

機関番号：12608

研究種目：特定領域研究

研究期間：2007～2010

課題番号：19047001

研究課題名（和文）爆発的X線・ γ 線から探るガンマ線バーストの起源と環境研究課題名（英文）Probing the Origins and Environments of Gamma-Ray Burst
with the explosive X-ray and gamma-ray emission

研究代表者 河合 誠之 (Kawai Nobuyuki)

東京工業大学・大学院理工学研究科・教授

研究者番号：80195031

研究成果の概要（和文）：本研究の目的は、ガンマ線バースト(GRB)の位置の迅速・正確に決定して速やかな残光観測に結びつけることと、X線・ γ 線放射の詳細観測から GRB の起源と環境を探ることである。そのため、X線全天監視装置 MAXI の開発を進め、GRB の検出・通報に成功した。また、将来のミッションのための X線分光器と GRB 位置検出器の基礎開発を進めた。さらに、HETE-2、Fermi、Suzaku などの人工衛星による観測データの解析を進め、ピークエネルギーと光度の相関関係、X線・ γ 線放射光度曲線のエネルギー依存性などを明らかにした。

研究成果の概要（英文）：The goals of this research are quick and precise localization of gamma-ray bursts (GRBs) which lead to prompt observations of afterglows, and investigation of origins and environments of GRBs from detailed X-ray and gamma-ray studies. We developed MAXI and succeeded in detecting and reporting GRBs. We also conducted basic development of X-ray spectrometers and GRB localization instruments. In addition, we analyzed the data obtained by satellites as HETE-2, Fermi, and Suzaku, and studied the correlation between the peak spectral energy and the luminosity, and the energy dependence of the X-ray/gamma-ray light curves.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2007 年度	34,200,000	0	34,200,000
2008 年度	60,600,000	0	60,600,000
2009 年度	58,600,000	0	58,600,000
2010 年度	50,500,000	0	50,500,000
年度			
総計	203,900,000	0	203,900,000

研究分野：数物系科学

科研費の分科・細目：天文学・天文学

キーワード：ガンマ線バースト・天体形成史・X線天文学・X線検出器・ γ 線天文学

1. 研究開始当初の背景

本研究の代表者を含む日本のチームが主要な参加者であったHETE-2衛星の活躍により2003年に超新星を伴うガンマ線バースト(GRB)が見つかったことなどから、GRBの多くが大質量星一生の最後の重力崩壊に伴っ

て発生することが確実となっていた。2005年にGRB衛星Swiftが本格的に稼働し始め、研究代表者の河合を中心とするチームが（当時）最遠方 $z=6.3$ のGRB050904を「すばる」望遠鏡を用いて分光観測して宇宙年齢9億年という初期宇宙の電離度や重元素などの測定に成功した。これにより、ガンマ線バース

トをプローブとして最も古い銀河や星が作られ始める太古の宇宙を探ることができることが実証された。X線でも高いエネルギー分解能で高赤方偏移のGRBを観測すれば初期宇宙に関する重要な知見が得られることが指摘された。さらに γ 線の即時放射の光度とスペクトルのピークエネルギーの間の相関が見つかり、宇宙論的距離指標としての可能性が検討され始めた。一方、GRBのX線・ γ 線を観測できる装置として、宇宙ステーションに搭載する日本の全天X線観測装置MAXI、米国を中心として日本も参加したFermi γ 線宇宙望遠鏡(旧称GLAST)の打ち上げが近づいており、GRB研究の一層の展開が期待される状況にあった。

2. 研究の目的

数十億年以上の遠方で発生する宇宙最大の爆発、ガンマ線バースト(GRB)を光源として、星や銀河が生まれつつある太古の宇宙を読み解くという本特定領域の目標を達成する上で、GRBの放射エネルギーの大部分を占め、最初に検出されるX線・ γ 線の爆発的放射(prompt emission)の観測は重要な役割を持つ。本研究の目的は大別すると以下の3項目となる。

