

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 4 年 6 月 1 日現在

機関番号：12601

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2019～2021

課題番号：19H01836

研究課題名(和文)八ニカム構造新量子液体の実現と素励起研究

研究課題名(英文) Toward realization of honeycomb-structure quantum liquid and study of excitations

研究代表者

北川 健太郎 (Kitagawa, Kentaro)

東京大学・大学院理学系研究科(理学部)・講師

研究者番号：90567661

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 23,620,000円

研究成果の概要(和文)：キタエフ量子スピン液体など新量子相研究では新素励起の検証が最重要課題である。その為には擬スピン1/2を持つd5八ニカム構造化合物が有望とされてきたが、候補が少ない上に二量体化し易いか、欠損を多く含むといった欠点があった。従って、本課題ではより広い物質系と実験手法でアプローチした。新たに4f電子化合物に着目し、高圧力も活用している。研究期間の前半には7万気圧まで常磁性程度の磁化測定を可能にする装置を開発した。Pr化合物では、キタエフ物性の兆候を捉え、Sm化合物では新しいキタエフ候補物質を発見した。Yb化合物ではボゾンのボーズアインシュタイン凝縮の擬二次元版として良いモデルケースを見出した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

量子スピン磁性では、特に新奇な素励起(準粒子)の発見が期待され、盛んに研究されている。その際、純良でかつ基底状態が制御しやすい物質系と制御・測定手段が求められている。本課題は、4fランタノイド化合物を1/2量子スピンの良い研究舞台として捉えて立証したこと、量子スピン系全般の高圧測定に適した精密磁化測定技術を開発したことで進歩性と大きな波及効果があると考え。前者は今後の物質開発に、後者はこれまで測定されていない未知の高圧下磁性発見につながる。

研究成果の概要(英文)：The key study of quantum spin physics like Kitaev spin liquid should be verification of the exotic excitations. The pseudo 1/2 spin systems, d5 honeycomb compounds, have been believed to be best suited for such the study. But, candidate materials lack varieties and easy to dimerize upon pressure, and sometimes full of deficiencies. We applied broader approach: Lanthanoids and utilization of high pressures.

We developed a highly sensitive technique to conduct magnetometry under very high pressures up to 7 GPa using an opposed-anvil type cell, which can detect a weak paramagnetic susceptibility. We acquired signatures of Kitaev physics in a Pr compound, found a new Kitaev candidate material in a Sm compound, and discovered a good model case as quasi-2D Bose-Einstein condensation of Bosons in a Yb compound.

研究分野：固体物理学

キーワード：量子スピン液体 擬スピン キタエフ系 ランタノイド 核磁気共鳴 ボーズアインシュタイン凝縮 高圧実験

## 様式 C-19、F-19-1、Z-19 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

八ニカム格子は2副格子と偶数角形を持つが故に幾何学的フラストレート系の三角格子などとは違った方向性の面白みがある。例えば、グラフェンの線型分散ディラック電子は結晶対称性に守られていて、類似の量子液体が理論的にはスピン系に対しても導かれる。元々、二次元以上の量子スピン液体は半世紀近く前に共鳴共有結合状態が提唱されて以来、専ら理論上の近似解であった。今世紀に入り、幾つかの三角格子、カゴメ格子物質などで相互作用の1/10000近くに相当する温度まで目立った秩序を起さないことがNMR(核磁気共鳴)など数多くの実験により発見された。ただし、最低温部では不純物誘起スピンの影響が予測不能な形で現れる。従って幾何学的フラストレーション物質のスピン液体の正体は突き止められていない。2008年にA. Kitaevにより提唱された八ニカム(蜂の巣)格子模型は厳密であるのでこの状況を打開する。難しいのはボンド方向に独立でかつ異方的な最近接相互作用の実現であるが、もし実現すれば、スピンを2種類のマヨラナ粒子(生成と消滅が同じ準粒子)に読み換え、局在マヨラナ(フラックス)とディラック分散的な遍歴マヨラナフェルミオンを使い厳密に解ける。この分数化マヨラナ素励起、並びにギャップ相での非可換分数統計、トポロジカル量子コンピューティングへの応用展開もあり単なる量子液体研究の枠を超えたインパクトのある物理を内包している。しかし、これらを実現する為に両方のマヨラナ励起が観える、「キタエフ型相互作用」が十分に卓越している物質は未発見である。

