

「ひので」衛星が明らかにした最新太陽像

柴田 一成 <京都大学大学院理学研究科附属天文台 607-8471 京都市山科区北花山大峰町 17 e-mail: shibata@kwasan.kyoto-u.ac.jp>
 一本 潔 <京都大学大学院理学研究科附属天文台 506-1314 高山市上宝町蔵柱 e-mail: ichimoto@kwasan.kyoto-u.ac.jp>
 浅井 歩 <京都大学宇宙総合学研究ユニット 607-8471 京都市山科区北花山大峰町 17 e-mail: asai@kwasan.kyoto-u.ac.jp>

日本の第3番目となる太陽観測衛星「ひので」が明らかにした最新太陽像について述べる。「ひので」衛星の最大の課題であるコロナ加熱問題は解明されたのか？ 黒点やフレアなどの電磁流体現象はどこまで明らかにされたのだろうか？あるいは、これまで誰も想像しなかったような新しい現象の発見はあったのか？ 本稿では、これらについて、打ち上げ後4年間あまりの観測成果を詳しく解説する。

1. はじめに

皆さんは皆既日食を見られたことがあるだろうか？ 皆既日食はわずか数分間の現象だが、真珠色に輝くコロナを見るとその美しさに感動し、一生忘れられない記憶となる。人類は太古の昔から、コロナを垣間見ている記録を残してきた。平均すると、地球上の固定された一か所で見える確率は数100年に1回程度なので、コロナを見ることができた人は極めて幸運と言える。

そのコロナの正体は何か？ コロナは実は100万度もの超高温プラズマ状態にある。このことは20世紀の中ごろ(1940年代)に判明した。¹⁾ 太陽の熱源(核融合反応)は中心にあり、そこは1,500万度の超高温である。中心から外側に向けて温度が下がるとともに、エネルギーは熱伝導と対流によって表面(光球)まで運ばれ、最後は光球から放射によって宇宙空間に放たれる。光球より外側では距離とともに放射エネルギー密度は次第に減少するので、放射で決まる温度はどんどん下がって行く。ところが、コロナの温度は下がるどころか逆に上昇し、100万度にも達しているのである。太陽の断面図を図1に示す。

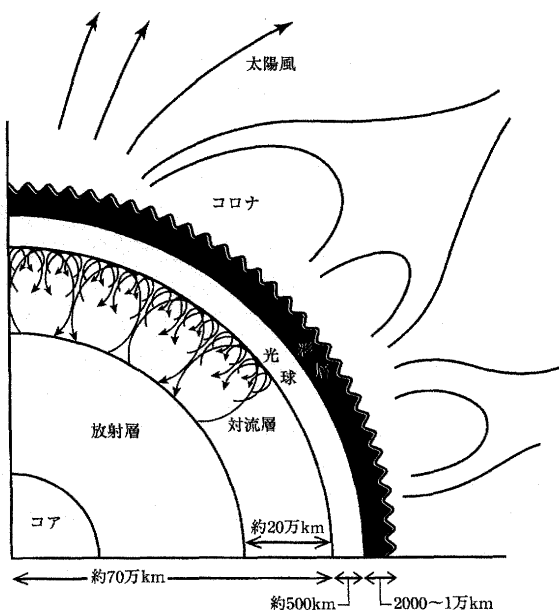


図1 太陽の断面図。(『最新画像で見る太陽』(柴田・大山・浅井・磯部)²⁾より。)

では、いかにして100万度もの超高温に加熱されているのか？ この問題はコロナ加熱問題と呼ばれ、半世紀以上たった今も未解決のままである。³⁾ このコロナ加熱問題をはじめとする太陽の電磁流体過程を解明するために、2006年9月に打ち上げられたのが「ひので」衛星⁴⁾であった。後述するように、コロナ加熱のメカニズムは他の太陽活動と同様に磁場と密接に関係している。磁場は元をたどると黒点が原因である。太陽で最も激しい爆発現象であるフレアも磁気エネルギーの解放によって起こる。したがって、「ひので」衛星のねらいは、太陽光球とコロナの電磁流体的なカップリングの解明にある。⁵⁾ このような電磁流体過程の結果、コロナ加熱、黒点、フレアなどが、いかにして発生しているのか明らかにするため、(1)可視光・磁場望遠鏡(Solar Optical Telescope; SOT⁶⁾)、(2)X線望遠鏡(X-Ray Telescope; XRT⁷⁾)、(3)極端紫外線撮像分光装置(EUV Imaging Spectrometer; EIS⁸⁾)の3種の観測装置が搭載された。SOTは光球の磁場と速度場、彩層(光球とコロナの間にある層; 図1)構造を観測し、XRTはコロナの構造を観測する。EISはコロナの速度や温度、密度を測る。

「ひので」衛星の観測結果はどのようなものだったのか？ コロナ加熱問題は解明されたのか？ 黒点やフレアなどの電磁流体現象はどこまで明らかにされたのだろうか？ 本稿では、これらについて、打ち上げ後4年間あまりの観測成果を詳しく解説したい。また、補助資料として動画を数多く用意した(<http://www.kwasan.kyoto-u.ac.jp/research/data/butsuri2011/>)。それらも適宜参考にしていただきたい(以下、動画[**]とあるのは、このサイト内の動画の番号「Movie**」に対応する)。

2. 彩層・コロナ・太陽風

2.1 コロナ加熱メカニズムの謎

コロナが100万度もの超高温状態にあることが発見された当初(1940-1950年代)は、対流層で発生した音波が希薄な上層に伝播する際に衝撃波となってコロナを加熱する、という説が提唱され、一時は定説とされた。太陽表面にはあまねく対流が存在するので、この音波衝撃波説に従えば、コロナは太陽光球の上空どこでも一様に存在することにな

る。ところが1970年代に入ってコロナのX線撮像観測が可能になると、コロナは一様に存在するのではなく、磁場の強い黒点の近くで明るくループ状に存在し、逆に磁場の弱い極域では暗い、ということがわかった。コロナの形成には磁場が重要な働きをしているのである。一時は定説とされた音波衝撃波説は見事に否定されてしまった。

代わって提唱された磁場説であるが、問題は簡単ではない。磁場があるとなぜプラズマは100万度もの超高温に加熱されるのか。次の二種類のメカニズムが有力だと考えられている。¹⁾一つは微小フレア説(ナノフレア説)で、コロナは無数の微小なフレアの重ね合わせで加熱されている、という説である。フレアというのは太陽面爆発のことであり、磁気リコネクション(磁力線のつなぎかえ; 図2)という物理過程がエネルギー解放の中心エンジンであることが近年確立している。そのミニチュア版を微小フレア(ナノフレア)と呼んでいる。もう一つは、アルベーン波説である。磁力線が対流層とコロナをつないでいれば、対流によって磁力線が揺らされアルベーン波(磁力線の振動によって起こる波)が発生して、エネルギーを光球からコロナに運ぶ、という説である。いずれの説も、太陽表面直下の対流層から磁場を介して、電磁エネルギー(ポインティング・フラックス)の形でエネルギーをコロナまで運び、そこで熱に変えるという点は同じである。違いは時間スケールである。アルベーン波の方は(光球における)数分程度の短い時間スケールの変動に伴い、微小フレア説の方はそれより長い時間スケールの変動が効く。結果としての(コロナにおける)加熱過程は、微小フレアの方が爆発的(短時間)で、アルベーン波の方が定常的(長時間)、というのは逆説的でおもしろい。

