

令和 5 年 5 月 2 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：20H02599

研究課題名（和文）核スピン-機械振動コヒーレント結合科学の開拓

研究課題名（英文）Experimental investigation of coherent coupling between nuclear spin, lattice, and mechanical vibration

研究代表者

吉川 貴史（Kikkawa, Takashi）

東京大学・大学院工学系研究科（工学部）・助教

研究者番号：60828846

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 14,400,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では、機械振動子・マイクロバー素子などを舞台に、高周波を入力として生じるマクロな力学運動やスピン励起・スピン流生成、及びその逆効果の開拓を行った。さらに、微小振動子の共振周波数に迫る低周波特性をもつ核スピンも取り入れた新しい学術の端緒を見出すことを目指した。本研究を通じて、核スピンからスピン流を生み出す現象「核スピンゼーベック効果」やスピン流を入力として機械振動を引き起こす現象「スピン流体積効果」等の実証に成功した。また、磁性体材料の元素置換に基づくマグノン・フォノン間のコヒーレント結合のチューニングなどにも成功し、意義深い研究成果を挙げる事ができた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究により、原子核スピン（核スピン）からスピン流を生成したり或いは、逆にスピン流から機械振動を引き起こすという新しいタイプの物理現象群が開拓された。今後本研究で見出した手法を利用することで、核スピントロニクス分野やスピンメカニクス分野の発展及び学理構築が実現されていくと期待される。また本研究により、これまで利用が難しかった核スピンのもつ角運動量を超微細相互作用によって取り出すことが可能であることが見出された。これにより本研究課題の最終目標である、核スピンのもつ角運動量の相互変換効果に基づく新しい科学技術の創生に向けた進展が得られたといえる。

研究成果の概要（英文）：In this study, we have explored high-frequency-input driven macroscopic mechanical motion, spin excitation, spin-current generation, and their reciprocal effects in mechanical oscillators and micro-bar devices. Furthermore, we aim to mark the beginning of a new science that incorporates nuclear spins which can be excited by very low-frequency inputs, approaching the resonant frequency of micro oscillators. Through this research, we succeeded in demonstrating the nuclear-spin Seebeck effect (i.e., a phenomenon that generates a spin current from nuclear spins via a heat current) and the spin-current volume effect (i.e., a phenomenon that causes mechanical vibration via spin-current injection) and so on. We have also succeeded in tuning coherent magnon-phonon coupling through element substitutions in yttrium iron garnets, and have obtained fruitful outcomes.

研究分野：スピントロニクス

キーワード：スピントロニクス 核スピン 機械振動 格子振動 フォノン スピンゼーベック効果 マグノン

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

スピントロニクスは、電子の持つ電荷とスピンの双方の結びつきの解明・開拓を目指した学問分野であり、応用面では GMR を利用したハードディスクドライブの大容量化や省電力化など IT 社会の根幹要素として進化を続けている。基礎物理学の面でスピントロニクス諸現象は、固体中の素励起とその相互作用の観点から深く理解されつつあり、例えば、フォトン(電磁波)の角運動量を使ってスピン流(スピン角運動量の流れ)を生成したり、磁性体中で角運動量を運ぶ量子であるマグノン(スピン波)から熱流を介してスピン流を生成する手法(スピンゼーベック効果)が開拓されてきた。

スピントロニクス分野は更に最近では、二量子間のコヒーレント結合系分野にまで発展をみせている。この結合状態は微視的には、異なる量子間のエネルギー(周波数)と波数(波長)が一致し、且つ相互作用により混成している状況であり、異種の二量子間でエネルギー量子をコヒーレントにやりとりできる状態である。興味深いことに、このとき形成される準粒子は、結合前の二量子の両方ともを持つ新しい素励起となっている。例えば、フォノン(結晶格子の振動の量子)とマグノンのコヒーレント結合状態である「マグノンポーラロン」は、固体中で極めて長い寿命を持つフォノンの性質とスピン角運動量を伝送するマグノンの性質の両方を併せ持った高効率なスピン流キャリアとなる。

しかしながらスピン系と巨視的な力学系・機械振動系間の結合効果や、原子核のもつスピン(核スピン)と他の準粒子との(コヒーレント)結合効果は、深く研究されていない状況が長く続いている。このようなコヒーレント結合効果を念頭におき、未開拓のスピン流 機械振動結合効果、核スピン 電子スピンのコヒーレント結合効果、原子核スピンによるスピン流生成効果、スピン流を用いた磁気共鳴法の開拓などを目指して研究に取り組んだ。