スピン軌道相互作用、結晶場分裂、超交換相互作用が一定の要件を満たせば良いが、研究は専らIr<sup>4+</sup>, Ru<sup>3+</sup>化合物に集中していた。しかしこれらの物質には、他の直接/超交換反強磁性相互作用が強く混ざっていて相図上でキタエフ液体相から遠いのが今でも課題である。従って、キタエフ型相互作用を持ちうる広い物質群に対して物質スクリーニングをする必要がある。

探索の一つの方向性として、ここ数年来擬スピン1/2の物理、キタエフ候補物質の新しい舞台として理論的に提案されたランタノイド化合物群(Pr<sup>4+</sup>酸化物<sup>1</sup>、Yb<sup>3+</sup>化合物<sup>2</sup>)がある。ただし、八ニカム物質の基底状態は殆ど明らかにされていなかった。別の方向性では、磁性体に高圧力を印加することによる基底状態制御でのアプローチが考えられる。ランタノイド化合物はd電子系と違い多量体化による非磁性化が起きにくいと、この2つの方法の組み合わせも相性が良く高圧印加による量子スピン液体相創発も有望である。しかしながら、磁性体を高圧下で調べること自体、技術的に難しいという問題もあり、高圧磁性測定技術の発展も望まれていた。

### 2. 研究の目的

本研究では八ニカム格子上での厳密解であるキタエフ模型が提唱されたものの未だ実現されていない、「真のキタエフ液体物質」により広い物質系と実験手法でアプローチする。ランタノイド八ニカム構造化合物を主目標とし、最先端超高压測定などを駆使して理論予想された新キタエフ液体相または関連する新奇磁性相を開拓する。当初の目標として、マヨラナ物理のより確からしい証拠を掴むため、孤立マヨラナ準粒子の検出を核磁気共鳴法のような局在磁性測定手段を用いて試みることも計画していた。

### 3. 研究の方法

Pr<sup>4+</sup>, Yb<sup>3+</sup>の4f電子擬スピン1/2による反強磁性キタエフ型相互作用を持つ八ニカム化合物群を研究の初期ターゲットに据え、磁性状態を明らかにする。Li<sub>2</sub>PrO<sub>3</sub>は仮に八ニカム構造をとればキタエフ型相互作用が卓越すると理論計算の先行研究により予測されているが<sup>1</sup>、バルク物質では八ニカム構造を取らない<sup>3</sup>。一方、Na<sub>2</sub>PrO<sub>3</sub>は八ニカム構造反強磁性体であるので、化学圧力効果(Na-Li)ではなく物理高圧印加によって量子液体発現を試みる。さらに、YbCl<sub>3</sub>などの単純な八ニカム構造物質でも常圧の磁性が未知であったため、これら未開拓の化合物群も合成後網羅的に評価し新たなキタエフ物質を探索する。4f系は相互作用が小さくエントロピー測定による分数励起の評価がしやすいこと、d<sup>5</sup>の強磁性的キタエフ物理に対して4f<sup>1,13</sup>の反強磁性のものは磁場誘起トポロジカル相転移が期待できる<sup>4</sup>などのメリットがあるため、探索の意義は大きいと考えられた。

4f電子擬スピン1/2は、従来のRu, Irキタエフ系よりも高圧下液体相探索に優れており、高圧下磁性測定を遂行する。近年の激しい競争によりRu, Ir系関連物質の高圧相図は徐々に明らかになってきたが、残念ながらこれらのほぼすべては非磁性二量体を形成している。一方、内核4f電子が二量体化することは考え難いため、圧力制御は超高压域まで有効である。一般に、絶縁体でかつ磁化率が小さいスピン液体周辺の高圧相図作成は困難である。しかし、応募者らはこれまでに超高压域(〜10GPa(万気圧)超)にアクセス可能な独自のNMR・磁化・ac比熱を開発してきたため、本課題の遂行に最適であった。特に、高圧磁化測定手段に関しては、本課題で大きな進展があったため、次項で詳説する。

