

太陽静穏領域における 磁束量頻度分布の維持機構 —磁極素過程の頻度分布から迫る—



飯田 佑輔

〈東京大学大学院理学系研究科 地球惑星科学専攻 〒113-0033 東京都文京区 7-3-1〉

e-mail: iida@eps.s.u-tokyo.ac.jp

太陽表面磁場はさまざまな太陽表面におけるダイナミックな現象の起源となっており、その理解は重要である。さらに太陽静穏領域の磁場は、現在最も詳細に観測できる恒星上の対流-磁場相互作用の場として興味深い。しかしながら、いまだにその定量的な描像は得られていない。特に磁束の輸送、維持機構については、空間分解能の向上とともに太陽表面上の総磁束量、供給量、消失量が大きく変化し決定的な観測結果があるとは言えなかった。磁極の出現、分裂、合体、消滅という素過程を調べることで、太陽静穏領域における磁束量頻度分布の維持機構についていくつかの側面がわかってきた。今回の記事では、磁極素過程の頻度分布とそこから提案する太陽静穏領域における磁束量維持機構の描像について紹介する。

1. 太陽表面磁場の重要性和面白さ

まずは、太陽表面磁場を調べることの重要性和面白さについて納得していただきたいと思う。太陽物理学における研究というと、多くの方はフレア、ジェット、X線輝点といった非常にダイナミックな表面現象やコロナ加熱問題、太陽ダイナモ問題といったグローバルな問題を頭に思い浮かべると思う。もちろん、これら個々の現象の物理過程の理解はプラズマ現象の理解という点で重要であることは言うまでもない。しかしながら、さらにこれらの現象に共通した因子はと考えると、太陽表面磁場に行き当たる。

太陽表面磁場は、先に述べたフレア、ジェット、X線輝点などのダイナミックな現象の起因となっていると考えられており、その構造理解は個々の現象の統計的性質を理解するために必要で

ある。また、コロナ加熱問題や太陽ダイナモ問題に対して、表面磁場運動の定量化は重要な観測事実となっている。これらから、太陽表面の磁場構造を理解することは個々の表面活動の理解とグローバルな太陽問題をつなぐものであり、表面磁場構造理解の重要性が分かる。

別の視点からその面白さを考えてみよう。太陽静穏領域では対流の影響を受けた磁場構造を見ることができる(図1)。対流に翻弄され気持ち悪く動く磁場の固まり(以降、磁極と呼ぶ)は眺めていると飽きない(私的感想を失礼!)が、このような恒星上の対流-磁場相互作用の場を詳細に観測できるのは、現在のところ太陽表面のみである。その点で、太陽表面磁場は対流-磁場相互作用の実験室として面白く、その理解は重要であるといえる。

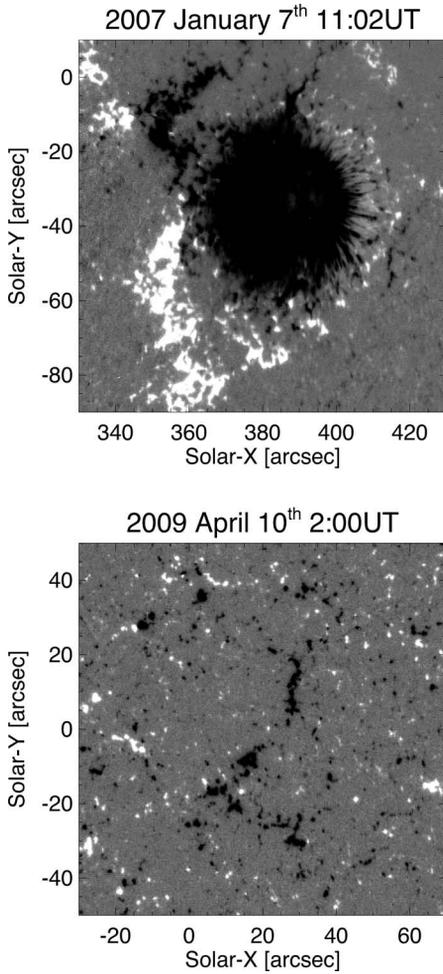


図1 太陽における活動領域(上)と静穏領域(下)における視線方向磁場観測データ。白がN極, 黒がS極を示す。静穏領域ではセル状の構造(ネットワーク磁場構造)が見られる。

