

# 太陽 X 線集光撮像分光観測ロケット実験 FOXSI シリーズ

成影 典之 (国立天文台)、高橋 忠幸、古川 健人 (東京大学 カブリ IPMU)、  
渡辺 伸 (宇宙航空研究開発機構・宇宙科学研究所)、萩野 浩一 (東京理科大学)、  
三石 郁之 (名古屋大学大学院理学研究科)、  
Lindsay Glesener、Sophie Musset、Juliana Therese Vievering (ミネソタ大学)、  
Sasha Courtade、Juan Camilo Buitrago-Casas、Gregory Dalton、Paul Turin、Sam Krucker  
(カリフォルニア大学バークレー校)、  
Steven Christe、Daniel Ryan (NASA ゴダード宇宙飛行センター)、  
Athiray Panchapakesan、Stephen Bongiorno、Brian Ramsey  
(NASA マーシャル宇宙飛行センター)

## Focusing imaging-spectroscopic observations of the solar corona in X-rays by FOXSI sounding rocket series

Noriyuki Narukage (National Astronomical Observatory of Japan),  
Tadayuki Takahashi, Kento Furukawa  
(Kavli Institute for the Physics and Mathematics of the Universe),  
Shin Watanabe  
(Japan Aerospace Exploration Agency / Institute of Space and Astronautical Science),  
Kouichi Hagino (Tokyo University of Science), Ikuyuki Mitsuishi (Nagoya University),  
Lindsay Glesener, Sophie Musset, Juliana Therese Vievering (University of Minnesota),  
Sasha Courtade, Juan Camilo Buitrago-Casas, Gregory Dalton, Paul Turin, Sam Krucker  
(University of California Berkeley Space Sciences Laboratory),  
Steven Christe, Daniel Ryan (NASA Goddard Space Flight Center),  
Athiray Panchapakesan, Stephen Bongiorno, Brian Ramsey (NASA Marshall Space Flight Center)

### ◇FOXSI-3 打ち上げ・世界初の観測に成功！！

2018年9月7日午前11時21分(アメリカ山岳部夏時間;日本時間では、2018年9月8日午前2時21分)、米国ニューメキシコ州ホワイトサンズの観測ロケット打ち上げ場にて、太陽観測ロケットFOXSI-3の打ち上げを行った。FOXSI-3は、最高到達高度約300kmの弾道軌道で約15分間飛行し、「活動領域」、「静穏領域」、「太陽の北極域」といったX線輝度の異なる3つの太陽コロナ領域を、約6分間観測した。FOXSI-3搭載の観測機器は全て正常に動作し、世界初となる太陽コロナの軟X線・集光撮像分光観測に成功した。現在、観測データの解析中であるが、合計一千万個近くの軟X線光子を検出しており、今後の科学成果が期待できる。



図 1. 打ち上げ前の FOXSI-3 チームの集合写真。FOXSI-3 が搭載された観測ロケットの前で撮影。(© NASA, FOXSI-3 team)

#### ◇FOXSI-3 が取得した世界初の軟 X 線撮像分光観測データ

世界初の軟 X 線撮像分光観測データを取得した手法だが、新たに開発した「裏面照射型 CMOS 検出器を用いた高速度軟 X 線カメラ」によって、太陽からの X 線光子 1 個 1 個を高速に検出・測定した。この高速度カメラの撮影枚数は 1 秒間に 250 枚（1 枚あたりの露光時間は 4 ミリ秒）で、1 枚あたり 50 個程度の X 線光子を検出した。図 2(a) が実際にカメラで取得した画像で、各画像に写っている白い点 1 つ 1 つが、X 線光子 1 個 1 個が作った信号である。この信号の強度は、X 線光子が持つエネルギーに比例するので、個々の X 線が持つ「エネルギー情報」が得られる。また、信号が検出器上のどの位置に出来たかを調べることで、個々の X 線が太陽のどの場所から放たれたかを知ることが出来る（「空間情報」の取得）。さらに、何枚目の画像に写っているかによって、いつ太陽から放たれた X 線光子であるかを知ることが出来る（「時間情報」の取得）。

