

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 3 年 5 月 12 日現在

機関番号：12601  
研究種目：若手研究  
研究期間：2018～2020  
課題番号：18K13488  
研究課題名（和文）遍歴磁性体におけるカイラル磁気秩序相の起源解明と特異な磁気・非相反伝導の探求  
研究課題名（英文）Stabilization mechanism of chiral magnetic orderings in itinerant magnets and search of unusual magnetotransport  
研究代表者  
速水 賢（Hayami, Satoru）  
東京大学・大学院工学系研究科（工学部）・講師  
研究者番号：20776546  
交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,100,000円

研究成果の概要（和文）：遍歴磁性体が示す多種多様なカイラルな磁気構造を対象として、その安定化機構や磁気伝導特性に関する幅広い理論研究を行った。空間反転対称性のない結晶構造下の遍歴磁性体においては、電子のスピン軌道結合とスピン電荷結合の相関効果により、ブロッホ型あるいはネール型のスキルミオン結晶が発現することを明らかにした。また、空間反転対称性を有する結晶構造下においても、遍歴電子のフェルミ面不安定性により、多彩な多重Q磁気構造が発現することを理論的に示した。さらに、実験で観測された磁気スキルミオン相や磁気バブル相の発現機構や磁気伝導特性を明らかにするなど、当初の予測を超える様々な成果を得た。

研究成果の学術的意義や社会的意義  
近年、トポロジカルに非自明な磁気構造を有するスキルミオン結晶に関する研究が急速に進展しつつある。本研究の主な成果は、従来は主に磁性絶縁体に対して行われてきた理論解析を、カイラルな金属磁性にまで拡張し、さらに金属系に特有の磁気相互作用を利用することにより、スキルミオン結晶の新しい安定化機構や磁気伝導特性を明らかにしたことである。さらには、現実物質で見出されたカイラルな磁気構造の微視的起源を説明する理論モデルの構築に成功した。これにより、従来理論の枠組みでは説明できない多くのカイラル磁気構造を説明することができるようになり、さらなる特異な磁気構造をもつ物質探索への礎を築いた。

研究成果の概要（英文）：We have theoretically investigated the stabilization mechanism and magneto-transport phenomena under a plethora of chiral magnetic textures in itinerant magnets. We have shown that the Bloch-type and/or Neel-type skyrmion crystals are stabilized by the interplay between the spin-orbit coupling and the spin-charge coupling in noncentrosymmetric itinerant magnets. We also found that various multiple-Q states are induced by the Fermi surface instability of itinerant electrons in centrosymmetric itinerant magnets. Furthermore, we have constructed an effective model to account for magnetic skyrmion crystals and magnetic bubble crystals discovered in experiments. We also have analyzed magneto-transport phenomena in these chiral magnetic orderings.

研究分野：物性理論

キーワード：遍歴磁性体 磁気スキルミオン カイラル磁性 スピン軌道相互作用 磁気異方性 磁気伝導現象 非相反伝導現象 多重Q磁気秩序相

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、研究者個人に帰属します。

## 1. 研究開始当初の背景

電気磁気応答や異常ホール効果といった興味深い物性現象を通じて、幾何学的な磁気構造(テクスチャ)をもつ磁性体に対する研究が著しい進展を見せている。最近の研究により、これらの物性現象の多くは、幾何学的な磁気テクスチャに伴うスピカイラリティといったミクロな自由度に起因していることが、明らかにされつつある。しかし、実験的には、金属・絶縁体の両方でこうしたスピカイラリティの秩序相(カイラル磁気秩序相)が報告されているにも関わらず、理論研究の多くは絶縁体を対象としており、金属に対しては、主に特定の磁気構造を仮定したもとの現象論的な解析にとどまっている。特に、金属中のカイラル磁気秩序相の安定化メカニズムや、電子状態、輸送現象などの基本的かつ重要な性質の多くは、未解明なままである。一方、最近になって遍歴磁性体におけるカイラル磁気秩序相の可能性が理論的に提案されたが、遍歴磁性体に対する解析はまだ端緒についたばかりであり、本質的なメカニズムの理解には至っていないのが現状である。

こうした中、申請者はこれまでに、伝導電子がカイラル磁気秩序相におよぼす影響を微視的な立場から理解するために、遍歴磁性体の最も単純なモデルである近藤格子モデルを対象とした解析を行い、以下の3つの点を明らかにしてきた。①大規模数値シミュレーションによる、遍歴磁性体に特有の新規カイラル磁気秩序相を発見、②解析的な摂動計算による、カイラル磁気秩序相の新しい安定化起源の解明、③伝導電子によるカイラル自由度の制御。①に関しては、遍歴電子系に特有のトポロジカル数2の磁気スキルミオン相およびカイラリティの密度波を伴うカイラルストライプ相を見出した。②に関しては、伝導電子が形成するフェルミ面の不安定性に起因した波数空間における双二次交換相互作用が本質的であることを明らかにした。さらに、遍歴電子モデルで発現するカイラル磁気秩序相を、定性的に説明する有効スピンモデルの構築に成功した。③に関しては、フェルミ面や電子密度といった遍歴電子系に特有のパラメータを変化させることにより、カイラル磁気秩序相の周期構造や、それらが示すトポロジカルに非自明なバンド構造の制御が可能であることを見出した。

