テルル化カドミウム半導体を用いたガンマ線イメージャの開発とこれを支えるアナログ ASIC 技術

佐藤 悟朗^{*1,*2}・渡辺 伸^{*1}

Developments of Gamma-ray Imagers using CdTe Semiconductors based on the Analog ASIC Technology

Goro SATO^{*1,*2} and Shin WATANABE^{*1}

^{*1}Institute of Space and Astronautical Science (ISAS), JAXA, 3-1-1 Yoshinodai, Chuo-ku, Sagami-hara-shi, Kanagawa 252-5210, Japan

^{*2}Nishina Center for Accelerator-Based Science, RIKEN, 2-1, Hirosawa, Wako-shi, Saitama 351-0198, Japan

(Received May 20, 2013, Accepted December 9, 2013)

Cadmium Telluride (CdTe) is one of the most promising semiconductor materials for hard X-ray and gamma-ray detection because of the high detection efficiency, and of the good energy resolution. Moreover, CdTe detectors with Schottky junction work as diode detectors, and show superior energy resolution. Based on the CdTe diode devices, we have developed CdTe pixel/strip imagers, and also realized a Si/CdTe Compton camera. These devices will be used for the Hard X-ray Imager (HXI) and the Soft Gamma-ray Detector (SGD) onboard ASTRO-H X-ray satellite to be launched in 2015. These developments are briefly reported in this article. We also describe our recent development of low-noise analog readout ASICs to be used for future development of CdTe gamma-ray imagers.

1. はじめに

テルル化カドミウム (CdTe) 半導体,あるいはテルル化亜鉛カドミウム ($\text{Cd}_{1-x}\text{Zn}_x\text{Te}$, CZT) 半導体は, NaI (TI) シンチレータと同等のガンマ線阻止能力を持つ, 比較的新しい半導体検出器である. バンドギャップが比較的大きいため, 常温で動作する. そのため, ガンマ線検出器として幅広い応用が可能であり, 近年, 国内外で開発が大きく進められている¹⁻⁴⁾. 我々のグループでは, 宇宙観測を目的として, 10年ほど前からこの CdTe 半導体に着目し, 数10 keV のエネルギーのガンマ線に対して, 1 keV (FWHM) を切るような, エネルギー分解能に優れたダイオード型の CdTe 検出器の開発を進めてきた. 最近では, これを数100 μm の位置分解能を持つ撮像素子として発展させている^{5,6)}. また, 数100 keV より高いエネルギーのガンマ線を高感度にとらえるため, シリコン (Si) と CdTe を用いた半導体コンプトンカメラの概念を提案し, これを実現した. これらの新しい検出器によって, これまで観測が進んでいない波長で, ガンマ線天文学を切り開くことを目指している.

宇宙観測の分野においては, これら CdTe/CZT を用いた第一世代の観測装置が2000年代初頭に開発された. 欧州宇宙機関の INTEGRAL 衛星 (2002年打ち上げ) は, 4 mm $\times$ 4 mm $\times$ 2 mm の大きさのプレナ型 CdTe 素子を16,384個用い⁷⁾, アメリカ NASA の Swift 衛星 (2004年打ち上げ) は同サイズの CZT 素子を32,768個用いている⁸⁾. いずれも, プレナ型素子一つ一つをピクセルに見立て, アレイ状に並べた大面積の検出器面を構築し, 符号化マスクと組み合わせることでガンマ線イメージャとして動作する. これに対し, CdTe/CZT の表面に分割した電極を形成することで, 単一

の素子の中に位置分解能を持たせることができる. ガンマ線光子一つ一つを識別し, 反応位置の情報を得るため, 電極ごとに独立した読み出し回路で処理を行う. この場合, コンパクトに多数のチャンネルの読み出しを行うため, 低雑音のアナログ集積回路 (Application Specific Integrated Circuit, ASIC) の利用が, 必須のものとなる. チャンネルごとの信号処理回路は, 電荷有感型プリアンプ, 整形アンプを備えることが一般的で, 目的に応じ, 計数情報を得るためのカウンター回路, エネルギー情報を得るためのアナログ・デジタル変換 (ADC) 回路などが加わる. また, CdTe/CZT 素子から信号を引き出すための接合技術や, 組み立て技術が要求される. このように, ガンマ線イメージャを開発するには, 優れた検出器素子のみならず, 周辺技術を含めた統合的な開発が必要となる.

現在, 我々は日本で6番目の宇宙 X 線観測衛星 ASTRO-H の開発を進めており, 搭載される硬 X 線撮像検出器 (Hard X-ray Imager, HXI) と軟ガンマ線検出器 (Soft Gamma-ray Detector, SGD) に CdTe ダイオード検出器を使用する. 本解説では, まず, CdTe ダイオード検出器について概説し, 両面ストリップ型 CdTe イメージャの開発と, 半導体コンプトンカメラへの応用について述べる. また, ガンマ線イメージャを開発する上で鍵となるアナログ ASIC については, 将来の検出器の読み出しに用いることを目指し, 独自の ASIC 開発を進めている. その現状についても述べる.

