

令和 2 年 6 月 3 日現在

機関番号：12601

研究種目：基盤研究(A) (一般)

研究期間：2016～2019

課題番号：16H02170

研究課題名(和文)半導体コンプトンカメラの革新によるラインガンマ線天文学の開拓

研究課題名(英文)Line Gamma-ray Astronomy by the next generation Semiconductor Compton Camera

研究代表者

高橋 忠幸 (Takahashi, Tadayuki)

東京大学・カブリ数物連携宇宙研究機構・教授

研究者番号：50183851

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 33,800,000円

研究成果の概要(和文)：我々が独自に考案した、Si-CMOSハイブリッドSi検出器の大型化を行い、それを用いたSi/CdTeコンプトンカメラを開発、評価した。素子は、20ミクロン角で640x640の画素を持ち、コンプトンカメラの散乱体として動作する上で必要な数 $\mu$ 秒のタイミング特性を持つ。我々は解析的な方法と機械学習を用いた手法の研究を行い、散乱電子の散乱方向を得ることに成功した。2mm厚のCdTe両面ストリップ検出器と組み合わせ、662 keVのガンマ線に対して、7.4 keV (FWHM)のエネルギー分解能、3.1度(FWHM)の角度分解能と、優れた性能が得られた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

感度のギャップに埋もれて進展が妨げられている数100keV から数MeVの領域でのガンマ線天文学に革新をもたらすために、エネルギー分解能が高く、また角度分解能が高い半導体コンプトンカメラの開発が重要である。本研究で新たに開発した散乱電子の方向を測定できるSi検出器とCdTeイメージャを組み合わせたコンプトンカメラは、到来するガンマ線の方向を一意に決めることができる。これを発展させることで、天体観測ばかりではなく、放射性物質の分布の可視化や医学イメージングにおいて検知力の向上につながる。

研究成果の概要(英文)：Electron tracking based Compton imaging is a key technique to improve the sensitivity of Compton cameras by measuring the initial direction of recoiled electrons. We have developed a new Si-CMOS hybrid detector as a scatterer of Compton cameras. It is a Si detector bump-bonded to a CMOS readout integrated circuit to obtain electron trajectories. To acquire the energy and the event timing, signals from back side, in which strip electrodes are implemented, are read out with a timing resolution of few  $\mu$ s. Images of recoiled electron trajectories are obtained successfully from CMOS side. By combining with a 2mm thick CdTe double sided detector, we constructed a Si/CdTe Compton camera. We confirmed that the initial direction of the electron is determined properly and incident directions of gamma-ray photons are successfully reconstructed. An energy resolution of 7.4 keV (FWHM) and an angular resolution of 3.1 degree (FWHM) are obtained from the camera for 662 keV gamma-rays.

研究分野：宇宙物理学実験

キーワード：ガンマ線検出器 コンプトンカメラ ガンマ線天文学 MeVガンマ線

様式 C-19、F-19-1、Z-19 (共通)

## 1. 研究開始当初の背景

電子陽電子消滅反応が現れ、さらに原子核反応の舞台となる数 MeV にいたる領域は、現代にいたっても依然、未開のままである。この領域はブラックホールなどからの熱的放射の高エネルギー端や非熱的スペクトルを含むばかりでなく、電子陽電子消滅線を探る上でも重要である。また近年の X 線衛星や Fermi ガンマ線衛星により、超新星残骸における効率的加速機構や、宇宙線の陽子起源の決め手となった  $\pi^0$  崩壊ガンマ線のスペクトルの同定など、銀河系内の「加速源」による宇宙線の理解は大きく深まってきた。しかし、宇宙線のエネルギー収支を決めるとともに、分子雲中の電離損失により星形成に大きな役割を果たすと考えられる低エネルギー宇宙線を探るために、宇宙線との反応で励起された  $^{12}\text{C}$  や  $^{16}\text{O}$  からの核ガンマ線の検出が鍵であるが、観測に必要な 3-8 MeV のエネルギー範囲において、現在の宇宙ガンマ線検出器はほとんど無力である。われわれは、CMOS センサーと Si ストリップ検出器をハイブリッドにするという独自のアイデアで電子飛跡の追跡が可能で高速な半導体素子の試作に世界にさきがけて成功した (図 1)。これを用いることで、バックグラウンドの極めて低い、究極の半導体コンプトンカメラへの道が開かれた。

