RIMOTS による GRB030329 可視光残光の観測

坂元 かほり¹⁾, 山内 誠²⁾, 園田 絵里¹⁾ 河合 誠之³⁾⁴⁾, 浦田 裕次³⁾⁴⁾, 小浜 光洋³⁾

Observation on the GRB030329 by RIMOTS

Kahori SAKAMOTO, Makoto YAMAUCHI, Eri SONODA Nobuyuki KAWAI, Yuji URATA, Mitsuhiro KOHAMA

Abstract

Bright gamma-ray burst GRB030329 was detected by HETE-2 at 11:37:14.67(UT) on 29 March 2003. We got first image of its optical afterglow with RIMOTS at 164 minutes after the burst. The telescope of RIMOTS has 30cm aperture, and its field of view is $43'\times43'$. Our data shows its magnitude decreases from 13.0 ± 0.2 to 14.2 ± 0.1 . This magnitude change can be described by a power-law function of time whose index is 1.0 ± 0.1 . These observations are consistent with other observations within the error. This power-law change of magnitude is explained by the model where a jet having nearly light speed expand and collide with interstellar gas decreasing its speed.

Our non-filterd data shows that the fading of the afterglow becomes slower at 0.16 day after the burst. This change isn't seen in any data taken with R-band by other observatory. This phenomenon may be due to the flux change of U, B, or V band. The spectroscopic observations are needed for further analysis of this phenomenon.

Key Words:

Gamma-ray burst, GRB, GRB030329, Afterglow, Optical observation

1. はじめに

「ガンマ線バースト(以下, GRB)」は、1967年に核実験を監視する米国の軍事衛星によって偶然発見されたものである。

GRB とは、宇宙のある一点から突然多量のガンマ線が 短時間で爆発的に放出される現象である。その爆発規模 はビッグバンに次ぐほどのものであり、太陽が 100 億年 かけて生み出すエネルギーをたった数秒で放出すると言

- 1) 物質工学専攻大学院生
- 2) 材料物理工学科助教授
- 3) 理化学研究所
- 4) 東京工業大学

われている。ガンマ線の放出時間は数秒から数十秒とごく短いため、観測が難しくその正体は今でも完全には解明されていない。しかし近年の研究により GRB は爆発後それに付随した可視光の残光を放出することが分かったことで地上から GRB を観測することが可能となり、現在多くの研究者により解明されつつある天体現象である。

GRB の可視光残光は GRB 発生後数時間から数日続くが、GRB 発生 1 日後にはほとんどのものが 20 等級よりも暗くなってしまい、すばる望遠鏡や Keck 望遠鏡などの限界等級の暗い大型望遠鏡でしか観測することができない。しかし、そのような大型望遠鏡の使用には事前の手続きが必要な上、観測スケジュールがつまっているた

め、いつでも観測ができるわけではない。よって、GRB 可視光残光の観測には、使用の手続きの必要がない小型 望遠鏡で観測するのが効果的である。しかし、小型望遠鏡では 20 等級ほどに暗くなると限界等級を超えてしまい観測することは不可能であるので、GRB 発生後即座に観測を開始しなければならない。

我々は 2001 年 3 月に理化学研究所との共同研究により宮崎大学工学部 A 棟屋上に、GRB の残光を即座にとらえることを目的としたシステム RIMOTS (Riken-Miyazaki Optical Transient Seeker)を設置し、GRB 監視衛星 HETE-2(High Energy Transient Explorer-2) ¹⁾と連携して、GRB 発生後即座に GRB の可視光残光の観測を行っている。

本研究の目的は RIMOTS により GRB の可視光残光を 観測し、取得した画像により GRB の位置・光度を解析 すること、またその結果から残光のメカニズムを考える ことである。これまでに観測された GRB 可視光残光の ほとんどは、時間に対してべき乗型に減光しており²⁰、 そのメカニズムはバースト発生源から光速に近い速度で 噴出したジェットが、星間ガスと衝突しながらその膨張 速度を次第におとしていくというモデル³⁰が広く受け入 れられている。

