

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成 25 年 6 月 10 日現在

機関番号：12601

研究種目：基盤研究(B)

研究期間：2009～2011

課題番号：21340094

研究課題名（和文）

グラフェンの磁場中伝導現象における幾何学的効果

研究課題名（英文）

Geometric Effect in High-Magnetic-Field Transport in Graphene

研究代表者

長田 俊人 (OSADA TOSHIHITO)

東京大学・物性研究所・准教授

研究者番号：00192526

研究成果の概要（和文）：

本研究はグラフェンの磁場中電気伝導における新しい幾何学的効果の探索を企図したものであり、特に異なる量子ホール相の接合界面に生ずるエッジ状態とその伝導特性に関する研究が中心となった。2層グラフェンの pnp 接合、単層-2層グラフェンヘテロ接合について量子ホールエッジ伝導を調べた結果、前者では並行エッジ状態の mixing が、後者では逆行エッジ状態の完全な相殺が起こることが明らかになった。

研究成果の概要（英文）：

This study aimed to search for novel geometric effects in magnetotransport of graphene. We have mainly studied the quantum Hall edge transport along the graphene junctions. We have experimentally investigated the p/n/p junctions of bilayer graphene and the monolayer-bilayer hetero-junctions of graphene. We have clarified that the full-mixing of parallel edge states and the perfect cancelling of counter-moving edge states occur along the p/n junction of bilayer graphene and the monolayer-bilayer graphene hetero-junction, respectively.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2009 年度	10,800,000	3,240,000	14,040,000
2010 年度	2,300,000	690,000	2,990,000
2011 年度	2,100,000	630,000	2,730,000
年度			
年度			
総計	15,200,000	4,560,000	19,760,000

研究分野：数物系科学

科研費の分科・細目：物理学・物性Ⅱ

キーワード：分子性固体・有機導体 メゾスコピック系・局在 グラフェン 量子ホール効果

1. 研究開始当初の背景

2005年に英国 Manchester 大学の A. K. Geim のグループが劈開法によってグラファイトから単層グラフェンを単離することに成功して以来、Geim 教授および米国 Columbia 大学 P. Kim 教授の2つのグループを中心に、単

層および少数層グラフェンの物性研究が世界的に急速に進展した。単層グラフェンは、単原子層からなる究極の2次元電子系であると同時に、円錐状の Dirac コーン分散により伝導帯と価電子帯が点接触してゼロギャップとなった massless Dirac 電子系である点が著しい特徴である。この系では後方弾性散

乱が抑制され、室温でも μm 近い極めて長い平均自由行程が実現し、基礎的・応用的に大きな注目を集めた。本研究を申請・開始した2008年～2009年は、世界的にグラフェンに関する各種の研究が出揃い、国内でも本グループを含む複数のグループがグラフェンの作製に成功して研究を開始した時期にあっている。

2. 研究の目的

本研究の目的は、単層および少数層グラフェンの磁場中伝導現象に現れる Dirac 電子系特有の位相や形状に関連した幾何学的効果の実験的探索と解明である。対象とする問題は①量子 Hall 状態の端状態、②複数層グラフェンの Dirac コーン構造、③Dirac 電子のメゾスコピック効果である。

3. 研究の方法

既存のプロセス装置類（電子線リソグラフィ装置、蒸着装置、イオンビームエッチング装置）と、研究費で新たに導入したスパッタ装置を用いて、各種グラフェン素子を作製した。作製した素子について既存の 10T 超伝導磁石システムと電気伝導測定機器を用いて強磁場下の電気伝導特性を調べた。

4. 研究成果

本研究で得られた知見は下の通りである。

(1) グラフェン素子の作製・評価技術

微細構造グラフェン素子や局所的キャリア濃度変調用トップゲート付き FET 素子の作製手順を確立した。光学顕微鏡像の色調デジタル増幅によるグラフェンの可視化、 O_2 イオンビーム照射によるグラフェンのエッチング、 SiO_2 によるトップゲート絶縁膜形成、さらに電気的評価の静電対策が重要であった。

(2) 40T 級パルス強磁場を用いたディラック分散のスピンスplit効果の観測

既存の 20kJ 小型コンデンサ電源で小型パルス磁石を駆動する装置を整備し、ピーク値 40T・幅 5ms のパルス磁場下でグラフェンの直流伝導測定を行うことに成功した。しかし平行強磁場の印加によるスピンスplitの効果 (Dirac 点状態密度の増大) は観測されなかった。これは散乱による準位ボケがスピンスplitより大きいためであると見積もられた。

