

令和 2 年 6 月 5 日現在

機関番号：11301

研究種目：挑戦的研究(萌芽)

研究期間：2017～2019

課題番号：17K18744

研究課題名(和文) スカーミオン格子相におけるトポロジカルマグノンの探索

研究課題名(英文) Topological magnons in skyrmion-lattice phases

研究代表者

佐藤 卓 (Sato, Taku)

東北大学・多元物質科学研究所・教授

研究者番号：70354214

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 5,000,000円

研究成果の概要(和文)：磁性体中のトポロジカルなスピントクスチャーである磁気スカーミオン格子中では、磁気モーメントの集団運動であるマグノンがトポロジカルなバンドを形成することが理論的に予想されていた。本研究で我々はこのトポロジカルマグノンバンドの探索に挑戦した。最初に、Mn(Si,Ge)等の混晶系における物性パラメータの置換濃度依存性を調べトポロジカルマグノンバンド観測に適した系を確定した。続いて、中性子非弾性散乱を行いスカーミオン格子相に特徴的なエネルギー方向にブロードな磁気励起を観測した。この結果は理論予想とは異なるが、有限温度の磁気ダイナミクス計算を行うことにより幅の広がり温度効果であることが示唆された。

研究成果の学術的意義や社会的意義

磁性体中に形成される磁気スカーミオンはその非自明なトポロジーに起因して外乱から保護された構造であると考えられるため、基礎科学の側面からだけでなく、スピントロニクス応用の観点からも興味を持たれている。本研究で我々は磁気スカーミオン中の準粒子マグノン(磁気モーメントの集団運動)に対してトポロジカルバンド形成の検証を行った。結果は予想されたものとは異なっていたが、磁気スカーミオン格子における有限温度のミクロな磁気ダイナミクスを明らかにしたという意味で基礎科学的に意義があると考えられる。

研究成果の概要(英文)：Magnetic skyrmion lattice, a lattice of swirling topological magnetic texture, is predicted theoretically to host "topological bands" of quantized collective dynamics of magnetic moments, or "magnons". In this study, we searched such topological magnons experimentally. First, we studied magnetic properties of various doped systems, such as Mn(Si,Ge), and found the appropriate systems to explore the topological magnons. In the neutron inelastic experiment, we observed a very broad inelastic excitation spectrum characteristic to the skyrmion lattice phase. This result is apparently not consistent with the theoretical predication, nonetheless, our numerical simulation suggests that the broadness is due to the finite temperature effect.

研究分野：磁性・中性子散乱

キーワード：magnetic skyrmion neutron scattering small angle scattering inelastic scattering topological magnon

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。

様式 C-19、F-19-1、Z-19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

反転対称性を持たない磁性体にはジャロシンスキー・守谷相互作用と呼ばれる反対称相互作用が存在する。この相互作用の存在のため、主要な磁気相互作用が強磁性的であっても磁気秩序は単純な強磁性秩序とはならず、長周期の磁気変調を伴うヘリカル・スパイラル磁気秩序になることがある。このような磁気変調構造は古くから知られていたが、2009年にMnSiの中性子小角散乱実験から、本物質においてはお互いに120度離れた向きを持つ3つの磁気変調ベクトルが共存するtriple- q 構造が安定化されることが報告された。この構造はスピネクスタチャーの観点から見ると局所的渦巻き型磁気配列が周期的な三角格子を形成していると理解できる(図1(c))。格子点に位置する渦巻き型磁気構造は磁気モーメントが 4π 方向すべてを指す構造であり(図1(a,b))、強磁性構造とはそのトポロジーが異なる非自明な構造である。この構造は理論的にスカーミオンとして予想されていたが、MnSi磁性体中に現実に見られたことから、磁気スカーミオンと命名されその性質に関して精力的な研究が始まった。

本研究開始時点では、磁気スカーミオンはMnSiのみならずFeGe、Cu₂OSeO₃等の種々の磁性体で確認されており、磁気スカーミオンの存在に関しては普遍性が確立されていたと言える。また、磁気テクスチャー構造の詳細に関しても、中性子小角散乱法という回折手法のみならず、ローレンツ顕微鏡法等の実空間観測手法でも確認されていた。また磁気スカーミオン構造中の磁気ダイナミクスについても長周期磁気ダイナミクスに関しては、数値計算と電磁波分光の両面から研究が進められており、その概要は明らかになっていたと言える。

磁気スカーミオン格子中にはもちろん有限波数(比較的短波長)の磁気励起モードも存在するはずである。この磁気励起モードに関しては、理論計算から三角格子の周期に対応して折り返すマグノン磁気励起モードの存在が示唆されていた。さらに、このモードは通常の磁性体のそれとは異なり、バンド毎に定義されるチャーン数が非自明な値を取る、いわゆるトポロジカルマグノンであることが示唆されていた。スカーミオン三角格子の格子定数が極めて長いこと(MnSiでは200Å程度)に対応して、マグノンバンドの折返しは $Q \sim 0.03 \text{ \AA}^{-1}$ 程度で起こる。したがって、有限波数とはいえマグノンバンドは極めて小さな波数領域でのみ観測されると想定される。この理由で、実験的な検証は非常に困難と考えられ、このような研究は殆ど行われていなかった。