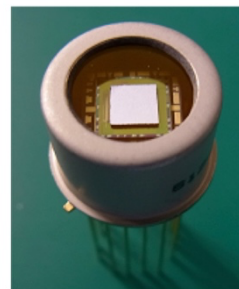


図 1 試作に成功した CMOS Si  
ハイブリッドセンサー

## 2. 研究の目的

世界ではじめて開発に成功した電子飛跡の追跡が可能で高速な半導体素子を用いて、究極の半導体コンプトンカメラを実現し、感度のギャップに埋もれて進展が妨げられている数 100keV から数 MeV の領域でのガンマ線天文学に革新をもたらすことを目的とする。このエネルギー領域は、ブラックホールなどからの熱的放射の高エネルギー端を含むばかりでなく、電子陽電子消滅線、さらには、低エネルギー宇宙線加速の直接的プローブである  $^{12}\text{C}$  や  $^{16}\text{O}$  からの核ガンマ線を検出する上で極めて重要である。本研究では、大型化した CMOS シリコンハイブリッド素子を用いた電子飛跡記録型の Si/CdTe コンプトンカメラを用い、読み出し回路の開発を含めて試作・性能評価を行う。並行して、対象となる高エネルギー物理学の理論的、観測的研究を実施し、要求性能へのフィードバックをかける。

## 3. 研究の方法

独自に開発した CMOS Si ハイブリッド素子の大型化をおこない、それを用いた電子飛跡記録型の Si/CdTe コンプトンカメラを実現する。CMOS シリコンハイブリッド素子中の電子飛跡の解析を行う。特に電子の散乱方向を検知するアルゴリズムの検討を行う。線源を用いて性能を評価する。2mm の厚さを持つ CdTe 両面ストリップ検出器の実現をはかり、試験を行う。最終的に CMOS Si 素子と組みあわせて、コンプトンカメラとしての性能を評価する。並行して X 線天文衛星や GeV、TeV の観測データから将来の MeV ガンマ線天文学の対象となる高エネルギー物理学の理論的、観測的研究を実施し、要求性能へのフィードバックをかける。

## 4. 研究成果

我々が独自に考案した、CMOS Si ハイブリッド Si 検出器の大型化を行い、その試験をおこなうことができた。また、それを用いた Si/CdTe コンプトンカメラの性能評価を実施し、入射ガンマ線の方向がコンプトンコーン上の 1 箇所制限されることを示した。図 2 (a) に大型化に成功した、電子飛跡追跡型 CMOS Si ハイブリッド素子 (厚さ 0.5mm) の写真を示す。20 ミクロン角で 640x640 の画素を持ち、コンプトンカメラの散乱体として動作する上で必要な数  $\mu$  秒のタイミ

ング特性を持つ。

Cs-137を照射したときに観測された電子飛跡(d,e)電子飛跡の観測データ実際に得られた飛程情報とを、裏面に設けられたストリップ電極から得られるエネルギーとタイミング情報とから、ガンマ線源の方向を正確に導き出すことができた。(c)Cs-137を照射したときに観測された電子飛跡を図1(c)に示す。電子はSi中で多重散乱をおこす。そのため、電子の散乱方向を知るためには、始点の識別が必要であり、最初の数ピクセルから方向を求めるためのアルゴリズムを開発する必要がある。我々は解析的な方法と機械学習を用いた手法の研究を行い、散乱電子の散乱方向を得ることに成功した(図1(d)(e))。

Si/CdTeコンプトンカメラは、我々が開発してきた半導体コンプトンカメラで、Doppler効果(電子の運動量分布による効果)が小さく、高い角度分解能をもつことができる。我々は開発を行ったSi-CMOSハイブリッド素子とCdTe両面ストリップ検出器(DSD)を組み合わせてコンプトンカメラを実現し、試験を行った。CMOS部からは画像情報がライン毎に、またストリップ部からはそれとは全く独立にデータが非同期で出力されるため、その二種類のデータを統合するデータ収集装置の開発を行った。従来の0.75mm厚のCdTeDSDにくらべて高い検出効率を持つ2mm厚のセンサーの開発を行い、実装方法を工夫することで完成させることができた(図2(b))。

電子の散乱情報を用いないで描いたコンプトンコーンを図3(a)に示す。これに電子の情報を加えると図3(b)のようにガンマ線の到来方向が制限されることがわかる。図3(c)に、電子飛跡追跡型のSi-CMOSハイブリッド素子とCdTe DSDを組み合わせて得られたスペクトル、図3(d)にARM(Angular Resolution Measure)分布を示す。662 keVのガンマ線に対して、7.4 keV(FWHM)のエネルギー分解能、3.1 度(FWHM)の角度分解能と、優れた性能が得られた。

