

氏 名	川久保 雄 太
学位(専攻分野)	博士 (理学)
学 位 記 番 号	博理理甲 第33号
学位授与の日付	2018年 9 月29日
学位授与の要件	学位規則 (昭和28年 4 月 1 日文部省令第 9 号) 第 4 条第 1 項該当
学 位 論 文 題 目	CALET ガンマ線バーストモニターによって観測された ガンマ線バーストの系統的解析
論 文 審 査 委 員	主 査 准教授 坂 本 貴 紀 副 査 教 授 吉 田 篤 正 副 査 教 授 山 崎 了 副 査 埼玉大学 准教授 寺 田 幸 功

論 文 内 容 の 要 旨

川久保 雄 太

本論文では、国際宇宙ステーションに搭載された CALorimetric Electron Telescope (CALET) の観測装置 Gamma-ray Burst Monitor (CGBM) の観測データを用いて、ガンマ線バースト (GRB) の明るいプロンプト放射とは別起源と思われる過剰成分や、プロンプト放射の立ち上がり部分において急激なスペクトルの変化を発見した事を報告する。これらの発見は、これまでの研究であまり着目されていなかった放射成分の存在やスペクトルの変化を観測的に明らかにし、GRB の放射機構の解明に新たな見地を与えるものである。本論文の構成は以下の通りである。第 1 章、2 章ではこれまでの GRB 観測と GRB の放射理論について紹介する。第 3 章では、本研究に用いた、CALET と MAXI の観測装置について述べる。第 4 章では CGBM のエネルギー応答関数の開発と軌道上における運用と観測について述べる。第 5 章では CGBM が観測開始の 2 年間に観測した 74 個の GRB の系統的解析結果について述べる。第 6 章では MAXI と CGBM で同時に検出された GRB 160107A の解析結果について述べる。第 7 章では明るいプロンプト放射とは異なる起源を持つと思われる過

剰成分の探査についてまとめる。第8章では、GRBのプロンプト放射初期のスペクトル発展を追跡した結果について述べる。そして、第9章で得られた結果に対するまとめと今後の展望について述べる。以降、第1章から第8章の概要を述べる。

第1章と第2章では、これまでのGRBの観測結果とGRBの放射の理論モデルをまとめた。GRBは宇宙遠方で起こる、宇宙で最も明るい爆発現象である。GRBは激しい時間変動を示す、プロンプト放射と呼ばれるX線、ガンマ線帯域の放射と、プロンプト放射の後に、残光と呼ばれるX線から電波までの広いエネルギー帯域での放射をもつ。GRBの継続時間は2秒を境に二山の分布しており、継続時間の短いGRBは中性子星同士、中性子星とブラックホールの衝突合体、一方、継続時間の長いGRBは大質量星の重力崩壊が起源であると考えられている。

プロンプト放射のスペクトルは異なる冪指数の冪関数が滑らかに繋がった、Band関数と呼ばれる関数でよく表される非熱的なスペクトルであることが知られている。Band関数のパラメータである、冪関数の冪指数 α と β 、そして、 νF_ν スペクトルのピークエネルギー E_{peak} （または、ベキが折れるエネルギー E_{break} ）はGRBのスペクトル形状を表す指標として用いられている。GRBの E_{peak} 分布はkeVからMeV帯域と広く分布している。また、Band関数で表されるような成分とは別に、熱的な成分やGeVのガンマ線領域まで伸びる新たな成分を持つGRBも発見されている。

GRBの放射は中性子星合体や大質量星の重力崩壊によってブラックホールが誕生する瞬間に伴う相対論的ジェットからの放射であると考えられている。中心エンジンによって開放された膨大なエネルギーによって、黒体放射温度1MeV程度の火の玉が出来る。火の玉は自らの高温によって、断熱膨張を起こし、加速膨張していく。火の玉の進化によって、物質の速度は相対論的速度（ローレンツ因子100以上）まで加速される。これをファイヤーボールと呼ぶ。加速された放出物質に速度の違いがあるとすると、放出された物質同士が衝突することで衝撃波が生じる。これを内部衝撃波と呼ぶ。一方、放出された物質と星間物質が衝突する際にも衝撃波が生じる。これを外部衝撃波と呼ぶ。GRBからの電磁波の放射は衝撃波によって加速された電子のシンクロトロン放射であると考えられており、プロンプト放射は内部衝撃波、残光は外部衝撃波に起因すると考えられている。シンクロトロン放射から予想される、Band関数の α は $-3/2 \leq \alpha \leq -2/3$ である。また、ファイヤーボールモデルからは非熱的な放射とは別に光球面からの熱的な放射が予測されている。

