

## 「ひので」衛星が明らかにした 太陽風の起源

### Kyoung-Sun LEE

〈国立天文台 太陽観測所 〒181-8588 東京都三鷹市大沢2-21-1〉  
e-mail: ksun.lee@nao.ac.jp



Lee



Brooks

### David H. BROOKS

〈College of Science, George Mason University, 4400 University Drive, Fairfax, VA 22030, USA〉  
e-mail: dhbrooks@ssd5.nrl.navy.mil



今田

### 今田 晋 亮

〈名古屋大学宇宙地球環境研究所 〒464-8601 名古屋市千種区不老町〉  
e-mail: shinimada@stelab.nagoya-u.ac.jp

太陽風の起源およびその駆動メカニズムは、いまだに解決されていない問題であり、太陽圏研究において重要な課題である。「ひので」衛星は、高空間分解能かつ高感度でコロナプラズマの密度、速度さらには元素組成比を測定することで、これら太陽風の起源に唯一迫ることができる。「ひので」衛星の10周年を迎えるにあたり、この10年での太陽風起源に関する発見を総括する。

## 1. はじめに

太陽からは継続的に電離したガス（プラズマ）が噴き出しており、それを太陽風と呼ぶ。この太陽風は1958年に理論的にユージーン・パーカーによって提唱された<sup>1)</sup>。この理論モデルによると、太陽近傍で亜音速であった流れが、ある程度離れた場所に流れ出すまでに超音速まで加速される。これまで、地球近傍にて直接プラズマを測定する方法（“その場観測”）と太陽コロナを診断するリモートセンシング観測によって太陽風の存在およびその物理状態が調べられ、理論モデルとの比較が行われてきた。しかし、パーカーのモデルは定常性や球対称性などを仮定しているが、太陽風の起源となる領域であるコロナは非常にダイナミッ

クに変動していることが知られており、コロナの非一様性・非定常性が太陽風にどのような影響を与えるかは興味深い。実際、地球近傍で太陽風を観測すると、いつも同じ太陽風が吹いているわけではない。特にその速度の違いは顕著で、通常二つのタイプに分類され、速いものを高速太陽風、遅いものを低速太陽風と呼んでいる。

高速・低速太陽風が、どうして違う速度なのかを理解するために、太陽風の起源であるコロナのどこから流れ出しているかを特定し、その領域の非定常な物理状態を考察する必要がある。太陽風が吹き出す領域はコロナの暗い場所（コロナホールなど）であると考えられており、このような場所での流速を計測するためには感度の高い紫外線分光観測が必須であり、「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) が威力を発揮する。

太陽風の起源を決定する、最も有効な方法の一つに元素組成比の違いを用いる方法が挙げられる。太陽風の起源となる太陽コロナは磁場が支配的な領域であると考えられており、プラズマは磁力線に凍結して、その特徴は地球まで飛んでくる間に、それほど変わらないと考えられている。そこで、この元素組成比を目印に、地球近傍で観測される太陽風と太陽表面で観測されるコロナを結びつける。元素組成比は太陽の表面 (光球) とその外側のコロナとは違うことが知られており、この組成比の違いは各元素の第一イオン化エネルギー (FIP: First Ionization Potential, 中性元素から電離してイオンになるために必要なエネルギー) の違いによるものと考えられている。コロナの元素組成は光球の組成比と比べて、低いFIPの元素を多く含んでおり、この効果をFIP効果と呼んでいる。何故、光球とコロナで元素組成比が違うのかはいまだに議論<sup>2)</sup>があるが、基本的にはイオンにはローレンツ力は直接作用するが中性原子には間接的にしか作用しないため、プラズマが光球からコロナに輸送される間に両者に僅かに違いが生じるためである。さらに、これまでの地球近傍で行われてきた“その場観測”により、高速太陽風は光球に近い元素組成をしており、逆に低速太陽風ではコロナに近い元素組成をしていることがわかっている<sup>3), 4)</sup>。また、黄道面外、太陽の極方向に周回する軌道をとって“その場観測”を行った「Ulysses」衛星により、高速太陽風は太陽の極付近から、低速太陽風は太陽の赤道近くから噴き出していることがわかっている。まとめると、高速太陽風は極域から光球と同じ元素組成比で、低速太陽風は赤道域からコロナと同じ元素組成比で噴き出しているという結果が得られている<sup>5)-7)</sup>。

