

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 4 月 24 日現在

機関番号：12601

研究種目：若手研究(A)

研究期間：2015～2016

課題番号：15H05456

研究課題名(和文) 固体中におけるモノポール場の発現とそのダイナミクス

研究課題名(英文) Emergent magnetic monopoles and their dynamics in solids

研究代表者

金澤 直也 (Kanazawa, Naoya)

東京大学・大学院工学系研究科(工学部)・助教

研究者番号：10734593

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 16,100,000円

研究成果の概要(和文)：電気の力の源である粒子(陽子や電子)に対応する、磁石のN極またはS極だけの性質を持った素粒子、すなわち磁気モノポールは未だ発見されておらず、電磁気学では磁気モノポールは存在しないと仮定されて体系化されています。しかし電子の幾何学的位相を利用すれば、物質中に磁気モノポールがあたかも存在しているかのような状況を実現できると理論的に提唱されていました。本研究では、磁石の源であるスピンの集団が織りなす幾何学構造のトポロジーに注目し、磁気モノポールの発現とその対消滅のダイナミクスに伴う電磁気効果を発見しました。

研究成果の概要(英文)：Elementary particles with electric charges, such as protons and electrons, are fundamental particles, forming our world. In contrast, magnetic monopoles with magnetic charges, i.e., particles as sources or sinks of magnetic field, have not been identified so far. The classical electromagnetism is therefore structured under assumption of their non-existence. However, it is theoretically proposed that we can create fictitious magnetic monopoles in materials by utilizing the geometric phase of electrons. In this research project, we have focused on topology of spin textures and realized emergence of magnetic monopoles and novel electromagnetic effects associated with their pair-annihilation dynamics.

研究分野：物性物理学

キーワード：トポロジー 強相関電子系 物性実験 キラル磁性体 モノポール スピントロニクス

1. 研究開始当初の背景

物質中の電子はスピンと呼ばれる磁性の源となる自由度を有する。多数の電子のスピンが秩序を成すと、我々の目で観測できるような巨視的磁気特性が発現する。いわゆる磁石はスピンが平行に揃った強磁性秩序を持つ物質であり、物をくっつけるマグネットとしての機能だけでなく、モーターや発電機など日常生活に欠かせない要素をもたらす。

これまでの長い磁性物理学の歴史の中で、強磁性状態だけではなく多種多様なスピン秩序が発見され、それぞれにおいて固有の物性・機能が開拓されている。特に最近では、トポロジーという数学の概念が物性物理において導入され、トポロジカルなスピン秩序という新しい磁性カテゴリーが注目を集めている。

スキルミオンと呼ばれる2次元の渦状のスピン構造は近年実験的に発見されたトポロジカルスピン構造の1つである。スキルミオン中を流れる電子は、その幾何学的な性質をベリー位相として感じ取り、数々の新奇な量子伝導現象をもたらす。それらの固有な物性の根源には、スキルミオンがナノメートルスケールの磁束量子として振舞い、電子には4000Tにも届き得る巨大な磁場(創発磁場)の影響を与えるに基づいている。

このような新奇物性からもスキルミオンは次世代情報担体として期待され、実用化に向け世界中で熾烈な物質開拓が行われている。

2. 研究の目的

本研究では新たなトポロジカル磁気構造の開拓を行い、それに固有の物性を観測することを目的とした。具体的には、研究背景で紹介したスキルミオンと次元性が異なる“ヘッジホッグ”と呼ばれる3次元のトポロジカル磁気構造の開拓と物性測定を行った。

ヘッジホッグ磁気構造も、スキルミオン磁気構造と同様に、伝導電子に対しては仮想磁場として振舞う。スキルミオンの磁場分布は柱状の磁束線の形をしていたが、ヘッジホッグ磁気構造は、磁束の湧き出しまたは吸い込みの特異点として存在する。すなわち、これらの特異点は、現実では未だ粒子として観測されていない磁気モノポール・反モノポールと等価に振舞う。

