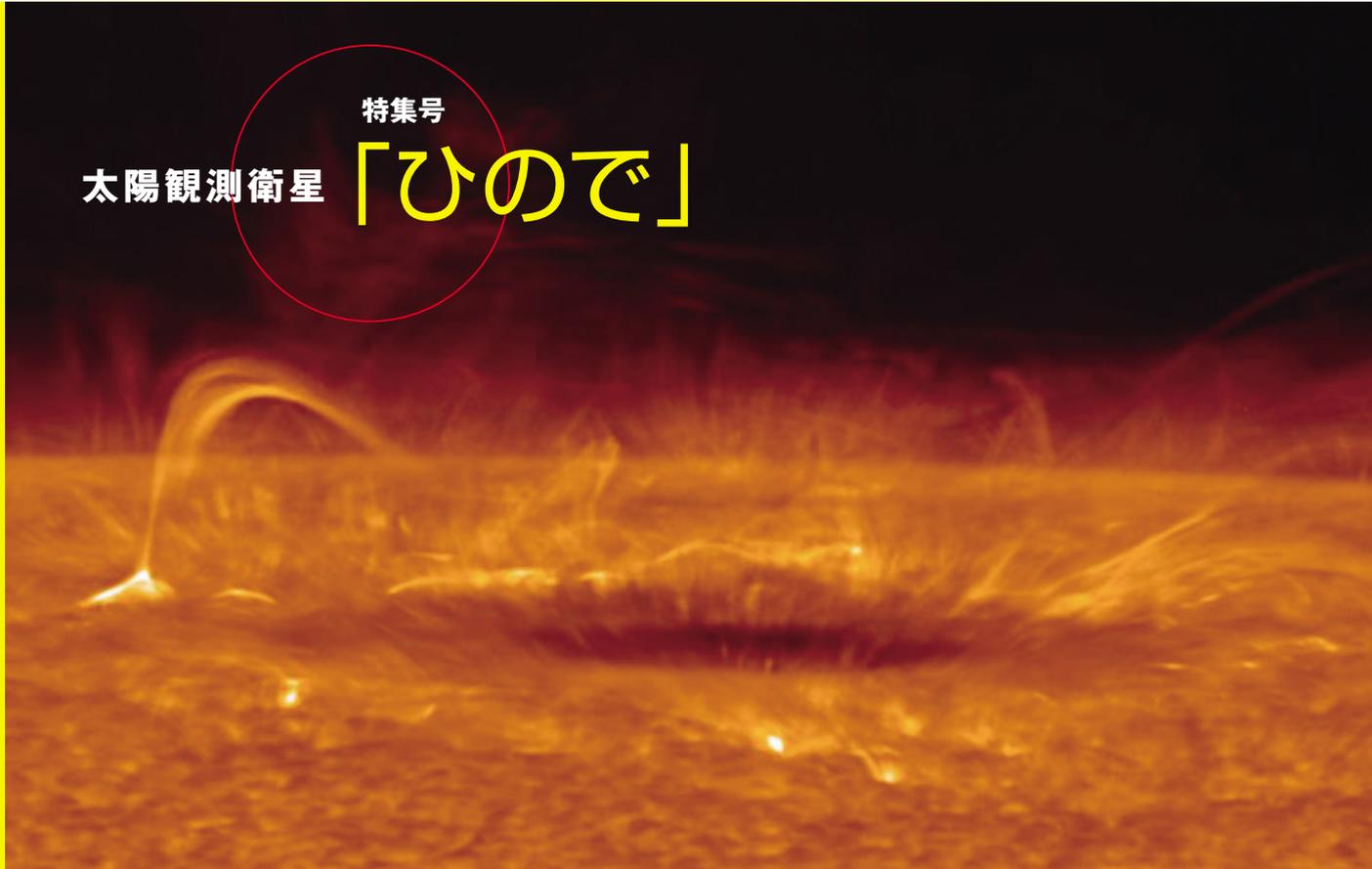


特集号
太陽観測衛星 「ひので」



太陽観測衛星「ひので」の可視光磁場望遠鏡がとらえた黒点周囲の噴出現象

はじめに

常田佐久 国立天文台 ひので科学プロジェクト 室長

2006年9月23日に打ち上げられた太陽観測衛星「ひので」(SOLAR-B)は、「ひのとり」「ようこう」に続く太陽観測シリーズ3機目の衛星です。

「ひので」には、3つの最先端の観測装置が搭載されています。可視光磁場望遠鏡(Solar Optical Telescope:SOT)は口径が50cmあり、波長3800~6700Åを角分解能0.2~0.3秒角(もし地上を観測すると50cmの解像度に当たる)で観測します。画像安定化装置の安定度は、0.01秒角を上回ります。これまで軌道上に打ち上げられた望遠鏡としては格段に解像度が高く、「太陽版ハッブル望遠鏡」ともいわれています。光球や彩層の画像や偏光を利用してベクトル磁場の高精度画像を取得しますが、衛星からのベクトル磁場の観測も史上初めてのことで、X線望遠鏡(X-Ray Telescope:XRT)は、100万度から数千万度のコロナやフレア(太陽面の大規模な爆発現象)のX線画像を取得します。観測開始以来、「ようこう」よりはるかに鮮明な画像によっていくつもの新発見をしています。さらに、極端紫外線撮像分光装置(EUV Imaging

Spectrometer:EIS)は、コロナの10万度から1000万度のプラズマが運動すると輝線がドップラー効果を受けることを利用して、プラズマの動きや乱流のマップを得ることができます。ESAのSOHO衛星に搭載された類似装置の約10倍の感度と4倍の解像度をもつ、優れた観測装置です。

3台の望遠鏡の性能は予想以上であり、これらの観測装置から送られてくる刻々と変化する太陽のムービー画像、特に大気のかげを逃れた可視光画像は素晴らしいものです。これまでに多くの発見がなされており、そのキーワードを並べると、アルヴェーン波、太陽風の起源、対流崩壊、水平磁場と局所ダイナモ、マイクロジェット、磁気リコネクション、磁気乱流、極域の強磁場などで、その影響は天体電磁流体力学のほぼ全域に及んでいます。この「ひので」特集号で紹介するのはそのほんの一部で、データ解析は始まったばかりです。この素晴らしい衛星の開発と打上げに貢献されたすべての関係者に深く謝意を表します。今後の「ひので」の成果にご期待下さい。(つねた・さく)

太陽観測衛星「ひので」

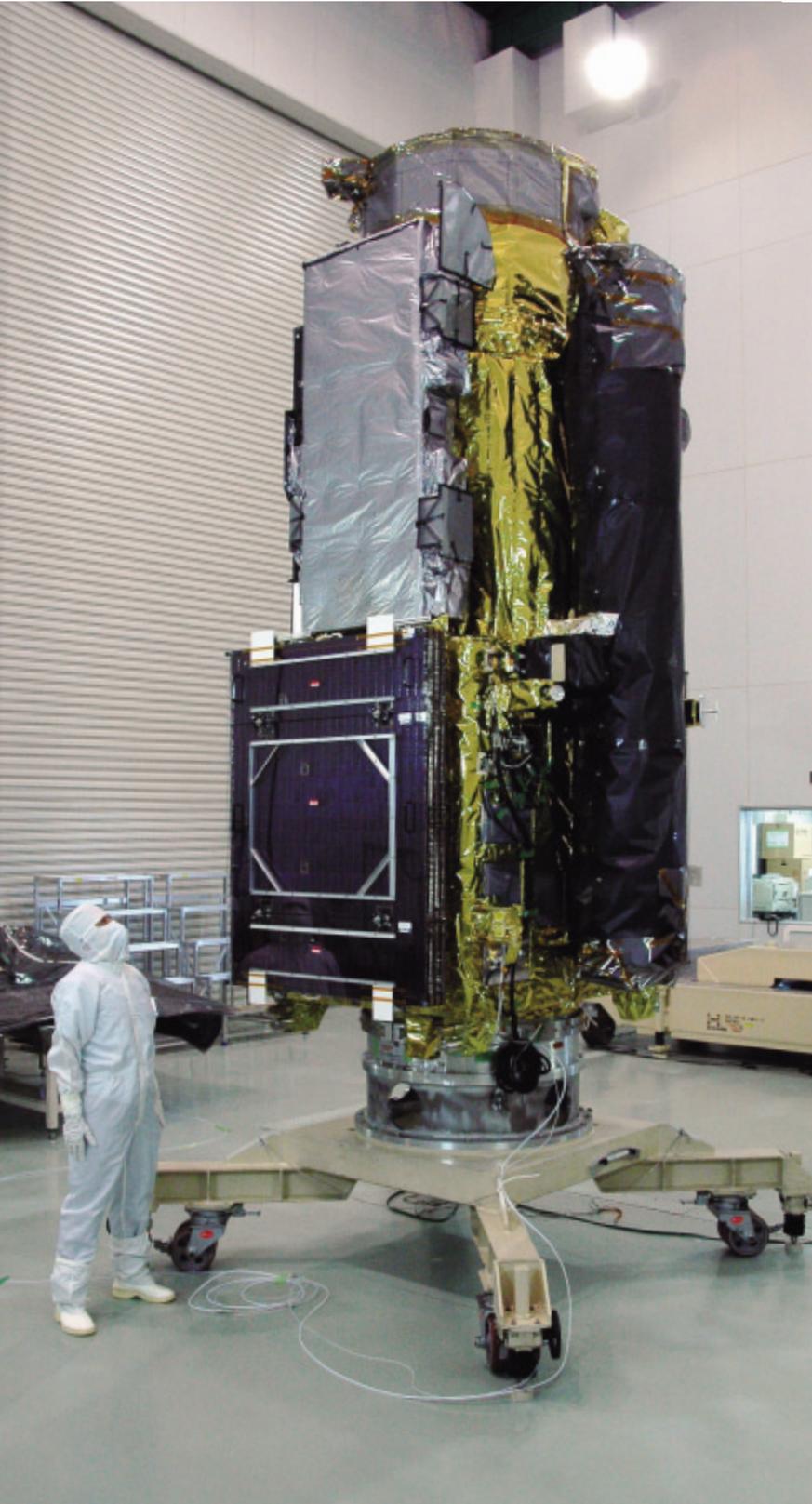


図1 太陽観測衛星「ひので」

最新鋭の望遠鏡を搭載した「ひので」

「ひので」(図1)は、太陽表面で起きるさまざまな磁気活動現象を詳細に観測し、太陽大気で起きる物理プロセスの理解を目指している。これは、宇宙に広く存在するプラズマと磁力線が引き起こす物理素過程を、私たちに最も近い恒星である「太陽」という「宇宙プラズマ実験室」を用いて解明しようというものである。とりわけ、以下の重要な研究課題について、私たちの理解を大きく進展させるものと期待されている。

- (1) 光球面の磁場的な活動と、それに対応するコロナ活動との関係を詳細に調べることで、光球=コロナを一つのシステムとした太陽大気中の電磁流体的諸現象を総合的に理解する。
- (2) 6000度の光球面の上空に100万度以上のコロナが定常的に存在する、いわゆる「コロナ加熱問題」の謎を探る。
- (3) 磁気リコネクション(磁場のつながりかえ)に代表される、プラズマ諸現象の詳細な物理過程を明らかにする。

さらには、太陽活動が地球周辺の宇宙空間や地球磁気圏にどのような影響を及ぼしているのかをシステムとして理解しようという試み、いわゆる「宇宙天気」研究においても、発生源側の観測的研究により「ひので」は大きな貢献を果たすと期待されている。

「はじめに」で述べられているように、これらの諸問題に観測的に取り組むために、いまだかつて実現されなかったことがない観測を可能とする最新鋭の望遠鏡が「ひので」に搭載された(図2)。可視光磁場望遠鏡(Solar Optical Telescope : SOT)、X線望遠鏡(X-Ray Telescope : XRT)、および極端紫外線撮像分光装置(EUV Imaging Spectrometer : EIS)である。各望遠鏡は、日本・米国・英国間の国際協力で開発された。日本は、高精度3軸姿勢制御を備え、熱構造変形を最少に抑えた衛星本体の他に、技術的に最も難しい可視光望遠鏡の望遠鏡部や可動鏡制御部、X線望遠鏡の力

メラ部、観測制御やデータ処理を行う部分などを他国にはない先端技術を駆使して製作し、また最終的に各望遠鏡を取り付けた衛星全体をシステムとして完成させた。もちろん、軌道に予定通りに衛星を運んでくれたM-Vロケットの打上げも日本の役割である。

これらの結果として関係者の想像を大きく超えた素晴らしい科学データ(図3)が取得され、この「ひので」特集号で紹介する話題をはじめとしたさまざまな観測成果が学術論文として発表され始めている。

軌道上太陽観測天文台「ひので」

「ひので」は現在、世界中の研究者に開かれた軌道上の太陽観測天文台として運用されている。2007年5月に、全観測データが観測後すぐ世界に公開されるようになってからは、開発に関与しなかった多くの国々でも「ひので」データへの関心が高まり、世界中でデータ解析が始まっている。同時に、新しい観測を可能とする「ひので」の望遠鏡を使った観測提案が、世界中から随時舞い込んでくる。一時は「ひので」チーム提案の観測テーマの実施時間を圧迫するほどの提案があったこともある。

各望遠鏡が行う観測の計画立案は、望遠鏡開発に参加した日米英の研究機関の研究者などが参加して、JAXA相模原キャンパスにおいて行われている。各望遠鏡の観測計画立案作業のために入れ代わり立ち代わり海外研究者が相模原を訪問している他、現在3名の研究者が宇宙研に長期駐在して衛星運用や研究活動を進めている。日曜日を除いて毎日開催される運用会議(図4)において、太陽面の活動状況や観測提案の実施スケジュールに基づき、観測目標や観測運用内容の調整が行われる。海外研究者も参加する運用会議で使われる言語は、もちろん英語である。今までの科学衛星にはなかったほど国際色豊かに衛星運用が行われている。(しみず・としふみ)

