

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 6 日現在

機関番号：14401

研究種目：若手研究(A)

研究期間：2012～2015

課題番号：24684010

研究課題名(和文)宇宙硬X線精密撮像分光観測に向けた広帯域CCDカメラの開発研究

研究課題名(英文)Development of wide-band CCD camera for precise imaging-spectroscopy of cosmic hard X-rays

研究代表者

中嶋 大(Nakajima, Hiroshi)

大阪大学・理学(系)研究科(研究院)・助教

研究者番号：70570670

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 16,200,000円

研究成果の概要(和文)：X線CCDカメラの高速低雑音信号処理用ASIC(MND03)を少量試作するとともに、単体性能試験専用の電気回路基板を製作した。雑音性能については、申請者が過去に開発し、2016年2月打ち上げられたX線天文衛星「ひとみ」搭載CCDカメラ用ASIC(MND02)と同等であったものの、線形性能についてはMND02を上回る性能が得られた(INL=0.1%、6keVのX線に対して6eVの誤差)。また放射線耐性(ラッチアップおよびトータルドーズ)を測定した。低高度地球周回軌道で目標稼働年数(5年)を大きく上回る放射線を照射した後も、性能に変化は見られず、軌道上での正常動作が期待できる。

研究成果の概要(英文)：We developed a mixed-signal ASIC for low-noise high-speed signal processing of onboard X-ray CCD cameras as well as dedicated printed circuit boards. While its noise performance was almost the same as that of the last version of ASIC that have been used for CCD camera onboard X-ray astronomical satellite Hitomi, the linearity performance improved (INL=0.1%, corresponds 6eV deviation at 6keV). We also verified the statistical radiation tolerance of our ASIC in terms of total ionizing dose and single event latch-up in the low earth orbit.

研究分野：X線天文学、宇宙物理学、衛星搭載機器開発

キーワード：X線CCD ASIC 放射線耐性

1. 研究開始当初の背景

天の川銀河中心や銀河団内の星間空間に満ちている数千万度の高温プラズマの発見など、1990年代以降のX線天文学における成果は、撮像と分光を同時に行えるX線 CCD カメラによる貢献が大きい。現在までに国内の「あすか」「すざく」衛星を始め、「国際宇宙ステーション」の全天X線監視装置、また欧米の大型天文衛星にも主要検出器として搭載されている。しかし弱点としては、有効エネルギー帯域が軟X線に限られる上に、時間分解能が乏しい。例えばブラックホール(BH)などの特に明るい天体を観測する際には、光子の重なりを防ぐため、観測効率が~1%の間欠的露光などで対応しているのが現状である。このような観測上の制限を取り払う、すなわち硬X線までの広い帯域で高い感度を持ちつつ、BHやガンマ線バーストといった明るいX線天体を連続的に観測し、正確な時間変動を知ることで極限環境の物理状態に迫ることが研究の全体構想である。

2. 研究の目的

前項で示した全体構想を実現するために、以下の焦点面検出器を開発することが本研究の目的である。すなわち、CCD素子の裏面にCsIシンチレータを密着させたSDCCD(scintillator-decoupled CCD)をセンサとして、フロントエンドエレクトロニクスには、従来の10倍速で低雑音信号処理が可能なアナログASICを開発する。

3. 研究の方法

SDCCDについては、可視光遮断層(OBL:Optical Blocking Layer)を設けることで、X線感度を保ちつつ可視光感度を下げる対策を施した素子を試作する。ASICについては、申請者が開発し、2016年2月に打ち上げられたX線天文衛星「ひとみ」搭載X線CCDカメラ(SXI: Soft X-ray Imager)に採用されたチップがある。本研究ではこのチップに対してデジタル回路部分に修正を加える形で製作する。「ひとみ」用ASICは単体で雑音性能、ゲイン、非線形性、及び放射線耐性等が詳細に測定されており(Nakajima et al. 2011, NIMA, 632, 138)、従来の個別IC回路と同じ速度ながら、低雑音駆動可能なチップの開発に成功している。そこで本研究では、低雑音を維持しつつも高速信号処理が可能なチップを実現する。

4. 研究成果

(1) ASIC 試作

申請者が既に開発してASTRO-H衛星搭載X線CCDカメラに採用されているASIC(MND02)のデルタシグマ型ADC回路を、2次から4次に高次化させたものを製作した。MND02ではADCの内部回路中の電圧を多数回サンプルする必要があったことから、1ピクセルの信号を処理するために、2ピクセル分の時間が掛かっていた。そのため1系統あたり2個のADC回路を実装し、交互に処理させる必要があった。これ

