

令和 6 年 6 月 26 日現在

機関番号：12608

研究種目：若手研究

研究期間：2021～2023

課題番号：21K14345

研究課題名（和文）超小型探査機に向けた可変形状ソーラーセイルの推進剤フリーな軌道・姿勢同時制御

研究課題名（英文）Integrated Orbit-Attitude Control of Variable-Shape Solar Sails for Application to Micro Space Probe

研究代表者

中条 俊大 (Chujo, Toshihiro)

東京工業大学・工学院・助教

研究者番号：80808618

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 2,500,000円

研究成果の概要（和文）：可変形状ソーラーセイル、特に一軸ジンバルを有する傘型（ピラミッド形状）ソーラーセイルの軌道・姿勢同時制御理論の基礎部分の確立に加え、その応用ミッション策定のためのラグランジュ点近傍や月近傍の様々な軌道設計を新たに考案した。特に多数の軌道設計については推進剤フリーな軌道・姿勢制御性能を十分に活かした長期に渡る探査ミッションに資するものであり、実ミッションに応用するための基礎研究に一通り取り組めたといえる。

研究成果の学術的意義や社会的意義

太陽輻射圧を推力として利用するソーラーセイルは、近年研究が活発に行われている超小型深宇宙探査機の航行能力を増強できる推進システムであり、超小型深宇宙探査ミッションの高度化に資すると期待される。ソーラーセイルを実際に利用する場合は探査機の軌道制御のために姿勢制御が必要であり、軌道と姿勢を同時に制御するシステムが求められていた。本研究ではこれを可能とする可変形状ソーラーセイルの制御則を体系的に求めるとともに、近い将来の月探査、月開発に資するミッション設計を行っており、超小型ソーラーセイルによるこれらのミッションの実現性を大幅に向上できたといえる。

研究成果の概要（英文）：In addition to establishing the basics of the integrated orbit-attitude control theory for variable-shape solar sails, especially umbrella-shaped (pyramid-shaped) solar sails with a single-axis gimbal, I also designed various trajectories and orbits near the Lagrangian points and cislunar region for application to space missions. In particular, the design of trajectories and orbits will contribute to long-term exploration missions that take full advantage of propellant-free integrated orbit-attitude control performance, and it can be said that I have completed fundamental research for application to actual missions.

研究分野：宇宙航行力学

キーワード：ソーラーセイル 超小型探査機 軌道制御 姿勢制御 軌道設計 三体問題 四体問題

1. 研究開始当初の背景

超小型探査機による深宇宙探査ミッションは、低コスト・短期間で実現可能であり、近年深宇宙ミッションの新たな主流となりつつあるが、推進剤搭載量の制約が厳しいため、寿命は必然的に短くなり、到達可能な領域も限られる。その解決策の一つである、太陽輻射圧を推力として利用するソーラーセイルは、推進剤を消費せず推力が得られ、その大きさは探査機重量に反比例するため、超小型探査機と相性が良い。一方、推力の制御には太陽方向に対する探査機の姿勢制御が必要であるが、太陽輻射圧は姿勢外乱としても作用するため、従来のソーラーセイルでは姿勢制御のために結局推進剤を要してしまうという課題があった。そこで本研究の予備的な検討では、可変形状ソーラーセイルにより、外乱トルクを蓄積させずに所望の推力を得るコンセプトを提案してきた。これにより完全推進剤フリーな制御が可能となり、超小型探査機の超長寿命化、到達可能領域の拡大が期待できる。この実現には、関連するダイナミクスの理解に基づいた制御則の具体化および体系化、超小型探査機に向けた応用法を求める研究が必要である。

2. 研究の目的

本研究の目的は、可変形状ソーラーセイルの軌道・姿勢制御技術を体系化し、超小型ミッションへの応用法を確立することである。特に、近い将来の超小型探査機のための機会として期待される、月近傍軌道からの放出機会を想定する。具体的には次の通りである。

