

令和 5 年 5 月 4 日現在

機関番号：12601

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2020～2022

課題番号：20H01859

研究課題名(和文) Zak位相制御による表面状態設計とスピントロニクス機能実現

研究課題名(英文) Design of surface state and spintronics functionality via Zak phase control

研究代表者

金澤 直也 (Kanazawa, Naoya)

東京大学・大学院工学系研究科(工学部)・講師

研究者番号：10734593

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 14,900,000円

研究成果の概要(和文)：電気分極の現代的理論体系の根幹を成すZak位相という量子位相の概念を応用して、新しいトポロジカル表面状態を開拓し、様々なスピントロニクス機能を設計できた。具体的には、FeSiという非磁性絶縁体の薄膜の合成に成功し、その表面においてZak位相由来の表面強磁性金属状態を発見した。特にFeSi表面はほぼ量子化したZak位相を有するため、大きな電気分極とそれに起因した強Rashba型スピン軌道結合が現れる。この特性を利用し、非相反電気伝導や電流誘起磁化反転を実現できた。さらに接合物質を適切に選択することで、表面の磁気状態・スピン軌道結合状態の制御が可能になり、電流誘起磁化反転機能の室温動作を実現した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

Zak位相という新しいトポロジーの概念に注目することによって、FeSiという地球上にありふれた元素のみで構成された物質においてスピントロニクス機能を設計することができた。これにより既存のスピントロニクスデバイスの課題の一つである「希少な重元素の含有」の制約に囚われない、物質設計指針を提唱することができた。これらの成果は、急激に成長している情報化社会の電力消費・資源消費を究極的に抑制する要素技術に繋がる可能性を秘めている。また、論文[Science Advances, Advanced Materials など]、プレスリリース、特許申請としてまとめることができ、社会的にも広く情報発信できた。

研究成果の概要(英文)：We developed new topological surface states and designed various spintronic functions by using the concept of quantum phase, so-called Zak phase, which is central in the modern theory of electric polarization. In particular, we succeeded in synthesizing epitaxial thin films of the nonmagnetic insulator FeSi and discovered the emergence of ferromagnetic-metal state on its surface. Since this FeSi surface has a nearly quantized Zak phase, there appear a large electric polarization and the resulting strong Rashba-type spin-orbit coupling. By taking advantage of these properties, we realized nonreciprocal electrical conduction and current-induced magnetization switching. Furthermore, by appropriately selecting the junction material, we controlled the magnetic and spin-orbit coupling states of the FeSi surface and also demonstrated room-temperature operation of the current-induced magnetization switching.

研究分野：物性物理学、応用物理学

キーワード：Zak位相 トポロジー 表面状態 スピントロニクス

1. 研究開始当初の背景

(1) 情報エレクトロニクスの基盤である半導体は身の回りの電化製品や自動車などあらゆる場面で使われるようになり、経済発展の未来を左右するキーテクノロジーとなっている。しかし、次世代エレクトロニクスが高度なバーチャル世界を支え切れるかという技術面の障壁が囁かれている。特に、現代社会が直面するエネルギー・環境資源の課題を解決する一つの戦略として新物質・新原理に基づく素子開発がある。情報量の爆発に付随して IT 機器の消費電力は増加の一途をたどっている。その一方で、2050 年までに温室効果ガスの排出を実質ゼロにするというカーボンニュートラル政策まで打ち出され、エネルギー問題を解決しない限り情報化社会はこのまま成長を続けることができなくなる懸念が出てきている。

(2) その中でも近年急速に発展しているトポロジカル物質の概念が、エレクトロニクスにおける物質革新を起こすのではないかと期待されている。しかしトポロジカル物質は、重元素・レアメタル固有の強いスピン軌道相互作用によってそのトポロジカルな電子状態が実現されており、原子番号が大きな希少かつ毒性の高い元素を多く含んでしまっている。そのため、現状を打破するトポロジカル物質の開発が重要な課題である。

