

TED Plaza

サーモリフレクタンس法の新展開 ースピнкаロリトロニクス現象への適用ー



山崎 匠

東北大学 助教
金属材料研究所
takumi.yamazaki.d5@tohoku.ac.jp

1. はじめに

未利用熱エネルギーの有効利用の観点から熱マネジメントの重要性が高まっており、熱と電気の直接変換を可能とする熱電変換材料の研究開発が活発に行われている。そのような中、従来の熱電変換とは異なる原理で駆動する、磁気源である電子の内部角運動量（スピン）を介した熱電変換現象に注目が集まっている。代表例は2008年に発見された、熱流からスピンの流れ（スピン流）を生成する現象「スピンゼーベック効果」であり、生成されたスピン流を電流に変換して取り出すことで熱電変換が可能となる。このスピンゼーベック効果の発見を契機に、熱とスピンの相互作用を扱う学際分野「スピнкаロリトロニクス」が急速に成長しており、数々の新現象・新原理が探求されている。一方で、スピнкаロリトロニクス現象の出力は産業応用化のレベルには至っておらず、高いエネルギー変換効率を有する材料の開発が急務である。それに伴い、性能向上に向けて現象の物理機構を理解し、材料の性能を正しく評価する必要があるが、当該分野の実験研究の多くは電気測定手法によって行われている。したがって、「熱」を測る技術を拡充することが、スピнкаロリトロニクス分野の更なる進展には必須である。

筆者らは光学的に温度変化を検出できるサーモリフレクタンس法をスピнкаロリトロニクス分野に導入し、様々なスピнкаロリトロニクス研究へと展開してきた。本稿では筆者らが取り扱ってきたスピнкаロリトロニクス現象の発現機構やサーモリフレクタンس法に基づく熱測定手法について概説し、サーモリフレクタンス法により得られた筆者らの研究成果について紹介する。

2. スピнкаロリトロニクス現象

スピнкаロリトロニクス分野においては、熱流ースピン流変換効果（熱スピン効果）や磁性体特有の熱流ー電流変換効果（磁気熱電効果）といった「変換」現象に関する原理開拓・材料開発の研究が主流である。ここ十数年の間に多彩なスピнкаロリトロニクス現象が発見されているが、本節では、筆者らが研究対象としてきた変換現象：熱スピン効果の一種であるスピンペルチェ効果、典型的な磁気熱電効果である異常エッチングスハウゼン効果および異常ネルンスト効果、に焦点を絞って説明する。その他のスピнкаロリトロニクス現象についてはレビュー論文 (Bauer, et al., 2012; Boona, et al., 2014; Uchida, et al., 2021) を参照されたい。

2・1 スピンペルチェ効果

スピンペルチェ効果 (Spin Peltier effect: SPE) は、磁性体/伝導体界面にスピン流が流れた際に熱流が生成される現象であり、スピンゼーベック効果の相反効果である。磁性体が絶縁体の場合にも発現する点が従来のペルチェ効果との決定的な相違点であり、これはスピンペルチェ効果が

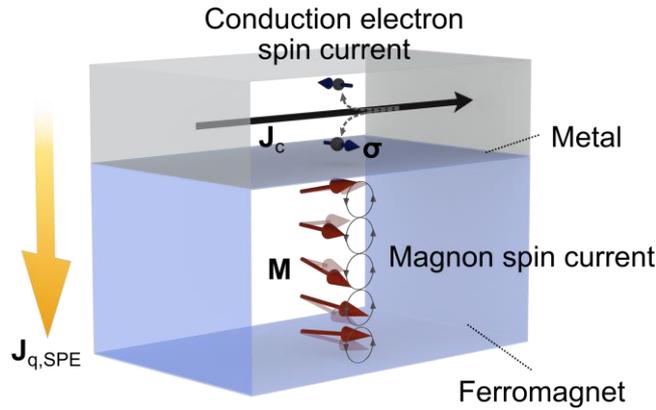


Fig. 1 Schematic illustration of the spin Peltier effect in a ferromagnet/metal junction system.

