令和 3 年度　修士論文

未同定 X 線突発現象の正体解明に向けた MAXI と NICER の即時連携システム開発

東京大学大学院 理学系研究科天文学専攻
宇宙航空研究開発機構 宇宙科学研究所
海老沢研究室

学籍番号 35-206131
博士前期課程 2 年

長塚 知樹
nagatsuka@ac.jaxa.jp

2022 年 2 月 21 日

Abstract

活動銀河や中性子星、ブラックホールから生じるジェットや恒星フレアなど、突発的に X 線で明るくなる天体現象が数多く知られている。これらの突発現象はいつ何処で発生するか分からないため、それを発見するためには常時広視野モニター観測を続ける必要がある。突発現象ではその発生時に物理の本質が現れることが多いので、発生直後に詳細観測を行うことが理想的である。しかし、広視野モニター観測では十分な感度を確保できないため、詳細なエネルギースペクトル解析やタイミング解析ができない。これらの X 線突発天体の詳しい性質を調べるには、より高感度・高性能を持つ X 線望遠鏡で観測することが必要であるが、発生直後に望遠鏡を新天体にポインティングするのは難しい、というジレンマがある。

2009 年から ISS (国際宇宙ステーション) 上で稼働を開始した JAXA の全天 X 線監視装置 MAXI (Monitor of All-sky X-ray Image) は、今までに数多くの突発天体を発見してきた。MAXI が発見した天体情報を NASA の Swift 衛星に知らせて追観測が行われてきたが、それには数時間以上かかる。Swift が観測を開始したときにはすでに検出限界以下に減光していた低エネルギー X 線突発天体が数例見つかっており、MUSST (MAXI Unidentified Short Soft Transients) 天体と呼ばれている。MUSST 天体の正体は全く分かっておらず、その正体を知るには発生直後の詳細観測が必要である。

2017 年に、低エネルギー X 線領域で過去最高の有効面積と時間分解能を誇る NASA の中性子星内部構造探査装置 (Neutron Star Interior Composition Explorer: NICER) が ISS に設置された。また、NICER は所要時間 2 分以内で、目標天体にポインティングすることが可能である。もし ISS のイントラネットを利用して MAXI と NICER を即時連携できれば、史上最速・最高感度の連携観測が可能となる。このような野心的な試みが「OHMAN (On-orbit Hookup of MAXI and NICER) 連携計画」である。私は、OHMAN 計画メンバーの一員として、OHMAN ソフトウェアの修正と MAXI の突発天体検出システムの開発を行ってきた。本論文では、これらの成果をまとめる。

OHMAN ソフトウェアの修正では、機上で連携するために当初 Windows7 向けに開発されたソフトウェアを、Windows7 のサービス終了に伴い、Windows10 で動作させるために必要な修正を行った。実際に機上でインストールするためのパッケージ化と、機上の PC を模した動作試験を行なった。

MAXI による突発天体検出システムの開発では、観測データに有効面積補正を施し、ISS の前周回との差分を取ることで、MAXI が発見した代表的な突発天体について、リアルタイムで検出できることを確認した。また、MAXI が今までに検出したガンマ線バースト (GRB) データ (MUSST を含む) に対して、OHMAN チームが現在開発中の「突発天体検出プロトタイププログラム」を適用し、効率よく即時検出できることを検証した。最後に、今後の OHMAN 計画の展望を記述した。

目次

第 1 章　序論　7

第 2 章　X 線突発天体　9
2.1　X 線突発天体の候補　9
2.2　MUSST 天体の観測　10

第 3 章　観測装置　12
3.1　MAXI　12
3.2　NICER　12
3.3　MAXI と NICER の連携　13

第 4 章　OHMAN 機上システムの概要　14

第 5 章　OHMAN 地上システム試験　16
5.1　OHMAN 実行環境の構築と試験　16
5.2　突発天体検出アルゴリズムの開発　17

第 6 章　まとめと今後の課題・計画　32

付録 A　OHMAN 開発で用いた解析環境　33
A.1　DB FITS ダンプと MAXI アーカイブ　33
A.2　MAXI で用いる座標系と座標変換　34
A.3　MAXI で検出された GRB のリスト　36

図目次

4.1 OHMAN 機上システムの概要 15

5.1 OHMAN2010(ohmancap) の地上での動作試験 17
5.2 novasoft の地上での動作試験 18
5.3 GSC0 の有効面積 18
5.4 GRB190708B の検出時刻から ±400s の時間範囲の exposure map 19
5.5 GRB190708B の検出前の周回のイベントマップ 19
5.6 GRB190708B の検出時の周回のイベントマップ 19
5.7 GRB190708B の露出補正した全天画像 24
5.8 「ラベリング」による天体検出 25
5.9 GRB161123A に対してプロトタイププログラムを実行した例 (バックグランド、PSF など) . 26
5.10 GRB161123A に対してプロトタイププログラムを実行した全天画像 27
5.11 MAX J1501–026 に対してプロトタイププログラムを実行した全天画像 27
5.12 MAXI J0545+043 に対してプロトタイププログラムを実行した全天画像 28
5.13 6σ 以上で生じた誤検出を含むプロトタイププログラムの出力結果 30

A.1 GSC の視野の説明 34
A.2 コリメーター座標の説明 36

表目次

2.1 MUSST 天体の MAXI による観測 11
2.2 MUSST 天体の Swift による追観測 11
2.3 MUSST 天体の e-folding 時間の上限値 11

5.1 天体検出方法の比較 21
5.2 突発天体検出プロトタイププログラムによる MUSST 天体の解析結果 22
5.3 6σ で生じた誤検出の一覧 29
5.4 GRB を含むデータに対するプロトタイププログラムの実行結果 31

A.1 プロトタイププログラムを実行した GRB の一覧 37
A.1 プロトタイププログラムを実行した GRB の一覧 38
A.1 プロトタイププログラムを実行した GRB の一覧 39

第 1 章

序論

近年、継続時間が短く稀な突発現象の時間経過を研究する「時間領域天文学」が活発である。その対象は新星、超新星、ガンマ線バースト（Gamma-Ray Burst: GRB）、重力波対応天体、潮汐破壊現象などである。これらの天体の性質、変動のメカニズム、進化などを明らかにするのが時間領域天文学の目的である。

こうした短時間の突発現象では、必然的に物質が超高温や高エネルギーを獲得するので、その検出とそこに内包される物理学の理解をする上で、高エネルギーの電磁波、すなわちX線やガンマ線による観測が有効な手段となる。X 線帯域では、JAXA の全天X線監視装置 (Monitor of All-sky X-ray Image： MAXI) と NASA の Swift 衛星が、突発天体を発見・速報し、様々な波長の国際的な観測チームに伝え、この分野を牽引している。国際宇宙ステーション (ISS) の周回を利用して約 92 分で全天観測を行う MAXI 装置は軟 X 線帯域 (<10 keV) に感度を持つ。2009 年以降、継続して X 線で全天監視し、これまで多数の X 線突発天体を検出してきた。広視野を持つ Swift 衛星 BAT 装置は硬 X 線 (>15keV) 帯域に感度を有す一方、Swift 衛星 XRT 装置は狭い視野で軟 X 線帯域に MAXI より高感度を持ち、比較的短時間で目標天体に視野を向けることができる。

MAXI 装置のこれまでの観測から、ISS の 1 周回のみで検出され、次の周回では検出限界以下であった「X 線急速減光天体」の存在が確認されている。現状の、MAXI データを解析した検出結果を Swift 運用チームにメールで伝える体制では、92 分以内で消え去る X 線急速減光天体に対する追観測は不可能である。

X 線急速減光天体の中で、特に重要な対象は「重力波対応天体」である。「キロノバ」と呼ばれる突発的な天体現象が知られており、それは二つの中性子星が合体した後の爆発により生じ、短期間 GRB(Short GRB: SGRB) が放出されると考えられている。実際に 2017 年 8 月 17 日には、連星中性子星合体に伴う重力波と SGRB がほぼ同時に検出され、キロノバと SGRB 研究の新時代が切り開かれた。重力波発生の 9 日後には、対応天体から X 線放射の検出に成功した。もし中性子星合体の瞬間が X 線急速減光天体として観測されれば史上初の快挙であり、中性子星合体による元素合成の理解が深まる。

X 線急速減光天体の候補には、SGRB 以外に、ジェットが地球を向いていない GRB で X 線残光のみが見える「GRB の親なし残光」や重い白色矮星上の「新星爆発」などが挙げられている。また、特にエネルギースペクトルがソフト (低温) であるものは「MAXI 未同定軟 X 線短時間突発天体」(MAXI Unidentified Short Soft Transient) と呼ばれているが、その起源も謎である。これらの現象を捉え、その正体を追求するためには、X 線帯域で発見直後に詳細観測を行う体制が不可欠であるが、未だ実現していない。

国際宇宙ステーション (ISS) 上で 2 つの X 線観測装置が独立に稼働している。MAXI と NASA の中性子星内部構造探査装置 (NICER) である。MAXI は、感度は低く詳細な X 線スペクトル観測をすることができない一方、NICER は、素早く目標へ向く機能と高い感度を誇る。そこで、MAXI と NICER を連携させれば、現

時点で世界最高性能の X 線監視・追観測体制が確立できる。さらに必要となるのは、追観測の即応性である。現在実現されている最速パスは、MAXI のデータを地上に下ろして確認した後に NICER の観測を依頼するもので、数時間以上かかる。ところが、両装置は ISS 内のイントラネット回線でつながっているので、もし直接通信を開通させれば、最速約 3 分での追観測開始が可能である。この構想を OHMAN (Onboard Hookup of MAXI and NICER) と呼ぶ。X 線突発現象において OHMAN の必要性は強く認識されており、日米で枠組みづくりが始まっている。ブラックホールや中性子星の増光など、物理の本質は突発現象の初期に現れやすいので、OHMAN の実現により、時間領域天文学の未開拓の裾野が拓ける。

第 2 章

X 線突発天体

本章では、OHMAN の主な対象となる X 線突発天体候補について述べる。

2.1 X 線突発天体の候補

- 宇宙論的遠方 (z>10) で起こった GRB
  これらの天体からのエネルギースペクトルは大きく宇宙赤方偏移しているので、ガンマ線より軟X線を主に放射する。よって、Swift/BAT などの硬 X 線モニターでは発見できず、MAXI のみが発見できる可能性がある。それを NICER で詳細観測し、スペクトル線のエネルギーを正確に測定できれば、z の値が決定できる。
- 新星爆発
  NICER による詳細 X 線スペクトル観測から、新星爆発に伴う強い電離 Ne 輝線、電離 O 輝線を検出できる。その例として、チャンドラセカール質量に近い O-Ne-Mg 白色矮星の新星爆発と判明した軟 X 線新星 MAXI J0158-744 がある (Morii et al. 2013)。
- 重力波対応天体 (SGRB)
  重力波が検出できるような中性子星連星合体は 20Mpc 以近の近傍で起きたものであり、それに付随する SGRB が起こった場合、それは X 線急速減光天体として見えると予想される。重力波源かどうかは、LIGO、VIRGO、KAGRA などの地上重力波観測装置と同時に検出されたかどうかが根拠となる。
- GRB の親なし残光
  GRB は鋭くビーミングしており、地球が真正面から外れると、残光だけが見えうる (Totani & Panaitescu 2002)。NICER による X 線減光トレンドが残光的（時間のべき型）かどうかを調べることが有力な証拠となる。
- 星潮汐破壊現象
  X 線急速減光天体として報告された MAXI J1501-026 は新星のような軟X線天体であったが、Swif 衛星 XRT 装置と木曽シュミット（可視光）で増光天体が検出されなかった (ATel#7960)。この天体のスペクトルと総エネルギー、時間尺度は、銀河系を漂う何億個もあると予想される単独ブラックホールに彗星質量の天体が落下したとして説明できる (三原 建弘 2017)。この場合、NICER の観測により、星潮汐亜破壊現象に特徴的な、$-5/3$ のべき乗則で減光する減光曲線 (Rees 1988) を捉えることが鍵となる。
- 恒星フレア

恒星フレアは、MeV 以上の高エネルギー粒子生成の現場であり、熱いX線プラズマの生成現場でもある。MAXI は dMe 星から、最大の太陽フレアの約 1000 倍、典型的な RS CVn 連星の約 10 万倍のX線光度の恒星フレアを検出している (Tsuboi et al. 2016)。フレアの立ち上がりを NICER で詳細観測することにより、磁気ループの大きさなどの情報を得ることができる。立下りからは、プラズマの自己 cooling やループ外への散逸の情報が得られる。

- X 線連星系

  磁場の弱い中性子星が通常の星と連星をなす系では、星のガスが中性子星に降着することで、強いX線源となる。中性子星の表面に水素やヘリウムがある程度まで蓄積すると、X線バーストと呼ばれる不安定・爆発的な核融合が生じ、炭素、酸素、鉄、またより重い元素までが合成されると考えられる。そうしたバーストは通常、10 秒〜 1 分ほどで終了するが、時折、数千秒も継続する例があり、「スーパーバースト」と呼ばれる。MAXI はこれまでスーパーバーストを 12 例を記録しており (三原 建弘 2017)、その結果、こうした中性子星連星系の多くが、頻繁に起こす通常のバーストに加えて、ごく稀にスーパーバーストを起こすことがわかってきた。

  スーパーバーストは、いつどの中性子星連星で起きるかわからない。MAXI のリアルタイム速報に基づいて NICER がスーパーバーストを即時観測できれば、X線スペクトル中に、重力的に赤方偏移したスペクトル線を検出できる可能性がある。その重力赤方偏移の値から、中性子星との質量-半径関係に制限と与えることができる。

- MUSST 天体

  MAXI がこれまで検出した突発的X線放射のうち、いかなる既知天体とも同定できず (Unidentified)、92 分後の MAXI スキャンでも Swift/XRT 高感度追観測でも検出できず (Short)、Swift/BAT 検出器では検出されない柔らかいスペクトルを持つ (Soft) 事象が 8 例あり、MUSST (MAXI Unidentified Short Soft transients) 天体と呼ばれている (芹野 素子 2019)。その正体は謎で、ガンマ線バーストのジェットを斜めから見たもの、星間空間を漂うブラックホールに彗星が落下したイベント、老齢なマグネター (超越強磁場をもつ中性子星) の磁場の崩壊 (三原 建弘 2017) などの諸説が提案されているが、決着が着いておらず、新たな天体現象の可能性もある。

  MUSST 天体のうち、GR 140814A については、MAXI のエラー領域から電波トランジェント VT J121001+495647 が観測されており (Dong et al. 2021)、その関係が示唆されている。MAXI による発見直後に NICER で詳細観測することにより、MUSST の正体を突き止めることは、OHMAN 計画の主目標の一つである。

2.2　MUSST 天体の観測

表 2.1 に、MAXI による MUSST 天体の観測、表 2.2 に、Swift による追観測の結果をまとめた (Serino 2019)。どれについても、MAXI の次の周回でも Swift の追観測でも検出できず、flux の上限値のみが得られている。MAXI の trigger が発生した時刻を基準とし、flux $f(t)$ に対し

$$f(t) \propto e^{-t/T} \tag{2.1}$$

を仮定し、e-folding 時間の上限値を計算した (表 2.3)。MAXI については 92 分後のスキャンで、1 回のスキャンによる検出限界である $6.0 \times 10^{-10}\,\mathrm{erg\,cm^{-2}\,s^{-1}}$ (2–20keV) 以下となったという条件のもと

