持できる、いわゆる不揮発性の記録媒体がある。現在でも、主要な記録装置はハードディスク

ドライブ (HDD) であり、多くの記録媒体がある昨今でも、磁性体を用いた不揮発性記録の重要性は変わらない。これは、情報を記録する媒体が磁性体であることに要因がある。磁性体は、その磁化の向きを変えるために比較的大きなエネルギーを必要とするため、室温でも長期間安定して情報を記録できるという利点がある。このように、磁性体は情報を長期保存するには好適な媒体であるが、代表的な記録デバイスである HDD は面記録密度が上限に達しつつある。

物質は、その内部のエネルギーを低く保とうとする傾向が一般的に認められる。磁性体においては、その磁気的エネルギーを最小に保つため、磁性体の内部に磁気構造を形成することが知られている。例えば、四角形の強磁性体薄膜では還流磁区構造と呼ばれる構造をとって、磁性体の内部で切れ目なく磁化を配列して磁性体の外にできるだけ磁場を発生しないようにしている[1]。このような内部磁気構造をとる場合、磁化の向きが揃っている各領域を磁区などと呼ぶ。この磁区がどのように形成され、外乱に対してどのように応答・運動するのかを知ることは、磁性体をデバイスとして利用する際に重要となる。

磁区構造の特殊な例として、磁気渦と呼ばれる構造がある。これは、薄膜円形磁性体などで見られる構造で、磁化が連続的にその方向を変化させて、一つの円盤面内で一周する磁区構造と考えてよい (図 1)。



(a)は円盤内で反時計回りに磁化が配列し、渦中心で面から垂直上方向に磁化が発生するパターンの模式図である。これを「反時計回り+上」と表すならば、磁気渦における磁化の配列は、(b)の「反時計回り+下」と(c)の「時計回り+上」、(d)の「時計回り+下」の合計 4 パターン存在する。円盤面内から垂直方向に磁化が配列する領域は、直径数十ナノメートルである。

図 1 磁気渦における磁化の配列パターンの模式

# 磁気光学カー顕微鏡による磁気渦の計測

## Measurement of the magnetic vortex using magneto-optical Kerr microscope

磁気渦の特徴の一つに、その中心に円盤面から垂直方向に磁化が発生することがある[2]。この磁気渦中心の磁化の向きは、磁気渦の渦の巻き方とは独立している。そのため、磁気渦の渦の巻き方と磁気渦中心の磁化の向きを考慮すると、図 1 に模式図を示すように、1つの磁気渦で4つの異なる状態を取りうる事になる。これら4つの状態は、各々が磁気的エネルギーを小さくしている状態であり、外部から何もしなければその状態を維持するので、不揮発性メモリとして機能すると思われる。特に、磁気渦中心は、その面外に磁化が向く領域が数十ナノメートルと小さいため[2]、高密度記録が実現できると期待されている。

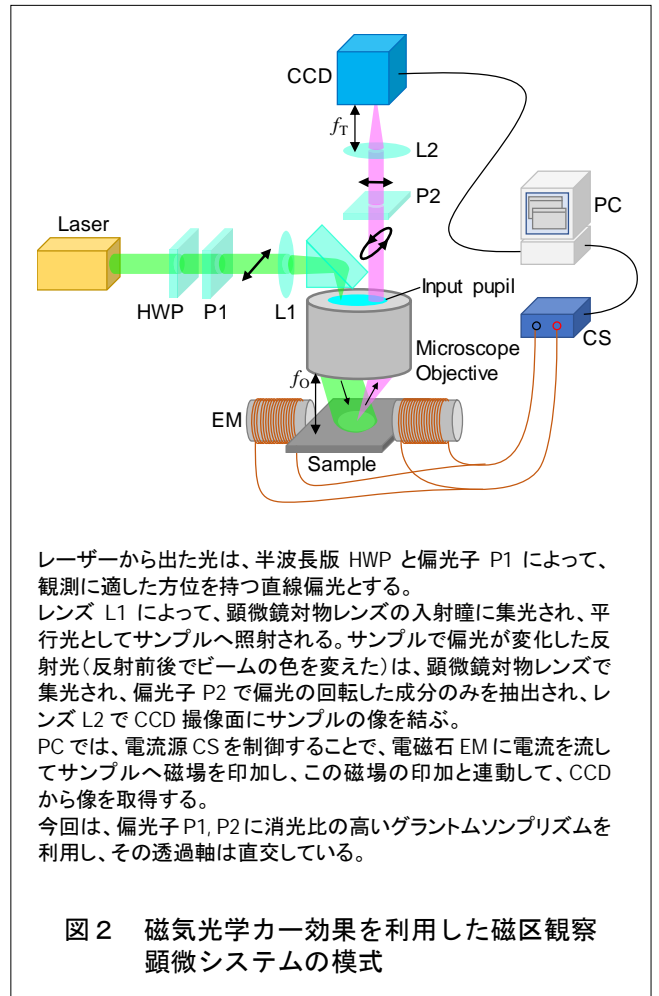
本研究では、高密度記録デバイスとしての利用が期待されている磁気渦構造における磁気渦中心の挙動、特に、外場磁場に対する運動性について理解することを目的とし、実験を行った。

