

地球惑星物理学特別研究

東京大学理学部地球惑星物理学科 土井崇史

1. 概要

レビュー論文(Shibata, Magara, 2011[1])の講読を通して太陽フレアについて概観し、Sigmoid 構造に着目する。Sigmoid とは、S 字型もしくは逆 S 字型の軟 X 線放射であり、これは太陽コロナでのねじれた磁場構造を示唆している。Sigmoid 構造は、フレアやコロナ質量放出(CME)といった力学的な爆発現象の発生において重要な要素となる。ここでは、太陽フレアの概観、足元の光球磁場でのねじれ不安定を仮定した Sigmoid 構造の形成モデルの紹介、ひの衛星データを用いた磁場構造の解析結果の報告を行う。

2. 導入

2.1. 浮上磁場と黒点の形成

対流層で磁束管に対し磁気浮力が働き、太陽表面に浮上する(図 1)。磁束間の光球での切り口が黒点となり白色光で観測される(図 2(b))。また彩層では arch filament system (AFS)が見られる(図 2(a))。AFS の頂点は彩層にあるとき、約 10km/s で上昇する。光球では、約 0.1~1km/s と遅い上昇運動になる。

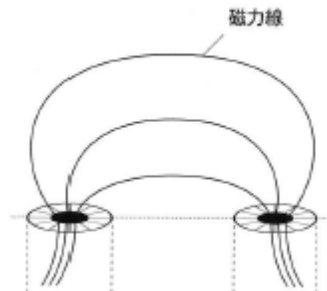


図 1: 浮上磁場と黒点 (「最新画像で見る太陽」[2]より)

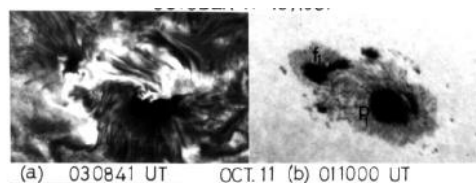


図 2: (a) 黒いフィラメント(H α 線)、(b) 双極黒点(白色光), Kurokawa, 1989[3]

2.2. 太陽フレア

フレアは太陽大気中で起こる爆発的増光現象である。フレア発生時、電波からガンマ線に至るあらゆる波長域で電磁波の強度が突発的に増加する。

H α 線単色像観測の始まった 20 世紀以降フレアは多数観測され、20 世紀後半にはフ

フレアのエネルギー源は黒点近傍に蓄えられた磁気エネルギーであることが分かっている。観測波長域を拡大すると、フレアのエネルギー開放は、 $H\alpha$ 線で見られる彩層ではなく、電波や X 線で見られるコロナ中で起こることが分かってきた。電波や X 線は、数千万 K に達する超高温プラズマや非熱的高エネルギー粒子(電子、陽子)から放射される。

また、フレアに伴い、大量のプラズマ噴出が発生することもわかっている。代表的なものがコロナ質量噴出(Coronal Mass Ejection, CME)であり、磁気嵐の原因になる。また、フレアや CME に伴い加速された高エネルギー粒子は短時間で地球に到達し、人工衛星の故障や宇宙飛行士の被ばくの原因になる。ゆえに、フレア発生前の活動領域での磁場構造を観測的に理解することはフレアや CME を予測する上で有用である。

フレアは黒点付近で発生することが多いことから、フレアのエネルギー源は黒点付近の太陽大気中の磁気エネルギーであるとされ、磁気エネルギーを運動エネルギーや熱エネルギーに変換する機構として、後述の磁気リコネクションが有力である。