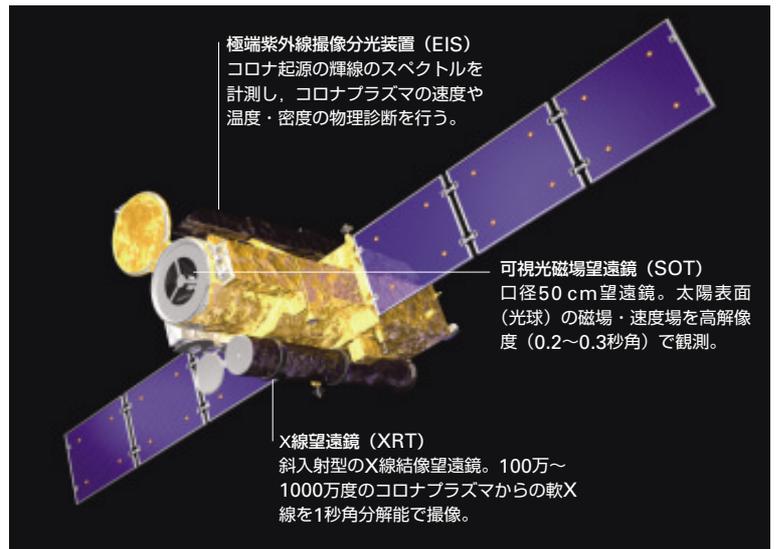


図2 「ひので」に搭載された観測望遠鏡

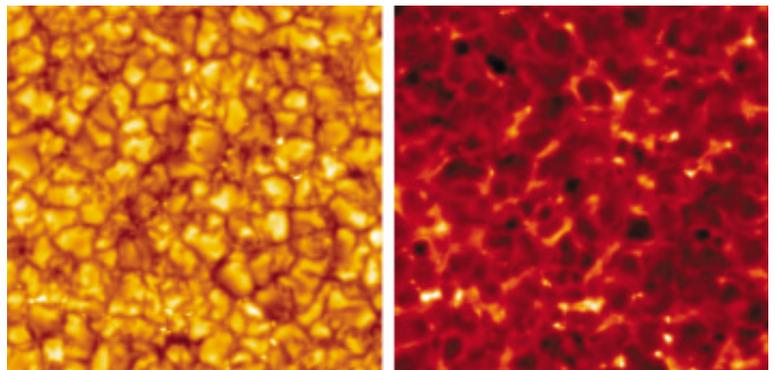


図3 可視光磁場望遠鏡の高解像度観測でとらえた太陽表面の微細構造



図4 毎日行われる観測計画の調整のための運用会議の様子

可視光磁場望遠鏡が とらえた黒点の微細構造

一本 潔

国立天文台
ひので科学プロジェクト 准教授

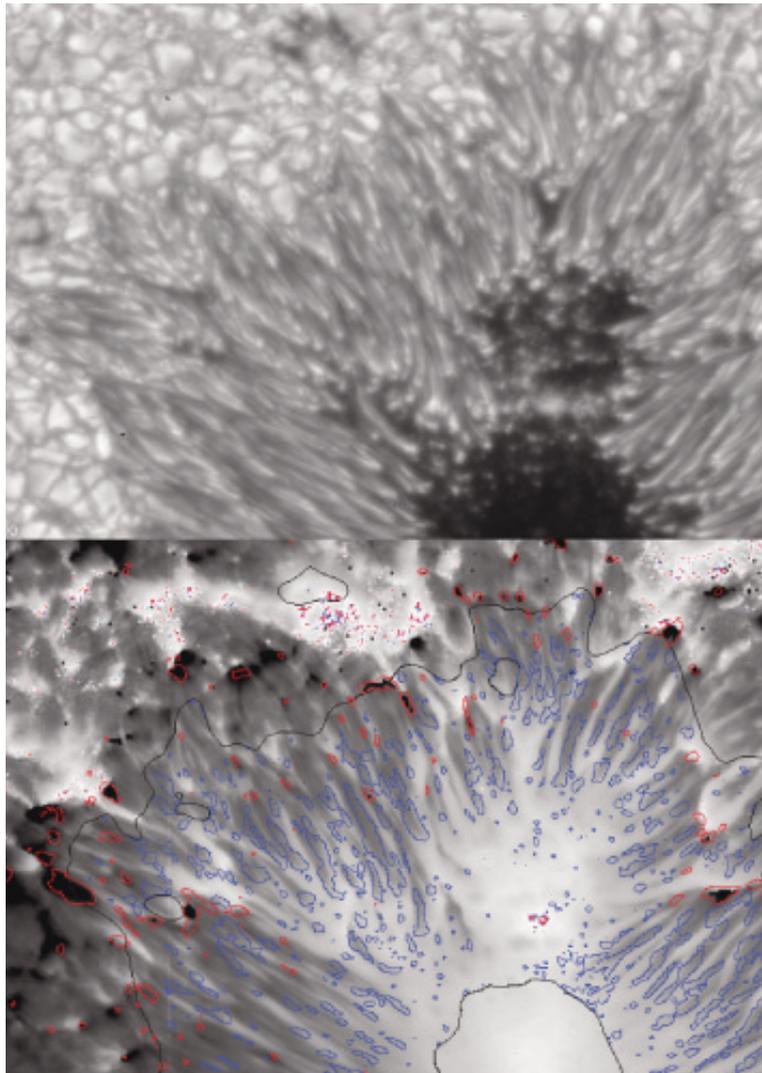


図5 エバーシェッド流の微細構造
上は連続光画像、下は磁場の傾き分布の上に視線方向速度の等高線を重ねたもの。青がガスの上昇運動、赤が下降運動を示す。比較的水平的な磁場の半暗部フィラメントに沿って、上下運動が並んでいるのが分かる。

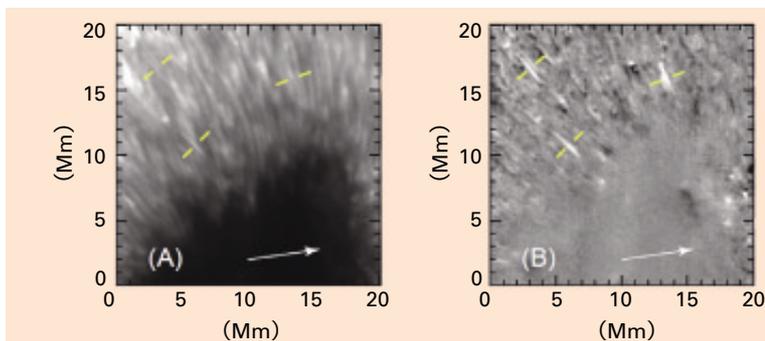


図6 黒点半暗部の彩層に発見された微細ジェット現象
左はカルシウム線のフィルターによる画像、右は平均画像を引いてコントラストを強調したもの。1 Mm=1000 km。

太陽黒点には、強い磁場とカップルしたプラズマの複雑で興味深い現象を見ることができる。黒点の暗部を取り囲む半暗部は、明暗の放射状の細い筋（フィラメント）からなっており、そこには顕著な外向きのガスの流れ（エバーシェッド流）が存在することが古くから知られている。この流れが半暗部の微細構造と深くかかわっていることは間違いないが、筋構造の起源や流れの原因はいまだ謎に包まれている。

「ひので」の可視光磁場望遠鏡（SOT）は、明暗の筋が太陽面に対して異なる磁場の傾きをもっていること、エバーシェッド流は内側の明るいフィラメントの先端から出発し、太陽面にほぼ水平的な磁場をもつフィラメントに沿って流れていることを明らかにした。さらに、個々の流れの湧き出しと沈み込みをスペクトルで同定し、エバーシェッド流の構造を初めて空間的に分解した（図5）。高温ガスが内部から強い磁束管とともに上昇し、水平的な磁力線に沿って勢いよく流れ出しているようである。

さらに黒点をカルシウム線のフィルターで撮像すると、半暗部上空の希薄なガスをとらえることができ、そこには頻発する短命な（1分より短い）微細ジェット現象が発見された（図6）。半暗部筋構造の傾きの異なる磁力線が隣り合うところで磁気リコネクションが発生し、エネルギーが解放されていると考えられる。彩層・コロナ加熱に寄与している可能性も高い。

今後、スペクトルの詳細な解析や時間発展のより詳しい観測により、これらの現象に対する理解はさらに深まるものと期待できる。そして、umbral dotsやlight bridgeと呼ばれる黒点内部の明るい微細構造や黒点のまわりを移動する磁気要素の研究も「ひので」のこれまでにない安定した高分解能データにより進行中であり、黒点の3次元的な構造や生成・消滅メカニズムの解明に少しずつ近づいていくことが期待される。

（いちもと・きよし）

可視光磁場望遠鏡で 探る太陽表面下

関井 隆

国立天文台
ひので科学プロジェクト 准教授

「ひので」は可視光・紫外線・X線の3つの波長域による観測で、太陽表面からコロナまでを同時にとらえることができる。では、表面より下の領域、太陽内部を観測することはできるだろうか。一つの方法は、音波を使うことである。

太陽内部の外側、半径にして約3割の部分は対流層であり、そこではプラズマの乱流的対流運動に伴って音波が発生する。太陽の内部では、約3mHzの周波数の音波が飛び交っているのである。

太陽の表面温度は約6000度であるが、表面から内部に向かうにつれて温度は高くなり、音波の伝わる速さ（音速）も上がる。それにより、音波は図7のように屈折する。つまり、音波が表面のある点を出発したとすると、この音波は一定時間の後に表面の別の点まで戻ってくる。このとき、もし太陽表面下に流れがあれば、音波の経路も変わるだろう。

図7 太陽表面の2点間を結ぶ音波の伝播経路
表面下に流れがあれば、伝播距離も伝播時間も影響を受ける。

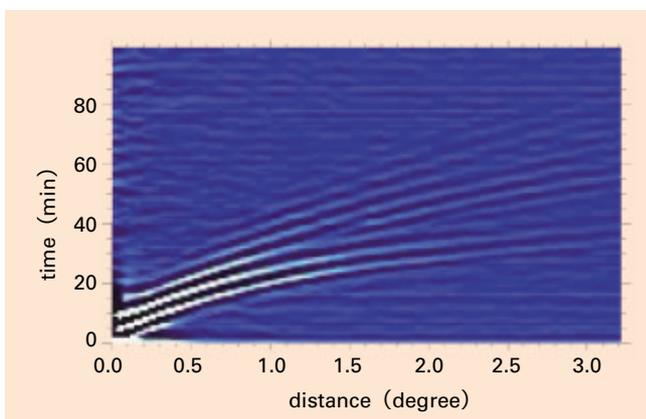
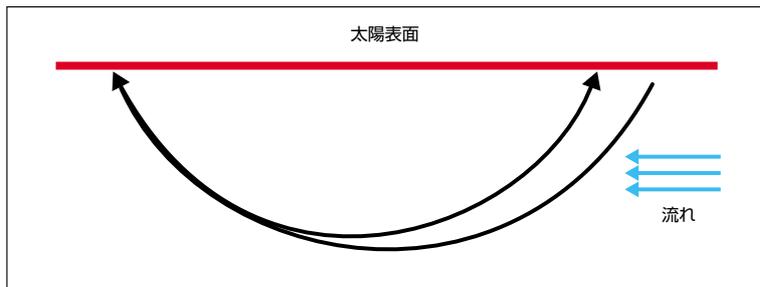


図8 可視光磁場望遠鏡（SOT）のカルシウムH線から算出した相関関数
一定の角距離（横軸）だけ離れた2点間で一定時間（縦軸）をずらした場合の、振動のシグナルの相関の強さを表している（白・黒がそれぞれ正・負の強い相関、青が無相関）。この図ではSOT視野内での平均値が示されている。（Sekii et al. 2007より改変）

だから、表面上の2点間を音波が伝わるのにかかる時間を測れば、表面下の流れの向きや速さも測ることができる。これは「日震学」と呼ばれる研究手法である。

表面上の2点間を音波が伝わる時間を測るには、この2点での波動のシグナルの相関を取ってやればよい。図8は、「ひので」可視光磁場望遠鏡（SOT）のカルシウムH線データを使って計算した、（相互）相関関数と呼ばれるものである。例えば、1度離れた2点間では20分だけ時間をずらすとシグナルがよく似ており（相関が強い）、この2点間を音波が伝わるには約20分を要することが、この図だけでも分かる。ここで示されているのはSOTの視野内の平均であるが、実際の解析には、もっと局所的な相関を取る。

最後に、「インバージョン」と呼ばれる手法を使って太陽内部におけるプラズマの流れの速度分布を求めたのが、図9である。ここでは深さ1000~2000kmの領域における平均的な水平方向の流速だけを掲げる。数万kmのスケールのパターンは、表面で見られる超粒状斑のパターンとよく一致しており、もっと深い領域でのインバージョンと合わせて、超粒状斑のパターンが深さ数千kmまではほぼ表面と変わらないことを示している。

（せきい・たかし）

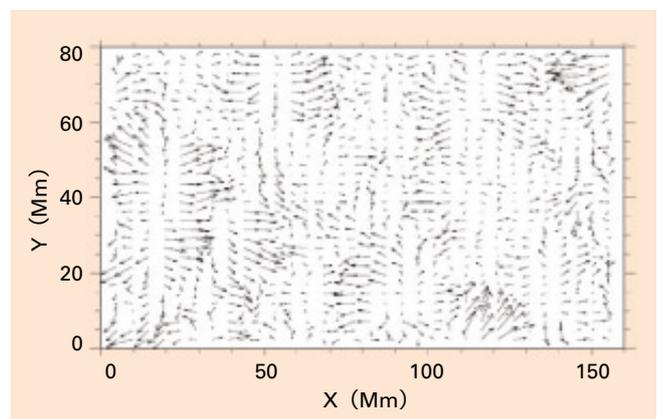


図9 カルシウムH線データのインバージョンから求めた深さ1000~2000km（1~2Mm）での水平方向の流れの様子
最も長い矢印が0.52 km/sの速さに相当する。（Sekii et al. 2007より改変）

ユビキタス・リコネクションの 証拠としての彩層アネモネ型 ジェットの見つけ

柴田一成

京都大学大学院理学研究科
附属天文台 台長

2006年、太陽観測衛星「ひので」が打ち上げられ、太陽の驚くべき素顔が明らかになってきました。中でも興味深いのは、太陽の「彩層」と呼ばれる層（太陽表面の上空の大気層）が、非常に小さなジェット現象（細長い高速の流れ）に満ちていることが発見されたことです。彩層は、想像されていたよりもずっとダイナミックだったのです。とりわけ、そのような小さなジェット現象のうち、アネモネ型ジェットが多数発見されたのは驚きでした。

アネモネ型ジェットは、今から16年ほど前、我が国が打ち上げた「ようこう」の太陽X線観測により、X線ジェットとしてコロナ中で多数発見されました。ジェットの足元の形が、イソギンチャク(sea-anemone)そっくりなので、その

ように呼ばれます。アネモネ型の形状から、コロナのX線ジェット生成機構が「磁気リコネクション」と呼ばれるメカニズムであることが判明しました。今回発見された彩層のアネモネ型ジェットは、コロナのアネモネ型ジェットの数十分の1程度の長さしかなく（2000～5000km）、速度も遅い（10～20km/s）のですが、形がコロナのアネモネ型ジェットとそっくりなのです。このことから、ジェット発生メカニズムは、磁気リコネクションであると考えられます。ジェットは彩層の至る所に存在するので、磁気リコネクションが太陽彩層中で普遍的に起きていることを示唆します。「ユビキタス・リコネクション（普遍的に発生するリコネクション）」が発見された、といってもよいでしょう。

コロナ加熱機構の有力な説の一つに、微小リコネクション（ナノフレア）説があります（パーカー、1988）。今回発見された彩層アネモネ型ジェットのエネルギーはまさにナノフレアのエネルギー程度なので、ユビキタス・リコネクションの発見は、コロナ加熱のナノフレア説をサポートする、ということができます。

磁気リコネクションによって、コロナ加熱のもう一つの有力な説であるアルヴェーン波も生成されます。「ひので」によって観測されたジェットを詳しく調べると、アルヴェーン波の証拠も次々に見つかってきました。したがって、私はひそかに、「ナノフレア説—アルヴェーン波説の統一モデル」を考えています。今後の研究の発展が楽しみです。

(しばた・かずなり)

