

## 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：新学術領域研究（研究領域提案型）

研究期間：2008～2012

課題番号：20110002

研究課題名（和文） 分子配列自由度を利用した新規電子相の開拓

研究課題名（英文） Exploration of novel electronic phases using molecular-arrangement degrees of freedom

研究代表者

鹿野田 一司 (KANODA KAZUSHI)

東京大学・大学院工学系研究科・教授

研究者番号：20194946

研究成果の概要（和文）：分子性物質における分子配列の多様性と加圧によるその可制御性を利用することで、物性物理学の基本問題に取り組むとともに、新しい電子相の開拓を行った。その結果、電子相関による金属絶縁体転移の臨界現象、その近傍で起こるスピン液体やその超伝導の性質、さらに、有効質量がゼロの Dirac 電子系における特異な相関効果や強磁場物性、また、分子内の軌道自由度が関与した電荷秩序相や電荷不均一相の存在を明らかにした。

研究成果の概要（英文）：Taking advantage of the variation of molecular arrangement and its controllability in molecular materials, we tackled the fundamental problems in condensed matter physics and explored new electronic phases. As a result, we clarified the critical phenomena of correlation-driven metal-insulator transition, the natures of a spin liquid and superconductivity emerging around the metal-insulator transition, the correlation effect and high-field properties of the massless Dirac electrons, and novel charge-disproportionated states, some of which occur within a molecule.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2008 年度	23,200,000	6,960,000	30,160,000
2009 年度	36,100,000	10,830,000	46,930,000
2010 年度	36,900,000	11,070,000	47,970,000
2011 年度	23,300,000	6,990,000	30,290,000
2012 年度	17,000,000	5,100,000	22,100,000
総計	136,500,000	40,950,000	177,450,000

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：強相関電子系、磁性、低温物性、半導体物性、分子性固体

## 1. 研究開始当初の背景

柔らかい分子性物質は圧力によって容易に格子が圧縮する。この特徴は、モット転移をはじめとする強相関物理学の系統的な研究には極めて有効である。また、分子性物質は多彩な分子配列を取り、ある種の分子配列では有効質量ゼロの Dirac 電子系が実現しているなど、分子配列の多様性と可制御性が、

興味ある電子相の実現と、精巧な実験研究を可能にしている。分子配列を積極的に制御することによって、さらに広い物質科学が展開されることが期待されている。

## 2. 研究の目的

非球形である分子は対称性が悪いために、多様な配列パターンで凝集する。さらに、凝

集が分子間の弱いファンデアワールス相互作用によるために、格子は圧力によって容易に圧縮・変形し得る。この特徴が構造の多様性を生み、物性の包括的な研究を可能にする。本計画研究は、分子配列が物性を支配する重要なパラメータであるとの認識のもと、分子配列自由度を化学圧力及び物理圧力を駆使して制御することにより、強相関物性科学、半導体物性科学、及び誘電物性科学に関わる問題に実験的及び理論的に挑むとともに、新しい電子相の開拓を目指す。

### 3. 研究の方法

- (1) 有機モット絶縁体とそのホールドープ系、および電荷秩序系に対し、静水圧及び異方的圧力を印加し、格子構造の変化による電子相制御と新規電子相の探索を行う。
- (2) 特殊な分子配列が実現しているゼロギャップ伝導体の電子物性を実験的、理論的に明らかにする。特に、有効質量ゼロの Dirac 電子系の強磁場物性の解明に注力する。その際、グラフェンと違いバルクな実験が行えることを最大限に利用するとともに、tilted Weyl 方程式に基づいて数値的・解析的手法を組み合わせた理論研究も行う。
- (3) 電荷移動と格子歪みの結合で(反)強誘電性が発現する中性-イオン性転移物質に高静水圧あるいは一軸圧を印加し、誘電性が絡む新規電子相の探索を行う。
- (4) 分子内軌道自由度に着目した電子状態計算を行い新規電子相の可能性を探る。
- (5) 電荷/スピン秩序相に隣接する超伝導を、サイト表示 RPA により理論的に調べると共に、電荷不均化状態が示唆されている磁場誘起超伝導体の常伝導及び超伝導状態を徹視の実験手法で調べる。

