

トランジェント水平磁場とその起源 —ローカルダイナモ機構の発見—



石川 遼子

〈東京大学大学院理学系研究科, 天文学専攻/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: ryoko.ishikawa@nao.ac.jp

太陽表面には、さまざまな空間・時間スケールで磁場構造が存在するが、これまでに観測されてきたものはほとんどが太陽表面に対して“垂直”なものであった。一方、太陽観測衛星「ひので」によって、これまで知られていなかった、非常に短寿命(4分)かつ非常に小規模(600 km)な水平磁場構造の存在が明らかとなった。この微細な“トランジェント(短寿命)”水平磁場は、静穏領域、活動領域、そして極域にもまんべんなく大量に存在している。この水平磁場の起源を解明するため、静穏領域と活動領域の水平磁場の性質を比較した結果、トランジェント水平磁場の性質はグローバル磁場にはほとんど影響を受けず、局所的な対流運動によるダイナモ(ローカルダイナモ)によって駆動されていることが明らかとなった。

1. はじめに

太陽では、フレアと呼ばれる爆発現象や、それに伴うコロナ質量放出などが頻繁に起こっていることはご存知だろう。これ以外にも、太陽表面(光球)から彩層・コロナに至るまで、太陽は大小さまざまな活動現象に富み、一度として同じ表情を見せない。刻々と変化するその姿は、私たち(少なくとも太陽物理学者)の目をひきつけてやまない。事実、筆者が太陽物理を志すことを決めたのも、太陽観測衛星「ようこう」で撮像された太陽コロナのムービを見た瞬間である。これまで教科書で見てきたようなのっぺりとした白い丸い球体だとばかり思っていた太陽が、波長を変えるとこんなにも美しく、激しい活動現象に満ち満ちているのかと圧倒されたことを覚えている。

太陽で起こる活動現象を引き起こしているのは、大小さまざまな空間・時間スケールの磁場である。そのため、太陽磁場の生成から消滅を理解

することは非常に重要であるが、その磁場の生成機構については、諸説あるもののどれも決定打に欠け、完全には解明されていない(「太陽ダイナモ問題」)。例えば、活動領域と呼ばれる磁気活動が活発な領域は、太陽の差動回転により駆動されるグローバルダイナモ(後述)を起源としていると考えられているが、なぜ黒点の数が11年の周期で増えたり減ったりするのか、なぜ黒点が長期的になくなるマウンダー極小期が発生するのかという基本的なことさえほとんどわかっていない。また、活動領域以外にも磁束が観測されるが、その生成機構についてもよくわかっていない。この問題にアプローチする第一歩として、われわれは磁場の高空間分解能観測を駆使し、静穏領域の磁場の性質を明らかにしようとしている。

2. 太陽表面の磁場構造—ひので前—

太陽表面にはどのようなスケールの磁場構造があるのか、大きなものから順に見ていこう。まず

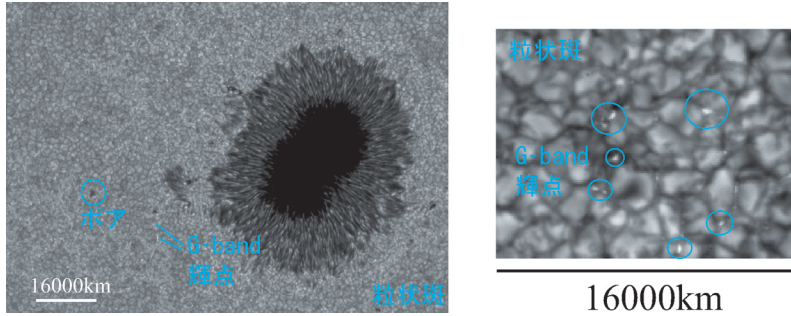


図1 「ひので」可視光望遠鏡によって G-band 波長帯で観測した活動領域（左）と静穏領域（右）。

一番に頭に思い浮かぶのは、黒点であろう。黒点は、巨大な磁束管の断面であり、典型的な大きさは数万 km で、寿命も長く、なかには1カ月以上も太陽表面に出現しているようなものもある。次に、黒点周辺に目を移してみると、ポアと呼ばれる半暗部をもたない暗い構造や、明るい輝点（Gバンド輝点^{*1}）が密集している様子がわかる（図1左）。これらは活動領域に特徴的な構造であり、ポアやGバンド輝点も黒点と同様に磁束管の断面を表している。次に、黒点など大規模な磁場構造のない領域（静穏領域）の太陽表面の様子を見てみよう（図1右）。静穏領域で最初に目につくのは、粒状斑と呼ばれる対流構造である。この粒状斑は1,000 km程度の大きさを持ち、黒点やポア以外の太陽全面を覆い尽くしている。よく見ると、静穏領域にも活動領域で見られたGバンド輝点が粒状斑間にところどころ存在していることがわかる。