この様に、個々の X 線光子の持つ空間・時間・エネルギー情報が得られれば、あとはそれを使ってどのように研究を行うかは研究者の腕次第である。例えば、検出した光子を全て空間上に並べると、点描のように太陽の画像を描くことが出来る（図 2(b)と図 3）。また、各時間に検出された X 線光子の数を調べることで、コロナの時間変化の様子を調べることが出来る。今回、高速度カメラにより高速連続撮像を行なったので、短時間で大量の X 線光子を集めることができ、10 秒の時間変化でも十分に追いかけることが可能である（図 2(c)）。さらに、各エネルギーに対して、そのエネルギーを持つ X 線光子が何個検出されたかを調べることで、コロナのスペクトルを作ることも出来る（図 2(d)）。図 2 では、活動領域 ((b)の黒の枠線で囲った場所)の時間変化とスペクトルを例に出したが、FOXSI-3 は太陽全面を観測しており（図 3）、太陽の全ての場所で同様のことが行える。

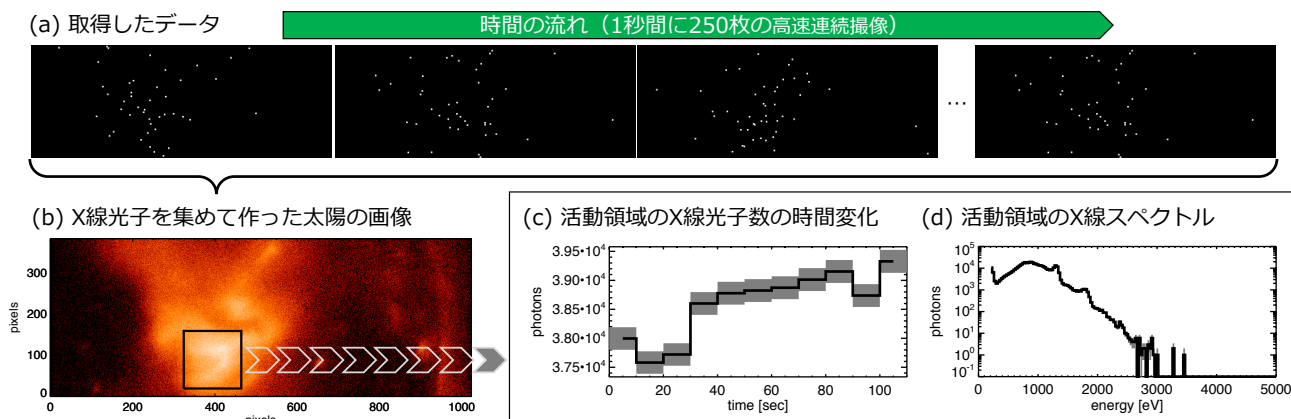


図2. FOXSI-3 で取得した世界初の軟 X 線集光撮像分光データの一例。FOXSI-3 に搭載した CMOS 検出器は、1 秒間に 250 枚 (1 枚あたり 4 ミリ秒) のデータを約 6 分間取得した。図(a)は実際に取得したデータであるが、白い点1つ1つが1個の X 光子で、検出された信号の強度が X 線のもつエネルギーに比例する。つまり、このデータから X 線光子 1 個 1 個のもつ位置・時間・エネルギー情報を得ることが出来る。こうして計測した光子を空間上に配置すると、X 線の太陽画像が作れる (図(b); この領域を観測した約 2 分間のうちに取得した約 150 万個の X 線光子で作った)。また、領域毎に「X 線の時間変化を調べたり (図(c))」、「エネルギースペクトルを求めたりすること (図(d))」が出来る。図(c)、(d)は、活動領域 (図(b)の四角で囲った領域) に対して作ったプロット。プロット中の灰色のバーは  $1\sigma$  の統計誤差を示す。(※図 1 の光子数は、検出器が検出した光子の数なので、太陽が放っている光子数を求めるには、観測装置の検出効率を考慮する必要がある。) (© FOXSI-3 team)