2. 研究の目的

本研究では、薄膜・機械振動子・マイクロパー素子などを舞台に、高周波を入力として生じるマクロな力学運動やスピン励起・スピン流生成、及びその逆効果の開拓を行った。さらに、微小振動子の共振周波数に迫る低周波特性をもつ核スピンも取り入れた新しい学術の端緒を見出すことを目指した。具体的には以下の項目の開拓を行った。

- (1) 核スピン 電子スピン波間のコヒーレント結合
- (2) 核スピンに基づくスピン流生成と核スピン 格子結合
- (3) 電子スピン波 フォノン間のコヒーレント結合の磁性体材料元素置換効果
- (4) スピン流による機械振動の生成

3. 研究の方法

【物質選定】

本研究では、上述の目標を達成するために、カテゴリー別に分けて物質選定を行った。まず項目(1)~(2)の研究では、大きな核スピンを持ち、電子-核スピン間の超微細相互作用が強い⁵⁵Mn核を持つ磁性絶縁体材料を用いた。代表的な物質が MnCO₃ である。MnCO₃ では、Mn²⁺イオンが磁性を担っており、ネール温度 $T_N = 35$ K 以下で容易面反強磁性が生じる。また Dzyaloshinsky-守谷相互作用(DM 相互作用)に由来して磁化が完全なコリニアア状態から約 1 度キャントしている。さらに MnCO₃ は高核スピン $I = 5/2$ を有し且つ、天然存在比が 100% の⁵⁵Mn核から構成されている。核スピンと電子スピンとの間の超微細相互作用は磁場換算で $B_{hf} \sim 60$ T と巨大であり、核スピンはこの有効磁場を受けて電子磁化の方向に向かたがる。この有効磁場により、核スピン分極率は 100 mK の極低温で約 40% にまで発達する。更に本研究では、MnCO₃ に加えて CsMnCl₃ 等の高核スピン材料も併用した。項目(3)では、研究代表者らが見出した電子スピン波とフォノンのコヒーレント結合(マグノンポーラロン)効果の制御を目指して、イットリウム鉄ガーネット Y₃Fe₅O₁₂ の Y サイトを Bi 置換した Bi_xY_{3-x}Fe₅O₁₂ ($x = 0, 0.5, 0.9$) を液相エピタキシー法によって(S)GGG 基板上に成膜した。また項目(4)では、Tb_{0.3}Dy_{0.7}Fe₂ という高いキュリー温度を示す強磁性体に注目した。Tb_{0.3}Dy_{0.7}Fe₂ は巨大なスピン 格子結合を示す物質であり、スピン状態の変化により大きな弾性変形を示すことが知られている。

【素子作製とセットアップ】

上記の(1)核スピン 電子スピン波間のコヒーレント結合の開拓においては、低温クライオスタットに広帯域マイクロ波反射分光が可能なセットアップを構築した。項目(2)及び(3)では MnCO₃ (111) 結晶や Bi_xY_{3-x}Fe₅O₁₂ ($x = 0, 0.5, 0.9$) に大きな逆スピンホール効果を示すことが知られている白金(Pt)薄膜(厚さ 5~10 nm)を成膜したデバイスを用意し、スピンゼーベック効果に基づくスピン流生成効果を探求した。項目(2)のテーマでは、Pt 細線は逆スピンホール効果にもとづくスピン流 電圧変換層として利用するだけでなく、微小ヒーターとしても活用し、スピンゼーベック効果測定を行った。すなわちこの Pt 細線に周波数 ω の AC 電流を流すことで二倍波 2ω のジュール発熱が生じ、これによって作られる温度勾配によって、MnCO₃/Pt 界面に周波数 2ω でスピン流が生み出される。生じたスピン流は逆スピンホール効果によって電圧に変換されるため、この 2ω 電圧をロックイン法で検出することで、高感度にスピンゼーベック効果を測定できる。また外部磁場 H を温度勾配 T と電極方向の両方に垂直する方向に印加し、⁴He クライオスタット及び³He-⁴He 希釈冷凍機を用いて実験を行った。また項目(3)では二つの熱浴の間に試料全体を挟み込み、片側をヒーターで加熱することで、試料に温度勾配を

与え、スピンゼーベック効果を測定するアプローチをとった。最後に項目(4)については、 $Tb_{0.3}Dy_{0.7}Fe_2$ 薄膜に Pt 薄膜或いは W 薄膜を接合させた素子を用意し、Pt (W)に電流を流すことで Pt(W)/ $Tb_{0.3}Dy_{0.7}Fe_2$ 界面を透過するスピン流が、スピン 格子結合を介して、 $Tb_{0.3}Dy_{0.7}Fe_2$ 薄膜に発生させる体積効果(膜厚変化)をレーザードップラー干渉計により測定した。

