

「ひので」で見る ダイナミックな太陽

勝川行雄

総合研究大学院大学助教 天文科学専攻／自然科学研究機構 国立天文台助教

太陽で起こる活動は、内部で作られた磁場のエネルギーがプラズマのエネルギーに転換されることにより生じる。「ようこう」は、このエネルギー転換の現場を観測したが、「ひので」ではエネルギーの源である磁場も同時に観測する。その結果、太陽の表面から大気上層にいたる各層で未知の現象が続々と発見され、太陽物理学の課題を解き明かす有力な手掛かりが得られている。

対流と磁場が生み出す光球の構造

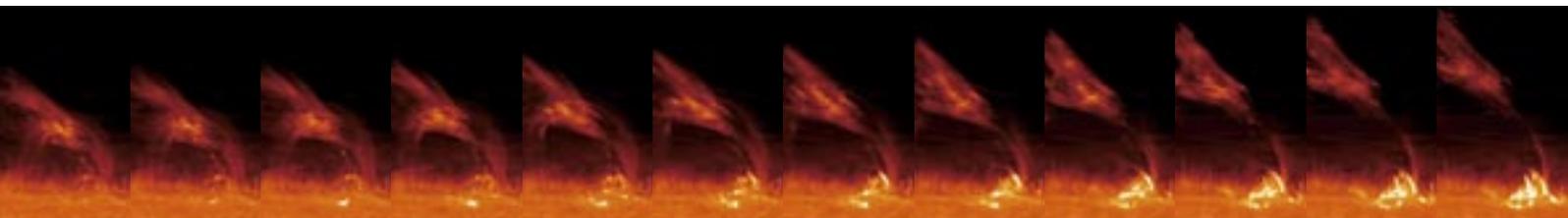
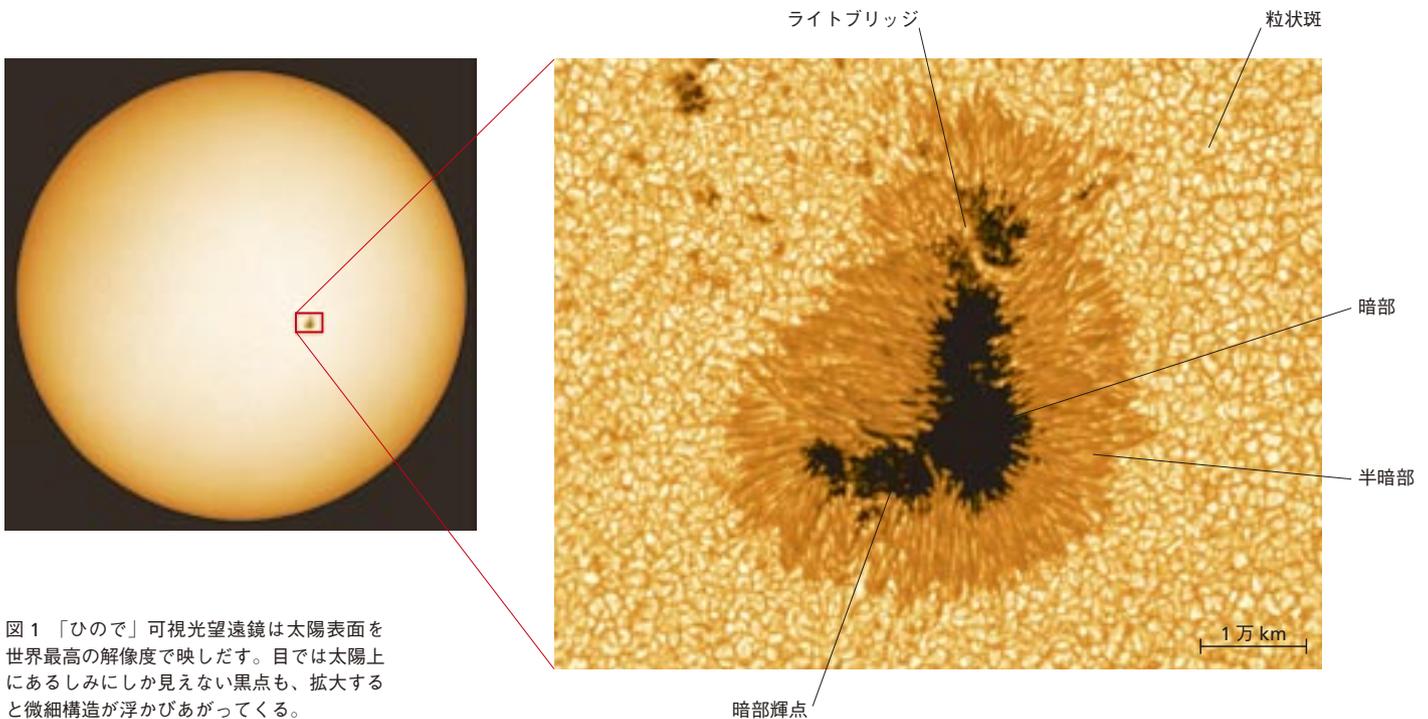
今から400年前、望遠鏡を初めて太陽に向けたガリレオは、太陽の表面に現れるしみのような黒点を発見した。ガリレオが観測していたのは可視光の望遠鏡で、この波長域で見える太陽は「光球」と呼ばれる表面である。それから400年後、「ひので」に搭載された可視光望遠鏡（Solar Optical Telescope, SOT）は光球

を超ズームインし、光球のイメージを変させた。

太陽の表面は、無数の粒状の模様でびっしりおおわれている。1つの粒の大きさは約1000km。この模様は「粒状斑」と呼ばれ、映像で見ると、約5分から10分で現れたり消えたりを繰り返していることがわかる。粒状斑のこのような変化は、太陽の表面近くで対流運動が活発に起きていて、それにと