2. HETE-2

2.1 概要

HETE-2 (High Energy Transient Explorer 2;高エネルギートランジェント天体探査機)は、主にガンマ線バーストを検出しその位置を決めるために作られた小型科学衛星であり、このプロジェクトは、米国マサチューセッツ工科大学 (MIT) 宇宙研究センター、理化学研究所宇宙放射線研究室、米国ロスアラモス国立研究所、仏国宇宙線研究センターなどによる国際共同研究として進められている。

初代 HETE は 1996 年 11 月に打ち上げられたが、ロケットの切り離しに失敗してしまい、太陽電池パネルを展開できず、一度も活躍することができなかった。現在はその 2 号機「HETE-2」がその役目を果たしている。HETE-2 は、2000 年 10 月 9 日 5 時 38 分 18 秒 (世界時:以下 UT と表記する)(日本時間 14 時 38 分 18 秒)、マーシャル諸島クウェジェリン環礁南方沖でLー1011 飛行機からペガサスロケットで打ち上げられた。ほぼ予定通り近地点 590km、遠地点 560km、傾斜角 1,95 度で地球の

赤道軌道に投入され、その直後の 5 時 50 分(UT)にロケットから衛星が分離され、太陽電池パネルを展開し、反太陽方向への姿勢制御が行われた。HETE-2 の軌道は観測効率を向上させるために放射線帯の影響が一番小さい地球の赤道軌道が選ばれた。

HETE-2 は、ガンマ線バーストに対して最も高感度なガンマ線分光器、10分角程度のバースト位置決定能力を持つ広視野 X線モニター、高密度の符号化マスクを備え、統計が良いバーストに対して広視野 X線モニターで得られたバースト位置の精度をさらに数秒角まで改善することが可能な軟 X 線カメラを搭載している。図 2.1 はHETE-2 衛星の写真である。

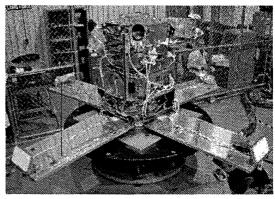


図 2.1 HETE-2 衛星

2.2 HETE-2 の情報配信

GRB が発生すると、HETE-2 がその位置を計算し、位置情報として赤道上に配置した専用受信局へ送信する。 受信局が受け取った GRB の位置情報は、すべて一度 MIT に集められ、NASA の GCN によりインターネットを通 して世界中の観測地へ配信される。図 2.2 に HETE-2 に よる位置情報の配信の流れを示す。

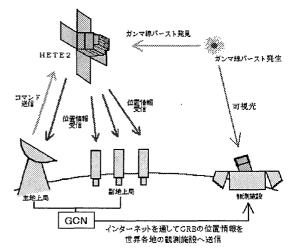


図 2.2 HETE-2による位置情報の配信

RIMOTS

2001年3月に理化学研究所との共同研究により宮崎大学工学部 A 棟屋上に、ガンマ線バーストの残光を即座にとらえることを目的としたシステム RIMOTS を設置した 4 。 RIMOTS は、ガンマ線バースト監視衛星 HETE-2などの衛星によりガンマ線バーストが検出されると、GCN を通してその位置情報を受け取り、自動で即座に望遠鏡をバースト発生方向に向け可視光残光の観測を行うことができるので、GRB 観測には理想的な観測システムである。HETE-2 が GRB を発見してから最速で約 20 秒後には、RIMOTS の望遠鏡で GRB の可視光残光を観測することができる。

3.1 観測機器

3.1.1 小屋

図 3.1.1 は RIMOTS システムが設置されている小屋である。大きさは約 $2m \times 2m \times 2m$ で,この中に CCD カメラを搭載した望遠鏡,Linux と Windows のそれぞれが搭載されたパソコン 2 台が収められている。屋根はRIMOTS 制御プログラムにより制御されており,自動開閉される。

