

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 6 月 7 日現在

機関番号：13301

研究種目：基盤研究(A) (一般)

研究期間：2013～2016

課題番号：25247038

研究課題名(和文) 135億光年彼方からのガンマ線バーストを捉えるX線撮像検出器の開発

研究課題名(英文) Development of X-ray imaging detector for gamma-ray bursts over 13.5 billion light years

研究代表者

米徳 大輔 (Yonetoku, Daisuke)

金沢大学・数物科学系・教授

研究者番号：40345608

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 28,300,000円

研究成果の概要(和文)：宇宙最大の爆発現象であるガンマ線バーストを利用して初期宇宙を探索することを目的とした、人工衛星搭載用の広視野X線撮像検出器のプロトタイプモデルを開発した。世界最高レベルの高利得・低雑音のアナログ集積回路を開発し、約1キロ電子ボルトからのX線読み出しを可能とするシステムを完成することができた。使用している回路部品等は、全て放射線耐性試験を実施したもので、衛星軌道上で10年程度は生存することを確認しているため、本研究成果により迅速にフライトモデルを開発することが可能となった。

研究成果の概要(英文)：We developed a wide field X-ray imaging detector aboard satellite to probe the early universe with gamma-ray burst phenomena known as the biggest explosion in the universe. We developed the world's highest level of "high-gain and low-noise" analog ASIC (application specific integrated circuit), and we demonstrated readout for X-ray signal above 1 keV. We performed radiation tolerant tests for all peripheral electric parts, and confirmed their tolerances are more than 10 years in satellite orbit. According to these results, we will quickly develop the flight hardware in near future.

研究分野：宇宙物理学

キーワード：ガンマ線バースト 人工衛星 初期宇宙 X線 検出器開発

様式 C-19、F-19-1、Z-19、CK-19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

これまでの天文学で、赤方偏移 $z=7$ 頃までの宇宙の姿が深く理解されるようになってきた。しかしながら、この宇宙の運命を決定したとも言える、初代星の形成や宇宙再電離、宇宙で最初の重元素合成を理解するためには、より遠方の初期宇宙を観測することが重要となる。遠方銀河は矮小で光度は暗いことから、鮮明な物理情報を取得するためには潜在的な困難を抱えている。

そこで、宇宙最大の爆発現象であるガンマ線バースト(GRB)を明るい光源として利用し、初期宇宙観測のフロンティアを開拓する人工衛星計画「HiZ-GUNDAM」を立案している(図1参照)。初代星は大質量星であると考えられているため、GRBを発生させる可能性が高く、従来の銀河観測と比較して圧倒的に統計精度の高い観測が可能となる。HiZ-GUNDAM衛星には、

[1] 広視野 X線撮像検出器

[2] 可視光・近赤外線望遠鏡

の2台の観測装置を搭載し、X線撮像検出器で発見したGRBに対して、自律制御で衛星姿勢を変更し、望遠鏡で迅速な追観測を行う。多色測光観測により遠方のGRBを発見した場合は、大型地上望遠鏡で分光観測を実施する。このような人工衛星と地上望遠鏡の有機的なネットワーク環境を構築できれば、GRBを用いた初期宇宙探査が可能となり、飛躍的に初期宇宙に対する理解が深まると期待できる。

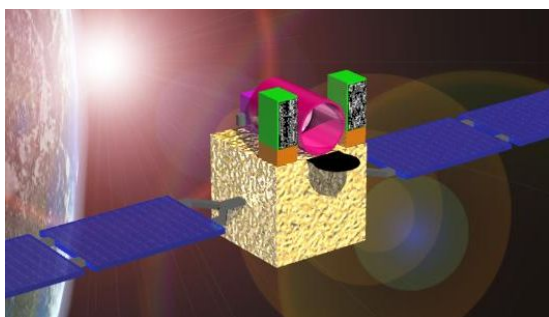


図1. HiZ-GUNDAM衛星の概念図

2. 研究の目的

強い赤方偏移の効果を受けたガンマ線バーストは、10キロ電子ボルト(keV)程度のエネルギー帯で輝くと考えられる。そのため、従来の観測装置よりも1桁程度エネルギーの低い、1キロ電子ボルトからの観測が可能な広視野 X線撮像検出器の開発が重要となる。そこで、本研究では、初期宇宙で発生するGRBを検出するために、1 keV程度からの読み出しが可能で、かつ1ステラジアン以上の広視野を同時にモニターできる X線撮像検出器のプロトタイプモデルを開発する。最終的には1,000 cm²の有効面積を要するが、本研究の枠組みでは、その1/20程度の小型ユニットを完成させる。