どちらの説が正しいのか? これらの2種類のメカニズムを検証するためには、ナノフレアやアルベーン波が発生、

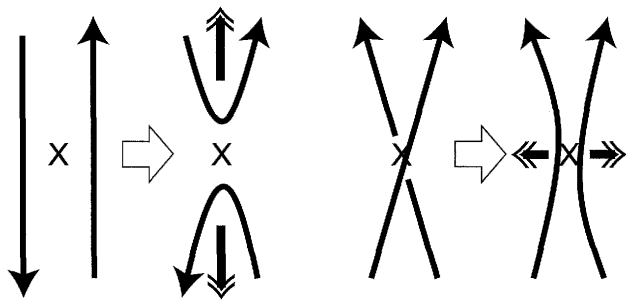


図2 磁気リコネクションの模式図。磁気リコネクションとは、逆向きの磁力線がつなぎかわることによって磁気エネルギーが爆発的にプラズマのエネルギーに変換される過程のことをいう。磁力線つなぎかえ、または、磁気再結合と呼ばれることもある。左図は反平行な磁力線がつなぎかわる典型的な場合である。黒い矢印付き実線は磁力線を、Xはリコネクションが起きる場所を表す。赤い矢印は磁気リコネクションの結果生じるプラズマの流れを示す。プラズマ中の磁力線はゴムひものような性質(張力-磁気張力)を持っているので、この図のように、磁力線がつなぎかわってパチンコのゴムひものような形状が生まれると、パチンコ玉のようにプラズマが激しく加速される。このようにして磁気エネルギーがプラズマの運動エネルギーに変換される。速度はしばしば音速を超えるので衝撃波が発生し、爆発的な加熱や非熱的(高エネルギー)粒子の加速も起こる。なお、右図のように反平行とまでは行かない場合でも、磁場の向きの不連続があれば磁気リコネクションが生じる。

伝播している彩層、コロナの詳細な観測が必要である。「ひので」衛星による彩層、コロナの最新観測の結果はどうだったのであろうか?

2.2 ジェット現象と磁気リコネクション

まず図3(a)をご覧ください。これは、「ひので」衛星のSOTで見た彩層の様子である。⁹⁾ 太陽の縁近く、縁に平行に細長く見えている黒い構造が黒点である。動画[01]からは至るところで、微小フレアやジェットが発生しているのがわかる。ジェットとは、細長く絞られたプラズマ噴出流のことである。図3(b)に典型的なジェットの時間変化を示してある。ジェットの長さは数千km、幅は数百km、速度は数10 km/sである。良く見ると、ジェットの足元では微小フレアが起きており、形が逆Y字型になっている。黒点の近くではこのような逆Y字型の輝点(微小フレア)を足元に持つジェットが多数見つかった(図3(a)の矢印の部分)。逆Y字型の部分は3次元的に見るとイソギンチャク(英語でsea-anemone)のように見えるので、アネモネ型ジェットと呼ばれる。同じような形をしたジェットは、20年ほど前に、やはりわが国の「ようこう」衛星によって、コロナ中で多数発見されていた。¹⁰⁻¹²⁾ ただし、コロナのアネモネ型ジェットは今回見つかった彩層のアネモネ型ジェットより10倍以上サイズが大きい。速度も100-1,000 km/sとずっと速い。「ひので」衛星が発見した彩層のアネモネ型ジェットはコロナのアネモネ型ジェットのミニチュア版と言える。

このことは何を意味するのか? 実はアネモネ型という形は、磁気リコネクションによってジェットが形成されていることを示唆している。図3(c)にジェットの想像図を示す。ジェットの足元では太陽内部より浮上してきた小さな磁気ループが周りの磁場と衝突することにより、逆向きの磁場が接する点(X点)を形成し、そこで磁気リコネクションが起きている。磁気リコネクションとは、逆向きの磁力線がつなぎかわるときに発生する磁気張力(ローレン

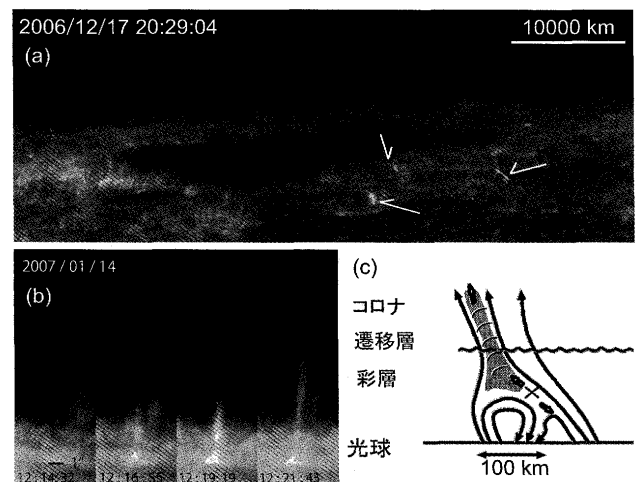


図3 (a) SOT で見た彩層の様子。太陽の縁付近を見ており、黒い細長い領域が黒点。矢印で示したのが彩層アネモネ型ジェット。(b) アネモネ型ジェットの拡大図。(c) アネモネ型ジェットの発生機構の想像図。赤いXのところで磁気リコネクションが起きていると考えられる。(Shibata ら⁹⁾より改編。) (表紙参照。)

ツ力)によってプラズマが加速されて高速ジェットが発生し、また同時に生成される衝撃波によって強い加熱が起きる、という物理過程である(図2)。太陽コロナで起こる典型的な爆発現象であるフレアの基本メカニズムである。それと同じメカニズムが彩層中で起きている、しかも、フレアの空間スケール(～1万km)よりずっと小さいスケール(～100km)で普遍的に起きている、ということを示しているのである。リコネクションによって加速されるジェットの速さは、典型的な磁場(～100ガウス)、質量密度(～ 10^{-9} g cm $^{-3}$)より、アルペーン速度

$$V_A = B / (4\pi\rho)^{1/2} \sim 10 \text{ km/s} (B/100 \text{ G}) (\rho/10^{-9} \text{ g cm}^{-3})^{-1/2} \quad (1)$$

程度なので、上記の彩層アネモネ型ジェットの観測と大体合っている。ただし、 B は磁束密度、 ρ は質量密度である。これにコロナの磁場(10ガウス程度)、質量密度(～ 10^{-15} g cm $^{-3}$)を代入すると速度は1,000 km/s程度となり、コロナのジェットの観測された速度100–1,000 km/sをも大体説明する。

