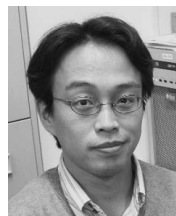


# 「ひので」SOTで明らかになったライトブリッジの形成過程



勝川 行雄

〈国立天文台・ひので科学プロジェクト 〒181-8588 東京都三鷹市大沢 2-21-1〉

e-mail: yukio.katsukawa@nao.ac.jp

「ひので」可視光望遠鏡 (SOT) は太陽表面にある磁場が作る微細構造の連続観測を可能にした。これによって、古くから存在する数々の黒点の謎を解明することが期待されている。ここでは、ライトブリッジの形成過程を観測した結果について紹介する。ライトブリッジは、黒点の強力な磁束が、対流によって二つに分割されることでできる構造である。黒点がどのように崩壊するのかに重要な示唆を与えるものである。

## 1. 「ひので」による黒点の観測

太陽表面にある黒いしみ「黒点」の存在は、古くはガリレオの頃から知られている。小さな望遠鏡で観察しても、太陽の表面に存在する黒点の存在はすぐにわかるし、望遠鏡の後ろに設置した板に太陽を投影し、黒点の影をスケッチすることも教材として用いられる。実際、筆者も中学生のときに、夏休みの自由研究で黒点スケッチをやったことがある。小さな望遠鏡を家のベランダにおいて、晴れた日に黒点の位置と数を記録していくものである。太陽の自転とともに東から西へ移動する様子や、日々、形や数が変化していくことが、とても面白かったものである。そのときは、なぜそのようなことが起こるのか、どうして黒点が存在するのかなど、深遠な科学的意味など全くわからず、ただ、楽しんでいただけであった。将来、人工衛星を使って黒点の研究を行うなど、もちろん、考えもしなかった。

太陽を可視光で（つまり肉眼で）見たときに見えるのは光球であり、そこでは黒体放射に近い輻射をしている。つまり、温度が高いほど明るく、

温度が低いほど暗くなる。黒点の中（特に暗部と呼ばれる領域）は、その大きさにもよるが、周囲よりも約10%程度の明るさしかなく、これは温度がおおよそ2,000度周囲よりも低いことに相当している。20世紀初頭に黒点には強力な磁場が存在することが発見された。強力な磁場の存在は対流運動による熱輸送を強く妨げるため、周囲よりも温度が下がる。ここまでは教科書に書かれていることであるが、いまだに謎が多い存在でもある。例えば、

- 黒点はなぜ安定に存在するのか
- 黒点はどのように崩壊するのか
- 黒点暗部、半暗部に存在する微細で複雑な構造の起源

など、まだ理解できていないことも多いのが実際であった<sup>1)</sup>。強力な磁場と対流がどのように相互作用しあっているかを理解することが、黒点の謎の解明のためには重要であるが、高い解像度で長時間にわたって観測することが、従来の地上からの観測ではなかなか実現できていなかった。

そこで「ひので」の登場である。「ひので」に搭載された可視光磁場望遠鏡 (Solar Optical Tele-

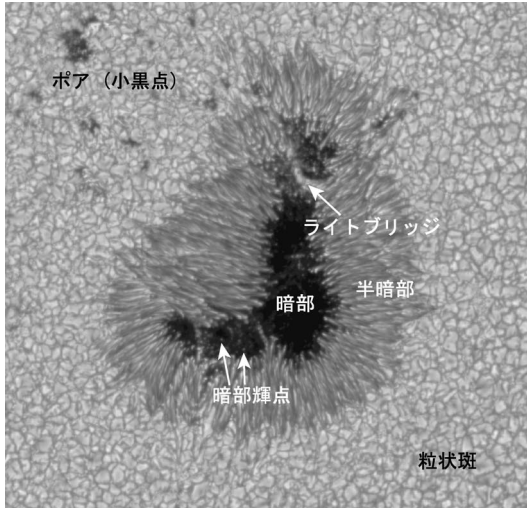


図1 「ひので」SOTで観測した黒点(2007年5月3日)。形が日本列島に似ていると思いませんか? 黒点の大きさは地球の約3倍。その中に微細な構造がたくさん存在している。

