

光電子顕微鏡を用いて観察したメゾスコピック磁性体における vortex カイラリティ制御

谷内敏之¹, 尾嶋正治¹, 秋永広幸², 小野寛太³

¹ 東京大学大学院工学系研究科応用化学専攻, ² 産総研ナノテクノロジー研究部門, ³ 物質構造科学研究所

Vortex chirality control in mesoscopic disk magnets observed by PEEM

Toshiyuki TANIUCHI¹, Masaharu OSHIMA¹, Hiroyuki AKINAGA² and Kanta ONO³

¹Department of Applied Chemistry, The University of Tokyo,

²National Institute of Advanced Industrial Science and Technology (AIST), ³Institute of Materials Structure Science

1. はじめに

磁気記録デバイスは超高密度化にともない微小化が進み、1ビットあたりの記録領域はナノメートルサイズに達している。メゾスコピック磁性体では大きな表面効果のためバルクとは異なった磁区構造を示すため、その磁気物性が形状や大きさに強く依存する。その顕著な例として、メゾスコピック磁性ディスクに見られる磁化分布の渦 (vortex) 構造が挙げられる [1,2]。

Vortex 構造の状態を示すものとして、その時計回り・反時計回りを示すカイラリティ、および vortex 中心での上向き・下向きの吹き出し磁化を示すポラリゼーションの2つが存在する [3,4]。我々は下記に述べる磁気ランダムアクセスメモリー (MRAM) 素子開発の観点から vortex のカイラリティに注目し、カイラリティの直接観察とそれに基づくカイラリティの制御を目的として研究を行ってきた。カイラリティは内部で磁束が閉じているため、磁気力顕微鏡などにより容易に観察できるポラリゼーションとは異なり、直接観察が実験的に非常に困難である。我々はカイラリティの直接観察手法として放射光光電子顕微鏡 (PEEM) の設計・製作を行ってきた。PEEM [5] と、放射光の持つ円 (直線) 偏光性・エネルギー可変性といった特長を利用し、元素選択的に磁気モーメントを直接イメージすることが可能であるため、これまで他の手法では不可能であったカイラリティの直接観察ができる。

2. 放射光光電子顕微鏡の開発と微小磁性体の磁区観察

我々は高エネルギー加速器研究機構 PF において放射光 PEEM システムの立ち上げを行った [6]。開発した PEEM はビームラインでの使用を目的として小型で移動可能なように設計した。測定は PF-AR BL-NE1B アンジュレータビームラインにシステムを接続し行った (Fig. 1)。空間分解能評価を行った結果、本装置の性能として 60 nm 以下という空間分解能が得られていることが明らかになった。また微細加工したメゾスコピック磁性ディスクの磁気イメージングを行った。磁気イメージングは X線磁気円二色性 (XMCD) [7] を利用し左右円偏光でそれぞれ得られた PEEM 像の差分により得る [8-10]。測定に用いた試料はリソグラフィ・リフトオフ法を用いて作製した。物質は後述シミュレーションと同じ、磁気異方性を持たない軟磁性体

であるパーマロイ ($\text{Ni}_{80}\text{Fe}_{20}$) である。Fig. 2 にその磁気像を示す。像の中のより白い部分は放射光に対して平行の磁化成分が大きく、逆により黒い部分は反平行の磁化成分が大きいことを意味する。その結果、この素子が vortex を持っていることが分かり、そのカイラリティを直接観察することに成功した。

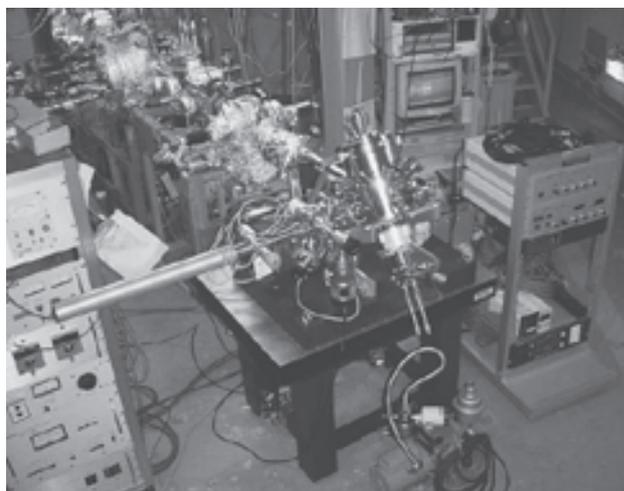


Figure 1
The SR-PEEM system connected to the undulator beamline PF-AR BL-NE1B.