なって温度のムラが生じていることを反映している。

粒状斑に囲まれるようにして存在する黒点は、直径が数万km程度、地球数個分の大きさがある。黒点の中央に存在する暗部は、その大きさにもよるが、周囲の約10%程度の明るさしかない。このような黒点も「ひので」の高解像度望遠鏡で観測すると、多様な微細構造がたえず変化していることがわかる（図1）。

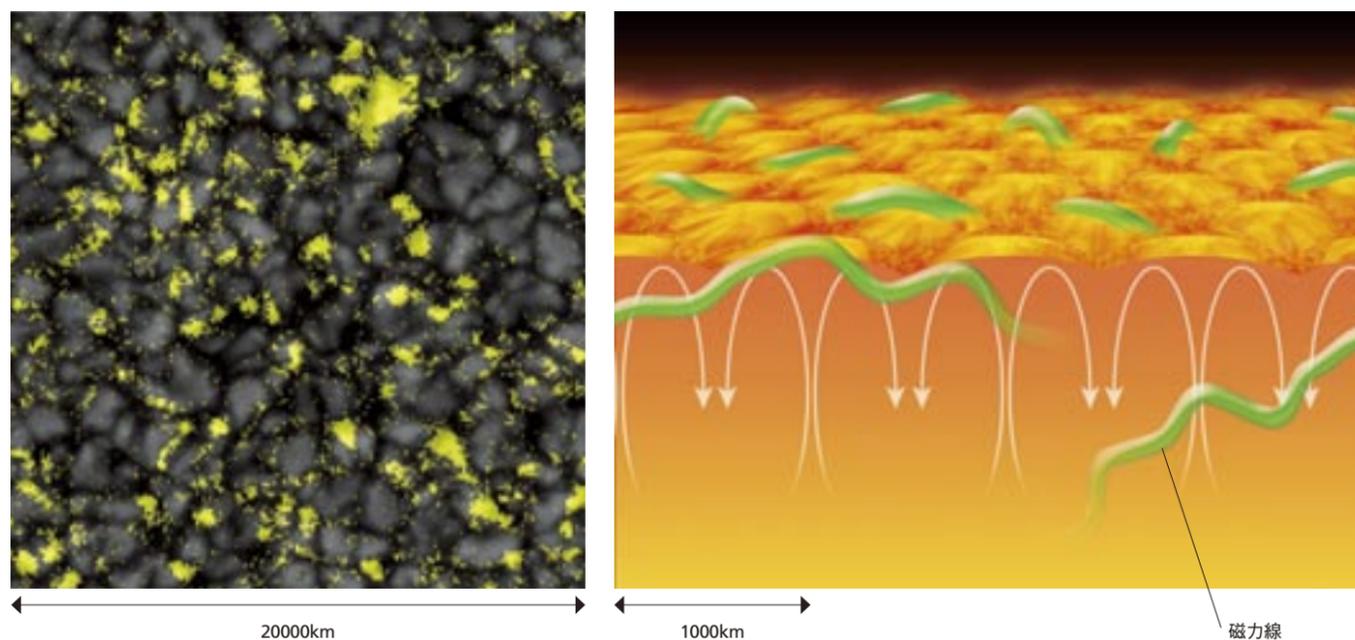


黒点をはじめとする太陽活動の源は、太陽内部で作られる強力な磁場である。黒点内には、1 キロガウス（地磁気は平均 0.4 ガウス程度）をこえる強力な磁場が存在する。この磁場によって対流による熱輸送が抑えられ、温度が下がるのだ。しかし、黒点内といえども、対流が完全に抑制されているわけではない。ときには、磁場と複雑に相互作用をしながら対流が発生し、多様な構造、例えば黒点暗部の周りに存在する半暗部の筋構造や、暗部を分断するようなライトブリッジなどを作りだしている。これらの構造は、太陽表面近くの対流が熱を輸送するだけでなく、巨大な磁束を安定させるような働きをしたり、あるいは磁束を崩壊させるような働きをすることで生まれるのだろう。

太陽表面をおおう水平磁場の発見

「ひので」可視光望遠鏡は、単に高解

図2 (左)「ひので」可視光望遠鏡によって観測された粒状斑と水平磁場。水平磁場強度の強いところが黄色で示されている。(右) 太陽表面付近の粒状斑と短寿命水平磁場の想像図。矢印は太陽表面の対流の流れを表す。



像度の画像を得るだけでなく、太陽表面の磁場を精密に計測するという重要な能力をもっている。磁場は、吸収線スペクトルの「偏光」から知ることができる。しかし、明るい太陽といえども偏光信号は弱い。微弱な偏光信号を取り出すためには、短くても数秒程度の露出が必要である。地上望遠鏡の場合、その間に大気の影響で像がぼけてしまう。大気の影響を受けない「ひので」だからこそ、微弱な偏光信号を高精度で取り出すことが可能なのだ。

「ひので」の観測以前には、太陽の磁場といえば、黒点をはじめ太陽表面に垂直なものが卓越していると考えられていた。実際に、黒点などが存在しない静穏領域でも、太陽表面に垂直な磁場を示す円偏光を観測すると、表面をおおいつくす粒状斑の中に、N 極・S 極の磁極がまるでゴマ塩のように無数に散在していることがわかる。

「ひので」は、太陽表面に水平な磁場を示す直線偏光も観測した。その結果、これまで知られていなかった、たくさんの水平方向の磁場が存在することが明らかにされた(図2)。これらの水平磁場は粒状斑程度の大きさ(～1000km)で、ぽっかりと粒状斑の上に浮かぶように出現し、4～5分程度の寿命で消滅する。これを繰り返している。黒点が数万 km の大きさを持ち、出現してから消滅するまでの典型的な寿命は数週間から数カ月であることを考えると、この水平磁場がいかに小さく短寿命で、かつ発生頻度の高い現象であるかがわかるだろう。

短寿命な水平磁場は太陽表面の至るところで観測される。これから、水平磁場が局所的な対流運動によって生まれており、磁場の起源を理解するうえで重要な手掛かりとなると考えられている。水平磁場の一つひとつの磁気エネルギーは小さなものだが、太陽全体では大量に存

