

「次世代エレクトロニクスデバイスの創出に資する
革新材料・プロセス研究」
平成 20 年度採択研究代表者

H24 年度 実績報告

前川 禎通

独立行政法人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

数値シミュレーションによる新材料・新機能の開発

§1. 研究実施体制

(1)「原研」グループ

- ① 研究代表者: 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
 - ・スピンエレクトロニクスデバイス機能の創出及び材料設計

(2)「理研」グループ

- ① 主たる共同研究者: 柚木 清司 (理化学研究所 基幹研究所、准主任研究員)
- ② 研究項目
 - ・スピン・熱交差効果を用いた新機能の創出及び材料設計を加速するシミュレーション

(3)「日立」グループ

- ③ 主たる共同研究者: 市村 雅彦 (日立製作所 基礎研究所、主任研究員)
- ④ 研究項目
 - ・スピントルク及びスピン起電力による論理素子の設計を加速するシミュレーション

§ 2. 研究実施内容

(文中に番号がある場合は(3-1)に対応する)

本年度は、平成 23 年度までに開発した材料及びデバイス開発のための数値計算プログラムを利用し、年次研究計画に掲げた 3 つのデバイス開発に関して下記の事項を達成した：

・「スピン起電力デバイス」

スピン起電力の理論を融合したマイクロマグネティックシミュレーションを実施し、大きな垂直磁気異方性を有する強磁性体中の磁壁移動が出力安定化に有利であることを実証した⁴⁾(原研グループ)。

形状効果を利用した「磁気・電気インバータ」の原理を見出し、スピン起電力のパワーエレクトロニクス分野への応用可能性を提案した⁶⁾(原研グループ)。

スピン増幅器の基礎原理(特許申請済み)に基づき、デバイス特性の定量評価のための数値解析ツールを開発した(日立グループ、原研グループ)。

・「スピン熱電対」

スピン熱電対を特徴付ける新しい性能指数の理論を完成させ、新たにフェリ磁性絶縁体におけるスピントラップ効果の理論を構築した¹⁹⁾(原研グループ)。

マンガン酸化物ヘテロ構造体の磁気構造に関する第一原理電子状態シミュレーションを実施し、異なった遷移金属酸化物を用いた人工格子系で現れる電子磁気相がどの物理パラメータによって決定されるかを解明した¹²⁾(理研グループ)。

・「強磁性ジョセフソン共鳴デバイス」

磁壁のような内部磁化構造を伴う強磁性体を障壁とするジョセフソン共鳴デバイスの特性評価を実施し、高感度磁気センサーへの応用可能性を示した⁵⁾(理研グループ、原研グループ)。

ここでは、新聞報道につながった成果 2 件を特に紹介する。

直流磁場から交流電圧を生み出す機構を発見⁶⁾

通常、スピン起電力の大きさは加える磁場の大きさに正比例する。すなわち、直流の磁場に対しては直流の電圧が生じ、交流磁場からは入力した磁場と同じ周波数を持った交流電圧が生じる。本研究では、この一般原則を拡張することに取り組み、磁性細線の形状変化を用いることで、「直流」の入力磁気エネルギーを磁壁エネルギーの変調を介して時間的に変化させ、機械的な動力を一切用いずに「交流」の電圧出力を得る仕組み、すなわち「磁気・電気インバータ」の原理を考案した。このアイデアを定量的に評価するために、磁壁運動の数値解析を実施しスピン起電力の理論と組み合わせることで、図1に示す通り周期変調細線におけるスピン起電力の出力電圧信号(赤)では直線状の非変調細線の場合に生じる直流電圧(黒)に加えて交流成分が発生することを見出した。本成果は、磁気と電気という異種のエネルギー形態を直接結びつけた、高効率なこれまでにないエレクトロニクス分野を切り開く大きな一歩であり、待機電源が不要な電子素子などへの応用