こうした非自明な磁気構造をもつカイラル磁気秩序相の実験による探索・観測は、近年の  $\text{MnSi}$  におけるスキルミオンをはじめとして、 $d$  電子系化合物の  $\text{SrFeO}_3$  や、 $f$  電子系化合物の  $\text{CeAuSb}_2$  といった幅広い物質群に対して行われており、急速に加速している。しかし、こうした系におけるカイラル磁気秩序相のメカニズムを微視的な立場から理解するためには、これまでの伝導電子の効果に加えて、スピン軌道相互作用や磁気異方性といった要素を考慮に入れた解析を行う必要がある。このような現実物質を念頭においたモデルの拡張・展開により、カイラル磁気秩序相がどのような条件を満たす物質で発現するのか、また、これらの秩序相はどのような新しい磁気・非相反伝導現象を示すのか、といった未解決問題を系統的に明らかにすることが、今後の新しい物性開拓や新概念の創出を見据えた際の重要な課題となる。

## 2. 研究の目的

本研究の目的は、遍歴磁性体が示すカイラル磁気秩序相の安定化メカニズムの解明、およびそれに伴う磁気伝導現象・非相反伝導現象を理論的に開拓することである。特に本研究では、スピン軌道相互作用や磁気異方性といった要素に着目した解析を行い、現実物質が示すカイラル磁気秩序相との関連を明らかにした上で、その秩序相が支配する伝導現象を予測・理解することを目指す。さらには、大規模数値シミュレーションを用いることにより、これまでに報告されていない新規なカイラル磁気秩序状態の探索を行う。

## 3. 研究の方法

主として、伝導電子とスピントクスチャの相互作用を含む近藤格子モデルを起点とした解析を行う。特に本研究課題では、現実物質で重要となるスピン軌道相互作用や磁気異方性が、カイラルな磁気構造に与える影響を、大規模数値シミュレーションと解析的な摂動計算を相補的に行うことにより明らかにする。数値シミュレーション法としては、少ない計算コストにより、大きなシステムサイズの下での磁気構造を調べることができる多項式展開ランジュバンダイナミクス法を用いる。この手法は、計算コストをシステムサイズ  $N$  に対して線形の範囲に抑えることができるオーダー  $N$  法であるため、数千から数万サイトのシミュレーションが可能となり、遍歴磁性体の解析において重要な長距離相互作用やフェルミ面の効果を精密に取り込むことができる。また、近藤格子モデルの有効スピンモデルの解析も併せて行うことで幅広いパラメータ空間におけるカイラル磁気秩序相の探索を行う。さらに、弱(強)結合極限における摂動計算を中心とした解析

的な計算を行い、カイラル磁気秩序相の起源を明らかにする。

#### 4. 研究成果

(1) 空間反転対称性のない近藤格子模型におけるネール型およびブロッホ型スキルミオン [1]  
正方格子におけるラッシュバ型のスピン軌道相互作用をもつ近藤格子模型に対して、局在スピンと遍歴電子スピン間にはたらく交換相互作用に関する摂動展開を行い、局在スピン間に生じる有効的な交換相互作用を導出することにより、有効スピン模型を構築した。得られた模型に対して、モンテカルロ計算を行うことにより、波数空間における異方的で対称的な交換相互作用および反対称的な交換相互作用が様々な磁気渦結晶相やスキルミオン結晶相の発現に重要な役割を果たしていることを明らかにした。特に、ラッシュバ型スピン軌道相互作用を有する磁性体模型において、従来のネール型スキルミオンが現れるだけでなく、ブロッホ型スキルミオンが発現する可能性を指摘した。

(2) 大規模数値シミュレーションによる遍歴電子スキルミオンに対する磁気異方性の効果 [2]  
三角格子において発現する、高いトポロジカル数をもつスキルミオン相に対する磁気異方性の効果を多項式展開ランジュバンダイナミクス法を用いて調べた。その結果、高いトポロジカル数をもつスキルミオン相は、従来のスキルミオン相と比べて、磁気異方性に対して堅牢であることを明らかにした。また、磁気異方性の中でも容易軸異方性と容易面異方性に対するスキルミオン相の安定性を詳細に解析することで、異方性の強さを大きくしていくと、共線および非共面磁気構造へのトポロジカル転移を示すことを明らかにした。

