

令和 6 年 6 月 19 日現在

機関番号：32660

研究種目：基盤研究(B)（一般）

研究期間：2021～2023

課題番号：21H01044

研究課題名（和文）スピン正20面体特有の新現象の開拓

研究課題名（英文）Exploration of New Phenomena Unique to Spin Icosahedra

研究代表者

田村 隆治（Tamura, Ryuji）

東京理科大学・先進工学部マテリアル創成工学科・教授

研究者番号：50307708

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 13,600,000円

研究成果の概要（和文）：近年、希土類スピン正20面体がどのような特異な性質を示すか大変興味を持たれている。本研究では、Au系化合物を舞台に希土類スピン正20面体の磁性、特に磁気構造を詳しく調べた。代表的な成果としては、Au/Ga比のわずかに異なる一連のAu-Ga-Tb化合物を合成し、強磁性・反強磁性・スピングラス相の存在を明らかにするとともに、中性子回折実験により、すべての磁気秩序を決定した。その結果、正20面体の対称性を直接に反映した渦巻き強磁性秩序と渦巻き反強磁性秩序の存在が突き止められた。一方、理論面では、実験との比較が可能な磁化過程や比熱をシミュレートし、スピン20面体の磁性を理解する学術基盤を整えた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

正20面体は正12面体とともにプラトンの多面体として古くから知られているが、その物性に関する理解は現代に至るまで遅々として進んでいなかった。本研究は、固体中の正20面体の物性（磁性）に関する実験的研究であることに学術的意義があり、本研究により、正20面体上の特異なスピン配列が解明された。また、正20面体上で見いだされた非共面磁気構造を用いた新たな物性研究や応用研究が今後立ち上がることが期待される。

研究成果の概要（英文）：In recent years, there has been significant interest in the unique phenomena of rare-earth spin icosahedra. In this study, we closely investigated the magnetism, particularly the magnetic structure, of rare-earth spin icosahedra in Au-based compounds. In this work, we synthesized a series of Au-Ga-Tb compounds with slightly different Au/Ga ratios, revealing the presence of ferromagnetic, antiferromagnetic, and spin-glass phases, and determined all magnetic structures through neutron diffraction experiments. As a result, we identified the existence of whirling ferromagnetic and antiferromagnetic orders, which directly reflect the symmetry of the icosahedron. On the theoretical side, we simulated the magnetization process and specific heat, which can be compared with experiments, thereby establishing a scholarly foundation for understanding the magnetism of spin icosahedra.

研究分野：金属物性

キーワード：準結晶 近似結晶 正20面体

### 1. 研究開始当初の背景

1984年に発見された正20面体準結晶は、局所構造に正20面体クラスターを有することが一つの特徴である。この準結晶の発見後ただちに、準結晶と同じ正20面体クラスターからなる兄弟物質である近似結晶が見い出され、両者の物性の関係について多くの関心が寄せられてきた。一方、2000年に、Cd-Yb希土類準結晶が発見され、この準結晶は希土類がつくる正20面体を局所構造に有することから、その磁性に注目が集まった。その後、Cd-R(R:希土類)近似結晶の存在も見い出され、希土類正20面体クラスターからなる固体の物性研究が活発になされてきた。しかしながら、本研究が始まる以前は、希土類準結晶の磁性は例外なく、スピングラス的な振る舞いを示し、固体中の正20面体の磁性に関する理解は遅々として進まなかった。一方、2018年にAu-Al-Gd系近似結晶において強磁性・反強磁性秩序が発見され、正20面体結晶の磁性研究がにわかに脚光を浴びるようになった。このAu-Al-Gd系近似結晶の一つの大きな特長に、その組成自由度の高さがあり、広い範囲にわたってAu/Al比を変化させることができる。興味深いことに、Au/Al比を変化させることで磁気基底状態が変遷する様子が突き止められ、正20面体結晶において様々な磁気秩序が手に入るようになった。このAu系近似結晶において見い出された高い組成自由度が、本研究の着想にいたった背景をなしている。

### 2. 研究の目的

以上の背景を踏まえて、本研究では、広い単相領域を有するAu系近似結晶に焦点を当てて、スピン正20面体結晶の磁性・磁気構造・磁性制御法を明らかにすること、それに基づき、スピン正20面体特有の新物性や新現象を開拓・実現することを目的とした。

