

観測ロケット FOXSI-3 が軟 X 線太陽像を新手法で描く ～観測ロケット実験 FOXSI-3 で取得した世界初の太陽コロナ観測データの公開～

国立天文台、名古屋大学、東京大学 Kavli IPMU、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、NASA からなる国際研究チームにより行われた観測ロケット FOXSI-3 が太陽からの軟 X 線を新たな手法で観測しました。光の粒 1 個 1 個のエネルギー、到達時刻、太陽のどの場所から放射されたかを記録したのです。このデータを基にした研究により、太陽コロナについて新たな知見が得られると大いに期待されます。名古屋大学からは、高速 X 線 CMOS カメラの開発に宇宙地球環境研究所 (ISEE) の 石川 真之介 研究員が参加し、太陽からの強烈な可視光を遮断して目的とする X 線のみを透過させる遮光フィルターを理学研究科の三石郁之助教が担当して開発しました。

【ポイント】

- ・ 2018 年 9 月 7 日に行った国際共同太陽 X 線観測ロケット実験 Focusing Optics Solar X-ray Imager の 3 回目の打ち上げ (FOXSI-3) で史上初めて実現した太陽軟 X 線 (0.5 ~5 キロ電子ボルトの帯域) の撮像分光観測のデータを公開した。
- ・ 太陽のほぼ全面に渡り、軟 X 線によりコロナのプラズマの空間分布、時間変化、エネルギースペクトルを調べられるようになった。
- ・ 名古屋大学からは、宇宙地球環境研究所が高速 CMOS カメラの開発を理学研究科が X 線のみ透過させ太陽の強烈な可視光を遮光するフィルターの開発を担当している。

【研究背景と内容】

太陽コロナは、100 万度以上の高温プラズマで満たされ、様々なエネルギー解放現象が起こる非常にダイナミックな世界です。その最たるものが太陽フレア (太陽系最大の爆発現象) で、フレアが起きれば、周辺の温度は数千万度にまで達し、粒子は光速近くまで加速されます。また、フレアによって放出されたプラズマは、時に地球環境に影響を与えます。この様に、太陽コロナの研究は、太陽物理やプラズマ物理という基礎学問

としてだけでなく、地球環境への影響を調査するという点でも極めて重要です。

さて、この様な太陽コロナの物理を理解するために、1980年代から気球や観測ロケット、人工衛星を用い、太陽から放たれる X 線の観測が行われてきました。X 線で観測する理由は、コロナを満たす 100 万度～数千万度のプラズマが X 線を放射しているからです。ただ、X 線の観測は容易ではありません。X 線は地球の大気によって吸収されてしまうため宇宙空間からの観測が必要な上、X 線の観測には通常の鏡やレンズを使うことが出来ないためです。この様な厳しい条件の中、様々な観測装置が発明され、継続して観測が行われてきました。しかし、まだ理想の観測には程遠い状況です。

では、理想のコロナ観測とは何でしょう？それは、プラズマの状態を反映して放たれる X 線を詳細に計測することです。具体的には、場所によって明るさがまちまちである X 線の空間分布を調査し、それらが時間によって変化する様子を追跡し、どの様なエネルギーの X 線がどの程度放たれているかを分析することです。つまり理想の観測とは、「明るい場所も暗い場所もくっきりと見えること（高いコントラストの達成）」と「空間分解能」、「時間分解能」、「エネルギー分解能」の 4 つの要件を同時に満たす観測です。しかし、既存の観測手法では、これらを同時に達成することは出来ませんでした。そこで国立天文台の 成影 典之 助教と、名古屋大学の 石川 真之介 研究員は、東京大学 Kavli IPMU や宇宙航空研究開発機構 (JAXA) 宇宙科学研究所の研究者らと共同で、軟 X 線用の高速度カメラを開発、日米共同・太陽観測ロケット実験 FOXSI-3 に搭載し、前述した 4 つの要件を満たす観測を世界で初めて実現させました。FOXSI-3 の打ち上げから回収までの様子は、以下の動画を御覧ください。(※FOXSI-3 は、米国・ホワイトサンズに於いて 2018 年 9 月 7 日 (現地時間) に打ち上げられました。観測装置の詳細は <https://hinode.nao.ac.jp/news/topics/foxsi-3/> を御覧ください。)

今回は、FOXSI-3 で取得した世界初のデータを公開します (図 1、図 2)。このデータを取得した手法ですが、新たに開発した「裏面照射型 CMOS 検出器を用いた高速度カメラ」(図 3)によって、太陽からの X 線光子 1 個 1 個を高速に検出・測定しました。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 線光子を検出しました。図 1(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 個が作った信号です。この信号の強度は、X 線光子が持つエネルギーに比例しますので、個々の X 線が持つ「エネルギー情報」が得られます。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ます (「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ます (「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様に研究を行うかは研究者の腕次第です。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ます (図 1(b)と図 2)。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ます。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出来ます (図 1(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できます(図 1(d))。図 1 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ましたが、FOXSI-3 は太陽全面を観測しており(図 2)、太陽の全ての場所で同様のことが行なえます。