- (1) ガンマ線バーストの検出と位置決定：空の広い領域(全天の1/10以上)を監視し、一旦GRBを検出したら望遠鏡を向けるに十分な精度で位置を決定し、可能な限り短時間地上に通報しなくてはならない。そのための位置決定能力をもつGRB検出器を開発する。
- (2) GRBの爆発的なX線 γ 線放射(即時放射)の理解：例えばX/ γ 線爆発的放射エネルギー E_γ とスペクトルのピーク光子エネルギー E_{peak} と間に経験的に知られている相関関係を、広い範囲の E_{peak} に対して検証してその物理的理由を理解できれば、X/ γ 線爆発的放射の性質と強度だけから真の光度と距離(即ち赤方偏移)を推定し、宇宙年代に対するGRBの発生率(さらに星生成率と深く相関)を求めることが可能になる。
- (3) 高分散X線スペクトルの観測による赤方偏移と発生源環境の計測：GRB源を取り囲む物質によって生じる、X線スペクトルに元素固有の吸収構造や蛍光輝線を精密に測定できれば、GRB源の赤方偏移と元素の存在量が推定される。GRB観測に相応しい高分散X線分光器の開発を進める。

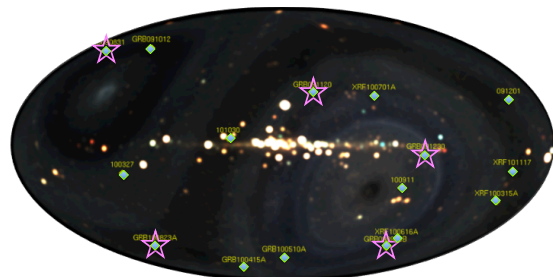
3. 研究の方法

領域期間中に運用される衛星を用いた観測研究を行ないつつ、太古のGRBでは重要

になるX線領域の観測に重心をおいて、次世代の広帯域・高分解能GRB検出器を開発する。まず、本研究期間中に運用開始する宇宙ステーション搭載装置(MAXI)およびFermiの開発、運用体制の整備を実施し、運用開始後はGRB位置速報と観測・解析を進める。他にも運用を停止した衛星(HETE-2, CGRO)と運用中の衛星(Swift, 「すざく」, Chandra)によるX線・ γ 線観測データに基づくGRBの研究を進める。また、近い将来の小型衛星や宇宙プラットフォーム搭載を目指して、小型軽量のGRB位置決定装置と特にX線領域に重点をおいた広帯域分光器、ASTRO-Hなど将来の衛星によるX線残光の観測をめざした高分解能X線分光器を開発する。

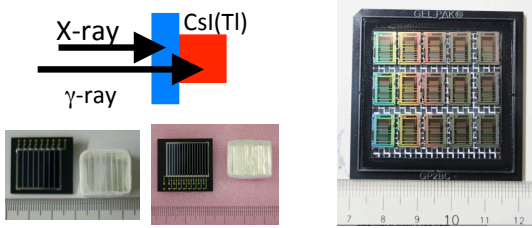
4. 研究成果

- (1) MAXIの開発と運用：GRB検出・位置速報能力をもつ宇宙ステーション搭載全天X線監視装置MAXIに関して、H19~H20に最終試験と解析ソフト開発を行い、予定より半年遅れてH21年7月にISSに設置し、同年8月から観測を開始した。その後16ヶ月間に16個のGRBをMAXIが観測し、そのうち5個は、他の衛星によっても同時に検出され、広いエネルギー範囲でのスペクトルを測定できた



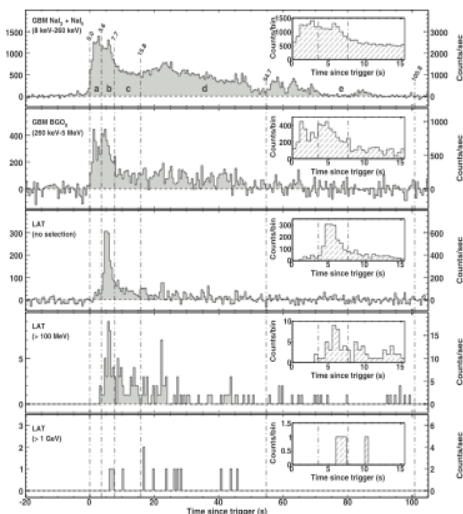
MAXIによって検出されたGRBを全天X線画像上に水色のダイヤモンドで示す。ピンクの星は他の衛星にも検出されたもの。

