

令和 3 年 6 月 10 日現在

機関番号：32704

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2018～2020

課題番号：18H01256

研究課題名(和文)宇宙硬X線観測のための広帯域高速コンパクトデジタルカメラの開発研究

研究課題名(英文)Development of wide-band high-speed compact digital camera for cosmic hard 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) 13,000,000円

研究成果の概要(和文)：もともと可視光および紫外光の高感度撮像のために製作されたCMOSセンサに注目し、冷却して単色X線を照射するシステムを構築した。22.1keVのX線に対して0.94keV(FWHM)のエネルギー分解能を達成した。これは従来のCCDカメラを上回るモノであり、宇宙硬X線観測に向けて十分な撮像分光性能を実証した。またセンサに対して陽子線および重粒子線を照射した結果、想定する衛星寿命を超える損傷を与えたにもかかわらず55Feからの輝線を分解出来ており、また致命的な故障も発生しなかった。これらの成果により、衛星搭載可能性が高まった。また、放射線シールドを設計製作した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

将来の高感度硬X線望遠鏡と従来のCCDを用いて観測したとすると、硬X線は検出器を透過してしまい検出できず、軟X線にしても検出器面上で光子密度が高くなりすぎて重なり合い(パイルアップ)、各光子の正確なエネルギーが測定できなくなるが、本研究で開発したCMOSを用いることで、パイルアップのない、連続的な観測を広帯域で行う見込みが得られた。

研究成果の概要(英文)：We have developed complementary MOS (CMOS) sensors originally fabricated for the sensitive visible light imaging. We irradiate the sensors with monochromatic X-rays from  $^{109}\text{Cd}$  (22.1keV). The energy resolution of 0.94 keV (FWHM) is better than that of conventional CCD camera. Radiation tolerance was evaluated with proton and heavy ion beams. We tested the device with the total dose of 100krad, which is much higher than the dose expected in the lifetime of the ordinary astronomical satellite. The Ka and K $\beta$  from  $^{55}\text{Fe}$  could be resolved after the irradiation. Furthermore, there was no critical malfunction in the heavy ion test, which ensures the radiation tolerance in space.

研究分野：X線天文学

キーワード：X線イメージング CMOS 放射線耐性

1. 研究開始当初の背景

X線天文学は、X線望遠鏡と焦点面検出器の進歩が未知の天体・未知の物理の発見を導いてきた。優れた結像性能と硬X線に対する高い集光力を合わせ持つ、高感度硬X線望遠鏡の開発が進む一方で、焦点面検出器には将来観測に向けて大きな弱点が残っていた。主力のX線CCDセンサを用いようとした場合、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。宇宙X線観測における分光とは、天体から到来する光子一つ一つのエネルギーを測定することである。にもかかわらず、将来の高感度硬X線望遠鏡と従来のCCDを用いて観測したとすると、硬X線は検出器を透過してしまい検出できず、軟X線にしても検出器面上で光子密度が高くなりすぎて重なり合い(パイルアップ)、各光子の正確なエネルギーが測定できなくなる。実際既にこの問題が一部の観測で起きている。すざく衛星やひとみ衛星の場合、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1/40に抑えている。つまり観測効率が~2%の間欠的観測になってしまっている。そこでX線CCDに代わる次世代のイメージセンサを用いて、こうした観測上の制限を取り払う必要があった。

2. 研究の目的

硬X線まで感度を持たせた高速CMOSセンサを開発し、時間分解能、広帯域感度、さらに撮像分光性能の全てにおいて優れた、宇宙硬X線観測用カメラを開発することが本研究の目的である。またCMOSセンサの信号処理回路として専用読み出し回路を開発することにより、宇宙硬X線観測用コンパクトデジタルカメラを実現する。これにより、現状のX線望遠鏡と検出器の組み合わせでは不可能である、ブラックホールやガンマ線バースト等の明るいX線天体の連続観測を可能にし、極限重力場環境における物理の解明につなげる。