表 2.1　MUSST 天体の MAXI による観測

Name	MAXI Trigger (UT)	2-20 keV flux(MAXI) $(10^{-12}\mathrm{erg\,cm^{-2}s^{-1}})$	ref
MAXI J1631-639	2011-04-29 16:12:38	0.47±0.04	ATel#3316
GRB130407A	2013-04-07 23:37:01	0.41±0.05	GCN#14359
MAXI J0545+043	2014-04-12 00:25:54	0.18±0.03	ATel#6066
MAXI J1540-158	2015-03-11 16:18:16	0.17±0.03	GCN#17568
GRB 150428C	2015-04-28 08:24:15	0.33±0.04	GCN#17772
MAXI J1501-026	2015-08-26 15:40:57	0.41±0.03	ATel#7954
GRB 161123A	2016-11-23 03:05:58	0.90±0.11	GCN#20203
GRB 180829A	2018-08-29 00:05:31	0.22±0.04	GCN#23186

表 2.2　MUSST 天体の Swift による追観測

Name	Swift Start Time(UT)	Response time	Swift Exposure time (ks)	Swift flux U.L. (0.2-10 keV) $(10^{-12}\mathrm{erg\,cm^{-2}s^{-1}})$
MAXI J1631-639	2011-04-30 19:04:02	26h51m24s	1000	0.86
GRB130407A	2013-04-08 15:17:22	15h40m21s	240	0.44
MAXI J0545+043	2014-04-13 02:22:06	25h56m12s	240	3.30
MAXI J1540-158	2015-03-13 17:33:24	49h15m8s	490	1.14
GRB 150428C	2015-04-28 13:03:05	4h38m50s	470	1.57
MAXI J1501-026	2015-08-26 17:26:01	1h45m4s	230	2.28
GRB 161123A	2016-11-23 09:09:07	6h3m9s	405	0.90
GRB 180829A	2018-08-29 15:44:58	15h39m27s	190	1.47

表 2.3　MUSST 天体の e-folding 時間の上限値

Name	e-folding 時間 (MAXI) (ks)	e-folding 時間 (Swift) (ks)
MAXI J1631-639	2.7	11
GRB 130407A	2.9	6.2
MAXI J0545+043	5.0	15
MAXI J1540-158	5.3	1.1
GRB 150428C	3.2	2.2
MAXI J1501-026	2.9	0.8
GRB 161123A	2.0	2.4
GRB 180829A	4.3	7.7

で計算した。MUSST 天体を MAXI で発見し NICER で追観測するためには、この時間より早く連携をとる必要がある。これより短い連携時間を実現することが、OHMAN 計画の目標である。

第 3 章

観測装置

3.1 MAXI

3.1.1 MAXI の観測装置

MAXI (Matsuoka et al. 2009) は理研が提案した走査型スリットカメラで、2-20 keV のエネルギー範囲を持ち、ガススリットカメラ (GSC; Sugizaki et al. 2011) と固体カメラ (SSC; Tsunemi et al. 2010) の 2 つの検出器から構成されている。2009 年 8 月から ISS の「きぼう」船外実験プラットフォームに実装され、2022 年 1 月現在まで稼働している。MAXI は 1 次元の位置検出型比例計数管と機械的コリメータを併用することで、幅 160° × 3° の細長い視野 (長手方向に 1.5° の分解能をもつ) を実現し、ISS の地球周回 (92 分) に同期してこの視野で全天をスキャンしていく。周回ごとに約 60 秒間、個々の天体の位置と強度を計測する。 1 スキャンでの検出限度は、約 100 mCrab で (Serino et al. 2016)、これまでに打ち上げられた X 線全天モニターの中で最高の感度を達成している。

3.1.2 MAXI の運用

MAXI による観測データは、ほぼリアルタイムで ISS から NASA を経由して JAXA 筑波宇宙センターへ送られ、専用の PostgreSQL データベース（以後 MAXI DB）に格納される。データは自動監視され、突発天体発見の可能性があると MAXI 観測チームにメールが届くシステムとなっている。その現象が有意であるかどうかは、24 時間 2 交代制で人の目によって判断され、有意と判断した場合は世界中の研究者へインターネットを通じて報告される。

3.2 NICER

Neutron star Interior Composition ExploreR (NICER; Gendreau et al. 2016) は NASA/GSFC が担当するX線観測装置で、ISS のアメリカ側 ELC3 トラスに 2017 年 3 月に搭載された。装置は、X線集光鏡にノンイメージングのシリコンドリフト検出器を組み合わせたものを 56 台束ねて用い、1.5 keV で 1,600 cm^2 という極めて大きな有効面積を実現している。 エネルギー帯は 0.2-12 keV で MAXI と良く整合し、視野は直径 5 分角である。天体をこの視野中に捕足するため、NICER は固有のポインティング機構をもつ。

NICER の主目的は、多数の定常的な中性子星パルサーのX線パルス波形を精密に測定し、それをモデル化

することで星表面の重力赤方偏移を推定し、そこから質量・半径比を求め、中性子星の状態方程式に制限をつけようというものである。しかし、装置は優れた性能をもつため、これ以外の観測でも威力を発揮すると期待されており、その１つが突発天体の即応観測である。

3.3　MAXI と NICER の連携

NICER は自分では突発現象を検知できないが、最大駆動時間としてわずか約 3 分で、目標の天体へポインティングすることができる。MAXI による突発天体情報を地上と人手を介して NICER 側へ知らせ、追観測を行う連携を MANGA(MAXI And NICER Ground Alert) と呼んでいる (岩切 渉 2019)。基本的な連携は地上の速報システムと同じであるが、NICER は ISS に搭載されており、コマンドアップリンクの機会も多く、姿勢制御にかかる時間が人工衛星の場合と比べて大幅に短いため迅速な連携が可能である。MANGA の対象としている天体は、主に恒星フレアやブラックホール連星のスペクトル状態変化など 1 日単位のゆっくりとした現象である。2017 年 7 月の NICER 運用開始から 2020 年 10 月末までに、45 件の MANGA による連携観測が実施された (三原 建弘 2021)。

2019 年 10 月時点では、NICER 観測までの最速記録は MAXI での発見から約 4 時間であったが (MAXIJ1727-203 のフォローアップ)、 2020 年 5 月 26 日には、MAXI が GRS1915+105 の突発的な増光を検出した後、70 分後に NICER フォローアップ開始を開始できた。4 時間から 70 分へと短縮された最も大きな要因は、NICER 側の運用体制の円滑化にある。MAXI がアラートを NICER チームにメールで伝える体制に変化はないが、NICER 側のコマンドアップリンク体制が効率化され、スケジュールアップデートの流れが改善されたためである[*1]。

しかし、MANGA 連携では人の手が介在するため、より迅速性への工夫を凝らしても連携には数十分の時間を要することとなる。また、MANGA 連携では、MUSST 天体のように短時間で減光する突発天体をフォローアップすることができない。そのため、MAXI と NICER を機上連携させる OHMAN が必須となる。NICER チームも OHMAN の重要性を認識しており、NASA の MOO (Mission of Opportunity) 枠に予算申請を行い、OHMAN 計画が正式に発足した。

[*1] 2020 年 4 月までは NICER の運用は NASA/GSFC の運用室で行うことが必須であったが、2020 年 4 月以降、COVID-19 の影響でリモート化が進み、NICER チームメンバーが自宅から観測スケジュールを更新できるようになった。

第 4 章

OHMAN 機上システムの概要

MAXI と NICER はともに ISS に搭載されている装置であるから、地上を介さずにより早い連携が原理的に可能である。しかし、それには 2 つの課題がある。1 点目は ISS 上のマシンパワーや OS が限定された環境で、信頼できる MAXI 突発天体発見システムを稼働させることである。筑波宇宙センターで動いている自動監視システムでは、特に明るく確実な突発天体についてのみ自動でアラートが発出されているが、それ以外の突発天体が有意であるかは人の目で判断しなければいけない。このため、完全自動で、突発現象を検出するためのロジックを考案することが必要となる。2 点目は、NICER 側が ISS 上で MAXI のイベント情報を受け取れるように、MAXI から NICER への通信を確立することである。そのために ISS 上のソフトウェアを書き換え、MAXI で検出した突発天体の情報を、NICER 側が理解できる型で送信する必要がある。

図 4.1 に OHMAN 機上システムの概要を示す。まず、MAXI から、地上に送信するものと同じ構造の MAXI テレメトリデータが格納されたパケットが、LEHX(Layer2 Ethernet Hub and Multiplexer) という ethernet のハブを介して、ISS「きぼう」モジュール内の OHMAN 専用 PC (以下、"OHMAN Laptop") に送られる。 その OS は Windows10 である。OHMAN Laptop 上で解析を実施し、X 線突発イベントが発見されたら、その情報 (天体の位置と有意度など) を NICER 側にデータ送信する。

OHMAN Laptop 上では、"ohmancap"と"novasoft"というソフトウェアが走っている。LEHX から送られたパケットを ohmancap で受け取り、解析に必要な情報を取り出し、novasoft へ送る。novasoft は、"novasearch"と"alertsystem"から成り、novasearch で解析を行い、もし検出された天体があれば、その天体の情報を alertsystem で NICER に送る手筈となっている。当初の OHMAN 運用では、上で述べた筑波宇宙センターで動いている自動監視システムを実装し、特に明るい天体突発にのみ確実に自動アラートを発出する予定である。

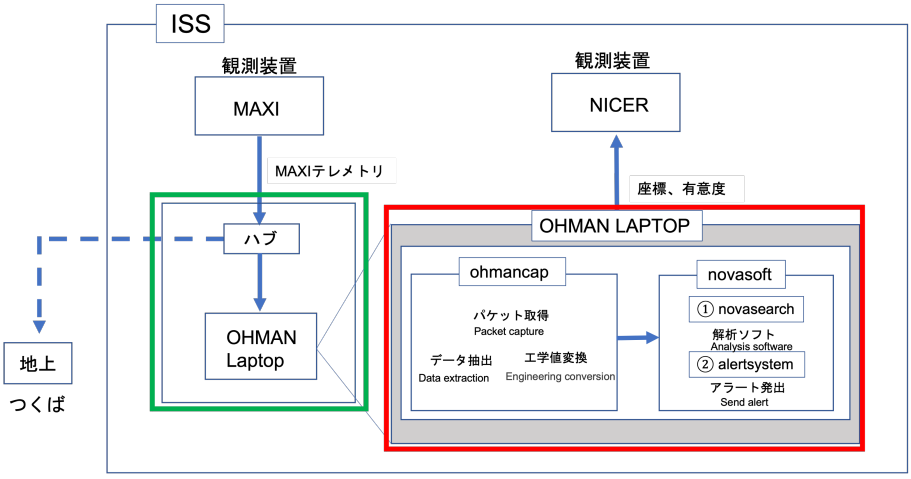


図 4.1　OHMAN 機上システムの概要

第 5 章

OHMAN 地上システム試験

本修士論文では、機上 OHMAN システムを模した地上実行環境を構築し、突発天体検出アルゴリズムの改良を行った。本章では、それらについて述べる。

5.1　OHMAN 実行環境の構築と試験

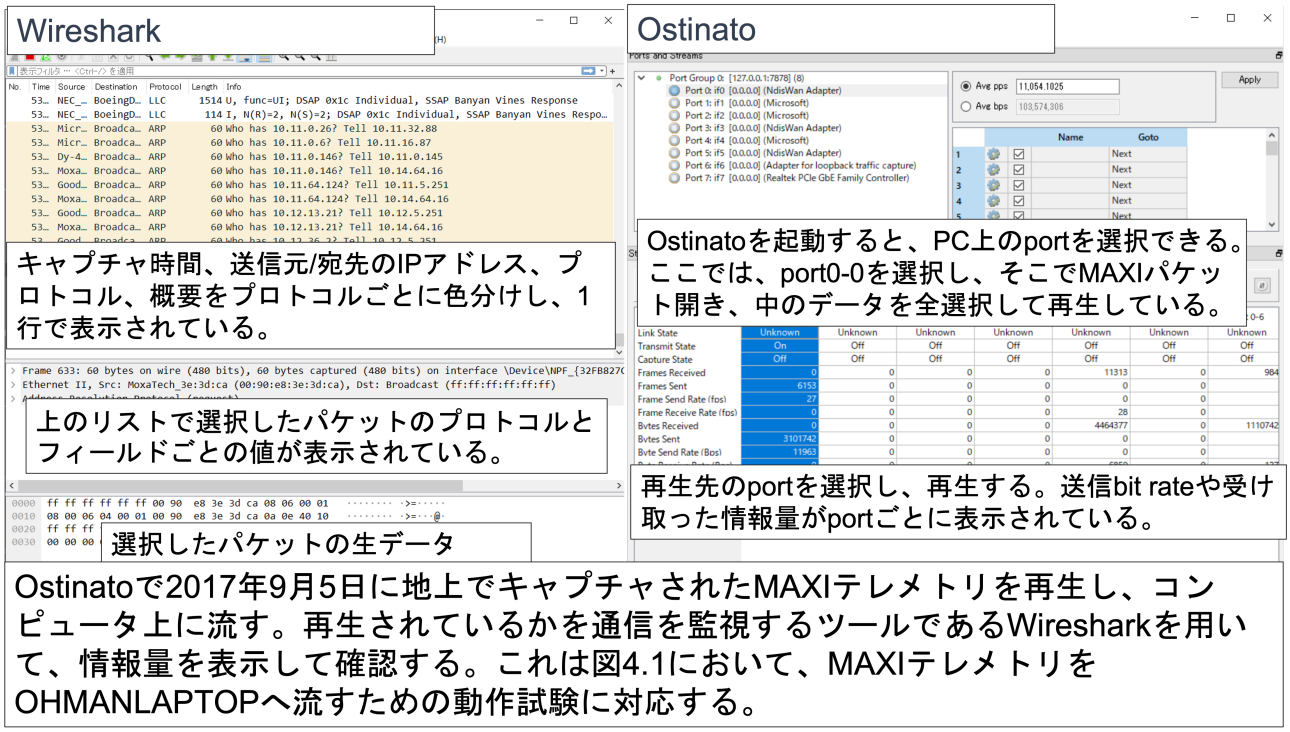
前章で述べたように、機上の OHMAN Laptop で使用するアプリケーションとして、テレメトリデータを受け取り工学値変換を行なう "ohmancap" と、観測データを時系列解析してその座標情報を送信する "novasoft" ("novasearch"と"alertsystem"からなる) が開発されていた。OHMAN 計画開始当初は、これらは Windows7 上の Visual Studio2010 環境で開発・構築されていたが、Microsoft による Windows7 のサポートが 2015 年 1 月 13 日で終了したため、Windows10 に移行する必要が生じ、そのための修正と動作確認を行なった。

ソフトウェアの修正にあたり、Windows10 Pro (バージョン 21H1) が入った PC に、visual studio community 2019[*1]をインストールし、統合開発環境 visual studio 2019 (バージョン 16.8.1) を入れた。ohmancap と novasoft が Windows10 で動作するように、必要な修正を行った。

