

令和 3 年 6 月 21 日現在

機関番号：14401

研究種目：挑戦的研究（萌芽）

研究期間：2018～2020

課題番号：18K18767

研究課題名（和文）X線偏光フィルタ機能つき蛍光X線元素分析3D撮像カメラの開発

研究課題名（英文）Development of X-ray Fluorescence Elemental Analysis 3D Imaging Camera with an X-ray Polarization Filter

研究代表者

林田 清（Hayashida, Kiyoshi）

大阪大学・理学研究科・准教授

研究者番号：30222227

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 4,900,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では、可視光用CMOSピクセル検出器をX線検出に流用し、コード化マスクと小型X線発生装置を組み合わせることで、コンパクト、安価な蛍光X線3Dイメージング装置の開発を目標とした。最小ピクセルサイズの可視光用CMOSを用いて、常温大気圧でX線光子のエネルギーを測定に成功し、さらに、X線偏光検出性能があることも初めて示した。複数の金属を張り付けた板からの蛍光X線を、ピンホールを通して撮像し画像の取得に成功した。コード化マスクを用いた撮影も行ったが、3D画像再合成は今後の課題となった。一方で、これまでとは全く異なる原理の天文用X線干渉計に、CMOS及びマスクの技術が利用できることを示した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

非破壊で元素組成を調べる蛍光X線分析装置は、広く普及している。ただし、多くは測定対象全体の元素組成を測定する装置である。測定対象の場所ごとの元素組成、つまり、元素ごとの分布を測定する、スキャン式の蛍光X線分析装置は、大型、高価で、測定時間もかかる。本研究は、X線ピクセル検出器とコード化マスクを組み合わせ、蛍光X線画像を一気に取得する、コンパクト、安価な装置の開発を目指している。本研究で、可視光用CMOS検出器でも、常温でX線光子エネルギー測定に成功し、ピンホール使用であるが、蛍光X線画像も得られた。目的の装置が可能であることをほぼ示せた。完成すれば、応用の範囲と規模は図りしれない。

研究成果の概要（英文）：Our primary goal is to develop a fluorescence X-ray 3D imager with a compact X-ray source, coded mask, and a CMOS pixel detector. We aimed to apply the CMOS detector designed for visible light to detect X-rays, and the imager system whole should be inexpensive and compact. We succeeded in measuring the energy of a single X-ray photon at room temperature in the air with the most minute size pixel CMOS detector designed for visible light. We also demonstrated that the same detector could measure X-ray polarization. We then detected fluorescent X-rays from a panel made of various metals in mosaic through a pinhole. We succeeded in obtaining a color X-ray image that shows a distribution of metals with different fluorescence energies. We replaced the pinhole with a coded mask, too. However, decoding procedure and 3D extension remained our future work. The CMOS pixel detector realized an astronomical X-ray interferometer, of which principle was invented by us, as a key device.

研究分野：X線天文学

キーワード：蛍光X線分析 X線ピクセル検出器 CMOSピクセル検出器 コード化マスク X線スペクトル

## 1. 研究開始当初の背景

### (1) 蛍光 X 線分析装置：全体積分型とスキャン型

工業製品や文化財、さらには惑星探査の岩石まで、蛍光 X 線分析は、非破壊で元素組成を明らかにする最も有効な手段である。小型の X 線発生装置と半導体検出器を組み合わせた可搬の装置も販売されており、広く利用されている。一般に、測定対象全体、あるいは一部の領域から出る蛍光 X 線の積分スペクトルを測定し、元素の種類と量を評価する。

一方、対象の場所ごとの元素組成を測定する必要な場合もあり、その際に使用されるのは、スキャン方式の蛍光 X 線分析装置である。スポット状に連続 X 線照射をして、そこから発生する蛍光 X 線を測定、スポットを移動してまた測定ということを繰り返し、各所での元素の種類と量をスキャンする。構造上大型となり可搬型は困難で、結果測定時間も長くなる。価格も高価で、普及度も高いとはいえない。

