

令和 6 年 5 月 24 日現在

機関番号：11301

研究種目：挑戦的研究（萌芽）

研究期間：2021～2023

課題番号：21K18611

研究課題名（和文）低気圧プラズマと動的液体金属流体の相互作用による天体模擬実験

研究課題名（英文）Laboratory simulation of astrophysical phenomena via interaction between a low-pressure plasma and dynamic liquid metal

研究代表者

高橋 和貴（Takahashi, Kazunori）

東北大学・工学研究科・准教授

研究者番号：80451491

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 4,900,000 円

研究成果の概要（和文）：プラズマと動的な液体金属が共存する室内実験系を構築し、動的な液体金属の乱れ現象がプラズマ内部にまで伝達している可能性を検証した。ここでは、真空容器内部で液体金属容器を3000rpmの高速回転駆動することに成功した。回転周波数の基本周波数および高調波に相当する周波数でコヒーレントな摂動が励起され、その振る舞いが液体金属と固体金属で変化することを明らかにした。また液体とプラズマの相互作用に関して、液体を原料とした電気推進機の基礎研究へと展開し、水原料を用いたスパッタリング推進機の開発と小型の原料供給システムの開発に成功した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

動的な液体金属とプラズマの相互作用は、天体内部の動的液体金属と惑星磁場の相互作用、そして周辺に存在するプラズマとの相互作用に直結する重要物理課題である。本研究で、室内実験において類似した環境を構築することで、惑星物理学の小型室内実験として展開できる可能性が見いだされたため、学術的な意義を有しているといえる。また、この発展研究として液体原料を用いた小型電気推進機の開発に着手し、安定した作動と推力発生を実証した。この成果は、近年開拓が進展する小型衛星を用いた宇宙開発・宇宙産業に対して貢献するものであり、通信網の構築などの展開の可能性がある。従って、社会的意義も大きいといえる。

研究成果の概要（英文）：A laboratory experiment on coexistence of a plasma and a dynamic liquid metal is successfully constructed, implying the fluctuation of the dynamic liquid metal transmits to the plasma core, where the liquid metal container can be rotated at the maximum frequency of 3000 rpm inside the vacuum chamber. The fluctuations at the fundamental and harmonic frequencies are generated by the rotating liquid metal; the measurement shows the change in the fluctuation behavior between the liquid and solid metals. Relating to an plasma-liquid interaction under low pressure conditions, the research is extended to the fundamental study on an electric propulsion device using a liquid propellant, where a water is chosen as the propellant. The thruster performance is experimentally characterized by the thrust measurement and a compact liquid propellant supply system is developed for a miniaturized electric propulsion device.

研究分野：プラズマ理工学

キーワード：液体金属 低気圧プラズマ 揺動 運動量放出 スパッタリング

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

地球や太陽の内部では、導電性流体が星の自転運動の影響、すなわちコリオリ力を受けながら対流し、ダイナモとして知られるように内部での磁場と導電性流体の相互作用を経て複雑な大規模磁場構造を形成し、天体周辺におけるプラズマ挙動へと影響している。例えば、太陽表面では、ダイナミックな磁場構造が内部の導電性流体の乱流によって形成され、この磁場を介してパラメータ領域が大きく異なる表面および周辺のプラズマへと影響し、太陽フレア、コロナ質量放出、コロナ加熱等の種々の現象が誘発されている。これらの太陽起源のプラズマが惑星間プラズマ形成や地球電磁気圏における磁気嵐発生、オーロラ形成などの種々の大規模プラズマ現象を引き起こす。地球周辺では外核部の液体金属の運動によって大規模な双極子磁場が形成され、上述の太陽風による高速プラズマ流が地上へと流入するのを妨げる役割を果たしている。これらの現象を体系的に解明するためには、天体内部の導電性流体のダイナミックな挙動、導電性流体と磁場の相互作用、そして磁場を介した周辺プラズマとの相互作用を含めた実験系を構築することが有用であり、パラメータ領域が大きく異なる導電性流体が直接接触または磁場で接続された際の物理現象の理解が重要である。