### 4. 研究成果

- (1) モット転移の臨界性の解明：モット転移は強相関系の物理の根幹を成す金属-絶縁体転移であるが、その臨界現象が如何なるものかは 21 世紀初頭まで実験的に未解決の問題であった。我々は、擬 2 次元伝導体  $\kappa\text{-(ET)}_2\text{Cu}[\text{N}(\text{CN})_2]\text{Cl}$  のモット転移の臨界終点近傍で電気伝導度と核磁気共鳴緩和率の精密測定を行うことでこの問題に挑んだ結果、電荷自由度とスピン自由度の双方で非従来型の臨界性を明らかにした。また、低温で反強磁性体となる  $\kappa\text{-(ET)}_2\text{Cu}[\text{N}(\text{CN})_2]\text{Cl}$  のモット転移は大きな電気抵抗の飛びを伴う強い 1 次転移性を示すのに対し、より三角格子性が強く低温でスピン液体になっている  $\kappa\text{-(ET)}_2\text{Cu}_2(\text{CN})_3$  のモット転移が弱いものであることが示された。すなわち、基本的に電荷自由度の現象であるモット転移がスピン自由度に強く影響を受けることが明らかに

なった。

- (2) スピン液体の相図と超伝導：スピン液体の出現には、絶縁体でありながら高次の電荷揺らぎが関与していることが理論的に示唆されていたが、 $\kappa\text{-(ET)}_2\text{Cu}_2(\text{CN})_3$  の温度-圧力電子相図を電気伝導度測定と核磁気共鳴実験により正確に決定した結果、スピン液体がモット転移近傍まで続くことが実証された。また、スピン液体相で見出されていたいわゆる 5 K 異常がモット転移の臨界圧まで存在すること、および、金属相側で発現する超伝導が熱励起にギャップの無いものであることが明らかになった。

- (3) ドープされた三角格子の超伝導と常伝導の電子状態：アニオン層に不定比性を持つ擬 2 次元伝導体  $\kappa\text{-(ET)}_4\text{Hg}_{3.8}\text{X}_8$  [ $\text{X}=\text{Br}, \text{Cl}$ ] は、 $U/t$  ( $U$ : ET ダイマー上の電子間クーロン相互作用、 $t$ : ダイマー間の移動積分) が他の  $\kappa$  型モット絶縁体に比べて大きいことと、ダイマー格子が三角格子に近いことを考えると、ドープされた三角格子モット絶縁体と考えられる。我々は、 $\kappa\text{-(ET)}_4\text{Hg}_{2.89}\text{Br}_8$  の常伝導状態の電気伝導特性と超伝導状態の反磁性を同時に圧力をパラメータとして調べるために、MHz 帯での交流帯磁率から非接触で電気抵抗率を与える手法を確立した。測定の結果、超伝導転移温度が 0.5 GPa 付近で最大値 (約 7 K) となるドームを形成すること、この圧力附近を境に超伝導が不均一な状態から均一な状態に変わること、さらに、常伝導状態が非フェルミ液体的な状態からフェルミ液体的なものに変わることが明らかになった。ホール係数が、0.5 GPa 付近で激減することを考えると、これらの異常は、電子相関により電子の 2 重占有が禁止されドープされたホールのみが伝導を担う強相関金属相から 2 重占有が許され全てのバンド電子が伝導を担う弱相関金属への急峻なクロスオーバーあるいは量子相転移を捉えたものと考えられる。

- (4) Dirac 電子の強相関効果： $\alpha\text{-(ET)}_2\text{I}_3$  は加圧下で質量ゼロの傾斜したコーン型分散を有する擬二次元 Dirac 電子系であることが、電子輸送特性及びバンド計算から示唆されていたが、我々は、2.3 GPa 静水圧、面平行磁場のもとで  $^{13}\text{C-NMR}$  測定を行った結果、30 K 以下でコーン型の線形分散に由来した緩和率の冪乗則 [ $(T_1T)^{-1} \propto T^2$ ] を観測することに成功した。同時に、緩和率とナイトシフトとの比較により、この Dirac 電子が強相関電子系となっていることも明らかになった。また、この系の単位胞内 3 独立分子サイトを分離して  $^{13}\text{C-NMR}$  測定を行った結果、スピン磁化率や電子相関の強さがサイトに依って大きく異なることが明らかになり、こ