4. 研究成果

(1) 核スピン 電子スピン波間のコヒーレント結合:

本研究課題の目標達成のためには、大きな核スピンを有する Mn 系の核スピン物質の素励起特性を理解する必要がある。そのために、マンガン系の高核スピン材料 $MnCO_3$ の低温マイクロ波スペクトロスコピーの技術開発と測定に重きをおいて研究を行った。これにより、核スピン波の磁場分散関係に関するパラメタを、 $MnCO_3$ のネール温度 (~ 35 K) から低温域 (2 K) までの広い温度域において決定することに成功した。低磁場域では、核スピンと電子スピン波のコヒーレント結合効果「核スピン波」の形成を裏付ける周波数プリングを観測し、この振る舞いをもとに、Suhl-Nakamura 相互作用の強さを特徴付ける、核スピンが電子スピン位置に作る有効磁場 H_a の温度依存性を決定することができた。この分光学的研究により、 $MnCO_3$ の核スピンドイナミクスの全貌が明らかになり、この物質を用いて核スピン フォノン 格子振動結合を調べるための土台が構築された。

(2) 核スピンに基づくスピン流生成と核スピン 格子結合

Pt/ $MnCO_3$ 試料において、核スピンを利用した熱電変換現象(核スピンゼーベック効果)を見出した。興味深いことに電圧信号の強度が極低温領域 (~ 100 mK) まで増大することが分かり、本現象が低温で増大する熱電効果であることが示された(図 1)。また、熱流強度に対する線形性や金属のスピンホール角依存性測定を通じて、観測された信号がスピンゼーベック効果により生じた逆スピンホール起電力の特徴と整合することも確認された。実験および計算の比較を通じて、核スピンのもつ角運動量を超微細相互作用によって直接取り出すことが可能であり、また、核スピンが電子マグノンとの混成を介して格子系と強く結合していることが明らかになった [Nature Communications 誌などに掲載、[T. Kikkawa et al., Nature Commun. 12, 4356 \(2021\).](#), [Annu. Rev. Condens. Matter Phys. 14, 129-151 \(2023\).](#)]

本研究を通じて核スピンによる熱電変換がはじめて実現され、極低温まで適用可能な新しい熱電変換技術・熱工学の可能性が見出された。今後、核スピンゼーベック効果の逆効果(核スピンを利用した発熱・吸熱効果)を探索することで、極低温域の新しい冷却技術が開拓されると期待される。また本研究を通じて、核スピンを利用した新しいスピン流生成メカニズム 界面コリン八機構 が見出された。この機構にもとづけば、核スピンのもつ巨大なエントロピーを直接スピン流を介して取り出すことができ、最終的には逆スピンホール効果を利用して電圧へと変換することが可能である。今後、本機構を利用した新しい核スピントロニクス現象の実験的開拓も期待される。本研究により、核スピンのもつ角運動量の相互変換効果に基づく新しい科学技術の創生に向けた意義深い進展が得られたといえる。

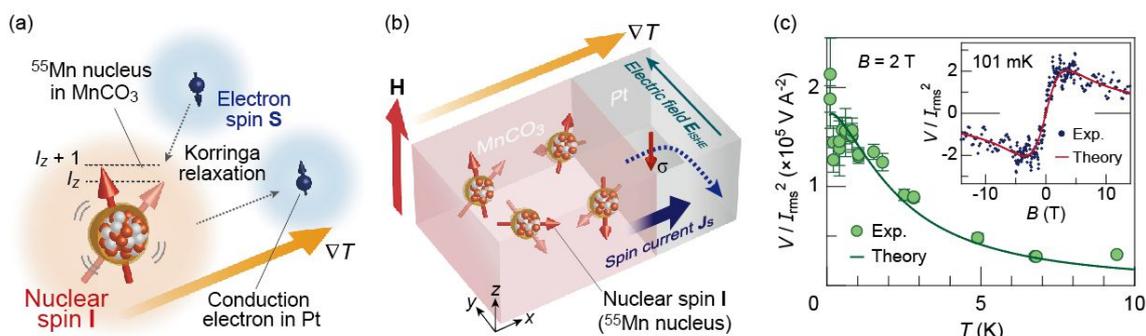


図 1(a) 界面コリン八緩和によるスピン流生成の模式図。これが核スピンからスピン流を生み出す原理となることが分かった。(b) Pt/ $MnCO_3$ 試料における核スピンゼーベック効果測定の様式図。(c) 核スピンゼーベック効果の観測。100 mK の極低温まで信号が増大し、強磁場を印加しても信号が有意であることが見出された。実線は理論計算を表している ([T. Kikkawa et al., Nat. Commun. 12, 4356 \(2021\).](#) DOI: 10.1038/s41467-021-24623-6 より抜粋)