第3章では本研究で用いた、CALET と Monitor of All-sky X-ray Image (MAXI) の二つの観測装置について述べる。CALET は高エネルギー宇宙電子、ガンマ線の観測を目的とした観測装置であり、主検出器である CALorimeter (CAL) と Gamma-ray Burst Monitor (CGBM) を搭載している。CALET は国際宇宙ステーション (ISS) の日本実験棟きぼうの船外実験プラットフォームに搭載され、2015年10月から観測を開始し、2年経過した現在も観測を続けている。本研究で用いた CGBM は Hard X-ray Monitor (HXM) と Soft Gamma-ray Monitor (SGM) の2種類の検出器から構成され、2種類の検出を組み合わせる事で、7 keV から20 MeV のエネルギー帯域の X 線、ガンマ線の観測を行う。CGBM の主な観測対象は GRB のプロンプト放射であり、GRB 観測装置としての CGBM の長所は広いエネルギー帯域と、後述する MAXI との連携観測である。CGBM は0.125秒おきの光度曲線データと、4秒おきのスペクトルデータを常時取得し、GRB 発生時には高時間、高エネルギー分解能のイベントデータを取得する事が可能である。

MAXI は CGBM と同じ ISS のきぼう船外プラットフォームに搭載された観測装置であり、X 線による全天観測を行っている。MAXI には12台の比例計数管を搭載したガススリットカメラ (GSC) と X 線 CCD を搭載した Solid-state Slit Camera (SSC) が搭載されている。本研究に用いた GSC は2 keV から30 keV の X 線に感度を持っている。GSC の比例計数管は到来 X 線に対して、1次元方向の位置決定を行う事ができ、さらに、検出器上面に取り付けられた、コリメータによって視野を制限することで、もう一方向の位置決定を可能としている。MAXI は視野を制限し、走査観測を行っているため、点源に対する瞬間的な有効面積は小さく、また、有効面積は時間によって変化することになる。

第4章では CGBM のデータを用いたスペクトル解析を行う上で欠かせないエネルギー応答関数について述べる。CGBM の応答関数は CAD データをベースに CALET 全体を取り込んだモンテカルロシミュレータを元に作られている。

2014年1月に行われた CGBM の地上較正試験の結果、HXM の低エネルギー X 線に対する感度が低下していることがわかった。この原因は明らかではないが、X 線感度の低下を HXM の結晶である LaBr₃ (Ce) の表面が劣化し、不感層が出来ていると仮定した場合、HXM1の不感層の厚みは16~24 μ m であり、HXM2の不感層の厚みは6~7 μ m であった。16~24 μ m の不感層による10 keV の X 線透過率は約40% である。

この低エネルギーX線の感度低下は応答関数に取り込まれている。また、この地上試験ではHXM表面の位置依存性を調べるために、コリメートされた6.4 keVと14.9 keVのX線、511 keVのガンマ線を用いた2次元スキャンを行った。これら3つのエネルギーによるHXM表面位置による検出効率、ゲイン、そして、エネルギー分解能の2次元分布が応答関数に取り込まれている。

応答関数の較正については、Swift衛星のBAT検出器と同時に観測された3つのGRB 161218A、GRB 170330AとGRB 170906Aのデータを用いて行った。その結果、HXMにおいては100 keV以上において、BATのデータと比較して系統的な正の残差が見える事が分かった。また、応答関数による有効面積の不定性はHXMにおいては10-20%程度、SGMにおいては、20-30%程度と評価した。

第5章では2015年10月から2017月から9月の観測開始からの二年間の間にCGBMで観測されたGRBの系統的な解析結果を述べる。CGBMは観測開始からの2年間のうちに74個のGRBの観測に成功した。74個のうち、継続時間の長いGRBは63個であり、継続時間の短いGRBは11個であった。CGBMの継続時間の長いGRBの継続時間の分布は他の観測装置によって得られた継続時間分布に比べて短い側に分布していることがわかった。しかし、これは、CGBMの観測データに現れる検出器固有の効果が見えているだけであり、本質的に継続時間が短いGRBを選択的に観測しているのではないと考えられる。

74個のうち、49個のGRBの時間平均スペクトル解析を行い、スペクトルパラメータの分布を調べた。その結果、CGBMで観測されたGRBのスペクトルパラメータの分布は、他のGRB観測装置であるCGRO衛星のBATSE検出器、Fermi衛星のGBM検出器、Swift衛星のBAT検出器で得られた分布と矛盾していないことがわかった。また、CGBMでは E_{peak} が100 keV以下となるような軟らかなスペクトルを持つGRBが観測されていないこともわかった。

