

令和 6 年 6 月 16 日現在

機関番号：32503

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2020～2023

課題番号：20K03991

研究課題名（和文）超小型衛星に搭載する膜面型ダストセンサシステムを用いたメテオロイド観測

研究課題名（英文）Observation of beta-meteoroids using a large film type dust sensor system on a CubeSat

研究代表者

石丸 亮（Ishimaru, Ryo）

千葉工業大学・惑星探査研究センター・上席研究員

研究者番号：10573652

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）：本研究では、太陽系の動径方向へ定常的に物質を輸送する主要なプロセスの一つであるメテオロイドを観測するために、独自の方式の膜面型ダストセンサシステムを開発した。本システムの適切な設計を決めるために、静電加速器で加速した粒子をセンサに衝突させて計測する宇宙塵衝突模擬実験を行った。実験によって、センサ部のコンフィギュレーション（圧電素子の配置、接着方法、膜の厚みなど）、アナログ系エレキの設計、信号処理ロジックなどを調整・最適化し、メテオロイドにおいて想定される運動量を検出できる感度を達成した。本システムを搭載した超小型衛星ASTERISCを2021年に打ち上げ、軌道上粒子の観測に成功している。

研究成果の学術的意義や社会的意義

宇宙塵は、惑星間塵雲の構造・進化や惑星系内の物質輸送を理解する上で重要であるにも関わらず、その理解は十分ではない。理由として観測の難しさが挙げられる。本研究が開発した膜面型ダストセンサシステムは、膜面に粒子が衝突することで発生する弾性波を検出する方式であり、膜面を大きくすることで数密度の小さい宇宙塵を検出可能な大面積のセンサを実現でき、かつ、本研究による設計最適化によって宇宙塵検出に必要な感度を達成している。非常にシンプルな構成であることから安価で製造でき、宇宙塵観測への使用に留まらず、昨今の宇宙環境問題で取り沙汰される微小スペースデブリのモニタリングにも応用可能な技術である。

研究成果の概要（英文）：In this study, we developed a new large film type dust sensor system to observe β -meteoroids, which is one of the main carriers that constantly transport planetary materials (containing possibly organics) outward within the solar system and out of the solar system. To obtain an optimal design for this system, we conducted cosmic dust collision simulation experiments using an electrostatic accelerator to measure the sensitivity of the dust sensor. Through the experiments, we adjusted and optimized the configuration of the sensor part (e.g., arrangement of piezoelectric elements, and the thickness of the film), the design of analog electronics, and the logic of signal processing and achieved sensitivity capable of detecting the momentum expected for β -meteoroids. Our nanosatellite “ASTERISC” equipped with the sensor system was launched in 2021 and succeeded for the observation of particles in orbit.

研究分野：惑星科学

キーワード：宇宙塵 ダストセンサ 超小型衛星 メテオロイド

1. 研究開始当初の背景

研究代表者が所属する惑星探査研究センター(PERC)は宇宙における生命の起源・進化を研究するアストロバイオロジーをメインテーマの一つとしており、惑星に有機物を供給する重要なキャリアである宇宙塵の研究を推進している。その一環として、将来の惑星探査を見据えた宇宙機搭載用に新型の粒子観測装置である膜面型ダストセンサシステムの開発を進めてきた。JAXA 宇宙科学研究所や PERC の高速衝突銃を用いた衝突実験による原理の検証や、衛星搭載のためのエレキ設計の目的が立ってきたことを契機に、PERC 独自の超小型衛星 2 号機 ASTERISC に本観測装置を搭載し軌道実証を行うこととなった(図 1)。打ち上げ機会を探す中で JAXA の革新的衛星技術実証プログラム 2 号機の実証テーマに無事採択され、令和 2 年度後半に JAXA のイプシロンロケットによって打ち上げられることが決定した。これにより正式に大学予算が付き、2018 年度から衛星開発がスタートした。その後開発を進める過程で、宇宙塵相当の微粒子を宇宙速度に加速できる静電加速器を利用できることが判明し、較正試験を実施できさえすれば、プロジェクト開始時の設計よりもさらにセンサ感度を上げられる(メテオロイドのように小さい粒子を観測できる)可能性があることがわかってきた。

