

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 2 年 6 月 5 日現在

機関番号：11301

研究種目：研究活動スタート支援

研究期間：2018～2019

課題番号：18H05841・19K21031

研究課題名(和文) 中性子を用いたスピン流-熱電変換プロトタイプ物質のマグノン分散及び寿命の決定

研究課題名(英文) Determination of magnon dispersion and lifetime of spin-Seebeck insulators

研究代表者

吉川 貴史 (Kikkawa, Takashi)

東北大学・材料科学高等研究所・助教

研究者番号：60828846

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,200,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、磁性ガーネット群の磁気励起特性(分散関係・寿命)を中性子散乱を基軸とした検出法により調べ、これらの情報をもとにスピンゼーベック効果(SSE)の信号特性を理解することを目指した。本研究を通じて、 $\text{Y}_3\text{Fe}_5\text{O}_{12}$ (YIG)及び  $\text{Tb}_3\text{Fe}_5\text{O}_{12}$ (TbIG)の磁気励起の全体像を解明することに成功し、LLG方程式に基づく理論計算と組み合わせることで、これら物質群のSSEの温度特性を説明可能であることを見出した。また、Bi-Ga置換のLuIG系において、低磁場域で巨大なマグノン-フォノン混成SSEを観測し、本結果が元素置換に伴うマグノン分散の変化と寿命低下によって理解できること示した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究により、物性物理学の重要概念である“素励起”という観点から、熱スピン変換現象を包括的に理解するための指針が得られた。絶縁体スピントロニクス分野の基盤材料であるイットリウム鉄ガーネットYIGのマグノン分極を初めて観測したことは意義深く、今後本手法を利用して、より複雑な磁気構造をもつ材料のマグノン分散・分極の検出が期待されている。また本研究を通じて、これまで関係性が希薄であった中性子などを利用する量子ビーム分野とスピントロニクス分野とが有機的に結合していくための端緒が開かれたと言える。

研究成果の概要(英文)：In this research, we investigate the magnetic excitation characteristics (dispersion relations and quasiparticle lifetime) of magnetic garnets by means of neutron scattering techniques and so on. Based on the results, we aim to obtain deep understanding of the spin Seebeck effect (SSE), in which such magnonic properties play an essential role. Through this research, we revealed the magnetic excitations of  $\text{Y}_3\text{Fe}_5\text{O}_{12}$ (YIG) and  $\text{Tb}_3\text{Fe}_5\text{O}_{12}$ (TbIG), and by combining the results with theoretical calculations based on an LLG equation, we found that the temperature-dependent SSE features in these materials can be understood in terms of their magnon excitation characteristics. Furthermore, in a Bi-Ga substituted LuIG system, we observed a strong enhancement of SSE at a low field induced by magnon-phonon hybridization and explained it in terms of change of the magnon dispersion and reduced magnon lifetime caused by the non-magnetic ions substitution into Fe sites of LuIG.

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 スピンゼーベック効果 マグノン 磁性ガーネット 中性子散乱 スピン流

## 様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

スピントロニクス分野は、電流-スピン流-熱流間の交差相関物性を探求する学問領域である。この分野で発見された現象に熱流からのスピン流生成現象「スピンゼーベック効果 (spin Seebeck effect: SSE)」がある。本効果は、磁性絶縁体と金属を張り合わせた二層膜で生じ、逆スピンホール効果と組み合わせることで、電流・電圧へと変換可能になるため、熱電変換素子への応用も検討されている。スピンゼーベック効果は  $\text{Y}_3\text{Fe}_5\text{O}_{12}$  (YIG) に代表される磁性ガーネット群でこれまで主に研究がなされ、磁性体中のマグノンやフォノン、及びそれらの混成状態といった素励起によって駆動されていることが分かってきた [T. Kikkawa *et al.*, Phys. Rev. Lett. **117**, 207203 (2016)., Phys. Rev. B **92**, 064413 (2015). etc].

