

量子ナノ磁性研究チーム

Quantum Nano-Scale Magnetism Laboratory

チームリーダー 大谷 義 近
OTANI, Yoshichika

当研究チームでは、ナノスケールの微小磁性体において特徴的になる磁気物理現象の研究を行っている。ナノスケールの微小磁性体は、その形状やサイズを反映して、磁気渦や単磁区構造のような秩序状態にある微細磁区構造を取る。我々は実験と理論の双方の観点から、磁壁移動や磁化反転の量子的振舞いに関する知見を深めるために、ナノスケール磁性体の静的および動的磁気特性（スピンドYNAMICS）を研究している。また、スピン偏極電流を供給する電極としてナノスケール磁性体を用いるスピン注入技術についても詳細に研究している。昨年度からは新たにポテンシャルラチェットを用いた磁壁運動やスピン流制御の研究も開始した。最終的にはこれらの技術やこのスピン注入により発現する新奇な磁性を応用してスピントロニクスデバイスを開発することを目指している。

1. ナノスケール磁性体のスピンドYNAMICSに関する研究（大谷、柴田、Hamrle、木村；Nori（FRS デジタル・マテリアル研究チーム））

ナノスケールの微小磁性体中には、そのサイズや形状の対称性を反映して極微な領域内に比較的単純な磁気渦や単磁区構造が出現する。さらに、これらの微小磁気渦、磁壁や単磁区を高周波磁場と相互作用させると固有エネルギー（固有振動数）を持つ様々なスピン波が誘起される。まず、最も簡単なシステムの1つである磁性体円盤中の単一磁気渦や静磁的に結合した2つの磁気渦や磁気渦格子のダイナミクスについて理論と実験の両面から研究を行っている。

円盤磁性体のように対称性の良い磁性体の場合は、円盤中心に磁気渦が現れ、円盤面内磁場に対してはその移動によって磁化過程が記述される。実際に磁気光学カー効果を用いて磁化曲線を測定すると磁気渦の生成・移動や消滅と相関を持って磁化が変化する様子が観測される。直感描像的には、磁気渦中心はパラボリックポテンシャル中に閉じ込められた擬似粒子のように振舞い、外部から印加される振動磁場や回転磁場と相互作用して調和振動する。このような特徴を持つ単一磁気円盤の磁化過程をより詳細に調べるために、磁気光学効果測定とイメージ解析の手法を用いた磁化ベクトル測定システムを開発した。現在このシステムを用いた時間分解測定を検討している。静磁的に結合した2つの円盤の場合、磁気渦の回転固有振動の縮退が解け、2つの円盤の磁気渦中心の分極方向とカイラリティーの組み合わせに依存して4つの固有振動が現れ、結合した磁気渦対はエネルギー的にファンデルワールス力によって結びついた2原子分子と同様に振舞うことが分かった。さらに以上の考察は容易に $N \times N$ 個の二次元磁気渦格子に拡張することができ、磁気渦の分極度の分布に応じて多彩な振動状態密度分布が得られることが明らかになった。すなわち、磁気渦の分極配列や磁気円盤の大きさを人為的に制御することにより振動状態密度を設計できることを意味する。チェッカーボード状に渦の分極が配列している格子の場合、双極子相互作用のために状態密度のピークは単一磁気渦の固有振動数 ω_0 より少し低いところに位置する。一方、交

互に分極の向きを変えるストライプ格子の場合は ω_0 を挟んで対象に2つのピークが出現する。以上のように二次元ナノ磁気渦格子はテイラードクリスタルとしての物性を示すことが理論的に示された。この理論的な考察を検証するための実験試料作製や時間分解磁気光学効果測定の実験準備も順調に進んでいる。

2. スピン注入によって誘起される磁化反転や磁気相転移現象に関する研究（大谷、木村、Yang、Hamrle、柴田、湯浅*、鈴木*、大岩*、宗片*；Nori（FRS デジタル・マテリアル研究チーム））

