

## 日米欧の国際協力で推進する硬 X 線集光偏光計 XL-Calibur 計画

高橋 弘充, Quin Abarr<sup>A</sup>, 青柳 美緒<sup>B</sup>, 朝倉 一統<sup>B</sup>, 粟木 久光<sup>C</sup>, Matthew G. Baring<sup>D</sup>, Richard Bose<sup>A</sup>, Dana Braun<sup>A</sup>, Gianluigi de Geronimo<sup>E</sup>, Paul Dowkontt<sup>A</sup>, John Elliot<sup>F</sup>, 榎戸 輝揚<sup>G</sup>, Manel Errando<sup>A</sup>, 深沢 泰司, 古澤 彰浩<sup>H</sup>, Thomas Gadson<sup>F</sup>, Epharaim Gau<sup>A</sup>, Victor Guarino<sup>I</sup>, 郡司 修一<sup>J</sup>, 袴田 知宏<sup>B</sup>, 萩原 涼太<sup>B</sup>, Kenny Hall<sup>F</sup>, 花岡 真帆<sup>B</sup>, Keon Harmon<sup>F</sup>, 服部 憲吾<sup>B</sup>, 林田 清<sup>B,L</sup>, Scott Heatwole<sup>F</sup>, Arman Hossen<sup>A</sup>, 井出 峻太郎<sup>B</sup>, 今村 竜太<sup>C</sup>, 今里 郁弥, 今澤 遼, 石橋 和紀<sup>K</sup>, 石田 学<sup>L</sup>, 石倉 彩美<sup>B</sup>, 石渡 幸太<sup>B</sup>, Nirmal Kumar Iyer<sup>M,N</sup>, Fabian Kislat<sup>O</sup>, Mozsi Kiss<sup>M,N</sup>, 亀谷 紀香<sup>C</sup>, 鴨川 航<sup>B</sup>, 北口 貴雄<sup>G</sup>, David Kotsifakis<sup>F</sup>, Henric Krawczynski<sup>A</sup>, James Lanzi<sup>F</sup>, Lindsey Lisalda<sup>A</sup>, 前田 良知<sup>L</sup>, 松下 友亮<sup>B</sup>, 眞武 寛人, 松本 浩典<sup>B</sup>, 峯田 大晴<sup>B</sup>, 宮本 明日香<sup>R</sup>, 宮澤 拓也<sup>P</sup>, 水野 恒史, 中庭 望<sup>R</sup>, 野田 博文<sup>B</sup>, 大出 優一<sup>B</sup>, 岡島 崇<sup>Q</sup>, 岡崎 貴樹<sup>B</sup>, Izabella Pastrani<sup>A</sup>, Mark Pearce<sup>M,N</sup>, Zachary Peterson<sup>F</sup>, Helen Poon, Chris Purdy<sup>F</sup>, Brian Rauch<sup>A</sup>, Felix Ryde<sup>M,N</sup>, 斎藤 芳隆<sup>L</sup>, 佐久間 翔太郎<sup>B</sup>, 佐藤 淳矢<sup>B</sup>, 澤上 拳明<sup>B</sup>, Chris Shreeves<sup>F</sup>, Garry Simburger<sup>A</sup>, Carl Snow<sup>F</sup>, Sean Spooner<sup>O</sup>, Theodor-Adrian Stana<sup>M,N</sup>, David Stuchlik<sup>F</sup>, 鈴木 瞳<sup>R</sup>, 武田 朋志<sup>S</sup>, 武尾 舞<sup>R</sup>, 玉川 徹<sup>G</sup>, 田村 啓輔<sup>Q</sup>, 常深 博<sup>B</sup>, 内田 和海<sup>L</sup>, 内田 悠介, 内山 慶祐<sup>S</sup>, Brett Vincent<sup>F</sup>, Andrew West<sup>A</sup>, Eric Wulf<sup>T</sup>, 山本 龍哉, 楊 冲, 米山 友景<sup>L</sup>, 吉田 勇登<sup>S</sup>, 善本 真梨那<sup>B</sup>