(3)  $d-p$  混成軌道模型におけるカイラルストライプ相 [3]  
遷移金属酸化物におけるカイラル磁気秩序相の発現可能性について調べた。理論模型としては、磁性イオンの  $d$  軌道とリガンドイオンの  $p$  軌道からなり、かつ  $d$  軌道間に強いフント結合がはたらく多軌道電子模型を考えた。混成の強さや結晶場準位といった模型パラメータを変化させたときの基底状態相図を求めた。その結果、直交する 2 つのらせん構造で特徴づけられる磁気渦結晶相が強磁性相とらせん秩序相の間において現れることを明らかにした。

(4) 磁気スキルミオン相および磁気バブル相のもとで生じる非線形伝導現象 [4]  
拡張したボルツマン方程式を用いて、磁気スキルミオン結晶相や磁気バブル相のもとで発現する非線形伝導現象を明らかにした。特に、トポロジカル数の一つである第二チャーン数がこれらの非線形現象の発現に重要な役割を果たしていることを示した。

(5) カイラルな結晶構造のもとで現れる磁気ヘッジホッグ相の安定化起源 [5]  
3 次元的なトポロジカルスピントクスチャを有する磁気ヘッジホッグ格子の安定性を遍歴電子系の立場から調べた。変分計算およびシミュレーテッド・アニーリングを用いることにより、遍歴電子系に起因した電荷スピン結合とカイラルな結晶構造に起因した反対称スピン軌道結合の協奏効果によって、磁気ヘッジホッグ相が安定になることを明らかにした。さらに、こうした磁気ヘッジホッグ相が示す磁場中相転移の振る舞いも明らかにした。

(6) 異方的な相互作用をもつ遍歴磁性体における多重  $Q$  磁気秩序 [6]  
三角格子の近藤格子模型に対して、遍歴電子と局在スピン間の交換相互作用の大きさがスピン軌道相互作用によってどのように変調を受けるのかを摂動論を用いて明らかにした。また摂動論により得られた模型をモンテカルロ計算により解析することで、従来の 6 回反転対称性をもつスキルミオン結晶に加えて、歪んだスキルミオン結晶や新しいカイラル磁気秩序状態を見出した。

(7) 空間反転対称性を有する系において発現する磁気スキルミオン相がもつ渦度の縮退 [7]  
空間反転対称性を有する系における磁気スキルミオン結晶相では、相互作用の性質から渦度やらせん度に関する縮退が残ると考えられている。本研究では、こうした渦度やらせん度に関する縮退がどのようにして解けるのかを遍歴磁性体模型を計算することにより調べた。その結果、波数空間における相互作用と格子の対称性の組み合わせにより、渦度やらせん度に関する縮退が解けることを明らかにした。これにより、従来では困難であったスキルミオン-反スキルミオン相転移が空間反転対称性を有する遍歴磁性体において制御可能であることが明らかになった。

(8) 磁気スキルミオン相を示す  $\text{GdRu}_2\text{Si}_2$  における電荷密度波 [8]  
遍歴磁性体においては、伝導電子と局在スピン間には交換相互作用がはたらくため、スピンによる磁気秩序状態の形成が伝導電子にも大きな影響を及ぼす。ここでは、磁気スキルミオン相を示す  $\text{GdRu}_2\text{Si}_2$  を対象として、磁気スキルミオン相の発現が伝導電子にどのような影響をもたらす

かを理論的に調べた。その結果、磁気スキルミオン相において、伝導電子が電荷密度波を形成すること、さらには、その周期パターンが磁気構造を特徴づける周期パターンに一致することを理論モデルの解析から示した。

(9) 正方格子型の磁気スキルミオンの発現機構 [9]

空間反転対称性を有する正方格子上の遍歴電子系において、磁気スキルミオン結晶が発現するために必要な条件を調べた。近藤格子模型を起点とした有効スピン模型を解析することにより、正方格子型の磁気スキルミオン結晶相が磁場中において発現することを明らかにした。さらにこうした正方格子型の磁気スキルミオン結晶相の発現には、スピン電荷結合に由来した高次のスピン間相互作用、容易軸異方性、ボンド型異方性が重要であることを指摘した。

(10) 三角格子遍歴磁性体におけるボンド型の磁気異方性がもたらすトポロジカル磁性相 [10]

双二次交換相互作用、ボンド型異方性、シングライオン異方性、磁場効果を取り込んだ三角格子上の有効スピン模型に対してシミュレーテッド・アニーリング法を用いて系統的な解析を行うことで磁気スキルミオン相およびその他のトポロジカル磁性相の探索を行った。その結果、トポロジカル数 1 と 2 で特徴づけられる磁気スキルミオン相の安定化条件を明らかにした。さらに、これまでに見出されてこなかった磁気メロン結晶相が安定になるモデルパラメタの条件を示した。

(11) 磁気スキルミオン相を示す  $Gd_3Ru_4Al_{12}$  に対する有効モデルの構築 [11]