### (2) ピクセル検出器：CCD と CMOS

X 線の画像検出器にはレントゲン依存、様々な形式が開発・利用されている。ただし、その多くは、X 線強度の分布を測定するのが目的で、X 線光子 1 個 1 個の入射位置とエネルギーを測定する装置の種類と目的は、少数派である。X 線天文学は、後者の測定が必須である、少数派の代表といえる。この X 線天文学の分野で、ここ 20 数年標準的に用いられてきたのが、X 線 CCD である。X 線 CCD の構造は、基本的には、可視光用のデジカメに広く普及して”いた”、CCD と同じである。ただし、読み出しノイズが低い、空乏層が厚いという特徴があった。しかし、 $-100\text{degC}$  程度まで素子を冷却しないとイケないなど、装置の小型化は難しかった。

ところが、2000 年代の後半、まず、可視光用のデジカメの素子が CCD から CMOS に置き換わった。消費電力や読み出し速度の面で有利な CMOS の低雑音化が進展し、十分実用にたる性能となったことによる。2010 年代半ば、特に Scientific CMOS と呼ばれるクラスの科学計測用 CMOS 素子では、読み出しノイズ数  $e^-$  まで達していた。

### (3) X 線ガンマ線イメージングの手法としてのコード化マスク

可視光と異なり、X 線やガンマ線を撮像するのは容易ではない。X 線に関しては、斜入射反射鏡があるものの、焦点距離が長く、小型化するのは難しい。硬 X 線やガンマ線では、さらに難しく、そのためにコード化マスクという手法が開発されている。これは、単純なピンホールカメラの撮影原理から、ピンホールの数を増やして効率を高める手法といえる。硬 X 線、ガンマ線天文学では、現在でも利用されており、代表例として、Swift 衛星搭載の BAT、AstroSat 衛星の CZT と呼ばれる装置は、硬 X 線、ガンマ線バンドで広い視野を観察し、バースト現象の発生天体を探すのに利用されている。広く普及しているとまではいえないが、工業用、医療用としても利用されている。

## 2. 研究の目的

本研究の最終目的は、短時間の撮影で、測定対象の蛍光 X 線像を取得する、コンパクト、安価な装置の開発である。ここで、蛍光 X 線像とは、ある元素の蛍光 X 線に相当するエネルギーバンドの撮影対象の像で、測定対象表面の当該元素の分布を示している。1 回の撮影で、様々な元素の蛍光 X 線像を同時に取得する。このためには、エネルギー測定能力と位置検出能力を兼ね備えて X 線ピクセル検出器が必須である。また、X 線光子 (イベント) ごとに、エネルギー、検出位置を記録するイベントデータ処理も必要である。X 線天文衛星搭載の X 線 CCD は、この条件を満たすが、コンパクト、安価を満たすことはそこで難しい。本研究では、性能向上が近年著しい可視光用 CMOS ピクセル検出器に着目し、これを X 線検出用に利用し、これらの条件を満たすことができないかと考えた。膨大な種類の CMOS ピクセル検出器から適当なものを選択、実際に X 線を照射し、性能評価することが、研究前半の目標になる。

測定対象に照射する連続 X 線は、既存の超小型 X 線発生装置を利用する。測定対象と X 線ピクセル検出器の間にピンホールを設置すれば、蛍光 X 線撮像装置が完成する。しかし、これでは蛍光 X 線のごく一部しか検出器に届かず、”短時間の撮影”の条件をみたさない。そこで、ピンホールをコード化マスクで置き換え、効率向上を図るのが、本研究の第二のポイントである。上述したように、コード化マスクに使用は硬 X 線、ガンマ線天文学では確立した手法である。コード化マスクで撮影したデータに対しては、像再合成という手順が必要になる。天体のような無限遠にある対象に対してはこれも確立しているが、近接した対象に対しては、そのまま適用できない。このアルゴリズムを開発し、実験で検証するところまでが、本研究後半の目標となる。