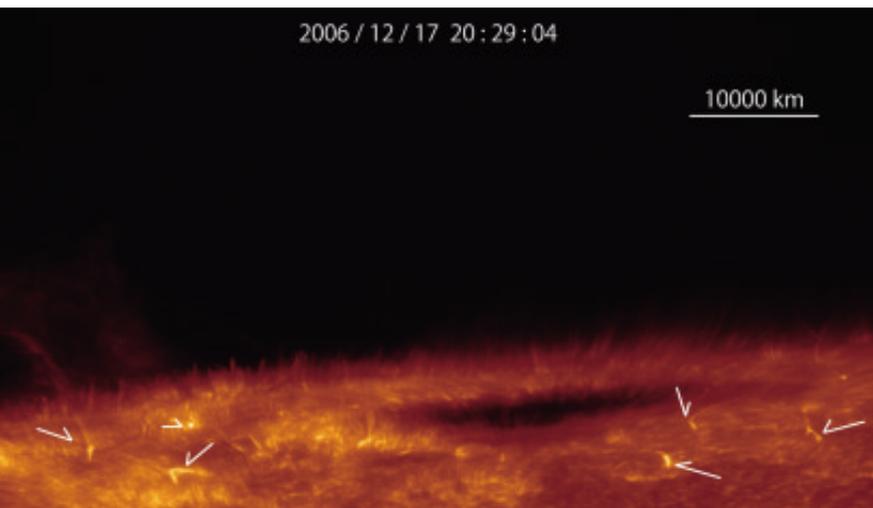
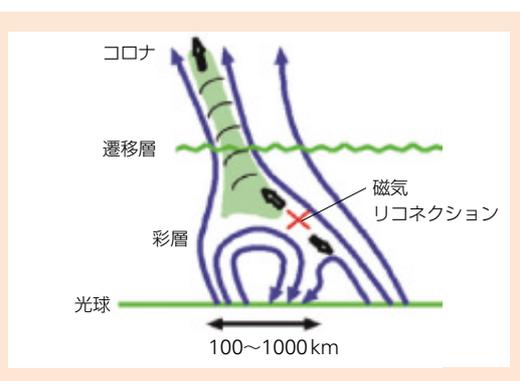
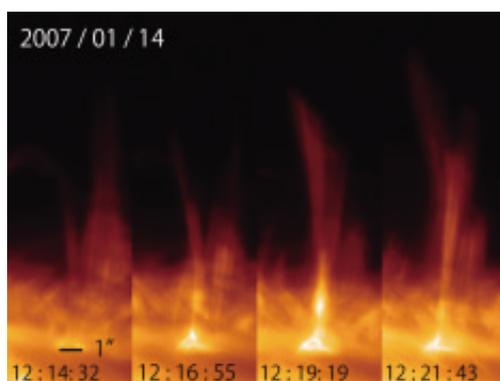


図10 可視光磁場望遠鏡（SOT）で見た彩層の様子
太陽の縁近傍を見ている。黒い楕円の領域は黒点。無数の微小ジェットが見える。その中で、足元が光っているジェットがアネモネ型ジェット（矢印）。2006年12月17日、カルシウムII H線フィルターによる。（Shibata et al. 2007, Science 318, 1591より）

図11 彩層アネモネ型ジェット
左は「ひので」によって発見された彩層アネモネ型ジェット。SOTのカルシウムH線フィルターによる。1秒角=720 km。右は彩層アネモネ型ジェットの発生機構の想像図。Xのところ磁気リコネクションが起きていると考えられる。（Shibata et al. 2007, Science 318, 1591より）



「ひので」が見た 太陽X線ジェット

下条圭美

国立天文台
野辺山太陽電波観測所 助教

「太陽X線ジェット」はその名の通り、「太陽」で起こり「X線」で見ることができる「ジェット」状の噴出現象です。X線で見ることができるということは、ジェットの温度が100万度以上であることを示しており、非常に高温なガスの噴出現象であることが分かります。この太陽X線ジェットは、日本の前・太陽観測衛星「ようこう」に搭載された軟X線望遠鏡で発見された現象です。その長さは平均15万km、最大のものになると30万kmにも達します。また、噴出物の見掛けの速度は平均200 km/sと、東京一大阪間を2秒半で通過してしまうほどの高速です。太陽X線ジェットは、フレアやマイクロフレアなど太陽面上の爆発現象とともに発生します。そのため、太陽X線ジェットの大多数が活動領域で発生し、太陽の北極や南極によく見られるコロナホールと呼ばれる活動度の低い領域では、まれにしか発生しないと考えられていました。

太陽X線ジェットは、「ひので」の打上げ前からその観測対象として考えられていましたが、「ようこう」の結果から活動領域で数多くのジェットが観測されると予想されていました。しかし、「ひので」を太陽の北極に向けたところ、予想外の結果が待ちました。図12は、「ひので」搭載のX線望遠鏡(XRT)で見た太陽の北極です。極のまわりはX線

が暗く、コロナホールになっていることが分かります。この領域を動画で見ると、多く(1時間に10例以上)の太陽X線ジェットが北極のコロナホールで起きているではありませんか。まったく予想外の結果でした。これは、XRTの空間・時間分解能が「ようこう」に比べ格段に向上したことと、「ようこう」より低温のプラズマ(~100万度)まで見るできるようになったために、観測できたものです。

この極域で発生するジェットでは、200 km/sのジェット本体の先に500~1000 km/sの超高速ジェットがあることや、ジェットの内部に波動のような構造(図13)があることが、XRTにより発見されました。500~1000 km/sという速度はコロナ中でのアルヴェーン波の速度に近く、またジェット内部の波動のような構造は、磁力線が曲げられている証拠でもあります。これらの結果により、太陽X線ジェットとともにアルヴェーン波が励起されていることが明白となりました。この太陽X線ジェット起源のアルヴェーン波がコロナホールから吹き出す高速太陽風を加速しているのではないかと、研究が進められています。また、「ひので」搭載の極端紫外線撮像分光装置(EIS)でも太陽X線ジェットが観測され、その分光観測によりジェットの速度構造も明らかになりました(図14)。(しもじょう・ますみ)

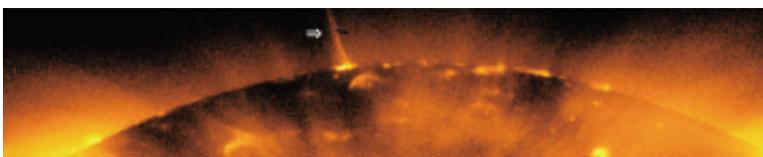


図12 X線望遠鏡(XRT)がとらえた北極のコロナホールで発生した太陽X線ジェット(白い矢印)

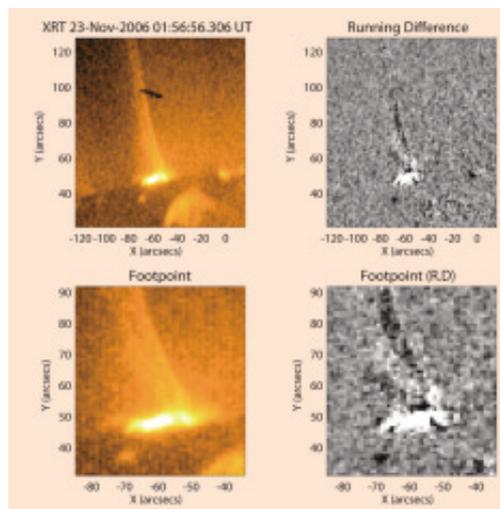


図13 XRTで撮影された太陽X線ジェット

左は通常、右は強度の変化を強調した画像。上段はジェット全体、下段はジェットの足元を拡大した画像。強度の変化を強調すると、ジェットの内部に白黒のパターンが見えている。

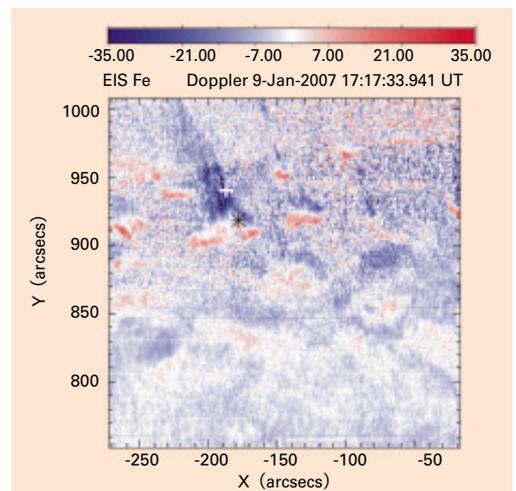


図14 極端紫外線撮像分光装置(EIS)で観測されたジェット(白プラスマーク付近)

画像はドップラー速度の構造を表しており、青が青方偏移、赤が赤方偏移を示している。ジェット本体は30 km/sの視線方向速度をもっていることが分かる。(Kamio et al. 2007)

「ひので」X線望遠鏡による日食観測

鹿野良平

国立天文台
ひので科学プロジェクト 助教

■ 皆既日食で目にする王冠状の神秘的な光は、太陽外層に広がる希薄な大気から届くもので、その大気を我々は「コロナ」(Corona:ラテン語で「王冠」の意)と呼んでいます。このコロナ、実は100万度以上のプラズマできており、X線で明るく輝いています。皆既日食は地上からコロナを観測する絶好の機会ですが、「ひので」搭載のX線望遠鏡(XRT)では、図15のような太陽コロナを常に観測できます。日食現象は、「ひので」でも年に数回観測され、2007年2月17日にも部分日食がありました。太陽の南極のコロナホール(図16aの暗い領域)が月によって^{えんぺい}掩蔽される様子(図16b)が、XRTでも観測され、コロナホールに対する貴重な

データを取得することに成功しました。

XRTにとっては観測対象が月で隠され、一見、邪魔に思える日食現象ですが、その観測が注目される理由の一つに、望遠鏡内の散乱という現象があります。XRTでは、鏡がX線を集めて像をつくっていますが、その鏡面はX線の波長に比べるとどうしても粗いので、できた像の周囲にX線が若干散乱します。コロナホールのような暗い領域を解析するためには、周囲の明るい領域から混入する散乱X線の量を正確に評価することが重要です。そこで、部分日食データが役立ちます。通常のX線画像(図16a)のコロナホールで観測される明るさは、コロナホール自身からのX線と周囲から混入する散乱X線との和ですが、月による掩蔽中の画像(図16b)では、周囲から混入する散乱X線のみです。つまり、両画像の差分が、コロナホール自身から来るX線強度となるわけです。これを温度感度の異なる2種類のX線フィルター画像で行うと、図17のように、暗いコロナ構造に対しても正確な温度マップが求まります。現在、これらの温度構造の検討から、太陽コロナを100万度以上に加熱する機構の解明が進められています。また、コロナホールは、地球環境にも影響を与える太陽風の源泉と考えられていて、太陽風の加速機構の解明の点でも、ここでの研究が注目を集めています。

今後もXRTは、太陽コロナのさまざまな姿をとるとともに、その温度構造を明らかにすることで、「ひので」搭載の他の望遠鏡(可視光磁場望遠鏡、極端紫外撮像分光装置)と連携し、太陽大気の物理現象の解明に貢献していきます。

(かの・りょうへい)

図15 X線望遠鏡(XRT)による太陽コロナ全面像

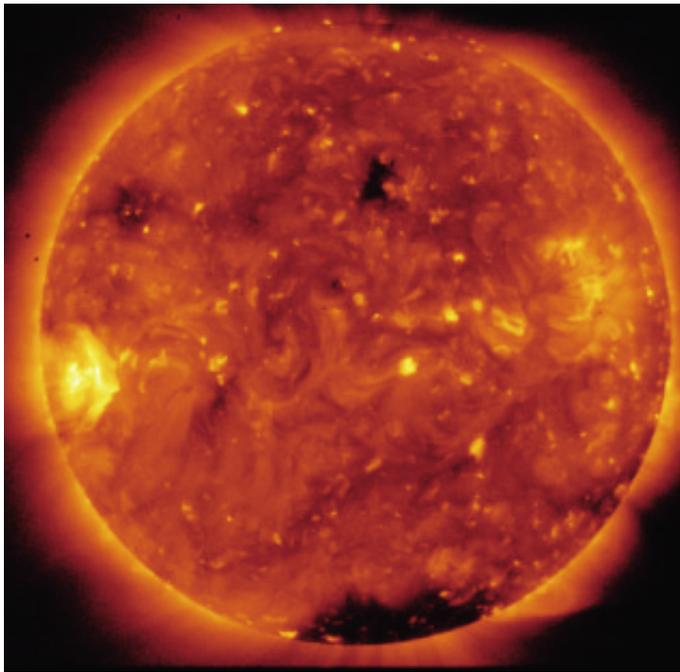


図16 XRTによる2007年2月17日の部分日食の観測 (Kano et al. 2008より)

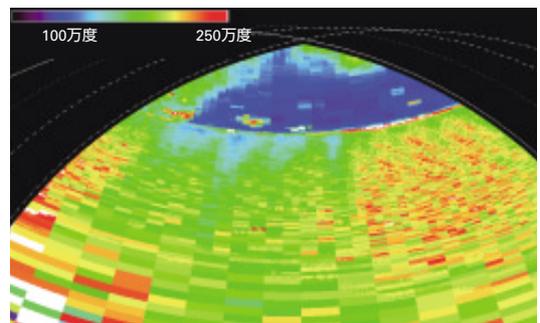
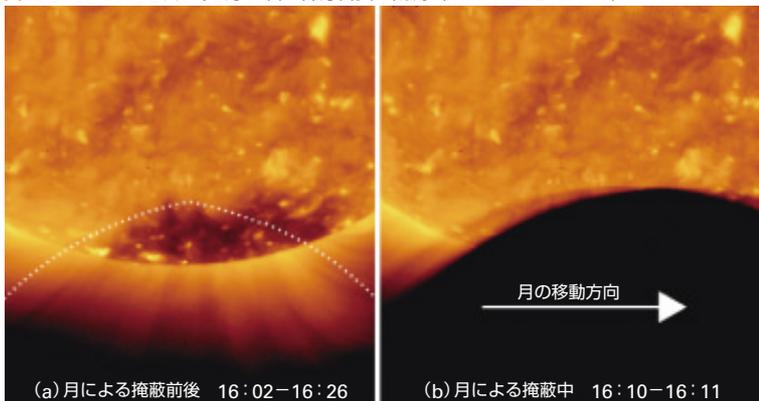


図17 コロナホールとその上空の温度マップ
複数フィルターで掩蔽が観測できた図16aの点線内のみを解析した。(Kano et al. 2008より一部改変)

極端紫外輝線でとらえた 活動領域コロナの温度構造 ～コロナ加熱の理解を目指して～

David H. Brooks

米国海軍研究所・ジョージメイソン大学
アシスタントプロフェッサー
※宇宙科学研究本部に長期駐在

太陽の高層大気である「コロナ」の温度は、表面（光球）よりも200倍以上も高い。この急激な温度上昇をつくり出す物理過程の解明は、宇宙物理学において最も重要な課題の一つである。「ひので」は、コロナの性質をかつてないほど詳細に診断し、温度の謎を解くことを可能にする観測を行っている。

極端紫外線撮像分光装置（EIS）は、狭いスリットで太陽面をスキャンして画像をつくる。その画像の各画素について、コロナの高温ガスを診断するのに有用なスペクトルが取得されている。図18は、EISが取得した活動領域の画像例で、電離状態にあるヘリウム、シリコンと鉄が放射する、異なる波長の輝線の強度マップである。約10万度から200万度まで、非常に広い温度域をカバーし、左から右、そして上から下に行くほど輝線をつくるプラズマ温度は高くなっている。異なる温度で見た活動領域の構造は非常に違っていることが分かる。He II画像ではこの活動領域はかなりコンパクトに見えるが、Si VII画像では長いループが多

数見られ、オリヅランのような形状にも見える。この長いループ構造は、高い温度に行くほど徐々にぼやけてきて、温度が最も高いFe XV画像では構造がぼやっとなる。

観測された活動領域コロナの温度構造を最新の計算モデルによるシミュレーション結果と比較することが、さまざまなコロナ加熱理論からの予測をテストするのに非常に有効な手段となりつつある。現在の計算機シミュレーションでは、各温度で見た画像を再現することができつつあるが、あらゆる温度での画像を再現することはまだ難しい。EISによる観測によってコロナループの基礎的な物理量（長さ、太さ、密度、温度、視線方向速度）が高精度に測定され、その結果は加熱理論の優劣を決めることや、理論を改良するのに重要な役割を果たすだろう。EISの観測によって、太陽コロナを加熱する物理過程を私たち研究者が明確に特定することができるかもしれない。