在することから、その総エネルギーは非常に大きなものになる。このエネルギーが解放されれば、彩層・コロナを高温に加熱することができるかもしれない。彩層・コロナがなぜ高温なのかという太陽の大きな課題に一步近づいたわけである。

彩層のあちこちで出現するジェット現象

「ひので」可視光望遠鏡による高解像度の威力がいかに発揮されたのは、光球のすぐ上の彩層で発生するダイナミックな現象の観測であろう。光球では、磁場の強い黒点を除き、磁気エネルギーと比較して対流の運動エネルギーが優勢であるため、磁場は対流からエネルギーを受け取る。これに対して彩層より上層では、逆に磁気エネルギーのほうが優勢になり、光球で得た磁気エネルギーによって周囲の大気(プラズマ)が加速されたり、加熱されたりしていると考えられている。

私たちが見ている太陽の光のほとんどは光球から放射されるものであり、彩層からの光は微弱である。彩層を見るに

は、特定のスペクトル線を観測する必要がある。「ひので」可視光望遠鏡は、温度1万度程度のプラズマに感度があるスペクトル線を使って彩層を観測し、われわれの予想をこえた活発な彩層の姿を明らかにした。

目を引くのは、彩層のあちこちらで発生しているプラズマ噴出(ジェット)現象である。わずか数十秒から数分の間に、プラズマが高さ数千 km から数万 km まで吹きとばされている様子が至るところでとらえられた(図3、特集ページ下端の連続画像)。プラズマの移動速度は毎秒 100km にまで加速されている。

このような高速の運動を駆動するメカニズムは、磁気再結合(リコネクション)と呼ばれる現象以外にはありえないと考えられている。磁気リコネクションとは、プラズマ中で磁力線がたがいつなぎ変わり、それによって磁気エネルギーが短時間のうちに、プラズマの熱や運動エネルギーに転換する物理過程である。彩層では、このようなジェット現象が、黒点の中でも外でも、全球にわたって頻繁に発生していることが、「ひので」に

よって発見されたのである。

「ひので」がもたらした高解像度観測によって、微小な振幅でプラズマが振動している様子も至るところで検出されるようになった。特に、磁力線を伝わる横波(アルベン波)が初めて検出されたことは大きな成果である(詳しくは11ページの岡本さんのコラムを参照)。

コロナホールの活発な活動

「ひので」は X 線観測においても大きな成果を上げている。その X 線望遠鏡(XRT)は、「ようこう」軟 X 線望遠鏡と比較して高解像度・高感度であるとともに、100万度から1000万度の幅広い温度のプラズマを観測できる世界で唯一の望遠鏡である。

X 線で見える太陽は可視光で見る太陽とはまったく異なる(図4)。X 線を強く放射しているところは活動領域と呼ばれ、黒点を中心として強力な磁場が集中して存在する領域である。そこでは、数百万度に加熱されたプラズマが磁場によって閉じこめられている。爆発現象(フレア)が発生しやすいのも活動領域である。活

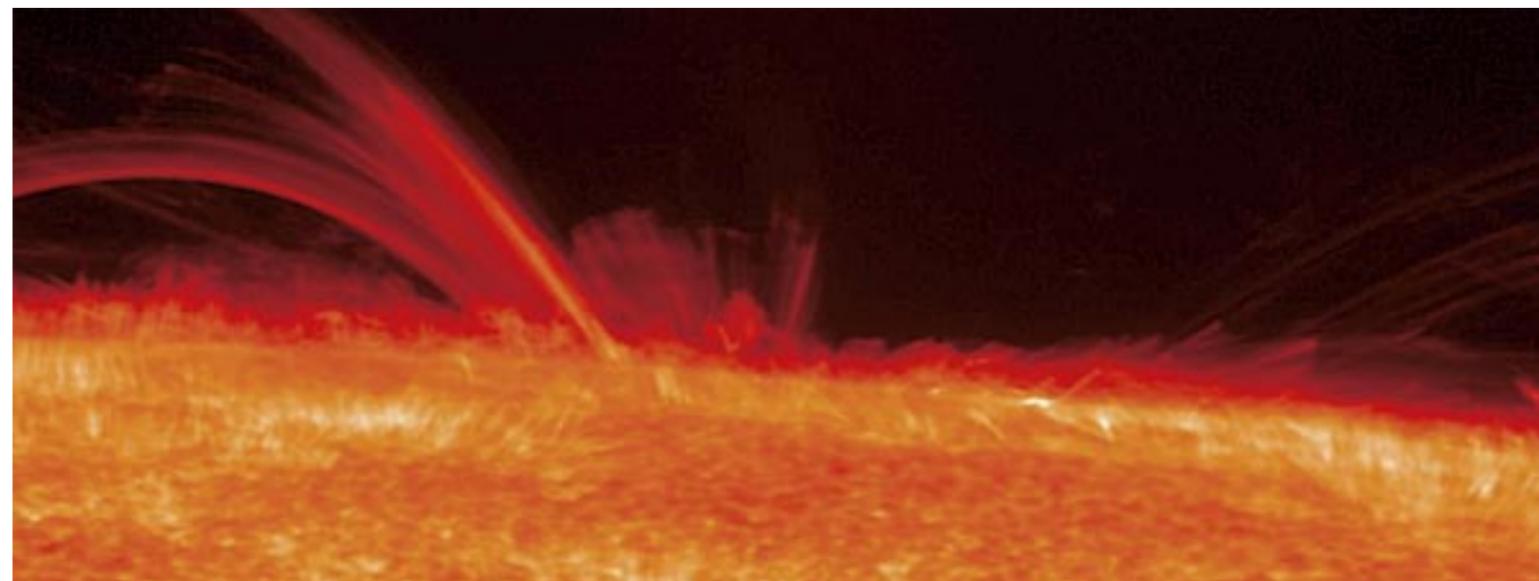
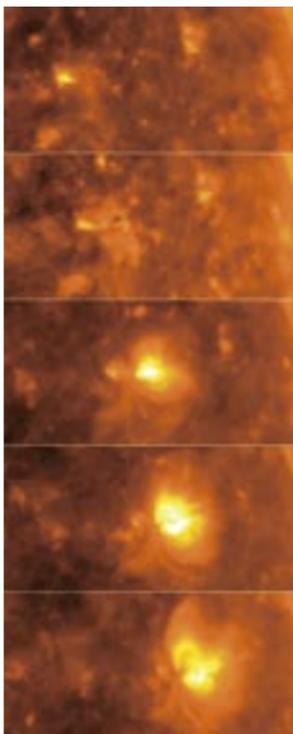
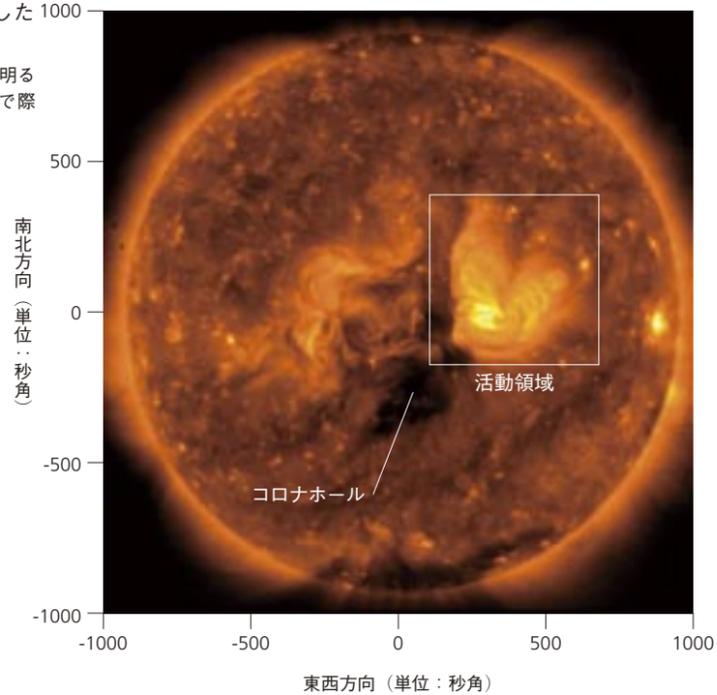