上述の手法によりキタエフ液体相等の新量子相候補がスクリーニングできれば、主として核磁気共鳴素励起研究を行うことにより素励起研究を行う。キタエフ液体候補の場合には、欠陥周りに誘起された局在磁化率・スピンゆらぎが測定できる。これは欠陥に対する端状態の研究であり、直接的な証拠を提供できる。過去には一次元スピン鎖等で活躍した極めて有効な実験手法である。キタエフスピン液

体の場合も欠陥効果は厳密に予想されており、欠陥サイトにフラックスが拘束される。磁化率に対数発散の特徴がある為、NMR の局所磁化率及びバルク磁化で捉えて検証することを計画した。ただし、研究期間内ではこのような測定に適した純良なスピン液体は発見に至らなかった。実際、 $\text{H}_3\text{LiIr}_2\text{O}_6$  の単結晶 NMR では、粉末試料のスペクトルに比べ大きな違いは見られなかった（論文 4）ため、この手法を用いた研究は今後の課題である。

#### 4. 研究成果

(1) 量子磁性研究のための高圧下精密磁化測定技術の開発(図 1、論文 1、2)

八ニカム化合物の高圧下物性探索促進のため、研究期間の前半に 7 GPa まで高精度（体積磁化率で約  $10^{-4}$ ）の磁化測定を可能にする装置を開発した。一般に、高圧力は物質の基底状態を連続的に変化することができるため、固体物理の研究手法の一つとして広く活用されている。例えば 200 GPa と非常に高い圧力下で室温近くの水素化物超伝導の発見報告の一部にダイヤモンドアンビルセルと SQUID 磁束計が利用されている。しかし、本課題が対象にしている量子スピン系のような弱い磁性体の研究には数 GPa 程度の圧力下であっても殆ど利用されてこなかった。我々は、小型の高圧装置と高感度な市販の SQUID 磁気計を組み合わせることで高圧磁化測定手法に多面的な改良を施すことにより、擬スピン 1/2 を含む量子スピン系の常磁性状態を評価可能な手段を実現した。高圧装置は測るべき試料に比べて遥かに大きいため、装置からの大きな磁性をいかにして消すかが開発要素であった。数値シミュレーションを駆使して装置構造を最適化し、信号処理に特異値分解を利用することで体積磁化率として  $10^{-4}$  相当の磁化（率）測定を可能にした。この開発成果は後述のランタノイド系の研究と Cr 八ニカム化合物（論文 5）の超高圧物性研究に生かされている。

なお、磁化測定は磁性研究の基礎中の基礎であるので、本成果は波及効果大きい。特に強相関電子系では、数万気圧～10 万気圧程度の圧力による物性変化が期待できるにも関わらず、モット絶縁体はこれまであまり高圧下で磁性はスクリーニング研究されてこなかった。しかし、本成果は磁化特性を迅速に評価可能である。量子スピン液体を始めとする高圧下の新磁性相発見に活躍することが期待できる。この装置開発を発表した論文は 2021 年 6 月に JPSJ 紙で注目論文に選ばれている。

