

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成24年 5月18日現在

機関番号：14401

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2010～2011

課題番号：22740122

研究課題名（和文） X線 CCD の高速低雑音信号処理に向けた
アナログ・デジタル混在 ASIC の開発研究研究課題名（英文） Development of Mixed Analog ASIC
for High-Speed Low-Noise Signal Processing of X-ray CCDs

研究代表者

中嶋 大 (NAKAJIMA HIROSHI)

大阪大学・大学院理学研究科・助教

研究者番号：70570670

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を目的としたアナログ・デジタル混在 ASIC (特定用途向け集積回路) を試作・開発した。従来カメラの約 10 倍の速度での低雑音動作に成功した。陽子及び重粒子線を用いた放射線耐性試験を行い、低高度地球周回軌道上での長期安定動作に耐えうることを実証した。CCD 素子と接続して X 線スペクトルを取得し、CCD カメラの信号処理回路として正常に機能することを実証した。

研究成果の概要（英文）：We designed and fabricated a mixed analog ASIC (Application-Specific Integrated Circuit) aimed for high-speed low-noise signal processing of X-ray CCD camera. It functioned with low noise at the speed of about 10 times faster than the electronics of the conventional cameras. The radiation tolerance tests using protons and heavy ions showed the sufficient hardness at the low earth orbit. X-ray spectrum was obtained using CCD and the ASIC, which verified the proper function of the ASIC as the signal processing circuit.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2010 年度	2,400,000	720,000	3,120,000
2011 年度	1,000,000	300,000	1,300,000
総計	3,400,000	1,020,000	4,420,000

研究分野：X線天文学

科研費の分科・細目：天文学・天文学

キーワード：X線、CCD、ASIC、宇宙、天文、衛星搭載機器

1. 研究開始当初の背景

近年の X 線天文学の科学的成果の多くは、撮像と分光を同時に行うことが出来る X 線 CCD カメラによるものである。しかし将来における高感度 X 線望遠鏡を用いた撮像分光観測に向けて、時間分解能が乏しいことから性能の制限が懸念される。例えば活動銀河核やガンマ線バースト、一部の超新星残骸などの明るい X 線天体を観測すると、検出器面上で光子密度が高くなりすぎて重なり合い、各光子の正確なエネルギーが測定できない。よって本来 CCD の持つ優れた分光性能

を大幅に劣化させてしまう。実際現在でもこの問題が一部の観測で起きている。現在軌道上のすざく衛星の場合、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光子の重なりを防ぐため、露光時間を通常の 1/80 に抑えている。つまり観測効率が約 1%の間欠的観測になってしまっている。こうした観測上の制限を取り払う、すなわち 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が本研究の全体構想である。

2. 研究の目的

明るいX線天体の観測を間欠的にしてしまっている要因は、CCD 信号処理回路の処理速度が遅いことである。CCD は一般に信号電荷読出し口が少なく、読出し口一つ当たり百万ものピクセルを処理する。従来の個別 IC 回路の処理速度は1秒あたり高々十万ピクセル程度(ピクセルレート 100kHz)が限界であり、画像1枚あたりの読出し時間に数秒も掛かっている。これでは1秒未満の時間変動を示す天体の連続観測は不可能である。根本的な解決策は、CCD の読出し口の数を大幅に増やして同時並列読出しを行うことであるが、これは信号処理回路の系統を増やすことにもなる。従来の個別 IC 回路のまま系統を増やせば衛星の質量・電力・スペースを大きく浪費することになり非現実的である。そこで本研究では、従来の信号処理回路を劇的に縮小し、さらにこれまでの10倍の高速低雑音信号処理が可能なアナログ・デジタル混在 ASIC チップを試作開発することを目的とする。大きさは3mm 四方、個別 IC 一個分である。消費電力は従来回路の1%、重量は0.1%にも満たない。

