

HiZ-GUNDAM ワーキンググループ申請書

High-z Gamma-ray bursts for Unraveling the Dark Ages Mission (HiZ-GUNDAM)

■ ワーキンググループ代表：米徳大輔（金沢大学）

■ X線・ガンマ線検出器

河合誠之（東工大）、黒澤俊介（東北大）、郡司修一（山形大）、芹野素子（理研）、谷森達（京都大）、三原建弘（理研）、村上敏夫（金沢大）、谷津陽一（東工大）、山岡和貴（青山学院大）、吉田篤正（青山学院大）

■ 赤外線望遠鏡

沖田博文（東北大）、川端弘治（広島大）、白旗麻衣（ISAS/JAXA）、津村耕司（ISAS/JAXA）、松浦周二（ISAS/JAXA）、柳澤顕史（国立天文台）、和田武彦（ISAS/JAXA）

■ 理論検討

浅野勝晃（東工大）、井岡邦仁（高エネ研）、井上進（宇宙線研）、川中宣太（高エネ研）、諏訪雄大（京都大）、高橋慶太郎（熊本大）、筒井亮（東京大）、当真賢二（大阪大）、戸谷友則（京都大）、長倉洋樹（京都大／早稲田大）、長滝重博（京都大）、中村卓史（京都大）、水田晃（高エネ研）、山崎了（青山学院大）、横山順一（東京大）

■ 衛星システム検討

坂井真一郎（ISAS/JAXA）

1. ミッションの目的

ガンマ線バースト(GRB)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る。図1(左)に示すように数秒から数十秒の短時間だけガンマ線で輝き、その後、時間とともに暗くなる残光を伴う現象である(図1右)。短時間ではあるが極めて明るく輝くことと、その多くが赤方偏移 $z>1$ で発生していることから、初期宇宙を探るプローブとして利用されてきている。これまでに分光観測された最高赤方偏移は GRB090423 の $z=8.2$ で、今後もより遠方の GRB が観測されると期待できる。

本ミッションの目的は、GRB をプローブとして高赤方偏移観測のフロンティアを開拓することである。GRB 検出直後の明るい残光を利用して、大型望遠鏡計画と協力しながら $z>7$ の宇宙における宇宙再電離、重元素合成、星生成歴などの現代宇宙論における最重要問題の解明に挑戦する。

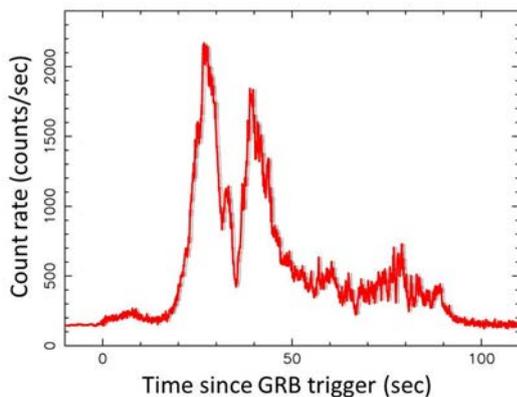
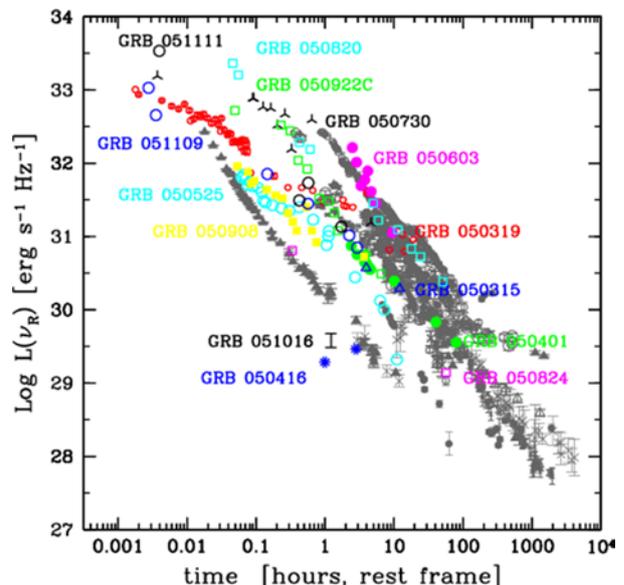


図1. (左図) GRB の光度曲線の例。数 100keV 程度の大量のガンマ線が、激しい時間変動を伴いながら飛来する。

(右図) 可視光残光の光度曲線の例。平均的には t^{-1} に比例して減光する。



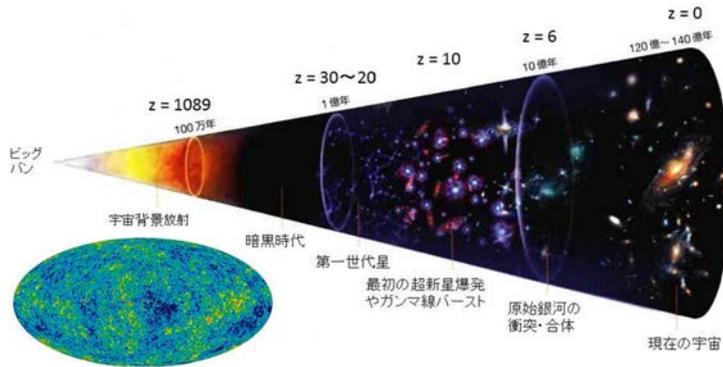


図 2. ビッグバン以降の宇宙進化を模式的に表した図(Larson & Bromm 2001)。宇宙で最初の星(第一世代星: Pop-III 星)は、宇宙誕生から約 2 億年頃($z \sim 20$)に誕生したと考えられる。

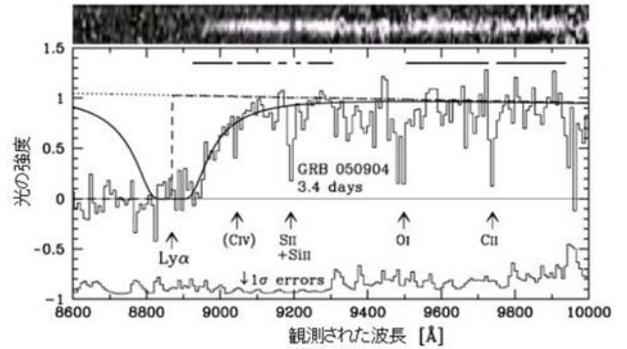


図 3. すばる望遠鏡で得られた GRB050904 ($z=6.3$)の分光スペクトル。ライマン α 線の形状から、宇宙の電離度が高い事を測定した(Kawai et al. 2005)。

2. ミッションの概要

宇宙マイクロ波背景放射の精密観測から宇宙年齢は 137 億年であると解明され、ビッグバン宇宙論と大型計算機を用いた第一原理シミュレーションによれば、宇宙で最初の星(第一世代星: Pop-III 星)は宇宙の晴れ上がり(中性化)から約 2 億年後($z \sim 20$)に誕生したと考えられている(図 2)。Pop-III 星からの強烈な紫外線放射は中性化した宇宙を再電離し、 $z=7$ の頃までには、現在のようにほぼ完全に電離した宇宙が形成したものと考えられる。星の核融合反応で生成された重元素は、超新星爆発や GRB などでばら撒かれ、水素とヘリウムばかりだった宇宙に新たな要素を付け加えた。このように、赤方偏移が $7 < z < 20$ の 6 億年という僅かな時間で宇宙は劇的に変化し、宇宙の運命を決定づけたといっても過言ではない。その頃の物理状態を探索することは、現代宇宙論にとって最も重要な研究対象となっている。

