

科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 3 年 6 月 15 日現在

機関番号：10101

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2018～2020

課題番号：18K03529

研究課題名(和文) 量子スピнкаゴメ格子反強磁性体におけるスピン液体の実現とトポロジカル秩序の探索

研究課題名(英文) Studies of a spin liquid state and a topological order in quantum kagome antiferromagnets

研究代表者

吉田 紘行 (Yoshida, Hiroyuki)

北海道大学・理学研究院・准教授

研究者番号：30566758

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,400,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、量子スピン液体状態の実現とトポロジカル秩序との関わりに関する知見を得ることを目的として、量子カゴメ反強磁性体 $\text{CaCu}_3(\text{OH})_6\text{Cl}_2 \cdot 0.6\text{H}_2\text{O}$ 単結晶において強磁場磁化、磁気トルク、熱ホール効果、NMR、中性子散乱実験による物性評価を行なった。その結果、本物質の基底状態が $q = 0$ (negative chirality) の長距離磁気秩序であることを実験的に確立した。一方、磁気転移点より高温ではスピン液体に関係する短距離秩序が発達することを見出し、量子カゴメ反強磁性体における強い量子揺らぎとフラストレーションが特異な磁気状態の形成に深く関わっていることを明らかにした。

研究成果の学術的意義や社会的意義

量子スピン液体は、高温超伝導やトポロジカル秩序との関係、量子コンピューティングへの応用の可能性などが指摘されており、古くから注目を集めてきた。従って、スピン液体を実験的に実現し、その性質を解明することは基礎のみならず応用上の観点からも重要な課題である。本研究では $\text{CaCu}_3(\text{OH})_6\text{Cl}_2 \cdot 0.6\text{H}_2\text{O}$ を対象とし、スピン液体実現の可能性を探った。結果として、基底状態はスピン液体ではなかったものの、磁気秩序の近傍にスピン液体との関連が期待される短距離秩序状態が実現することを見出した。本研究の知見を基に更なる物質探索や物性評価を進めることで、スピン液体を実現する物質の開発に繋がると期待される。

研究成果の概要(英文)：In this study, we have investigated the physical properties of the quantum kagome antiferromagnet $\text{CaCu}_3(\text{OH})_6\text{Cl}_2 \cdot 0.6\text{H}_2\text{O}$ single crystal by means of high field magnetization, magnetic torque, thermal Hall effect, NMR and neutron scattering experiments in order to elucidate a quantum spin liquid state and its topological property. As a result, it was experimentally established that the ground state of this material is the long-range magnetic order with $q = 0$ (negative chirality), while the short-range order related to spin liquid develops at high temperatures above the transition temperature. The strong quantum fluctuation and frustration in the quantum kagome antiferromagnet are found to be deeply related to the formation of the peculiar magnetic state.

研究分野：新物質科学

キーワード：幾何学的フラストレーション 量子スピン液体 カゴメ反強磁性体

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

フラストレート磁性体では通常の磁気秩序は抑制され、非自明な基底状態が実現すると期待される。理論的には、量子スピカゴメ反強磁性体において強いフラストレーションと量子揺らぎの効果により、スピン系の量子多体状態である量子スピン液体の実現が予想されている。量子スピン液体は、キャリアドーピングによる高温超伝導の発現やトポロジカル秩序の形成、更に量子コンピューターへの応用の可能性などが指摘されている。このような背景から、スピン液体を実験的に実現し、その性質を解明することは基礎のみならず応用上の観点からも重要な課題である。

多様な理論研究が進展している一方で、現実には構造中にカゴメネットワークを有する物質は数少なく、また実在するいくつかの候補物質には格子歪みや元素の欠損、乱れが多く存在しており、実験的なスピン液体状態の解明には達していなかった。従って、スピン液体の実現可能性、その詳細な性質、トポロジカル秩序との関連性について検証するには、より多くの実験的研究が必要であった。

申請者は若手研究(B) (15K17686)の支援のもと、スピン液体を実現すべく新物質開発に取り組み、その成果として歪みのない $S = 1/2$ カゴメ反強磁性体 $\text{CaCu}_3(\text{OH})_6\text{Cl}_2 \cdot 0.6\text{H}_2\text{O}$ (Ca-Kapellasiite) の開発に成功し、単結晶構造解析、磁化測定、比熱測定により基礎的なバルク物性を明らかにした[1]。 $T^* = 7.2$ Kにおいて相転移が生じ、何らかの磁気状態の形成が示唆された。また、本物質は絶縁体であるにも関わらず T^* 以下の比熱に温度比例項が観測された。絶縁体における比熱の温度比例項は有機三角格子反強磁性体で観測されており、スピン液体状態における磁気励起を反映したものとして考えられている[2]。このことは本物質の基底状態の特異性、また通常のスピン波励起とは異なる磁気励起が存在することを示唆している。