の結果から、Dirac 電子系の電子構造は以下のように結論付けられる。室温から温度を下げると、系は Schrödinger 的な二次元電子状態から Dirac 電子状態へクロスオーバーするが、その際、高温相と低温相では電子相関の状態密度への効果が質的に異なる。すなわち、高温域では電子相関が状態密度を『増大』させるのに対し、低温の Dirac 電子相では逆に状態密度を『減少』させる。磁化率やスピン揺らぎに見られる大きなサイト依存性は、各サイトの分子軌道が  $k$ -空間内の傾斜コーン上で異方的に分布することに起因するため、実際の Dirac コーンがバンド計算に比べて大きく変形していることを示唆している。

(5) ディラック電子の磁場効果：質量ゼロの 2 次元 Dirac 電子系に垂直に磁場を印加すると、磁場の大きさに依らずにフェルミレベルにゼロモードランダウ準位が現れることが期待される。この準位の有無を、加圧下 (2.2 GPa) の  $\alpha$ -(ET)<sub>2</sub>I<sub>3</sub> に対して垂直磁場下の NMR 実験を行うことにより検証することを試みた。NMR 緩和率  $1/T_1$  は、ランダウ量子化の無い平行磁場下の緩和率と高温では大きな違いは無なかったが、20-30 K 以下の低温で平行磁場下の振舞い ( $(T_1 T)^{-1} \propto T^2$ ) から上方へ外れてプラトーを形成することが見出された。15T 磁場下では、プラトー形成温度が 5T のときに比べて高温側へシフトし、プラトー領域の  $1/T_1 T$  の絶対値は 5T のそれに比べて約 3 倍となる。これは高磁場の印加により Landau 準位間隔が大きくなり、より高い温度から量子極限が実現すること、さらに磁場の大きさに比例して Landau 縮重度が増大するという描像で説明できる。また、緩和率はプラトーを示した後低温で指数関数的に減少するが、その活性化エネルギーがスピン分裂幅に対応した。すなわち、この系が量子ホール強磁性状態にあることが実証された。

(6) ディラック電子系の理論的研究

①  $\alpha$ -(ET)<sub>2</sub>I<sub>3</sub> のゼロギャップ状態において、NMR のナイトシフトを計算し、電子の状態密度がディラック点で線形にゼロになることから磁化率が温度に比例すること、各分子で値が異なることから、ディラック電子の波動関数の特異な性質を示した。

② この発展として、分子性導体のディラック電子系における波動関数のノード (ゼロライン) と NMR 観測量との関係を指摘し、単位胞に含まれる 4 分子による「分子自由度」の役割を明らかにした。

③ さらに、有機導体のディラック電子の波動関数のトポロジカルな性質に着目し、ベリー位相の振舞いや、反転対称性とディラック

ク点の関係を明らかにした。

④ 傾斜したディラックコーンにおける長距離クーロン相互作用の新しい効果を見出し、強磁場で出現すると期待される量子ホール強磁性とコスタリッツ-サウレス転移の可能性を示した。

⑤  $\alpha$ -(ET)<sub>2</sub>I<sub>3</sub> の類縁物質  $\alpha$ -(ET)<sub>2</sub>NH<sub>4</sub>Hg(SCN)<sub>4</sub> において 1 軸圧力によりゼロギャップ状態が現れる可能性を予測した。

⑥ 質量ゼロのディラック電子が電荷秩序中において質量を獲得し、さらに圧力変化に伴い生成・消滅するメカニズムを解明した。

⑦ 傾斜したディラックコーンを持つ 2 次元系および層状系における光学応答とプラズマモードの解析的表式を導出し、特に傾斜コーン対の異方性に起因する新しいプラズマモードを予測した。