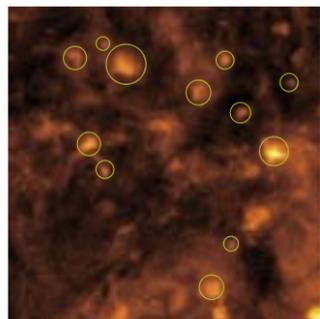
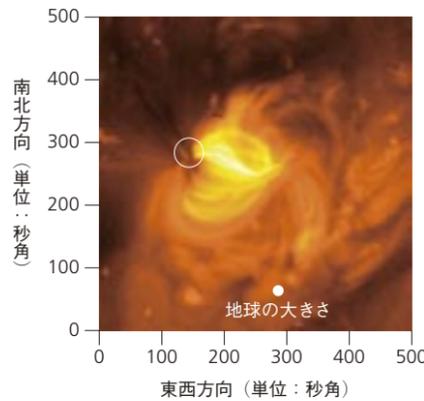
図3 彩層で発生するダイナミックな噴出現象

図4 「ひので」X線望遠鏡が撮影した1000太陽コロナのX線画像

X線を強く放射している「活動領域」は明るく輝く。そのほかの「静穏領域」の中で際だって暗いのが「コロナホール」。



活動領域の出現。静穏領域の中から短時間で現れる。



(左) 活動領域の拡大図。○で囲んだ領域からプラズマが流れ出している様子がとらえられた。
(右) 静穏領域の拡大図。穏やかだと考えられていた静穏領域にもループ状の構造が見られ(○で囲んだ領域)、激しい活動が起こっていることが明らかになった。

動領域以外は静穏領域と呼ばれ、活動領域と比べるとコロナの温度が低い。X線で最も暗い領域はコロナホール(コロナの穴)と呼ばれ、北極・南極や活動領域の脇に位置する。

これまで、コロナホールはX線で暗いこともあり、活動も穏やかだと考えられていた。ところが、「ひので」X線望遠鏡は、コロナホールの中でも活発な現象が起きていることを明らかにした。活動領域とコロナホールの境界付近

では、プラズマが磁力線に沿って、秒速140km程度で絶えず上空に流れ出ている。コロナホールから上空に向かう磁力線は、太陽表面に戻ることなく、惑星間空間へと伸びている。この磁力線に沿って流れ出すプラズマが、われわれの太陽系を満たしている太陽風の源となっていると考えられる。「ひので」は太陽風の吹き出しの様子を初めてとらえたのである。

太陽の北極・南極に位置するコロナ

ホールでも、頻発するX線ジェットなど、活発な現象が観測された(図5)。コロナホールはもはや静穏な領域とはいえないのである。「ようこう」は毎秒200km程度のX線ジェットを観測していたが、「ひので」はさらに高速の毎秒800kmにもなるジェットを発見した。

太陽の極域については、X線観測と同時に、可視光望遠鏡でも詳細な磁場観測がなされていて、光球での磁場の構造とX線ジェットの関係も市だいに明らかに

映像を活用した太陽研究

岡本文典

自然科学研究機構 国立天文台学振特別研究員

天文学では、非常に遠くて暗い天体を撮影することが多い。星雲や銀河などは、実際には秒速数百kmかそれ以上のものすごいスピードで動いているが、地球からあまりにも遠いため、その動きを画像上の変化としてとらえるができない。つまり、「動かない」うえに「暗い」ので、1枚の画像を得るのに数時間、あるいは数日かけなければならない(逆にいえばそれだけ時間をかけることができる)。