3. 研究の方法

アナログ・デジタル混在 ASIC の少量試作を行い、チップ単体の試験でピクセルレート1MHz、読みだし雑音電子換算<5個の性能を達成する。申請者はこれまで ASIC 少量試作を行った結果、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 ASIC 開発をさらに進め、低雑音を維持しつつも高速信号処理が可能なアナログ・デジタル混在チップを実現する。回路構成としては、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ものである。ASIC チップ単体での電気的性能を測定した後、チップを CCD カメラシステムに組み込み、X線撮像分光実験を行い、雑音・分光性能を測定する。CCD 素子は、申請者の研究室と浜松ホトニクス社等とが共同開発したオリジナル素子「CCD Pch NeXT4(以下 NeXT4)」を用いる。NeXT4 は200 μ m厚のウェハが完全空乏化しており、裏面照射により0.3-20keVの広帯域撮像分光が可能な素子である。また地球周回軌道における長期安定動作を保障するため、放射線耐性試験及び温度環境試験を行う。

4. 研究成果

(1) ASIC 単体の雑音性能

単体電気試験の結果、入力等価雑音は約30 μ V

であった。これは既存の天文衛星搭載X線 CCD カメラと同等の雑音性能である。さらにピクセルレート 500kHz での動作に成功した。ゲイン・入力信号レンジ・積分非線形を含め、ASIC 単体性能としては目標を達成した(図1)。仮に変換効率が6 μ V/e-のCCDと接続した場合、読み出し雑音は電子数換算で約5個となる。

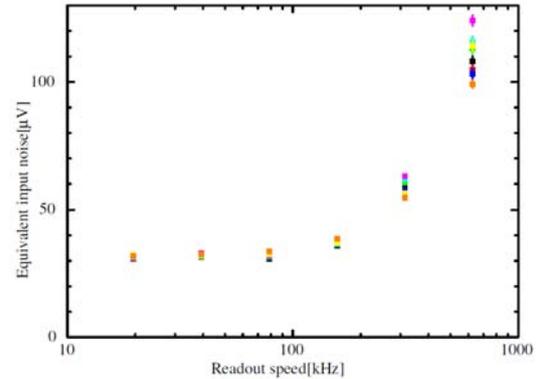


図1: ピクセルレートの関数としての入力等価雑音。256kHz以下で<40 μ Vの低雑音を実現した。512kHzでも100 μ V以下の雑音レベルであり、高速動作を実証した。

(2) ASIC の放射線耐性

放射線が半導体素子へ与える影響は、素子がさらされた放射線の累積効果によるものと、荷電粒子1粒子の入射による効果によるものと大きく分けられる。前者をトータルドーズ(TID)効果、後者をシングルイベント効果(SEE)と総称している。以下、この2つの現象について、放射線医学総合研究所重粒子線がん治療装置(HIMAC)を用いて耐性試験を行った。

① TID 効果

ASICチップに100MeVのプロトンを照射した。TIDに対する耐性評価は、素子の性能を吸収線量(単位質量あたりに吸収されたエネルギー、単位はrad)の関数として評価する。吸収

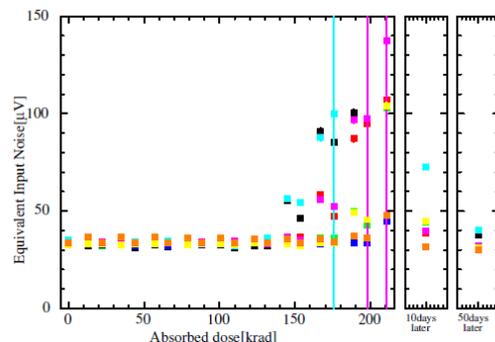


図2: 吸収線量の関数としての入力等価雑音。データ点が複数あるのは、ASIC1チップに含まれる8個のADCそれぞれのデータを示しているため。

線量の関数としての入力等価雑音を図 2 に示す。140krad 以下の吸収線量では単体性能に変化はみられず、この値を超えたあたりから、各単体性能のパラメータについて、一部の ADC において性能の劣化が見られた。低高度地球周回軌道 (LEO: ここでは高度 550km、軌道傾斜角 30° とする) 上で予想される吸収線量率は約 550rad/yr であるので、10 年間の安定動作と 2 倍のマーヅンを見込めば、22krad が要求値である。本実験の結果はそれを十分に超える耐性を実証した。

