

齊藤 英治

東北大学金属材料研究所 教授

スピン流による熱・電気・動力ナノインテグレーションの創出

§1. 研究実施の概要

本研究は、スピントロニクスとナノマシニング技術の融合により、電気・熱・動力の間の量子力学的な変換を実現する新しいナノテクノロジー体系の構築を目指すものである。我々の開発したスピン流生成・検出技術を、スピン流相互作用が顕在化するナノメートルスケールで融合させることで、スピン流を媒介として電気・磁気・熱・動力を高効率に変換するテクノロジー体系を構築することを狙う。本年度は、従来のインピーダンス整合条件に拘束されないスピン流注入により飛躍的に高効率なスピン流注入を可能にするスピン流動的注入法の開発、スピン流による熱電・熱スピン変換（スピンゼーベック効果）の性能を決定づけるフォノンスピンポンプの検出、スピン流と回転運動の結合の基礎定式化を行い、研究をスタートアップさせた。

§2. 研究実施体制

(1)「齊藤」グループ

- ① 研究分担グループ長: 齊藤 英治 (東北大学金属材料研究所、教授)
- ② 研究項目
 - ・スピン流注入効率の飛躍的向上
 - ・スピンゼーベック効果及びスピンペルチェ効果による熱電変換素子の開拓
 - ・スピントロニクスとマイクロ機械流体工学の融合

(2)「高梨」グループ

- ① 研究分担グループ長: 高梨 弘毅 (東北大学金属材料研究所、教授)
- ② 研究項目
 - ・高品質 FePt 垂直磁化膜および高スピン分極ホイスラー薄膜の最適成膜条件の探索
 - ・数十 nm サイズの磁性ナノドットの微細加工プロセスの確立

(3)「前川」グループ

①研究分担グループ長:前川 禎通 (日本原子力研究開発機構 先端基礎研究センター、センター長)

②研究項目

- 一般座標変換共変なディラック方程式のパウリ近似に基づく微視的理論の建設
- 磁場中での力学的回転によるスピン流生成を理論的に予言
- 実験グループと共同で力学的に生成されるスピン流の検出方法を検討

§3. 研究実施内容

(文中に番号がある場合は(4-1)に対応する)

スピン流を媒介として電気・磁気・熱・動力を高効率に変換させるテクノロジー構築に不可欠な以下の研究を行った。

1. スピン流注入の効率の飛躍的向上を目指した研究

スピン流の注入においては、従来「インピーダンス整合条件」と呼ばれる輸送係数に関する制約条件があり、特に高抵抗物質へのスピン流注入は不可能であった。シリコンやグラフェンなどの高抵抗物質へのスピン流注入がなかなか実現しなかったのは、このためである。広範囲な物質へスピン注入を行うために、動的なスピン注入技術を開拓した。我々は、スピン混成コンダクタンスのある界面を通して磁化歳差運動を励起した磁性体に接触させた金属に起スピン力が生じる筈であるとの理論的予想を得ており、これを証明・実現するために、ショットキー障壁高さを変化させた GaAs/NiFe 接合を作成し、マイクロ波共鳴によるスピンプンプ誘起逆スピンホール効果の測定を行った。この逆スピンホール効果の強度は、接合から GaAs 層に動的に注入されたスピン流の大きさに比例する。インピーダンス整合条件によると、通常の(静的な)スピン注入の効率はショットキー障壁が高いほうが良い筈である。

測定の結果、スピンプンプによる動的なスピンプンプの効率は、ショットキー高さの変化にあまり敏感でなく、むしろショットキー障壁の低い系で注入効率が良いことがわかった。これは、この方法によるスピン流注入が、インピーダンス整合条件と全く関係ないことを示しており、非平衡スピン蓄積を経由せずにスピン混成コンダクタンスの効果のみでスピン流がポンプされていることを示している。ショットキー障壁が低くなることによって、界面での波動関数の重なりが増大しスピン混成コンダクタンスが大きくなることで、注入効率が少しだけ変化したものと考えられる。この動的スピン注入法はインピーダンス整合条件による拘束は無く、高抵抗系へのスピン注入が可能になる。実際、この手法により GaAs への室温スピン流注入検出にはじめて成功した。

