

令和 4 年 6 月 13 日現在

機関番号：11301

研究種目：研究活動スタート支援

研究期間：2019～2021

課題番号：19K23419

研究課題名（和文）遍歴磁性体における光誘起スピンドYNAMIXの理論

研究課題名（英文）Photoinduced spin dynamics in correlated itinerant magnets

研究代表者

小野 淳 (Ono, Atsushi)

東北大学・理学研究科・助教

研究者番号：40845848

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 2,200,000円

研究成果の概要（和文）：本研究課題では、磁性体への光照射によって生じるピコ秒程度の高速な実時間ダイナミクス（DYNAMIX）の理論研究を行った。特に遍歴的な電子と局所的な磁気モーメントが結合した系に焦点を置いて解析を行い、電子を光電場によって駆動することで磁気的性質が大きく変化することが見出された。具体的には、強磁性金属へのテラヘルツパルス電場照射によって、反強磁性絶縁体状態や120度ネール状態、スピンスカラーカイラル状態など様々な磁気秩序状態が現れることや、反強磁性磁化の方向を回転させることが可能であることが明らかになった。

研究成果の学術的意義や社会的意義

近年、磁性体への光照射効果の研究が様々な角度から精力的に進められているが、その一方で磁性を担う多体電子の動力学の解析は困難を伴い、未解明の事柄が多く残されている。本研究課題では磁性を担う局所的な磁気モーメントと電気伝導性等を担う遍歴的な電子とが強く結合した模型の数値的解析を行い、既存の平衡状態の理論からは予想されない新たな非平衡状態を理論的に見出した。これは非平衡物性物理学に新たな学術的知見をもたらすのみならず、将来的には新たな高速磁気デバイスの基礎原理にも繋がる可能性があるものと期待される。

研究成果の概要（英文）：In this research project, we have theoretically investigated the light-induced ultrafast real-time dynamics in magnets, focusing on systems in which mobile electrons are coupled with localized magnetic moments. We have found that the magnetic properties are drastically changed when the electrons are driven by an electric field of light. For example, it was demonstrated that terahertz electric-field pulses can induce transitions to various magnetically ordered states such as an antiferromagnetic insulating state, a 120-degree Neel state, and a spin-scalar chiral state, and that the direction of antiferromagnetic magnetization can also be controlled by light.

研究分野：非平衡物性理論

キーワード：遍歴磁性体 光誘起相転移 実時間ダイナミクス スピнкаイラルリティ ディラック半金属 スピン軌道トルク スピントロニクス

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属します。

1. 研究開始当初の背景

高強度・超短パルスレーザー光源等の技術発展を背景として、光照射による磁性の高速制御に関する研究が精力的に進められている。特に磁性の起源である交換相互作用を光によって直接的に操作するというアイデアが理論的に提案されており、従来とは異なる磁性制御の原理として関心を集めている。一方で、これまでの先行研究は局在磁性体を対象とするものが多く、電子の持つ電荷自由度とスピン自由度が結合した遍歴磁性体の光制御に関する研究は限定的であった。磁性の源となるスピン自由度のみならず電荷自由度をあらわに考慮することで、光誘起高速ダイナミクスへの理解が一層深まるだけでなく、より豊かな物理が現れることが期待される。

2. 研究の目的

本研究課題では主に遍歴磁性体に注目し、光照射によって誘起される高速な電荷・スピンドイナミクスを解明すること、ならびにこれによって新たな磁性の高速光制御の可能性を探ることを目的とした。

3. 研究の方法

局在的な磁気モーメントと遍歴的な伝導電子が結合した系を記述する理論模型の一つとして二重交換模型(近藤格子模型)が古くから知られている。局在磁気モーメントを古典的なスピンベクトルとして取り扱う近似を導入することで、比較的大きいクラスターサイズでの数値計算が可能となるだけでなく、エネルギー緩和を取り入れることができる。局在スピン系と遍歴電子系の時間発展は、それぞれランダウ・リフシッツ・ギルバート方程式とフォノンイマン方程式を数値的に解くことで解析することができる。また、必要に応じてフロケ理論や非平衡グリーン関数法、テンソルネットワーク法等を用いた多角的な解析を行った。