(7) 中性-イオン性転移とスピンの生成：TTF-CA は、TTF から CA に電荷移動を起こす (中性-イオン性転移) と同時に格子変位 (分子 2 量体転移) を伴う強誘電転移系として長く研究されてきた。本来、電荷移動に伴いスピンの生成が期待されるが、分子 2 量体化がスピン-重項状態へと導くことから、中性相 (N 相) と量体化強誘電イオン性相 (DI 相) の双方が非磁性状態となり、バルクな磁性が議論されることはなかった。我々は、この物質の加圧下での電荷と格子の状態を NQR で調べた結果、2 量体を伴わないイオン性相 (I 相) が高压高温で実現していることを見出した。この相は磁性を持つことが期待されるが、<sup>1</sup>H NMR によって、常磁性スピンが生成されていることを明らかにし、この物質が誘電物性から磁性までを含む研究対象になることを示した。また、高温における N 相から I 相へのクロスオーバー (0.8-1.0 GPa) 領域において、特に一次元カラム方向で電気伝導度の顕著な増大を見出した。電気伝導度の解析の結果、N-I ドメインウォールが電気伝導を担っていることが示唆された。温度降下により、低压 N 相も高压 I 相も電荷移動と分子 2 量体を有する 2 量体イオン性相 (DI 相) へと転移するが、その素励起を電気伝導度と <sup>1</sup>H NMR 緩和率の温度依存性を様々な圧力で測定することにより調べた。その結果、スピンソリトンの熱励起を準粒子励起と区別して観測することに成功した。

(8)  $\lambda$ -(BETS)<sub>2</sub>FeCl<sub>4</sub> の電荷不均化：本物質は 32T の磁場下で T<sub>c</sub> ~ 4 K を持つ磁場誘起超伝導体である。強磁場下で超伝導が観測される機構は、系が強い二次元系であることと伝導電子と局在 d スピンの相互作用による補償効果で説明できる。我々は <sup>77</sup>Se-NMR 研究を行い、補償効果を微視的に確認した。その際、磁場誘起超伝導相に相図上で接しているは

ずの常伝導相で、約 30K 以下の低温領域で金属状態にしては異常に広い NMR 線幅を観測した。 $\lambda$ 型 BETS 配列が作る純粋二次元伝導層の性質を知るために Fe 位置を Ga で置換した同型物質 (Ga 塩) の  $^{77}\text{Se}$ -NMR 測定を Fe 塩と同じ空間配置で行ったところ、NMR 吸収線幅の増大が観測され、Fe 塩、Ga 塩ともにシフトと線幅はよく対応していることから、この異常な線幅が BETS 層の電子的な事情で決まっており、磁性不純物によるものではないことが明らかになった。電荷の空間的不均化の度合いは、Fe 塩の方が Ga 塩よりも大きいことが判明した。

(9) 陰イオンダイナミクスと伝導電子の相互作用:  $(\text{TMTSF})_2\text{FSO}_3$  は、対イオンとして永久電気双極子モーメントを有する四面体型陰イオンを持ち、この運動自由度が伝導電子に影響を与えることが期待される。すなわち四面体の配向と電気双極子の配向という二つの自由度が電子系と結合する可能性がある。圧力下でフッ素 NMR 緩和率の温度依存性、周波数依存性を調べ、 $\text{FSO}_3$  のフッ素のダイナミクスを解析したところ、 $^{77}\text{Se}$ -NMR で TMTSF の  $\pi$  電子系に異常が見出された温度でフッ素 NMR にも異常が見出され、伝導電子と陰イオンのダイナミクスが結合していることが示唆された。

(10) 第一原理計算による多軌道モデルの導出とフラグメント分解: 分子配列自由度を利用した新規電子相として分子内電荷秩序を研究した。分子性導体における多軌道効果を示す  $(\text{TMTTF})_2\text{I}_3$  について、TMTTF 分子の第一原理計算より、SOMO と HOMO-1 が、左右の部分軌道 (フラグメント軌道) の結合および反結合軌道として記述されることを見いだした。これにより分子軌道上の電荷秩序現象を明らかにシラマン散乱の実験を説明した。

