

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 30 年 6 月 6 日現在

機関番号：17102

研究種目：若手研究(A)

研究期間：2015～2017

課題番号：15H05454

研究課題名(和文) 逆磁気光学効果による磁化のベクトル制御と磁気相転移の検証

研究課題名(英文) Vector control of magnetization and magnetic phase transition via the inverse magneto-optical effects

研究代表者

佐藤 琢哉 (Sato, Takuya)

九州大学・理学研究院・准教授

研究者番号：40451885

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 18,900,000円

研究成果の概要(和文)：偏光制御された超短光パルスを磁性体に照射することで、高い自由度で超高速にコヒーレント磁化制御することを目的として研究を行った。六方晶マンガン酸化物において逆磁気光学効果を用いたマグノン励起と、それを線形・非線形磁気光学効果を用いた多角的なプローブを行った。非線形磁気光学効果によるマグノンの時間分解測定は、これまでほとんど例がない。マグノンの緩和定数の強い温度依存性が観測され、緩和過程に関する考察を行った。また、光で励起されたスピン波(静磁波)が空気ギャップを乗り越えて透過する現象を実験・計算の両面から研究を行った。その結果、スピン波エヴァネッセント波として理解できることを解明した。

研究成果の概要(英文)：The purpose of this research is ultrafast coherent control of magnetization using polarized ultrashort pulses. We investigated hexagonal manganite excited via the inverse magneto-optical effect and probed via the linear- and nonlinear magneto-optical effect. For the first time, we detected time-resolved coherent magnon via the nonlinear magneto-optical effect. Temperature dependence of the magnon relaxation time was performed and its mechanism was discussed. We also investigated transmission of spin wave through an air gap, both from the experiment and calculation. As a result, we observed evanescent spin wave.

研究分野：磁気光学

キーワード：磁気光学 スピン波 フェムト秒レーザー 反強磁性体 フェリ磁性体 超高速 逆磁気光学効果

1. 研究開始当初の背景

光パルスを用いた磁化制御は近年盛んに研究されている。非熱的な磁化制御の典型例が逆ファラデー効果であり、これは透明媒質において円偏光ポンプ光によって有効磁場が生成され、磁化振動が誘起されるというものである。磁化振動は直線偏光ポンプ光のよっても誘起され、これは逆コットン・ムートン効果とよばれる。

反強磁性体は磁気副格子間に働く交換相互作用のために反強磁性共鳴周波数が数 THz に達する。またフェリ磁性体も磁気副格子間の交換共鳴モードの周波数は数 100 GHz になることが知られている。

2. 研究の目的

本研究は、偏光制御された超短光パルスを磁性体に照射することで、逆ファラデー効果、逆コットン・ムートン効果などの逆磁気光学効果によって、より高い自由度で超高速にコヒーレント磁化制御することを目的とする。

3. 研究の方法

直線偏光 (逆コットン・ムートン効果) と円偏光 (逆ファラデー効果) を用いたマグノン励起と、それをファラデー効果、コットン・ムートン効果、磁気非線形光学効果を用いた多角的なプローブを行った。

フェムト秒光パルスを用いたスピン励起は、インパルス誘導ラマン散乱に基づく。したがって、同じ機構に基づく自発的ラマン散乱を測定し、インパルス誘導ラマン散乱と比較することで、周波数空間・時間空間からの多角的アプローチが可能になる。そこで自発的ラマン散乱測定装置を立ち上げ、マルチフェロイック物質等の測定を行い、偏光依存性を詳細に解析した。

4. 研究成果

これまで反強磁性体では逆ファラデー効果は作用しないと考えられてきたが、我々は反強磁性体 NiO を用いて、作用することを実証した。逆ファラデー効果と逆コットン・ムートン効果によるマグノン生成効率の比較を行い、逆コットン・ムートン効果による高い効率が示された。また、S ドメインの分布に関する知見を得ることができた。

軌道角運動量が部分的に消失していない反強磁性体 CoO において、マグノンのラマン散乱と磁気光学時間分解ポンプ・プローブ測定を行い、軌道角運動量を反映した高い散乱能が確認された。スピン-軌道相互作用による大振幅な磁気振動 (~9 THz) 励起を観測した。

3 副格子反強磁性体 YMnO₃ では光の 3 つの偏光自由度をフルに活かし、ポンプ光の 3 つのストークスパラメータを試料に 1 対 1 に転写し、またそれをプローブ光の偏光変調として 1 対 1 で読み取ることを実証した。マグノンの緩和定数の強い温度依存性が観測され、緩和

過程に関する考察を行った。

フェリ磁性希土類鉄ガーネットにおいて、強磁性共鳴モードとともに交換共鳴モードを励起した。その周波数は交換共鳴に寄与する全磁化に比例し、低温において 1 THz にも達した。