磁気スキルミオン相を示す  $Gd_3Ru_4Al_{12}$  を対象としたモデル解析を行った。容易面異方性およびボンド型異方性を取り込んだ有効スピン模型を構築し、解析することにより、実験的に得られていた磁気相図を微視的な理論モデルの立場から再現することに成功した。さらに、 $Gd_3Ru_4Al_{12}$  の磁気スキルミオンで観測された磁場方向に敏感なトポロジカル相転移が、容易軸異方性とボンド型異方性の競合効果により定められていることを明らかにした。

(12) 磁気バブル相を示す  $CeAuSb_2$  における磁気伝導現象 [12]

磁場中においてヘリカル相から磁気バブル相への相転移を示す  $CeAuSb_2$  に対する理論解析を行った。観測された磁気相転移を説明する有効スピンモデルの構築を行い、さらに磁気バブル相において観測された特異な磁気伝導現象が、磁気バブル構造下における電子状態の変形によって説明できることを明らかにした。

[1] S. Hayami and Y. Motome, Phys. Rev. Lett. **121**, 137202 (2018).

[2] S. Hayami and Y. Motome, Phys. Rev. B **99**, 094420 (2019).

[3] R. Yambe and S. Hayami, J. Phys. Soc. Jpn. **89**, 013702 (2020).

[4] Y. Su, S. Hayami, and S.-Z. Lin, Phys. Rev. Research **2**, 013160 (2020).

[5] S. Okumura, S. Hayami, Y. Kato, and Y. Motome, Phys. Rev. B **101**, 144416 (2020).

[6] S. Hayami, J. Magn. Magn. Mater. **513**, 167181 (2020).

[7] S. Hayami and R. Yambe, J. Phys. Soc. Jpn. **89**, 103702 (2020).

[8] Y. Yasui, C. J. Butler, N. D. Khanh, S. Hayami, T. Nomoto, T. Hanaguri, Y. Motome, R. Arita, T.-h. Arima, Y. Tokura, and S. Seki, Nat. Commun. **11**, 5925 (2020).

[9] S. Hayami and Y. Motome, Phys. Rev. B **103**, 024439 (2021).

[10] S. Hayami and Y. Motome, Phys. Rev. B **103**, 054422 (2021).

[11] M. Hirschberger, S. Hayami, and Y. Tokura, New J. Phys. **23**, 023039 (2021).

[12] S. Seo, S. Hayami, Y. Su, S. M. Thomas, F. Ronning, E. D. Bauer, J. D. Thompson, S.-Z. Lin, and P. F. S. Rosa, Commun. Phys. **4**, 58 (2021).

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計27件（うち査読付論文 27件 / うち国際共著 2件 / うちオープンアクセス 7件）