絶縁体中のスピンのキャリアとなる磁化秩序の素励起（マグノン）によって駆動されることに起因する。

以下にスピネルチェ効果の基本的メカニズムを概説する。図1に示す磁性体/金属薄膜接合系において、金属薄膜に電流 J_c を印加すると、スピン軌道相互作用がもたらす電流-スピン流変換効果「スピンホール効果 (Sinova, et al., 2015)」によって膜厚方向に伝導電子スピン流が生成される。その結果、以下の関係を満たす方向に偏極したスピンの蓄積が磁性体/金属の接合界面近傍に蓄積される。

$$J_s \propto \sigma \times J_c \quad (1)$$

ここで、 σ はスピン偏極ベクトルを表す。スピン蓄積は界面交換相互作用を介して磁性体中のマグノンによって運ばれるスピン流に変換される。このマグノンスピン流によって熱流が生成される現象がスピネルチェ効果である。注入されるスピン流の偏極方向 σ が磁性体の磁化 M と平行か反平行かによって熱流の符号が変化し、 σ と M が直交している場合には熱流は生じない。つまり、スピネルチェ効果によって生成される熱流 $J_{q,SPE}$ が満たす対称性は以下の通りである。

$$J_{q,SPE} \propto (\sigma \cdot M)n \quad (2)$$

ここで n は磁性体/金属界面の法線ベクトルを表す。スピネルチェ効果の本質はスピン流から熱流への変換効果であるものの、スピンホール効果を介することによって電流から熱流への変換効果へと帰着する。そして、 M が接合界面に沿った方向を向いている場合には、式(3)に示す熱電変換の対称性を満たす。

$$J_{q,SPE} \propto J_c \times M \quad (3)$$

オンサーガーの相反関係からスピンゼーベック効果の逆効果であるスピネルチェ効果が存在することは理論的に予測されていたが、実験的観測は2014年にオランダの Flipse らによって初めて報告された (Flipse, et al., 2014)。Flipse らは磁性絶縁体 $Y_3Fe_5O_{12}/Pt$ 薄膜接合系において、微細加工により形成されたサーモパイルを用いることで、スピネルチェ効果に起因する温度変化を観測した。その後、内田らはサーモグラフィとロックイン検出を組み合わせたロックインサーモグラフィ法を用いることで、スピネルチェ効果が空間的に局在した温度分布を形成することを明らかにした (Daimon, et al., 2016)。

2・2 異常エッチングスハウゼン効果と異常ネルンスト効果

異常エッチングスハウゼン効果 (Anomalous Ettingshausen effect: AEE) は磁性金属に電流 J_c を印加した際に、 J_c と磁性体の磁化 M の外積方向に熱流 $J_{q,AEE}$ が生成される現象である (図 2a)。一方、異常ネルンスト効果 (Anomalous Nernst effect: ANE) は異常エッチングスハウゼン効果の相反効果であり、磁性金属に温度勾配 ∇T を印加した際に、 M と ∇T の外積方向に電場 E_{ANE} が生成される現象である (図 2b)。異常エッチングスハウゼン効果と異常ネルンスト効果はそれぞれ次のように定式化される：

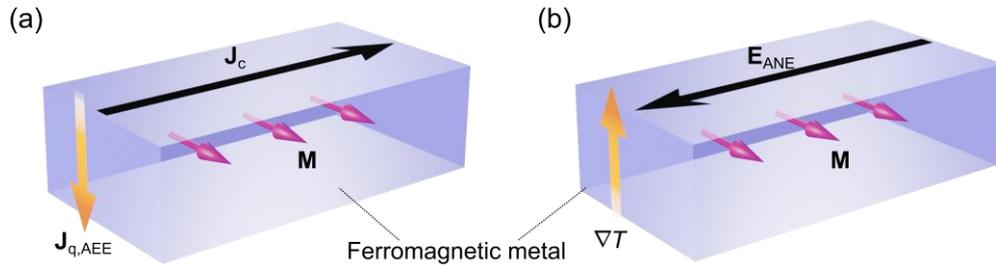


Fig. 2 Schematic illustration of (a) the anomalous Ettingshausen effect and (b) the anomalous Nernst effect in a ferromagnetic metal.

$$\mathbf{j}_{q,AEE} = \Pi_{AEE} \left(\mathbf{j}_c \times \frac{\mathbf{M}}{|\mathbf{M}|} \right) \quad (4)$$

$$\mathbf{E}_{ANE} = S_{ANE} \left(\frac{\mathbf{M}}{|\mathbf{M}|} \times \nabla T \right) \quad (5)$$

ここで、 $\mathbf{j}_{q,AEE}$ 、 \mathbf{j}_c 、 Π_{AEE} 、 S_{ANE} はそれぞれ、異常エッチングスハウゼン効果により生じる熱流束、電流密度、異常エッチングスハウゼン係数、異常ネルンスト係数を表す。式(3)、式(4)を比較すると、スピネルチェ効果と異常エッチングスハウゼン効果は類似した対称性を有することがわかる。実際、関らはロックインサーモグラフィ法を用いて強磁性金属 FePt 薄膜に生じる異常エッチングスハウゼン効果を測定し、磁化が薄膜の面内方向を向く配置の場合にはスピネルチェ効果と同様の空間的に局在した温度分布が生じることを明らかにした (Seki, et al., 2018)。

