

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 5 月 30 日現在

機関番号：63903

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2015～2016

課題番号：15K13683

研究課題名(和文) 金属ナノ構造に誘起される局所的円偏光電場による磁性体中の磁化制御

研究課題名(英文) Control of magnetization with local circularly polarized field induced on metallic nanostructures

研究代表者

岡本 裕巳 (OKAMOTO, Hiromi)

分子科学研究所・光分子科学研究領域・教授

研究者番号：20185482

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,800,000円

研究成果の概要(和文)：光で物質の磁性を制御する基礎となりうる逆ファラデー効果が、金属ナノ構造物質によって増強するかどうかを検討した。螺旋状の捻れた構造を持つ円偏光を物質に照射すると、その物質に磁化(磁石の性質)が生じる現象(逆ファラデー効果)が知られているが、通常この効果は非常に弱い。金属ナノ構造に光を照射すると、その周辺に通常より強く捻れた円偏光が発生する場合があります、これを利用することで逆ファラデー効果が強く現れ、磁性制御に利用できる可能性があると考え、それを探った。現時点までに円偏光による磁化と思われる信号の検出に成功したので、今後試料や条件を変えた試みを継続し、増強逆ファラデー効果の特性解明を進めたい。

研究成果の概要(英文)：We investigated whether inverse Faraday effect, which is potentially utilized as a basis for optical control of magnetic properties of materials, can be enhanced with metal nanostructures. When a material is irradiated with circularly polarized light, which possesses twisted (spiral) field structure, the material is slightly magnetized (this phenomenon is called as inverse Faraday effect). However, this effect is usually very small. Because strongly twisted circular polarized field is sometimes induced when a metallic nanostructure is shined with light, we considered that inverse Faraday effect may be enhanced by the strongly twisted field with metallic nanostructures, and explored the possible utility for control of magnetic properties with light. Up to now, we have succeeded in observing circularly-polarized-light induced magnetization. We will continue the efforts toward characterizing properties of enhanced inverse Faraday effects by changing the sample materials and conditions.

研究分野：物理化学

キーワード：プラズモン 近接場光学 磁気光学効果 逆ファラデー効果

1. 研究開始当初の背景

近年、エレクトロニクスを超える機能をもつデバイスの原理としてのスピントロニクスが注目されており、既に素子の実用化もなされている。それに関連して光による磁化の制御を意識した基礎研究も行われている。本研究では、透明物質に円偏光を照射すると、その進行方向に平行（または反平行）な磁化が生じる逆ファラデー効果に注目した。光のスピンを直接磁化に変換する現象で、光によるスピ制御素子の基礎原理としてのポテンシャルも持つ。この効果の最初の実験的報告は30年以上前になされた。逆ファラデー効果を素子に用いるためには、その効果が十分大きなものである必要があるが、現時点で実用になるレベルの大きな効果が得られているとは言い難い。我々はこれまで、ナノ光学の原理に基づく測定手法により、金属ナノ構造の周辺では大きくねじれた光電場が生じていることを実験的に示した。この金属ナノ構造の特性が、逆ファラデー効果の増強に寄与する可能性があるのではないかと考え、局所的な光電場の大きなねじれによる、磁気光学効果に対する影響を検討することとした。

2. 研究の目的

本研究では物質に円偏光を照射すると磁化が生じる、逆ファラデー効果に着目する。申請者は金ナノ構造の局所光学活性を調べ、ナノメートルレベルの局所的な光学活性が極めて大きい場合のあることを明らかにした。これは金属ナノ構造の周辺で、自由空間中の円偏光よりも強くねじれた回転する光電場が生成することを意味する。本研究では磁性材料（通常の常磁性の誘電体を含む）に2次元的な金属ナノ構造を乗せた構造を作成し、それに左右円偏光を照射した際の磁化のナノメートルレベルでの観測を試み、金属ナノ構造に誘起される局所的な光電場の強いねじれが、逆ファラデー効果を増強するかどうかを明らかにする。これは光のスピンのことによって物質の電子系のスピンや角運動量を局所的に直接制御する上での重要な基礎となる。

3. 研究の方法

局所的に強くねじれた円偏光電場を発生させるための貴金属ナノ構造と磁性材料が共存した系を作成し、それに対する逆ファラデー効果の検出を試みる。二つの方法、磁気力顕微鏡による方法と磁気光学的な検出法が考えられるが、ここでは主に前者を採用する。円偏光変調した光を試料に照射しつつ磁性カンチレバーを装着したプローブ顕微鏡（磁気力顕微鏡）で磁気力を検出し、左右円偏光照射時の磁化の差を計測することで、金属ナノ構造周辺に円偏光で誘起される局所的な磁化を可視化（イメージング）する。これを種々の金属ナノ構造を