宇宙空間は放射線量が膨大であることから、回路部品には高い放射線耐性が要求される。本研究で使用する回路に対しては、粒子線・ガンマ線照射試験を行い、衛星軌道上で10年程度は動作可能な放射線耐性を有するもののみを使用することを目標とする(ただし、高集積部品は放射線耐性の高い部品のピン互換品を使用する)。これにより、衛星搭載可能なレベルのプロトタイプモデルを完成させ、HiZ-GUNDAM衛星のフライトモデルを迅速に開発できる技術基盤を形成することを目標とする。

3. 研究の方法

本研究では、符号化マスクを用いた広視野 X線撮像検出器システムを構成する。低エネルギーの X線を符号化マスクで容易に遮蔽できることと、空間分解能(角度分解能)に優れた撮像システムを構築できるためである。これにより、強い赤方偏移を受けたGRBの発生方向を詳細に決定することが可能となる。本研究では、以下の3つの要素について重点的に開発を行う。

(1) シリコン半導体検出器

300 μmの電極ピッチを持つ1次元シリコンストリップ検出器を開発する。検出器の主要な雑音は、逆バイアスを印加した際のリーク電流と静電容量となる。検出器のストリップ長や電極幅を最適化することで、本科学目的に適合したシリコン半導体検出器を開発する。

(2) 高利得・低雑音のアナログ集積回路

多チャンネルの読み出しを実現するためには、アナログ集積回路の技術が必須となる。かつ、低エネルギーの X線読み出しを実現するためには、世界最高レベルの「高利得・低雑音」な集積回路を開発しなくてはならない。過去の開発リソースを十分に利用し、初段アンプおよび波形整形回路などの回路パラメータを最適化することで、(1)で開発するシリコン半導体検出器と組み合わせられた状態で、約1 keVからの読み出しを実現する。

(3) デジタル回路基板

集積回路から出力される多チャンネルのデジタル信号を処理し、時系列データ・エネルギースペクトル・撮像を同時に実現できるデジタル回路系を開発する。アナログ集積回路はFPGAで駆動し、かつ、データのヒストグラム化を行う。それらのデータに対するGRBの判定や衛星バーストのコマンド・テレメトリのやりとりはCPUに実装する。ここで使用する回路部品は放射線耐性試験を実施し、衛星軌道上で10年以上の動作が可能なもののみで構成する。

4. 研究成果

(1) シリコン半導体検出器

浜松ホトニクス社の協力の下、シリコンストリップ検出器を試作した。ストリップ長は 16mm または 32mm の 2 種類、電極幅は 50 μm から 280 μm の間で 8 種類を試作した。これらの電極パラメータの違いにより、リーク電流特性と静電容量特性を測定した。

リーク電流特性

試作モデルに対するリーク電流測定を行った結果、電極幅が狭いモデルほどリーク電流が大きくなる傾向が見出された。また、降伏電圧も低くなる傾向も観測された。

静電容量特性

静電容量には、半導体内部に空乏層が成長することによる成分と、隣接したストリップ間で構成される成分の 2 種類が存在し、本検出器では後者が支配的である。全モデルに対する測定の結果、電極幅はできるだけ狭い方が静電容量が小さくなり、検出器の雑音レベルが低いことが判明した。

以上の測定結果から、ストリップ長は 16mm のものを選定し、かつ長期安定性を考慮した結果、電極幅を 150 μm とすることが最適であるとの結論に至った。

(2) 高利得・低雑音のアナログ集積回路

本検出器の読み出しに利用するためのアナログ集積回路の開発を行った。宇宙科学研究所の池田博一教授の設計を基本とし、本検出器に適合するように設計を修正した。特に初段アンプの増幅率を飛躍的に高めたことと、低雑音化を目的として波形整形アンプの時定数最適化を重点的に行なった。

開発した集積回路の写真を図 2 に示す。サイズは 8mm \times 9mm 程度で、同時に 64 チャンネルのセンサー入力に対応できる仕様である。検出器からの電荷信号でトリガーが生成されると、後段の FPGA でデジタル的に駆動し、10 ビットの波高値を取得することができる。

検出器と接続した状態で、-20 環境下で X 線測定を実施したところ、電気雑音と完全に分離できるエネルギーが 2keV であり、実効的な観測では約 1keV からの読み出しが可能であることを確認した。

