

令和 6 年 6 月 14 日現在

機関番号：13301

研究種目：基盤研究(B)（一般）

研究期間：2021～2023

課題番号：21H01090

研究課題名（和文）超小型衛星による重力波源および突発天体の同定とブラックホール形成過程の研究

研究課題名（英文）Identification of gravitational wave sources and transients by micro-satellites and study of black hole formation process

研究代表者

米徳 大輔 (Yonetoku, Daisuke)

金沢大学・数物科学系・教授

研究者番号：40345608

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 13,600,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では、重力波と同期したガンマ線バーストの観測を目的に、50cm/50kg級の超小型衛星「こよう」の開発と、ガンマ線バースト(GRB)を発見するための2種類の観測装置の開発を行った。電機試験・熱真空試験・振動試験を実施し、健全性を確認した上で、2023年12月2日（日本時間）に米国より衛星を打ち上げた。衛星機能のうち星センサーの異常とバッテリーの枯渇に見舞われたが、現時点で運用を実施しており、ガンマ線バーストと考えられる現象を検出することに成功している。本研究の目的である「重力波と同期したGRB」の検出には至っていないが、今後の観測で成果を挙げていきたい。

研究成果の学術的意義や社会的意義

現在の天文学では、重力波やニュートリノのような電磁波ではない情報を用いて宇宙を包括的に理解する「マルチメッセンジャー天文学」が重要課題となっている。本研究では、広視野X線・ガンマ線観測の観点から、マルチメッセンジャー天文学の発展に貢献するための超小型衛星 KOYOH を実現し、重力波と同期したガンマ線バーストを観測することで、その発生方向や発生時刻を通報し、時間変動やエネルギースペクトルを測定する。これにより、従来のX線・ガンマ線天文学では実施できなかった新たなブラックホールが誕生する瞬間に生じる物理現象を理解するものである。

研究成果の概要（英文）：The purpose of this research is to develop a 50cm/50kg class micro-satellite "KOYOH", and two types of mission instruments to observe gamma-ray bursts (GRBs) associated with gravitational waves. After conducting electrical, thermal vacuum, and vibration tests to confirm its integrity, the KOYOH satellite was launched from the United States on December 2, 2023 (Japan Standard Time). Although the satellite suffered from an anomaly on the star tracker and battery depletion among its functions, it is currently in operation and has succeeded in detecting a phenomenon thought to be GRB. We have not yet detected "GRBs associated with gravitational waves," which is the objective of this research, we hope to achieve results through future observations.

研究分野：宇宙物理学

キーワード：ガンマ線バースト 重力波 X線天文学 超小型衛星 ブラックホール

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

現在の天文学では、重力波やニュートリノのような電磁波ではない情報を用いて宇宙を包括的に理解する「マルチメッセンジャー天文学」が重要課題となっている。2017年8月17日に中性子星連星の衝突・合体からの重力波と同時に継続時間の短いガンマ線バーストが検出され、X線から電波にわたる様々な波長で追観測が行われた。ここから、ランタノイド属にも達する極めて重たい元素の生成や、相対論的な速度を持ったジェットの形成など、ブラックホールが誕生した瞬間の物理現象を垣間見ることができた。また、高エネルギーニュートリノの発生とともにX線などで増光する現象が報告されており、ブラックホールが成長する過程における粒子加速などの現象も理解されつつある。

2. 研究の目的

本研究は、広視野 X 線・ガンマ線観測の観点から、マルチメッセンジャー天文学の発展に貢献することで、ブラックホールの誕生と成長に関わる普遍的な学理を形成していくことを目的とする。重力波やニュートリノは突発的な天体現象として発生するため、それらに同期した電磁波現象を発見し、世界中の研究者に連絡することが多波長観測にとって重要な要素となる。広視野観測に適した X 線・ガンマ線衛星が活躍しているものの、全天のカバー率は 20%程度に留まっている。そこで、広視野 X 線モニターを搭載した超小型衛星でマルチメッセンジャー天体を観測することで、その発生方向や発生時刻を通報し、時間変動やエネルギースペクトルを測定する。これにより、従来の X 線・ガンマ線天文学では実施できなかったブラックホールが誕生する瞬間に生じる物理現象を理解することを目標とする。

3. 研究の方法

金沢大学では理学・工学が融合することで人工衛星を用いた宇宙科学を推進している。これまでに開発してきた超小型衛星をプラットフォームとして利用し、これまでに開発してきた広視野 X 線モニターとガンマ線検出器の 2 つの観測機器を搭載することでマルチメッセンジャー天文学に貢献する。