（ブルックス・デービッド）

（清水敏文 訳）

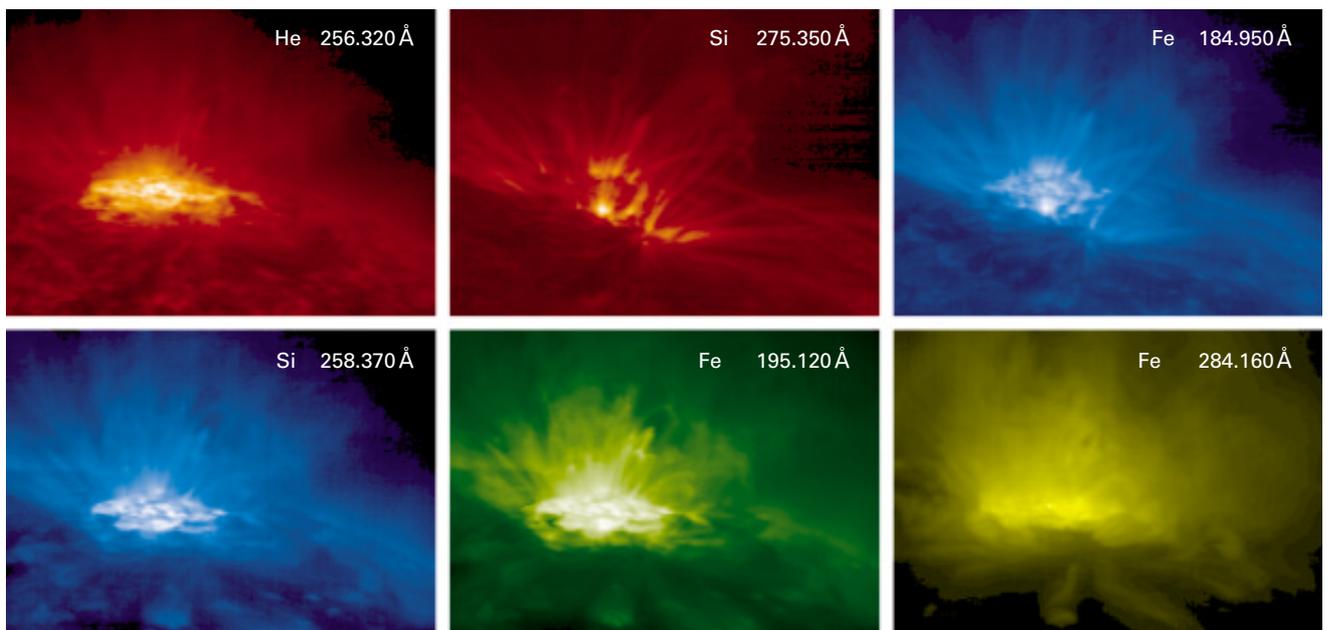


図18 極端紫外線撮像分光装置（EIS）が取得した、電離状態にあるヘリウム（He）、シリコン（Si）と鉄（Fe）が放射する、異なる波長の輝線の強度マップ

約10万度から200万度まで非常に広い温度域をカバーし、左から右、そして上から下に行くほど輝線をつくるプラズマ温度は高い。

極端紫外線 スペクトル診断で分かる 静穏領域のコロナ構造

松崎恵一

JAXA宇宙科学研究本部
宇宙科学情報解析センター 准教授

我々の星である太陽のコロナの研究では、「ループ」という言葉をよく耳にします。このループは磁場に高温のプラズマの粒子が絡み付いたもので、観測されるのはプラズマからの極端紫外線や軟X線輻射です。理科の実験などで、棒磁石のまわりに砂鉄をまき、磁力線がループを描いている様子を観察したことがあるでしょうか？ 太陽コロナのループも、それと同じ磁力線がしんをなしています。

これまで太陽からの極端紫外線や軟X線輻射の観測では、1～数秒角（太陽表面上で700～数千km）の分解能で撮像が可能な装置が活躍してきました。撮像可能な温度は装置ごとに決まっており、およそ100万度、150万度、200万度のプラズマをそれぞれ撮像するものと、それらより高い温度のループをまとめて観測するものがありました。太陽のプラズマは時々刻々変わるため、いろいろな温度のループの様子を同時に知りたい。しかし、従来の装置では、ある温度の撮像をした後に別の温度を撮像するため、観測された構造の違いが時間変化によるのか温度の違いによるのか、推測するほかありませんでした。

「ひので」の極端紫外線撮像分光装置(EIS)は、100万度から数百万度において放射される輝線を、複数同時かつ1秒角の分解能で撮像可能な初めての装置です。同時に複数の輝線を観測できるため、撮像ごとに温度方向にほとんど取りこぼしなく観測できます。図19に、2006年12月23日に観測された静穏領域の画像を示します。それぞれ、40万度、117万度、158万度、209万度、263万度のプラズマに対応します。これらは、電離度の異なる7つの鉄イオン(7, 9～14階電離)が放射する輝線強度を加工して得られたものです。コロナの観測結果で普通、目にするのは、輝線の強度そのものです。その場合、いろいろな温度のプラズマからの輻射の重ね合わせなので、単純には輻射源の様子が分かりません。図19は、観測結果を輻射しているプラズマの量に反した(密度の2乗と体積の積にデコンボリューションした)ものであり、この場合はパネルごとに完全に独立な成分を見えています。

40万度の画像は、10秒角程度のまだら模様が主な構造です。それより高温の画像では繊細なループが主な構造ですが、温度が高くなるにつれて構造が30～100秒角以上と次第に大きくなっていきます。263万度の画像では、活動領域のループのコアの部分だけが見て取れます。117万度のプラズマも209万度のプラズマも、どちらもありふれていますが、繊細なループの向きは異なっています。

図20は、図19の視野の全般に広がる静穏領域のループを模式化したもの、図21は視野の中央より少し上にある活動領域のループを模式化したものです。いずれも、水色、緑、だいだい、赤、紫の順に温度が高くなります。静穏領域ではループの長さが温度を決めるのに支配的なのに対し、活動領域では同じような長さでも温度が異なることが見て取れます。40万度のループとそれ以上の温度のループで見え方が著しく異なっているのは、前者のループが太陽の表面近くにある対流構造のセルの大きさ以下なのに対し、後者がそれを超えるものであり、起源が大きく異なるためです。

このように、「ひので」のEISを用いることで、視線方向に幾重にも重なって見えるプラズマを余すところなく見て取ることができました。

(まつぎき・けいいち)

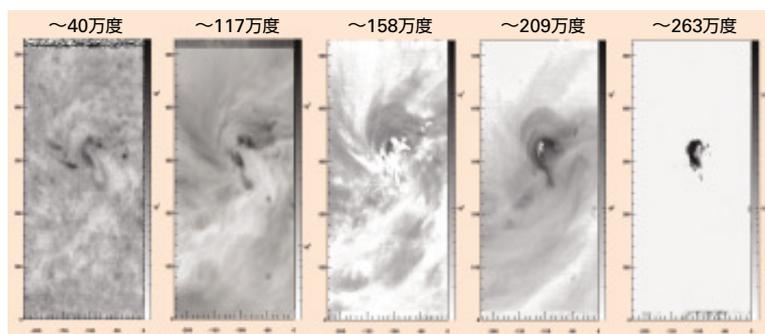


図19 静穏領域の温度構造 極端紫外線撮像分光装置(EIS)の観測から得られた各温度のプラズマ分布。(Matsuzaki et al. 2007より)



図20 静穏領域のループの模式図
(Matsuzaki et al. 2007より)

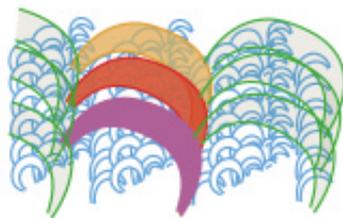


図21 活動領域のループの模式図
(Matsuzaki et al. 2007より)

超巨大フレアを引き起こした 太陽光球面の磁場変化

久保雅仁

米国大気研究所
高高度観測所 研究員

太陽フレアは、太陽面で見られる最も激しい爆発現象です。フレアによってコロナ中のプラズマは数億度まで加熱され、フレアで生じた高エネルギー粒子は地球にも飛来し、人工衛星に障害を与えたりオーロラを発生させたりします。そのような地球環境への影響を予報する「宇宙天気予報」という試みが盛んになってきました。「ひので」では、影響の源である太陽フレアの発生機構を解明することが非常に重要な研究課題になっています。

2006年12月、太陽フレアのうちで最大規模を示すXクラスフレアを4回起こす活発な黒点群が現れました。太陽活動の極小期に当たるこの時期に、巨大なフレアを多数引き起こす黒点群が出現することは、非常にまれです。「ひので」の本格的な科学観測が開始された直後に、このような黒点群が出現したことは幸運でした。ここでは、「ひので」の可視光磁場望遠鏡(SOT)による「顕微鏡観測」で初めてとらえた、フレア領域における微細な光球磁場構造の変化を紹介します。

フレアはコロナ中で起こる磁気リコネクションに起因することが、「ようこう」のX線観測で明らかにされました。蓄積された磁場のエネルギーが、磁気リコネ

ションによって、加熱や粒子の加速に必要な熱・運動エネルギーへと変換されます。多くの場合、巨大フレアは正極と負極が複雑に混じり合った黒点群で起きます。このような黒点群では、磁力線がねじ曲げられ、蓄積される磁気エネルギーが大きくなります。それでは、何がフレアの引き金になるのでしょうか？

図22aに示したように、今回観測された黒点群では北側の負極黒点と南側の正極黒点が衝突して、衝突領域では正負極の境界線(極性反転線)が非常に入り組んでいます。2006年12月13日にXクラスフレアが起きたときの彩層領域の時間発展(図22b)を見ると、2つの黒点間の入り組んだ極性反転線付近で明るいループが現れ、その後2つのフレアリボンへと成長していきます。フレア前後の光球面磁場を比較すると、図22cの丸で示した極性反転線の一部の凹凸がフレア後になくなり、極性反転線が全体的に少し滑らかになりました。さらに、この凹凸のなくなった領域付近で、磁場の方位が90度近く大きく変化しました。

今回とらえたような光球面での局所的な磁場構造の変化が、巨大フレアの引き金になったと考えています。(くぼ・まさひと)

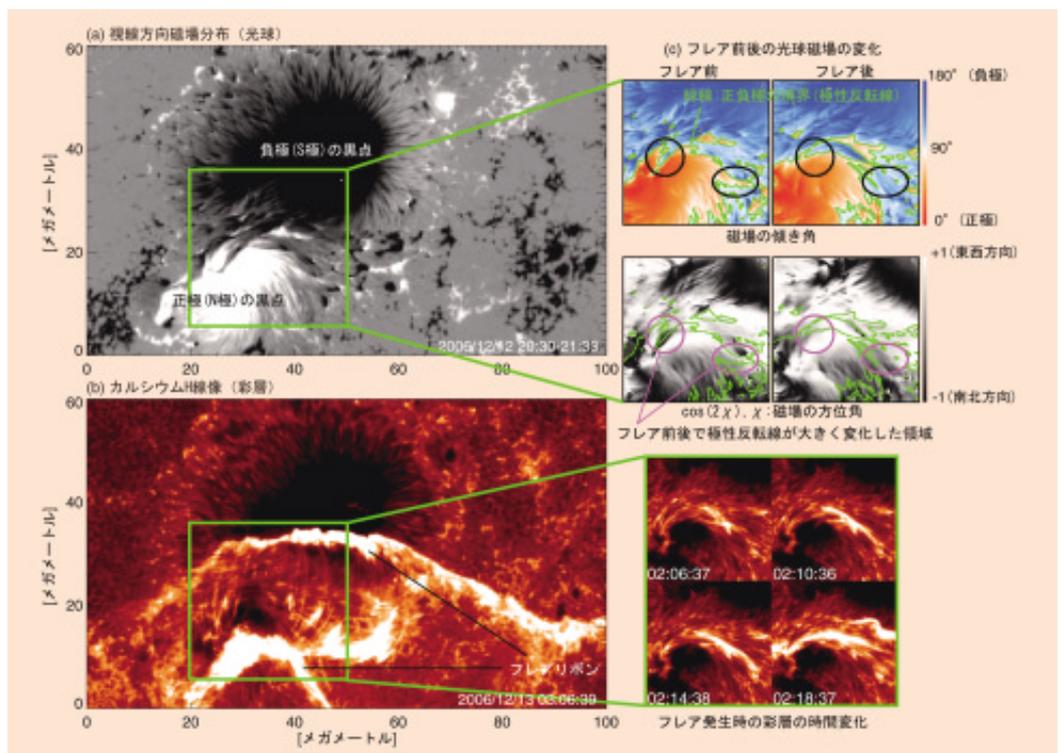


図22 可視光磁場望遠鏡(SOT)で観測した2006年12月13日に起きたXクラスフレア(kubo et.al. 2007より一部改変)

「ひので」データを用いて 太陽フレア機構に迫る

Alphonse Sterling

NASAマーシャル宇宙飛行センター

NASAサイエンティスト

※宇宙科学研究本部に駐在

2006年に打ち上げられた「ひので」より、今まで見たことのない太陽の鮮明なデータと画像が次から次へと研究所の端末に届き、日本のみならず、世界中の太陽研究者から高い評価が集まっている。「ひので」のデータを見ると、太陽はどれほど活発なのか、どれほど美しいのか、という印象をあらためてもつ。

私たち太陽物理学者の目標の一つは、太陽の現象の機構を解明することである。それを攻めるために、「ひので」と他の太陽観測衛星、またはいくつかの地上天文台の観測データを重ねて解析する。さまざまな現象のうち、太陽フレアとそれに伴う爆発的な活動の完全理解は、大きな課題の一つである。太陽表面と表面上空の大気を貫く磁力線がフレアの原因と密接な関係にあることについては、研究者にはよく知られているものの、その具体的な関連は未解決のままである。

太陽フレアの起源を調べるに当たり、最近一部の研究者は、太陽大気によく現れる「フィラメント」と呼ばれる現象に注目している。フィラメントとは、約200万度の熱いコロナに浮かぶ1万度程度の比較的冷たい物質である（図23）。細く長い形をしていて、フィラメントの特徴の一つが、その長い方向は太陽表面にある磁場の極と他極が接する中性線に沿うことである。あ

る程度の大きさの太陽フレアなら、そのフレアの主なエネルギーの解放場所はフィラメントが存在できる磁場中性線にある。その上、フレアが発生すると、まるで同時に中性線に沿ったフィラメントが上昇して宇宙空間に飛び出していく、という展開がよく観測される。

最近一部の研究者が注目している点は、フィラメント上昇の開始はフレアが発生する数分前（場合によっては数時間前）で、そして、その「早期」における上昇は比較的ゆっくりしていることである。フィラメントの存在も上昇も、上に述べた太陽の磁力線によるものである。したがって、フィラメントの上昇もフレアが発生も両方とも、同じ磁力線の振る舞いに基づく現象であると推定できる。ということは、フィラメントの早期上昇は、フレア発生のかきかけとなる機構を示唆しているかもしれない。コロナ中の磁力線を直接観測することはできない。でも、もしフレアが発生する直前のフィラメントの動きを可視光や極端紫外線などで見ることができれば、フレア発生寸前の磁力線の動きを把握することができるはずである。