2. 高エネルギー分解能 CdTe ダイオード検出器

CdTe 半導体は比較的大きな原子番号 ($Z=48, 52$) と高い密度 ($\sim 5.85 \text{ g/cm}^3$) を持つため, ガンマ線に対する検出効率が高い. また, 1.44 eV と比較的大きいバンドギャップエネルギーを備えているため, 室温動作が可能である. そのため1970年代より精力的に研究が進められ, 1990年代に入ると半導体結晶の製造技術が大きく進歩した. 我が国ではアクロラド社が, 移動加熱法 (Traveling Heater Method,

^{*1} 宇宙航空研究開発機構 宇宙科学研究所 (〒252-5210 神奈川県相模原市中央区由野台 3-1-1)

^{*2} 理化学研究所 仁科加速器研究センター (〒351-0198 埼玉県和光市広沢 2-1)

THM)を用いて、高純度で一様性の高いCdTe素子を製造している⁹⁾。

入射ガンマ線とCdTe素子の反応により、検出器内で電子・正孔対が発生する。素子に印加されたバイアス電圧によりこれらの電荷が移動するのに合わせて、電極に誘導電荷が生じる。化合物半導体ではしばしば観られるように、CdTe結晶中の電荷の移動特性はSiやGeほど高くなく、移動度と寿命の積が電子で $10^{-3} \text{ cm}^2/\text{V}$ 、正孔の場合 $10^{-4} \text{ cm}^2/\text{V}$ のオーダーである。そのため、特に正孔が移動する途中で捕獲されやすく、誘導電荷の量に損失が生じる。これにより、スペクトルにテイル構造が現れるだけでなく、検出器の一部分しかエネルギーを正確に検出できず、真の検出効率を高めることはできない。

これに対し、我々はアクロラド社と共同して、ダイオード型のCdTe半導体検出器を実用化し、高いエネルギー分解能を得ることに成功した。これは、THMで製造された単結晶CdTeウェハに対して、Te面にインジウム(In)を蒸着したものを陽極とし、陰極にはプラチナ(Pt)を無電解メッキで付けたものである。アクロラド社のCdTeは、p型の半導体であり、仕事関数の小さい金属であるInを電極として用いると、CdTeとの間に高いショットキー障壁が生じ、検出器はダイオード特性を示す。逆バイアス時のリーク電流は、陽極・陰極ともにPtを用いたオーム接触のCdTeに比べると二桁以上低い値となる。そのため、より高いバイアス電圧を印加することが可能となる。強い電場で電荷を移動させる事で損失を防ぎ、低エネルギー側にほとんどテイルを引くことなく、半導体検出器本来の優れたエネルギー分解能を達成できる (Fig. 1)^{10,11)}。

さらに我々は、CdTeダイオード素子の場合、結晶を貫くバルクなリーク電流よりも、端面を経由して流れる電流が支配的である事を見出した。その結果に基づき、陰極のPt電極の外周部に0.5 mmから1 mm幅のガードリング電極を設けることで、読み出し雑音に寄与するリーク電流の大きさをさらに一桁低減することに成功した¹²⁾。

当初、陽極にInを使用したものだけが確立していたが、その後、琉球大学とアクロラド社により、アルミニウム

(Al)を陽極に使用したダイオード型CdTe素子も実用化された^{13,14)}。印加可能なバイアス電圧の高さはInよりも低いものの、同様に優れたエネルギー分解能を得ることができている。また、Inでは分割した電極を形成することが困難であったが、Alではこれが可能となる。そこで我々は、Al電極を応用したピクセルあるいはストリップ検出器の開発に乗り出し、いくつかの技術革新を経てこれに成功した¹⁵⁾。

ショットキー接触を用いたダイオード型検出器では、バイアス電圧を印加してから経過時間に伴ってスペクトル性能の劣化が起こり、これをポラリゼーション現象と呼んでいる。同じCdTe素子でも、オーム接触を用いたCdTe素子ではこれが起こらないが、ダイオード型素子ではポラリゼーションが起こる。我々は、これまでの実験から、高いバイアス電圧を印加するか、低温にすることで、ポラリゼーションの進行が極端に遅くなることを発見し¹⁶⁾、その用途が大きく広がった。

ポラリゼーション現象が起こるのは、CdTe中の深いアクセプタ準位が正孔を放出することで、負の電荷が蓄積するこ

Fig. 2 For evaluation of the deep acceptor level, peak shift time was measured for In/CdTe/Pt and Al/CdTe/Pt detectors using 59.5 keV line. Each detector had an area of $4.1 \times 4.1 \text{ mm}^2$ and thickness of 0.5 mm, and was operated under the bias voltage of 100 V¹⁸⁾.