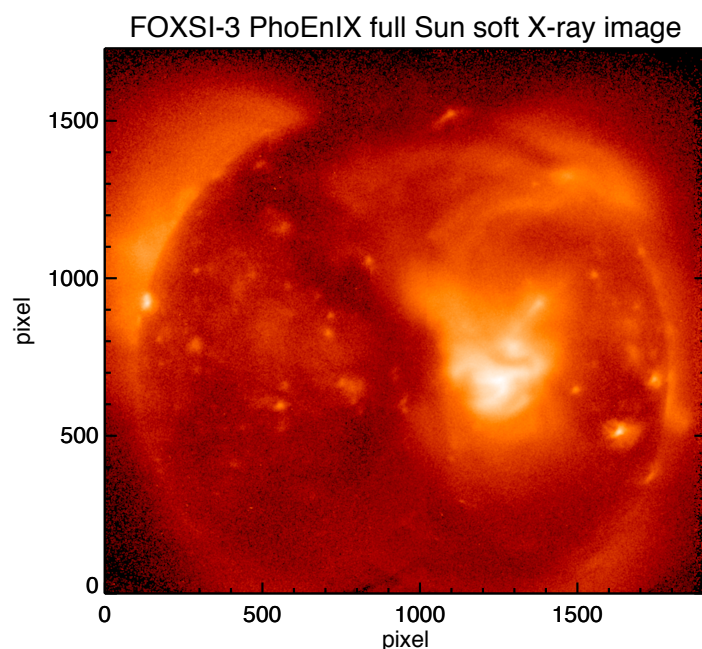


図3. 観測中に検出した軟 X 線光子全てを使って作った太陽コロナ全面画像。点描の様に太陽の画が描ける。(© FOXSI-3 team)

#### ◇FOXSI-3 の概要と科学目的

FOXSI (Focusing Optics X-ray Solar Imager) は太陽コロナが放つ X 線を集光撮像分光観測する日米共同のロケット実験で、今回の FOXSI-3 が 3 回目の飛翔であった。FOXSI-3 は、斜入射ミラーと検出器から成る望遠鏡を 7 本持ち、ミラーの数や検出器の種類を変えることで、広いエネルギー範囲の X 線を観測することが出来る。6 本の望遠鏡は、硬 X 線域 (主に 4 keV~20 keV の高エネルギー域) を観測するために日本の FOXSI チームが開発した焦点面検出器を搭載している。これらの検出器は、FOXSI の過去 2 回の飛翔でも搭載されており、科学成果を出してきた。FOXSI-3 で新たに採用されたのは、軟 X 線域 (主に 0.5 keV~10 keV の低エネルギー域) の撮像分光観測を行うための裏面照射型 CMOS 検出器で、望遠鏡の 1 本に搭載された。0.5keV からの太陽軟 X 線域における集光撮像分光観測は、FOXSI-3 が世界初の試みである。これら 7 本の望遠鏡により、太陽コロナ中の超高温プラズマや非熱的プラズマについて、詳細に調査することが可能となる。

FOXSI-3 の科学目的は、太陽コロナにおける高エネルギー現象 (エネルギー解放、粒子加速、加熱など) の理解である。そのうちのひとつが、「ナノフレア」のコロナ加熱 (※文末の注釈参照) への寄与を調べることである。ナノフレアは、通常の太陽フレアの 10 億分の 1 程度の極めて小さなフレアだが、太陽コロナの加熱の担い手の有力な候補の 1 つであると考えられている。通常、コロナの温度は数百万度程度だが、ナノフレアが起こると 1000 万度の高温のプラズマが生成されると考えられている。今後、得られたデータを詳細に解析し、1000 万度の高温プラズマが太陽コロナ中に恒常的に存在するかを調べることで、ナノフレアのコロナ加熱への寄与に関する理解が進むと期待される。また FOXSI-3 は、太陽フレアにおける粒子加速の理解を目指した将来の衛星計画 PhoENiX (<https://www.phoenix-project.science/>) に向けた科学的・技術的実証実験でもある。

