

平成 22 年 5 月 14 日現在

研究種目：基盤研究 (C)

研究期間：2007 ～ 2009

課題番号：19540402

研究課題名 (和文) 弱結合系におけるカイラリティを秩序変数とする相転移の研究

研究課題名 (英文) Studies of the chiral order on the weak coupling systems

研究代表者

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

研究成果の概要 (和文)：右手系・左手系を区別する量カイラリティ (キラリティ) で特徴付けられる相転移が存在する可能性の検証を、スピンとカイラリティを結びつける役割を果たすジャロシンスキー守谷型異方性を制御する実験を行うことにより試みた。その結果、金属スピングラスと呼ばれるランダム磁性体で、カイラリティを秩序変数とする相転移の可能性を強く示唆する結果を得るとともに、異常ホール効果がカイラリティ研究に非常に有用であることを示した。

研究成果の概要 (英文)：The phase transition whose order parameter can be considered as 'chirality' has been investigated by using anomalous Hall effect on canonical spin glass systems. The Dzyaloshinsky-Moriya anisotropy was controlled by changing the atomic radius of the host metal. The results strongly suggests that the existence of the phase transition characterized by chirality.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2007 年度	2,900,000	870,000	3,770,000
2008 年度	500,000	150,000	650,000
2009 年度	500,000	150,000	650,000
年度			
年度			
総計	3,900,000	1,170,000	5,070,000

研究分野：低温・磁性、統計物理学

科研費の分科・細目：物理学・数理物理・物性基礎論

キーワード：統計物理学、磁性、フラストレート系、ランダム系、カイラリティ、異常ホール効果、臨界現象

1. 研究開始当初の背景

実際の世界と鏡に映った世界、実像と鏡像といったテーマは古来より多くの科学者が興味を持ってきた。この問題は化学の分野では光学異性体の問題として有名で、2001 年のノーベル化学賞が、この問題の研究により野

依博士に授与されたことは記憶に新しい。それでは物性物理学はこの問題をどうとらえてきたのであろうか。実際の世界と鏡の中の世界は、座標系の右手系と左手系として表される。空間に座標系を設定するためには 3 本のベクトルが必要で、物性物理学の問題とし

て考える場合、電子スピンを利用するのが好都合である。近接する3スピンで、 $\chi_{ijk} = \mathbf{S}_i \cdot (\mathbf{S}_j \times \mathbf{S}_k)$ というスカラー量を定義するとその符号が右手系、左手系を表し、この量を「カイラリティ」と呼ぶ。簡単な計算から明らかであるが、カイラリティは3つのスピンの平行の場合、あるいは同一平面にある場合はゼロであり、有限の値を持つためには3つのスピンの立体構造を取らなければならない。スピン配列自体は中性子回折で決定できるが、本研究で問題にしたいのは、単なる幾何学的スピン配列の問題ではない。スピンの立体構造を表す幾何学的な量、カイラリティが物性に影響を及ぼしうる物理量として確立できるか、またカイラリティの物性への寄与がどのような機構で出現するのかをスピングラスと呼ばれる磁性合金を用いて解明することである。

カイラリティが物性物理学の分野で注目されたのは1980年代、フラストレーション系、スピングラス等のランダム系で発見された新しい磁性相を理解する過程であった。大規模コンピュータシミュレーション等から「カイラリティを新たな秩序変数とする相転移」の存在が予測され注目された。しかしカイラリティは、単にスピンの幾何学的配置を数学的に表した量であり、物性への直接的影響は不明であり、基礎物理的な興味以上を集めることはなかった。しかし、最近思わぬ方向からカイラリティの物性への影響を、金属スピングラス等の弱結合系(所謂 s-d 系)で直接観測できる可能性が指摘され、工学的な応用も含め注目されている。金属スピングラス、中でも最も多くの研究がなされてきた AuFe, AgMn, CuMn 等の希薄磁性合金はカノニカルスピングラスと呼ばれ、スピン間の相互作用は伝導電子を媒介とする RKKY 相互作用である。通常の磁性研究ではスピンそのものに注目するが、スピン間の相互作用を媒介する伝導電子の振る舞いにこそカイラリティの影響が現れる可能性が、Tatara と Kawamura [1] による s-d 系の輸送係数の摂動計算により示された。カノニカルスピングラスではスピンはランダムな方向に凍結しているため、局所的には近接3スピンは立体構造を形成すると考えられる。この立体構造を反映し、異常ホール効果にカイラリティの寄与が現れる可能性がある。従来のスピングラス研究は局在スピンそのものに着目したもので、ホール効果などの輸送現象は二次的なものであり、局在スピンの影響が反映されにくい興味を集めることもなく、測定はほとんど行われてこなかった。Tatara と Kawamura の理論発表後、内外の研究グループがカイラリティ起源の異常ホール効果の観測に挑戦したが、スピングラス特有の履歴現象の扱いが不適切であったり、通常の磁性