(11) 低次元導体における電荷秩序と揺らぎ 2 次元有機導体 ET 塩において低温の電荷秩序と高温の電荷揺らぎの空間変化が異なる。この高温の状態を研究した。1/4 充填の異方的三角格子の拡張ハバード模型を用いて、フェルミ点を分割して繰りこみ群を適用して調べた。この方法では、電荷感受率の波数についてブリルアンゾーン的全領域を計算することが可能である。2 つの顕著なピークが得られ、ひとつはフェルミ面のネスティングによるもの、もうひとつはサイト間のクーロン斥力によるものである RPA の結果と比較し、RPA が全体的に数倍大きく見積もっていること、これを改良するには電子-正孔チャンネルの揺らぎを考慮することが重要であることを明らかにした。この塩の電荷揺らぎ

のピークはサイト間斥力による波数ではなくネスティングによる波数の位置に存在する。RPA では逆の結果を与えるが、繰りこみ群を用いて揺らぎを適切に考慮することによりこの事実と一致する結果を得た。

(12) 擬 1 次元超伝導における電荷揺らぎの効果: 擬 1 次元有機導体  $(\text{TMTSF})_2\text{ClO}_4$  の超伝導の秩序変数は運動量空間でフェルミ面にギャップがあるかどうかが長年議論されている。この塩は、低温でアニオンが秩序化し単位胞に 4 個の分子のサイトが存在するので 2 種類の 1 次元的なフェルミ面をもつ。このような系について、拡張ヒュッケル法により得られているトランスファーエネルギーを考慮した拡張ハバード模型を用いて電荷及びスピン揺らぎによる様々な超伝導状態について乱雑位相近似を用いて調べた。鎖間の斥力が大きい場合、電荷揺らぎにより、スピン 1 重項によるノードをもつギャップレスの d-波超伝導が得られた。この結果は米澤らの実験 [Yonezawa et al., Phys. Rev. Lett. 100 117002 (2008)] を説明できる超伝導機構を示唆している。

## 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 49 件)

① F. Kagawa, T. Sato, K. Miyagawa, K. Kanoda, Y. Tokura, K. Kobayashi, R. Kumai, “Charge-cluster glass in an organic conductor”, *Nature Physics*, [査読有] 掲載決定 (2013) DOI: 10.1038/NPHYS2642

② Y. Suzumura, A. Kobayashi, “Zero-Gap State in  $\alpha$ -(BEDT-TTF) $_2$ I $_3$  under Hydrostatic Pressure”, *Journal of Physical Society of Japan*, [査読有] **82** (2013) 044709-1-5 DOI: 10.7555/JPSJ.82.044709

③ M. Hirata, K. Miyagawa, K. Kanoda, M. Tamura, “Electron correlations in the quasi-two-dimensional organic conductor  $\theta$ -(BEDT-TTF) $_2$ I $_3$  investigated by  $^{13}\text{C}$  NMR”, *Physical Review B*, [査読有] **85** (2012) 195146 DOI: 10.1103/PhysRevB.85.195146

④ T. Takahashi, “Charge fluctuation, charge ordering, and zero-gap state in organic conductors”, *Physica B*, [査読有] **407** (2012) 1757-1761 DOI: 10.1016/j.physb.2012.01.024

⑤ M. Hirata, K. Ishikawa, K. Miyagawa, K. Kanoda, M. Tamura, “ $^{13}\text{C}$  NMR study on the

charge-disproportionated conducting state in the quasi-two-dimensional organic conductor  $\alpha$ -(BEDT-TTF)<sub>2</sub>I<sub>3</sub>”, Physical Review B, [査読有] **84** (2011) 125133-1-12 DOI: 10.1103/PhysRevB.84.125133

⑥F. L. Pratt, P. J. Baker, S. J. Blundell, T. Lancaster, S. Ohira-Kawamura, C. Baines, Y. Shimizu, K. Kanoda, I. Watanabe, G. Saito, “Magnetic and non-magnetic phases of a quantum spin liquid”, Nature, [査読有] **471** (2011) 612-616 DOI: 10.1038/nature09910

⑦A. Kobayashi, Y. Suzumura, F. Piechon, and G. Montambaux, “Emergence of Dirac electron pair in the charge-ordered state of the organic conductor  $\alpha$ -(BEDT-TTF)<sub>2</sub>I<sub>3</sub>”, Physical Review B, [査読有] **84** (2011) 75450-1-11 DOI: 10.1103/PhysRevB.84.075450