### 3. 研究の方法

研究対象としてはAu-SM(半金属)-R(希土類)系を選択し、半金属と希土類を様々に変えて試料作製を行った。特に、半金属としてGaを選択したときに、広いAu/Ga比で単相の近似結晶が得られることを見出し、その磁性の平均価電子数依存性を詳細に調べた。試料の作製は、高純度金属原料を用いてアーク溶解により母合金を作製し、次いで、アルゴン雰囲気下で高温長時間の熱処理を施すことにより構造良質化を図った。相評価には粉末X線回折測定を行い、単相試料については、MPMS装置を用いて室温以下1.8Kまでの低温域で磁化測定を行った。磁化測定より、反強磁性・強磁性・スピングラス転移を検出し、反強磁性相と強磁性相については、JRR-3施設の三軸分光器(4G GPTAS)を用いて粉末中性子回折実験を行い、その磁気構造を決定した。

### 4. 研究成果

本研究において、様々なAu系希土類近似結晶において磁気秩序の発見および解明がなされたが、代表的な成果として、Au-Ga-Tb近似結晶の成果を述べる(Labib, Tamura *et al.*, Mater. Today Phys. **40** (2024) 101321)。

Au-Ga-Tb系において、Au/Ga比を細かく制御することで、平均価電子数の異なる一連の単相試料を作製した。その磁化測定の結果、図1に示すように、平均価電子数( $e/a$ )を増加させるに従い、反強磁性・強磁性・スピングラス相へと磁気秩序が変遷することをまず明らかにした。図中で、赤丸は磁気転移温度もしくはスピングラス凍結温度を表すが、強磁性相と反強磁性相の境界で転移温度が顕著に落ち込む様子も観察された。これは、両者が拮抗して強いフラストレーションが生じていることを示唆するものである。

さらに強磁性相と反強磁性相については、JRR-3施設の4G GPTASを用いて中性子回折測定を行い、磁気散乱ピークを検出し、磁気構造解析を行った。その結果を図2に示す。図は20面体の1つの3回軸方向から見た

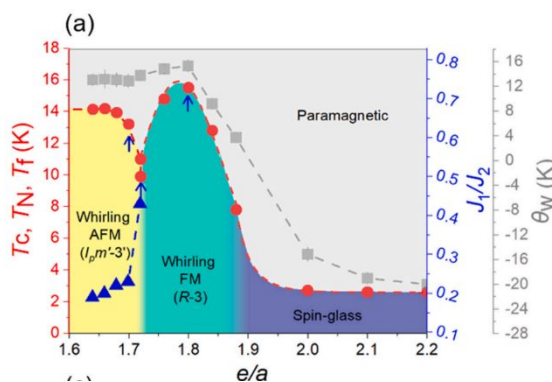


図1 Au-Ga-Tb系 1/1 近似結晶の磁気相図。横軸は  $e/a$  (一原子あたりの価電子数) を表す。

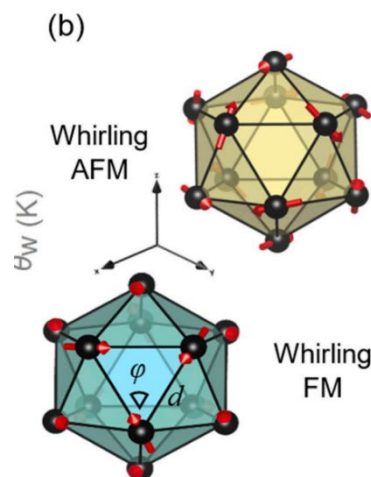


図2 強磁性相(上)と反強磁性相(下)の磁気構造。反強磁性相では、原点と体心位置の磁気モーメントの向きが逆になっている。

磁気秩序を表しており、20 面体頂点には Tb スピンが位置している。各 Tb スピンは概ね、20 面体と接する方向を向き、どちらも右回りの渦を巻いている様子が見てとれる。このように、本研究により、20 面体の対称性を直接に反映した、興味深い磁気構造を有することが突き止められた。また、理論解析から、このような磁気構造をつくる条件も明らかにされた。さらに理論面では、磁気基底状態として Hedgehog 相や Cuboc 相などの特異な磁気構造実現の可能性が明らかにされ、今後、正 20 面体結晶において、様々な新奇な磁気秩序を発見されることが期待される。

