

令和 4 年 6 月 2 日現在

機関番号：11301

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2019～2021

課題番号：19K04486

研究課題名（和文）極微細スピントロニクスデバイスにおける微細構造表面の磁気特性評価とその制御

研究課題名（英文）Evaluation and control of magnetic properties at a nanomagnet surface in ultra-small spintronics devices

研究代表者

陣内 佛霖（Jinnai, Butsurin）

東北大学・材料科学高等研究所・助教

研究者番号：60807692

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,400,000円

研究成果の概要（和文）：直径10 nm以下の極微細MTJデバイスでの微細加工プロセスや保護絶縁膜材料とデバイス特性の関係を明らかにし、デバイス特性改善のための保護絶縁膜材料や微細加工プロセスによる影響を抑制する膜構造を示すことができた。さらに当初の研究計画では想定していなかったが、得られた知見を進展させ、直径10 nm以下の極微細領域で高い性能が得られるMTJデバイス構造の設計指針を確立した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究で明らかにされた極微細領域でのMTJデバイス特性と微細加工プロセス・保護絶縁膜材料の関係や極微細MTJデバイス設計指針は、MTJデバイスの性能向上に大きく貢献できる。またMTJデバイス技術の応用発展に資するだけでなく、極微細領域のMTJデバイスで発現する物理現象のさらなる理解により、表面の物性に敏感な、マグノン、フォトン、またはフォノンなどが介在するスピントロニクス関連減少の学理の発展へと繋がっていくと期待される。

研究成果の概要（英文）：The relationship between nanofabrication process and passivation film materials and device characteristics has been revealed in the ultra-small MTJ devices with diameters of 10 nm or less. Passivation film materials for device performance improvement and film stack structures that can suppress the effects of the nanofabrication process have been shown. Furthermore, a design guideline for MTJ devices that can achieve high performance at the ultra-small scale beyond 10 nm in diameter has been established.

研究分野：スピントロニクス

キーワード：スピントロニクス 微細加工 微細構造表面 磁気トンネル接合

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、研究者個人に帰属します。

1. 研究開始当初の背景

現在の集積回路の発展は、シリコン半導体デバイスを微細化することによって成し遂げられてきた。しかしさらなる集積回路の高性能化・低消費電力化を実現するためには、SRAMやDRAMなどの揮発性メモリを不揮発性メモリに置き換える必要がある。不揮発性メモリとして、スピントロニクスデバイス、特に磁気トンネル接合 (MTJ) デバイスを用いたスピン移行トルク磁気抵抗メモリ (STT-MRAM) が期待されている。MTJ デバイスは、トンネル絶縁膜を磁性膜ではさんだ構造をもち、一方の磁性膜が参照層、もう一方が自由層として、自由層の磁化方向を電流や磁場によって制御することによって抵抗を変化させることができる。実用化間近である MTJ デバイスサイズは 40 nm 径程度であり、今後さらなる MTJ デバイスの微細化が求められている。しかし MTJ デバイスの微細化が進むと磁性材料特性から予想されるデバイス特性を示さなくなる (デバイス特性が劣化する) 問題があることが近年申請者の所属するグループの研究からわかってきた [Igarashi et al., Appl. Phys. Lett. 111, 132407 (2017); Shinozaki et al., Appl. Phys. Express 11, 043001 (2018)]。高性能極微細スピントロニクスデバイスを実現するためには、このデバイス劣化の問題を解決する必要がある。

2. 研究の目的

本研究では、極微細スピントロニクスデバイスの高性能化を目指し、一桁ナノメートルサイズ極微細領域のデバイス特性にとって重要となる、磁性材料の微細加工表面における磁気特性を詳細に調べその変化機構を理解し制御することを目的としている。

極微細構造では表面の寄与が大きくなる。磁性材料表面は、微細加工プロセス、隣接材料 (保護絶縁膜材料)、または大気曝露などの影響によってその磁気特性が変化する。極微細スピントロニクスデバイスでは、その表面磁気特性がデバイス特性を左右する。したがって高性能極微細スピントロニクスデバイスを実現するために、微細構造表面の磁気特性を体系的に調べその変化機構を理解し、そのデバイス特性への影響を明らかにする。

3. 研究の方法

微細加工プロセス条件や保護絶縁膜材料を変えて、様々な膜構造を有する極微細 MTJ デバイスを作製した。実デバイスでのデバイス特性を評価することによって、表面磁気特性がどのようにデバイス特性に影響しているかを明らかにした。デバイス特性は以下に示すように多角的な手法を用いて、デバイス応用およびデバイス物理の両面から微細構造表面磁気特性の影響について議論した。