#### (2) 擬スピン 1/2 ランタノイド研究の進展

主な成果としては、ここ数年来キタエフ候補物質の新しい舞台として理論的に提案されたランタノイド系の一つ、 $\text{Pr}^{4+}$  化合物の  $\text{Na}_2\text{PrO}_3$  の磁性状態を明らかにしたことを挙げる。 $^{23}\text{Na}$ -NMR 測定とその解析結果から、渦糸的磁気構造の非コリニア反強磁性が基底状態として尤らしく、 $\text{Na}_2\text{PrO}_3$  が理論予想の相図上で反強磁性キタエフスピン液体に近い磁性状態にあることが確認できた。また、物性研究所でのパルス強磁場を用いた実験では、メタ磁性が観測された。これは、理論計算で予測された遍歴マヨラナ励起のフェルミ面のリフシツツ転移に対応する可能性がある。つまり、磁場下で反強磁性的キタエフスピン液体になっている可能性を示唆する結果が得られた。一方、圧力による変化に関しては、8 GPa まででは磁化の振る舞いに検出可能な変化は生じなかった。今後より高圧での液体相探索を行う予定である。 $\text{Na}_2\text{PrO}_3$  の研究は今後の真なるキタエフスピン液体の実現を目指すための指針を与えたと言える。

4f 電子擬スピン 1/2 系のさらなる物質展開とバリエーション豊かな物性発現を目指して、 $\text{Ce}^{3+}$  ( $4f^1$ ),  $\text{Sm}^{3+}$  ( $4f^5$ ),  $\text{Yb}^{3+}$  ( $4f^{13}$ ) が八ニカム構造を組む化合物の単結晶を合成し評価した。

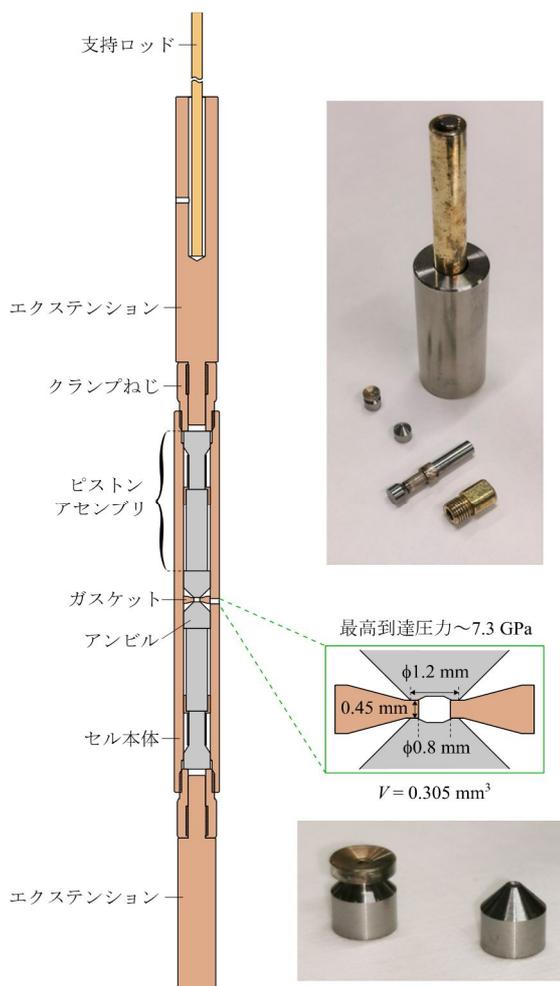


図 1：2021 年に新たに開発した精密磁化測定用超高圧セル。

セルの断面図及び写真。断面図では灰色がセラミック素材、茶色がバインダレス非磁性超合金素材を表す。セル本体の内径は 5 mm、外径は 8.4 mm。

まずキタエフ物性としては、 $\text{Ce}^{3+}$ ハライドでは相互作用のエネルギースケールが小さく ( $< 1 \text{ K}$ )、研究続行が困難であったため、同じ合成角運動量  $J=5/2$  をもつ  $\text{Sm}^{3+}$ カルコゲナイド化合物を量子スピン液体候補として研究している。第一原理計算データベースを参考にして物質開発を進めた結果、実際にハニカム構造を組む化合物を一つ見出した。キタエフ型相互作用が期待できる  $\gamma$  クラマース二重項基底でかつ数K以上の相互作用を持つハニカム化合物としては、 $\text{Pr}^{4+}$ 化合物系に続く2例目となる。現在、単結晶試料を用いて高圧下を含む基底状態を研究中であるが、合成の詳細は日本物理学会で発表済みである。