2.3. エネルギー解放：磁気リコネクション

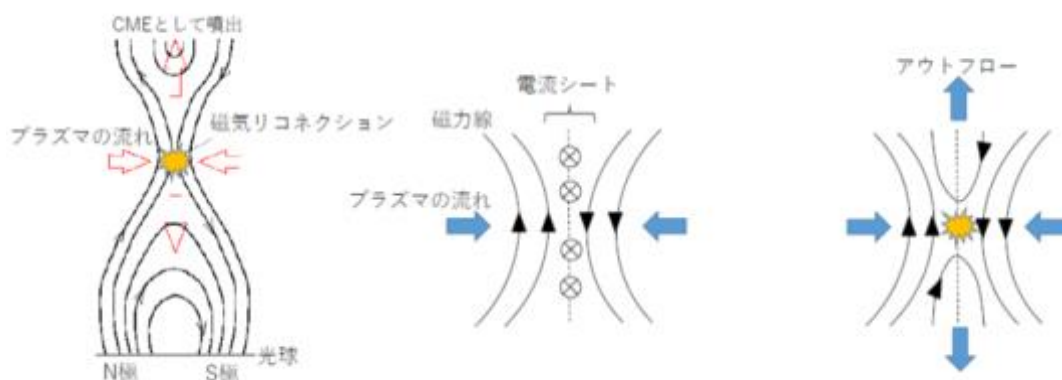


図 3: フレア発生と磁気リコネクション

図 3 中央のように互いに反平行な磁力線同士が接近すると、2つの磁場の間に強い電流が流れ、電流シートを形成。電流シート内部に抵抗率の偏りがあると、電流が散逸し、2磁場で磁力線のつなぎ変わりが生じる。

図 3 右のように、上下の2本の磁力線がつなぎ変わり、右(左)に凸な磁力線が生じ、磁気張力によって周囲へ高速のプラズマの流れ(outflow)が生じる。これにより、拡散領域付近のプラズマが周囲よりも希薄となり、拡散領域への自発的な流れ(inflow)が生じ、磁力線とプラズマが新たに引き込まれ、上下の磁力線の間で再び磁気リコネクションを起こす。この自発的な磁気リコネクション過程を繰り返し、磁力線に蓄えられた磁気エネルギーが、熱エネルギーあるいは力学的エネルギーへと変換されて解

放される。また、抵抗率を持つ地点は、磁力線に沿って点在し、3次元的には強い電流の流れる面を形成するため、電流シートと呼ばれる。

太陽磁場に適用すると、黒点の両極から延びる磁力線同士の間で磁気リコネクションが起き、このエネルギー放出を太陽表面で観測したものが太陽フレアということになると考えられている。

3. Sigmoid

シグモイド(図4)はS字型あるいは逆S字型の軟X線(コロナ)で観測される増光現象であり、磁力線に凍結したプラズマの発光をX線撮像観測で捉えているため、シグモイドはS字型のコロナループを表す。このように磁力線がねじれた構造を持つことで大規模な爆発現象を起こすのに必要な高い磁気エネルギーを蓄えることができ、大規模カスプ型フレアやCMEの前兆として知られる。

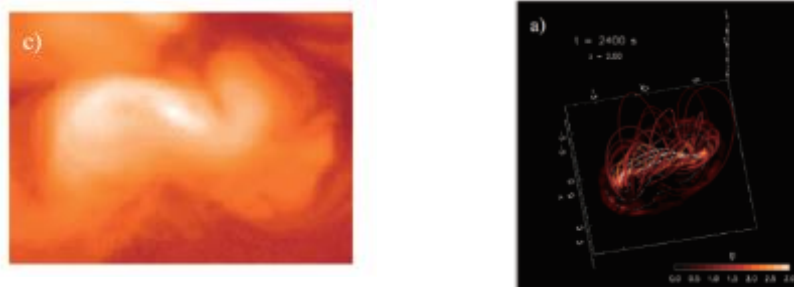


図4: 左: 軟X線で観測されるシグモイド
右: 太陽大気のねじれた磁力線構造 (Magara, 2006[4])

今回は、シグモイド構造に着目し、

- ・ 光球磁場のねじれによる電磁流体的不安定とシグモイド構造の形成の数値計算に関する先行研究のレビュー
- ・ 太陽観測衛星「ひので」により得られた観測データ(光球磁場、コロナループ)の位置関係の把握と今後の解析の展望