以上を受けて、現在のスピンゼーベック効果の研究ステージは、現象の温度・磁場依存性を磁性体中の静的・動的パラメタの観点から、より深く定量的に議論するという局面を迎えている。しかしながら、最も効率の良いスピンゼーベック効果を発現する磁性体 YIG ですら、そのマグノン励起の全貌は完全に理解されておらず、マグノンモードの持つ分極 (ヘリシティ)・寿命・温度依存性といったパラメタが本現象の出力にどう関係しているかについて十分な理解が得られていない。また最近、YIG の Y サイトを磁性希土類イオンで置換したフェリ磁性体  $\text{Gd}_3\text{Fe}_5\text{O}_{12}$  (GdIG) において、スピンゼーベック効果の非自明な符号反転が観測されている [S. Geprägs *et al.*, Nat. Commun. **7**, 10452 (2016).]. 本現象の起源として、マグノンの分極依存の機構が理論的に指摘されているものの、これらの磁性体におけるマグノン分散関係の全体像が分かっておらず、定量的な議論を行うまで至っていない。ゆえに、これら磁性体の磁気励起の全体像を明らかにし、マグノンモードの温度依存性や分極、寿命を実験的に定める研究が強く求められている。

### 2. 研究の目的

本研究の目的は、スピンゼーベック効果 (SSE) の発現を担う磁性体中のマグノン励起特性を磁気ダイナミクス検出における強力ツールである中性子散乱を基軸としたプローブ手法によって実験的に調べ、本現象をマグノン励起 (分散関係・寿命) の観点から説明することである。これにより従来成し得なかった、素励起及びその輸送特性という最も本質的な立場から、熱スピン流諸現象の議論及び開拓が可能になる。対象とする物質群は、磁性ガーネット YIG 及び、Y を希土類 Tb で置換した  $\text{Tb}_3\text{Fe}_5\text{O}_{12}$  (TbIG) とする。TbIG においても従来の GdIG と同様な SSE の温度依存性が期待される一方で、Tb は Gd に比べて中性子吸収断面積が極めて小さく (Tb: 23.4 barn, Gd: 49700 barn である)、中性子非弾性散乱実験に適用できるという利点を有する。これまでの研究により、スピンゼーベック効果に関しては既に理論が整備されつつあり、ボルツマン輸送方程式などを用いた議論が試みられている。本研究により、詳細議論に不可欠なマグノン分散関係・分極・寿命などの重要ピースがそろい、スピンゼーベック効果の全容解明を目指す。バルク物性を調べる中性子分野とナノ現象を扱う伝統的なスピントロニクス分野は決して相性が良いとは言えず、これまで密な関係性を持っていたとは言にくい。しかしながら、スピンゼーベック効果が磁性体バルク内部のマグノンダイナミクスによって発現していることが明らかになった今、これら異なる分野を有機的に結合させるための機が熟したといえる。

### 3. 研究の方法

中性子実験に用いる、 $\text{Y}_3\text{Fe}_5\text{O}_{12}$  (YIG) や  $\text{Tb}_3\text{Fe}_5\text{O}_{12}$  (TbIG) 単結晶試料は、TSFZ (traveling solvent floating zone) 法によって作製した。試料の特性評価は、X 線回折や磁化測定などを通じて行った。スピンゼーベック効果の測定用に、単結晶試料を  $4 * 2 * 1 \text{ mm}^3$  程度のサイズに切断し、 $4 * 2 \text{ mm}^2$  の表面を紙やすり及びアルミナパウダーで研磨し、膜厚 5 nm の Pt 薄膜をスパッタリング法で形成することで、Pt/YIG 及び、Pt/TbIG 接合試料を作製した。試料の面直方向に温度勾配、面内方向に磁場を印加し、Pt 層に生じた (逆スピンホール) 起電力信号を検出することでスピンゼーベック効果の検出を行った。中性子散乱実験は、J-PARC、オークリッジ国立研究所、Institut Laue-Langevin などの施設において、チョッパー分光器、三軸分光器などを用いて行った。