前述のように、既に人類は $z=8.2$ (131 億光年先)で発生した GRB090423 を観測している(Tanvir et al. 2009, Salvaterra et al. 2009)。しかしながら、このイベントについては光学分光による赤方偏移の同定はできたものの、宇宙の物理状態については何一つ情報を得られていない。一方で、図 3 に示すように、すばる望遠鏡で観測した GRB050904 ($z=6.3$)の可視残光スペクトルからは、大きく赤方偏移を受けたライマン α 吸収の Dumping Wing 形状を測定し、宇宙がほぼ電離していたことを明らかにした。また、スペクトル中の吸収線から炭素や酸素などの重元素組成を測定することができている(Kawai et al. 2005, Totani et al. 2005)。したがって、赤方偏移 $z > 7$ の GRB を用いて、このような良質のデータを取得することが次の課題と言えよう。赤方偏移 $z > 7$ を探求するには、最も重要なライマン系列端(912 Å)やライマン α 線(1216 Å)を近赤外線で見守る必要がある。

ここで我々は、強く赤方偏移を受けた GRB を検出するために 10keV 以下に感度を有する X 線・ガンマ線イメージング検出器と、可視光・近赤外線望遠鏡を同時に搭載した衛星 HiZ-GUNDAM (High-z Gamma-ray bursts for Unraveling the Dark Ages Mission)を提案する。本ミッションは GRB を検出した直後から可視光・近赤外線で見守りを行い、高赤方偏移 GRB をいち早く特定することを目標とする。続けて、残光が明るいうちに大型望遠鏡を用いて詳細な分光観測を実施し、 $z > 7$ の GRB に対する高分散可視光・近赤外線スペクトルを取得する。これにより、宇宙再電離や重元素合成の歴史といった、現在の宇宙論における最重要トピックの解明を目指す。GRB は大質量星の終焉(重力崩壊型超新星爆発)で発生し、恒星質量ブラックホールを形成するため、星形成歴やブラックホールの誕生・進化、超新星爆発のメカ

ニズム、活動銀河核のブラックホール進化などの天文学的課題も探求できると期待している。

もう一つ、GRB を用いた宇宙論研究にも大きな可能性が秘められている。GRB のガンマ線 νF_ν スペクトルに見られるピークエネルギー (Epeak) は、GRB の特性を示す重要なパラメータであると考えられている。この Epeak と光度や全放射エネルギーとの間に強い相関関係が存在することが知られている (Yonetoku et al. 2004, Amati et al. 2002)。また、近年、相関関係のバラつきを補正するパラメータの候補が発見されている (Tsutui et al. 2009)。これらの相関関係を用いることで、Ia 型超新星やその他の天体現象では探ることが極めて難しい $z > 2$ の初期宇宙において、GRB 独自でハッブル図を描くことができ (図 4 左)、かつ宇宙論パラメータ (Ω_m や Ω_Λ) の測定を行えることである (図 4 右)。図 4 右には本ミッションで得られる制限の予想についても重ねて示してある。青の等高線は、現在の 557 個の Ia 型超新星の観測から得られる制限、紫色は現段階で精度よく Epeak が測定された GRB を用いた場合の制限である。本ミッションで、100 例の GRB について赤方偏移を同定し、それらの Epeak を 5% の精度で決定できれば、赤の等高線で示すように非常に高い精度で宇宙論パラメータを測定できるようになる。これにより WFIRST のようなミッションと共同で、「暗黒エネルギー」を意味する Ω_Λ の時間変化を探れるようになるだろう。暗黒エネルギーの起源や素性は全くの謎であり、その解明は 21 世紀物理学において最重要課題である。GRB を用いた天文学から、その難題に挑戦したい。そのためには MeV 帯域まで感度のあるスペクトロメータを搭載して Epeak を詳細に測定することが重要で、GRB の特性を総合的に理解すると同時に、GRB 独自の宇宙論を展開したいと考えている。

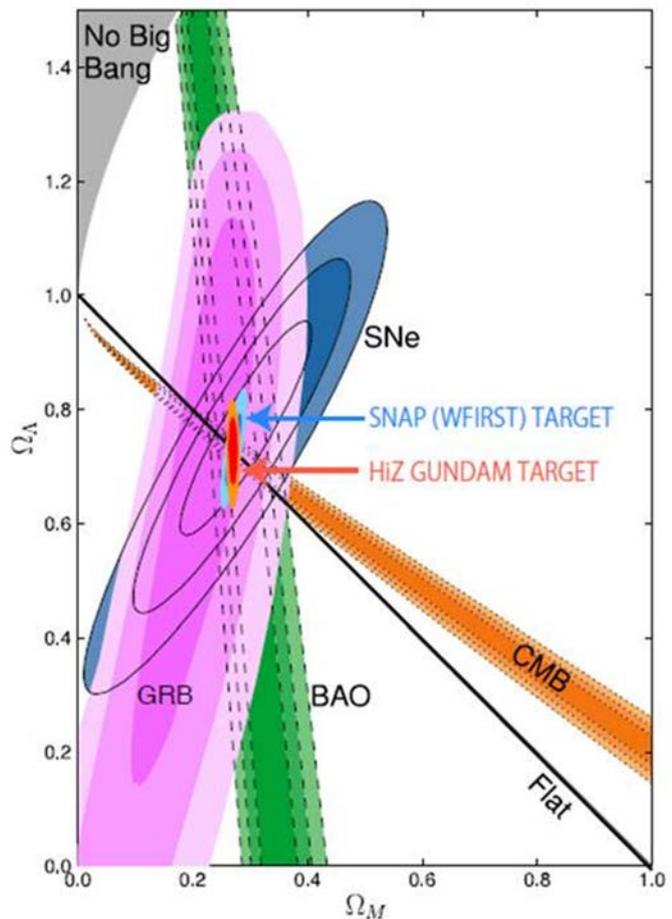
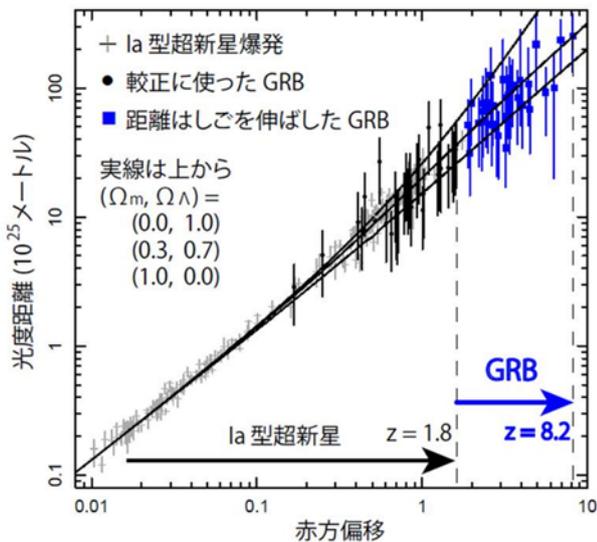


