



宇宙科学研究所

2003.1 No.262

特集：「ようこう」の10年

▲太陽コロナの軟X線写真（1992年5月8日）

新年の御挨拶

所長 松尾弘毅

明けましておめでとうございます。

いよいよ3機関統合の年を迎えました。現況は昨11月号に詳しすぎる程に述べましたので、ここでは省略致しますが、新機関のための個別法は去る12月6日に国会を通過し、今年の10月からの新機関の発足が確定しました。今後は、新機関の近々未来を律する中期計画の策定、評価の在り方も必ずしも確定していない状況で、いかに魅力的なまた臨機の対応の出来る柔軟な案を出せるかが、特に重要になります。

昨年は、所員一同統合の実務に追われ、今年も前半は間違いなくそうなるでしょうが、これはいずれも宇宙科学の将来の大発展へ向けてのコストと思いたいものです。

さて、その本業ですが、M-Vの復活により今年から堰を切ったように科学衛星の打上げが始まります。昨年はいわばそのための準備の年でした。その中にあって、年明けの超高速再突入実験機DASHの失敗は痛い教訓でしたが、S-310ロケットによる観測条件にも恵まれた電離層の満点の観測、三陸実験場からの大気球

による高度世界記録達成などの目に見える成果もありました。

M-Vの打上げ再開第1号のMUSES-Cは当初昨12月に予定されていましたが、準備になお慎重を期する為、本年の5月に延期され現在作業を進めています。惑星間飛行に固有の条件からどうしても5月に打上げ時期を変更する必要があったのですが、漁業関係を始めとする関連の方々のご尽力とご理解により実現することになりました。改めて御礼申し上げます。

宇宙科学研究所の輝かしい伝統に一区切りつけるのであるから、感慨も一入である、とも書けますし、伝統を更に発展させるためにもその第一歩であるMUSES-Cの打上げに向けて平静に全力を傾注したい、とも結べます。どちらも本当です。





★ASTRO-F(FM)姿勢軌道制御系機能性能評価試験

ASTRO-F衛星の搭載機器のうち、特に姿勢制御、軌道制御に使用する機器の機能・性能を確かめるため、8月19日～12月13日の期間にC棟姿勢系試験室において評価試験を行いました。宇宙空間での衛星の動作を評価するため、姿勢軌道制御装置(AOCU)にダイナミクスシミュレータと呼ばれる計算機を接続して衛星の姿勢・軌道運動を模擬し、太陽センサ、恒星センサ、ジャイロなどの搭載機器の出力する信号を擬似的に発生させてAOCUへ入力します。AOCUはこの信号および指定されたコマンド指令に基づいて姿勢軌道制御の演算を行い、リアクションホイール、磁気トルカ、推進系スラスタへの駆動信号を出力します。これをダイナミクスシミュレータに取り込むことにより、軌道上の動作を模擬することができます。いわゆる静的閉ループ試験(SCLT)を実現しています。

本試験ではAOCUの機能・性能評価とともに、各センサ等の搭載機器の評価も行うため、上記擬似信号の部分は適宜実際の搭載機器の出力を併用しています。実際の試験は、各搭載機器とダイナミクスシミュレータが机の上にならべられて相互に接続された地味なものでありました。(橋本樹明)

★相模原局 3mアンテナ

工学技術実証とオーロラ観測を目的とする小型衛星INDEXは、現在新A棟4階の次世代探査機センターでFM一次噛み合わせ試験に入っている状況です。この衛星の目的の1つに簡易地上局による衛星運用があり、新A棟屋上のアンテナはこのために設置されました。

11月8日、KSCから輸送された3mアンテナは、50t

クレーンで中庭から地上高34mの新A棟屋上につり上げられ、相模原局として設置されました。主反射鏡は900MHzのロケットテレメトリ受信用に、ベデスタルは風向風速レーダとして、かつてKSCで使われていたものです。いずれもロケットテレメータセンターで内之浦の潮風に数十年さらされていましたが、この度お化粧直しをして相模原でINDEX運用のために活躍してもらうことになりました。周波数S帯、アンテナ直径3m、駆動速度 10° /秒、送信出力100Wで大容量のオーロラ観測データをKSC20mアンテナに頼る以外は、INDEX運用は相模原局で行うことが可能です。

夜間ライトアップすると白いアンテナがとても綺麗(写真)で、新人のI技官は「新しいデートスポット」と評していましたが、アンテナは夜間も赤外カメラで監視されておりますので、その目的に適当な場所ではないと思います。

来春には駆動系、RF系の調整を終了し2004年に予定されているINDEX打上げを待ちます。

(水野貴秀)



3mアンテナと相模原の夜景

MUSES-C 月報-1

★MUSES-C 総合試験

搭載装置の一部に点検を行っていたため、中断していたMUSES-C探査機の総合試験が11月から再開され、12月上旬に最終の機械環境(振動)試験を終了しました。あとは1月に最終の熱真空試験、重量など慣性諸量の測定を終え、機能確認を終えれば、内之浦町の射場へ搬出となる予定です。探査機の射場作業は、3月中旬から開始の予定です。スケジュールは大変にきびしく、土曜日は打上げまで全てふさがり、日曜も作業する日が見込まれています。

打上げが近づくにつれて、しだいに世間の関心も高まっているようで、探査機の見学をされる方もどんどん増えてきました。クリーンルームの拡張前には、監視室からガラス越しに、無塵服で作業をする方の目線で衛星や探査機を見学いただけたのですが、

拡張後は、2階の廊下の端の窓からご覧いただくようになってしまいました。ASTRO-Fと両方が並んで試験中のときは壮観でしたが、今はやや距離があるようで、いささか申しわけないなという気がします。全ての方をクリーンルームにまでご案内できないのですが、この点をご容赦いただきたいと思います。

世界中のみなさんからお寄せいただいたお名前を載せたターゲットマークも搭載されました。このマークは、MUSES-C探査機本機にさきがけて、小惑星上に投下されることになっています。このマークには別な名前をつけてもよいかなと考えたりしています。

(川口淳一郎)

★M-V-5号機TVCオペレーション

いよいよ5月に迫ったM-V-5号機の打上げのための準備の先陣を切って、12月12日～19日にTVCオペレーションがKSCにて行われました。このオペは従来の第1組立オペのうちTVC部分を先行的に独立させたもので、ロケットを組み立てる前にTVC(ロケットの推力の向きを制御する装置)の機能と性能を確認しておくことが主な目的です。このオペを引継ぐ形で、今月には第1組立オペでロケットとノズルを結合し、来月には第2組立オペでロケット全体の組立てと搭載機器の総合的なチェックを行います。

これまでISASニュースで何度か紹介してきましたが、M-25モータの登場により、M-VのTVCは全て可動ノズルになりました。新開発の第2段アクチュエータは熱電池駆動の大型電動モータで、約200Vという高電圧を要するために地上設備も更新しています。

さて、TVCならぬTBC(注)と呼ばれていたTVC班にかつての面影はかけらもなく、明るく元気よく動くノズルは頼もしい限りです。我々にとっては、約3年間の試練を乗り越えての復活戦であり、また、改良型M-Vロケットの初フライトでもあります。打上げまでしっかり気を引き締めて進まなくてはなりません、小惑星探査という壮大なミッションに向けて、幸先のよいスタートが切れたと思います。

(注) Trouble Boys Company (森田泰弘)

★再使用ロケットエンジン燃焼試験 RVT-7

12月上旬から中旬にかけて、再使用ロケット実験機のエンジン単体地上燃焼試験を石川島播磨重工ロケット試験センター(兵庫県相生市)にて実施しました。将来の完全再使用型ロケットを実現するためにはロケットエンジンの高いレベルの信頼性・耐久性が求められます。このため、エンジンの信頼性・耐久性の向上を目指して、再使用ロケット実験機のエンジン噴射器の改良に取り組んできました。今回の試験は噴射器改良後の初めての試験で、新しい噴射器を組み込んだエンジンの性能を把握することが目的です。

実験班は宇宙研から5名、IHIの設計・現場の方々が約10名。実験が始まった当初はIHIの方々のペースで進められ、ちょっとだけ肩身が狭い気もしましたが、準備段階で次々に起こるトラブルに宇宙研・IHI全員の知恵を絞って対処していくうちに、すっかりいつもの能代でのRVTペースです。エンジンに火がつくまで毎日ドタバタ、火がついてからも夜中までドタバタ。しかし気が付いてみればあっという間に予定していた試験ケースを全て無事完了。今後の試験につながる重要なエンジン性能データを得ることができました。実験データだけでなく、試験期間中に次から次へと生じた問題とその解決策はとても貴重な経験となりました。山に囲まれてなかなか日のあたらないスタンド点で寒い中作業をされたIHIのみなさん、毎晩遅くまでデータ解析し、町で唯一の深夜営業をしているファミレスに駆け込んだ宇宙研実験班のみなさん、ご苦労様でした。次は複合材タンクの実液加圧試験、エンジン・タンクを実験機に組み込んだの地上燃焼試験、そしてフライト試験とどんどん進んでいきます。(野中 聡)

★S-310-31,32号機(SEEK-2)の初期結果

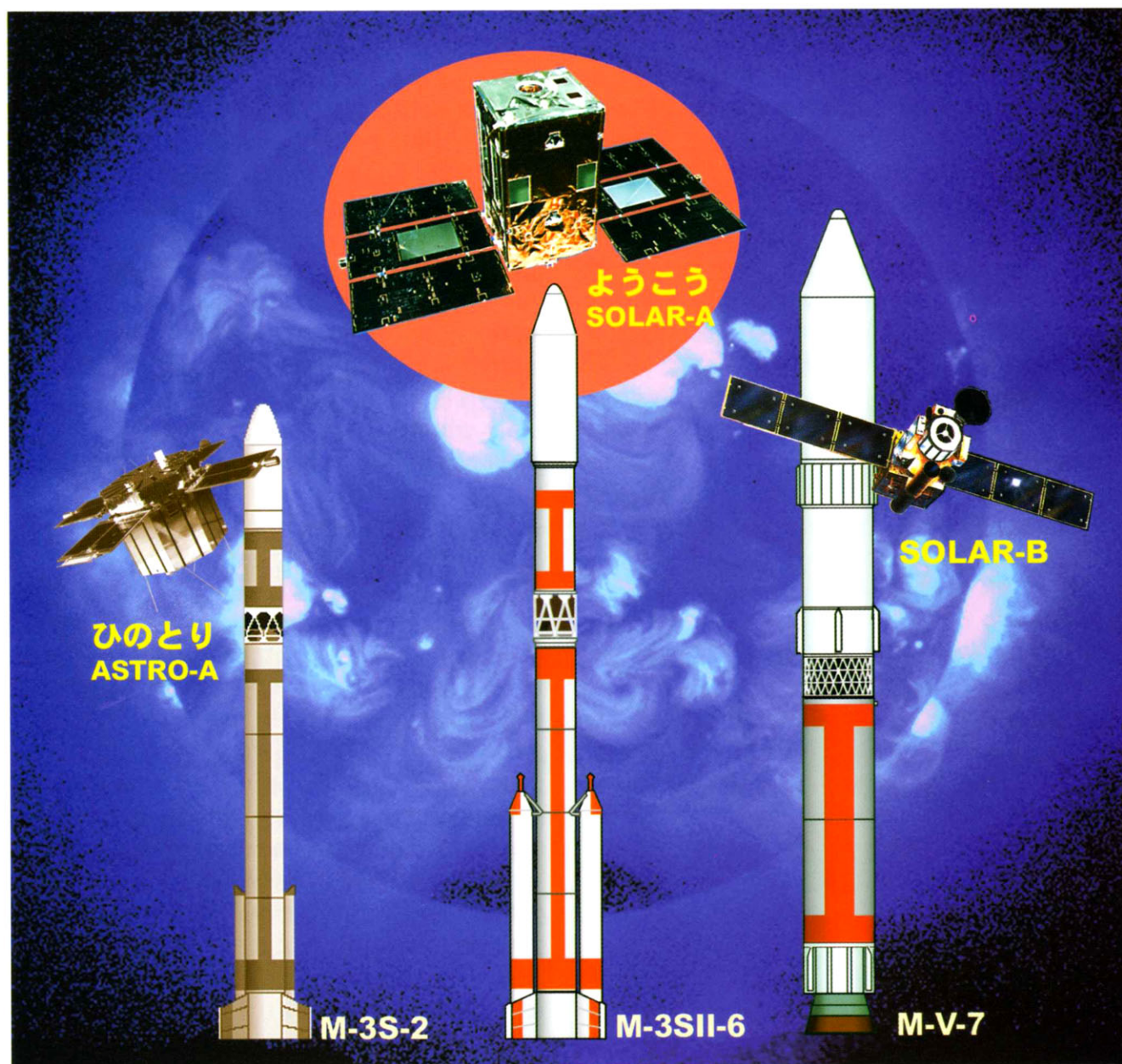
スポラディックE層に伴う準周期エコーの構造と成因の解明を目指して8月3日の夜半に内之浦から打ち上げられたS-310-31,32(SEEK-2)ですが、搭載各機器のデータ解析が始まり初期結果が出始めています。スポラディックE層に関連した電子密度の変動や電場の変動などが観測されており、11月11～14日の日程で電気通信大学にて開催された地球電磁気・地球惑星圏学会においては口頭発表5件、ポスター発表1件計6件の発表がSEEK-2実験関連で行われました。また、本来の実験目的とは別に写真に示すようにTMA放出に伴ってTMAとは別の発光現象が捕らえられており、その発光機構についても興味を持たれています。今後各機器の詳細な解析に伴ってスポラディックE層に伴う準周期エコーの構造と成因に関して様々な事が明らかになると期待されます。(早川 基)



写真説明：

高知県幡多において京大・クレムソン大の観測によって撮影されたTMA放出実験に伴う発光の写真。右側上部の螺旋模様に見える部分と左側上部の濃い線状の部分が見えるのはTMAによる発光。中央から左にかけての下側半分に見える薄く幅広い部分が問題の発光現象。TMAの発光が螺旋模様に見えるのは大気の運動によるもの。(写真提供：クレムソン大学M.F.ラーセン教授)

特集：「ようこう」の10年



特集にあたって

明けましておめでとうございます。統合に腹を括って約1年、やっと「その年」となりました。まずは1990年代に「あすか」とともに世界の宇宙科学をリードした太陽物理学衛星「ようこう」の特集をお送りします。その軟X線像がSky & Telescope誌の世界的規模のインターネット投票で、20世紀における

天体ショットのベスト・テン入りしたことはご存知でしょう。素人から玄人までを唸らせた華々しい成果を、この衛星に賭けた研究者の情熱と共に読み取っていただければ、編集委員会の意図は達成されます。ISASニュースは今年も元気です。

編集委員長 的川泰宣

第1章 はじめに

飛翔体を利用した宇宙空間からの観測が、研究に画期的な発展をもたらした例は多いが、太陽物理学はその典型的な例といえる。宇宙研では、1969年に福島県原町市郊外から飛翔した大気球により太陽硬X線源の撮像観測に世界で初めて成功、フレアの形状、大きさを測定した。引き続き1981年に打ち上げた観測衛星「ひのとり」はスピン衛星の特徴を活かした回転すだれコリメータによる硬X線像、ブラック結晶による高分解スペクトル等の観測で宇宙空間からの本格的な太陽X線観測の道を拓いた。これらの経験と成果をもとに、太陽の高エネルギー現象を総合的に解明しようとするSOLAR-A(「ようこう」)衛星計画の検討が80年代の前半に始まった。

この計画の目的は、高性能の観測装置で地上観測ではできなかった太陽表面での高エネルギー現象を総合的に観測し、太陽フレアを中心とした太陽活動を解明することである。そのため世界の天体物理学者の叡智と技術を結集して最高の性能を持つ太陽観測天文台を宇宙空間に作るための作業が開始された。そして、計画の立案から始まり、搭載する観測装置の選定・設計・製作、衛星の運用、データの受信・取得と配布、データ解析・研究、研究成果にもとづく啓蒙活動にいたるすべての点で全面的に緊密な国際協力がとり入れられてきた。このことは今では珍しいことではないが、宇宙研の衛星としては初めてのことであったといえる。

「ようこう」のもう一つの特徴は、宇宙研の中にこの分野の中核となる研究者集団が無く、所外の研究機関(国立天文台他)、研究グループの力を結集し、宇宙研がそれをまとめて衛星計画を遂行するという形をとったことである。これは共同利用研究所としての事業遂行の一つの重要な形態であるが、「ようこう」の後にも先にも無いことであった。



図1.1 M-3SII ロケットの3段目に載ったSOLAR-A

技術的には、初めての本格的画像データ取得のための大容量のデータ蓄積・伝送、高精度天体望遠鏡のための高精度・高安定度姿勢制御、世界初のX線CCDの搭載等々、多くの新規開発事項があったが、幸い宇宙工学グループ、関係メーカーのご協力により十分に所期の性能を実現することができた。

こうして、半年間の研究開発(概念設計)の後、4年半という短い開発期間で衛星は完成、当初からの予定通り1991年8月に打上げに成功した。さらに、衛星は予想寿命を遥かに超える10年以上にわたり、ほとんど故障無しに正常に機能し、太陽活動の1周期(極大期から次の極大期まで)連続観測ができたことは望外の成果であった。

今回「ようこう」特集号を作るにあたって、ここに改めて所内外の関係者のご協力・ご支援に深く感謝する次第である。
(小川原嘉明)

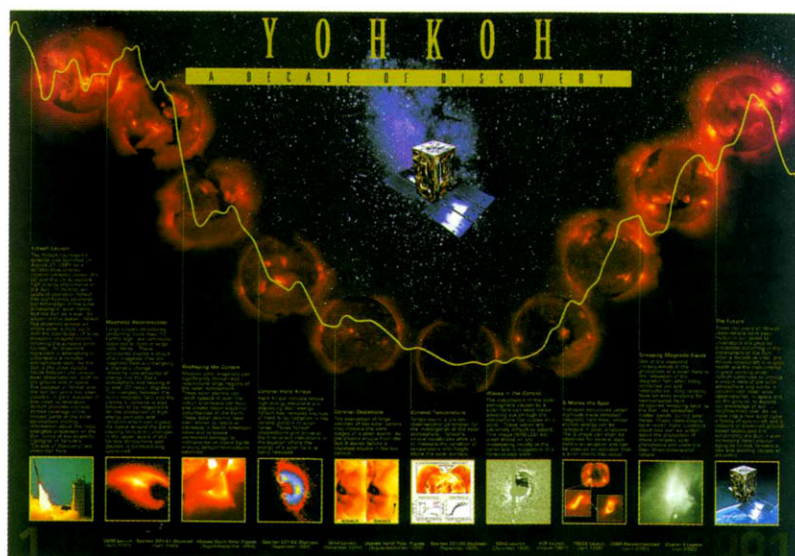


図1.2 「ようこう」の10年(1991年~2001年)

第2章 「ひのとり」から「ようこう」へ ——コロナの加熱機構とフレア爆発の謎に挑む——

コロナは皆既日食の時に見える太陽の薄い大気です。太陽表面の温度は6,000度ですが、コロナが200万度もの高温のガスであることは、1940年代に初めてわかりました。コロナのスペクトルの中に見られる、どの元素が出しているのかわからなかったスペクトル線が、電子を13個失った鉄のイオン(鉄の原子は常温では26個の電子を持っています)によるものだということが分光実験によって解明されたのです。

コロナの観測は皆既日食のわずかな時間だけでなく、太陽本体を金属円盤で隠して観測できるコロナグラフという特殊な望遠鏡で、長時間にわたって観測できるようになりましたが、地上からの可視光による観測では、太陽の縁の外のコロナしか見ることができず、得られる情報は限られたものでした。この状況が一変したのは、ロケットや人工衛星による大気圏外からの観測により、コロナが放射するX線が直接観測できるようになってからです。特に1973~74年に行われたアメリカのスカイラブ実験により、長期間にわたってコロナの軟X線(エネルギーの低いX線)観測が実施され、大きな研究の進展がありました。コロナは、強い磁場を持つ黒点の周辺で特に高温・高密度で、磁極を結ぶ磁力線をかたどっていることから、コロナを200万度もの高温に加熱するメカニズムには、磁場の存在が大きな役割を果たしていることが確実に became したのです。

