

「ひので」可視光・磁場望遠鏡10年の成果

末松 芳法

〈国立天文台 〒181-8588 東京都三鷹市大沢2-21-1〉

e-mail: suematsu@solar.mtk.nao.ac.jp



2006年10月末からの科学運用開始以来、「ひので」可視光・磁場望遠鏡は、太陽下層大気の連続した今までにない高分解能、高精度ベクトル磁場データを提供し続けている。「ひので」が掲げた科学目的：上層大気の成因、エネルギーの伝播過程、電磁流体现象；とりわけ磁力線再結合過程などの理解について、10年間でどこまで達成されたかをまとめる。

1. 可視光・磁場望遠鏡の科学目的

「ひので」衛星¹⁾は、太陽光球-コロナ間の相互関係を理解するため、(1) 太陽彩層・コロナの成因、エネルギーの伝播と散逸・加熱過程の理解、(2) 光球の微細磁場構造と上空コロナ磁気活動との結合過程の理解、(3) 彩層・コロナでの電磁流体现象、とりわけ磁力線再結合の素過程などの解明を目的として設計された。このため搭載装置には、温度4,000-6,000度の光球から、約10,000度の彩層、数百万度に至るコロナの物理情報を、現象の時間スケール内に、かつ解像できる空間分解能でデータを取得する性能が求められた。温度が大きく変わる太陽大気をすべてカバーするため、「ひので」には三つの観測装置が搭載された²⁾。そのうちのひとつ可視光・磁場望遠鏡³⁾(以下、SOTと略)には、光球・彩層で起こる現象の物理診断、特に地上観測では困難な光球磁場構造の高解像度・高精度・連続観測が要求された。光球微細磁場構造を解像できる0.2-0.3秒角の空間分解能を達成する口径50 cmのグレゴリアン式望遠鏡⁴⁾と像安定化装置⁵⁾を備える。焦点面は、光球・彩層のダイナミック現象を捉える広帯域フィルター撮像装置(BFI)、その磁場・速度場を観測する狭帯域フィルター撮像装置

(NFI)³⁾、光球磁場高精度観測に適した分光偏光装置(SP)⁶⁾⁻⁸⁾の三つの観測装置で構成される。SOTは2006年10月末の観測開始以降10年近く安定して、連続した今までにない高分解能、高精度ベクトル磁場データを提供し続けている。特にSPの光球磁場データは10年経った今でも、地上の口径1.5 mクラスの観測を凌駕している。

太陽外層大気は、大部分が磁力線構造を反映した筋状構造からできており、大気プラズマの加熱や加速は磁場に関係した現象である。現象のエネルギーの源は、光球下で起こっている対流の運動エネルギーに発しており、光球から外層に伸びる磁力線を介して、エネルギー・質量が輸送されていると考えられる。このため、エネルギーの入力場所である光球での磁場の生成・発展過程、対流運動との相互作用を詳しく調べることが「ひので」が掲げる問題解明のカギとなる。

SOTの科学成果は膨大であり、すべてを紹介することはできないが、代表的なものを簡単に列挙するだけでも、次のようなものがある。(1) 光球面上至る所に現れる短命の小スケール水平磁場構造の発見とそれが対流起源(局所ダイナモ)であること(2章)、(2) 黒点以外の小さな磁場構造が対流の動圧を超える磁場強度(1,000 Gauss)に達する機構の解明⁹⁾、(3) 彩層・コロナの

ジェット、活動領域プロミネンスの筋構造の横揺れ¹⁰⁾(アルペン波)の発見とその輸送エネルギーがコロナ加熱に必要な量に匹敵すること(3章)、(4)黒点内や黒点周辺の彩層で磁力線再結合と考えられるジェット現象が頻発していることの新発見(3章,8月号の勝川の記事)、(5)発見から100年来謎であった、黒点半暗部を音速近いスピードで外側に流れるエパーシェッド流の起源解明¹¹⁾、(6)黒点暗部、半暗部、その形成・崩壊に伴う周辺領域の磁場・速度場構造の新知見(9月号の久保記事)、(7)11年の太陽活動周期を生み出す大局ダイナモ機構の理解に重要な極域の磁場構造と極性反転過程の新知見(9月号の塩田記事)、(8)プロミネンスの形成につながるらせん状磁場構造の浮上過程の発見¹²⁾、(9)静穏領域プロミネンスの上昇渦現象(レーリー・テラー不安定)の発見¹³⁾、(10)フレアを引き起こす原因と考えられる小規模磁気構造の同定(9月号の伴場記事)、などである。