## 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 2件／うちオープンアクセス 4件）

1. 著者名 Farid Labib, Hiroyuki Takakura, Asuka Ishikawa, and Ryuji Tamura	4. 巻 107
2. 論文標題 Atomic structure of the unique antiferromagnetic 2/1 quasicrystal approximant	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 PHYSICAL REVIEW B	6. 最初と最後の頁 184110-1-10
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1103/PhysRevB.107.184110	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 Takeuchi Ryo, Labib Farid, Tsugawa Takafumi, Akai Yuto, Ishikawa Asuka, Suzuki Shintaro, Fujii Takenori, Tamura Ryuji	4. 巻 130
2. 論文標題 High Phase-Purity and Composition-Tunable Ferromagnetic Icosahedral Quasicrystal	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Physical Review Letters	6. 最初と最後の頁 176701-1-5
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1103/PhysRevLett.130.176701	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 Labib Farid, Nawa Kazuhiro, Suzuki Shintaro, Wu Hung-Cheng, Ishikawa Asuka, Inagaki Kazuki, Fujii Takenori, Kinjo Katsuki, Sato Taku J., Tamura Ryuji	4. 巻 40
2. 論文標題 Unveiling exotic magnetic phase diagram of a non-Heisenberg quasicrystal approximant	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Materials Today Physics	6. 最初と最後の頁 101321-1-9
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1016/j.mtphys.2023.101321	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 Sugimoto Takanori, Suzuki Shintaro, Tamura Ryuji, Tohyama Takami	4. 巻 93
2. 論文標題 Revisiting the Magnetic Orders in Heisenberg Model for Tsai-Type Quasicrystal Approximant	5. 発行年 2024年
3. 雑誌名 Journal of the Physical Society of Japan	6. 最初と最後の頁 045001-1-2
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.7566/JPSJ.93.045001	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 Labib Farid, Suzuki Shintaro, Ishikawa Asuka, Fujii Takenori, Tamura Ryuji	4. 巻 106
2. 論文標題 Emergence of long-range magnetic order from spin-glass state by tuning electron density in a stoichiometric Ga-based quasicrystal approximant	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Physical Review B	6. 最初と最後の頁 174436-1-6
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevB.106.174436	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 Labib Farid, Takakura Hiroyuki, Ishikawa Asuka, Tamura Ryuji	4. 巻 6
2. 論文標題 Competition between spin-glass and antiferromagnetic states in Tsai-type 1/1 and 2/1 quasicrystal approximants	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Physical Review Materials	6. 最初と最後の頁 124412-1-12
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevMaterials.6.124412	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 Nawa Kazuhiro, Okuyama Daisuke, Ebina Akihito, Sato Taku J, Ishikawa Asuka, Tamura Ryuji	4. 巻 2461
2. 論文標題 Single-crystal neutron diffraction study on the quasicrystal approximant Au70Al16Tb14	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Journal of Physics: Conference Series	6. 最初と最後の頁 012015 ~ 012015
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/1742-6596/2461/1/012015	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 杉本貴則、遠山貴巳	4. 巻 56
2. 論文標題 3次元ハイパーマテリアルの磁気秩序と有効模型 近似結晶の磁気秩序と20面体クラスタのスピ基底状態	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 固体物理	6. 最初と最後の頁 43-53
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 Tamura Ryuji, Ishikawa Asuka, Suzuki Shintaro, Kotajima Takahiro, Tanaka Yujiro, Seki Takehito, Shibata Naoya, Yamada Tsunetomo, Fujii Takenori, Wang Chin-Wei, Avdeev Maxim, Nawa Kazuhiro, Okuyama Daisuke, Sato Taku J.	4. 巻 143
2. 論文標題 Experimental Observation of Long-Range Magnetic Order in Icosahedral Quasicrystals	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Journal of the American Chemical Society	6. 最初と最後の頁 19938 ~ 19944
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1021/jacs.1c09954	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

〔学会発表〕 計128件 (うち招待講演 11件 / うち国際学会 26件)

