

ひので観測が与えた太陽表面の 微小磁気対流場に対するインパクト



飯田 佑輔

〈関西学院大学理工学部 〒669-1337 兵庫県三田市学園2-1〉

e-mail: iida@kwansei.ac.jp

2006年9月に打ち上げられたひので衛星は、その安定した高時間・空間分解能の観測によって、私たちが想像している以上に活動的な太陽表面微小磁場の様子が明らかになった。ひので衛星に搭載された可視光望遠鏡によって、1) 対流崩壊、2) 水平磁場、3) 磁気要素などが研究された。ひのでが観測を始めてからほぼ10年が経過し、太陽面の磁気対流理解におけるひので観測の位置づけを俯瞰し、これからの課題を示したい。

1. なぜ太陽の磁気対流を調べるのか？

太陽やほかの恒星が、なぜ活動的な大気を持っているのかという疑問は一つの大きなテーマである。その解決のために、最も私たちの近くに位置する太陽を詳細に調べることは、自然な一歩だと考えられる。では、太陽大気活動を理解するうえで、本稿のテーマである磁気対流が果たす役割は何だろうか？ それは本稿のテーマである、太陽内部から太陽大気へのエネルギー輸送である。

太陽のエネルギー源は、コアで起こる核融合反応であることは周知のとおりである。核融合反応で発生したエネルギーは、その外側の放射層では光の放射の形で伝えられる。その外側には対流層が存在し、主にガスの対流運動によって外側にエネルギーが輸送される。さらに外側では対流安定な状態となり、対流運動は減速する。その結果、ガスが供給されなくなることで密度が急激に減少し、ガスから光が宇宙空間に放出される。この高さが私たちが光で見ることが出来る太陽の表面であり、光球と呼ばれる。一方で、対流層中では、ガスがもつエネルギーの一部は磁場に与えられ

る。対流層中や太陽表面では、平均的にはガスの力のほうが大きく、磁場はガスに翻弄されていると考えられる。しかし、表面よりも上空では、ガスがもつエネルギーが急速に減少する一方で、磁場がもつエネルギーは緩やかに減少する。その結果、彩層の上部やコロナといった上空大気では磁場が支配的となり、磁場を起因とするさまざまな大気活動現象を引き起こす(図1参照)。このような、磁場がガスの対流運動からエネルギーを受け取り、上空大気に伝えるという役割をもっているだろうということは、ひので衛星以前から理解されていた。しかし、問題となるのは、このようなエネルギーのやりとりが小さな空間スケールの対流と磁場の間で行われることである。この微小磁場を観測することが難しかったために、具体的にどのようにエネルギーを輸送しているのか、どれほどのエネルギーを輸送しているのか、などの理解は進んでいなかった。

2. 表面磁気対流に挑むひので衛星

ひので衛星打ち上げ以前の観測装置では、太陽表面の磁気対流を調べることは容易ではなかった。大きな問題は、前述したような微小磁場を捉

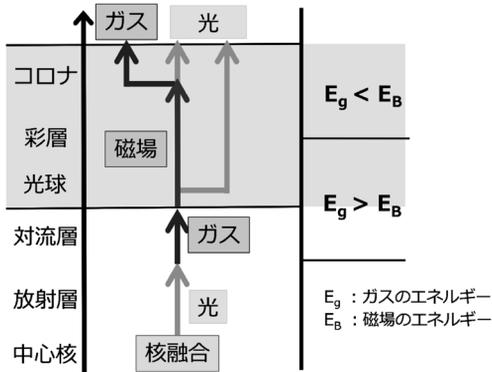


図1 太陽内部から大気までのエネルギー輸送とエネルギー間の関係。対流層までは平均的にはガスのエネルギーが優勢であるが、大気中では磁場のエネルギーが優勢となる。

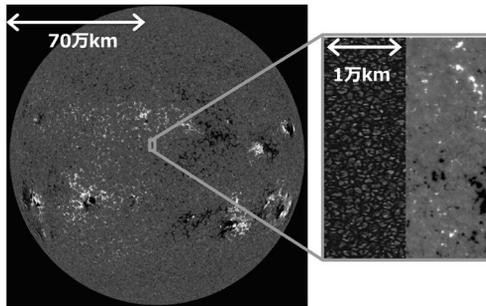


図2 Solar Dynamics Observatoryによる太陽全面磁場観測(左)とひので衛星による対流・磁場観測(右)。

えるためには高い時間・空間分解能を必要とすることである。太陽表面は、粒状斑と呼ばれる1,000 km程度の対流構造と、同程度かそれ以下の空間スケールをもつ磁場で覆われている(図2参照)。太陽面上での1,000 kmは、地球から見た視野角で約1秒角程度にあたり、これを十分に分解する空間分解能が必要である。また、粒状斑は約10分程度の寿命をもつため、数分以上の時間分解能も必要となる。さらに、磁気対流では乱流の状態となるため統計的な性質が重要となる。そのため、数例のイベントスタディだけでは、決定的な結論を得ることはできない。十分な統計性を確保するためには、数時間程度の安定観測が必要

