



## 小特集 プラズマが作る磁場トポロジー：磁気島とプラズモイド

# 6. 太陽フレアにおけるプラズモイド

## 6. Plasmoids in Solar Flares

高 棹 真 介

TAKASAO Shinsuke

名古屋大学大学院理学研究科

(原稿受付：2018年5月21日)

太陽フレアは磁気リコネクションで駆動される太陽系最大の爆発現象として知られ、プラズマ物理・宇宙物理の両面から長年注目され続けている。太陽フレアは磁気リコネクションで駆動されていると信じられており、そのような観測的証拠も数多く見つかっている。しかし磁気リコネクションが起きる空間スケールは太陽フレアのスケールに比べて桁も小さく観測的理解も不十分であるため、フレアの駆動エンジンの物理は未だ理解されていない点が多い。近年の理論・観測の進展によりリコネクション領域は乱流的になっていることが示唆されてきた。その乱流の担い手となりうるプラズモイドと呼ばれる構造の形成・運動が現在盛んに研究されている。本章では筆者の観測的研究を中心に、太陽フレアにおけるプラズモイド研究の現状を紹介する。

### Keywords:

MHD, solar physics, magnetic reconnection, plasmoids, particle acceleration

### 6.1 太陽コロナと太陽フレア

太陽大気は約6千Kの光球の上空に1万K程度の弱電離プラズマからなる彩層、そして100万Kの完全電離プラズマであるコロナからなっている。太陽フレアはこのコロナで発生する「超高温(数千万K)プラズマ生成を伴う爆発現象」として定義され、空間スケール1-10万kmにおいて $10^{22-25}$ Jもの莫大なエネルギーを、わずか $10^3-4$ sという短い時間スケールで解放する現象である。

はじめに太陽フレアの発生現場である太陽コロナの物理状態について軽く触れておく。高温なコロナは完全電離プラズマとなっており、太陽フレア程度の空間スケールではイオンと電子が概ねよくカップルして磁気流体近似、さらには1流体近似が成り立っていると仮定されることが多い。観測からも2体衝突の結果生じる極端紫外線(EUV)やX線の輝線放射がコロナから放射されているため、粒子間の衝突が実際に起きていることが確認できている。太陽フレアのように温度が非常に高くなると粒子間の衝突時間が長くなるため、場合によってはイオンと電子をそれぞれ別に扱う必要があるが、ここではその詳細に立ち入らないことにする。

太陽フレアのタイムスケールについても見ておきたい。磁気流体現象の時間スケールを特徴付ける重要な速度としてAlfven速度がある。Alfven速度 $V_A$ が決めるAlfven時間スケール $t_A$ を太陽コロナで見積もってみると

$$t_A = \frac{L}{V_A} = 10s \left( \frac{L}{10^7 m} \right) \left( \frac{V_A}{10^6 m/s} \right)^{-1}$$

となる。太陽フレアの時間スケールは $10^2-10^4$ 秒程度となっており、多くのフレアで一声 $10-100t_A$ とかける[1]。

### 6.2 太陽フレアモデルと太陽フレア観測

太陽フレアは磁気リコネクションによって駆動されることが多くの観測事実から支持されている。とは言え現在の撮像観測による空間分解能は、例えば広く用いられているSolar Dynamics Observatory/Atmospheric Imaging Assembly (SDO/AIA)によるEUV観測を考えると太陽面上で約880kmである。これはコロナにおけるイオンのラーモア長(約1m)といった運動論的空間スケールより遥かに大きいため、リコネクション領域を直接空間分解して観測することは到底できていない。したがって、磁気リコネクションの結果生じる観測可能な現象を予想して、それを間接的証拠として集めていくという研究スタイルが広く取られている。

図1をもとに太陽フレアのリコネクションモデルを概観していきたい([2]も参照)。(1)-(4)は時系列の順に並んでいる。太陽内部で生成された磁場が星表面上に浮上して黒点が形成されると、黒点同士は磁力線でつながっているためその上空で(1)のような磁力線のアーケード(磁気ループと慣習的に呼んでいる)ができる。足元の黒点は時折回転やシア運動を示す。それによって上空にポインティングフラックスの形で磁気エネルギーが運ばれ、磁気ループのシア・ねじれという形で自由磁気エネルギーが溜まっていく。磁気エネルギーが増えると磁気圧の上昇に伴い磁気ループは膨張するが、その際に(2)に示すような磁場の