1. 発表者名 Ryuji Tamura
2. 発表標題 Search for long-range magnetic order in icosahedral quasicrystals
3. 学会等名 The 15th International Conference on Quasicrystals (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Ryuji Tamura
2. 発表標題 Search for long-range magnetic order in icosahedral quasicrystals
3. 学会等名 THERMEC ' 2023 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Farid Labib, Kazuhiro Nawa, Shintaro Suzuki, Hung-Cheng Wu, Asuka Ishikawa, Kazuki Inagaki, Takenori Fujii, Taku J. Sato and Ryuji Tamura
2. 発表標題 Magnetic properties investigation of the Au-Ga-Tb 1/1 approximant crystals with single ferromagnetic and successive ferromagnetic/antiferromagnetic transitions
3. 学会等名 International Union of Crystallography (IUCR) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 渡邊輔, 山本貴史, 石川明日香, Farid Labib, 鈴木慎太郎, 田村隆治
2. 発表標題 Au-Al-Gd系1/1近似結晶の磁気エントロピー
3. 学会等名 日本物理学会第78回年次大会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 田村 隆治, Farid Labib, 石川明日香, 鈴木慎太郎
2. 発表標題 Tsai型ハイパーマテリアルの局在磁性
3. 学会等名 第17回領域横断研究会(招待講演)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Labib Farid, 和宏 那波, 鈴木 慎太郎, Wu Hung-Cheng, 石川 明日香, 稲垣 和樹, 藤井 武則, 金城 克樹, 佐藤 卓, 田村 隆治
2. 発表標題 Unveiling exotic magnetic phase diagram of a non-Heisenberg quasicrystal approximant
3. 学会等名 日本金属学会2024年春季(第174回)講演大会
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 阿部宇希, 鈴木慎太郎, 山本貴史, Farid Labib, 石川明日香, 田村隆治
2. 発表標題 Au-SM-Eu系2/1近似結晶の作製と磁性
3. 学会等名 日本物理学会2024年春季大会
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 山本貴史, 小笠原圭彦, 石川明日香, 田村隆治
2. 発表標題 Au系1/1近似結晶の磁性に対する化学圧力効果の検証
3. 学会等名 日本物理学会2024年春季大会
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 那波和宏, 松浦直人, 出口和彦, 石川明日香, 梶本亮一, 池内和彦, 鈴木慎太郎, 田村隆治, 佐藤卓
2. 発表標題 近似結晶Au70Al16Tb14におけるスピン波励起
3. 学会等名 日本物理学会2024年春季大会
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 野末悟郎, 藤原秀紀, 堤美和, 鳥井優杜, 中島将, 阪口真衣, 坂本紀乃香, 中村拓矢, 木須孝幸, 保井晃, 石川明日香, Farid Labib, 山本貴史, 田村隆治, 関山明
2. 発表標題 磁性体Au-Al-Gd近似結晶の内殻・価電子帯光電子分光
3. 学会等名 日本物理学会2024年春季大会
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 田村隆治
2. 発表標題 (共催シンポジウム講演) 正20面体準結晶と近似結晶の磁性(実験)
3. 学会等名 日本物理学会2024年春季大会(招待講演)
4. 発表年 2024年



1 . 発表者名 T. Sugimoto, S. Suzuki, R. Tamura, and T. Tohyama
2 . 発表標題 Multifarious magnetic orders in icosahedral-quasicrystal approximants
3 . 学会等名 International Conference on Strongly Correlated Electron Systems 2023 ( 国際学会 )
4 . 発表年 2023年

1 . 発表者名 T. Sugimoto, S. Suzuki, R. Tamura, T. Yamada and T. Tohyama
2 . 発表標題 Various magnetic phases in Tsai-type 2/1 quasicrystal approximants
3 . 学会等名 15th International Conference on Quasicrystals ( 国際学会 )
4 . 発表年 2023年

1 . 発表者名 Ryuji Tamura, A. Ishikawa, S. Suzuki, M. Avdeev, T. J. Sato
2 . 発表標題 Ferromagnetic transition in the Au-Ga-(Gd,Tb) icosahedral quasicrystals
3 . 学会等名 Aperiodic2022 ( 国際学会 )
4 . 発表年 2022年

1 . 発表者名 Farid Labib, H. Takakura, A. Ishikawa, R. Tamura
2 . 発表標題 Atomic structures of Ga-Pd-Tb 1/1 and 2/1 approximant crystals; Possible correlation between structure and magnetic behavior
3 . 学会等名 Aperiodic2022 ( 国際学会 )
4 . 発表年 2022年

