

# プロミネンス活動でみる太陽周期

下条 圭 美

〈国立天文台 〒181-8588 東京都三鷹市大沢2-21-1〉

e-mail: masumi.shimojo@nao.ac.jp



野辺山電波ヘリオグラフは、太陽フレアだけではなくプロミネンスを研究するうえでも有用な観測装置である。また電波干渉計である野辺山電波ヘリオグラフは悪天候でも太陽観測が可能のため、モニター観測にも適した観測装置である。これらの特徴を生かし、筆者は17 GHz太陽電波画像を基としたプロミネンス活動の自動検出システムを構築した。20年以上の観測データを使って1,000を超えるプロミネンス活動を検出し、イベントの太陽周期依存性を調べることにより、太陽磁場分布の異常が第23太陽周期の極大期以降に南半球で起こっていることがわかった。

## 1. 怠け者、計算機の小人さんを頼る

今から14年ほど前の2000年4月、筆者は野辺山太陽電波観測所に赴任した。野辺山太陽電波観測所ではマイクロ波帯の太陽専用電波干渉計である野辺山電波ヘリオグラフ<sup>1)</sup>の運用が9年目に入り、1995年に行われた17/34 GHz 2周波同時観測のための改修<sup>2)</sup>も完全に終了しており、現在まで続く安定した運用を行っていた時期である。さらに2000年は第23太陽周期の極大期にあたり、毎日のように大規模な太陽フレアが発生し、太陽フレア時の粒子加速研究が主な科学目的である野辺山電波ヘリオグラフとしては活気あふれる時期でもあった。ようこう衛星に搭載された軟X線望遠鏡で観測された小規模な太陽フレアに伴うジェット現象、特に熱的プラズマの運動を研究していた筆者にとって、X線から電波へ波長で換算して約6桁のジャンプと、野辺山電波ヘリオグラフでのサイエンスの本道である粒子加速研究に対応する必要があった。特に後者に関しては、観測所内外に太陽フレアの粒子加速研究をする人が多く、知識を習得することは必須であった。一方、この分野にて特色ある研究ができるか、赴任後に

悩むことになった。

この時期の観測所所員は二つの当番を週代わりで担当していた。一つは、日々の観測装置の健全性のチェックと観測データの保全を担当する当番であり、現在でも野辺山常駐の所員が担当している。もう一つは、観測データから太陽フレアや噴出現象等のリストを作成し、メールやウェブページで国立天文台の内外へ報告するイベントチェック当番であった。野辺山電波ヘリオグラフの干渉計データから太陽画像を合成するため、NEC製ベクトル計算機であるSXシリーズが野辺山に導入されており、2000年当時、数十秒の計算時間で1枚の像合成が可能になっていた。また、野辺山太陽電波観測所の助教だった横山央明さん(現:東京大学准教授)によるソフトウェア整備<sup>3)</sup>の成果により、一つのコマンドにて像合成をすることができた。ほぼリアルタイムで10分に1枚の17 GHz太陽画像をウェブページにて公開を始めたのもこの時期である。イベントチェック当番は10分ごとに生成された画像、1日あたり46枚、1週分322枚を精査し、その週に発生した太陽フレアやプロミネンス/ダークフィラメント放出現象をリストアップする必要があった。このイベント

チェック当番に、筆者は大きな不満があった。太陽フレア検出には、野辺山電波ヘリオグラフの一機能として自動フレア検出機能を使ったので、一定のしきい値による太陽フレアの抽出がなされていた。一方、プロミネンス／ダークフィラメント放出現象に関しては当番の目で検出を行っており、検出率は当番の力量と熱意に依存するため、イベントリストとしては不完全なものであった。特に太陽面上で見られるダークフィラメント放出現象は、野辺山電波ヘリオグラフのデータだけでは検出することは非常に難しい。熱意のある担当者は、野辺山以外の観測データも使って検出を行っていたと思われる。このように、検出された現象の質が週によって大きく異なるイベントリストを公表する意味があるか、筆者には疑問だった。しかし一番の不満は、イベントチェック当番が単にめんどくさいことであった。

野辺山太陽電波ヘリオグラフの主な科学目標は、前述のとおり太陽フレア時に起きる粒子加速を理解することである。そのためフレア時には0.1秒ごと、静穏時でも1秒ごとに電波画像を合成をすることが可能である。一方、84台という多数のアンテナにより100を超えるダイナミックレンジを野辺山電波ヘリオグラフは達成しているため、合成した太陽電波画像にて太陽の縁の外側に存在するプロミネンスをはっきりみることができ(図1)。また野辺山電波ヘリオグラフの観測周波数である17 GHzは雲に対して透明であるため、パラボラアンテナ内に水がたまってしまうような大雨や雪の日以外は質のそろった画像を一年中出力することができ、光学観測では真似ができない観測率が達成できていた。さらに、プロミネンス研究によく使われるH $\alpha$ 線観測と違い、マイクロ波ではプロミネンスの熱放射を観測するため、プロミネンスの移動速度が大きくなって観測波長域から輝線が逃げるといこともなく、かなりの高高度までプロミネンス放出現象を追跡することが可能である。これらの利点を考えると、野