メテオロイドは太陽系の内から外へ定期的な物質を輸送する主なプロセスの一つであるため、惑星系の物質輸送において重要である。メテオロイドの挙動が惑星形成に影響を及ぼすだけでなく、有機物を含むメテオロイドが原始地球への有機物供給に寄与していた可能性がある。また、星間塵の一部は、他の惑星系から飛び出したメテオロイドが星間空間を経て太陽系に飛来したものであるかもしれない。過去にメテオロイドを観測した探査機として Ulysses、Helios1、Pioneer8、Pioneer9 の報告があるが(Wehry and Mann, 1999; Grün et al., 1985; Fechtig et al., 1978)、いずれもメテオロイドの観測の妥当性に問題がある。Ulysses 搭載のダストセンサは太陽方向に向けることができないため本当にメテオロイドを観測できているか定かではない。Helios1 はダストセンサを太陽放射から保護するために薄いフィルムをセンサに貼っているために、観測へのフィルムの影響が無視できず観測バイアスを避けられない。Pioneer8 と Pioneer9 はメテオロイドの観測データとして最も引用されているが、実は Pioneer8 と Pioneer9 で観測された宇宙塵のフラックス(単位面積単位時間あたりの塵の個数)データを説明するにはダストセンサを較正した質量・速度範囲を著しく逸脱するような宇宙塵(較正範囲より著しく小さく速い宇宙塵)を考えないと辻褄が合わず、このデータからメテオロイドの存在を立証できたとはいえない状態にある。本研究により高感度化を実現できさえすれば、本システムを搭載した衛星を軌道投入し観測を行う絶好の機会を得ることができることから、今回の科研費の応募に至った。

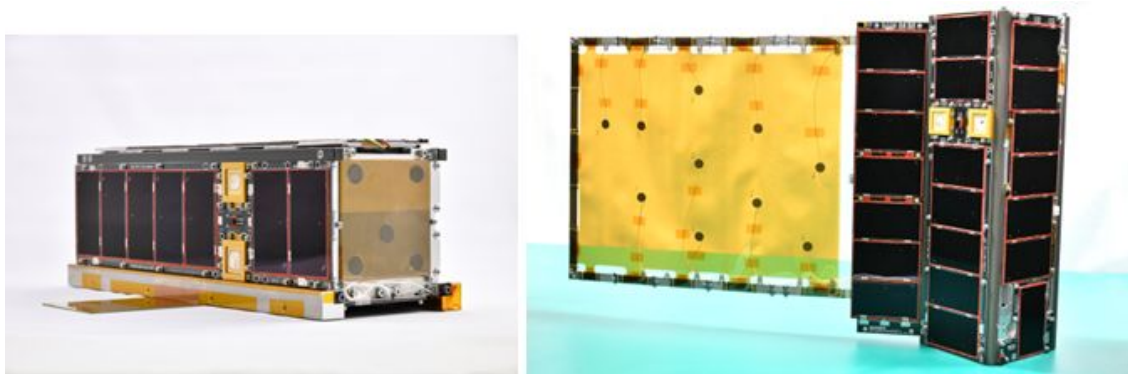


図 1. 超小型衛星 ASTERISC 外観図
左図は膜面型ダストセンサ展開前、右図は展開後

2. 研究の目的

本研究は、メテオロイドの観測を実現するために、惑星探査研究センターが独自開発する膜面型ダストセンサシステムを高感度化することを目的とする。本センサシステムの高感度化ができれば、メテオロイド観測の課題を解決できる。さらに、打ち上げ予定の PERC 独自の超小型衛星 2 号機 ASTERISC に本センサシステムを搭載し、実際の軌道上で宇宙塵の観測運用を実施する。

3. 研究の方法

PERC が独自に考案した膜面型ダストセンサシステムの検出原理は、宇宙塵がポリイミド膜に衝突することで発生した弾性波を膜面上に配置した PZT 圧電素子群により電気信号波形に変換し(図 2 -)、圧電素子の出力信号をプリアンプで増幅し、バンドパスフィルタによって特定

