

「ひので」による未踏の太陽極域の磁場観測

常 田 佐 久

〈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: saku.tsuneta@nao.ac.jp



太陽観測衛星「ひので」により、太陽の極域の磁場ベクトルの観測が、これまでにない解像度と精度で実施された。その結果、太陽極域は、点在する数十個の黒点なみの1キロガウスを超えるパッチ状の強磁場領域と、無数の水平磁場破片よりなっていることが明らかになった。太陽のダイナモ機構や高速太陽風の加速機構の観点から、この驚くべき観測結果について議論する。

1. 「ようこう」から「ひので」へ

1991年に打ち上げられた「ようこう」衛星は、磁気リコネクション（磁力線のつながり替え）が太陽コロナで発生し磁気エネルギーが解放されることで、フレアを含むトランジエント的な加熱現象を引き起こしていることを明らかにした。磁気エネルギーの散逸に重要な「遅い電磁流体衝撃波」が同定される¹⁾など、その観測的特長は、Harry Petschekが1964年に理論的に提唱したもの²⁾とよく整合していた。「ようこう」による観測を機に、磁気リコネクション現象は磁気プラズマの普遍的現象として認識され、多くの理論的・実験的研究が行われるようになった。「ようこう」以降、磁気リコネクションが天文学にも日常的に登場するようになった。

さて、「ひので」衛星^{3), 4)}が打ち上がったから約2年が経過した。「ひので」の観測結果から、どのような新しい概念が飛び出すのであろうか？この特集でも、その初期成果を紹介してきたが、ここで改めて、その成果の一部分を挙げると以下のようなになる。(1) 光球面上に大量の水平磁場が出現・消滅を繰り返していることが発見され、対流

起源の磁場生成が初めて確認された^{5), 6)}。(2) エクイパーティション磁場強度^{*1}を超える磁場の生成メカニズムとして、30年前に理論的に予測されていた対流崩壊現象が確認された^{7), 8)}。(3) 巨大ならせん状水平磁場が、光球下から浮上するのが発見された。らせん状磁場の浮上は、プロミネンスの形成や太陽内部におけるダイナモ機構を探るうえで、注目すべき現象である⁹⁾。(4) 光球・彩層・コロナを伝わるアルペン波が、初めて確認された^{10), 11)}。(5) 彩層や黒点半暗部でジェット現象が多発していることが発見され、磁気リコネクションがコロナのみならず彩層の多様な活動現象を担っていることがわかってきた^{12), 13)}。(6) 太陽風の光球近傍での発生源が発見された^{14), 15)}。(7) コロナループの足元で、上昇流と顕著な輝線幅の広がりが発見された。これらは、コロナ加熱機構との関連で注目すべき現象である^{16), 17)}。(8) 静穏領域プロミネンスについて、従来の説を覆すような、微細構造をもつ渦や上昇・下降流が観測された¹⁸⁾。(9) コロナの高さ方向の温度構造が、非常に高精度で求められた¹⁹⁾。(10) 黒点暗部と半暗部に関して、数々の新知見が得られた²⁰⁾。(11) 太陽の極域で、1キロガウスを超えるパッチ状の強磁

*1 磁気圧 ($B^2/8\pi$) がガス圧 ($\rho v^2/2$) に等しくなるような磁場強度 B_c 。 $B > B_c$ の場合、対流の運動エネルギーに対して磁場が支配的になっている。

場領域と無数の水平磁場片が発見された²¹⁾。

これらの成果は、(a) 全く新しい現象の発見、(b) 地上観測でその片鱗が見えていた現象の質・量ともに圧倒する形での〔再〕発見、(c) 理論的に予測されていた現象の発見〔確認〕に分けられる。そして、本稿で紹介する「ひので」による太陽の極域観測の結果は、(b) に分類されるだろうか。