3.1.2 望遠鏡

図 3.1.2 は RIMOTS システムで用いている Meade-LX200 望遠鏡である ⁹。 Meade-LX200 はシュミットカセグレン式望遠鏡で、口径は 300mm、f/3.3 のレデューサ使用時の焦点距離は 923.6mm、赤道儀の移動の速さは最大約 8 度/s である。GCN サーバーよりガンマ線バースト発生情報を受信した際、目標天体をいかに早く視野内に入れるかが非常に重要であるので、市販の望遠鏡の中で導入速度の最も早い Meade-LX200 を使用している。

3.1.3 CCD カメラ

天体画像の撮影に用いる CCD カメラには、SBIG 社製 ST 9 E を使用し 9 、図 3.1.2 に示されるように望遠鏡の焦点部分に取り付けられている。 CCD チップの大きさは $10.2 \text{mm} \times 10.2 \text{mm}$ 、ピクセルサイズは $20 \, \mu \, \text{m}$ である。 CCD カメラを使用すると、画像データを電気的に扱えるため自動観測に最適であるということ以外に、写真用フィルムと比べて感度が高い、入力信号と出力信号がほぼ比例関係にあり測光や位置測定の精度がよい、ダイナミックレンジが広い、などの利点も持っている。 CCD カメラは

一般に本体やその周辺から発生する熱からの赤外線でさえもノイズとしてとらえてしまうほどの感度を持つが、CCD チップを冷却することで飛躍的にノイズを抑えることができる。我々がガンマ線バースト観測に用いるシステムでは、冷却 CCD カメラは撮影に使用するまでに常温より35℃低い温度に冷却される。

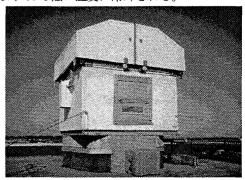


図 3.1.1 小屋

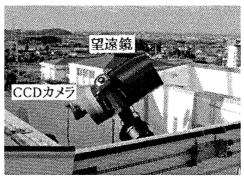


図 3.1.2 望遠鏡・CCD カメラ

3.2 RIMOTS制御

RIMOTS は Linux を搭載したパソコンと Windows を搭載したパソコン各 1 台で制御されている。 Linux マシーンでは、GCN からの GRB 位置情報の受け取り、屋根の開閉、望遠鏡の制御、CCD カメラが取得した画像の保存を行い、 Windows マシーンでは CCD カメラの制御を行っている。図 3.2 に Linux マシーンと Windows マシーンそれぞれの役割を示す。

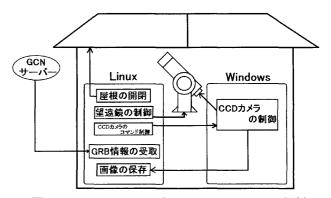


図 3.2 Linux マシーンと Windows マシーンの役割

3.3 観測スケジュール

RIMOTS は地平線からの太陽高度によりスケジュールが決められおり、夜になると自動で屋根を開け、CCDカメラの冷却やダークフレームの撮影などの観測準備を行い、その後、観測を行う。

GRB が発見されていない時には、RIMOTS は HETE-2 の視野方向である反太陽方向の観測を 15 秒積分で行っている。GRB が発見され、その位置情報を受け取った場合には、それまでの反太陽方向の観測をすぐにやめ、GRB 方向へ望遠鏡を向け GRB 残光観測を 15 秒積分で行う。しかし、すでに GRB 残光観測を行い撮影中である場合は、撮影中の 1 枚の撮影が終了してから、新たに受け取った GRB の方向へ望遠鏡を向け観測する。

4. GRB030329 の観測

2003 年 3 月 29 日に発生した GRB030329 は HETE-2 により発見され、すぐに GCN に発見の速報が配信された。その後、HETE-2 に搭載されている軟 X 線カメラから得られた情報を MIT や理化学研究所などが解析し、発見の速報から 73 分後にこの GRB の最初の位置情報が配信された。図 4.1 は RIMOTS で撮影した GRB030329 方向の画像である。視野は 43'×43'であり、中央付近の点線の丸印は GCN から最初に送られてきた GRB030329 の位置を表す直径 4 分角の誤差範囲である。実線の丸印は、その後 GRB を軟 X 線カメラの端のほうで感知したために生じる誤差を考慮してさらに解析され、19:53:03(UT)に90%の誤差範囲で決定されたもので、この範囲も直径 4 分角である。