(3) 多層グラフェン FET のゲート特性

多層グラフェン FET 素子の抵抗のゲート電圧依存性における電荷中性点ピークの顕

著な磁場依存性を見出した。この原因として層間スクリーニング長の磁場依存性を提案した。

(4) 量子ホール接合界面のエッジ伝導

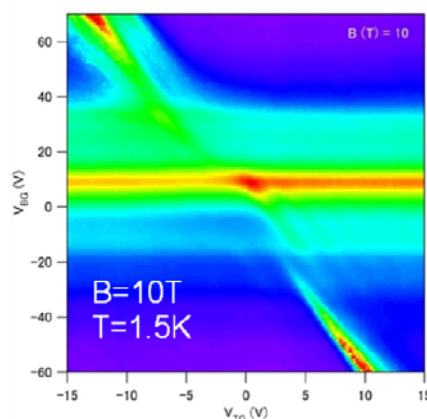
本研究を進めるにつれて研究の中心を量子ホール接合界面のエッジ状態に置くようになった。接合系はトポロジカル相の幾何学的効果であるバルク-エッジ対応の研究に適しているからである。

①単層グラフェン pnp 接合

単層グラフェンの一部の領域にトップゲート電極を付加してキャリア数や極性を変えたバイポーラ接合構造(p/n/p 型・n/p/n 型)を作製し量子 Hall 状態におけるコンダクタンスの分数量子化を観測し、Williams らによる端状態の full-mixing を示唆した先行研究の結果を確認した。

②2層グラフェン pnp 接合

同様の実験を2層グラフェンのバイポーラ接合 (p-n 接合) 構造について世界で初めて行った。2層系ではトップゲート電圧はキャリア数変調の他にエネルギーギャップを開く効果も持つ。これは通常は現れない $\nu=0$ 量子ホール状態を発現させ、コンダクタンスの分数量子化に影響を与える。実験結果は、 $\nu=0$ 量子ホール状態の存在とエッジ状態の full-mixing を仮定した Landauer-Buttiker エッジ伝導モデルで良く説明された。

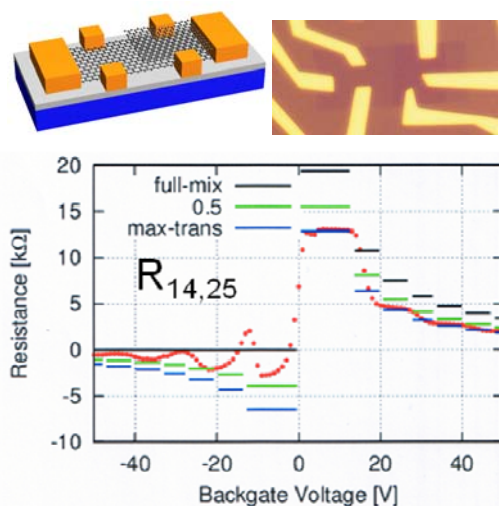


【図1】2層グラフェン p/n/p 接合素子の抵抗のトップ/バックゲート電圧依存性

③単層-2層グラフェン接合

単層グラフェンと2層グラフェンのヘテロ接合構造について、同様の実験を世界で初めて行った。単層-2層接合は機械的劈開法でグラフェンを作製する際に偶然生じたものを加工して使用した。接合をまたぐ2端子コンダクタンスは量子化を示すが、接合界面でのエッジ状態の mixing の有無を判定する実験精度は得られなかった。そこで単層側・

2層側に複数の電圧端子を有する多端子試料を作製して実験を行った。多端子量子ホール抵抗を Landauer-Buttiker エッジ伝導モデルで解析した結果、mixing の起こる pn 接合系とは異なり、対向するエッジ状態の完全な相殺 (maximum-transmission) を示唆する結果を得た。しかし2層グラフェン部の移動度が低く完全な量子 Hall 状態にないという実験上の問題点が判明したため、決定的な結論を下すに至らなかった。



【図2】単層-2層グラフェン接合素子の接合をまたぐ Hall 抵抗のゲート電圧依存性

そこで研究期間を延長し (平成 24 年度への繰越)、2層部分の移動度を向上させるため空中懸架(suspended)構造化を試みたが、期待された移動度の向上は達成できなかった。低移動度の問題の解決は今後の課題であるが、平成 25 年夏に米国強磁場施設の 30T 級強磁場下で実験を行い、移動度問題を克服するとして対向量子 Hall エッジ状態の相殺の確認を行う予定である。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