3. ロックインサーモフレクタンス法

前節で紹介したスピネルチェ効果や異常エッチングスハウゼン効果のような熱を出力とするスピネカロトロニクス現象の測定手段として、筆者らは光学測定に基づく微小温度変化検出法「ロックインサーモフレクタンス法」を構築した。本節ではロックインサーモフレクタンス法について概説する。サーモフレクタンス法とは物質の反射率の温度依存性を利用した光学的な温度変化検出法であり、この手法をベースに多様な材料（薄膜材料や液体）の熱物性や異種材料界面における界面熱抵抗の測定法が開発されている。筆者らはサーモフレクタンス法にロックイン検出を組み合わせることで、周期的な入力に対応する微小な温度変化を非接触で検出できる装置を構築した。図3に筆者らが構築したロックインサーモフレクタンス法の概略図を示す。ファンクションジェネレータより試料の金属層に正弦波の交流電流を印加し温度変化を誘起する。そして試料上に形成されたトランスデューサ層に連続光（レーザー光もしくはLED光）を照射し、反射光強度をフォトディテクタで取得する。この反射光強度は温度変化に対応して変動する。ここで熱電・熱スピン効果による温度変化は電流に比例するため、交流電流と同一周波数で変動す

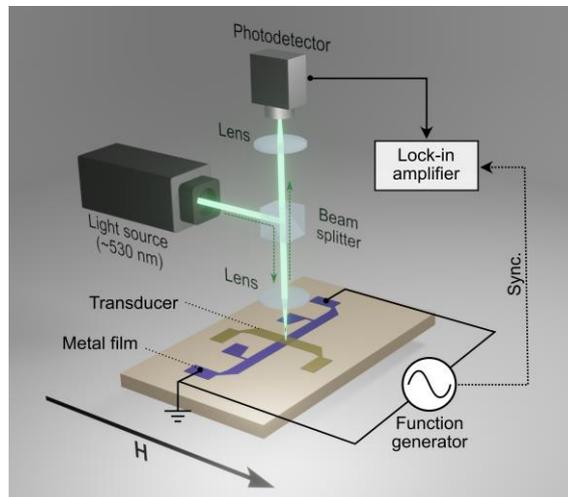


Fig. 3 Experimental setup of the lock-in thermoreflectance method.

るのに対し、ジュール熱による温度変化は電流の二乗に比例するため、交流電流の2倍の周波数で変動する。したがって、ロックイン検出により熱電・熱スピン効果の寄与とジュール熱の寄与を分離評価することが可能となる。さらに、式(2)、式(4)が示すようにスピネルペルチェ効果や異常エッチングスハウゼン効果により生じる熱流は \mathbf{M} に対応して符号が反転する。つまり、磁性体の磁化が飽和する磁場 H において、磁場反転操作により H に対する温度変化の奇成分を抽出することで、純粋なスピネルペルチェ効果や異常エッチングスハウゼン効果の寄与を評価することができる。スピネルペルチェ効果や異常エッチングスハウゼン効果による温度変化は mK レベルと小さいため、十分な S/N 比を担保するために温度変化-反射率変化の変換係数（サーモフレクタンス係数）が大きくなるトランスデューサ材料と照射光の波長の組み合わせが重要となる。本研究では、トランスデューサ材料として Au を、照射光の波長として Au のサーモフレクタンス係数が大きな ~ 530 nm を選定した。なお、トランスデューサ層への分流を避けるため、金属層とトランスデューサ層は電氣的絶縁層で隔たれている。

