

令和元年6月26日現在

機関番号：32704

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2015～2017

課題番号：15H03641

研究課題名(和文) 宇宙X線広視野高感度観測のための汎用高速低雑音アナログASICの開発研究

研究課題名(英文) Development of high-speed low-noise analog ASIC for high-sensitive cosmic X-ray observation

研究代表者

中嶋 大(Nakajima, Hiroshi)

関東学院大学・理工学部・准教授

研究者番号：70570670

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 13,500,000円

研究成果の概要(和文)：4次のデルタシグマ型ADC回路を用いたアナログデジタル混在ASICを開発した。新型ASICの単体性能試験を、専用基板を製作した上で行った。結果として、2016年に打ち上げた「ひとみ」衛星搭載ASICを上回る線形性能を実現した。放射線耐性を測定した結果、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、本研究で開発したASICを用いた場合のCCDカメラのラッチアップ耐性は問題ないと言える。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究により、将来の天文衛星で使用される、各種X線イメージャのカメラをコンパクト化させる目的を付けることが出来た。コンパクト化させるだけでなく、高速低雑音信号処理することで、高性能のカメラを製作することが可能である。本研究期間内に実績を作ったのはイメージャのうちCCDであるが、ほぼ同じ回路で他のイメージャにも応用が可能であり、非常に汎用性の高い研究成果を得たといえる。

研究成果の概要(英文)：We have developed an analog-digital mixed ASIC using a fourth-order delta sigma ADC circuit. The unit performance test of the new ASIC was conducted after the dedicated print circuit board was manufactured. As a result, we achieved linear performance that surpassed the ASIC onboard the Hitomi satellite launched in 2016. As a result of measuring the radiation resistance, the upper limit value of the frequency of latch-up in the orbit with a height of 550 km and an inclination angle of 30° was determined once in 48 years (90% reliability). In fact, even if latch-up is performed, a mechanism is provided to turn the power on and off while preventing thermal destruction, so it can be said that the latch-up resistance of the CCD camera when using the ASIC developed in this research is not a problem.

研究分野：X線天文学

キーワード：X線 イメージャ ASIC

様式 C-19、F-19-1、Z-19、CK-19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

将来の X 線天文衛星搭載イメージセンサの主要候補として、CCD、SOIPIX、DEPFET が世界各地で開発されていた。しかし、光子のパイルアップを防ぎつつ、センサからの微弱アナログ信号を高速低雑音信号処理することが共通の未解決課題となっていた。

2. 研究の目的

本研究では、次世代イメージセンサ候補の全てに適用可能な汎用アナログデジタル混在 ASIC を開発することを目的とした。1 系統あたりのサイズは 1mm 四方未満で、従来の個別パーツ回路に比べて 10 倍速の 1Mpix/sec、読出し雑音 5e-rms 未満の高速低雑音動作を行う。これにより、宇宙 X 線観測において現状不可能である、ブラックホールやガンマ線バースト、銀河系内超新星残骸等の、明るい X 線天体の高感度連続観測を可能にすることを目的とした。

3. 研究の方法

申請者は本研究以前に 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た。そこで本研究初年度では 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チップを実現した。以下具体的手法を述べる。まず高速動作に向け回路の一部変更を施す。申請者らは、雑音性能を決めるカギとなる $\Delta\Sigma$ モジュレータ (ADC) 部分に関して実データとシミュレーションの両面から解析を進めた結果、ADC 回路を 2 次から 4 次に高次化させることにより、 $\Delta\Sigma$ モジュレータの特徴であるノイズ整形機能が強化され、ピクセルレート 1MHz、読みだし雑音 $\leq 5e\text{-rms}$ の性能が達成できることをシミュレーションで明らかにした。さらに高次化の恩恵として、ASIC の駆動クロックパターンがより簡素になる。すなわち、ASTRO-H 用 ASIC では入力信号のオーバーサンプリング比を高くしなければならず、チャンネルごとに 2 つの ADC を必要とした。そのため ADC 間のゲインのずれを後段のソフトウェアで補正する必要があった。 $\Delta\Sigma$ モジュレータを高次化すると、従来よりも少ないサンプリング回数で低雑音を達成できることから、高速化の実現だけでなくゲインの補正を不要にするという効果もある。高次化回路の設計が済み次第、計算機上でシミュレーションを行って検証した。回路図からマスクレイアウトに起こす作業は外注でデジアンテックノロジー社に依頼する。レイアウトが決まると、各回路ブロックに生じる寄生容量・寄生抵抗が決まる。そこでこれらを考慮した各ブロックのシミュレーションを行い、その結果得た性能からレイアウトデザインにフィードバックを与えた。

