

「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

H23 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

- ① 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)
- ② 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)

ここでは本年度実施した研究内容から、特に集中的に取り組んだスピン起電力の理論的
解明とデバイス応用に向けた数値シミュレーションに関する成果を紹介する。

①研究のねらい

古典的な電磁気学では、磁場の中に電気回路を置いたとき、磁場の時間的な変化が回路に起電力をもたらす。これは1831年にファラデーが発見した電磁誘導の法則であり、さまざまな電気機器の動作原理となっている。この起電力は磁場が電子の「電荷」に作用する力を反映している。一方、マイクロな世界を扱う量子力学では、電子の「スピン」にも力が作用する。我々は、磁性材料を含むナノ構造においては時間的に変化しない静磁場の中でも起電力を発現できることを理論的に示し、このスピンの起因する起電力を「スピン起電力」と名付けた[S.E. Barnes and S. Maekawa, Phys. Rev. Lett. 98, 246601 (2007)]。この原理を用いれば、磁気エネルギーから電気エネルギーへの効率的な変換が可能になり、**新しいタイプの電池**(スピン電池)としての応用が考えられる。

②研究実施方法

スピン起電力は、一般に強磁性体において磁化が空間的にも時間的にも非一様な状況で発現する。そこで、磁性ナノ粒子、磁壁、磁気渦といった非一様磁化を有する強磁性ナノ構造に着目し、磁化の運動方程式であるランダウ・リフシッツ・ギルバート(LLG)方程式に基づいた実空間実時間磁化ダイナミクスシミュレーションを行う。求めた磁化ダイナミクスから、各時間・空間におけるスピン電場を計算し、ポアソン方程式を解くことで試料全体の電位分布を求める。

研究実施に当たって、**原研グループ**と**日立グループ**でLLG計算、スピン起電力計算プログラムの整備を行い、それらを統合した任意の強磁性物質・材料形状におけるスピン起電力を求める数値計算のアルゴリズムの開発を行う。また、本研究で得られた理論予測を、実証実験協力グループと共同で検証する。

③本年度の実施内容

スピン起電力の数値計算アルゴリズムの開発^[2]

元来スピン起電力は、電子のスピンの獲得するベリー位相の時間微分として定式化された。ベリー位相が解析的に計算できる系においては、これに基づくスピン起電力の見積もりが可能である。我々は、より一般的な系において定量的にスピン起電力を議論するために、s-d型の交換相互作用モデルに基づくスピン起電力理論を構築し、スピン起電力 V が

$$V = -\left(P\hbar/2e\right) \int \mathbf{m} \cdot (\dot{\mathbf{m}} \times \nabla \mathbf{m}) d\mathbf{r} \quad (1)$$

で与えられることを明らかにした。ここで、 P は強磁性体のスピン分極率、 e は素電荷、 \mathbf{m} は局在磁化の方向を示す単位ベクトルである。(1)式からわかることは、一つはスピン起電力を計算するためには局在磁化のダイナミクスを計算すればよいということ。もう一つは、スピン起電力生成のためには、時間、空間双方に依存した局在磁化ダイナミクスの誘起が必要だということである。本研究の成果により、任意の系におけるスピン起電力の定量的な計算が可能になり、従って数値的な解析が可能になった。局在磁化のダイナミクスはLLG方程式に従うことがよく知られている。スピン起電力を計算するためには、LLG方程式を解いて得られた局在磁化ダイナミクスを用いて(1)式を計

算すればよい。

形状効果を用いた磁壁移動スピン起電力の解明^[7]