(3) 電子スピン波 フォノン間のコヒーレント結合の磁性体材料元素置換効果

研究代表者らは2016年に電子スピン波とフォノンのコヒーレント結合(マグノンポーラロン)によるスピンゼーベック効果の増大現象を見出した。本課題では、磁性体材料の元素置換を行うことで本現象を制御することを念頭に実験研究・モデル検討及び成果取りまとめを行った。対象とした物質は、イットリウム鉄ガーネット $Y_3Fe_5O_{12}$ (YIG) の Y サイトを Bi 置換した $Bi_xY_{3-x}Fe_5O_{12}$ ($x = 0, 0.5, 0.9$, Bi:YIG) であり、この $Bi_xY_{3-x}Fe_5O_{12}$ では、Bi 量 x の増加により、磁気弾性結合定数 B が増大する一方で、音速 $C_{TA,LA}$ は減少を示す (C_{TA} : 横波フォノンの速度、

C_{LA} : 縦波フォノンの速度)。前者の特徴は、運動量空間におけるマグノン・フォノン間の混成可能領域の増大、すなわち anti-crossing ギャップ (B) の増加につながり、マグノンポーラロン誘起スピンゼーベック効果の発現に有利に働く。後者の特徴は、マグノン・フォノン混成のオンセット条件である両者の接触磁場値 $H_{TA(LA)}$ を減少させる [$H_{TA(LA)} \propto C_{TA(LA)}^2$]。この状況は、接触磁場でのマグノン・フォノンのブランチをスケッチすることで直感的に理解することができる (図 2 に示すように、より小さな音速を示す $\text{Bi}_x\text{Y}_{3-x}\text{Fe}_5\text{O}_{12}$ の方が pure YIG に比べて、接触状態を作るために必要な外部磁場 H が小さくなるが見えてとれる)。実際、スピンゼーベック効果の異常増大磁場として観測されるマグノンポーラロン共鳴磁場を、Bi 置換により最大 2 テスラ程度、低磁場側にシフトできることが明らかになった。また、 $\text{Bi}_{0.9}\text{Y}_{2.1}\text{Fe}_5\text{O}_{12}$ 試料においては、温度 3K でバックグラウンドのマグノン駆動スピンゼーベック信号よりも 500% も大きな増強信号も見出されている。これは元素置換に基づくコヒーレント結合の変調がスピントロニクス機能を向上させるための指針となり得ることを示している。さらに局所配置と非局所配置でのスピンゼーベック効果の比較を行うことで、異方的なマグノンポーラロン輸送が確認された。本結果はマグノンポーラロン誘起スピンゼーベック効果の物理をさらに解明するための手がかりとなることが期待される。本成果は Physical Review Materials 誌に掲載され、Editors' Suggestion に選出された [T. Kikkawa *et al.*, Phys. Rev. Materials **6**, 104402 (2022).].

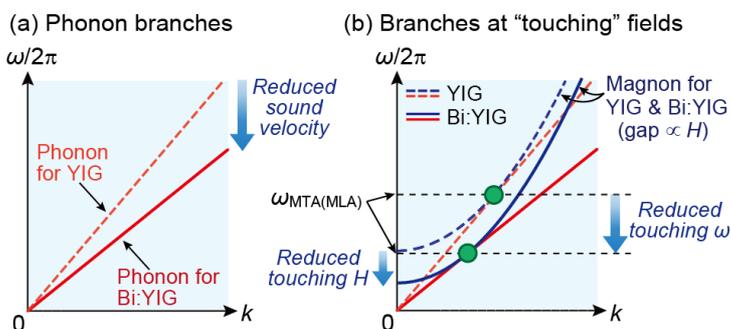


図 2 (a) YIG と Bi 置換 YIG (Bi:YIG) のフォノン分散関係の模式図。直線の傾きが音速を表す。(b) YIG と Bi:YIG におけるマグノン - フォノン分散関係が接する磁場値におけるブランチの模式図 (T. Kikkawa *et al.*, Phys. Rev. Materials **6**, 104402 (2022). DOI: 10.1103/PhysRevMaterials.6.104402 より抜粋)。