長年にわたり諸現象に関して種々のモデルが提唱されるとともに、観測技術(衛星観測、地上観測)と電磁流体(MHD)コードを用いたシミュレーションにより研究が進められてきた。観測を用いた手法では、多点同時計測が困難であり、イベントが生じるタイミングの問題があるため、データ量が限られており、発生イベントの詳細計測が困難であるのが現状である。太陽や地球の内部・表面を模擬しうる室内実験が構築できれば、再現性の確保、詳細データ計測、能動的パラメータ制御が可能となるため、物理現象の理解が飛躍的に進展すると期待される。また、パラメータが大きく異なる流体が接触する系は、シミュレーションではその境界条件の設定に大きく依存するため、この境界を有する室内実験装置の構築と詳細計測により、現象の大局的な理解と新規現象の模索が可能になる。

2. 研究の目的

本研究では、上述のような動的挙動を有する導電性流体、磁場、およびプラズマが相互作用する系を模擬可能な室内実験を構築する。導電性流体による磁場形成や、太陽の内部と表面のようなパラメータ領域の大きく異なる流体が接触した実験系を実現することにより、動的・乱流状態にある導電性流体が周辺プラズマへと与える影響の理解、さらには新規物理現象の発現を探求する。また、液体原料は宇宙機用の推進剤としても燃料貯蔵密度の高さから注目を集めており、液体原料を用いたプラズマ生成技術と推進機応用についても実験を行い、新型の電気推進機開発を進めることを目的とする。

3. 研究の方法

図1(a)は、高速で回転する液体金属とプラズマが接触する系を実現するための実験装置概略図を示している。内径約150mmの真空容器の上下にソレノイドコイルを設置し、軸方向(図1(a)の縦方向)の外部磁場を印加可能な設計とし、ソレノイド電流5Aを供給した際に、容器中心において約60G程度の磁場が印加可能である。真空容器上部には、25-30MHz帯の周波数可変アンテナおよびマッチング回路を有する誘導結合性プラズマ源を設置し、アルゴン雰囲気下でプラズ

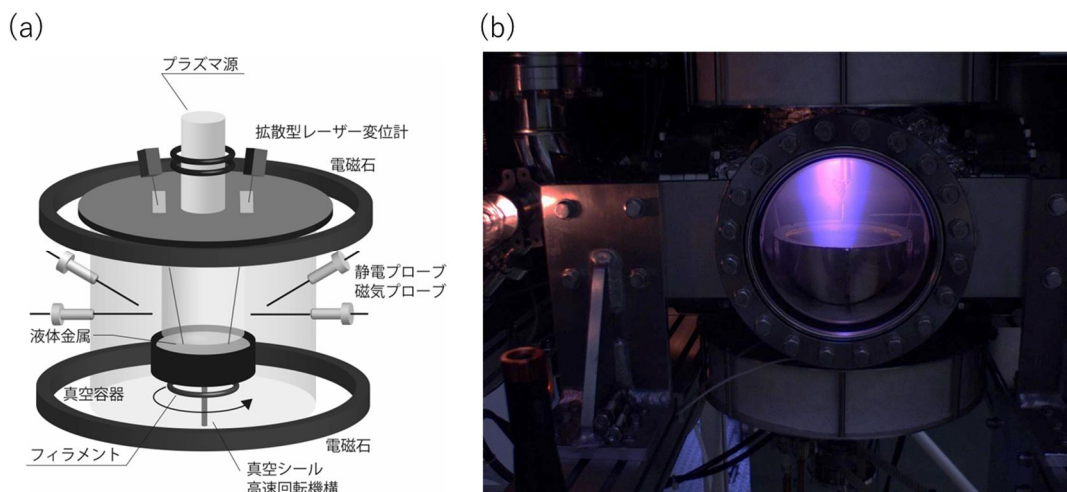


図1: (a)高速回転液体金属とプラズマの相互作用に関する実験装置概略図。(b)今回の研究で制作した実験装置 PRIMA (Plasma with Rotational and Interactive Metallic Alloy)。

