

研究プロジェクト名: スピン軌道相互作用に基づく熱制御

概要: 物質中には多彩な熱流-電流-スピン流変換現象が発現する。特に、近年盛んに研究されているスピンホール効果(電流→スピン流変換)や異常ネルンスト効果(熱流→電流変換)のように、入力と出力が直交している電子輸送現象は“横効果”と呼ばれ、多くの場合スピン軌道相互作用が重要な役割を担う。本研究では、強磁性金属における熱流を出力とする横効果、すなわち異常エッチングスハウゼン効果(電流→熱流変換)と熱ホール効果(熱流→熱流変換)の物理と材料科学を確立し、スピン軌道相互作用に基づく新奇な熱エネルギー制御原理・機能を創出することを目指す。

コアメンバー: 内田グループ(東北大金研・NIMS)、高梨・関グループ(東北大金研)

期待される研究成果: 熱流を出力とする磁気熱電効果の実験はこれまで主に室温における計測に限定されていたが、昨年度までの研究により高温領域における測定手法を確立し、高い熱制御能を得るための指針を得た(右図)。今年度は、引き続き動的サーモグラフィ法を活用し、高い横熱電能を示す磁性複合材料の創製と、熱ホール効果の計測・解析基盤の確立を目指す。コンビナトリアル薄膜作製技術も活用し、磁気熱電効果の原理解明と材料探索を加速させる。

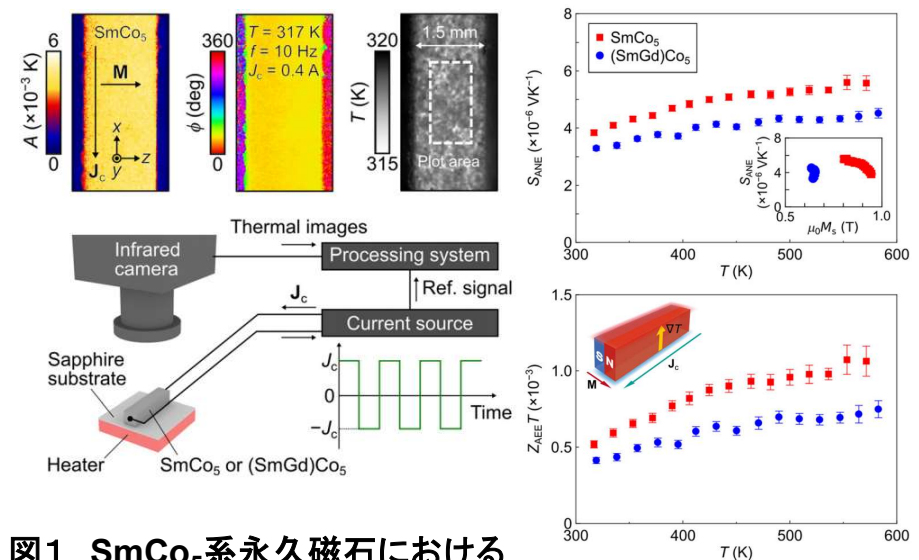


図1. SmCo₅系永久磁石における異常エッチングスハウゼン効果の温度依存性
A. Miura et al., Appl. Phys. Lett. **117**, 082408 (2020).

研究プロジェクト名: スピン軌道相互作用に基づく熱制御

概要: 物質中には多彩な熱流-電流-スピン流変換現象が発現する。特に、近年盛んに研究されているスピンホール効果(電流→スピン流変換)や異常ネルンスト効果(熱流→電流変換)のように、入力と出力が直交している電子輸送現象は“横効果”と呼ばれ、多くの場合スピン軌道相互作用が重要な役割を担う。本研究では、強磁性金属における熱流を出力とする横効果、すなわち異常エッチングスハウゼン効果(電流→熱流変換)と熱ホール効果(熱流→熱流変換)の物理を開拓し、スピン軌道相互作用に基づく新奇な熱エネルギー制御原理・機能を創出することを目指す。

研究成果(実施状況): 最近スピンカロリトロニクス研究に導入された動的サーモグラフィ法を用いることにより、FePt垂直磁化膜における異常エッチングスハウゼン効果の観測に成功した(図1)。特筆すべきは、従来の面内磁化配置だけでなく、垂直磁化配置において薄膜面内方向に生成された熱流をも高感度に計測できた点であり、これによって異常ネルンスト効果との相反性や異常エッチングスハウゼン係数の異方性の検証が可能になった。

