

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成29年6月5日現在

機関番号：14401  
研究種目：特別推進研究  
研究期間：2011～2016  
課題番号：23000004  
研究課題名（和文） 高感度 X 線 CCD とスーパーミラーによる観測と宇宙進化の研究  
研究課題名（英文） Cosmic evolution study by using a combination between the high sensitivity X-ray CCD and the super mirror  
研究代表者  
常深 博 (TSUNEMI, Hiroshi)  
大阪大学・大学院理学研究科・教授  
研究者番号：90116062  
交付決定額（研究期間全体）（直接経費）：428,800,000 円

研究成果の概要（和文）：宇宙にあるブラックホールなどは、X線で明るく輝いている。そこで、我々はエネルギーの高いX線に焦点を絞り、宇宙の進化を探ろうとする研究を推進する。このためには、衛星に高感度X線CCDカメラとスーパーミラーを搭載し、広い天空を走査観測したい。搭載装置は、ひとみ衛星に搭載したものをベースに準備する。ひとみ衛星は2016年2月に軌道に載り、その性能を確認し終えたところで、姿勢制御装置の異常で失われてしまった。これを踏まえ、より高性能な観測衛星を目指すことになった。

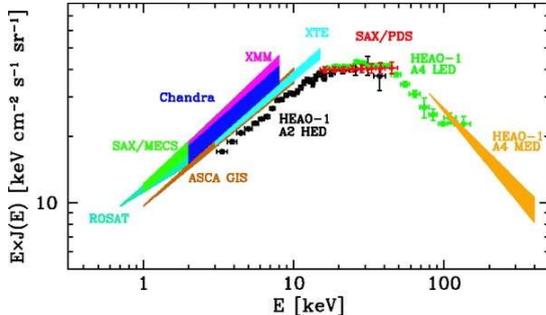
研究成果の概要（英文）：There are many celestial objects, including black holes, shining bright in X-rays. We will focus on hard X-ray to study the evolution of our universe. We have prepared an X-ray CCD camera and a super-mirror so that we can scan the X-ray sky with high sensitivity. We have developed these two instruments based on the heritage of the Hitomi satellite, launched on February, 2016. After the verification phase of the satellite about one month, Hitomi was lost due to the malfunction of the attitude control system. We will redesign the program with higher sensitivity and better angular resolution for future observation.

研究分野：X線天文学

キーワード：宇宙科学、宇宙物理、X線天文学、人工衛星、宇宙線

1. 研究開始当初の背景

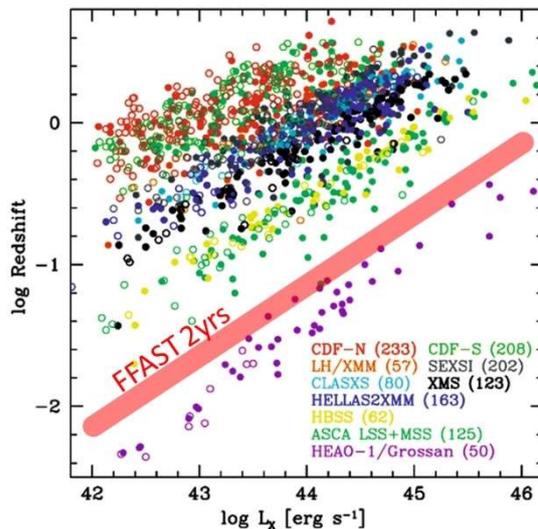
硬 X 線 (10keV 以上) で見た天空の詳細な状況はまだよく知られていない。つまり、それまでは集光系を使わない観測が行われており、たくさんの点源が報告されているものの、広がった天体が存在するかどうか、点源がかたまって存在しているかどうか等は判りようがなかった。この状態は、1970 年にウフル衛星が初めて軟 X 線 (10keV 以下) で天空を走査した時の状況と似ている。



これまでの X 線観測で、銀河系に起因する成分を除くと、つまり銀河面から離れた領域は、ほぼ一様に X 線で輝いており、宇宙 X 線背景放射 (CXB) と呼ばれている。そのエネルギーフラックススペクトルは、上図のようになり、30-40keV 付近でピークを作る。これらは、遠方の活動銀河核 (Active Galactic Nucleus: AGN) の寄与と推測されているが、それらを分離して研究するためには、硬 X 線での撮像がキーになる。