一方、磁場中の新規量子状態の探索と解明についてもカゴメ反強磁性体の興味の一つとして注目されている。特に、量子カゴメ反強磁性体では飽和磁化の $1/9$ 、 $1/3$ 、 $5/9$ 、 $7/9$ で磁化プラトーを示すことが理論的に予想されている[3]。中でも $1/9$ プラトーは磁場中で実現するギャップレススピン液体であると考えられており、その実験的な観測が待たれている。申請者は Ca-Kapellasiite における先行研究により 1.4 K で 70 T までの磁化過程を測定したが、理論で予想された磁化プラトーは観測されなかった。一方、 5 T において磁化過程は僅かな変化を示し、何らかの磁場誘起相転移が生じている可能性が示唆されたが、 5 T 以上の高磁場相の磁気状態の詳細は明らかになっていなかった[1]。

2. 研究の目的

本研究では以下の(1)～(3)を課題として設定し、量子カゴメ反強磁性体の実験的理解の進展を目的として研究を行なった。

- (1) Ca-Kapellasiite におけるスピン液体の確立とトポロジカル秩序の探索
- (2) 強磁場磁化測定による Ca-Kapellasiite の高磁場相の解明と磁化プラトーの探索
- (3) 新しいカゴメ反強磁性体の探索と物性評価

3. 研究の方法

- (1) Ca-Kapellasiite におけるスピン液体の確立とトポロジカル秩序の探索

一般にスピン液体状態を実験的に観測することは容易ではない。本研究ではスピン液体が実現していることを実験的に示すために、Ca-Kapellasiite 単結晶を用い以下の実験を行なった。

単結晶を用いた NMR 実験により緩和率を測定し、スピン揺らぎの周波数、異方性を明らかにした。実験は、北海道大学の井原講師と共同で行った。

単結晶試料を用いて中性子散乱実験を行なった。これにより、Ca-kapellasiite の磁気励起構造を明らかにした。中性子散乱実験では重水置換を施した単結晶が必要である。そのため、重水中での水熱合成法により重水置換単結晶を育成した。中性子実験は、J-PARC の AMATERAS を利用した。

T^* 以下の磁気構造を明らかにするため、重水素置換単結晶を用いた中性子回折実験を J-PARC、SENJU で行い磁気構造解析を行った。この中性子実験は CROSS の飯田一樹博士との共同研究で行った。

熱ホール効果を測定し、基底状態の磁気励起に関する知見を得た。実験は東京大学物性研究所の山下准教授との共同研究として行った。

- (2) 強磁場磁化測定による Ca-Kapellasiite の強磁場相の解明と磁化プラトーの探索

Ca-Kapellasiite 単結晶を用いて強磁場磁化測定を行い、磁化プラトーを探索した。 1.4 K、 70 T までの実験は大阪大学先端強磁場科学研究センターでパルス法を用いて行った。また、 $70 \sim 125$ T までの超強磁場磁化測定は、東京大学国際超強磁場科学研究施設で、一巻きコイル法によって行った。強磁場実験は、大阪大学萩原教授、鳴海准教授、東京大学松田教授の協力のもと

とで行った。

5 Tでの磁化過程の異常の詳細を調べるために、磁気トルク測定を行なった。測定はPPMSを用いて、2 ~ 20 K、7 Tの磁場中で行った。

5 T以上の磁場中での磁気構造を明らかにするため、重水素置換単結晶を用いた中性子回折実験をJ-PARC、SENJUで行い磁場中の磁気構造解析を行った。

(3) 新しいカゴメ格子反強磁性体の探索と物性評価

スピン液体実現の可能性を実験的により広く検討するため、カゴメ反強磁性体の新しいモデル物質を探索した。固相反応、水熱合成、高压合成を駆使し、多くの遷移金属を対象に幅広く物質合成を行った。