さらに発展的なテーマとして、ガーネット試料の元素置換にともなうマグノン分散関係及び寿命の変化がスピンゼーベック効果に与える影響及び、異方的なマグノン分散を有する磁性体におけるスピンゼーベック効果を実験的に調べた。前者については、母物質  $\text{Lu}_3\text{Fe}_5\text{O}_{12}$  の Fe サイトの一部を非磁性 Ga、Lu サイトの一部を非磁性 Bi に置換した  $\text{Lu}_2\text{Bi}_1\text{Fe}_4\text{Ga}_1\text{O}_{12}$  膜を用いた。 $\text{Lu}_2\text{Bi}_1\text{Fe}_4\text{Ga}_1\text{O}_{12}$  膜は、常磁性絶縁体  $\text{Gd}_3\text{Ga}_5\text{O}_{12}$  (GGG) (001) 基板上に液相エピタキシー (liquid phase epitaxy: LPE) 法で成長しており、膜厚は約 4  $\mu\text{m}$  である。本試料はフィルムであることから、中性子による磁気励起特性の評価が難しい。そこで、ブリルアン光散乱法を利用した。また、後者のテーマには、最近物理・化学の両分野で注目を集めている擬二次元強磁性体  $\text{CrSiTe}_3$  及び  $\text{CrGeTe}_3$  を用いた。これらの物質では、磁化構造の二次元性から、面内のスピン相関がキュリー温度  $T_c$  を超えて室温まで残ることが知られている。 $\text{CrSiTe}_3$  及び  $\text{CrGeTe}_3$  はセルフラックス法により Te を主成分とするフラックス中で結晶成長を行った。結晶  $ab$ -面が 1 cm 弱の単結晶を得ることに成功した。YIG、TbIG と同様に BiGa:LuIG、 $\text{CrSiTe}_3$  及び  $\text{CrGeTe}_3$  に膜厚 5 nm の Pt 薄膜をスパッタリング法で成膜し、スピンゼーベック効果測定を行った。

#### 4. 研究成果

##### (1) YIGにおけるマグノン分散・分極の観測：

磁気緩和が非常に小さいフェリ磁性絶縁体ガーネット  $\text{Y}_3\text{Fe}_5\text{O}_{12}$  (YIG) は、スピン流を用いた次世代デバイス実現に向けて最も理想的な物質であると考えられている。しかしながらその磁気励起の全体像は未だに明らかになっていない。また、ガーネットはその反強磁性相互作用に由来してフェリ磁性を発現しており、反時計回りに歳差する強磁性的な正分極マグノンモード<sup>+</sup> (正分極)と時計回りに歳差する負分極マグノンモード<sup>-</sup> (負分極)が存在し得る。分極はスピン流の符号を決める重要因子である。実際に、YIGにおいて室温以上で観測される SSE 信号の急速な抑制には、負分極マグノンモード<sup>-</sup> が関与している可能性がある。本研究ではマグノン分散の温度依存性をその分極を含めて測定し、SSE の温度特性を解明することを目的に研究を遂行した。

図 1a にフランスの Institut Laue-Langevin で実施した YIG の偏極中性子散乱の実験結果を示す (温度は 293 K)。本測定は、中性子のスピン偏極及び YIG の磁化が中性子の散乱ベクトル  $Q$  と平行になるようにして行った。これによりカイラル項とよばれる、 $Q$  に垂直な磁化成分のベクトル積に対応する物理量が検出可能となり、正・負分極のマグノン分散を符号の観点から識別可能となる。図 1a を見て分かる通り、ギャップレスに現れる放物線型の磁気励起 (図 1a の赤色のモード) と 25 meV 程度のギャップを持って高周波側に現れる磁気励起 (図 1a の青色のモード) の観測に成功した。また興味深いことに、カイラル項の符号が両者で逆であり、二つの分散において磁気励起の極性が反転していることが分かった。これらの分散及び分極は、Landau-Lifshitz-Gilbert (LLG) 方程式に基づき計算された動的構造因子とよく整合することが確かめられ (図 1b)、それぞれ、正分極<sup>+</sup>音響マグノン、負分極<sup>-</sup>光学マグノンモードにアサインできた。さらに負分極モードの温度依存性を系統的に測定し、負分極モードが実際に SSE の高温域での信号抑制に寄与していることを理論計算から指摘した。

本研究を通じて、マグノンの分極が初めて定量評価され、これまで間接的にしか得られていなかった YIG のフェリ磁性としての特性を実験的に見出すことに成功した。カイラル項自体は、これまでカイラル磁気秩序や励起の測定に利用されてきたが、測定対象は全て空間的にノンコリニアな磁気モーメントを有する物質に限られていた。本研究では、コリニアな磁気秩序をもつ物質を舞台とし、その磁気励起の分極の検出にカイラル項を適用した初めての研究であるという点で意義深い。本成果は現在、論文投稿中である。