4. 研究成果

2016 年 2 月に軌道投入された「ひとみ」衛星搭載 X 線 CCD カメラ (SXI) に採用された ASIC の実績をさらに発展させ、ひとみ衛星用 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。我々が今年度製作および性能評価した新型 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。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 1 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。

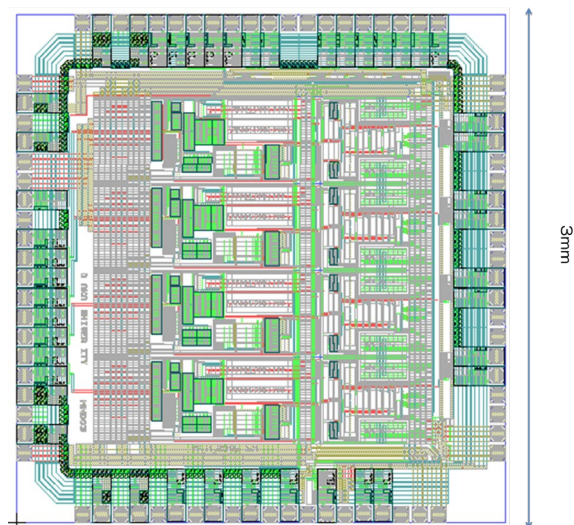


図 1: 新型 ASIC (MND03) のマスクレイアウト。3mm 四方のベアチップに 4 系統の信号回路を持つ。アナログ・デジタル両回路の電源ピンも含め、約 60 の入出力ピンを持つ。このベアチップを 15mm 四方の QFP にパッケージした後、後述の各種実験を行った。

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

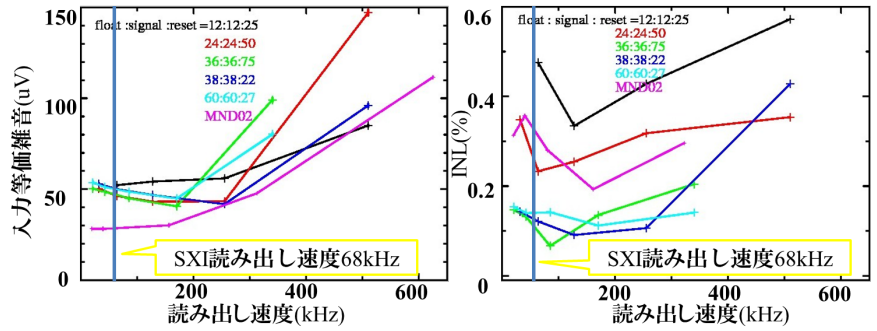
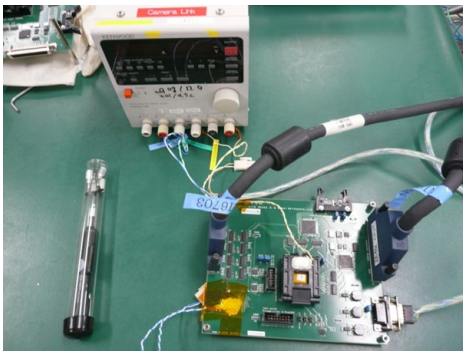


図 2: (左)MND03 単体性能試験用回路基板。専用ワイヤハーネスを通して複数のアナログ一定電圧信号を与え、アナログスイッチ回路で疑似信号を生成する。ASIC の出力信号は基板内のメモリ (FIFO) にバッファリングされた後に計算機に伝送する。復号化フィルタはソフトウェアに実装され、データ取得後に独立して復号する。(中)読み出し速度に対する入力等価雑音。200kHz 超ではパラメタの調整で MND02 程度になるが、低速域では雑音が多い。(右)積分非線形性。MND02 よりも小さく、優れた線形性能が得られている。

