

# 円形凹みをもつグラフェンのアハラノフ・ボーム型効果の観測

Aharonov-Bohm type effects in graphene with circular hollows

物理学専攻 渡邊 寛人

Hiroto Watanabe

## 1. 序論

Aharonov-Bohm 効果 (AB 効果) は、1959 年に Aharonov と Bohm によって提唱された理論である。[1] 電子がベクトルポテンシャル中を通過する場合に、電子波が影響を受けることで位相にズレが生じる現象である。外村はトロイド状強磁性体試料を作製し、干渉縞のズレを観測することで、これを実証した。[2]

磁場中のリング状の導体の電気伝導に振動的な振る舞いが観測されることがある。こちらは磁場が共存しているため、純粋な AB 効果ではないが、AB 効果に類似していることから、AB 型振動と呼ばれている。この振動は金属リング [3] や GaAs 界面二次元電子系 [4]、グラフェンリング [5] などで観測されている。

瀧澤は、グラフェンに円形の歪みを与え、その効果によってリング状ポテンシャルディップを生成し、磁気抵抗を観測した。[6] その観測の中で、振動的振る舞いを観測し、フーリエ解析したところ、AB 振動の条件式  $\Delta B = h/eS$  ( $S = \pi r^2$ ) より、二つのリング状ポテンシャルを貫く磁束の周期に対応する振動成分があることを見出した。瀧澤の試料ではリング状ポテンシャルのサイクロトロン運動に対する効果を調べるために、多くのポテンシャルを含む試料を用いていた。これにより、AB 型振動を観測する際に、干渉の小さなズレが足しあわされて振動のスペクトル幅が増大することが考えられる。そこで、本研究では、Si/SiO<sub>2</sub> 基板の上にリング状ポテンシャル数の異なる試料を作製し、AB 型振動を調べることを目的とする。試料として、円形凹みを一個配置したもの、一列に並べたもの、二列に並べたもの、および五列に並べたものを作製した。

## 2. 実験

本研究では、Si/SiO<sub>2</sub> 基板の上に電子線リソグラフィー法を用いてパターンを描画、現像し、ウェットエッチングによって凹凸を作製した。設計は、円の直径 0.4  $\mu\text{m}$ 、周期 10  $\mu\text{m}$  (凹凸一個)、0.8  $\mu\text{m}$  (一列、二列、および五列) で設計を行った。作製した凹凸表面上に KISH グラファイトからスコッチテープ法を用いてグラフェンを剥離した。ここでは、測定を行った試料 No.5 と試料 No.6 の 2 つの試料について記載する。試料 No.5 は凹凸五列の基板上にグラフェンを採取した。採取したグラフェンは、長さ 8.7  $\mu\text{m}$ 、幅 2.5  $\mu\text{m}$  である (図 1)。試料 No.6 は凹凸二列の基板上にグラフェンを採取した。採取したグラフェンは、長さ 25  $\mu\text{m}$ 、幅 0.9  $\mu\text{m}$  である (図 3)。試料に対して垂直に磁場を  $\pm 3$  T の範囲で印加し、100 nA の交流定電流法で磁気抵抗を測定した。

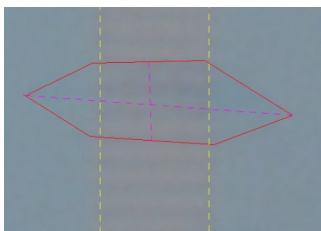


図 1: 採取したグラフェン (No.5)

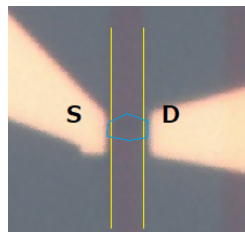


図 2: 測定試料 No.5



図 3: 採取したグラフェン (No.6)