②SEE

SEE は、半導体デバイス内に単一の荷電粒子が入射した際、荷電粒子の落としたエネルギーがある閾値を超えた瞬間に起こる確率的現象である。主にチップ破壊につながる致命的損傷であるシングルスイベントラッチアップ (Single Event Latch-up: SEL) と、データの一部が異常値を示すシングルスイベントアップセット (Single Event Upset: SEU) の 2 つがある。

一般に、入射荷電粒子が半導体デバイスに落としたエネルギーを表す線エネルギー付与 (Linear Energy Transfer: LET) が大きい粒子ほど SEE を起こしやすい。そこで我々は、LET の非常に大きい鉄イオン 6MeV/u とキセノンイオン 6MeV/u を用いて SEL 耐性試験を行った。結果として大量のイオンを照射しても SEL は観測されなかった。軌道上で ASIC に入射する粒子の LET 分布をシミュレートし (図 3)、SEL の起こる頻度を見積もったところ、6700 年に 1 回以下であることが分かった。

次に SEU 耐性試験のために、プロトンを含む複数の LET の核種を照射した。図 4 に示すように、ある一定の振幅の CCD 疑似アナログ信号を処理させている間にも、粒子照射中には以上な波高値を示すピクセルが現れた。これはチップ内部で SEU あるいはアナログ回路に粒子起源の電荷が流れ込んだことによる。こ

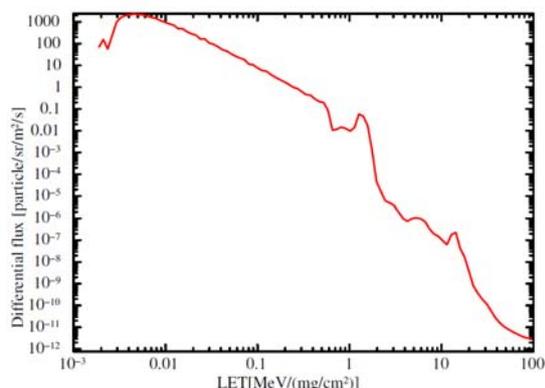


図 3: LEO 上で予想される荷電粒子の LET スペクトル。

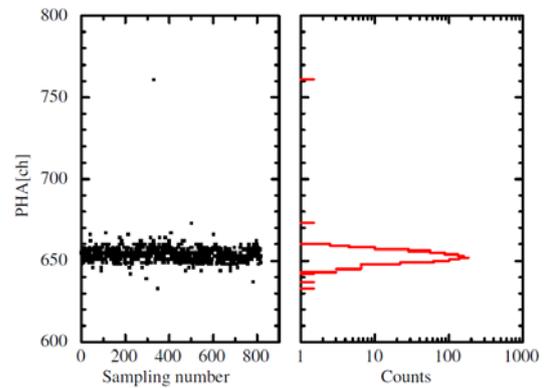


図 4: キセノンイオン照射中に振幅一定の入力信号を処理させた場合の出力波高値散布図 (左) と、散布図を縦軸に投影した波高値のヒストグラム (右)。

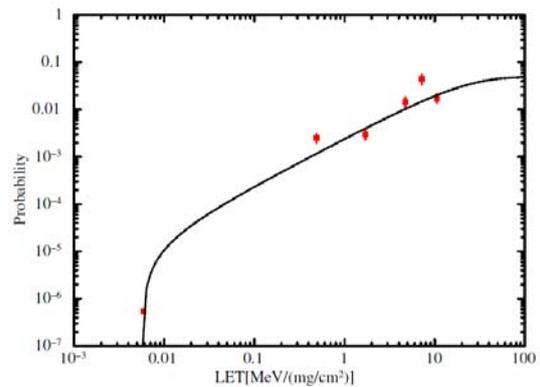


図 5: LET の関数としての SEU イベントが起こる確率。ASIC チップに一樣に垂直に粒子が入射することを仮定している。実線は Weibull curve と呼ばれる、SEU 断面積を再現する際に一般に使用される関数で、我々のデータにフィットさせたもの。