- (2) GRB位置検出器の開発 将来ミッションのGRB位置検出器として透過型APD多素子検出器(下図左)と、新規開発のアナログVLSIを用いる読み出し回路(下図右)の開発を進め、それぞれ性能評価を行った。それぞれ、要素技術としては開発を完了し、所期の性能を得られることを確認した。さらに、この技術を用いた超小型衛星搭載用 γ 線検出器システムを開発し、ほぼ搭載品と同等のエンジニアリングモデルを製作した。

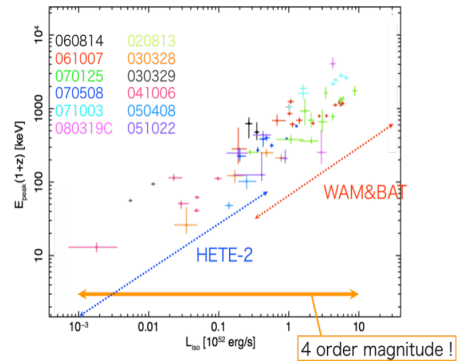


(左) 8ch 及び 16ch 透過型 APD 一次元アレイと、それに組み合わせる CsI シンチレータ。(右) APD 読出用 VLSI VATA462。広いダイナミックレンジ、低雑音、低消費電力を確認した。

(3) Fermi γ 線宇宙望遠鏡等による GRB の観測 Fermi 衛星 (旧称 GLAST) は予定から半年遅れて H20 年 6 月に打上げられたが、強い GeV 放射を示す GRB 080916C を観測して GRB 光源のローレンツ因子がほぼ 1000 であることを明らかにするなど、GeV 領域放射をもつ GRB の観測で大きな観測成果を上げた。また、HETE-2、「すざく」、および Swift 衛星の GRB 観測データを解析し、爆発的放射の時間発展の詳しい解析からその放射機構に関する新たな情報を得た。GRB 等方放射エネルギー (Eiso) とスペクトルのピークエネルギー (Epeak) の相関 (Amati の関係) の検証を進めた。これは、放射機構の研究に加えて、GRB 爆発的即発放射の距離指標としての適用可能性にも関係する。

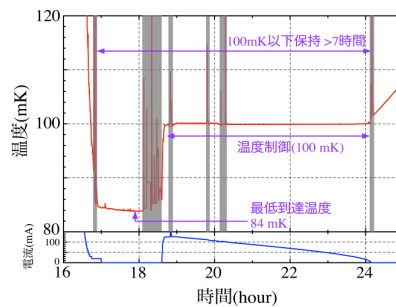


(左) Fermi 衛星による GRB 080916C の γ 線光度曲線。GeV γ 線 (下3段) が、MeV 以下の放射 (上2段) より遅れて発生。



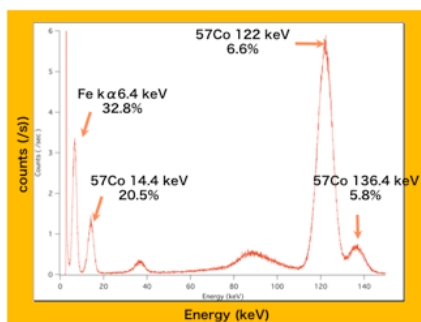
HETE-2、Suzaku/WAM、Swift/BAT で受けた GRB のスパイクごとに光度と Epeak の間の Yonetoku 相関が存在する。

(4) 高分散 X 線分光観測 次世代 GRB 観測衛星への X 線マイクロカロリメータ搭載を目指して断熱消磁冷凍機 (ADR) の研究開発を進めた。最終的に最低到達温度 84 mK、100 mK の保持時間 7 時間以上、温度安定度 9 μ Krms を実現した。本研究で得られた知見は、2014 年打ち上げ予定の ASTRO-H 衛星の設計製作にも生かすことができた。



製作した ADR の消磁後の温度。最低到達温度は 84 mK で、100 mK 以下を 7 時間以上保持できた。

(5) 広帯域 X 線 γ 線分光器の開発 ベリリウム入射窓をもつ薄型大口径 LaBr3(Ce) 検出器を開発した。陽子ビーム照射実験によって放射化と放射線耐性を調査し、衛星搭載 γ 線検出器として使用可能であること、1 台の検出器で 10keV 以下の X 線領域から約 1MeV におよぶ γ 線まで観測可能であることを示した。この成果を踏まえ、宇宙ステーションきぼうに搭載する CALET の GRB 検出器に応用することになった。



