

様 式 C-19、F-19-1、Z-19 (共通)

科学研究費助成事業

研究成果報告書



平成 29 年 6 月 12 日現在

機関番号：82645

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2015～2016

課題番号：15K21679

研究課題名(和文) CFRPと湾曲結晶を用いた集光型X線偏光計の開発

研究課題名(英文) Development of X-ray polarimetry with bent Si crystals and CFRP substrate

研究代表者

飯塚 亮 (Iizuka, Ryo)

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・研究開発員

研究者番号：50548120

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 1,600,000円

研究成果の概要(和文)：偏光X線は、高エネルギー現象に携わる極限天体周辺の構造や放射メカニズムを決定する鍵になることが期待されるが、30年観測的成果がない。そこで、私はX線天文学の新たな局面を切り開くために、回転放物面基盤にCFRPを用い、シリコン単結晶を貼ることで、鉄輝線付近に特化する偏光感度の極めて高い、集光する大面積のブラッグ反射型X線偏光計を開発する。結果、CFRPとシリコン結晶を一体成型することで、大面積の回転放物面鏡を製作する手法を確立した。評価したからシミュレーションを行った結果、製作した偏光計が最適な光学系であることがわかった。

研究成果の概要(英文)：X-ray polarization is the key to search for the spatial structure and emission mechanism around the celestial object in the extreme condition. However, the progress for the polarimetry is considerably delayed because of technical difficulties. In order to make a breakthrough in the field of X-ray polarimetry, we have developed a Bragg-type polarimeter which large effective area and high polarization sensitivity which is specialized near the iron emission line, by using CFRP for the paraboloid of revolution and sticking a Si single crystal. As a results, we have established a method to fabricate a large paraboloid of revolution mirror by integrally molding CFRP and Si crystal. The simulation from the evaluated results found that the produced polarimeter is the optimum optical system.

研究分野：X線天文学

キーワード：X線天文学 X線偏光計 ブラッグ反射 CFRP シリコン結晶

1. 研究開始当初の背景

偏光は、電磁波の放射の空間分布、波長分布、時間変動とならんで天体の物理状態を探るための重要な情報源である。偏光X線は、高エネルギー現象に携わる極限天体周辺の構造や放射メカニズムを決定する鍵になることが期待され、特に、ブラックホールの時空構造や存在証明が直接観測できると考えられる。ところが実際は、1970年代にカニ星雲から有意なX線偏光が検出されて、30年観測的成果がない。

2. 研究の目的

これは、偏光感度の高いX線偏光計がなかったことが原因の1つにあげられる。偏光X線の検出に成功すれば、他の波長の結果では見えない、主に極限天体の偏光情報を得ることができるため、様々な天体の構造や放射メカニズムを決定する鍵になることが期待される。

そこで、私はX線天文学の新たな局面を切り開くために、回転放物面基盤にCFRPを用い、シリコン単結晶を貼ることで、鉄輝線付近に特化する偏光感度の極めて高い、集光する大面積のブラッグ反射型X偏光計を開発する。

3. 研究の方法

特に、X線天文学では、鉄輝線付近の偏光情報が、天体の性質を知るうえで非常に重要だと私は考えている。偏光感度を非常に高くするにはブラッグ反射型しかない。よって、ブラッグ反射させる結晶を曲げることでエネルギーに幅を持たせることを考えた（図1参照のこと）。

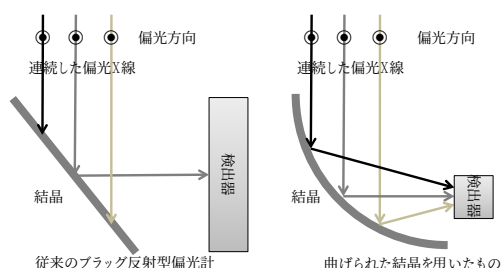


図1：ブラッグ反射型偏光計の概略図

結晶としては鉄輝線付近で偏光感度が極めて高いシリコン単結晶（Si 100, 400 反射）、検出器としては CCD がよい組み合わせである。また、大きな結晶を曲げて集光させることで有効面積もかせげる。集光するので S/N 比も良くなり、ある程度の結像性能が見込める。このような観測機器は従来には存在せず、私の開発する偏光計は極めて独創的である。