また、光で励起されたスピン波 (静磁波) が空気ギャップを乗り越えて透過する現象を実験・計算の両面から研究を行った。その結果、スピン波エヴァネッセント波として理解できることを解明した。

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 9 件)

- ① T. Satoh, R. Iida, T. Higuchi, Y. Fujii, A. Koreeda, H. Ueda, T. Shimura, K. Kuroda, V. I. Butrim, B. A. Ivanov, Excitation of coupled spin-orbit dynamics in cobalt oxide by femtosecond laser pulses, *Nature Communications* 8, 638 (2017). 査読有 DOI: 10.1038/s41467-017-00616-2
- ② Y. Hashimoto, S. Daimon, R. Iguchi, Y. Oikawa, K. Shen, K. Sato, D. Bossini, Y. Tabuchi, T. Satoh, B. Hillebrands, G. E. W. Bauer, T. H. Johansen, A. Kirilyuk, Th. Rasing, E. Saitoh, All-optical observation and reconstruction of spin wave dispersion, *Nature Communications* 8, 15859 (2017). 査読有 DOI: 10.1038/ncomms15859
- ③ I. Yoshimine, Y. Y. Tanaka, T. Shimura, T. Satoh, Unidirectional control of optically induced spin waves, *EPL (Europhysics Letters)* 117, 67001-1-5 (2017). 査読有 DOI: 10.1209/0295-5075/117/67001
- ④ C. Tzschaschel, K. Otani, R. Iida, T. Shimura, H. Ueda, S. Günther, M. Fiebig, T. Satoh, Ultrafast optical excitation of coherent magnons in antiferromagnetic NiO, *Physical Review B* 95, 174407-1-11 (2017). 査読有 DOI: 10.1103/PhysRevB.95.174407
- ⑤ S. Parchenko, T. Satoh, I. Yoshimine, F. Stobiecki, A. Maziewski, A. Stupakiewicz, Non-thermal optical excitation of terahertz-spin precession in a magneto-optical insulator, *Applied Physics Letters*

108, 032404-1-5 (2016). 査読有
DOI: 10.1063/1.4940241

- ⑥ 佐藤琢哉, 逆ファラデー効果を用いた超高速スピン制御, 応用物理 85, 9-14 (2016). 査読有
- ⑦ T. Satoh, R. Iida, T. Higuchi, M. Fiebig, and T. Shimura, Writing and reading of an arbitrary optical polarization state in an antiferromagnet, Nature Photonics 9, 25-29 (2015). 査読有
DOI: 10.1038/nphoton.2014.273
- ⑧ 佐藤琢哉, 光を用いたスピン波生成・検出技術, まぐね 10, 307-313 (2015). 査読有
- ⑨ 佐藤琢哉, 逆磁気光学効果を用いた偏光一磁化振動の3次元転写, 日本物理学会誌 70, 840-844 (2015). 査読有

[学会発表] (計 74 件)

- ① 佐藤琢哉, 逆ファラデー効果を用いた超高速磁化制御と時間分解イメージング (invited), レーザー学会学術講演会第 38 回年次大会, Jan. 24-26, 2018 (京都市勧業館みやこめっせ)
- ② T. Satoh, Optical excitation of magnons in antiferromagnets (invited), Reimei/GP-Spin/ICC-IMR International Workshop "New Excitations in Spintronics", Jan. 10-14, 2018 (IMR, Tohoku University)
- ③ 佐藤琢哉, フェムト秒パルスを用いた反強磁性体の超高速制御 (invited), 日本磁気学会 65 回スピンエレクトロニクス専門研究会/応用物理学会スピントロニクス研究会, Nov. 22, 2017 (中央大学駿河台記念館)
- ④ 佐藤琢哉, 光パルスを用いた反強磁性体の超高速磁化制御, 第 11 回物性科学領域横断研究会 (領域合同研究会), P029, Nov. 17-18, 2017 (東京大学物性研究所)
- ⑤ 佐藤琢哉, 反強磁性体におけるテラヘルツ・スピンドイナミクス, 光・熱・磁気の相互作用を利用した新規スピンデバイス・ストレージ技術調査専門委員会, Nov. 16-17, 2017 (東北大学)
- ⑥ T. Satoh, Optical excitation of magnons in antiferromagnets (invited), CEMS Symposium on Trends in Condensed

Matter Physics, Nov. 6-8, 2017 (RIKEN, Saitama, Japan)

