



大阪大学  
OSAKA UNIVERSITY



## Press Release

研究成果

報道解禁あり

本研究成果は「Scientific Reports」から、以下のとおり報道解禁設定があります。

6月30日(火) 10時(英国時間)

TV・ラジオ・WEB ……6月30日(火) 18時(日本時間)

新聞 ……7月1日(水) 朝刊(日本時間)

平成27年6月30日

キーワード: 物性 I、ナノ構造物理、グラフェン、量子効果、量子デバイス

# 接合数の偶数・奇数で電流の流れが全く異なる新しい現象 注目物質“グラフェン”におけるパリティ効果を世界で初めて確立！

## ❖ 研究成果のポイント

- グラフェンと呼ばれる、原子層一層で形成される  $pn$  接合において電流の流れ方を精密に調査
- 電流の流れ方が  $pn$  接合の数の偶奇性によって全く異なる新しい現象(パリティ効果)を発見
- 光学干渉計で起きる現象と強い類似性を持つため、原子層を用いた量子干渉素子作成への応用に期待

## ❖ 概要

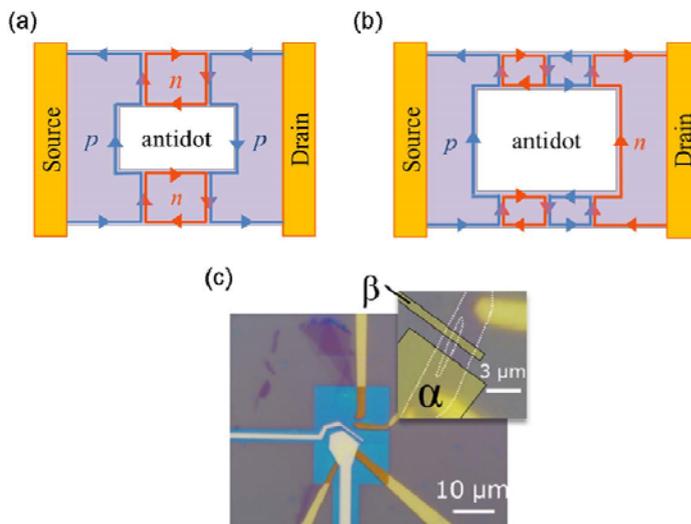
小林研介(大阪大学大学院理学研究科教授)と松尾貞茂(東京大学大学院工学系研究科助教)は、小野輝男(京都大学化学研究所教授)および塚越一仁(物質・材料研究機構国際ナノアーキテクトニクス研究拠点主任研究者)らの研究グループとの共同研究により、金属と半導体の両方の性質を持つグラフェン<sup>注1</sup>(単層グラファイト)中に形成された  $pn$  接合<sup>注2</sup>での量子ホール状態<sup>注3</sup>の輸送現象にパリティ効果<sup>注4</sup>があることを理論的に予測し、実験によって検証することに成功しました。グラフェンは、特異な電子構造に起因する豊富な電子物性とその応用可能性のため、非常に注目を集めている物質です。

このパリティ効果は、光学干渉計で起きる現象と強い類似性を持つため、今後グラフェンにおける量子干渉素子の形成における指導原理となることが期待されます。

本研究成果は、2015年6月30日(英国時間)に「Scientific Reports」のオンライン版に発表される予定です。

## ❖ 研究の背景

物理学では、整数値を取る物理量の偶奇性に依存して、物理現象が質的に全く異なる振る舞いを示すことがあります。このような物理量の偶奇性という抽象的な概念に基づいた現象の分類はパリティ効果と呼ばれ、物理現象の理解に極めて重要な役割を果たします。本研究チームはグラフェンと呼ばれる、単層グラファイトの輸送現象でみられるパリティ効果を発見し、その検証を行いました。



図(a)は  $pn$  接合が偶数個のとき、(b)は奇数個のときの量子ホール端状態を流れる電流を示しています。この二つ場合の伝導度が質的に異なることを本研究では報告しています。(c)はパリティ実証に用いたグラフェン試料の光学顕微鏡写真です。拡大図の白線で囲んだ部分がアンチドットを持つグラフェン(グラファイト)で、 $\alpha$ と $\beta$ がトッパゲート電極です。この試料では  $pn$  接合が0,1,2,3本の場合を実現できます。

2004年の報告以降、**グラフェンは、特異な電子構造に起因する豊富な電子物性とその応用可能性のため非常に注目を集めている物質**です。この物質の大きな特徴は、**ゲート電極を用いて容易に電荷の極性を変化させることが可能なこと**です。この性質を利用すると、グラフェンに  $pn$  接合と呼ばれる、電荷の極性が異なる二つの領域を形成することができます。そこに強磁場を印加することで、それ以前には実現が困難であった、 $pn$  接合における量子ホール状態の輸送現象の研究が可能となります。これまで、このような  $pn$  接合の量子ホール状態の輸送特性では、グラフェンの特異な電子構造を反映して、 $pn$  接合上で量子ホール端状態が完全に混合されることが報告されていました。

