

令和 元 年 5 月 16 日現在

機関番号：82626

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2016～2018

課題番号：16K17509

研究課題名(和文) コーン磁化薄膜を利用した高速・低消費電力MRAM素子の理論研究

研究課題名(英文) Theoretical study of high-speed and low-power-consumption MRAM devices using cone magnetization thin films

研究代表者

松本 利映 (Matsumoto, Rie)

国立研究開発法人産業技術総合研究所・エレクトロニクス・製造領域・主任研究員

研究者番号：10635303

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,300,000円

研究成果の概要(和文)：SRAMおよびDRAM代替向けの磁気ランダムアクセスメモリ(MRAM)素子のデザインを行った。まず、高速・低消費電力なスピン移行トルク(STT)書き込みが可能な垂直磁化型MRAM素子を提案した。この記録層は二次の垂直磁気異方性をもつ。STT-MRAMにより低消費電力で書き込みが可能なため電圧トルク(VT)書き込み型のMRAMも注目を集めている。コーン磁化状態と形状磁気異方性を組み合わせて記録層の初期磁化状態を制御することで、無磁界電圧トルク磁化反転が可能なMRAM素子を提案した。ダンピングトルクを積極的に利用することで電圧パルス時間幅の許容範囲が広い垂直磁化型VT-MRAM素子も提案した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

二次の垂直磁気異方性をもつ記録層の採用により、書き込みに必要な電流を上げずに熱擾乱耐性を上昇できる上に、バイアス電流の印加により現れるコーン磁化を経由させることで高速書き込みが可能になるという基本原理を発見できた。また外部磁界を必要としない電圧書き込み型MRAM素子によって高記録密度化と低コスト化が期待される。電圧パルス時間幅の許容範囲が広いMRAM素子は、電圧源および記録層磁化の歳差時間のバラツキがあっても高い信頼性での電圧書き込みを可能にするものである。本研究の成果によって、SRAMおよびDRAMを不揮発性のMRAMで置き換えることが可能となり、IT機器の大幅な省エネ化が期待される。

研究成果の概要(英文)：Magnetoresistive random access memories (MRAMs) for the replacement of SRAMs and DRAMs are designed in this project. First, we proposed a spin-transfer torque (STT) MRAM device where high-speed and low-power consumption writing is enabled by the second-order uniaxial magnetic anisotropy in a recording layer.

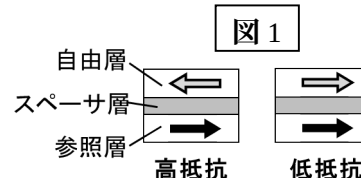
The voltage-torque (VT) MRAMs are also attracting an attention because of its low-power-consumption writing compared with STT-MRAMs. Here we proposed a VT-MRAM device having a conically magnetized recording layer and an elliptic cylinder shape which does not require the external magnetic field for writing operations. We also proposed a VT-MRAM device which does not require the voltage pulse to be turned off at around half-period of precessional motion of magnetization, and it can be realized by the energy dissipation through the damping torque.

研究分野：スピントロニクス

キーワード：MRAM スピントルク 電圧トルク 垂直磁化 コーン磁化 一軸磁気異方性

1. 研究開始当初の背景

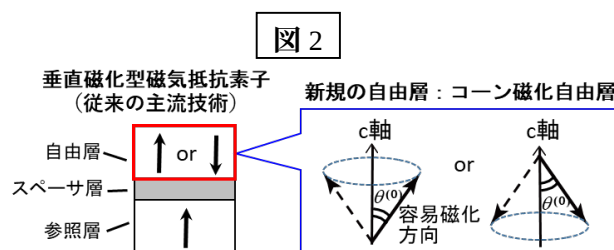
電子の持つ電荷とスピンの両方を活用した新機能デバイスの創出を目指すスピントロニクスと呼ばれる分野が注目を集めている。スピントロニクスの基礎となる物理現象に磁気抵抗(MR)効果がある。MR 効果とは自由層と呼ばれる強磁性金属層、スペーサ層と呼ばれる非磁性層、参照層と呼ばれる強磁性金属層から成る厚さ nm オーダーの多層膜において、電気抵抗の値が自由層と参照層の磁化の相対的な配置に依存して変化する現象である。反平行配置の場合には抵抗が高く、平行配置の場合には抵抗は低くなる(図 1)。この MR 効果を利用したメモリは磁気ランダムアクセスメモリ(MRAM)と呼ばれる。MRAM 素子では自由層の磁化の向きとして書き込まれた情報を MR 効果による抵抗の違いとして電氣的に読み出す。