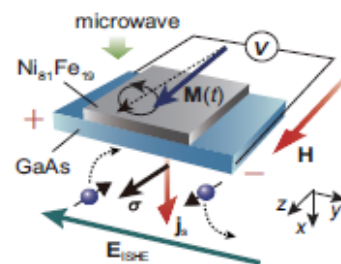


図1 ショットキー障壁を介した GaAs へのスピンプンプの模式図。界面にショットキー障壁が形成される。

2. 電子スピンによる熱電エネルギー変換技術の開拓

スピンゼーベック効果及びスピンペルチェ効果による熱電変換素子の開拓の実現へ向けた研究を行った。スピンゼーベック効果の効率を向上させるためには、スピンゼーベック効果の効率を支配する因子を解明する必要がある。我々は現在までに、スピンゼーベック効果の基本メカニズムである“マグノン分布関数と電子対分布関数の差”を与える具体的な機構として、スピン波伝播機

構、フォノン機構のモデルを提案してきた。特に、フォノン機構は、バルクから熱エネルギーを回収できることから重要であるが、現在までに検出されてこなかった。フォノン機構を調べるために、図2に模式的に示したような $\text{Ni}_{81}\text{Fe}_{19}/\text{Pt}$ 二層膜ワイヤーを絶縁体基板上に成膜し、基板に一樣な温度勾配を付けた。従来の典型的なスピントラニクス系とは異なり、本試料では温度勾配に沿った方向のキャリアはフォノンに限定されている。ゆえに、この系においてスピントラニクス効果が発現すれば、フォノンを介したスピントラニクス生成プロセスが存在することの決定的な証拠になる。本実験では、逆スピントラニクス効果を用いてスピントラニクス効果を電氣的に検出するために、図2の試料において Pt 層の両端に発生した起電力を測定した。実験はすべて室温下で行った。 $\text{Ni}_{81}\text{Fe}_{19}/\text{Pt}$ ワイヤーは電氣的・磁氣的に完全に孤立しているにもかかわらず、Pt 層に発生した起電力はワイヤーの接合位置に依存して変化し、ワイヤーを基板の高温側に接合した場合、低温側に接合した場合でそれぞれ起電力信号の符号が反転した。この結果は、金属ワイヤー中の電子が“絶縁体基板上の位置を認識している”ということを示している。

起電力の温度勾配依存性に加えて、磁場依存性、ワイヤー接合位置依存性、ワイヤーの物質依存性、基板依存性を系統的に検証し、上記のような起電力の異常な振る舞いが、これまでに観測されていたスピントラニクス効果の振る舞いと完全に整合するものであることを

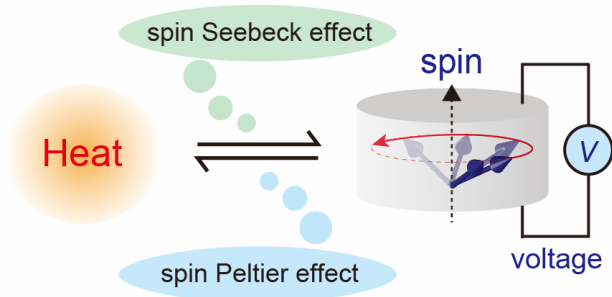


図3 スピントラニクス効果、スピントラニクス効果の概念図。

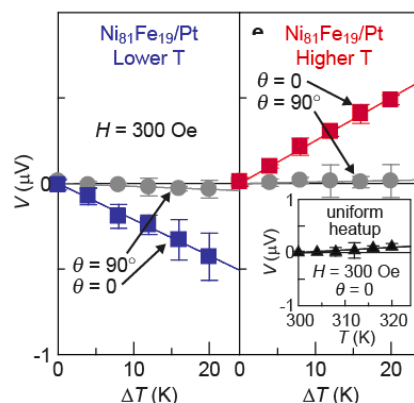
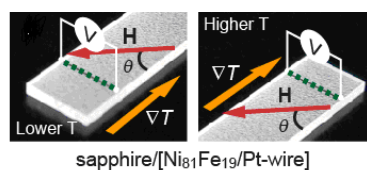