また地上のテスト環境を作成するにあたり、PC 上に ohmancap と novasoft の他に、pcap (packet capture), Wireshark[*2],Ostinato[*3]のインストールを行った。ここで、pcap とは、LAN 上を通過する情報やその情報量を監視・記録するための API の総称である。Unix 系のシステムでは "libpcap" が広く使用されており、Windows 上では libpcap を移植した WinPcap の後継である "Npcap" が現在広く使用されている。ohmancap では、libpcap と Winpcap を使用している。Wireshark は、多くのプロトコルに対応した高機能なパケット取得・プロトコル解析ソフトで、ネットワークに流れるパケット情報をリアルタイムで確認することができる。Ostinato は、Wireshark でキャプチャしたパケットを編集し、それを送信するためのオープンソースのソフトである。

今回行った OHMAN 地上試験においては、まず観測情報などを格納したパケットを Ostinato で流す。pcap を利用した ohmancap でパケットをキャプチャし解析情報を取得し 、工学値変換処理を施して novasoft へ渡す。実際に PC 上で行なったソフトウェア動作試験の様子を図 5.1, 5.2 へ載せる。Ostinato により 2017 年 9 月 5 日に地上でキャプチャされた MAIX パケットの一部を編集し PC 上に流す。GUI でどのネットワークイ

[*1] https://visualstudio.microsoft.com/ja/vs/community/
[*2] https://www.wireshark.org/download.html
[*3] https://ostinato.org



、

図 5.1　Ostinato で MAXI パケットの一部を編集し、さらに PC 上の port を選択して再生している様子。ここでは port0-0 を選択して MAXI パケットを再生している。Wireshark でイーサネット内に流れる通信情報を通信プロトコルとともに表示している。この画像に対応する動作試験は、図 4.1 の MAXI パケットが OHMANLAPTOP へ流れる部分に対応する。

ンターフェースにパケットが流れているかを確認し、そのパケットを取得するために Wireshark を使用した。図 5.1 のように Wireshark によりイーサネット内に流れるパケットの情報がリスト表示され、流れているポートを確認し、MAXI パケットを取得できることを確認した。さらに、図 5.2 にあるように ohmancap で取得した MAXI パケットからカテゴリごとに分けた解析に必要な情報を novasearch へ正常に流し、novasearch と alertsystem が連携していることも確認した。novasearch では、ohmancap から受け取った順にデータサイズとカテゴリ番号が一行ずつ表示されている。取得した情報の中にイベント情報があれば、alertsystem に贈られる。図 5.2 では PC 上の port (ポート番号 8765) へ alertsystem が接続されたことが確認できた。

5.2　突発天体検出アルゴリズムの開発

5.2.1　突発天体即時検出の原理

付録 A.1 に、テレメトリデータから各 GSC の姿勢を決定する方法を示した。また、各 GSC の有効面積が記述されているファイルがキャリブレーションデータベース (CALDB) へ保存されている。図 5.3 で示すようにどの GSC にも中央に不感領域が存在するため、有効面積を補正して exposure map を作成することが肝要である。

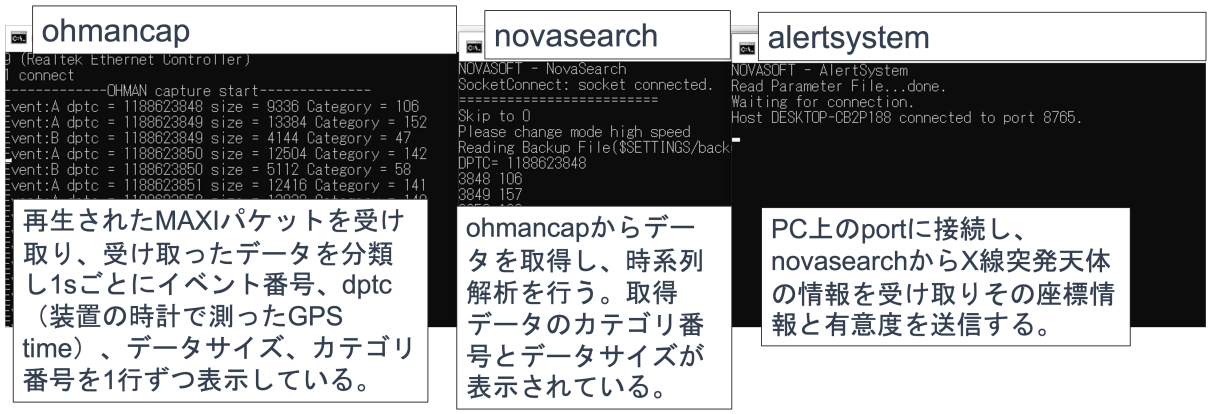


図 5.2　ohmancap で MAXI パケットを取得し、それをイベント番号、MAXI time、データサイズ、カテゴリ番号という工学値に変換し、1 行ごとに表示している。novasearch では、ohmancap から受け取った順にデータサイズとカテゴリ番号が 1 行ずつ表示されている。PC 上の port (ポート番号 8765) へ alertsystem が接続されたことが確認できた。図 4.1 の OHMAN LAPTOP 上での動作試験全般に対応する。

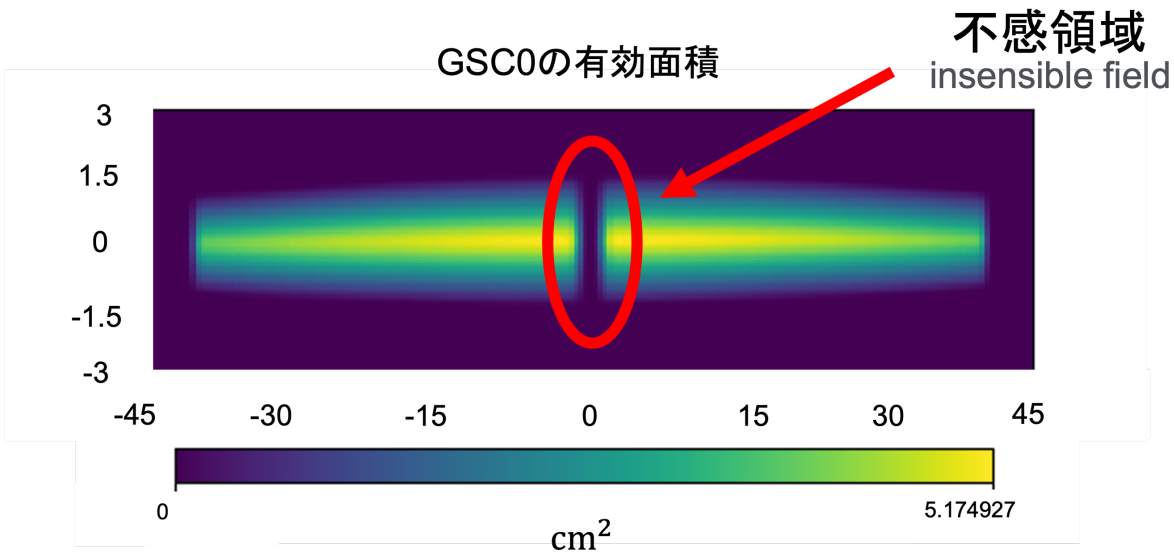


図 5.3　GSC0 の有効面積を図示したものである。縦軸はコリメータ座標の theta で ±3° の範囲を表し 0.05° 単位で表示されている。横軸はコリメータ座標の phi で ±45° の範囲を表し 0.225° 単位で表示されている。カラーバーの単位は cm^2 である。コリメーター座標の定義は、A.1 (左) を参照のこと。

本節では、GRB190708B の検出を例として、exposure corrected map (ECM) を作成し、前週の ECM との差をとることで、効率的に新天体を見つけることができることを示す。ある時刻の姿勢から視野を決定し、全天を分割した各 pixel がその視野内に入っているかを判定するコードを python で作成した。視野が時間と共に掃く領域を 1 秒ごとに計算し、空の pixel が視野内にあれば 1 秒 × 有効面積 と重み付けし、その様子を exposure map として図示した (図 5.4)。図 5.4 は $NSIDE = 64$ の HEALPix で全天を分割し、分割した

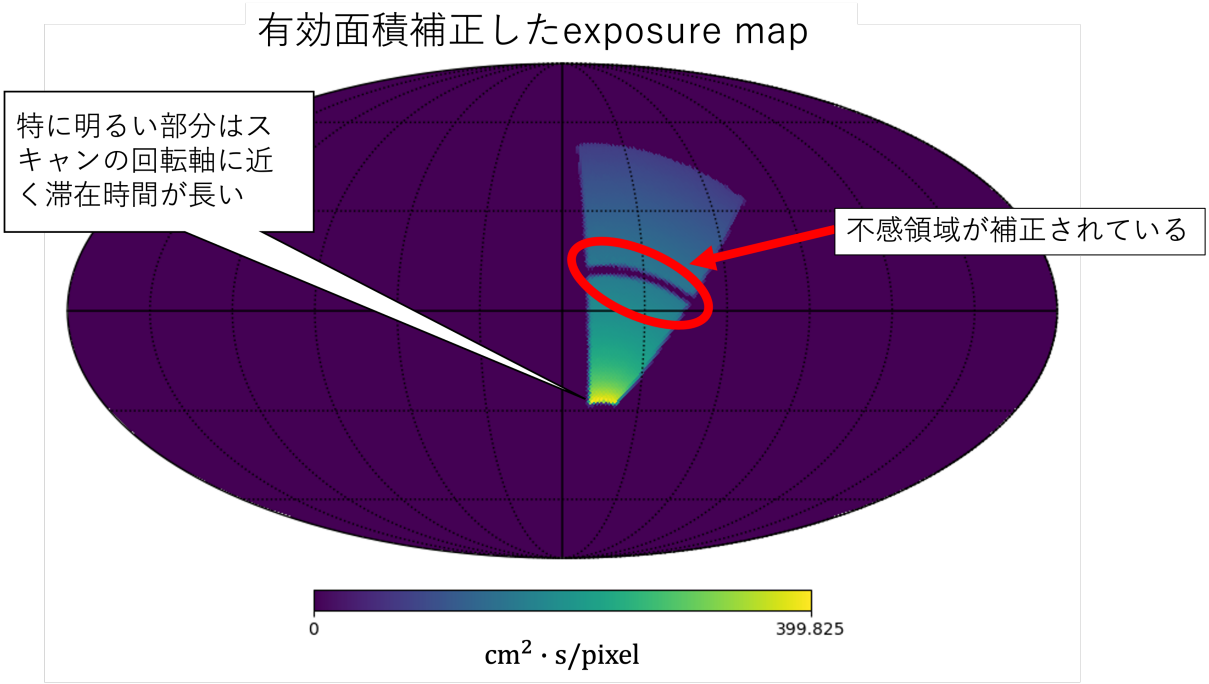


図 5.4　GRB190708B の検出時刻から $\pm 400s$ の時間範囲の exposure map を示す。値が大きいほど観測された時間が長い。ISS の回転軸に近いところほど、値が大きくなり黄色く色付けされていることがわかる。カラーバーの単位は cm^2 ×s/pixel である。

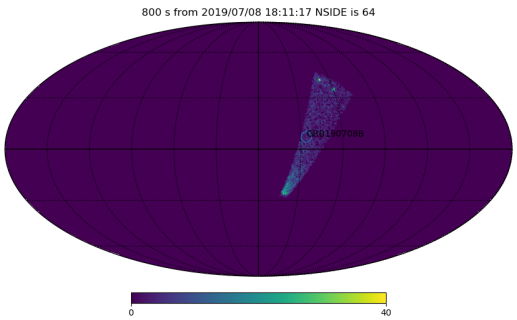


図 5.5　GRB190708B の検出前の周回の時間範囲 800s を示す。カラーバーの単位は count/pixel である。

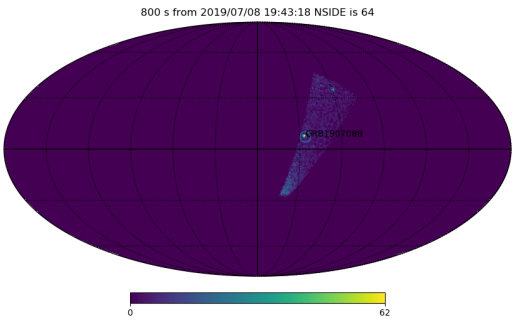


図 5.6　GRB190708B の検出時の ISS の周回の時間範囲 800s を示す。カラーバーの単位は count/pixel である。

pixel ごとの GSC5 での観測時間 × 有効面積を GRB190708B の検出時刻 (2019-07-08T19:49:58 UTC) から $\pm 400s$ の時間範囲で図示したものである。特に値が大きい領域は、ISS の回転軸に近いために、視野中の滞在時間が長くなっている。次に MAXI アーカイブデータより取得した cleaned event より GRB190708B の検出時刻から $\pm 400s$ の時間範囲の観測データ (図 5.6) とその前の ISS の周回で取られた観測データの画像 (図 5.5) を示す。前周では天体の姿が捉えられておらず、検出時刻で天体が捉えられている様子が図中の青い円で確認できる。

これらの画像を exposure map で徐算して、天球上の各 pixel における count/(cm^2×sec) を算出する。それが exposure corrected map (ECM) であり、GRB190708B について検出時の周回とその前の周回、またそれらの差分をとって図示した画像が図 5.7 である。差分を取ることでより明瞭に天体が表示されていることが確認できた。

5.2.2　突発天体検出方法の比較

前節で示したように、短時間積分した画像に適切な有効面積補正を施し、前周回との差をとることによって、突発天体を検出することができる。この場合、前周回の観測データがバックグラウンドと既存天体カタログとして使われていることになる。この方法を、ここでは「差分法」と良ぶことにする。突発天体を検出するもう一つの方法は、リアルタイムで何らかの方法でバックグラウンドを見積もり、バックグラウンドに対する超過として検出された天体を既存のカタログ天体と比較することである。この方法を「BGD モデル法」と呼ぶことにする。

表 5.1 に差分法と BGD モデル法のメリットとデメリットをまとめた。まず、荷電粒子などのバックグラウンドに関して、差分法ではバックグラウンドの計算が必要ないという利点がある一方、周回スケールの (92 分) のバックグラウンド時間変化を考慮できないことがデメリットである。 BGD モデル法では、バックグラウンドの時間変化には対応できるが、モデル化の精度に依存するというデメリットがある。例えば、地上との往来に使われるソユーズ宇宙船にはガンマ線源が装着されており、ソユーズが ISS に合体しているときといない時期で、バックグラウンドが異なる。また、ソユーズごとの個性により若干のバックグラウンドレートの差異が生じる。現在のモデルではこれらの影響が考慮されていないが、ISS の運用履歴を参照データとして用いれば、バックグラウンドモデルの改善は可能である。

また、MAXI は周回毎に少しずれた場所を観測しているため、差分法では、前周との差を取れない視野の周辺近くは使えない一方、BGD モデル法では、全視野を利用できる。既存のカタログ天体については、差分法では前周回から急檄に増光した天体を選び出すことは容易であるが、BGD モデル法ではカタログに記載されている強度との比較になるので、前周回からの増光を検出するのは比較的難しい。このように、二つの突発天体検出方法にはそれぞれメリットとデメリットが存在するため、OHMAN の実装においては両者を併用することが望ましい。