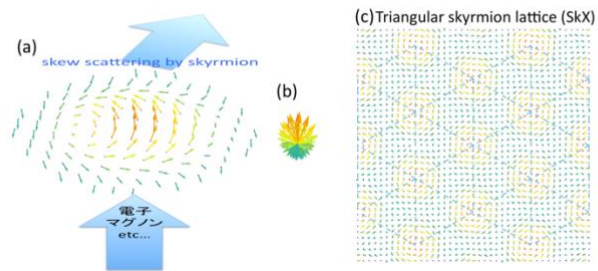


図1: (a)磁気スカーミオンの模式図。(b)スカーミオン中の磁気モーメントを原点に移動した図。4 π を張る。(c)磁気スカーミオン格子の模式図。

2. 研究の目的

本研究の最終的な目的は磁気スカーミオン格子相に予想されていたトポロジカルマグノンバンドの実験的検証であった。このためには2つの研究項目を設定した。一つはトポロジカルマグノン検出に適切な磁気スカーミオン物質の探索である。上述の通りトポロジカルマグノンバンド出現が予想される波数領域は $Q \sim 0.03 \text{ \AA}^{-1}$ と小角領域であるが、この領域の実験は極めて難しい。 Q が大きくなれば実験可能性は格段に上昇するので、 Q の大きな(スカーミオン格子間隔の小さな)磁気スカーミオン格子を形成する物質を発見することが本研究の最初の項目であった。

一方、たとえ Q が大きくなったとしても、それほど大きくならないことが予想される。したがって、本研究の成功には小角領域において高エネルギー分解能かつ高強度の中性子非弾性散乱法を確立する必要がある。これが本研究の第二の項目であった。

3. 研究の方法

磁気スカーミオン格子変調ベクトルの大きな物質の探索には、Mn(Fe, Ge)混晶系を中心に、(Mn, Fe)Si混晶系、(Mn, Ir)Si混晶系等多くの混晶系を作成し、その磁気特性を調べた。多結晶試料作成にはアーク溶解法もしくは高周波溶解法を用いた。これら多結晶試料は必要に応じてアルゴン雰囲気下で石英管封入し高温電気炉で熱処理を行うことで単相化した。単結晶試料育成に関しては、多結晶試料をアルゴン雰囲気下で石英管封入もしくは金属管封入の上、ブリッジマン成長を行った。なお、単結晶試料育成時のつぼにはアルミナるつぼを用いた。

得られた試料の質に関しては粉末X線回折にて結晶構造を確認するとともに、走査型電子顕微鏡を用いて合金組織観察を行い単相性を確認した。試料組成に関してはエネルギー分散X線分析(EDX)により同定した。

試料の磁気特性に関してはSQUID帯磁率計を用いて $1.8 < T < 300 \text{ K}$, $0 < H < 5000 \text{ Oe}$ の範囲で直流ならびに交流帯磁率を測定した。中性子散乱実験は限られたビームタイムで実施する必要があるため、試料に関しては帯磁率測定で磁気相図を詳細に決定するとともに、得られた磁気相図から磁気パラメータを推測することで中性子散乱に用いる試料を厳選した。

Q ベクトルを決定するための中性子弾性散乱実験は米国オークリッジ国立研究所に設置され

た冷中性子三軸型分光器 CTAX を用いた。低角領域を精度良く測定するためにコリメータとして $20' - 20'$ を設置し、アナライザエネルギーとしては $E_f = 3.25$ meV を用いた。また実験には縦磁場超磁場マグネットを用いて、必要な外部磁場を印加した。

当初中性子非弾性散乱に関しても米国オークリッジ国立研究所で実施すべく研究計画を立てていたが、オークリッジ国立研究所原子炉 HFIR のトラブルにより、実験実施が困難となった。この状況は研究期間延長後も改善されなかったため、非弾性散乱実験は豪州原子力研究機構に設置された冷中性子三軸型分光器 SIKA を用いて実施した。SIKA においても装置責任者の協力の下、種々の実験条件最適化を行い、結果的に $E_f = 2.75$ meV を使用することで、高い波数分解能とエネルギー分解能を実現した。実験は主に MnSi 単結晶および MnSi_{0.98}Ge_{0.02} 単結晶を用いて行われた。

なお、研究の進展に伴い、磁気スカーミオン物質以外においてもトポロジカルマグノンや関連するトポロジカル磁気励起が予想され始めたので、そのような物質群に対しても物質合成、並びに中性子非弾性散乱実験を行った。

