

# HE T E 2 衛星と連携した フォローアップ観測による $\gamma$ 線バーストの研究

(研究課題番号：13640293)

平成13年度～平成16年度  
科学研究費補助金（基盤研究(c)(2)）  
研究成果報告書

平成16年3月

研究代表者：山内 誠  
(宮崎大学工学部助教授)

ガンマ線バーストは1967年に発見されたものの、その後約30年間にわたり研究はほとんど進まなかった。しかしイタリアとオランダが共同で打ち上げた Beppo-SAX 衛星により、1997年に GRB970228 の X 線残光が発見されると、地上の望遠鏡を含めたあらゆる波長域での追観測が行われるようになり研究は急進展しだした。特に可視光追観測では複数のガンマ線バースト発生方向に数十億光年離れた遠方の銀河が見つかり、ガンマ線バーストが宇宙論的遠方で起こる現象であることが明らかとなった。

ところが残光は時間が経つにつれ急激に暗くなるので追観測を開始するまでの時間を極力短くする必要がある。そこで我々は空の広い範囲を常時監視してガンマ線バーストを発見し、広い波長域でガンマ線バーストを観測するとともに、その位置を迅速かつ正確に特定して即座に世界中に配信することを目的とした HETE2 衛星を 2000 年 10 月 9 日に打ち上げ、2001 年度初めから定常観測を続けている。

HETE2 衛星には、ガンマ線、硬 X 線、軟 X 線、近紫外線の観測器が搭載されており、これまでに約 300 個におよぶガンマ線バーストを発見している。また机上計算や地上解析により、X 線観測器では数分角、近紫外線観測器では数秒角の精度でバースト発生位置を決定することができ、これまでに約 70 個のバーストについて詳細な位置を GCN (Gamma-ray burst Coordinate Network) を通して発見から数十秒程度で世界中へ速報している。このため追観測の開始が飛躍的に早くなり、ガンマ線バーストの半数近くに X 線や可視光、電波の残光が見つかるとともに、距離の判明したバーストの例が増えてきた。特に GRB030329 では、追観測との連携によりガンマ線バーストと Ic 型超新星爆発 (SN2003dh) との関係を確認なものとした。

しかし超新星爆発から、いかにしてガンマ線バーストのような激しい現象へと繋がっていくのかは未だに解明されていない。HETE2 衛星により発見、観測されたガンマ線バーストは、そのスペクトルの特徴により典型的ガンマ線バースト、X 線過剰ガンマ線バースト、X 線フラッシュの 3 種類に分類できるが、これらのスペクトルは連続的に分布しており、典型的なガンマ線バーストに対して見い出されたピークエネルギーと等方的エネルギーとの間の強い相関が X 線フラッシュにも当てはまることがわかるなど、これら 3 種類のバーストが同一現象を起源としている可能性が高く、これらのバーストの存在は、ガンマ線バースト発生機構解明の手がかりになると期待されている。

また、ガンマ線バーストに付随する残光の発生機構についても幾つかのモデルが提唱されているものの決定的な解釈には至っていない。我々は宮崎大学に設置した小型望遠鏡により、これまでに GRB030329 と GRB041006 について HETE2 衛星からの速報を受け可視光残光の観測に成功している。特に GRB041006 ではバースト発生から 70 秒後には可視光残光を捉えることに成功しており、このように早期の光度曲線はこれまでも数例しか得られておらず、残光発生機構を考えるうえで重要な観測となった。さらに今後は、2004 年末に打ち上げられた Swift 衛星も活躍し始めたので、ますます残光の早期観測例が増えていき、残光の発生機構も解明されていくであろう。

本研究の遂行にあたっては、分担者だけでなく、国際共同研究の共同研究者や理化学研究所、宇宙航空研究開発機構、東京工業大学、青山学院大学の共同研究者の方々から多大なご助力を頂いた。ここに深く感謝する次第である。

## 研究組織

研究代表者：山内 誠 (宮崎大学工学部助教授)

研究分担者：高岸 邦夫 (宮崎大学工学部教授)

研究分担者：廿日出 勇 (宮崎大学工学部教授)

研究分担者：松澤 英之 (宮崎大学工学部助手)

## 交付決定額 (配分額)

(金額単位：千円)

	直接経費	間接経費	合計
平成 13 年度	1,900	0	1,900
平成 14 年度	500	0	500
平成 15 年度	500	0	500
平成 16 年度	500	0	500
総 計	3,400	0	3,400

## 研究発表

### (1) 学会誌等

1. N.Kawai, A.Yoshida, T.Tamagawa, M.Matsuoka, Y.Shirasaki, M.Yamauchi, F.Tokanai, E.E.Fenimore,, M.Galassi, and The Hete-2 Science Mission Team,  
“In-orbit Performance of the Wide-field X-ray Monitor on Board the High Energy Transient Explorer 2”  
Proceedings of Astronomical Society of the Pacific Conference, Vol.251, pp.554-555, 2002 年
2. M.Kohama, N.Kawai, A.Yoshida, Y.Urata, K.Ayani, T.Kawabata, T.Kosaka, M.Yamauchi, H.Matsuzawa,  
“RIBOTS: An Automatic Telescope System for Gamma-ray Burst Follow-up Observation”  
Proceedings of Astronomical Society of the Pacific Conference, Vol.251, pp.558-559, 2002 年
3. G.Ricker, K.Hurley, D.Lamb, S.Woosley, J.L.Atteia, N.Kawai, R.Vanderspek, G.Crew, J.Doty, J.Villasenor, G.Prigozhin, G.Monnolly, N.Butler, M.Matsuoka, Y.Shirasaki,, T.Tamagawa, K.Torii, T.Sakamoto,A.Yoshida, E.Fenimore, M.Galassi,T.Tavener, T.Donaghy,, C.Graziani, M.Boer, J.P.Dezalay, M.Niel, J.F.Olive,G.Vedrenne,, T.Cline, J.G.Jernigan, A.Levine, F.Martel,, E.Morgan, J.Braga, R.Manchanda, G.Pizzichini, K.Takagishi, M.Yamauchi,  
“GRB010921: Localization and Observations by the High Energy Transient Explorer Satellite”  
The Astrophysical Journal Letters, Vol.571, Issue 22, pp.127-130, 2002 年 6 月

4. Y.Shirasaki, N.Kawai, A.Yoshida, T.Tamagawa, K.Torii, T.Sakamoto, M.Matsuoka, E.E.Fenimore, M.Galassi, D.Q.Lamb, C.Graziani, T.Donaghy, R.Vanderspek, M.Yamauchi, K.Takagishi, I.Hatsukade,  
 “In-orbit performance of wide-field x-ray monitor on HETE-2”  
 Proceedings of the SPIE Conference, Vol.4851, pp.1310-1319, 2003 年 3 月
5. N.Kawai, A.Yoshida, M.Matsuoka, Y.Shirasaki, T.Tamagawa, K.Torii, T.Sakamoto, D.Takahashi, E.E.Fenimore, M.Galassi, T.Tavener, D.Q.Lamb, C.Graziani, T.Donaghy, R.Vanderspek, M.Yamauchi, K.Takagishi, I.Hatsukade,  
 “In-Orbit Performance of WXM(Wide-field X-Ray Monitor)”  
 Proceedings of the AIP Conference, Vol.662, pp.25-32, 2003 年 4 月
6. Y.Shirasaki, N.Kawai, A.Yoshida, M.Matsuoka, T.Tamagawa, K.Torii, T.Sakamoto, M.Suzuki, Y.Urata, R.Sato, Y.Nakagawa, D.Takahashi, F.E.Fenimore, M.Galassi, D.Q.Lamb, C.Graziani, T.Q.Donaghy, R.Vanderspek, M.Yamauchi, K.Takagishi, I.Hatsukade,  
 “Design and Performance of the Wide-Field X-Ray Monitor on Board the High-Energy Transient Explorer 2”  
 Publications of the Astronomical Society of Japan, Vol.55, No.5, pp.1033-1049, 2003 年 10 月
7. G.Crew, D.Q.Lamb, G.R.Ricker, J.-L.Atteia, N.Kawai, R.Vanderspek, J.Villasenor, J.Doty, G.Prigozhin, J.G.Jernigan, C.Graziani, Y.Shirasaki, T.Sakamoto, M.Suzuki, N.Butler, K.Hurley, T.Tamagawa, A.Yoshida, M.Matsuoka, E.E.Fenimore, M.Galassi, C.Barraud, M.Boer, J.-P.Dezalay, J.-F.Olive, A.Levine, G.Monnelly, F.Martel, E.Morgan, T.Q.Donaghy, K.Torii, S.E.Woosley, T.Cline, J.Braga, R.Manchanda, G.Pizzichini, K.Takagishi, M.Yamauchi,  
 “HETE-2 Localization and Observation of the Bright, X-Ray-rich Gamma-Ray Burst GRB 021211”  
 The Astrophysical Journal, Vol.599, No.1, pp.387-393, 2003 年 12 月
8. M.Matsuoka, N.Kawai, A.Yoshida, T.Tamagawa, K.Torii, Y.Shirasaki, G.Ricker, J.Doty, R.Vanderspek, G.Crew, J.Villasenor, J.-L.Atteia, E.E.Fenimore, M.Galassi, D.Q.Lamb, C.Graziani, K.Hurley, J.G.Jernigan, S.Woosley, F.Martel, G.Prigozhin, J.-F.Olive, J.-P.Dezalay, M.Boer, T.Cline, J.Braga, R.Manchanda, G.Pizzichini, A.Levine, E.Morgan, N.Butler, T.Sakamoto, Y.Urata, M.Suzuki, R.Sato, Y.Nakagawa, K.Takagishi, M.Yamauchi, I.Hatsukade,  
 “The Gamma-Ray Burst Alert System and the Results of HETE-2”  
 Proceedings of the Baltic Astronomy, Vol.13, pp.201-206, 2004 年
9. N.Kawai, M.Matsuoka, A.Yoshida, Y.Shirasaki, G.Ricker, J.Doty, R.Vanderspek, G.Crew, J.Villasenor, J.Atteia, E.Fenimore, M.Galassi, D.Lamb, C.Graziani, K.Hurley, J.Jernigan, S.Woosley, F.Martel, G.Monnelly, G.Prigozhin, J.Olive, J.Dezalay, M.Boer, G.Pizzichini, T.Cline, A.Levine, E.Morgan, T.Tamagawa, N.Butler, T.Sakamoto, K.Torii, C.Barraud, T.Donaghy, M.Suzuki, Y.Nakagawa, D.Takahashi, T.Tavener, R.Sato, Y.Urata, R.Manchanda, G.Azzibrouck, J.Braga, K.Takagishi, M.Yamauchi, I.Hatsukade,  
 “HETE-2 Observations of Gamma-Ray Bursts and Their Follow-Ups”  
 Progress of Theoretical Physics Supplement, No.155, pp.279-286, 2004 年

10. T.Sakamoto, D.Q.Lamb, C.Graziani, T.Q.Donaghy, M.Suzuki, G.Ricker, J.-L.Atteia, N.Kawai, A.Yoshida, Y.Shirasaki, T.Tamagawa, K.Torii, M.Matsuoka, E.E.Fenimore, M.Galassi, T.Tavener, J.Doty, R.Vanderspek, G.B.Crew, J.Villasenor, N.Butler, G.Prigozhin, J.G.Jernigan, C.Barraud, M.Boer, J.-P.Dezalay, J.-F.Olive, K.Hurley, A.Levine, G.Monnelly, F.Martel, E.Morgan, S.E.Woosley, T.Cline, J.Braga, R.Manchanda, G.Pizzichini, K.Takagishi, M.Yamauchi,  
“High Energy Transient Explorer 2 Observations of the Extremely Soft X-Ray Flash XRF 020903”  
The Astrophysical Journal, Vol.602, Issue 2, pp.875-885, 2004年2月
11. D.Q.Lamb, G.R.Ricker, J.-L.Atteia, C.Barraud, M.Boer, J.Braga, N.Butler, T.Cline, G.B.Crew, J.-R.Dezalay, T.Q.Donaghy, J.P.Doty, A.Dullighan, E.E.Fenimore, M.Galassi, C.Graziani, K.Hurley, J.G.Jernigan, N.Kawai, A.Levine, R.Manchanda, M.Matsuoka, F.Martel, G.Monnelly, E.Morgan, J.-F.Olive, G.Pizzichini, G.Prigozhin, T.Sakamoto, Y.Shirasaki, M.Suzuki, K.Takagishi, T.Tamagawa, K.Torii, R.Vanderspek, G.Vedrenne, J.Villasenor, S.E.Woosley, M.Yamauchi, A.Yoshida,  
“Scientific highlights of the HETE-2 mission”  
Proceedings of the 2nd VERITAS Symposium, Vol.48, Issue 5-6, pp.423-430, 2004年4月
12. D.Q.Lamb, G.R.Ricker, J.-L.Atteia, C.Barraud, M.Boer, J.Braga, N.Butler, T.Cline, G.B.Crew, J.-R.Dezalay, T.Q.Donaghy, J.P.Doty, A.Dullighan, E.E.Fenimore, M.Galassi, C.Graziani, K.Hurley, J.G.Jernigan, N.Kawai, A.Levine, R.Manchanda, M.Matsuoka, F.Martel, G.Monnelly, E.Morgan, J.-F.Olive, G.Pizzichini, G.Prigozhin, T.Sakamoto, Y.Shirasaki, M.Suzuki, K.Takagishi, T.Tamagawa, K.Torii, R.Vanderspek, G.Vedrenne, J.Villasenor, S.E.Woosley, M.Yamauchi, A.Yoshida,  
“Scientific highlights of the HETE-2 mission”  
Nuclear Physics B Proceedings Supplements, Vol.132, pp.279-288, 2004年6月

