

平成 21 年 3 月 31 日現在

研究種目：基盤研究 (C)
 研究期間：2005～2008
 課題番号：17540261
 研究課題名 (和文) 人工衛星および地上観測によるガンマ線バースト・X線フラッシュの研究
 研究課題名 (英文) Observational Study on Gamma-Ray Bursts and X-Ray Flush

研究代表者
 山内 誠 (YAMAUCHI MAKOTO)
 宮崎大学・工学部・准教授
 研究者番号：80264365

研究成果の概要：

我々はガンマ線バースト発生時の突発 X 線突発放射および X 線残光放射を HETE2 衛星、および「すざく」衛星で、可視光残光放射を地上の望遠鏡で観測した。その結果、ガンマ線バーストはスペクトルの違いから古典的バースト、X 線豊富バースト、X 線フラッシュに分類されているが、これらの分類が明確なものではなく連続的に分布していることがわかった。一方、突発放射の継続時間の違いにより、ロングバーストとショートバーストに分けられており、この二種類のバースト間では、全放射エネルギーやスペクトルを表わすパラメーターなどに違いが見られることから、その起源が異なることがわかった。

交付額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2005 年度	1,100,000	0	1,100,000
2006 年度	500,000	0	500,000
2007 年度	500,000	150,000	650,000
2008 年度	600,000	180,000	780,000
年度			
総計	2,700,000	330,000	3,030,000

研究分野：数物系科学

科研費の分科・細目：物理学・素粒子・原子核・宇宙線・宇宙物理

キーワード：ガンマ線バースト・X線観測・飛翔体観測・可視光観測・地上観測

1. 研究開始当初の背景

ガンマ線バーストと呼ばれる現象は、突然一瞬だけガンマ線を放出する天体現象で、いつ、どこでバーストが発生するのか全く予測できない。このため、発見から約 30 年以上にわたりその正体は謎に包まれたままであった。ところが 1996 年に打ち上げられたヨーロッパの BeppoSAX 衛星がガンマ線バーストの X 線残光を発見したことをきっかけとして、世界中の望遠鏡がバースト発生直後にガ

ンマ線バーストの方向に向けられるようになり、いくつかバーストから X 線残光や可視光残光、電波残光が見つかった。さらに 2000 年に打ち上げられた HETE2 衛星では、ガンマ線バーストが発生し、その情報を世界中へ通報するまでに要する時間が飛躍的に短縮され、より多くのガンマ線バーストで残光強度が検出限界以下に減光する前に観測することが可能となり、多波長同時観測も行なわれ、ガンマ線バーストと超新星爆発との関係が

ほぼ確実なものとなった。

また、HETE2 衛星にはガンマ線、硬 X 線、軟 X 線、可視光に感度のある 4 種類の観測器が搭載されているので、広い波長域にわたるスペクトルが観測可能となり、ガンマ線バーストには典型的なスペクトルを持つものの他に、X 線放射を多く含む X 線過剰ガンマ線バーストや、X 線領域での放射が全放射のほとんどの割合を占める X 線フラッシュといった多様性が存在することが明らかになった。なかでも X 線フラッシュについては可視光残光の発見例がわずかに 1 例しかないなど、これらの現象の違いに対して新たな謎が生まれた。

これらのバースト現象を詳しく調べるためには、衛星による観測に加え、可視光残光をとらえて対応天体を同定すること、およびその光度変化を調べることが重要である。そこで我々は、衛星からバースト発見の情報を受け、すぐに可視光残光の自動観測を開始する小型の望遠鏡を準備し、可視光残光の捜索を続けている。

2. 研究の目的

研究初年度以降のガンマ線バースト観測の状況としては、HETE2 衛星や INTEGRAL 衛星に加え、Swift 衛星が打ち上げられ、ガンマ線バーストの発見例は飛躍的に増加し、残光の観測例も増える。しかし Swift 衛星では長波長域の X 線を観測することができないため、X 線過剰ガンマ線バーストや X 線フラッシュについては、観測波長域の広いことが特長の一つである HETE2 衛星による観測が重要である。また日本の X 線天文衛星「すざく」も打ち上げられ、X 線領域での詳細な観測も可能である。したがって HETE2 衛星や「すざく」衛星を使った観測は、その特色から INTEGRAL 衛星や Swift 衛星による観測とは相補的なものである。

