

金沢大学衛星 1 号機「こよう」の通信成功 と重力波源の電磁波対応天体観測に向けて

澤野 達哉*¹

Sawano Tatsuya

井町 智彦*¹

Imachi Tomohiko

莊司 泰弘*¹

Shoji Yasuhiro

米徳 大輔*¹

Yonetoku Daisuke

笠原 禎也*²

Kasahara Yoshiya

松田 昇也*¹

Matsuda Shoya

高橋 直暉*³

Takahashi Naoki

木邑真理子*¹

Kimura Mariko

八木谷 聡*¹

Yagitani Satoshi

有元 誠*¹

Arimoto Makoto

軸屋 一郎*¹

Jikuya Ichiro

1. はじめに

金沢大学が開発する人工衛星 1 号機となる X 線突発天体監視速報衛星「こよう」は、大学規模の人工衛星計画でありながら、現代天文学において比較的新しい領域であるマルチメッセンジャー天文学への貢献を目指している 50 kg 級の科学観測衛星である。中性子星と呼ばれる高密度の天体同士が合体すると、時空の歪みが波として伝搬する重力波が発生する。こよう衛星は、合体とほぼ同時に放出されるガンマ線バースト等の突発天体事象を観測する。また、望遠鏡による追観測を実現するために、観測天体の発生時刻と方向の情報を天文学研究者に提供し、高密度天体同士が合体した直後の極限的な物理環境の探究に貢献することを目指している。

こよう衛星は、宇宙航空研究開発機構 (JAXA) の革新的衛星技術実証 3 号機の実証テーマの 1 つとして選定され、日本時間 2023 年 12 月 2 日午前 3 時 19 分に米国ヴァンデンバーグ宇宙軍基地より SpaceX 社の Falcon 9 ロケットにより打ち上げられ、高度 560 km 付近の低軌道に投入された。金沢大学が保有する 2.4 m の S 帯パラボラアンテナと UHF 帯クロス八木アンテナによって衛星との交信を行う衛星運用を日々続けている。

2. 背景

天体同士の合体によって発生する重力波の直接観測は、その波形情報から合体前の天体の質量、天体までの距離、公転軌道面等の情報を得ることができる、現代天文学の新たな観測手段である。2017 年に米国の LIGO 重力波干渉計及び欧州の Virgo 重力波干渉計で観測された重力波イベント GW 170817 は、世界で初めて検出された中性子星同士の衝突合体事象であった。更に、X 線・γ線帯域におけるガンマ線バースト初期放射 GRB 170817A、X 線帯域や電波帯域におけるガンマ線バースト残光、可視光線・近赤外線帯域におけるキロノヴァ等の電磁波突発天体事象も続けて観測された、天文学史に残るイベントである。

ガンマ線バースト (GRB) は宇宙最大の電磁波突発事象とも呼ばれ、数百 ms～数十 s の間に 10^{45} J ものエネルギーを X 線・γ線で放出し、数十億光年もの彼方で発生したものが 1 日に 1 回程度の頻度で地球に届く。GRB の継続時間の分布をとると、およそ 2 秒を境に二峰性を示し、2 秒よりも長いものは重力崩壊型超新星と同期する例があり、重い恒星の爆発によって発生することが理解されている。一方、2 秒より短いものは高密度天体の衝突・合体で発生すると予想され、中性子星同士又は中性子星と恒星質量ブラックホールがその起源と考えられている。GW 170817 と GRB 170817A の同時観測は、少