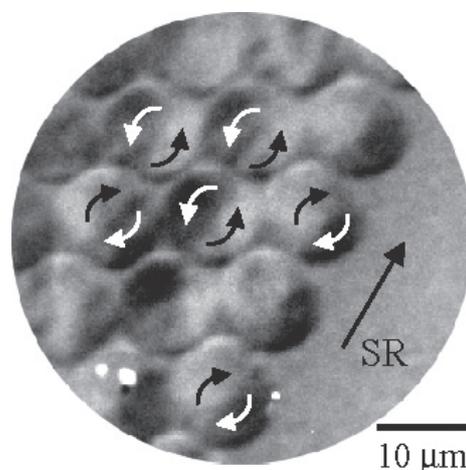


Figure 2
A magnetic image of permalloy micron-sized dot observed by XMCD-PEEM. The photon energy of light source is set at the Ni L3-edge. The black and white parts in the dot indicate the magnetization rotation parallel and antiparallel to the SR light, respectively.

メゾスコピック磁性体は次世代メモリーとして有望な MRAM としての応用が期待されている。MRAM は不揮発性であるため、消費電力の点で従来の DRAM よりも極めて優れている。さらにその書き込み速度や耐久性は DRAM と同等かそれ以上、他の不揮発性メモリーと比較しても極めて高い性能を持っている。しかしながら、現在開発が進められている MRAM は磁化の方向で情報を記録するため、超高密度化へはビット間の磁気的な干渉が大きな壁となっている。現在、この問題を解決する方法として、vortex のカイラリティを利用した記録方法が注目されている。これは、磁束が閉じた vortex を用いることでビット間の干渉を大幅に低減することができるためである。しかしながら応用へ向けては、カイラリティの制御という非常に困難な課題が残されている。この課題は様々試みられているが [11], 制御の際の磁区構造が熱的に不安定であるため、制御に成功したという確かな報告はいまだされていない。

我々は、カイラリティの制御とその MRAM への応用を目的として、1) マイクロ磁気シミュレーションによる物質設計、2) ナノ加工による試料作製、3) 放射光 PEEM を用いたカイラリティ制御の直接観察を試みた。

3. Vortex 構造の磁化反転過程

我々はマイクロ磁気シミュレーション [12] を用いて vortex 構造の磁化反転過程について詳細に調べた [13]。これまで vortex 構造をもったディスクの磁化反転過程については単一 vortex の生成・移動・消滅により説明されてきた [3,14,15]。しかしながら、磁化反転過程では vortex が同時に 2 つ存在することが実験的に示されており、単一 vortex だけのモデルでは説明が十分ではない。加えて、メゾスコピック磁性体の磁化反転過程や磁化反転ダイナミクスを詳細に調べる必要がある。そこで磁化反転過程における vortex のダイナミクスを解明することが、カイラリティ制御の実現への糸口となると考え、マイクロ磁気シミュレーションを行った。

Fig. 3 と Fig. 4 にゼロ磁場で vortex 構造を持ったディスクに対して、右方向に磁場を印加したときの、2 種類の磁化曲線と磁化分布を示す。ディスクのサイズは直径が 1 μm 、厚さが 50 nm である。

ゼロ磁場では、vortex が 1 つだけ存在する (single-vortex 状態)。この状態から右方向に磁場を印加していくと、右方向磁化が増加する方向に vortex が移動する。Fig. 3 では