## (2) 口頭発表

1. 河合誠之, 吉田篤正, 松岡 勝, 白崎裕治, 玉川 徹, 鳥居研一, 坂本貴紀, 山内 誠, 高岸邦夫, 甘日出 勇, G.Ricker, 他 HETE2 チーム,  
“ $\gamma$ 線バースト観測衛星 HETE-2 の現状 (I) 運用状況”  
日本物理学会 2001 年秋季大会, 2001 年 9 月 22 日-25 日
2. 白崎裕治, 河合誠之, 吉田篤正, 玉川 徹, 鳥居研一, 坂本貴紀, 松岡 勝, 山内 誠, 高岸邦夫, 甘日出 勇, George.R..Ricker, 他 HETE2 チーム,  
“ $\gamma$ 線バースト観測衛星 HETE-2 の現状 (II) 較正観測”  
日本物理学会 2001 年秋季大会, 2001 年 9 月 22 日-25 日
3. 玉川 徹, 河合誠之, 吉田篤正, 松岡 勝, 白崎裕治, 鳥居研一, 坂本貴紀, 山内 誠, 高岸邦夫, 甘日出 勇, George.R..Ricker, 他 HETE2 チーム,  
“ $\gamma$ 線バースト観測衛星 HETE-2 の現状 (III) 初期成果”  
日本物理学会 2001 年秋季大会, 2001 年 9 月 22 日-25 日

4. 河合誠之, 坂本貴紀, 吉田篤正, 松岡 勝, 白崎裕治, 玉川 徹, 鳥居研一, 山内 誠, 高岸邦夫, 廿日出 勇, G.Ricker, R.Vanderspek, G.Crew, J.Doty, G.Monnelly, J.Villasenor, N.Butler, J.-L.Atteia, E.E.Fenimore, M.Galassi, D.Q.Lamb, C.Graziani, K.Hurley, G.Jernigan, S.Woosley, 他 HETE2 チーム,  
“HETE2 の現状 (I) 運用状況”  
日本天文学会秋季年会, 2001 年 10 月 4 日-6 日
5. 吉田篤正, 河合誠之, 坂本貴紀, 松岡 勝, 白崎裕治, 玉川 徹, 鳥居研一, 山内 誠, 高岸邦夫, 廿日出 勇, G.Ricker, R.Vanderspek, G.Crew, J.Doty, G.Monnelly, J.Villasenor, N.Butler, J.-L.Atteia, E.E.Fenimore, M.Galassi, D.Q.Lamb, C.Graziani, K.Hurley, G.Jernigan, S.Woosley, 他 HETE2 チーム,  
“HETE2 の現状 (II) 速報体制”  
日本天文学会秋季年会, 2001 年 10 月 4 日-6 日
6. 白崎裕治, 河合誠之, 坂本貴紀, 吉田篤正, 松岡 勝, 玉川 徹, 鳥居研一, 山内 誠, 高岸邦夫, 廿日出 勇, G.Ricker, 他 HETE2 チーム,  
“HETE2 の現状 (III) 較正観測”  
日本天文学会秋季年会, 2001 年 10 月 4 日-6 日
7. 玉川 徹, 鳥居研一, 河合誠之, 坂本貴紀, 吉田篤正, 松岡 勝, 白崎裕治, 山内 誠, 高岸邦夫, 廿日出 勇, G.Ricker, R.Vanderspek, G.Crew, J.Doty, G.Monnelly, J.Villasenor, N.Butler, J.-L.Atteia, E.E.Fenimore, M.Galassi, D.Q.Lamb, C.Graziani, K.Hurley, G.Jernigan, S.Woosley, 他 HETE2 チーム,  
“HETE2 の現状 (IV) 初期成果”  
日本天文学会秋季年会, 2001 年 10 月 4 日-6 日
8. 茶谷道夫, 山内 誠, 浦田裕次, 小浜光洋, 鳥居研一, 河合誠之,  
“RIMOTS の現状”  
日本天文学会秋季年会, 2001 年 10 月 4 日-6 日
9. 茶谷道夫, 山内 誠, 坂元かほり, 柴田博介, 他 RIMOTS チーム,  
“HETE 衛星と連携したガンマ線バースト天体観測システム”  
日本物理学会九州支部大会, 2001 年 12 月 8 日
10. 河合誠之, 坂本貴紀, 吉田篤正, 松岡勝, 白崎裕治, 玉川徹, 鳥居研一, 山内誠, 高岸 邦夫, 廿日出勇, G.Ricker, R.Vanderspek, G.Crew, J.Doty, G.Monnelly, J.Villasenor, N.Butler, J.L.Atteia, E.E.Fenimore, M.Galassi, D.Q.Lamb, C.Graziani, K.Hurley, G.Jernigan, S.Woosley, 他 HETE-2 チーム,  
“HETE-2 衛星の観測運用状況”  
日本天文学会春季年会, 2002 年 3 月 28 日-30 日
11. 玉川徹, 鳥居研一, 河合誠之, 坂本貴紀, 吉田篤正, 松岡勝, 白崎裕治, 山内誠, 高岸 邦夫, 廿日出勇, G.Ricker, R.Vanderspek, G.Crew, J.Doty, G.Monnelly, J.Villasenor, N.Butler, J.L.Atteia, E.E.Fenimore, M.Galassi, D.Q.Lamb, C.Graziani, K.Hurley, G.Jernigan, S.Woosley, 他 HETE-2 チーム,  
“HETE-2 衛星搭載広視野 X 線モニター (WXM) のエネルギー応答関数”  
日本天文学会春季年会, 2002 年 3 月 28 日-30 日

12. 鈴木素子, 河合誠之, 吉田篤正, 松岡勝, 白崎裕治, 玉川徹, 鳥居研一, 坂本貴紀, 浦田裕次, 佐藤理江, 高橋大樹, 中川友進, 山内誠, 高岸邦夫, 廿日出勇, G.R.Ricker, 他 HETE-2 チーム,  
“ $\gamma$ 線バースト観測衛星 HETE-2 の現状”  
日本物理学会 2002 年秋季大会, 2002 年 9 月 13 日-16 日
13. Y.Shirasaki, N.Kawai, T.Sakamoto, M.Suzuki, A.Yoshida, T.Tamagawa, K.Torii, M.Matsuoka, M.Yamauchi, K.Takagishi, I.Hatsukade, E.Fenimore, M.Galassi, D.Q.Lamb, C.Graziani, T.Donaghy, R.Vanderspek, G.Ricker, and HETE-2 Science Team,  
“In-orbit calibration of the HETE-2 WXM”  
International Workshop on “Gamma-Ray Burst in the Afterglow Era: 3rd Workshop”,  
2002 年 9 月 17 日-20 日
14. 河合誠之, 坂本貴紀, 浦田裕次, 吉田篤正, 高橋大樹, 中川友進, 松岡勝, 白崎裕治, 玉川徹, 鳥居研一, 鈴木素子, 佐藤理江, 山内誠, 高岸邦夫, 廿日出勇, G.Ricker, 他 HETE-2 チーム,  
“HETE-2 衛星による  $\gamma$ 線バースト観測”  
日本天文学会秋季年会, 2002 年 10 月 7 日-9 日
15. 白崎裕治, 河合誠之, 坂本貴紀, 吉田篤正, 松岡勝, 玉川徹, 鳥居研一, 山内誠, 高岸邦夫, 廿日出勇, G.Ricker, R.Vanderspek, G.Crew, J.Doty, G.Monnelly, J.Villasenor, N.Butler, J.L.Atteia, E.E.Fenimore, M.Galassi, D.Q.Lamb, C.Graziani, K.Hurley, G.Jernigan, S.Woosley, 他 HETE-2 チーム,  
“HETE-2 衛星の観測運用状況”  
日本天文学会秋季年会, 2002 年 10 月 7 日-9 日
16. 玉川徹, 鳥居研一, 河合誠之, 坂本貴紀, 鈴木素子, 浦田裕次, 佐藤理恵, 吉田篤正, 高橋大樹, 中川友進, 白崎裕治, 松岡勝, 山内誠, 高岸邦夫, 廿日出勇, G.Ricker, R.Vanderspek, G.Crew, J.Doty, G.Prigozhin, J.Villasenor, N.Butler, E.E.Fenimore, M.Galassi, D.Q.Lamb, C.Graziani, K.Hurley, G.Jernigan, S.Woosley, 他 HETE-2 チーム,  
“HETE-2 の最新成果 - ガンマ線バーストにおける「即時」位置通報に成功 -”  
宇宙科学シンポジウム, 2003 年 1 月 9 日-10 日
17. 河合誠之, 鈴木素子, 吉田篤正, 松岡勝, 白崎裕治, 玉川徹, 鳥居研一, 坂本貴紀, 浦田裕次, 佐藤理恵, 高橋大樹, 中川友進, 山内誠, 高岸邦夫, 廿日出勇, G.Ricker, R.Vanderspek, G.Crew, J.Doty, J.Villasenor, N.Butler, G.Prigozhin, J.-L.Atteia, E.E.Fenimore, M.Galassi, D.Q.Lamb, C.Graziani, T.Donaghy, K.Hurley, G.Jernigan, S.Woosley, 他 HETE-2 チーム,  
“HETE-2 衛星の観測運用状況 -2002 年~2003 年初頭”  
日本天文学会春季年会, 2003 年 3 月 24 日-26 日
18. 鈴木素子, 河合誠之, 吉田篤正, 松岡勝, 白崎裕治, 玉川徹, 鳥居研一, 坂本貴紀, 浦田裕次, 佐藤理恵, 高橋大樹, 中川友進, 山内誠, 高岸邦夫, 廿日出勇, G.Ricker, 他 HETE-2 チーム,  
“GRB021004 の HETE2 による観測”  
日本天文学会春季年会, 2003 年 3 月 24 日-26 日
19. 大島直哉, 上田博之, 内田正美, 籠谷正則, 坂元かほり, 高橋渉, 中川道夫, 中村暮一, 向井謙治, 山内誠,  
“GRB 残光の可視光観測装置 MIKOTS について”  
日本物理学会秋季大会, 2003 年 9 月 9 日-12 日