Fig. 1 (Left) Spectrum of ^{57}Co obtained with a CdTe diode detector with an area of $3 \text{ mm} \times 3 \text{ mm}$ and 1 mm thickness. The applied bias voltage was 800 V and the operating temperature was -40°C . The energy resolution at 6.4 keV was 0.26 keV (FWHM)¹⁰⁾. (Right) High energy spectrum of ^{137}Cs above 620 keV with a CdTe diode detector with an area of $2 \text{ mm} \times 2 \text{ mm}$ area and 0.5 mm thickness. The applied bias voltage was 1400 V and the operating temperature was -40°C . The energy resolution at 662 keV was 2.1 keV (FWHM)¹¹⁾.

とが原因と考えられる。バイアス電圧を印加する前は、素子内に正孔が多数存在するため逆過程の正孔捕獲が起こるが、バイアス印加後は正孔の流入がブロックされるため、負の電荷蓄積が進む。我々の計算では、この深い準位が局所的に存在するよりも、素子全体に渡って存在していると仮定すると、スペクトルの時間変化を定量的に再現できることが分かった¹⁷⁾。ポラリゼーション現象のタイムスケールの温度依存性を測定した結果を Fig. 2 に示す。その傾きから深いアクセプタ準位のエネルギーを特定することができる。ショットキー電極に In を用いた素子と、Al を用いた素子とで、 1.11 ± 0.03 eV の一致した値が得られている¹⁸⁾。

3. 両面ストリップ型 CdTe イメージャ

2015年の打ち上げを目指して開発を進めている宇宙 X 線観測衛星 ASTRO-H では、硬 X 線望遠鏡システムを搭載する。通常、X 線望遠鏡では鏡面に重元素薄膜を形成し、小さい角度で入射した X 線の全反射を利用する。これに対して、鏡面に多層膜を形成し、物質内部でのブラッグ反射を利用することで、より高いエネルギーまで有効面積を伸ばすことができる。ASTRO-H 衛星では、この硬 X 線望遠鏡と、12 m 先の焦点面に置かれる硬 X 線撮像検出器 (Hard X-ray Imager, HXI) により、5 keV から 80 keV までの集光撮像観測を行う。

HXI では、新規に開発した CdTe 両面ストリップ検出器が高エネルギー側を担う。前述したように、最近になって Al 電極を使用したダイオード型 CdTe 素子が入手できるようになり、両面の電極を分割できるようになったため、本検出器が実現した⁶⁾。Fig. 3 は、HXI 用の CdTe 検出器モジュールである。中央部に $3.2 \text{ cm} \times 3.2 \text{ cm}$ の大きさの受光面が見えている。硬 X 線望遠鏡の像をオーバーサンプリングするため、ストリップ間隔は $250 \mu\text{m}$ となっている。一面当り 128 本のストリップ電極が並び、反対面にもこれと直交する形で 128 本のストリップ電極が並ぶ。実質的に、 $128^2 = 16,384$ ピクセル分の情報を、256 チャンネルで読み出すことが可能である。また、受光部の周囲には、両面とも 1 mm 幅のガードリング電極が設けられ、端面を流れるリーク電流を受光部から分離している。素子の厚みは 0.75 mm であり、

80 keV においても 70% の検出効率を達成できる。

我々は、これまでに CdTe 検出器の読み出し用の ASIC を GM-Ideas 社と共同で開発してきており^{19,20)}、HXI ではそれをさらに発展させた ASIC を用いる。1 チップ当り 32 チャンネルの構成となっており、CdTe ストリップ検出器の読み出しには、両面合わせて 8 つの ASIC を用いる。チャンネルごとに VA および TA と呼ばれる回路ブロックを持ち (Fig. 4)、TA 部は $0.6 \mu\text{s}$ または $1.2 \mu\text{s}$ の早い時定数の整形回路を備え、入力 32 チャンネルの OR をとってトリガー信号を出力する。VA 部は、約 $3 \mu\text{s}$ の遅い時定数の整形回路を持ち、TA 部でトリガー信号を生成されてから設定された遅延時間の後に、全 32 チャンネルをサンプルホールドする。我々の開発した HXI 用の ASIC では、さらに Wilkinson 型の ADC 回路を各チャンネルに組み込んだ。これは、できるだけ早い段階で検出器信号をデジタル信号に変換し、予測が難しい衛星環境での雑音による影響を可能な限り低減するためである。AD 変換は、全 32 チャンネル共通のランプ電圧を発生させ、チャンネルごとにサンプルホールドした波高値に達するまでのクロック数を勘定することで達成する。

信号ラインに重畳するノイズのうち、チャンネル間に同相

Fig. 3 A photograph of the CdTe double-sided strip detector module.

Fig. 4 Block diagram of the ASIC for ASTRO-H/HXI.

Fig. 5 Spectrum of ^{241}Am obtained with the CdTe double-sided strip detector for HXI. Both one-strip and two-strip events were used to make the histogram²¹⁾.

Fig. 6 Imaging performance of the CdTe double-sided strip detector, showing the shadow pattern of a tungsten slit with $100\ \mu\text{m}$ width at the pitch of $800\ \mu\text{m}$, and with $\Phi 2\ \text{mm}$ and $\Phi 3\ \text{mm}$ holes²¹⁾.

