

## 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 5 月 13 日現在

機関番号：32661

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2010～2012

課題番号：22540379

研究課題名（和文） 有機導体で実現する相対論的電子と磁場効果

研究課題名（英文） Effects of magnetic field in organic conductors with relativistic electrons.

研究代表者

田嶋 尚也 (TAJIMA NAOYA)

東邦大学・理学部・准教授

研究者番号：40316930

研究成果の概要（和文）：我々は高圧下にある有機導体 $\alpha$ -(BEDT-TTF) $_2$ I $_3$  で世界最初のバルクなディラック電子系を発見した。特徴の 1 つはゼロモードと呼ばれる特別なランダウ準位が、ゼロエネルギー点に磁場によらず常に現れることである。本研究では、ゼロモードランダウキャリアとそのスピン分裂による層間電気伝導性を明らかにした。最も重要な成果の 1 つは、測定対象物質を $\theta$ -(BEDT-TTF) $_2$ I $_3$  へ広げ、ディラックコーンと独立に通常フェルミ面をもつ多バンド系におけるディラック電子を実現したことである。

研究成果の概要（英文）：We have discovered first bulk massless Dirac fermion systems in an organic conductor  $\alpha$ -(BEDT-TTF) $_2$ I $_3$  under high pressure. One of the characteristic feature is that the zero-mode Landau level always exist at the zero-energy in magnetic field. In this work, we succeeded in detecting the effects of zero-mode including its spin splitting on inter-layer transport. The most impressive findings are that the multi-band Dirac fermion systems with both Dirac particles and normal electrons are realized in  $\theta$ -(BEDT-TTF) $_2$ I $_3$ .

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2010 年度	1,900,000	570,000	2,470,000
2011 年度	800,000	240,000	1,040,000
2012 年度	600,000	180,000	780,000
年度			
年度			
総計	3,300,000	990,000	4,290,000

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：有機導体、ディラック電子、ゼロモードランダウ準位

## 1. 研究開始当初の背景

長年、多くの研究者が、伝導帯と価電子帯との間のエネルギーギャップがゼロ、つまり点(ディラック点と呼ぶ)で接しているゼロギャップ電気伝導体を探し求めてきた。例えば、Cd $_{1-x}$ Hg $_x$ Te という無機物質では、Cd と Hg の比率を変えてエネルギーギャップを制御することによって、エネルギーギャップが約 6meV まで狭められた(ナローギャップ半導

体)。しかし、完全なゼロギャップ電気伝導体は見つかっていなかった。

多くの研究者がゼロギャップ電子系を探索する理由は、固体中で電子がとり得るバンド構造が、コンタクトポイント付近では特殊だからである。線形分散型のバンド構造によって、電子があたかも質量ゼロの素粒子ニュートリノのように固体の中で振る舞い(ディラック電子と呼ぶ)、電気伝導の主役を演じ、

通常の金属や半導体では見られない電気伝導特性や新奇の量子効果を示すとされる。従って、新奇の電子デバイス等が期待できる。2005年に、ガйм(マンチェスター大学)らの研究グループが、層状構造のグラファイトを1層だけにしたグラフェンで、ゼロギャップ電子系を実現し、質量ゼロの電子による新奇の量子現象等を発見した。一方で、我々は2000年より前から、1.5GPa以上の高圧下にある二次元層状構造の有機導体 $\alpha$ -(BEDT-TTF) $_2$ I $_3$ が、金属や半導体と異なるまったく新しいタイプの電気伝導体であることを発見した。この物質がゼロギャップ電気伝導体であることは、グラフェン実現と同時期に小林(名古屋大学)らの理論グループによって指摘された。ディラック点近傍で、2つの円錐型バンドが上下から角突き合わせたゼロギャップ構造(ディラックコーン)をしているのである。

最近、ゼロギャップ構造の描像を基に、この系の異常伝導現象の理解が急速に発展してきた。さらに我々は、この物質がゼロギャップ構造をもつ決定的な実験証拠を得ることに成功した。二次元面垂直に磁場が加わるとディラックコーンはランダウ準位に量子化されるが、必ずディラック点の位置にゼロモードと呼ばれている  $n=0$  の特別なランダウ準位が現れる。ランダウ準位の縮重度は磁場に比例して増大するので、ディラック点における状態密度はゼロから磁場に比例して増大する。我々はゼロモードの縮重度の増大に反映して、磁場に反比例して減少する負の磁気抵抗を発見した。この結果は、理論的に導いた長田(東京大学物性研究所)の結果と定量的によく一致し、ディラック電子系が高圧下にある $\alpha$ -(BEDT-TTF) $_2$ I $_3$  で実現した決定的な実験証拠となる。さらに、低温・高磁場でゼロモードのスピン分裂を観測することにも成功した。