磁場印加によって磁壁が動くとき、局在磁化の向きは時間・空間双方に依存するため、スピン起電力が生じる。これまでに行われた実験では、磁壁を駆動するために外部磁場を用いている。我々は、断面積が一樣でない磁性細線を用いることで、外部磁場を必要とせず磁性体固有の磁気エネルギーによるスピン起電力を提唱した。磁壁は固有の界面エネルギーを持ち、このエネルギーは磁性細線の断面積に比例する。そのため、断面積が非一樣な磁性細線中に磁壁を導入すると、磁壁はこのエネルギーが下がる方向(断面積が小さくなる方向)へと自発的に動く。このとき磁壁の運動に伴いスピン起電力が発生する。我々は、図1(a)に示すような形状のパーマロイ細線に対し数値シミュレーションを行い、先細りになっている細線右端部分では外場無しで自発的な磁壁移動が起こることを確かめた。そしてそれに伴い、数マイクロボルトの起電力[図1(b)]が得られた。こうして、磁性体が持つ内部エネルギーを利用した起電力が、非一樣な断面積を持つ磁性細線を用いて得られることを検証した。現在、物質・材料研究機構の実験グループと共同で、本提案の検証実験を計画している。

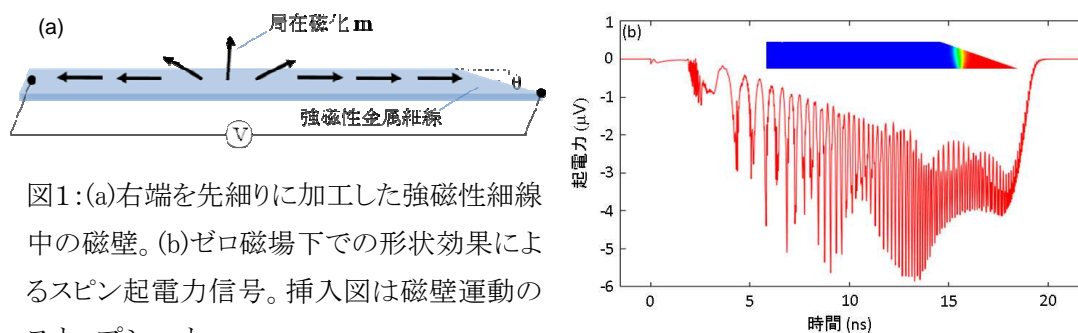


図1:(a)右端を先細りに加工した強磁性細線中の磁壁。(b)ゼロ磁場下での形状効果によるスピン起電力信号。挿入図は磁壁運動のスナップショット。

強磁性共鳴を用いたスピン起電力の連続発信^[11]

これまでに実験で観測されたスピン起電力は、いずれも断続的なものである。例えばスピン起電力の典型例である磁壁移動の系では、有限時間で磁壁は細線の端まで到達し消滅してしまう。スピン起電力のデバイス応用には、継続的なスピン起電力の生成が不可欠であり、それを可能にする系の提案が急務である。我々は、東北大学の実験グループとの共同研究において、物質の形状異方性を利用した継続的なスピン起電力の生成を実現した。図2(a)のように、広い平板と多くの細線から成る「くし型」の単一強磁性金属薄膜を用い、平板部分と細線部分の形状異方性の違いから、平板・細線のいずれか一方のみを選択的に強磁性共鳴させる。このとき、共鳴部分の局在磁化が際差運動をする一方で、非共鳴部分の局在磁化は静止している。この結果、局在磁化の向きは時間・空間双方に依存し、スピン起電力が得られる。数値解析により、サブミリスケールのパーマロイを用いて数十～数百ナノボルトの起電力が生じることを明らかにし、実験的にもその振る舞いが観測された[図2(b)]。

