

「高度情報処理・通信の実現に向けたナノ構造体材料の制御と利用」  
平成 16 年度採択研究代表者

前川 禎通

(東北大学金属材料研究所 教授)

「電子内部自由度制御型ナノデバイス創製原理の構築」

## 1. 研究実施の概要

遷移金属、遷移金属酸化物、有機化合物では電子間に働くクーロン相互作用が強い  
ため、電子の内部自由度であるスピン（磁性）や軌道（電子の空間的広がり）の小さ  
な変化が電荷（電気伝導）の巨大な変化に跳ね返ってくる。また逆に電荷の小さな変  
化が磁性の巨大な変化を引き起こす。さらに、ナノスケールの大きさに微細加工され  
た物質・材料では、電子の微小領域への閉じ込め効果のために電子間のクーロン相互  
作用が強調され、上記の効果がより顕著になる。これらの系では、電子間の相互作用  
が局所的多体効果であることから、局所密度近似に基づく第一原理計算や平均場など  
の近似計算ではその本質が捉えられない。一方、系を記述する微視的モデルに対する  
近似を挟まない数値シミュレーションがその物性の本質解明に威力を発揮する。

本プロジェクトでは、電子の内部自由度の交互作用によりもたらされる新しい量子  
現象を開拓する。さらに、磁性と伝導の相関により得られるスピンエレクトロニクス  
や量子キュービット素子の可能性を探る。今年度は特に、ナノ構造磁性体におけるス  
ピン流の性質を明らかにし、いくつかの新しいスピンエレクトロニクス素子を提案し  
た。

## 2. 研究実施内容

今日のエレクトロニクスは、電子自由度のうち電荷の流れを制御することで発展してき  
た。近年これに加えて、電子の内部自由度であるスピンの流れを制御することで新機能デ  
バイスの開発・素子性能の向上を目的とする、スピン・エレクトロニクスの展開が推し進  
められている[1]。スピン流の供給源としては、強磁性体中を流れる電流（有限のスピン偏  
極率を有する）や、スピン・ホール効果を通じたスピン流の生成などが挙げられ、スピン  
流と磁化の相互作用を通じたナノ構造磁性体の電流による直接制御などが実証されている。

電流と磁性体中の磁化の相互作用においては、これまで角運動量保存則に基づいたスピ  
ン移行過程による磁化の運動に焦点が当てられてきた（図 1 中の左のブランチ）。一方で、

同過程におけるエネルギー保存則に相当する物理機構 (図 1 中の右のブランチ) に関してはほとんど注意が払われてこなかった。

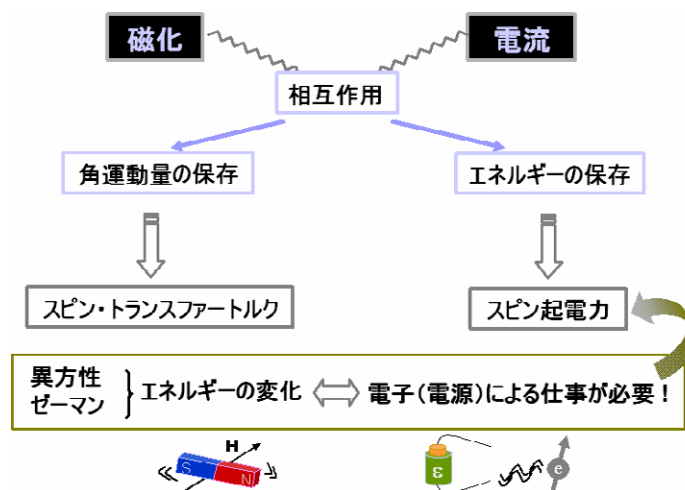


図 1 : 電流と磁性体磁化の相互作用に関する概念図。左側のブランチがスピン移行過程、右側のブランチがスピン自由度に作用する起電力 (スピン起電力) を生じさせる保存則の対応関係をそれぞれ表す。

本研究ではこの点を補完すべく、磁性体-電流間のエネルギーのやり取りをも考慮する理論を一般的に構築した。そのモデルケースとして応用・基礎の両面で注目を集めている、強磁性ナノ細線における磁壁とスピン偏極電流の相互作用系に適用することで、磁壁移動に伴い磁壁をはさんだ細線の両端に起電力が生じることを明らかにした[2]。