2. 太陽の極域はなぜ重要か

太陽の南北極域は、(1) 高速太陽風の吹き出し口であること (6章で詳述)、(2) ダイナモ機構の要となるポロイダル磁場 (子午面内にある南北方向の磁力線) が見える場所であること (4章で詳述)、(3) 子午面環流^{*2}の沈み込み場所といった、太陽の他の部分にはないユニークな特徴がある。さらに、「ひので」により極域にジェット現象やマイクロフレアが頻発していることが発見され、極域コロナの活動性にも関心が集まっている²²⁾。

このため、太陽のダイナモ機構や高速太陽風の加速機構の解明にとって、極域の観測は欠かすことができない。にもかかわらず、これまで地上からの観測がほとんど行われてこなかった理由は、太陽端部の明るさの急激な減少〔リムダークニング〕と幾何学的な foreshortening 効果にシーイングの影響が重なって、まともなデータを取ることが難しかったことにある。また、極端に斜めから磁場ベクトルを観測するので、観測データのインバージョン (偏光線輪郭から逆問題を解くことで磁場ベクトルを求めること) が果たして可能なのか? と思われていたこともある。

3. 極域の景色

「ひので」は、2007年3月16日に太陽の南極領域を観測した²¹⁾。可視光望遠鏡の観測視野は、ちょうど極域のコロナルホールにあたる部分にある (図1)。図2 (表紙写真) に、この領域の磁場

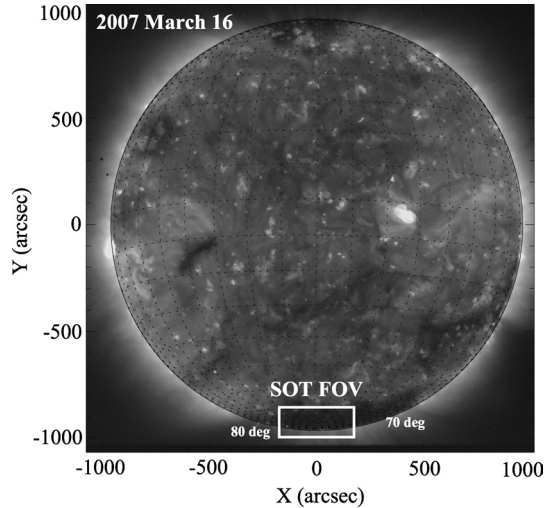


図1 「ひので」X線画像。極域観測時の可視光望遠鏡 (SOT) の視野位置を示してある。

強度マップを示す。この図は、南極の上空から眺めた図に座標変換してある。十字印で南極点を示してあり、南極とその少し向こう側まで解像されていることに注意されたい。太陽自転軸は、地球公転面に対し約7度傾いている。そのため、観測時期を選び、極が約7度こちらを向いている間隙を突くことで、光球面に対して角度にして数度から十数度の極端に斜め方向からであるが、有効な観測を行うことができることが判明した。これが、人類が初めて目にする極域の磁場景色といったらおおげさであろうか。

まず、パッチ状の構造が極域全域に見えるが、その磁場強度はエクイパーティション磁場強度を超える1キロガウスほどある。そのサイズは大きく、1秒角から5秒角 (700から4,000 km) 程度あり、ポア [小黒点] の大きさに達する。磁場のエネルギーは磁束管の疎密具合により異なり、同じ磁気フラックスでも、磁場を一様に分布させた場合より、磁束管に集中させたほうが総磁場エネルギーは高い。今回の場合、観測されたパッチ状磁