## 2. 研究の目的

こうして高圧下にある $\alpha$ -(BEDT-TTF) $_2$ I $_3$  は二次元ディラック電子系の伝導特性を調べるのに適した物質であると言える。今のところ、二次元ディラック電子系としては、グラフェンと $\alpha$ -(BEDT-TTF) $_2$ I $_3$  (およびその類縁物質)しか見つかっていない。(最近、Bi $_{1-x}$ Sb $_x$  など三次元トポロジカル絶縁体の表面でもディラック電子系が実現することが報告されている。)しかし、グラフェンはグラファイトを1層だけにした特殊物質である。バルクな結晶の二次元ディラック電子系としては $\alpha$ -(BEDT-TTF) $_2$ I $_3$  (とその類塩物質)が世界で唯一である。その特徴の1つが層間磁気抵抗に見られた。他にグラフェンと大きく異なるのは、バンド計算によるとディラックコーンが大きく傾いていることである。従

って、グラフェンとは異なる新しいタイプのディラック電子系が予期される。

一方で、何故この物質でゼロギャップ構造が安定して存在するのか分かっていない。我々は幾つかの類縁物質でもゼロギャップ電子系を見つけている。従って、この手の物質にはゼロギャップ構造が安定して存在する理由が何かあるように見受けられる。

本研究では、 $\alpha$ -(BEDT-TTF) $_2$ I $_3$  (およびその類縁物質)を舞台にして分子性導体におけるディラック電子系の基礎学理を構築することを目指し、研究期間内にはゼロギャップ構造の出現機構を解明する手がかりを得ること、傾いたディラックコーンによる特徴的な性質を明らかにすることを目的とする。

## 3. 研究の方法

本研究では以下の利点から層間磁気抵抗測定を主な研究手段とする。

ディラック電子系は通常の導体とは異なるランダウ準位をもつことが特徴の1つである。最も重要な特徴は $n=0$ のランダウ準位(ゼロモード)が常にディラック点の位置に現れることである。磁場をかけると、この準位には温度に依存せず、磁場強度に比例した数の担体が発生する。この効果は磁場を二次元面に垂直にかけたときの層間磁気抵抗に観測することができる。層間抵抗は磁場強度に反比例して減少するのである。

以下が、本研究の研究内容・方法である。

(1) **ゼロモード効果**：ゼロモードランダウキャリアの基本的および新たな性質を見出すことを目的に、磁場強度、磁場角度、温度をパラメータにして層間磁気抵抗・ホール効果を測定することを計画する。

(2) **ゼロモードのバレー分裂観測**：この物質は第一ブリルアンゾーンに独立した2つのバレー(ディラック点近傍の低エネルギー電子構造をバレーと呼ぶ)を持つが、1K以下の温度域、3T以上の磁場域でバレーが分裂することを示唆する結果を得た。本研究では、測定磁場領域を16Tの磁場域まで拡張し、バレー分裂の有無および明瞭な観測を目指す。

(3) **傾いたディラックコーンのパラメータ決定**：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実験的に明らかにする。

(4) **バンド間磁場効果**：ゼロギャップ構造のように、2つのエネルギーバンドが近接している系では、弱い磁場下で仮想的な電子と正孔の対が軌道運動をし、異常な磁化率やホール伝導度を生じることが理論的に指摘されている。これをバンド間磁場効果と呼ぶ。本

研究ではバンド間磁場効果による異常ホール伝導度を観測することを計画する。

(5) 圧力誘起金属-ディラック電子系相転移:  $\theta$ -(BEDT-TTF)<sub>2</sub>I<sub>3</sub> は常圧下で非常に大きなフェルミ面もつ二次元金属であるが、我々は 0.5GPa 以上の圧力でディラック電子系に相転移することを発見した。既に、高圧下にあるこの物質の X 線構造解析を試みているが、詳細な構造を解くことができていない。そこで本研究ではこの物質の量子振動と角度依存磁気抵抗振動を 0.5GPa 以下の圧力下で測定することを計画する。フェルミ面の圧力変化から分子配列の圧力変化を予測し、ゼロギャップ構造の出現機構解明の手掛りを得ようというのである。