MRAM 素子における情報の書き込みは自由層の磁化を反転させることで行われる。ハードディスクなど従来型の磁気記録では、磁場を用いて強磁性体の磁化を反転させる方法が一般的であったが、MRAM ではスピントルク磁化反転という現象を用いて電氣的に自由層の磁化を反転させる。スピントルクとは電流によって運ばれる伝導電子のspin角運動量が強磁性体中の局在電子のspin角運動量に移行することで生じるトルクであり、このスピントルクによって起こる磁化の反転をスピントルク磁化反転と呼ぶ。スピントルク磁化反転では磁化の反転方向が電流の向きによって異なるため、電流の向きを選ぶことで任意の情報を書き込むことができる。

MRAM は揮発性の半導体メモリである DRAM や SRAM の代替メモリとしての応用が期待されている。揮発性メモリは記録を保持するだけでも電力を要するが、不揮発性の MRAM は記録保持のための電力を要しない。MRAM の実用化によってコンピュータメモリ・CPU

の大幅な低消費電力化が期待されているが、そのためには次に挙げる 1～3 の要件を全て満たす MRAM 素子を開発しなければならないという技術課題が残されている：(1)DRAM(SRAM)代替であれば 10～30 ns 程度(3～10 ns あるいはそれ未満)で書き込み・読み出しができること、(2)30 μ A 以下の低電流で書き込みができること、(3)高集積できる小さい素子サイズでありながらも記録保持時間(ゼロバイアスでの熱擾乱耐性 $\Delta^{(0)}$ で評価され $\Delta^{(0)} \geq 60$ が要求されている)を保つこと。2012 年には、自由層と参照層を垂直磁化とし(図 2 左)ダンピング定数(磁化反転する際の摩擦係数がこれに比例)が小さい材料を自由層として採用した MgO スペーサ層 MRAM 素子で L2・L3 キャッシュ SRAM 代替のための要件を満たすことが実証された[引用文献①, ②]。



しかしながら、L1 キャッシュ SRAM 代替に関しては現在の主流技術である $K_{u2} \approx 0$ の垂直磁化型の MRAM 素子では解がない。L2・L3 キャッシュ SRAM 代替に関してもより低消費電力動作が可能な新規 MRAM 素子の開発が切望されている。このような背景のもと、研究代表者はコーン磁化薄膜を自由層に用いることで MRAM 素子のさらなる高速・低消費電力化を目指す研究に着手した。コーン磁化とは、2 次の結晶磁気異方性(K_{u2})が 1 次のそれ(K_{u1})と競合し磁化方向が円錐側面に沿って膜面面直な方向から傾いている磁化状態である(図 2 右)。スピントルクの大きさは参照層の磁化と自由層の磁化の外積に比例するため、反転の初期においてコーン磁化の方が垂直磁化よりも大きなスピントルクを受けることとなり、高速かつ低消費電力な動作が可能となる。研究代表者はマクロスピンモデルを用いた解析を行い、実在するコーン磁化材料で K_{u2} が大きいものを自由層に用いることで、熱耐性の要件を満たしつつも従来型の $K_{u2} \approx 0$ の垂直磁化自由層よりも高速かつ低消費電力な磁化反転が可能であることを提案していた[引用文献③, ④, ⑤]。

2. 研究の目的

2 次の結晶磁気異方性(K_{u2})を持つ、コーン磁化または垂直磁化の薄膜における磁化ダイナミクスを理論・シミュレーションを駆使して解析し、高速かつ低消費電力動作が可能な磁気ランダムアクセスメモリ(MRAM)素子の理論提案を行う。具体的には、応用上重要な有限温度下かつ 10 ns 以下の時間領域における電流および電圧誘起のスピンドダイナミクスが素子の大きさ、形状、飽和磁化、異方性定数、減衰定数などの素子パラメタにどのように依存するのかを系統的に調べ、DRAM・SRAM 代替のための要件を満たす素子パラメタを決定する。