2. 太陽面における磁束量分布の理解

2.1 磁束量分布

前節では、太陽表面磁場の重要性と面白さを述べたが、具体的にどのような未解決問題があるのだろうか？ 本稿では、磁束量という観点から問

題提起をしたい。

磁場構造を特徴づける物理量はいろいろ思い浮かぶが、一つに磁束量がある。太陽の全球磁束量については、太陽磁場観測が比較的定常に行われ始めた1950年代頃から報告されている¹⁾。しかし、その値は時代が進み分解能が上がるにつれて著しく大きくなり*¹、現在も最終的な結論には至っていない。太陽表面磁場測定はゼーマン効果を観測することで行われている。その線形性*²から、高分解能ほど観測される磁束量が増えるだろうと予測できる。しかし、オーダーまで変わるといのは、そのような観測手法の効果だけでなく、小さい磁極のほうが総磁束量により寄与していることを意味している。

これまでの議論からわかるように、単純に総磁束量を調べようとした際にも、そのスケール依存性を調べるのが重要となる。つまり、総磁束量を決定するには、どれほど小さい磁極が効いてくるのかということを定量的に調べなければならない。その観点から、各磁極に含まれる磁束量の数頻度の密度関数(以降、磁束量分布)が1990年代から調べられている^{2),3)}。これまでに、いろいろな磁束量分布が報告されてきたが、2009年のParnellらの論文により一つの結論を得た³⁾。彼女たちは、広い視野をもつSOHO衛星(Solar and Heliospheric Observatory)/MDI望遠鏡(Michelson Doppler Imager)と高分解能をもつひので衛星(Hinode)/可視光望遠鏡(Solar Optical Telescope)の視線方向磁場データを組み合わせることで、活動領域から現在の観測限界までの磁束量分布を得た。図2にその結果を示す。

この図を見ると、磁束量分布がべき分布であり、そのべき指数は-1.85であることがわかる。密度関数の傾きは-2を境に、大きい磁極か小さ

*¹ おおよそ、 10^{22} Mxから 10^{24} Mxまで変化している。

*² 偏光度の磁場に対する2次項の大きさは、その1次項の大きさに対して 1.06×10^{-10} B [G]である。典型的な太陽表面磁場の強さ(100-1,000 G)では、2次項は非常に小さい。

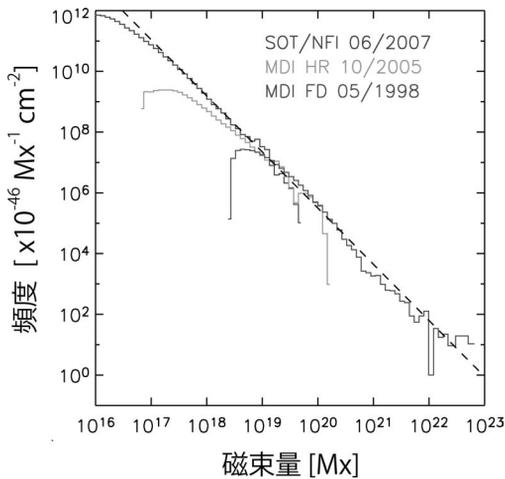


図2 Parnellら³⁾によって得られた磁束量分布. 広い視野をもつSOHO衛星/MDI望遠鏡と高い分解能をもつひので衛星/可視光望遠鏡のデータを合わせて用いることで, 活動領域から静穏領域の観測限界付近まで続くべき分布を得た.

い磁極のどちらかが総磁束量に対して支配的であるかが変化する^{*3}. -1.85という指数は, 大きい磁極が総磁束量に対して支配的であることを示す. さきほどの, 分解能が上がるほど総磁束量が増えるという話と矛盾するように感じるかもしれない. しかし, この分布は-2に近い傾きをもっているので, 精度の良い総磁束量を求めるにはある程度小さい磁束量まで考えなければいけない.