ピンホール撮影では、あらゆる距離にピントがあうのに対し、レンズを用いた (可視光) 撮影では、ピントが合う距離は限定される。コード化マスクを用いた撮影でも像再合成をするためには、対象までの距離を仮定する必要がある。しかし、同じデータを、異なる距離を仮定して、像再合成することで、その距離の 2 次元画像が得られる。これを繰り返すと、原理的には、対象の 3 次元 (3D) 情報を得ることができるはずである。この点にも挑戦することを目的に含めた。

## 3. 研究の方法

以下の手順で研究をすすめた。

- (1) 可視光用 CMOS ピクセル検出器の選択と導入、X線検出性能試験  
膨大な種類、数の可視光用 CMOS ピクセル検出器素子が製造されているが、本研究に必要な X 線光子のエネルギー検出に必要な低いノイズレベルを実現している CMOS 素子は、科学計測用 sCMOS と呼ばれるモデルに限定される。我々は、本研究開始前に Gpixel 社の GSENSE5130 という、ピクセルサイズ  $4.25\ \mu\text{m}$ 、ピクセル数 15M の素子を手入し、エネルギー分解能 200eV 程度の X 線検出性能が得られる結果を得ていた。本研究開始後の 2018 年に、同社から、この時点で Global Shutter 式としては、世界最小ピクセルサイズ  $2.5\ \mu\text{m}$ 、ピクセル数 25M の GMAX0505 が発売された。本研究では、これを手入し、X 線性能評価を実施した。結果的に、この素子が良好な性能を示し、本研究で使用する事となった。さらに、同素子を放射光施設 SPring8 BL20B2 に持ち込み、偏光 X 線ビームを照射、隣接ピクセルにスプリットした電荷を測定することで、X 線偏光検出が可能か評価をした。
- (2) コード化マスクの試作と近接対象に対する像再合成のソフトウェア作成  
X 線実験の前に、模擬的な画像 (PC のディスプレイに表示) を、レンズをコード化マスクにつけかえた、デジタルカメラで撮影し、それを素材に、像再合成のアルゴリズムの開発、ソフトウェアを作成した。
- (3) ピンホールを用いた蛍光 X 線像の撮影  
超小型 X 線発生装置 Amptek 社 mini-X からの連続 X 線を、Fe, Cu などの金属小片をモザイク状にはりつけた板に照射した。この板を、ピンホールを介して、(1) で評価した GMAX0505 で撮影した。得られた X 線イベントデータを、処理し、それぞれの蛍光 X 線エネルギーに相当するイベントだけを選択し、蛍光 X 線像を作成した。
- (4) コード化マスクを用いた蛍光 X 線像の撮影  
(3) の実験セットアップで、ピンホールをコード化マスクに置き換え X 線撮影する実験を行った。

#### 4. 研究成果

研究方法の (1)-(4) のそれぞれに段階における成果をまとめる。

- (1) GMAX0505 が、常温大気中という条件で、 $5.9\text{keV}$  の X 線に対してエネルギー分解能 FWHM  $176\text{eV}$  で X 線光子検出できることがわかった。SPring8 での X 線照射実験から、X 線検出器としての有効厚みを  $5\ \mu\text{m}$  と評価した。さらに、 $12.4\text{keV}$ 、 $24.8\text{keV}$  の X 線に対して、GMAX0505 のデータ処理を工夫することで、X 線偏光検出性能をもたせることができることを実証した。