3次元スピントクスチャの形成を通して、固体中にモノポール場を創成し、その静的・動的な性質からどのような物性が現れるのかを探索することが本研究の主題である。

特に、キラル磁性体 MnGe を候補物質として着目した。MnGe において期待しているトポロジカルスピン秩序が形成しているかを検証した後、電気伝導率や弾性率などの測定を通してモノポールのダイナミクスが引き起こす電磁気応答を観測することを目的とした。さらにデバイス応用可能性を議論するために薄膜作製が可能であるかを検証すると

共に、薄膜化による磁気構造への影響も調査した。

トポロジカルスピン構造と創発電磁気学という大きな観点からも、今回注目しているヘッジホッグ磁気構造という希有な例の貢献するところは大きい。

3. 研究の方法

磁気構造解析にはローレンツ型電子顕微鏡を用いた実空間磁気構造観測と小角中性子散乱法を用いた逆空間における磁気変調波数の観測を行った。また得られた磁気構造からどのような創発磁場の分布をしているか、そしてそのダイナミクスがどのような振舞いを示すかシミュレーションした。

磁気抵抗効果、ホール効果、弾性率といった物性を測定し、モノポール場のダイナミクスとの関連を議論した。

薄膜作製には分子線エピタキシー法やスパッタ法を用いてエピタキシャル薄膜を作製した。

特に、ヘッジホッグ磁気構造という特異な磁気構造がどのような条件で発現するかという指針確立に向けて、元素ドーピングを通して様々な物質系を高圧合成法や薄膜作製法によって作製し、上記測定も併せて行った。

4. 研究成果

スピン配列のトポロジーを解明するには実空間観察が好ましいため、中性子回折法といった逆空間の変調構造を観察する手法ではなく、ローレンツ顕微鏡法を用いて候補物質 MnGe におけるスピン構造を解明した(T. Tanigaki, K. Shibata, N. Kanazawa *et al.*, *Nano Lett.* **15**, 5438 (2015).)。

図1が観察結果の例であり、磁気転移温度($T_N \sim 170\text{K}$)以下において磁気コントラストが観測された(図1左上)。(001)面の原子格子のコントラスト(黄色線で示しているのが原子間距離)に重畳している白と黒の3nm程度の長距離の磁気コントラストが正方状に現れている。これは当初予測した3次元磁気構造(図1右上)と整合した結果であり、ヘッジホッグ構造・反ヘッジホッグ構造(図1下)の実現を強力に支持している。

3次元スピン構造の解明により、対応する創発磁場の分布と磁場応答がシミュレーション出来るようになった。その結果が図2に示してある。ヘッジホッグと反ヘッジホッグが形成されている特異点(それぞれ図2の黄色と緑の丸)に、上方向の創発磁場が存在する領域(図2の赤領域)と下方向の創発磁場が存在する領域(図2の青領域)が繋がっている様子が見て取れる。これはちょうど特異点から創発磁場が湧き出し・吸い込まれている状況と等価であり、期待通り MnGe においては創発磁場のモノポールと反モノポール状態が実現しているということが分かった。

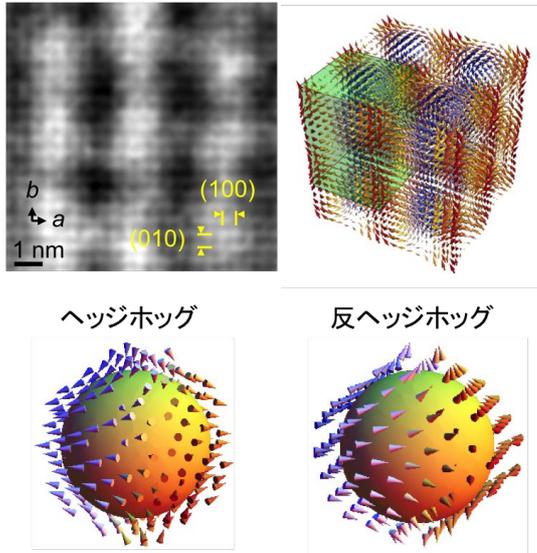


図 1: (左上図)ローレンツ電子顕微鏡法による MnGe における磁気構造の実空間観察像。白と黒の磁気コントラストが原子格子像(細かい正方状パターン)の上に正方状に分布している。(右上図)電子顕微鏡像から考え得るスピン構造。この構造の中にヘッジホッグ(左下図)と反ヘッジホッグ(右下図)の特異的な 3 次元スピン構造が含まれている。