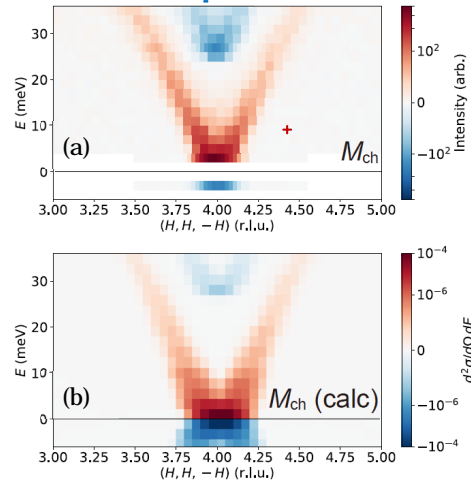


図 1: YIG のマグノン分散(カイラル項)の (a)実験結果と (b)理論計算の比較 (arXiv:1911.11968 より抜粋)。

##### (2) $\text{Tb}_3\text{Fe}_5\text{O}_{12}$ におけるスピントラップ効果と磁気励起の観測：

テルビウム鉄ガーネット  $\text{Tb}_3\text{Fe}_5\text{O}_{12}$  (TbIG) の SSE の測定を行い、信号の二回の符号反転を観測した (図 2b)。一つ目の符号反転は、約 250 K で生じる。これは、TbIG の磁気補償温度と対応しており、各磁性元素の静的なスピンフリップに伴うスピン流の偏極方向の反転という観点から容易に理解できる。一方で興味深いのは、20 K 程度の低温域で観測された符号反転である。対照実験を通じて、この符号反転が従来の熱電効果 (ネルンスト効果) では説明されないことを確かめた。本結果は、GdIG の場合との類似から、TbIG のマグノンブランチの分極 (通常の強磁性マグノンとは逆の極性をもったブランチ) とブランチ自身の温度依存性に起因していると考えられる。しかしながら、TbIG の磁気励起の全貌はこれまで未解明であった。そこで J-PARC BL014SEASONS において、飛行時間分光法に基づく (非偏極) 中性子非弾性散乱実験を通じて TbIG における磁気励起の検

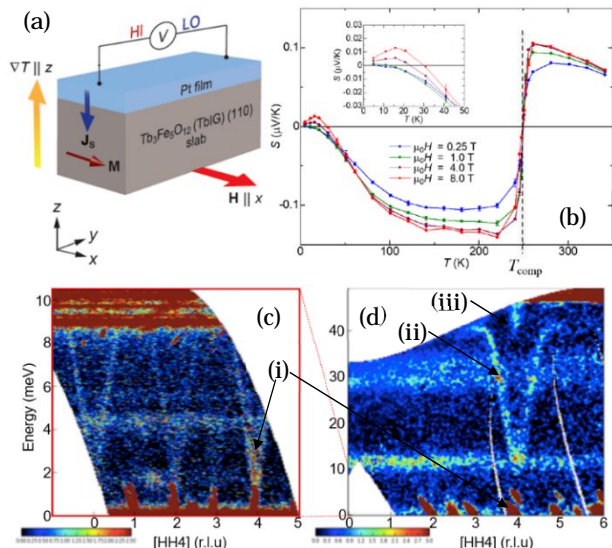


図 2: Pt/TbIG の (a)模式図と (b)SSE の測定結果。 (c, d) 温度 5K における TbIG の励起スペクトル。



出を行った。図 2c,d に温度 5 K において観測された TbIG の磁気励起スペクトルを示す。実験の結果、明瞭な音響モード 1 つ [図 2c,d の(i)]と、光学モード 2 つ [図 2c,d の(ii)及び(iii)]の観測に成功した。様々な温度で測定を繰り返すことで、低エネルギー側(ii)及び高エネルギー側(iii)の光学モードは共に、昇温に伴いソフト化していくことが明らかとなった。更に、TbIG の磁化ダイナミクスを LLG 方程式を用いて考察することで、観測されたマグノンモードの分極を評価した。以上を通じて、TbIG において生じる SSE 信号の 20 K 付近の符号反転が、TbIG の負分極を持つ、低エネルギー側の光学マグノンモードの温度依存性から定性的に説明されることを見出した。今後は、YIG で実証した偏極中性子に基づくカイラル項の検出法を TbIG に適用することで、各ブランチの分極を確かめ、更には磁場応答について検討していく予定である。以上を通じて、希土類置換ガーネット系の SSE の温度特性を解明する。非偏極中性子で得られた結果については、現在論文投稿準備中である。