CdCu₃(OH)₆Cl₂がカゴメ反強磁性体の良い候補物質になり得ることが示唆されており、PPMS、MPMSを用いた磁化、比熱測定によりその性質評価を行った。

4. 研究成果

(1) Ca-Kapellasiteにおけるスピン液体の確立とトポロジカル秩序の探索

J-PARC/MLFのSENJUで重水置換単結晶を用いた中性子回折実験を行い、 T^* 以下に長距離磁気秩序の形成を示す磁気Bragg反射が観測された。この結果、 T^* 以下の磁気構造が $q=0$ のnegative chiralityを有する 120° 構造であることが明らかになった[4]。単結晶NMR測定では、磁気秩序を示す T^* 以下で磁気揺らぎが異方的に生じることを発見した。具体的には、カゴメ面内方向には磁気秩序に由来する2次元のスピン波動励起が観測され、一方カゴメ面直方向には通常のスピン波とは異なって緩和率が温度に比例する特異な揺らぎが存在することを観測し、この揺らぎが磁気励起のラインモードと関係することを示唆する結果を得た[5]。更に、 T^* 上の7.2 Kから25 K程度の温度領域でスピン液体的な短距離秩序状態の形成を示唆する結果を得た[6]。同様の結果が熱ホール測定からも示唆されており、 T^* 以上の温度領域における熱ホール効果の起源がカゴメスピン液体におけるベリー位相効果で説明できることが理論解析から明らかになった[7]。

(2) 強磁場磁化測定によるCa-Kapellasiteの強磁場相の解明と磁化プラトーの探索

単結晶を用いた強磁場磁化測定を行い、125 Tまでの磁化過程を得ることができた。125 Tで飽和磁化の約60%の磁化を観測し、その磁場まで磁化プラトーなどの特異な磁気状態の形成は観測されなかった。今後更に実験を重ね、飽和磁化までの全磁化過程の解明を進め、論文としてまとめる予定である。一方、2 Kで7 Tまでの磁気トルク測定により、5 Tで磁化容易軸が $a+2b$ 方向から a 方向へと変化する現象を見出した。これは、磁化過程で観測された5 Tの僅かな異常と対応する。この起源を明らかにするべく、J-PARC/MLFのSENJUで磁場中の中性子回折実験を行ない、磁場中で磁気構造が変化する兆候を観測した。より詳細な結果を得るため、継続して実験を行うことを計画している。

(3) 新しいカゴメ格子反強磁性体の探索と物性評価

Ca-Kapellasiteに関連するカゴメ反強磁性体CdCu₃(OH)₆Cl₂粉末試料の磁性の解明を進め、本物質ではCu²⁺の軌道配列の異方性により磁気相互作用のネットワークがカゴメから低対称化し、有効的には1次元鎖と鎖間のフリースピンで系の磁性を説明できることを明らかにした[8]。

研究期間全体を通して、Ca-Kapellasiteにおける磁化、NMR、中性子、磁気トルク、熱ホール測定などの微視的、巨視的測定が大きく進展した。その結果、本物質が $q=0$ (negative chirality)の長距離秩序を示す数少ない磁性体であること、磁気秩序相において異方的なスピン揺らぎが存在すること、また磁気転移直上にスピン液体との関連が期待される短距離秩序相が存在することが明らかになった。また、磁場中では125 Tまで磁化プラトーは存在しないものの、5 Tで $q=0$ 構造のカゴメ面内での回転に対応する振る舞いが観測された。これらはカゴメ反強磁性体で期待される磁気秩序やスピン液体の性質に関連する結果であり、実験的な検証として意義深い。今後は、得られた実験結果を論文としてまとめるとともに、125 T以上の超強磁場下での実験やより詳細な磁場中の中性子回折実験を行うことで、本物質の磁性の全貌を解明し、カゴメのフラストレート磁性の理解を深めていきたいと考えている。

[1] H. Yoshida *et al.*, J. Phys. Soc. Jpn., **86**, 033704 (2017).

[2] S. Yamashita *et al.*, Nat. Phys. **4**, 459 (2008).

[3] S. Nishimoto *et al.*, Nat. Commun. **4**, 2287 (2013).

[4] K. Iida *et al.*, Phys. Rev. B, **101**, 220408(R) (2020).

[5] Y. Ihara *et al.*, Phys. Rev. Research, **2**, 023269 (2020).

[6] Y. Ihara *et al.*, J. Phys. Soc. Jpn., **90**, 023703 (2021).

[7] H. Doki *et al.*, Phys. Rev. Lett., **121**, 097203 (2018).

[8] H. K. Yoshida *et al.*, J. Phys. Soc. Jpn., **90**, 044714 (2021).

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計20件（うち査読付論文 20件 / うち国際共著 7件 / うちオープンアクセス 4件）

