

# 太陽浮上磁場と活動現象 —シミュレーションと日震学による研究

鳥海 森

〈国立天文台 〒181-8588 東京都三鷹市大沢2-21-1〉

e-mail: shin.toriumi@nao.ac.jp



太陽における最も顕著な磁気活動現象の現場である「活動領域」は、太陽の深部から磁束が浮上することで形成されると考えられている。筆者らはこの「浮上磁場」に関して数値シミュレーションと日震学という二つのアプローチから研究を行った。始めに大型の数値シミュレーションを実施し、太陽内部を浮上する磁束は表面へ接近する際に一時的に減速し、全体として2段階的な浮上過程を示すことを明らかにした。この一時的な減速は日震学的手法を用いた観測データの解析によっても確認された。本稿では筆者らの研究やその結果得られた物理的描像を紹介し、太陽浮上磁場と関連するさまざまな活動現象という観点から今後の展望について議論する。

## 1. 活動領域と浮上磁場

最も身近な恒星である太陽を人類は長年眺めてきた。17世紀初頭にガリレオが発明されたばかりの望遠鏡を太陽に向けて以来、多くの黒点観測データが残されている。黒点を含む「活動領域」が磁場の強い領域であるということが発見されたのは、ようやく20世紀に入ってからであるが、いまだに太陽磁場の生成維持機構（ダイナモ機構）は完全には解明されていない。活動領域は太陽フレアなどダイナミックな磁気活動現象を起こすため、非常に注目される領域である。しかし、400年以上も観測が続いているにもかかわらず、どのように活動領域が出現するのかよくわかっていないのである。

現在までの理解をまとめると、次のようになる(図1)。まず、太陽深部において、ダイナモ作用によって自転軸の周囲を東西方向に巻きつく磁場成分(トロイダル磁場)が作られる。その磁場が対流層を局所的に浮上し、光球(太陽表面)に出現することで、活動領域が形成される<sup>1)</sup>。これを

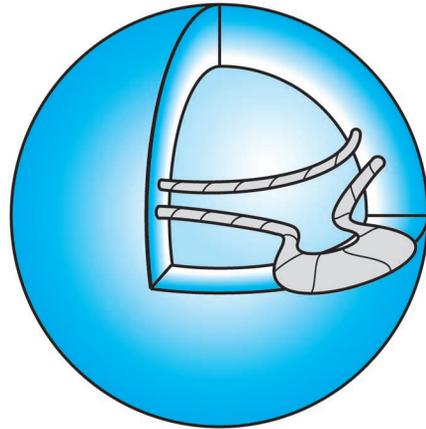


図1 浮上磁場の想像図。ダイナモによって作られた磁束管が対流層を局所的に浮上し、太陽表面に出現することで、黒点を含む活動領域が形成される。

「浮上磁場」と呼ぶ。太陽表面において、活動領域は正負の磁極要素からなり、これらはまとまった磁場構造をとる。このことから、対流層において浮上磁場は「磁束管」の構造をもつものと考えられている<sup>2)</sup>。この浮上する磁束管の光球での切り口が、黒点として観測されるのである。ところ

が、われわれは太陽内部を直接観測することができないため、実際に磁束がどのように浮上するのか探ることができない。しかし、それこそが本研究のテーマなのである。

## 2. 二つの研究方法

さて、直接光学観測が不可能な太陽表面下において浮上磁場を研究するには2通りの方法がある。一つは磁気流体方程式をスーパーコンピュータに解いてもらう「数値シミュレーション」。もう一つは唯一の太陽内部診断手法である「日震学」である。ここでは、それぞれの研究分野について簡単に紹介したい。

### 2.1 シミュレーション研究

まず、太陽内部（対流層）における浮上磁場のシミュレーションには、細管近似<sup>3)</sup>・\*1や非弾性近似<sup>4)</sup>・\*2と呼ばれる手法が用いられてきた。これらのシミュレーションによって、活動領域を形成する磁束管に必要な磁場強度・磁束量や、磁束管が浮上する際のグローバルなダイナミクスが明らかとなった<sup>2)</sup>。しかし、これらの近似手法は、いずれも太陽表面下2万-3万kmの地点で破たんしてしまう。表面付近で圧力や音速などの物理量が急激に変化するためである。そのため、この種のグローバルスケールのシミュレーションでは、対流層を上昇する浮上磁場が表面付近に接近する際のダイナミクスに迫ることができなかった。