一方、太陽は近くて明るい。「ひので」の1枚の撮像時間は、早いもので30ミリ秒しかかからない。だから、秒速1kmという比較的低速の動きであっても、1分ほど時間をおけばその動きを十分感知できる。つまり、1分かそれ以下の単位で画像を撮ってパラパラ漫画のようにすれば、映像ができあがるのである。

動かないものと動くものでは、そこに含まれる情報は当然異なる。しかも、「ひので」はとても細かい構造(太陽面で160km相当)のものまで見極められる。そのうえ、地球大気の外で観測しているので、大気による画像の歪みがなく、非常に小さな構造の動きを詳細にとらえることが可能である。これにより、今まではボヤけてよくわからなかったものまで研究でき

るようになった。

一例として「ひので」は、太陽縁に浮かぶプロミネンスを構成する非常に細かな筋構造の動きを明らかにした(図2)。さらに、映像をじっくり見ると、この筋構造が上下方向に揺れている。これは今まで知られていなかった現象であり、プロミネンスに限らず太陽大気中の至るところで同じような振動があることもわかった。この振動現象は太陽コロナにエネルギーを輸送する波動と関連していると考えられ、コロナ加熱問題解明への手がかりとして注目されている。

この成果は静止画像からは得られないため、太陽研究における映像解析は、新たな知見をもたらしうる極めて重要なものであるといえる。一方、映像解析の難しさもある。頻繁に撮像を行ったり、あるいは長い時間にわたって観測したりすれば、それだけ画像枚数も増える。あまりにデータ量が多く、コンピュータの演算処理速度やメモリーの制限に当たることもしばしばである。観測データの中で不要と考える部分を削り、重要な部分だけを残すなど、解析やデータ取得そのものにもテクニックが必要である。

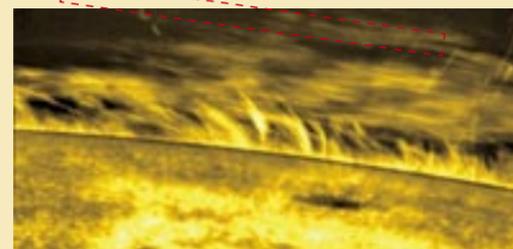


図1 「ひので」可視光望遠鏡が撮影した太陽縁上に浮かぶプロミネンス

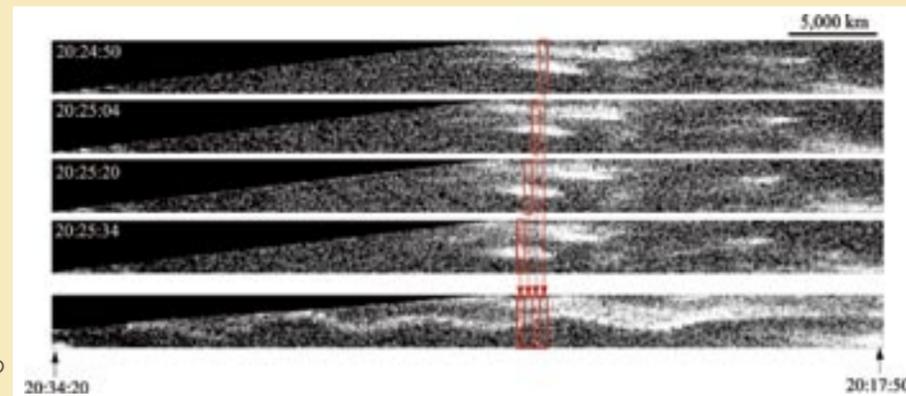


図2 図1のプロミネンスの一部。筋状の構造が上下に振動している様子がわかる。

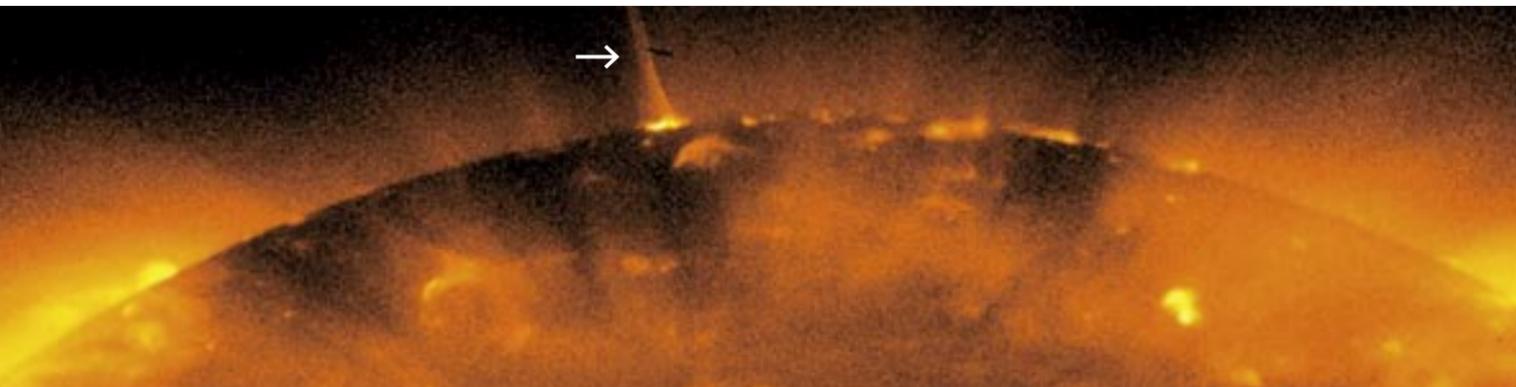


図5 「ひので」X線望遠鏡が撮影したX線ジェット(矢印)。太陽の北極に位置するコロナホールの中で頻発していることが発見された。

されてきている。

コロナのプラズマ運動をとらえる

「ひので」には可視光望遠鏡とX線望遠鏡のほかに、極端紫外線撮像分光装置(EIS)が搭載されている。EISはコロナと、コロナと彩層の中間層(遷移層)のプラズマの性質を詳しく観測する装置で、極端紫外線と呼ばれる紫外線でも波長が短い光を使って分光観測を行う。この波長域には、コロナや遷移層から放射される数百本の輝線が含まれており、太陽プラズマの温度、運動速度、密度などの物理量を得ることができる。EISは目