LaBr3(Ce)検出器によって得られた広帯域エネルギースペクトルの例。

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 42 件)

1. “Solid-State Slit Camera (SSC) Aboard MAXI”, H. Tomida et al, PASJ, 63, 397 (2011) 査読有
2. “ORIGIN: metal creation and evolution from the cosmic dawn”, den Herder, J.-W., Kawai, N., Fujimoto, R. and 156 colleagues, Experimental Astronomy 20-(2011) 査読有
3. “Gamma-Ray Burst Polarimeter - GAP - aboard the Small Solar Power Sail Demonstrator IKAROS,” Yonetoku, Daisuke; Murakami, Toshioほか13名, Publications of the Astronomical Society of Japan, 63, 625-638 (2011) 査読有
4. “Fermi Detection of Delayed GeV Emission from the Short Gamma-Ray Burst 081024B”, Abdo, A. A., Kawai, N., and 206 colleagues, The Astrophysical Journal 712, 558-564 (2010) 査読有
5. “Swift and Fermi Observations of the Early Afterglow of the Short Gamma-Ray Burst 090510”, De Pasquale, M., Kawai, N., and 193 colleagues, The Astrophysical Journal 709, L146-L151 (2010) 査読有
6. “Fermi Observations of GRB 090510: A Short-Hard Gamma-ray Burst with an Additional, Hard Power-law Component from 10 keV TO GeV Energies”, Ackermann, M., Kawai, N., and 177 colleagues, The Astrophysical Journal 716, 1178-1190 (2010) 査読有
7. “Development of an Adiabatic Demagnetization Refrigerator for X-ray Microcalorimeter Operations”, Fujimoto R., Sato K, Wada A, Yatsu T, Hoshino A, Murakami T., Shinozaki K, (2010), AIP Conf. Proc. 1279, 309-311 査読無
8. “Cooling system for the soft X-ray spectrometer onboard Astro-H”, Fujimoto R., Mitsuda K, Yamasaki N, Takei Y, Tsujimoto M, Sato K, ほか25名, (2010), Cryogenics 50, 488-493 査読有
9. “In-orbit performance of avalanche photodiode as radiation detector on board the picosatellite Cute-1.7+APD II”, Kataoka, J., Kawai, N., and 18 colleagues, Journal of Geophysical Research (Space Physics) 115, 5204-(2010) 査読有
10. “Spectral-Lag Relations in GRB Pulses Detected with HETE-2”, Arimoto, M., Kawai, N., Yoshida, A. and 36 colleagues, Publications of the Astronomical Society of Japan 62, 487-(2010) 査読有
11. “Design and In-Orbit Performance of the Suzaku Wide-Band All-Sky Monitor”, Yamaoka, K., Endo, A., Yoshida, A., et al. 2009, PASJ, 61, S35 (査読有)
12. “Suzaku-WAM, Konus-Wind, and Swift-BAT Observations of Prompt Emission of the High-Redshift GRB 050904”, Sugita, S., Yamaoka, K., et al. 2009, PASJ, 61, 521 (査読有)
13. “Testing the E peak-E iso Relation for GRBs detected by SWIFT and SUZAKU-WAM, Krimm, H., Yamaoka, K., et al. 2009, ApJ, 704, 1405 (査読有)
14. “Fermi Observations of High-energy Gamma-ray Emission from GRB 080825C”, Abdo, A. A., Kawai, N., and 179