図 4. (左) GRB の距離指標 (Epeak - 光度関係やファンダメンタルプレーン) を用いて描いた、赤方偏移 $z=8.2$ までのハッブル図。Ia 型超新星では探れていない領域を GRB では探査できているため、独立な観測・実験として重要である。

(右) Λ -CDM モデルを仮定した際の宇宙論パラメータの測定。青：Ia 型超新星の観測からの制限、紫色：現在の GRB 観測からの制限、赤：100 例の GRB について Epeak を 5% で測定した場合の制限。同時期に活躍する予定の WFIRST 衛星と協力することで、宇宙論パラメータの時間発展を調べることができるだろう。

GRB 固有の研究として、赤方偏移 $z < 1$ の X 線フラッシュ(X-Ray Flash : XRF) や継続時間の短い short GRB の研究を発展させたいと考えている。XRF は GRB と類似した振る舞いを示すが、10keV 以下の X 線領域で主に輝き、通常の GRB のような 100keV 帯域の放射はほとんど見られない天体現象である。GRB と同様に大質量星の崩壊に伴って発生すると考えられており、関連性が極めて深い現象である。GINGA 衛星で発見され、HETE-2 衛星で多くの研究がなされたが、Swift 衛星は 15keV 以下に感度が無かったため全くと言って良いほど研究が進まなかった。XRF のローカルな発生率は、GRB よりも 10 倍程度多いと見積もられているため、XRF・GRB の包括的な研究は極めて重要な位置づけとなっている。また、Swift 衛星では short GRB の検出例が想定していたよりも少なかったため、より多くの例を観測することが望まれている。理論的に考えられている「コンパクト星同士の合体(中性子星連星など)」が起源であるならば、確実に重力波を放出するので、LCGT や LIGO のような重力波実験との同期観測が大変面白い位置づけとなる。近傍の GRB, XRF, short GRB を観測することは、現象そのものを理解するのに不可欠であり、理論研究へも大きく貢献できるだろう。

ミッションの目標 (ミッション期間を 3 年と想定)

以上、これまでに記述したミッションの目標をまとめておく。

- ・赤方偏移 $z > 7$ の GRB を 10 例程度検出し、大型望遠鏡と協力して詳細な分光スペクトルを取得する。
- ・宇宙再電離、重元素合成、星形成率 (GRB 発生率) について、GRB 観測から新たな知見を得る。
- ・ $z < 1$ で発生する XRF の検出例を増やし、その起源について研究する。
- ・short GRB の検出例を増やし、その起源を研究するとともに、重力波との同期を探索する。
- ・3 桁に渡る広帯域スペクトル測定で GRB の放射特性を研究する。
- ・スペクトルの Epeak を約 5% の精度で測定し、GRB 宇宙論の精度を高め、新たな手法を開拓する。
- ・初期宇宙における宇宙論パラメータの測定を通じて、暗黒エネルギーの起源を探索する。
- ・TeV ガンマ線、重力波、ニュートリノ観測などと連携し、マルチメッセンジャー天文学の一躍を担う。
- ・近赤外線望遠鏡による高赤方偏移クェーサーのサーベイ、系外惑星のトランジット観測、変動天体のモニター観測、宇宙背景放射の揺らぎなど、独自の観測を推進する。

通常の GRB の検出レートは Swift-BAT と同等の約 100 イベント/年を見込んでいる。これに加えて、強い赤方偏移の効果を受けて 10keV 以下で輝く高赤方偏移 GRB、近傍の XRF や超新星爆発の shock breakout 等を検出できると考えている。したがって、GRB のような突発天体に対する稼働率は年間 1/3 程度であり、それ以外の 2/3 の時間については近赤外線望遠鏡を用いたサーベイ・モニター観測や広視野 X 線モニター観測を実施し、可能な限り多くの科学成果を得られるような運用を行う。

Pop-III 星が発生させる GRB については様々な理論研究が行われており、(1) 10keV 程度の低エネルギーで主に輝き、(2) 継続時間が極めて長く、(3) ピーク光度は低いが、(4) 平均光度は通常の GRB 程度、となるようなイベントと予想されている(Suwa & Ioka 2011)。そのような GRB も観測対象となるように観測装置を設計しているが、発生率が極めて低い可能性もあり、検出は困難かもしれない。本ミッションの枠組みでは、Pop-III GRB の検出をエクストラサクセスと位置づけ、将来の GRB ミッションへの足掛かりとなるようにしたい。

ミッション構成および開発状況

3種類のミッション機器の搭載を検討している。

① X線・ガンマ線イメージング検出器

- ・テルル化カドミウム(CdTe)撮像検出器とコーデッドマスクを用いた GRB 到来方向観測装置
- ・4~100keV 帯域で有効面積 1000cm²を有する、高赤方偏移 GRB に照準を合わせたトリガー機能

② MeV ガンマ線検出器 (以下の2種類のうちいずれか)

- ・電子追跡型コンプトンカメラによるイメージングトリガー機能
- ・シンチレータ+光電子増倍管による連続スペクトルの取得 (高い精度で Epeak を測定する)

③ 可視光・近赤外線 45cm 望遠鏡

- ・可視光(500~800nm)と近赤外線(0.8~1.7 μ m)で同時に観測するカメラシステム
- ・明るい初期残光を利用して迅速に赤方偏移を決定するためにバンド測光または低分散分光

以下に、それぞれの機器の設計思想およびデザインについて説明する。

① X線・ガンマ線イメージング検出器

GRB の到来方向を決定する検出器を設計するにあたり、Swift-BAT の観測成果を十分に踏まえることが重要である。Swift-BAT で検出されたイベントのうち、赤方偏移が同定されているイベントについての継続時間(T90)とピーク光子フラックス(Fp)の分布を図5に示す(see also Sakamoto et al. 2011)。高赤方偏移イベントは Time Dilation の効果を受けて T90 が長くなるはずだが、最も遠い2例はかなり短時間のイベントであった。また Fp の分布図に示すように、z=1 で最も明るい GRB が z=8 で発生した場合でも、Swift-BAT のレートトリガー (カウントレートの増加によるトリガー) の実効的な感度限界と同等となるため検出は難しくなる。この2つの事実から、Swift-BAT が検出した高赤方偏移イベントは極めて明るいイベントで、且つ、バーストの時間変動の中で最も明るい部分のみを観測したものと考えられる。

