

平成 30 年 6 月 12 日現在

機関番号：12601

研究種目：基盤研究(S)

研究期間：2013～2017

課題番号：25220709

研究課題名(和文) 分子性物質の可制御性を用いた領域横断型研究と境界領域の物性開拓

研究課題名(英文) Interdisciplinary exploration of novel properties taking advantage of the controllability in molecular materials

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(工学部)・教授

研究者番号：20194946

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 175,500,000円

研究成果の概要(和文)：我々は、分子性物質の構造的な可制御性を利用することで、誘電性、伝導性、磁性、半導体といった既成の学問分野の境界領域に潜む未知の物性を発掘し、物質科学における新たな研究の潮流を創出することを目指した。その結果、電子移動型強誘電体における新奇な電氣的/磁氣的励起の発見、電子系におけるガラス形成の学理構築、質量ゼロのDirac電子系における特異な電子相関効果の発見、スピン液体と金属状態の共存状態の発見等、分野を跨ぐ成果を得た。これらの成果は、物性科学における新たな境界領域のシーズとなることが期待される。

研究成果の概要(英文)：We aimed to find novel and interdisciplinary properties of materials across the research fields of dielectrics, conductivity, magnetism and semiconductors, which lead to open new fields in material science, by exploiting the structural flexibility and controllability of molecular materials. As a result, we obtained the following achievements across these fields; the discovery of novel electric and magnetic excitations in a charge-transfer type of ferroelectric, the creation of a research field of electronic glasses, the discovery of anomalous correlation effects in massless Dirac electrons, and the discovery of the coexistence of a spin-liquid and a metal. These achievements are expected to be seeds for future interdisciplinary researches in material science.

研究分野：物性物理

キーワード：分子性導体 強相関電子系 誘電物性 電荷ガラス Dirac電子系 スピン液体 超伝導

## 1. 研究開始当初の背景

P. W. Anderson による "More is different" で象徴されるように、粒子が多数集まると集団としての新たな存在が生まれ、その振る舞いは時として我々の想像をはるかに超える。電子は電荷とスピンという自由度を持つが、物質中のその集団の振舞いは、電荷の静的な性質が誘電性、動的な性質が伝導性、スピン自由度に関わる性質が磁性と分類され、多くの場合、各領域の中で研究が進められている。本来、電子集団はこの枠組みを知る由もなく、領域に囚われずに自由に "More is different" を演じてよいはずである。しかし、現実には領域間を自在に往来して電子物性を研究することは難しい。なぜなら、物性は物質の構造とそれを構成する原子軌道で決まるが、一般に対称性の高い構造を持つ無機物質においては、異なる構造の間を繋ぐことは難しいからである。超伝導と磁性を例に取るなら、高温超伝導は銅と酸素からなる正方格子で発現するのに対し、フラストレート磁性は、三角格子あるいはカゴメ格子がその舞台となる。正方格子を三角格子やカゴメ格子に歪めることはできず、その逆も不可能である。それゆえ、強相関電子系の重要課題である超伝導とフラストレート磁性は密接に関連しているにも関わらず、2つの問題を繋ぐことができない。化学結合で頑強に構築された構造が物性研究の領域間の往来を阻んでいる。

## 2. 研究の目的

本研究では、分子性物質における誘電性、伝導性、磁性、半導体といった多岐に渡る領域での重要課題を取り上げ、有機物質の構造の可制御性を用いて、領域間の境界で新たな物性を開拓する。分子性物質の構造的な特徴を利用することで、既成の研究領域の間を往来する実験方法を確立し、領域間を横断して物性研究を行うことにより、境界領域に潜む未知の物性を発掘し物質科学における新たな研究の潮流を創出することを目指す。以下の4つの課題に取り組む。

### (i) 電子分極型強誘電性と金属-絶縁体転移

中性イオン性転移系において、物理圧力を用いて電子分極強誘電体からイオン分極強誘電体まで制御し、強誘電分極について古典領域から量子領域にわたる包括的な理解を目指す。また、電子分極強誘電体において、分極と伝導性が絡む新規な伝導相の創出に挑む。

