

**科学研究費助成事業 研究成果報告書**

平成 30 年 6 月 19 日現在

機関番号：32660

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2013～2017

課題番号：25287042

研究課題名(和文) 可視光・紫外線遮光 フィルムをコートした超大型・高感度X線CCDの開発実証

研究課題名(英文) Development and demonstration of ultra large and high sensitivity X-ray CCD coated with visible and UV light blocking film

研究代表者

幸村 孝由 (Komura, Takayoshi)

東京理科大学・理工学部物理学科・准教授

研究者番号：20365505

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 13,600,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、宇宙X線観測用のX線CCDの観測性能のうち、検出感度を向上させ、かつ、X線CCDのカメラシステムを簡素化することを目的とし、素子の表面に直接、可視光・紫外線を遮光するためのフィルムをコーティングしたX線CCDの開発を行った。開発したコーティング技術は、2015年に打ち上げたHitomi衛星に搭載したX線CCDにも採用され、軌道上で天体起源の可視光線の十分な遮光性能を発揮した。

研究成果の概要(英文)：We have developed newly X-ray CCD coated with optical and UV blocking film in order to improve the detection sensitivity in the soft X-ray band and simplify the camera body of the X-ray CCD on board X-ray satellite. Developed X-ray CCD coated with film for shielding ultraviolet rays. The developed coating technology was adopted for the X-ray CCD mounted on the Hitomi satellite launched in 2015, and demonstrated sufficient light shielding performance of the astrophysical origin visible light on orbit.

研究分野：X線天文学

キーワード：X線CCD X線 可視光線 紫外線 薄膜 OBF OBL 遮光

### 1. 研究開始当初の背景

X線 CCD は、日本の「あすか」衛星に搭載された SIS を皮切りに、日本の「すざく」衛星、米国の「チャンドラ」、欧州の「ニュートン」衛星にも搭載され、国際的に標準的な宇宙 X 線検出器となっている。「あすか」、「すざく」衛星(Mitsuda et al. (2007))には、米国の MIT 製の X 線 CCD を搭載していたが、国内でも X 線 CCD の開発が進み、惑星探査衛星「はやぶさ」や、国際宇宙ステーションに搭載されている全天モニター-MAXI には、浜松ホトニクス社製の国産の X 線 CCD が搭載され、国産 X 線 CCD の性能は欧米製の X 線 CCD を凌ぐものとなっている。

また、「すざく」衛星で初めて搭載した裏面照射型の X 線 CCD (Back Illuminated CCD; BI-CCD) (Koyama et al.(2007))は、従来の表面照射型の X 線 CCD と異なり、低エネルギー側の感度が極めて高くサイエンスにもたらしたインパクトは、「すざく」衛星の研究成果をみると言うまでも無い。

X 線 CCD は、X 線に加えて、可視光線や紫外線にも高い感度を持つ。天体の中には、晩期型星のように X 線放射強度に比べ可視光強度が 5 桁以上も強い天体がある。また星生成領域のように、観測視野の多くの天体が強い可視光線を放射している領域がある。そのような天体を観測するには可視光強度を十分落とす必要がある。また、太陽が放射する紫外線は、地球大気で共鳴散乱を起こし、衛星が周回する軌道は、その大気が放射する紫外線で明るいため、X 線 CCD にとっては、この紫外線も遮光する必要がある。そのため、X 線 CCD の前面に可視光線・紫外線を遮光するための薄膜のフィルター (Optical Blocking Filter; OBF) を装備している。OBF は厚みが 140nm のポリイミドと 120nm 程度の薄膜で、アルミニウムで可視光線を、ポリイミドで紫外線を遮光する。また、ポリイミドは、OBF が衛星打ち上げ時の音響振動によって破損しないために、紫外線を遮光する能力以上に、分厚いものとなっていた。

ただし、水素、炭素、窒素、酸素からなるポリイミドは、1keV 以下の軟 X 線を吸収する。そのため、ポリイミドの厚みは、振動に対する耐久性を維持するために厚くする必要はあるが、一方で、特に軟 X 線帯域で格段に高い検出効率を誇る BI-CCD にとっては薄くする必要もある。さらに、OBF は薄膜であるため、製造も難しく、厚さの制御が難しい。また、地上の校正実験での OBF の取り扱いが難しいことに加え、OBF をロケット打ち上げ時の音響や振動による破損から守るために、X 線 CCD と OBF を格納するカメラシステムを、複雑な構造の真空容器にする必要があるなど、10 年以上にわたる XIS を始めとする X 線 CCD の開発の経験から OBF の扱いは非常に難しいことを痛感した。