配置した様々な磁性材料に適用し、金属ナノ構造周辺の強くねじれた円偏光電場が磁性を変化させることが可能かどうかを解析する。

金属ナノ構造は、電子線描画法（電子線リソグラフィ-リフトオフ法）によって作成する。あるいは、化学合成で得られる特定形状の金属ナノ微粒子を用いる。局所的な磁場の検出装置は、倒立型光学顕微鏡に装着したプローブ顕微鏡によって構築する。プローブ顕微鏡には磁性探針をもったカンチレバーを装着することで、磁気力顕微鏡として用いる。試料には対物レンズを通して外部から円偏光を導入して磁化を誘起する。円偏光は、直線偏光したレーザー光を光弾性変調器に通して発生させる。これにより、左円偏光と右円偏光の間を一定の周波数で往復する円偏光変調した光となる。カンチレバーの応答信号を円偏光変調に同期したロックイン検波することで、右円偏光照射時と左円偏光照射時の試料上の磁場の差を検出し、試料上の局所的な磁化のマッピングを行う。

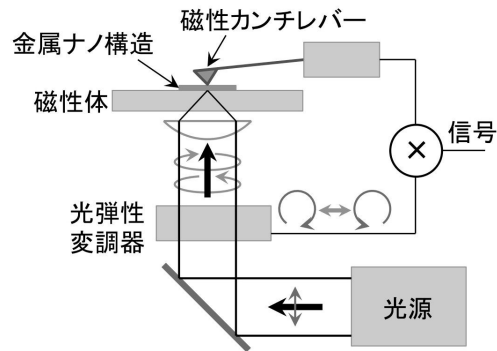


図1 磁気検出・イメージング装置の概念図

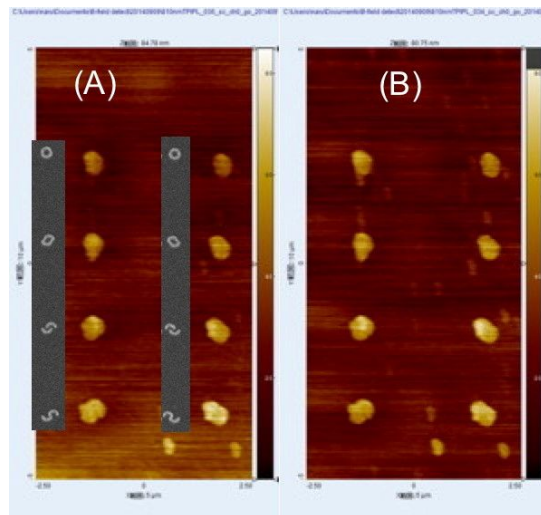


図2 ガラス基板上的金ナノ構造体試料に対する円偏光照射下での磁気カンチレバーによる原子間力顕微鏡像。(A)右円偏光照射時、(B)左円偏光照射時。(A)には試料の走査電子顕微鏡像を挿入してある。最上部の円環において、円環の外径は230 nm。照射光波長は785 nm。

4. 研究成果

磁気力顕微鏡は、現有(自作)のプロープ顕微鏡に磁性カンチレバーを装着して構築した。これに図1のように光弾性変調器で円偏光変調した光照射系を組み込んで装置を構築し、円偏光照射下での磁化検出に取り組んだ。

当面、ガラス基板上に電子線描画法で作成した幾つかの金ナノ構造試料を対象として測定を行った。特に、リング状の構造は、円偏光電場の照射によって円環電流が誘起されて磁化を生じる可能性を想定し、金ナノリングと関連した構造体を中心に試みた。

まず、最初の試みとして、磁気カンチレバーによるトポグラフ像を、左円偏光照射時と右円偏光照射時について別々に計測し、その差が現れるかどうかを検討した。照射光の波長は785 nmである。結果は図2に示すように、左右円偏光照射時の像がほぼ同一で試料の形状像となっており、磁気力による差を検出できておらず、通常のアトモスフィア顕微鏡像に対応している。理由としては、この計測法では磁場検出感度が十分でないこと、あるいはプラズモン励起により誘起される磁化が弱いこと、のいずれかであると考えられる。

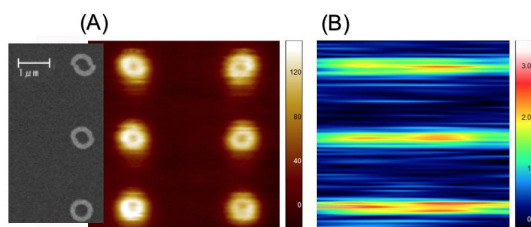


図3 ガラス基板上の金ナノ構造体試料に対する左右円偏光照射時の磁気力差像。(A)試料の形状像。左列に対応する走査電子顕微鏡像を合わせて示す。右列は左列の鏡像に対応するものになっている。最下部の円環において、円環の直径は680 nm。(B)磁気力の左右円偏光照射時の差によるイメージ(詳細は本文参照)。照射光波長は785 nm。

