

量子ホール系の電子温度分布の熱流体力学的研究

学位論文内容の要旨

近年、量子ホール系における実験においてサイクロトロン発光現象を利用した温度の空間分布の精密測定技術が確立し、温度が関与する現象の実験的研究が急速に進展している。電流が流れている量子ホール系では多くの場合、格子系の温度(格子温度)とは異なる電子のエネルギー分布を決定する電子温度という概念が重要な役割を果たしていると考えられている。この電子温度が関係していると考えられている現象には、量子ホール効果の破壊現象やサイクロトロン発光の空間分布、ホットスポットでの発熱現象などが挙げられる。これらの実験で報告される内容は多様化してきているが、量子ホール系において電子温度やその空間分布を考慮した理論的研究は極めて少なく、数々の現象に対して理論計算および考察が無いままである。その一つであるホットスポットでの発熱現象では、メカニズムとして「電場の集中している二次元電子系の角でのジュール発熱である」「電極から二次元電子系に電子が注入される際のトンネル遷移により非平衡電子が存在するようになり、電子温度が上昇している」など、幾つかの説がある。しかし、いずれも定性的モデルとして提案されているに留まり、理論的計算でその根拠が示された例は無い。本研究では熱流体力学的アプローチによる数値計算および理論的考察を行い、量子ホール系における電気化学ポテンシャルと電子温度の空間分布を明らかにし、特にホットスポットの特性について新たな知見を得た。

以下に本研究での成果を示す。

- (1) ホットスポットとは電極と二次元電子系の境界での一方の角を指しており、ホットスポットでは電子温度が上昇することが大電流領域での実験で確かめられている。このホットスポットでの電子温度上昇のメカニズムを理論的に議論するためには電極と接続した二次元電子系を扱う必要がある。そこで、電極と二次元電子系を接続したモデルを提案した。電極には電子浴・熱浴の役割を持たせ、電極が接続されている境界で電気化学ポテンシャルと電子温度が一定であるとした。また、電極は電子浴なので二次元電子系に比べて電子の拡散係数は非常に大きい。ここでは、電極と二次元電子系の拡散係数が連続的に接続するモデルを提案した。
- (2) 量子ホール系の電子温度と電気化学ポテンシャルの空間変動を決定する流体力学方程式は、空間2次元・2変数・2階・非線形・連立微分方程式である。そこで、有限要素法と繰り返し計算を組み合わせた数値計算手法により、量子ホール系での流体力学方程式を解く方法を確立した。
- (3) 流体力学方程式を解いて得た結果から以下の3点の新知見を得た。

- i.) 電極に接続された二次元電子系での電気化学ポテンシャルの空間分布は、実験で知られているように、電極近傍で急峻な変動をし一方の角に電場が集中することが明らかになった。一方、電子温度の空間分布は、電場が集中している領域（ホットスポット）に電子温度のピークやディップが生じることが明らかとなった。また、電子温度の変動の振る舞いは二箇所のホットスポットにおいて異なることが明らかとなった。
 - ii.) ホットスポットでの電子温度の変動は電流の大きさによってその振る舞いが異なることを明らかにした。電子温度が電流に対して一次の依存性を示す線形電流領域と、電子温度が電流の2次以上の効果を示す非線形電流領域に分けて考える。線形電流領域において二箇所のホットスポットの電子温度は一方で高く他方で低くなり、その分布は試料中心に対して反対称となることが明らかになった。この電子温度分布は、熱流を考慮し一方のホットスポットから出た熱が他方のホットスポットに流れ込むことで電子温度が変動するというメカニズムで理解できることを示した。非線形電流領域では、電流の増加に伴いホットスポットでの電子温度の上昇が顕著になることが明らかとなった。この非線形電流領域での電子温度の上昇に大きく寄与しているのは、電流の二次の効果であるジュール発熱であると考えられる。
 - iii.) 量子ホール系ではランダウ準位が形成されているため、ホットスポットでの電子温度は化学ポテンシャルに強く依存する。二次元電子系に流れる電流を固定して化学ポテンシャルを変えると、ホットスポットでの電子温度は化学ポテンシャルの関数として振動（量子振動）することが明らかとなった。線形電流領域では、二箇所のホットスポットでの電子温度の格子温度からの差が異なる符号をとる。一方、非線形電流領域での電子温度の量子振動には、電流を増加させるに伴って高周波数成分が混ざり、振動のパターンが複雑になることも明らかとなった。
- (4) 本研究で用いた電子遷移過程にはトンネル遷移を考慮していないが、ホットスポットで電子温度の変動が生じることが明らかとなった。ホットスポットでの電子温度の変動を生じさせるメカニズムとして、線形電流領域では熱流が支配的であり、非線形電流領域でもジュール発熱に加えて熱流が関与することをはじめて突き止めた。