### (ii) 電荷ガラス相の確立とソフトマター物理

強相関電子系は、フェルミ流体（電子液体）、電荷秩序（電荷結晶状態）のどちらにもなり得るにもかかわらず、その中間状態に相当する電荷ガラス相という概念は確立していない。我々は、電荷フラストレート系有機導体に着目し、時間分解及び波数空間分解の両側面から電荷ガラス相の実験証拠を見出し、ソフトマターとの類似性に注目して、電荷ガラス状態の新奇物性を開拓し、電子系におけるガラスの科学という新しい学理を構築する。

### (iii) 電荷秩序から Dirac 電子相へ -強相関 Dirac 電子系の物理学-

異方的な三角格子を持つ分子性物質において、強相関電子系としての電荷秩序相と特異な半導体としての Dirac 電子相が圧力をパラメータとして隣接している。この境界圧力領域を研究することにより、Dirac 電子系における電子相関効果を明らかにし、強相関 Dirac 電子系という新たな研究領域を開拓する。

### (iv) スピン液体から超伝導へ

三角格子スピン液体や三角格子強相関超伝導は、半導体分野で近年盛んに議論されているトポロジカル秩序構造を持つ可能性がある。有機物質で実現している三角格子スピン液体、そしてそれを加圧して実現する超伝導状態で、トポロジカル構造を検出する実験的試みを行い、これら異分野を統一する概念の構築を目指す。

本研究の特色は、強相関電子系に発現する電荷ガラス、電子型量子強誘電性、金属-絶縁体転移、Dirac 電子、スピン液体、超伝導といったそれぞれ物理学の大きな問題となっているテーマを、分子性物質が持つ分子配列の可制御性を利用することで、共通の舞台で横断的に研究することにある。それにより、強相関を核として、誘電性、ソフトマター、トポロジーとの間の境界領域を開拓する。

## 3. 研究の方法

本研究課題は境界領域を開拓することを目指しているため、「研究の目的」で述べたように、複数の領域に跨る学際的な研究である。従って、対象とする物質は多様で、本研究が掲げる4つの研究課題も、磁性、誘電性、伝導性、半導体物性と広範囲の分野に跨っていることから、様々な実験手法を必要としている。本研究では、物質に等方的/異方的圧力を印加して構造を変化させ、電子相の質的な変化を追う。加圧法としては、従来の静水圧および一軸加圧に加え、両者を組み合わせる方式も取り入れている。電子状態は、微視的手法と巨視的手法を併用して、複眼的に調べる。物質の微視的な状態については、スピン状態を核磁気共鳴 (NMR) 実験で、電荷状態を核四重局共鳴 (NQR) 実験で調べる。巨視的物性測定は、磁化率、電子輸送特性、熱電輸送特性（ゼーベック効果、ネルンスト効果）及び誘電特性の測定である。電子輸送の動的性質は雑音測定によって調べる。

## 4. 研究成果

以下に、「研究の目的」に記載した4つの課題毎に、成果をまとめる。

### (i) 電子分極型強誘電性と金属-絶縁体転移

電荷移動型強誘電転移系は低圧で中性バンド絶縁体、高圧で電荷が移動したイオン性モット絶縁体になる。更なる加圧でモット転移が起こり新規な金属相が生まれる可能性を睨み、擬1次元系 TTF-QC1<sub>4</sub> と擬2次元系 M<sub>2</sub>P-

TCNQF<sub>4</sub>に8GPaまでの超高压を印加した。その結果、前者の絶縁性は頑強であったのに対し、後者では、室温での電気抵抗が5桁、電荷ギャップが1/5に減少することを見出し、分極性モット転移の実現に迫った。

一方、比較的低圧で起こる、中性バンド絶縁体からイオン性モット絶縁体へのクロスオーバーにおいては、両者とも非磁性絶縁体であるために電氣的にも磁氣的にも不活性と考えられるが、TTF-QCl<sub>4</sub>のクロスオーバー圧力領域において、電気伝導度測定、<sup>1</sup>H核と<sup>13</sup>C核の核磁気共鳴(NMR)実験、Cl核の核四重極共鳴(NQR)実験を詳細に行った結果、電子分極型強誘電体において強く結合していた電荷移動と分子2量体化が分離することで、電荷自由度とスピン自由度の非閉じ込めが起こり、高い電気伝導性と磁性が発現することが明らかになった。さらに、電気伝導は中性/イオン性ドメイン壁の励起が、磁性はソリトンのようなスピン励起が担っていることを実証した。これは、電荷-スピン-格子が強く結合した系から創発的な電氣的、磁氣的自由度が生まれることを示すもので、物性物理学の基礎的な枠組みに関わる知見である。