20. 坂元かほり, 山内誠, 園田絵里, 河合誠之, 浦田裕次, 小浜光洋,  
“宮崎大学におけるRIMOTSを用いたGRB030329の観測”  
日本天文学会秋季年会, 2003年9月25日-27日
21. 河合誠之, 鈴木素子, 吉田篤正, 松岡勝, 白崎裕治, 玉川徹, 鳥居研一, 坂本貴紀, 浦田裕次, 佐藤理恵, 山本佳久, 高橋大樹, 中川友進, 山崎徹, 山内誠, 高岸邦夫, 廿日出勇, G.Ricker, R.Vanderspek, G.Crew, J.Doty, J.Villasenor, N.Butler, G.Prigozhin, J.-L.Atteia, E.E.Fenimore, M.Galassi, D.Q.Lamb, C.Graziani, T.Donaghy, K.Hurley, G.Jernigan, S.Woosley, 他 HETE-2 チーム,  
“HETE-2 衛星の観測運用状況 -2003 年春から現在まで”  
日本天文学会秋季年会, 2003年9月25日-27日
22. 吉田篤正, 中川友進, 山崎徹, 高橋大樹, 河合誠之, 松岡勝, 白崎裕治, 玉川徹, 鳥居研一, 坂本貴紀, 浦田裕次, 鈴木素子, 佐藤理恵, 山本佳久, 山内誠, 高岸邦夫, 廿日出勇, J.-L.Atteia, C.Barraud, G.Ricker, R.Vanderspek, G.Crew, J.Doty, J.Villasenor, N.Butler, G.Prigozhin, E.E.Fenimore, M.Galassi, D.Q.Lamb, C.Graziani, T.Donaghy, K.Hurley, G.Jernigan, S.Woosley, 他 HETE-2 チーム,  
“HETE-2 衛星によるGRB030328の観測”  
日本天文学会秋季年会, 2003年9月25日-27日
23. 玉川徹, 鳥居研一, 河合誠之, 坂本貴紀, 鈴木素子, 浦田裕次, 佐藤理恵, 山本佳久, 吉田篤正, 中川友進, 山崎徹, 松岡勝, 白崎裕治, 山内誠, 高岸邦夫, 廿日出勇, G.Ricker, R.Vanderspek, G.Crew, J.Doty, J.Villasenor, N.Butler, G.Prigozhin, J.-L.Atteia, E.E.Fenimore, M.Galassi, D.Q.Lamb, C.Graziani, T.Donaghy, K.Hurley, G.Jernigan, S.Woosley, 他 HETE-2 チーム,  
“HETE-2 衛星によるGRB030329の観測”  
日本天文学会秋季年会, 2003年9月25日-27日
24. 園田絵里, 山内誠, 有衛孝次, 落合良樹,  
“ガンマ線バースト可視光残光専用分光器の開発”  
日本天文学会秋季年会, 2003年9月25日-27日
25. 坂元かほり, 山内誠, 園田絵里, 河合誠之, 浦田裕次, 小浜光洋,  
“RIMOTSを用いたGRB030329の観測”  
第109回日本物理学会九州支部例会, 2003年11月29日
26. 園田絵里, 山内誠, 有衛孝次, 落合良樹, 森田善之, 那須祐司,  
“GRB 残光の分光観測計画”  
第109回日本物理学会九州支部例会, 2003年11月29日
27. K.Sakamoto, M.Yamauchi, E.Sonoda, N.Kawai, Y.Urata, M.Kohama,  
“Optical afterglow of GRB030329 detected by RIMOTS”  
理研シンポジウム「ガンマ線バースト天文学の新たな地平」, 2003年12月8日-10日
28. W.Takahashi, M.Kagotani, M.Nakagawa, T.Nakamura, K.Mukai, N.Ohshima, K.Sakamoto, M.Uchida, H.Ueda, M.Yamauchi,  
“Full auto optical afterglow searching system: MIKOTS”  
理研シンポジウム「ガンマ線バースト天文学の新たな地平」, 2003年12月8日-10日



28. 玉川徹, 河合誠之, 坂本貴紀, 鈴木素子, 浦田裕次, 佐藤理恵, 吉田篤正, 中川友進, 山崎徹, 白崎裕治, 松岡勝, 鳥居研一, 山内誠, 高岸邦夫, 廿日出勇, G.Ricker, R.Vanderspek, G.Crew, J.Doty, G.Prigozhin, J.Villasenor, N.Butler, E.E.Fenimore, M.Galassi, D.Q.Lamb, C.Graziani, T.Donaghy, K.Hurley, G.Jernigan, S.Woosley, 他 HETE-2 チーム,  
“HETE-2 の最新成果 - ついに正体をみせたガンマ線バースト -”  
宇宙科学シンポジウム, 2004 年 1 月 8 日-9 日
29. 玉川徹, 河合誠之, 坂本貴紀, 鈴木素子, 浦田裕次, 佐藤理恵, 山本佳久, 小谷太郎, 吉田篤正, 中川友進, 山崎徹, 白崎裕治, 松岡勝, 鳥居研一, 山内誠, 高岸邦夫, 廿日出勇, G.Ricker, R.Vanderspek, G.Crew, J.Doty, G.Prigozhin, J.Villasenor, N.Butler, J.-L.Atteia, C.Barrand, J.-H.Olive, E.Fenimore, M.Galassi, D.Lamb, C.Graziani, T.Donaghy, K.Hurley, G.Jernigan, S.Woosley, 他 HETE-2 チーム,  
“HETE-2 衛星の現状報告 -2003 年秋から現在まで”  
日本天文学会春季年会, 2004 年 3 月 22 日-24 日
30. 廿日出勇, 杉原将, 山内誠, 前野将太, 園田絵里,  
“GRB 閃光観測用広視野・高時間分解能カメラの開発”  
日本天文学会秋季年会, 2004 年 9 月 21 日-23 日
31. 園田絵里, 山内誠, 前野将太, 松尾嘉比古, RIMOTS チーム,  
“RIMOTS でとらえた GRB041006 の可視光残光”  
第 110 回日本物理学会九州支部例会, 2004 年 12 月 4 日
32. 園田絵里, 山内誠, 前野将太, 山本幹生, 松尾嘉比古, 河合誠之, 小浜光洋,  
“RIMOTS による GRB041006 可視光残光の早期観測”  
日本天文学会春季年会, 2005 年 3 月 28 日-30 日

## 研究成果

本研究による成果として、下記の通り可視光追観測による成果を記した修士論文と HETE2 衛星による観測成果を記した論文各 1 篇を以下に転載する。

- “ROMOTS による GRB041006 可視光残光の早期観測”, 園田 絵里,  
宮崎大学大学院工学研究科博士前期課程修士論文, 2005 年 3 月 ..... 1
- “Scientific highlights of the HETE-2 mission”, D.Q.Lamb et al.,  
Nuclear Physics B Proceedings Supplements, Vol.132, pp.279-288, 2004 年 6 月 ..... 34

# 第1章 はじめに

$\gamma$ 線バースト (Gamma Ray Burst : GRB) は、1967年にアメリカの軍事衛星 Vela によって偶然発見された高エネルギー天体现象である。発見当時は突然宇宙のある方向から大量の  $\gamma$ 線が放射されていることしかわかっておらず、その発生源が我々の銀河系内にあるのかどうかも不明だった。その後 1991年4月5日にアメリカが GRB 観測専用打ち上げた CGRO (Compton Gamma-Ray Observatory) 衛星によって、GRB の発生源の分布が我々の銀河面だけではないことがわかり (Paciesas, W. et al., 1999)、その5年後の 1996年4月30日にイタリアとオランダが共同で打ち上げた X線観測衛星 BeppoSAX が GRB を観測したところ、GRB は短時間の内に  $\gamma$ 線及び X線を放射した後に X線の残光現象を伴うことを発見した (Costa, E. et al., 1997)。この GRB の X線残光の発見以来、多くの観測者が地上観測装置や衛星を使用して GRB 残光の観測を行なっている。その結果、残光は電波から X線に渡って放射されていること、そして GRB のホスト銀河と考えられる銀河の可視光分光観測の結果から発生源までの距離は大体数十億 ~ 百億光年近くまで分布していること (Lamb, D. Q. et al., 1999)、および残光が急激に暗くなる様子などがわかっている (Galama, T. J., 2000)。

この残光の光度変化の様子については現在シンクロトロンショックモデル (Tavani, M. et al., 1996) が有力説として考えられており、これまでに観測されている残光の光度曲線の大部分がこのモデルでうまく説明できる。しかし、2002年10月4日に発生した GRB では可視光残光の早期における光度変化にそれまでにない非常にゆるやかな減光の様子が見られた (Fox, D. W. et al., 2003a) など、従来の GRB の発生モデルのままでは説明ができない観測例もある。GRB 残光発生メカニズムを考える上でも残光の早期の観測は非常に有益であるが、地上から残光を観測する場合、GRB が発見された後に望遠鏡を向けて観測を開始するため、残光早期の観測に成功している例は少ない。

我々は 2004年10月6日に発生した GRB (GRB041006) の可視光残光をバースト発生後の 1分10秒後から観測した。本研究の目的は、今まで観測例の少なかったバースト発生後2時間以内の残光観測を行い、それによって得られた光度曲線から GRB 可視光残光の発生メカニズムについて検討することである。本論文では GRB041006 の残光早期の光度曲線と GRB 残光発生モデルから予測される光度曲線とを比較した結果について次の

## 第1章 はじめに

ような順序で報告する。2章はこれまでに発表されている GRB と残光について紹介し、3章では観測に用いた RIMOTS の観測システムについて述べる。4章で GRB041006 の発見と RIMOTS による観測について示し、5章では得られた画像の解析方法を、6章ではその結果について述べ、7章では得られた GRB041006 可視光残光の発生モデルについての考察を述べ、8章で論文全体をまとめる。

## 第2章 GRB残光

### 2.1 GRB および残光の特性

GRB は宇宙のある一点から 0.1 秒 ~1000 秒程度の間突然大量の  $\gamma$  線が放出される現象である (高原文郎、2002)。この時同時に X 線も放射されており、この X 線の分光解析から、観測された  $\gamma$  線及び X 線は非熱放射によって発生していると考えられている (Band,D.et al.,1993)。

また GRB は高エネルギーの電磁波を放出した後に、X 線から電波の広波長領域に渡って残光現象を伴うことがわかっており、特に可視光領域については地上から観測しやすい波長領域のためこれまで多くの研究者達によって観測が試みられている。図 2.1 は過去の GRB 可視光残光の観測例で、縦軸と横軸はそれぞれ残光の R 等級とバーストからの経過日数を log スケールで表示している (Fox,D.W.et al.,2003b)。それぞれの残光の光度曲線を見ると減光の様子が直線で近似でき、可視光残光の変化はバーストからの経過日数を  $t$  とすると、ベキ指数を  $\alpha$  としたベキ関数  $t^\alpha$  に比例するような減光をしていることがわかる。また、観測例のほとんどがバースト発生後約 0.1 日以降に行なわれており、これらの光度曲線から GRB 可視光残光は大体  $\alpha$  が -1 程度で減光していることがわかる。

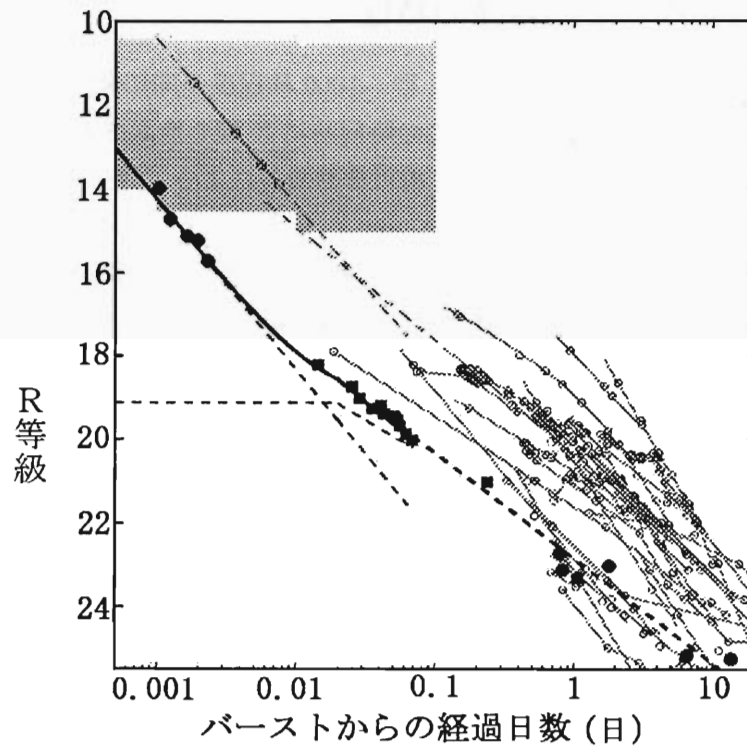


図 2.1: GRB 可視光残光の過去の観測例

縦軸が等級、横軸がバーストからの経過日数を log スケールで表示している。

## 2.2 シンクロトロンショックモデル

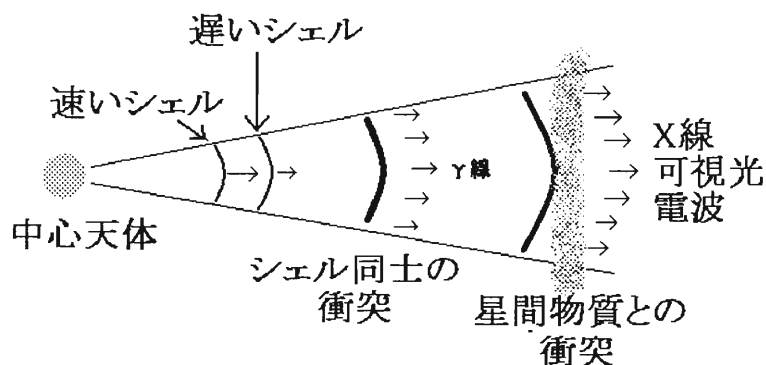


図 2.2: シンクロトロンショックモデルの概念図

亜光速のプラズマシェルが複数噴出された後、遅いシェルに早いシェルが衝突してガンマ線を放射する。その後、合体したシェルが星間物質と衝突し、X線から電波に渡る電磁波を放射する。

GRB 可視光残光は、これまでの観測結果から  $t^\alpha$  :  $\alpha = -1 \sim -2$  で減光していることがわかっている。この残光の光度変化と、高エネルギー電磁波の突発放射を同時に説明できる GRB 発生メカニズムのモデルとして、現在シンクロトロンショックモデル (Tavani, M., 1996) が有力である。