一方、新種のジェット現象が思いもよらないところで発見された。黒点の半暗部(後述)の彩層を詳しく解析したところ、ジェットのような細長い高速流らしき現象が大量に発見されたのだ¹³⁾(動画[02])。典型的な長さは数千km、幅は400km。大変小さいので、半暗部マイクロジェットと呼ばれる。見かけの速度を測ると100 km/sにも達する。黒点半暗部は黒点の外部の領域より磁場が強い(～1,000ガウス)ので、上記のリコネクション理論の予言(ジェットの速度～アルペーン速度)と大体合っている。ただし、黒点半暗部中では磁場の極性は大体同じなので逆向きの磁力線が出会うことはなく、磁気リコネクションがどうして起こるのか不思議である。どうも磁場構造(後述の図7)にヒントがあるらしい。半暗部では図7d)にあるように磁力線の向きが不連続な分布をしている。髪の毛に櫛を入れたような状況である。このような不連続があれば、磁気リコネクションは起こりうる(図2右図)。私見では、この半暗部マイクロジェットの発見は「ひので」衛星最大の発見ではないかと思っている。というのは、磁気プラズマ中に自由エネルギーがあれば、磁力線はねじられたり、ひねられたりして、このような形状は自然に発生するからだ。おそらく、宇宙の磁気プラズマ現象の本質も同じであろう。分解能の悪い観測では見えなくても、分解能を良くしていくと、宇宙の磁気プラズマも、ジェットだらけ、フレアだらけ、そのエンジンとしての、リコネクションだらけが見えてくるのではなからうか。

「ひので」衛星は「通常のコロナだけでなく、彩層などでもこれまで想像されていた以上にダイナミックで、微小なフレアやジェットに満ちている」ことを明らかにしたと言える。これらは、パーカー博士(京都賞受賞)が加熱の微小フレア説として予想していたことでもある。では、コロ

ナ加熱は微小フレア説で決着が付いたかということ、そうは言えない。観測された微小フレアやジェットでは、コロナを加熱するのに必要なエネルギーが足りないのだ。

2.3 アルペーン波の発見

微小フレア説の対抗馬であるアルペーン波の観測は進んだのだろうか? 図4を見られたい。これは太陽の縁近くの彩層をSOTで観測したものである。スピキュールと呼ばれる彩層微細構造とプロミネンスの微細構造が良く見えている。スピキュールは細長い高速流、すなわち一種のジェット現象であるが、その足元は小さすぎて分解できておらず小爆発があるかどうかはまだ不明である。スピキュールもプロミネンス中の筋模様もすべて磁力線を表していると考えて良い。このような高空間分解能画像は、地上では空の状態が良いときに短時間しか観測できなかったが、「ひので」衛星では宇宙空間で観測しているので長時間観測できる。このような安定した長時間高分解能観測より、スピキュールやプロミネンスの微細な筋模様が激しく振動していることが発見された^{14,15)}(動画[03])。すなわち、磁力線の振動が発見されたのだ。これは直接撮像による「アルペーン波の発見」と言える。これらのアルペーン波の伝播速度から、どれくらいのエネルギーが運ばれているか推算すると、ちょうどコロナ加熱(および太陽風加速)に必要なエネルギーがあることが判明した。ただし、アルペーン波のエネルギーが彩層からコロナへ確かに輸送されているかどうかはまだ不明である。

一方、前節の彩層アネモネ型ジェットや極域のコロナ・ジェット(後述)の運動を詳しく調べると、これらのジェットでもジェットに垂直な方向に振動が起きていることがわかった。これは上述のスピキュールやプロミネンスと同様に磁力線が振動していることを意味する。つまり、ジェットからアルペーン波が発生しているのだ。^{16,17)} ジェットが磁気リコネクションによって発生しているのはほぼ確かなことから、このことは「磁気リコネクション(微小フレア)からアルペーン波が発生している」ことを意味する。リコネクションからアルペーン波が効率良く発生することは、理論的にも電磁流体シミュレーションによって確認されている。¹⁷⁾ これまで微小フレア説とアルペーン波説は対立する説として議論されてきたが、これらの観測に基づく

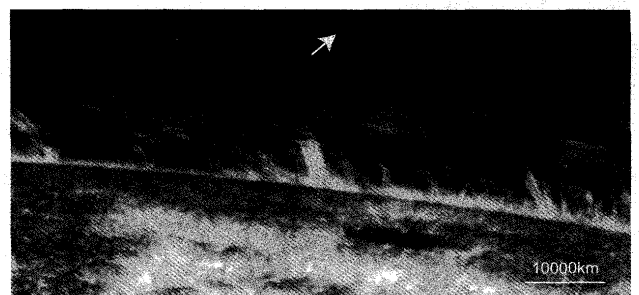


図4 SOTで観測された活動領域プロミネンス。白い矢印で示した構造が時間とともに右から左へ移動しながら上下にも振動する。(Okamotoら¹⁴⁾より改編。)

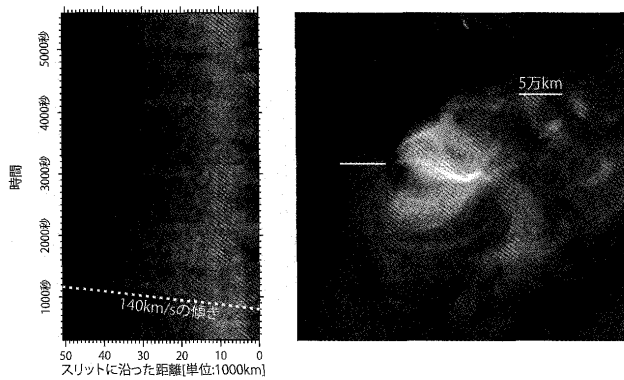


図5 X線で見えたアウトフロー現象。右図で明るく見えるのが活動領域。図中の白い直線に沿った時間-空間図を左に示す。この白い線に沿う方向に平均140 km/sの速度でプラズマが移動している。(Sakaoら²¹⁾から改編。)

と、両者は対立する説ではなく、統一すべき説として考えた方が良いかもしれない。古い考えにとらわれない、発想のコペルニクス的転換が必要である。

コロナ加熱が解明されたかどうかという点、決着はまだ、と言わざるを得ない。しかし、その素過程たる微小リコネクションとアルベーン波はかなり見え出した。観測ですべてを「見る」ことはできないが、理論モデル構築¹⁸⁻²⁰⁾と観測データ解析をうまく組み合わせることができれば、近い将来、答えが出せる可能性がある。独創的なアイデアが求められている。