黒点やその周辺(総称して活動領域と呼ばれます)では、時々フレアと呼ばれる爆発現象が起きます。フレアは磁場の歪みのエネルギーが元となって起こる爆発現象で、コロナを1,000万度以上の超高温に熱します。また電子、陽子は高速に加速されて磁力線に沿って流れ落ち、正負の磁極に対応する太陽表面をたたき、高いエネルギーのX線(硬X線)を放射します。1981年に打ち上げられた「ひのとり」は、すだれコリメータを使った硬X線望遠鏡で、この画像を見事にとらえました。

X線観測時代以前では、超高温のフレア領域から伝わった熱が太陽表面を暖めて輝く様子が地上から可視光線により観測されていました。これはいわばフレア領域の足跡のようなもので、フレア爆発の現場はX線観測で初めて見えるようになったわけです。しかし「ひのとり」の時代にはスカイラブ衛星に搭載されたような軟X線望遠鏡が打ち上げられなかったため、高温のコロナやその中の磁場の構造と、フレア爆発の関係は未知のままでした。「ようこう」衛星は、この謎を解き明かすことを目指して打ち上げられたのです。

(桜井 隆)

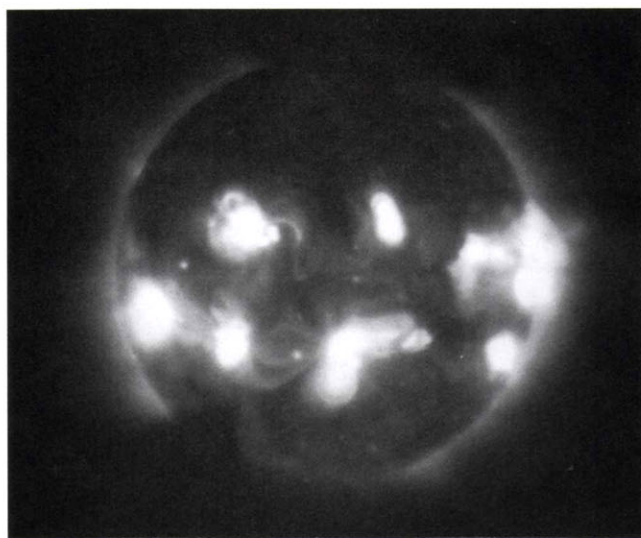


図2.1 スカイラブ衛星の軟X線望遠鏡による太陽コロナの画像(1973年9月4日)。CCDを搭載した「ようこう」と違い、これはフィルムに撮影されたもの。

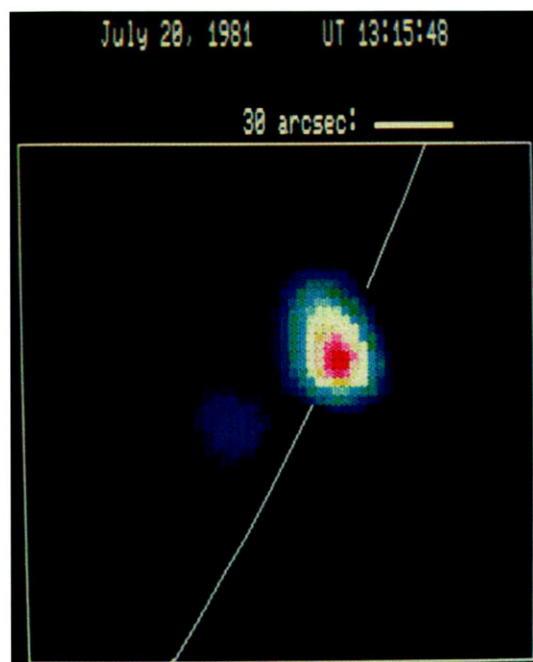


図2.2 「ひのとり」衛星の硬X線望遠鏡がとらえたフレアの二つ目玉構造。円弧は太陽の縁を表す。

第3章 「ようこう」の観測装置

太陽観測衛星「ようこう」には4種類の観測装置が搭載されています。「軟X線望遠鏡(SXT)」「硬X線望遠鏡(HXT)」「ブラッグ分光器(BCS)」「広帯域スペクトル計(WBS)」の4つです。

「軟X線望遠鏡」は、日米の国際協力で開発された、太陽全面を軟X線領域(5-60 Å)で撮像する望遠鏡です。太陽コロナのダイナミックな変化や太陽フレアで生成される高温プラズマを高い空間分解能(2.45秒角)で観測します。軟X線望遠鏡は、斜入射X線反射鏡により直接太陽像を焦点面に結び、X線CCDを検出器として用いています。6種類のフィルタで太陽を撮像することにより、太陽プラズマの温度・エミッションメジャーなどの物理量を温度解析によって求めることができます。「ようこう」上に搭載されたマイクロプロセッサにより、フィルタの選択、露出時間、観測領域を自動制御しています。

「硬X線望遠鏡」は、太陽フレアが作り出す高エネルギー電子・超高温プラズマからの硬X線放射の撮像観測を行い、フレアにともなう磁気エネルギーの解放機構、とくに粒子加速機構及び硬X線放射機構の解明を目的としています。HXTは、64個のすだれコリメータから構成された、世界で初めての「フーリエ合成型」のX線望遠鏡です。64個の空間フーリエ成分を地上のコンピュータを用いて像合成を行います。第21太陽極大期(1979-1982年)に活躍したSMMや「ひのとり」に比べ、時間分解能(0.5秒)、空間分解能(5秒角)ですぐれています。また、4種類のエネルギーバンド(14-23-33-53-93keV)でフレアの硬X線像をとらえることができ、30keV以上の高いエネルギー領域での撮像観測を初めて実現しました。

「ブラッグ分光器」は鉄などの高階電離イオンが発する軟X線の4波長域の輝線スペクトルを高分解能で分光観測することができます。これにより、フレア中のプラズマの加熱や運動の様子を解明することができます。BCSは日英米国際協力で開発されました。

「広帯域スペクトル計」は、軟X線(2-30keV)から、硬X線(20-400keV)・ガンマ線(0.2-100MeV)にいたる広いエネルギー域のスペクトル観測を目的としていま

す。なお、ガンマ線領域のスペクトル計は、宇宙ガンマ線バーストのモニターとしても活躍しました。フレアのスペクトル観測を行うことで、フレア時に生成される高温プラズマの加熱メカニズムや、高エネルギー電子やイオンの非熱的な加速メカニズムを明らかにすることを目的としています。

(矢治健太郎, 坂尾太郎)



図3.1 軟X線望遠鏡(SXT)



図3.2 硬X線望遠鏡(HXT)



図3.3 ブラッグ分光器(BCS)

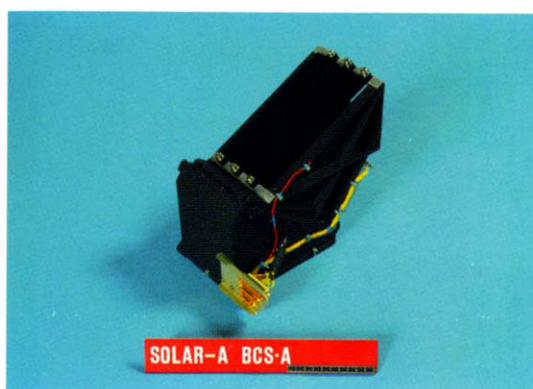


図3.4 広帯域スペクトル計(WBS)

第4章 「ようこう」の科学成果

4.1 概観

宇宙科学研究所の太陽X線観測衛星「ようこう」は、太陽大気(コロナ)の高エネルギー現象を観測するために、1991年8月30日、鹿児島宇宙空間観測所からM-3S-II型6号機により地球周回軌道に打ち上げられました。「ようこう」には、日米、日英米の国際協力で作られたX線望遠鏡とX線ブラッグ分光器を含めて、合計4種類の観測装置が搭載され、衛星の運用およびデータ解析も広く国際協力で行われてきました。さらに、取得後一定期間が経過した観測データはすべて世界中の研究者に公開され、所期の想定を超えたさまざまな視点からの広範な太陽研究にも役立てられてきました。

「ようこう」は打上げ直後より、搭載された最新鋭の観測装置により、画期的な科学成果を挙げてきました。軟X線望遠鏡は、衛星に載せたX線望遠鏡としては世界で初めてCCDカメラを検出器に使用し、高分解能・高画質・連続観測を実現し、太陽コロナがさまざまな空間・時間スケールでダイナミックに激しく変動する様子を鮮明に映し出しました。また、やはり世界で初めて30keV以上の高エネルギー域での硬X線撮像を実現した硬X線望遠鏡により、太陽フレアが生み出す高エネルギー電子の振舞いを明らかにしました。

「ようこう」は、その後10年間にわたって順調に観測を継続し、1太陽活動周期(約11年)にわたって連続してX線で太陽を観測した世界で初めての科学衛星となりました。2001年12月15日、南太平洋の上空で金環

食の日食帯に遭遇したことに端を発して姿勢制御異常、電源喪失という事態に追い込まれ、現在にいたるも科学観測が再開できないでいますが、それまでに、ほぼ600万枚に及ぶ「激しく活動する太陽コロナ」の鮮明な軟X線画像を撮影、3,000個もの太陽フレアを硬X線で撮像観測し、さらにその詳細なスペクトルを記録することができました。

「ようこう」の科学成果は、これまでに1,000編を超える学術論文に結実しました。「ようこう」のデータを用いて書かれた論文による博士学位の取得者数は世界中で54名(内、日本国内で24名)、日本国内での修士学位の取得者数は47名を数えました。これらの学術論文は、そのひとつひとつが我々の太陽コロナ理解を大きく塗り替えたと言っても過言ではないでしょう。ここでは誤解を招くおそれをあえて侵して、多岐にわたる「ようこう」の特筆すべき科学成果を、いくつかのキーワードに括ってみることにします。

- 太陽磁場に支配されるコロナの多様な構造・ダイナミックな変動を鮮明に描き出したこと
- 太陽フレアが磁気再結合(リコネクション)過程であることを確証したこと
- 太陽コロナが太陽磁場により加熱・生成されていることを確証したこと
- 地磁気嵐を引き起こすコロナ大規模噴出現象(CME)の前兆をX線でとらえ、その予測可能性を実証したこと

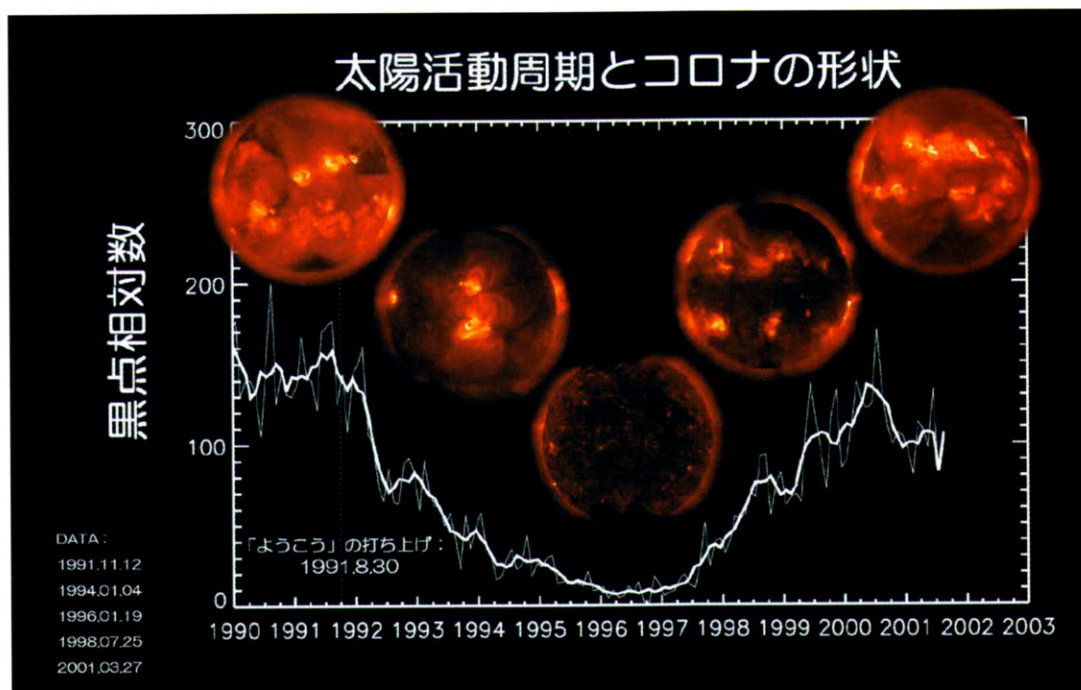


図4.1 「ようこう」の10年

これらの内容については、本特集の各々の記事に詳述されますので、ここでは触れません。忘れてならないその他の側面について、まとめておきます。

- 国際協力：「ようこう」に結集した日米英の3カ国の研究者は、それぞれが得意とする技術を持ち寄って、搭載装置の開発、衛星の運用、データの解析を共同で実施しました。この経験と教訓が今後に活かされる資産となるでしょう。
- 全世界へのデータ発信：「ようこう」画像はインターネットで世界中に即刻配信され、各地で太陽観測計画の策定に使われました。また、「宇宙天気予報」のための基礎的データとして活用されました。
- 科学成果の社会への還元：X線という全く新しい目で見た太陽画像を動画に編集し、最先端の科学成果を親しみやすい形で一般の人々に提供しました。「ようこう」の映像は、ワシントンのスミソニアン航空宇宙博物館でビデオで常設展示されたのをはじめとして、世界各国で博物館・科学館、テレビ番組、科学映画、雑誌等で広く紹介され、また教科書に登場し、科学教育と啓蒙活動のために活用されてきました。

かくして、1990年代は太陽物理学分野では「ようこう」時代と呼ばれるようになりました。いまSOHO衛星(ESA, NASA)やTRACE衛星(NASA)が「ようこう」の切り拓いた地平をさらに推し進めるべく太陽観測を続けていますが、宇宙科学研究所が次の太陽観測衛星SOLAR-Bを打ち上げ、再び世界の最先端に飛翔する日が遠からず来ることを信じています。

(小杉健郎)

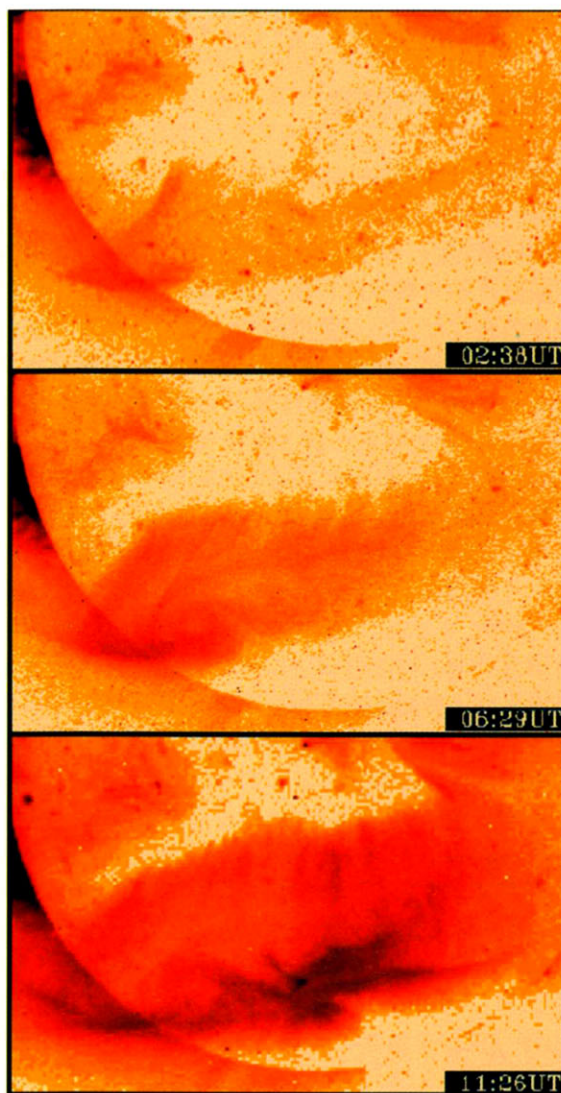


図4.2 「ようこう」が捉えた太陽コロナの大規模再編成
(1994年4月14日、太陽南極近傍)

日本的発想と国際協力

科学を推し進めるのは、個人の独創的な発想による。しかし、今日多くの人々の協力なしには可能でない観測があり、個人と多くの人との協調が必要となっている。衛星観測は、特にそうである。

「ようこう」は、それ以前に打ち上げられた「ひのとり」を、精神的には引き継いでいる。「ひのとり」には、2人の独創的な研究者が日本的発想で開発した2つの機器が搭載され、183kgという矮小な衛星であるにもかかわらず、世界の太陽研究者を驚かせた研究成果を出した。この2人は今は亡き小田稔先生と田中捷雄氏である。機器の1つは“すだれ” コリメータであり、もう1つは受動的X線分光器である。前者は、周知のとおり。後者は、回転する小衛星のため、その回転を利用して、ブラッグ結晶に入射する太陽光が、必要な角度をスキャンできるように工夫されたものであ

る。田中君から何度となく、相談を受け、そのたびに受身でありながら必要なデータが取れること、これこそ柔道のような日本的発想であると実感したものである。

「ようこう」は、「ひのとり」に比べ、384kgとはるかに大きい。重量制限が厳しかったことに変わりなく、その機器は、現在活躍している研究者の、精神的、肉体的なエネルギーの発露されたものである。すばらしい成果を上げた陰には、小川原嘉明・内田豊両氏の先見性的な見識と忍耐強い説得力、およびL. ActonさんとL. Culhaneさんの研究環境とそれに対する精神的な態度の段差をこえた協力があつた。「ようこう」チームは、国際協力、国内他(多?)機関協力の鑑であることを誇りにしたい。

(日江井栄二郎)

4.2 硬X線で見た新しい太陽フレアの姿

さまざまな硬X線源

太陽フレア(太陽面爆発)では、非常に高いエネルギーのX線が放射されます。10keV以上の光子エネルギーのX線を硬X線と呼びます。典型的には、太陽フレアの開始直後から数分間程度、硬X線強度は激しく変動し、その後ならかな強度減少が見られます。前者をインパルス相、後者をグラデュアル相と呼びます。それぞれの相で硬X線源は異なる姿をしています。「ようこう」衛星搭載の硬X線望遠鏡は、世界で初めて30keV以上のエネルギー域での太陽フレアの撮像観測を行い、10年間に3,000以上の太陽フレアを検出しました。また、空間分解能や時間分解能も以前の衛星に比べてはるかに優れています。これらの特徴を活かし、「ようこう」に搭載されている軟X線望遠鏡を始めとする、他の観測装置との共同観測により、さまざまなタイプの硬X線源の存在を示してきました。軟X線フレアループの両足元の硬X線源、軟X線フレアループ上空に浮かんだ硬X線源、グラデュアル相で支配的になる硬X線源などを以下に順に紹介します。また、ここでは紹介できませんが、コロナ中の高々度に淡く広がった硬X線源や1,000km/s程度の速度でコロナ下部から上方へ移動する硬X線源など、これまでにない新しいタイプの硬X線源も観測されています。

フレアループ足元の双子ソース

太陽フレアのインパルス相では、30keV以上のエネルギー域において、硬X線源は、しばしば2つ目玉構造を示します。これらは、軟X線画像との比較からフレアループの両足元に位置していることが分かり、コロナ中で加速された高エネルギーの電子が磁力線に沿って足元に降り注ぎ、彩層上部の高密度の領域で制動放射により硬X線を放射していると考えられます。光速に近い速度の高エネルギー電子が成因であることは、1万km以上離れた二つの硬X線源が0.2秒以内の