しかし、結晶を3次元に曲げることはできない。我々が注目したのは炭素繊維強化プラスチック（CFRP）である。CFRPを反射鏡基盤に用いることで、高精度な回転放物面基盤を作る。さらに、シリコン単結晶を台形状に切

り出し、結晶を隙間なく貼ることで実現する（図2参照のこと）。

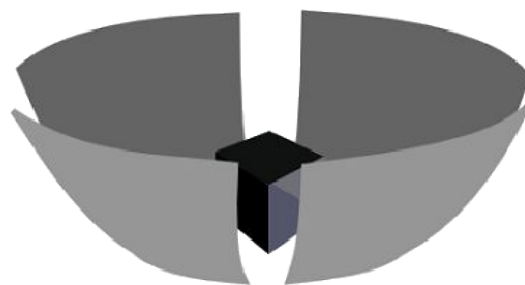


図2：回転放物面を用いたブラッグ反射型の光学系の設計。中心は検出器を置く。大きさは50cm四方程度。

4. 研究成果

1年目として、CFRPを用いて精密な回転放物面を製作した。愛媛大学がCFRP基盤を用いたX線反射鏡基盤を製作する研究を行っているため、助言をいただきながら、基盤の試作を行った。まず、目的の回転放物面にするために、精密な金属金型を製作し、それをもとに、高精度なCFRP基盤を作った。CFRPの素材となるプリフレグを積層する際、積層する方向や枚数などを組み合わせながら、積層パラメータをいくつか調整しながら行ったところ、ミクロン程度の表面形状を持つことが確認できた。また、試作として、シリコンを張り合わせて一体成型する方法も確立できた。これらの結果やアイデアは非常によいものであり、特許に出願した。

2年目として、シリコンを大形状に切断し、すべてのシリコン結晶の向きが中心に向くように、できるだけ隙間なく配置することで、大面積の回転放物面鏡を製作した（図3参照のこと）。回転放物面鏡の形状から像の広がりやを推定すると角度分解能が0.7度と求まった。また、実際に可視光集光評価を行うことで角度分解能が0.6度と求まった。シミュレーションを行った結果、製作した偏光計がブラックホールから出る鉄輝線の広がりを調べるために最適な光学系であることがわかった。これらの結果について、国内学会、国際学会にて発表を行った。



図3：CFRPを用いたシリコン結晶（半径200mm）

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計16件)

1. Hitomi Collaboration; Iizuka, R (55 番目); 他 216 名, Hitomi Constraints on the 3.5 keV Line in the Perseus Galaxy Cluster, ApJL, 837, 1, L15, 2017
2. Tsuboi, Yohko; Iizuka, Ryo (6 番目); 他 30 名, Large X-ray flares on stars detected with MAXI/GSC: A universal correlation between the duration of a flare and its X-ray luminosity, PASJ, 68, 5, 90, 2016
3. Sato, Toshiki; Ryo, Iizuka; 他 13 名, Examining the angular resolution of the ASTRO-H's soft x-ray telescopes, JATIS, 2, 044001, 2016
4. Iizuka, Ryo; Izumiya, Takanori; Tsuboi, Yohko, Development of X-ray spectroscopic polarimetry with bent Si crystals and CFRP substrate, SPIE, 9905, 99055E, 2016
5. Hayashi, Takayuki; Sato, Toshiki; Kikuchi, Naomichi; Iizuka, Ryo; 他 8 名, Point spread function of ASTRO-H Soft X-ray Telescope (SXT), SPIE, 9905, 99055D, 2016
6. Matsumoto, H.; Iizuka, R. (8 番目); 他 24 名, Ray-tracing simulation and in-orbit performance of the ASTRO-H hard x-ray telescope (HXT), SPIE, 9905, 990541, 2016
7. Maeda, Yoshitomo; Iizuka, R. (5 番目); 他 15 名, Reflectivity around the gold L-edges of x-ray reflector of the soft x-ray telescope onboard ASTRO-H, SPIE, 9905, 99053Z, 2016
8. Kurashima, Sho; Iizuka, R. (8 番目); 他 15 名, Reflectivity around the gold M-edges of x-ray reflector of the Soft X-ray Telescope onboard ASTRO-H, SPIE, 9905, 99053Y, 2016
9. Sato, Toshiki; Iizuka, Ryo; 他 10 名, The ASTRO-H SXT performance to the large off-set angles, SPIE, 9905, 99053X, 2016
10. Leutenegger, Maurice A.; Iizuka, Ryo (13 番目); 他 45 名, In-flight verification of the calibration and performance of the ASTRO-H (Hitomi) Soft X-Ray