2.4 太陽風の始まりの発見

「ひので」衛星は太陽風の始まりと言える興味深い現象を発見した。²¹⁾ 図5にXRTで見えた黒点近くのコロナのX線像を示す。右図の白い線上のX線強度の時間変化(左図)を見ると擾乱が伝播しているのがわかる(動画[04])。速度は140 km/s程度である。これはコロナプラズマが流れ出しているところを見ていると考えられる。黒点近傍から流れ出す太陽風は最終的に400 km/s程度にまで加速されるので、その始まりを捉えたものであろう。「ひので」衛星のEISで速度を測ると、確かに20-50 km/s程度のドップラー速度(視線方向速度)が検出された。^{22, 23)}

3. 磁場観測と黒点

輝線スペクトルを発する高温気体に磁石を近づけると、そのスペクトル線が波長方向にいくつかの成分に分裂しそれぞれが偏光を示す。これは19世紀の終わりに実験室で発見されたもので、発見者の名前によりゼーマン効果と呼ばれる。1909年、マウントウィルソン天文台のヘールは黒点からのスペクトルにこのゼーマン効果を確認し、太陽黒点に強い磁場があることを発見した。「ひので」衛星のSOTはスペクトル偏光観測装置(スペクトロポリリメータ; SP)を搭載し、鉄の吸収線(Fe I 6302.5 Å (=630.25 nm)と6301.5 Å (=630.15 nm))の偏光スペクトルをかつてない高い空間分解能と精度で取得することを可能にした。図6は黒点の偏光スペクトルの一例である。

磁場は強さと向きを持つベクトル量である。線スペクト

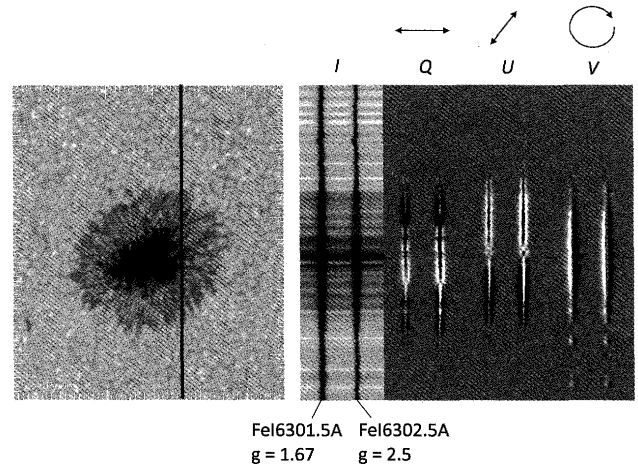


図6 スペクトロポリリメータで得られた黒点の偏光スペクトル。右の画像は左の黒点画像にある縦線(スリット)の場所におけるスペクトルで、左から強度(I)、スリット方向の直線偏光(Q)、45度方向の直線偏光(U)、円偏光(V)を示す。Iに見られる2つの黒い縦線は光球で作られる吸収線で、 g は各吸収線の磁場に対する応答感度(ランデ因子)を表す。2つの吸収線が黒点でゼーマン効果による大きな偏光を示している。QUVスペクトルの白い部分は各スペクトルの上に矢印で示した偏光が強いことを意味する。

ルの円偏光からは視線方向の磁場成分が、直線偏光からは視線と垂直な方向の磁場成分がわかり、これらを組み合わせることで太陽面における磁場の強さとその向きを求めることができる。またドップラー効果によるスペクトル線の波長のずれから、プラズマの視線方向の運動速度を求めることができる。

3.1 黒点の微細構造

黒点は太陽面における最も顕著な磁場の出現形態であり観測の歴史も古いが、その内部に見られる小さな構造やプラズマの運動の起源は謎として残されていた。図7はSOTのスペクトロポリリメータで得られた黒点画像である。図7a)の連続光マップでわかるように、黒点は放射状の明暗の筋構造からなる「半暗部」と中央の「暗部」を持ち、暗部の中には暗部輝点と呼ばれる小さな明るい構造がある。図7b)はスペクトル線のドップラーシフトから求めた光球プラズマの視線方向の運動を表す。観測時この黒点は地球から見て太陽中心から西に太陽半径の半分ほど離れたところに位置していた。太陽面縁側の半暗部(図7b)右側)には顕著な赤方偏移(白い領域)が、太陽中心側の半暗部(図7b)左側)には青方偏移(黒い領域)が存在しているのがわかる。これはエバーシェッド流として知られる暗部から黒点の外周へ向かう太陽面に沿ったほぼ水平なプラズマの流れである(動画[05])。このデータはエバーシェッド流がいくつかの筋状の領域に集中していることを示している。図7c)は視線方向に対する磁場の角度分布を表す。半暗部で放射状の筋パターンが見えているのは、半暗部の筋模様が実は磁場が太陽面に対してほぼ水平な筋と大きな角度を持つ筋が交互に並んだものであることを示している。これらを詳しく解析することにより、エバーシェッド流は磁場がほぼ水平な筋に存在し、個々の流れの暗部側には高温プラズマの湧き出しが、外周側には音速を超える下降流が存在する

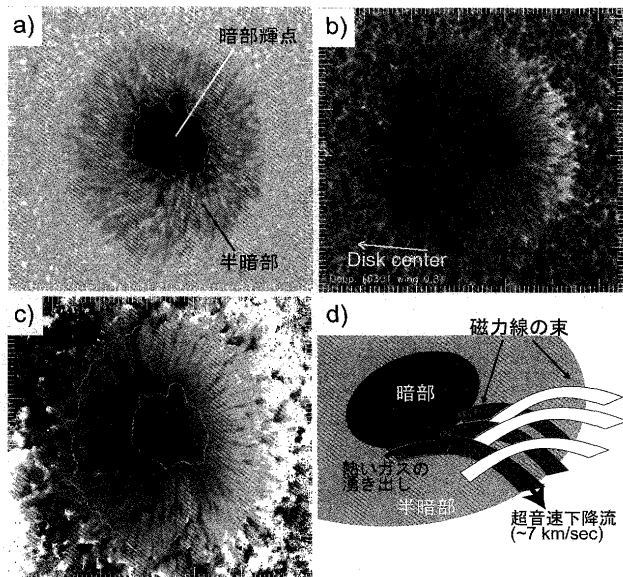


図7 黒点の磁場構造. a) 連続光強度, b) 視線方向速度 (白が速さる方向, 黒が近づく方向), c) 磁場の傾き, d) 黒点の磁場と速度構造. 2007年1月7日, 「ひので」衛星 SOT スペクトロポラリメータによる. (フルカラー口絵参照.)

