

審査の結果の要旨

論文提出者氏名：小澤 遼

近年、遍歴磁性体に現れる非共面なスピントクスチャが大きな興味を集めている。これらは、スピンベリ一位相を通じて電子状態に非自明なトポロジーをもたらすことで、トポロジカルホール効果をはじめとする興味深い輸送現象を引き起こすことが知られている。しかし、こうした非自明なスピントクスチャの探索は研究の途上にあり、それらの安定化機構とともに多くの未解明な点が残されている。特に、伝導電子の自由度をあらわに取り扱った理論研究の例は少ない。本論文では、遍歴磁性体における新しい非共面なスピントクスチャを理論的に開拓することを目的として、最も基本的なモデルのひとつである近藤格子モデルをとりあげ、大規模な数値シミュレーションを用いて全く新しい状態を見出すことに成功した。

本論文は英文で執筆されており、以下の7章からなる。以下に各章の概要を述べる。

第1章では、遍歴電子系に現れる種々の非共面なスピントクスチャとそれらがもたらす興味深い電子状態や輸送現象をいくつか紹介し、本研究の研究動機を述べている。

第2章では、本研究で取り扱う理論モデルと大規模数値計算の手法を紹介している。

第3章から第6章にわたって、本研究を通じて得られた結果がまとめられている。まず第3章では、スピン電荷結合が弱い極限において見出した磁気渦結晶に関する結果を論じている。この状態が2つのヘリカル状態を重ね合わせた非共面なスピン構造であること、スピンスカラーカイラリティのストライプ構造を伴うことを明らかにしている。スピン電荷結合に関する摂動展開と電子系におけるフェルミ面の局所的なギャップ形成の観点から、磁気渦結晶の安定機構を論じている。この磁気渦結晶に伴う興味深い電子状態として、カイラリティストライプに沿った交代的な自発電流を見出している。また、電子密度の変化などによるフェルミ面の変形に応じて、磁気渦結晶の周期が連続的に変化することも示している。正方格子と三角格子の結果から、この新しい状態は格子構造によらず一般的に安定な新しい基底状態であることを結論している。

第4章では、三角格子において新しく見出したスキルミオン結晶に関する結果を論じている。ゼロ磁場の基底状態として安定に存在すること、磁気ユニットセルあたりトポロジカル数2を有することから、この状態が質的に新しいスキルミオン結晶であることが示されている。また、磁場を印加することにより、トポロジカル数が1のスキルミオン結晶、トポロジカル数が0の非共面状態へと逐次的に相転移を起こすことを見出している。これらの相転移に応じて、伝導電子の電荷密度やスピン密度、電流密度がどのように変化する

かも明らかにしている。また、電子系のフェルミ面の変化に応じて、スキルミオンのサイズを連続的に制御できることが示されている。

第5章では、遍歴電子系に現れる磁気ドメインの形状に関する結果を論じている。準安定状態として現れる磁気ドメインの形成過程を様々な磁気状態に対して詳細に調べ、同じ磁気秩序でも電子状態が異なる場合には、異なるドメイン形状をとることを見出している。こうした形状異方性が、遍歴電子の感受率の波数依存性によって支配されていることを論じている。また、磁気ドメイン壁近傍の状態を詳細に調べることにより、電子状態に応じたドメイン壁の幅の大小や、バルクのトポロジカルな状態に対応した自発電流の実空間分布などを明らかにしている。

第6章では、第3章と第4章で得られた結果をもとに、近藤格子模型の弱結合領域における新しい基底状態相図を論じている。従来のRKKY理論で予想されていたヘリカル秩序は本研究で見出した新しい状態で全て置きかわり、スピン電荷結合の強さに応じて、カイラリティストライプを伴った磁気渦結晶と、トポロジカル数が2のスキルミオン結晶（あるいはそれに類似した状態）が広く現れることを示している。これにより、これまで信じられてきた基底状態相図が一新されることを論じている。

第7章では、本研究によって得られた成果についての総括と今後の展望が示されている。

以上をまとめると、本論文では、遍歴磁性体のミニマルなモデルのひとつである近藤格子模型に対して、多項式展開とランジュバンダイナミクス法を組み合わせた大規模数値シミュレーションを用いて基底状態を調べ上げることにより、従来のRKKY理論では現れない全く新しいトポロジカルなスピントクスチャを理論的に発見した。本研究の結果は、これらの新規な状態の起源や発現条件を明らかにした点で、基礎物理学的な側面だけでなく将来のエレクトロニクスへの応用上も重要な研究成果といえる。今回得られた成果のいくつかは、物性科学・物理工学の発展に大きく寄与すると期待される。以上より、本論文審査委員会において審査員全員一致で、本論文が博士（工学）の学位論文として合格であると判定された。