

平成 21 年 5 月 29 日現在

研究種目：若手研究（B）

研究期間：2007～2008

課題番号：19710084

研究課題名（和文） 微小磁性体における磁壁運動制御・観測手法の開発

研究課題名（英文） Development of a method for control and observation of domain walls in a micro-fabricated ferromagnet

研究代表者

原 正大（HARA MASAHIRO）

熊本大学・大学院自然科学研究科・准教授

研究者番号：50392080

研究成果の概要：1 ミクロン以下の微小磁石における磁化構造の制御及び観測手法に関する研究を行った。非常に短い時間（ナノ秒程度）のパルス磁場を用いたり、超伝導体を微小磁石に近接させたりすることにより、微小磁石を制御する新しい知見を得ることができた。また、半導体微小素子の抵抗変化を用いることで、微小磁石における磁化構造の変化を高感度に検出する手法を確立した。

交付額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2007 年度	1,500,000	0	1,500,000
2008 年度	1,500,000	450,000	1,950,000
年度			
年度			
年度			
総計	3,000,000	450,000	3,450,000

研究分野：微小領域磁性

科研費の分科・細目：ナノ・マイクロ科学 マイクロ・ナノデバイス

キーワード：微小磁性体、磁壁

## 1. 研究開始当初の背景

近年における微細加工技術の進歩により、磁性体をサブミクロンスケールで任意形状に加工することが可能となり、そこでは形状に応じた特徴的な磁気構造をとる。磁性体細線の場合、磁区の境目である磁壁は、微小細管に閉じ込められた粒子のように振る舞い、磁壁の運動を利用したロジック回路やメモリなどへの応用が提案されている。このような観点から、微小磁性体中の磁壁操作手法及び観測手法の開発が重要な研究課題となっている。

磁壁を移動させるためには細線に沿って外部磁場を印加する方法が古くから用いられてきたが、最近では磁性体に直接電流を印加することにより磁壁を操作する方法が研究されてきている。磁壁操作の新しい手法を開発することは物理現象としての関心を集めると同時に、低消費電力化等へとつながるという意味で応用上も重要である。そこで我々はさらに新たな方法として超伝導体と磁性体の磁氣的相互作用を利用して磁壁を移動させる試みを始めている（特許申請出願中）。

磁壁の運動制御およびその物理現象を解

明するうえで、従来の測定手法に加えて新しい観測手法を確立することも重要な課題である。我々は半導体二次元電子ガスのパリストイックな伝導特性を利用して、磁性体リングにおける磁化状態を高感度に検出できることを示している。電気抵抗測定によるものでは、直接磁性体に端子を付けて磁性体自身の抵抗を測定することがよく行われているが、我々の手法はシグナルの変化が遥かに大きく、磁性体からの漏れ磁場による二次元電子系の抵抗変化を観測しているため、測定自体が磁性体の状態に影響を与えることはないという点でより有効な手段といえる。また、リング構造のみならずディスク構造、細線等あらゆる形状で測定可能である。

## 2. 研究の目的

微小磁性体における磁壁（磁化構造）の制御手法として、従来には無い新しい知見を得ることが本研究の主な目的である。1つ目の方法として、ナノ秒オーダーのパルス磁場を用いて制御することを考えた。応用が検討されている磁壁の運動を用いたロジック回路では、回路中に存在する多数の磁壁を制御する必要があるが、磁壁の応答は外部駆動（磁場印加もしくは電流注入）に対して、全く同時に起こるわけではないことに着目した。そこで、2つの磁壁のみが安定に存在する単純な系である微小リングにおいて、対磁壁のパルス磁場応答を調べた。外部駆動（パルス磁場）の立ち上がり時間、磁壁間の距離及び磁壁の移動速度の関係によって、磁化構造がどのように変化するかを詳細に調べることにより、多数の磁壁を同時に制御する際に重要な指針を与えることを目的として実験を行った。

2つ目の方法は、近接させた超伝導体との磁氣的相互作用を利用して、微小磁性体における磁化構造を制御する試みである。最初に、様々な実験により既に振る舞いの良く分かっている微小磁気ディスクに第一種超伝導体であるNbを近接させることにより、双方の間に磁氣的相互作用が確かに働いていることを実証し、その結果を定量的に議論することを目的として実験を行った。

これら2つの制御方法の開発において、磁化構造の変化は半導体二次元電子系の曲がり抵抗変化を用いて検出している。超伝導体との複合構造では、第一種超伝導体中を磁束が量子化されて不連続に貫通することが予想される。様々な系における実験を行うことにより、局所的な磁場変化を高感度に検出する手法を確立することも本研究課題の目的である。

