

科学研究費補助金研究成果報告書

平成 24 年 5 月 18 日現在

機関番号：14401
 研究種目：特定領域研究
 研究期間：2007～2011
 課題番号：19052006
 研究課題名（和文） フラストレーションとカイラリティ

研究課題名（英文） Frustration and Chirality

研究代表者

川村 光 (KAWAMURA HIKARU)
 大阪大学・大学院理学研究科・教授
 研究者番号：30153018

研究成果の概要（和文）：**カイラリティ**とは、秩序状態の構造が局所的に「右」か「左」かの“掌性”を表す自由度であり、「**フラストレート系**」において、重要な役割を果たす。本計画研究においては、**幾何学的フラストレート磁性体、スピングラス磁性体、超伝導セラミックス、マルチフェロイクス系**等の多様なフラストレート系を対象に**カイラリティ**が導く新現象を探究し、新奇**カイラルグラス**状態を見出し「**スピン - カイラリティ分離現象**」に関する知見を得た。

研究成果の概要（英文）：“Chirality” represents the handedness of the local noncollinear structure of the ordered state, either “right” or “left”, playing an important role in frustrated systems characterized by competing interactions. The present project is devoted to exploring a variety of chirality-induced new phenomena. Target materials include geometrically frustrated magnets, spin-glass magnets, superconducting ceramics and multiferroic materials. We found a novel “chiral-glass” state in spin-glass magnets and ceramic superconductors, and obtained insights into the “spin-chirality decoupling” phenomena.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2007年度	30,300,000	0	30,300,000
2008年度	33,100,000	0	33,100,000
2009年度	33,100,000	0	33,100,000
2010年度	31,200,000	0	31,200,000
2011年度	13,800,000	0	13,800,000
総計	141,500,000	0	141,500,000

研究分野：数物系科学

科研費の分科・細目：物理学・物性II

キーワード：フラストレーション・カイラリティ・フラストレート磁性・スピングラス

1. 研究開始当初の背景

カイラリティ（キラリティ）とは、秩序状態の構造が局所的に「右」か「左」かの、所謂“掌性”を表す自由度として定義され、特に化学の分野では分子の立体異性体（光学異性体）の問題と関連して古くより大きな関心を集めてきた。一方、多数の分子からなる凝縮系を主たる対象とする物性物理学の分野においても、近年の**フラストレート系**研究の急速な発展が1つの契機になり、カイラリティ自由度が凝縮系の諸物性に新奇な効果を及ぼすことが認識されるようになってきた。代表的なカイラリティとして、磁性体を舞台とした**スピнкаイラリティ**があげられる。例えば、3角格子やパイロクロア等の**幾何学的フラストレート磁性体**、フラストレートしたランダム磁性体である**スピングラス磁性体**等で、カイラリティ自由度が出現し重要な役割を演じることが明らかになってきた。特に近年は、磁性が誘電自由度とカップルした所謂**マルチフェロイック系**において、スピнкаイラリティが決定的な役割を果たしていることも確立されてきた。

2. 研究の目的

このような背景を受け、本計画研究は、数値シミュレーションを主な研究手法とする数値的・理論的研究と、スピングラス AuFe, CuMn やパイロクロア $A_2B_2O_7$ 等のフラストレート磁性体や銅酸化物超伝導セラミックスを対象としたホール測定・磁気電気測定による実験研究を有機的に連携させ、**物性研究にカイラリティ・コンセプトに基づく新たな地平を拓く**ことを目的として、スタートした。特に、理論的に予測されている“**スピン-カイラリティ分離現象**”の有効性とその詳細、スピングラス秩序に対するカイラリティ仮説の妥当性とその実験的検証、幾何学的フラストレート磁性体を舞台とした**カイラリティ起源のトポロジカル励起（トポロジカル・テクスチャ）**と特異秩序化の探求、超伝導セラミックスやマルチフェロイックス系におけるカイラリティの秩序化とダイナミクスの探求、といった主題に集中的に取り組むことにより、フラスト

