

# ランダム磁場下の GaAs/AlGaAs 界面二次元電子系の負磁気抵抗

Scaling of magnetoresistance of two-dimensional electron systems  
in GaAs/AlGaAs heterostructures under random magnetic fields

小原一夫

Department of Physics, Kazuo Ohara

## 序論

本研究では、ランダム磁場中における二次元電子系の磁気抵抗のスケールリングについて議論する。ランダム磁場に注目が集まったのは、分数量子ホール効果との関連が挙げられる。分数量子ホール効果の中でも特に、電子がランダウ準位を半分満たした状態 ( $\nu = 1/2$ ) 近傍の理論的解釈に、複合フェルミオン描像が用いられていることに深い関係がある。ここでいう複合フェルミオンとは、磁束量子を二本背負った電子のことである [1]。この複合フェルミオン描像では、対象とする電子が、印加磁場以外にも周りの電子が背負っている磁束量子の影響も受けていることになる。これはランダム磁場を受けていることに相当する。これによりランダム磁場に注目が集まり、これまでに多くの研究がなされてきた [2,3]。

二次元電子系に対してランダム磁場を形成する代表的な手法として、ホールバー型試料の上に薄膜強磁性体を載せる手法がある。印加磁場によってランダム磁場を変化することが可能になり、強磁性体の厚さやサイズを変化させることでランダム磁場の振幅や相関長を制御できる利点がある [4]。またグラフェンでも、リップルと呼ばれる凹凸によるランダム磁場測定が行われている。

グラフェンの実験では正磁気抵抗と負磁気抵抗が混在し、この負磁気抵抗は、局在効果とランダムな磁場に起因すると考えられている。GaAs/AlGaAs ヘテロ界面二次元電子系でもランダム磁場中の磁気抵抗が以前より研究されており、低電子濃度領域では負の磁気抵抗も観測されている。本研究では、GaAs/AlGaAs ヘテロ界面二次元電子系で平行磁場と垂直磁場中での測定を行い、これらの測定結果から平行磁場中の磁気抵抗、特に負磁気抵抗の磁場依存性、電子濃度依存性を調べる。

## 実験

GaAs/AlGaAs ヘテロ構造基盤上に電子線リソグラフィ法・真空蒸着法・ウェットエッチング法を利用してホールバー型試料を作製した。電極は S (ソース), D (ドレイン) の電流用電極, LG, RG のゲート電極, L1~L10, R1~R10 の電圧用電極の計 24 個を設けた (図 1)。チャンネル幅と電圧端子間長は  $20\mu\text{m}$  で、ホールバーのチャンネル長は  $400\mu\text{m}$  である。チャンネル表面に膜厚  $48\text{nm}$  の金を蒸着してゲート電極とし、金ゲート上に強磁性体コバルト円盤を同一のランダムパターンで異なる膜厚  $100\text{nm}$ ,  $84\text{nm}$ ,  $67\text{nm}$  領域を作製した。金ゲートのみの 1 個の参照領域を設けている (図 2)。二次元電子面は基盤表面から  $60\text{nm}$  離れて分布している。

ランダム磁場領域は強磁性体コバルト円盤を  $21\mu\text{m} \times 60\mu\text{m}$  の領域に対し、重複しないようにランダムに配置して形成している。各ランダム磁場領域は 3 種類の直径の Co 円盤が面積比 45 % になるように構成した。さらに、強磁性体コバルト円盤の膜厚を変化させ、直径を固定させることで、ランダム磁場の実効磁場を系統的に変化させた。以下では、参照領域を SampleA, Co 膜厚の厚い順に SampleB, C, D と呼ぶことにする。

各ランダム磁場領域の強磁性体コバルトの飽和磁化が二次元電子面に作るランダム磁場の垂直成分  $B_z$  を数値計算した。各 SampleA ~ D の実効値  $B_{\text{rms}}$  は  $48\text{mT}$ ,  $57\text{mT}$ ,  $63\text{mT}$  となっている。

ランダム磁場の相関長は，相関  $\langle B_z(\mathbf{R})B_z(\mathbf{R} + \mathbf{r}) \rangle$  を算出し，相関関数  $\cos(ar) \exp(-r^2/2\xi^2)$  を関数フィッティングして，相関長  $\xi$  を求めた．相関長は  $x, y$  方向に異方性が現れるため，それらの値の平均をとった．

表 1: 各ランダム磁場の相関長

| Sample   | $\xi_x$ ( $\mu\text{m}$ ) | $\xi_y$ ( $\mu\text{m}$ ) | $\xi(= \frac{\xi_x + \xi_y}{2})$ ( $\mu\text{m}$ ) |
|----------|---------------------------|---------------------------|----------------------------------------------------|
| 膜厚 100nm | 0.659                     | 0.468                     | 0.564                                              |
| 膜厚 84nm  | 0.642                     | 0.464                     | 0.553                                              |
| 膜厚 67nm  | 0.621                     | 0.450                     | 0.535                                              |

