

戦略的国際科学技術協力推進事業（日本－ドイツ研究交流）

1. 研究課題名：「ナノエレクトロニクス：半導体スピントロニクスにおける揺らぎと相関」
2. 研究期間：平成20年10月～平成24年3月
3. 支援額： 総額 8,316,000 円

4. 主な参加研究者名：

日本側（研究代表者を含め6名までを記載）

	氏名	所属	役職
研究代表者	内海裕洋	東京大学 → 三重大学	助教→准教授
研究者	今村裕志	産業技術総合研究所	主任研究員 →研究グループ長
研究者	芝田光敏	三重大学	大学院生
研究者	谷口知大	筑波大学 → 産業技術総合研究所	大学院生→ 産総研特別研究員
参加研究者 のべ 6 名			

ドイツ側（研究代表者を含め6名までを記載）

	氏名	所属	役職
研究代表者	Gerd Schön	Karlsruhe大	Prof. Dr.
研究者	Dimitry Golubev	Karlsruhe大	Dr.
研究者	Matthias Hettler	Karlsruhe大	Dr.
研究者	Michael Martihaler	Karlsruhe大	PhD Student → Dr.
参加研究者 のべ 4 名			

5. 研究・交流の目的

本研究交流は半導体スピントロニクス素子における揺らぎの相関にまつわる物理を研究し、将来の半導体スピントロニクス量子情報処理素子実現へ指針を与えることを目的とする。具体的には、日本側の非平衡系の場の理論的解析技術と、ドイツ側の縮約密度行列に関する Keldysh 実時間ダイアグラム展開法を組み合わせ、半導体スピントロニクスを舞台に非平衡 Keldysh の場の理論の研究を行う。ナノスケールの半導体スピントロニクス素子では、ノイズつまり信号電流の揺らぎは信号と同程度の大きさになるため、揺らぎ相関を理解する必要がある。本研究では、「完全計数統計」を用いて、「揺らぎの定理」をはじめとする統計物理分野の近年の成果を導入し、スピントロニクスの揺らぎ相関の理解を目指す。「揺らぎの定理」は、非平衡状態における揺らぎの分布について厳密に成り立つ関係式であり、ジョンソン・ナイキストの定理・オンサーガーの相反定理を非平衡状態に拡張する、揺らぎ研究において重要な定理である。日独が本研究交流を通じて相互補完的に取り組むことで、スピンの自由度の測定や制御を基本とした、次世代のセンサーやメモリ、また量子情報処理素子が実現されることが期待される。

6. 研究・交流の成果

## 6-1 研究の成果

研究成果例：

(結果1) 単一電子トンネル電流の揺らぎ分布について揺らぎの定理の理論・実験

縮約密度行列の Keldysh 実時間ダイアグラム展開法を用い、日独共同で半導体 2 重量子ドット-量子ポイントコンタクト電荷計複合系における完全計数統計理論を構築した。その結果、複合系の揺らぎの定理を見出した。また、量子ポイントコンタクトの自由度を積分し、2 重量子ドットのみに着目すると、量子ポイントコンタクト電荷計の測定による反作用により温度が実効的に上昇することが分かった。

量子ポイントコンタクト電荷計は外部の増幅回路につながっており、増幅回路の時間分解能は電流の揺らぎ分布の測定結果に影響を与える。この効果を、離散マルコフ・マスター方程式による完全計数統計理論により調べ、有限時間分解能も実効的な温度上昇に寄与することを明らかにし、その補正理論を構築した。

さらに NTT 藤沢利正博士らとの共同研究で、スプリットゲート法で作成した 2 重量子ドットを用いて実時間電子計数の実験を行い、量子ポイントコンタクト電荷計の測定による反作用が、温度を実効的に 10 倍程上げることを見出した。また ETH の K. Ensslin 博士らとの共同研究で、走査プローブ・リソグラフィで作成した量子ポイントコンタクトを用い、電荷計の反作用を抑えた実時間電子計数の実験とそのデータ解析を行った。時間分解能の補正理論を適用すると、揺らぎの定理が定量的に成り立つことが確認できた。

(結果2) アハロノフ・ボーム干渉計を用いた揺らぎの定理の検証

アハロノフ・ボーム干渉計を用いて揺らぎの定理の検証を行った。アハロノフ・ボーム干渉計では電子が波として振る舞うために、実時間電子計数法で電流揺らぎの分布を求めることができない。日本側は電流の非線形応答係数とノイズの線形応答係数の間に、線形応答理論を超えた普遍的な関係式が成り立つことを揺らぎの定理を使って導き、京大化研小林研介博士らと共同研究で実験での検証もおこなった。これは量子系の揺らぎの定理の初めての検証である。

