

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 20 日現在

機関番号：32601

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2013～2015

課題番号：25287088

研究課題名(和文) 強相関電子系における動的電気磁気効果の理論的研究

研究課題名(英文) Theoretical study of dynamical magnetoelectric phenomena in strongly correlated models

研究代表者

古川 信夫 (Furukawa, Nobuo)

青山学院大学・理工学部・教授

研究者番号：00238669

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 7,500,000円

研究成果の概要(和文)：本研究はモット絶縁体を中心とした強相関電子系をとりあげ、微視的模型における電荷自由度および磁気自由度の動的応答を求める。電気磁気相互作用を理論的に探索するとともに、これらの相互作用により実現する新しい動的電気磁気現象を予言・設計することを目的とした。

このような系における電磁波による動的な電場応答と磁場応答の干渉から、方向二色性などの特異な動的応答を調べた。微視的模型から、非共線磁性体における新奇電気磁気相互作用を導いた。動的電気磁気現象を起こす新奇スピン構造としてスキルミオン相をとりあげ、その性質を調べ、スピン構造制御について議論した。

研究成果の概要(英文)：We have studied dynamical magnetic and electric responses for microscopic models of strongly correlated electron systems, in particular Mott insulators. We have investigated magnetoelectric interactions which appear in these models. We have also tried to predict and design novel dynamical magnetoelectric phenomena through these interactions.

From the interference of the dynamical electric and magnetic response caused by incident electromagnetic waves, we investigated characteristic dynamic response, such as non-reciprocal direction dichroisms. From a microscopic model, we derived novel magnetoelectric interactions in non-collinear spin systems. We focused on the skyrmion phases as a novel spin structure which causes a dynamic electric magnetic phenomena, to examine their dynamical natures and to discuss the control of spin textures.

研究分野：物性理論

キーワード：動的電気磁気効果 スキルミオン らせん磁性体 キラル結晶 円偏光レーザー マイクロ波素子

1. 研究開始当初の背景

(1) 電気磁気効果とは、「電場による磁気応答」や「磁場による電荷応答」を示す現象で、交差相関効果とも呼ばれる。最近になって電荷の秩序(強誘電性など)と磁化の秩序(強磁性など)が共存するマルチフェロイクス物質が数多く発見され、これらの物質において巨大な電気磁気効果が観測されることから、加速的に研究が進められている。動的電気磁気効果とは、主に電磁波の電場成分・磁場成分に対する交差相関による動的応答を示す。代表的な例としてエレクトロマグノンがあげられる。これは、マグノンが電磁波の電場成分によって励起されるという現象で、通常の磁気共鳴(電磁波の磁場成分による磁気励起)よりも強い共鳴吸収を示すことが期待されている。さらに、これらの複合自由度の励起が必然的に持っている複数の励起プロセス(電場による励起と磁場による励起)間の干渉が、巨大な方向二色性や旋光性などの劇的な磁気光学現象を引き起こすことも申請者らの研究によって示された。

(2) 旧来の電気磁気効果の研究は、主に固体結晶の対称性の議論により進められてきた。しかし、近年になって微視的模型に立脚したスピン誘起電気分極のメカニズムが理解されるようになった。代表例としては桂永長らによるスピントラップ機構が挙げられる。これを契機に、らせん磁性体における強誘電相としてのマルチフェロイクス、およびその揺らぎと結合したエレクトロマグノン励起などが、実験および理論の両面で精力的に研究されるようになった。さらに、さまざまな微視的模型から種々のスピン誘起電気分極メカニズムが導かれ、同時にそれらによって引き起こされる電気磁気効果が議論されるようになった。

2. 研究の目的

(1) 強相関電子系における微視的模型に立脚した、電気磁気相互作用の解明

微視的模型としてスピン・電荷・軌道の複合自由度を持つモット絶縁体などの強相関電子系模型を取り上げ、新規の電気磁気相互作用(電荷-磁気自由度間の有効的な相互作用)を探索する。このような系では、スピン軌道相互作用や交換磁歪のみならず、電子励起、トポロジカル効果など、様々な要因でスピン自由度と電荷自由度の有効相互作用が生じることから、未知の機構が存在する可能性は非常に高い。特に、動的なスピン誘起電流や電場誘起スピン流など、新規な動的結合機構の確立を目指す。

同時に、様々な現実物質を取り上げ、それぞれの系における(既知の機構を含む)さまざまな電気磁気相互作用の出現について議論する。ここでは単なる対称性の議論を越えて、その格子構造を元に、物質の個性を考慮した多原子・多自由度の微視的模型から、ど

