

研究種目：特定領域研究  
研究期間：2007 年度～2011 年度  
課題番号：19052003  
研究課題名（和文）フラストレーションと量子伝導

研究課題名（英文）Frustration and Quantum Transport

研究代表者

常次 宏一（TSUNETSUGU HIROKAZU）  
東京大学・物性研究所・教授  
研究者番号：80197748

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：物性実験、物性理論、磁性、量子伝導

1. 研究計画の概要

近年フラストレートしたスピン系において特異な磁気的性質が次々と発見されている。本研究計画の目的はフラストレート効果が顕著な強相関金属における量子輸送現象の特質を明らかにすると共に新しい概念を創出し、その結果を応用して量子臨界性を利用した磁場、圧力などによる輸送係数の制御と増強を目指すことである。そのために、フラストレートした格子上のクーロン斥力の強い遍歴電子系のモデルに量子揺らぎを十分に取り入れて、電子状態と輸送係数の理論的研究を行うと同時に、フラストレート金属の純良試料の合成とそれを用いた精密な磁性および輸送特性測定を行う。特に、多重臨界点近傍の非フェルミ液体相、異方的超伝導、重い電子的振舞いや、量子ベリー位相の伝導現象への効果に注目し、磁気的性質との関係が深い磁気抵抗、スピンのカイラリティーが密接に関係する異常ホール効果や熱電効果などの交差特性を実験的・理論的に研究する。

2. 研究の進捗状況

まず新物質探索の点ではフラストレート格子新伝導物質を多く発見するとともに典型物質の純良化を行った。代表的なものは  $\text{Ag}_2\text{MnO}_2$ 、 $\text{Fe}_3\text{Mo}_3\text{N}$ 、 $\text{GaNb}_4\text{O}_8$ 、 $\text{YMn}_2\text{Zn}_{20}$  である。また、高圧により金属化する試みを展開中である。

新奇伝導現象としては、 $\text{Pr}_2\text{Ir}_2\text{O}_7$  において磁気秩序を伴わない特異な自発的ホール効果を見出した。この現象の解明のため、フラストレート磁性体中の特異な励起の伝導電子への影響を研究中である。また、Mo 酸化物の熱電効果の測定により、スピнкаイラリティー起源のネルンスト効果の発現を示した。さらに、典型物質の1つであ

る  $\text{YMn}_2$  について交差物性の代表としてスピンホール効果検出の測定を実行するとともに、金属クラスタ系に対してはNMR、中性子散乱などの磁気揺らぎの微視的測定を行い、フラストレート系の特性の解明が進行中である。

電荷フラストレーションに関しては、分子性三角格子物質の電気伝導度測定が行われ、異なる電荷秩序間の競合が明らかになると共に、電流による電荷秩序制御の可能性を示した。

典型的伝導系の  $\text{LiV}_2\text{O}_4$  における重い電子的な振舞いを解明するために、スピン・電荷と軌道自由度の相互作用を記述する低エネルギー有効模型が構築され、複数自由度の間のエンタングルメントの存在が明らかにされた。この有効模型を用いた準粒子質量増大の計算が着手された。さらに、局在スピン系の Berry 位相に由来するホール効果の理論が構築され、スピン波の伝導に関する微視的な計算が実行された。

また、スピン 1/2 カゴメ格子の典型物質として銅鉍物ボルボサイトおよびベシニエイトの純良結晶が合成され、特異な基底状態や磁場誘起逐次相転移を発見した。

3. 現在までの達成度

②おおむね順調に進展している。

（理由）

まず  $\text{Pr}_2\text{Ir}_2\text{O}_7$ 、 $\text{Ag}_2\text{MnO}_2$ 、 $\text{Fe}_3\text{Mo}_3\text{N}$  などを代表とするさまざまな新伝導物質の発見に成功するとともに、試料の純良化が着実に進んでいることがあげられる。また、純良化された試料を用いた多様な物性測定実験が実行され、Pr 化合物における自発的ホール効果や Mo 化合物におけるスピнкаイラリティー起源の熱電効果などの、フラストレート系独自の伝導現象が発見されたこ

とも評価できる。理論の面においても、 $\text{LiV}_2\text{O}_4$  の電子ダイナミクスに影響するスピンと軌道自由度の量子エンタングルメントの様相を具体的に示すと同時に、スピン波の Berry 位相によるホール効果という新概念を提出するなど、所期の計画に沿う成果が順調にあげられている。

#### 4. 今後の研究の推進方策

今後はさらにフラストレートした新伝導物質の発見および、典型物質の一層の純良・高品質化を推進する。そのために、平成22年度導入予定のX線回折装置を用いた品質測定を活用する。特に典型物質  $\text{YMn}_2$  の単結晶化、新発見の  $\text{YMn}_2\text{Zn}_{20}$  の純良化および  $\eta$  カーバイド型化合物の絞り込みは努力を傾注する予定である。