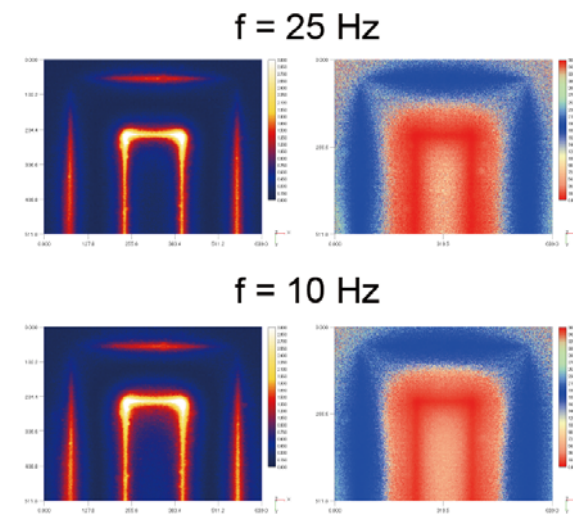


図1. FePt垂直磁化膜における異常エッチングスハウゼン効果によって生成された温度分布の例.

主要発表論文等: 無し

研究プロジェクト名: スピン軌道相互作用に基づく熱制御

概要: 物質中には多彩な熱流-電流-スピン流変換現象が発現する。特に、近年盛んに研究されているスピンホール効果(電流→スピン流変換)や異常ネルンスト効果(熱流→電流変換)のように、入力と出力が直交している電子輸送現象は“横効果”と呼ばれ、多くの場合スピン軌道相互作用が重要な役割を担う。本研究では、強磁性金属における熱流を出力とする横効果、すなわち異常エッチングスハウゼン効果(電流→熱流変換)と熱ホール効果(熱流→熱流変換)の物理を開拓し、スピン軌道相互作用に基づく新奇な熱エネルギー制御原理・機能を創出することを目指す。

研究成果(実施状況): ロックインサーモグラフィ(LIT)法を用いて、異常エッチングスハウゼン効果[1]やスピンペルチェ効果[2,3]の系統的な測定を進めた。特に注力したのは異常エッチングスハウゼン効果と異常ネルンスト効果の相反性の検証であり、FePt単一デバイスにおいて両効果を定量的に比較した(図1)。その結果、両効果の相反性を概ね実証できた一方、FePt薄膜の異常エッチングスハウゼン係数や熱伝導率に異方性が存在する可能性が見出された。現在、異常エッチングスハウゼン係数の異方性の検証を行っているところである。

さらに、周期的な磁場変動が誘起する温度変化をLIT法で抽出することにより、熱ホール効果をイメージング計測することにも成功した[4]。

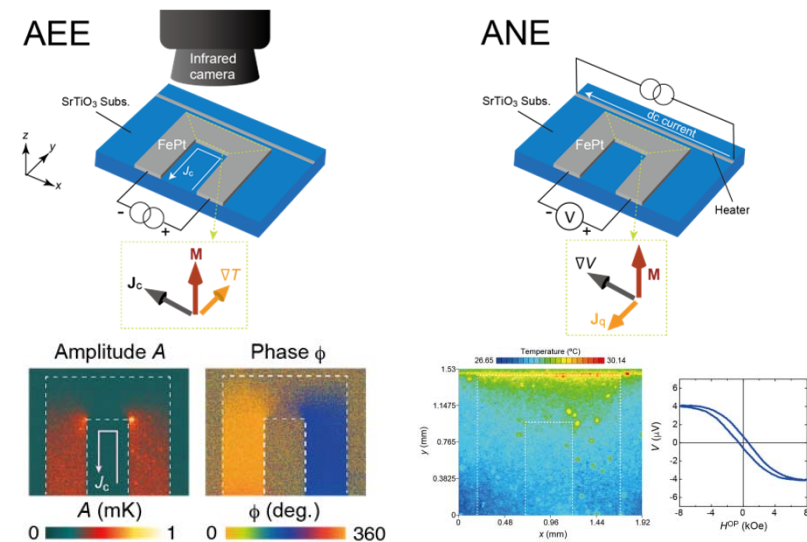


図1. FePt単一デバイスにおける異常エッチングスハウゼン効果と異常ネルンスト効果の相反性の検証。

主要発表論文等: [1] T. Seki, R. Iguchi, K. Takanashi, and K. Uchida: arXiv:1709.05449. [2] S. Daimon, K. Uchida *et al.*, Phys. Rev. B 96, 024424 (2017). [3] K. Uchida *et al.*, Phys. Rev. B 95, 184437 (2017). [4] 井口亮, 内田健一, 動的サーモグラフィ法に基づく熱スピン現象のイメージング(電気学会 マグネティックス研究会, 2017).