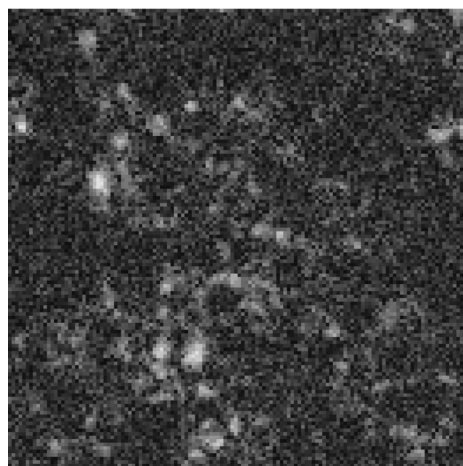
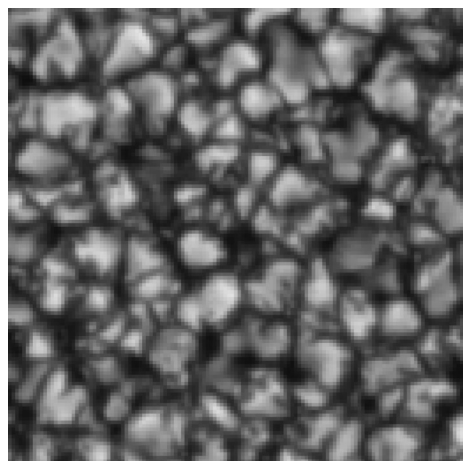
以上に挙げた黒点、ポア、Gバンド輝点は、磁束管の大きさに差はあるが、いずれもその磁場強度は強く（1k Gauss以上）、太陽表面でのエクイパーティション磁場強度（対流の運動エネルギーと磁場のエネルギーが同程度である磁場強度）の400 Gaussを優に超える。またこれらの磁場は、太陽表面に対して垂直であることが観測的に示されてきた。特にこのGバンド輝点のような100

km から200 kmの細い磁束管は、“magnetic elements/磁気要素”と呼ばれ、太陽の磁場構造を構成する基本要素と見なされていた。つまり、太陽の磁場は基本的に太陽表面に対して“垂直”であり、活動領域は垂直磁場が密集し、静穏領域はまばらに存在する場所であると考えられてきたのである。

そんななか、2007年、アメリカのグループが、数分以下のタイムスケールで時間変化する視線方向磁場が太陽表面に存在することを報告した²⁾。その視線方向磁場は太陽中心に比べ周辺付近でより大きく変動することから、時間変化しているのは太陽表面に対して水平方向の磁場であり、このような磁場が太陽表面に普遍的に分布していると解釈した。彼らの観測では、空間分解能が3秒角（2,300 km）と、磁場構造を空間分解することはできないのはもちろんのこと、磁場強度などもわからないため、水平方向の磁場の存在を示唆するにとどまった。

そして、太陽観測衛星「ひので」が登場し、完全にこれまでの概念を覆すことになる。「ひので」に搭載された可視光望遠鏡（Solar Optical Telescope; SOT）は、回折限界である0.3秒角という高空間分解能に加え、非常に高精度（ 10^{-3} ）な偏光スペクトルデータを常時取得可能である。これにより、これまで地上観測では見ることのできな

*1 Gバンド輝点とは、Gバンド（ $\sim 4,305 \text{ \AA}$ ）波長帯で観測される、200 kmほどの小さな輝点。



16000km

図2 静穏領域の連続光画像（上）と水平磁場強度マップ（下）。水平磁場強度は200 Gaussが最大（黒く表示）になるように表示した。

かった微細なスケールの水平磁場構造とその振舞いの全貌が明らかとなった。

3. 太陽表面を覆い尽くすトランジェント（短寿命）水平磁場

図2上に、静穏領域の連続光マップを示す。一見何の変哲もなく粒状斑に覆われているように見える。ところが、これを偏光スペクトルデータによって得られる磁場分布と比較して見てみる（図

