

令和 4 年 6 月 29 日現在

機関番号：17601

研究種目：若手研究

研究期間：2019～2021

課題番号：19K14742

研究課題名（和文）CPU組み込みFPGAを用いたガンマ線リアルタイムイメージング手法の研究

研究課題名（英文）Research for gamma-ray real-time imaging method using CPU embedded FPGA

研究代表者

武田 彩希（Takeda, Ayaki）

宮崎大学・工学部・准教授

研究者番号：40736667

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,200,000円

研究成果の概要（和文）：本研究は、CPU組み込みFPGAを用いたガンマ線リアルタイムイメージング手法の研究を目的とする。本研究により、以下の3つの研究成果を得た。1）パターン情報を抽出するデジタル回路を開発しイメージセンサ内へ組み込むことで、ガンマ線によるコンプトン散乱起因の反跳電子を効率よくデータ取得することが可能となった。2）コンプトン散乱事象をシミュレーションすることで反跳電子の疑似画像データを生成し、それらを用いてニューラルネットワークによるデータ処理モデルを作成した。3）開発したモデルをCPU組み込みFPGAに実装する手法を検討し、実機を用いた実装検討を進めることができた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

ガンマ線リアルタイムイメージングを実現するため、CPU組み込みFPGAを用いて基板上で高度な解析モデルを適用したデータ処理を行うための手法研究を実施した。本研究の遂行により、解析モデルを構築する上での課題の洗い出しとCPU組み込みFPGA上に実装する手法の検討を進めることができた。本研究で得られた成果は、可搬型でコンパクトな物理計測システムを実現するための基盤技術であり、今後、ガンマ線イメージングだけでなく、様々な量子イメージング分野への応用が期待できる。

研究成果の概要（英文）：This study aims to research a gamma-ray real-time imaging method using a CPU-embedded FPGA. This study obtained three results: 1) We developed a digital circuit for extracting hit-pattern information and embedded it into our image sensor. This circuit contributed to efficient data acquisition of recoil electrons due to Compton scattering by gamma-rays. 2) We generated pseudo-image data of recoiled electrons by simulating Compton scattering events. We also generated a neural network data processing model using the image data. 3) We investigated a method to implement the developed model on the CPU-embedded FPGA.

研究分野：半導体検出器・量子イメージング・物理計測システム

キーワード：ガンマ線イメージング コンプトンカメラ リアルタイム処理 電子飛跡 X線ガンマ線天文学

## 様式 C-19、F-19-1、Z-19 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

現在、硬X線から MeV ガンマ線領域の宇宙観測は発展途上である。この分野を切り拓くには、観測装置の性能向上が鍵となる。ガンマ線検出手法のひとつに固体素子のコンプトンカメラが知られているが、いかに到来方向とエネルギーを決めるかが重要となる。コンプトンカメラの基本原理は、ガンマ線による散乱部でのコンプトン散乱と吸収部での光電吸収のエネルギーを測定することで、到来方向がコーン状に決定できる。さらに、これをリングイメージとして重ねることで到来方向を絞っていく。従来型に加え、もし、コンプトン散乱の電子飛跡をとらえることができれば、より少ないイベント数で到来方向が決定でき、高速かつ高精度なイメージングが可能となる。上記の条件に適した検出器の候補として「イベント駆動型 SOI-CMOS イメージセンサ」がある。これは、研究代表者がこれまで次世代宇宙X線観測へ向け研究開発してきた、センサ部・読み出し回路部一体型の半導体イメージセンサである。

研究代表者は、イベント駆動型 SOI-CMOS イメージセンサを用いた電子飛跡型コンプトンカメラの研究開発を進めている。コンプトンカメラの研究開発は他でも進むが、ガンマ線の到来方向をリアルタイムに確定することが困難であることは、共通する課題である。これは、取得データから到来方向を決定するために高い演算処理能力が必要なこと、また、電子飛跡の情報を用いても到来方向に制限を与えることしかできないためである。リアルタイム性を躍進させるには、従来の演算処理を必要としない新たなアプローチが不可欠である。

