

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 1 日現在

機関番号：14401

研究種目：新学術領域研究(研究領域提案型)

研究期間：2010～2014

課題番号：22104012

研究課題名(和文) スピンエレクトロニクス材料の探索

研究課題名(英文) Computational Design and Realization of Spin-electronics Materials

研究代表者

佐藤 和則 (Sato, Kazunori)

大阪大学・工学(系)研究科(研究院)・准教授

研究者番号：60379097

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 66,300,000円

研究成果の概要(和文)：本研究班では超省エネルギー次世代エレクトロニクスの候補であるスピンエレクトロニクスの実用化への大きなブレークスルーのために、半導体スピントロニクスおよび金属系スピントロニクスについて第一原理計算に基づくマテリアルデザインと実証実験の連携研究を行った。同時ドーピング法やスピノダル分解を用いた磁性半導体の制御法、d0強磁性体を含む新規磁性半導体の提案、金属薄膜(真空/M/Fe/M(001), M=Pt, Pd)、接合薄膜(MgO/Fe/M(001), M=Au, Pt)、2重界面薄膜(MgO/Fe/MgO)の磁気異方性エネルギーの電界効果の予測と検証をおこなった。

研究成果の概要(英文)：In this research project, to make a breakthrough in realizing spintronics as a practical electronics, we carried out collaborative research between computational design for spintronics and experimental verification. Concerning to the design for semiconductor spintronics, it is proposed that the 'co-doping' method and the spinodal decomposition can be used to control the ferromagnetism of dilute magnetic semiconductors (DMS). We also proposed new DMS systems including GeTe-DMS and so on. The magnetic anisotropy energy (MAE) was also studied, particularly for the metallic thin film (vacuum/M/Fe/M(001), M=Pt, Pd), the magnetic junction film (MgO/Fe/M(001), M=Au, Pt), and double interface thin film (MgO/Fe/MgO) were investigated. Experimental demonstrations were performed concerning to the computational design for metallic spintronics, especially for the voltage control of magnetic anisotropy, and the semi-quantitative agreement with the experimental data was obtained.

研究分野：計算物理

キーワード：スピントロニクス 計算物理 磁気異方性 第一原理計算 磁性 材料設計

## 1. 研究開始当初の背景

現在、我が国だけでなく世界的にエネルギー問題がクローズアップされており、CO<sub>2</sub>を排出せず地球温暖化を回避できるカーボン・ニュートラルなエネルギーの創出、環境に負荷をかけず持続的に発展可能な省エネルギーシステムの提案が最重要課題となっている。同時に、よく知られたゴードン・ムーアの法則(半導体チップ上のトランジスタ集積密度は約2年で倍増する)が2020年ごろに破綻し半導体エレクトロニクスの持続的な発展が困難になることが予想されている。このような状況下で次世代の基盤技術となりうる超高集積・超高速・超省エネルギーの次世代エレクトロニクスの開発がとくに重要な社会的要請となっている。

次世代エレクトロニクスの候補としてはスピントロニクスが活発に研究されている。スピン操作による情報処理や演算が実現すれば、ジュール熱の抑制により、従来のエレクトロニクスに比べて千分の1の消費電力を実現できるとされている。

## 2. 研究の目的

本研究課題では、半導体スピントロニクスと金属系スピントロニクス両方について計算機マテリアルデザインの手法を適用し、応用の観点から必要とされる物性を持った新物質のデザインを提案し、実験グループによりデザインの実証を行う。

### (1) 半導体スピントロニクス:

磁性半導体(Ga, Mn)Asや(In, Mn)Asの合成とキャリア誘起強磁性の発見に伴い、1990年頃から磁性半導体をベースにした半導体スピントロニクスの研究が活発化している。本研究課題では、磁性半導体中の自己組織化と強磁性の複合相関の制御による半導体スピントロニクス材料のデザインを、(a) 磁性不純物の濃度を制御するための同時ドーピング法、(b) d<sup>0</sup>磁性半導体とスピノダル分解を用いた磁性の制御法、(c) 新規磁性半導体のデザイン、の観点から行った。デザインに用いた Korringa-Kohn-Rostoker coherent potential approximation (KKR-CPA)コードの高機能化(オーダーN-KKR法の開発、磁性半導体の磁氣的・電氣的特性の計算)を行い、デバイスデザインに向けた大規模計算も行った。