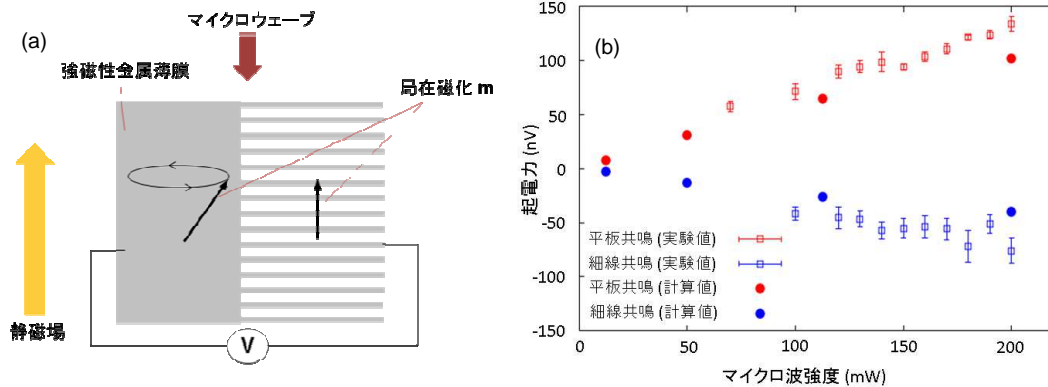


図2: (a) 平板部分と細線部分からなる非対称パーマロイ薄膜。実線矢印は磁化の向きを表している。(b) 平板共鳴、細線共鳴それぞれの場合のスピン起電力の実験値と理論計算結果。

④今後の展開と見通し

低温(4.2K)における磁性ナノ粒子の系を例外として、これまでに実現されているスピン起電力の大きさは高々数マイクロボルトにとどまっている。実用を鑑みた場合、電圧信号として微弱であるという点が大きな課題として残されている。この問題を解決する手段として、2つの方向性を模索している。1つ目は、磁性ナノ粒子の系で見出された近藤効果を媒介したスピン起電力の増幅機構の解明と応用である。もう1つは、スピン起電力を電圧信号としてではなく抵抗変化として捉えなおすという視点である。前者は物性物理の新しい展開の糸口となるテーマであり、後者は高感度磁気センサーや磁気ヘッドへの応用を念頭に研究を進める。

§3. 成果発表等

(3-1) 原著論文発表

●論文詳細情報

1. M. Uchida, K. Oishi, M. Matsuo, W. Koshibae, Y. Onose, M. Mori, J. Fujioka, S. Miyasaka, S. Maekawa, and Y. Tokura, "Thermoelectric response in the incoherent transport region near Mott transition: the case study of $\text{La}_{1-x}\text{Sr}_x\text{VO}_3$ ", Phys. Rev. B83, 165127 (2011) (DOI: 10.1103/PhysRevB.83.165127)
2. Y. Yamane, J. Ieda, J. Ohe, S. E. Barnes, and S. Maekawa, "Equation-of-motion approach of spin-motive force", J. Appl. Phys. 109, 07C735 (2011) (DOI: 10.1063/1.3565398)
3. M. Matsuo, J. Ieda, E. Saitoh, and S. Maekawa, "Spin current generation due to mechanical rotation in the presence of impurity scattering", Appl. Phys. Lett. 98, 242501 (2011) (DOI: 10.1063/1.3597220)