3. 研究の方法

本研究は大きく、以下の3ステップで開発を進める。第一に、広帯域高速イメージセンサを製作・性能評価する。第二に、CMOSセンサ専用読み出し回路を設計・製作する。最後に、CMOSと読み出し回路を組合せ、CMOSデジタルカメラとして完成させる。最も重要なセンサの撮像分光性能については、センサ単体で行う。その際に必要な実験設備、特に真空槽・冷却装置・単色X線発生装置といった大型あるいは高額な設備は、関東学院大学の研究室で稼働しているものを用いる。

4. 研究成果

我々は、もともと可視光および紫外光の高感度撮像のために製作されたGpixel社のCMOSセンサに注目した。CCDと比較しておよそ1000倍もの高い時間分解能を持ちつつ、暗電流と読み出し雑音が低いため、X線撮像分光が可能と予想された。実際に放射性同位元素及びX線発生装置からの単色X線照射し、その撮像分光性能を測定した。とくに硬X線に対する応答に注目し、放射性同位元素<sup>109</sup>Cdを用いてAg K $\alpha$ /K $\beta$ 線のスペクトルを照射した。センサは-30°Cに冷却した状態である。エネルギー分解能0.94keV(FWHM)@22.1keVであった。すなわち $\Delta E/E=4.3\%$ であり、これは、我々が従来開発していた、シンチレータ付きCCDの分解能4.6%をしのぐ性能であった。読み出し雑音は2.0 e<sup>-</sup> rmsであり、これも従来のCCDより優れている。

読み出し雑音が低いことから軟X線の分光性能も期待される。そこで<sup>55</sup>Fe(5.9keV)およびAl K輝線(1.49keV)からのX線を照射した。前者の結果を図1に示す。X線の光電吸収によって生じる信号電荷が1ピクセルに収まるイベント(図1左の赤字)と複数ピクセルにまたがるイベント(同黄色)を別々に表示すると、同じGpixel社のCMOSであるGSENSE400BSIであっても、異なる応答を示すことが分かった。図1中央はSiウエハの厚いタイプ、図1右はウエハが薄いタイプの素子である。前者の場合は、マルチピクセルイベントの波高値がシングルピクセルイベントのそれに対して有意に低く、信号電荷の一部を失っていることが分かる。これは、信号電荷

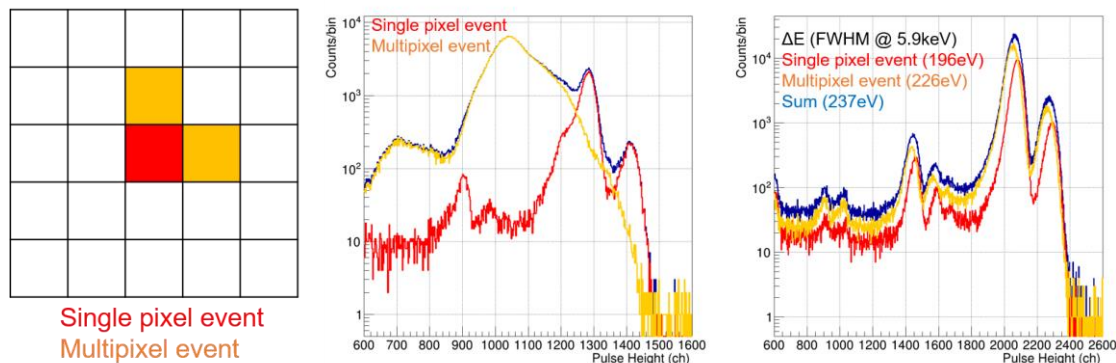


図1: CMOSセンサによる<sup>55</sup>Feのスペクトル

を集めるための Si ウェハ内部の電圧構造の違いが原因の一つであると推測する。すなわち、厚いウェハのうち空乏化されている層(有感層)は一部でしかなく、電場が不十分な層がある。そこで吸収されたイベントは信号電荷の一部が読み出し FET まで到達していないと考えられる。硬 X 線の感度という点では厚いウェハが有利であるが、分光性能の点では不利である。本研究の目的を鑑みれば厚いウェハタイプが好ましいが、両者について開発を継続すると判断した。