について述べる。

3.1. シグモイド構造形成モデル

ここではまず、ねじれた磁束管と周囲の磁場との相互作用を考慮した代表的なシグモイド構造形成モデルについて述べる。

3.1.1. Bald-patch separatrix surface model (Titov & Demoulin, 1999 [5])

太陽内部を浮上する上に凸な磁力線が光球面と接する場所を bald patch(BP)とする。はじめに磁気中性線付近に2つのBP(BP1,BP2)が存在するとし、BP1,BP2について、BPを足元とする磁力線で形成される面を separatrix とする(図5(a),(b))。光球面に垂直真上方向から見ると、2つの separatrix 面はJ字型となる。2つの separatrix 面は2つの磁気中性線付近のBPと対応し、2つのJ型は磁気中性線に沿うところで互いを包み込むように存在する。2つのJ型構造が合わさってS字型に見え、これがシグモイドとして観測される。

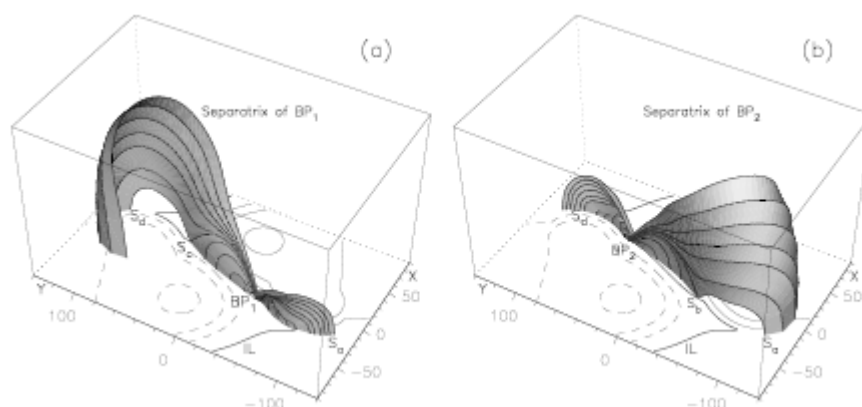


図5: 2つの Bald-patch(BP1,BP2)とそれぞれに対応する separatrix 面(黒色)、直方体底面は光球面、ILは磁気中性線(inversion line)、光球面の点線の閉じた輪は黒点を表す、Titov & Demoulin, 1999 [5]

3.1.2. Kinking Flux Rope Model (Fan & Gibson,2004 [6])

周囲の磁場中に存在するねじれた磁束管を仮定し、数値シミュレーションを行っている。ねじれた磁束管中の磁場は周囲の磁場とは違うベクトルとなる。そのため、磁束管と周囲の磁場との接触面で不連続が生じる(図6左)。この不連続面は、コロナ中で磁束管に沿って電流シートが形成されることを示唆している。この電流シートが、磁束管のねじれ方向に依存して、S字型あるいは逆S字型に観測される。図6右で表された任意の高さでの電流シートの切り口は、連続でなめらかなS字型を示している。

このモデルの本質として、強い電流密度が大規模なS字型に分布し、形成された電流シート付近のプラズマが電流あるいは電流シート上で起こるリコネクションによって加熱され、S字型に分布している高温のプラズマがシグモイドとして観測される。

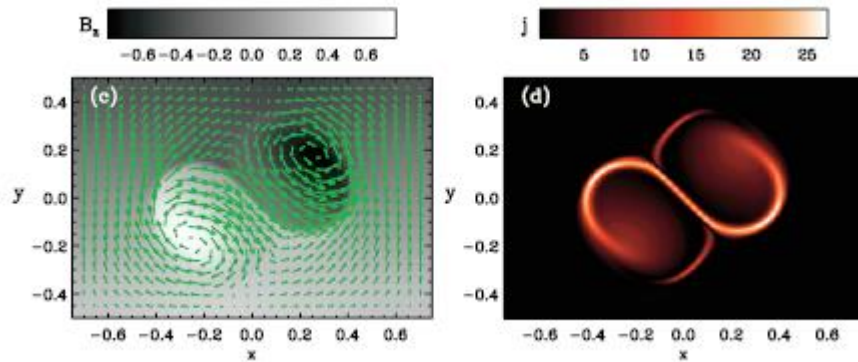


図 6: ねじれた磁束管の時間発展シミュレーション。左: 高度 $z=0.25$ での平面。背景の色の濃淡は磁場の鉛直方向成分、緑色の矢印は磁場の水平方向成分ベクトル。右: 高度 $z=0.25$ での平面。色の濃淡は電流密度を表す、Fan & Gibson,2004 [6]