*2 対流層表層で赤道から極に向かう秒速10 m程度の流れ²³⁾。

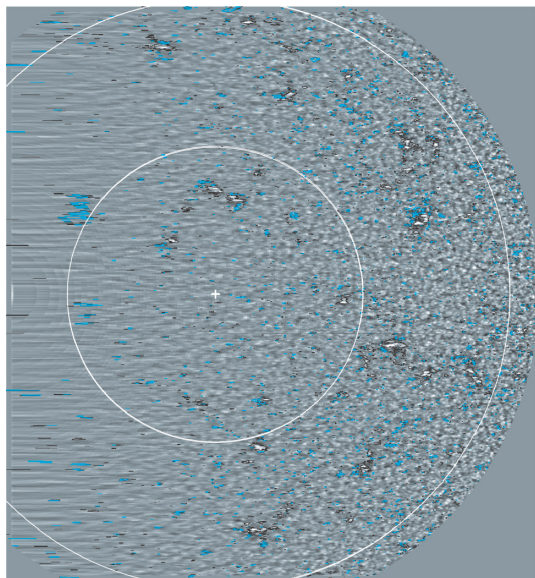


図3 南極域の白色光画像に磁場ベクトルの向きをコントラで記載している。黒は、磁場ベクトルが光球にほぼ垂直、青はほぼ水平。

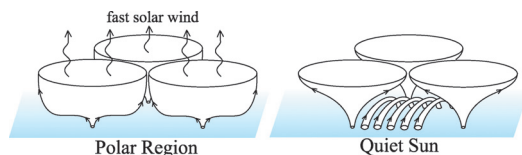


図4 極域(左)と静穏太陽(右)の磁場構造の違い(模式図)。青色の部分が光球・彩層で、極では単極性のためキロガウス磁場パッチの磁束管が光球・彩層で急激な膨張(インフレーション)を起こしている。観測された極域では約300倍のインフレーションが起きているが模式図では表現されていない。

場が薄く極域全域に広がっているとしたときと比べて、そのエネルギー差は90倍にもなる。磁場は、エネルギー状態の高いフラックスチューブ(磁束管)の形態で存在したがるようである。

また、パッチ状強磁場の他に、小さな1-2秒角の構造(図2で青色に見える)が、たくさん見えるが、その磁場の強さは数百ガウスとやや小さい。図3に、磁場ベクトルの太陽表面に対する傾きを、可視光画像上に示している(太陽の縁に近

づくにつれ、対流のセル構造が見えなくなり解像度が落ちていくのがわかる)。キロガウス磁場パッチは、黒点のように光球面にほぼ垂直なのに対して、それ以外の磁場構造は、ほとんど水平なことがわかる。この観測により、太陽極域には、点在する数十個のパッチ状の垂直な強磁場と無数の水平磁場破片よりなっていることが明らかになった(図4左)。

4. 極域磁場と大局的ダイナモ

極域と静穏太陽の磁場は異なるか?

極域の磁場は、赤道帯の黒点磁場が子午面環流に乗って、ベルトコンベヤーのように極域に輸送された結果と考えられている(flux transport dynamo)。これは、極磁場の維持と反転をもたらす機構と考えられており、ダイナモを考えるうえで極めて重要なプロセスである。極磁場が赤道帯域からの磁場の輸送の結果とすると、キロガウス磁場パッチはプラスとマイナスの両方の極性を持ち、しかもエクイパーティション磁場強度を超える強磁場なので、極域にある程度安定して存在していると考えられる。

そこで、極域磁場(コロナホール)と静穏太陽(任意に選んだ黒点のない赤道帯のある部分)を比べてみた。図5に極域と静穏太陽の垂直磁場のヒストグラムを示す。静穏太陽は正負の磁極の数がほぼバランスしているのに対して、極磁場は単極に近く、しかもエクイパーティション磁場強度を超える磁場が静穏太陽より多い。(なお、静穏太陽については、場所・時間の異なる2カ所のヒストグラムを示しているが、その分布は驚くほど一致している。一見ランダムに見える静穏太陽の磁場であるが、太陽は分布関数のコントロールを厳格に行っているようである!)この比較から、浮かび上がる極域と静穏太陽の磁場構造の違いは、図4のようになる。極域ではすべての垂直磁場が単極なので、磁力線は近場で光球に戻ることはできない。一方、静穏領域では、ほとんどの磁力線