一方、正孔が一つの  $\text{Yb}^{3+}$  ( $4f^{13}$ ) のハニカム化合物  $\text{YbCl}_3$  では、キタエフ型相互作用でなくほぼ理想的なハイゼンベルグ型相互作用<sup>5</sup>であることが分かってきた。逆に言えば、ハニカム格子  $1/2$  スピンハイゼンベルグ模型の良い例となる。ただし、理想からのわずかなずれにより非常に低温で長距離反強磁性秩序を示す。この秩序は外部磁場により磁場誘起強磁性状態に相転移するが、この近傍の傾角反強磁性状態を素励起としてとらえると、ボゾンのボーズアインシュタイン凝縮相(BEC)と等価とみなすことができる。我々は、良質な単結晶試料を合成し、磁化・比熱・熱伝導率・NMR測定を進めた。飽和磁場近傍の量子臨界物性は、二次元のBECで特徴づけられることが分かったが、NMRで観測して秩序状態は明確に長距離秩序であったため、興味深い二面性を示した。技術面では、研究期間内に独自開発した混合槽を磁場中で2軸回転可能な希釈冷凍プローブにより単結晶NMR測定を行った。当初期待していたキタエフ物理ではない擬スピン  $1/2$  ランタノイド研究の新しい展開として、擬二次元BECの良好な研究舞台を擬スピン  $1/2$  ランタノイド化合物の多様性を追求する過程で見出すことが出来た。これらの成果は学会等で発表済みで現在投稿準備中である。

**文献** [1] S. H. Jang *et al.*, Phys. Rev. B **99**, 241106(R) (2019). [2] J. G. Rau and M. J. P. Gingras, Phys. Rev. B **98**, 054408 (2018). [3] Y. Hinatsu and Y. Doi, Journal of Alloys and Compounds **418**, 155 (2006). [4] J. Nasu *et al.*, Phys. Rev. B **98**, 060416(R) (2018).; S. Liang *et al.*, Phys. Rev. B **98**, 054433 (2018). [5] G. Sala *et al.*, Nature Commun. **12**, 171 (2022).

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計5件（うち査読付論文 4件 / うち国際共著 3件 / うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Naoka Hiraoka, Kelton Whiteaker, Marian Blankenhorn, Yoshiyuki Hayashi, Ryosuke Oka, Hidenori Takagi, and Kentaro Kitagawa	4. 巻 90
2. 論文標題 Design of Opposed-Anvil-Type High-Pressure Cell for Precision Magnetometry and Its Application to Quantum Magnetism	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Journal of the Physical Society of Japan	6. 最初と最後の頁 74001
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.7566/JPSJ.90.074001	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 該当する
1. 著者名 平岡奈緒香、北川健太郎	4. 巻 673
2. 論文標題 量子磁性研究のための高圧下精密磁化測定技術	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 固体物理	6. 最初と最後の頁 23-35
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 無
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. Yoshida, T. Koyama, H. Yamada, Y. Nakai, K. Ueda, T. Mito, K. Kitagawa, Y. Haga	4. 巻 103
2. 論文標題 Nonmagnetic-Magnetic Transition and Magnetically Ordered Structure in SmS	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Physical Review B	6. 最初と最後の頁 155153
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevB.103.155153	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. Geirhos, P. Lunkenheimer, M. Blankenhorn, R. Claus, Y. Matsumoto, K. Kitagawa, T. Takayama, H. Takagi, I. Kezmarki, and A. Loidl	4. 巻 101
2. 論文標題 Quantum paraelectricity in the Kitaev quantum spin liquid candidates H <sub>3</sub> LiIr <sub>2</sub> O <sub>6</sub> and D <sub>3</sub> LiIr <sub>2</sub> O <sub>6</sub>	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Physical Review B	6. 最初と最後の頁 184410
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevB.101.184410	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 該当する

