

令和 3 年 5 月 25 日現在

機関番号：12601

研究種目：基盤研究(B)（一般）

研究期間：2018～2020

課題番号：18H01164

研究課題名（和文）三軸制御回転磁場下の磁化測定の実現と対称性の破れへの応用

研究課題名（英文）Probing broken symmetry by triple-axis controlled magnetization measurements

研究代表者

榊原 俊郎（Sakakibara, Toshiro）

東京大学・物性研究所・教授

研究者番号：70162287

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 12,500,000円

研究成果の概要（和文）：固体電子系の相転移に伴う対称性の破れを検出する新たな測定手段として、3軸制御の回転磁場下磁化測定装置を開発した。この装置は、0.3Kの極低温において試料の特定の結晶軸のまわりで正確に磁場を回転させながら磁化を測ることが可能である。この装置を用いて、ビスマスの3回軸についての対称性の破れの検証を行った。先行研究の磁気抵抗測定では低温磁場中で3回対称性の破れが報告されていたが、磁化測定の結果、有意な対称性の低下は認められなかった。

研究成果の学術的意義や社会的意義

相転移における対称性の破れを検出する手段としてX線や中性子による構造解析は強力な実験手段である。しかし、電子系における相転移には、これらの回折実験では検出できない場合が少なくない。ある種の軌道整列やネマチック転移、異方的超伝導転移などがそのような例に含まれる。本課題で開発した回転磁場下の磁化測定装置は、このような対称性の破れを検出する新たな測定手段を提供するもので、相転移現象の解明に広く応用できるものである。

研究成果の概要（英文）：We have developed a triple-axis-controlled magnetization measurement system as a new means of detecting symmetry breaking associated with phase transitions in solid-state electron systems. This system can measure the magnetization of a sample at low temperatures down to 0.3 K with precisely rotating the magnetic field around a specific crystal axis. Using this apparatus, we have examined the spontaneous symmetry breaking of the threefold valley degeneracy in Bi, which was reported in previous magnetoresistivity measurements at low temperatures in an applied magnetic field. In our magnetization measurements, however, we found no evidence of a threefold symmetry breaking in Bi.

研究分野：固体物理学

キーワード：磁性 相転移 対称性の破れ 磁化測定

### 1. 研究開始当初の背景

気相・液相型を除くと、相転移の本質は「対称性の破れ」である。対称性の破れを検出する手段として X 線や中性子による構造解析は強力な実験手段である。しかし、電子系における相転移には、これらの回折実験では検出できない場合が少なくない。ある種の軌道整列やネマチック転移、異方的超伝導転移などがそのような例に含まれる。このような対称性の破れを検出する測定手法として、回転磁場下の熱伝導測定や比熱測定が各種異方的超伝導体に対して行われ、そのギャップ構造の特定に有効であることがわかっている。一方、磁化測定に関しては、これまでのところ、精度の良い回転磁場下の実験はあまり行われていなかった。相転移の機構によっては磁化に顕著な異常が現れる場合が少なくない。精密な回転磁場下の磁化測定技術の開発は学術的にも重要であると考えられた。

### 2. 研究の目的

本研究の目的は、高精度な回転磁場下の磁化測定により対称性の破れを高感度に検出する装置を開発し、各種のエキゾチックな相転移現象に適用することにある。対称性の破れを精度良く検出するには、磁場を試料の対称軸に完全に平行に向けた状態で試料を回転させる必要があり、これには三軸の回転機構が必要である。申請者の知る限り、このような磁化測定装置はこれまで作製されたことはない。本研究では、以下に示すように、申請者が開発し測定実績のある一軸回転磁場下の磁化測定装置に二軸ゴニオメータを組み合わせることで、三軸制御を可能にし、精密な回転磁場下の磁化測定および磁歪測定を実現させる。また、開発した装置を用いて、半金属ピスマスの磁気抵抗測定で報告された 3 回軸のバレー対称性の自発的破について、磁化測定で検証することを試みる。