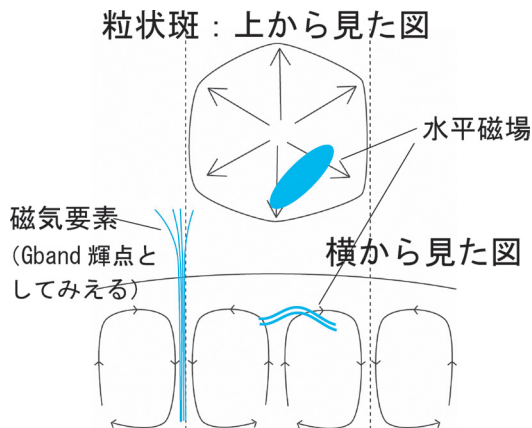


図3 粒状斑（対流）と磁気要素、水平磁場の模式図。粒状斑は熱いプラズマが対流層から湧き上がってくる部分に対応する。磁気要素は粒状斑間に見られるが、水平磁場は粒状斑内に見られる。

2下）と、連続光マップからは想像できないような磁場構造が現れる。粒状斑の上に、粒状斑の大きさほどの小さな水平磁場が視野内に多数見られるのである。ちなみに、連続光マップで明るい粒状斑は熱いプラズマが上昇してくる湧き出しの部分に対応し、暗い溝のような部分（粒状斑間）は冷めたプラズマが沈み込む部分に対応している。これら粒状斑と磁気要素の構造を模式的に示したのが、図3である。水平磁場の位置関係も、図内に示してある。

次にこの水平磁場の時間変化を追ってみる。図4は連続光で見られる粒状斑の34秒ごとの時間変化に、水平磁場の強い場所をコントラストで示したものである。観測開始から34秒後に、水平磁場が出現する。出現する場所は、プラズマの上昇流が支配的な粒状斑の端のほうである。時間とともに水平磁場のサイズは大きくなり、170秒後には粒状斑に拮抗する大きさにまで達するが、その後、水平磁場は縮み、374秒後に消滅する。このように水平磁場は、出現してから消滅するまでたった6分しかない。百個の水平磁場について統計的に調べても、その平均寿命は4分であった。そこで

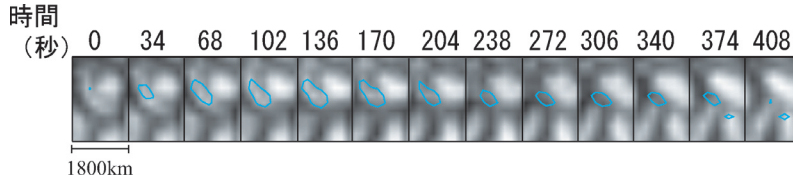


図4 図2の粒状斑1個程度の領域に着目し、水平磁場の出現から消滅までを追う。連続光画像に水平磁場強度をプロットしたもの。上の数字は観測開始（左端のフレーム）からの時間を示している。青のコンタは182ガウスに対応している。

私たちは、この水平磁場のことをトランジェント（短寿命）水平磁場と呼ぶことにする³⁾。トランジェント水平磁場は、その寿命が短いだけではなく、大きさも最大で1,000 kmと非常に微細な構造であることがわかる。そして面白いことに、このトランジェント水平磁場の大きさや寿命は、粒状斑の大きさや寿命に非常によく合っている。このトランジェント水平磁場の対流（粒状斑）に対する運動を偏光スペクトルのドップラーシフトから調べたところ、水平磁場は対流とほぼ同じ速度で運動していることもわかった⁴⁾。

これらの特徴（水平磁場と対流の相対速度がほぼゼロ、水平磁場の寿命・サイズ）より、水平磁場は対流に翻弄されるようにして太陽表面に出現したと考えられる。黒点などの活動領域を形成するような大きな磁束管は、次章で述べるように、通常磁気浮力⁵⁾によって対流層から出現することから、対流運動により駆動されるトランジェント水平磁場は、これまで報告されてきた浮上磁場とは全く異なる、新現象であるといえる。さらにこのトランジェント水平磁場は、粒状斑があればどこにでも存在しており^{4), 6)}、言い換えれば、太陽全面をこのトランジェント水平磁場が覆いつくしていることが「ひので」によって明らかになった。