1. セイルのたわみや探査機重心ずれ等に対応できるロバストな形状制御則を確立する。
2. 軌道・姿勢運動のカップリング効果を詳細に評価し、制御則へ反映する。
3. 太陽-地球系および地球-月系ラグランジュ点近傍の航行ミッションを設計し、応用する。
4. さらに発展として、小型イオンエンジンを搭載した場合を想定した、光子加速とイオンエンジンの加速を合わせたハイブリッド推進による惑星間航行ミッションを設計する。

ソーラーセイルの軌道・姿勢制御は国内外で長らく研究されてきたが、外乱や柔軟構造物であるセイルのたわみといった現実的なモデル誤差を考慮した制御は未達成である。さらに、本技術を超小型探査機に適用し、実ミッションとして実現することを見据えている。

3. 研究の方法

本研究は基本的に数式処理による運動・制御則の解析と、数値シミュレーションによる検証により行う。当初予定していた実施事項は次の4点である。いずれにおいても、実ミッションとして実現することを念頭に置いた問題設定、パラメータ設定を行う。

1. モデル誤差に対してロバストな形状制御則構築
2. 軌道・姿勢運動のカップリング効果の詳細評価と制御則への反映
3. 太陽-地球系および地球-月系ラグランジュ点近傍の航行ミッションへの応用
4. ハイブリッド推進による惑星間航行ミッションへの応用

4. 研究成果

【可変形状ソーラーセイルによる軌道・姿勢同時制御に関する研究成果】

研究開始当初は、任意のセイル形状を取り得る可変形状ソーラーセイルを想定しており、その準備として、任意形状の宇宙機に適用可能な、太陽輻射圧下における姿勢運動と安定性解析を体系的にまとめた上で、一般的な姿勢制御則(マヌーバ、維持、アンローディング)を整理していた。一方、その後はその理解に基づき、超小型探査機に搭載できる見込みがあるシンプルな機構で実現でき、かつセイルのたわみや探査機重心ずれ等のモデル誤差に対してロバスト性が期待される、一軸ジンバル付きの傘型(ピラミッド形状)ソーラーセイルのコンフィグレーション(図1)に焦点を当てることとした。以降の可変形状ソーラーセイルによる軌道・姿勢同時制御に関する検討はこのコンフィグレーションを前提としている。