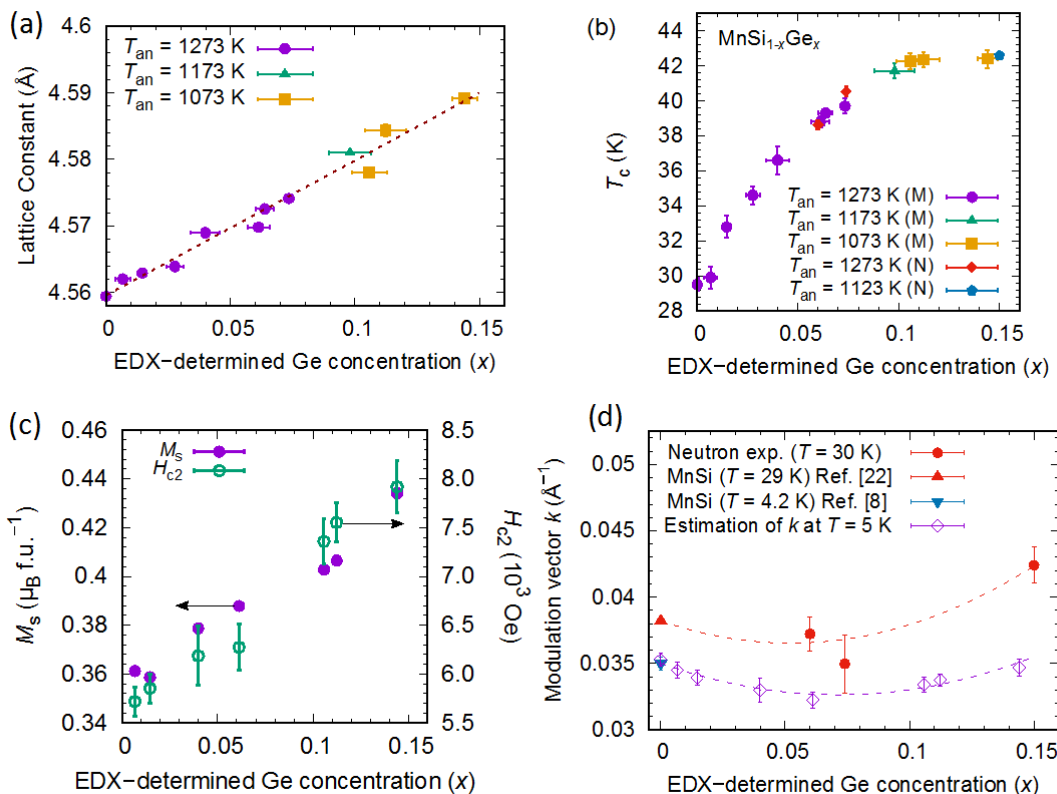


図 2: (a) 格子定数の Ge 濃度依存性。(b) ヘリカル相への磁気転移温度の Ge 濃度依存性 (c) 飽和磁気モーメントおよび強制強磁性相への転移温度の Ge 濃度依存性。(d) 中性子回折から求めた $T = 30$ K での磁気変調ベクトルの Ge 濃度依存性、並びにバルク物性パラメータから推測した磁気変調ベクトル。文献[1]より転載。

4. 研究成果

混晶系物質探索に関しては、上述の通り種々の系の育成とその評価を試みたが、ここでは特に成果のあがった Mn(Si, Ge)系に関して述べる。我々の研究開始時点では、MnSi_xGe_{1-x}系に関しては2つの矛盾する報告があるのみであった。比較的広範囲 ($0 < x < 0.1$) に Ge 濃度を変化させた実験報告によると、磁気転移温度は Ge 濃度にほとんど依存しないとされていた[1]。一方で、単結晶を用いた実験によると 1% の Ge 置換により転移温度が約 10 K 上昇すると報告されていた[2]。この矛盾を解決し、Ge 置換系におけるトポロジカルマグノン探索に適した組成を探るため、本系の金属学的研究に着手した。図 2(a) に Mn(Si, Ge) 混晶系の Ge 濃度と格子定数の関係を示す。この図より分かる通り $x = 0.15$ まで格子定数は直線的に変化しており、Ge 置換が正常に行われていることが明らかとなった。なお、 x が増大するにつれて単相化のためのアニール温度を低下させる必要があることが明らかとなった。なお図の Ge 濃度は EDX 分析によるものである。

本混晶系の磁気転移温度の Ge 濃度依存性を調べるため、得られた試料の磁気測定を行った。その結果 $x = 0.1$ においては磁気転移温度は $T_c = 42.3$ K まで増大しており、Ge 置換で磁気転移温度が上昇することが確認された。Ge 濃度と磁気転移温度の関係を図 2(b) に示す。この図より分かる通り 1% の Ge 置換では磁気転移温度はほとんど変化せず、逆に 10% ($x = 0.1$) 程度