一方、太陽表面付近の磁束がコロナ（上空大気）へと浮上していく過程については、京都大学の柴田一成教授らによる一連のシミュレーション研究が有名である<sup>5)</sup>。これらのシミュレーションは、太陽大気中を上昇する磁束や、磁力線に沿った下降流など、観測事実を非常によく再現した。しかし、計算における初期磁場の深度は1,000

km程度のことが多く、グローバルスケールのシミュレーション（対流層下部から深さ2万km程度まで）とは、対象とする領域にギャップが残されていた。

### 2.2 日震学研究

太陽には対流が存在するため、つねにさまざまな波動が励起されている。すなわち、太陽はつねに振動している。このとき、（周波数や波数の関数としての）振動のパワー分布は、振動体の構造によって決まる。したがって、太陽表面において振動場（とくに音波振動）を観測することで、内部構造を探查することができる。これを「日震学」と呼ぶ。

日震学のさまざまな手法のうち、波動の局所的な伝播を観測し、表面下の流れ場などを調べるのが局所の日震学である<sup>6)</sup>。日震学を行うのに必要な観測時間（多くの場合、6時間以上）に対し、対流層最上部（数万km）を浮上磁場が通過する時間スケールは1-2時間と短いため、浮上磁場のシグナルはノイズに埋もれてしまう。したがって、これまで局所の日震学による浮上磁場の検出は非常に難しいと考えられてきた<sup>7)</sup>。近年、わずかにスタンフォード大学のグループらが検出に成功した程度であり<sup>8)</sup>、いまだ発展途上の研究分野といえる。

### 2.3 本研究の目的と方針

本研究では、磁束の浮上過程、特に磁束が太陽表面へ接近する際のダイナミクス解明を目的とする。これまでに見たとおり、研究方法としては数値シミュレーションと日震学の2通りがある。そこで、始めに数値シミュレーションによって磁束の浮上過程を再現し、理論的なモデルを提案する。つづいて、日震学観測による浮上磁場の検出と、それによる理論モデルの検証を目指す。

\*1 対流層内部では磁束管が周囲のプラズマのスケール長に対して十分に細いと仮定することで、磁束管を細長い1次元的な線要素の集合とみなす近似。磁束管の各断面における物理量分布の計算を省略できる。

\*2 対流層内部では音速が熱対流速度などに対して十分に速いことを利用し、音速を無限大とする近似。音波の伝播を陽に解かなくて良いため、数値シミュレーションの時間幅を大きく取ることができる。

