

令和 6 年 6 月 3 日現在

機関番号：12601

研究種目：学術変革領域研究(B)

研究期間：2020～2022

課題番号：20H05748

研究課題名（和文）長期の深宇宙ミッション遂行能力を有する超小型探査機システムの研究

研究課題名（英文）Research on small spacecraft systems that can carry out long-term deep space missions

研究代表者

船瀬 龍 (Funase, Ryu)

東京大学・大学院工学系研究科（工学部）・准教授

研究者番号：70509819

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 89,600,000円

研究成果の概要（和文）：本研究は、地球低軌道において爆発的に利用が拡大している超小型衛星の活動領域を深宇宙へと拡大させ、誰でもいつでも実施可能な真に高頻度で機動的な深宇宙探査の実現、そして太陽系科学の発展への貢献を目指している。

1 km/s 前後の増速が可能な軌道変換推進系を搭載し、静止トランスファー軌道（GTO）や月軌道ゲートウェイへの相乗り打ち上げから月、火星などの深宇宙に向かう超小型探査機を実現するべく、高推力推進系を駆動可能な軌道姿勢制御系を構築し、その技術を用いた超小型探査機にサイエンスペイロードを搭載した具体的なミッションの概念設計を行うことによって、本研究で提案する超小型探査機システムの実現性を示した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究は、近年爆発的に活用が広がっている低コスト・短期開発可能な超小型衛星の活動領域を、地球低軌道から月やそれ以遠の深宇宙へと拡大することにより、「深宇宙探査をいつでも誰でも実施可能」という真に高頻度で機動的な深宇宙探査の実現を目指すものであり、太陽系科学という学術分野の発展や深宇宙領域の民間活用に貢献することが期待される。

研究成果の概要（英文）：This research aims to extend the frontier of small satellite activities to deep space, which has been expanding explosively in low Earth orbit, to realize truly high-frequency and flexible deep space exploration that can be carried out by anyone at any time, and to contribute to the advances in solar system science.

We have realized an orbit and attitude control system capable of driving a high thrust propulsion system to enable an ultra-small spacecraft that is equipped with an orbit transfer propulsion system capable of about 1 km/s acceleration, and that can head for deep space such as the Moon and Mars from a piggy-back launch to a geostationary transfer orbit (GTO) or lunar gateway. The feasibility of the proposed system was demonstrated through the design of a specific mission with a science payload on board.

研究分野：宇宙工学

キーワード：超小型衛星 深宇宙探査 太陽系探査 超小型探査機

様式 C - 19、F - 19 - 1 (共通)

1. 研究開始当初の背景

100 kg 以下の超小型衛星は、Planet が地球観測データでのビジネスを、SpaceX が Starlink 衛星でインターネットビジネスを展開するなど、単なる技術実証ツールを超えて科学的・経済的成果をもたらせるツールになりつつある。一方で、より遠く(月以遠)の深宇宙領域ではその利用は進んでいない。その主要因の1つは、打ち上げ機会確保の難しさである。小型ロケットでの専用打ち上げや大型ロケットでの相乗りによる打ち上げ、国際宇宙ステーション(ISS)からの放出といった様々な機会に恵まれている地球周回低軌道に対し、深宇宙への打ち上げ機会は極めて少ない。もうひとつの困難は、長期間の探査ミッションを遂行可能な探査機の信頼性確保にある。すなわち、高頻度・多数機打ち上げを前提として、ある程度の故障率を許容するような地球周回超小型衛星の技術は、深宇宙ミッションにそのまま適用することはできない。このように、月以遠への打ち上げ機会の欠如と長期の信頼性確保の難しさは、超小型衛星の本格的な深宇宙進出にあたっての障壁となっている。

2. 研究の目的

本研究では、前述の2つ課題を解決し、超小型衛星の本格的な深宇宙進出の道を開くことを目指す。打ち上げ機会確保については、打ち上げ機会が多い地球周辺の軌道から、キックモータ等を用いて自力で軌道変換を行い深宇宙軌道に到達することが解決策となる。その際、擾乱トルク抑制方法など、キックモータのような高推力推進系作動時特有の課題に対応する必要がある。また、信頼性確保については、「小さく・軽く・低コストに・早く」といった超小型の良さを毀損せずに、長期間の探査ミッションを遂行できる信頼性を探査機システムとして確保する必要がある。これらを踏まえて、本研究は、高軌道変換能力に対応し、長期間の探査ミッション遂行能力を備えた超小型探査機システムの実現性を示すことを目的とする。