の周波数帯域のみを抽出した後に ADC でデジタル信号に変換し最終的に FPGA で信号処理を行うことによる(図2 -)。このシステムは光の影響を受けず物理的に衝突する固体物質のみを検出するため、太陽方向の粒子観測を可能とする。また、有感領域である膜面を大きくするだけで大面積センサを実現できるため、数密度が小さい宇宙塵の観測に有効となる。

素子が受け取る弾性波波形は、粒子の衝突条件や生成された弾性波が伝播する膜・圧電素子の物性や特徴長さ等の影響を受けるため、適正な設計を決めるには、実際想定する宇宙塵衝突を模擬した実験が必須である。本研究では、フライトモデル(FM)と同等の部品・基板で構成した地上実験用の膜面型ダストセンサシステムを製作し、小さい粒子を加速できる静電加速器を用いた宇宙塵衝突模擬実験で実際に粒子をセンサに衝突させて取得した信号を使って、センサ感度に影響する因子を調整し高感度化する。実験は大阪大学設置の静電加速器を用いた。本研究で製作する地上実験用センサシステムは、感度に影響する以下で挙げる因子についてパラメタ調整、試験できる設計とする。本研究で感度向上を試みるのは以下の3つの因子である。

1. センサ部のコンフィギュレーション：センサ部における感度に影響する因子として、圧電素子の種類・形状、圧電素子の個数・配置、膜の材質、膜の厚さ、圧電素子と膜を接着する接着剤の種類、同軸ケーブルの種類などを調整する。
2. アナログ系エレキの S/N 比向上：圧電素子で取得した信号を増幅し周波数抽出するアナログ回路の S/N 比の向上のために、特にプリアンプの定数設定とバンドパスフィルタで S/N 比の大きい特定の周波数帯域の信号のみを通過させるように衝突模擬実験で調整し最適化する。グラウンド処理についても調整する。
3. FPGA による信号処理の最適化：FPGA での信号処理によって信号とノイズを精度良く判別できれば感度向上が期待できる。本研究では、PERC 開発のセンサで実績ある方法である、信号波形の振幅・継続時間と到達時刻差(圧電素子毎の信号の到達時刻差が、衝突する粒子のサイズ・速度・方向に依存)等の閾値を試験で調整し、閾値を満たす信号を真のイベントとして検出する FPGA ロジックを構築する。