ナノスケール磁性体中にスピン偏極電子を注入すると、スピンの角運動量トランスファーと電気化学ポテンシャルがスピン依存して分極するスピン蓄積の2つの効果が発現する。これら2種類の効果によりにスピン注入された磁性体中の局在スピンにはトルクが働いたり、注入端子との接合近傍に非平衡磁化（内部磁場）が発生したりする。これらの効果を用いれば強磁性体の磁化を反転したり、磁壁移動を誘起したりすることも不可能ではない。本研究では、磁化反転と磁壁移動の2つに着目して実験を進めている。まず前者については、強磁性体（Fe-Ni 合金）/非磁性体（Cu）/強磁性体（Fe-Ni 合金）3層膜を直径 100 nm 程度のナノピラー（柱状）構造に極微細加工して2つの強磁性体の相対的な配向を平行から反平行へとスピン注入により磁化反転させることに成功した。さらに、昨年度のスピン流分布の数値計算結果を基にナノピラー構造の終端電極サイズを変化させることによりピラー中のスピン流の強度あるいはスピン蓄積量を増幅させることに実験的に成功した。この実験から、3層ナノピラー構造のスピン注入磁化反転にはスピン流の増強がスピン蓄積の増大よりも重要であることが分かった。

また、昨年度までに確立したノンローカルスピン注入の手法を面内の強磁性体（Fe-Ni 合金）/非磁性体（Cu）/強磁性体（Fe-Ni 合金）構造に適用することにより、微小強磁性体（Fe-Ni 合金）の磁化反転を誘起する実験に成功した。理論的研究においても強磁性体細線中にスピントランスファー

によって生じるスピン波励起に伴う磁化状態の不安定性と磁壁生成を説明する理論を構築した。

3. 生体擬似ナノスピントロニクス素子の開発・研究（大谷，木村，原，柴田；Nori, Savel'ev（FRS デジタル・マテリアル研究チーム））

生体分子モーターを構成するアクチンやミオシン等のタンパク質は，細胞レベルで栄養素の搬送，老廃物の排出など，生体内における物質輸送の主な役割を果たしている。これら生体分子モーターでは，等方的な運動を異方的な輸送に変換して搬送機能を作り出す。例えば熱擾乱による等方的な運動を，ポテンシャルラチェットを用いて直線運動に変換する。本研究では，このような生体系に特徴的なポテンシャルラチェットを用いた整流機構に着目して研究を遂行している。例えば前述の熱擾乱を振動磁場や振動電場置き換えることにより強磁性/非磁性体複合ナノ構造中の電子スピンの極制御や極微細ナノ磁壁の運動制御方法を確立する。さらに，これらの手法を用いて，従来に無いスピンポンプ，スピンレンズ，スピンプリズムと言った次世代スピントロニクスデバイス開発につながる新パラダイムを理論と実験の両面から構築する。本年度は，昨年度に開発した極低温から室温までの温度領域で交流伝導特性が測定できる測定装置を用いて，スピン流の整流と磁壁のラチェット駆動の両テーマについて実験を遂行した。その結果，スピン整流素子については未だ効率的な整流効果を観測できず，素子構造の最適化にさらなる試行錯誤が必要である。また，磁壁のラチェット駆動については対称的な楕円リング構造に傾斜印加磁場を用いて非対称を導入することにより所望の鋸歯型に系のポテンシャルを変化させる方法を見いだした。さらにこの手法を用いてリング内に核発生させた対磁壁を回転運動させることが可能であることを数値計算で確認した。並行して行った予備実験からも同様の運動が起こることを確認している。さらに詳細な検証実験を行っている。

* 招聘研究員

Nano-scale magnets can have, according to their shape and size, ordered domain structures such as magnetic vortices and single-domains. Using experimental and theoretical approaches, we study the static and dynamical magnetic properties of nano-scale magnets, to obtain a better understanding of the quantum behavior associated with domain wall displacement and magnetization reversal. Moreover, we employ spin injection techniques using nano-scale magnets as electrodes which provide spin-polarized current. This spin-injection induced magnetism will be applied to the development of spintronic devices. We have three major research subjects as follows.