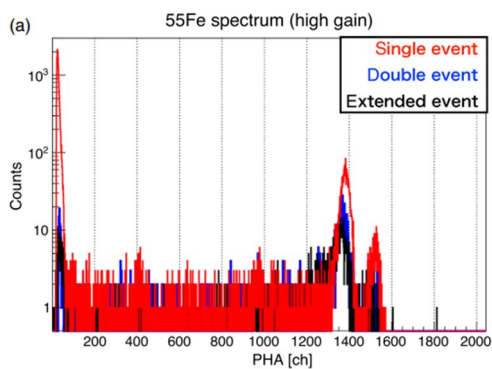


図1 GMAX0505 に  $55\text{Fe}$  からの X 線を常温大気圧で照射して得たスペクトル (Asakura, Hayashida et al.2019 より)

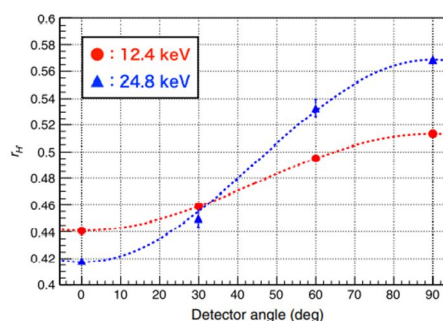


図2 SPring8/BL20B で偏光 X 線ビームを GMAX0505 に照射して得た、スプリットピクセルイベントの角度依存性 (Asakura, Hayashida et al.2019 より)

- (2) 無限遠に対して確立していた像合成の方法を拡張すること、近距離の対象に対しても像合成ができるようになった。

- (3) ピンホールを使用した蛍光 X 線像の撮影に成功した。図 3 の例では、撮影対象の  $1\text{mm}$  程度

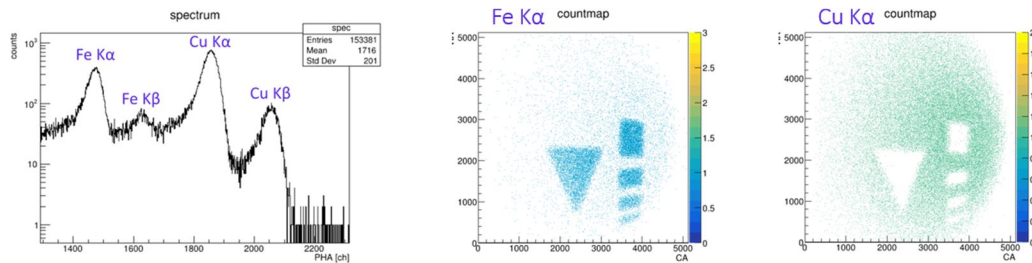


図3 銅板に鉄の小片を複数あり、連続 X 線を照射、発生した蛍光 X 線をピンホールを介して GMAX0505 で撮影した。フレームデータを複数枚取得し、抽出したイベントデータをもとに作成したスペクトルが左図、FeK 輝線に対応するエネルギーだけ選択して作成した蛍光 X 線像が中図、CuK 輝線に対するそれが右図(石倉、林田他 2020)

の構造まで撮影できている。

(4) ピンホールをコード化マスクに置き換えて、X 線撮影まで行った。蛍光 X 線発生点を、小さな領域にしぼるとコード化マスクに対応する像が得られることまでは確認できたが、図 3 のような広い領域から放射される蛍光 X 線の像の再合成に成功するまでには至らなかった。

以上の成果の位置づけを述べる。(1)の GMAX0505 に X 線検出とその性能は、本研究の目的にとどまらず、X 線検出の様々な応用に重大な意味をもつ。X 線 CCD で X 線光子のエネルギー測定をする場合、-100degC 程度まで冷却する必要があった(従って CCD は真空容器にいれることが必須)ことと比べ、常温大気中で十分なエネルギー分解能で X 線検出できるメリットは甚大である。実際、多くの研究者から問い合わせを受けており、同様の CMOS 素子を導入した研究者も多い。X 線検出可能な CMOS 素子は GMAX0505 に限らず、少なくとも数種類の評価、応用が報告されている。その中で、GMAX0505 の特徴は、ピクセルサイズは 2.5 $\mu\text{m}$  と小さいことである。CMOS 以外ではこのようなピクセルサイズのものはなく、GMAX0505 によって得た X 線画像は、現時点で世界最高の位置分解能によるそれとすることができる。CMOS 検出器による X 線偏光検出は、世界初の成果である。これも小さなピクセルサイズがカギになっている。