ことがわかった (図7d)). そしてエバーシェッド流と半暗部の筋構造は, 黒点の傾いた強い磁場の中で発生する対流現象として理解できることが明らかになってきた.²⁴⁾

暗部輝点や暗部に架かる筋状の明るい構造 (ライトブリッジ) についてもプラズマの運動と磁場の強さが調べられ, これらも高温プラズマの上昇を伴っていること, すなわち黒点の強い磁場の中で起こる一種の対流現象として解釈できることが示された.²⁵⁻²⁷⁾ また, 出現からしばらく経った黒点の周りには正負の小さな磁極が0.3-2 km/sの速度で外に向かって流れ出すのが観測される. これは黒点の減衰・消滅を理解する上で重要と考えられ, 移動磁気要素 (Moving Magnetic Feature) と呼ばれている. 「ひので」衛星の安定した黒点磁場の時系列観測により, これらの磁場構造が黒点周縁の磁場と対流運動の相互作用によって形成され, また移動磁気要素によって運ばれる磁束量が黒点の失う磁束量と一致していること等が確認された.²⁸⁾ 一方, 黒点形成の極初期である浮上磁場の現場も詳細に捉えられている.²⁹⁾ このように「ひので」衛星 SOT の優れた解像度により, 黒点を形成する微細構造の正体が明らかになりつつある. 強い磁場とプラズマが相互作用して引き起こす磁気対流現象については, 宇宙電磁流体における一つの基本的なプロセスとして, 数値シミュレーション等を駆使した研究が精力的に行われている.

3.2 静穏領域と短命微細水平磁場

黒点から離れた何もないところ, すなわち静穏領域に目を転じてみよう. 図8はSOTのスペクトロポラリメータで得られた太陽中心の連続光画像 (a) と偏光強度 (b), (c) のマップである. これから磁場の存在は黒点に限られたものではないことが明らかである. スペクトル線の円偏光で示される視線方向の磁場 (3節の冒頭, ゼーマン効果) は, 正

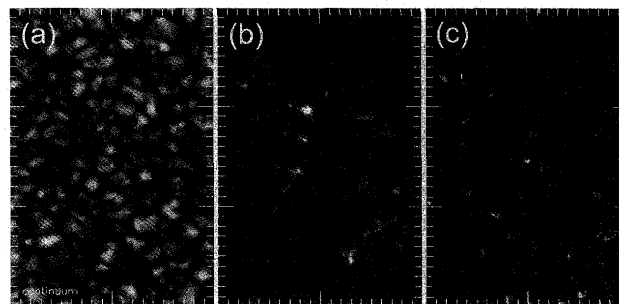


図8 太陽の中央にある静穏領域の磁場. (a) 連続光強度, (b) 太陽面に垂直な磁場 (白/黒がN/S極, 円偏光強度), (c) 水平方向の磁場 (白いところが強い, 直線偏光強度). (フルカラー口絵参照.)

負の小さなかたまりとして, 粒状斑¹⁾の間に無数に埋め込まれている. 1キロガウス以上の磁場強度を持つ小さな「磁気要素」は, 粒状斑の流れによって磁場が集められたところで, 対流不安定によって強い下降流を伴い一気に形成されることが明らかにされた.³⁰⁾ またこれとは逆に2つの極性の異なる磁気要素が合体し, Ω 状のループとなって沈み込み消滅する過程も確認された.³¹⁾

図8(c)は直線偏光, すなわち太陽面に沿った水平磁場の分布を示している. 偏光シグナルは円偏光に比べて弱いが, 磁束量に換算すると太陽面に垂直な磁場よりも数倍大きいと見積もられた.³²⁾ これらの水平磁場は粒状斑の中に出現し, 寿命は1-10分と短命, その方向はランダムであり, 粒状斑を10個ほど含む少し大きめの対流セル (メソグラニューレーション) の境界に出現することが確認された.³³⁾ 粒状斑の運動による局所的なダイナモ (発電) 作用がその生成機構として注目されている. また, この粒状斑に乗って上昇する水平磁場は光球の上を覆うように広がる磁場とリコネクションを引き起こし熱や波動を発生, 上空コロナの加熱や太陽風の加速に役かっている可能性が指摘されている.³⁴⁾ 太陽面では静穏領域といえども磁場と対流が絡み合っためまぐるしい現象がひっきりなしに起こっているのである.

3.3 極域構造

太陽の南北極域は活動極小期になるとN極またはS極の単極磁場²⁾に覆われ, その上にはX線で見たとき暗い「コロナホール」が広がり高速太陽風が吹き出していることが知られている. しかし地球から見ると極域は太陽の縁に近いので, その表面は大きな角度でしか観測することができず, 詳しい構造は謎に包まれていた. 「ひので」衛星のSOTは高い空間分解能により未踏の極域の磁場構造を見事に描き出した. すなわち, 極域においても磁場は1キロガウス以上の強度を持つ多数の磁束管として局在し, また水平磁場も静穏領域と同様に表面を覆い尽くしている (図9(a)). 個々の磁束管は光球からコロナにかけてその直径

*1 図8(a)を埋め尽くしている明るい構造で, これらは大きさ1,000-1,500 kmの対流の泡である.

*2 「単極磁場」といってもモノポールではない. 磁場極性が一樣な (異なる極性が混在していない) 領域が現れている, という事.

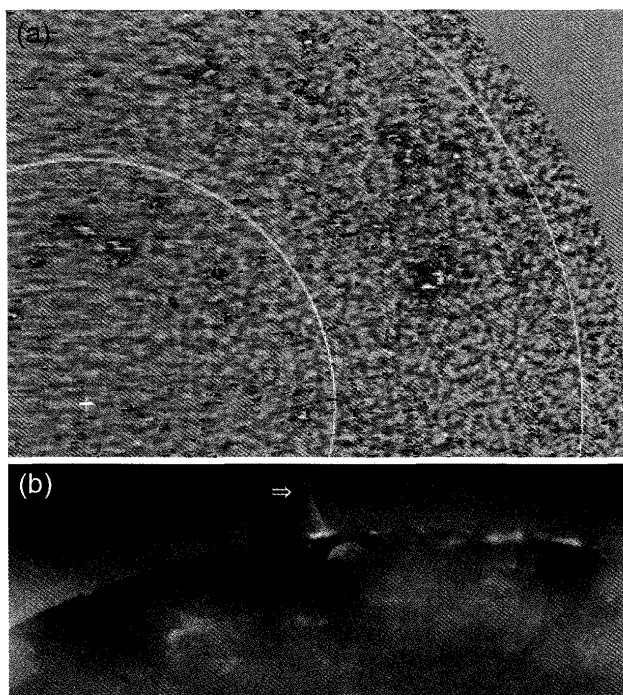


図9 (a) 太陽南極の白色光画像に磁場強度分布を重ねたもの。黒は磁場ベクトルが光球面に対しほぼ垂直、赤はほぼ水平。極を真上から見た座標に変換してある。図左側の+が太陽の南極点、等高線は中央から順に南緯85度、80度を表す。(Tsunetaら³⁵⁾より改編。) (b) XRTによる極域付近のX線画像。矢印はX線ジェットを指す。(フルカラー口絵参照)