scope; SOT) は、天候や大気の揺らぎの影響を受けない宇宙空間から、高解像で長時間にわたる連続した観測が実現できる世界で唯一の望遠鏡である。「ひので」が観測した黒点のスナップショット(図1)をご覧ください。黒点やその周辺にある、微細な構造がとらえられていることがわかる。暗部を取り囲む半暗部は細い筋状の構造(フィラメント)から構成されていること、暗部内に多数の小さな点(暗部輝点)が存在すること、暗部を二つに分割している明るい帯(ライトブリッジ)が精細にとらえられていることがわかる。また黒点の周囲には、半暗部を伴わない小黑点(ポア)が散在しており、黒点の周囲にも強力な磁場が存在していることを示唆している。

「ひので」の売りの一つは、多数の連続したスナップショット画像をつなげることで、動画を作成することができる点である。磁場構造や対流の時間発展を追跡するのに威力を発揮する。その一例として、2006年11月に太陽表面に現れた活

動領域(NOAA 10923と名づけられた)の中の黒点を、可視連続光で6日間にわたって観測した動画<sup>\*1</sup>をご覧ください。この黒点は、大きさが5万kmを超えるかなり大きなもので、観測期間中は安定に存在していた。しかし、「ひので」のもつ高解像度により、黒点内部や周囲が絶えず変化し続けている様子がとらえられている。暗部と半暗部の境界では、半暗部フィラメントの付け根や暗部輝点が暗部の中に侵入していく様子がとらえられている(以下で詳しく説明)。黒点の周囲では、粒状斑として現れる対流が活発に起こっており、その中で、ポアが発生したり消えたり、また黒点から遠ざかるように移動しているのがわかる。黒点周辺は、対流と磁場が複雑にからみ合う極めて興味深い場所なのである。

## 2. 黒点の崩壊過程—ライトブリッジ—

ここでは黒点の崩壊過程にスポットをあてる。黒点の崩壊過程の一つとしては、Moving Magnetic Features (MMF) が寄与している可能性が知られている。これは、黒点から周囲に向かって、小さな磁極がほぼ放射状に移動する現象である<sup>\*2</sup>。黒点の崩壊期に観測される、もう一つの重要な現象が、ライトブリッジである。ライトブリッジは磁束をばらばらに分割していく現象である。周囲の暗部と比べて明るい帯状の構造であり、すなわち、対流による熱輸送が働いており、温度が暗部よりも高くなっている。極めて磁場の強い暗部の中に、どのように対流によってガスが供給されるのか、これがライトブリッジ、しいては、黒点の崩壊メカニズムを解明する鍵となる。

再度、2006年11月に観測された黒点をご覧ください。この黒点の観測で特徴的なのは、暗部の中央西側(右)から東側(左)にかけて、ライトブリッジが形成される様子がとらえられてい

\*1 [http://hinode.nao.ac.jp/Column/HSC\\_SciCol\\_02/sunspot\\_movie.mpg](http://hinode.nao.ac.jp/Column/HSC_SciCol_02/sunspot_movie.mpg)