### 2. 研究の目的

本研究は、コンプトンカメラのリアルタイム性を躍進させるデータ処理手法の研究を目的とする。具体的には、1) イメージセンサ内にて電子飛跡候補を検出するデジタル処理回路の開発、2) Geant4 を用いたシミュレーションによるデータ処理アルゴリズムの研究、3) CPU 組み込み FPGA「Zynq」による基板上でのデータ処理手法を検討する。加えて、より柔軟なカメラシステムを模索すべく、4) GPU コンピューティングボード「Jetson」シリーズの利用を検討する。これらにより、コンパクトかつガンマ線リアルタイムイメージングが可能なカメラシステムの実現へ向けた研究を進める。

### 3. 研究の方法

上記に示した背景・目的に従い、下記の通り研究を進めた。

#### 1) イメージセンサ内にて電子飛跡候補を検出するデジタル処理回路の開発：

イベント駆動型 SOI-CMOS イメージセンサは、X線・ガンマ線・電子などを検出したタイミング・位置をトリガ信号として出力可能であり、それらの情報を用いることで検出対象のみを選択的に読み出すことができる。電子飛跡をより効率的に取得するために、イメージセンサ内で検出時にパターン形状を抽出するデジタル処理回路を開発する。回路機能を確認するため、実機で評価試験を行う。

#### 2) Geant4 を用いたシミュレーションによるデータ処理アルゴリズムの研究：

コンプトン散乱イベントのデータ処理アルゴリズムを研究するために、Geant4 を用いてシミュレーションを行う。Geant4 は放射線シミュレーションのためのツールキットとして知られている。イベント駆動型 SOI-CMOS イメージセンサを再現し、コンプトン散乱による反跳電子の擬似画像を生成する。それらの画像、および、電子飛跡の方向の正解ラベルを基に深層学習モデルを構築することで、イベント駆動型 SOI-CMOS イメージセンサに適した解析アルゴリズムの検討を進める。

#### 3) CPU 組み込み FPGA「Zynq」による基板上でのデータ処理手法の検討：

2) で開発する解析アルゴリズムを FPGA 内に組み込みデータ処理するための手法検討を進める。本検討には、Xilinx 社製 CPU 組み込み FPGA「Zynq」の評価ボードを利用する。

#### 4) GPU コンピューティングボード「Jetson」シリーズの利用検討：

研究開始当初の計画にはなかったが、最先端の AI 組み込みシステムとして注目されている、NVIDIA 社製 GPU コンピューティングボード「Jetson」シリーズの利用を検討する。これにより、高性能な GPU をシステムに組み込むことが可能となる。Zynq と Jetson は、ギガビットイーサネット通信で接続すれば、ひとつの強力なデータ処理システムとして構築できる。ハードウェアとソフトウェアを融合させることで、より柔軟なシステムの実現性を模索する。

### 4. 研究成果

#### 1) イメージセンサ内にて電子飛跡候補を検出するデジタル処理回路の開発：

開発したパターン形状を抽出する回路機能を確認するため、実機で評価試験を行なった。図1は、本機能の概念図を示した例である。簡単なデジタル回路で構成しているが、本機能により得られ

た情報を基に、X線と電子の候補を識別可能であることを示した (A. Takeda et al., JINST 2020)。図2は、実機によるX線・電子の候補イベント取得例、そして、縦方向・横方向の長さ (パターン長) の分布の線種による違いを示す。X線と比較し電子は、パターン長が長いことが確認できる。本機能を用いることで、イメージセンサ内で放射線の種類をリアルタイムに識別する原理実証ができた。

2) Geant4 を用いたシミュレーションによるデータ処理アルゴリズムの研究：  
 コンプトン散乱イベントのデータ処理アルゴリズムを研究するために、Geant4 を用いてシミュレーションを行った。図3はシミュレーションにより得られたイベント駆動型 SOI-CMOS イメージセンサにおける電子飛跡の擬似画像である。イメージセンサの画素サイズは、 $36 \mu\text{m}$ 角である。実機にて確認できた電子飛跡 (図2) と比較しても、再現できていることがわかる。シミュレーションデータの画像と電子飛跡の方向の正解ラベルを用い、電子の反跳方向を8分割の角度で推定させたところ、正答率は35%程度しか得られなかった。これは、シリコンセンサ中の電子の散乱の影響により、反跳方向の推定が難しいことが要因として考えられる。隣接する角度を許容することで、正答率は65%程度まで改善したが、実用的なモデルを構築するには、さらなる検討が必要となる。