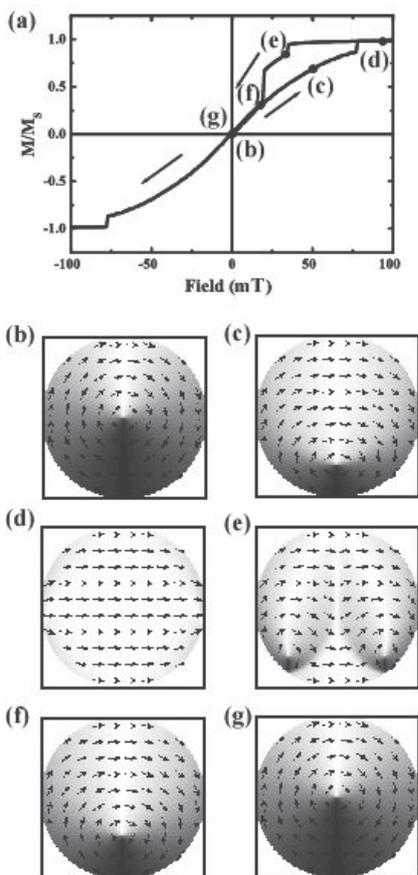


Figure 3
 (a) Initial magnetization and magnetization reversal curve and magnetic structures of the C-shaped mode in a disk with $D = 1000$ nm. (b) A single-vortex state under zero field; (c) ambulation of a vortex as an applied field; (d) a single-domain state under saturation field; (e) nucleation of two vortices with the same chirality in the magnetization reversal process; (f) combination of two vortices; (g) a single-vortex state in the magnetization reversal process.

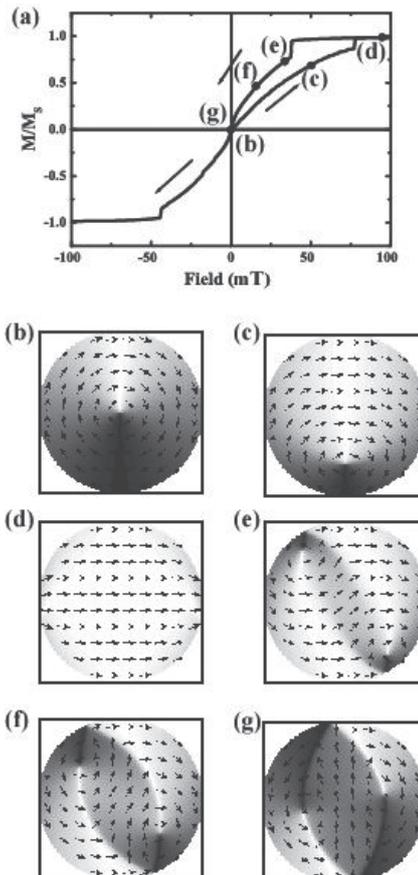


Figure 4
 (a) Initial magnetization and magnetization reversal curve and magnetic structures of the S-shaped mode in a disk with $D = 1000$ nm. (b) A single-vortex state under zero field; (c) ambulation of a vortex as an applied field; (d) a single-domain state under saturation field; (e) nucleation of two vortices with different chirality in the magnetization reversal process; (f) a double-vortex state in the magnetization reversal process; (g) a double-vortex state under zero field.

下方向に vortex が移動していることが分かる。そして、一定以上の磁場を印加すると vortex はディスク外側へと消滅し、ディスクの磁化がほぼ飽和し単磁区構造になった。初期磁化過程は前述のとおり、Guslienko らによって単一 vortex が運動するモデル (rigid-vortex model) で解析的に説明された [7]。

一方、磁場を高磁場から減少させていく磁化反転過程の場合には2つの vortex が同時に存在するような磁化反転モードが2種類あり、互いに異なる磁化曲線を持つことが分かった (Figs. 3 and 4)。これら2種類の磁化反転モードは、生成する2つの vortex のカイラリティが等しいモード (C-shaped mode) と異なるモード (S-shaped mode) に分類できることが分かった。

前者では生成する2つの vortex のカイラリティが等しく、Fig. 3 の場合はディスクの中央よりも下の位置から時計回りの vortex が左右から同時に2つ生成した。さらに磁場を小さくしていくと2つの vortex が互いに近づく方向に (中心に) 移動し、途中で結合した。1つになった vortex は磁場とともに移動し続け、ゼロ磁場では中心に戻る。さらに磁場を負に (左方向に) 印加した場合は初期磁化過程と同様な振る舞いを示した。