研究プロジェクト名: スピン軌道相互作用に基づく熱制御

概要: 物質中には多彩な熱流-電流-スピン流変換現象が発現する。特に、近年盛んに研究されているスピンホール効果(電流→スピン流変換)や異常ネルンスト効果(熱流→電流変換)のように、入力と出力が直交している電子輸送現象は“横効果”と呼ばれ、多くの場合スピン軌道相互作用が重要な役割を担う。本研究では、強磁性金属における熱流を出力とする横効果、すなわち異常エッチングスハウゼン効果(電流→熱流変換)と熱ホール効果(熱流→熱流変換)の物理を開拓し、スピン軌道相互作用に基づく新奇な熱エネルギー制御原理・機能を創出することを目指す。

研究成果(実施状況): これまで主に用いてきたFePt規則合金[1,2]に加えて、CoGd合金における異常エッチングスハウゼン効果の系統的な測定を進めた。その結果、CoGd合金の異常エッチングスハウゼン係数の符号がCoモーメントによって決定されること、および磁化補償組成においても熱電能は低下しないことを見出した[3]。本成果は、磁化が小さい磁性体においても大きな異常エッチングスハウゼン効果が発現し得る可能性を示すものである。現在、異常エッチングスハウゼン効果による熱電能を向上するための材料探索やメカニズムの解明を進めている。さらに、2018年に世界初の観測に成功した異方性磁気ペルチェ効果[4]の物質依存性も同時に検証を進めている。

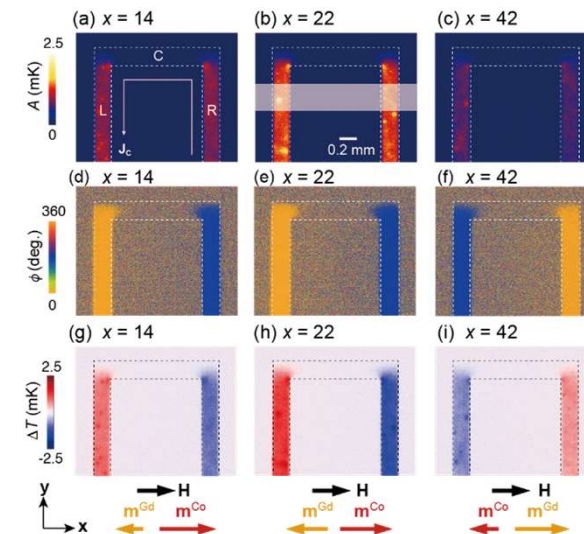


図. CoGd合金における異常エッチングスハウゼン効果の熱イメージング計測 [3]

主要発表論文等: [1] T. Seki et al., Appl. Phys. Lett. 112, 152403 (2018). [2] T. Seki et al., J. Phys. D: Appl. Phys. 51, 254001 (2018). [3] T. Seki et al., Appl. Phys. Express 12, 023006 (2019). [4] K. Uchida et al., Nature 558, 95–99 (2018).

研究プロジェクト名: スピン軌道相互作用に基づく熱制御

概要: 物質中には多彩な熱流-電流-スピン流変換現象が発現する。特に、近年盛んに研究されているスピンホール効果(電流→スピン流変換)や異常ネルンスト効果(熱流→電流変換)のように、入力と出力が直交している電子輸送現象は“横効果”と呼ばれ、多くの場合スピン軌道相互作用が重要な役割を担う。本研究では、強磁性金属における熱流を出力とする横効果、すなわち異常エッチングスハウゼン効果(電流→熱流変換)と熱ホール効果(熱流→熱流変換)の物理を開拓し、スピン軌道相互作用に基づく新奇な熱エネルギー制御原理・機能を創出することを目指す。

研究成果(実施状況):

強磁性二元合金における異方性磁気ゼーベック/ペルチェ/異常エッチングスハウゼン/ネルンスト効果の系統的な測定を行い、その熱電性能指数を定量化した[1](右図)。磁気熱電効果の材料探索の一環として、実用永久磁石の一つであるSmCo₅系磁石が大きな異常エッチングスハウゼン効果を示し、その性能指数が既存材料の中でトップレベルであることを見出した[2]。これら一連の成果により、磁気熱電効果による熱制御能を向上させるための指針が得られた。確立した熱計測技術を駆使して、CIP-GMR素子における磁気ペルチェ効果の初めての直接観測にも成功した[3]。