### 2. 実験方法

磁気渦中心の運動は、磁気光学カー効果を利用した光学顕微鏡で観測した[3]。磁気光学カー効果とは、磁場内の物質または磁性体によって直線偏光が反射されるとき、反射光の偏光面が回転する現象である[4]。入射光の偏光方向と反射面の磁化の向きにより、反射光の偏光の向きが変わるため、検出光のとある偏光成分のみを観察していると、反射光の強度が変化するように見える。この磁気光学カー効果を利用することで、磁性体表面における磁化の分布を反射光の強度変化の分布として可視化できる。この手法の利点は、電極などを利用しないために、非破壊・非接触・非侵襲で磁化の分布そのものを直接確認できる明瞭性があること、装置が一つのテーブルに収まる程度のコンパクトさで実現できるなどである。これまでも、磁区の可視化や磁区の運動の計測など多くの実験的研究で利活用され、磁性体の研究を支えてきた重要な計測技術である。本研究では、このような磁気光学カー効果顕微鏡を利用して、磁性体薄膜中の磁気渦を可視化した。

観察は、波長 532 nm のレーザーを光源として用い、サンプルからの反射光を CCD カメラで撮影して実現した (図 2)。レーザー光は、顕微鏡対物レンズでサン

プルへ照射され、同じ対物レンズで反射光を計測するようになっている。反射光は、別のレンズ L2 によって集光され、CCD 撮像面にサンプルの像を結像する。顕微鏡対物レンズ (焦点距離  $f_0=4$  mm, NA=0.70) と結像レンズ L2 の焦点距離  $f_r=200$  から、観察結果の光学分解能が  $\sim 0.8$   $\mu\text{m}$ 、光学倍率 50 倍の観察を行った。