また、中性イオン性転移物質 TTF-QBr<sub>2</sub>I<sub>2</sub>における、圧力誘起の量子臨界点近傍での強誘電ドメイン壁の動的性質を調べた。その結果、量子臨界点近傍では、比較的小さい電界の印加によって強誘電ドメイン壁を動かせることを見いだした。さらに量子揺らぎの下で動かした強誘電ドメイン壁の運動を解析し、強誘電ドメイン壁の有効質量を算出したところ、強誘電ドメイン壁自体は重い有機分子で構成されているにもかかわらず、あたかも水素原子と同程度の軽さを持つような振る舞いが示された。この発見は、量子揺らぎが強誘電ドメイン壁の運動に与える特異な一面を捉えたものであり、境界領域における新奇物性開拓に資する結果と言える。さらに、ヘリウムを圧力媒体とした連続加圧によって関連物質DMTF-QBr<sub>4</sub>を量子臨界点近傍に位置させ、核四重極共鳴実験を行うことで、反強誘電極の量子臨界揺らぎの直接観測に成功した。

また、電子型強誘電体に期待されるベリー位相由来のいわゆるシフト電流機構による大きなバルク光起電力効果の観測に成功した。光誘起キャリアは200μmを超える距離まで到達し、シフト電流機構は、半導体におけるドリフト電流や拡散電流とは異なる特性を示すことが分かった。

## (ii) 電荷ガラス相の確立とソフトマター物理

幾何学的にフラストレートした格子上の強相関電子系が電荷ガラスになり得ることを検証するために、 $\theta$ -(BEDT-TTF)<sub>2</sub>CsZn(SCN)<sub>4</sub>塩において電気抵抗ノイズ測定及びX線散漫散乱実験を行なった結果、低温において電荷配列に関する自由度がガラス的に凍結し、電荷ダイナミクスの凍結過程と電荷クラスタの成長は密接に関連していることが明らかになった。

さらに、化学的に異なる圧力が印加されて

いると考えられる一連の $\theta$ -(BEDT-TTF)<sub>2</sub>X塩に対して、ガラスのなりやすさの指標として“電荷ガラス形成能”という概念を提唱し、幾何学的フラストレーションが強い物質ほど、高い電荷ガラス形成能(電荷ガラスを形成するのに必要な冷却速度が低い)を示すことを明らかにした。ガラス的なダイナミクスと微視的構造との関連は、構造ガラス分野において現在も議論が続く長年の問題であるが、今回の研究成果は、この問題に対して強相関電子系の切り口から知見を与えている。

また、フラストレーションの強い三角格子物質 $\theta$ -(BEDT-TTF)<sub>2</sub>I<sub>3</sub>において、電荷ガラス/結晶が量子融解していることを示す実験的示唆や、電子が遍歴的であるにも関わらず動的不均一を伴うガラス的な性質を示すことを見出しており、本研究の成果がガラスの物理学に量子性という新たな光を投げかけている。

これまで電荷ガラスとは無縁であった物質に関しても、超急冷を適用することにより電荷ガラス化を創出できるはずという我々の仮説を検証すべく、レーザーや電気パルスを用いて1000 K/sを超える急冷技術を開発した。このような超急冷技術を適用することで、これまで電荷ガラス化することが知られていなかった $\theta$ -(BEDT-TTF)<sub>2</sub>TlCo(SCN)<sub>4</sub>塩においても電荷ガラス化を創出することに成功した。さらに、この物質において、急冷とアニールをレーザーパルス制御によって行うことで、電荷のガラス状態と結晶状態を可逆的かつ不揮発に制御することに成功し、電気抵抗2ケタの変化を伴う強相関電子相変化メモリの原理実証を行なった。この原理に基づき、無機物質においても、電気パルスを用いた磁性の可逆的かつ不揮発な制御に成功しており、分子性固体において確立した概念が物質系の垣根を越えて、その普遍性が実証されつつあると言える。

また、ガラスの結晶化の観測にも成功した。すなわち、有機伝導体における電荷ガラスの結晶化過程を電気抵抗とNMR測定によって調べた結果、結晶化に要する時間の温度依存性が、広く構造ガラスで観測される特徴を示す一方で、低温においては電荷ガラスが中間相を経て結晶化することが明らかになった。