1. 著者名 吉田紘行	4. 巻 48
2. 論文標題 カペラサイト型量子カゴメ反強磁性体で観測された特異な磁気励起	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 熱測定	6. 最初と最後の頁 59-64
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 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 Yoshida Hiroyuki K., Noguchi Naoya, Ishii Yuto, Oda Migaku, Chen Jie, Yamaura Kazunari, Yamashita Satoshi, Nakazawa Yasuhiro, Kida Takanori, Narumi Yasuo, Hagiwara Masayuki	4. 巻 90
2. 論文標題 Magnetic Properties of $S = 1/2$ Distorted Kagome Antiferromagnet $CdCu_3(OH)_6Cl_2$ with Low-Symmetry Orbital Arrangement	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 044714/1-6
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.7566/JPSJ.90.044714	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 Ishii Y., Narumi Y., Matsushita Y., Oda M., Kida T., Hagiwara M., Yoshida H. K.	4. 巻 103
2. 論文標題 Field-induced successive phase transitions in the J1-J2 buckled honeycomb antiferromagnet $Cs_3Fe_2Cl_9$	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Physical Review B	6. 最初と最後の頁 104433/1-11
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1103/PhysRevB.103.104433	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 Ihara Yoshihiko, Matsui Kazuki, Kohama Yoshimitsu, Luther Sven, Opherden Daryna, Wosnitza Jochen, Kuehne Hannes, Yoshida Hiroyuki K.	4. 巻 90
2. 論文標題 Emergence of Frustrated Short-Range Order above Long-Range Order in the $S = 1/2$ Kagome Antiferromagnet $CaCu_3(OD)_6Cl_2 \cdot 0.6D_2O$	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 023703/1-5
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.7566/JPSJ.90.023703	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 Mizuta Shusei, Oda Migaku, Momono Naoki, Yoshida Hiroyuki K., Ido Masayuki	4. 巻 102
2. 論文標題 Coexistence of checkerboard and quasiparticle interference modulations in Bi2Sr2CaCu2O8+x studied by scanning tunneling microscopy/spectroscopy	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Physical Review B	6. 最初と最後の頁 184513/1-8
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevB.102.184513	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 Matsuda Masaaki, Dissanayake Sachith E., Yoshida Hiroyuki K., Isobe Masaaki, Stone Matthew B.	4. 巻 102
2. 論文標題 Magnetic excitations affected by spin-lattice coupling in the S=3/2 triangular lattice antiferromagnet Ag2CrO2	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Physical Review B	6. 最初と最後の頁 214411/1-6
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevB.102.214411	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 Yoshida H. K., Matsuda M., Stone M. B., de la Cruz C. R., Furubayashi T., Onoda M., Takayama-Muromachi E., Isobe M.	4. 巻 2
2. 論文標題 Partially disordered state with short-range spin correlation in S=5/2 classical triangular antiferromagnet Ag2FeO2	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Physical Review Research	6. 最初と最後の頁 043211/1-6
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevResearch.2.043211	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 該当する