並行して、Si両面ストリップ検出器を用いたSi/CdTeコンプトンカメラを用いて3次元的に分布する線源などの点源以外の対象物に対する画像再構成アルゴリズムの研究を行なった。トモグラフィのアルゴリズムを用い、数cm間隔に複数の線源を配置したファントムからのデータを用い、線源を明瞭に分離することができた。これらの成果を国際会議に発表するとともに、実装技術の検討、2mm厚のCdTe素子の研究を進めた。将来のMeVガンマ線天文学に向けて、衛星に搭載されたガンマ線検出器の軌道上性能評価や検出器の長期動作試験のほか、MeVガンマ線観測の対象である超新星残骸やブラックホールからのアウトフロー、ガンマ線バイナリーの研究を行い、論文を出版した。

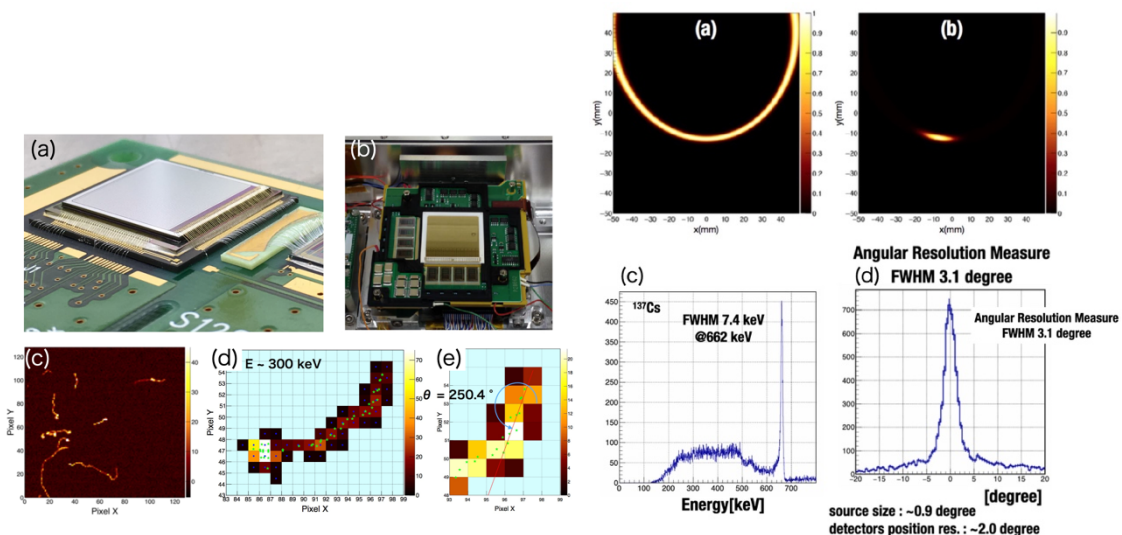


図 2 新たに開発したセンサーと電子飛跡

図 3 電子飛跡を用いた Si/CdTe コンプトンカメラの性能実証

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計20件（うち査読付論文 18件／うち国際共著 16件／うちオープンアクセス 5件）

1. 著者名 Yoneda Hiroki, Saito Shinya, Watanabe Shin, Ikeda Hirokazu, Takahashi Tadayuki	4. 巻 印刷中
2. 論文標題 Development of Si-CMOS hybrid detectors towards electron tracking based Compton imaging in semiconductor detectors	5. 発行年 2017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 印刷中
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.nima.2017.11.078	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 Katsuragawa Miho, Tampo Motonobu, Hamada Koji, Harayama Atsushi, Miyake Yasuhiro, Oshita Sayuri, Sato Goro, Takahashi Tadayuki, Takeda Shin'ichiro, Watanabe Shin, Yabu Goro	4. 巻 印刷中
2. 論文標題 A compact imaging system with a CdTe double-sided strip detector for non-destructive analysis using negative muonic X-rays	5. 発行年 2017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 印刷中
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) doi:10.1016/j.nima.2017.11.004	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 J. Katsuta, T. Takahashi (16番目) (全20名)	4. 巻 840
2. 論文標題 Study of the polarimetric performance of a Si/CdTe semiconductor Compton camera for the Hitomi satellite	5. 発行年 2016年
3. 雑誌名 Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A	6. 最初と最後の頁 51-58
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.nima.2016.09.057	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 H. Odaka, H. Yoneda, T. Takahashi, and A. Fabian	4. 巻 462
2. 論文標題 Sensitivity of the Fe K $\alpha$ Compton shoulder to the geometry and variability of the X-ray illumination of cosmic objects	5. 発行年 2016年
3. 雑誌名 MNRAS	6. 最初と最後の頁 2366-2381
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/mnras/stw1764	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 該当する