#### 4. 研究成果

(1) ゼロモード効果(論文:②, ⑥, ⑦, ⑧):

ゼロギャップ電子系の場合、そのランダウ準位は通常の伝導体とは異なり、 $E_{nLL} \propto (|n| |B|)^{1/2}$  と記述される。ここで、 $n$  と  $B$  はそれぞれランダウ指数と磁場強度である。最も重要な特徴は、ディラック点の位置に特別なランダウ準位 ( $n=0$ : ゼロモード) が磁場に依存せず常に現れるという事実である。我々は、これを調べることで、ゼロギャップ電子系が  $\alpha$ -(BEDT-TTF)<sub>2</sub>I<sub>3</sub> で実現している決定的な証拠を得ることに成功した。ゼロモードの縮重度が磁場強度に比例して増大するために、層間抵抗が磁場強度に反比例して減少する巨大な負の磁気抵抗が観測されるのである。以上は以前得た研究成果である。

本研究では、低磁場に見られる磁気抵抗のピークに着目した。このピークが現れる磁場強度は温度の低下に伴い、低磁場へシフトすること、それよりも高い磁場領域で層間抵抗が磁場強度に反比例して量子極限状態になることから、この抵抗ピーク磁場で量子極限へのクロスオーバーが起きていると推察される。すなわち、ランダウ準位はそれぞれエネルギー幅(一般に、ランダウ準位は熱エネルギーやキャリアの散乱により広がっている)をもつが、 $n=0$  のランダウ準位と他のランダウ準位、特に  $n=\pm 1$  のランダウ準位との重なりが無視できるようになる磁場強度で抵抗ピークが現れるのである。

この描像を基にして抵抗ピークの温度 ( $k_B T$ ) と磁場強度 ( $B$ ) の関係は  $k_B T \propto B^{1/2}$  で表されることが期待される。答えは“YES”である。われわれは、ランダウ準位のゼーマン効果を含めた  $k_B T = v_F (2e\hbar B)^{1/2} \pm \mu_B B$  の関係式を得た。これからフェルミ速度  $v_F \sim 3.5 \times 10^4$  m/s を実験的に得ることができた。

間接的にだがこの系のランダウ準位構造を初めて明らかにした重要な成果である。

もう 1 つ重要な成果を紹介する。

我々はゼロモードキャリアの新たな性質

を見出すことを目的に層間ホール抵抗 ( $\rho_{zx}$ ) を量子極限領域で測定することに成功した。

$\rho_{zx}$  の角度依存性は、量子極限領域では、磁場が二次元伝導面に垂直方向のときに  $\theta=0$  とすると、磁場強度によらず  $\cot(\theta)$  に比例した 1 本の直線になるのである。その比例係数はだいたい量子抵抗  $h/e^2$  に層間方向に格子定数をかけた値のオーダーで表わされることを見出した。

(2) ゼロモードのバレー分裂観測(論文:②, ⑦):

低温・高磁場ではゼーマン効果が顔を出す。ゼーマン効果はゼロモードの上向きスピンと下向きスピンの準位を  $\Delta E_z = g\mu_B B$  だけ分裂する。この効果はフェルミ準位にいるゼロモードランダウ電子数を減少し、その結果、層間伝導度を減少させる。層間抵抗は量子極限になると負の磁気抵抗を示すが、磁場を強くすると図 1(a) に示すように極小を作って正の磁気抵抗へと変わる。例えば 2 T の磁場のときのゼーマンエネルギーは約 2 K であるが、2 K のデータを見てみると、確かに 2 T の磁場近傍から抵抗増大が始まる。ゼーマン分裂は磁場に比例して増大するので、低温・高磁場下に見られる正の磁気抵抗は指数関数的に増大するのである。