4. 研究成果

主な成果の概要を以下に記す。

(1) 直流電場印加による強磁性金属相から反強磁性絶縁体相への転移

二重交換模型で記述される強磁性金属状態に直流電場を印加することで反強磁性への不安定性が誘起され、定常状態における電流が電場の大きさに反比例することが見出された(図1)。これは直流電場印加によって反強磁性絶縁体への転移が生じることを示唆する。電場下の絶縁体的状態としてワニエ・シュタルク局在が古くから知られているが、本研究で見出されたものは磁気転移を伴っており、新しいタイプの光誘起相転移であると捉えられる。転移に必要な電場の強度は最近の高強度テラヘルツパルス光源によって到達可能な大きさであり、実験的な検証のための指針を与えることができた。

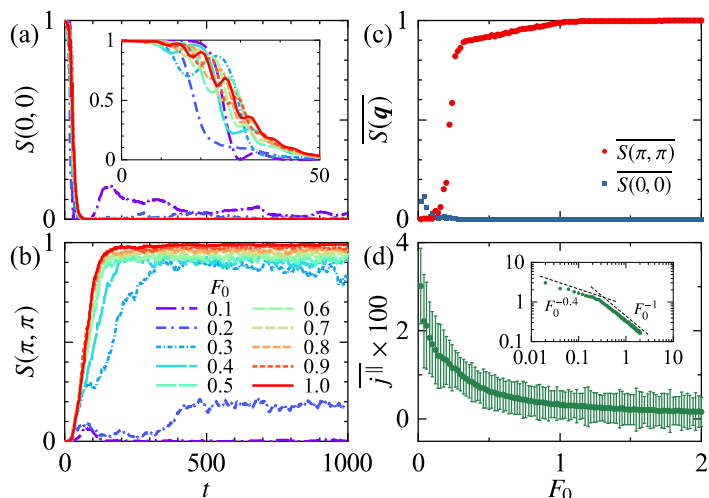


図1. (a, b)直流電場印加時のスピン構造因子の(a)強磁性成分および(b)反強磁性成分の時間変化。 $F_0$ は電場の強さを表す。(c, d)定常状態における(c)スピン構造因子および(d)電流密度の時間平均値の電場強度依存性。A. Ono and S. Ishihara, J. Phys. Soc. Jpn. **89**, 095001 (2020)より引用。

### (2) 空間反転対称な遍歴磁性体におけるスピンスカラーカイラリティの光制御

三角格子上の空間反転対称性を持つ強磁性金属へのテラヘルツ電場パルスの照射により、スピン 120 度構造やスカラーカイラル構造と呼ばれる磁気構造が現れることが見出された。この 120 度構造は、平衡状態では強磁性的な二重交換相互作用が光照射下において反強磁性的に振る舞うという我々が以前に得た知見[A. Ono and S. Ishihara, Phys. Rev. Lett. **119**, 207202 (2017)]を三角格子系に拡張することで理解でき、“反強磁性的”二重交換相互作用という概念を一層補強するものである。スピンスカラーカイラル構造は、従来は反対称相互作用によって安定化されるものとされてきた非共面的磁気構造の一つであるが、近年は空間反転対称な系においても実現することが理論的・実験的に報告されており、大きな関心を集めている。その非平衡状態での安定性や制御性に関する研究はごく限られたものであったが、本研究によって空間反転対称な系においてもスピンスカラーカイラリティの光制御が可能であることが明らかになった。さらに最近、そのカイラリティの符号が円偏光の左右によって選択的に制御できることが見出された。このような円偏光による選択性は光振幅に対して非単調かつ非振動的な振る舞いを示しており、さらなる研究の進展が見込まれる。