### 2. 研究の目的

そこで、OBF に替わる可視光と紫外線の遮断対策方法として、本研究ではアルミニウムとポリイミドの 2 層からなる可視光・紫外線遮光膜 (Optical Blocking Filter; OBL) を CCD 素子に直接コートする新技術を確立することを目的とした。

本研究申請者は OBL に関する特許を取得している。OBL を CCD 素子に直接コートする技術を世界に先駆けて確立することこそが、本研究の独創的な点である。この技術を確立させることで、OBF のように振動に対する耐久性を考慮する必要性を大幅に軽減させ、1keV 以下の軟 X 線にとって不感層となるポリイミド層を可能な限り薄くすることができる。その結果、軟 X 線帯域の BI-CCD 検出効率を飛躍的に向上させることで、BI-CCD の性能を最大限に発揮させることができる (「すざく」衛星の XIS は OBF に換えて OBL を装備すれば検出感度は最大で 20% 向上する)。さらに、カメラシステムは、OBF を装備しないことで、真空容器にする必要がなくなり、小型化・簡素化ができる。

また、世界最高性能を誇る浜松ホトニクス (HPK) 社製の大面積 BI-CCD を用いた広視野の X 線観測が実現できる時代になってきた。2016 年に打ち上げた日本の宇宙 X 線望遠鏡「Hitomi」には、「すざく」衛星の XIS に比べ 4 倍もの大面積をもつ HPK 社製の BI-CCD (Soft X-ray Imager; SXI) を搭載し、X 線 CCD 史上最大視野の観測を行う。

本研究では、SXI を始めとする大面積 BI-CCD に OBL を組み合わせた大面積・超高感度 BI-CCD を開発し、広視野を超高感度で観測することを実現させる。大面積・超高感度 BI-CCD による観測は、特に超新星残骸、銀河、銀河団など空間的に広がった天体の観測を、限られた観測時間で効率良く観測するには非常に有効であり、また GRB や新星など Transient 天体の発見にも非常に強力なツールとなる。さらに、広視野に加え超高感度でこれらの天体を観測すれば、これらの天体の多くが、特に 1keV 以下の軟 X 線帯域に高温プラズマから多くの輝線を放射することから、天体からのプラズマ診断にも威力を発揮する。このように、本研究で開発する大面積・超高感度 BI-CCD がサイエンスへもたらすインパクトは非常に大きい。

### 3. 研究の方法

OBL は、天体が放射する可視光線と、地球大気が放射する紫外線を遮光するために、可視光透過率と紫外線透過率の目標値をそれぞれ  $< 10^{-5}$ 、 $< 10^{-1}$  と設定した。そのためには、アルミニウムとポリイミドの厚みの設計値をそれぞれ 100nm、100nm とした。

また、OBL の開発体制は、BI-CCD を開発する浜松ホトニクスが製造し、本研究申請者が可視光・紫外線・X 線透過率を評価した。また、可視光線、紫外線、X 線の各透過率が

OBL の厚みの設計値から期待したものと異なる場合や、その他の技術的な問題がある場合なども含め、OBL のコーティング方法について、浜松ホトニクス社と定期的に打ち合わせを行い、OBL の開発を行う体制とした。

ハロゲンランプの白色光源と回折格子を組み合わせた分光器からなる評価装置を大学の研究室に構築し、それを用いて OBL の可視光透過率の測定を行った。OBL の紫外線透過率は高エネルギー加速器研究機構の放射光施設 (KEK-PF) のビームライン BL-20A で、また X 線透過率は KEK-PF のビームライン BL-11A, 11B, と SPring8 のビームライン 25SU において、それぞれ測定を行った。上記の通り OBL の可視光線・紫外線・X 線透過率の測定を行い、コーティング方法の確立を行った。

さらに、OBL をコーティングした BI-CCD 本体についても、OBL の X 線透過率 (および検出効率) の測定に加えて、X 線に対するエネルギー分解能、エネルギースケールの評価を行った。さらに、衛星に搭載する (実用化する) ためには、軌道上で問題となる放射線耐性についても評価を行った。浜松ホトニクス社との共同開発体制を確立し、以上の ~ の評価を通じ、OBL をコーティングした BI-CCD の開発を進めた。

#### 4. 研究成果

以下 ~ の順で成果を報告する。

BI-CCD に OBL をコーティングする前に、OBL 単体の評価として、アルミニウムとポリイミドからなる薄膜を試作し、その可視光線と紫外線の透過率の評価を行った。

