

3.3 太陽嵐の予測

3.3.1 フレア活動領域の形成

鳥海 森 (宇宙航空研究開発機構宇宙科学研究所)

(2019年10月31日受付、2021年5月31日公開)

3.3.1.1 黒点分類とフレア活動性

黒点の形状はフレア活動度を定める重要な要因である。例えば、代表的な黒点分類法であるマッキントッシュ分類 (チューリッヒ分類の拡張版) では、黒点群を、広がり方、半暗部の対称性、全体の分布によってグループ分けするが、形状的に複雑な黒点ほどフレア活動度が高いことが統計的に示されている (Bornmann & Shaw 1994)。また、黒点群の磁氣的構造に着目した分類法としてよく用いられるのがウィルソン山天文台分類であり、これは以下の四つの識別子の組み合わせで表される。

- α : 単極型の黒点群
- β : 正極と負極からなる単純な双極型の黒点群
- γ : 正極負極いずれの黒点も不規則に分散しており β 型とは分類できない複雑な黒点群
- δ : 正極負極の暗部が互いに 2° 以下で近接し同一の半暗部を共有する黒点群

このうち、デルタ黒点は非常に高いフレア活動度を示す。様々な黒点群についてフレア強度を調べた統計研究 (Sammis et al. 2000) からは、黒点群の面積とフレア強度の間には明瞭な相関が存在するが、同時に、黒点群の複雑性が増すに従ってフレア規模が増大することが示された。特に、X4 クラス以上のフレアは全て 1000 MSH (MSH は太陽の半球表面積の 100 万分の 1 で約 300 万 km^2 に相当) 以上の面積を持つベータ・ガンマ・デルタ黒点から発生している。

このように、面積が大きい黒点、また複雑な黒点ほど、より大型の太陽フレアを生じやすいことが一般的な傾向として知られるが、これらは大型フレアの十分条件ではないことに注意を払う必要がある。例えば、1947年4月に出現した、19世紀後半以降で最大の面積を持つ黒点群は顕著なフレア活動を示さなかったことが知られている (Aulanier et al. 2013)。すなわち、フレア発生には複数の要因が存在する可能性があり、観測・理論研究を進めることでその組み合わせ条件などを解明する必要がある。

3.3.1.2 フレア活動領域の形成と磁気的特徴

長年に渡るビッグベア天文台での観測から、H. Zirin らはデルタ黒点の形成過程を

- タイプ I : 磁束が同時多発的に浮上
- タイプ II : 既存の黒点の近傍に磁束が浮上
- タイプ III : 2つの浮上磁場が衝突し四重極型の黒点群を形成

の3種類に大別した (Zirin & Liggett 1987)。これらはデルタ黒点の形成が大局的な磁束浮上の結果として生じること、すなわち、太陽表面下における磁束の理解が本質的に重要であることを示唆している。しかしながら、太陽内部を光学的に観測することは不可能である。

そこで、太陽表面で観測された見かけの黒点運動から、太陽内部における磁束の形状を推定する試みがなされた。例えば、強くねじれた磁束がキンク不安定性によって浮上する可能性 (Tanaka 1991; Linton et al. 1996; Ishii et al. 1998, 2000) や、最上部がU字型に凹んだ形状を持つ磁束が浮上する可能性 (Poisson et al. 2013) などが指摘された。しかし、これらはいずれも黒点観測からの推測であり、浮上磁場の幾何学的構造とフレア活動領域の形成との因果関係を解明するには、磁気流体数値シミュレーションの登場を待たねばならなかった。

一方、フレア活動領域の観測的特徴づけは、磁場診断技術の発展、特に光球ベクトル磁場観測の実現に伴って格段の進歩を遂げた。太陽フレアは磁気リコネクションを通じたエネルギー解放現象であるため、磁気エネルギーが蓄積される磁気中性線(磁場の極性が反転する領域)の近傍にフレアの発生と関連する特徴的な磁場構造が現れるのは自然なことと言える。大規模なフレアを生じる活動領域の磁気中性線は、以下のような特徴を持つことが知られる (Hagyard et al. 1984)。