レート系を舞台としたカイラリティ物性の豊富な内容を明らかにする。

3. 研究の方法

本計画研究は、大別すると、1) スピングラス・**3角格子・パイロクロア**等のフラストレート磁性体を舞台としたカイラリティの秩序化とダイナミクスの理論研究、2) ホール測定・精密磁気測定を主な観測手段としたカノニカルスピングラス AuFe, CuMn のカイラリティ秩序の実験研究、3) 磁気電気測定を主な観測手段とした YBCO 超伝導**カイラルガラス**の実験研究、である。総括を川村が、理論を川村・小野田・吉野が、スピングラスの実験を谷口が、超伝導セラミックスの実験を萩原・出口・谷口が担当した。また理論研究においては、特任研究員として、20-23年度に大久保が、22-23年度は小淵が加わり、大久保は主にパイロクロア、カゴメ、3角格子等の幾何学フラストレート磁性体のカイラリティ秩序の大規模数値シミュレーションを、小淵は3角格子やXYスピングラスのスピン-カイラリティ分離に関わる大規模数値シミュレーションを担当した。実験装置面では、精密磁気測定用の高感度 SQUID 装置の導入をメインに、合わせて試料作成用の諸備品やホール素子等も導入した。

4. 研究成果

カイラリティは、その基本的性質から、**スカラー・カイラリティとベクトル・カイラリティ**に大別される。共にスピン S の高次量でありスピンの**複合自由度**とみなせるが、ベクトルカイラリティはスピンの2次量 $S \times S$ であり、非共線状のスピン配位に対して有限値を取る。対して、スカラーカイラリティはスピンの3次量 $S \cdot S \times S$ であり、非平面状スピン配位に対して有限値を取る。どちらのタイプのカイラリティが重要となるかは、両者の対称性に関する性質の差を反映し、系や条件によって異なってくる。例えば、ベクトルカイラリティは分極自由度と強くカップルし系の誘電的性質に際し重要となるのに対し、スカラーカイラリティは電流と強くカップルし系

の伝導的性質に際し重要となる。また、スカ
ラーカイラリティ、ベクトルカイラリティ双
方のケースともに、カイラリティが秩序変数
として主役を担った形での新奇な秩序相や相
転移が起きる可能性がある。とりわけ、スピ
ンが秩序化せずにカイラリティのみが秩序化
した**カイラル秩序相**の出現—**スピン - カイラ
リティ分離**—に大きな興味を持たれている。
本計画研究においては、双方のタイプのカイ
ラリティともを研究の対象とし、フラストレ
ート磁性体、マルチフェロイクス系、超伝導
セラミクスといった広汎な系をターゲット物
質として、研究を展開した。

スピングラス磁性体はフラストレートした
ランダム磁性体として、長く磁性・統計物理
分野で活発に研究されてきた系であるが、カ
イラリティ自由度が本質的に重要な役割を果
たしていることが認識されるようになったの
は、比較的最近のことである。研究代表者（川
村）は、スピングラスにおけるカイラリティ
秩序研究のパイオニア的存在であり、この方
面の研究では、主導的な役割を果たしてきた。
スピングラス磁性体の中でも標準的な物質と
して最も研究が進んでいる物質として、希薄
磁性合金スピングラス—所謂**カノニカルスピ
ングラス**—がある。この系は、理論的には等
方的な**ハイゼンベルグスピングラスモデル**を
ベースに、これに若干の磁気異方性を加えた
モデルとして良く記述される。今次計画研究
における理論研究では、まず、等方的な3次
元ハイゼンベルグスピングラスモデルがスピ
ン - カイラリティ分離現象を示す、即ちカイ
ラリティの転移温度がスピン自体の転移温度
より10%~15%程度高温に有ることを、
大規模数値シミュレーションにより明らかに
した。また、低温カイラルガラス秩序相にお
ける**レプリカ対称性の破れが1ステップ的**
になっていることや、カイラルガラス転移の臨
界性質が非イジング的になっていること等も
明らかにした。現実的な3次元モデルと相補
的に、長距離相互作用を有する1次元のハイ
ゼンベルグスピングラスモデルや高次元（4
次元）ハイゼンベルグスピングラスモデルに
関しても、合わせて大規模数値シミュレーシ
ョンを行い、スピン-カイラリティ分離が起き