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 2 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。

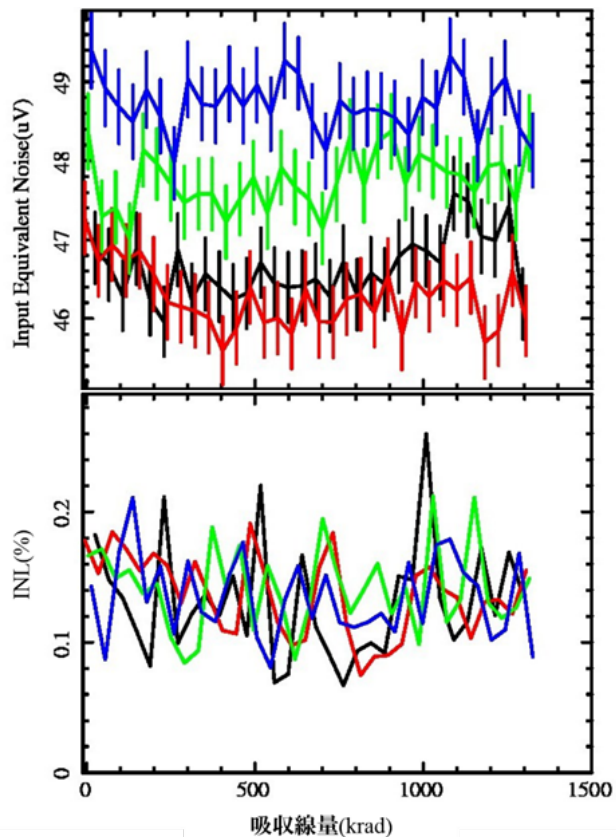


図 3 : (上) 吸収線量に対する入力等価雑音の推移。4 つの信号系統それぞれを別の色で示している。いずれの系統でも有意な性能劣化は見られない。(下) 積分非線形性の推移。

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。後者は、宇宙線が IC を通過する際に発生する高エネルギー粒子が MOS トランジスタの絶縁層に正孔を生成し、しきい値電圧を変化させる。この現象は、シングルイベント効果 (SEE) と呼ばれる。SEE は、宇宙線が IC を通過する際に発生する高エネルギー粒子が MOS トランジスタの絶縁層に正孔を生成し、しきい値電圧を変化させる。この現象は、シングルイベント効果 (SEE) と呼ばれる。SEE は、宇宙線が IC を通過する際に発生する高エネルギー粒子が MOS トランジスタの絶縁層に正孔を生成し、しきい値電圧を変化させる。この現象は、シングルイベント効果 (SEE) と呼ばれる。

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 3 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。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 14 件)