が大きく広がるため、高速太陽風を加速する(であろう)アルベーン波の通り道として都合がよい。³⁵⁾

「ひので」衛星のXRTによる観測から、以前の観測では活動性がほとんどないと思われていたこの太陽の極域がジェットだらけであることが判明した(図9(b); 動画[06]).^{16, 36, 37)} X線望遠鏡の分解能や感度が良くなり、微小でかすかなフレアやジェットが大量に見えられたのである。微小でかすかではあるが速度は速く、1,000 km/sに達するジェットが続々と見つかった。しかもジェットの形状は、先に見たようにまさに「アネモネ型」である。「ようこう」衛星より空間分解能が格段に良くなったので、微小ジェットの形が良く見えるようになり、コロナ・ジェットの基本形は「アネモネ型」であることがほぼ確かとなった。これはつまり、ジェットが磁気リコネクションで発生していることを意味する。

また極域にキロガウスの磁場が存在するという事は、太陽の11年活動周期を説明するダイナモ理論、とくに極域磁場を種として次の活動サイクルの磁場を生成する磁束輸送ダイナモ理論にとって重要な発見であるかもしれない。ダイナモ理論において極域は磁場構造のみならず対流の大規模構造も重要である。太陽内部の様子は表面に見られる振動から日震学の手法³⁾を用いて推定することができる。

³⁾ 地震の波から地球の内部を探るのと同じように、太陽の内部を伝わる波(音波)を表面で観測することにより、太陽の内部構造を調べることができる。

「ひので」衛星の安定した時系列画像(時間分解能は約1分)より極域内部の大規模な対流構造が初めて調べられた。それによると、極に近いところでは大規模対流セル(超粒状斑)がほぼ南北の方向に並んで存在している。これは太陽の自転の効果で形成される特徴的なパターンではないかと考えられるが、その起源と意味するところはまだよくわかっていない。³⁸⁾ 今後の長期的な観測と流体モデルによる説明が期待されるところである。

4. 2006年12月13日のフレア

「ひので」衛星は、太陽面のいたるところで磁気プラズマ活動が起きていることを明らかにした。それら磁気プラズマ現象の中で最大級のもがこの節で紹介する「太陽フレア(太陽面爆発現象)」である。2006年12月13日世界時02:14に発生したフレアは、「ひので」衛星が観測したフレアの中でも最大級(X3.4クラス⁴⁾)のものであり、精力的に研究が行われている(2010年1月の時点で36編にも上る学術論文が出版されている)。このフレアの後、太陽活動が異常に長く低調な極小期に突入しフレアの発生頻度が著しく低下したこともあって、このフレアの特異性・重要性がさらに増した。

このフレアを起こした活動領域はNOAA 10930という識別番号が付いている。その成長過程は、「ひので」衛星のSOTで詳細に追跡された³⁹⁾(動画[07])。図10の白色光画像(a)と磁場分布図(b)を見比べると、この活動領域では北/南(図の上/下)にS(-)/N(+)極の磁場極性を持つ黒点の対が主体となっている。さらにフレア発生の直前には、

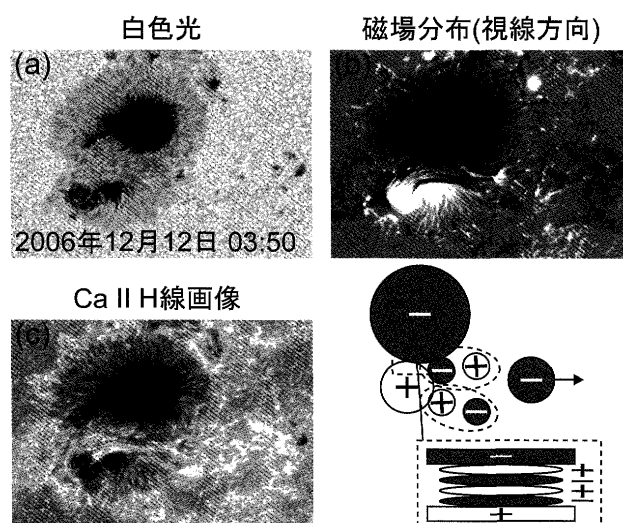


図10 活動領域NOAA 10930の成長。(a)連続光強度図(光球画像)、(b)磁場分布(白/黒は磁場極性のN/Sに対応する)図、(c)彩層画像。右下はこの活動領域の磁場極性の分布を模式的に示した図(+/-は磁場極性がN/Sであることを示す)。(Kuboら³⁹⁾より改編。)

⁴⁾ フレアの規模を表す指標として軟X線の最大値が用いられる。最大値の大きい方からログスケールでX, M, C, B, Aとクラス分けされており(X1.0はM10.0に相当)、Xクラスフレアは「巨大フレア」とされる。

この南北の大きな黒点の対の間にN/S極の磁場領域が幾重にも繰り返されるような、非常に複雑な構造が形成されていたことがわかる。いたるところで磁場の極性が反転することで電流シートが形成され、小規模なエネルギー解放現象が多発していたことが、SOTの彩層画像での増光現象などから確認されている。また、SOTの詳細な磁場データが連続的に得られたことで、活動領域の成長に伴うコロナ中へのエネルギー蓄積過程やコロナ磁場の推定が盛んに議論されている。⁴⁰⁾

フレアの詳細に話題を移そう。SOTの彩層画像(図11(e))では、典型的なフレアリボンの形成が見られた(動画[08], 動画[09])。フレアリボンとは2筋の細長く明るい領域で、フレア発生時に彩層で観測される特徴的な構造である。フレアリボンの間には磁気中性線(磁場のN/S極性が反転する線)がある、つまり2筋のフレアリボンはそれぞれ対となる極性を持つ。フレアリボンは、コロナ中で磁気リコネクション(図2)が起き、解放された磁場エネルギーの一部が熱や加速粒子といった形で彩層に突入したことで生じる(太陽フレアにおける磁気リコネクション機構については、例えば、柴田¹⁾を参照されたい)。巨大なフレアの場合は、解放された磁場エネルギーが彩層より下層の大気にまで影響が及ぶことがある。もっとも強烈な場合は、白色光でも増光が見られる場合があり「白色光フレア」と呼ばれる。^{*5}

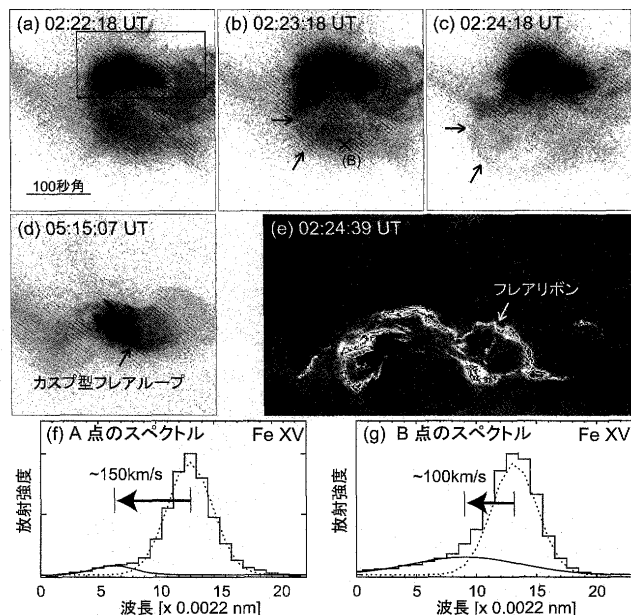


図11 2006年12月13日のフレアの様子。(a)-(d) XRTによるX線画像。1秒角=720 km。(e) SOTによる彩層画像。(f), (g)(a)および(b)中にXで示す場所(A, B)でのEISによる鉄輝線のスペクトル。ヒストグラムが観測値、実線と点線で示す曲線はそれらを2つのガウス関数でフィッティングした結果(それぞれ青方偏移成分と静止成分に対応)。(b), (c)の中に示す矢印はX線波の先端を示す。(Asaiら⁴³⁾より改編。)