1. 著者名 S. Ishikawa, M. Katsuragawa, S. Watanabe, Y. Uchida, S. Takeda, T. Takahashi, S. Saito, L. Glesener, J.C. Buitrago-Casas, S. Krucker, S. Christe	4. 巻 121
2. 論文標題 Fine-pitch CdTe detector for hard X-ray imaging and spectroscopy of the Sun with the FOXSI rocket experiment	5. 発行年 2016年
3. 雑誌名 Journal of Geophysical Research (Space Physics)	6. 最初と最後の頁 6009-6016
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1002/2016JA022631	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 該当する

1. 著者名 Hitomi Collaboration (including T. Takahashi, S. Takeda, S. Watanabe)	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 113-1, 19
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 Ishikawa Shin-nosuke, Takahashi Tadayuki, Watanabe Shin, Narukage Noriyuki, Miyazaki Satoshi, Orita Tadashi, Takeda Shin' ichiro, Nomachi Masaharu, Fujishiro Iwao, Hodoshima Fumio	4. 巻 912
2. 論文標題 High-speed X-ray imaging spectroscopy system with Zynq SoC for solar observations	5. 発行年 2018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 191 ~ 194
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.nima.2017.11.033	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 Odaka Hirokazu (including T. Takahashi, S. Takeda, S. Watanabe)	4. 巻 891
2. 論文標題 Modeling of proton-induced radioactivation background in hard X-ray telescopes: Geant4-based simulation and its demonstration by Hitomi's measurement in a low Earth orbit	5. 発行年 2018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 92 ~ 105
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.nima.2018.02.071	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 該当する

1. 著者名 Nakazawa Kazuhiro et al. (including Takahashi Tadayuki)	4. 巻 10699
2. 論文標題 The FORCE mission: science aim and instrument parameter for broadband x-ray imaging spectroscopy with good angular resolution	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Proceedings of the SPIE	6. 最初と最後の頁 106992
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1117/12.2309344	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 該当する

1. 著者名 Tomaru Ryota, Done Chris, Odaka Hirokazu, Watanabe Shin, Takahashi Tadayuki	4. 巻 476
2. 論文標題 Monte Carlo simulations of the detailed iron absorption line profiles from thermal winds in X-ray binaries	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Monthly Notices of the Royal Astronomical Society	6. 最初と最後の頁 1776 ~ 1784
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/mnras/sty336	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 該当する

1. 著者名 Tajima Hiroyasu, Watanabe Shin, Fukazawa Yasushi, Blandford Roger	4. 巻 4
2. 論文標題 Design and performance of Soft Gamma-ray Detector onboard the Hitomi (ASTRO-H) satellite	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 ~ 1
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1117/1.JATIS.4.2.021411	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 Nakazawa Kazuhiro, Sato Goro, Kokubun Motohide, Enoto Teruaki, Fukazawa Yasushi, Hagino Kouichi, Hayashi Katsuhiro, Kataoka Jun, Katsuta Junichiro, Kobayashi Shogo B., Laurent Philippe, Lebrun Francois, Limousin Olivier, Maier Daniel, Makishima Kazuo, Mizuno Tsunefumi, Mori Kunishiro, Nakamori Takeshi	4. 巻 4
2. 論文標題 Hard x-ray imager onboard Hitomi (ASTRO-H)	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 ~ 1
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1117/1.JATIS.4.2.021410	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 Hagino Koichi et al.	4. 巻 4
2. 論文標題 In-orbit performance and calibration of the Hard X-ray Imager onboard Hitomi (ASTRO-H)	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 1~1
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1117/1.JATIS.4.2.021409	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 Maier Daniel, Horeau Benoit, Laurent Philippe, Limousin Olivier, Renaud Diana, Kawaharada Madoka, Kokubun Motohide, Sato Goro, Takahashi Tadayuki, Watanabe Shin, Nakazawa Kazuhiro, Boatella Polo Cesar	4. 巻 912
2. 論文標題 Long-term test of a stacked CdTe mini-HXI setup	5. 発行年 2018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 199~204
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.nima.2017.11.035	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 該当する