第6章ではMAXIとCGBMによって観測されたGRB 160107Aの解析結果を述べる。GRB 160107AはCGBMがこのGRBを検出した時刻の約45秒前にMAXIのGSC検出器によっても放射が検出された。MAXIが検出した放射はCGBMが検出したプロンプト放射に先行する弱い放射であった。MAXIとCGBMのデータを用いたスペクトル解析を行った結果、CGBMが検出したプロンプト放射は非熱的なスペクトル

を持っていたのに対し、MAXI が検出した弱い放射は非熱的な幂関数に加えて黒体放射成分を含むことがわかった。この黒体放射成分の起源として、ファイヤーボールの光球面放射が観測された可能性を議論し、典型的な距離を仮定すると光球面放射の半径は $\sim 10^{13}$ cm 程度となる事がわかった。

第 7 章では GRB 160107A で検出されたような、プロンプト放射の前の過剰成分が他の GRB でも見られないか探査した。明るい 6 個の GRB について、プロンプト放射の光度曲線に対し、パルスフィッティングを行い、フィッティングの残差をすることでこの過剰成分の有無を調べた。その結果、4 個の GRB で明るいプロンプト放射前に過剰な成分を発見した。その過剰成分は非常に弱く、継続時間も明るいプロンプト放射の 2–3 倍長く続くものであった。この過剰成分は、Fenimore et al. 1999 で議論されている外部衝撃波起源の放射が明るいプロンプト放射の始まる前から観測された可能性があるとして議論した。

第 8 章では GRB のプロンプト放射初期のスペクトルの時間発展を 60–100 keV と 7–50 keV の帯域でのカウント数の比と 100–300 keV と 60–100 keV の帯域でのカウント数の比（以後 color-color diagram と呼ぶ）を用いて時間的に細かく調べた。その結果、color-color diagram 上のデータ点と GRB の放射スペクトルのパラメータを結びつけることで、プロンプト放射の立ち上がり部において、スペクトルの折れ曲がりのエネルギー E_{break} が増加する傾向と、その後、急激にスペクトルの低エネルギー側の幂指数 α が増加する傾向を発見した。このプロンプト放射の立ち上がり部分で起きている急激なスペクトルの変化は、プロンプト放射のピーク部分と立ち下がり部分で一般的に知られている現象であるスペクトルラグ（エネルギーの低い光子がエネルギーの高い光子に対して遅れる現象）と観測的に類似していると考え、このスペクトルラグの理論モデルで、プロンプト放射の立ち上がり部分でみられた急激なスペクトルの変化を説明できるか議論した。

発 表 論 文

本研究に関する論文

【学術雑誌】

(査読のあるもの)

1. Y. Kawakubo, T. Sakamoto, A. Yoshida, D. Kazanas “Systematic spectral lag analysis of Swift known-z GRBs”, *Advances in Astronomy*, 2015巻, Article ID 341018, 1–12ページ, 2015
2. Y. Kawakubo, T. Sakamoto, S. Nakahira, K. Yamaoka, M. Serino, Y. Asaoka, M. L. Cherry, S. Matsukawa, M. Mori, Y. Nakagawa, S. Ozawa, A. V. Penacchioni, S. B. Ricciarini, A. Tezuka, S. Torii, Y. Yamada, A. Yoshida, “Detection of the thermal component in GRB 160107A”, *Publications of the Astronomical Society of Japan*, 70巻, 1号, id6, 1–10ページ, 2018

【国際会議議事録】

(査読の無いもの)

3. Y. Kawakubo, T. Sakamoto, A. Yoshida, M. Serino, S. Nakahira, K. Yamaoka, R. Inoue, S. Terazawa, K. Senuma, R. Fujioka and the CALET Collaboration “Feasibility study of GRBs simultaneously observed by MAXI/GSC and CALET Gamma-ray Burst Monitor”, *Suzaku-MAXI 2014 EXPANDING THE FRONTIERS OF THE X-RAY UNIVERSE*, 325–326ページ, 2014
4. Y. Kawakubo, A. Yoshida, T. Sakamoto, for the CALET collaboration “Overview and first year observation of CALET Gamma ray Burst Monitor”, *7 Years of MAXI : monitoring X-ray transients*, 273–274ページ, 2017

【受賞】

5. 日本学生支援機構 第一種奨学金 返還半額免除 (2015年度)
6. 薦田先端学術奨学金 (2015, 2016, 2017年度)
7. 早川幸男基金 第95回 渡航費全額援助, (2016年度)

【その他】

8. The Gamma-ray Coordinates Network (<https://gcn.gsfc.nasa.gov>) への報告74件
(博士論文で解析した GRB)

その他の公表論文

【学術雑誌】

(査読のあるもの)