2. 研究の目的

Zak 位相という電気分極の現代的な理論に用いられるトポロジーの概念を応用した新しい物質設計指針を展開し、スピン偏極した表面金属状態を有する半導体(絶縁体)とそのスピントロニクス機能を開拓することが目的である。注目する物質はトポロジカル絶縁体とは全く異なる量子相を示すものであり、構成元素は重元素(強いスピン軌道相互作用)を必ずしも必要としない。本研究では、その第一歩として雛形物質として注目している FeSi という非磁性半導体を用いることによって、上記指針の原理実証を行うものである。

3. 研究の方法

(1) 候補物質の薄膜作製と表面伝導の検出：本研究の雛形物質 FeSi のエピタキシャル薄膜を分子線エピタキシー法(MBE)によって作製した。また様々な膜厚の薄膜試料に対して電気伝導特性や磁気特性(磁化や異常ホール効果など)を測定することにより、膜厚に依存しない表面状態の寄与を定量的に評価し、表面状態の発現を実証した。また当初の予定を超えて、偏極中性子反射率実験によって表面磁化を直接検出した。

(2) 第一原理計算による表面状態の起源の解明：FeSi (111)表面を持つスラブ計算を行い、表面状態の発現の有無、そしてその電子構造について評価した。さらに Zak 位相を算出し、FeSi のトポロジカルな性質を明らかにした。また当初の予定を超えて、様々な絶縁体物質との接合界面における電子状態・磁気状態を計算し、接合による FeSi 表面状態の制御可能性を調べた。

(3) 微小回路デバイス作製とスピン偏極表面電流を用いた機能実証：非相反電気伝導特性(pn 接合を必要としないダイオード効果)や電流誘起磁化反転現象(磁気メモリの情報担体となる磁化の向きの電氣的制御)といったスピントロニクス機能を実現するために、フォトリソグラフィを用いたマイクロサイズのデバイスを作製した。また高電流密度を印加した時の磁気伝導や磁化ダイナミクスを電氣的に測定した。さらに当初の予定を超えて、原理実証だけでなく、現実的な応用を可能にするスピントロニクス機能の室温動作を実現した。

4. 研究成果

(1)非磁性絶縁体 FeSi における強磁性金属表面状態の発見

様々な膜厚の FeSi 薄膜の伝導特性を調べた。図 1(a)は抵抗率 ρ_{xx} の温度依存性を表している。本来、物質固有の値であるはずの抵抗率が膜厚を厚くするほど大きくなっている。これは表面に金属伝導状態が表れていることを示唆している。図 1(c)に模式的に示したように、表面に金属状態がない通常物質であれば、膜厚を薄くして電流が流れる断面積を小さくしていくと、電気の流れやすさであるシートあたりの電気伝導度 $\sigma_{xx}^{\text{sheet}} = t / \rho_{xx}$ も単調に減少し、膜厚 $t=0$ の極限では伝導度も 0 になる。一方で、表面にバルクと異なる伝導状態が発現する場合、膜厚に依存しない表面の寄与が常に存在するため、伝導度を膜厚 $t=0$ の極限に外挿すると表面の 2 次元伝導成分に対応する有限の値が現れることが期待される。実際に FeSi の抵抗率をシートあたりの伝導度に変換し、膜厚に対してプロットすると、バルクの電気伝導率を表すグラフ傾き σ_{3D} だけでなく、表面伝導を示す有限の切片成分 σ_{2D} が観測された。

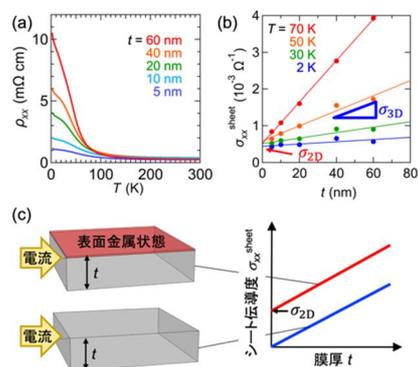


図 1. FeSi 薄膜の表面伝導特性

実際に FeSi の抵抗率をシートあたりの伝導度に変換し、膜厚に対してプロットすると、バルクの電気伝導率を表すグラフ傾き σ_{3D} だけでなく、表面伝導を示す有限の切片成分 σ_{2D} が観測された。