一方、もう1つの磁化反転過程では、異なるカイラリティを持った vortex が同時に2つ生成することが分かった (Fig. 4)。先ほどと同様に外部磁場によって磁化が右方向に飽和した状態から磁場を減少させていった場合、ディスクの真横よりも左上の部分と右下の部分からそれぞれ反時計回りと時計回りの vortex が同時に生成した。さらに磁場が減少するとこれらは移動し、ゼロ磁場になっても2つの vortex は共存することが分かった (double-vortex 状態)。このまま磁場を負の方向に印加すると2つは最後まで結合することなくディスクの外へ消滅した。

前者ではカイラリティが等しいので2つの vortex は結合することができ単一 vortex 状態へと変化するが、後者においてはカイラリティが異なるため2つの vortex は結合することができず、2つの vortex がゼロ磁場においても存在することを明らかにした。2つの vortex の同時生成メカニズムと2種類の磁化反転モードについて、全エネルギーの立場から考察を試みることで、磁化反転では必ず2つの vortex が生成すると結論づけた。さらに2種類の磁化反転モードが現れる起源を解明するために、ディスク内の磁化分布の変化について詳細に検討し、磁化分布の対称性がモードを決定していることを明らかにした。

Fig. 5 上段および中段は右方向磁場によって磁化が飽和したときのディスク内の磁化分布を詳細に示した模式図である。ディスクのエッジの上端付近および下端付近の磁化は反磁界エネルギーを減少させるようにエッジに沿っている。このような磁化になると図のように左右両端での磁化分布は集まるような分布になり、磁束密度が大きくなる。しかしながらこれは反磁界エネルギーが不利な構造であるため、磁場とは垂直な方向へ磁化分布が傾き (チルトし)、エネルギーを減少させる構造になることが明らかになっ

た。チルトには図に示すような4種類の可能性が考えられる。このような状態から外部磁場を小さくしていくとこの磁化の傾きがより大きくなることで全体の磁化が減少するが、さらに磁場を小さくすると、あるところで vortex が生成する。このとき生成する vortex の位置とカイラリティはそのチルトの方向によって決定されることが分かった。

4. カイラリティ制御

理論計算により得られた知見をもとに、カイラリティ制御を行う方法について説明する。例えば右方向磁場を印加してから磁場を小さくしたときに時計回りの vortex を得て、左方向磁場では反時計回りの vortex を得ようとするとき、vortex は両方の場合とも下側から vortex を生成させればよいことになる。つまりカイラリティ制御を達成するには磁場印加方向によらず、常に同じ位置から vortex が生成すればよいということになる。そこで円形ディスクにタグを付加した形状で磁化反転モードの制御や vortex 生成の制御が可能になると予測し (Fig. 5 下段)、磁場の印加方向でカイラリティ制御が可能な素子を新たに開発した。カイラリティ制御が可能であることを実証するため、リソグラフィによって試料を作製し、これまで開発を進めてきた放射光 PEEM を用いて磁区構造の観察を行った。試料のパターンを Fig. 6 (a) に示す。4つのタグ付きの円形ディスクが並列し、両端のディスクには下側にタグが、中央2つのディスクには上側にタグが付いた構造である。

試料には真空系に搬送する前に外部磁場を印加してから、残留磁化状態での磁気イメージングを行った。実験は全て室温で行った。結果を Fig. 6 (b) に示す。図から分かるように、タグが同じ方向に付いているものは互いに等しいカイラリティを持っており、タグが異なる方向に付いているものは互いに異なるカイラリティを持っている。この結果によって4つの素子のカイラリティがすべて制御され

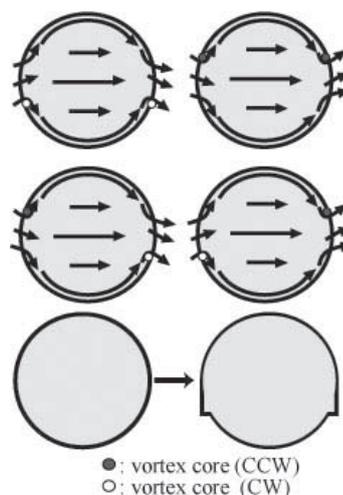


Figure 5 Schematic images of saturated magnetization distributions in circular disks and designed device image. The possible configurations of magnetization distribution are shown in the upper four figures. The points are vortex nucleation sites. The designed disk geometry with lower symmetry is shown in the lower right figures.