Spectrometer, SPIE, 0095, 99053U, 2016

11. Awaki, Hisamitsu; Iizuka, Ryo (8 番目); 他 24 名, Performance of ASTRO-H hard x-ray telescope (HXT), SPIE, 9905, 990512, 2016
12. Okajima, Takashi; Iizuka, Ryo (10 番目); 他 22 名, First peek of ASTRO-H Soft X-ray Telescope (SXT) in-orbit performance, SPIE, 9905, 99050Z, 2016
13. Takahashi, Tadayuki; Iizuka, Ryo (74 番目); 他 267 名, The ASTRO-H (Hitomi) x-ray astronomy satellite, SPIE, 9905, 99050U, 2016
14. Hitomi Collaboration; Iizuka, Ryo (56 番目); 他 214 名, The quiescent intracluster medium in the core of the Perseus cluster, Nature, 535, 7610, 117, 2016
15. Hayashi, Takayuki; Sato, Toshiki; Kikuchi, Naomichi; Kurashima, Sho; Nakaniwa, Nozomi; Sato, Takuro; Iizuka, Ryo; Maeda, Yoshitomo; Ishida, Manabu, Upgrade of the 30-m x-ray pencil beam line at the Institute of Space and Astronautical Science, JATIS, 1, 044004, 2015
16. Tamura, Takayuki; Iizuka, Ryo; Maeda, Yoshitomo; Mitsuda, Kazuhisa; Yamasaki, Noriko Y., An X-ray spectroscopic search for dark matter in the Perseus cluster with Suzaku, PASJ, 67, 2, 2316, 2015

〔学会発表〕(計22件)

1. 飯塚亮, 辻本匡弘, 竹井洋, 堂谷忠靖, 石田学, 大川拓也, 生田ちさと (ISAS/JAXA), 他ひとみコラボレーションチーム、広範な協力で行われた「ひとみ」衛星の地上光学観測とその成果、日本天文学会 2017 年春季年会、2017 年 3 月
2. 前田良知, 飯塚亮, 石田学 (ISAS/JAXA), 林多佳由 (GSFC/NASA, 名古屋大学)、高角度分解能 X 線望遠鏡の概念検討、日本天文学会 2017 年春季年会、2017 年 3 月
3. 倉嶋翔, 佐藤寿紀, 中庭望, 浅井龍太 (首都大学東京), 石田学, 前田良知, 飯塚亮, 上田周太朗 (ISAS), 岡島崇, 森英之, 林多佳由 (GSFC), 内田裕之、田中孝明 (京