4. 観測的研究

太陽フレアが起こるときの、X線で見られるコロナの構造と、可視光で見られる光球の構造の位置関係を、実際の衛星観測データを用いて比較する。

本研究の解析には太陽観測衛星ひのでに搭載されている可視光磁場望遠鏡(Solar Optical Telescope, SOT)、X線望遠鏡(X-Ray Telescope, XRT)を用いる。本研究では2015年3月15日M1.1クラスフレア(発生:6:11(UT), X線強度ピーク時:6:58(UT)、図7)を起こした活動領域であるNOAA11692を解析のターゲットとした。

	空間分解能	時間分解能	観測波長
XRT	1"	2秒	2-200 Å
SOT/SP	0.16"	数秒~10数秒/1slit	6301.5/6302.5 Å

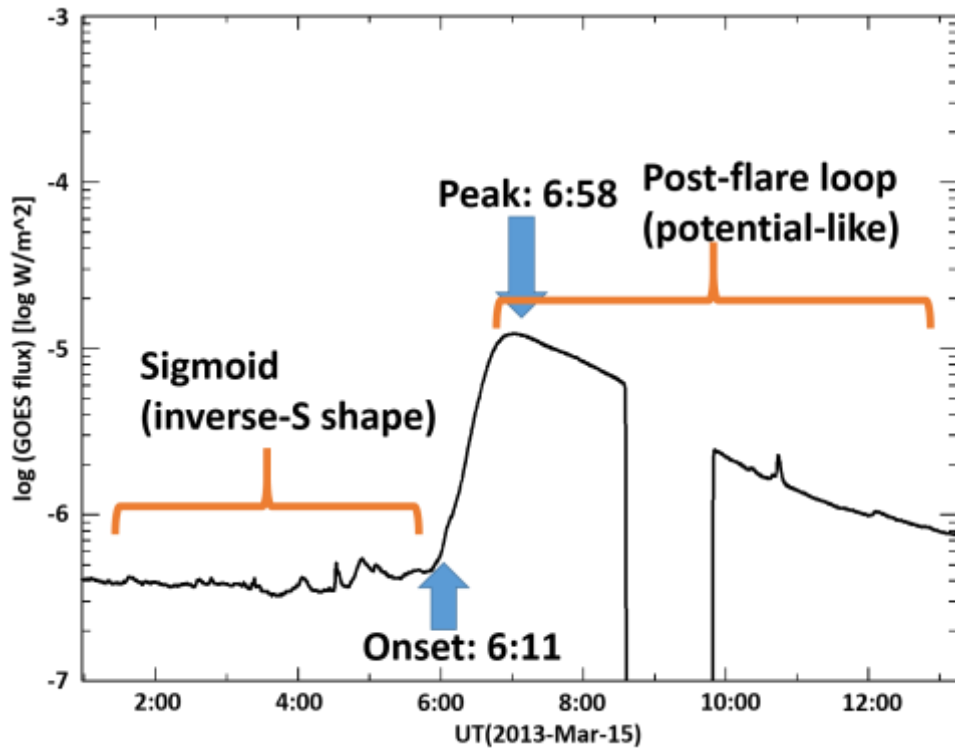


図 7: X 線強度のライトカーブ(GOES 衛星)

2つのJ字型ループ(フレア発生6時間前)から1つのS字型ループ(フレア発生3時間前)が形成され、過去文献のモデルと一致し、典型的なシグモイド形成といえる。フレア発生後は、XRT でポテンシャル磁場に近いコロナルループ(ポストフレアループ)が観測された(図 8 左)。また、SOT/SP の偏光分光観測により、先行黒点周辺での光球磁場強度マップが得られている。XRT フレアループと光球磁場強度マップの位置合わせを行った(図 8 右、cf. Shimizu.T et al. 2007 [7])。