我々は共同研究者として HETE2 衛星だけでなく「すざく」衛星の観測データを解析できる立場にある。したがって衛星に搭載された観測装置による多波長スペクトル観測を行なうこと、および衛星からの情報を受けて地上や他の衛星による観測を開始することにより多波長同時観測を行なって、多様な性質を示すバースト間の関連性を調べ、ガンマ線バーストの研究を進めることが本研究の目的であり、特に、

- (1) 衛星により通報されたガンマ線バーストや X 線フラッシュと可視光天体との同定
- (2) HETE2 衛星搭載観測装置および地上の望遠鏡による広帯域のエネルギースペクトルの研究
- (3) バースト直後の残光の振る舞い
- (4) 全てのガンマ線バーストや X 線フラッシュに対する可視光残光の存在の有無

が主な研究対象である。

3. 研究の方法

(1) バースト時の X 線突発放射の観測

HETE2 衛星でこれまでの定常観測により得られた観測器の軌道上性能を考慮して、X 線観測装置のレスポンス行列などのデータ処理用ソフトウェアを随時更新しながら、特にバースト毎のスペクトルの違いや、一つのバースト中でのスペクトル変化に着目したデータ解析を行なった。HETE2 衛星の運用は平成 18 年に終了したが、稼動を続けている Swift 衛星の他に、広帯域全天モニタ (WAM) を搭載した「すざく」衛星が平成 17 年に打ち上げられ、50keV から 5MeV という広帯域でガンマ線バーストの観測を行なうことができるようになった。そこで、HETE2 衛星のデータ解析と並行して Swift 衛星や「すざく」衛星搭載の WAM による観測データの解析も行なった。

(2) X 線残光観測

平成 17 年に打ち上げられた「すざく」衛星において、打ち上げ頭初の試験運用期間中に取得される校正データを用いてバーストデータの解析方法を確立し、HETE2 衛星や Swift 衛星で発見されるガンマ線バーストについて、「すざく」衛星での観測可能性を判断し、迅速な追観測を行なうよう関係機関との調整を行なった。このようにして「すざく」衛星で得られたデータから、これまでになく広い波長域にわたる X 線残光のスペクトルや時間変化を求めた。衛星のデータ解析については衛星プロジェクトの関係者と連絡を取り合う必要があり、これらは主にインターネットを利用したが、年に 1 回程度は会合を開いた。

(3) 可視光残光のノンフィルター観測

可視光残光の振る舞いとガンマ線バーストの種類との間の相関を探ることを目的として可視光残光の探索を行なった。観測には宮崎大学工学部棟屋上に設置されている口径 30 センチメートルの小型望遠鏡を利用し、HETE2 衛星や Swift 衛星からの通報を受け、ただちに可視光残光の自動追観測を行なった。この望遠鏡では、急激に暗くなる残光を効率よく捉えるためにノンフィルターで観測することとした。

これらの自動観測システムは設置後数年が経過しているため、必要に応じて保守や改修も行なった。

(4) 可視光残光のフィルター観測

学内には口径 50 センチメートルの望遠鏡が設置されている。この望遠鏡は架台の能力により、目的の方向に向くには上記の口径 30

センチメートル望遠鏡に比べて時間はかかる。しかし口径が大きいために、口径 30 センチメートル望遠鏡でとらえた残光についてのフィルター観測を行なうことができるだけでなく、残光の探索であれば、より暗いものまで捉えられることが見込まれる。そこで、HETE2 などの衛星からガンマ線バーストの情報を受けて、この 50 センチ望遠鏡での追観測を行なうために、望遠鏡の駆動モーター、制御コンピューター、および制御ソフトを整備し、動作試験を行なった。