で 42 K まで増大する。磁場中で強制強磁性相に転移する外部磁場 H_2 並びに飽和磁気モーメント M_s の Ge 濃度依存性を調べた結果が図 2(c) である。 M_s と H_2 は Ge 濃度に対して単調に変化することが明らかとなった。

中性子回折実験により求めた Mn(Si, Ge) 混晶系の磁気変調ベクトルの Ge 濃度依存性を図 2(d) に示す。図より分かる通り変調ベクトルは低 x 領域ではほぼコンスタントであり、 $x > 0.1$ 程度から増加する。ただし、測定 x 点が少ないためこの結果には多少の不確かさが残る。分子場近似を用いることで、バルク磁気パラメータから変調ベクトルを見積もることができる。この結果も図 2(d) に示されているが、その振る舞いは中性子回折から求められたそれと測定温度の違いを除いておおよそ一致している。これらの結果は論文として Phys. Rev. Mater. に掲載された [3]。

このような物質探索の結果、従来の予想と反し磁気変調ベクトルを劇的に大きくすることは困難であることが判明したので、小角領域での中性子非弾性散乱をより精密に行うこととした。種々の技術的考察、さらに実験施設の運転時期等を鑑み、豪州原子力機構 SIKa にて MnSi および MnSi_{0.98}Ge_{0.02} 単結晶の中性子非弾性散乱を行った。図 3 に MnSi および MnSi_{0.98}Ge_{0.02} における磁気スカーミオン相中の磁気励起スペクトルを示す。測定温度・磁場は $T = 28.4$ K, $H = 2000$ Oe (MnSi)、および $T = 30.5$ K, $H = 2000$ Oe (MnSi_{0.98}Ge_{0.02})、測定波数点は磁気ゾーンセンター (ただし $3Q$) である。本実験のエネルギー分解能は弾性散乱位置で約 40 μ eV であった。図よりわかるように、磁気励起スペクトルは明瞭なピーク構造を示さず、ブロードなスペクトルとなっている。この線幅はエネルギー分解能では説明できず、本質的なものと考えられる。このふるまいは逆格子空間中の他の点においてもほとんど同じであり、どの点においてもシャープでよく定義された磁気励起モードは観測されなかった。この結果は理論的に予想されていたトポロジカルマグノンバンドがそのままの意味では形成されていないことを示している。これらの結果は日本物理学会で発表するとともに、強相関係国際会議 (SCES2019) でも発表した [4]。

さて、このようなブロードな磁気励起スペクトルは有限温度の効果の可能性がある。そこで、このブロードな励起スペクトルの起源を理解するために、磁気スカーミオン格子相に対する有限温度磁気励起スペクトル計算を行った。有限温度効果を含めるため、計算には始状態としてモンテカルロ法で得られた有限温度磁気構造群を、また時間発展はそれぞれの始状態から Landau-Lifshitz 方程式を数値的に解くことで見積もった。この結果有限温度ではブロードな磁気励起が見られることがわかり、確かに有限温度効果であることが理解できた。この結果は日本物理学会 [5] で発表するとともに現在論文にまとめているところである。

このように、磁気スカーミオン相におけるトポロジカルマグノン観測としては否定的な結論に至ったが、一方で磁気スカーミオン相に特徴的なブロードな磁気励起の観測という意味では大きな成果と考えている。また、本研究の過程で得られた知見を他の系に应用することで、Au-Al-Tb 金属間化合物における渦巻き型磁気構造の発見、Ba₂CuSiO₆Cl₂ におけるトポロジカルトリプロン励起の発見等種々の新奇な磁気構造および磁気励起の発見があった。

- [1] K. M. Sivakumar *et al.*, J. Magn. Magn. Mater. 304, e315 (2006).
- [2] N. Potapova *et al.*, Phys. Rev. B 86, 060406(R) (2012).
- [3] A. Seno, H. Ishida, D. Okuyama, K. Nawa, T. Hong and T. J. Sato, Phys. Rev. Mater. 3 104408 (2019).
- [4] A. Seno *et al.* SCES 2019 (2019/09/27, Okayama, Japan)
- [5] A. Seno *et al.* 日本物理学会 (現地開催中止, 名古屋大学)

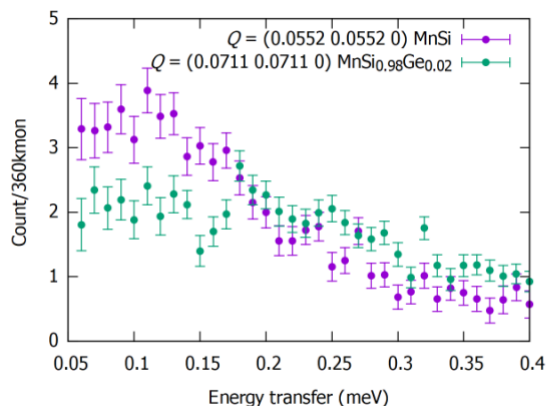


図 3: MnSi および MnSi_{0.98}Ge_{0.02} の磁気スカーミオン格子相における磁気励起スペクトル。磁気ゾーンセンター ($3Q$) で測定。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計10件（うち査読付論文 10件／うち国際共著 8件／うちオープンアクセス 2件）