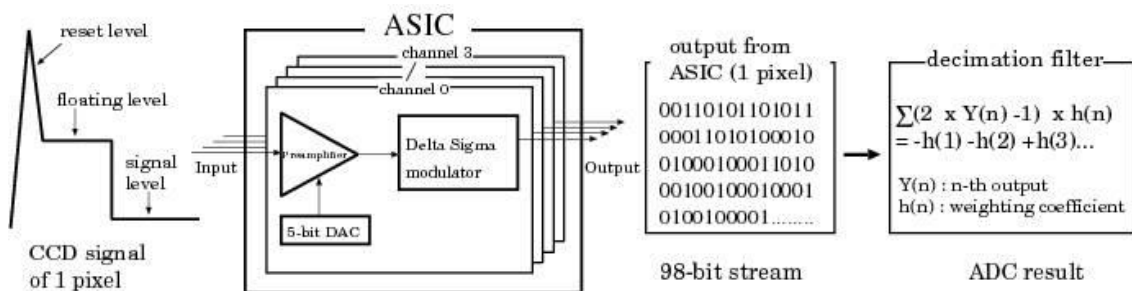


図1: 本研究で開発したASICの回路構成。CCDの微弱なアナログ信号を前置増幅器(Preamp)で10倍増幅した後、1ピクセル当たり155-bitのデジタル信号に変換する。さらにASIC後段のFPGAに実装したデシメーションフィルタによって波高値に変換する。

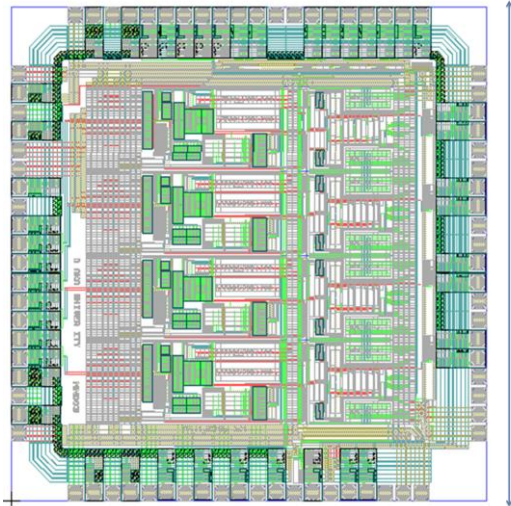


図 2: 新型 ASIC (MND03)のマスクレイアウト。3mm 四方のベアチップに 4 系統の信号回路を持つ。アナログ・デジタル両回路の電源ピンも含め、約 60 の入出力ピンを持つ。このベアチップを 15mm 四方の QFP にパッケージした後、後述の各種実験を行った。

は、1 枚の画像内でピクセルによりオフセットとゲインが異なることを意味しており、フラットなダーク画像を得るためにオフセット差の補正が必要となる。特に複数のピクセルに信号電荷がまたがるスプリットイベントでの信号波高値の決定に煩雑な処理を行わなければならなかった。我々が今年度製作した新型 ASIC (MND03) では、デルタシグマ ADC の持つノイズ整形機能を

強化したため、MND02 と同じ雑音性能を得るために必要なサンプル回数が大幅に減った。これにより 1 つの信号系統あたりに必要な ADC は 1 つになり、従来の個別 IC 回路と同様の、フラットなダーク画像を得ることが出来る。基本的な回路構成を図 1 に示す。CCD の微弱アナログ信号を ASIC 内部で増幅し、デジタル信号に変換する機能を持つ。4 系統の同一回路を持ち、それらが同時に信号処理を行う。図 2 にマスクレイアウトを示す。QFP (quad flat package)を想定し、3mm 四方の正方形にしており、また MND02 の開発を通して得た知見を生かし、全てのトランジスタにガードリングを施すなど、放射線耐性に優れたレイアウト設計を施した。

(2) ASIC 単体性能試験

新型 ASIC (MND03)の単体性能試験を、専用基板を製作した上で行った。ハードウェアは計算機と基板を結ぶ専用ワイヤハーネスのみである(図 3 左)。同じ振幅の CCD 疑似信号を約 800 ピクセル入力させ、出力信号を復号化した結果得られる波高値のばらつきを雑音性能として測定した。この測定を、振幅を変えながら繰り返して行うことで、線形性能を測定した。複数の素

