

非平衡環境下における電子エネルギー分布の統一的記述

[1] 要旨

電圧が印加されたナノワイヤ中で電子がどのようなエネルギー分布に従うか、非平衡グリーン関数法を用いることで理論的に明らかになってきた。不純物による弾性散乱、および、フォノンによる非弾性散乱の効果を取り入れることで、弾道領域、拡散領域、局所熱平衡領域にわたる多様な環境下でのエネルギー分布を統一的に記述する理論枠組みが構築された。この成果は、非平衡電子分布に起因する多彩な量子多体现象の理解に向けた、新たな理論的基盤を提供するものと期待される。

[2] 本文

私たちの身の回りには多くの電子機器は、電圧をかけて電子を流し、その流れ（電流）を利用して動作している。しかし、電圧が印加された物質内部で電子がいかなるエネルギー分布をとるかについては、必ずしも十分に理解されているとは言えない。近年、デバイスの超小型化が進み、ナノメートルスケールの微小構造が広く形成されるようになってきている。このような微小構造中での電子の振る舞いは古典的な直感とは大きく異なり、電子の波動性や量子干渉といった量子力学的効果が顕著に現れる。したがって、これらの量子効果を適切に考慮しながら電子のエネルギー分布を理論的に記述することは、基礎物理学の観点からばかりでなくデバイス応用の観点からも、重要な課題となっている。

通常、物質中の電子は熱平衡状態にあり、そのエネルギー分布はフェルミ分布関数により記述される。しかし、例えば図1に示すように、ナノワイヤを二つの電極で挟み、電極間にバイアス電圧を印加すると、ワイヤ内部の電子は熱平衡状態ではなくなる。このとき電子が従うエネルギー分布は、電極の温度・印加電圧・ワイヤの長さ、さらには内部での散乱過程など、さまざまな物理条件に依存する。特定の条件下では、二段階の階段状をなす非平衡エネルギー分布が実現することが実験的に観測されている（図1参照）。この二段構造は、局所的な温度や化学ポテンシャルといった熱平衡の概念では記述し得ない、真に非平衡な電子状態を反映している。

