

令和 6 年 6 月 27 日現在

機関番号：13901

研究種目：国際共同研究加速基金（国際共同研究強化(A））

研究期間：2019～2023

課題番号：18KK0377

研究課題名（和文）スピнкаロリトロニクスを基軸とした高効率テラヘルツ波発生機能の開拓

研究課題名（英文）Efficient terahertz emission based on spin caloritronics

研究代表者

水口 将輝（Mizuguchi, Masaki）

名古屋大学・未来材料・システム研究所・教授

研究者番号：50397759

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 12,000,000円

渡航期間： 1ヶ月

研究成果の概要（和文）：本研究の目的は、超短パルスレーザーを用いたスピンドYNAMIKSの研究手法を取り入れることにより、全く新しい物理概念に基づいたスピнкаロリトロニクス現象を創出することである。FePt薄膜にパルスレーザーを照射し、異常ネルンスト効果の時間分解測定を行った結果、高速な異常ネルンスト効果を観測することに成功した。また、Pt / FePt 二層薄膜にパルスレーザーを照射することにより、テラヘルツ波の放射を観測し、複数の物理メカニズムがテラヘルツ波の放射に寄与していることを明らかにした。これらの成果により、スピнкаロリトロニクスを基軸とした高効率なテラヘルツ発振現象の実現の可能性が示唆された。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究では、磁性薄膜にパルスレーザーを照射することにより、テラヘルツ波の放射を観測し、複数の物理メカニズムがテラヘルツ波の放射に寄与していることを明らかにした。そのため、熱流とテラヘルツ領域の電磁波の相関に係る包括的な物理の解明・学理の構築が図られ、学術的意義があった。また、本研究で得られた成果を応用することにより、医療分野における可視化技術や非破壊検査、あるいは近距離通信などへの応用展開が実現されることが見込まれる。そのため、新たなデバイス創成へのパラダイムを拓くことにより、市場規模の大きな分野へのインパクトを与えることが見込まれ、社会的意義も大きいと考えられる。

研究成果の概要（英文）：The purpose of this study is to create spin caloritronics phenomena based on completely new physical concepts by incorporating an ultrashort laser pulse method to study spin dynamics. Time-resolved measurements of the anomalous Nernst effect were carried out by irradiating the FePt thin film with laser pulse, and the fast anomalous Nernst effect was successfully observed. In addition, terahertz emission was observed by irradiating a Pt / FePt bilayer thin film with laser pulse, and it was clarified that multiple physical mechanisms contribute to the terahertz emission. These results suggest the possibility of realising highly efficient terahertz oscillation phenomena based on spin caloritronics.

研究分野：磁性材料、スピントロニクス

キーワード：スピнкаロリトロニクス

様式 F-19-2

1. 研究開始当初の背景

成熟期に入ったスピントロニクス的发展分野の一つとして、電流・スピン流と熱流との相関を取り扱う「スピнкаロリトロニクス」とよばれる新しい研究が注目を集めている。スピンの自由度を取り入れることによる、新しい熱電素子や冷却素子などの新機能の発現が期待されている。我々はこれまでに、このスピнкаロリトロニクスを基盤とし、固体金属やイオン液体において、巨大熱電効果・巨大冷却効果・熱励起高周波発振などの革新的な熱磁気機能を創出することを目的として研究を進めてきた。特に、熱磁気効果の一つである異常ネルンスト効果という効果について、この効果を増大するいくつかの物理現象や構造制御の手法を明らかにすることができた。異常ネルンスト効果は、強磁性物質に温度勾配を付与して熱流を流し、熱流と垂直方向に磁場を印加した場合に、熱流と磁場の双方に垂直な方向に電圧が生じる現象であり、最近その熱電素子への応用展開が大きな注目を集めている。その背景には、ネルンスト効果の熱流の方向と電圧を取り出す方向が互いに垂直であるため、熱流によるエネルギー損失が無く、ゼーベック効果などと比較して、素子設計の自由度が飛躍的に高いという利点がある。