4. 研究成果

(1) バースト時の X 線突発放射

① ショートバースト

HETE2 衛星により 2005 年 7 月 9 日に検出されたバースト GRB050709 は継続時間が 400ms よりも短く、スペクトルでピークを示すエネルギーが 840keV であること、および等方的に放射しているとみなしたときの全放射エネルギーと光度が、ロングバーストの典型的なものと比較してそれぞれ約 3 桁および約 2 桁低いことから、ショートバーストであることがわかった。HETE2 衛星によるこのバーストの発見情報が GCN を通して速報されたことを受け、ショートバーストに対して初めての可視光残光の発見と、2005 年 5 月 9 日に発生したバーストに次いで 2 例目となる X 線残光の検出につながった。これらの残光観測の結果から、母銀河は $z=0.16$ の晩期型渦巻銀河であり、このバーストは母銀河の中心部から離れた場所で起こったことが示された。ショートバーストの起源として中性子星の合体モデルが提唱されているが、GRB050709 の観測結果は、このモデルを支持していることが解った。

② X 線フラッシュ

HETE2 衛星による観測から X 線フラッシュと分類されたバースト GRB040912、および距離の解っている他の X 線フラッシュの殆どものは、その発生場所における放射スペクトルを調べると、ソフトなスペクトルを持つガンマ線バーストの範疇に入ることが解った。一方、GRB060218 や GRB020903 は本質的に X 線放射が多い X 線フラッシュである。このことから、ソフトなガンマ線バーストが遠方に位置するために、赤方偏移により X 線フラッシュと分類されるものと、本質的に X 線放射が多い X 線フラッシュの 2 種類が存在し、これら二つの起源は別のものである可能性を見出した。

また、HETE2 衛星が 2004 年 9 月に観測した X 線フラッシュ GRB040916 では、早期 X 線残光に突発放射の一部であると考えられる増光が見られたことから、中心エンジンが長時間にわたり活動する可能性のあることが解

った。

HETE2 衛星によって観測されたガンマ線バーストの統計的な解析から、スペクトルのピークエネルギーの低いものは X 線フラッシュが多いこと、および、全放射エネルギーが 10^{52} erg 以上のものの殆どは古典的バーストに、 $10^{50} \sim 10^{51}$ erg のものは X 線フラッシュに分類されることがわかった。また、ガンマ線バーストや X 線フラッシュの出現率は Ib 型や Ic 型超新星の出現率に比べてずっと少ないことから、Ib 型や Ic 型超新星がガンマ線バーストや X 線フラッシュとして観測されるには、何らかの特別な性質を持つ必要のあることがわかった。

③ ロングバースト

「すざく」衛星搭載 WAM 検出器により観測されたガンマ線バースト GRB061007 では、突発放射の光度変化にいくつかのスパイク状のパルスが存在し、パルスの立ち上がり時期と減衰時期ではスペクトルのピークエネルギーと強度との間の相関は異なっていることが解った。これはパルスの位相によって爆発による噴出物の速度、もしくは放射領域が異なることを示している。また、GRB070328 では、Swift 衛星搭載 BAT 検出器と「すざく」衛星搭載 WAM 検出器で得られたデータを同時解析することにより、パルス強度の減衰時期に MeV 領域の放射が急激に減少しているのが見つかった。しかし、このような振る舞いを示すメカニズムについてはまだはっきりしていない。

④ ショートバーストとロングバーストの比較

「すざく」衛星打ち上げ後の 2 年間に WAM 検出器で観測されたショートバーストとロングバーストについて調べたスペクトルのピークエネルギー (E_p) と等方的放射を仮定した場合の全放射エネルギー (E_{iso}) との相関を図 1 に示す。

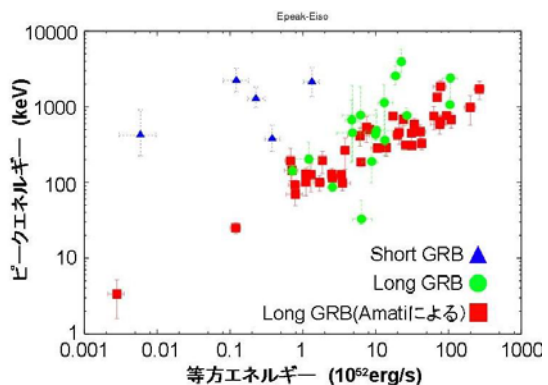


図 1 E_p と E_{iso} の相関

図に示されているように、ロングバーストについては Amati が提唱した相関に従うもの

の、ショートバーストでは相関がはっきりしないことがわかった。また、スペクトルパラメーターの分布、硬度比、スペクトルラグ、全放射エネルギーなどもロングバーストとショートバーストとは完全に異なっており、これら2種のバーストにおいて爆発前の天体や噴出物の速度が異なっていることがわかった。