- ⑦ 佐藤琢哉, 反強磁性体におけるテラヘルツ・スピン制御 (invited), 豊田理研ワークショップ, Oct. 19-20, 2017 (豊田産業技術記念館)
- ⑧ 佐藤琢哉, 光パルスを用いたスピン波伝播イメージング (invited), 日本放射光学学会第 9 回若手研究会「最先端のパルス光で観る超高速科学」, Sep. 11-12, 2017 (東京大学本郷キャンパス)
- ⑨ 佐藤琢哉, 光で生成したスピン波のトンネル効果 (invited), 2017 年 第 78 回応用物理学会秋季学術講演会シンポジウム「光とスピンの織りなす研究の最前線」, 6p-C18-7, Sep. 5-8, 2017 (福岡国際会議場・国際センター)
- ⑩ 佐藤琢哉, 反強磁性体・フェリ磁性体酸化物における光パルスを用いたテラヘルツ・マグノン励起 (invited), 2017 年 第 78 回応用物理学会秋季学術講演会シンポジウム「酸化物のテラヘルツ光物性とデバイス応用への展望」, 6p-A202-2, Sep. 5-8, 2017 (福岡国際会議場・国際センター)
- ⑪ T. Satoh, Time-resolved imaging of photo-induced spin wave tunneling through an air (invited), Magnonics 2017, Aug. 7-10, 2017 (Oxford, UK)
- ⑫ 佐藤琢哉, 逆磁気光学効果による超高速磁化制御 (invited), 第 64 回日本磁気学会スピンエレクトロニクス専門研究会「スピンオプトロニクス」, Jun. 19, 2017 (名古屋大学)
- ⑬ 佐藤琢哉, 時間分解スピン波イメージングとトンネル現象 (invited), 顕微ナノ・表面科学合同シンポジウム, Mar. 2-3, 2017 (東京理科大学葛飾キャンパス)
- ⑭ 佐藤琢哉, 逆ファラデー効果を用いたマグノン生成と伝播制御 (invited), ATI スピントロニクス研究会「多様な光学的スピン変換現象」, Feb. 17, 2017 (TKP ガーデンシティお茶の水)
- ⑮ T. Satoh, Optical excitation of coupled spin-orbit dynamics in antiferromagnetic CoO (invited),

- Korea-Japan Spin-Orbit Workshop, Dec. 15-16, 2016 (Fukuoka Reient Hotel)
- ⑩ T. Satoh, Time- and space-resolved spin wave transmission through an air gap (invited), 4th JSPS Core-to-Core Workshop on "New-Concept Spintronic Devices", Nov. 19-20, 2016 (Tohoku University, Japan)
- ⑪ T. Satoh, Opto-magnonics: Spin-wave generation and detection by light (invited), International workshop on novel photo induced phenomena and applications, Nov. 11-12, 2016 (Nihon University, Japan)
- ⑫ T. Satoh, Time-resolved imaging of spin wave transmission, International Workshop on Nano Spin Conversion Science (NSCS) & Quantum Spin Dynamics QSD, N-25, Oct. 12-15, 2016 (The University of Tokyo, Japan)
- ⑬ T. Satoh, Opto-Magnonics: Spin-Wave Manipulation by Light Pulses (invited), The 222nd Special CMSM seminar, Sep. 21, 2016 (NIMS)
- ⑭ 佐藤琢哉, 逆ファラデー効果による超高速磁化制御 (invited), CMRC 研究会「量子ビームを用いた多自由度強相関物質における動的交差相関物性の解明」と PF 研究会「共鳴軟 X 線散乱を用いた構造物性研究の進展」の合同ワークショップ, Sep. 20-21, 2016 (KEK つくばキャンパス)
- 21 T. Satoh, I. Yoshimine, T. Shimura, Time-resolved imaging of spin wave transmission through an air gap (invited), Symposium "Advance and development of photo magnonics", 6pC-8, 第40回日本磁気学会学術講演会, Sep. 5-8, 2016 (金沢大学角間キャンパス)
- 22 佐藤琢哉, 光で誘起したスピン波トンネル効果の時間分解イメージング (invited), 電気学会 A 部門大会, 5-B-a2-1, Sep. 5-6, 2016 (九州工業大学戸畑キャンパス)
- 23 T. Satoh, Writing and reading of an optical polarization state in hexagonal YMnO_3 (invited), 13th Russia/CIS/Baltic/Japan Symposium on Ferroelectricity (RCBJSF)-International Workshop on Relaxer Ferroelectrics (IWRf), Invite18, Jun. 19-23, 2016 (Matsue, Japan)
- 24 T. Satoh, Generation and control of magnetic excitations by polarized light in antiferromagnets and ferrimagnets (invited), The Sir Martin Wood Prize Lecture, Jun. 3, 2016 (University of York, UK)
- 25 T. Satoh, Generation and control of magnetic excitations by polarized light in antiferromagnets and ferrimagnets (invited), The Sir Martin Wood Prize Lecture, Jun. 2, 2016 (University of Exeter, UK)
- 26 T. Satoh, Generation and control of magnetic excitations by polarized light in antiferromagnets and ferrimagnets (invited), The Sir Martin Wood Prize Lecture, Jun. 1, 2016 (University of Oxford, UK)
- 27 T. Satoh, Generation and control of magnetic excitations by polarized light in antiferromagnets and ferrimagnets (invited), The Sir Martin Wood Prize Lecture, May 30, 2016 (Max-Planck-Institute for solid state research, Germany)
- 28 佐藤琢哉, 偏光を用いた反強磁性体・フェリ磁性体における磁気励起の光学的生成と制御 (invited), Sir Martin Wood Prize Lecture, 東京大学大学院理学系研究科・理学部物理学教室・ミレニアムサイエンスフォーラム共催 談話会, Feb. 18, 2016 (東京大学小柴ホール)
- 29 佐藤琢哉, 直線・円偏光パルスを用いたマグノンのコヒーレント制御 (invited), 東京大学物性研究所短期研究会「量子物質研究の最前線」, G4, Dec. 8-9, 2015 (東京大学柏キャンパス)
- 30 佐藤琢哉, 偏光を用いた反強磁性体・フェリ磁性体における磁気励起の光学的生成と制御 (invited), Sir Martin Wood Prize Lecture, 大阪大学 博士課程教育リーディングプログラム SMW 賞受賞者講演会, Dec. 4, 2015 (大阪大学シグマホール)