GRB030329 可視光残光は, 発生直後 R バンドにおいて 12 等級台で観測されたという報告 ⁷⁸⁾もあるほど明るく, 発生直後の位置は日本においてちょうど天頂付近であったことから, 日本でも理化学研究所 ⁹⁾, 東京工業大学 ¹⁰⁾, 木曽観測所 ¹¹⁾, 京都大学 ¹²⁾, ぐんま天文台 ¹³⁾¹⁴⁾, 美星天文台 ¹⁵⁾などの研究グループが観測を行い, また日本で観測できる時刻をすぎてからも世界中で観測され, 数多くの報告がなされている。HETE-2 が GRB030329 を発見してから, RIMOTS を用いてそれを観測し終えるまでの流れを表 4.2 に示す。

RIMOTS システムは、今回、自動で位置情報を受け取ることができず、希望すれば誰でも購読できる VSNET(Variable Star Network)から携帯電話に送られてきたガンマ線バースト即時通報のメールで GRB が発見さ れたことを知り、手動で望遠鏡を GRB の方向へ向けた。 また、この時望遠鏡のエンコーダーがずれていたため、 正しい方向へ望遠鏡を向け直す必要があった。これらの 理由から、HETE-2 が GRB を発見してから RIMOTS で 最初に GRB をとらえるまでに 163 分かかってしまった。

その後, GRB が西へ沈んで観測できなくなる 18:17:59(UT)まで15秒積分で, ノンフィルター観測を続け, 304枚の画像を得ることができた。

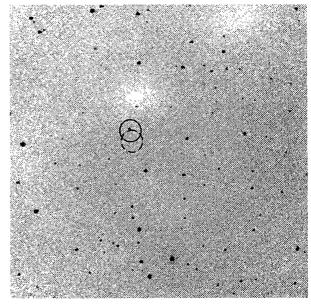


図 4.1 RIMOTS により取得した GRB030329 方向の画像

HETE-2 による GRB030329 の発見	11:37:14.67	UT
GCN から最初の報告	11:38:41	UT
GCN から最初の位置情報の報告	12:50:24	UT
RIMOTS による観測開始	13:52:14	UT
RIMOTS により残光を初めて取得	14:19:32	UT
RIMOTS による観測終了	18:17:59	UT

表 4.2 HETE-2による GRB030329 の発見から RIMOTS によ る観測終了までの流れ

5. データ解析

5.1 一次処理

5.1.1 ダークフレーム処理

冷却 CCD カメラを冷却してノイズを抑えても、どうしても一部の暗電流によるノイズは残ってしまう。暗電流によるノイズは同じ温度で同じ装置を使用している場合に、非常によく似た形であらわれることがわかっている。よって、ダークフレームという夜空を撮影するときと同じ温度、露出時間で真っ暗な何もない場所を撮影し、その後夜空を撮影した画像からダークフレームを画素ご

とに引き算することで、星の光だけを含んだ画像が得られる。これで完全にノイズを除去できるわけではないが、 大幅に低減できる。今回のダークフレーム処理には、観 測直前に取得したダークフレームを使用した。