本研究で特に注目するのは、磁性半導体で知られている相分離現象にともなう不均一性の制御である。磁性不純物の不均一分布と磁性の複合相関を、開発した多階層連結シミュレーション法を適用する事で明らかにし、不均一性制御による新しい半導体スピントロニクス材料のデザインをおこなった。

### (2) 金属系スピントロニクス

電圧による磁気異方性の制御は省電力スピントロニクスの実現にきわめて重要な技術であり、その基礎学理の構築と現実物質へ

の適応、新物質のデザインと実証研究はスピントロニクス実現にむけて極めて重要となる。強磁性金属を使ったスピントロニクス研究では、スピン注入磁化反転の実用化問題がもっとも重要と考えられている。本研究課題では、金属と誘電体を接合した界面系を構成する実用上の物質について、電界下での第一原理電子状態計算法のコード開発およびそれを用いた物質デザインを行った。理想的接合界面における電子状態や磁気異方性エネルギーの電界依存性から、磁性状態の電界効果の起源を明らかにすると同時に、電界誘起磁化反転を実現するための電界効果増大を目指した物質設計指針を提案する。実証実験としては、Au/超薄膜 Fe(Co)/MgO/Polyimide/ITO 接合において、電界印加による垂直磁気異方性の制御にすでに成功しているが、本研究課題では、電界効果を増大し実用的電界(10<sup>6-7</sup>V/m程度)または実用的電位差にて有意な磁気異方性エネルギー制御を実現するため、金属/磁性体/誘電体の3種接合体界面に注目し物質デザインおよび実証実験を行った。このような実験に対応した現実的な量子シミュレーションのために、2個の化学ポテンシャルを定義できる第一原理計算法を発展的に使用した。

## 3. 研究の方法

半導体スピントロニクス材料のデザインについて、磁性半導体での自己組織化を利用したマテリアルデザインを実現するために、自己相互作用補正を取り入れた計算法の開発、原子間相互作用の計算法の開発と運動学的モンテカルロ法の計算機コード開発を行い、これらの結合による多階層連結シミュレーターを整備した。開発したシミュレーターを用い磁性半導体中にナノ構造を自己組織化させその磁性を制御する方法をデザインした。逆に自己組織化を抑制するという観点から、キャリアドーピングにより磁性不純物間の原子間相互作用を変化させ、自己組織化を制御する同時ドーピング法をKKR-CPA法によりデザインした。

スピントロニクスデバイスデザインにむけたコードの高機能化について、一次元系オーダーN計算(SKKR)コードの整備も行った。さらに、SKKR法と久保公式を組み合わせることによって電気伝導や光学伝導などの輸送現象のオーダーN<sup>2</sup>シミュレーションを目指した。また、1次元系SKKR手法を発展させて3次元系オーダーN計算コードの開発を行った。

金属系スピントロニクスのデザインについては、外部電界下での磁性薄膜の磁気状態を、密度汎関数理論に基づいた相対論的2成分擬ポテンシャル第一原理電子状態計算法によりおこなった。電界印加については有効遮蔽媒質の方法をふくめた複数の方法についてその妥当性と有効性を実証実験との比

較により検証した。とくに、接合薄膜 MgO/Fe/Pt(001)、MgO/Fe/Au(001)等を理論・実験の両面から取り扱う。また、MgO/Fe 界面への超薄膜非磁性層の挿入効果に関して調べ、界面における電界効果の基礎物理を明らかにする。物質デザインの発展として、磁気状態の外部電界依存性について基板金属(Pt, Pd, Au, Ag)や磁性金属(Fe, FeCo)など、物質依存性も研究した。誘電体と金属の接合面に電界を印加した場合の物理学はほとんど明らかになっていないが、誘電体の原子緩和効果は、誘電性物質の誘電率の変化を通して磁気異方性エネルギーの電界効果に直接的に影響するはずである。