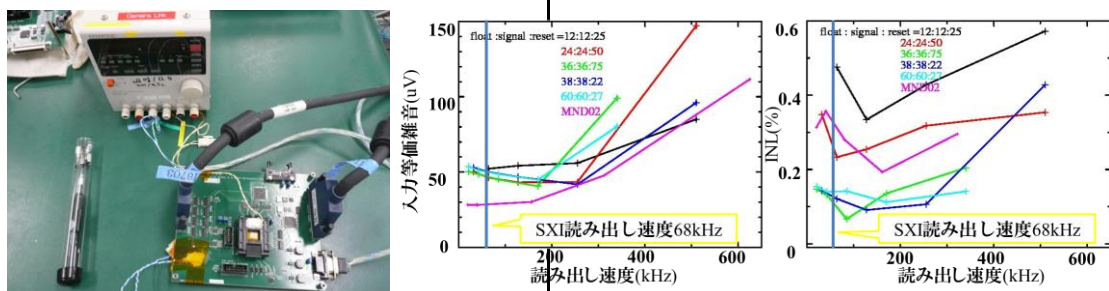


図 3: (左)MND03 単体性能試験用回路基板。専用ワイヤハーネスを通して複数のアナログ一定電圧信号を与え、アナログスイッチ回路で疑似信号を生成する。ASIC の出力信号は基板内のメモリ(FIFO)にバッファリングされた後に計算機に伝送する。復号化フィルタはソフトウェアに実装され、データ取得後に独立して復号する。(中)読み出し速度に対する入力等価雑音。200kHz 超ではパラメタの調整で MND02 程度になるが、低速域では雑音が多い。(右)積分非線形性。MND02 よりも小さく、優れた線形性能が得られている。

子に対して試験を行ったが、そのうちの 1 素子についての結果を図 3 に示す。入力等価雑音については、低速域で MND02 よりも雑音が高く、200kHz 以上の速度でも MND02 と同程度という結果になった。1 ピクセルあたりのサンプル回数と復号化フィルタ係数の調整を行ったが、MND02 を上回ることはなかった。この原因としては、今回の 4 次のデルタシグマ回路に対し、スケジュールの関係で、寄生容量を考慮したポストレイアウトシミュレーションを行えなかったことが挙げられる。今後、ポストレイアウトシミュレーションを行い実機の性能を再現出来るか否かを確かめる予定である。確かめることが出来れば、次の素子のレイアウト修正にフィードバックさせることが出来る。一方で線形性能については MND02 を上回る性能が得られた。INL は 0.1%、6keV の X 線に対して 6eV の誤差である。INL はレイアウト設計よりも回路パラメタにより強く依存する性能指標であるため、事前の動作パラメタ最適化が正しく行われたとも言える。

(3)陽子・重粒子照射による新型 ASIC の

放射線耐性試験

一般に宇宙用 IC に対する放射線損傷には、トータルドーズ効果とシングルイベント効果の 2 種類がある。前者は、衛星が南大西洋地磁気異常帯付近を通過するたびに浴びる捕捉陽子を主要因とした経年的損傷である。特に MOS トランジスタの絶縁層に正孔が蓄積され、MOS スイッチのしきい値電圧を変化させるなどの影響を与える。後者は特に単一の重粒子が入射した際にウエハ内で生成する電子正孔対により、一時的にデジタル回路のビットが入れ替わるアップセットや、ウエハ内に存在する寄生サイリスタをオン状態にしてしまうラッチア

ップが問題となる。特にラッチアップは素子の熱破壊につながる致命的損傷である。そこで本研究のカメラで使用するセンサに対して、陽子線および重粒子線照射による放射線耐性評価実験を行った。まず線エネルギー付与が大きい Xe 6MeV/u (57.9 MeV · cm²/mg) と Fe 6MeV/u (22.0 MeV · cm²/mg) をベアチップに照射し、ラッチアップ耐性を測定した。照射中も軌道上と同じ信号処理を行わせたが、ラッチアップは一度も起こらなかった。そこで、高度 550km 軌道傾斜角 30° の軌道におけるラッチアップの起こる頻度の上限値を、48 年に一度(90%信頼度)と求めた。実際にはラッチアップしても熱破壊を防ぎつつ電源をオフ・オンする機構を設けるため、MND03 を用いた CCD カメラのラッチアップ耐性は問題ないと言える。