- 磁場強度: 強い水平磁場(太陽面に平行な磁場成分)強度を示す
- 磁場空間勾配: 磁気中性線を横切る向きに、垂直磁場(太陽面に垂直な磁場成分)が急峻な空間勾配を持つ
- 磁気シア: 水平磁場が磁気中性線とほぼ平行に揃っており、ポテンシャル磁場からの逸脱が顕著である

これらの磁場構造は黒点の回転運動やシア運動に伴って形成されることが多い (Harvey & Harvey 1976)。

図1は「ひので」衛星によるXクラスフレアの彩層画像と黒点のベクトル磁場データを示している。フレアは近接した正負極黒点(デルタ黒点)に挟まれた磁気中性線を中心として発生し、そこでは水平磁場が強くシアしている。また、フレアが発生する磁気中性線にしばしば現れる「磁気チャンネル」と呼ばれる正負極磁場の縞模様が見られる (Zirin & Wang 1993)。

磁気中性線の上空で観測される特徴的な構造として、H α 線などで見られる「フィラメント」や軟X線で見られるS字状の「シグモイド」などが挙げられる。これらはいずれもフラックスロープと呼ばれるねじれた磁力線の束を反映しており、フレアに伴い宇宙空間へ放出されることでコロナ質量放出(CME)の磁気的な骨格になると考えられている。

光球で観測されるデルタ黒点、シア磁気中性線や黒点回転、上空に現れるフラックスロープなどは、いずれも活動領域の大局的な成長に伴って形成される構造であり、フレア活動領域の理論モデルはこれらの形成を矛盾なく説明できなければならない。

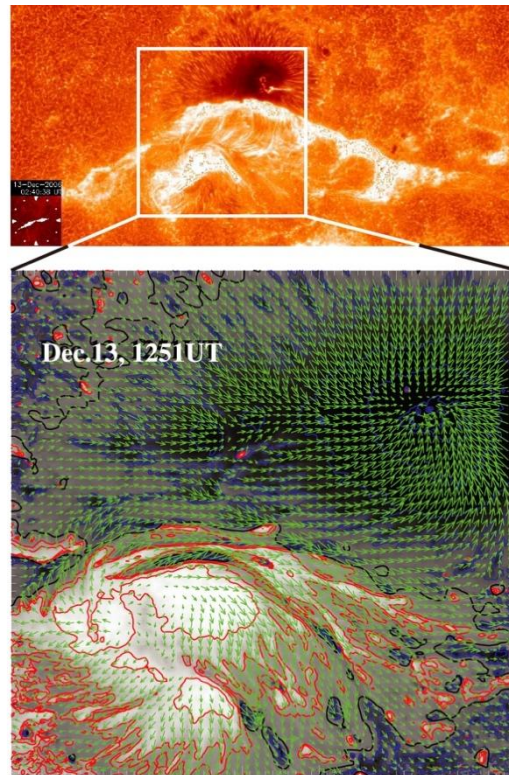


図1. 「ひので」衛星によるXクラスフレアの観測。(上) カルシウムH線画像。岡本文典氏提供。(下) 光球ベクトル磁場。白黒は視線方向磁場の正極・負極成分、緑矢印は視線方向と垂直な平面内の磁場を表す。赤、青、黒線は正極黒点、負極黒点、磁気中性線を示す。Wang et al. (2008) より許可を得て転載。

3.3.1.3 フレア活動領域の形成理論

これまで観測家たちが指摘してきたように、デルタ黒点を含むフレア活動領域の形成過程を理解するには、太陽内部から磁束が浮上する様子を追跡せねばならない。それを理論的に解決する手段として、磁気流体 (MHD) シミュレーションを用いた浮上磁場のモデル計算がなされてきた。これは、太陽成層大気を模した計算領域を設置し、対流層内部から磁束を浮上させ、活動領域を形成させる数値実験である。浮上磁場の計算条件を工夫することで、デルタ黒点を再現する試みが行われてきた。