同時性を持って強度変動をしていることから確かめられています。図4.3は、1991年11月15日に発生した最大級のフレアの硬X線源の時間発展を示しています。左の強度変化を見ると、インパルス相中に3つの目立ったスパイク構造があることが分かります。それぞれのスパイクのピーク時刻(赤い線の時刻)とその間(青い線の時刻)の硬X線像を右に示しています。2つ目以降のピーク時刻では2つ目玉構造が顕著に見え、2つのソースの間の距離が時間的に広がっていることも分かります。このように2つのフットポイントソースの間の距離が時間的に広がることは、カスプ型磁気リコネクションモデルによく合っています。

フレアループ上空に浮かんだ硬X線源

図4.4は、1992年1月13日に太陽の西の縁で発生した中規模のフレアです。カラー(ネガ：暗いところほどX線が強い)は、「ようこう」SXTで観測された軟X線画像、等高線はHXTで観測された硬X線画像を示しています。強い2つの硬X線が軟X線ループの足元に位置しているのが分かります。これらは、前節で述べたフットポイントソースに対応します。それらに加え

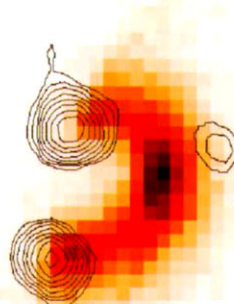


図4.4 フレアループ上空の硬X線源。カラーは軟X線画像、等高線は硬X線画像。

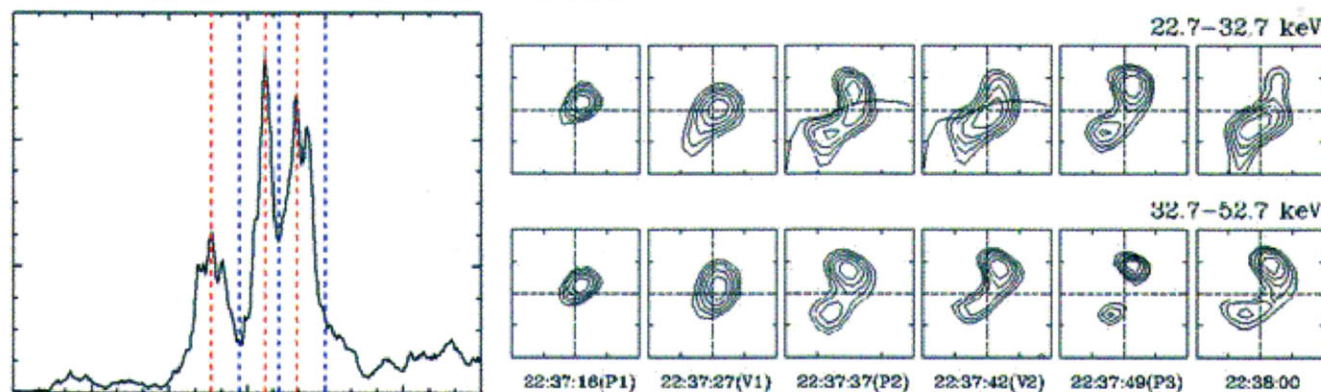


図4.3 フレアの硬X線源の時間発展

て第3の硬X線源がループ上空に存在していることが分かります。この硬X線源は、フットポイントソースと同様、インパルシヴな時間変化を示し、比較的硬いスペクトルをしています。このまったく新しい観測結果は、フレアのエネルギー解放(おそらく磁気リコネクション)がループの外側(上部)で起きていることを示す重要な証拠の一つとなります。しかしながら、この硬X線源については未解決な問題が残っています。この硬X線源が非熱的な電子により作られているとすると、その高エネルギー電子が衝突する高密度プラズマがこの領域に必要なのですが、観測的にその兆候は見えません。また、これが熱的な放射だとすると、約1-2億度の温度が必要であり、そのような高温プラズマをこのコンパクトな領域に閉じこめておく機構を考えないといけません。まだまだ謎が多い硬X線源です。

コロナ中で作られる超高温ソース

フレアのグラデュアル相では、これまで述べた2種類の硬X線源は弱まり、別の種類の硬X線源が支配的になります。この硬X線源は、通常、軟X線ループの頂上付近に位置しており、3,000~4,000万度のプラズマからの熱制動放射で説明可能な非常にソフトなスペクトルを持っています。ときには、この硬X線源がフレアの開始から支配的な熱的なフレアも観測されます。その典型的な例が図4.5に示した1992年2月6日のフレアです。

これらの硬X線像はフレアのX線強度の最大時刻付

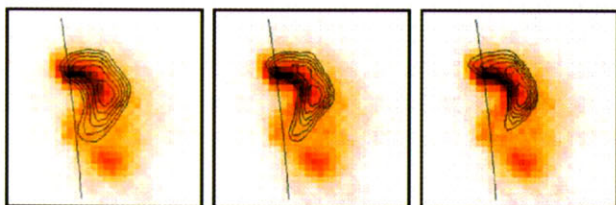


図4.5 コロナ中で作られる超高温ソース。軟X線画像(カラー)は共通。硬X線画像(等高線)は、左が低いエネルギーバンドのもので、右にいくほど高いエネルギーバンドのもの。

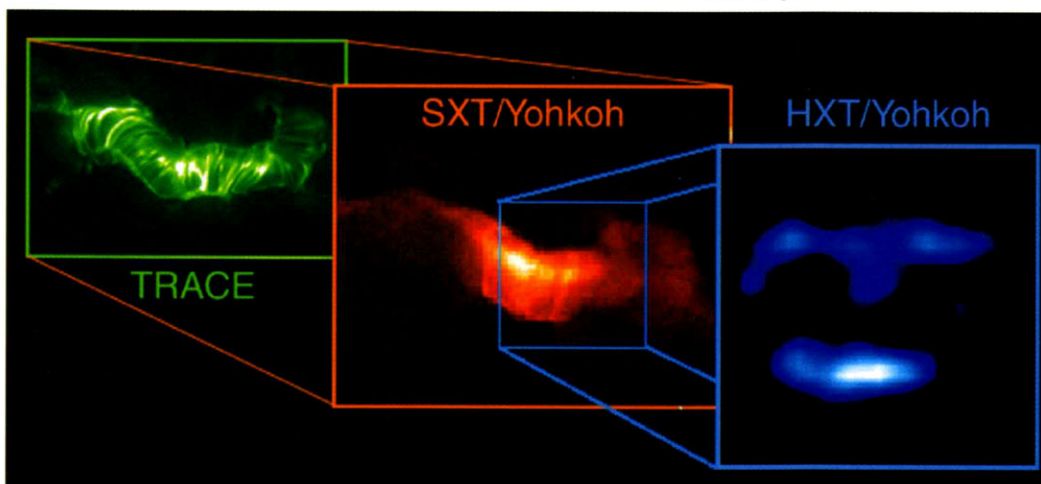


図4.6 紫外線(左)と軟X線画像(中)で見られるアーケード構造と硬X線画像(右)の「平行リボン」

近のものですが、どのエネルギーバンドでみてもループ頂上付近の硬X線源しか存在せず、非熱的電子により作られるフットポイントソースはほとんど見えません。この硬X線源は、軟X線ループとほぼ同じ位置に存在しているように見えますが、軟X線ループを形成する1,000~2,000万度のフレア主成分プラズマが彩層蒸発により供給されているのに対し、超高温成分はコロナ中でプラズマが直接加熱されて作られていると考えられています。

硬X線の二本のリボン

H α 線(水素の輝線)では、2本の平行な帯のように明るく輝く「平行リボン」フレアと呼ばれるフレアがしばしば観測されます。また、軟X線や紫外線では、その2本のリボンをまたぐようにループ群がアーケード状に存在することがあります。しかし、そのようなフレアでもあいかわらず硬X線源は二つ目玉であり、粒子加速はある特定の磁力線でのみ起きているのだろうか、という疑問が存在していました。しかし、2000年7月14日のフレアで、初めて硬X線の「平行リボン」が観測されました。

図4.6左はTRCAE衛星の撮影した紫外線写真で、東西方向に12万kmもの長さを持つアーケード構造を示しています。これに対して右は53~93keVのエネルギー域での硬X線画像です。アーケードを構成するループ群の足元に対応して東西方向に伸びた2本の帯状の硬X線がはっきりと見えます。この観測により、粒子加速(エネルギー解放)はアーケード中のある特定のループだけで起きているのではなく、アーケードシステム全体で同時に起きていることが確かめられました。

これまでいくつかの例を紹介しましたように、硬X線望遠鏡の観測により太陽フレアに関する新しい知見を得ましたが、もっとも重要な問題の一つであるフレアの粒子加速機構の最終的な特定にはいたっていません。硬X線望遠鏡の観測データを解析しつくした上で、新しい観測装置を用いてチャレンジしたいテーマであります。(増田 智, 坂尾太郎)

4.3 フレアの磁気リコネクションモデル

「ようこう」の最大の成果のひとつは、フレアのエネルギー解放過程が磁気リコネクションであることをほぼ決定づけたことです。図4.7は、その根拠になった多数の証拠のうちでも最も重要な「カスプ型ループ」の軟X線画像です。丸いループの上に乗っている尖った構造(カスプ構造)が重要な発見です。

磁気リコネクションモデル(図4.8)では、フレアのエネルギー解放は磁力線のつながりかわり(リコネクション)によって起こると考えられています。図4.8のちょうど中央あたりにアルファベットの「X」の字のようになっている箇所があります。ここがちょうどつながりかわっている箇所です。このX字構造の左側と右側とでは磁力線の向きが上下逆さまで反対の向きをもっています(つながりかわる前の磁力線は図には描いていませんがたくさん存在しています)。これがちょうど「X」のところだけで互いに打ち消しあうと、その結果、とがった構造をもった磁力線が「X」字の上下に2組できあがることになります。

磁力線はゴムひものような性質をもっていますから、この2組のとがった磁力線はパチンコの要領で上と下とにそれぞれ弾かれていきます(矢印が弾かれる流れの様子を示します)。そうして空っぽになったところは圧力が下がりますので左右からまた磁力線がやってきて(矢印が流入する様子を示しています)、つながかわるという作業が繰り返されるのです。このとき周囲のガス(プラズマ)が磁力線に巻き込まれていっしょに運動します。左右からやってくるプラズマは互いに衝突して(磁気流体スローモード)衝撃波をつくりそこで熱を発生します。

おおもとをたどるとそのエネルギーはつながりかわった磁力線がもっていたものですから、これらのサイクルは磁力線のエネルギーをガスの運動エネルギーや熱エネルギーに転換している作業になります。この過程が劇的にしかも大量に起こるのがフレアだとこのモデルでは説明しています。

このモデル(図4.8)と観測(図4.7)とを比較して見るとその類似性は明らかです。磁力線がつながりかわった箇所の下では頂上のとがったループ、すなわちカス

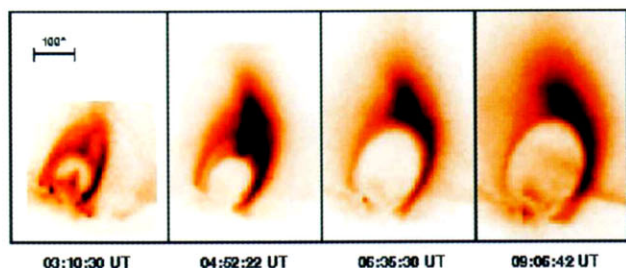


図4.7 1992年2月21日のフレアの「ようこう」軟X線望遠鏡による観測(ネガ画像)。太陽の東の縁付近で起きたフレアで、上が太陽面の東、右が北。太陽面上では1秒角が700kmにあたる。

プ型ループができますので、さきの図4.7の観測結果は、この磁気リコネクションモデルを強く支持する根拠になったのです。さらにこのカスプ型ループは時間とともにそのままの形を保ちつつだんだん大きく成長していきます。ループのふたつある足元の間の距離が少しずつ離れていくのも見てとれます。

磁気リコネクションで磁力線が次々につなぎかわるとカスプの尖った先のさらに外側に新しくつながりかわった磁力線が降り積もっていきますので、この成長は磁気リコネクションモデルによって自然に説明できます。

「ようこう」軟X線望遠鏡の威力のひとつは、プラズマの温度を測定できることでした。このカスプ型フレアについても温度構造がくわしく調べられていて、カスプのより外側ほど高温になることがわかりました。これはエネルギーが解放された直後のより新鮮な高温プラズマが外側から積もってくる様子を示しており、やはり磁気リコネクションモデルでは自然にこれが説明できます。最近のことなのですが、さらにもっと強力な証拠が見つかりました。リコネクションにとまなう流れが別のフレアで見つかったのです。

「ようこう」でみると図4.7のフレアと同じような見事なカスプ型ループを軟X線で示していたのですが、同時に観測していたSOHOの極紫外線撮像望遠鏡(EIT)が、そのカスプの先端に向かって左右からものが動いて集まってくるようすを捉えたのです。ついにリコネクションの現場をつかまえた最初の例でした。フレアの磁気リコネクションモデルを支持する証拠にはこれ以外に、ループ頂上でみつかったインパルス硬X線源や、プラズモイド放出現象などがあります。それぞれ本特集の増田さんらと大山さんらとの記事に詳しく記されていますのでここでは省略させていただきます。

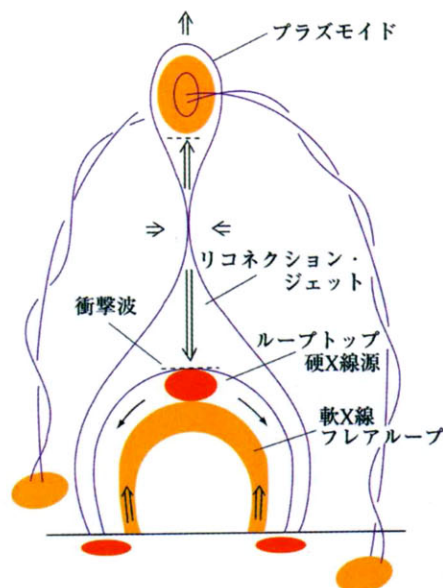


図4.8 フレアの磁気リコネクションモデル。実線は磁力線を表す。

このようなフレアの様子は、「ようこう」観測と平行してコンピュータシミュレーションによっても調べられてきました。図4.9はその結果の図です。このシミュレーションでは、磁気流体力学の連立偏微分方程式系をスーパーコンピュータを用いて解いています。結果の温度分布を見ると、観測で示されたようなカスプ型の構造ができているのがわかります。このカスプ型の縁は熱伝導が伝わる先頭の熱伝導面です。コロナのような高温電離プラズマ中では、熱伝導は磁力線の方だけに効率よくはたらず、その結果熱伝導面はほぼ磁力線に沿った形をしています。このシミュレーション結果(図4.9)と観測(図4.7)との比較から、観測されたカスプ型のループもどうやら熱伝導面をみているものと考えられます。

しかし磁気リコネクション過程では磁気エネルギーを解放する主役は熱伝導面ではなく磁気流体スローモード衝撃波だと思われています。シミュレーションの結果(図4.9)で、カスプ付近で密度が高くなっている箇所があり、注意深く調べると先の熱伝導面とすこし位置が異なることがわかつていますが、この縁がスローモード衝撃波です。このスローモード衝撃波を確かにとらえたという観測例はまだありません。将来の観測が待たれるところです。シミュレーション結果の図をさらに見るとカスプの下に高密ガスで満たされたループがあるのがわかります。このガスは、コロナよりも太陽表面に近い彩層という高密大気から「彩層蒸発」という過程を経て上昇したガスで、強い軟X線を放射します。

実際、「ようこう」で見られるフレアループの多くはこの彩層蒸発ガスを観測していると考えられています。コロナ上空でリコネクションにより発生した熱が熱伝導によって彩層に運ばれて、その高密ガスを急加熱、ガス圧が急上昇してその力でものを持ち上げるの

が彩層蒸発現象です。実際、「ようこう」ブラック結晶分光器でもそのドップラー偏移が受かっています。

図4.7のようなカスプ型ループは数多くのフレアで見つかっており、さらにはフレアだけでなくもっと巨大なスケールで起こる(ただし解放エネルギー密度は小さな)「大規模アーケード形成現象」とよばれる、CMEと関係が深いと考えられる現象でも見つかっています。マイクロフレアとよばれるフレアの縮小版でもどうやらリコネクションが起こっているらしいということが「ようこう」観測で明らかになってきています。つまり磁気リコネクションは、フレアという派手な現象だけを説明するものではなくて太陽コロナでみられるさまざまなエネルギー解放現象の本質なのです。さらに太陽大気中での磁気リコネクションの現場をとらえる努力は今後もつづきます。次のSolar-Bでは磁気リコネクションにともなうプラズマの流れや衝撃波をとらえることが最大の目標のひとつです。

(横山央明・柴田一成)

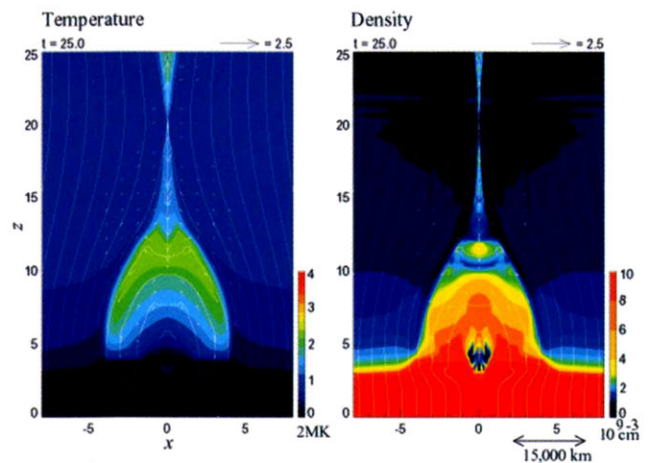
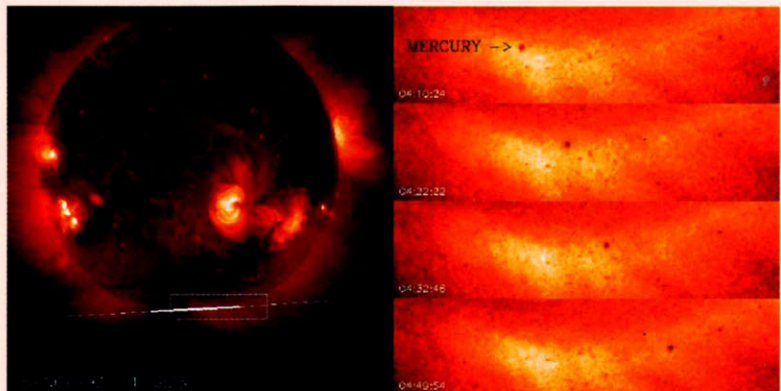


図4.9 フレアの磁気リコネクションモデルにもとづいたコンピュータシミュレーションの結果。左が温度、右が密度の図で、実線は磁力線、矢印はガスの流れを表している。

水星の日面通過

「ようこう」がとらえた太陽画像の中には、ユニークなものがいくつかあります。その中の一つが、1994年11月6日の水星日面通過です。水星日面通過は、太陽の表面を水星が通過するという天文現象で、数年に一度しか起こらない珍しい現象です。「ようこう」でこの現象を観測すると、水星の形が背景の太陽X線像にシルエットとして見えます。この水星日面通過の画像は「スカイウォッチャー」誌に紹介され、天文ファンの関心を引きました。また、SXT画像の正確な座標系や光学特性を確認するのに役立ちました。(矢治健太郎)