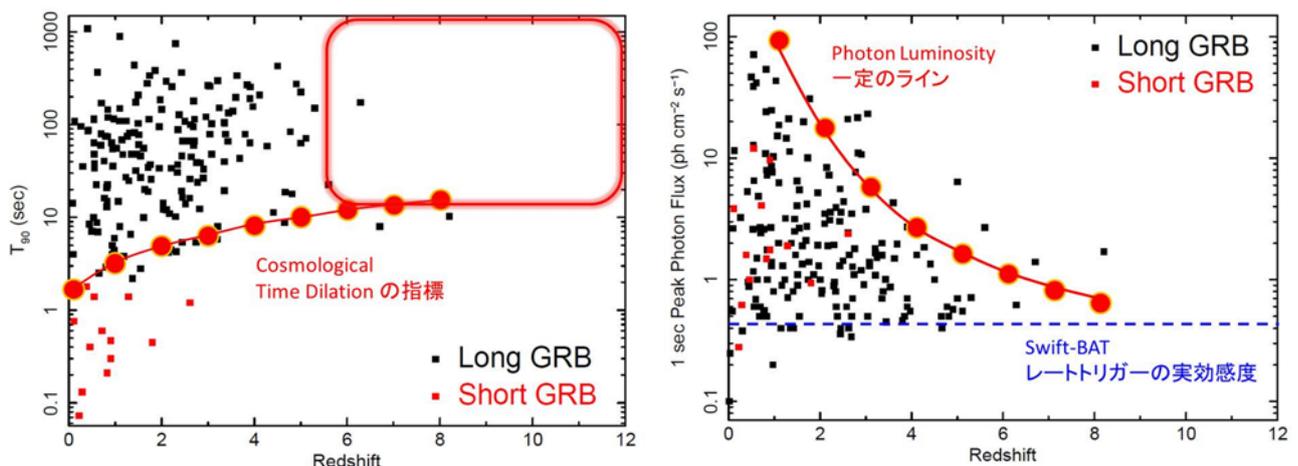


図5. Swift-BAT が検出した GRB のうち、赤方偏移が測定されたイベントの性質。(左) 観測された T90 分布。高赤方偏移イベントの T90 は短いため、バースト中の最も明るい時間帯のみしか検出できていない可能性が高い。検出器のレートトリガー機能の感度以下で長時間輝くイベントを検出できていないと考えられる。(右) ピークフラックスの分布。赤方偏移 z=1 に存在する最も明るいイベントが z=8 で発生すると想定した場合でも、検出感度と同レベルになるため、レートトリガーのみで検出するのは難しいだろう。10keV 以下の低エネルギーでイメージングトリガー機能を充実させる必要がある。

高い頻度で高赤方偏移 GRB を検出するには、

- (1) Swift-BAT のエネルギーレスショルド(15keV)よりも低いエネルギーで観測すること、
 - (2) カウントレートの増加でトリガーするだけでなく、イメージングトリガー機能を充実させること、
- の2点が重要と考えられる。Swift-BAT もイメージングトリガー機能を有しており、レートトリガーよりも1桁程度暗い GRB を検出できている。それを 10keV 以下のエネルギー帯で行うことと、1000 秒程度に渡る長時間積分にも対応することが、これまでは観測が難しかった高赤方偏移 GRB を検出するポイントとなるだろう。以下に、具体的な検出器構成と、想定している感度等について記す。

CdTe 撮像検出器とコーデッドマスク

X 線・ガンマ線イメージング検出器には、原子番号の高いテルル化カドミウム(CdTe)半導体検出器を用いる。シリコンセンサーに比べ、高いエネルギーのガンマ線でも光電効果の効率が高いため、数 10 キロ電子ボルト帯でのイメージングセンサーとして有用である。現在、金沢大学を中心として CdTe 撮像検出器とコーデッドマスクを組み合わせた GRB 検出器を開発している。図 6 (左) に示すように、36mm×36mm×1mm の CdTe ウェハの表裏に 0.5mm×64 本の電極ストリップを、それぞれ x 軸と y 軸に直行に配列することで、2次元撮像検出器を構成している。外周 1mm にガードリングを設けることでセンサー端面に起因する暗電流を信号と分離し、エネルギー閾値を下げるようにしている。両面ストリップにすることで、表裏で 128 チャネルの読み出しであっても、実効的には 4096 画素の 2次元イメージセンサーとして機能する。

コーデッドマスクは厚さ 0.5mm のタングステン素材を使用する予定である。図 6 (中央、右) に示すように、CdTe センサーの読み出しピッチと同様の 0.5mm ピッチで符号化するマスクを製作している。現在は開口率 0.5 のランダムマスクを開発しているが、その他のパターンも検討し、GRB の検出感度に対する最適化を図りたい。

有効面積は HETE-2/WXM よりも1桁程度大きい約 1000cm²を想定している。マスクの開口率が 0.5 であることから、実効的なセンサーサイズは 45cm×45cm 相当となる。ただし、GRB の検出数を増やすために 500cm²のセンサーを視野が重ならないように別々の方向へ向け、2台設置することも検討している。視野内にかに星雲や Sco X-1 などの極めて明るい X 線天体が混入すると、GRB の検出感度に大きな影響を与えるため、可動式太陽電池パドルを用いるなど、運用方法やシステムを検討する必要がある。

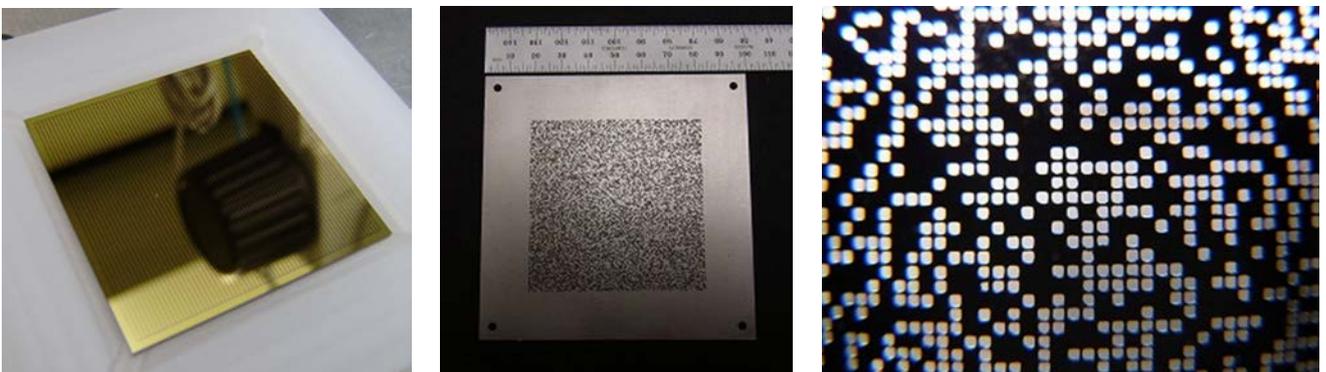


図 6. (左) 開発中のショットキー型 CdTe 撮像検出器。センサーの実効面積は 32mm×32mm で厚さは 1mm である。表裏で直行した読み出しを設けることで、64ch×2面の読み出しで 4096 画素相当としている。(中央、右) タングステンマスクとその拡大写真。厚さ 0.5mm のタングステン素材に、0.5mm ピッチでランダムに穴を開けている。現在は 64mm×64mm (センサーの 4 倍の面積)のランダムマスクを製作している。

