

機関番号：17104

研究種目：基盤研究（C）

研究期間：2007～2010

課題番号：19540371

研究課題名（和文） カイラル磁性体におけるスピン位相制御の理論

研究課題名（英文） Theory of spin phase control in chiral magnets

研究代表者

岸根順一郎（Kishine Jun-ichiro）

九州工業大学・大学院工学研究院・准教授

研究者番号：80290906

研究成果の概要（和文）：

カイラル空間群に属する磁性単結晶において「スピンの位相」を外場や電流で制御するための種々の方法を理論物理学の立場から探った。その結果、結晶の構造カイラリティがスピン位相のマクロな秩序化を引き起こし、これを外場によって制御できることを明らかにした。とくに、カイラルスピンソリトン格子と呼ばれるスピントクスチャが伝導電子と結合することにより、単結晶においてメモリ効果、磁気抵抗効果、起電力効果の共存する物質を作ることが可能であることを明らかにした。

研究成果の概要（英文）：

We have explored various ways to control magnetic texture in chiral magnetic crystal by using external fields or electric currents. As a result, we pointed out that crystal chirality causes macroscopic spin chirality in the form of chiral helimagnetic structure. By applying the magnetic field perpendicular to the helical axis, we have a new type of spin texture called magnetic kink crystal or chiral spin soliton lattice. We have made clear that this state has possibility to carry magnetic information, cause magneto-resistance, and electromotive force.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2007年度	1,500,000	450,000	1,950,000
2008年度	600,000	180,000	780,000
2009年度	600,000	180,000	780,000
2010年度	600,000	180,000	780,000
年度			
総計	3,300,000	990,000	4,290,000

研究分野：物性理論

科研費の分科・細目：物理学・物性II

キーワード：カイラル磁性体, スピントロニクス, 磁気抵抗, ゲージ場

1. 研究開始当初の背景

対称性と物理現象の相関を明らかにすることは基礎科学の根幹である。特に、空間反転（パリティ）対称性の破れは物質の機能と深く結びついている。パリティが破れた系では、左右のカイラリティを持つ構造が許される。カイラリティを巡る研究は、もともと

結晶・分子のカイラリティについての化学的研究として進展し、18世紀前半のアラゴを経てパスツールへと受け継がれた。ギリシャ語の $\chi\epsilon\iota\rho$ (cheir, 掌) から chirality (カイラリティ) という用語を考案したのはケルビン卿である (Baltimore Lectures, 1884年)。現在、自然科学におけるカイラリティの精確な

定義として受け入れられている「パリティ変換では重なるが、時間反転では重ならない一対の構造を持つ属性」という表現は、1980年代に Laurence D. Barron が与えたものである。時間反転まで含めることで、カイラリティは円偏光やミュー中間子のヘリシティなど、運動の概念を含む形に拡張される。生体分子の機能、コレステリック液晶のフォトニック効果、水晶などのカイラル結晶の光学活性、スピングラス転移におけるカイラリティ秩序、磁性体のスピントクスチャと異常ホール効果など、カイラリティの概念は時空対称性と物質機能を結ぶキーコンセプトとして、基礎科学の広範な領域と深く関わっている。

カイラリティ研究の底流にある「化学と物理」、「分子と結晶」、「構造的カイラリティと磁気的カイラリティ」といった視点を統合して物質機能との関連を解明する研究を志し、本研究代表者（岸根）は2003年ころより、秋光純（青山学院大学）、井上克也（広島大学）両氏らとともに、結晶カイラリティを持つ磁性結晶《カイラル磁性結晶》の系統的な研究を開始した。「結晶がカイラリティを持つ」とは、結晶空間群が反点群、鏡映面を持たず、結晶学的な右旋、左旋構造が許されるということである。水晶はその代表である。しかしながら、特に無機磁性結晶となると極めて例が少なく、現在でも表1に例示する物質群が知られているのみである。そもそも丸い原子からいかにしてカイラル構造が発現するかという結晶学的な問題自体未解明の部分が多く、興味深い。本研究計画は、以上の背景を踏まえたものである。

2. 研究の目的

カイラル結晶では、原子スケールでの電子の軌道運動がらせん状になる。これがスピン軌道相互作用を通して磁気構造と結びつく。この働きがジャロシンスキー・守谷(DM)相互作用である。結晶中でDM相互作用が一樣に定まると、数百オングストローム程度の周期で磁気モーメントが右巻き・左巻きいずれかにらせん配列したカイラルらせん磁気構造が実現する。カイラルらせん磁気構造は、スピンの位相のねじれが凝縮した秩序状態(マクロスケールスピントクスチャ)である。