9. O. Adriani, Y. Akaike, K. Asano, Y. Asaoka, M. G. Bagliesi, G. Bigongiari, W. R. Binns, S. Bonechi, M. Bongi, P. Brogi, J. H. Buckley, N. Cannady, G. Castellini, C. Checchia, M. L. Cherry, G. Collazuol, V. Di Felice, K. Ebisawa, H. Fuke, T. G. Guzik, T. Hams, M. Hareyama, N. Hasebe, K. Hibino, M. Ichimura, K. Ioka, W. Ishizaki, M. H. Israel, A. Javaid, K. Kasahara, J. Kataoka, R. Kataoka, Y. Katayose, C. Kato, N. Kawanaka, Y. Kawakubo, H. Kitamura, H. S. Krawczynski, J. F. Krizmanic, S. Kuramata, T. Lomtadze, P. Maestro, P. S. Marrocchesi, A. M. Messineo, J. W. Mitchell, S. Miyake, K. Mizutani, A. A. Moiseev, K. Mori, M. Mori, N. Mori, H. M. Motz, K. Munakata, H. Murakami, Y. E. Nakagawa, S. Nakahira, J. Nishimura, S. Okuno, J. F. Ormes, S. Ozawa, L. Pacini, F. Palma, P. Papini, A. V. Penacchioni, B. F. Rauch, S. Ricciarini, K. Sakai, T. Sakamoto, M. Sasaki, Y. Shimizu, A. Shiomi, R. Sparvoli, P. Spillantini, F. Stolzi, I. Takahashi, M. Takayanagi, M. Takita, T. Tamura, N. Tateyama, T. Terasawa, H. Tomida, S. Torii, Y. Tsunesada, Y. Uchihori, S. Ueno, E. Vannuccini, J. P. Wefel, K. Yamaoka, S. Yanagita, A. Yoshida, K. Yoshida, and T. Yuda, “CALET Upper Limits on X-Ray and Gamma-Ray Counterparts of GW151226”, *The Astrophysical Journal Letters*, 829巻, 1号, L20, 1–5 ページ, 2016.
10. Y. Asaoka, Y. Akaike, Y. Komiya, R. Miyata, S. Torii, O. Adriani, K. Asano, M. G. Bagliesi, G. Bigongiari, W. R. Binns, S. Bonechi, M. Bongi, P. Brogi, J. H. Buckley, N. Cannady, G. Castellini, C. Checchia, M. L. Cherry, G. Collazuol, V. Di Felice, K. Ebisawa, H. Fuke, T. G. Guzik, T. Hams, M. Hareyama, N. Hasebe, K. Hibino, M. Ichimura, K. Ioka, W. Ishizaki, M. H. Israel, A. Javaid, K. Kasahara, J. Kataoka, R. Kataoka, Y. Katayose, C. Kato, N. Kawanaka, Y. Kawakubo, H. Kitamura, H.