で乗るコモンモードノイズは、多数のチャンネルを同時にサンプルホールドし、得られる ADC 値の中央値から推定できる。HXI 用の ASIC では、これをチップ内で実行する機能を有している。さらに、検出したコモンモードノイズの値を、各チャンネルの ADC 値から減算し、設定した閾値を上回っているかどうか改めて判定するデジタル閾値機能を持つ。デジタル閾値を越えたチャンネルだけを後段の回路に転送することで、読み出し時間を大幅に節約できる。

CdTe ストリップ検出器で測定した ^{241}Am のスペクトルを Fig. 5 に示す。 $250\ \mu\text{m}$ という狭ピッチのため、二つのストリップにまたがって検出されるイベントの数が全体の 20–30 % に上る。このようなイベントも捨てずに、エネルギーを足し合わせてスペクトルに加えた上で、 $13.9\ \text{keV}$ のラインに対して $1.7\ \text{keV}$ (FWHM), $59.5\ \text{keV}$ で $2.0\ \text{keV}$ (FWHM) の

Fig. 7 Count rates for different event types in the energy range of 20 to 40 keV. The standard deviation of the count rate for the “all event” was about 1%, which was consistent with the statistical errors²¹⁾.

分解能を達成している。また、Fig. 6 は、イメージング性能を確認するために、 $100\ \mu\text{m}$ 幅のスリットが $800\ \mu\text{m}$ ピッチで並んだタングステンの板を通してガンマ線を照射し、 $59.5\ \text{keV}$ のラインに対して撮像したものである。直径 $2\ \text{mm}$ と $3\ \text{mm}$ の穴もきれいに捉えている。さらに細かい検出器応答と検出効率の一様性を調べるために、大輝度放射光施設 SPring-8 にて、 $6\ \mu\text{m}$ 角に絞った $30\ \text{keV}$ の平行光を照射し、ストリップ境界をまたいでスキャン測定を実施した。Fig. 7 に示すように、隣り合うストリップにまたがって検出されるイベントも含めると損失無く検出できていることが分かる²¹⁾。

4. Si/CdTe 半導体コンプトンカメラ

コンプトンカメラは、ガンマ線を検出し、そのイメージングを可能にする手法として最も有望視されているもので、高感度の宇宙観測のみならず、放射性物質の可視化、医学応用などに向けて、国内外で研究・開発が行なわれている。コンプトンカメラは、散乱体検出器と吸収体検出器からなり、それぞれ反応の位置とエネルギー情報を検出できるイメージャで構成する。入射ガンマ線は、散乱体検出器でコンプトン散乱され、その散乱ガンマ線が吸収体検出器で光電吸収されると、エネルギー情報から元のガンマ線のエネルギーとコンプトン散乱角を求めることができ、さらに位置情報と散乱角より、ガンマ線の到来方向を制限することができる。コンプトン散乱された電子の方向をとらえられない場合、検出した一つのイベントは、Fig. 8 で示すような円錐面上に制限できる*。このようなイベントを数多く検出すると、円錐面の重ね合わせにより、ガンマ線による画像を得ることができる。高感度で高精度のイメージングが可能なコンプトンカメラを

* 反跳電子の方向まで分かると、円錐面上でさらに方位角も制限される。しかし、通常の半導体検出器では困難である。

Fig. 8 Concept drawings for (a) Compton camera and (b) Si/CdTe Compton camera.

構成するには、優れたエネルギー分解能と位置分解能を持つイメージャが求められる。

我々のグループでは、高感度の宇宙観測を目指し、シリコン (Si)/テルル化カドミウム (CdTe) 半導体コンプトンカメラの概念を提案し、これまでの半導体イメージング検出器の研究をもとに、実現に向けた開発・研究を行ってきた²²⁻²⁵⁾。Fig. 8は、その概念図であり、Si半導体イメージング検出器とCdTe半導体イメージング検出器から構成される。半導体検出器により、優れたエネルギー分解能と位置分解能との実現が可能で、イメージング能力に重要な役割を果たす。Si半導体は主に散乱体として、CdTe半導体は吸収体として働くが、この組み合わせはコンプトンカメラにとって、とても都合がよい。Si半導体は、原子番号が14と小さいため、コンプトン散乱を起こす確率が光電吸収に比べて高く、またドップラーブロードニング効果の影響が小さいという利点がある。ドップラーブロードニング効果は、実際の物質中の電子が自由電子ではなく、原子核に束縛されていることに起因する不定性で、これがコンプトンカメラにおけるイメージング性能の限界を決定する。一方、CdTe半導体は、比較的大きな原子番号 (48, 52) と密度を持ち、光電吸収効率がよく、従来、吸収体検出器として使わざるを得なかったエネルギー分解能に劣るシンチレータ検出器を置き換え、半導体検出器のみでコンプトンカメラを構成することを可能にする。