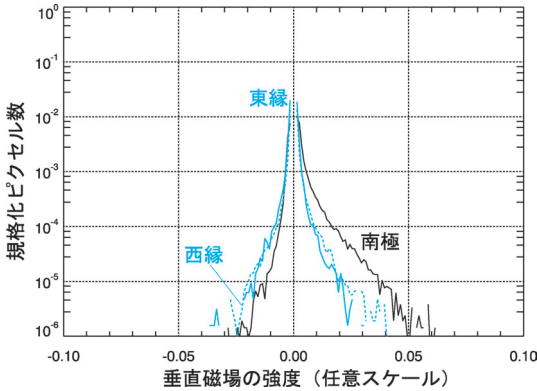


図5 極域と静穏太陽2カ所の垂直磁場強度のヒストグラム。静穏太陽は、日時と場所の異なる2点の分布を掲載している。黒線は南極域、青線は、異なる2カ所の静穏領域。横軸のプラス側は磁場ベクトルが太陽面から外向き、マイナス側は内向き。

は近場で閉じてしまい、惑星間空間につながる磁力線は少ない。

極磁場パッチの寿命

それでは、個々の極磁場パッチは、どれくらいの寿命をもつのであろうか？ 図6にキロガウス磁場の生成消滅の様子を示す。極域には単極の磁場しか見えず、単極磁場が無から生じて無に消えたり、複数の単極パッチが合体して大きくなり、また分裂していくように見える。その寿命は、5-10時間程度しかないにもかかわらず、極域全体の総磁気フラックスはほぼ一定値を保っているよう

だ。短寿命の単極磁場が、これまでの通説（ベルトコンベヤー説）に疑問を投げかける。「ひので」は極域の観測を重点的に継続しており、太陽活動の上昇とともに、極域の景色も変化していくはずで、極磁場パッチの生成消滅の機構を解明することができるだろう。

強すぎるトロイダル磁場問題

太陽の差動回転により、太陽のポロイダル磁場から太陽内部にトロイダル磁場（円周方向磁場）が生成されると考えられ、その強度は、いろいろな観測的・理論的証拠から、数十キロガウスから百キロガウス近くあると多くの研究者は思っている²⁴⁾。すべてのダイナモ理論は、このような差動回転によるポロイダル磁場からのトロイダル磁場の増幅を仮定している。しかし、日震学から測られた太陽内部の角速度分布からは、太陽活動周期の11年間で増幅できる磁場の大きさはたかだか100倍程度でしかない。太陽の極域は、数ガウス程度の比較的弱い単極の平均磁場をもっていると考えられていた。つまり、極の磁場が10ガウス程度の広がった磁場とすると、増幅されるトロイダル磁場はたかだか1キロガウスにしかならず、このような強いトロイダル磁場を得ることは不可能である。この「強すぎるトロイダル磁場問題」は、ダイナモ理論の未解決問題の一つとして議論されてきた。太陽内部においても、磁場が磁束管の形状をとるなら、極域の1キロガウスの磁場の存在

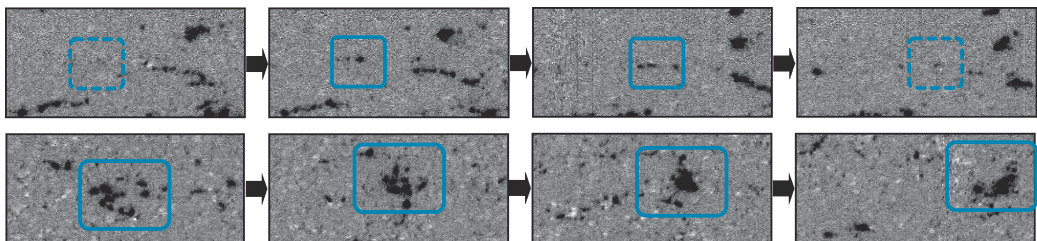


図6 キロガウス垂直磁場パッチの生成から消滅までの様子。上図：磁場パッチが現れ消滅する例（青線で囲った部分）。全体で約9時間。視野の大きさ42.5×20.5秒角。青線部分の大きさは、9秒角。下図：極磁場パッチが集合して大きくなる例（青線で囲った部分）。全体で約9時間。このあと分裂して消滅していく。視野の大きさ42.5×20.5秒角。青線部分の大きさは、16×11.5秒角。