である。まとめると、1秒角以上の空間分解能、数分以上の時間分解能、数時間以上にわたって均質な観測データを取得することが必要である。

このような中で、2006年9月23日にひので衛星が打ち上げられた。ひので衛星には、三つの望遠鏡が搭載されている。その中の一つである可視光望遠鏡では、フィルタグラムとスペクトロポラリメータにより、光球磁場を捉えている。可視光望遠鏡の最大の特徴は、その高時間・空間分解能にある。可視光望遠鏡は、打ち上げ当時では最大となる50 cmの口径をもち、0.2秒角の空間分解能と30秒の時間分解能を達成する。さらに、極軌道を利用した衛星観測であることから、常に均質な観測データを取得することができる。これらは、前述した課題となる数値を達成しており、ひので衛星/可視光望遠鏡は、太陽表面の微小な磁気対流を調べるために最適化された衛星と言える。

3. ひのでで得られた新しい知見

ひのでによる高い安定性と高空間・時間分解能をもつ観測データは、私達が想像していなかった微小磁場の姿を明らかにした。本稿では、対流崩壊・水平磁場・磁気要素の三つの具体例を挙げて説明したい。これらは、対流層から太陽大気へのエネルギー輸送の観点から重要となる。

3.1 対流崩壊

太陽表面には、ガス圧によって作りうる以上の磁場強度をもつ磁場が存在することが、観測的に知られていた。ガス圧よりも強い強度をもつ磁場は、対流に翻弄される磁場とは対流からエネルギーを受け取る方法も異なると考えられ、これまでのエネルギー輸送の描像を一変させる。一方で、対流により磁場が生成されるという標準的な太陽表面描像では、このような磁場強度をもつことは説明が困難な観測事実である。1978年、Parkerにより、そのようなありえない強度の磁場を作るメカニズムとして、対流崩壊が提案された¹⁾。

対流により掃き寄せられた小さな磁場領域を考える。この領域は、磁場によって周囲と直接ガスの移動による熱のやりとりが妨げられている。さらに領域が十分に小さいと、周囲の十分に熱をもった領域からの光を十分に吸収することができない。これらのために、ガスと光の両方での熱輸送が妨げられ、熱的に孤立する。その結果、この小さな磁場領域では周囲よりも温度が低くなり、ガスが落下する。このガスの落下のためにガス圧が下がり、それによって圧力バランスが崩れるために磁場領域が押しつぶされる。この現象で鍵となるのは、磁場だけでなく、光が十分に吸収されないほど小さい領域という部分であり、その検証には高い空間分解能を要する。永田らは、可視光望遠鏡に搭載されたスペクトロポラリメータを用いて、太陽面の微小磁場における磁場強度とドップラー速度の時間変化を探った²⁾。その結果、理論モデルが予想するように、下降流が見られた後に磁場強度が強くなる様子が、観測的に初めて確かめられた。その後、Fischerらによって、同様の傾向が49例のイベントの解析によって確かめられている³⁾。

3.2 水平磁場

ひので以前の描像では、磁場の大部分は太陽面に垂直であると考えられていた。一方で、LitesやHarveyらによって、間接的に太陽面に水平な磁場が存在する可能性が提案されていた^{4),5)}。

太陽面の磁場はZeeman効果を原理として偏光を生み出す。それによると、視線に垂直となる太陽面水平磁場は直線偏光として表れる。しかし、その偏光度は太陽面垂直磁場に比べて非常に小さく、直接検出のためには高精度が要求される。ひので衛星可視光望遠鏡に搭載されているスペクトロポラリメータは、円偏光だけでなく直線偏光も高精度で測定している。そのため、太陽面に水平な磁場を直接測定することができる。スペクトロポラリメータの観測データが詳細に解析されると、その正体は至る所に存在する磁気対流に翻弄

される微小な水平磁場であることが見いだされた^{6),7)}。この水平磁場は、ひので以前にはあまり着目されておらず、太陽面に垂直な磁場と対流間のエネルギーやりとりが考えられていた。しかし、このような太陽面に水平な磁場を通したエネルギー輸送を考えなければならない可能性がある。またひので後も、ロケット観測により、ひのでより高空間分解能をもつ観測データで引き続き解析が行われている⁸⁾。