1990年代にはねじれの強い磁束管がキンク不安定性によって浮上するプロセスが検証された。キンク不安定性によって磁束管のねじれ(磁束管軸周りの磁力線の巻きつき)がよじれ(磁束管の軸自体の旋回)に変換され、全体として浮上磁束管は強く変形を受ける。その結果、太陽表面で近接した

正負極黒点（すなわちデルタ黒点）や周囲の複雑な磁場配置、強い黒点回転が生じることが示された（Fan et al. 1998; Takasao et al. 2015）。キンク不安定性によってもたらされる複雑な磁場配置は、タイプ I 型のデルタ黒点を想起させる。

2000 年代に入り、2 本の浮上磁束管が互いに衝突することで、太陽表面にデルタ構造を作るモデルが提案された（Murray & Hood 2007）。2 本の磁束管に非対称性を仮定すれば（例えば一方が先行して浮上しもう一方が遅れる）、これはタイプ II 型のデルタ黒点をよく説明する。

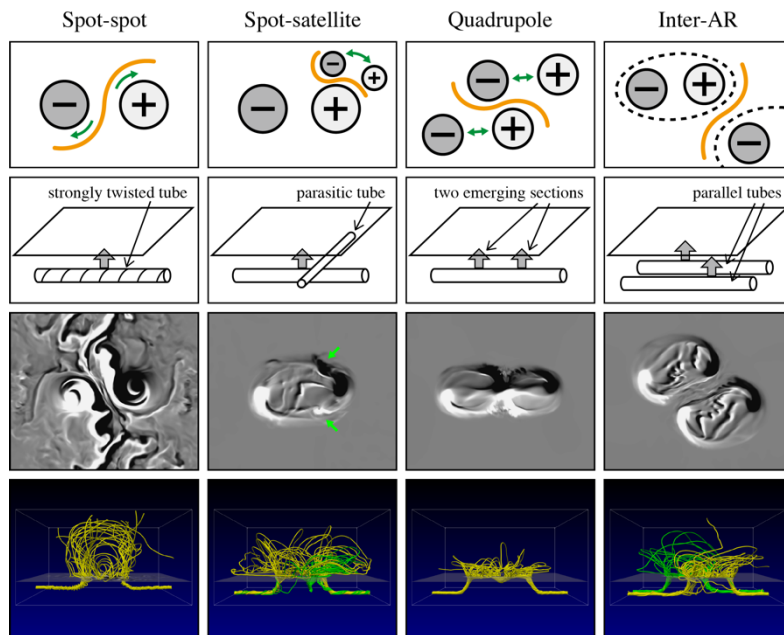


図 2. 浮上磁場シミュレーションによるフレア活動領域の形成モデル。左からキンク不安定性モデル、磁束管衝突モデル、複数浮上モデル、複数磁束管独立浮上モデル。上から、黒点の磁場配置、計算条件、光球磁場、磁力線を表す。Toriumi & Takasao (2017) より許可を得て転載。

さらに別の可能性として、1 本の磁束管が 2 箇所で浮上するモデルが提案された（Toriumi et al. 2014）。この場合、太陽表面では 2 つの浮上磁場が互いに衝突することで、シアした磁気中性線を内部に持つ四重極型のデルタ黒点が形成される。すなわち、これはタイプ III 型のデルタ黒点に相当する。

