

平成 30 年 5 月 24 日現在

機関番号：32661

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2013～2017

課題番号：25287089

研究課題名(和文) 相対論的電子を有する有機導体へのキャリア注入と量子伝導現象

研究課題名(英文) Effects of carrier doping on the quantum transport phenomena in organic massless Dirac electron system

研究代表者

田嶋 尚也 (TAJIMA, Naoya)

東邦大学・理学部・教授

研究者番号：40316930

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 14,800,000円

研究成果の概要(和文)：我々は高圧下で質量ゼロのディラック電子系を実現する有機導体を発見した。最初のバルクなディラック電子系である。さらに、グラフェンと異なる傾いたディラックコーンを持つ。ディラック電子系の特徴の1つは磁場下で現れる。通常の導体とは異なる特別なランダウ準位構造を形成するのである。しかし、この系はフェルミ準位が常にディラック点にあるために、これまで特別なランダウ準位構造を検出できていなかった。本研究では、この系へのキャリア注入手法を確立し、ディラック電子系の特徴であるベリー位相を含む量子振動と半整数量子ホール効果を観測した。さらに、ディラックコーンの線形分散型から補正し、傾きパラメーターを決定した。

研究成果の概要(英文)：We have discovered an organic conductor which 2D massless Dirac electron system was realized under high pressure. This is the first bulk massless Dirac electrons system. Moreover, according to the band calculation, the Dirac cones of this system are highly tilted. Thus, this material belongs to a broader category of 2D massless Dirac electrons system. However, both Shubnikov-de Haas (SdH) oscillations and quantum Hall effect (QHE) have not been observed yet in this system, because the Fermi level is always located at the Dirac point. Thus, the relativistic Landau levels has not directly been obtained yet. In this work, we succeeded in injecting carriers into this system. Significant is that SdH oscillations whose phase was modified by Berry's phase and half integer QHE were detected at low temperature. The detail examination of this quantum phenomena led to the reconstruction of the Dirac cones. Moreover, the tilt parameters of the Dirac cone were determined.

研究分野：固体物理学

キーワード：有機導体 ディラック電子 量子ホール効果 ランダウ準位

## 1. 研究開始当初の背景

グラフェンで質量ゼロの電子系(ディラック電子)が実現されて以来、グラファイト、ピスマス、トポロジカル絶縁体、さらには鉄系超伝導体などでもディラック電子が発見され、最近、固体中のディラック電子が大きく注目されている。理由は、2つの円錐型バンドが上下から角突き合わせた特殊なエネルギー構造(ディラックコーン)をもつことにより、素粒子ニュートリノと同様、質量ゼロの電子が固体の中に存在し、それが電気伝導性の主役となって通常の金属や半導体では見られない電気伝導性を示すことにある。

一方で、我々は1.5GPa以上の高圧下にある2次元層状構造の有機導体 $\alpha$ -(BEDT-TTF)<sub>2</sub>I<sub>3</sub>で、ディラック電子系を発見した。グラフェンと異なり、世界で最初にバルク(多層構造)で実現した2次元ゼロギャップ伝導体なのである。

ディラック電子系の特徴の1つは磁場下で見ることが出来る。通常、磁場 $B$ をかけると固体中の電子のエネルギーは、とびとびの値( $n$ )をとる(ランダウ準位)。通常の導体のランダウ準位は $E_n \propto nB$ と表されるが、ディラック電子系では $E_n \propto (|n||B|)^{1/2}$ で記述される特別な構造をとる。特に、 $n=0$ のゼロモードと呼ばれる特別なランダウ準位が、ディラックコーンの接点(ディラック点)の位置に磁場に依らず常に現れることが特長である。我々は、層間方向の電気抵抗測定からゼロモードの観測に成功した。ゼロモードの縮重度による磁場強度に反比例する大きな負の層間磁気抵抗を発見したのである。この結果は、長田(東大物性研)の理論結果と定量的に一致する。これがバルク(多層)なディラック電子系の特徴の1つである。