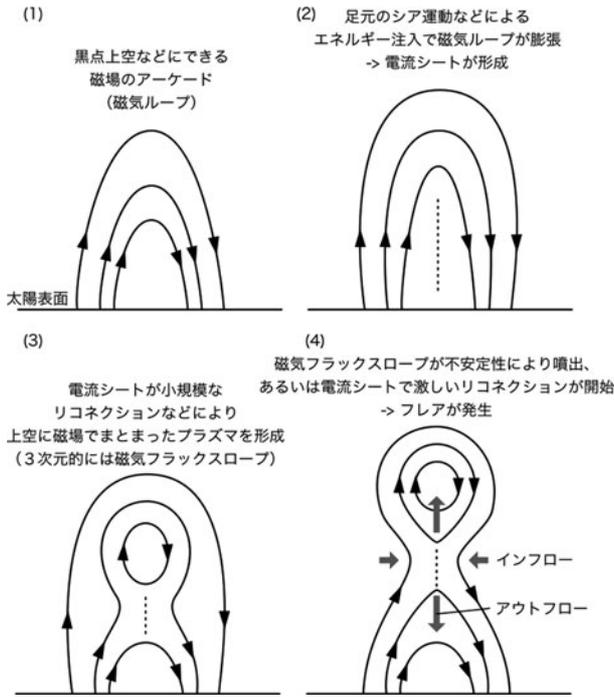


図1 太陽フレアの標準モデル (1-4は時系列順)。

反平行成分が電流シートを形成していく。この電流シートではリコネクションが生じやすく、フレアにつながるまでも小規模なリコネクションが繰り返し起き、(3)に示すような磁場でまとまったプラズマ塊を形成していく。このようなプラズマ塊をプラズモイドと呼ぶ。この図は2次元ののだが実際には奥行き方向にも磁力線が走っており、観測的にはプロミネンスと呼ばれる構造が対応する。このプラズモイド下の電流シートが薄くなり、何らかの原因で激しいリコネクションが開始すると蓄えられた磁気エネルギーが一気に解放され太陽フレアが発生する。プラズモイドが何らかの磁気流体不安定性によって噴出しても同様にリコネクションがその下で駆動されフレアにつながる。このリコネクション領域に向かう流れをインフロー、流出する流れをアウトフローと呼ぶ。アウトフローは磁気エネルギーの熱化によって高温になるため、リコネクションの結果足元には高温の磁気ループ (フレアループと呼ぶ) が形成される。

太陽フレアの標準モデルの観測的検証には日本が多大な貢献をしてきた。日本の太陽観測衛星「ようこう」によるX線撮像観測が尖ったフレアループを発見し、リコネクション説が一気に支持されるようになった[3,4]。リコネクションインフローはEUV撮像観測によって初めて発見され[5]、その後もインフロー・アウトフローはEUV分光観測によるドップラー観測によってより確かなものとされた[6]。

### 6.3 太陽フレアとプラズモイド

ここまで太陽フレアのリコネクションモデルが成功しているという話をしたが、定量的に十分説明がついていない根本的問題が残っている。その1つは、磁場の拡散スケールである運動論的スケールと太陽フレアの7桁以上もあるス

ケールギャップがどのようにつながっているのかという疑問である。太陽コロナにおけるSpitzer磁気拡散係数 ( $10 \text{ m}^2/\text{s}$ ) と太陽フレアのスケール ( $10^8 \text{ m}$ ) で磁気拡散時間を見積もるとおおよそ3000万年となり、とても太陽フレアの時間スケールを説明できない。高速化するに磁気拡散係数を高めるか空間スケールを小さくするかが必要で、磁気拡散を波動・粒子相互作用のような運動論的効果で高めるか、何らかの形で小さな構造を作っていくという2つが考えられた。前者はリコネクションが起きる電流シートの厚みが運動論的長さスケールになった時に期待できるが、実験から磁気拡散係数の上昇は上記のギャップを埋めることはできないと言われている。したがって小さな空間構造を作るプロセスが太陽フレア発生の物理の肝であることがわかる。

小さな構造を作る物理として注目されているのは乱流である。太陽コロナは磁気拡散係数が小さく、高いLundquist数 ( $10^{13}$ 程度) を持つ。同様に粘性係数も小さくレイノルズ数も非常に大きい。したがって太陽コロナは乱流が発達しやすい環境であると言える。では、磁気リコネクションが起きる領域 (つまり電流シート) でどのように乱流が発達するのか、そしてその結果どのような構造を取るのだろうか？