が期待される。

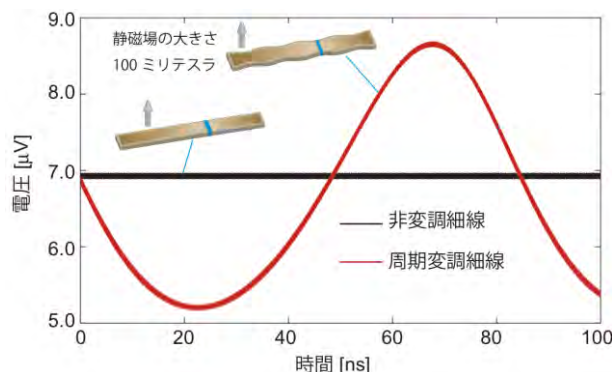


図 1：磁気・電気インバータの出力電圧（赤）。形状を加工のない磁性細線における出力電圧（黒）とともに示す。

強磁性体中の磁壁振動の高感度かつ高精度測定の原理を発見⁵⁾

強磁性体中の磁壁をメモリーに応用しようとする試みは、数あるスピントロニクスデバイスの中で最も有望視されている。そのため、磁壁を磁場や電場で制御する方法や、その運動を高精度で観測する手段はデバイス設計上極めて重要となる。本研究では、磁壁運動を高精度で観測する原理を探索し、図 2 左に示すような強磁性体を 2 つの超伝導体で挟んだ「強磁性ジョセフソン接合」を考案するとともにその動作特性の理論解析を行った。磁壁が振動運動をしているときの接合方向(y 方向)の電流電圧特性は、超伝導電流成分と磁気との結合を反映し、図 2 右に示す階段状の電流電圧特性を示すことを見出した。さらに、その階段の現れる電圧の値は振動数の整数倍に比例し、比例係数がプランク定数と素電荷の比という基礎物理定数のみで決まること分かった。電圧はジョセフソン接合を用いて 9 桁という驚異的な精度で規定されている。また、基礎物理定数も同様な精度で規定されている。よって、磁壁の振動数を同様に高精度で観測が可能になる。今後、この原理を応用して磁壁運動を高感度かつ高精度に測定することが出来るようになれば、磁壁を用いたデバイス開発を促進すること出来ると期待される。

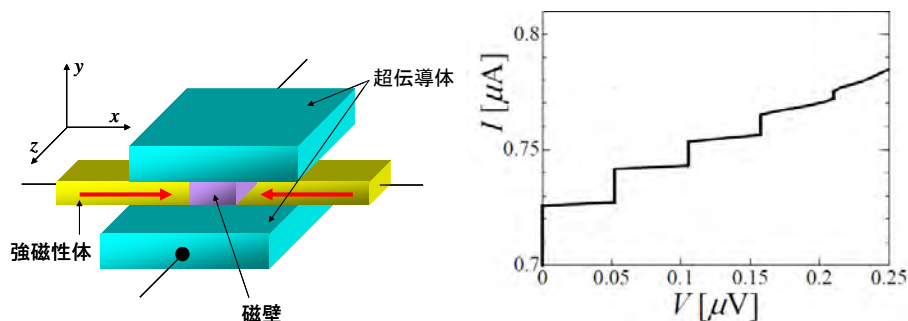


図 2. 磁壁を含む強磁性ジョセフソン接合の概念図(左)と磁壁が振動している場合の電流電圧特性(右)。

§3. 成果発表等

(3-1) 原著論文発表

●論文詳細情報

1. Dahai Wei, Yasuhiro Niimi, Bo Gu, Timothy Ziman, Sadamichi Maekawa, and Yoshichika Otani, “The spin Hall effect as a probe of non-linear spin fluctuations”, *Nature Communications* **3**, 1058 (1-5) (2012) (DOI: 10.1038/ncomms2063).
2. K. Tanabe, D. Chiba, J. Ohe, S. Kasai, H. Kohno, S. E. Barnes, S. Maekawa, K. Kobayashi, and T. Ono, “Spin-motive force due to a gyrating magnetic vortex”, *Nature Communications* **3**, 845 (2012) (DOI: 10.1038/ncomms1824).
3. M. Hayashi, J. Ieda, Y. Yamane, J. Ohe, Y. K. Takahashi, S. Mitani, and S. Maekawa, “Time-domain observation of spinmotive force in permalloy nanowires”, *Phys. Rev. Lett.* **108**, 147202 (2012) (DOI: 10.1103/PhysRevLett.108.147202).
4. Y. Yamane, J. Ieda, and S. Maekawa, “Stability of Spinmotive Force in Perpendicularly Magnetized Nanowires under High Magnetic Fields”, *Appl. Phys. Lett.* **100**, 162401 (2012) (DOI:10.1063/1.4703933).
5. S. Hikino, M. Mori, W. Koshibae, and S. Maekawa, “Towards precise measurement of oscillatory domain wall by ferromagnetic Josephson junction”, *Appl. Phys. Lett.* **100**, 152402 (2012) (DOI: 10.1063/1.3701782).
6. Jun'ichi Ieda and Sadamichi Maekawa, “Magnetic power inverter: AC voltage generation from DC magnetic fields”, *Appl. Phys. Lett.* **101**, 252413 (2012) (DOI: 10.1063/1.4773214).
7. B. Gu, T. Ziman, and S. Maekawa, “Theory of the spin Hall effect, and its inverse, in a ferromagnetic metal near the Curie temperature”, *Phys. Rev. B* **86**, 241303 (2012) (DOI: 10.1103/PhysRevB.86.241303).
8. K. Uchida, T. Ota, H. Adachi, J. Xiao, T. Nonaka, Y. Kajiwara, G. E. W. Bauer, S. Maekawa, and E. Saitoh, “Thermal spin pumping and magnon-phonon-mediated spin-Seebeck effect”, *J. Appl. Phys.* **111**, 103903 (2012) (DOI: 10.1063/1.4716012).
9. K. Tsutsui, T. Tohyama, W. Koshibae, and S. Maekawa, “Theoretical Study of Resonant Inelastic X-ray Scattering Spectrum in Nickelates”, *J. Phys.: Conf. Ser.* **400**, 032105 (2012) (DOI:10.1088/1742-6596/400/3/032105).
10. S. Hikino and S. Yunoki, “Spin Hall effect in a superconductor/normal metal junction”, *Physics Procedia* **27**, 84 (2012) (DOI: 10.1016/j.phpro.2012.03.416).
11. Q. Zhang, S. Dong, B. Wang, and S. Yunoki, “Strain-engineered magnetic order in $(\text{LaMnO}_3)_n/(\text{SrMnO}_3)_{2n}$ superlattices”, *Phys. Rev. B* **86**, 094403 (2012) (DOI:

