

科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 4 年 6 月 14 日現在

機関番号：82626

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2019～2021

課題番号：19K03757

研究課題名(和文) 時間分解磁気光学顕微鏡を用いた磁区ダイナミクスとスピン起電力発生の同時観測

研究課題名(英文) Simultaneous observation of magnetic domain dynamics and spin-motive force generation using time-resolved magneto-optical microscopy

研究代表者

小笠原 剛 (Ogasawara, Takeshi)

国立研究開発法人産業技術総合研究所・エレクトロニクス・製造領域・主任研究員

研究者番号：00392598

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,300,000円

研究成果の概要(和文)：本研究開始以前に開発した高分解能磁気光学顕微鏡を基礎とし、パルス半導体レーザーを照明光源とする時間分解磁気光学顕微鏡を構築した。従来の時間分解磁気光学顕微鏡に比べ、高分解能であるだけでなく、磁化ベクトルの3成分を同時に測定可能であり、安定で測定の柔軟性も高い装置とすることができた。

一辺数 μm のパーマロイ薄膜矩形構造に数十MHz程度の高周波磁場を印可し、渦状磁区が旋回運動をする様子を、上記装置を用いて観察することに成功した。半導体レーザー光源を用いたことにより、磁区ダイナミクスの励起周波数依存性を測定することが可能となり、磁気渦の旋回運動が共鳴を示す様子を観察することに成功した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

高性能の時間分解磁気光学顕微鏡装置を開発した。時間分解磁気イメージングはスピントロニクスやマイクロ磁気工学の分野において欠くことのできない測定技術であるが、放射光などの特別な施設が必要であったり測定に熟練が必要であるなど、使いやすい技術ではなかった。本研究で開発した時間分解磁気光学顕微鏡は、従来にくらべ空間分解能が高だけでなく、磁化のベクトル観察が可能であり、安定で操作性もよいものとなった。本測定手法が普及すれば、今後のこの分野の研究開発を大きく促進できるものと考えられる。

研究成果の概要(英文)：Based on the high-resolution magneto-optical microscope developed before the start of this research, we have constructed a time-resolved magneto-optical microscope using a pulsed semiconductor laser as an illumination source. Compared to conventional time-resolved magneto-optical microscopes, the new system has not only higher resolution but also enables simultaneous measurement of the three components of the magnetization vector, and is more stable and flexible in measurement.

We have succeeded in applying a high-frequency magnetic field of several tens of MHz to a permalloy thin-film rectangular structure of several micrometers per side, and observed the gyration of magnetic vortex using the above apparatus. The use of a semiconductor laser light source made it possible to measure the excitation frequency dependence of the magnetic domain dynamics and to observe the resonance of the swirling motion of the magnetic vortex.

研究分野：物性物理学

キーワード：磁気イメージング 磁化ダイナミクス 時間分解磁気光学顕微鏡

1. 研究開始当初の背景

巨大磁気抵抗効果の発見から発展したスピントロニクスの研究は、電流注入による磁壁の駆動の実現を機に、様々なスピン制御方法・スピン流発生方法の開発へと進展してきた。これと同時に、これらの逆過程として、スピンの変化を電気エネルギーへと変える方法の研究も発展してきている。磁性体におけるスピン自由度を介したエネルギー変換方法には、スピン・ゼーベック効果や、スピン起電力（Spin Motiveforce）がある。磁性体中においては、スピンの時間的・空間的な変化によって生ずる量子力学的な位相により、実効的な電磁場がつくられることがよく知られているが、スピン起電力はこの電磁場による誘導起電力とみなすことができる。

例えば、磁性細線中に磁壁を導入し、磁場の印加によって磁壁を移動させると、磁壁の両側にスピン起電力による電位差が発生する。しかし、細線中に多数の磁壁を導入しても、それぞれの起電力が打ち消し合うため、大きな起電力を得ることはできない。そこで、より大きな起電力を得るために、磁気バブルやスキルミオン格子といった、より複雑な磁気構造を用いる方法などが理論的に提案されている。一方、実験的には、磁性細線中の磁壁や円盤中の磁気渦といった、比較的単純な空間的構造を持つ場合においてのみ、起電力の発生が確認されている。

これまでの実験的な研究は、細線中の磁壁の移動や、円盤中の磁気渦の旋回運動といったように、その運動をすることがほぼ確実であるような系で行われている。しかし、このような系は、必ずしもスピン起電力の効率的な発生に有利ではない。実際に磁区構造とその運動を確認すると同時にスピン起電力の発生を観察を可能にすることは、スピン起電力の研究の進展にかかせないものである。