3. 研究の方法

マクロスピンモデルを用いた理論解析とマイクロマグネティクスシミュレーション (Spin-PM および MuMax3) を用いたシミュレーション解析を併用して、2 次までの結晶磁気異方性を持つ自由層における磁化ダイナミクスの解析を行った。以下、具体的な研究方法を示す。

(1) 主に SRAM を想定し素子形状を直径 10 nm から 100 nm の円柱もしくは楕円柱に限定したシミュレーションを行い、素子サイズとアスペクト比がスピントルク磁化反転の閾値電流や反転時間にどのような影響を与えるのかについて詳しく調べる。飽和磁化(M_s)、異方性定数(K_{u1} , K_{u2})、ダンピング定数(α)などの材料で決定される素子パラメタはマクロスピンモデルでの解析結果[引用文献③, ④]を参考に現実的な範囲で探索した。

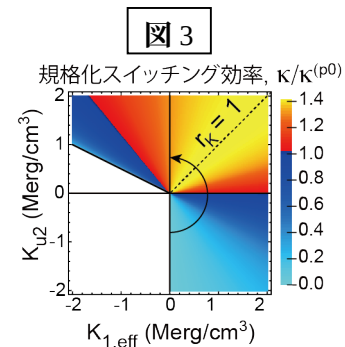
(2) また、マクロスピンシミュレーションとマイクロマグネティクスシミュレーションでどのような違いが出るのかについても調べた。

(3) シミュレーションで得られる磁化ダイナミクスに関する大量のデータを効率良く解析するための、データ解析システムを構築した。

4. 研究成果

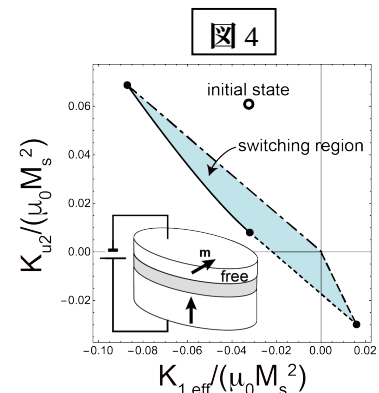
(1) ゼロバイアス電流で垂直磁化状態の薄膜を自由層として用いた場合であっても、二次の磁気異方性(K_{u2})を利用することで高速・低消費電力な MRAM 素子を実現可能であることを新たに指摘した。動作速度に関しては、書き込み電流パルスの立ち上がりの過程で垂直磁化状態からコーン磁化状態を経由させることで高速スイッチングが可能であることを示した。消費電力に関しては、二次の磁気異方性はスイッチングに必要な電流 (I_{sw}) を上昇させずに熱擾乱耐性 ($\Delta^{(0)}$) を上昇させる効果があることを確認できた。それを示す、スイッチング効率($\kappa = \Delta^{(0)} / I_{sw}$)の ($K_{1,eff}$, K_{u2}) の依存性を図 3 に示す。 κ が大きいほど消費電力は小さい。なお $K_{1,eff} = K_{u1} - (1/2)\mu_0 M_s^2$ であり、 $K_{1,eff}$ は反磁界エネルギーが差し引かれた実効的な一次の異方性定数を表す。図 3 では $K_{u2} = 0$ の垂直磁化自由層の κ ($\kappa^{(p0)}$) で規格化したスイッチング効率がカラープロットされている。 $r_K = K_{u2} / K_{1,eff} = 1$ の垂直磁化自由層は、従来の $K_{u2} = 0$ の垂直磁化自由層より 1.4 倍(正確には $\sqrt{2}$ 倍)スイッチング効率が高くなる。一方で二次の磁気異方性が読み出し性能に与える影響についても調査した。読み出し動作では書き込み動作ほど大きい電流は印加しないものの、リード・ディスターバンスと呼ばれる読み出し中の誤書き込みが起こり得る。リード・ディスターバンスが起こる確率は、一次だけでなく二次の磁気異方性にも依存することがわかった。二次の磁気異方性が書き込み性能と読み出し性能に与える効果についてまとめ上げ、Physical Review Applied 誌において論文発表を行った[雑誌論文②]。

本研究成果について国内特許出願[産業財産権①]および外国特許出願[産業財産権③、登録査定済み]を行った。国内外の学会で口頭発表およびポスター発表も行い、国外の学会での招待講演も行った[学会発表②、④、⑥、⑦]。