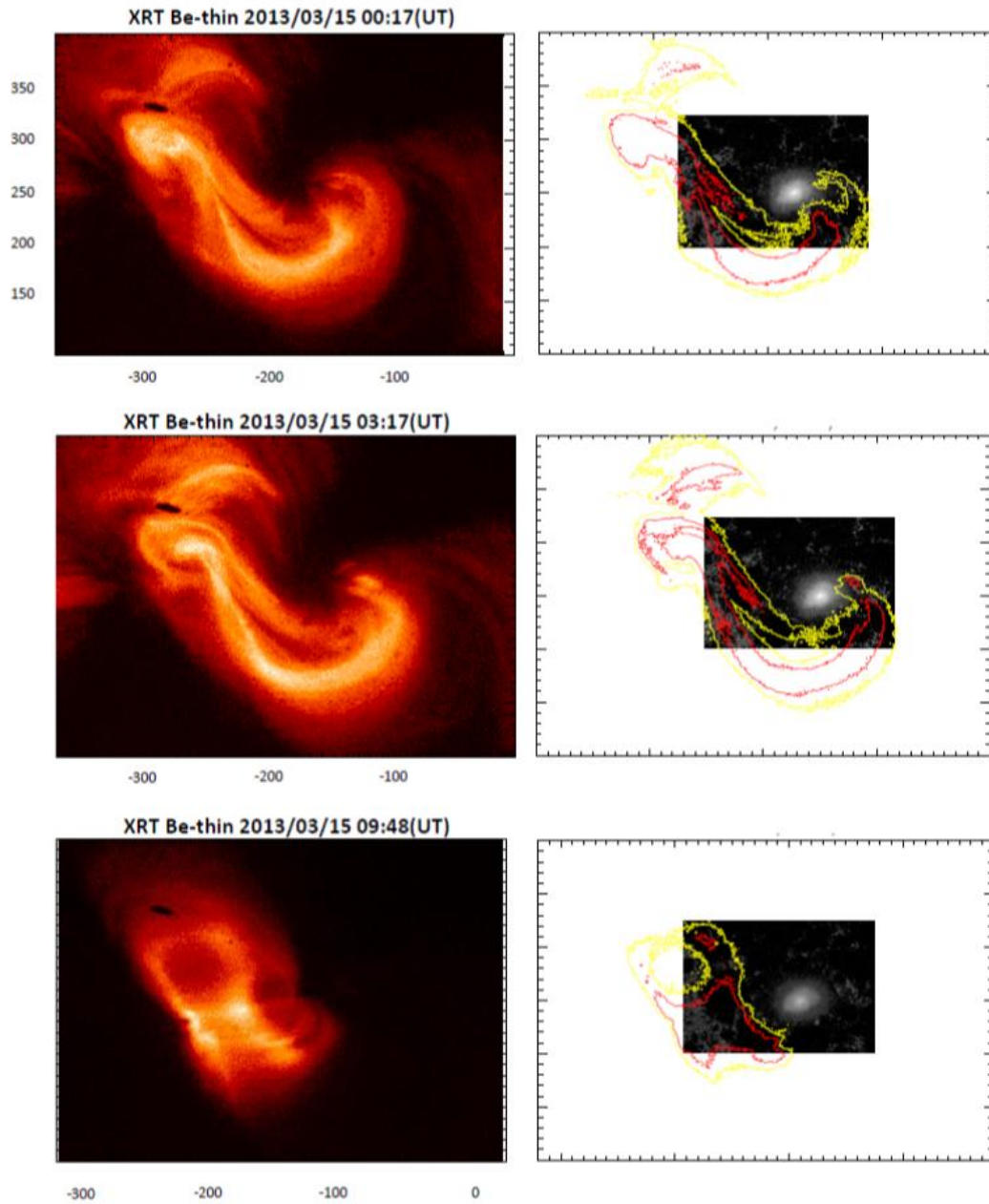


図 8: 左はフレア発生 6 時間前、3 時間前、3 時間後のコロナループの形状(ひので XRT)、右は同時刻の光球磁場強度(ひので SOT/SP)とコロナループの位置関係、縦軸および横軸の値は太陽中心からの秒角[arcsec]

