

令和 5 年 6 月 6 日現在

機関番号：82645

研究種目：挑戦的研究（萌芽）

研究期間：2019～2022

課題番号：19K21886

研究課題名（和文）分光・偏光・撮像の3大観測能力を高いレベルで備えた新しいX線望遠鏡の開発

研究課題名（英文）Development of high-resolution Imaging and spectroscopic polarimetry

研究代表者

前田 良知（Yoshitomo, Maeda）

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

研究者番号：80342624

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）：偏光・分光・撮像の3大観測能力を高いレベルで備えた新しいX線望遠鏡の実証にむけて、開発を進めた。スリット(ARB)の製作技術にはレプリカ法を用い、透過率の低い重金属の金で精度高いスリット製作が実現できることを実証し、像再構成がうまくいくことを証明した。ソフトウェアの開発は、宇宙空間での観測を想定し、ポワソン統計を前提に、あらゆるスリット形状に対応させることができた。望遠鏡は製造メーカーがなく、インハウスでの開発を進めた。ただし、新型コロナウイルスの影響を受け、大幅な遅延を余儀なくされたが、要素技術に進展が見られた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

偏光・分光・撮像の3大観測能力を高いレベルで同時に満たすのは技術的ハードルがとても高い。ただし、この3つが同時に実現できると、鉄などの輝線を一本一本分離し、その偏光度マッピングが世界で初めて可能になる。つまり、輝線ダイナミクス&偏光&撮像という全く新しい高エネルギー天文学に挑むことができる。コンプトンダウン散乱を用いた中心核ブラックホールの周りのガスの3次元分布や共鳴散乱を用いた銀河団ガスの質量・ダイナミクスなどの大幅な進展が期待される。当研究は、その未踏の分野へ踏み込む一歩となる研究と位置づけている。

研究成果の概要（英文）：Using replica technology, we have been able to create slits with micro meter accuracy. We also found that the internal stress of the gold causes the entire slit to shrink regardless of the processing conditions. The level of our technology is definitely improving. The image reconstruction technique is the key to the success of this telescope, and the software was also improved this year. For data in the Poisson limit, the Richardson-Lucy method is generally the preferred method, so we coded it and made it available.

As for the focusing telescope, during the funding period, the laboratory access was strongly restricted due to the policy to prevent the spread of the new coronavirus, which caused a significant delay in its fabrication. We managed to produce a prototype of the technology for improving the integral reflectance in the final year of the project.

研究分野：X線天文学

キーワード：X線天文学 分光 撮像 偏光

様式 C-19、F-19-1、Z-19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

偏光・分光・撮像の3大観測能力を高いレベルで備えた新しいX線望遠鏡は、現存しない。この3つが同時に実現できると、それぞれの観測能力で世界最先端を実現できる。さらに、鉄などの輝線を一本一本分離し、その偏光度マッピングが世界で初めて可能になる。つまり、輝線ダイナミクス&偏光&撮像という全く新しい高エネルギー天文学に挑むことができる。コンプトンダウン散乱を用いた中心核ブラックホールの周りのガスの3次元分布や共鳴散乱を用いた銀河団ガスの質量・ダイナミクスなどの大幅な進展が期待される。

2. 研究の目的

偏光・分光・撮像の3大観測能力を高いレベルで備えた新しいX線望遠鏡を開発する。

3. 研究の方法

曲げ結晶を用いたブラッグミラーを90度反射で集光させることにより、中帯域で高い偏光能力をまず実現する。集光光をデフォーカスさせ、結晶分光の効果を引き出し、高い分光能力を実現する。さらに、スリット光学系をミラーの前面に配することにより高い撮像能力を獲得する。

4. 研究成果

撮像を担うスリット部、偏光・分光を担う集光部の2つに分けて開発を進めた。

4.1 撮像部

撮像部の技術実証のため、スリットの製作を行った(図1)。スリットを2枚外して像再構成を可能にし、10秒角程度に広がった光源のスリット透過像の取得を実施した(図2)。並行して開発した像再構成ソフトウェアを完了し、実際のデータに適用した。その結果、ダブルホーン構造を再現できた(図3)。3秒角程度の高い角度分解能を実現できていると思われる。