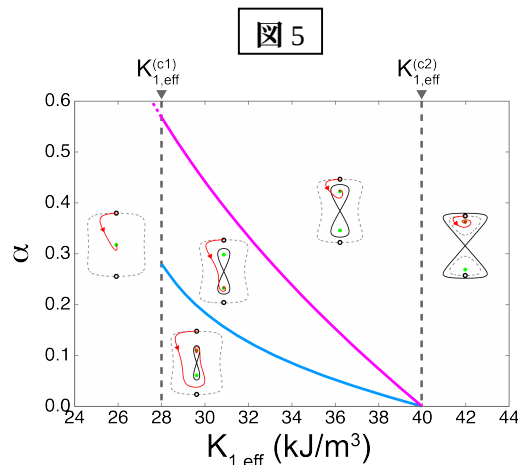
(2) コーン磁化薄膜を発振器の磁化自由層として応用することも検討した。垂直磁化ポラライザ層の発振器においては、コーン磁化自由層の場合は面内磁化自由層の場合より発振に必要な電流(閾電流)が大きくなるなどのデメリットが判明した。この結果について国際学会(MML 2016)において発表を行った[学会発表①]。この研究の過程で、応用上重要な面内磁化自由層の場合について、閾電流の解析式を得ることができた。本成果について AIP advances 誌に論文発表を行い[雑誌論文①]、国内外の学会において口頭発表を行った[学会発表③、⑤]。

(3) 電圧書き込み型の MRAM 素子(電圧トルク MRAM 素子)は電流書き込み型の MRAM 素子(スピントルク MRAM 素子)より桁違いに少ない消費電力で書き込みが可能であるため最近注目を集めている。しかし、電圧トルク MRAM 素子の場合、書き込みを可能とするために膜面内方向の外部磁界を自由層に印加する外部素子を設置しなければならない欠点があった。この欠点を克服するため、コーン磁化薄膜を磁化自由層として用いた電圧トルク MRAM 素子(図 4 の差し込み図)を提案した。膜面内方向に関する形状磁気異方性磁界を利用するため楕円柱形状が採用されている。コーン磁化状態と形状磁気異方性を組み合わせて初期磁化状態を制御した磁化自由層において、電圧磁気異方性変化を用いた無磁界磁化反転が可能であることをマクロスピンモデル計算によって示した。図 4 に示すように、initial state の異方性定数から青色で示した磁化反転領域



(switching region)の異方性定数にバイアス電圧の印加によって変化させることで無磁界磁化反転が可能であることを明らかにした。また、この磁化反転領域を表す解析式も得た。本研究成果について国内特許出願「産業財産権②」および外国特許出願「産業財産権④」を行った。Physical Review Applied 誌の Editors' Suggestion として論文発表も行った〔雑誌論文③〕。国内外の学会で口頭発表およびポスター発表も行い、国外での学会での招待講演も行った〔学会発表⑧、⑨、⑩、⑪〕。

(4) 電圧トルク MRAM 素子では書き込みを完了させるために電圧パルスを適切な時間で切らなければならないという問題があった。この問題を解決するため、ダンピングトルクを積極的に利用することで電圧パルスの許容時間を長くすることができる垂直磁化型 MRAM 素子を提案した。ダンピングトルクは、異方性磁界や外部磁界などを合わせた有効磁界の方向へ磁化を緩和させるトルクである。電圧パルスの許容時間が長い電圧トルク磁化反転が可能な条件を、図 5 を用いて示す。図 5 中の赤い曲線は、バイアス電圧印加中の磁化ダイナミクスの様子を領域ごとに示したものである。白抜き丸はバイアス電圧印加前の容易磁化方向を、黄緑色の点はバイアス電圧印加中の容易磁化方向を表す。ここでは飽和磁化が $M_s = 1400$ kA/m で円柱形状の垂直磁化自由層に 31.83 kA/m ($=400$ Oe) の面内の外部磁界が印加されており、バイアス電圧の印加により異方性定数が $K_{1,\text{eff}} = 70$ kJ/m³ から図 5 の横軸の $K_{1,\text{eff}}$ に減少すると仮定している。 K_{u2} はあってもよいが、無くても電圧パルスの許容時間を長くすることは可能であるので $K_{u2} = 0$ としている。シアン色の曲線とマゼンタの曲線とのダンピング定数(α)であり、バイアス電圧印加中に $K_{1,\text{eff}}^{(c1)}$ と $K_{1,\text{eff}}^{(c2)}$ の間の異方性定数となる場合に、バイアス電圧を印加したままであっても所望の反転後の磁化方向を保持する。このため電圧パルスの許容時間を長くすることができる。温度 300 K の熱擾乱がある環境であっても、体積が $140 \times 140 \times \pi \times 2$ 立方ナノメートルの磁化自由層であれば、電圧パルスの許容時間が長い磁化反転が 1 万分の 1 程度の誤書き込み確率で実現可能であることが数値シミュレーションからわかった。本研究成果について Applied Physics Express 誌において論文発表を行った〔雑誌論文④〕。