- colleagues, *The Astrophysical Journal* 707, 580-592 (2009) (査読有)
15. “Fermi Observations of GRB 090902B: A Distinct Spectral Component in the Prompt and Delayed Emission”, Abdo, A. A., Kawai, N., and 204 colleagues, *The Astrophysical Journal* 706, L138-L144 (2009) (査読有)
 16. “The MAXI Mission on the ISS: Science and Instruments for Monitoring All-Sky X-Ray Images”, Matsuoka, M., Kawai, N., Yoshida, A., Tomida, H., Kataoka, J. et al. *Publications of the Astronomical Society of Japan* 61, 999- (2009) (査読有)
 17. “A limit on the variation of the speed of light arising from quantum gravity effects”, Abdo, A. A., Kawai, N., and 207 colleagues, *Nature* 462, 331-334 (2009) 査読有
 18. “Fermi Observations of GRB 090902B: A Distinct Spectral Component in the Prompt and Delayed Emission”, Abdo, A. A., Kawai, N., and 204 colleagues, *The Astrophysical Journal* 706, L138-L144 (2009) 査読有
 19. “Fermi Observations of High-Energy Gamma-Ray Emission from GRB 080916C”, Abdo, A. A., M. Ackermann, M. Arimoto, K. Asano, W. B. Atwood, Kawai, N., T. Nakamori, R. Yamazaki, 他238名 (The Fermi LAT Collaboration, and The Fermi GBM Collaboration), *Science* 323, 1688- (2009) 査読有
- [学会発表] (計 39 件)
1. 「超小型衛星TSUBAME搭載用ガンマ線バースト検出器の開発」 川上孝介, 林真由美, 常世田和樹, 榎本雄太, 戸泉貴祐, 谷津陽一, 河合誠之, 松永三郎, 中森健之, 片岡淳, 久保信、日本物理学会2012年春季大会2012年3月24日～27日 (関西学院大学)
 2. 「広天域X線監視観測 (Wide-Field MAXI) 計画」 河合誠之、常深博、上野史郎、富田洋、三原 建弘、吉田篤正, 根來均, 上田佳宏ほかMAXI team、天文学会2012年春季年会2012年3月19日～22日 (龍谷大学)
 3. 「MAXI/GSCによるX線突発天体の探索」戸泉貴裕、薄井竜一、杉森航介、青木 優、森井幹雄、河合誠之、廣井和雄、諏訪文俊、根來 均、芹野素子、杉崎睦、三原建弘ほかMAXIチーム、天文学会2012年春季年会2012年3月19日～22日 (龍谷大学)
 4. 「超小型衛星TSUBAME搭載用ガンマ線バースト検出器の開発」常世田 和樹、林真由美、川上孝介、榎本雄太、戸泉貴裕、谷津陽一、河合誠之、松永三郎、中森健之、片岡淳、久保信、天文学会2012年春季年会2012年3月19日～22日 (龍谷大学)
 5. Yoshida, A.: “X-ray/gamma-ray Astrophysics” (review) “International Symposium on the Recent Progress of Ultra-high Energy Cosmic Ray Observation” December 10-12, 2010, Nagoya, Japan
 6. N. Kawai: “GRBs as probes for the high-z Universe”; Cosmic Chemical Evolution Workshop (St Michaels, Maryland USA, June 2-4, 2010)
 7. 「X線全天監視装置MAXIとフェルミによる全天多波長モニター」河合誠之、富田 洋、吉田篤正、山岡和貴、ほか全天X線監視装置チーム、日本天文学会2010年春季年会2010年3月24日～27日 (広島大学)
 8. 「MAXI/GSCの軌道上データによるアライメント較正」杉森航介、森井幹雄、河合誠之、上野史郎、松岡勝、川崎一義、富田 洋、吉田篤正、山岡和貴、ほか全天X線監視装置チーム、日本天文学会2010年春季年会2010年3月24日～27日 (広島大学)
 9. N. Kawai: “Deciphering the Ancient Universe with Gamma-Ray Bursts”; The 7th Tour Symposium on Nuclear Physics and Astrophysics (Kobe, Japan, Nov 16-20, 2009).
 10. Yamaoka, K.: “Suzaku observations of GRB prompt emissions and X-ray afterglows”; *The Shoking Universe*, 2009, Sep. 14-18, S. Servolo,
 11. 「MAXI/GSCのコリメータ応答関数の開発」森井幹雄、河合誠之、杉森航介、松岡勝、上野史郎、富田洋、鈴木素子、三原建弘、杉崎睦、吉田篤正、磯部直樹ほかMAXIチーム、日本天文学会2009年秋季年会2009年9月14日～16日 (山口大学)
 12. 「HETE-2 衛星を用いたガンマ線バーストのスペクトルラグの解析」有元誠、河合誠之、Nicolas Vasquez、下川辺隆史、吉田篤正、他HETE-2チーム、日本天文学会2008年秋季年会2009/09/11-09/13 (岡山)
 13. “Development of Adiabatic Demagnetization Refrigerator for X-ray