The first topic is a study on the spin dynamics. We have investigated theoretically the dynamics of vortices in a square lattice system with various combinations of vortex core polarizations in the lattice. The vortex core polarizations play an important role in determining the rotational dynamics of vortices. In the orderly polarized vortex lattice, their dynamical properties can be represented by the dispersion curves and the density of states. These can be

designed by choosing the combinations of vortex core polarizations. From our analysis, we can speculate on the following phenomena. A randomly polarized vortex lattice should reveal the localization behavior in the rotational motion of vortices in real space as a consequence of various superposition of ferromagnetic type I and anti-ferromagnetic type II domains. On the analogy of the lattice vibration of a coupled diatomic lattice, a vortex lattice with two kinds of disks is expected to exhibit an eigen-frequency gap in the dispersion curves. Furthermore the localization mode can be controlled since we can design a defective lattice. Finally, extension of the above expected results encourages us to fabricate an electromagnetic wave guide in an artificial crystal of the magnetic vortex system similar to the two-dimensional photonic crystal.

The second topic is the spin accumulation in the non-local configuration. We have established the experimental techniques to induce spin currents in between ferromagnetic wires bridged by non-magnetic copper wire. This technique has also been applied to the non-local spin injection to flip the magnetization of the nano-scale ferromagnetic particle. We have also established the method to calculate the distributions of spin and the charge currents using the formalism based on the equivalent spin polarized resistor network.

The third topic is the development of biologically inspired spintronic devices. In this project, we try to manipulate the motion of a nano-scale magnetic domain wall and conduction electron spins using the principle of the potential ratchet characteristic of biological systems. A source of the driving force is typically thermal agitation for biological systems. For our spintronic devices, we use the above spin-injection technique or modulated magnetic field for nano-domain walls and modulated electric field for rectification of the conduction spins whereby the dc motion of the domain walls and the spins are generated from the ac excitation.

Research Subjects

1. Study on the static and dynamic magnetic properties of nano-scale magnets
2. Study on the spin injection induced magnetization reversal and magnetic phase transition
3. Study on the development of biologically inspired spintronic devices

Staff

Head

Dr. Yoshichika OTANI

Research Scientists

Dr. Takashi KIMURA

Dr. Junya SHIBATA

Dr. Jaroslav HAMRLE

Dr. Tao YANG

Dr. Masahiro HARA

in collaboration with

Dr. Franco NORI (Digital Mater. Lab., FRS)

Dr. Sergey SAVEL'EV (Digital Mater. Lab., FRS)

Visiting Members and Postdoctoral Fellows

Dr. Valentyn NOVOSAD (Argonne Natl. Res. Lab., USA)

Dr. Akira OIWA (Tokyo Inst. Technol.)

Dr. Gen TATARA (Osaka Univ.)

Collaborators (Outside of RIKEN)

Dr. Konstantine GUSLIENKO (Seagate Res., USA)

Prof. Hiroo MUNEKATA (Tokyo Inst. Technol.)

Prof. Kungwon RHIE (Korea Univ., Korea)

Dr. Yoshishige SUZUKI (Osaka Univ., / Natl. Inst. Adv. Ind. Sci. Technol. (AIST))

Dr. Shinji YUASA (Natl. Inst. Adv. Ind. Sci. Technol. (AIST))

誌 上 発 表 Publications

[雑誌]

(原著論文) *印は査読制度がある論文

Kakazei G. N., Wigen P. E., Gusliencko K. Y., Novosad V., Slavin A. N., Golub V. O., Lesnik N. A., and Otani Y.: "Spin-wave spectra of perpendicularly magnetized circular submicron dot arrays", *Appl. Phys. Lett.* **85**, 443–445 (2004). *