的に応じて複数の輝線を選択し同時に観測することができるため、1度の観測で太陽の多温度構造を調べることができる点も大きなメリットである。

EISの観測例として、太陽の活動領域を13階電離した鉄イオンが放射する輝線(27.4nm)で見た結果を示す(図6)。この輝線は180万度ほどのプラズマから放射されるもので、ドップラーシフトと幅から、その温度に対応するプラズマの運動や乱流を精密に測定することができる。ループ状に見えるコロナ構造(図6左)の足元近くでは、輝線が青方偏移していること、つまり上昇流が存在してい

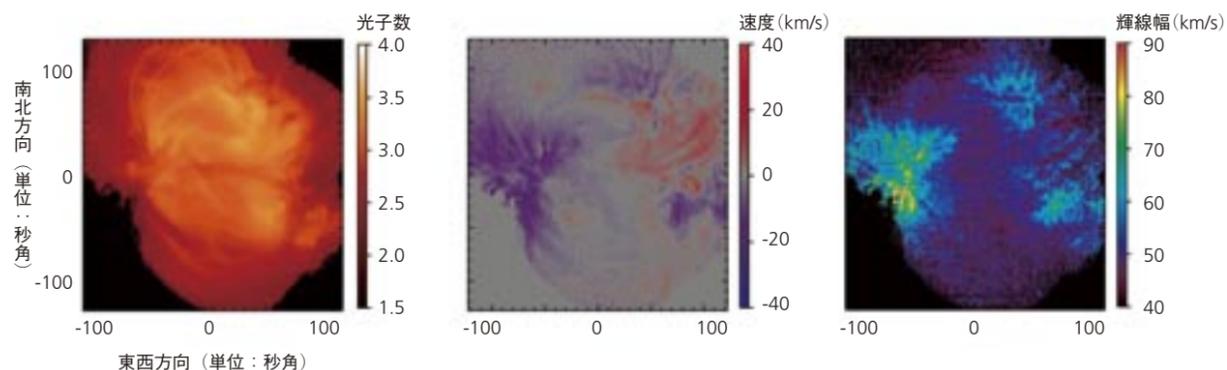
ることがわかる(図6中)。EISの空間分解能は2秒角(太陽面の1400kmに相当)。これだけの解像度で実際にプラズマの流れや乱らしき構造が存在することを明確に示したのは初めてのことである。

このようなプラズマの流れと乱流はどの活動領域でも存在しているようで、コロナ加熱メカニズムの理解を進展させる貴重なデータをもたらしてくれた。

宇宙天気予報の実現をめざして

太陽大気の中で磁場とプラズマが引き起こすさまざまな現象の背後にある物理過程を探ることは、太陽-地球間の宇宙

図6 活動領域を「ひので」極端紫外線撮像分光装置により鉄イオンが放射する輝線で測定した結果。(左)輝線強度(光子数)、(中)ドップラー速度、(右)輝線幅。ループ構造の足元に上昇流が存在し、また大きな乱流が存在していることが明らかになった。

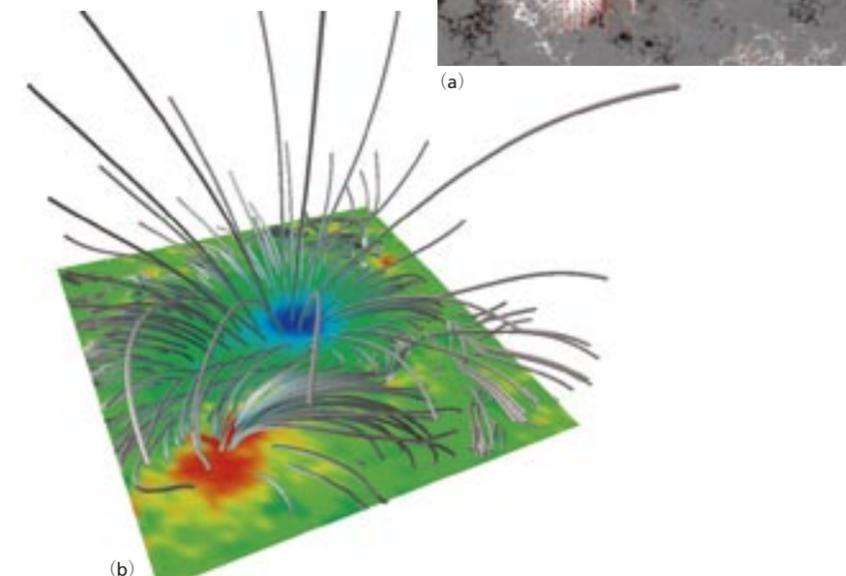


環境を理解する「宇宙天気」の研究にもつながってくる。

太陽で巨大な爆発現象(フレア)やコロナホールが発生すると、高エネルギー粒子が地球にも到来し、地磁気の擾乱を引き起こす。その結果、遠距離通信を行うことが困難になったり、複数衛星からの信号によって正確な位置情報を知るGPS(全地球測位システム)による位置精度が一時的に悪化したりするなど、人びとの生活にも影響を与える。太陽についての基礎的な研究は、高度化する社会インフラへの影響、地球環境への影響の観点からも、近年、重要な研究テーマとなっている。

なかでも、太陽フレアの発生に至る磁気エネルギーの蓄積過程や、その蓄積されたエネルギーが瞬時に解放される機構の理解は、宇宙天気研究の中心的な課題である。「ひので」可視光望遠鏡による

図7 「ひので」によって測定された太陽表面の磁場マップ(a)を境界条件としてモデル化した黒点上空の磁力線構造(b)。2つの黒点をつなぐ磁力線が強くねじられていることがわかる。この黒点上空のコロナでは、巨大なフレアが発生した。