図 1 には厚さが 100nm と 200nm のアルミニウムとポリイミドからなる薄膜の可視光線と紫外線の透過率の測定結果を示す。

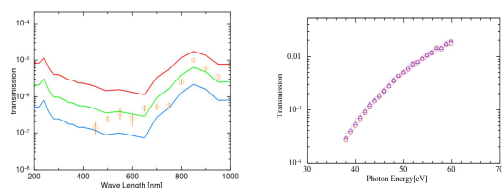


図 1. 可視光線透過率 (左) と紫外線透過率 (右) の測定結果。左図は横軸が光の波長 [nm]、縦軸が可視光透過率を表す。図中の実線は、透過率の高いものから順に、アルミニウムの厚みが 90, 100, 110nm の計算結果である。右図は、横軸が紫外線のエネルギー [eV]、縦軸が紫外線透過率を表す。

この結果から、アルミニウムの厚みが 100nm であれば、期待通りの可視光遮光能を得ることが分かった。次に、X 線 CCD と同じシリコン系の母材として安価な透明ガラスに、厚みが 100nm と 100nm のアルミニウムとポリイミドをコーティングしたサンプルを製作し、可視光透過率の評価を行った。その結果、可視光透過率が期待よりも 2 桁高い  $10^{-3}$  という結果となった。これは、アルミニ

ウムをコーティングする際の熱処理の方法に問題があることが発覚し、熱処理方法を見直すことで改善した。ここまでのこの可視光透過率の可視光強度の測定には、フォトダイオードを使用した。

続いて、BI-CCD に直接 OBL をコーティングした小面積の X 線 CCD を試作した。この測定から、可視光強度は OBL をコーティングした BI-CCD で測定を行った。すると、これまでのフォトダイオードでは見落としていた非常に小さいピンホールが OBL に生じていることが判明した。ピンホールのサイズは、BI-CCD の 1 画素のサイズ (24 $\mu$ m 四角) よりも十分小さく、顕微鏡写真では数  $\mu$ m 程度のものであった。OBL のアルミニウム層にピンホールが生じたことで、本研究には、ピンホール数の低減が大きな課題となった。

さらに、このピンホールの大きさは継時的に大きくなることと、さらに、数が増えることが判明した。数が増えることについては、OBL を製膜した段階からもともと小さいピンホールとして存在していたものが、継時的に、顕微鏡でも確認できる大きさに成長したと考えている。ピンホールの数が増えることが判明したため、OBL を製膜した後の経過観察に時間を要し、研究計画を 1 年延長することになった。

このピンホールについては、本研究終了時まで原因究明を継続した。OBL を製膜する前の段階の BI-CCD 素子の表面の洗浄方法や成膜スピードなども徹底的に見直し、ピンホールの数を完全にゼロにするまでには至らなかったが、X 線観測に支障がないほどまでに大幅に軽減することに成功した。

また、OBL としてアルミニウム単層のものを製膜した小型の X 線 CCD を用いて、X 線透過率の評価を行った。測定方法は斜入射照射法を用いた。図 2 に結果を示す。この結果では、アルミニウム、酸化アルミニウム、不感層である  $\text{SiO}_2$  の厚みがそれぞれ  $83.7 \pm 4.0$  nm, 1.5nm 未満,  $20.1 \pm 7.5$  nm と分かった。アルミニウムの厚みは設計値が 100nm に対し、酸化アルミニウム層も考慮しても 10% 程度薄い結果となった。一方、 $\text{SiO}_2$  層は浜松ホトニクス社の設計値と矛盾の無い結果である。

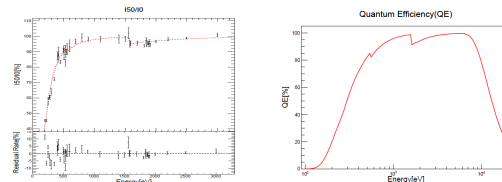


図 2. 斜入射照射法の測定結果 (左) と斜入射照射法から得られたアルミニウムと、BI-CCD の  $\text{SiO}_2$  の不感層、Si の空乏層の厚みから求めた検出効率の計算結果 (右)。左図と右図は横軸はともに X 線のエネルギー [eV] を表し、縦軸は左図が斜入射実験時の  $0^\circ$  入射時と  $50^\circ$  入射時の X 線の検出強度比を表し、右図は、X 線の検出効率を表す。