実験によって高感度化した設計を FM に反映し、ASTERISC に搭載し軌道実証する。

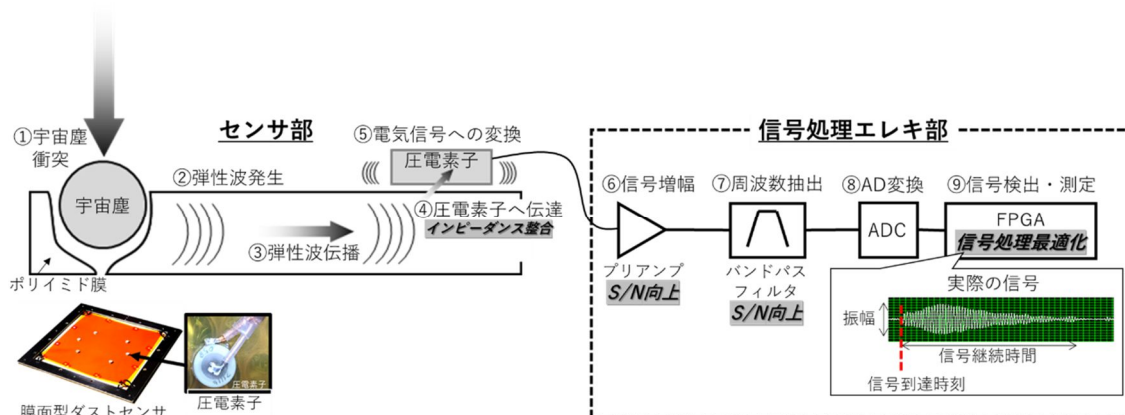


図2. 膜面型ダストセンサシステムの概念図

4. 研究成果

(1) 高感度化のための設計最適化

本ダストセンサシステムの高感度化をするために、センサ部およびエレキの設計および最適化を行った。粒子がポリイミド膜に衝突することで発生する弾性波は膜面を伝播し圧電素子を振動させることで電気信号に変換される。検出感度の良い設計を決めるために、圧電素子の形状、ポリイミド膜の種類・厚さについて複数の候補を用いた宇宙塵衝突模擬実験を行った。結果として圧電素子は 10mm x 2mm の PZT (ジルコン酸チタン酸鉛) 製の素子を選定した。この圧電素子は、特徴長さで決まる共振周波数を持つ(動径方向の共振周波数は 210kHz、厚さ方向の共振周波数は 1.1MHz)。本研究では、共振周波数 210kHz 付近の周波数の信号のみを抽出して解析に用いることとした。210kHz 付近の信号を使うことは S/N 比を向上できるだけでなく、一般的な環境雑音の周波数の範囲外であることから地上試験時の外部ノイズを低減できるメリットがある。一方、ポリイミド膜については、膜厚が厚いほど信号が大きくなる傾向がある反面、厚すぎると打ち上げ時に膜を折りたたんで衛星内に収納することが困難になる。これら両方の観点を考慮し、厚さ 25μm の Upilex ポリイミド膜 (UBE 株式会社) を選定した。

圧電素子、ポリイミド膜とこれらを接着する接着剤の三者の音響インピーダンスの整合が取れないと、境界面で弾性波が反射されてしまい、一部の弾性波しか圧電素子に伝達されない。インピーダンスの整合を取るために、PZT とポリイミドの中間のインピーダンスを持つエポキシ系の接着剤を用いることとした。採用したエポキシ接着剤の宇宙環境耐性を評価するため、熱衝撃

試験と放射線試験を実施し、軌道上での使用に問題無いことを確認した。

圧電素子が出力する電気信号はプリアンプで増幅した後に、共振周波数 210kHz を含む周波数範囲をバンドパスフィルタで抽出し、さらにこのアナログ信号波形をデジタル信号として取得するため、AD コンバータによりサンプリングされる。210kHz の信号を十分な時間分解能で測定するため、サンプリングレート 10MHz でサンプリング可能な AD コンバータを採用した。最終的にサンプリングした波形の処理を FPGA で行う構成とした。アナログ回路におけるセンサ感度に影響する因子(プリアンプ定数、バンドパス定数など)を調整し高感度化することで数 $\text{pg} \cdot \text{km/s}$ の運動量の粒子を検出できる感度を達成した。検出された運動量はサブミクロンからミクロンサイズのメテオロイドで想定される運動量として想定されるため、本システムが目的とするメテオロイドを観測するのに必要な感度を有することが示された。加えて、パルスジェネレータを用い、エレキの入力部にダストイベントと等価な疑似信号を印加し、プリアンプのリニアリティとダイナミックレンジを測定した。線形性が確保される条件でダイナミックレンジが 70 程度と運動量の広い範囲で粒子の測定が可能であることが示された。

本ダストセンサシステムのフライトモデルは、32cm x 26cm のポリイミド膜面上に 8 個の圧電素子を配置し(図 3) 圧電素子からの電気信号を 8cm x 20cm の基板 2 枚でサンプリングする構成とした。8 個の圧電素子によって信号波形を取得することで、各圧電素子によって取得された信号の到達時刻を用いて計算した膜上の衝突位置の妥当性から真の衝突イベントと電気的なノイズを区別することが可能となる。

本ダストセンサは、膜面自体をダストセンサとする技術であるため、膜の面積を大きくするだけで大面積センサを容易に実現できるメリットがある。従来のダストセンサはコストの観点からセンサ面積を大きくすることは容易ではなかったが、一方、本研究が開発するダストセンサは既に宇宙実績のある圧電素子とポリイミド膜及びエレキにより構成されるシンプルな構成であるため、圧倒的に低価格で製造可能である。加えて、このシステムは光の影響を受けず物理的に衝突する固体物質のみを検出するため、メテオロイドの観測において必要となる太陽方向の粒子観測を可能とする。また、リアルタイムで粒子を検出できるため、その粒子がいつどこで衝突したかがわかる。粒子検出時の膜センサの向き(衛星の向き)から大体の粒子の軌道が推定される。