3. 研究の方法

(1) 高軌道変換能力に対応した超小型探査機システムの構築

超小型衛星の姿勢制御系やスラスタを用いて高推力推進系作動時の推力誤差を抑制し、所定の軌道に投入可能な探査機システムの構築を目指す。高推力なキックモータ作動時には、推力が大きいことと推力方向と重心のオフセットのために発生する姿勢擾乱トルクにより、推力発生方向が乱されるため、これをできる限り抑える必要がある。スラスタの制御により3軸姿勢制御を維持しながら軌道変換マヌーバを実行する方法や、推力方向軸まわりに探査機を高速スピンさせることにより推力方向の誤差を抑制する方法など、複数の方式をトレードオフしながら軌道姿勢制御系の実現解を見出す。

(2) 長期間の探査ミッションを遂行可能な超小型探査機のミッション保証技術

深宇宙探査は、探査対象の天体に到達するまで数カ月から数年を要することもある長期的なミッションである。単に宇宙環境耐性が保証され低い故障率が担保された高コストで重量・電力等のリソース消費の大きな宇宙用の部品で宇宙機を構成するという従来の高信頼な衛星開発手法ではなく、いかにして超小型の良さである「小さく・軽く・低コストに・早く」を毀損することなく品質・信頼性向上を図るかが超小型衛星の深宇宙進出においては重要であり、宇宙機の試験手法や運用手法なども含めてミッション全体としての信頼度向上策を見出す。

(3) 実証ミッションを目指した宇宙機的设计

上述の成果を踏まえて、具体的な打ち上げ機会および搭載ペイロード(ユーザー)を想定した実証ミッションの概念設計を行い、本研究で提案する超小型探査機システムの実現可能性を示す。

4. 研究成果

以下のように、超小型衛星による深宇宙アクセスを実現するにあたって課題となる、高推力推進系を駆動するための軌道姿勢制御系の実現可能な解を導くとともに、各種超小型探査機ミッションの打ち上げ運用結果からの Lessons Learned や新しいミッションの概念検討を通じて、将来の超小型探査機の信頼性確保についての指針を得た。そして、これらを踏まえて、ユーザーとなるサイエンスペイロードを搭載した実際の宇宙ミッションを想定した宇宙機全体の概念設計を行った。以上により、本研究で提唱する超小型探査機システムの実現性を示し、高頻度で機動的な深宇宙探査が可能な世界の実現にむけて大きな一歩となる成果をあげることができた。

(1) 高推力推進系を駆動するための軌道姿勢制御系設計

高推力推進系(キックモータ)を有する超小型探査機システムの構築を見据えて、様々な構成の軌道姿勢制御系のトレードオフ検討を行った。深宇宙脱出のための高推力噴射は、質量が軽い超小型探査機に対して従来のミッションにはない強い推力擾乱を与える。これに対処するため、複数の推進系(スラスタ)を必要とする三軸姿勢制御方式と比較した結果、スピン制御による姿勢

安定方式と超小型機に適したシンプルな姿勢決定手法を適用した外乱に強い姿勢決定・制御システムが有効であるという結論を得た。

スピン安定方式による姿勢制御でキックモータを噴射する際には、スピンレートの大きさに応じて推力擾乱の抑制効果が影響されるだけでなく、姿勢決定精度も変動し、それによってスピン軸方向制御誤差やそれによる V 実行誤差などが生じ、最終的には目的軌道に投入するための軌道修正マヌーバ (TCM) が必要となる。本研究ではこれらの重要な設計パラメータ間の相互依存関係を整理するとともに (図 1)、スピンアップ制御・スピン軸方向制御・軌道修正マヌーバを含めた全体として必要となる燃料量を指標としたシステム全体の End-to-End でのスピンレート最適化手法を構築し、モデルケースとして GTO 打ち上げを想定した宇宙機のパラメータに対して最適なスピンレートを導出した (図 2)。

