

## 最遠方 GRB 観測を目指した X 線撮像検出器の開発

吉田 和輝 (金沢大学大学院 自然科学研究科)

### Abstract

ガンマ線バースト (Gamma-Ray Burst : GRB) は  $10^{52}$  erg ものエネルギーをガンマ線放射として解放する宇宙最大の爆発現象である。短時間ではあるが極めて明るく輝き、その多くは赤方偏移  $z > 1$  で発生していることから、初期宇宙を探るための光源として利用されてきている。これまでに分光観測されている GRB の多くは  $z < 7$  の頃までのものであるが、宇宙再電離や重元素合成など宇宙が劇的に変化したのはそれ以前のことである。そこで我々は、 $z > 7$  の GRB を観測することでその当時の宇宙の物理状態を探ることを目的とした小型科学衛星 HiZ-GUNDAM を計画している。

金沢大学では、強く赤方偏移をして数 keV の X 線帯で輝く GRB を検出し、その到来方向を決定するための広視野 X 線撮像検出器を開発している。目標として 1~20 keV で輝く GRB を検出するため、検出器には 1 次元ストリップ型の電極を 64 本配置したシリコン半導体検出器 (SSD) とその読み出しに特化した集積回路 (ASIC) を用いる。SSD は電極の長さや幅が違う 6 種類のものを開発した。ASIC は池田研・高橋研 (ISAS/JAXA) で開発されてきた KW04F64 を雛型に増幅率を大きくし、低エネルギー X 線の読み出しに特化した設計となっている。

## 1 研究背景

### 1.1 ガンマ線バースト

ガンマ線バースト (Gamma-Ray Burst : GRB) は  $10^{52}$  erg ものエネルギーをガンマ線放射として解放する宇宙最大の爆発現象である。数秒から数十秒の短時間だけガンマ線で輝き、その後、時間とともに暗くなる残光を伴う現象である。短時間ではあるが極めて明るく輝くことと、その多くが赤方偏移  $z > 1$  で発生していることから、初期宇宙を探るプローブとして利用されてきている。これまでに分光観測された最高赤方偏移は GRB090423 の  $z = 8.26$  で [1]、今後もより遠方の GRB が観測されると期待できる。

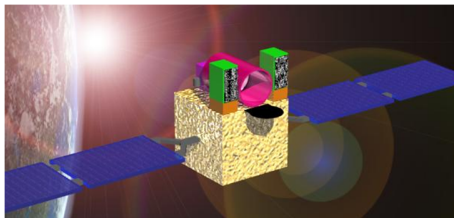


図 1: HiZ-GUNDAM 構想図

### 1.2 初期宇宙探査計画 HiZ-GUNDAM

赤方偏移  $7 < z < 20$  の 6 億年というわずかな期間で第一世代星の誕生や宇宙の再電離、重元素合成など宇宙は劇的に変化した。この頃の物理状態を探索することは、現代宇宙論にとって最も重要な研究対象となっている。しかし、これまでの GRB 観測では  $z = 8.26$  で発生した GRB090423 を観測してはいるものの、宇宙の物理状態については何一つ情報を得られていない。 $z > 7$  を探求するためには、強く赤方偏移を受けた GRB に対する高分散可視光・近赤外線スペクトルを取得する必要がある。

以上のことから、高赤方偏移 GRB を検出するため 10 keV 以下に感度を有する X 線撮像検出器と、可視光・近赤外線望遠鏡を同時に搭載した小型科学衛星 HiZ-GUNDAM (High-z Gamma-ray bursts for UNraveling the Dark Ages Mission) が計画されている [2]。本ミッションは GRB を検出した直後から可視光・近赤外線望遠鏡で追観測を行い、非常に遠方の GRB をいち早く特定することを目標としている。