学位論文審査の要旨

主 査 教 授 明 楽 浩 史

副 査 教 授 田 村 信一朗

副 査 助 教 授 矢 久 保 考 介

学 位 論 文 題 名

量子ホール系の電子温度分布の熱流体力学的研究

近年、走査トンネル顕微鏡に代表される先端測定技術によって高い分解能で構造と物性の空間分解測定が可能になった。本研究の対象である量子ホール系は半導体ヘテロ構造に形成される2次元電子系に強い磁場を加えた系であり、その2次元的拡がりのため走査型プローブが真価を発揮する系である。実際これまでにこの系において静電ポテンシャルの空間分解測定が盛んになされてきた。

最近の新しい進展として、サイクロトロン発光現象を利用して電子温度の空間分解測定が可能になり電子温度が関与する現象の実験的研究が急速に進んだことが挙げられる。電流が流れている導体では、電流により励起された電子のエネルギー分布を記述する物理量として電子温度が導入され、格子系の温度(格子温度)と区別されている。量子ホール系においてこの電子温度が重要な役割を果たしている現象として、量子ホール効果の破壊現象やホットスポットでの発熱現象が知られている。すでにこれまでの実験によって量子ホール系の熱輸送現象の多彩な側面が明らかとなったが、理論的研究は少なく電子温度の空間分布を実際の系において数値的に計算した例はほとんどない。

本論文では、熱流体力学的アプローチによる数値計算により、量子ホール系と電極との接合部における電子温度と電気化学ポテンシャルの空間分布を初めて計算し、さらに、接合部に現れる電子温度の空間変動のメカニズムについて理論的に考察した研究の成果について述べられている。以下に本論文で述べられている研究成果を要約する。

(1) まず、量子ホール系と電極との接合に関する理論モデルを提案している。また、この量子ホール系における電子温度と電気化学ポテンシャルの空間変動を決定する流体力学方程式は非線形連立2階微分方程式であるので、有限要素法と繰り返し計算を組み合わせた数値計算手法を開発し、量子ホール系における流体力学方程式の解法を確立している。

(2) 電子温度と電気化学ポテンシャルの空間分布を数値的に計算することにより、量子ホール系と2つの電極との接合部のそれぞれにおいて電場が集中している箇所(ホットスポット)が現れ、そこで電子温度のピークやディップが生じることを明らかにしている。

(3) ホットスポットでの電子温度の空間変動は電流の大きさによって異なる。電子温度が電流に対して一次の依存性を示す線形電流領域では、2箇所のホットスポットの電子温度は一方で高く他方で低くなり、その分布は試料中心に対して反対称となることを明らかにしている。この線形電流領域での電子温度の空間変動は、熱流の発散によるものであると議論している。電子温度が電流の2次以上の効果を示す非線形電流領域では、両方のホットスポットにおいて、電流の増加に伴い電子温度の上昇が顕著になることを明らかにしている。この非線形電流領域での電子温度の上昇に主に寄与しているのは、電流の二次の効果であるジュール発熱であるが、この非線形電流領域においても熱流が重要な役割を果たしていると議論している。

(4) 量子ホール系ではランダウ準位が形成されているため、ホットスポットでの電子温度は化学ポテンシャルに強く依存し、化学ポテンシャルの関数として振動する(量子振動)。線形電流領域では、電子温度の格子温度からの差が2箇所のホットスポットで異なる符号をとり、その符号が量子振動することを明らかにしている。一方、非線形電流領域での電子温度の量子振動には、高周波数成分が混ざり、振動のパターンが複雑になることを明らかにしている。

これを要するに、著者は、量子ホール系における電子温度の空間分布を計算し、電子温度の空間変動について新しいメカニズムを提案した。本研究によって得た知見は物性物理学、量子物理学の発展に寄与するところ大なるものがある。よって著者は、北海道大学博士(工学)の学位を授与される資格あるものと認める。