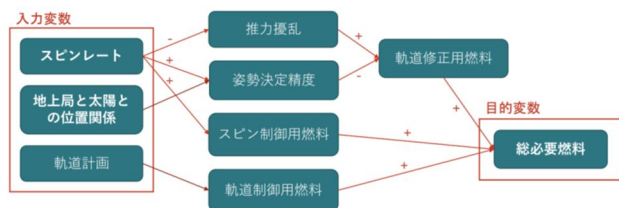


図 1：設計パラメータ間の依存関係

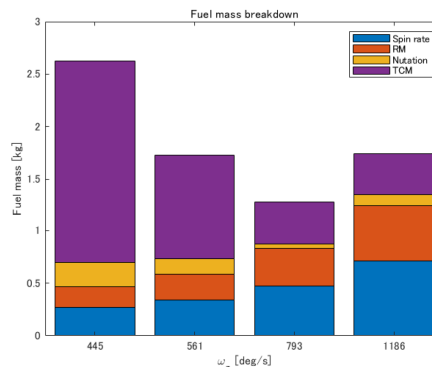


図 2：最適なスピンレート評価の例

(2) 超小型探査機の信頼性確保方策

超小型衛星を月およびそれ以遠 (他惑星や小天体等) に到達させるにあたっては、地球低軌道よりも厳しい宇宙放射線環境 (重イオン等) への耐性と、数年におよぶ長期間の航行を可能にする信頼性が要求される。地球低軌道で超小型衛星が爆発的な発展を遂げたのは、「小さく・軽く・低コストに・早く」という超小型衛星の特長によるところが大きい。この超小型の良さを毀損することなく品質・信頼性向上を図ることが超小型衛星の深宇宙進出においては重要であり、宇宙機の試験手法や運用手法なども含めて、システム全体としての信頼度向上策を見出す必要がある。本研究では、各種超小型探査機ミッションの打ち上げ運用結果からの Lessons Learned や超小型衛星コミュニティ内の新しい超小型探査機ミッションの概念検討活動を通じて、将来の超小型探査機の信頼性確保についての指針を以下のように整理した。

初期不良除去

宇宙環境耐性が保証され低い故障率が担保された高コストで重量・電力等のリソース消費の大きな宇宙用の部品で宇宙機を構成するのではなく、多様な用途向けに大量生産され一定の品質を保っている民生部品の実力を活用するために、フライト品に対して基板レベル・機器レベル・システムレベルで長時間のバーンインを行って初期不良品を除去する方針は、従来低軌道での超小型衛星では標準的な考え方となってきたが、月・惑星探査においても同様の方針をとることが適切と考えられる。

長寿命化方策

数年以上の長期間の航行が必要になるような探査ミッション (例えば、まだ超小型衛星としてのミッション例はないが外惑星探査ミッション等) においては、初期不良除去だけで十分な故障率の低減が達成できるとは限らない。このようなケースにおいては、探査機システムの大部分の通電を OFF し偶発故障の発生確率を極限まで下げる「冬眠運用 (ハイバネーション運用)」が有効と考えられる。冬眠中の温度制御回路や冬眠からの復帰を管理する回路など一部の回路を高信頼性部品で構成することや、冬眠中の姿勢運動を受動的に安定化させるための姿勢制御方策等が新たな超小型探査機ミッションの概念検討の中で検討されてきており、これらの方針を今後の超小型探査機の信頼性向上のために広く取り込むことは有効であると考えられる。

深宇宙特有の放射線環境への対処

深宇宙は、地球低軌道に比べて重粒子の飛来確率が高い等、放射線環境が厳しい。したがって、従来低軌道で軌道上実績のある機器であっても、深宇宙の放射線環境では故障する可能性は排除できない。本研究期間内に打ち上げられた複数の超小型探査機ミッションにおいても、超小型衛星として実績のある機器で構成されたシステムに故障が生じたと思われる事象が確認されている。したがって、深宇宙環境で確実に動作させるためには、実績のある機器であっても深宇宙環境を想定したシングルイベント (SEU, SEL) 耐性の追加評価を行って搭載する等の対応が必要と考えられる。

システムレベルでの検証

超小型衛星の失敗事例の多くは、部品等の偶発的故障だけでなく衛星自体の設計の過誤によるものも多いとされている。高忠実度シミュレータによる計算機上でのシミュレーションや、実機のシステム全体での End-to-End 試験などにより設計検証を図る方法は地球低軌道ミッションを

中心に研究されつつあるが、深宇宙探査ミッションにおいても同様に有効であると考えられる。特に大きな軌道変換能力を持った推進系は深宇宙探査機特有の機能であり、推進系の計算機上での高忠実なモデル化および推進系運用の実機での End-to-End 検証は重要である。

