

# 動的メソスコピック系における 光支援トンネリングの理論的研究

## 学位論文内容の要旨

メソスコピック系にレーザー光のようなコヒーレントな時間変動外場が印加されると、系内部の電子のエネルギーは非保存であるにも関わらず、その位相記憶は保たれる。このような系は動的メソスコピック系と呼ばれ、そこで起こる電子輸送現象は、通常の電子-光子相互作用から導かれるものとは全く異なる。このような系に対する物性研究は、基礎科学的に興味深いだけでなく、応用上も高い利用価値があるため、理学・工学両面から高い関心を集めている。中でも、電子が光のエネルギーを吸収・放出することで系のトンネル電流が変化する光支援トンネリング(Photon-Assisted Tunneling: PAT)は、超微弱マイクロ波検出や超高速スイッチ等への利用が可能であるため、この現象に対する研究は極めて重要である。

本論文は、動的メソスコピック系の量子輸送現象を理論的に研究したものである。特に、動的メソスコピック系特有の非線形伝導現象である PAT についての諸性質を、新しく開発した転送行列法を用いて明らかにした。本論文は全10章で構成され、各章の概要は以下のとおりである。

第1章は緒論であり、本論文の主題である動的メソスコピック系の量子輸送現象に関する研究の背景と問題点を概説する。

第2章では、この系で現れる特異な物理現象について述べ、特に PAT 現象について本研究以前までに得られている知見やその問題点を挙げる。

第3章では、本研究で開発された、時間に依存したシュレディンガー方程式に対しても適用可能な転送行列法を詳しく紹介し、さらにその有効性を明らかにしている。この数値計算方法は、複雑なポテンシャル形状を有する動的メソスコピック系におけるコンダクタンスや I-V 特性等の輸送特性を定量的に計算することができる。また、その計算時間は、従来の数値積分法に比べて格段に短い。さらに、系の全コンダクタンスのみならず、サイドバンドごと、チャンネルごとのコンダクタンスも計算することができる。また、この方法を利用することで、系内部の電流分布も求めることができる。これらの特徴を生かして、系のコンダクタンスのみでは理解できなかった系の内部の物理現象を、より直感的に理解できることを示した。また、この方法では、直流伝導のみならず交流伝導特性をも解析する

ことが可能である。本章では本方法で計算された結果と実験結果とを比較することで、本方法の有効性の実証を行っている。

第4章では、PAT 現象よりも単純な過程によって起こる、量子ポイント・コンタクトにおける光支援量子輸送現象(Photon-Assisted Quantum Transport : PAQT)に対する数値解析を行うことで、強い PAT 信号を得るための条件を求めている。また、PAQT が未だ実験的に観測されていない理由を明らかにするとともに、観測されるための条件を示す。

第5章では、第4章で得られた知見を基に、強い PAT 信号が得られるメソスコピック・デバイスのデザインを行う。その結果、パラメータをうまく選ぶことで2重障壁系で得られる PAT 信号の数倍の PAT 信号が、時間変動ポテンシャルを印加した3重障壁系で得られることを示す。また、そのような系では、コンダクタンスの PAT ピークにおけるラビ分裂が現れることを予想した。回転磁場中の原子においてすでに観測されているラビ分裂(あるいはラビ振動)が半導体デバイスでも観測されれば、量子コンピュータにおける  $q$ -bit として利用できる可能性がある。

第6章では、PAT 現象における非線形効果の一つであるサイドバンド・クエンチングについての解析を行う。クエンチング現象に対する研究は、すでにいくつか報告されているが、いずれも従来の解析法で扱いうる極めて単純なシステムを対象としていた。本章では実際の実験系で実現されるポテンシャル形状を想定することにより、サイドバンド・クエンチングが  $\omega^{-1}$  ( $\omega$  は時間変動ポテンシャルの振動数) に比例する時間変動ポテンシャル強度で起きることを明らかにする。また、ラビ振動を起こすような動的メソスコピック系においては、クエンチングがラビ分裂幅の減少として現れることを示す。

第7章では、サイドバンド状態を通して共鳴透過する電子の位相について述べる。また、この電子位相がアハロノフ・ボーム効果を利用した実験でどのように現れるのかを予想する。

第8章では、動的メソスコピック・リング(Mach-Zender 型電子波干渉計)において、新しいタイプの PAT 現象が現れることを明らかにする。Fabry-Perot 型電子波干渉計における従来の PAT では、PAT 信号がブロードなコンダクタンス・ピークとして現れていたのに対し、この系で起こる PAT 現象は鋭いコンダクタンス・カスプとして現れる。また、このカスプ幅は  $V_{ac}^2/\omega$  ( $V_{ac}$  は時間変動ポテンシャルの強度) に比例することを示し、この PAT 信号が有限温度の実験でも観測可能であることを明らかにする。カスプの幅が極めて狭いため、この系における PAT は、従来のものより格段に高精度のマイクロ波検出器として利用できる可能性がある。