4. サーモフレクタンス法を用いたスピネルカロリトロニクス研究

4.1 スピネルペルチェ効果と異常エッチングスハウゼン効果の過渡応答観測

スピネルペルチェ効果は磁性体/金属界面を境界に発熱源と吸熱源を形成する。この特異な吸発熱分布に起因して定常状態に至るのが早い。熱電対やロックインサーモグラフィ法といった既存の温度変化測定法ではそれぞれ測温部の熱容量とサーモグラフィのフレームレートによって上限周波数が制限されるため約 100 Hz までの周波数応答しか取得できず、スピネルペルチェ効果の時間応答特性が観測できずにいた (Iguchi, et al., 2018)。それに対し3節で紹介したロックインサーモフレクタンス法の場合には、非接触測定であるため熱容量の問題を回避でき、さらに応答速度の速いフォトディテクタを使用することで、従来手法の上限周波数以上の領域にアクセスすることが可能となる。筆者らは $\text{Y}_3\text{Fe}_5\text{O}_{12}/\text{Pt}$ (厚み 9.0 nm) 試料に対し、ロックインサーモフレクタンス法により温度振幅 A_{odd} の周波数 f 依存性を測定した (図 4, 青プロット)。ここで A_{odd} は磁場反転に対して奇の依存性を示す温度振幅成分である。その結果、従来手法の測定限界を大幅に超える MHz 領域の温度応答を捉えることに成功した (Yamazaki, et al., 2020)。図 4 より、 $f < 1$ kHz の領域では A_{odd} はほとんど変化しないが、 $f > 1$ kHz の領域では f の増加に伴い A_{odd} が単調に減衰することがわかる。続いて、スピネルペルチェ効果と同様の熱電変換対称性を有する面内磁化配置の異常エッチングスハウゼン効果についても同様の測定を行った。非磁性基板上的強磁性金属 Ni (厚み 13.3 nm) 薄膜試料に対し A_{odd} の f 依存性を測定した結果、スピネルペルチェ効果の場合とは異なり、測定周波数範囲にわたって A_{odd} はほぼ一定値を示した (図 4, 灰色プロット)。この周波数応答の違いは、異常エッチングスハウゼン効果とスピネルペルチェ効果による熱流の長さスケールが異なることに起因する。面内磁化配置の異常エッチングスハウゼン効果の場合には Ni の膜厚が熱流の長さスケールとなるのに対し、スピネルペルチェ効果の場合には $\text{Y}_3\text{Fe}_5\text{O}_{12}$ 中を伝搬するスピネル誘起熱流の特性長によって過渡応答が決まる。そこで、スピネルペルチェ効果の過渡応答を多層

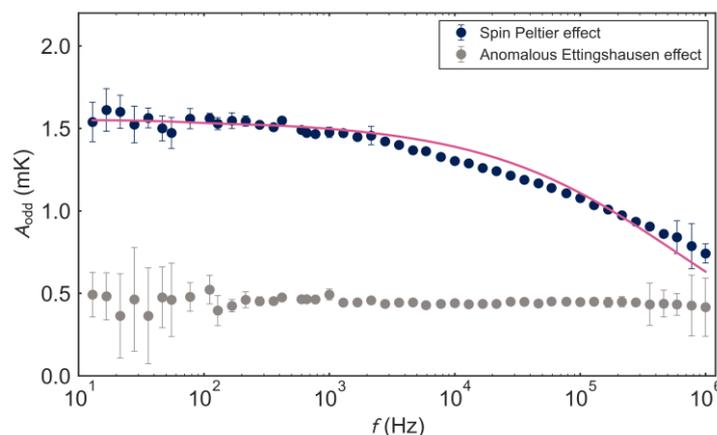


Fig. 4 Frequency f dependence of the temperature amplitude A_{odd} induced by the spin Peltier effect in the $\text{Y}_3\text{Fe}_5\text{O}_{12}/\text{Pt}$ junction (blue plots) and the anomalous Ettingshausen effect in the Ni film (gray plots). The pink line is the fitting curve derived from the multilayer heat diffusion model. (Yamazaki, et al., 2020)

熱伝導解析より得られた理論曲線とフィッティングすることでこの特性長を見積もった結果、 $0.94 \mu\text{m}$ という値が得られた。この値はこれまで報告されてきたスピンゼーベック効果の特性長より 1 オーダー程度小さい。これはスピンペルチェ効果においてスピンホール効果により誘起されるマグノンの長さスケールとスピンゼーベック効果における熱励起されたマグノンの長さスケールが異なることを意味しており、スピンペルチェ効果とスピンゼーベック効果の間に成立するオンサーガーの相反関係が単純ではないことを示唆する結果となった。このように、ロックインサーモリフレクタンス法により従来手法では捉えられなかったスピンペルチェ効果の過渡応答を観測することで、熱流-スピン流変換の物理機構の理解に繋がる新たな知見が得られた。