解析を進め、交換相互作用がゼーマン分裂を増強(スピン分裂  $\Delta E_s$  と呼ぶ)していることを明らかにした。交換相互作用は低温・高磁場下で重要な効果を与える。この系はグラフェンと同様に第一ブリルアンゾーン内にバレーを 2 つもつが、野村(東北大学)らと小林(名古屋大学)らは強い交換相互作用が低温・高磁場下でバレー対称性を破ることを理論的に指摘した。野村(東北大学)のグラフェンをモデルにした理論によると、交換相互作用がゼロモードの広がりよりも強くなる高磁場あるいは低温でバレー対称性は破れる。今の系では、例えば 7 T の磁場下では、2 K 以下の低温でその効果が強く現れていることが次のような観測から見てとれた。2 つの縮退したバレーが分裂した場合、スピン分裂でできた電荷ギャップ  $\Delta E$  は狭くなるので(図 1(b))、その効果はキャリア濃度の増大として層間磁気抵抗に現れることが予期される。7 T の磁場下における  $\Delta E$  の温度依存性を図 1(c) に示す。2 K よりも高温では  $\Delta E_s \sim \Delta E$  であるが、それ以下の温度で見られる  $\Delta E$  の急激な減少はバレー縮退が破れたことによると推察される。

一方で以下の描像も推察される。ゼーマン効果が大きく関与している低温・高磁場下では  $v=0$  の量子ホール強磁性状態が実現していることが期待される。 $\Delta E$  の急激な減少は、層間の反強磁性相互作用による特異なスピントキスチュアが形成されたことによる可

能性もあるのである。

さらなる研究で面白い結果が得られるであろう。

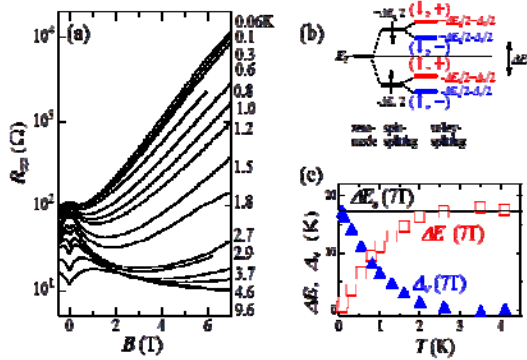


図 1: (a) 0.06 K までの低温、7 T までの高磁場下層間抵抗、(b) ゼロモードとそのスピン分裂およびバレー分裂、(c) 7 T の磁場下ギャップ  $\Delta E$  とバレー分裂  $\Delta v$  (c)。

### (3) 傾いたディラックコーンのパラメータ決定(論文：準備中)：

我々の系がグラフェンや他のディラック電子系とは大きく異なる 1 つの特徴は、ディラックコーンが大きく傾いていることにある。従って、新しいタイプのディラック電子系が期待され、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 つの重要な要素となる。

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の重要なパラメータを森成(京都大学)らによる層間抵抗の解析式を使い決定することに成功した。ディラックコーンの傾きの効果が層間磁気抵抗の異方性に現れるのである。

傾いたディラックコーンの構造を簡単に  $E = \hbar(v_0 k_x \pm v_r k)$  と表すことから、傾きの度合いは  $v = v_0/v_r \sim 0.8$  と見積もることに成功した。また、傾きの方向は結晶軸の  $a$  軸方向であることを実験的に明らかにした。

### (4) バンド間磁場効果(論文：③)：

ゼロギャップ構造のように、2 つのエネルギーバンドが近接している系では、弱い磁場下で仮想的な電子と正孔の対が軌道運動をし、異常な磁化率やホール伝導度を生じることが理論的に指摘されている。これをバンド間磁場効果と呼ぶ。本研究では、バンド間磁場効果による異常なホール伝導度を電子ドープ型の試料で得ることに成功した。 $\alpha$ -(BEDT-TTF) $_2$ I $_3$  はグラフェンと異なり、電子-正孔対称性が良くないことも特徴の 1 つである。したがって、化学ポテンシャルの温度変化が伝導性に重要な役割をする。

図 2(a) に示すように、ホール伝導度は温度を下げていくと、その符号は正から負へ変わ

るが、これは化学ポテンシャルが温度変化をしてディラック点を通過したことによる。着目したいことは、化学ポテンシャルがディラック点を通過する近傍でホール伝導度にピークが現れることである。これがバンド間磁場効果による異常なホール伝導度である。小林(名古屋大学)らの理論によると、バンド間磁場効果がない場合にはホール伝導度にピーク構造は現れない。

さらに、理論結果(ホール伝導度の化学ポテンシャル依存性)と比較するために化学ポテンシャルの温度依存性を見出すことに成功した。電子ドープ量が異なる試料を系統的に調べることから、化学ポテンシャルの温度依存性は近似的に  $\mu = E_F - 0.24 k_B T$  と得ることができたのである。この近似式を用い、ホール伝導度の温度依存性を化学ポテンシャル依存性に変換したのが図 2(b) である。この結果は、小林らの実験結果と定量的によく一致する。

