

平成 30 年 6 月 8 日現在

機関番号：14401

研究種目：基盤研究(A) (一般)

研究期間：2013～2017

課題番号：25247064

研究課題名(和文) フラストレート磁性体のカイラル秩序化と異常伝導現象

研究課題名(英文) Chiral order and anomalous transport phenomena in frustrated magnets

研究代表者

川村 光 (Kawamura, Hikaru)

大阪大学・理学研究科・教授

研究者番号：30153018

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 34,200,000円

研究成果の概要(和文)：本計画では、幾何学的フラストレート磁性体やスピングラス等を対象に、その新奇な相構造や磁気秩序の解明を目指した。研究の主たる研究成果として、1) フラストレーションとランダムネスが誘起する特異な「量子スピン液体状態」の種々の2次元フラストレート格子磁性体における同定、2) 規則的な量子フラストレート系における特異な有限温度クロスオーバー現象の発見、3) ランダム磁気異方性を持つハイゼンベルグ型スピングラスの秩序化におけるレプリカ対称性の破れと関連した特異現象の発見、4) スピンと伝導電子がカプラした1次元近藤モデルにおける、新たなコリニア相やカイラル相を含む豊富な相構造の発見、等が挙げられる。

研究成果の概要(英文)：In the project, with geometrically frustrated magnets and spin glasses as research targets, we aim at clarifying their novel phase structures and magnetic orders. Main results of our research include, 1) identification of novel "quantum-spin-liquid" states induced by frustration and randomness in a variety of two-dimensional quantum magnets, 2) finding of novel finite-temperature crossover phenomena in a regularly frustrated two-dimensional magnet, 3) finding of anomalous ordering behaviors related to "replica-symmetry breaking" in Heisenberg spin glasses with random magnetic anisotropy, and 4) finding of novel phase structures including a collinear state and a chiral state in the Kondo lattice model where spins and conduction electrons are coupled.

研究分野：物性物理学

キーワード：フラストレーション 量子スピン液体 ランダムネス トポロジカル励起 3角格子 カゴメ格子 厳密対角化 カイラルリティ

1. 研究開始当初の背景

物性物理学の分野において、「**フラストレーション**」という概念が大きな注目を集めている。これは、様々な最適化条件が互いに競合し、系がそれらを同時に満たすことが出来ないような状況を指す。このようなフラストレート系では、自明な最適化条件が存在しないために、系は一般に不安定となりやすく、大きな揺らぎの効果が発現したり、時には非フラストレート系では見られない新しいタイプの熱力学的状態や相が実現される。もとより、フラストレーションは自然界では広く見られる極めて一般的な現象であるが、典型的なフラストレート系として集中的に研究されてきた系として、相互作用に競合を持つ磁性体 **フラストレート磁性体** がある。そこでは、各磁性分子上のスピン自由度を舞台とした磁氣的フラストレーションが、強い揺らぎの効果を生み、幾多の新奇な物性を導く [Novel States of Matter Induced by Frustration, JPSJ Special Topics, J. Phys. Soc. Jpn. 79, no.1 ed. H. Kawamura, (2010)]. 3角状に配置した反強磁性的なスピン・ユニットから構成される種々の**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**、スピン間相互作用と磁気異方性が競合したスピンアイス磁性体等、多様なフラストレート磁性体があり、また幾何学的フラストレート磁性体もその結晶構造により**3角格子磁性体**、**カゴメ磁性体**等の(擬)2次元磁性体から**パイロクロア格子磁性体**のような3次元磁性体まで、豊富な実現例がある。

このようなフラストレート磁性体では、スピン系は新奇な諸物性を示すことが、近年の活発な研究から確立してきた。とりわけ、新奇な磁気秩序化および伝導・輸送現象との関連で、近年大きな注目を集めている自由度として、「**カイラリティ**」自由度がある。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る。カイラリティ自由度が多彩な電磁気現象 例えは磁気強誘電性や異常ホール効果 を導くことをからも注目される。

