



## トポロジカルな量子バレー流を観測

～高移動度グラフェン超格子デバイスの作製により成功 量子エレクトロニクスへの展開に期待～

配布日時：2018年5月15日午後2時

解禁日時：2018年5月19日午前3時

国立研究開発法人 物質・材料研究機構

国立大学法人 群馬大学

### 概要

1. 物質・材料研究機構と群馬大学は、高い移動度を持つグラフェン超格子デバイスを作製し、トポロジカルな原理による量子バレー流の観測に成功しました。バレーという固体結晶内の電子が持つ量子力学的内部自由度（隠れた自由度）を利用した量子光学的干渉素子やトポロジカルな超伝導量子情報素子など新しい量子エレクトロニクスへの展開が期待されます。
2. バレー流によって情報を伝達することを目指すエレクトロニクスはバレートニクスとも呼ばれ、近年の Internet of Things (IoT) に資する低消費電力素子の候補の一つとして注目されています。エレクトロニクスの担い手である電子は、電荷やその自転方向に対応するスピンと呼ばれる量子力学的な内部自由度を持っています。固体結晶中の電子は、さらにバレーという隠れた内部自由度が存在し、今日のエレクトロニクスの基盤を担うシリコンなどの半導体材料で古くから知られていました。しかし、バレー自由度を制御することは難しく、積極的にデバイスなどに利用する視点は最近まで注目されていませんでした。
3. 黒鉛の単原子層であり、炭素原子が蜂の巣状に並んだシートであるグラフェンと、同じく蜂の巣構造を持つ六方晶窒化ホウ素を貼り合わせたグラフェン超格子デバイスでは、電子はバレー自由度を持つことができ、電荷の移動に伴って電流が生じると同様に、バレー流というものが電荷の流れを伴わずに発生することが予測されています。今回研究チームは、高品質なグラフェン超格子デバイスを作製してバレー流の検出を試み、巨大なシグナルとしてバレー流を電氣的に検出することに成功しました。さらに、デバイスの端（エッジ）に局在した電流が現象を支配している、量子バレー流の可能性を確認しました。
4. 量子バレー流の基礎科学的研究をベースに、将来のデバイス応用を目指し、バレー自由度を外部から制御する量子光学的干渉素子やトポロジカルな超伝導量子情報素子などの開発を進めていきます。
5. 本研究は、物質・材料研究機構国際ナノアーキテクニクス研究拠点の小松克伊 博士研究員（現在、東芝メモリ株式会社）、森山悟士 主任研究員と、群馬大学大学院理工学府電子情報部門の守田佳史 准教授からなる研究チームによって行われました。本研究成果は、現地時間 2018 年 5 月 18 日午後 2 時（日本時間 19 日午前 3 時）に米国の科学雑誌「Science Advances」に掲載されます。

## 研究の背景

電子は電荷やその自転方向に対応するスピンと呼ばれる量子力学的内部自由度<sup>(1)</sup>を持っています。一方固体結晶中の電子は、バレー<sup>(2)</sup>という隠れた内部自由度が存在し、今日のエレクトロニクスの基盤を担うシリコンなどで古くから知られていました。しかし、バレー自由度を制御することは難しく、積極的にデバイスなどに利用する視点は最近まで注目されていませんでした。黒鉛の単原子層であり、炭素原子が蜂の巣状に並んだシートであるグラフェン<sup>(3)</sup>は、次世代エレクトロニクスの旗手として期待されています。今回本研究グループは、同じく蜂の巣構造を持つ六方晶窒化ホウ素<sup>(4)</sup>のシートとグラフェンを貼りあわせて、超格子構造<sup>(5)</sup>を形成した高い移動度<sup>(6)</sup>を持つグラフェン超格子デバイスを作製しました。このような高品質デバイスの実現には物質・材料研究機構の渡邊・谷口らが開発した高品質な六方晶窒化ホウ素の結晶が鍵となる役割を果たしています。グラフェン超格子デバイスでは相対論的粒子であるディラック粒子が準粒子<sup>(7)</sup>として実現します。このデバイスにおいて電気的な信号をバレー流にまず変換し、また逆の変換をおこなうことによって非局所的な電気信号としてバレー流が検出することができます。このようなバレー流の検出は近年試みられてきましたが、移動度の低さなどからそのシグナルは非常に小さく、量子エレクトロニクスなどに必要とされる巨大な応答は実現されていませんでした。