- microcalorimeter experiments” K. Sato, A. Wada, T. Yatsu, R. Fujimoto, T. Murakami, K. Shinozaki, 13th International Workshop on Low Temperature Detectors, Stanford, California, USA, 20-24 July 2009
14. “Development of an adiabatic demagnetization refrigerator at Kanazawa for X-ray microcalorimeter operation” R. Fujimoto, K. Sato, A. Wada, T. Yatsu, T. Murakami, K. Shinozaki, The Energetic Cosmos: from Suzaku to Astro-H, Otaru, Hokkaido, Japan, 29 June - 2 July 2009
15. “Cooling system for the soft X-ray spectrometer onboard Astro-H” R. Fujimoto, K. Mitsuda, N. Yamasaki, K. Sato, R. L. Kelley, 他26名, Space Cryogenics Workshop, Arcadia, California, USA, 23-25 June 2009
16. N. Kawai: “Gamma-Ray Bursts”; The 58th Fujihara Seminar - World Wide Network for Gravitational Wave Observation (Hayama, Japan, May 27-29, 2009).
17. 「フェルミ・ガンマ線宇宙望遠鏡によるガンマ線バーストの観測」河合誠之, 有元誠, 浅野勝晃, 下川辺隆史, 中森健之, 片岡淳, 山崎了, 深沢泰司, 水野恒史, 大杉節, 片桐秀明, 花畑義隆, 高橋弘充, 田島宏康, A. Bouvier, J. Granot, 釜江常好, 大野雅功, 他 Fermi-LAT Collaboration, 日本物理学会「第64回年次大会」2009年3月27日～30日 (立教大学)
18. 「透過型APDアレイによる広帯域X線／ガンマ線検出器の開発」中森健之, 戸泉貴裕, 片岡淳, 河合誠之, 石川嘉隆, 河合哲, 川端信行, 松永祐輔、日本物理学会「第64回年次大会」2009年3月27日～30日 (立教大学)
19. 「HETE-2によるガンマ線バーストのラグ光度関係の検証」有元誠、河合誠之、浅野勝晃、Nicolas Vasquez、下川辺隆史、吉田篤正、他HETE-2チーム、日本天文学会2009年春季年会2009年3月24日～27日 (大阪府立大学)
20. Yamaoka, K., Physics of Relativistic Flows: An observational view, 2009, Jun. 1-3, Stockholm Suzaku X-ray and gamma-ray observations of GRBs and SGRs
21. 「透過型撮像広帯域X線／ガンマ線検出器の開発」中森健之、片岡淳、戸泉貴裕、田中識史、金井義和、谷津陽一、有元誠、小泉誠、河合誠之、石川嘉隆、河合哲、川端信行、松永祐輔、日本天文学会2008年秋季年会2008/09/11-09/13 (岡山)「ガンマ線バーストを用いた高赤方偏移宇宙の金属量測定--- SubaruからEDGEへ」河合誠之 日本天文学会2007年秋季年会 2007/09/25-09/28 (岐阜大学)
- [その他]
ホームページ
<http://www.hp.phys.titech.ac.jp/grb/>
6. 研究組織
(1) 研究代表者
河合 誠之 (KAWAI NOBUYUKI)
東京工業大学・大学院理工学研究科・教授
研究者番号：80195031
- (2) 研究分担者
吉田 篤正 (YOSHIDA ATSUMASA)
青山学院大学・理工学部・教授
研究者番号：80240274
- 山岡 和貴 (YAMAOKA KAZUTAKA)
青山学院大学・理工学部・助教
研究者番号：00365016
- 村上 敏夫 (MURAKAMI TOSHIO)
金沢大学・自然科学研究科・教授
研究者番号：60092350
- 藤本 龍一 (FUJIMOYO RYUICHI)
金沢大学・自然科学研究科・准教授
研究者番号：20280555
- 富田 洋 (TOMIDA HIROSHI)
独立行政法人宇宙航空研究開発機構・宇宙科学研究所・開発員
研究者番号：30399547
- (3) 連携研究者
片岡 淳 (KATAOKA JUN)
早稲田大学・理工学術院・准教授
研究者番号：90334507