の異常値を示すピクセルの頻度を、LET の関数として測定した (図 5)。

LEO 上で予想される非 X 線バックグラウンド (Non X-ray Backgramud: NXB) は 1 秒あたりおよそ 0.1 イベントである。一般的な 1 天体当りの観測時間である 100k 秒の観測での SEU イベント数と NXB イベントを比較すると、前者の頻度は後者に対して多く見積もっても数%程度であり、観測に影響のない頻度といえる。

以上より、放射線による全ての種類の影響に対して十分な耐性を持つことが実証できた。

(3) CCD カメラとしての雑音性能

CCD 素子と本研究の ASIC チップを接続して放射性同位体 ^{55}Fe からの X 線を照射してスペクトルを取得した。従来の CCD カメラと同じピクセルレート (68kHz) で、

読み出し雑音電子数換算 8.0 個であった。この CCD 素子は変換効率が約 $5.5\mu\text{V}/\text{e}^-$ であるので、ASIC 起源の読み出し雑音は電子数換算で 5.5 個、つまり ASIC 以外を起源とする雑音が主要である。K α 線のエネルギー分解能は 154 eV (FWHM) @ 5.9keV を得た。これにより ASIC が CCD カメラの信号処理回路として正常に機能することを実証した。

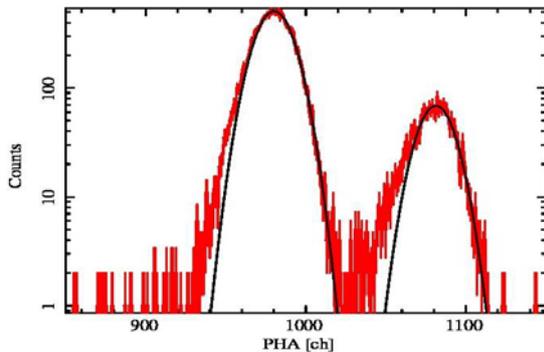


図 6: 本研究の ASIC チップと X 線 CCD 素子を接続して得られた ^{55}Fe のスペクトル。読み出し雑音は電子数換算で 8.0 個、エネルギー分解能は 150eV (FWHM) @ 5.9keV である。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 (計 6 件)

- ① Takahisa Fujinaga, Hiroshi Nakajima, Development of the data acquisition system for the x-ray CCD camera (SXI) onboard ASTRO-H, Proceedings of the SPIE, 査読無, 8145 (2011) 814503-814503-7
- ② Shutaro Ueda, Hiroshi Nakajima, Development of the x-ray CCD for SXI on board ASTRO-H, Proceedings of the SPIE, 査読無, 8145 (2011) 814504-814504-9
- ③ Kiyoshi Hayashida, Hiroshi Nakajima, Development of the soft x-ray imager (SXI) for ASTRO-H, Proceedings of the SPIE, 査読無, 8145 (2011), 814505-814505-9
- ④ Hiroshi Nakajima, Development of the analog ASIC for multi-channel readout X-ray CCD camera, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A, 査読有, 632 (2011), 128-132
- ⑤ Satoru Katsuda, Hiroshi Nakajima, Possible Charge-Exchange X-Ray Emission in the Cygnus Loop Detected with Suzaku, The Astrophysical Journal, 査読有, 730 (2011), 24-39
- ⑥ Hiroshi Tsunemi, Hiroshi Nakajima, Soft X-ray Imager (SXI) Onboard ASTRO-H, Proceedings of the SPIE, 査読無, 7732 (2010), 773210-773210-11