Fig. 9は、半導体イメージング検出器に、両面ストリップ型のSiイメージャとCdTeイメージャを適用した「超広角コンプトンカメラ」の原理実証モデルである。ASTRO-H衛星搭載HXIの要素技術を組み合わせて、コンプトンカメラを構築しており、250 μm の位置分解能をもつSiストリップ検出器2層と、CdTeストリップ検出器3層を密に積層した構造になっている。これにより、超広角の視野 ($180^\circ \times 180^\circ$) と核種固有のガンマ線を認識するエネルギー分解能 (FWHMで2-3%) を併せ持つコンプトンカメラが実現した。検出効率は、入射角が 80° となっても20%程度しか低下しない。Fig. 10は、得られたガンマ線イメージの一例であり、格段に広い視野での放射性セシウムの分布の高精度可視化に成功している[†]。

Fig. 9 The prototype of the ultra wide angle Compton camera, composed of two identical Si/CdTe Compton cameras. Each tower has two layers of Si strip detectors and three layers of CdTe strip detectors with 250 μm position resolutions.

ASTRO-H衛星の軟ガンマ線検出器 (SGD) では、さらに高効率化されたSi/CdTe半導体コンプトンカメラが搭載される。Fig. 11は、SGDのコンプトンカメラ部の最終試作機である。高効率を達成するため、さらなる高密度実装を図り、0.6 mm厚のSiピクセル検出器32層と、その周りを取り囲む80枚の大面积 (26 mm角) CdTeピクセル検出器とで構成した。前述した原理実証モデルと比較して、約30倍の検出効率を実現している。2.7 MBqの ^{137}Cs の点線源が1 m先にある場合、この線源が作り出す空間線量は0.25 $\mu\text{Sv/h}$ となるが、このコンプトンカメラを用いると、10秒間以内の測定時間で、この線源を画像化することができる。現在、SGD向けに衛星搭載モデルの開発を進めており、また、放射性物質可視化カメラとしては、このSGDコンプトンカメラをベースに実用化、商用化が行なわれている。

5. アナログASICの独自開発

低雑音のアナログASICは、微弱なセンサー信号を処理す

[†] 本画像は、福島県で行った放射性物質の可視化実証実験において取得したものである。実験の詳細は日本物理学会誌上で報告しており、画像再構成の手法についても議論しているので、そちらの記事²⁶⁾も併せて参照されたい。

Fig. 10 Visualization of radioactive materials using the ultra wide angle Compton camera. (Left) Optical image taken with a fisheye lens. (Right) Gamma-ray images of ^{137}Cs and ^{134}Cs are overlaid on the optical image. The air dose rate was about $3\ \mu\text{Sv/h}$. A hot spot with a maximum dose rate of $30\ \mu\text{Sv/h}$ was found at the place where rainwater dropped from the building roof.

Fig. 11 The final prototype of the Compton camera for AS-TRO-H/SGD. Thirty-two layers of 0.6 mm thick Si pixel detectors and 80 large area ($26 \times 26\ \text{mm}^2$) CdTe pixel detectors are densely packaged with 208 ASICs for readout of the 13,312 channels.

るアナログ回路を限られた面積内に配置するため、精緻な設計が必要であり、今後、新しい検出器・イメージャの開発を進めて行く上でも鍵となる技術である。また、目的に応じた回路構成や機能を持った ASIC を、短時間にかつ低コストで開発できることが望ましい。このような観点から、これまで進めてきた GM-Ideas 社との共同開発に加え、独自の ASIC 開発を進めている²⁷⁻³²⁾。

5.1 一次元型アナログ ASIC

最近、我々が開発した ASIC は、32チャンネル構成で、チャンネルごとの信号処理回路を短冊状に構成し、これを

4.2 mm × 7.6 mm のチップ内に一次的に並べて配置した。XFAB 社の $0.35\ \mu\text{m}$ CMOS プロセスで製造され、 $\pm 1.65\ \text{V}$ の電源電圧で動作する。消費電力は $2.8\ \text{mW/ch}$ となっている。**Fig. 12**に回路構成を示す。検出器信号は、電荷有感型増幅器 (Charge sensitive amplifier: CSA) に DC 結合で入力される。CSA は折り畳みカスコード形式の増幅器を用いており、入力は $1/f$ 雑音の小さい PMOS を採用した。CSA の帰還容量は、CMOS スイッチによって $0.02\ \text{pF}$ と $0.04\ \text{pF}$ の間で切り替えられ、ゲインを変更できるようになっている。また、CSA の帰還抵抗は、トランスファークラップ型の FET を利用した。CSA の出力は二系統に分離され、トリガー信号生成用の速い時定数の整形アンプと、波高値を検出するための遅い時定数の整形アンプに入力される。それぞれ、ポールゼロ補償回路 (PZC) と、二次の積分ローパスフィルターで構成される。波形のピーキング時間は、前者が $1\ \mu\text{s}$ と $2\ \mu\text{s}$ 、後者が $5\ \mu\text{s}$ と $10\ \mu\text{s}$ で選択できる。遅い時定数の整形アンプの出力は、サンプルホールド回路で、波高が保持される。

