

令和 4 年 6 月 15 日現在

機関番号：32503

研究種目：国際共同研究加速基金（国際共同研究強化(A））

研究期間：2019～2021

課題番号：18KK0407

研究課題名（和文）局在表面プラズモン共鳴から励起されるホットスポット電界による磁気物性の操作

研究課題名（英文）Control of magnetic properties by "hot-spot" electric field generated by localized-surface plasmon resonance

研究代表者

安川 雪子（Yasukawa, Yukiko）

千葉工業大学・工学部・准教授

研究者番号：10458995

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 12,000,000円

渡航期間： 6ヶ月

研究成果の概要（和文）：磁性薄膜と貴金属ナノ粒子から成る「磁気プラズモニック物質」に関する研究を実施した。この物質中の貴金属ナノ粒子から励起される局在表面プラズモン共鳴(LSPR)による増強電場の光波長依存性と定量を主目的とし、国立台湾大学にてDr. J. G. Linらと共に研究を実施した。複数の分光法を組み合わせLSPRによる増強電場の評価を行った。LSPR励起波長では、他の波長帯と比較して顕著に電場強度が最大となることを明らかにした。

研究成果の学術的意義や社会的意義

これまでは表面プラズモン共鳴やLSPRによる電場の増強は理論計算等から説明されてきた。本研究はこれを実際の物質において実験から観測した研究として意義がある。また物質中で励起するLSPRによってどの程度電場が増強するかを定量を行ったことも学術的に大きな意義がある。

今回の研究ではLSPR励起波長では他の波長帯と比較して数桁に及ぶ電場強度の増大を明らかにした。この増強電場を利用することにより、物質の様々な物理的物性を増大あるいは変調でき、新奇物理的物性を開拓できる可能性がある。

研究成果の概要（英文）： We studied "magneto-plasmonic materials" consisting of a magnetic-thin film and self-organized noble-metal nanoparticles. The present study was carried out with a collaboration of Dr. J. G. Lin et al. of National Taiwan University. The main objective in this study was to investigate the optical wavelength dependence of enhanced-electric field originated from localized-surface plasmon resonance (LSPR). LSPR is generated by noble-metal nanoparticles. The quantification of the enhanced-electric field by LSPR is also one of the main objectives in the present study.

We evaluated the LSPR-enhanced electric field by means of several different spectroscopic techniques. The results clarified that the electric-field intensity is significantly enhanced at LSPR wavelength compared to other wavelengths.

研究分野：磁性材料

キーワード：電気電子材料 ナノ磁性構造体 磁気光学効果 金属ナノ粒子 プラズモン プラズモン増強電界

## 1. 研究開始当初の背景

本国際共同研究の基課題は「厳密制御した局在表面プラズモン型磁気プラズモニック材料：磁気センサへの展開」(基盤研究(C) H.28年～H.30年度)である。基課題では貴金属ナノ粒子から励起される局在表面プラズモン共鳴(LSPR)と磁気物質を組み合わせた「磁気プラズモニック物質」の創成が目的であった。さらに、磁気プラズモニック物質が発現する磁気光学効果(MOKE)を利用し、入射光に対する反射光の偏光角( $\theta_k$ )の絶対値の差異や極性から検出対象物質をセンシングする新しい原理による超高感度なセンサ材料に関する基盤的研究も基課題の主目的である。

これらの基課題の目的を実現するには、磁気プラズモニック物質のMOKE、即ち $\theta_k$ の飛躍的増大が必須である。そこで磁性材料の中でも特に優れたMOKEを示す磁性薄膜を磁気プラズモニック物質の磁性層に選定した。しかしこの磁性薄膜の $\theta_k$ ですらセンサ材料の実現には $\theta_k$ が小さく不十分である。そこでこの磁性薄膜の $\theta_k$ を増大させるため、貴金属ナノ粒子のLSPRから発生する増強電場(ホットスポット)を利用し、磁性薄膜のMOKEを増強して $\theta_k$ を飛躍的に増大することを着想した。ホットスポットは光と物質の物理的性質の相互作用が可能な場と知られている。しかし基課題では $\theta_k$ の増大において重要なキーになるホットスポットの評価、ホットスポットとナノ空間での磁気物性との相互作用が解明できておらず、これが研究の壁となっていた。

## 2. 研究の目的

そこで本国際共同研究では、貴金属ナノ粒子のLSPRから生じるホットスポットと、ナノスケールの磁気物性の融合による磁気物性の向上・制御・操作を目指し、(1)磁気プラズモニック物質内部でのホットスポットの励起状態の定量評価を実験的アプローチにより検証することを目的とした。また(2)ホットスポットとナノスケールの磁気物性との相互作用のメカニズムの解明も目的とした。