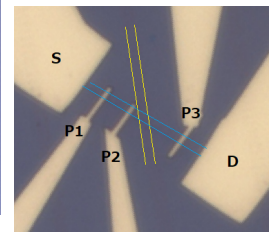


図 4: 測定試料 No.5

### 3. 測定結果

試料 No.5 はゲート電圧によりキャリア濃度の制御が可能な試料であった。二端子抵抗  $R_{ds}$  のゲート電圧依存性測定を行った。測定温度 4.2 K での -40 V から +40 V までの測定結果が図 6 である。この結果から、電荷中性点 (CNP) は  $V_g = +2$  V 近傍であると分かる。 $V_g = 0$  V ~ +4 V の磁場依存性の測定結果を図 5 に -3 T から +3 T までの範囲で示す。図 7、図 8 はグラフェンを剥離する前に  $\text{SiO}_2$  表面を原子間力顕微鏡を用いて測定したものである。穴の外直径、内直径、周期を表 1 に示す。

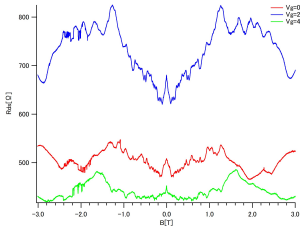


図 5: 磁場依存性

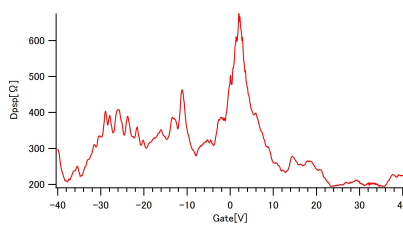


図 6: ゲート電圧依存性

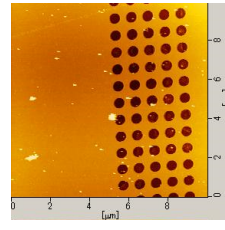


図 7: AFM 測定結果

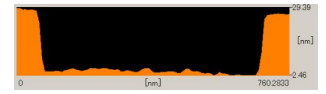


図 8: 凹凸の断面図  
凹凸の縦横比は 28:1 である

試料 No.6 はゲートリークによりキャリア濃度の制御が不可能な試料であった。そこで、温度 2.0 K、ゲート電圧 0 V で抵抗の磁場依存性測定を行い、結果を -3 T から +3 T の範囲で図 9 に示す。図 10 と図 11 はグラフェンを剥離する前に  $\text{SiO}_2$  表面を原子間力顕微鏡を用いて測定したものである。穴の外直径、内直径、周期を表 2 に示す。

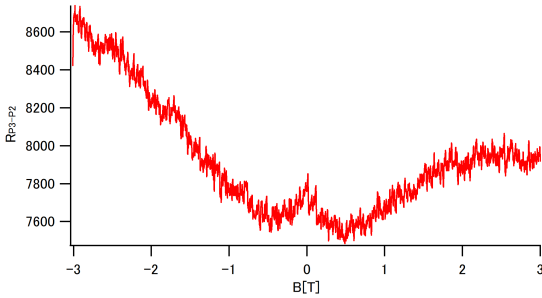


図 9: 磁場依存性

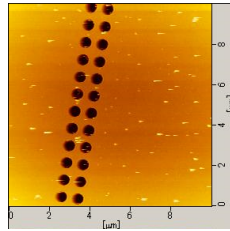


図 10: AFM 測定結果

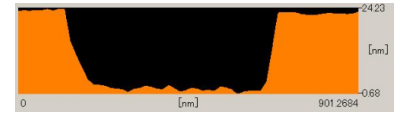


図 11: 凹凸の断面図  
凹凸の縦横比は 36:1 である

外直径 [ $\mu\text{m}$ ]	内直径 [ $\mu\text{m}$ ]	周期 [ $\mu\text{m}$ ]
$0.64 \pm 0.01$	$0.61 \pm 0.01$	$0.80 \pm 0.01$

表 1: AFM 測定での凹凸データ (No.5)

外直径 [ $\mu\text{m}$ ]	内直径 [ $\mu\text{m}$ ]	周期 [ $\mu\text{m}$ ]
$0.55 \pm 0.01$	$0.51 \pm 0.02$	$0.80 \pm 0.01$