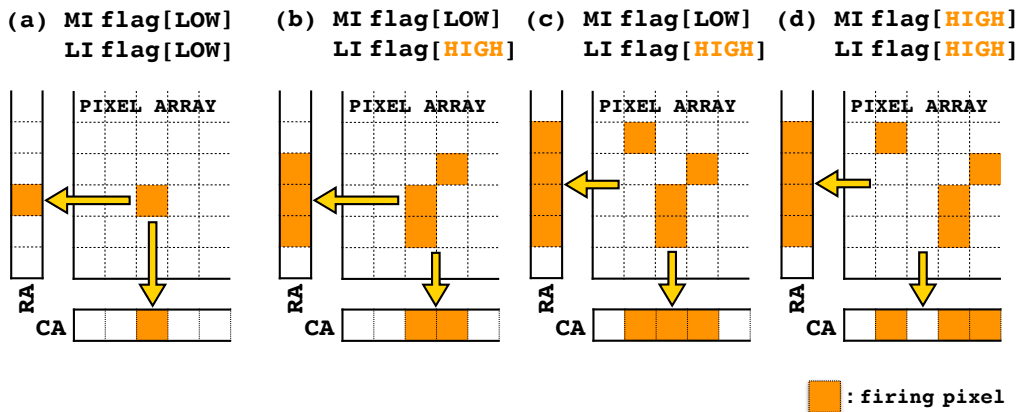


図1. パターン形状抽出回路の概念の例 (A. Takeda et al., JINST 2020)。オレンジ色が信号を検出した画素で、縦方向 (RA) と横方向 (CA) に射影した情報を用いて判断する。複数の分布 (島) の有無を判断する Multi Island (MI) フラグ、縦方向と横方向を足した長さが、予め設定した閾値長さ以上かどうかを判断する Long Island (LI) フラグで構成する。図の例では、LI フラグは「3」としている。

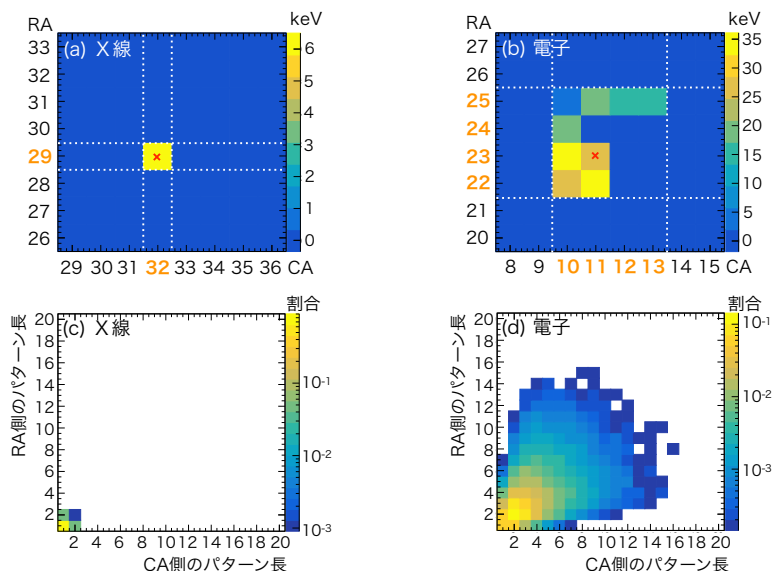


図2. 実機によるX線・電子の候補のイベント取得例。デモンストレーションとしてX線は $^{55}\text{Fe}$ 線源を、電子は $^{90}\text{Sr}$ 線源を用いた。上段は、イメージセンサで得られた画像で(a) X線、(b) 電子である。オレンジ色文字の座標は信号を検出した画素である。赤字×は、読み出し時に指定した中心座標であり、適切に情報を取得できていることがわかる。下段は、縦方向 (RA) と横方向 (CA) に射影したパターン長の分布で(c) X線、(d) 電子である。X線は最大  $2 \times 2$  画素の広がりであるとわかる。電子は  $10 \times 10$  画素に渡り飛跡となることがわかる。