体で現れるカイラリティ起源ではない異常ホール効果との分離が不明瞭であったためカイラリティに関し確証は得られなかった。しかし申請者は最近、独自の測定装置の開発と測定法の確立を行い、代表的なカノニカルスピングラスである AuFe 合金でカイラリティ起源異常ホール効果の観測に成功した。[2]

2. 研究の目的

本研究の目的は、3つのスピンの作る立体構造を表す幾何学的な量であるカイラリティ χ_{ijk} が、物性に影響を及ぼしうる「物理量」として確立できるか、またカイラリティの物性への寄与がどのような機構で出現するのかをスピングラスと呼ばれる磁性合金を用いて解明することである。この目的のため、カイラリティ起源異常ホール効果出現機構の解明とカイラリティが秩序変数になりうるか否かを、以下の二点に着目し研究を行う。

(1) カイラリティ起源異常ホール効果のジャロシンスキー-守谷 (D-M) 型異方性依存性を定量的に評価し、カイラリティとスピンの関係に関する知見を得る

(2) 弱磁場での異常ホール係数測定により、カイラリティに関する臨界現象の観測を試み、可能であれば臨界指数の決定を行い、カイラリティを秩序変数とする相転移のユニバーサリティに関して考察する

3. 研究の方法

申請者の研究成果から、スピンとカイラリティを結び付けていると考えられる、ジャロシンスキー-守谷 (D-M) 型異方性を系統的に制御した試料の精密測定から、カイラリティ起源異常ホール効果出現機構の解明とカイラリティが秩序変数になりうるか否かの検証を、以下の2点に絞って研究を行う。

(1) カイラリティ起源異常ホール効果の D-M 異方性依存性の定量的評価

物質のホール抵抗率 ρ_{Hl} は、キャリアにはたらくローレンツ力による、磁場 H に比例する正常ホール抵抗率 ρ_0 と、磁化 M に比例する異常ホール抵抗率 ρ_{ex} の和であり、 $\rho_{Hl} = \rho_0 + \rho_{ex} = R_0 H + 4 \pi R_s M$ と書ける。ここで、 R_0 、 R_s は各々正常、及び異常ホール係数と呼ばれる。通常の磁性体では、 R_s は抵抗率 ρ を用い $R_s = A \rho + B \rho^2$ と表されることが知られている。(Karplus - Luttinger (K-L) 理論)しかし、我々はカノニカルスピングラス AuFe で、 ρ_{ex} と M の同時測定から K-L 理論では説明できない温度磁場履歴に依存する項が存在することを示し、スピングラスのホール効果の理論[3]との比較から、カイラリティ起源の異常ホール効果の存在を示すことが出来た。その後さらに実験を進め、磁気的には同じ性質を示すスピングラスでも

ホール効果の振る舞いが極めて異なった場合があることが判明しつつある。我々の予備実験では、同じカノニカルスピングラスでも、D-M異方性が小さいとされるAgMn合金では異常ホール効果はほとんど観測されない。磁気的な性質を変えず、D-M異方性のみを制御できる可能性はないのであろうか？過去の研究を調査し、D-M異方性の弱い系でも原子半径の大きなAu、Pt等の非磁性不純物を少量ドーピングすることでD-M異方性を大きくできる可能性があることが判明した。そこで我々は系統的にD-M異方性を制御した試料における精密 ρ_{xx} 、Mの同時測定より、カイラリティ起源異常ホール効果のD-M異方性の依存性を定量的に評価し、カイラリティ起源異常ホール効果の出現にD-M異方性が果たす役割を解明することを目的とする。

(2) 弱磁場での異常ホール係数測定によるカイラリティに関する臨界指数の決定

同時測定より求まる異常ホール係数 R_s はカイラリティが秩序変数であれば、ある種の「応答係数」と考えられ、転移点近傍で強い異常を持つことが期待される。スピングラスの場合期待されるカイラリティの秩序もランダムであるため、応答係数の発散は R_s の非線形項と考えられる[3]。相転移でこの種の異常を特徴づけるのは臨界指数であり、臨界指数の値は空間次元、オーダーパラメータの成分数などごく少数のパラメータにのみ支配されることが期待される。(相転移のユニバーサリティ) そこで申請者は、まず第一に精密測定の感度を向上させ、カイラリティに関する臨界指数の決定を目標とする。

次に、上記D-M異方性を制御した一連の試料での測定を行う。D-M異方性はスピンの性質をハイゼンベルグからイジング的に変えることが期待されるが、このときの臨界指数の振る舞いは興味深い。

[1] G. Tatara and H. Kawamura:
J. Phys. Soc. Jpn. 71(2002)2613.