我々は、新たな原理の天体用 X 線干渉計、多重像 X 線干渉計を 2016 年より提案し、その開発をすすめていた。最大の技術的障壁が、高い位置分解をもつ X 線ピクセル検出器にあった。GMAX0505 の利用により、一気に原理実証、性能向上のブレークスルーが実現できた。

(2)、(3)と本研究の目的にそった開発ができた。最終目標(4)の成功にまで、到達できなかったことは、反省点である。しかし、これは原理的な問題ではなく、技術的調整の不足であると認識している。今後の調整で、目的の装置のプロトタイプを開発することは十分可能と考えている。その先、商品化や普及は我々のスコープには含まれないが、シャッターを 1 回押しただけで、対象の元素ごとの像が得られるような一眼レフカメラのサイズの装置が完成すれば、その応用は図りしれない。衛星探査への利用のオプションもあるだろう。

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計13件（うち査読付論文 9件 / うち国際共著 3件 / うちオープンアクセス 0件）

|  |                               |
|--|-------------------------------|
| 1. 著者名<br>Asakura Kazunori, Hayashida Kiyoshi, Hanasaka Takashi, Kawabata Tomoki, Yoneyama Tomokage, Okazaki Koki, Ide Shuntaro, Noda Hirofumi, Matsumoto Hironori   | 4. 巻<br>5                     |
| 2. 論文標題<br>X-ray imaging polarimetry with a 2.5- $\mu$ m pixel CMOS sensor for visible light at room temperature   | 5. 発行年<br>2019年               |
| 3. 雑誌名<br>Journal of Astronomical Telescopes, Instruments, and Systems   | 6. 最初と最後の頁<br>1~1             |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子)<br>10.1117/1.JATIS.5.3.035002   | 査読の有無<br>有                    |
| オープンアクセス<br>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<br>-                     |
| 1. 著者名<br>Katsuda S., Ohno M., Mori K., Beppu T., Kanemaru Y., Tashiro M. S., Terada Y., Sato K., Morita K., Sagara H., Ogawa F., Takahashi H., Murakami H., Nobukawa M., Tsunemi H., Hayashida K., Matsumoto H., Noda H., Nakajima H., Ezoe Y., Tsuboi Y., Maeda Y., Yokoyama T., Narukage N. | 4. 巻<br>891                   |
| 2. 論文標題<br>Inverse First Ionization Potential Effects in Giant Solar Flares Found from Earth X-Ray Albedo with Suzaku/XIS  | 5. 発行年<br>2020年               |
| 3. 雑誌名<br>The Astrophysical Journal  | 6. 最初と最後の頁<br>126 ~ 126       |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子)<br>10.3847/1538-4357/ab7207   | 査読の有無<br>有                    |
| オープンアクセス<br>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<br>-                     |
| 1. 著者名<br>Kanemaru Y., Sato J., Mori K., Nakajima H., Nishioka Y., Takeda A., Hayashida K., Matsumoto H., Iwagaki J., Okazaki K., Asakura K., Yoneyama T., Uchida H., Okon H., Tanaka T., Tsuru T.G., Tomida H., et al.  | 4. 巻<br>14                    |
| 2. 論文標題<br>Radiation hardness of a p-channel notch CCD developed for the X-ray CCD camera onboard the XRISM satellite  | 5. 発行年<br>2019年               |
| 3. 雑誌名<br>Journal of Instrumentation   | 6. 最初と最後の頁<br>C04003 ~ C04003 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子)<br>10.1088/1748-0221/14/04/C04003   | 査読の有無<br>有                    |
| オープンアクセス<br>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<br>-                     |
| 1. 著者名<br>Hayashida Kiyoshi, Kawabata Tomoki, Hanasaka Takashi, Nakajima Hiroshi, Matsumoto Hironori, Tsunemi Hiroshi, Awaki Hisamitsu, Asakura Kazunori, Okazaki Koki, Yoneyama Tomokage, Ide Shuntaro  | 4. 巻<br>10699                 |
| 2. 論文標題<br>Sub-arcsecond imaging with multi-image x-ray interferometer module (MIXIM) for very small satellite   | 5. 発行年<br>2018年               |
| 3. 雑誌名<br>SPIE proceeding  | 6. 最初と最後の頁<br>106990U         |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子)<br>10.1117/12.2314181   | 査読の有無<br>無                    |
| オープンアクセス<br>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<br>-                     |