\*2 「ひので」を使ったMMFの詳細な研究については、久保ら<sup>2)</sup>を参照。

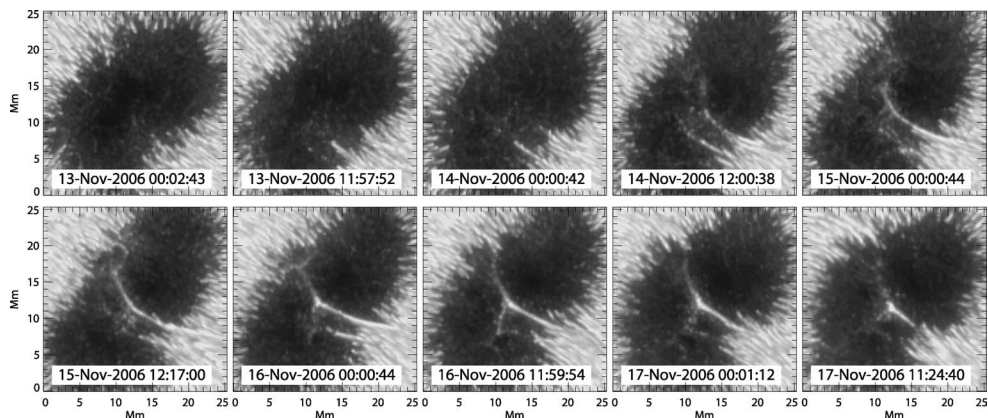


図2 「ひので」SOTが2006年11月13-17日に観測したライトブリッジ形成の様子. [http://hinode.nao.ac.jp/Column/HSC\\_SciCol\\_02/sunspot\\_movie\\_zoom.mpg](http://hinode.nao.ac.jp/Column/HSC_SciCol_02/sunspot_movie_zoom.mpg)にあるムービーと併せてご覧いただきたい.

る点である<sup>3)</sup> (図2). このような高い解像度で数日にわたって連続的にライトブリッジの形成過程がとらえられたのは、世界初である<sup>3)</sup>. 黒点暗部はどれも真っ暗というわけではなく、大きさおよそ 200-300 km の暗部輝点 (umbral dot; UD) と呼ばれる、比較的明るい小さな領域が無数に存在している<sup>4)</sup>. 特に顕著なのは、暗部と半暗部の境界付近に見られる暗部輝点 (ここでは周縁部 UD と呼ぶ) である. 半暗部フィラメントの付け根 (つまり暗部側の端) が暗部内に侵入していく現象とともに、半暗部フィラメント付け根から暗部輝点が発生し、暗部のほうへと移動し見えなくなる. これが暗部と半暗部の境界で絶えず発生しているのである. 一方、暗部の中心に近い場所にも、暗部輝点は存在している. ここではそのような暗部輝点を中央部 UD と呼ぶ. 周縁部 UD と比較すると明るくはないが、暗部の中に広く分布しており、それが約 0.1 km/s の速度でゆっくりと循環するように運動している.

この研究の核心は、ライトブリッジが形成される段階であるが、まず、すぐに気づくのは、暗部

と半暗部の境界から多数の暗部輝点が断続的に出現し、あたかも線路があるかのように、出現した暗部輝点が暗部内へ次々と侵入していくことである. たくさんの暗部輝点が数珠つなぎに並ぶことで、最終的にライトブリッジへと成長する様子にとらえられたのである. この暗部輝点の運動をより詳しく調べるために、ライトブリッジに沿って、可視連続光の明るさの時間発展を図示したのが図3である. 半暗部と暗部の境界では常に周縁部 UD が 0.7 km/s で暗部に侵入していく現象が観測される. しかし、2,000 km から 3,000 km 暗部内に侵入すると、周縁部 UD は消えてしまい、ライトブリッジにはならない. ライトブリッジ形成に関与している暗部輝点は、暗部への侵入速度が周縁部 UD とは明らかに異なっており、1 から 2 km/s の速度をもち、より暗部の深いところまで侵入している (特に図3(b)を見るとその違いがよくわかる). その侵入速度の違いから高速度 UD と呼ぶ. 高速度 UD は暗部内のあるところまで侵入すると、徐々に減速する. 次々にやってくる暗部輝点が密に並んだ状態になり、ライトブリッジ

\*3 黒点暗部を拡大した動画 [http://hinode.nao.ac.jp/Column/HSC\\_SciCol\\_02/sunspot\\_movie\\_zoom.mpg](http://hinode.nao.ac.jp/Column/HSC_SciCol_02/sunspot_movie_zoom.mpg) もご覧いただきたい.

\*4 「ひので」を使った暗部輝点の詳細な研究については、北井ら<sup>4)</sup>を参照.