## 3. 研究の方法

本研究では、半導体二次元電子系の微小クロス構造上に微小磁性体を配置し、磁化の変化に伴う漏れ磁場の変化を二次元電子系の曲がり抵抗により高感度に検出するという方法を用いている。そのため、まず半導体二次元電子系基板をエッチングにより、1ミクロン程度のクロス構造に加工し、その基板表面のクロス中心に微小磁性体を配置する。半導体二次元電子系は、表面から深さ数10ナノメートルの界面に形成される極めて散乱の少ない電子系である。クロス内を弾道的に直進する電子軌道が、微小磁性体を作る漏れ磁場により曲げられることにより、半導体二次元電子系の曲がり抵抗が顕著に変化することから、微小磁性体におけるわずかな磁化構造の変化を検出することができる。

微小磁気リングにおける対磁壁の制御では、図1のようにナノ秒程度のパルス磁場を印加することができる試料構造となっている。また、超伝導体と磁性体との磁氣的な相互作用を見るため、図2のように超伝導体Nbの上に薄い絶縁層を挟んで、微小磁気ディスクを配置した試料を作製した。

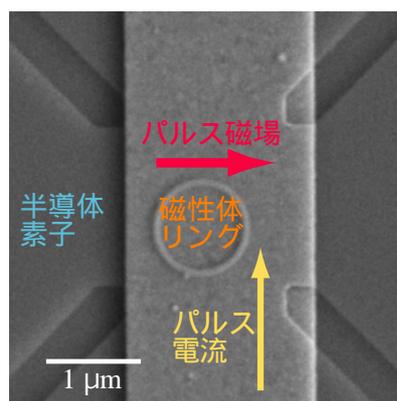


図1：作製した試料の電子顕微鏡写真（パルス磁場制御の実験）

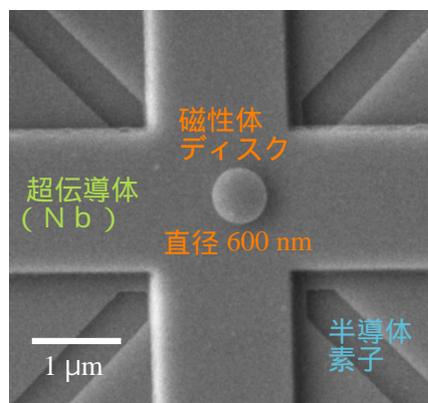


図2：作製した試料の電子顕微鏡写真（超伝導体制御の実験）

#### 4. 研究成果

##### (1) パルス磁場制御の実験

微小磁気リングにおいては、2つの磁壁が存在するオニオン構造という磁化状態をとることが知られている。これら2つの磁壁は磁場や電流の外部駆動により、同じ位置に移動すると対消滅して、磁壁のない閉塞構造へ磁化状態が変化する。

本実験では、対磁壁をパルス磁場で駆動し、パルス磁場の立ち上がり時間によって、磁壁の対消滅が制御できることを示した。(論文)

磁化状態の変化は、直下に存在する半導体二次元電子系の曲がり抵抗変化により、測定した。図3はパルス磁場印加による磁化状態の変化を、パルス磁場の立ち上がり時間と強度に対して、マッピングした結果である。

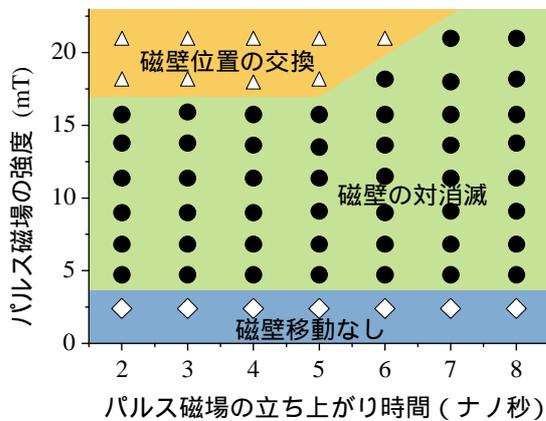


図3：パルス磁場印加による磁化状態変化

まず、パルス磁場強度が小さい領域では、立ち上がり時間には関係なく、2つの磁壁とも動かない。磁場強度が中間的な領域になると、片方の磁壁のみ駆動されるので、磁壁の対消滅が必ず起こる。さらに磁場強度を上げると、双方の磁壁とも駆動されるが、磁化状態の変化は立ち上がり時間に依存するようになる。これは、磁壁の動き出すタイミングに必ずずれがあるためである。立ち上がり時間が長いと、片方の磁壁が移動し、もう一方の磁壁が動き出す前に対消滅が起きてしまう。一方、立ち上がり時間が早いと、双方の磁壁の移動が可能となり、対消滅を起こさず、磁壁位置の交換が起こる。

この結果は、磁性体中に多数の磁壁を含む系で磁化状態を制御する際に、外部駆動の変化の時間スケールと磁壁移動の時間スケールの相関を考える重要性を示唆するものであり、将来の磁壁運動を用いたロジック回路やメモリへ応用されることが期待される。また、Nature誌にNewsとして紹介されるなど、世界的にもインパクトを与える研究成果となった。