### (3) Lu<sub>2</sub>BiFe<sub>4</sub>GaO<sub>12</sub> におけるマグノン-フォノン混成誘による熱スピン流の増大:

研究代表者らの研究によって 2016 年に見出されたマグノン-フォノン混成による SSE の増大現象はこれまで数テスラ且つ低温 (~50 K 以下) という環境下のみで有意に現れていたが、Lu<sub>2</sub>BiFe<sub>4</sub>GaO<sub>12</sub> (以下 BiGa:LuIG と表記)を用いた本研究により、0.4 T という低磁場且つ室温下において、従来の YIG に比べて 700% も大きな SSE の増大を観測することに成功した。

マグノン-フォノン混成による SSE の増大は、マグノンが磁気弾性結合を介して長寿命なフォノンと混成することで生じる、スピン流の長寿命化が起源となっている。特にこの増大効果はマグノンとフォノンの混成が最も顕著になる、両者のブランチが接する条件下 (図 3c) で最大となり、SSE の磁場依存性におけるピーク構造として検出される (マグノン分散は磁場印加に伴いゼーマン効果によって高周波側にシフトする一方で、フォノン分散は磁場応答しない。従って磁場を増やしていくとマグノンの分散がやがてフォノンの分散に接するようになる)。図 3a は Pt/BiGa:LuIG 試料における室温下での SSE の磁場依存性の結果であり、通常の SSE のバックグラウンド信号に加えて、0.4 T 付近にピーク構造が確認される。ピークが観測された磁場値は、従来の YIG のピーク磁場値 2.6 T に比べて極めて低磁場であり、且つピーク強度自体も YIG に比べて 700% も大きいことが確かめられた (図 3b)。

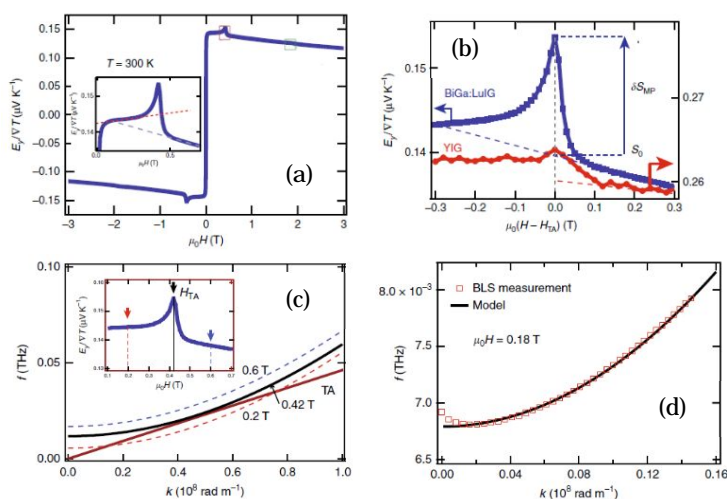


図 3: (a) Pt/BiGa:LuIG における SSE の結果 (b) YIG のピークとの比較 (c,d) マグノン-フォノン分散関係 (DOI: 10.1038/s41467-019-13121-5 より抜粋)。