Parnellらの研究結果³⁾により, 磁束量のスケール依存性がわかったと言える. では, この磁束量分布はどのような機構で形成されているのだろうか? これには, 二つのアイデアが提案されている. 一つは「太陽表面下からの磁束量供給の形を反映している.」というもので, もう一つは「太陽表面の磁極素過程で作られている.」というものだ. 砕いて表現すれば, 供給されたままの分布か, 表面で(おそらく対流による)作用を受けているかということである. よって, 磁束供給量

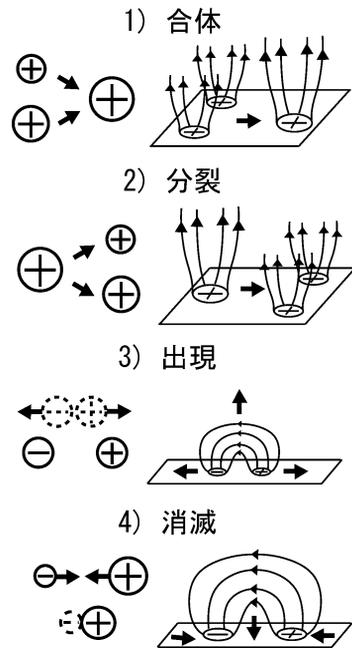


図3 1) 合体, 2) 分裂, 3) 出現, 4) 消滅の四つの磁極素過程の描像. それぞれ, 磁場観測画像での描像(左)と3次元描像(右)を示す.

に対して, 次節で述べる磁極素過程の頻度を調べることで, これらは区別ができると考えられる.

2.2 磁極素過程とその頻度

磁極素過程の描像について述べる. 磁極活動素過程とは, 磁極の1) 合体, 2) 分裂, 3) 出現, 4) 消滅の四つの過程を言う. 図3にそれぞれの素過程の描像を示す. ただし, 消滅については, Ω 字型磁束管の沈降もしくはU字型磁束管の上昇どちらが支配的であるか, まだ結論は確定していないことを注意したい^{4), 5)}.

太陽表面での実効的な磁気拡散率は非常に小さい. このことから, これらの磁極素過程のみにより, 磁極の磁束量やその数が変化すると考えられる. まず, 合体や分裂は総磁束量には変化を与えず, 磁極の数を増減する働きのみをする. これら

*3 総磁束量は, $\int_{\phi_{\min}}^{\phi_{\max}} \phi \cdot \phi^{\gamma} d\phi = \frac{1}{\gamma+2} [\phi_{\max}^{\gamma+2} - \phi_{\min}^{\gamma+2}]$ で与えられる.

合体や分裂の過程については、これまであまり着目されておらず、その頻度について統計的な研究は存在していない。一方、出現や消滅は総磁束量の変化も伴う。これらの現象は極紫外線など高温の輝線で発光現象を伴うなど、非常にダイナミックであり1980年代から着目されてきた。しかしながら、それらの発生頻度は総磁束量以上に、分解能に依存した結果が得られてきた*4。

これまでに出現以外の三つの過程については、磁束量依存性を調べられていない⁶⁾。筆者は、素過程の自動判別コードを作成し、特に太陽静穏領域において統計頻度の比較とその磁束量依存性を調べることを試みた。

3. 自動検出による磁極素過程の頻度

3.1 磁極の自動判別と追跡方法

本稿の始めに述べた通り、太陽表面の磁極は非常に複雑な動きをしている。そのため、統計的な結果を効率良く得るためには、磁場画像データに対して自動的に磁極の追跡と各素過程を判別するコードを利用することが有効である。しかし、磁極の自動追跡、そして各素過程を判別するコードは一般的には存在しなかった。そこで、筆者は磁極の自動検出コード開発で実績のある Hageenaar 博士との共同研究を通して、各素過程の自動判別コードを作成した。その概略を説明する。

まず、磁極の判別方法は、これまでの研究に習い Clumping 法を用いた。Clumping 法では、あるしきい値以上のピクセルを有効とし、それらの固まりを一つの磁極と定義する。次に、磁極を追跡する。磁極の追跡では、ある時刻と次の時刻の画像間での空間的重なりを利用して、同一磁極と判断した。また、追跡中に複数の磁極と重なりをもつ場合は、新たな磁極が出現もしくは消滅したかを判断することで分裂もしくは合体を判別する。すべての磁極を追跡した後、出現と消滅を