### 3. 研究の方法

本研究で使用する回転磁場下の磁化測定装置を図 1 に示す。水平磁場を発生するスプリット型超伝導マグネットを用い、回転機構によりヘリウム 3 冷凍機を回すことで試料に対して 360 度の磁場回転ができる。磁化の検出には新たに開発した自作のキャパシタンス式トランスデューサーを用いている。これは垂直方向の力成分を電気容量の変化として高感度に検出できるデバイスである。また可動式の z ステージを用いて試料を磁場中心から垂直方向に 2cm 程度離れた位置にくるようにセットすることにより、マグネットの自然磁場勾配を利用してファラデー法による磁化測定が行える。通常、トランスデューサーの出力は磁化信号に加えて磁気トルクの寄与が現れる。このトルクの寄与を差し引くために、+z と -z の位置でそれぞれ測定を行い、差を取ることで磁化が得られる。一方、場合によってはトルク信号の方が有用なことがある。その時には z=0 の位置で測定を行う。このトランスデューサーは軸対称の構造のため、水平面内の磁場回転に対して一定の感度で測定が行える。磁気異方性が非常に大きい試料の場合に軸回りの磁気トルクの影響を抑えるため、トランスデューサーのデザインを見直し、改良を施した。測定可能な磁場温度範囲は、0~8T、0.3K 以上である。

本課題では、この磁化測定装置のトランスデューサーを図 2 に示すようにピエゾ駆動式二軸ゴニオメータ (attocube ANGt101/ANGp101) に乗せることにより、試料の対称軸を正確に磁場回転軸に一致させた状態で磁場回転できるようにした。ピエゾ駆動式ゴニオメータの可動範囲は ±3 度程度しかないが、試料の最終的な軸立て用には十分である。このゴニオメータには抵

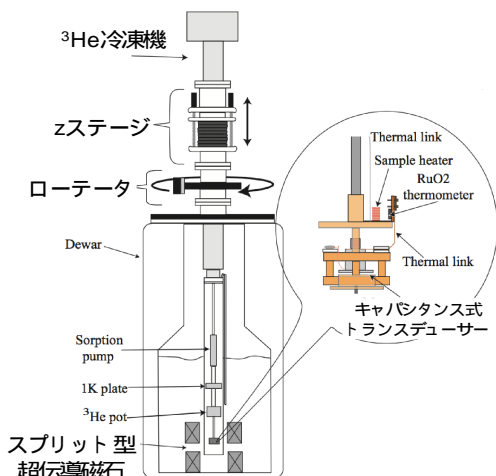


図 1. 回転磁場下の磁化測定装置

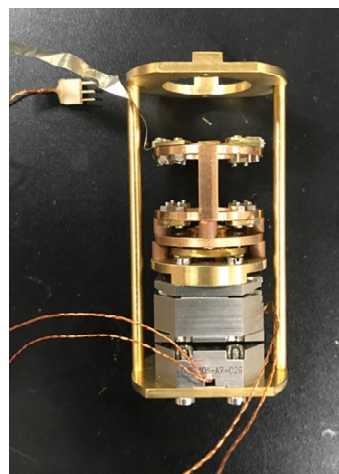


図 2. ピエゾ駆動 2 軸ゴニオとキャパシタンス式トランスデューサー

抗式エンコーダが内蔵されているため、角度を正確に読み取ることができるものである。

#### 4. 研究成果

作製した磁化測定装置の性能をチェックするために、古典スピナイス化合物である  $\text{Ho}_2\text{Ti}_2\text{O}_7$  (HTO) の磁化測定を行った。HTO では  $\text{Ho}^{3+}$  イオンが頂点共有した正四面体からなるパイロクロア格子を形成している。各  $\text{Ho}^{3+}$  イオンは正四面体の中心と各頂点を結ぶ方向に強いイジング異方性を有するため、強磁性相互作用のもとで強い幾何学的フラストレーション効果が生じる。その結果、基底状態は各四面体ユニットについて 2 つのスピンの内向き、2 つが外向きのいわゆる 2-in, 2-out 構造になり、巨視的縮退が残る。この縮退度は氷の結晶における水素原子の配置の問題と等価なため、スピナイスと呼ばれている。この系の希土類サイトの局所対称性は三方晶であるが、グローバルには立方晶であるため、磁気異方性も立方対称である。2-in, 2-out 状態における [001], [111] および [110] 方向の飽和磁化は、それぞれ  $\text{Ho}^{3+}$  イオンの固有磁気モーメント ( $10.6 \mu_B$ ) の  $1/3$ ,  $1/3$ ,  $1/6$  倍になる [1]。1 T の磁場下では各磁場方向について 2-in, 2-out 状態が保たれるので、この異方性が