太陽面の大部分を占める静穏領域では、直径約30,000 km程度の対流構造である超粒状斑境界にネットワーク状に分布する磁場構造が顕著であり、上層大気活動現象もこの場所で顕著である。したがって、上層大気の成因、エネルギーの流れに関して中心的な観測対象となる。SOTの数多くの成果の中でも、黒点外の強い磁場領域に関係する内容を、2章と3章で概略する。

2. 静穏領域光球磁場構造の解明

太陽面で磁場が顕著なのは、黒点・白斑などからなる活動領域で、その磁場は対流層での大局的な流れ場によるダイナモ機構(大局ダイナモと呼ぶ)で作られていると考えられ、磁場の増幅は約11年の活動周期を示す。活動領域の磁場は、ほぼ東西方向に向いた双極磁場で現れ、先行(西側)黒点成分が赤道方向に、後行(東側)黒点成分が極域に移動していく様子が見られる。この磁場の大局的な移動は、対流による磁場の乱流拡散と、

子午面流で説明されており、差動回転(赤道で速く高緯度ほど自転が遅い)により作られるトロイダル(緯度方向)成分をポロイダル(経度方向)成分に変換させる重要な機構と考えられている。

この大局ダイナモ起源の磁場に対し、SOTが発見した小スケールの水平磁場およびそれに関する一連の観測研究は、局所ダイナモの存在を明らかにし、静穏領域の磁場形成・分布の仕組みを一新した。静穏領域の光球の磁場は1秒角(太陽面で720 km)以下の小さなスケールに集中しているため、地上からの観測では難しく、特に精度が要求される水平成分磁場の詳細がわからなかった。SOT-SPの安定した高解像度・高精度の分光偏光観測により、ネットワーク内部に存在する小スケールの磁場(以下INと略)や速度場の詳細が明らかとなった¹⁴⁾⁻²⁴⁾。さらにネットワーク磁場(NEと略)とINの関係もわかってきた。

小スケール水平磁場は、太陽面の至る所に現れる(図1)。その特徴は、1,000-2,000 kmサイズの乱流対流胞である粒状斑の縁に現れ、短命であり、水平磁場の強さがエネルギー等分配則から決まる約400ガウス程度であることである¹⁶⁾。弱い視線方向磁場も至る所に現れ、反対極性が比較的接近して分布しており磁束量が釣り合っている^{24), 25)}、これらのことから至る所に現れる小スケール磁場は、光球下部の対流運動により磁場が生成・増幅される局所ダイナモ起源が示唆される。

SOTのさらなる発見は、局所ダイナモ起源の磁場が、単にその場で増えたり減ったりしているだけではなく、静穏領域の基本構造であるネットワーク磁場(NE)の起源として有力視されるようになり、静穏領域の描像が一新されつつあることである。これまで、NEの起源は活動領域といった大局ダイナモ起源の磁場が分散・拡散して、超粒状斑境界まで運ばれたものだと考えられていた。しかし、SOTの高精度連続磁場観測は、INからNEへ十分な磁束が供給されていることを明らかにした。INで出現した磁気要素は、合