この結果をより詳細に調べるために、BiGa:LuIG のマグノンの分散と寿命を Brillouin 散乱 (BLS) 法により定めた (BLS は、中性子散乱が苦手とする、波数~0 付近のマグノンの分散関係及び寿命を測定する上で極めて強力なツールであり、また薄膜試料の測定にも適用可能であるという利点を有する)。まず初めに、BiGa:LuIG のマグノンの分散を測定したところ、その交換ステイフネス係数は、従来の YIG に比べて実効的に増大していることが判明した (図 3d)。得られたマグノン分散と、ポンププローブ法によって定めたフォノン分散 (音速) から両者のブランチが接する磁場値を計算したところ約 0.4 T となり、実験結果のピーク磁場値と良く整合することが確かめられた。次いで時間分解 BLS により BiGa:LuIG 試料のマグノンの寿命を測定したところ、~12.6 nsec と評価された。この結果は YIG におけるマグノンの寿命 ~50-75 nsec と比べると有意に短くなっていると言える。この低寿命化したマグノンが長寿命なフォノンと混成することで、スピン流の寿命増大効果が YIG の場合に比べて顕著となり、結果として大きなピーク構造が生じる。以上の観点から BiGa:LuIG で観測された、低磁場且つ室温環境下での巨大なマグノン-フォノン混成ピークのメカニズムを理解することができた。本成果は Nature Communications 誌に掲載された [R. Ramos, T. Hioki, Y. Hashimoto, T. Kikkawa *et al.*, Nat. Commun. **10**, 5162 (2019).]。さらに、SSE の逆効果であるスピネルチェ効果 (SPE) も本試料構造において実証することに成功した。これにより、マグノン-フォノン混成を介したスピン流による加熱・冷却原理が実証されただけでなく、SPE の観点からも、マグノン分散関係と熱スピン流現象の解明に向けた進展が得られた。本成果は Physical Review B 誌に掲載された [R. Yahiro, T. Kikkawa *et al.*, Phys. Rev. B **101**, 024407 (2020).]。

(4) 異方性マグノン分散をもつ CrSiTe<sub>3</sub> 及び CrGeTe<sub>3</sub> におけるスピンゼーベック効果

CrSiTe<sub>3</sub> 及び CrGeTe<sub>3</sub> は層状物質であり、層間がファンデルワールス力によって弱く結合している (図 4a)。これにより、面内・面間のスピン相関に強い異方性が生じ、面間の Cr<sup>3+</sup> イオン間のスピン-交換結合は、面内のそれに比べ比較的小さい値を持つ。この性質によって、面間方向のスピン相関はキュリー温度 (CrSiTe<sub>3</sub>:  $T_c \sim 31$  K, CrGeTe<sub>3</sub>:  $T_c \sim 65$  K) 直上で消失するにも関わらず、面内方向では室温下でも残ることが中性子の実験から指摘されている [T. J. Williams *et al.*, Phys. Rev. B **92**, 144404 (2015)]. このように面内方向と面間方向 (スピン流の伝搬方向) とで異方的なマグノン分散をもつ物質において、SSE の信号特性を実験的に調べた。その結果、両試料系ともに、信号がキュリー点付近では有意となる一方、室温では消失することが明らかとなった (図 4cd)。キュリー温度以下では、面内・面直方向に強磁性秩序が発達しており、これまでと同様の 3 次元強磁性体の SSE の観点から解釈できる。一方で、面直のスピン相関が抑制されるキュリー温度以上で信号が消失したということは、SSE の発現には Pt 膜直下 (界面) の CrSiTe<sub>3</sub>, CrGeTe<sub>3</sub> レイヤーのスピン相関だけではなく、面間 (すなわちスピン流の伝搬方向) のスピン相関が重要であることを示唆している。本成果は、これまで静的な磁性の研究がメインであった CrSiTe<sub>3</sub> 及び CrGeTe<sub>3</sub> という擬二次元強磁性体を初めてスピン流物理に組み込んだものとしても意義深く、Physical Review B 誌の Rapid Communications セクションに掲載された [N. Ito, T. Kikkawa *et al.*, Phys. Rev. B **100**, 060402(R) (2019)].

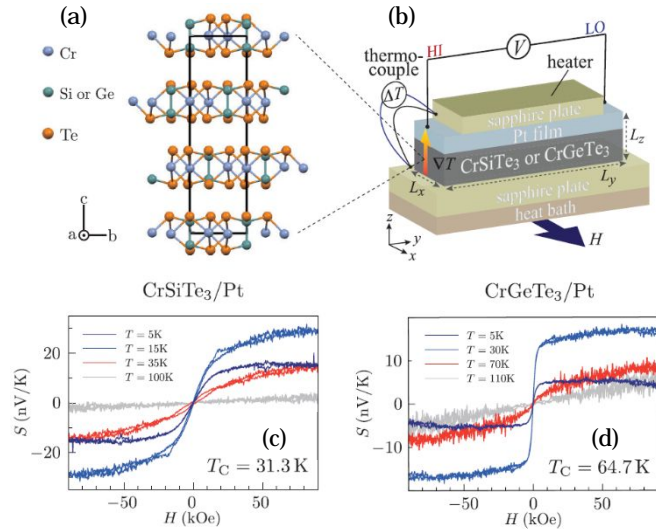


図 4: (a)CrSiTe<sub>3</sub>, CrGeTe<sub>3</sub> の模式図、(b)SSE 実験配置及び (c,d)実験結果 (DOI: 10.1103/PhysRevB.100.060402 より抜粋)