「ひので」に搭載されている可視光磁場望遠鏡（SOT）は、ふさわしいフィルターを選べば、直接フィラメントを見たり、太陽表面磁場を検出したり、同磁場の時間的変化を追跡したりすることができる。X線望遠鏡（XRT）で見れば、フィラメントの早期における上昇とそれに伴うコロナのかすかな変化を検出することができる。また、極端紫外線撮像分光装置（EIS）を使うと、そのときのコロナプラズマを診断する情報をさらに得ることも可能となる。

2007年3月2日、「ひので」はあるフィラメントの噴出とそれに伴うフレアを観測した。フィラメントそのものはTRACE衛星で最もよくとらえられ、「ひので」はそれに伴う表面の磁場変化と軟X線コロナの振る舞いをよくとらえた。詳細は学術論文（Sterling et al. 2007, PASJ 59, S823）に書かれているが、図24に概要を示した。フレアが明るくなるわずか数分前に撮られたXRTの画像上に、それに近い時間における太陽表面の磁力線を等高線で示した。この1枚の

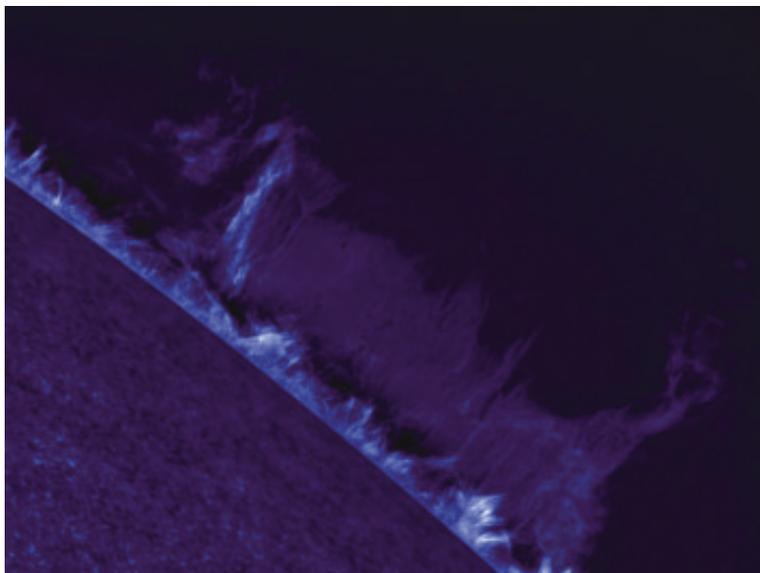


図23 可視光磁場望遠鏡（SOT）がとらえた太陽リム上空のフィラメント（T.Berger）

画像だけでは分かりづらいが、XRTの動画とSOT磁場の動画を見ると分かるのは、異なる磁極領域がちょうどぶつかっている場所で新たに輝くコロナループが形成されていることである。さらに、この磁極同士はフレアが起こる数時間前から互いに向かって移動していることが見て取れる。

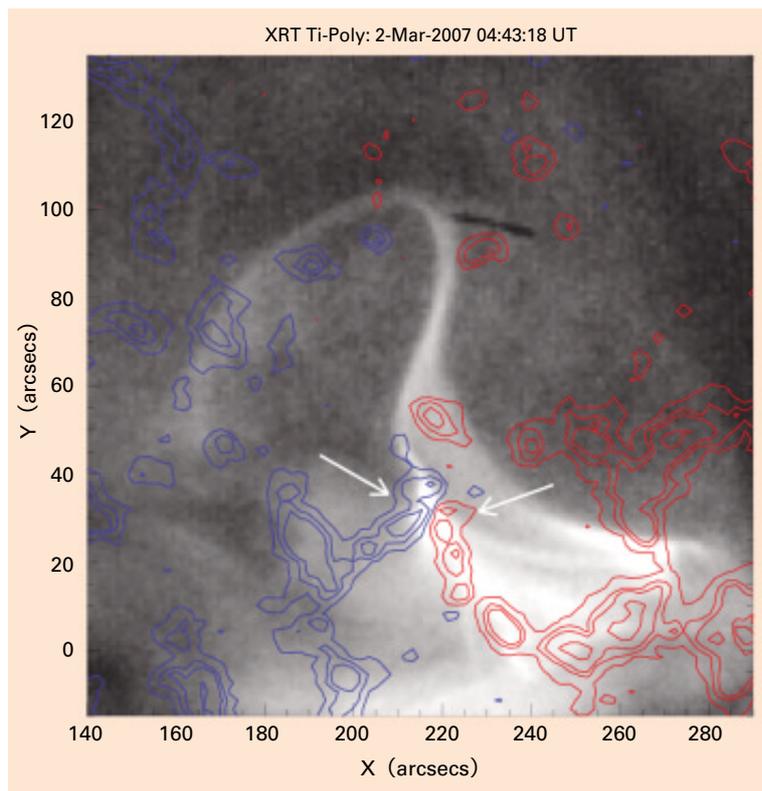


図24 2007年3月2日に発生したフレア

白黒は、フィラメントがゆっくりと上昇中、フレアが明るくなる数分前に撮られた「ひので」X線望遠鏡（XRT）軟X線画像。赤青の等高線は、同時刻に撮られたSOHO衛星のMDI磁場画像。「ひので」のSOTデータと比較すると、赤と青の磁場領域は互いにぶつかっていることが明確である。ちょうどぶつかっている場所（両矢印）で、新しい軟X線ループが形成されつつある。このようなデータが得られると、発生する直前のフレアが起こす磁力線の振る舞いを推測できて、フレアの機構に迫ることができる。（Sterling et al. 2007）

この観測結果に基づいて、次のような推測をしている。太陽の表面上の流れによって逆の極性をもつ磁極が互いに近づき、その結果、コロナ中に磁気リコネクションが起きて、またフィラメントの早期上昇が始まる。そして、コロナ中の余った磁場エネルギーが解放され、そのエネルギーによってフィラメントが飛び出すと、フレアが発生する。この推測を確かめるには、いくつかの同様なイベントを観測するのが不可欠である。

この課題や他のいくつかの太陽の謎を解くため、「ひので」は観測を続けている。今までに解析された「ひので」のデータはほんのわずかだが、その解析結果から「ひので」が太陽物理学に大きな貢献をもたらすだろうことは明確である。（スターリング・アルフォンス）

巨大フレア後に観測された 温度に依存した高速流

～コロナ質量放出（CME）の足元か？～

今田晋亮

国立天文台
ひので科学プロジェクト 研究員

2006年12月13日に起こった巨大フレアを、「ひので」搭載の極端紫外線撮像分光装置（EIS）でとらえることに成功しました。ここでは、そのフレアに付随して起こったと考えられる、温度に依存した高速流について説明します。

EISは、極端紫外線領域において太陽大気（コロナ）の分光観測を行う観測装置です。分光することにより、画像を撮るだけでなくプラ

ズマの視線方向の速度、温度、密度などを診断できることが、この望遠鏡の最大の利点です。図25a～cは、EISによって得られた巨大フレアのHe II、Fe XIVおよびFe XVの輝線で得られた2次元空間マップです。He IIの輝線は低温（約10万度）の、Fe XIVおよびFe XVの画像は高温（約200万度）のプラズマの様子を反映しています。撮像観測では視線方向（太陽表面からの高さ方向）にさまざまな温度のプラズマ

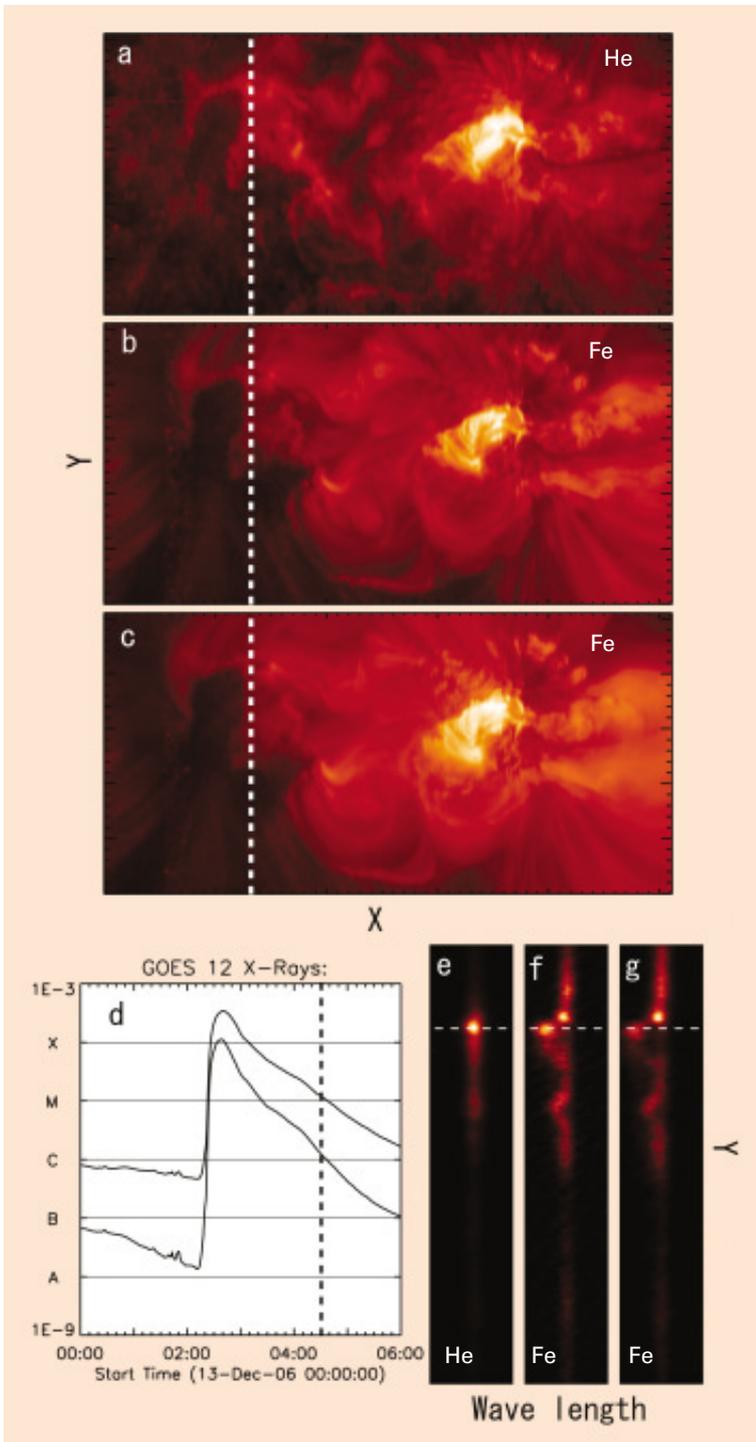


図25 2007年12月13日に起きた巨大フレアの観測
a~cは極端紫外線撮像分光装置（EIS）によって得られた2次元マップ、dはGOES衛星によるX線強度の時間プロファイル、e~gはEISの輝線スペクトル。

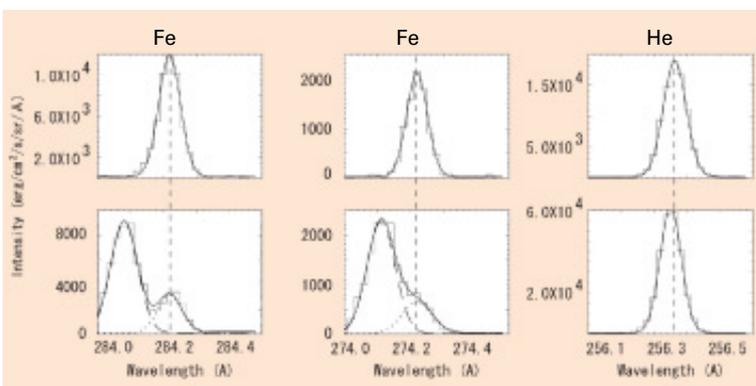


図26 EISの輝線スペクトル 上段は静止、下段はドップラーシフトしたもの。

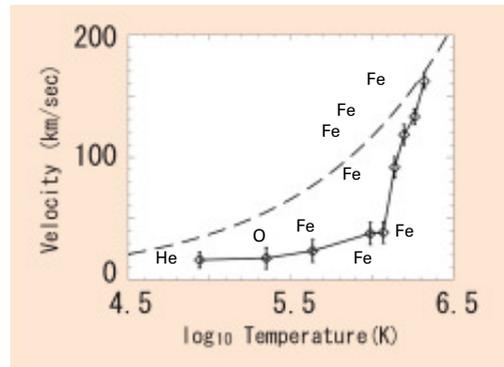


図27 EISによって観測された温度と速度の関係

が重ね合わせられるため、温度の違いは太陽表面からの高さの違いによると考えられています。

それでは、a~cの白点線について詳しく見ることにしましょう。dはGOES衛星によるX線強度の時間プロファイルで、フレアの強度および時間変化を表すものです。黒点線で、a~c白点線を観測していた時間を示してあります。この時間の分光スペクトルを見てみましょう(e~g)。縦軸はスリット方向、横軸は波長、色で光子の数を表しています。ある波長に光子の数が集中していますが、この波長がそれぞれの輝線の典型的な（静止プラズマから発生する）波長だと考えられます。eでは典型的な波長のものしか観測されていないのに対し、fとgでは左（短波長側）にシフトした輝線が観測されています。これは、プラズマが視線方向手前側に運動しているためドップラーシフトしたものと考えられます。

図26下段は、図25e~gの白点線部を見たものです。参考のため、上段には典型的な輝線を載せてあります。確かにFeXVとFeXIVでは短波長側にシフトしていますが、HeIIではシフトしていないことが分かります。この違いは見ているプラズマの温度によるものと考えられ、高温プラズマは高速で運動していて、低温プラズマはほぼ運動していないと考えることができます。

EISでは、この他さまざまな温度に対応する輝線を観測しています。それらを用いて温度と速度の関係を明らかにしたものが図27です。先ほども述べましたが、この温度の違いは太陽表面からの高度によるものです。つまり、この結果は、太陽から外側に加熱されながら加速している現場をとらえたものと考えられます。詳細は省きますが、このフレアではコロナ質量放出（CME）も観測されていて、この領域はCMEの足元に当たるのではないかと考えられています。この結果はCMEの理解に貢献するものと期待され、さらに研究が進められています。

（いまだ・しんすけ）

古くて新しい謎，白色光フレア

磯部洋明

東京大学大学院理学系研究科
地球惑星科学専攻
日本学術振興会特別研究員

太陽フレアは、コロナから出るX線や彩層から出るスペクトル線（水素H α 線、カルシウムH線など）で主に観測されます。特に強いフレアでは可視連続光（白色光）、つまり人間の目で見える光でもフレアに伴う増光が観測されることがあり、「白色光フレア」と呼ばれます。1859年にキャリントンが黒点のスケッチ中に初めて発見し

たフレアも、白色光フレアでした。可視連続光は、彩層の下の「光球」と呼ばれる薄い層から放射されます（図28a）。フレアが起きると、コロナからやって来る高エネルギー粒子により彩層が加熱されますが、光球は密度が高いため、高エネルギー粒子が到達することは難しいと考えられています。何が白色光フレアを光らせているかは、その長い観測の歴史にもかかわらず、太陽フレアの物理で最も分かっていないことの一つです。