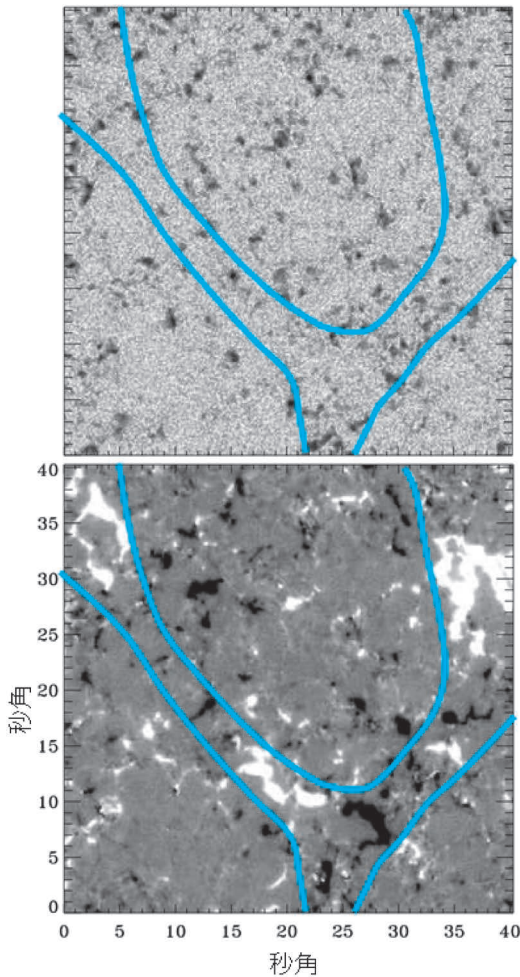


図1 SOT-SPで明らかにされた静穏領域の弱い磁場分布¹⁷⁾。青線はネットワーク境界を示す。鉛直方向磁場（下図、白はN極、黒はS極）と水平方向成分（上図）。目盛は1秒角（720 km）。

体・分離・拡散など、複雑な変化を示す²¹⁾が、およそ半分の磁束がNEへ供給されていることがSOTによる38時間の連続磁場観測でわかった^{22), 23)}。INからNEの磁束供給量は、それまで言われていた量よりはるかに大きく、磁束収支からすると18-24時間程度でNEはIN起源の磁場にすべて置き換わってしまうと考えられる。

小スケールのIN磁場が、大局ダイナモ磁場とは無関係であることは、太陽面でのIN磁場の分布が太陽周期活動（大局ダイナモ）に連動した系統

的な周期変化がないことから示された²⁴⁾⁻²⁶⁾。なお例外は、活動領域出現帯の緯度近くに見える活動領域からの拡散磁場成分、これが行き着く極域での対応した単極磁場成分（NEでは強い磁場が塊としてみえる磁気パッチ^{27), 28)}）には周期性があり、大局ダイナモ起源で説明される。これらの結果はSOTが蓄積した活動極小期から極大期に渡る高精度データの詳しい解析から導かれたものである。IN磁場の生成・消滅過程が、局所ダイナモによること、それとNE磁場形成との関係がSOTの観測により定量的にも示されたことは大きな成果であり、大局ダイナモ機構における拡散を通じたトロイダル成分からポロイダル成分への変換過程を理解するうえで重要な情報を与えている²⁹⁾。

IN磁場の磁束の小さいものは水平磁場の寄与が大きいく、磁束の大きい成分はNE磁場と同様鉛直に立ったキロガウス磁場（1,000ガウスを超える）からなっていることも見えてきた²⁴⁾。キロガウス磁場は磁気浮力で鉛直に立ち、圧力平衡から上層に伸びた磁力線構造をもつと考えられるため、上層大気の成因、エネルギー輸送を考える上で重要である。

局所ダイナモだけでは400ガウス程度の磁場しか生成されないはずで、キロガウス磁場の存在は不思議であるが、この問題はE. N. Parkerにより提唱された対流崩壊機構でよく説明でき、実際、SOT-SPの観測により確定的になった⁹⁾。

ただし、キロガウス磁場あるいはその塊である磁気パッチ形成に至る前の磁束のかき集め過程は、いまだ不明で、SOTでも検出できない磁場の存在を示唆している。不思議なことに、太陽面では単極出現、単極消滅が頻繁に起こっている。この説明として、実際は双極磁場出現であるが、一方の極性が広い面積を占めており、検出されない可能性もある。しかし、SOT-NFIの磁場マップを同極の磁気要素を位置合わせして多数のデータを重ね合わせても、周りに反対極性の磁場が見えてこないことから、双極磁場出現は否定されて

いる^{30),31)}。

一方、単極出現に伴う収束流がSOT-SPの極域、連続観測で発見されており³²⁾、キロガウス磁場あるいは磁気パッチは、検出限界以下の弱い分散した磁場が収束流で寄せ集められ、収束流が磁場の乱流対流による拡散効果を上回る場合に、形成・維持されると推測される。SOTで検出できていない磁場の検出、その磁場形成・消滅の役割は、DKIST, SOLAR-Cといった次世代大口径太陽望遠鏡に残された課題である。

以上のように、光球での小スケール磁気要素の分布や磁場形成、消滅過程が詳しくわかってきたが、磁気エネルギーの上層大気への輸送については、キロガウス磁場の内部構造・時間的振る舞いが一部でしか見えておらず、まだ観測的証拠が不十分な状況である。