## ❖ 研究成果

本研究チームは、グラフェン  $pn$  接合上にアンチドットと呼ばれる穴を作った場合に電子の輸送がどのような影響を受けるのかを評価しました。その結果、 $pn$  接合における量子ホール端状態の完全混合が起きる場合には、アンチドットの数に対する伝導度の振る舞いが、 $pn$  接合の数が偶数であるか奇数であるかによって決まってしまうこと(=パリティ効果)を理論的に発見しました。また、実際にこのパリティ効果を実証するため、グラフェンにアンチドットを作り、その上にトップゲート電極をのせることでアンチドット直上に  $pn$  接合が形成できるデバイスを作製し、 $pn$  接合の本数が1,2,3本ときの伝導度を測定しました。その結果、実験で得られた伝導度は、パリティ効果が得られた理論式とよい一致を示すことが明らかになりました。これは、研究チームが発見したパリティ効果を実証できたことを意味しています。

また、研究チームは、パリティ効果を反映して、 $pn$  接合が偶数個の場合と奇数個の場合とで、それぞれ異なる光学干渉計との類似性があることを指摘しています。この類似性は、グラフェンの  $pn$  接合における量子ホール状態を用いて、様々な電子の干渉計(量子干渉素子)を実現できる可能性を示唆しています。**これまでグラフェンにおける量子ホール状態での電子の干渉計は実現されておらず、本研究がその契機となることが期待**されます。

## ❖ 本研究成果が社会に与える影響(本研究成果の意義)

本研究は、**量子ホール状態にあるグラフェン  $pn$  接合の普遍的な性質「パリティ効果」**を世界で初めて明らかにした**もの**です。これは、**グラフェンとよく似た電子構造を持つトポロジカル絶縁体の  $pn$  接合などでも成り立つことが期待**されると同時に、**今後の  $pn$  接合における量子ホール状態の研究に寄与**します。また、**本研究を基に、グラフェン量子ホール状態の量子干渉素子の研究が発展していくことが期待**されます。

## ❖ 特記事項

本研究成果は、2015年6月30日(英国時間)に「Scientific Reports」に発表されます。

タイトル : “Parity effect of bipolar quantum Hall edge transport around graphene antidots”

著者名 : Sadashige Matsuo, Shu Nakaharai, Katsuyoshi Komatsu, Kazuhito Tsukagoshi, Takahiro Moriyama, Teruo Ono, and Kensuke Kobayashi

本研究の一部は、日本学術振興会 科学研究費補助金 基盤研究(S) (No.26220711)、文部科学省科学研究費補助金新学術領域研究「ゆらぎと構造」(No.25103003)および「原子層科学」(No.25107004)の補助を受けて行われました。

## ❖ 本件に関する問い合わせ先

大阪大学大学院理学研究科物理学専攻

教授 小林研介

Tel: 06-6850-5368 Fax: 06-6850-5372

E-mail: kensuke@phys.sci.osaka-u.ac.jp



大阪大学  
OSAKA UNIVERSITY



## ❖ 用語の説明

### 注1) グラフェン

炭素の層状構造を持つグラファイトから原子層一層だけを取り出した二次元的な物質を指す。2004年に初めて実現された。グラフェンを初めて実現した Geim と Novoselov は 2010 年にノーベル賞を受賞している。

### 注2) $pn$ 接合

半導体中で  $p$  型の領域と  $n$  型の領域が接する部分を指す。グラフェンはゲート電圧によって、キャリアを、電子にも、正孔にもできるので、 $pn$  接合を形成できる。本研究では、さらに強磁場を印加して、量子ホール状態にある  $pn$  接合の振る舞いを研究した。

### 注3) 量子ホール状態

二次元電子(正孔)系に対し垂直に強い磁場を印加すると、電子の軌道運動が量子化され、系のホール伝導度が離散化された普遍的な値をとるようになる。これを量子ホール効果と呼び、そのような現象を示す電子(正孔)系を量子ホール状態と呼ぶ。

### 注4) パリティ効果

整数値を取る物理量が偶数であるか、奇数であるか、という違いに強く依存して、物理現象が質的に全く異なる振る舞いを示すこと。

### 注5) 干渉計(量子干渉素子)

波はお互いに強め合ったり弱め合ったりする効果(干渉効果)を示す。光の持つ波としての性質を利用した様々な実験・測定装置を干渉計と呼ぶ。量子力学の世界では、電子も波として振る舞う。電子の波としての性質を利用する素子のことを量子干渉素子と呼ぶ。