なくとも中性子星同士の合体が GRB の起源となりうる証拠を示したが、中性子星とブラックホールの合体でも発生するかは、今後の観測が必要である。

キロノヴァは、可視光及び近赤外線帯域で観測される天体現象で、数日から1週間程度で減光するとされる。中性子過剰環境で進む r 過程元素合成により大量の中性子過剰な放射性同位元素が生成され、その崩壊熱で周囲の物質が加熱されることで、熱放射が可視光及び近赤外線で見られる。キロノヴァが発生すると考えられる代表的な例として、連星中性子星の衝突合体事象が挙げられる。GW 170817 に付随して観測されたキロノヴァでは、特有の減光パターンが観測されただけでなく、分光観測データにセリウム (Ce) 等のランタノイド元素の吸収線が報告され、ランタノイドのような重元素合成の現場を示す初めての観測例となった。一方で、Au や Pt 等の更に重い元素が実際に合成されているかどうか、またその生成量については、今後の観測が期待されている。

重力波の直接観測では、観測所間の到達時間差から方向を絞り込むことができるが、その方向決定精度は良い場合でも数十平方度である。この情報だけでは、狭視野の望遠鏡でキロノヴァを観測するために、空をタイル状に順番に観測する必要が生じる。しかし、GRB 観測によってある程度発生方向が制限されれば、キロノヴァの観測が容易になる。

3. 「こよう」衛星と観測装置の構成と開発の顛末

こよう衛星は、アルミハニカムパネルを6面体に組み合わせた50 cm立方構造を本体とし、2枚の展開式の太陽電池パドルを両翼に備える。また、衛星の太陽指向面の反対側に2つの観測装置を備える。方向決定能力に特化した広視野 X 線撮像検出器 T-LEX と幅広いエネルギー帯域をカバーする γ 線検出器 KGD である (図 1)。

T-LEX は、0.5 mm 厚のシリコンセンサー、0.1 fC の微弱な電荷信号を読み取るための専用集積回路、デジタル信号処理用の FPGA (Field Programmable Gate Array) を使用する 1 次元 X 線検出器である。これに 50 μ m 厚のタングステン製符号化マスクを組み合わせて 1 次元コーデッドマスクイメージャーとして作動させる。天体の X 線はマスクのスリット

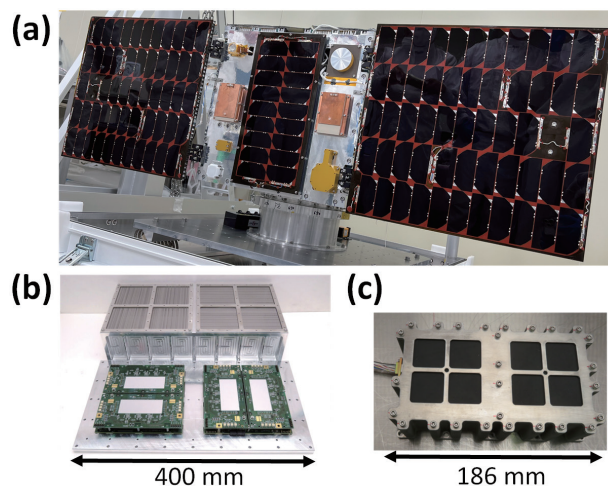


図 1 (a)こよう衛星フライトモデル。(b)広視野 X 線撮像検出器 T-LEX。(c) γ 線検出器 KGD

パターンを通してシリコンセンサーに投影され、相互相関関数を計算することで天体の位置を特定する。T-LEX は 2 セットの 1 次元イメージャーを 90 度ずらして配置することで天体の 1 位置を 1 点に定めることができる。検出器有感面積は 100 cm²、視野は 1 sr 以上、位置決定精度は 15 分角である。観測エネルギー帯域は 4 keV ~ 20 keV で、特に低エネルギー X 線に感度を持つ。GRB が 10 keV よりも低い帯域で特に明るい場合は、現行の GRB 観測衛星であるニール・ゲーレルス・スウィフト衛星に匹敵する天体感度を持つ設計である。KGD は、CsI(Tl) シンチレータと Multi-Pixel Photon Counter (MPPC) を組み合わせた γ 線検出器である。シンチレータは 70 mm 角、厚さ 6 mm のものを 2 枚使用し、アナログ信号は前置増幅器、波形整形回路、ピークホールド回路を経て ADC で読み出される。消費電力は 0.3 W で、衛星全体の消費電力の 1% を占めるのみである。観測エネルギー帯域は 20 ~ 300 keV で、GRB の典型的な放射エネルギー帯域をカバーしている。いずれの観測装置も放射線のカウントレートをモニターし、指定した統計的揺らぎの閾値を超えるカウントレートの増大を検知すると、自動的に詳細な観測データを記録し、衛星本体に自律的にデータを転送するようプログラムされている。また、突発天体検知のサマリーデータをパッケージにまとめ、衛星に搭載したイリジウム衛星端末を用いて即時通信を試みる。