次に、X 線 CMOS カメラが衛星軌道上の宇宙線粒子環境下でどのような応答を示すかを予めエンジニアリングモデルを用いて地上で詳細に測定した。本研究では、過去の日本の大型天文衛星が採用した低高度地球周回軌道、あるいは将来の超小型衛星搭載で想定される静止

トランスファ軌道を仮定する。軌道上での 1 年あたりのドーズ量は、センサ周辺のシールド構造によって変わるが、ここでは 10krad のトータルドーズを仮定した。これは、100MeV の陽子線を  $10^{10}$  protons/cm<sup>2</sup> だけ照射することに相当する。このエネルギーは Si ウェハを貫通し、かつウェハ内でのエネルギー損失がセンサ内の場所に依存しないように設定した。また、陽子線ビーム径はセンサのサイズよりも十分小さくすることで、照射前後の性能を比較した。実験は放射線医学総合研究所の HIMAC 物理汎用照射室にて、複数のセンサに対して行った。照射後にセンサを -15°C に冷却して得られたイメージを図 2 上に示す。センサの一部で暗電流が高くなっている領域が確認できる。その増加分は領域によって異なり、正規分布で再現できる。この状態のセンサに <sup>55</sup>Fe から X 線を照射して得られたスペクトルを図 2 左下に示す。エネルギー分解能の劣化度合い

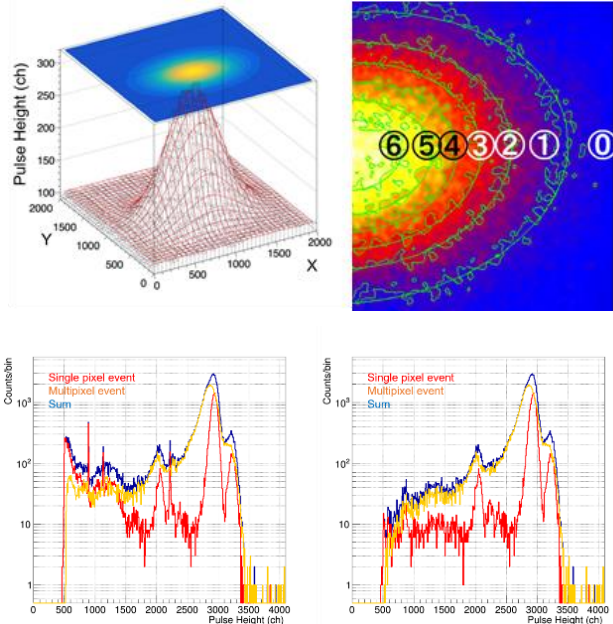


図 2: 陽子線照射後の画像とスペクトル

は大きくないが、スペクトル中に細い偽ピークが複数見られる。これは、異常ピクセルによるものであることが分かった。X 線が生じていないにも拘わらず多量の電荷が発生していることで偽イベントが発生している。この異常ピクセルをマスクしたうえで再度抽出したスペクトルが図 2 右下であり、偽ピークが消えていることが分かる。

次に、暗電流増加量が放射線損傷量に比例すると仮定し、ピクセルアレイ中の領域を図 2 右上のように分けし、各領域におけるドーズ量を決定してスペクトルを抽出した。そうしてエネルギー分解能の損傷量依存性を示したものが図 3 である。その結果、5krad 未満では分光性能に影響がないことが分かった。これは、従来の CCD センサと比較してもそんな色のない放射線耐性である。また、衛星寿命を超える時間に相当する 100krad を照射した領域であっても、<sup>55</sup>Fe の Mn K $\alpha$  K $\beta$  輝線を分解できることが分かった。また、イメージセンサ上の CMOS 回路部分、

あるいは信号処理回路基板上の IC に対して重粒子線が入射した場合に、陽子に比べて回路に与えるエネルギーが大きいためにラッチアップ等の致命的な損傷を与える場合がありこれをシングルイベント効果と呼んでいるが、今回我々は Si, Kr, Fe, Xe などの重粒子線もセンサに照射した。照射中センサを観測時と同様に動作させたが、ラッチアップは 1 度も発生しなかった。これにより、本研究で開発しているセンサは軌道上での長期間動作が確実視される。