測定は交流四端子定電流法で行った．試料を  $^3\text{He}-^4\text{He}$  希釈冷凍機内に設置し，約 1.9K で抵抗測定を行った．試料電流 100nA，周波数 87.0Hz で測定し，ゲート電圧を 0mV から -210mV の範囲で印加し，いくつかの電子濃度において磁気抵抗を測定した．磁場は超伝導磁石を用いて -0.4T から +0.4T の範囲で印加し，二次元電子面に対し磁場を平行に印加した測定（ランダム磁場の平均値がゼロ）と  $90^\circ$  傾けた測定を行った．

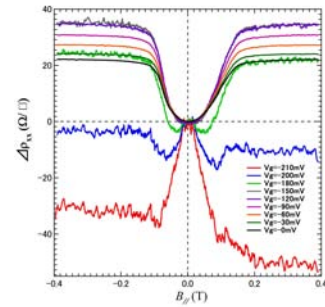
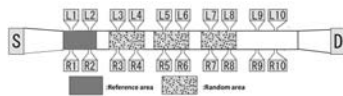
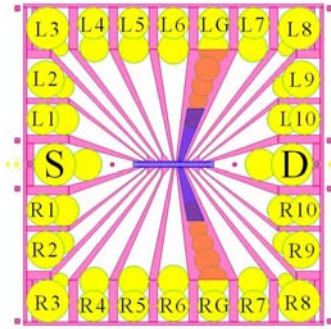


図 1: ゲート電極付きホールバー型デザイン

図 2: チャンネル部模式図

図 3:  $\theta = 0^\circ$  の平行磁場測定 (B)

## 結果

図 3 は，二次元電子系と印加磁場との成す角  $\theta$  が  $0^\circ$  における磁気抵抗のグラフである．低電子濃度（特に  $V_g = -210\text{mV}, -200\text{mV}$ ）では，負磁気抵抗が観測できている．しかし， $V_g = -200\text{mV}$  を見ると負磁気抵抗の挙動とカスプの挙動の両方を見ることができる．つまり負磁気抵抗中に正磁気抵抗が混在していることを示す．そこで，観測されている磁気抵抗から正磁気抵抗を差し引く必要がある．

### 考察:ランダム磁場の平均値がゼロの場合の磁気抵抗

ランダム磁場の磁気抵抗  $\Delta\rho$  は磁場と電子濃度と，

$$\Delta\rho_c \propto \frac{B_{\text{amp}}^2}{n_s^{3/2}} \quad (1)$$

式 1 との関係があるということが知られている. この関係からカスプの大きさを推測した結果が図 5 である. このデータを図 3 から差し引くと図 6 のようになる. ここで, 負磁気抵抗としての特性を議論するために,

$$\Delta\sigma = -\frac{\Delta\rho(B)}{\rho^2(0)} \quad (2)$$

の関係から図 6 を  $\sigma_{xx}$  に変換した (図 7). この形状のふくらみは, 印加した磁場と実際に生じている Co 薄膜による磁場 (実効磁場) との差から生じるものと考えた. 以下では,  $V_g = -200\text{mV}, -210\text{mV}$  に注目する.

