

最先端・次世代研究開発支援プログラム  
事後評価書

研究課題名	固体素子における非平衡多体系のダイナミクス
研究機関・部局・職名	大阪大学・大学院理学研究科・教授
氏名	小林 研介

## 【研究目的】

現在、既存の半導体素子に代わる量子多体効果を積極的に利用した次世代素子の開発に向けて、強相関量子科学・スピントロニクス・量子情報技術などの研究分野では精力的な研究が進められている。一般にトランジスタのような能動素子を実現するには、系の平衡状態だけでなく、非平衡状態を含めたキャリアダイナミクスの定量的な理解が必須であり、現在の半導体エレクトロニクスはこの点で膨大な知見の蓄積を持つ。しかし、強相関エレクトロニクス等の次世代素子の母体である量子多体系では、その非平衡状態と非平衡電流ゆらぎを定量的に理解することは、大きな課題となっている。

本研究は、次世代素子の開発の現場で、近い将来、必ず解決を迫られることになる非平衡状態に関わる問題を先行的に扱うものである。半導体ナノ構造や微小接合系を主たる舞台として、非平衡物理学における新しい指導原理として期待されている「ゆらぎの定理」の精密な実験的検証を行うことを目的とする。具体的には、電流ゆらぎ測定を古典的に非自明なスピン軌道相互作用等がある場合や発熱等の散逸がある場合等に適用するとともに、電流ゆらぎ測定技術を発展させ、電子輸送の実時間測定の手法を開発することを目指す。

言い換えると、本研究は、ゆらぎの定理を軸として、電流ゆらぎの精密測定によって固体素子における非平衡多体ダイナミクスを定量的に解明する方法論を創出する。さらに、その手法を利用して非平衡性を積極的に利用した電子系の新機能の開拓を行うことにより、グリーン・イノベーションに貢献するものである。

## 【総合評価】

<input type="radio"/>	特に優れた成果が得られている
<input type="radio"/>	優れた成果が得られている
<input type="radio"/>	一定の成果が得られている
<input type="radio"/>	十分な成果が得られていない

<b>【所見】</b>
<b>① 総合所見</b>
<p>短期間に当初の目的を達成する優れた研究成果を発表し、スピントロニクスやメゾスコピック非平衡統計力学分野の研究に大きなインパクトを与えている。これらの研究成果は基礎的なものであるが、将来の実際のナノデバイスの応用開発には不可欠のものとなり、これらを先行実施して、将来のデバイス開発に応用できる可能性は大きく、大変優れた研究成果が得られていると判断できる。汎用的な揺らぎの定理を積極的に次世代ナノエレクトロニクスなどに応用して、社会への貢献度を広げスケールの大きな研究へと発展展開させることが期待できる。</p>

<b>② 目的の達成状況</b>
<p>・所期の目的が  <input checked="" type="checkbox"/>全て達成された ・ <input type="checkbox"/>一部達成された ・ <input type="checkbox"/>達成されなかった)</p> <p>固体中のナノ超構造を積極的に利用し、メゾスコピック系での精緻な電流揺らぎ測定より、非平衡多体系での揺らぎの研究を固体量子素子中で計測することにより、メゾスコピック非平衡統計力学の基礎の分野を拓く研究成果を挙げている。実験技術における測定感度の改良による電流揺らぎの精密測定より、揺らぎの定理の検証と固体素子上での非平衡状態でのスピン依存伝導の解明の成果が得られている。特に近藤状態での電子散乱過程の解明、量子細線での電子—核スピン散乱の観測、ラシュバ効果によるゼロ磁場下高分極率のスピン偏極電流の生成、トンネル磁気抵抗素子での量子コヒーレント伝導の実証など多くの先駆的な研究成果がある。本研究が契機となって非平衡揺らぎの重要性が一般に認識され、大きなインパクトを与えつつある。</p> <p>所期の研究目的は、ほぼ達成されており、さらに非平衡量子ホール状態での発振現象や、スピン流に伴うスピントラップ雑音等の新しい現象の発見でも成果が期待できる。</p> <p>今後、更なる測定精度の向上と揺らぎによる新たな物理量を計測する研究へと大きく展開することが課題となるが、それらへの対応策は明確である。</p>