4・2 反強磁性エピタキシャル薄膜におけるスピン流伝搬特性の評価

熱スピン効果をスピン流プローブとして活用することにより、ロックインサーモリフレクタンス法はスピン流伝搬特性の評価手法へと拡張できる。スピン流は、磁化秩序や磁化ダイナミクスの制御に有用であり、スピン流を活用した記録・演算素子を目指したエレクトロニクスは「スピントロニクス」として発展してきた。特に、マグノンスピン流は電荷の移動を伴わずに絶縁体中を長距離にわたって伝搬するため、ジュール熱によるエネルギー散逸の問題を回避でき、超低消費電力の情報処理が可能となる。初期には強磁性絶縁体を中心にマグノンスピン流の新現象が開拓されてきたが、近年になり、正味の磁化を持たない反強磁性絶縁体においてもマグノンスピン流が流れることが明らかとなった。NiO は長距離のマグノンスピン流伝搬を示す反強磁性絶縁体であり、様々な測定手法によりそのスピン流伝搬特性が精力的に研究されている (Wang et al., 2014; Lin et al., 2016; Wang et al., 2019)。ただ、これらの研究の大半は多結晶 NiO 薄膜に焦点を当てたものであり、単結晶基板上にエピタキシャル成長した NiO 薄膜に関する研究は限定的である。エピタキシャル NiO 薄膜におけるマグノンスピン流伝搬の特性長 (マグノン拡散長) は、 $\sim 2 \text{ nm}$ から 100 nm を超えるものまで大きく異なることから、エピタキシャル NiO 薄膜中のスピン流伝搬の背景にある物理を理解するためには、より系統的な調査が不可欠である。

筆者らは、エピタキシャル成長が NiO 膜のスピン流伝搬に及ぼす影響を調査した。ここで、NiO 内を伝搬するスピン流のプローブとして Pt/NiO/CoFeB 積層構造に生じる熱スピン効果を用いた。Pt でのスピンホール効果により生成されたスピン流は NiO を伝搬し、強磁性金属 CoFeB に到達する。ここで NiO を伝搬したスピン流量は CoFeB での熱スピン効果により温度変化として捉えることができる (図 5a)。筆者らは NiO 薄膜の成長条件を制御することにより、エピタキシャル膜と多結晶膜の 2 種類の NiO 薄膜を作り分けた。そして、ロックインサーモリフレクタンス法を用いることで、熱スピン効果によって誘起される温度振幅、すなわち NiO を伝搬するスピン流量を膜厚依存的に評価した。その結果、単純なマグノン拡散に支配されていれば指数関数減衰を示すはずのスピン流伝搬特性がエピタキシャル NiO 薄膜の場合には非単調な振る舞いを示し、多結晶 NiO 薄膜の場合にはその振る舞いが顕著でなくなることがわかった (Yamazaki, et al., 2023, 図 5b)。この非自明な振る舞いの起源を明らかにするためにはさらなる系統的な評価が必要であるものの、エピタキシャル NiO 薄膜におけるスピン流伝搬がもはや単純なマグノン拡散の枠組みだけでは説明できないことを示唆する結果となった。

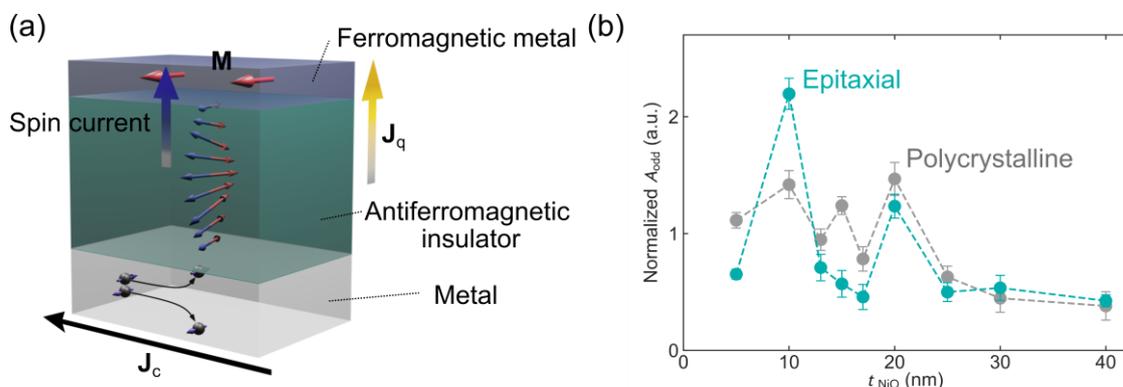


Fig. 5 (a) Schematic illustration of evaluation method for spin current transmission in NiO via thermo-spin effects, (b) NiO thickness t_{NiO} dependence of normalized temperature amplitude A_{odd} in Pt/NiO/CoFeB stacks for epitaxial NiO and polycrystalline NiO. (Yamazaki, et al., 2023)