薄くて長い電流シートは不安定化して分裂することが1960年代から知られていた[7]。プラズマの背景流がない場合におけるこの不安定性はテリング不安定性と呼ばれ、Sweet-Parke型の電流シートにおけるものはプラズモイド不安定性と呼ばれる[8]。

このような電流シートの不安定性をシミュレーションで詳細に調べられるようになったのは2000年代に入ってからであった。Shibata & Tanuma[9]は一度分裂した電流シートがさらに分裂をする様子を発見した。そしてこれをきっかけに、電流シートの分裂が繰り返しフラクタル的に起こることによってどんどん薄くて短い電流シートが形成され、ついには運動論的スケールに到達して高速リコネクションが駆動されるという「フラクタルリコネクション」の考えを提案した。この考えはプラズモイドがフラクタル的に形成されてフレアと運動論的スケールを接続し、高速なリコネクションを引き起こせる有力な考えとして広く議論されてきており、支持するシミュレーション結果も多く存在する[10]。

上と異なる考えとして、磁気流体乱流の引き起こす乱流拡散を考慮した乱流リコネクションモデルがある[11]。電流シート中に励起された乱流が無数の小規模なリコネクションを繰り返すことで高速なリコネクションが駆動できるというものだ。このモデルは乱流の起源について明確なことが言えていない点をよく指摘されているが (リコネクションが始まればKelvin-Helmholtz不安定性を通じて乱流が起きると議論もあるが[12]、そもそものリコネクションが起きるような薄い電流シートの形成起源に答えが与えられていない)、乱流理論・乱流拡散理論に基づいたモデルでありシミュレーション結果の物理量依存性等をよく説明する[12]。

リコネクションの速さを特徴付けるリコネクション率(単位時間あたりにつなぎ変わる磁束量)という量がある。この2つのモデルをリコネクション率の観点で比較してみると、フラクタルリコネクションの方はプラズモイドのサイズと噴出速度がリコネクション率の決定に重要だと考えられているのに対し(後述)、乱流リコネクションの方はプラズモイドのようなコヒーレント構造を必要とせず、リコネクション率が乱流の強度によって決まる。どちらのモデルも速度のパワースペクトル等がべき分布を取るため[10, 12]乱流リコネクションと一括りに言っても良いかもしれないが、この点の違いには注意されたい。

実際の太陽フレアではどのような構造が現れるのだろうか? 未だ明確な答えは導き出されていないが、筆者は太陽フレアにおいて電流シート内でのプラズモイドの出現・合体・噴出の過程を初めて撮像観測において発見した。以下ではその研究[13, 14]について紹介したい。

#### 6.4 撮像観測によるプラズモイドの発見

筆者はEUV撮像観測衛星SDO/AIAを用いて、構造が標準モデルでよく理解できる太陽フレアを解析した。この衛星は太陽全面を常時多波長で高空間分解能で観測するという驚異的能力を持ち、このデータの中から新しい構造がみえる期待があった。図2(a)上に今回ご紹介する太陽フレアの131 Å (1000万度と高温なプラズマに感度あり)で見た画像を載せている。通常、太陽フレアを観測すると足元に高温のフレアループが見えるが、このフレアでも見えている。図2(b)上に推測される磁場構造を描いている。ここではフレアループの上空に電流シートとリコネクションインフロー・アウトフローが描かれているが、撮像観測データ中の構造の動きを追うことでインフロー・アウトフロー両者が確かに存在することを確認している。ここまでは過去のフレア観測とも整合的でありリコネクションモデルの予想の範囲内である。

しかしこの太陽フレアはさらに興味深い構造を示していた。それは電流シートに対応しそうな場所に直線的に明るく輝く構造である。通常感覚では太陽フレアの電流シートは観測できないほど極めて薄くなっており(繰り返しになるが観測の分解能は1000 km弱、運動論的スケールは100 m)、観測画像中では見えなどしないと考えられてき

た。実際それまでの観測でもそのような構造は見えていない。しかしここでははっきり見えてしまっているのである。このフレアでは何か特別な理由(乱流で分厚くなった、密度が偶々高かった、等)で電流シート構造が見えやすい状況になっている、そう解釈して筆者はこの直線構造の時間発展を詳細に解析した。