1. 著者名 Hayami Satoru, Yanagi Yuki, Kusunose Hiroaki, Motome Yukitoshi	4. 巻 122
2. 論文標題 Electric Toroidal Quadrupoles in the Spin-Orbit-Coupled Metal Cd <sub>2</sub> Re <sub>207</sub>	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Physical Review Letters	6. 最初と最後の頁 147602-1-6
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevLett.122.147602	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 Yatsushiro Megumi, Hayami Satoru	4. 巻 88
2. 論文標題 Atomic-Scale Magnetic Toroidal Dipole under Odd-Parity Hybridization	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 054708-1-10
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.7566/JPSJ.88.054708	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 Suzuki M.-T., Nomoto T., Arita R., Yanagi Y., Hayami S., Kusunose H.	4. 巻 99
2. 論文標題 Multipole expansion for magnetic structures: A generation scheme for a symmetry-adapted orthonormal basis set in the crystallographic point group	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Physical Review B	6. 最初と最後の頁 174407-1-10
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevB.99.174407	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 Hayami Satoru, Kusunose Hiroaki, Motome Yukitoshi	4. 巻 88
2. 論文標題 Magnetic Vortex Induced by Nonmagnetic Impurity in Ferromagnets: Magnetic Multipole and Toroidal around the Vacancy	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 063702-1-5
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.7566/JPSJ.88.063702	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 Naka Makoto, Hayami Satoru, Kusunose Hiroaki, Yanagi Yuki, Motome Yukitoshi, Seo Hitoshi	4. 巻 10
2. 論文標題 Spin current generation in organic antiferromagnets	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Nature Communications	6. 最初と最後の頁 4305-1-8
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1038/s41467-019-12229-y	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 Hayami Satoru, Yanagi Yuki, Kusunose Hiroaki	4. 巻 88
2. 論文標題 Momentum-Dependent Spin Splitting by Collinear Antiferromagnetic Ordering	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 123702-1-5
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.7566/JPSJ.88.123702	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 Yambe Ryota, Hayami Satoru	4. 巻 89
2. 論文標題 Double-Q Chiral Stripe in the d-p Model with Strong Spin-Charge Coupling	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Journal of the Physical Society of Japan	6. 最初と最後の頁 013702-1-5
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.7566/JPSJ.89.013702	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 Su Ying, Hayami Satoru, Lin Shi-Zeng	4. 巻 2
2. 論文標題 Dimension transcendence and anomalous charge transport in magnets with moving multiple-Q spin textures	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Physical Review Research	6. 最初と最後の頁 013160-1-13
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevResearch.2.013160	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 Okumura Shun, Hayami Satoru, Kato Yasuyuki, Motome Yukitoshi	4. 巻 30
2. 論文標題 Tracing Monopoles and Anti-monopoles in a Magnetic Hedgehog Lattice	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 JPS Conference Proceedings	6. 最初と最後の頁 011010-1-6
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.7566/JSPSC.30.011010	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 Hayami Satoru, Yanagi Yuki, Naka Makoto, Seo Hitoshi, Motome Yukitoshi, Kusunose Hiroaki	4. 巻 30
2. 論文標題 Multipole Description of Emergent Spin-Orbit Interaction in Organic Antiferromagnet $\kappa$ -(BEDT-TTF) $2\text{Cu}[\text{N}(\text{CN})_2\text{Cl}]$	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 JPS Conference Proceedings	6. 最初と最後の頁 011149-1-10
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.7566/JSPSC.30.011149	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 Hayami Satoru, Motome Yukitoshi	4. 巻 121
2. 論文標題 Neel- and Bloch-Type Magnetic Vortices in Rashba Metals	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Physical Review Letters	6. 最初と最後の頁 137202-1-6
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevLett.121.137202	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 Hayami Satoru, Yatsushiro Megumi, Yanagi Yuki, Kusunose Hiroaki	4. 巻 98
2. 論文標題 Classification of atomic-scale multipoles under crystallographic point groups and application to linear response tensors	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Physical Review B	6. 最初と最後の頁 165110-1-35
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevB.98.165110	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 Hayami Satoru, Motome Yukitoshi	4. 巻 99
2. 論文標題 Effect of magnetic anisotropy on skyrmions with a high topological number in itinerant magnets	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Physical Review B	6. 最初と最後の頁 094420-1-8
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevB.99.094420	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 Okumura Shun, Hayami Satoru, Kato Yasuyuki, Motome Yukitoshi	4. 巻 101
2. 論文標題 Magnetic hedgehog lattices in noncentrosymmetric metals	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Physical Review B	6. 最初と最後の頁 144416-1-12
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevB.101.144416	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 Hayami Satoru, Yanagi Yuki, Kusunose Hiroaki	4. 巻 101
2. 論文標題 Spontaneous antisymmetric spin splitting in noncollinear antiferromagnets without spin-orbit coupling	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Physical Review B	6. 最初と最後の頁 220403(R)-1-6
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevB.101.220403	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 Matsumoto Takuya, Hayami Satoru	4. 巻 101
2. 論文標題 Nonreciprocal magnons due to symmetric anisotropic exchange interaction in honeycomb antiferromagnets	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Physical Review B	6. 最初と最後の頁 224419-1-7
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevB.101.224419	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 Hayami Satoru	4. 巻 513
2. 論文標題 Multiple-Q magnetism by anisotropic bilinear-biquadratic interactions in momentum space	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Journal of Magnetism and Magnetic Materials	6. 最初と最後の頁 167181-1-11
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.jmmm.2020.167181	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 Naka Makoto, Hayami Satoru, Kusunose Hiroaki, Yanagi Yuki, Motome Yukitoshi, Seo Hitoshi	4. 巻 102
2. 論文標題 Anomalous Hall effect in $d$ -type organic antiferromagnets	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Physical Review B	6. 最初と最後の頁 075112-1-11
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevB.102.075112	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 Hayami Satoru, Yambe Ryota	4. 巻 89
2. 論文標題 Degeneracy Lifting of Neel, Bloch, and Anti-Skyrmion Crystals in Centrosymmetric Tetragonal Systems	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Journal of the Physical Society of Japan	6. 最初と最後の頁 103702-1-5
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.7566/JPSJ.89.103702	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 Kusunose Hiroaki, Oiwa Rikuto, Hayami Satoru	4. 巻 89
2. 論文標題 Complete Multipole Basis Set for Single-Centered Electron Systems	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Journal of the Physical Society of Japan	6. 最初と最後の頁 104704-1-10
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.7566/JPSJ.89.104704	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 Hayami Satoru, Yanagi Yuki, Kusunose Hiroaki	4. 巻 102
2. 論文標題 Bottom-up design of spin-split and reshaped electronic band structures in antiferromagnets without spin-orbit coupling: Procedure on the basis of augmented multipoles	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Physical Review B	6. 最初と最後の頁 144441-1-24
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevB.102.144441	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 Yasui Yuuki, Butler Christopher J., Khanh Nguyen Duy, Hayami Satoru, Nomoto Takuya, Hanaguri Tetsuo, Motome Yukitoshi, Arita Ryotaro, Arima Taka-hisa, Tokura Yoshinori, Seki Shinichiro	4. 巻 11
2. 論文標題 Imaging the coupling between itinerant electrons and localised moments in the centrosymmetric skyrmion magnet GdRu <sub>2</sub> Si <sub>2</sub>	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Nature Communications	6. 最初と最後の頁 5925-1-6
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1038/s41467-020-19751-4	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 Yatsushiro Megumi, Hayami Satoru	4. 巻 102
2. 論文標題 NQR and NMR spectra in the odd-parity multipole material CeCoSi	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Physical Review B	6. 最初と最後の頁 195147-1-17
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevB.102.195147	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 Hayami Satoru, Motome Yukitoshi	4. 巻 103
2. 論文標題 Square skyrmion crystal in centrosymmetric itinerant magnets	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Physical Review B	6. 最初と最後の頁 024439-1-11
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevB.103.024439	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 Hayami Satoru, Motome Yukitoshi	4. 巻 103
2. 論文標題 Noncoplanar multiple-Q spin textures by itinerant frustration: Effects of single-ion anisotropy and bond-dependent anisotropy	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Physical Review B	6. 最初と最後の頁 054422-1-36
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevB.103.054422	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 Hirschberger Max, Hayami Satoru, Tokura Yoshinori	4. 巻 23
2. 論文標題 Nanometric skyrmion lattice from anisotropic exchange interactions in a centrosymmetric host	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 New Journal of Physics	6. 最初と最後の頁 023039-1-7
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/1367-2630/abdef9	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 Seo Soonbeom, Hayami Satoru, Su Ying, Thomas Sean M., Ronning Filip, Bauer Eric D., Thompson Joe D., Lin Shi-Zeng, Rosa Priscila F. S.	4. 巻 4
2. 論文標題 Spin-texture-driven electrical transport in multi-Q antiferromagnets	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Communications Physics	6. 最初と最後の頁 58-1-8
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1038/s42005-021-00558-8	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56件 (うち招待講演 9件 / うち国際学会 9件)