1. 発表者名 Shintaro Suzuki, Y. Shimozaki, A. Ishikawa, T. Fujii, R. Tamura
2. 発表標題 Magnetism of new Eu-based quasicrystal approximants
3. 学会等名 Aperiodic2022 (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 竹内涼, 石川明日香, 鈴木慎太郎, 田村隆治
2. 発表標題 Ag-Al-Ga-R(R=希土類)系1/1近似結晶の作製と磁性
3. 学会等名 日本物理学会2022年秋季大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Farid Labib, Asuka Ishikawa, Ryuji Tamura
2. 発表標題 Frequency dependence of the spin-glass freezing temperatures in the Ga-Pd-RE (RE = rare earth) quasicrystalline approximants
3. 学会等名 日本物理学会2022年秋季大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 鈴木慎太郎, 霜崎結太, 竹内涼, 石川明日香, 藤井武則, 田村隆治
2. 発表標題 Eu系Tsai型近似結晶における磁性探索
3. 学会等名 日本物理学会2022年秋季大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 渡邊輔, 鈴木慎太郎, 石川明日香, 田村隆治
2. 発表標題 Au系1/1近似結晶の磁気熱量効果
3. 学会等名 日本物理学会2022年秋季大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 須藤佐介, 鈴木慎太郎, 石川明日香, 室裕司, 藤井武則, 田村隆治
2. 発表標題 Au-SM-La(SM=Sn, Si)系1/1近似結晶の合成と電子物性
3. 学会等名 日本物理学会2022年秋季大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 小笠原俊輔, 鈴木慎太郎, 石川明日香, 室裕司, 藤井武則, 田村隆治
2. 発表標題 Au-SM-La(SM=Al, Ga)系ハイパーマテリアルの合成と電子物性
3. 学会等名 日本物理学会2022年秋季大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 杉本貴則
2. 発表標題 Tsai型準結晶におけるRKKY磁性
3. 学会等名 第18回量子スピン系研究会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 杉本 貴則, 鈴木 慎太郎, 田村 隆治
2. 発表標題 Tsai型近似結晶の等方的RKKY磁気模型におけるメタ磁性転移
3. 学会等名 日本物理学会2022年秋季大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Kazuhiro Nawa, D. Okuyama, A. Ishikawa, R. Tamura, T. J Sato
2. 発表標題 Neutron scattering study on the magnetic quasicrystal approximant Au70Al16Tb14
3. 学会等名 Aperiodic2022 (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 R. Tamura, A. Ishikawa, S. Suzuki, M. Avdeev, T. J. Sato
2. 発表標題 Search for long-range magnetic order in icosahedral quasicrystals
3. 学会等名 33rd European Crystallographic Meeting (ECM33) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 杉本貴則、鈴木慎太郎、田村隆治
2. 発表標題 希土類元素を含むTsai型近似結晶合金における磁気秩序
3. 学会等名 日本金属学会2022年秋季大会171回講演大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 田村隆治
2. 発表標題 「ハイパーマテリアル」新学術創成とその局在磁性
3. 学会等名 日本物理学会北陸支部定例学術講演会（招待講演）
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 LABIB FARID、石川 明日香、田村 隆治
2. 発表標題 Magnetic properties of the Dy-contained 1/1 approximant crystals
3. 学会等名 日本金属学会2023年春季第172回講演大会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 三宅厚志, Farid Labib, 石川明日香, 鈴木慎太郎, 徳永将史, 田村隆治
2. 発表標題 Au-Al-Tb系近似結晶の磁気相図
3. 学会等名 日本物理学会2023年春季大会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Farid Labib, Kazuhiro Nawa, Shintaro Suzuki, Asuka Ishikawa, Takenori Fujii, Ryuji Tamura and Taku J. Sato
2. 発表標題 Sign of a new ferromagnetic phase in Au-Ga-Tb 1/1 quasicrystalline approximant crystal with successive phase transitions
3. 学会等名 日本物理学会2023年春季大会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 T. Sugimoto
2. 発表標題 Magnetic orders induced by the RKKY interaction in Tsai-type quasicrystal Approximants
3. 学会等名 IRN theory session (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 津川高史、鈴木慎太郎、石川明日香、藤井武則、田村隆治
2. 発表標題 Au-Al-Gd系1/1近似結晶の磁性への異種元素添加の影響
3. 学会等名 日本物理学会2021年秋季大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 霜崎結太、石川明日香、鈴木慎太郎、室裕司、高倉洋礼、田村隆治
2. 発表標題 Au-Si-Eu系1/1近似結晶の作製と磁性
3. 学会等名 日本物理学会2021年秋季大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 菊川直樹、廣戸孝信、石川明日香、鈴木慎太郎、櫻井裕也、田村隆治
2. 発表標題 強磁性秩序を示す1/1近似結晶Au <sub>64</sub> Al <sub>22</sub> R <sub>14</sub> (R = Gd, Tb, Dy) の磁気熱量効果
3. 学会等名 日本物理学会2021年秋季大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 竹内涼、石川明日香、鈴木慎太郎、高倉洋礼、田村隆治
2. 発表標題 新規なAg系1/1近似結晶の作製と磁性
3. 学会等名 日本物理学会2021年秋季大会
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 分 担 者	杉本 貴則  (Sugimoto Takanori)	大阪大学・量子情報・量子生命研究センター・特任准教授 (常勤)	
	(70735662)	(14401)	

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			
オーストラリア	オーストラリア原子力科学技術 機構(ANSTO)			
フランス	フランス国立科学研究センター (CNRS)			
米国	North Dakota State University			
ドイツ	フリッツ・ハーバー研究所	ユリウス・マクシミリアン大学 ヴュルツブルク		
英国	ISIS Neutron & Muon Facility	University of Liverpool		