Kimura T., Hamrle J., Otani Y., Tsukagoshi K., and Aoyagi Y.: "Spin-dependent boundary resistance in the lateral spin-valve structure", *Appl. Phys. Lett.* **85**, 3501–3503 (2004). *

Kimura T., Hamrle J., Otani Y., Tsukagoshi K., and Aoyagi Y.: "Suppression of spin accumulation in non-magnet due to ferromagnetic ohmic contact", *Appl. Phys. Lett.* **85**, 3795–3796 (2004). *

Kimura T., Hamrle J., Otani Y., Tsukagoshi K., and Aoyagi Y.: "Enhancement of nonlocal spin-valve signal using spin accumulation in local spin-valve configuration", *Appl. Phys. Lett.* **85**, 5382–5384 (2004). *

Counil G., Kim J., Shigeto K., Otani Y., Devolder T., Crozat P., Hurdequint H., and Chappert C.: "Inductive measurement of the high frequency permeability of a Permalloy thin film", *J. Magn. Magn. Mater.* **272/276**, 290–292 (2004). *

Shibata J., Shigeto K., and Otani Y.: "Dynamics of nano-scale magnetic vortices in ferromagnetic dot arrays", *J. Magn. Magn. Mater.* **272/276**, 1688–1689 (2004). *

Kimura T., Otani Y., Tsukagoshi K., and Aoyagi Y.: "Non-local Hall resistance measured in submicron-scale non-magnetic/ferromagnetic junctions", *J. Magn. Magn. Mater.* **272/276**, e1333–e1334 (2004). *

Kimura T., Otani Y., Yagi I., Tsukagoshi K., and Aoyagi Y.: "Domain wall drag due to dc current injection into ferromagnetic nano-wires", *J. Magn. Magn. Mater.*

272/276, e1347–e1348 (2004). *

Shibata J. and Otani Y.: "Magnetic vortex dynamics in a two-dimensional square lattice of ferromagnetic nanodisks", *Phys. Rev. B* **70**, 012404-1–012404-4 (2004). *

Kimura T., Hamrle J., Otani Y., Tsukagoshi K., and Aoyagi Y.: "Effect of probe configuration on spin accumulation in lateral spin-valve structure", *J. Magn. Magn. Mater.* **286**, 88–90 (2005). *

Shibata J., Tataru G., and Kohno H.: "Effect of spin current on uniform ferromagnetism: Domain nucleation", *Phys. Rev. Lett.* **94**, 076601-1–076601-4 (2005). *

木村崇, Hamrle J., 大谷義近: "非局所手法を用いたスピン蓄積およびホール効果の測定", *日本応用磁気学会誌* **29**, 192–198 (2005). *

(総 説)

大谷義近: "ナノ磁気円盤格子の多彩な物性", *パリティ* **19**, No. 4, pp. 44–48 (2004).

口 頭 発 表 Oral Presentations

(国際会議等)

Hamrle J., Kimura T., and Otani Y.: "Vectorial magnetization measurements by Kerr effect", *Magneto-Optical Recording Int. Symp. (MORIS2004)*, Yokohama, May (2004).

Hamrle J., Kimura T., and Otani Y.: "4 × 4 matrix formalism to calculate a spin accumulation in an electrical network", *5th Int. Symp. on Metallic Multilayers (MML'04)*, (National Institute of Standards and Technology), Boulder, USA, June (2004).

Kimura T., Hamrle J., Otani Y., Tsukagoshi K., and Aoyagi Y.: "Effect of probe configuration on spin accumulation in lateral spin valve structure", *5th Int. Symp. on Metallic Multilayers (MML'04)*, (National Institute of Standards and Technology), Boulder, USA, June (2004).

Hamrle J.: "How can we switch magnetization without magnetic field", *Int. Nanotechnology Exh. & Conf. (nano tech 2005)*, Tokyo, Feb. (2005).

