

科学研究費助成事業（基盤研究（S））公表用資料
〔令和5（2023）年度 中間評価用〕

令和5年3月31日現在

研究期間：2021～2025
課題番号：21H05016
研究課題名：ナノ超構造がもたらす熱・スピン機能変革
研究代表者氏名（ローマ字）：水口 将輝（MIZUGUCHI Masaki）
所属研究機関・部局・職：名古屋大学・未来材料・システム研究所・教授
研究者番号：50397759

研究の概要：

熱とスピンの相関を扱う「スピントロニクス」とよばれる新しい研究分野が注目を集めているが、熱とスピンの相関機能のベースとなるさまざまな熱磁気現象をどのように制御するのかという指導原理は確立されていない。本研究は、ナノメートルサイズの磁性超構造を作製し、熱とスピンの相関現象に関連する革新的な物理を解明し、その機能を極限まで引き出すことを目的とする研究である。

研究分野：

キーワード：スピントロニクス、熱磁気効果

1．研究開始当初の背景

熱とスピンの相関を扱う「スピントロニクス」とよばれる新しい研究分野が注目を集めている。この研究は、スピン角運動量の流れとして定義される「スピン流」と熱の相互作用を扱うものであり、興味深い物理が豊富にあるのに加え、スピンの概念を取り入れることによる新しい熱電変換素子や冷却素子などへの応用展開が期待されている。しかしながら、熱とスピンの相関機能のベースとなるさまざまな熱磁気現象をどのように制御し、その効果を最大化するのか、という根本的な問いに対する指導原理は確立されていない。

2．研究の目的

研究代表者らは、規則合金材料を中心として磁化や磁気異方性、スピン流と熱磁気現象の關係に着目し、そのミクロな物理現象を探求する研究を行ってきた。その結果、熱磁気効果の一つである異常ネルンスト効果が、ゼーベック効果のような既存の熱電変換現象に対して高い優位性を示すため、熱電変換素子への応用の可能性があることを見いだした。本研究では、ナノメートルサイズの磁性超構造を作製し、熱とスピンの相関現象に関連する革新的な物理を解明し、その機能を極限まで引き出すことを目的とする。

3．研究の方法

本研究では、「どのような磁気構造や物理パラメータが異常ネルンスト効果のような熱磁気効果の特性を決定づけ、さらにそれを制御し最大化する本質的な要因になるのか？」という核心的な問いに対する回答を目指す。研究対象として、超薄層や多層構造、ポーラス（多孔質）構造、ナノドット構造、グラニューラー構造などに代表されるナノ超構造を基軸に据えてそれらを創製し、その熱磁気効果とさまざまな物理パラメータとの關係を探求する。これらを通して、熱磁気効果の制御と最大化のための指導原理を確立する。

そのために、以下の研究実施項目を設定し、遂行する。

(1) 磁性ナノ超構造のデザインと創製

多層膜構造、ポーラス構造、ナノドット構造、グラニューラー構造などについてマテリアルデザインを行い、結晶性、スケール、界面構造などを精緻に制御した強磁性ナノ超構造薄膜を作製する。

(2) 磁性ナノ超構造の結晶/磁気構造および熱・スピン機能の解明

(1)で作製した磁性ナノ超構造について、結晶性や原子構造、磁気構造を高分解能計測により詳細に解明する。並行して、熱磁気効果の測定を行い、構造に応じた熱・スピン相関機能特性を解明する。

(3) 磁性ナノ超構造の熱・スピン機能の高機能化/多機能化

(1)で創製された磁性ナノ超構造について、(2)で解明された構造パラメータと熱磁気機能の相関を基にし、熱磁気効果を最大化するための基軸を探索する。同時に、熱磁気機能を外場で制御することにより、機能の多機能化を実現する。

本研究は、4グループから構成される。各グループは常に情報を共有し合い、効率的に研究を展開していく。

4. これまでの成果

スパッタリング法によりさまざまな組成比を有する Co-Ge 薄膜を作製し、異常ホール効果および異常ネルンスト効果を室温で測定した。Ge の添加量を増加させたところ、異常ホール効果、異常ネルンスト効果ともに組成に依存して大きな変化が見られた。特に異常ネルンスト効果は $0.65 \mu\text{V/K}$ まで上昇した。この値は Co 単層膜よりも大きな値であり、ナノ構造が異常ネルンスト効果を上昇させたと考えられる。