金沢大学ではこの HiZ-GUNDAM に搭載するための広視野 X 線撮像検出器の開発を行っている。

## 2 広視野 X 線撮像検出器

X 線撮像検出器はコーデッドマスク、半導体検出器、信号読み出し集積回路で構成されている。表 1 に検出器の仕様の目標値を示した。

表 1: X 線撮像検出器仕様

エネルギー帯域	1 ~ 20 keV
方向決定精度	5 分角程度 (光子統計の重みづけ)
視野	約 1 ステラジアン

### 2.1 コーデッドマスクによる方向決定原理

発生方向の特定には 1 次元のコーデッドマスクとストリップ型半導体検出器を用いる。マスクは X 線を通さない材質でできており、半導体検出器のストリップピッチと同等または整数倍で穴が開けられている。ストリップ型半導体検出器は電極がストリップ上に分かれており、位置分解能を持つ。図 2 のように GRB から放射された X 線がマスクを通過することにより、マスクの開口パターンが X 線の強度分布として半導体検出器に写しだされる。発生方向によって強度分布が変わるため、マスクパターンと検出された X 線強度分布の相互相関を取ることで、GRB の発生方向を決定する。現在、タングステン素材で厚さが 50  $\mu\text{m}$  の 1 次元コーデッドマスクを製作中である。開口率は 52 % で、ストリップピッチは 300  $\mu\text{m}$  となっている。今後、最終的な半導体検出器の幾何学形状に合わせ、開口率やパターンの最適化を行っていく必要がある。

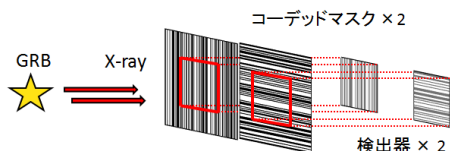


図 2: 2 次元撮像検出器の模式図。1 次元のマスクと検出器を直交に配置することによって構成する。

### 2.2 シリコン半導体検出器

1 ~ 20 keV の X 線で輝く GRB を検出するため、検出器には 20 keV 以下に感度を持つシリコン半導体を用いる。我々は、ストリップ型の電極を 300  $\mu\text{m}$  ピッチで 64 本配置したシリコン半導体検出器 (SSD: Silicon Strip Detectors) を開発した。厚さは 500  $\mu\text{m}$  (10 keV の X 線光子に対する光電吸収確率は 98 %) で図 3(左) の上段 3 素子はストリップの長さが 32 mm (SSD-L)、下段の 3 素子は 16 mm (SSD-S) となっている。電極の幅は 100  $\mu\text{m}$ 、200  $\mu\text{m}$ 、280  $\mu\text{m}$  のものがあり、合計 6 種類である。図 3(右) の拡大図を見ると、次の節で説明する集積回路を直接繋げて信号を読み出すため、91.2  $\mu\text{m}$  のピッチでボンディングパッドが配置された構造 (fan-out 構造) を設けている。また、端の電極と高圧面を流れるリーク電流を抑えるため、64 本の電極の周りにガードリングを設置している。6 種類それぞれの素子性能を調べるため、リーク電流と静電容量の測定を行った。

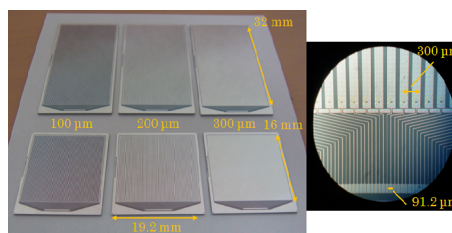


図 3: (左) 開発した 6 種類のシリコン半導体検出器 (右) fan-out 構造部分の拡大図

まず、0 下で半導体検出器に 300V まで逆バイアスを与えていき、リーク電流の測定を行った。表 2 には 200V 時の値を示した。測定の結果、電極幅が 100  $\mu\text{m}$  の 2 つの素子は 200  $\mu\text{m}$  と 280  $\mu\text{m}$  の他の素子に比べて降伏現象が起きやすいことが分かった。この理由は同じバイアス値でも電極の幅が狭いと、そこにかかる電場が強くなり、結果的に低いバイアス値で降伏現象が起きるためである。