- 都大)、中嶋大、井上翔太 (大阪大)、森浩二 (宮崎大)、信川正順 (奈良教育大)、ひとみ (ASTRO-H) 搭載軟 X 線望遠鏡の Crab 観測による軌道上での性能評価、日本天文学会 2017 年春季年会、2017 年 3 月
4. 中庭望, 佐藤寿紀, 倉嶋翔, 浅井龍太 (首都大学東京), 石田学, 前田良知, 飯塚亮, 上田周太朗 (ISAS), 内田裕之, 田中孝明 (京都大学), 中嶋大, 井上翔太 (大阪大学), 森浩二 (宮崎大学), 信川正順 (奈良教育大学), 岡島崇, 森英之, 林多佳由 (GSFC), 「ひとみ (ASTRO-H)」搭載軟 X 線望遠鏡 (SXT) の軌道上での有効面積の評価、日本天文学会 2017 年春季年会、2017 年 3 月
 5. 栗木久光 (愛媛大), 國枝秀世, 松本浩典, 石橋和紀, 田村啓輔, 田原譲, 三石郁之 (名古屋大), 古澤彰浩 (藤田保健衛生大), 宮澤拓也 (沖縄科技大), 岡島崇, 森英之, 林多佳由 (NASA/GSFC), 石田学, 前田良知, 飯塚亮 (ISAS/JAXA), 幅良統 (愛知教育大), 山内茂雄 (奈良女子大), 杉田聡司 (東工大), 吉田鉄生 (愛媛大) 他「ひとみ」HXT チーム、X 線天文衛星「ひとみ (ASTRO-H)」搭載硬 X 線望遠鏡 (HXT) の軌道上での性能評価 II、日本天文学会 2017 年春季年会、2017 年 3 月
 6. 河合広樹, 坪井陽子, 山田宗次郎 (中央大学), 飯塚亮, 菅原泰晴 (JAXA/ISAS), X 線フレアの可視光追観測システムの構築、日本天文学会 2017 年春季年会、2017 年 3 月
 7. Yohko Tsuboi, Kyohei Yamazaki, Yasuharu Sugawara, Atsushi Kawagoe, Soichiro Kaneto, Ryo Iizuka (Chuo University), and the MAXI Team, X-ray study of stellar flares with MAXI/GSC: A universal correlation between the duration of a flare and its X-ray luminosity、日本天文学会 2017 年春季年会、2017 年 3 月
 8. 一戸悠人 (首都大), 飯塚亮 (ISAS), 井上翔太 (大阪大), 上田周太朗 (ISAS), 太田直美 (奈良女子大), 北山哲 (東邦大), 佐藤浩介 (東京理科大), 田中桂悟 (金沢大), 田村隆幸 (ISAS), 辻本匡弘 (ISAS), 藤本龍一 (金沢大), 前田良知 (ISAS), および「ひとみ」コラボレーション、「ひとみ」によるペルセウス座銀河団のガス速度測定: (1)速度構造、日本天文学会 2017 年春季年会、2017 年 3 月
 9. 上田周太朗 (ISAS), 飯塚亮 (ISAS), 一戸悠人 (首都大), 井上翔太 (大阪大), 太田直美 (奈良女子大), 北山哲 (東邦大), 佐藤浩介 (東京理科大), 田中桂悟 (金沢大), 田村隆幸 (ISAS), 辻本匡弘 (ISAS), 藤本龍一 (金沢大), 前田良知 (ISAS), および「ひとみ」コラボレーション、「ひとみ」によるペルセウス座銀河団のガス速度測定: (2)輝線の非ガウス性とイオン温度への制限、日本天文学会 2017 年春季年会、2017 年 3 月
 10. 前田良知, 石田学, 飯塚亮 (ISAS/JAXA), Peter Serlemitsos, Yang Soong, Takashi Okajima, Hideyuki Mori (NASA/GSFC), 林多佳由, 三石郁之, 松本浩典, 石橋和紀, 桜井郁也, 田村啓輔, 田原譲, 國枝秀世 (名古屋大), 栗木久光 (愛媛大), 古澤彰浩 (藤田保健衛生大), 宮澤拓也 (沖縄科技大), 杉田聡司 (東工大), 他「ひとみ」SXT チーム、X 線天文衛星「ひとみ (ASTRO-H)」搭載軟 X 線望遠鏡 (SXT) の軌道上での性能評価、日本天文学会 2016 年秋季年会、2016 年 9 月
 11. 中庭望, 佐藤寿紀, 菊地直道, 倉嶋翔 (首都大学東京), 飯塚亮, 前田良知, 石田学 (ISAS), 岡島崇, 森英之, 林多佳由 (GSFC), 他 the ASTRO-H SXT team, 「ひとみ (ASTRO-H)」搭載軟 X 線望遠鏡に用いる反射鏡の反射率測定、日本天文学会 2016 年秋季年会、2016 年 9 月
 12. 栗木久光 (愛媛大), 國枝秀世, 松本浩典, 石橋和紀, 田村啓輔, 田原譲, 三石郁之 (名古屋大), 古澤彰浩 (藤田保健衛生大), 宮澤拓也 (沖縄科技大), 岡島崇, 森英之, 林多佳由 (NASA/GSFC), 石田学, 前田良知, 飯塚亮 (ISAS/JAXA), 幅良統 (愛知教育大), 山内茂雄 (奈良女子大), 杉田聡司 (東工大), 他「ひとみ」HXT チーム、X 線天文衛星「ひとみ (ASTRO-H)」搭載硬 X 線望遠鏡 (HXT) の軌道上での性能評価、日本天文学会 2016 年秋季年会、2016 年 9 月
 13. 飯塚亮, 石田学, 上野史郎, 河野太郎, 石村康生 (ISAS/JAXA), 湯浅孝行 (理研), Koujelev Alexandre, Moroso Franco (ASC/CSA), Guibert Martin, Stephane Gagnon, Timothy Elgin (Neptec), Gallo Luigi C. (Saint Mary's University), 他「ひとみ」AMS チーム、「ひとみ (ASTRO-H)」搭載アライメントモニタシステム (AMS) の軌道上性能評価、日本天文学会 2016 年秋季年会、2016 年 9 月
 14. 寺田幸功 (埼玉大学), 飯塚亮 (19 番目), ほか 28 名、X 線天文衛星「ひとみ (ASTRO-H)」搭載機器の解析ソフトウェアの開発、日本天文学会 2016 年秋季年会、2016 年 9 月