1. 著者名 Yoshida H. K., Dissanayake S. E., Christianson A. D., de la Cruz C. R., Cheng Y.-Q., Okamoto S., Yamaura K., Isobe M., Matsuda M.	4. 巻 102
2. 論文標題 Static and dynamic spin properties in the quantum triangular lattice antiferromagnet Ag2CoO2	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Physical Review B	6. 最初と最後の頁 024445/1-10
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevB.102.024445	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 Ishii Yuto, Chen Jie, Yoshida Hiroyuki K., Oda Migaku, Christianson Andrew D., Yamaura Kazunari	4. 巻 289
2. 論文標題 High-pressure synthesis, crystal structure, and magnetic properties of the Shastry-Sutherland-lattice oxides BaLn ₂ ZnO ₅ (Ln = Pr, Sm, Eu)	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Journal of Solid State Chemistry	6. 最初と最後の頁 121489/1-7
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.jssc.2020.121489	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 Iida K., Yoshida H. K., Nakao A., Jeschke H. O., Iqbal Y., Nakajima K., Ohira-Kawamura S., Munakata K., Inamura Y., Murai N., Ishikado M., Kumai R., Okada T., Oda M., Kakurai K., Matsuda M.	4. 巻 101
2. 論文標題 q=0 long-range magnetic order in centennialite CaCu ₃ (OD)6Cl ₂ ·0.6D ₂ O: A spin-1/2 perfect kagome antiferromagnet with J ₁ -J ₂ -J _d	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Physical Review B	6. 最初と最後の頁 220408/1-6
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevB.101.220408	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 Ihara Y., Yoshida H., Arashima K., Hirata M., Sasaki T.	4. 巻 2
2. 論文標題 Anisotropic magnetic excitations from single-chirality antiferromagnetic state in Ca-kapellasite	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Physical Review Research	6. 最初と最後の頁 023269/1-5
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevResearch.2.023269	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 H. Taniguchi, M. Watanabe, M. Tokuda, S. Suzuki, E. Imada, T. Ibe, T. Arakawa, H. Yoshida, H. Ishizuka, K. Kobayashi and Y. Niimi	4. 巻 10
2. 論文標題 Butterfly-shaped magnetoresistance in triangular-lattice antiferromagnet Ag ₂ CrO ₂	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Scientific Reports	6. 最初と最後の頁 2525/1-7
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1038/s41598-020-59578-z	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 M. Yamashita, M. Akazawa, M. Shimosawa, T. Shibauchi, Y. Matsuda, H. Ishikawa, T. Yajima, Z. Hiroi, M. Oda, H. Yoshida, H.-Y. Lee, J. H. Han and N. Kawashima	4. 巻 32
2. 論文標題 Thermal-transport studies of kagome antiferromagnets	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Journal of Physics: Condensed Matter	6. 最初と最後の頁 074001/1-11
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/1361-648X/ab50e9	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 T. Nagase, M. Komatsu, Y. G. So, T. Ishida, H. Yoshida, Y. Kawaguchi, Y. Tanaka, K. Saitoh, N. Ikarashi, M. Kuwahara, and M. Nagao	4. 巻 123
2. 論文標題 Smectic Liquid-Crystalline Structure of Skyrmions in Chiral Magnet Co _{8.5} Zn _{7.5} Mn ₄ (110) Thin Film	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Physical Review Letters	6. 最初と最後の頁 137203/1-6
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevLett.123.137203	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 Z. Hiroi, H. Ishikawa, H. Yoshida, J. Yamaura, Y. Okamoto	4. 巻 58
2. 論文標題 Orbital Transitions and Frustrated Magnetism in the Kagome-Type Copper Mineral Volborthite	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Inorganic Chemistry	6. 最初と最後の頁 11949-11960
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1021/acs.inorgchem.9b01165	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. Iida, Y. Nagai, S. Ishida, M. Ishikado, N. Murai, A. D. Christianson, H. Yoshida, Y. Inamura, H. Nakamura, A. Nakao, K. Munakata, D. Kagerbauer, M. Eisterer, K. Kawashima, Y. Yoshida, H. Eisaki, and A. Iyo	4. 巻 100
2. 論文標題 Coexisting spin resonance and long-range magnetic order of Eu in EuRbFe ₄ As ₄	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Physical Review B	6. 最初と最後の頁 014506/1-8
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevB.100.014506	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 Iida Kazuki, Yoshida Hiroyuki, Okabe Hirotaka, Katayama Naoyuki, Ishii Yuto, Koda Akihiro, Inamura Yasuhiro, Murai Naoki, Ishikado Motoyuki, Kadono Ryosuke, Kajimoto Ryoichi	4. 巻 9
2. 論文標題 Quantum magnetisms in uniform triangular lattices Li ₂ AMo ₃ O ₈ (A=In, Sc)	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Scientific Reports	6. 最初と最後の頁 1826/1-9
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1038/s41598-018-36123-7	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 Doki Hayato, Akazawa Masatoshi, Lee Hyun-Yong, Han Jung Hoon, Sugii Kaori, Shimozawa Masaaki, Kawashima Naoki, Oda Migaku, Yoshida Hiroyuki, Yamashita Minoru	4. 巻 121
2. 論文標題 Spin Thermal Hall Conductivity of a Kagome Antiferromagnet	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Physical Review Letters	6. 最初と最後の頁 097203/1-6
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevLett.121.097203	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 Taniguchi Hiroki, Suzuki Shota, Arakawa Tomonori, Yoshida Hiroyuki, Niimi Yasuhiro, Kobayashi Kensuke	4. 巻 8
2. 論文標題 Fabrication of thin films of two-dimensional triangular antiferromagnet Ag ₂ CrO ₂ and their transport properties	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 AIP Advances	6. 最初と最後の頁 025010/1-6
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1063/1.5016428	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 Mizuta S, Kurosawa T, Takeyama K, Momono N, Ishii Y, Yoshida H, Oda M, Ido M	4. 巻 969
2. 論文標題 STM/STS study on electronic superstructures in the superconducting state of high-T _c cuprate Bi ₂ Sr ₂ CaCu ₂ O ₈ +	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Journal of Physics: Conference Series	6. 最初と最後の頁 012071/1-6
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/1742-6596/969/1/012071	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52件（うち招待講演 13件 / うち国際学会 11件）