- ① Tomokage Yoneyama, Kiyoshi Hayashida, Hiroshi Nakajima, Hironori Matsumoto., 「Universal detection of high-temperature emission in X-ray isolated neutron stars」、Publications of the Astronomical Society of Japan、査読有、71、2019、17 <https://doi.org/10.1093/pasj/psy135>
- ② Yuichiro Ezoe, Hiroshi Nakajima (15 人中 10 番目), et al., 「Ultralightweight x-ray telescope missions: ORBIS and GEO-X」、Journal of Astronomical Telescopes, Instruments, and Systems、査読有、4、2018、46001 <https://doi.org/10.1117/1.JATIS.4.4.046001>
- ③ Hiroshi Nakajima, Satomi Onishi, Jun-ichi Iwagaki, Junko S. Hiraga, John P. Doty, Hirokazu Ikeda, Yuichiro Ezoe, Naoki Isobe, Hironori Sahara, 「Development of focal plane x-ray detector aboard a microsatellite for monitoring supermassive blackholes」、Proc. of SPIE、査読無、10699、2018、1069963 <https://doi.org/10.1117/12.2311990>
- ④ Hiroshi Nakajima et al. (49 人中 1 番目), 「In-orbit performance of the soft X-ray imaging system aboard Hitomi (ASTRO-H)」、Publications of the Astronomical Society of Japan、査読有、70、2018、21 <https://doi.org/10.1093/pasj/psx116>
- ⑤ Hiroshi Nakajima et al. (193 人中 1 番目), 「Glimpse of the highly obscured HMXB IGR J16318-4848 with Hitomi」、Publications of the Astronomical Society of Japan、査読有、70、2018、17 <https://doi.org/10.1093/pasj/psx154>
- ⑥ Takaaki Tanaka, Hiroyuki Uchida, Hiroshi Nakajima (28 人中 3 番目), et al., 「The Soft X-ray Imager (SXI) aboard Hitomi (ASTRO-H)」、Journal of Astronomical Telescopes, Instruments, and Systems、査読有、4、2018、11211 <https://doi.org/10.1117/1.JATIS.4.1.011211>
- ⑦ Hiroshi Nakajima, 「Astronomical Imaging with the X-ray Observatory Hitomi」、Nucl. Instru. Methods in Phys. Research A、査読有、873、2017、16 <https://doi.org/10.1016/j.nima.2017.02.023>
- ⑧ Tomokage Yoneyama, Hiroshi Nakajima (5 人中 3 番目) et al., 「Discovery of a keV-X-ray excess in

- RX J1856.5-3754」、Publication of the Astronomical Society of Japan、査読有、69、2017、50
<https://doi.org/10.1093/pasj/psx025>
- ⑨ Hiroshi Nakajima (11人中1番目) 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、831、2016、283-287 <https://doi.org/10.1016/j.nima.2016.04.040>
- ⑩ Hiroshi Tsunemi, Hiroshi Nakajima (25人中5番目) et al.、「Soft x-ray imager (SXI) onboard ASTRO-H」、Proc. of SPIE、査読無、9905、2016、990510 <https://doi.org/10.1117/12.2230672>
- ⑪ Hiroshi Nakajima (7人中1番目) 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、1-10 <https://repository.exst.jaxa.jp/dspace/handle/a-is/236426>
- ⑫ Takaaki Tanaka, Hiroshi Nakajima (25人中6番目) et al.、「The Soft X-ray Imager (SXI) for the ASTRO-H mission」、Proc. of SPIE、査読無、9601、2015、96010E <https://doi.org/10.1117/12.2190808>
- ⑬ Fumiyoshi Kamitsukasa, Hiroshi Nakajima (8人中4番目) 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、161-168 <https://doi.org/10.1093/pasj/psu149>
- ⑭ Satoru Katsuda, Hiroshi Nakajima (10人中7番目) et al.、「Kepler's Supernova: An Overluminous Type Ia Event Interacting with a Massive Circumstellar Medium at a Very Late Phase」、Astrophysical Journal、査読有、808、2015、49 <https://doi.org/10.1088/0004-637X/808/1/49>
〔学会発表〕(計18件)
- ① Hikari Kashimura, Hiroshi Nakajima、「Characterization and calibration of the front-end ASIC for the X-ray CCD camera aboard the XRISM satellite」、14th International Astronomical Consortium for High Energy Calibration meeting (国際学会)、2019.5.20、湘南国際村センター
- ② Hiroshi Nakajima, Satomi Onishi, Jun-ichi Iwagaki, Junko S. Hiraga, John P. Doty, Hirokazu Ikeda, Yuichiro Ezoe, Naoki Isobe, Hironori Sahara、「Development of focal plane x-ray detector aboard a microsatellite for monitoring supermassive blackholes」、SPIE Space Telescopes and Instrumentation、2018.6.14、Austin
- ③ Yuichiro Ezoe, Yoshizumi Miyoshi, Satoshi Kasahara, Tomoki Kimura, Kumi Ishikawa, Masaki Fujimoto, Kazuhisa Mitsuda, Hironori Sahara, Naoki Isobe, Hiroshi Nakajima, Takaya Ohashi, Harunori Nagata, Ryu Funase, Munetaka Ueno, Graziella Branduardi-Raymont、「Ultralightweight x-ray telescope missions: ORBIS and GEO-X」、SPIE Space Telescopes and Instrumentation、2018.6.14、Austin
- ④ Koki Okazaki, Kiyoshi Hayashida, Hiroshi Nakajima, Riku Shomura, Tomokage Yoneyama, Hironori Matsumoto, Hiroshi Tsunemi, Koji Mori, Masahiro Tsujimoto, Yoshitomo Maeda, Ken Ebisawa、「The spectral response of X-ray CCDs in the energy band around Si-K edge: a solution to the Si-K edge problem for the XIS onboard Suzaku」、SPIE Space Telescopes and Instrumentation、2018.6.14、Austin
- ⑤ Kiyoshi Hayashida, Tomoki Kawabata, Takashi Hanasaka, Kazunori Asakura, Tomokage Yoneyama, Koki Okazaki, Shuntaro Ide, Hironori Matsumoto, Hiroshi Nakajima, Hisamitsu Awaki, Hiroshi Tsunemi、「Sub-arcsecond imaging with multi-image x-ray interferometer module (MIXIM) for very small satellite」、SPIE