また、ホール伝導測定や磁化測定、偏極中性子反射率測定によって、表面に2次元強磁性状態も共存していることがわかった。特に偏極中性子反射率実験においては、FeSi とキャップ層 MgO との界面に明瞭な磁気散乱長密度が観測された。結晶表面粗さを考慮して表面強磁性層の厚さを見積もると、約 0.35 nm という3原子層程度の限られた厚さに強磁性磁化が存在していることがわかった。これら一連の実験結果によって、非磁性絶縁体 FeSi の表面に強磁性金属状態が発現していることを特定した[1]。

(2) 第一原理計算による FeSi のトポロジーの解明

FeSi の特徴的な表面状態の起源を明らかにするために、FeSi スラブに対してスピン軌道相互作用を考慮した第一原理計算を行った。図 2(a), (b) は常磁性状態におけるバンド構造とスピン偏極したフェルミ面を表している。バルクバンドはエネルギーギャップが開いた絶縁体状態であるが、太線で示した表面バンドはフェルミ準位を横切る金属状態となっている。特に Γ 点まわりにおいて Rashba 分裂に特徴的なスピン分裂が見られ、その大きさは重元素が不在にも関わらず約 35 meV にも及ぶ。また実際にフェルミ面上のスピンは大まかに渦状に偏極していることがわかった。また表面の電子軌道を可視化すると、表面の原子核位置から変位して浮き上がったような分布を形成していることがわかった(図 2(c))。これは Fe と Si の原子間に広がった共有結合軌道(図 2(d))が表面において切断され、電子軌道が表面においても原子核位置から外れた位置に存在していることによる。このような双極子状の電荷分布(表面分極 P)が表面に強いポテンシャル勾配をもたらし、巨大な Rashba 効果を引き起こす起源となっている[1]。

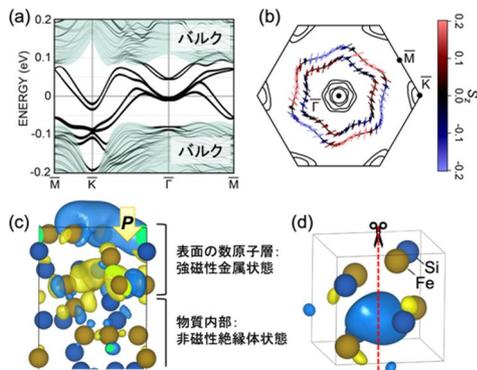


図 2. FeSi スラブの電子状態計算

(3) FeSi 表面におけるスピントロニクス機能の実証

強磁性磁化状態と巨大な Rashba 効果が共存する FeSi 表面において電流による磁化スイッチングを実現できた。電流印加によってスピン蓄積が生じ(エーデルシュタイン効果)、ある閾電流値以上でスピン軌道トルクを介して垂直磁化の向きが反転する(図 3(a), (b))。表面に通常このような磁化スイッチングデバイスには磁化を保持する磁性層とスピン蓄積を起こす重金属層の2層または多層構造となっているが、FeSi 表面の場合は両方の役割が備わっている。さらに、FeSi に BaF₂ といったバンドギャップの大きなフッ化物を接合させることによって、FeSi 表面状態が守られ、強磁性転移温度が室温を大きく超え、室温で安定的に磁化スイッチング動作を実現することができた(図 3(b))。特に磁化反転に必要な電流密度が、他の磁性体/重金属積層膜系と比較して遜色無く(図 3(c))、希少な元素を使わないスピントロニクスデバイスとしての有用性が示された[2-4]。