#### ◇2023 年の打ち上げを目指して FOXSI-4 を計画中

現在、我々は FOXSI の 4 度目の飛翔 (FOXSI-4) を計画している。FOXSI-4 では、観測ロケットをランチャーに設置した状態で待機し、太陽の状態をリアルタイムでモニタ、フレア発生を検知後、直ちにロケットを打ち上げることで、フレアの中期から後期を観測することを目指している。

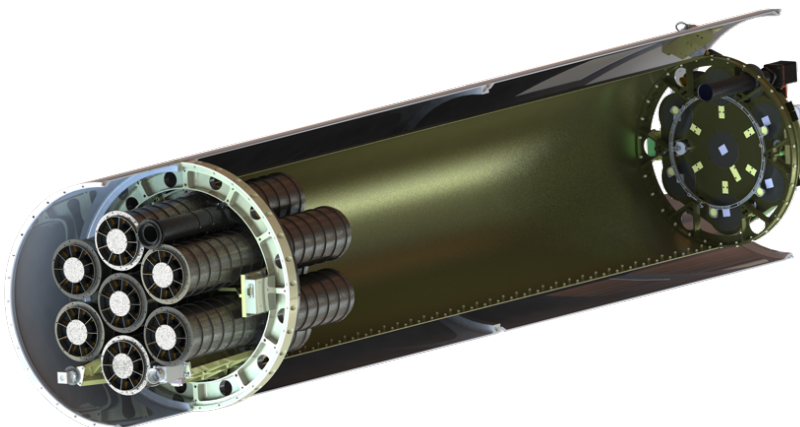


図 4. FOXSI の観測装置。7 本の望遠鏡 (左側) と 7 個の検出器 (右側) から成る。(© FOXSI-3 team)

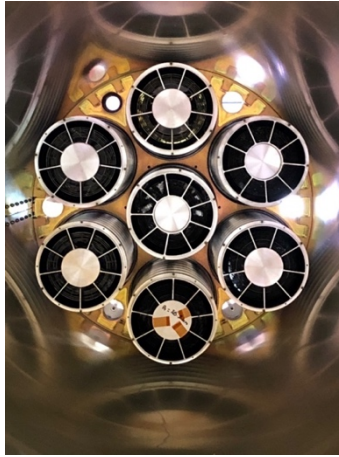


図5. 7本のX線斜入射ミラー。(© FOXSI-3 team)

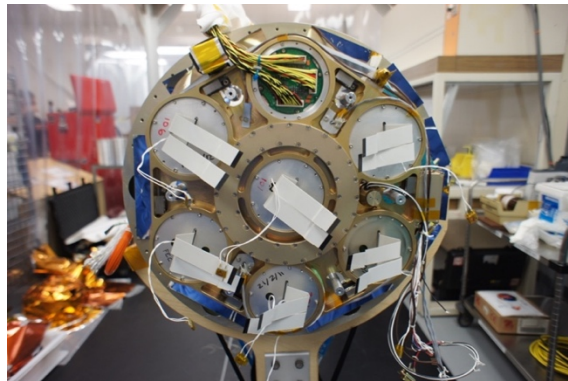


図6. 7個の検出器。1個が軟X線観測用の検出器（12時の位置）で、他の6個が硬X線観測用の検出器。(© FOXSI-3 team)



図7. FOXSI-3 のロゴ。きつね (fox) がマスコット。(© FOXSI-3 team)