《位相と機能》という点で超伝導現象とのアナロジーを考えると、らせん磁気構造に新規の物理的機能が宿ると期待するのは自然である。しかし、らせん構造は線形構造であって位相情報を運ぶことはできない。これを克服するには、非線形性を導入する必要がある。そこで我々は、カイラルらせん磁気構造に磁場をかけることで、らせんのねじれが周期的にはぐれたスピン位相ソリトン格子[正確には磁気位相キック格子(MKC)]とい

う非線形スピントクスチャが安定化されることに着目した。MKCはカイラル結晶特有のものであり、Hoなど希土類金属に見られる、交換相互作用のフラストレーションに起因する対称らせん磁気構造においては決して見出されない。

この意味で、MKCは真に結晶カイラリティに保護されたバルク秩序状態である。MKCの空間周期 $L_{\{MKC\}}$ は、磁場とともに数100Åから連続的に広がり、数100 Gauss程度で全スピンが磁場方向に揃うまで自在に制御できる。さらにMKCを基底状態とする励起スペクトルは、楕円関数を用いて厳密に記述できる。これは、非線形スピントクスチャとしては稀有な状況であり、電流や外場との結合も含めたダイナミクスまでを解析的に分析することが可能である。以上のように、スピン位相ソリトン格子は数理・物理両面から制御可能なスピントクスチャとして他に類を見ないものであり、理論との対応関係を実験的に検証・分析することが可能な対象である。

本研究計画の目標は、「スピン位相制御とスピントクスチャ」を中心としてカイラル磁性体に潜む豊かな物理を探り出し、磁性物理の新領域を開拓するとともにスピントロニクス分野にも波及効果のある研究を推進することであった。

3. 研究の方法

以上の目標に対し、単結晶において「スピンの位相」を外場や電流で制御するための種々の方法を理論物理学の立場から探った。その結果、以下に示すように、結晶の構造カイラリティがスピン位相のマクロな秩序化を引き起こし、これを制御できることを明らかにした。これによって、《カイラル結晶を舞台とするスピン位相制御》という新たな研究分野の鉱脈を探り当てることができたと考えている。

4. 研究成果

●伝導性カイラル磁性体の理論：伝導電子からのスピントルク転送によって磁気位相キック格子が全体として並進運動する機構を提案し、電流密度と磁気位相キック格子の滑走速度を結びつける応答係数(sliding conductivity)を求めた。この結果に基づき、伝導帯のキャリア濃度をコントロールすることによりMKCの滑走の向きを制御できること(磁気カレントの整流機能)を明らかにした。さらに、伝導電子から磁気位相キック格子へのスピントルク転送をボルン近似の枠内で議論した。

●磁気位相キック格子(MKC)滑走の基礎理論：連続モデルで記述される磁気位相キック格子が並進対称性を持つことは自明ではない。

そこで、MKC がガリレイ対称性を持つことを Lie 対称性に基づいて証明し、磁化カレントがネータカレントとして導出できることを示した。また、MKC がひとたび滑走を始めると、キンク内部に磁化が生じ、これが MKC 滑走のマーカーとして測定可能であることを示した。さらに、MKC の滑走を集団座標の方法を用いて定式化し、磁化カレントが流れる機構を提案した。

- 磁気位相キンク格子を滑走する新ソリトン解：MKC 上を滑走する孤立ソリトン解の存在を、Bäcklund 変換を用いて明らかにした。

- 磁気位相キンク格子の基底状態と素励起：MKC 状態を基底状態とする素励起は並進対称性の破れに伴うフォノン的なもの(MKC フォノン)である。この励起が、外部磁場による磁氣的プリルアンゾーンの伸縮に伴って ESR 信号の振動を与えることを示した。

- 電流駆動磁壁運動の理論：定常電流が存在する環境下で、磁壁による伝導電子の散乱に起因する電気抵抗を非平衡統計力学の手法(非平衡統計演算子法)を用いて解析した。また、スピン偏極電流からのスピントルク転送によって単一磁壁が動く機構を記述するため、適切な集団座標の選び方を示した。これによって、非断熱トルクの起源を微視的に明らかにした。さらに、単一磁壁の並進運動を記述する正準理論を、特異ラグランジアンに対する Dirac 処方を用いて構築した。

以上の成果によって、結晶カイラリティに保護された環境下で、非対称・非線形・非平衡の組み合わせが紡ぎ出すスピン位相の物理を解明する基盤理論が構築できた。また、MKC を記述するカイラルサイン・ゴルドンモデルは、楕円関数を用いて基底状態と素励起を厳密に解くことができる。つまり、キンクの内部構造から外場に対する応答までを、すべて厳密に解析することができる。