(4) スピン流による機械振動の生成

電子スピン系のスピン流を入力として機械振動を引き起こす新しい現象「スピン流体積効果」の実証に成功した。Pt, W 薄膜 (大きなスピンホール効果を示す重金属) と高磁歪材料 $\text{Tb}_{0.3}\text{Dy}_{0.7}\text{Fe}_2$ の接合系に電流を流すと、電流方向及びスピンホール角 (すなわち金属に生じるスピン蓄積方向) に応じて符号変化する磁性体材料中の体積変化を観測した (図 3)。系統的な磁場強度・角度依存性及び、理論計算との比較からスピン流注入による磁化揺らぎの変調とスピン - 格子結合が本現象の発現に重要な役割を担っていることが見出された。ここで実証された現象は、磁気体積効果 (磁場下において磁性体の体積が変化する現象) のスピン流版ともいえる現象であり、スピン流を入力源として、機械振動を誘起したり、磁性体の体積を変調する新しい科学技術の可能性が示されたと言える [Nature Communications 誌に掲載、H. Arisawa, H. Shim, S. Daimon, T. Kikkawa *et al.*, Nature Commun. **13**, 2440 (2022).].

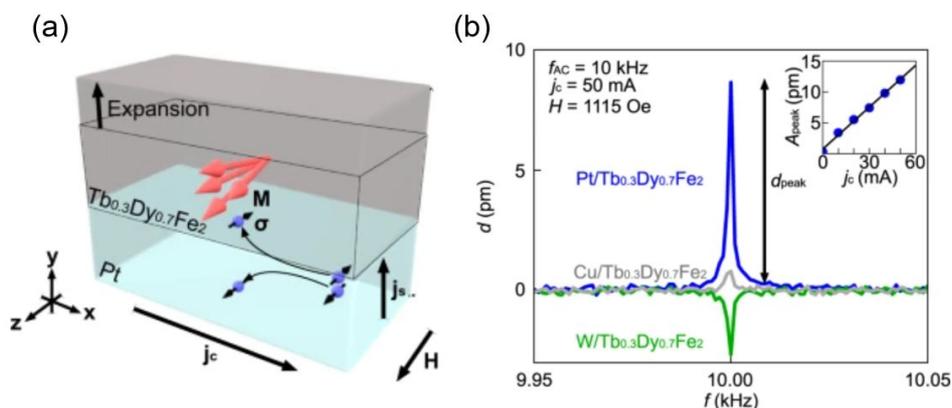


図 3 (a) スピン流体積効果測定の様式図。(b) Pt, W 中のスピンホール効果によって誘起された $\text{Tb}_{0.3}\text{Dy}_{0.7}\text{Fe}_2$ の膜厚変化の測定結果。スピンホール効果を殆ど示さない Cu 電極では膜厚変化の信号が大きく抑制された (H. Arisawa *et al.*, Nat. Commun. **13**, 2440 (2022). DOI: 10.1038/s41467-022-30115-y より抜粋)。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計19件（うち査読付論文 18件 / うち国際共著 10件 / うちオープンアクセス 8件）