1. 著者名 Dilip Bhoi, Jun Gouchi, Naoka Hiraoka, Yufeng Zhang, Norio Ogita, Takumi Hasegawa, Kentaro Kitagawa, Hidenori Takagi, Kee Hoon Kim, and Yoshiya Uwatoko	4. 巻 127
2. 論文標題 Nearly Room-Temperature Ferromagnetism in a Pressure-Induced Correlated Metallic State of the van der Waals Insulator CrGeTe <sub>3</sub>	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Physical Review Letters	6. 最初と最後の頁 217203
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevLett.127.217203	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 該当する

〔学会発表〕 計20件 (うち招待講演 7件 / うち国際学会 4件)

1. 発表者名 今田絵理阿, 松本洋介, Simon Schnierer, Jan Bruin, 北川健太郎, 高木英典
2. 発表標題 NMR測定によるハイゼンベルク反強磁性体YbCl <sub>3</sub> のBEC-QCPの研究
3. 学会等名 日本物理学会 2021年秋季大会, オンライン開催, 2021年9月22日.
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 平岡奈緒香, 今田絵理阿, 郷地順, 北川健太郎, 上床美也, 高木英典
2. 発表標題 2次元ハイゼンベルグ量子磁性体YbCl <sub>3</sub> への高圧印加による反強磁性相互作用の抑制
3. 学会等名 日本物理学会 2021年秋季大会, オンライン開催, 2021年9月22日.
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 吉田章吾, 遠藤宏太, 山田陽彦, 小山岳秀, 中井祐介, 上田光一, 水戸毅, 北川健太郎, 芳賀芳範
2. 発表標題 高圧下33S-NMR測定によるSmS金色相の低温ギャップ状態
3. 学会等名 日本物理学会 2021年秋季大会, オンライン開催, 2021年9月23日.
4. 発表年 2021年

1. 発表者名	森川悦司, 二本木克旭, 木田孝則, 本多善太郎, 平岡奈緒香, 北川健太郎, 鳴海康雄, 金道浩一, 上床美也, 萩原政幸
2. 発表標題	高圧力下におけるS=1/2スピラダー物質Cu(DEP)Br <sub>2</sub> の強磁場磁性
3. 学会等名	日本物理学会第77回年次大会, オンライン開催, 2022年3月15日
4. 発表年	2022年

1. 発表者名	北川健太郎, 露木裕太, 矢田季寛, 高木英典
2. 発表標題	Smカルコゲナイドでのキタエフ候補物質開発
3. 学会等名	日本物理学会第77回年次大会, オンライン開催, 2022年3月16日
4. 発表年	2022年

1. 発表者名	北川健太郎
2. 発表標題	対向アンビル型装置による磁化とNMR測定、量子磁性から超伝導まで
3. 学会等名	未来を拓く高圧力科学技術セミナーシリーズ(46)「高圧力下における物性測定技術の最前線」、オンライン、2022年3月3日(招待講演)
4. 発表年	2022年

1. 発表者名	北川健太郎
2. 発表標題	10GPa前後までの精密なマクロとマイクロ(NMR)磁気測定
3. 学会等名	ISSPワークショップ「高圧セミナー “最近の話題から”」、オンライン、2022年3月5日(招待講演)
4. 発表年	2022年