1. 著者名 Katsuragawa Miho, Nakashima Shinya, Matsumura Hideaki, Tanaka Takaaki, Uchida Hiroyuki, Lee Shiu-Hang, Uchiyama Yasunobu, Arakawa Masanori, Takahashi Tadayuki	4. 巻 70
2. 論文標題 Suzaku X-ray observations of the mixed-morphology supernova remnant CTB-1	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 114
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/pasj/psy114	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 該当する

1. 著者名 Caradonna Peter, Reutens David, Takahashi Tadayuki, Takeda Shin'ichiro, Vegh Viktor	4. 巻 3
2. 論文標題 Probing entanglement in Compton interactions	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Journal of Physics Communications	6. 最初と最後の頁 105005~105005
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/2399-6528/ab45db	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 Tomaru Ryota, Done Chris, Ohsuga Ken, Nomura Mariko, Takahashi Tadayuki	4. 巻 490
2. 論文標題 The thermal-radiative wind in low-mass X-ray binary H1743?322: radiation hydrodynamic simulations	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Monthly Notices of the Royal Astronomical Society	6. 最初と最後の頁 3098 ~ 3111
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/mnras/stz2738	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 該当する

1. 著者名 Musset Sophi et al. (including Tadayuki Takahashi)	4. 巻 1111812
2. 論文標題 Ghost-ray reduction and early results from the third FOXSI sounding rocket flight	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Proceedings of the SPIE	6. 最初と最後の頁 1111812 16
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1117/12.2530029	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 該当する

1. 著者名 Ohno Masanori et al. (including T. Takahashi, S. Watanabe)	4. 巻 924
2. 論文標題 Event-selection technique for the multi-layer Si/CdTe Compton camera onboard Hitomi	5. 発行年 2019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 327 ~ 331
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.nima.2018.09.114	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 該当する

1. 著者名 Vievering Juliana, Glesener Lindsay, Athiray P. Subramania, Musset Sophie, Ishikawa Shin-nosuke, Buitrago-Casas Juan Camilo, Takahashi Tadayuki, Watanabe Shin, Furukawa Kento, Hagino Kouichi, Ryan Daniel F., Inglis Andrew, Krucker S?m, Christe Steven, Courtade Sasha	4. 巻 11118
2. 論文標題 Characterization of fine-pitch cadmium telluride detectors for the FOXSI sounding rocket experiment (Conference Presentation)	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 SPIE	6. 最初と最後の頁 1111813
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1117/12.2530107	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 該当する