このように、異常ネルンスト効果は、エネルギーハーベスティングなどの環境発電の技術要素としての応用だけでなく、基礎物理学的な研究対象としても注目されており、その研究の展開は世界的にも大きな拡がりを見せているが、その発生に係る微視的な起源の解明はほとんどなされていない。また、温度勾配によるテラヘルツ波の発生現象などの興味深い物理現象との関連性も明らかになっていない。

2. 研究の目的

上記の背景に基づき、本研究では、海外共同研究者である **Kampfrath** のグループにおいて精力的に進められている、超短パルスレーザーを用いたスピндаイナミクスの研究手法を取り入れることにより、異常ネルンスト効果に立脚した高効率テラヘルツ波の発生機能の開拓を目指す。ミリ波と遠赤外線の中間の帯域を指すテラヘルツ波は、電磁波における最後の未踏領域と位置づけられており、医療分野における可視化技術や非破壊検査、あるいは近距離通信への応用など、その市場規模も拡大の一途を辿っている。**Kampfrath** のグループでは、強磁性体金属にフェムト秒オーダーの短パルス光を照射することにより、スピン流（伝導電子スピンの角運動量の流れ）を発生させ、これを伝導電子に変換することによりテラヘルツ波を発生することに成功している。本研究では、この新規手法とこれまで研究代表者が培ってきた異常ネルンスト効果の物理に関する知見や実験技術を有機的に組み合わせることにより、全く新しい物理概念に基づいたスピнкаロリトロニクス現象の創出を試みる。強磁性金属に対してフェムト秒レーザーを照射することにより、高速な熱勾配を局所的に生じさせる。これにより、超高速な異常ネルンスト電圧信号が得られることが期待される。また、異常ネルンスト効果に誘起されたテラヘルツ波が発生する可能性も高いと予想される。以上のように、本研究では国際共同研究を進めることにより、スピнкаロリトロニクス分野におけるさらなる物理の解明を図り、革新的な機能創出と応用展開を実現することを目指す。

3. 研究の方法

(1) L1₀型 FePt 薄膜試料の作製

MgO(001)基板上に膜厚 30 nm あるいは 50 nm の FePt 合金薄膜を、スパッタリング法を用いて様々な成膜温度で成膜した。薄膜の原子組成は Fe:Pt = 43:57 であった。Pt/L1₀型 FePt 二層薄膜についても、同じくスパッタリング法により作製した。

(2) 異常ネルンスト効果の測定

試料を長方形 (3×6 mm) に切断して物理特性測定システム (PPMS) に装填し、試料の片面を加熱することにより長方形の長辺に沿って温度勾配を付与した。試料に垂直な方向に磁場を印加し、短辺方向に誘起される電圧をネルンスト電圧として測定した。また、短パルスレーザーを試料に照射することにより温度勾配を付与する方法でも測定を行った。

(3) レーザー励起テラヘルツ波の測定

400 Oe の外部磁場を薄膜面内方向に印加した。試料の薄膜表面あるいは基板表面からフェムト秒レーザーパルスを照射し、放射されるテラヘルツ波を室温において測定した。測定は、海外共同研究者であるベルリン自由大学の **Kampfrath** 研究室において行った。

4. 研究成果

(1) L1₀型 FePt 薄膜における異常ネルンスト効果の特性評価

異常ネルンスト効果を用いた高速熱電変換およびテラヘルツ波の発生の実現に向け、本研究で用いる L1₀型 FePt 規則合金強磁性薄膜における異常ネルンスト効果を、静温度勾配下で調べた。磁気異方性が異なる 3 種類の L1₀型 FePt 薄膜 (膜厚 30 nm) を作製し、その異常ネルンスト効果の温度依存性を調べた。図 1 に異常ネルンスト係数の温度依存性を示す。100 K 以下のスピン波が励起しない温度領域では異常ネルンスト係数の値は小さく、試料による差は見られな

