

# ガンマ線バーストにともなう光学閃光観測のための光学系の開発

Development of optics for observing the optical flash associated with the gamma-ray burst

プロジェクト代表者：田代 信 (理工学研究科・教授)

Makoto Tashiro (School of Science and Engineering: Professor)

## 1 ガンマ線バーストと可視光閃光

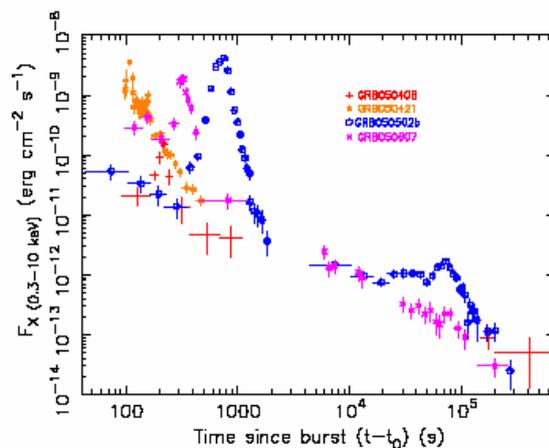
ガンマ線バースト(GRB)は、 $10^{44}$ Jものエネルギーを1秒～数分のうちに放出する、ビッグバンを除くと宇宙で最も大規模な爆発的な現象として知られる。巨大星の崩壊など、大規模な重力エネルギーの解放が原因と推測されているが、突発的現象であり、また一つの天体では一度しかおきない現象であるため、広視野による発見的観測に頼るしかない。また放射の主軸である、ガンマ線およびX線は、地球大気によって吸収されるため、地上からの観測は不可能である。このため、広視野のX線望遠鏡を搭載した人工衛星や、複数の人工衛星や人工惑星に搭載されたガンマ線検出器を有機的に組み合わせて用いる惑星間空間ネットワークが検知の主体となる。

1990年代には、コンプトンガンマ線天文台に搭載された、BATSE検出器が、全天で3000近くのGRBを観測し、最初の系統的な観測成果をあげた。これによってGRBは、毎日のおきにおきており、しかも全天に等方的に分布している普遍的な現象であることが明らかにされた。ついで、1997年には、GRBの発生後にX線から可視光、電波と広い帯域にわたって、残光と呼ばれる、数日から数ヶ月かけて減光していく放射がみつかった。すぐに、可視光残光の観測によって、これが他の銀河でおきている現象であることが確実になり、GRBがこれまで知られている天体の中でもっとも大きな爆発現象であることがわかったのである。これが呼び水となり、GRBもガンマ線に限らず地上からの可視光・電波観測を含めた総合的な観測がおこなわれるようになった。

これを受け、衛星軌道上でGRBを探知し、地上に発生時刻と方向を速報し、地上から残光観測がおこなわれるようになった。この軌道上と地上の連携による観測を後押ししたのが、最初のGRB探知専用衛星として、MITと理化学研究所が中心になって計画したHETE-2衛星である。1999年に打ち上げられたHETE-2は、赤道軌道をとって反太陽方向に向けた広視野の位置検出型の比例計数管をもちいて、ガンマ線バーストの探知し、即座に地上に通報する。地上では、インターネットを通じた速報網が、これを各地の天文台に伝え、ロボット化された望遠鏡が残光を観測する。2003年には、可視光の残光観測によって、GRBが特殊な超新星爆発に伴う現象である証拠が得られ、冒頭に書いた「巨大星の重力崩壊による」現象であることがわかった。

ここまでの残光観測は、GRB発生のお知らせを受け、早くても数分後に始まるものであった。そのため、重力崩壊による爆発現象そのものではなく、超新星爆発によって放出された物質と星間物質との相互作用を見ているので、崩壊星そのものの観測には、手が届かないもどかしさがあった。

しかし、我々が開発に参加し、2004年に打ち上げられたSwift衛星の登場によって、この状況が一変した。Swiftは、衛星自体に残光観測のための可視光・紫外光、X線の望遠鏡を搭載し、1分ほどで自律的に残光観測を行う画期的な衛星である。これによって、X線帯域に関しては、GRBから残光まで、ほとんど時間差なしで連続的な観測が可能になった。



Nousek et al. 2005 より。Swift 搭載 XRT による GRB 直後の X線光度曲線の例

その結果、X線残光は単一のベキ型ではあわせない複雑な減光をしめしていることが明らかになったのである(右図)。これは、単純な断熱膨張や放射冷却では説明できず、実際に数時間におよぶエネルギー注入(すなわち中心天体への質量降着)などを必要とする。すなわち、GRB起源天体の動的な状態が反映されている可能性が極めて高い。