〔学会発表〕 計17件（うち招待講演 4件 / うち国際学会 11件）

1. 発表者名 Tadayuki Takahashi, Shin Watanabe, Shin'ichiro Takeda
2. 発表標題 Large Area CdTe Imaging Sensor and its applications
3. 学会等名 SPIE Optics + Photonics 2017 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 S. Watanabe, H. Yoneda, S. Saito, H. Ikeda, T. Takahashi, S. Takeda
2. 発表標題 Si/CdTe semiconductor Compton cameras with electron-tracking based imaging
3. 学会等名 IEEE Nuclear Science Symposium and Medical Imaging Conference (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 渡辺 伸、米田 浩基、池田 博一、高橋 忠幸、武田 伸一郎
2. 発表標題 電子軌跡検出型のSi/CdTe半導体コンプトンカメラの開発
3. 学会等名 第65回応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Kento Furukawa, Athiray P. S., Juan Camiko Buitrago Casas, Juliana Vievering, Koichi Hagino, Lindsay Glesener, Sam Krucker, Shin Watanabe, Shin'ichiro Takada, Shin'nosuke Ishikawa, Sophie Musset, Steven Chritste, Tadayuki Takahashi
2. 発表標題 Development of 60 micro m pitch CdTe double-sided strip detectors for the FOXSI-3 sounding rocket experiment. ", 11th International "Hiroshima" Symposium on the Development and Application of Semiconductor Tracking Detectors (HSTD11), 2017/12
3. 学会等名 ymposium on the Development and Application of Semiconductor Tracking Detectors (HSTD11) (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 S. Takeda, T. Orita, F. Moriyama, H. Sugawara, G. Yabu, H. Yoneda, S. Watanabe, T. Takahashi, Y. Mizumachi, M. Uenomachi, Y. Yoshihara, H. Takahashi, K. Shimazoe
2. 発表標題 Double-photon emission imaging of 111-In with a high-resolution Si/CdTe Compton camera
3. 学会等名 Symposium on the Development and Application of Semiconductor Tracking Detectors (HSTD11) (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 大下紗百合, 桂川美穂, 内田悠介, 武田伸一郎, 萩野浩一, 渡辺伸, 高橋忠幸
2. 発表標題 将来のミッションへの搭載を目指した広視野小型全天モニターの研究
3. 学会等名 日本天文学会春季年会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Ryota Tomaru, Chris Done, Tadayuki Takahashi
2. 発表標題 Full spectral model for thermal wind line profiles using Monte Carlo method
3. 学会等名 KITP Conference; Disks, Dynamos, and Data: Confronting MHD Accretion Theory with Observations (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Tadashi Orita, Shin'ichiro Takeda, Shin Watanabe, Hirokazu Ikeda, Tadayuki Takahashi
2. 発表標題 Development of a front-end ASIC for CdTe Hybrid Pixel Detector,
3. 学会等名 International Workshop on Semiconductor Pixel Detectors for Particles and Imaging (PIXEL 2018) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Tadayuki Takahashi
2. 発表標題 Novel and interdisciplinary application of space hard X-ray and gamma-ray detectors,
3. 学会等名 The 1st Workshop on Quantum Beam Imaging (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 古川健人, 高橋忠幸, 武田伸一郎, 渡辺伸, 石川真之介, 萩野浩一, Lindsay Glesener, ほかFOXSIチーム
2. 発表標題 FOXSI-3ロケット実験に向けた狭ピッチCdTe両面ストリップ検出器の性能評価とイメージングアルゴリズムの開発
3. 学会等名 日本物理学会, 2018年秋季大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Tadayuki Takahashi
2. 発表標題 The cosmos at high energies: exploring extreme physics through novel instrumentation
3. 学会等名 The cosmos at high energies: exploring extreme physics through novel instrumentation( (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Ryota Tomaru, Chris Done, Ken Ohsuga, Mariko Nomura, Takahashi Tadayuki,
2. 発表標題 The thermal-radiative disc wind in the low mass X-ray binary H 1743-322
3. 学会等名 XCalibur2019, Next Generation X-ray Spectroscopy, (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 T. Takahashi, S. Takeda, T. Orita, S. Watanabe
2. 発表標題 High Energy Resolution CdTe Diode and its Applications to Hard X-ray and Gamma-ray Imaging,
3. 学会等名 CERN Medpix Open Meeting (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 T. Orita, T. Kawamura, K. Mine, S. Takeda, S. Watanabe, H. Ikeda, T. Takahashi
2. 発表標題 Development of CdTe Hybrid Pixel ASIC for Hard X-ray Imaging
3. 学会等名 International 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 成影典之、、、高橋忠幸、渡辺伸他 Phoenixワーキンググループ
2. 発表標題 気リコネクションに伴う粒子加速の理解を目指す衛星計画PhoENiXの進捗報告(2019年秋)
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 都築豊, 渡辺伸, 大石晋平, 沼館直樹, 櫻井誠, 渡邊裕文, 中村信行, 内田悠介, 米田浩基, 小高裕和, 高橋 忠幸
2. 発表標題 Si/CdTeコンプトンカメラの原子物理実験における偏光測定への応用
3. 学会等名 原子衝突学会第44回年会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 中澤知洋、高橋忠幸、渡辺伸他 FORCEワーキンググループ
2. 発表標題 軟X線/硬X線の広帯域を高感度観測する次世代衛星 FORCE:サイエンスとミッション提案の現状
3. 学会等名 日本物理学会, 2019年秋季大会
4. 発表年 2019年

〔図書〕 計1件

1. 著者名 高原文郎、家正則、小玉英雄、高橋忠幸	4. 発行年 2020年
2. 出版社 朝倉書店	5. 総ページ数 912
3. 書名 宇宙物理学ハンドブック	

〔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
研究分担者	渡辺 伸  (Shin Watanabe)  (60446599)	国立研究開発法人宇宙航空研究開発機構・宇宙科学研究所・助教   (82645)	
研究分担者	武田 伸一郎  (Shinichiro Takeda)  (80553718)	東京大学・カブリ数物連携宇宙研究機構・特任助教   (12601)	