

「ひので」X線望遠鏡が見た 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 〒384-1305 長野県南佐久郡南牧村野辺山 462-2〉

e-mail: shimojo@nro.nao.ac.jp

「ひので」衛星に搭載されたX線望遠鏡(X-Ray Telescope; XRT)は、その高い空間・時間分解能と広い温度感度で、太陽コロナ中の現象を明らかにしつつあります。前太陽観測衛星「ようこう」で発見された太陽X線ジェットも、そのような現象の一つです。XRTの観測により、静穏な領域であると思われていたコロナホールでジェットが頻発しており、さらにジェット内部でMHD波動が励起されている可能性が示されました。この結果により、極域にて発生する太陽X線ジェットが、高速太陽風を加速するためのエネルギーを供給するメカニズムである可能性が指摘されています。

1. 太陽大気中でのジェット現象

われわれが目で見える太陽は、眩しいけれど、丸く暖かく穏やかな太陽です。太陽活動極大期には裸眼でも見える大型の黒点が現れる場合もありますが、大抵は構造のない、ただの光る球にしか見えません。しかし、観測する波長を変えるだけで、太陽は怒れる太陽に豹変するのです。

1933年にリオが単色フィルターを開発して以来、太陽は天文学者にさまざまな謎を多量に問いかけ始めました。その一つは、太陽大気にて絶え間なく発生しているジェット現象です。太陽観測において彩層内の運動を観測するには、数万度程度のプラズマの運動がよくわかるH α 線がよく使われます。このH α 線による観測だけでも、小さいほうから、スピキュール(代表的な長さ6,000 km)、サージ(数万 km)、スプレイ(太陽半径程度)とバラエティに富んだジェット現象が観測されています。このなかでもスピキュールは、太陽のリム(縁)上至る所で観測されています。しかし、これら彩層でのジェット現象の発生メカニズムが何であるか、いまだに議論がなされていま

す。「ひので」衛星/可視光磁場望遠鏡による超高空間分解能の画像により、これら彩層のジェット現象について新たな知見が得られつつあります。

一方、第2次世界大戦以降ロケットや人工衛星の発達により、太陽コロナからX線が放射されていることがわかり、1970年代のスカイラブ実験の頃から太陽のX線画像が撮像されるようになりました。スカイラブ実験では、写真乾板がX線観測に使われており、時間・空間分解能が低く、ジェットのような微細でダイナミックな現象は発見されませんでした。この状況は、1991年に打ち上げられた日本の前太陽観測衛星「ようこう」¹⁾で一変します。「ようこう」衛星搭載の軟X線望遠鏡(SXT)²⁾は、世界で初めて太陽X線観測にCCDカメラを使った、エポックメイキングな観測装置でした。図1の左側は、SXTが撮像した太陽全面X線画像です。まさに、怒れる太陽といった表現がふさわしいと思いませんか? このCCDカメラにより空間・時間分解能が飛躍的に向上し、「ようこう」/SXTは太陽コロナ中のさまざまな現象を発見しました。その一つが太陽X線ジェット^{3), 4)}なのです。