|   |                           |
|---|---------------------------|
| 1. 著者名<br>Hosono, Ryo; Kawabata, Tomoki; Hayashida, Kiyoshi; Kudo, Togo; Ozaki, Kyosuke; Teranishi, Nobukazu; Hatsu, Takaki; Hosoi, Takuji; Watanabe, Heiji; Shimura, Takayoshi | 4. 巻<br>26(16)            |
| 2. 論文標題<br>Advancement of X-ray radiography using microfocus X-ray source in conjunction with amplitude grating and SOI pixel detector, SOPHIAS                                 | 5. 発行年<br>2018年           |
| 3. 雑誌名<br>Optics Express  | 6. 最初と最後の頁<br>21044-21053 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子)<br>10.1364/OE.26.021044  | 査読の有無<br>有                |
| オープンアクセス<br>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<br>-                 |

|   |                       |
|---|-----------------------|
| 1. 著者名<br>Hayashida Kiyoshi et al.  | 4. 巻<br>10699         |
| 2. 論文標題<br>Soft x-ray imaging telescope (Xtend) onboard X-ray Astronomy Recovery Mission (XARM) | 5. 発行年<br>2018年       |
| 3. 雑誌名<br>SPIE proceeding   | 6. 最初と最後の頁<br>1069923 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子)<br>10.1117/12.2311446  | 査読の有無<br>無            |
| オープンアクセス<br>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<br>該当する          |

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

|  |                         |
|--|-------------------------|
| 1. 著者名<br>Yoneyama T., Hayashida K., Nakajima H., Matsumoto H.   | 4. 巻<br>340             |
| 2. 論文標題<br>Unification of strongly magnetized neutron stars with regard to X ray emission from hot spots | 5. 発行年<br>2019年         |
| 3. 雑誌名<br>Astronomische Nachrichten  | 6. 最初と最後の頁<br>221 ~ 225 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子)<br>10.1002/asna.201913593   | 査読の有無<br>有              |
| オープンアクセス<br>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<br>-               |

|   |                      |
|---|----------------------|
| 1. 著者名<br>Hitomi Collaboration  | 4. 巻<br>70           |
| 2. 論文標題<br>Detection of polarized gamma-ray emission from the Crab nebula with the Hitomi Soft Gamma-ray Detector | 5. 発行年<br>2018年      |
| 3. 雑誌名<br>Publications of the Astronomical Society of Japan   | 6. 最初と最後の頁<br>id.113 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子)<br>10.1093/pasj/psy118   | 査読の有無<br>有           |
| オープンアクセス<br>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<br>該当する         |

|   |                     |
|---|---------------------|
| 1. 著者名<br>Hitomi Collaboration  | 4. 巻<br>70          |
| 2. 論文標題<br>Hitomi X-ray observation of the pulsar wind nebula G21.5-0.9 | 5. 発行年<br>2018年     |
| 3. 雑誌名<br>Publications of the Astronomical Society of Japan             | 6. 最初と最後の頁<br>id.38 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子)<br>10.1093/pasj/psy027                         | 査読の有無<br>有          |
| オープンアクセス<br>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<br>-           |