太陽フレアと磁気圏サブストームの比較リコネクション学的发展

地球のもつ磁場、地磁気は太陽風により閉じ込められて固有の勢力範囲、磁気圏を作る。この磁気圏には太陽風のエネルギーが流れ込み、オーロラなどを伴う多彩な現象、サブストーム現象が引き起こされている。この磁気圏サブストーム現象においても磁気リコネクションが本質的な役割を果たしていることが明らかになってきた。そして、「ようこう」が主導した太陽フレアにおける磁気リコネクションの研究は磁気圏における磁気リコネクションの研究と相補的な役割を果たしてきたといえる。磁気圏のサブストームは人工衛星による「その場」観測を通してミクロな素過程に関する詳細な知識が得られるのに対し、太陽フレアでは、X線像などによる可視化が可能であることから、大規模な磁力線構造の変化などのマクロな特性に関する情報が容易に得られるからである。

表に太陽フレアの舞台であるコロナ活動域と磁気圏におけるサブストームの主舞台、磁気圏尾プラズマシートの物理的パラメタの一覧を示した。興味深いことに、どちらの舞台でも、特徴的なアルフェン速度($V_A \sim 10^8 \text{ cm/s}$)や空間スケール(数十億cm)はほぼ同じオーダーの量となっている。リコネクション過程においてはその周辺でのプラズマの速度はこうした特徴的アルフェン速度程度に達するから、太陽フレアも磁気圏サブストームも、リコネクション領域からの吹き出し流は数百から千数百km/s程度となっている。

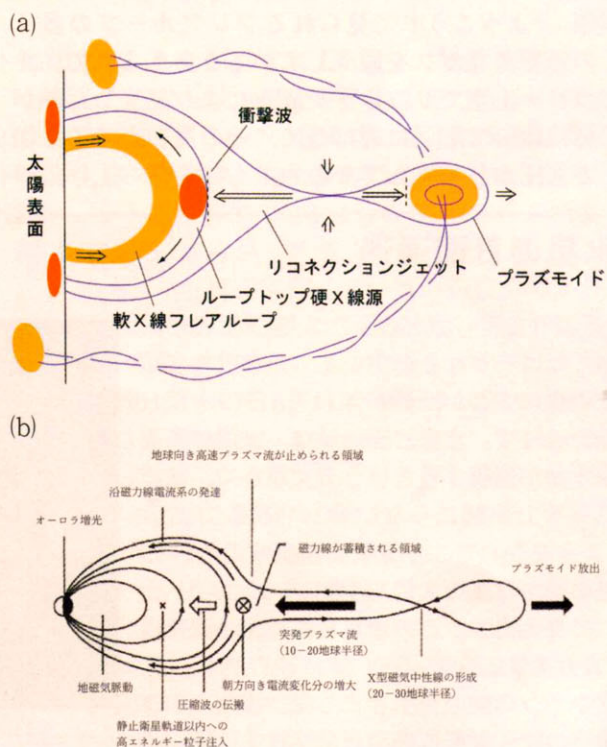
言うまでもなく、太陽フレアとサブストームの間には相違点もある。まず、地磁気ダイポールは一定の方向を持っており、惑星間空間磁場の南北成分が南を向いたときのみ太陽風エネルギーの磁気圏へのエネルギー流入のスイッチが入る。他方、フレア領域の磁場は彩

表：太陽コロナ活動域と地球磁気圏尾の典型的パラメタの比較

物理量	太陽コロナ	地球磁気圏尾
T 温度(K)	$\sim 2 \times 10^6$	$10^7 - 10^8 \text{ K}$
n 粒子数密度(cm^{-3})	$\sim 10^{10}$	$0.01 - 0.1$
B 磁場強度(G)	~ 100	$\sim 10^{-4}$
V_A アルフェン速度(cm sec^{-1})	$\sim 2 \times 10^8$	$(1 - 2) \times 10^8$
C_s 音速(cm sec^{-1})	$\sim 0.2 \times 10^8$	$(0.5 - 1) \times 10^8$
特徴的空間スケール(cm)	数 $\times 10^9$	数 $\times 10^9$
解放されるエネルギー(erg)	$10^{29} - 10^{32}$	$10^{22} - 10^{23}$

層を通して太陽大気下部と結びついており、その構造は全くランダムとはいえないものの極めて複雑である。そして、この磁場構造の違いを反映しているに違いないが、典型的な磁気圏サブストームの全エネルギーは $10^{22} - 10^{23}$ エルグの1桁程度の幅を持つのに過ぎないのに対し、太陽フレアの全エネルギーは $10^{29} - 10^{32}$ エルグの3桁にまたがっている(最近解明の進んできたマイクロフレアやナノフレアまで含めれば、太陽フレアで解放されるエネルギーの分布の幅はさらに大きくなるだろう)。

図に、(a)太陽フレアにおけるリコネクション領域の構造と(b)サブストームに伴う磁気圏尾リコネクション領域の構造を比較して示した。どちらも右(フレアではコロナ上方、磁気圏尾では反太陽方向)向きに磁力線ループに閉じ込められたプラズマのかたまり、プラズモイドが放出される。そして、太陽フレアの場合には、「ループ・トップ硬X線源」(軟X線で明るく光る磁気ループの直上に出現する硬X線源)がX型中性点(リコネクション領域)から放出された高速プラズマ流の証拠と考えられてきた。磁気圏尾では地球半径の10～20倍の距離のところで観測される「突発プラズマ流」と呼ばれる高速プラズマ流がリコネクション領域から放出されたものと考えられている。(寺澤敏夫)



全世界への「ようこう」データの配信

データ解析をしていて別の衛星や装置のデータを探する必要が生じた場合、とりあえずWWWブラウザを立ち上げて、心当たりのブックマークを片っ端から探してみると何かしら役に立つデータがすぐ見つかる。毎日の観測データが、キャリブレーションされてムービーに編集してある場合さえあり、簡単なデータ解析ならWWWさえあればできてしまうのではないかと錯覚するほど便利である。

しかし、「ようこう」が打ち上げられた1991年当時、データというものはなんらかのメディアに収容されて運搬されるのがあたりまえであり、大きな磁気テープを大量に抱えて海外をうろうろする事も珍しくなかった。初期のデータ運搬と解析では500MBのMOが大活躍であった。なにしろオープンリール式磁気テープの10倍以上のデータがわずか5インチの小さなディスクに収まるのであるから画期的である。運用当番等で宇宙研に来る際には、夜な夜なD棟でデータをコピーして持ち帰るという崇高な使命を帯びていた院生も多かった。その後、国立天文台の関係者の努力で、エクサバイトテープにコピーされたアーカイブデータが数ヵ月遅れで配布されるようになり、関係者はずいぶんとありがたい思いをした。

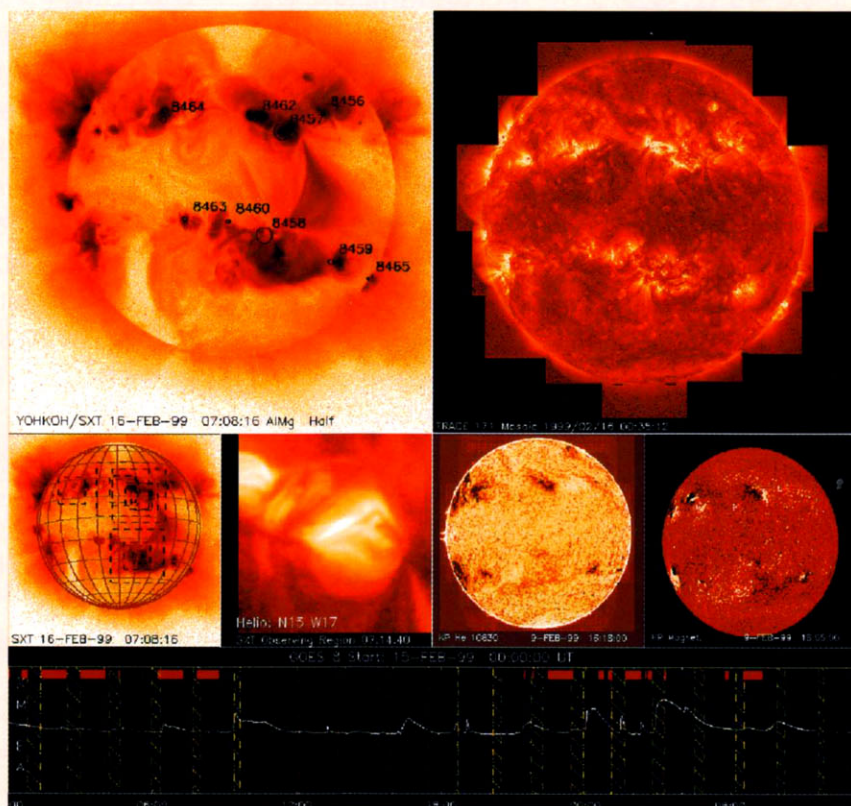
「ようこう」の運用開始時期は日本でも主要大学を中心に今で言うインターネットが導入された時期であり、地上天文台等に観測情報をメールで配信したり、お互いのデータを見ながら共同観測を実施するなどと言う、今ではあたりまえのことを関係者は一つ一つ試行錯誤していった。

その中で、インターネットを利用して、全世界に向けて「ようこう」データの配信ができないかという要望が高まり、常田さんから平磯(通信総合研究所：CRL)で担当することを打診された。当時、私はCRLに採用されたばかりであったが、自由に使える(お守りさせられている)ワークステーションがいくつかあり、これに取り組むことになった。当時平磯は独自にインターネット接続しており、64kbpsという高速接続(!)で回線に余裕があった事も理由の一つだったと思う。

今のようにセキュリティにうるさい時代と違ってファイアーウォール等というややこしいものもなく、付け焼刃の知識でftpサーバを仕立てた。1日1枚のデータを処理して毎日CRLへ送信する仕組みはロッキードのモリソン氏と一緒に作り、直ちに運用を開始した。これは非常に好評であり、システムのトラブル等で数日サービスが停止するたびに、必ず何通かのお叱りのメールを海外からいただいたものである。また、CRLでは現在の「宇宙環境情報サービス」の前身の「電波擾乱予報」を業務として行っていたが、コロナホールの形状の正確な把握やLDEフレアに伴うアーケード形成といった地磁気嵐や電波伝播異常の原因となる太陽面現象をいち早く確認することができるようになり、我々自身も大きな恩恵を受ける事ができた。

その後WWWの爆発的普及で、あちこちのサイトで「ようこう」の準リアルタイム画像が閲覧できるようになり、CRLのftpサーバも自然とその役割を終えていった。

(秋岡真樹)



「ようこう」ホームページ上の「昨日の太陽」

4.4 フレアに伴うX線プラズモイド噴出現象

「ようこう」が打ち上げられてから3ヵ月が過ぎた頃、多くの研究者を驚かせる一連の画像が軟X線望遠鏡から送られてきました。そこには、フレアループの上空で飛び出すプラズマの「かたまり」(プラズモイド)が鮮明に写しだされていたのです。その内の1枚を図4.10に示します。そもそもX線を放射しているのですから、このX線プラズモイドは非常に高温であるはずで、このようなX線プラズモイドは過去のX線観測では見つかっていませんが、「ようこう」の軟X線望遠鏡画像の高画質が検出を可能としたのです。

それでは、このX線プラズモイドが太陽フレアといかなる関係にあるのか、今までに何が分かってきたのかを説明していくことにしましょう。

フレアのメカニズムとプラズモイドの噴出現象

太陽フレアには短寿命(数分~数十分)のものから長寿命(数時間以上)のものまで、さまざまなバリエーションがあります。長寿命フレアでは、しばしば、プロミネンスの噴出現象が見られます。プロミネンスは約1万度のプラズマから放射される光($H\alpha$ 線)で観測されますから、長寿命フレアでは低温プラズマの噴出は珍しいことではなかったのです。

「ようこう」は、このプロミネンスの噴出した下方に、カスプ構造やアーケード構造をしたフレアループが軟X線で明るく輝くことを見つけました。両者の位置関係、発生タイミング、フレアループ内の温度構造を調べた結果、長寿命フレアではフレアループの上空で磁力線のつながりかえ(磁気リコネクション)が起きていることが明らかになりました。

他方、短寿命なインパルス・フレアでは、プロミネンスの噴出が見られることは稀で、また、軟X線の

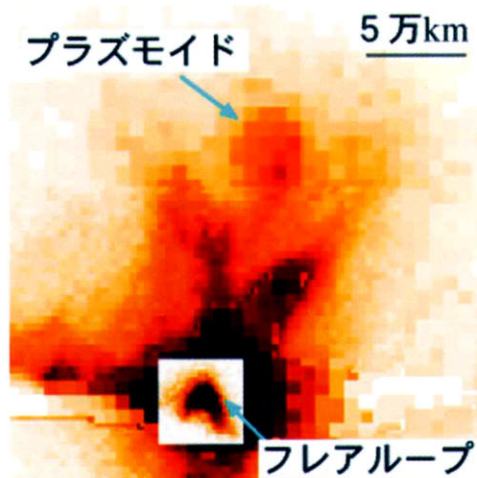


図4.10 軟X線観測で捉えられたX線プラズモイドの噴出現象(1991年12月2日)。ネガ表示(濃い色ほどX線強度が強い)。このプラズモイドは上方に向かって噴出している。

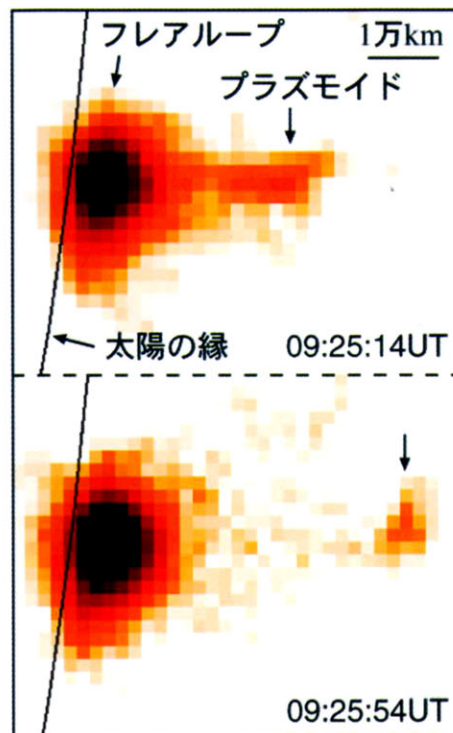


図4.11 インパルス・フレアに伴うプラズモイド噴出(1992年10月5日)。ネガ表示。

観測でもひとつのループがひときわ明るく見えるだけなので、発生メカニズムが長寿命フレアとは異なるのではないかと、思われてきました。ところが、「ようこう」の硬X線観測によってフレアループ上空に位置する硬X線源が発見され、さらには、フレアループやこの硬X線源のさらに上空でX線プラズモイドの噴出現象が見つかったのです。図4.11にその1例を示します。

また、長寿命フレアでもX線プラズモイドの噴出が起きています。1992年2月21日の長寿命フレアの例を図4.12に示します。カスプ構造をしたフレアループの上空を飛んでいるX線プラズモイドがはっきりと見えます。

このように、どちらのタイプのフレアでもX線プラズモイドの噴出が起っています。X線プラズモイドの発見によって、短寿命のインパルス・フレアも、長寿命フレアと同じように、コロナ上層で起こる磁気リコネクションがフレアの爆発エネルギーを供給しているという、統一的な理解ができるようになりました。

X線プラズモイドの性質

「ようこう」が見つけたX線プラズモイドの性質をまとめてみます。

X線プラズモイドの温度は、通常、700万~1,500万度で、フレア時に明るく輝くフレアループ(1,500万~

2,000万度)や、しばしばフレアループのすぐ上空に見られる超高温領域(1,500万～3,500万度)ほどには高温ではありません。

X線プラズモイドの噴出方向ですが、フレアループのすぐ上空に超高温領域が現れる方向と一致していることが多い(約60%)ことが分かりました。この超高温領域は磁気リコネクションの発生箇所そのもの、もしくは磁気リコネクションに伴う衝撃波を見ていると考えられますから、X線プラズモイドが磁気リコネクションに直接的に関係した現象であることが分かります。

噴出速度は10～400km/s程度のものが大部分で、インパルス・フレアに伴うX線プラズモイドの方が長寿命フレアに伴う場合よりは速い速度で飛んでいくという傾向があります。磁気リコネクション説によると噴出速度はアルフベン波の速度と関係づけられるはずですから、インパルス・フレアは長寿命フレアよりもフレア領域の磁場が強いために噴出速度が速くなると解釈されます。

さて、X線プラズモイドはいつ飛び出すのでしょうか？ フレア開始前よりなんらかの「かたまり」の痕跡を見ることのできるX線プラズモイドを調べていくと、フレアの始まる10～15分前に姿を現し、その後フレアが始まるまで数km/s～10km/s程度のゆっくりとした速さで上昇しています。そして、フレア(フレアに伴う硬X線放射)の始まりと時をほぼ同じくして、X線プラズモイドは突然強い加速を受け、噴出となることが分かりました(図4.13参照)。このタイミングに関する研究から、フレア・メカニズムである磁気リコネクションの進行を速めるのにプラズモイドが一役かっているのではないかと思います。

最後に構造ですが、そもそもX線プラズモイドがフレアに比べるときわめて暗い現象であること、「ようこう」の軟X線望遠鏡がフレア本体の観測に最適化さ

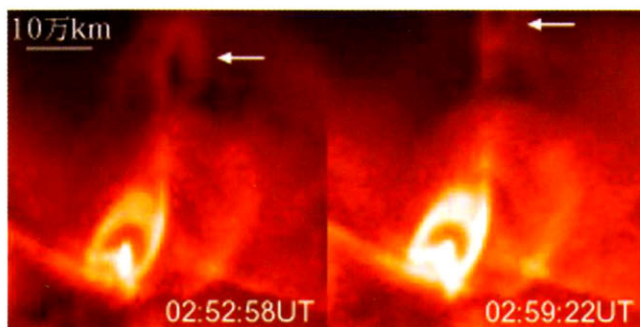


図4.12 長寿命フレアに伴うプラズモイド噴出(1992年2月21日)。プラズモイド(矢印)の下にカスプ構造をしたフレアループが見える。カスプ構造は時間とともに成長する。

れており、広く周辺部を最高の空間分解能で観測するように設計されてなかったことなどの制約により、なかなか断定的なことは言えませんが、なんとなく捩れたループのように見えるような気がします。図4.10や図4.12からは、皆さんにはどのように見えるでしょうか？

すべてのフレアはX線プラズモイドを伴う

それでは、すべてのフレアでX線プラズモイドの噴出が起きているのでしょうか？ 答えはイエスのようです。さきに述べたプラズモイド噴出のタイミングを考慮しながらたくさんのフレアを調べたところ、約70%のフレアでX線プラズモイドを見つけることができました。フレアのX線強度ごとにプラズモイドの有無を調べてみると、最もX線強度が強いXクラスのフレア(現象数は少ないですが)では100%、次に強いMクラスでは約80%、Cクラスでは約35%のフレアでX線プラズモイドが見つかるという結果になりました。フレアのX線強度が弱くなるとプラズモイド検出の割合が下がるのは、X線プラズモイドが小さく、寿命も短くて観測が困難になるのではないかと推測できます。どうやら、すべてのフレアがX線プラズモイドの噴出を伴うと結論できそうです。

「ようこう」によって発見されたX線プラズモイドは、太陽フレアや磁気リコネクションの理解に大きな役割を果たしてきました。フレアのメカニズムである磁気リコネクションは、地球磁気圏も含め、宇宙のいたるところで起きている重要な天体プラズマ現象です。太陽は磁気リコネクション領域を詳細に観測できる唯一の星であり、X線プラズモイドは磁気リコネクションを理解する重要な鍵の一つです。今後の研究の進展を期待しています。

(大山真満, 秋山幸子)