## 研究内容と成果

今回本研究グループは、グラフェンと六方晶窒化ホウ素のシートを積層した超格子構造を作製し(図1)、そのグラフェン超格子構造に電気伝導を測定するための電極を取付けたグラフェン超格子デバイスを作製しました(図2)。作製したデバイスの電気伝導測定から、世界最高水準の高い移動度と、素子内を散乱されずに伝導するバリスティック(弾道)伝導現象<sup>(8)</sup>を確認し、さらに超格子構造を反映した量子ホール効果<sup>(9)</sup>を観測しました(図3)。得られた実験データから作製した超格子の構造を解析することができ、グラフェンと六方晶窒化ホウ素の結晶方位は1度以下の角度で揃い、モアレ超格子構造を形成していることがわかりました。このようなグラフェンと六方晶窒化ホウ素から構成される超格子構造では、電子はバレーという隠れた自由度を持ち、電荷の移動に伴って電流が生じるのと同様に、バレー流というものが電荷の流れを伴わずに発生することが予測されています。我々は非局所測定法を用いて、電気的な信号をバレー流にまず変換し、数マイクロメートルにおよぶ伝送の後にまた逆の変換をおこなうことによるバレー流の電気的検出を行い、量子化抵抗( $h/2e^2 = 12.9 \text{ k}\Omega$ ,  $h$ はプランク定数,  $e$ は素電荷)オーダーの巨大なシグナルとして検出することに世界で初めて成功しました(図4)。さらに、デバイスの端(エッジ)に局在した電流が現象を支配している、量子バレー流の可能性を確認しました。

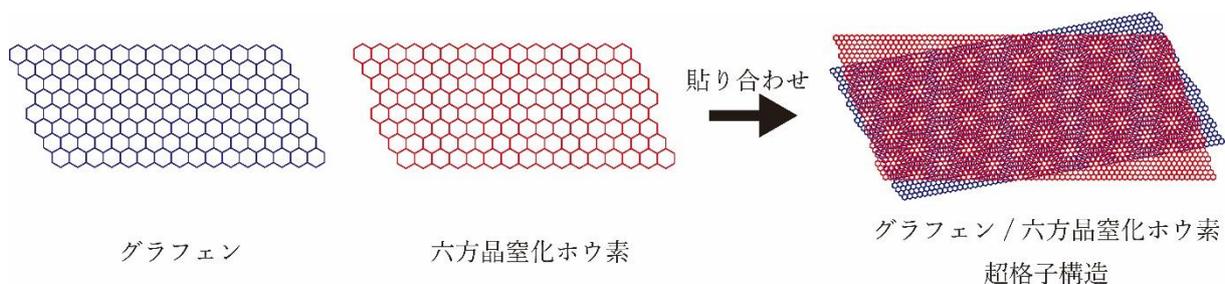


図1: グラフェンと六方晶窒化ホウ素によって形成されるモアレ超格子構造の模式図

蜂の巣型の周期構造を持つグラフェンと六方晶窒化ホウ素を貼り合わせることによって、それぞれの蜂の巣構造よりも長い周期を持つモアレ構造が形成されます。図は2つのシートを10度ずらして重ね合わせたもので、角度のずれが小さいほどより長い周期を持ちます。グラフェンと六方晶窒化ホウ素の蜂の巣構造の大きさが同じではないことから、完全に角度を揃えてもモアレ構造が形成されます。

