50cm MITSuME 望遠鏡による ガンマ線バースト の残光観測

河合誠之（東京工業大学）

科学研究費学術創成研究「ガンマ線バーストの迅速な発見、観測による宇宙形成・進化の研究」（平成 14-18、研究代表者　河合誠之）は、宇宙で最も明るい光源であるガンマ線バースト (GRB) およびその残光を用いて、宇宙における最初期の星や銀河の成り立ちを探ることを目的とする。

この研究の課題の一つは、ガンマ線バースト発生直後の残光が明るいうちに専用小望遠鏡で機動的に可視・近赤外領域の多色測光を行ない、Lyman Break を利用してガンマ線バースト源の赤方偏移を求めるとともに、観測した残光位置を世界に通報し、特に高赤方偏移イベントは大望遠鏡による分光観測につなげることであった。そのため、岡山天体物理観測所に新たに口径 50cm の光学望遠鏡（図 1）を設置した。クラシカルカセグレンにコマ収差補正レンズを組み合わせ、F/6.5 の光学系を実現している。主に柳澤顕史氏が望遠鏡の設計を担当し、中央光学が製作した。ガンマ線バーストの位置速報に迅速に対応するため毎秒 2 度の導入速度をもつ。望遠鏡とニッシン商会製の 4m ドームの駆動系の回路とソフトウェアは、清水康広氏と吉田道利氏が担当した。望遠鏡は設置後、副鏡の修正などを行い 2004 年に完成した。また、V,Rc,Ic 三色同時撮像カメラも柳澤氏と長山省吾氏によって開発され、撮像のためのソフトウェアは黒田大介氏が書いた。Apogee 社製 CCD カメラ Alta U6 を 3 台使用し、26 分角の視野を 1024×1024 画素でカバーする。2005 年に導入した新型 (図 2) は V バンドを SDSS g′バンドに変更し、バンド幅を広げるとともに水銀灯由来の人工光を避けることによって感度の向上を果たした (図 3)。

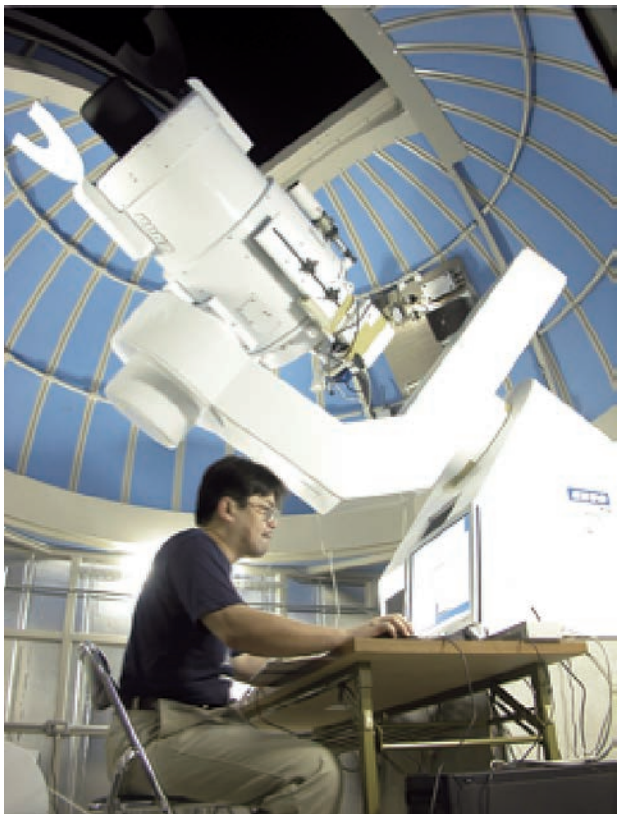

図 1　MITSuME 50cm 光学望遠鏡

当初は遠隔操作での撮像観測を行っていたが、2007 年ごろより GCN（ガンマ線バースト連携ネットワーク）の常時接続通信によって人工衛星から通報された GRB の座標を自動的に観測するロボット望遠鏡として運用するようになった。この観測および自動解析ソフトウェアの開発には岡山観測所の柳澤氏、吉田氏と東工大大学院生であった谷津陽一氏、下川辺隆史氏、森由希氏が貢献した。望遠鏡の色変換係数の較正などで上記各氏に加え京大の太田耕司氏のグループも参加した。本研究では、もう一