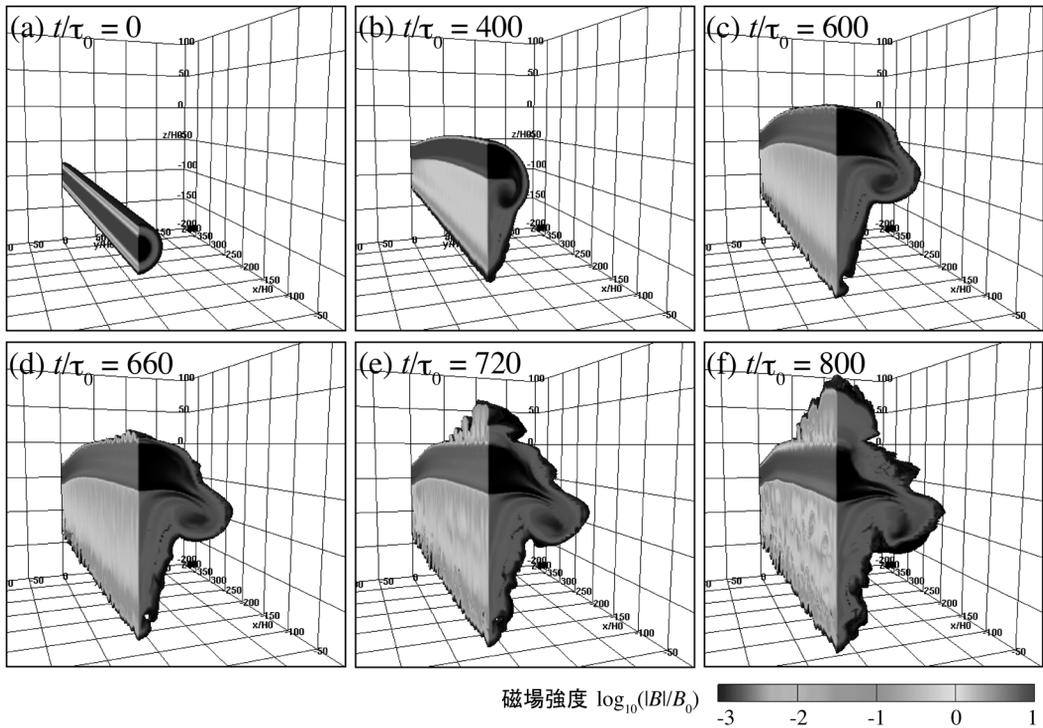


図2 3次元浮上磁場シミュレーションの結果. 磁場強度を対数スケールでプロットしたもの. 図中の水平線が太陽表面に相当する. シミュレーションでは物理量の規格化定数として, 長さ $H_0=200$  km (光球における圧力スケール長), 速度 $C_{s0}=8$  km  $s^{-1}$  (光球における音速), 時間 $T_0=H_0/C_{s0}=25$  s, 磁場強度 $B_0=300$  Gを用いた.

### 3. 浮上磁場シミュレーション

対流層深さ2万 km からの大規模な浮上磁場シミュレーションを行った. 2万 km という初期磁場深度は, グローバルシミュレーションにおける近似的破たんする深度を想定しており, 対流層内部を扱うグローバルな浮上磁場計算と表面付近から上空大気への浮上磁場計算を接続することを念頭に置いたものである. 計算を実行するスーパーコンピュータとしては国立天文台の天文シミュレーションプロジェクト (CfCA) を利用し, 16 万, 8 万, 9 万 km の3次元計算領域を1,602, 256, 1,024グリッドで分解するシミュレーションを行った.

図2に結果を示す. これは浮上する磁束管の磁場強度をプロットしたものである. 初期に深さ2万 km に置かれた磁束管は, 磁気浮力によって対

流層内部を浮上し始める. 周囲のプラズマは成層しているため, 磁束管は高度とともに膨張する. 一方, 上昇する磁束管は周囲のプラズマから流体力学的な抗力を受けるため, 下方には剥がされた磁束が渦状に付随するようになる. 磁束管は太陽表面を突破し, 最終的には上空大気に到達する. ここで興味深いのは, 磁束が太陽表面を突破する直前には, 表面下に磁束が水平方向に広がっているということである. すなわち, 太陽に活動領域が出現する直前, われわれが観測しえない表面下には磁束がテーブル状に広がっていることを示唆している.

図3は磁束管の高度に関する時間変化を示している. これを見ると, 磁束管は太陽表面に接近する際, 一時的に減速し, 全体としては2段階的な浮上を示していることがわかる. 特に, 対流層内部における減速の開始深度は8,000 km 程度であ

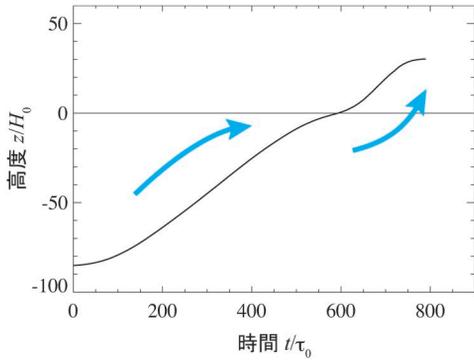
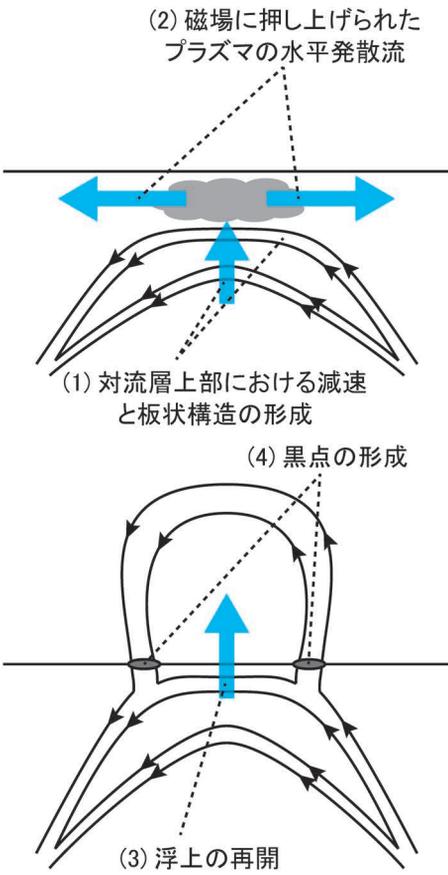