12月13日のフレアも白色光フレアであったと推測されている。⁴¹⁾ どうやって白色光での増光を引き起こすのか、その詳細なメカニズムはまだ明らかになっていないが、大気による揺らぎの影響がなく高い空間分解能での連続観測を誇るSOTではより小さな規模のフレアに伴う白色光増光をとらえることができ、白色光フレアに関する研究が進むと期待されている。⁴²⁾

ではこのフレアのコロナでの様相はどうなっていたのだろうか? XRTの画像(図11(a)-(d))からは、カスプ型のフレアループの形成や、プラズマ塊が複数回噴出する様子が見られる。これらも磁気リコネクション機構を観測的に示唆する現象である。加えて、フレアの初期段階で弧状の淡い噴出物が伝播する様子が観測された。⁴³⁾ これは「ようこう」衛星の軟X線望遠鏡で発見された、「X線波^{*6}」の可能性がある。XRT画像から求まる平面内の速度は、プラズマ塊噴出で約100 km/s、X線波で約700 km/sであった。

「ひので」衛星のもう一つの観測装置であるEISもこのフレアを観測している。^{43,44)} そこで、分光観測からこのX線波現象を探ってみよう。図11(f)と(g)には、EISによるプラズマ塊噴出(f)とX線波(g)のFe XV輝線(284.2Å=28.42 nm)のスペクトルを示す。どちらも静止成分に対して青方偏移を示しており(それぞれ150 km/sと100 km/sのドップラー速度に相当)、我々に向かって飛来していることが確認できる。一方、衝撃波でのスペクトル形状は、通常のプラズマ流で見られる典型的なスペクトルとは大きく異なり、裾野が非常に広がった形状を示している。これは、ある速度を持ったプラズマの流れではなく、視線方向に複雑な速度構造があり、例えば膨張する球殻状の構造に付随する速度場を考えれば説明が付く。この現象が、アルベーンマッハ数が1.4程度のファストモード衝撃波として矛盾ないと見積もられていることから、EISにより世界で初めて電磁流体衝撃波の分光観測に成功した例であることは間違いない。

活動領域の成長過程や12月13日のフレアの概要を述べてきた。これらをスーパーコンピュータを用いて数値的に再現しよう、という野心的なアプローチが草野ら⁴⁵⁾によって推進された。草野らは可視光望遠鏡の観測データ(特に磁場分布データ)を基にコロナ磁場の3次元構造を復元することでコロナ中への磁場エネルギーの蓄積過程を追い、フレアに伴う衝撃波(X線波)の形成も再現することに成功した。さらにはフレアに伴う噴出現象の惑星間空間での伝播過程も追い、太陽風の乱れや磁気嵐が起きるといった一連の現象まで再現している。このような実データに基づく現象の再現がより発展することで、近い将来太陽面活動現象に起因する地球周辺の磁場・プラズマ環境(「宇宙天気」と呼ばれる)の予報が大きく進展すると期待される。

*5 太陽フレアはコロナ中で発生する磁気プラズマ活動現象であり、主としてコロナからX線や彩層からのスペクトル線(水素のH α 線やカルシウムのH・K線など)で顕著な発光が見られる。特に巨大フレアの場合は白色光でも増光を伴う場合があり、「白色光フレア」と呼ばれている。

*6 フレアに伴って軟X線で観測される、コロナ中を伝播する電磁流体衝撃波現象。弧状で淡い(放射強度がそれほど強くない)現象として観測される。

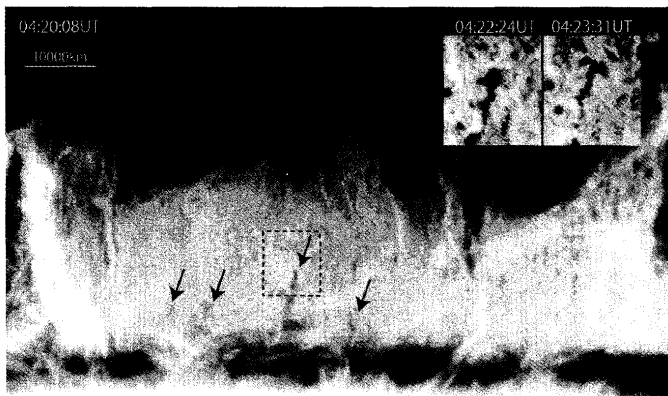


図12 SOTで観測された静穏プロミネンス。矢印で示すのがブルーム、四角の領域の時間変化を右上に示す。

5. 新たな謎：プロミネンス中のバブル現象

「ひので」衛星は、驚くべきデータを地上に送ってきた。図12をご覧ください。プロミネンス中に無数のバブル（ブルームと呼ばれる）が見える。動画[10]を見るとブルームが、まるで水の中の泡のように、上方へ浮かんでいくのがわかる。プロミネンスが水のように単純な流体现象なら不思議はないが、プロミネンスというのは、重い冷たいプラズマが重力に抗して磁場によって支えられた磁気平衡構造なのだ。強い磁場でがちがちになっていると思っていたら、磁場構造は泡のようなブルームを作り、まるで沸き立っているかのようなのだ。^{46,47)} こんな現象はこれまで誰も予想さえしなかった。自然が我々にチャレンジをつきつけていると言えよう。

6. おわりに

本稿では、太陽観測衛星「ひので」が、打ち上げ後、4年間の間に成し遂げた主要観測の成果を紹介した。紙数の制限から紹介できなかった重要研究は数多い。最大の課題であるコロナ加熱の問題はまだ解決に至っていないが、近い将来の決着を予感させる重要成果が続々と得られている。彩層、コロナの極域、黒点が、これまで予想された以上に激しくダイナミックに活動し、アルベーン波、微小フレア、ジェットだらけであることが判明したのは、半ば予想されていたとは言え、各方面に極めて大きなインパクトを与えた。

一方5節でも述べたように、「ひので」衛星は従来全く予想もされなかった不思議な興味深い現象も続々と発見している。太陽は星の代表例と言えるので、宇宙の星々の正体もおそらくフレアやジェットだらけの激しい姿であり、まだ我々に発見されていない謎の現象に満ち満ちているに違いないと予想される。「ひので」衛星は間違いなく、太陽研究の新たな1ページを開いたと言える。

