

HiZ-GUNDAM/MONSTER 搭載のケスタープリズムの開発と性能評価

堀友哉, 川端弘治, (広島大学), 津村耕司 (東京都市大学), 米徳大輔 (金沢大学), 松浦周二(関西学院大学), 松原英雄, 土居明広 (ISAS/JAXA), 秋田谷洋 (千葉工業大学), ほか HiZ-GUNDAM チーム

概要 (Abstract)

HiZ-GUNDAM/MONSTER では近赤外の観測波長 $0.9\text{-}2.5\mu\text{m}$ を 4 バンドに分割し、1 つの近赤外検出器で同時に撮像観測をするためにケスタープリズムを導入する。我々はダブルケスタープリズムを試作し、その性能評価を進めている。これまでに評価した項目は、プリズムの接着に用いる接着剤で接着した石英板サンプルの真空・冷却、放射線耐性と分光透過率特性に加え、試作したプリズムの真空・冷却耐性と各バンドの透過率である。本講演では、ケスタープリズムの開発状況と性能評価試験の結果について報告する。

1. イントロダクション

The **High-z Gamma-ray Bursts for Unraveling the Dark Ages Mission (HiZ-GUNDAM)** はキーサイエンスの一つとして、遠方で発生した高赤方偏移のガンマ線バースト (GRB) を観測することで初期宇宙の探査をすることを掲げている。初期宇宙の探査としては、近年打ち上げられた JWST が遠方銀河を観測することでアプローチをしているが、銀河はそのスペクトルが複雑であるため、我々はより SED が単純な GRB を観測対象としている。

また、X 線・可視光・近赤外線での観測をするという点で、重力波やニュートリノで観測された天体の電磁波カウンターパートをフォローアップ観測することでマルチメッセンジャー天文学に貢献することを目指している。

HiZ-GUNDAM 衛星の観測戦略として、まず広視野 X 線モニター: **Exploration of Ancient GRBs with Lobster Eye (EAGLE)** で GRB を含む突発天体を検出し、地上にファーストアラート送信すると同時に 300 秒以内に自律制御により姿勢を変更する。次に、中央に位置する可視近赤外望遠鏡: **Multiband Optical and Near-infrared Simultaneous Telescope for Efficient Response (MONSTER)** にて衛星自身で追観測を行う。そして、検出後 1 時間以内に位置や明るさの他に測光赤方偏移 phot-z を含んだセカンドアラートを地上へ送信することを目標としている。これによって地上の大型望遠鏡は即座に追観測を実施することができ、GRB 残光がまだ明るいうちにスペクトルを得ることができると考えられる。

2. 可視近赤外線望遠鏡 MONSTER

MONSTER は EAGLE で検出した GRB を含む突発天体を追観測し、検出後 1 時間以内に phot-z を含むアラートを地上へ送信することが要求されている。効率良く phot-z を決定するため、 $0.5\text{-}2.5\mu\text{m}$ の波長域を 5 バンドに分割して同時に観測する。また衛星全体の省コスト・省スペースのために、可視光検出器 1 個で 1 バンド分、近赤外検出器 1 個で 4 バンド分の情報をカバーするような構造で設計が予定されている。近赤外線での高い感度での観測を行う都合上、望遠鏡本体を 200K 以下、近赤外検出

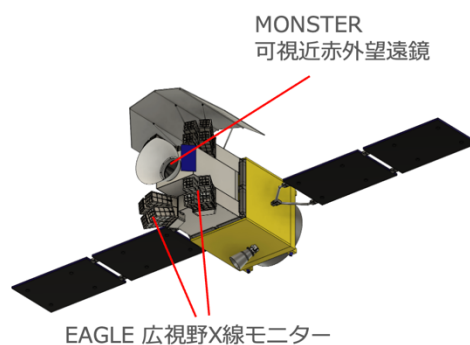


図 1. HiZ-GUNDAM 衛星

器を 120K 以下の温度に保つ必要があり、大きな温度変化に対して相似収縮により光学性能の劣化を低減するためにアサーマル設計を採用する。MONSTER の光学系では、口径 30cm の主鏡とそれに続く副鏡で集光し、ダイクロイックミラーを用いて可視光チャンネル (ch1:0.5-0.9 μm) と近赤外チャンネルに光を分割する。さらに近赤外チャンネルに向かう光はケスタープリズムを用いて 4 つの波長域 (ch2:0.9-1.3 μm , ch3:1.3-1.7 μm , ch4:1.7-2.1 μm , ch5:2.1-2.5 μm) に分割されて 1 つの検出器面上に結像される構造となっている。