5.2.3　突発天体検出プロトタイププログラムの検証

本節では、BGD モデル法に基づいて OHMAN チームが現在開発中の「突発天体検出プロトタイププログラム」(以下、プロトタイププログラム) の検証を行う。付録 A.1 にて紹介した「on-demand 解析システム」には、GSC の House Keeping (HK) データからバックグランドを計算する方法 Hiroi et al. (2011) が独立に実装されている。また、同システムには、画像から天体強度を見積もるために、GSC の点源応答関数 (PSF) も実装されている。プロトタイププログラムには、on-demand 解析システムに使われているものと同等のバックグランド計算方法と PSF が実装されている。

本プロトタイププログラムでは、以下のような手順で天体検出を行っている。

1. 観測データを積算したのと同じ時間に対して HK データからバックグラウンドを計算する。その際バックグラウンドは Hiroi et al. (2011) と同様に、アンチコインシデンスレートを使った経験式から見積も

	差分法	BGD モデル法
メリット	BGD の計算が不要 カタログ天体の急激な増光を捉えることができる。	周回時間スケールの BGD 変化に対応できる。 視野全体を使える。
デメリット	周回時間スケールの BGD 変化に対応できない。 前周と重ならない視野周辺部には使えない。	BGD のモデル化が必要 カタログ天体の急激な増光を捉えることは難しい。

表 5.1　差分法と BGD モデル法のメリットとデメリット

られる 1,000 倍の数を検出器座標上の乱数で計算した。

2. 各 HEALPix のピクセルのバックグラウンドに対する超過を以下のように計算する:
   $Rate_{src-bg} = C_{src} - C_{bg}/SCALE_{bg}$
   $Err_{src-bg} = \sqrt{C_{src} + C_{bg} \times (\frac{1}{SCALE_{bg}})^2}$
   $Sigma = Rate_{src-bg}/Err_{src-bg}$
3. HEALPix マップ上で、基準を超えたピクセルを判定し (図 5.8a)、その後隣接して検出されたピクセルをクラスター化し「ラベリング」した (図 5.8b)。
4. その後、検出されたクラスターごとに、広がり、有意度、重心位置を求めた。

この方法の検証として、表 2.1 で示す過去に検出された MUSST 天体から代表的なものを選び (GRB161123A, MAXI J1501–026, MAXI J0545+043)、プロトタイププログラムを実行した。天体を検出した GSC カウンターを選び、検出された時刻の ±300 秒について、天体検出を行い、PSF を用いて有意度を計算した (表 5.2, 図 5.9)。

表 5.2 に示す通り、MUSST 天体が、ほぼ正確な位置に検出されていることがわかる。MAXI J0545+043 の観測中に受かった最も明るい天体 1 は、Crab (かに星雲) である。プロトタイププログラムによって計算された、生の全天イメージ、計算されたバックグラウンドイメージ、有効面積、バックグラウンドを引いて有効面積補正をしたイメージを、それぞれの天体について、図 5.10, 図 5.11, 図 5.12 に示す。

5.2.4　突発天体検出プロトタイププログラムを用いた GRB の解析

次に、MAXI が今までに検出した GRB を用いて、プロトタイププログラムの検証を行った。GRB は比較的明るく継続時間が短いため、この目的に適している。MAXI で検出された GRB は `http://maxi.riken.jp/grbs/` に記録されている (これには 8 つの MUSST も含まれている)。現状の alertsystem で、これらの GRB を自動で検出しアラートを発出できたのは 21 個である (4 章参照)。それ以外の GRB については、MAXI 当番が目視で検出し、手動で詳細解析を行って位置や強度を求めて、アラートを発出したものである。

今回、解析に必要な情報 (検出した GSC カウンター番号など) が得られた GRB を対象に、プロトタイププログラムを実行した。各 GRB の詳細情報 (正確な座標、強度など) と、プロタイププログラムを走らせた結果 (検出有意度、GRB の座標からの距離、ピクセルの広がり) を付録 A.3 に記載する。116 個の GRB に対して実行し、115 個に対して結果を得た (GRB140219A は、原因不明のエラーで実行できなかった)。

その結果、106 個の GRB が、正確な座標から 1 度以内に有意度 2.5σ 以上で検出された。検出されなかった GRB のうち 7 つ (GRB110429、GRB120127A、GRB120528C、GRB120816B、GRB170511A、

天体名	赤経 (度)	赤緯 (度)	強度 (Crab)	広がり (pixels)	有意度 (σ)
GRB161123A	32.21	−39.65	0.14	–	–
天体 1	32.55	−39.68	–	2	5.9

天体名	赤経 (度)	赤緯 (度)	強度 (Crab)	広がり (pixels)	有意度
MAXI J1501–026	225.37	−2.60	0.44	–	–
天体 1	225.30	−2.61	–	6	10.5

天体名	赤経 (度)	赤緯 (度)	強度 (Crab)	広がり (pixels)	有意度
MAXI J0545+043	86.44	4.32	0.2	–	–
天体 1	83.72	21.90	–	10	15.8
天体 2	86.17	4.52	–	2	3.5

表 5.2　代表的な MUSST 天体が検出された時刻 ±300 秒にプロトタイププログラムを適用した出力結果。詳細観測によって決まった MUSSST 天体の正確な位置、強度と、プロトタイププログラムによる検出天体の決定位置と有意度を示している。MAXI J0545+043 の観測では、天体 1 は Crab (かに星雲)、天体 2 が MAXI J0545+043 である。

GRB180720B、GRB120510A、GRB140221A、GRB211225A) は継続時間が短く検出できなかったものと考えられる。残りの 2 つは GRB170511A と GRB211225A である。GRB170511A の解析で、新天体は GRB170511A から角距離 1.560 度、Cyg X-1 から 0.514 度の位置に検出された。明るい Cyg X-1 の大きな PSF と重なったために GRB と同定できなかったものと考えられる。GRB211225A については、新天体は GRB211225A から 1.098 度の距離に検出された。これは、ピクセルの広がりが 7 と大きかったため、1 度以内の検出にならなかったものと思われる。

さらに我々は、検出されたすべての天体を既知天体カタログ[*4]と照合し、検出効率と誤検出の割合を評価した。検出有意度とカタログ天体からの距離が閾値以上のものを新天体とした。それらの閾値の組み合わせについて、検出された GRB 数、誤検出の数を求めた。その結果を表 5.4 に示す。検出有意度の閾値を上げていく、またはカタログ天体からの距離の閾値を上げていくと、当然誤検出は減るが GRB の検出数も下がることがわかる。検出された GRB 数/誤検出数が最大の値 (=14) になる検出有意度と距離の組み合わせは、以下の通りであった：

- 検出有意度= 6 σ, 上限距離=1.5°。70 個の GRB を検出、5 個の誤検出。
- 検出有意度= 7 σ, 上限距離=1.5° または 2°。 56 個の GRB を検出、4 個の誤検出。

いずれの場合も、現状の alertsystem で自動検出された数 (=21) よりも多くの GRB を自動検出できているが、誤検出も避けられないことがわかる。OHMAN における誤検出は、NICER 装置を無駄に稼働させることになり、失われるコストが大きい。よって、プロトタイププログラムを改良して、誤検出を減らすことが今後の課題である。

上記に示した 5 個の誤検出 (カタログ天体から 1.5° 以上かつ GRB から 1.0° 以上離れている) は、GRB160814A、GRB180720B、GRB210109A、GRB210521A、GRB211225A に対して生じたものである

[*4] http://maxi.riken.jp/top/slist_ra.html

が、GRB211225A については GRB からの距離が 1.098° であったので、正しい検出と考えてもよいだろう。以下に、これらの誤検出された出力結果をまとめた。合わせて最も近い天体との角距離の情報を載せている。さらに、図 5.13 に、それらの誤検出が含まれているバックグラウンドを引いた画像に対し露出補正を行なった全天画像を載せた。誤検出を青丸、GRB の位置を赤丸として示している。GRB160814A に対する結果では、画像でも誤検出された天体候補が視野の端で真の天体のように見える。しかし、実際にこの座標の近傍には既知天体がない。GRB180720B に対する結果では、表に載せた誤検出を含めて、出力された全ての天体候補が同定できなかった。姿勢計算が正しく行えてなく、天体候補の座標を正しく算出できていなかった。これはこの一例のみに生じた問題であり、原因を調査中である。図 5.13b の矢印の先に生じたイベントについて座標値を計算すると、(0.58,−2.66) であった。これは GRB180720B と 0.22° 離れており、最も近い天体は WW Cet で 9.60° 離れているという結果であった。すなわち、プログラムでは位置が正しく計算されていなかったが、GRB が検出できていた。その他、GRB2010109A と GRB210521A についての誤検出はどちらの誤検出も視野の端で生じていることが確認できた。ISS の回転軸に近く exposure とバックグラウンドが高くなっており、これらが影響して天体候補と誤認した可能性がある。より精度の高い突発天体検出を行うために、我々はこのような誤検出の原因を究明しプログラムの修正を行っていく必要がある。

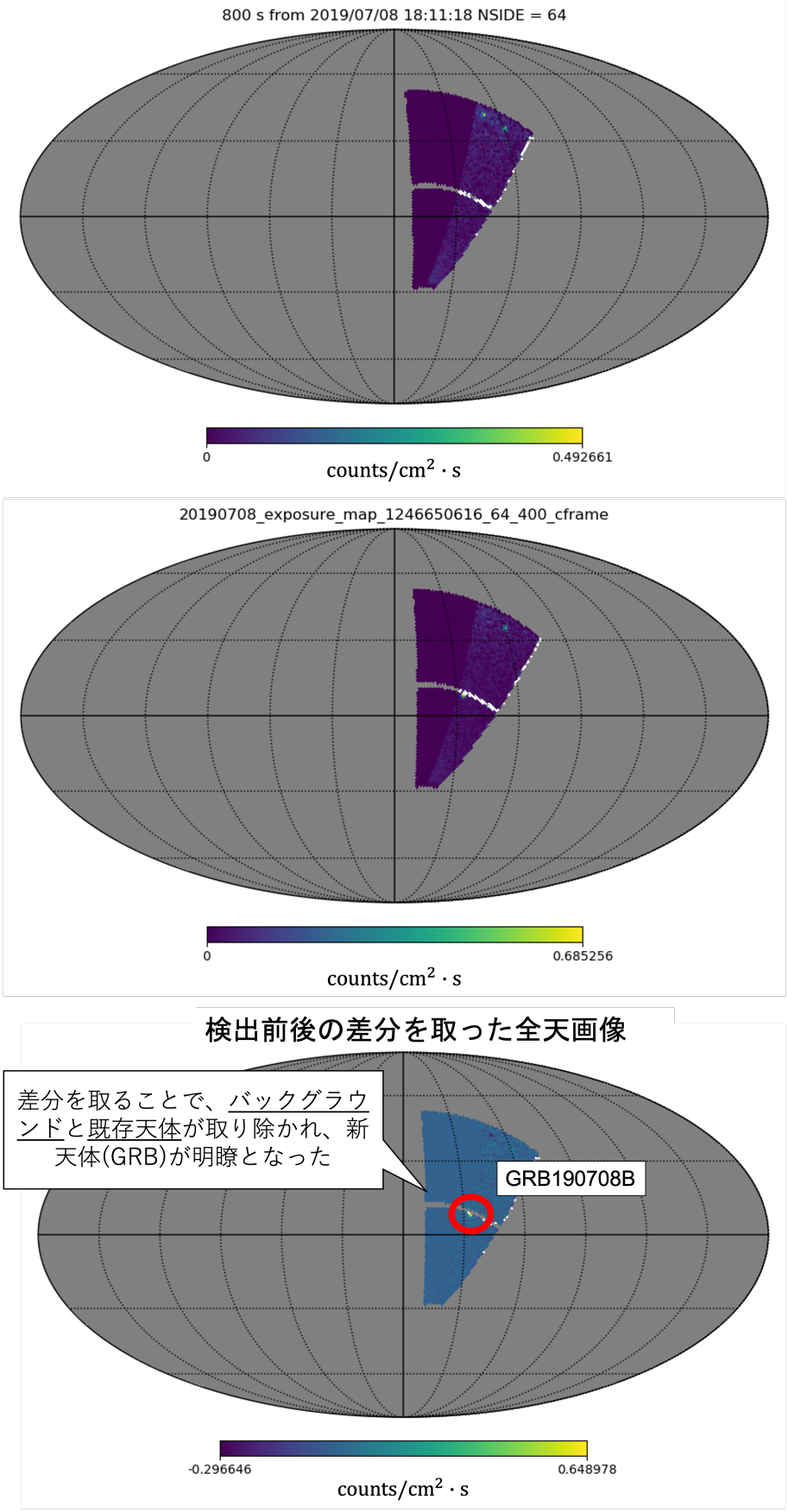


図 5.7　GRB190708B(GCN#25037) の検出時刻から ±400 秒間の露出補正したマップとその前周との差。上から 1 枚目は検出前、2 枚目は検出時、3 枚目はそれらの差分である。

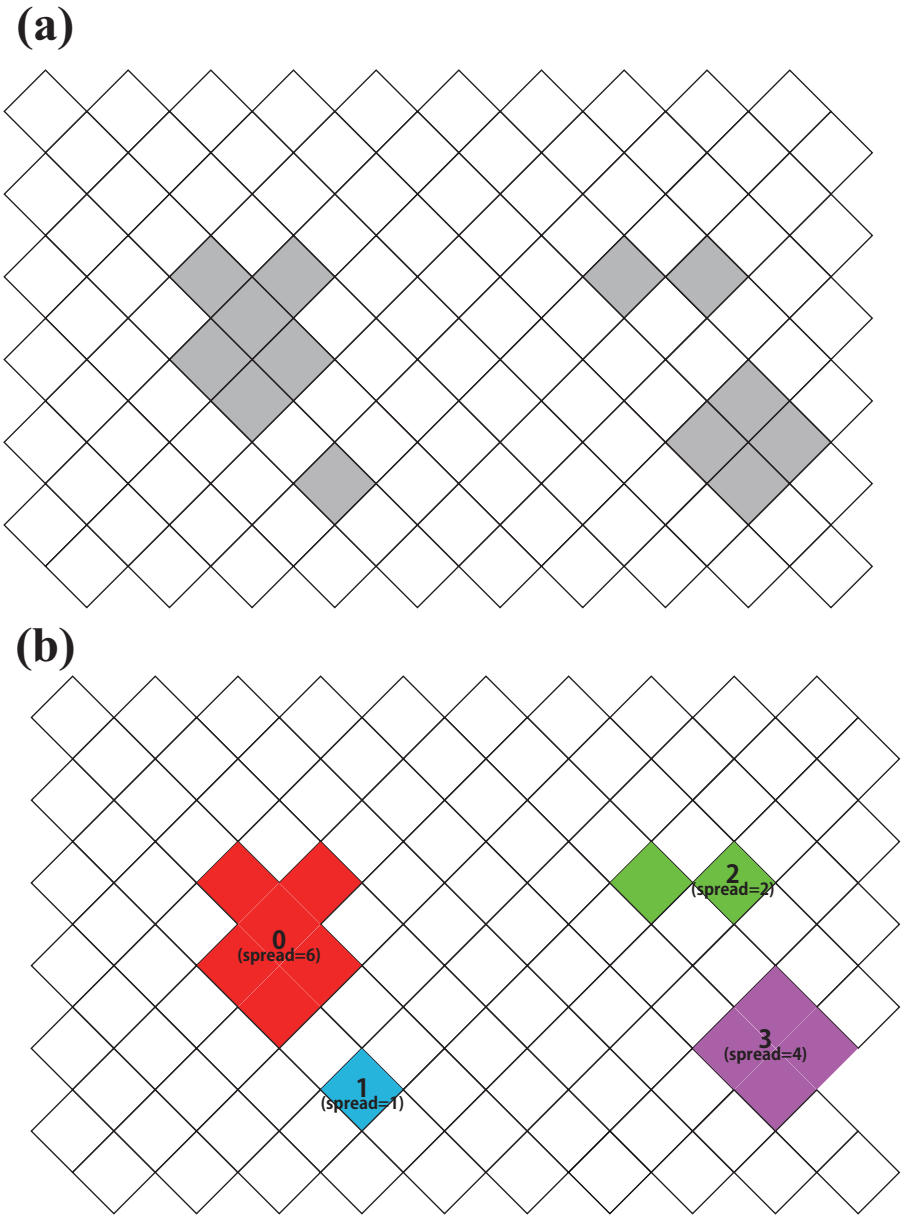


図 5.8　HEALpix マップ上での天体検出のアルゴリズムの模式図。ひし形の領域が HEALPix のピクセル１つ１つを示す。まず各ピクセルの有意度を求め、(a) 一定の有意度を超えて検出されたピクセルと (b) ラベリングの結果。