<引用文献>

- ① T. Kishi et al., IEDM Tech. Dig., 12.6 (2008) ② E. Kitagawa et al., IEDM Tech. Dig., p. 29.4 (2012). ③ R. Matsumoto et al., APEX, 8, 063007 (2015). ④ 松本利映 ら, 特願 2015-103909. ⑤ R. Matsumoto et al., PRB, 92, 140409(R)-1-4.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 (計 4 件)

- ① R. Matsumoto and H. Imamura, Critical current density of a spin-torque oscillator with an in-plane magnetized free layer and an out-of-plane magnetized polarizer, AIP Advances, 査読有, 6 巻, 2016, 125033-1–125033-6 DOI:10.1063/1.4972263
② Rie Matsumoto, Hiroko Arai, Shinji Yuasa and Hiroshi Imamura, Efficiency of Spin-Transfer-Torque Switching and Thermal-Stability Factor in a Spin-Valve Nanopillar with First- and Second-Order Uniaxial Magnetic Anisotropies, Physical Review Applied, 査読有, 7 巻, 2017, 044005-1–044005-6 DOI: 10.1103/PhysRevApplied.7.044005
③ R. Matsumoto, T. Nozaki, S. Yuasa and H. Imamura, Voltage-Induced Precessional Switching at Zero-Bias Magnetic Field in a Conically Magnetized Free Layer, Physical Review Applied, 査読有, 9 巻, 2018, 014026-1–014026-8 DOI: 10.1103/PhysRevApplied.9.014026
④ Rie Matsumoto, Tomoyuki Sato and Hiroshi Imamura, Voltage-induced switching with long tolerance of voltage-pulse duration in a perpendicularly magnetized free layer, Applied Physics Express, 査読有, 12 巻, 2019, 053003-1–053003-4 DOI: 10.7567/1882-0786/ab1349

〔学会発表〕 (計 12 件)

- ① R. Matsumoto and H. Imamura, Critical magnetic field of spin torque oscillator with