1. 発表者名 Satoru Hayami
2. 発表標題 Neel- and Bloch-type magnetic vortices in Rashba metals
3. 学会等名 SPIE Optics + Photonics 2019 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Satoru Hayami
2. 発表標題 Augmented multipoles and cross-correlated couplings
3. 学会等名 KINKEN-WAKATE 2019 Multipole Physics (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Satoru Hayami
2. 発表標題 Momentum-Dependent Spin Splitting by Collinear Antiferromagnets without Atomic Spin-Orbit Coupling
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 Satoru Hayami
2. 発表標題 Classification of Atomic-Scale Multipoles under Crystallographic Point Groups
3. 学会等名 The International Conference on SCES 2019 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 M. Naka, S. Hayami, H. Kusunose, Y. Yanagi, Y. Motome, and H. Seo
2. 発表標題 Organic antiferromagnet as a spin current generator
3. 学会等名 The International Conference on SCES 2019 (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 S. Okumura, S. Hayami, Y. Kato, and Y. Motome
2. 発表標題 Numerical study on magnetic hedgehog lattices in noncentrosymmetric metals
3. 学会等名 JSPS Core-to-Core Program International meeting "Core-to-Core Final Meeting in Jaca (2019)" (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 速水 賢
2. 発表標題 多極子自由度と非対角応答
3. 学会等名 J-Physics 令和元年度領域全体会議
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 速水 賢
2. 発表標題 微視的な多極子自由度とスピン分裂を示すバンド構造の関係
3. 学会等名 J-Physics地域研究会 -札幌
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 八城 愛美、速水 賢
2. 発表標題 f電子系金属CeCoSiにおける奇パリティ多極子秩序
3. 学会等名 J-Physics地域研究会 -札幌
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 松本拓哉, 速水 賢
2. 発表標題 八二カム格子反強磁性体における対称な異方的交換相互作用に由来した非相反マグノン励起
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 奥村 駿, 速水 賢, 加藤 康之, 求 幸年
2. 発表標題 磁性金属中の磁気ヘッジホッグ格子に対する磁場効果の数値的研究
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 安田寛徳, 加藤 康之, 速水 賢, 求 幸年
2. 発表標題 パイロクロア酸化物Cd <sub>2</sub> Re <sub>2</sub> O <sub>7</sub> における電流磁気効果の第一原理計算
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 Khanh Nguyen, Taro Nakajima, Satoru Hayami, Shang Gao, Hironori Nakao, Hajime Sagayama, Yuichi Yamasaki, Yukitoshi Motome, Yoshinori Tokura, Takahisa Arima, Shinichiro Seki
2. 発表標題 Multiple-Q spin textures in itinerant magnet GdRu <sub>2</sub> Si <sub>2</sub>
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 速水賢, 柳有起, 楠瀬博明
2. 発表標題 結晶中の多極子自由度を起点としたスピン分裂バンド構造の理解
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 八城愛美, 柳有起, 速水賢
2. 発表標題 ジグザグ鎖上の磁気トロイダル多極子秩序下における非相反電気伝導
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 山家椋太, 速水賢
2. 発表標題 異方的なc-f混成を有する周期的アンダーソン模型を起点とした異方的近藤カップリングの導出
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 奥村 駿, 速水 賢, 加藤 康之, 求 幸年
2. 発表標題 3次元遍歴電子系における多重Q磁気ヘッジホッグ格子の数値的研究
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 中 惇, 速水 賢, 楠瀬 博明, 柳 有起, 求 幸年, 妹尾 仁嗣
2. 発表標題 型分子性導体における異常ホール効果
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 速水賢
2. 発表標題 局所的な軌道混成に由来するトロイダル多極子をもたらす新奇マルチフェロイクスの開拓
3. 学会等名 J-Physics 平成30年度領域全体会議(後半キックオフミーティング)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 速水賢
2. 発表標題 トロイダル多極子自由度に基づく物質設計
3. 学会等名 J-Physics トピカルミーティング ものづくりシリーズ第3回「物質探索最前線」(招待講演)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 速水賢
2. 発表標題 電気トロイダル多極子と交差相関現象
3. 学会等名 第1回ETQ研究会「多極子秩序と超伝導」
4. 発表年 2018年