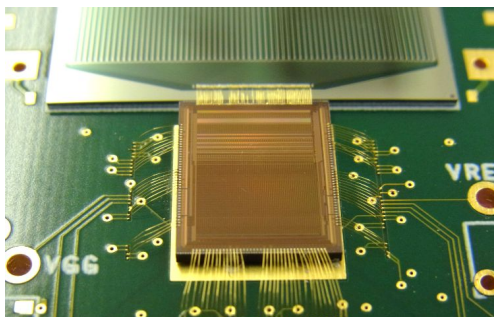


図 2. 開発したアナログ集積回路とセンサーを接続したもの

(3) デジタル回路基板

アナログ集積回路の駆動と衛星バスとのコマンド・テレメトリ送信を担うデジタル回路基板を開発した。本検出器は 1 次元ストリップ検出器であることから、直交する 2 台の検出器を組み合わせて 2 次元画像を取得する。各センサー基板には 8 個のアナログ集積回路が実装されており、1 つの FPGA で 8 個の集積回路を並列処理することが可能である。また、CPU は 8051 コアを FPGA に焼き込んだものを使用している。

FPGA は集積回路の駆動のほか、データのヒストグラム化を行い、圧縮したデータを CPU へ受け渡す。CPU はそのデータから GRB の判定を行い、衛星バスへデータを送信する。また、CPU は温度・電流・電圧等の状態監視も担う設計である。

以上のような機能を実装したデジタル回路基板にセンサー基板を接続したもの（プロトタイプモデルの完成形）を図 3 に示す。全体の大きさは 30cm \times 15cm で、検出器の有効面積は 50cm² となっている。



図 3. 開発したデジタル回路基板にセンサー基板を接続した状態

ここで使用した回路部品のほとんどは、自動車や家電等で利用される信頼性の高い民生部品ではあるが、放射線耐性については全く評価されていないものである。そこで、若狭湾エネルギー研究センターの加速器を利用して放射線耐性試験（プロトン照射試験）を実施した。製造ロットが同一の回路部品を購入し、プロトン照射量ごとに特性の変化をモニターした。複数回の大規模な実験を行い、図 3 の検出器で使用しているすべての回路部品は、衛星軌道上で 10 年は動作が可能なもののみで構成している。

符号化マスクを検出器前面に配置し、Co-57(14.4 keV)の X 線を用いた撮像実験の結果を図 4 に示す。十字の点の中心に放射線源が存在することを撮像することに成功している。また、様々な角度からの X 線入射に対して、撮像検出器の応答が設計通りであることを確認している。

以上の成果により、目標としていた検出器のプロトタイプモデルが完成したと判断している。本検出器は、放射線耐性の高い回路部品のみを使用しているため、フライトモデルの開発に迅速に移行できるレベルに到達できたと言える。

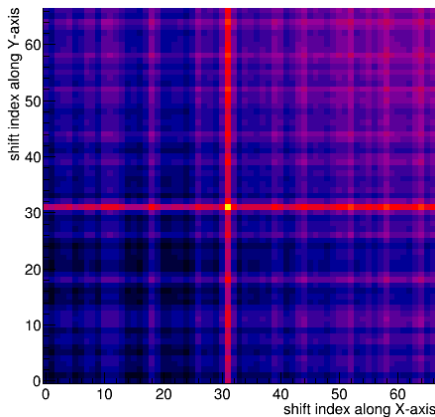


図 4. X線撮像実験で得られた画像の例

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 8 件)

Yoshida, K., Yonetoku, D., Sawano, T.,
他 9 名

Development of wide-field low-energy
X-ray imaging detectors for
HiZ-GUNDAM
The International Society for Optical
Engineering (SPIE), 9905, id 99050M, 11
pp. (2016)

Doi: 10.1117/12.2231370

Sawano, T., Yonetoku, D., Mihara, T.,
他 11 名
Transient X-ray Sky Monitor Aboard a
Micro Satellite for Gravitational Wave
Astronomy
UNISEC Space Takumi Journal. (2016)
(online)

Kagawa, Y., Yonetoku, D., Sawano, T.,
他 7 名
X-raying extended emission and rapid
decay of short gamma-ray bursts
Astrophysical Journal, 811, 8 (2015)
Doi: 10.1088/0004-637X/811/1/4

Yonetoku, D., Mihara, T., Sawano, T.,
他 27 名
and HiZ-GUNDAM working group

High-z gamma-ray bursts for unraveling
the dark ages mission HiZ-GUNDAM
The International Society for Optical
Engineering (SPIE), Volume 9144, id.
91442S, 12 (2014)

Doi: 10.1117/12.2055041

Yonetoku, D., Nakamura, T., Sawano,
T., Takahashi, Toyanago, A.