## 2. 研究の目的

$\alpha$ -(BEDT-TTF)<sub>2</sub>I<sub>3</sub>はバルクな2次元ディラック電子系の電気伝導特性を調べるのに適した物質であると言える。しかし、この系のフェルミ準位は常にディラック点にあり、これまでに十分なキャリア注入を実現する手法が見出されていないために、ゼロモード以外のランダウ準位は未だ直接観測されていない。我々は、バルクなディラック電子系の新たな特性、傾いたディラックコーンの効果による物理をどう展開できるのかを明らかにするには、フェルミ準位をディラック点から移動させ、特別なランダウ準位に起因した量子磁気抵抗振動(シュブニコフ・ド・ハース振動:SdH振動)や量子ホール効果の観測と詳細な解析が重要であると考え。ディラック電子系では、 $\pi$ のベリー位相をもつため、その効果はSdH振動位相が通常の電子のものとは $\pi$ ずれて現れる。一方、量子ホール効果への顕著な効果は、充填率 $\nu = \pm 4(n+1/2)$ に半整数の因子が存在することにある。我々は、低温・磁場下の量子伝導現に $\alpha$ -(BEDT-TTF)<sub>2</sub>I<sub>3</sub>

のバルクなディラック電子系および傾いたディラックコーンの特徴が現れると考える。

本研究では、 $\alpha$ -(BEDT-TTF)<sub>2</sub>I<sub>3</sub>を舞台にしてバルクなディラック電子系の基礎学理を構築することを目指し、 $\alpha$ -(BEDT-TTF)<sub>2</sub>I<sub>3</sub>へキャリアを注入する方法を確立すること、SdH振動や量子ホール効果の観測およびランダウ準位構造を明確にすることが目的である。

## 3. 研究の方法

本研究は、物理と化学が協力し、実験と理論が連携を取る以下研究体制で遂行する。

- ・デバイス作製: 研究分担者(須田)はデバイス作製を実践する。

- ・物性評価: 研究代表者(田嶋)はデバイスの物性評価を磁気抵抗とホール効果測定から行い、量子ホール状態を観測する。一方、研究分担者(西尾)は熱的性質を評価する。

- ・輸送現象理論: 研究分担者(森成)は測定結果を理論的に評価し、この系の量子輸送現象の理論構築を行う。

以下が、本研究の研究内容と方法である。

(1)  $\alpha$ -(BEDT-TTF)<sub>2</sub>I<sub>3</sub>へのキャリア注入

本研究を円滑に遂行する上で最も重要なことは、如何にキャリアをバルクな試料へ注入できるかである。しかも、 $\alpha$ -(BEDT-TTF)<sub>2</sub>I<sub>3</sub>でディラック電子系を実現するには高圧力下を必要とする。本研究では100nm以下の厚みの薄板結晶とプラスチック等の基板を用い、試料をチャンネルとした以下のトランジスタ構造を作製する。

## (2) 量子輸送現象の観測

ディラック点近傍のハミルトニアンはスピンと同様のパウリ行列を用いて記述できるが、そのことが電子の周回軌道にベリー位相をもたらす。ベリー位相がディラック電子系を特徴付ける最も重要な物理量であるが、これは低温で量子現象に検出できる。本研究では、 $\alpha$ -(BEDT-TTF)<sub>2</sub>I<sub>3</sub>の高圧力下で、ディラック電子系に特徴的な量子磁気抵抗振動と量子ホール効果を観測する。

## (3) ディラックコーンの補正

$\alpha$ -(BEDT-TTF)<sub>2</sub>I<sub>3</sub>のディラック電子系は圧力・温度相図上で電荷秩序状態に隣接する。電荷秩序絶縁体相のように強相関電子系に隣接したディラック電子系はこの物質が初めてである。本研究では、強相関ディラック電子の物理展開を目指して、この系にキャリア注入し、ディラックコーン対の対称性は保たれているのかを調べる。

## (4) ディラックコーンの傾き

この系のディラック電子の性質を理解するのに、ディラックコーンが傾いていることが1つの重要な要素である。本研究では、傾いたディラックコーンの特徴的な性質を

見出すため、傾きの方向や傾き方など重要なパラメータを明らかにする。

### (5) スピン反転効果

我々は多層ディラック電子系である有機導体 $\alpha$ -(BEDT-TTF) $_2$ I $_3$ において、面間磁気抵抗にスピン反転効果が存在することが実験的に示唆してきた。この問題について、層間のクーロン相互作用に着目した解析を行う。

