

新見康洋 大阪大学大学院理学研究科 准教授

丸文学術賞 受賞者

微小伝導体内の電子の 量子コヒーレンスとスピン輸送の研究

デバイス応用に資する基礎物性の定量評価方法の確立

■ 研究の背景

ある特徴的な長さ以下の微小導体中で は、量子性が顕著に発現し、バルク結晶と は大きく異なる伝導特性が現れる。このよ うな舞台はメゾスコピック系と呼ばれ、これ までにアハラノフ・ボーム効果などの量子 力学的な効果の検証や、半導体及び超伝 導体を用いた量子コンピュータへの応用な ど、幅広い分野にわたって研究が行われて いる。一方、磁性分野から発展してきたスピ ントロニクスでも同じように微小磁性体を扱 い、巨大磁気抵抗効果をはじめとする様々 な現象が発見されてきた。これらの現象を 積極的にデバイス応用するためには、微小 伝導体内の電子の量子コヒーレンス及び スピンのコヒーレンスなどの基礎物性の根 本的な理解が必要不可欠となる。

上記のような背景の下、本研究では、半 導体、半金属、金属磁性体、超伝導体など 様々な物質を、微細加工技術を用いて微 小化し、そこに現れる電子の量子コヒーレ ンスとスピンのコヒーレンスの定量評価を 行った(図1参照)。また微細化したスピン トロニクスデバイスを用いて、メゾスコピック 系特有の現象も見出した。以下に3つの 例を挙げて、それらの詳細を説明する。

■ 研究の成果

 「内因的デコヒーレンス問題」の解決 半導体及び超伝導体を用いた量子コ ンピュータへの応用を見据えたとき、最も 解決しなければならない問題の一つが、量 子デコヒーレンスの問題である。固体中に 波として広がる電子は、様々なものと相互 作用することで、波動関数の位相の情報 を失い、量子状態を保てなくなる。これは 量子デコヒーレンス問題として1980年代 から研究されてきた。例えば、高温ではフォ ノンとの相互作用によって、電子の波動 関数の位相は乱される。フォノンの影響が 無視できる低温でも、電子間の相互作用 によって位相は乱されるが、温度ゼロの極 限では、非弾性散乱時間が発散的に長 くなることはランダウのフェルミ液体論から 説明できる。しかし、フェルミ縮退した電子 同士には、内因的に量子コヒーレンスを 壊す「内因的デコヒーレンス」のため、非 弾性散乱時間が極低温度で一定値にな る実験、及びそれを支持する理論が相次 いで1990年代後半に提唱されたため、そ れ以降大きな論争となっていた。

そこでこの研究では、不純物がこれまで の実験よりも圧倒的に少ない半導体2次 元電子系を用いて、非弾性散乱時間を 0.02 Kまで精密に測定した結果、一定値 に近づくことはなく、発散的な振る舞いを 示した[1]。これはフェルミ液体論を支持す るもので、長年の論争に終止符を打つ決 定打となった。さらにこれは、将来の量子 コヒーレンスを用いたデバイス作製の指針 も与える重要な結果である。

2. グラファイトにおける 局所電子状態の解明

グラファイトの2次元的な電子状態は、長 い歴史を持つ研究テーマである。その端に は、ジグザグとアームチェアの2種類の形状 が存在する。藤田らは、ジグザグ端にのみ 「グラファイトエッジ状態」と呼ばれるユニー クな局在状態が現れることを1996年に理 論的に予言した[2]。これはコヒーレンスのも たらすトポロジカルな効果の代表例である。 この研究では、走査トンネル顕微・分光法 (STM/STS)を用いて、ジグザグ端にのみ グラファイトエッジ状態が存在することを 初めて実験的に証明した(図2)[3]。さらに、



磁場中でグラファイト表面に形成されるラ ンダウ準位をSTM/STS観測し、不純物 付近で量子ホール効果の局在・非局在状 態の実空間観察にも成功した^[4, 5]。

以上の研究は、グラフェンの発見とほぼ 同時期に行われたものである。近年のグラ フェン及びトポロジカル物質研究の興隆に 先立って、コヒーレンスとトポロジーのもたら すユニークな局所電子状態を可視化した 先駆的な研究と位置付けられる。

3. 高効率スピン流検出手法の確立と それを用いた応用研究

電子のもつスピンの自由度を積極的に 利用したスピントロニクスデバイスでは、スピ ンのコヒーレンス、さらにスピン角運動量の 流れ「スピン流」の生成、検出、制御が重要 な課題となる。この研究では、スピン軌道相 互作用の弱い銅に、スピン軌道相互作用 の強いイリジウムやビスマスをごく微量添加 することによって、スピン流の検出効率を劇