### (3) 反強磁性ディラック半金属における交替磁化の高速再配向

スピン軌道相互作用の存在が本質的に重要となる反強磁性ディラック半金属における光誘起ダイナミクスを解析を行った。スピントロニクス分野ではこれまで直流電流から誘起される交替的なスピン軌道トルクによる交替磁化方向のスイッチングが行われており、高効率な磁性制御法として注目を集めていたが、光パルス照射による高速なダイナミクスに関する研究は限定的であり、特に磁気構造と結合した電子構造については未解明であった。本研究では 2 副格子自由度を持つ二重交換模型を採用し、直流電場とテラヘルツパルス電場によって誘起される実時間発展を調べた。その結果、外部電場に追従して流れる反磁性電流によって交替的なトルクが生じ、これと磁気異方性に起因するトルクの協奏によって、ピコ秒程度の時間スケールで交替磁化方向が回転すること、ならびに回転に伴ってディラック点のバンドギャップが変調することが明らかになった (図 2)。さらに、交替磁化の観測、特にその高速時間分解測定は一樣磁化に比して実験的に困難であるが、この系では共線的反強磁性秩序状態であっても磁気光学効果が現れ、これにより交替磁化方向の時間分解測定が可能であることを理論的に示した。

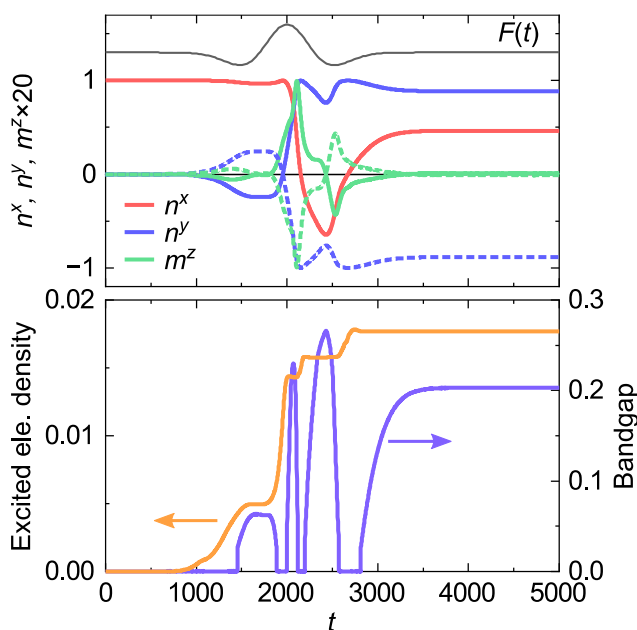


図 2. 単サイクルテラヘルツパルス電場 (灰色実線) を照射した際の(上)交替磁化, ならびに(下)励起電子密度およびバンドギャップの時間依存性。A. Ono and S. Ishihara, npj Comput. Mater. **7**, 171 (2021)より引用。

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計3件（うち査読付論文 3件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 Atsushi Ono, Sumio Ishihara	4. 巻 7
2. 論文標題 Ultrafast reorientation of the Neel vector in antiferromagnetic Dirac semimetals	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 npj Computational Materials	6. 最初と最後の頁 171
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1038/s41524-021-00641-2	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

1. 著者名 Atsushi Ono, Sumio Ishihara	4. 巻 89
2. 論文標題 Electric-Field-Induced Antiferromagnetic Insulating State in a Metallic Ferromagnet	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Journal of the Physical Society of Japan	6. 最初と最後の頁 095001 ~ 095001
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.7566/JPSJ.89.095001	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 Shohei Imai, Atsushi Ono, and Sumio Ishihara	4. 巻 124
2. 論文標題 High Harmonic Generation in a Correlated Electron System	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Physical Review Letters	6. 最初と最後の頁 157404
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1103/PhysRevLett.124.157404	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20件（うち招待講演 3件 / うち国際学会 6件）