マ発生が可能な設計としている。真空容器下流部には、真空を維持した状態で高速回転が可能な駆動機構、液体金属容器、および加熱用のタングステンフィラメント群が設置されている。ここで、高速回転機構の真空シール部分には、水冷式の磁性流体シールを用い、最大 3,000 rpm の高速回転が可能な設計とした。液体金属には、低融点合金 U アロイ（融点 138 °C）を使用し、フィラメントからの熱放射によって加熱することが可能である。ここで、放射光を効率よく吸収するために、液体金属容器の下部面を黒色・耐熱塗料で塗装し、 10^{-4} Pa の高真空状態を保持した状態での U アロイの液化が可能である。図 1(b) は実験の様子の写真であり、高周波プラズマ源で生成したプラズマが、外部磁場に沿ってチャンパー領域へと流入し、下部にある液体金属と接触していることが観測された。装置の側面からは静電ラングミュアプローブを導入し、イオン飽和電流または浮遊電位の計測が可能な状態となっている。液体金属の溶融およびプラズマ発生の後に、駆動機構を回転し、プラズマ領域に存在する揺動の計測を実施した。

また、液体とプラズマが関連する工学展開として、マグネトロンスパッタリング源へ水原料を導入し、ガス導入法の精密制御法や推力発生の評価を行った。ここでは、基本的には DC マグネトロンスパッタリング源を用い、その下流域に設置したターゲット式振子スタンドを持ちいて推力および力積の直接計測を行った。

4. 研究成果

図 2 には、固体金属および液体金属を 240rpm で回転した際の、イオン飽和電流の周波数スペクトルを示している。現在の興味の対象は液体金属の回転周波数近傍であるため、カットオフ周波数 35Hz 程度のローパスフィルタを用いて高周波成分を除去している。また図中には信号ノイズレベルを明示しており、ノイズレベルよりも十分高い信号強度でプラズマ中に揺動が発生していることが実験的に確認された。また、図 2 に示されるように、回転周波数(4Hz)およびその高調波においてコヒーレントな静電揺動が励起されていることが観測されている。これは、回転する固体および液体金属によって歪められる磁場揺動がプラズマ中へと伝搬している可能性と、金属表面の凹凸が静電波動としてプラズマ中へと伝搬している二つの可能性が考えられる。また、基本周波数で顕著に観測されているが、液体金属の場合と固体金属の場合で、基本波振幅強度が大きく変化していることが観測されている。これは、外部磁場が存在する環境下で運動する液体金属の場合には、金属内部および表面に不安定性が誘起され、その情報が伝搬していることを示唆しているといえる。

図 3 には、回転周波数を 60rpm (1Hz)、120rpm (2 Hz)、240rpm (4 Hz) とした場合の規格化揺動振幅の外部磁場依存性の計測結果を示している。またリファレンスとして、固体金属を回転した際の計測結果も合わせて示している。固体金属の場合には、 $I_{Bup}=3A$ の場合に揺動強度が最大になるが、液体金属とした場合には $I_{Bup} = 2A$ 程度で揺動強度が最大になることが観測された。従って、液体と固体の場合では回転金属と外部磁場の相互作用が変化し、その結果としてプラズマ中に誘起される揺動の振る舞いに変化が発生したものと解釈できる。

装置下部に設置した回転駆動機構は 3,000rpm まで回転可能であるが、500rpm 以上になると、容器内の液体金属に遠心力が働き、容器から飛散することが観測された。今後、さらに高速回転領域で実験を行うためには、液体金属の飛散を防止するような構造を検討する必要がある。