〔雑誌論文〕 (計 7 件)

- ① "Magnetotransport in organic Dirac fermion system at the quantum limit: Interlayer Hall effect and surface transport via helical edge states", Toshihito Osada, Phys. Status Solidi B **249**, No.5, 962-966 (2012), 査読有, DOI:10.1002pspb.201100587.
- ② "Anomalous Interlayer Hall Effect in Multilayer Massless Dirac Fermion System at the Quantum Limit", Toshihito Osada, J. Phys. Soc. Jpn. **80**, No.3, 033708-1-4 (2011). 査読有, DOI: 10.1143/JPSJ.80.033708.

- ③ "Magnetotransport of Massless Dirac Fermions in Multilayer Organic Conductors", T. Osada, K. Uchida, and T. Konoike, J. Phys.: Conf. Ser. **334**, 012049-1-5 (2011), 査読有, DOI:10.1088/1742-6596/334/1/012049.

- ④ "Quantum Hall Transport across Monolayer-Bilayer Boundary in Graphene", A. Tsukuda, H. Okunaga, D. Nakahara, K. Uchida, T. Konoike, and T. Osada, J. Phys.: Conf. Ser. **334**, 012038-1-5 (2011), 査読有, DOI:10.1088/1742-6596/334/1/012038.

- ⑤ "First observation of angle-dependent Stark cyclotron resonance in bulk crystals: High-electric-field interlayer magnetotransport in a layered organic conductor", A. Kumagai, T. Konoike, K. Uchida, and T. Osada, Physica B **405**, S202-S204 (2010), 査読有, DOI: 10.1016/j.physb.2009.11.095.

- ⑥ "Angle-dependent magnetoresistance oscillations and magnetic breakdown in α -(BEDT-TTF)₂KHg(SCN)₄", K. Uchida, T. Konoike, and T. Osada, Physica B **405**, S221-S223 (2010), 査読有, DOI:10.1016/j.physb.2010.02.031.

- ⑦ 「グラファイトの磁気輸送とディラック電子」、長田俊人・今村大樹・内田和人・鴻池貴子、固体物理 **45**, No.11, 599-610 (2010), 査読なし, ISSN:0454-4544.

〔学会発表〕 (計 23 件)

- ① "Surface Magnetotransport due to Helical Edge State in the Organic Dirac Fermion system at the Quantum Limit", T. Osada, M. Sato, K. Uchida, and T. Konoike, International Symposium on Materials Science Opened by Molecular Degrees of Freedom (MDF2012), 2012 年 12 月 1-4 日, 宮崎.
- ② "Surface transport due to helical edge state in the organic Dirac fermion system under high magnetic fields", T. Osada, M. Sato, K. Uchida, and T. Konoike, The 20th International Conference on High Magnetic Fields in Semiconductor Physics (HMF-20), 2012 年 7 月 22-27 日, Chamonix (France).
- ③ 「グラフェン単層 2 層接合における量子ホール伝導と界面状態」 (25aSB-5), 上原史也, 内田和人, 鴻池貴子, 長田俊人, 日本物理学会第 67 回年次大会, 2012 年 3 月 24-17 日, 関西学院大学 (兵庫) .
- ④ 「強磁場下多層ディラック電子系における

ヘリカル表面状態の層間伝導特性」(25aBK-8), 長田俊人, 日本物理学会第67回年次大会, 2012年3月24-17日, 関西学院大学(兵庫).

⑤ "Magnetotransport in Organic Dirac Fermion System at the Quantum Limit: Interlayer Hall Effect and Surface Transport via Helical Edge State", T. Osada, The 9th International Symposium on Crystalline Organic Metals, Superconductors and Ferromagnets (ISCOM 2011), 2011年9月25-30日, Gniezno (Poland).

⑥ 「グラフェン単層2層接合における量子ホール界面状態」(21pTE-5), 上原史也, 佃明, 内田和人, 鴻池貴子, 長田俊人, 日本物理学会2011年秋季大会, 2011年9月21-24日, 富山大学(富山).

⑦ 「スプリットゲートを持つ二層グラフェンの量子伝導」(21pTE-14), 内田和人, 鴻池貴子, 長田俊人, 日本物理学会2011年秋季大会, 2011年9月21-24日, 富山大学(富山).

