

ナノスケール・サーマルマネジメント基盤技術の創出  
2017年度採択研究代表者

2019年度 実績報告書
-----------------

内田 健一

物質・材料研究機構  
磁性・スピントロニクス材料研究拠点  
グループリーダー

スピントロニック・サーマルマネジメント

## § 1. 研究成果の概要

本研究は、磁性材料やスピントロニクス素子が有する制御性・対称性・整流作用を利用した熱エネルギー制御原理とその応用に向けた基盤技術を構築することを目的としている。2019 年度の各グループの研究実施内容の概要は以下の通りであり、スピン自由度を用いることでしか実現できない熱制御機能の実証に次々と成功するなど、順調に進展と成果が得られている。

### 非遍在性・非接触性熱制御機能の原理実証と材料開発(内田グループ)

磁性材料やスピントロニクス素子に特有の熱電効果(磁気熱電効果)と、熱流とスピン流の変換現象(熱スピン効果)を対象として、系統的な研究を進めた。特に注力したのは、磁化と電流の相対角に依存して磁性材料のペルチェ係数が変化する現象「異方性磁気ペルチェ効果」と、磁化と電流の外積方向に熱流が発生する「異常エッチングスハウゼン効果」に関する原理解明・材料探索と、これらの現象を利用した新しい熱制御機能の実証である。現状これらの現象を観測・定量評価できるのは世界的に見ても当グループのみであり、高い競争力をもって本研究を遂行している。

2019 年度の研究により、異常エッチングスハウゼン効果に関して大きな進展が得られた。この現象を用いれば、電流に伴う熱流の方向や大きさを、磁化操作を介して制御することができる。このような“アクティブな熱制御”を実現するための取り組みを進め、以下の成果を得た。

A) 円偏光照射により電流に伴って生じる熱流を自在に制御することに成功(図1参照、Nature

Communications 誌に論文掲載(代表論文1)、2020 年 1 月 8 日プレスリリース)

B) 歪印加により熱流方向を制御することに成功(Scientific Reports 誌に論文掲載)

C) 電界印加により熱流を ON/OFF 制御することに成功(Applied Physics Express 誌に論文掲載)

これらの成果は、A)に関しては光誘起磁化反転現象、B)に関して磁気弾性効果、C)に関しては磁性の電界効果といった、これまでスピントロニクス分野とは関わりの無かった原理や技術を導入することによって得られたものである。

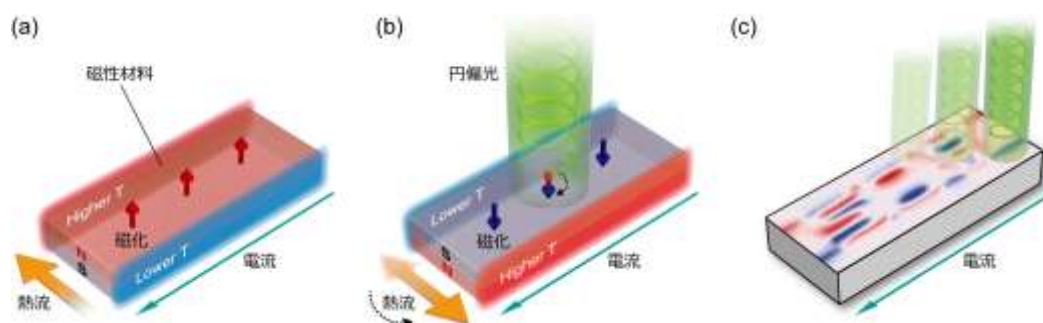


図1 (a) 異常エッチングスハウゼン効果の模式図。(b) 円偏光照射による異常エッチングスハウゼン熱流の反転。(c) 光による熱流分布の自在制御(実験結果の例)。

磁気熱電効果の出力を向上させるための材料探索の一環として、実用永久磁石の一つであるSmCo<sub>5</sub>系磁石が大きな異常ネルンスト・エッチングスハウゼン効果を示すことを発見した(Applied Physics Letters 誌に論文掲載(代表論文2)、Editor's Pickに選定、三浦グループとの共同研究)。垂直熱電能の起源である“横熱電係数”は既報材料の中で最高値であることを見出し、内因性機

構に基づく第一原理計算により実験結果が定量的に再現されることを示した。

材料物性の評価に加えて、磁気センサー応用に向けた研究開発が進められているスピントロニクスデバイスにおいて、磁気熱電効果がどのような熱制御機能をもたらすのか検証した。CIP-GMRと呼ばれる薄膜面に沿って電流を流す磁気センサー素子を用いて、磁化配置が異なる領域の境界に加熱・冷却信号のペアが発生することや、加熱・冷却位置を局所磁場印加により自在に制御できることを実証した (Applied Physics Letters 誌に論文掲載)。