図28 白色光フレアの放射メカニズム

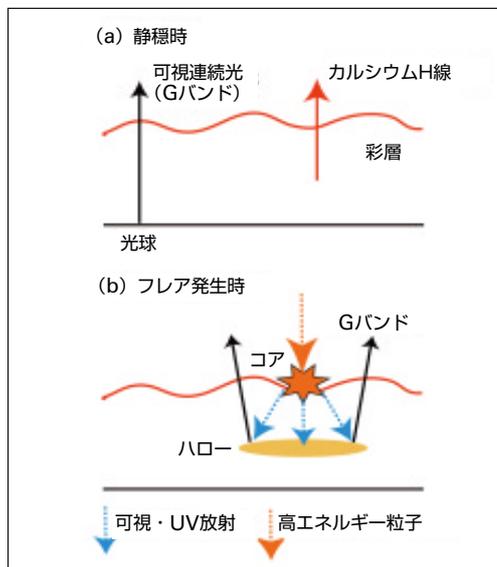


図29 可視光磁場望遠鏡 (SOT) がとらえたXクラスフレア
上はカルシウムH線、下は可視連続光 (Gバンド)。

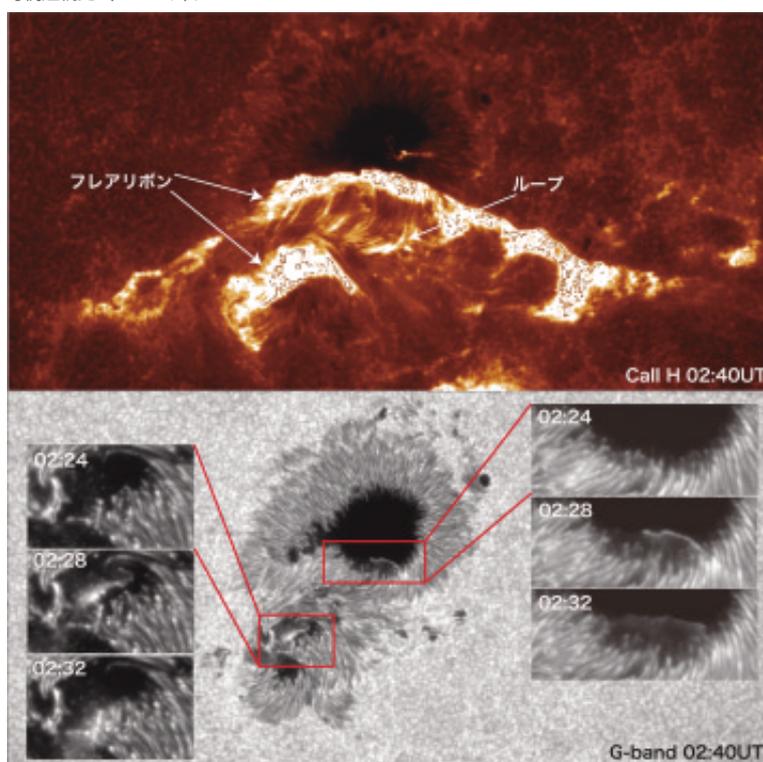
「ひので」可視光磁場望遠鏡 (SOT) は、2006年12月13日に起きたXクラスのフレアをカルシウムH線と可視連続光 (Gバンド) によって、これまでになく高解像度で観測しました。図29はSOTが観測したカルシウムH線 (上) とGバンド (下) の画像です。逆の磁場極性をもつ2つの黒点の間でフレアが起きており、カルシウムH線では明るい帯状の構造 (フレアリボン) が2本と、それらをつなぐループ状の構造が見えています。

注目している白色光フレアは、図29下の赤い四角で囲った部分です。拡大図をよく見ると、フレアに伴う明るい構造には、特に明るい部分 (コア) とその周囲のぼんやりと明るい部分 (ハロー) があることが分かります。またフレア前後の画像を詳細に比較すると、フレア前に光球で見えている構造 (半暗部の筋構造や粒状斑) が、フレア発生中でも見えていることが分かりました。これらのことは、以下のように解釈されます (図28b)。

まず彩層上部で加熱が起こり、そこで圧縮により密度の高い層ができて、可視光や紫外線 (UV) などの強い放射を起こします (コアに相当)。放射のエネルギーが彩層のより下の部分を加熱し、そこから可視連続光が放射されます (ハローに相当)。したがって、白色光フレアは光球が光っているのではなく、彩層中で一時的に光球のような高密度の状態が形成されるためであると考えられます。

SOTによるこれらの微細構造の観測は、白色光フレアの増光メカニズムに新たな知見をもたらしました。今後は観測例をさらに増やすとともに、下層大気の輻射輸送を考慮した理論モデルとの比較が重要な研究テーマとなります。

(いそべ・ひろあき)



「ひので」がとらえた 太陽フレアに伴う衝撃波

成影典之

JAXA宇宙科学研究本部
宇宙航空プロジェクト研究員

太陽フレアは、太陽系で最大の爆発現象です（解放されるエネルギーは 10^{29} ~ 10^{32} erg）。そのフレアの中でも最大級に分類されるXクラスのフレアが、2006年12月13日に発生しました。このフレアは、「ひので」が打ち上げられて最初に起きた大規模フレア群のうちの一つで、フレアはもちろん、フレアに関するダイナミックなさまざまな現象を観測することができました。

このフレアにおいて「ひので」の性能が遺憾なく発揮されたのが、「衝撃波」の観測です。爆発が起これば衝撃波が発生することは、想像できると思います。太陽でもフレアが発生すると、しばしば衝撃波が発生し、コロナ中を伝搬します。しかし、衝撃波の発生数に比べ、その伝搬の様子を観測した例は非常に少ないのです。その要因は2つあります。まず、衝撃波はおよそ毎秒1000kmという非常に速いスピードで伝搬するため、観測装置には広い視野と高い時間分解能が要求されるからです。2つ目は、衝撃波がフレアに比べて「かすかな」現象だからです。X線や紫外線の波長域で観測した場合、フレアの明るさはまわりのコロナの数千倍以上になるのに対し、フレアで生じた衝撃波の明るさはコロナの明るさの数倍程度にしかありません。このため、観測装置には優れた感度が求

められます。

「ひので」搭載のX線望遠鏡（XRT）は、これまでのX線望遠鏡と比べて感度と時間分解能、空間分解能が優れており、コロナ中を伝搬する衝撃波の観測にも適しています。図30は、2006年12月13日にXRTが観測したフレアと衝撃波です。衝撃波が円弧状に広がりながら伝搬していく様子がとらえられています。この衝撃波の速度は、毎秒630kmでした。

また、「ひので」に搭載された極端紫外線撮像分光装置（EIS）も、衝撃波をとらえていました。EISは分光装置なので、コロナからの光を分解し、波長ごとに光の強さを測定できるのが大きな特徴です。観測された波長ごとのデータには、プラズマの温度や密度、速度の情報が含まれており、解析することでコロナ中にあるプラズマの物理量を引き出すことができます。

図31は、EISがとらえた衝撃波のデータです。aは195Åの波長のデータで、約150万度のプラズマの様子が撮影されています。bは274Åで約200万度、cは193Åで約500万度のプラズマを見えています。各図に示されている十印は衝撃波の先端を示してあり、十印の下側が通常のコロナ、上側が衝撃波です（d参照）。aとbでは、衝撃波部分の明るさがコロナ部分より暗くなっていることがわかります。これは、定常的に存在する200万度以下のコロナが、衝撃波中では500万度以上に加熱されていることを示しています。

XRTは、衝撃波の伝搬の様子をとらえ、衝撃波の速度を測ることができました。EISの分光データからは、温度と密度を知ることができました。我々は、これらの観測データと電磁流体理論を合わせることで、この衝撃波のマッハ数（MHD fast-mode Mach number）が1.4であると算出しました。また、直接観測することの難しいコロナの磁場を、約7ガウスであると見積もることができました。

「ひので」に搭載されている装置は、それぞれが世界最高レベルのデータを取得し、数々の新発見をしています。そして、それらのデータを合わせて解析することにより、さらに新しい発見がなされています。（なるかげ・のりゆき）

図30 X線望遠鏡（XRT）がとらえたXクラスフレアと衝撃波

上段はXRTの1分ごとの画像。図の上の数字は観測時刻。下段は衝撃波の先端に+印を付け加えた画像。

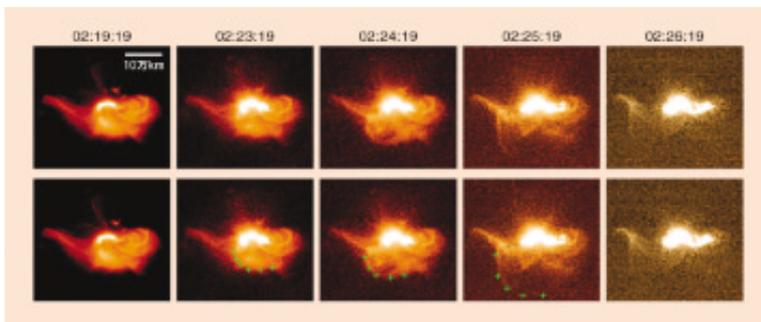
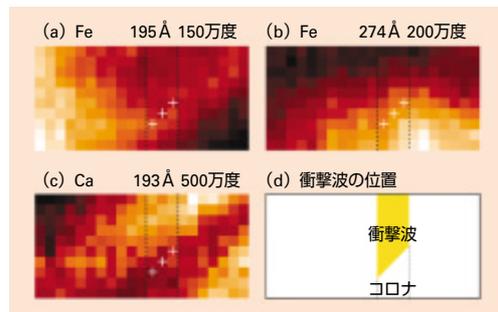


図31 極端紫外線撮像分光装置（EIS）がとらえた衝撃波

a~cは、ある波長（図の上に記載）での光の強さを示す。これらは、ある温度（図の上に記載）のプラズマの様子を表している。図中の+印は、衝撃波の先端を示している。dは、a~cにおける衝撃波の位置を示す。



多波長同時観測の威力

David R. Williams

英国ロンドン大学マラード宇宙科学研究所
EISプロジェクトサイエンティスト
※宇宙科学研究本部に駐在

2006年9月に「ひので」が打ち上げられたとき、太陽活動度は低調な状態にあった。衛星と望遠鏡の初期立ち上げ作業を進めるかたわらで、望遠鏡運用に携わる私たち研究者は、太陽で起きる活動的な現象を調べるための観測プログラムの準備に追われていた。その観測プログラムが初めて使われるときは、すぐにやって来た。

「ひので」には、太陽が静かであっても活動的であっても観測できる望遠鏡が搭載されている。太陽表面（光球）とそのすぐ上空の大気（彩層）は、常に明るくダイナミックだ。可視光磁場望遠

鏡(SOT)は打上げ以来、光球と彩層の素晴らしい画像を取得し続けている。SOTが取得する太陽表面の磁場データは非常に印象的だ。小さな正極と負極の磁場が現れたり、動き回ったり、衝突したり、また見掛け上消滅する様子も見られる。極端紫外線撮像分光装置(EIS)は、SOTが見る大気よりもさらに上空の大気、温度が急上昇する遷移層と高温のコロナの振る舞いをとらえ、複雑な3次元データを取得している。私が深く関与しているEISの観測によって、よじれたフィラメントがほどけていかないうちに変った現象や、極端紫外線(EUV)で暗い領域が非常に速いプラズマ運動に満ちあふれていることが分かったり、また低速太陽風の新しい流源の可能性を示唆するデータが得られている。また、X線望遠鏡(XRT)は、SOTやEISによって観測された活動現象について、時には早く、また時には驚くほどゆっくりとコロナ構造が応答する様子を、見事にとらえている。

太陽で起きる現象を同時に3つの望遠鏡で観測することによる威力は、2006年12月17日に早くも示された。太陽の縁に存在した活動領域が巨大なフレア(図32)を引き起こし、「ひので」の3つの望遠鏡すべてが同時に観測することに成功したのだ。太陽表面と彩層、コロナと遷移層とが、どのように結び付いているかは、まだ理解に乏しい。計算機上の計算モデルでは、このような多層の大気構造のうち、おそらく1つか2つの層しか取り扱うことができていない。多層大気構造間の相互結び付きは、非常に明確な観測なしには物理的に理解することは極めて難しいのだ。

「ひので」はすでに、そのような研究を可能とするデータを取得している。このようなブレークスルーをもたらす科学衛星は、大規模な国際協力の実現によって初めて可能となったのである。

(ウィリアムズ・デービッド)(清水敏文 訳)

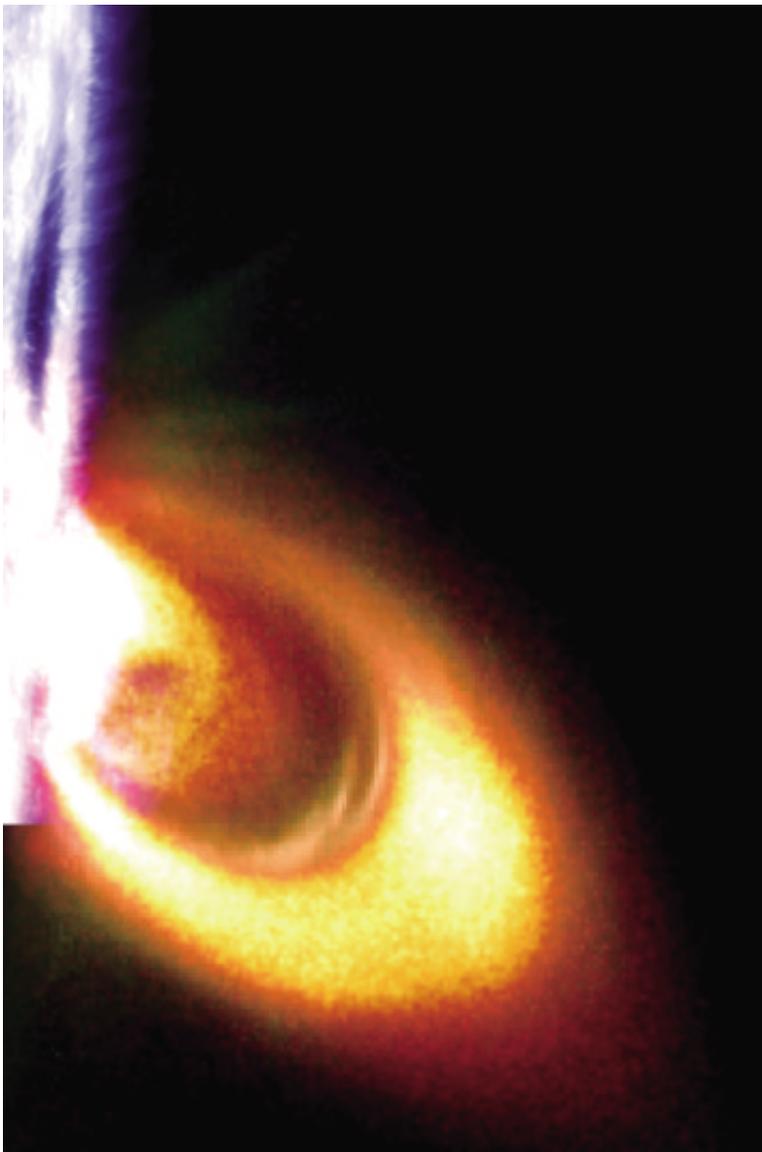


図32 2006年12月17日に発生したXクラスフレアの合成画像
「ひので」搭載の3つの望遠鏡による同時観測の威力を示している。可視光磁場望遠鏡(SOT)の可視画像は青色で、X線望遠鏡(XRT)のX線画像は赤色で、そして極端紫外線撮像分光装置(EIS)による画像は緑色を用いて合成した。
(画像作成: D. Brooks, D. Williams)