観測されるはずである。図 3 に (1-10) 面内で磁場を回転させたときの磁化の角度変化の測定結果を示す。温度は 0.3 K である。また横軸は [001] 方向から測った磁場角度である。1 T の測定結果は、[001] 方向が  $6.1 \mu_B$ 、[111] 方向が  $3.4 \mu_B$ 、[110] 方向が  $4.35 \mu_B$  となっていて、予想どおりの磁化の異方性を示している。[111] 方向付近のヒステリシスは、スピナイス特有の長時間緩和によるもので、磁場が [001] 付近のときのスピン配置と [110] 付近のときのスピン配置との切り替わりの緩和時間が低温において増大することによる。

磁場を上げていくと、[001] および [110] 方向の磁化の値は変化しないが、[111] 方向には、ある臨界磁場において 2-in, 2-out 状態が壊れて 3-in, 1-out 状態への転移が起きる。HTO の場合、この転移磁場は 1.7 T 付近である。3-in, 1-out 状態における [111] 方向の磁化の値は固有磁気モーメントの  $1/2$  倍 [1]、およそ  $5.3 \mu_B$  になる。図 3 の 2 T および 3 T のデータには、この [111] 方向の転移の様子が明瞭に現れている。また図 3 の結果から、この転移が低温では気相液相型の 1 次転移になっていることがわかる。以上のように、スピナイス化合物 HTO の実験から立方対称の強い磁気異方性が正しく観測されたので、本磁化測定装置が期待どおりに稼働することが確認された。

この装置を用いて、半金属 Bi における対称性の破れの検証を行った。Bi は L 点に葉巻型の小さいフェルミ面 (電子面) を 3 つ持つ。これらは 3 回軸に対してほぼ垂直方向に対称に配置している。この 3 回対称性が低温磁場中で破れている可能性が Zhu らによる磁気抵抗測定から報告された [2]。図 4 は温度 10 K における結果で、磁場を 3 回軸の回りに回転させたとき、0.02 T では電子構造の 3 回対称性を反映して 6 回振動が観測されるが、2 T では明瞭な 2 回振動成分が現れていて、対称性の破れを示唆している。この現象は 20 K 以下の低温で現れ、その機構としてネマチックバレー転移の可能性が議論された。この対称性の破れを熱力学量から検証するために、回転磁場下の磁化測定を行った。用いた試料は薄板 Bi 単結晶で、面に垂直方向に 3 回軸があるものである。測定の結果、磁化信号よりもトルク信号の方が大きく出ることがわかったので、データ収集はトルクモードにて行った。図 5 に結果を示す。

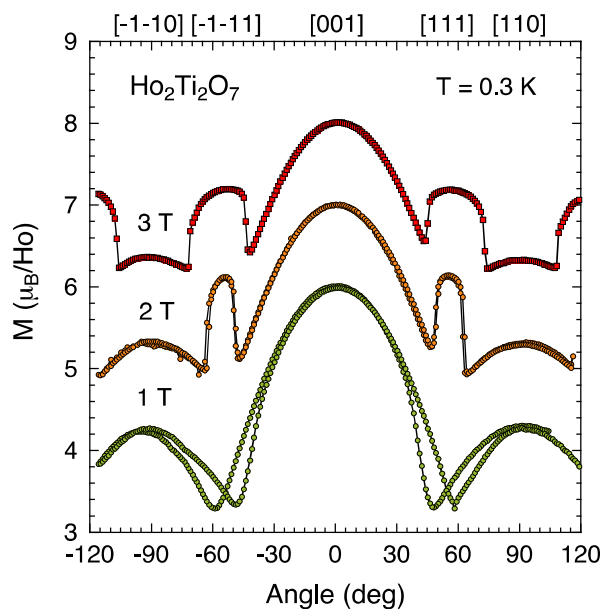


図 3 .HTO の磁化の磁場方向変化 .磁場は(1-10)面内で回転している .見やすくするために磁化の値は縦方向にシフトさせてある .