SOT-SPによる小黒点での磁気波動の検出により、上層に向かうエネルギーフラックスが静穏領域の加熱に十分なことを示す先駆的研究³¹⁾があるが、静穏領域の弱い磁気要素では、光球での磁気波動の検出が難しく、彩層で見える筋構造の横揺れを磁気波動とみなして、間接的に磁気エネルギー流速を見積もるにどまっている(次章参照)。

先に述べたSOTで発見された小スケール水平磁場に伴う、磁気エネルギー流束(ポインティングフラックス)はコロナを加熱するのに十分な量があると見積もられる¹⁶⁾が、この水平磁場が光球から彩層さらにその上層まで浮上している観測的証拠、あるいはキロガウス磁場と相互作用している証拠は得られていない。SOT-BFIで観測された粒状斑の時間的形狀変化から水平速度場のパワースペクトルを求め、これを磁気流体数値シミュレーションの下部境界条件として、アルベン波の上層大気への伝播を計算してやると、静穏領域の彩層やコロナ、コロナホールを加熱するのに十分なエネルギーが輸送可能であるという結果も得られている^{34),35)}。

これら磁気波動加熱に対し、光球の磁気要素の

運動が上層の磁力線をゆっくりねじり、電流が流れることで加熱する機構も考えられる。これを確かめるため、活動領域ブラージュ(彩層の明るい領域)で、SP観測による光球ベクトル磁場とNFI観測による磁気要素の水平運動を導出し、磁気エネルギー流速を求めてやると、正味上向きで活動領域コロナの加熱に十分な量が得られている^{36),37)}。エネルギー流速と彩層のCa II H画像での明るさの相関が良いことから³⁶⁾、加熱機構として有望視されている。一方、同様の手法で求めた磁気エネルギー流束に、温度の高いコロナループと低いループで違いがないこと³⁸⁾から、まだ見えていないエネルギー源があることも示唆されており、精度を高めたデータ解析が今後の課題である。

3. 彩層ダイナミクスの解明

太陽大気の平均モデルでは、彩層は高さ2,000 km程度の静水圧平衡大気であるが、太陽縁で見える彩層は、背の高いジェット構造で構成されている。彩層に普遍的に見えるジェット現象はスピキュールと呼ばれ、ネットワーク磁場でコロナまで伸びた磁力線に沿って運動している。スピキュールは、彩層の起源の理解だけでなく、コロナへの通り道として質量・エネルギーの流れを研究するうえで重要な対象である。

スピキュールは、高さ4,000-10,000 km、幅800 km程度、見掛けの速度20 km/sで、寿命5-15分というのが今までの地上観測からよく知られたパラメータであった³⁹⁾。これに対し、SOTの高分解能観測は、より高速(30-110 km/s)で短命(50-150秒)なスピキュールが存在することを明らかにし、今まで考えられた以上に彩層下部で激しいエネルギー解放が起こっていることを示した。これを強調するため、今まで知られていた特徴をもつスピキュールをタイプIと呼び、高速・短命なものはタイプIIと呼ばれる³⁹⁾。タイプIは上昇・下降運動を示し、赤道帯、活動領域近傍に多く見られ、タイプIIは上昇後見えなくな

り、極域コロナホール領域に多く見られ、コロナの温度・密度に依存して見掛けの運動が違うことを示唆している。

SOT観測を契機に彩層分光観測に主眼を置いて打ち上げられたIRIS衛星の観測で、SOTのCa II Hフィルターで上昇後見えなくなるスピキュールも、より光学的に厚いMg II kフィルターや、より高温で形成されるスペクトル線のフィルター観測では上昇の続きと下降運動まで見えてきており⁴⁰⁾、見掛けの運動というよりも、加熱のされやすさがタイプ間の違いとなっていることがわかってきた。