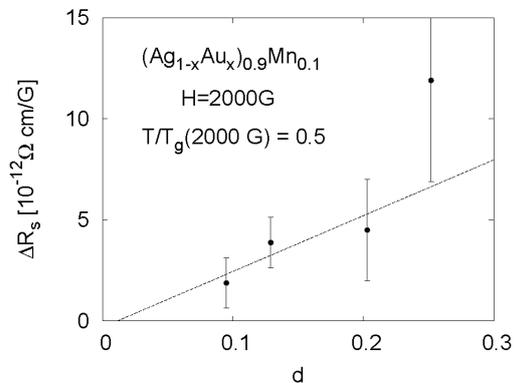
[2] T. Taniguchi et al., Phys. Rev. Lett.
93(2004)246605.

[3] H. Kawamura: Phys. Rev. Lett.
90(2003)47202.

4. 研究成果

カノニカルスピングラスではジャロシンスキー-守谷 (D-M) 異方性は、スピングラス転移の性質に強く影響を与えられ、異方性依存性を詳細に研究することによりカイラリティを秩序変数とする相転移の有無を調べることができると考えられている。この異方性の大きさを、ホスト金属の原子の軌道半径と異なる非磁性金属原子のドーピングで制御し、カイラリティ起源異常ホール

効果の測定を行った。用いた試料は比較的D-M異方性が弱いとされるAgMn合金で、異方性の制御のためMn濃度を一定に保ったままAgより原始半径の大きなAuを少量ドーピングした試料を作成した。Mn濃度が同じにもかかわらず、スピングラス転移温度はAu濃度に依存し上昇した。また、転移温度のAu濃度依存性の関数形は過去に報告のある形と一致した。転移点より高温の常磁性相での温度依存性や、有効磁気モーメントの大きさなどはAuをドーピングしても変化しなかったため、AuドーピングによるMnスピン状態はAuをドーピングしていない試料と同じと考えられる。これらの試料について、磁化-異常ホール効果の同時測定を行った。申請者が過去に行ったAuFeの場合と比べシグナルが非常に小さいが、今回の課題申請で作成した回路を用い、カイラリティ起源異常ホール効果の測定に成功した。下図には転移温度の半分の温度における磁場中冷却測定とゼロ磁場冷却測定の異常ホール係数の差を異方性の大きさに関してプロットしたものである。この解析により異常ホール係数の中でカイラリティ起源ではない部分は打ち消しあい、カイラリティ起源の部分のみを考察することが可能になる。この測定結果より、カイラリティ起源異常ホール効果は、D-M異方性の大きさに比例し、異方性がゼロの極限(理想ハイゼンベルグスピン極限)ではカイラリティ起源ホール効果は

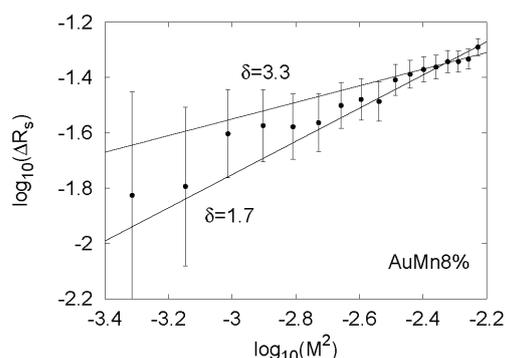


消失することを示している。この結果は、弱結合系の理論的な予測と一致し、D-M異方性がカイラリティと磁化の結合定数の役割を果たしていることを示すものである。

また、Agを母合金とするスピングラスの異方性の制御に加え、異方性がさらに小さいCuを母合金とするスピングラスの詳細な実験を行い、既にAg系で得たデータと定量的に一致する結果を得た。現在定量的な評価を行っているが、予備的な解析から今まで得たデータが転移温度でスケールされることが明らかになってきた。転移温度は相互作用の分布の幅に対応していると考えられることから、カノニカルスピングラスは、特徴的なパラメータ：異方性の大きさ/転移温度、す