図 2.2 はシンクロトロンショックのイメージ図である。シンクロトロンショックモデルでは、まず何らかの原因で中心天体が爆発し、同時に亜光速のプラズマシェルを複数個噴出する。この過程で遅いシェルに早いシェルが衝突すると、シェルの進行方向に向かってシンクロトロン放射で  $\gamma$  線及び X 線を放射し、これが GRB として観測される。その後合体したシェルは星間物質などのガスと衝突し再度シンクロトロン放射により電磁波を放射する。そのとき発生した電磁波は電波から X 線の領域に渡っており、これが残光として観測されると考えられている。

## 2.3 残光早期光度曲線

GRB 発生直後における可視光残光の観測例は数少ないが (Fox, D. W. et al., 2003, Sato, R. et al., 2003, Weidong, L. et al., 2003)、光度変化の様子については 1999 年に Sari 氏らにより予測されている (Sari, R. et al., 1998)。これによると、シェルが星間物質と衝突し始めた時に電磁波を放射する源としてフォワードショックとリバースショックの 2 つが考えられてい

## 第2章 GRB 残光

る。一つ目のフォワードショックとは、シェルと星間物質が衝突する時に衝突面を基準面として星間物質中をシェルの進行方向に向かって進んでいく衝撃波の事をいい、フォワードショックが星間物質を通過すると星間物質中にある電子が磁場に巻きつくようにして加速される。加速された電子の速度は亜光速にまで達しているが、電子は衝突によって得た運動エネルギーをシンクロトロン放射により徐々に失い、速度を落していくと Sari 氏らは考えている。この電子が減速する過程で、電子はシェルの速度で決まる臨界速度までしか減速しない。残光早期においてはシェルに比べてフォワードショックの速度が早いいため、加速される電子の最小速度は常に臨界速度より大きいと考えられる。ここで臨界速度で運動する電子がシンクロトロン放射するときの振動数を  $\nu_c$ 、加速された電子のうち最小速度の電子がシンクロトロン放射するときの振動数を  $\nu_{min}$  とすると、次式の関係になる。

$$\nu_c < \nu_{min}$$

シェルおよびフォワードショックは時間が経つと減速し、その減速の仕方がそれぞれ違うため、それらに依存して決まる  $\nu_c$  および  $\nu_{min}$  は次式のように変化する (Sari, R. et al., 1998)。

$$\nu_c \propto t^{-\frac{1}{2}}$$

$$\nu_{min} \propto t^{-\frac{3}{2}}$$

すると  $\nu_{min}$  の方が早く小さくなっていくため、時間がたつと  $\nu_c = \nu_{min}$  となる。この時シンクロトロン放射される電磁波の振動数を  $\nu_0 (= \nu_c = \nu_{min})$  とすると、観測している電磁波の振動数  $\nu$  がこの  $\nu_0$  より大きいか小さいかで2通りの光度曲線が予想される。図 2.3 は Sari 氏らの予想した残光早期の光度曲線の形である。

もう1つの電磁波を放射する源であるリバースショックはフォワードショックとは逆にシェルと星間物質の衝突面を基準面にしたときに、シェルの内側へ向かう衝撃波の事である。シェルは薄いためリバースショックは短時間でシェル中を通過する。従ってリバースショックによって加速を受けた電子のシンクロトロン放射による増光は一度だけであるため、リバースショックによる残光発生メカニズムから考えられる光度曲線として、早期の残光指数  $\alpha$  は -1 以上になると予想されている (Wei, D.M., 2003)。例えば、2002 年 12 月 11 日に発生した  $\gamma$  線バースト (GRB021211) の可視光残光光度曲線では後半の減光が  $\alpha \sim -1$  で近似できるのに対し、バースト発生から 12 分後までは  $\alpha \sim -1.6$  で減光している (Wei, D.M., 2003)。

従って、残光の初期段階ではフォワードショックによるものとリバースショックによるものの2つの成分がみられることが期待される。

第2章 GRB 残光

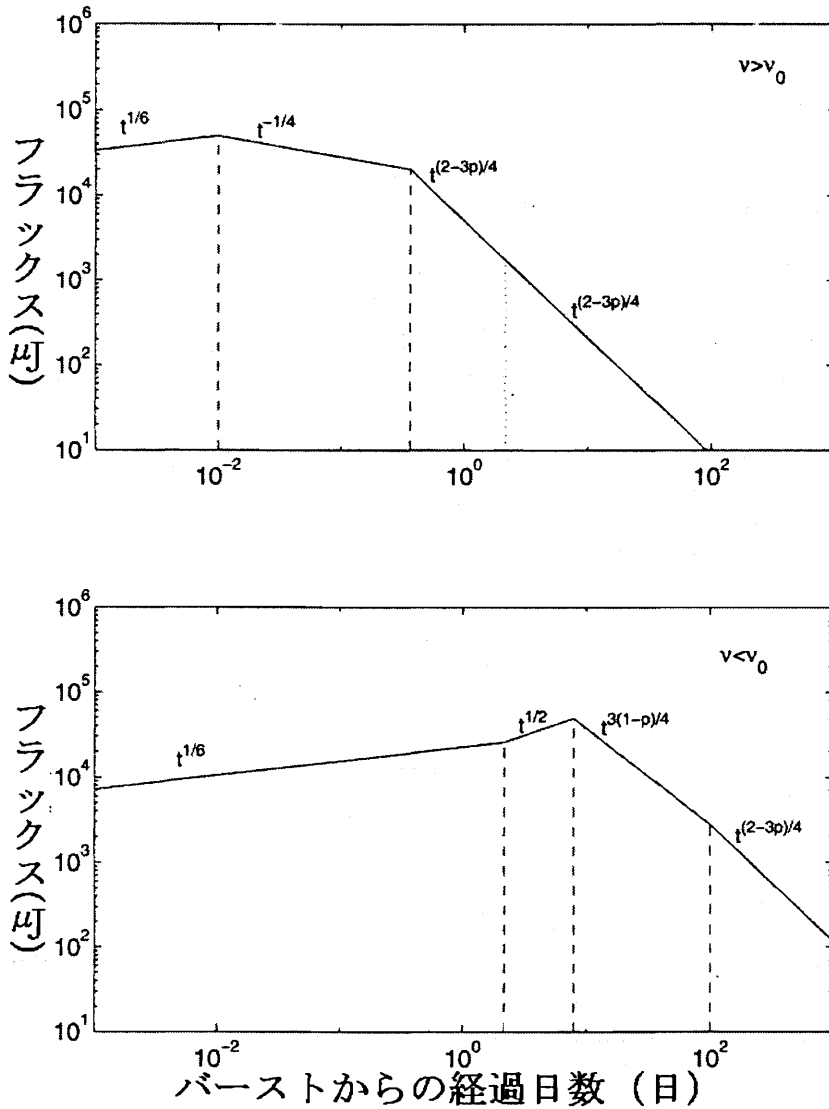


図 2.3: Sari 氏らによって予測された残光の光度曲線 (Sari,R.et al.,1998)

上の2つの図は縦軸が観測される電磁波の強度(フラックス)、横軸がバーストからの経過日数を log スケールで表示している。上の図は観測している電磁波の振動数  $\nu$  が  $\nu_0$  より大きい場合であり、下の図は  $\nu$  が  $\nu_0$  よりも小さい場合を示している。 $p$  は電子のエネルギー分布の指数であり、標準的な値としては 2.5 が使用される (Sari,R.et al.,1996)。



## 第3章 観測システム

我々の観測システムは人工衛星が発見した GRB の位置情報を GCN を介して自動で受け取り、GRB 可視光残光の観測を行なっている。

### 3.1 GCN(Gamma-ray-burst Coordinates Network)

GCN([http://gcn.gsfc.nasa.gov/gcn\\_main.html](http://gcn.gsfc.nasa.gov/gcn_main.html)) は NASA が配信している GRB 専用の情報ネットワークである。GCN 加入者は、HETE-2 や INTEGRAL 衛星などの GRB 観測専用の衛星が検出した GRB についての情報をリアルタイムで受け取ることができるため、現在世界中の多くの観測施設が GCN に加入して残光観測を行なっている。またそれぞれの観測施設による残光の観測結果なども GCN を通して知ることができるので、観測者や研究者同士の間での情報のやりとりとしても重要なネットワークとなっている。

### 3.2 HETE-2

図 3.1 は HETE-2 の概観である。HETE-2 はアメリカのマサチューセッツ工科大学宇宙研究センター、ロスアラモス国立研究所、日本の理化学研究所宇宙放射線研究室、フランスの宇宙線研究センターなどの協力により開発され、2000 年 10 月 9 日 5:38:18 (UT ; 日本時間では 14:38:18) にマーシャル諸島のクウェジェリン環礁南方沖からペガサスロケットによって打ち上げられた GRB 観測専用衛星である。

HETE-2 は  $\gamma$  線検出器として FREGATE(FRENch GAMMA TElescope)、X 線領域の観測及び GRB の位置決定に WXM(Wide-field X-ray Monitor) と SXC(Soft X-ray Camera) の 3 種類の検出器を搭載している。それぞれの観測エネルギー領域は FREGATE が 6 ~ 400 keV、WXM が 2 ~ 25 keV、SXC が 2 ~ 14 keV である。GRB の位置決定は WXM と SXC が担い、機上計算での誤差範囲は WXM がおよそ 30 分角、SXC が数秒角であるが地上解析により WXM の誤差範囲は大体 10 分角程度まで小さくできる。HETE-2 はこれらの検出器でバーストを感知すると、即座に地上局へその位置情報を配信する。地上局へ送られたデータは一度 MIT(Massachusetts Institute of Technology) へ

### 第3章 観測システム

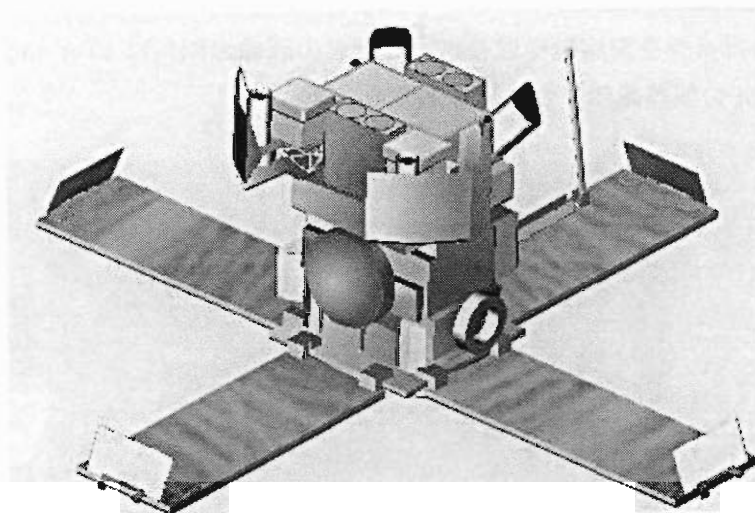


図 3.1: HETE-2

HETE-2 の大きさは 89cm×66cm、重量は 124kg である。2001 年 1 月から 2003 年 9 月の間で 45 個の GRB を検出した (T.Sakamoto, 2004)。

集められた後 GCN を通して世界中へ転送される。

## 3.3 RIMOTS (RIken-Miyazaki Optical Transient Seeker)

RIMOTS は 2001 年 3 月に理化学研究所と宮崎大学が共同で宮崎大学の工学部屋上に設置した GRB 可視光残光専用の観測システムである。望遠鏡は天体観測が可能な時間帯に常時反太陽方向を向いて自動観測を行っており、GCN を通して HETE-2 が検出したバースト情報を受け取ると即座に残光の方向に望遠鏡を向けて GRB 残光の観測を行なう。以下に、RIMOTS を構成する観測装置についての詳細を示す。

### 3.3.1 望遠鏡および CCD カメラ

図 3.2 は RIMOTS で使用している望遠鏡と CCD カメラの写真である。望遠鏡は Meade 社の LX200 で口径 300mm シュミットカセグレン式望遠鏡を使用しており、f/3.3 のレデューサーレンズを取り付けて焦点距離を約 1000mm にしている。望遠鏡の赤道儀の移動速度は最大約 8 度/秒である。

CCD カメラは SBIG 社の ST-9E であり、CCD チップは Kodak 社の KAF-0261E、画

### 第3章 観測システム

素数は  $512 \times 512$  ピクセルで、1 ピクセルのサイズは  $20 \times 20 \mu\text{m}$ 、有効受光面積は  $10.2 \times 10.2\text{mm}$  である。