1. 発表者名 Atsushi Ono
2. 発表標題 Ultrafast reorientation of the Neel vector in antiferromagnetic Dirac semimetals
3. 学会等名 Electronic Properties of Two-Dimensional Systems / Modulated Semiconductor Structures (EP2DS-24/MSS-20) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Atsushi Ono, Sumio Ishihara
2. 発表標題 Photocontrol of magnetic and electronic structures in antiferromagnetic Dirac semimetals
3. 学会等名 Photoinduced Phase Transitions and Cooperative Phenomena (PIPT7) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 小野淳, 赤城裕
2. 発表標題 空間反転対称な遍歴磁性体におけるスピンスカラーカイラリティの円偏光制御
3. 学会等名 日本物理学会第77回年次大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 今井渉平, 小野淳
2. 発表標題 トンネル励起された電子波束による高次高調波の時間波形
3. 学会等名 日本物理学会第77回年次大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 小野淳
2. 発表標題 テラヘルツパルスによる強誘電体における第二高調波発生の実時間変調
3. 学会等名 日本物理学会2021年秋季大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 今井渉平, 小野淳
2. 発表標題 光駆動電子の時間反転現象を通した高次高調波発生の解析
3. 学会等名 日本物理学会2021年秋季大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Shohei Imai, Atsushi Ono, Sumio Ishihara
2. 発表標題 High harmonic generation in spontaneously symmetry broken systems
3. 学会等名 Photoinduced Phase Transitions and Cooperative Phenomena (PIPT7) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Shohei Imai, Atsushi Ono, Sumio Ishihara
2. 発表標題 Optical momentum-resolved spectroscopy based on time-reversal dynamics in correlated insulators
3. 学会等名 New Generation in Strongly Correlated Electron Systems (NGSCES-2021) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Atsushi Ono, Sumio Ishihara
2. 発表標題 Ultrafast reorientation of the Neel vector in antiferromagnetic Dirac semimetals
3. 学会等名 APS March Meeting 2021 (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 小野淳, 赤城裕
2. 発表標題 三角格子遍歴磁性体における光誘起スピンスカラーカイラル状態
3. 学会等名 日本物理学会第76回年次大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 今井渉平, 小野淳, 石原純夫
2. 発表標題 相関絶縁体における光励起キャリアのエネルギー分散測定法の提案
3. 学会等名 日本物理学会第76回年次大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 小野淳, 石原純夫
2. 発表標題 反強磁性ディラック半金属における磁性・伝導性の光制御の理論II
3. 学会等名 日本物理学会2020年秋季大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 今井渉平, 小野淳, 石原純夫
2. 発表標題 中性イオン性転移系の高次高調波発生と強結合相関効果
3. 学会等名 日本物理学会2020年秋季大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Atsushi Ono and Sumio Ishihara
2. 発表標題 Double-Exchange and RKKY Interactions in Photoinduced Nonequilibrium States in Correlated Magnets
3. 学会等名 International Conference on Strongly Correlated Electron Systems (SCES 2019) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 小野淳, 山下竜律, 石原純夫
2. 発表標題 遍歴磁性体の光励起・緩和ダイナミクスにおけるスピン軌道相互作用の効果
3. 学会等名 日本物理学会2019年秋季大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 今井渉平, 小野淳, 石原純夫
2. 発表標題 相関電子系における高次高調波の発生機構
3. 学会等名 日本物理学会2019年秋季大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 小野淳
2. 発表標題 遍歴磁性体における光誘起現象
3. 学会等名 第9回凝縮系理論の最前線 (招待講演)
4. 発表年 2020年



1. 発表者名 石原純夫, 今井渉平, 正木祐輔, 小野淳
2. 発表標題 光誘起非平衡状態の理論研究
3. 学会等名 第67回応用物理学会春季学術講演会 (招待講演)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 小野淳, 石原純夫
2. 発表標題 反強磁性ディラック半金属における磁性・伝導性の光制御の理論
3. 学会等名 日本物理学会第75回年次大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 今井渉平, 小野淳, 石原純夫
2. 発表標題 中性イオン性転移系における高次高調波発生
3. 学会等名 日本物理学会第75回年次大会
4. 発表年 2020年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

<p>高強度超短光パルスによる光高調波発生の新しい仕組みを解明  <a href="http://www.tohoku.ac.jp/japanese/2020/04/press20200420-01-kocho.html">http://www.tohoku.ac.jp/japanese/2020/04/press20200420-01-kocho.html</a></p>
--

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
--	---------------------------	-----------------------	----

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
---------	---------