このような新展開をもたらした鍵は、GRB本体(プロンプト放射)から残光にいたる連続的な観測である。従来の「GRB検知」をうけて「追観測」を行っていた時代の時間的なギャップで見過ごされてきた姿が、単独の衛星で時間的なギャップなしに観測できるSwiftによって、顕わにされているのである。

しかしX線観測だけでは不十分である。崩壊の規模や物質分布、磁場、さらには崩落の時間スケール、星周物質の状態など起源天体の状態を観測的に明らかにするためには、X線ガンマ線だけでなく、むしろ、より星周物質の影響を反映しやすい可視光での「光学閃光」の同時観測が重要である。

## 2 GRB可視光閃光観測カメラ「WIDGET」

そこで我々は、理化学研究所の共同研究者とともに、活躍中のGRB探知衛星の視野を追尾する広視野可視光望遠鏡「WIDGET」を考案した。これは、あらかじめ公開されている、GRB探知衛星の視野を、常時、地上から可視光でモニターし、撮影し続けることで、GRBが検知された瞬間の星野を確実に撮影しようというものである。そのためには、毎日、自動的に衛星の観測計画をインターネット経由で取得し、赤道儀の制御を行う完全に自律的な観測システムが必要であり、またGRB探知衛星の広い視野をよい効率でカバーする広角レンズ、もしくは複数のカメラの同時運用が不可欠になる。われわれは、2003年から制作に着手し、2004年に東大宇宙線研明野観測所に設置した。類似の試みは世界中をみても他に3箇所で行われているが、WIDGETは視野の広さで他を圧倒している。まず最初の一年間は、1台の広視野カメラであるが運用効率95%の稼働実績を達成した。すなわち、日の出・日の入りだけでなく、降雨センサーによる天候情報をもとりこみ、自動的に観測小屋の開閉するシステムや、衛星の視野を自動的に追尾するようにカメラの方向を定める赤道儀制御システム、そして観測・データ蓄積・転送システムを確立した。2005年度には、カメラを24mmレンズのもの1台から、35mmレンズのもの3台へと拡充し、性能評価を行った。その結果、天候などの条件を整えば、約11等級の限界等級がと所定の値を達成できることを実証した。またいくつかのGRBについては同時観測に成功したが、いずれも上限値を得るにとどまった。

そこで、2006年度には、限界等級の向上を主眼とした改良をおこなった。改良のポイントは以下の3点である。

1. 観測サイトの変更: 明野サイトは甲府盆地に近く夜光があかるく、広視野カメラに与える影響が無視できないことがわかった。このため、より暗い空を求めて、各地のサイト調査を行い、最終的に東京大学天文教育センター一木曾観測所内に移転することにした。
2. 光学系の改良: レンズの変更し、狭視野にすることで、一ピクセルあたりの夜光を実質的に低減する。失う視野の広さは、カメラの台数を4台に増やすことで補う。

このうち、1の移転については、2006年度から認められた科研費によりすすめることにし、3の光学系の改良について、本プロジェクト研究の主目的とすることにした。

### 3 木曾への移設

第2項で述べたように、広視野望遠鏡として、当初、焦点距離 24mm のカメラレンズを採用した。これによって、60度四方の広角を1台でカバーできるので、WIDGET が当初追跡していた、HETE-2 衛星の視野とよくマッチしていた。カメラとしては、感度とピクセル数に優れた Apogee 社の Altra U-10 CCD カメラを採用した。このCCDカメラは、2K x 2K のピクセル数を持つので、1ピクセルのカバーする空は、1.8 分角四方程度となる。天体が点源としてシャープに決像していても、1.8 分角四方の空を覆う夜光も同時に観測していることになる。初年度の観測の結果、この夜光成分が超広視野望遠鏡の限界等級を決める、実質的な要因になっていることがあきらかになった。

そこで我々は、まず、夜光の少ない観測サイトへの移設を検討した結果、夜光の少ないことに加え、電気や通信線(電話線)、設置場所、いざというときの現地スタッフのサポートに加え、埼玉からのアクセスも考慮し、東京大学天文教育センター木曾観測所の「夜天光観測室」の屋上に設置した。

移設は、2006年10月から11月にかけて行った。小屋の移設と観測装置、小屋の制御装置を順次移設し、初期観測の結果、移設によって、**2.1等級の限界等級の向上**が確認された。