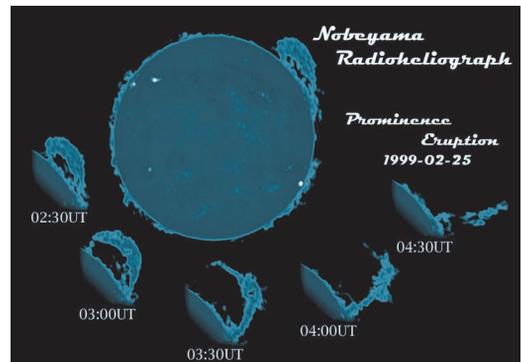


図1 野辺山電波ヘリオグラフで観測された1999年2月25日のプロミネンス放出現象。

辺山電波ヘリオグラフはプロミネンス放出現象をモニターするために最適な望遠鏡であり、自動検出法を開発することはそれほど難しいことではないと、筆者には思えたのである。プロミネンス放出現象を自動検出すればイベントチェック当番を無くすことが可能になり、イベント数を稼ぐことでほかではできない電波によるプロミネンス研究ができると考え、自動検出プログラムの開発をスタートした。そう、自分の仕事を計算機内の小人さんに押し付けようと考えたのである。検出プログラムやホームページ掲載用HTMLファイルのタイムスタンプを調べてみると、赴任3カ月後の2000年6月末にはプログラムの第1版が完成しており、2001年4月からは自動検出の定常運用および検出したイベントのウェブ公開が始まっている。当時のことはほとんど覚えていないが、よほどイベントチェック当番が嫌だったのだろう。

## 2. プロミネンス／ダークフィラメント

自分がいかにめんどくさがりだったのを自慢しても誌面は埋まらないので、プロミネンス／ダークフィラメントの特徴を紹介しておきたい<sup>4)</sup>。プロミネンス／ダークフィラメントは、数百万度のコロナ中に浮かぶ数万度の低温プラズマの塊である。低温プラズマが太陽面上にある場合、光球か

らの放射を低温プラズマが吸収するため周りより暗い線条が観測される。この暗い線条は、ダークフィラメントと呼ばれている。同じコロナ中に浮かぶ低温プラズマの塊が太陽の縁（リム）上に現れると、今度は明るく輝きだす。これは背後に光球がなく周りが暗いため、低温プラズマそのものからの放射によって周りより明るく見えるからである。こちらはプロミネンス（紅炎）と呼ばれている。物理的にはプロミネンス／ダークフィラメントは同じコロナ中に浮かぶ低温プラズマの塊だが、存在する位置と見え方によって違う名前になっている。この記事ではプロミネンスを主な話題とするため特別な場合以外にはダークフィラメントという言葉を使わないが、プロミネンスの特徴などを話している場合はダークフィラメントも同じ特徴をもっていると考えてほしい。

プロミネンスは大きく分けて二つの種類がある。一つは活動領域内の磁気中性線上に現れる活動プロミネンスと呼ばれるもの、もう一つは静穏領域に現れる静穏プロミネンスである。ひので衛星の可視光磁場望遠鏡によりプロミネンスを観測した結果、プロミネンスの中を磁気流体波が伝播しており<sup>5)</sup>、レイリーテイラー不安定性が成長していることなど<sup>6)</sup>、微細構造とその運動が明らかになってきている。一方、プロミネンスの出現場所は光球磁場の極性が変わる磁気中性線上に限られることがわかっている。これは例外のない特徴である。この特徴によりコロナ中に浮かぶ低温プラズマは磁場で支えられていると思われているが、低温プラズマの供給源や低温プラズマを支える磁場構造の形成は、いまだ大きな謎である。プロミネンスの形成過程はわかっていないが、そのなくなり方は大別して二つに分けることができる。一つは、低温プラズマが磁力線に沿って太陽表面に流れ出し、プロミネンスを構成する低温プラズマがなくなってしまう場合で、プロミネンス消失現象と呼ばれている。もう一つはプロミネンス放出現象と呼ばれる現象で、名前のおおきプロミネ