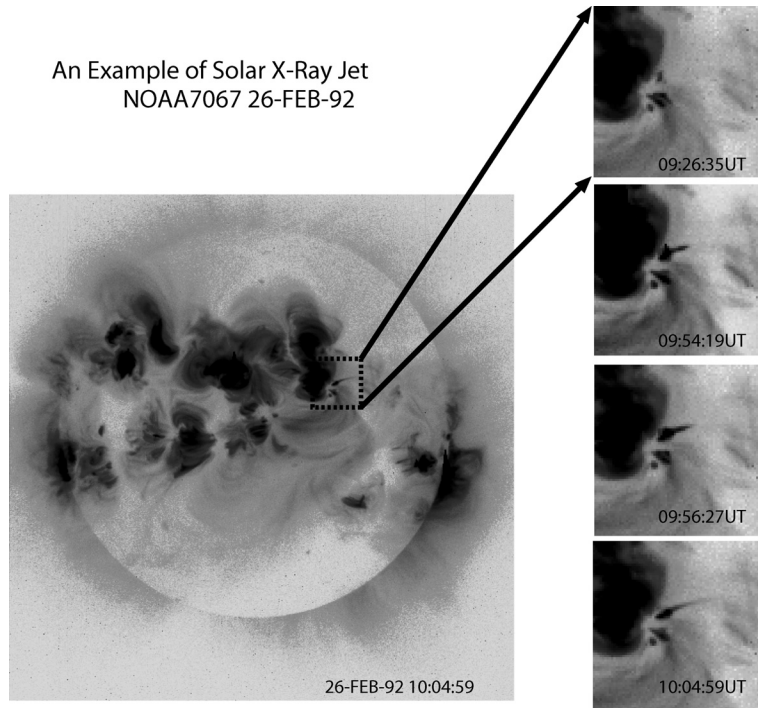


図1 1992年2月26日に「ようこう」/SXTにより撮像された太陽X線像（ネガ画像）。左が太陽全面，右側はジェットが発生している領域を拡大し，時系列に並べたもの。

2. 太陽X線ジェットとは？

—「ようこう」/SXTによる成果—

太陽X線ジェット（以後ジェット）は，その名のとおりX線で観測されるジェット現象です。X線といっても軟X線の波長域で観測されており，熱的プラズマの現象だということとなります。図1の右側が，活動領域近傍で発生したジェットの一例です。この図で見取れるように，ほとんどのジェットはマイクロフレア*1やフレアなどの爆発現象とともに発生しており，そこを基点としてX線の構造（ジェット本体）が伸びていきます。「ようこう」/SXTによる統計的研究⁵⁾では，この伸びる見かけの速度は，10-1,000 km/sで，平均が200 km/s。長さ（最大時）は1万-40万 kmとレン

ジが広く，最大のジェットは太陽半程度まで伸びることがあります⁶⁾。長さとの比は10:1以下であり，8割以上のジェットが伸びるほどに幅が狭まることわかっています。また，X線ジェットとともに彩層でのジェットであるH α サージが同時に発生し⁷⁾，Type III電波バーストが，ジェットが通った磁力管の延長上で観測されています⁸⁾。

ジェットの足元で発生するマイクロフレアの構造変化を調べたところ，一つのX線ループしかなかった場所で，ジェット発生後に新しいループが形成されていました³⁾。ジェット足元の光球磁場を調べてみると，7割以上のジェットの足元の磁場配意が+と-の磁極が複数混在しており，さらに磁場の時間変化を調べることができたいくつ

*1 その名のとおり，解放されるエネルギーが普通のフレアと比べ，6桁ほど小さい「マイクロ」なフレアのこと。

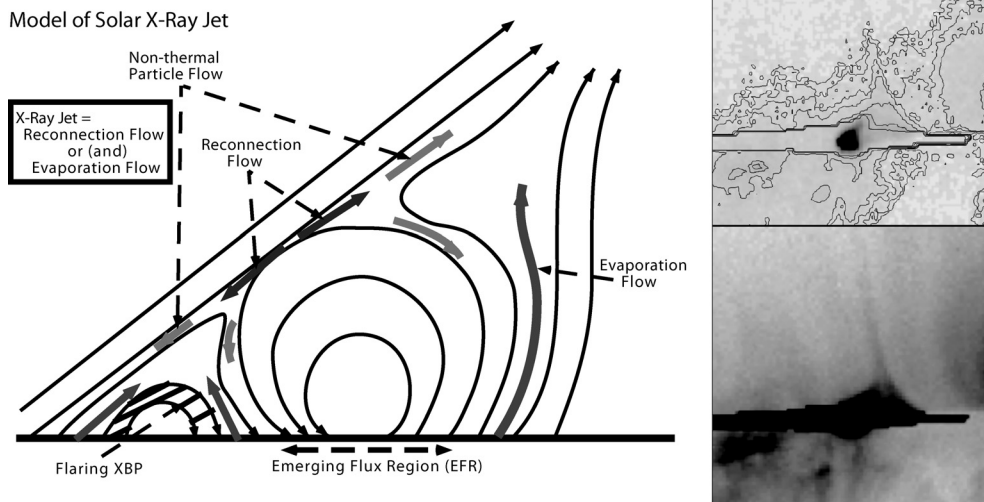


図2 左側：磁気リコネクションを基に考えられた太陽X線ジェットモデル。細い矢印が磁力線を示し、太い矢印がプラズマや粒子の流れを示す。右側：「ようこう」/SXTが捕らえた太陽の西のリムで発生した太陽X線ジェット。上が短時間露出画像上に長時間露出画像の等強度線を引いた画像。フレアループがよく見える。下が長時間露出画像。ジェットが上空に伸びていることがよくわかる（X線画像はいずれもネガ画像）。

