



Title	2次元電子系の非局所伝導
Author(s)	沢崎, 立雄; 音, 賢一; 鷹岡, 貞夫 他
Citation	大阪大学低温センターだより. 1993, 81, p. 5-8
Version Type	VoR
URL	https://hdl.handle.net/11094/10964
rights	
Note	

The University of Osaka Institutional Knowledge Archive : OUKA

<https://ir.library.osaka-u.ac.jp/>

The University of Osaka

2次元電子系の非局所伝導

理学部 音 賢一・沢崎立雄・鷹岡貞夫・邑瀬和生（豊中4162）

はじめに

半導体ヘテロ界面などの2次元電子系に垂直に磁場をかけると電子の状態はランダウ準位に分かれ、低温で量子ホール効果¹⁾や電気抵抗のシュブニコフ・ド・ハース (SdH) 振動などが観測される。このような系で測られる電気抵抗には、試料の電流を流している部分の電気伝導率だけでは説明できない特異な現象、例えば「非局所抵抗」が現れる。非局所抵抗とは「電流経路」と電位差を測定する部分を離して測定した4端子抵抗である（図1）。この電流経路と電圧測定端子対との間の距離を分離距離

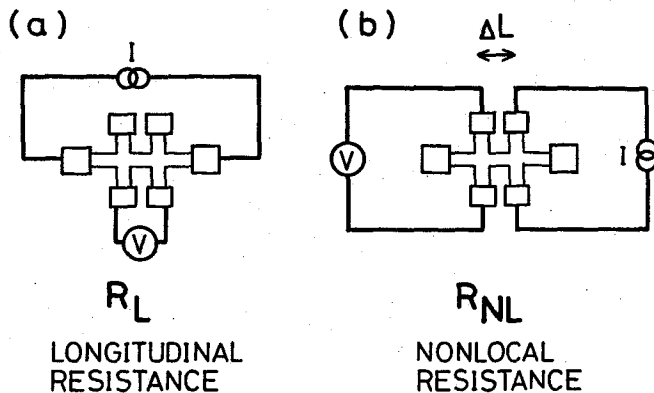
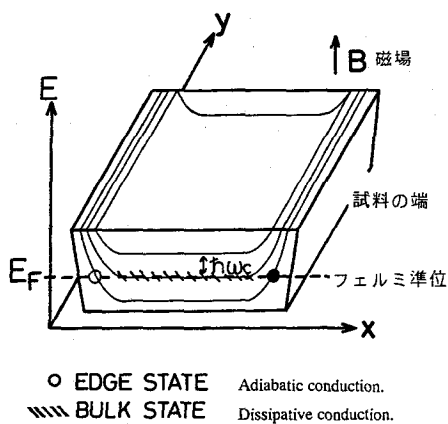


図1 (a)縦抵抗 R_L と、(b)非局所抵抗 R_{NL} の測定方法を示した模式図

ΔL と定義する。ふつう、このような抵抗は非常に小さい値しか観測されない。なお、区別のため通常の4端子抵抗を「縦抵抗」と呼ぶことにする。ここでは高移動度GaAs/AlGaAsヘテロ構造基板を加工して作製した半導体細線の、低温(0.5K程度)・強磁場(8テスラまで)での電気伝導を調べた実験について紹介し、この系での伝導に見られる非局所的な性質について説明する。

金属や縮退半導体の電気伝導は、フェルミ単位付近の電子で決まる。磁場によりランダウ準位に分かれた2次元電子系をフェルミ単位がよぎるのは、試料の中に広がった「バルク状態」と試料の端に沿った「エッジ状態」である（図2）。エッジ状態²⁾とは試料の端での閉じ込めポテンシャルにより、ランダウ準位が持ち上がっている所の状態である。エッジ状態にある電子は、試料の端に沿って磁場の向きによって決まる方向に進み、非常に長い距離にわたって化学ポテンシャルを変えず（非弾性散乱を受けず）に伝導する。電気伝導にはこれら「バルク状態」と「エッジ状態」の両方が関与している。以後これらをバルク電流、エッジ電流と呼ぶことにする。

試料はMBE成長で作製されたGaAs/AlGaAs HEMT構造を持つ基板を化学エッチングして作った。



エッジ状態、バルク状態の模式図

図2 エッジ状態が形成される様子を示した模式図。試料の端でランダウ準位が持ち上がり、フェルミ準位をよぎる○●で示した状態が占有される。○で示したエッジ状態の電子はY方向に、●は-Y方向に試料に沿って進む。試料中央部分はバルク状態を示す。