#### 熱スピン・熱電効果の理論設計とマテリアルズ・インフォマティクスへの展開 (三浦グループ)

トンネル磁気抵抗(TMR)素子において、格子歪を加えることで界面共鳴トンネル効果を制御して熱電能やパワーファクターを増大できることを第一原理計算によって明らかにした (Physical Review B 誌に論文掲載)。また、陽イオンサイトの原子がランダムに置換された  $\text{MgAl}_2\text{O}_4$  をバリア障壁層に有する TMR 素子において、TMR 比を増大させるための原子構造の制御指針を機械学習により明らかにした (Physical Review Research 誌に論文掲載)。

#### 非相反性熱制御機能の原理実証と材料開発 (安グループ)

非相反スピン波により空間ギャップを介した熱移送を実現した成果に関して、論文執筆を進めた。異なるスピン波共鳴モードに伴う発熱解析や、スピン波熱移送効果を能動的に制御・変調する実験にも着手している。

#### 熱スピン効果・磁気熱量効果の熱制御工学的応用開拓 (長野グループ)

ロックインサーモフレクタンス法に基づく新しい熱電・熱スピン効果計測システムの高精度化を行い、スピン流による熱流生成現象「スピンペルチェ効果」の過渡応答や特性長を明らかにした (Physical Review B 誌に論文掲載 (代表論文 3)、Editors' Suggestion に選定)。同手法を用いて、強磁性金属/磁性絶縁体接合系における熱電変換の過渡応答特性を詳細に測定することで、スピンペルチェ効果と異常エッチングスハウゼン効果の相乗効果を検証している。

各種熱制御現象の新しい計測法の提案・実証も進めており、2019 年度には熱ホール効果のイメージング計測システムを構築した (特許出願済・論文執筆中)。熱ホール係数が既知である Bi を用いて本計測法の有効性・定量性を示した。

#### **【代表的な原著論文】**

1. J. Wang, Y. K. Takahashi, and K. Uchida, "Magneto-optical painting of heat current", Nature Communications, Vol. 11, No. 2, pp. 1-7, 2020
2. A. Miura, H. Sepehri-Amin, K. Masuda, H. Tsuchiura, Y. Miura, R. Iguchi, Y. Sakuraba, J. Shiomi, K. Hono, and K. Uchida, "Observation of anomalous Ettingshausen effect and large transverse thermoelectric conductivity in permanent magnets", Applied Physics Letters, Vol. 115, No. 22, p. 222403, 2019 [Editor's Pick]
3. T. Yamazaki, R. Iguchi, T. Ohkubo, H. Nagano, and K. Uchida, "Transient response of the spin Peltier effect revealed by lock-in thermoreflectance measurements", Physical Review B, Vol. 101, No. 2, p. 020415(R), 2020 [Editors' Suggestion & Rapid Communications]

## § 2. 研究実施体制

### (1)「非遍在性・非接触性熱制御機能の原理実証と材料開発」グループ

- ① 研究代表者:内田 健一 (物質・材料研究機構磁性・スピントロニクス材料研究拠点  
グループリーダー)
- ② 研究項目
  - ・磁気熱電効果(異方性磁気ペルチェ効果・異常エッチングスハウゼン効果)、熱スピン効果(スピンペルチェ効果)の発現機構・熱制御特性の解明と物質依存性の検証
  - ・磁気熱電効果や熱スピン効果を利用した“アクティブな熱制御機能”の実証
  - ・スピントロニクスデバイスにおける熱電変換・熱スイッチ効果の観測と解明

### (2)「熱スピン・熱電効果の理論設計とマテリアルズ・インフォマティクスへの展開」グループ

- ① 主たる共同研究者:三浦 良雄 (物質・材料研究機構磁性・スピントロニクス材料研究拠点  
グループリーダー)
- ② 研究項目
  - ・第一原理計算による異方性磁気ペルチェ効果・異常エッチングスハウゼン効果の起源解明
  - ・巨大磁気抵抗・トンネル磁気抵抗素子におけるスピнкаロトロニクス現象の理論的検討
  - ・マテリアルズ・インフォマティクスを駆使した磁気熱電効果・熱スピン効果の最適設計

### (3)「非相反性熱制御機能の原理実証と材料開発」グループ

- ① 主たる共同研究者:安 東秀 (北陸先端科学技術大学院大学先端科学技術研究科  
准教授)
- ② 研究項目
  - ・スピン波励起に伴う熱発生過程の解明と評価
  - ・スピン波熱移送効果を用いた熱輸送機能の実証とその能動的制御

### (4)「熱スピン効果・磁気熱量効果の熱制御工学的応用開拓」グループ

- ① 主たる共同研究者:長野 方星 (名古屋大学大学院工学研究科 教授)
- ② 研究項目
  - ・ロックインサーモフレクタンス法によるスピンペルチェ効果・異常エッチングスハウゼン効果の観測と熱源サイズ依存性・時間応答特性の解明
  - ・熱ホール効果のイメージング計測法の構築
  - ・磁気熱電効果・スピン波熱移送効果の新規計測法の開発