GRB の方向決定精度はマスクおよびセンサーの幾何学配置で決まる。マスクおよびセンサーのピッチを d (mm)、マスクとセンサー間の距離を D (mm)としたとき、 $\theta = \tan^{-1}(2d/D)$ (ラジアン)程度となる。現在の検討では $d=0.5\text{mm}$ で、 $D=300\text{mm}$ とすることで $\theta=11.5\text{arcmin}$ となる。実際には Swift-BAT でも行われているように、光子の重みづけで方向決定精度は改善されるため、最終的には $\theta=5\text{arcmin}$ 程度を実現できると考えている。以上のような検出器を、読み出し回路や高圧電源、筐体を含めて約 50kg で構成する。

② MeV ガンマ線検出器 (以下の 2 種類のうちいずれか)

GRB の物理を考える上で重要となるのが、プロンプト放射のスペクトルパラメータである。Swift-BAT の観測帯域は 15–150 keV と非常に狭かったため、スペクトルの全貌を捉える事には不向きだった。一般に、GRB のスペクトルは滑らかに連結された折れ曲がったベキ関数で記述され、とりわけピークエネルギー(Epeak)は GRB を特徴づける重要なパラメータで、GRB を用いた独自の宇宙論を展開する上で欠かせない物理量となる。また、最近では黒体放射に類似したスペクトル成分とシンクロトロン放射のベキ成分が共存するという考えもあり、これらを分離するためにも数 keV から数 MeV 帯域を包括的に観測することが重要となる。前述の CdTe 撮像検出器では数 keV~100keV 程度までしか感度が無いため、数 MeV までカバーできるようなガンマ線センサーを検討している。現段階では 2 種類のガンマ線検出器を検討しているが、このうち 1 種類のみを搭載する。

(1) 電子追跡型コンプトンカメラ

赤方偏移 $z>10$ の長時間 GRB を検出するために、光子バックグラウンドの少ない 80keV 以上で観測を行うことが有利かもしれない。図 7 に示すように 30cm 立方のガスチェンバーの周辺および底面に、 LaBr_3 シンチレータアレイを配置することでコンプトンカメラを形成する。入射ガンマ線がガスチェンバー内で散乱した際の反跳電子のエネルギーと飛跡を検出し、散乱ガンマ線は外周のシンチレータアレイで光電吸収させる。コンプトン散乱の運動学を解くことで到来ガンマ線の方向を決定することができる。このとき、反跳電子の飛跡を観測しているため、1 光子ごとのガンマ線の到来方向を強く制限できる点が特徴である。そのため、天空を 5 度×5 度程度のメッシュに区切って常時モニターすることができ、短時間に MeV ガンマ線フラックスが増加した天空領域を同定することができる。このようなリアルタイムイメージングを実現できれば、コーデッドマスク法の 100 分の 1 程度の低雑音を実現でき、高い S/N 比で GRB を検出できる可能性がある。GRB からの光子フラックスは少ないが、100 秒程度の積分を行えばイメージングトリガーを実現できる。検出光子の重みづけを行い、1 度よりも良い精度で GRB の到来方向を決定することを目標とする。ガスで散乱した後、シンチレータアレイで光電吸収されるコンプトンイベントとしての検出効率は約 1%であるが、残りのイベントの大半は直接シンチレータアレイに入射するため、GRB のスペクトル測定に使える。このコンプトンカメラと、①で示した X 線・ガンマ線イメージング検出器とが同時に同じ方向から暗い GRB を検出した場合、単独で観測するよりも遥かに高い有意度でアラートを出すことができるだろう。

このように MeV ガンマ線イメージング検出器を利用して、GRB のイメージトリガーを掛ける手法は新しい概念で極めて挑戦的である。北極圏を周回する長時間気球実験を行い、GRB 検出実証を行いながら搭載の実現性を検討していきたい。しかも広視野 MeV ガンマ線モニターとして機能するため、GRB 待機時のデータを用いて MeV ガンマ線の全天探査が可能となる。重量は約 100kg 程度を見込んでいる。

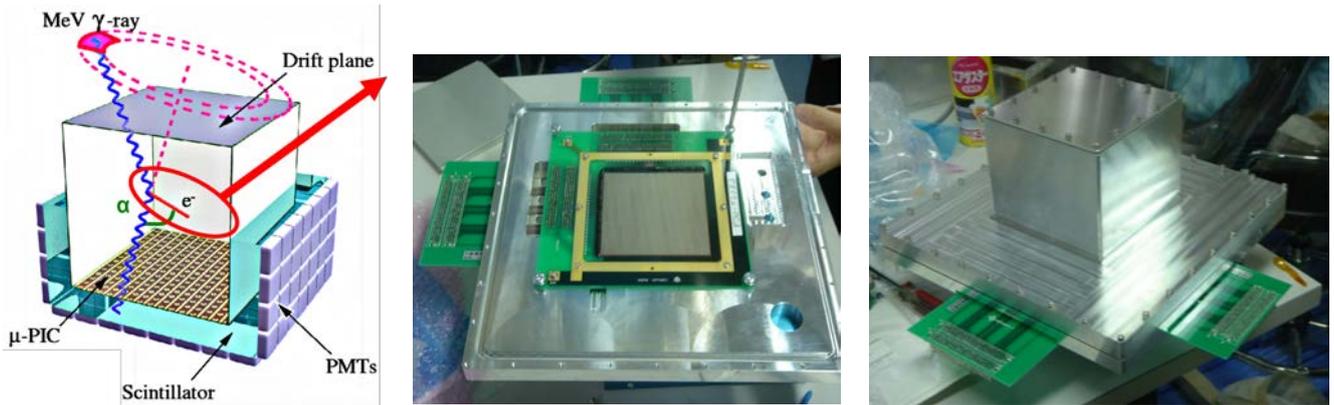


図7. (左) 京都大学で開発している電子追跡型コンプトンカメラ。30cm 立方のガスチェンバーの外周に LaBr₃ シンチレータを配置している。(中央) ガスチェンバーを読み出す μ -PIC アレイ。(右) 気球搭載モデル。

(2) 広帯域ガンマ線シンチレータ検出器

青山学院大学が中心となって開発している、国際宇宙ステーション搭載 CALET-GBM の発展型は、小型科学衛星搭載の GRB スペクトロメータとして極めて現実的である (図 8)。CALET-GBM の高エネルギー側を担当する SGM センサーは、直径 4 インチ×高さ 3 インチの BGO 結晶と光電子増倍管で構成されている。このセンサーを一回り大きくした直径 5 インチ×高さ 3 インチのものを 4 台搭載し、およそ数 10keV~10MeV 帯域でのワイドバンドスペクトロメータを構成する。また、CALET-GBM には実装されていないが BGO 結晶をプラスチックシンチレータで囲んでフォスウィッチ検出器を構成し、反同時計数処理を行うことで宇宙線イベントを除去することも検討している。

シンチレータそのものの重量が極めて重く、1つの結晶で 7kg 程度となる。したがって、光電子増倍管や読み出し処理回路を含めて合計 40kg を想定している。BGO 結晶の温度を下げることで光量を稼げば、より低エネルギー側への感度を拡張できるだろう。また、short GRB の検出に対しては、この検出器の方が有利となる可能性もあるため、シンチレータでトリガーを掛けて①の X 線イメージャーで方向を決定するなどの連携を取ることも想定している。