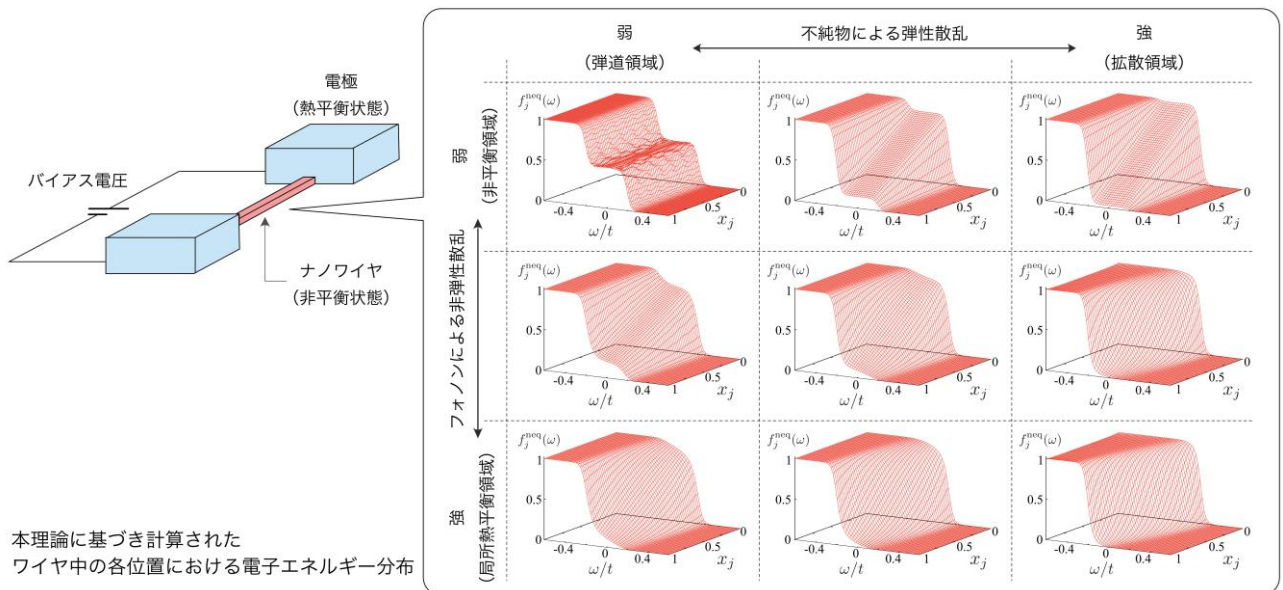


図1 電圧印加により非平衡状態へ駆動されたナノワイヤ中の電子エネルギー分布

このような非平衡エネルギー分布は、ジョセフソン接合における臨界電流の制御や π 接合の形成、さらには非従来型超伝導状態の出現など、多くの興味深い量子多体现象と密接に関係することがこれまでに指摘されている。したがって、非平衡状態に駆動されたナノスケール系において電子が従うエネルギー分布を統一的に記述する理論枠組みの確立は、これらの現象の物理的起源を解明するうえで重要であるのみならず、新奇量子多体现象の探索や将来的な量子デバイス応用に向けた理論的基盤を提供するものとしても期待される。

以上の背景のもと、日本大学理工学部と東京大学大学院総合文化研究科の研究グループは、非平衡グリーン関数法と呼ばれる非平衡量子多体系に対する強力な理論手法を用い、熱平衡状態にある熱浴と接続された非平衡電子系のエネルギー分布を記述するスキームを構築した。さらに、このスキームを電圧印加により非平衡状態へ駆動されたナノワイヤ系に適用し、さまざまな条件下における電子エネルギー分布を統一的に記述できることを示した。本成果は JPSJ2026 年 3 月号に掲載された。

成果の概要を図 1 に示す。不純物などによる散乱がほとんど存在しない弾道領域では、電子はほぼ散乱を受けずにワイヤを通過し、電極に由来する二つのフェルミ分布関数の重ね合わせとして二段構造のエネルギー分布が実現する。一方、ワイヤ内部に多数の不純物が存在する場合、電子は散乱を繰り返しながら伝導する拡散的状態となり、二段構造は保たれつつもエネルギー分布は空間位置に依存した形へと変化する。さらに、フォノンなどとの非弾性散乱が生じると電子系の局所的なエネルギー緩和が進み、エネルギー分布は次第に熱平衡系におけるフェルミ分布の形状へと漸近する。本研究の重要な点は、このような弾道的・拡散的・局所熱平衡的という異なる輸送領域におけるエネルギー分布を、一つの簡潔な理論枠組みのもとで統一的に記述できることを示した点にある。

また、微視的理論に基づく本手法は、接触抵抗や界面反射など、従来の粗視化された理論では扱いにくい効果も自然に取り込むことができる。特に弾道領域においては、電極界面での反射波の干渉に起因する振動構造が非平衡エネルギー分布に現れることが、本理論により明らかとなった。

本研究で用いた非平衡グリーン関数法は、量子輸送や強相関電子系など、さまざまな非平衡量子多体现象の解析に広く活用されている手法である。本研究は、この汎用性の高い理論手法を用いて、熱浴と接続された非平衡電子系のエネルギー分布を統一的に記述できることを示した点に意義がある。今後は、本枠組みを超伝導接合系や時間周期的に駆動された系など、より広いクラスの非平衡量子多体系へと拡張することで、非平衡エネルギー分布に起因する多様な量子多体现象の理解と開拓がさらに深まると期待される。

原論文 (2026 年 2 月 4 日公開済)

Nonequilibrium Electron Distribution Function in a Voltage-Biased Nanowire: A Nonequilibrium Green's Function Approach

T. Kawamura and Y. Kato, J. Phys. Soc. Jpn. **95**, 034702 (2026).

<情報提供：河村泰良（日本大学理工学部 物理学科）>