さらに、我々は Wilkinson 型の ADC 回路を組み込むことにも成功した。回路に含まれるコンパレータは、 $100\ \mu\text{s}$ 程度で昇圧するランプ信号がサンプルホールドした電圧を越えたところで、ストローブ信号を出力し、 $10\ \text{MHz}$ のクロックで動作するデジタルカウンターをラッチする。計数率は、この AD 変換で律速され、数 kHz 程度が達成可能である。また、前述の HXI 用 ASIC と同様、ASIC 内にコモンモードノイズの検出機能を備えており、設定した閾値以上のチャンネルのみを選択的に出力することができる。

これらの回路では、低雑音化のため、MOS キャパシタによる定電流源の安定化や、デジタル電源とアナログ電源の分離などの工夫を行っている。ASIC 単体での性能評価試験では、等価雑音電子数で 69 ± 9 電子 (RMS) を達成した。線形性は、 $4\ \text{fC}$ 入力まで $\pm 1\%$ を確保している。さらに、 $1\ \text{cm}$ 角の CdTe ストリップ検出器と接続し、動作試験を行った (**Fig. 13**)。ここでは簡便のため、Al 電極側のみを読み出し

Fig. 12 Signal processing chain for each readout channel.

Fig. 13 A CdTe with 1 cm×1 cm area is connected to the one-dimensional ASIC.

ている。Fig. 14に示すように、全32チャンネルからの信号を正しく取得することに成功し、良好な ^{241}Am と ^{57}Co のスペクトルが得られている。本ASICは、硬X線領域を対象として製作したが、コンプトンカメラへの応用へ向けて、ダイナミックレンジを10倍程度に拡大したチップの試作も進めている。

5.2 二次元型アナログASIC

ピクセル型の検出器の場合、ピクセルサイズを細かくして行くと、高い位置分解能を得られるのみならず、検出器の容量と流入するリーク電流を非常に小さくできるため、さらに高いエネルギー分解能が望める。また、個々のピクセル信号を独立に処理することができれば、高いカウントレートの環

境でも使用可能な検出器となる。しかし、微細なピクセル電極を使用すると、信号を引き出して一次元型のASICに接続することが困難になる。そこで、検出器ピクセルと同サイズになるように信号処理回路を構成し、これを升目状に配置した二次元型ASICを開発し、検出器素子と重ねて配置・接続する手法が取られる。ただし、この手法では、回路面積がピクセルサイズに限られることもあり、これまでに開発されてきたものはカウンター型が主で、スペクトルを取得するタイプの開発は限定的になっていた^{33,34)}。

最近、我々は独自に二次元型ASICの開発に成功した³⁵⁾ (Fig. 15)。TSMC社の0.35 μm プロセスを用いている。12×12=144の回路セルが、270 μm ピッチで並ぶ。回路規模を縮小するため、速い時定数と遅い時定数の二系統に分けることはせずに、ピークホールド回路を実装した。トリガー信号は、全体でORを取るのとは別に、各行・各列でORを取ったものをD型フリップフロップに保持する。これによって、X/Y方向の検出情報が得られる。電源電圧 $\pm 1.65\text{ V}$ のもと、200 $\mu\text{W}/\text{ch}$ で動作する。ASIC単体では、等価雑音電子数で 50 ± 10 電子 (RMS) を達成した。また、Alのピクセル電極を持つCdTeダイオードと接合する試験を行った (Fig. 16)。全てのピクセルから信号を読み出すことに成功し、優れたエネルギー分解能とイメージ特性を取得できている (Fig. 17)。AD変換には外部のADC回路を用いた。本試験では全ピクセルからの信号をシリアル方式で読み出し、1 kHz程度の計数率を達成している。ヒットしたピクセルの

Fig. 14 Spectra for ^{241}Am and ^{57}Co radioactive isotopes. The operation temperature was -20°C , and the bias voltage was -500 V .

周囲だけを読み出すなどの工夫で、より高速に（10倍程度）読み出すことも可能である。

6. おわりに

ここまで述べてきたように、10年間を越える開発と研究により、ダイオード型の CdTe 検出器の開発を進め、これをイメージャへと発展させてきた。その一つの結実が、2015 年打ち上げ予定の ASTRO-H 衛星に用いる HXI や SGD 検出器となる。HXI では、本稿で述べた CdTe 両面ストリップ検出器を硬 X 線望遠鏡の焦点面に用い、また SGD には

Fig. 15 A photograph of the two-dimensional ASIC together with the layout in a single pixel cell ($270\ \mu\text{m} \times 270\ \mu\text{m}$).

Fig. 16 A photograph of the CdTe-ASIC hybrid. The CdTe 144 pixels are connected to the ASIC by the Au stud bump bonding technique³⁵⁾.

