

# 揺動散逸定理の量子破綻とそこから見つかった電流ゆらぎの新奇な性質

## [1] 要旨

平衡状態における電流ゆらぎは伝導度と温度だけで決まる、という揺動散逸定理により、伝導度に比べて電流ゆらぎの研究は十分には成されてこなかったが、近年、この定理が量子効果で一般には破綻することが指摘された。本論文では、量子破綻が起こるときには電流ゆらぎが伝導度とは独立な物理量になることに着目し、電流ゆらぎの性質を詳しく調べられている。その結果、異方向を流れる電流同士の異時刻相関で与えられる非対角電流ゆらぎには、試料の一部分に局在しているような電子状態も非局在状態と同程度に寄与することを見いだされている。これは、同方向を流れる電流同士の異時刻相関で与えられる対角電流ゆらぎや伝導度にはない非対角電流ゆらぎに特有な性質で、非対角電流ゆらぎだけが不純物や結晶欠陥の存在にきわめて鈍感であることを意味する。これは応用上も有用であり、量子効果が著しい低温・強磁場において、非対角電流ゆらぎの測定から電子数密度を推定できるという新しい測定手段を与える。

## [2] 本文

巨視的な平衡系における電流ゆらぎはその系の温度と電気伝導度の積に一致する、これは揺動散逸定理(FDT)の主張の一例である。電気伝導度は系に電場を印加した非平衡系で測定される物理量なのに対して、温度や平衡電流ゆらぎは平衡状態で測定される物理量である。そのため FDT は全く異なる測定で得られる物理量の測定値同士が一致するという非常に強い主張になっている。この定理は発表当初、対角電流ゆらぎと対角伝導度のような散逸に直結する成分に対する関係式だと考えられていたが、後に古典系では電流ゆらぎの全ての成分に対して成立することが証明された。古典系では非対角電流ゆらぎと Hall 伝導度の間にも FDT は成立する。

しかし、量子系でも FDT が成立するのかという点に関しては長年の間疑問視されてきた。その理由は量子系ではどんな測り方を行ったとしても、測定の反作用を避けられないためである。この量子系特有の性質が原因となり、同じ状態を繰り返し測定することで得られるゆらぎがどのような相関関数で与えられるのかというのは非自明な問題になっている。Kubo 公式により電気伝導度は電流演算子のカノニカル相関という時間関数で与えられることが知られているため、測定されるゆらぎがカノニカル相関になっているのであれば、FDT は成立するということになるが、実際にはどうなっているのだろうか？近年この問題に対して、量子測定理論を用いた解析が行われた。その結果として、量子論の許す範囲内で可能な限り系を乱さないようにしてゆらぎを測ったとしても、ゆらぎの測定結果はカノニカル相関にはならず、対称化積相関という別の相関関数になることが示された。つまり量子系では FDT が破綻することが明らかにされた。

しかし、このような FDT の破れが巨視的な系で問題になるほど増大する例はこれまで示されていなかった。この点に着目した東京大学理学系研究科、同大学総合文化研究科と大阪大学全学教育推進機構の共同研究グループは、FDT の破れがどのような条件で増大するのかについて二次元電子系における静的な電気伝導度と電流ゆらぎを例にとり解析を行った。その結果として、対角成分に対する FDT は任意のパラメタに対して成立するものの、非対角成分に対する FDT は低温強磁場下では大きく破綻することが示された。量子 Hall 効果の実験で用いられるような標準的な設定でさえ、非対角電流ゆらぎは、Hall 伝導度と温度の積の数十倍まで大きくなり得ることが示された。

さらに同研究グループは、FDT の破綻は電流ゆらぎがこれまでに知られていなかったような新奇

な性質を有することを示唆しているのではないかと考え、巨視的な二次元電子系における静的な電流ゆらぎの性質の解析を行った。その結果として、非対角電流ゆらぎには試料全体に広がった状態だけでなく、巨視的な試料内部の局所的な領域でしか運動できないような状態も寄与することが明らかになった。この成果は JPSJ の 2022 年 2 月号に掲載された。

