

近年、量子ドットに代表されるナノスケール量子系において輸送過程のプロープとして、準静的かつ時間周期的な外場駆動により電荷を熱浴から別の熱浴に輸送する断熱電荷ポンピングが注目されている。本論文は、これらの研究の進展に動機付けられた研究で、断熱電荷ポンピングを用いて量子ドットを介した電子輸送について、これまで知られてこなかった輸送特性を明らかにする理論的研究である。特に、電子浴と量子ドットが強く量子混成する輸送領域に注目し、電子浴の状態密度や電子間相互作用が電子輸送に与える影響について議論している。

本論文は6章からなる。第1章は論文全体のイントロダクションであり、断熱電荷ポンピングにおける研究の進展と、研究動機が述べられている。第2章は本論文で用いる基礎理論の概略が述べられている。まず、散乱理論によって断熱電荷ポンピングを定式化する手法が紹介され、それらを有限温度系に拡張するために用いられるケルディッシュ形式が紹介されている。その後、ケルディッシュ形式で電子相関を取り扱う理論手法がレビューされている。

以上の準備の下で、本論文では量子ドットを介した断熱電荷ポンピングについて二つの輸送特性を新たに明らかにしている。第3章では、電子間相互作用をもつ単一準位量子ドットについて、準静的な外場駆動によってポンプされた電荷を評価する一般的な定式化が与えられている。電子浴の温度・電圧駆動を含めた一般の外場駆動を取り扱える点と、電子間相互作用の効果を1体グリーン関数と2体グリーン関数で定式化している。この定式化は第4章・第5章で用いられる基礎理論となっている。第4章では、二つの電子浴が接続された、電子間相互作用のない単一準位量子ドットにおいて、電子浴・量子ドット間のトンネル結合強度の駆動による断熱電荷ポンピングの電子浴の状態密度依存性が議論されている。先行研究においては、外場の駆動振幅を十分大きく取る事で、一回の操作でポンプされる電子数は1に量子化される事が指摘されていたが、その結果は電子浴のバンド構造がタイトバインディング模型で記述される事を前提とするものであった。本論文では、第3章の定式化を用いて、任意の電子浴のバンド構造について、ポンプされる電荷が量子化する値を調べている。その結果、ポンプ電荷が量子化する値は0から1まで連続的に変化し、その値はフェルミ準位におけるラムシフトと線幅の比という、電子浴の状態密度に強く依存するパラメータによって決定される事を明らかにしている。第5章では、二つの電子浴が接続された、電子間相互作用のある単一準位量子ドットについて、電子浴の温度・電圧の駆動による断熱電荷ポンピングが議論されている。これまで調べられてこなかった、電子浴の温度・電圧駆動がポンピングにもたらす効果に着目し、第3章の定式化を用いて、ポンピングの原理と電子間相互作用がもたらす効果を解析している。その結果、電子浴の温度・電圧駆動が量子ドットの占有数などの量子状態を変化させ、その変化が駆動に対して一定の遅延応答を行う事で電流を整流するという物理を明らかにし、その上で、ポンプ電荷から量子ドットのスペクトル関数のエネルギー微分特性に関する情報がプロープできる事を指摘している。また、繰り込まれた摂動論を用いることでポンプ電荷に現れる電子間相互作用依存性を議論し、電子間相互作用によって繰り込まれた量子ドットのエネルギー準位がフェルミ準位に固定される効果によってポンプ電荷が減少する効果が顕著に観測できる事を指摘している。第6章では全体のまとめと展望を述べている。

本論文の内容は加藤岳生氏、Robert Whitney 氏、Étienne Jussiau 氏との共同研究を含むものであるが、論文中で述べられている結果はいずれも論文提出者が主体となって導出したものであり、論文提出者の寄与が十分であると判断する。

したがって、博士（理学）の学位を授与できるものと判断する。