口径	30cm				
視野	15分角×15分角				
ピクセルスケール	2秒角×2秒角				
積分時間	10分 (2分×5フレーム)				
観測波長域 (μm)	0.5-0.9	0.9-1.3	1.3-1.7	1.7-2.1	2.1-2.5
限界等級 (ABmag)	21.3	20.9	20.6	20.5	20.4

表 1. MONSTER の仕様

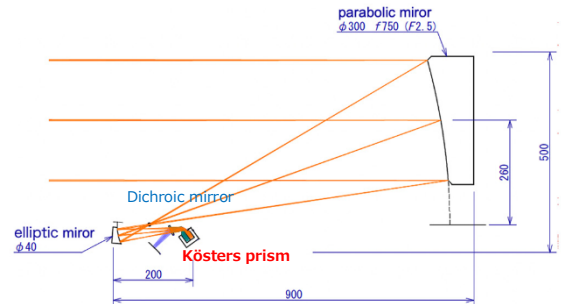


図 2. MONSTER の光学系

3. ケスタープリズム

ケスタープリズムは多層コートを施し光軸が同一方向になるように光を複数の波長域に分割して出射するビームスプリッターの一種であり、我々はそれを斜めに 2 つ組み合わせて 4 波長に分割し 2 行 2 列の形で出射するダブルケスタープリズム (以下単にプリズムまたはケスタープリズムと記載) を採用予定である。同一方向に分割した光を出射するという点から検出器の要求数を抑え、省スペース・省コストの実現が可能という小型衛星にとって大きな利点となる特徴を持っている。しかし、天文分野での利用実績は少なく、特に宇宙環境での運用実績は我々が知る限り無い。ケスタープリズムの一部の面間では全反射のための空隙を設ける必要があり、打ち上げ時の振動や衝撃に加え、低温環境や宇宙線への耐性に関する性能評価を行う必要がある。ケスタープリズムの保持機構に関してはケスタープリズム実用化に向けた先行研究である Rothhardt et al. 2022 で選択されているものと同型のもので設計を行っている。

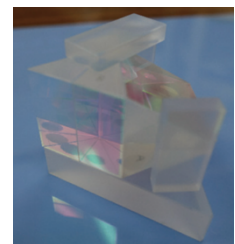


図 3-1. ケスタープリズム BBM

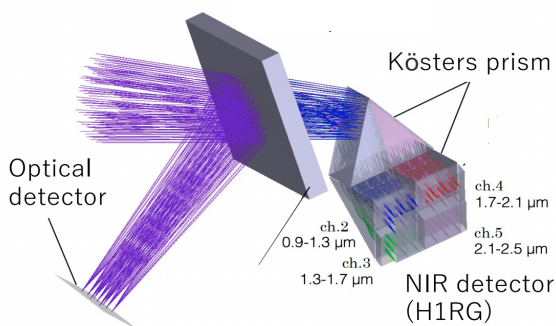


図 3-2. 各 ch の分割の様子

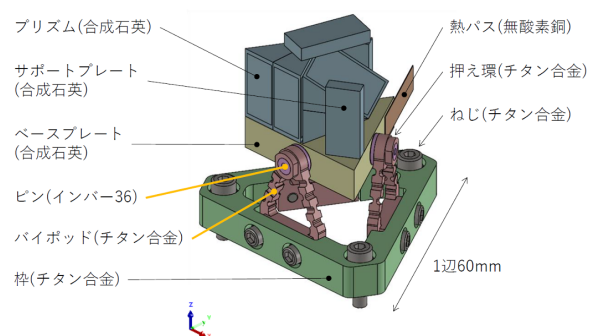


図 3-3. ケスタープリズム保持機構

4. 性能評価試験(接着)