これらフラストレート系研究の活性化に当たって、本計画研究の研究代表者(川村)は、早い時期よりフラストレート磁性体やスピンカイラリティの秩序化・相転移現象の理論研究に携わって先駆的な貢献を行い、フラストレーション研究の分野では、国際的にもパイオニアとして認知されている。とりわけ、平成19~23年度には、**特定領域研究「フラストレーションが創る新しい物性」**の領域代表を務め、プロジェクトの成功に寄与した(事後評価A)。

本基盤A研究開始時点において、「フラストレート系」特定領域活動等を通し、フラストレート磁性体の研究は国際的にも極めて活発化しており、それらを踏まえて、研究の

一層の展開が待たれる状況であった。

2. 研究の目的

本基盤A研究では、3角格子、カゴメ格子やパイロクロア格子上の幾何学的フラストレート・スピン系やスピングラスを主な対象に、近年の実験結果を参照しつつ、フラストレーション起源の新奇な秩序化現象を探究することを主な目的とする。

フラストレート磁性体では、スピン系は低温まで強く揺らいだ特異な状態におかれ、その結果、新奇な諸物性を示すことが、近年の活発な研究から確立してきた。例えば、フラストレートしたスピン系は、低温まで通常の長距離磁気秩序を形成できずに、低温で「**スピン液体**」と呼ばれる特異な揺らいだ状態を取ることがある。特に量子効果が強い場合には、「**量子スピン液体**」と呼ばれる状態 代表的なものとして古く P.W.Anderson によって提唱された Resonating Valence Bond (RVB) 状態がある になると期待される。近年、有力な候補物質が報告されているが、なお未解明なところも多く、今後の研究の展開が期待されている。理論的にも、このようなスピン液体状態は、物質の新しい集合状態 相 の存在を意味し、その本性の解明には大きな興味を持たれている。また、スピン・フラストレーションは、例えばカイラリティのようなスピンの高次構造・新しい自由度を生みだしたり、スカーミオンや Z_2 ボルテックスといった、トポロジカルに安定な新奇な磁気励起 トポロジカル励起 を作り出したりすることがある。

また、フラストレート磁性体においては、しばしば低温でガラス的な状態を取るものも多い。その典型的な例が、いわゆるスピングラスであるが、同様の現象は、例えばパイロクロア磁性体等の多くのフラストレート磁性体でも広汎に観測される。研究代表者は、典型的なスピングラス秩序化においては、カイラリティ自由度が決定的に重要や役割を果たしているとする、「**カイラリティ・シナリオ**」を提唱してきた。スピングラス磁性体に限らず、磁性体の**ガラス化**に際しては、系に内在する**乱れ**、**ランダムネス**が重要と考えられる。他方、ガラス化に際してのランダムネスの役割については、理論的にも多くの未解明な点が残っており、フラストレーションと絡んだ大変興味深い問題を提起する。

このような状況下において、本基盤A研究においては、フラストレート磁性体を対象に、最近のフラストレート系に対する豊富な実験データを参照しつつ、フラストレーション起源の新奇な磁気秩序化現象の理論的探究をメインに、さらには実験との協力による理論のさらなる展開と検証も合わせ、フラストレーションやカイラリティが生み出す新規物性現象の探査・解明を目指す。

3. 研究の方法

現象の本質を抜き出した古典および量子モデル・ハミルトニアンに対し統計物理的計算手法 主としてモンテカルロシミュレーションや厳密対角化法 を適用し、最近の多くの興味深い実験結果の解釈とともに、フラストレーションならではの新現象、新概念の発掘と実験への提言を目標とする。ハイゼンベルグモデルのような局在スピンモデルを主たる研究対象とするが、適宜、伝導電子の自由度とカップルさせた拡張されたモデルも対象とする。