1. 発表者名 林浩章, 吉田紘行, 小田研, 山浦一成, 松下能孝
2. 発表標題 f電子系プリージングカゴメ反強磁性体Gd ₃₀ s ₄ Al ₁₂ の合成と物性
3. 学会等名 日本物理学会第76回年次大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 石井裕人, 池田暁彦, 巖正輝, 小濱芳允, 吉田紘行, 松田康弘
2. 発表標題 プリージングカゴメ反強磁性体Li ₂ Cr ₃ Sb ₀₈ の超強磁場磁歪
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 井原慶彦, 松井一樹, 小濱芳允, 吉田紘行
2. 発表標題 2D-NMR測定によるCaCu ₃ (OH) ₆ Cl ₂ ·0.6H ₂ Oの短距離相関状態の研究
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 飯田一樹, 吉田紘行, 中尾朗子, Harald O. Jeschke, Yasir Iqbal, 中島健次, 河村聖子, 宗像孝司, 稲村泰弘, 村井直樹, 石角元志, 熊井玲児, 岡田武久, 小田研, 加倉井和久, 松田雅昌
2. 発表標題 スピン1/2カゴメ反強磁性体CaCu ₃ (OH) ₆ Cl ₂ ·0.6D ₂ Oにおけるq = 0 長距離磁気秩序
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 林浩章, 山浦一成, 小田研, 吉田紘行
2. 発表標題 新規f電子系カゴメ反強磁性体の合成と物性
3. 学会等名 第61回高圧討論会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 藤井健太郎, 吉田紘行, 石井裕人, 小田研, Harald O. Jeschke, 下川統久朗, 木村健太, 木村剛, 鳴海康雄, 萩原政幸
2. 発表標題 S = 1/2三角キューボラ反強磁性体SrCu(OH)3Clの磁性
3. 学会等名 日本物理学会2020年秋期大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 長瀬知輝, 肖英紀, 安井隼太, 石田高史, 吉田紘行, 田仲由喜夫, 齋藤晃, 五十嵐信行, 川口由紀, 桑原真人, 長尾全寛
2. 発表標題 カイラル磁性薄膜におけるドメインウォールスキルミオンの観測
3. 学会等名 日本物理学会2020年秋期大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 藤井健太郎, 吉田紘行, 石井裕人, 小田研, Harald O. Jeschke, 木村健太, 木村剛, 鳴海康雄, 萩原政幸
2. 発表標題 S = 1/2三角キューボラ反強磁性体SrCu(OH)3Clの単結晶育成と物性
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 荒島洸樹, 井原慶彦, 藤井健太郎, 吉田紘行
2. 発表標題 NMR分光法によるSrCu(OH)3Clの磁気状態の研究
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 水田崇聖, 黒澤徹, 吉田紘行, 小田研, 伊土政幸, 桃野直樹
2. 発表標題 STM/STSからみたBi2212の電子系変調構造とエネルギーギャップ
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 石井裕人, 吉田紘行, 小田研, 山浦一成
2. 発表標題 フリージングカゴメ格子物質Li2M3SbO8 (M = Mn, Fe) の合成と磁性
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 吉田紘行
2. 発表標題 水熱法によるフラストレート磁性体の新物質探索と単結晶育成
3. 学会等名 日本物理学会2020年秋季大会(招待講演)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 今田絵理阿, 谷口祐紀, 渡邊杜, 徳田将志, 鈴木将太, 荒川智紀, 吉田紘行, 石塚大晃, 小林研介, 新見康洋
2. 発表標題 三角格子反強磁性体 Ag ₂ CrO ₂ 高純度薄膜における磁気異方性の電氣的検出
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 谷口祐紀, 渡邊杜, 徳田将志, 井邊昂志, 荒川智紀, 吉田紘行, 石塚大晃, 小林研介, 新見康洋
2. 発表標題 三角格子反強磁性体Ag ₂ CrO ₂ 薄膜における磁気伝導測定
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 長瀬知輝, 小松正弥, 肖英紀, 石田高史, 吉田紘行, 川口由紀, 田仲由喜夫, 齋藤晃, 五十嵐信行, 桑原真人, 長尾全寛
2. 発表標題 カイラル磁性薄膜におけるスキルミオンの液晶構造
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 谷口祐紀, 鈴木将太, 荒川智紀, 吉田紘行, 新見康洋, 小林研介
2. 発表標題 三角格子反強磁性体Ag ₂ CrO ₂ 薄膜における磁気輸送測定
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 堀田知佐, 吉田紘行
2. 発表標題 S = 3/2 breathing kagomeにおけるquantum-classical spin liquid状態
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 石井裕人, 吉田紘行, 小田研, 鳴海康雄, 萩原政幸, 松田康弘
2. 発表標題 S = 3/2ブリージングカゴメ格子反強磁性体Li ₂ Cr ₃ Sb ₀₈ の超強磁場磁化過程
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 荒島洸樹, 井原慶彦, 佐々木孝彦, 平田倫啓, 吉田紘行
2. 発表標題 7Li NMR法による高磁場におけるLi ₂ Cr ₃ Sb ₀₈ の磁気状態の研究
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 Y. Ishii, Y. Narumi, Y. Matsushita, T. Matsumoto, M. Oda, T. Kida, M. Hagiwara, and H. Yoshida
2. 発表標題 Field Induced Successive Phase Transitions in Classical J1-J2 Buckled Honeycomb Lattice Antiferromagnet Cs ₃ Fe ₂ C ₁₉
3. 学会等名 International Conference on Strongly Correlated Electron Systems 2019 (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Y. Ishii, Chen Jie, H. Yoshida, M. Oda, A.D. Christianson, and K. Yamaura