電気伝導度には試料全体に渡って有限の確率振幅を持つ非局在状態のみが寄与するということが知られている。そして磁場中の二次元電子系ではほとんど全ての状態が局在状態になっているため、Landau 準位占有率が変化しても Hall 伝導度 ( $\sigma_{xy}$ ) が変化しないプラトー領域が現れる(図 1 赤の破線)。この現象は整数量子 Hall 効果として広く知られている。ではゆらぎに対して局在・非局在状態はどのように寄与するのだろうか？本研究の結果、対角ゆらぎは対角伝導度と同様に非局在状態しか寄与しないものの、非対角ゆらぎ ( $S_{xy}$ ) には Hall 伝導度とは対照的に局在状態も寄与ということが示された。さらに局在状態の寄与は非局在状態の寄与と同程度であり、不純物がない場合(pure)の線形なふるまい(図 1 緑の実線)からほとんど変化しないことも示された(図 1 青の二点鎖線)。図 1 において Hall 伝導度と非対角ゆらぎはスケールされた値でプロットされているが、両者の単位は約 125 倍異なっており、FDT は大きく破綻している。FDT により一致すると考えられてきた Hall 伝導度と非対角電流ゆらぎが、実は全く異なる物理に従うことが明らかになったのである。

同研究では、上記の結果を用いて Landau 準位占有率・電子数密度を推定する手法も提案されている。従来の電子数密度推定手法は弱磁場領域における Hall 抵抗と電子数密度の比例関係を利用するものであり、量子 Hall 効果が起こるような低温強磁場領域では使うことができないと知られていた。彼らが新たに提案した手法は低温強磁場領域で高精度に電子数密度を推定可能な手法であることから従来の欠点を補うものであり、実用的な応用へとつながることが期待される。

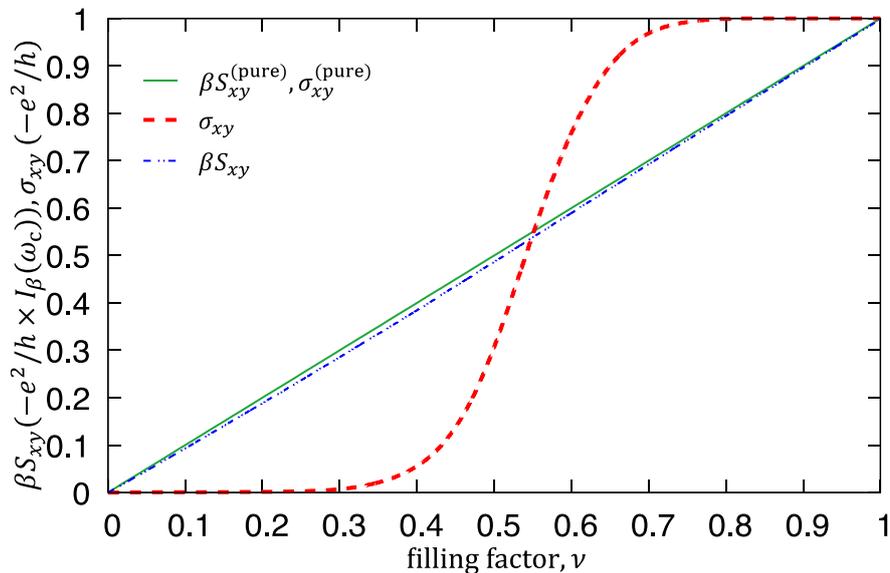


図 1. 低温強磁場領域における Hall 伝導度 ( $-e^2/h$  を単位)、非対角電流ゆらぎ ( $-I_{\beta}(\omega_c)e^2/h$  を単位) の Landau 準位占有率 ( $\nu$ ) 依存性。(縦軸は 1 に規格化されている。)

原論文 (2022 年 1 月 20 日公開済)

[Robustness of Equilibrium Off-Diagonal Current Fluctuation against Localization of Electron States in Macroscopic Two-Dimensional Systems](#)

K. Kubo, K. Asano, and A. Shimizu, J. Phys. Soc. Jpn. **91**, 024004 (2022).

<情報提供：久保賢太郎（東京大学 理学系研究科物理学専攻・総合文化研究科先進科学研究機構、  
日本学術振興会 DC1 特別研究員）

浅野建一（大阪大学全学教育推進機構）

清水明（東京大学総合文化研究科 先進科学研究機構・広域科学専攻相關基礎科学系）>