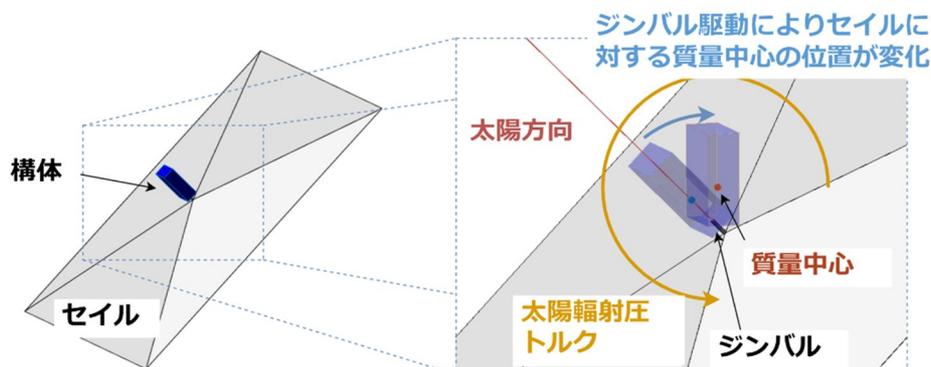


図1. 一軸ジンバル付きの傘型(ピラミッド形状)ソーラーセイルのイメージ

まず、一般化したモデル（図2）を用いて、所望の軌道制御を実現するために適切な姿勢を平衡点（トルクフリーな姿勢）とするジンバル角の解析解を導出し、リアクションホイールを組み合わせた制御則の構築と安定性解析、セイルの変形などのモデル誤差の影響の評価、推進剤フリーなアンローディングの方法の考案と検証を行った。さらに、軌道・姿勢同時制御の制御フローを具体化し、例として太陽-地球系ラグランジュ点周りのハロー軌道の軌道維持を行うミッションシナリオの中での制御の成立性をシミュレーションにより確認した（図3）。ここでは軌道・姿勢運動を同時に解く統合シミュレータを開発して用いており、軌道・姿勢運動のカップリング効果も含めて計算を行っている。さらに、モデル誤差として未知のセイルの変形がある場合を想定し、同様にシミュレーションを行ったところ、ある程度であればモデル誤差が存在しても有効に制御がはたらくことが確認できた。

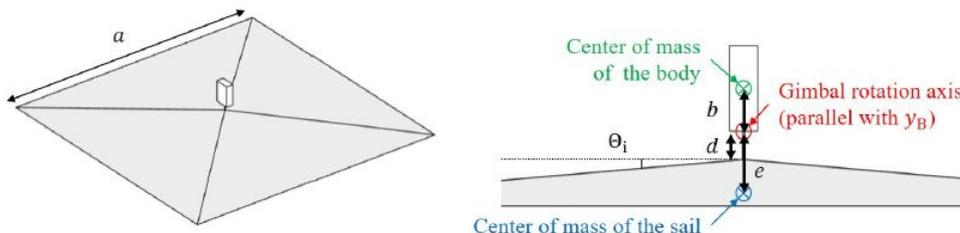


図2. 一般化した一軸ジンバル付きの傘型（ピラミッド形状）ソーラーセイルのモデル

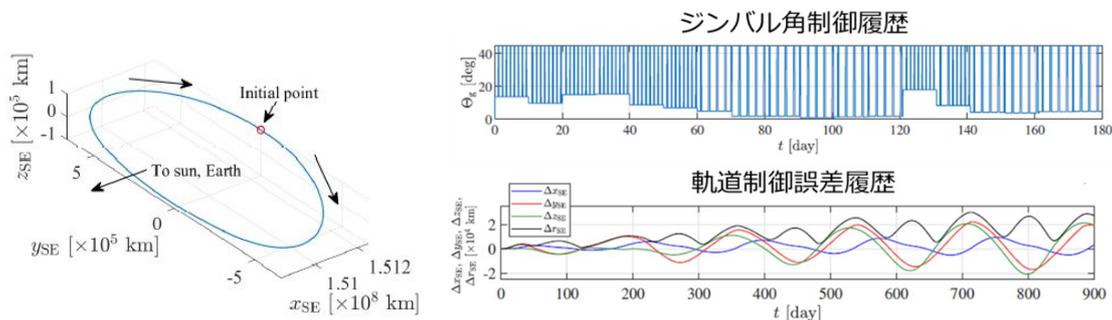


図3. 軌道・姿勢統合シミュレータによる太陽-地球系ラグランジュ点周りのハロー軌道維持のミッション解析のイメージ

以上は研究の目的および研究の方法の1,2に相当する成果である。当初の予定と比較すると、(i) モデル誤差に対してロバストとなる形状制御を見出すという計画であったが、実際はロバスト性が期待される傘型（ピラミッド形状）のコンフィギュレーションで制御則を体系化した、(ii) 軌道・姿勢運動のカップリング効果を詳細に評価し、制御則へ反映するという計画であったが、実際は本研究の範疇においては大きなカップリング効果は見られず、また柔軟なセイルの振動を評価するには至らなかった、という2点の相違がある。ただし一軸ジンバル付きの傘型（ピラミッド形状）ソーラーセイルについては、軌道・姿勢統合シミュレータの開発および制御則の体系化ができており、当初の見立てよりも成果が得られたと考える。