ンスが惑星間空間に飛んでいく現象である（図1）。活動領域で放出現象が起きると、太陽フレアを伴うことが多い。

### 3. 17 GHz電波画像によるプロミネンス活動の自動検出

さて、怠け者が計算機内の小人さんに頼るためにはそれ相応の準備、具体的には検出対象範囲を明確に決め、装置の限界を知り、計算機資源による制限条件を考慮したうえで、検出ロジックを構築する必要がある。当時の筆者の目標は、この自動検出プログラムがイベントチェック当番の代わりをすることである。イベントチェック当番は、太陽フレアとプロミネンス／ダークフィラメント放出現象をデータから抽出することが役割である。前述のとおり、太陽フレア自動検出システムはすでに存在するので、必要なのはプロミネンス／ダークフィラメント放出現象の自動検出プログラムである。ただし野辺山電波ヘリオグラフで取得した17 GHz太陽画像上では、ダークフィラメントがとぎれとぎれになったり、場合によってはダークフィラメントのごく一部のみが現れるため、17 GHz太陽画像のみでダークフィラメント放出現象を検出することは人間でも不可能である。そのため、検出対象をプロミネンス放出現象のみとした。プロミネンスは図1でみるように17 GHz太陽画像にてリム上に明るく輝くので、「噴出現象」ではなく「プロミネンス」そのものを検出対象にすべきではと思われるだろう。しかし17 GHz太陽画像のリム上では、プロミネンスだけでなく黒点など活動領域上空に存在する高密度なコロナも明るく輝くのである。この二つの構造には、物理的な温度に2桁程度の違いがあるにもかかわらず、輝度温度がほぼ同じであり17 GHz太陽画像だけでは見分けがつかないのである。そのため大きなスケールでの激しい時間変動を伴うプロミネンス放出現象を検出対象とした。2000年当時の野辺山太陽電波観測所の計算機資源を考

えれば、検出ロジック用に画像合成をすることは難しく、ウェブページ用に日々10分ごとに生成される17 GHz太陽画像を利用することが妥当だと判断した。これらの条件と限界を基に、以下のような検出ロジックを考えた。

- 1) 17 GHz太陽画像1日分のデータから各ピクセルごとにその日の平均輝度温度を算出し、10分ごとに合成された個々の画像から平均輝度温度より6倍高い輝度温度をもつ、リムより外側のピクセルを抽出する。
- 2) 抽出したピクセルのうち、輝度温度が2,000度以上、かつ太陽面を含むその画像の最大輝度の1/100より明るいピクセルを候補ピクセルとする。
- 3) 個々の画像において候補ピクセルの輝度重心を求め、連続する3枚以上の画像において、リムの外の同じような領域に重心が位置する画像を選び出す。

3) で選び出された画像にプロミネンス放出現象が捉えられていると考え、それらの画像の中で候補ピクセル数が一番多い時間をその現象のピーク時間と定義し、そのときの輝度重心をそのイベントの位置と定義した<sup>7)</sup>。このロジックをベースに、プロミネンス放出現象を検出したのちイベントのムービを作成するプログラムを開発、野辺山電波ヘリオグラフの観測終了後に毎日プログラムを実行してウェブ上に掲載しているイベントリストを自動更新することとした。もちろんこのロジックは完璧ではない。この検出ロジックはプロミネンスの移動方向を考慮しないため、プロミネンス噴出現象だけではなくプロミネンス消失現象も検出するが、二つを分別することはできない。本記事では、この二つの現象を合わせて『プロミネンス活動』と称している。検出ロジックのもう一つの欠点は、リム上で発生する太陽フレアも検出してしまうことである。ただしイベントチェック当番の役割としては、プログラムが太陽フレアを検出してしまっても問題にはならないので、太陽フレ

アを除外するロジックを追加しなかった。そのため、リストのウェブページは「プロミネンス活動リスト」ではなく「リムイベントリスト」という名前で公開を開始した<sup>8)</sup>。この自動検出システムは2001年の春頃には定常運用に移行し、イベントチェック当番が廃止になった。当番廃止という当初の目標を達成したちょうどそのころ、当時日本の太陽研究コミュニティにおける最も大きな計画であるSOLAR-B（ひので）衛星計画が本格的にスタートした。筆者も衛星開発に参加し、さまざまな開発に関する活動を行った。忙しいときには、平日は相模原の宇宙研に滞在して試験に参加し、土日だけ野辺山に帰ってきて野辺山の仕事をするという日々が1カ月間続いたこともあった。研究する時間がなかなか割けなかった筆者だったが、計算機の中の小人さんはプロミネンス活動を検出し、着実にデータを蓄積していたのである。

多忙な日々を過ごしていたある日、当時SOHO探査機チームのメンバーであるGopalswamyさんたちから、SOHO探査機搭載のコロナグラフ(LASCO)で捉えられたコロナ放出現象<sup>9), 10)</sup>と、野辺山電波ヘリオグラフで捉えられたプロミネンス放出現象を比較したいとの、共同研究の提案を受けた。SOLAR-B衛星計画で忙しい自分にとって負荷が軽い共同研究の提案であったため、喜んで共同研究をスタートした。この共同研究の詳細はここでは述べないが、電波で観測された180イベントのプロミネンス活動現象のうち72%という大多数がコロナ放出現象と関連していたことがわかった<sup>11)</sup>。コロナ質量放出現象と太陽表面近くで発生する現象の対応が取れていなかった当時において、この分野では比較的規模の大きい統計研究による結果は画期的であった。しかし、この論文に筆者は不満があった。それは、プロミネンス活動現象リストのイベント数である。この記事を読んでいただいている読書の皆様にはおわかりであろうが、このリストはイベントチェック当番を