- S. Krawczynski, J. F. Krizmanic, S. Kuramata, T. Lomtadze, P. Maestro, P. S. Marrocchesi, A. M. Messineo, J. W. Mitchell, S. Miyake, K. Mizutani, A. A. Moiseev, K. Mori, M. Mori, N. Mori, H. M. Motz, K. Munakata, H. Murakami, Y. E. Nakagawa, S. Nakahira, J. Nishimura, S. Okuno, J. F. Ormes, S. Ozawa, L. Pacini, F. Palma, P. Papini, A. V. Penacchioni, B. F. Rauch, S. Ricciarini, K. Sakai, T. Sakamoto, M. Sasaki, Y. Shimizu, A. Shiomi, R. Sparvoli, P. Spillantini, F. Stolzi, I. Takahashi, M. Takayanagi, M. Takita, T. Tamura, N. Tateyama, T. Terasawa, H. Tomida, Y. Tsunesada, Y. Uchihori, S. Ueno, E. Vannuccini, J. P. Wefel, K. Yamaoka, S. Yanagita, A. Yoshida, K. Yoshida, and T. Yuda. , “Energy calibration of CALET onboard the International Space Station”, *Astroparticle Physics*, 91巻 , 1 -10ページ , 2017
11. B. P. Abbott, R. Abbott, T. D. Abbott, F. Acernese, K. Ackley, C. Adams, T. Adams, P. Addesso, R. X. Adhikari, V. B. Adya, (中略) , Y. Kawakubo et al. , “Multi-messenger Observations of a Binary Neutron Star Merger”, *The Astrophysical Journal Letters*, 848巻 , L12, 1 -59ページ , 2017 (著者多数のため一部省略)
 12. O. Adriani, Y. Akaike, K. Asano, Y. Asaoka, M. G. Bagliesi, G. Bigongiari, W. R. Binns, S. Bonechi, M. Bongi, P. Brogi, J. H. Buckley, N. Cannady, G. Castellini, C. Checchia, M. L. Cherry, G. Collazuol, V. Di Felice, K. Ebisawa, H. Fuke, T. G. Guzik, T. Hams, M. Hareyama, N. Hasebe, K. Hibino, M. Ichimura, K. Ioka, W. Ishizaki, M. H. Israel, A. Javaid, K. Kasahara, J. Kataoka, R. Kataoka, Y. Katayose, C. Kato, N. Kawanaka, Y. Kawakubo, H. S. Krawczynski, J. F. Krizmanic, S. Kuramata, T. Lomtadze, P. Maestro, P. S. Marrocchesi, A. M. Messineo, J. W. Mitchell, S. Miyake, K. Mizutani, A. A. Moiseev, K. Mori, M. Mori, N. Mori, H. M. Motz, K. Munakata, H. Murakami, S. Nakahira, J. Nishimura, G. A. de Nolfo, S. Okuno, J. F. Ormes, S. Ozawa, L. Pacini, F. Palma, P. Papini, A. V. Penacchioni, B. F. Rauch, S. B. Ricciarini, K. Sakai, T. Sakamoto, M. Sasaki, Y. Shimizu, A. Shiomi, R. Sparvoli, P. Spillantini, F. Stolzi, I. Takahashi, M. Takayanagi, M. Takita, T. Tamura, N. Tateyama, T. Terasawa, H. Tomida, S. Torii, Y. Tsunesada, Y. Uchihori, S. Ueno, E. Vannuccini, J. P. Wefel, K. Yamaoka, S. Yanagita, A. Yoshida, K. Yoshida, and T. Yuda. , “Energy

Spectrum of Cosmic-ray Electron and Positron from 10 GeV to 3 TeV observed with the Calorimetric Electron Telescope on the International Space Station”, *Phys. Rev. Lett.*, 119巻, 18号, 181101–181106ページ, 2017

13. Y. Asaoka, S. Ozawa, S. Torii, O. Adriani, Y. Akaike, K. Asano, M. G. Bagliesi, G. Bigongiari, W. R. Binns, S. Bonechi, M. Bongi, P. Brogi, J. H. Buckley, N. Cannady, G. Castellini, C. Checchia, M. L. Cherry, G. Collazuol, V. Di Felice, K. Ebisawa, H. Fuke, T. G. Guzik, T. Hams, M. Hareyama, N. Hasebe, K. Hibino, M. Ichimura, K. Ioka, W. Ishizaki, M. H. Israel, A. Javaid, K. Kasahara, J. Kataoka, R. Kataoka, Y. Katayose, C. Kato, N. Kawanaka, Y. Kawakubo, H. S. Krawczynski, J. F. Krizmanic, S. Kuramata, T. Lomtadze, P. Maestro, P. S. Marrocchesi, A. M. Messineo, J. W. Mitchell, S. Miyake, K. Mizutani, A. A. Moiseev, K. Mori, M. Mori, N. Mori, H. M. Motz, K. Munakata, H. Murakami, S. Nakahira, J. Nishimura, G. A. de Nolfo, S. Okuno, J. F. Ormes, L. Pacini, F. Palma, P. Papini, A. V. Penacchioni, B. F. Rauch, S. B. Ricciarini, K. Sakai, T. Sakamoto, M. Sasaki, Y. Shimizu, A. Shiomi, R. Sparvoli, P. Spillantini, F. Stolzi, I. Takahashi, M. Takayanagi, M. Takita, T. Tamura, N. Tateyama, T. Terasawa, H. Tomida, Y. Tsunesada, Y. Uchihori, S. Ueno, E. Vannuccini, J. P. Wefel, K. Yamaoka, S. Yanagita, A. Yoshida, K. Yoshida, and T. Yuda, “On-orbit Operations and Offline Data Processing of CALET onboard the ISS. ”, *Astroparticle Physics*, 100巻, 29–37ページ, 2018

【国際会議議事録】

(査読の無いもの)