### (6) カイラリティ効果

我々は、有機導体 $\alpha$ -(BEDT-TTF) $_2$ I $_3$ において、静磁場下起電力が生じる現象が実験的に観測してきた。この問題について、異方的なスピン間の相互作用を仮定して基底状態を数値計算によって求める。

## 4. 研究成果

### (1) $\alpha$ -(BEDT-TTF) $_2$ I $_3$ へのキャリア注入

：論文 [2, 4, 8, 10, 14]

以下の手法で高圧力下におけるキャリア注入方法を確立し、量子現象を観測することに成功した。

**接触帯電法**：100 nm 程の厚みの試料をわずかに負または正に帯電した基板に試料を固定しただけのユニークな手法（接触帯電法）による正孔または電子注入、さらには量子ホール効果観測に初めて成功した。基板の種類を変えることで、ドーパ量とキャリアの種類が制御が可能である。

キャリア注入効果は電気抵抗の温度依存性に見ることができた。図 1 に PEN (polyethylene naphthalate)、PET (poly[ethylene terephthalate])、PC (polycarbonate) 基板上試料の電気抵抗率の温度変化を示す。

7 K 以下の PEN 基板と PC 基板上試料の電気抵抗率の温度依存性に着目する。電気抵抗率は温度  $T$  の低下に伴い減少するが、これは

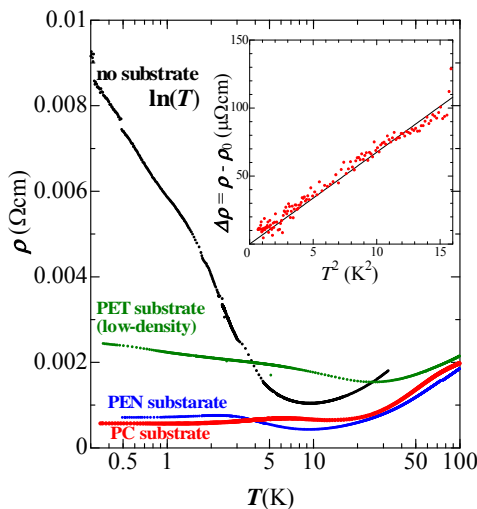


図 1：プラスチック基板上試料の高圧力下電気抵抗率の温度依存性。

キャリアを注入することに成功したことを示す。通常バルク結晶では、電気抵抗率は  $\log T$  に依存して上昇するのである。それに対して、PC 基板上薄片結晶の電気抵抗率が  $T^2$  に依存しているが、これはフェルミ液体状態の特徴の 1 つである。

なお、ホール効果測定から、PEN 基板を用いると正孔が、PC 基板を用いると電子が注入されることを確認した。

### アニールによる電子注入：真空・高温

で試料をアニールすると、I $_3$  分子の欠損により電子注入が実現することを見出した。アニール時間で注入量を制御でき、それに伴う量子現象を実現できた。

### (2) 量子輸送現象の観測

：論文 [2, 4, 8, 10, 14]

この系では、フェルミ準位が常にディラック点にあるために、磁場下でゼロモード以外のランダウ準位を観測できていなかった。そのために、ディラック電子系に特徴的なランダウ準位の観測、量子ホール効果の観測が大きな課題の 1 つであった。本研究では、わずかに負に帯電した基板に試料を固定しただけで、接触帯電法による正孔注入の効果を電気伝導性に検出することに成功した。

本研究の最も大きな成果として、ディラック電子系の特徴である、ベリー位相 $\pi$ を含む SdH 振動と充填率 $\nu = \pm 4(n + 1/2)$ に半整数の因子が存在する量子ホール効果をそれぞれ観測することに成功したことを挙げる。例えば、PEN 基板を用いて正孔注入したデバイスにおける量子磁気抵抗振動と量子ホール効果を図 2 に示す。抵抗  $R_{xx}$  が極小のところでホール抵抗  $R_{xy}$  がプラトーを示すのが量子ホール効果のホールマークである。