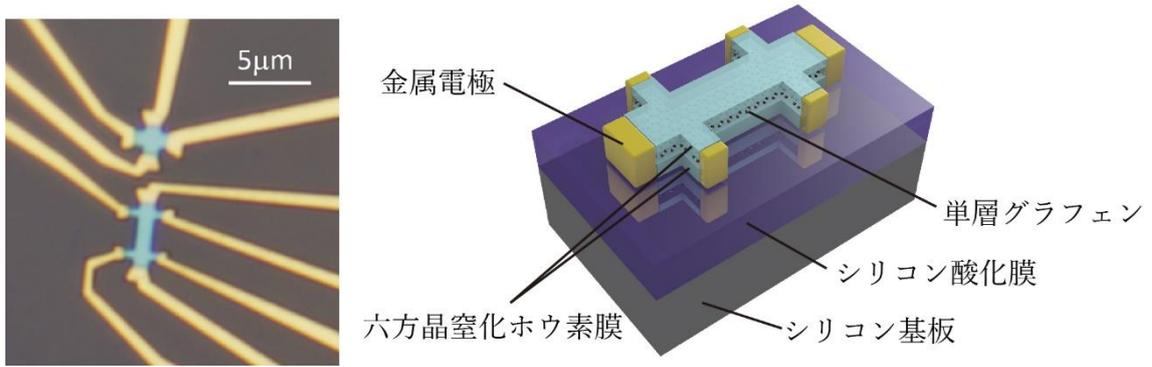


図2: グラフェンと六方晶窒化ホウ素で作製した原子層超格子デバイス

グラフェンと六方晶窒化ホウ素のシートを貼りあわせて作製したグラフェン超格子デバイス。左図は作製したデバイスの光学顕微鏡写真で右図はその模式図。グラフェンを六方晶窒化ホウ素膜ではさみこみ、デバイス形状に加工後、金属電極を取り付けています。このときグラフェンの端（エッジ）と金属電極が1次元的に接合しています。

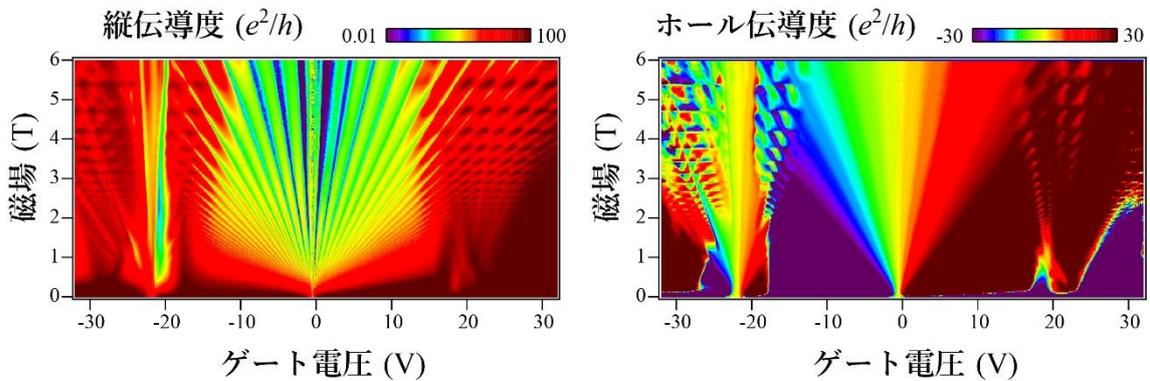


図3: 量子ホール効果と超格子構造に対応する'蝶'

磁場下での電気伝導度（縦伝導度とホール伝導度，単位 $[e^2/h]$ ， $e$ は素電荷， $h$ はプランク定数）のカラースケールプロット。現れるパターンは量子ホール効果と超格子構造に対応し、ホフスタッターの蝶(Hofstadter's butterfly)と呼ばれることもあります。