のような電気磁気相互作用が生じるのかを、定性的さらには定量的に示すことを行う。

(2) 電気磁気相互作用によって引き起こされる動的電気磁気効果の解明

種々の電気磁気相互作用を導入した微視的模型における動的電気磁気応答テンソルを計算し、この系の電磁波応答を解明する。このような応答は、電氣的・磁氣的な揺らぎによって生じるため、(静的)強誘電性は必須ではない。このため、これまで重点的に調べられなかった反強磁性・フェリ磁性などの単純な共線的(コリニア)磁気秩序系や、スキルミオンや磁気ボルテックスなどの非共線的なスピントクスチャ系など、さらにはバルク磁性体だけでなく接合界面や、希釈磁性半導体なども対象とした幅広い研究を行う。ここでは、線形応答のみならず、非線形応答や共鳴励起による巨大応答なども含み、新規動的電気磁気現象の予言・設計も視野に入れる。

(3) 動的電気磁気効果を用いた、スピン・電荷・軌道自由度等の秩序構造の検出、同定、イメージングおよび制御手法の開発・設計

一般に電気磁気相互作用はスピン変数の偶数次項を含むため、動的電気磁気応答テンソルは高次スピン構造に依存し、したがってスピン多体相関(三体以上)を検知することも可能である。種々の電気磁気相互作用の存在によってどのような秩序構造が動的電気磁気効果を引き起こすかを包括的に調べ、エキゾチックな秩序相の検知・イメージング手法の確立を目指す。

また逆に、電気磁気効果を用いることによってスピン構造を電場で制御することが可能であり、特に局所・動的電場に対する非線形・不可逆な磁気応答は

3. 研究の方法

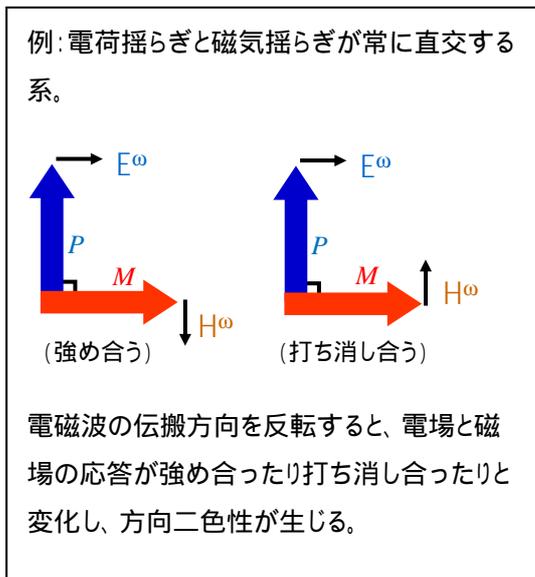
本研究では主に強相関電子系を対象に、ハイゼンベルグ模型、二重交換模型、多軌道ハバード模型などの微視的模型のダイナミクスを主に数値的に求め、動的電気磁気応答を包括的に研究する。ダイナミクスの計算方法としては、厳密対角化の手法に連分展開法を用いて動的スペクトルを得る、またはLLG方程式を解くことによりスピンの動力学を直接シミュレートする、などの方法をとる。

計画研究を遂行中に、スピン Skyrmion 構造を持つ材料における電気磁気効果の研究が実験的にも理論的にも精力的に行われるようになったため、本計画でもこれを主な対象として取り上げ研究を行った。

4. 研究成果

(1) 電気磁気効果を示す磁性体において、同一マグノンモードが互いに直交した選択則において同時に電場励起と磁場励起を行う場合、電磁波の電場および磁場成分の干渉

効果が生じることをらせん磁性体を例にとって調べた。このような系における電気および磁気双極子モーメントの共存によってトポロジカルな磁気モーメントが発生し、これによって方向二色性を示すことを示した。



(2) 空間対称性の破れた結晶構造を持つ磁性絶縁体において、従来知られていた桂-永長-Balazsky 型の電気磁気相互作用とは異なる種類のスピン反対称結合が生じ、これによって今まで見逃されていた様々な磁気構造をもつ磁気強誘電体や動的電気磁気効果の発現が提案された。具体例として、ピスマス鉄酸化物 BiFeO_3 の横方向電気分極や、層状三角格子系 CuFeO_2 , $\text{RbFe}(\text{MoO}_4)_2$ などにおける強誘電性・エレクトロマグノン励起などについて調べた。 BiFeO_3 については、この物質の実験データと合わせて Nature Communications 誌にて発表した。

