

## 審査の結果の要旨

氏名 石塚 大晃

固体中を運動する電子における電荷の自由度とスピンの自由度の結合は、凝縮系物理学における基本的で重要な問題のひとつである。その微視的な理解は、磁性や金属絶縁体転移、輸送現象といった基礎物理学的な興味だけでなく、スピン自由度を積極的に用いた新しいエレクトロニクス（スピントロニクス）といった応用上も重要である。とりわけ、近年、格子構造に幾何学的なフラストレーションをもつ系におけるスピン電荷結合の効果が大きな注目を集めている。そこでは、フラストレート系特有の巨視的な縮退や、それにまつわるスピン液体的な振舞い、摂動に対する超巨大応答などが、スピン電荷結合を通じて系の電氣的・磁氣的な性質に非自明な効果を与えることが期待される。実際、伝導性パイロクロア酸化物や擬二次元三角格子をもつデラフォサイト酸化物、およびそれらの類縁物質において、興味深い磁性や電子状態、金属絶縁体転移や特異な輸送現象などが見出され、実験・理論ともに精力的な研究が行われている。本論文では、こうしたフラストレート伝導系におけるスピン電荷結合の効果を理論的に明らかにする目的で、最も基本的なモデルのひとつである近藤格子模型をとりあげ、磁性、電子状態、輸送現象を包括的に調べた。特に局在スピンのイジングスピンである場合に着目し、主にモンテカルロ法を用いることで、揺らぎの効果まで取り込んだ結果を得た点に特徴がある。

本論文は英文によって執筆され、以下の9章からなる。以下に各章の概要を述べる。

第1章は、導入として、スピン電荷結合系の基礎的事項と、本研究の研究動機のひとつとなっているフラストレート伝導系における最近の実験結果を概観している。

第2章は、本研究で用いるモデルと手法の説明である。手法については、メインのモンテカルロ法とともに、相補的に用いた変分法や摂動展開法などの詳細を説明している。

第3章から第8章までは、本研究を通じて得られた結果を格子系ごとに順序立ててまとめている。まず第3章では、三角格子系で得られた部分無秩序状態に関する結果を示している。部分無秩序状態とは、長距離秩序を担うスピンと非磁性スピンの共存した特異な秩序状態である。従来の局在スピン系に対する研究では、二次元系では部分無秩序状態は安定化しないとされてきた。本研究では、スピン電荷結合系では二次元でも部分無秩序状態が実現しうることを初めて示した。この部分無秩序相は磁氣的な相競合領域において電子的な相分離に関連して現れることを明らかにした。また、電子状態の解析から、この状態は絶縁体であり、いわゆるスレーター機構を通じて安定化していることを論じた。

第4章では、同じ三角格子系において見出したディラックハーフメタルに関する結果をまとめている。ここでは、3副格子フェリ磁性秩序とともにギャップレスの線形分散が現れることを示している。この線形分散は、グラフェンで議論されているディラック電子状態と低エネルギー極限で等価なものであるが、片方のスピンのバンドにギャップが開きスピンの完全遍極した状態であることが特徴である。このハーフメタル性を用いたスピン自

由度の制御は、ディラック電子系のスピントロニクスへの応用上重要となりうる。

第5章では、カゴメ格子系において見出した特異な状態を2つ論じている。ひとつはループ液体と呼ばれる状態で、フラストレーションによる局所拘束条件に起因して、アップスピンで構成されたループという創発的な自由度で記述出来る状態である。電子状態の変化に対して、ループの結晶化や凝集に対応する相転移やクロスオーバーが現れることを見出した。また、光学伝導度に、ループ形成に特有な共鳴ピークが現れることも示した。もうひとつの特異な状態は、前章の結果に類似した部分無秩序状態である。この結果は、二次元スピン電荷結合系では普遍的に部分無秩序状態が発現しうることを示唆している。

第6章では、同じカゴメ格子系において、スピンアイス的な非共面的なイジングスピンと結合した電子系に量子異常ホール状態が実現することを示している。ここでは、カゴメアイスと呼ばれる特異な状態のもとで、磁気的な長距離秩序が無いにも関わらずホール伝導度が量子化されることを見出した。これは、ランダウ準位やスピン軌道相互作用、磁気秩序を必要としない新しい量子ホール状態といえる。また、磁場を変化させることで、長距離秩序を伴った別の異常ホール状態へのトポロジカルな転移が生じることを示した。

第7章では、三次元パイロクロア格子系において見出した新しいスピン電荷秩序相に関する結果をまとめている。ここでは、有効的な磁気相互作用の拮抗領域に、複雑な磁気秩序を伴った32副格子秩序相が現れることと、それが電荷秩序を伴うこと、磁場の印加によりそのスピン電荷秩序をスイッチング出来ることを示した。

第8章では、同じパイロクロア格子系において、時間反転対称性は保ったまま空間反転対称性のみが破れた特異な相が実現することを論じている。この状態は、パイロクロア格子の上向き四面体と下向き四面体が分化し、その片方のみが特定のスピン配置間を熱的に揺らいだ状態として特徴付けられる。有効スピンモデルの解析を通じて、この相が四面体間の創発的なフラストレーションによって安定化していることを論じた。またこの状態ではスピンホール伝導度がゼロではない有限な値をもつことを見出した。

第9章では、本研究によって得られた成果についての総括を行っている。

以上をまとめると、本論文では、格子構造に幾何学的なフラストレーションをもつスピン電荷結合系に対する基本的なモデルのひとつであるイジングスピン近藤格子模型に対して主にモンテカルロ法を用いた理論解析を行うことで、フラストレート系特有の磁性や電子状態に着目した包括的な研究を行い、新たな視点から様々な特異な性質を明らかにした。本研究の結果は、新規な秩序相をいくつも発見しただけでなく、それらの安定化機構を解明し、またそこに現れる特異な輸送特性をも明らかにした点で、基礎物理学的な側面だけでなく将来のスピントロニクス等への応用の上でも重要といえる。今回得られた成果は、物性科学・理工学の発展に大きく寄与すると期待されることから、本論文は博士（工学）の学位論文として合格と認められる。