大学衛星でいきなり 50 kg 級の衛星ミッションを

扱うというのは、衛星開発の先駆者から見るとかなり無謀だったようで、周囲からは、キューブサットと呼ばれる約 10 cm 立方を 1 U (ユニット) とした規格における 1~3 U サイズの人工衛星から始めないのかという声を度々いただいた。それでも、こよう衛星がこだわったのは、キューブサット規格の厳しいスペースや重量の制約に縛られず、先鋭的な観測装置を搭載して本格的な科学観測を実現することであった。50 kg 級の衛星を大学で開発し、科学観測プラットフォームとしての道を切り拓くという信念のもと、打ち上げまでこぎつけた。

ここでは、どのようにして実際に宇宙へ打ち上げられるフライトモデルが開発されたかを紹介する。こよう衛星は、概念設計に基づいて、構造設計や熱設計の妥当性を検証するための熱構造モデル (STM) と、設計の妥当性を確認しつつ打ち上げ実機モデルともなるプロトフライトモデル (PFM) を製作する方式を採用した。観測装置の設計・開発は衛星設計に先行して行われ、主要な制約条件である寸法、質量、消費電力、温度要求、姿勢要求等を決定した。概念設計では、宇宙実績のある衛星バス機器の選定、観測装置の配置、定常的な衛星姿勢での電力収支や温度環境等を検証した。2017 年には、フライトモデルと同等の製法で作製された衛星パネルと、機器の質量を模擬したダミーマス、更に各機器の発熱を模擬したヒーターを搭載して構成された STM を製作した。ロケット打ち上げ時の振動条件を模擬した振動試験や、宇宙の熱真空環境を模擬した熱真空試験を実施し、機械強度や剛性、温度範囲の適合性を確認した。STM の設計検証結果をもとに 2020 年には PFM 製作を開始したが、新型コロナウイルスの流行による開発の停滞や打ち上げロケットの調整等、PFM 開発フェーズでは困難が続いた。PFM では、宇宙搭載用機器同士の電氣的及び通信的な接続の健全性を確認し、最終的にすべての機器を衛星に搭載した。衛星が打ち上げ可能な状態で全システムの機能チェックができるようになったのは、打ち上げのために出荷される約半年前の 2023 年 2 月であった。PFM は 2023 年 2 月に熱真空試験を、8 月から 9 月にかけてロケットの搭載認定を受けるための振動試験を実施し、10 月末に米国へ輸送された。射場では衛星に搭載するバッテリーの補充電作業を行い、現地スタッフに引き渡した。こうして衛星作

業チームの仕事は終わり、地上局の通信準備へとバトンタッチされた。

4. 打ち上げと初期運用

こよう衛星は、日照側では太陽電池面を太陽に指向させ、日陰側では慣性指向で観測装置が突発天体を待ち構えるという定常的な運用状態をとる。打ち上げ後から衛星がこの定常状態に至るまでは、基本的に自律的に機能するよう計算機がプログラムされている。太陽電池パドルはロケット打ち上げ時には折り畳まれて格納されており、ロケットから分離後 120 秒が経過してから自律的に展開される。展開後、磁気トルカと呼ばれる電磁石と地球磁場を利用して衛星の回転を止めるデタンプリング操作を行う。衛星角速度が安定したところで、搭載された太陽センサーや恒星の画像から衛星の慣性姿勢を取得するスタートラッカーによって太陽方向を決定し、3 軸のリアクションホイールを使って太陽電池面を太陽側に向け続ける。これらの自律的な姿勢制御ができれば、日照側でバッテリーの充電と機器への電力供給が可能となる。もしこれらのうち 1 つでも達成できない場合、衛星はバッテリー電力を使い果たして機能を喪失してしまう。

地上局上空を衛星が通過する時間をパスと呼ぶが、こよう衛星にとって大学地上局最初のパスは打ち上げから約 6 時間後に予定されていた。もし上空でトラブルがあり、バッテリーに太陽電池で充電できない場合には、ぎりぎりバッテリーを使い果たしてしまう厳しい条件であった。最初のパスの時間は 10 分足らずであり、地上局の上空を通過している間だけ衛星から電波を発信するよう、何度も同じ命令のコマンドが地上から衛星に送信された。パスの後半、衛星が地平線に沈む 1 分前に UHF 帯による衛星からの電波信号が地上局のモニターに現れ、まもなく受信機器を通して信号の復調が行われ、衛星の健全性に関するデータが取得された。太陽電池パドルの展開は正常に行われ、太陽センサーが太陽を捕捉しており、バッテリーは満充電に近い状態であった。この結果は、想定した中で最良の状態であった。その後、半日後の夜のパスで S 帯でのダウンリンク通信にも成功し、衛星の展開系、姿勢系、電源系、通信系の基本機能が軌道上で期待どおりに動

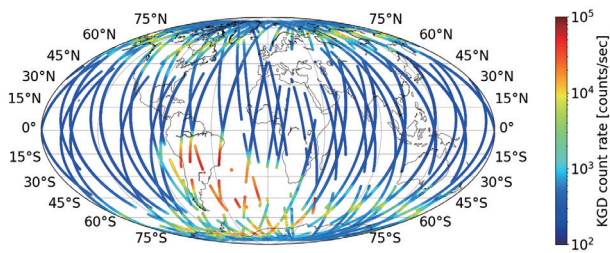


図2 2024年2月のテスト運用で計測したKGDによるカウントレートマップ

作していることが確認された。

その後、衛星が冷えて全ヒーターがオンになったことで電力収支がアンバランスになるトラブルが発生したが、打ち上げから2週間以内に2つの観測装置の立ち上げテストを行い、機器の健全性を確認できた。しかし、打ち上げ後1か月を目前にしてスタートラッカーの不具合が発生し、日陰側での慣性姿勢センサーが機能しなくなったため、日照突入直後の充電機会が度々失われ、電力バランスが不安定な状態に直面した。それでも、4月までに突発天体検知機能を外したテスト観測を行い（図2）、50 ksを超える2つの観測機器の観測データを取得した。2024年4月25日からは衛星が健全なときに定常観測を開始し、自律的な突発事象の検知機能が地球近傍の

荷電粒子フラックス増大ではたらくことも確認している。

5. 今後の展望

スタートラッカーの不具合にもかかわらず、こよう衛星は観測時間を着実に積み重ねている。重力波イベントが発生した際、観測状態であれば、天体が検知されなくても、衛星の向きに対する突発天体のフラックス上限という意義のある科学データを提供できる。観測時間を増やし続けることが重要である。地道に運用を続け、科学観測データの収集を続け、幸運であれば重力波に伴うGRBの検出のような一大イベントの観測に立ち会えることを願う次第である。

参考文献

- 1) Abbott, B. P., *et al.*, *PRL*, **119**, 161101 (2017)
- 2) Domoto, N., *et al.*, *ApJ*, **939**, 8 (2020)
- 3) Barthelmy, S. D., *et al.*, *Sci. Rev.*, **120**, 143 (2005)
- 4) Yonetoku, D., *et al.*, *Isotope News*, **757**, 40 (2018)

(*1 金沢大学 理工研究域, *2 金沢大学 学術メディア創成センター, *3 金沢大学大学院自然科学研究科)