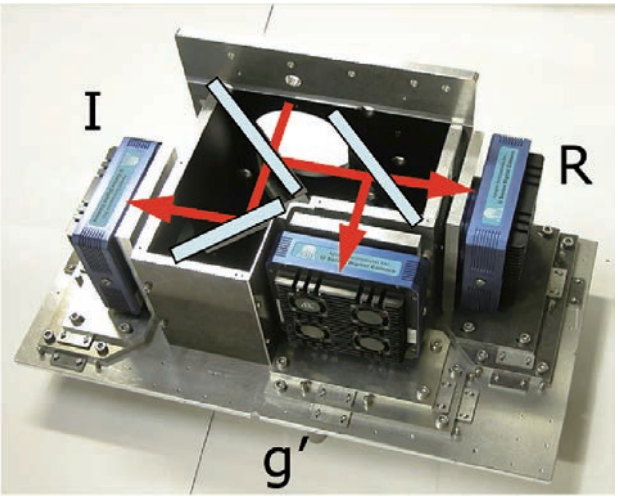

図 2　3 色撮像カメラ。ダイクロイックミラーによって、Ic, Rc, g′ の 3 バンドに分けられた光が 3 台の冷却 CCD カメラ (Alta U6) カメラ上に結像する。

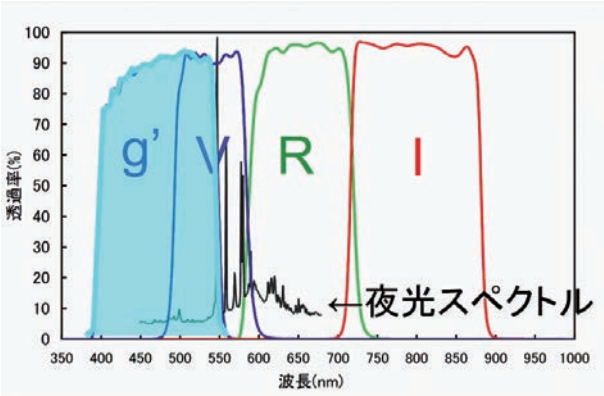

図 3　3 色撮像カメラのフィルター透過率。

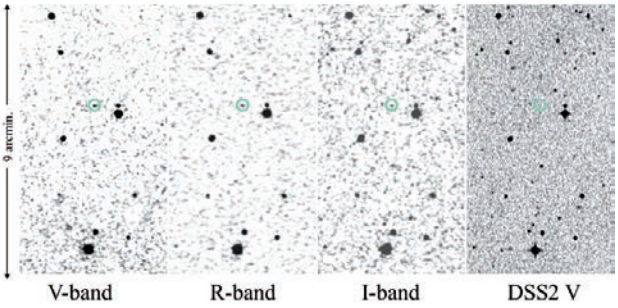

図 4　MITSuME 望遠鏡が初めてとらえたガンマ線バースト残光の画像。GRB 041006 の発生 2 時間 23 分後の 14:41 (UT) から露光時間 30 秒の連続画像を 20 枚重ねた。GRB 残光を円で囲んである。一番右の図は、参照のための DSS2 の図。

台のほぼ同じ仕様の望遠鏡を渡部潤一氏の設計指導により昭和機械製作所で製作し、2004 年 3 月に東京大学宇宙線研究所明野観測所に設置した。この 2 台の望遠鏡はなるべくソフトウェアを共通化して運用し、すべての取得画像は東工大へ 1 日以内に転送され、データーベスに登録され、さらに国立天文台にミラーされて 1 年後には一般に公開される。さらに、岡山観測所の 90cm 望遠鏡を広視野近赤外線望遠鏡へ改造したが、これは今後、2 台の光学望遠鏡と連携して運用していく予定である。これら 3 台の望遠鏡を合わせて、MITSuME (Multicolor Imaging Telescopes for Survey and Monstrous Explosions) と名付けた。以下に、いくつかの観測成果を紹介する。

GRB 041006

この GRB は HETE-2 衛星によって 2004 年 10 月 6 日 12:18:08 UT に検出された (Galassi et al., GCN Circ. 2770)。岡山 MITSuME 望遠鏡は GRB 発生 2 時間 23 分後に観測を開始し、MITSuME 望遠鏡として最初の GRB 残光の撮像に成功した (図 4)。