14. K. Yamaoka, A. Yoshida, T. Sakamoto, I. Takahashi, T. Hara, T. Yamamoto, Y. Kawakubo, R. Inoue, S. Terazawa, R. Fujioka, K. Senuma, S. Nakahira, H. Tomida, S. Ueno, S. Torii, M. L. Cherry, and S. Ricciarini, for the CALET collaboration, “CALET Gamma-ray Burst Monitor (CGBM)”, 33rd International Cosmic Ray Conference, 1007–1011ページ, 2013
15. K. Yamaoka, A. Yoshida, T. Sakamoto, I. Takahashi, T. Hara, T. Yamamoto, Y. Kawakubo, R. Inoue, S. Terazawa, R. Fujioka, K. Senuma, S. Nakahira, H. Tomida, S. Ueno, S. Torii, M. L. Cherry, S. Ricciarini, the CALET collaboration,

“The CALET Gamma-ray Burst Monitor (CGBM)”, 7 th Huntsville Gamma-Ray Burst Symposium, paper 41, 1 – 7 ページ, 2013

【その他】

16. The Gamma-ray Coordinates Network (<https://gcn.gsfc.nasa.gov>) への報告61件

(博士論文で解析した GRB 以外)

17. The Astronomer’s Telegram (<http://www.astronomerstelegam.org>) への報告148件

審 査 の 結 果 要 旨

本論文では国際宇宙ステーションに搭載された CALorimetric Electron Telescope (CALET) ガンマ線バーストモニター (CALET Gamma-ray Burst Monitor ; CGBM) の観測データを用いて、ガンマ線バースト (Gamma-Ray Burst ; GRB) の明るいプロンプト放射とは別起源と思われる過剰成分や、プロンプト放射の立ち上がり部分において急激なエネルギースペクトルの変化を発見したことを報告している。本論文において発見された、プロンプト放射の特徴は、現在でもまだ多くの未解明問題を抱える GRB の放射機構の解明に新たな見地を与えるものである。本論文の構成は以下の通りである。第1章と第2章では、これまでの GRB の観測と放射理論についてそれぞれ述べている。第3章で、本論文で用いた観測装置 CALET と Monitor of All-sky X-ray Image (MAXI) について述べており、第4章で、CGBM の検出器性能と軌道上での観測データやエネルギー応答関数の較正についてまとめている。第5章では CGBM が観測開始から2年間で観測した GRB の系統的な解析結果について述べている。第6章では、MAXI と CGBM で同時に検出し、熱的な放射が検出された GRB 160107A の解析結果について述べている。第7章では、明るいプロンプト放射とは異なる起源をもつと思われる過剰成分の探査結果、そして、第8章では、プロンプト放射初期のエネルギースペクトルの時間発展についてまとめている。第9章で得られた結果に対するまとめと今後の展望について述べている。以下、第1章から第8章の概要とともに、研究背景と目的、そして得られた結果について述べる。

第1章と第2章では、これまでの GRB の観測結果と放射の理論モデルを紹介して

いる。GRB は宇宙遠方で起こる明るい爆発現象で、激しい時間変動を示すプロンプト放射と呼ばれる X 線やガンマ線帯域の放射と、プロンプト放射の後に残光と呼ばれるガンマ線から電波までの広いエネルギー帯域での放射を持つ。GRB の継続時間の分布は 2 秒を境に二山を示しており、継続時間の短い GRB は中性子星同士または中性子星とブラックホールの衝突合体、一方、継続時間の長い GRB は大質量星の重力崩壊が起源であると考えられている。

プロンプト放射は 2 つの異なる冪指数の冪関数がなめらかにつながった関数でよく表される非熱的なエネルギースペクトルであることが知られている。この関数は冪関数の冪指数 α と β 、そして、典型的な放射光子のエネルギーである E_{peak} （または、冪指数が α から β に変わるエネルギー E_{break} ）で現される。また、非熱的な放射成分とは別に、熱的な成分や GeV ガンマ線まで伸びる新たな放射成分を持つ GRB も発見されている。

GRB の放射は中性子星合体や大質量星の重力崩壊によってブラックホールが誕生する瞬間に伴う光速に近い速度で運動する物質からの放射であると考えられている。中心エンジンによって解放された膨大なエネルギーによって、黒体放射温度 $\sim 1\text{MeV}$ 程度の火の玉が出来る。火の玉は自らの高い圧力によって、断熱的に加速膨張していく。火の玉の進化によって、物質の速度は光速近く（ローレンツ因子 100 以上）まで加速される。これを火の玉モデルと呼ぶ。加速された放出物質に速度の違いがあるとすると、放出された物質同士が衝突することで衝撃波が生じる。これを内部衝撃波と呼ぶ。一方、放出された物質と星間物質が衝突する際にも衝撃波が生じる。これを外部衝撃波と呼ぶ。GRB からの電磁波の放射は衝撃波によって加速された電子のシンクロトロン放射であると考えられており、プロンプト放射は内部衝撃波、残光は外部衝撃波に起因すると考えられている。そのため、シンクロトロン放射から予想される低エネルギー側のエネルギースペクトルの冪指数 α には $-3/2 \leq \alpha \leq -2/3$ という理論的な強い制約がある。また、火の玉モデルからは非熱的な放射とは別に光球面からの熱的な放射が予測されている。