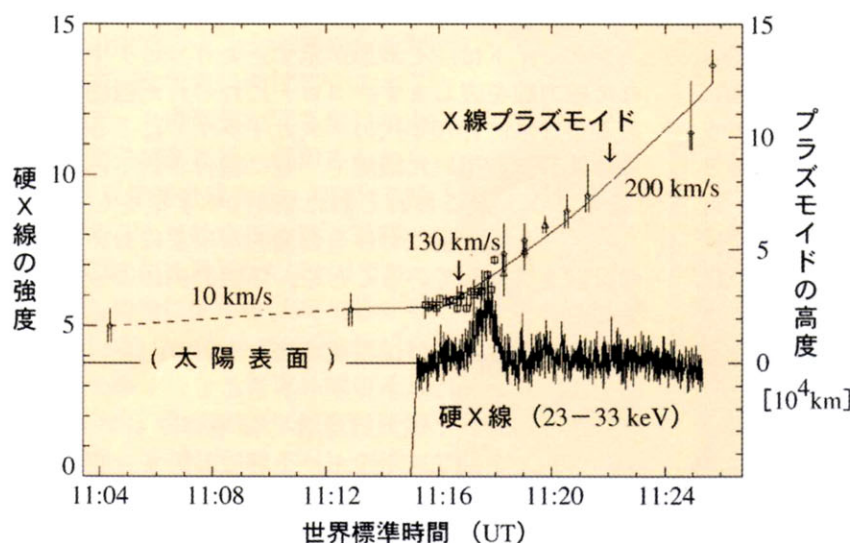


図4.13 プラズモイドの高度と硬X線放射の時間変化(1993年11月11日のフレア)。プラズモイドは硬X線フレアの開始付近で突然強い加速を受けている。

4.5 S字マークは要注意 — 太陽からの質量放出

CME(Coronal Mass Ejection)と呼ばれる巨大な電離ガスのかたまりが、太陽から惑星間空間に向けて毎日少なくとも1回ほどは飛び出していくのをご存知でしょうか？

CMEの立体構造は視線方向に沿った情報がないため詳しくはわかっていませんが、写真からは主に先端部分、中心にあるコア部分、両者の間を占める空洞部分の3つから構成されると考えられています(図4.14)。風船のように膨らんでいくもの、パチンコ玉のように飛び出すもの、らせんや渦を描くものと形は様々ですが、どのCMEもしばらく太陽面につながったまま、太陽をすっぽり覆い隠すサイズまで急激に成長していきます。CMEの平均質量は $10^{15}\sim 10^{16}$ g、速度は数十～数千km/s、運動エネルギーは $10^{31}\sim 10^{32}$ エルグと見積もられており、まさにフレアに匹敵する大爆発現象です。

CMEは時々地球に向かって飛び出します。地球を通過する際、CMEは地球周辺の電磁場、粒子環境を大きくかき乱し、人工衛星や長距離電波通信に障害をひき起こします。高エネルギー粒子の飛来で宇宙飛行士はもちろん、高高度軌道を飛ぶ旅客機の乗員乗客が被曝したり、高緯度地方の発電所やパイプラインが被害を受ける危険性もあります。そこで、CMEが太陽面上のどこから、いつ、どちらの方向へ飛び出すかをあらかじめ予報して、CMEの襲来に備える必要があります。

ここでは、「ようこう」とSOHOの2つの衛星の共同観測で見えてきた、CMEの源について紹介します。

「ようこう」が見つけたCMEの目印

太陽コロナの密度は太陽表層に比べるとはるかに希薄ですが、太陽本体を円盤で隠して強い光をさえぎる(コロナグラフ)と、コロナを漂う電子に反射した淡い光を見ることができます。光の明るさは視線方向に沿って足し合わせたコロナ密度に比例するので、天球面に投影した二次元面上でのコロナの密度分布がわかります。まず目に入ってくるのが、太陽から放射状に伸びた無数の細い線、ストリーマーです。ストリーマーは太陽面上の双極性磁場領域に根本をもつ、惑星間空間に向かって口を開けた長大な磁力管構造です。CMEはこのストリーマーをかき分けながら飛び出すのですが、そのとき太陽面では何が起きているのでしょうか。

太陽とそのごく近傍をX線で観測する「ようこう」では、直接的には巨大なCMEをとらえることができません。しかし、「ようこう」の軟X線画像から、CME放出のメカニズムを知る上で非常に重要となる鍵が見つかりました。CME出発点の目印といわれるS字状の構造、シグモイドです(図4.15)。太陽の南半球ならS字、北半球なら逆S字に光って見える活動領域

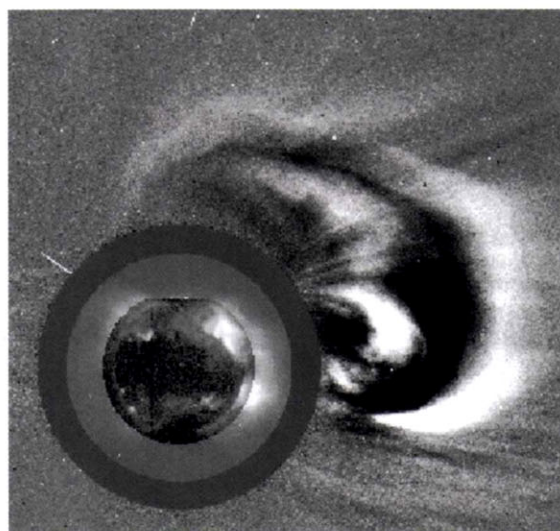


図4.14 はっきりとした構造をもつCME。足元でアーケード型フレアが起きた。円内は「ようこう」SXTの太陽全面像、円外はSOHO搭載LASCOコロナグラフの差分像。1997年12月6日。

が現れたら、要注意。数日中にそこでフレアと共にCMEが起こるでしょう。同時にS字構造は姿を消し、S字のあったまん中あたりに先のとがったカスプ構造やアーケード状の構造が現れます。このカスプやアーケードは、逆向きの開いた磁力線同士がくっついて磁気エネルギーを解放し、周囲の物質をはじき飛ばして閉じた磁力線に姿を変えたことを示唆します(磁気リコネクション)。CME前後の画像の差分をとると、S字の両端が対になって減光しています。輝度減光は紫外線画像でも確認でき、そこにあったコロナ物質がごっそり消えた証拠なのです。こうして、CMEの源が見えてきました。

シグモイドとは？

シグモイドは、その形が示すとおりコロナ中のねじれた磁力線を表します。コロナにねじれた磁場構造があることは、1970年代の「スカイラブ」による宇宙からの鉄輝線を用いた観測で、既に報告されています。「ようこう」はこのねじれた構造がS字型をしていること、そして太陽における爆発的な現象において重要な役割を果たしていることを、多数の例によって示しました。

ねじれた磁力線には電流が流れており、まっすぐな磁力線より余計にエネルギーを蓄えています。このため、強くねじれた磁力線を含む領域はフレアやCMEを起こして余分なエネルギーを解放し、まっすぐな磁力線へ姿を変えていくのです。

シグモイドは、その見かけの形から、(a)1本の磁気ループだけで作られたS字、(b)釣り針のように曲がった二つの磁気ループが各々の端でくっついてできたS

字、(c)明るさが同程度の複数の磁気ループが集まってできたS字、(d)2つの離れた活動領域を結ぶS字、などに分類することができます。CMEの噴出を起こしやすいのは、(a)と(b)のタイプで、これらのS字は同じ活動領域に見られる他の構造よりも明るく輝いています。もっとも、S字のサイズは活動領域のサイズとほぼ同等なので、シグモイドは活動領域そのものの特徴といってよいでしょう。シグモイド型活動領域の数は、太陽面上に分布する活動領域総数の半分以下です。このシグモイド型活動領域の大半(約80%)が、太陽の東の縁に現れてから西の縁に消えるまでの約2週間の間に、もっていたS字構造を吹き飛ばしてしまうことがわかりました。それで、CMEの出発点としてシグモイドが注目されるようになったのです。ただし、発生頻度は下がりますが(約50%)、ねじれた磁場構造があれば非シグモイド型活動領域でもCMEが発生するので注意が必要です。

シグモイドを多波長で観測すると、温度に関する情報を得ることができます。静穏領域で形成されたシグモイドの場合、軟X線よりずっと低温のH α 線(1万度)で、暗いS字型フィラメントが観測されることがあります。活動領域に現れるシグモイドは紫外線でも対応する構造が見られますが、数百万度以上の輝線でなければはっきりしたS字に見えません。シグモイドは軟X線でもっともよく見える高温構造なのです。高温状態を維持するために、シグモイドには数日間にわたって何らかの加熱作用が働いていると考えられます。S字の中央部分はN極とS極の境界にあたる磁気中性線にほぼ平行で、特に多くの磁気エネルギーが蓄えられているため、ここで準定常的な加熱が起きているのか

もしれません。シグモイドの多波長解析はまだ始まったばかりです。

太陽面上に現れる磁場構造は、南北半球で正反対の癖をもつことが知られています。この癖は太陽活動の11年周期に左右されずに見られるものです。南(北)半球に現れるシグモイドの70%がS字(逆S字)型であることから、シグモイドもこの「半球則」を満たす傾向があることがわかりました。この点は、目下議論されているシグモイド形成のシナリオが満たすべき条件の1つになります。コロナ磁場はもともと太陽内部でつくられた磁場が光球下から浮上して現れたものです。しかし、S字構造が光球下から浮上する様子をとらえたという報告はまだありません。これは観測装置の分解能が足りないせいかもしれませんが、そもそもシグモイドが太陽内部でなくコロナで形成されることを意味するのかもしれませんが。コロナ磁場の根本にあたる光球では、太陽の微分回転(差動自転)や黒点を取りまく渦巻き運動、対流、磁気シアなど、磁場のねじれを作り出す運動や、ねじれの供給源と考えられている小さなねじれた磁束管の浮上がひんぱんに見られます。シグモイド形成にはどの因子が最も有効か、シグモイドの「半球則」や温度構造も説明できるシナリオを目指して、観測と理論の双方からの研究が続けられています。

シグモイドからCMEへ

軟X線S字構造は「ようこう」の観測開始直後に見つかったのですが、これがシグモイドとして脚光を浴びるようになったのは、NASA/ESAのSOHO衛星が打ち上げられた1996年以降のことでした。宇宙からのCME観測は1989年から中断していましたが、SOHO搭載の白色光コロナグラフLASCOのおかげで、太陽面現象とCMEの関係が再び調べられるようになったのです。LASCOでCMEを観測し、「ようこう」SXTで高温コロナを、SOHO搭載の紫外線望遠鏡で低温コロナを観測した結果、CMEの出発点が見えてきたのは上述のとおりです。さらに、地球周辺の電離ガスの状態と比較することで、シグモイド放出を伴うCMEの多くがねじれたロープ状の構造をもつ磁気雲として惑星間空間でも観測されることがわかってきました。ロープのねじれの向きとシグモイドのねじれの向きが一致することから、ロープ構造はコロナで形成された可能性があります。決定的な証拠はまだ見つかっていません。シグモイドの形成とCMEの放出がなぜ起きるのかさえ、いまま議論されているのです。「ようこう」と他のデータを比較することで、CMEの発生メカニズムが断片的に見えてきましたが、これを完全に理解してCME予測に結びつけるには、太陽光球面磁場の詳細な観測とCMEの3次元観測が不可欠でしょう。

(堀 久仁子, Alphonse C. Sterling)

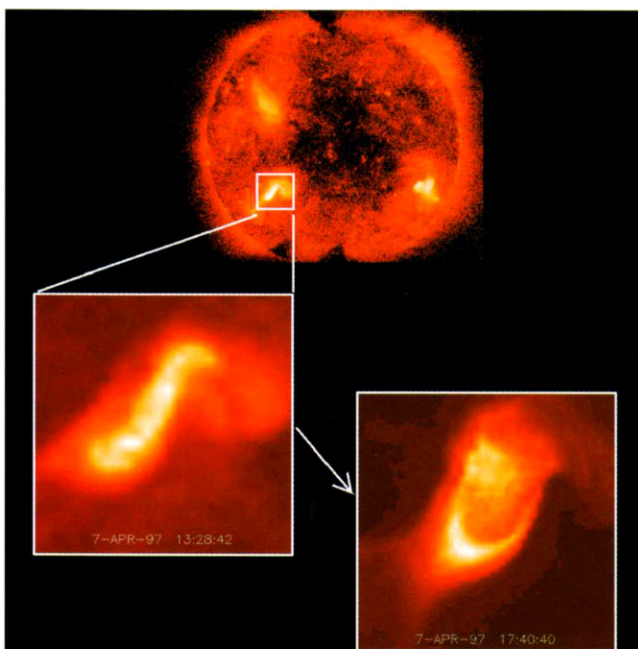


図4.15 (上)1997年4月7日の太陽全面像、(左)CMEを起こす直前のシグモイド、(右)CME直後に形成されたカスプと淡いアーケード。「ようこう」SXTにて撮像。

4.6 X線ジェット

太陽コロナの下にある彩層では、 $H\alpha$ 線での太陽観測が始まった当初からジェット現象が発見されていました。サイズの小さいほうから列挙すると、スピキュール(長さ: 5,000~8,000km)、サージ(数万km)、スプレイ(10万km)と言われる現象です。これらは温度約1万度という比較的低温のプラズマで、 $H\alpha$ 線のドップラーシフトを測定することにより速度が30~100km/s程度であることが知られていました。一方、X線をつかった太陽コロナ観測がロケット等によって始まりましたが、「ようこう」以前には、彩層ではいたる所に見ることができるジェット現象がコロナでは発見されていませんでした。しかし「ようこう」搭載の軟X線望遠鏡では、今までとは比較にならないほどの高空間・時間分解能が実現し、とうとう太陽コロナでのジェット現象が見つかりました。

図4.16が、典型的なX線ジェットの連続写真です。X線ジェットは、図にあるようなX線輝点(XBP)や活動領域で発生する小さなフレア(マイクロフレア)に伴って発生しており、これらのフレアを起こした構造を足元として時間と共に細長く伸びていきます。なかには小さなフレアではなく、GOESクラスでXクラスフレア(もっともX線強度が大きいレベルのフレア)に伴って発生するX線ジェットもあります。X線ジェットのサイズは、長さが数万km~数十万km、幅が1,000km~1万kmです。図4.17は「ようこう」が観測した中でも最も大きいX線ジェットで、長さは太陽半径程度です。X線ジェットの平均的な速度は約200km/s程度で、ジェット内のプラズマの音速程度であることがわかっています。また、多くのジェットが活動領域の端に存在するXBPから発生します。ただし、静穏領域やコロナホールと呼ばれるX線強度の弱い領域でもジェットは発生していますので、太陽のいたる所でX線ジェット

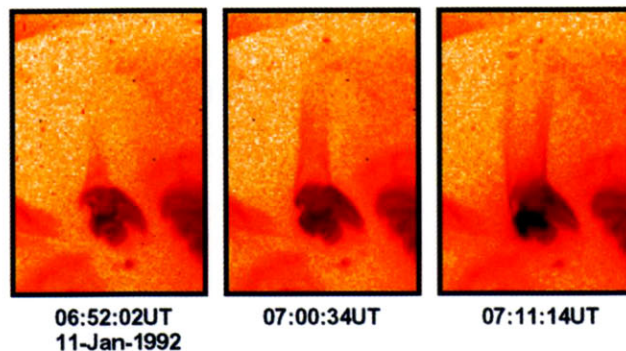


図4.17 「ようこう」で観測されたもっとも大きいX線ジェット

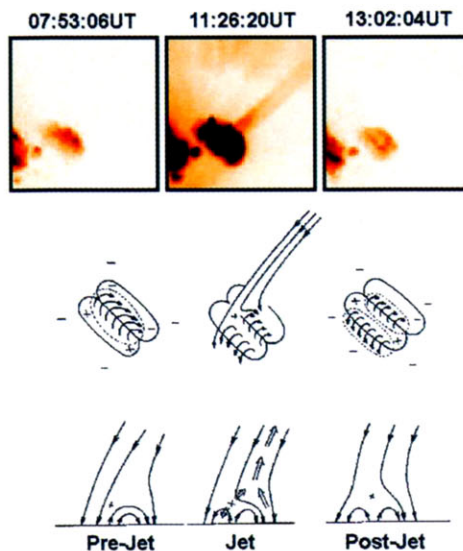


図4.18 磁気リコネクションを基にしたX線ジェットのモデル

トは起きているといってもよいでしょう。

では、このジェット現象を発生させているメカニズムは何なのでしょう？ 図4.18の1行目はX線のジェットの発生前・発生中・発生後の画像です。よく見ると、X線ジェット発生前は小さい1つのアーケード状だった足元の構造が、X線ジェット発生後は2つのアーケード構造になっているのが良くわかります。これは、ジェット発生前と発生後で磁場構造が変わっていることを意味します。この磁場構造の変化を基に作られたモデルが図4.18の2, 3行目の線画です。このモデルは、光球下から現れた磁気ループがもともと存在していたコロナ中の磁場と磁気リコネクションを起こし、磁気エネルギーの解放によりジェットが発生するというシナリオになっています。このモデルを基に2次元のMHDシミュレーションが行われ、高温のジェットが発生することが確認されました(図4.19)。観測的には更に、X線ジェットが発生する領域の光球磁場が調べられ、モデルにあるような+と-の磁極が混在し、磁場強度が変化している領域でX線ジェットが発生してい

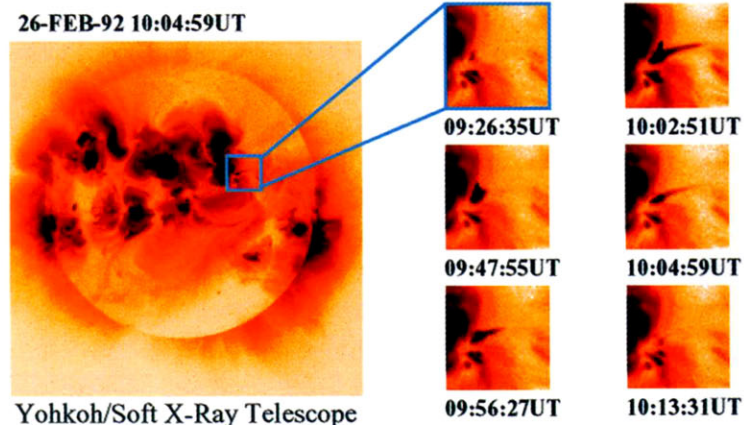


図4.16 太陽X線ジェットの典型例。右側はジェット発生領域の拡大写真。ネガ画像なので黒い領域がX線強度の強い領域を示している。

ることがわかりました。これらの結果、コロナ中の磁場と太陽大気下層からコロナへ出てきた磁場との磁気リコネクションによってX線ジェットが発生している、ということが明らかになったと思います。

X線ジェットのエネルギーは磁気リコネクションで解放された磁気エネルギーであることがわかりました。では、X線ジェットは解放されたエネルギーをどのように使って加速されたプラズマ流なののでしょうか？X線ジェットの速度がプラズマの音速程度であるという所に謎を解く鍵があります。温度や密度の解析をくわしく行った結果、その生成メカニズムが明らかになりました。温度が低く密度が高い下層の大気(彩層・遷移層)へ、磁気リコネクションで発生した熱が伝導して高温高密のプラズマを生成し、このプラズマとコロナとの圧力勾配で加速された高温プラズマ流(彩層蒸発流)がX線ジェットだったのです。圧力勾配で加速されたプラズマですから、基となる高温プラズマの音速以上の速度にはなりません。最近、熱伝導を含んだ2次元MHDシミュレーションによって、磁気リコネクションによる彩層蒸発ジェットモデルの検証が行われ、観測と同じような特徴がシミュレーションで再現できることが示されました。

「ようこう」で発見されたX線ジェットですが、「ようこう」の観測とMHDシミュレーションにより、発

生メカニズムから成長過程までの全容がほぼ明らかになったと思います。また、「ようこう」以降の太陽衛星観測により極紫外領域でもジェット現象が発見され、これらのX線・極紫外線ジェット現象が太陽半径の数倍程度まで伸びていることがコロナグラフの観測によりわかっています。X線・極紫外線ジェットは太陽のいたる所で発生していますので、今後は太陽風や太陽コロナ加熱とジェット現象の関係が研究課題となっていくでしょう。(下条圭美, 柴田一成)