5.1.2 フラットフレーム補正

フラットフレーム補正とは CCD 素子の感度のばらつ き・光学系のひずみ・レンズの周辺減光・ごみなどによ るばらつきを取り除くものである。一般的には均一な光 量を持った壁面やスクリーンを撮影したものをフラット フレームとするが、今回はそれに代わりナイトスカイフ ラットを作成しフラットフレーム補正に使用した。ナイ トスカイフラットはある一方向を基準として、できるだ け同じ画像を撮影しないように撮影方向を少しずつラン ダムにずらしていきながら撮影したものをすべて重ね合 わせてメジアンをとり、感度ムラのみを表すよう規格化 することで作成できる。この方法は星像の形が残ってし まう場合があるが、RIMOTS の場合、一晩で最大約600 枚ほどの大量のデータを取得できるので、積極的に画像 を取得することでこれを解決する方が、効率良くフラッ トフレームを得ることができる。今回のフラットフレー ム補正には、2002年5月19日の画像を用いこの方法で 作成したフラットフレームを用いて補正を行った。

ダークフレーム処理, フラットフレーム補正は, 画像 に対して次の計算をすることにより行うことができる。

$$E(x,y) = \frac{I(x,y) - D(x,y)}{F(x,y) - D(x,y)}$$

ここで(x,y)は画像のビクセル座標とし、E(x,y)はダークフレーム処理とフラットフレーム補正を行った画像のx,y 座標のピクセル値,D(x,y)はダークフレームのx,y 座標のピクセル値,F(x,y)はフラットフレームのx,y 座標のピクセル値,I(x,y)はダークフレーム処理前の画像のx,y 座標のピクセル値である。

5.2 位置測定

RIMOTS で取得した画像を解析し GRB030329 の位置を決定する際、変光星を観測する MISAO Project の吉田誠一氏が開発した天体画像自動検査システム PIXY を使用した ¹⁶⁾。これは天体画像に写っているすべての星像を検出し、USNO-A2.0(US Naval Observatory)などの恒星カタログと比較して新天体や変光星を自動で検出するとともに、画像に写っている各星像の位置と光量の測定をすることができるソフトウェアである。このシステムでは

星像の検出は閾値を超えるピクセルを星像とみなすという, 簡単な閾値法を用いている。今回使用したカタログは USNO-A2.0 である。

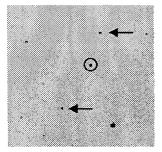
GRB030329 の可視光残光は、RIMOTS により取得した 画像である図 4.1 において、実線の丸印の中央に存在す ることが確認できた。PIXY を用いて GRB030329 の位置 を解析した結果、赤経 10h 44m 50s、赤緯 21°31′18″ であった。

5.3 測光

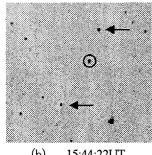
フィルターをつけずに観測すると、それぞれの観測者 が使う CCD カメラの分光感度特性の違いにより取得し たデータから得られる等級に差が生じてしまうが、異な る観測装置で得られたデータとの比較を行うために、特 定の波長範囲しか通さないバンドフィルターをつけて天 体の観測を行うのが通常である。また、フィルターをつ けて観測することで星のスペクトルの形を知ることがで きる。このときよく使われるフィルターは中心波長 U=350nm, B=440nm, V=550nm, R=650nm, I=800nm (2) ものである。しかしフィルターをつけて観測すると、つ けないときに比べ限界等級が明るくなってしまう。とこ ろがすぐに暗くなってしまう GRB 残光観測では、でき るだけ多くの GRB 残光をとらえるために可能な限り限 界等級を暗くしておくことが望ましい。そのため RIMOTS ではフィルターをつけないノンフィルター観測 を行い、Henden 氏によって求められた変換式 ¹⁷⁾を用いて、 R バンド等級に変換することにより、他の観測者のデー タと比較できるようにした。

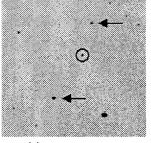
図 5.3.1 は RIMOTS で取得した GRB030329 付近の画像である。 測光には米国 NOAO のグループによって開発された IRAF(Image Reduction and Analysis Facility) ¹⁸⁾を用いた。この画像の大きさは約 14.5'×14.5'で, (a)は14:45:59UT, (b)は15:44:22UT, (c)は18:08:27UT の画像であり、丸で示された領域の中心部分に写っているのがGRB030329 の可視光残光である。それぞれの画像において矢印で示した2 つの星と GRB030329 可視光残光を見ると, (a)では矢印で示した星よりも GRB 可視光残光のほうが明るく写っており, (b)では矢印で示した星と GRB可視光残光とはほぼ同じくらいの明るさ, (c)では矢印で示した星よりも GRB 可視光残光は暗く写っていることが分かる。つまり、時間の経過とともに GRB 可視光残光