### ● 新しい知の創造/画期的な科学技術の進展/新分野の開拓

- ・ メゾスコピック量子導体における揺らぎの定理を、理論的に予測し実験的に検証した。これはメゾスコピック系の電気伝導に、最近の非平衡統計力学の成果を導入し、それが有用であることを示した点で、新分野の開拓に寄与したと考える。
- ・ (結果1) について低温領域 ( $\sim 100\text{mK}$ ) における揺らぎの定理を検証する過程で、量子ポイントコンタクト電荷計の測定の反作用や時間分解能の影響を定量的に評価することができた。量子ポイントコンタクトは、量子ビットの連続測定に欠かせない技術である。揺らぎの定理を確認することで、反作用の大きさを有効温度の形で定量的に評価することが分かり、これは量子情報処理素子の実現という画期的な科学技術の進展にとって重要な一助となったと考えている。
- ・ (結果2) で線形応答理論を越えて非線形応答領域で成り立つ輸送係数間関係式を理論的に導き、実験でも検証した点について、新しい知の創造に貢献したと考える。また、アハロノフ・ボーム干渉計を用いた実験は、量子系での揺らぎの定理の初めての検証実験であり、今後のメゾスコピック量子系の非平衡統計力学の構築へ向けた第一歩といえ、新分野の開拓に寄与したと考える。

●相手国との協力による研究への相乗効果

・本研究では、具体的に実験と比較可能な理論を構築した。これは日本側の非平衡系の場の理論に基づく完全計数統計理論の知識と、ドイツ側の縮約密度行列に関する Keldysh 実時間ダイアグラム展開法を組み合わせ得られた結果であり、お互い相手国との協力による相乗効果の結果といえる。

・日本側は半導体スピントロニクスにメゾスコピック系の非平衡統計力学の視点を導入した。実験で得られた結果の解釈、実効温度の違いや時間分解能の効果の解明には、ドイツ側のメゾスコピック量子輸送の研究の蓄積が必須であった。両者が相互補完的な役目を果たして、理論から実験までつなげることができた。

●当該研究の今後の展開見込、社会への波及効果

・近年、半導体 2 重量子ドットにおける核スピンのアンサンブルのコヒーレント状態をはじめとする量子系の制御・検出の実験技術が進んでいる。今後はこれらの量子系の制御・検出技術とメゾスコピック系の非平衡統計力学の橋渡しをする理論研究への展開が見込まれる。

6-2 人的交流の成果

●相手国との研究交流につながる人材育成

・日本側研究者は、計約 8 ヶ月カールスルーエ大に滞在し、研究交流の基盤を固めた。日本側研究代表者は研究交流プログラムの途中で三重大に異動し、そこで大学院教育の国際化の面からも、研究交流の持続的発展の足場を固めている。

・本研究交流を通じて、日本側は、完全計数統計理論の Keldysh 実時間ダイアグラム展開によるアプローチのノウハウやジョセフソン接合のダイナミクスの研究で培われた確率微分方程式の知識の習得、ドイツ側は揺らぎの定理をはじめとするメゾスコピック系の非平衡統計力学やスピントロニクスのノウハウの習得ができ、双方にとり有意義であった。

・参加時博士課程に在籍していたドイツ側研究者は研究交流を通じて計約 6 ヶ月日本に滞在し、現在はカールスルーエ大の助教相当のポジションに就いている。参加時博士課程に在籍していた日本側研究者も本研究交流を通じて成果を上げ、産総研のテニュアトラック・ポジションについている。日本側研究代表者も含め、三重大・産総研・カールスルーエ大との、今後の交流の持続的発展の軸となる人材が育成されたと考える。

●当該事業を端緒とした相手国との研究交流の増加/持続的発展の可能性

・日独双方とも本研究交流終了後も補助金を得て持続的に研究交流を持続的に発展させる計画である。また当該研究交流で行った実験グループとの共同研究を通じ、ドイツの国外にもつながりができた。またカールスルーエ大学側の若手研究者が、日本の研究環境を知り、学位を取得したのちの次のポジションとして日本の研究機関を選択肢に入れるようになった。このことも当該研究交流の成果と考えている。

・本研究交流事業を通じ、ドイツ側研究者による学生向けのセミナー、学生との議論や交流の機会を設けた。これは三重大の教育の国際化という面でも有意義であった。

7. 主な論文発表・特許等（5 件以内）

相手国側との共著論文については、その旨を備考欄にご記載ください。

論文 or 特許	・論文の場合： 著者名、タイトル、掲載誌名、巻、号、ページ、発行年 ・特許の場合： 知的財産権の種類、発明等の名称、出願国、出願日、 出願番号、出願人、発明者等	備考
論文	Yasuhiro Utsumi, Dimitri S. Golubev, Michael Marthaler, Keiji Saito, Toshimasa Fujisawa, Gerd Schön, Bidirectional Single-Electron Counting and the Fluctuation	日独 共同

	Theorem, Physical Review B 81, 125331 (2010)	
論文	D. S. Golubev, M. Marthaler, Y. Utsumi, Gerd Schön, Fluctuation theorem for a double quantum dot coupled to a point-contact electrometer, Physical Review B 84, 075323 (2011)	日独 共同
論文	Shuji Nakamura, Yoshiaki Yamauchi, Masayuki Hashisaka, Kensaku Chida, Kensuke Kobayashi, Teruo Ono, Renaud Leturcq, Klaus Ensslin, Keiji Saito, Yasuhiro Utsumi, and Arthur C. Gossard, Nonequilibrium Fluctuation Relations in a Quantum Coherent Conductor, Physical Review Letters, 104, 080602 (2010)	