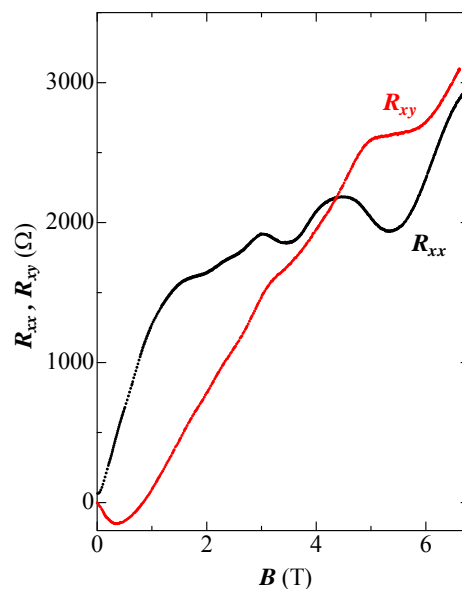


図 2：SdH 振動と量子ホール効果

一方、量子ホール状態で抵抗は  $R_{xx}=0$  を示すのが通常の量子ホール効果である。しかし、この系では、 $R_{xx}$  は有限の値を示す。これは、多層構造へのキャリア注入効果を表している。試料の層数（厚み）依存性とその詳細な解析から、層方向のエネルギーダイアグラムを明らかにした。例えば、5.5 T の磁場下では、界面から第1層目は  $\nu=-6$ 、第2層目は  $\nu=-2$ 、他の層は  $\nu=0$ 、トータルとして  $\nu=-8$  の量子ホール状態にあることを明らかにした。

### (3) ディラックコーンの補正

：論文 [2, 4, 13]

電子注入したデバイスで、高圧力下・極低温・高磁場下で量子磁気抵抗振動を調べた。重要な成果は、高磁場で磁場分の1に対して非周期的な磁気抵抗振動を観測したことである。この現象はディラックコーンが非対称であること、線形分散型からずれていることを示唆する。詳細な解析を行なった結果、ディラック点の周りでハミルトニアンは  $H=\nu_F \sigma p + p^2/2m$  と書け、図 3(b) のようなエネルギー構造をしていることが示唆された。ここで、 $\nu_F$  はフェルミ速度、 $\sigma$  はパウリ行列、 $p$  は運動量、 $m$  は有効質量である。

さらに、この描像をもとに、比熱および熱起電力の測定結果は無理なく理解できた。

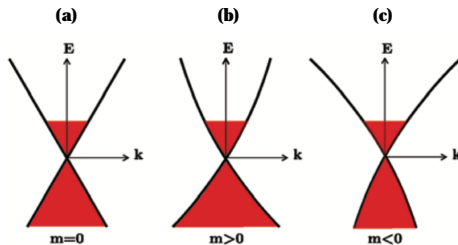


図 3: ディラックコーン。(a)  $m=0$ 。(b)  $m>0$ 。(c)  $m<0$ 。

### (4) ディラックコーンの傾き

：論文 [1]

有機導体におけるディラック電子系では、

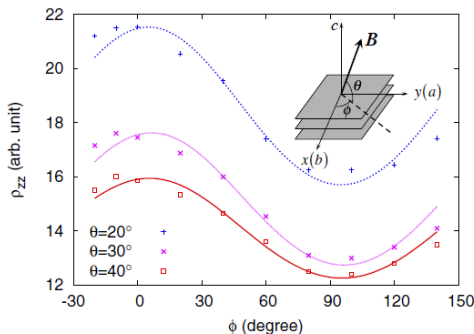


図 4: 面間磁気抵抗の磁場方位角  $\phi$  依存性。 $\theta$  は磁場の傾き角度。データ点は実験データで、実線と点線は理論曲線である。

エネルギー分散が傾いた円錐として記述されることが指摘されていたが実験的には確認されていなかった。この問題について、面間磁気抵抗の磁場方向依存性の解析および面内伝導度の異方性から、傾きのパラメータを決定することに成功した。この系のディラック電子系がローレンツ不変性をやぶるタイプIIとよばれるディラック電子系に非常に近いことが明らかになった(図4)。

### (5) スピン反転効果

：論文 [9, 12]