#### 4. 研究成果

##### (1)半導体スピントロニクス

###### (a)同時ドーピング法のデザイン

半導体スピントロニクスで研究されている(Ga, Mn)As などの磁性半導体は、磁性不純物である Mn の GaAs 中での固溶度が低いいため相分離を起こす。同時ドーピング法とは、(Ga, Mn)As 合成時に Mn に加えて Cu や Li などの不純物を同時に添加し Mn の固溶度をあげる方法である。KKR-CPA 法で計算した(Ga, Mn)As の Mn 濃度-温度相図によると、Li の添加により Mn の固溶度が大幅に上昇することが示された。Li は GaAs の格子間隙に入りドナーとして振る舞う。そのため p 型半導体である(Ga, Mn)As の正孔は補償され強磁性が消失する。本マテリアルデザインでは(Ga, Mn)As 中の格子間 Li の拡散障壁を PAW 法 (VASP コード) によりみつもり運動学的モンテカルロ法から Li 拡散をシミュレートし、低温アニーリングのデザインも行った。

###### (b)d<sup>0</sup>磁性半導体のデザイン

環境調和性の高い半導体スピントロニクス材料として MgO ベース磁性半導体のデザインをおこなった。KKR-CPA コードに自己

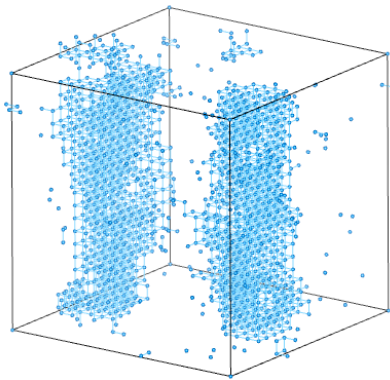


図1: MgO ベース磁性半導体中での Mg 空孔の自己組織化シミュレーション。Mg 空孔の位置を青点で示した。

相互作用補正を取り入れ、Mg 空孔や N 不純物を添加した MgO の電子状態計算をおこない、どちらの場合も強磁性状態が安定となることを示した。Mg 空孔の場合は空孔周りの酸素原子が、N 添加の場合は N 不純物が磁気モーメントを発生し系の磁性を担う。これらの系は、磁性の発生に d 電子が関与しておらず d<sup>0</sup> 強磁性体と呼ばれ近年盛んに研究が行われるようになった。Mg 空孔間、N 不純物間にはたらく原子対相互作用を KKR-CPA を応用して計算し、得られた相互作用を用いて運動学的モンテカルロシミュレーションを行うことで MgO ベース d<sup>0</sup>磁性半導体の相分離をシミュレートした。相分離が layer-by-layer で進行すると仮定した場合のシミュレーション結果が図1に示す。空孔や不純物の拡散が結晶成長面内に制限されることから、相分離により発生する析出物の形状が異方的となり、結晶成長方向にのびたナノ構造が出現する。この現象を利用することで形状磁気異方性による磁気特性の制御が可能となる。また、われわれはこのようなナノ構造の自己組織化が MgO ベースの磁気トンネル接合の特異な電気伝導現象を説明すると考えている。

###### (c)新規磁性半導体のデザイン

高い T<sub>C</sub> を持つ磁性半導体の探索を、KKR-CPA 法とモンテカルロ法が多階層連結法により行った。GeTe ベース磁性半導体、LiZnAs ベース磁性半導体、n-型 InAs などに応用しマテリアルデザインを実施した。例として Mn 添加 p 型 GeTe のデザインについて説明する。強磁性キュリー温度の Mn 濃度依存性を示す。図2に示した計算は、この系の強磁性キュリー温度の Mn 濃度依存性である。Liechtenstein の方法により計算した Mn 間の交換相互作用を用いて、平均場近似(MFA)、乱雑位相近似(RPA)、モンテカルロ法(MCS)によりキュリー温度を計算した。最も信頼性の高い MCS による計算では、40%の Mn 添加で 250K 程度のキュリー温度が得られる。また、Cr 添加 GeTe 系ではスピノダル分解が予測され、前項で説明した相分離を利用した磁気特性の調整が可能である。