- (1) 不揮発性メモリ応用にとって重要なデバイス特性である、磁化反転電流と熱安定性指数 (磁化が反転する際に超えるエネルギー障壁高さと熱擾乱エネルギーの比) を測定した。
- (2) MTJ デバイスの保磁力の印加磁場依存性から磁化反転モードを評価した。磁化反転モードは、表面磁気特性が内部のそれとは異なっている場合、磁化が一斉に反転する単磁区モデルでは記述できないことがわかっている。

また極微細 MTJ デバイスから得られる実験結果の理解を深めるために、実験から得られる値を数値計算パラメータとして用いて、磁性体の磁気モーメントをひとつのスピンのみとして磁化ダイナミクスを調べるマクロスピンシミュレーション解析や、磁性体内部の原子磁気モーメントの向きやその動的変化を調べることができるマイクロマグネティックシミュレーション解析を行った。

4. 研究成果

図 1 に、保護絶縁膜材料を変化させたときのトンネル磁気抵抗 (TMR) 比を示す。保護絶縁膜材料を SiN から Ta/SiN または MgO/Ta/SiN にすることによって TMR 比の平均が 50%程度から 70%程度に改善した。TMR 比は SiN に含まれる窒素 (N) や水素 (H) が熱処理中に MTJ 素子構造に拡散しデバイス特性を劣化することがわかっており [Jeong et al., J. Appl. Phys. 115, 17C727 (2014); Satake et al., Jpn. J. Appl. Phys. 56, 046202 (2017); Sato et al., IEEE IEDM

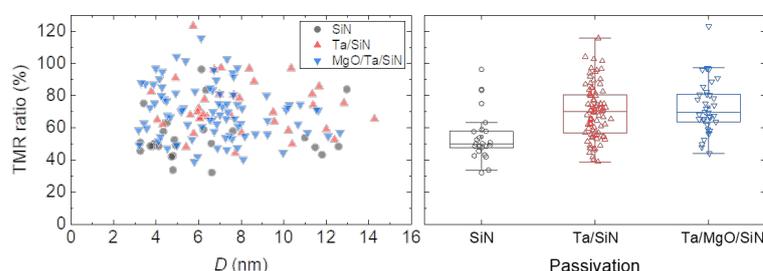


図 1. 保護絶縁膜材料を変化させたときの TMR 比。

27.2.1 (2018)], Ta または MgO/Ta 層が N や H の MTJ 素子構造への侵入を抑制したため TMR 比が向上したと考えられる。

次に膜構造を変化させて微細加工プロセスとデバイス特性の関係を調べた。CoFeB/MgO 材料系の MTJ デバイスのデバイス特性は、CoFeB/MgO 界面由来の磁気異方性 (界面磁気異方性) と CoFeB 膜の膜厚と直径から決まる磁気異方性 (形状磁気異方性) から決定される。そこで、ここでは CoFeB/MgO 界面の数と CoFeB 膜厚を変化させ、界面磁気異方性と形状磁気異方性がそれぞれ支配的であるデバイスを作製した (図 2a)。極微細領域では積層磁性体が、古典的電磁気学的な効果である静磁気的な相互作用により結合しているため、MgO 層で隔てられた CoFeB 層はひとつの記録層として振る舞う。図 2b は、様々な膜構造での、熱安定性指数と自発磁化の温度依存性から求まる指数 n を示している。 n が大きい (小さい) と熱安定性指数の温度依存性が大きい (小さい)。界面数の増加または膜厚の減少で n が増大していることがわかる。ブランケット膜では n の値が 2-3 程度になるが、微細加工プロセスなどによって素子表面における磁気特性が変化すると n の値はそれよりも大きくなる計算によってわかっている [Naganuma et al., AIP Adv. 10, 075106 (2020)]。したがって微細加工プロセスは CoFeB/MgO 界面に影響を及ぼしていることが示唆され、界面効果の大きい膜構造ではデバイス特性の劣化が顕著となる。

続いて微細加工プロセスとデバイス特性の関係を調べる過程で作製した、界面数や CoFeB 膜厚の異なる極微細 MTJ デバイスの熱安定性と反転特性について評価した。図 3 に様々な膜構造での熱安定性指数のサイズ依存性を示す。熱安定性は、極微細領域では CoFeB/MgO 界面数または CoFeB 膜厚の増大によって向上する。界面磁気異方性が支配的である場合、直径 5 nm 程度のデバイスでも 100 に近い熱安定性指数が得られた。さらに図 2b で示したように、形状磁気異方性が支配的であるとき熱安定性指数の温度依存性が小さくなる。一方で界面磁気異方性が支配的な場合、50 程度の熱安定性指数が得られた。