かのイベントでは、ジェット発生前後で磁極の磁束量が増減していることがわかっています⁹⁾。このX線ループの構造変化と、光球磁場配意・変化を元に、図2のモデルが提案されました³⁾。

このモデルは、惑星間空間につながる磁力線や太陽半径程度のコロナループの磁力線（図左下から右上に伸びる磁力線）と磁気浮上や光球の対流運動で運ばれてきた磁気ループ（図中央のループ構造）が磁気リコネクションを発生、エネルギー開放するというシナリオです。リコネクションした磁力線は、一方は小さいループを形成し、もう一つは長い磁力線につながります。リコネクションにより開放された熱エネルギーおよびリコネクションジェットは、リコネクションによってできた小さいループと長い磁力線に注入され、ループのほうはジェット足元のマイクロフレア/フレアとなり、長い磁力線に注入されたリコネクションジェットがX線ジェットになります。

このモデルをベースに、2次元のMHD数値シ

ミュレーションが行われ、ジェットのX線構造を再現し（図2右側のSXT画像と比較してみてください）、さらにH α サージの同時発生もこのモデルで説明できることがわかりました^{10), 11)}。唯一問題だったのは、ジェットの速度でした。SXTの観測では、ジェットの平均速度は200 km/sと遅く、さらに温度解析が可能な活動領域のジェットを詳細解析した結果、ジェットの速度は音速より遅いことがわかりました¹²⁾。一方、モデルから予測されるジェットの速度＝リコネクションジェットの速度はアルヴェン波の速度（コロナでは約1,000 km/s）と同程度であり、観測が見かけの速度だったとしても、観測との差を埋められません。そこで、SXTで観測されるジェットは、リコネクションジェットそのものではなく、長いループに注入された熱エネルギーが引き起こす、彩層蒸発による高温プラズマ流である可能性が示されました。彩層蒸発流は、ガス圧の差により発生するため、その速度が音速を超えることはあり

ません。このアイデアを元に1次元の熱伝導を含んだ流体シミュレーションが行われ、彩層蒸発流によりジェットの色やジェットに沿ったX線強度分布を説明できることがわかりました¹³⁾。その後、熱伝導を含んだ2次元MHDシミュレーションも行われ^{14), 15)}、SXTで観測されたジェットが、リコネクションによるエネルギー開放によって生じた彩層蒸発流であることが有力視されました。

このように正体が解明されたかに見えるジェットですが、磁場配意の時間変化などは、日に2枚程度の時間分解能で観測したもので、光球磁場の変化とコロナでの影響を議論するには、想像の部分が大きかったのも確かです。また、SXTの空間分解能ではジェット内部の構造を分解することは、例外的に大きなイベント以外は不可能であるため、ジェットの発生メカニズムであるリコネクションの物理そのものに観測データだけで迫ることは難しい状態でした。

3. 「ひので」/X線望遠鏡 (XRT)

「ひので」衛星¹⁶⁾に搭載されたX線望遠鏡 (X-Ray Telescope; XRT 図3, 文献17, 18) は、「ようこう」/SXTの高性能化を目指し、製作された望遠鏡です。望遠鏡の光学系および鏡筒部分は、アメリカ・スミソニアン天文台が、検出部であるCCDカメラは宇宙航空研究開発機構/宇宙科学研究本部 (JAXA/ISAS) と国立天文台が中心となって製作されました。

光学系は、Wolter-Schwarzschild型の斜入射X線光学系を採用し、焦点距離は207 cmです。すざく衛星やあすか衛星のX線望遠鏡と基本原理はほぼ同じですが、「ひので」/XRTの場合には太陽が他天体に比べて非常に近く、望遠鏡に入ってくるX線の量が多いのでネスト化^{*2}せず、1枚鏡でX線光学系を構成しています。このため、X線天