- 31 T. Satoh, Magnetization Dynamics and Optical Control of Antiferromagnets (invited), 第20回スピン工学の基礎と応用(PASPS-20), Invite-3, Dec. 3-4, 2015 (東北大学片平キャンパス)
- 32 T. Satoh, R. Iida, T. Higuchi, M. Fiebig, T. Shimura, One to One Mapping of Optical Polarization to Magnetic Oscillations in Hexagonal YMnO₃, 2nd International Symposium on Frontiers in Materials Science (FMS2015), R1-3-3, Nov. 19-21, 2015 (Waseda University, Japan)
- 33 T. Satoh, Optical control of antiferromagnetism (invited), International Workshop : Spintronics with Antiferromagnets (32nd Reimei Workshop on Frontiers of Condensed Matter Physics), Nov. 16-17, 2015 (Tohoku University, Japan)
- 34 T. Satoh, Generation and control of magnetic excitations by polarized light in antiferromagnets and ferrimagnets (invited), Sir Martin Wood Prize Lecture, 18th Millennium Science Forum, Nov. 11, 2015 (駐日英国大使館)
- 35 佐藤琢哉, 六方晶反強磁性体を用いた偏光-磁化振動の3次元転写, 第5回光科学異分野横断萌芽研究会, Aug. 4-6, 2015 (ホテル竹島)
- 36 佐藤琢哉, 反強磁性体における逆磁気光学効果~超高速磁化制御に向けて~ (invited), 第25回日本磁気学会光機能性デバイス・材料専門研究会「磁気光学材料と効果を用いた評価・デバイスへの応用」, Jul. 30, 2015 (九州工業大学戸畑キャンパス)
- 37 T. Satoh, R. Iida, T. Higuchi, M. Fiebig, T. Shimura, Antiferromagnetic writing and reading of an optical polarization state, 20th International Conference on Magnetism (ICM), Th. I-P02, Jul. 5-10, 2015 (Barcelona, Spain)

[図書] (計0件)

[産業財産権]

○出願状況 (計0件)

○取得状況 (計2件)

名称: スピン波の誘起・初期位相制御システム及び方法、スピン波の誘起・伝播制御システム及び方法

発明者: 佐藤琢哉, 志村努, 吉峯功, 飯田隆吾

権利者: 同上

種類: 特許

番号: 特許第6116053号

出願年月日: 平成25年7月4日

取得年月日: 平成29年3月31日

国内外の別: 国内

名称: 波動の誘起・伝播制御システム及び波動の誘起・伝播制御方法

発明者: 佐藤琢哉, 黒田和男, 志村努, 照井勇輝

権利者: 同上

種類: 特許

番号: 特許第5979757号

出願年月日: 平成24年9月14日

取得年月日: 平成28年8月5日

国内外の別: 国内

[その他]

ホームページ等

<https://ocmp.phys.kyushu-u.ac.jp/>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

佐藤 琢哉 (SATO, Takuya)

九州大学・理学研究院・准教授

研究者番号: 40451885

(2) 研究分担者

なし

(3) 連携研究者

なし

(4) 研究協力者

姫野 滉盛 (HIMENO, Kosei)

松本 慧大 (MATSUMOTO, Keita)