さらに磁場印加によるスピン構造の変形の効果を考えて、モノポールのダイナミクスについて考察することができた。磁場を印加していくと、モノポール・反モノポールの位置がそれぞれ図 2 の黄色・緑の軌跡にそって移動し、最終的に対消滅する。この磁化過程においてモノポール流が上方向に流れていて、特にその大きさが対消滅直前で大きいことが判明した。これを踏まえ我々は対消滅時のモノポールの激しい動的効果を期待し、物性測定を行った。

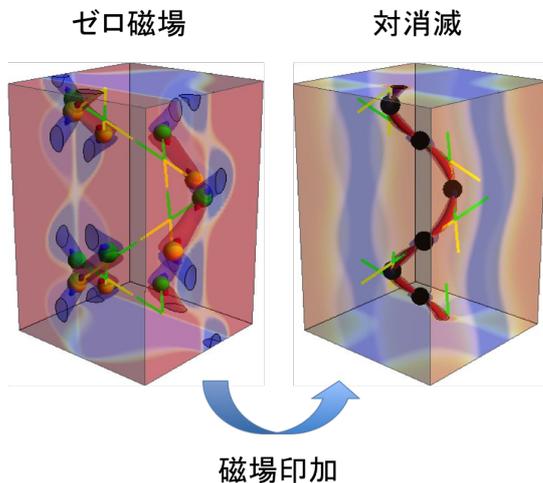


図 2: 図 1 右上の緑の領域における創発磁場の分布。赤領域が上方向、青領域が下方向の創発磁場強度を表している。

図 2 説明つづき:黄色の丸がヘッジホッグ(モノポール)の位置、緑の丸が反ヘッジホッグ(反モノポール)の位置に対応している。磁場印加によるスピン構造変化に伴いモノポール・反モノポール位置も変化し、最終的には黒丸の位置において対消滅を起こす。

ホール効果や磁気抵抗効果といった電気伝導物性と弾性率に、モノポールのダイナミクスの効果が顕著に現れることが分かった。図 3 は温度 30K における磁化過程(磁場印加過程)の各物理量の変化である。対消滅前は有限の平均創発磁場の存在によりホール効果が生じ(トポロジカルホール効果)、磁性体において一般的に生じる異常ホール効果(図 3 上の赤線)からの大きな逸脱が見られた。一方で対消滅時に正の磁気抵抗効果や弾性定数変化が共に顕著に現れることが分かった。理論計算からのサポートからも、対消滅時に増強された創発モノポールのゆらぎがこのような非従来型の物性を引き起こしている可能性を示すことができた。(N. Kanazawa *et al.*, Nature Commun. 7, 11622 (2016).)

