

## 審査の結果の要旨

論文提出者氏名 田中 未羽子

本論文は、電子相関が強い2層グラフェンの量子ホール反強磁性状態における非電荷流の生成と相転移現象などに関する研究の成果をまとめたものである。

グラフェンはスピンとバレーの内部自由度を持ち、非電荷流であるスピン流、バレー流の研究の舞台となってきた。本学位研究が対象とする量子ホール状態は、クーロン相互作用のエネルギーが運動エネルギーに比べて大きく、電子相関効果が強い。グラフェンの量子ホール状態では、電子相関によってスピンとバレーの内部自由度が秩序化し、特に零エネルギーのランダウ準位が半分占有された状態では、スピンとバレーが結合した興味深い伝導現象や相転移が発現する。しかし、このような特徴的な伝導の実験的検証や相転移現象の解明はまだほとんど行われていなかった。

本学位研究は、ゼロランダウ準位のバレー間エネルギーや秩序状態を面直電場で制御できる2層グラフェンを用いた電気伝導実験によって、この系の電子相関効果の理解を飛躍的に進展させたものである。まず、スピンとバレーに依存するホール伝導度（スピンに依存するバレーホール伝導度）を基に、スピンとバレーが結合した非電荷流である「スピンのバレー流」の存在を考察し、その生成を高い技術を用いた非局所輸送測定によって実証した。相転移に関しては、様々な形状の試料を用いた電気伝導測定により、その物理を明らかにしている。特に、電気伝導の温度依存性を詳細に調べ、層間反強磁性状態と層偏極状態との間の量子相転移や温度上昇による2段階の相転移を明らかにした。また、内部自由度に関連して、ベリー位相 $\pi$ を持つ単層グラフェンに由来するバンドとベリー位相 $2\pi$ を持つ2層グラフェンに由来するバンドが共存するABA積層の3層グラフェンにおいて弱局在の測定を行い、局在効果は、単層グラフェンのバンドの電子によって主に起こっていることを明らかにした。

論文は8章から成る。第1章では、固体の電子系の内部自由度と相転移、非電荷流について簡単に紹介し、本学位研究の動機と概要を説明している。第2章から第4章では、グラフェンのバンド構造、グラフェンにおける非電荷生成と検出、2層グラフェンの量子ホール磁性に関して、本研究の背景となる知識を説明している。第5章以下が本学位研究の成果に当たる内容となっている。

第5章では、2層グラフェンのゼロランダウ準位の半占有状態（電荷中性点）における非電荷流生成実験を紹介している。まず、その原理である「スピンのバレーホール効果」の提案をしている。スピンのバレーホール効果は、スピントロニクスでよく用いられるスピン流と、生成効率に優れたバレー流とを相互に変換する原理としても利用できる。空間反転対称性と時間反転対称性を有し、スピン軌道相互作用が小さい系で非電荷流を生成した例はこれまでなく、電子相関状態で非電荷流を生成する新しい原理として説明されている。続いて、実験手法とその結果を紹介している。実験では、2層グラフェンをトップゲート電極とバックゲート電極で挟んだ2層ゲート構造のホールバー試料において、層間反強磁性状態での非局所輸送の著しい増大が観測されている。

非局所抵抗が電気抵抗率の3乗にスケールされる振る舞いから、非局所輸送が非電荷流によるものであると結論付けている。また、非局所輸送の増大をもたらす他の要因についても検討し、それらが主要因ではないことを確認している。

第6章は、ゼロランダウ準位の半占有状態の相転移に関する実験を紹介している。端伝導の影響を排除できるコルビノ型の試料などを用いて、バルクの電気伝導を面直電場、磁場、温度の関数として測定している。面直電場による層間反強磁性状態から層偏極状態への量子相転移が、その温度に対する依存性から、理論予想に反して2次以上の相転移であることを明らかにしている。また、層間反強磁性状態で温度を上げていくと、準長距離秩序が失われる温度（コステリッツ-サウレス転移の温度）と反強磁性状態自体を喪失する温度の2段階で相変化が起こる様子を観測している。

第7章は、ABA積層の3層グラフェンにおける弱局在の実験を紹介している。2層ゲート構造のデバイスにおける弱局在、弱反局在の測定結果から散乱時間を解析し、局在効果が主に平均自由行程が長い単層グラフェンの線形バンドの電子によって起こっていると結論付けている。

第8章は、研究成果のまとめと今後の課題について述べている。

本学位研究は、スピンとバレーの内部自由度を持つグラフェンの電子相関と非電荷流の物理を明らかにした独創性が高いものである。内部自由度がある系の電子相関に関する一般的な概念と非電荷流の応用への可能性が導かれており、物理工学分野の進展に大きく寄与する内容となっている。

よって本論文は博士（工学）の学位請求論文として合格と認められる。