## ◇FOXSI-3 に使われた最新技術

FOXSI-3 には、日本で開発した最新技術が使われている。以下にそれらを解説する。

### ◆裏面照射型 CMOS 検出器を用いた高速度軟 X 線カメラ

太陽軟 X 線の光子計測による 2 次元撮像分光観測には、高速連続撮像が可能なカメラが必要になる。太陽コロナで起きているダイナミックな現象は寿命が短いので（数十秒～数分間程度）、1 回の露光と読み出しに 1 秒程度を要する CCD では、スペクトルを作るために必要な数の光子を集めるのに時間がかかりすぎる（数時間程度）。そこで我々は、裏面照射型 CMOS 検出器を用いることで、1 秒間に 250 枚の撮像が可能な高速度 X 線カメラを開発し、FOXSI-3 で世界初となる太陽軟 X 線の撮像と分光の同時観測に挑戦した。



図 8. 軟 X 線観測用の裏面照射型 CMOS 検出器。(© FOXSI-3 team)

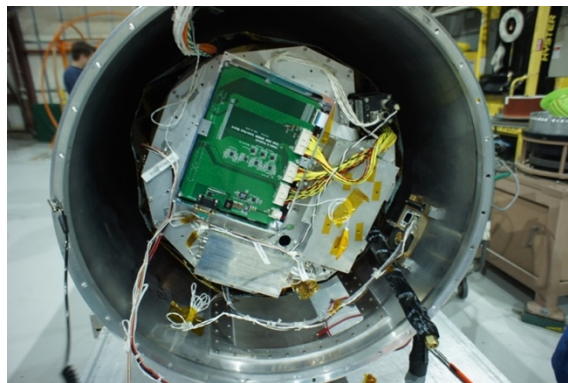


図 9. CMOS 検出器用のカメラエレキ。CMOS 検出器から出てくる 1 秒間に約 160MB という大量のデータを処理、保存する（緑色の基板）。(© FOXSI-3 team)

### ◆硬 X 線観測用の CdTe 検出器

太陽の観測には秒角レベルの空間分解能が必要である。しかし、これまでの硬 X 線観測用の検出器の解像度は受光面で数百  $\mu\text{m}$ （一般的な焦点距離の望遠鏡では数十秒角の空間分解能に相当）もあり、太陽観測には不十分であった。そこで我々は、新たに  $60\ \mu\text{m}$  という世界最高の解像度を実現し、秒角レベルの空間分解能を持つ撮像と、硬 X 線域の分光を同時に達成した。CdTe 検出器は硬 X 線に対する感度が 100%であり、高解像度化により太陽観測に新たな可能性をもたらした。

#### ◆3D 金属プリンターを用いた迷光遮蔽構造体（プレ・コリメータ）

FOXSI で用いる斜入射ミラーは、望遠鏡が向いている場所からの光だけでなく、そこから 18 分角以上離れた場所からの光も検出器に集めてしまう。この不要な光（迷光）を除去するために、18 分角に相当するアスペクト比 1:190（=直径:高さ）の穴を多数持つ迷光遮蔽構造体を製作した。このように高いアスペクト比をもつ構造体を機械加工で製作することは極めて困難であるため、最新の技術である 3D 金属プリンターを用いて開発した。

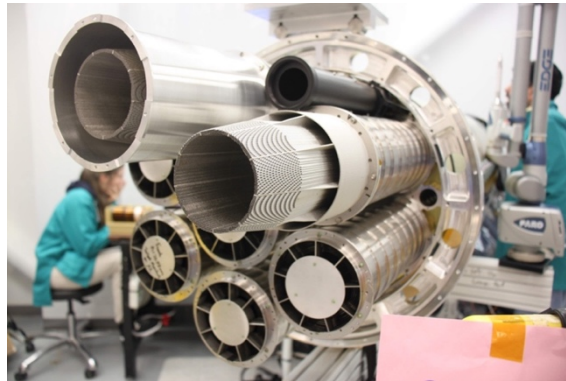


図 10. FOXSI-3 の望遠鏡に搭載された迷光遮蔽構造体（プレ・コリメータ）。(© FOXSI-3 team)