4. トランジェント水平磁場の起源

トランジェント水平磁場が太陽表面に多量に存在することから、太陽表面下に水平磁場を供給する貯蔵庫があり、ここから粒状斑スケールの対流

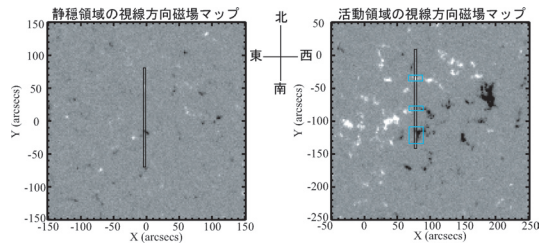


図5 SOHO 衛星によって撮像された視線方向磁場マップ（白がN極、黒がS極）。太陽中心付近の東西300秒角（24万km）、南北300秒角（24万km）を表示。黒い四角で囲われた領域を「ひので」によって偏光分光観測を行った。青い四角で囲まれた領域は水平磁場を検出する際に取り除かれた領域。観測視野の16%にあたる。

が水平磁場を表面まで運んでいると考えられる。果たして、この水平磁場の貯蔵庫なるものはどのようにして生成されたのであろうか？ トランジェント水平磁場の起源について考えてみよう。

4.1 活動領域と静穏領域

活動領域は、黒点などを含む磁束が集中した領域で、そのスケールも数十万 km と広範囲である。また、出現場所も活動領域帯と呼ばれる太陽面上の決まった緯度帯（0度から30度付近）に限られる。太陽の差動回転によって太陽内部の磁場が東西に引き伸ばされリング状の磁場管が生成された後（図9左）、その一部が磁気浮力により表面に浮き上がることで、活動領域が形成されると考えられている。この太陽内部での磁束管生成過程は一般に、「グローバルダイナモ機構」と呼ばれる

水平磁場強度分布

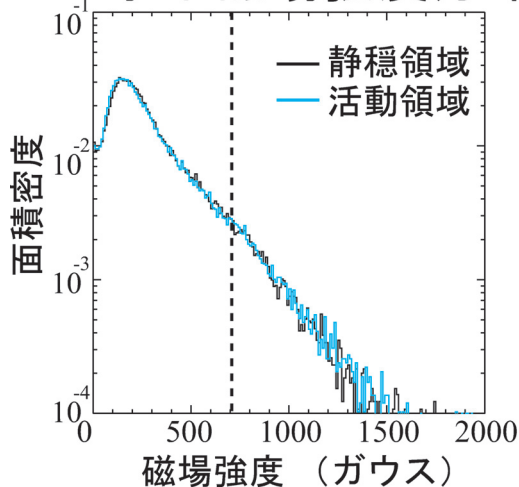


図6 静穏領域(黒)と活動領域(青)の水平磁場強度分布. 点線は700ガウス(粒状斑の運動エネルギーに対応するエクイパーティション磁場強度)を示す. 活動領域では観測時間中定常的に垂直磁場が存在する領域は取り除いてある.

が、普遍的に存在する微細トランジェント水平磁場の貯蔵庫も生成しているのだろうか？ それとも何か別の局所的な機構が働いているのだろうか？ もしも、トランジェント水平磁場もグローバルダイナモ起源であるならば、グローバル磁場の影響が全く異なる静穏領域と活動領域で、トランジェント水平磁場の性質にも大きな違いが見られるはずである。そこで、私たちは静穏領域と活動領域(プラージュ領域)にあるトランジェント水平磁場の性質(発生頻度、方位角、磁場強度)を比較することで、トランジェント水平磁場の起源を探ってみた³⁾。

比較に用いた領域の視線方向磁場マップとして、図5左に静穏領域、図5右に活動領域のものを示す。これらの磁場マップを見ると、静穏領域と活動領域で磁気フラックスが異なることが一目瞭然である。実際、この活動領域の垂直磁場の総磁気フラックスは静穏領域の8倍にもなる。この