次に、磁気カンチレバーからの応答信号を、左右円偏光を交代で照射しその差をロックイン検出することで、左右円偏光照射時の力の差が現れるかどうかを検証した。この計測ではカンチレバーは試料表面上をコンスタントギャップモード(試料表面とプローブ先端の間隔が一定となるようフィードバックをかけて制御)で走査し、カンチレバーの振動の位相変化を応答信号として検出した。照射光の波長は同じく785 nmである。変調周波数は、現時点では諸事情により5 Hzで行った。結果を図3に示す。変調周波数が低く、ロックイン検出の時定数を長く設定せざるをえなかったため、像が走査方向に大幅に伸長してしまっているが、金ナノ構造の存在する部位付近で、左右円偏光照射時の位相信号の差が現れているように見える。この結果は、左右円偏光照射により、カンチレバーにかかる力が変化していることを示しており、円偏光によるキラルなプラズモン励起によって

磁化が発生していることを示唆する。

以上のことから、左右円偏光に変調した光照射によって、金ナノ構造上に生じた磁化が実測できたと考えられるが、まだ信号が小さく、また再現性の確認も十分行えてはいない段階である。今回は円偏光変調の周波数が5 Hzと低い状況で計測を行ったが、これを本来の光弾性変調器の変調周波数である数十kHzとして適切なロックイン検出条件を探することで、信号検出・イメージングの感度は高まると考えている。信号の大きさについては、磁気カンチレバーの選択により若干の改善は見込めるかもしれないが、大幅な改善は困難であろう。金属ナノ構造の選択、基板の選択によって、大幅な増強があるかもしれないが、試行錯誤と理論的な考察を進める必要があると考えられる。今回用いたものは直径が680 nmの金ナノリングであるが、この大きさでは最低次(双極モード)のプラズモン共鳴波長が用いた光源の波長よりも相当長波長となる。用いることのできるレーザー波長により近い双極モードの共鳴波長を持つナノリングを用いることで、より円環電流が大きくなり、大きな磁化が得られるのではないかと期待される。最近、化学合成で作成されたリング状金ナノ構造試料が作成されており、これについても今後試料を入手し計測を進めたい。この試料では直径が50 nm以下と小さく、最低次双極モードと思われるプラズモン共鳴が比較的短波長に現れるため、可視～近赤外域の円偏光により強い磁場の誘起が期待される。また、基板に磁性の大きな物質を用いることを計画していたが、まだその計測に至っておらず、これについても今後検討・実施する。今回の実施の結果として、今後の展開に向けた萌芽は得られたと考えられる。

5. 主な発表論文等

[雑誌論文](計 3件)

Yoshio Nishiyama, Hiromi Okamoto, Near-field Nonlinear CD Imaging of Single Gold Nanostructures, *J. Phys. Chem. C* 120, 2016, 28157-28162. 査読有
doi: 10.1021/acs.jpcc.6b07315

Tetsuya Narushima, Hiromi Okamoto, Circular Dichroism Microscopy Free from Commingling Linear Dichroism via Discretely Modulated Circular Polarization, *Sci. Rep.* 6, 2016, 35731 (10 pages). 査読有
doi: 10.1038/srep35731

Tetsuya Narushima, Shun Hashiyada, Hiromi Okamoto, Optical Activity Governed by Local Chiral Structures in Two-Dimensional Curved Metallic Nanostructures, *Chirality* 28, 2016, 540-544. 査読有
doi: 10.1002/chir.22611

〔学会発表〕(計 15 件)

岡本裕巳, プラズモンの近接場光学イメージング: 光場構造, 波束伝搬ダイナミクス, キラリティの実空間観察, 新世代研究所界面ナノ科学研究会, 2017 年 3 月 30 日, 新世代研究所 (東京都千代田区)

Hiromi Okamoto, Local optical activity of nanomaterials (ナノ物質の局所的な光学活性), 日本化学会第 97 春季年会 特別企画「配位アシンメトリー: 非対称な構造と空間の科学」, 2017 年 3 月 19 日, 慶応義塾大学 (神奈川県横浜市)

Hiromi Okamoto, Time- and Space-Domain Structures of Optical Fields on Metal Nanostructures, JSPS-EPSRC Symposium on Materials Science Pioneered by Structured Light, 2017 年 1 月 6 日, London (UK)

Tetsuya Narushima, Shun Hashiyada, Hiromi Okamoto, Near-field Circular Dichroism Microscopy for Chiral Nanostructures, 24th International Colloquium on Scanning Probe Microscopy (ICSPM24), 2016 年 12 月 14 日, Honolulu (USA)