図 2 では、上に挙げた 3 種類を含むフレア活動領域の理論モデルを比較している。対流層内部の磁束管に対し、ねじれを強くする、付随する小規模な磁束管を設置する、浮上箇所を 2 箇所にするなど、幾何学的構造に変更を施すことで多彩なデルタ黒点が作られる。また、磁束浮上によって形成されたコロナ磁場を詳細に観察すると、フラックスロープ状のねじれた磁力線構造が存在することも明らかになった。さらに近年では、太陽内部の乱対流を再現する輻射磁気流体シミュレーションを活用することで、磁場が対流と相互作用しながら浮上する、よりリアリスティックなデルタ黒点の再現計算が

可能となっている (図3)。これらの数値実験により、フレア活動領域の観測的特徴を矛盾なく説明できるようになりつつある。

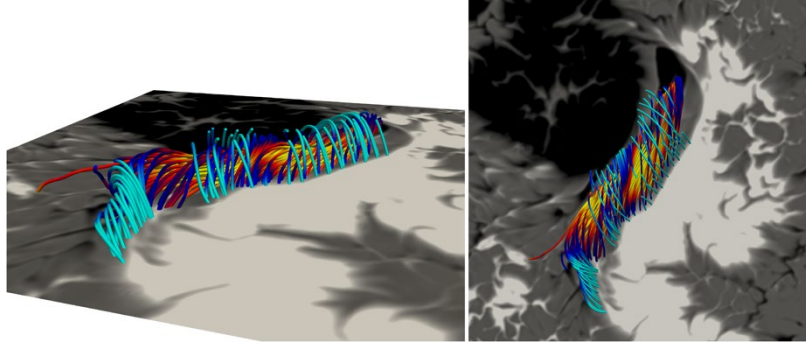


図3. 輻射磁気流体シミュレーションにより再現されたデルタ黒点。磁気中性線の上空にはフラックスロープが形成されている。Toriumi & Hotta (2019) より許可を得て転載。

3.3.1.3.4 まとめと今後の課題

これまで見てきたように、フレア活動領域にはデルタ黒点、シア磁気中性線、黒点回転やフラックスロープなどの特徴的な磁場構造が存在し、それらは大局的な磁束浮上——特に太陽内部における磁束のねじれや対流との相互作用が大きな役割を果たす——の結果として形成されることが明らかになった。これは、ベクトル磁場データなどに基づく観測的研究と、浮上磁場シミュレーションを応用した理論的研究を相補的に組み合わせることで得られた描像である。

フレア活動領域の研究は私たちの物理的理解を深めるだけでなく、近年では、得られた知見をフレア発生の予測に応用する取り組みも精力的に進められている。例えば、機械学習を応用したフレア予測システムでは、活動領域で測定されるカレントヘリシティ・ローレンツ力・自由磁気エネルギー・電流など磁場のねじれに関連する物理量や、活動領域の面積や総磁束量など黒点サイズに対応する物理量と、発生するフレアの軟 X 線強度との対応関係を学習することで予測を行っている (Bobra & Couvidat 2015)。数値シミュレーションに基づく物理モデルと組み合わせることで、近い将来には精度の高いフレア予報が実現するであろう。

その一方で、未解明の問題が残されていることも指摘しておきたい。例えば、そもそもフレア活動領域を形成する浮上磁場がどのようにねじれを獲得するのかは依然としてはっきりしておらず、太陽・恒星ダイナモ理論の解決すべき重要課題として残されている。フレア発生メカニズムとの関連では、フレアを駆動する微細な磁場構造が存在する可能性が観測的、理論的に指摘されているが、そのような微細構造がフレア活動領域の内部にどのように形成されるかも明らかにする必要がある。これらを解明するには、観測技術と理論モデルの双方を高度化することが不可欠である。