廃止するために不純な動機にて作成したもので、メジャーなプロミネンス活動の検出しか考慮されていない。特に、宇宙天気研究において重要と思われる速度の速い放出現象は検出できないのである。幸いなことに、論文が出版された2003年頃は太陽活動は極大期をすぎてフレア発生数も減り、観測終了後のデータ処理に必要とされる計算機資源も極大期より減少していた。そこでSXのCPUを一つお借りして、プロミネンス活動検出用の高時間分解能17 GHz太陽画像の作成を2004年にスタートさせた。1年程度で1992年の観測開始から2004年まで約12年間分の像合成ができ、かつ上記の検出ロジックに適切な時間分解能を探した結果、3分ごとの画像が最適であることがわかった。ただし誤検出は防ぎきれないため完全自動化をあきらめ、プログラムにてイベント検出をした後に人の手で誤検出を訂正することになった。結局、小人さん任せでは立ちゆかなくなったのである。

観測開始から2004年末までの像合成とイベント検出を2005年春までに終了させ、2006年に検出ロジックと検出結果を基に論文を出版した<sup>7)</sup>。その後も3分画像の作成とイベント検出は継続している。観測開始から2013年3月までに検出されたイベントの数は1,131となり、この結果を基に太陽周期を議論する論文を出版した<sup>12), 13)</sup>。次章からはこれらの論文を基に、野辺山電波ヘリオグラフが観測したプロミネンス活動と太陽周期の関係について議論する。

#### 4. プロミネンス活動でみる太陽周期

前章にてプログラムが検出する現象はプロミネンス放出現象・プロミネンス消失現象・リム上で発生する太陽フレアの3種類があると述べたが、リムで発生した太陽フレアは人間がチェックする段階でイベントリストから外されている。また、検出されたプロミネンス活動1,131イベントのうち、

プロミネンス消失現象は10%程度である。よって検出イベントの大多数がプロミネンス放出現象であると考えて構わない。まずは、プロミネンス活動の発生頻度・大きさ・上昇速度の太陽周期依存性をみていこう。

##### 4.1 プロミネンス活動の発生頻度・大きさ・上昇速度の太陽周期依存性

太陽周期は約11年ごとに黒点数が増減することだが、プロミネンス活動も太陽周期に伴って発生頻度が増減している。ただし、増減のしかたが黒点と同じではない。図2をみると、発生頻度の最初のピークが黒点より1-2年早く起きていることがわかる。また第23太陽周期(1996-2008)では、黒点数と同様に二つのピークがあるが、二つ目のピークでは黒点数のピークより発生頻度のピークが遅れているのがわかる。半球別にみると、第23太陽周期と第24太陽周期前半(2009-2013)では最初のピークは北半球の発生頻度が支配的であり、これは黒点数の南北非対称性と一致している<sup>14)</sup>。この二つの太陽サイクルの比較において特筆すべきは、最初のピーク付近の黒点数が第23太陽周期に比べて第24太陽周期では半分程度に減少しているにもかかわらず、プロミネンス活動の発生頻度は10%程度しか減少していない点である。

プロミネンス活動の大きさは、検出ロジックで利用している候補ピクセルの総数で評価している。野辺山電波ヘリオグラフのプレートスケールは2.5秒角であるため、ピクセル数1,000は6万km×6万km程度の面積を示すことになる。ちなみに図1で示されたプロミネンス放出現象のピクセル数は約3,000である。図3の左側のパネルはプロミネンス活動の大きさの発生時期ごとの変動を示している。このグラフ中の年平均は、実は意味のない値である。なぜならば、極小期を除き大きさによる発生頻度分布が、指数-2.9-2.5のべき関数的な分布を示すからである。一方、極小期に