## (iii) 電荷秩序から Dirac 電子相へ -強相関 Dirac 電子系の物理学-

分子性物質 $\alpha$ -(BEDT-TTF)<sub>2</sub>I<sub>3</sub>における質量ゼロのディラック電子に対する電子相関効果をNMR実験と理論計算を併用することで、長距離および短距離クーロン相互作用の効果を区別して明らかにした。すなわち、分子サイト選択<sup>13</sup>C NMR測定から得られる傾斜ディラックコーンの $k$ -空間局所磁化率の実験結果を、Weyl方程式に基づく長距離クーロン相互作用の繰り込み計算で解析することにより、フェルミ速度がディラック点近傍で対数発散的に繰り込みを受けコーンが先鋭化していること、および、実験結果をハバードモデルで解析することにより、短距離クーロン相互作用によ

ってフェリ磁性的にスピンの分極していることを明らかにした。

さらに、面平行磁場下の NMR 緩和率が低温の 3 K 以下で予期せぬ増大を示したが、理論計算との比較により、この異常が、バレー間の電子-ホール対 (エキシトン) 形成の揺らぎによるものであることが分かり、ディラック電子における動的質量生成機構の詳細が初めて明らかになった。これは、ディラック電子の強相関効果を磁気的測定に基づいて明らかにした初めての例である。尚、電気抵抗においても、この現象に関連すると考えられる低温での増大を観測している。

また、 $\alpha$ -(BEDT-TTF)<sub>2</sub>I<sub>3</sub> が電荷秩序相からディラック電子相に転移する臨界圧力近傍で、電荷秩序相側で電荷励起がギャップレスとなること、一方、ディラック電子相側で電気抵抗の低温での増大が臨界圧に向かって増強されることを見出した。それぞれ、理論で予言された端電流の存在とディラック電子への電子相関効果を支持する結果である。また、 $\alpha$ -(BEDT-TTF)<sub>2</sub>I<sub>3</sub> においては、ディラック電子相が電荷秩序相から生まれているが、類縁物質の  $\theta$ -(BEDT-TTF)<sub>2</sub>I<sub>3</sub> では、ディラック電子相が金属相から加圧によって生まれることを NMR 実験で明らかにした。

垂直磁場下では質量ゼロのディラック電子系に励起ギャップが生じることが知られているが、 $\alpha$ -(BEDT-TTF)<sub>2</sub>I<sub>3</sub> について、印加磁場の角度をパラメータとして磁気抵抗を測定することにより、励起ギャップがバレーギャップ起源からゼーマンギャップ起源へと移り変わることを明らかにした。

#### (iv) スピン液体から超伝導へ

分子性三角格子 Mott 転移系に対し、金属-絶縁体転移・磁性・超伝導にまたがる成果を得た。

まず、強相関電子系が示す最も基本的な現象の一つであるモット転移を異なる 3 つの物質で調べたところ、どの物質も転移領域の高温側で電気抵抗が量子臨界スケールリングを満たすこと、すなわち、電子系が量子臨界状態にあることを明らかにした。また、Mott 絶縁体 EtMe<sub>3</sub>Sb[Pd(dmit)<sub>2</sub>]<sub>2</sub> を加圧により金属化したときに、低温で非常に遅い電子揺らぎを伴う特異な電子状態が実現することを見出した。これは通常の Mott 転移の枠組みを超えた新奇電子状態—電子 Griffiths 相と呼ぶべき相—が実現している可能性を示すもので、項目 (ii) の電荷ガラスにも関連する発見である。

一方、モット絶縁体側では、正三角格子に近い  $\kappa$ -(BEDT-TTF)<sub>2</sub>Cu<sub>2</sub>(CN)<sub>3</sub> は磁気秩序の無いスピン液体となるが、モット転移近傍の低温における電気抵抗の振る舞いと、さらにそれによって得られたモット転移の温度-圧力相図の熱力学的考察から、スピン液体のモット転移が連続転移的であることが示され、スピン液体状態がスピノンと呼ばれる特異な磁気励起状態をもつとする理論モデルを支持することとなった。また、スピン液体を磁気熱量