4. S. Hikino, M. Mori, S. Takahashi, and S. Maekawa, “Composite excitation of Josephson phase and spin waves in Josephson junctions with ferromagnetic insulator”, *Phys. Soc. Jpn*, 80, 074707 (2011) (DOI: 10.1143/JPSJ.80.074707)
5. Y. Fukuma, L. Wang, H. Idzuchi, S. Takahashi, S. Maekawa, and Y. Otani, “Giant enhancement of spin accumulation and long-distance spin manipulation in metallic lateral spin valves”, *Nature Materials* 10, 527 (2011) (DOI: 10.1038/nmat3046)
6. K. Ando, S. Takahashi, J. Ieda, H. Kurebayashi, T. Trypiniotis, C. Barnes, S. Maekawa, and E. Saitoh, “Electrically tunable spin injector free from the impedance mismatch problem”, *Nature Materials* (advanced online publication, DOI:10.1038/nmat3052)
7. Y. Yamane, J. Ieda, J. Ohe, S. E. Barnes, and S. Maekawa, “Spinmotive Force Due to Intrinsic Energy of Ferromagnetic Nanowires”, *Appl. Phys. Express* 4 (2011) 093003 (2011) (DOI: 10.1143/APEX.4.093003)
8. M. Matsuo, J. Ieda, E. Saitoh, and S. Maekawa, “Spin-dependent inertial force and spin current in accelerating systems”, *Phys. Rev. B* 84, 104410 (2011) (DOI: 10.1103/PhysRevB.84.104410)
9. K. Uchida, H. Adachi, T. An, T. Ota, M. Toda, B. Hillebrands, S. Maekawa, and E. Saitoh, “Long-range spin Seebeck effect and acoustic spin pumping”, *Nature Materials* 10, 737 (2011) (DOI: 10.1038/nmat3099)
10. Z. Deng, C.Q. Jin, Q.Q. Liu, X.C. Wang, J.L. Zhu, S.M. Feng, L.C. Chen, R.C. Yu, C. Arguello, T. Goko, Fanlong Ning, Jinsong Zhang, Yayu Wang, A.A. Aczel, T. Munsie, T.J. Williams, G.M. Luke, T. Kakeshita, S. Uchida, W. Higemoto, T.U. Ito, Bo Gu, S. Maekawa, G.D. Morris, and Y.J. Uemura, “Li(Zn,Mn)As as a new generation ferromagnet based on a I-II-V semiconductor”, *Nature Communications*. 2, 422 (2011) (DOI: 10.1038/ncomms1425)
11. Y. Yamane, K. Sasage, T. An, K. Harii, J. Ohe, J. Ieda, S. E. Barnes, E. Saitoh, and S. Maekawa, “Continuous Generation of Spinmotive Force in a Patterned Ferromagnetic Film”, *Phys. Rev. Lett.* 107, 236602 (2011) (DOI: 10.1103/PhysRevLett.107.236602)
12. M. Matsuo, S. Okamoto, W. Koshibae, M. Mori, and S. Maekawa, “Nonmonotonic temperature dependence of thermopower in strongly correlated electron systems”, *Phys. Rev. B* 84, 153107 (2011) (DOI: 10.1103/PhysRevB.84.153107)
13. K. Ando, S. Takahashi, J. Ieda, Y. Kajiwara, H. Nakayama, T. Yoshino, K. Harii, Y. Fujikawa, M. Matsuo, S. Maekawa, and E. Saitoh, “Inverse spin-Hall effect induced by spin pumping in metallic system”, *J. Appl. Phys.* 109, 103913 (2011) (DOI: 10.1063/1.3587173)