ダストセンサシステムの開発・製造と並行して、ダストセンサシステム-衛星バスシステム間のデータ処理や制御を担う MPU の設計・開発を行った。MPU の主な機能は、地上から送られたコマンドのデコード、観測装置を含む各コンポーネントの制御、観測装置が取得したデータのエンコードと地上へ送信するテレメトリデータの生成などである。

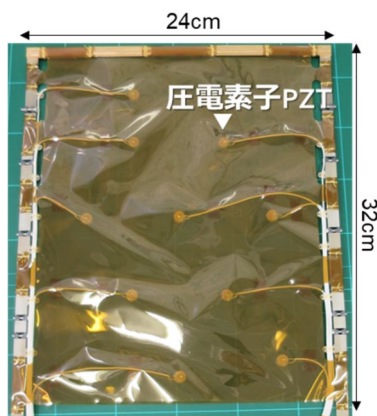


図 3. 膜面型ダストセンサ FM の外観写真

(2) 軌道上実証

衛星アセンブリ後の最終的な総合試験を経て、膜面型ダストセンサシステムを搭載した ASTERTISC は 2021 年 8 月 19 日に JAXA 内之浦宇宙空間観測所に引き渡され、2021 年 11 月 9 日にイプシロンロケット 5 号機により打ち上げられた。投入軌道は高度 560km の太陽同期地球周回軌道である。衛星運用は全て千葉工業大学内に設置された千葉工大地上局にて行っている。初期運用では、膜面型ダストセンサを展開し、軌道上粒子の観測に初めて成功(膜面型ダストセンサの技術実証成功)している(図 4)。安定した電力収支サイクルの成立、コマンドアップリンクおよびダウンリンク通信、姿勢センサ(太陽センサ、磁気センサ、ジャイロ)を用いた姿勢決定と磁気トルカを用いた姿勢制御などバスシステムの技術項目全てに成功している。ミッションおよびバスシステムいずれもミニマムサクセスを達成したため、定常観測運用に移行した。定常観測運用では、磁気トルカを用いて衛星をスピンさせることで、衛星のスピン軸を慣性空間の特定方向に指向させるスピン安定姿勢をとらせている。衛星のスピン軸が膜面型ダストセンサの法線方向となるコンフィギュレーションであるため、膜面型ダストセンサを目的のダスト粒子の飛来方向に指向させ続け観測することが可能となっている。衛星がスピン状態にあると、衛星搭載送信アンテナの向きが回転するため、ダウンリンク通信に切れ込みが発生しやすくなる。そこで、地上局に対する衛星の位置に応じて、使用する衛星搭載アンテナ(ASTERISC に 2 つの

送信アンテナが逆向きに搭載されている)を切り替える制御を行うことで、切れ込みを抑制し、取得した観測データの高速度ダウンリンクを実施している。定常運用では主にメテオロイドを観測するために、スピン安定姿勢制御によってメテオロイドの飛来方向である太陽方向にダストセンサを指向させた状態で現在も観測運用を継続中である。

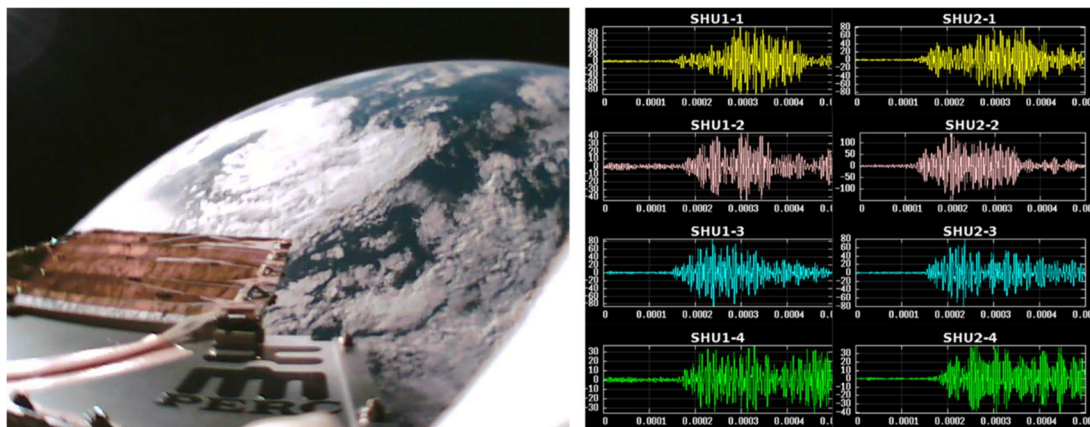


図4. 展開した膜面型ダストセンサのオンボードカメラ写真(左図)と軌道上で取得した粒子観測波形(右図)