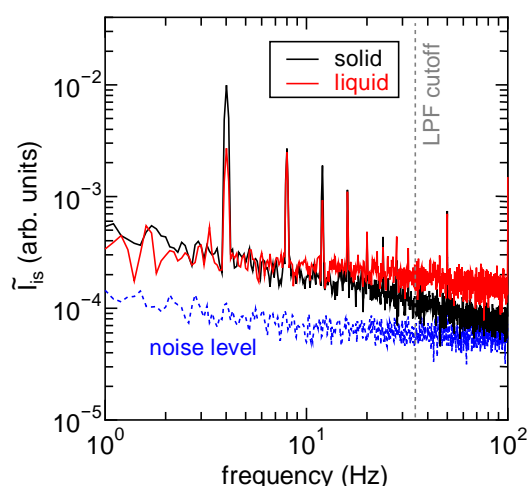


図 2: 固体金属および液体金属を 240 rpm (4Hz) で回転した際の、イオン飽和電流の振幅スペクトル。青点線は、計測系のノイズレベル。

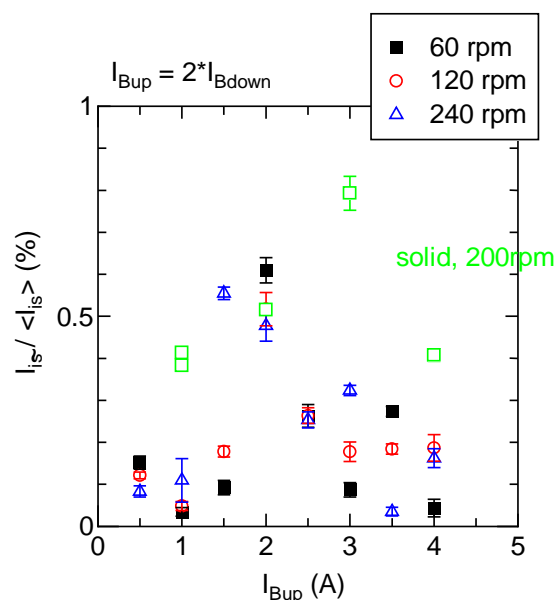


図 3: イオン飽和電流の規格化揺動強度の外部磁場依存性の計測結果。

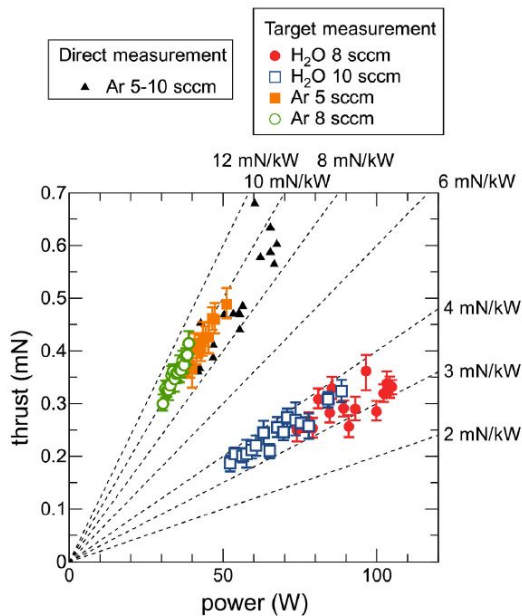


図 4: 安定した水原料導入下での、マグネトロンスパッタリング推進機の推力評価結果。

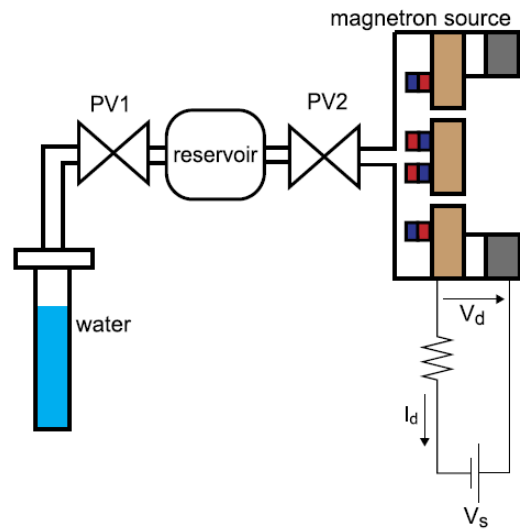


図 5: 安定した水原料導入下での、マグネトロンスパッタリング推進機の推力評価結果。

図 4 に、液体原料を導入した際のマグネトロンスパッタリング推進機によって発生する推力の評価結果を示す。液体原料を用いた場合でも安定したプラズマ発生が可能であり、スパッタリングによるシステムからの質量放出によって推力を発生可能であることが示されたといえる。ここで得られた推力から推進効率および比推力を見積もったところ、最大 0.7%, 350 秒が発生可能であり、水を原料としたイオンエンジンと同等の性能が得られることが明らかになった[1]。