(2) X線残光

Swift 衛星が2006年1月5日に発見したガンマ線バースト GRB060105 のX線残光は、「すざく」衛星により発生から約5時間半という記録的な早さで観測され、Swift 衛星と「すざく」衛星のデータから、図2に示すようなX線残光の光度曲線が得られた。

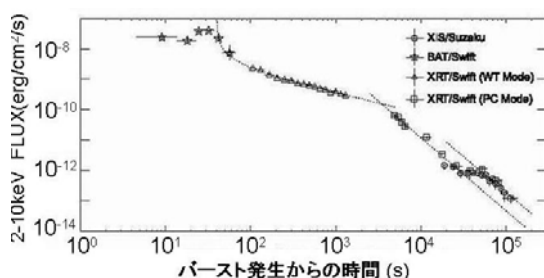


図2 GRB060105 のX線光度曲線

図のように、GRB060105 の残光光度曲線には、ジェットによって生じる折れ曲りが $3\text{--}4 \times 10^3$ 秒付近にあると考えることができる。これは、それまでに観測されたジェットによる折れ曲がりの中で最も早い時間であり、ジェットの開き角が1度程度以下であることを示している。

また、Swift 衛星が2006年9月4日に検出したガンマ線バースト GRB060904A のX線残光を「すざく」衛星搭載のXIS検出器で追観測したデータでは、突発放射の末期とX線フレアの減衰期の両方でスペクトルの急激な軟化が見られたにもかかわらず、X線残光の部分では多くのガンマ線バーストに典型的なスペクトルを保持していた。このことから内部衝撃波では電子加速が十分に行なわれなかったこと、および突発放射の末期と残光放射では、それぞれの放射の起源が全く異なることが分かった。

(3) 可視光残光の観測

我々はこれまでもHETE2衛星が検出したガンマ線バーストに対する可視光残光の自動追観測を行っており、本研究機関開始時にはSwift衛星が本格稼動を始めたことに対応し、Swift衛星からの情報にも自動で観測を開始するようにシステムの整備を行なった。これにより研究期間内にこれらの衛星が検出したガンマ線バーストのうち、宮崎大学で観測可能であった44個のバーストについ

て残光光度の上限値を測定し、ガンマ線バースト研究者の世界的なネットワーク(GCN; The Gamma ray bursts Coordinates Network)に報告した。

学内に既存の口径50cm望遠鏡では、より暗い可視光残光の検出や残光のフィルター観測を目指している。そこで、この望遠鏡での追観測が可能となるように望遠鏡駆動モーター、および駆動ソフトを変更し、動作試験により正常に駆動することを確認した。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計20件)

1. K.Yamaoka, A.Endo, T.Enoto, 他37名35番目, "Design and In-orbit Performance of the Suzaku Wide-band All-sky Monitor", Publications of the Astronomical Society of Japan, 査読有, Vol.61, (2009), pp.35-53
2. K.Yamaoka, A.Endo, T.Enoto, 他29名32番目, "Suzaku Wide-band All-sky Monitor Observations of Gamma-Ray Bursts", Proceedings of the 30th. International Cosmic Rays Conference, 査読無, Vol.3, (2008), pp.1151-1154
3. A.P'elangeon, J.-L.Atteia, Y.E.Nakagawa, 他32名35番目, "Intrinsic properties of a complete sample of HETE-2 gamma-ray bursts. A measure of the GRB rate in the Local Universe", Astronomy and Astrophysics, 査読有, Vol.491, (2008), pp.157-171
4. D.Yonetoku, S.Tanabe, T.Murakami, 他38名35番目 "Suzaku and Swift observations for X-ray afterglows; Investigation into the electron acceleration in the internal/external shocks", Proceedings of the AIP Conference, 査読無, Vol.1000, (2008), pp.603-606
5. M.S.Tashiro, Y.Terada, Y.Urata, 他29名23番目 "Status of GRB Observations with the Suzaku Wideband All-sky Monitor", Proceedings of the AIP Conference, 査読無, Vol.1000, (2008), pp.162-165
6. M.Ohno, T.Uehara, T.Takahashi, 他30名24番目 "The spectral properties of the GRB prompt gamma-ray emission observed by the Suzaku Wide-band All-sky Monitor", Proceedings of the AIP Conference,