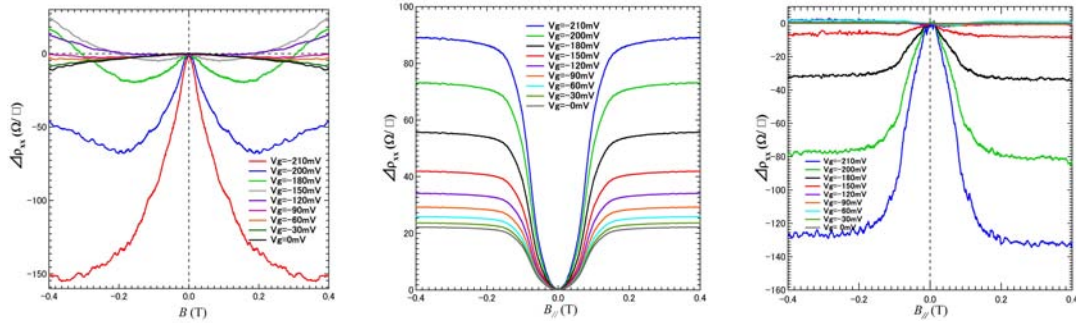


図 4: 垂直磁場下における負磁気抵抗  
図 5:  $V_g = 0\text{mV}$  から推測したカスプ  
図 6: 推測したカスプを差し引いた時

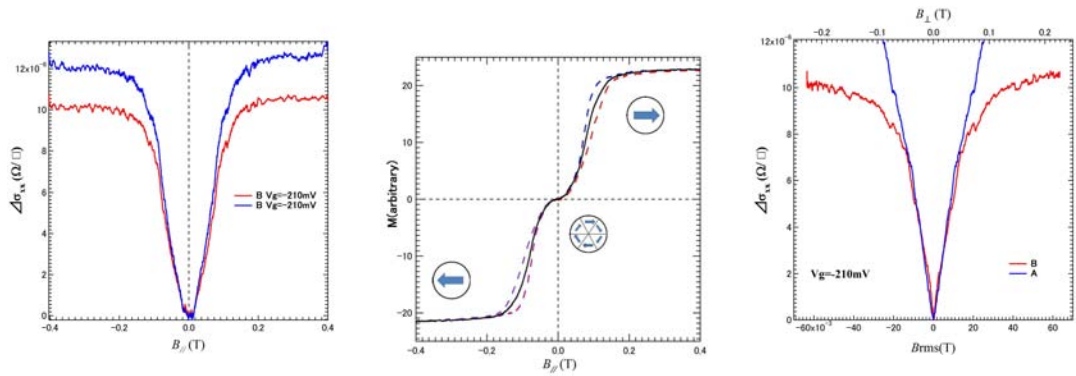


図 7: 推測したカスプを差し引いた時の  
図 8:  $\xi^{-1}$  と  $r_c^{peak}$  の関係  
図 9:  $V_g = -210\text{mV}$  における実効磁場と垂直磁場の比較

$$\Delta\rho \propto B_{\text{amp}}^2 \propto M^2 \quad (3)$$

という関係から図 8 のような磁化曲線を導くことができる. この時, 磁化の飽和した Co 円盤が作るランダム磁場分布を計算して, その実効値を求める. その値を, この磁化曲線の飽和値とする. この磁化曲線の  $0 \sim 0.2\text{T}$  程度の範囲において三次関数によりフィッティングを行い, その関数により, 実効値  $B_{\text{rms}}$  を求めた.  $\Delta\sigma$  を  $B_{\text{rms}}$  に対してプロットしたのが, 図 9 である. この図では, 垂直磁場中の参照領域の負磁気抵抗の磁場依存性とを比較している. 0 磁場近傍の負磁気抵抗の磁場依存

性が一致するようにしたとき、横軸スケールを比較すると、領域 B ではランダムの実効値 70mT に対して、垂直磁場は 250mT になっている。すなわち、同じ負磁気抵抗を引き起こすのに、垂直磁場の方が 3.6 倍の磁場を必要とする。他の二つの試料についても同様の解析をした結果、表 2 のようになった。いずれも、垂直磁場の方が 4 倍から 8 倍の磁場が必要となっている。これは、予想とは逆の結果である。逆の結果が出た原因の可能性として、磁化曲線を用いたランダム磁場の実効値への不確かさがあるが、このような大きな違いは考えにくい。現在のところ、原因は明らかではない。今後さらに実験する必要がある。

表 2: 実効磁場と垂直磁場との関係

| Sample | Co 膜厚 | Brms(mT) | 垂直磁場/平行磁場 (実効値) |
|--------|-------|----------|-----------------|
| B      | 100nm | 63       | 3.6             |
| C      | 84nm  | 57       | 8.2             |
| D      | 67nm  | 48       | 7.6             |

## まとめ

GaAs/AlGaAs ヘテロ構造基板を用いた二次元電子系に膜厚の違う微小強磁性体薄膜をランダムに配置したゲート電極付きホールバー型試料を作製し、平行磁場及び垂直磁場中の負磁気抵抗について研究を行った。平行磁場中でランダム磁場に起因する負磁気抵抗を観測した。観測された正磁気抵抗から Co の磁化曲線を推測し、ランダム磁場中の負磁気抵抗の磁場依存性を導出した。垂直磁場中の通常の二次元電子系の負磁気抵抗と比較した結果、ランダム磁場中の負磁気抵抗は、垂直磁場の 12 % ~ 25 % の実効値の磁場で生じることがわかった。

## 参考文献

- [1] J.K.Jain, Phys.Rev.Lett.41(1990)7653.
- [2] T.Kawarabayashi, T.Ohtsuki, Phys.Rev.B67((2003)165309, Phys.Rev.B71(2005)045302.
- [3] A.D.Mirlin, J.Wilke, F.Evers, D.G.Polyakov and P.Wölfle, Phys.Rev.Lett.87(1999)2801.
- [4] 甘楽 雅和, 中央大学大学院理工学研究科 2009 年度修士論文.
- [5] 尾高 孝祐, 中央大学大学院理工学研究科 2010 年度修士論文.