図1 : 試作したスリット (鈴木瞳 2020 修士論文より)



図 2 : スリットを 2 枚距離を離して取得した、10 秒角程度の広がりを持った X 線源の透過像。
(鈴木瞳修士論文より)

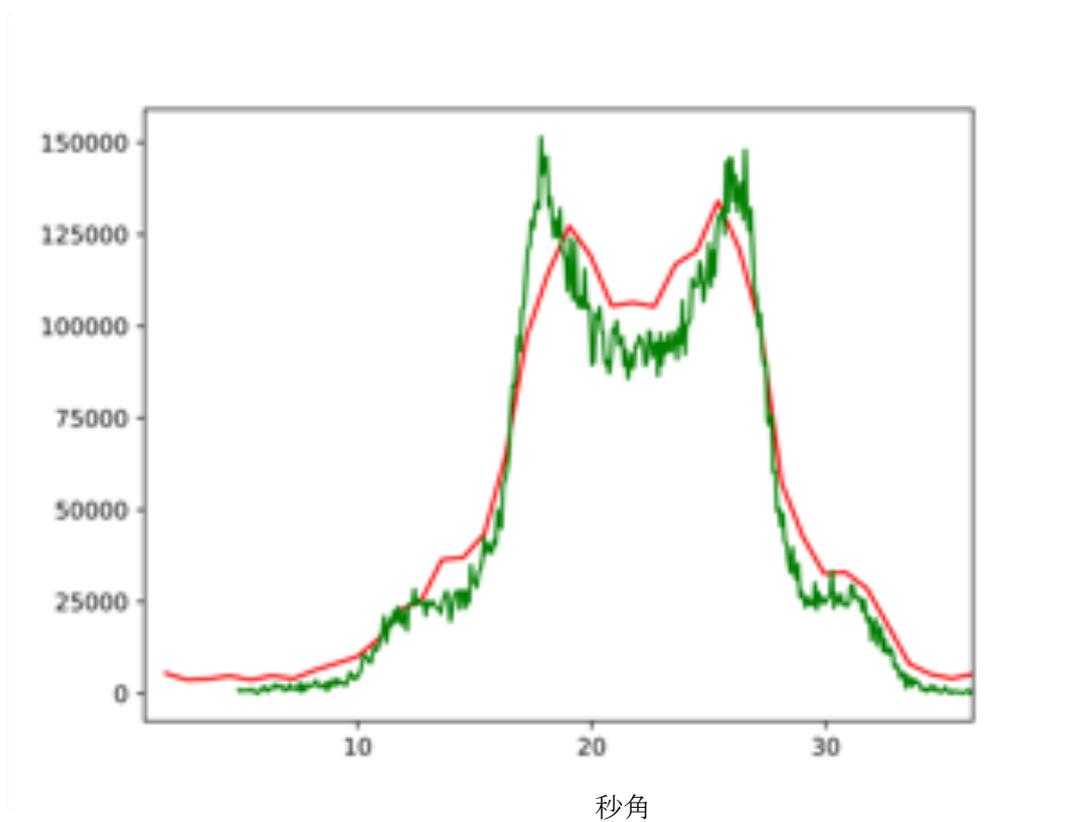


図 3 : X 線源の一次元像再構成像。緑が別の方法で取得した実際の像の広がり。赤が今回像再構成で求めた像。(鈴木瞳修士論文より)

4.2 集光部

直線偏光に感度を持つ光学系を組むデザインを採用した。M 値は完全に 1 になり理想的な偏光計になる。ただし集光するために二次曲面にする必要があり、実際にはミラーの端から端で 70 deg から 110 deg ぐらいまで連続的に変化することになる。実際に M 値は 1 から 0.8 ぐらいになることが、実証できた(芳野 2020 修士論文、井上 2021 修士論文、西山 2022 修士論文)。