参考文献

- Bornmann, P.L., Shaw, D.: Flare Rates and the McIntosh Active Region Classifications. *Solar Physics* 150, 127-146 (1994)
- Sammis, I., Tang, F., Zirin, H.: The Dependence of Large Flare Occurrence on the Magnetic Structure of Sunspots. *The Astrophysical Journal* 540(1), 583-587 (2000)
- Aulanier, G., Demoulin, P., Schrijver, C.J., Janvier, M.,ariat, E., Schmieder, B.: The standard flare model in three dimensions. II. Upper limit on solar flare energy. *Astronomy and Astrophysics* 549, A66 (2013)
- Zirin, H., Liggett, M.A.: Delta spots and great flares. *Solar Physics* 113, 267-283 (1987)
- Tanaka, K.: Studies on a very flare-active delta group: Peculiar delta spot evolution and inferred subsurface magnetic rope structure. *Solar Physics* 136, 133-149 (1991)
- Linton, M.G., Longcope, D. W., Fisher, G. H.: The Helical Kink Instability of Isolated, Twisted Magnetic Flux Tubes. *The Astrophysical Journal* 469, 954-963 (1996)
- Ishii, T.T., Kurokawa, H., Takeuchi, T.T.: Emergence of a Twisted Magnetic Flux Bundle as a Source of Strong Flare Activity. *The Astrophysical Journal* 499, 898-904 (1998)
- Ishii, T.T., Kurokawa, H., Takeuchi, T.T.: Emergence of Twisted Magnetic-Flux Bundles and Flare Activity in a Large Active Region, NOAA 4201. *Publications of the Astronomical Society of Japan*, 52, 337-354 (2000)
- Poisson, M., Lopez Fuentes, M., Mandrini, C.H., Demoulin, P.,ariat, E.: Study of magnetic flux emergence and related activity in active region NOAA 10314. *Advances in Space Research* 51(10), 1834-1841 (2013)
- Hagyard, M.J., Smith, J.B.Jr., Teuber, D., West, E.A.: A Quantitative Study Relating Observed Shear in Photospheric Magnetic Fields to Repeated Flaring. *Solar Physics* 91, 115-126 (1984)
- Wang, H., Jing, J., Tan, C., Wiegelmann, T., Kubo, M.: Study of Magnetic Channel Structure in Active Region 10930. *The Astrophysical Journal* 687(1), 658-667 (2008)
- Harvey, K.L., Harvey, J.W.: A study of the magnetic and velocity fields in an active region. *Solar Physics* 47, 233-246 (1976)
- Zirin, H., Wang, H.: Narrow lanes of transverse magnetic field in sunspots. *Nature* 363, 426-428 (1993)
- Toriumi, S., Takasao, S.: Numerical Simulations of Flare-productive Active Regions: delta-sunspots, Sheared Polarity Inversion Lines, Energy Storage, and Predictions. *The Astrophysical Journal* 850(1), 39 (2017)
- Fan, Y., Zweibel, E. G., Linton, M.G., Fisher, G.H.: The Rise of Kink-Unstable Magnetic Flux Tubes in the Solar Convection Zone. *The Astrophysical Journal Letters* 505(1), 59-63 (1998)
- Takasao, S., Fan, Y., Cheung, M.C.M., Shibata, K.: Numerical Study on the Emergence of Kinked Flux Tube for Understanding of Possible Origin of delta-spot Regions. *The Astrophysical Journal* 813(2), 112 (2015)
- Murray, M.J., Hood, A.W.: Simple emergence structures from complex magnetic fields. *Astronomy and Astrophysics* 470(2), 709-719 (2007)
- Toriumi, S., Iida, Y., Kusano, K., Bamba, Y., Imada, S.: Formation of a Flare-Productive Active Region: Observation and Numerical Simulation of NOAA AR 11158. *Solar Physics* 289, 3351-3369 (2014)

Toriumi, S., Hotta, H.: Spontaneous Generation of δ -sunspots in Convective Magnetohydrodynamic Simulation of Magnetic Flux Emergence. *Astrophysical Journal Letters* 886(1), 886, L21 (2019)

Bobra, M.G., Couvidat, S.: Solar Flare Prediction Using SDO/HMI Vector Magnetic Field Data with a Machine-learning Algorithm. *Astrophysical Journal* 798(2), 135 (2015)