表 2: AFM 測定での凹凸データ (No.6)

### 4. 解析及び考察

AB 型振動を示すリング状ポテンシャルの直径を求めるために、ポテンシャルを計算した。図 12 は試料 No.5 の AFM データの凹み部分を取り出し 6 個平均化して得た断面図である。ポテンシャルの落ち込みは  $V(r) \approx V^0 - \alpha(2/R(r))^2$  で表される。ここで、基準値  $V^0$  は平らな面でのポテンシャルで、 $R(r)$  は曲率半径である。曲率半径  $R(r)$  は図 12 の曲線を 2 階微分することで求めた。また、 $\alpha$  は定数で、 $\alpha = 10 \text{ eV}\text{\AA}^2$  である。結果を図 13 に示す。求めたポテ

ンシャルモデルから、試料 No.5 のリング状ポテンシャルの直径を求め、表 3 にまとめる。同様にして、試料 No.6 のリング状ポテンシャルの直径を求め、表 4 にまとめる。

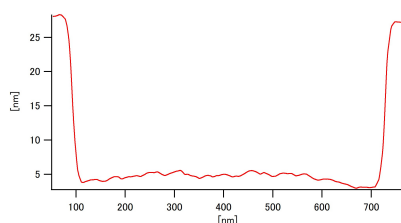


図 12: AFM データを平均化した凹凸の断面図

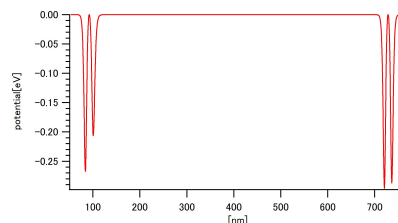


図 13: 計算で求めたポテンシャルモデル

外直径 [ $\mu\text{m}$ ]	内直径 [ $\mu\text{m}$ ]	周期 [ $\mu\text{m}$ ]
0.652	0.620	0.80

表 3: ポテンシャル図から求めた凹凸データ (No.5)

外直径 [ $\mu\text{m}$ ]	内直径 [ $\mu\text{m}$ ]	周期 [ $\mu\text{m}$ ]
0.552	0.491	0.80

表 4: ポテンシャル図から求めた凹凸データ (No.6)

求めた直径から、AB 振動の条件式  $\Delta B = h/eS$  ( $S = \pi r^2$ ) にあてはめると、スペクトルのピーク位置はそれぞれ表 5、表 6 のようになることが予測される。図 14、図 15 は磁気抵抗の測定結果の振動成分を抽出し、フーリエ

$r[\mu\text{m}]$	$S[\mu\text{m}^2]$	$\Delta B[\text{mT}]$	$1/B[1/\text{T}]$
0.276	0.239	0.0173	57.8
0.246	0.190	0.0218	45.9

表 5: 予測されるピーク位置 (No.5)

$r[\mu\text{m}]$	$S[\mu\text{m}^2]$	$\Delta B[\text{mT}]$	$1/B[1/\text{T}]$
0.192	0.116	0.0365	27.4
0.207	0.135	0.0299	33.4

表 6: 予測されるピーク位置 (No.6)

スペクトル図にしたものである。しかしながら、試料 No.5 では直径に対応するピークを見出すことができなかった。また、試料 No.6 では対応するピークはあるものの隣接したピークと区別することができなかった。

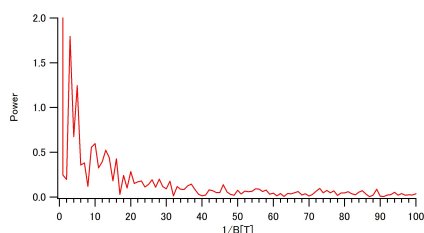


図 14: 振動のフーリエスペクトル図 (No.5)

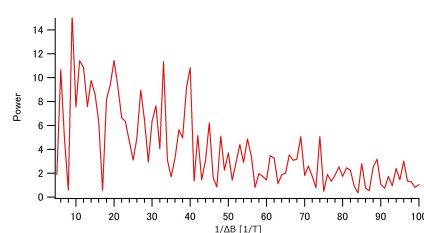


図 15: 振動のフーリエスペクトル図 (No.6)