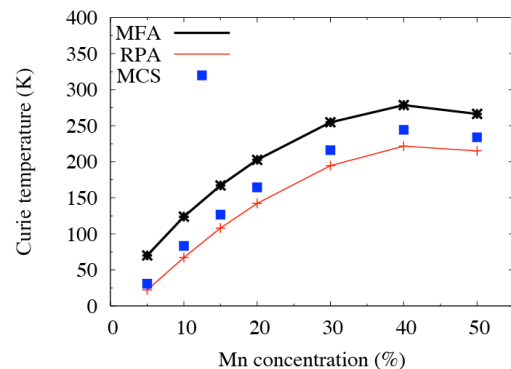


図2: Mn 添加 p 型 GeTe のキュリー温度の Mn 濃度依存性。

(d) KKR-CPA コードの高度化

上記の半導体スピントロニクス材料の計算にはおもに KKR-CPA 法を用いたが、計算コードは MACHIKANAYAMA2002 として公開されており、年 2 回のチュートリアルワークショップ (CMD ワークショップ) によりアウトリーチ活動を行っている。KKR-CPA 計算コードの高度化にも取り組み、久保公式に基づく磁気円二色性および磁気カー効果の計算、オーダー  $N$ -KKR 法の開発、Keldysh グリーン関数法による有限バイアス下での電子状態計算法の開発等を実施した。

(2) 金属系スピントロニクス

具体的な計算対象として、金属薄膜 (真空/M/Fe/M(001), M=Pt, Pd)、接合薄膜 (MgO/Fe/M(001), M=Au, Pt)、2 重界面薄膜 (MgO/Fe/MgO) を取り上げ、全エネルギーの磁化方向依存性から磁気異方性エネルギー (MAE) の電界効果を計算した。得られたデザインに関する知見はおもに以下の 7 点である。

- (a) 接合薄膜 (MgO/Fe/M(001), M=Au, Pt) の 2 種類の薄膜において、Pt 層をもつ系では Fe 層だけの薄膜に比較して電界変調効果が数倍程度大きくなる。
- (b) 磁性金属薄膜 (真空/M/Fe/M(001), M=Pt, Pd) において、実験で観測される電界効果を定性的に再現し、磁気異方性エネルギー密度の導入により MAE の実空間分布の解析を可能にした。
- (c) 誘電体層と磁性金属層の界面に Au, Pd, Pt 等の金属を単層挿入することで磁気異方性とその電界変調効果が制御出来ることを示し、磁気異方性転移を起こす閾値電界値を求めた。
- (d) 接合膜 (MgO/Au/Fe(001)等) において、Au 基板上的 Fe 積層時に Au が Fe 層の上へ移動し、積層完了時に Fe 層上に Au 層が偏析する可能性があることを示し、実験結果を定性的に説明することに成功した。
- (e) 接合膜 (MgO/Fe(1-x)Co(x)等) において、合金磁性層 Fe(1-x)Co(x)層中の Co は垂直磁化を弱める一方、電界効果を増強する効果を有することを明らかにした。

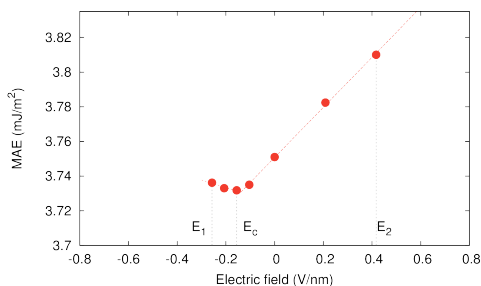


図 3: 二重界面系 MgO/Fe/MgO(001)における MAE の印加電圧依存性。

(f) Fe 数原子層の形状磁気異方性は、スピン軌道相互作用に起因する MgO/Fe 界面の面直磁気異方性と丁度打ち消すことを明らかにした。この平衡状態を電界印加により歪ませることにより、磁気異方性によるスイッチが形成出来ることを理論的に提案した。

