



丸文研究奨励賞 受賞者

内田 健一

国立研究開発法人 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

スピン自由度を活かした
熱エネルギー変換原理の発見と展開

磁性材料やスピントロニクス技術を用いて熱エネルギーを自在に制御する

研究の背景

金属や半導体における電流と熱流の相互作用は熱電効果と呼ばれ、温度差から電圧を作り出すゼーベック効果や、電流で加熱・冷却するペルチェ効果が古くから知られている。熱電変換技術は、可動部が無いいため静音で信頼性が高く、小型化可能であるため、環境発電から電子冷却まで幅広い用途に応用できる。

一方、次世代電子技術の有力候補であるスピントロニクス分野においては、電子の電荷の自由度に加えてスピン角運動量の自由度も積極的に利用することで、電荷のみを用いていた従来のエレクトロニクスでは現れなかった新しい機能や特性を創出することを目指し、世界中で研究が進められている。エレクトロニクスが電流によって機能しているように、スピントロニクスの発展にはスピン流（スピン角運動量の流れ）の生成・検出・制御技術の拡充が必須である。スピン

流を用いれば磁場を介さない磁化の制御やこれに基づく情報の書き込み・読み出し技術を実現できるため、基礎物理研究のみならず、高性能な磁気メモリ・センサーの実現を目指した応用研究においても、ますますスピン物性の重要性が高まっている。スピン流がもたらす新しい物理現象が次々と発見される中、私たちはスピンと熱の相互作用に基づく新しい物理原理・エネルギーデバイス技術を開拓してきた。

研究の成果

1. スピン流-熱流相互作用の開拓

本研究の原点は、温度差からスピン流を生成する物理現象「スピンゼーベック効果」の発見にある（図1）^[1]。スピンゼーベック効果はその名の通り、ゼーベック効果のスピン版の現象であり、スピントロニクスと熱効果の融合研究領域「スピントロニクス」の端緒となった。2010年には、スピンゼー

ベック効果が金属や半導体のみならず絶縁体においても発現することを実証し、この現象が局在磁気モーメントの集団励起モードであるマグノンによって駆動されていることを明らかにした^[2,3]。この報告以降、実験・理論ともにスピンゼーベック効果の研究が急速に進展し、“絶縁体を用いた熱電変換”という新しいコンセプトが誕生した（図1）。私たちは、スピンゼーベック効果の原理解明を進めると同時に、スピン流によって駆動される新原理の熱電変換技術を発展させるべく、企業との共同研究にも取り組んできた^[4,5,6]。その後、半導体産業界において集積デバイス解析に用いられているロックインサーモグラフィ技術をスピントロニクス研究に取り入れ、独自の計測・解析ノウハウを構築することで、スピンゼーベック効果の相反現象であるスピンペルチェ効果（スピン流による熱流生成現象）の熱イメージング計測を実現した（図1）^[7]。スピンペルチェ効果に伴う温度変化は空間的に局在した特異な分布を示すことを見出すなど、発見以来数年間にわたってほぼ進展のなかったスピンペルチェ効果の基本的な特性が、本研究によって明らかになった。

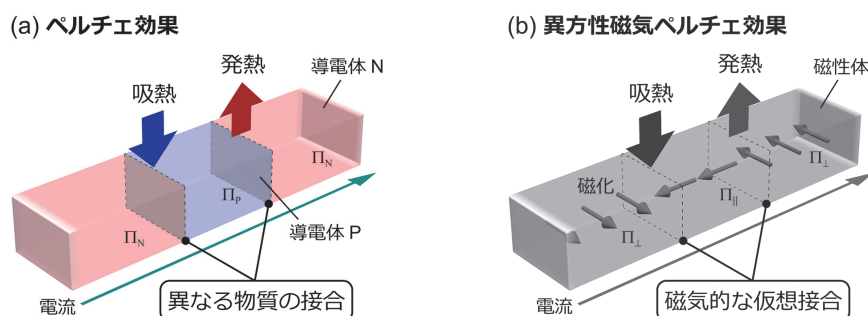
2. スピンを用いた熱エネルギー制御

従来のスピントロニクス研究においては、主に熱流を入力としてスピン流や電流を生成する現象に焦点が当てられてきたが、本研究によって熱流や温度変化を出力とする熱スピン変換現象を自在に観測することが可能になった。2016年に私が物質・材料研究機構に着任して以降、私たちの研究グループでは「磁性材料やスピントロニクス技術を用いて熱エネルギーを制御する」ことを旗印に、スピントロニクス研究を推進している。スピンペルチェ効果のみなら