今回、太陽全面にわたってコントラストの高い画像(「明るい場所も暗い場所もくっきり見える」画像)が撮れています(図 2)、これは特殊な X 線用の鏡(NASA マーシャル宇宙飛行センターが開発した斜入射ミラー)を使って光を集め、それを検出器で撮影したおかげであり、この点も重要です(図 3)。今回の観測手法は、「集光撮像分光観測」と呼びます。鏡を使って光を集め(集光)、太陽の画像を撮る(撮像)と同時に、光をエネルギー毎に分けて(分光)観測するからです。これによって、先述の 4 つの観測要件、全てを同時に合わせ持つ観測を世界で初めて実現しました。太陽軟 X 線の集光撮像分光観測は、今回の FOXSI-3 が世界初であり、現在、今回公開したデータを使った解析が行われています。この解析から得られる科学成果については、続報をお待ちください。

[動画へのリンク]

FOXSI-3 の打ち上げから回収までの様子：<https://youtu.be/kTml3Rso8S4>

[FOXSI-3 チームメンバー] (図 4)

成影 典之(国立天文台)、石川 真之介(名古屋大学)、高橋 忠幸、古川 健人(東京大学 Kavli IPMU)、渡辺 伸(ISAS/JAXA)、萩野 浩一(東京理科大学)、三石 郁之(名古屋大学)、L. Glesener、P. S. Athiray、S. Musset、J. Vievering、L. Davis(ミネソタ大学)、S. Courtade、J. C. Buitrago-Casas、G. Dalton、P. Turin、Z. Turin(カリフォルニア大学バークレー校)、D. Ryan、S. Christe(NASA ゴダード宇宙飛行センター)、S. Bongiorno、B. Ramsey(NASA マーシャル宇宙飛行センター)、S. Krucker(カリフォルニア大学バークレー校)

[FOXSI-3 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]

- FOXSI-3 打ち上げ成功の web リリース：<https://hinode.nao.ac.jp/news/topics/foxsi-3/>
- 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-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）。また、観測ロケット実験 FOXSI-3 は NASA LCAS grant NNX16AL60G の助成を受けたものです。

図 1： 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 1σ 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）

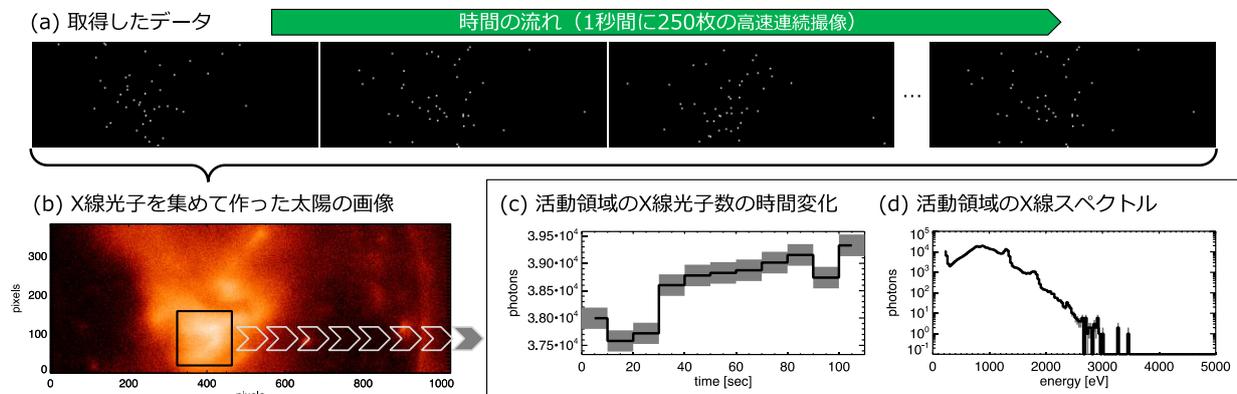


図 2： 観測中に検出した軟 X 線光子全てを使って作った太陽コロナ全面画像
点描の様に太陽の画が描ける(© FOXSI-3 team)

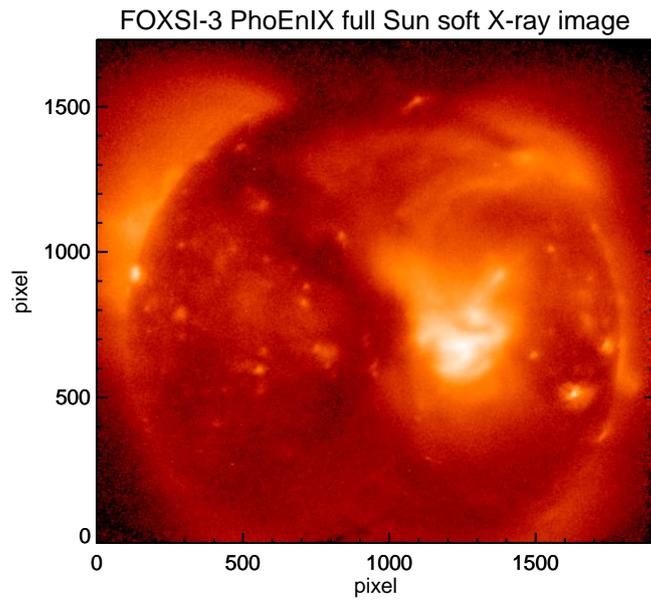


図 3： FOXSI-3 の軟 X 線観測装置

詳細は <https://hinode.nao.ac.jp/news/topics/foxsi-3/> をご覧ください(© FOXSI-3 team)



図 4 : FOXSI-3 が搭載された観測ロケットと FOXSI-3 チーム(© NASA, FOXSI-3 team)