エネルギー分解能も Fe-K (6.4keV) で 9 eV, Cu-K (8.1 keV) で 14 eV の分解能が得られることを実測にて証明した。

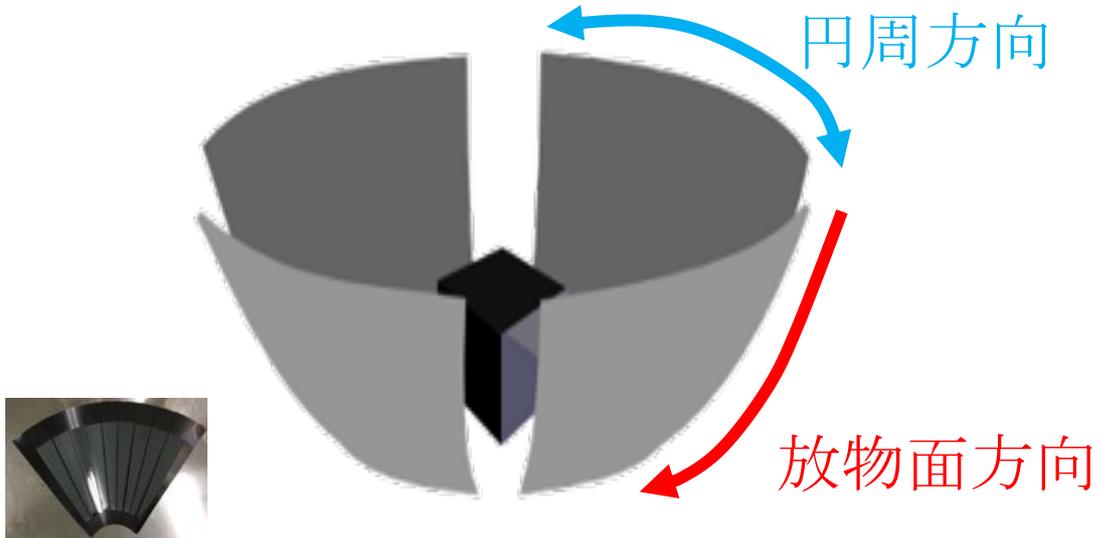


図 4. 集光部のデザイン概要と実際の試作モデル (左下)。(芳野 2019 修士論文より)