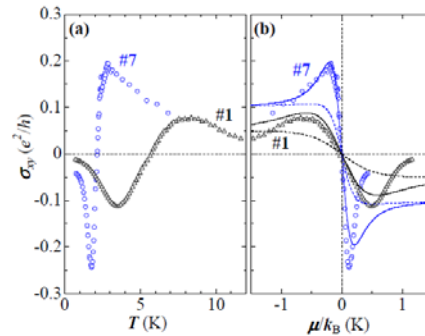


図 2: ホール伝導度の(a) 温度依存性と(b) 化学ポテンシャル依存性。実線と破線はそれぞれバンド間磁場効果を取入れた理論曲線と取入れていない理論曲線である。

### (5) 圧力誘起金属-ディラック電子系相転移(論文：準備中)：

我々は、有機導体の中にディラック電子系を幾つか見出してきた。しかし、有機導体におけるディラック電子系の出現機構は未だ明らかでない。それぞれ少しずつ異なる電子状態をもつことから、偶然ではなく、そうなる理由があると考えている。そこで本研究では、ディラック電子系の出現機構解明を目指して、その中の 1 つである  $\theta$ -(BEDT-TTF) $_2$ I $_3$  に着目した。この物質は大きなフェルミ面をもつ二次元金属であるが、0.5 GPa 以上の圧力下でディラック電子系へ相転移を起こす。

本研究の重要な成果は、0.5 GPa 以上の圧力下にある  $\theta$ -(BEDT-TTF) $_2$ I $_3$  は通常の電子とディラック電子とが共存する多バンド系ディラック電子系であることを発見したことである。面白いことに、ディラックコーンと独立に通常フェルミ面を有するのにも、ディラック電子が輸送現象という低エネルギーの物理に顔を出すという予想外の実験結果を得

たのである。

高压下では $\alpha$ -(BEDT-TTF) $_2$ I $_3$ と同様ディラック電子系に特徴的な電気伝導性を示す。1層あたりの電気抵抗率は広い温度範囲で量子抵抗( $h/e^2$ )に近い値を示す。また、ディラック電子系では磁場下でディラック点の位置に常にゼロモードランダウ準位が現れるが、ゼロモードランダウ電子による特徴的な磁気抵抗・ホール効果および層間磁気抵抗を示す。層間抵抗は、ゼロモードの縮重度が磁場に比例して増大するために負の磁気抵抗を示す。驚くべきことは、層間磁気抵抗に低温で量子振動が現れるという実験事実である。振動の位相解析から、量子振動の起源はディラック電子ではなく通常の電子である。従って、高压下にある $\theta$ -(BEDT-TTF) $_2$ I $_3$ はディラックコーンと独立に通常フェルミ面をもつことが明らかである。

このような多バンド系におけるディラック電子は、最近、鉄系超伝導体でホットな話題として注目されている。また森成(京都大学)は、多バンド系でのディラック電子のカイラリティはそれ特有の構造を持つことを指摘している。しかし、鉄系超伝導体ではディラック点はフェルミ準位から離れており、複雑な構造をしている。それに対して、 $\theta$ -(BEDT-TTF) $_2$ I $_3$ はゼロモードの観測からディラック点がちょうどフェルミ準位に位置している。従って、この物質を舞台にして多バンド系におけるディラック電子の理解が発展するだろう。

#### (6) その他の研究(論文: ①, ④, ⑤):

本研究課題と関連して、内外部の研究者との共同研究を行った。

**論文①:**  $\alpha$ -(BEDT-TTF) $_2$ I $_3$ は常圧力下では、135K以下の温度域で電荷秩序絶縁体である。我々は、この電荷秩序絶縁体状態に波長約450nmの光を照射して金属状態へ相転移を起こすことを発見してきた。最近、この光誘起金属状態がディラック電子系であることを示唆する実験結果を得た。

**論文④:** 有機導体へのキャリア注入は幾グループが研究を遂行しているが、その効率的な方法はまだ確立していないと言える。我々は低温で何桁もの抵抗変化を伴う有機モット電界効果トランジスタを作製することに成功した。 $\alpha$ -(BEDT-TTF) $_2$ I $_3$ で実現するディラック電子系の磁場下ランダウ準位の直接観測および量子ホール効果実現へ向けた重要な成果である。