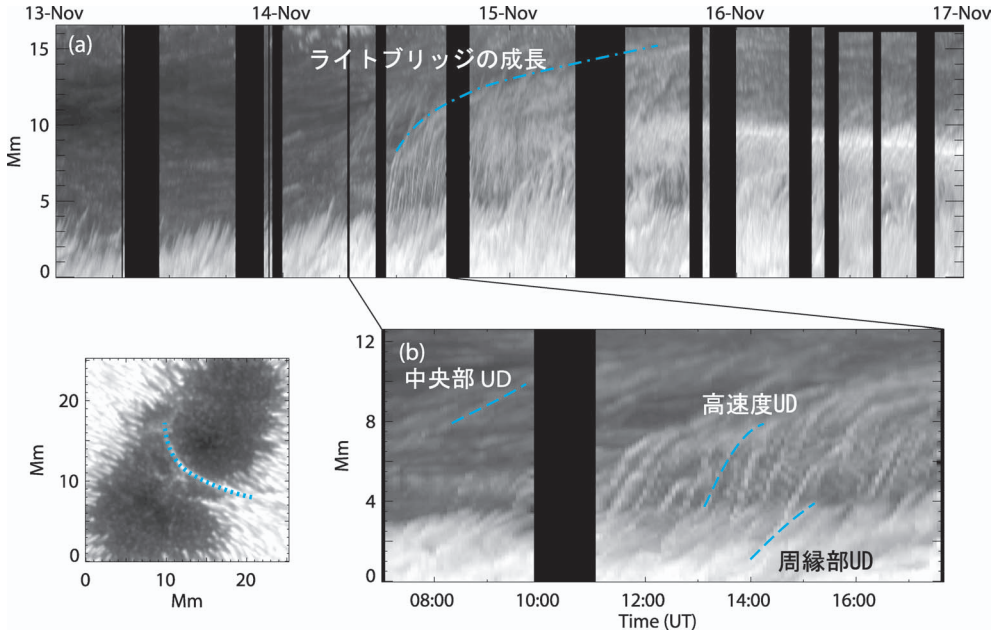


図3 ライトブリッジ（左下図の点線）に沿った連続光強度の、4日間にわたる時間発展 (a) と、ライトブリッジ形成初期段階を拡大したもの (b)。多数の暗部輝点が半暗部（下側）から暗部（上側）に向かって移動しているのがわかる。図中の縦の黒縞領域はデータが取得されていない時間帯。

となる。

さらに、高速度 UD が出現しライトブリッジが形成されるより以前（11月14日11 UT より前）の様子を見てみる。形成前でも、あまり明るくない中央部 UD が無数に存在しているが、ライトブリッジが後に形成される場所では、中央部 UD はやはり西から東（右から左）に運動していることがわかった。図3を見ると、中央部 UD の運動はライトブリッジ形成の約1日前から存在しており、その速度は、約0.1 km/s からライトブリッジ形成期に向けて徐々に速くなり、最終的には0.5 km/s 程度にまでなっている（図3(b)）。この中央部 UD の運動は、ライトブリッジ形成の前兆現象であると考えられ、これまで知られていなかったものである。

また、ライトブリッジが形成された後（11月15日以降）を見てみると、ライトブリッジはより明るく発達していることがわかる。とくに半暗部の

近傍ではそれが顕著であり、後述する光球磁場ベクトルの観測と合わせて見てみると、半暗部フィラメントが暗部のより内側から生えているような構造が発達しているのである。その後の進化であるが、図3に示した時間帯以降、ライトブリッジはこれ以上発達せず消滅してしまった。他の黒点では、ライトブリッジによって暗部が完全に二つに分裂する場合もあり、黒点やライトブリッジの個性によってその進化は異なってくる。どのような条件のときに黒点を分割するまでライトブリッジが発達できるかについては、さらなる研究が必要である。

### 3. ライトブリッジ内の物理量

「ひので」SOT のもう一つの（実は最も大切な）特徴は、偏光分光観測によって、光球における磁場や速度を測定することができる点である。精度の高い偏光分光観測には、単なる撮像観測と比較