CCD カメラを望遠鏡に取り付けたときの画像の画角は  $43 \times 43$  分角で、3.2 章で述べた WXM の誤差範囲をカバーしている。

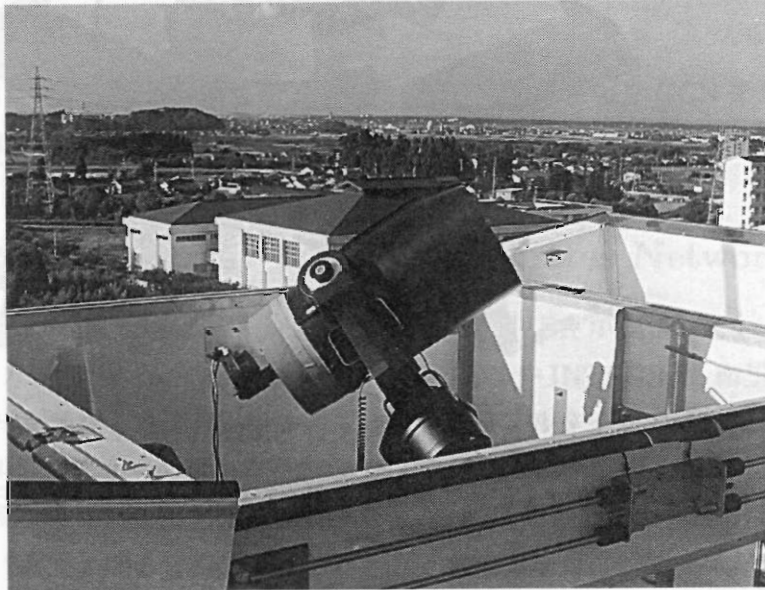


図 3.2: 望遠鏡と CCD カメラ

黒い筒が鏡筒、その下の方 (画像左下付近) に CCD カメラが接続されている。

#### 3.3.2 観測小屋

図 3.3 は RIMOTS の観測小屋の概観である。この小屋は宮崎大学工学部 A 棟屋上に設置されており、大きさが約  $2\text{m} \times 2\text{m} \times 2\text{m}$  で、この中に制御コンピューター 2 台 (Linux 搭載 1 台、Windows 搭載 1 台)、CCD カメラ、望遠鏡などの観測装置が収まっている。屋根の開閉は Linux 搭載コンピューターで制御されており、観測開始時には自動で開く。また、観測時に雨が降った場合には小屋の外に設置している雨滴センサーが雨を感知してその信号を Linux 搭載コンピューターに伝え、屋根が閉じるようになっている。

### 第3章 観測システム

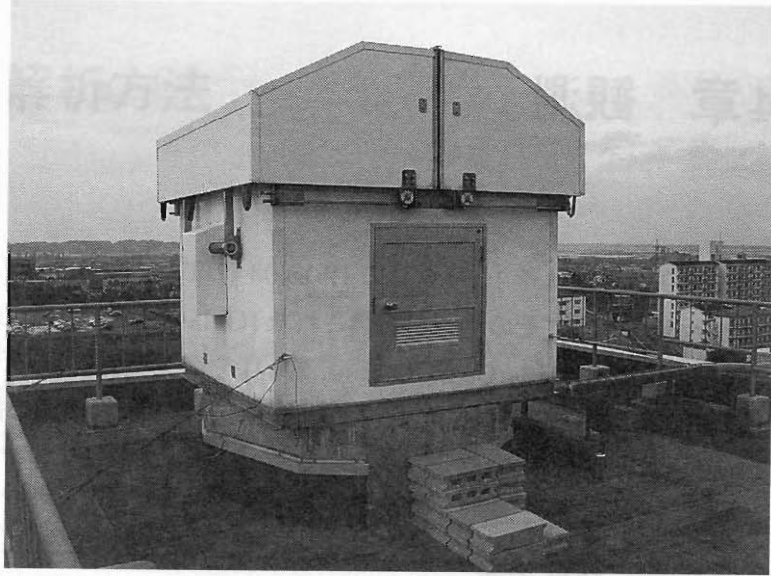


図 3.3: 観測小屋

画像の右側が東である。屋根は観測開始時および観測終了時に自動開閉する。

#### 3.3.3 観測制御

RIMOTS は 2 台のコンピューターで観測を制御している。Windows 搭載コンピューターは主に CCD カメラの制御を行ない、取得データを Linux 搭載コンピューターのハードディスクへ受け渡す役目をしている。Linux 搭載コンピューターは屋根の開閉や望遠鏡の制御を行ったり、Windows 搭載コンピューターへコマンドを送信して CCD カメラの動作を設定するなど観測の主な部分を担っている。また、Linux 搭載コンピューターでは GCN からのデータを随時受け取るプロセスが立ち上がっており、観測時に GCN からバースト情報を受け取ると即座に望遠鏡に信号を送り残光観測を開始するようになっている。RIMOTS では HETE-2 が GRB を感知して約 40 秒後には自動で GRB 残光の観測開始が可能である。

## 第4章 観測

GRB041006 は 2004 年 10 月 6 日の 12:18:08 (UT) に HETE-2 の WXM によって検出され、12:18:50 (UT) にその情報が配信された (Galassi,M.et al.,2004)。その後も GCN を通して残光の位置座標 (da Costa,G.et al.,2004) や残光星像を含む天体画像 (Price,P.A.et al.,2004) が報告された。RIMOTS では 12:19:18 (UT) から残光の観測を開始し、明け方まで GRB041006 可視光残光の観測を続けた。観測はノンフィルター CCD カメラを用いて 30 秒露出で行なった。表 4.1 に観測の流れを示す。

時刻 (UT)	
09:28:57	ダーク画像撮影
09:48:14	反太陽方向を観測
12:18:08	HETE-2 がバーストを発見
12:18:50	RIMOTS がバーストの位置情報を受信
12:19:18	RIMOTS が残光の観測を開始
20:20:27	RIMOTS での残光観測終了
20:21:21	ダーク画像撮影
20:48:58	観測終了

表 4.1: 2004 年 10 月 6 日の RIMOTS の観測スケジュール

時刻は UT(Universal Time:世界時) で表わしている。

## 第5章 解析方法

### 5.1 画像1次処理

取得したままの生画像には、望遠鏡による周辺減光や CCD のピクセル毎の感度ムラ、および電氣的ノイズが含まれているため、そのままでは正しく測光ができない。そのため星像の測光前に、解析ソフト IRAF (Image Reduction and Analysis Facility: <http://iraf.noao.edu/iraf/web/iraf-homepage.html>) を使用してこれらのムラやノイズの除去をおこなう。

#### 5.1.1 ダークフレーム処理

CCD カメラは CCD チップ上に光を当て、電子を生成することで画像を取得する。しかし、実際には光を当てなくても生じる電荷があり、この電荷によって生成されるノイズを「ダークノイズ」と呼ぶ。ダークノイズには、熱によって生じる「暗電流」、電子回路が原因で発生する「読み出しノイズ」、露出時間が 0 であってもバックグラウンドのレベルが 0 にならないように電氣的に出力値をわずかにもちあげる補正による「バイアス」の 3 種類がある。このうち暗電流については CCD を冷却することで低減できるため、RIMOTS では観測前に小屋の屋根を開いて小屋内の温度を下げた後、CCD 周辺の気温から 35 度だけ CCD を冷やしてから撮影を開始している。また、観測の開始と終了時には天体観測時の露出時間と同じ 30 秒の間シャッターを閉じた状態でダークノイズ画像を数十枚撮像しており、解析の時はこのダークノイズ画像数十枚を合成したものをダークフレームとして使用する。このダークフレームを取得した画像から差し引くことで、殆どのダークノイズを除去できる。

#### 5.1.2 フラットフレーム補正

画像のピクセル毎の感度ムラや望遠鏡による周辺減光の補正をし、画面上のバックグラウンド (以下、スカイという) のカウント値が均一になるようにすることをフラットフレーム補正という。フラットフレームの作成は、全くムラの生じない均一な光を撮影し

## 第5章 解析方法

て取得するのが理想的であるが、ムラのない光をつくるのは非常に困難である。そのため、RIMOTS では次の手順でフラットフレームを作成している。

1. 観測した日の画像から、同じピクセルに同じ星像の写っていないものを複数枚選出す。
2. 選出した全ての画像からピクセル毎の中央値を計算し、一枚の画像を作る。
3. 作成した画像を全ピクセルの平均値で割って規格化し、フラットフレームとする。

解析の際には、ダークフレームを差し引いた画像をこのフラットフレームで割ることで画像のムラを補正している。

以上のダークフレーム処理及びフラットフレーム処理を合わせて1次処理という。

### 5.2 残光位置測定

残光の位置座標(赤道座標)の導出には PIXY システム (Practical Image eXamination and Inner-objects Identification system :吉田 誠一, 1999) を使用した。PIXY システムでは天体画像に写っている全ての星像を検出し、USNO-A2.0 (US Naval Observatory) などの星表カタログと比較することで天体画像に写っている星像それぞれの位置座標や明るさの測定を行なう。位置座標の測定誤差は大体2秒角程度、等級誤差は0.2等級程度であるが、等級誤差については画像のムラや観測状況により変る。また、カタログと比較した時に位置座標が同じで明るさが違う場合には変光星、カタログに記載されていない位置に星像があった場合には新天体候補星として検出する。我々は一次処理した画像を PIXY システムを用いて解析し、検出した星像について位置の同定を行なう。

## 5.3 参照星の測光

### 5.3.1 参照星

参照星は、測光した残光の光度を正しく校正して、残光のノンフィルター測光による機械等級を 5.4.2 で説明する R 等級に変換するために必要である。R 等級変換のために選ぶ参照星は R 等級、および V-I の値のわかっているものであり、RIMOTS で観測したときに星像のカウント数が CCD チップの飽和量未満の明るさの星でなくてはならない。

今回の参照星には Henden 氏らの作成した (Henden, A., 2004) 星表カタログから残光と同一画像に写っている星を複数選び出して解析に使用した。このカタログには V 等級で 13.5 等級より暗い星について V, I, R それぞれの等級と等級誤差、星の座標などが記載されている。その中ですぐ近くに別の星がある場合には参照星の等級を正確に求められないので、参照星として使用しない。

### 5.3.2 アパーチャー測光

星像の測光には IRAF (National Optical Astronomy Observatories: NOAO) の `apphot` パッケージの `phot` タスク (`noao.digiphot.apphot`: 中村 隆, 1999) を使用した。このタスクでは、図 5.1 に示されているようにある大きさの円で領域を区切り、その領域内の明るさを測る。この時の内側の円の半径をアパーチャーと呼び、この内部を星像、外環の中をスカイとみなす。この時アパーチャー内の星像についてのフラックスは以下の様に計算され、この測光方法をアパーチャー測光と呼ぶ。

$$\text{フラックス} = \text{sum} - \text{area} \times \text{sky} \quad (5.1)$$

ここで、`sum` はアパーチャー内のカウントの合計、`area` はアパーチャーの面積、`sky` はスカイの平均値である。しかし測光の際にアパーチャーが実際の星像より小さい場合には、本当の明るさより暗いように測光してしまう。従ってそれを避けるために、次の手順でアパーチャーを決めて測光する。まず、IRAF の `imexa` タスク (中村 隆, 1999) を使用して星像の半値幅を求め、アパーチャーを半値幅と同じ値にして測光する。その後星像の広がりを確認しながら、明らかに星像より大きな範囲までアパーチャーを少しずつ大きくしていく。こうして測光した結果を、縦軸にフラックス、横軸にアパーチャーとしてグラフに示すと図 5.2(a) の様になる。アパーチャーが星像より小さい場合には、アパーチャーを大きくする度に星像のフラックスが急激に増加するが、アパーチャーが星像より大きくなるとフラックスはほぼ一定になる。一方、図 5.2(b) に示すように縦軸を



## 第5章 解析方法

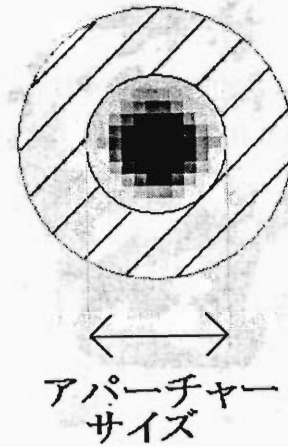
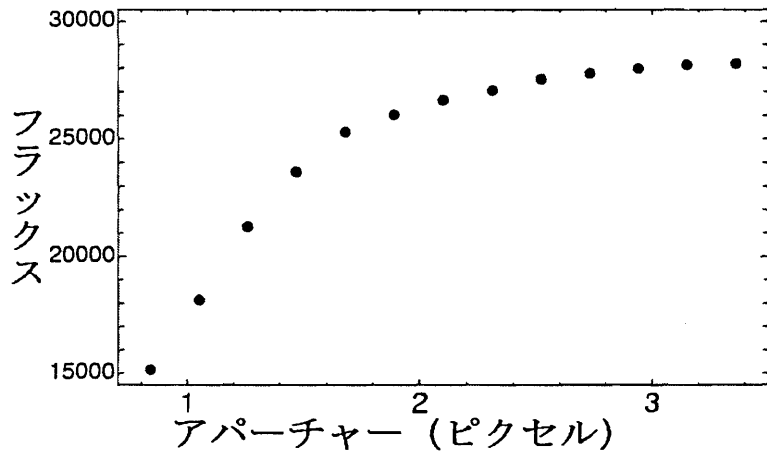