太陽の「音」を聞いて内部を探る

長島 薫

総合研究大学院大学 天文科学専攻博士課程 / 日本学術振興会特別研究員

太陽の観測は、太陽が放つさまざまな電磁波を望遠鏡でとらえることで行われてきた。しかし、電磁波で調べられるのは太陽の表面とその上空の大気だけで、どの波長域であっても内部を見ることはできない。修士課程時代、太陽フレアを調べていた私には、これがもどかしかった。なんとかして内部を見たい一心で、私は「日震学」に取り組み始めた。

日震学とは、太陽表面の振動を観測して、これをもとに内部構造を探る手法である。地震波を利用して地球内部を探る、地震学の太陽版だ。熱いガスからなる太陽の内部では、乱流運動により絶え間なく音波が発生している。これが地震波の代わりになる。太陽の音波を直接聞くことはできないが、可視光での観測からドップラー効果を利用して、音波による表面の揺れを測ることができる。太陽内部での音波の伝わり方は、温度・密度などの物理量で決まってくるので、逆に太陽の「音」から内部の物理量が計算できる。このとき、物理量と観測量との関



係がわかっているならば、いきなりコンピューターで計算もできるが、そうでない場合は流体力学や統計数学を駆使してこの関係式を立てる必要がある。というわけで、私の日常には地道な手計算も多い。最終的にはコンピューターによる数値計算を行うが、こうやって物理・数学を武器に一から自分で組み立てていくのも楽しいものだ。

「ひので」の可視光望遠鏡は空間分解能が高いので、他の広視野の観測機器と相補的に活用することで、日震学の研究に新しい道が開かれた。太陽活動周期を支配するダイナモ機構解明にもいつかつなげたいと、今日も私は太陽の「音色」に聞き入っている。

精緻な偏光観測から構築された磁場マップは、宇宙天気研究を進展させるものと強く期待されている。

「ひので」はいくつかの太陽フレアの観測に成功しており、2006年12月に出現した黒点で発生したフレア（清水さんの記事、21ページの図4を参照）が、その代表例である。下側に位置するN極の黒点が回転しながら移動する様子が連続的に観測され、N極とS極の黒点の境界には、強くねじれた磁場が作られていくことが、磁場マップに見てとれる（図7a）。このような磁場のねじれは磁気エネルギーが蓄積されている兆候である。

このときに観測された太陽表面の磁場データを境界条件として、計算機の中で上空のコロナ磁場をモデル化し、フレア発生を再現させる試みもなされている（図7b）。このフレアについては、「ひので」のX線望遠鏡や極端紫外線撮像分光装置、さらには他の太陽観測衛星も同時に観測していて、フレアによって惑星間空間にプラズマが放出される様子が詳しく調べられている。宇宙天気予報の実

現に向け前進したことは間違いない。

コロナ加熱の問題解決へ向けて

太陽表面の温度は約6000度であるが、そのわずか数千km上空には、数百万度のコロナが存在する。なぜ高温のコロナができるのか、加熱メカニズムとして、「ナノフレア加熱説」と「波動加熱説」の2つが有力な候補であると考えられてきた（図8）。しかし、ナノフレアも波も、極めてエネルギーの小さな現象であるため、個々を分解して観測するのはなかなか難しい。そのために、コロナ加熱の問題は長年解明されなかったともいえる。

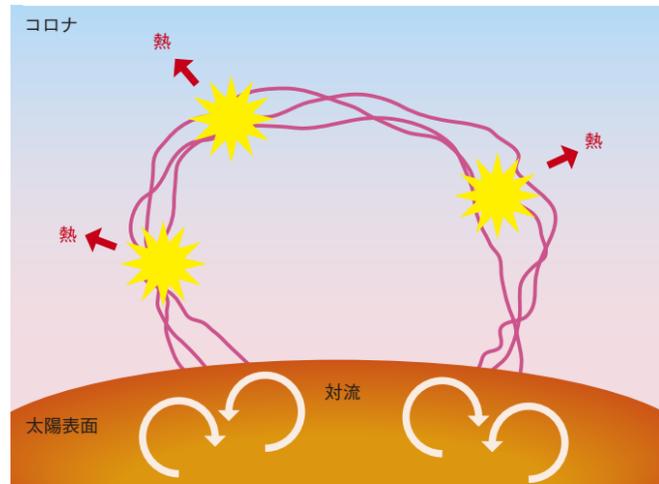
「ひので」は、微細なジェット現象、エネルギーを運んでいると考えられる波、高温プラズマの高速な流れなど、コロナ加熱や太陽風加速の鍵を握っている可能性のある現象を続々と発見してきた。特に、太陽表面に多数浮上してくる水平磁場は、周囲の磁場と衝突すると、磁気エネルギーを解放したり、波を発生させたりするはずである。しかも、これ

らの多様な現象は単独で起きているわけではなく、密接につながっている。したがって、それらの相互作用を明らかにしていくことが、コロナ加熱の問題を解明する方策となるであろう。

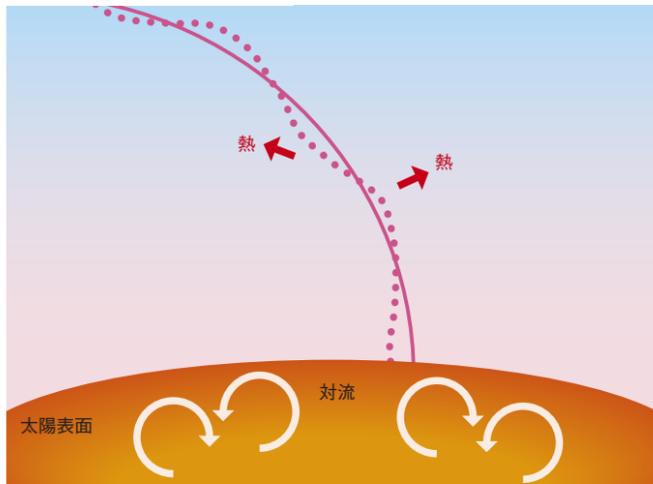


勝川行雄（かつかわ・ゆきお）
太陽という天体との出会いは中学生の頃、自由研究として黒点スケッチをしたことである。その頃は、偶然にも、太陽活動の極大期で、太陽表面には多数の黒点が存在していた。もし、そのとき黒点の数が少なかったら、太陽への興味はそれほど強くなかったかもしれない。太陽研究で得られた知見を、他の天体活動の理解へと応用していくことが目標である。