今回設計した保持機構では、接着剤を用いて接着を行う箇所がある。具体的には A:プリズムとサポートプレート、ベースプレートを接着する箇所と B:ベースプレートとインバーピンを接着する箇所であ

る。この接着点に関してまずは接着剤の選定を行った。選定のための試験の事前準備として、2枚の石英板を後述する3種類の接着剤を用いて接着し、放射線を照射したり、低温環境下に置いたりした後透過率の測定を実施した。調査する接着剤は Rothhardt et al. 2022 にて使用されている Scotch-Weld EC-2216 B/A と Masterbond EP21TCHT-1 である。両者共に2液混合型エポキシ接着剤であり、前者は接着後の状態がほぼ透明に近く、後者は不透明で白濁としている。これら2種にひので衛星などの運用実績があり、透明かつUV硬化型接着剤である Norland NOA61 を加えた3種で試験を行った。試験の目的としては光が通る可能性のある箇所Aに透明である EC-2216 と NOA61 のどちらが適するかを光学的に不具合が生じないかも加味して調査し、B 箇所に EP21TCHT が適するかどうかを確認することである。接着剤の光学透過性に関して行った試験は 1. 上空 3, 7, 12 年分に相当する ^{60}Co の照射による放射線耐性試験、2. 真空デューワーを用いて 120K まで冷却し常温まで昇温するというサイクルを 1 サイクル分と 5 サイクル分施す冷却・真空耐性試験、3. 若狭湾エネルギー研究センターでの上空 10 年分に相当する陽子照射による放射線耐性試験である。これらの試験を施した後、国立天文台・先端技術センターのオプトショップにある UV-3600i Plus 分光光度計を用いて観測波長域における透過率の測定を行った。測定結果は 1, 2, 3 のどの試験を実施したサンプルについて、透過率に変化はほとんど見られず、また透過率を測定した後に各サンプルに対して 80G 相当の剪断荷重を加えたがこちらも破損するといった不具合は見られず、放射線耐性、冷却・真空耐性に関して良好な耐性を持つという結果が得られた。これらの結果からプリズムとの接着である A 箇所の接着には最も光学透過性の良い Norland NOA61 を使用することに決定した。

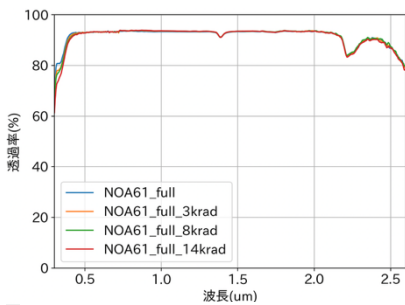


図 4-1. 放射線耐性試験(^{60}Co)

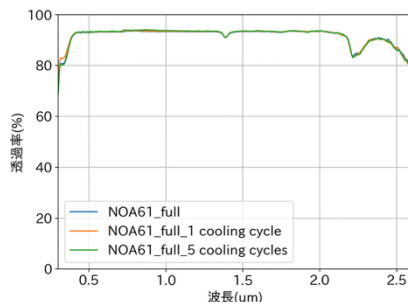


図 4-2. 冷却・真空耐性試験

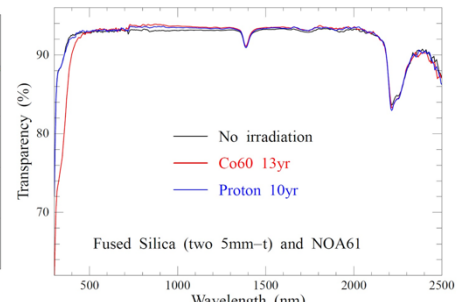


図 4-3. 放射線耐性試験(陽子)