|  |                          |
|--|--------------------------|
| 1. 著者名<br>Takahashi Tadayuki et al.                                    | 4. 巻<br>4                |
| 2. 論文標題<br>Hitomi (ASTRO-H) X-ray Astronomy Satellite                  | 5. 発行年<br>2018年          |
| 3. 雑誌名<br>Journal of Astronomical Telescopes, Instruments, and Systems | 6. 最初と最後の頁<br>id. 021402 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子)<br>10.1117/1.JATIS.4.2.021402                 | 査読の有無<br>有               |
| オープンアクセス<br>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<br>該当する             |

|  |                           |
|--|---------------------------|
| 1. 著者名<br>Hayashida Kiyoshi, Asakura Kazunori, Ishikura Ayami, Sakuma Shotaro, Hanasaka Takashi, Kawabata Tomoki, et al.                           | 4. 巻<br>11444             |
| 2. 論文標題<br>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<br>2020年           |
| 3. 雑誌名<br>Proc. of SPIE  | 6. 最初と最後の頁<br>id. 114441C |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子)<br>10.1117/12.2562193   | 査読の有無<br>無                |
| オープンアクセス<br>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<br>-                 |



|  |                          |
|--|--------------------------|
| 1. 著者名<br>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<br>11444            |
| 2. 論文標題<br>Subsub-arcseconds x-ray imaging with multi-image x-ray interferometer module (MIXIM): experimental results  | 5. 発行年<br>2020年          |
| 3. 雑誌名<br>Proc. of SPIE  | 6. 最初と最後の頁<br>id.114441D |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子)<br>10.1117/12.2560772   | 査読の有無<br>無               |
| オープンアクセス<br>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<br>-                |

〔学会発表〕 計17件 (うち招待講演 0件 / うち国際学会 6件)

|  |
|--|
| 1. 発表者名<br>Kiyoshi Hayashida   |
| 2. 発表標題<br>Multiple Image X-ray Interferometer Modules (MIXIM) and their Scalable Mission Plans from Sub-arcsecond to Subsub-arcsecond Resolution X-ray Images |
| 3. 学会等名<br>X-ray Astronomy 2019 (国際学会)   |
| 4. 発表年<br>2019年  |

|   |
|---|
| 1. 発表者名<br>Kazunori Asakura, Kioshi Hayashida et al.  |
| 2. 発表標題<br>X-ray imaging with a 2.5- $\mu$ m pixel CMOS sensor designed for visible light at room temperature |
| 3. 学会等名<br>The 15th Symposium of Japanese Research Community on X-ray Imaging Optics (国際学会)                   |
| 4. 発表年<br>2019年   |

|   |
|---|
| 1. 発表者名<br>林田清、他  |
| 2. 発表標題<br>サブ秒角からマイクロ秒角の角度分解能のX線撮像を目指すMIXIM: 近傍活動銀河核の観測に向けて |
| 3. 学会等名<br>日本天文学会2020年春期年会                                  |
| 4. 発表年<br>2020年   |



|   |
|---|
| 1. 発表者名<br>石倉 彩美、林田 清、他                   |
| 2. 発表標題<br>探査機搭載を目指した超小型X線蛍光分析3D撮像システムの開発 |
| 3. 学会等名<br>日本天文学会2020年春季年会                |
| 4. 発表年<br>2020年                           |

|   |
|---|
| 1. 発表者名<br>佐久間 翔太郎  |
| 2. 発表標題<br>微小ピクセルCMOSセンサー動作ボードとX線イベント検出・バックグラウンド除去のアルゴリズム開発 |
| 3. 学会等名<br>日本天文学会2020年春季年会                                  |
| 4. 発表年<br>2020年   |

|  |
|--|
| 1. 発表者名<br>林田清、他                       |
| 2. 発表標題<br>X線天体をサブ秒角で撮像する多重像X線干渉計の開発現状 |
| 3. 学会等名<br>日本物理学会2019秋季大会              |
| 4. 発表年<br>2019年                        |

