

科学研究費助成事業（特別推進研究）公表用資料
〔令和5（2023）年度 中間評価用〕

令和5年3月31日現在

研究期間：2021～2024
課題番号：21H04972
研究課題名：X線で挑む地球磁気圏のグローバル撮像
研究代表者氏名（ローマ字）：江副 祐一郎（EZOE Yuichiro）
所属研究機関・部局・職：東京都立大学・理学研究科・准教授
研究者番号：90462663

研究の概要：

本研究は、太陽風と地球磁場の相互作用の結果、形成されている地球磁気圏の衝撃波面や磁気圏界面といった大局的構造の把握と太陽風に対する過渡的応答の理解を目的とする。そのために近年 X 線天文衛星「すざく」等によって発見されてきた、電荷交換反応に起因する X 線を用いた地球磁気圏 X 線撮像衛星計画 GEO-X を推進する。

研究分野：太陽地球系科学、X 線 γ 線天文学

キーワード：X 線、地球磁気圏

1. 研究開始当初の背景

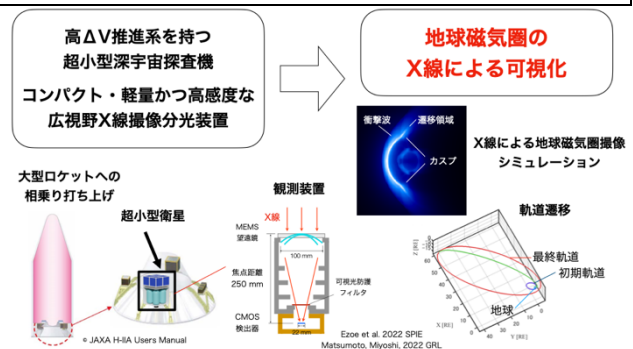
地球周辺には太陽風と地球磁場の相互作用によって数万 km に広がる磁気圏が形成されている。観測の主力となっているのが、衛星による「その場」プラズマ計測である。しかし、この方法では広大な磁気圏を点で繋ぐため、衝撃波や磁気圏界面といった大局構造は点観測を補間して理解する必要がある。

一方で、近年 X 線天文衛星の観測によって、磁気圏起因と考えられる軟 X 線が発見された。太陽風に含まれる重イオンが地球の超高層大気と衝突して電子を奪い発光する電荷交換反応(Charge eXchange, CX)に伴う放射である。我々は日本の「すざく」衛星を用いて CX 放射を研究する中で、衝撃波通過後の太陽風プラズマは、シースと呼ばれる衝撃波面と磁気圏界面の間に密度を増すことから、X 線によって昼側磁気圏構造を可視化できることに気がついた。しかし、X 線天文衛星による観測は遠方天体を主目的とするため、基本的に狭視野で磁気圏内からの観測であり、磁気圏 X 線撮像は未実証である。そこで我々は地球磁気圏 X 線撮像を実証するための新たな衛星として GEO-X を推進する。

2. 研究の目的

本研究では GEO-X 衛星を開発し、大型ロケットへの相乗りで打ち上げて観測成果を創出する。目標達成のために(1)磁気圏外から CX 放射を俯瞰的に捉え、(2)磁気圏構造の X 線撮像を実証し、(3)太陽風変動に伴う磁気圏構造の変動を抑える。いずれも実現すれば世界初である。

この目的のために超小型衛星(約 50 kg)とそこに搭載する超軽量 X 線撮像分光装置(約 10 kg, 約 10 W)を開発する。世界初の超小型深宇宙探査を実現してきた日本の超小型衛星バスと推進系技術を革新し、地球磁気圏外からの観測を実現する。同時に超小型衛星の限られたリソース内で大型衛星並の感度を実現するため独自の X 線撮像分光装置を開発する。研究の全体像を図 1 に示す。



3. 研究の方法

本研究で開発する衛星は汎用性が高く入手性の良い CubeSat 規格の部品を活用し、下部に推進系であるハイブリッドキックモーターを取り付け、全体として相乗り衛星の標準規格である 50 cm 立方以内、50 kg を満たすものとする。キックモーターは高い軌道変換能力を有し、静止トランスファ軌道(GTO)等の相乗りから目標高度まで衛星を上昇するのに必要となる。

観測装置は軟 X 線(0.3-2 keV)に高い感度を持ち、広視野(5°角以上、5 R_E 角 at 60 R_E)で中程度(10 分角、0.2 R_E)の角度分解能を必要とする。これらの要求を超小型衛星の限られたリソースで満たすため、独自の観測装置を開発する。望遠鏡には日本独自かつ世界最軽量の MEMS(マイクロマシン)方式を採用し、検出器には読み出しが早く高撮像分光力を備えた CMOS を用いる。さらに地球からの可視光を防護するための Al 付きポリイミドの極薄フィルムを開発して必要な耐性を確保する。

4. これまでの成果

本研究は(1)観測装置の性能実証モデルの製作と試験、衛星設計および打ち上げ機会の獲得、(2)観測装置と衛星のフライトモデルの製作と試験、(3)打ち上げと運用および科学的成果創出の3段階からなる。2021-22年度までに(1)がほぼ完了し、(2)へ移行しつつある。図2に衛星の最新図を示す。