次に陽子線 100MeV を照射し、トータルドーズ耐性を測定した。前述の想定軌道で予想される吸収線量率は 550rad/year である。典型的なミッション寿命を 10 年とすると、マージンを考えなければ、少なくとも 5-6krad の耐性が要求される。我々はベアチップに対して吸収線量に換算して 1Mrad 以上の陽子線を照射した。照射中はラッチアップ試験と同様に疑似 CCD 信号を処理させ、入力等価雑音や線形性能、ゲインなどの性能変化をモニタした。その結果を図 4 に示す。軌道上で 590 年に相当する吸収線量に対して、入力等価雑音と積分非線形性の有意な劣化は見られなかった。

以上の試験から MND03 は、雑音性能は期待通りではなかったが、衛星搭載 X 線 CCD カメラのフロントエンド回路としては十分な機能を持つことが検証された。

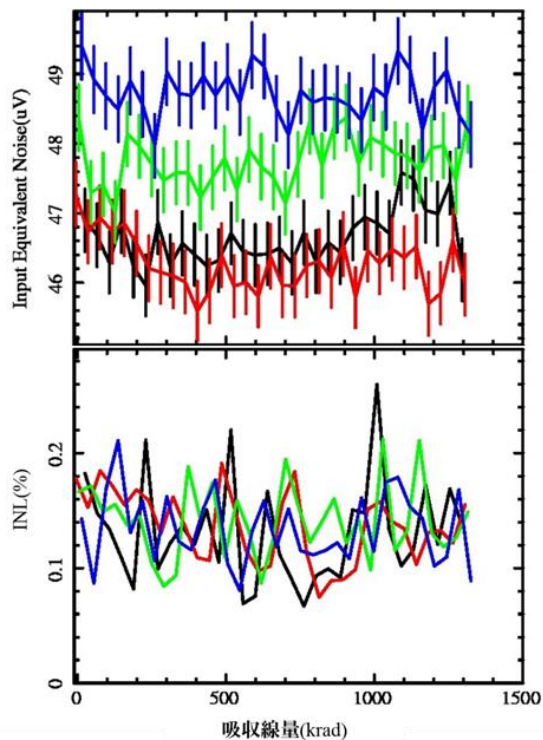


図 4 : (上) 吸収線量に対する入力等価雑音の推移。4つの信号系統それぞれを別の色で示している。いずれの系統でも有意な性能劣化は見られない。(下) 積分非線形性の推移。

(4) CCD カメラシステムに組み込んだの

動作実証

次は実際に CCD 素子と接続してカメラシステムとして動作させることが課題である。ASTRO-H/SXI のために申請者らが開発した CCD 駆動回路、デジタルエレクトロニクス回路による MND03 の動作準備を進めている。

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 17 件)

- ① Kiyoshi Hayashida et al.、「Soft X-ray Imager (SXI) onboard ASTRO-H」、Proc. of SPIE、査読無、8443、2012、pp.844323
- ② Hiroshi Nakajima et al.、「Fe-rich and S-rich ejecta distribution in the Cygnus Loop」、Proc. of SUZAKU2011: Exploring the X-ray Universe、査読無、Vol.1、2012、

pp.269-270

- ③ Shutaro Ueda et al.、「X-ray measurement of the elemental abundances at the outskirts of the Perseus cluster with Suzaku」、Proc. of Galaxy Clusters as Giant Laboratories、査読無、Vol.1、2012、pp.58
- ④ Shutaro Ueda et al.、「Measurement of the soft X-ray response of P-channel back-illuminated CCD」、Nucl. Instru. Methods in Phys. Research A、査読有、704、2013、pp.140-146
- ⑤ Hiroshi Nakajima et al.、「Single Event Effect Characterization of the Mixed-Signal ASIC Developed for CCD Camera in Space Use」、Nucl. Instru. Methods in Phys. Research A、査読有、731、2013、pp.166-171
- ⑥ Koji Mori et al.、「Proton Radiation Damage Experiment on P-Channel CCD for an X-ray CCD camera onboard」、Nucl. Instru. Methods in Phys. Research A、査読有、731、2013、pp.160-165
- ⑦ Shutaro Ueda et al.、「Suzaku observations of the type 2 QSO in the central galay of the phenenix cluster」、Astrophysical Journal、査読有、778、2013、pp.33
- ⑧ Hiroshi Tsunemi et al.、「Soft x-ray imager onboard ASTRO-H」、Proc. of SPIE、査読無、8859、2013、pp.88590C
- ⑨ Ryo Nagino et al.、「Proton irradiation test to Scintillator-directory-coupled CCD onboard FFAST」、Proc. of SPIE、査読無、8859、2013、pp.88590G
- ⑩ Fumiyoshi Kamitsukasa et al.、「Suzaku Discovery of Fe K-shell line from the O-rich SNR G292.0+1.8」、Publication of the Astronomical Society of Japan、査読有、66、2014、pp.66
- ⑪ Kumiko Nobukawa et al.、「Use of a charge-injection technique to improve performance of the Soft X-ray Imager