(3)超小型探査機システムの実証ミッションの設計

以上の成果を踏まえて、実際の宇宙ミッションを想定した宇宙機全体の概念設計を行った。具体的には、地球磁気圏の撮像を目的とする GEO-X ミッションをサイエンスペイロードとして搭載した、超小型衛星による深宇宙アクセス技術の実証機の概念設計を行った。GEO-X ミッションは、地球磁気圏外である 30-60R_E 以上の高度から X 線による地球近傍の撮像を行い磁気圏の大局的な構造やその変化を観測することを目標としており、静止トランスファー軌道 (GTO 軌道) あるいは月近傍への相乗り打ち上げ機会を利用し、キックモータによって軌道変換することでその観測が可能となる。本研究では、推進系運用や観測機器運用を含むミッション全体の運用シナリオを整理し、具体的な打ち上げ軌道を想定した軌道・姿勢制御シーケンス設計を行ったうえで、別の計画研究で実施しているキックモータの研究開発状況と歩調を合わせる形で探査機システム全体の設計および解析を行い、システム全体の成立性を確認した (図 3)。姿勢制御シーケンスの設計においては、(1)で構築した手法をベースに、この実証ミッションで想定されるパラメータ空間の中で V 実行精度および必要燃料を網羅的に解析し、スピンレートや衛星の質量特性、推進系の取付誤差などへ要求を配分した。

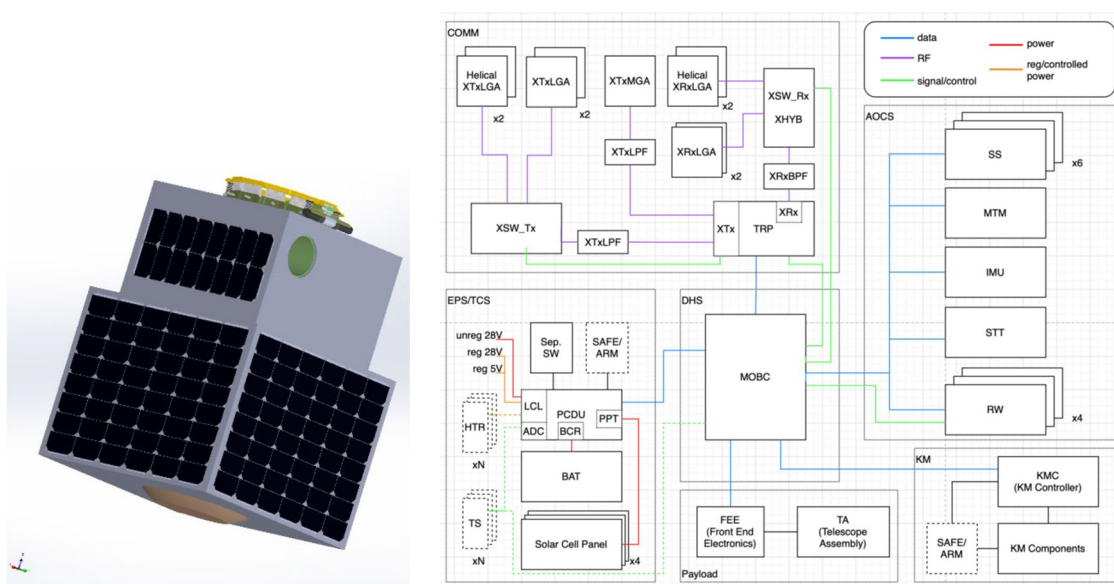


図 3：検討した実証衛星全体の外観図とシステムブロック図

また、実際の相乗り打ち上げ機会を想定してミッション設計・システム設計を実施する中で、打ち上げタイミングや打ち上げ軌道自体をミッション側から自由に選べないという相乗り打ち上げにおける制約が、目的地の決まった深宇宙探査ミッションを実現する際の大きな障害となることが識別されたため、これらの制約を緩和するような軌道計画手法についても研究を行った。本研究では、GTO 軌道への相乗り打ち上げや、月近傍に国際協力によって構築される計画であるゲートウェイからの放出を、将来的に想定する打ち上げ機会として考えている。GTO 軌道への相乗りにおいては、打ち上げ軌道が必ずしも目的の天体へ遷移するのに適切なタイミングや軌道パラメータになっていない可能性がある中で、GTO 軌道からいったん軌道変更して月スイングバイを繰り返す軌道 (Moon to Moon Transfer) に投入し、タイミングを合わせて目的の天体への遷移軌道へ脱出する軌道設計手法を確立した。また、近地点での V マヌーバを複数周回に適切に配分する多段階近地点キック手法を提案し (図 4)、各種誤差への柔軟な対応による燃料節約を実現するとともに、打ち上げ時期制約の緩和も可能にすることを明らかにした。提案する深宇宙脱出シーケンスと一連の姿勢・軌道制御系設計手順の有効性を、具体的なミッション例として火星フライバイミッションを想定したケーススタディ (シミュレーション) を通じて検証した。さらに、月スイングバイとの組み合わせによる、放出軌道の制約緩和などの相乗効果も明らかにした。