(3) 空間反転対称性の破れたキラルな結晶構造を持つ磁性絶縁体において、磁気強誘電性を示すスキルミオンやスパイラル磁性、強制強磁性相などの磁気テクスチャで実現するエレクトロマグノン励起に由来する物質機能や物性現象の探索に取り組んだ。その結果、典型的なトポロジカル磁気構造を基盤とする新奇な磁性強誘電体であるキラル絶縁磁性体 (Cu_2SeO_3) において、空間反転対称性の破れに由来する Dzyaloshinskii-守谷相互作用によって長周期の変調を獲得した磁気秩序相が、これまでに報告例がないほど巨大なマイクロ波周波数領域の磁気カイラル二色性を示すことを理論的に予言し、成果を論文にまとめた。さらに、この予言結果を検証すべく、実験グループと共同研究を行った。エレクトロマグノン励起の二種類の励起チャネル(電場励起と磁場励起)の干渉効果に由来する「マイクロ波ダイオード効果」を、いくつかのマイクロ波偏光配置で、巨大な効

果として発見した。この成果は、Nature Communications 誌などにて発表した。この現象は、高性能なマイクロ波アイソレーター素子の実現に道を開くものとして大きな注目を集めており、日本物理学会誌に依頼記事を執筆し、特許出願を行った。

(4) 対称性の議論から「結晶構造が C_{nv} の点群に属する絶縁磁性体」が有望な物質の候補であることを見出し、そのような化合物中心に調べた結果、世界で2例目となる磁気強誘電性を示すスキルミオン相を発現する物質を発見した。この物質の磁性と強誘電性を記述する微視的な数理モデルを構築し、モンテカルロ法による数値計算で解析することで、この物質が示す磁気強誘電相図と磁気構造を余すところなく解明した。

(5) キラルな結晶構造を持つ絶縁性磁性体 Cu_2SeO_3 を対象に、この物質の薄膜試料において探針電極により局所的に電場を印加することで、トポロジカルな渦状磁気構造であるスキルミオンを書き込めることを理論的に実証した。さらに、その物理的なメカニズムとして、電気磁気結合を通じた電場による局所磁化反転に基づく機構を明らかにした。この成果を Applied Physics Letters 誌や Advanced Electronic Materials 誌に発表した。さらに、これらの成果を含む磁気スキルミオンに関する書籍やレビュー、解説記事を執筆し、発表した。

(6) スパイラル磁性マルチフェロイクスの典型物質である TbMnO_3 を対象に、磁場印加による強誘電分極の 90° フロップ現象の動的プロセスを研究し、このフロップ現象が従来素朴に信じられていた「確率的プロセス」ではなく、「決定論的プロセス」によって引き起こされることを明らかにした。この成果は、スパイラル磁性マルチフェロイクス物質のデバイス応用に道を開く画期的な成果として、Science 誌に掲載された。さらに、詳細な物理機構や実験結果への適用に関する理論研究を進め、その成果を Physical Review B 誌に発表した。

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10件)

I. Kezsmarki, S. Bordacs, P. Milde, E. Neuber, L. M. Eng, J. S. White, H. M. Ronnow, C. D. Dewhurst, M. Mochizuki, K. Yanai, H. Nakamura, D. Ehlers, V. Tsurkan, A. Loidl, Neel-type skyrmion lattice with confined orientation in the polar magnetic semiconductor GaV_4S_8 , Nature Materials, 査読有り, 巻 14, 1116-1122 (2015).

DOI:10.1038/nmat4402

M. Mochizuki and Y. Watanabe, Writing a skyrmion on multiferroic materials, Appl. Phys. Lett., 査読有り, 巻 107, 082409/1-5 (2015).

DOI: 10.1063/1.4929727

M. Matsubara, S. Manz, M. Mochizuki, T. Kubacka, A. Iyama, N. Aliouane, T. Kimura, S. Johnson, D. Meier, and M. Fiebig, Magnetolectric domain control in multiferroic TbMnO₃, Science, 査読有り, 巻 348, 1112-1115 (2015).

DOI: 10.1126/science.1260561

M. Mochizuki, Microwave Magnetochiral Effect in Cu₂OSeO₃, Phys. Rev. Lett. 査定有り, 巻 114, 197203/1-5 (2015).

DOI: 10.1103/PhysRevLett.114.197203.