図 5.3.1 RIMOTS により取得した画像



(a) 14:45:59UT





(b) 15:44:22UT

(c) 18:08:27UT

図 5.3.2 は、RIMOTS で得られた R バンド等級と GCN で報告されている GRB030329 の R バンド等級をプロッ トしたライトカーブである。 横軸は GRB030329 が発生 した時刻を0時とし、時刻を日単位に換算し対数目盛で 表したもの、縦軸はRバンド等級を表す。〇プロットは RIMOTS で取得した画像を解析したもの、◇プロットは GCN circ. 2080¹⁹⁾, ×プロットはGCN circ. 2091²⁰⁾, ロプ ロットは GCN circ. 2064²¹⁾により報告されたものである。 直線は RIMOTS で得られたデータに最もよく合うべき 関数であり、べき指数は 1.0 ± 0.1 である。この時の χ^2 は0.176, 自由度は41である。図5.3.2より、我々の観測 結果は他の観測所の結果と誤差範囲内で一致しているこ とが分かる。

図 5.3.3 は図 5.3.2 から RIMOTS のデータのみを取り出 したものである。非常に微妙な変化であるが、バースト 発生後 0.16 日から 0.20 日にかけて, それまでよりも減光 がゆるやかになっている。我々と同じノンフィルター観 測を行った京都大学のライトカーブでも、バースト発生 後 0.163 日から 0.227 日にかけて、それまでよりも減光が ゆるやかになっている¹²⁾。しかし、Rバンドフィルター をつけて観測した木曽観測所のライトカーブにはこのよ うな一部分だけのゆるやかな減光はみられない¹¹⁾。 RIMOTS におけるライトカーブが同じノンフィルター観 測を行った京都大学と同様の結果が得られたことで, 一 部分のゆるやかな減光はノンフィルター観測することで 見つけることができたものだと考えられる。

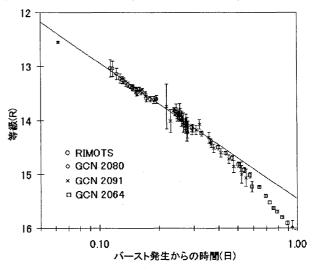


図 5.3.2 GRB033029 のライトカーブ

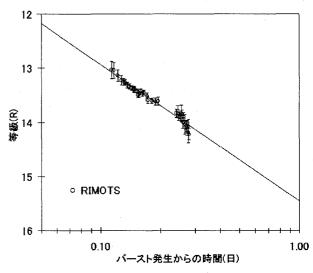


図 5.3.3 GRB030329 のライトカーブ (RIMOTS のみ)

議論とまとめ

RIMOTS システムを用いて、バーストが発生してから 163 分後の 14:19:32(UT)から 18:17:59(UT)までの GRB030329 可視光残光を観測することに成功した。

図 5.3.2 に示された RIMOTS による観測データに注目 すると、残光は指数が 1.0±0.1 の単一のべき指数で減光 しているが, 我々が観測できる時刻以降のデータ²⁰⁾²¹⁾を みると、バースト発生後0.58日あたりから急速に減光し ている折れ曲がりがあることから, バースト発生後1日 間のライトカーブは一つの関数では表現できないことが 分かる。これまでに観測されている GRB はほとんどが 時間に対して一つのべき関数で表現できる減光をしてお り、またそのメカニズムはバースト発生源から光速に近 い速度で噴出したジェットが、星間ガスと衝突しながらその膨張速度を次第におとしていくというモデルが広く受け入れられている³⁾。GRB030329 残光の場合は、折れ曲がりがあるものの、その前後ではべき関数型で減光しているので、この部分についてはいままでのモデルにあてはまると言える。その折れ曲がりの原因は、バースト源から光速に近い速度で噴出したジェット状のシェル放出の時間間隔が大きくなったこと、またはシェルそのもののエネルギーが低くなったこと、星間ガスに密度の揺らぎがあることなどが考えられている³⁾が、ジェットが連続的に放出されているのか、単発的なジェット状のシェルが繰り返し放出されているのかはまだ解明されていない。GRB030329の可視光残光は、バースト発生後1日間を通してみるとこれまでのモデルだけでは表現できない複雑な動きをしている。