図 5.1: アパーチャーの概念図

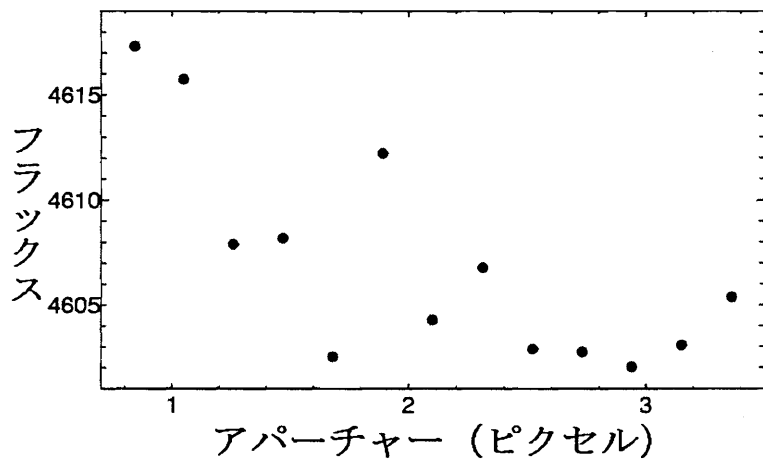
内側の円内に写っている黒く広がっているものが星像である。内側の円で囲まれた部分が星像の測光範囲となり、外側の斜線で囲まれた外環部分がスカイ範囲である。

スカイのフラックスの平均値としてグラフを描くと、アパーチャーが星像より小さいうちはスカイの領域に星像が含まれているが、測光範囲を広げていく度に星像の成分がなくなるため、アパーチャーを大きくするにつれスカイの平均値は小さくなっていき、アパーチャーが星像を超えた後はほぼ一定値となる。この星像のフラックスとスカイのフラックスが一定になる所を正しいアパーチャーとみなして測光し、その時の等級を星像の機械等級とする。

第5章 解析方法



(a) 星像



(b) スカイ

図 5.2: 参照星のフラックスとアパーチャー

(a) が星像、(b) がスカイについてのグラフ。縦軸がフラックス、横軸がアパーチャーサイズである。(a) についてはアパーチャーが 2.4 以上で安定してきており、(b) のスカイもアパーチャーが 2.4 以上で安定している。

## 第5章 解析方法

### 5.4 残光の測光

#### 5.4.1 測光

式 5.1 にあるように、星像の明るさを精度よく求めるにはスカイの値も精度よく求める必要がある。このためになるべく広い領域からスカイを測定し、統計量を増やすのが望ましい。従ってスカイの測定範囲である図 5.1 の外環部分はなるべく幅の広い方がよい。しかし残光の近くには別の星像があるため、参照星と同じように星像に隣接した領域でスカイを決めるとスカイの範囲に別の星のカウントが入ってしまい正しいスカイを見積もることができない。ところが一次処理を済ませた画像は理想的には画像全体にムラはないとみなせるため、外環部分を残光よりやや離れた所に固定してもスカイの平均値は正しく測定できるはずである。そこで図 5.3 のように星像から離れた所でスカイの測定範囲を決定した。このようにスカイの領域を固定した状態で、アパーチャーを徐々にかえて残光星像の測光を行ない、この時の星像のフラックスをグラフに表わすと図 5.4 のようになった。図 5.4(a) ではアパーチャーが大きくなるにつれ星像のフラックスが一定となりうまく測光できていることがわかる。

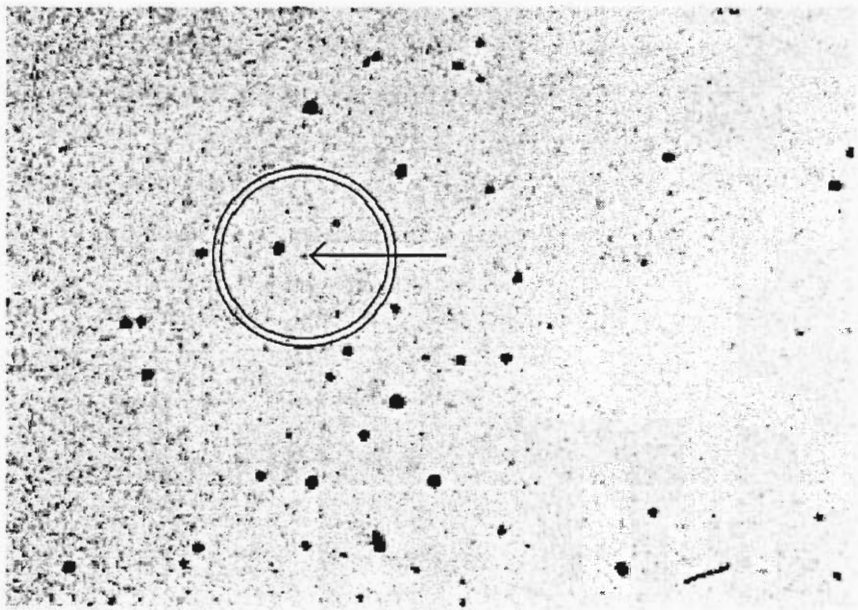


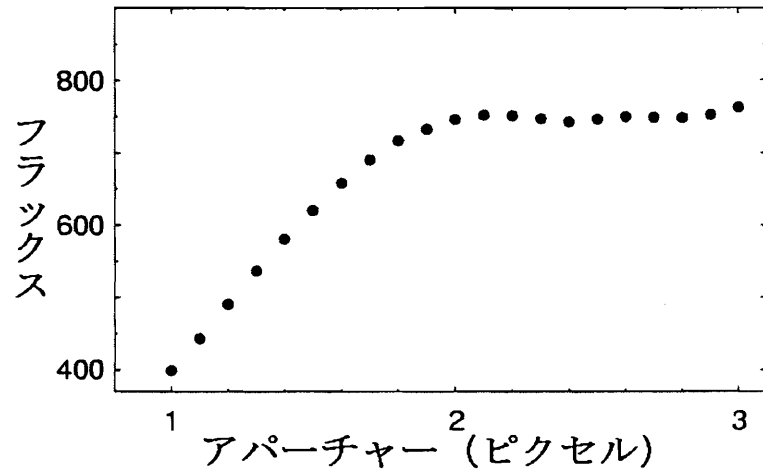
図 5.3: 残光のスカイ領域

画像は白黒反転しており、黒い広がりを持つものが星像である。円環内がスカイの領域である。矢印の先に写っているのが残光の星像である。

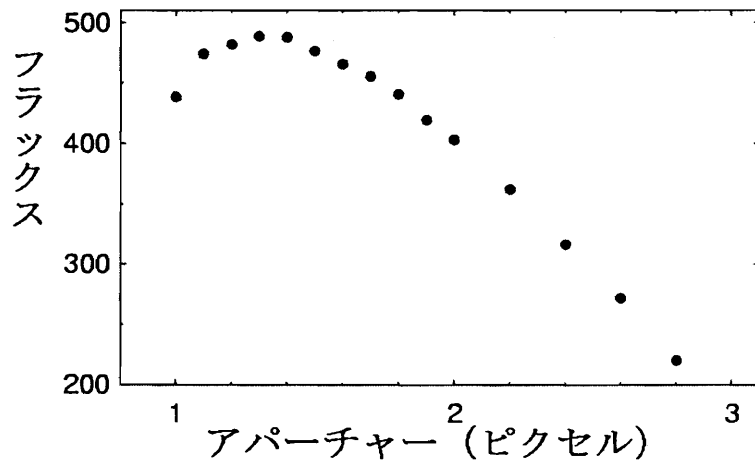
## 第5章 解析方法

しかし画像によっては図5.4(b)のようにアパーチャーがある大きさ以上でフラックスが減少し始めている。これは、採用したスカイの値が本来のスカイよりも大きな値であることを表わしており、この原因としてフラット補正が理想的にされていなかったため、残光星像の領域とここで使用したスカイの領域との間でスカイの平均値が違っていたことが考えられる。図5.4(b)では、フラックスはアパーチャーが1.4ピクセルになったところで減少し始めているので、この辺りまでは星像内であると考えられるため、このような場合はこのアパーチャーを使用して次の様にスカイの平均値を求めなおした。

まず、スカイの領域を図5.4(b)のピークに対応するアパーチャーのところから0.1ピクセル幅の円環内にとり、スカイの平均値を求める。その後0.1ピクセルずつ円環幅を増やしていくと、もし円環内に残光星像が含まれていれば円環幅が広い時に比べて狭い時のスカイの平均値が高くなる。ある円環幅内に残光星像が含まれるとみなせる場合、再度アパーチャーのサイズを大きくし、先程と同様に円環幅を少しずつ増やしてスカイの平均値の測定を繰り返して円環幅によらずスカイの平均値が一定になる時の値をスカイの値とし、その時のアパーチャーを星像のアパーチャーとした。従って星像のすぐそばにスカイの測定範囲をとることになり、スカイを測定するためのピクセル数は減るが、この方法により残光星像を正しく測光するためのスカイの平均値を見積もることができる。



(a) 理想的に測光できたもの



(b) スカイのムラにより正しく測光できなかったもの

図 5.4: 残光のフラックスとアパーチャー

(a) が縦軸がフラックス、横軸がアパーチャーサイズである。(a) のフラックスはアパーチャーサイズが 2 ピクセルを超えた辺りでほぼ一定になっているが、(b) はアパーチャーサイズが 1.4 ピクセルを超えた所から徐々に減少している。

## 第5章 解析方法

### 5.4.2 R 等級変換

我々の観測はノンフィルターによる CCD 観測のため、公開されている R 等級での測光結果と比較が出来ない。R 等級とは、波長約 600nm を中心として約 550nm から 700nm の間の光を透過する R バンドフィルターを用いて測光した星の等級である。従って IRAF で求めた機械等級を他の観測所のデータと比較できるように R 等級に変換する必要がある。ノンフィルターでの機械等級から R 等級への変換式は

$$R \text{ 等級} = (\text{機械等級}) + a + b \times (\text{残光の } V - I) \quad (5.2)$$

である (Henden, A., 2000)。ここで  $a$  は、星のスペクトルと CCD カメラの感度特性により決まるパラメーターで次式の様に表される。

$$a = \{(\text{カタログによる } R) - (\text{機械等級})\} - b \times (\text{カタログによる } V - I) \quad (5.3)$$

従って  $a$  の値は参照星の測光結果から求めるが、この値は観測状況により多少変化するため、取得した画像毎に決める必要がある。今回の解析には GCN で公開された星表カタログ (Henden, A. 2004) に記載されている星の中から、残光と同一画像に写っている星像を複数選びだし、それぞれの星毎に  $a$  を算出して平均したものを使用している。 $b$  は観測に使用する CCD チップの特性によるパラメーターであるが、我々が使用している ST-9E について、この値は Henden 氏の研究により  $b = -0.154$  であることがわかっている。

## 第6章 結果

### 6.1 GRB041006 の画像

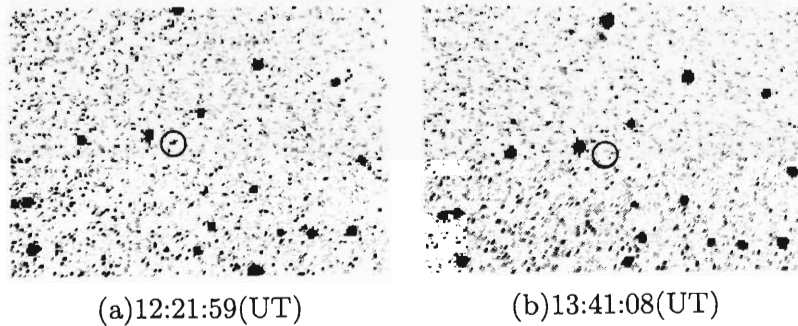


図 6.1: RIMOTS で撮影した GRB041006 残光の画像

画像は白黒反転しているため、黒く広がりを持って写っているのが星像である。(a) の円内にあるのが残光の星像である。(b) にも同じ所に円を描いているが、その中に星像はみられない。(a) に写っている残光は  $16.96 \pm 0.23$  等級で、画像の限界等級は (a)(b) とも約 18 等級である。