図3 磁束管高度の時間変化. 規格化定数は図2と同様.

る. 従来の浮上磁場シミュレーション<sup>9)</sup>でも磁束の減速は見つかっているが, それは初期磁束管が対流安定層である光球(表面層)へ直接的に突入するためであった. 今回の減速開始深度はそれよりも1桁深いため, 異なる物理が働いていることが考えられる. 詳細な解析の結果, 浮上する磁束の上方には非磁化プラズマが蓄積し, それが磁束の浮上を抑制していることが明らかになった. すなわち, (1) 対流層を浮上する磁束管は周囲の成層に伴って膨張する, (2) 膨張した磁束管はしだいに非磁化プラズマを押し上げるようになる, (3) 非磁化プラズマは(近似的に)対流安定層である光球を突破できないため, 磁束管と光球とに挟まれ圧縮される, (4) その結果, 浮上磁束管はプラズマに押し返され, 減速する, という過程である. これはあたかも壁に向かって雪かきをしているような状態である. 雪は自分と壁とに挟まれ, 圧縮されるため, 自分はしだいに抵抗を感じるようになるというわけである.

さて, 磁束管と光球とに挟まれ, 垂直方向に逃げ場を失った非磁化プラズマは, しだいに水平方向に逃げるようになる. すなわち, 磁束が太陽表面に出現する直前には, プラズマが水平方向に発散する様子が観測されるであろうことが, シミュレーション結果から予期されるのである<sup>10)</sup>. また, ひとたび減速した磁束管であるが, シミュレーションの中では磁気浮力不安定により, 表面

本研究による描像「2段階浮上」



これまでの描像  
[文献 12) に基づく]

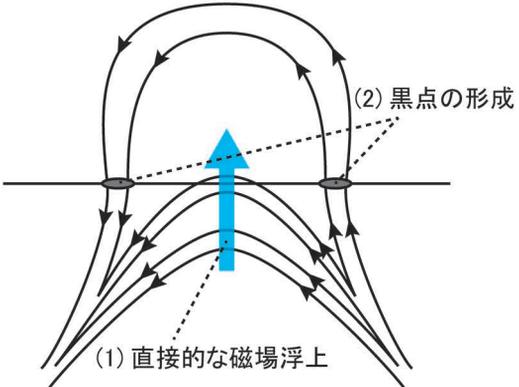


図4 今回のシミュレーション研究から得られた「2段階浮上」モデルのまとめ.

層から上空大気へと浮上を再開する。この2段階目の浮上は、太陽表面からの磁束浮上を扱った先行シミュレーション研究の結果<sup>5),9)</sup>とよく一致している。今回のシミュレーションでは扱っていないが、光球に出現した磁束は、磁場強度が十分に強化されれば黒点が形成されると考えられる<sup>11)</sup>。

図4に今回のシミュレーション結果をもとに得られた「2段階浮上」モデルをまとめる。始めに、対流層を浮上する磁束管は周囲の密度成層により膨張し、上方のプラズマを押し上げる。プラズマは磁束と光球に挟まれ、圧縮される。そのため浮上磁場は減速し、垂直方向に行き場を失ったプラズマは太陽表面を水平方向に逃げ出す。その後、磁束は表面に到達し、浮上を再開することで黒点を含む活動領域を形成する。本研究では、光球付近の効果を考慮に入れ、より大きなスケールのシミュレーションを行ったことで、従来の浮上磁場モデル<sup>12)</sup>と比べて浮上磁場の減速や水平発散流といったダイナミクスが明らかになった。