【ソーラーセイルのミッション設計に関する研究成果】

超小型ソーラーセイル探査機によるミッション設計に資する、太陽-地球系および地球-月系ラグランジュ点周辺の軌道設計を複数行った。まず将来建設予定の月軌道プラットフォームゲートウェイからの放出を想定した、ソーラーセイルによる太陽-地球系ラグランジュ点周りのハロー軌道への遷移軌道の設計法を体系化し、様々な放出条件に対して軌道の成立性を調査した（図4）。小型電気推進系の搭載を前提としているが、光子加速を積極的に利用することで、推進剤の消費を大きく低減できる（場合によっては推進剤フリーとなる）ことを確認した。また、L2周りのハロー軌道間をソーラーセイルの制御により次々と遷移する軌道設計手法を考案し、計算例によりその妥当性を示した（図5）。

他に、地球-月系ラグランジュ点周りの（準）周期軌道に関する解析を行った。ソーラーセイル特有のハロー軌道の解析に加え、ソーラーセイルの積極的な姿勢制御を取り入れることで初めて成立する、月の裏側の観測に適した新たな軌道を見出し、その設計法の考案と特性調査を行った（図6）。従来研究では月の裏側近傍に滞在するには非常に大きなソーラーセイルが必要であるとされてきたが、姿勢制御を積極的に行えば小さなソーラーセイルでも軌道が成立することを示した。この他、摂動が非常に大きい月周回軌道を長期に渡り維持するソーラーセイルの制御則について検討し、シミュレーションによりその妥当性を示すことができた。