1. 著者名 Kikkawa T., Reitz D., Ito H., Makiuchi T., Sugimoto T., Tsunekawa K., Daimon S., Oyanagi K., Ramos R., Takahashi S., Shiomi Y., Tserkovnyak Y., Saitoh E.	4. 巻 12
2. 論文標題 Observation of nuclear-spin Seebeck effect	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Nature Communications	6. 最初と最後の頁 4356
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1038/s41467-021-24623-6	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 Lee Won-Yong, Park No-Won, Kang Min-Sung, Kim Gil-Sung, Yoon Young-Gui, Lee Suheon, Choi Kwang-Yong, Kim Keun Soo, Kim Jin-Hyuk, Seong Maeng-Je, Kikkawa Takashi, Saitoh Eiji, Lee Sang-Kwon	4. 巻 13
2. 論文標題 Extrinsic Surface Magnetic Anisotropy Contribution in Pt/Y3Fe5012 Interface in Longitudinal Spin Seebeck Effect by Graphene Interlayer	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 ACS Applied Materials & Interfaces	6. 最初と最後の頁 45097 ~ 45104
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1021/acsami.1c13180	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 Oyanagi Koichi, Gomez-Perez Juan M., Zhang Xian-Peng, Kikkawa Takashi, Chen Yao, Sagasta Eburne, Chuvilin Andrey, Hueso Luis E., Golovach Vitaly N., Bergeret F. Sebastian, Casanova Felix, Saitoh Eiji	4. 巻 104
2. 論文標題 Paramagnetic spin Hall magnetoresistance	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Physical Review B	6. 最初と最後の頁 134428
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevB.104.134428	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 Ogata K., Kikkawa T., Saitoh E., Shiomi Y.	4. 巻 120
2. 論文標題 Modulation of spin Seebeck effect by hydrogenation	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Applied Physics Letters	6. 最初と最後の頁 72405
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1063/5.0083012	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 Nambu Y., Barker J., Okino Y., Kikkawa T., Shiomi Y., Enderle M., Weber T., Winn B., Graves-Brook M., Tranquada J. M., Ziman T., Fujita M., Bauer G. E. W., Saitoh E., Kakurai K.	4. 巻 125
2. 論文標題 Observation of Magnon Polarization	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Physical Review Letters	6. 最初と最後の頁 027201 ~ 027201
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevLett.125.027201	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 Lee Sang Kwon, Lee Won Yong, Kikkawa Takashi, Le Chinh Tam, Kang Min Sung, Kim Gil Sung, Nguyen Anh Duc, Kim Yong Soo, Park No Won, Saitoh Eiji	4. 巻 30
2. 論文標題 Enhanced Spin Seebeck Effect in Monolayer Tungsten Diselenide Due to Strong Spin Current Injection at Interface	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Advanced Functional Materials	6. 最初と最後の頁 2003192 ~ 2003192
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1002/adfm.202003192	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 Ramos R., Makiuchi T., Kikkawa T., Daimon S., Oyanagi K., Saitoh E.	4. 巻 117
2. 論文標題 Observation of quantum interference conductance fluctuations in metal rings with strong spin-orbit coupling	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Applied Physics Letters	6. 最初と最後の頁 242402 ~ 242402
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1063/5.0031708	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 Park No-Won, Lee Won-Yong, Kim Gil-Sung, Yoon Young-Gui, Kikkawa Takashi, Saitoh Eiji, Lee Sang-Kwon	4. 巻 125
2. 論文標題 High In-Plane Seebeck Coefficients of Bi-Sb-Te Alloy Thin Films with Growth Texture and Their Field-Controlled Seebeck Coefficients	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 The Journal of Physical Chemistry C	6. 最初と最後の頁 2373 ~ 2381
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1021/acs.jpcc.0c10926	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 Chumak A. V., Kabos P., Wu M., Abert C., Adelman C., Adeyeye A. O., Akerman J., Aliev F. G., Anane A., Awad A., Back C. H., Barman A., Bauer G. E. W., Becherer M., Beginin E. N., Bittencourt V. A. S. V., Blanter Y. M., Bortolotti P., Boventer I., Bozhko D. A., Kikkawa T. et al	4. 巻 58
2. 論文標題 Advances in Magnetism Roadmap on Spin-Wave Computing	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 IEEE Transactions on Magnetism	6. 最初と最後の頁 800172
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/TMAG.2022.3149664	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 Arisawa Hiroki, Shim Hang, Daimon Shunsuke, Kikkawa Takashi, Oikawa Yasuyuki, Takahashi Saburo, Ono Takahito, Saitoh Eiji	4. 巻 13
2. 論文標題 Observation of spin-current striction in a magnet	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Nature Communications	6. 最初と最後の頁 2440
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1038/s41467-022-30115-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 Daimon Shunsuke, Tsunekawa Kakeru, Kawakami Shinji, Kikkawa Takashi, Ramos Rafael, Oyanagi Koichi, Ohtsuki Tomi, Saitoh Eiji	4. 巻 13
2. 論文標題 Deciphering quantum fingerprints in electric conductance	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Nature Communications	6. 最初と最後の頁 3160
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1038/s41467-022-30767-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 Kikkawa Takashi, Oyanagi Koichi, Hioki Tomosato, Ishida Masahiko, Qiu Zhiyong, Ramos Rafael, Hashimoto Yusuke, Saitoh Eiji	4. 巻 6
2. 論文標題 Composition-tunable magnon-polaron anomalies in spin Seebeck effects in epitaxial BixY3-xFe5O12 films	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Physical Review Materials	6. 最初と最後の頁 104402
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevMaterials.6.104402	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 Maekawa Sadamichi, Kikkawa Takashi, Chudo Hiroyuki, Ieda Jun'ichi, Saitoh Eiji	4. 巻 133
2. 論文標題 Spin and spin current-From fundamentals to recent progress	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Journal of Applied Physics	6. 最初と最後の頁 20902
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1063/5.0133335	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 Kikkawa Takashi, Saitoh Eiji	4. 巻 2023
2. 論文標題 Experimental observation of nuclear-spin Seebeck effect	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 JSAP Review	6. 最初と最後の頁 230403
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.11470/jsaprev.230403	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 Kikkawa Takashi	4. 巻 20
2. 論文標題 Room-Temperature Ferromagnetism Manifests Itself in Ultrathin Pt Films	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 JPSJ News and Comments	6. 最初と最後の頁 2
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.7566/JPSJNC.20.02	査読の有無 無
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 Lee Oscar, Yamamoto Kei, Umeda Maki, Zollitsch Christoph W., Elyasi Mehrdad, Kikkawa Takashi, Saitoh Eiji, Bauer Gerrit E. W., Kurebayashi Hidekazu	4. 巻 130
2. 論文標題 Nonlinear Magnon Polaritons	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Physical Review Letters	6. 最初と最後の頁 46703
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevLett.130.046703	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 Oyanagi Koichi, Takahashi Saburo, Kikkawa Takashi, Saitoh Eiji	4. 巻 107
2. 論文標題 Mechanism of paramagnetic spin Seebeck effect	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Physical Review B	6. 最初と最後の頁 14423
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevB.107.014423	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 Kikkawa Takashi, Saitoh Eiji	4. 巻 14
2. 論文標題 Spin Seebeck Effect: Sensitive Probe for Elementary Excitation, Spin Correlation, Transport, Magnetic Order, and Domains in Solids	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Annual Review of Condensed Matter Physics	6. 最初と最後の頁 129 ~ 151
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1146/annurev-conmatphys-040721-014957	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 Rongione E., Gueckstock O., Mattern M., Gomonay O., Meer H., Schmitt C., Ramos R., Kikkawa T., Micica M., Saitoh E., Sinova J., Jaffres H., Mangeney J., Goennenwein S. T. B., Geprags S., Kampfrath T., Klaui M., Bargheer M., Seifert T. S., Dhillon S., Lebrun R.	4. 巻 14
2. 論文標題 Emission of coherent THz magnons in an antiferromagnetic insulator triggered by ultrafast spin-phonon interactions	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Nature Communications	6. 最初と最後の頁 1818
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1038/s41467-023-37509-6	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15件 (うち招待講演 3件 / うち国際学会 3件)