GRB 060115

当初の目的通り、分光観測に結びつけた例として特筆すべきものは、GRB060115 の観測である。Swift 衛星による検出時刻 2006 年 1 月 15 日 13:08:00(UT)(Tagliaferri et al., GCN Circ. 4509) の 6 分後に観測を開始して Rc および Ic バンドでの残光検出と正確な位置を 3 時間後に GCN に報告した（図 5，Yanagisawa et al., GCN Circ. 4510)。短波長の g' バンドで暗いことから、その付近にライマン吸収端があることが示唆される。実際、われわれの報告に基づいて ESO-VLT FORS1 による分光観測が行われ、赤方偏移が 3.53 と測定された (Piranomonte et al. 2006, GCN Circ. 4520)。この赤方偏移は発見当時知られていた GRB としては 6 番目に大きい値であり、MITSuME 望遠鏡の今後の成果に大きな期待を抱かせる結果である。

GRB 080506

2008 年 5 月 6 日 17:46:21(UT) に Swift 衛星によって検出され (Baumgartner et al., GCN Circ. 7685)、約 200 秒という長い継続時間を示すこの

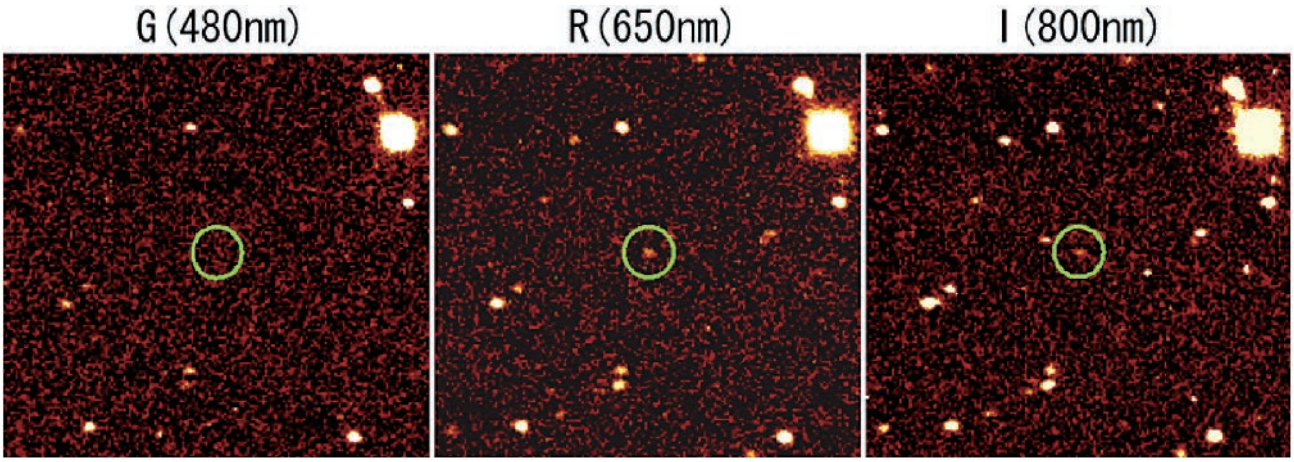

図 5 MITSuME 望遠鏡による GRB060115 残光の 3 バンド画像。GRB 発生 6 分後から 42 分間観測し、その前半の 21 分間の長波長側 2 バンド (Rc, Ic) に検出された。GRB の位置を円で囲んである。

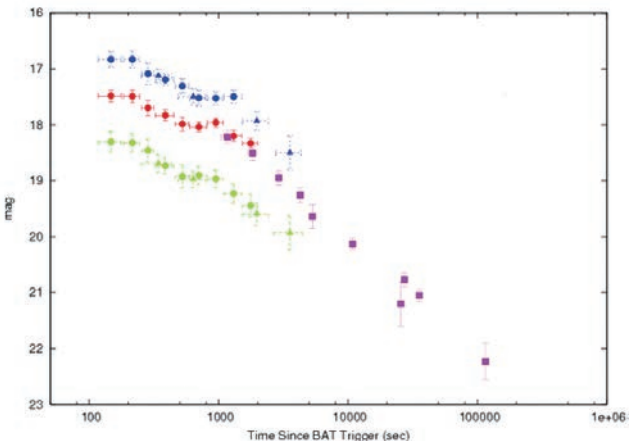

図 6　MITSuME 望遠鏡（明野、岡山）によって得られた GRB 080506 の可視光残光の 3 バンド光度曲線。GCN Circular に報告された R バンドのデータも共に示す。