4・3 磁性金属多層膜における横型熱電変換の性能指数の定量評価

印加する温度勾配と生成される電場の方向が直交する「横型熱電変換」は接合部のない単純な素子構造により出力を増強できるという特長がある (Uchida, et al., 2022). これは、p 型-n 型半導体の接合を必要とする従来の (縦型) 熱電変換に対する明らかな優位性であり、接合部レス構造により、モジュール化の製造プロセスを簡素化できる、モジュールの耐久性が向上する、接触熱・電気抵抗によるエネルギー変換効率低下の問題を避けられる、といった応用上の数々の利点を有する. 2 節で紹介した異常ネルンスト効果は代表的な横型熱電変換現象であり、候補材料の種類が豊富であることから精力的に材料探索が進められている. ここで材料探索において重要な横型熱電変換効率の評価指標「無次元性能指数 $z_T T$ 」は以下の式で表される.

$$z_T T = \frac{(S_T)^2 \sigma_{yy} T}{\kappa_{xx}} \quad (6)$$

式(6)は横熱電能 S_T (x 方向に与えた温度勾配と y 方向に発生した電場の比), 電気伝導率 σ_{yy} , 熱伝導率 κ_{xx} の 3 種の物性値によって材料の横型熱電変換効率が決定されることを意味する. しかし, フレキシブルデバイスへの応用が期待される薄膜材料においては, 横型熱電変換のみならず通常の縦型熱電変換においても性能指数を定量評価する手法が確立されていなかった.

筆者らは, 膜厚方向の熱伝導率 κ_{xx} 測定用の時間領域サーモリフレクタンス (Time-domain thermoreflectance: TDTR) 法を, S_T 測定用の熱流束法, 面内方向の電気伝導率 σ_{yy} 測定用の 4 端子法と組み合わせることで, 薄膜材料の $z_T T$ の定量評価が可能であることを提案・実証した (Yamazaki, et al., 2024). ここで時間領域サーモリフレクタンス法 (Cahill, 2004) とはサーモリフレクタンス法と光学的ポンプ・プローブ法を組み合わせた手法であり, 薄膜材料の熱伝導率や界面熱抵抗を評価するスタンダードな手法として熱工学分野で広く普及している. 筆者らは提案手法を, スピントロニクスにおいて古くから重要な研究対象であり, スピнкаロリトロニクス材料としても有用性が期待される磁性金属多層膜 (図 6) に適用した. そして, 磁性金属多層膜における κ_{xx} , S_T , σ_{yy} の積層繰り返し数 (N) 依存性やエピタキシャル成長の影響を系統的に調査した. 図 7 に 2 種類の Fe/Pt 磁性金属多層膜 (エピタキシャル多層膜と多結晶多層膜) における κ_{xx} , S_T , σ_{yy} , および $z_T T$ の N 依存性を示す. ここでは参照試料として作製した FePt 合金膜の結果も併せて示している. 図 7a より, N の増大により κ_{xx} が低減でき, $N = 200$ においては FePt 合金膜よりも低い値を達成した. この結果は, 多層構造が $z_T T$ の向上に繋がる κ_{xx} の抑制に効果的に寄与していることを示している. また, 図 7d より, $z_T T$ は N の増加とともに増大しており, N に依存した S_T の増大 (図 7c) を顕著に反映する結果となった. さらに $z_T T$ の値はエピタキシャル多層膜の方が多結晶多層膜より大きいことがわかった. 注目すべきは, S_T と σ_{yy} の値について, エピタキシャル多層膜の方が

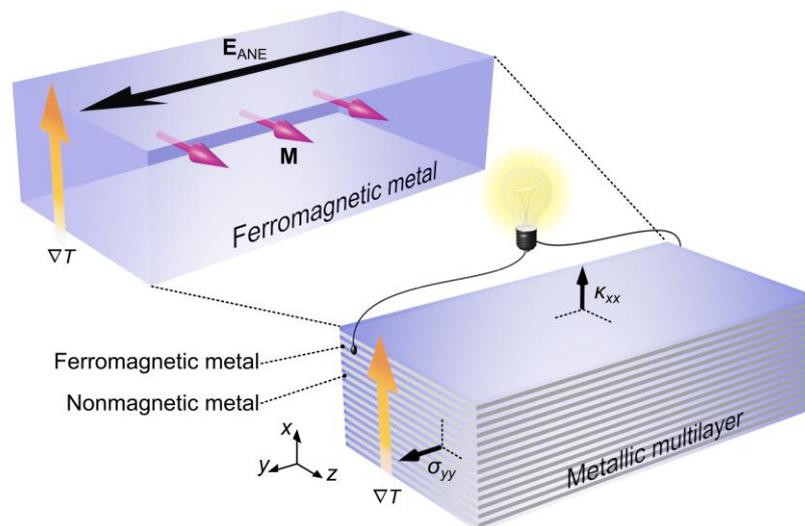


Fig. 6 Schematic illustration of transverse thermoelectric conversion due to the anomalous Nernst effect in a metallic multilayer comprised of ferromagnetic metal and nonmagnetic metal.