Fig. 17 (Left) Spectrum of ^{241}Am obtained with the CdTe hybrid pixel detector, operated at -18°C . The bias voltage was $-500\ \text{V}$. (Right) Radiographic image for 59.5 keV line, using a hexagonal nut with a 2 mm diameter hole³⁵⁾.

Si/CdTe コンプトンカメラを搭載する。これにより、硬 X 線、軟ガンマ線領域において、これまでより一桁から二桁の高感度を達成し、新しい宇宙観測を切り開くことになることが期待されている。また、Si/CdTe コンプトンカメラによる放射性物質の検出例を示したように、地上での応用も進んでいくことが期待される。

謝辞

本研究は、宇宙航空研究開発機構宇宙科学研究所、高橋忠幸、池田博一、国分紀秀、太田方之、武田伸一郎、小高裕和、福山太郎、齊藤新也、萩野浩一、佐藤有、一戸悠人、中澤知洋（現：東京大学）、岸下徹一（現：ボン大学）、田中孝明（現：京都大学）、名古屋大学、田島宏泰らと共同で行われた。また、アクロラド社、三菱重工名古屋誘導推進システム製作所、GM-Ideas 社の協力を得て、製造・開発が進められた。

〔文 献〕

- 1) G. F. Knoll: *Radiation Detection and Measurement*, 3rd ed. (John Wiley & Sons Inc., Hoboken, 1999).
- 2) T. Takahashi and S. Watanabe: *IEEE Trans. Nucl. Sci.*, **48** (2001) 950.
- 3) P. N. Luke and M. Amman: *IEEE Trans. Nucl. Sci.*, **54** (2007) 834.
- 4) A. Owens and A. Peacock: *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. A*, **531** (2004) 18.
- 5) S. Watanabe, S. Takeda, S. Ishikawa, H. Odaka, M. Ushio, T. Tanaka, K. Nakazawa, T. Takahashi, H. Tajima, Y. Fukazawa, Y. Kuroda and M. Onishi: *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. A*, **579** (2007) 871.
- 6) S. Watanabe, S. Ishikawa, H. Aono, S. Takeda, H. Odaka, M. Kokubun, T. Takahashi, K. Nakazawa, H. Tajima, M. Onishi and Y. Kuroda: *IEEE Trans. Nucl. Sci.*, **56** (2009) 777.
- 7) O. Limousin, C. Blondel, J. Cretolle, H. Dzitko, P. Laurent, F. Lebrun, J.P. Leray, M. Arques, N. Baffert, F. Mathy, A. Noca, P. Trystram, P. Villard, P. Baron, E. Delagnes and M. Rouger: *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. A*, **442** (2000) 244.
- 8) G. Sato, A. Parsons, D. Hullinger, M. Suzuki, T. Takahashi, M. Tashiro, K. Nakazawa, Y. Okada, H. Takahashi, S. Watanabe, S. Barthelmy, J. Cummings, N. Gehrels, H. Krimm, C. Markwardt, J. Tueller, E. Fenimore and D. Palmer: *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. A*, **541** (2005) 372.
- 9) M. Funaki, T. Ozaki, K. Satoh and R. Ohno: *Nucl. Instrum.*