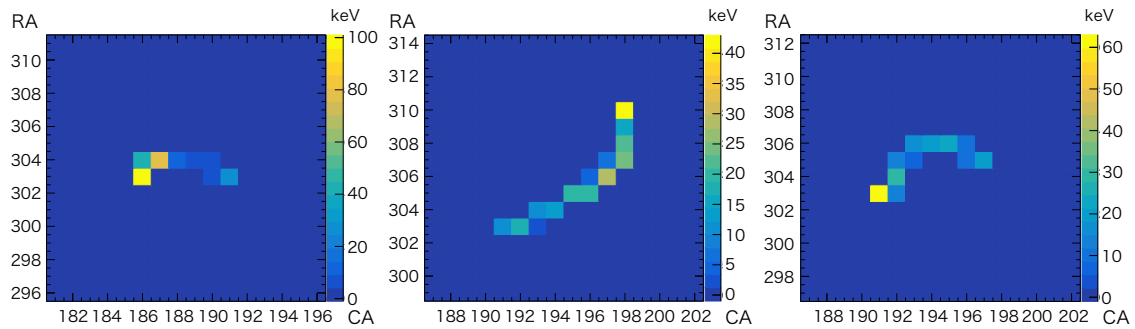


図3. シミュレーションにより得られたコンプトン散乱イベントにおける電子飛跡の画像。

3) CPU 組み込み FPGA 「Zynq」による基板上でのデータ処理手法の検討：

2)で開発する解析アルゴリズムをFPGA内に組み込みデータ処理するための手法検討を進めた。検討開始当初から、図4に示すXilinx社製CPU組み込みFPGA「Zynq ZC702」評価ボードに独自の回路を構築し、深層学習モデルによる解析アルゴリズムを実装することを目標として進めてきたが、課題が多く実現が困難であるとわかった。しかし、ここ数年で発展してきているXilinx社のVitis™ AI開発環境を利用すれば、例えばPyTorchなどのフレームワークから学習モデルをインポートすることが可能となった。FPGAとしては、Zynq UltraScale+ MPSoCが搭載されている必要があり高価になるが、基板上でのAI推論の高速化を最大限に引き出すことができるため、今後も継続して実装検討を進めていく。以上より、本研究の大きな目的である基板上でのデータ処理手法の研究は達成できた。

4) GPU コンピューティングボード「Jetson」シリーズの利用検討：

最先端のAI組み込みシステムとして注目される、NVIDIA社製のGPUコンピューティングボード「Jetson」シリーズの利用を検討した。本研究では、コストパフォーマンスがよい「Jetson Xavier NX」評価ボード(図5)を用いた。本製品は、コンパクトな基板にもかかわらず1秒間に最大21兆回の整数演算(21TOPS)能力を実現し、本研究で想定するような組み込みシステムでのハイパフォーマンスなデータ処理やAI処理に最適と考える。本研究の中で、Zynqボードとの融合までは到達できなかったが、これまでにない計測システムの実現可能性は十分にあり、今後の新たな展開を期待させる組み合わせとなることは間違いないであろう。

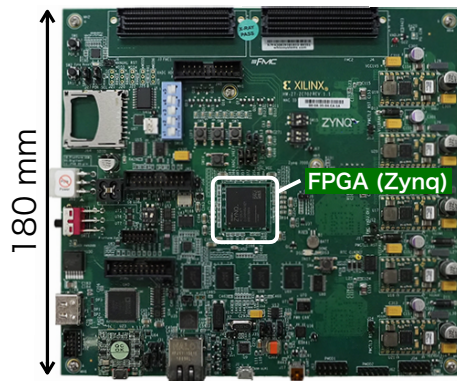


図4. Zynq ZC702 評価ボード

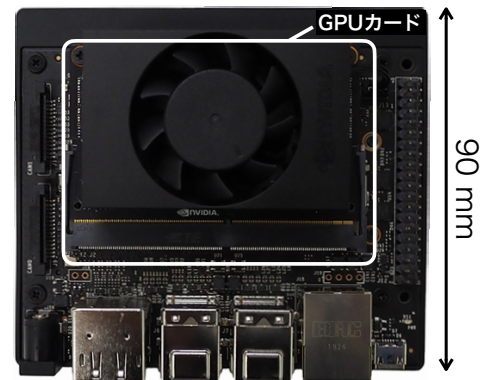


図5. Jetson Xavier NX 評価ボード

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計8件（うち査読付論文 8件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 3件）