(g) 2 重界面系 MgO/Fe/MgO(001)の薄膜において、MAE の外部電界依存性を計算し、MAE が非線形な挙動を示すことを示した。結果を図 3 に示す。電界に対する非線形的な振る舞い、電界に対する変調割合 (線形変化する部分の傾き) の 2 点は実験結果と良く一致し、非線形な変化は電界が印加されている界面の Fe 層の電子数とよく相関していることを明らかにした。

第一原理分子動力学のコード開発については、電界印加の計算手法でいろいろな境界条件に対応出来るようにすること、MPI と OpenMP を組み合わせた混成並列による高速化、および、GP-GPU の利用を考慮した計算コードの高度化、を行った。

ファン・デル・ワールス密度汎関数 (vdW-DF)法の開発・実装・検証および磁性物質への応用についても研究を行った。vdW-DF 法にて原子間力、応力を計算できるようにし、アルゴン、グラファイト、セレン、固体二酸化炭素(ドライアイス)にて確認計算を実施し、妥当な結果を得た。また、磁性物質へ適用するための汎関数を考案し酸素分子対と固体酸素へ適用して系統的に良好な計算結果を得た。

金属系スピントロニクスのデザインに関連して、実証実験を実施した。主要成果は以下の 3 点である。

(a) 金属磁性薄膜における電圧による磁気異方性制御と物質探索

Au/超薄膜 Fe/MgO 接合構造において既実証されていた電圧による磁気異方性制御について、より大きな電圧効果を得るためにバッファ層の物質探索をおこなった。Pt, Pd などの 10 族元素が有望であるという理論予測に基づき、(Ag または Pd)/超薄膜 Fe/MgO/Polyimide/ITO の構造を MgO 基板の上に MBE 法により作成し、超薄膜 Fe の磁性を磁気光学カー効果により測定した。Pd バッファ層における界面磁気異方性エネルギーと異方性エネルギー電圧による変化率はそれぞれ  $470\text{mJ/m}^2$ ,  $100\text{fJ/Vm}$  であった。Ag をバッファ層に用いた場合、界面磁気異方性エネルギーは  $980\text{mJ/m}^2$  に達し、膜厚が  $0.7\text{nm}$  のときに電圧による変化率  $195\text{fJ/Vm}$  を観測した。理論予測との定量的な一致は完全ではなく、Pd と Fe 界面での合金化や Pd の偏析等の影響を考慮する必要があると思われる。

(b) 電界誘起磁気異方性制御への下地層依存性

スパッタ法により作成した、バッファ層/強磁性超薄膜/MgO 接合における電圧誘起磁気異方性効果について、バッファ層に使用する金属に対する依存性を調べた。Ta または Ru をバッファ層として作成した多層膜を磁気トンネル接合に加工し、それぞれの場合について 300°C、200°C でアニーリングをおこなった。磁気抵抗曲線から面内磁化曲線を見つめると、電圧誘起垂直磁気異方性変化の極性は Ta と Ru で変化していることがわかった。また、電圧効果は Ta バッファ層の方が大きい。バッファ層の違いによる MgO の構造変化が影響していると思われる。

(c) MgO 二重障壁構造での電圧による磁気異方性制御

垂直磁気異方性および電圧効果の増大のために、図 4(a) に示した MgO 二重障壁構造を作成し磁気抵抗曲線の観測から磁化曲線を見積もった。VSM による飽和磁化の観測とあわせて垂直磁気異方性エネルギーを計算することが出来る。このようにして得られた垂直磁気異方性エネルギーのバイアス電圧依存性を図 4(b) に示す。ゼロバイアス下での界面磁気異方性エネルギーは  $300\mu\text{J}/\text{m}^2$  で Au/FeCo/MgO 構造の 6 倍、MgO/CoFeB/Ta の場合の 1.5 倍の値が得られた。また、正バイアス側で特に大きな異方性の変化が見られており、その変化率は  $110\text{fJ}/\text{Vm}$  に達する。これは、CoFeB/MgO/CoFeB/Ta トンネル磁気接合の場合の 2 倍の値である。さらに、負バイアス側でも異方性の増大が見られる。これは理論計算の結果と定性的に一致し、その起源についての解析に興味を持たれる。