5. 議論と今後の課題

このイベントで興味深い点は、SP のマグネトグラムより、光球では 1 対の黒点が形成されており、M クラスの大規模フレア発生際の光球磁場としては単純な構造をなしている点である。コロナループの西側のカーブは、先行黒点を左回りに半周するように位置していることが分かる(図右の 1,2 枚目)。このイベント発生には、磁束管のねじれのほか先行黒点の回転により蓄えられた強い磁気エネルギーが寄与していると予想される。

現段階では SOT/SP による光球の 3 次元磁場構造(図 9)のみではフレア前後の変化を確認できていない。時間分解能がより高く、視野角がより広いほかの可視光データを用いた解析により、先行黒点付近での回転運動や起きている場所の特定を行う。その上で、その場所での速度場や光球 3 次元磁場のねじれパラメータの時間発展を追うことで上の予測を裏付けることを試みる。

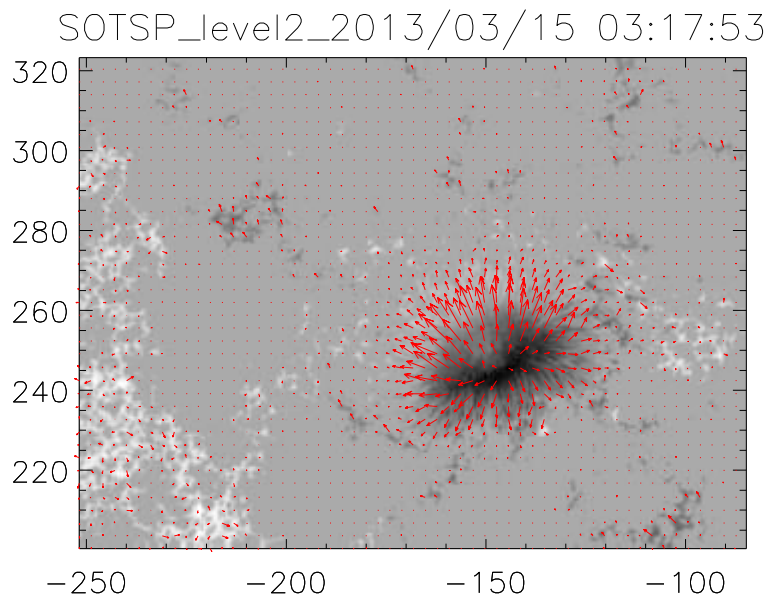


図 9: SOT/SP 3 次元光球磁場構造。背景のコンターは動径方向の磁場(白：鉛直下向き、黒：鉛直上向き)、赤色の矢印は水平方向の磁場ベクトルを表す。

また、今回用いた 1 イベントのみでなく、ひのかが観測した複数のイベントについて S 字型ループ構造は目視により確認されている。フレア発生前のコロナループ形状から得られる幾何学的パラメータの導出を行い、同時間帯でのコロナループ足元の光球磁場および光球の運動との比較により、シグモイド形成とそれを表す光球からのシグナルについて考察することを今後の目標としたい。

6. 引用文献

- [1] Shibata K, Magara T, 2011, "Solar flares: magnetohydrodynamic processes." *Living Rev Solar Phys* 8:6
- [2] 柴田一成、浅井歩、磯部洋明、大山真満, 2011, "最新画像で見る太陽" ナノオプトニクスエナジー出版局
- [3] Kurokawa, H., 1989, "High-resolution observations of $H\alpha$ flare regions", *Space Sci. Rev.*, 51, 49–84.
- [4] Magara, T., 2006, "Dynamic and Topological Features of Photospheric and Coronal Activities Produced by Flux Emergence in the Sun", *Astrophys. J.*, 653, 1499–1509
- [5] Titov, V.S. and D´emoulin, P., 1999, "Basic topology of twisted magnetic configurations in solar flares", *Astron. Astrophys.*, 351, 707–720
- [6] Fan, Y., & Gibson, S. E., 2004, "Numerical simulations of three-dimensional coronal magnetic fields resulting from the emergence of twisted magnetic flux tubes", *ApJ*, 609, 1123
- [7] Shimizu, T., Katsukawa, Y., Matsuzaki, K., et al. 2007, "Hinode Calibration for Precise Image Co-alignment between SOT and XRT", *PASJ*, 59, 845