次に図 4 に様々な膜構造での反転電圧のパルス幅依存性を示す。パルス幅が短くなる領域 (歳差領域) では、熱擾乱によるアシストがなくなり反転電圧が増加する。形状磁気異方性が支配的であるデバイスではパルス幅が数十ナノ秒で反転電圧の増加が始まるのに対して、界面磁気異方性が支配的であるデバイスでは反転電圧の増加が抑制され、サブ 10 ナノ秒での反転が得られた。これは、歳差領域での高速反転動作を特徴づける時定数である緩和時間が界面磁気異方性に反比例しており、界面磁気異方性の寄与が大きくなるにつれてそれが小さくなるためである。

これらの結果は、極微細領域で CoFeB/MgO 界面数や CoFeB 膜厚を変化させることでデバイス特性を制御できることを示しており、極微細 MTJ デバイスを使用した STT-MRAM の幅広い用途への展開が期待できる。形状磁気異方性が支配的なデバイスは、動作速度は数十ナノ秒だが、長期データ保持特性を有し車載応用に必要とされる 150 度での動作も可能であるため、Flash 置換向け STT-MRAM に適している。一方、界面磁気異方性が支配的なデバイスは、サブ 10 ナノ秒の高速動作が可能であるため、高いデータ保持特性が要求されない SRAM 置換向け STT-MRAM に適している。

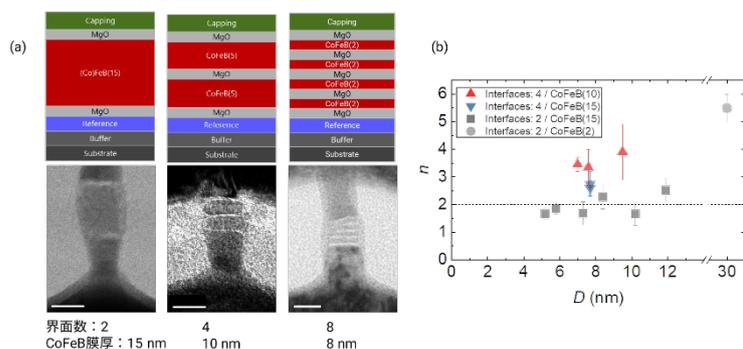


図 2. (a) 異なる CoFeB/MgO 界面数と CoFeB 膜厚を有する MTJ デバイスの TEM 像。(b) 様々な膜構造での熱安定性と自発磁化から求まる指数 n のサイズ依存性。

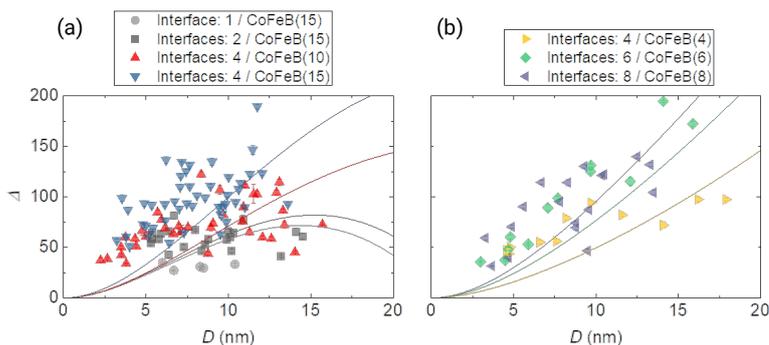


図 3. 熱安定性指数のサイズ依存性: (a) 形状磁気異方性と (b) 界面磁気異方性がそれぞれ支配的なデバイス。線は解析モデルから求まる熱安定性指数を示している。

上述の通り、当研究期間での一連の研究によって直径 10 nm 以下の極微細 MTJ デバイスでの微細加工プロセスや保護絶縁膜材料とデバイス特性の関係を明らかにし、デバイス特性改善のための保護絶縁膜材料や微細加工プロセスによる影響を抑制する膜構造を示すことができた。さらに当初の研究計画では想定していなかったが、得られた知見を発展させ、直径 10 nm 以下の極微細領域で高い性能が得られる MTJ デバイス構造の設計指針を確立した。