また得られた理論結果を、研究分担者との研究協力等も通して、関連する実験結果と比較検討し、また可能な限り、理論の実験的な検証をも目指す。

4. 研究成果

本計画は、幾何学的フラストレート磁性体やスピングラス等を対象に、その新奇な相構造や磁気秩序の解明を目指すものであった。なお最終 29 年度は、本基盤 A 研究から派出したテーマに対する基盤 S 研究「フラストレーションが創るスピネクスタチャ」が採択されたため、基盤 A の研究費の支給を辞退した。

平成 25 年度～28 年度の 4 年間での本基盤 A 研究の主たる研究成果として、1) **フラストレーションとランダムネスが誘起する特異な「量子スピン液体状態(ランダムシングレット相)」の種々の 2 次元フラストレート格子磁性体における同定**、2) **規則的な量子フラストレート系における特異な有限温度クロスオーバー現象の発見**、3) **ランダム磁気異方性を持つハイゼンベルグ型スピングラスの秩序化におけるレプリカ対称性の破れと関連した特異現象の発見**、4) **スピンと伝導電子がカップルした 1 次元近藤モデルにおける、新たなコリニア相やカイラル相を含む豊富な相構造の発見**、等が挙げられる。以下では、これらについて、以下では、もう少し詳しく紹介したい。

1) 近年のフラストレート磁性研究の大きなトピックとして「量子スピン液体」がある。これは、スピン系が磁気長距離秩序やガラス凍結を示さずに、極低温まで“液体的”な性格を保持した量子状態を指す。近年、 $S=1/2$ の 3 角格子有機分子磁性体や $S=1/2$ カゴメ格子磁性体ハーバースミサイト等において、実験的な観測例が次々と報告されているが、研究代表者らは、これら「量子スピン液体」の多くのものは、系の**ランダムネス(不均一性)**が重要な「**ランダムシングレット状態**」ではないかとの結論に至り、一連の論文として公開した。3 角格子、カゴメ格子等の 2 次元の幾何学的フラストレート格子に加え、最近接相互作用と次近接相互作用間に競合があるハニカム格子上の $S=1/2$ ランダム量子ハイゼンベルグモデルに対し、厳密対角化法および有限温度での Hams-deRaedt 法に基づく数値研究を行い、これらのランダムネスを有する量子フラストレート磁性体が広いパラメ

ータ範囲で量子スピン液体的な挙動を示すこと、また現実の実験系で観測されている量子スピン液体的な振る舞いが、このランダム“シングレット”描像で整合的に理解できることを示した(発表論文、学会発表 他)。

2) ランダムネスがない場合にも量子スピン液体的挙動を示すことが理論的に知られているカゴメ格子モデルに対し、Hams-de Raedt 法による規則系の有限温度シミュレーションを行い、新たに比熱の第 3 ピークを同定し、これがスピンの近距離秩序のクロスオーバー的变化に伴うものであることを見出した(発表論文、学会発表 他)。

3) 例えばカノニカルスピングラス等の典型的なスピングラス磁性体は、ランダムな磁気異方性を持つ 3 次元ハイゼンベルグスピングラスモデルとしてモデル化できる。当モデルに対する大規模モンテカルロシミュレーションにより、磁気異方性の強さ D が等方的な交換相互作用の強さ J の 5%程度のところまで $D-T$ 相図におけるスピン(カイラル)グラス転移線が「折れ曲がり」的異常を示すことを見出し、この境界異方値より異方性が弱い場合には**1 ステップ的 RSB**が、強い場合には**full ステップ的な RSB**が起きていることを数値的に明らかにした(発表論文、図書)。

4) 局在古典ハイゼンベルグスピンが伝導電子とカップルした**近藤格子モデル**は、局在スピンと伝導電子の間の非自明な結合を表した最も簡単なモデルである。1 次元の近藤格子モデルに対する数値シミュレーションにより、その絶対零度相図を明らかにし、近藤結合 J が中間的な領域では、しばしばカイラルな(立体的な)スピン構造が安定化されること、 J が弱い極限においては、概ね摂動論的に予想される平面的なヘリカルタイプのスピン構造が安定化されるが $1/4$ フィリングにおいては共線的な が安定化されること等を、新たに見出した(発表論文、学会発表 他)。