バースト源についても依然明らかになっておらず大質 量星の崩壊や中性子星の合体,ブラックホールなどが考 えられている²²⁾が, GRB030329 では分光観測を行った観 測所の結果より,残光現象から極超新星の成分が現れた という報告がなされ²³,バースト源は極超新星と密接に 関連していると言われている。

我々のノンフィルター観測では、図 5.3.3 に見られるように減光がゆるやかになっている部分が存在するが、これは R バンドでの観測ではみられない。これは約 580nm~850nmの R 波長域以外の成分、おそらく R 波長域よりも短い U,B,V の波長域の放射を強くする現象が起こったことでノンフィルター観測では明るく写り、減光がゆるやかになったものと考えられる。一部分のゆるやかな減光の現象として上記に述べたモデルより、先にジェット状に噴出されたシェルが後から噴出されたジェットに追いつかれて合体することや星間ガスに密度のゆらぎがあることが考えられるが、その場合はこれまでの観測結果から R バンドフィルターをつけた観測にも同じ影響が出ると考える。この原因を調べるには同じ時間に同じ光を分光させてその成分を観測する分光観測を行うことで、解決の手がかりをつかめるものと考えられる。

参考文献

- D. Q. Lamb et al., AIP conference Proc. vol.522. p.265, 2000
- 2) D. W. Fow et al., Nature vol.422 p.284, 2003
- 3) A. J. Castro-Tirado et al., Science Vol.2069, 1999
- 4) 茶谷道夫, 宮崎大学大学院博士前期課程工学研究科物質工学専攻修士論文, 2002
- Meade LX200 ユーザーズマニュアル, Meade Instruments Corporation
- 6) SBIG ST7 8(E) / 9E イメージングオートガイダーハ ードウエア取扱説明書, 株式会社マゼラン天文機器 事業部国際光機
- 7) P.A.Price and B.A.Peterson, GCN circ, No.1987, 2003
- 8) E S. Rykoff and D. A. Smith, GCN circ. No.1995, 2003
- 9) K.Torii, GCN circ. No.1986, 2003
- N. Kawai, http://www.hp.phys.titech.ac.jp/nkawai/ 030329/index e.html, 2003
- 11) 浦田裕次, 日本天文学会秋季年会予稿集 p.73 H40b, 2003
- 12) M. Uemura et al., Nature Vol.423 no.6942 p.843, 2003
- 13) ぐんま天文台, http://www.astron.pref.gunma.jp/news/ 030329grb.html
- 14) 西原英治 et al., 日本天文学会秋季年会予稿集 p.73 H41b, 2003
- 15) 美星天文台, http://www.town.bisei.okayama.jp/bao/astro/grb/grb030329/, 2003
- 16) 吉田誠一, 早稲田大学大学院理工学研究科情報科学 専攻修士論文, 1999
- 17) A. A. Henden, JAAVSO Vol.29 p.35, 2000
- 18) IRAF, http://iraf.noao.edu/iraf-homepage.html
- 19) R. Sato et al., GCN circ. 2080, 2003
- 20) V. Lipunov et al., GCN circ. No.2091, 2003
- 21) W. Li et al., GCN circ. No.2064, 2003
- 22) J. S. Bloom et al., Ap.J. Vol.518 p.1, 1999
- 23) T. Matheson et al., GCN circ. No.2120, 2003