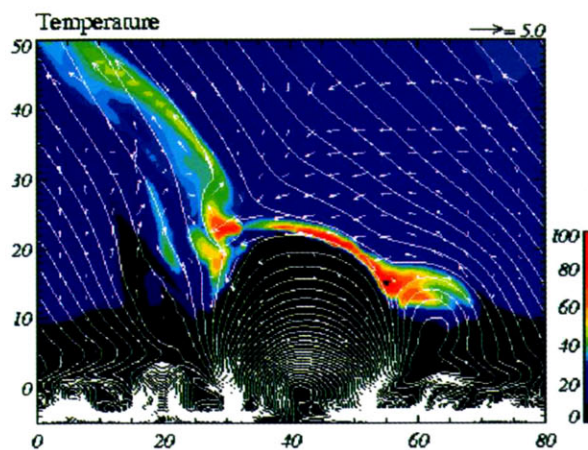


図4.19 X線ジェットの2次元MHDシミュレーション結果。カラーは温度分布、線は磁力線、矢印は流れを示している。左上に向かって高温のジェットが噴出している。

「ようこう」と世界の科学者たち

人であれ物であれ、品格・品質の高きものは、常に魅力的である。「ようこう」の取得したデータは、まさにわれわれの研究心を惹きつける。それだけではなく、研究者同士の議論を通して人と人とも結びつける。1980年代までは、米ソの巨大衛星主義が主流であり、国際会議などで「ようこう」の計画を話すと、トランジスタラジオ並みにコンパクトにまとめられたなど、ほめ言葉とも励ましとも取れる言葉が返ってきたものだ。それが打ち上げられると、期待以上の成果を出し始めたので、世界中の研究者は、刮目しだした。「ようこう」のSXT画像はわかりやすく、そのビデオはどこでも引っ張りだこであった。

1993年、米コロラド州ボールダのHAOに夏期滞在した折りにも、そのビデオを見せた。彼らの反応は敏感で早い。特にA. J. Hundhausen氏やB. C. Low氏らと、ビデオを見ては、HAOに整っている諸データ(黒点、H α 像、K-コロナ、磁場、シノプティック図、太陽風)を参照しつつ、毎日のように議論をした。H氏は、個性ある人として知られていたが、彼のデータを見る観察眼はすばらしく、或る日の現象を、数ヵ月にわたる活動現象の1フェーズとして見ていた。SMM衛星のデータを使って、CMEの研究をしていた彼は、1992年1月24日に現れた最大級のヘルメット構造に惹かれることになった。

NRLは、太陽研究者としては、G. A. Doschek氏やU. Feldman氏らのグループとG. Brueckner氏らのグループに分かれていた。エリートのB氏は近寄りがたい存在であったが、彼は独創的な考えを豊富に持っていた才人であった。早くに亡くなったのは惜しいことだ。D氏は頭の回転がはやく、議論をしていても楽しい。F氏と話をすると考えもしなかった視点からの発想が飛び出し、「目からうろこ」の経験をする。

T. G. Forbes氏も理論家とはいえ、新事実には鋭敏である。フランスでは、J.-C. Pecker氏が、内田豊氏とともに、College de Franceでの講義に招いてくれ、J.-C. Vial氏や、Meudon天文台の連中と「ようこう」の研究成果の議論をさせてくれた。彼らは、SOHOや、Tenerifeの観測に多忙のようであった。ロシアや東欧の、ならびに中国やインドの人々も熱心であり、日本に来て、共同研究をすることを望んでいる。

人々により、考え方やアプローチの仕方が異なり、多くの人と接することは、自然への理解度の多様性を知らせてくれることになり、楽しいものである。概して、米・英国人は、フロンティアの観測事実に敏感であり、また多くの比較・参照すべきデータが整っていて、良い研究環境にいるという印象を持っている。

(日江井栄二郎)

4.7 活動的なコロナ

ピカピカ光るマイクロフレア

「太陽コロナは我々が考えていた以上に活動的であった。」これが、「ようこう」に搭載された軟X線望遠鏡による観測が多くの人々に与えたコロナについての新しい描像であり、「ようこう」の重要な成果の一つとして必ず挙げられるものです。この活動的なコロナを演出している第一人者が「マイクロフレア」(トランジェント・ブライトニング)です(図4.20)。フレア(太陽面爆発)、より正確に言うと、最も巨大なフレアに比べて放出エネルギーが6桁ほど小さな爆発です。軟X線望遠鏡の優れた解像力、時間分解能、感度が、マイクロフレアを初めて画像として捉え、詳細研究することを可能としました。

100万度を超える高温のプラズマであるコロナが約6,000度の太陽面上空に存在するのはなぜか? 天文学の重要課題のひとつであるこの問題に答えるのに、マイクロフレアは重要な可能性を持っています。マイクロフレアの1つ1つはエネルギー的には小さいですが、多数発生しているので、コロナを加熱するのに必要なエネルギーを総量でまかなえる、という考えです。「ようこう」の観測から、マイクロフレアの温度・密度・サイズ・継続時間などが評価できるようになり、マイクロフレアのエネルギーや発生頻度分布が分かるようになりました。この結論ですが、マイクロフレアは500万度を超える高温成分の形成に重要な役割を果たしていますが、観測された個数のみではコロナすべてを説明するのに必要なエネルギーは不足することが明らかになりました。その後、さらなる可能性を求めて、さらに小さな爆発現象「ナノフレア」を検出するために、軟X線望遠鏡の限界レベルで探索する研究や、「ようこう」では観測し難いより低温のコロナで起きるマイクロフレア、ナノフレアを探す観測へと進展し

ています。

コロナ活動の活力：太陽面下から浮上する磁場

太陽面下から浮上する磁場は、コロナの成因やコロナで起きる活動現象を理解する上で、重要な役割を果たしていると考えられています。多数の磁力線が浮上して、新しい活動領域を形成する領域を「浮上磁場領域」と呼んでいます。この領域の上空を軟X線で観測すると、磁場の浮上に伴って、軟X線で非常に明るいコロナが形成されるのが分かります(図4.21)。これは、磁場の浮上活動に伴って、コロナで加熱が起こり、温度や密度が上昇することを示しています。浮上磁場領域の上空のコロナでは、マイクロフレア、フレア、ジェットなどコロナ活動が頻発します。この様子は、同時に得られた光球面磁場やH α 像と共に、「ようこう」の軟X線望遠鏡によって見事に捉えられ、領域の成長が、コロナ加熱率の上昇やコロナ活動の頻度と密接に関連していることが明らかになりました。

浮上磁場に伴い観測されるコロナ活動は、「磁力線のつなぎ替え」によって磁場のエネルギーが解放されるものであろうと、多くの研究者が考えています。ここでの「磁力線のつなぎ替え」は、太陽面下から浮上してきた磁力線と、元々あるコロナの磁力線との間のつなぎ替えです。幾つかのマイクロフレアについて、足元の光球面磁場の変化を、「ようこう」と同時に取得した高空間分解能データで調べると、マイクロフレアの発生の直前10~30分前に小さな規模の磁場の浮上に伴うことが発見されました。この観測は、浮上する磁場がコロナ活動発生に重要な役割を果たしていることを示しています。同様に、フレアやジェットについても浮上活動との関連を示す観測も得られています。

(清水敏文, 勝川行雄, 久保雅仁)

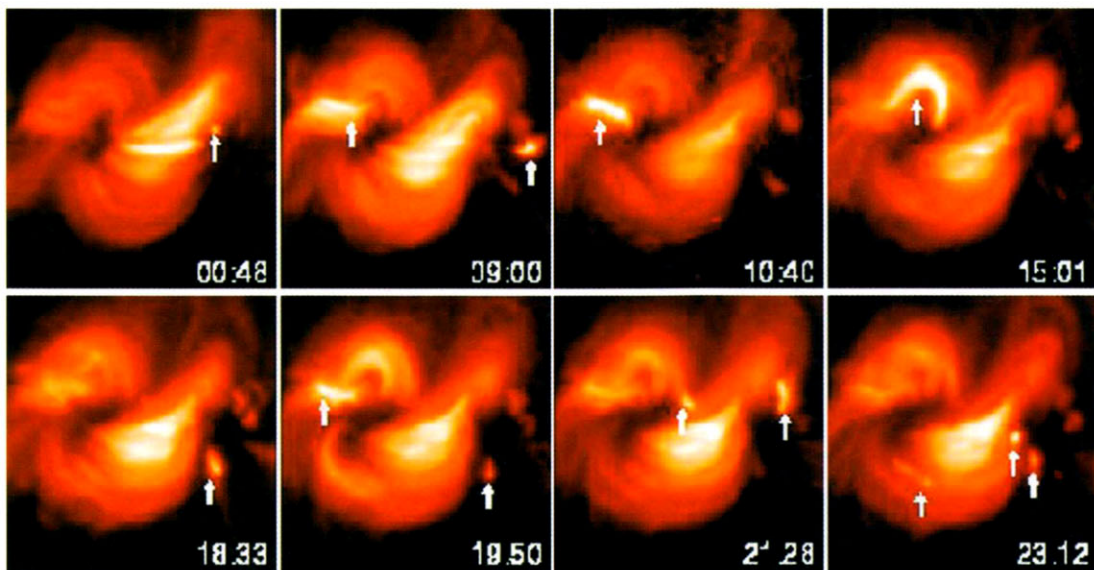


図4.20 活動領域で頻発するマイクロフレア。小さなコロナループが急激に明るくなる現象が活動領域のいたるところで起きている。

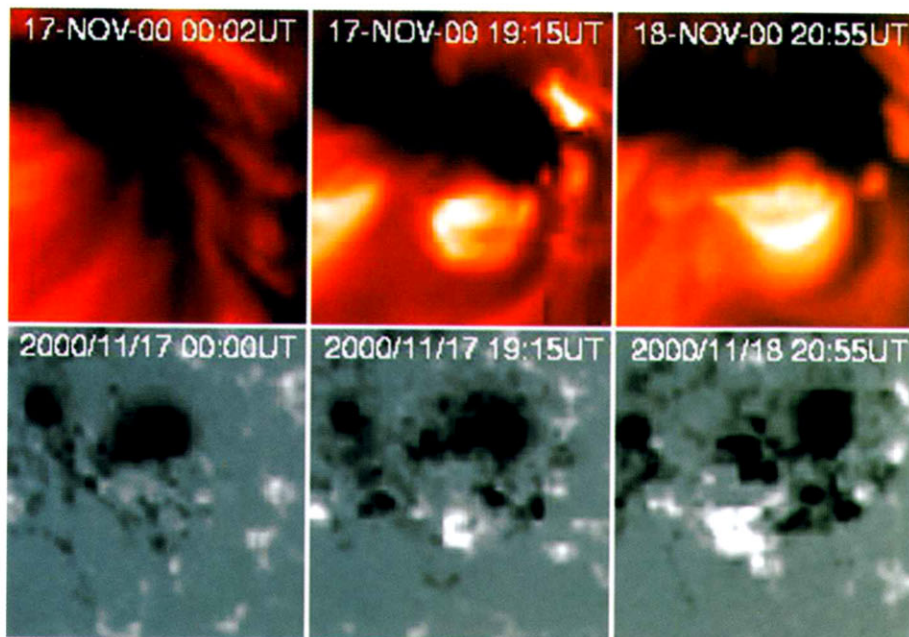


図4.21 浮上磁場とマイクロフレア。
上空のコロナ磁場の浮上活動により軟X線で明るくなり、マイクロフレアなどのコロナ活動が活発化する。ほぼ同時刻に撮像された(上)「ようこう」が見たX線コロナと(下)SOHOが見た光球面視線方向磁場マップ。

日食観測は鬼門！

小学校の教科書にも、「日月食は年に1、2度は起こる」と書いてある。「ようこう」が上がってから、本当にそれを実感することとなった。「ようこう」は飛翔後、世界各地で見られた皆既日食、金環食、部分食のほぼ全てを体験してきた。

日食に際し、科学観測を継続させることは、衛星打ち上げ以前の段階では、真剣には考慮されていなかった。しかし打上げ直後(1992年1月4日の部分食)から日食中のX線観測への要望は高まり、その後「日食中は如何にして観測を行ったらいいか」が検討された。その結果、衛星の軌道上の位置を勘定している軌道タイマーを無効にして、日食観測を行う方法が提案され、実行されるようになった一即ち、「Sunrise, sunset ♪, Sunrise, sunset ♪, swiftly flow the days ♪, swiftly fly the years ♪」(Fiddler on the Roofより)のように、衛星の規則正しい日照・日陰の時計を強制的に止めて、日食観測中は、衛星(姿勢制御)には「今は日陰ですよ」と騙し、科学機器には「はい、今はまだ昼間ですよ」と観測を継続させる手段を考えたわけである。

「ようこう」は生涯に4度、セーフ・ホールド状態に落ちているが、その内3回が日食の運用に関連している。残りの1度は、衛星のポインティングを外部コロナに向けようとして、姿勢系へのコマンドを間違えた、打上げ当初の初歩的なミスであった。三度目の正直か、日食に絡んでセーフ・ホールドに落ちた時、そこからの脱出が不可能になってしまった。この日食(2001年12月14日、世界時)は、「ようこう」が体験したものとしては、食分の最も大きな日食で、「ようこう」の軌道は南太平洋上空の金環食帯のほぼ真ん中を通過して

いたのである。この日食がもし仮りに、この日付より3ヵ月以上前に起こるか、あるいは食がもう少し浅ければ、またひとつエピソードが追加されるだけで済んだのであるが、それは「死んだ子の年を数える」ことになる。

この10年の間に、IRUやCMGのジャイロは劣化を余儀なくされた。姿勢の冗長系は消耗し、あるいは切り離されて、満身創痍で衛星姿勢を維持していた。日照中と日陰中では、姿勢制御モードを変更して運用されていたのであるが、その状態でセーフ・ホールドに落ちることが、衛星にとっては決してセーフ・ホールドではなく、実は最も危険な「蟻地獄」がほっかり口を開いて待っていたことを誰も知らなかった。

(渡邊鉄哉)



前世紀最後の皆既日食(1999年8月11日)は「ようこう」では部分食として観測され、その速報が世界に報じられた。

4.8 コロナ加熱

太陽では、6,000度の表面温度の上空に100万度以上に達するプラズマが広がっています。これはたとえば、冷たい氷の上においたヤカンが沸騰しているようなものです。冷たいものから、熱いものへと熱自体を直接的に輸送することはできないので、何らかの方法でエネルギーを上層大気に注入し、そこで熱に変換する現象が起こっていることになります。冷たい太陽表面の上空に高温コロナが広がっている問題は「コロナ加熱」問題とよばれ、天文学上の大きな課題の一つです。

高温のコロナはX線領域で明るく輝きます。図4.22に「ようこう」の軟X線望遠鏡で撮像したコロナの画像を示します。この図からわかるように、X線で観測するコロナは、非常に明るく輝く領域から、暗くて内部構造の見えない部分まで、さまざまな構造で満たされている事がわかります。明るく輝く部分は活動領域と呼ばれ、そこではフレアに代表されるような文字通り活動的な現象が見られます。さらに微細に見ると、コロナは多数の明るいループ構造からなることがわかります。活動領域は、太陽表面では黒点などの強い磁場の領域に対応しており、X線で輝くループは、太陽表面の磁場のS極とN極を結ぶ磁力線であることがわかっています。このようにして、コロナを小さく分解してみると、磁気ループ(磁力線)がコロナを構成する単位要素であることがわかります。

すなわち、コロナ加熱の問題とは、単位磁力線をどのようにして高温に保つのかという問題になるのです。このため、コロナ加熱を調べるためには個々のループの様子を詳細に調べる必要があります。コロナが磁気

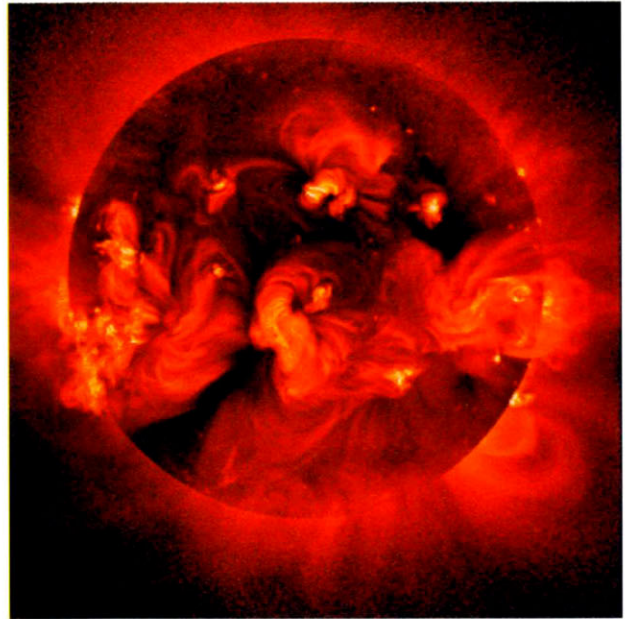


図4.22 「ようこう」SXTの太陽全面像

ループの集まりであること自体は、「ようこう」以前から知られていましたが、それまでのX線望遠鏡の性能ではコロナの構造はぼんやりとしか見えていませんでした。このぼんやりとしたデータをもとに、コロナ加熱とはコロナ全体を200万度に保つ機構であると考えられてきました。このコロナ加熱の描像は「ようこう」の観測により一変しました。

活動領域の温度構造

「ようこう」の軟X線望遠鏡は、複数のX線フィルターを交換しながら、高い空間分解能と時間分解能で観測を行います。こうして得たデータを組み合わせることで、コロナの温度を推定することができます。図4.23に、ある活動領域の3日間にわたる変化を示します。この図には、X線像の変化とともに、その温度の変化も示しています。X線の時間変化で見ると、明るさの変化とともに、ループ構造の変化が見て取れます。また、構造があまり変化しない成分もあります。構造が変化するものには、大きなフレアで見られるのと同じようなとんがり構造を示すものや、ループとループがぶつかりあっているように見えるものもあります。変化の少ない成分では、特に際立った個性のあるループは見当たらず、領域全体が発展をとげているように見えます。これらの成分の温度構造に目を向けると、300万度以上に達する構造は、短時間の変化を示す成分に相当し、時間的な変化を示さない領域の温度は、常に300万度以下であることがわかります。すなわち活動領域は、突発的に発生する高温成分と、定常的に存在する低温成分からなることが分かったのです。コロナの温度は、加熱の大きさを示すものと考えられますから、加熱の度合いが空間的に異なることを示しています。これは、「ようこう」によってもたらされた、コロナ加熱に関する重要な発見です。

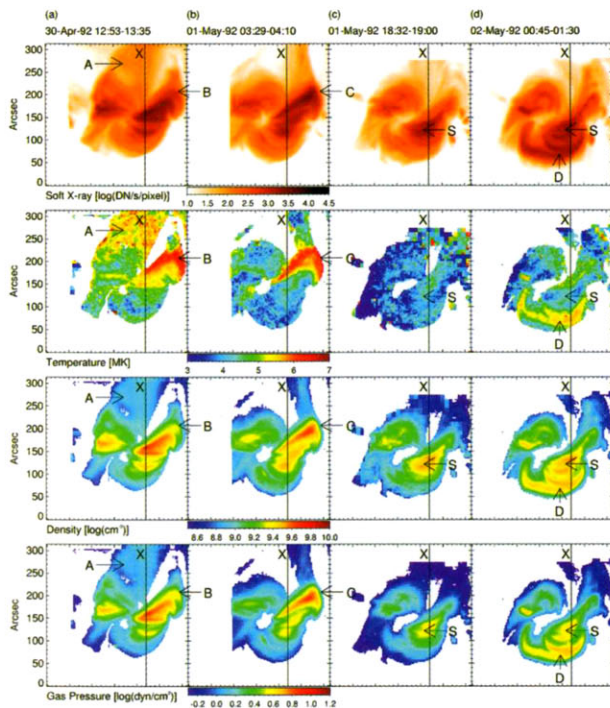


図4.23 ある活動領域における(上から)X線強度・温度・密度・圧力分布の3日間での変化

コロナループ

活動領域内部の高温に達する構造はその形態などから、フレアと同様の機構(磁気リコネクション)により加熱を受けていることが強く示唆されます。ところで、温度マップを見て分かるように、活動領域はどちらかといえば定常的な比較的低温(≤ 300 万度)の成分が多くを占めていることが分かります。これらのループのプラズマとしての性質を詳細に調べると、定常的な熱入力が必要であることが分かりますが、この熱入力の正体はまだ明らかにされていません。ループ全体の構造を変化させるようなことのない微小なフレアの可能性や、ループ内部の温度分布からループ内部での加熱源を探る研究が、現在でも盛んに続けられています。