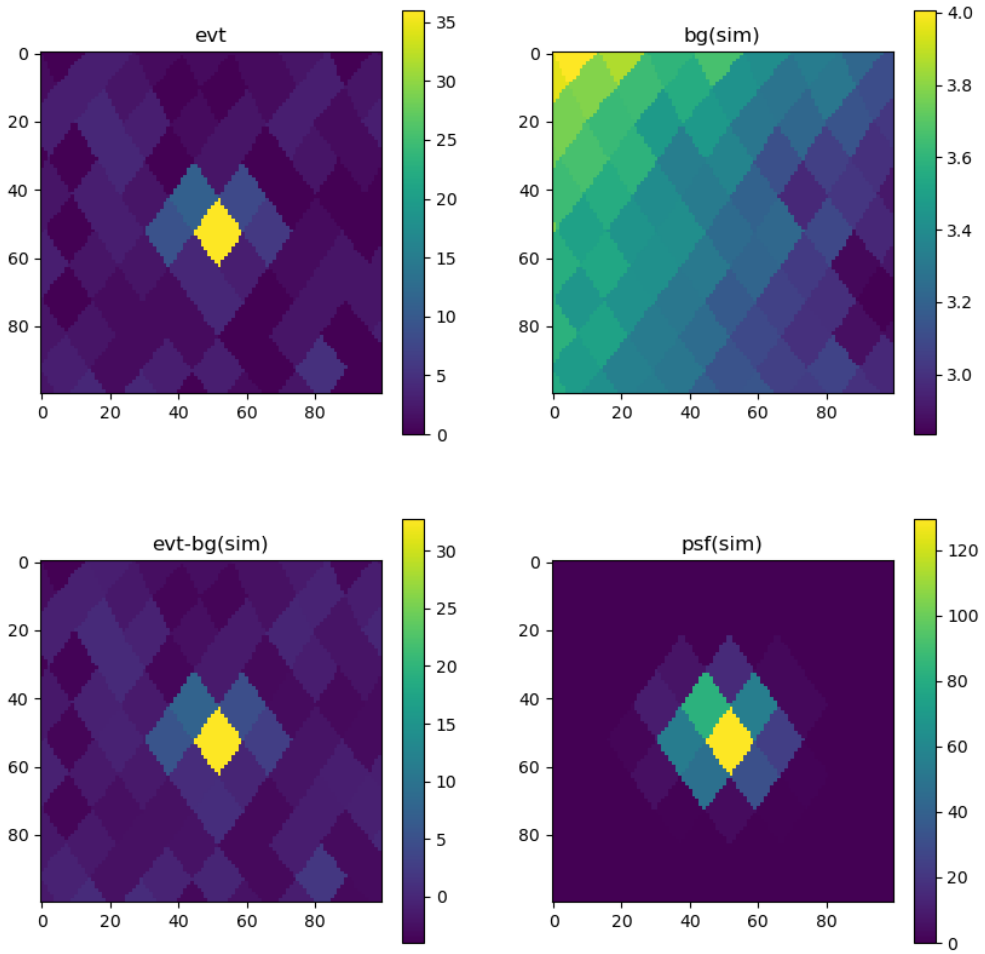


図 5.9　MUSST 天体 GRB161123A に対して、プロトタイププログラムを適用した例。左上が生のイメージ、右上が計算したバックグランドイメージ、左下がバックグラウンドを引いたイメージ、右下が計算した PSF。

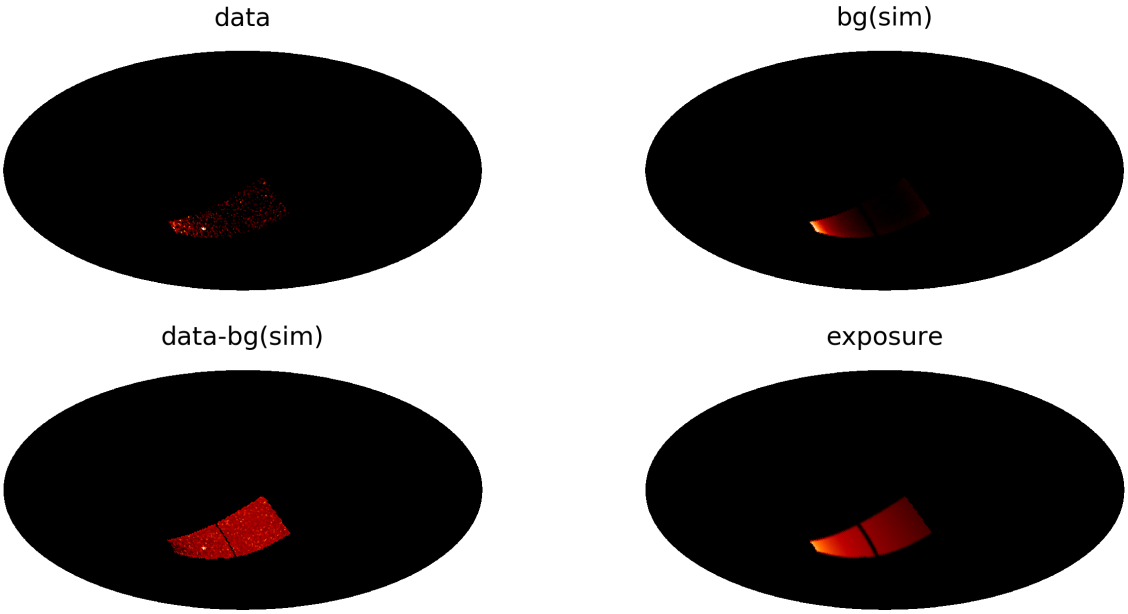


図 5.10　GRB161123A を含む観測時間に対して、プロトタイププログラムを実行した出力結果。左上が生の全天イメージ、右上がシミュレーションで計算した全天のバックグラウンドイメージ、右下が exposure map、左下が、バックグランドを引いたイメージに exposure 補正を行ったもの。赤道座標で表示している。

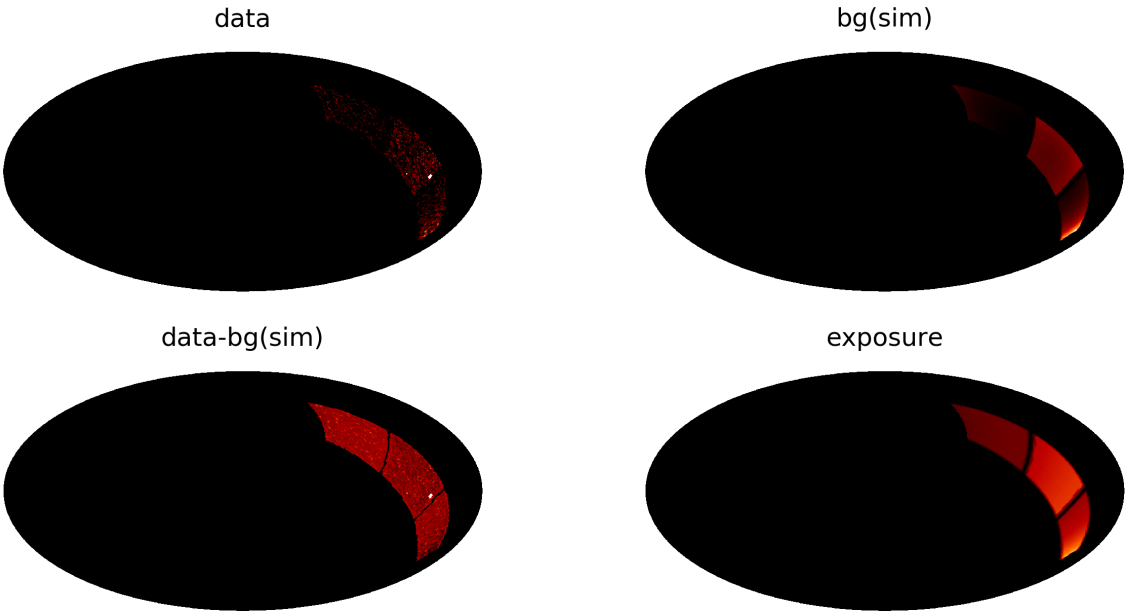


図 5.11　MAX J1501–026 を含む観測時間に対して、プロトタイププログラムを実行した出力結果。

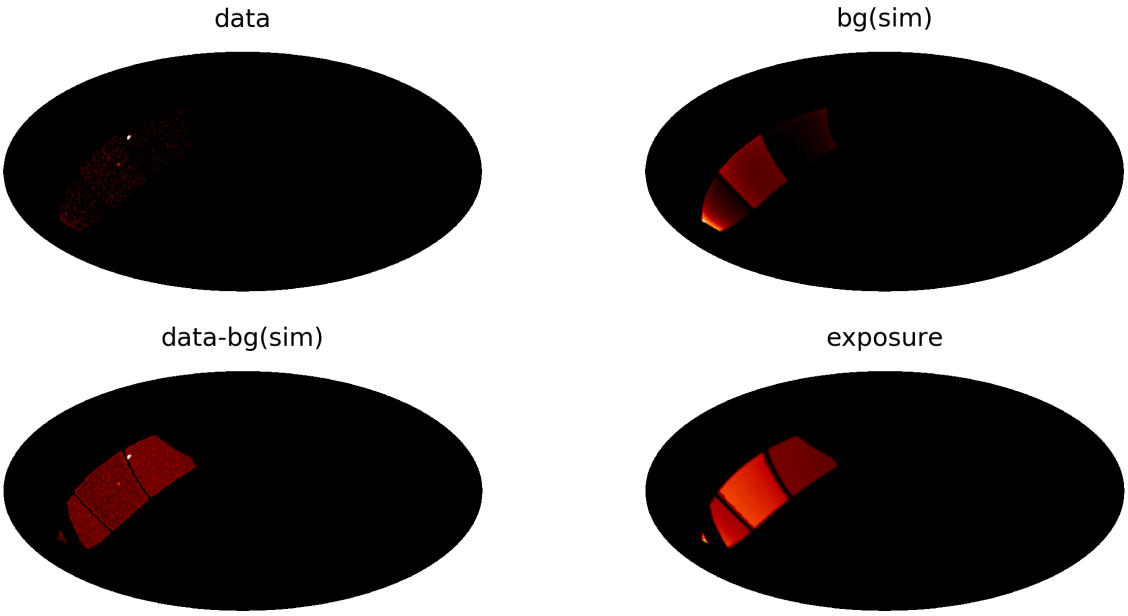
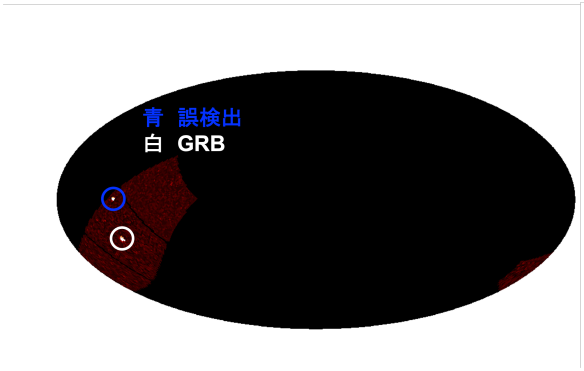


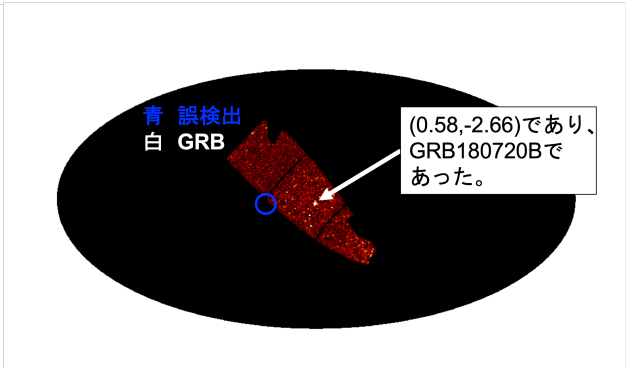
図 5.12　MAXI J0545+043 を含む観測時間に対して、プロトタイププログラムを実行した出力結果。左下の図で最も明るく見えている天体は Crab (かに星雲)、その南東に MAXI J0545+043 が検出されている。

表 5.3　6σ で生じた誤検出についてまとめた。t0 は GRB の検出時刻である。

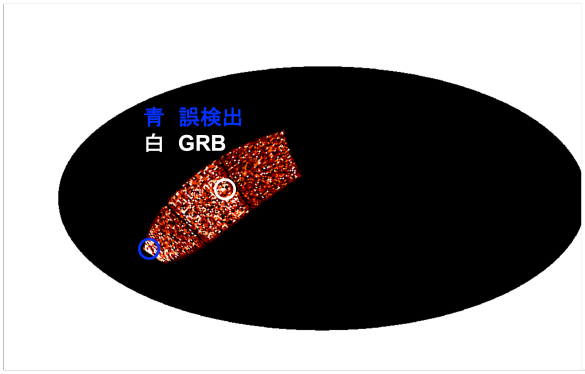
天体名	gscid	t0	赤経 (度)	赤緯 (度)	広がり (pixels)	有意度	角距離/最近既知天体	GRB 検出
GRB 160814A	4,5	2016-08-14T21:13:09	134.37	0.42	5	10.5	5.13/GRB 130505B	有
GRB 180720B	4,5	2018-07-20T14:28:34	30.68	-2.74	7	9.7	10.35/NGC 1068	無
GRB 210109A	4,5	2021-01-09T09:03:22	124.53	-27.84	12	8.1	8.85/Swift J0840.7-3516	有
GRB 210521A	5	2021-12-25T03:22:39	216.62	-51.64	8	6.6	9.54/2MASX J14104482-4228325	有