広大, WUSTLA, 阪大<sup>B</sup>, 愛媛大<sup>C</sup>, Rice U.<sup>D</sup>, DG CIRCUITSE, NASA WFF<sup>F</sup>, 理研<sup>G</sup>, 藤田 医大<sup>H</sup>, Guarino Engineering Services<sup>I</sup>, 山形大<sup>J</sup>, 名大<sup>K</sup>, ISAS/JAXA<sup>L</sup>, KTH<sup>M</sup>, OKC<sup>N</sup>, UNH<sup>O</sup>, OIST<sup>P</sup>, NASA GSFC<sup>Q</sup>, 都立大<sup>R</sup>, 東理大<sup>S</sup>, NRL<sup>T</sup>

### 1. 硬 X 線集光偏光計 X(L)-Calibur

我々の X(L)-Calibur 計画 (PI: Henric Krawczynski ワシントン大学) は、20~80 keV の硬 X 線帯域で天体の偏光度と偏光方位角を測定することを目的としている。偏光は、シンクロトロン放射や散乱プロセスによって生じるため、X 線・ガンマ線の高エネルギー帯域においても、中性子星やブラックホール、超新星残骸、活動銀河核などにおける高エネルギー放射機構を研究する上で非常に強力な観測手法と考えられている。これまでに、日本とスウェーデンの国際共同ミッション PoGO+や「ひとみ」衛星 SGD 検出器により、全天で定期的に硬 X 線で最も明るい「かに星雲」(パルサー星雲) と「はくちょう座 X-1」(ブラックホール連星系) から、精度の良い硬 X 線偏光観測の結果が得られた。しかし、これらはコリメータ型の検出器であり、検出器を大きくするとその分バックグラウンドも増加するため、感度が制限されている。そこで、硬 X 線望遠鏡により天体信号を集光することで、天体信号は損なわずに、検出器を小型化することでバックグラウンドを低減し、感度を向上させるのが X(L)-Calibur 計画である (全体の様子: 図 1)。

2018年フライトまでは、硬X線望遠鏡にNASA/GSFCと名古屋大学で製作したInFOCuS望遠鏡を利用しており、ミッション名はX-Caliburであった。次回2022年以降は有効面積が大きな日本製のFFAST望遠鏡を利用するため、XL-Caliburと呼んでいる。



図1: X-Calibur気球の全体写真。2018年12月の南極フライトで利用。全長~8m。

左: 偏光計、右: 硬X線望遠鏡。次回2021年のフライトでは日本からFFAST衛星用の硬X線望遠鏡を提供する。焦点距離が12mなので、ゴンドラも長くなる。

## 2. XL-Calibur気球のフライト計画と検出器の改良

X-Calibur気球は、これまでにアメリカ国内で2度の試験フライトを実施し(それぞれフライト時間は約1日)、NASA/Wallopsの製作した姿勢制御系(Wallops Arc Second Pointer: WASP)と、ワシントン大学を中心に開発した偏光計、InFOCuS硬X線望遠鏡の動作実証に成功している。これを踏まえて、2018年12月30日~2019年1月2日に南極のアメリカMcMurdo基地で科学観測フライトを実施した。当初は8日以上フライト計画であったが、気球からヘリウムガスが漏れたため、3日間のフライトとなった。

これまでのPoGO+や「ひとみ」SGDでは、北天の2天体しか観測されておらず、X(L)-Caliburによって南天の天体を硬X線偏光観測するのは世界初の試みである。2018年フライトでは観測時間は3日間に限られたが、定常天体の中では全天で硬X線で最も明るい質量降着型パルサー「Vela X-1」とアウトバーストして600 mCrabの光度に達した質量降着型パルサー「GX 301-2」の観測を実施した。WASPによる秒角オーダーでの姿勢制御に成功しており、GX 301-2からはパルサーからの周期的な信号の検出に成功している。統計不足により、偏光情報については上限値のみが得られ、磁場の強い中性子星の極付近において放射の形状がペンシルビーム型なのかファンビーム型なのかは決定できておらず、次回以降への観測へと持ち越しとなった(Abarr et al. 2020)。