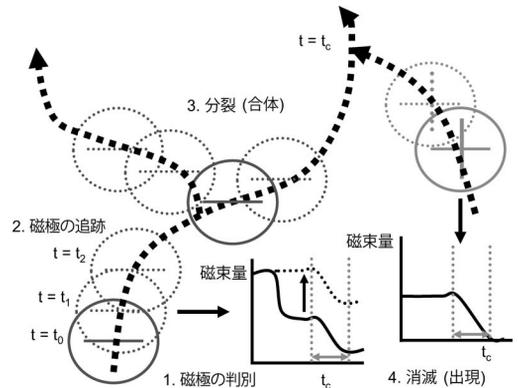


図4 磁極の追跡方法と各素過程の判別方法の概略。

判断する。これらは、各磁極内に含まれる磁束量の時間変化の中で、合体や分裂ではないものの組を作ることで判断する。磁極の追跡方法と各素過程の判別方法の概略を図4に示した。

3.2 磁極素過程の頻度

前節で説明した磁極素過程の自動判別コードを、ひので衛星が取得した視線方向磁場データに適用した。自動判別コードの適応には、衛星観測などによる安定した分解能が要求される。さらに、静穏領域の磁場をできるだけとらえようとすると、安定した高い分解能をもつひので衛星による磁場観測データが、本解析には最適だと考えられる。今回は、高い時間分解能をもつ観測データ(データ1)と観測期間が非常に長い観測データ(データ2)の2データに適用した。

図5に判別された各素過程の例を挙げる。背景は観測された視線磁場データ、等高線(点線)は判別された磁極を示す。これを見ると、それぞれの磁極素過程が無事に判断されていることがわかる。

判別された磁極数と、各磁極素過程の数を表1に示す。この表を見ると、データ1とデータ2ともに合体と分裂の頻度が、出現と消滅の頻度よりも非常に大きい。これは、予想外の結果であった。また、その時間スケールは16分程度と非常