次にピンとの接着である B 箇所について接着剤の種類と厚みを変えてピン上での応力を調査した。NOA61 と EC-2216 の引張強度はともに 24MPa であり、EP21TCHT の引張強度は 55MPa である。この数値と 100K におけるシミュレーション結果から、NOA61 と EC-2216 の場合は接着部からの距離に寄らず内部応力値が強度限界を超えること、EP21TCHT の場合でも接着層の厚みが $50\mu\text{m}$ 以下になると接着部における応力値が急激に大きくなることが判明した。これらの結果からピンとの接着である B 箇所には EP21TCHT をビーズを用いて $50\mu\text{m}$ の厚みで使用することに決定した。また、ビーズを使用したことで強度が下がる懸念があったため、実際に作成した BBM に対して静荷重試験を施した。ケスタープリズム、ベースプレート、サポートプレートからなる BBM の質量は 46.9g であり、その 100G 相当の荷重にピン 1 つで耐えられるかを確認した。試験内容はピン部分に細く硬いものを押し当てて荷重を加えた後、120K までの冷却を 1 サイクル施して常温にて同様の荷重を加えた。結果はどのピンにも接着効果に不具合は生じなかった。

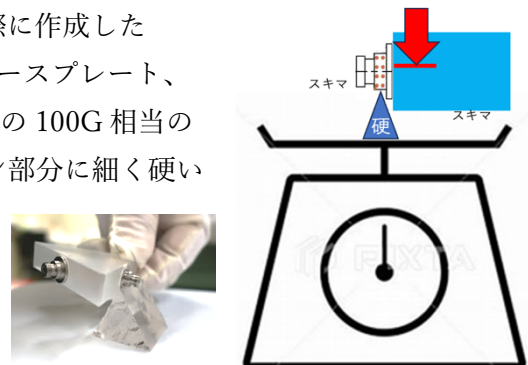


図 4-4. ピン荷重試験

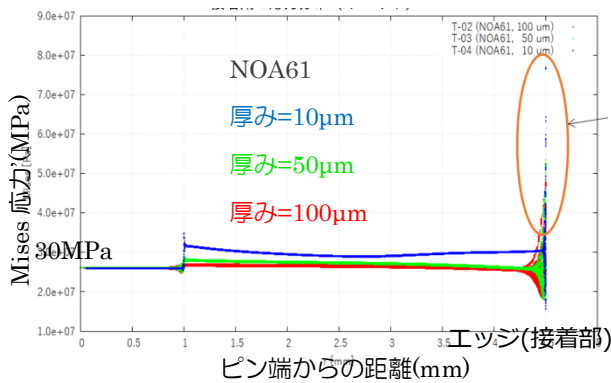


図 4-5. 接着剤の厚みによる Mises 応力分布

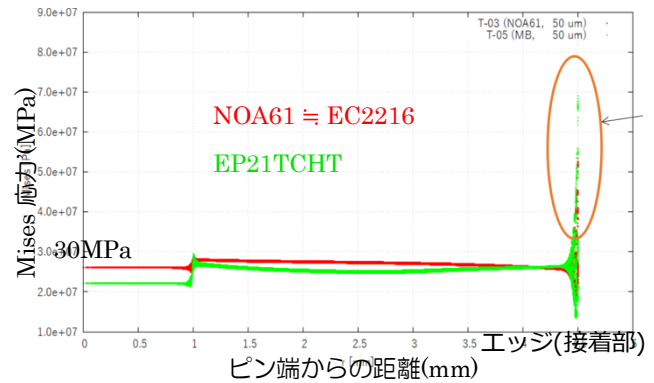


図 4-6. 接着剤の種類による Mises 応力分布

5. 性能評価試験(透過率)