図2 フォノン機構によるスピントラニクス効果検出のための実験系。

明らかにした。また、線形応答理論を用いた理論計算も行い、このような起電力の起源が絶縁体基板中を伝播するフォノン(によって誘起されたスピントラニクス)であることを見出した。低周波フォノンは非常に長い伝播距離を有するため、これと磁性体($\text{Ni}_{81}\text{Fe}_{19}$)中の

マグノン-フォノン相互作用が結合することによってスピントラニクスの長距離性、すなわちスピントラニクス効果が発現する。従来の試料系において観測されたスピントラニクス効果の信号は、 $\text{Ni}_{81}\text{Fe}_{19}$ 膜中のフォノン媒介プロセスによって説明できる。従って、このフォノン機構を利用することで、フォノン伝搬部分の設計によりスピントラニクス効果の効率の増大が可能である。

さて、上記スピントラニクス効果は、熱から電圧やスピントラニクスが生成される効果である。スピントラニクス効果の存在は、その逆効果である「スピントラニクスによって熱が奪われる効果:スピントラニクス効果

果」の存在を予言する(図3)。本年度は、赤外線スペクトル測定系と顕微鏡光学系を組み合わせることによって酸化絶縁体の精密温度分布観察システムを作成し、スピネルペルチェ効果の観測の準備を行った。

3. 電子スピンによるナノスケール動力・電力生成技術の開拓

スピントロニクスとマイクロ機械工学の融合により、電子から量子力学原理により動力を取り出す技術、及び発電の技術を開拓するための準備を行った。まず、運動している系においてスピン流を記述する有効ハミルトニアンを導出し¹⁰⁾、スピン流と機械的運動の間の相互作用の基礎理論を提示した。また、古典的な運動方程式にスピントルクを組み込んだ方程式を提示し、これを簡単な系に対して数値計算することで、試料設計を行った。

§4. 成果発表等

(4-1) 原著論文発表

● 論文詳細情報

1. Ken-ichi Uchida, Hiroto Adachi, Takeru Ota, Hiroyasu Nakayama, Sadamichi Maekawa, and Eiji Saitoh, "Observation of longitudinal spin-Seebeck effect in magnetic insulators", Applied Physics Letters, vol. 96, pp.172505_1-172505_3, 2010 (DOI:10.1063/1.3507386)
2. Kazuya Ando and Eiji Saitoh, "Inverse spin-Hall effect in palladium at room temperature", Journal of Applied Physics, vol. 108, pp.113925_1-113925_4, 2010 (DOI:10.1063/1.3517131)
3. Christian W. Sandweg, Yosuke Kajiwara, Kazuya Ando, Eiji Saitoh, and Burkard Hillebrands, "Enhancement of the spin pumping efficiency by spin wave mode selection", Applied Physics Letters, vol. 97, pp.252504_1-252504_3, 2010 (DOI:10.1063/1.3528207)
4. Hiroto Adachi, Ken-ichi Uchida, Eiji Saitoh, Jun-ichiro Ohe, Saburo Takahashi, and Sadamichi Maekawa, "Gigantic enhancement of spin Seebeck effect by phonon drag", Applied Physics Letters, vol. 97, pp.252506_1-252506_3, 2010 (DOI:10.1063/1.3529944)
5. Ken-ichi Uchida, Tatsumi Nonaka, Takeru Ota, and Eiji Saitoh, "Longitudinal

spin-Seebeck effect in sintered polycrystalline (Mn,Zn)Fe₂O₄", Applied Physics Letters, vol. 97, pp.262504_1-262504_3, 2010 (DOI:10.1063/1.3533397)

6. Ryo Iguchi, Kazuya Ando, Eiji Saitoh, and Tetsuya Sato, "Spin current study of spin glass AgMn using spin pumping effect", Journal of Physics (conference series), vol. 266, pp. 012089_1-012089_4, 2011 (DOI:10.1088/1742-6596/266/1/012089)