加えて、前年度までの異常エッチングスハウゼン効果に関する研究成果を解説記事にまとめた[4]。

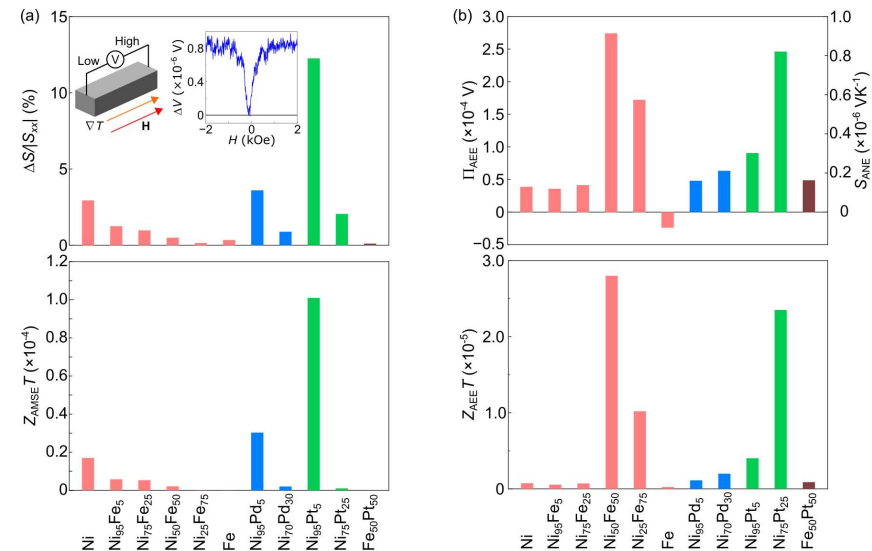


図. 強磁性二元合金における異方性磁気ゼーベック/ペルチェ効果(a)と異常エッチングスハウゼン/ネルンスト効果(b)の物質依存性[1].

主要発表論文等: [1] A. Miura et al., Phys. Rev. Mater. 4, 034409 (2020). [2] A. Miura et al., Appl. Phys. Lett. 115, 222403 (2019). [3] H. Nakayama et al., Appl. Phys. Lett. 115, 092406 (2019), “Featured” article. [4] 関剛斎, 内田 健一, 電気学会誌 139, 662 (2019).

研究プロジェクト名: スピン軌道相互作用に基づく熱制御

概要:

物質中には多彩な熱流-電流-スピン流変換現象が発現する。特に、近年盛んに研究されているスピンホール効果(電流→スピン流変換)や異常ネルンスト効果(熱流→電流変換)のように、入力と出力が直交している電子輸送現象は“横効果”と呼ばれ、多くの場合スピン軌道相互作用が重要な役割を担う。本研究では、強磁性金属における熱流を出力とする横効果、すなわち異常エッチングスハウゼン効果(電流→熱流変換)と熱ホール効果(熱流→熱流変換)の物理を開拓し、スピン軌道相互作用に基づく新奇な熱エネルギー制御原理・機能を創出することを目指す。

研究成果(実施状況):

2020年度の主な成果は以下の3点である。

(A) SmCo_5 系永久磁石[1]やNi/Pt人工格子[2]における異常エッチングスハウゼン/ネルンスト効果の系統的な測定を行い、その熱電変換特性を定量した。特に、 SmCo_5 系永久磁石については中低温領域を含む温度依存性測定を行い、熱電能や性能指数が温度上昇に伴い単調に増加していく振る舞いを明らかにした(図1)。

(B) 動的熱イメージング技術とコンビナトリアル薄膜作製技術を駆使して、スピン流-電流変換材料のハイスループット探索を行い、強制固溶させたCuIr合金において大きなスピン流-電流変換効率を観測した[3]。