しかしながら、これまでの観測は空間分解能が低く、さらに感度も低かったため、時間・空間に関して極域および赤道の上空の平均した描像しか

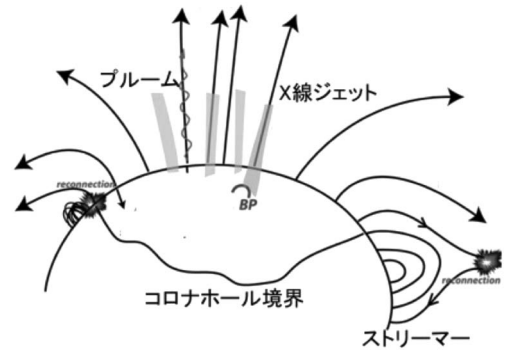


図1 極域コロナホールの概念図<sup>8)</sup>。矢印は磁力線を表す。シアンはブルーム（極端紫外線で柱のように見える構造）を表す。グレーはX線ジェットを表す。

得られず、ある特定の場所からどのような特徴をもった太陽風が噴き出しているかはわからなかった。高速太陽風が噴き出している極域のコロナホールではいくつかの特徴的なコロナの構造が見られ、例えばブルーム、インターブルーム、そしてX線ジェットなどがある (図1参照)。また、低速太陽風についても起源の候補となりうる特徴的なコロナ構造がいくつかあり、活動領域、ストリーマーなどが挙げられる (図1参照)。「ひので」衛星打ち上げ後、多波長かつ高感度の分光観測ができるようになり、さまざまな元素からの輝線を用いて、暗い領域の元素組成比診断ができるようになった。また、その高い空間分解能から、ある特定の構造に対して元素組成比の診断をすることができるようにもなった。EISを用いた観測的研究により、高速および低速太陽風の起源について飛躍的に理解が進んだ。

## 2. 高速太陽風の起源

極域コロナホールより噴き出していると考えられている高速太陽風の起源の候補としてブルーム、インターブルーム (ブルームとブルームの間)、そしてX線ジェットが挙げられる。実際、極域コロナホールにある、これらの候補領域の磁場構造は惑星間空間に向けて開いていることが知られて

おり、この開いた磁力線に沿って高速太陽風が惑星間空間まで噴き出していると考えられている。しかし、どのようにプラズマが加速され、さらに極域のどの構造が高速太陽風の最も重要な起源であるかは明らかでなかった。

「ひので」X線望遠鏡(XRT)による最も重要な発見の一つに、極域X線ジェットの見えが挙げられる。これまでの観測から考えられてきた極域ジェットの頻度に比べて、非常に頻繁に起こっていることが明らかになった<sup>9)</sup>。これらのジェットは磁気リコネクションによって引き起こされていることが示唆されていて<sup>10)</sup>、このX線ジェットの速度はCirtain et al.<sup>11)</sup>によればおよそ800 km/sであることが明らかになった。彼らが観測から求めた速度および質量から、極域X線ジェットは太陽風に対して十分に質量を供給でき、また磁気リコネクションが太陽風の加速メカニズムの一つになりうることを示唆された。この可能性をさらに検証するため、Lee et al.<sup>12)</sup>では極域ジェットの元素組成比を求めることを試みた(図2)。彼女らは、

ジェットの元素組成比はほぼ光球のものと同じ、つまりは高速太陽風の元素組成比と同じであることを明らかにした(図2右)。この観測により、極域X線ジェットが高速太陽風の起源の一つになった。

極域に数日間にわたって安定して存在するブルームおよびインターブルームの元素組成比もEISを用いて同様に明らかにされた<sup>13)</sup>。インターブルームの元素組成比は光球のものと同じであることが明らかになった。一方で、ブルームは低いFIP元素の割合がときどき高くなることがわかり、高速・低速太陽風両者の特性をもっていることがわかった。

まとめると、「ひので」衛星によって高速太陽風の一つの候補として極域のX線ジェットが発見され、EISによる新しい観測でX線ジェットおよび太陽極域に存在するそのほかの構造(ブルームやインターブルーム)も高速太陽風と同じ元素組成比をしており、高速太陽風の起源は複合的で非一様かつ非定常なものであることが明らかになった。