1. 著者名 Okuyama D., Bleuel M., White J. S., Ye Q., Krzywon J., Nagy G., Im Z. Q., Zivkovic I., Bartkowiak M., Ronnow H. M., Hoshino S., Iwasaki J., Nagaosa N., Kikkawa A., Taguchi Y., Tokura Y., Higashi D., Reim J. D., Nambu Y., Sato T. J.	4. 巻 2
2. 論文標題 Deformation of the moving magnetic skyrmion lattice in MnSi under electric current flow	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Communications Physics	6. 最初と最後の頁 79-1-7
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1038/s42005-019-0175-z	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 Nawa Kazuhiro, Tanaka Kimihiko, Kurita Nobuyuki, Sato Taku J., Sugiyama Haruki, Uekusa Hidehiro, Ohira-Kawamura Seiko, Nakajima Kenji, Tanaka Hidekazu	4. 巻 10
2. 論文標題 Triplon band splitting and topologically protected edge states in the dimerized antiferromagnet	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Nature Communications	6. 最初と最後の頁 2096-1-8
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1038/s41467-019-10091-6	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 Sato Taku J., Ishikawa Asuka, Sakurai Akira, Hattori Masashi, Avdeev Maxim, Tamura Ryuji	4. 巻 100
2. 論文標題 Whirling spin order in the quasicrystal approximant Au72Al14Tb14	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Physical Review B	6. 最初と最後の頁 054417-1-6
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevB.100.054417	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 Aji Seno, Ishida Hidesato, Okuyama Daisuke, Nawa Kazuhiro, Hong Tao, Sato Taku J.	4. 巻 3
2. 論文標題 Effect of Ge substitution on magnetic properties in the itinerant chiral magnet MnSi	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Physical Review Materials	6. 最初と最後の頁 104408-1-9
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevMaterials.3.104408	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 Sandvik Kim E., Okuyama Daisuke, Nawa Kazuhiro, Avdeev Maxim, Sato Taku J.	4. 巻 271
2. 論文標題 Controlling the stoichiometry of the triangular lattice antiferromagnet $\text{Li}_{1+x}\text{Zn}_{2-y}\text{Mo}_3\text{O}_8$	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Journal of Solid State Chemistry	6. 最初と最後の頁 216 ~ 221
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.jssc.2018.12.064	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 Okuyama Daisuke, Tsujimoto Masaki, Sagayama Hajime, Shimura Yasuyuki, Sakai Akito, Magata Atsushi, Nakatsuji Satoru, Sato Taku J	4. 巻 88
2. 論文標題 Crystal Structure in Quadrupolar Kondo Candidate $\text{PrTr}_2\text{Al}_{12}\text{O}_{20}$ ($\text{Tr} = \text{Ti}$ and V)	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Journal of the Physical Society of Japan	6. 最初と最後の頁 015001 ~ 015001
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.7566/JPSJ.88.015001	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, Avdeev Maxim, Nojiri Hiroyuki, Yoshida Masahiro, Ueta Daichi, Yoshizawa Hideki, Sato Taku J.	4. 巻 98
2. 論文標題 Degenerate ground state in the classical pyrochlore antiferromagnet $\text{Na}_3\text{Mn}(\text{CO}_3)_2\text{Cl}$	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Physical Review B	6. 最初と最後の頁 144426-1-8
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevB.98.144426	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 Sato Taku J, Matan Kittiwit	4. 巻 88
2. 論文標題 Nonreciprocal Magnons in Noncentrosymmetric Magnets	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Journal of the Physical Society of Japan	6. 最初と最後の頁 081007 ~ 081007
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.7566/JPSJ.88.081007	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 Y. Shiomi, R. Takashima, D. Okuyama, G. Gitgeatpong, P. Piyawongwatthana, K. Matan, T. J. Sato, E. Saitoh	4. 巻 96
2. 論文標題 Spin Seebeck effect in the polar antiferromagnet -Cu2V2O7	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Physical Review B	6. 最初と最後の頁 180414(1)-(5)
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevB.96.180414	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 A. M. Samarakoon, M. Takahashi, D. Zhang, J. Yang, N. Katayama, R. Sinclair, H. D. Zhou, S. O. Diallo, G. Ehlers, D. A. Tennant, S. Wakimoto, K. Yamada, G-W.Chern, T. J. Sato, S.-H. Lee	4. 巻 7
2. 論文標題 Scaling of Memories and Crossover in Glassy	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Magnets Scientific Reports	6. 最初と最後の頁 1-8
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1038/s41598-017-12187-9	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42件 (うち招待講演 11件 / うち国際学会 20件)