研究開始当初、すざく衛星は X 線 CCD による軟 X 線の観測と、星間吸収などに影響されない硬 X 線検出器 (Hard X-ray Detector: HXD) による観測をしていたが、HXD は撮像能力がなかった。硬 X 線でも撮像観測が出来れば、熱成分にとどまらず、非熱成分も観測しやすく、それを基にいろいろな研究に繋がる。

我々が目指している FFAST 衛星による硬 X 線の走査観測で予想される成果はいろいろあるが、中でも AGN の輝度関数の決定が最も重要である。下図は、これまでに観測された AGN を X 線輝度  $L_x$  と距離 (Red shift)  $z$  で表す  $L_x$ - $z$  平面にプロットした図である。この図で、



$z$  を一定とした断面は、 $z$  で決まる時代における AGN の光度関数に対応している。したがって、宇宙の進化を調べるためには AGN を  $L_x$ - $z$  平面で抜けがないように検出し、いろいろな  $z$  での光度関数を求めることが必要である。ASTRO-H や将来の ATHENA 計画では、図中の左上のより暗い領域まで輝度関数を決定するだろう。しかし、図に見えているギャップを埋めるためには、吸収に影響されない硬 X 線で、集光鏡を使って空の広い範囲を撮像観測しなければならない。

例えば、ASTRO-H による硬 X 線観測は、ポインティングを念頭においているので、走査観測を実行して広い領域を探索する予定はない。また、ASTRO-H では CdTe 検出器を使用するが、我々は面積化が容易な SDCCD を採用する。さらに SDCCD のデータ処理は従来の CCD と同様に扱えるために、これまでの技術蓄積をベースにできる。FFAST で二年間の走査観測をすれば、この図に示すように、従来までの観測でカバーしきれていない領域を確実に埋めることができる。

2. 研究の目的

ビッグバンで始まった直後の宇宙は超高温でほとんど一様なプラズマであった。その後の宇宙の発展は一様な状態からの乖離であり、その結果として、多様な現在の姿が出現している。例えば温度では、宇宙背景放射からブラックホールなどの周辺まで 8 桁以上も違いがある。熱平衡を離れて粒子のエネルギーと言う観点で見ると、 $10^{21}$ eV にも達するような高エネルギー宇宙線の観測結果から、25 桁もの広がりがある。さらに、密度では、中性子星のような原子核密度からポイドと呼ばれる領域まで、40 桁を越える非一様性が生まれた。このように、宇宙は一様からの乖離が進んでおり、まさに宇宙は進化していると言える。

X 線天文学も熱輻射する各種天体やプラズマだけでなく、非熱輻射する天体も多く観測されるようになった。熱輻射は軟 X 線にその主要な輻射を出す、非熱輻射となると、エネルギーのベキ関数として吸収の効いてこない硬 X 線に延びている。X 線天体の分布は宇宙の果てにまで及ぶことが判っており、これらの詳細な観測的研究が進んでいる。これに伴い CXB のなぞも次第に明らかになってきた。特に軟 X 線では、X 線反射鏡の導入で、CXB の 75% は AGN など点源であると判った。ところが、軟 X 線の観測においても、幾つか特異な天体が検出されている。つまり、SN1006 (Koyama et al., 1995) に代表されるように、広がった天体で、軟 X 線では熱スペクトルが優勢でも、硬 X 線まで延びるベキ成分を持つ天体や、NGC4258 を始めとして吸収が極めて大きく、硬 X 線観測で初めてその輻射の全貌が判る天体などである。CXB のエネルギーフラックススペクトルは 30-40keV にピークを持つので、10keV 以下の帯域の CXB を

説明するために使われた天体の単純な外挿では説明がつかない。まさに硬 X 線には、AGN を中心として大きな未知の世界が広がっていることは確実である。

前頁下図の  $L_x$ - $z$  図は、宇宙の進化を調べる基礎となるデータである。そして、いろいろな  $z$  での光度関数を知るには、この図で抜けない観測が必要であることはすでに述べた。左上部分は集光鏡を使ったポインティング衛星によってカバーされ、右下部分は集光鏡を使わない走査型衛星によってカバーされている。その間にある部分が、集光鏡を使って広天走査する衛星がカバーする領域で、今までのところ観測が不十分なためにギャップとなって残っている。望遠鏡を使ったポインティング観測では、高感度で星を発見するものの、視野が狭いため、広い天空を走査できず、明るい天体の発見は難しい。一方、集光系を持たない広天走査観測では、検出感度が低く、見かけの明るい天体だけを見つけることになる。我々はこれまでのギャップを埋めるべく、集光鏡を使った広天走査観測が可能な FFAST 衛星計画を立てた。これにより、宇宙進化解明のためのギャップを埋める観測を、我々のアイデアで、そして我々の手で実行したい。