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 52 件)

- ① L. Bergqvist, K. Sato, H. Katayama-Yoshida and P. H. Dederichs, “Computational Materials design for high- $T_C$  (Ga, Mn)As with Li-codoping”, Phys. Rev. B **83** (2011) 165201 (6 pages).
- ② K. Sato and H. Katayama-Yoshida, “Electronic structure and magnetism of IV–VI compound based magnetic semiconductors”, J. Non-crystal. Sol., **358** (2012) 2377-2380.
- ③ M. Seike, V. A. Dinh, T. Fukushima, K. Sato and H. Katayama-Yoshida, “Self-Organized Nanostructures and High Blocking Temperatures in MgO-based d0 Ferromagnets”, Jpn. J. Appl. Phys. **51** (2012) 050201 (3 pages).
- ④ M. Ogura and H. Akai, “First-principles calculation of magnetic circular dichroism spectra of magnetic semiconductors”, Phys. Rev. B **82** (2010) 184426 (9 pages).

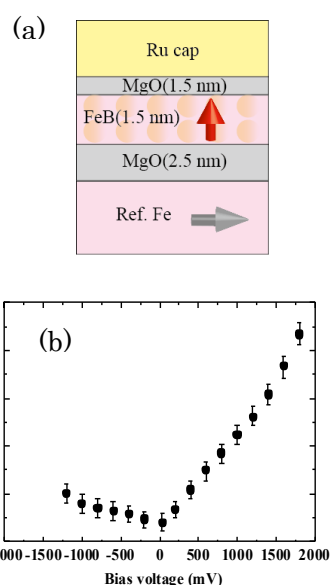


図 4: (a) MgO 二重障壁トンネル接合素子の模式図、(b) 垂直磁気異方性の印加バイアス電圧依存性

- ⑤ M. Ogura and H. Akai, “First-principles KKR-CPA calculation of the magnetic and transport properties of  $\text{La}_{1-x}\text{X}_x\text{MnO}_3$  ( $X = \text{Ca}, \text{Sr}$ )”, Journal of Physics: Condensed Matter **24** (2012) 455501 (6 pages).
- ⑥ D. Yoshikawa, M. Obata, Y. Taguchi, S. Haraguchi, and T. Oda, “Possible origin of non-linear magnetic anisotropy variation in electric field effect in a double interface system”, Appl. Phys. Express **7** (2015) 113005 (1-4).
- ⑦ M. Obata, M. Nakamura, I. Hamada, and T. Oda, “Improving the Description of Nonmagnetic and Magnetic Molecular Crystals via the van der Waals Density Functional”, J. Phys. Soc. Jpn. **84** (2015) 024715(1-9).
- ⑧ S. Haraguchi, M. Tsujikawa, J. Gotou and T. Oda, “Electric-field effects on magnetic anisotropy in Pd/Fe/Pd(001) surface”, J. Phys. D: Appl. Phys. **44** (2011) 064005 (8pages).
- ⑨ T. Nozaki, Y. Shiota, S. Miwa, S. Murakami, F. Bonell, S. Ishibashi, H. Kubota, K. Yakushiji, T. Saruya, A. Fukushima, S. Yuasa, T. Shinjo, and Y. Suzuki, “Electric-field induced ferromagnetic resonance excitation in an ultrathin ferromagnetic metal layer”, Nature Physics **8** (2012) 491-496.
- ⑩ T. Nozaki, K. Yakushiji, S. Tamaru, M. Sekine, R. Matsumoto, M. Konoto, H. Kubota, A. Fukushima, and S. Yuasa, “Voltage-Induced Magnetic Anisotropy Changes in an Ultrathin FeB Layer”, Appl. Phys. Exp. **6** (2013) 073005 (3 pages).