15. 鈴木涼太, 坪井陽子 (中央大学), 飯塚亮 (宇宙科学研究所), 泉谷喬則, 佐々木亮, 白井沙季 (中央大学), 湾曲結晶鏡の X 線分光実験及び評価、日本天文学会 2016 年秋季年会、2016 年 9 月
16. Ryo Iizuka (ISAS/JAXA), Takanori Izumiya, Yohko Tsuboi (Chuo Univ), Development of x-ray spectroscopic polarimetry with bent Si crystals and CFRP substrate, SPIE Astronomical Telescopes + Instrumentation, 2016 年 6 月
17. 飯塚亮 (ISAS/JAXA), 泉谷喬則, 坪井陽子 (中央大学), 湾曲結晶を用いた X 線偏光計の開発、日本天文学会 2016 年春季年会、2016 年 3 月
18. 菊地直道, 佐藤寿紀, 倉嶋翔 (首都大学東京), 石田學, 前田良知, 飯塚亮 (ISAS/JAXA), 林多佳由, 岡島崇 (NASA/GSFC), 佐治重孝, 立花猷 (名古屋大学), 宇留賀朋哉, 新田清文 (JASRI/SPRing-8), ほか measurements collaborations, ASTRO-H SXT 用反射鏡の金の L 吸収端付近の反射率測定と応答関数構築用の原子散乱因子、日本天文学会 2016 年春季年会、2016 年 3 月
19. 倉嶋翔, 佐藤寿紀, 菊地直道, 中庭望 (首都大学東京), 飯塚亮, 前田良知, 石田學 (ISAS), 岡島崇, 森英之, 林多佳由 (GSFC), 他 the ASTRO-H SXT team, ASTRO-H 搭載軟 X 線望遠鏡の迷光の較正、日本天文学会 2016 年春季年会、2016 年 3 月
20. 佐藤寿紀 (首都大学東京), 飯塚亮, 林多佳由, 前田良知, 石田學 (ISAS), 古澤彰浩 (名古屋大), 森英之 (GSFC), 菊地直道, 倉嶋翔, 中庭望 (首都大学東京), 岡島崇, Peter J. Serlemittos, Yang Soong, Lorella Angelini, Tahir Yaqoob (GSFC), 他 the ASTRO-H SXT team, Ray-tracing による ASTRO-H 搭載軟 X 線望遠鏡の結像性能の再現、日本天文学会 2015 年秋季年会、2015 年 9 月
21. 倉嶋翔 (首都大学東京), 古澤彰浩 (名古屋大学), 佐藤寿紀, 菊地直道 (首都大学東京), 前田良知, 石田學, 飯塚亮 (ISAS), 岡島崇, 森英之 (NASA/GSFC), 松本浩典, 田村啓輔, 石橋和紀, 林多佳由, 宮澤拓也, 岩瀬敏博, 前島将人, 吉川駿 (名古屋大学), ASTRO-H SXT 用反射鏡の M 吸収端付近の反射率測定、日本天文学会 2015 年秋季年会、2015 年 9 月

22. Ryo Iizuka, 他 12 名, Ground-based X-ray calibration of the Astro-H soft X-ray telescopes, The 13th Symposium on X-ray Imaging Optics, 2015 年 9 月

〔産業財産権〕

○出願状況 (計 2 件)

1. 名称：望遠鏡システム
 発明者：前田良知, 石田學, 飯塚亮, 林多佳由
 権利者：同上
 種類：特許
 番号：特願 2016-078208
 出願年月日：2016 年 4 月 8 日
 国内外の別：国内
2. 名称：X 線分光偏光計
 発明者：飯塚亮, 坪井陽子
 権利者：同上
 種類：特許
 番号：特願 2016-048851
 出願年月日：2016 年 3 月 11 日
 国内外の別：国内
6. 研究組織
 (1) 研究代表者
飯塚 亮 (IIZUKA, Ryo)
 宇宙航空研究開発機構・宇宙科学研究所・研究開発員
 研究者番号：50548120