3.3 磁気要素

ひので観測は、対流により掃き集められた塊(以下、磁気要素)が、これまでの予想よりも非常に多く存在することを明らかにした。これは、大きなスケールの磁場ではなく、このような非常に小さな磁場がエネルギー輸送でも重要となる可能性を示唆している。ひのでにより微小な磁気要素までが観測できるようになったことで、さまざまな磁気要素のスケージング則から、その生成機構などが調べられた。図3にParnellらによって得られた、磁気要素の磁束量分布を示す⁹⁾。Parnellらは、太陽全面を観測するSoHO衛星と高空間分解能をもつひので衛星を組み合わせることで、磁束量としておよそ6桁にも及ぶ範囲を調べ

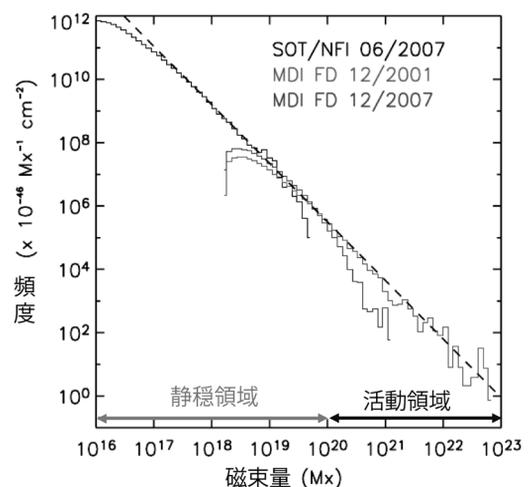


図3 Parnellらによって得られた、磁気要素に含まれる磁束量の頻度分布。

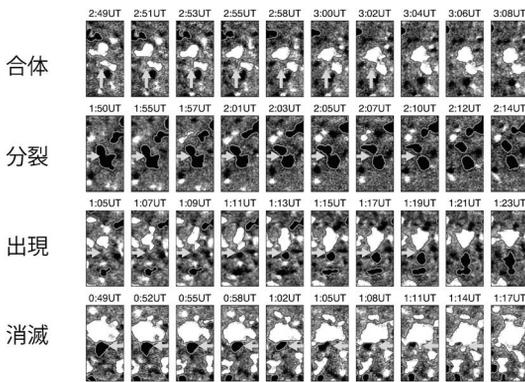


図4 ひのでにより捉えられた、磁気要素間の相互作用。上段から合体、分裂、出現、消滅を示す。コンターは自動判別された磁極を示す。

た。その結果によると、活動領域から静穏領域に至るまで、5桁ほどの範囲で太陽面上の磁気要素は同一の磁束量分布が見られる。Parnellらは、これから大きな磁場も小さな磁場も同一の生成機構があるのではないかと議論した。

また、これら微小な磁気要素は、出現してから消えるまでに合体・分裂・消滅といった磁気要素間の相互作用(図4参照)を経て、活動的な様相を示す。特に、出現や消滅といった現象は、上空のコロナでの大気活動との関連性が多く報告されている。ひのでによる安定した観測を利用し、これら相互作用検出の研究が行われてきた。これらの解析は、莫大な数の解析を可能とするために、コンピュータによる画像認識を利用して、磁極の自動認識・追跡から行われている。飯田らは、これら四つの相互作用の頻度を詳しく調べ、合体と分裂が支配的であることを見だし、これらにより磁束維持を行うモデルを提案した¹⁰⁾。一方で、Thorntonらによって、磁極出現における磁束量の頻度分布が調べられた¹¹⁾。それによると、指数が -2.7 の急峻なべき分布が得られた。さらに、飯田らにより磁極消滅における磁束量の頻度分布についても、指数 -2.6 の急峻なべき分布が得られている¹²⁾。これらのべき指数の値から、小さいスケールと大きいスケールのどちらが支配的か

がわかる。たとえば、ある物理量 X に対して、 $n(X) = n_0(X/X_0)^{-\alpha}$ の頻度が得られたときを考える。物理量 X の最少スケールを X_{\min} 、最大スケールを X_{\max} とすると、物理量 X の総量は

$$\int_{X_{\min}}^{X_{\max}} X n(X) dX = \frac{n_0 X_0}{2-\alpha} \frac{X_{\max}^{2-\alpha} - X_{\min}^{2-\alpha}}{X_0^{2-\alpha}} \quad (1)$$

となる。 $X_{\max} \gg X_{\min}$ の場合、 $\alpha > 2$ のときは X_{\min} 、 $\alpha < 2$ のときは X_{\max} のみで記述できる。実際に、磁極の出現や消滅においては、 -2 よりも小さい指数が得られていることから、黒点のような大きな磁気要素よりも、ひのでで見られるような微小な磁気要素によって、太陽面上と内部の磁束のやりとりが行われていることがわかる。