1. 発表者名 奥山大輔, 山内邦彦, 小口多美夫, 佐藤卓
2. 発表標題 カイラル磁性体の電流効果に関する研究
3. 学会等名 物質・デバイス領域共同研究拠点第9回活動報告会/平成30年度ダイナミック・アライアンス成果報告会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 奥山大輔, 那波和宏, 佐藤卓
2. 発表標題 中性子散乱によるトポロジカル磁性の研究
3. 学会等名 物質・デバイス領域共同研究拠点第9回活動報告会/平成30年度ダイナミック・アライアンス成果報告会
4. 発表年 2019年

1 . 発表者名 D. Okuyama, M. Bleuel, J.S. White, Q. Ye, J. Krzywon, G. Nagy, Z.Q. Im, I. Zivkovic, M. Bartkowiak, H.M. Ronnow, S. Hoshino, J. Iwasaki, N. Nagaosa, A. Kikkawa, Y. Taguchi, Y. Tokura, D. Higashi, J.D. Reim, Y. Nambu, T.J. Sato
2 . 発表標題 Spatial Inhomogeneous Deformation of the Moving Magnetic Skyrmion Lattice in MnSi under Electric Current Flow
3 . 学会等名 International Conference on Strongly Correlated Electron Systems (SCES) 2019 (国際学会)
4 . 発表年 2019年

1 . 発表者名 S. Aji, H. Ishida, D. Okuyama, K. Nawa, T. Hong, S. Yano, T. J Sato
2 . 発表標題 Magnetic properties in the itinerant chiral magnet MnSi _{1-x} Gex
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 奥山大輔, 山内邦彦, 小口多美夫, 佐藤卓
2 . 発表標題 中性子回折による磁気スキルミオン格子の電流駆動観測
3 . 学会等名 第7回アライアンス若手研究交流会プログラム
4 . 発表年 2019年

1 . 発表者名 Kazuhiro Nawa, Kimihiko Tanaka, Nobuyuki Kurita, Taku J Sato, Haruki Sugiyama, Hidehiro Uekusa, Seiko Ohira-Kawamura, Kenji Nakajima, Hidekazu Tanaka
2 . 発表標題 Triplon band splitting and topologically protected edge states in the dimerized antiferromagnet
3 . 学会等名 The 3rd Asia-Oceania Conference on Neutron Scattering 2019 (AOCNS 2019) (国際学会)
4 . 発表年 2019年