### 3. 研究の方法

#### (1) X 線の広天走査観測

X 線天文学がスタートしたとき、X 線観測衛星は視野の狭い主観測装置の他に、有効面積は小さいものの広い視野のモニター装置を持つものが多かった。日本の X 線観測衛星も同じで、はくちょう、てんま、ぎんが といずれも広視野モニターを持っていた。この後の日本の観測衛星は、X 線 CCD を搭載するようになり、広視野モニターは使われなくなった。

2009 年 7 月に全天 X 線モニター (MAXI) を国際宇宙ステーションに設置した。広視野モニターとしては高感度で、各種 AGN の長期時間変動を検出 (Isobe et al., 2010) するなどしているが、その感度はポインティングする望遠鏡には及ばない。したがって、今後は望遠鏡を使った硬 X 線での精度の高い走査観測が必要である。

宇宙の進化を探るには、AGN の光度関数の時間変化を求めることが最も直接的で、そのためには、いろいろなレベルの観測を寄せ集める必要がある。すでに説明したように、これまでの観測ではカバーしきれていない領域を埋める観測は望遠鏡を使った広天走査観測をする FFAST でしかできない。我々は地道な技術の蓄積を基に、このアイデアに到達した。つまり、吸収に埋もれないエネルギー領域での高感度観測にはスーパーミラーの登場が欠かせなかったし、CCD の高い位置分解能を生かし、観測エネルギー範囲を広げるには SDCCD が有効であった。

#### (2) 技術開発と気球実験

我々は、スーパーミラーと SDCCD とを開発し、これらを組合せて、10keV 以上での高感度システムを作り、気球実験 SUMIT を実行した。焦点距離 8m の望遠鏡を搭載した SUMIT は、2006 年 11 月にブラジルで放球したものの回収に失敗し、有効なデータは取れなかった。

#### (3) FFAST 計画

これに対して、最近の編隊飛行技術 (FF) により、焦点距離の長い望遠鏡を二機の小型衛星で実現することは可能であることが判った。



その概念図を上図に示す。FF の重要性は工学的には良く認識されているが、実現した例は少なく、まして理学への応用はない。低軌道地球周回衛星で FF を実行する場合、重力傾斜によりポインティングが困難であるため、大型望遠鏡への応用は難しい。今回の我々のアイデアは、ポインティングをせず、望遠鏡による広天走査という新発想に基づき、FF としては姿勢制御用燃料をほとんど使わない形態である。このアイデアは世界的にはまだ誰も提案していないもので、我々の独創性は高い。

### 4. 研究成果

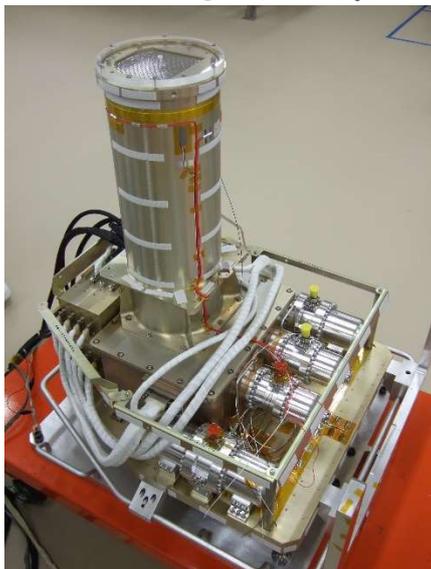
#### (1) FFAST を念頭に置いたひとみ衛星の準備

本研究開発により、FFAST 衛星への搭載を念頭に置いた検出器と望遠鏡の開発を進めた。検出器は CCD カメラを利用したものであり、その構造はひとみ (ASTRO-H) 衛星搭載の SXI を基本としている。また、信号処理装置は SXI を基礎として、FFAST のための機能を追加した。望遠鏡は、多層膜を使い硬 X 線まで集光できるスーパーミラーであり、その構造はひとみ衛星搭載の硬 X 線望遠鏡 (Hard X-ray Telescope: HXT) を基本としている。衛星の軌道も類似しているため、宇宙環境を模擬する各種試験は、ひとみ衛星搭載装置としての各種試験をクリアすることが基礎となっている。つまり、我々の装置開発は、ひとみ衛星に搭載する装置開発がベースとなっている。

#### (2) X 線 CCD カメラ

これまで大阪大学ではあすか、ASTRO-E、すざく、MAXI 搭載の CCD カメラなどを開発した。これらは全て軌道上で 10 年前後にわたる動作実績がある。この過程で、宇宙環境下