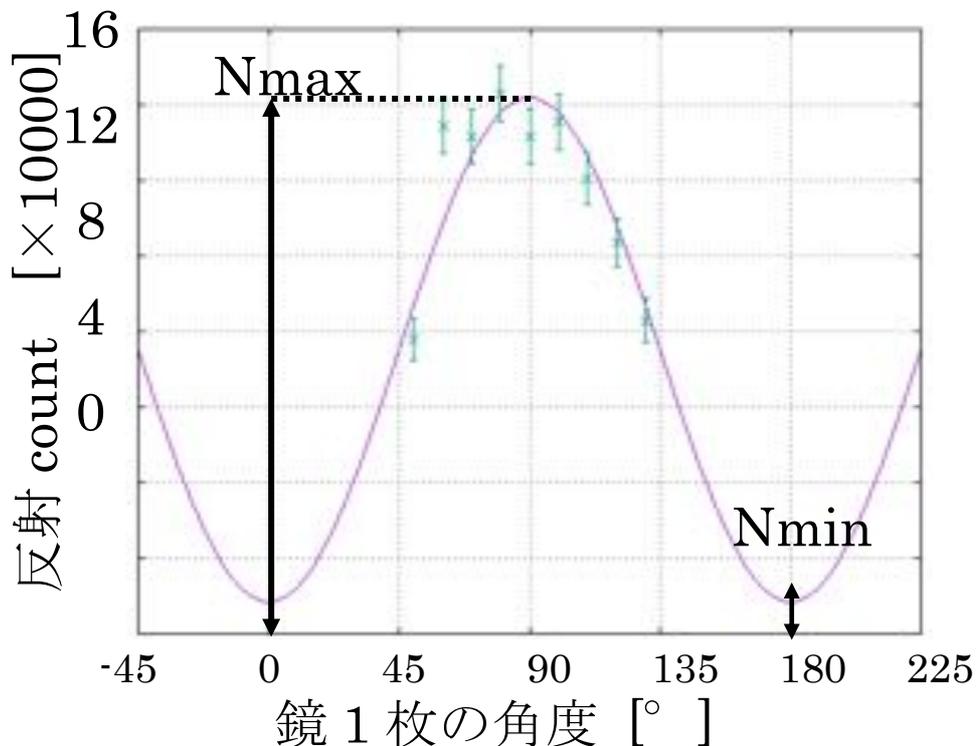


図 5. X 線を用いた直線偏光した X 線の反射率の実測結果 (左下)。(芳野 2020 修士論文より)

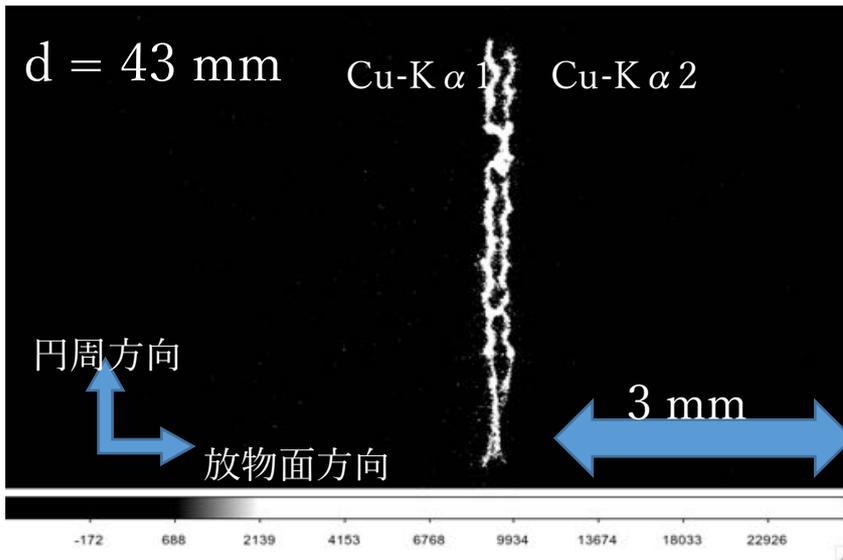


図 6. Cu-K 特性 X 線を用いた反射像の実測結果。(井上 2021 修士論文より)

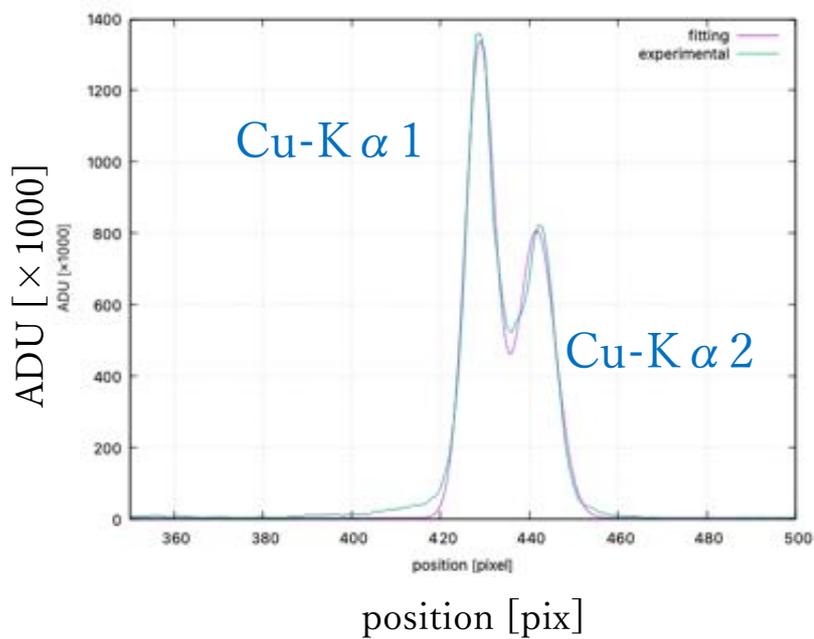


図 7. Cu-K 特性 X 線を用いた反射像を使った分光スペクトル。FWHM で 14eV の分解能を達成 (井上 2021 修士論文より)