現在製品化されている STT-MRAM には、数十 nm 程度の直径を有する MTJ デバイスが用いられている。将来の STT-MRAM は、半導体デバイス技術と同様に、MTJ デバイスの微細化が必須であり、極微細領域では MTJ デバイス表面の寄与が大きくなる。本研究で明らかにされた極微細領域での MTJ デバイス特性と微細加工プロセス・保護絶縁膜材料の関係や極微細 MTJ デバイス設計指針は、MTJ デバイスの性能向上に大きく貢献できる。また MTJ デバイス技術の応用発展に資するだけでなく、極微細領域の MTJ デバイスで発現する物理現象のさらなる理解により、表面の物性に敏感な、マグノン、フォトン、またはフォノンなどが介在するスピントロニクス関連現象の学理の発展へと繋がっていくと期待される。

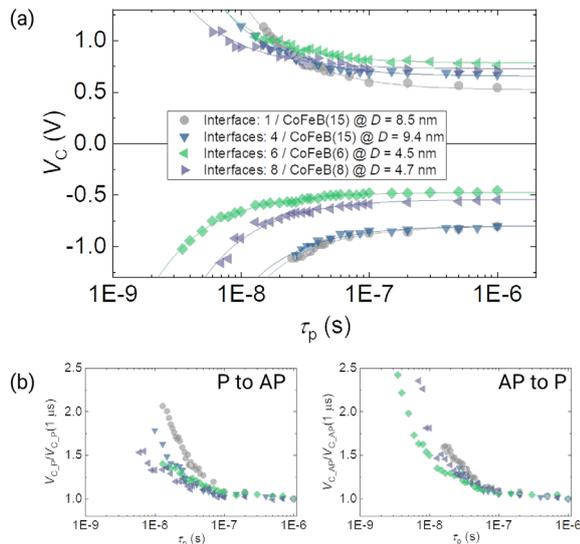


図 4. (a) 反転電圧のパルス幅依存性。(b) パルス幅 1 μs の反転電圧で規格化した反転電圧のパルス幅依存性。線は解析モデルから求める反転電圧を示している。

のさらなる理解により、表面の物性に敏感な、マグノン、フォトン、またはフォノンなどが介在するスピントロニクス関連現象の学理の発展へと繋がっていくと期待される。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計5件（うち査読付論文 4件 / うち国際共著 2件 / うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 陣内佛霖, 五十嵐純太, 渡部杏太, 深見俊輔, 大野英男	4. 巻 56
2. 論文標題 極微細高性能磁気トンネル接合素子の開発と5G/6G時代 への展望	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 セラミックス	6. 最初と最後の頁 418-422
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -
1. 著者名 Hayakawa K., Kanai S., Funatsu T., Igarashi J., Jinnai B., Borders W. A., Ohno H., Fukami S.	4. 巻 126
2. 論文標題 Nanosecond Random Telegraph Noise in In-Plane Magnetic Tunnel Junctions	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Physical Review Letters	6. 最初と最後の頁 117202
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevLett.126.117202	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Jinnai Butsurin, Igarashi Junta, Watanabe Kyota, Enobio Eli Christopher I., Fukami Shunsuke, Ohno Hideo	4. 巻 118
2. 論文標題 Coherent magnetization reversal of a cylindrical nanomagnet in shape-anisotropy magnetic tunnel junctions	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Applied Physics Letters	6. 最初と最後の頁 082404 ~ 082404
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1063/5.0043058	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する
1. 著者名 Igarashi Junta, Jinnai Butsurin, Desbuis Valentin, Mangin Stephane, Fukami Shunsuke, Ohno Hideo	4. 巻 118
2. 論文標題 Temperature dependence of the energy barrier in X/1X nm shape-anisotropy magnetic tunnel junctions	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Applied Physics Letters	6. 最初と最後の頁 012409 ~ 012409
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1063/5.0029031	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Butsurin Jinnai, Kyota Watanabe, Shunsuke Fukami, and Hideo Ohno	4. 巻 116
2. 論文標題 Scaling magnetic tunnel junction down to single-digit nanometers - Challenges and prospects	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Applied Physics Letters	6. 最初と最後の頁 160501
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1063/5.0004434	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計16件 (うち招待講演 4件 / うち国際学会 11件)