#### 4. 日震学による浮上磁場の検出

第2章に述べたとおり、これまで局所の日震学では浮上磁場を捉えることは難しいと考えられていた。そこでわれわれは、従来とは少し異なるアプローチを取ることにした。これは太陽表面において音波振動強度<sup>\*3</sup>を測定する手法で、2011年にはスタンフォード大学の研究グループが、表面に浮上磁場が出現する約1時間前に特定の周波数帯の音波振動強度が減衰を開始したという観測例を報告している<sup>13)</sup>。これは、対流層内部を通過する音波が（対流層内部に存在する）浮上磁場の影響を受け、表面に到達する際に減衰して観測されたものと考えられている<sup>\*4</sup>。すなわち、太陽表面で観測される音波振動は、対流層内部に存在

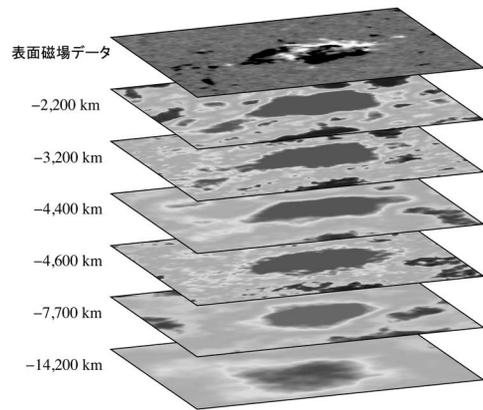


図5 表面磁場データ（上1枚）と音波振動強度マップ（下6枚）。磁場データは白が正極、黒が負極を表し、音波振動マップは色の濃い部分が音波の減衰された領域を表す。

する磁場の情報を持っていることを意味している。

このことに基づいて、本研究では、太陽表面下の音波振動をモニターする日震学的な研究手法を新たに開発した。これは、浮上磁場領域の速度場データに対して、特定の深度に対応する周波数・波数成分のみを抽出し、2次元の音波振動強度マップとして表示する手法である。図5に結果を示す。ここでは、表面で観測された磁場データと表面下6層に対応する音波振動強度マップが並べられている。この時刻にはすでに太陽表面に磁場が出現しているが、表面下には音波抑制の擾乱源が広がっている。これをムービーとして見ると、表面に磁場が広がるとともに表面下で擾乱源が拡大していく様子がわかる。

図6は各マップにおける音波振動の減衰開始時刻をプロットしたものである。それぞれの減衰開始時刻をつなぐ曲線は、太陽表面における磁場の出現時刻よりも前に、対流層内部において減速し

<sup>\*3</sup> 観測された速度の2乗をある時間幅にわたって平均したもの。時間 $t$ 、速度 $V(t)$ 、時間幅 $T$ として、音波振動強度は $(1/T) \int_0^T [V(t)]^2 dt$ と表される。

<sup>\*4</sup> 表面で観測される音波の減衰は表面下の擾乱源による。擾乱の候補として、磁場による音波の吸収や散乱、磁場によって対流が抑制されるために音波の生成が弱まる効果、さらには表面下の移流などが考えられている。

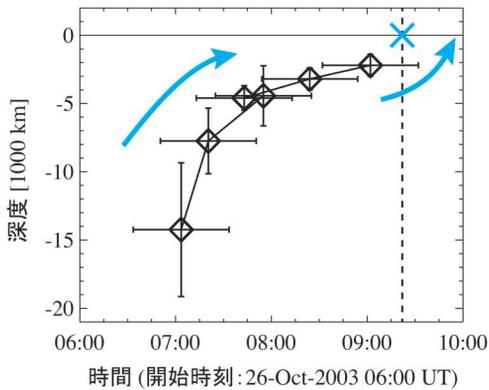


図6 各音波振動強度マップにおける振動の減衰開始時刻(ダイヤモンド). ×と破線は太陽表面における磁束の出現時刻を表す.

つつ上昇する傾向を示している. 音波の減衰が浮上磁場によるものと仮定すると, この図はシミュレーションの予測する「2段階浮上」を描いていることが見てとれる. シミュレーション結果と日震学観測が整合的であることは, 図3と図6を比較すれば一目瞭然であろう.

## 5. まとめ

太陽の表面に現れる活動領域は, 太陽深部から磁場が浮上することで形成されると考えられている. しかし, われわれはその表面下の磁場を見ることができないため, どのように磁場が浮上してくるのかわることができない. それを克服する手段として, われわれは数値シミュレーションと日震学を用いた.