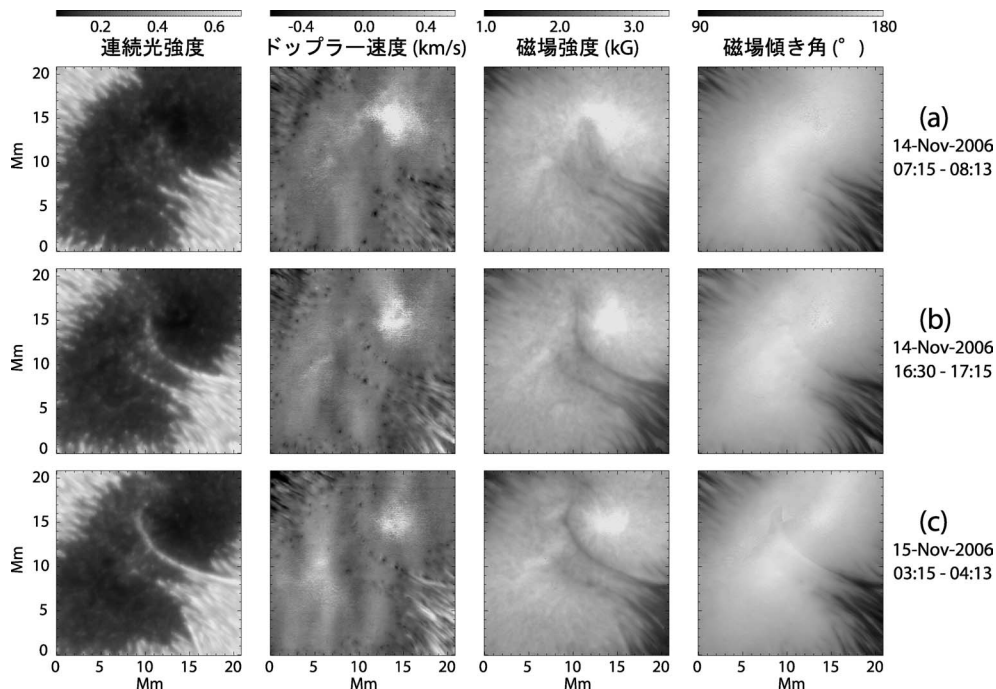


図4 「ひので」SOTの偏光分光装置で観測した、黒点内の連続光強度(左)、ドップラー速度(左中)、磁場強度(右中)、磁場傾き角(右)の空間分布。ドップラー速度は正は赤方偏移、すなわち下降流、負は青方偏移、すなわち上昇流を表す。磁場傾き角は $90^\circ$ が表面に水平、 $180^\circ$ は表面に垂直下向きの磁場を表す。ライトブリッジに沿って、磁場強度が弱くなっていることがわかる。また、暗部輝点では上昇流が観測されている。

して、長い積分時間を要するため、大気揺らぎの影響を受ける地上の観測では、高い解像度を達成することがなかなか難しい。「ひので」ではそれが簡単に達成されるのである。図4が、実際に偏光分光観測によって得られた黒点暗部内の、ライトブリッジ形成前(a)、形成中(b)、形成後(c)における、連続光強度、ドップラー速度、磁場強度、磁場傾き角<sup>\*5</sup>の2次元マップである。大きさ300 kmの暗部輝点が、空間的に分解されているのがわかる。

ライトブリッジ形成前(図4(a))において、連続光強度ではライトブリッジがまだ発達していないが、磁場強度のマップを見ると、あたかもライトブリッジのように、磁場強度が周囲よりも弱く

なった構造がすでに存在していることがわかる。このときは、ライトブリッジ形成の前兆現象である中央部UDの移動が観測され始めた段階であり、中央部UDはこの磁場強度の弱い領域に沿って移動していると考えられる。多数の高速度UDによるライトブリッジ形成が進行している段階(図4(b))では、磁場強度が弱い帯状の構造がよりはっきりと発達している。また、特徴的な点として、高速度UDは0.2-0.5 km/sの上昇流を伴っているものが多いことがはっきりと判別できる。さらに、形成後(図4(c))の段階になると、水平な磁場(磁場傾き角のマップで黒い領域)をもった細かいフィラメント状の構造がライトブリッジの中ほどから伸びていることがわかる。これは、半