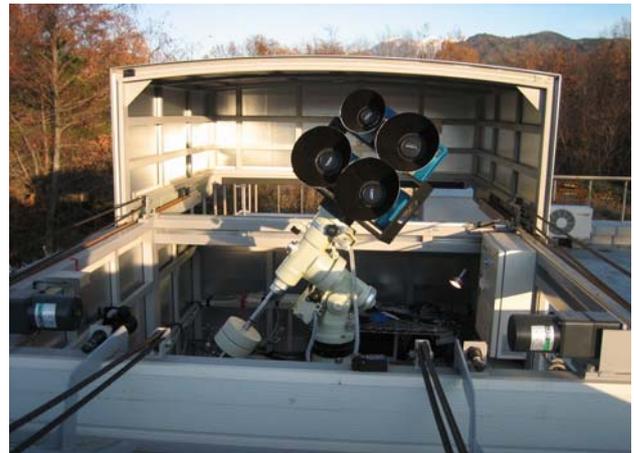


図2 木曾観測所に設置された WIDGET

### 4 光学系の性能評価

感度の向上のためのもうひとつ方策が狭視野化である。これは焦点距離を長くすることで、単純にCCDの1ピクセルあたりに入る空を狭め、結果としてノイズ源である夜光を低減することができる。我々は、2006年末に新しく市販された、50mm f1.2 のキヤノン製レンズを入手し、それまで用いていた35mm f1.5 のレンズと、木曾において、限界等級の比較を行った。その結果を表1にまとめた。レンズの交換によっておよそ2等級の改善がみられ、限界等級は15等級近くにまで達していることがわかる。これによって、条件がよければ、GRBにもなう可視光閃光観測の可能性が飛躍的に高まった。

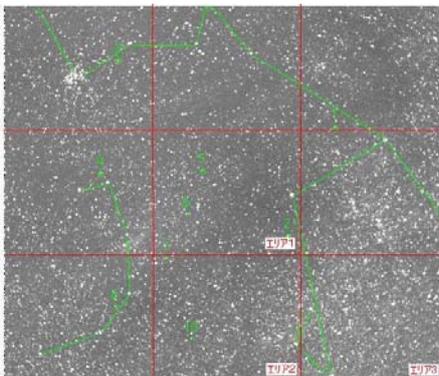
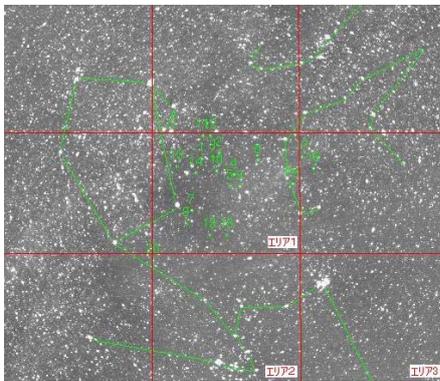


図3 木曾で撮影した星野。  
上が 35mm, 下が 50mm のもの

	35 mm F 1.4	50 mm F 1.2
中心領域	12.9 (1 $\sigma$ ), 11.7 (3 $\sigma$ )	14.7 (1 $\sigma$ ), 13.6 (3 $\sigma$ )
周辺領域	12.8 (1 $\sigma$ ), 11.6 (3 $\sigma$ )	13.6 (1 $\sigma$ ), 11.8 (3 $\sigma$ )

表1 35mm レンズと 50mm レンズの限界等級比較

## 5 追観測望遠鏡

次いで我々は、GRBの光学閃光観測から残光観測までを一貫して行うために、中規模の望遠鏡の導入を計画している。その後の残光観測は、木曾観測所のシュミット望遠鏡をふくむ東アジアで連携している天文台網によって観測するので、これによってGRB発生時から残光まで、完全な観測を行う計画である。

このために我々は、本プロジェクト経費を使用して、Meade 社製の口径30cmの反射型望遠鏡を2006年度は、このために口径30cmの可視光望遠鏡を購入し、現在、セットアップを進めている。従来の WIDGET は、新規に制作し、夜天光観測室の屋上に設置し、試運転中の新観測小屋に移設する。空いた旧観測小屋に、この中規模の望遠鏡を設置し、連携によって、GRB可視光閃光から残光への連続的な観測を可能にする。

また同時に WIDGET のデータ処理の自動化をすすめ、両者の有機的な連携を進めているところである。



図4 実験室でセットアップ中の追観測望遠鏡

## 6 成果発表

以下に本年度に発表した成果をまとめておく。

これらは、Swift や「すざく」衛星を含む軌道上からの観測によるもの。また、WIDGETを含む東アジアの追観測望遠鏡網による観測によるものである。また WIDGET 単独によるものとしては、2006年度に1報、これまでに7報の報告を、世界的な GRB 観測の速報である、GRB coordinate network におこなっている。

査読つき論文誌での発表成果

- Butler, N. R., et al., The Astrophysical Journal, vol. 652, pp.1390-1399 (2006)
- Huang, K. Y., et al., The Astrophysical Journal, vol. 654, pp. L25-L28 (2006)
- Tashiro, M. S., et al., Publications of the Astronomical Society of Japan, vol. 59, S361-S367 (2007)
- de Ugarte Postigo et al., Astronomy and Astrophysics, vol. 462, L57-L60 (2007)
- Sato, G., et al., The Astrophysical Journal, vol. 657, 359-366 (2007)