- an in-plane magnetized free layer and an out-of-plane magnetized reference layer under angled magnetic field, The 9th International Symposium on Metallic Multilayers (MML 2016) (国際学会)、2016 年 6 月 20 日、Uppsala (Sweden)
- ② 松本 利映、荒井 礼子、湯浅 新治、今村 裕志、高次の磁気異方性を有する自由層の磁化反転特性、第 40 回日本磁気学会学術講演会、2016 年 9 月 5 日、金沢大学 角間キャンパス (石川県金沢市)
- ③ R. Matsumoto and H. Imamura, Theoretical analysis of spin torque oscillator having an in-plane or conically magnetized free layer and an out-of-plane magnetized reference layer under angled magnetic field, 第 77 回応用物理学会秋季学術講演会、2016 年 9 月 16 日、朱鷺メッセ 新潟コンベンションセンター (新潟県新潟市)
- ④ R. Matsumoto, H. Arai, S. Yuasa and H. Imamura, Spin-transfer-torque switching in a free layer with higher-order perpendicular magnetic anisotropy, The 61st Annual Magnetism and Magnetic Materials (MMM) Conference (国際学会)、2016 年 11 月 1 日、New Orleans (U.S.A.)
- ⑤ R. Matsumoto and H. Imamura, Critical current density of a spin-torque oscillator with an in-plane magnetized free layer and an out-of-plane magnetized polarizer, 2017 IEEE International Magnetism Conference (INTERMAG 2017) (国際学会)、2017 年 4 月 25 日、Dublin (Ireland)
- ⑥ Rie Matsumoto, Hiroko Arai, Shinji Yuasa and Hiroshi Imamura, Enhancement of the efficiency of spin transfer torque switching in a perpendicularly magnetized free layer by the second-order uniaxial magnetic anisotropy, The Moscow International Symposium on Magnetism (MISM 2017) (招待講演) (国際学会)、2017 年 7 月 3 日、Moscow State University, Moscow (Russia)
- ⑦ R. Matsumoto, H. Arai, S. Yuasa and H. Imamura, Efficiency of spin transfer torque switching in a perpendicularly magnetized free layer with the first- and second-order uniaxial magnetic anisotropies, The 28th Magnetic Recording Conference (TMRC 2017) (国際学会)、2017 年 8 月 3 日、エポカルつくば (茨城県つくば市)
- ⑧ Rie Matsumoto, Takayuki Nozaki, Shinji Yuasa and Hiroshi Imamura, Voltage-induced precessional switching at zero bias magnetic field in a conically magnetized free layer, 第 41 回日本磁気学会学術講演会、2017 年 9 月 20 日、九州大学 伊都キャンパス (福岡県福岡市)
- ⑨ R. Matsumoto, T. Nozaki, S. Yuasa and H. Imamura, Voltage-driven precessional switching at zero bias magnetic field in a conically magnetized free layer, 2018 IEEE International Magnetism Conference (INTERMAG 2018) (国際学会)、2018 年 4 月 26 日、Dublin (Ireland)
- ⑩ R. Matsumoto, T. Nozaki, S. Yuasa and H. Imamura, Theoretical analysis of write error rate in bias-magnetic-field-free voltage-torque MRAM, The 21st International Conference on Magnetism (ICM2018) (国際学会)、2018 年 7 月 19 日、San Francisco (U.S.A.)
- ⑪ Rie Matsumoto, Takayuki Nozaki, Shinji Yuasa and Hiroshi Imamura, Voltage-induced precessional switching at zero-bias magnetic field in a conically magnetized free layer with elliptic cylinder shape, SPIE Spintronics XI conference (招待講演) (国際学会)、2018 年 8 月 21 日、San Diego (U.S.A.)
- ⑫ Rie Matsumoto, Steven Lequeux, Hiroshi Imamura and Julie Grollier, Chaos and relaxation oscillations in spintronic neurons, SPIE Spintronics XI conference (招待講演) (国際学会)、2018 年 8 月 23 日、San Diego (U.S.A.)

〔図書〕(計 0 件)

〔産業財産権〕

○出願状況 (計 4 件)

①名称：磁気抵抗素子

発明者：松本 利映、荒井 礼子、湯浅 新治、今村 裕志

権利者：産業技術総合研究所

種類：特許

番号：特願 2017-025451

出願年：平成 29 年

国内外の別：国内

②名称：磁気素子

発明者：松本 利映、野崎 隆行、湯浅 新治、今村 裕志

権利者：産業技術総合研究所

種類：特許

番号：特願 2017-090398

出願年：平成 29 年

国内外の別： 国内

③名称：MAGNETORESISTIVE DEVICE

発明者：松本 利映、荒井 礼子、湯浅 新治、今村 裕志

権利者：産業技術総合研究所

種類：特許

番号：(米国出願) 15/897121

出願年：平成 30 年

国内外の別： 外国

④名称：MAGNETIC ELEMENT

発明者：松本 利映、野崎 隆行、湯浅 新治、今村 裕志

権利者：産業技術総合研究所

種類：特許

番号：PCT/JP2018/014605

出願年：平成 30 年

国内外の別： 外国

○取得状況 (計 1 件)

名称：MAGNETORESISTIVE DEVICE

発明者：松本 利映、荒井 礼子、湯浅 新治、今村 裕志

権利者：産業技術総合研究所

種類：特許

番号：(米国出願) 15/897121

取得年：平成 31 年

国内外の別： 外国

〔その他〕

ホームページ等：該当なし

6. 研究組織

(1)研究分担者：該当なし

研究分担者氏名：

ローマ字氏名：

所属研究機関名：

部局名：

職名：

研究者番号 (8 桁)：

(2)研究協力者

研究協力者氏名：今村 裕志

ローマ字氏名：(IMAMURA, hiroshi)

研究協力者氏名：荒井 礼子

ローマ字氏名：(ARAI, Hiroko)

※科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。