1. 著者名 Hagino Kouichi, Ayaki Takeda, et al.	4. 巻 978
2. 論文標題 Radiation damage effects on double-SOI pixel sensors for X-ray astronomy	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 164435
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1016/j.nima.2020.164435	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 -
1. 著者名 Suzuki Hiromasa, Ayaki Takeda, et al.	4. 巻 979
2. 論文標題 Development of the detector simulation framework for the Wideband Hybrid X-ray Imager onboard FORCE	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 164433
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1016/j.nima.2020.164433	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 -
1. 著者名 Ayaki Takeda, Koji Mori, et al.	4. 巻 15
2. 論文標題 Spectroscopic performance improvement of SOI pixel detector for X-ray astronomy by introducing Double-SOI structure	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Journal of Instrumentation	6. 最初と最後の頁 P11001
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1088/1748-0221/15/11/P11001	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 Ayaki Takeda, Koji Mori, et al.	4. 巻 15
2. 論文標題 Development of on-chip pattern processing in event-driven SOI pixel detector for X-ray astronomy with background rejection purpose	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Journal of Instrumentation	6. 最初と最後の頁 P12025
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1088/1748-0221/15/12/P12025	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 Kodama Ryota, Ayaki Takeda, et al.	4. 巻 986
2. 論文標題 Low-energy X-ray performance of SOI pixel sensors for astronomy, "XRPIX"	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 164745
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.nima.2020.164745	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 -

1. 著者名 Kazuho Kayama, Ayaki Takeda, et al.	4. 巻 14
2. 論文標題 Subpixel response of SOI pixel sensor for X-ray astronomy with pinned depleted diode: first result from mesh experiment	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Journal of Instrumentation	6. 最初と最後の頁 C06005
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/1748-0221/14/06/C06005	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 Koichi Hagino, Ayaki Takeda, et al.	4. 巻 14
2. 論文標題 Sub-pixel response of double-SOI pixel sensors for X-ray astronomy	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Journal of Instrumentation	6. 最初と最後の頁 C10023
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/1748-0221/14/10/C10023	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 Kenji Shimazoe, Ayaki Takeda, et al.	4. 巻 15
2. 論文標題 Simulation study on SOI based electron tracking Compton camera using deep learning method	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Journal of Instrumentation	6. 最初と最後の頁 C02010
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/1748-0221/15/02/C02010	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 -