一般的に、強磁性体中の磁化が運動状態にあるとき、伝導電子のスピンと結合するスピンベクトルポテンシャルが定義され、その時間微分が電子のスピンに力を及ぼす。これは通常の電磁気学における電荷自由度に対するファラデーの法則のスピン自由度への拡張となっており、起電力の発生に必要となる非保存力の存在を表している。この結果として、磁壁一枚あたり細線の両端に起電力 ( $\varepsilon$ ) として、

$$\varepsilon = 2p\mu H / (-e)$$

が発生することが示される。ここで、 $p$  は磁性体のスピン分極率、 $H$  は外部磁界の大きさ、 $-e$ 、 $\mu$  はそれぞれ電子の電荷と磁気モーメントである。鉄・ニッケル合金 ( $p = 0.7$ ) の細線を用いた場合、磁場 1 テスラに対し約 100 マイクロボルト程度の起電力が期待される。この理論予測に近い値がごく最近慶応大学の行った実験において報告されている。

この成果を応用し、外部磁界  $H$  の代わりに細線の構造自体によって磁壁移動を生じさせることで、磁界を全く用いない新しい動作原理を持つ磁気デバイスの提案を 2 件行った[3]。  
**【磁気メモリー】** 強磁性伝導体によるナノ細線中に磁壁を導入し、磁壁の安定箇所となるくさび状のくびれを二つ有する構造を形成、さらに適当な配線を施しメモリーセルとする。

細線に電流を入力することで、磁壁が二つのくびれを移動し、位置による二状態間遷移を実現する（書き込み）。また、磁壁が移動する際に生じる起電力を測定することで、磁壁の位置状態を電氣的に検出する（読み出し）。従来の磁気メモリーと比して、細線加工と磁壁の利用することでメモリーへのデータ書き込みに外部磁界を用いず、読み出しも素子自体に発生する電圧を用いるため、コイルやトンネル磁気抵抗（TMR）素子等の付加構造を必要とせず、簡便、小型、高集積性、高効率な素子設計が可能となる。

【電流増幅器】強磁性伝導体によるナノ細線中に磁壁を導入し、磁壁の安定箇所となるくさび状のくびれ（大・小）を形成する。細線に電流及び電圧を介して電気エネルギーを入力することで、磁壁は両くびれ間を移動する。磁壁に蓄えられた磁気エネルギーはその断面積に比例することから、移動の前後で収支のエネルギーが出力電圧、または電流として電氣的に取り出される。細線加工と磁壁の利用により、電子のスピン流と局在スピン間における角運動量の保存の帰結として導かれる磁気エネルギーと電気エネルギーの変換原理が実用化でき、コイルを必要としない、小型、高集積性、高効率な素子設計が可能となる。

現在、実験グループとの協同により本研究成果の実証をさらに進めるとともに、磁気多層膜など別種のナノ構造磁性体における起電力の発生に関して考察を行っている。上記提案の磁気素子のように、磁界を用いない装置は簡単でエネルギー効率が良く、かつ小型化して集積化が可能のため、エレクトロニクス、エネルギー関連分野での応用が期待される。

- [1] “Concepts in Spin Electronics”, ed. S. Maekawa (Oxford University Press, 2006).
- [2] S. E. Barnes and S. Maekawa, submitted to Phys. Rev. Lett.
- [3] S. E. Barnes, J. Ieda, and S. Maekawa, Appl. Phys. Lett. 89, 122507 (1-3) (2006).

### 3. 研究実施体制

#### (1) 「量子デバイス開発」グループ

##### ①研究者名

前川 禎通（東北大学金属材料研究所 教授）

##### ②研究項目

- ・ ナノデバイス理論および実験の統括および新規量子デバイスの基盤開発
- ・ 多体電子系新規計算プログラムの整備

#### (2) 「多体電子系シミュレーション」グループ

##### ①研究者名

遠山 貴巳（京都大学基礎物理学研究所 教授）

##### ②研究項目

- ・ シミュレーション用計算プログラムの開発・整備
- ・ モット絶縁体の光励起状態における電子内部自由度と格子系との相互作用の解明
- ・ 軌道の自由度に関わる新しい現象の解明

(3) 「デバイス理論構築」グループ

①研究者名

今村 裕志 ((独) 産業技術総合研究所ナノテクノロジー研究部門 主任研究員)