衛星バスは、構造系・電装系・通信系のコンポーネントを選定し、配置を決定して概形を定めつつ、必要な環境の整備等のフライトモデル製作に向けた準備を進めた。想定軌道からの磁気圏の観測効率を定量的に見積もり、高効率を達成できることも確認した。衛星バスのベースとなるEQULEUS(2022年打ち上げ)が本ミッションと近い月軌道付近の環境で高精度の軌道制御に成功したことも大きなプラス材料である。衛星バスと結合して用いる推進系であるキックモータは別予算で開発しており、性能実証モデルを用いた真空中の燃焼試験を実施して、性能に問題がないことを確認した。

観測装置は、望遠鏡、検出器、可視光防護フィルタ(OBF)の性能実証モデルを開発し性能を評価した(図3)。望遠鏡はSi基板から基本的にインハウスで製作し、JAXA 30 m X線ビームラインで製造手順を確立すると共に性能を確認した。検出器は試作センサ(G-pixel 社 GSENSE)を冷却し、真空中で軟X線応答を評価して、線形応答と分解能が要求を満たすことを確認した。X線イベントの判別とデータ処理を行うバックエンド回路も開発し、データ取得にも成功した。OBFは可視光透過率及びX線透過率を計測し、面内の厚みムラが十分に小さく、要求する透過率を満たすことを確認した。各コンポーネントを納めるハウジングとの機械的I/Fチェックも実施済みである。

サイエンス検討も、衛星及び観測装置の性能が具体化したことで、最新モデル予測を用いて深化した。高解像度のMHDシミュレーションを用いたX線発光強度予測を行うとともに(図1)、軌道や装置視野を考慮した世界的にもこれまでにない観測モデルを構築し、既存のX線天文データと比較して高精度の予測が可能であることを実証した。今後の観測予測に役立てる。

打ち上げ機会の獲得については、当初想定していたH3ロケット等の打ち上げ遅延があったため、国内外の相乗り機会をJAXA等と協力及び相談をしつつ調査して、海外の相乗り機会の候補を見いだした。

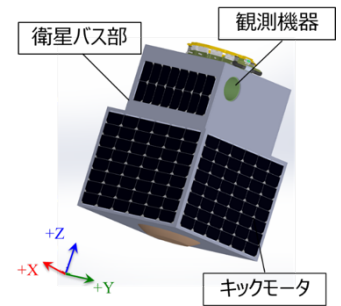


図2：GEO-X衛星。

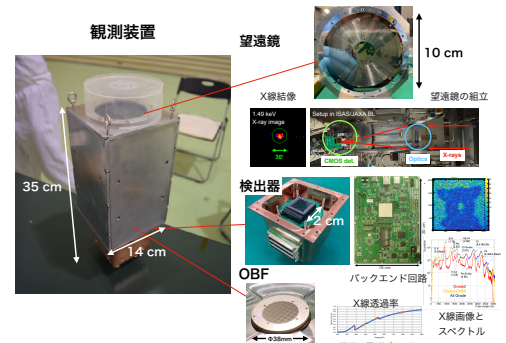


図3：観測装置の性能実証モデル。

5. 今後の計画

総じて開発は順調であり、当初想定していた打ち上げ機会からの変更はあったが、迅速にリカバーして2023年度から順次フライトモデルの製作及び試験に移る予定である。打ち上げは複数ある海外の有償の相乗りロケット候補から1つに絞って確定させる。太陽活動は高く、強い太陽風の到来によって、高品質のデータが期待できる。よって想定していた通りの科学的成果が十二分に得られる見込みである。

本研究は「地球磁気圏探査の点観測から面観測への転換」という観点から地球磁気圏分野の本質課題である磁気圏の構造と変動の理解に大きく資するものである。同時に自在な太陽系探査を可能にする高 ΔV 推進系を持った超小型衛星バスと、探査衛星に搭載可能な超軽量X線撮像分光装置は、太陽系X線天文学という新たな分野の創成に繋がる。スペクトル情報から得られる電荷交換反応の素過程の理解はX線天文分野とリンクしている。同時に太陽風イオンの組成も分かることから、宇宙で如何に高温プラズマが作られ、太陽が惑星に如何に影響を及ぼしているか、という太陽圏システム科学の根本課題ともリンクする。

6. これまでの発表論文等(受賞等も含む)

1. “GEO-X (GEOSpace X-ray imager)”, Y. Ezoe, R. Funase (2番目), H. Nakajima (5番目), I. Mitsuishi (6番目), 他25名, Proc. SPIE, 12181, 1218124, 2022
2. “Development of the focal-plane CMOS detector for the GEO-X mission”, H. Nakajima, Y. Ezoe (9番目), 他8名, Proc. SPIE, 12181, 121812C, 2022
3. “Modeling of geocoronal solar wind charge exchange events detected with Suzaku”, D. Ishi, K. Ishikawa, Y. Miyoshi, N. Terada, Y. Ezoe, Publ. Astron. Soc. Japan, 75, 128-152, 2022
4. “Improvement of imaging performance of silicon micropore X-ray optics by ultra long-term annealing”, A. Fukushima, D. Ishi, Y. Ezoe (3番目), 他12名, Optics Express, 30, 25195-25207, 2022
5. 「先導研究者」称号授与, 江副 祐一郎, 東京都立大 2022年4月 など

7. ホームページ等

<https://tokusui-geox.jp>