2. 発表標題 Synthesis and physical properties of BaRE ₂ ZnO ₅ (RE: rare earth element)
3. 学会等名 International Workshop on Topological Quantum Materials 2019 (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Hiroyuki Yoshida
2. 発表標題 Application of hydrothermal technique to develop 3d transition metal compounds without local inversion symmetry
3. 学会等名 J-Physics 2019 International Conference (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Hiroyuki Yoshida
2. 発表標題 Synthesis and physical properties of Spin-1/2 SrCu(OH)3Cl without inversion symmetry
3. 学会等名 International Conference on Strongly Correlated Electron Systems 2019 (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 吉田 紘行
2. 発表標題 Exploring of the new materials without time- and spatial-inversion symmetry
3. 学会等名 第29回日本MRS年次大会 (招待講演)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 吉田 紘行
2. 発表標題 S = 1/2三角キューボラ化合物SrCu(OH)3Clの磁性
3. 学会等名 スピン系研究の開拓前線 -理論的挑戦と新物質開拓- (招待講演)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 吉田 紘行
2. 発表標題 強磁場磁化測定による新規フラストレート磁性体の磁化過程の研究
3. 学会等名 強磁場フォーラム総会 (招待講演)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 吉田 紘行
2. 発表標題 フラストレート磁性体の新規物質開発と物性評価
3. 学会等名 日本物理学会第75回年次大会 (招待講演)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Hiroyuki Yoshida
2. 発表標題 Dual magnetic excitations in S = 1/2 kagome antiferromagnet CaCu ₃ (OH) ₆ Cl ₂ ·0.6H ₂ O
3. 学会等名 International workshop on topological quantum materials 2019 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Y. Ishii, H. Yoshida
2. 発表標題 Competing magnetic phases emerged under magnetic field in triangular lattice dimer Cs ₃ Fe ₂ Cl ₉
3. 学会等名 The International Conference for Young Researchers on Advanced Materials 2018 (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 S. Mizuta, T. Kurosawa, N. Momono, H. Yoshida, M. Oda, M. Ido
2. 発表標題 STM/STS Study on Electronic Superstructures in High-Tc Cuprate Bi ₂ Sr ₂ CaCu ₂ O _{8+x}
3. 学会等名 M2S2018 conference (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Y. Ishii, Y. Matsushita, H. Yoshida, M. Oda, M. Hagiwara, T. Masuda, T. Kida, Y. Narumi, and M. Hagiwara
2. 発表標題 Competing magnetic phases emerged under magnetic field in triangular lattice dimer Cs ₃ Fe ₂ Cl ₉
3. 学会等名 Emallia Conference 2018 (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 T. Okada, and H. Yoshida
2. 発表標題 Magnetic Properties of Perfect Kagome Lattices in YCu ₃ (OH) ₆ Cl ₃
3. 学会等名 Emallia Conference 2018 (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 木田孝則, 奥谷顕, 萩原政幸, 吉田紘行
2. 発表標題 二次元三角格子反強磁性体Ag ₂ CrO ₂ の強磁場磁化および磁気輸送特性
3. 学会等名 第28回日本MRS年次大会 (招待講演)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 石井裕人, チェンジエ, 吉田紘行, 小田研, アンドリュークリスチャンソン, 山浦一成
2. 発表標題 BaRE ₂ ZnO ₅ (RE:希土類元素)の合成と物性
3. 学会等名 第28回日本MRS年次大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 荒島洸樹, 井原慶彦, 吉田紘行
2. 発表標題 7Li NMR法による低磁場におけるLi ₂ Cr ₃ SbO ₈ の磁気状態の研究
3. 学会等名 日本物理学会2018年秋期大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 谷口祐紀, 鈴木将太, 荒川智紀, 吉田紘行, 新見康洋, 小林研介
2. 発表標題 三角格子反強磁性体Ag ₂ CrO ₂ 薄膜における磁気抵抗効果
3. 学会等名 日本物理学会第73回年次大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 飯田一樹, 吉田紘行, 野口直彌, 小田研, 石角元志, 村井直樹, 河村聖子, 中島健次