②研究項目

- ・低ノイズな微小 TMR・GMR 素子のデザイン
- ・複合ナノ構造における非局所スピン注入とスピン制御
- ・磁性積層膜の界面における磁気構造とスピン流に関する理論的研究

(4) 「実証実験」グループ

①研究者名

小池 洋二 (東北大学大学院工学研究科 教授)

②研究項目

- ・スピン流の生成による非局所磁気メモリの原理実験
- ・n 型伝導を示すバナジウムブロンズ系酸化物の組成最適化と熱電発電素子の試作
- ・巨大熱起電力をもつ低次元遷移金属酸化物の探索と単結晶育成
- ・巨大熱伝導を持つ低次元遷移金属酸化物の試料作製と巨大熱伝導の実証
- ・新しい高温超伝導体の開発

## 4. 研究成果の発表等

### (1) 論文発表(原著論文)

- Kenji Tsutsui, Hayato Yamamoto, Takami Tohyama, and Sadamichi Maekawa; Theory of Cu L-edge resonant inelastic X-ray scattering in insulating cuprates; Journal of Physics and Chemistry of Solids, Vol. 67, No. 1-3, 274-276 (2006); 20060401; 160903080
- S. Ishihara, and N. Nagaosa; Electron-Phonon Interaction in Correlated Cuprate Superconductors; Jour. Phys. Chem. Solids. 67, 154-156; 20060401
- S. Akbar Jafari, Takami Tohyama, and Sadamichi Maekawa; Nonlinear Optical Response of SDW Insulators; Journal of the Physical Society of Japan, Vol. 75, No. 5, 054703 (2006); 20060425; 160903076
- Taro Yamashita, Saburo Takahashi, and Sadamichi Maekawa; Controllable pi junction with magnetic nanostructures; Physical Review B, Vol. 73. P. 144517 (1-4) (2006); 20060427; 160901032
- S. Takahashi, and S. Maekawa; Spin injection and transport in magnetic nanostructures.; Physica C, 437-438, 309-313 (2006); 20060515; 160901033
- B. J. Kim, H. Koh, E. Rotenberg, S.-J. Oh, Hiroshi. Eisaki, Naoki Motoyama, Shinichi

- Uchida, Takami Tohyama, Sadamichi Maekawa, Z.-X. Shen and C. Kim; Distinct spinon and holon dispersions in photoemission spectral functions from one-dimensional SrCuO<sub>2</sub>; *Nature Physics*, Vol. 2, No. 6, 397-401 (2006); 20060521; 160903078
- S. Akbar Jafari, Takami Tohyama, and Sadamichi Maekawa; Dynamical Mean Field Theory of Optical Third Harmonic Generation; *Journal of the Physical Society of Japan*, Vol. 75, No. 8, 083706 (2006); 20060810; 160903077
  - T. Tohyama; Numerically exact diagonalization study of Drude weight and chemical potential in two-dimensional Hubbard model; *Journal of Physics and Chemistry of Solids*, Vol. 67, P. 2210-2213 (2006); 20060814; 160903102
  - Tsutomu Nojima, Takafumi Hyodo, Shintaro Nakamura, and Norio Kobayashi; Phase Transition from Superconducting to Normal State Induced by Spin Injection in Manganite/Cuprate/Au Double Tunnel Junctions; *The American Institute of Physics Conference Proceedings*, Volume 850, Page 885-886 (2006); 20060915; 160902057
  - Stewart E. Barnes, Jun'ichi Ieda, and Sadamichi Maekawa; Magnetic memory and current amplification devices using moving domain walls; *Applied Physics Letters*, Vol. 89, P. 122507 (1-3) (2006) (2006); 20060918; 160904058
  - Takami Tohyama; Effect of frustration on charge dynamics for a doped two-dimensional triangular Hubbard lattice: Comparison with a square lattice; *Physical Review B*, Vol. 74, 113108 (2006); 20060921; 160903079
  - N. Bulut, H. Matsueda, T. Tohyama, and S. Maekawa; Anomalous temperature dependence of the single-particle spectrum in the organic conductor TTF-TCNQ; *Phys. Rev. B*, 74, 113106 (1-4) (2006); 20060926; 160904059
  - N. Bulut, S. Maekawa; Strength of dx<sup>2</sup>-y<sup>2</sup> pairing in the two-leg Hubbard ladder; *Phys. Rev. B*, 74, 132503 (1-4) (2006); 20061011; 160904060
  - K. Satoh, and S. Ishihara; Photo induced phase transition in charge ordered perovskite manganites; *Jour. Mag. Mag. Matt.* 310, 798; 20061102
  - T. Tanaka, M. Matsumoto and S. Ishihara; Dilution effects in classical and quantum systems; *Jour. Mag. Mag. Matt.* 310, 804; 20061102
  - Y. Utsumi, J. Martinek, H. Imamura, P. Bruno and S. Maekawa; "Indirect exchange interaction between two local spins embedded in an Aharonov-Bohm Ring," *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, Volume 310, Issue 2, Part 2, 20061103, Pages 1142-1144
  - H. Tsuchiura, K. Takaki, S. Kashiwaya and A. Sakuma; Inhomogeneous electronic states due to out-of-plane disorder in the t-t' -J model; *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, Vol. 310, 514-516 (2007) (2006); 20061109; 160901042
  - T. Tohyama; Symmetry of magnetic excitons in two-dimensional Mott insulators;