1. 発表者名 T. Kikkawa, D. Reitz, H. Ito, T. Makiuchi, T. Sugimoto, K. Tsunekawa, S. Daimon, K. Oyanagi, R. Ramos, S. Takahashi, Y. Shiomi, Y. Tserkovnyak, and E. Saitoh
2. 発表標題 Observation of nuclear-spin Seebeck effect
3. 学会等名 第82回応用物理学会秋季学術講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 吉川貴史, Derek Reitz, 伊藤宏陽, 巻内崇彦, 杉本宜陽, 恒川翔, 大門俊介, 大柳洸一, Rafael Ramos, 高橋三郎, 塩見雄毅, Yaroslav Tserkovnyak, 齊藤英治
2. 発表標題 核スピンに基づくゼーベック効果の観測
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 T. Kikkawa, D. Reitz, H. Ito, T. Makiuchi, T. Sugimoto, K. Tsunekawa, S. Daimon, K. Oyanagi, R. Ramos, S. Takahashi, Y. Shiomi, Y. Tserkovnyak, and E. Saitoh
2. 発表標題 Observation of nuclear-spin Seebeck effect
3. 学会等名 The 5th Symposium for The Core Research Clusters for Materials Science and Spintronics, and the 4th Symposium on International Joint Graduate Program in Materials Science
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 巻内崇彦, 吉川貴史, シツチャヌギリッツ タナポーン, 沼田淳希, 高橋三郎, 齊藤英治
2. 発表標題 キヤント反強磁性体MnCO3のマイクロ波スペクトロスコピー
3. 学会等名 第13回 低温科学研究センター研究交流会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 T. Kikkawa
2. 発表標題 Magnon-phonon hybridization in thermal spin transport
3. 学会等名 CEMS Topical Meeting Online “Magnon-phonon coupling” (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 吉川貴史、Derek Reitz、伊藤宏陽、巻内崇彦、杉本宜陽、恒川翔、大門俊介、大柳洸一、Rafael Ramos、高橋三郎、塩見雄毅、Yaroslav Tserkovnyak、齊藤英治
2. 発表標題 核スピンゼーベック効果の観測
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 T. Makiuchi, T. Kikkawa, T. Sichanugrist, J. Numata, S. Takahashi, and E. Saitoh
2. 発表標題 Microwave spectroscopy of canted antiferromagnet MnCO ₃
3. 学会等名 29th International Conference on Low Temperature Physics (LT23) (国際学会) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 T. Kikkawa, D. Reitz, H. Ito, T. Makiuchi, T. Sugimoto, K. Tsunekawa, S. Daimon, K. Oyanagi, R. Ramos, S. Takahashi, Y. Shiomi, Y. Tserkovnyak, and E. Saitoh
2. 発表標題 Observation of nuclear-spin Seebeck effect in Pt/MnCO ₃
3. 学会等名 SPIE Nanoscience + Engineering, Spintronics XV (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 吉川貴史、齊藤英治
2. 発表標題 核スピンを利用した低温熱電変換 (Nuclear-spin driven low-temperature thermoelectric effect)
3. 学会等名 第14回 低温科学研究センター研究交流会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 巻内崇彦, 吉川貴史, シツチャヌギリッツ タナポーン, 沼田淳希, 高橋三郎, 齊藤英治
2. 発表標題 キャント反強磁性体MnCO ₃ のマイクロ波分光
3. 学会等名 第14回 低温科学研究センター研究交流会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 吉川貴史
2. 発表標題 原子核を利用したスピントロニクスの開拓
3. 学会等名 第4回若手放談会: エキゾチック核物理の将来 (招待講演)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 巻内崇彦, 吉川貴史, シツチャヌギリッツ タナポーン, 沼田淳希, 高橋三郎, 齊藤英治
2. 発表標題 Microwave spectroscopy for field dispersions in MnCO ₃ (MnCO ₃ 磁場分散のマイクロ波分光)
3. 学会等名 第70回 応用物理学会 春季学術講演会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 有沢洋希, 藤本雄人, 吉川貴史, 齊藤英治
2. 発表標題 超伝導体MoGeにおける非線形熱電効果
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 藤本雄人, 有沢洋希, 吉川貴史, 齊藤英治
2. 発表標題 超伝導体MoGeにおける非線形熱電効果の観測に向けた測定手法の開発と理論モデル
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 吉川貴史, 沼田淳希, 窪田崇秀, 関剛斎, 中堂博之, 巻内崇彦, 埋田真樹, 高梨弘毅, 齊藤英治
2. 発表標題 NiMnSbにおける核-電子スピン共鳴スペクトロスコピー
3. 学会等名 日本物理学会 2023年春季大会
4. 発表年 2023年