上述の実験により、液体とプラズマの相互作用に関して、小型の宇宙推進機へと展開可能であることが示唆された。一方で、液体原料の導入としてガス化装置とマスフローコントローラを用いており、そのサイズの問題で小型衛星への搭載が困難であることが判明した。そこで、図 5 に示すような小型のパルスバルブを用いた水原料の供給系の開発を実施した。図中の二つの高速ソレノイドバルブ PV1 および PV2 のタイミングとパルス幅をコントロールすることで、準安定な原料の導入を実現している。

図 6(a) はその際の真空容器内部の圧力計測結果であり、 8 ± 2 sccm 程度で準安定なガス制御が実現できていることを示している。この状態で計測した推力の結果を図 6(b) に示す。マスフローコントローラを用いた場合と同等の推進性能が得られていることが示され[2]、液体とプラズマの作用という観点から、新たな推進方式に関する研究開発へと展開されたといえる。

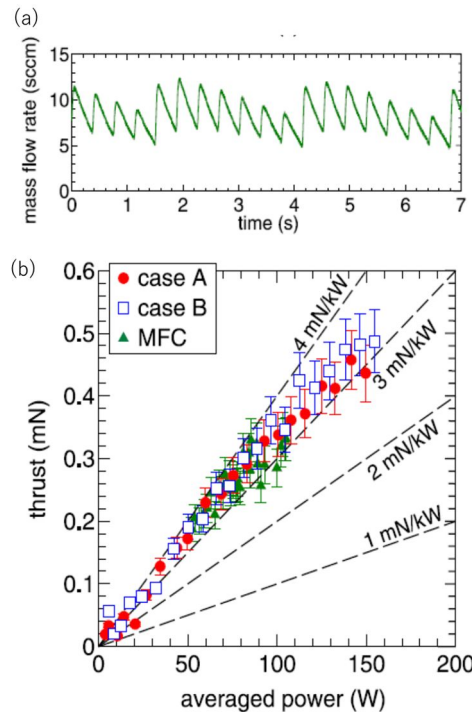


図 6: (a) 図 5 の原料供給系での流量制御結果。(b) 推力計測結果。

< 引用文献 >

[1] Sota Shimizu and Kazunori Takahashi, Acta Astronautica, **204**, 370 (2023).
 [2] Sota Shimizu and Kazunori Takahashi, Acta Astronautica, **221**, 79 (2024).

