

# 「ひので」XRTにより明らかになった 太陽風の源



坂尾 太郎

〈宇宙航空研究開発機構・宇宙科学研究本部・宇宙科学共通基礎研究系 〒229-8510 神奈川県相模原市由野台 3-1-1〉  
e-mail: sakao@solar.isas.jaxa.jp

太陽観測衛星「ひので」衛星に搭載された軟 X 線望遠鏡 XRT によって、これまで特定されていなかった、コロナから太陽風が吹き出している現場の一つをとらえることができました。コロナホールと隣接した活動領域で、両者の境界にあたる場所から、温度 110 万度のプラズマが磁力線に沿ってコロナ上空へ絶えず流れ出ているのが発見されたのです。この場所の磁力線は惑星間空間につながっていると考えられ、見つかったプラズマの流れは太陽風の源になっていると考えられます。太陽風が実際に吹き出すところを直接観測できるようになったことから、今後、太陽風の理解が大きく進展することが期待されます。

## 1. はじめに

太陽系は、太陽風と呼ばれる超音速（秒速 100 km）の荷電粒子の流れに満たされています。太陽から絶えず吹き出すこの太陽風は、磁場をもつ惑星でのオーロラ発光（ハッブル望遠鏡による木星や土星のオーロラ写真を目にした人も多いでしょう）、惑星大気の散逸、また、電荷交換過程を通じた彗星や大気からの X 線放射<sup>1), 2)</sup>、など、太陽系惑星の磁氣的活動や大気活動に大きな影響を及ぼしています。さらには、ときとして地球の磁気圏を乱して通信を妨げたり、人工衛星の帯電故障を引き起こすことさえあります。通信衛星や GPS など、社会インフラの多くを人工衛星に依存するようになってきた今日、太陽フレアやコロナ質量放出現象（CME: Coronal Mass Ejection）だけでなく、太陽風もまた、われわれの日常生活に大きな影響を及ぼすようになってきました。

惑星間空間に太陽風が吹きわたっているという事実は、1950 年代にイオンテイルと呼ばれる彗星

の尾の観測から予想されるようになり<sup>3)</sup>、1962 年の金星に向かう人工衛星マリナー 2 号による観測で実際に確認されました。これまでに行われてきた観測から、太陽風には地球周辺での速度が秒速 200–300 km 程度の「低速太陽風」と、秒速 600–800 km 程度の「高速太陽風」があることがわかっています。これら 2 種類の太陽風は、11 年で変化する太陽の周期活動の時期によって、太陽から吹き出す様子が大きく異なることが、ユリシーズ (Ulysses) 衛星によって明らかになりました<sup>4)</sup> (図 1)。図 1 が示すように、高速太陽風は太陽の南北両極域を含む中・高緯度領域から、低速太陽風はそれ以外の低緯度領域から吹き出していると一般的には考えられています。しかしながら、太陽風が太陽のどの場所から吹き出しているのか、その現場を特定した観測はこれまでありませんでした。また、太陽を出発した太陽風がどこで、どのようにして秒速数百 km にまで加速されているのか、そのメカニズムはいまだ明らかにはなっていません。