次に静電容量の測定を行った。SSD には 2 つの容量があり、陽極と陰極の電極間に生じる容量 (body capacitance) と、ストリップ構造の電極間に生じる容量 (inter-strip capacitance) がある。どの素子も ~

表 2: SSD の各測定値

	SSD-S(16 m)			SSD-L(32 m)		
	100 $\mu\text{m}$	200 $\mu\text{m}$	280 $\mu\text{m}$	100 $\mu\text{m}$	200 $\mu\text{m}$	280 $\mu\text{m}$
Leakage current (pA) @0 deg,200 V	-	35.5	35.2	-	70.9	86.1
Reverse bias at full depletion (V)	94.0	76.2	73.2	103.4	83.9	83.3
Body capacitance (pF/strip)	1.10	1.16	1.15	1.96	2.20	2.27
Inter-strip capacitance (pF/strip)	2.5	3.7	5.6	4.4	6.8	10.0

100V 程度で完全空乏層化し、1 ストリップあたりの静電容量が一番大きいもので  $\sim 10\text{pF}$  であった。

今後は、次節で述べる SSD を読み出す集積回路 (ASIC) と一体のシステムで性能評価を行っていき、6 種類の SSD の内、ASIC の性能に最適な形状の素子の評価していく。

### 2.3 信号読み出し集積回路 (ALEX-01)

我々は、SSD からの信号を読み出すための集積回路 ALEX-01(ASICs for Low Energy X-ray ver. 01) を開発した。ALEX-01 は池田研・高橋研 (ISAS/JAXA) で開発されてきたモデル [3] を雛型に 1-20keV の X 線からの微小な電荷信号を読み出すための設計となっている。この ALEX-01 は現存する ASIC の中でも非常に高い信号増幅率を持っている。図 4 は IC パッケージに実装してある ALEX-01 の写真である。ALEX-01 は試作機であるため、40 チャンネルだけパッケージに接続し、残りの 24 チャンネルは仕様していない。

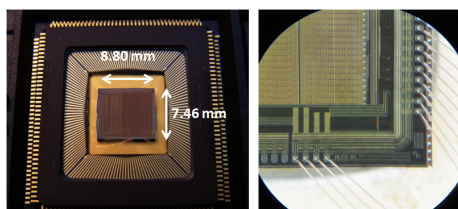


図 4: (左)IC パッケージに実装された ALEX-01 (右)ALEX-01 の拡大図。SSD とボンディングで接続するためアナログ入力のパッドは  $91.2 \mu\text{m}$  間隔で配置されている。

ALEX-01 は X 線やガンマ線機器を読み出す一般的な回路構成となっており、前置増幅器、波形整形器、Wilkinson 型の AD 変換器が組み込まれている。

(図 5 参照) 前置増幅器の  $0.016 \text{ pF}$  ( $0.032 \text{ pF}$ ) の帰還コンデンサが大きな信号増幅率を持っており、スイッチで 2 つの容量値に切り替えることで増幅率を変えることができる。波形整形器は整形時間の違う 2 種類あり、トリガーを生成するため  $0.8 \mu\text{sec}$  程度の整形時間の早いものと、信号の波高値を読み出すため  $4 \mu\text{sec}$  程度の遅いものがある。AD 変換器はこの整形時間の遅い整形器の後段にあり、アナログ波高値をデジタル値に変換する。以上の回路が SSD を読み出すために 64 系統あり、並列に信号処理が行われる。ALEX-01 の制御やデータの入出力は FPGA を介して行われる。