層状のディラック電子系である有機導体  $\alpha$ -(BEDT-TTF)<sub>2</sub>I<sub>3</sub> において、面間磁気抵抗にスピン反転効果が存在することが実験的に示唆する結果が得られていた。この問題について、層間のクーロン相互作用に着目した解析を行った。少数キャリア系であることから、遮蔽効果がほとんど存在しないため、スピン反転を生じさせる平均場が現れる。この効果を取り入れて、久保公式を用いて磁場下での面間の伝導率を計算し、実験結果と良く一致する結果を得た(図5)。

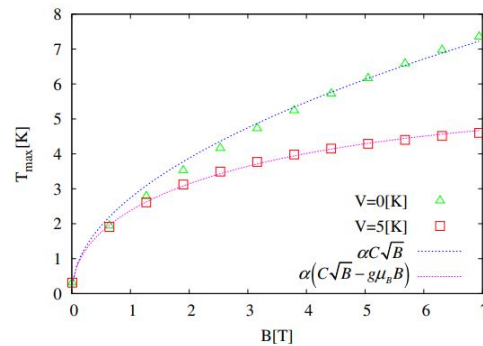


図 5: 磁気抵抗が極大を示す温度の磁場依存性。スピン反転効果がある場合(□)とない場合(Δ)。

### (6) カイラリティ効果

：論文 [5, 6, 7, 11]

我々は、有機導体  $\alpha$ -(BEDT-TTF)<sub>2</sub>I<sub>3</sub> において、静磁場下起電力が生じる現象が実験的に観測した。この問題について、異方的なスピン間の相互作用を仮定して基底状態を数値計算によって求め、時間に依存するベリー位相効果によってスピン起電力が生じることを示した。ディラック電子系の著しい特徴として、電子の運動方向と擬スピンの平行になるカイラリティ効果が知られている。このカイラリティ効果によって、ディラック電子の超伝導状態において、超伝導ギャップにノードが生じる可能性を数値的に超伝導ギャップ方程式を解析することで指摘した。さらに、有機導体におけるディラック電子の安定性が、三角格子のブラケットを貫くフラックスと関係していることを示唆した。

## (7) その他: EuMnBi<sub>2</sub>系

### : 論文 [3]

有機導体と同様にディラック電子系が積層した構造を持つ EuMnBi<sub>2</sub> 系の磁気抵抗を、この系に特徴的な局在磁気モーメントの効果を取り入れて理論的な計算を行い、実験とよく整合する結果を得た (図 6)。

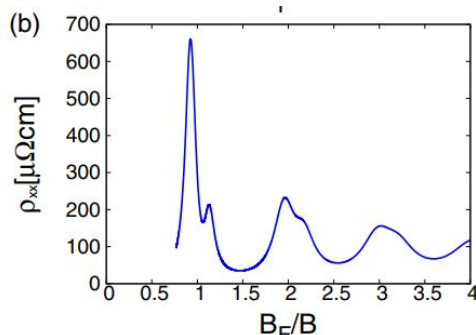


図 6: EuMnBi<sub>2</sub> の面内磁気抵抗の磁場依存性。

## 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 25 件)

- [1] N. Tajima and T. Morinari, “Tilted Dirac Cone Effect on Interlayer Magnetoresistance in  $\alpha$ -(BEDT-TTF)<sub>2</sub>I<sub>3</sub>”, J. Phys. Soc. Jpn., 査読有, 87 (2018) 045002-1-2.  
<https://doi.org/10.7566/JPSJ.87.045002>
- [2] N. Tajima, “Effects of Carrier Doping on the Transport in the Dirac Electron System  $\alpha$ -(BEDT-TTF)<sub>2</sub>I<sub>3</sub> under High Pressure”, Crystals, 査読有, 8 (2018) 126-1-17.  
DOI: 10.3390/cryst8030126
- [3] Y. Iwasaki and T. Morinari, “Magnetotransport in Layered Dirac Fermion System Coupled with Magnetic Moments”, J. Phys. Soc. Jpn. 査読有, 87, (2018) 033706-1-4.  
<https://doi.org/10.7566/JPSJ.87.033706>
- [4] E. Tisserond, J. N. Fuchs, M. O. Goerbig, P. Auban-Senzier, C. M’eziane, P. Batail, Y. Kawasugi, M. Suda, H. M. Yamamoto, R. Kato, N. Tajima and M. Monteverde, “Aperiodic quantum oscillations of particle-hole asymmetric Dirac cones”, EPL, 査読有, 119 (2017) 67001-1-5.  
DOI:10.1209/0295-5075/119/67001
- [5] T. Morinari, “Chirality effect on superconductivity”, J. Phys., Conf. Ser. 査読有, 603 (2015) 012007-1-8.  
DOI: 10.1088/1742-6596/603/1/012007
- [6] F. Piéchon, Y. Suzumura, T. Morinari, “Plaquette chirality patterns for robust zero-gap states in  $\alpha$ -type organic conductor”, J. Phys.: Conf. Ser. 査読有, 603 (2015)