なおこれら 1) - 4) に加えて、フラストレート磁性体に関係した研究期間中の成果として、5) **積層 3 角格子ハイゼンベルグ反強磁性体の臨界現象**(学会発表 他)、6) **バイロクロア反磁性体における局所格子歪みの効果の探査**(発表論文、学会発表 他) 等もあることを付言する。

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)

K.Uematsu and H.Kawamura, “Randomness-Induced Quantum Spin Liquid Behavior in the $s = 1/2$ Random J_1 - J_2 Heisenberg Antiferromagnet on the Honeycomb Lattice”

J.Phys.Soc.Jpn, 査読有, 86, 2017,044704(1-12)
(<http://doi.org/10.7566/JPSJ.86.044704>)

T.Shimokawa and H.Kawamura,
“ Finite-temperature crossover
phenomenon in the S=1/2 antiferromagnetic
Heisenberg model on the kagome lattice ”
J.Phys.Soc.Jpn. 査読有, 85,2017,
113702(1-4)
(<http://doi.org/10.7566/JPSJ.85.113702>)

K.Aoyama and H. Kawamura, "Spin-lattice
coupled order in Heisenberg antiferromagnets
on the pyrochlore lattice", Phys. Rev. Lett.,
査読有, 116, 2016, 257201(1-5)
(<http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevLett.116.257201>)

T.Shimokawa, K.Watanabe and H. Kawamura,
"Static and dynamical spin correlations of the
S =1/2 random-bond antiferromagnetic
Heisenberg model on the triangular and kagome
lattices", Phys. Rev. B, 査読有, 92, 2015,
134407(1-12)
(<http://dx.doi.org/10.1103/PhysRev.92.134407>)

S.Minami and H.Kawamura, " Low-temperature
magnetic properties of the Kondo lattice model
in one dimensions ", J. Phys. Soc., 査読有,
84, 2015, 044702(1-8) (<http://dx.doi.org/10.7566/JPSJ.84.044702>)

H.Kawamura, K.Watanabe and T. Shimokawa,
" Quantum Spin-Liquid Behavior in the Spin-1/2
Random-Bond Heisenberg " J.Phys.Soc.Jpn,
査読有, 83, 2014, 034714-(1-4).
(<http://dx.doi.org/10.7566/JPSJ.83.103704>)

F.Atuhiro, T.Kondo, T.Taniguchi, " Pressure
dependence of Neel transition in (Mg, Fe)O " Physics
and Chemistry of Minerals, 査読有, 41(2014)27-32

T.Obuchi and H.Kawamura, " Monte Carlo
simulations of the three-dimensional XY spin glass
focusing on the chiral and the spin order " Phys.
Rev.B, 査読有, 87, 2013, 174438(1-14)
(<http://dx.doi.org/10.1103/PhysRev.87.174438>)

K. Watanabe, H. Kawamura, H. Nakano,
and T. Sakai, "Quantum spin-liquid

behavior in the spin-1/2 random Heisenberg
antiferromagnet on the triangular lattice " J. Phys.
Soc. Jpn. 査読有. 83, 2014 034714(1-6)
(<http://dx.doi.org/10.7566/JPSJ.83.034714>)

H.Kobori, T.Taniguchi, " Magneto-transport
study of Magnetite(Fe₃O₄) nanoparticles between
nanogap electrodes on surface-oxidized Si
substrate ", Journal of Magnetism and Magnetic
Materials, 査読有, 331(2013)88-91

[学会発表](計36件)
H.Kawamura, " Frustration-induced spin
textures ", Core-to-Core Spintronics
Workshop, 2017年, Senri Hankyu Hotel
Osaka