- aboard ASTRO-H」、Nucl. Instru. Methods in Phys. Research A、査読有、765、2014、pp.269-274
- ⑫ Kiyoshi Hayashida et al.、「Soft X-ray Imager (SXI) onboard ASTRO-H」、Proc. of SPIE、査読無、9144、2014、pp.914429
- ⑬ Hiroshi Nakajima et al.、「Performance of front-end mixed-signal ASIC for onboard CCD cameras」、Proc. of SPIE、査読無、9154、2014、pp.91541C
- ⑭ Hiroshi Nakajima et al.、「Screening of ASIC for signal processing of Soft X-ray Imager onboard ASTRO-H」、JAXA Research and Development Report、査読有、JAXA-RR-14-007、2015、pp.1-10
- ⑮ Takaaki Tanaka et al.、「The Soft X-ray Imager (SXI) for the ASTRO-H mission」、Proc. of SPIE、査読無、9601、2015、pp.96010E
- ⑯ Fumiyoshi Kamitsukasa et al.、「Global Distribution of Ionizing and Recombining Plasmas in the Supernova Remnant G290.1-0.8」、Publication of the Astronomical Society of Japan、査読有、67、2015、pp.161-168
- ⑰ Hiroshi Nakajima et al.、「Development of Low-noise High-speed Analog ASIC for X-ray CCD Cameras and Wide-band X-ray Imaging Sensors」、Nucl. Instru. Methods in Phys. Research A、査読有、2016、in Press
- ⑤ 中嶋大、「衛星搭載 CCD カメラ信号処理用アナログ ASIC 素子の開発」、日本物理学会、2013.3
- ⑥ 中嶋大、「ASTRO-H 搭載 X 線 CCD カメラ SXI 用 CCD 素子スクリーニング」、日本物理学会、2013.9
- ⑦ 中嶋大、「広帯域大面積 CCD 素子 (Scintillator-Decoupled CCD) の放射線耐性」、日本天文学会、2013.9
- ⑧ Hiroshi Nakajima、「Performance of front-end mixed-signal ASIC for onboard CCD cameras」、SPIE、2014.6
- ⑨ 井上翔太、「次世代衛星搭載 CCD 高速低雑音処理 ASIC の性能」、日本天文学会、2014.9
- ⑩ 中嶋大、「次世代衛星搭載 CCD カメラ用 ASIC の開発(2)」、日本物理学会、2015.3
- ⑪ 中嶋大、「次世代衛星搭載 CCD 高速低雑音処理 ASIC の開発」、日本天文学会、2015.3
- ⑫ Hiroshi Nakajima、「Development of Low-noise High-speed Analog ASIC for X-ray CCD Cameras and W-de-band X-ray Imaging Sensors」、10th International “Hiroshima” Symposium on the Development and Application of Semiconductor Tracking Detectors、2015.9
- ⑬ 廣瀬真之介、「X 線 CCD 信号読み出し ASIC の開発」、X 線光学シンポジウム、2015.11
- ⑭ 今谷律子、「広帯域 X 線イメージングセンサ SDCCD の硬 X 線分光性能評価」、宇宙科学シンポジウム、2016.1
- ⑮ 今谷律子、「広帯域 X 線イメージングセンサ SDCCD の硬 X 線分光性能評価」、日本天文学会、2016.3
- 〔その他〕
ホームページ等
<http://wwwxray.ess.sci.osaka-u.ac.jp/OskXrayTlabHP/ASIC.html>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

中嶋 大 (NAKAJIMA, Hiroshi)

大阪大学・理学研究科・助教

研究者番号：70570670

〔学会発表〕(計 15 件)

- ① 菅裕哲、「ASTRO-H 搭載 X 線 CCD カメラ(SXI)用 CCD 素子のスクリーニングシステムの構築 2」、日本天文学会、2012.9
- ② 中嶋大、「ASTRO-H 搭載 SXI 用アナログエレクトロニクスの開発」、日本天文学会、2012.9
- ③ 中嶋大、「ASTRO-H 搭載 X 線 CCD カメラ(SXI)信号処理用 ASIC のシングルイベント耐性」、日本物理学会、2012.9
- ④ 中嶋大、「衛星搭載 CCD カメラ高速低雑音信号処理のためのアナログ ASIC の開発」、日本天文学会、2013.3