図 6.1 に RIMOTS で撮影した GRB041006 可視光残光の画像を示す。(a) と (b) はそれぞれバースト発生約 0.0027 日後と 0.0576 日後に撮影した画像であり、どちらも 30 秒露出で撮影した画像に対し 1 次処理を行なった後のものである。(a)(b) ともにこの時の画像の限界等級は約 18 等級であり、(a) に写っている残光の等級は  $16.96 \pm 0.23$  等級である。(b) 図をみると明らかにバースト発生約 0.0576 日後にはこの時の RIMOTS による観測の限界等級をこえて暗くなっていることがわかる。

### 6.2 残光の位置座標

PIXY で解析した結果、残光星像と思われる新天体候補の座標は赤道座標で赤経 00 時 54 分 50.14 秒  $\pm 1.64$  秒、赤緯 +01 度 14 分 05.8 秒  $\pm 1.23$  秒である。また、GCN で公表された残光の位置座標は赤経 00 時 54 分 50.17 秒、赤緯 +01 度 14 分 07.0 秒 (P.A.Price

## 第6章 結果

et al.,2004) であり、我々が観測した新天体候補星は残光の位置と誤差範囲内で一致している。

### 6.3 参照星の機械等級

表 6.1 は参照星の位置座標や等級等を示しており、図 6.2(a) は各参照星の機械等級の変化である。どの星についてもほぼ同じような変化をしていることから、図に見られる光度の変化は星そのものが変光したのではなく、データ取得時の条件の違いによるものであるといえる。図 6.2(b) は参照星毎に計算した  $a$  の値である。参照星同士の  $a$  の値の違いは 0.5 以内に収まっており、残光の R 等級変換にはこれらの値を平均した値を使用した。画像毎に算出した  $a$  の平均値を表 6.2 に示す。

参照星	RA(deg)	DEC(deg)	V-I (等級)	V-I の誤差 (等級)	R (等級)	R の誤差
A	13.657	1.234	0.677	0.001	13.308	0.001
B	13.696	1.231	0.671	0.001	13.245	0.001
C	13.712	1.158	0.755	0.001	12.744	0.001
D	13.630	1.297	0.571	0.001	12.816	0.001

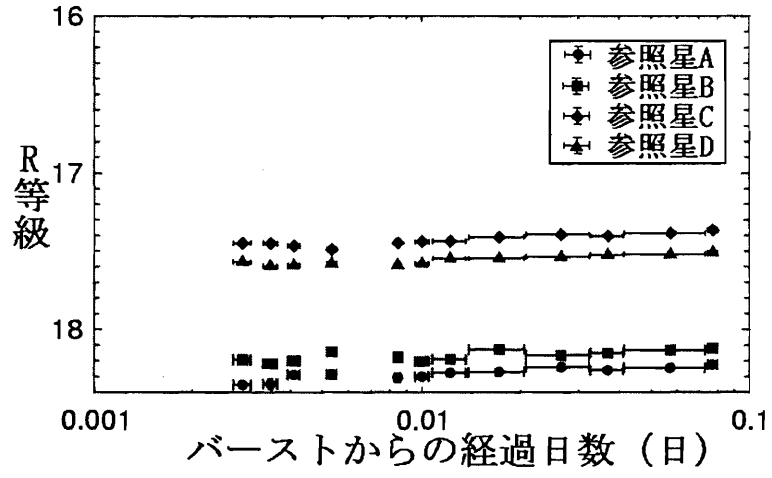
表 6.1: 解析に使用した参照星それぞれについての位置座標、R 等級、及び V-I の値。4 つの参照星を区別するために便宜的に A,B,C,D で区別した。

時刻 (UT)	バーストからの経過時間 (日)	$a$ の平均値	$a$ の誤差
12:21:59	0.002848	-4.758551	0.010
12:22:53	0.003473	-4.769051	0.011
12:23:47	0.004098	-4.754051	0.010
12:25:34	0.005336	-4.742551	0.011
12:30:04	0.00846	-4.748301	0.011
12:31:51	0.010012	-4.747801	0.005
12:33:39	0.012199	-4.730301	0.004
12:38:09	0.017199	-4.706801	0.004
12:48:02	0.026551	-4.700801	0.003
13:05:05	0.036829	-4.700801	0.003
13:17:39	0.057144	-4.688301	0.002
14:05:23	0.077142	-4.671301	0.002

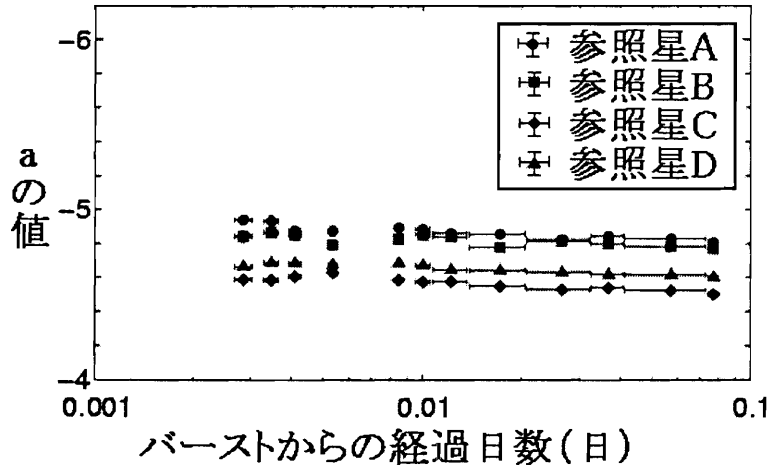
表 6.2: 参照星の観測時刻と R 等級変換に使用した  $a$  の値



第6章 結果



(a) 参照星毎の機械等級変化



(b) 参照星毎の a の値

図 6.2: 参照星の時間変化

縦軸は機械等級、横軸は log スケール表示である。(a) では参照星はほぼ同じ変化をしており、(b) では画像毎に計算した参照星同士の a の値の差はおよそ 0.5 以内に収まっている。

## 第6章 結果

### 6.4 残光の R 等級光度曲線

21 ページの式 (5.2) にあるように残光の R 等級変換には残光の V-I の値が必要であるが、GRB041006 残光では V-I の値が不明である。GCN に公開された V 等級の観測結果 (Price,P.et al.,2004 , Williams,G.et al.,2004 , Shaw,S.et al.,2004) ではバースト発生からの経過日数  $t=0.002741$  で  $V=17$ 、 $t=0.065941$  で  $V=21.2\pm 0.6$ 、 $t=1.109$  で  $V=20.9\pm 0.2$  であり、I 等級の観測結果 (Ferrero,P.et al.,2004) では  $t=0.36251$  で  $I=19.35\pm 0.3$  あることから V-I を求めたところ  $V-I=0.675\pm 0.455$  となった。すると  $b \times (V - I)$  の値は RIMOTS の各データの誤差であるおよそ 0.3 等級に比べ十分小さくなるため、今回は  $b$  の値を 0 とした。表 6.3 は GRB041006 残光を R 等級に変換した結果を表わしており、図 6.3 は光度曲線を示している。光度曲線の前半の丸のプロットが RIMOTS のデータ、後半の四角

バーストからの経過日数	経過日数の誤差	残光の R 等級	R 等級誤差
0.002848	0.000174	16.96	0.23
0.003473	0.000174	16.73	0.20
0.004098	0.000174	16.94	0.32
0.005336	0.000174	16.47	0.28
0.00846	0.000174	17.14	0.32
0.010012	0.000487	17.49	0.27
0.012199	0.001424	17.39	0.22
0.017199	0.003299	17.66	0.21
0.026551	0.005787	18.02	0.28
0.036829	0.004225	17.82	0.24
0.057144	0.015814	18.64	0.30
0.077142	0.002662	18.04	0.21

表 6.3: 表 6.2 の  $a$  の値を使って変換した残光の R 等級

のプロットで表わされているのが GCN で現在までに公表されたデータである。公表されたデータには、誤差の報告のないものも含まれているが、GCN のデータが示す減光の傾きは約  $\alpha_{GCN} = -1$  である。

一方、RIMOTS の光度曲線には 2 つの成分が見られる。ひとつはバースト発生後 0.005336 (日) までのフラットな成分であり、このデータから最小二乗法で求めた  $\alpha$  の値は 0.62 である。この間の画像は 30 秒露出の画像 1 枚ずつに対して測光した結果であるが、残光の等級は RIMOTS の限界等級に近く、星像が CCD の 1 画素内に収まってしまう可能性がある。この場合画素内の感度ムラによる影響を受け、正しく測光が出来ない。そこでこ

## 第6章 結果

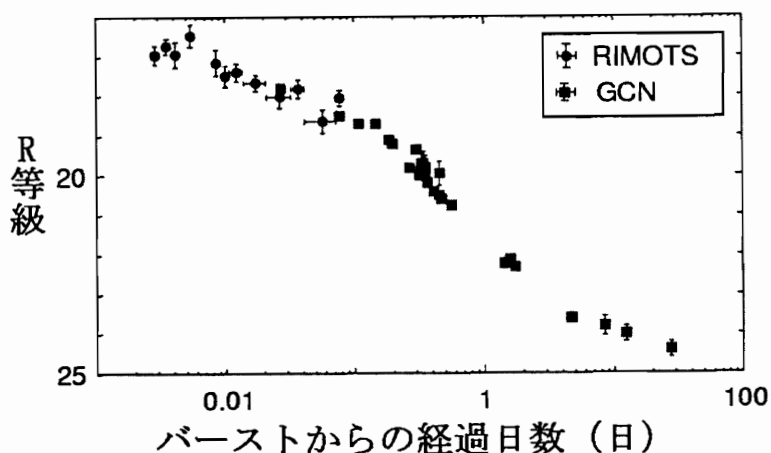


図 6.3: 残光の光度曲線

縦軸が R 等級、横軸がバーストからの経過日数を log スケールで表示している。丸のプロットが RIMOTS のデータで四角のプロットが GCN で公表されたデータを表わしている。

の影響の有無を調べるために、残光と同じくらいの明るさの星像 2 つについて、この明るさの変化を調べた。もし残光の光度曲線が画素内の感度ムラによるものならば、これらの星の光度曲線も、明るい参照星に比べて全く異なる変光が現われるはずである。

測光の結果、暗い星毎の光度曲線は図 6.4 の様になった。残光光度曲線の初めには約 0.5 等級の変化がみられたが、この図を見ると暗い星の変動に 0.5 等級以上のランダムな変動はみられない。従って、この残光の光度変化は画素内の感度ムラによるものではないといえる。

もう一つの成分は 0.005336(日) ~ 0.077142 (日) にみられる緩やかな減光の成分である。最小二乗法で求めたこの間の減光の指数は  $\alpha = -0.45$  である。

第6章 結果

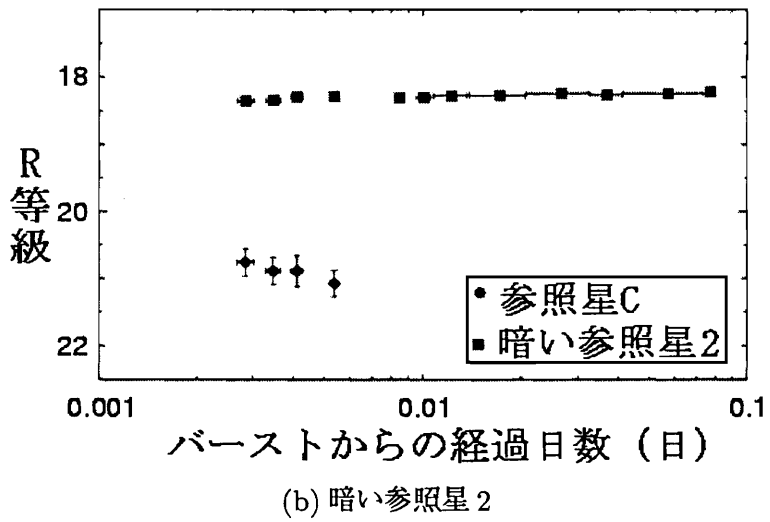
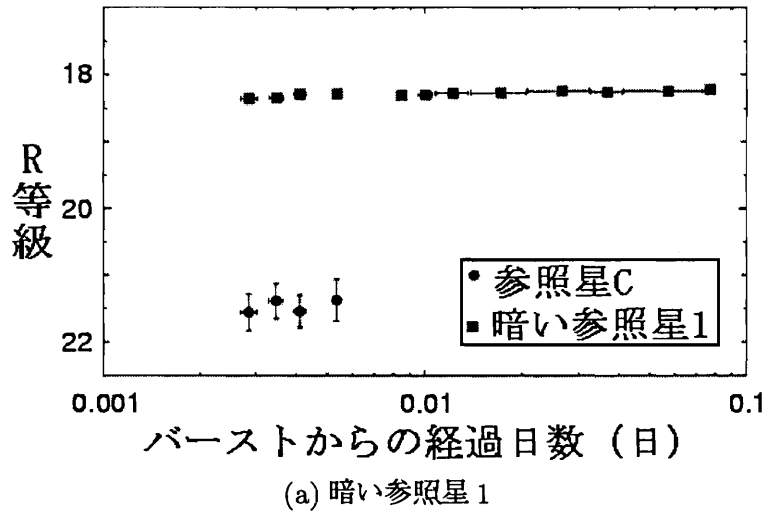