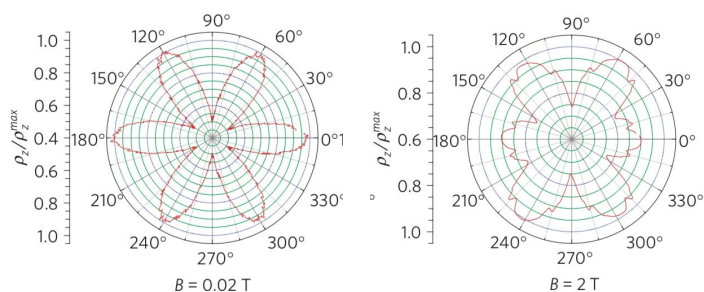


図 4 .ピスマスの磁気抵抗の角度依存性 .磁場は 3 回軸のまわりに回転させている .温度は 10 K (文献 2 より) .

るが、2 T では明瞭な 2 回振動成分が現れていて、対称性の破れを示唆している。この現象は 20 K 以下の低温で現れ、その機構としてネマチックバレー転移の可能性が議論された。この対称性の破れを熱力学量から検証するために、回転磁場下の磁化測定を行った。用いた試料は薄板 Bi 単結晶で、面に垂直方向に 3 回軸があるものである。測定の結果、磁化信号よりもトルク信号の方が大きく出ることがわかったので、データ収集はトルクモードにて行った。図 5 に結果を示す。

測定温度は2 Kで、2 Tの磁場を3回軸のまわりに回転させている。明確な6回振動に加えて細かい振動が見られるが、これはドハース・ファンアルフェン振動によるものと考えられる。葉巻型のフェルミ面の長軸方向に垂直に近い磁場方向のときに、ドハース・ファンアルフェン振動の角度変化が大きくなると考えられるので、振動が速くなっていく方向が等分線軸方向と考えられる。一方、今回の実験からは有意な3回対称性の破れが検出されなかった。文献[2]でも明確な相転移などの異常は見つかっていない。今後、ドハース・ファンアルフェン振動の角度変化を定量的に調べることも重要であろう。

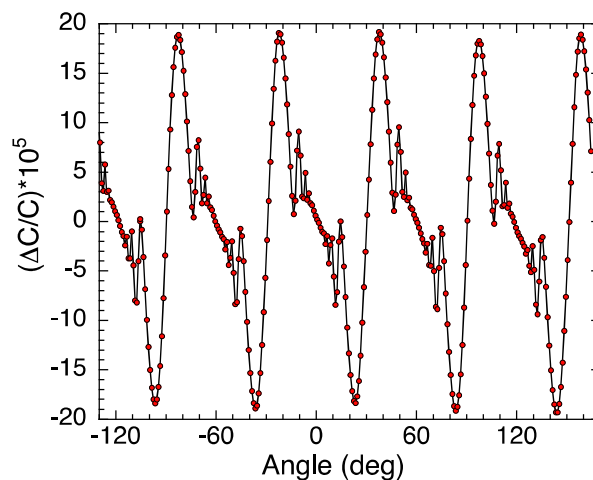


図5. ビスマスのトルク振動。磁場(2 T)は3回軸の回りで回転させている。温度は2 K。

#### 引用文献

- [1] H. Fukazawa et al., Phys. Rev. B 65, 054410 (2002).
- [2] Z. Zhu et al., Nat. Phys. 8, 89 (2012).