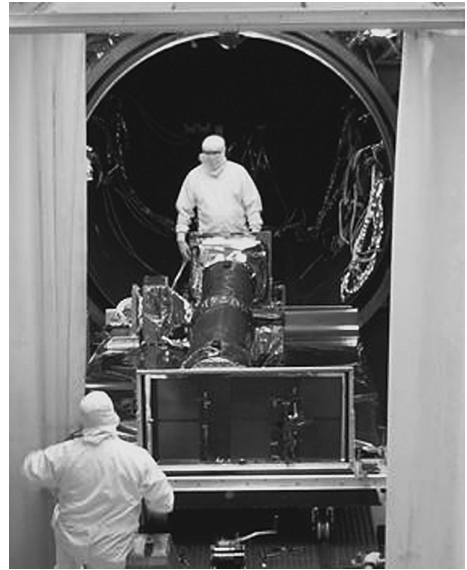


図3 熱真空試験のためスペースチャンバーに運び込まれるXRT。

文衛星の望遠鏡に比べ焦点距離が短いですが、空間分解能は約1秒角という高空間分解能を達成しています。また、「ようこう」/SXTと同様に望遠鏡の中心には可視光の光学系が搭載され、同じCCDでX線像と可視光像の両方が取得できる工夫がされており、「ひので」衛星搭載の他望遠鏡や他の衛星・地上観測との位置合わせを容易にしています。

CCDカメラは、2k×2kピクセルという大フォーマットのCCDを採用し、高空間分解能で太陽全面の画像が取得可能になっています。すざく衛星やあすか衛星に搭載されたCCDカメラでは、天体から望遠鏡にくるX線量が少ないため、X線光子一つ一つを数えることができ、X線スペクトルを取得することが可能です。一方、「ひので」/XRTの場合、太陽からくるX線量は非常に多く、CCDで捕らえた光子を数えスペクトルを得ることは不可能です。このため、X線透過率の波長依存性が異なるフィルターを複数枚用意し、

*2 すざく衛星のX線望遠鏡の場合、一つの望遠鏡に対して175枚ものX線鏡を使っています。

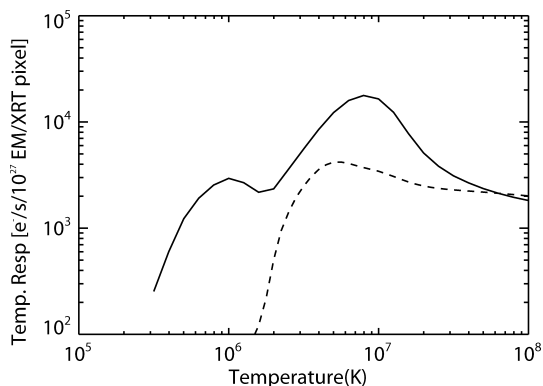


図4 XRTとSXTの温度感度曲線. 実線がXRT, 破線がSXTの温度感度曲線を示す.

異なるフィルターで取得したX線カウントの比を取ることで、コロナの温度や密度を推定します。XRTには、温度診断用に計9枚の解析用X線フィルターが搭載されています。この方法は、「ようこう」/SXTでも行われていましたが、大きく違うのはその温度範囲です。図4は、「ひので」/XRTと「ようこう」/SXTの一番薄いフィルターによる温度感度曲線を示したものです。「ようこう」/SXTの場合、200万度以下のプラズマには急激に感度がなくなってしまいます。一方、XRTでは200万度以下のプラズマにも感度があり、SXTより広い温度感度をもっていることがわかりま

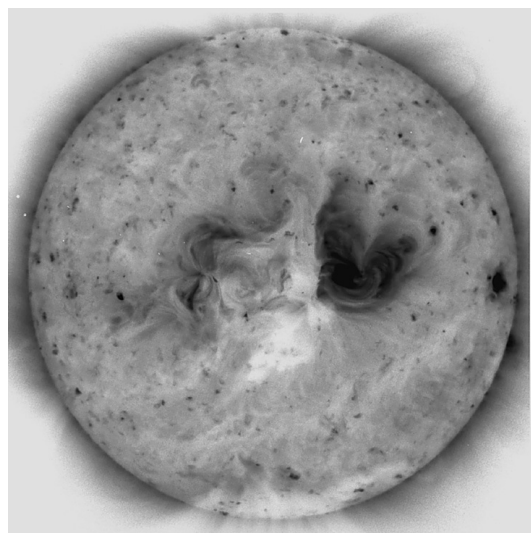


図5 XRTが捕らえた太陽全面X線画像(ネガ画像).