<b>③ 研究の成果</b>
<p>・これまでの研究成果により判明した事実や開発した技術等に先進性・優位性が  <input checked="" type="checkbox"/>ある ・ <input type="checkbox"/>ない)</p> <p>・ブレークスルーと呼べるような特筆すべき研究成果が  <input checked="" type="checkbox"/>創出された ・ <input type="checkbox"/>創出されなかった)</p> <p>・当初の目的の他に得られた成果が (<input checked="" type="checkbox"/>ある ・ <input type="checkbox"/>ない)</p> <p>研究課題の成果として、本研究内容では、電流揺らぎ測定が有効な実験手段であることを通し、①揺らぎの定理の精密検証とメゾスコピック非平衡統計力学、②固体素子に於ける多様な非平衡スピン依存伝導の解明、③固体素子に於ける量子コヒーレントな伝導の実証、④非平衡量子ホール状態の観測、⑤トポロジカル絶縁体に</p>

おける量子コヒーレンス、⑥新しい計測手法の開発、また⑦スピン流の電氣的検出や、⑧非平衡量子ホール状態を利用した発振現象、などの成果も得られつつある。各項目において特筆すべきは、①揺らぎの定理の精密検証とメゾスコピック非平衡統計力学では、電流揺らぎを高精度に計測し、微視的可逆性が成立することを実験的に検証することに成功。また、仕事揺らぎの定理の検証実験の手法を理論家とともに共同提案。また、固体素子に於けるシュテルン・ゲルラッハ効果の実証を世界で初めて行った。②固体素子に於ける多様な非平衡スピン依存伝導の解明では、近藤状態における二粒子後方散乱の実験や角スピン散乱を直接電氣的に計測。③固体素子に於ける量子コヒーレントな伝導の実証ではMgOバリアによるTMR素子により、巨大な磁気抵抗効果の原因とされるコヒーレント・トンネルモデルの根拠の明確化。④非平衡量子ホール状態の観測では、電流揺らぎに着目し、ブレークダウンの前駆現象を発見。⑤トポロジカル絶縁体における量子コヒーレンスでは、ショット雑音の測定に着目し、エッジ状態の実態を明らかにするため弱局在や伝導揺らぎを研究し、量子コヒーレンスに関する基本的なパラメータを明確化。⑥低温高分解能での新しい計測手法の開発。及び⑦スピン流の電氣的検出や、⑧非平衡量子ホール状態を利用した発振現象等があげられる。

当初目的外の特筆すべき結果は、⑤に記述した、トポロジカル絶縁体での電気伝導における量子コヒーレンスに関する成果、及び非平衡量子ホール状態での発振現象等の発見等である。

#### ④ 研究成果の効果

・研究成果は、関連する研究分野への波及効果が  
見込まれる ・ 見込まれない

・社会的・経済的な課題の解決への波及効果が  
見込まれる ・ 見込まれない

本研究課題での成果により、非平衡分野に於ける電流揺らぎ測定が有効な実験手段であることが、大きな研究の進展に寄与すると思われる。非平衡はナノ超構造の関与する多くの分野に一般的に応用できる汎用的な概念であり、生命、触媒、人工光合成、物理、化学、電気、半導体、情報通信などの巨大な学際分野に適用でき、将来大きな研究分野に発展すると期待される。

本研究課題の成果は基礎的なものであり、汎用的に多くの研究分野に適用できることが期待されている。特に、省エネルギーデバイス（スピンエレクトロニクス【磁性半導体に於けるスピン制御、コヒーレンスによるSN比向上】、モルトロニクス、クオントロニクス）、ナノスケールやメゾスコピックスケールで起きるエネルギー創成（触媒・人工光合成・太陽電池）などの分野に一般的に適用できる可能性が大きい。

⑤ 研究実施マネジメントの状況

・適切なマネジメントが（行われた ・ 行われなかった）

所期の研究目的は、ほぼ達成されており、研究計画、研究体制、マネジメントが適切であったと言わざるをえない。特に理論家や国内外の共同研究者との連携がうまく行き、理論と実験がうまくかみ合ったことが良い成果につながったのではないかと思われる。また、研究途中で研究機関が変わったが、研究体制を円滑に維持できたことはマネジメント能力が高かったことによる。本助成金も有効に利活用されて、測定感度の改良等の測定技術の向上により良い成果が生まれたものと思う。

成果発表は、知財を除き適切に行われている。基礎的分野であるので、現時点で知的財産権の出願はないが、将来貢献できる内容となっている。