上松和樹・川村光, " ランダム J_1 - J_2 正
方格子反強磁性体における量子スピン液体
的ふるまい ", 日本物理学会年次大会、2017
年、大阪大学

永野凱大・川村光, " 積層 3 角格子反強磁
性ハイゼンベルグモデルの臨界現象の数値
的研究 ", 日本物理学会年次大会、2017 年、
大阪大学

青山和司・川村光, " フリージングパイロ
クロア反強磁性体における局所格子歪みと
磁気秩序 ", 日本物理学会年次大会、2017 年、
大阪大学

谷口祐樹・山岸航大・荒川智紀・谷口年史・
新見康洋・小林研介, " 三元合金スピングラ
スにおけるスピンホール効果の測定 ", 日本
物理学会年次大会、2017 年、大阪大学

山岸航大・谷口年史, " ルテニウム系パイ
ロクロア酸化物 $R_2Ru_2O_7$ (R=rare earth) の臨
界指数に関する研究 ", 日本物理学会年次大
会、2017 年、大阪大学

青山和司・川村光, " パイロクロア反強磁
性体における局所格子歪みと磁場効果 ", 日
本物理学会秋季大会、2016 年、金沢大学

下川統久朗・川村光, " S=1/2 カゴメ格子
ハイゼンベルグ反強磁性体の秩序化に対す
る熱ゆらぎの効果 ", 日本物理学会秋季大会、
2016 年、金沢大学

永野凱大・川村光, " 積層 3 角格子反強磁
性ハイゼンベルグモデルの臨界現象の数値

的研究”、日本物理学会秋季大会、2016年、金沢大学

川村光、“ランダムネスが誘起する3角、カゴメ格子上の量子スピン液体”、日本物理学会秋季大会、2016年、金沢大学

谷口祐樹・山岸航大・荒川智紀・谷口年史・新見康洋・小林研介、“三元合金スピングラスにおける異常ホール効果とスピンホール効果の測定”日本物理学会秋季大会、2016年、金沢大学

山岸航大・谷口年史、“ルテニウム系パイロクロア酸化物 R_2Ru_{207} ($R=rare\ earth$) における非線形帯磁率測定”、日本物理学会秋季大会、2016年、金沢大学

H.Kawamura，“Quantum spin liquid behaviors in the random spin-1/2 Heisenberg antiferromagnets on the triangular and kagome lattices” Highly Frustrated Magnetism(HFM)、2016年、GIS NTU Convention Center,Taipei

山岸航大・真木まゆみ・谷口年史、“ルテニウム系パイロクロア酸化物 R_2Ru_{207} ($R=rare\ earth$) の磁性”、日本物理学会年次大会、2016年、東北大学

谷口祐樹・山岸航大・荒川智紀・谷口年史・新見康洋・小林研介、“スピングラス $AuFe$ 素子におけるスピンホール効果の測定”、日本物理学会年次大会、2016年、東北大学

Hikaru Kawamura，“Frustration-induced symmetric skyrmion lattices in triangular magnets”,EMN Hong Kong Meeting 2015, 2015年、Eaton Hotel Hong Kong,Hong Kong

Hikaru Kawamura，“Novel order and dynamics in frustrated and random magnets”,International Symposium on Present and Future of Material Sciences, 2015年、Sigma Hall,Osaka University

川村光、“ランダムネスが誘起する3角、カゴメ磁性体における量子スピン液体相”、物性研短期研究科、2015年、東京大学物性研究所

川村光、“フラストレーションとエントロピー”、日本物理学会秋季大会、2015年、関西大学千里山キャンパス

真木まゆみ・谷口年史、“横方向帯磁率測定によるカノニカルスピングラスのランダム磁気異方性の評価”、日本物理学会秋季大

会、2015年、関西大学千里山キャンパス

②下川統久朗・川村光、“3角・カゴメ格子上の $S=1/2$ ランダム反強磁性ハイゼンベルグ模型の静的・動的構造因子”、日本物理学会年次大会、2015年、早稲田大学