⑧ 「低温強磁場における有機多層ディラック電子系のヘリカル表面状態 II」(21pTR-8), 長田俊人, 佐藤光幸, 鴻池貴子, 日本物理学会2011年秋季大会, 2011年9月21-24日, 富山大学(富山).

⑨ 「グラフェン接合系における量子ホール端伝導」(23pTE-7: シンポジウム講演), 長田俊人, 日本物理学会2011年秋季大会, 2011年9月21-24日, 富山大学(富山).

⑩ "Quantum Hall Transport in Monolayer-Bilayer Graphene Heterojunction", T. Osada, A. Tsukuda, H. Okunaga, and K. Uchida, The 19th International Conference on Electronic Properties of Two-Dimensional Systems (EP2DS19), 2011年7月25-29日, Tallahassee (USA).

⑪ "Interlayer Magnetotransport of Massless Dirac Fermions in Zeropgap Organic Conductors", T. Osada, The 19th International Conference on Electronic Properties of Two-Dimensional Systems (EP2DS19), 2011年7月25-29日, Tallahassee (USA).

⑫ 「単層/2層グラフェン接合系の磁場中電気伝導 II」(24pRA-2), 佃明, 奥永洋夢, 長田俊人, 内田和人, 鴻池貴子, 日本物理学会2010年秋季大会, 2010年9月23-26日, 大阪府立大学(大阪).

⑬ 「2層グラフェン n-p-n 接合系における量子ホール伝導」(24pRA-3), 奥永洋夢, 長田俊

人, 佃明, 内田和人, 鴻池貴子, 日本物理学会2010年秋季大会, 2010年9月23-26日, 大阪府立大学(大阪).

⑭ 「多層グラフェン FET における層間スクリーニング長の磁場依存性」(23pRA-6), 内田和人, 長田俊人, 鴻池貴子, 日本物理学会2010年秋季大会, 2010年9月23-26日, 大阪府立大学(大阪).

⑮ "Magnetotransport in organic Dirac fermion systems", T. Osada, K. Uchida, and T. Konoike, ISSP-MDF Joint International Workshop on Spin-Related Phenomena in Organic Materials, 2010年7月1-3日, 柏(千葉).

⑯ 「単層/2層グラフェン接合系の磁場中電気伝導」(23aGS-6), 佃明, 長田俊人, 中原大介, 内田和人, 鴻池貴子, 日本物理学会第65回年次大会, 2010年3月20-23日, 岡山大学(岡山).

⑰ 「トップゲートを用いたグラフェン FET 素子の磁気輸送特性」(23aGS-5), 中原大介, 長田俊人, 内田和人, 鴻池貴子, 日本物理学会第65回年次大会, 2010年3月20-23日, 岡山大学(岡山).

⑱ 「多層グラフェン FET における層間スクリーニング長の磁場依存性」(20aGS-11), 内田和人, 長田俊人, 今村大樹, 鴻池貴子, 日本物理学会第65回年次大会, 2010年3月20-23日, 岡山大学(岡山).

⑲ 「多層 Dirac 粒子系の強磁場 Hall 効果」(21aGT-11), 長田俊人, 日本物理学会第65回年次大会, 2010年3月20-23日, 岡山大学(岡山).

⑳ "Dirac Fermion and Magnetotransport in Multilayer Graphite", T. Osada, D. Nakahara, S. Sugawara, H. Imamura, K. Uchida, and T. Konoike, International Symposium on Multifunctional Organic Materials and Devices (MOMD), 2009年12月11-12日, 長津田(千葉).

[図書] (計1件)

① 「グラフェンの機能と応用展望 II」(齊木幸一郎監修) 第16章「グラフェンの量子ホール伝導」、長田俊人, pp.169-184 (シーエムシー出版、東京、2012).

[その他]

ホームページ等

<http://osada.issp.u-tokyo.ac.jp/>

6. 研究組織

(1)研究代表者

長田 俊人 (OSADA TOSHIHITO)
東京大学・物性研究所・准教授
研究者番号：00192526

(2)研究分担者

鴻池 貴子 (KONOIKE TAKAKO)
東京大学・物性研究所・助教
研究者番号：70447316

内田 和人 (UCHIDA KAZUHITO)
東京大学・物性研究所・技術専門職員
研究者番号：20422438

(3)連携研究者

なし