M. Tokunaga, M. Akaki, T. Ito, S. Miyahara, A. Miyake, H. Kuwahara, N. Furukawa, Magnetic control of transverse electric polarization in BiFeO₃, Nature Communications, 査読有り, 巻 6, (2015) 5878/1-5

S. Miyahara, N. Furukawa, Theory of magneto-optical effects in helical multiferroic materials via toroidal magnon excitations, Physical Review B, 査読有り, 巻 89 (2014) 195145/1-11

DOI: 10.1103/PhysRevB.89.195145

M. Mochizuki, X.Z. Yu, S. Seki, N. Kanazawa, W. Koshibae, J. Zang, M. Mostovoy, Y. Tokura, N. Nagaosa, Thermally driven ratchet motion of a skyrmion microcrystal and topological magnon Hall effect, Nature Materials, 査読有り, 巻 13 (2014) 241-246

DOI: 10.1038/nmat3862

望月 維人, 関真一郎, 絶縁体中の磁気スキルミオン相が示す電気磁気ダイナミクス, 日本物理学会誌, 査読無し, 巻 69, (2014) 132-139

J. Iwasaki, M. Mochizuki, N. Nagaosa, Current-induced skyrmion dynamics in constricted geometries, Nature Nanotechnology, 査定有り, 巻 8 (2013) 742-747

DOI: 10.1038/nnano.2013.176

Y. Okamura, F. Kagawa, M. Mochizuki, M. Kubota, S. Seki, S. Ishiwata, M. Kawasaki, Y. Onose, Y. Tokura, Microwave magnetoelectric effect via skyrmion resonance modes in a helimagnetic multiferroic, Nature Communications, 査定有り, 巻 4 (2013) 2391/1-6

DOI: 10.1038/ncomms3391

[学会発表] (計 20 件)

望月 維人, 磁気スキルミオンが示す特異なダイナミクスの理論, 5 回化合物新磁性材料専門研究会「トポロジカルなスピントクスチャの可視化とダイナミクス」(東京大学浅野

キャンパス情報基盤センター, 2016 年 3 月 11 日)

M. Mochizuki, Dynamical phenomena of magnetic skyrmions, RIKEN CEMS Discussion Meeting "Topological Phenomena in Noncentrosymmetric Magnets" (理化学研究所, 埼玉県和光市, 2016 年 1 月 28 日)

N. Furukawa, Magneto-optical effects in multiferroic materials through non-KNB couplings (招待講演), EMN (Energy Materials and Nanotechnology) Hong Kong Meeting (Eaton Hotel, Kowloon, Hong Kong, 2015 年 12 月 9 日 ~ 12 月 12 日)

M. Mochizuki, Dynamics of magnetic skyrmions in multiferroics (招待講演), EMN (Energy Materials and Nanotechnology) Hong Kong Meeting (Eaton Hotel, Kowloon, Hong Kong, 2015 年 12 月 9 日 ~ 12 月 12 日)

望月 維人, 磁気スキルミオンのダイナミクスとデバイス機能 (招待講演), 日本磁気学会第 205 回研究会/第 56 回スピントロニクス専門研究会(共催)「将来の磁気デバイスを担う新しいナノ磁気構造とスピン操作の可能性 ~ カイラル磁性とスピンオービトロニクスが拓く新現象 ~」, (中央大学駿河台記念館, 2015 年 12 月 14 日)

望月 維人, マルチフェロイックスにおける電荷・スピン・格子結合と熱揺らぎの物理 (招待講演), 豊田理化学研究所特定課題研究「巨大負熱膨張材料を用いた革新的熱膨張制御技術の開発」第 3 回研究会, (東京工業大学日野キャンパス, 2015 年 8 月 5 日)

M. Mochizuki, Dynamics of Skyrmions in Chiral-Lattice Magnets (招待講演), International Workshop on "Topological structures in ferroic materials", (University of New South Wales (UNSW), Sydney, Australia, 2015 年 5 月 19 日 ~ 5 月 21 日)

望月 維人, 高いデバイス機能を有するナノスケールトポロジカル磁気テクスチャの理論設計, 科学技術振興機構さきがけ研究 [平成 25 ~ 28 年度] 第 3 回領域会議 研究領域:「素材・デバイス・システム融合による革新的ナノエレクトロニクスの創成」(神戸チサンホテル, 2015 年 1 月 13 日 ~ 1 月 15 日)