図1 スピン流-熱流変換現象に関する基礎物理・熱電応用研究



図2 ペルチェ効果(a)と異方性磁気ペルチェ効果(b)の概念図



ず、様々な熱輸送現象やその応用技術へと研究を展開し、これまでに磁気熱量効果のハイスループット計測技術の確立^[8]や異常エッチングスハウゼン効果の薄膜における初めての観測^[9]などの成果を得てきた。

近年の研究の中で最も重要な成果は、「異方性磁気ペルチェ効果の世界初の観測」である^[10]。異方性磁気ペルチェ効果は、磁性体におけるペルチェ係数が磁化と電流の相対角度に依存して変化する現象であり(図2)、磁性体における基本的な熱電変換現象の一つであるにも関わらず、これまで直接観測されたことが無かった。本研究では、ロックインサーモグラフィ技術を駆使して典型的な強磁性金属であるニッケルに電流を流した際に生じた温度分布を精密に測定し、異方性磁気ペルチェ効果によって生成された温度変化の観測を実現した(図3)。ペルチェ効果で加熱・冷却するためには2つの異なる物質を接合した構造が用いられてきたが、本研究によって、接合のない単一物質において、その磁気的な性質のみによって熱エネルギーを制御できる新しい

機能が実証された(図2)。異方性磁気ペルチェ効果が初めて観測されたことで、熱電分野やスピントロニクス基礎科学や応用技術のさらなる進展が期待される。

将来の展望

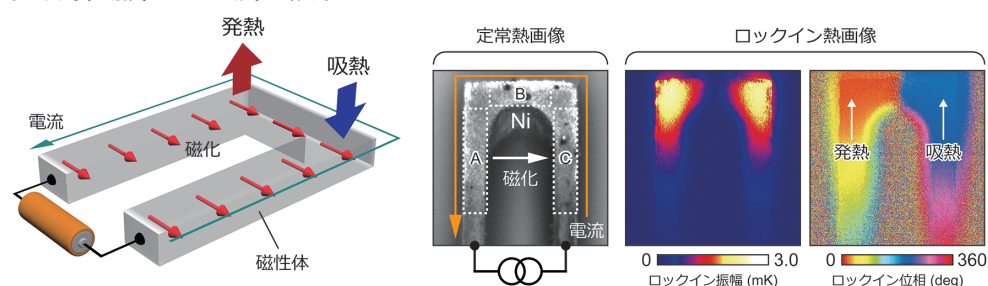
異方性磁気ペルチェ効果をはじめとした磁性・スピントロニクス材料に特有の熱電・熱スピン変換現象を用いれば、単一材料による電子冷却のみならず、磁性体の形状や磁化分布を変えることによる熱電変換特性の再構成など、従来の熱電効果では実現できない様々な熱エネルギー制御機能が得られる。電子デバイスの効率向上・省エネ

ギー化に資するサーマルマネジメント技術への応用を目指し、大きな熱流—電流—スピン流変換を示す磁性・スピントロニクス材料の探索や、アクティブに熱エネルギーを制御するための新手法の開発を進めている。

謝辞

物質・材料研究機構着任以前の研究は、慶應義塾大学理工学部物理情報工学科および東北大学金属材料研究所の齊藤研究室において行われました。学生時代よりご指導いただいた齊藤英治教授(現 東京大学)をはじめ、ご協力・ご支援いただいている多くの共同研究者の皆様に深く感謝申し上げます。

図3 異方性磁気ペルチェ効果の観測



一様に磁化した「コの字」形状の強磁性体は図2(b)と等価であり、制御性よく異方性磁気ペルチェ効果を測定できる。この構造に電流を流した際に発生した温度変化を、ロックインサーモグラフィ法により計測した。

References(参考文献)

- [1] K. Uchida et al., Nature 455, 778-781 (2008).
- [2] K. Uchida et al., Nature Mater. 9, 894-897 (2010).
- [3] K. Uchida et al., Appl. Phys. Lett. 97, 172505 (2010).
- [4] K. Uchida et al., Nature Mater. 10, 737-741 (2011).
- [5] A. Kirihaara et al., Nature Mater. 11, 686-689 (2012).
- [6] T. Kikkawa et al., Phys. Rev. Lett. 110, 067207 (2013).
- [7] S. Daimon, R. Iguchi, T. Hioki, E. Saitoh, and K. Uchida, Nature Commun. 7, 13754 (2016).
- [8] Y. Hirayama, R. Iguchi, X.-F. Miao, K. Hono, and K. Uchida, Appl. Phys. Lett. 111, 163901 (2017).
- [9] T. Seki, R. Iguchi, K. Takamashi, and K. Uchida, Appl. Phys. Lett. 112, 152403 (2018).
- [10] K. Uchida, S. Daimon, R. Iguchi, and E. Saitoh, Nature 558, 95-99 (2018).