図8 コロナ加熱メカニズムの模式図



ナノフレア加熱説
エネルギーの小さな爆発（小さなフレアの意味で、「ナノ」フレアと呼ばれる）が無数に発生し、プラズマを加熱するという考え方である。



波動加熱説
光球における対流が波を助起し、その波が上空に伝わり周囲のプラズマを加熱するという考え方である。

「ひので」の次期計画は？ 原弘久

総合研究大学院大学准教授 天文科学専攻／自然科学研究機構 国立天文台准教授

「ひのとり」「ようこう」「ひので」という3つの衛星計画を実現し、太陽を通した宇宙プラズマ現象の理解に邁進してきた太陽研究者。次の夢は、ダイナミックな太陽活動現象の源である太陽磁場の生成メカニズムを解明すること（A）と、「ひので」が明らかにした活動現象や微細構造の物理状態を理解すること（B）である。

いずれも科学衛星による観測を必要とするが、衛星を投入する適切な軌道と近い将来に実現できる技術レベルを考慮すると、この2つの目標を1つの衛星計画で達成することは困難である。よって、それぞれが独立した計画案A、計画案Bとなる。われわれは現在、2つの衛星計画を並行して検討している。うち1案を次期太陽観測衛星「SOLAR-C」として提案し、早期に実現させたいと考えている。

前者の計画案Aでは、太陽全体の表面磁場と日震学（13ページのコラム参照）により得られる太陽表面下の速度構造を観測して、黒点数の11年周期に代表される太陽磁気周期の起源を探る。そのためには、これまで実施されてきた地上観測や地球周回衛星による観測では、地球方向から太陽の北極・南極付近が見えにくく、また極域の連続観測データが欠けているため、約11年ごとに極性が反転する太陽磁場のモデルを考える際に不十分である。極領域を含めた太陽全体の磁場と、次の周期の磁場を生み出す速度場を観測することで、太陽磁場が生みだされ

るメカニズムを解き明かすことができる。さらに、極領域を好条件で観測することができれば、極領域での未知の活動やそこから放出される高速の太陽風の吹きだし口を調査することもできる。これらの観測計画を実現するためには、衛星を地球の公転軌道面に対して角度をもたせた軌道に投入して（図1）、いろいろな緯度（黄緯）方向から太陽を観測する必要がある。

後者の計画案Bという活動現象とは、彩層-コロナ間で発生するダイナミックな磁気エネルギー解放現象のことで、これを新たな手法によって高解像度で観測する。この観測には、物理量の取得を可能にする分光観測や、磁場情報を得るための高精度の偏光観測も計画されている。これによって、「ひので」で新たに明らかになった彩層活動現象やコロナの加熱を引き起こすメカニズムを、構造を分解した高解像度観測から解明することができる。これらの観測を実現する衛星がとる軌道は、「ひので」と同じく常時観測が可能な太陽同期極軌道か、より安定した熱環境と地上局との常時リンクが可能な静止軌道となる。

われわれはSOLAR-Cを「ひので」と同様、国際協力のもとに実現することを想定しており、主要な宇宙機関間の国際的枠組み形成にも配慮して計画の策定を進めている。どちらの案も海外研究者からの期待は極めて高い。現在、SOLAR-C計画の検討作業が海外の研究者・技術者が加わった形で進められているが、それは「ひので」の一つの成果であるといえる。

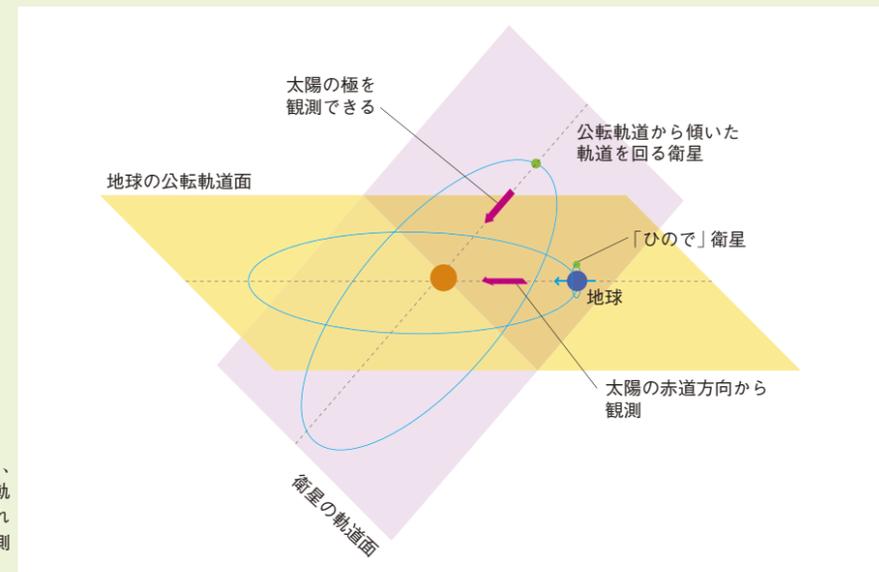


図1 「ひので」は地球の公転軌道面にあるので、太陽を赤道方向から観測することになる。公転軌道面から傾斜角をもった軌道に衛星を投入すれば、太陽の北極・南極領域を見降ろす方向で観測することが可能になる。