注記) ここでの「プロミネンス活動」は一般的な定義ではなく、本記事のみで利用する定義である。

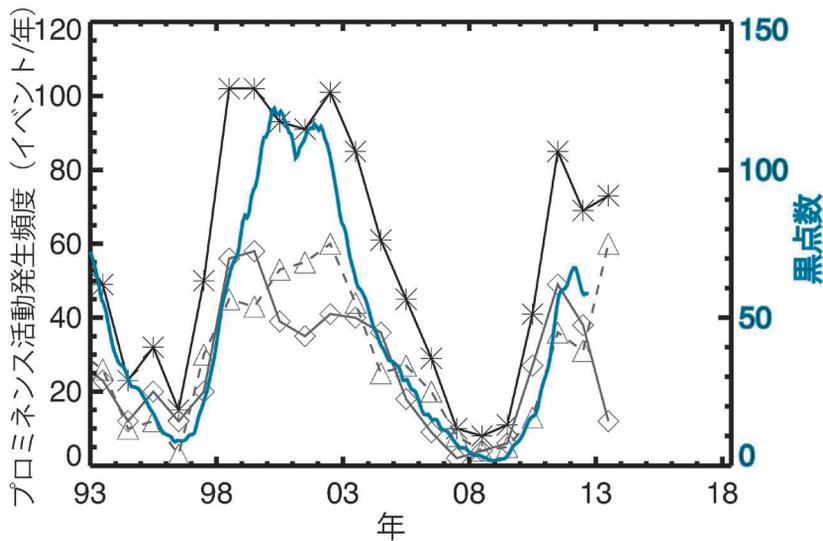


図2 プロミネンス活動の年別発生頻度と黒点数. 黒の実線と米がプロミネンス活動の年別発生頻度. グレイの実線と◇, 破線と△がそれぞれ北半球と南半球での発生頻度を示す. シアンの実線が黒点数を示している.

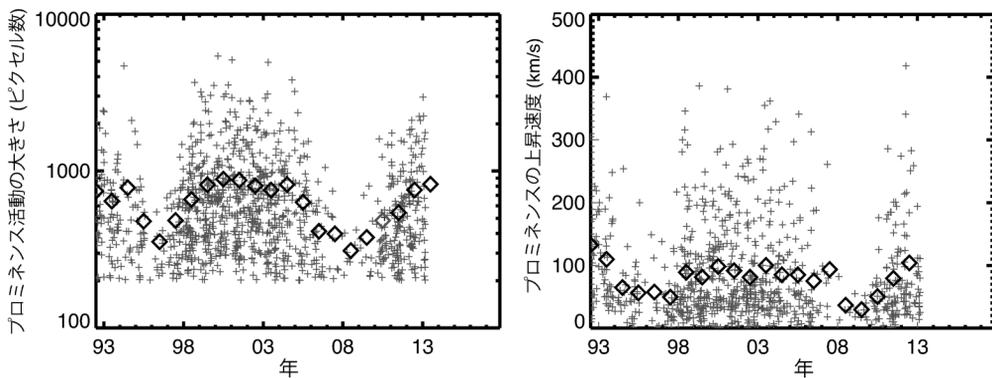


図3 プロミネンス活動の大きさ(左)と上昇速度の発生時期ごとの変化. +が個々のイベントの値を示し, ◇が年平均を示している. ピクセル数200以下では誤検出が多いため, 200以下のイベントはデータから省いている.

はピクセル数1,000以上のイベントはほとんど発生せず, 全体のイベント数の少なさもあり, 分布を算出することができない. また, 発生頻度には活動領域起源の緯度依存性があるが, 大きさには緯度依存性がないことがわかってい

図3の右側のパネルが, 個々のイベントにおけるプロミネンスの上昇速度と年平均速度を示している. 速度は, 候補ピクセルの輝度重心の位置変化から計測しているが, 太陽中心からの動径方向成分のみを抽出しているの上昇速度を示してい

ることになる. 輝度重心を測定点としているため, 通常プロミネンス放出研究で使われるプロミネンス上端の位置変化を基に計測された速度より若干小さめの速度になっている. ほかの研究と本記事の値を比較するときは注意してほしい. 検出できたイベントの中での最高上昇速度は400 km/s程度であり, 平均的なコロナ中の音速 (100-200 km/s) を大きく超える値となっている. 一方, 平均値は極小期を除き100 km/s程度である. これまでの研究でわかっていることではあるが, 最高速度を

考えるとプロミネンスが磁氣的な力で加速されていることは確かだと言えよう。また、コロナ中の平均的な磁場強度（ $\sim 10$  ガウス）とプロミネンスの数密度（ $\sim 10^{11}$  個/cc）を考えるとプロミネンス内部のアルフヴェン速度は約100 km/s程度である。平均上昇速度がプロミネンス内のアルフヴェン速度程度になることは、磁気加速を考えれば妥当な結果である。磁気加速であるにもかかわらず黒点数のようにピークをもたないのは、次節で述べるが、プロミネンス活動の多くが活動領域で発生するわけではないからと推測できる。

#### 4.2 プロミネンス活動発生領域の太陽周期依存性

前述のとおり、プロミネンスやダークフィラメントは例外なく磁気中性線上に現れる。このためダークフィラメントのスケッチ観測を行って太陽表面の磁場分布を推定することが、第22太陽周期