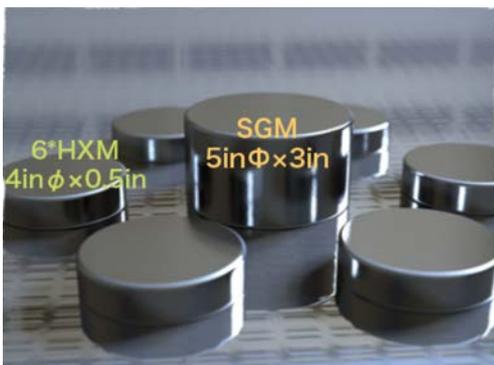


図 8. (左) CALET-GBM 搭載シンチレータのプロトタイプモデル。直径 4 インチ×高さ 0.5 インチの LaBr₃ 結晶(HXM)を 6 個と、直径 5 インチ×高さ 3 インチの BGO 結晶 1 個を搭載する予定であった (重量削減のためサイズ変更)。本ミッションでは、上記 SGM 相当の検出器を 4 台搭載することを考えている。

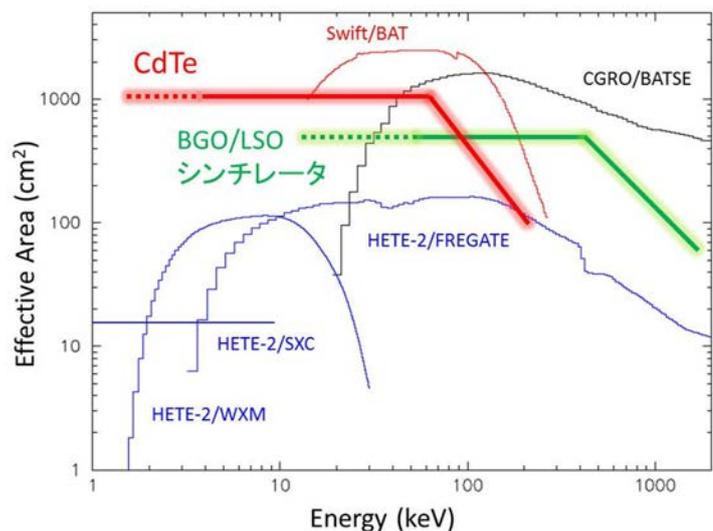


図 9. 過去のミッションとの有効面積の比較。10keV 以下では HETE-2/WXM の約 10 倍の面積を持ち、シンチレータと合わせて 3 桁に渡るスペクトルを取得できる。

CdTe 撮像検出器とシンチレータユニットの有効面積を図9に示す。CdTe を用いた X 線・ガンマ線イメージ検出器の 10keV 以下の有効面積は、過去の GRB 検出器の中でも突出して大きい。HETE-2/WXM は世界で初めて GRB のリアルタイムアラートを実現したほか、XRF のような GRB と類似した新種族の天体を発見するなど、たいへん良い成果を挙げた。その HETE-2/WXM と比較して約 10 倍の有効面積を実現し、赤方偏移の効果を強く受けた GRB に照準を合わせた検出器構成を取っている。同時に、近傍の XRF や超新星の X 線 shock break-out など数多く検出できるだろう。BGO シンチレータを用いることで数 keV～約 10MeV に渡る広帯域スペクトルを取得し、精度良く Epeak などの物理量を測定できるシステムを構成する。Fermi-GBM の観測結果と比較して、エネルギー帯が拡張されたことと有効面積が増大したという2つの観点から、 $several \times 10^6 \text{ erg/cm}^2$ よりも明るい GRB に対しては、5 - 10% の精度で Epeak を決定できると見積もっている。以上のように、Swift 衛星で得られた教訓を十分に活かした構成となっており、高赤方偏移 GRB および XRF、short GRB などの研究を大きく発展させられるだろう。

表 1. X線・ガンマ線検出器の主な仕様

	X 線・ガンマ線イメージング検出器	シンチレータ検出器
検出器	CdTe 両面ストリップ	BGO または LSO 結晶+光電子増倍管
エネルギー帯域	数 keV ~ 100 keV	50 keV ~ 10 MeV
検出器サイズ	45cm×45cm または、その半分を 2 台	直径 5 インチ×高さ 3 インチを 4 台
有効面積	1000cm ² @ 10keV (Half Coded)	500cm ² @ 100keV
方向決定精度	11.5 分角 (幾何学形状から) 約 5 分角 (光子統計の重みづけから)	無し
視野	約 2 ステラジアン	約 2π ステラジアン

③ 可視光・近赤外線 45cm 望遠鏡

本ミッションでは、GRB 検出後すぐに衛星の姿勢を変えて追観測を行い、残光が明るい初期段階で正確な座標と大まかな赤方偏移を同定する。GRB 発生から 30 分以内に赤方偏移の情報を発信することで世界中の研究者の協力を仰ぎ、JWST、すばる望遠鏡、VLT、Keck などの大型望遠鏡と連動した観測を実現したい。そのために、45cm 径望遠鏡を搭載し、その焦点面に可視光・近赤外線の両方で同時に観測ができる多色カメラを設置する。

望遠鏡およびカメラユニットの光学設計

望遠鏡の光学系は、リッチー・クレチアン光学系を検討している。カメラユニット内の補正光学を含めて、図 1 0 に示すようなレイトレース法で成立性を確認した結果、主鏡 45cm に対して焦点距離を 142cm 程度に抑えられると見積もっている (ただし、迷光対策を施すことで多少は長くなる可能性がある)。望遠鏡から導かれた光はダイクロミックミラーによって可視光と近赤外線に分けられ、それぞれの補正光学系を経由した上で結像する。焦点面検出器は、可視光 CCD および近赤外線 HAWAII2-RG (HgCdTe アレイ: 図 1 1) を検討している。主鏡を冷却すれば K バンド(2.2 μm 帯)まで観測可能だが、リスクを避けるため主鏡・副鏡は自然冷却のみとし、H バンド(1.7 μm)までを観測帯とする。可視光 CCD も HAWAII2-RG も 17 分角×17 分角という広い視野を持つように光学系を組むことで、①の X 線・ガンマ線イメージング検出器による GRB の方向決定精度を確実に網羅できるようにする。