図 6.4: 暗い参照星の光度曲線

(a),(b) とともに明るい参照星 A と一緒にプロットしている。

## 第7章 考察

図 6.3 に示す残光の光度曲線においてバースト発生約 0.0053 日後までの光度変化のベキ指数は各データの誤差が大きいながらも平均値の傾きは  $\alpha = 0.62$  であり、約 0.0053 日から 0.077 日の間では  $\alpha = -0.45$  である。 $\alpha$  の値の変わり目はバースト発生後約 0.0053 日後に生じている。また、GCN のデータから計算したバースト発生後 0.07 日以降の  $\alpha$  の値は大体  $-1$  程度であり、これは従来の光度曲線の傾きと同程度である。図 6.3 の形は図 2.3 の上段の図、 $\nu > \nu_0$  の場合に予期される光度曲線の形と似ており、この残光の変化の様子は Sari 氏らの提唱したフォワードショックによる残光の光度変化のモデル (Sari, R. et al. 1998) で説明できる。すなわち、フォワードショックによって加速された電子はシンクロトロン放射で電磁波を放出しながら減速していくが、そのときシエルの速度に依存して電子がどこまで減速できるかの臨界速度が決まっている。Sari 氏らのモデルによれば、残光早期ではフォワードショックにより加速される全ての電子の速度は常に臨界速度より大きいとされている。フォワードショックが星間物質中を通過していく間に、加速されていく電子の速度は以下の様うつり変わる。

初めにフォワードショックが星間物質中を通過し始めた時、電子は十分に加速されるため、

$$\gamma_{opt} < \gamma_c < \gamma_{min} < \gamma_{max}$$

の関係が成り立つ。ここで、 $\gamma_{min}$  はショックにより加速された電子の中の最小ローレンツ因子、 $\gamma_{max}$  は最大ローレンツ因子で、 $\gamma_c$  は臨界速度に対応する臨界ローレンツ因子である。また、 $\gamma_{opt}$  は可視光領域の振動数でシンクロトロン放射するような電子のローレンツ因子を表わす。この時電子はシンクロトロン放射によりエネルギーを失い、全て  $\gamma_c$  まで減速することが可能であるが、電子の運動方向は磁場に対してランダムであるので可視光領域の電磁波も放射される。従って、 $\gamma_{opt} < \gamma_c$  となっている間は、可視光残光は減光しない。しかしシエルは星間物質を掃き集める様にして進んでいくのでその速度が遅くなり、そのため臨界ローレンツ因子が小さくなる。この時

$$\gamma_c = \gamma_{opt} < \gamma_{min} < \gamma_{max}$$

となり、可視光領域で一番明るくなる。GRB041006 では、観測者からみてバースト発生

## 第7章 考察

後約 0.0053 日で  $\gamma_c = \gamma_{opt}$  となったと考えられる。

その後もシエルが進み  $\gamma_c$  が小さくなると

$$\gamma_c < \gamma_{opt} < \gamma_{min} < \gamma_{max}$$

となる。この時、加速を受けた電子が  $\gamma_{opt}$  以下に減速すると、可視光領域の電磁波を放射しなくなるため、 $\gamma_c$  が  $\gamma_{opt}$  以下となった後は緩やかに減光していく。そのため我々の観測結果ではバースト発生後 0.0053 日後から緩やかに減光する様子がみられたと考えられる。

更に時間が経ち、フォワードショックが減速すると加速による電子の速度も遅くなり、ローレンツ因子の関係は

$$\gamma_c < \gamma_{min} < \gamma_{opt} < \gamma_{max}$$

となる。この場合、 $\gamma_{min}$  から  $\gamma_{opt}$  の間にある電子は可視光を放射しなくなる。しかも、電子の速度分布は、低い速度を持つ電子の方が多いと考えられているため、 $\gamma_{min} < \gamma_{opt}$  以降は急激に減光していく。我々の観測結果ではバースト発生後 0.07 日以降に  $\gamma_{min}$  が  $\gamma_{opt}$  を下まわったと考えられる。

また、Sari 氏らのモデル (Sari, R., et al., 1999) ではリバースショックにより、早期の光度曲線は一般的な  $\alpha = -1$  程度に比べて急激に減光すると予測されているが今回観測された光度曲線ではそのような変化は見られない。この原因は 2 つ考えられる。1 つは、我々が観測した時には既にリバースショックによる減光が終ってしまっていた可能性がある。例えば、GRB021211 の残光早期の光度曲線にはバースト発生後約 0.004 日までにベキ指数  $-1.82 \pm 0.02$  で減光しており、その後は  $-0.82 \pm 0.11$  の減光をしている (Weidong, L. et al., 2003) が、この光度曲線の折れ曲がりが見える時間は残光発生時の環境に左右されるため GRB041006 の場合には GRB021211 の時より早くリバースショックの影響が終ったのかもしれない。もう 1 つ考えられるのは、リバースショックによりシンクロトロン放射された電磁波が、フォワードショックにより亜光速まで加速された電子により逆コンプトン散乱を受けて、より高エネルギーの電磁波となってしまう、可視光では観測されないというものである (Sari, R. et al., 1999)

## 第8章 まとめ

RIMOTS システムを用いて、バースト発生から 1 分 10 秒後という早さで GRB041006 可視光残光の観測に成功し、早期の光度曲線を得ることができた。この光度曲線と GCN で公開された R 等級の光度曲線とを比較することで次に示す特徴がみられた。

1. バースト発生から約 0.005 日までの間にフラットな成分がみられた
2. バースト発生から約 0.005 日後から 0.077 日後までの間の減光の様子はそれ以降に比べると緩やかである
3. バースト発生から約 0.07 日後以降は  $\alpha$  が大体  $-1$  で減光している。

これらの変化の様子は、シンクロトロンショックモデルにおけるフォワードショックによるものだと考えられる。1、2、3 の光度変化については次の事が考えられる。

1. フォワードショックの速度が非常に早いため、加速を受けた電子全てがシンクロトロン放射により可視光領域の電磁波を放出した。
2. シェルの速度が遅くなり臨界振動数が可視光領域の振動数よりも低くなったため、加速を受けた電子が減速をした時  $\gamma_{opt}$  以下になったものはシンクロトロン放射で可視光を放射しなくなった。
3. 加速を受けた電子の最小速度が、 $\gamma_{opt}$  より遅くなったため、可視光を放射する電子の数が激減した。

GRB041006 では早期の観測に成功したのが RIMOTS だけであったので同じ時間帯における他波長の観測結果との比較はできなかった。しかし 2004 年 11 月 20 日に打ち上げられて現在運用中の Swift 衛星は GRB 観測専用の衛星であり、可視光望遠鏡も搭載しているので GRB 発生直後の観測例が多くなることが期待されている。今後は HETE-2 だけでなく Swift 衛星とも連携して残光の観測を行なうことで残光の発生メカニズムが更に解明されていくものと思われる。

## 参考文献

- Ayani, K. et al., 2004, GCN Circ. 2779,  
<http://gcn.gsfc.nasa.gov/gcn3/2779.gcn3>
- Balman, S. et al., 2004, GCN Circ. 2821,  
<http://gcn.gsfc.nasa.gov/gcn3/2821.gcn3>
- Band, D. et al., 1993, ApJ, 413, 281
- Bikmaev, I. et al., 2004, GCN Circ. 2826,  
<http://gcn.gsfc.nasa.gov/gcn3/2826.gcn3>
- Costa, E. et al., 1997, Nature, 387, 783
- Covino, S. et al., 2004, GCN Circ. 2803,  
<http://gcn.gsfc.nasa.gov/gcn3/2803.gcn3>
- D'Avanzo, P. et al., 2004, GCN Circ. 2788,  
<http://gcn.gsfc.nasa.gov/gcn3/2788.gcn3>
- da Costa, G.S. et al., 2004, GCN Circ. 2765,  
<http://gcn.gsfc.nasa.gov/gcn3/2765.gcn3>
- Ferrero, P. et al., 2004, GCN Circ. 2777,  
<http://gcn.gsfc.nasa.gov/gcn3/2777.gcn3>
- Fox, D.W. et al., 2003a, Nature, 422, 284
- Fox, D.W. et al., 2003b, ApJ, 586, L5
- Fugazza, D. et al., 2004, GCN Circ. 2782,  
<http://gcn.gsfc.nasa.gov/gcn3/2782.gcn3>
- Fukushi, H. et al., 2004, GCN Circ. 2767,  
<http://gcn.gsfc.nasa.gov/gcn3/2767.gcn3>
- Fynbo, J.P.U. et al., 2004, GCN Circ. 2802,  
<http://gcn.gsfc.nasa.gov/gcn3/2802.gcn3>
- Galama, T.J. et al., 2000, ApJ, 536, 185
- Galassi, M. et al., 2004, GCN Circ. 2770,  
<http://gcn.gsfc.nasa.gov/gcn3/2770.gcn3>
- Garg, A. et al., 2004, GCN Circ. 2829,  
<http://gcn.gsfc.nasa.gov/gcn3/2829.gcn3>
- Garnavich, P. et al., 2004, GCN Circ. 2792,  
<http://gcn.gsfc.nasa.gov/gcn3/2792.gcn3>
- Greco, G. et al., 2004, GCN Circ. 2804,  
<http://gcn.gsfc.nasa.gov/gcn3/2804.gcn3>



## 参考文献

- Henden, A., 2000, JAAVSO, 29, 35
- Henden, A., 2004, GCN Circ. 2801,  
<http://gcn.gsfc.nasa.gov/gcn3/2801.gcn3>
- Kahharov, B. et al., 2004, GCN Circ. 2775,  
<http://gcn.gsfc.nasa.gov/gcn3/2775.gcn3>
- Kinoshita, D. et al., 2004, GCN Circ. 2785,  
<http://gcn.gsfc.nasa.gov/gcn3/2785.gcn3>
- Kinugasa, K. et al., 2004, GCN Circ. 2832,  
<http://gcn.gsfc.nasa.gov/gcn3/2832.gcn3>
- Lamb, D.Q. et al., 1999, A& A, 138, 479
- Misra, K. et al., 2004, GCN Circ. 2795,  
<http://gcn.gsfc.nasa.gov/gcn3/2795.gcn3>
- Misra, K. et al., 2004, GCN Circ. 2794,  
<http://gcn.gsfc.nasa.gov/gcn3/2794.gcn3>
- Monfardini, A. et al., 2004, GCN Circ. 2790,  
<http://gcn.gsfc.nasa.gov/gcn3/2790.gcn3>
- Paciesas, W. et al., 1999, ApJS, 122, 465
- Price, P.A. et al., 2004, GCN Circ. 2766,  
<http://gcn.gsfc.nasa.gov/gcn3/2766.gcn3>
- Price, P.A. et al., 2004, GCN Circ. 2771,  
<http://gcn.gsfc.nasa.gov/gcn3/2771.gcn3>
- Rumyantsev, V. et al., 2004, GCN Circ. 2798,  
<http://gcn.gsfc.nasa.gov/gcn3/2798.gcn3>
- Sakamoto, T., 2004, Spectral Characteristics of X-ray flashes and X-ray rich Gamma-ray bursts observed by HETE-2, 2004 年度博士論文, 東京工業大学
- Sari, R. et al., 1996, ApJ, 473, 204
- Sari, R. and Piran, T., 1999, ApJ, 520, 641
- Sari, R. et al., 1998, ApJ, 497, L17
- Sato, R. et al., 2003, ApJ, 599, L9
- Shaw, S. et al., 2004, GCN Circ. 2799
- Tavani, M., 1996, ApJ, 466, 768
- Wei, D.M., 2003, A& A, 402, L9
- Weidong, L. et al., 2003, ApJ, 586, L9
- Williams, G. et al., 2004, GCN Circ. 2830,  
<http://gcn.gsfc.nasa.gov/gcn3/2799.gcn3>
- 小浜光洋, 2001, 「RIMOTS 制御 programing」, 理化学研究所
- 桜井 邦朋, 1993, 「天体物理学の基礎」, 地人書館
- 高原 文郎, 2002, 「天体高エネルギー現象」, 岩波書店
- 中村 隆, 1999, 「いらっしゃいませ IRAF へようこそ」, 電気通信大学

## 参考文献

吉田 誠一, 1999, 「多様な天体画像から自動的に星の位置・光度を測定し、要注意天体を選別するシステムの開発」, 1998年度修士論文, 早稲田大学