1. 発表者名 Keisuke Hayakawa, Shun Kanai, Keito Kobayashi, William A. Borders, Junta Igarashi, Butsurin Jinnai, Hideo Ohno, and Shunsuke Fukami
2. 発表標題 Determination of Attempt Time Using Stochastic Magnetic Tunnel Junctions
3. 学会等名 Joint MMM-Intermag Conference (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 陣内佛霖, 五十嵐純太, 篠田峻伸, 渡部杏太, 船津拓也, 佐藤英夫, 深見俊輔, 大野英男
2. 発表標題 大容量STT-MRAM向け一桁ナノメートル磁気トンネル接合技術
3. 学会等名 シリコン材料・デバイス研究会 (招待講演)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Butsurin Jinnai, Junta Igarashi, Shunsuke Fukami, and Hideo Ohno
2. 発表標題 Ultra-small magnetic tunnel junction for fast STT switching
3. 学会等名 Seminaire organise dans le cadre du projet IMPACT Nanomaterials for Sensors (N4S) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Butsurin Jinnai, Junta Igarashi, Takanobu Shinoda, Kyota Watanabe, Shunsuke Fukami, and Hideo Ohno
2. 発表標題 Fast Switching Down to 3.5 ns in Sub-5-nm Magnetic Tunnel Junctions Achieved by Engineering Relaxation Time
3. 学会等名 IEEE International Electron Devices Meeting (IEDM) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Keisuke Hayakawa, Shun Kanai, Keito Kobayashi, William Borders, Junta Igarashi, Butsurin Jinnai, Hideo Ohno, Shunsuke Fukami
2. 発表標題 Attempt time determined in stochastic magnetic tunnel junctions
3. 学会等名 第82回応用物理学会秋季学術講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Butsurin Jinnai, Junta Igarashi, Shunsuke Fukami, and Hideo Ohno
2. 発表標題 Ultra-Small Shape-Anisotropy Magnetic Tunnel Junctions below 10 nm - Material, Device Engineering, and Performance
3. 学会等名 IEEE International Magnetics Conference (Intermag) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Junta Igarashi, Butsurin Jinnai, Kyota Watanabe, Shunsuke Fukami, and Hideo Ohno
2. 発表標題 Crossover of magnetization reversal mode with thickness and diameter in shape-anisotropy magnetic tunnel junctions
3. 学会等名 IEEE International Magnetics Conference (Intermag) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Junta Igarashi, Butsurin Jinnai, Shunsuke Fukami, and Hideo Ohno
2. 発表標題 Shape-anisotropy magnetic tunnel junctions with multilayered ferromagnets
3. 学会等名 Tohoku-Lorraine Joint Conference (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Junta Igarashi, Butsurin Jinnai, Kyota Watanabe, Shunsuke Fukami, and Hideo Ohno
2. 発表標題 Ultra-Small Shape-Anisotropy Magnetic Tunnel Junctions: Physics and Device Engineering
3. 学会等名 The 4th International Symposium for The Core Research Cluster for Spintronics (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Junta Igarashi, Butsurin Jinnai, Valentin Desbuis, Stephane Mangin, Shunsuke Fukami, and Hideo Ohno
2. 発表標題 Physics and stack engineering of ultra-small magnetic tunnel junctions using shape anisotropy
3. 学会等名 第68回応用物理学会春季学術講演会 (招待講演)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Junta Igarashi, Butsurin Jinnai, Kyota Watanabe, Shunsuke Fukami, and Hideo Ohno
2. 発表標題 Ultra-Small Shape-Anisotropy Magnetic Tunnel Junctions: Physics and Device Engineering
3. 学会等名 The 4th International Symposium for The Core Research Cluster for Spintronics (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Butsurin Jinnai, Junta Igarashi, Kyota Watanabe, Takuya Funatsu, Hideo Sato, Shunsuke Fukami
2. 発表標題 High-Performance Shape-Anisotropy Magnetic Tunnel Junctions down to 2.3 nm
3. 学会等名 IEEE International Electron Devices Meeting (IEDM) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Junta Igarashi, Butsurin Jinnai, Valentin Desbuis, Stephane Mangin, Shunsuke Fukami, and Hideo Ohno
2. 発表標題 Variation of energy barrier with temperature in 1X/X nm shape-anisotropy magnetic tunnel junctions
3. 学会等名 Magnetism and Magnetic Materials Conference (MMM) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Junta Igarashi, Butsurin Jinnai, Valentin Desbuis, Stephane Mangin, Shunsuke Fukami, and Hideo Ohno
2. 発表標題 Energy barrier of X/1X-nm shape-anisotropy magnetic tunnel junctions at high temperature
3. 学会等名 第81回応用物理学会秋季学術講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Junta Igarashi, Kyota Watanabe, Butsurin Jinnai, Shunsuke Fukami, and Hideo Ohno
2. 発表標題 Temperature dependence of thermal stability of 1X/X nm magnetic tunnel junctions with interfacial or shape anisotropy
3. 学会等名 IEEE International Magnetics Conference (Intermag) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Junta Igarashi, Kyota Watanabe, Butsurin Jinnai, Shunsuke Fukami, and Hideo Ohno
2. 発表標題 Thermal stability of 1X/X nm magnetic tunnel junctions with interfacial or shape anisotropy at high temperature
3. 学会等名 第67回応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2020年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------