\*5 表面の法線から測った角度。傾き角は $90^\circ$ は表面に水平、 $180^\circ$ は表面に垂直下向きの磁場を表す。

暗部のフィラメント構造と同一のものであると考えられる。ライトブリッジが形成されることで、半暗部フィラメントが暗部のより内側からも現れるようになるのである。

#### 4. ライトブリッジ形成のメカニズム

暗部内光球近傍では、ガス圧や対流運動と比較して、磁気圧の方が圧倒的に優勢（つまり、プラズマ $\beta < 1$ ）である。よって、磁場が強いところでは、対流による熱輸送が強く抑制され、温度が低くなる。しかし、光球下へいくと、ガス圧が磁気圧よりも優勢な状態（プラズマ $\beta > 1$ ）になっていると考えられている。つまり、黒点の下では対流が活発に起こっている。暗部輝点やライトブリッジは、その光球下の対流の一部が、磁力線を掻き分けて表面付近まで上昇してきて、顔を出している現象である（図5(a)）。この上昇流の部分は、周囲よりも磁場強度が弱く高温なガスを伴っているはずである（でないと、対流が上がってこられない）。今回「ひので」によって観測された、暗部輝点（特に、高速度UD）の特徴はこの描像と合致している。すなわち、黒点下の対流が光球まで上昇して来られるかどうか、ライトブリッジ形成において重要なのである。

暗部輝点、とくに、周縁部UDや高速度UDは半暗部フィラメントの付け根から出現する。このメカニズムはまだよく理解されていない。一方、半暗部フィラメントの付け根が暗部へと移動する現象は、水平な磁束管が光球下から浮上してくるモデルで説明される<sup>5)</sup>。半暗部には、エバーシェッド流と呼ばれる水平で外向きのガスの流れが存在することが観測的に明らかになっている。このエバーシェッド流は、磁束管に沿って光球下から熱いガスを運んでくるもので、その浮力によって水平な磁束管は浮上すると考えられている<sup>\*6</sup>。この水平磁束管の浮上現象は、周囲の環境

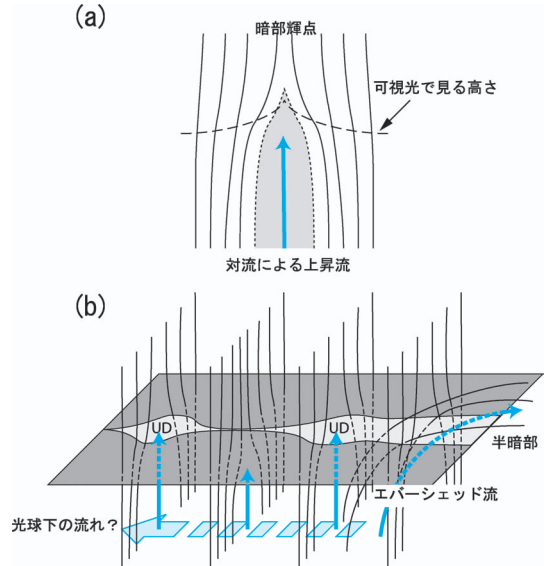


図5 暗部輝点の断面図 (a) と、それが数珠つなぎになってできるライトブリッジの模式図 (b)。光球下の対流が磁力線を掻き分けて上昇してきて、光球に顔を出してできるのが暗部輝点。その上昇流は周囲の暗部よりも磁場が弱く高温なガスを伴っている。

にも影響を与え、密に寄せ集まった暗部の磁力線に隙間を作るはずである。光球下から対流が上昇しやすくなり、暗部輝点が半暗部フィラメントの付け根付近で出現できるようになると考えられる（図5(b)）。