Nb 単層膜及び Nb/Fe 2 層膜を作製し、薄膜面直に熱勾配を、薄膜面内に外部磁場を印加した状態で、超伝導転移温度付近およびそれ以下の温度でのネルンスト効果を測定した。Nb 単層膜では、温度の上昇に従い、ネルンスト効果に起因すると思われるピーク構造が消失していく傾向が見られた。一方、Nb/Fe 2 層膜では Nb 単層膜とは異なる電圧プロファイルが観測された。これは Fe から Nb ヘスピン流が注入されることにより生じた逆スピンホール効果が重畳しているためであることが分かった。

イオン液体による異常ネルンスト効果の制御を狙って、電気二重層を用いた電界効果による熱電材料の制御法の確立を進めた。熱電材料のキャリア密度を連続的に制御するため、酸化タングステン薄膜を半導体して用いた電界効果型トランジスタを作製し、静電容量の大きいイオン液体をゲート絶縁体に用いることで、絶縁体状態の酸化タングステン薄膜に多数の電子を注入した。その結果、単位温度差当たりの発電量に相当する熱電出力因子を温度およびゲート電圧 (すなわちキャリア密度) を系統的に変化させ、熱電出力因子を最適化することに成功した。

磁気フラストレーション系におけるスカーミオン構造の特徴量である「トポロジカルチャージ」を円偏光照射によって制御できること理論的に示すことを目指した。計算の結果、円偏光によって、磁気スカーミオン構造のトポロジカルチャージの符号を揃えることができることを示した。さらに、円偏光の向きによって、トポロジカルチャージの符号を選択できることも示した。この構造制御に必要な光強度やパルス照射時間なども明らかにした。また、粒子状の磁気スカーミオンを形成していないようなランダムな磁化構造においても、局所的なスカラーカイラリティと呼ばれる量を制御できることを明らかにした。トポロジカルチャージやスカラーカイラリティは、異常ネルンスト効果の電圧を決定するものであるため、この機構を使えば磁性ネルンスト効果の電圧の向きを光によって制御できることを示した。

新しい研究分野で革新的な物理を探索するときの最も重要な課題の一つとして、さまざまな研究テーマの中から革新的な物理解明に関連する有望なトピックスを選ぶことが挙げられる。有望な研究トピックの自動選択については、SEMNET (Structural equation modeling discussion network) などがあるが、国内では同様な技術は開発されていない。そこで、新たに ARTS: autonomous research topic selection system (自律型研究トピック選択システム) を開発した。この技術により、過去の膨大な文献を自然言語処理により解析し、その中から新たな研究対象を自動選択することが可能になった。

5. 今後の計画

本研究でこれまでに得られた成果や知見を十分に生かし、特に磁性ナノ超構造の熱・スピン機能の高機能化/多機能化の達成にむけて、加速的に研究を展開していく予定である。

6. これまでの発表論文等 (受賞等も含む)

【論文】

1. “Spin Seebeck effect mediated reversal of vortex-Nernst effect in superconductor-ferromagnet bilayers”, H. Sharma, Z. Wen, M. Mizuguchi, Scientific Reports, 査読あり, **13**, 4425 (2023).
2. “Enhancement of the anomalous Nernst effect in epitaxial Fe_xN films grown on $\text{SrTiO}_3(001)$ substrates with oxygen deficient layers”, K. Ito, J. Wang, Y. Shimada, H. Sharma, M. Mizuguchi, and K. Takanashi, Journal of Applied Physics, 査読あり, **132**, 133904 (2022).
3. “Electrical mapping of thermoelectric power factor in WO_3 thin film”, S. Shimizu, T. Kishi, G. Ogane, K. Tokiwa, and S. Ono, Scientific Reports, 査読あり, **12**, 10908 (2022).
4. “Topological charge control of skyrmion structure in frustrated magnets by circularly polarized light”, M. Miyata, J. Ohe, and G. Tatara, Physical Review Applied, 査読あり, **18**, 014075 (2022).
5. “Self-supervised learning of materials concepts from crystal structures via deep neural networks”, Y. Suzuki, T. Taniai, K. Saito, Y. Ushiku, and K. Ono, Machine Learning: Science and Technology, 査読あり, **3**, 045034 (2022).

【受賞】

1. 令和4年度 科学技術分野の文部科学大臣表彰 若手科学者賞, 宮町 俊生 (水口研究室) (2022).
2. IEEE Magnetics Society 名古屋支部若手研究会 Outstanding Presentation Award, 福田豊輝 (水口研究室) (2023).

7. ホームページ等

<https://mizuguchi-gr.jp/>