測定で調べたところ、低温磁場中でスピン系と格子系が熱的にデカップルするという予期せぬ振る舞いを見出した。スピン液体が示す極めて特異な性質であると考えられる。

他方、反強磁性磁気秩序を示す歪んだ三角格子系  $\kappa$ -(BEDT-TTF)<sub>2</sub>Cu[N(CN)<sub>2</sub>]Cl が、X線照射による乱れの導入によって、量子スピン液体へと変わることを明らかにし、乱れがスピン液体を生むもう一つのパラメータであることを実証した。また、近年新たに合成された水素結合を持つ三角格子系分子性物質  $\kappa$ -H<sub>2</sub>(Cat-EDT-TTF)<sub>2</sub> が量子スピン液体であることを NMR 実験で示した。このように、量子スピン液体が広範な物質に現れることを明らかにし、スピン液体研究を一段と加速することができた。

超伝導については、フラストレーションの弱い異方的な三角格子系がモット転移近傍にあるとき、 $T_c$  の 2 倍という高い温度から超伝導揺らぎ (preformed pairs) が起こることを明らかにした。これは、電子が局在化する寸前で起こる位相揺らぎの増大に起因すると考えられる。また、その有無が議論されている強磁場中で超伝導秩序変数が空間変化する FFLO 超伝導状態について、NMR 実験でその存在を示す結果を得た。一方、三角格子量子磁性が融解する際に発現すると期待されるトポロジカルな内部構造を持つ特異な超伝導を求めて、三角格子量子磁性体 EtMe<sub>3</sub>P[Pd(dmit)<sub>2</sub>]<sub>2</sub> の圧力下超伝導状態 ( $T_c \sim 5$ K) を NMR で調べた結果、ナイトシフトに、 $p$  波あるいは  $f$  波的な内部構造を持つトリプレット超伝導を示唆する特徴を見出した。

また、ドーピングされた三角格子物質がスピン液体性と金属性を併せ持つことを実証した。さらに、このドーピングされたスピン液体が、加圧によって非フェルミ液体からフェルミ液体に量子相転移あるいはクロスオーバーすること、それに伴い、低温で現れる超伝導が BEC 型の電子対から BCS 型へとクロスオーバーすることを見出した。加力によって電子相関が弱められ、禁止されていた格子点当たりのホールの二重占有が許されることで起こる超伝導性の変化であると考えられる。

#### 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 51 件)

- ① H. Oike, M. Suda, M. Kamitani, A. Ueda, H. Mori, Y. Tokura, H. M. Yamamoto, and F. Kagawa, "Size effects on supercooling phenomena in quantum materials", 査読有, Phys. Rev. B **97**, 085102 (2018) (7 pages), DOI: 10.1103/PhysRevB.97.085102.
- ② Takayuki Isono, Shiori Sugiura, Taichi Terashima, Kazuya Miyagawa, Kazushi Kanoda and Shinya Uji, "Spin-lattice decoupling in a triangular-