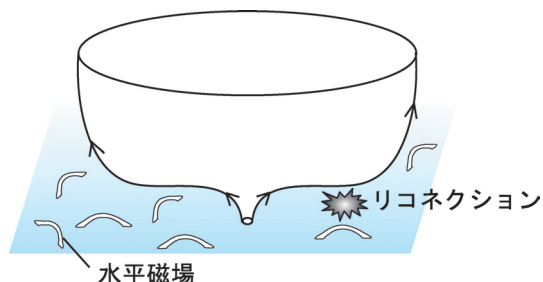


図7 インフレーションした垂直磁場とユビキタスな水平磁場のリコネクションによる彩層加熱(推定図).

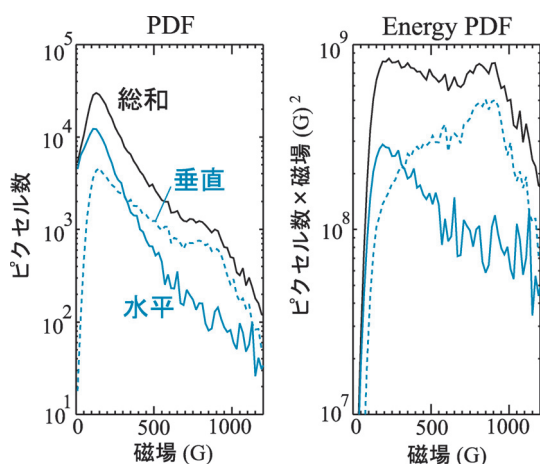


図8 太陽の極域の磁場強度の Probability Distribution Function (PDF, ヒストグラム) (a) 黒線: 総和, 青実線: 垂直磁場, 青点線: 水平磁場, (b) (a) に B の2乗を掛けて磁場エネルギーの PDF としたもの.

により、このハードルは低くなり、太陽活動周期の11年間での増幅が可能となる。

5. 極域を埋め尽くす水平磁場

太陽物理のパラダイムの一つは、太陽表面の磁場は、パーカー不安定性〔浮力〕により必ず表面にはほぼ垂直になるというものであった。これまでの観測も実際そうになっていた。「ひので」により、静穏太陽にも活動頭域にも共通にトランジエントな水平磁場の存在が明らかになり、ダイナモ的

観点のみならず、水平磁場と彩層やコロナにおける既存の垂直磁場との衝突・磁気リコネクションにより、全く新しい彩層・コロナ加熱の可能性が指摘され、話題となっている^{5),6)} (図7)。

図2と3に示した極域の観測結果は、極域にも大量の水平磁場が出現していることを示している。図8は極域の水平磁場強度と垂直磁場強度のヒストグラムを示している。垂直磁場のエネルギー密度は1キログauss付近にピークがあるが、水平磁場は、ずっと弱い磁場にピークがある。水平磁場と垂直磁場が異なる起源をもつことは、これからも明らかであろう。磁場の弱いほうで分布が下がっているのは、ゼーマン効果による磁場の検出限界による可能性が高い。観測された水平磁場は、おそらく氷山の一角で、太陽の対流層は、実は、水平な磁場で埋め尽くされているのではないか。

水平磁場の起源は、本号の石川の記事⁶⁾にあるように、対流による局所的な磁場生成の可能性が高いが⁵⁾、極域の観測に限って言えば、(1) 対流層奥深くの比較的弱いトロイダル(東西方向の)磁場が強力なコリオリ力により極域に達し、黒点になりきれないで、さまよっている可能性、(2) 赤道域の水平磁場が子午面環流により輸送され極域に達している可能性を完全には排除できない。磁場の方向分布が、ランダムか東西方向へ偏っているかが重要で、今後の「ひので」による観測で決着をつけることができるだろう。