金沢大学衛星（以下、こよう衛星）は 50cm/50kg 級の超小型衛星である。広視野 X 線モニターは符号化マスク方式を採用し、タングステン製のランダムスリットを通過した X 線を 1 次元の位置検出型のシリコン半導体検出器で撮影する。2 台の検出器を直交して配置することで、3~20 キロ電子ボルトの X 線帯で約 1.5 ステラジアンの広い視野を監視し、15 分角よりも良い精度で方向決定を行う。ガンマ線検出器はヨウ化セシウムシンチレータと MPPC と呼ばれる光検出器を組み合わせたもので、20~300 キロ電子ボルト程度を観測する。突発天体の方向は決定できないが、約 3 ステラジアン程度の非常に大きな視野角で突発天体を検出し、発生時刻やエネルギースペクトルを測定することが可能となる。

本研究では、これらの観測機器の地上較正、衛星システムの総合試験（電気試験・振動試験・熱真空試験）、運用設備の構築、衛星の打ち上げ、および軌道上観測を実施して科学成果を創出するまでを目標としている。

4. 研究成果

2021 年度からの 2 年間で、こよう衛星(図 1 左)および 2 種類のミッション機器(図 1 中・右)のフライトモデルを完成させ、検出器較正、および運用設備の構築を行ってきた。

[1] 広視野 X 線モニターの最終較正試験と応答関数の構築

X 線ビームラインを用いて、広視野 X 線モニターの較正試験を行った。角度応答では視野中心から +/-30 度の範囲で実験を行い、設計通りの方向決定精度が得られることを確認した。また、エネルギー応答については、4.5keV から 22.5keV の範囲の特性を把握し、検出器応答関数に用いる基礎データを取得した。ガンマ線検出器の有効面積の角度依存性を調査し、エネルギースペクトルの較正を行った。

[2] 熱真空試験と総合試験の実施

衛星搭載機器を統合した制御ソフトの開発とデバッグを行った。全搭載機器を組み込んだ状態で、約 1 週間にわたる電気試験を行ない、ソフトウェア的な不具合に対処した。その後、金沢大学のクリーンルームに設置した熱真空チャンバで熱真空試験を実施し、衛星内の温度分布を計測した。一部、予想していた温度範囲よりも高温になる部分があったため、熱制御素材(MLI)の面積の調整などで対応することで問題を解決した。

[3] 運用設備の構築と地上系アンテナの受信試験

金沢大学の屋上に建設した口径 2.4m の S バンドアンテナと UHF クロス八木アンテナを利用して受信試験を行った。軌道上の衛星から発せられる信号をスペクトラム・アナライザーでモニターすることで受信レベルを確認した。また、こよう衛星の運用時にステータス情報をモニターしたり、コマンド送信を行うための地上系運用設備を構築した。



図 1. (左)こよう衛星のフライトモデル、(中) 広視野 X 線モニター、(右) ガンマ線検出器

金沢大学衛星「こよう」は、JAXA の革新的衛星技術実証プログラム 3 号機に選定され、2022 年度中にイプシロンロケット 6 号機で打ち上げられる予定であったが、優先して打ち上げる必要のある衛星が出てきたことから、我々を含む 3 大学の無償相乗り衛星は別の機会での打ち上げとなった（このロケットは打ち上げ失敗となっている）。JAXA と打ち上げサービスを提供する企業、および 3 大学との間で調整を行い、2023 年度に打ち上げが変更となった。

2023 年度には、最終的な総合試験を実施した。振動試験は JAXA の設備を利用させていただき、JAXA・企業の立ち会いのもとで実施した。打ち上げロケットの振動条件をすべてクリアし、その後も正常に動作することを確認している。熱真空試験では 2021 年度の試験結果を踏まえて、断熱材を追加するなどの調整を行ったところ、熱数学モデルのシミュレーションと良く整合する結果を得ることができた。これにより、観測機器は軌道上で適切な温度環境化である 0 以下で運用できる見込みが得られた。