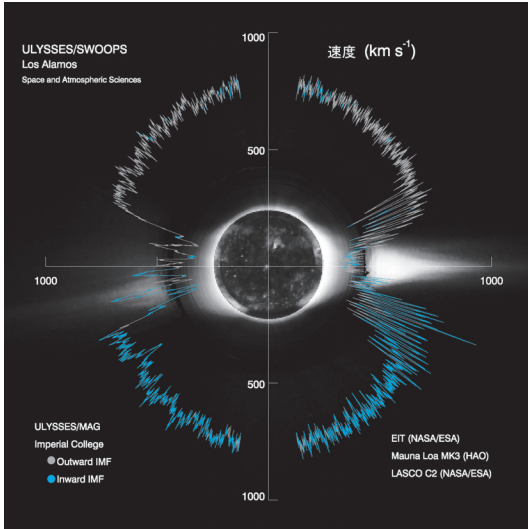


図1 Ulysses 衛星で測定された、太陽風速度の緯度分布。左半分が太陽活動極小期、右半分が極大期の分布 (NASA ホームページより)。

## 2. 「ひので」の観測

2006年に打ち上げられた「ひので」衛星<sup>5)</sup>には、可視光磁場望遠鏡 (SOT)<sup>6)</sup>、X線望遠鏡 (XRT)<sup>7), 8)</sup>、極端紫外線撮像分光装置 (EIS)<sup>9)</sup> という3台の最先端の望遠鏡装置が搭載されています。このうち、本稿の主役であるX線望遠鏡XRTについて少し説明しましょう。XRTは「ようこう」に搭載された軟X線望遠鏡SXTと同様の、斜入射型の軟X線望遠鏡ですが、望遠鏡を大型にすることで、空間分解能を3倍向上させる一方、必要な露光時間 (CCDの1ピクセルに十分な数の光子を貯めるのに必要な時間) をSXTと同程度に保っています。さらに、焦点面検出器として裏面照射型CCDを採用することで、SXTでは感度がなくて観測できなかった、温度100–200万度Kの比較的「低温」なコロナプラズマをも撮像観測することができるようになりました。またXRTは、特にフレアの起きていないときはSXTに比べて10倍高い撮像頻度でコロナの観測を行うことができます。低温プラズマを高い頻度で撮

像できるようになったことで、「ようこう」やこれまでの他の太陽観測衛星で見ることのできなかつた、新しい現象が次々と見つかってきました。

「ひので」は2007年2月20日から22日にかけて、活動領域NOAA10942を観測しました。活動領域というのは、黒点など磁場の強い領域の上空のコロナを指し、軟X線で撮像すると周囲のコロナに比べて明るく光って見えます。図2左に2月22日の太陽全面コロナの軟X線画像を示します。白の正方形で囲った領域の中に見えるのが活動領域NOAA10942です。活動領域の左側 (太陽の東側) にコロナホール (コロナ中の軟X線で暗く見える領域) があり、この活動領域はコロナホールに隣接していることがわかります。「ひので」XRTは、この図に示した正方形の領域を約100秒に1枚の撮像頻度で観測しました。XRTの焦点面CCDの前方には2台のフィルタータレットがあり、全部で9枚の薄膜金属フィルターの中から撮像ごとに1枚ないし2枚を選んで光路中に挿入することができます。複数のフィルターで撮像した画像のペアから、「フィルターレシオ法」という方法を用いてプラズマの温度解析を行うことができます<sup>10)</sup>。

図2の右側の図は、先の正方形領域を拡大表示したもので、一辺はおおよそ37万kmにあたります。XRTによる観測で取得した画像を時系列にムービー表示したところ、図中の丸で示した領域から筋状に見える磁力線に沿って、軟X線を放射するプラズマガスが絶えず流れ出ているのが発見されました<sup>11)</sup>。この流出現象は、観測した3日間にわたって常に起きています。ガスの投影面内を移動する、見かけの速さを知るために、図3左に示したスリット上の軟X線強度分布を、時間を追って上方向に積み上げてみました。結果を図3右に示します。(ただし図3右ではスリット上の強度分布を左右反転していることに注意してください。) スリットに沿って右から左へと伝わるガスの流れは、図3右で左下から右斜め上方向へと