また、キンクの個数は磁場の強さとシステムサイズによって決まるトポロジ的不変量となる。このように、本研究の対象は、解析・幾何・トポロジーという数理科学の基本概念を複合的に応用できる格好の舞台でもある。さらに、カイラル構造と物性機能の関係の背後には、より原理的な問題が潜んでいる。たとえば、伝導スピン(量子スピン)と MKC(準古典系)の結合の問題は、量子系と古典系の結合の問題であり、量子力学の根幹にかかわる。

これらの問題は、カイラリティの概念が量子力学基礎論、素粒子論、固体電子論から生体機能の問題にわたる広範な領域に関与する事実根ざしている。今回の研究では、カイラル磁性結晶の物理を理論物理学の問題として究明することに重点を置いた。今後は、実験研究との連携をより強化し、カイラル磁

性結晶の物理を物質科学の新たな一分野として発展させていきたい。

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 24 件)

[1]"Nonequilibrium density operator approach to domain wall resistivity,"J.Kishine, A.S.Ovchinnikov, and I.V. Proskurin, 286, 012017 (2011).

[2]"Canonical formulation of magnetic domain-wall motion,"J. Kishine and A.S.Ovchinnikov, Phys. Lett. A. 375, 1824-1830 (2011)

[3] "物質科学のための表現論入門(その 4),"岸根順一郎, 固体物理, Vol. 45 No.12 (2010).

[4] "物質科学のための表現論入門(その 3),"岸根順一郎, 固体物理, Vol. 45 No. 4, pp.1-22 (2010)

[5] "物質科学のための表現論入門(その 2),"岸根順一郎, 固体物理, Vol. 45 No. 1, pp.1-11 (2010)

[6]"Sliding conductivity of magnetic kink crystal in a chiral helimagnet,"J.Kishine, A.S.Ovchinnikov, and I.V. Proskurin, Phys. Rev. B82, 064407 (2010).

[7]"Origin of adiabatic and non-adiabatic spin transfer torques in current-driven magnetic domain wall motion,"J. Kishine and A.S.Ovchinnikov, Phys. Rev. B81, 134405 (2010).

[8]"Field-like spin-transfer torque in chiral helimagnet,"I.V. Proskurin, A.S.Ovchinnikov and J. Kishine, Journal of Experimental and Theoretical Physics (JETP)138, 1-5 (2010).

[9] "物質科学のための表現論入門(その 1),"岸根順一郎, 固体物理, Vol. 44 No. 9, pp.553-569 (2009)

[10]"Spin resonance in chiral helimagnet,"J. Kishine and A.S.Ovchinnikov, Phys. Rev. B79,220405(R) (2009).

[11]"Magnetic soliton transport over topological spin texture in chiral helimagnet with strong easy-plane anisotropy,"A.B.Borisov, J.Kishine, I.G.Bostrem, and A.S.Ovchinnikov, Phys. Rev. B79,134436 (2009).

[12]"Giant non-linear magnetic response in a molecule-based magnet,"M. Mito, K. Iriguchi, H. Deguchi, J. Kishine, K. Kikuchi, H. Osumi, Y. Yoshida and K. Inoue, Phys. Rev. B79, 012406 (2009)

[13]"Hidden Galilean symmetry,

conservation laws and emergence of spin current in the soliton sector of chiral helimagnet,"I.G. Bostrem, J. Kishine, R. V. Lavrov, A.S. Ovchinnikov, Phys. Lett. A 373, 558(2009).

[14]"Theory of spin current in chiral helimagnet,"I.G. Bostrem, J. Kishine, A.S. Ovchinnikov, Phys. Rev. B78, 064425 (2008).

[15]"Chiral helimagnetism in $T_{1/3}NbS_2$ ($T=Cr$ and Mn),"Y. Kousaka, Y. Nakao, J. Kishine, M. Akita, K. Inoue and J. Akimitsu, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A, Volume 600, Issue 1, 21 February 2009, Pages 250-253

[16]"Transport spin currents by a moving kink crystal in chiral helimagnets,"I.G. Bostrem, J. Kishine, and A. S. Ovchinnikov, Phys. Rev. B77, 132405 (2008).

[17]"Commensurate to Incommensurate Transition in the Chiral Helimagnet CuB_2O_4 ,"T. Fujita, Y. Fujimoto, S. Mitsudo, T. Idehara, T. Saito, Y. Kousaka, S. Yano, J. Akimitsu, J. Kishine, K. Inoue, and M. Motokawa, J. Phys. Soc. Jpn. 77, 053702 (2008).

[18]"Spin solitons and spin waves in chiral and racemic molecular based ferrimagnets,"R. Morgunov, M. V. Kirman, K. Inoue, Y. Tanimoto, J. Kishine, A. S. Ovchinnikov, and O. Kazakova, Phys. Rev. B77, 184419 (2008).

[19]"Spin solitons and waves in chiral molecular ferrimagnets,"R. B. Morgunov, M. V. Kirman, V. L. Berdinskiĭ, K. Inoue, and J. Kishine, JETP Letters 107, p. 74 (2008).