SOTで発見された、スピキュールやプロミネンスの筋構造に見られる波動は、磁力線を伝わる横波(キンク(折れ釘)モード)と解釈されているが、単純にアルペン波と仮定することが多い^{39), 40)}。Ca II Hフィルターによる高時間分解能(1.6秒間隔)から、スピキュールを伝わる短周期、解像度以下の小振幅の横揺れの進行波が見つかった(見つかった波動の半分近くは、上方伝播であったが、残りは下方伝播、定在波)。一つのスピキュールの振動にはこれらの伝播形式が混在しており、波動の反射が起こっていると考えられる⁴¹⁾。スピキュールには3-5分周期の大振幅の横揺れが顕著である⁴²⁾が、波長がスピキュールよりもはるかに長く、進行波と定在波の区別ができていない。仮に進行波とすると、静穏領域コロナを加熱するのに十分なエネルギー流速である⁴²⁾。上に述べた短周期の進行波のエネルギー流速はこれより小さいが、スピキュール上空のみのコロナを加熱するのに十分なエネルギーが見積もられている⁴¹⁾。

太陽緑のスピキュールに関しては、二重筋構造の発見⁴³⁾もSOTの高分解能観測の成果である(図2)。スピキュールの幅は1秒角程度と十分小さいが、さらに小さい構造(0.1秒角程度)があるのは驚きである。二重筋構造の解釈としては、スピキュールの外側のみが放射しているとすなわち鞘構造説と二つの分離した筋構造説がある。同じよ

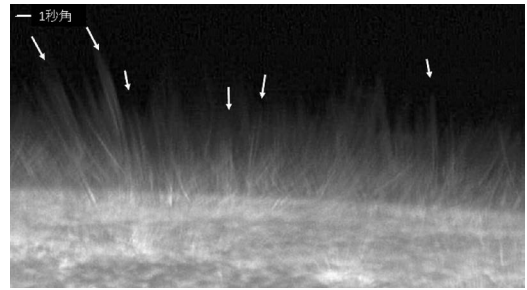


図2 太陽縁彩層スピキュールのSOT-BFI Ca II H線フィルター像。スケールは1秒角(720 km)。矢印は二重筋構造が顕著なスピキュールを示す。

うな物理状態であるプロミネンスでは二重筋構造は見えないこと、また、スピキュールでは、二重筋構造が時間的に一重、二重を繰り返すものもあり⁴³⁾、分離した筋構造が軸回りに10-20 km/s程度の回転速度でスピンしていると解釈されるスペクトル線の傾きとも辻褄が合っている。

スピキュールは、太陽面上では光球の単極磁気要素に根ざしているように見え、発生機構(したがって彩層の成因)についてはいまだに謎である。SOTの找けた磁気波動、微細構造、ダイナミクス、加熱・多温度構造は、スピキュールが磁場エネルギーの解放を起源とすることを示唆する。発生機構の理解には、高分解能での彩層磁場・速度場の観測が必須であり、次世代大口径望遠鏡の実現を期待するところである。

これに対し、活動領域の彩層で、磁力線再結合機構と関係づけられるジェット現象が、SOTの高分解能で今までになくよく観測されるようになった。同様のジェットはコロナ中で発生するX線ジェットとして、「ようこう」衛星により発見されていたが、物理状態が全く異なる彩層でも頻度高くジェットが発生している。

顕著なものは黒点の周りで至る所に現れる、足元が逆Y字型に開いた逆Y字型ジェット⁴⁴⁾⁻⁴⁸⁾である。逆Y字の形状と合わせて、磁場マップで足元に双極磁場があることから、すでに表面に存在する鉛直方向に近い磁力線が Ω 型の浮上磁場と

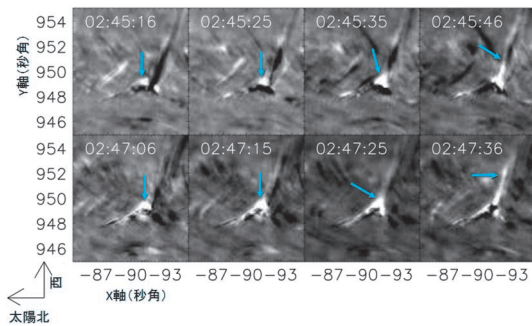


図3 黒点周りで見える彩層逆Y字型ジェットの場合⁴⁸⁾。SOT-BFI Ca II H線フィルター像で、移動時間差分を取ることで、時間変化を強調したもの。

再結合した (Ω の左右いずれかが既存磁力線と反平行) 結果、磁気張力で彩層大気が飛び出したと考えられる。また、黒点半暗部、ライトブリッジにもジェットが発見され、これは磁力線の傾きが大きく変わる境界に現れ、そこでの部分的な反平行磁力線が再結合することで説明されている(詳細は、8月号の勝川の記事)。必ずしもジェットが見えるわけではないが、水平磁力線の局所沈降により、逆 Ω ループができ、上部の反平行磁力線が再結合を起こすことで説明されるエラーマン・ボム⁴⁹⁾もある。