1. 発表者名 北川健太郎
2. 発表標題 キタエフ系と幾何学的フラストレーション系物質のNMR・高圧磁性研究
3. 学会等名 ISSPワークショップ「量子物質研究の最近の進展と今後の展望」、オンライン、2020年9月28日。(招待講演)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Kentaro Kitagawa
2. 発表標題 Quantum magnetisms in pseudospin-1/2 honeycomb lanthanoids
3. 学会等名 UBC-MPG-UTokyo PI-Meeting, online, 03/03/2021 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 平岡奈緒香, 北川健太郎, 林義之, Kelton Whiteaker, Marian Blankenhorn, 高木英典
2. 発表標題 SQUID磁気計用対向アンビル型高圧セルの装置および測定方法改良
3. 学会等名 日本物理学会 2020年秋季大会, オンライン開催, ポスター, 2020年9月8日.
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 露木裕太, 北川健太郎, Kelton Whiteaker, Marian Blankenhorn, 高木英典, 松田康, 周旭光, 徳永将史, 三宅厚志
2. 発表標題 f電子系キタエフ候補物質Na <sub>2</sub> PrO <sub>3</sub> の磁気特性
3. 学会等名 日本物理学会 2020年秋季大会, オンライン開催, 2020年9月10日.
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 北川健太郎, 平岡奈緒香, WHITEAKER Kelton, 露木裕太, 岡良輔, 林義之, 高木英典
2. 発表標題 対向アンビル型セルを用いた磁化測定による擬スピン1/2量子磁性
3. 学会等名 第61回高圧討論会, オンライン開催, 2020年12月2日.
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 今田絵理阿, 松本洋介, Simon Schnierer, Jan Bruin, 北川健太郎, 高木英典
2. 発表標題 NMRが解き明かす擬スピン1/2ハニカム格子YbCl <sub>3</sub> の量子磁性
3. 学会等名 日本物理学会第76回年次大会, オンライン開催, 2021年3月15日.
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 安藤翔, 北川健太郎, 松本洋介, 高木英典
2. 発表標題 f電子系ハニカム量子磁石YbCl <sub>3</sub> におけるKitaev量子スピン液体の探索
3. 学会等名 日本物理学会2019年秋季大会, 岐阜大学柳戸キャンパス(岐阜), ポスター, 2019年9月10日
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 北川健太郎, 松本洋介, 三宅厚志, 徳永将史, 露木裕太, 安藤翔, 高木英典
2. 発表標題 ランタノイド擬スピン1/2磁性とKitaev量子スピン液体の探索
3. 学会等名 日本物理学会2019年秋季大会, 岐阜大学柳戸キャンパス(岐阜), 2019年9月11日
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 露木裕太, 北川健太郎, K. Whiteaker, M. Blankenhorn, 高木英典
2. 発表標題 キタエフ系八ニカム化合物の超高压磁化測定
3. 学会等名 日本物理学会2019年秋季大会, 岐阜大学柳戸キャンパス(岐阜), 2019年9月13日
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 K. Kitagawa
2. 発表標題 Pseudospin Magnetism and Phase Diagram in quest of Kitaev Spin Liquid
3. 学会等名 Strongly Correlated Electron Systems 2019 Okayama, Japan, Sep. 24(招待講演)(国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 露木裕太, 北川健太郎, K. Whiteaker, M. Blankenhorn, 高木英典
2. 発表標題 八ニカム格子希土類酸化物の磁性
3. 学会等名 第13回 物性科学領域横断研究会(領域合同研究会), 東京大学小柴ホール, ポスター, 2019.11.27
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 K. Kitagawa
2. 発表標題 Pseudospin-1/2 Magnetism and Phase Diagram in quest for Kitaev Spin Liquid
3. 学会等名 International Conference on Topological Materials Science 2019 (TopoMat2019) Kyoto University, Kyoto, Japan, Dec. 5(招待講演)(国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 K. Kitagawa
2. 発表標題 Pseudospin magnetism and phase diagram in quest of Kitaev spin liquid
3. 学会等名 Max Planck-UBC-UTokyo Centre for Quantum Materials 2019 Workshop, University of British Columbia, Vancouver, Canada, Dec. 9 (招待講演)(国際学会)
4. 発表年 2019年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

高木・北川研究室   東京大学 高木・北川研究室のページ <a href="http://park.itc.u-tokyo.ac.jp/takagi_lab/">http://park.itc.u-tokyo.ac.jp/takagi_lab/</a>
---

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
研究分担者	松林 和幸  (Matsubayashi Kazuyuki)  (10451890)	電気通信大学・大学院情報理工学研究科・准教授   (12612)	
研究分担者	平岡 奈緒香(太田奈緒香)  (Hiraoka Naoka)  (40758827)	東京大学・大学院理学系研究科(理学部)・助教   (12601)	

	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	高木 英典  (Takagi Hidenori)		

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			
ドイツ	マックスプランク研究所	アウグスブルク大学		