M. Mochizuki, Thermally Driven Ratchet Motion of a Skyrmion Microcrystal and Topological Magnon Hall Effect (招待講演), 59th Annual Conference on Magnetism and Magnetic Materials (MMM 2014) (Hilton Hawaiian Village, Honolulu, Hawaii, 2014 年 11 月 3-8 日)

M. Mochizuki, Current-Driven Dynamics of Magnetic Skyrmions in Chiral-Lattice Magnets (招待講演), Japan-Swiss Joint Workshop TCM2014, (青山学院大学青山キャンパス 2014 年 10 月 6 日 ~ 10 月 9 日)

N. Furukawa and S. Miyahara, Theory of antisymmetric spin-pair dependent electric polarization in multiferroics (招待講演), Japan-Swiss Joint Workshop TCM2014, (青山学院大学青山キャンパス 2014年10月6日~10月9日)

望月 維人, 高いデバイス機能を有するナノスケールトポロジカル磁気テクスチャの理論設計, 科学技術振興機構さきがけ研究 [平成25~28年度] 第2回領域会議 研究領域:「素材・デバイス・システム融合による革新的ナノエレクトロニクスの創成」, (新横浜グレイスホテル, 2014年9月4日~9月5日)

M. Mochizuki, Magnon Current-Driven Dynamics of Magnetic Skyrmions in Chiral-Lattice Magnets (招待講演), International Conference on Strongly Correlated Electron Systems (SCES 2014), (Grenoble France, 2014年7月7日~7月11日)

望月 維人, カイラル絶縁磁性体における磁気スキルミオンの電場駆動・制御の理論 (招待講演), 日本学術振興会「産業応用をめざした新物質機能の設計と実証」に関する研究開発専門委員会「電気と磁気に関する物性研究, 現在・過去・未来」, (東京大学山上会館(初日)およびお茶の水セントヒルズホテル(二日目), 2014年5月17-18日)

M. Mochizuki, Current-driven dynamics of skyrmions (招待講演), Workshop on Current Driven Magnetization Dynamics (Weetwood Hall Conference Centre, Leeds, UK, 2014年1月7日~1月9日)

望月 維人, 最近のスキルミオン研究 (招待講演), 第3回強相関電子系理論の最前線 (勝浦観光ホテル, 2013年12月16日~12月18日)

N. Furukawa, Dynamical Electric Effects in Multiferroic Materials (招待講演), Trends in Theory of Correlated Materials 2013 (EPFL Lausanne, Switzerland, 2013年10月2日~10月5日)

N. Furukawa, Nonreciprocal Directional Dichroism and Toroidal magnons, 12nd Asia-Pacific Physics Conference, (幕張メッセ, 2013年7月14日~7月19日)

N. Furukawa, Magnon and Electromagnon Excitations in BiFeO3 (招待講演), Strongly Correlated Electron Systems 2013 (東京大学本郷キャンパス, 2013年8月5日~8月9日)

M. Mochizuki, Theory of dynamical magnetoelectric phenomena in multiferroics with noncollinear spin structures (招待講演), 5th Asia Pacific Center for Theoretical Physics Workshop (Nanyang Technical University, Singapore, 2013年5月22日~5月24日)

(図書) (計 2件)

S. Seki, M. Mochizuki, Skyrmions in Magnetic Materials

出版社: Springer

ISBN 978-3-319-24651-2

M. Mochizuki 他 30名, Topological Structures in Ferroic Materials: Domain Walls, Skyrmions and Vortices

出版社: Springer

ISBN 978-3-319-25301-5

(産業財産権)

出願状況 (計 1件)

名称: スキルミオンによるマイクロ波整流機構
発明者: 岡村嘉大, 賀川史敬, 望月 維人, 十倉好紀, ほか
権利者: 同上
種類: 特許
番号: 特願 2013-240064
出願年月日: 2013年11月20日
国内外の別: 国内

取得状況 (計 0件)

名称:
発明者:
権利者:
種類:
番号:
出願年月日:
取得年月日:
国内外の別:

(その他)

ホームページ等

<http://www.phys.aoyama.ac.jp/>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

古川 信夫 (FURUKAWA, Nobuo)

青山学院大学・理工学部物理・数理学科・教授

研究者番号: 00238669

(2) 研究分担者

望月 維人 (MOCHIZUKI, Masahito)

青山学院大学・理工学部物理・数理学科・准教授

研究者番号: 80450419

(3) 連携研究者

()

研究者番号: