

ガンマ線バースト探査衛星 HiZ-GUNDAM 衛星搭載の 可視・近赤外線望遠鏡 MONSTER の開発

津村耕司 (東京都市大学)

ktsumura@tcu.ac.jp

概要

HiZ-GUNDAM 衛星は、2030 年頃の打ち上げを目指し開発中のガンマ線バースト (GRB) の探査衛星である。HiZ-GUNDAM には発見した GRB を即時追観測する可視光・近赤外線望遠鏡 MONSTER が搭載される。MONSTER は 0.5-2.5 μm の波長範囲を 5 分割して同時観測する。常温での打上げ後に軌道上で放射冷却により筐体を 200 K 以下、近赤外線検出器を 120 K 以下に冷却することで近赤外線波長域での高感度を実現する。本発表では、HiZ-GUNDAM 衛星搭載の MONSTER の開発の現状について報告する。

1. はじめに

1.1 ガンマ線バーストとは

ガンマ線バースト (Gamma-Ray Burst, GRB) とは、 10^{52} erg ものエネルギーをガンマ線放射として解放する宇宙最大の爆発現象であり、X 線・ガンマ線で数秒から 100 秒程度明るく輝く「即時放射」に続き、数日かけて X 線から電波の広い電磁波波長帯で輝く「残光」現象を伴う。GRB には継続時間が 2 秒以上で大質量星の重力崩壊が原因である「長時間 GRB」と、継続時間が 2 秒以下で中性子星連星の合体が原因である「短時間 GRB」の 2 種類がある。それぞれの観測から、以下の重要な課題に対して観測的に迫ることができる。

長時間 GRB の観測と初期宇宙探査

宇宙誕生後最初の数億年は星や銀河などがない「宇宙の暗黒時代」であった。その後、初代星の形成が起こると、それによる紫外線で宇宙は電離され、さらに初代星により生成される重元素が宇宙に巻き散らされることで宇宙の重元素汚染が始まる。このように、初代星形成により宇宙全体の環境が激変する「宇宙の夜明けの時代 (赤方偏移 $z > 10$)」を観測的に探ることは、宇宙の進化史を理解する上で極めて重要である。「宇宙の夜明けの時代」における宇宙環境の激変を理解するためには、その環境変化の担い手である遠方銀河を広視野サーベイにて探し出さなければならない。しかし広視野サーベイで検出される遠方銀河は、その当時において「極めて明るい」銀河が観測されやすいという選択バイアスが生じるため、宇宙の一般的な性質を調べる為には十分でない。一方で、初期宇宙においてはあらゆる銀河に大質量星が含まれており、その大質量星の重力崩壊に伴う GRB の発生直後の残光は普通の銀河の 1000 倍以上の明るさとなるため、GRB を用いて無バイアスな初期宇宙探査を圧倒的な統計精度で達成できる。GRB のこの明るさゆえ、GRB 発生直後にその分光観測を実現できれば、「誕生直後の宇宙はどのような環境で、それがどのように進化して現在に至ったのか」という重要な学術的問いに対して観測的に迫ることができる。

短時間 GRB の観測と極限宇宙探査

中性子星連星が合体してブラックホールが生成される際に、重力波と同期して短時間 GRB が発生する。さらにその直後に金などの重い元素を合成する r 過程元素合成も起こり、それはキロノヴァという近赤外線で見える現象として観測される。すなわち、短時間 GRB を重力波や多波長の電磁波を含むマルチメッセンジャー観測を行うことで、「ブラックホールが生成されるような極限的な時空における物理はどのようなものか?」「金などの重い元素はどのように生成されるのか?」という重要な学術的問いに対して観測的に迫ることができる。

1.2 GRB 観測の現状

現在の GRB の観測的研究の基盤を作り上げたのが、2004 年に打上げられた Neil Gehrels Swift 衛星である。2 sr という広視野なガンマ線望遠鏡 BAT で GRB を検知すると即座にその位置情報を地上にアラートする。それと同時に衛星は素早く姿勢を変更し、X 線望遠鏡 XRT および紫外・可視光望遠鏡 UVOT にて GRB 残光の追観測を行う。このような観測体制の構築により、年間 100 個を超える GRB が発見され、地上追観測網も整備され、GRB の観測的研究が大きく発展した。しかし、遠方宇宙探査の観点からは、Swift 衛星からのアラート情報に GRB までの距離情報が含まれていない点に大きな課題がある。数多発見される GRB の中で、小型・中型の地上望遠鏡で追観測され赤方偏移(距離)が測定される GRB は数が限られてしまうため、貴重な高赤方偏移 GRB は数多く見逃されてきたと考えられている。実際に、Swift 衛星の 20 年間の観測期間で $z > 7$ の GRB はわずか 2 例のみである。しかも地上追観測による赤方偏移同定に時間がかかってしまうため、それら高赤方偏移 GRB を地上大型望遠鏡で分光観測しようとする段階では、既に GRB 残光は暗くなってしまっており、精度が高い観測データの取得は困難である(図 2 左)。2024 年に打ち上がった Einstein Probe 衛星においても、GRB を探査する X 線望遠鏡の感度が大幅に向上し、暗い GRB を含むより多くの GRB が発見されているが、赤方偏移測定を地上追観測に委ねる現状は変わっていない。

そこで我々は、このような現状を打破すべく、GRB を探査し、迅速な追観測を実現することを目指した天文衛星 HiZ-GUNDAM (High-z Gamma-ray bursts for Unraveling the Dark Ages Mission) [1] の開発を進めている。

2. HiZ-GUNDAM 衛星

HiZ-GUNDAM は JAXA 宇宙科学研究所の公募型小型計画ミッションコンセプト案として採択されており、公募型小型科学衛星 5 号機候補として 2030 年代の打ち上げを目指して、現在は衛星製造メーカーと共に概念検討を進めている段階である。

GRB の残光は時間に反比例して暗くなっていくため、その詳細な追観測を実現するためには、GRB 検出後できるだけ早くその位置情報をアラートしなければならない。しかし、GRB は全天で 1 日数回発生する現象であるため、地上大型望遠鏡でその全てを追観測する事は非現実的である。従来の GRB 監視衛星で初期宇宙の観測がさほど進展していない直接的な原因は、GRB 発見のアラートに距離情報が無いことであった。そこで HiZ-GUNDAM 衛星では、自律的な追観測により、GRB 発見から 1 時間以内に赤方偏移情報を含むアラートを発出する点が画期的である(図 2 右)。

そのような要求の実現のため、HiZ-GUNDAM 衛星では、(1) GRB を検出する広視野 X 線モニター EAGLE (Exploration of Ancient GRBs with Lobster Eye) を搭載し、かつ、(2) GRB 検出に即応して自律的追観測を行う口径 30 cm の可視光・近赤外線望遠鏡 MONSTER (Multiband Optical and Near-infrared Simultaneous Telescope for Efficient Response) [2] を搭載している。EAGLE による最初の GRB 検出後に、位置精度 10 分角程度の荒い位置情報を含むアラート第一報を出し、それと同時に衛星は自律的に GRB 発生方向に向き、MONSTER での観測を開始する。赤外線での高感度観測には装置の冷却が必須であり、その熱的な制約から従来は赤外線望遠鏡と他の観測装置との共存は困難であった。特に、発見した GRB の方向に応じて衛星が姿勢を変えることで搭載装置の熱環境も変化するため、冷却が必須な赤外線望遠鏡の搭載はますます困難であった。これが、従来の GRB 探査衛星に赤外線望遠鏡が搭載されていない理由である。HiZ-GUNDAM 衛星では、巧みな熱設計によりこの困難を克服する。

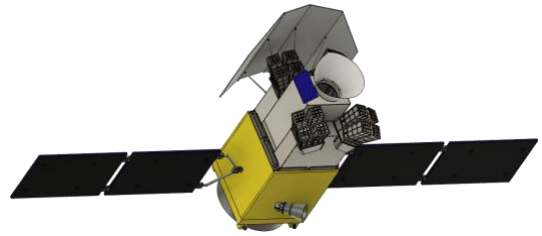


図 1 HiZ-GUNDAM 衛星の外観

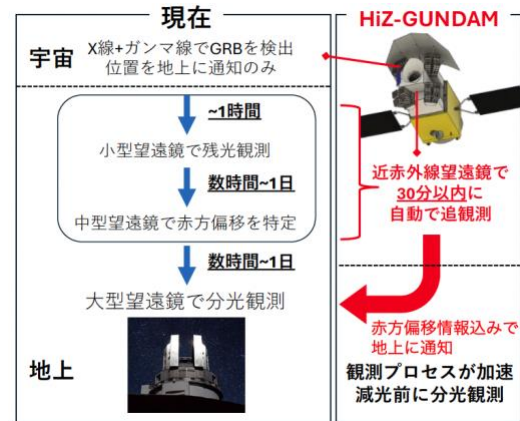


図 2 GRB 観測の流れ

3. 可視光・赤外線望遠鏡 MONSTER の開発状況

3.1 光学設計と公差解析

MONSTER は、口径 30cm の反射望遠鏡である。発見した GRB の測光赤方偏移を測定するために、は 0.5-2.5 μm という可視光から近赤外線の波長域で 5 バンド同時測光観測を行う。そのため、まずはダイクロミックミラーで可視光と近赤外線に分割し、近赤外線についてはさらにダブルケスタープリズムにて 4 バンドに分割することで、可視光検出器と近赤外線検出器の 2 つの検出器で 5 バンドの同時測光観測を実現させる(図 3)。GRB の発生位置に応じて様々な姿勢をとる事を想定し、地球や月などの視野外の明るい光源からの迷光をできる限り減らすべく、主鏡と副鏡の間の焦点に視野絞りを置くことで、その先へ侵入する迷光を大幅に低減する設計としている。また、公差解析により、温度勾配による熱収縮の非一様性が原因で最も光学性能の劣化にきくのは主鏡-副鏡間の距離の変化であり、主副鏡間距離が 40 μm 以上ずれると光学性能が劣化するという解析結果を得ており、温度勾配による熱変形への要求を明らかにした。

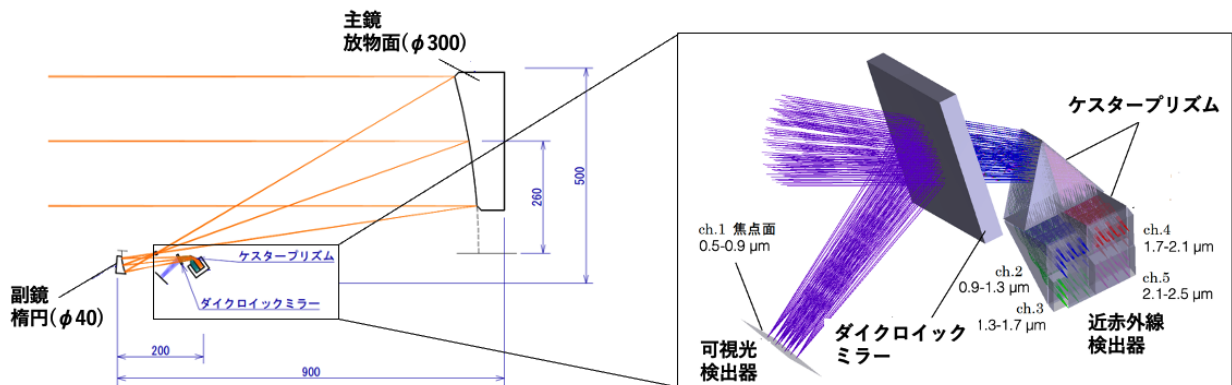


図 3 HiZ-GUNDAM 衛星搭載の可視光・近赤外線望遠鏡 MONSTER の光学設計

3.2 熱解析

近赤外線で高い感度を達成するために、HiZ-GUNDAM 衛星を常温で打ち上げた後、宇宙に到達してから望遠鏡は 200 K 以下、近赤外線検出器は 120 K 以下に冷却する。この際に機械式冷凍機を用いずに放射冷却のみで冷却することで、安価に冷却を実現するのみでなく、姿勢擾乱などを低減させる。この 100 K 以上の大きな温度変化を経ても光学性能が崩れない望遠鏡を実現するために、望遠鏡やその筐体をすべて、同一のアルミニウム合金により製造するというアサーマル光学系という設計コンセプトを採用する。それにより、望遠鏡全体の大きな温度変化に対しても、全体が相似収縮することで光学性能を維持するという設計である。このような熱設計の成立性を確認するために、MONSTER および周囲に配置された EAGLE 等の熱数学モデルを構築し(図 4)、熱解析ソフトウェア(Thermal Desktop)にて、とりうる様々な衛星姿勢に対して熱解析を行った。

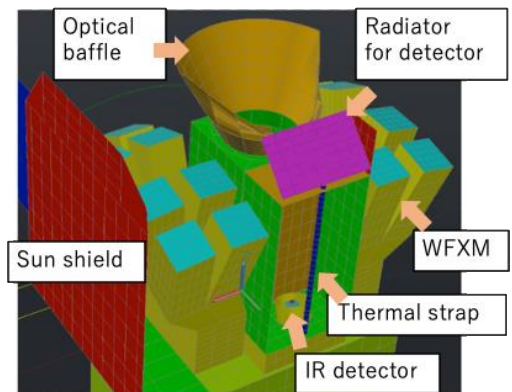


図 4 MONSTER の熱数学モデル

HiZ-GUNDAM 衛星は昼夜境界線上の太陽同期極軌道(Dawn-Dusk 軌道)を周回する。望遠鏡および検出器を冷却するための放熱板(ラジエタ)は、衛星の軌道運動の進行方向の逆側に取り付けられている。この放熱板に太陽や地球からの入熱があると温度が上昇してしまうため、それを避けるために姿勢に対する様々な制約がある。具体的には、HiZ-GUNDAM 衛星は「GRB 探査姿勢」と呼ばれる基本姿勢で固定をして GRB を探査し、ある一定期間(約 10 分間)が経過すると、次の GRB 探査姿勢に移行するというシーケンスで運用される。このような運用の中で GRB を発見すると、衛星は GRB の方向に指向して追観測を行う「追観測姿勢」をとる。この追観測姿勢は、発見した GRB の位置によってさまざまな姿勢がありえて、熱環境もさまざまである。

そこでまずは、さまざまな追観測姿勢の中で、どのタイミングで、どちらの方向に指向するのが熱的に最悪かという「熱的最悪姿勢」を熱解析によって明らかにした。次に、衛星が1周回する間に、1度だけ熱的最悪姿勢を取るという状況を考え、それでも熱的要求を満たす望遠鏡温度が実現されるかを熱解析によって確かめた。その解析結果を図5に示す。熱的最悪姿勢に入ると望遠鏡および赤外線検出器の温度は上昇するが、それでも最高温度は要求温度以下に冷却されている事を確認した。また、通常のGRB 探査姿勢から熱的最悪姿勢への姿勢変更における望遠鏡の温度勾配の変化から、望遠鏡の熱変形量を解析した結果、主副鏡間距離の変化は30 μm 程度で、上述の要求以内に収まる事を確認した。

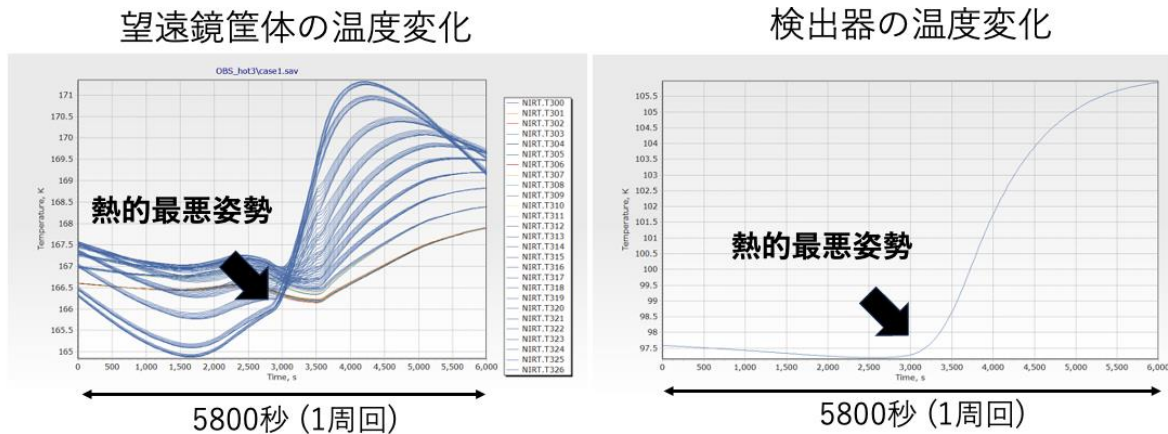


図5 熱的最悪姿勢になった時の望遠鏡(左)および赤外線検出器(右)の温度変化の解析結果

3.3 冷却光学試験の実施に向けた準備

鏡から筐体までを同一金属で構成することによるアサーマル光学設計というコンセプトを、冷却光学実験により実験的に実証するために、MONSTERの光学試験用試作機(Bread Board Model, BBM)を製造中である。BBMを製造後、まずは常温にて光学調整を行い、その結像性能を確認する。次に、光学調整後のBBMを、金沢大学が保有する光学窓付きのチャンバー内に設置して、目標温度(~160 K)にまで冷却しながら、チャンバーの外からコリメート光を入射して結像性能を評価し、光学性能が望遠鏡の冷却に応じて変化しないというアサーマル性能を実験的に実証する(図5)。

特に、本実験で重要と考えている検証項目は、望遠鏡の温度勾配が変化した場合のアサーマル性能である。望遠鏡全体を同一金属で構成することによる相似収縮で光学性能を維持するというアサーマル設計のコンセプトにおいて、望遠鏡の温度勾配が変化した場合は、熱収縮の非一様性に起因する光学性能の劣化が懸念される。特にHiZ-GUNDAM衛星の場合は、発見したGRBの位置に応じて衛星は様々な姿勢をとるため、それに伴って望遠鏡の熱環境も変化し、望遠鏡の温度勾配が変化することが想定される。そこで本実験では、チャンバー内に設置した望遠鏡BBMの複数箇所に温度計とヒーターを接着して冷却光学試験を行う。これにより、望遠鏡BBMに生じた様々な温度勾配に応じた光学性能の劣化度合いを実験的に評価するだけでなく、望遠鏡BBMに取り付けた複数のヒーターによって温度勾配の変化をキャンセルして光学性能を維持するという能動的な温度勾配制御による光学性能維持の手法を実験的に検証する。この技術を確認できれば能動的な温度勾配制御により、可動部なしで、安価かつ高い信頼性で、望遠鏡の光学性能を広い温度レンジで維持することが可能となる。

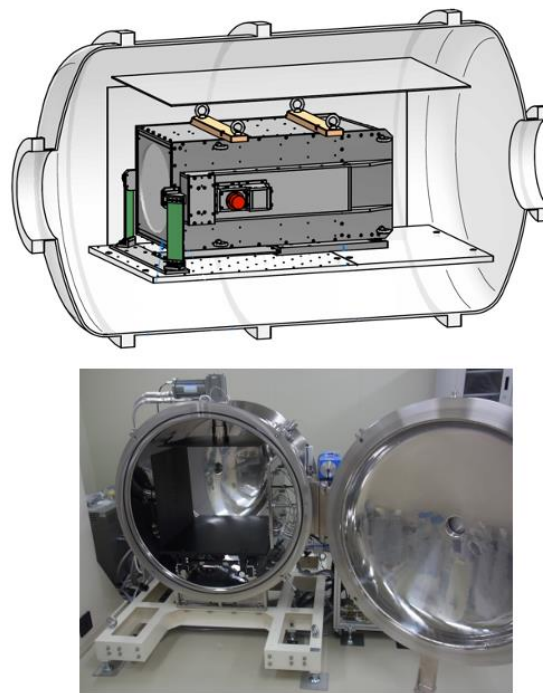


図5 BBM冷却光学試験の外観図(上)と、使用予定の試験チャンバー(下)

4. まとめ

HiZ-GUNDAM 衛星に搭載される可視光・赤外線望遠鏡 MONSTER の開発状況について紹介した。MONSTER は放射冷却により望遠鏡は 200 K 以下、赤外線検出器は 120 K 以下に冷却することが要求されるが、熱的最悪姿勢を取った場合でもこの要求温度を満たすことを熱解析により確認することができた。次はアサーマル光学系という設計コンセプトを実験的に検証するべく、BBM を用いた冷却光学試験を実施する計画である。BBM は 2026 年 6 月に完成予定で製造を進めている。

参考文献

[1] Daisuke Yonetoku, Akihiro Doi, Tatehiro Mihara, Hideo Matsuhara, Takanori Sakamoto, Kohji Tsumura, Kunihito Ioka, Makoto Arimoto, Yoshiyuki Ando, Teruaki Enoto, Kenjiro Fujimoto, Hatsune Goto, Junko Hiraga, Nobuyuki Kawai, Ryuji Kondo, Shunsuke Kurosawa, Yoshitomo Maeda, Ikuyuki Mitsuishi, Toshio Murakami, Issin Nagataka, Yujin Nakagawa, Hiroshi Nakajima, Naoki Ogino, Masataka Sato, Tomoya Sato, Tatsuya Sawano, Motoko Serino, Hsien-Chieh Shen, Satoshi Sugita, Mutsumi Sugizaki, Shuta Takahashi, Toru Tamagawa, Keisuke Tamura, Takaaki Tanaka, Toru Tanimori, Makoto S. Tashiro, Hiroshi Tomida, Hiroyuki Uchida, Shutaro Ueda, Kazutaka Yamaoka, Makoto Yamauchi, Yoichi Yatsu, Atsumasa Yoshida, Hiroshi Akitaya, Akihiko Fukui, Haruki Fukui, Ryo Hashimoto, Tomoya Hori, Yoshifusa Ita, Rinon Kageyama, Koji Kawabata, Shuji Matsuura, Akihiro Miyasaka, Kentaro Motohara, Norio Narita, Hirofumi Noda, Hirofumi Okita, Kei Sano, Keisuke Shinozaki, Sou Tajima, Yuji Urata, Takehiko Wada, Hayato Yamashita, Kenshi Yanagisawa, Michitoshi Yoshida, Shuichi Gunji, Takumi Togashi, Ryuji Sato, Keito Watanabe, Haruaki Niinuma, Nobutaka Bando, Ichiro Jikuya, Kenji Minesugi, Yasuyuki Miyazaki, Yusuke Kono, Naoki Takase, Shinichi Nakatsubo, Tooru Kaga, Katsuaki Asano, Kohei Inayoshi, Susumu Inoue, Hirotaka Ito, Hideyuki Izumiura, Norita Kawanaka, Tomoya Kinugawa, Shota Kisaka, Kenta Kiuchi, Koutarou Kyutoku, Jin Matsumoto, Akira Mizuta, Kohta Murase, Hiroki Nagakura, Shigehiro Nagataki, Yoshikazu Nakada, Takashi Nakamura, Yuu Niino, Yudai Suwa, Keitaro Takahashi, Takahiro Tanaka, Kenji Toma, Tomonori Totani, Ryo Yamazaki, Jun'ichi Yokoyama, Yuichi Harikane, Masaomi Tanaka, Shigeo S. Kimura, Mariko Kimura, Hiroya Umeda

Concept of high-z gamma-ray bursts unraveling the dark ages and extreme space-time mission—HiZ-GUNDAM

Journal of Astronomical Telescopes, Instruments, and Systems 11(04), 044002, 2025

DOI: 10.1117/1.jatis.11.4.044002

[2] Kohji Tsumura, Hideo Matsuhara, Koji S. Kawabata, Hiroshi Akitaya, Shuji Matsuura, Haruki Fukui, Rinon Kageyama, Akito Masuko, Akihiro Miyasaka, Keisuke Shinozaki, Takehiko Wada, Hirofumi Noda, Yoshifusa Ita, Tomoyasu Yamamuro, Hiroshi Tomida, Akihiro Doi, Daisuke Yonetoku

Concept of the MONSTER onboard the HiZ-GUNDAM satellite

Journal of Astronomical Telescopes, Instruments, and Systems 11(03), 034002, 2025

DOI: 10.1117/1.jatis.11.3.034002