〔学会発表〕 計11件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 6件）

1. 発表者名 武田彩希, 森浩二, 西岡祐介, 日田貴熙, 行元雅貴 他16名
2. 発表標題 宇宙X線観測向けSOIピクセル検出器におけるPinned Depleted Diode構造の改良
3. 学会等名 日本物理学会 2020年 秋季大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 行元雅貴, 森浩二, 武田彩希, 西岡祐介, 三枝紀嵐 他18名
2. 発表標題 SOI技術を用いた新型X線撮像分光器の開発 44: PDD構造に改良を加えたX線SOIピクセル検出器の性能評価
3. 学会等名 日本天文学会 2020年 秋季大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 M. Hayashida, T. Kohmura, K. Hagino, K. Oono, A. Takeda 他18名
2. 発表標題 Proton radiation hardness of x-ray SOI pixel detectors with pinned depleted diode structure
3. 学会等名 SPIE Astronomical Telescopes + Instrumentation (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 児玉涼太, 鶴剛, 田中孝明, 内田裕之, 佳山一帆, 天野雄輝, 武田彩希, 森浩二, 西岡祐介, 日田貴熙, 行元雅貴, 川人祥二, 安富啓太, 亀濱博紀, 新井康夫, 倉知郁生, 幸村孝由, 萩野浩一, 林田光揮, 北島正隼
2. 発表標題 SOI 技術を用いた新型 X 線撮像分光器 の開発 38: X 線 SOI ピクセル検出器の軟 X 線性能評価
3. 学会等名 日本天文学会 2019年 秋季年会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 林田光揮, 幸村孝由, 萩野浩一, 大野頭司, 根岸康介, 鏝田敬吾, 北島正隼, 鶴剛, 田中孝明, 内田裕之, 佳山一帆, 天野雄輝, 児玉涼太, 森浩二, 武田彩希, 西岡祐介, 日田貴熙, 行元雅貴, 新井康夫, 倉知郁生, 濱野毅, 北村尚, 川人祥二, 安富啓太, 亀濱博紀
2. 発表標題 SOI 技術を用いた新型 X 線撮像分光器の開発 39: 新規構造を導入した X 線 SOI ピクセル検出器の放射線耐性の評価
3. 学会等名 日本天文学会 2019年 秋季年会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 日田貴熙, 武田彩希, 行元雅貴, 西岡祐介, 森浩二, 鶴剛, 田中孝明, 内田裕之, 佳山一帆, 天野雄輝, 児玉涼太, 新井康夫, 倉知郁生, 幸村孝由, 萩野浩一, 林田光揮, 北島正隼
2. 発表標題 SOI 技術を用いた新型 X 線撮像分光器の開発 40: イベント駆動読み出しにおけるヒットパターン処理回路の評価
3. 学会等名 日本天文学会 2019年 秋季年会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 A. Takeda, K. Mori, Y. Nishioka, M. Yukumoto, T. Hida, T. G. Tsuru, T. Tanaka, H. Uchida, K. Kayama, Y. Amano, H. Matsumura, Y. Arai, I. Kurachi, T. Kohmura, K. Hagino, S. Kawahito, K. Kagawa, K. Yasutomi, S. Nakanishi, H. Kamehama
2. 発表標題 Performance Improvement of the Event-Driven SOI Pixel Detectors for X-ray Astronomy
3. 学会等名 21st International Workshops on Radiation Imaging Detectors (iWoRiD2019) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 A. Takeda, K. Mori, Y. Nishioka, M. Yukumoto, T. Hida, T. G. Tsuru, T. Tanaka, H. Uchida, K. Kayama, Y. Amano, R. Kodama, Y. Arai, I. Kurachi, T. Kohmura, K. Hagino, M. Hayashida, S. Kawahito, K. Yasutomi, H. Kamehama
2. 発表標題 Improvement and Evaluation of the Event-driven SOI Pixel Detector with Pattern Processing Circuit for X-ray Astronomy
3. 学会等名 12th International "Hiroshima" Symposium on the Development and Application of Semiconductor Tracking Detectors (HSTD12) (国際学会)
4. 発表年 2019年



1. 発表者名 H. Katagiri, M. Kagaya, N. Tojo, Y. Arai, T. Uchida, A. Takeda, T. G. Tsuru
2. 発表標題 Performance evaluation of recoil electron track detection with an electron tracking Compton camera using an SOI pixel sensor
3. 学会等名 12th International "Hiroshima" Symposium on the Development and Application of Semiconductor Tracking Detectors (HSTD12) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 K. Hagino, K. Yarita, M. Kitajima, K. Negishi, K. Oono, M. Hayashida, T. Kohmura, T. G. Tsuru, T. Tanaka, H. Uchida, K. Kayama, Y. Amano, R. Kodama, A. Takeda, Y. Nishioka, M. Yukumoto, T. Hida, Y. Arai, I. Kurachi, T. Hamano, H. Kitamura
2. 発表標題 Radiation Damage Effects on Double-SOI Pixel Sensors for X-ray Astronomy
3. 学会等名 12th International "Hiroshima" Symposium on the Development and Application of Semiconductor Tracking Detectors (HSTD12) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 R. Kodama, T. G. Tsuru, T. Tanaka, H. Uchida, K. Kayama, Y. Amano, A. Takeda, K. Mori, Y. Nishioka, T. Hida, M. Yukumoto, S. Kawahito, K. Yasutomi, H. Kamehama
2. 発表標題 Soft X-ray Trigger Performance of X-ray Astronomy SOI Pixel Sensors, "XRPIX"
3. 学会等名 12th International "Hiroshima" Symposium on the Development and Application of Semiconductor Tracking Detectors (HSTD12) (国際学会)
4. 発表年 2019年

〔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
---------	---------