Short Gamma Ray Burst Formation Rate
from BATSE data using E_p - L_p correlation
and the minimum gravitational wave
event rate of coalescing compact binary
Astrophysical Journal, 789, 65 (2014)

Doi: 10.1088/0004-637X/789/1/65

Yonetoku, D., Sawano, T., Takata, S.,
Yoshida, K., Seta, H., Toyanago, A.,
Wakashima, Y., Yonemochi, H., Ikeda, H.
Establish of Gravitational Wave
Astronomy with Gamma-Ray Burst and
X-ray Transient Monitor
UNISEC Space Takumi Journal, Vol.5,
No.2, 19 (2014) (online)

三原建弘、村上敏夫、米徳大輔、
郡司修一
IKAROS の科学観測機器：ガンマ線パース
ト偏光検出器
日本航空宇宙学会誌 2013 年 第 61 巻 第 9
号 301 - 308 特集 小型ソーラー電力セ
イル実証機「IKAROS (イカロス) 第 10 回」
2013 年 9 月

Tsutsui, R., Yonetoku, D.,
Nakamura, T., Takahashi, K,
Moriyama, Y.
Possible existence of the E_p - L_p and
 E_p - E_{iso} correlations for short gamma-ray

bursts with a factor 5-100 dimmer than those for long gamma-ray bursts
Monthly Notices of the Royal
Astronomical Society, 431, 1398 (2013)
Doi: 10.1093/mnras/stt262

〔学会発表〕（計 11 件）

米徳大輔 (招待講演)

高密度連星系の合体と短時間ガンマ線バースト
Coalescence of Compact Star Binary
Objects and Short Gamma-Ray Bursts
日本物理学会秋季大会 2016/09/21 – 24
（宮崎大学）

米徳大輔

ガンマ線バーストを用いた初期宇宙探査計画
HiZ-GUNDAM の進捗 (5)
日本天文学会秋季年会 2016/09/14 – 16
（愛媛大学）

米徳大輔

ガンマ線バースト観測衛星 HiZ-GUNDAM
と TAO 望遠鏡の連携による初期宇宙探査
日本天文学会春季年会 2016/03/14 – 17
（首都大学東京）

米徳大輔

初期宇宙探査 HiZ-GUNDAM 搭載へ向け
た X 線撮像検出器の開発
日本天文学会秋季年会 2015/09/09 – 11
（甲南大学）

米徳大輔

ガンマ線バーストを用いた初期宇宙探査計画
HiZ-GUNDAM の進捗 (4)
日本天文学会春季年会 2015/03/18 – 21
（大阪大学）

米徳大輔

ガンマ線バーストを用いた初期宇宙探査計画
HiZ-GUNDAM の進捗状況
日本物理学会秋季大会 2014/09/18 – 21
（佐賀大学）

Yonetoku, D. (Invited)

Study of prompt emission mechanism by
gamma-ray polarization with IKAROS-GAP

X-ray polarization in astrophysics – a window
about to open? Stockholm, Sweden, 25-28,
Aug., 2014

米徳大輔

ガンマ線バーストを用いた初期宇宙探査計画
HiZ-GUNDAM の進捗 状況 (High-z
Gamma-ray bursts for Unraveling the
Dark Ages Mission)
日本天文学会秋季年会 2014/03/19 - 22
（国際基督教大学）

Yonetoku, D. (Invited)

Study of prompt emission mechanism by
gamma-ray polarization with IKAROS-GAP
SN & GRB Conference, Kyoto, Japan, 11-15,
Nov., 2013

米徳大輔

ガンマ線バーストを用いた初期宇宙探査計画
HiZ-GUNDAM の進捗状況 (High-z
Gamma-ray bursts for Unraveling the
Dark Ages Mission)
日本物理学会秋季大会 2013/09/20 – 23
（高知大学）

米徳大輔

ガンマ線バーストを用いた初期宇宙探査
計画 HiZ-GUNDAM の進捗 (2)
日本天文学会春季年会 2013/09/10 – 12
（東北大学）

〔図書〕（計 3 件）

米徳大輔

ガンマ線偏光観測の実現とガンマ線バースト
放射メカニズムの研究
宇宙科学研究所 ISAS ニュース
2016 年 3 月号 24 (19 – 20)

米徳大輔(訳) Bertram Schwarzschild, 著

超大光度ガンマ線バーストに迫る
パリティ 2015 年 5 月号 76 (38 – 41)

米徳大輔(訳)、David J. Thompson, Seth

W. Digel, Judith L. Racusin 著

フェルミガンマ線宇宙望遠鏡で探る極限宇宙

パリティ 2013年9月号 72(4-13)

出願状況(計1件)

名称：空間放射線検出装置

発明者：**米徳 大輔**、若島 雄大、米持 元、
根本 龍男、久保 信、山口 明則、松浦 貢
権利者：クリアパルス株式会社

種類：国際特許分類

番号：特願 2013-077555

出願年月日：2013/04/13

国内外の別：国内

取得状況(計0件)

[その他]

ホームページ等

<http://astro.s.kanazawa-u.ac.jp/~yonetoku/>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

米徳 大輔 (YONETOKU, Daisuke)

金沢大学・理工研究域数物科学系・教授

研究者番号：40345608