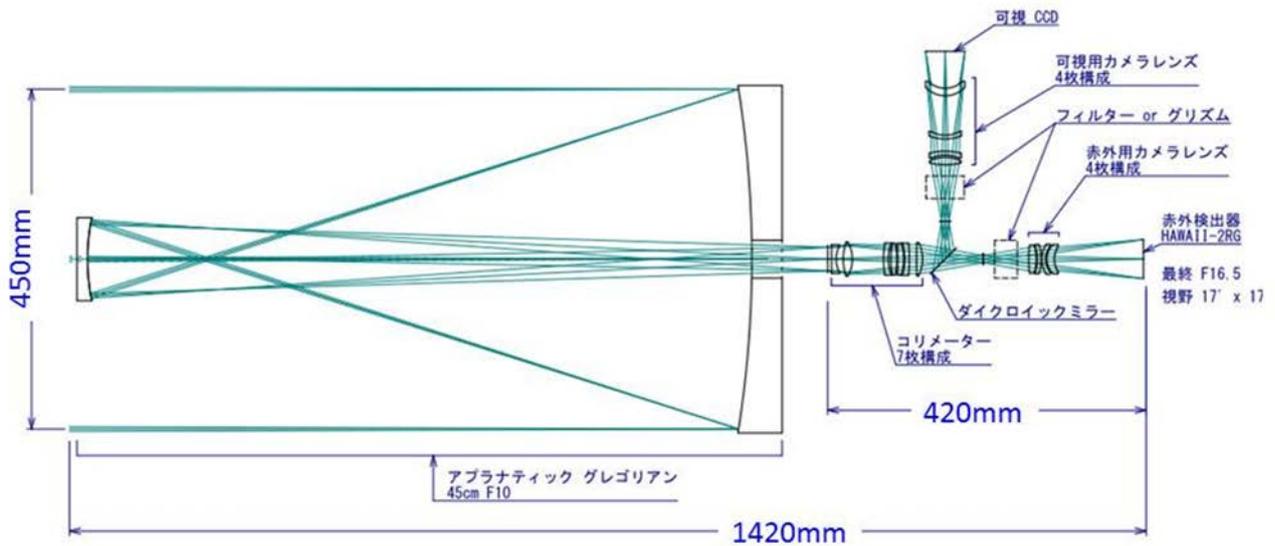


図 1 0. 45cm 望遠鏡の光学設計案。リッチー・クレチアン F/16.5 望遠鏡と、補正光学系を用いている。

近赤外線 HgCdTe 検出器は、Cd の配合比を変えることでバンドギャップ（有効感度のカットオフ波長）調整できる。本ミッションでは、 $1.75\ \mu\text{m}$ カットオフ の HAWAII2-RG アレイを使用するため、ジュールトムソン冷凍機で 120K まで冷却する。読み出しは SIDE CAR ASIC と呼ばれる専用の集積回路を用いる。これは JWST でも採用されている技術であるため、宇宙での使用は問題ないだろう。Si で作られた HAWAII2-RG (HyViSI) と呼ばれるセンサーを用いれば、SIDE CAR ASIC で読み出しを共通化できるので、可視光 CCD の代替として検討したい。

主鏡および副鏡は、あかり衛星を参考に SiC 素材で製作することを想定している。ただし、あかり衛星よりも観測波長が短いため、鏡面精度を高くし、かつ維持するための工夫が必要である。波長 700nm の可視光に対して、主鏡の鏡面精度を $\lambda/10 = 70\text{nm}$ 程度に保つことを目標としたい。主鏡の裏面全体で支持することで（約 12 点で支持）、重力変形を 50nm RMS 程度に抑えられると考えている (Kaneda et al. 2008)。



図 1 1. 2048×2048 画素の HAWAII-2RG 近赤外線検出器



図 1 2. あかり衛星の主鏡(直径 70cm)

あかり衛星で使われた望遠鏡やクライオスタットの重量を、寸法の 2 乗でスケールリングできると仮定して重量を概算すると、全体として 100kg 以内で実現できると想定している。内訳は、望遠鏡本体の構造 15kg, クライオスタット構造 55kg, 冷凍機 10kg, 観測装置を 20kg である。本ミッションの主鏡などは自然冷却であるため、あかり衛星で使われたクライオスタットの構造および液体ヘリウムに関する部分は大幅に削減できる。冷凍機は観測装置（近赤外線アレイ、可視光 CCD）を冷却するために用いる。

検出感度の見積り

近赤外線バンドの観測で主なバックグラウンド源は、太陽光の黄道面散乱である。観測波長を $1.7\mu\text{m}$ よりも短波長に限っているため、主鏡および副鏡等が 200K 程度であれば構造体からの熱放射は黄道光に比べて無視できる。HAWAII-2RG を用いて、0.5 秒角/ピクセルの光学系を組んだ際の検出感度(5σ)を図 1 3 に示す。我々が観測する J,H バンドでは、1 分露光で 20 等級(AB)を達成できると見積もっている。過去に近赤外線で観測された GRB 残光が、 $z=8$ に存在していると仮定した場合の予想光度曲線を図 1 4 に示す。1 分露光で 20 等級(AB)を達成できる望遠鏡ならば、大部分の残光を検出できるはずである。現に $z=8.2$ で発生した GRB090423A の光度曲線も赤色で示しているが、十分に検出できることがわかる。本ミッションで検討している 45cm 望遠鏡で、 $z>7$ の GRB を十分に検出できると考えている。大まかな赤方偏移を決定するためには、複数のバンドで測光する手法や、低分散分光器を導入して分光する手法が考えられるが、感度の最適化と GRB 待機時のサイエンスを考慮して設計していく。

ミッション期間中の多くの時間は、近赤外線望遠鏡を用いたサーベイ観測やモニター観測を行うことになる。高赤方偏移クェーサーのサーベイ、系外惑星のトランジット観測、変動天体のモニター観測、宇宙背景放射の揺らぎの観測などが候補として考えられる。同時期に実現する、他のミッションや科学成果の重要性を考慮し、GRB 観測と両立できる検出器構成を検討する。

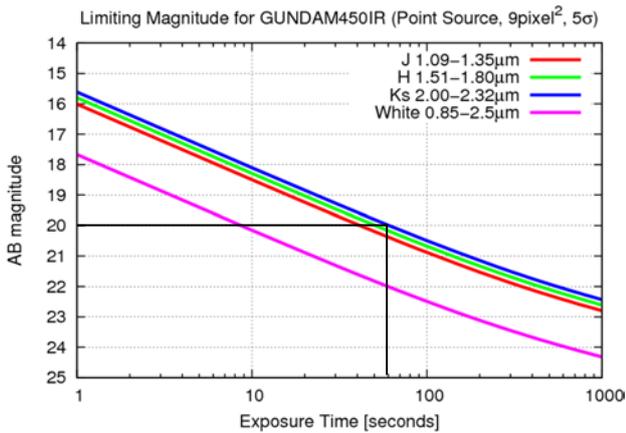


図 1 3. 45cm 望遠鏡を用いた時の検出感度計算。J,H,K バンドで換算した場合、1 分露光で 20 等級(AB)を実現できる。長時間の露光ではより深い限界等級を達成できるため、待機時のモニター観測でも利用できる。