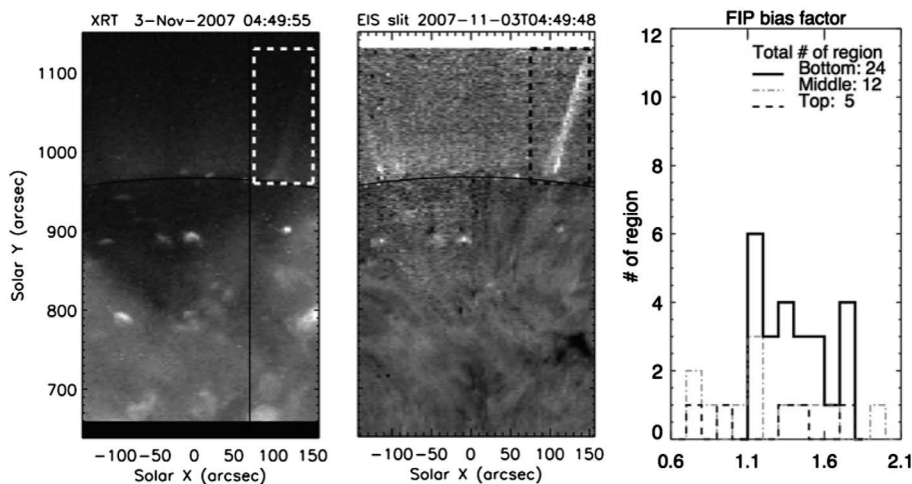


図2 極域X線ジェットの観測例。左:「ひので」衛星搭載XRTによる画像。中央:「ひので」衛星搭載EISによる160万度に対応する輝線から得られたドップラー速度のマップ。黒は紙面垂直手前向き(赤方偏移)の速度を表し、白は紙面垂直奥向き(青方偏移)の速度を表す。点線で囲まれた領域でX線ジェットが起こっている。右:極域ジェットにおけるFIPバイアス値(低FIP元素と高FIP元素の比を光球のもので規格化したもの。1は光球の元素組成を表し、通常コロナは4程度)。黒実線、シアン点破線、黒破線は場所の違いを表す。ほとんどの領域で、FIPバイアスは0.7-1.5であり、極域ジェットは光球の元素組成比と同程度である。

### 3. 低速太陽風の起源

「ひので」衛星によって低速太陽風に関する多くの発見がなされた。ここでは紙面の都合上、限られたもののみを紹介する。最も重要な発見は多くの活動領域の境界に存在するX線で暗い領域から惑星間空間へ流れ出す高温のプラズマが観測されたことであろう。これらについては最初、X線望遠鏡 (XRT) による撮像観測によって上空に流れ出すプラズマの様子が観測された<sup>14)</sup>。見た目の運動としてX線撮像によって観測されたが、本当にプラズマ自体が動いているかどうかは明らかではない。そこで、EISのドップラー速度を用いて、プラズマが本当に噴き出しているかどうか議論した。その結果、実際にこの領域のプラズマは数十km/sで上空へ向かって運動していることが明らかになった<sup>15)–17)</sup>。さらに、これらの速度成分は温度に依存して速くなることもわかった<sup>18)</sup>。このプラズマの流れが本当に低速太陽風の起源になっているかどうかは、高速太陽風と同様にEISの元素組成比診断によって議論することができる。先ほど議論したように、低速太陽風の組成比は高速太陽風のものとは異なる。EISの観測データを解析すると確かにこの活動領域近くの暗い領域からのアウトフロー成分は、地球近傍で「ACE」衛星によって観測される低速太陽風の元素組成と近いものになっていることが確認された<sup>19)</sup>。しかしながら、太陽風の一部を担うためには、プラズマは惑星間空間まで逃げ出す必要がある。本当に惑星間空間へこの領域から磁場が続いているのかを確認する必要がある。Sakao et al.<sup>14)</sup>ではポテンシャル磁場を用いて活動領域の境界にあるアウトフロー領域は確かに開いた磁力線の足元に位置することを示した。一方で、この領域は必ずしもいつも開いた磁力線に対応するわけではないらしい。Edwards et al.<sup>20)</sup>は七つの活動領域について同様の解析を行ったところ、たった一つの活動領域しかX線で暗いアウトフ

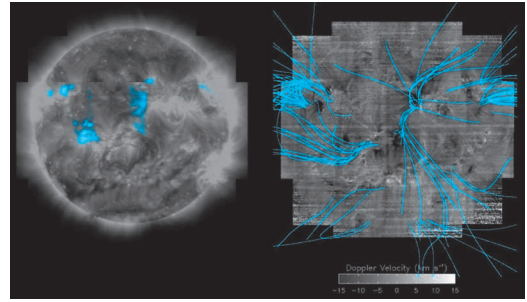


図3 EISによる太陽コロナ全面からの太陽風の起源を同定した結果。左: SDOによる1.8 MKのコロナ全面像。シアンは低FIPで開いた磁力線の足元の領域(低速太陽風の起源)を表す。右: 1.8 MKに対応する輝線から得られた太陽全面ドップラー速度のマップ。黒は紙面垂直手前方向の速度。シアン線は磁力線を表す。

ロー領域は開いた磁力線に対応していなかった。ポテンシャル磁場近似は定常性を仮定しており、非定常な効果まで考慮すると、この領域の磁力線は惑星間空間まで到達するのではないかと考えられている<sup>21), 22)</sup>。