った。一方、100 K 以上の温度領域では、スピン波励起に起因する異常ネルンスト係数の増幅効果が確認された。また、その増幅率は磁気異方性の大きさが小さいほど高くなることが分かった。この起源を解明するため、放射光を用いた硬 X 線光電子分光の測定を行い、L1₀ 型 FePt の電子状態を明らかにした。硬 X 線光電子分光により L1₀ 型 FePt 薄膜の価電子帯スペクトルを測定し、L1₀ 規則度の高い FePt 薄膜と不規則 FePt 薄膜についての比較を行った。その結果、価電子帯スペクトルの形状に明確な差異が見られた。この差異は、Fe 2*p* 内殻スペクトルでも確認することができることから、Fe 原子の周囲の原子配位が規則度により異なり、電子状態にも差が出ていることが推測される。両者の間には、磁気異方性にも大きな差があることから、この電子状態の変化に起因して磁気異方性が変化し、スピン波の励起状態に差が生じていることが分かった。また、熱磁気効果の増幅効果の実験結果と理論計算の詳細な比較検討も行った。実験的に確認されていた強磁性金属材料における異常ネルンスト効果の増大現象について、温度勾配が誘起するスピン波スピン流がネルンスト電圧に変換される過程を理論的に明らかにした。実験と同じ条件下で温度差を付与した場合のネルンスト電圧の計算を行った結果、特定の温度以上で異常ネルンスト効果の強度が大きくなることが分かり、実験結果を説明することに成功した。また、図 2 に示すように、磁気異方性の大きさが異なる材料についても同様な計算を行った結果、磁気異方性の小さい材料の方が、スピン波スピン流によるネルンスト電圧の増大効果が大きいことが分かった。この傾向も実験結果に一致しており、この効果に係る物理現象を明らかにすることができた。さらに、スピン波スピン流 (純スピン流) による異常ネルンスト効果の増幅効果を解明するため、温度勾配が誘起するスピン波スピン流がネルンスト電圧に変換される過程を理論的に明らかにした。FePt 中のマグノンの分散関係について、Fe と Pt の多原子層構造を用いた詳細な計算を行った。完全な規則構造 (Fe 8 層/Pt 8 層) における Fe 層および Pt 層それぞれのマグノン分散関係を計算した結果、Fe 層の分散関係は、2 次元正方格子の分散形を示した。それに対して Pt 層の分散関係は、Fe 層のマグノンバンドと混成しているために複雑な形をとった。特に 5 THz 付近でバンド交差が起こっており、それにより非常に大きな状態密度を生成していることが分かった。この大きな状態密度が、実験で観測された 100 K (2 THz) 付近からの異常ネルンスト効果の増大を説明できる可能性が高い。また、このスピン波の効果が FePt 特有の効果であることを示すため、Fe 単結晶でのマグノン状態密度の計算を行った。Fe のみの結晶の場合、Pt の磁気モーメント由来のマグノンは存在しないため、高温における低周波数マグノンの増大は見られなかった。そのため、この効果は Pt が規則配列した構造に由来して起きることが確認された。さらに、FePt の結晶不規則度を増大することで、Fe 層および Pt 層のそれぞれの層間でのマグノン状態密度の違いは小さくなること分かった。