4. これからの課題

ひので衛星に搭載された可視光望遠鏡によって、微小な磁気対流が想像以上に活動的であり、さまざまな新しい現象を捉えることができた。では、これらの研究によって太陽表面の磁気対流は解決されたのだろうか? 著者の答えはノーである。

一番の課題は、ひので衛星により観測された新しい磁気対流現象と、太陽全球スケールや太陽活動変化との結びつきが明らかになっていないことだと考えている。その理由には、ひので衛星は安定した高時間・空間分解能に長所がある一方、観測できる視野は太陽面の $1/40$ 程度であるという欠点をもっていたことが挙げられる。本稿で述べた対流崩壊でできた強磁場や水平磁場が、全球スケールのエネルギー輸送においてどれほどの影響をもっているのかは明らかでない。この解決には、まさに本稿で特集されているひので衛星が10年間蓄積してきたデータが大きな鍵となる。この10年間で可視光望遠鏡が蓄積した観測データは15TB以上であり、これらのデータを太陽全球を定常的に捉えているSoHO衛星やSolar Dynamics Observatoryによる観測と、系統的に比較することが重要である。一つの問題は、これら

の膨大なデータを解析する手段である。筆者は、まさにコンピュータによる画像認識を取り入れたデータベース作成と解析に挑んでおり、今後成果が出れば報告したい。一方で、逆に小さいスケールを調べることも興味深い。Stenfloらによれば、永田らの調べたような対流崩壊したような磁場よりも、ただ単に乱流に乱されているような磁場の方が磁束量としては大きいという結果が得られている¹³⁾。このような磁場に迫るには、ひのをさらに上回る空間分解能が必要となる。

また、表面である光球とコロナの中間層である彩層を調べることの重要性が認識されつつある。ひので衛星で多くが明らかになった光球、それ以前のひのとり・ようこう衛星によって調べられたコロナは、それぞれガスと磁場が優勢な大気層であった。その中間層である彩層は、図1に示されたようにガス優勢から磁場優勢に移り変わる中間層である。太陽内部から外層大気へのエネルギー輸送の観点において、この中間層で何が起きているかは重要となる。しかし、輻射の効果が重要となることから、数値シミュレーションを行うための計算コストも非常に大きくなってしまう。その彩層を観測の面から進めようというのが、Solar-C衛星計画であり、太陽大気におけるエネルギー輸送の理解が著しく進むことが期待されている。

謝 辞

本記事を執筆するにあたり、このような機会を作っていただいた天文月報編集部ならびに太陽研究者連絡会の皆様に感謝いたします。また、これまでにひので衛星の開発・運用に携わった皆様にも、この場を借りて感謝します。

参考文献

- 1) Parker E. N., 1978, ApJ 221, 368
- 2) Nagata S., Tsuneta S., Suematsu Y., et al., 2008, ApJ 684, 1469
- 3) Fischer C. E., de Wijn A. G., Centeno R., et al., 2009, A&A 504, 588
- 4) Lites B., Leka K. D., Skumanich A., et al., 1996, ApJ 460, 1019
- 5) Harvey J. W., Branston D., Henney C. J., et al., 2007, ApJ 659, L177
- 6) Lites B., Kubo M., Socas-Navarro H., et al., 2008, ApJ 672, 1237
- 7) Ishikawa R., Tsuneta S., Ichimoto K., 2008, A&A 481, L25
- 8) Danilovic S., Beeck, B., Pietarila A., et al., 2010, ApJ 723, L149
- 9) Parnell C. E., DeForest C. E., Hagenaar H. J., et al., 2009, ApJ 698, 75
- 10) Iida Y., Hagenaar H. J., Yokoyama T., 2012, ApJ 752, 149
- 11) Thornton L. M., Parnell C. E., 2011, Sol. Phys. 269, 13
- 12) Iida Y., Hagenaar H. J., Yokoyama T., 2015, ApJ 814, 134
- 13) Stenflo J. O., 2011, A&A 529, A42

Impact of Hinode Observation on Our Understanding of Solar Surface Magneto-Convection

Yusuke IDA

School of Science and Technology, Kwansai Gakuin University, 2-1 Gakuen, Sanda, Hyogo 669-1337, Japan

Abstract: Taking advantage of stable high temporal and spatial resolution, Hinode satellite, which was launched in September 2006, reveals that small magnetic fields on the solar surface are much more active than we expected. It captured convective collapse, horizontal magnetic field, and interactions among magnetic elements. Now ten years have passed since its launch. I want to overview the role of Hinode in the investigation of magneto-convection and show future studies in this article.