上述の(1) (2)を達成するための本国際共同研究での具体的な目的は以下の3点とした。貴金属ナノ粒子のLSPRによって励起されるホットスポットを直接観察してイメージング(可視化)し、物質内部でのホットスポットの実空間分布状態を解明する。ホットスポットで発生する増強電場の強度を定量評価する。基課題では磁気プラズモニック物質全体のMOKEや磁気物性を評価している。一方、磁気プラズモニック物質は貴金属ナノ粒子によってナノ磁気構造を形成しており、ホットスポットはそれぞれの貴金属ナノ粒子近傍で励起される。従ってそれぞれのナノスポット領域でのMOKEや磁気物性を評価する。

## 3. 研究の方法

### (1) ホットスポットの直接観察

本国際共同研究の受け入れ機関にて研究協力者が現有する Scanning Near-field Optical

Microscopy (SNOM) を用いて磁気プラズモニック物質の貴金属ナノ粒子近傍で生じるホットスポットのイメージング画像を取得する。この実験により、磁気プラズモニック物質内部の実空間的でのホットスポット分布状態を評価する。

(2) ホットスポットの電場強度の評価

SNOM から得た結果を基に、計算によりホットスポットの電場強度を定量的に議論する。

(3) ナノスポット領域での MOKE および磁気物性の測定

外部磁場を印加した状態で SNOM によるイメージングを行うことにより、ホットスポット電場に対する磁場の影響を明らかにする。また渡航国のシンクロトロン放射光実験施設にて、X線円磁気円二色性 (XMCD) によりホットスポット電場が生じた際のナノ微小領域の磁気構造を評価する。

4. 研究成果

はじめに磁気プラズモニック物質の各層の界面状態や微細構造を明らかにした。その結果、各層間での原子拡散は観察されなかった。当初はSNOMを用いてホットスポットを直接観察・イメージングする予定であったが、本研究で扱う磁気プラズモニック物質はSNOMでの実験が困難なことが明らかとなった。そこで当初の研究計画を変更し、表面増強ラマン分光法からホットスポットの定量的な議論を行うことにした。

磁気プラズモニック物質内の貴金属ナノ粒子によりLSPRが励起する光の波長と、それより短波長/長波長の入射光を用いて表面増強ラマン分光実験を実施した。その結果、LSPR励起波長においてのみ、3桁以上に及ぶ顕著な電場の増強が確認された。これに対しLSPRより短波長側/長波長側ではホットスポット電場が急激に減少することを定量的に明らかにした。また可視光領域において波長を掃引しながらMOKEを測定したところ、LSPR励起波長で磁気プラズモニック物質の $\theta_k$ が最大となることがわかった。従ってホットスポット電場とMOKEの相関を実験的に明らかにできたと考えられる。表面増強ラマン分光法から得られたホットスポット電場強度の結果と計算から推測されるホットスポット電場強度の比較については現在も継続して研究中である。

研究の方法(3)については、コロナによる渡航制限下での国際共同研究となったため実験計画を変更せざるを得なかったが、現在シンクロトロン放射光実験施設にて予備実験の段階にある。

表 1. 表面増強ラマン分光法による結果  
左：貴金属ナノ粒子による LSPR 励起なし、右：貴金属ナノ粒子による LSPR 励起あり

	532 nm	633 nm	785 nm		532 nm	633 nm	785 nm
Power (mW)	0.174	0.041	16.6	Power (mW)	0.174	0.041	16.6
Exposure Time (s)	1	0.4	4	Exposure Time (s)	10	0.5	20
1621 cm <sup>-1</sup> Intensity (counts)	330(std 9)	64(std 10)	48.7(std 0.4)	1621 cm <sup>-1</sup> Intensity (counts)	185(std 25)	159(std 32)	38(std 9)
1621 cm <sup>-1</sup> Intensity (counts/s*mW)	1900	3900	0.733	1621 cm <sup>-1</sup> Intensity (counts/s*mW)	106	7760	0.11

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 1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 H. Yamane, Y. Yasukawa, M. Kobayashi	4. 巻 129
2. 論文標題 Polar Kerr effect and perpendicular magnetic anisotropy in Fabry-Perot cavity containing CoPt/AZO magneto-optical interference layer	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 J. Appl. Phys.	6. 最初と最後の頁 203902/1-9
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	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2件（うち招待講演 1件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 山根治起、梁瀬智、小林政信、安川雪子
2. 発表標題 CoPt 垂直磁化膜における表面プラズモン共鳴と極 Kerr 効果
3. 学会等名 第45回 日本磁気学会学術講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 安川 雪子
2. 発表標題 機能デザインに基づいた新しい磁性材料の創製
3. 学会等名 長野県テクノ財団 令和3年度第2回 磁気エレクトロニクス研究会（招待講演）
4. 発表年 2021年

〔図書〕 計0件

〔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
主たる渡航先の主たる海外共同研究者	ジャウイン グレイス リン  (Jauyn Grace Lin)	国立臺灣大学・凝態科學研究中心・Research Fellow, PI	

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			
その他の国・地域	国立臺灣大学			