その結果、電流シート状の構造の中で明るいプロブ状の構造が複数出現しては互いに合体し、ある時は太陽面に向かって、またある時は太陽面から遠ざかる向きに噴出していく様子を捉えることに成功した。図2(a)下に合体直前の3つのプロブが見えている時の193 Åでの画像を示している(図2(b)下はその解釈)。この結果は電流シートが分裂してプラズモイドを作っているというシナリオに極めて整合的に見える。ただし注意として、一般に太陽コロナの磁場ベクトル情報を得ることは極めて困難であり今回もプロブの磁場を測定できていない。しかし、複数の波長でプラズモイド状の構造は明確に見え、かつ合体したりフレアループにぶつかる急減速を示したりと単なる見かけの構造ではなくプラズモイドらしい振る舞いを見せていた。したがって以下ではプロブ構造をプラズモイドと仮定して話を進めていく。

プラズモイドの運動はリコネクション率を高める役割があると言われている。プラズモイドが電流シート中を移動するとその空いた空間を埋めるために電流シートに向かう強いインフローを駆動する。リコネクション率はインフロー速度に比例するため、これがプラズモイドはリコネクションを高速化するという所以である。現状の観測装置はプラズモイド周りの流れを捉えるほどの能力がないのでこのシナリオの直接検証はできないが、プラズモイドの出現・消滅とリコネクション率の関係なら観測的に調べることができる。筆者はこれを調べることにした。

リコネクション率には様々な見積り方法があるが、今回用いた見積り方法は観測されたインフロー・アウトフローの速度から無次元化されたリコネクション率を推定するというものである。ここで用いている仮定はアウトフロー速度がAlfvén速度と同程度というもので、(リコネクション率) = (インフロー速度)/(Alfvén速度) ~ (インフロー速度)/(アウトフロー速度)である。アウトフロー速度は電流シート方向に動くプラズモイドの見かけの速度から求めている。すると、アウトフロー速度はほとんど時間変化しなかったのに対し、インフロー速度はプラズモイドが見えている時に比べ消失した時間帯では有意に小さくなっていることがわかった。つまり、リコネクション率はプラズモイドが消失すると下がっていたのである。このことからプラズモイドがリコネクションを高速化しているという示唆が得られたのである。

太陽フレアの電流シート中におけるプラズモイドの形成・噴出の発見に次いで、彩層中のより小さい爆発現象でも同様のプラズモイド形成・噴出が発見されている[15]。このことはプラズモイド形成が普遍的な現象だと示唆しているように見える。

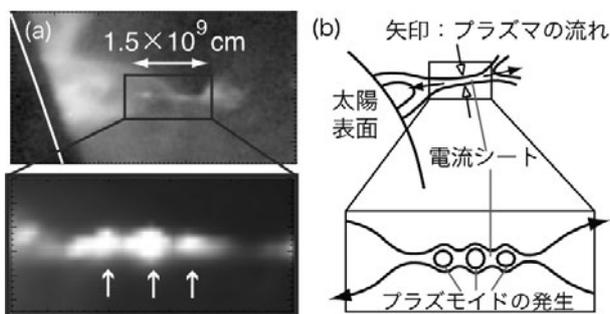


図2 左はSDO/AIAの131 Å(上)と193 Å(下)の画像。このフレアは太陽の右端あたりで発生した。右はその画像から推測された磁力線構造。

### 6.5 プラズモイドと電子加速の関係

このフレアでは電子加速の兆候も見られていた。一般に太陽フレアで生じる非熱的電子のエネルギーはおよそ10–100 keVと若干相対論的になっている程度で、そのような電子が磁場の周りを巡回運動する際には電波波長帯(周波数でいうとGHz程度)で gyrosynchrotron 放射を出す。筆者は野辺山電波ヘリオグラフという電波干渉計による34 GHzの撮像画像データを解析し、EUV撮像画像で見つかったプラズモイドの運動と電子加速の対応づけを試みた。

EUV画像に電波画像のコントアを重ねたものが図3である。図2では3つのプラズモイドが電流シートで形成されている様子をお見せしたが、図3ではその3つが合体して大きなプラズモイドを形成し(P13と名付けられている)、その後太陽に向かう方向に移動して(図3左上)フレアループと衝突している様子(図3左下)が示されている。この図からプラズモイドがフレアループに衝突した時に強い電波放射がでていることがわかる。つまりフレアループに衝突したプラズモイドが電子加速を引き起こしたことを示しているのである。このようなプラズモイドの形成・合体・噴出、そして電子加速に至るまでを1つのイベントで追うことに成功した例は本研究[14]以外に他にない(噴出と電子加速の関係については[16])。