**論文⑤:**  $\alpha$ -(BEDT-TTF) $_2$ I $_3$ の類縁物質である $\alpha$ -(BETS) $_2$ I $_3$ と $\alpha$ -(BEDT-STF) $_2$ I $_3$ におけるディラック電子の特徴を磁氣的性質から明らかにした。

#### まとめ:

本研究では、世界で唯一のバルクな二次元ゼロギャップ電気伝導体 $\alpha$ -(BEDT-TTF) $_2$ I $_3$ (と類縁物質 $\theta$ -(BEDT-TTF) $_2$ I $_3$ 等)を舞台にして、グラフェンには無い、あるいは観測困難なディラック電子の特徴を見出すことができた。さらに、 $\theta$ -(BEDT-TTF) $_2$ I $_3$ の高压力域で、通常の電子とディラック電子とが共存する多バンド系ディラック電子系を発見した。以上の成果は分子性ディラック電子系の基礎学理を構築していき、分子エレクトロニクスへの新たな展開を指し示す。

#### 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8件)

- ① N. Takubo, N. Tajima, H. M. Yamamoto, and R. Kato, "Observation of photo-induced insulator-to-metal transition in charge-ordered  $\alpha$ -(BEDT-TTF) $_2$ I $_3$  thin crystal by simultaneous transport and optical measurement", *Journal of Luminescence* 137 (2013) 234-240. 査読有  
<http://dx.doi.org/10.1016/j.jlumin.2012.12.040>
- ② N. Tajima, Y. Nishio, and K. Kajita, "Transport Phenomena in Multilayered Massless Dirac Fermion System  $\alpha$ -(BEDT-TTF) $_2$ I $_3$ ", *Crystals*, 2 (2012) 643-661. 査読有  
DOI:10.3390/cryst2020643
- ③ N. Tajima, R. Kato, S. Sugawara, Y. Nishio, and K. Kajita, "Interband effects of magnetic field on Hall conductivity in the multilayered massless Dirac fermion system  $\alpha$ -(BEDT-TTF) $_2$ I $_3$ ", *Phys. Rev. B*, 85 (2012) 033401-1-4. 査読有  
DOI: 10.1103/PhysRevB.85.033401
- ④ Y. Kawasugi, H. M. Yamamoto, N. Tajima, T. Fukunaga, K. Tsukagoshi and R. Kato, "Electric-field-induced Mott transition in an organic molecular crystal", *Phys. Rev. B.*, 82 (2011) 125129-1-9. 査読有  
DOI: 10.1103/PhysRevB.84.125129
- ⑤ K. Hiraki, S. Harada, K. Arai, Y. Takano, T. Takahashi, N. Tajima, R. Kato and T. Naito, "Local Spin Susceptibility of  $\alpha$ -D $_2$ I $_3$  (D = bis(ethylendithio)tetraselenafulvalene (BETS) and bis(ethylendithio)dithiadiselenafulvalene (BEDT-STF)) Studied by  $^{77}\text{Se}$  NMR", *J. Phys. Soc. Jpn.*, 80 (2011) 014715-1-5. 査読有  
DOI: 10.1143/JPSJ.80.014715
- ⑥ M. Sato, K. Miura, S. Endo, S. Sugawara, N. Tajima, K. Murata, Y. Nishio and K. Kajita,

“Transport Phenomenon of Multilayer Zero-Gap Conductor in the Quantum Limit”, J. Phys. Soc. Jpn., 80 (2011) 023706-1-4. 査読有

DOI: 10.1143/JPSJ.80.023706

- ⑦ N. Tajima, M. Sato, S. Sugawara, R. Kato, Y. Nishio and K. Kajita, “Spin and Valley Splittings in Multilayered Massless Dirac Fermion System”, Phys. Rev. B., 82 (2010) 121420-1-4. 査読有

DOI: 10.1103/PhysRevB.82.121420

- ⑧ S. Sugawara, M. Tamura, N. Tajima, M. Sato, R. Kato, Y. Nishio and K. Kajita, “Temperature Dependence of Inter-Layer Longitudinal Magnetoresistance in  $\alpha$ -(BEDT-TTF)<sub>2</sub>I<sub>3</sub>: Positive versus Negative Contributions in a Tilted Dirac Cone System”, J. Phys. Soc. Jpn., 79 (2010) 113704-1-4. 査読有