SOTは彩層の磁場を診断する機能がないために定量的に磁力線の再結合過程を調べることはできないが、高分解能画像により一部の磁力線構造を浮き彫りにすることができる。彩層での磁力線再結合の新しい描像を与えた面白い結果を図3に示す⁴⁸⁾。間欠的に再結合ジェットが左側足元から放出され(青色矢印、速度30–80 km/s)、上部で合体する様子が見える。1分程度の短い間欠性は、再結合域でのプラズモイド(磁力線で囲まれたプラズマ)が放出されるまでの成長時間を示す。一方、10分程度の長い間欠性も見え、これは再結合を起こすためのエネルギー蓄積時間を表していると考えられる。図3で、ジェット部で白黒が左右にずれて見えるのは、ジェットの横揺れを意味しており、再結合に伴うアルペン波(周期88

秒、振幅0.26秒角)の発生と解釈される⁴⁸⁾。再結合に伴うアルペン波の発生はSOT観測による大型ジェットでも確認⁵⁰⁾されている。

スピキュールをはじめとする波動や微細構造の変化の検出は、地上の瞬間的な高解像度観測では不可能で、散乱光の小さいSOTの安定した高解像度観測で初めて検出できたことを強調したい。

4. まとめ

「ひので」衛星の科学課題(1)、(2)の外層大気の成因、エネルギーの輸送過程の理解について、SOTは多くの重要な発見をもたらすことができた。

SOTは局所ダイナモ起源の磁場が、大局ダイナモで作られる磁場よりもはるかに多いことを明らかにした。その特性、特に上層大気への磁気エネルギーへの通り道となるネットワーク磁場(キロガウス磁場)への寄与を明らかにし、外層大気の下部境界となる磁気大気構造を定量的に与えることに成功した。

また、これら磁気要素の運動から上層へ伝わる磁気エネルギーに関しては、高解像のおかげで彩層の磁力線構造を伝播する磁気波動を検出することに成功した。さらに定量的なエネルギー流束の導出を可能とし、理論モデルや、数値シミュレーションとの詳細な比較研究が進化した。まだ証拠が不足しているが、静穏領域ネットワークでは磁気波動によるもの、活動領域のブラージュでは、磁力線の歪に関係したエネルギーが卓越している様子が見えてきている。

課題(3)の磁力線再結合機構の理解についても、彩層において変化に富んだ磁力線配置の下で再結合が起こりうることを明らかにした。これまでのコロナでの完全電離、無衝突環境での磁力線再結合に対し、彩層の部分電離、衝突環境での再結合過程の研究、また、実験室での磁力線再結合過程による再現実験⁵¹⁾まで発展している。

残念ながら、2016年2月末にフィルター撮像装

置 (FG) のカメラエレキにショート故障が発生し、回復が望めない状況であるが、SPは全く問題なく働いている。SPへ割けるデータ量が増えたおかげで、光球像、光球ベクトル磁場・視線速度場を、今までよりも頻度高く、高い空間分解能、時間分解能、広視野で観測している。また、磁場導出手法も進歩しており、像改善の手法と高さ方向の大気構造を導出する手法で高品質、高解像度の磁場、速度場、温度の光球3次元構造導出が始まっている^{52), 53)}。観測のバラエティが増えたSPデータへ新しい手法を適用することで、光球についても新たなダイナミック現象の発見と、同時に磁場構造や磁気エネルギー流速の定量評価の改善が期待できる。

謝辞

可視光・磁場望遠鏡の開発、製作、試験、科学運用は日米の多くの方々のご共同作業であり、この間、科学成果を上げるために苦勞を共にした皆様に感謝します。本稿の執筆では、編集委員の方に有益なコメントをいただき、ここに感謝します。