第 3 章では、本論文で使用した CALET と MAXI の二つの観測装置について述べている。CALET は高エネルギー宇宙電子、ガンマ線の観測を目的とした観測装置であり、主検出器である CALorimetor と CGBM を搭載している。CALET は国際宇宙ステーションの日本実験棟きぼうの船外実験プラットフォームに搭載され、2015 年 10

月から観測を開始し、2年経過した現在も観測を続けている。本研究で主に用いた CGBM は Hard X-ray Monitor (HXM) と Soft Gamma-ray Monitor (SGM) の2種類のシンチレーション検出器から構成され、2種類の検出器を組み合わせることで、7 keV から20 MeV のエネルギー帯域の X 線、ガンマ線の観測を行う。CGBM の主な観測対象は GRB のプロンプト放射であり、GRB 観測装置としての CGBM の長所は広いエネルギー帯域と、後述する MAXI との連携観測である。

MAXI は CGBM と同じ国際宇宙ステーションのきぼう船外実験プラットフォームに搭載された観測装置であり、X 線による全天観測を行っている。MAXI には12台の比例計数管を搭載したガススリットカメラと X 線 CCD を搭載した X 線 CCD スリットカメラが搭載されている。本研究に用いたガススリットカメラは2 keV から30 keV の X 線に感度を持っている。ガススリットカメラの比例計数管は到来 X 線に対して、1次元方向の位置決定を行うことができ、さらに、検出器上面に取り付けられた、コリメータによって視野を制限することで、もう一方向の位置決定を可能としている。

第4章では CGBM のデータ解析を行う上で欠かせない、検出器の性能、軌道上でのデータ較正、そしてエネルギー応答関数について述べている。2014年1月に行われた CGBM の地上較正試験において、HXM の低エネルギー X 線に対する感度が低下していることが判明した。この原因は明らかではないが、X 線感度の低下を HXM の結晶である $\text{LaBr}_3(\text{Ce})$ の表面が劣化し、不感層が出来ていると仮定し、モデル化しエネルギー応答関数に反映させた。また、同地上試験では、HXM 表面の位置依存性を調べるために、コリメートされた6.4 keV と14.9 keV の X 線、511 keV のガンマ線を用いた2次元スキャンを行った。これら3つの入射エネルギーによる HXM 表面位置による検出効率、ゲイン、そして、エネルギー分解能の2次元分布がエネルギー応答関数に取り込まれた。CGBM のエネルギー応答関数は CAD データをベースに CALET 全体を取り込んだモンテカルロシミュレータを元に作られている。また、本論文で使用した CGBM 軌道上で取得した実際のデータを用いたデータのエネルギー較正方法がまとめられている。

現時点でのエネルギー応答関数の較正については、Swift 衛星の BAT 検出器と同時に観測された3つの GRB 161218A、GRB 170330A と GRB 170906A のデータを用いて行った結果が付録 A にある。その結果、HXM においては100 keV 以上において、

BAT のデータと比較して系統的な正の残差が現れる事が分かった。また、応答関数による有効面積の不定性は HXM においては10-20% 程度、SGM においては、20-30% 程度という評価である。

第5章では2015年10月から2017年9月の観測開始からの二年間の間に CGBM で観測された GRB の系統的な解析結果について述べている。CGBM は観測開始からの2年間のうちに74個の GRB の検出に成功した。74個のうち、継続時間の長い GRB は63個であり、継続時間の短い GRB は11個であった。CGBM の継続時間の長い GRB の継続時間の分布は他の観測装置によって得られた継続時間分布に比べて短い側に分布していることを示している。これは、CGBM の観測データに現れる検出器固有の効果が見えているとすると説明可能であり、本質的に継続時間が短い GRB を選択的に観測しているのではないと考えられる。

続いて、74個の GRB のうち、49個の GRB の時間平均エネルギースペクトルの解析を行い、スペクトルパラメータの分布を調べた。その結果、CGBM で観測された GRB のスペクトルパラメータの分布は、他の GRB 観測装置である CGRO 衛星の BATSE 検出器、Fermi 衛星の GBM 検出器、Swift 衛星の BAT 検出器で得られた分布と矛盾していないことを示している。また、CGBM では E_{peak} が100 keV 以下となるような軟らかなスペクトルを持つ GRB が観測されていないことも述べており、その原因として E_{peak} の小さい GRB は本質的に暗いため、CGBM の検出感度では検出自体が難しいと考察している。