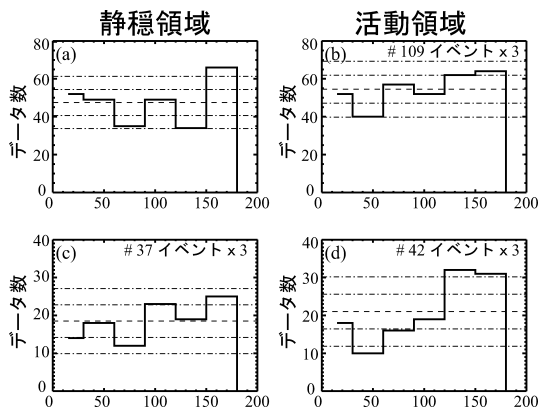


図7 トランジェント水平磁場の静穏領域(左)と活動領域(右)での方位角分布. 上の二つの図は全トランジェント水平磁場の方位角を、下の二つの図は強い水平磁場強度をもつ一部のトランジェント水平磁場の方位角をプロットしている. 統計をあげるため、各イベントから3ピクセルずつ選んでおり、全データ数はイベント数の3倍になっている. トランジェント水平磁場の方位角が東西方向を向いているとき0度もしくは180度、南北方向を向いているとき90度に対応する. 点線は一樣分布を仮定したときの分布を表しており、点破線は $\pm\sigma$, $\pm2\sigma$, $\pm3\sigma$ を表している.

ように磁気フラックスの全く異なる二つの領域から、図5の黒線で示されるような細長いスリット状視野(東西; 約2秒角, 南北; 164秒角)を切り出し、偏光分光観測を85分間行った。なお、活動領域では、観測時間中、定常的に垂直磁場が存在する領域(図5の青色の四角で囲まれた領域)があるが、この領域はトランジェント水平磁場を検出する際に省いた。まず、トランジェント水平磁場の発生頻度を比較しよう。静穏領域ではスリット視野内に95個、活動領域でのスリット視野内では105個のトランジェント水平磁場が検出され、その発生頻度を求めたところ、どちらも $\sim 1 \times 10^{-2} \text{ Mm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ とほぼ同程度であることがわかった。なんと垂直磁気フラックスは8倍と大きな差があるにもかかわらず、トランジェント水平磁場の発生頻度は同じなのである。

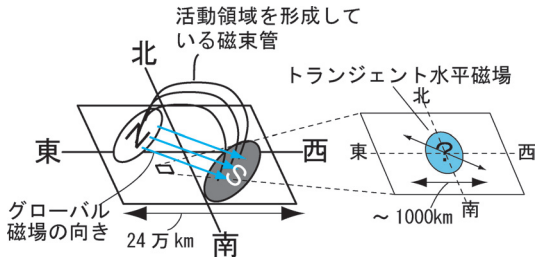


図8 活動領域の視線方向磁場マップ(図5, 右)から想像されるS極とN極を結ぶ磁束管(左). 活動領域を形成している磁場の向きは, S極, N極の分布からおおよそ145度から180度程度, 東西方向から傾いていると考えられる(青の矢印で示した). 本研究では, 1,000 kmほどの小さなトランジェント水平磁場の方位角分布を求めた(右).

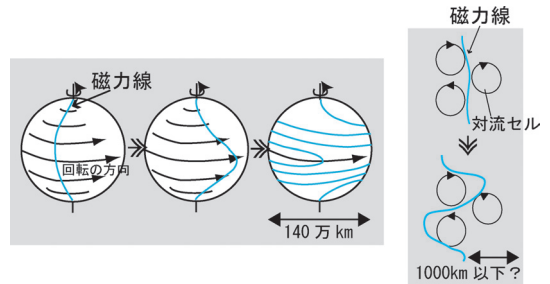


図9 左図は, 差動回転による磁場の増幅機構(グローバルダイナモ)の概念図. 右図は, 粒状斑スケール, もしくはそれ以下の対流の速度シアによる磁場の増幅機構(ローカルダイナモ)の想像図.