⑧K. Hiraki, S. Harada, K. Arai, Y. Takano, T. Takahashi, N. Tajima, R. Kato and T. Naito, “Local Spin Susceptibility of  $\alpha$ -D<sub>2</sub>I<sub>3</sub> (D = bis(ethylenedithio)tetraselenafulvalene (BETS) and bis(ethylenedithio)dithiadiselenafulvalene (BEDT-STF)) Studied by <sup>77</sup>Se NMR”, Journal of Physical Society of Japan, [査読有] **80** (2011) 014715-1-6 DOI: 10.1143/JPSJ.80.014715

⑨Y. Shimizu, H. Kasahara, T. Furuta, K. Miyagawa, K. Kanoda, M. Maesato, and G. Saito, “Pressure-induced superconductivity and Mott transition in spin-liquid  $\kappa$ -(ET)<sub>2</sub>Cu<sub>2</sub>(CN)<sub>3</sub> probed by <sup>13</sup>C NMR”, Physical Review B, [査読有] **81** (2010) 224508-1-5 DOI: 10.1103/PhysRevB.81.224508

⑩ T. Nishine, A. Kobayashi, and Y. Suzumura, “Tilted-Cone Induced Cusps and Nonmonotonic Structures in Dynamical Polarization Function of Massless Dirac Fermions”, Journal of Physical Society of Japan, [査読有] **79** (2010) 114715-1-14 DOI: 10.1143/JPSJ.79.114715

⑪ F. Kagawa, K. Miyagawa, K. Kanoda, “Magnetic Mott criticality in a kappa-type organic salt probed by NMR”, Nature Physics, [査読有] **5** (2009) 880-884 DOI: 10.1038/nphys1428

⑫A. Kobayashi, Y. Suzumura, H. Fukuyama,

and M. O. Goerbig, “Tilted-Cone-induced easy-plane pseudo-spin ferromagnet and Kosterlitz-Thouless transition in massless Dirac fermions”, Journal of Physical Society of Japan, [査読有] **78** (2009) 114711-1-7 DOI: 10.1143/JPSJ.78.114711

⑬ S. Katayama, A. Kobayashi, and Y. Suzumura, “Electronic Properties Close to Dirac Cone in Two-Dimensional Organic Conductor  $\alpha$ -(BEDT-TTF)<sub>2</sub>I<sub>3</sub>”, Euro Physics Journal, [査読有] **67** (2009) 139-148 DOI: 10.1140/epjb/e2009-00020-0

[学会発表] (計 149 件)

① K. Kanoda, “Quantum spin liquid in organics with quasi-triangular lattices”, The March Meeting 2013 of the American Physical Society (招待講演) 2013 年 3 月 18 日～23 日, ボルチモア(アメリカ)

② Y. Suzumura, “Exotic states of Dirac electrons in organic conductors”, International School and Symposium on Multifunctional Molecule-based Materials (ISSMMM) (招待講演), 2012 年 9 月 24 日, ダラム(イギリス)

③ K. Kanoda, “Overview of superconductivity and Mott physics in organic materials”, 10th MATERIALS & MECHANISMS OF SUPERCONDUCTIVITY CONFERENCE (M2S 2012), (基調講演) 2012 年 7 月 29 日-8 月 3 日, ワシントン(アメリカ)

④ K. Kanoda, “Correlated electrons in triangular-lattice organics with variable Mottness”, International Conference on Highly Frustrated Magnetism (HFM2012), (基調講演) 2012 年 6 月 4 日-8 日, ハミルトン(カナダ)

⑤ K. Kanoda, “NMR study of massless Dirac Fermions in an Organic Conductor”, The “International Conference on Science and Technology of Synthetic Metals 2012” (ICSM 2012) (招待講演) 2012 年 7 月 8 日～13 日, アトランタ(アメリカ)

⑥ Y. Suzumura, “Dirac electron in organic conductors”, The 26th Nishinomiya-Yukawa Memorial International Workshop, Novel Quantum States in Condensed Matter 2011 (招待講演), 2011 年 11 月 22 日, 京都(日本)