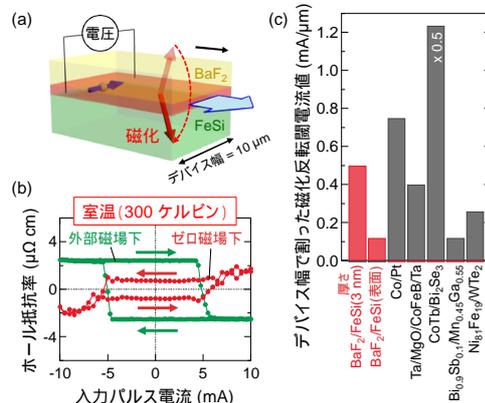


図 3. FeSi 界面での電流誘起磁化反転

<引用文献>

- [1] Yusuke Ohtsuka[†], Naoya Kanazawa^{*†}, Motoaki Hirayama[†], Akira Matsui, Takuya Nomoto, Ryotaro Arita, Taro Nakajima, Takayasu Hanashima, Victor Ukleev, Hiroyuki Aoki, Masataka Mogi, Kohei Fujiwara, Atsushi Tsukazaki, Masakazu Ichikawa, Masashi Kawasaki, and Yoshinori Tokura, "Emergence of spin-orbit coupled ferromagnetic surface state derived from Zak phase in a nonmagnetic insulator FeSi", *Sci. Adv.* 7, eabj0498 (2021).
 - [2] Tomohiro Hori, Naoya Kanazawa^{*}, Motoaki Hirayama, Kohei Fujiwara, Atsushi Tsukazaki, Masakazu Ichikawa, Masashi Kawasaki, Yoshinori Tokura, "A Noble-Metal-Free Spintronic System with Proximity-Enhanced Ferromagnetic Topological Surface State of FeSi above Room Temperature", *Adv. Mater.* 35, 2206801 (2023).
 - [3] 金澤直也, 大塚悠介, 堀智洋, 平山元昭, 十倉好紀, 塚崎敦, 藤原宏平, "磁気素子", 特願 2022-030135, 出願日 2022年2月28日.
 - [4] 金澤直也, 大塚悠介, 堀智洋, 平山元昭, 十倉好紀, 塚崎敦, 藤原宏平, "磁気素子", 特願 2022-177723, 出願日 2022年11月4日.
 - [5] 解説記事: 金澤直也, 平山元昭, "非磁性半導体 FeSi における強磁性金属表面の発現とスピンオービトロニクス機能", *まてりあ* 61, 671-678 (2022).
- ([†]: equal contribution, ^{*}: corresponding author)