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計2件（うち査読付論文 2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 S. Fujita, R. Ishimaru, Y. Sakamoto, K. Maeda, O. Okudaira, Y. Yuji, T. Kuwahara, T. Matsui	4. 巻 -
2. 論文標題 Development of Spin Stabilization Control System for the Cosmic Dust Observation CubeSat	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Proceedings of 2022 IEEE/SCIE Symposium on System Integration	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） 10.1109/SII52469.2022.9708909	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 Masanori KOBAYASHI, Osamu OKUDAIRA, Ryo ISHIMARU, Sho SASAKI, Masayuki FUJII	4. 巻 1
2. 論文標題 Technological Development of Dust Sensor for CMDM to be aboard MMX	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Journal of Evolving Space Activities	6. 最初と最後の頁 1-11
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.57350/jesa.96	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7件（うち招待講演 1件/うち国際学会 1件）

1. 発表者名 石丸 亮、小林 正規、奥平 修、前田 恵介、坂本 祐二、藤田 伸哉、木村 宏、松井 孝典
2. 発表標題 超小型衛星搭載の膜面型ダストセンサによる宇宙塵観測：ASTERISCプロジェクト
3. 学会等名 Japan Geoscience Union Meeting 2022
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 石丸 亮
2. 発表標題 超小型衛星 ASTERISC による地球周辺ダスト粒子の観測
3. 学会等名 月-地球圏ダスト環境ワークショップ
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 石丸 亮, 坂本 祐二, 藤田 伸哉, 小林 正規, 奥平 修, 前田 恵介, 木村 宏, 松井 孝典
2. 発表標題 宇宙塵探査実証衛星ASTERISCの運用状況
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 石丸 亮, 坂本 祐二, 藤田 伸哉, 小林 正規, 前田 恵介, 奥平 修, 木村 宏, 松井 孝典
2. 発表標題 宇宙塵探査実証衛星ASTERISCの開発状況
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 石丸 亮, 坂本 祐二, 藤田 伸哉, 小林 正規, 前田 恵介, 奥平 修, 木村 宏, 松井 孝典
2. 発表標題 ASTERISC 宇宙塵探査実証衛星
3. 学会等名 革新的衛星技術実証ワークショップ2022 (招待講演)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 石丸 亮, 坂本祐二, 藤田伸哉, 前田恵介, 小林正規, 奥平 修, 木村 宏, 松井孝典
2. 発表標題 キューブサットによる宇宙塵・スペースデブリ観測を目指した膜型ダストセンサおよび国産キューブサットバスシステムの軌道上実証
3. 学会等名 第64回宇宙科学技術連合講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 R Ishimaru, Y. Sakamoto, S. Fujita, M. Kobayashi, O. Okudaira, K. Maeda, H. Kimura and T. Matsui
2. 発表標題 ASTERISC Project: Cubesat Mission for Observation of Cosmic Dusts with a Large Film Type Dust Sensor
3. 学会等名 52nd Lunar and Planetary Science Conference (国際学会)
4. 発表年 2021年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

PERC超小型衛星2号機：宇宙塵探査実証衛星「ASTERISC」 http://www.perc.it-chiba.ac.jp/projects/nano-satellite2

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
研究協力者	小林 正規 (Kobayashi Masanori) (70312080)	千葉工業大学・惑星探査研究センター・主席研究員 (32503)	
研究協力者	奥平 修 (Okudaira Osamu) (30386718)	千葉工業大学・惑星探査研究センター・研究員 (32503)	
研究協力者	藤田 伸哉 (Fujita Shinya) (90847279)	東北大学・工学研究科・特任講師 (11301)	

6. 研究組織（つづき）

	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
研究協力者	坂本 祐二 (Sakamoto Yuji) (50431523)	東北大学・宇宙ビジネスフロンティア研究センター・特任教授 (11301)	

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