第9章では、動的メソスコピック系における交流電流に対する解析を行う。単一時間変動ポテンシャルのみを有するような簡単な系においても、その交流電流は複雑な振る舞いを見せることを明らかにする。また、この交流電流は、有限の波数を持つという特徴があることも示す。さらに、時間変動ポテンシャルを有する2重障壁系では、交流電流にも PAT 現象が現れることを示し、この交流電流を観測するための実験系を提案する。具体的には、動的メソスコピック・リング内に流れる交流電流に注目し、この交流電流から誘起される交流磁場を観測することにより、この交流電流を実験的に観測する方法を示す。

第10章は結論である。動的メソスコピック系の量子輸送現象について本研究で得られた知見、開発された数値計算法の利点をまとめると共に、今後の課題について述べる。

# 学位論文審査の要旨

|    |     |       |
|----|-----|-------|
| 主査 | 教授  | 中山恒義  |
| 副査 | 教授  | 徳田直樹  |
| 副査 | 教授  | 山谷和彦  |
| 副査 | 助教授 | 矢久保考介 |

## 学位論文題名

### 動的メゾスコピック系における 光支援トンネリングの理論的研究

近年、メゾスコピック系における量子輸送現象に関する研究が盛んに行われている。特に、メゾスコピック系にレーザー光のようなコヒーレントな時間変動外場が印加されると、系内部の電子のエネルギーは非保存であるにも拘わらず、その位相記憶は保たれる。このような系は動的メゾスコピック系と呼ばれ、そこで起こる電子輸送現象は、通常の電子—光子相互作用から導かれるものとは全く異なる。このような系に対する物性研究は、基礎科学的に興味深いだけでなく、応用上も高い利用価値があるため、理学・工学両面から高い関心を集めている。中でも、電子が光のエネルギーを吸収・放出することで系のトンネル電流が変化する光支援トンネリング(Photon-Assisted Tunneling : PAT)は、超微弱マイクロ波検出や超高速スイッチ等への利用が可能であるため、この現象に対する研究は極めて重要である。

従来の動的メゾスコピック系における量子輸送現象を扱う理論的手法は、いずれも定性的であり、実験系に対応するような複雑な系に対して定量的な理解を与えるものではなかった。現在得られている定量的知見の殆どは、数値解析によるものであるが、通常これらの計算は、極めて長い計算時間を必要とするため、1次元矩形ポテンシャルなど単純化された系でしか計算を行えないのが現状であった。

本研究では、時間に依存したシュレディンガー方程式にも適応可能な新しい転送行列法を開発した。この方法には以下のような特長がある。(1) 複雑で大規模な系を扱える。(2) 定量的な計算が可能である。(3) 従来の方法に比べて計算時間が極めて短い。(4) サイドバンドごとの透過率が計算できる。(5) サンプル内部での電流分布が計算できる。

本論文は、この方法を用いて動的メゾスコピック系における電子輸送問題、特に光支援トンネリングとその周辺に関して系統的に研究することを目的としている。

本研究の結果、以下の事柄が明らかとなった。(1) 量子ポイント・コンタクトにおける

光支援量子輸送現象が実験的に観測されにくい理由を明らかにし、光とコヒーレント電子が強く結合するための条件を示した。(2) 強い PAT 効果を得るには多重障壁系を用いることが有効であることを示した。(3) 実験系で実現されているようなポテンシャル形状を用いて、PAT におけるサイドバンド・クエンチング特性が実際の実験ではどのように観測されるかを明らかにした。(4) Fabry-Perot 型電子波干渉計のコンダクタンスに現れる新しいタイプの PAT 現象を理論的に予想した。(5) 動的メソスコピック系に発生する非線形・非平衡領域での交流電流を定量的に計算することで、交流電流においても PAT 現象が起ることを示した。さらに、この交流 PAT 現象を実験的に観測するためのシステムを提案した。

本論文は以下のように構成されている。2 章では動的メソスコピック系の特徴や、動的メソスコピック系特有の物理現象を紹介している。さらに動的メソスコピック系の研究において現在問題となっている点を挙げると共に、本論文の目的を述べている。3 章では本研究で開発した新しい数値計算方法について説明し、その方法の有効性を検証している。4 章以降はこの数値計算法を用いた研究の成果を紹介している。4 章では量子ポイント・コンタクトにおける光支援量子輸送現象を扱い、光照射効果が実験で現れなかった原因を明らかにすると共に、この効果を観測するための条件を示している。5 章では、4 章で得られた結果を基に、強い PAT 信号を得るためのメソスコピック・デバイスの提案を行っている。6 章では PAT 現象におけるサイドバンド・クエンチング特性についての解析を行っている。7 章ではサイドバンド状態の電子の位相変化を明らかにし、さらにアハロノフ・ボーム効果を利用した実験で、この位相変化がどのように現れるかを予想している。8 章では、新しいタイプの PAT として、動的メソスコピック・リングに現れる特異なコンダクタンス・カスプについての解析を行っている。9 章は、動的メソスコピック系における交流電流についての研究結果であり、交流電流においても PAT 現象が現れることや、この交流 PAT 現象をいかにして実験的に観測するかが述べられている。最終章では本論文の結論と、これからの課題が述べられている。

これを要するに著者は、動的メソスコピック系における量子輸送現象、特に光支援トンネリングに対する新知見を得たものであり、コヒーレント電子系の物性物理学のみならず応用物理学に対して貢献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。