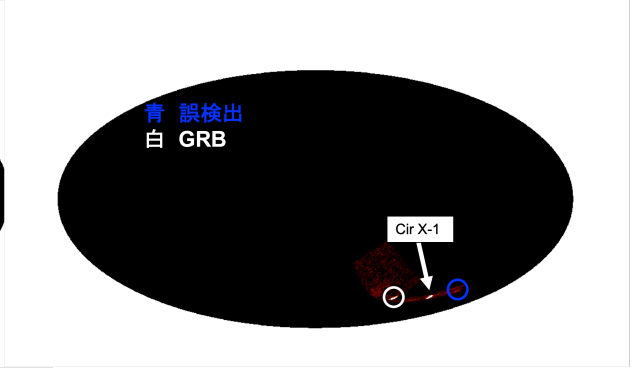
(a) GRB160814A



(b) GRB180720B



(c) GRB210109A



(d) GRB210521A

図 5.13　6σ 以上で生じた誤検出を含む出力結果を示す。いずれもバックグラウンドを引いて露出補正した全天画像である。白丸が GRB(新天体) であり、青丸が誤検出である。

表 5.4　GRB を含むデータに対するプロトタイププログラムの実行結果。検出有意度とカタログ天体からの距離が閾値以上のものを新天体の検出とした。そのうち、GRB からの距離が 1° 以内のものを GRB と同定し、それ以外は誤検出とした。検出有意度の閾値は 2 $\sigma, 2.5\sigma, 3\sigma, 4\sigma, 5\sigma, 6\sigma, 7\sigma, 8\sigma$、カタログ天体からの距離の閾値は、$0.5°, 0.75°, 1.0°, 1.25°, 1.5°, 2.0°$ を試した。GRB 数/誤検出数が最大の値 (=14) になる組み合わせを太字で示した。

	2 σ			2.5 σ			3 σ			4 σ		
距離 (度)	GRB	誤検出	GRB/誤検出	GRB	誤検出	GRB/誤検出	GRB	誤検出	GRB/誤検出	GRB	誤検出	GRB/誤検出
0.5	106	1100	0.10	106	190	0.56	105	111	0.95	99	56	1.77
0.75	105	1054	0.10	105	164	0.64	104	94	1.11	98	41	2.39
1	102	1029	0.10	102	152	0.67	101	86	1.17	95	35	2.71
1.25	101	995	0.10	101	136	0.74	100	73	1.37	94	24	3.92
1.5	100	960	0.10	100	121	0.83	99	61	1.62	93	17	5.47
2	98	935	0.10	98	117	0.84	97	60	1.62	91	17	5.35

	5 σ			6 σ			7 σ			8 σ		
距離 (度)	GRB	誤検出	GRB/誤検出	GRB	誤検出	GRB/誤検出	GRB	誤検出	GRB/誤検出	GRB	誤検出	GRB/誤検出
0.5	90	43	2.09	75	33	2.27	60	32	1.88	52	32	1.63
0.75	89	33	2.70	75	26	2.88	60	25	2.40	52	25	2.08
1	86	27	3.19	72	20	3.60	58	19	3.05	50	19	2.63
1.25	85	18	4.72	71	12	5.92	57	11	5.18	49	11	4.45
1.5	84	11	7.64	**70**	**5**	**14.00**	**56**	**4**	**14.00**	48	4	12.00
2	83	11	7.55	69	5	13.80	**56**	**4**	**14.00**	48	4	12.00

第 6 章

まとめと今後の課題・計画

今回、現状蓄積されたデータを使い、OHMAN で想定されているアルゴリズムで突発天体を検出できることが確認できた。解析のために使用しているコードの実行時間が長いため、機上で現状のコードをリアルタイムで流すことが困難である。最も計算に時間を要するのは各 GSC の視野内に全天を分割した pixel が入っているか判定する部分である。また、姿勢の計算に行列・四元数の計算が非効率に混在していることもわかっている。実行時間の短縮にあたり、時間を要する部分の計算方法の工夫と修正を行い、コードの高速化とそれに伴う天体の検出精度（解像度、位置精度を含め）とのトレードオフを吟味する必要がある。

また、今回利用したデータはバックグラウンドの高いところを除いた cleaned event データである。しかし、実際に機上で使用するデータはバックグランドを含む uncleaned event データである。よって、機上でリアルタイムでバックグランドを除去するアルゴリズムを考案する必要がある。これらの修正を加えたコードをパッケージ化して、OHMAN LAPTOP(機上の OHMAN で用いる PC) にインストールする。

2022 年 4 月から実装される初期段階の OHMAN システムには、まだ本論文で考案した方法は実装されておらず、暗い突発天体を検出することは困難である。そこで、運用開始から約 1 年間は、OHMAN 連携の初期運用のデータを元に、さらに暗い天体を精確に捉えるアルゴリズムを追求し、そのための技術課題解決に注力する。改良したノバ発見アルゴリズムを OHMAN に実装して本格的な観測を開始し、MAXI と NICER による「X 線急速減光天体」のデータをできるだけ収集する。

ISS の運用が 2030 年まで延期されることとなったこと[*1]で、OHMAN がより長く継続され、インパクトの高い科学的成果を出すことが期待される。また 2022 年打ち上げ予定の XRISM 衛星が控えており、発見した現象の X 線分光観測にも繋げられ、より科学的成果の向上が見込まれる。OHMAN 計画 は JAXA と NASA の緊密な協力のもとで進められる計画であり、その連携が成功すれば、真の意味で ISS の国際的価値を高めるだろう。今後の国際的な宇宙開発において、多国の装置が軌道上で連携を進 める計画の嚆矢となる。

[*1] https://blogs.nasa.gov/spacestation/2021/12/31/biden-harris-administration-extends-space-station-operations-through-2030/

付録 A

OHMAN 開発で用いた解析環境

A.1　DB FITS ダンプと MAXI アーカイブ

NASA から JAXA の筑波宇宙センターに送られた MAXI テレメトリーデータは、"MAXI DB" と呼ばれるデータベースに格納される。MAXI DB の内容を binary のまま FITS ヘダーを付けたファイルを "DB FITS ダンプ" と呼ぶ。筑波宇宙センターでは DB FITS ダンプからパイプライン処理によって標準 FITS ファイルが作成され、それが宇宙科学研究所に送られ、DARTS[*1]から公開されている。また、同じデータが、世界の高エネルギー天文アーカイブを集約している NASA の High Energy Astrophysics Science Archive Research Center（HEASARC[*2]）からも入手可能である。MAXI の標準解析に必要なソフトウェアパッケージとキャリブレーションファイルは、それぞれ HEASARC が管理する HEASoft [*3], CALDB[*4]の一部として配布されている。これによって、世界中の研究者が MAXI のデータ解析を行えるようになっている。

標準的な X 線天体のライトカーブなどの高次プロダクトは、理研から公開されている[*5]。また、データやソフトウェアをダウンロードしなくても、Web 上で任意の位置と時間を選択して、スペクトルやライトカーブを抽出することができる on-demand 解析システムも公開されている[*6]。

パイプライン処理では、姿勢補足のための Visual Star Camera (VSC) のデータを用いた姿勢決定が行われ、正確な姿勢ファイルが生成される。それがパイプライン処理において、各 X 線光子の到来方法を決めるのに用いられる。一方 OHMAN では、テレメトリに出力される暫定的な ISS の姿勢情報を用いて、X 線の到来方向を決定する必要がある。

ISS の姿勢情報は、1 秒ごとに q パラメータ (単位四元数) としてテレメトリーに送られる。OHMAN ではそれを用いてリアルタイムで姿勢を決定するが、そのアルゴリズム検証のために、DB FITS ダンプを用いることができる。DB FITS ダンプは一日ごと、テレメトリの種別ごとに作成される。各日付の姿勢情報は、筑波宇宙センターで MAXI チームが利用する計算機の

`/mxdata.tksc/archive/DBFITS_Dump/med/日付/IssAncCdtPsPd.fits`

[*1] https://darts.isas.jaxa.jp
[*2] https://heasarc.gsfc.nasa.gov
[*3] https://heasarc.gsfc.nasa.gov/docs/software/heasoft/
[*4] https://heasarc.gsfc.nasa.gov/docs/heasarc/caldb/caldb_intro.html
[*5] http://maxi.riken.jp/top
[*6] http://maxi.riken.jp/mxondem/

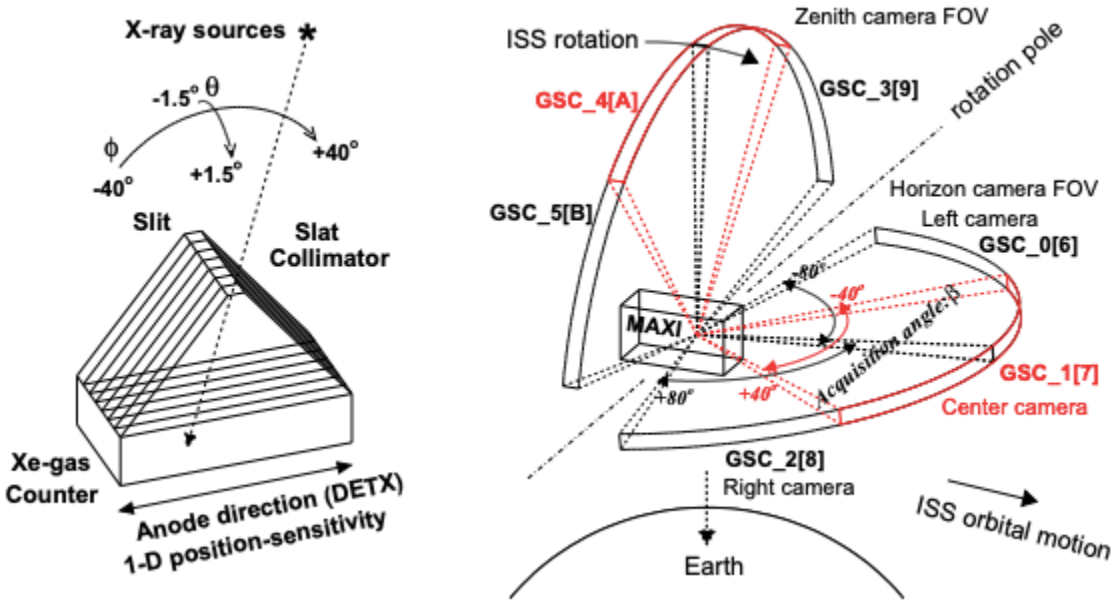


図 A.1　(左)：GSC カウンター 1 台とその視野の模式図。$\pm 1.5^\circ \times \pm 40^\circ$ の視野と、一次元の位置決定能力を持つ。(右)： 12 台のカウンタ（GSC 0, ..., GSC 9, GSC A, GSC B）から成る 6 台のカメラの視野。2 つのカウンタごとに、例えば GSC 0 と GSC 6 が 1 つのカメラを構成し、おなじ視野を持つ。左、中央、右のカメラを合わせて、$1.5^\circ \times 160^\circ$ (FWHM) の細長い視野をカバーしている。天頂を向いている Zenith モジュールと ISS の進行方向を向いている Horizontal カメラモジュールの視野は 90° ずれている。 図は Sugizaki et al. (2011) による。

から得ることができる。

A.2　MAXI で用いる座標系と座標変換

テレメトリから得られる ISS の簡易姿勢を用いて、各 GSC の姿勢の計算を行うことができる。その計算処理をこのセクションで説明する。図 A.1(左) は、GSC カウンター 1 台とその視野の模式図で、図 A.1(右) は、6 台のカメラ全体の視野を示す。詳細は、Sugizaki et al. (2011) に記載されている。各カウンターのコリメータ座標 (θ, ϕ) は、図 A.1(左) のように定義されていて、天体の検出位置はコリメータ座標で与えられる。そこから、ISS の姿勢やカウンターの配置を考慮し、天球上の赤経、赤緯を計算する必要がある。

DBFITS ダンプには、ISS の q パラメータが格納されている。これは、天球座標と ISS 基準座標との間の変換を与える。天体位置のコリメーター座標を得るには、天球座標から ISS 基準座標への変換、ISS 基準座標から VSC 基準座標への変換、そこから MAXI 基準座標への変換が必要である。さらに、そこから 12 個の GSC の個別のコリメーター座標への変換が必要である。これらの変換は 3 次元空間における回転として与えられ、それぞれの回転に対する q パラメータが、CALDB 中のファイルに記載されている。

以下に、コリメータ座標を天球座標に変換する関数の例を示す。地上解析システムに実装されている C 言語で書かれた MAXI の座標計算ライブラリ"MAXITOOL"を、そのまま python 版に書き直した。ここで、姿勢

や軌道の計算を簡便に行うための python パッケージ、python-atFunctions[*7]を利用している。今回、座標変換の関数を python 版に書き直す際に、以下のプログラム中のコメントで説明するように、現状の地上解析システムにおける実装には無駄な部分があることがわかった。地上解析システムでは問題にならないが、OHMAN では迅速性が要求されるため、将来的にはこの計算を効率化することが必要である。

```
def maxi_colsp2detsp(col_th, col_ph):
  # 各 GSC のコリメータ座標を各 GSC の極座標に直す:
  col_th_rad = np.radians(col_th) #入力をラジアンに変換
  col_ph_rad = np.radians(col_ph) #入力をラジアンに変換
  vect=np.array([np.cos(col_th_rad)*np.sin(col_ph_rad),np.
  sin(col_th_rad),np.cos(col_th_rad)*np.cos(col_ph_rad)]).T
  # 各 GSC 座標における方向ベクトルの x,y,z 成分
  pol = pyat.atVectToPol(vect) # python-atFunctions の関数を用いて極座標変換
  det_th = 90.0-np.degrees(pol["lat"])  # 各 GSC における極座標 theta
  det_ph = np.degrees(pol["lon"]) # 各 GSC における極座標 phi
  return det_th, det_ph

def maxi_detsp2ecs(gsc_teldef_quat, qpar_maxi , det_th, det_ph):
  # 各 GSC の極座標から天球座標に変換する：
  # gsc_teldef_quat:MAXI 基準座標と各 GSC 座標への回転四元数。GSC 毎に 12 個ある。
  # qpar_maxi: 天球座標から MAXI 基準座標への回転四元数。時間変化する姿勢に対応する。
  #            天球座標->ISS 基準座標->VSC 基準座標->MAXI 基準座標の変換を含んでいる。
  delta_gsc = 90.0 - det_th
  alpha_gsc = det_ph
  vec_gsc = pyat.atPolDegToVect(1., alpha_gsc, delta_gsc)
  # 各 GSC 座標における方向ベクトルの x,y,z 成分。上記関数の vect と同じ。
  Mij = pyat.atQuatToRM(gsc_teldef_quat)
  # MAXI 基準座標から各 GSC 基準座標への回転四元数に対する回転行列
  invMij = pyat.atInvRotMat(Mij)  #Mij の逆行列を定義する
  vec_maxi = pyat.atRotVect(invMij, vec_gsc)  # MAXI 基準座標での方向ベクトル
  Bij = pyat.atQuatToRM(qpar_maxi) # 天球座標から MAXI 基準座標への回転行列を定義
  invBij = pyat.atInvRotMat(Bij) # Bij の逆行列を定義
  vec_ecs = pyat.atRotVect(invBij, vec_maxi)
  # MAXI 基準座標での方向ベクトルを赤道座標系の方向ベクトルに変換する
  return pyat.atVectToPolDeg(vec_ecs)[1:] #(RA,DEC) を出力する
```