References(参考文献)

[1] Y. Niimi, Y. Baines, T. Capron, D. Mailly, F.-Y. Lo, A. D. Wieck, T. Meunier, L. Saminadayar, and C. Båuerle,

- Phys. Rev. Lett. 102, 226801 (2009); Phys. Rev. B 81, 245306 (2010).
- [2] M. Fujita, K. Wakabayashi, K. Nakada, and K. Kusakabe, J. Phys. Soc. Jpn. 65, 1920 (1996).
- [3] Y. Niimi, T. Matsui, H. Kambara, K. Tagami, M. Tsukada, and H. Fukuyama, Appl. Surf. Sci. 241, 43 (2005); Phys. Rev. B 73, 085421 (2006).
- [4] Y. Niimi, H. Kambara, T. Matsui, D. Yoshioka, and H. Fukuyama, Phys. Rev. Lett. 97, 236804 (2006).
- [5] Y. Niimi, H. Kambara, and H. Fukuyama, Phys. Rev. Lett. 102, 026803 (2009).
- [6] Y. Niimi, M. Morota, D. H. Wei, C. Deranlot, M. Basletic, A. Hamzic, A. Fert, and Y. Otani, Phys. Rev. Lett. 106, 126601 (2011).
- [7] Y. Niimi, Y. Kawanishi, D. H. Wei, C. Deranlot, H. X. Yang, M. Chshiev, T. Valet, A. Fert, and Y. Otani, Phys. Rev. Lett. 109, 156602 (2012).
- [8] Y. Niimi, D. H. Wei, H. Idzuchi, T. Wakamura, T. Kato, and Y. Otani, Phys. Rev. Lett. 110, 016805 (2013).
- [9] D. H. Wei, Y. Niimi, B. Gu, T. Ziman, S. Maekawa, and Y. Otani, Nat. Commun. 3, 1058 (2012).
- [10] Y. Niimi, M. Kimata, Y. Omori, B. Gu, T. Ziman, S. Maekawa, A. Fert, and Y. Otani, Phys. Rev. Lett. 115, 196602 (2015).
- [11] T. Wakamura, H. Akaike, Y. Omori, Y. Niimi, S. Takahashi, A. Fujimaki, S. Maekawa, and Y. Otani, Nat. Mater. 14, 675 (2015).

[12] M. Tokuda, N. Kabeya, K. Iwashita, H. Taniguchi, T. Arakawa, D. Yue, X.-X. Gong, X.-F. Jin, K. Kobayashi, and Y. Niimi,

Appl. Phys. Express 12, 053005 (2019).



的に増大させることに成功した^[6,7]。また 微細化したスピントロニクスデバイスを用い て、これらの定量的な評価方法を確立させ た^[8]。

スピン流はスピン角運動量の流れである ため、物質中の磁気状態を探るプローブと して利用することが可能となる(図3)。具体 的には、磁気転移温度近傍の弱強磁性体 [9]、磁気状態が複雑なスピングラス[10]、さ らには基底状態でクーパー対を形成する超

> 伝導体[11, 12]にスピン流を注 入することで、これらの対象物 質の磁気的な特性が得られる 新しいプローブになることを実 証した。

■将来の展望

上述したように本研究では、 様々な材料を舞台とした微小 伝導体内の電子の量子コヒー レンスとスピン輸送現象を、多 様な実験手法で解明してきた。 これらの成果は、いずれも個々 の微小伝導体の特徴を最大 限に活かした精緻かつ定量性の高い研究 であり、科学技術の進展並びに次世代の 産業創出に資するものである。

さらに最近、グラフェンに限らず、超伝導 や磁性などの特性をもつバルク結晶を機 械的に劈開することで原子層レベルの薄 膜を作製でき、これまでの材料では実現で きなかった人工結晶系を構築することがで きるようになってきた。今後は、このような 人工結晶に対しても、本研究で行ったよう な量子コヒーレンス及びスピン輸送測定を 適用することで、これまでの単純な物質で は実現できなかった新しい機能を開拓でき る可能性がある(図1参照)。

謝辞

本研究は、様々な場所でお世話になっ た多くの方々のご支援、ご協力の下に行 われたものです。東京大学大学院理学系 研究科の福山寛教授、ネール研究所の Christopher Bäuerle教授、東京大学 物性研究所の大谷義近教授、大阪大学 大学院理学研究科の小林研介教授を始 め、共同研究者の方々にはこの場を借り て深く御礼申し上げます。