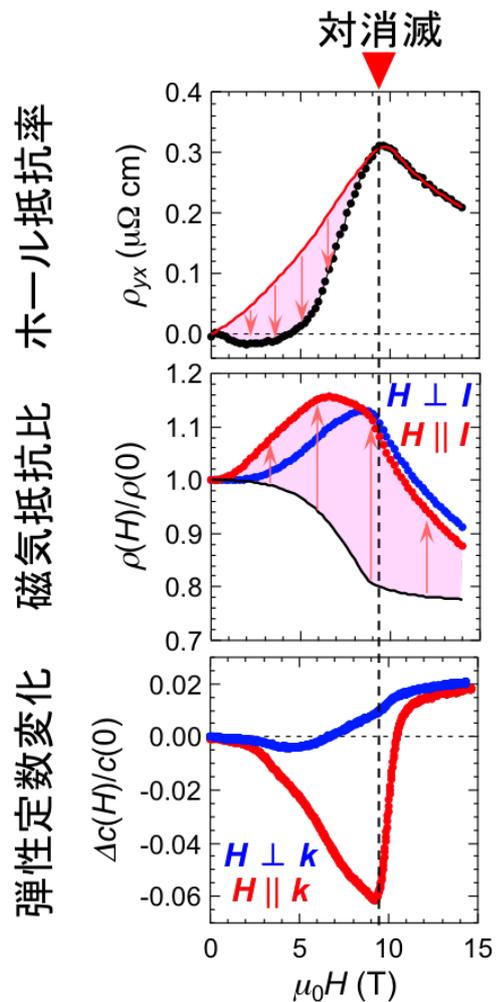


図 3: 磁場印加過程におけるホール抵抗率(上)、磁気抵抗比(中)、弾性定数変化(下)。

MnGe における希有な磁気構造形成とその創発モノポールダイナミクスを通して得られた知見を生かし、その他にも研究を進展させることができた。例えばヘッジホッグ磁気構造という特異な磁気構造がどのような条件で発現するか、またそれらは応用化できるのかという指針確立に向けて、元素ドーピングによる様々な物質系の高圧合成やデバイス加工可能性に向けた薄膜作製を行った。その結果、磁気異方性の変調によるトポロジカルスピン構造の変形・相転移の制御に成功できた(N. Kanazawa *et al.*, New J. Phys. **18**, 045006 (2016); N. Kanazawa *et al.*, PRB **94**, 184432 (2016).)。

このように、ヘッジホッグ格子状態という3次元的に変調したトポロジカルスピン構造の新規実現によって、電子系にモノポール場を創発させることに成功した。特にモノポール場の静的・動的性質に起因した電磁気応答も観測でき、さらにスピン構造から演繹できる理論的予測とも良い一致を確認できたことから、今後モノポール流など未確認物理現象の実証や応用物性への展開も期待できる。本研究を通してスピン構造のトポロジーという新たな学理構築に大きく貢献できた。

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12件)

Naoya Kanazawa, Shinichiro Seki, and Yoshinori Tokura, “Noncentrosymmetric Magnets Hosting Magnetic Skyrmions”, *Advanced Materials*, online publication, (2017). 査読有, DOI: 10.1002/adma.201603227
K. Shibata, A. Kovács, N. S. Kiselev, N. Kanazawa, R. E. Dunin-Borkowski, and Y. Tokura, “Temperature and Magnetic Field Dependence of the Internal and Lattice Structures of Skyrmions by Off-Axis Electron Holography”, *Physical Review Letters* **118**, 087202-1-5 (2017). 査読有, DOI: 10.1103/PhysRevLett.118.087202
N. Kanazawa, J. S. White, H. M. Rønnow, C. D. Dewhurst, Y. Fujishiro, A. Tsukazaki, Y. Kozuka, M. Kawasaki, M. Ichikawa, F. Kagawa, and Y. Tokura, “Direct observation of anisotropic magnetic field response of the spin helix in FeGe thin films”, *Physical Review B* **94**, 184432-1-7 (2016). 査読有, DOI: 10.1103/PhysRevB.94.184432
A. Dussaux, P. Schoenherr, K. Koumpouras, J. Chico, K. Chang, L. Lorenzelli, N. Kanazawa, Y. Tokura, M. Garst, A. Bergman, C. L. Degen, and D. Meier, “Local dynamics of topological