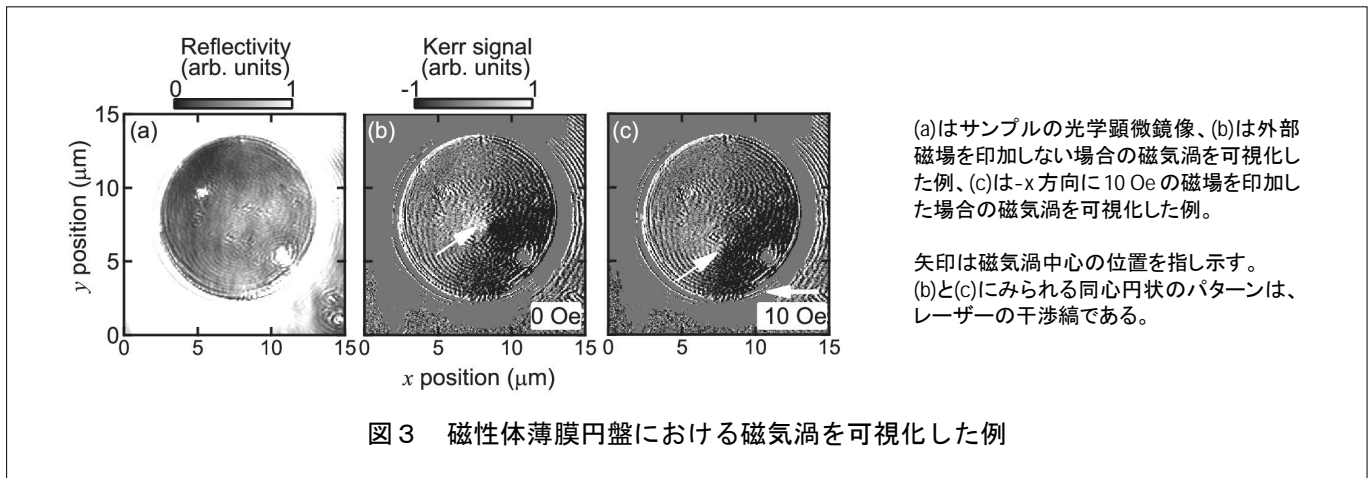
レーザーから出た光は、半波長版 HWP と偏光子 P1 によって、観測に適した方位を持つ直線偏光とする。レンズ L1 によって、顕微鏡対物レンズの入射瞳に集光され、平行光としてサンプルへ照射される。サンプルで偏光が変化した反射光(反射前後でビームの色を変えた)は、顕微鏡対物レンズで集光され、偏光子 P2 で偏光の回転した成分のみを抽出され、レンズ L2 で CCD 撮像面にサンプルの像を結ぶ。PC では、電流源 CS を制御することで、電磁石 EM に電流を流してサンプルへ磁場を印加し、この磁場の印加と連動して、CCD から像を取得する。今回は、偏光子 P1, P2 に消光比の高いグラントムソプリズムを利用し、その透過軸は直交している。

図 2 磁気光学カー効果を利用した磁区観察顕微システムの様式

CCD センサーのセルサイズ 3.75  $\mu\text{m}$  を考慮すると、フルハイビジョンの 27 インチディスプレイに表示したときに、総合倍率 4000 倍の観察となる (図 3 (a))。今回は、レーザー光を顕微鏡対物レンズの入射瞳上の光軸外 (中心ではない端部と考えてよい) へレンズ L1 で集光することによって、斜め入射のケーラー照明としてサンプルへ入射させた[5]。入射光の偏光は、グラントムソプリズム P1 によって直線偏光とし、反射光は、入射光と直行する方向の偏光成分のみをグラ

# 磁気光学カー顕微鏡による磁気渦の計測

Measurement of the magnetic vortex using magneto-optical Kerr microscope



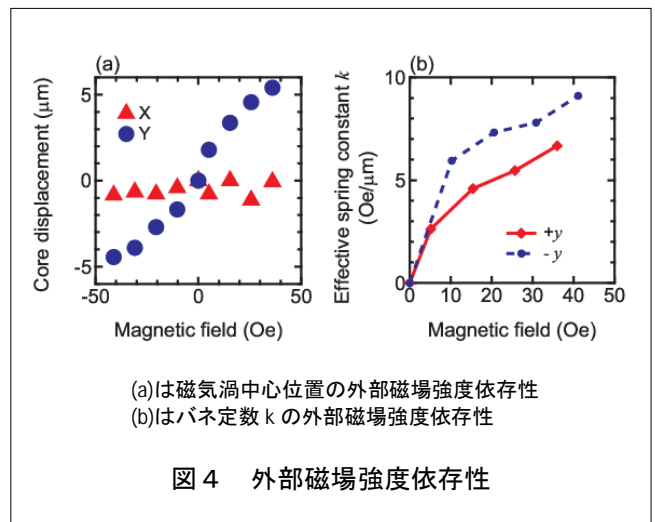
トムソンプリズム P2 によって抽出した。こうすることによって、磁性体表面での磁気光学カー効果によって変化した偏光成分のみを選択的に観測できる。磁性体サンプルとして、厚さ 50 nm、直径 10  $\mu\text{m}$  の強磁性体パーマロイ薄膜円盤を用いた。このサンプルは、電子線リソグラフィとスパッタリング法による薄膜形成技術により作製した。