- Methods Phys. Res. A, **436** (2000) 120.
- 10) T. Takahashi, K. Nakazawa, S. Watanabe, G. Sato, T. Mitani, T. Tanaka, K. Oonuki, K. Tamura, H. Tajima, T. Kamae, G. Madejski, M. Nomachi, Y. Fukazawa, K. Makishima, M. Kokubun, Y. Terada, J. Kataoka and M. Tashiro: Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. A, **541** (2005) 332.
 - 11) T. Takahashi, S. Watanabe, M. Kouda, G. Sato, Y. Okada, S. Kubo, Y. Kuroda, M. Onishi and R. Ohno: IEEE Trans. Nucl. Sci., **48** (2001) 287.
 - 12) K. Nakazawa, K. Oonuki, T. Tanaka, Y. Kobayashi, K. Tamura, T. Mitani, G. Sato, S. Watanabe, T. Takahashi, R. Ohno, A. Kitajima, Y. Kuroda and M. Onishi: IEEE Trans. Nucl. Sci., **51** (2004) 1881.
 - 13) H. Toyama, A. Nishihira, M. Yamazato, A. Higa, T. Maehara, R. Ohno and M. Toguchi: Jpn. J. Appl. Phys., **43** (2004) 6371.
 - 14) H. Toyama, M. Yamazato, A. Higa, T. Maehara, R. Ohno and M. Toguchi: Jpn. J. Appl. Phys., **44** (2005) 6742.
 - 15) S. Watanabe, S. Ishikawa, S. Takeda, H. Odaka, T. Tanaka, T. Takahashi, K. Nakazawa, M. Yamazato, A. Higa and S. Kaneku: Jpn. J. Appl. Phys., **46** (2007) 6043.
 - 16) T. Takahashi, K. Hirose, C. Matsumoto, K. Takizawa, R. Ohno, T. Ozaki, K. Mori and Y. Tomita: *Proc. SPIE, Hard X-Ray and Gamma-Ray Detector Physics and Applications*, San Diego, CA, 3446 (1998) 29.
 - 17) G. Sato: Master's thesis, University of Tokyo (2002).
 - 18) T. Takahashi, S. Watanabe, S. Ishikawa, G. Sato and S. Takeda: in *Biological and Medical Sensor Technologies*, ed. K. Iniewski (CRC Press, Boca Raton, 2012) Chap. 14, p. 343.
 - 19) H. Tajima, T. Nakamoto, T. Tanaka, S. Uno, T. Mitani, E. do C. e Silva, Y. Fukazawa, T. Kamae, G. Madejski, D. Marlow, K. Nakazawa, M. Nomachi, Y. Oakada and T. Takahashi: IEEE Trans. Nucl. Sci., **51** (2004) 842.
 - 20) T. Tanaka, S. Watanabe, S. Takeda, K. Oonuki, T. Mitani, K. Nakazawa, T. Takashima, T. Takahashi, H. Tajima, N. Sawamoto, Y. Fukazawa and M. Nomachi: Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. A, **568** (2006) 375.
 - 21) K. Hagino, H. Odaka, G. Sato, S. Watanabe, S. Takeda, M. Kokubun, T. Fukuyama, S. Saito, T. Sato, Y. Ichinohe, T. Takahashi, T. Nakano, K. Nakazawa, M. Makishima, H. Tajima, T. Tanaka, K. Ishibashi, T. Miyazawa, M. Sakai, K. Sakanobe, H. Kato, S. Takizawa and K. Uesugi: *Proc. SPIE, Space Telescopes and Instrumentation 2012: Ultraviolet to Gamma Ray*, Amsterdam, Netherlands, **8443** (2012) 844355.
 - 22) T. Takahashi, K. Nakazawa, T. Kamae, H. Tajima, Y. Fukazawa, M. Nomachi and M. Kokubun: *Proc. SPIE, X-Ray and Gamma-Ray Telescopes and Instruments for Astronomy*, Waikoloa, USA, **4851** (2002) 1228.
 - 23) T. Takahashi, K. Makishima, Y. Fukazawa, M. Kokubun, K. Nakazawa, M. Nomachi, H. Tajima, M. Tashiro and Y. Terada: New Astron. Rev., **48** (2004) 309.
 - 24) S. Watanabe, T. Tanaka, K. Nakazawa, T. Mitani, K. Oonuki, T. Takahashi, T. Takashima, H. Tajima, Y. Fukazawa, M. Nomachi, S. Kubo, M. Onishi and Y. Kuroda: IEEE Trans. Nucl. Sci., **52** (2005) 2045.
 - 25) S. Takeda, H. Aono, S. Okuyama, S. Ishikawa, H. Odaka, S. Watanabe, M. Kokubun, T. Takahashi, K. Nakazawa, H. Tajima and N. Kawachi: IEEE Trans. Nucl. Sci., **56** (2009) 783.
 - 26) T. Takahashi, S. Takeda and S. Watanabe: J. Phys. Soc. Jpn., **68** (2013) 382.
 - 27) H. Ikeda: Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. A, **569** (2006) 98.
 - 28) K. Tamura, T. Hiruta, H. Ikeda, H. Inoue, T. Kiyuna, Y. Kobayashi, K. Nakazawa, T. Takashima and T. Takahashi: IEEE Trans. Nucl. Sci., **52** (2005) 2023.
 - 29) T. Hiruta, K. Tamura, H. Ikeda, K. Nakazawa, T. Takashima, and T. Takahashi: Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. A, **565** (2006) 258.
 - 30) T. Kishishita, H. Ikeda, K. Tamura, T. Hiruta, K. Nakazawa, T. Takashima and T. Takahashi: Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. A, **578** (2007) 218.
 - 31) T. Kishishita, H. Ikeda, T. Kiyuna, K. Tamura, K. Nakazawa and T. Takahashi: Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. A, **580** (2007) 1363.
 - 32) T. Kishishita, H. Ikeda, T. Sakumura, K. Tamura and T. Takahashi: Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. A, **598** (2009) 591.
 - 33) F. Harrison, A. E. Bolotnikov, C. M. H. Chen, W. R. Cook, P. H. Mao and S. M. Schindler: *Proc. SPIE, X-Ray and Gamma-Ray Telescopes and Instruments for Astronomy*, Waikoloa, USA, **4851** (2003) 823.
 - 34) K. Oonuki, H. Inoue, K. Nakazawa, T. Mitani, T. Tanaka, T. Takahashi, H. C. M. Chen, W. R. Cook and F. A. Harrison: *Proc. SPIE, High-Energy Detectors in Astronomy*, Glasgow, Scotland, **5501** (2004) 218.
 - 35) G. Sato, T. Kishishita, H. Ikeda, T. Sakumura and T. Takahashi: IEEE Trans. Nucl. Sci., **58** (2011) 1370.