- 査読無, Vol.1000, (2008), pp.101-104
7. D. Yonetoku, S. Tanabe, T. Murakami, 他 39 名 35 番目
“Spectral evolution of GRB 060904A observed with Swift and Suzaku — Possibility of Inefficient Electron Acceleration”, Publications of the Astronomical Society of Japan, 査読有, Vol. 60, (2007), pp. 351-360
 8. M. Tashiro, K. Abe, L. Angelini, 他 34 名 34 番目
“The Suzaku-Swift Joint Observation of the Early X-Ray Afterglow of GRB060105”, Progress of Theoretical Physics Supplement, 査読有, (2007), pp. 3-6
 9. M. Arimoto, N. Kawai, M. Suzuki, 他 43 名 19 番目
“HETE-2 Observations of the X-Ray Flash XRF 040916”, Publications of the Astronomical Society of Japan, 査読有, Vol. 59, (2007), pp. 695-702
 10. G. Stratta, S. Basa, N. Butler, 他 49 名 51 番目
“X-ray flashes or soft gamma-ray bursts?. The case of the likely distant XRF 040912”, Astronomy and Astrophysics, 査読有, Vol. 461, (2007), pp. 485-492
 11. M. S. Tashiro, K. Abe, L. Angelini, 他 34 名 34 番目
“Swift and Suzaku Observations of the X-Ray Afterglow from the GRB 060105”, Publications of the Astronomical Society of Japan, 査読有, Vol. 59, (2007), pp. 361-367
 12. Y. E. Nakagawa, A. Yoshida, S. Sugita, 他 33 名 34 番目
“An Optically Dark GRB Observed by HETE-2: GRB 051022”, Publications of the Astronomical Society of Japan, 査読有, Vol. 58, (2006), pp. L35-L39
 13. 前野将太, 山内誠, 園田絵里, 山本幹生, “ガンマ線バースト可視光残光の光度解析”, 宮崎大学工学部紀要, 査読無, Vol. 35, (2006), pp. 17-24
 14. R. Sato, T. Sakamoto, J. Kataoka, 他 40 名 18 番目
“HETE-2 Localization and Observations of the Gamma-Ray Burst GRB 020813”, Publications of the Astronomical Society of Japan, 査読有, Vol. 57, (2005), pp. 1031-1039
 15. J. S. Villaseñor, D. Q. Lamb, G. R. Ricker, 他 30 名 33 番目
“Discovery of the short γ -ray burst GRB 050709”, Nature, 査読有, Vol. 437, (2005), pp. 855-858
 16. T. Sakamoto, D. Q. Lamb, N. Kawai, 他 35 名 38 番目
“Global Characteristics of X-Ray Flashes and X-Ray-Rich Gamma-Ray Bursts Observed by HETE-2”, The Astrophysical Journal, 査読有, Vol. 629, (2005), pp. 311-327
 17. J.-L. Atteia, N. Kawai, R. Vanderspek, 他 36 名 38 番目
“HETE-2 Observation of Two Gamma-Ray Bursts at $z > 3$ ”, The Astrophysical Journal, 査読有, Vol. 626, (2005), pp. 292-297
- [学会発表] (計 18 件)
1. 辺見香理, “X 線天文衛星「すざく」と GRB 観測衛星 Swift による GRB070328 の初期放射と X 線残光の観測”, 日本物理学会第 64 回年次大会, 2009 年 3 月 27-30 日, 立教大学
 2. 山岡和貴, “「すざく」衛星搭載硬 X 線検出器広帯域全天モニタ部 (HXD-WAM) の現状 (V)”, 日本物理学会第 64 回年次大会, 2009 年 3 月 27-30 日, 立教大学
 3. 大野雅功, “「すざく」衛星搭載硬 X 線検出器広帯域全天モニタ部 (HXD-WAM) の現状 (VII)”, 日本天文学会 2009 年春季年会, 2009 年 3 月 24-27 日, 大阪府立大学
 4. 恩田香織, “「すざく」衛星搭載 WAM 検出器で観測した、ガンマ線バーストの高エネルギー放射”, 日本天文学会 2009 年春季年会, 2009 年 3 月 24-27 日, 大阪府立大学
 5. 園田絵里, “GRB041006 早期残光における増光”, 日本天文学会 2009 年春季年会, 2009 年 3 月 24-27 日, 大阪府立大学
 6. 大野雅功, “すざく衛星搭載 WAM によるガンマ線バーストの広帯域高感度観測”, 日本天文学会 2008 年秋季年会, 2008 年 9 月 11-13 日, 岡山理科大学
 7. 田代信, “「すざく」衛星搭載硬 X 線検出器広帯域全天モニタ部 (HXD-WAM) の現状 (VI)”, 日本天文学会 2008 年秋季年会, 2008 年 9 月 11-13 日, 岡山理科大学
 8. 寺田幸功, “「すざく」衛星搭載硬 X 線検出器広帯域全天モニタ部 (HXD-WAM) の現状 (V)”, 日本天文学会 2008 年春季年会, 2008 年 3 月 24-27 日, 国立オリンピック記念青少年総合センター
 9. 山岡和貴, “「すざく」衛星搭載硬 X 線検出器広帯域全天モニタ部 (HXD-WAM) の現状 (IV)”, 日本物理学会第 63 回年次大会, 2008 年 3 月 22-26 日, 近畿大学
 10. 杉田聡司, “「すざく」衛星搭載硬 X 線検出器広帯域全天モニタ部 (HXD-WAM) の現状 (IV)”, 日本天文学会 2007 年秋季年会, 2007 年 9 月 26-28 日, 岐阜大学