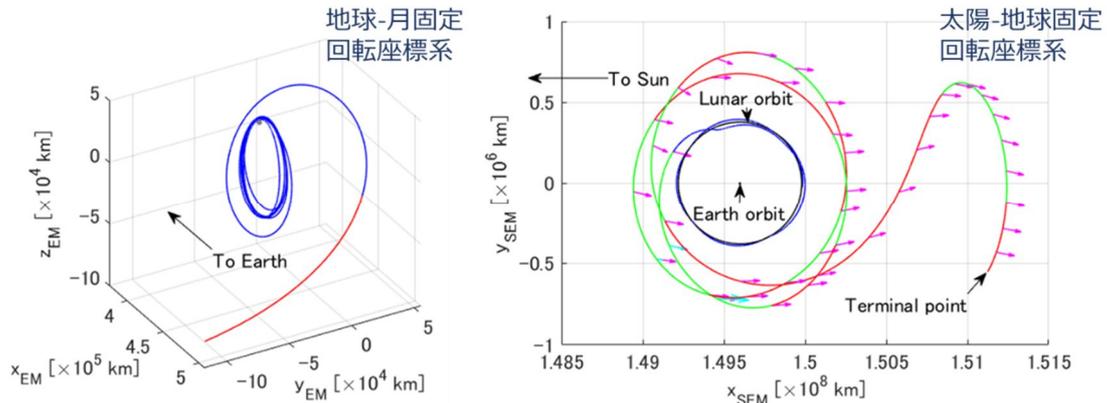


図4. ソーラーセイルと小型水深計を利用した月軌道プラットフォームゲートウェイから太陽-地球系ラグランジュ点L2周りのハロー軌道までの遷移軌道の例

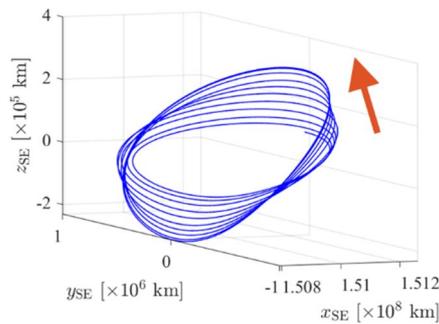


図5. ソーラーセイルによる太陽-地球系ラグランジュ点L2周りのハロー軌道間を次々と遷移する軌道設計の例

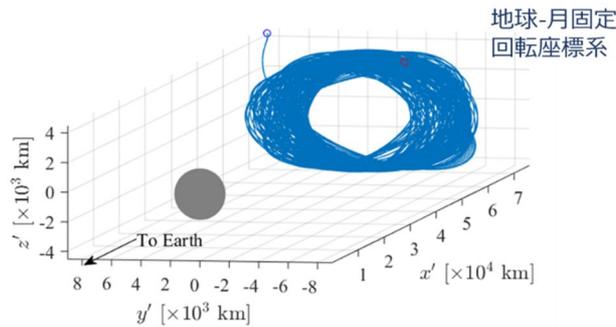


図6. 地球-月系ラグランジュ点L2周りのソーラーセイル特有の準周期軌道

以上は研究の目的および研究の方法の3, 4に相当する成果である。電気推進とソーラーセイルを組み合わせたハイブリッド推進による軌道設計は、月軌道プラットフォームゲートウェイから太陽-地球系ラグランジュ点L2周りのハロー軌道までの遷移軌道の例では取り組んだものの、惑星間航行ミッションについては検討に至っておらず、この点で当初の計画と異なっている。昨今の超小型深宇宙探査に関する動向を鑑み、太陽-地球系や地球-月系や月近傍といった比較的地球から近い領域のミッション設計に重きを置いたためであり、その分だけ、これらの領域における新たな軌道の解析や軌道設計に関する成果は当初の見立て以上に得られたと考える。

研究期間全体を通じて、可変形状ソーラーセイルの軌道・姿勢同時制御理論の基礎部分の確立に加え、その応用ミッション策定のためのラグランジュ点近傍や月近傍の様々な軌道設計を新たに考案できたといえる。特に多数の軌道設計については推進剤フリーな軌道・姿勢制御性能を存分に活かした長期に渡る探査ミッションに資するものであり、実ミッションに応用するための基礎研究に一通り取り組めたといえる。

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 2件）

1. 著者名 Chujo Toshihiro, Takao Yuki	4. 巻 59
2. 論文標題 Synodic Resonant Halo Orbits of Solar Sails in Restricted Four-Body Problem	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Journal of Spacecraft and Rockets	6. 最初と最後の頁 2129 ~ 2147
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.2514/1.A35324	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 Chujo Toshihiro	4. 巻 193
2. 論文標題 Propellant-free attitude control of solar sails with variable-shape mechanisms	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Acta Astronautica	6. 最初と最後の頁 182 ~ 196
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.actaastro.2021.12.044	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 Chujo Toshihiro, Takao Yuki, Oshima Kenta	4. 巻 60
2. 論文標題 Transfer from Lunar Gateway to Sun-Earth Halo Orbits Using Solar Sails	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Journal of Spacecraft and Rockets	6. 最初と最後の頁 1527 ~ 1540
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.2514/1.a35559	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 Chujo Toshihiro	4. 巻 8
2. 論文標題 Quasi-periodic orbits of small solar sails with time-varying attitude around Earth?Moon libration points	5. 発行年 2024年
3. 雑誌名 Astrodynamics	6. 最初と最後の頁 161 ~ 174
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/s42064-023-0186-0	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 Chujo Toshihiro, Watanabe Kei, Takao Yuki	4. 巻 -
2. 論文標題 Integrated attitude/orbit control of solar sail with single-axis gimbal mechanism	5. 発行年 2024年
3. 雑誌名 Astrodynamics	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/s42064-023-0192-2	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 -

[学会発表] 計14件(うち招待講演 1件/うち国際学会 3件)