4.2 トランジェント水平磁場の磁場強度

次にトランジェント水平磁場の磁場強度分布を比較しよう. 図6は, 全観測時間内にとられたデータからほぼ水平な磁場成分を抜き出し, その磁場強度をプロットしたものである. このように, 水平磁場強度分布は静穏領域と活動領域で見事に一致しているのである. また極域でさえも, 水平磁場の強度分布が静穏領域, 活動領域の水平磁場強度分布と非常によく似ていることが確認されているのである⁹⁾. 周囲に強い磁場強度をもった磁束管が密集しようといまいと, 粒状斑サイズの水平磁場強度分布は全く影響を受けないということである. さらに, 図6から両領域とも, 水平磁場の大部分(93%)が700 Gauss以下の磁場強度をもっていることもわかる. この700 Gaussの磁場強度をもつ磁気エネルギーは, 深さ1,000 kmの粒状斑サイズの対流をもつ運動エネルギーと同程度である(つまり, 700 Gaussは, 深さ1,000 kmでのエクイパーティション磁場強度に対応する). 水平磁場強度がエクイパーティション磁場より小さいということは物理現象を対流が支配しているということに対応しており, 3章で述べた, トランジェント水平磁場が対流によって太陽表面に出現しているという描像ともよ

く一致する.

4.3 トランジェント水平磁場の向き

つづいて, トランジェント水平磁場の方位角分布にも着目する. もしトランジェント水平磁場がグローバルダイナモ機構と直接関係しているのであれば, トランジェント水平磁場の方位角の向きが活動領域のN極とS極を結ぶグローバルな磁力線の向きとそろう可能性が考えられるからである(図8). 検出した全トランジェント水平磁場の方位角分布を見てみよう(図7上). 顕著なピークは見られず, どこかに方位角が集中して分布しているということはない. つづいて, より強い水平磁場をもったトランジェント水平磁場(静穏領域37イベント, 活動領域42イベント)に着目してみる(図7下). 静穏領域では全イベントの場合と同様, 方位角分布に有意なピークは見られなかったが(図7下左), 活動領域の方位角分布(図7下右)では120度から180度に分布が集中している. さて, ここでもう一度活動領域の磁場分布を見てみよう(図5右). 視線方向磁場のN極とS極の分布から, この大局的な磁力線の向きは南西(145度)から西(180度)方向に分布していると推測でき(図8), 方位角分布のピークとよく合っていることがわかる. つまり, 活動領域のグローバル磁場の向きと一部のトランジェント水平磁場

の方位角の向きが一致しているといえる。これらの方位角分布より、全体としてはトランジェント水平磁場とグローバルな磁場には関係はないが、トランジェント水平磁場の一部（特に磁場が強い成分）は何らかの影響を受けていることが示唆された。

4.4 グローバルダイナモか、ローカルダイナモか
静穏領域と活動領域の比較から明らかとなった、トランジェント水平磁場の性質をまとめてみよう。

- 1) 発生頻度は静穏領域と活動領域で差はなく、トランジェント水平磁場は活動領域、非活動領域に関係なく一様に存在する。
- 2) 水平磁場強度分布は、極域を含むどの領域でも共通であり、大部分はエクイパーティション磁場強度より小さい。
- 3) 概してトランジェント水平磁場の方位角に異方性はない。

これらの観測事実より、トランジェント水平磁場の貯蔵庫がどのようにして生成されたのか？つまり、トランジェント水平磁場の起源は何か？を考えてみよう。まず、トランジェント水平磁場の貯蔵庫が、グローバルダイナモによって生成されているとする*2。グローバルダイナモ由来の磁気フラックスが大量に存在する活動領域では、その直下に位置する水平磁場の貯蔵庫にもたくさんの磁場が存在するであろう。活動領域のトランジェント水平磁場の発生頻度は、静穏領域と比べて格段に大きくなるはずである。また、磁場強度や方位角分布にも活動領域の影響が多かれ少なかれ見られると期待される。これらの予想は 1) から 3) のトランジェント水平磁場の性質とは異なり、グローバルダイナモ起源では、これらの観測結果を説明することは困難である。次に、粒状斑スケールの対流のシア運動による磁場生成機構である、ローカルダイナモ機構^{11), 12)} (図9右)を考

えてみよう。ローカルダイナモ機構では粒状斑スケールの対流運動によって磁場を増幅し供給することができるため、生成される磁場はグローバル磁場の影響を受けない。つまり、活動領域と静穏領域でトランジェント水平磁場の発生頻度、磁場強度分布、方位角分布に違いが生じない。ローカルダイナモ機構がトランジェント水平磁場の観測結果に最も適合することから、トランジェント水平磁場の生成機構はローカルダイナモが作用していると結論づけた。