プラズマが太陽大気から流出する過程はおそらく複合的で、これらの活動領域の境界からのプラズマ流で十分に低速太陽風を賄えるかどうか見積もることは重要である。元素組成比のマップを太陽面全体にわたって作ることで、Brooks et al.<sup>23)</sup>は低速太陽風の起源となる活動領域を太陽全体にわたって同定した(図3)。さらに、この活動領域からの惑星間空間に吹き出すプラズマの質量フラックスが低速太陽風をまかなうのに十分であることを明らかにした。

低速太陽風に関する「ひので」衛星の発見をまとめると、「ひので」衛星は新しい低速太陽風の起源を活動領域の境界に見つけた。そして、新しいEISの解析によってこれらの領域から流出するプラズマの元素組成比は低速太陽風のものと同じで、供給する質量フラックスも低速太陽風の起源として十分であることがわかった。



## 5. おわりに

「ひので」衛星は高速太陽風および低速太陽風の起源に関して非常に重要な発見をもたらした。しかし、これで太陽風起源に関してすべて理解できたわけではない。例えば、先に示した極域ジェットのようなトランジェントな現象を追うのに、「ひので」衛星をもってしても時間分解能は十分とは言えない。残念ながらトランジェントな現象の解析では、時間分解能の都合から1枚のスナップショットを得るのが精一杯である。太陽風起源領域の詳細な時間変化まで理解するには、「ひので」衛星より、さらに高い時間分解能をもった望遠鏡が必要である。また、リモートセンシングによる太陽大気の観測と、“その場観測”による太陽風の観測を結びつけるのに、地球近傍にある“その場観測”のみ用いており、太陽風起源領域の時間変動が黄道面付近の太陽風への影響にバイアスがかかっている。太陽コロナで起こるダイナミックな現象が太陽風全体へどう影響するのかを理解するためには、例えば黄道面外の“その場観測”と太陽コロナ観測を結びつける必要がある。

今後予定されている二つの太陽観測衛星ミッションによってこの二つの問題が著しく発展することが期待できる。「ひので」衛星を発展させた「Solar-C」衛星は高い空間分解能かつ高い時間分解能で光球から、彩層、遷移層、そしてコロナと太陽大気すべての領域を観測する。さらに、「Solar-Orbiter」<sup>24)</sup>は黄道面を脱出し0.3 AUにおいて太陽大気のリモートセンシング観測と太陽風の“その場観測”を合わせて行う。この衛星観測は「Solar-C」と相補的な関係にあり、この数十年でこれらの衛星計画により、太陽風の理解は著しい発展が期待できる。

## 参考文献

- 1) Parker E. N., 1958, ApJ 128, 664
- 2) Laming J. M., 2004, ApJ 614, 1063
- 3) Geiss G., et al., 1995, SSRv 72, 49
- 4) von Steiger R., et al., 2000, JGR 105, 27217
- 5) Wilhelm K., Bodmer R., 1998, SSRv 85, 371
- 6) Young P. R., et al., 1999, A&A 350, 286
- 7) Feldman U., et al., 2005, JGR 110, 10918
- 8) Teriaca L., et al., 2012, Experimental Astronomy 34, 273
- 9) 坂尾太郎, 2016, 天文月報 109, 694
- 10) Shibata K., et al., 1992, PASJ 44, L173
- 11) Cirtain J. W., et al., 2007, Science 318, 1580
- 12) Guennou C., et al., 2015, ApJ 807, 145
- 13) Lee K.-S., et al., 2015, ApJ 809, 114
- 14) Sakao T., et al., 2007, Science 318, 1585
- 15) Del Zanna G., 2008, A&A 481, L49
- 16) Harra L. K., et al., 2008, ApJ 676, L147
- 17) Doschek G., et al., 2008, ApJ 686, 1362
- 18) Brooks D. H., Warren H. P., 2012, ApJ 760, L5
- 19) Brooks D. H., Warren H. P., 2011, ApJ 727, L13
- 20) Edwards S. J., et al., 2016, Solar Physics 291, 117
- 21) Culhane J. L., et al., 2014, Solar Physics 289, 3799
- 22) Mandrini C., et al., 2014, Solar Physics 289, 2041
- 23) Brooks D. H., et al., 2015, Nat. Commun. 6, 5947
- 24) Muller D., et al., 2013, Solar Physics 285, 25

### The Origin of the Solar Wind Observed by Hinode

Kyoung-Sun LEE, David H. BROOKS and Shinsuke IMADA

National Astronomical Observatory of Japan,  
2-21-1 Osawa, Mitaka, Tokyo 181-8588, Japan

Abstract: The source regions of the solar wind, and its driver and acceleration mechanism, remain key topics of study in heliophysics. With the combination of high sensitivity and high spatial resolution measurements of Doppler flows, mass motions, and plasma composition, the Hinode satellite is uniquely equipped to investigate many of these issues. On the occasion of the tenth anniversary of the launch of Hinode, we here briefly review some of the scientific highlights on this subject from the mission over the last decade.