ゲートウェイからの放出においても、最適なタイミング (日時) での放出は難しいと想定されるため、いかに目的地となる天体等への遷移タイミングを合わせられるかが課題となる。中間軌道として m:1 の synodic 共鳴軌道へ unstable manifold を用いて遷移させ、その後適切なタイミングで目的の天体への遷移軌道へ投入する軌道設計手法を確立した。

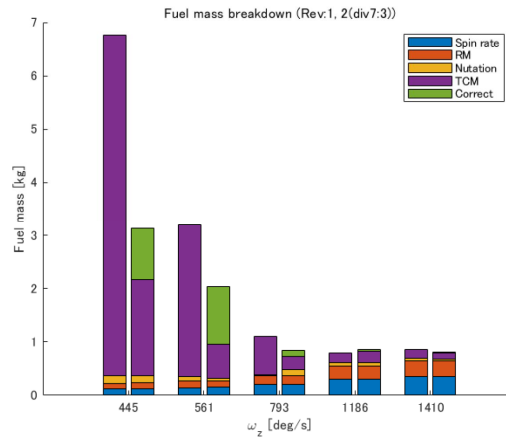


図4：多段階近地点キック手法による燃料最小化検討の例

以上により、高軌道変換能力を持った超小型衛星による深宇宙アクセスを実現するにあたっての、軌道計画および軌道姿勢制御上の課題を克服するとともに、このシステムにとってのユーザーとなるサイエンスペイロードを搭載した実際の宇宙ミッションのシステム成立性を確認し、本研究で提案する超小型探査機システムの実現性を示すことができた。

なお、本研究後の別の活動の中で、本研究成果を活用・発展させる形で宇宙実証ミッションを実際に打ち上げることを計画しており、本研究の提唱する「深宇宙探査をいつでも誰でも実施可能」という真に高頻度で機動的な深宇宙探査の実現が期待される。

5. 主な発表論文等

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

1. 著者名 Yuichiro Ezo, Ryu Funase, Harunori Nagata, Yoshizumi Miyoshi, Hiroshi Nakajima, Ikuyuki Mitsuishi, et al.	4. 巻 9
2. 論文標題 GEOspace X-ray imager (GEO-X)	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Journal of Astronomical Telescopes, Instruments, and Systems	6. 最初と最後の頁 34006
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1117/1.JATIS.9.3.034006	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15件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 6件）