2. 発表標題 Spin-1/2反強磁性カゴメCaCu ₃ (OD)6Cl ₂ ·0.6D ₂ Oにおける連続励起の観測
3. 学会等名 日本物理学会第73回年次大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 井原慶彦, 佐々木孝彦, 吉田紘行
2. 発表標題 35Cl NMR分光法によるCaカペラサイトにおける異方的磁気励起の研究
3. 学会等名 日本物理学会第73回年次大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 水田崇聖, 黒澤徹, 竹山幸作, 桃野直樹, 吉田紘行, 小田研, 伊土政幸
2. 発表標題 STM/STSから見たBi ₂ Sr ₂ CaCu ₂ O ₈ + における電子系の変調構造
3. 学会等名 日本物理学会第73回年次大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 黒澤徹, 高品博光, 近藤広康, 市村晃一, 桃野直樹, 吉田紘行, 小田研, 伊土政幸, 丹田聡
2. 発表標題 STM/STSからみた1T-TaS ₂ の電子状態II
3. 学会等名 日本物理学会第73回年次大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Hiroyuki Yoshida
2. 発表標題 Unusual magnetic ground state with dual magnetic excitations in $S = 1/2$ J1-J2-Jd kagome antiferromagnet $\text{CaCu}_3(\text{OH})_6\text{Cl}_2 \cdot 0.6\text{H}_2\text{O}$
3. 学会等名 4th International Conference on Functional Materials Science 2018 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Hiroyuki Yoshida
2. 発表標題 Material development towards the perfect frustration on kagome antiferromagnet
3. 学会等名 J-Physics 2018: International Workshop on New Materials and Crystal Growth (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 吉田 紘行
2. 発表標題 Magnetic properties of $S = 3/2$ breathing kagome antiferromagnet $\text{Li}_2\text{Cr}_3\text{SbO}_8$
3. 学会等名 神戸大学フォトサイエンス研究センタースピン系物理研究会 (招待講演)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 吉田 紘行
2. 発表標題 カゴメ反強磁性体の強磁場磁化過程の実験的研究
3. 学会等名 スピン系物理の最前線 (招待講演)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 吉田紘行
2. 発表標題 Magnetic properties of $S = 1/2$ antiferromagnetic bond alternating chain system: $\text{CaCu}_2(\text{OH})_3\text{Cl}_3$
3. 学会等名 第5回西日本強磁場科学研究会 (招待講演)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 岡部博孝, 飯田一樹, 梶本亮一, 吉田紘行, 石井裕人, 村井直樹, 石角元志, 稲村泰弘, 中島健次, 幸田章宏, 平石雅俊, 竹下聡史, 小嶋健児, 門野良典
2. 発表標題 三角格子反強磁性体 $\text{Li}_2\text{AMo}_3\text{O}_8$ ($A = \text{In}, \text{Sc}$) の μSR
3. 学会等名 日本物理学会2018年秋期大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 鈴木哲平, 斎藤佑, 原茂生, 櫻井敬博, 大久保晋, 太田仁, 赤木暢, 鳴海康雄, 萩原政幸, 吉田紘行
2. 発表標題 $S = 1/2$ カゴメ格子反強磁性体 Ca-kapellasilite の圧力下の磁性
3. 学会等名 日本物理学会2018年秋期大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 谷口祐紀, 鈴木将太, 荒川智紀, 吉田紘行, 新見康洋, 小林研介
2. 発表標題 三角格子反強磁性体 Ag_2CrO_2 薄膜におけるホール効果測定
3. 学会等名 日本物理学会2018年秋期大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 石井裕人, 吉田紘行, 山浦一成, 小田研
2. 発表標題 希土類酸化物BaRE ₂ ZnO ₅ (RE: 希土類元素)の合成と磁性
3. 学会等名 日本物理学会2018年秋期大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 石井裕人, 松下能孝, 吉田紘行, 小田研, 高田篤, 木田孝則, 鳴海康雄, 萩原政幸
2. 発表標題 三角格子ダイマーCs ₃ Fe ₂ C ₁₉ の磁性
3. 学会等名 第28回日本MRS年次大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 岡田武久, 松下能孝, 石井裕人, 小田研, 吉田紘行
2. 発表標題 S = 1/2カゴメ格子磁性体YCu ₃ (OH) ₆ Cl ₃ ·0.2H ₂ Oとα-MgCu ₃ (OH) ₆ Cl ₂ の磁性
3. 学会等名 第28回日本MRS年次大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 吉田紘行
2. 発表標題 特異なスピン構造を有する新規酸化物の探索
3. 学会等名 第28回日本MRS年次大会
4. 発表年 2018年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

スピン液体状態における熱ホール効果の発見
http://www.issp.u-tokyo.ac.jp/issp_wms/DATA/OPTION/news20160719.pdf

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
--	---------------------------	-----------------------	----

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
---------	---------