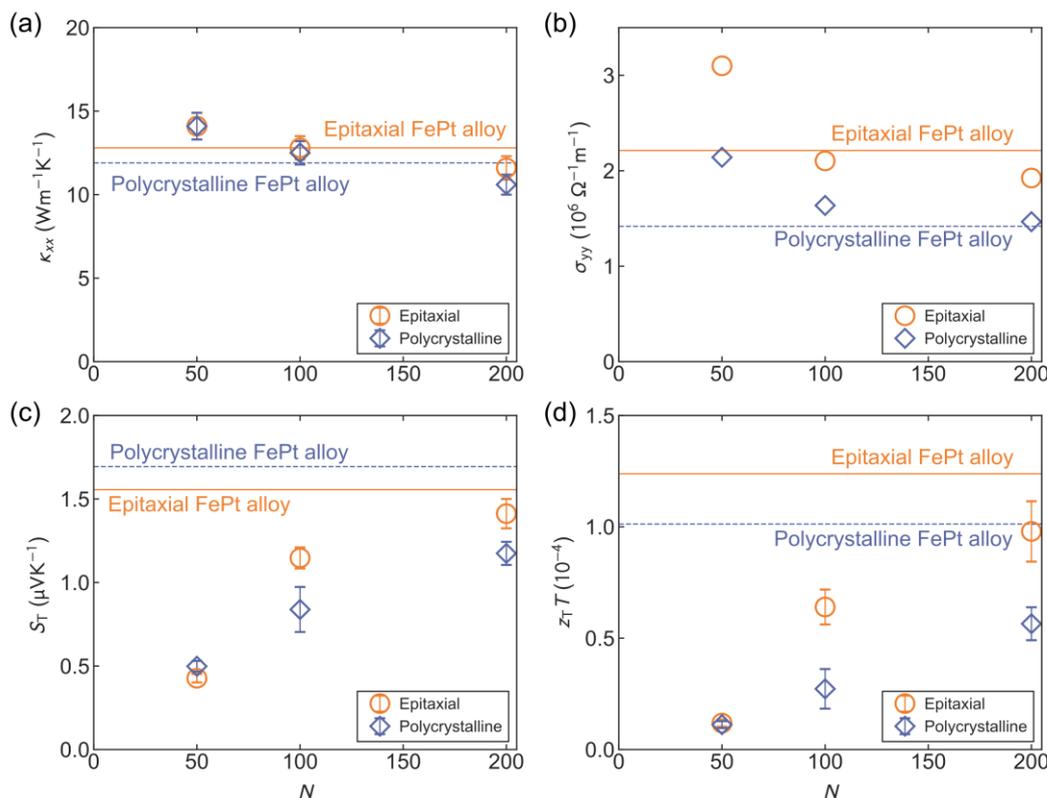


Fig. 7 Repetition number N dependence of (a) κ_{xx} , (b) σ_{yy} , (c) S_T , and (d) $z_T T$ in epitaxial and polycrystalline Fe/Pt metallic multilayers. Orange lines (blue dashed lines) represent the results for epitaxial (polycrystalline) FePt alloy films. (Yamazaki, et al., 2024)

多結晶多層膜よりも大きいものに対し、 κ_{xx} の場合には両者の間にほとんど差が見られないことである。これは、エピタキシャル多層膜と多結晶多層膜では電子輸送の異方性の程度が異なることに起因すると推察できる。本研究を通して、エピタキシャル成長が磁性金属多層膜における横型熱電変換性能の向上に重要であることを示したのみならず、サーモフレクタンズ法を活用することで薄膜材料の $z_T T$ を評価できることを初めて実証した。現時点で本手法が薄膜材料における熱電変換性能指数を定量評価する唯一の手法であることを強調したい。