金沢大学衛星を X 線突発天体監視速報衛星「こよう (KOYOH)」と名付け、日本時間 2023 年 12 月 2 日に米国バンデンバーグ宇宙基地から打ち上げた（図 2）。最初に金沢大学上空を通過するタイミングで衛星からの電波を捉えることに成功した。受信データから、ロケットから衛星を分離した後、太陽電池パドルの展開、太陽指向の一連の流れが自動的に実現できたことを確認した。約 4 ヶ月にわたって安定した運用の実現と観測機器の軌道上較正を行ってきており、すべての機器が正常に動作したことを確認できている。現在、バッテリーの枯渇や姿勢センサの異常などがあり、安定した運用を行うことに苦労しているが、軌道上での観測はできている。当初の目標であるマルチメッセンジャー天体からの X 線・ガンマ線信号は未だ検出できておらず、本研究期間で科学成果を達成するには至らなかった。このような観測は長期間にわたって広い視野をモニターし続ける必要があるため、今後も注力していきたいと考えている。

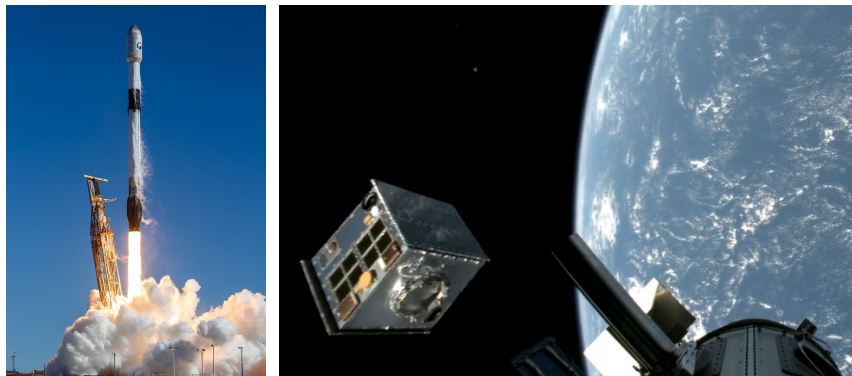


図 2. (左) 打ち上げロケット、(右) 衛星放出の様子

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計7件（うち査読付論文 4件／うち国際共著 2件／うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Hatsune Goto, Daisuke Yonetoku, et al.	4. 巻 12181
2. 論文標題 Development of a method for aligning lobster eye optics onboard HiZ-GUNDAM with visible light and shape measurements	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Proceedings of the SPIE	6. 最初と最後の頁 121815J, 7pp
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1117/12.2627445	査読の有無 無
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 Daisuke Yonetoku, et al.	4. 巻 12181
2. 論文標題 High-redshift gamma-ray burst for unraveling the dark ages Mmission: HiZ-GUNDAM	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Proceedings of the SPIE	6. 最初と最後の頁 121811J, 10pp
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 無
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 Ogino Naoki, Arimoto Makoto, Hamidani Hamid, Sakamoto Takanori, Yonetoku Daisuke, Sawano Tatsuya, Serino Motoko, Asano Katsuaki, Kawai Nobuyuki	4. 巻 in print
2. 論文標題 Possible X-ray cocoon emission from GRB 050709	5. 発行年 2024年
3. 雑誌名 Publications of the Astronomical Society of Japan	6. 最初と最後の頁 in print
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1093/pasj/psae032	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 Ogino Naoki, Yonetoku Daisuke, Arimoto Makoto, Sawano Tatsuya, Hamidani Hamid	4. 巻 in print
2. 論文標題 Peak energy isotropic luminosity correlation and jet opening angle evolution in Swift-BAT short GRBs with soft-tail emission	5. 発行年 2024年
3. 雑誌名 Publications of the Astronomical Society of Japan	6. 最初と最後の頁 in print
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1093/pasj/psae018	査読の有無 無
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 Bozzo Enrico et al.	4. 巻 10
2. 論文標題 Future Perspectives for Gamma-ray Burst Detection from Space	5. 発行年 2024年
3. 雑誌名 Universe	6. 最初と最後の頁 187 ~ 187
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3390/universe10040187	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 該当する

1. 著者名 Ito Hiroataka, Matsumoto Jin, Nagataki Shigehiro, Warren Donald C., Barkov Maxim V., Yonetoku Daisuke	4. 巻 961
2. 論文標題 Numerical Simulation of Photospheric Emission in Long Gamma-Ray Bursts: Prompt Correlations, Spectral Shapes, and Polarizations	5. 発行年 2024年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal	6. 最初と最後の頁 243 ~ 243
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/1538-4357/ace775	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 該当する