- 10.1103/PhysRevB.86.094403).
12. S. Dong, Q. Zhang, S. Yunoki, J.-M. Liu, and E. Dagotto, “Magnetic and orbital order in $(RMnO_3)_n/(AMnO_3)_{2n}$ superlattices studied via a double-exchange model with strain”, *Phys. Rev. B* **86**, 205121 (2012) (DOI: 10.1103/PhysRevB.86.205121).
 13. H. Watanabe, T. Shirakawa, and S. Yunoki, “Variational Monte Carlo study for superconductivity in multi-orbital systems”, *J. Phys.: Conf. Ser.* **400**, 022134 (2012) (DOI: 10.1088/1742-6596/400/2/022134).
 14. G. Chen, Q. Zhang, X. Gong, and S. Yunoki, “ d^0 ferromagnetic surface in HfO_2 ”, *J. Phys.: Conf. Ser.* **400**, 032008 (2012) (DOI: 10.1088/1742-6596/400/3/032008).
 15. Q. Zhang and S. Yunoki, “A first-principles study for electronic and magnetic properties of $LaFeO_3/LaCrO_3$ superlattices”, *J. Phys.: Conf. Ser.* **400**, 032126 (2012) (DOI: 10.1088/1742-6596/400/3/032126).
 16. S. Sorella, Y. Ostuka, and S. Yunoki, “Absence of a Spin Liquid Phase in the Hubbard Model on the Honeycomb Lattice”, *Scientific Reports* **2**, 992 (2012) (DOI: 10.1038/srep00992).
 17. Y. Ohnuma, H. Adachi, E. Saitoh, and S. Maekawa, “Spin Seebeck effect in antiferromagnets and compensated ferrimagnets”, *Phys. Rev. B* **87**, 014423 (2013) (DOI: 10.1103/PhysRevB.87.014423).
 18. M. Matsuo, J. Ieda, and S. Maekawa, “Renormalization of spin-rotation coupling”, *Phys. Rev. B* **87**, 115301 (2013) (DOI: 10.1103/PhysRevB.87.115301).
 19. H. Adachi, K. Uchida, E. Saitoh, and S. Maekawa, “Theory of the spin Seebeck effect”, *Rep. Prog. Phys.* **76** 036501 (2013) (DOI: 10.1088/0034-4885/76/3/036501).
 20. X. Wang, J. Xiao, A. Manchon, and S. Maekawa, “Spin-Hall Conductivity and Electric Polarization in Metallic Thin Films”, *Phys. Rev. B.* **87**, 014423 (2013) (DOI: 10.1103/PhysRevB.87.014423).
 21. S. Zhang, S. Yamagiwa, M. Okumura, and S. Yunoki, "Kernel polynomial method on GPU", *Int. J. Parallel Prog.* **41**, 59 (2013) (DOI: 10.1007/s10766-012-0204-y).
 22. J. Ieda, Y. Yamane, and S. Maekawa, “Real time analysis of spinmotive force due to domain wall motion”, *J. Korean Phys. Soc.* (in press).
 23. M. Matsuo, J. Ieda, E. Saitoh, and S. Maekawa, “Effects of mechanical rotation and vibration on spin currents”, *J. Korean Phys. Soc.* (in press).
 24. H. Adachi and S. Maekawa, “Linear-response theory of the longitudinal spin Seebeck effect”, *J. Korean Phys. Soc.* (in press).
 25. S. Maekawa and H. Adachi, “Heat and Spin”, *J. Korean Phys. Soc.* (in press).
 26. T. Hamada, T. Ohno, and S. Maekawa, “Implementation of the DFT+U Method and Constrained DFT Calculations of U and J within a Pseudopotential Formalism:

Application to FeO and LaVO₃", J. Korean Phys. Soc. (in press).

27. 小椎八重 航, 遷移金属酸化物にみられる巨大な熱起電力に関する理論的研究, 粉体および粉末冶金 **59**, 190 (2012).

(3-2) 知財出願

① 平成 24 年度特許出願件数(国内 1 件)

② CREST 研究期間累積件数(国内 4 件)