ところで、「ようこう」の軟X線望遠鏡が観測する波長帯域(5~50Å)は、200万度以上のプラズマからの放射で占められているために、高温のコロナ構造を観測するには適していますが、100万度程度の低温コロナの観測ができません。このために「ようこう」だけではコロナを構成する全ループを捉えきることはできません。そこで、極端紫外線望遠鏡(NASA/ESAのSOHO衛星と、宇宙研の観測ロケット)が観測する100万度程度のループと、「ようこう」の軟X線望遠鏡で観測されるループの関係を示したのが図4.24です。「ようこう」で観測される200万度以上の温度のループと、極端紫外線で観測される100万度程度のループは空間的に別々に存在し、さらにこれらの温度パターンが継続的な現象であることが分かりました。これは、

各定常ループは100万度から300万度の温度になるように、局所的に異なる効率で加熱されていることを示唆しています。

こうして明らかにされたコロナループの熱入力の空間分布と、加熱源である太陽表面磁場の運動との直接的な関係が現在精力的に研究されています。

(永田伸一、鹿野良平)

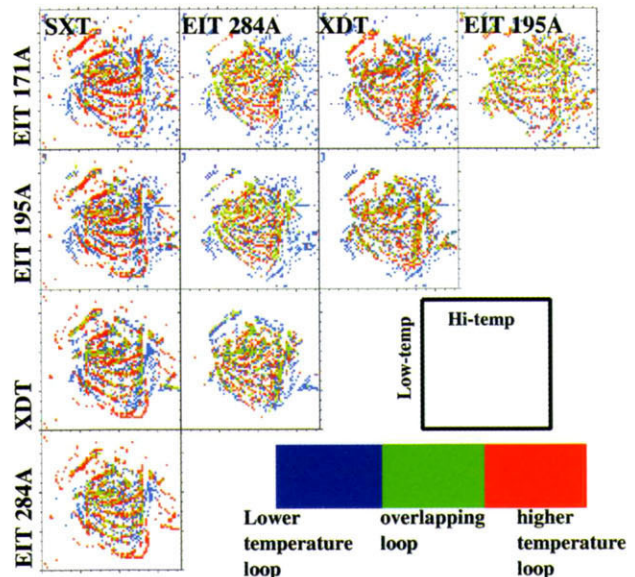


図4.24 活動領域でのループの多温度構造。「ようこう」SXT, SOHO/EIT(284Å), XDT(211Å), SOHO/EIT(195Å), SOHO/EIT(171Å)で観測されたループを2枚ずつ重ねた。高温側のループを赤、低温側を青、両者が重なったところを緑色で示す。

英語になったTOHBAN(当番)

「ようこう」を打ち上げたKSC(内之浦)のある鹿児島、その鹿児島の旧国名・薩摩は、れっきとした英語の一般名詞である。小型で甘い(温州)みかんのことをsatsumaというのをご存知だろうか。その薩摩から実はもうひとつ、「ようこう」の活躍によって、英語の一般名詞かつ動詞(自動詞?)が誕生したと思っている。いわゆるtohban(当番)である。

「ようこう」は打上げから10年3ヵ月間、継続して科学運用が行われたが、その間、延べ35研究機関に所属する、約250人の研究者・技術系職員が運用当番を勤めた。運用当番は2人1組で、SSOC(相模原)には1週間、KSCには2週間の滞在を基本のデューティ期間として行われ、SSOCにおける運用計画の作成、KSCにおける衛星の追跡、データ取得に貢献した。更に打上げ当初(1年9ヵ月)は、それらに加えて、軟X線望遠鏡(SXT)専属の当番にも、毎週2名の参加を仰いでいた。国内で運用当番派遣に貢献した大学・研究所の数は計22機関にのぼり、その最大手はもちろん国立天文台で、職員だけでも常に全「ようこう」当番の35%、天文科学専攻の総研大院生などまで含めれば、約50%のシェ

アーを保持していた。

「ようこう」はしかし、国際協力に立脚したミッションであったので、海外研究機関・海外研究者の運用への大規模な参加があった。研究者が衛星の科学運用に直接参加するという宇宙研のtohbaning dutyが受け入れられて、海外の計13研究機関から、毎年10人以上の外国人tohbanがSSOCに滞在、Yohkoh operationに奮闘して貰ったことになる。

さすがに、彼らにKSC tohbanをして貰うことは憚られた。公用の日本語、英語、あるいはジャパニーズ・イングリッシュとはまた違う薩摩弁まで理解して貰うのは難しかりうという配慮ではなかったかと理解している。しかし考え直してみれば、彼らの母国語にしても、6ヵ国語(米・英・仏・チェコ・インドネシア・韓国)に亘っていたわけであるし、また英語、日本語、関西弁、更に中国語まで操る外国人tohbanもいたことでもあるし、そこにもうひとつ、Satsuman languageが増えたからといってもQue sera sera, どうってこともなかったのではないかという気もしている。

(渡邊鉄哉)

4.9 コロナの観測から分かった磁気周期活動

太陽表面に黒いしみのように見える黒点の数は約11年ごとに増減します。2003年はまだ、その黒点数が比較的多い時期に当たりますが、正確にいいますと2001年にピークを迎えて黒点数が減少していく段階です。「ようこう」は12年前の1991年後半に打ち上げられました。これはちょうど1990年に黒点活動がピークを迎えて徐々にその数が減少し始めたところでした。「ようこう」は1996年に太陽表面から黒点が非常に少なくなってしまう時期を経て、次の黒点数最大の時期にあたる2001年12月まで、10年を越えて太陽コロナの観測を続けることができました。このような長期にわたる太陽コロナの詳細なX線観測は世界で初めてのことで、「ようこう」が取得したデータはたいへん貴重なものです。

太陽黒点は他の領域に比べて非常に強い磁場をもつ領域で、N極とS極のペアで現れては消えていきます。11年の間にはその発生領域の緯度中心が中緯度から赤道に向かって移動していき、縦軸に緯度、横軸に時間というグラフの中に黒点の位置をプロットしますと、赤道をはさんで両極に向けて羽を広げたような蝶型の模様が11年ごとに現れます。太陽黒点の近傍にも比較的磁場の強い領域があり、太陽コロナは黒点を除くこの磁場の強い領域では明るく、黒点から離れた磁場の弱い領域では暗くなりますので、「ようこう」で観測されたコロナの明るさで同じような図をつくると、やはり黒点の蝶型図と似た構造が見られます(図4.25)。黒点の蝶型図には見られないものとしては、11年よりも短い1~2年程度の振動成分が見られることや、高緯度にも局所的に明るい構造が見られることです。前者は黒点を含む比較的磁場の強い領域が生成されている領域のより時間スケールの短い変化を、また後者は11年ごとに極性の反転する北極・南極における磁場の変化の過程をとらえていると考えられています。

太陽コロナでは、黒点領域近傍に見られる明るい領域だけでなく、小さい輝点を数多くみることが出来ます(X線小輝点; XBP, 図4.26)。この小輝点の数が11年周期の間にどのように変化するかということについては、数年に一度の頻度で打ち上げられたNASAの観測ロケットでのX線観測を用いて今から20年ほど前に調べられました。それによると、小輝点の数は大きく変動し太陽11年周期とは位相が180度ずれる、すなわち、黒点数が多い活動期にはこの輝点数が少なく、黒点数が少ないときに多くなる、という結果でした。「ようこう」が取得した10年程度の連続観測データからこの輝点数を詳細に調べてみると、図4.27で示されるように極小期に大きな増加はなく、おおまかにいって太陽11年周期によらないということが分かりました。コロナと太陽表面の磁場の同時観測からは、この輝点

はN極とS極という異なる極性をもつ磁場が衝突して発生することが知られていますので、衝突して輝点が発生するのに寄与している磁場は、太陽周期によらない、黒点とは別起源のものであるというように考えることができます。このように太陽には、黒点のように11年で変化する磁場成分と、小輝点に関連する11年周期によらない磁場成分があることが分かります。これらの磁場が、どのように太陽の中で作られているかということを理解していくことがこれからの課題です。

(原 弘久, 中久保佳代子)

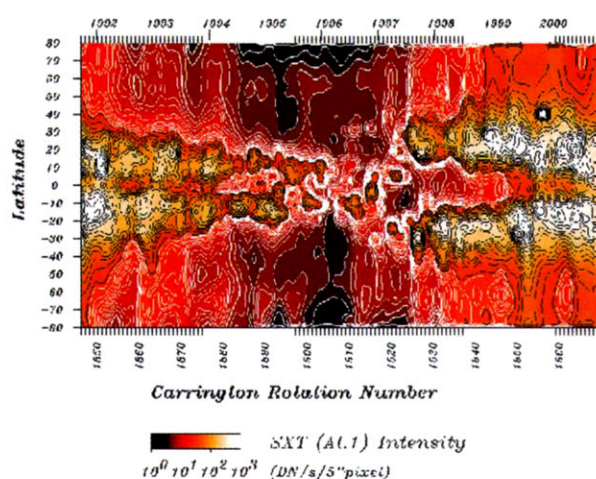


図4.25 「ようこう」軟X線観測によるコロナ活動の長期変化

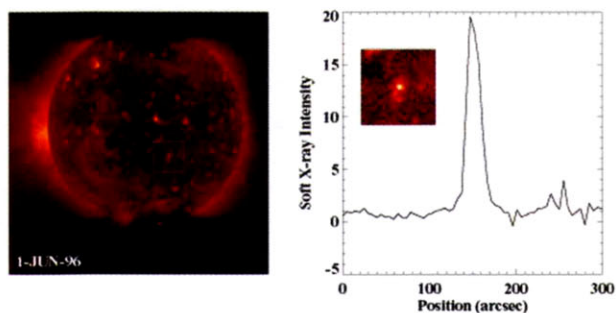


図4.26 (左)極小期における太陽面上のコロナ小輝点の分布と(右)その輝度分布

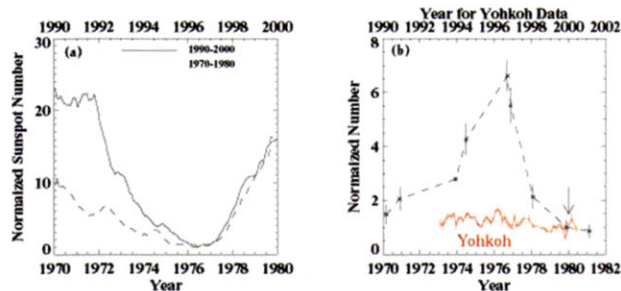


図4.27 (左)太陽黒点相対数の変化と(右)極大期(矢印位置)で正規化されたコロナ小輝点の数の変化。破線は20年前の研究結果。

第5章 国内の共同観測

5.1 太陽を波長 $10\text{\AA}$ と波長 $10^8\text{\AA}$ ($=1\text{cm}$)で見る ―X線と電波で観測するフレア―

「ようこう」がX線望遠鏡で見ている光の波長は長くても $10\text{\AA}$ 、つまり 0.0000001cm という短さであり、普段私たちに太陽から届いている可視光よりずっと短い波長で太陽の激しい活動現象をとらえています。一方、可視光よりずっと波長の長い電波領域でも太陽は実に激しい素顔を見せ、太陽フレアの時には太陽から来る電波の強さが何十倍、何百倍にもなります。それにしても、X線など短い波長(=高いエネルギー)で太陽フレアが顕著であるのは当然として、なぜ電波のようなさらに長い波長でフレアがよく見えるのでしょうか。これは、太陽フレアが磁場の起こす現象であるので、フレアで生成された高いエネルギーの電子も磁場のあるところを飛んでいるため、磁力線の周りを回転してシンクロトロン放射を出すからで、これが波長 1cm オーダーの電波なのです。

国立天文台の電波ヘリオグラフ(図5.1)は、電波でフレアをとらえるための専用装置として建設されました。「ようこう」と共同すべく、「ようこう」より少し遅れて1992年に観測を開始しており、現在も活躍中です。この装置は長野県の野辺山にあり、口径 80cm という小ぶりのアンテナ84台が東西 500m 、南北 220m に配置された干渉計と呼ばれる装置で、波長 1.7cm と 8.5mm で太陽全面を2次元の画像としてとらえることができます。

「ようこう」衛星と電波ヘリオグラフでともに観測された現象のうち、特に詳しく解明されたのが、小さな領域で急激なエネルギー解放を起こすインパルスフレアというタイプのフレアでした。図5.2に示すように、軟X線と太陽表面磁場の解析から、これはもともと太陽の活動領域に存在していた磁気ループに、光球下から浮上してきた小さいループ(浮上磁場)がぶつかって起こるフレアであること、高エネルギー粒子の加速が実際にループの衝突領域で起こっていること、加速された電子は小さいループの両

方の足元に特に大量に降っているが大きいループの離れた足元にも飛んでいっていること、など想像の域であったフレアにおけるループ構造・加速領域、高エネルギー電子の動きを観測で詳細に解明することができたのです。強い磁場を持つ黒点に代表される太陽の活動領域というのははもともと光球下から浮上してくるものであるもので、浮上磁場によって引き起こされるフレアをはじめとする活動現象というのは太陽の活動現象の代表例といってよいでしょう。

こういった高エネルギー電子の起こす現象ばかりではなく、電波ヘリオグラフでは低温プラズマであるプロミネンス(太陽面に浮かぶ雲のようなもの)の爆発も詳細に観測され、「ようこう」でのX線ループの爆発の観測とあわせて研究され、多くの成果をあげています。

(花岡庸一郎)



図5.1 ハケ岳を背景とする電波ヘリオグラフ

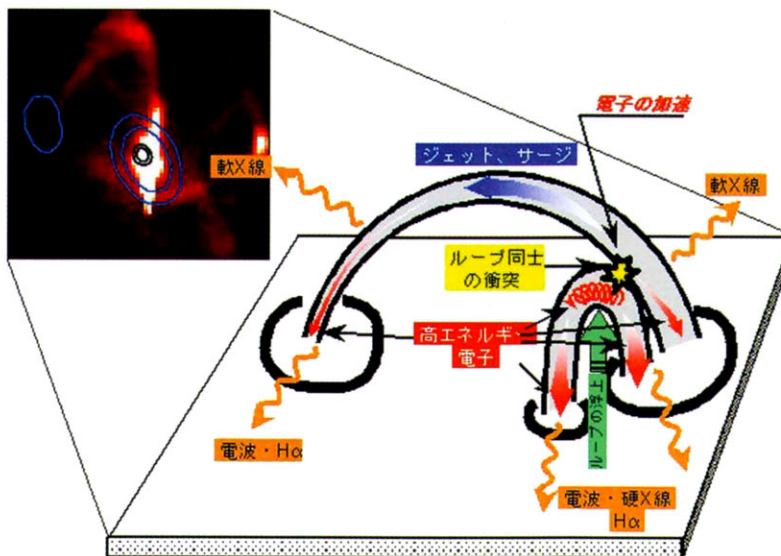


図5.2 浮上磁場によって引き起こされるフレアの様子。(左上)軟X線(カラー)、硬X線(黒の等高線)、電波(青の等高線)の観測と、(右下)その解釈。

5.2 フレア望遠鏡との協力

太陽フレア望遠鏡は「ようこう」によるコロナのX線観測を地上から支援すべく、その打上げと時期を同じくして国立天文台三鷹の構内に建設されました。赤道儀に4本の屈折望遠鏡を搭載し、連続光による光球画像、 $H\alpha$ 線による彩層画像、光球のベクトル磁場、光球の速度場を観測します。「ようこう」がコロナで繰り広げられるダイナミックな現象を捉えるのに対して、フレア望遠鏡はその足下、すなわちコロナの現象をドライブする光球磁場の発達過程を総合的に観測し、例えばフレア爆発に至る物理過程を解明しようというものです。1991年の観測開始以来、毎日KSCから送られてくる「ようこう」の運用日報を参照し、「ようこう」と同じ活動領域を天候の許す限り観測してきました。

フレア望遠鏡で得られた磁場の分布データは、「ようこう」で観測される活動領域の複雑なループ構造を理解するのに参照されました。又、フレアに伴ってコロナの磁場構造が大きく変化することが「ようこう」の観測から明らかになりましたが、光球磁場から推定される磁場の自由エネルギーがフレアの前後でどのように変化するか、フレアを引き起こす磁場配置の必要条件は何か、等の基本的な研究が現在も蓄積された両者のデータをもとにすすめられています。

(一本 潔, 桜井 隆)



図5.3 フレア望遠鏡外観

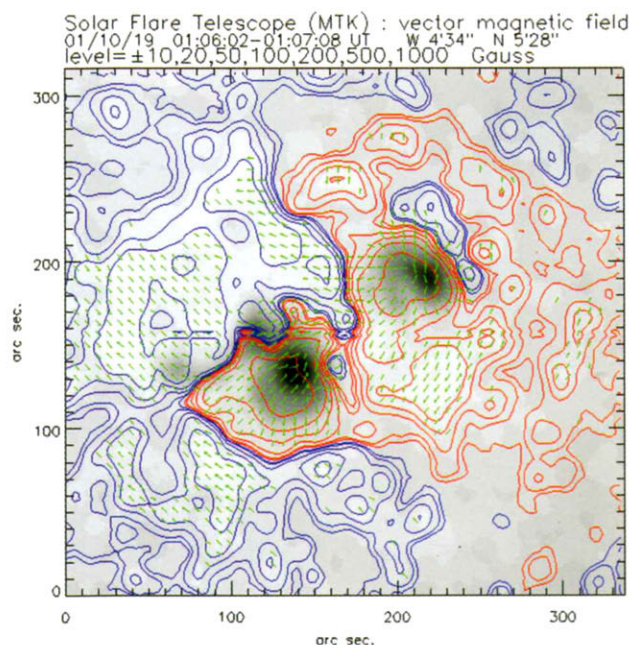
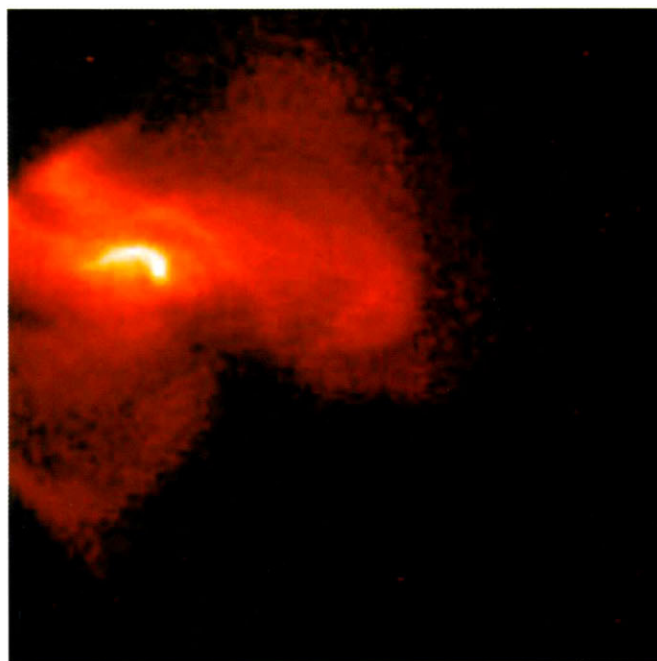