1. 著者名 Ogino Naoki, Arimoto Makoto, Sawano Tatsuya, Yonetoku Daisuke, Shen Hsien-chieh, Sakamoto Takanori, Hiraga Junko S., Yatsu Yoichi, Mihara Tatehiro	4. 巻 19
2. 論文標題 High-speed readout system of X-ray CMOS image sensor for time domain astronomy	5. 発行年 2024年
3. 雑誌名 Journal of Instrumentation	6. 最初と最後の頁 C01006 ~ C01006
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/1748-0221/19/01/C01006	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17件 (うち招待講演 8件 / うち国際学会 4件)

1. 発表者名 Daisuke Yonetoku, et al.
2. 発表標題 High-redshift gamma-ray burst for unraveling the dark ages Mission: HiZ-GUNDAM
3. 学会等名 SPIE Space Telescope and Instrumentation 2022 (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Hatsune Goto, Daisuke Yonetoku, et al.
2. 発表標題 Development of a method for aligning lobster eye optics onboard HiZ-GUNDAM with visible light and shape measurements
3. 学会等名 SPIE Space Telescope and Instrumentation 2022 (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Daisuke Yonetoku, et al.
2. 発表標題 High-redshift gamma-ray burst for unraveling the dark ages Mission: HiZ-GUNDAM
3. 学会等名 American Astronomical Society High Energy Astronomy Division (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 米徳大輔
2. 発表標題 ガンマ線バーストを用いた初期宇宙・極限時空探査計画 HiZ-GUNDAMの進捗
3. 学会等名 宇宙科学シンポジウム
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 米徳大輔
2. 発表標題 ガンマ線バーストを用いた初期宇宙・極限時空探査計画 HiZ-GUNDAM
3. 学会等名 高エネルギー宇宙物理学連絡会「高エネルギー宇宙物理ミッションの現状から近未来を考える」(招待講演)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 後藤初音
2. 発表標題 可視光によるLobster Eye Opticsの焦点距離測定法の評価
3. 学会等名 日本天文学会2023年春季年会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 鈴木大晴
2. 発表標題 X線突発天体監視速報衛星こよう搭載の広視野X線撮像検出器 T-LEX の応答関数構築
3. 学会等名 日本天文学会2022年秋季年会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 吉田翼
2. 発表標題 X線突発天体監視速報衛星こよう搭載のガンマ線検出器 KGD の性能評価
3. 学会等名 日本天文学会2022年秋季年会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 後藤初音
2. 発表標題 可視光による Lobster Eye Optics のアラインメント調整とX線結像性能評価
3. 学会等名 日本天文学会2022年秋季年会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 萩野直樹
2. 発表標題 HETE-2 で観測された GRB 050709 から のコクーン放射
3. 学会等名 日本天文学会2022年秋季年会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 米徳大輔
2. 発表標題 ガンマ線バーストを用いた初期宇宙・極限時空探査計画 HiZ-GUNDAM
3. 学会等名 高エネルギー宇宙物理連絡会研究会・マスタープラン2023（招待講演）
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 米徳大輔
2. 発表標題 ガンマ線バーストを用いた初期宇宙・極限時空探査計画 HiZ-GUNDAM
3. 学会等名 光赤外線天文学連絡会将来計画シンポジウム・マスタープラン2023（招待講演）
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 米徳大輔
2. 発表標題 ガンマ線バーストを用いた初期宇宙・極限時空探査計画 HiZ-GUNDAM の進捗
3. 学会等名 宇宙科学シンポジウム（招待講演）
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 米徳大輔
2. 発表標題 公募型小型計画の課題 - 高宇連へのメッセージ -
3. 学会等名 高エネルギー宇宙物理連絡会研究会（招待講演）
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 米徳大輔
2. 発表標題 HiZ-GUNDAMとGREX-PLUSのシナジー
3. 学会等名 GREX-PLUSサイエンス会議（招待講演）
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 米徳大輔
2. 発表標題 High-z Gamma-ray bursts for Unraveling the Dark Ages and Extreme Space Time Mission - HiZ-GUNDAM
3. 学会等名 マルチメッセンジャー宇宙物理学領域会議（招待講演）（国際学会）
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 米徳大輔
2. 発表標題 High-z Gamma-ray bursts for Unraveling the Dark Ages and Extreme Space Time Mission - HiZ-GUNDAM
3. 学会等名 高エネルギー宇宙物理連絡会（招待講演）
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
---------	---------