参考文献

- 1) Kosugi T., et al., 2007, SoPh 243, 3
- 2) 清水敏文, 2016, 天文月報109, 524
- 3) Tsuneta S., et al., 2008, SoPh 249, 167
- 4) Suematsu Y., et al., 2008, SoPh 249, 197
- 5) Shimizu T., et al., 2008, SoPh 249, 221
- 6) Ichimoto K., et al., 2008, SoPh 249, 233
- 7) Lites B., et al., 2013, SoPh 283, 579
- 8) Lites B., Ichimoto K., 2013, SoPh 283, 601
- 9) 永田伸一, 2008, 天文月報101, 506
- 10) Okamoto T. J., et al., 2007, Science 318, 1577
- 11) 一本潔, 2008, 天文月報101, 378
- 12) 岡本文典, 2008, 天文月報101, 385
- 13) Berger T., et al., 2011, Nature 472, 197
- 14) 石川遼子, 2008, 天文月報101, 630
- 15) Ishikawa R., et al., 2007, A&A 472, 911
- 16) Ishikawa R., Tsuneta S., 2009, A&A 495, 607
- 17) Lites B. W., et al., 2008, ApJ 672, 1237
- 18) Orozco Suárez D., et al., 2007, ApJ 670, L61
- 19) Centeno R., et al., 2007, ApJ 666, L137
- 20) Katsukawa Y., Orozco Suarez D., 2012, ApJ 758, 139
- 21) 飯田祐輔, 2013, 天文月報106, 134
- 22) Gošić M., et al., 2014, ApJ 797, 49
- 23) Gošić M., et al., 2016, ApJ 820, 35
- 24) Lites B., et al., 2014, PASJ 66 (SP1), S4
- 25) Jin C. L., Wang J. X., 2015, ApJ 806, 174
- 26) Jin C. L., Wang J. X., 2015, ApJ 807, 70
- 27) Shiota D., et al., 2012, ApJ 753, 157
- 28) 常田佐久, 2008, 天文月報101, 638
- 29) Hotta H., et al., 2016, Science 351, 1427
- 30) Lamb D. A., et al., 2010, ApJ 720, 1405
- 31) Lamb D. A., et al., 2013, ApJ 774, 127
- 32) Kaithakkal A. J., et al., 2015, ApJ 799, 139
- 33) Fujimura D., Tsuneta, S., ApJ 702, 1443
- 34) Matsumoto T., Kitai R., 2010, ApJ 716, L19
- 35) Matsumoto T., Shibata K., 2010, ApJ 710, 1857
- 36) Welsch B. T., 2015, PASJ 67, 18
- 37) Yeates A. R., et al., 2014, A&A 564, A131
- 38) Kano R., et al., 2014, ApJ 782, L32
- 39) Tsiropoula G., et al., 2012, Space Sci. Rev. 169, 181
- 40) Skogusrud H., et al., 2015, ApJ 806, 170
- 41) De Pontieu B., et al., 2007, Science 318, 1574
- 42) Okamoto, T. J., de Pontieu B., 2011, ApJ 736, L24
- 43) Suematsu Y., et al., 2008, in First Results From Hinode ASP conf. ser. 397, eds. Matthews S. A., Davis J. M., Harra L. K. (Astronomical Society of the Pacific, San Francisco), p. 27
- 44) Shibata K., et al., 2007, Science 318, 1591
- 45) Nishizuka N., et al., 2011, ApJ 731, 43
- 46) Singh K. A. P., et al., 2011, Phys. Plasmas 18, 111210
- 47) Singh K. A., et al., 2012, ApJ 759, 33
- 48) Yan L., et al., 2015, ApJ 804, 69
- 49) Matsumoto T., et al., 2008, PASJ 60, 577
- 50) Nishizuka N., et al., 2008, ApJ 683, L83
- 51) 西塚直人, 2013, 天文月報106, 434
- 52) Buehler D., et al., 2015, A&A 576, A27
- 53) Quintero Noda C., et al., 2015, A&A 579, A3

Ten-Year Results of Solar Optical Telescope (SOT) aboard Hinode Yoshinori SUEMATSU

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

Abstract: Since the science operation of Hinode started in the end of October, 2006, the Solar Optical Telescope (SOT) aboard Hinode has kept providing unprecedentedly high resolution and precision data of magnetized solar photosphere and chromosphere. I review the achievements by SOT observations in a first decade to the Hinode scientific goals, such as understanding the formation and heating mechanism of the outer atmosphere and basic plasma process like magnetic reconnection to be happening there.