る場合と起きない場合のそれぞれが次元に相
当するパラメータにどのように依存するかを
系統的に解析し、スピングラス系の秩序化に
関する包括的な描像を得ることに成功した。
スピングラスの実験面では、カノニカルスピ
ングラス AuMn, AgMn, PtMn 等の磁気測定及
び**高精度ホール測定**を行い、**カイラリティ起
源の異常ホール効果**を観測した。とりわけ、
カイラリティのガラス秩序化 — カイラルグ
ラス秩序化 — に伴うホール係数の温度依存
性のカスプ状アノマリーと熱履歴現象の観測
に成功した。また、帯磁率やホール抵抗の磁
気異方性の強さに関する依存性を詳細に解析
し、スピングラスのカイラリティ機構の理論
と整合的な結果を得た。合わせて精密磁気測
定により様々なタイプのカノニカル・スピ
ングラスの臨界指数を系統的に測定・解析し、
カノニカル・スピングラスでは磁気異方性の
強さに依らない**普遍的な臨界指数**値が実現し
ていることを明らかにした。これはスピング
ラスのカイラリティ機構の理論と調和的な結
果である。

スピングラス的な挙動は、典型的なスピ
ングラス磁性体以外のフラストレート系でも、
しばしば観測される。良く知られている例と
して、 $Y_2Mo_2O_7$ 等のハイゼンベルグ型のパイロ
クロア反強磁性体がある。本計画研究では、
これらフラストレート系一般で広く観測さ
れるスピングラス的挙動の起源と普遍性の
問題に関する知見を得るため、集中的な理論
研究を展開した。まず、 $Y_2Mo_2O_7$ の簡単化され
たモデルとして、ランダムに分布した相互作
用を有するパイロクロア格子上的反強磁性
ハイゼンベルグモデルを考え、大規模数値シ
ミュレーションにより、このモデルがスピ
ングラスの場合と類似のスピン - カイラリ
ティ分離現象を示すことを見出した。またカ
イラリティの臨界性質の解析も合わせておこ
ない、先に見出した3次元ハイゼンベルグス
ピングラスのカイラリティの臨界指数と一
致することを確認した。

磁性体で観測されているのと同様のカイラ
ルガラス状態は、より広汎に、磁性体以外の
系でも観測され得る。以前よりその存在が理
論的に提案されている系として、銅酸化物等

の異方的な超伝導オーダーパラメータを有する超伝導物質から形成される粒状の超伝導ネットワーク系がある。本特定では、これら超伝導セラミックスが示す特異秩序についても、カイラリティ秩序化の立場からの実験研究を展開した。この系はミクロン・オーダーのグレインから成る弱い接合系なので、マクロな物性がグレイン間の超伝導コンタクトの様相に敏感で、良い試料を得ることが極めて重要である。本計画研究においては、グレイン間の接合強度を制御した良質のY124超伝導セラミックス系試料の作成に成功した。また接合を意識的に切る目的で、Y124と非超伝導グレインを種々の比率で含む複合セラミックス系の試料作製も行った。これらの良質試料を対象として行った高感度磁気測定により、カイラルグラス理論と整合的な**帯磁率の負発散**が観測され、また発散の臨界指数値についても、高調波成分の丹念な解析を通して、最終的には理論と整合的な値が得られた。さらには、カイラルグラス転移温度で線形抵抗が有限に残るという“スピン-カイラリティ分離”の理論の予言の検証を行うべく高精度の電気抵抗測定を行い、理論と調和的なデータを得た。

ランダムネスが無視できるような規則的なフラストレート磁性体においても、カイラリティは、しばしば特異なトポロジカル励起（トポロジカル・テクスチャ）や新奇な相転移、秩序相を導く。本計画研究においても、いくつかの規則フラストレート系に対し、理論研究を主体に、これらカイラリティ起源の新奇トポロジカル励起や新奇相転移の研究を展開した。

ベクトル・カイラリティが形成するトポロジカル励起として **Z_2 ボルテックス**がある。本計画研究においては、3角格子ハイゼンベルグ反強磁性体が様々なタイプの**新奇なボルテックス励起**を有することを明らかにした。また Z_2 ボルテックスのダイナミクスを、中性子の非弾性散乱で観測可能な**動的スピン構造因子**を通して精査し、 Z_2 ボルテックスは特徴的な**セントラルピーク**を伴うことを見出した。また、本特定エ班で見出された3角格子ハイゼンベルグ反強磁性体 NiGa_2S_4