[*7] https://darts.isas.jaxa.jp/software/python-atFunctions/ atFunctions は、日本の X 線グループが、初期の時代から利用してきた姿勢や軌道に関する関数群である。C 言語で書かれたバージョンは、HEASoft に含まれている。

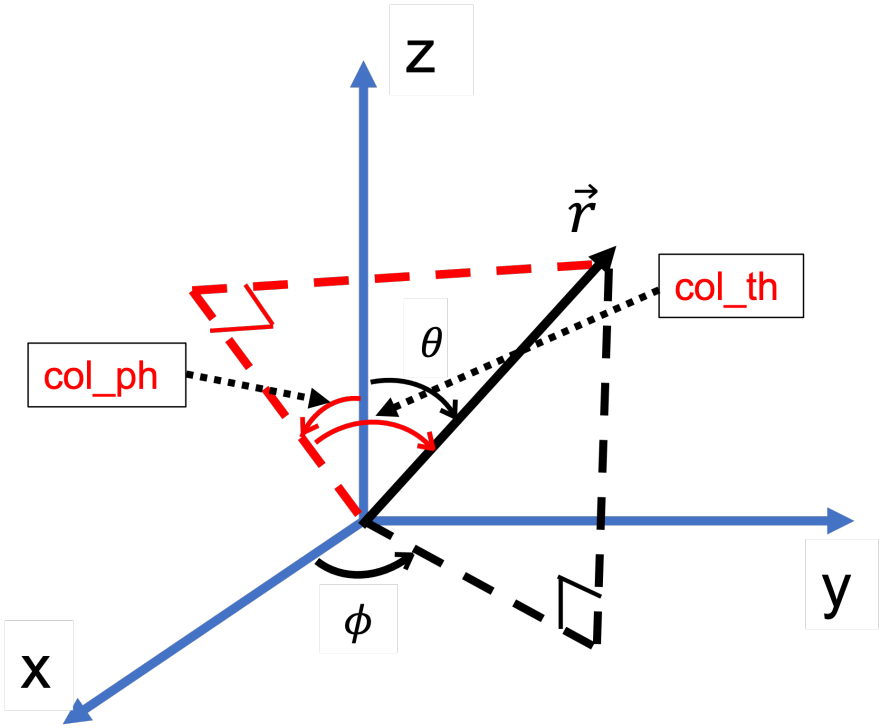


図 A.2　各検出器の直交座標 (xyz) とコリメーター座標 (col_th, col_ph) との関係を図示したもの。コリメーターは xz 面に配置されていて、+z 方向を向いている。細長い視野は x 軸に沿っている。よって、天体の方向ベクトル $\vec{r}$ とcol_th, col_ph の角度関係は上図のようになる。col_th は xz 平面からの方向ベクトル $\vec{r}$ の傾き (方向ベクトルとその xz 平面への正射影がなす角) であり、col_ph はその正射影を +z 軸から測った角である。黒字の θ, ϕ は、通常の極座標である。

A.3　MAXI で検出された GRB のリスト

これまでに MAXI で検出された GRB は 141 個であり、 `http://maxi.riken.jp/grbs` に記録されている。表 A.1 は今回プロトタイププログラムで実行した GRB の観測情報である。GCN/Atel までのコラムでは、検出後の詳細な解析によって得られた情報が載せられている。それ以降の 3 つのコラムでは、今回、突発天体検出プロトタイププログラムで実行した結果を示している。 1 つ目のコラムはピクセルの広がり、2 つ目のコラムは検出有意度、3 つ目のコラムで GRB の正確な位置との角距離を示している。

表 A.1: プロトタイププログラムを実行した GRB の一覧

天体名	t0	gscid	RA	DEC	l	b	flux (2-20keV)	hardness (8-20keV/2-8keV)	GCN/Atel	プロトタイププログラムの出力結果 ピクセルの広がり	検出有意度 (σ)	距離のずれ (度)
GRB090831	2009-08-31T07:37:07	2 , 8	145.40	51.40	165.63	46.34	4.91±0.14	0.47±0.04	#9852	13	32.07	0.87
GRB090926B	2009-09-26T21:55:39	0 , 1 , 7	46.30	−39.10	245.24	−60.63	1.68±0.15	1.75±0.47	#9943	5	8.30	0.44
GRB091120	2009-11-20T04:35:20	0 , 1 , 7	226.81	−21.79	159.17	31.69	7.69±0.23	0.46±0.04	#10188	11	28.84	0.11
GRB091230	2009-12-30T06:27:15	2 , 8	132.91	−53.88	271.63	−6.60	0.27±0.04	1.06±0.38	-	2	3.79	0.81
GRB100415A	2010-04-15T03:44:54	4	7.48	−15.57	273.90	−76.94	0.96±0.11	0.38±0.13	#10596	4	7.01	0.82
GRB100510A	2010-05-10T19:27:23	1 , 7	355.80	−35.60	179.81	−72.33	2.57±0.19	0.54±0.11	#10739	7	15.66	0.20
GRB110429	2011-04-29T16:21:51	1 , 7	247.83	−63.95	144.05	−10.31	0.47±0.04	0.28±0.07	#3316	-	-	-
GRB111024A	2011-10-24T07:21:44	4	221.93	25.87	216.42	65.04	2.76±0.17	0.19±0.04	#12489	10	15.27	0.15
GRB120127A	2012-01-27T04:21:57	4 , 5	139.14	15.88	213.58	38.12	-	-	#12901	-	-	-
GRB120424A	2012-04-24T16:48:06	4 , 5	23.99	−29.87	232.62	−80.83	0.47±0.05	0.22±.07	#13261	4	7.09	0.16
GRB120510A	2012-05-10T08:48:06	0 , 7	44.29	72.85	131.68	12.07	1.53±0.12	0.52±0.12	#13282	-	-	-
GRB120528B	2012-05-28T18:12:08	2 , 7	77.59	−37.80	241.49	−36.33	1.28±0.10	0.39±0.09	#13346	7	9.78	0.26
GRB120528C	2012-05-28T21:21:58	4 , 5	12.93	−0.95	300.47	−63.80	0.32±0.05	1.17±0.53	#13349	-	-	-
GRB120614A	2012-06-14T05:49:10	0 , 7	312.73	65.16	280.66	13.55	0.96±0.07	0.30±0.07	#13364	5	7.89	0.05
GRB120622A	2012-06-22T03:21:51	2	205.43	−1.71	145.61	59.13	0.45±0.06	0.22±0.10	#13374	3	4.98	0.35
GRB120711A	2012-07-11T02:45:07	2	94.70	−71.00	281.48	−28.56	0.99±0.10	0.42±0.12	#13436	5	8.07	0.27
GRB120816B	2012-08-16T23:58:14	4,5	336.00	1.00	244.26	−43.87	-	-	-	-	-	-
GRB120908A	2012-09-08T22:35:12	4 , 5	230.64	−25.79	159.78	26.40	0.18±0.03	0.23±0.12	#13731	3	4.80	0.19
GRB121025A	2012-10-25T07:46:30	4 , 5	248.75	27.73	227.00	41.84	0.33±0.06	0.22±0.13	#13895	2	5.25	0.38
GRB121209A	2012-12-09T21:59:08	4 , 5	327.02	−7.69	227.56	−41.49	0.52±0.06	0.86±0.30	#14084	2	3.95	0.35
GRB121229A	2012-12-29T05:00:27	2 , 7	190.10	−50.59	300.39	12.20	0.47±0.05	0.31±0.10	#14118	5	6.17	0.38
GRB130102B	2013-01-02T04:42:03	2	309.58	−72.38	142.03	−33.43	1.36±0.11	0.35±0.08	#14130	8	10.07	0.16
GRB130407A	2013-04-07T23:36:57	4 , 5	248.10	10.51	205.73	36.62	0.41±0.05	0.26±0.10	#14359	4	6.30	0.22
GRB130505A	2013-05-05T08:22:29	4	136.96	17.59	210.61	36.80	11.22±0.37	0.41±0.04	#14566	10	26.42	0.15
GRB130925A	2013-09-25T05:13:53	5	41.38	−25.91	216.33	−65.53	0.85±0.06	0.30±0.07	#15248	6	10.65	0.22
GRB131215A	2013-12-15T09:08:33	4	258.65	7.86	208.35	26.10	0.97±0.13	0.78±0.29	#15597	6	6.74	0.11
GRB140219A	2014-02-19T19:45:58	4	156.44	7.42	234.87	49.31	-	-	#15882	-	-	-
GRB140221A	2014-02-21T00:26:00	4 , 5	107.44	−17.34	229.93	−4.89	0.18±0.03	0.07±0.05	#6066	-	-	-
GRB140509B	2014-05-09T16:18:35	4 , 5	312.97	21.02	245.67	−13.80	0.52±0.06	0.19±0.08	#16242	3	6.46	0.07
GRB140515B	2014-05-15T13:00:43	4 , 5	289.35	−11.70	204.82	−9.99	0.21±0.03	0.17±0.08	#16276	4	5.30	0.03
GRB140814A	2014-08-14T07:12:23	4	182.52	49.35	141.62	66.08	0.61±0.10	0.18±0.10	#16686	3	4.99	0.32
GRB140818A	2014-08-18T05:31:52	4 , 5	199.54	6.89	138.47	69.09	5.05±0.19	0.66±0.07	#16702 #16705	8	21.57	0.10
GRB140930A	2014-09-30T14:26:53	0 , 7	344.88	52.43	285.55	−6.46	0.79±0.12	0.74±0.30	#16855	2	3.76	0.02
GRB141020B	2014-10-20T10:59:23	4 , 5	214.30	7.98	171.78	62.88	0.40±0.04	0.11±0.05	#16930	5	7.60	0.07
GRB141029A	2014-10-29T04:32:09	0 , 7	69.24	−16.22	212.84	−37.94	0.57±0.08	0.29±0.13	#16981	4	5.29	0.43
GRB141121A	2014-11-21T03:44:52	2 , 7	122.67	22.23	199.99	25.85	0.14±0.03	0.17±0.10	#17077	2	3.58	0.48
GRB141229A	2014-12-29T11:49:19	0 , 7	72.43	−19.23	217.74	−36.18	0.81 ± 0.08	0.57 ±0.16	#17246	3	4.71	0.43
GRB150110A	2015-01-10T10:23:57	2 , 7	217.70	19.77	199.25	67.10	0.98 ± 0.09	0.72 ±0.19	#17290	4	6.70	0.50
GRB150110C	2015-01-10T23:41:12	0 , 7	68.48	−16.97	213.39	−38.89	1.22 ± 0.09	0.77 ± 0.16	#17293	3	5.75	0.48
GRB150123A	2015-01-23T15:01:55	4 , 5	111.56	−9.69	225.00	2.20	1.36 ± 0.09	0.59 ± 0.12	#17345	7	11.65	0.08
GRB150222B	2015-02-22T05:24:19	2 , 7	155.90	−41.17	274.44	13.11	0.42 ± 0.05	0.34 ± 0.13	#17497	4	5.58	0.31
GRB150311A	2015-03-11T16:18:18	4 , 5	235.10	−15.81	170.74	31.41	0.17 ± 0.03	0.14 ± 0.07	#17568	3	4.68	0.05
GRB150313A	2015-03-13T03:52:06	5	252.35	−10.47	187.55	22.12	2.85 ± 0.31	0.37 ± 0.12	#17572	3	8.27	0.05
GRB150413A	2015-04-13T13:56:42	0 , 7	190.43	71.84	124.52	45.25	1.24 ± 0.09	0.35 ± 0.07	#17691	7	8.33	0.08
GRB150418A	2015-04-18T00:52:14	4 , 5	160.55	−4.94	252.60	44.45	5.00 ± 0.27	0.40 ± 0.07	#17719	5	16.17	0.22
GRB150424B	2015-04-24T09:40:22	4 , 5	182.76	−16.21	287.48	45.30	1.73 ± 0.12	0.28 ± 0.06	#17746	6	10.13	0.25
GRB150428C	2015-04-28T08:24:33	0 , 7	60.25	67.82	139.06	10.95	0.33 ± 0.04	0.07 ± 0.03	#17772	4	6.26	0.21
GRB150430A	2015-04-30T00:21:28	4 , 5	326.48	−27.90	200.45	−48.11	2.34 ± 0.14	0.62 ± 0.11	#17791	8	13.97	0.26
GRB150518A	2015-05-18T21:42:25	4	234.20	16.33	205.19	51.32	1.33 ± 0.13	0.54 ± 0.15	#17825 #17833 #17860	4	7.84	0.04
GRB150622A	2015-06-22T10:23:38	2 , 7	252.03	−52.77	153.91	−4.47	1.80 ± 0.13	0.56 ±0.12	#17952	10	11.53	0.21
GRB150725A	2015-07-25T08:45:10	4	220.42	−2.42	167.84	51.00	6.14 ± 0.32	0.59 ± 0.09	#18062	8	16.08	0.24