ケスタープリズム自体の簡易的な透過率測定を行った。まずは我々の手元にある $0.8\text{-}1.7\mu\text{m}$ に感度を持つ InGaAs アレイを用いて測定を実施した。この波長域はちょうど ch2 と ch3 に該当する。測定のセットアップは、タングステンランプからの光をモノクロメータを使って光の波長を $10\mu\text{m}$ 刻みで変えながら単色光とし、ファイバーコリメータにてプリズム BBM に照射して出射された光を InGaAs アレイで検出した。光量測定は検出した光を全て測定するように領域を取り、背景レベルは画面縁の光量測定した場所から遠い領域を切り出して測定を行った。ch2 と ch3 の簡易透過率測定の結果はともに観測波長域に置いて概ね 90% 程度の透過率を持つことが判明し、同時に ch2 と ch3 の切り替わり部分も確認することができた。次に $1.3\text{-}2.15\mu\text{m}$ に感度を持つ他の近赤外カメラを用いて対応する波長域である ch3 と ch4 の透過率を同様に測定した。光量測定の際、受光面の大きさと距離が前回の測定に使用したものと異なるため、ch3 の透過率で比較・スケールングを行って ch4 の透過率を導出した。結果は ch4 も同様に観測波長域で 90% の透過率を持つことを確認した。



図 5-1. 簡易測定の設定アップ

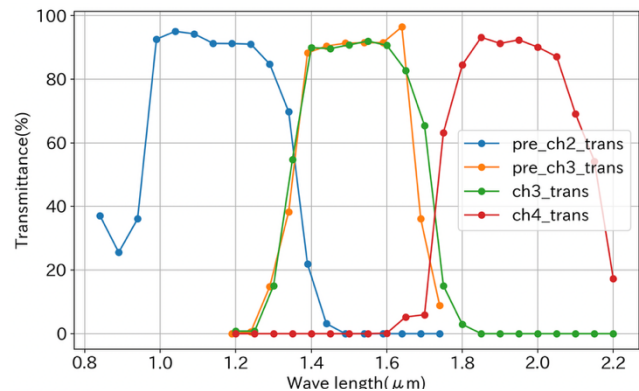


図 5-2. 各 ch の簡易透過率測定の結果

6. まとめ

HiZ-GUNDAM 衛星の MONSTER に搭載予定のケスタープリズムの開発・性能評価を行っている。ケスタープリズムは光軸が同一方向になるように光を 2 波長に分割して出射するビームスプリッターの一種であり、検出器の要求数を抑え、省スペース・省コストが実現可能である。しかし、ケスタープリズムの宇宙空間における運用実績は今の所存在しないので、各種性能評価の実施が必要である。我々がやっている性能評価試験について、プリズム周りの接着剤の選定ではプリズムとベースプレート、サポートを接着する箇所では Norland NOA61 を使用し、ベースプレートとピンを接着する箇所に

は Masterbond EP21TCHT-1 を用いることに決定した。一方で、ケスタープリズム自体の簡易透過率測定を行った結果として、ch2, ch3, ch4 の観測波長域において概ね 90%程度の透過率を持つことを確認した。今後は ch5 まで透過率測定を行うことや BBM に対して打ち上げ時の振動に耐えられるかどうかの試験を実施したいと考えている。

謝辞

^{60}Co の照射試験では広島大学大学院先進理工系科学研究科量子エネルギー工学研究室の遠藤暁氏、および高エネルギー宇宙・可視赤外線天文学研究室の須田祐介氏、高橋弘充氏、水野恒史氏にご協力頂きました。

分光透過率測定では、国立天文台・先端技術センターのオプトショップの機器を利用させて頂きました。

参考文献

- D. Yonetoku et al., “Concept of high-z gamma-ray bursts unraveling the dark ages and extreme space-time mission HiZ-GUNDAM” JATIS Vol.11, Issue4, 044002 (2025)
- K. Tsumura et al., “Concept of the MONSTER onboard the HiZ-GUNDAM satellite” JATIS Vol.11, Issue3, 034002 (2025)
- K. S. Kawabata et al., “Design and fabrication of the double Kösters prism for nir telescope of on HiZ-GUNDAM satellite” Proc. SPIE 13092, 130926Z (2024).
- C. Rothhardt et al., “Technical layout and fabrication of a compact all-glass four-channel beam splitter based on a Kösters design” CEAS Space Journal 14:287-301 (2022)