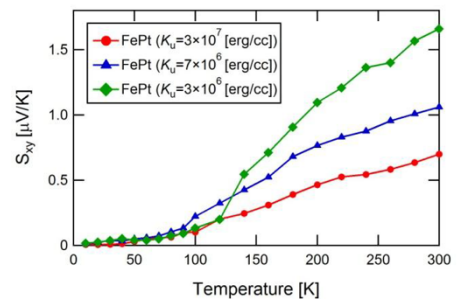


図 1: 磁気異方性が異なる L1₀ 型 FePt 薄膜の異常ネルンスト係数の温度依存性。

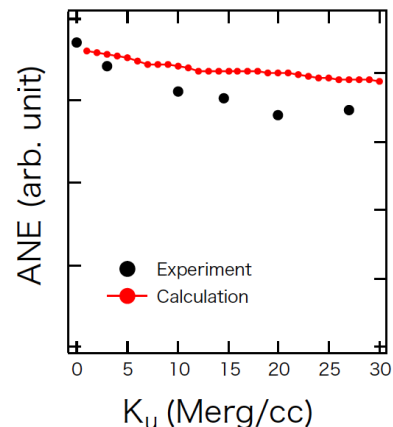


図 2: 磁気異方性の異なる L1₀ 型 FePt 薄膜におけるスピン波スピン流誘起の異常ネルンスト効果の計算と実験結果の比較。

(2) L1₀ 型 FePt 薄膜の異常ネルンスト効果の時間分解測定

異常ネルンスト効果を用いた高速熱電変換およびテラヘルツ波の発生の実現に向け、本効果の高速ダイナミクスを調べるのが肝要となる。そこで、パルスレーザーを用いて、L1₀ 型 FePt 薄膜の時間分解ネルンスト効果 (Time-resolved Nernst effect; TR-NE) の測定を行った。様々な磁気異方性エネルギー (K_u) を有する膜厚 50 nm の L1₀ 型 FePt 薄膜を作製し、それらの TR-NE を室温で GHz 帯域のオシロスコープにより測定した。中央波長 800 nm の Ti:Sapphire レーザーを光源とし、パルス幅 120 fs のレーザーパルスを繰り返し周波数 1 kHz で照射した。光源から発振されたレーザー光は、ポンプ光とプローブ光に分割され、それぞれ光学パスを通過して試料に入射した。光は、光チョッパーを介して 800 Hz に変調した。薄膜面内方向に 15

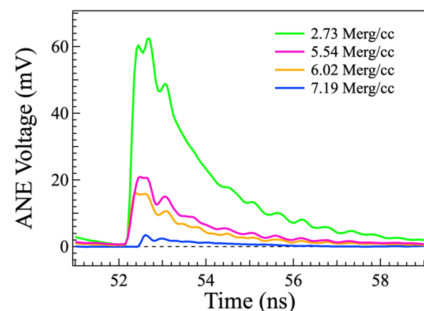


図 3: FePt 薄膜における時間分解ネルンスト電圧の磁気異方性依存性。

kOe の磁場を印加した。図 3 に、測定した TR-NE シグナルの時間分解測定結果を示す。いずれの K_u の試料についても、パルス照射によるネルンスト電圧の急峻な立ち上がりが確認された。その後、振動を伴いながらネルンスト電圧は減衰していくことが分かった。振動の要因は分かっていないが、レーザーパルスの照射の瞬間に FePt 表面の温度が上昇し、急速に熱勾配が付与されることにより、ネルンスト電圧が上昇したことが分かった。観測された電圧は 60 mV と非常に大きな値となった。また、FePt の K_u が小さいほど、ネルンスト電圧が大きくなることが分かった。(1)項で示した静温度勾配下における異常ネルンスト効果についてもこれと同じ振る舞いが観測されており、スピン波がネルンスト効果に寄与している可能性が示唆された。

(3) Pt/L1₀型 FePt 二層薄膜における異常ネルンスト効果誘起テラヘルツ波の測定

異常ネルンスト効果を用いた高速熱電変換およびテラヘルツ波の発生の実現に向け、Pt (5 nm) / L1₀型 FePt (50 nm) / MgO(001)基板の構造をもつ二層薄膜を作製し、試料にフェムト秒レーザーパルスを照射した状態で放射されるテラヘルツ波を室温で測定した。図 4 (a)にフェムト秒レーザーを基板表面側および Pt 薄膜表面側のそれぞれから垂直に入射した際に測定されたテラヘルツ波シグナルを示す。どちらの表面からレーザーを照射した場合も、明確なテラヘルツ信号を観測することができた。また、入射方向に依存して異なるシグナルが取得された。これは、テラヘルツ波の発生過程に複数のプロセスが寄与している可能性を示唆している。そこで、Pt 薄膜表面側から入射した際のシグナルを対称成分および非対称成分に分離して、解析を行った (図 4 (b))。その結果、対称成分にはレーザーによる熱勾配により誘起された異常ネルンスト効果による成分と、超高速減磁過程による成分の双方が寄与していることが明らかになった。また、非対称成分については、Pt 層内に誘起された逆スピンホール効果が寄与していると考えられることが分かった。この結果から、スピнкаロリトロニクスを基軸とした高効率なテラヘルツ発振現象の実現の可能性が示唆された。