1. 発表者名 速水賢, 柳有起, 楠瀬博明, 求幸年
2. 発表標題 Cd <sub>2</sub> Re <sub>2</sub> O <sub>7</sub> における電気トロイダル四極子秩序の可能性
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 速水賢
2. 発表標題 多極子の拡張・一般化と交差相関物性
3. 学会等名 日本物理学会2018年秋季大会 共催シンポジウム講演(招待講演)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 速水賢, 八城愛美, 柳有起, 楠瀬博明
2. 発表標題 結晶点群の下での多極子の分類論
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 速水賢
2. 発表標題 フラストレート磁性体におけるスキルミオン結晶相
3. 学会等名 基研研究会「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 速水賢
2. 発表標題 多極子の拡張・一般化と交差相関物性
3. 学会等名 J-Physics トピカルミーティング「拡張多極子研究の進展と展望」
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 速水賢
2. 発表標題 バンド自由度を用いた拡張多極子 -Cd <sub>2</sub> Re <sub>2</sub> O <sub>7</sub> における電気トロイダル四極子秩序を例にとって-
3. 学会等名 J-Physics トピカルミーティング「拡張多極子研究の進展と展望」
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 速水賢
2. 発表標題 トロイダルモーメントと交差相関物性の微視的な理論研究
3. 学会等名 日本物理学会第74回年次大会（招待講演）
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 柳 有起, 速水 賢, 求 幸年, 楠瀬 博明
2. 発表標題 Cd <sub>2</sub> Re <sub>2</sub> O <sub>7</sub> における多極子秩序と非相反応答
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 松本 拓哉, 速水 賢
2. 発表標題 ブリージングカゴメ磁性体における非相反マグノン励起
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 中 惇, 速水 賢, 楠瀬 博明, 柳 有起, 求 幸年, 妹尾 仁嗣
2. 発表標題 型分子性導体におけるスピン分裂
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 中 惇, 速水 賢, 楠瀬 博明, 柳 有起, 求 幸年, 妹尾 仁嗣
2. 発表標題 型分子性導体におけるスピン流生成
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 松本 拓哉, 速水 賢
2. 発表標題 ブリージングカゴメ磁性体におけるトロイダル多極子と非相反マグノン励起
3. 学会等名 基研研究会「スピン系物理の最前線」
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 奥村 駿, 速水 賢, 加藤 康之, 求 幸年
2. 発表標題 Numerical study of topological spin textures in 3D spin-charge coupled systems
3. 学会等名 第4回領域研究会「トポロジーが紡ぐ物質科学のフロンティア」
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 奥村 駿, 速水 賢, 加藤 康之, 求 幸年
2. 発表標題 Chiral 3Q and 4Q hedgehog lattices in 3D spin-charge coupled systems
3. 学会等名 日本学術振興会 研究拠点形成事業 トピカルミーティング「キラル物性シンポジウム」
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 山家 椋太, 速水 賢
2. 発表標題 強いフント結合をもつd-p軌道混成モデルにおける多重Q磁気秩序
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 中 惇, 速水 賢, 楠瀬 博明, 柳 有起, 求 幸年, 妹尾 仁嗣
2. 発表標題 型分子性導体における対称性の破れと輸送特性
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 松本 拓哉, 速水 賢
2. 発表標題 異方的な交換相互作用をもつフラストレート磁性体におけるスキルミオン結晶相
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 S. Hayami
2. 発表標題 Atomic-scale augmented multipoles
3. 学会等名 Recent Developments on Multipole Moments in Quantum Systems (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Yuuki Yasui, Christopher Butler, Khanh Nguyen, Satoru Hayami, Takuya Nomoto, Tetsuo Hanaguri, Yukitoshi Motome, Ryotaro Arita, Taka-hisa Arima, Yoshinori Tokura, and Shinichiro Seki
2. 発表標題 Imaging the coupling between itinerant electrons and localised moments in the centrosymmetric skyrmion magnet GdRu <sub>2</sub> Si <sub>2</sub>
3. 学会等名 APS March Meeting 2021 (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 M. Yatsushiro and S. Hayami
2. 発表標題 Theoretical study of odd-parity multipole orders in CeCoSi
3. 学会等名 APS March Meeting 2021 (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 八城愛美, 速水賢
2. 発表標題 CeCoSiの奇パリティ多極子秩序下におけるNMRスペクトルの理論的研究
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 安田寛徳, 加藤 康之, 速水 賢, 求 幸年
2. 発表標題 第一原理計算を用いたパイロクロア酸化物Cd <sub>2</sub> Re <sub>2</sub> O <sub>7</sub> におけるスピン軌道結合現象の解析
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 安井勇気, Christopher J. Butler, Nguyen D. Khanh, 速水賢, 野本拓也, 花栗哲郎, 求幸年, 有田亮太郎, 有馬孝尚, 十倉好紀, 関真一郎
2. 発表標題 磁気スキルミオン物質GdRu <sub>2</sub> Si <sub>2</sub> における電子状態変調と磁気構造の関係
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 八城愛美, 速水賢
2. 発表標題 ジグザグ鎖上の電気・磁気的な奇パリティ多極子に由来した非線形電気伝導
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 奥村 駿, 速水 賢, 加藤 康之, 求 幸年
2. 発表標題 磁性金属中の磁気ヘッジホッグ格子が示す磁場誘起トポロジカル転移
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 山家 椋太, 速水 賢
2. 発表標題 遍歴磁性体における異方的なスピン電荷結合が誘起するスキルミオン結晶
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 松本 拓哉, 速水 賢
2. 発表標題 反転中心を持たない磁性体におけるクラスター磁気トロイダル多極子による非相反マグノン励起
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 長谷川 巧, 花手 洋樹, 河野 翔也, 松平 和之, 筒井 智嗣, 速水 賢
2. 発表標題 イリジウム酸化物Ca <sub>5</sub> Ir <sub>3</sub> O <sub>12</sub> の105 K相転移における秩序変数
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 花手洋樹, 河野翔也, 松平和之, 長谷川巧, 筒井智嗣, 速水賢
2. 発表標題 非弾性X線散乱によるCa5Ir3012の105 Kにおける隠れた秩序の研究
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 松平和之, 花手洋樹, 中村和磨, 河野翔也, 林田桃佳, 長谷川巧, 筒井智嗣, 速水賢
2. 発表標題 幾何学的フラストレート系イリジウム酸化物Ca5Ir3012における105Kの隠れた相転移と電流誘起物性
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 奥村 駿, 速水 賢, 加藤 康之, 求 幸年
2. 発表標題 反転対称性をもつ金属磁性体に現れる磁気ヘッジホッグ格子
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 速水賢, 楠瀬博明
2. 発表標題 磁気四極子秩序下における隠れたスピン-軌道結合
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 八城愛美, 楠瀬博明, 速水賢
2. 発表標題 磁性体中における多極子の分類論
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 加藤 康之, 速水 賢, 求 幸年
2. 発表標題 多重Q磁気秩序相のスピン波励起
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 山家 椋太, 速水賢
2. 発表標題 磁気異方性に起因した遍歴磁性体スキルミオン結晶の新しい安定化機構
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5件