始めに, 太陽の深さ2万kmからの浮上磁場シミュレーションを行った. このスケールは, 従来の研究で行われてきた太陽内部に関するグローバルな浮上シミュレーションと表面層から上空への浮上シミュレーションとのギャップを埋める試みといえる. その結果, 磁束は表面下で一時的に減速しテーブル状に広がった構造をもつことや, 圧

縮されたプラズマが水平方向に発散する様子などが明らかになった. これらのシミュレーション結果をまとめ, 磁束の「2段階浮上」モデルを提案した.

つづいて, 日震学を用いた浮上磁場の検出に取り組んだ. 従来の局所の日震学的手法とは異なり, 本研究では太陽表面に観測される音波振動強度を用いる手法を新たに開発した. この手法を実際の活動領域データに適用したところ, 磁束が表面に出現する2時間以上前に対流層深さ14,000 km付近のマップで音波振動の減衰が始まり, 各マップにおける減衰開始は上昇かつ減速する傾向を示した. 音波の減衰を磁場によるものだと考えると, この傾向は「2段階浮上」モデルによく一致する. すなわち, シミュレーションに基づく理論モデルを観測的にも検証できたということである.

これら二つの結果から明らかになった「2段階浮上」モデルは, 太陽の磁束輸送過程において表面層が非常に重要な役割を果たしていることを示唆している. 対流層の最上部では圧力や密度が急激に減少し, 音速も温度の減少によって周囲のプラズマ速度を下回るようになる. また, (近似的に見て) 等温成層した光球は対流安定層であるため, 流体の上昇運動を妨げる. 以上の効果によって, 対流層を浮上してきた磁束は急速に膨張し, 板状の構造をもつ. 磁束の上昇運動は減速に転じ, また, 表面層を突破するに伴ってプラズマベータ<sup>\*5</sup>は1を下回るようになる. このように, 太陽表面層は磁場に対して「遷移層」<sup>\*6</sup>のように振る舞うことが理解されるのである.

## 6. 今後の展望

ここまで, われわれが行った浮上磁場シミュレーションと日震学的観測研究について紹介して

\*5 ガス圧 $p$ と磁気圧 $p_m$ の比:  $\beta = p/p_m$ . この値が1を下回るということは, ガス圧優勢の状況から磁場が卓越した状況に変化することを意味する.

\*6 通常, 太陽の遷移層は約1万Kの彩層と約100万Kのコロナを接続する厚さ数百kmの急激な温度勾配層を指す.

きた。シミュレーションと観測の結果は非常に良い整合性を示すため、磁束の浮上過程、特に光球付近におけるダイナミクスはよくわかってきたように思える。しかし、実際にはまだ多くの問題が残されている。

例えば、今回の浮上磁場シミュレーションでは、終状態においても磁束の大半が太陽表面下に残されたままになっている(図2f)。磁束管の全体を表面より上空に持ち上げるプロセスとして期待されるのが「抵抗性浮上」<sup>14)</sup>と呼ばれる過程である。これは、太陽表面に出現した磁束が小スケールの磁気リコネクション(磁力線再結合)を繰り返すことによって、プラズマのみを下方に排出し、磁束を効果的に浮上させるプロセスである。近年盛んになってきた輻射入りの浮上磁場シミュレーション<sup>15)</sup>では、輻射冷却によって駆動された表面对流が磁気リコネクションを助ける役割を果たしていることが明らかとなっている。浮上磁場領域をH $\alpha$ 線で観測する際に見られる局所的な増光現象は「エラーマンボム」<sup>16)</sup>と呼ばれ、約100年も前から存在が知られているが、エラーマンボムは抵抗性浮上の磁気リコネクションによって発生するという説が提唱されており<sup>14)</sup>、実は浮上磁場・活動領域の形成に重要な役割を果たしている可能性が高い。したがって、これを数値的・観測的に検証する意義は大きいだろう。