5. おわりに

本稿では、スピントロニクス現象の一部を概説するとともに、光学的な温度変化測定法「サーモフレクタンズ法」に焦点を当て、スピントロニクス分野における様々な適用事例を紹介した。筆者らが行ってきた研究を通して、サーモフレクタンズ法は熱電・熱スピン変換現象の評価に有用であるのみならず、スピントロニクスという物理現象を評価する手法にもなり得ることがわかった。このように、精緻な熱測定を可能とするサーモフレクタンズ法は、スピントロニクス・スピントロニクス分野に限らず、他分野への応用可能性を秘めている。熱工学分野において培われてきたサーモフレクタンズ法が、熱工学に関わる様々な学際研究を切り拓く強力なツールとして波及していくことを期待したい。

謝辞

本稿で紹介した研究は、主に日本学術振興会科学研究費 特別研究員奨励費 (JP18J23465, JP22KJ0210), 研究活動スタート支援 (JP21K20392) の助成を受けて実施されました。また、本研究成果は、博士課程時代の指導教官である名古屋大学 長野方星教授、共同研究者である物質・材料研究機構 内田健一上席グループリーダー、井口亮博士、平井孝昌博士、東北大学金属材料研究所 関剛斎教授、日本原子力研究開発機構 高梨弘毅教授、産業技術総合研究所 八木貴志研究グループ長をはじめとする方々との共同研究により得られました。心より御礼申し上げます。

文献

- Bauer G. E. W., Saitoh E., van Wees B. J., Spin caloritronics, *Nature Materials*, Vol. 11 (2012), pp.391-399.
- Boona S. R., Myers R. C., Heremans J. P., Spin caloritronics, *Energy & Environmental Science*, Vol. 7 (2014), pp.885-910.
- Cahill D. G., Analysis of heat flow in layered structures for time-domain thermoreflectance, *Review of Scientific Instruments*, Vol. 75 (2004), pp.5119-5122.
- Daimon S., Iguchi R., Hioki T., Saitoh E., Uchida K. Thermal imaging of spin Peltier effect, *Nature Communications*, Vol. 7 (2016), 13754.
- Flipse J., Dejene F., Wagenaar D., Bauer G. E. W., Ben Youssef J., van Wees B. J., Observation of the Spin Peltier Effect for Magnetic Insulators, *Physical Review Letters*, Vol. 113 (2014), 027601.
- Iguchi R., Uchida K., Charge-current angle and frequency dependences of the spin Peltier effect induced by the spin Hall effect, *Japanese Journal of Applied Physics*, Vol. 57 (2018), 0902B6.
- Lin W., Chen K., Zhang S., Chien C. L., Enhancement of Thermally Injected Spin Current through an Antiferromagnetic Insulator, *Physical Review Letters*, Vol. 116 (2016), 186601.
- Seki T., Iguchi R., Takanashi K., Uchida K., Visualization of anomalous Ettingshausen effect in a ferromagnetic film: Direct evidence of different symmetry from spin Peltier effect, *Applied Physics Letters*, Vol. 112 (2018), 152403.
- Sinova J., Valenzuela S. O., Wunderlich J., Back C., Jungwirth T., Spin Hall effects, *Reviews of Modern Physics*, Vol. 87 (2015), pp.1213-1289.
- Uchida K., Transport phenomena in spin caloritronics, *Proceedings of the Japan Academy, Series B*, Vol. 97 (2021), pp.69-88.
- Uchida K., Heremans J. P., Thermoelectrics: From longitudinal to transverse, *Joule*, Vol. 6 (2022), 2240.
- Wang H., Du C., Hammel P. C., Yang F., Antiferromagnonic Spin Transport from $Y_3Fe_5O_{12}$ into NiO, *Physical Review Letters*, Vol. 113 (2014), 097202.
- Wang Y., Zhu D., Yang Y., Lee K., Mishra R., Go G., Oh S., Kim D., Cai K., Liu E., Pollard S. D., Shi S., Lee J., Teo K. L., Wu Y., Lee K., Yang H., Magnetization switching by magnon-mediated spin torque through an antiferromagnetic insulator, *Science*, Vol. 366 (2019), 1125.
- Yamazaki T., Iguchi R., Ohkubo T., Nagano H., Uchida K., Transient response of the spin Peltier effect revealed by lock-in thermoreflectance measurements, *Physical Review B*, Vol. 101 (2020), 020415(R).
- Yamazaki T., Seki T., Kubota T., Takanashi K., Influence of epitaxial growth on spin current transmission of NiO films, *Applied Physics Express*, Vol. 16 (2023), 083003.
- Yamazaki T., Hirai T., Yagi T., Yamashita Y., Uchida K., Seki T., Takanashi K., Quantitative measurement of figure of merit for transverse thermoelectric conversion in Fe/Pt metallic multilayers, *Physical Review Applied*, Vol. 21 (2024), 024039.