前回フライトが予想より短時間で終わってしまったため、我々は次回のフライトを2022年夏にスウェーデンから実施する。科学目標は、「かにパルサー」(回転駆動型パルサー)と「はくちょう座X-1」からの偏光の検出である(PoGO+や「ひとみ」SGDでは統計不足のため、偏光情報の上限値の制限しかかけられていない)。2-8 keVの軟X線偏光を観測するIXPE衛星も2021年12月に打ち上げ予定であり、広帯域での同時観測を計画している。2022年の後も、2023年末に南極でのフライトを計画している。

我々は次回以降のフライトに向け、大きく以下の4点の改良を日本・アメリカ・スウェーデンで実施した (Abarr et al. 2021)。

(1 望遠鏡) X-Calibur で利用した InFOCuS 望遠鏡は 15 年前に製作されたものであり有効面積が小さい。そこで 2022 年以降の XL-Calibur では、日本の FFAST チームが小型衛星のために製作した FFAST 望遠鏡を搭載する。FFAST 硬 X 線望遠鏡は、「ひとみ」衛星の HXT 望遠鏡と同型で世界最大の有効面積を持つため、バックグラウンドを増やすことなく、天体信号のみを 5 倍増やすことができる。また観測帯域も従来の 40 keV から 80 keV まで広げられる (望遠鏡の比較: 図 2 参照)。焦点距離が 8 m から 12 m へ伸びるため、トラスは米国で新規製作された。日本では、FFAST 望遠鏡の全パーツを搭載部品に置換した後、SPRING-8 のシンクロトロン光を用いて有効面積と角度分解能の較正を実施した。

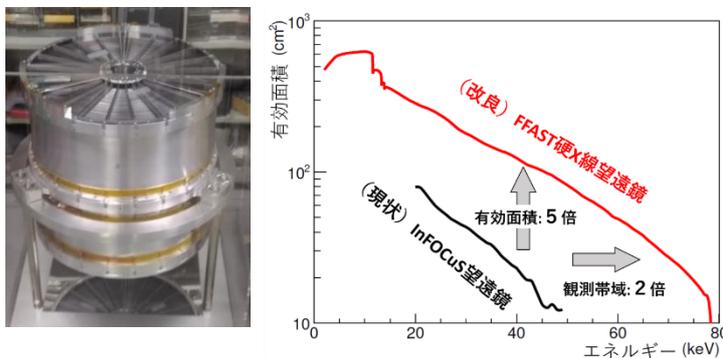


図 2 : 次回 2022 年以降のフライトに搭載する FFAST 望遠鏡。従来の InFOCuS 望遠鏡よりも有効面積を増し、エネルギー帯域を広げられる。

(2 偏光計) X(L)-Calibur では、硬 X 線の偏光を検出するために、コンプトン散乱の散乱角の異方性を利用する (偏光方向と垂直方向に散乱光子が飛びやすい)。偏光計は断面が 1 辺約 3 cm とコンパクトで、中心に散乱体ベリリウムを置き、周囲の 4 辺を吸収体 CdZnTe (CZT) 半導体が囲っている (図 3 参照)。CZT 検出器は 2.5 mm ピクセルの位置分解能を持ち、CZT で検出された信号によって、中心のベリリウムからの散乱角を測定する。

これまでは CZT の厚みが 2 mm あり、望遠鏡が集光できる 80 keV 以上の信号まで検出できる状態であった。しかし厚すぎると、検出器の体積に比例してバックグラウンドが増えてしまう。そこで、次回からは 0.8 mm 厚 (80 keV で 8 割の硬 X 線を検出可能) にすることで、バックグラウンドを 1/2.5 に低減する。アメリカで、フライト品として組み上げられ、熱真空試験を突破し、最終動作確認が進行中である。