1. 著者名 速水 賢, 八城 愛美, 柳 有起, 楠瀬 博明	4. 発行年 2019年
2. 出版社 株式会社アグネ技術センター	5. 総ページ数 15
3. 書名 固体物理	

1. 著者名 速水 賢, 八城 愛美, 柳 有起, 楠瀬 博明	4. 発行年 2020年
2. 出版社 株式会社アグネ技術センター	5. 総ページ数 11
3. 書名 固体物理	

1. 著者名 速水 賢, 八城 愛美, 柳 有起, 楠瀬 博明	4. 発行年 2020年
2. 出版社 株式会社アグネ技術センター	5. 総ページ数 17
3. 書名 固体物理	

1. 著者名 楠瀬 博明, 速水 賢	4. 発行年 2020年
2. 出版社 株式会社アグネ技術センター	5. 総ページ数 11
3. 書名 固体物理	

1. 著者名 速水 賢, 八城 愛美, 柳 有起, 楠瀬 博明	4. 発行年 2021年
2. 出版社 株式会社アグネ技術センター	5. 総ページ数 19
3. 書名 固体物理	

〔産業財産権〕

〔その他〕

研究室ホームページ

<http://hayami-lab.t.u-tokyo.ac.jp/index.html>

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		
米国	ロスアラモス国立研究所		