での放射線損傷による性能劣化についても理解が進んだ。具体的には低エネルギー陽子により結晶格子欠陥が増え、エネルギー分解能が劣化していくが、人工的な電荷注入により観測時間を失うことなく性能の劣化速度を低減することが可能である。FFAST に搭載する SD-CCD は、SXI(下図)用に開発した CCD 素子を用いる。SXI 用 CCD 素子との差違は薄い CsI(Tl)シンチレータを接着したことにより硬 X 線に対する感度の向上したことであるが、形態は同じである。また、陽子照射実験による放射線耐性試験で、SXI と同レベルの耐性を持つことを確認し、さらにシンチレータ部の放射化等を含めて、Geant4 による再現シミュレーションも進めている。



アナログ回路基板は SXI と同一である。ASTRO-H の開発を通して、ASIC、FPGA の機能性能検証は完了している。特に前者は陽子ビーム試験により、FFAST が投入される低高度地球周回軌道における荷電粒子環境で、10 年以上にわたり正常動作することを実証した。

デジタルエレクトロニクスについては、基本的に SXI の資産を有効活用するが、FPGA に実装するロジックと DE 内のソフトウェアには FFAST 固有の機能を追加した。ミッション機器と衛星バスとのインターフェースはスペースワイヤ規格であるが、これは ASTRO-H 衛星と同じである。ミッションデータの発生レートは、あすか、すざくと同様にオンボードで X 線イベント候補を抽出し、データ圧縮を図り、十分に抑える見通しができた。

### (3) スーパーミラー

反射型の X 線望遠鏡の原理は、Wolter-I 型光学系と呼ばれる 2 回反射型の斜入射光学系である。集光能力を高めるために、多数の光学系を同軸上に共焦点を持つように積層する。これまでに実現した全ての X 線望遠鏡はこの原理に基づいている。X 線の反射は、X 線が金属へ斜入射するとき起こる全反射

を利用する。硬 X 線における感度は、周期構造による X 線干渉(ブラッグ反射)を反射原理とする多層膜スーパーミラーによって大きく向上した。さらに、多重薄板光学系により小型軽量を達成している。現在運用中の X 線天文衛星に搭載されている X 線望遠鏡は 10keV までしか集光できないが、下図に示した FFAST に搭載するスーパーミラーは 80keV まで感度を持つ。



これらのスーパーミラーに関する技術はこれまで名古屋大学において独自開発されてきたもので、合計 4 回の気球搭載観測実験を通じて、衛星搭載品開発レベルに達している。この技術はひとみ衛星搭載の硬 X 線望遠鏡(HXT)と共通であり、確かな技術基盤を持つ。FFAST での要求性能は、有効面積が 30keV において 150cm<sup>2</sup>、結像性能が 2 分角(Half Power Diameter; HPD)である。また、新規開発要素もなく、開発期間の短縮、製作コストの低減という点からも、望遠鏡部分についてはこの開発形態が最適であると判断している。

### (4) ひとみ衛星とその後継機

当初の ASTRO-H 衛星計画では、2014 年度には軌道に載る予定であった。その後、計画の遅延はあったものの、2016 年 2 月に種子島宇宙センターから打ち上げられ、無事軌道に乗り、ひとみと命名された。FFAST 関連の装置開発の観点から、ひとみ衛星の軌道上での正常動作を確認することができている。

SXI では冷凍機により CCD 素子が -110°C まで冷却され、熱雑音を抑え、所定の性能で動作させることができた他、各種動作モードも正常動作を確認した。HXT も軌道上での結像性能が想定通りであったことを確認した。

ひとみが軌道に載ってから順次観測装置の立ち上げや衛星の動作機能確認を進め、定常観測に移行しようとする最中、2016 年 3 月末に姿勢制御系の異常により、衛星喪失に至った。結局、ひとみに搭載した観測装置、SXS、SXI、HXI そして SGD の一通りの動作確認を終えただけであった。その後、ひとみ後継機の計画が急遽立ち上がっている。後継機では、いろいろな経緯から、必要最小限にとどめる

ことになり、SXS(カロリメータ)、SXI(CCDカメラ)の二種類の観測装置だけを搭載することになり、現在開発中である。

(5) 遅延に基づく状況の変化と今後の見通し

2012年6月、硬X線の集光鏡システムを搭載したアメリカのNuSTAR衛星が軌道に乗り観測を始めた。これはポインティングを指す衛星であり、FFASTよりもひとみのHXTに類似している。従って、広い天空を走査観測するには至っていない。