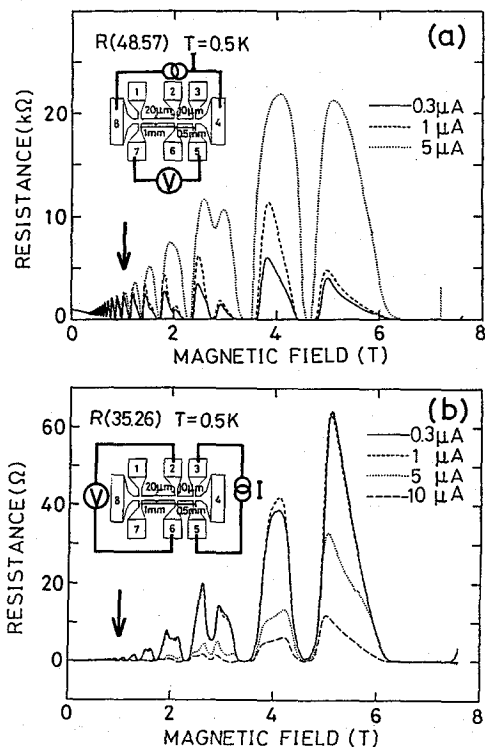


図3 マクロなサイズ（長さ1.5mm、線幅20μm）の試料での(a)縦抵抗、(b)分離距離 $\Delta L=0.5\text{mm}$ での非局所抵抗。↓は電気伝導にエッジ状態の寄与が現れはじめた磁場を示す。

電極はAu-Ge合金、Ni、Auを真空蒸着した後、加熱し合金化させて作製した。抵抗の測定は0.5Kで行い、交流4端子法を用いた。試料のキャリア濃度は $3.4 \times 10^{21} \text{cm}^{-2}$ 、移動度は $1.3 \times 10^6 \text{cm}^2/\text{Vs}$ である。

図3は電流を変えて測った縦抵抗、および分離距離 $\Delta L=0.5\text{mm}$ での非局所抵抗である。縦抵抗（図3-a）はSdH振動を示している。電流を増加すると、弱磁場ではほとんど変化がないが強磁場では抵抗が増加している。また、非局所抵抗（図3-b）はゼロ磁場では非常に小さいが、磁場が強くなると共に大きくなり、

縦抵抗のSdH振動に対応した振動を示す。非局所抵抗の値は電流を増すとともに減少する。

非局所抵抗が現れるモデルを図4に示した。図の縦軸は電子の化学ポテンシャル（～電位）を示す。バルク電流は散乱を受け化学ポテンシャルを変化させるのに対して、エッジ電流はバルク電流と空間的に分離され、試料の端に沿ってその化学ポテンシャルを保って電極間を伝わって行く。エッジ電流があるために、電圧端子1の化学ポテンシャルが高くなっている。次の端子2の化学ポテンシャルは端子1を出たエッジ電流と端子2付近のバルク電流の化学ポテンシャルで決まるので端子1-2間に電位差が生じる。

縦抵抗で電流依存性が生じる磁場と非局所抵抗が現れるはじめる磁場（約1T、図3の↓印）が一致しており、エッジ状態の形成と共に縦抵抗のSdH振動の振幅が抑制され、非局所抵抗が現れていることが分かる。また、電流を増加すると、試料中でのエッジ電流—バルク電流の化学ポテンシャルの差が大きくなり非平衡な状態が緩和しやすくなる。つまり相対的にエッジ電流による伝導の効果が小さくなるの

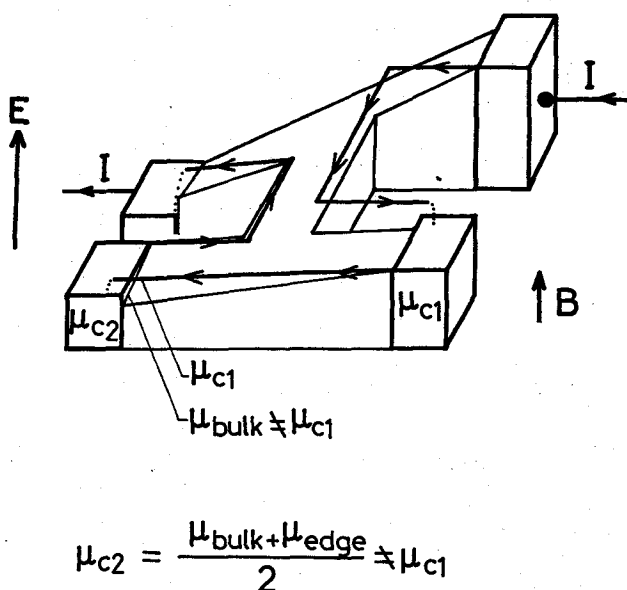


図4 非局所抵抗が現れることを示した模式図。電子は水、電極は水槽で、電流を流すことは水槽に注水したり排水することに当たる。2次元電子系のバルク状態は水路、エッジ状態は高さを一定にした雨樋としてみると考え易い。