DOI: 10.1143/JPSJ.79.113704

[学会発表] (計 28 件)

- ① 田嶋尚也, “分子性ディラック電子系の電気伝導性とキャリア注入効果”, 科研費基盤研究(A)「固体中のディラック電子」第 2 回研究会(招待講演), 2012 年 12 月 19 日, 下呂温泉小川屋 (岐阜県)

- ② 田嶋尚也, “相対論的電子(ディラック電子)を有する有機導体の輸送特性”, 分子科学研究所電子物性部門セミナー, 2012 年 12 月 03 日, 分子科学研究所

- ③ 田嶋尚也, 山内貴弘, 須田理行, 川楯義高, 山本浩史, 加藤礼三, 西尾豊, 梶田晃示, “多層 Dirac 電子系における量子ホール効果 I”, 日本物理学会 2012 年秋季大会, 2012 年 9 月 19 日, 横浜国立大学

- ④ N. Tajima, T. Yamaguchi, M. Suda, Y. Kawasugi, H. M. Yamamoto, R. Kato, Y. Nishio and K. Kajita, “Quantum Hall effect in multilayered massless Dirac fermion system:  $\alpha$ -(BEDT-TTF)<sub>2</sub>I<sub>3</sub>”, 20th International Conference on High Magnetic Fields in Semiconductor Physics, 2012 年 07 月 26 日, Chamonix Mont-Blanc, France

- ⑤ 田嶋尚也, 山口達也, 須田理行, 川楯義高, 山本浩史, 加藤礼三, 西尾豊, 梶田晃示, “薄板結晶の分子性ディラック電子系: FET 効果と非局所電気伝導性”, 日本物理学会第 67 回年次大会, 2012 年 3 月 25 日, 関西学院大学

- ⑥ 田嶋尚也, 佐藤光幸, 菅原滋晴, 加藤礼三, 西尾豊, 梶田晃示, “多層 Dirac 電子系のエッジ効果”, 日本物理学会 2011 年秋季大会, 2011 年 9 月 22 日, 富山大学

- ⑦ 田嶋尚也, 佐藤光幸, 菅原滋晴, 田村雅史, 加藤礼三, 西尾豊, 梶田晃示,

“ $\alpha$ , $\theta$ -(BEDT-TTF)<sub>2</sub>I<sub>3</sub> における Dirac 電子”, 日本物理学会 2010 年秋季大会, 2010 年 9 月 22 日, 大阪府立大学

- ⑧ N. Tajima, “Spin and Valley Splittings in Multi-Layer Massless Dirac Fermions System”, The 19th International conference on the Application of High Magnetic fields in Semiconductor Physics and Nanotechnology (招待講演), 2010 年 8 月 3 日, 福岡国際会議場

- ⑨ N. Tajima, “Spin and Valley-Split Levels in Multi-Layer Massless Dirac Fermions System”, International conference on Science and Technology of Synthetic Metals 2010 (招待講演), 2010 年 7 月 6 日, 国立京都国際会館

- ⑩ M. Sato, K. Miuta, S. Sugawara, N. Tajima, Y. Nishio, K. Kajita and K. Murata, “Interlayer Hall Effect in Organic Conductor,  $\alpha$ -(STF)<sub>2</sub>I<sub>3</sub>”, International conference on Science and Technology of Synthetic Metals 2010, 2010 年 7 月 6 日, 国立京都国際会館

- ⑪ S. Sugawara, M. Tamura, N. Tajima, M. Sato, R. Kato, Y. Nishio and K. Kajita, “Out-of-plane Magnetoresistance in Quasi 2D Massless Dirac Fermions System,  $\alpha$ -(BEDT-TTF)<sub>2</sub>I<sub>3</sub>”, International conference on Science and Technology of Synthetic Metals 2010, 2010 年 7 月 6 日, 国立京都国際会館

- ⑫ N. Takubo, N. Tajima and R. Kato, “Photoinduced Insulator to Metal Transition in Charge Ordered BEDT-TTF Salts”, International conference on Science and Technology of Synthetic Metals 2010, 2010 年 7 月 5 日, 国立京都国際会館

[その他]

ホームページ

<http://www2.ph.sci.toho-u.ac.jp/tajima/research.html>

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

田嶋 尚也 (TAJIMA NAOYA)  
東邦大学・理学部・准教授  
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: 20171629

### (3) 連携研究者

該当者なし