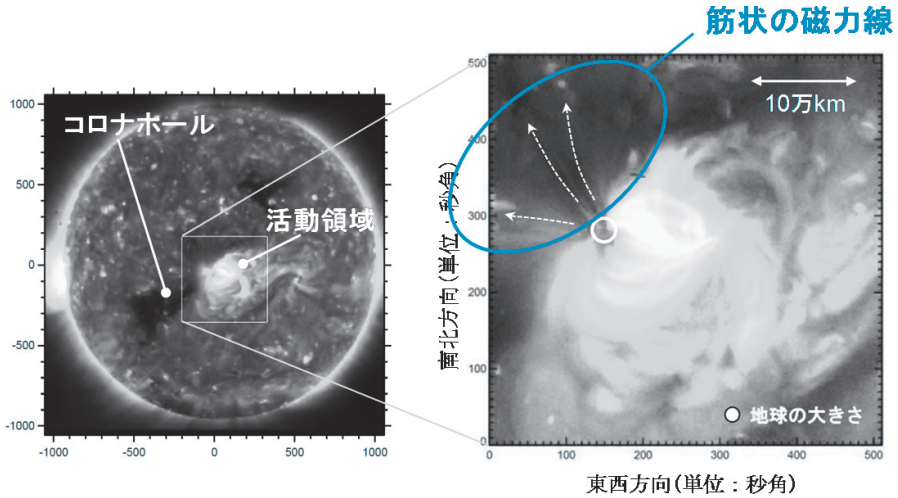


図2 XRTによる太陽全面画像(左)と、観測領域の拡大像(右)。

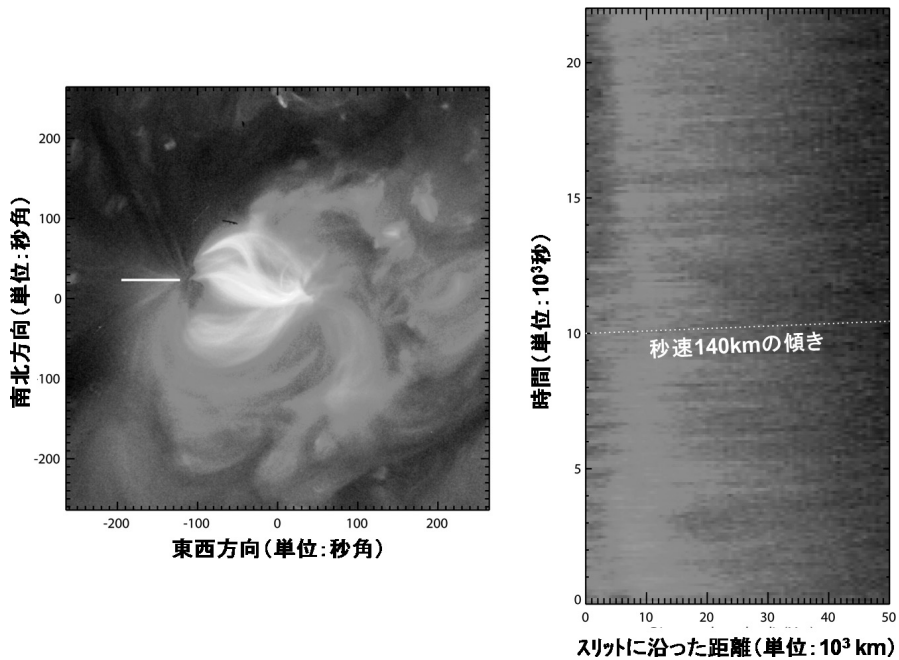


図3 プラズマ流に沿ったスリット位置(左図の白線)と、スリットに沿った軟X線強度分布の時間発展(右図)。

伸びるパターンとして現れます。この傾きがプラズマガスのスリットに沿った投影面内の流出速度を与えます。図3から、流出速度は秒速100-170 km程度と求まりました。

軟X線画像からプラズマガスが流れ出ているようなパターンが見えました。しかし、ガスが実際には流出してなくてもプラズマの密度や温度の変化が波として伝播することでこのようなパ

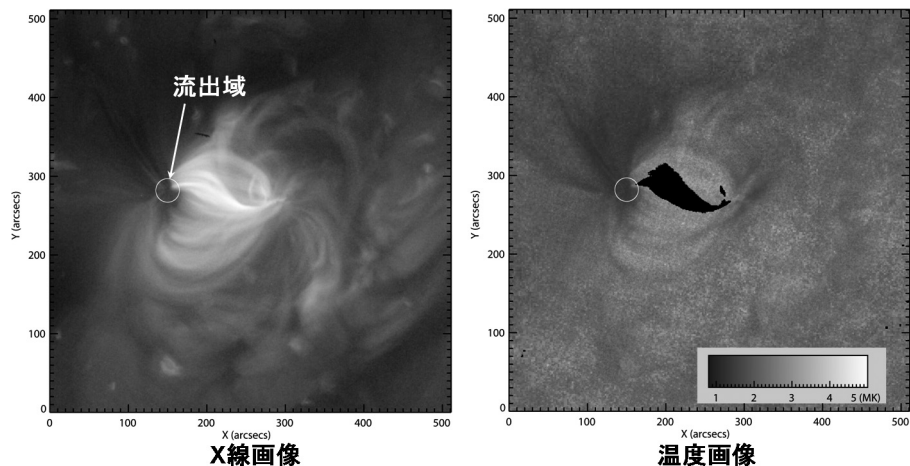


図4 太陽風流出域の X 線像 (左) とフィルターレシオ温度分布 (右). (右図の黒抜きの領域は、X 線強度が強く CCD ピクセルが飽和したため、温度が導出できなかった領域.)

ターンが見えている可能性もあります. けれども, XRT と同時に観測を行った EIS による極端紫外線分光によって, この流出域で常に, コロナ温度の鉄輝線 (FeX II) が短波長側にドップラシフトしていることが判明しました<sup>12)</sup>. このことは, プラズマガスが実際に視線方向に上昇していることを示しており, XRT が観測した流れのパターンがプラズマガスの流出によるものであることが明らかとなりました. (なお, EIS の検出した視線方向のプラズマガスの上昇速度は 50

km/s 程度です.)