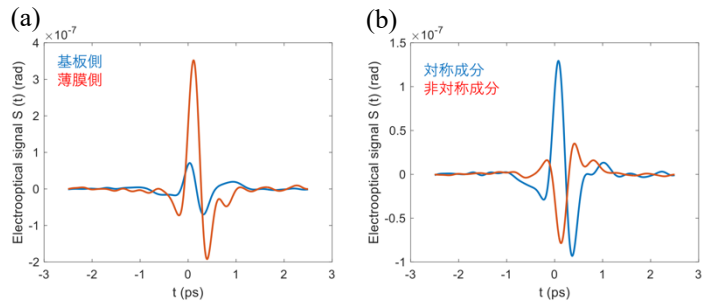


図 4: L1₀型 FePt/Pt 二層薄膜からのテラヘルツ波シグナル。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計8件（うち査読付論文 8件/うち国際共著 1件/うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 水口将輝	4. 巻 696
2. 論文標題 異常ネルンスト効果による熱電変換現象	5. 発行年 2024年
3. 雑誌名 固体物理	6. 最初と最後の頁 55～65
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	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 Sharma Himanshu, Wen Zhenchao, Mizuguchi Masaki	4. 巻 13
2. 論文標題 Spin Seebeck effect mediated reversal of vortex-Nernst effect in superconductor-ferromagnet bilayers	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Scientific Reports	6. 最初と最後の頁 4425-1～8
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1038/s41598-023-31420-2	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 Ito Keita, Wang Jian, Shimada Yusuke, Sharma Himanshu, Mizuguchi Masaki, Takanashi Koki	4. 巻 132
2. 論文標題 Enhancement of the anomalous Nernst effect in epitaxial Fe4N films grown on SrTiO3(001) substrates with oxygen deficient layers	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Journal of Applied Physics	6. 最初と最後の頁 133904-1～8
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1063/5.0102928	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 Kitaura Reona, Ishibe Takafumi, Sharma Himanshu, Mizuguchi Masaki, Nakamura Yoshiaki	4. 巻 14
2. 論文標題 Nanostructure design for high performance thermoelectric materials based on anomalous Nernst effect using metal/semiconductor multilayer	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Applied Physics Express	6. 最初と最後の頁 075002～075002
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.35848/1882-0786/ac05db	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 Mizuguchi Masaki	4. 巻 60
2. 論文標題 New Developments in Thermoelectric Materials Based on the Thermomagnetic Effects	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Materia Japan	6. 最初と最後の頁 558 ~ 561
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.2320/materia.60.558	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 水口 将輝	4. 巻 16
2. 論文標題 ナノスケール磁性薄膜における異常ネルンスト効果	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 まぐね	6. 最初と最後の頁 285 ~ 290
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	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 Sheng P., Fujita T., Mizuguchi M.	4. 巻 116
2. 論文標題 Anomalous Nernst effect in Cox(MgO)1-x granular thin films	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Applied Physics Letters	6. 最初と最後の頁 142403 ~ 142403
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1063/1.5140461	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 Kubota Yuya, Motoyama Hiroto, Yamaguchi Gota, Egawa Satoru, Takeo Yoko, Mizuguchi Masaki, Sharma Himanshu, Owada Shigeki, Tono Kensuke, Mimura Hidekazu, Matsuda Iwao, Yabashi Makina	4. 巻 117
2. 論文標題 Scanning magneto-optical Kerr effect (MOKE) measurement with element-selectivity by using a soft x-ray free-electron laser and an ellipsoidal mirror	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Applied Physics Letters	6. 最初と最後の頁 042405 ~ 042405
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1063/5.0012348	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20件（うち招待講演 11件 / うち国際学会 7件）