#### ◆軟 X 線用の可視光遮光フィルター

軟 X 線の観測には、太陽からの強烈な可視光を完全に遮光する一方、軟 X 線を十分に透過するフィルターが求められる。可視光を遮光するには金属を使えばよいのだが、厚すぎるとエネルギーの低い軟 X 線では十分に透過できない。つまり、150 ナノメートルという極めて薄い厚みを持つ一方、微小な破れ（穴）もなく、均一な厚みを持つアルミ製のフィルターが求められる。加えて、ロケットの打ち上げの振動でも破れないという課題もクリアしなければならない。我々は、この難易度の高いフィルターの開発に成功し、FOXSI-3 の軟 X 線観測を成功させた。

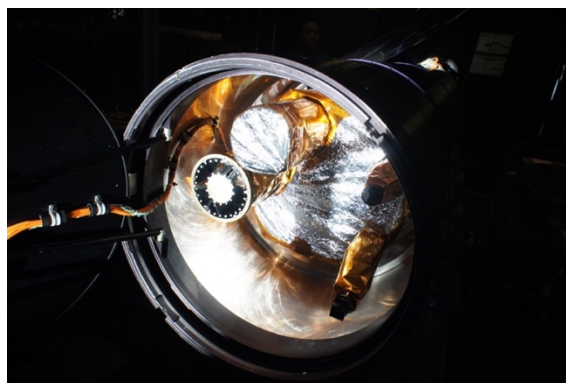


図 11. FOXSI-3 の望遠鏡に搭載された可視光遮光フィルター（9 時の方向）。(© FOXSI-3 team)

### ◇FOXSI-3 の共同研究機関

国立天文台、東京大学 Kavli IPMU、名古屋大学、宇宙航空研究開発機構 (JAXA) 宇宙科学研究所、東京理科大学、ミネソタ大学、カリフォルニア大学バークレー校、アメリカ航空宇宙局 (NASA) ゴダード宇宙飛行センター、アメリカ航空宇宙局 (NASA) マーシャル宇宙飛行センター

### ◇FOXSI についての関連リンク

- ミネソタ大学 (英語) : <http://foxsi.umn.edu/>
- カリフォルニア大学バークレー校 (英語) : <http://foxsi.ssl.berkeley.edu/>
- NASA (英語) : <https://www.nasa.gov/feature/goddard/2018/nasa-funded-rocket-to-view-sun-with-x-ray-vision>
- FOXSI-3 twitter (英語) : <https://twitter.com/foxsirocket3>
- FOXSI-3 の web リリース (日本語) :
  - <https://hinode.nao.ac.jp/news/topics/foxsi-3/>
  - <https://hinode.nao.ac.jp/news/topics/foxsi-3-data-release-jp-20190115/>他
- FOXSI-2 の成果 (日本語) : <http://www.isas.jaxa.jp/topics/001146.html>

### ◇謝辞

本研究は、JSPS 科研費 JP18H03724 (基盤研究(A)、研究代表者: 成影典之), JP17H04832 (若手研究(A)、研究代表者: 石川真之介), JP16H02170 (基盤研究(A)、研究代表者: 高橋忠幸), JP16H03966 (基盤研究(B)、研究代表者: 渡辺伸), JP15H03647 (基盤研究(B)、研究代表者: 成影典之), JP24244021 (基盤研究(A)、研究代表者: 高橋忠幸), JP21540251 (基盤研究(C)、研究代表者: 成影典之), JP20244017 (基盤研究(A)、研究代表者: 高橋忠幸) の助成を受けたものです。(助成開始年度で降順に記載)

### ◇注釈

(※) コロナ加熱

太陽表面温度が 6000 度であるのに対し、上空のコロナの温度は数百万度である。太陽のエネルギーは太陽中心部で生み出されているので、中心部から離れたコロナの方が、表面よりも遥かに高温なのは非常に不思議なことである。コロナがどのようにして加熱されているかは、太陽物理学の重要な研究課題の一つである。

以上