### 3. 実験結果

図 3 に、作製したサンプルを磁気光学カー顕微鏡で観察した例を示す。図 3(a)は、偏光子 P2 を用いずに磁性体の反射率を観察した例である。円盤内で反射率の差が見られるものの、全体として秩序あるパターンは確認されない。一方、偏光子 P2 を用いて反射光において磁気光学カー効果によって回転した偏光成分だけを抽出するようにすると、図 3(b)に示すような光学像が得られる。磁化と偏光回転角（カー効果信号）の関係を別途校正しておく必要があるが、校正結果を利用すると、図 3(b)示したイメージは、「矢印で指し示す位置に中心がある反時計回りに磁化が分布している磁気渦」であることがわかる。このように、比較的簡便な磁気光学カー顕微鏡を用いることで、磁気渦を観察できた。この状況で、外部より磁場を印加することによって磁気渦を駆動できる。今回は、直流的な磁場を印加したため、磁気渦の中心が中心から変位する。図 3(c)に、磁場を印加して磁気渦を可視化した例を示す。磁場を加えると、その方向と強さに応じて、磁気渦の中心が磁性体円盤の中心から偏る事が確認できる。

この例が示すように、磁気光学カー効果を利用した顕微計測は、テーブルトップで一般的な環境で利用でき、簡便に磁気渦を観察するためのツールとして活用できる。

実験では、図 3(c)に例示したような磁気渦の磁場に対する応答性を、磁場を x 方向に強度を +40 Oe から -40 Oe まで（つまり -x 方向に 80 Oe）変化させつつ測定した。得られた各観察結果から抽出した磁気渦中心の変位をプロットすると、図 4(a)に示すようになる。



磁場の印加方向である x 方向の位置は、磁場を印加しても中心から  $\pm 1 \mu\text{m}$  以内で左右にふれているだけであり、磁場に対して有意に応答したとはいえない。僅かに変化しているのは、サンプルの不均一性によるものと考えられる。一方、磁場と直行する y 方向の磁気渦中心の位置は、磁場に対して有意に変化している。これは、



# 磁気光学力一顕微鏡による磁気渦の計測

## Measurement of the magnetic vortex using magneto-optical Kerr microscope

磁場と同じ方向を向く磁化が依り安定であるから、磁場と同じ方向を向く磁化の領域が広がる、ないし反対方向を向く磁化の領域が狭くなるという、エネルギーを最小にしようという原理によって理解できる。

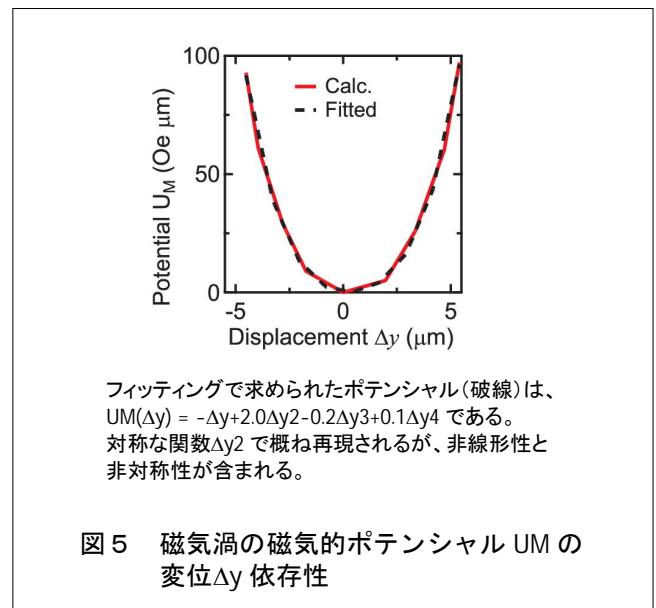
### 4. 力学的モデルによる磁気渦変位の理解

外部から磁場を印加すると、磁気渦中心が円盤の中心から変位するが、磁場を切ると、磁気渦中心は円盤中央に戻る。このことから、磁気渦は円盤の中心が最も安定した状態であり、磁場がなければ、円盤中心と磁気渦の中心を一致させようという力、一種の復元力が働いていると考えられる。この性質は、一端が固定されたバネの挙動と似ている。ここでは、このような一端が固定されたバネのモデルで磁気渦の磁場に対する挙動を考える。バネは、その復元力すなわちバネ定数  $k$  によって特徴付けられる。バネ定数は、印加した外力に対する変位で定義されるので、磁気渦中心の円盤中央からの距離を磁場の強さで割ることで求まる (図 4(b))。