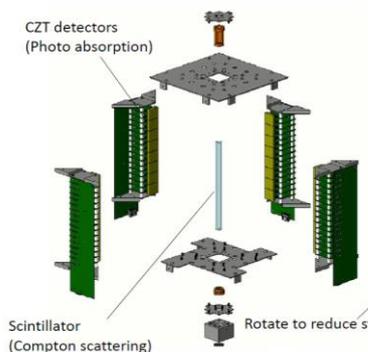


図 3 : X(L)-Calibur 偏光計の解体図。上方から入射した硬 X 線は、中心の散乱体で散乱され、周囲 4 辺を囲う CZT 半導体検出器で検出される。これにより散乱角が測定でき、その垂直方向が入射光子の偏光方向であると分かる。散乱体は、パッシブなベリリウム単体である。次回以降フライトでは、CZT 検出器の厚みを 2 mm から 0.8 mm に薄くし、バックグラウンドを低減させる。

(3 アクティブシールド) 偏光計の周囲は、ほぼ  $4\pi$  を従来は CsI(Na)シンチレータのアクティブシールドで囲っていた。この読み出し回路は、SuperTIGER 気球実験 (宇宙線の重イオン観測をする低レート用) のものを利用したため、2018 年フライトでは宇宙線の陽子やガンマ線に起因する数 kHz の高レートを十分に処理しきれていなかった。

そこでスウェーデンにおいて、読み出し回路を改良するとともに、光電子増倍管のリーダーも「すぎく」衛星 HXD 検出器と PoGO+気球実験で利用した宇宙線の大信号に対応したものを再製作した。さらにシンチレータも、より有効原子番号が大きく、減衰時定数の速い BGO に置換し、高レートへの対応を完了させた。

(4 姿勢制御系) スウェーデンから「かに星雲」を夏季に観測すると、太陽方向を指向することになる。X-Calibur では、WASP 姿勢制御系は硬 X 線望遠鏡と同じ視野の恒星をスタートラッカーで補足して姿勢を制御していたため、従来のセットアップだけでは太陽方向の観測時には制御できない。そのため、WASP チームによって、X 線望遠鏡と同じ方向には太陽センサーを、X 線望遠鏡と別の視野方向にはもう 1 台スタートラッカーを追加する。両者は太陽方向を観測するための冗長系であるが、2 台目スタートラッカーにより、1 台目が気球の陰に入ってしまう仰角の高い観測にも対応できるようになる。これにより、とくに南極で 1 ヶ月の長期フライトを実施した際には、数個発生すると予想される突発天体を観測できる可能性 (観測できる領域) が 1.5 倍ほど増える。

現在は、NASA/WFF にて全機器をゴンドラに組み上げる試験が進行中である。その後 CSBF において気球との噛み合わせ試験を経て、来年度のスウェーデン放球を実施する。

### 3. まとめ

硬 X 線集光偏光計 X-Calibur 気球実験は、2018 年に南極において科学観測を実施した。フライトは 3 日間の短時間に終わってしまったものの、姿勢制御や検出器を正常に動作させ、質量降着型パルサーの観測に成功した。次回以降は、日本製 FFAST 望遠鏡に置き換えるなど改良を加えた XL-Calibur として、2022 年にスウェーデンから放球し、「かにパルサー」と「はくちょう座 X-1」からの偏光検出を目指している。その後も、南極でのフライトを計画している。

#### 参考文献

- [1] Q. Abarr et al., 2020 ApJ 891, 70, “Observations of a GX 301–2 Apsastron Flare with the X-Calibur Hard X-Ray Polarimeter Supported by NICER, the Swift XRT and BAT, and Fermi GBM”
- [2] Q. Abarr et al., 2021 Astroparticle physics 126, 102529, “XL-Calibur – a second-generation balloon-borne hard X-ray polarimetry mission”