

審査の結果の要旨

論文提出者氏名 島崎 佑也

バレーは非等価なバンド端の電子系に対して定義される量子力学的自由度であり、スピン流に類似して電氣的に中性なバレー流の生成をもたらす。ギャップをもつグラフェンはスピン軌道相互作用が小さく、また高品質であることからバレー流の生成に有望な材料であるが、実験は意外と進んでいない。最近 h-BN と積層することにより単層グラフェンの空間反転対称性を破ってギャップを開けた試料を用いて、バレー効果を観測した例があるのみである。島崎君の学位研究は、ギャップを電氣的に自由に変調してバレー自由度を制御できれば、バレー流の物理解明のみならず、デバイス応用にも有用になる、という発想のもとに始まったもので、二層グラフェンにおける非局所抵抗の電場依存性、温度依存性の実験によって、見事にバレー流の生成と検出に成功している。

本論文は「Topological valley current in bilayer graphene with broken inversion symmetry」と題し、二層グラフェンの 2 重ゲート電極構造を用いて巨大な非局所抵抗を観測し、それがバレー流に起因することを初めて解明したという結果について、論文提出者が行った研究をまとめたものである。

論文は 7 章から成っている。第 1 章は研究の背景と目的の章で、2 次元正六角形格子の空間反転対称性を破ることによってバレー自由度が制御できることを説明した後、電場によって二層グラフェンの反転対称性を破った試料で生成されるバレー流を非局所抵抗測定で検出するという、研究のシナリオが記述されている。

第 2 章では、二次元ブロッホ電子のベリー位相とベリー曲率、ベリー曲率で記述される半古典論的な異常速度の発生について一般論を紹介した後、その概念を反転対称性の破れた二層グラフェンに適用して導かれる、ギャップ近傍でのバレーホール伝導度について理論説明がなされている。

第 3 章では、本論文で用いたホールバー構造の試料によるバレー流検出のモデルが具体的に説明されている。バレー流に因る非局所抵抗は局所抵抗の 3 乗に比例するという性質があり、これを利用して拡散伝導、エッジ伝導など他の要因と区別できることが説明されている。

第 4 章は試料作製の手順を示した章で、高品質な試料を作製するために、2 枚の h-BN の間に二層グラフェンを挟み込むための手法と AFM を用いたグラフェンのクリーニング法の開発が詳細に述べられている。

第 5 章には本研究の中心的成果が書かれており、2 重ゲート電極を使ってギャップの大きさとフェルミエネルギーを独立に調整したうえで、局所、非局所

抵抗を比較的高温のバンド伝導領域で測定した結果が議論されている。局所抵抗が最大となるギャップ近傍で非局所抵抗が最大になること、非局所抵抗は拡散伝導の予測値より数桁大きく、また、バレー流モデルの予想通り、局所抵抗の3乗に比例することを見出し、この結果がバレー流の生成を示すと結論している。さらに、温度をパラメータとして局所抵抗を変化させた実験でも、同様な3乗則が成り立ち、また、同温度変化から求められる活性化エネルギーに関しても非局所、局所抵抗の間には3乗則に呼応する関係があることが確認されており、上記結論の妥当性が裏付けられている。これらは電場で制御してバレー流の生成と検出に成功した初めての実験であり、レベルの高い成果と言える。

本章の最後には、試料端でのバンド間散乱による非局所抵抗の減少、両抵抗の磁場依存性の違いなどが実験データとして示されている。これらについては未だ定量的な理解が得られていないが、バレー流の性質を反映する結果として興味深い。

第6章では、前章で見出されたバレー流による非局所抵抗の性質が、低温のホッピング伝導領域で消失することを議論している。抵抗の温度依存性からバンド伝導とホッピング伝導の交差温度が明瞭に導出され、この交差温度は、非局所抵抗の場合はギャップを反映するのに対して、局所抵抗ではギャップが小さい領域で飽和することが見出されている。後者は、不純物等によるポテンシャルのパドルの影響と考えられている。前者の理由はまだ定かではないが、ここでは、トポロジカルバレー流が移動度端の影響を受けないことが示唆されており、興味深い問題として残されている。

第7章は、本研究における成果のまとめと今後の展望が述べられている。

以上述べたように、本研究は、二層グラフェンの空間反転対称性の破れを電場で制御することによってバレー自由度を操作することを中心概念として、非局所、局所抵抗の電場依存性、温度依存性などを詳細に調べることによりバレー流の生成と検出に成功したもので、研究の独自性、信頼性ともに高い。得られた結果は、固体物理、ナノ科学の進展、グラフェンの新しい電子デバイス応用に大きな寄与があったと評価できる。とくにバレー流の物理と応用というグラフェン研究に新しい話題と問題を提起しており、物理工学としての貢献が大きい。

よって、本論文は博士（工学）の学位申請論文として合格と認められる。