7. Hiroyasu Nakayama, Kazuya Ando, Kazuya Harii, Yasunori Fujikawa, Yosuke Kajiwara, Tatsuro Yoshino, and Eiji Saitoh, "Inverse spin-Hall effect induced by spin pumping in different size Ni₈₁Fe₁₉/Pt films", Journal of Physics (conference series), vol. 266, pp. 012100_1-012100_4, 2011 (DOI:10.1088/1742-6596/266/1/012100)

8. Tatsumi Nonaka, Kazuya Ando, Tatsuro Yoshino, and Eiji Saitoh, "Spin pumping and magnetization-precession trajectory in thin film systems", Journal of Physics (conference Series), vol. 266, pp. 012101_1-012101_4, 2011 (DOI:10.1088/1742-6596/266/1/012101)

9. Tatsuro Yoshino, Kazuya Ando, Kazuya Harii, Hiroyasu Nakayama, Yosuke Kajiwara and Eiji Saitoh, "Quantifying spin mixing conductance in F/Pt (F =Ni, Fe, and Ni₈₁Fe₁₉) bilayer film", Journal of Physics (conference Series), vol. 266, pp. 012115_1-012115_4, 2011 (DOI:10.1088/1742-6596/266/1/012115)

10. Mamoru Matsuo, Jun-ichi Ieda, Eiji Saitoh, and Sadamichi Maekawa, "Effects of mechanical rotation on spin currents" (selected as Editor's Suggestion), Physical Review Letters, vol. 106, pp. 076601_1-076601_1_4, 2011 (DOI:10.1103/PhysRevLett.106.076601)

11. Tatsuro Yoshino, Kazuya Ando, Kazuya Harii, Hiroyasu Nakayama, Yosuke Kajiwara, and Eiji Saitoh, "Universality of the spin pumping in metallic bilayer films" Applied Physics Letters, vol. 98, pp. 132503_1-132503_3, 2011 (DOI:10.1063/1.3571556)

12. H. Chudo, Kazuya Ando, K. Saito, S. Okayasu, R. Haruki, Y. Sakuraba, H. Yasuoka, Koki Takanashi, and Eiji Saitoh, "Spin pumping efficiency from half metallic Co₂MnSi", Journal of Applied Physics, vol. 464, pp.073915_1-073915_4, 2011. (DOI:10.1063/1.3556433)

13. S. Bosu, Y. Sakuraba, Ken-ichi Uchida, K. Saito, Takeru Ota, Eiji Saitoh, and Koki Takanashi, “Spin Seebeck effect in thin films of the Heusler compound Co_2MnSi ”, *Physical Review B*. (in press).

14. Christian W. Sandweg, Yosuke Kajiwara, A. V. Chumak, A. A. Serga, V. I. Vasyuchka, M. B. Jungfleisch, Eiji Saitoh, and Burkard Hillebrands, “Spin pumping by parametrically excited exchange magnons”, *Physical Review Letters*. (in press).

15. Kazuya Harii, Toshu An, Yosuke Kajiwara, Kazuya Ando, Hiroyasu Nakayama, Tatsuro Yoshino, and Eiji Saitoh, “Frequency dependence of spin pumping in Pt/ $\text{Y}_3\text{Fe}_5\text{O}_{12}$ film”, *Journal of Applied Physics*. (in press).

16. Kazuya Ando, Yosuke Kajiwara, Hiroyasu Nakayama, Kazuya Harii, Tatsuro Yoshino, Yasunori Fujikawa, Saburo Takahashi, Jun-ichi Ieda, Sadamichi Maekawa, and Eiji Saitoh, “Inverse spin-Hall effect induced by spin pumping in metallic systems”, *Journal of Applied Physics*. (in press).

17. Yosuke Kajiwara, Saburo Takahashi, Sadamichi Maekawa, and Eiji Saitoh, “Detection of spin-wave spin current in a magnetic insulator”, *IEEE transactions on Magnetism*. (in press).

(4-2) 知財出願

① 平成22年度特許出願件数(国内 2件)

② CREST 研究期間累積件数(国内 2件)