magnetic defects in the itinerant helimagnet FeGe”, *Nature Communications* **7**, 12430-1-9 (2016). 査読有, DOI: 10.1038/ncomms12430
N. Kanazawa, Y. Nii, X. Zhang, A. S. Mishchenko, G. De Filippis, F. Kagawa, Y. Iwasa, N. Nagaosa, and Y. Tokura, “Critical phenomena of emergent magnetic monopoles in a chiral magnet”, *Nature Communications* **7**, 11622-1-7 (2016). 査読有, DOI: 10.1038/ncomms11622
N. Kanazawa, K. Shibata, and Y. Tokura, “Variation of spin-orbit coupling and related properties in skyrmionic system $Mn_{1-x}Fe_xGe$ ”, *New Journal of Physics* **18**, 045006-1-6 (2016). 査読有, DOI: 10.1088/1367-2630/18/4/045006
Hiroshi Oike, Akiko Kikkawa, Naoya Kanazawa, Yasujiro Taguchi, Masashi Kawasaki, Yoshinori Tokura, and Fumitaka Kagawa, “Interplay between topological and thermodynamic stability in a metastable magnetic skyrmion lattice”, *Nature Physics* **12**, 62-66 (2016). 査読有, DOI: 10.1038/nphys3506
Y. Yamasaki, D. Morikawa, T. Honda, H. Nakao, Y. Murakami, N. Kanazawa, M. Kawasaki, T. Arima, and Y. Tokura, “Dynamical process of skyrmion-helical magnetic transformation of the chiral-lattice magnet FeGe probed by small-angle resonant soft x-ray scattering”, *Physical Review B* **92**, 220421(R)-1-5 (2015). 査読有, DOI: 10.1103/PhysRevB.92.220421
Tomoyuki Yokouchi, Naoya Kanazawa, Atsushi Tsukazaki, Yusuke Kozuka, Akiko Kikkawa, Yasujiro Taguchi, Masashi Kawasaki, Masakazu Ichikawa, Fumitaka Kagawa, and Yoshinori Tokura, “Formation of In-plane Skyrmions in Epitaxial MnSi Thin Films as Revealed by Planar Hall Effect”, *Journal of Physical Society of Japan* **84**, 104708-1-5 (2015). 査読有, DOI: 10.7566/JPSJ.84.104708
Toshiaki Tanigaki, Kiyou Shibata, Naoya Kanazawa, Xiuzhen Yu, Yoshinori Onose, Hyun Soon Park, Daisuke Shindo, and Yoshinori Tokura, “Real-Space Observation of Short-Period Cubic Lattice of Skyrmions in MnGe”, *Nano Letters* **15**, 5438-5442 (2015). 査読有, DOI: 10.1021/acs.nanolett.5b02653
K. Shibata, J. Iwasaki, N. Kanazawa, S. Aizawa, T. Tanigaki, M. Shirai, T. Nakajima, M. Kubota, M. Kawasaki, H. S.

Park, D. Shindo, N. Nagaosa, and Y. Tokura, "Large anisotropic deformation of skyrmions in strained crystal", Nature Nanotechnology 10, 589-592 (2015). 査読有, DOI: 10.1038/nnano.2015.113

金澤直也, 于秀珍, 賀川史敬, 十倉好紀, "スキルミオンの創発電磁物性が拓くスピントロニクス", 固体物理 50, 721-732 (2015). 査読有, <http://www.agne.co.jp/kotaibutsuri/kota1050.htm>

〔学会発表〕(計6件)

金澤直也, Jonathan White, Henrik Rønnow, Charles Dewhurst, 塚崎敦, 小塚裕介, 川崎雅司, 市川昌和, 賀川史敬, 十倉好紀, "MnGe 薄膜におけるトポロジカルスピン構造への磁気異方性の効果", 日本物理学会第72回年次大会, 2017年3月18日, 大阪大学豊中キャンパス(大阪府・豊中市)

Naoya Kanazawa, "Control of chiral magnetic states in B20-type compounds by tuning magnetic anisotropy", The 37th REIMEI Workshop on Frontiers of Correlated Quantum Matters and Spintronics, 2017年1月14日, iVi1(茨城県・東海村), 招待講演

金澤直也, Jonathan White, Henrik Rønnow, Charles Dewhurst, 藤代有絵子, 塚崎敦, 小塚裕介, 川崎雅司, 市川昌和, 賀川史敬, 十倉好紀, "FeGe 薄膜中のらせん磁気構造に対する磁気異方性の効果", 日本物理学会第68回年次大会, 2016年3月19日, 東北学院大学(宮城県・仙台市)

金澤直也, "キラルな磁性体におけるスキルミオンの発現と創発物性", 第2回大学院リーディングセミナー〜物質科学最前線と未来創造〜, 2015年12月8日, 東京大学本郷キャンパス(東京都・文京区), 招待講演

Naoya Kanazawa, "Skyrmion Formation in B20-type Germanides", Workshop on "Topological Magnets", 2015年5月26日, 理化学研究所(埼玉県・和光市)

Naoya Kanazawa, "Skyrmions in bulks and films of B20-type compounds", Hefei mini-workshop on skyrmions, 2015年5月19日, 合肥(中国), 招待講演

〔その他〕

ホームページ等

<http://www.cmr.t.u-tokyo.ac.jp/members/kanazawa.shtml>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

金澤 直也 (KANAZAWA, Naoya)

東京大学・大学院工学系研究科・助教

研究者番号: 10734593