1. 発表者名 D. Okuyama, M. Bleuel, J.S. White, Q. Ye, J. Krzywon, G. Nagy, Z.Q. Im, I. Zivkovic, M. Bartkowiak, H. M. Ronnow, S. Hoshino, J. Iwasaki, N. Nagaosa, A. Kikkawa, Y. Taguchi, Y. Tokura, D. Higashi, J. D. Reim, Y. Nambu, T. J. Sato
2. 発表標題 Plastic deformation of the moving magnetic skyrmion lattice in MnSi under electric current flow
3. 学会等名 The 3rd Asia-Oceania Conference on Neutron Scattering 2019 (AOCNS 2019) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 奥山大輔, 東大樹, 南部雄亮, 佐藤卓
2. 発表標題 中性子回折による電流下の磁気スキルミオン格子の非平衡定常/非定常状態
3. 学会等名 第19回東北大学多元物質科学研究所研究発表会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 奥山大輔, 牧野晃也, J. D. Reim, E. P. Gilbert, N. Booth, 大石一城, 山内邦彦, 小口多美夫, 佐藤卓
2. 発表標題 立方晶カイラル磁性体Pr ₅ Ru ₃ Al ₂ の磁気相図及び中性子小角散乱
3. 学会等名 日本物理学会2019秋季大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 佐藤 卓
2. 発表標題 Topological magnetic textures and topological magnetic excitations
3. 学会等名 The 20th Korea-Taiwan-Japan Symposium on Strongly Correlated Electron Systems (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 佐藤 卓
2. 発表標題 Magnetic structures of quasicrystal approximants
3. 学会等名 Interdisciplinary Symposium for Quasicrystals and Strongly Correlated Electron Systems (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 佐藤 卓
2. 発表標題 Topological Magnetic Textures and Excitations
3. 学会等名 INTERNATIONAL CONFERENCE ON ADVANCED MATERIAL TECHNOLOGY IN CONJUNCTION WITH INTERNATIONAL CONFERENCE OF MULTIDISCIPLINARY RESEARCH 2019 (ICAMT-ICMR 2019) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 佐藤 卓
2. 発表標題 Quantum condensed matter & WAND2 University users
3. 学会等名 WAND2「Complementarity and Synergy effects with the JRR3 Instrument Suite」(招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 佐藤 卓
2. 発表標題 Quantum magnetism and topological magnetic structures
3. 学会等名 International School of Crystallography 53rd Course: Magnetic Crystallography (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Kazuhiro Nawa, Kimihiko Tanaka, Nobuyuki Kurita, Taku J Sato, Haruki Sugiyama, Hidehiro Uekusa, Seiko Ohira-Kawamura, Kenji Nakajima, and Hidekazu Tanaka
2. 発表標題 Topological triplon band and edge states in the spin dimer antiferromagnet Ba ₂ CuSi ₂ O ₆ Cl ₂
3. 学会等名 The 2nd Asia Pacific Workshop on Quantum Magnetism (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 佐藤 卓
2. 発表標題 反転対称性の破れた磁性体中のマグノン非相反性
3. 学会等名 磁性材料研究会 (招待講演)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 高橋満, 那波和宏, Matthias Frontzek, 奥山大輔, 吉田雅洋, 植田大地, 吉沢英樹, 野尻浩之, 佐藤卓, Maxim Avdeev
2. 発表標題 歪んだカゴメ格子反強磁性体Yb ₃ Ni ₁₁ Ge ₄ の磁気散漫散乱
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 高木強平, 肖英紀, 佐藤卓
2. 発表標題 Ga-Pd-Tb系Tsai型近似結晶の形成と磁性III
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 佐藤卓, 石川明日香, 櫻井晶, Maxim Avdeev, 田村隆治
2. 発表標題 Au-Al-Tb 近似結晶の磁気構造
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 村崎遼, 那波和宏, 中島健次, 河村聖子, Tao Hong, 佐藤卓
2. 発表標題 S=1/2異方的三角格子反強磁性体Cs ₂ CuCl ₄ の非弾性中性子散乱による磁気励起測定
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 Taku J. Sato
2. 発表標題 MAGNETIC SKYRMIONS: THERMAL STABILITY, KINETICS AND ELECTRIC-CURRENT EFFECT
3. 学会等名 XVII International Small Angle Scattering Conference - SAS2018 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 奥山大輔, M Bleuel, Q Ye, P Butler, 永長直人, 吉川明子, 田口康二郎, 十倉好紀, J. D Reim, 東大樹, 南部雄亮, 佐藤卓
2. 発表標題 MnSiにおける変動電流中の磁気スキルミオン格子のダイナミクス
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 佐藤卓, 米山祐樹, 廣川慎之介, 出口和彦, 佐藤憲昭, 益田隆嗣, 松浦直人, 柴田薫
2. 発表標題 中性子散乱による Al-Al-Yb の量子臨界磁気揺動観測
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 Reim, Johannes D., Makino, Koya., Higashi, Daiki., Okuyama, Daisuke., Sato, Taku J., Nambu, Yusuke. Gilbert, Elliot P., Booth, Norman., Seki, Shinichiro., Tokura, Yoshinori
2. 発表標題 Stabilizing the Skyrmion Phase in Cu ₂ SeO ₃ : The Influence of Field, Temperature and Time
3. 学会等名 International Conference on Magnetism 2018 (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 J. D. Reim, E. Ros en, O. Zaharko, M. Mostovoy, M. Valldor, T. J. Sato, W. Schweika
2. 発表標題 Neutron diraction study and theoretical analysis of the antiferromagnetic order and diuse scattering in the layered Kagome system CaBaCo ₂ Fe ₂ O ₇
3. 学会等名 International Conference on Highly Frustrated Magnetism 2018 (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Kazuhiro Nawa, Daisuke Okuyama, Maxim Avdeev, Hiroyuki Nojiri, Masahiro Yoshida, Daichi Ueta, Hideki Yoshizawa, and Taku J. Sato
2. 発表標題 Degenerate ground state in classical pyrochlore antiferromagnet Na ₃ Mn(CO ₃) ₂ Cl
3. 学会等名 International Conference on highly Frustrated Magnetism 2018 (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Taku J Sato
2. 発表標題 Nonreciprocal Magnons in Noncentrosymmetric Magnets
3. 学会等名 ISSP Workshop Present and Future of Neutron Scattering Research on Condensed Matter Physics - Future Perspective of US-Japan Cooperative Program on Neutron Scattering (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 那波和宏, 野尻浩之, 奥山大輔, Maxim Avdeev, 吉田雅洋, 植田大地, 吉澤英樹, 佐藤卓
2. 発表標題 パイロクロア格子反強磁性体 $\text{Na}_3\text{T}(\text{CO}_3)_2\text{Cl}$ (T = Co, Mn) の磁化過程
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 高木強平, 肖英紀, 佐藤卓
2. 発表標題 Ga-Pd-Tb系Tsai型近似結晶の形成と磁性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 Taku Sato
2. 発表標題 Magnons in Noncentrosymmetric Magnets
3. 学会等名 Gordon Research Conference (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2017年

1 . 発表者名 Taku J Sato
2 . 発表標題 THERMAL STABILITY AND SLOW DYNAMICS OF THE SKYRMION-LATTICE PHASES IN CU20SE03
3 . 学会等名 MATERIALS RESEARCH SOCIETY-INDONESIA CONFERENCE AND CONGRESS 2017 (招待講演) (国際学会)
4 . 発表年 2017年