14. K. Uchida, H. Adachi, T. An, H. Nakayama, M. Toda, B. Hillebrands, S. Maekawa, and E. Saitoh, "Acoustic spin pumping: Direct generation of spin currents from sound waves in Pt/Y₃Fe₅O₁₂ hybrid structures", *J. Appl. Phys.* 111, 053903 (2012) (DOI: 10.1063/1.3688332)
15. M. J. Calderon, S. Liang, R. Yu, J. Salafranca, S. Dong, S. Yunoki, L. Brey, A. Moreo, and E. Dagotto "Magnetoelectric coupling at the interface of BiFeO₃/La_{0.7}Sr_{0.3}MnO₃ multilayers", *Phys. Rev. B* 84, 024422 (2011) (DOI: 10.1103/PhysRevB.84.024422)
16. S. Hikino and S. Yunoki, "Anomalous enhancement of spin Hall conductivity in a superconductor/normal-metal junction", *Phys. Rev. B* 84, 020512(R) (2011) (DOI: 10.1103/PhysRevB.84.020512)
17. Y. Zhu, S. Dong, Q. Zhang, S. Yunoki, Y. Wang, and J.-M. Liu, "Tailoring magnetic order in (LaFeO₃)_n-(LaCrO₃)_n superlattices model", *J. Appl. Phys.* 110, 053916 (2011) (DOI: 10.1063/1.3631787)
18. R. Shindou, S. Yunoki, and T. Momoi, "Projective studies of spin nematics in a quantum frustrated ferromagnet", *Phys. Rev. B* 84, 134414 (2011) (DOI: 10.1103/PhysRevB.84.134414)
19. Y. Sun, X.-Q. Chen, C. Franchini, D. Li, S. Yunoki, Y. Li, and Z. Fang, "Strain-driven onset of nontrivial topological insulating states in Zintl Sr₂X compounds (X=Pb, Sn)", *Phys. Rev. B* 84, 165127 (2011) (DOI: 10.1103/PhysRevB.84.165127)
20. Q. Zhang, S. Hikino, and S. Yunoki, "First-principles study of the spin-mixing conductance in Pt/Ni₈₁Fe₁₉ junctions", *Appl. Phys. Lett.* 99, 172105 (2011) (DOI: 10.1063/1.3657144)
21. G. Zhang, S. Dong, Z. Yan, Y. Guo, Q. Zhang, S. Yunoki, E. Dagotto, and J.-M. Liu, "Multiferroic properties of CaMn₂O₁₂", *Phys. Rev. B* 84, 174413 (2011) (DOI: 10.1103/PhysRevB.84.174413)
22. H. Watanabe, T. Shirakawa, and S. Yunoki, "Spin-orbit-induced Mott insulator in 5d electron systems", *J. Phys. Soc. Jpn.* 80, SB006 (2011) (DOI: 10.1143/JPSJS.80SB.SB006)
23. T. Shirakawa, H. Watanabe, and S. Yunoki, "Microscopic study of electronic and magnetic properties for Ir oxide", *J. Phys. Soc. Jpn.* 80, SB010 (2011) (DOI: 10.1143/JPSJS.80SB.SB010)
24. S. Dong, Q. Zhang, S. Yunoki, J.-M. Liu, and E. Dagotto, "Ab initio study of the intrinsic exchange bias at the SrRuO₃/SrMnO₃ interface", *Phys. Rev. B* 84, 224437 (2011) (DOI: 10.1103/PhysRevB.84.224437)
25. Y. Wang, B. Wang, Q. Zhang, D. Shi, S. Yunoki, F. Kong, and N. Xu, a, "A simple

- capacitor model and first-principles study of carbon-doped zigzag ZnO nanoribbons", *Solid State Comm.* 152, 534 (2012) (DOI: 10.1016/j.ssc.2011.12.035)
26. W. Koshibae, N. Furukawa, and N. Nagaosa, "Photo-induced insulator-metal transition of a spin-electron coupled system", *Euro. Phys. Lett.* 94, 27003 (2011) (DOI:10.1209/0295-5075/94/27003)
 27. K. Miura, R. Sugano, M. Ichimura, J. Hayakawa, S. Ikeda, H. Ohno, and S. Maekawa, "Reduction of intrinsic critical current density under a magnetic field along the hard axis of a free layer in a magnetic tunnel junction", *Phys. Rev. B* 84, 174434 (2011) (DOI: 10.1103/PhysRevB.84.174434).
 28. 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.* (in press).
 29. S. Hikino, M. Mori, W. Koshibae, and S. Maekawa, "Towards precise measurement of oscillatory domain wall by ferromagnetic Josephson junction", *Appl. Phys. Lett.* (in press).
 30. Y. Yamane, J. Ieda, and S. Maekawa, "Stability of Spinmotive Force in Perpendicularly Magnetized Nanowires under High Magnetic Fields", *Appl. Phys. Lett.* (in press).
 31. K. Tanabe, D. Chiba, J. Ohe, S. Kasai, H. Kohno, S. E. Barnes, S. Maekawa, K. Kobayashi, and T. Ono, "Spinmotive force due to a gyrating magnetic vortex", *Nature Communications* (in press).

(3-2) 知財出願

- ① 平成 23 年度特許出願件数(国内 1 件)
- ② CREST 研究期間累積件数(国内 3 件)