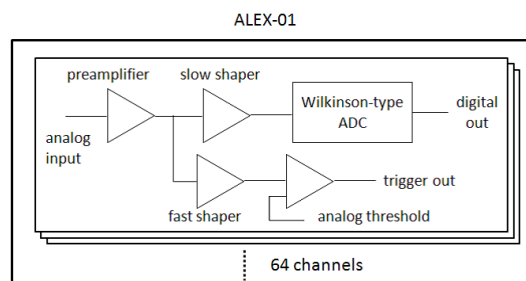


図 5: ALEX-01 の回路構成

### 2.4 ALEX-01 の性能評価

始めにエネルギー較正を行った。テストパルスの入力電荷量を変えていき、入力した電荷量と AD 変換された値の関係に線形性があるか調べた。図 6 を見ると、 $1 \sim 23\text{keV}$  の範囲では 1 次関数でフィッティングした標準偏差が 2% 以内であった。つまり、我々が目標としている  $1 \sim 20\text{keV}$  の範囲ではエネルギー較正が正しくできていることが分かった。

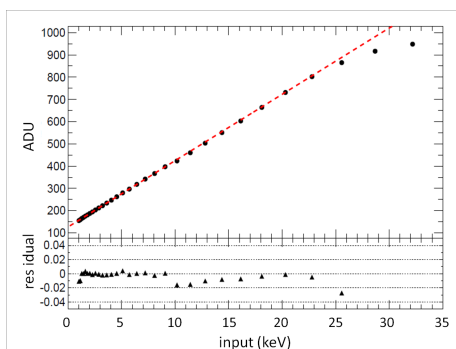


図 6: 入力電荷に対する AD 変換値の線形性

次に、入力容量に対するノイズレベルの測定を行った。ALEX-01 のアナログ入力に容量の違うコンデンサを付け替えていき、その都度テストパルスのスペクトルをガウス分布でフィットして、容量依存で発生するノイズを電子の数で推測した。測定の結果、入力容量に対して電子数は 1 次関数で増加していき、その傾きを調べたところ、 $\sim 3 e^-/\text{pF}$  であった。

また、パッケージに結線されていないチャンネルでノイズレベル (ALEX-01 単体の性能) を測定したところ、 $88 e^-/\text{pF}$  であった。この値から求めたエネルギー分解能は 1.8 keV 程度であり、数 keV の X 線を区別するためには、ALEX-01 で発生する容量を抑える必要がある。

## 2.5 ALEX-01 で SSD を読み出す

図 7 のように SSD と ALEX-01 を接続して、 $^{241}\text{Am}$  のスペクトルを取得することが出来た。図 8 は 1 チャンネルのデータから作成したスペクトルで、分解能は FWHM 換算で 3.0 keV であった。

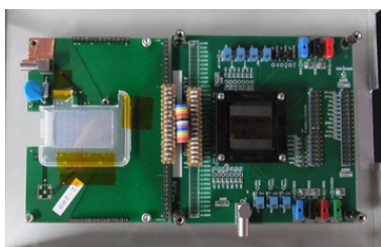


図 7: 2 枚の基板を介して SSD と ALEX-01 を接続。64 チャンネルの内、中心の 16 チャンネルだけ接続。

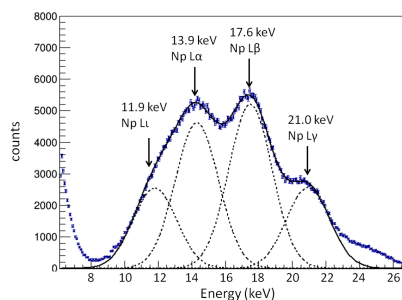


図 8:  $^{241}\text{Am}$  のスペクトル

## 3 まとめ

GRB 観測で初期宇宙探査を目指す小型科学衛星 HiZ-GUNDAM を計画しており、この衛星に搭載するための X 線撮像検出器の開発をしている。形状の異なる 6 種類のシリコン半導体検出器 (SSD) とそれを読み出す ALEX-01 を開発した。それぞれ単体での性能評価を終え、これからは一体となったシステムで実験を行い、最適な SSD の形状や、ALEX-02 の検討に向けて性能評価を進めていく。

## Reference

- [1] Tanvir et al., Nature, 461, 7268, 1254 (2009)
- [2] D.Yonetoku et al., SPIE published (2014)
- [3] H.Ikeda et al., Nucl. Instr.Meth. A, 569, 98 (2006)