の新奇な低温スピン状態は Z_2 ボルテックス凝縮に伴うものではないかとの提案も行い、実験との比較を試みた。

Z_2 ボルテックスはベクトル・カイラリティが形成するトポロジカル励起であったが、スカラー・カイラリティが形成するトポロジカル励起として**スカーミオン**がある。特に、スカーミオンが周期的に配列して「**スカーミオン格子**」を形成する場合があります、近年注目を集めている。スカーミオン格子は、通常、ジャロシンスキ-守谷タイプの相互作用によって誘起される反対称なタイプのものであるが、本計画研究において、フラストレーションによって誘起される対称的なスカーミオン格子が存在することが理論的に示された。具体的には、強い次近接以降の相互作用によって非整合なヘリカル構造を持つ3角格子ハイゼンベルグ反強磁性体が、磁場中で多彩な**多重Q秩序**を示すこと、特にその中の triple-Q 状態は、カイラリティが”スカーミオン格子”相になっていることを明らかにした。同時に、このスカーミオン格子相においては顕著な異常ホール効果が観測されることも判明した。

磁性が強誘電性と共存する所謂「**マルチフェロイック系**」は、応用上の興味もあって、近年特に大きな注目を集めている。その際、フラストレーションが誘起するベクトル・スピンカイラリティが電気分極とカップルする機構が、マルチフェロのメインの機構として確立してきた。本計画研究においては、 $S=1/2$ のジグザグ鎖1次元ハイゼンベルグモデルの量子ダイナミクスを、擬1次元マルチフェロイック物質 LiCuVO_4 を念頭に理論的に解析し、カイラリティのソリトン対の励起がギャップレスの誘電応答として観測される可能性を明らかにした。

一見フラストレーションが効かないと思われる**ハニカム格子**においても、次近接以降の相互作用が強くなると、フラストレーションが重要な役割を果たし、その結果、低温で新奇な状態が形成され得る。本計画研究では、次近接相互作用によりフラストレートした

ハニカム格子上の古典ハイゼンベルグ反強磁性モデルの秩序化を理論的に解析し、この系が低温で“リング液体”“パンケーキ液体”という波数空間で特異な構造を持ったスピン液体状態を取ること、低温で磁場誘起の反強磁性秩序が現れることを示した。本特定キ班で見出された新奇フラストレート磁性体 $\text{Bi}_3\text{Mn}_4\text{O}_{12}(\text{NO}_3)$ で実験的に観測されたスピン液体的な振る舞いと磁場誘起反強磁性がこのモデルで記述されるのではないかとの提案も行い、実験との比較を試みた。

3角格子と並んで典型的なフラストレート格子として盛んに研究されている格子として、**カゴメ格子**がある。本計画研究では、歪んだカゴメ格子上のハイゼンベルグモデルの秩序化を理論的に探索し、歪んだ系特有の一次相転移が有限温度で起きること、また**カイラル・ドメインウォール**と Z_2 ボルテックスの協力現象的な熱生成が1次転移の起源になっていることを見出し、本特定キ班で見出されたボルボース石等の歪んだカゴメ格子磁性体が見出す奇妙な相転移現象との関連を議論した。

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 59 件)

1. T. Okubo, S. Chung and H. Kawamura, “Multiple-q states and skyrmion lattice of the triangular-lattice Heisenberg antiferromagnets under magnetic fields” 査読有, Phys. Rev. Lett. **108**, 017206, 2012
2. T. Okubo, T. H. Nguyen and H. Kawamura, “Cubic and non-cubic multiple-q states in the Heisenberg antiferromagnets on the pyrochlore lattice” 査読有, Phys. Rev. B **84**, 144432, 2011
3. H. Kawamura, “ Z_2 -vortex order of frustrated Heisenberg antiferromagnets in two dimensions” J. Phys. Conf. Ser. **320**, 012002, 2011
4. S. Okumura, H. Yoshino and H. Kawamura, “Spin-chirality decoupling and critical properties of a two-dimensional fully frustrated XY model” 査読有, Phys. Rev. B **83**, 094429, 2011
5. H. Kawamura, “The ordering of XY spin glasses” 査読有, J. Phys. Condens. Matter **23**, 164210, 2011
6. T. Neupert, S. Onoda and A. Furusaki, “Chain of Majorana states from superconducting Dirac fermions at a Magnetic domain wall” 査読有, Phys. Rev. Lett. **105**, 206404, 2010
7. S. Furukawa, M. Sato and S. Onoda, “Chiral order and electromagnetic dynamics in one-dimensional multiferroic cuprates” 査読有, Phys. Rev. Lett. **105**, 257205, 2010
8. D. X. Viet and H. Kawamura, “Monte Carlo studies of the ordering of the one-dimensional Heisenberg spin glass with long-range power-law interactions” 査読有, J. Phys. Soc. Jpn. **79**, 104708, 2010
9. S. Okumura and H. Kawamura, T. Okubo and Y. Motome, “Novel spin-liquid states in the frustrated Heisenberg antiferromagnet on the honeycomb lattice” 査読有, J. Phys. Soc. Jpn. **79**, 114705, 2010
10. D. X. Viet and H. Kawamura, “Spin-chirality decoupling in the one-dimensional Heisenberg spin glass with long-range power-law interactions” 査読有, Phys. Rev. Lett. **105**, 097206, 2010
11. T. Okubo and H. Kawamura, “Phase transition of the three-dimensional chiral Ginzburg-Landau model: search for the chiral phase” 査読有, Phys. Rev. B **82**, 014404, 2010
12. T. Okubo and H. Kawamura, “Signature of a Z_2 vortex in the dynamical correlations of the triangular-lattice Heisenberg antiferromagnet” 査読有, J. Phys. Soc. Jpn. **79**, 084706, 2010
13. S. Onoda and Y. Tanaka, “Quantum melting of spin ice: Emergent cooperative quadrupole and chirality” 査読有, Phys. Rev. Lett. **105**, 047201, 2010
14. H. Kawamura, A. Yamamoto and T. Okubo, “ Z_2 -Vortex ordering of the triangular-lattice Heisenberg antiferromagnet” 査読有, J. Phys. Soc. Jpn. **79**, 023701, 2010
15. N. Nagaosa, J. Sinova, S. Onoda, A. H. MacDonald and N. P. Ong, “Anomalous Hall effect” 査読有, Reviews of Modern Physics **82**, 1539, 2010