（1980年代）まで行われていた<sup>15)</sup>。これらのデータを使って、黒点発生領域から極域に向かって流れ出す磁極が極域に達したときに極域磁場の極性反転が発生することが、磁場観測だけでなくダークフィラメントの観測からも明らかとなった<sup>16), 17)</sup>。しかし第23および第24太陽周期ではダークフィラメントのルーティン的なスケッチ観測は行われていない。そこで、野辺山電波ヘリオグラフで観測されたプロミネンス活動と過去のダークフィラメントによる研究結果<sup>18), 19)</sup>を比較することで、最近の太陽磁場分布の太陽周期依存性が第22太陽周期までと同じなのか、それとも大きく異なるのか調べた。

図4は、光球磁場と野辺山電波ヘリオグラフで観測されたプロミネンス活動発生位置の蝶型図である。見方は黒点の蝶型図と同じく横軸が年、縦

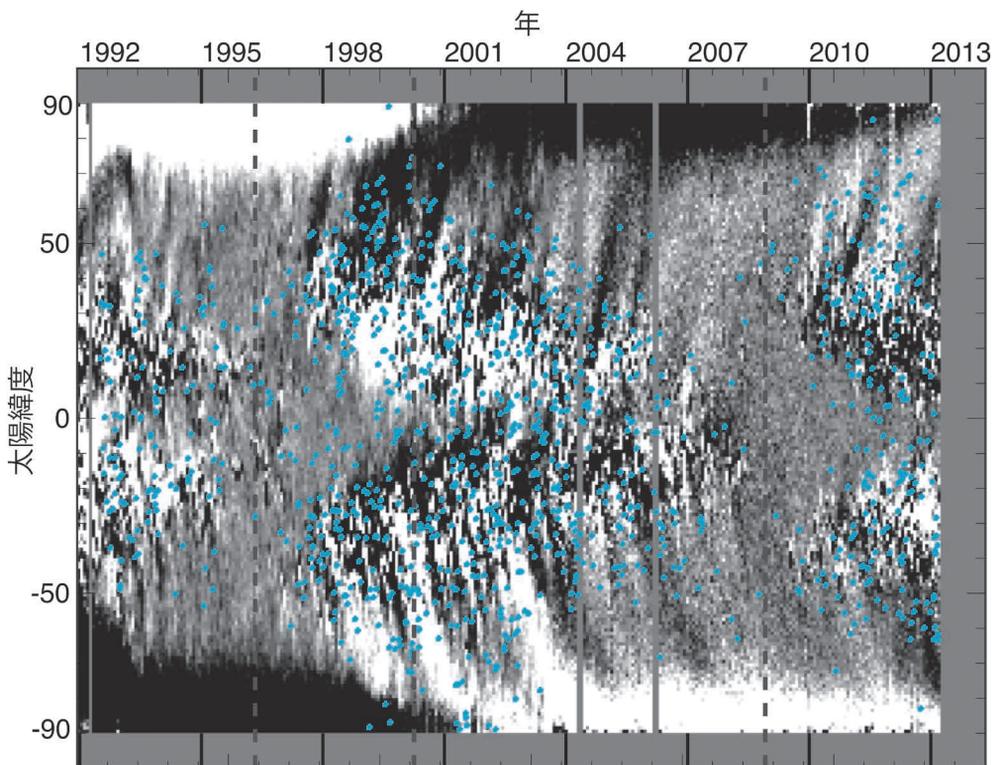


図4 光球磁場とプロミネンス活動発生位置の蝶型図。シアンのが検出されたプロミネンス活動発生位置を示し、グレースケールで光球磁場分布が示されている。破線が極大期と極小期を示す。

軸が太陽緯度である。まずは北半球（図4の上半分）でのプロミネンス活動の発生位置の変動からみていこう。1996年の極小期から2000年の極大期および2008年の極小期から2013年までの間では、発生領域が緯度30度あたりから極域に向かって広がっていることがみて取れる。これは、黒点から拡散する磁極の移動によって作られる磁気中性線上のプロミネンスを示している。この発生領域の拡大は、黒点の蝶型図とプロミネンス活動やダークフィラメントの蝶型図とで最も大きく異なる点である。もちろんこの時期に中緯度帯（緯度30-40度）にて出現する黒点に伴ってプロミネンス活動も発生しているが、図4をみる限り黒点周囲以外の領域、特に高緯度にてプロミネンス活動が多く発生している。このような黒点周辺以外で発生するプロミネンス活動により、プロミネンス活動の発生頻度のピークが黒点数のピークより早いことが説明できるだろう。この時期の最も極域に近いプロミネンス活動の発生位置は、極域に流れ込む逆極性の磁極の勢力範囲を意味していると考えられる。プロミネンス活動発生領域の極域方向への拡大速度を算出した結果、第23太陽周期では5.9 m/s、第24太陽周期では5.2 m/sであった、これらの値は過去のダークフィラメントの観測結果<sup>18)</sup>よりは若干小さめだが、第23太陽周期に磁場観測で測られた磁極の移動速度<sup>20)</sup>とほぼ同じである。2010年に開かれたCOSPAR総会の分科会にて、第24太陽周期でのプロミネンス活動発生領域の拡大速度を基に、北極域の磁極反転は2011年後半から2012年前半の間に起こると予測する口頭発表をした。実際、ウィルコックス天文台で測定されている北極域磁場（緯度55度以上の平均磁場）の極性が2012年6月に反転をしているので<sup>21)</sup>、2010年中に研究結果を論文化しておけば良かったと今になって思う。ただしひので衛星の結果により“北極点”での磁極反転は、緯度55度以上の平均磁場で調べた結果より遅れることがわかっている<sup>22)</sup>。よってダークフィラメントやプ