- lattice quantum spin liquid”, 査読有, Nature Commun. **9**, 1509 (2018), (6pages).  
DOI: 10.1038/s41467-018-04005-1
- ③ Tetsuya Furukawa, Kazuhiko Kobashi, Yosuke Kurosaki, Kazuya Miyagawa, and K. Kanoda, “Quasi-continuous transition from a Fermi liquid to a spin liquid in  $\kappa$ -(ET)<sub>2</sub>Cu<sub>2</sub>(CN)<sub>3</sub>”, 査読有, Nature Commun. **9**, 307 (2018), (7pages), DOI: 10.1038/s41467-017-02679-7.
- ④ Michihiro Hirata, Kyohei Ishikawa, Genki Matsuno, , Akito Kobayashi, Kazuya Miyagawa, Masafumi Tamura, Claude Berthier, Kazushi Kanoda, “Anomalous spin correlations and excitonic instability of interacting 2D Weyl fermions”, 査読有, Science, **358**, 1403-1406 (2017), (4 pages), DOI: 10.1126/science.aan5351.
- ⑤ T. Furukawa, Y. Shimokawa, K. Kobayashi, and T. Itou, “Observation of current-induced bulk magnetization in elemental tellurium”, 査読有, Nature Commun. **8**, 954 (2017), (5pages), DOI: 10.1038/s41467-017-01093-3.
- ⑥ H. Oike, Y. Suzuki, H. Taniguchi, Y. Seki, K. Miyagawa, and K. Kanoda, “Anomalous metallic behaviour in the doped spin liquid candidate  $\kappa$ -(ET)<sub>4</sub>Hg<sub>2.89</sub>Br<sub>8</sub>”, 査読有, Nature Commun. **8**, 756 (2017), (7pages). DOI: 10.1038/s41467-017-00941-6.
- ⑦ T. Sato, K. Miyagawa, K. Kanoda, “Electronic crystal growth”, 査読有, Science **357**, 1378-1381 (2017), (4 pages), DOI:10.1126/science.aal2426.
- ⑧ H. Yamakawa, T. Miyamoto, T. Morimoto, T. Terashige, H. Yada, N. Kida, M. Suda, H. M. Yamamoto, R. Kato, K. Miyagawa, K. Kanoda and H. Okamoto, “Mott transition by an impulsive dielectric breakdown”, 査読有, Nature Mat. **10**, 1100-1105, (2017), (6pages), DOI:10.1038/nmat4967.
- ⑨ T. Itou, E. Watanabe, S. Maegawa, A. Tajima, N. Tajima, K. Kubo, R. Kato and K. Kanoda, “Slow dynamics of electrons at a metal-Mott insulator boundary in an organic system with disorder”, 査読有, Science Adv. **3**, e1601594 (2017), (6pages), DOI:10.1126/sciadv.1601594.
- ⑩ Yi Zhou, Kazushi Kanoda, and Tai-Kai Ng, “Quantum Spin Liquid States”, 査読有, Rev. Mod. Phys., **85**, 025003 (2017) (50pages), DOI: 10.1103/RevModPhys.89.025003.
- ⑪ F. Kagawa, H. Oike, W. Koshibae, A. Kikkawa, Y. Okamura, Y. Taguchi, N. Nagaosa, and Y. Tokura, “Current-induced viscoelastic topological unwinding of metastable skyrmion strings”, Nature Commun. **8**, 1332 (2017) (8 pages), DOI: 10.1038/s41467-017-01353-2.
- ⑫ F. Kagawa, S. Horiuchi, and Y. Tokura, “Quantum Phenomena Emerging Near a Ferroelectric Critical Point in a Donor-Acceptor Organic Charge-Transfer Complex”, Crystals **7**, 106 (2017) (12 pages), DOI: 10.3390/cryst7040106.
- ⑬ F. Kagawa and H. Oike, “Quenching of Charge and Spin Degrees of Freedom in Condensed Matter”, 査読有, Adv. Mat. **29**, 1601979 (2017) (8 pages), DOI: 10.1002/adma.201601979.
- ⑭ Takayuki Isono, Taichi Terashima, Kazuya Miyagawa, Kazushi Kanoda, and Shinya Uji, “Quantum criticality in an organic spin-liquid insulator  $\kappa$ -(BEDT-TTF)<sub>2</sub>Cu<sub>2</sub>(CN)<sub>3</sub>”, 査読有, Nature Commun. **7**, 13494 (2016) (5pages), DOI:10.1038/ncomms13494.
- ⑮ Michihiro Hirata, Kyohei Ishikawa, Kazuya Miyagawa, Masafumi Tamura, Claude Berthier, Denis Basko, Akito Kobayashi, Genki Matsuno and Kazushi Kanoda, “Observation of an anisotropic Dirac cone reshaping and ferrimagnetic spin polarization in an organic conductor” 査読有, Nature Commun. **7**, 12666 (2016) (14 pages), DOI:10.1038/ncomms12666
- ⑯ F. Kagawa, N. Minami, S. Horiuchi, Y. Tokura, “A thermal domain-wall creep near a ferroelectric quantum critical point”, 査読有, Nature Commun. **7**, 10675-1-6. (2016), DOI:10.1038/ncomms10675
- ⑰ H. Oike, A. Kikkawa, N. Kanazawa, Y. Taguchi, M. Kawasaki, Y. Tokura, F. Kagawa, “Interplay between topological and thermodynamic stability in a metastable magnetic skyrmion lattice”, 査読有, Nature Phys. **12**, 62-66 (2016), DOI:10.1038/ncomms10675.
- ⑱ T. Furukawa, K. Miyagawa, H. Taniguchi, R. Kato, and K. Kanoda, “Quantum criticality of Mott transition in organic materials”, 査読有, Nature Phys. **11**, 221-225 (2015), DOI:10.1038/nphys3235.
- ⑲ H. Mayaffre, S. Kramer, M. Horvatic, C. Berthier, K. Miyagawa, K. Kanoda and V. F. Mitrovic, “Evidence of Andreev bound states as a hallmark of

the FFLO phase in  $\kappa$ -(BEDT-TTF)<sub>2</sub>Cu(NCS)<sub>2</sub>”, 査読有, Nature Phys. **10**, 928-932 (2014), DOI:10.1038/nphys3121.