〔図書〕 計2件

1. 著者名 吉川貴史, 大門俊介, 齊藤英治	4. 発行年 2023年
2. 出版社 エヌ・ティー・エス	5. 総ページ数 -
3. 書名 II基礎編 第6章 第2節 スピンと熱の諸現象 (スピントロニクスハンドブック 基礎から応用まで 佐橋政司、湯浅新治、遠藤哲郎監修)	

1. 著者名 大門俊介, 吉川貴史, 齊藤英治	4. 発行年 2023年
2. 出版社 エヌ・ティー・エス	5. 総ページ数 -
3. 書名 II基礎編 第6章 第1節 スピンと光の諸現象 (スピントロニクスハンドブック 基礎から応用まで 佐橋政司、湯浅新治、遠藤哲郎監修)	

〔産業財産権〕

〔その他〕

世界初の核の自転を利用した熱発電～熱エネルギー利用技術・スピントロニクスに新たな可能性～
https://www.t.u-tokyo.ac.jp/press/foe/press/setnws_202107261409014299427347.html
 【解説記事】吉川貴史, 齊藤英治, “ スピン流とスピントロニクス ” 数理科学 697, 60 - 66 (2021).
 【解説記事】吉川貴史, 齊藤英治, “ 核スピンを利用した熱電変換 ” 日本熱電学会誌 18, 143 - 144 (2022).
 【解説記事】吉川貴史, 齊藤英治, “ 核スピンゼーベック効果の観測 ” 応用物理 91, 745 - 749 (2022).

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	巻内 崇彦 (Makiuchi Takahiko)	東京大学・大学院工学系研究科(工学部)・特任研究員 (12601)	
研究協力者	有沢 洋希 (Arisawa Hiroki)	東北大学・金属材料研究所・博士課程大学院生 (11301)	
研究協力者	大柳 洸一 (Oyanagi Koichi) (50881223)	岩手大学・理工学部・助教 (11201)	

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	カリフォルニア大学ロサンゼルス校			
ドイツ	ヨハネス・ゲーテンベルク大学 マインツ			
英国	UCL ユニバーシティ・カレッジ・ロンドン			