先に述べたフィルターレシオ法により, プラズマ流出域周辺の温度分布—視線方向の「代表的な温度」ですが—やエミッションメジャー分布, さらに視線方向の厚みを仮定した密度分布, を求めることができます. 図4 は流出域周辺の温度分布です. 白円で示した流出域のプラズマガスの温度は約 110 万度 K, 密度は  $3.2 \times 10^9 \text{ cm}^{-3}$  と求まりました. このガスが流出してくるわけですが, 流出速度の代表値として 140 km/s をとると, 質量

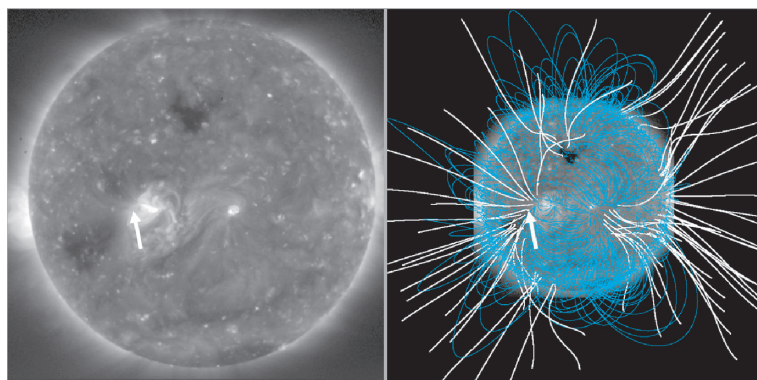


図5 XRT による太陽全面像 (左) とポテンシャル磁場計算から求めた磁力線 (右). プラズマ上昇流の観測場所を白矢印で示す.

流出率は  $2.8 \times 10^{11}$  g/s となります。

### 3. コロナガスの流出と太陽風

さて、ガスの流れをガイドしている磁力線は、どこにつながっているのでしょうか？ 図5にそれを調べた結果を示します。これは、SoHO衛星に搭載されたMDI観測装置(Michelson-Doppler Imager)が観測した太陽全面の視線方向の磁束密度分布から、ポテンシャル磁場計算によって磁力線を描かせたものです。図中、白色で表示した磁力線は、2.5太陽半径の位置に設定したsource surface球面(この表面に磁力線が垂直に交わるとする)にまで到達している磁力線で、これらの磁力線は、太陽から惑星間空間へと伸び出していると考えられます。一方、青色の磁力線は、source surfaceに達することなく太陽表面に戻ってくる、いわゆる閉じた磁力線です。プラズマガスの流出場所を図中の白矢印で示します。ちょうど活動領域がコロナホールに接した場所にあたり、ここからの磁力線は、惑星間空間へと伸び出していることがわかります。磁力線に沿って流出するガスは、太陽表面へは戻ってこずにそのまま太陽系へと流れ出す、つまり太陽風となりうるものが判明しました。太陽風の質量放出率は  $\sim 1 \times 10^{12}$  g/sと見積もられているので、今回「ひので」が見つけたプラズマ流が仮にすべて太陽風として流出しているとする、太陽風の全質量放出率のおよそ1/4はこの流出域のみでまかなっていることとなります。

今回発見されたような太陽風の流出場所は、実はこれまでの研究で示唆されていた場所の一つに合致しています。名古屋大学太陽地球環境研究所のグループが行っている、キューサーなど電波源を利用したシンチレーション観測の手法による惑星間空間の太陽風伝播の研究から、ある種の低速太陽風は、活動領域の端の(コロナホールに隣接するなどして)磁力線が上空へ大きく開いているような領域から出ているらしいことが示唆されて

いました<sup>13), 14)</sup>。また、ACE衛星を用いた太陽風観測からも同様に、活動領域端部が流出起源となっているらしいことが指摘されています<sup>15)</sup>。「ひので」XRTが発見したプラズマ流出現象は、まさにそうした低速太陽風が流れ出している現場を画像として初めてとらえたものだと考えています。

### 4. 「ひので」と太陽風研究の今後

「ひので」XRTは、太陽の極域でも、太陽風との関連が期待される現象を見つけています。太陽の北極・南極域にはコロナホールが広がっていますが、従来ここではX線の活動がほとんど見られないと考えられていました。しかし、XRTによる観測で、このコロナホールの中でX線ジェットと呼ばれる現象が頻繁に(1時間に10イベント以上)起きていることが発見されたのです<sup>16)</sup>(図6)。X線ジェットは磁力線によって方向的に局在されたプラズマガスが、磁力線足元部での磁気リコネクションによって上空に噴出する現象で<sup>17), 18)</sup>、このようなジェットが頻繁に生じているということは、極域の太陽表面に予想外に活発な磁気活動(光球面下からの磁束の上昇活動)があることを意味しています。高速太陽風は太陽極域から出ていると考えられていることから、このX線ジェットと高速太陽風との関連の有無にも注目が集まっています。一方、SOTはこの極域で