「ひので」構造開発物語

峯杉賢治

JAXA宇宙科学研究本部
宇宙構造・材料工学研究系 准教授

「太陽観測衛星SOLAR-Bというプロジェクトが走り始めたけど、熱と構造の話を書いてくれという依頼が来てるよ。ちょっと行ってきて」という一言が、その後続く、長くて陰しい道のりの始まりでした。

「ひので」には3本の望遠鏡が搭載されています。それらが太陽の同じ場所を同時に観測するために、大変高い精度で望遠鏡の向きを合わせ、ロケットで運ばれるときの大きな加速度や宇宙空間での温度変化にさらされても、その

向きがほとんど変わらないことが要求されました。特に厳しい条件として、「ひので」が地球のまわりを1周している間の望遠鏡同士の向きのずれを2秒角（1秒角は1度の1/3600）以内に抑える必要がありました。これは、3つの望遠鏡の視野中央の相対的なずれが、例えば、100 km先の物を見ている場合で1 m以内でしかないことに相当します。

この厳しい要求を実現するためには、熱変形を抑えることが鍵でした。「ひので」は太陽を観測するために、常に望遠鏡が向いている方向から太陽光を浴びています。また、地球から放射される熱も受けています。さらに、搭載機器による発熱もあります。そこで、自らの発熱が小さい望遠鏡と発熱の大きな機器を分けて、図33のように別々の構体に搭載しました。機器を搭載するバス構体部は、機器から発生した熱を宇宙空間に逃がすために、熱が伝わりやすい材料でつくらなければなりません。しかし、そのような材料は熱膨張が大きいので、熱変形が大きくなります。そこで、バス構体部の熱変形が望遠鏡に伝わらないように、望遠鏡を搭載する光学架台とバス構体部との間に支持トラスを設けました。

一方、望遠鏡本体と光学架台は熱変形を極限まで抑える必要がありました。そのため、炭素繊維に特殊な樹脂を組み合わせることで、熱膨張がアルミニウムの1/200という、ほとんどゼロに近い素材を実現しました。さらに、炭素繊維の中でも強度の高いものと熱を伝えやすいものを上手に組み合わせて部材を設計した結果、望遠鏡の向きに影響を与える熱変形は非常に小さく、大きな加速度にも耐えられる構造を実現しました。

それから、望遠鏡の取り付け方も大きな問題でした。普通は、多くのねじを使って互いをがっちりと固定するのですが、それでは望遠鏡の向きを調整することが大変難しくなります。そこで、光学架台から取り付け足を伸ばして望遠鏡を3ヶ所で支える方式にしました。さらに、部材が図面通りの寸法には完璧にできないことで組み立て時に生じる変形を抑えるた

図33 「ひので」の構造

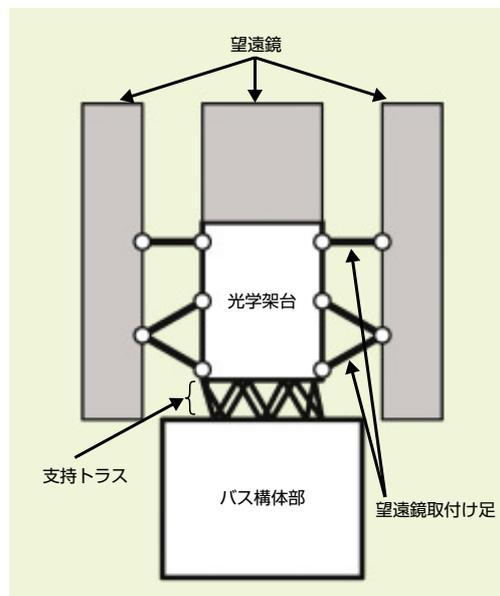
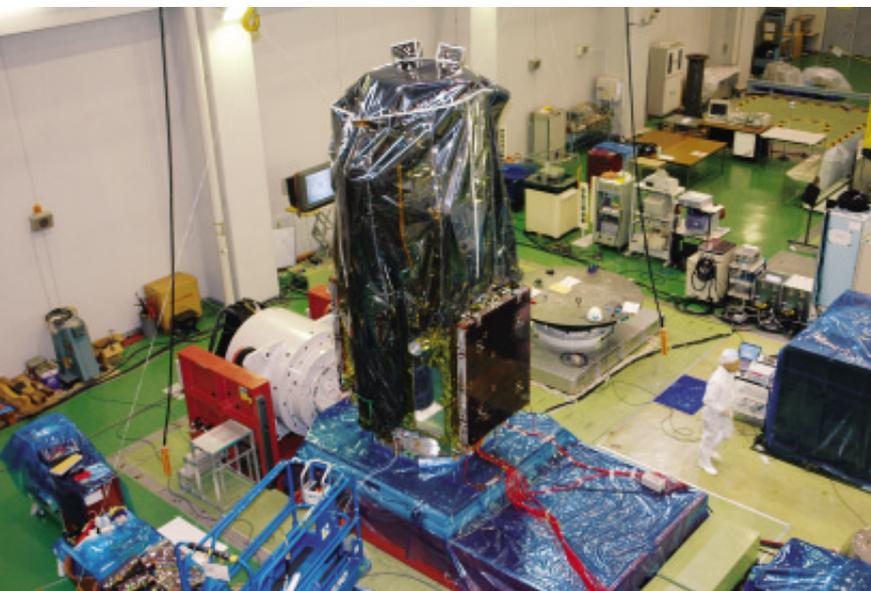


図34 衛星耐環境試験の様子
望遠鏡をコンタミネーション（汚染物質の混入）から守るため、カバーをかけて実施された。



めに、足の両端を削って板ばねのように柔軟な構造にすることで、その寸法の誤差を吸収できるようにしました。この板ばね部ですが、海外において過大な振動試験で折られてしまったり、やわであるが故に望遠鏡を取り外す際に曲げてしまったり、いろいろと悩まされました(図34, 衛星レベルの振動試験の様子)。

最後に、設計の通りに熱変形が小さく抑えられていることを確認するために、熱変形試験を実施しました。計測値を見ると、試験終了後に元に戻らず、変形が残っているのです。これは「いったい?」と悩みましたが、よく調べてみると、衛星表面に貼った試験用断熱材が自分の

重さではがれていることが分かりました。わずかなことでしたが、熱変形自体が非常に小さいために、その影響が現れたのです。最終的には、熱変形に対する要求を満たしていることを確認しました。

そして、今も鮮明に記憶に残るM-V最後の打上げ……。「頑張れ!」

現在のところ、「ひので」の軌道上での観測データから、望遠鏡同士の向きのはずれは、要求の2秒角に対してその半分以下であることが判明しています。構造屋としては、ほっと胸をなで下ろしているところです。

(みねすぎ・けんじ)

「ひので」の観測を支える 高精度姿勢制御

橋本樹明

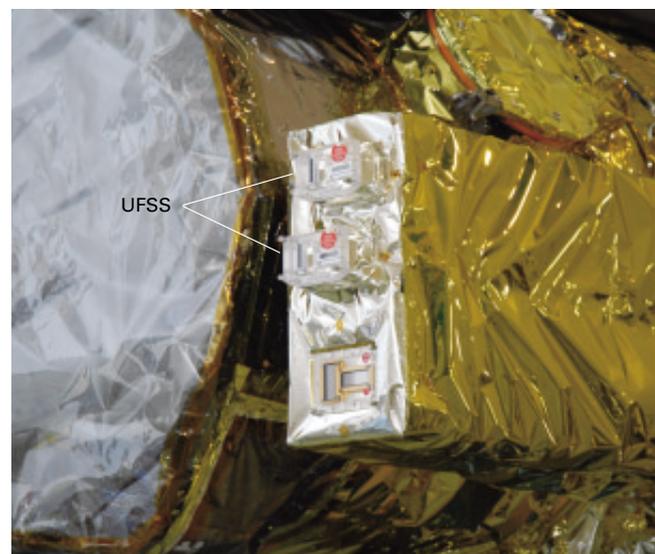
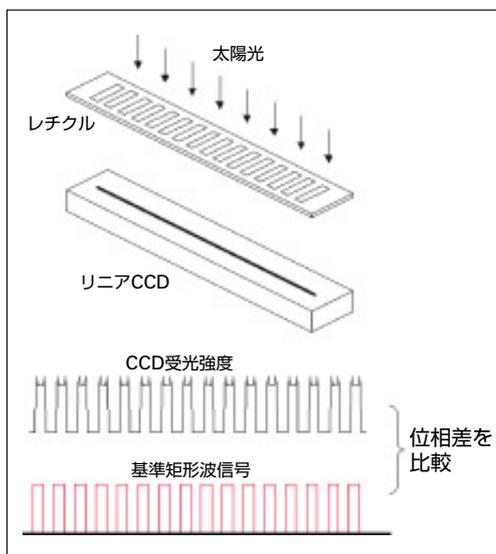
JAXA宇宙科学研究本部
宇宙探査工学研究系 教授

人工衛星の姿勢を制御するためには、まず衛星がどちらを向いているかを精密に測定するセンサが必要です。「ひので」の場合には、1時間の姿勢変動が2秒角(1秒角は0.00028度)以内とする必要があり、精密に太陽方向を検出する超高精度太陽センサ(UFSS)を開発しました。UFSSは、リニアCCD検出素子の前面にレチクルと呼ばれるパターンが置かれ、そこを透過した太陽光の像と基準矩形

波信号との位相差から太陽入射方向を高精度に検出する姿勢センサであり(図35)、衛星から見た太陽中心の方向が約1秒角の精度で検出できます。

姿勢を安定化させ、10秒間の姿勢変動が0.3秒角以内という要求を満たすためには、姿勢の変化(角速度)を精密に測定するジャイロが必要で、「ひので」には、FRIG型とTDG型という2方式の機械式ジャイロスコープが搭載さ

図35 超高精度太陽センサ(UFSS)の外観と動作原理



れています。両方式とも、人工衛星の高精度姿勢制御に実績のあるものでしたが、どちらを改良すれば最高性能が出るのか、10年前の検討段階では分かりませんでした。そこで、ジャイロを製造している両メーカーの技術者と協力して、2方式で競いながら開発を続けました。結果として、地上での性能試験ではほとんど同じ性能でしたので、「あとは軌道上での勝負」ということで、両方載せることにしました。人工衛星の姿勢制御のためにはX、Y、Zの3軸用のジャイロがあればよく、多くの場合は1軸故障したときに備えてもう1軸を追加して4軸構成とします。「ひので」の場合は、FRIG型、TDG型それぞれで4軸構成となる、計8軸分のジャイロを搭載するというぜいたくをさせていただきました。

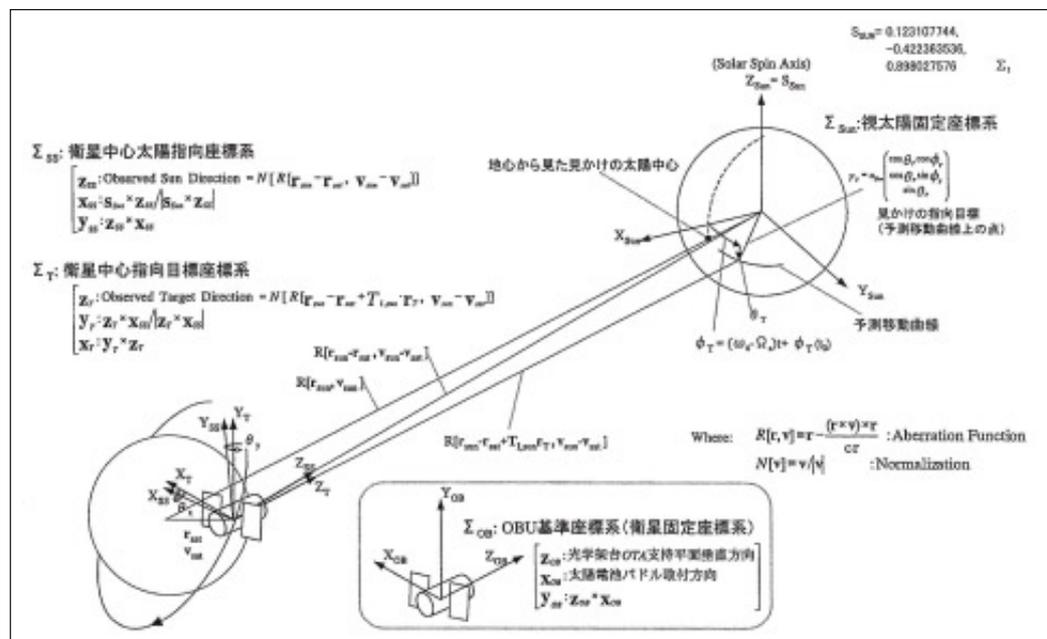
それらの姿勢センサの出力から衛星の姿勢を計算するのですが、どの座標系に対しての姿勢であるかを注意深く考える必要があります。ジャイロは、慣性座標系に対する姿勢を検出します。太陽センサは太陽の中心方向を検出するのですが、衛星の地球まわりの周回運動、太陽まわりの公転運動により光の方向が曲がって見える効果(光行差、視差)を考慮する必要があります。観測望遠鏡は、太陽面上の決まった位置に向けたいので、太陽の自転運動も考慮する必要があります。これらの座標軸の関係を図36に示します。この関係は何度考えても混乱し、姿勢制御系の会議では毎回最初の3時間ぐらいは座標系の議論をしていたため、深夜まで続くことが多くありました。

実際に衛星の姿勢を動かすためには、モーメントムホイール(MW)と呼ばれる「はずみ車」を使用します。角運動量保存の法則から、回

転する円盤を加速すれば衛星は反対方向に回り始めるので、3台以上のMWを搭載してその回転数を加減速することにより、衛星を任意の方向に向けることが可能となります。ここで問題になるのは、MWや機械式ジャイロが発生する振動です。円盤の回転軸がずれていると振動の発生源となり、望遠鏡の向きがぶれてしまうので、製造メーカーの技術者とともに、極限まで精密にバランスを取ることにしました。特にMWは、世界中で最も静かなものを求め、灼熱のアリゾナ州フェニックスに何度も足を運び、米国のメーカーのものを輸入することにしました。

可視光磁場望遠鏡(SOT)では、さらに高精度な撮像を行うため、望遠鏡に可動鏡制御機構を採用し、ぶれを補正しています。また、観測センサと姿勢センサの間の取り付け構造が熱ゆがみなどにより変形すると指向誤差になるので、温度差が付かないような熱設計、変形しない一体構造にするなど、工夫が必要でした。このように極限の指向精度の達成には、姿勢制御のみならず衛星システムとしてのものもろの高度な技術が必要であり、理学と工学、JAXA、国立天文台、メーカーの連携により実現しています。(はしもと・たつあき)

図36 「ひので」の姿勢制御に使用する座標系



「ひので」可視光磁場望遠鏡 (SOT) の製作・試験

勝川行雄

国立天文台
ひので科学プロジェクト 助教

可視光磁場望遠鏡 (SOT) は口径50 cm の回折限界性能をもつ世界最大・最高性能の太陽観測用可視光宇宙望遠鏡です。大気の影響のない宇宙空間から、0.2秒角という高い解像度で、太陽大気の微細構造を観測することが可能です。