⑦ K. Kanoda, “Mott transition, frustrated magnetism and superconductivity in triangular-lattice organics”, International Conference on Strongly Correlated Electron Systems (SCES2011) (招待講演) 2011年8月29日～9月3日, ケンブリッジ(イギリス)

⑧ T. Takahashi, “Charge Fluctuations, Charge Ordering and Zero-gap State in Molecular Conductors”, International School and Workshop on Electronic Crystals (ECRYS2011) (招待講演) 2011年8月25日, カルケーゼ(フランス)

⑨ Y. Suzumura, “Dirac electron and Berry curvature in organic conductors”, International School and Symposium on Multifunctional Molecule-based Materials (ISSMMM), 2011年3月18日, シカゴ(米国)

⑩ K. Kanoda, “Mott physics revealed by triangular-lattice organics”, International Conference on Science and Technology Synthetic Metals 2010 (ICSM2010), (キーノート講演) 2010年7月5日, 京都

⑪ T. Takahashi, K. Hiraki, M. Sakata, Y. Yoshida and G. Saito, “SDW State of  $(\text{TMTSF})_2\text{NbF}_6$  Studied by  $^{77}\text{Se}$  NMR”, The International Conference on Science and Technology of Synthetic Metals (ICSM2010), 2010年7月5日, 京都

⑫ 小林晃人、鈴木順三、福山秀敏、Mark O. Goerbig, “ $\alpha$ -(BEDT-TTF) $_2\text{I}_3$ のゼロギャップ状態における擬スピン強磁性とK T転移”, 日本物理学会 2009年9月25日, 熊本

⑬ K. Hiraki, M. Kitahara, T. Takahashi, H. Mayaffre, M. Horvatic, C. Berthier, T. Yamaguchi, S. Uji, H. Tanaka, B. Zhou, A. Kobayashi and H. Kobayashi, “Se NMR studies on  $\lambda$ -type BETS based superconductors”, International Symposium on Crystalline Organic Metals, Superconductors and Magnets (ISCOM2009), 2009年9月16日, ニセコ

⑭ K. Kanoda, Y. Kurosaki, H. Hashiba, H. Oike, K. Miyagawa, Y. Shimizu, H. Taniguchi, S. Yamashita, Y. Nakazawa, “Spin liquid in triangular-lattice organic Mott insulator”, European-Japanese Joint Conference on Frustration in Condensed Matter, (招待講演) 2009年5月14日, リヨン(フランス)

⑮ 小林晃人、鈴木順三、福山秀敏, “ $\alpha$ -(BEDT-TTF) $_2\text{I}_3$ のゼロギャップ状態における磁場下での電子間斥力の効果”, 日本物理学会, 2009年3月29日, 東京

[図書] (計1件)

① 鹿野田一司, 超伝導ハンドブック (共著), 朝倉書店, 2009年12月

[その他]

ホームページ等

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

鹿野田 一司 (KANODA KAZUSHI)  
東京大学・大学院工学系研究科・教授  
研究者番号: 20194946

### (2) 研究分担者

高橋 利宏 (TAKAHASHI TOSHIHIRO)  
学習院大学・理学部・教授  
研究者番号: 60163276

小林 晃人 (KOBAYASHI AKITO)  
名古屋大学・大学院理学研究科・准教授  
研究者番号: 80335009  
(H22、H23:連携研究者)

鈴木 順三 (SUZUMURA YOSHIKAZU)  
名古屋大学・大学院理学研究科・教授  
研究者番号: 90108449  
(H20、H21、H25:連携研究者)

### (3) 連携研究者

開 康一 (HIRAKI KOICHI)  
学習院大学・理学部・助教  
研究者番号: 00306523

宮川 和也 (MIYAGAWA KAZUYA)  
東京大学・大学院工学系研究科・助教  
研究者番号: 90302760

土射津 昌久 (TSUCHIIZU MASAHISA)  
名古屋大学・大学院理学研究科・助教  
研究者番号: 70362225

森 健彦 (MORI TAKEHIKO)  
東京工業大学・大学院理工学研究科・教授  
研究者番号: 60174372  
(H22、H23、H24)

田嶋 尚也 (TAJIMA NAOYA)  
東邦大学・理学部・准教授  
研究者番号: 40316930  
(H23、H24)