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 3件 / うちオープンアクセス 3件）

1. 著者名 Kitaori A., Kanazawa N., Ishizuka H., Yokouchi T., Nagaosa N., Tokura Y.	4. 巻 103
2. 論文標題 Enhanced electrical magnetochiral effect by spin-hedgehog lattice structural transition	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Physical Review B	6. 最初と最後の頁 L220410
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevB.103.L220410	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 Kitaori Aki, Kanazawa Naoya, Yokouchi Tomoyuki, Kagawa Fumitaka, Nagaosa Naoto, Tokura Yoshinori	4. 巻 118
2. 論文標題 Emergent electromagnetic induction beyond room temperature	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Proceedings of the National Academy of Sciences	6. 最初と最後の頁 e2105422118
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1073/pnas.2105422118	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 Ohtsuka Yusuke, Kanazawa Naoya, Hirayama Motoaki, Matsui Akira, Nomoto Takuya, Arita Ryotaro, Nakajima Taro, Hanashima Takayasu, Ukleev Victor, Aoki Hiroyuki, Mogi Masataka, Fujiwara Kohei, Tsukazaki Atsushi, Ichikawa Masakazu, Kawasaki Masashi, Tokura Yoshinori	4. 巻 7
2. 論文標題 Emergence of spin-orbit coupled ferromagnetic surface state derived from Zak phase in a nonmagnetic insulator FeSi	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Science Advances	6. 最初と最後の頁 abj0498
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1126/sciadv.abj0498	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 Fujishiro Yukako, Kanazawa Naoya, Kurihara Ryosuke, Ishizuka Hiroaki, Hori Tomohiro, Yasin Fehmi Sami, Yu Xiuzhen, Tsukazaki Atsushi, Ichikawa Masakazu, Kawasaki Masashi, Nagaosa Naoto, Tokunaga Masashi, Tokura Yoshinori	4. 巻 12
2. 論文標題 Giant anomalous Hall effect from spin-chirality scattering in a chiral magnet	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Nature Communications	6. 最初と最後の頁 317
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1038/s41467-020-20384-w	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 Tokura Yoshinori, Kanazawa Naoya	4. 巻 121
2. 論文標題 Magnetic Skyrmion Materials	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Chemical Reviews	6. 最初と最後の頁 2857 ~ 2897
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1021/acs.chemrev.0c00297	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 Kanazawa N., Kitaori A., White J. S., Ukleev V., Ronnow H. M., Tsukazaki A., Ichikawa M., Kawasaki M., Tokura Y.	4. 巻 125
2. 論文標題 Direct Observation of the Statics and Dynamics of Emergent Magnetic Monopoles in a Chiral Magnet	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Physical Review Letters	6. 最初と最後の頁 137202
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PHYSREVLETT.125.137202	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 Fujishiro Y., Kanazawa N., Shinmei T., Nishi M., Nakajima T., Arima T., Hashizume D., Bahramy M. S., Irifune T., Tokura Y.	4. 巻 4
2. 論文標題 Monoclinic semimetal IrSi synthesized under high pressure above 25 GPa: Crystal structure, electronic, and magnetic properties	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Physical Review Materials	6. 最初と最後の頁 55002
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PHYSREVMATERIALS.4.055002	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 Kanazawa Naoya, Fujishiro Yukako, Akiba Kazuto, Kurihara Ryosuke, Mitamura Hiroyuki, Miyake Atsushi, Matsuo Akira, Kindo Koichi, Tokunaga Masashi, Tokura Yoshinori	4. 巻 91
2. 論文標題 Topological Phase Transitions and Critical Phenomena Associated with Unwinding of Spin Crystals by High Magnetic Fields	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Journal of the Physical Society of Japan	6. 最初と最後の頁 101002
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.7566/JPSJ.91.101002	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 Kitaori Aki, White Jonathan S., Kanazawa Naoya, Ukleev Victor, Singh Deepak, Furukawa Yuki, Arima Taka-hisa, Nagaosa Naoto, Tokura Yoshinori	4. 巻 107
2. 論文標題 Doping control of magnetism and emergent electromagnetic induction in high-temperature helimagnets	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Physical Review B	6. 最初と最後の頁 24406
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevB.107.024406	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 Hori Tomohiro, Kanazawa Naoya, Hirayama Motoaki, Fujiwara Kohei, Tsukazaki Atsushi, Ichikawa Masakazu, Kawasaki Masashi, Tokura Yoshinori	4. 巻 35
2. 論文標題 A Noble Metal Free Spintronic System with Proximity Enhanced Ferromagnetic Topological Surface State of FeSi above Room Temperature	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Advanced Materials	6. 最初と最後の頁 2206801
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1002/adma.202206801	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15件 (うち招待講演 8件 / うち国際学会 10件)