*4 これらの現象頻度で総磁束量を割った磁束入れ替えのタイムスケールは、数日だったものが10分程度になっている。

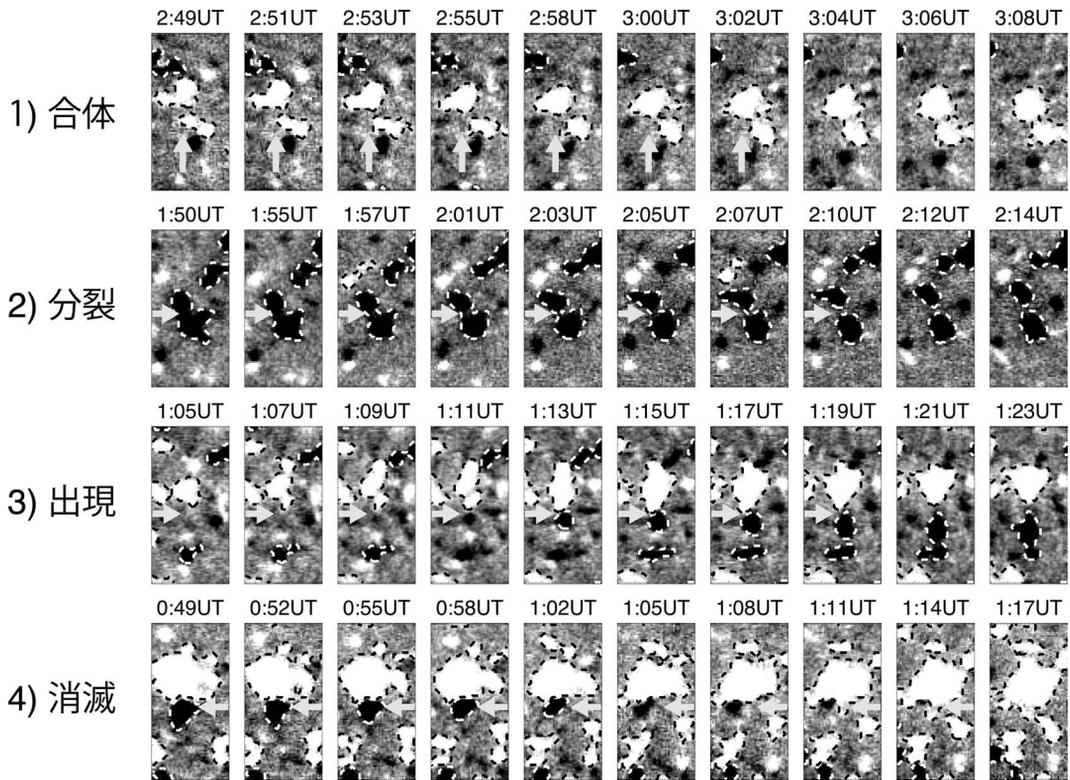


図5 自動判別コードを用いて判別された磁極素過程. それぞれ1) 合体, 2) 分裂, 3) 出現, 4) 消滅を示す.

表1 自動判別された磁極数とその素過程頻度

	データ1		データ2	
	正極	負極	正極	負極
磁極	1,636	1,637	21,823	19,544
分裂	536	535	5,905	4,252
合体	493	482	5,764	4,143
出現	3		27	
消滅	86		775	

に短く、私たちが磁極と呼んでいる構造は思っているよりも安定していないことが分かった。

3.3 磁極素過程頻度の磁束量依存性

さらに、十分な数が検出された磁極の分裂、合体、消滅についてそれぞれの磁束量依存性を調べた。図6にその結果を示す。

図6上段に、合体確率の磁束量依存性を示す。合体確率はその頻度分布を各磁束量ごとに個数で規格化したものである。つまり、単位時間、一磁

極あたりの合体確率である。この分布をべき関数でフィッティングすることで、べき指数0.28を得た。これから、合体確率の磁束量依存性は小さいと言える。次に、中段に分裂確率の磁束量依存性を示す。分裂では、分裂後の磁極が判別限界以下になってしまう効果があるため、その影響を考えなければならない。その効果を含めて磁束量依存性を考えたモデル線を点線に示す。観測された分裂確率は、このモデル線と大きな差が見られない。このことから、分裂についても磁束量依存性が小さいと言える。最期に、下段に消滅頻度の磁束量依存性を示す。今度は、磁束量の頻度分布よりも急峻なべき分布をしていることがわかる。べき関数でフィッティングした結果、べき指数として-2.5を得た。筆者らのデータでは、出現頻度については検出数が不足し有効な磁束量依存性が得られなかったが、Thorntonらの研究⁶⁾により