以上のセンサ開発に並行して、本研究期間中に原子番号の異なるシールドを重ね合わせる Graded-Z シールドを採用したカメラボディを設計および製作した。このカメラボディを用いた放射線耐性を測定することが今後の課題となる。

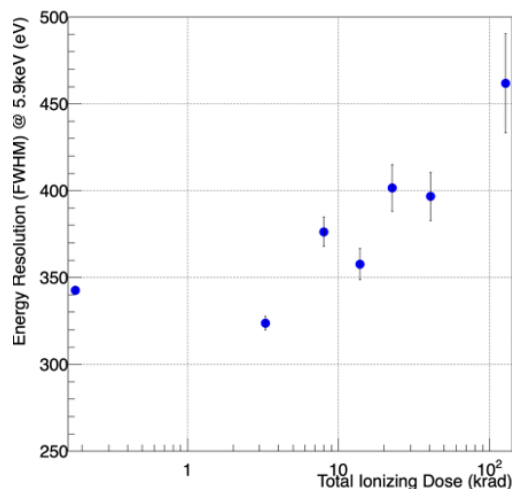


図 3: エネルギー分解能のドーズ量依存性

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計25件（うち査読付論文 20件 / うち国際共著 12件 / うちオープンアクセス 12件）

1. 著者名 Hitomi Collaboration, Hiroshi Nakajima, et al.	4. 巻 70
2. 論文標題 Atmospheric gas dynamics in the Perseus cluster observed with Hitomi*	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Publications of the Astronomical Society of Japan	6. 最初と最後の頁 9
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/pasj/psx138	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する
1. 著者名 Hitomi Collaboration, Hiroshi Nakajima, et al.	4. 巻 70
2. 論文標題 Measurements of resonant scattering in the Perseus Cluster core with Hitomi SXS*	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Publications of the Astronomical Society of Japan	6. 最初と最後の頁 10
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/pasj/psx127	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する
1. 著者名 Hitomi Collaboration, Hiroshi Nakajima, et al.	4. 巻 70
2. 論文標題 Temperature structure in the Perseus cluster core observed with Hitomi*	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Publications of the Astronomical Society of Japan	6. 最初と最後の頁 11
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/pasj/psy004	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する
1. 著者名 Hitomi Collaboration, Hiroshi Nakajima, et al.	4. 巻 70
2. 論文標題 Atomic data and spectral modeling constraints from high-resolution X-ray observations of the Perseus cluster with Hitomi*	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Publications of the Astronomical Society of Japan	6. 最初と最後の頁 12
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/pasj/psx156	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する

1. 著者名 Hitomi Collaboration, Hiroshi Nakajima, et al.	4. 巻 70
2. 論文標題 Hitomi observation of radio galaxy NGC1275: The first X-ray microcalorimeter spectroscopy of Fe-K line emission from an active galactic nucleus*	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Publications of the Astronomical Society of Japan	6. 最初と最後の頁 13
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/pasj/psx147	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する

1. 著者名 Hitomi Collaboration, Hiroshi Nakajima, et al.	4. 巻 70
2. 論文標題 Search for thermal X-ray features from the Crab nebula with the Hitomi soft X-ray spectrometer*	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Publications of the Astronomical Society of Japan	6. 最初と最後の頁 14
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/pasj/psx072	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する

1. 著者名 Hitomi Collaboration, Hiroshi Nakajima, et al.	4. 巻 70
2. 論文標題 Hitomi X-ray studies of giant radio pulses from the Crab pulsar*	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Publications of the Astronomical Society of Japan	6. 最初と最後の頁 15
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/pasj/psx083	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する

1. 著者名 Hitomi Collaboration, Hiroshi Nakajima, et al.	4. 巻 70
2. 論文標題 Hitomi observations of the LMC SNR N132D: Highly redshifted X-ray emission from iron ejecta*	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Publications of the Astronomical Society of Japan	6. 最初と最後の頁 16
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/pasj/psx151	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する