|  |
|--|
| 1. 発表者名<br>Hayashida, K. et al.  |
| 2. 発表標題<br>Sub-arcsecond Imaging with Multi Image X-ray Interferometer (MIXIM) for Very Small Satellites |
| 3. 学会等名<br>SPIE Astronomical Telescopes and Instrumentation (国際学会)                                       |
| 4. 発表年<br>2018年  |

|   |
|---|
| 1. 発表者名<br>Hayashida, K. et al.   |
| 2. 発表標題<br>Soft x-ray imaging telescope (Xtend) onboard X-ray Astronomy Recovery Mission (XARM) |
| 3. 学会等名<br>SPIE Astronomical Telescopes and Instrumentation (国際学会)                              |
| 4. 発表年<br>2018年   |

|   |
|---|
| 1. 発表者名<br>林田 清、他                         |
| 2. 発表標題<br>サブ秒角でX線天体を撮像する多重像X線干渉計MIXIMの開発 |
| 3. 学会等名<br>日本物理学会秋季年会                     |
| 4. 発表年<br>2018年                           |

|   |
|---|
| 1. 発表者名<br>林田 清、他                               |
| 2. 発表標題<br>X線多重像干渉計MIXIMの開発現状(2) モデルプランの策定と概念検討 |
| 3. 学会等名<br>日本天文学会秋季年会                           |
| 4. 発表年<br>2018年                                 |

|  |
|--|
| 1. 発表者名<br>林田 清、他                      |
| 2. 発表標題<br>多重像X線干渉計MIXIM 概念検討とモデルプラン策定 |
| 3. 学会等名<br>量子イメージング研究会                 |
| 4. 発表年<br>2018年                        |

|   |
|---|
| 1. 発表者名<br>Hayashida, K. et al.   |
| 2. 発表標題<br>Sub Arc-seconds to Micro Arc-seconds Imaging with Multi Image X-ray Interferometer Modules (MIXIM) |
| 3. 学会等名<br>Japan-China High Energy Astrophysics Meeting (国際学会)  |
| 4. 発表年<br>2018年   |

|   |
|---|
| 1. 発表者名<br>林田 清、他   |
| 2. 発表標題<br>Sub Arc-seconds to Micro Arc-seconds Imaging with Multi Image X-ray Interferometer Modules (MIXIM) |
| 3. 学会等名<br>第19回宇宙科学シンポジウム   |
| 4. 発表年<br>2019年   |

|   |
|---|
| 1. 発表者名<br>林田 清、他                                       |
| 2. 発表標題<br>多重像X線干渉計MIXIMの開発の現状微小ピクセルサイズの効能とスケーラブルな計画立案- |
| 3. 学会等名<br>日本天文学会春季年会                                   |
| 4. 発表年<br>2019年   |

|  |
|--|
| 1. 発表者名<br>林田 清、他                      |
| 2. 発表標題<br>サブ秒角を達成したMIXIMの開発の現状とスケーラブル |
| 3. 学会等名<br>高エネルギー宇宙物理連絡会シンポジウム         |
| 4. 発表年<br>2019年                        |

|                                     |
|-------------------------------------|
| 1. 発表者名<br>林田 清、他                   |
| 2. 発表標題<br>サブ秒角でX線撮像する多重像X線干渉計MIXIM |
| 3. 学会等名<br>超小型衛星利用シンポジウム（国際学会）      |
| 4. 発表年<br>2019年                     |

|   |
|---|
| 1. 発表者名<br>林田 清、他                                       |
| 2. 発表標題<br>サブ秒角を達成した多重像X線干渉計(MIXIM)開発の現状とスケーラブルなミッション形態 |
| 3. 学会等名<br>BH研究会  |
| 4. 発表年<br>2019年   |

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

| 氏名<br>(ローマ字氏名)<br>(研究者番号) | 所属研究機関・部局・職<br>(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 |
|---------|---------|
|         |         |