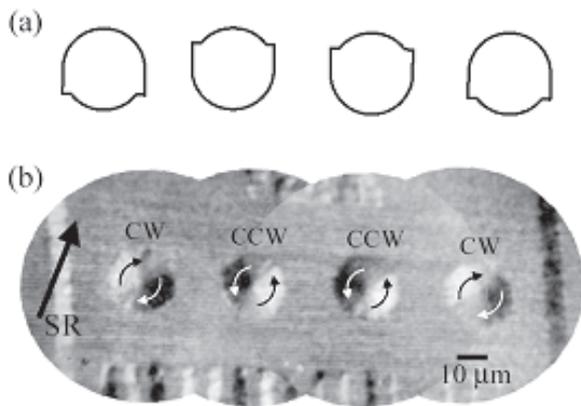


Figure 6
(a) Geometry of designed permalloy devices for chirality control. (b) magnetic image of the devices. The photon energy of light source is set at the Ni $L_{2,3}$ -edge. The black and white arrows in the devices indicate the magnetization distribution parallel and antiparallel to the SR light, respectively.

ていることが分かる。以上よりこの手法によるカイラリティ制御が実現可能であることが実証された。制御の熱的安定性は、磁化分布の対称性および反磁界エネルギーと密接な関係を持つ。考案した素子についての安定化エネルギーのシミュレーションを行ったところ、本素子による制御が熱的に十分安定であることが確認された。さらに、この素子では付加したタグの大きさを変えることによって熱的安定性の変調が可能であることも分かった。現在、本研究のカイラリティ制御の成果をもとに MRAM 技術に関連する特許を出願している。

5. 今後の展開

今日の超高密度磁気記録媒体の開発現場では高密度化と同時に情報処理の高速化が急速に進んでおり、それを可能とするために磁性体の高速磁化ダイナミクスに関する研究が注目を集めている。しかしながら、微小な磁性体の磁化過程のダイナミクスについては、その重要性にも関わらず研究例は少ない。例えば、メゾスコピック磁性体の高速磁化反転過程での vortex の動的過程をサブナノ秒スケールで時分割して実験的に検証することは、磁性の基礎的な理解を与えるだけでなく、デバイス開発の点からも極めて重要である。しかしながら、これには高い空間分解能と時間分解能を併せもった観察手法が必須である。そこで時間分解 PEEM という手法を開発し、その手法をメゾスコピック磁性体に適用することでその高速磁化過程や磁化反転ダイナミクスの解明を目指す。放射光 PEEM による時分割磁区構造観察は新しい観察手法であり、実験の報告例はわずかである [16,17]。今後、放射光パルスと磁場パルスとを完全に同期させることにより、サブナノ秒スケールの時間分解能を持つ時間分解 PEEM システムの開発を行う。またこれまで培ってきた知見に基づき、メゾスコピック磁性体における vortex 生成・移動・消滅の高速ダイナミクスを観察しそれを支配するパラメータを明らかにする。