表 A.1: プロトタイププログラムを実行した GRB の一覧

天体名	t0	gscid	RA	DEC	l	b	flux (2-20keV)	hardness (8-20keV/2-8keV)	GCN/Atel	プロトタイププログラムの出力結果 ピクセルの広がり	検出有意度 (σ)	距離のずれ (度)
GRB150801A	2015-08-01T01:19:02	4 , 5	256.01	−9.52	190.56	19.67	0.34 ± 0.05	0.52 ± 0.20	#18102	4	5.26	0.09
GRB150907A	2015-09-07T16:00:53	2 , 7	224.85	−47.59	143.50	10.29	4.06 ± 0.15	0.20 ± 0.02	#18246	12	25.60	0.05
GRB151112A	2015-11-12T13:45:25	2 , 7	2.05	−61.66	132.70	−54.55	0.70 ± 0.07	0.25 ± 0.07	#18596	9	8.86	0.15
GRB151205C	2015-12-05T23:54:09	0 , 7	329.73	77.71	293.94	18.06	1.33 ± 0.19	0.56± 0.22	#18666	3	4.95	0.23
GRB151212A	2015-12-12T14:00:31	4 5	68.15	−3.96	198.70	−33.48	0.21 ± 0.03	0.36 ± 0.17	#18685	3	4.35	0.01
GRB151216A	2015-12-16T19:03:18	2 , 7	323.76	24.77	255.34	−19.00	0.30 ± 0.04	0.15 ± 0.07	#18705	3	5.35	0.11
GRB160101A	2016-01-01T00:43:59	5	219.73	−13.82	157.50	42.04	18.92 ± 0.85	0.69 ± 0.09	#18793	7	20.00	0.15
GRB160102A	2016-01-02T03:39:24	0 , 7	80.84	−21.04	222.98	−29.38	1.05 ± 0.12	0.11 ± 0.05	#18801	7	8.58	0.30
GRB160107A	2016-01-07T22:20:09	4 , 5	299.67	6.41	225.98	−10.82	1.06 ± 0.07	0.17 ± 0.04	#18839	9	13.17	0.16
GRB160206A	2016-02-06T02:52:47	5	132.70	−36.10	257.62	4.38	0.52 ± 0.06	0.48 ± 0.16	#18993	6	6.21	0.05
GRB160509A	2016-05-09T09:04:36	0 , 7	311.75	76.11	289.86	20.08	5.22 ± 0.25	0.41 ± 0.06	#19404	12	18.06	0.07
GRB160705A	2016-07-05T02:30:20	4 , 5	117.01	−14.96	232.18	4.34	2.40 ± 0.13	0.21 ± 0.04	#19654	6	16.66	0.22
GRB160814A	2016-08-14T21:13:09	4 , 5	136.07	−20.96	247.46	16.14	1.10 ± 0.06	0.08 ± 0.02	#19793	10	16.52	0.27
GRB161123A	2016-11-23T03:05:55	5	32.21	−39.65	257.19	-70.38	0.90 ± 0.11	0.19 ± 0.08	#20203	4	7.17	0.34
GRB170511A	2017-05-11T06:00:17	2 , 7	300.63	33.32	249.68	2.17	1.20 ± 0.08	0.22 ± 0.05	#21137	-	-	-
GRB170610A	2017-06-10T20:43:07	4 , 5	92.57	−9.42	216.27	−14.41	0.31 ± 0.04	0.35 ± 0.14	#21243	5	6.00	0.40
GRB170808A	2017-08-08T02:47:48	4 , 5	157.56	−28.28	267.84	24.48	0.20 ± 0.03	0.14 ± 0.07	#21422	3	5.35	0.22
GRB170830A	2017-08-30T03:15:45	0 , 1 , 7	267.24	−2.00	203.29	13.93	2.89 ± 0.12	0.10 ± 0.02	#21761	9	16.23	0.17
GRB170911A	2017-09-11T06:24:22	1 , 2 , 7	72.10	30.91	170.57	−9.75	0.44 ± 0.06	0.53 ±0.20	#21858	4	5.81	0.31
GRB171112A	2017-11-12T20:49:41	1 , 2 , 7	20.47	−59.68	296.93	−57.15	1.49 ± 0.09	0.34 ±0.06	#22118	10	9.92	0.11
GRB180116A	2018-01-16T00:38:32	4 , 5	215.66	18.96	195.16	68.52	1.63 ± 0.10	0.27 ± 0.05	#22347	8	14.84	0.16
GRB180701A	2018-07-01T06:47:33	4 , 5	319.92	−4.50	226.63	−33.78	0.14 ± 0.03	0.23 ± 0.15	#22880	4	4.82	0.32
GRB180720B	2018-07-20T14:28:34	4 , 5	0.47	−2.85	272.52	−62.47	0.50 ± 0.05	0.21 ± 0.07	#22993	6	9.46175	0.220
GRB180722A	2018-07-22T05:59:11	1 , 2 , 7	302.89	24.22	243.01	−4.33	0.57 ± 0.04	0.18 ± 0.05	#23005	9	10.47	0.14
GRB180809A	2018-08-09T11:38:16	4 , 5	297.90	−34.79	185.28	−25.82	3.21 ± 0.15	0.28 ± 0.04	#23103	9	20.38	0.15
GRB180829A	2018-08-29T00:05:26	4 ,5	61.73	−1.98	192.46	−37.89	0.22 ± 0.04	0.24 ± 0.13	#23186	2	5.09	0.28
GRB180923A	2018-09-23T04:08:31	4 , 5	38.30	6.30	161.60	−49.13	0.72 ± 0.07	0.29 ± 0.09	#23257	5	8.76	0.25
GRB181011A	2018-10-11T03:36:28	5	93.50	20.84	189.71	0.60	1.37 ± 0.15	1.20 ± 0.37	#23327	3	6.80	0.16
GRB181222A	2018-12-22T06:44:37	5	270.73	−38.85	172.76	−7.28	1.23 ± 0.07	0.32 ± 0.06	#23547	13	16.02	0.47
GRB190129A	2019-01-29T12:21:47	5	11.46	−31.89	147.40	−84.75	2.11 ± 0.18	0.39 ± 0.10	#23806	4	10.51	0.19
GRB190204A	2019-02-04T05:46:13	0 , 1 , 7	351.48	54.88	290.13	−5.73	13.42 ± 0.36	0.64 ± 0.05	#23854	16	23.20	0.13
GRB190305A	2019-03-05T13:07:43	1 , 2 , 7	11.33	−50.12	127.34	−66.92	0.26 ± 0.03	0.17 ± 0.06	#23933	5	6.85	0.27
GRB190306A	2019-03-06T20:51:58	1 , 2 , 7	222.56	30.94	228.48	64.82	0.25 ± 0.03	0.45 ± 0.17	#23937	4	5.41	0.39
GRB190404A	2019-04-04T12:24:38	4 , 5	12.09	27.49	300.84	−35.35	1.51 ± 0.10	0.41 ± 0.08	#24048	9	13.34	0.28
GRB190404B	2019-04-04T13:14:32	4 , 5	220.99	−22.63	153.19	33.82	1.09 ± 0.08	0.27 ± 0.06	#24049	9	13.03	0.24
GRB190408A	2019-04-08T18:06:23	2	47.34	1.76	176.31	−46.83	0.47 ± 0.08	0.12 ± 0.07	#24073	3	5.64	0.46
GRB190701A	2019-07-01T09:46:51	0 , 1 , 7	28.08	58.91	130.16	−3.17	1.35 ± 0.09	0.23 ± 0.05	#24937	8	9.95	0.13
GRB190706A	2019-07-06T03:26:40	5	26.61	−43.25	273.86	-70.93	0.32 ± 0.05	0.90 ± 0.41	#24992	2	3.45	0.20
GRB190708B	2019-07-08T19:50:11	5	326.57	7.71	243.15	−32.36	1.24 ± 0.09	0.09 ± 0.03	#25037	7	12.89	0.11
GRB190714A	2019-07-14T13:20:42	4	246.73	14.96	210.17	39.69	0.53 ± 0.07	0.22 ± 0.09	#25068	5	6.64	0.86
GRB190804B	2019-08-04T07:58:23	5	240.03	−44.78	153.88	6.75	0.58 ± 0.06	0.51 ± 0.14	#25262	4	7.19	0.12
GRB190805B	2019-08-05T04:49:25	1 , 2 , 7	211.85	19.77	192.46	72.08	0.29 ± 0.03	0.21 ± 0.07	#25262	5	6.36	0.65
GRB190823A	2019-08-23T13:30:44	1 , 2 , 7	279.69	−43.53	171.51	-15.39	0.91 ± 0.06	0.34 ± 0.07	#25456	7	10.63	0.34
GRB190828A	2019-08-28T07:58:04	1 ,2 , 7	58.01	46.45	151.72	−6.35	0.93 ± 0.07	0.28 ± 0.07	#25502	5	8.68	0.15
GRB200105A	2020-01-05T21:55:37	1 , 7	319.28	−35.85	188.00	−43.12	5.52 ± 0.31	0.47 ± 0.08	#26638	10	16.83	0.31
GRB200310A	2020-03-10T09:23:18	1 , 2 , 7	227.50	48.33	261.24	56.53	0.34 ± 0.04	0.62 ± 0.21	#27355	4	5.00	0.31
GRB200320B	2020-03-20T13:12:34	2	125.92	−75.73	288.75	−21.11	0.30 ± 0.05	0.61 ± 0.28	#27418	1	2.73	0.36
GRB200514A	2020-05-14T02:21:15	4	170.10	19.63	226.71	66.85	1.71 ± 0.24	0.76 ± 0.30	#27735	3	6.40	0.18
GRB200517A	2020-05-17T11:27:21	1 ,2 , 7	17.23	−50.75	297.88	−66.26	1.00 ± 0.07	0.53 ± 0.10	#27750	10	10.82	0.29
GRB200615B	2020-06-15T10:30:28	4 , 5	153.42	−5.16	246.18	39.20	0.36 ± 0.05	0.42 ± 0.16	#27960	5	6.19	0.27
GRB200809B	2020-08-09T15:41:34	1 , 2 , 7	15.83	−73.85	302.24	−43.28	0.30 ± 0.04	0.41 ± 0.15	#28240	5	5.72	0.01

表 A.1: プロトタイププログラムを実行した GRB の一覧

天体名	t0	gscid	RA	DEC	l	b	flux (2-20keV)	hardness (8-20keV/2-8keV)	GCN/Atel	プロトタイププログラムの出力結果		
										ピクセルの広がり	検出有意度 (σ)	距離のずれ (度)
GRB200903D	2020-09-03T15:32:07	4	312.78	−0.60	226.41	−25.65	0.51 ± 0.08	0.37 ± 0.16	#28363	4	5.78	0.15
GRB201021B	2020-10-21T16:19:08	1 , 2 , 7	3.59	−63.54	130.63	−52.97	0.68 ± 0.05	0.38 ± 0.08	#28726	11	10.43	0.18
GRB210102B	2021-01-02T09:03:59	1 , 7	353.82	−21.08	226.75	−70.62	0.36 ± 0.04	0.05 ± 0.02	#29223	8	7.83	0.15
GRB210109A	2021-01-09T09:03:22	4 , 5	62.00	4.68	185.96	−33.81	0.32 ± 0.05	0.35 ± 0.16	#29282	5	6.15	0.44
GRB210110A	2021-01-10T15:14:53	5	172.73	−41.35	286.21	18.73	0.38 ± 0.04	0.21 ± 0.08	#29284	9	8.54	0.55
GRB210222A	2021-02-22T15:59:32	4 , 5	353.13	−29.46	200.80	−71.49	1.11 ± 0.08	0.36 ± 0.07	#29543	8	13.22	0.17
GRB210320A	2021-03-20T22:15:23	1 , 2 , 7	4.63	−47.42	140.39	−68.42	0.33 ± 0.04	0.86 ± 0.25	#29676	5	6.33	0.24
GRB210521A	2021-05-21T13:04:33	5	264.67	−61.75	150.50	−15.20	1.41 ± 0.09	0.21 ± 0.05	#30067	10	14.60	0.02
GRB210528B	2021-05-28T22:51:59	4 , 5	239.54	5.98	195.34	41.89	0.47 ± 0.05	0.25 ± 0.08	#30094	10	9.62	0.05
GRB210602A	2021-06-02T12:04:02	4	44.63	−2.67	178.36	−51.84	5.18 ± 0.47	0.81 ± 0.21	#30113	3	8.99	0.23
GRB211115A	2021-11-15T16:31:20	4 , 5	122.98	−25.71	244.31	3.59	2.57 ± 0.20	0.43 ± 0.10	#31082	3	11.21	0.22
GRB211218A	2021-12-18T01:01:32	4	137.28	−4.11	233.52	27.01	0.28 ± 0.05	0.15 ± 0.09	#31261	2	3.55	0.20
GRB211225A	2021-12-25T03:22:39	4 , 5	125.92	−7.18	229.86	15.81	0.67 ± 0.06	0.18 ± 0.05	#31303	7	10.66	1.098
GRB211227A	2021-12-27T23:32:06	4 , 5	132.15	−2.74	229.21	23.41	2.78 ± 0.10	0.65 ± 0.10	#31319	7	15.31	0.26

謝辞

本論文の作成にあたり、多くの方々にご指導ご鞭撻を賜りました。指導教官の海老沢教授には、個人打ち合わせや定期研究室打ち合わせ、X 線天文学演習、申請書作成など大学院生活全体を通して学問的なことだけでなく個人の将来を見据えたご助言を賜るなど、終始大変熱心に、そして懇切丁寧かつ適切なご指導を賜りました。ここに深謝の意を表します。

同研究室の宇宙科学研究所科学衛星運用・データ利用ユニット主任研究開発員の中平聡志さんには、OHMAN のミーティングへ参加していただき、OHMAN に関する研究・開発を進める上で多くの貴重な情報の提供だけでなく突発天体検出プログラム作成に尽力していただきました。ここに深謝の意を表します。

国立研究開発法人理化学研究所開拓研究本部専任研究員である三原建弘さんには、OHMAN の現状や OHMAN で用いるソフトウェアの開発についてご教示いただきました。これからどのように開発を進めていくかという道標となりました。大変感謝しております。中央大学理工学部助教の岩切渉さんには、MANGA 連携において詳しくその内情までご教示いただきました。OHMAN の役割を考える上でとても役に立ちました。大変感謝しております。青山学院大学理工学部助教の芹野素子さんには、MUSST ドラフトや MAXI で検出された GRB リストが大変参考になった上、MAXI での GRB の検出について自動検出の内訳などをご教示いただき、大変感謝しております。また、本研究開発を行う上で使用したライブラリやデータの元になったこれまでの MAXI チームの皆様の貢献に敬意と深謝の意を表します。

東京大学理学系研究科天文学専攻附属天文学教育研究センター、酒向重行准教授には、本論文の作成にあたり、査読員として丁寧に査読していただき、適切なご助言を賜りました。感謝申し上げます。

海老沢研究室の皆様には、本研究の遂行にあたり多大なご助言、ご協力頂きました。同研究室の先輩である富永さんには、特に OHMAN で用いるプログラムの作成にあたり一緒に問題を考え解決へと導く貴重な助言をいただきました。また、同研究室の先輩である御堂岡さんには特に発表や申請書作成にあたり、隅々まで目を通し細かく適切なご指摘をいただきました。また、今年度から入学された同研究室の大間々さんには、己が理解のために多くの質問を投げかけていく研究に対する真摯な姿勢にとても刺激を受け、本研究の発表に関しても実に丁寧に細かくご助言いただきました。さらに今年度から入学した後輩の栗原くんと学部の途中で技術研修生として海老沢研究室で研究を行なっている望月くんにも多くの助言をいただくだけでなく、意欲を持って積極的に研究を進めている姿勢に大いに感化され、研究を進めていく上での原動力となりました。ここに深謝の意を表します。

最後に、これまで支えてくれた家族には本当に感謝しております。大変多くの方々のお力添えで本論文を執筆することができました。誠にありがとうございました。

参考文献

Dong, D. Z., Hallinan, G., Nakar, E., et al. 2021, Science, 373, 1125

Gendreau, K. C., Arzoumanian, Z., Adkins, P. W., et al. 2016, in Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers (SPIE) Conference Series, Vol. 9905, Space Telescopes and Instrumentation 2016: Ultraviolet to Gamma Ray, ed. J.-W. A. den Herder, T. Takahashi, & M. Bautz, 99051H

Hiroi, K., Ueda, Y., Isobe, N., et al. 2011, , 63, S677

Matsuoka, M., Kawasaki, K., Ueno, S., et al. 2009, , 61, 999

Morii, M., Tomida, H., Kimura, M., et al. 2013, , 779, 118

Rees, M. J. 1988, , 333, 523

Serino, M., Iwakiri, W., Tamagawa, T., et al. 2016, , 68, 95

Serino, M., M. T. S. T. 2019, unpublished

Sugizaki, M., Mihara, T., Serino, M., et al. 2011, , 63, S635

Totani, T. & Panaitescu, A. 2002, , 576, 120

Tsuboi, Y., Yamazaki, K., Sugawara, Y., et al. 2016, , 68, 90

Tsunemi, H., Tomida, H., Katayama, H., et al. 2010, , 62, 1371

三原 建弘. 2017, 平成 28 年度 ISAS 小規模計画 OHMAN 提案書

三原 建弘. 2021, 天文学会秋季年会

岩切 渉. 2019, 天文月報, 112, 707

芹野 素子. 2019, 天文月報, 112, 717