4.3 撮像+集光部

上記に示すように個別の測定では、撮像は 3 秒角 at 6.4 keV、分光は 9eV at 6.4 keV、偏光は M 値で約 1 at 6.4 keV と高いレベルを確認している。

当計画の最終目標は偏光、集光を担う両光学系を組み合わせ、実際に撮像、分光、偏光の 3 つを同時に達成することにあるが、まだ実測できていない。X 線ビームラインのマシントイムを確保し、今後実証を目指す。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計11件（うち査読付論文 11件 / うち国際共著 8件 / うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Kawai Hiroki, Tsuboi Yohko, Iwakiri Wataru B, Maeda Yoshitomo, Katsuda Satoru, Sasaki Ryo, Kohara Junya, MAXI TEAM	4. 巻 74
2. 論文標題 X-ray/H scaling relationships in stellar flares	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Publications of the Astronomical Society of Japan	6. 最初と最後の頁 477 ~ 487
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/pasj/psac008	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 Takeo Mai, Hayashi Takayuki, Ishida Manabu, Nakaniwa Nozomi, Maeda Yoshitomo	4. 巻 73
2. 論文標題 Spatial distribution of the X-ray-emitting plasma of SS?Cygni in quiescence and outburst	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Publications of the Astronomical Society of Japan	6. 最初と最後の頁 1418 ~ 1428
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/pasj/psab086	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 Midooka Takuya, Tsujimoto Masahiro, Kitamoto Shunji, Nakaniwa Nozomi, Maeda Yoshitomo, Ishida Manabu, Ebisawa Ken, Tominaga Mayu	4. 巻 7
2. 論文標題 X-ray transmission calibration of the gate valve for the x-ray astronomy satellite XRISM	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Journal of Astronomical Telescopes, Instruments, and Systems	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1117/1.JATIS.7.2.028005	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, Fujiwara Hitoshi, Ishisaki Yoshitaka, Yoshitomo Maeda, Mori Koji, Motizuki Yuko, Sato Kosuke, Tashiro Makoto S., Terada Yukikatsu	4. 巻 126
2. 論文標題 New Measurement of the Vertical Atmospheric Density Profile From Occultations of the Crab Nebula With X Ray Astronomy Satellites Suzaku and Hitomi	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Journal of Geophysical Research: Space Physics	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1029/2020ja028886	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 Sasaki Ryo, Tsuboi Yohko, Iwakiri Wataru, Nakahira Satoshi, Maeda Yoshitomo, Gendreau Keith, Corcoran Michael F., Hamaguchi Kenji, Arzoumanian Zaven, Markwardt Craig B., Enoto Teruaki, Sato Tatsuki, Kawai Hiroki, Mihara Tatehiro, Shidatsu Megumi, Negoro Hitoshi, Serino Motoko	4. 巻 910
2. 論文標題 The RS CVn type Star GT Mus Shows Most Energetic X-Ray Flares Throughout the 2010s	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal	6. 最初と最後の頁 25 ~ 25
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/1538-4357/abde38	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 Abarr Q., ... Maeda, Y., et al.	4. 巻 126
2. 論文標題 XL-Calibur a second-generation balloon-borne hard X-ray polarimetry mission	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Astroparticle Physics	6. 最初と最後の頁 102529 ~ 102529
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.astropartphys.2020.102529	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 Sato Toshiki, Yoshida Takashi, Umeda Hideyuki, Nagataki Shigehiro, Ono Masaomi, Maeda Keiichi, Hirai Ryosuke, Hughes John P., Williams Brian J., Maeda Yoshitomo	4. 巻 893
2. 論文標題 A Subsolar Metallicity Progenitor for Cassiopeia A, the Remnant of a Type IIb Supernova	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal	6. 最初と最後の頁 49 ~ 49
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/1538-4357/ab822a	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 Takeo Mai, Hayashi Takayuki, Ishida Manabu, Nakaniwa Nozomi, Maeda Yoshitomo	4. 巻 73
2. 論文標題 Spatial distribution of the X-ray-emitting plasma of U Geminorum in quiescence and outburst	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Publications of the Astronomical Society of Japan	6. 最初と最後の頁 143 ~ 153
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/pasj/psaa111	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 Tamura Takayuki, Fabian Andrew C, Gandhi Poshak, Gu Liyi, Kamada Ayuki, Kitayama Tetsu, Loewenstein Michael, Maeda Yoshitomo, Matsushita Kyoko, McCammon Dan, Mitsuda Kazuhisa, Nakashima Shinya, Porter Scott, Pinto Ciro, Sato Kosuke, Tombesi Francesco, Yamasaki Noriko Y	4. 巻 71
2. 論文標題 An X-ray spectroscopic search for dark matter and unidentified line signatures in the Perseus cluster with Hitomi	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 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/pasj/psz023	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 Maeda Yoshitomo, Iizuka Ryo, Hayashi Takayuki, Sato Toshiki, Nakaniwa Nozomi, Takeo Mai, Suzuki Hitomi, Ishida Manabu, Ikeda Shiro, Morii Mikio	4. 巻 71
2. 論文標題 Concept for an X-ray telescope system with an angular resolution booster	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 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/pasj/psz081	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 Katsuda Satoru, ... Maeda Yoshitomo, ... Yohko Tsuboi, ... 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 該当する