2. 研究の目的

本研究は、高分解能の時間分解磁気光学顕微鏡をもちいて磁区の高速な運動とそれに伴うスピン起電力の発生を同時に観測し、これらの関係の直接的な評価を可能とすることを目的とするものである。

3. 研究の方法

上記の目的を達成するため、以下の順で研究を行った。

（1）時間分解磁気光学顕微鏡の構築

我々が本研究開始前に開発した磁気光学顕微鏡は、従来の磁気光学顕微鏡に比べて高い分解能を有し、また磁化ベクトル3成分の同時観察が可能であるなど、優れた特徴を有している。本研究ではこの磁気光学顕微鏡の照明光源をピコ秒パルス半導体レーザーとすることにより、時間分解測定を可能とすることに取り組んだ。

（2）磁気渦の旋回運動の観測

スピン起電力が発生することが知られている典型的な系である磁気渦の旋回運動の観測を行

う。パーマロイの微細構造に交流磁場を印加することにより磁気渦の旋回運動を励起し、これを時間分解磁気光学顕微鏡をもちいて観察する。

(3) 磁区の運動とスピン起電力の同時観測

磁気渦の旋回運動を観測できる試料に、さらにスピン起電力検出のための電極を付与し、磁区変化とスピン起電力の発生を同時に観測する。

4. 研究成果

(1) 時間分解磁気光学顕微鏡の構築

図1に本研究で構築した時間分解磁気光学顕微鏡の構成を示す。一般にレーザー光を照明光源として用いる場合には、レーザー光の干渉により照明に不均一が発生することが大きな問題となる。多くの場合、拡散板などを用いて照明の不均一（スペックル）を細かくし、さらにこの拡散板を振動させるなどしてスペックルを時間的に変化させ、時間的な平均をとることで均一な照明を生成する。半導体レーザーはモードロックレーザーに比べて出力が小さいため、均一化の際に光量の損失を小さくすることが技術的な課題となる。本研究では、マルチモード光ファイバーを用いた照明均一化機構（スペックルリデューサー）を開発し、十分な光量を得つつ均一度の高いレーザー照明を得ることに成功した。

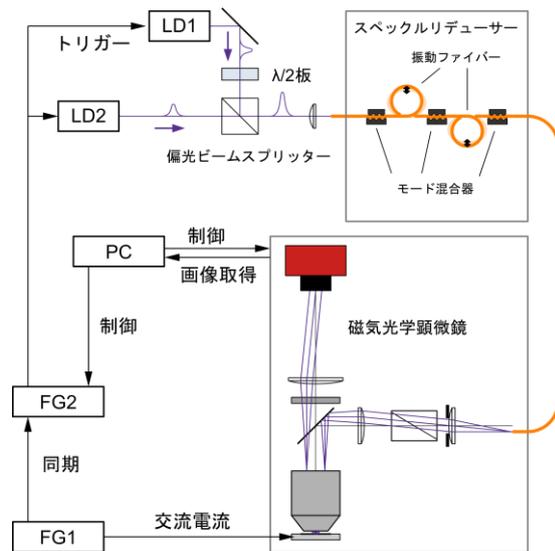


図1：時間分解磁気光学顕微鏡の構成。(LD:半導体レーザー、FG:波形発生器)

本研究で構築した時間分解磁気光学顕微鏡は空間分解能約 300nm を有し、これは世界最高水準といえる。時間分解能は約 150ps であり、磁化ベクトルの3成分すべての観察が可能である。光源として半導体レーザーを用いることで、パルス光の繰返し周期が自由に設定できるようになり、従来のモードロックレーザーや放射光を用いた測定に比べて測定の自由度が飛躍的に向上し非常に汎用性の高い装置となった。今後のマイクロ磁気工学・スピントロニクス分野における研究に貢献することが期待できる。

(2) 磁気渦の旋回運動の観測

開発した時間分解磁気光学顕微鏡を用いて、パーマロイ微細構造中の磁気渦の旋回運動の観測を行った。磁気渦の旋回運動はスピン起電力を発生することが知られており、また時間分解磁気イメージングのベンチマークともいえる現象である。

シリコン基板上に幅 20 μm の金配線を作製し、その上に一辺 7 μm の正方形のパーマロイ微細構造を作製した。金配線に数十 MHz の交流電流を流すことによりパーマロイ微細構造に交流磁場