第6章では MAXI と CGBM によって観測された GRB 160107A の解析結果を述べている。GRB 160107A は CGBM がこの GRB を検出した時刻の約45秒前に MAXI の GSC 検出器によっても放射が検出された。MAXI が検出した放射は CGBM が検出したプロンプト放射に先行する弱い放射であり、MAXI と CGBM のデータを用いたエネルギースペクトル解析を行った結果、CGBM が検出したプロンプト放射は非熱的なスペクトルを持っていたのに対し、MAXI が検出した弱い放射は非熱的な幂関数に加えて黒体放射成分を含むことを示している。この黒体放射成分の起源として、火の玉の光球面放射が観測された可能性を議論し、典型的な距離を仮定すると光球面放射の半径は $\sim 10^{13}$ cm 程度となると見積り、理論の標準的な予想と同程度となると結論付けている。

第7章では GRB 160107A で検出されたような、プロンプト放射の前の過剰成分が他の GRB でも見られないか探査している。明るい6個の GRB について、プロンプト放射の光度曲線に対し、標準的なパルスの形状を仮定し、データに対してフィッティングを行い、フィッティングの残差を見ることでこの過剰成分の有無を調べた。その結果、4個の GRB で明るいプロンプト放射前に過剰な成分を発見したと報告している。また、その過剰成分は非常に弱く、継続時間も明るいプロンプト放射の2～3倍長く続くものである事を明らかにした。この過剰成分の起源は明らかではないが、本章で検出された過剰成分のスペクトルは比較的軟かく、前章で述べた GRB 160107A で検出された過剰成分との類似性を確認している。そのため、本研究で発見された過剰成分はどの GRB にも共通に存在する放射成分ではないかと述べている。

第8章では GRB のプロンプト放射初期のエネルギースペクトルの時間発展を60–100 keV と7–50 keV の帯域でのカウント数の比と100–300 keV と60–100 keV の帯域でのカウント数の比（以後 color-color diagram と呼ぶ）を用いて、CGBM データの最小の時間分解能である0.125秒ごと細かく調べた結果が述べられている。color-color diagram 上のデータ点と典型的な GRB のエネルギースペクトルの関数形を仮定し、GRB の放射スペクトルのパラメータを結びつけることで、プロンプト放射の立ち上がり部において、 E_{break} が増加する傾向と、その後、急激にエネルギースペクトルの低エネルギー側の冪指数 α が増加する傾向を発見した。各時間帯のスペクトルパラメータを導出する際に各エネルギースペクトルをフィッティングするのではなく color-color diagram を用いる手法を GRB 研究に適用した点は新しい。このプロンプト放射の立ち上がり部分で起こっている急激なエネルギースペクトルの変化は、プロンプト放射のピーク部分と減衰時間帯部分で一般的に知られている現象である「スペクトル・ラグ」（エネルギーの低い光子がエネルギーの高い光子に対して遅れる現象）と観測的に類似していると考え、このスペクトル・ラグの理論モデルで、プロンプト放射の立ち上がり部分でみられた急激なエネルギースペクトルの変化を説明できるか議論している。その結果、この理論モデルで観測されたエネルギースペクトルの時間変化を説明することは難しく、新たな放射機構が必要であると結論付けている。

これらの研究成果は川久保氏を筆頭著者とする原著論文2編として、Hindawi 社のオープンアクセス誌である *Advances in Astronomy* 誌、日本天文学会が発行する

Publications of the Astronomical Society of Japan 誌に公表されている。また、4 件の国際会議と 6 件の国内での学会や研究会でも川久保氏が筆頭著者として発表している。

以上のように、本論文では新たな観測装置のデータを駆使し、まだ未解明な問題を多く抱える GRB のプロンプト放射の放射初期の過剰成分や放射初期の時間発展とそのエネルギースペクトルの変化に着目し、プロンプト放射とは異なる起源を持つと考えられる放射成分の存在と、急激なエネルギースペクトルの変化を発見した。また、本論文で用いた解析手法は今後、プロンプト放射のエネルギースペクトルの変化を研究する上で広く使われる可能性がある。さらに、本論文での結果は、これまでの標準的なシナリオでは説明が難しく、モデルの再考を迫るものである。そのため、本論文での成果は GRB の放射機構の研究に対して大きな寄与をあたえるものである。以上ことから、本委員会は審査論文が博士（理学）の学位論文として十分相当なものであると認定し、学位申請者が博士（理学）の学位を受けるのに十分な資格を有するものと認める。