図5.4 「ようこう」によるコロナ画像とフレア望遠鏡による光球磁場 (2001年10月19日)

5.3 飛騨天文台との協力観測

太陽は今、安定して輝いて、われわれ生命体をやさしく育ててくれています。その太陽コロナでは激しくダイナミックな爆発現象が時々刻々起こっていることを「ようこう」は目の当たりに見せてくれました。また、コロナは磁力線のループでおおわれていて、これらの磁気プラズマループの活動がさまざまな太陽表面爆発の根源であることもわかって来ました。

それではこの磁力線はどこからやってきて、どのようにして数百万度から数千万度という高温のコロナの磁気プラズマループを作るのでしょうか。どこからやって来るのかは、飛騨天文台のドームレス太陽望遠鏡で撮影された図5.5の写真で見ることができます。これはコロナの下、太陽内部から磁気ループの束が今盛んに浮き上がってきている様子を表しています。黒い筋模様が磁力線の束で、その足下に黒点が成長しているのが判ります。

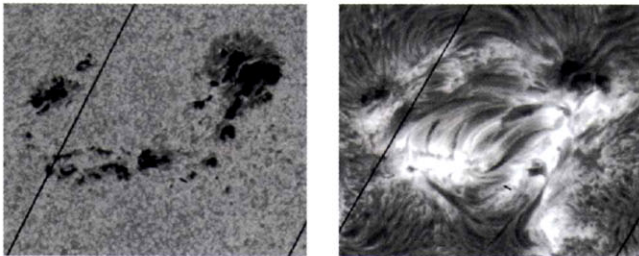


図5.5 コロナの下から浮上してくる磁気ループの束

さてしかし、これらの生まれたての磁気ループの温度は約数千度なので、これらが更に上昇していつどのようにして100倍から1000倍も高温のコロナループに加熱されるのかが、長い間の大きな謎なのです。

この謎に挑戦するために、「ようこう」は飛騨天文台と協力しました。太陽の内部から新しく浮き上がってきた生まれたての磁気ループ領域を飛騨天文台のドームレス太陽望遠鏡で見つけて、すぐに同じ領域を観測するというものです。新しい小さい領域はX線では未だ暗いので長い露出時間がかかります。その露出の間に他の領域で、もし強いフレアが発生すると検出器が劣化する危険がありますので、できるだけ太陽全面が静かな時期を選んで行われました。このような敏速な同時観測を行うために、飛騨天文台から相模原の「ようこう」指令室への連絡、そこから鹿児島県のオペレーションセンターへの指令、更に衛星へのコマンドと、緊密な連携プレーが十数回にわたって行われ、貴重な成果が得られました。

図5.6にその成果の1例を見ることができます。上の列の写真は飛騨天文台で撮影された新しい低温の浮上磁気ループを示しています。00時51分40秒(世界時)にループAの右に新しい小さいループCが現れて、約3分後の00時54分22秒で黒味が増し(ループBの左)、更に4分後の00時58分05秒には既に消え始めていることが

わかります。一方その時、少し遅れて数百万度のコロナループが光り始めたことが「ようこう」で見事にとらえられたのです。図5.6の下列の写真で、00時50分52秒に見られる1と2のコロナループの間に、次の写真(00時55分16秒)では新しいループ3が低温ループより約5分遅れて現れて、00時58分18秒には更に強く輝いていることが判ります。精密な位置合わせの結果、この高温コロナループは元の低温ループとは平行ではなく約17度傾いていることが判りました。このように低温ループと高温ループの時間差や傾きなどの詳細な関係が得られたのは初めてで、これから、磁気プラズマループの加熱メカニズムの解明の道が開かれようとしています。(黒河宏企, 上野 悟)

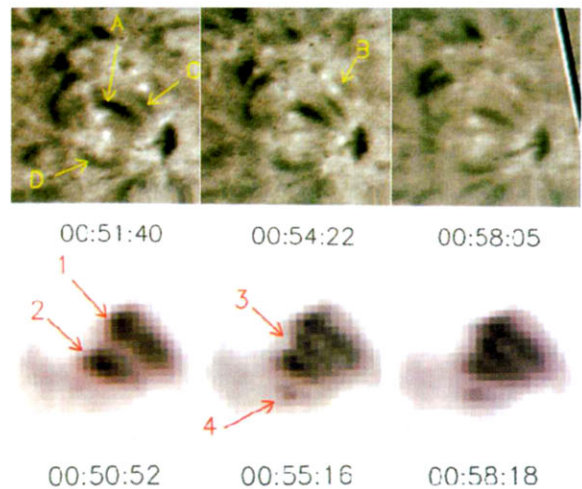


図5.6 低温磁気ループ(上段)が高温ループ(下段)に加熱されている現場をとらえた



図 5.7 ドームレス太陽望遠鏡

「ようこう」関連の国際会議，成果出版物

1990年10月: Solar-A Science Meeting (東京)
参加概数 100名 (うち日本からの参加 55名)
“Flare Physics in Solar Activity Maximum 22”
(370頁): Y. Uchida, R. C. Canfield, T. Watanabe,
and E. Hiei (eds.), Springer-Verlag, 1991.

1991年12月: 「ようこう」観測機器特集
“The Yohkoh (SOLAR-A) Mission” (110頁): Z.
Svestka and Y. Uchida (eds.), Solar Physics 誌,
vol.136, No.1, 1991.

1992年12月: 「ようこう」初期成果特集
“Initial Results from Yohkoh” (220頁): Publ.
Astron. Soc. Japan誌, vol.44, No.5, 1991.

1993年2月: Symp. on Yohkoh Scientific Results
(相模原)
参加概数 110名 (うち日本からの参加 60名)
“X-ray Solar Physics from Yohkoh” (350頁): Y.
Uchida, T. Watanabe, K. Shibata, and H. S. Hudson
(eds.), Universal Academy Press, 1994.

1993年9月: 「ようこう」電波ヘリオグラフシンポジウム (甲府)
参加概数 130名 (うち日本からの参加 75名)
“Proc. Kofu Symposium on New Look at the Sun”
(460頁): S. Enome and T. Hirayama (eds.), NRO
Report No.360, NRO/NAO, 1994.

1995年5月: IAU Colloq. No.153 (幕張)
参加概数 210名 (うち日本からの参加 100名)
“Magnetodynamic Phenomena in the Solar
Atmosphere” (650頁): Y. Uchida, T. Kosugi, and
H. S. Hudson (eds.), Kluwer Academic Publ., 1996.

1996年3月: Yohkoh Conf. on Magnetic Reconnection
(Bath, UK)
参加概数 100名 (うち日本からの参加 15名)
“Observations of Magnetic Reconnection in the
Solar Atmosphere” (450頁): R. D. Bentley and J. T.
Mariska (eds.), ASP Conference Series No.111,
1996.

1996年11月: Yohkoh 5th Anniversary Symposium
(東京)
参加概数 130名 (うち日本からの参加 70名)

“Observational Plasma Astrophysics” (410頁): T.
Watanabe, T. Kosugi, and A. C. Sterling (eds.),
Kluwer Academic Publ., 1998.

1998年10月: 電波ヘリオグラフ「ようこう」シン
ポジウム (清里)

参加概数 60名 (うち日本からの参加 30名)

“Solar Physics with Radio Observations” (490頁):
T. Bastian, N. Gopalswamy, and K. Shibasaki (eds.),
NRO Report #479, NAO, 1999.

2002年1月: Yohkoh 10th Anniversary COSPAR
Colloq. (Kona, USA)

参加概数 140名 (うち日本からの参加 50名)

“Multi-Wavelength Observations of Coronal
Structures and Dynamics” (450頁): P. C. H. Martens
and D. P. Cauffman (eds.), Pergamon, 2002.

○その他, IAU, COSPAR等の総会に付随して,
「ようこう」関連のシンポジウム多数開催。



「ようこう」関係受賞一覧 (受賞者, 賞名, 受賞年)

Lockheed SXT Team: NASA Group Achievement
Award, 1992
Loren Acton: NASA Exceptional Scientific
Achievement Medal, 1993
George Doschek, et al.: Alan Berman Publication
Award, 1994
常田 佐久: 井上学術賞, 1995
Loren Acton: Wiley Award for Memorial Research,
Montana State Univ., 1996
草野 完也: 西宮湯川記念賞, 1998
横山 央明: 日本天文学会研究奨励賞, 1998
坂尾 太郎: COSPAR Zeldovich Medal, 1998

Richard Canfield: Wiley Award for Meritorious
Research and Creativity, Montana State Univ.,
2000

Dana Longcope: Presidential Early Career Award,
2000

Loren Acton: George Ellery Hale Prize, Solar Phys.
Division, Amer. Astron. Soc., 2000

Yohkoh X-Ray Image of the Sun, The 10 most
inspiring images of the Century, Sky & Telescope
Magazine, 2000

柴田一成: 日本天文学会林忠四郎賞, 2002

清水敏文: COSPAR Zeldovich Medal, 2002

第6章 「ようこう」からSOLAR-Bへ：新しい挑戦

SOLAR-B衛星(図6.1)は、「ようこう」の科学成果を踏まえつつ、太陽物理学に新しい地平を切り拓くことをめざして開発されている。すなわち、「ようこう」が明らかにした太陽大気(コロナ)の構造とダイナミックスを、これらを規定・駆動する太陽表面の磁場・速度場の運動から根源的に理解することを目指す。

SOLAR-Bには主観測装置として、口径50cm、回折限界分解能0.2秒角の可視光磁場望遠鏡(Solar Optical Telescope: SOT)が搭載される。SOTは宇宙空間に置かれるものとしては世界初の本格的な太陽観測用可視光望遠鏡で、太陽表面の磁場と速度場をベクトル的に精密計測することができる。さらに、X線望遠鏡(X-Ray Telescope: XRT)と極端紫外線撮像分光装置(EUV Imaging Spectrometer: EIS)も搭載され、これまでに実現したことのない高い性能で、太陽コロナ及び遷移層の高温プラズマの構造、変動、スペクトル診断を行う。これらの観測を結合して、太陽光球の磁気的な活動とコロナ加熱・コロナ活動の関連、ダイナモ機構、磁気リコネクション、太陽磁場の浮上と散逸・拡散など磁気流体力学に関連した天体物理学の基本問題の解明を目指すのである。また、太陽・地球間宇宙空間擾乱の発生・伝播と関わって、「宇宙天気予報」の予測につながる知識を集積する。

SOLAR-Bは2005年度にM-V-7号機で太陽同期極軌道に打ち上げられる予定となっている。ミッション期間としては3年以上を想定している。このSOLAR-B衛星のあらましを紹介する。

搭載観測機器の概略

1) 可視光・磁場望遠鏡(SOT)

口径50cm、空間分解能0.2秒角のグレゴリアン光学系の望遠鏡部(Optical Telescope Assembly: OTA)と磁場ベクトルと速度場を精密に測定する焦点面検出装

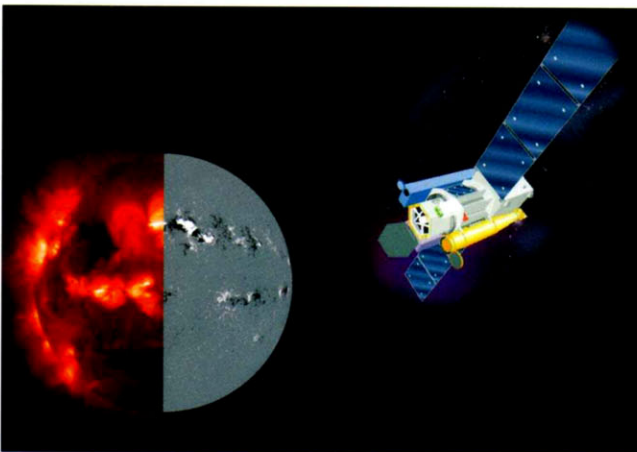


図6.1 SOLAR-B衛星と太陽(右が太陽光球面磁場, 左がX線コロナ)

置(Focal-Plane Package: FPP)とからなる。FPPには、画像取得優先のフィルタグラフ2系統(観測波長域: $3,880\text{Å} \sim 6,700\text{Å}$)と精密なスペクトル取得優先のスペクトロ・ポラリメータ系(観測波長: $6,302\text{Å}$)が置かれ、それぞれ $2,048 \times 2,048$ ($2k \times 2k$)ピクセルのCCDで撮像される。また、衛星姿勢のゆらぎへの対策として、FPP内のコリレーショントラッカ装置が画像の揺れを検出し、OTA-FPP間に置かれたティップティルト鏡を駆動して、画像ブレを除去する仕組みを導入している。視野は最大で320秒角 $\times$ 160秒角、太陽活動領域をじゅうぶんにカバーできる視野を確保している。

2) X線望遠鏡(XRT)

「ようこう」の軟X線望遠鏡と同様の斜入射反射鏡でX線結像系を構成し、空間分解能1秒角、 $2k \times 2k$ ピクセル(ピクセルサイズは1秒角相当)のCCDで太陽全面をカバーする。

3) 極端紫外線撮像分光装置(EIS)

スリット/スロット、及びグレーティングを用いて、極端紫外線域(波長域: $170\text{Å} - 210\text{Å}$, $250\text{Å} - 290\text{Å}$)のスペクトル線を分光撮像、高温プラズマの運動を測定する。空間分解能2秒角、スペクトル分解能 22mÅ (速度分解能に換算して $23 \sim 38\text{km/s}$ 相当)。視野は512秒角(スリット方向) $\times$ 250秒角(最大スロット幅)である。

SOLAR-B衛星の構造

SOLAR-B衛星は、衛星バス部の上に光学ベンチの役割を果たす筒を置き、その中に可視光磁場望遠鏡(SOT)の鏡筒部を抱きかかえ、光学ベンチの外側にX線望遠鏡(XRT)、極端紫外線撮像分光装置(EIS)、及びSOTの焦点面検出装置部(FPP)を取り付けた構造をしている。総重量は約900kgである。図6.2に、衛星と搭載望遠鏡の外観図を掲げておく。

搭載観測機器の節で触れたが、SOLAR-Bの望遠鏡群はいずれも空間分解能が非常に高く、その分、望遠鏡各部の構造(例えば、鏡と焦点の位置)への精度要求が厳しく、わずかな変形も致命的な結果につながりかねない。また、可視光望遠鏡では太陽全面からの光をいったん望遠鏡内に導き入れて焦点を結ぶので、全般的な熱対策はもちろんのこと、万が一の場合にも強烈な太陽熱が望遠鏡や衛星を傷つけない保障が必要である。さらに、3つの望遠鏡が同一の領域を観測することがミッション目的を達成するために不可欠で、SOT及びEISの視野があまり広くないことも相まって、精密なアラインメント要求も出てくる。これらの事情から、いきおい、衛星の構造・熱設計、姿勢制御要求が厳しくなっている。

これらの厳しい要求を満足するため、構造素材の選定、構造設計及び開発、衛星バス部機器の性能向上と開発、更には性能確認試験等を中心として、長期にわたる開発努力が続けられている。

共同プロジェクト

SOLAR-Bは、「ひのとり」、「ようこう」に継ぐ第3世代の太陽観測ミッションであり、科学面で「ようこう」を受け継ぐだけでなく、組織的にも「ようこう」の形態を大きく発展させるものとなっている。

特筆すべきことの第1は、宇宙科学研究所外の研究グループの大きな貢献である。国立天文台はSOLAR-Bを自身の枢要なプロジェクトのひとつと位置付け、宇宙科学研究所のプロジェクトマネジメントと一体となって、衛星開発全般、とくに太陽観測用としては世界で初めての本格的可視光望遠鏡の開発において、主要な役割を果たしている。SOTの開発にはハワイの「すばる」望遠鏡の建設の経験がフルに活用されている。

第2に、全ての望遠鏡が米・英との共同開発であり、ミッション運用にはESAも北極域の地上局をダウンリンク局として提供することで参加するというように、かつてなく大規模な国際協力ミッションとなっている。

本稿では国際協力の詳細にまで触れる余裕はないが、「ようこう」でその威力が発揮された国際協力3原則、すなわち、

- 1) 分野の最先端の仕事をするための国際協力であり、参加する各国がそれぞれの得意とする技術を持ち寄る
- 2) 共同設計、分担製作を貫く。設計にあたっては、より良い観測装置を実現する立場から、互いに相手側製作担当部分にもおおいに口をはさむ
- 3) 単一の科学チームを組織し、衛星運用からデータ解析、研究、論文執筆にいたるまで、共同作業として取り組むを堅持し、SOLAR-Bから最大限の科学成果を引き出すことができるようにしたいと考えている。

余談となるが、上記の第2項目に関しては、とくにアメリカとの関係において、「ようこう」時代と比べて、しだいにその貫徹が難しくなっていることを率直に指摘しておきたい。すなわち、国家としてのアメリカが“技術安全保障”、“知的所有権保護”にうるさくなってきており、技術情報開示に制限を設ける例が増えてきている。基礎科学の分野でさえ国際協力の障害が増大しつつあるのである。障害を減らすよう努力を継続するとともに、我が国自身が幅広い技術基盤を確立しなければならないことを痛感している。

今後のスケジュール

SOLAR-Bは、2001年度にプロトモデル電気インタフェース試験、2002年の暮れまでに構造モデル試験、熱モデル試験を終え、今後この結果をフライトモデルの設計に反映させつつ、2003年いっぱいにかけてコンポーネント、サブシステムの製作を進めることとなっている。

2004年早々からはいよいよ秒読みに入る。一次噛み合わせ試験、総合試験、フライトオペレーションまで、日程はびっしりと詰まっているが、ここまで来ると一日も早く感激のファーストライトを迎えたい。開発チーム一同、さらに気を引き締め、遺漏なく開発を進めていくつもりである。

(小杉健郎)

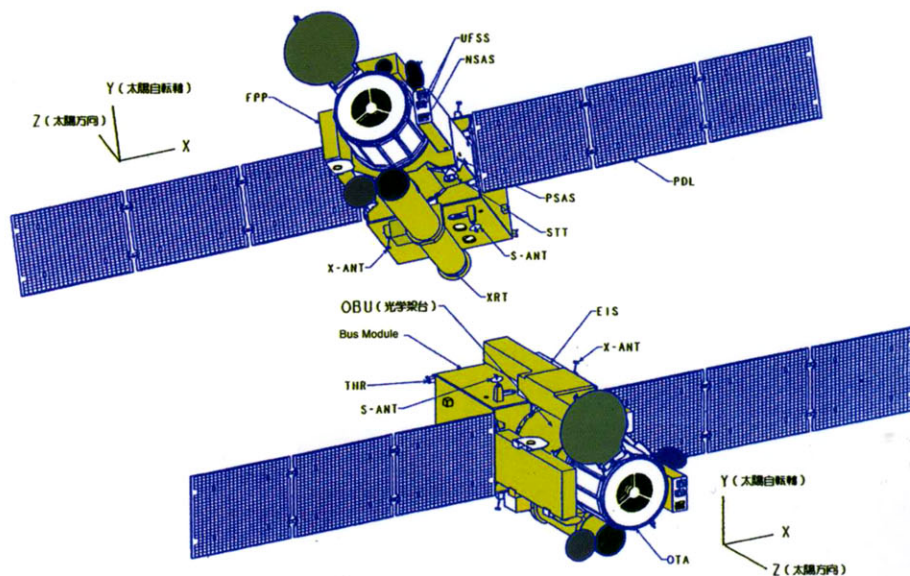


図6.2 SOLAR-B外観図 (衛星と搭載望遠鏡)

ISASニュース

No.262 2003.1

ISSN 0285-2862

発行：宇宙科学研究所(文部科学省) ☎229-8510 神奈川県相模原市由野台3-1-1 TEL 042-759-8008

The Institute of Space and Astronautical Science

◆本ニュースに関するお問い合わせは、上記の電話(庶務課企画・広報係)までお願いいたします。(無断転載不可)

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