ロミネンス活動によってグローバルな磁場構造の反転の予測は可能だが、極性反転の“完了”時期の予測は不可能であろう。

北半球の極大期以降（2000-2008年）のプロミネンス活動発生領域の変化は、黒点の蝶型図と同じように、赤道に向かって発生領域が縮小する。ただしその緯度範囲は黒点より広い。これは、拡大期と同じように、黒点から拡散する磁極が形成する磁気中性線上にプロミネンスが形成されるからである。過去の研究により、この時期のダークフィラメントの出現領域の平均緯度は三次関数でよく再現できることがわかっている<sup>19)</sup>。同様の解析を第23太陽周期のプロミネンス活動の発生領域に対して行ったところ、以前の太陽周期とほぼ同じ緯度変動であることがわかった。これらの観測結果をまとめると、北半球では第23太陽周期でも約11年の間隔で大きいスケールの極性反転が発生し、極大期を過ぎた時期のプロミネンス活動発生領域の変動が過去のダークフィラメントの出現領域の変動とほぼ同じである。よって、北半球は、第24太陽周期における黒点数およびプロミネンス活動の発生頻度の減少以外は、これまでの太陽周期と同様な磁場分布変動を示していると思われる。

一方、南半球である。第23太陽周期極大期まで（～2000年）のプロミネンス活動発生領域の変動は、北半球とそれほど変わらない。極域方向への拡大速度は7.3 m/sと若干北半球より速いが、過去のダークフィラメントの観測結果<sup>18)</sup>と同等であり、磁場観測により測られた速度とほぼ同じ値である<sup>20)</sup>。南半球は極大期を過ぎた頃（2000年～）から北半球の振る舞い、ひいては以前の太陽周期での振る舞いから大きく逸脱していく。最初に見られる異変は、極域（緯度70度以上）でのプロミネンス活動が2002年頃までなくなることである。これが意味することは、極大期をすぎても極域付近に磁気中性線が存在し、2002年頃まで磁極反転の進行が小康状態であったことを示し

ている。極域からプロミネンス活動がなくなる時期から極小期までの変動を、北半球と同様にプロミネンス活動発生領域の平均緯度でみると、北半球や以前の活動周期と全く異なる振る舞いがみられた。この原因は、黒点から極域方向へ拡散する磁極が形成する分布パターンの違いだと思われる。図4の磁場分布からみて取れるように、黒点から極域に向かっての磁極の強い流れが間欠的に起きていることがわかる。これは“rush to the pole”と言われる現象で、プロミネンス活動もこの“rush to the pole”が形成する磁気中線性上で起きていることが図4からわかる。北半球では黒点数の減少に伴い、“rush to the pole”が2006年以降発生していないが、北半球でプロミネンス活動発生領域の極域への拡大が始まる2007-2008年でも、南半球では“rush to the pole”がみられ、南緯60度付近でプロミネンス活動が発生している。さらに、2008年に新しい周期の黒点が南半球にも出現しているのだが、前周期の活動が周期終盤まで残っていたせいか、新周期の黒点から極域へのプロミネンス活動発生領域拡大が北半球ほど顕著にみられない。地上観測やひので衛星の磁場観測データからも指摘されているが<sup>22), 23)</sup>、プロミネンス活動発生領域の拡大を調べることで、南半球での磁極反転が遅延していることを判断できる。

プロミネンス活動の観測結果から最近の太陽周期におけるグローバルな磁場分布変動を読み解くと、北半球は、第24太陽周期でのイベント数の若干の減少を除けば、磁場分布の変動に以前の周期と著しい差異はないであろう。一方、南半球では第23太陽周期極大期以降に磁場分布が北半球および以前の周期と著しく異なる変動を示している。磁場観測データも考慮すると、南半球では極小期寸前まで黒点による極域への磁束供給が行われ、極小期付近の中～高緯度の磁場分布が単極的でなくなっていたと思われる。