ひとみによる硬X線観測ができなくなったうえ、その後継機は軟X線に集中することになった。一方、硬X線集光鏡による観測状況がNuSTARで判り始めたことなどを考え合わせると、硬X線観測はますます重要になっている。しかし、ひとみ喪失により、ポインティングの有効性も考慮すると、今後の硬X線観測衛星に求められる性能はFFASTを超える必要のあることが判った。そこで、有効面積を増大させるためにスーパーミラーを3台搭載し、更に望遠鏡の結像性能を改善した衛星を目指すことになった。この計画はFORCEとしてスタートし、FFAST計画はFORCEに発展的に解消することとした。

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計53件)

① Hitomi Collaboration; Tsunemi, Hiroshi (218人中186番目); Hayashida, Kiyoshi (50番目); Nakajima, Hiroshi (122番目), The quiescent intracluster medium in the core of the Perseus cluster, Nature, 査読有、535巻、2016、117-121、DOI:10.1038/nature18627

② Hiroshi Nakajima (7人中1番目), Ryo Nagino, Naohisa Anabuki, Kiyoshi Hayashida (4番目), Hiroshi Tsunemi (5番目), et al., Screening of ASIC for signal processing of Soft X-ray Imager onboard ASTRO-H JAXA-RR-14-007, JAXA-RR-14-007, 査読有、2015、<https://repository.exst.jaxa.jp/dspace/bitstream/a-is/236426/1/AA1530003000.pdf>

③ Y. Yao, H. Kunieda, H. Matsumoto, K. Tamura, Y. Miyata, Design and fabrication of a supermirror with smooth and broad response for hard x-ray telescopes, Applied Optics, 査読有、52巻、2013、6824-6833、DOI:10.1364/AO.52.006824

④ Hiroshi Nakajima (10人中1番目), Daisuke Matsuura, Toshihiro Idehara, Naohisa Anabuki, Hiroshi Tsunemi (5番目), et al., Development of the analog ASIC for

multi-channel readout X-ray CCD camera, Nucl. Instrum. and Meth., 査読有、A632-1巻、2011、128-132、DOI:10.1016/j.nima.2010.12.174

⑤ Tsunemi, Hiroshi (6人中1番目); Ueda, Shutaro; Shigeyama, Kazuo; et al. Performance of a newly developed SDCCD for X-ray use, Nucl. Instrum. and Meth., 査読有、A652-1巻、2011、508-511、DOI:10.1016/j.nima.2010.08.118

[学会発表] (計89件)

① 今谷 律子、広帯域X線イメージセンサSDCCD(Scintillator Deposited CCD)の硬X線分光性能評価、第16回宇宙科学シンポジウム、2016年1月6日-7日、宇宙科学研究所(神奈川県相模原市)

② 中嶋 大、FFAST搭載硬X線カメラ(HXC)用信号処理ASICおよびアナログエレクトロニクスの開発状況、第15回宇宙科学シンポジウム、2015年1月6日-7日、宇宙科学研究所(神奈川県相模原市)

③ Ryo Nagino, Performance study of Scintillator-directory-coupled CCD onboard FFAST, The 12th Symposium on X-ray Imaging Optics, 18-20 Nov. 2013, Osaka University Nakanoshima Center, Osaka (Japan)

④ Tsunemi Hiroshi、FFAST mission to study the evolution of the universe in hard x-ray, SPIE Astronomical Telescopes + Instrumentation 2012, Amsterdam RAI Convention Ctr., 1-6 July 2012, Amsterdam (Netherlands)

⑤ 常深 博、硬X線走査観測で宇宙進化を探るFFAST計画、日本天文学会2011年秋季年会、2011年9月22日、鹿児島大学(鹿児島県)

[その他]

大阪大学X線天文学グループホームページ  
<http://wwwxray.ess.sci.osaka-u.ac.jp/>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

常深 博 (TSUNEMI, Hiroshi)  
大阪大学・大学院理学研究科・教授  
研究者番号: 90116062

(2) 研究分担者

國枝 秀世 (KUNIEDA, Hideyo)  
名古屋大学・大学院理学研究科・教授  
研究者番号: 00126856

(3) 連携研究者

林田 清 (HAYASHIDA, Kiyoshi)  
大阪大学・大学院理学研究科・准教授  
研究者番号：30222227

中嶋 大 (NAKAJIMA, Hiroshi)  
大阪大学・大学院理学研究科・助教  
研究者番号：70570670