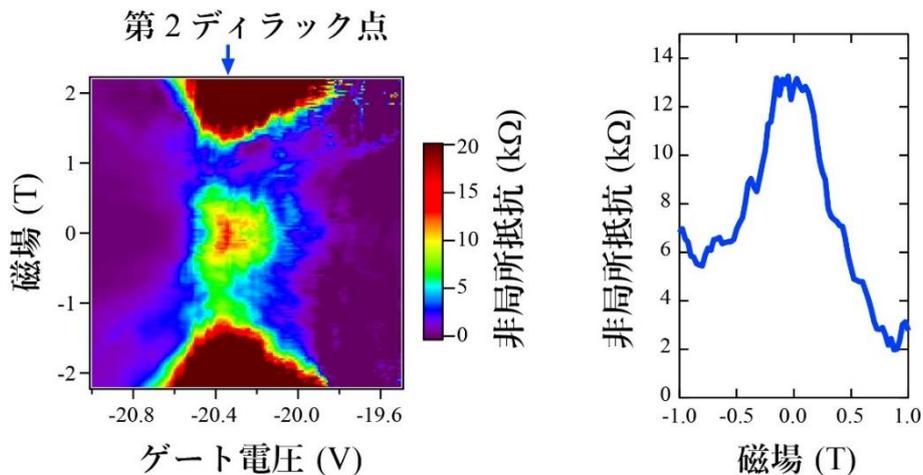


図4: バレー流生成に対応する巨大な非局所抵抗シグナル

グラフェン超格子デバイスにおいて電氣的な信号をバレー流にまず変換し、伝送の後にまた逆の変換をおこなうことによって非局所的な電気信号としてバレー流を検出することができます。左図は第2ディラック

ク点と呼ばれるバレー流が生成される領域近傍での非局所抵抗のカラースケールプロットで、右図は第 2 ディラック点での非局所抵抗の磁場依存性を示しています。ゼロ磁場下において量子化抵抗( $h/2e^2 = 12.9 \text{ k}\Omega$ )オーダーの巨大なシグナルとしてバレー流を検出し、さらに磁場によるスイッチによってシグナルが大きく減少する様子を観測しました。

## 今後の展開

バレー自由度を用いたエレクトロニクスはバレートロンクスとも呼ばれ、近年の Internet of Things(IoT)に資する低消費電力素子の候補の一つとして注目されています。トポロジカルな原理<sup>(10)</sup>による量子バレー流の基礎科学的研究をベースに、将来のデバイス応用を目指し、バレーという隠れた自由度を外部から制御する量子光学的干渉素子<sup>(11)</sup>の開発を現在進めています。また、量子の世界の波動性が巨視的なレベルで現れる超伝導などと組み合わせたトポロジカルな超伝導量子情報素子の開発も今後期待されます。

## 掲載論文

題目： Observation of the quantum valley Hall state in graphene superlattices

著者： Katsuyoshi Komatsu, Yoshifumi Morita, Eiichiro Watanabe, Daiju Tsuya, Kenji Watanabe, Takashi Taniguchi, and Satoshi Moriyama

雑誌： Science Advances

掲載日時： 現地時間 2018 年 5 月 18 日午後 2 時（日本時間 19 日午前 3 時）

## 用語解説

(1) 内部自由度：物質の持つ 3 次元空間の運動の自由度以外の、内在する‘隠れた’自由度。電子の持つ電荷やスピン、また素粒子物理学の分野では、クォークなどの素粒子が他の内部自由度（カラーなどと呼ばれます）を持つことが知られています。

(2) バレー/バレー流：固体のなかの準粒子、特にシリコンなどの半導体の準粒子は通常電荷やスピンの加えて、バレーと呼ばれる量子力学的な内部自由度を持つことがあります。電荷の移動に伴って電流が生じるのと同様に、バレー流というものが電荷の流れを伴わずに発生することがありうることから、近年、新しい低消費電力素子の動作原理として注目されています。

(3) グラフェン：炭素原子が蜂の巣状に並んだシートからなる層状物質であるグラファイト（黒鉛）から一原子層を取り出したもの。2004 年に初めてグラフェンの取り出しと電気伝導測定に成功したガイムとノボセロフは、その功績により 2010 年にノーベル賞を受賞しました。

(4) 六方晶窒化ホウ素：ホウ素と窒素がグラフェンと同様に蜂の巣に並んだシートからなる層状物質。電氣的性質は、バンドギャップの無いグラフェンとは異なり約 6 eV のバンドギャップを持つ絶縁体であり、グラフェンを含めた多くの原子層薄膜材料の良質な基板材料として注目されています。さらにグラフェンとは蜂の巣格子の大きさが非常に近い（格子不整合が小さい）ことから、本研究で作製した超格子構造が実現されました。物質・材料研究機構の渡邊・谷口らが開発した六方晶窒化ホウ素の結晶は現在、高品質グラフェンデバイスを追求する世界中の研究者から注目され、多くの成果を生み出しています。