1. 発表者名 Naoya Kanazawa
2. 発表標題 Multiple magnetic phases and topological transport properties in chiral magnets
3. 学会等名 SKYMAG 2021 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Naoya Kanazawa
2. 発表標題 Emergent transport phenomena induced by spin-chirality fluctuations in a chiral magnet MnGe
3. 学会等名 International Conference on Quantum Liquid Crystals 2021 (QLC2021) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Naoya Kanazawa
2. 発表標題 Emergence of spin-orbit-coupled surface state derived from topological polarization and its spintronic functionality in a nonmagnetic insulator FeSi
3. 学会等名 The 2021 Around-the-Clock Around-the-Globe Magnetism Conference (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Naoya Kanazawa
2. 発表標題 Formation of spin-hedgehog lattices and giant topological transport properties in chiral magnets
3. 学会等名 Annual Meeting of DPG (German Physical Society) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Naoya Kanazawa
2. 発表標題 Emergence of spin-orbit coupled ferromagnetic surface state derived from Zak phase in a nonmagnetic insulator FeSi
3. 学会等名 APS March Meeting 2022 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 堀智洋, 金澤直也, 平山元昭, 松井彬, 野本拓也, 有田亮太郎, 藤原宏平, 塚崎敦, 市川昌和, 川崎雅司, 十倉好紀
2. 発表標題 絶縁体接合によるFeSiの表面強磁性金属状態の制御
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 堀智洋, 金澤直也, 山崎裕一, 平山元昭, 松井彬, 野本拓也, 有田亮太郎, 藤原宏平, 塚崎敦, 市川昌和, 川崎雅司, 有馬孝尚, 雨宮健太, 十倉好紀
2. 発表標題 FeSi表面強磁性金属相のX線磁気円二色性測定によるスピン・軌道状態の観測
3. 学会等名 日本物理学会 第77回年次大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Naoya Kanazawa
2. 発表標題 Spin-orbit coupling properties in ferromagnetic-metal surface state of FeSi
3. 学会等名 令和3年度 新学術領域研究「量子液晶の物性科学」領域研究会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 大塚悠介, 金澤直也, 平山元昭, 松井彬, 野本拓也, 有田亮太郎, 塚崎敦, 市川昌和, 川崎雅司, 十倉好紀
2. 発表標題 狭ギャップ半導体FeSi 薄膜における表面強磁性金属状態形成と磁気輸送特性
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 大塚悠介, 金澤直也, 平山元昭, 松井彬, 野本拓也, 有田亮太郎, 茂木将孝, 藤原宏平, 塚崎敦, 市川昌和, 川崎雅司, 十倉好紀
2. 発表標題 狭ギャップ半導体FeSiのスピン偏極表面状態における非相反伝導と電流誘起磁化反転
3. 学会等名 日本物理学会76回年次大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Naoya Kanazawa
2. 発表標題 Emergence of spin-orbit coupled ferromagnetic surface state derived from Zak phase in a nonmagnetic insulator FeSi
3. 学会等名 The 6th Asia-Pacific Conference on Semiconducting Silicides and Related Materials (APAC-SILICIDE 2022) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Naoya Kanazawa
2. 発表標題 Emergence of Ferromagnetic Topological Surface State in FeSi and Nonlinear Dynamics of Magnetic Domains
3. 学会等名 2022 MRS Fall Meeting & Exhibit (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 金澤 直也
2. 発表標題 FeSi における強磁性トポロジカル表面状態の発現と強スピン-軌道結合物性
3. 学会等名 2022年度第2回界面ナノ科学研究会 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 T. Hori, N. Kanazawa, M. Hirayama, A. Matsui, T. Nomoto, R. Arita, K. Fujiwara, A. Tsukazaki, M. Ichikawa, M. Kawasaki, Y. Tokura
2. 発表標題 Noble-metal free spintronic system with proximity-enhanced topological surface-ferromagnetic state of FeSi above room temperature
3. 学会等名 29th International Conference on Low Temperature Physics (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 T. Hori, N. Kanazawa, M. Hirayama, K. Fujiwara, A. Tsukazaki, M. Ichikawa, M. Kawasaki, Y. Tokura
2. 発表標題 Noble-metal free spintronic system with proximity-enhanced ferromagnetic topological surface state of FeSi above room temperature
3. 学会等名 American Physical Society March Meeting 2023 (国際学会)
4. 発表年 2023年

〔図書〕 計0件

〔出願〕 計2件

産業財産権の名称 磁気素子	発明者 金澤直也, 大塚悠介, 堀智洋, 平山元昭, 十 倉好紀, 塚崎敦, 藤原	権利者 国立大学法人東 京大学, 国立大 学法人東北大学
産業財産権の種類、番号 特許、特願2022-030135	出願年 2022年	国内・外国の別 国内

産業財産権の名称 磁気素子	発明者 金澤直也, 大塚悠介, 堀智洋, 平山元昭, 十 倉好紀, 塚崎敦, 藤原	権利者 国立大学法人東 京大学, 国立大 学法人東北大学
産業財産権の種類、番号 特許、特願2022-177723	出願年 2022年	国内・外国の別 国内

〔取得〕 計0件

〔その他〕

researchmap (金澤直也) https://researchmap.jp/n_kanazawa 金澤研究室ホームページ https://sites.google.com/view/kanazawa-lab 平山研究室ホームページ https://hrym.weebly.com/

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	平山 元昭 (Hirayama Motoaki) (70761005)	東京大学・大学院工学系研究科(工学部)・特任准教授 (12601)	

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		
スイス	Paul Scherrer Institute	Ecole Polytechnique Federale de Lausanne	