Space Telescopes and Instrumentation、2018.6.14、Austin

- ⑥ Kiyoshi Hayashida, Hiroshi Tomida, Koji Mori, Hiroshi Nakajima, Takaaki Tanaka, Hiroyuki Uchida, et al.、「Soft x-ray imaging telescope (Xtend) onboard X-ray Astronomy Recovery Mission (XARM)」、SPIE Space Telescopes and Instrumentation、2018.6.14、Austin
- ⑦ Y. Kanemaru, J. Sato, K. Mori, H. Nakajima, et al.、「Radiation Hardness of a P-Channel Notch CCD Developed for the X-ray CCD Camera onboard the XRISM Satellite」、International Workshop on Semiconductor Pixel Detectors for Particles and Imaging (PIXEL2018)、2018.12.10、Taipei
- ⑧ 中嶋大、「X線天文衛星「ひとみ」による大質量X線連星 IGR J16318-4848 の観測」、日本物理学会、2017.3.19、大阪大学
- ⑨ 村上弘志、「X線天文衛星「ひとみ」搭載軟X線撮像検出器 SXI の軌道上性能と較正の現状 II」、日本天文学会、2017.3.17、九州大学
- ⑩ Hiroshi Nakajima、「Hitomi Observation of the Highly Obscured High-Mass X-ray Binary IGR J16318-4848」、7 years of MAXI : monitoring X-ray transients (国際学会)、2016.12.5、理研
- ⑪ 中嶋大、「ひとみ衛星搭載軟X線撮像検出器(SXI)：軌道上性能と較正の現状」、日本物理学会、2016.9.24、宮崎大学
- ⑫ Hiroshi Nakajima、「Astronomical Imaging with the X-ray Observatory Hitomi」、Imaging 2016 (招待講演) (国際学会)、2016.6.13、ストックホルム
- ⑬ 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、2016.3.16、首都大学東京
- 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、2016.1.6、宇宙研
- ⑮ 廣瀬真之介、「X線 CCD 信号読出し ASIC の開発」、X線光学シンポジウム、2015.11.17、名古屋大学
- ⑯ 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 (国際学会)、2015.9.25、西安
- ⑰ Shota Inoue、「Modeling the spectral response for the soft X-ray imager onboard the ASTRO-H satellite」、10th International “Hiroshima” Symposium on the Development and Application of Semiconductor Tracking Detectors (国際学会)、2015.9.25、西安
- ⑱ 中嶋大、「ASTRO-H 搭載軟X線撮像検出器 SXI の現状」、日本天文学会、2015.9.10、甲南大学

[その他]

ホームページ等

<http://wwwxray.ess.sci.osaka-u.ac.jp/OskXrayTlabHP/ASIC.html>

紀要

天文月報 2019年6月号記事

http://www.asj.or.jp/geppou/archive_open/2019_112_06/112-6_363.pdf

※科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。