す。いままで、コロナ中の100万度程度のプラズマは、極紫外線の輝線による観測でしか見ることができませんでした。輝線による観測ですので、その温度範囲は狭く、コロナ全体の温度構造からすればごく一部しか観測できません。XRTは、その温度感度の広帯域化により、100万度のプラズマから1千万度のプラズマまで一度に見ることができ、さらに複数のフィルターによる観測によ

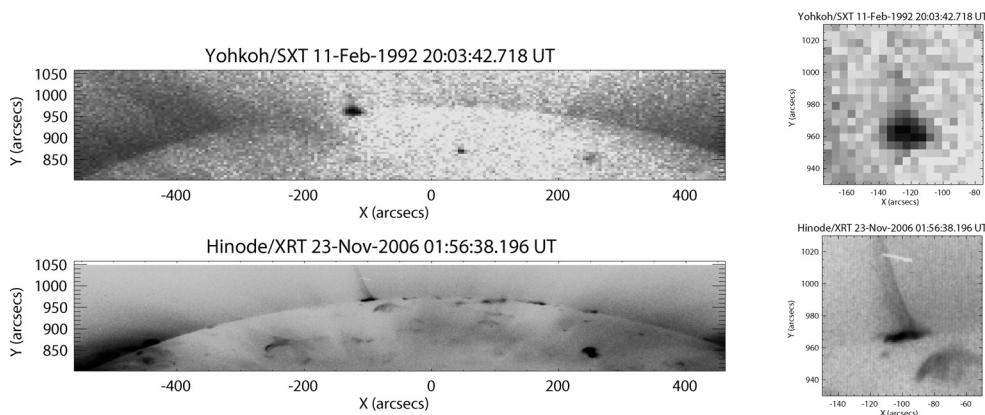


図6 SXT(1992年2月11日)とXRT(2006年11月23日)が撮像した太陽の北極. 右側のパネルは、極付近で発生しているジェットの拡大図. いずれもネガ画像.

り、コロナの多温度構造を捕らえることができる唯一無二の望遠鏡となっています。

このような優れた基本性能の望遠鏡に、「ようこう」/SXT で使われた自動観測システムの進化版（自動露出補正機能、自動観測領域選択機能、自動フレア検出機能）が搭載され、フレキシブルで、効率的な観測ができる望遠鏡システムに仕上がりました。

これらの成果が、図5のXRTで撮像された太陽全面X線画像です。活動領域のループ1本1本がシャープに分解され、その複雑な構造が磁気エネルギーの蓄積を物語っています。図6は、観測された日は異なりますが、同じ視野の広さで太陽の北極付近をSXTとXRTで観測したものです。どちらも、極付近はコロナホールと呼ばれるX線強度が低い領域が見られ、そこから太陽X線ジェットが発生していることがわかります。図6右側はこれらのジェットを拡大した画像です。この図で明らかなように、SXTでは何とかジェットの形を捕らえているのに対し、XRTではジェットの内部構造まではっきり分解していることがわかります。

4. 「ひので」/XRTによる発見

太陽X線ジェットは「ひので」衛星の観測ターゲットの一つでした。高空間分解能・高時間分解能化されたXRTによりジェット内部構造が明らかになり、さらに可視光磁場望遠鏡のベクトル光球磁場観測と組み合わせることにより、磁気リコネクションの詳細を明らかにすることが期待されていました。一方、「ようこう」/SXTの統計的研究⁵⁾により、ジェットは活動領域付近、とくに先行黒点西側のX線輝点にて頻発し、極付近では発生頻度が非常に低いと思われていました。よって、ジェットの研究は活動領域のデータにより進展するだろうと、筆者は思っていました。しかしその考えは、「ひので」の望遠鏡を極に向けたとき全面的に否定されることになったのです。

太陽活動極小期近くに打ち上げられた「ひので」衛星にとって、極域はもっとも重要な観測ターゲットの一つでした。太陽内部ではダイナモによって、黒点を形成する強磁場が生じ、その磁場が最終的には対流により極付近へ流れると考えられています。このような運動が太陽11年周期をつかさどっているのではかと考えられており、極域の精密な磁場観測が非常に重要視されていました。この観測キャンペーンにXRTも従い、「ようこう」/SXTでは取得できなかった、空間分解能1秒角・時間分解能30秒による極域コロナの観測が行われました。その結果、以前は静穏な領域と考えられていたコロナホール内で、太陽X線ジェットが頻発していたことがわかりました^{19), 20)}。その発生頻度は1日あたり60イベントと非常に多く、コロナホールは静穏な領域といえる代物ではなくなっていました。このSXTとXRTとの差は、図6に見られるように、圧倒的な分解能の差によるものだと思われています。