1 . 発表者名 K. Makino, D. Okuyama, M. Avdeev, K. Ohishi, K. Yamauchi, T. Oguchi, T. J. Sato
2 . 発表標題 Magnetic structure determined by small angle neutron and powder neutron scatterings in cubic chiral crystal Pr5Ru3Al2
3 . 学会等名 International Conference on Neutron Scattering 2017 (国際学会)
4 . 発表年 2017年

1 . 発表者名 Johannes D. Reim, Koya Makino, Daiki Higashi, Yusuke Nambu, Daisuke Okuyama, Taku J. Sato, Elliot P. Gilbert, Norman Booth, Shinichiro Seki, Yoshinori Tokura
2 . 発表標題 Phase stability and higher order peaks of the skyrmion lattice in Cu20Se03 International Conference on Neutron Scattering 2017
3 . 学会等名 International Conference on Neutron Scattering 2017 (国際学会)
4 . 発表年 2017年

1 . 発表者名 K. Makino, D. Okuyama, M. Avdeev, K. Ohishi, K. Yamauchi, T. Oguchi, T. J. Sato
2 . 発表標題 Helical magnetic structure in cubic chiral crystal Pr5Ru3Al2
3 . 学会等名 24th Congress and General Assembly of the International Union of Crystallography (国際学会)
4 . 発表年 2017年

1. 発表者名 Johannes D. Reim, Koya Makino, Daiki Higashi, Daisuke Okuyama, Taku J. Sato, Yusuke Nambu, Elliot P. Gilbert, Norman Booth, Shinichiro Seki, Yoshinori Tokura
2. 発表標題 Influence of path and time on the stabilization of the skyrmion-lattice phases in Cu ₂ OSeO ₃
3. 学会等名 日本物理学会2017年度秋季大会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 奥山大輔, M. Bleuel, Q. Ye, P. Butler, 星野晋太郎, 岩崎惇一, 永長直人, 吉川明子, 田口康二郎, 十倉好紀, 東大樹, 南部雄亮, 佐藤卓
2. 発表標題 MnSiで観測される磁気スキルミオン反射の回転とブロードニングの特異な電流密度及び温度依存性
3. 学会等名 日本物理学会2017年度秋季大会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 栗田伸之, 那波和宏, 佐藤卓, 河村聖子, 中島健次, 田中秀数
2. 発表標題 フラストレーションの強いS=1スピンドイマー磁性体Ba ₂ NiSi ₂ O ₆ Cl ₂ における磁気励起
3. 学会等名 日本物理学会2017年秋季大会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 田中公彦, 栗田伸之, 那波和宏, 佐藤卓, 河村聖子, 中島健次, 桑原慶太郎, 伊藤晋一, 田中秀数
2. 発表標題 擬2次元量子スピンドイマー系Ba ₂ CuSi ₂ O ₆ Cl ₂ の磁気励起
3. 学会等名 日本物理学会2017年秋季大会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 羽合孝文, 南部雄亮, 大串研也, Barry Winn, V. Ovidiu Garlea, Melissa Graves-Brook, Igor Zaliznyak, 伊藤晋一, 横尾哲也, 佐藤卓
2. 発表標題 非弾性中性子散乱を用いた梯子型鉄系化合物 BaFe ₂ Se ₃ の磁性に対する研究
3. 学会等名 日本物理学会2017年秋季大会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 高橋満, 那波和宏, 奥山大輔, 佐藤卓
2. 発表標題 歪んだ籠目格子系Yb ₃ Ni ₁₁ Ge ₄ の構造と低温物性
3. 学会等名 日本物理学会2017年秋季大会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 栗田伸之, 那波和宏, 佐藤卓, 河村聖子, 中島健次, 田中秀数
2. 発表標題 フラストレーションの強いS=1スピンドイマー磁性体Ba ₂ NiSi ₂ O ₆ Cl ₂ における局在励起
3. 学会等名 日本中性子科学会第17回年会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 S. Aji, D. Okuyama, K. Nawa, S. Yano, and T. J. Sato
2. 発表標題 Low-energy magnetic excitations in the skyrmion lattice phase of MnSi
3. 学会等名 日本物理学会2020年年次大会 (現地開催中止、発表扱い)
4. 発表年 2020年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

QSPL, IMRAM, Tohoku University
http://www2.tagen.tohoku.ac.jp/lab/sato_tj/
東北大学多元物質科学研究所 スピン量子物性研究分野
http://www2.tagen.tohoku.ac.jp/lab/sato_tj/

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	レイム ヨハネス (Reim Johannes)		
研究協力者	奥山 大輔 (Okuyama Daisuke)		
研究協力者	ホン タオ (Hong Tao)		
研究協力者	那波 和宏 (Nawa Kazuhiro)		
研究協力者	アジ セノ (Aji Seno)		