(C) スピнкаロリトロニクスに関するレビュー論文を発表した[4]。

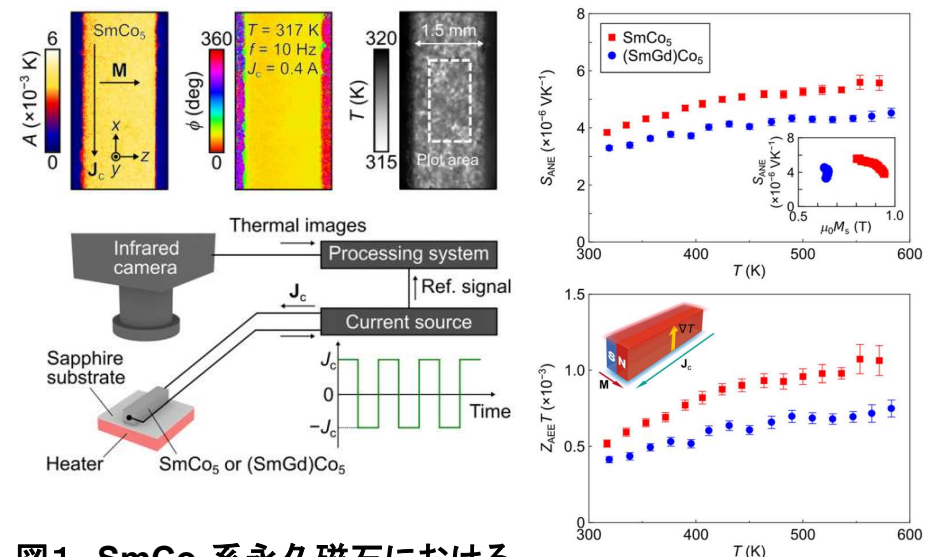


図1. SmCo_5 系永久磁石における異常エッチングスハウゼン効果の温度依存性[1]

主要発表論文等: [1] A. Miura *et al.*, Appl. Phys. Lett. 117, 082408 (2020). [2] T. Seki *et al.*, Phys. Rev. B 103, L020402 (2021). [3] H. Masuda *et al.*, Commun. Mater. 1, 75 (2020). [4] K. Uchida, Proc. Jpn. Acad. Ser. B 97, 69-88 (2021).

研究プロジェクト名: スピン軌道相互作用に基づく熱制御

概要: 物質中には多彩な熱流-電流-スピン流変換現象が発現する。特に、近年盛んに研究されているスピンホール効果(電流→スピン流変換)や異常ネルンスト効果(熱流→電流変換)のように、入力と出力が直交している電子輸送現象は“横効果”と呼ばれ、多くの場合スピン軌道相互作用が重要な役割を担う。本研究では、強磁性金属における熱流を出力とする横効果、すなわち異常エッチングスハウゼン効果(電流→熱流変換)と熱ホール効果(熱流→熱流変換)の物理を開拓し、スピン軌道相互作用に基づく新奇な熱エネルギー制御原理・機能を創出することを目指す。

研究成果(実施状況): 中低温領域における異方性磁気ゼーベック効果の定量評価法を確立し、NiPt合金の熱電能・性能指数の温度依存性を明らかにした[1]。その結果、NiPt合金におけるゼーベック/ペルチェ係数の異方性はNi₉₅Pt₅において最大値を取り、性能指数は温度上昇に伴い単調に減少し、キュリー温度で消失することを見出した(図1)。同手法を横効果(異常ネルンスト効果)の定量評価に拡張するための予備実験を進めている。

また、横型熱電変換やスピнкаロリトロニクスに基づく熱制御原理に関するレビュー論文を発表した[2,3]。

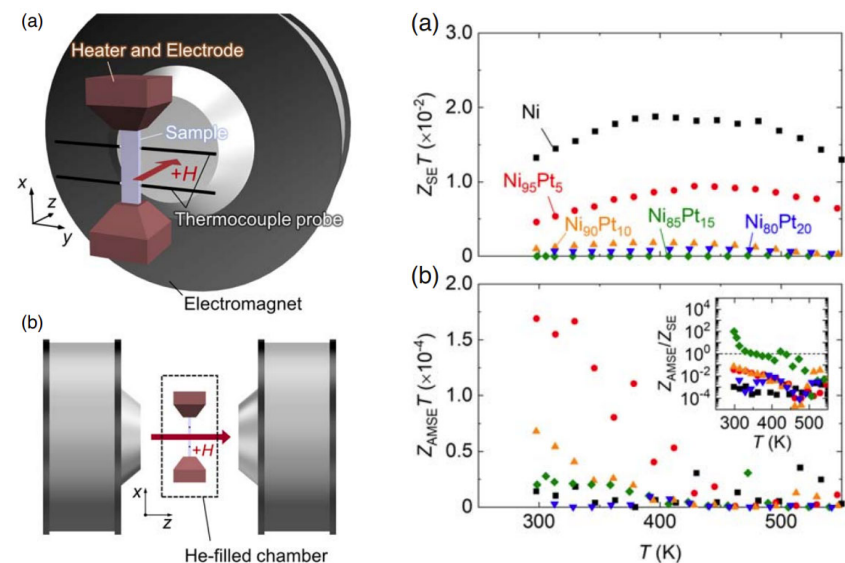


図 NiPt合金における異方性磁気ゼーベック効果 [1]

主要発表論文等: [1] T. Hirai et al., Appl. Phys. Express 14, 073001 (2021). [2] K. Uchida, W. Zhou, and Y. Sakuraba, Appl. Phys. Lett. 118, 140504 (2021). [3] K. Uchida and R. Iguchi, J. Phys. Soc. Jpn. 90, 122001 (2021).