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計13件（うち査読付論文 13件／うち国際共著 9件／うちオープンアクセス 4件）

1. 著者名 Ito Naohiro, Kikkawa Takashi, Barker Joseph, Hirobe Daichi, Shiomi Yuki, Saitoh Eiji	4. 巻 100
2. 論文標題 Spin Seebeck effect in the layered ferromagnetic insulators CrSiTe <sub>3</sub> and CrGeTe <sub>3</sub>	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Physical Review B	6. 最初と最後の頁 060402 ~ 060402
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevB.100.060402	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 Kikkawa T., Suzuki M., Ramos R., Aguirre M. H., Okabayashi J., Uchida K., Lucas I., Anadon A., Kikuchi D., Algarabel P. A., Morellon L., Ibarra M. R., Saitoh E.	4. 巻 126
2. 論文標題 Interfacial ferromagnetism and atomic structures in high-temperature grown Fe <sub>304</sub> /Pt/Fe <sub>304</sub> epitaxial trilayers	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Journal of Applied Physics	6. 最初と最後の頁 143903 ~ 143903
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1063/1.5125761	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, Cornelissen Ludo J., Shan Juan, Daimon Shunsuke, Kikkawa Takashi, Bauer Gerrit E. W., van Wees Bart J., Saitoh Eiji	4. 巻 10
2. 論文標題 Spin transport in insulators without exchange stiffness	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Nature Communications	6. 最初と最後の頁 4740 ~ 4740
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1038/s41467-019-12749-7	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 Ramos R., Hioki T., Hashimoto Y., Kikkawa T., Frey P., Kreil A. J. E., Vasyuchka V. I., Serga A. A., Hillebrands B., Saitoh E.	4. 巻 10
2. 論文標題 Room temperature and low-field resonant enhancement of spin Seebeck effect in partially compensated magnets	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Nature Communications	6. 最初と最後の頁 5162 ~ 5162
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1038/s41467-019-13121-5	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 Oyanagi Koichi, Kikkawa Takashi, Saitoh Eiji	4. 巻 10
2. 論文標題 Magnetic field dependence of the nonlocal spin Seebeck effect in Pt/YIG/Pt systems at low temperatures	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 AIP Advances	6. 最初と最後の頁 015031 ~ 015031
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1063/1.5135944	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 Yahiro Reimei, Kikkawa Takashi, Ramos Rafael, Oyanagi Koichi, Hioki Tomosato, Daimon Shunsuke, Saitoh Eiji	4. 巻 101
2. 論文標題 Magnon polarons in the spin Peltier effect	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Physical Review B	6. 最初と最後の頁 024407 ~ 024407
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevB.101.024407	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 Kobata Masaaki, Yoshii Kenji, Fukuda Tatsuo, Kawasaki Ikuto, Okane Tetsuo, Yamagami Hiroshi, Yaita Tsuyoshi, Harii Kazuya, Ieda Jun'ichi, Okayasu Satoru, Hioki Tomosato, Kikkawa Takashi, Saitoh Eiji	4. 巻 30
2. 論文標題 Hard X-ray Photoelectron Spectroscopy Study of Pt/Y3Fe5O12	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 JPS Conference Proceeding	6. 最初と最後の頁 011192 ~ 011192
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.7566/JPSCP.30.011192	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 Wang Hua, Hou Dazhi, Kikkawa Takashi, Ramos Rafael, Shen Ka, Qiu Zhiyong, Chen Yao, Umeda Maki, Shiomi Yuki, Jin Xiaofeng, Saitoh Eiji	4. 巻 112
2. 論文標題 The bimodal distribution spin Seebeck effect enhancement in epitaxial Ni <sub>0.65</sub> Zn <sub>0.35</sub> Al <sub>0.8</sub> Fe <sub>1.204</sub> thin film	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Applied Physics Letters	6. 最初と最後の頁 142406 ~ 142406
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1063/1.5022195	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 Umeda Maki, Shiomi Yuki, Kikkawa Takashi, Niizeki Tomohiko, Lustikova Jana, Takahashi Saburo, Saitoh Eiji	4. 巻 112
2. 論文標題 Spin-current coherence peak in superconductor/magnet junctions	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Applied Physics Letters	6. 最初と最後の頁 232601 ~ 232601
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1063/1.5027456	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 Nozue Tatsuhiko, Kikkawa Takashi, Watamura Tomoki, Niizeki Tomohiko, Ramos Rafael, Saitoh Eiji, Murakami Hirohiko	4. 巻 113
2. 論文標題 Fabrication of yttrium-iron-garnet/Pt multilayers for the longitudinal spin Seebeck effect	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Applied Physics Letters	6. 最初と最後の頁 262402 ~ 262402
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1063/1.5046977	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 Yoon Yo-Seop, Lee Won-Yong, Park No-Won, Kim Gil-Sung, Ramos Rafael, Takashi Kikkawa, Saitoh Eiji, Koo Sang-Mo, Park Jin-Seong, Lee Sang-Kwon	4. 巻 7
2. 論文標題 Cross-plane thermoelectric Seebeck coefficients in nanoscale Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> /ZnO superlattice films	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Journal of Materials Chemistry C	6. 最初と最後の頁 1670 ~ 1680
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1039/C8TC05114C	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 R. Ramos, T. Kikkawa, A. Anadon, I. Lucas, T. Niizeki, K. Uchida, P. A. Algarabel, L. Morellon, M. H. Aguirre, M. R. Ibarra, and E. Saitoh,	4. 巻 114
2. 論文標題 Interface-induced anomalous Nernst effect in Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub> /Pt-based heterostructures	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Applied Physics Letters	6. 最初と最後の頁 113902 ~ 113902
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1063/1.5063553	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 Sola Alessandro, Basso Vittorio, Kuepferling Michaela, Pasquale Massimo, ne Meier Daniel Carsten, Reiss Gunter, Kuschel Timo, Kikkawa Takashi, Uchida Ken-ichi, Saitoh Eiji, Jin Hyungyu, Watzman Sarah J., Boona Steve, Heremans Joseph, Jungfleisch Matthias B., Zhang Wei, Pearson John E., Hoffmann Axel, Schumacher Hans W.	4. 巻 -
2. 論文標題 Spin caloritronic Measurements: A Round Robin Comparison of the Longitudinal Spin Seebeck Effect	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement	6. 最初と最後の頁 1~9
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/TIM.2018.2882930	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