岡本裕巳, キラルプラズモンの局所的な光学活性, 第 4 回豊田理研ワークショップ「キラル対称性系の電磁応答」, 2016 年 11 月 20 日, トヨタ産業技術記念館 (愛知県名古屋)

Shun Hashiyada, Tetsuya Narushima, Hiromi Okamoto, Generation of Chiral Optical Near-Fields with Non-Chiral Plasmonic Nanostructures, Optics & Photonics Japan 2016, OSJ-OSA Joint Symposia on Plasmonics and Digital Photonics, 2016 年 10 月 31 日, Tokyo Bunkyo School Building, University of Tsukuba (東京都文京区)

Hiromi Okamoto, Near-field imaging of plasmons: field structures, propagation dynamics, chirality, Optics & Photonics Japan 2016, OSJ-OSA Joint Symposia on Plasmonics and Digital Photonics, 2016 年 10 月 30 日, Tokyo Bunkyo School Building, University of Tsukuba (東京都文京区)

成島哲也, 岡本裕巳, 2 次元金ナノ構造体の局所円二色性測定, 第 77 回応用物理学会秋季学術講演会, 2016 年 9 月 15 日, 朱鷺メッセ (新潟県新潟市)

橋谷田俊, 成島哲也, 岡本裕巳, 金ナノ長方形のプラズモン共鳴励起に伴う局所光学活性の偏光解析, 第 10 回分子科学討論会, 2016 年 9 月 14 日, 神戸ファッションマート (兵庫県神戸市)

Kensaku Endo, Shun Hashiyada, Malcolm Kadodwala, Hiromi Okamoto, Yoshihiko Togawa, Chiral plasmon response of enantiomeric nanostructures on a chiral substrate, ICMM2016 Satellite Meeting -NFM2016- New Frontier of

Multi-functional Magnets, 2016 年 9 月 10 日, Hiroshima City Bunka Kouryu Kaikan (広島県広島市)

Shun Hashiyada, Tetsuya Narushima, Hiromi Okamoto, Observation of Polarization States of Plasmonic Fields in Rectangular Gold Nanostructures using Near-Field Polarimetry, The 14th International Conference on Near-Field Optics, Nanophotonics and Related Techniques (NFO-14), 2016 年 9 月 6 日, Act City Hamamatsu Congress Center (静岡県浜松市)

Tetsuya Narushima, Hiromi Okamoto, Circular Dichroism Microscopy Free from Commingling Linear Dichroism to Analyze Chiroptical Properties of Materials, The 14th International Conference on Near-Field Optics, Nanophotonics and Related Techniques (NFO-14), 2016 年 9 月 5 日, Act City Hamamatsu Congress Center (静岡県浜松市)

橋谷田俊, 成島哲也, 岡本裕巳, 金ナノ長方形の縦プラズモンモード励起に伴う局所光学活性, 日本分光学会 平成 28 年度年次講演会, 2016 年 5 月 26 日, 大阪大学豊中キャンパス (大阪府豊中市)

Tetsuya Narushima, Shun Hashiyada, Hiromi Okamoto, Near-Field Circular Dichroism Imaging to Design Optically Active Nanomaterials, 11th Annual IEEE International Conference on Nano/Micro Engineered and Molecular Systems (IEEE-NEMS 2016), 2016 年 4 月 20 日, Taikanso (宮城県松島町)

成島哲也, 橋谷田俊, 岡本裕巳, ナノ構造物質に発現する強い局所光学活性, 日本物理学会 2015 年秋季大会, 2015 年 9 月 16 日, 関西大学千里山キャンパス (大阪府吹田市)

〔図書〕(計 0 件)

〔産業財産権〕
出願状況 (計 1 件)

名称: 円偏光照射器, 分析装置及び顕微鏡
発明者: 岡本裕巳, 成島哲也
権利者: 大学共同利用機関法人自然科学研究機構
種類: 特許
番号: 特願 2016-236414
出願年月日: 2016 年 12 月 6 日
国内外の別: 国内

取得状況 (計 0 件)

6. 研究組織

(1) 研究代表者

岡本 裕巳 (OKAMOTO, Hiromi)

分子科学研究所・光分子科学研究領域・教授
研究者番号：20185482

(3) 連携研究者

成島 哲也 (NARUSHIMA, Tetsuya)
分子科学研究所・光分子科学研究領域・助教
研究者番号：50447314

西山 嘉男 (NISHIYAMA, Yoshio)
分子科学研究所・光分子科学研究領域・特任助教
研究者番号：40617487
(平成27年度のみ)

(4) 研究協力者

橋谷田 俊 (HASHIYADA, Shun)