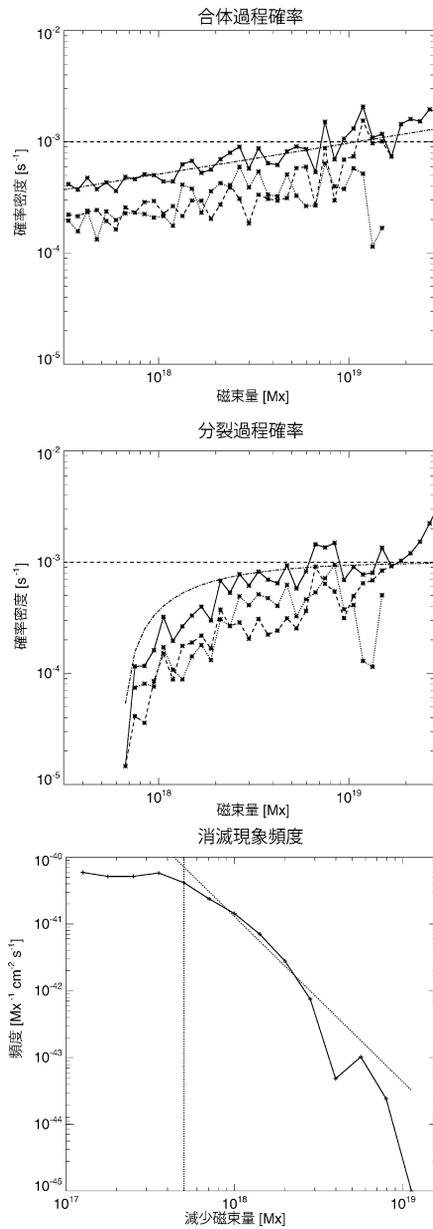


図6 各磁極素過程頻度の磁束量依存性. それぞれ (上) 合体現象確率, (中) 分裂現象確率, (下) 消滅現象頻度を示す. 合体, 分裂確率において, 実線, 点線, 破線はそれぞれ正負合計, 正極, 負極の観測結果, 一点鎖線はフィッティング線またはモデル線, 水平破線は103秒のタイムスケールを示す. 消滅確率において, 実線は観測結果, 点線はフィッティング結果, 垂直破線は自動判別コードの判別限界を示す.

調べられている. その結果は, べき指数 -2.7 の急峻なべき関数となり, ここで得られた消滅頻度と誤差の範囲で一致している.

4. 静穏領域における磁束量輸送, 維持の描像の提案

これまで得られた結果をまとめて, 静穏領域における磁束量に対する描像を提案したい. これまでに, 私たちが得た結果は以下である.

- 1) 出現, 消滅頻度に対して, 合体, 分裂過程頻度は非常に大きい.
- 2) 合体, 分裂確率は磁束量依存性が小さい.
- 3) 出現, 消滅頻度は磁束量依存性が大きい (べき指数 $-2.4 \sim -2.7$).

ここからどのような描像が描けるであろうか?

まず, 合体, 分裂過程頻度が出現頻度に対して非常に大きいことから, 磁束量分布は表面对流の作用を受けてつくられているだろうと考えられる. 本稿の最初に述べた疑問には, 「磁束供給の分布を直接反映している」のではなく, 「表面对流の作用を受けて作られている」というのが筆者の答えである.

次に, 消滅過程頻度の磁束量依存性について考えよう. 太陽の表面磁極の動きが対流運動に支配されていることを考えると, 磁極は正負間で特にぶつかりやすいという性質はないと考えられる. さらに, 前述の合体, 分裂による磁束量分布の維持 (つまり, 消滅現象以外での維持) を考える. これらの仮定のもとでは, 磁極の衝突は一定速度をもったランダム運動における衝突と同様に考えられる. つまり, 衝突確率は自分と相手の数の積に比例する. 詳細は省略するが, 磁束分布のべき指数を $-\gamma$ と置くと, 消滅現象頻度のべき指数は $-2\gamma+1$ となる. 観測結果は $\gamma=1.8-1.9$ であることから, $-2\gamma+1=-2.6-2.8$ が予想される. この値は観測で得られた急峻なべき分布に一致していると言える.

最期に, 出現, 消滅頻度が似た磁束量分布をも

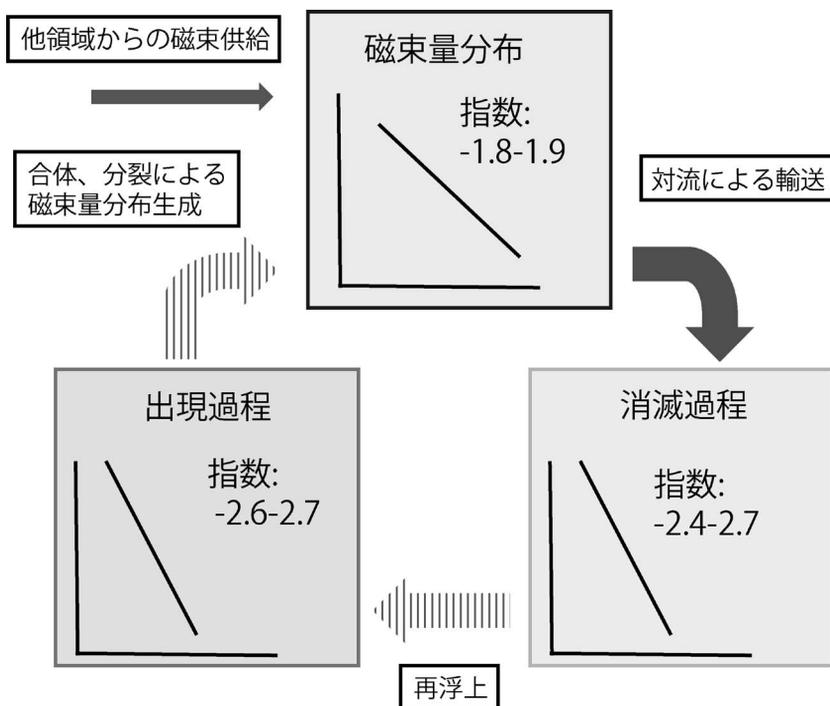


図7 提案する静穏領域における磁束量の描像.