〔学会発表〕 計7件 (うち招待講演 7件/うち国際学会 4件)

1. 発表者名 吉川貴史
2. 発表標題 マグノン-フォノン結合誘起スピントロニクス・スピンバルチエ効果
3. 学会等名 Mini Workshop on "Cross correlation dynamics under a strain field" (招待講演)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 吉川貴史
2. 発表標題 磁性絶縁体Y3Fe5O12におけるマグノン-フォノン混成誘起スピントロニクス効果
3. 学会等名 J-PARCとJRR-3の相補利用による偏極中性子科学の新展開 (招待講演)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 T. Kikkawa and E. Saitoh
2. 発表標題 Spin Seebeck/Peltier effects induced by magnon-phonon hybridization
3. 学会等名 New Perspective in Spin Conversion Science (NPSCS2020) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 T. Kikkawa
2. 発表標題 Hybridized magnon-phonon excitation in spin Seebeck effect in magnetic garnets
3. 学会等名 Spin Cavitronics with photons and phonons (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 吉川貴史
2. 発表標題 マグノン-フォノン混成誘起スピンゼーベック効果
3. 学会等名 735th ASRC Seminar (基礎科学セミナー) (招待講演)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 T. Kikkawa
2. 発表標題 Spin Seebeck effect induced by magnon polarons
3. 学会等名 53rd REIMEI International Workshop "New Excitations in Spintronics 2019" (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 T. Kikkawa
2. 発表標題 Spin Seebeck effect induced by magnon-phonon coupling
3. 学会等名 The 2nd Symposium for World Leading Research Centers -Materials Science and Spintronics- (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019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
研究協力者	南部 雄亮 (Nambu Yusuke) (60579803)	東北大学・金属材料研究所・准教授  (11301)	
研究協力者	バーカー ジョセフ (Barker Joseph) (10746910)	東北大学・金属材料研究所・助教  (11301)	