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計11件（うち査読付論文 11件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 Shunichiro Kittaka, Takanori Taniguchi, Kazumasa Hattori, Shota Nakamura, Toshiro Sakakibara, Masashi Takigawa, Masaki Tsujimoto, Akito Sakai, Yosuke Matsumoto, Satoru Nakatsuji	4. 巻 89
2. 論文標題 Field-Orientation Effect on Ferro-Quadrupole Order in PrTi <sub>2</sub> Al <sub>20</sub>	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 J. Phys. Soc. Jpn.	6. 最初と最後の頁 043701(1-4)
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.7566/JPSJ.89.043701	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Y Kono, T Okabe, N Uemoto, Y Iwasaki, Y Hosokoshi, S Kittaka, T Sakakibara, H Yamaguchi	4. 巻 101
2. 論文標題 Magnetic properties of a spin-1/2 honeycomb lattice antiferromagnet	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Phys. Rev. B	6. 最初と最後の頁 014437(1-6)
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevB.101.014437	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Toshiro Sakakibara, Shota Nakamura, Shunichiro Kittaka, Masashi Kakihana, Masato Hedo, Takao Nakama, Yoshichika Onuki	4. 巻 88
2. 論文標題 Fluctuation-Induced First-Order Transition and Tricritical Point in EuPtSi	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 J. Phys. Soc. Jpn.	6. 最初と最後の頁 093701-1-5
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.7566/JPSJ.88.093701	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Y Kono, S Kittaka, H Yamaguchi, Y Hosokoshi, T Sakakibara	4. 巻 100
2. 論文標題 Emergent critical phenomenon in spin-1/2 ferromagnetic-leg ladders: Quasi-one-dimensional Bose-Einstein condensate	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Phys. Rev. B	6. 最初と最後の頁 054442(1-8)
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevB.100.054442	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Takanori Taniguchi, Kazumasa Hattori, Makoto Yoshida, Hikaru Takeda, Shota Nakamura, Toshiro Sakakibara, Masaki Tsujimoto, Akito Sakai, Yosuke Matsumoto, Satoru Nakatsuji, Masashi Takigawa	4. 巻 88
2. 論文標題 Field-Induced Switching of Ferro-Quadrupole Order Parameter in PrTi2Al20	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 J. Phys. Soc. Jpn.	6. 最初と最後の頁 084707(1-20)
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.7566/JPSJ.88.084707	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 N. Uemoto, Y. Kono, S. Kittaka, T. Sakakibara, T. Yajima, Y. Iwasaki, S. Miyamoto, Y. Hosokoshi and H. Yamaguchi	4. 巻 99
2. 論文標題 S=1/2 ferromagnetic Heisenberg chain in a verdazyl-based complex	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Phys. Rev. B	6. 最初と最後の頁 094418 (1-6)
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevB.99.094418	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 S. Kittaka, S. Nakamura, H. Kadowaki, H. Takatsu and T. Sakakibara	4. 巻 87
2. 論文標題 Field-rotational Magnetocaloric Effect: A New Experimental Technique for Accurate Measurement of the Anisotropic Magnetic Entropy	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 J. Phys. Soc. Jpn.	6. 最初と最後の頁 073601 (1-5) _
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.7566/JPSJ.87.073601	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 S. Nakamura, A. Kasahara, S. Kittaka, Y. Kono, Y. Onuki and T. Sakakibara	4. 巻 87
2. 論文標題 Low-Temperature Magnetization Measurements with Precise Two-Axis Alignment of the Sample Orientation	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 J. Phys. Soc. Jpn.	6. 最初と最後の頁 114001 (1-5) _
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.7566/JPSJ.87.114001	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Y. Iwasaki, T. Okabe, N. Uemoto, Y. Kono, Y. Hosokoshi, S. Nakamura, S. Kittaka, T. Sakakibara, M. Hagiwara, T. Kawakami, H. Yamaguchi	4. 巻 101
2. 論文標題 Magnetic properties of a spin-2 antiferromagnet with metal-radical hybrid spins	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Phys. Rev. B	6. 最初と最後の頁 174412(1-6)
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevB.101.174412	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 K. Kataoka, D. Hirai, T. Yajima, D. Nishio-Hamane, R. Ishii, K.-Y. Choi, D. Wulferding, P. Lemmens, S. Kittaka, T. Sakakibara, H. Ishikawa, A. Matsuo, K. Kindo and Z. Hiroi	4. 巻 89
2. 論文標題 Kitaev Spin Liquid Candidate OsxCl3 Comprised of Honeycomb Nano-Domains	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 J. Phys. Soc. Jpn.	6. 最初と最後の頁 114709(1-9)
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.7566/JPSJ.89.114709	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 T. Sakakibara, S. Nakamura, S. Kittaka, M. Kakihana, M. Hedo, T. Nakama, Y. Onuki	4. 巻 90
2. 論文標題 Magnetic Phase Transitions of the 4f Skyrmion Compound EuPtSi Studied by Magnetization Measurements	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 J. Phys. Soc. Jpn.	6. 最初と最後の頁 064701(1-8)
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.7566/JPSJ.90.064701	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計14件 (うち招待講演 0件 / うち国際学会 1件)