つことから、消滅で沈降した磁束管が再浮上して出現として観測されるのではないかと考えられる。

ただし、これは大きな仮定であり、これからの検証が必要である。

ここまで述べてきた描像を図7にまとめる。

5. これからの展望

太陽面磁場観測データに磁極素過程の自動判別コードを適用することで、各素過程の頻度とその磁束量依存性を得た。さらに、そこから静穏領域における定性的な磁束量の描像を提案した。本稿では割愛したが、筆者らはその後、各素過程の発生頻度と磁束分布の数方程式（磁気化学方程式と呼ばれる⁷⁾）の数値計算を行っている。これにより、観測で得られた磁極素過程頻度をを用いると図7の描像が定量的に達成できることを示すことができた。次の疑問は、図6に示された素過程の統計頻度の力学的理解、つまり各素過程を支配する力学過程の決定である。これには、ひので衛星に

よる偏光スペクトル観測を利用した3成分磁場と対流速度場の比較、輻射磁気流体数値計算での各過程の再現によって取り組む予定である。筆者は、この力学的理解から得られた知見を広げ、より一般の対流-磁場相互作用の理解に広げることができればと考えている。

謝辞

本稿は、筆者の博士論文⁸⁾ また投稿論文⁹⁾ の内容を中心に執筆しました。本稿の研究内容は、多くの方々やプログラムなしでは得られないものでした。まず、辛抱強く指導して下さった横山 央明准教授に感謝を示したいと思います。次に、本稿に置いて重要な共同研究を行った、Lockheed Martin Space and Astrophysical Laboratory の Hagenaar 博士と、その機会を与えていただいた GCOE プログラム「地球から地球たちへ」に感謝したいと思います。また、本稿の内容は安定した高分解能をもつひので衛星の観測データが

あってこそでした。ひので衛星の開発から運用まで携わっているすべてのの方々に感謝を示したいと思います。

参考文献

- 1) Babcock H. W., Babcock H. D., 1955, ApJ 121, 349
- 2) Wang J., et al., 1995, Sol. Phys. 160, 277
- 3) Parnell C. E., et al., 2009, ApJ 698, 75
- 4) Kubo M., Low B. C., Lites B. W., 2010, ApJ 712, 1321
- 5) Iida Y., Yokoyama T., Ichimoto K., 2010, ApJ 713, 325
- 6) Thornton L., M. Parnell C. E., 2011, Sol. Phys. 269, 13
- 7) Hagenaar H. J., Schrijver C. J., Title A. M., 2003, ApJ 584, 988
- 8) 飯田佑輔, 2012, 博士論文 (東京大学)
- 9) Iida Y., Hagenaar H. J., Yokoyama T., 2012, ApJ 725, 149

Flux Transport and Maintenance in Quiet Regions on the Solar Surface —From the Investigation of Frequency Distribution of Flux Content—

Yusuke IIDA

Department of Earth and Planetary Science, University of Tokyo, 7-3-1 Hongo, Bunkyo-ku, Tokyo 113-0033, Japan

Abstract: The understanding of magnetic field on the solar surface is important not only as a cause of the various solar activities but also as an actual magneto-convection system on the stellar surface. However, the quantitative understanding of it is still in veil. Especially the total flux amount, flux supply from the solar interior, and flux removal from the surface drastically increase with the higher resolution. We find some aspects of the flux maintenance system in the quiet Sun by means of the investigation of frequencies of patch interactions on the solar surface, namely emergence, splitting, merging, and cancellation. We also suggest the new physical picture of the flux maintenance in the magneto-convection system in this article.