〔学会発表〕 計8件 (うち招待講演 1件 / うち国際学会 3件)

1. 発表者名 前田良知, the XRISM PV, Eta Carinae team
2. 発表標題 XRISM's observations of Eta Carinae
3. 学会等名 nuclear burning in massive stars; towards the formation of binary black holes (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 井上諒大, 坪井陽子, 岩切渉, 中島七海, 前田良知
2. 発表標題 湾曲 Si 結晶を用いたブラッグ反射型偏光計の分光性能評価 (2)
3. 学会等名 日本天文学会2022年春季年会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 芳野史弥, 坪井陽子, 前田良知, 他
2. 発表標題 湾曲Si結晶を用いたブラッグ反射型偏光計の偏光性能評価 (2)
3. 学会等名 日本天文学会2021年春季年会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 鈴木瞳, 前田良知, 他
2. 発表標題 像再構成型X線光学系に用いる前置スリットの開発
3. 学会等名 日本天文学会2021年春季年会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 井上諒大, 坪井陽子, 前田良知, 他
2. 発表標題 湾曲 Si 結晶を用いたブラッグ反射型偏光計の分光性能評価
3. 学会等名 日本天文学会2020年秋季年会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Yoshitomo Maeda et al.
2. 発表標題 XL-Calibur the next-generation balloon-borne hard x-ray polarimeter
3. 学会等名 Space Telescopes and Instrumentation 2020: Ultraviolet to Gamma Ray (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Maeda, Yoshitomo
2. 発表標題 "XL-Calibur", the next-generation balloon-borne hard X-ray polarimeter with the world-largest effective-area telescope"
3. 学会等名 The 15th Symposium of Japanese Research Community on X-ray Imaging Optics (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 芳野史弥, 塚田晃大, 坪井陽子, 岩切涉 (中央大学), 前田良知 (宇宙科学研究所)
2. 発表標題 湾曲 Si 結晶を用いたブラッグ反射型偏光計の偏光性能評価
3. 学会等名 日本天文学会
4. 発表年 2020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
研究分担者	坪井 陽子 (Tsuboi Yohko) (70349223)	中央大学・理工学部・教授 (32641)	

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
---------	---------