ただし、上述のメカニズムは暗部と半暗部の境界の至る所で起きる可能性のあるものであり、ライトブリッジが形成されるためには十分でない。その鍵は、「ひので」による観測で見つかった前兆現象、つまり、中央部UDの移動現象にあると考えられる。ライトブリッジが形成される場所には、光球下にはすでに磁力線の裂け目構造が存在しており、それに沿って、暗部を横切るような流れが光球下に存在している可能性が有力であると考えている（図5(b)）。実際に、日震学によって光球下で黒点を横切る流れが検出された例もあ

\*6 半暗部のエバーシェッド流についての研究は一本ら<sup>6)</sup>を参照。

る<sup>7)</sup>。光球下に存在する磁力線の裂け目では、対流が活発に起こるので、その一部は光球まで上昇し、中央部 UD として観測される。対流が光球まで上昇してくると、磁場強度がより弱くなり、対流がより上昇しやすくなる。このようなサイクルによって、光球下の磁力線の裂け目が発達し、ある臨界状態まで発達すると、急激にライトブリッジが形成されるようになるのである。

「ひので」SOT による高解像度観測によって、半暗部フィラメント、暗部輝点といった黒点内微細構造の性質がより詳しく観測できるようになってきた。しかし、プラズマと磁場が複雑に相互作用することで形成される、これらの構造の起源を理解することはまだできていない。近年、大規模な電磁流体シミュレーションが活発に行われるようになっており、計算機の中で黒点を作る試みもなされているが<sup>8), 9)</sup>、まだ黒点全体を作るには程遠いのが現実であり、今後の発展が期待される。

ライトブリッジの形成は、彩層(1万度程度)やコロナ(100万度以上)といった、光球より上空の大気の加熱とも関係している可能性が指摘されている。実際に、ライトブリッジ上空の彩層が定常的に明るくなる現象<sup>10)</sup>や、サージと呼ばれる彩層プラズマの噴出(ジェット)現象<sup>11)</sup>が報告されている。また、ライトブリッジ形成に伴って、100万度プラズマを有するコロナループが出現する例も観測されており<sup>12)</sup>、プラズマ加熱とも関連している可能性が示唆されている。つまり、光球下の対流が光球に現れて黒点暗部を二つに分割するのみでなく、磁気エネルギーの一部を散逸させる過程としてもライトブリッジは重要である可能性がある。ライトブリッジ上空には、磁力線のつながり方が不連続になる面(磁気セパトリティクスと呼ばれる)が形成され、電流の散逸、磁気リコネクションが発生しやすくなっているかもしれない。

今後、同じく「ひので」に搭載されている、極端紫外線撮像分光装置(EIS)やX線望遠鏡(XRT)によるコロナの観測と比較することで、プラズマ加熱過程にも迫ることができるはずである。

## 参考文献

- 1) Solanki S. K., 2003, A&ARv 11, 153
- 2) Kubo M., et al., 2007, PASJ 59, S607
- 3) Katsukawa Y., et al., 2007, PASJ 59, S577
- 4) Kitai R., et al., 2007, PASJ 59, S585
- 5) Schlichenmaier R., Jahn K., Schmidt H. U., 1998, A&A 337, 897
- 6) Ichimoto K., et al., 2007, PASJ 59, S593
- 7) Zhao J., Kosovichev A. G., Duvall T. L., 2001, ApJ 557, 384
- 8) Schussler M, Vogler A., 2006, ApJ 641, L73
- 9) Heinemann T., et al., 2007, ApJ 669, 1390
- 10) Berger T. E., Berdyugina S. V., 2003, ApJ 589, L117
- 11) Asai A., Ishii T. T., Kurokawa H., 2001, ApJ 555, L65
- 12) Katsukawa Y., 2007, ASP Conf. Ser. 369, 287

## Formation Process of a Light Bridge Revealed with HINODE SOT

Yukio KATSUKAWA

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

Abstract: The Solar Optical Telescope (SOT) on-board HINODE has enabled us to continuously observe fine features created by magnetic fields on the solar surface, and is expected to shed light on longstanding puzzles on a sunspot. Here presented is an observational study on formation process of a light bridge. A light bridge is a photospheric structure dividing a sunspot umbra into two parts, and provides implications on how strong magnetic flux in a sunspot is broken up by convection.