本研究で開発した単層のアルミニウムからなる OBL は、「Hitomi」衛星搭載の SXI の BI-CCD に採用され、また、本測定結果で得られた検出感度は、SXI の応答関数に組み込まれ世界の研究者が SXI を用いた天体の観測結果のデータ解析に使用されている。

エネルギー線形性とエネルギー分解能 KEK-PF の BL-11A と 11B において、図 2 に示した OBL の X 線透過率、および検出効率の測定と同時に、OBL をコーティングした BI-CCD のエネルギー線形性とエネルギー分解能の測定を行った。図 3 に結果を示す。

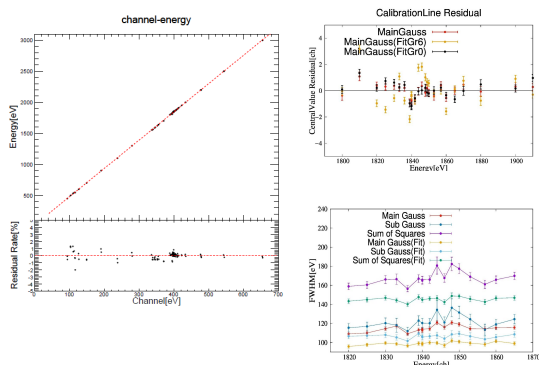


図 3. 左図はエネルギー線形性を表す。横軸は BI-CCD の出力波高値を、縦軸は照射 X 線のエネルギーを表す。右上図と右下図は、ともに横軸は照射 X 線のエネルギーを表す。縦軸は、右上図が Si K 吸収端付近のエネルギー線形性の拡大図で、左図のデータに対し、1 次関数をモデルとして近似した時の、データとモデルとの残差を表す。右下図の縦軸はエネルギー分解能を表す。

図 3 から OBL をコーティングしたことで、線形性やエネルギー分解能に、露わな変化がないことが分かった。一方、線形性に関しては、Si の K 吸収端付近で、XAFS の影響と考えられる構造が見られた。ここまで X 線の照射エネルギーを細かく稠密に変えて、性能評価を行ったのは、本研究が初めてである。また、この結果は、検出効率と同様に、SXI の応答関数や、将来の X 線望遠鏡の応答関数に反映させる。

#### 放射線耐性の評価

X 線 CCD を宇宙環境下で使用すると、陽子や重粒子からなる宇宙線によってシリコン結晶内にトラップが生じ、光電子がトラップによって失われ、結果として電荷転送非効率 (Charge Transfer Inefficiency ; CTI) が悪化する。また暗電流も増加し、X 線 CCD の分光性能は経年的に劣化することが知られている。

そこで OBL をコーティングした BI-CCD を実用化させるためには、宇宙空間で使用する前に、地上で宇宙線に相当する粒子線を照射し性能の劣化具合を確認する必要がある。そこで、本研究では放射線医学総合研究所の

重粒子線がん治療装置 (HIMAC) を用いて、6MeV の陽子線を BI-CCD に照射した。本研究で開発した BI-CCD は、日本の BI-CCD で初めて、画素中の電荷転送経路を制限し、転送電荷がトラップに捕獲されることを軽減するノッチおよび機能を採用したものである。図 4、図 5 に結果を示す。

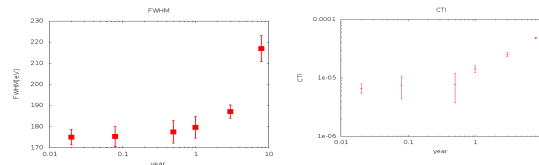


図 4. 左図：放射性同位体  $^{55}\text{Fe}$  からの X 線に対する BI-CCD のエネルギー分解能の経年変化。横軸は宇宙空間での陽子の照射時間、縦軸はエネルギー分解能を表す。右図：CTI の経年変化。横軸は宇宙空間での陽子の照射時間、縦軸は CTI を表す。

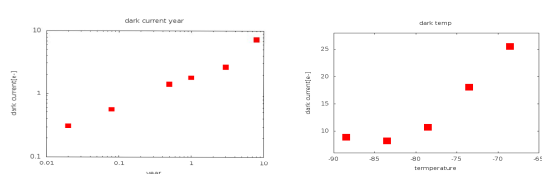


図 5. 左図：BI-CCD の暗電流の経年変化。横軸は宇宙空間での陽子の照射時間、縦軸は暗電流を表す。右図：軌道上で 8 年分相当の陽子線を照射した状態での暗電流の温度依存性。横軸は BI-CCD の冷却温度、縦軸は暗電流を表す。