1. 発表者名 Masaki Mizuguchi
2. 発表標題 Anomalous Nernst effect in Ferromagnetic Nano-structures
3. 学会等名 韓国冬期磁気学会(KMS) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 水口将輝
2. 発表標題 磁性ナノ構造における熱電効果
3. 学会等名 光・熱・電気と磁気の相互作用の活用技術調査専門委員会研究会 (招待講演)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 水口将輝
2. 発表標題 異常ネルンスト効果の基礎
3. 学会等名 第244回研究会 / 第7回磁気センサ専門研究会 (招待講演)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 水口将輝
2. 発表標題 Thermoelectric power generation by magnetic nano-structures
3. 学会等名 物性研短期研究会 (招待講演)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Masaki Mizuguchi
2. 発表標題 Anomalous Nernst effect in nanostructured materials
3. 学会等名 Iwate Spintronics School (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 Masaki Mizuguchi
2. 発表標題 Energy Conversion Materials with Magnetic Nano-structures
3. 学会等名 International Conference on Functional Materials Science 2022 (ICFMS 2022) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 M. Mizuguchi, R. Kitaura, H. Sharma, T. Ishibe, Y. Nakamura
2. 発表標題 Anomalous Nernst effect in semiconductor / ferromagnetic metal multilayer
3. 学会等名 The 67th Annual Conference on Magnetism and Magnetic Materials (MMM 2022) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Takuya Tsujimoto, Toshio Miyamachi, Masaki Mizuguchi
2. 発表標題 Spin caloritronic Effect in Co-Ge Granular Thin Films
3. 学会等名 The 22nd International Vacuum Congress (IVC-22) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Takuya Tsujimoto, Takeshi Fujita, Toshio Miyamachi, Masaki Mizuguchi
2. 発表標題 Large anomalous Nernst effect s in Ge doped Co thin films
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 福田豊輝, 宮町俊生, 水口将輝
2. 発表標題 Co/Au/Fe交換結合多層膜における異常ネルンスト効果
3. 学会等名 IEEE Magnetism Society 名古屋支部 若手研究会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 水口将輝
2. 発表標題 Thermoelectric Conversion in Nanostructured Magnetic Materials
3. 学会等名 2022 年度 ナノ構造・物性 - ナノ機能・応用部会 合同シンポジウム (招待講演)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 高橋侑暉, 宮町俊生, 水口将輝
2. 発表標題 ネルンスト素子における熱電変換現象の実証
3. 学会等名 第59回日本伝熱シンポジウム
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 池田優, 宮町俊生, 水口将輝
2. 発表標題 スピン波伝搬による熱輸送現象の観測
3. 学会等名 第59回日本伝熱シンポジウム
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Masaki Mizuguchi
2. 発表標題 Thermoelectric Generation in Nanostructured Magnetic Materials
3. 学会等名 International Conference on Materials and Systems for Sustainability 2021 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Hiroyuki Fukuda, Toshio Miyamachi, Masaki Mizuguchi
2. 発表標題 Anomalous Nernst effect in Co/Au/Fe trilayer thin films
3. 学会等名 第71回応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Takuya Tsujimoto, Toshio Miyamachi, Masaki Mizuguchi
2. 発表標題 Anomalous Nernst and Hall effect in Ge doped Co thin films
3. 学会等名 第71回応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 M. Mizuguchi
2. 発表標題 Nanostructured magnetic materials for thermoelectric generation
3. 学会等名 The 4th Symposium for The Core Research Cluster for Materials Science and the 3rd Symposium on International Joint Graduate Program in Materials Science (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 水口将輝
2. 発表標題 異常ネルンスト効果におけるスピン流
3. 学会等名 大阪大学大学院基礎工学研究科附属スピントロニクス学術連携研究教育センター 熱-スピン流・スピン波研究会 (招待講演)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 H. Sharma, Z. Wen, K. Takanashi, M. Mizuguchi
2. 発表標題 Thickness dependent Nernst effect for superconducting NbN thin films
3. 学会等名 第67回 応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 水口将輝
2. 発表標題 ナノ構造における異常ネルンスト効果の物理と応用の新展開
3. 学会等名 IEEE Magnetics Society 名古屋支部 若手研究会 (招待講演) (招待講演)
4. 発表年 2021年

〔図書〕 計1件

1. 著者名 Masaki Mizuguchi	4. 発行年 2021年
2. 出版社 Elsevier	5. 総ページ数 812
3. 書名 Nanomagnetic Materials - Fabrication, Characterization and Application, Micro & Nano Technologies Series	

〔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
トビアス カンプラス (Tobias Kampfrath)	ベルリン自由大学・理学部・教授	

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			
ドイツ	ベルリン自由大学			
ベルギー	Interuniversity Microelectronics Centre			