1. 発表者名 河野洋平, 橘高俊一郎, 榊原俊郎, 山口博則, 細越裕子, 上本菜央, 元木大介
2. 発表標題 フェルダジラジカルをベースとした低次元量子磁性体の低温物性
3. 学会等名 日本物理学会2019年秋季大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 元木大介, 河野洋平, 橘高俊一郎, 榊原俊郎, 高津浩, 門脇広明
2. 発表標題 スピンアイスDy <sub>2</sub> Ti <sub>2</sub> O <sub>7</sub> の気相液相転移の本質的転移幅について
3. 学会等名 日本物理学会2019年秋季大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 唐楠, 木村健太, 酒井明人, 中村翔太, Mingxuan Fu, 松本洋介, 榊原俊郎, 中辻知
2. 発表標題 量子スピンアイス物質Pr <sub>2</sub> Zr <sub>2</sub> O <sub>7</sub> における四極子-歪み相互作用の研究
3. 学会等名 日本物理学会第75回年次大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Y. Kono, S. Kittaka, H. Yamaguchi, Y. Hosokoshi and T. Sakakibara
2. 発表標題 Quasi-one-dimensional Bose-Einstein Condensation in Spin- 1/2 Ferromagnetic-leg Ladder Organic Magnets
3. 学会等名 ICM2018 (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 上本菜央, 山口博則, 細越裕子, 河野洋平, 橘高俊一郎, 榊原俊郎
2. 発表標題 S=1/2八二カム格子系の低温物性
3. 学会等名 日本物理学会2018年秋季大会
4. 発表年 2018年



1. 発表者名 元木大介, 河野洋平, 橘高俊一郎, 榊原俊郎, 高津浩, 門脇広明
2. 発表標題 スピンアイスDy <sub>2</sub> Ti <sub>2</sub> O <sub>7</sub> の気相液相転移再考
3. 学会等名 日本物理学会2018年秋季大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 河野洋平, 橘高俊一郎, 山口博則, 細越裕子, 榊原俊郎
2. 発表標題 フェルダジルラジカル系スピン1/2フェロレッグラダーにおける量子臨界現象の普遍性
3. 学会等名 日本物理学会2018年秋季大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 津田研, 楊崇立, 山根悠, 梅尾和則, 志村恭通, 鬼丸孝博, 高畠敏郎, 福岡宏, 菊川直樹, 寺嶋太一, 廣瀬陽代, 宇治進也, 橘高俊一郎, 榊原俊郎
2. 発表標題 擬カゴメ近藤格子系CeIrSnの磁気フラストレーション
3. 学会等名 日本物理学会2018年秋季大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 岩崎義己, 山口博則, 細越裕子, 川上貴資, 木田孝則, 萩原政幸, 河野洋平, 橘高俊一郎, 榊原俊郎
2. 発表標題 八二カム格子系における特異な内部磁場と磁場誘起量子物性
3. 学会等名 日本物理学会第74回年次大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 河野洋平, 上本菜央, 山口博則, 細越裕子, 榊原俊郎
2. 発表標題 スピン1/2ハニカム様格子系[Zn(hfac) <sub>2</sub> ](4-Cl-o-Py-V)の極低温物性
3. 学会等名 日本物理学会第74回年次大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 上本菜央, 山口博則, 細越裕子, 河野洋平, 橘高俊一郎, 榊原俊郎
2. 発表標題 フェルダジル系金属錯体を用いたスピンモデル設計
3. 学会等名 日本物理学会第74回年次大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 河野洋平, 橘高俊一郎, 榊原俊郎, 山口博則, 細越裕子
2. 発表標題 ボンドランダムネスを有する新規スピン1/2ハニカム格子錯体の低温物性
3. 学会等名 日本物理学会2020年秋季大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 丸本涼太, 松下琢, 張中岳, 山口明, 榊原俊郎, 三角勇気, 阿波賀邦夫, 土射津昌久, 清水康弘, 伊藤正行, 和田信雄
2. 発表標題 スピン液体候補カゴメ格子磁性体Cu-CAT-1の磁場中帯磁率と磁化曲線
3. 学会等名 日本物理学会第76回年次大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 唐楠, 榊原俊郎, 酒井明人, Mingxuan Fu, 木村健太, 松本洋介, 中辻知
2. 発表標題 量子スピンアイス物質Pr2Zr2O7における極低温磁気特性
3. 学会等名 日本物理学会第76回年次大会
4. 発表年 2021年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究協力者	橋高 俊一郎  (KITAKA Shunichiro)  (80579805)	中央大学・理工学部・准教授   (32641)	
研究協力者	河野 洋平  (KONO Yohei)  (60827252)	中央大学・理工学部・助教   (32641)	
研究協力者	中村 翔太  (NAKAMURA Shota)  (40824892)	名古屋工業大学・物理学教育類・助教   (13903)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------