また、活動領域に生じる突発的エネルギー解放現象「太陽フレア」も、浮上磁場に深く関係している可能性がある。経験的に、太陽フレアは複雑な形状の活動領域に生じることが知られている<sup>17)</sup>。このような複雑な活動領域においては、磁力線はポテンシャル磁場から逸脱した構造を取り、自由磁気エネルギーを保持していることが予想される。この自由エネルギーを磁気リコネクションや不安定性を通じて解放するのが太陽フレアである。すなわち、太陽フレアは磁場の自発的なエネルギー緩和過程として捉えることができる。このようなフレア活動領域の形成も、対流層内部から

浮上してくる磁束管の形状に由来するものと考えられる。磁束管が対流層内部で複雑な構造をもっていれば、太陽表面上に形成される活動領域も複雑な構造をとるであろう。また、最新の研究ではフレアを発生させるためには特徴的な磁場構造が必要であることが提唱されているが<sup>18),19)</sup>、その磁場構造の候補の一つが微細な浮上磁場である。したがって、フレア発生機構の本質的な理解のためには、大スケールの浮上磁場(フレア活動領域の形成)とともに小スケールの浮上磁場(フレアのトリガー磁場)を解明することが重要なカギとなっている。

これまで見てきたように、浮上磁場は、それ自体が物理過程として興味深いだけでなく、ダイナモ機構から太陽フレアまで、また、大スケールから小スケールまで、太陽のさまざまな活動現象を結びつける結節点として機能していることがわかる。また、浮上磁場に関連するさまざまな磁気活動現象のうち、特に小スケールの現象を研究するには、高時間・高空間分解能の観測機器が不可欠である。日本の太陽観測衛星「ひので」や次期太陽観測衛星計画Solar-Cには、この点で重要な寄与を果たすことを期待している。

## 謝 辞

本稿の科学的な内容は筆者の博士論文<sup>20)</sup>の一部および投稿論文<sup>21),22)</sup>に基づいています。本研究は共著者をはじめ多くの方々協力の上になり立っています。特に東京大学・横山央明准教授(筆者の指導教員)と国立天文台・関井 隆准教授には本稿の執筆にあたり貴重な助言をいただきました。また、月報編集委員の国立天文台・勝川行雄助教には本稿の執筆をご提案いただきました。皆様に深く感謝いたします。

## 参考文献

- 1) Parker E. N., 1955, ApJ 121, 491
- 2) Fan Y., 2009, Living Reviews in Solar Physics 6, 4
- 3) Spruit H. C., 1981, A&A 98, 155
- 4) Gough D. O., 1969, Journal of Atmospheric Sciences 26, 448
- 5) Shibata K., et al., 1989, ApJ 345, 584
- 6) Gizon L., Birch, A.C., 2005, Living Reviews in Solar Physics 2, 6
- 7) Kosovichev A. G., 2009, Space Science Reviews 144, 175
- 8) Ilonidis S., et al., 2011, Science 333, 993
- 9) Magara T., 2001, ApJ 549, 608
- 10) Toriumi S., et al., 2012, ApJ 751, 154
- 11) Rempel M., et al., 2009, Science 325, 171
- 12) Zwaan C., 1985, Solar Physics 100, 397
- 13) Hartlep T., et al., 2011, Solar Physics 268, 321
- 14)ariat E., et al., 2004, ApJ 614, 1099
- 15) Cheung M. C. M., et al., ApJ 720, 233
- 16) Ellerman F., 1917, ApJ 46, 298
- 17) Sammis I., et al., 2000, ApJ 540, 583
- 18) Kusano K., et al., 2012, ApJ 760, 31
- 19) Toriumi S., et al., 2013, ApJ 773, 128
- 20) Toriumi S., 2014, 博士論文, 東京大学
- 21) Toriumi S., Yokoyama T., 2012, A&A 539, A22
- 22) Toriumi S., et al., 2013, ApJ 770, L11

## Solar Flux Emergence and Activity Phenomena

**Shin TORIUMI**

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

Abstract: In the Sun, most prominent magnetic activity phenomena occur in the “active regions,” which are thought to be produced by rising magnetic fields from the deep solar interior. We have investigated this “flux emergence” by taking two different approaches: numerical simulation and helioseismology. From the simulations, we revealed that the magnetic flux rising in the interior temporarily slows down on approaching the surface, showing a two-step emergence. This temporal deceleration was also found in the actual Sun through the seismic analysis of observation data. Here we introduce our study and the results and show future perspective from a viewpoint of the solar flux emergence and various related activity phenomena.