

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

2018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。2018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)

研究代表者らがこれまでに報告した研究により、強磁性体/常磁性体接合において発現するスピンペルチェ効果(スピン流による熱流生成現象)を用いると、双極子型熱源が生成されることにより空間的に局在した温度変化が生じることが確かめられている。双極子型熱源による局所温度変調機能の汎用性を向上させるべく、スピンペルチェ効果に加えて、異常エッチングスハウゼン効果に関する実験的な検証を進めた。異常エッチングスハウゼン効果は強磁性体において磁化と電流の両方に直交する方向に熱流が生成される現象であり、スピンペルチェ効果と同様に薄膜素子において局所的に温度変調することができる。本研究では、ロックインサーモグラフィ法を用いることにより磁性薄膜素子における異常エッチングスハウゼン効果を観測することに初めて成功し、スピンペルチェ効果との対称性の違いを明らかにした(Appl. Phys. Lett.誌のEditor's Pickに選定)。異常エッチングスハウゼン効果はスピンペルチェ効果と類似した熱制御機能を持ちながら強磁性体単層膜において発現することから、より汎用性の高い熱制御技術の実現に繋がる可能性がある。

当グループが世界初の観測に成功した異方性磁気ペルチェ効果(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)に関しては、2018年5月に論文がNature誌に掲載され、大きな注目を集めた【代表論文1】。異方性磁気ペルチェ効果は、

- 異なる物質の接合の無い、単一の磁性体による電子冷却
- 磁性体の形状や磁化分布を変えることによる熱電変換特性の再構成
- 局所的に磁化させることによる任意箇所の温度変調

など、従来のペルチェ効果では実現できなかった熱制御機能をもたらすため、その特性を活かすためのデバイス構造の開拓が重要である。異方性磁気ペルチェ効果に関する2018年度の大きな進展としては、同現象のためのサーモパイル構造の提案と実証が挙げられる(図1)【代表論文2】。サーモパイル構造の基本形の一つとなる十字型素子を試作し、従来の単一ワイヤーからなる素子よりも2桁大きな温度変化を誘起できることを示した(Appl. Phys. Lett.誌のEditor's Pickに選定)。

以上のように、磁性体特有の熱電・熱スピン効果をもたらす熱制御機能の実証に相次いで成功しているが、これらの機能をサーマルマネジメント応用に結実させるためには、熱電・熱スピン変換能の大幅の向上が必須である。本研究における重要課題の一つは、動的熱イメージング計測技術とコンビナトリアル薄膜作製技術とを融合することで、高性能な熱電・熱スピン変換材料を見出すことにある。2018年度は、すでに素子作製技術が確立しているスピンペルチェ効果を対象として、コンビナトリアル材料技術に基づく熱スピン変換能のハイスループット・スクリーニングの有用性を示した(Scientific Reports誌に論文掲載)。早期にこの手法をルーティン化することで、熱電・熱スピン変換材料の開発・探索を加速させる。

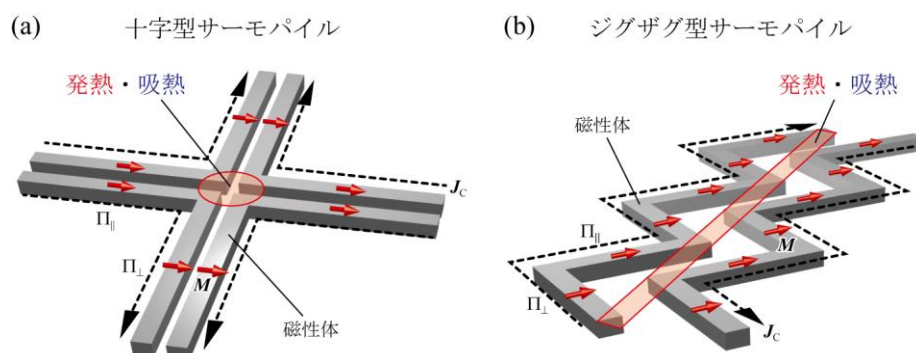


図1 異方性磁気ペルチェ効果に基づくサーモパイル構造の基本形.

### 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)

異方性磁気ペルチェ効果の第一原理計算に関する論文が Phys. Rev. B 誌に掲載された【代表論文3】。異方性磁気ペルチェ効果に加えて、異常エッチングスハウゼン効果も線形応答理論に基づく第一原理計算により検証可能になり、複数の材料系において内田グループにおいて得られた実験結果を定量的に再現できている。この手法を活用することで、異常エッチングスハウゼン効果の微視的メカニズムを明らかにするための理論的検討・予備計算も進めている。

理論主導の研究としては、主にトンネル磁気抵抗素子における磁気ゼーベック効果の第一原理計算を進め、界面共鳴トンネル効果を利用することで熱電能やパワーファクターを向上できるという結果を得ている(国内学会で発表済)。

### 非相反性熱制御機能の原理実証と材料開発(安グループ)

前年度に確立したスピン波熱移送効果のロックインサーモグラフィ計測法を駆使して、空間ギャップを介した熱移送特性の評価を主に進めた。スピン波熱移送効果の物質依存性測定や、スピンホール効果を用いた熱生成制御の実現に向けた予備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)

ロックインサーモリ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構築を主に進めた。構築した装置を用いることでスピンペルチェ効果や異常エッチングスハウゼン効果を高い温度分解能で測定できており、ロックインサーモグラフィよりも4桁高い周波数領域まで高速熱応答特性を観測するに至っている(国内会議で発表済)。本成果については2019年度の早期に論文化すると共に、温度依存性測定への拡張を進める。

### 【代表的な原著論文】

1. K. Uchida, S. Daimon, R. Iguchi, and E. Saitoh, "Observation of anisotropic magneto-Peltier effect in nickel", Nature, Vol. 558, No. 7708, pp. 95–99, 2018
2. R. Das and K. Uchida, "Thermopile based on anisotropic magneto-Peltier effect", Applied Physics Letters, Vol. 114, No. 8, p. 082401, 2019
3. K. Masuda, K. Uchida, R. Iguchi, and Y. Miura, "First-principles study of anisotropic magneto-Peltier effect", Physical Review B, Vol. 99, No. 10, p. 104406, 2019

## § 2. 研究実施体制

### (1) 内田グループ

- 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
  - ・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、スピンペルチェ効果の測定方法の確立と物質依存性の検証
  - ・異方性磁気ペルチェ効果に基づくサーモパイル構造の提案と実証

### (2) 三浦グループ

- 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
  - ・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第一原理計算手法の確立
  - ・トンネル磁気抵抗素子における磁気ゼーベック効果の増大指針の理論的検討

### (3) 安グループ

- 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
  - ・空間ギャップを有する磁性材料におけるスピン波熱移送効果による熱生成特性の評価
  - ・スピン波熱移送効果の物質依存性の検証

### (4) 長野グループ

- 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
  - ・熱スピン効果による熱制御アプリケーションに関する検討