1. 著者名 Hitomi Collaboration, Hiroshi Nakajima, et al.	4. 巻 70
2. 論文標題 Glimpse of the highly obscured HMXB IGR J16318-4848 with Hitomi*	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Publications of the Astronomical Society of Japan	6. 最初と最後の頁 17
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/pasj/psx154	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する

1. 著者名 Hitomi Collaboration, Hiroshi Nakajima, et al.	4. 巻 70
2. 論文標題 In-orbit performance of the soft X-ray imaging system aboard Hitomi (ASTRO-H)*	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Publications of the Astronomical Society of Japan	6. 最初と最後の頁 21
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/pasj/psx116	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する

1. 著者名 Hitomi Collaboration, Hiroshi Nakajima, et al.	4. 巻 70
2. 論文標題 Hitomi X-ray observation of the pulsar wind nebula G21.5-0.9	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Publications of the Astronomical Society of Japan	6. 最初と最後の頁 38
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/pasj/psy027	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する

1. 著者名 Ezoe Yuichiro, Miyoshi Yoshizumi, Kasahara Satoshi, Kimura Tomoki, Ishikawa Kumi, Fujimoto Masaki, Mitsuda Kazuhisa, Sahara Hironori, Isobe Naoki, Nakajima Hiroshi, Ohashi Takaya, Nagata Harunori	4. 巻 4
2. 論文標題 Ultralightweight x-ray telescope missions: ORBIS and GEO-X	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Journal of Astronomical Telescopes, Instruments, and Systems	6. 最初と最後の頁 1
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1117/1.JATIS.4.4.046001	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Hitomi Collaboration, Hiroshi Nakajima, et al.	4. 巻 70
2. 論文標題 Detection of polarized gamma-ray emission from the Crab nebula with the Hitomi Soft Gamma-ray Detector †	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Publications of the Astronomical Society of Japan	6. 最初と最後の頁 21
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/pasj/psy118	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する

1. 著者名 Yoneyama Tomokage, Hayashida Kiyoshi, Nakajima Hiroshi, Matsumoto Hironori	4. 巻 71
2. 論文標題 Universal detection of high-temperature emission in X-ray isolated neutron stars	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Publications of the Astronomical Society of Japan	6. 最初と最後の頁 17
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/pasj/psy135	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Asakura Kazunori, Hayashida Kiyoshi, Hanasaka Takashi, Kawabata Tomoki, Yoneyama Tomokage, Okazaki Koki, Ide Shuntaro, Noda Hirofumi, Matsumoto Hironori	4. 巻 5
2. 論文標題 X-ray imaging polarimetry with a 2.5- $\mu$ m pixel CMOS sensor for visible light at room temperature	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Journal of Astronomical Telescopes, Instruments, and Systems	6. 最初と最後の頁 1~1
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1117/1.JATIS.5.3.035002	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Kanemaru Y., Sato J., Mori K., Nakajima H., et al.	4. 巻 14
2. 論文標題 Radiation hardness of a p-channel notch CCD developed for the X-ray CCD camera onboard the XRISM satellite	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Journal of Instrumentation	6. 最初と最後の頁 C04003 ~ C04003
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/1748-0221/14/04/C04003	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -



1. 著者名 Katsuda Satoru, Ohno Masanori, Mori Koji, Beppu Tatsuhiro, Kanemaru Yoshiaki, Tashiro Makoto S., Terada Yukikatsu, Sato Kosuke, Morita Kae, Sagara Hikari, Ogawa Futa, Takahashi Haruya, Murakami Hiroshi, Nobukawa Masayoshi, Tsunemi Hiroshi, Hayashida Kiyoshi, Matsumoto Hironori, Noda Hirofumi, Nakajima Hiroshi, et al.	4. 巻 891
2. 論文標題 Inverse First Ionization Potential Effects in Giant Solar Flares Found from Earth X-Ray Albedo with Suzaku/XIS	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal	6. 最初と最後の頁 126 ~ 126
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/1538-4357/ab7207	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Uchida Hiroyuki, Tanaka Takaaki, Amano Yuki, Okon Hiromichi, Tsuru Takeshi G., Nakajima Hiroshi, et al.	4. 巻 978
2. 論文標題 Optical blocking performance of CCDs developed for the X-ray Astronomy Satellite XRISM	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment	6. 最初と最後の頁 164374 ~ 164374
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.nima.2020.164374	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Yoneyama Tomokage, Noda Hirofumi, Hanaoka Maho, Okazaki Koki, Asakura Kazunori, Hayashida Kiyoshi, Ishikura Ayami, Sakuma Shotaro, Hattori Kengo, Matsumoto Hironori, Mori Koji, Kanemaru Yoshiaki, Sato Jin, Takaki Toshiyuki, Uchida Hiroyuki, Tanaka Takaaki, Nakajima Hiroshi, et al.	4. 巻 985
2. 論文標題 Screening and selection of XRISM/Xtend flight model CCD	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment	6. 最初と最後の頁 164676 ~ 164676
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.nima.2020.164676	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Kanemaru Yoshiaki, Sato Jin, Takaki Toshiyuki, Terada Yuta, Mori Koji, Nakajima Hiroshi, et al.	4. 巻 984
2. 論文標題 Experimental studies on the charge transfer inefficiency of CCD developed for the soft X-ray imaging telescope Xtend aboard the XRISM satellite	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment	6. 最初と最後の頁 164646 ~ 164646
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.nima.2020.164646	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -



1. 著者名 Nakajima Hiroshi、Hayashida Kiyoshi、Tomida Hiroshi、Mori Koji、 et al.	4. 巻 11444
2. 論文標題 Soft x-ray imager (SXI) for Xtend onboard X-Ray Imaging and Spectroscopy Mission (XRISM)	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Proc. SPIE	6. 最初と最後の頁 1144423
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1117/12.2560348	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Hayashida Kiyoshi、Asakura Kazunori、Ishikura Ayami、Sakuma Shotaro、Hanasaka Takashi、Kawabata Tomoki、Yoneyama Tomokage、Noda Hirofumi、Okazaki Koki、Hanaoka Maho、Hattori Kengo、Sawagami Kenmei、Kamogawa Wataru、Nakajima Hiroshi、 et al.	4. 巻 11444
2. 論文標題 Sub-arcseconds to micro-arcsecond x-ray imaging with multi image x-ray interferometer method (MIXIM): concept and scalabe mission plans	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Proc. SPIE	6. 最初と最後の頁 114441C
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1117/12.2562193	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Asakura Kazunori、Hayashida Kiyoshi、Hanasaka Takashi、Kawabata Tomoki、Yoneyama Tomokage、Noda Hirofumi、Sakuma Shotaro、Okazaki Koki、Ishikura Ayami、Hanaoka Maho、Ide Shuntaro、Hattori Kengo、Matsumoto Hironori、Tsunemi Hiroshi、Awaki Hisamitsu、Nakajima Hiroshi、Hiraga Junko S.	4. 巻 11444
2. 論文標題 Subsub-arcseconds x-ray imaging with multi-image x-ray interferometer module (MIXIM): experimental results	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Proc. SPIE	6. 最初と最後の頁 114441
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1117/12.2560772	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Nakajima Hiroshi、Nakamura Shotaro、Kouno Hikaru、Hiraga Junko S.、Yuhi Daito、Ezoe Yuichiro、Ishikawa Kumi	4. 巻 11454
2. 論文標題 Developing the detector of x-ray imaging spectrometer for GEO-X mission	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Proc. SPIE	6. 最初と最後の頁 114540K
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1117/12.2562221	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Hiraga Junko S., Kamata Yasuaki, Yuhi Daito, Urabe Yukino, Yoshida Akihiro, Nakajima Hiroshi	4. 巻 11454
2. 論文標題 X-ray photon counting performance of front-illuminated scientific CMOS image sensor	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Proc. SPIE	6. 最初と最後の頁 1145438
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1117/12.2562976	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計0件

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------