物性測定の間では、低温における電気伝導特性と磁性測定の関係の解明を、純良化した試料を用い、温度範囲もさらに広げることを含めて展開する。また、電気磁気効果、熱電磁気効果測定をさらに多くの物質に対して系統的に実施し、電子ダイナミクスに対するフラストレート系特有の低エネルギー励起の影響の解明を目指す。

理論の間では、準粒子ダイナミクスの研究のため、磁気・カイラリティー揺らぎとの相互作用を取り入れるクラスター動的平均場理論を展開し、輸送係数の微視的計算を実施する予定である。さらに、スピン波のホール効果のより一般的な発現条件を解明することを目指した理論研究を行う。

輸送現象の解明を目指し、実験研究者と理論研究者の研究交流が密接に行われるように図る。

#### 5. 代表的な研究成果

〔雑誌論文〕 (計 65 件)

- ① Y. Machida (筆頭), S. Nakatsuji (2番目), 他3名: Time-reversal symmetry breaking and spontaneous Hall effect without magnetic dipole order, *Nature*, vol.463, 210-213, 2010年, 査読有
- ② T. Waki (筆頭), H. Nakamura (10番目), 他8名: Non-Fermi-liquid behavior on an iron-based itinerant electron magnet  $\text{Fe}_3\text{Mo}_3\text{N}$ , *J. Phys. Soc. Japan*, vol.79, 043701/1-4, 2010年, 査読有
- ③ K. Hattori, H. Tsunetsugu: Effective Hamiltonian of three-orbital Hubbard model on pyrochlore lattice: application to  $\text{LiV}_2\text{O}_4$ , *Phys. Rev. B*, vol.79, 035115/1-25, 2009年, 査読有
- ④ S. Fujimoto: Hall Effect of Spin Waves in Frustrated Magnets, *Phys. Rev. Lett.*, vol.103, 047203/1-4, 2009年, 査読有
- ⑤ H. Yoshida (筆頭), Z. Hiroi (6番目), 他4名: Unique phase transition on spin-2 triangular lattice of  $\text{Ag}_2\text{MnO}_2$ , *J. Phys. Soc. Japan*, vol.77, 074719/1-8, 2008年, 査読有

- ⑥ N. Hanasaki (筆頭), 他9名: Anomalous Nernst effects in pyrochlore molybdates with spin chirality, *Phys. Rev. Lett.*, vol.100, 106601/1-4, 2008年, 査読有

〔学会発表〕 (計 174 件)

- ① S. Nakatsuji: “Non-Fermi-Liquid and novel phase formation in  $\beta\text{-YbAlB}_4$  and  $\text{Pr}_2\text{Ir}_2\text{O}_7$ ”, *Quantum Criticality and Novel Phases 2009*, 2009年8月3日, ドレスデン(ドイツ)
- ② S. Fujimoto: “Hall Effect of Spin Waves in Frustrated Magnets”, *Joint European Japanese Conference: Frustration in Condensed Matter*, 2009年5月14日, リヨン(フランス)
- ③ Z. Hiroi: “Surprises on the ground state of the  $S = 1/2$  kagome-like lattice in volborthite”, *Highly Frustrated Magnetism 2008*, 2008年9月10日, ブラウンシュバイヒ(ドイツ)
- ④ H. Tsunetsugu: “Low-Energy Effective Model of ‘Heavy-Fermion’ Vanadium Spinel  $\text{LiV}_2\text{O}_4$ ”, *KIAS Workshop “From correlated electrons to nanoscale materials”*, 2008年9月2日, ソウル(韓国)
- ⑤ H. Nakamura: “Structural transition in  $\text{Mo}_3\text{Sb}_7$  probed by muon spin relaxation”, *International Conference on Muon Spin Rotation, Relaxation and Resonance*, 2008年7月7日, つくば国際会議場(つくば市)

〔図書〕 (計 1 件)

D. Poilblanc, H. Tsunetsugu, “Mobile holes in frustrated quantum magnets and itinerant fermions on frustrated geometries”, *Book chapter in “Introduction to Frustrated Magnetism”*, Springer Verlag, 2010年, in press

〔産業財産権〕

○出願状況 (計 2 件)

名称: 酸化物及び電気導体の電気物性制御方法  
発明者: 池田直、花咲徳亮  
権利者: 岡山大学  
種類: 特許権  
番号: 特願2008-222351、特開2010-053006  
出願年月日: 平成20年8月29日  
国内外の別: 国内

名称: 電歪素子及び電気歪生成方法  
発明者: 池田直、野上由夫、花咲徳亮、寺崎一郎  
権利者: 岡山大学、早稲田大学  
種類: 特許権  
番号: 特願2008-001653、特開2009-164429  
出願年月日: 平成20年1月8日  
国内外の別: 国内