この頻発するジェットの見かけの速度を測ってみたところ、一つのジェットの中に、SXTで見られた200 km/s程度のジェットのほかに、800 km/s程度の高速な成分があることがわかりました¹⁹⁾。これは、SXTでは見つけることができなかった、リコネクションアウトフローか、リコネクションによって発生したアルヴェン波によって加速されたプラズマである可能性が示されています。一方、ジェットの内部構造を詳細に調べた結果、ジェット本体の内部で細い筋状の物がジェットの横切っていく運動が観測されました（図7下段）。これは、リコネクションよってつなぎ変わった磁力線がジェットの内部を横切っていくか、ジェット内部に波動が存在していることを示しています²¹⁾。これらを総合すると、太陽X線ジェット内部では、リコネクションによるエネルギー開放とともにMHD波動が発生していると考えられます。また、ジェットの発生直前に足元からループ

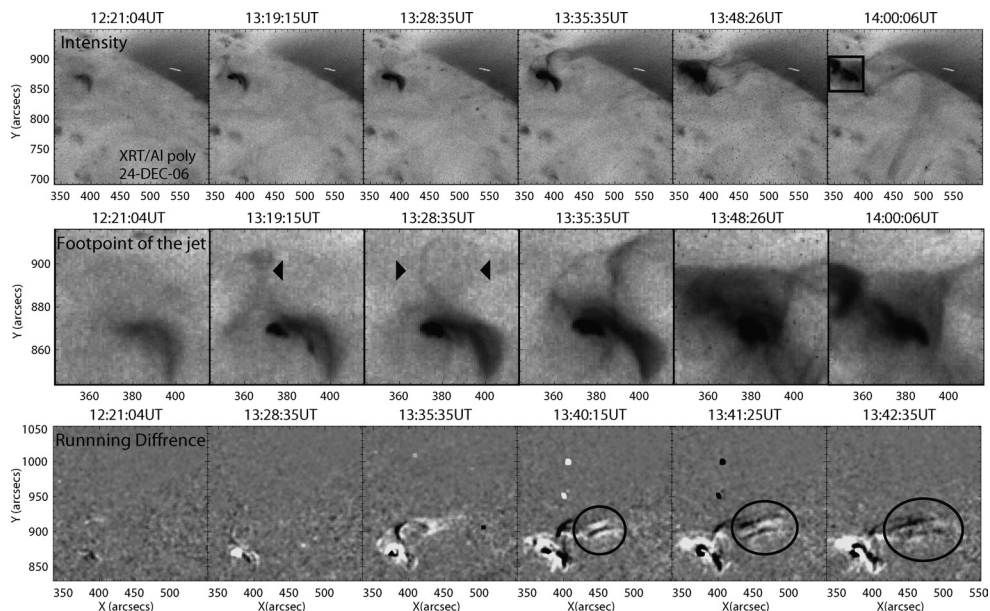


図7 XRTが捕らえた太陽X線ジェット。上段がジェット全体の画像、中段が、ジェットの足元付近を拡大した画像。ジェット発生前にループが膨張している（三角マーク）。下段は、Running Difference画像、ジェット内部にシマウマ模様が見れており、磁力線の移動か、波動を示していると思われる。

の膨張が発生しており、そのループが壊れた後、ジェット現象がスタートすることがわかりました²¹⁾ (図7中段)。これは、通常フレアと同じ特徴で、ジェットとフレアで同じ物理メカニズムが働いていることを示唆しています。

このほか、「ひので」衛星に搭載されている極端紫外線撮像分光装置 (EIS) により、ジェットのドップラー速度の測定をした結果、ジェットの足元で上昇流と下降流が同時に観測されました。これは、リコネクションの *bi-directional flow* の可能性が示唆されています²²⁾。また、EISによる複数の輝線の観測により、彩層蒸発で噴出したプラズマ流が熱伝導により冷却していく様子も捕らえられました²³⁾。