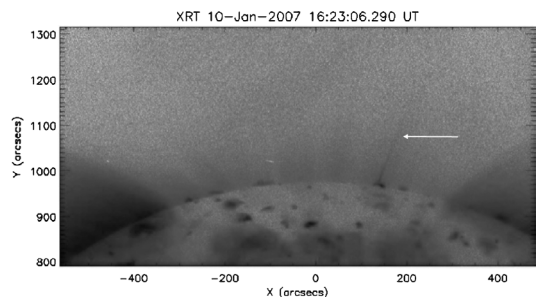


図6 「ひので」XRTによる極域X線ジェットの観測例(図中の矢印)。

1,000 G もの強い磁場がパッチ状に分布していることを発見しており、これが高速太陽風の加速に果たす役割(アルフベン波による加速<sup>19)</sup>)や X 線ジェットとの関係も現在活発に研究されています。

紹介してきたように、XRT によって太陽コロナの中で太陽風プラズマが実際に流れ出ている現場をとらえることができるようになってきました。今後、上述のシンチレーション測定や衛星による太陽風の観測データと組み合わせることで、これまで謎に包まれていた太陽風の素顔に迫れるものと期待しています。

## 謝 辞

「ひので」衛星は、国内では JAXA 宇宙科学研究本部と国立天文台との緊密な協力、また国外では米国 NASA、英国 PPARC (現 STFC) との広範な国際協力のもとで開発されました。打上げ後は、ESA が地上受信局のサポートで協力しています。また、衛星開発・ロケット打上げに携わったメーカー各位、JAXA 理工学研究者の皆様に厚くお礼申し上げます。最後に、衛星プロジェクトマネージャーとして陣頭指揮にあたり、観測開始直後に急逝された小杉健郎先生のご冥福を改めてお祈りします。

## 参考文献

- 1) Cravens T. E., 1997, GRL 24, 105
- 2) 藤本龍一, 満田和久, McCompton D., 2007, 天文月報 100, 321
- 3) Biermann L., 1951, Z. Astrophys. 29, 274  
また、彗星と太陽活動の関係を最初に指摘した論文として、Ahnert P., 1943, Z. Astrophys. 22, 286 があり

ます。

- 4) McCompton D. J., et al., 1998, GRL 25, 1
- 5) Kosugi T., et al., 2007, Sol. Phys. 243, 3
- 6) Tsuneta S., et al., 2008, Sol. Phys. 249, 167
- 7) Golub L., et al., 2007, Sol. Phys. 243, 63
- 8) Kano R., et al., 2008, Sol. Phys. 249, 263
- 9) Culhane J. L., et al., 2007, Sol. Phys. 243, 19
- 10) Hara H., et al., 1992, PASJ 44, L135
- 11) Sakao T., et al., 2007, Science 318, 1585
- 12) Harra L. K., et al., 2008, ApJ 676, L147
- 13) Kojima M., et al., 1999, J. Geol. Res. 104, 16993
- 14) 大見智亮, 2003, 博士論文(名古屋大学)
- 15) Ko Y.-K., et al., 2006, ApJ 646, 1275
- 16) Cirtain J. W., et al., 2007, Sci. 318, 1580
- 17) Shibata K., et al., 1992, PASJ 44, L173
- 18) Shimojo M., et al., 1996, PASJ 48, 123
- 19) Suzuki T. K., Inutsuka S., 2005, ApJ 632, L49

## Source Region of the Solar Wind Identified with Hinode X-Ray Telescope

Taro SAKAO

*Institute of Space and Astronautical Science,  
Japan Aerospace Exploration Agency, 3-1-1  
Yoshinodai, Sagami-hara, Kanagawa 229-8510,  
Japan*

Abstract: A possible source region for the slow solar wind was identified with the X-Ray Telescope (XRT) aboard Hinode satellite. Continuous outflow of hot ( $\sim 1$  MK) plasmas was found to emanate from the edge of a solar active region adjacent to a coronal hole. Magnetic field lines along which outflowing plasmas propagate are most likely opened toward the interplanetary space. Hence the observed outflow would constitute a part of the solar wind.