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計5件（うち査読付論文 5件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 Shimizu Sota, Takahashi Kazunori	4. 巻 204
2. 論文標題 Assessment of a thrust induced by a water-fueled magnetron sputtering source	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Acta Astronautica	6. 最初と最後の頁 370 ~ 375
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.actaastro.2023.01.014	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 Takahashi Kazunori, Miura Hidemasa	4. 巻 11
2. 論文標題 Comparison of thrusts imparted by a magnetron sputtering source operated in DC and high power impulse modes	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 AIP Advances	6. 最初と最後の頁 105115-1 ~ 6
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1063/5.0069184	査読の有無 有
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 Shimizu Sota, Takahashi Kazunori	4. 巻 90
2. 論文標題 Temporally resolved measurement of a force induced by a pulsed water-fuelled magnetron sputtering source	5. 発行年 2024年
3. 雑誌名 Journal of Plasma Physics	6. 最初と最後の頁 975900205-1 ~ 12
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1017/S0022377824000485	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 Shimizu Sota, Takahashi Kazunori	4. 巻 221
2. 論文標題 Magnetron sputtering thruster operated with a compact gas feeding system using double pulsed valves	5. 発行年 2024年
3. 雑誌名 Acta Astronautica	6. 最初と最後の頁 79 ~ 84
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.actaastro.2024.05.019	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 Takahashi Kazunori	4. 巻 56
2. 論文標題 Comparison of vacuum-immersed helicon thrusters terminated by upstream magnetic and physical walls	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Journal of Physics D: Applied Physics	6. 最初と最後の頁 475207-1~9
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/1361-6463/acef36	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13件 (うち招待講演 5件 / うち国際学会 8件)

1. 発表者名 Sota Shimizu, Kazunori Takahashi
2. 発表標題 Measurement of a thrust induced by water-fueled magnetron sputtering source
3. 学会等名 The 75th Annual Gaseous Electronics Conference (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Sota Shimizu, Kazunori Takahashi
2. 発表標題 Measurement of a thrust induced by water-fueled magnetron sputtering source
3. 学会等名 6th Asia Pacific Conference on Plasma Physics (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Kazunori Takahashi
2. 発表標題 Magnetic nozzle radiofrequency plasma systems for space and industry
3. 学会等名 The 31st International Toki Conference on Plasma and Fusion Research (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 清水颯太, 高橋和貴
2. 発表標題 水を燃料に用いたマグネトロンスパッタリングによる推力発生の実証
3. 学会等名 第66回宇宙科学技術連合講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 高橋和貴
2. 発表標題 ミニマルファブ向けヘリコンプラズマ源を用いたマルチターゲットスパッタリング装置の開発
3. 学会等名 日本表面真空学会 スパッタリングおよびプラズマプロセス技術部会 第173回定例研究会 (招待講演)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 高橋和貴
2. 発表標題 プラズマ材料科学分野の歴史と将来展望
3. 学会等名 JSPS プラズマ材料科学第153委員会 研究会 (招待講演)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Kazunori Takahashi
2. 発表標題 Magnetic nozzles and plasma plumes
3. 学会等名 ExB Plasma Workshop R4 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Sota Shimizu, Kazunori Takahashi
2. 発表標題 Performance assessment of a pulsed gaseous water-fueled magnetron sputtering source for a compact electric propulsion device
3. 学会等名 The second International Fusion and Plasma Conference (iFPC 2023) and the 13th International Conference on Open Magnetic Systems for Plasma Confinement (OS 2023 (国際学会))
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Sota Shimizu, Kazunori Takahashi
2. 発表標題 Operating a magnetron sputtering electric propulsion device with a pulsed gaseous water propellant
3. 学会等名 7th Asia-Pacific Conference on Plasma Physics (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Kodai Kikuchi, Kazunori Takahashi
2. 発表標題 Electron beam extraction from an inductively coupled radiofrequency plasma source
3. 学会等名 ISPlasma2024/IC-PLANTS2024/APSPT-13 (国際学会)
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 清水颯太, 高橋和貴
2. 発表標題 小型電気推進システムの開発~Water-Fueled Sputtering Propulsion~
3. 学会等名 第40回 プラズマ・核融合学会 年会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 清水颯太, 高橋和貴
2. 発表標題 水燃料スバッタリング推進機に関する室内実験
3. 学会等名 2023年度宇宙輸送シンポジウム
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 Kazunori Takahashi
2. 発表標題 Fundamental studies and applications of magnetic nozzle plasma
3. 学会等名 International Conference on Phenomena in Ionized Gases XXXVth edition (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2023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
---------	---------