1. 発表者名 中条 俊大
2. 発表標題 ソーラーセイルの姿勢制御に基づいた地球-月系L2周りの小さな準周期軌道
3. 学会等名 第32回アストロダイナミクスシンポジウム
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 中条 俊大, 高尾 勇輝, 多々良 飛鳥, 渡邊 奎, 安田 萌恵, 小林 大輝, 中嶋 哲大, 木下 幹大, 荒井 湧介, 上野 晟太郎, 森 治, 宮崎 康行, 松下 将典, 杉原 アフマッド清志, 鳥居 航, 富木 淳史, 津田 雄一, 佐伯 孝尚, 松永 三郎
2. 発表標題 超小型ソーラー電力セイルによる深宇宙航行技術実証計画
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 Chujo Toshihiro, Watanabe Kei, Takao Yuki
2. 発表標題 Attitude Orbit Integrated Control of Solar Sail with Single Axis Gimbal Mechanism
3. 学会等名 2023 AAS/AIAA Space Flight Mechanics Meeting (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 中条 俊大, 高尾 勇輝, 大島 健太
2. 発表標題 ソーラーセイルによる地球-月系NRH0から太陽-地球系ハロー軌道への遷移軌道設計
3. 学会等名 第31回アストロダイナミクスシンポジウム
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 中条 俊大, 高尾 勇輝
2. 発表標題 平面円制限四体問題におけるソーラーセイルの地球-月系L1/L2周りの周期軌道
3. 学会等名 第31回アストロダイナミクスシンポジウム
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 中条 俊大, 高尾 勇輝, 森 治, 松永 三郎, 船瀬 龍, 渡邊 奎, 奥泉 信克, 松下 将典, 杉原 アフマツト清志, 松浦 周二, 津村 耕司
2. 発表標題 超小型ソーラーセイルによる太陽-地球-月系航行ミッションの検討状況
3. 学会等名 第65回宇宙科学技術連合講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 中条 俊大, 高尾 勇輝, 渡邊奎, 宮崎 康行, 森 治, 奥泉 信克, 松永 三郎, 多々良 飛鳥, 立川 璃子
2. 発表標題 可変形状機能によるソーラーセイルの軌道・姿勢同時制御とセイル構造システムの設計
3. 学会等名 第65回宇宙科学技術連合講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 中条 俊大, 高尾 勇輝, 森 治, 松永 三郎, 宮崎 康行, 船瀬 龍, 渡邊 奎, 奥泉 信克, 松下 将典, 杉原 アフマッド清志, 松浦 周二, 津村 耕司
2. 発表標題 地球および月近傍におけるソーラーセイルの利用と技術実証ミッション案
3. 学会等名 第17回「運動と振動の制御」シンポジウム / 第30回スペース・エンジニアリング・コンファレンス
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 中条 俊大, 高尾 勇輝, 森 治, 松永 三郎, 宮崎 康行, 渡邊 奎, 船瀬 龍, 奥泉 信克, 松下 将典, 杉原 アフマッド清志, 松浦 周二, 津村 耕司
2. 発表標題 月近傍軌道放出による超小型ソーラーセイルのミッション計画と軌道設計
3. 学会等名 第22回宇宙科学シンポジウム
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 中条 俊大
2. 発表標題 ソーラーセイルの姿勢・軌道統合制御による推進剤フリーな月周回軌道の制御
3. 学会等名 日本航空宇宙学会第54期年会講演会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 中条 俊大
2. 発表標題 Near-Optimal Controlに基づいたソーラーセイルによる月周回軌道の制御性能評価
3. 学会等名 第33回アストロダイナミクスシンポジウム
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Chujo Toshihiro
2. 発表標題 Floquet Mode-Based Transfer between Halo Orbits Using Solar Sails
3. 学会等名 10th International Congress on Industrial and Applied Mathematics (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 中条 俊大, 高尾 勇輝, 多々良 飛鳥, 中嶋 哲大, 安田 萌恵, 小林 大輝, 荒井 湧介, 渡邊 奎, 立川 璃子, 尾崎 直哉, 森 治, 宮崎 康行, 松下 将典, 杉原 アフマッド清志, 鳥居 航, 富木 淳史, 松浦 周二, 超小型ソーラー電力セイルの開発研究RG
2. 発表標題 超小型ソーラー電力セイルの開発研究と月以遠探査への応用
3. 学会等名 第67回宇宙科学技術連合講演会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Toshihiro Chujo
2. 発表標題 Near-Optimal Lunar-Orbit Control Using Solar Sails
3. 学会等名 2024 AIAA SciTech Forum (国際学会)
4. 発表年 2024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
---------	---------