6. 極域磁場と太陽風の加速

太陽の極域では、磁場は惑星間空間につながっており、巨大なコロナホールとなっている。軟X線画像では暗く(図1)、その部分のコロナの温度は低く活動性は低いとされてきた。一方、極域コロナホールは高速太陽風の源であり、Ulysses衛星の観測が示したように、その速度は地球周辺で秒速600–800 kmに達する。Eugene Parkerの太陽風加速機構(圧力勾配による加速)では、低温の

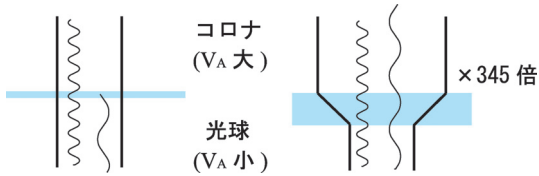


図9 磁束管を伝わるアルベン波の伝播と反射. 光球の対流運動で生成されたアルベン波は, 光球とコロナ境界で反射されてしまう(左図). 極域のキロガウスパッチに対応する磁束管(図4左)では, ~345 倍の磁束管のインフレーションが起き, 波長の長いアルベン波も透過するようになる(右図).

極域コロナホールからの高速太陽風を説明できないため, 光球で作られたアルベン波による加速と熱化が検討されてきた²⁵⁾. その際の問題の一つに, 光球-コロナの境界面でアルベン波が反射されてしまうということがある. この高速太陽風の加速問題についても, 「ひので」の観測から, (思わぬ) ヒントが得られつつある.

キロガウスパッチの磁気フラックスを全部足し合わせた極域の総磁気フラックスは, 「ひので」の観測結果から 10^{22} Mx^* 程度であり, これは *Ulysses* 衛星により求められた太陽の極域コロナホールからの総磁気フラックスとよく一致する. 極域からの磁場は惑星間空間を覆いつくしており, 高速太陽風の源は数十個のキロガウスパッチにさかのぼることができる. これらの強磁場パッチから出た磁力線は, その圧倒的な磁気圧によりインフレーションを起こし上空のコロナを埋め尽くすので, その光球から彩層にかけての磁束管の口径拡大率は, 正負の磁場が混ざっている静穏太陽より非常に大きくなる(図4). 彩層や下部コロナでの急激な磁束管の拡大は, アルベン波の透過に都合が良く, 光球の対流により生じたアルベン波が, 効率良く惑星間空間に抜けていき, 太陽風加速に寄与できる可能性がある.

ここで, 静穏太陽のように(図4右), 磁束管が拡大していない場合を考えてみる. この場合, 上層にいくに従って密度が減少し, アルベン速度は急激に上昇する. すると(屈折率が大きく変化する媒質中を伝播する光との類推から), 上方へ伝播するアルベン波は下方へ反射されやすくなる. 波長の長い(周期の長い)波ほど, この反射の影響を受けやすくなる(図9). 一般にアルベン速度の変化スケールと波長が同じぐらいになると, 反射が効果的になる. このため, これまでは, 光球の5分振動で生成されたアルベン波の9割かそれ以上は, 反射で表面に戻ってくると言われており, 低周波アルベン波が実際に太陽風領域まで伝播して, 加速に寄与できるのか疑問を呈する人もいた.