参考文献

- 1) 柴田一成：『太陽の科学』（NHK出版、2010）。
- 2) 柴田一成，他：『最新画像で見る太陽』（ナノオプトニクス・エナジー出版局、2011）。
- 3) 桜井 隆，他編：『太陽』（日本評論社、2009）。

- 4) T. Kosugi, *et al.*: *Sol. Phys.* **243** (2007) 3.
- 5) 坂尾太郎：日本物理学会誌 **63** (2008) 642.
- 6) Y. Suematsu, *et al.*: *Sol. Phys.* **249**, (2008) 197 とその引用文献。
- 7) N. Narukage, *et al.*: *Sol. Phys.* **269** (2011) 169 とその引用文献。
- 8) J. L. Culhane, *et al.*: *Sol. Phys.* **243** (2007) 19.
- 9) K. Shibata *et al.*: *Science* **318** (2007) 1591.
- 10) K. Shibata, *et al.*: *Publ. Astron. Soc. Jpn.* **44** (1992) L173.
- 11) T. Yokoyama and K. Shibata: *Nature* **375** (1995) 42.
- 12) M. Shimojo, *et al.*: *Publ. Astron. Soc. Jpn.* **48** (1996) 123.
- 13) Y. Katsukawa, *et al.*: *Science* **318** (2007) 1594.
- 14) T. J. Okamoto, *et al.*: *Science* **318** (2007) 1577.
- 15) B. De Pontieu, *et al.*: *Science* **318** (2007) 1574.
- 16) J. W. Cirtain, *et al.*: *Science* **318** (2007) 1580.
- 17) N. Nishizuka, *et al.*: *Astrophys. J.* **683** (2008) L83.
- 18) P. Antolin, *et al.*: *Astrophys. J.* **668** (2008) 669.
- 19) T. Matsumoto and K. Shibata: *Astrophys. J.* **710** (2010) 1857.
- 20) T. K. Suzuki and S. Inutsuka: *Astrophys. J.* **632** (2005) L49.
- 21) T. Sakao, *et al.*: *Science* **318** (2007) 1585.
- 22) L. Harra, *et al.*: *Astrophys. J.* **676** (2008) L147.
- 23) H. Hara, *et al.*: *Astrophys. J.* **678** (2008) L67.
- 24) K. Ichimoto, *et al.*: *Publ. Astron. Soc. Jpn.* **59** (2007) S593.
- 25) H. Watanabe, *et al.*: *Publ. Astron. Soc. Jpn.* **61** (2009) 193.
- 26) Y. Katsukawa, *et al.*: *Publ. Astron. Soc. Jpn.* **59** (2007) S613.
- 27) T. Shimizu, *et al.*: *Astrophys. J.* **696** (2009) L66.
- 28) M. Kubo, *et al.*: *Publ. Astron. Soc. Jpn.* **59** (2007) S607.
- 29) K. Otsuji, *et al.*: *Publ. Astron. Soc. Jpn.* **59** (2007) S649.
- 30) S. Nagata, *et al.*: *Astrophys. J.* **677** (2008) 145.
- 31) Y. Iida, *et al.*: *Astrophys. J.* **713** (2010) 325.
- 32) B. W. Lites, *et al.*: *Publ. Astron. Soc. Jpn.* **59** (2007) S571.
- 33) R. Ishikawa and S. Tsuneta: *Astrophys. J.* **718** (2010) L171.
- 34) H. Isobe, *et al.*: *Astrophys. J.* **679** (2008) L57.
- 35) S. Tsuneta, *et al.*: *Astrophys. J.* **688** (2008) 1374.
- 36) M. Shimojo, *et al.*: *Publ. Astron. Soc. Jpn.* **59** (2007) S745.
- 37) S. Kamio, *et al.*: *Publ. Astron. Soc. Jpn.* **59** (2007) S757.
- 38) K. Nagashima, *et al.*: *Astrophys. J.* **726** (2011) L17.
- 39) M. Kubo, *et al.*: *Publ. Astron. Soc. Jpn.* **59** (2007) S779.
- 40) 例えば T. Magara and S. Tsuneta: *Publ. Astron. Soc. Jpn.* **60** (2008) 1181.
- 41) H. Isobe, *et al.*: *Publ. Astron. Soc. Jpn.* **59** (2007) S807.
- 42) K. Watanabe, *et al.*: *Astrophys. J.* **715** (2010) 651.
- 43) A. Asai, *et al.*: *Astrophys. J.* **685** (2008) 622.
- 44) S. Imada, *et al.*: *Publ. Astron. Soc. Jpn.* **59** (2007) S793.
- 45) 草野完也，他 (http://www.jamstec.go.jp/ifree/space_earth/jswm/ja/2009/06/post-3.html).
- 46) T. Berger, *et al.*: *Astrophys. J.* **676** (2008) L89.
- 47) T. Berger, *et al.*: *Nature* **472** (2011) 197.

著者紹介



柴田一成氏：太陽および宇宙における激しい活動現象、とくに磁気流体的な爆発・ジェット・活動現象を研究している。



一本 潔氏：地上観測装置および人工衛星による可視光領域での観測データから、精密な太陽表面の磁場診断を行っている。



浅井 歩氏：太陽フレアなどさまざまな太陽面活動現象について、観測データを解析することで研究している。

(2011年3月10日原稿受付)

Recent Progresses of Solar Physics Achieved by *Hinode*

Kazunari Shibata, Kiyoshi Ichimoto and Ayumi Asai

abstract: The latest view of the Sun is discussed with the results of the Japanese 3rd solar satellite *Hinode*. The coronal heating is the most important problem to be studied by *Hinode*. Has the coro-

nal heating problem been solved? How much are sunspots and flares made clear with *Hinode*? Has *Hinode* discovered entirely new phenomenon which had never been predicted? In this article, we review the observational results with *Hinode* during recent 4 years after the launch in 2006.

日本物理学会誌 第67巻 第1号 (2012年1月号) 予定目次

口絵: 今月号の記事から

巻頭言

新しい法人制度に対応した日本物理学会……………倉本義夫

解説

電子定在波とフリーデル振動

……………長谷川幸雄, 小野雅紀, 鈴木孝将, 江口豊明

精密 γ 線分光が明らかにしたハイパー核の世界

……………鶴養美冬, 田村裕和

実験室宇宙物理学—大型レーザーによる宇宙模擬実験—

……………高部英明

最近の研究から

陽電子束縛化合物の第一原理計算……………立川仁典, 北 幸海

宇宙原理の観測的検証……………柳 哲文, 中尾憲一

半導体励起子のボース・アインシュタイン凝縮

……………吉岡孝高, 五神 真

超新星での元素合成とニュートリノ振動

……………鈴木俊夫, 吉田 敬, 千葉 敏, 梶野敏貴

JPSJの最近の注目論文から Vol. 80 (2011) No. 10より

……………川畑有郷

談話室

第41回天文天体物理若手夏の学校開催報告……………古澤 圭

新著紹介