012010-1-14.

DOI: 10.1088/1742-6596/603/1/012010

- [7] K. Kubo and T. Morinari, “Anisotropic spin motive force in multi-layered Dirac fermion system,  $\alpha$ -(BEDT-TTF)<sub>2</sub>I<sub>3</sub>”, J. Phys.: Conf. Ser. 査読有, 603 (2015) 012012-1-6.  
DOI: 10.1088/1742-6596/603/1/012012
  - [8] 田嶋尚也, 佐藤光幸, 鴻池貴子, 長田俊人, “有機ディラック電子系における量子ホール状態”, 固体物理, 査読無, 49 (2014) 229-240.
  - [9] K. Kubo and T. Morinari, “Effect of Interlayer Spin-Flip Tunneling for Interlayer Magnetoresistance in Multilayer Massless Dirac Fermion Systems”, J. Phys. Soc. Jpn., 査読有, 83 (2014) 083701-1-4.  
<http://dx.doi.org/10.7566/JPSJ.83.083701>
  - [10] K. Kajita, Y. Nishio, N. Tajima, Y. Suzumura, and A. Kobayashi, “Molecular Dirac Fermion System -Theoretical and Experimental Approach-”, J. Phys. Soc. Jpn., 査読有, 83 (2014) 072002-1-31.  
<http://dx.doi.org/10.7566/JPSJ.83.072002>
  - [11] K. Sasaki and T. Morinari, “Dirac Fermion State with Real Space  $\pi$ -Flux on Anisotropic Square Lattice and Triangular Lattice”, J. Phys. Soc. Jpn., 査読有, 83 (2014) 034712-1-4.  
<http://dx.doi.org/10.7566/JPSJ.83.034712>
  - [12] K. Kubo and T. Morinari, “Spin-Ordered States in Multilayer Massless Dirac Fermion Systems”, J. Phys. Soc. Jpn., 査読有, 83 (2014) 033702-1-4.  
<http://dx.doi.org/10.7566/JPSJ.83.033702>
  - [13] R. Kitamura, N. Tajima, K. Kajita, R. Kato, M. Tamura, T. Naito and Y. Nishio, “Thermoelectric Power of Multilayered Massless Dirac Fermion System  $\alpha$ -(BEDT-TTF)<sub>2</sub>I<sub>3</sub> -Charge Ordering and Zero-gap States-”, JPS Conf. Proc., 査読有, 1 (2014) 012097-1-4.  
<http://dx.doi.org/10.7566/JPSJ.83.033702>
  - [14] N. Tajima, T. Yamauchi, T. Yamaguchi, M. Suda, Y. Kawasugi, H. M. Yamamoto, R. Kato, Y. Nishio, and K. Kajita, “Quantum Hall Effect in Molecular Dirac Fermion Systems with Tilted Cones”, Phys. Rev. B, 査読有, 88 (2013) 075315-1-6.  
DOI:10.1103/PhysRevB.88.075315
- [学会発表] (計 12 件)
- [1] Y. Iwasaki and T. Morinari, “Magnetic transport phenomena in a layered antiferromagnet EuMnBi<sub>2</sub>”, Novel Quantum States in Condensed Matter 2017, Yukawa Institute for Theoretical Physics, 2017 年.
  - [2] N. Tajima, “Switching Control of Non-Trivial and Trivial Berry's Phases in Molecular Massless Dirac Fermion Systems”, International Symposium on Crystalline Organic Metals, Superconductors and