5. 太陽X線ジェット研究の今後

「ひので」/XRTの活躍により、極域コロナホールにおいて太陽X線ジェットが頻発し、さらにその中ではMHD波動が励起されていることが

明らかになりつつあります。これは惑星間空間につながる磁力線という煙突に、波動というエネルギーを持続的に注入していることを意味しています。その結果、何が起こるのでしょう。一つの可能性として、太陽X線ジェットによる波動エネルギーが、コロナホールが源と言われている高速太陽風の加速に使われている可能性があります。今後、太陽X線ジェットというエネルギー源を元に、太陽地球間空間における小さな擾乱などの物理が明らかになるかもしれません。

一方、これまでの「ひので」衛星の初期成果は、「ひので」衛星に搭載された一つの望遠鏡のデータを基に得られたものがほとんどで、「ひので」衛星最大の持ち味である、「1度に光球からコロナまでを見る」というコンセプトを最大限に活かした結果はまだ少数です。太陽X線ジェットに当てはめてみると、光球磁場の運動とジェットを引き起こす磁気リコネクションの関係が明確ではありません。またジェットは、大きなフレアと違い、

必ず画面内にリコネクションポイントが存在している現象です。そう、リコネクションポイント自体が画角に入っているのです。ジェット内部の構造および速度構造を調べることにより、磁気リコネクションそのものの物理を観測的に明らかにできるかもしれません。ただし、図7のように内部構造が見えてきたことにより、3次元構造を調べることが非常に重要になりました。今後も、MHD 数値シミュレーションによる磁場の3次元構造のモデル化と「ひので」衛星のような高分解能観測を合わせることが、さらに重要になっていくと思われます。今後も「ひので」衛星の活躍にご期待ください。

参考文献

- 1) Ogawara Y., et al., 1991, Sol. Phys. 136, 1
- 2) Tsuneta S., et al., 1992, Sol. Phys. 136, 37
- 3) Shibata K., et al., 1992, PASJ 44, L173
- 4) Strong K. T., et al., 1992, PASJ 44, L161
- 5) Shimojo M., et al., 1996, PASJ 48, 123
- 6) Shibata K., et al., 1994, ApJ 431, L51
- 7) Canfield R., et al., 1996, ApJ 464, 1016
- 8) Kundu M. R., et al., 1998, Sol. Phys. 178, 173
- 9) Shimojo M., Shibata K., Harvey K. L., 1998, Sol. Phys. 178, 379
- 10) Yokoyama T., Shibata K., 1995, Nature 375, 6526, 42
- 11) Yokoyama T., Shibata K., 1996, PASJ 48, 353
- 12) Shimojo M., Shibata K., 2000, ApJ 542, 1100
- 13) Shimojo M., et al., 2001, ApJ 550, 1051
- 14) Miyagoshi T., Yokoyama T., 2003, ApJ 593, L133
- 15) Miyagoshi T., Yokoyama T., 2004, ApJ 614, 1042
- 16) Kosugi T., et al., 2007, Sol. Phys. 243, 3
- 17) Golub L., et al., 2007, Sol. Phys. 243, 63
- 18) Kano R., et al., 2007, Sol. Phys. in press
- 19) Cirtain J., et al., 2007, Science 318, 1519
- 20) Savcheva A., et al., 2007, PASJ 59, S771
- 21) Shimojo M., et al., 2007, PASJ 59, S745
- 22) Kamio, S., et al., 2007, PASJ 59, S757
- 23) Culhane L., et al., 2007, PASJ 59, S751

Solar X-ray Jets Observed with the X-ray Telescope aboard Hinode

Masumi SHIMOJO

Nobeyama Solar Radio Observatory, National Astronomical Observatory of Japan, Nobeyama, Minamimaki, Minamisaku, Nagano 384-1305, Japan

Abstract: A solar X-ray jet is the jet phenomenon of coronal plasma and it was discovered by the Soft X-ray Telescope aboard Yohkoh. Since the X-ray telescope (XRT) aboard Hinode has the high-resolution and the wider temperature response, we found that the X-ray jets frequently occur even in the polar coronal hole. And, XRT also revealed that the jets generate MHD wave. Based on the XRT results, we suggest that the X-ray jets in coronal hole provide the energy for the acceleration of fast solar wind.