〔学会発表〕(計 40 件 (すべて招待講演))

- ① M. Ogura, “First-principles calculation of the magneto-optical effects of magnetic semiconductors”, International Conference on Core Research and Engineering Science of Advanced Materials (Osaka, Japan, 30 May – 4 Jun., 2010).
- ② T. Oda, “Toward a computer modeling in magnetic anisotropy and its electric-field-control for nano-structures”, International Workshop on Computational Science and Application in nanoscience and nanotechnology, (Hanoi, Vietnam, 31 Oct., 2011).
- ③ T. Nozaki, “Voltage-induced magnetic anisotropy change in ultrathin Fe(Co)/MgO junctions”, 2011 MRS Spring Meeting and Exhibit (San Francisco, USA, Apr. 26, 2011).
- ④ K. Sato, “Computational Design of Oxide-based Spintronics Materials”, Asian Workshop on First-Principles Electronic Structure Calculation (ASIAN-15), (Taipei, Taiwan, 5-7 Nov., 2012).
- ⑤ K. Sato, “Computational Nano-materials Design and Realization for Semiconductor Spintronics: Control of Defect and Spinodal Nano-Decomposition”, Gordon Research Conference on Defects in Semiconductors (Biddeford, USA, 12-17 Aug., 2012).
- ⑥ T. Nozaki, “Electric-field induced ferromagnetic resonance in magnetic tunnel junctions”, 58th Magnetism and Magnetic Materials Conference, Denver, Colorado, USA, 8 Nov. 2013.
- ⑦ T. Oda, “Recent development in the non-collinear magnetic molecular dynamics”, International Symposium on Computational Science (ISCS2014) (Bandung, Indonesia, 20 May, 2014).

〔図書〕(計 1 件)

- ① M. Seike, T. Fukushima, K. Sato, H. Katayama-Yoshida, “Computational Materials Design of  $d^0$  Ferromagnetism in Metal Oxides”, (invited chapter contribution in New Developments in Metal Oxides Research) Nova Science Publishers Inc., 2013 ISBN: 978-1-62808-148-0

〔その他〕

報道関係者への通知(プレスリリース計 4 件)

- ① 記者会見 <日時> 平成 25 年 7 月 1 日(月) 13 時 00 分-13 時 30 分 <場所> 千葉県庁 5 階 千葉県政記者クラブ <説明者> 千葉大学大学院融合科学研究科 坂本一之、金沢大学理工学研究域 小田竜樹 <発表形式> 資

料配付(レク付き)(千葉テレビ報道局、時事通信社記者、東京新聞・中日新聞記者が会見に参加)

- ② 東京新聞(2013年7月5日(金)第2千葉版 27面)「スマホ充電回数が激減!? 千葉大坂本准教授ら スピン流制御に成功 電化製品省エネなど期待」

アウトリーチ活動の状況

- ① コンピューテーショナルマテリアルズデザインワークショップ(第17回-第26回まで計10回)

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

佐藤 和則 (SATO, Kazunori)  
大阪大学・大学院工学研究科・准教授  
研究者番号: 60379097

### (2) 研究分担者

小田 竜樹 (ODA, Tatsuki)  
金沢大学・大学院数物科学系・教授  
研究者番号: 30272941

野崎 隆行 (NOZAKI, Takayuki)  
産業技術総合研究所・ナノスピントロニクス研究センター・研究員  
研究者番号: 60452405

### (3) 連携研究者

小倉 昌子 (OGURA, Masao)  
ユーリッヒ研究センター(ドイツ)・固体物理研究所・研究員  
研究者番号: 30397640

黒田 眞司 (KURODA, Shinji)  
筑波大学・大学院数理物質科学研究科・教授  
研究者番号: 40221949

吉田 博 (KATAYAMA-YOSHIDA, Hiroshi)  
大阪大学・大学院基礎工学研究科・教授  
研究者番号: 30133929

下司 雅章 (GESHI, Masaaki)  
大阪大学・ナノサイエンスデザイン教育研究センター・特任准教授  
研究者番号: 70397660

鈴木 義茂 (SUZUKI, Yoshishige)  
大阪大学・大学院基礎工学研究科・教授  
研究者番号: 50344437

赤井 久純 (AKAI, Hisazumi)  
東京大学・物性研究所・特任教授  
研究者番号: 70124873

朝日 一 (ASAHI, Hajime)  
大阪大学・産業科学研究所・名誉教授  
研究者番号: 90192947