②崎山泰樹・川村光、“3次元積層八ニカム格子上的クラスターXYスピングラスにおける誘電分極の磁場方向依存性”、日本物理学会年次大会、2015年、早稲田大学

③田中浩奈・谷口年史、“カノニカルスピングラスの横方向帯磁率測定によるランダム磁気異方性測定”、日本物理学会年次大会、2015年、早稲田大学

④前田正博・田中浩奈・竹下俊平・田辺賢士・荒川智紀・谷口年史・小林研介、“スピングラス薄膜における $1/f$ 雑音の測定”、日本物理学会年次大会、2015年、早稲田大学

⑤Tokuro Shimokawa and Hikaru Kawamura，“Multiple-Q order of the frustrated Heisenberg model on the honeycomb lattice under magnetic fields”,NQS (Novel Quantum States in Condensed Matter) 2014, 2014年、Yukawa Institute for Theoretical Physics,Kyoto University

⑥Tokuro Shimokawa and Hikaru Kawamura，“Dynamical properties of the $S=1/2$ random Heisenberg antiferromagnets on the kagome and the triangular lattices”,NQS (Novel Quantum States in Condensed Matter) 2014, Yukawa Institute for Theoretical Physics, 2014年、Kyoto University

⑦Hikaru Kawamura，“Quantum spin liquid behaviors in the random spin-1/2 Heisenberg antiferromagnets on the triangular and the kagome lattices”,NQS (Novel Quantum States in Condensed Matter) 2014, Yukawa Institute for Theoretical Physics, 2014年、Kyoto University

⑧川村光・渡辺健・下川統久朗、“ランダム量子カゴメ格子ハイゼンベルグ反強磁性体の量子スピン液体状態”、日本物理学会秋季大会、2014年、中部大学

⑨下川統久朗・川村光、“フラストレート八ニカム磁性体における多重Q秩序”、日本物理学会秋季大会、2014年、中部大学

⑩田中浩奈・谷口年史、“カノニカルスピン

ガラスの横方向帯磁率測定によるランダム磁気異方性測定を試み”、日本物理学会秋季大会、2014年、中部大学

③①前田正博・田中浩奈・竹下俊平・田辺賢士、荒川智紀・谷口年史・小林研介、“スピニングラス薄膜における電気測定”、日本物理学会秋季大会、2014年、中部大学

③②Hikaru Kawamura, “Quantum spin-liquid behavior in the spin-1/2 random Heisenberg antiferromagnet on the triangular lattice”, RIKEN-APW joint workshop, 2014, 理研 和光

③③Hikaru Kawamura, “Quantum spin-liquid behavior in the spin-1/2 random Heisenberg antiferromagnet on the triangular lattice”, International workshop on frustration and topology in condensed matter physics, 2014, NCKU, 台湾

③④田中浩奈・谷口年史、“カノニカルスピニングラスの横方向帯磁率測定によるランダム磁気異方性測定を試み”、日本物理学会年次大会、2014年、東海大学

③⑤前田正博・田中浩奈・竹下俊平・田辺賢士、荒川智紀・谷口年史・小林研介、“スピニングラス薄膜における電気測定の試み”、日本物理学会年次大会、2014年、東海大学

③⑥谷口年史、微小領域磁束測定のためのコイル設計と試作、日本物理学会年次大会、2014年、東海大学

〔図書〕(計1件)

H.Kawamura and T.Taniguchi, Elsevier, Spin glasses(Handbook of Magnetic Materials, vol.24), 2015, 137

〔産業財産権〕

出願状況(計 件)

名称：
発明者：
権利者：
種類：
番号：
出願年月日：
国内外の別：

取得状況(計 件)

名称：
発明者：

権利者：
種類：
番号：
取得年月日：
国内外の別：

〔その他〕
ホームページ等

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

(3)連携研究者 ()

研究者番号：

(4)研究協力者 ()