## 5. ま と め

筆者の不純な動機から開始されたプロミネンス活動の自動検出が、長期データを利用したイベント検出の結果、太陽磁場分布の異常が第23太陽周期の極大期以降に南半球で起こっていることを明らかにした。もちろんこの結果は磁場観測データからも導きだせるが、最近の磁場分布画像は全面観測といえども空間分解能が高く、微細な構造が詳細にみえてしまうので、極性の勢力範囲のようなグローバルな磁場分布を示すにはダークフィラメントやプロミネンスの出現位置を使ったほうがわかりやすいこともあるだろう。一方、1,000を超えるイベントによるプロミネンス活動の大きさや上昇速度の統計結果は、これまでのプロミネンス放出現象の研究では得られなかった知見であり、宇宙天気研究における良い基礎データになるだろう。

この研究に利用したプロミネンス活動のイベントリストは、野辺山太陽電波観測所のホームページにて公開されており<sup>24)</sup>、野辺山電波ヘリオグラフ運用中は更新をしていく予定である。第25太陽周期まで野辺山電波ヘリオグラフの運用が継続することは難しいと考えられる。同様の研究はデータの質が比較的均一な人工衛星で取得した画像データを基に、Computer Visionなど最新の画像解析手法<sup>25)</sup>を用いて行われていくだろう。

## 謝 辞

20年を超える長期データの解析を可能にしたものは、野辺山電波ヘリオグラフの装置としてのタフさと運用および保守を行ってきた歴代の野辺山太陽電波観測所スタッフの努力です。彼らに深く感謝します。

## 参考文献

- 1) Nakajima H., et al., 1994, Proc. of the IEEE 82, 705
- 2) Takanao T., et al., 1997, Proc. of the CESRA Workshop, ed. by G. Trotter (Springer), p. 183
- 3) 野辺山太陽電波観測所, 1999, "Nobeyama Radio Heliograph, Software & Database Vol. 1" (CD-ROM)
- 4) 詳しくは, Tandberg-Hanssen E., 1974, "Solar Prominence" (D. Reidel Publ.)などを参照
- 5) Okamoto J., et al., 2007, Science 318, 1577
- 6) Berger T. E., et al., 2011, Nature 472, 197
- 7) Shimojo M., et al., 2006, PASJ 58, 85
- 8) 野辺山太陽電波観測所, 1992–2014, Nobeyama Radioheliograph Limb Events: <http://solar.nro.nao.ac.jp/norh/html/prominence/>
- 9) Yashiro S., et al., 2004, JGR 109, A07105
- 10) Yashiro S., Gopalswamy N., 1996–2014, SOHO LASCO CME Catalog: [http://cdaw.gsfc.nasa.gov/CME\\_list/](http://cdaw.gsfc.nasa.gov/CME_list/)
- 11) Gopalswamy N., et al., 2003, ApJ 586, 562
- 12) Shimojo M., 2013, PASJ 65, SP1, 16
- 13) Shimojo M., 2013, in IAU Symp. 300, Nature of Prominences and their Role in Space Weather, ed. by B. Schmieder, J.-M., Malherbe, S. T. Wu (Cambridge Univ. Press), p. 161
- 14) SIDC-Team, 1992–2014, World Data Center for the Sunspot Index, Royal Observatory of Belgium, Monthly Report on the International Sunspot Number, online catalogue of the sunspot index: <http://sidc.oma.be/silso/>
- 15) NOAA, 1955–2009, Solar Geophysical Data Reports
- 16) Waldmeier M., 1973, Sol. Phys. 28, 389
- 17) Topka K., et al., 1982, Sol. Phys. 79, 231
- 18) Mouradian Z., Soru-Escout I., 1994, A&A 290, 279
- 19) Li K. J., 2010, MNRAS 405, 1040
- 20) Hathaway D. H., Rightmire L., 2010, Science 327, 1350
- 21) Wilcox Solar Observatory, 1976–2014, Polar Field Observations: <http://wso.stanford.edu/Polar.html>
- 22) Shiota, D., et al., 2012, ApJ, 753, 157
- 23) Svalgaard L., Kamide Y., 2013, ApJ 763, 23
- 24) 野辺山太陽電波観測所, 1992–2014, The Database of Prominence Activities observed with Nobeyama Radioheliograph (17 GHz): <http://solar.nro.nao.ac.jp/norh/html/prom.html#db/>
- 25) Martens P. C. H., et al., 2012, Solar Phys. 75, 79

### Solar Cycles Seen from Prominence Activities

**Masumi SHIMOJO**

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

Abstract: The Nobeyama Radioheliograph (NoRH) is useful for investigating not only solar flares but also solar prominences. Furthermore, NoRH can be used for monitoring of solar activities because NoRH can observe the Sun even in cloudy and rainy days. Based on the advantages of NoRH, I developed the automatic detection system for prominence activities. I applied the detection system to 20 years NoRH data, and detected over 1,000 events. The variation of the prominence activities during the recent solar cycles shows that the anomaly of the magnetic field distribution has happened in the southern hemisphere from the solar maximum of Cycle 23.