物理系は、そのエネルギーを最小にするような状態をとることを最初に述べた。この観点から磁気渦の変位について考える。エネルギー最小が最も安定な状態であることとおなじで、エネルギーが高い状態は力学的に不安定であると考えられ、その磁気構造や磁気渦部分の磁化の向きなどが変化しやすい・壊れやすいと考えられる。変位  $\Delta x$  とバネ定数  $k$  の積が復元力に相当するから、その積分で磁気渦中心の変位によって系に蓄えられたエネルギーが得られる。この考えに基づいて磁場を印加した際の磁気渦の持つエネルギー (ポテンシャルとよぶ) を計算すると、図 5 に示すようになる。この磁気的ポテンシャル  $U_M$  は、変位  $\Delta y$  (渦中心と円盤中心の位置の差) が大きくなると単調に増加し、渦中心が円盤の端に近づくにつれて急激に大きくなる。このポテンシャルは、4 次までの多項式で良く再現でき、磁気渦が磁場に対して非線形バネの様な応答をする事がわかった。

ポテンシャル  $U_M$  を再現する関数には、1 次と 3 次の奇数事項も含まれていた。これは、ポテンシャルひいてはバネ定数  $k$  が、 $x$  方向で非対称であることを意味している。実験系は、上下左右対称であり、サン

ル形状も上下左右の区別は無い。しかしながら、実験結果は下方向 ( $-y$  方向) へは変位しやすく、上方向 ( $+y$  方向) へはより変位し難いことを教えてくれている。図 5 に示したポテンシャルは、とある一つの磁気渦の運動から導かれたものであるため、サンプル形状以外の個性、例えば欠陥があることで磁化が変化し難いなどの理由によって、非対称性が生じていると考えられる。筆者らは、詳細な理論を持ち合わせていないため、これ以上踏み込んで議論ができないが、磁性体円盤中の見えない磁気的性質や構造に関する情報が、見えるようになったとも考えられる。実験からのアプローチとしては、サンプル数を増やすことにより、磁気渦や磁性体円盤の有する一般的性質と個性を切り分けることができるようになると考えられる。渦のバネ定数を指標として、磁性体円盤の磁性の均一性を評価することができるようになるかもしれない。



### 5. まとめ

本稿では、磁気光学カー効果を利用した表面磁化の顕微計測について、計測例を挙げて説明した。そして、外部から印加した磁場に対する磁性体薄膜円盤における磁気渦の応答から、磁場に対する磁気渦の力学的な特徴を垣間見た。単純なモデルを用いた考察により、端に近づくにつれてポテンシャルが非線形的に増加すること、すなわち復元力が急激に大きくなる事が分った。

## 磁気光学力一顕微鏡による磁気渦の計測

Measurement of the magnetic vortex using magneto-optical Kerr microscope

磁気渦中心が磁性体円盤の端に近づくことによって、磁氣的にエネルギーが高い状態となり、不安定化していると考えられる。このような巨視的な運動の非線形性を考慮することで、磁気渦の理解や制御が少しでも進むと期待される。

### 参考文献

- [1] C. Kittel, "Physical theory of ferromagnetic domains," *Rev. Mod. Phys.* **21**, 541 (1949).
- [2] T. Shinjo, T. Okuno, R. Hassdorf, K. Shigeto, and T. Ono, "Magnetic Vortex Core Observation in Circular Dots of Permalloy," *Science* **289**, 930 (2000).
- [3] J. McCord, "Progress in magnetic domain observation by advanced magneto-optical microscopy," *J. Phys. D: Appl. Phys.* **48**, 333001 (2015).
- [4] J. Kerr, "On rotation of the plane of polarization by reflection from the pole of a magnet," *Phil. Mag.* **3**, 321 (1877).
- [5] A. Köhler, "Ein neues Beleuchtungsverfahren für mikrophotographische Zwecke," *Z. Wiss. Mikrosk. Mikroskopisc. Tech.* **10**, 433 (1893).

この研究は、平成25年度SCAT研究助成の対象として採用され、平成26～27年度に実施されたものです。