引用文献

- [1] A. Aharoni, J. Appl. Phys. **68**, 2892 (1990).
- [2] T. Shinjo, T. Okuno, R. Hassdorf, K. Shigeto, T. Ono, Science **289**, 930 (2000).
- [3] K. Yu. Guslienko, V. Novosad, Y. Otani, H. Shima, K. Fukamichi, Appl. Phys. Lett. **78**, 3848 (2001).
- [4] J. Shibata, K. Shigeto, Y. Otani, Phys. Rev. B **67**, 224404 (2003).
- [5] E. Bauer, Rep. Prog. Phys. **57**, 895 (1994).
- [6] T. Taniuchi, M. Oshima, H. Akinaga, K. Ono, J. Electron Spectr. and Rel. Phen. **144-147**, 741 (2005).
- [7] C. T. Chen et al., Phys. Rev. Lett. **43**, 6785 (1991).
- [8] J. Stöhr, Y. Wu, B. D. Hermsmeier, M. G. Samant, G. R. Harp, S. Koranda, D. Dunham, B. P. Tonner, Science **259**, 658 (1993).
- [9] A. Scholl, J. Stöhr, J. Lüning, J. W. Seo, J. Fompeyrine, H. Siegart, J. -P. Locquet, F. Nolting, S. Anders, E. E. Fullerton, M. R. Scheinfein, H. A. Padmore, Science **287**, 1014 (2000).
- [10] C. M. Schneider, K. Holldack, M. Kinzler, M. Grunze, H. P. Oepen, F. Schäfers, H. Petersen, K. Meinel, J. Kirschner, Appl. Phys. Lett. **63**, 2432 (1993).
- [11] M. Schneider, H. Hoffmann, J. Zweck, Appl. Phys. Lett. **79**, 3113 (2001).
- [12] <http://math.nist.gov/oommf/>
- [13] T. Taniuchi, M. Oshima, H. Akinaga, K. Ono, J. Appl. Phys. **97**, 10J904 (2005).
- [14] K. Yu. Guslienko, V. Novosad, Y. Otani, H. Shima, and K. Fukamichi, Phys. Rev. B **65**, 024414 (2001).
- [15] V. Novosad, M. Grimsditch, K. Yu. Guslienko, P. Vavassori, Y. Otani, S. D. Bader, Phys. Rev. B **66**, 052407 (2002).
- [16] J. Vogel, W. Kuch, M. Bonfim, J. Camarero, Y. Pennec, F. Offi, K. Fukumoto, J. Kirschner, A. Fontaine, and S. Pizzini, Appl. Phys. **82**, 2299 (2003).
- [17] S.-B. Choe, Y. Acremann, A. Scholl, A. Bauer, A. Doran, J. Stöhr, H. A. Padmore, Science **304**, 420 (2004).

(原稿受付：2006年1月18日)

著者紹介

谷内敏之 (Toshiaki TANIUCHI)



東京大学大学院工学系研究科
博士課程

〒113-8656 東京都文京区本郷 7-3-1

TEL:03-5841-7193

FAX:03-5841-8744

taniuchi@sr.t.u-tokyo.ac.jp

略歴：2002年東京大学工学部応用化学学科卒業。2004年東京大学大学院工学系研究科応用化学専攻修士課程修了。東京大学大学院工学系研究科応用化学専攻博士課程在学中。日本学術振興会

特別研究員。

最近の研究：放射光光電子顕微鏡によるナノ構造の顕微分光。

趣味：野球，音楽鑑賞，読書。

尾嶋正治 (Masaharu OSHIMA)



東京大学大学院工学系研究科 教授
〒 113-8656 東京都文京区本郷 7-3-1

TEL:03-5841-7191

FAX:03-5841-8744

oshima@sr.t.u-tokyo.ac.jp

略歴：1974年東京大学大学院工学系研究科修士課程修了。同年日本電信電話公社電気通信研究所入社，半導

体表面の研究に従事。1981-81年スタンフォード大学客員研究員。1995年東京大学大学院工学系研究科応用化学専攻教授。

最近の研究：磁性体結晶成長と放射光利用 in-situ 光電子分光，放射光利用ナノ分光法の研究，窒化物半導体の結晶成長と光学特性。

趣味：テニス，カラオケ，歴史小説，学生に奨励賞を取らせること。

秋永広幸 (Hiroyuki AKINAGA)



独立行政法人産業技術総合研究所
ナノテクノロジー研究部門

研究グループ長

茨城県つくば市梅園 1-1-1

TEL: 029-861-2438

FAX: 029-861-3211

akinaga.hiro@aist.go.jp

略歴：1992年筑波大学大学院工学研究科博士課程修了。1993年産業技術融合領域研究所，アトムテクノロジー研究体研究員。2002年8月から現職。その間，1997年ベルギー IMEC 客員研究員。2001年東京大学物性研究所客員助教授。2002年～2004年東京工業大学大学院理工学研究科客員教授。

最近の研究：ナノスピンエレクトロニクス材料の開発，磁気ストレージ用プロセス・計測技術の開発，抵抗スイッチ効果の応用。

趣味：小動物の飼育を子供と楽しむこと。