- Journal of Magnetism and Magnetic Materials, Vol. 310, P. e255–e257 (2007) (2006); 20061110; 160903145
- M. Ichimura, J. Ieda, H. Imamura, S. Takahashi and S. Maekawa; Numerical analysis of spin accumulation due to a domain wall; Journal of Magnetism and Magnetic Materials, Volume 310, Issue 2, Part 3, 20061120, Pages 2055–2057
  - J. Ieda, S. Takahashi, M. Ichimura, H. Imamura and S. Maekawa; "Spin accumulation and resistance due to a domain wall," Journal of Magnetism and Magnetic Materials, Volume 310, Issue 2, Part 3, 20061121, Pages 2058–2060
  - Shin-ichi Hikino, Michiyasu Mori, Saburo, Takahashi, and Sadamichi Maekawa ; Theory of  $0-\pi$  transition in a superconductor/ferromagnet/superconductor junction ; Journal of Magnetism and Magnetic Materials, Volume 310, Issue 2, Part 3 , March 2007, Pages 2456–2458 (2006); 20061127; 160903116
  - H. Matsueda, T. Tohyama, S. Maekawa ; Electron-phonon coupling and spin-charge separation in one-dimensional Mott insulators; Physical Review B, Vol. 74, 241103(R) (2006); 20061215; 160903108
  - W. Koshibae, H. Murata, S. Maekawa; THEORETICAL STUDY OF THE ELECTRONIC STRUCTURE IN beta-PYROCHLORE OXIDES; Journal of Magnetism and Magnetic Materials, Vol. 310, P.1005–1007 (2007); 20070301; 160903137
  - S. Takahashi and S. Maekawa; Nonlocal spin Hall effect and spin-orbit interaction in nonmagnetic metals, J. Magn. Magn. Mater., Vol. 310, 2067–2069 20070301.
  - M. Ichimura, J. Ieda, H. Imamura, S. Takahashi, and S. Maekawa; Numerical analysis of spin accumulation due to a domain wall; J. Magn. Magn. Mater., Vol. 310, 2055–2057 20070301.
  - J. Ieda, S. Takahashi, M. Ichimura, H. Imamura, and S. Maekawa; Spin accumulation and resistance due to a domain wall; J. Magn. Magn. Mater., Vol. 310, 2058–2060 20070301.
  - Yasuhiro Ono, Ken-ichi Satoh, Tomohiro Nozaki and Tsuyoshi Kajitani; Structural, Magnetic and Thermoelectric Properties of Delafossite-type Oxide,  $\text{CuCr}_{1-x}\text{Mg}_x\text{O}_2$  ( $0 \leq x \leq 0.05$ ); Jpn. J. Appl. Phys., Vol. **46 No. 3A**, 1071–1075 (2007); 20070308
  - M. Mori, T. Tohyama, and S. Maekawa; Electronic states of multilayered high-Tc cuprates with charge imbalance: Gutzwiller approximation on interlayer hopping; Physica C, (2007); 20070321; 160903093
  - A. Nagano and S. Ishihara; Spin-charge-orbital structures and frustration in multiferroic RFe<sub>2</sub>O<sub>4</sub>; Jour. Phys. Cond Matt. 19 145263; 20070323

## (2) 特許出願

平成18年度特許出願：1件（CREST研究期間累積件数：4件）