[学会発表] (計 151 件)

- ① F. Kagawa, A thermal domain-wall creep near a ferroelectric quantum critical point, APS March meeting (招待講演), 2018年3月5-9日, ロサンゼルス(米国).
- ② F. Kagawa, Kinetic approach toward metastable states —charge glass, hidden magnetic state, and superconductivity, 12th International Symposium on Crystalline Organic Metals, Superconductors and Magnets (ISCOM2017), (招待講演) 2017年9月24-29日, 宮城蔵王ロイヤルホテル(宮城県).
- ③ K. Kanoda, Doping a spin liquid, Gordon Research Conference on Topological & Correlated Matter: From Fundamentals to New Discoveries (招待講演), 2017年06月18-23日, 香港(中国).
- ④ T. Itou, Possible triplet superconductivity in EtMe<sub>3</sub>P[Pd(dmit)<sub>2</sub>]<sub>2</sub>, International Workshop on Superconductivity and Related Functional Materials 2016 (招待講演), 2016年12月20日-22日, 物質・材料研究機構(茨城県).
- ⑤ T. Itou, Superconductivity realized in an organic system with a triangular lattice, 11th International Conference on New Theories, Discoveries, Applications of Superconductors and Related Materials (招待講演), 2016年09月12日-16日, ブレッド(スロベニア).
- ⑥ K. Kanoda, Quantum criticality, preformed pairs and spin liquids emerging near Mott transition in triangular-lattice organics, International Conference on Strongly Correlated Electron Systems (SCES 2016) (基調講演), 2016年05月09日-13日, 杭州市(中国).
- ⑦ K. Kanoda, Diverse manifestation of electron correlation in molecular materials, The 11th International Symposium on Crystalline Organic Metals, Superconductors and Magnets (ISCOM2015) (招待講演), 2015年09月07日-11日, バート・ゲギング(ドイツ).
- ⑧ K. Kanoda, Quantum critical transport near Mott transition, The 27th International Conference on Low Temperature Physics (LT27) (基調講演), 2014年08月06日-13日, ブエノスアイレス(アルゼンチン).

[図書] (計 2 件)

- ① 鹿野田一司、宇治進也 編著, 朝倉書店, 分子性物質の物理, 2015年, 212 ページ
- ② T. Furukawa and K. Kanoda, “Quantum critical transport near Mott transition in organic materials”, (Pan Stanford Publishing, S. Kravchenko, edited, 2017), 117-143.

[産業財産権]

○ 出願状況 (計 0 件)

○ 取得状況 (計 2 件)

名称: 磁気素子、スキルミオンメモリ及び演算処理装置

発明者: 大池広志、賀川史敬、十倉好紀

権利者: 同上

種類: 特許

番号: 特開 2017-041580

出願年月日: 2015年8月21日

国内外の別: 国内

名称: Magnetic element, skyrmion memory and arithmetic processing unit

発明者: H. Oike, F. Kagawa, Y. Tokura

権利者: 同上

種類: 特許

番号: US9704550B2

出願年月日: 2016年5月31日

国内外の別: 国外

[その他]

ホームページ等

[http://park2014.itc.u-tokyo.ac.jp/kanoda\\_lab/kiban\\_S/index.html](http://park2014.itc.u-tokyo.ac.jp/kanoda_lab/kiban_S/index.html)

## 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

賀川 史敬 (KAGAWA Fumitaka)

東京大学・大学院工学系研究科・准教授

研究者番号: 30598983

伊藤 哲明 (ITOU Tetsuaki)

東京理科大学・理学部第一部 応用物理学科・准教授

研究者番号: 50402748

(3) 連携研究者

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

(4) 研究協力者