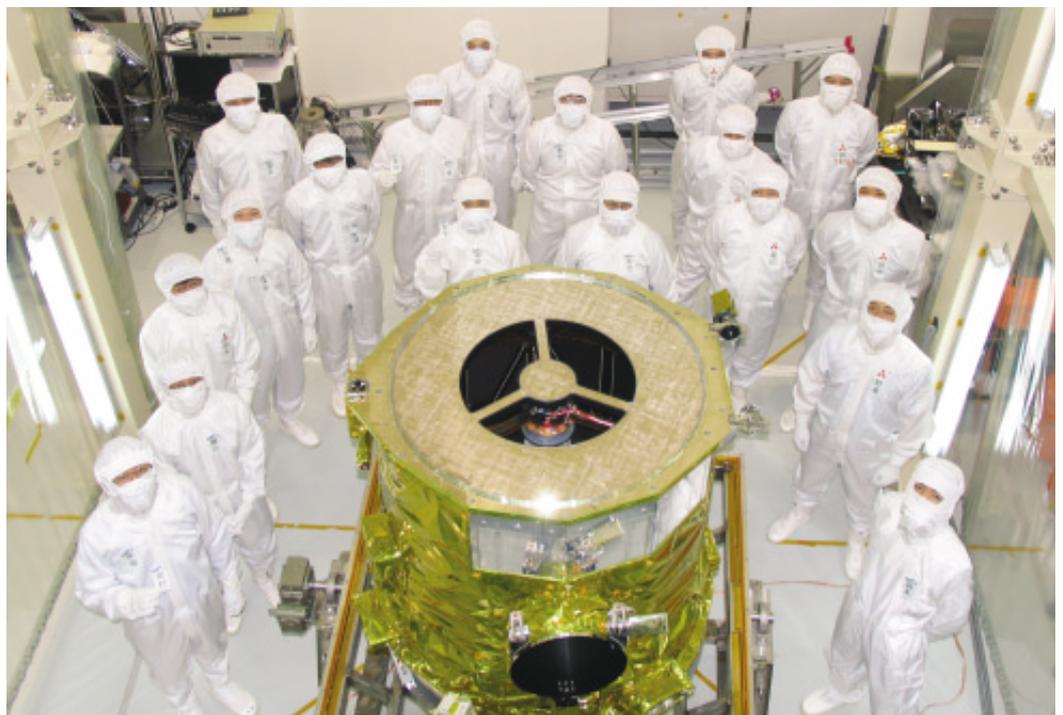
望遠鏡部 (OTA) の開発は、国立天文台と宇宙研が中心となって行われました。この望遠鏡には、さまざまな最先端の宇宙光学技術が集約されています。鏡面精度が極めて高くかつ軽量化された主鏡・副鏡、それらをゆがみなく支持するための支持機構、軽量かつ低熱膨張なCFRP望遠鏡構体、可視光全域で無収差・無偏光なレンズ、衛星の揺れを取り除くための可動鏡、モーメンタムホイールやジャイロによる微小擾乱の評価と低減化、光学系を汚染から守るためのコンタミネーション管理などが挙げられます。さらに、過酷な打上げ時の振動・衝撃、地上実験室と大きく異なる軌道上での温度分布や真空環境においても光学性能が維持されることを、地上試験で確実に検証する必要があり、その試験方法の開発自体が最先端の研究でした。ここでは語り尽くせない

ノウハウが、SOTには集約されているのです。

私がまだ博士課程1年のとき、ちょうどOTAの構造モデルの製作が始まり、SOLAR-Bの開発に本格的に参加することになりました。それまで、望遠鏡のこともSOLAR-Bのことも、まだろくに知らない時期でした。毎日のように宇宙研の大クリーンルームに通い、国立天文台の先生方、メーカーの方々に鍛えられ、実験や光学測定の手順、衛星開発の大変さを身をもって経験することができました。その後、フライトモデルの製作や試験、NASAで開発された焦点面パッケージと組み合わせて行った実太陽光試験などが国立天文台で行われ、SOTは完成しました。私を育ててくれた望遠鏡なので、非常に思い出があります。2006年10月25日、望遠鏡のふたを開けたときに目の当たりにした、視野一面にわたる粒状斑の画像は、今でも忘れられません。

日本においても今後、宇宙空間からの光学観測がますます本格化すると思われますが、「ひので」のSOTで培われた高精度望遠鏡技術は、次世代に継承発展させていくべき貴重な財産です。(かつかわ・ゆきお)

図 37 可視光磁場望遠鏡 (SOT) の望遠鏡部 (OTA) の完成



高解像度観測を可能にした 衛星微小擾乱源管理

一本 潔

国立天文台
ひので科学プロジェクト 准教授

「ひので」の可視光磁場望遠鏡(SOT)が回折限界分解能を達成できた背景には、長年にわたる微小擾乱との戦いがあった。衛星の中にはモーメンタムホイール、慣性系基準装置(ジャイロ)、および観測装置内の多数の可動機構があり、望遠鏡の鏡が運悪くこれらの発生する擾乱に共振すると、CCD上の像が動いてシャープな画像が得られなくなる。SOTの有する画像安定化装置が有効に働くのは15 Hz程度までであるため、それよりも高周波の擾乱につい

ては、擾乱源の徹底した管理と擾乱伝達の抑制によって要求を達成しなければならない。これはあらかじめ定量的に予測することが大変難しい課題であり、微小擾乱に対する取り組みは、設計による保証よりも、実験による検証の道を取る必要があった。

そのためPM(プロトタイプモデル)・FM(フライトモデル)フェーズを通して、微小擾乱伝達特性の測定や可動機構を動かした像安定度の測定を、衛星レベルの試験として繰り返し実施した。図38は、衛星全体をばねでつるし、加速度センサによって鏡の振動を測定する試験の風景である。これらの実験結果に基づき、一部ジャイロの回転数の見直しと搭載位置の変更、モーメンタムホイールの回転数の制限、構体パネルへの補強材の追加などを行い、ようやくSOTの像安定要求を満足する見通しを立てることができた。

図39は、軌道上において画像安定化装置センサ(580 Hz)によって測定された像擾乱スペクトルである。指向誤差はX、Y方向にそれぞれ0.010、0.009秒角(rms)と、ほぼ予測通り、かつ要求を十分に満足するものである。微小擾乱による指向誤差は、「ひので」の開発において最も困難な課題の一つであった。早い段階から実験的に指向擾乱を評価してフライトモデルの製作にフィードバックできたこと、可能な限り軌道上に近いコンフィギュレーションで信頼に足る測定を実施できたことが、成功の要因であろう。

(いちもと・きよし)

図38 一次噛合わせ試験における微小擾乱測定風景
衛星をばねでつるし、望遠鏡の鏡の振動を高感度加速度センサで測定。

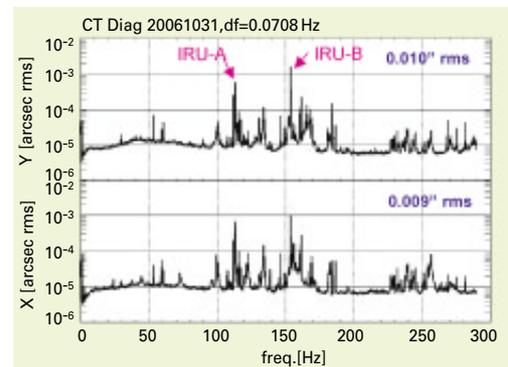


図39 軌道上での画像安定化装置センサ信号でとらえた擾乱スペクトル

2006年10月31日。安定化装置サーボON、定常稼働物はすべて稼働状態。

宇宙天気予報から見た「ひので」

巨 慎一

情報通信研究機構
宇宙環境計測グループ
研究マネージャ

情報通信研究機構 (NICT) は、世界11ヶ国が加盟する国際宇宙環境サービス (ISES: International Space Environment Service) の日本の宇宙天気予報センター (図40) として活動しています。「宇宙天気予報」とは、衛星、GPSによる測位システム、地上の送電システムなど人間がつくったシステムや、人間自身の活動に影響を与えるような宇宙環境の状態を予測しようというものです。NICTでは、太陽、太陽風、磁気圏、電離圏という広範な領域のデータをほぼリアルタイムで収集し、常時モニターして、現在の宇宙天気の状態に関する情報、太陽フレア・地磁気嵐・高エネルギー粒子現象の24時間予報、大きな宇宙環境の擾乱発生時の臨時警報などをweb page (<http://swc.nict.go.jp>, 図41) や電子メールなどにより提供しています。

太陽風の擾乱が太陽から地球までやって来るには2~3日程度の時間がかかるため、擾乱の原因となるコロナホールの位置や大きさ、コロナ質量放

出 (CME) の発生位置や規模を正確に知ることで、数日先の予報を行うことができます。これらに関する情報源の一つとして、「ひので」衛星の観測データが使われています。

太陽からの高エネルギー粒子は速度が速いため、数十分から数時間で地球までやって来ますが、その原因となる現象が発生した太陽面経度により到来時間が異なるので、やはり現象の発生位置を正確に知ることは大切です。

コロナホールは、X線や極端紫外線で暗く見えるコロナの領域で、高速な太陽風が吹き出されています。コロナホールは比較的安定的に存在し、そこからの高速太陽風による擾乱は太陽の自転周期である約27日で繰り返すことが多いため、「回帰性の擾乱」と呼ばれています。「ひので」のX線望遠鏡 (XRT) は、SOHO衛星の極端紫外線望遠鏡 (EIT) に比べると観測している温度のカバー範囲が100万度から3000万度と広いので、コロナホールの識別がしやすいという特長があります。そこで、太陽の自転周期である約27日前のXRTの画像と現在のXRTの画像を比べてコロナホールの形状の変化を検討し、コロナホールからの高速な太陽風の影響を推定することができます (図42)。

コロナホールからの高速太陽風は、先行する低速太陽風に追いつき、CIR (Corotating Interaction Region) と呼ばれる太陽風が乱された領域を形成します。この領域が地球を通過する際に、地磁気擾乱を引き起こします。地磁気擾乱の後に高速太陽風が続くと、通信、放送、気象などの衛星で使われている静止軌道において、高エネルギー電子フラックスの大きな増加が起こることが知られています。高エネルギー電子は、衛星の外被を通り抜けて衛星内部の回路や導体に帯電を起こしたり、宇宙機の外被のケーブルシールドなどの絶縁物に入り込んで帯電を起こし (これらの帯電は表面帯電に対して内部帯電と呼ばれている)、その障害の原因となります。1994年にカナダなどの衛星で、高エネルギー電子による内部帯電と思われる障害が立て続けに発生しました。

現在は11年周期で変動する太陽活動の極小期に当たり、CMEによる宇宙環境の擾乱はほとんどありません。しかし今後、太陽活動が活発になって



図40 情報通信研究機構 (NICT) の宇宙天気予報センターで毎日午後に行われる予報会議の様子



図41 Web page (<http://swc.nict.go.jp/>) によるNICTの宇宙天気情報サービス

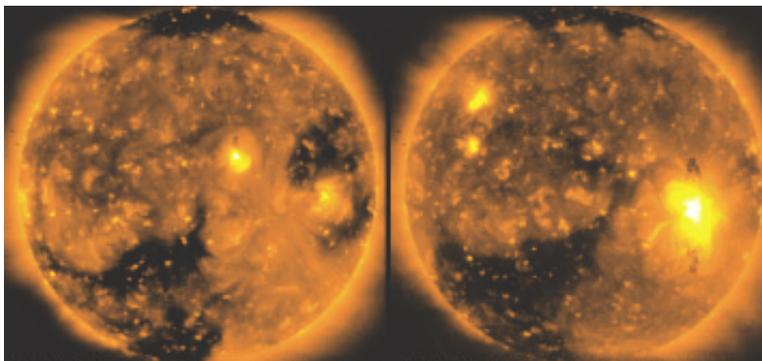


図42 「ひので」のX線望遠鏡 (XRT) による太陽のX線画像
暗く見える部分がコロナホール。左図 (2007年11月17日) は右図 (2007年12月14日) の27日前のX線画像。南から伸びる大きなコロナホールが回帰しているのが分かる。

くと、CMEを発生する可能性が高いとされ、X線の画像で見るとS字状の構造をもつ「シグモイド(コロナ中のねじれた磁場構造)」と呼ばれる活動領域のモニターとして、XRTのデータを使うことができるものと考えられます。XRT画像による数日程度のムービーは、CMEによって生じるX線のアーケードや減光(dimming)領域の形成などCMEに伴う太陽コロナの変化を判別しやすいので、CMEの発生領域を特定するのに役立ちます。シグモイド、アーケード、dimmingといった現象とCMEの関連は、「ひので」の前の「ようこう」によって明らかにされたものですが、「ひので」のデータを使って、実際

の予報の中で有効性が検証されていきます。

NICTでは将来の数値予報に向けた数値モデルの開発を行っています。計算結果と「ひので」で得られたコロナの温度や密度分布の比較を行うことにより、モデルの開発にフィードバックできるのではないかと考えています。また、「ひので」がこれから明らかにしてくれると思われるフレアやCMEのトリガー機構、太陽風の加速機構などについての新たな知見を、逐次、宇宙天気予報のアルゴリズムの中に取り込んでいくことにより、アルゴリズムを改良し、より良い予報が提供できるようになっていくものと期待しています。(わたり・しんいち)

「ひので」特集の最後に

坂尾太郎・清水敏文

JAXA宇宙科学研究本部
宇宙科学共通基礎研究系 准教授

先進的な宇宙科学技術の開発と広範な国際協力などにより実現した「ひので」が観測を開始してから1年数ヶ月がたった。初期定常観測から新たな発見や知見が次から次に得られ、2007年度だけで約87編の査読付き学術論文が刊行された。中でも、宇宙科学分野にとどまらない大きなインパクトをもつ、世界的に定評のある学術雑誌『Science』が2007年12月8日号で「ひので」特集を組み、9編の論文を掲載した。表紙も「ひので」が撮影した軟X線太陽像で、「はやぶさ」特集以来の快挙である。



「ひので」は世界に開かれた軌道上太陽天文台として科学運用を実施し、得られる画像・動画は世界中の研究者から、さらには一般からも、極めて高く注目されている。打上げからほどなく急逝された前プロジェクトマネージャー小杉健郎先生も天国から「ひので」の大活躍を喜んでいると思う。今回

『ISASニュース』で特集号を組み、初期成果のごく一部を紹介したが、紹介した研究内容にとどまらず、太陽物理学の幅広い研究対象においてさまざまな研究が行われており、新たな進展が期待されている。また、従来の研究の枠を超えた広範な研究分野との新しいつながりも、「ひので」の動画がもつインパクトによって生まれつつある。

現在、太陽は最も活動度が低い時期にあり、「静かな」太陽の観測に時間を割いている。2008年1月初旬には次の太陽活動サイクルの始まりを告げる活動領域(黒点)が出現し、「ひので」は今後、上昇を始める太陽活動に注目した観測を行うフェーズに入る。昨年末以降、観測データ伝送に使用しているXバンド信号が不安定となる現象が発生しているが、今後とも優れた観測を可能とする科学観測運用が行えるように、現在、受信や科学運用方法の効率化などの対策を進めている。今後とも「ひので」による科学成果に期待していただければと思う。また、「ひので」にかかわったすべての皆さんに感謝するとともに、今後も一層のご支援をお願いしたい。

(さかお・たろう、しみず・としふみ)

ISASニュース No.323 2008.2 ISSN 0285-2861

発行/独立行政法人 宇宙航空研究開発機構 宇宙科学研究本部
〒229-8510 神奈川県相模原市由野台3-1-1 TEL: 042-759-8008

本ニュースは、インターネット(<http://www.isas.jaxa.jp/>)でもご覧になれます。

デザイン/株式会社デザインコンピビア
制作協力/有限会社フォトンクリエイト

*本誌は再生紙(古紙100%)、
大豆インキを使用しています。



古紙配合率100%再生紙を使用しています