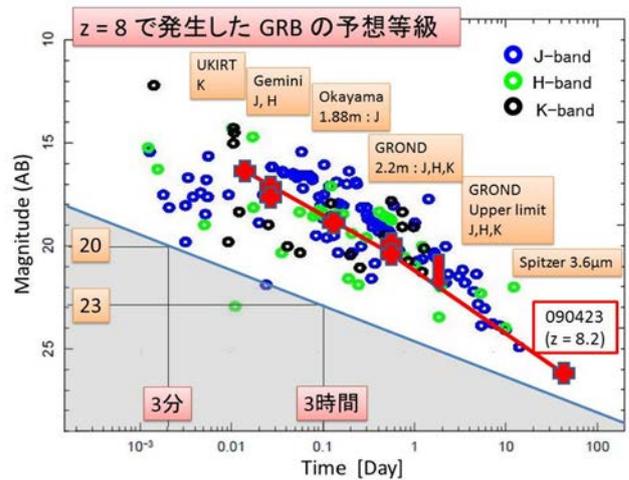


図 1 4. これまでに近赤外線で観測された残光が $z=8$ で発生したと仮定した場合の予想等級。1 分露光で 20 等級(AB)の検出感度は、大半の残光を検出できる見積りとなっている。

希望打ち上げ時期

2010 年代後半から 2020 年頃の打ち上げを希望する。小型科学衛星 4 号機が適切と考えている。この頃には JWST が活躍していると予想できるため、本ミッションで高赤方偏移 GRB を検出し、JWST および現在稼働中の大型望遠鏡で詳細なスペクトルを測定できると期待している。30m 望遠鏡(TMT)計画は 2020 年代の前半を目指しているが、スケジュールが明確ではないため、現時点ではターゲットとしては設定しない。また、次世代チェレンコフ望遠鏡(CTA)や LCGT などの重力波アンテナ群が活動している時期であるため、GRB をトレーサーとしたマルチメッセンジャー天体物理学にも貢献できるだろう。

3. ミッション固有の要求

(1) バス部への要求

本ミッションでは、効率よく GRB の残光を追観測することと、地上観測者のためにリアルタイムでトリガーアラートを出すことを検討している。以下のような項目について成立性を検討していきたい。

■可動式太陽電池パドル

搭載予定の X 線・ガンマ線イメージング検出器は非常に広い視野（約 2 ステラジアン）を持つため、明るい X 線源を視野内に入れてしまう可能性が高い。特に Sco X-1 や Cyg X-1 のように明るくて変動する天体は、バックグラウンドを高くするだけでなく、偽トリガーを生成する要因となる。これらの天体を視野外に配置できるような姿勢を取りながら運用したい。また、GRB の追観測を効率よく行うために、衛星姿勢の太陽角制限を可能な限り緩和したい。以上の理由から、可動式太陽電池パドルを希望する。

■自立的姿勢制御

GRB の発生方向を同定した場合、衛星は自立的に姿勢を変更して（マヌーバして）、可視光・近赤外線望遠鏡で追観測を開始する。この時、姿勢が安定するまで時間を含めて約 180 秒以内（早ければ早い方が良い）でマヌーバを完了し、追観測を実施したい。また、近赤外線カメラは 100K 程度まで冷却されているため、太陽、月、地球を視野に入れないように運用したいと考えている。通常はスケジューリングされた姿勢を取ることで対応できるが、追観測の際は自立的に制御されるようにしたい。

■指向精度

X 線・ガンマ線イメージング検出器による GRB の方向決定精度は、光子の重みづけを行った場合でも 5 分角程度と予想している。可視光・近赤外線望遠鏡の視野は一辺 17 分角を想定しているため、指向精度は 1 分角を実現できれば十分である。

■姿勢安定度

可視光・近赤外線望遠鏡システムは、1 秒角よりも良い角度分解能で撮像を行う。したがって、撮影フレーム 1 枚（10～30 秒露光：要検討）の最中に、姿勢擾乱を 0.5 秒角以下に抑えたい。

■リアルタイムアラート機能

GRB を検出した場合は、リアルタイムで地上観測者へ向けて発生方向の情報を連絡したい。これは GRB の観測には必須の機能である。HETE-2 衛星は赤道軌道に投入し、独自の基地局を複数地点に配置することで（主地上局を 3 局、副地上局を 15 局）、軌道上のどこでもアラートを出せる体制を整えていた。Swift 衛星は、リレー中継衛星 TDRSS を利用している。方向やトリガー情報は、非常に少ないデータ量であるため、衛星携帯電話のポケット程度でも十分対応できると考えているが、そのような方式が実現可能かは検討課題である。

(2) 投入軌道、ロケットへの要求

投入軌道については、前述の「バス部への要求」の項目と密接に関連するため、総合的に検討する必要がある。特に、リアルタイムアラート機能をどのように実現するかが一つのポイントとなるが、衛星携帯電話等のインフラ機能を利用する場合は、衛星高度を検討した上で、通常のインクリネーション 31 度の軌道で構わない。一方、独自の地上基地局を設置する場合は、接地点数を減らす目的で赤道軌道が好ましい。

(3) 世界の GRB 観測計画

GRB 観測計画はいくつか存在するが、代表的なものについてこれまでの経緯を言及する。

まず、2010 年に行われた、NASA の Decadal Survey (Astro 2010) において、EXIST という超巨大 GRB ミッションが提案された。これは Swift 衛星を飛躍的に大きくしたもので、巨大なコーデッドマスク検出器に、直径 1.1m の近赤外線望遠鏡、そして X 線望遠鏡を搭載したものである。GRB 業界から大きく期待されていたが、Decadal Survey では選出されなかった。この時に top priority で選ばれたミッションは、WFIRST (赤外線広視野サーベイミッション：Ia 型超新星を用いたダークエネルギーの研究、系外惑星の発見など)で、次に Explorer Mission という中小型衛星計画である。

この中小型衛星計画は、各時代に応じた重要トピックを流動的に実現できるような枠組みとして用意されたものであり、2011 年にプロポーザル募集が行われた。本提案と同様に、高赤方偏移 GRB の観測をコンセプトとした JANUS (Joint Astrophysics Nascent Universe Satellite)や Lobster と呼ばれるミッションが、Explorer Mission Proposals に提案されたが採択されなかった。科学的意義については高い評価であったが、Swift 衛星が稼働中であることもあり、系外惑星探査等を優先させた結果になったと聞いている。

2015 年頃の実現を目標として中国・フランスが共同で開発している SVOM と呼ばれるミッションは、Swift 衛星の後継機として期待されている。光学望遠鏡も搭載する予定だが、可視光観測のみで近赤外線には対応していない点が本ミッションとの大きな相違点である。赤方偏移 $z > 7$ のフロンティアを開拓するためには、どうしても近赤外線観測が必要となるため、SVOM のコンセプトではこれまでと同様の $z < 7$ の宇宙が主な観測ターゲットとなるだろう。

以上のようにいくつかの GRB 観測計画が提案されてきたが、残念ながらいずれも不採択となっている。我々は 2009 年ころから本計画に向けた検討を行っており、世界の動向を見据えた上で、現在がワーキンググループの結成に最も良いタイミングであると判断し、本申請を行うことにした。Explorer Mission Proposals は 2~3 年に 1 度程度の頻度で行われる予定で、JANUS や Lobster は次回以降も提案されるだろう。したがって、日本の活動性を積極的にアピールし、日本が主導できるミッションの基盤を作り上げていくためには、これからの数年が大切な時期となる。本ワーキンググループの活動で衛星の成立性を検討し、世界に先駆けて高赤方偏移 GRB 観測を実現したい。