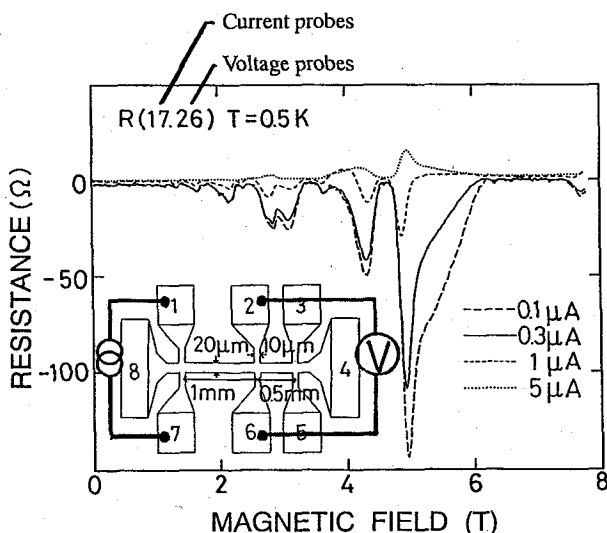


図5 「たちの悪い」端子を用いて測定した非局所抵抗。電流端子1は、強磁場下で約100kΩの高い端子抵抗を示した。

で縦抵抗は大きくなり非局所抵抗は減少する。

非局所伝導の特徴として、電極端子の影響が抵抗に現れることがあげられる。図5は分離距離 $\Delta L = 1 \text{ mm}$ での非局所抵抗の電流依存性である。電流が小さいとき非局所抵抗は負の値を示した。強磁場下で電流端子1の“接触抵抗”は、約100kΩと非常に大きい（通常100Ω以下）。このような「悪い」電極を使って測定すると、非局所抵抗だけでなく縦抵抗すら負の値を示す³⁾。元来、4端子法は電極の接触抵抗などの影響を無くするために用いられるが、この系では電極（測定に用いるかどうかに関わらず）の性質が電気伝導に大きな影響を及ぼす。「悪い端子」はエッジ状態やバルク状態に不均一に（むしろ異常に）電流を注入する。その不均一状態は伝導の途中で緩和せずに電圧端子まで到達する。また、電圧端子もエッジ電流、バルク電流の化学ポテンシャルを単純に平均せずに感じる。このとき条件によっては電圧端子の電位差が逆転し、負の抵抗が観測されると説明できる³⁾。

まとめ

強磁場中の2次元電子系の電気伝導では、電位差を測定している場所以外の要因が大きく関与する「非局所性」が強く現れ、また測定に用いる電極端子の性質が大きく影響する。これはエッジ状態の（エネルギー）緩和長が非常に長く、試料サイズ

(mmのオーダー)を上回っているからで、超伝導と同じくマクロなサイズに現れる量子効果の一つである。量子ホール効果を電気抵抗の標準として精密に測定するとき、エッジ状態による伝導の非局所性(特に電極の性質など)に十分配慮することが必要である。この研究で注目した非局所抵抗には(1)エッジ状態(端に沿って試料中を周回している)、(2)バルク状態、(3)電極の性質、などの情報が非常に敏感に反映するため、試料の均一性や電極端子の性質を評価する鋭敏な「バロメータ」となる可能性がある。本研究は基礎工学部、極限物質研究センター 蒲生健次教授、難波進名誉教授(現在、長崎総合科学大学)らとの共同研究である。

参考文献

- 1) K. v. Klitzing, G. Dorda and M. Pepper, Phys. Rev. Lett, **45** (1980) 494.
総合報告として、T. Ando, Prog. Theor. Phys. Suppl. **84** (1985) 69.
川路紳治: 応用物理 **58** (1989) 500.
青木秀夫: 「量子ホール効果」物理学最前線(大槻義彦編) 11巻 共立出版 (1985) など
- 2) 平井宏、小宮山進: 固体物理 **25** (1990) 121.
- 3) S. Takaoka, T. Sawasaki, K. Tsukagoshi, K. Oto, K. Murase, K. Gamo, and S. Namba, Solid State Commun. **80** (1991) 571.