11. 洪秀徴, “「すざく」衛星搭載硬 X 線検出器広帯域全天モニタ部 (HXD-WAM) の現状 (III)”, 日本物理学会第 62 回年次大会, 2007 年 9 月 21-24 日, 北海道大学
12. 杉原将, “Miyazaki Wide-field Monitor (MWM) の現状 (3)”, 日本天文学会 2006 年秋季年会, 2006 年 9 月 19-21 日, 九州国際大学
13. 田代信, “Swift 衛星と「すざく」衛星による GRB060105 の早期 X 線残光の観測”, 日本天文学会 2006 年秋季年会, 2006 年 9 月 19-21 日, 九州国際大学
14. 山内誠, “インターネットが可能にした爆発天体の早期観測”, 電子情報通信学会, 2006 年 1 月 11 日, 宮崎大学
15. J.S.Villasenor, “Discovery of the Short Gamma Ray Burst GRB 050709”, American Astronomical Society 207th Meeting, 2006 年 1 月 8-12 日, Marriott Wardman Park Hotel (Washington DC)
16. 前野将太, “GRB041006 早期可視光残光の解析”, 第 111 回日本物理学会九州支部例会, 2005 年 12 月 10 日, 熊本大学
17. 杉原将, “Miyazaki Wide-field Monitor (MWM) の現状 (2)”, 日本天文学会 2005 年秋季年会, 2005 年 10 月 6-8 日, 北海道大学
18. 園田絵里, “RIMOTS による GRB041006 可視光残光の早期光度曲線”, 日本物理学会 2005 年秋季大会, 2005 年 9 月 12-15 日, 大阪市立大学

[その他]

GCN Circular 投稿

2005 年度 25 件
 2006 年度 12 件
 2007 年度 28 件
 2008 年度 30 件

The Astronomer's Telegram 投稿

2008 年度 1 件

6. 研究組織

(1) 研究代表者

山内 誠 (YAMAUCHI MAKOTO)
 宮崎大学・工学部・准教授
 研究者番号: 80264365

(2) 研究分担者

高岸 邦夫 (TAKAGISHI KUNIO)
 宮崎大学・総合情報処理センター・教授
 研究者番号: 80041060

廿日出 勇 (HATSUKADE ISAMU)
 宮崎大学・工学部・教授
 研究者番号: 30221500

松澤 英之 (MATSUZAWA HIDEYUKI)
 宮崎大学・情報戦略室・助教
 研究者番号: 30301443

(3) 連携研究者