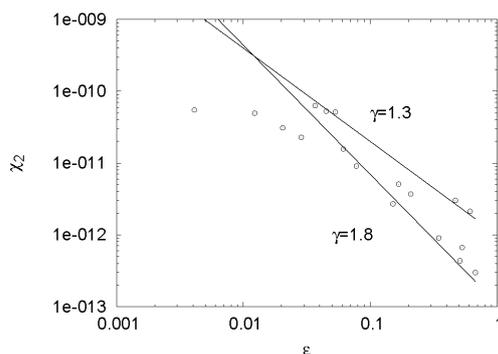
なわち異方性と相互作用の比で特徴付けられることを意味する。

上で述べた結果はカイラリティを秩序変数とする相転移の場合、秩序変数を誘起する「場」は、磁化であることを意味している。この結果をふまえて、カイラリティの臨界現象の観測を試みた。先に述べたようにシグナルが小さいため、現在に至るまで、完全な形の臨界現象の観測には成功していないが、相転移に伴う揺らぎの効果が一番大きいと考えられる転移温度直上で秩序変数の「場」依存性の測定を試みた。シグナルが一番大きな試料である Au 系の結果を下図に示す。この結果からカイラリティに関する臨界指数 δ_χ は 2.0 ± 0.3 と求まった。この結果は、カイラリティに関する世界初の臨界指数である。また、この値はスピンの臨界指数と実験精度内で一致し、この系では、カイラリティ系の相転移とスピン系の相転移が同一温度で起こり、スピン系のユニバーサリティがカイラリティ系と同一であることを示唆している。



また、本課題申請では、新たなスピングラス系として、Ca₂Ru₂O₇ パイロクロア酸化物の臨界現象の研究も行った。パイロクロア酸化物は、所謂幾何学的フラストレート系として有名で、中でも、Nd₂Mo₂O₇ は金属強磁性相で、カイラリティの寄与が観測されたと報告のある物質である。この物質は希土類を変えた時に金属強磁性から絶縁体スピングラスになることが知られている。申請者はこのことに注目し新たなパイロクロア酸化物として Ca₂Ru₂O₇ のスピングラスの性質を調べるために、中央大学理工学部の佐藤博彦氏から試料を提供していただき、磁化の精密測定から臨界指数の決定を行い、合金系のスピングラスとの比較検討を行った。この物質はパイロクロア酸化物であるにもかかわらず、電気抵抗の値が金属的な興味深い物質であり、一見元素置換などのランダムネスの導入が無いにもかかわらずスピングラスになる奇妙な性質を持つ。これは、上で述べた絶縁体スピ

ングラスも同様で、未だに原因が不明である。下図は、Ca₂Ru₂O₇ の転移温度近傍の非線形磁化率の温度変化を対数プロットしたものである。この解析結果より、臨界指数 γ は1.5程度となり、合金系のスピングラスに近い値をとることが分かった。また、独立にほかの臨界指数 β, δ も求めこれらの間にスケーリング関係式が成立していることを確認した。この結果は、Ca₂Ru₂O₇ のスピングラスは合金系のそれと類似しており、同一のユニバーサリティに属している可能性を示唆している。



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 7 件)

① 川村光、谷口年史 「フラストレーションが生みだす右・左の世界」
パリティ 25 (2010) 64-68 査読無

② T. Taniguchi and H. Sato “Spin Glass Behavior in Metallic Pyrochlore Ruthenate Ca₂Ru₂O₇”

J. Phys. : Conference Series 145 (2009)
0120171-0120174 査読有

③ K. Yamanaka and T. Taniguchi “Anisotropy dependence of anomalous Hall effect in canonical spin glass alloys”

J. Phys.: Condens. Mater. 19 (2007)
1452221-1452225 査読有

④ T. Taniguchi “Chiral susceptibility of canonical spin glasses from Hall effect measurements” (invited)

J. Phys.: Condens. Mater. 19 (2007)
1452131-1452138 査読有

[学会発表] (計 10 件)

① 谷口年史、左右田稔 「LuBaCo₄O₇ の磁気相図」

日本物理学会 2009年9月25日 熊本大学

② T. Taniguchi H. Sato “Spin Glass Behavior in Metallic Pyrochlore Ruthenate Ca₂Ru₂O₇”
Highly Frustrated Magnetism 2008 2008年
9月8日 Braunschweig 大 (ドイツ)

③ 谷口年史 シンポジウム「異常ホール効果と nontrivial な磁気構造」
「カノニカルスピングラスのカイラリティ起源異常ホール効果」
日本物理学会 2008年3月24日 近畿大学

6. 研究組織

(1) 研究代表者

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

(2) 研究分担者

()

研究者番号：

(3) 連携研究者

()

研究者番号：