- Ferromagnets 2017, 2017 年.
- [3] K. Kubo and T. Morinari, “Effect of Interlayer Spin-flip Tunneling for Interlayer Magnetoresistance in Multilayer Dirac Fermion Systems”, International Workshop on Dirac Electrons in Solids, 2015 年.
- [4] T. Morinari, “Chirality effect on superconductivity”, International Workshop on Dirac Electrons in Solids, 2015 年.
- [5] N. Tajima, T. Yamauchi, T. Ozawa, M. Suda, Y. Kawasugi, H. M. Yamamoto, R. Kato, Y. Nishio and K. Kajita, “Quantum Transport Phenomena in Molecular Dirac Fermion Systems”, International Workshop on Dirac Electrons in Solids, 2015 年.
- [6] N. Tajima, “Quantum transport phenomena in molecular Dirac fermion systems”, LPS セミナー, 2015 年.
- [7] K. Kubo and T. Morinari, “Effect of Interlayer Spin-flip Tunneling for Interlayer Magnetoresistance in Multilayer Dirac Fermion Systems”, International Workshop “Novel Quantum States in Condensed Matter 2014 (NQS2014)”, 2014 年.
- [8] N. Tajima, “Quantum Hall effect in multilayered massless Dirac fermion systems”, The 3th International Conference and Exhibition on Materials Science and Engineering, 2014 年.
- [9] R. Kitamura, Y. Nishio, N. Tajima, K. Kajita, R. Kato and T. Naito, “Thermoelectric power in multilayered massless Dirac Fermion system  $\alpha$ -(BEDT-TTF) $_2$ I $_3$ ”, The 12th Asia Pacific Physics Conference, 2013.
- [10] T. Ozawa, T. Yamauchi, S. Kurosaka, N. Tajima, R. Kato, Y. Nishio and K. Kajita, “Effects of zero-mode Landau carriers on transport in Dirac fermion system  $\alpha$ -(BEDT-TTF) $_2$ I $_3$ ”, The 12th Asia Pacific Physics Conference, 2013 年.
- [11] T. Yamauchi, N. Tajima, M. Suda, Y. Kawasugi, H. M. Yamamoto, R. Kato, Y. Nishio and K. Kajita, “Quantum Hall Effect in Molecular Dirac fermion systems”, The 12th Asia Pacific Physics Conference, 2013 年.
- [12] N. Tajima, T. Yamauchi, M. Suda, Y. Kawasugi, H. M. Yamamoto, R. Kato, Y. Nishio and K. Kajita, “Quantum Transport Phenomena in Molecular Dirac Fermion Systems”, 20th International Conference on Electronic Properties of Two-Dimensional Systems, 2013 年.

〔その他〕

ホームページ等

東邦大学理学部物理学科物性物理学教室ホームページ

<http://www2.ph.sci.toho-u.ac.jp/tajima/index.htm>

1

- ・2013 年 8 月 26 日 東邦大・理研・分子研共同プレスリリース「エネルギーロスのないグリーンな分子性電子デバイス開発に光～ついに分子性ゼロギャップ伝導体へのキャリア注入に成功～」
- ・2013 年 8 月 27 日掲載, 化学工業日報新聞(5 面)「ゼロギャップ有機電導帯 キャリア注入に成功 低損失電子デバイス期待」
- ・2013 年 8 月 27 日掲載, 日刊工業新聞(21 面)「ゼロギャップ分子性伝導体 キャリア注入に成功 東邦大など新デバイス実現に道」
- ・2013 年 8 月 30 日掲載, 日経新聞(9 面)「電子の重さ『ゼロ』東邦大などが半導体材料演算速度を 100 倍高速化」

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

田嶋 尚也 (TAJIMA, Naoya)

東邦大学・理学部・教授

研究者番号: 40316930

### (2) 研究分担者

西尾 豊 (NISHIO, Yutaka)

東邦大学・理学部・教授

研究者番号: 20172629

須田 理行 (SUDA, Masayuki)

分子科学研究所・協奏分子システム研究センター・助教

研究者番号: 80585159

森成 隆夫 (MORINARI, Takao)

京都大学・人間・環境学研究科・准教授

研究者番号: 70314284