を印加し、磁気渦の旋回運動を励起した。

図 2 (a)は、観測された磁気渦の旋回運動の様子である。交流磁場の位相が変化するとともに磁気渦の中心の位置が円を描く運動をしている。画像の色は磁化ベクトルの方向を表しており、本研究で開発した時間分解磁気光学顕微鏡が磁化をベクトルとして観察可能であることを反映している。図 2 (b)は、磁気渦の中心の軌跡をプロットしたもので、励起周波数によって旋回運動の半径が大きく異なることがわかる。磁気渦中心の軌跡が囲む面積の周波数依存性をプロットしたのが図 2 (c)で、A～Dは同時に測定した同じ大きさの4つの微細構造を示している。励起周波数に依

存して、磁気渦の旋回運動が共鳴による増大を示すことが明瞭に観測されている。共鳴周波数は試料によって大きくことになっており、試料の欠陥などによる磁壁のピン留めなどの効果が大きく影響することを示唆している。周波数依存性を観測できることは照明光源をパルス半導体レーザーとすることによって可能となっており、個別の微細構造の共鳴周波数を観測できたことも時間分解磁気光学顕微鏡を用いることによって初めて実現可能となったことである。本成果は、Takeshi Ogasawara and Akinobu Yamaguchi 2022 *Jpn. J. Appl. Phys.* **61** 018001 に掲載された。

(3) 磁区の運動とスピン起電力の同時観測

磁気渦の旋回運動はスピン起電力を発生することが知られているので、(2) で用いた試料にスピン起電力を検出するための電極を付与した試料を作製することによりスピン起電力との同時観測が可能となる。しかし、研究期間内ではこれを達成するには至らなかった。

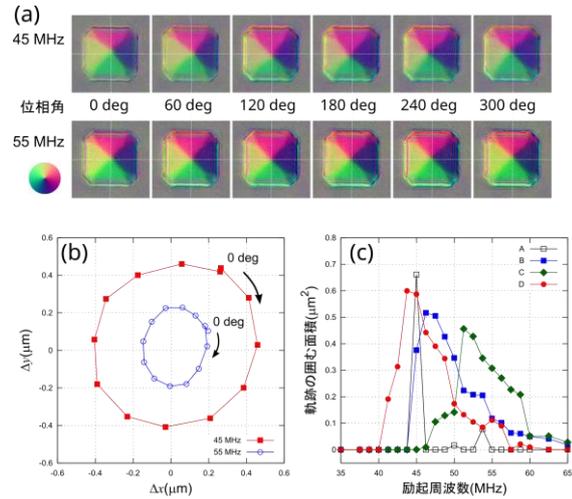


図 2 : (a) 磁気渦の旋回運動の様子。(b)磁気渦中心の軌跡。(c) 磁気渦中心の軌跡が囲む面積の励起周波数依存性。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計2件（うち査読付論文 2件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Ogasawara Takeshi, Yamaguchi Akinobu	4. 巻 61
2. 論文標題 Observation of frequency dependent resonances in magnetic vortex core gyration using time-resolved magneto-optical Kerr microscope with pulsed semiconductor laser illumination	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Japanese Journal of Applied Physics	6. 最初と最後の頁 018001 ~ 018001
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.35848/1347-4065/ac3ea6	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Nakamura Ryo, Saegusa Shunya, Akamatsu Naoya, Yamada Keisuke, Ogasawara Takeshi, Oura Masaki, Ohkochi Takuo, Yamaguchi Akinobu	4. 巻 60
2. 論文標題 Direct observation of a magnetic domain change in Ni wire and film on a LiNbO3 substrate using X-ray magnetic circular dichroic photoemission electron microscopy	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Japanese Journal of Applied Physics	6. 最初と最後の頁 SBBC01 ~ SBBC01
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.35848/1347-4065/abdce	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計1件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 小笠原 剛、中村遼、山口明啓
2. 発表標題 半導体レーザー光源を用いた時間分解磁気光学顕微鏡の開発
3. 学会等名 第44回日本磁気学会学術講演会
4. 発表年 2020年

〔図書〕 計1件

1. 著者名 Akinobu Yamaguchi, Atsufumi Hirohata, Bethanie Stadler	4. 発行年 2021年
2. 出版社 Elsevier Inc.	5. 総ページ数 812
3. 書名 Nanomagnetic Materials Fabrication, Characterization and Application	

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究 分担 者	山口 明啓 (Yamaguchi Akinobu) (70423035)	兵庫県立大学・高度産業科学技術研究所・准教授 (24506)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------