##### (2) 超伝導制御の実験

微小磁気ディスクにおいては、磁気渦構造をとることが知られている。外部より面内磁場を印加すると、渦がディスク中心より外側へシフトしていき、磁気渦消滅磁場で渦が完全に外側へ押し出されて消滅する。

本実験でも磁気ディスクから生じる漏れ磁場の変化を半導体二次元電子系で高感度に検出することが可能であり、磁気渦消滅に伴う不連続な磁化変化を検出した。測定は超伝導転移が起こる温度前後で行い、微小磁気ディスクの磁化過程における超伝導体の効果を調べた。

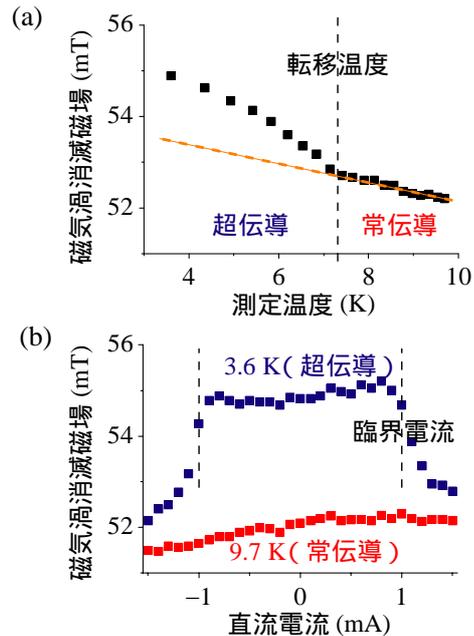


図4：磁気渦消滅磁場の変化

(a)温度依存性, (b)直流電流依存性

磁気渦消滅磁場は温度を下げていくことにより、徐々に上昇していくが、図4(a)に見られるように、超伝導転移温度以下で明らかに高磁場側にシフトしている様子を観測することができた。また、超伝導体に直流電流を印加していくと、図4(b)のように、超伝導状態から常伝導状態へ変化する臨界電流付近で急激に磁気渦消滅磁場が減少する。これらの結果から、超伝導体が近接して存在することにより、磁気渦消滅磁場が増加することが分かる。この現象はロンドン近似により、定量的にも説明することができた。

また、外部磁場を面内からわずかに傾けていくと、超伝導体中に磁束量子が不連続に1つずつ貫通していく様子を観測することもできた。これまでの研究により、微小磁性体と超伝導体の間に磁氣的相互作用が働いていることを実証できたので、今後は、より効率的に磁性体中の磁化構造を制御するための素子構造の吟味が必要である。

5. 主な発表論文等  
(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文](計3件)

Masahiro Hara, Takashi Kimura, Yoshihiko Otani, Magnetic Interaction in a Submicron Ferromagnetic Disk/Superconductor Hybrid, Physics Reports of Kumamoto University, 査読なし, Vol. 13, 2008, 107-114.

Masahiro Hara, Takashi Kimura, Yoshihiko Otani, Detection of paired domain walls in a ferromagnetic ring by a bend resistance measurement, Physica E, 査読あり, Vol. 40, 2008, 1108-1110.

Masahiro Hara, Takashi Kimura, Yoshihiko Otani, Controlled depinning of paired domain walls in a ferromagnetic ring circuit, Appl. Phys. Lett., 査読あり, Vol. 90, 2007, 242504-1-3.

[学会発表](計6件)

原 正大、微小磁性体/超伝導体複合構造における磁氣的相互作用、第9回リサーチコア研究会、2009年3月5日、九州大学

原 正大、微小磁性体/超伝導体複合構造における磁氣的相互作用の検出、第6回国研究会、2008年12月13日、熊本大学

原 正大、磁気ディスク/超伝導体複合構造における磁氣的相互作用、日本物理学会第62回年次大会、2007年9月22日、北海道大学

原 正大、微小磁気リングにおける対磁壁のパルス磁場制御、第31回応用磁気学会学術講演会、2007年9月14日、学習院大学

原 正大、微小磁性体/超伝導体複合構造における磁化過程、第45回茅コンファレンス、2007年8月20日、長野

Masahiro Hara, Detection of paired domain walls in a ferromagnetic ring by a bend resistance measurement, 17<sup>th</sup> International Conference on Electronic Properties of Two-Dimensional Systems(EP2DS-17), July 16 2007, Genova, Italy

[その他]

ホームページ等

<http://www.riken.jp/lab-www/nanomag/indexjpn.html>

6. 研究組織

(1)研究代表者

原 正大 (HARA MASAHIRO)

熊本大学・大学院自然科学研究科・准教授  
研究者番号：50392080