電子加速の兆候は他のプラズモイドに対しても観測され、1.プラズモイドの急激な噴出、2.電流シートにおけるプラズモイド同士の合体、3.プラズモイドのフレアループとの衝突、の3つのケースで強い電波放射が出ていることがわかった。この観測だけから電子加速過程を決定づけることはできないものの、これまで提案されてきたプラズモイドによる電子加速過程の多くを支持するものであり、今後同種のイベントの詳細解析が望まれる。

### 6.6 まとめ

本章では太陽大気と太陽フレアの概観から始めて太陽フレアのリコネクションモデルが抱える問題点、スケールギャップ問題をご紹介し、それにまつわる理論モデルの概説と筆者らによる観測的理解の進展について述べた。近年フラクタルリコネクションの考えにも進展が見られているように[17]、我々の理解は未だ発展途上である。プラズモイドは太陽フレアのスケールギャップ問題と粒子加速問題の両方の解決に重要であり、さらにこの2つの問題解決にはマイクロとマクロのつながりの理解が必須である。そのためプラズマ物理と宇宙物理の両研究者が乱流的なりコネクションの物理をテーマに協力することは大きな成果につな

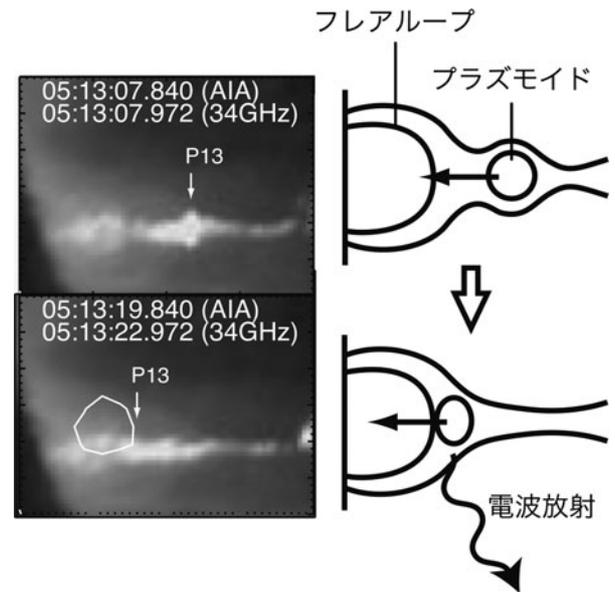


図3 プラズモイドがフレアループに衝突して電波放射が出ていることを示す図。左はSDO/AIAによる193Aの画像(2枚の画像の時間差は12秒)、右は画像から推測された磁場構造。

がると期待している。

### 参考文献

- [1] K. Shibata and S. Takasao, *Magnetic Reconnection*, ed. W. Gonzalez and E. N. Parker (Cham: Springer International Publishing, 2016) 373.
- [2] K. Shibata and Magara, *Living Rev. Sol. Phys.* **8**, 99 (2011).
- [3] S. Tsuneta, *Astrophys. J.* **456**, 840 (1996).
- [4] K. Shibata *et al.*, *Astrophys. J. Lett.* **451**, 83 (1995).
- [5] Yokoyama *et al.*, *Astrophys. J.* **546**, 69 (2001).
- [6] H. Hara *et al.*, *Astrophys. J.* **741**, 107 (2011).
- [7] Furth *et al.*, *Phys. Fluid* **6**, 459 (1963).
- [8] N. Loureiro *et al.*, *Phys. Plasmas* **14**, 100703 (2007).
- [9] K. Shibata and S. Tanuma, *Earth Planets Space* **53**, 473 (2001).
- [10] Barta *et al.*, *Astrophys. J.* **737**, 24 (2011).
- [11] A. Lazarian and E.T. Vishniac, *Astrophys. J.* **517**, 700 (1999).
- [12] G. Kowal *et al.*, *Astrophys. J.* **838**, 91 (2017).
- [13] S. Takasao *et al.*, *Astrophys. J. Lett.* **745**, 6 (2012).
- [14] S. Takasao *et al.*, *Astrophys. J.* **828**, 103 (2016).
- [15] K.A.P. Singh *et al.*, *Astrophys. J.* **759**, 33 (2012).
- [16] N. Nishizuka *et al.*, *Astrophys. J.* **799**, 126 (2015).
- [17] F. Pucci and M. Velli, *Astrophys. J. Lett.* **780**, 19 (2014).