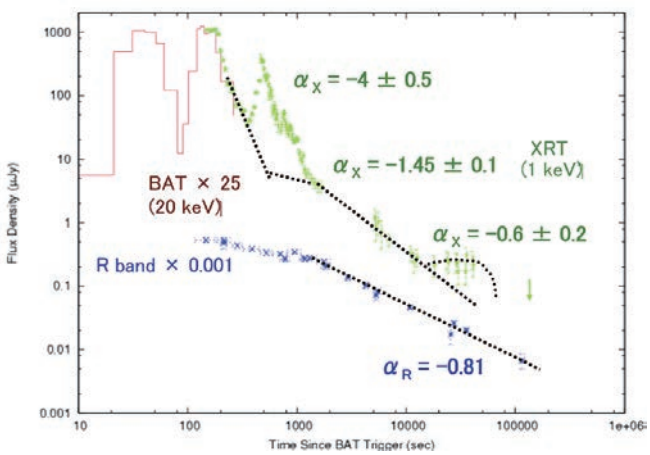

図 7 GRB 080506 の X 線および可視光光度曲線。Swift BAT による バースト本体放射（赤）、Swift XRT による X 線残光（緑）、および MITSuME 望遠鏡による可視光 R バンド（青）を示す。

GRB に対して、明野の MITSuME 望遠鏡は発生 117 秒後、岡山では 253 秒後に自動観測を開始し、ともに可視光残光の検出に成功した。明野望遠鏡はまだ GRB が継続中、146 秒後に活動を開始した Swift 自体の X 線望遠鏡 (XRT) よりも早く観測を始めたことになる。残念ながら、赤方偏移はわかっていない。二つの MITSuME 望遠鏡によって観測された光度曲線を、GCN Circular に報告された後の時間帯の R バンドのデータとともに図 6 に示すが、発生 100 秒後から 1000 秒後までの間で 3 色足並みをそろえた光度曲線のうねりを見せるとともに、平均的な傾きが 1000 秒付近を境として急になっていることがわかる。初期のうねりは、GRB の中心エンジンの活動が長時間続いていたことを示唆する。ただし、Swift BAT および XRT による X 線光度曲線を可視光残光とともにプロットしてみると (図 7) X 線残光に発生 500 秒後に見られる強い X 線フレアに対応する増光は、可視光の残光には存在しないことがわかる。さらに発生 100 秒後以降の光度曲線の傾きが X 線残光と可視光 とで異なっており、20000 秒後には傾きが緩くなる現象が見られる。X 線残光の振る舞いは可視光以上に複雑であり、他の多数の Swift によって観測された X 線残光と同様に、その解釈は難しく、可視光残光とは異なる領域で放射された可能性がある。一方、可視光の振る舞いは、初期のうねりを除いて標準的なシンクロトロン衝撃波モデルで解釈可能である。1000 秒における光度曲線の減光指数の変化は、シンクロトロン放射の特徴的な振動数 ν m が低下していく過程で観測帯域の 3 つのバンドを g', Rc, Ic の順に次々に通過していったと考えることができる。衝撃波が “slow cooling” 領域にあれば、折れ曲がり後の減衰指数 -0.81 からシンクロトロン放射する電子のスペクトル指数として標準的な値である p=-2.08 が得られる。折曲がり前のスペクトル指数は MITSuME の多色測光データから、ほぼ 1/3 であることも、衝撃波モデルによく一致する。一方、MITSuME 望遠鏡による多色測光観測と Swift UVOT (紫外光学望遠鏡) による 600 秒前後の紫外線から v バンドまでのデータ (Oates et al. GCN Circ. 7693) を組み合わせると、b バンド付近で短波長側のフラックスが落ちていることがわかる。これが Lyman α ブレイクであると解釈すると、赤方偏移が z=2.2±0.4 と求められる。

GRB 以外の観測成果

Swift 衛星は、年間約 100 個の GRB の位置速報を流すが、天球上の位置の関係で日本で対応できるのはその半数以下である。したがって、MITSuME 望遠鏡の観測時間の大部分は待機中になるため、小惑星、変光星 (e.g. V455 And, Matsui et al. 2009, PASJ 61, 1081)、活動銀河核 (e.g. S5 0716+714, Stalin et al. 2009, MNRAS 399, 1357)、太陽系外惑星のトランジットの観測など様々な変光天体の観測を行っている。

謝辞　岡山天体物理観測所の強力な支援に深く感謝します。文科省科研費学術創成研究（本文参照）及び特定領域研究「ガンマ線バーストの光学・近赤外残光から読み解く太古の宇宙」(平成 19-22、研究代表者　太田耕司）の支援を受けた。