[20]"Chiral Magnetic Ordering and Commensurate-to-incommensurate Transition in CuB_2O_4 ,"Y. Kousaka, S. Yano, J. Kishine, Y. Yoshida, K. Inoue, K. Kikuchi, and Jun Akimitsu, J. Phys. Soc. Jpn.76, No.12 (2007).

[21]"Chiral Effects on Magnetic Properties for Chiral and Racemic $WVCuII$ Prussian Blue Analogues,"H. Higashikawa, K. Okuda, J. Kishine, N. Masuhara, K. Inoue, Chemistry Letters 36, 1022 (2007).

[22]"Static and dynamical anomalies caused by chiral soliton lattice in molecular-based chiral magnets,"J. Kishine, K. Inoue, and K. Kikuchi, J. Magn. Mater. 310, 1386 (2007).

[23]"Chiral Magnetic Ordering and Commensurate-to-incommensurate Transition in CuB_2O_4 ,"Y. Kousaka, J.

Kishine, S. Yano, and J. Akimitsu, J. Magn. Mater. 310, 463(2007).

[24]"Effect of pressure on a chiral two-dimensional ferrimagnet,"K. Iriguchi, Y. Komorida, I. Akimiya, M. Mito, J. Kishine, H. Deguchi, Y. Yoshida and K. Inoue, J. Phys. Soc. Jpn. 76, Supplement A, p.192 (2007).

[学会発表] (計 13 件)

[1] "カイラル磁性結晶におけるスピン位相制御,"岸根順一郎,「金属錯体の固体物性科学最前線---錯体化学と固体物性物理と生物物性の連携新領域創成をめざして---」(主催:東北大学 G-COE「分子系高次構造体化学国際教育研究拠点」)(2010年12月,東北大学)

[2] "カイラル磁性体理論研究の現状~非対称・非線形・非平衡から機能へ~, "岸根順一郎, SPring-8 利用者懇談会 情報・磁性デバイス研究分野, ナノ・デバイス磁性研究会/キラル磁性・マルチフェロイクス研究会 合同研究会, (2010年11月,東京)

[3] "The sense of chirality and its physical consequence in chiral helimagnet,"J. Kishine, The 12th International Conference on Molecule-Based Magnets (2010年10月,北京)

[4] "磁壁運動の電流駆動における断熱トルクと非断熱トルクの起源,"岸根順一郎, A.S.Ovchinnikov,日本物理学会第65回年次大会(2010年3月,岡山大学)

[5] "偏極ビームで探る構造と磁性のカイラリティ,"岸根順一郎, CMR C研究会「関連電子と構造物性」(2010年2月,高エネルギー加速器研究機構)

[6] "カイラルらせん磁性体の ESR で見えるキルク格子フォノン共鳴,"岸根順一郎, A.S.Ovchinnikov,日本物理学会2009年秋季大会(2009年9月,熊本大学)

[7] "磁壁運動の正準理論について,"岸根順一郎, 日本物理学会2009年秋季大会(2009年9月,熊本大学)

[8] "カイラルらせん磁性体におけるスピントの理論,"岸根順一郎, 日本物理学会第64回年次大会(2009年3月,立教大学)

[9] "カイラルらせん磁性体のソリトン格子振動と ESR,"岸根順一郎, 第57回原研・兵県大合同コロキウム(2009年3月, SPring-8)

[10] "Probing chirality by polarized beams,"岸根順一郎, 第52回原研・兵県大合同コロキウム(2008年12月, SPring-8)

[11] "Theory of spin current in chiral helimagnet,"岸根順一郎, The 2nd ISAQM and the 7th Asia-Pacific Workshop (2008年11月,東京大学)

[12] "カイラルらせん磁性体におけるスピントの理論,"岸根順一郎, 神戸大学物性

セミナー (2008年11月, 神戸大学)
[13] "Spin Dynamics in Chiral Magnets," J. Kishine, New Developments in ESR of Strongly Correlated Systems, ISSP Workshop / COE21 "QUESTS" 7th International Workshop (2007年5月, 東京大学物性研究所)

[図書] (計0件)

[産業財産権]

○出願状況 (計1件)

特願 2011-16147

【発明の名称】 弾性操作で駆動するスピンドバイス

【発明者】 美藤正樹, 鶴田一樹, 長野琢磨, 岸根順一郎 (以上九州工業大学), 井上克也 (広島大学)

【出願日】 2011.1.28

[その他]

ホームページ等

<http://www.mns.kyutech.ac.jp/~kishine/>

6. 研究組織

研究代表者

岸根順一郎 (Kishine Jun-ichiro)

九州工業大学・大学院工学研究院・准教授

研究者番号: 80290906