そこで、今年度実験を行った黒沢の測定結果に対しても振動成分を抽出しフーリエ解析を行った。黒沢の作製した試料は直径  $0.3 \mu\text{m}$  の円型凹凸を周期  $0.6 \mu\text{m}$  で正方形格子に七列配置したものである。黒沢の試料のリング状ポテンシャルの直径と、予測されるピーク位置を表 7 にまとめる。

図 16 は黒沢の磁気抵抗の測定結果である。低磁場領域において微小な振動が見受けられる。図 17 は振動成分

をフーリエ解析した結果である。予測された位置にピークが存在していることが分かる。したがって、この振動はリング状ポテンシャルの直径に対応した AB 型振動であると考えられる。

r[ $\mu\text{m}$ ]	$\Delta B[\text{mT}]$	1/B[1/T]
0.192	0.0365	27.4
0.207	0.0299	33.4

表 7: 対応するピークの予想

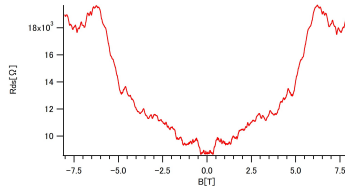


図 16: 黒沢の測定結果

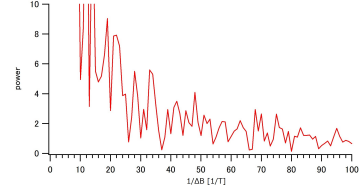


図 17: 振動のフーリエスペクトル図 (黒沢の試料)

No.5、No.6 の試料では AB 型振動と考えられる振動を観測することができなかったが、黒沢の試料では、AB 型振動と考えられる振動を観測することができた。この理由について考える。

Tikhonenko らによると、移動度  $0.5 \sim 1.0 \text{ m}^2/\text{V} \cdot \text{s}$  の試料において、位相緩和長  $L_\phi$  は温度 10 K 以下において約 750 nm である。[7] 今回作製した試料のリング状ポテンシャルの直径は 500 nm を超えており、その経路の長さが位相緩和長よりも長くなってしまったと考えられる。一方で、黒沢の試料では、経路の長さが 650 nm 前後となり位相緩和長と比べて短いことから、可干渉性が保たれたのだと考えられる。

直径 [nm]	経路 [nm]
652	1024
620	973

表 8: 試料 No.5

直径 [nm]	経路 [nm]
552	867
491	771

表 9: 試料 No.6

直径 [nm]	経路 [nm]
384	603
414	650

表 10: 黒沢の試料

## 5. まとめ

本研究では、二列、及び五列の円形凹凸加工を施した Si/SiO<sub>2</sub> 基板上にグラフェンを剥離し、リング状ポテンシャルを課したグラファイト試料を作製し、磁気抵抗の測定を行った。本研究で作製した試料では、リング状ポテンシャルの直径に対応する振動成分を見出すことができなかった。これは、グラフェンの位相緩和長がリング状ポテンシャルのサイズに対して十分に長くなかったためだと考えられる。一方、黒沢の試料では、リング状ポテンシャルの直径に対応する振動を観測することができた。これはリング状ポテンシャルの直径が小さく、電子波の経路が位相緩和長よりも短く、干渉効果が生じたためだと考えられる。

## 参考文献

- [1] Y.Aharonov *et al.*, Physical Rev.115.485 (1959)
- [2] A.Tonomura *et al.*, Physical Rev A 34,2 (1986)
- [3] R.A.Webb *et al.*, Physical Rev Lett.54.2696(1985)
- [4] G.Timp *et al.*, Physical Rev Lett.58.2814
- [5] S.Russo *et al.*, Physical Rev B 77,085413 (2008)
- [6] 瀧澤完地、中央大学大学院理工学研究科 2014 年度修士論文
- [7] F.V. Tikhonenko *et al.*, Physical Rev PRL 100, 056802 (2008)