1. 発表者名 岡田博高, 川端洋輔, 船瀬龍, 中須賀真一
2. 発表標題 高推力推進系を有する小型衛星のキックモーター作動シーケンスにおける設計空間探索およびトレードオフ
3. 学会等名 日本航空宇宙学会第55期年会講演会
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 布施綾太, Boden Ralf, 中島晋太郎, 川端洋輔, 松下将典, 秋山茉莉子, 船瀬龍, 他
2. 発表標題 高推力推進系を有する超小型衛星GEO-Xのバスシステム検討状況
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 Yuichiro Ezo, Ryu Funase, Harunori Nagata, et al.
2. 発表標題 GEO-X (GEOspace x-ray imager)
3. 学会等名 Space Telescopes and Instrumentation 2022: Ultraviolet to Gamma Ray (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 中島晋太郎, 川端洋輔, 布施綾太, 石川晃寛, 藤本和真, 船瀬龍
2. 発表標題 高推力推進系を有する超小型衛星の検討状況
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 江副祐一郎, 船瀬龍, 川端洋輔, 中島晋太郎, 永田晴紀, Kamps Landon, 中嶋大, 三石郁之, 石川久美, 沼澤正樹, 三好由純, 上野宗孝
2. 発表標題 GEO-X計画の現状と将来展望
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 藤本和真, 川端洋輔, 近澤拓弥, 中須賀真一, 船瀬龍
2. 発表標題 高推力推進系を有する超小型衛星の月遷移軌道から惑星間軌道への遷移軌道設計
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 Shintaro Nakajima, Ralf Boden, Yosuke Kawabata, Ryota Fuse, Kazuma Fujimoto, Akihiro Ishikawa, Ryu, Funase
2. 発表標題 System Design of 50kg-class Microsatellite with High Thrust Propulsion System
3. 学会等名 34th International Symposium on Space Technology and Science (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Shintaro Nakajima, Yosuke Kawabata, Tomotaka Yamamoto, Kazuma Fujimoto, Akihiro Ishikawa, Ryu Funase
2. 発表標題 System Design of Interplanetary Microsatellite with High Thrust Propulsion System
3. 学会等名 International Symposium on Space Technology and Science (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Tomotaka Yamamoto, Yosuke Kawabata, Ryu Funase, Shinichi Nakasuka
2. 発表標題 Trajectory and Attitude Planning during Deep Space Insertion from GTO for Microsatellite having High Thrust Propulsion System
3. 学会等名 International Symposium on Space Technology and Science (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 山本智貴, 川端洋輔, 船瀬龍, 中須賀真一
2. 発表標題 高推力推進系を有する超小型探査機によるGTOから深宇宙への移行時の軌道と姿勢計画に関する研究
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 川端洋輔, 中島晋太郎, 山本智貴, 石川晃寛, 藤本和真, 船瀬龍
2. 発表標題 高推力推進系を有する超小型探査機による軌道制御技術
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 江副祐一郎, 船瀬龍, 永田晴紀, 三好由純, 中嶋大, 三石郁之, 川端洋輔, Kamps Landon, 石川久美, 上野宗孝
2. 発表標題 GEO-X計画とその将来ビジョン 太陽系X線天文学
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 藤本和真, 川端洋輔, 中須賀真一, 船瀬龍
2. 発表標題 高推力推進系を有する超小型衛星の月近傍軌道から惑星間軌道への遷移軌道設計に関する研究
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 Ishikawa, Kumi ; Mitsuda, Kazuhisa ; Ezoe, Yuichiro ; Ueno, Munetaka ; Funase, Ryu ; et al.
2. 発表標題 The Earth's magnetosphere imaging mission : GEO-X
3. 学会等名 43rd COSPAR Scientific Assembly (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Yuichiro Ezoe, Ryu Funase, Harunori Nagata, et al.
2. 発表標題 GEO-X (GEOspace x-ray imager)
3. 学会等名 Proceedings of SPIE, Vol.11444, Space Telescopes and Instrumentation 2020: Ultraviolet to Gamma Ray (国際学会)
4. 発表年 2020年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

革新的超小型衛星プロジェクト ホームページ
<https://www.isas.jaxa.jp/home/smallsat/tra-b/>

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
研究分担者	川端 洋輔 (Kawabata Yosuke) (80803006)	東京大学・大学院工学系研究科(工学部)・助教 (12601)	
研究分担者	中島 晋太郎 (Nakajima Shintaro) (80873380)	国立研究開発法人宇宙航空研究開発機構・宇宙科学研究所・特任助教 (82645)	

	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	山本 智貴 (Yamamoto Tomotaka)	東京大学・大学院工学系研究科(工学部) (12601)	
研究協力者	藤本 和真 (Fujimoto Kazuma)	東京大学・大学院工学系研究科(工学部) (12601)	

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	岡田 博嵩 (Okada Hirotaka)	東京大学・大学院工学系研究科(工学部) (12601)	
研究協力者	布施 綾太 (Fuse Ryota)	東京大学・大学院工学系研究科(工学部) (12601)	
研究協力者	ボーデン ラルフ (Boden Ralf)	国立研究開発法人宇宙航空研究開発機構・宇宙科学研究所 (82645)	
研究協力者	秋山 茉莉子 (Akiyama Mariko)	国立研究開発法人宇宙航空研究開発機構・宇宙科学研究所 (82645)	
研究協力者	石川 晃寛 (Ishikawa Akihiro)	東京大学・大学院工学系研究科(工学部) (12601)	
研究協力者	永田 晴紀 (Nagata Harunori)	北海道大学・工学研究院	
研究協力者	ケンプス ランドン (Kamps Landon)	北海道大学・工学研究院	
研究協力者	江副 祐一郎 (Ezoe Yuichiro)	東京都立大学・理学研究科	

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
---------	---------