この結果から、動作温度が SXI の -120 よりも高い -90 程度であっても、宇宙空間で 3 年運用後のエネルギー分解能 200eV 以下という SXI の性能基準を満たしている。さらに CTI は、宇宙空間で 8 年運用経過の陽子線総照射量であっても  $5 \times 10^{-5}$  であり、SXI の要求性能よりも低く抑えられることが分かった。つまり、本研究で開発した BI-CCD は、すでに宇宙放射線耐性を十分有することを実証することができた。

#### 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 18 件)

- Tanaka, T., Uchida, H., Nakajima, H., Tsunemi, H., Hayashida, K., Tsuru, T.G., Dotani, T., Tomida, H., ..., Kohmura, T., et al., "Soft X-ray Imager aboard Hitomi (ASTRO-H)", Journal of Astronomical Telescopes, Instruments, and Systems, 査読有, 4,1, 2017
- Arimoto, M., Harita, S., Sugita, S., Yatsu, Y., Kawai, N., Ikeda, H., Tomida, H., Isobe, N., Ueno, S., Mihara, T., Serino, M., Kohmura, T., Sakamoto, T., Yoshida, A., Tsunemi, H., Hatori, S., Kume, K., Hasegawa, T., "Development of a 32-channel ASIC for an X-ray APD detector onboard the ISS", Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated

Equipment, 査読有, 882, 138-147, 2018  
Hitomi Collaboration, Aharonian, F., ..., Kohmura, T., ..., Tomida, H., et al (他 191 名),  
"Measurements of resonant scattering in the Perseus Cluster core with Hitomi SXS",  
Publications of the Astronomical Society of Japan, 査読有, 70, 10, 2018  
Hitomi Collaboration, Aharonian, F., ..., Kohmura, T., ..., Tomida, H., et al (他 191 名),  
"Temperature structure in the Perseus cluster core observed with Hitomi",  
Publications of the Astronomical Society of Japan, 査読有, 70, 11, 2018  
Hitomi Collaboration, Aharonian, F., ..., Kohmura, T., ..., Tomida, H., et al (他 191 名),  
"Atomic data and spectral modeling constraints from high-resolution X-ray observations of the Perseus cluster with Hitomi",  
Publications of the Astronomical Society of Japan, 査読有, 70, 12, 2018  
Hitomi Collaboration, Aharonian, F., ..., Kohmura, T., ..., Tomida, H., et al (他 191 名),  
"Hitomi observation of radio galaxy NGC1275: The first X-ray microcalorimeter spectroscopy of Fe-K $\alpha$  line emission from an active galactic nucleus",  
Publications of the Astronomical Society of Japan, 査読有, 70, 13, 2018  
Hitomi Collaboration, Aharonian, F., ..., Kohmura, T., ..., Tomida, H., et al (他 191 名),  
"Search for thermal X-ray features from the Crab nebula with the Hitomi soft X-ray spectrometer",  
Publications of the Astronomical Society of Japan, 査読有, 70, 14, 2018  
Hitomi Collaboration, Aharonian, F., ..., Kohmura, T., ..., Tomida, H., et al (他 191 名),  
"Hitomi X-ray observation of the pulsar wind nebula G21.5-0.9",  
Publications of the Astronomical Society of Japan, 査読有, 70, 16, 2018  
Hitomi Collaboration, Aharonian, F., ..., Kohmura, T., ..., Tomida, H., et al (他 191 名),  
"Hitomi X-ray studies of giant radio pulses from the Crab pulsar",  
Publications of the Astronomical Society of Japan, 70, 13, 2018  
Hitomi Collaboration, Aharonian, F., ..., Kohmura, T., ..., Tomida, H., et al (他 191 名),  
"Hitomi observations of the LMC SNR N132D: Highly redshifted X-ray emission from iron ejecta",  
Publications of the Astronomical Society of Japan, 査読有, 70, 16, 2018  
Hitomi Collaboration, Aharonian, F., ..., Kohmura, T., ..., Tomida, H., et al (他 191 名),  
"Glimpse of the highly obscured HMXB IGRJ16318-4848 with Hitomi",  
Publications of the Astronomical Society of