(5) (モアレ)超格子デバイス：複数の（例えば半導体）物質を積み重ね、人工的に長周期の変調を施したデバイス。材料を人工的にデザインして固体電子の量子状態を制御しようという超格子物理の研究は、1973 年にノーベル物理学賞を受賞した江崎らの超格子の提案から、富士通研究所の三村の高電子移動度トランジスタ(HEMT)に至るまで、日本には半導体超格子の伝統があります。今回、格子不整合が小さく、同じ蜂の巣構造を持つ六方晶窒化ホウ素とグラフェンの結晶方位を揃えて貼り合わせることにより、モアレ長周期構造を持つ超格子（モアレ超格子）デバイスを実現しました。

(6) 移動度：固体において、電場の下での電子の移動のしやすさをしめす量。今回の実験では温度 5 K で

約 250,000 cm<sup>2</sup>/Vs のキャリア移動度を観測し、世界最高レベルの高移動度グラフェン超格子デバイスを実現しました。

(7)相対論的準粒子：固体のなかでは、電子は‘環境’の影響をうけて、‘衣を着た’粒子として現れ、準粒子と呼ばれます。グラフェンにおいて準粒子は、相対性理論および量子力学によって記述される相対論的粒子であるディラック粒子として現れます。

(8)バリスティック（弾道）伝導：固体中の電子が散乱されずにデバイス内を伝導する現象。電子が散乱されずに動ける長さ（平均自由行程）が素子のサイズと同等、もしくは大きくなると実現できます。平均自由行程は電子の移動度と関連し、今回の研究では 2~3 マイクロメートルで、作製した素子のサイズ（2.5 マイクロメートル）とほぼ同等になっています。

(9)量子ホール効果：2次元電子系に対し垂直に強磁場をかけると、新しい物質の状態（量子ホール状態）が実現します。そこではホール伝導度が量子化され、 $e^2/h$  を単位としてその整数/分数倍の値をとり、乱れなどによる‘変形’に対して安定な性質をもちます。

(10)トポロジカルな原理/性質：図形の連続的な変形に対して不変な特徴を、その図形のトポロジカルな性質といいます。固体における電子の集団も同様なトポロジカルな性質を持つことがあり、量子ホール状態もその例です。このような視点を導入した先駆的な業績などにより、サウレスらは2016年にノーベル物理学賞を受賞しました。たとえば、サウレス・甲元らによるホール伝導度のトポロジカルな表式である TKNN 公式は、現代の物理学において重要な役割を果たしています。

(11)量子干渉効果/干渉素子：波はその性格としてお互いに強め合い弱めあう、所謂干渉効果があります。光の波としての性格を利用した測定装置を干渉計といいます。原子・分子の世界では、物質である電子も波としての性格を現すことがあり、その結果、干渉効果をしめすことがあります。そのような性質を利用した素子を量子干渉素子といいます。

#### 本件に関するお問い合わせ先

（研究内容に関すること）

国立研究開発法人物質・材料研究機構 国際ナノアーキテクトゥクス研究拠点量子デバイス工学グループ  
主任研究員 森山 悟士（もりやま さとし）  
E-mail: MORIYAMA.Satoshi@nims.go.jp  
TEL: 029-860-4405

（報道・広報に関すること）

国立研究開発法人物質・材料研究機構 経営企画部門 広報室  
〒305-0047 茨城県つくば市千現 1-2-1  
TEL: 029-859-2026, FAX: 029-859-2017  
E-mail: pressrelease@ml.nims.go.jp

国立大学法人群馬大学 理工学部庶務係広報担当  
〒376-8515 群馬県桐生市天神町 1-5-1  
TEL: 0277-30-1011, FAX: 0277-30-1020  
E-mail: t-kouhou@jimu.gunma-u.ac.jp