16. D. X. Viet and H. Kawamura, “Monte Carlo studies of chiral and spin ordering of the three-dimensional Heisenberg spin glass” 査読有, Phys. Rev. B **80**, 064418, 2009
17. D. X. Viet and H. Kawamura, “Numerical evidence of spin-chirality decoupling in the three-dimensional Heisenberg spin glass model” 査読有, Phys. Rev. Lett. **102**, 027202, 2009
18. H. Yoshino, T. Nogawa and B. Kim, “Vortex jamming in superconductors and granular rheology” 査読有, New J. Phys. **11**, 013010, 2009
19. A. Ikeda and H. Kawamura, “Ordering of the pyrochlore Ising model with the long-range RKKY interaction” 査読有, J. Phys. Soc. Jpn. **77**, 073707, 2008
20. H. Yoshino and T. Rizzo, “Step-wise responses in mesoscopic glassy systems: a mean field approach” 査読有, Phys. Rev. B **77**, 104429, 2008
21. H. Kawamura and A. Yamamoto, “Vortex-induced topological transition of the bilinear-biquadratic Heisenberg antiferromagnet on the triangular lattice” 査読有, J. Phys. Soc. Jpn. **76**, 073704, 2007
22. K. Yamanaka, T. Taniguchi, T. Yamazaki, (他 4 名) “Anisotropy dependence of anomalous Hall effect in canonical spin glass alloys” 査読有, J. Phys. Condens. Matter **19**, 145222, 2007
23. T. Taniguchi, “Chiral susceptibility of canonical spin glasses from Hall effect measurements” 査読有, J. Phys. Condens. Matter **19**, 145213, 2007

[学会発表] (計 229 件)

1. Hikaru Kawamura, “Novel order and topological excitation in a two-dimensional Heisenberg antiferromagnet on a distorted kagome lattice”, Frustrated Magnets: From Spin Ice to Kagome Planes, Dec. 12, 2011, Federal Univ. of Rio Grande, Natal, Brazil

[その他]

ホームページ等

<http://www.frustration.jp/>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

川村 光 (KAWAMURA HIKARU)

大阪大学・大学院理学研究科・教授
研究者番号：30153018

(2) 研究分担者

谷口 年史 (TANIGUCHI TOSHIFUMI)
大阪大学・大学院理学研究科・准教授
研究者番号：80207183

吉野 元 (YOSHINO HAJIME)
大阪大学・大学院理学研究科・助教
研究者番号：50335337

萩原 亮 (HAGIWARA MAKOTO)
京都工芸繊維大学・工芸科学研究科・
准教授
研究者番号：70198654

出口 博之 (DEGUCHI HIROYUKI)
九州工業大学・大学院工学研究院・教授
研究者番号：30192206

小野田 繁樹 (ONODA SHIGEKI)
独立行政法人理化学研究所・専任研究員
研究者番号：70455335
(H22 から研究分担者として参画)