Hamrle J., Yang T., and Hara M.: "Spin polarized current inside magnetic nanostructures", *Int. Nanotechnology Exh. & Conf. (nano tech 2005)*, Tokyo, Feb. (2005).

Shibata J., Tataru G., Kohno H., and Otani Y.: "Fate of uniform ferromagnetism under spin current: domain nucleation", *2005 APS March Meet.*, Los Angeles, USA, Mar. (2005).

(国内会議)

柴田絢也, 多々良源, 大谷義近, 河野浩: "Modified LLG equation in the presence of a spin polarized current", *日本物理学会 2004 年秋季大会*, 青森, 高知, 9 月 (2004).

Yang T., 木村崇, 大谷義近: "Switching behaviors caused by spin polarized current in nanopillar structure", *日本物理学会 2004 年秋季大会*, 青森, 高知, 9 月 (2004).

木村崇, Hamrle J., 大谷義近, 塚越一仁, 青柳克信: "面内スピンバルブ素子におけるスピン蓄積とスピンプリッパ抵抗", *日本物理学会 2004 年秋季大会*, 青森, 高知, 9 月 (2004).

- Hamrle J., 木村崇, Yang T., 大谷義近: “3D calculation of spin polarized current in nano-pillars”, 戦略的基礎研究推進事業 (CREST) 研究領域「電子・光子等の機能制御」2004 シンポジウム, 東京, 9 月 (2004).
- Yang T., 木村崇, Hamrle J., 大谷義近: “Spin injection induced magnetization reversal in Co/Cu/Co nano-pillars”, 戦略的基礎研究推進事業 (CREST) 研究領域「電子・光子等の機能制御」2004 シンポジウム, 東京, 9 月 (2004).
- 木村崇, Hamrle J., 大谷義近: “Suppression of spin accumulation in non-magnet due to additional ohmic contact”, 戦略的基礎研究推進事業 (CREST) 研究領域「電子・光子等の機能制御」2004 シンポジウム, 東京, 9 月 (2004).
- Yang T., 木村崇, 大谷義近: “Magnetic switching behaviors of nano-pillar structure induced by spin polarized current”, 第 28 回日本応用磁気学会学術講演会, 宜野湾, 9 月 (2004).
- 大谷義近: “ナノ構造磁性体の作製と物性”, 第 3 回スピントロニクス入門セミナー「磁性の初歩からスピントロニクス材料, デバイスまで」, (応用磁気学会スピントロニクス研究会), 大阪, 12 月 (2004).
- 大谷義近: “ノンローカル手法を用いたスピン蓄積の測定”, 東京大学物性研究所談話会, 柏, 1 月 (2005).
- 柴田絢也: “スピン偏極電流による磁壁生成”, 東京大学物性研ミニワークショップ「磁性体における伝導」, 柏, 2 月 (2005).
- 原正大: “半導体二次元電子系による微小磁性体の磁化測定”, 東京大学物性研ミニワークショップ「磁性体における伝導」, 柏, 2 月 (2005).
- 木村崇: “非局所スピン注入によるスピン分極の制御”, 東京大学物性研ミニワークショップ「磁性体における伝導」, 柏, 2 月 (2005).
- 柴田絢也: “スピン流による強磁性不安定化と磁壁生成 (理論)”, 日本物理学会第 60 回年次大会, 野田, 3 月 (2005).
- 原正大, 木村崇, 柴田絢也, 大谷義近: “半導体二次元電子系を用いた微小磁性体リングにおける磁化過程の検出”, 日本物理学会第 60 回年次大会, 野田, 3 月 (2005).
- 木村崇, Hamrle J., 大谷義近, 塚越一仁, 青柳克信: “面内スピンバルブ素子におけるスピン信号の増大”, 日本物理学会第 60 回年次大会, 野田, 3 月 (2005).