しかし, 極域のように磁束管が急拡大しているとすると(図4左), 密度の減少と同時に磁場強度も減少していくので, アルベン速度自体の変化は少ないはずである. これは, アルベン波の反射率を下げる方向に働くので, 表面で生成されたアルベン波が効率良く抜けていけようことを示唆する(図9). 高速太陽風の起源はキロガウスパッチであり, それは太陽風を加速するアルベン波をコロナに送り出す煙突の役割も果たしているのではないだろうか?^{21), 25)}

7. マグネタイズする天文学

最近, 天文学で「磁場」が話題になったり, 磁場を導入しないと説明できない現象が増えている. 原始星のフレア, 銀河の「プロミネンス」や「スピキュール」²⁶⁾, 高温コロナ(X線リッジ放射), 宇宙ジェット, 銀河団の非熱的粒子加速や多温度構造, ガンマ線バーストとマグネター, 初期宇宙の磁場と銀河ダイナモの関係など枚挙に暇がない. 太陽は, 望遠鏡によりアクセス可能な自然の実験室であり, 理論や数値シミュレーションとの詳細

*1 磁束の cgs 系での単位. 1 Mx は 1 Gcm^2 を表しており, 10^{-8} Wb に相当する.

な比較も可能である。実際、本特集で見たように、観測手段の進歩とともに、豊かな電磁流体现象を手取るように観測できるようになっており、これが太陽物理学の大きな魅力である。太陽物理学の進展により、宇宙全域の電磁流体现象の理解が進むことを期待して、この特集を終わりたい。

謝 辞

本稿の準備にあたり、岡本文典（国立天文台）、伊藤大晃（名大STE研）の2氏にお世話になった。記して感謝する。

参 考 文 献

- 1) Tsuneta S., 1996, ApJ 456, 840
- 2) Petschek H. E., 1964, in AAS-NASA Symp. on Solar Flares, ed. W. N. Hess, NASA SP-50, 425
- 3) Kosugi T., et al., 2007, Sol. Phys. 243, 3
- 4) Tsuneta S., et al., 2008, Sol. Phys. 249, 167
- 5) Lites B. W., et al., 2008, ApJ 672, 1237
- 6) 石川遼子, 2008, 天文月報 101, 630
- 7) 永田伸一, 2008, 天文月報 101, 560
- 8) 清水敏文, 2008, 天文月報 101, 414
- 9) 岡本文典, 2008, 天文月報 101, 385
- 10) Okamoto T. J., et al., 2007, Science 318, 1577
- 11) De Pontieu B., et al., 2007, Science 318, 1574
- 12) Shibata K., et al., 2007, Science 318, 1591
- 13) Katsukawa Y., et al., 2007, Science 318, 1594
- 14) Sakao T., et al., 2007, Science 318, 1585
- 15) Harra L., et al., 2008, ApJ 676, L147
- 16) Imada S., et al., 2007, PASJ 59, 793

- 17) Hara H., et al., 2008, ApJ 678, L67
- 18) Berger T. E., et al. 2008, ApJ 676, L89
- 19) Kano R., et al., 2008, PASJ 60, 827
- 20) 例えば Ichimoto K., et al., 2007, Science 318, 1597
- 21) Tsuneta S., et al., 2008, ApJ, in press
- 22) Cirtain J. W., et al., 2007, Science 318, 1580
- 23) Osaki Y., 1972, PASJ 24, 509
- 24) 例えば D'Silva S., Choudhuri A. R., 1993, A&A 272, 621
- 25) Suzuki T. K., Inutsuka S., 2005, ApJ 632, L49
- 26) Sofue Y., et al., 1994 AJ 108, 2102

Magnetic Landscape of Sun's Polar Region Saku TSUNETA

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

Abstract: We present the magnetic landscape of the polar region of the Sun that is unprecedented in terms of high spatial resolution, large field of view, and polarimetric precision. These observations were carried out with the Solar Optical Telescope aboard Hinode. We found many vertically-oriented magnetic flux tubes with field strength as strong as 1 kG that are scattered in the polar region. The polar region is also covered with ubiquitous horizontal fields. These surprising observations are discussed in terms of solar dynamo and acceleration of fast solar wind.

図2 (表紙掲載) 南極域の磁場マップ。南極上空から見ているように座標変換してある。十字は南極点、白線は、緯度 85 度, 80 度, 75 度, 70 度を示す。端に近づくにつれ、解像度が失われている。