5. トランジェント水平磁場研究の今後

実のところ、このトランジェント水平磁場の消滅過程はまだ謎に包まれたままである。太陽表面下から出てきたトランジェント水平磁場は再び太陽表面下に戻っていくのか？それとも浮上し、彩層に到達しているのか？のどちらであるかは、まだわかっていないからである。もし、トランジェント水平磁場が彩層に到達しているのであれば、そこで何らかの活動現象を引き起こしている可能性が十分考えられる。トランジェント水平磁場がもっている磁場のエネルギーフラックスを磁場強度、発生頻度、サイズなどから見積もってみると、トランジェント水平磁場が静穏領域、活動領域ともに上層の彩層・コロナのプラズマを加熱、維持するのに必要なエネルギーフラックスを十分もっていることがわかった³⁾。つまり、トランジェント水平磁場が活動現象を引き起こし、そのエネルギーが解放されれば彩層やコロナを加熱することが可能なのである。

ダイナモのみならず彩層・コロナ加熱の観点からトランジェント水平磁場の消滅過程は非常に興味深い。トランジェント水平磁場が何らかの活動現象を彩層で引き起こしているのかを確かめるためには、彩層を観測するのに適した波長帯での偏

*2 例えば、活動領域が崩壊してその残骸がトランジェント水平磁場の貯蔵庫としてトランジェント水平磁場を供給するといった過程が考えられる。

光分光観測による彩層の磁場診断・ダイナミクス診断が必須となってくる。しかし、「ひので」では彩層を観測できる波長帯では分光を行うことができないため、彩層の偏光分光観測が可能である地上の望遠鏡と「ひので」の共同観測を今後行っていく。また、「ひので」に続く SOLAR-C に搭載予定の彩層の偏光分光観測装置による本格観測に期待したい。彩層へトランジェント水平磁場は到達しているのか？ トランジェント水平磁場の出現に関連する彩層での活動現象は見られるのか？ を調べ、トランジェント水平磁場の彩層・コロナ加熱へ果たす役割を明らかにしたいと考えている。

謝 辞

本稿は筆者の修士論文の一部と、日本学術振興会特別研究員として行っている研究を基にしています。これらの研究を進めるにあたり、筆者の共同研究者であり指導教官でもある常田佐久教授をはじめ、ここには書ききれないくらいの人たちに出会い、数々の助言をいただきました。こんな刺激的な研究ライフが送れているのもこれらの皆様のおかげです。そして最後に、私の研究の要である「ひので」(Solar-B) の開発・運用にかかわる多くの皆様に、深く感謝いたします。

参考文献

- 1) Ishikawa R., et al., 2007, A&A 472, 911
- 2) Harvey J. W., Branston D., Henney C. J., Keller C. U., 2007, ApJ 659, L177
- 3) Ishikawa R., Tsuneta S., 2008, A&A, in press
- 4) Ishikawa R., et al., 2008, A&A 481, L25
- 5) Shibata K., et al., 1989, ApJ 345, 584

- 6) Lites B. W., et al., 2008, ApJ 672, 1237
- 7) Orozco Suárez D., et al., 2007, ApJ 670, L61
- 8) Centeno R., et al., 2007, ApJ 666, L137
- 9) Tsuneta S., et al., 2008, ApJ, in press
- 10) 常田佐久, 2008, 天文月報 101, 638
- 11) Cattaneo F., 1999, ApJ 515, L39
- 12) Vögler A., Schussler M., 2007, A&A 465, L43

Transient Horizontal Fields Discovered by Hinode and Its Implication to a Local Dynamo Process

Ryohko ISHIKAWA

Department of Astronomy, University of Tokyo and National Astronomical Observatory of Japan 2-21-1 Osawa, Mitaka, Tokyo 181-8588, Japan

Abstract: Magnetic field so far observed on the photosphere is essentially vertical with various spatial and temporal scales. This paradigm was now changed by the Hinode discovery of massive small-scale horizontal magnetic fields that exist all over the Sun, namely in the quiet Sun, in active regions, and in the polar regions. The size and life-time of these horizontal magnetic fields are similar to those of a convective pattern. They are thus named the Transient Horizontal Magnetic Fields (THMFs). In order to understand the origin of the ubiquitous THMFs, we compare properties of THMFs appearing in the quiet Sun with those appearing in an active region. We find that the properties of THMFs in both regions are strikingly similar, and thus are not affected by the amount of the vertical magnetic fields that may come from the global toroidal field. The observed properties strongly suggest a local dynamo process in the convective layer of the Sun.