〔学会発表〕 (計 10 件)

- ① 菅 裕哲, 中嶋 大, X 線衛星 ASTRO-H 搭載 X 線 CCD カメラ SXI 用 CCD 素子の開発—スクリーニングシステムを用いた CCD 性能評価、日本天文学会、2012. 3. 19、龍谷大学
- ② 林田 清, 中嶋 大, X 線天文衛星 ASTRO-H 搭載 X 線 CCD カメラ (SXI) の開発の現状、日本天文学会、2012. 3. 19、龍谷大学
- ③ 穴吹 直久, 中嶋 大, FFAST 焦点面検出器 SD-CCD カメラ用デジタルエレクトロニクスの開発、宇宙科学シンポジウム、2012. 1. 5、宇宙科学研究所
- ④ 中嶋 大, FFAST 焦点面検出器 SDCCD カメラ用アナログ回路 (駆動/信号処理回路) の性能、宇宙科学シンポジウム、2012. 1. 5、宇宙科学研究所
- ⑤ 上田 周太郎, 中嶋 大, ASTRO-H 搭載軟 X 線 CCD カメラ (SXI) のシステム開発の現状、宇宙科学シンポジウム、2012. 1. 5、宇宙科学研究所
- ⑥ 菅 裕哲, 中嶋 大, ASTRO-H 搭載 SXI 用 CCD 素子エンジニアリングモデルの開発と性能評価、宇宙科学シンポジウム、2012. 1. 5、宇宙科学研究所
- ⑦ 平原 真帆, 中嶋 大, FFAST の軌道と期待される検出天体数、宇宙科学シンポジウム、2012. 1. 5、宇宙科学研究所
- ⑧ 中嶋 大, ASTRO-H 搭載 Soft X-ray Imager (SXI) 用 ASIC・Video Board の開発、日本天文学会、2011. 9. 21、鹿児島大学
- ⑨ 穴吹 直久, 中嶋 大, ASTRO-H 搭載 SXI (Soft X-ray Imager) 用 EGSE の開発、日本天文学会、2011. 9. 21、鹿児島大学
- ⑩ 堂谷 忠康, 中嶋 大, X 線天文衛星 ASTRO-H 搭載 X 線 CCD カメラ (SXI) の開発の現状、日本天文学会、2011. 9. 21、鹿児島大学
- ⑪ 穴吹 直久, 中嶋 大, FFAST 焦点面検出器のエレクトロニクス開発、宇宙科学シンポジウム、2011. 1. 5、宇宙科学研究所
- ⑫ 中嶋 大, FFAST 焦点面検出器 (SD-CCD カメラ) 用駆動/信号処理回路、宇宙科学シンポジウム、2011. 1. 5、宇宙科学研究所
- ⑬ 精松 高志, 中嶋 大, X 線天文衛星搭載用 CCD 素子評価システムの構築、宇宙科学シンポジウム、2011. 1. 5、宇宙科学研究所
- ⑭ 藤川 真里, 中嶋 大, 衛星搭載 X 線 CCD カメラ信号処理用 ASIC の開発の現状、宇宙科学シンポジウム、2011. 1. 5、宇宙科学研究所
- ⑮ 森 秀樹, 中嶋 大, X 線天文衛星搭載用 CCD 素子のスクリーニングシステムの構築、宇宙科学シンポジウム、2011. 1. 5、宇宙科学研究所
- ⑯ 藤川 真里, 中嶋 大, ASTRO-H 搭載用軟 X 線撮像検出器 (SXI) 信号処理用 ASIC の開発の現状、日本天文学会、2010. 9. 22、金沢大学

[その他]
ホームページ等
<http://wwwxray.ess.sci.osaka-u.ac.jp/0skXrayTlabHP/ASIC.html>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

中嶋 大 (NAKAJIMA HIROSHI)
大阪大学・大学院理学研究科・助教
研究者番号：70570670