Japan, 70, 17, 2018  
Hitomi Collaboration, Aharonian, F., ..., Kohmura, T., ..., Tomida, H., et al (他 191 名),  
"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, 21, 2018  
Hitomi Collaboration, Aharonian, F., ..., Kohmura, T., ..., Tomida, H., et al (他 191 名),  
"Solar abundance ratios of the iron-peak elements in the Perseus cluster",  
Nature, 査読有, 551, 478-480, 2017  
Hitomi Collaboration, Aharonian, F., ..., Kohmura, T., ..., Tomida, H., et al (他 191 名),  
"The quiescent intracluster medium in the core of the Perseus cluster",  
Nature, 査読有, 535, 117-121, 2016  
Hitomi Collaboration, Aharonian, F., ..., Kohmura, T., ..., Tomida, H., et al (他 191 名),  
"Hitomi Constrains on the 3.5keV Line in the Perseus Galaxy Cluster",  
The Astrophysical Journal Letter, 査読有, 837, 15-23, 2016  
Tanaka, T., ..., Tomida, H., ..., Kohmura, T., et al, (他 14 名),  
"The Soft X-ray Imager (SXI) for the ASTRO-H Mission",  
Proceedings of the SPIE, 査読無, 9601, 10, 2015  
Nobukawa, K., ..., Kohmura, T., et al, (他 21 名)  
"Use of a charge-injection technique to improve performance of the Soft X-ray Imager aboard ASTRO-H",  
Nuclear Inst. and Methods in Physics Research, A, 査読有, 765, 269-274, 2014  
Kohmura, T., et al (他 21 名),  
"Soft x-ray transmission of contamination blocking filter for SXI onboard ASTRO-H",  
Proceedings of the SPIE, 査読無, 9144, 91445, 8, 2014  
Mori, K., ..., Kohmura, T., et al, (他 17 名),  
"Proton radiation damage experiment on P-Channel CCD for an X-ray CCD camera onboard the ASTRO-H satellite",  
Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A, 査読有, Volume 731, p. 160-165, 2013

[学会発表](計 10 件)

幸村孝由, "X線天文衛星代替機(XARM)搭載の軟X線撮像装置の開発の状況", 日本物理学会第73回年次大会, 2018

Kohmura, T., et al, "Soft X-ray, UV, optical transmission of the contamination blocking filter for the Soft X-ray Imager (SXI) on board ASDTRO-H", SPIE, 2015

Kohmura, T., et al, "Soft X-ray quantum efficiency of X-ray CCD onboard ASTRO-H", 10<sup>th</sup> International "Hiroshima Symposium on



the Development and Application of Semiconductor Tracking Detectors HSTD10”, 2015 年

幸村孝由, 他, “X線天文衛星 ASTRO-H 搭載 X線 CCD カメラ SXI の軟 X線帯域の性能評価”, 日本物理学会 2015 年秋季年会, 2015

Kohmura, T., “Radiation Damage Tests for iWF-MAXI”, 4<sup>th</sup> Annual Symposium of the Innovative Area on Multi-messenger Study of Gravitational Wave Sources, 2016

幸村孝由, 他, “ASTRO-H 衛星搭載 X線 CCD の軟 X線レスポンス”, 第 3 回物構研サイエンスフロンポジウム, 2015 年

幸村孝由, 他, “ASTRO-H 衛星搭載 X線 CCD(SXI)の Si-K edge 前後のレスポンスの測定”, 日本天文学会 2014 年秋季年会, 2014 年

幸村孝由, 他, “ASTRO-H 衛星搭載 X線 CCD カメラ(SXI)のコンタミ防止膜の X線・紫外線・可視光透過率測定”, 日本物理学会 2014 年秋季大会, 2014 年

Kohmura, T., et al, “Soft X-ray transmission of contamination blocking filter for SXI on board ASTRO-H”, SPIE Astronomical Telescope + Instrumentation 2014, 2014

Kohmura, T., et al, “Performance of the X-ray CCD coated with optical blocking layer for SXI on board ASTRO-H”, SPIE, 2013

〔図書〕(計 0 件)

〔産業財産権〕

○出願状況(計 0 件)

○取得状況(計 0 件)

〔その他〕

ホームページ等

6. 研究組織

(1)研究代表者

幸村 孝由 (KOHMURA, Takayoshi)  
東京理科大学工学部物理学科・准教授  
研究者番号: 20365505

(2)研究分担者

富田 洋 (TOMIDA, Hiroshi)  
国立研究開発法人宇宙航空研究開発機構・主任開発員  
研究者番号: 30399547

(3)連携研究者

なし

(4)研究協力者

常深 博 (TSUNEMI, Hiroshi)  
林田 潔 (HAYASHIDA, Kiyoshi)  
北本 俊二 (KITAMOTO, Shunji)  
鶴 剛 (TSURU, Takeshi)