

# 噴出プロミネンスによる 太陽フレア電波の掩蔽と宇宙天気現象



八代 誠 司

〈The Catholic University of America, Washington, D.C. 20064, USA〉

e-mail: seiji.yashiro@nasa.gov

2002年5月21日から22日にかけて太陽フレアが連続して発生し、野辺山電波ヘリオグラフはその両者を観測した。2番目のフレアに伴った噴出プロミネンスは1番目のフレアの前面を通過し、太陽フレア電波を掩蔽した。噴出プロミネンスは加速を続け、高速ハロー型コロナ質量放出となり前面に衝撃波を形成、II型電波バーストとプロトンイベントを引き起こした。およそ32時間後、コロナ質量放出は地球に到達し巨大磁気嵐が発生した。太陽表面から地球近傍まで、噴出プロミネンスが引き起こしたさまざまな現象を紹介する。

## 1. はじめに

太陽には100万度のコロナ中に磁場で支えられて浮かんでいる彩層温度プラズマがある。太陽の縁で観測すると形が炎のように見えることから、日本語では紅炎、英語ではprominence（プロミネンス）と呼ばれる。H $\alpha$ 線観測の印象が強いが他の波長でも観測される。電波では連続光で観測されるので、ドップラー運動の影響を受けずにプロミネンスを観測できる<sup>1)</sup>。プロミネンスが縁でなく太陽面上にあると、太陽面の明るさとの相対的な関係で、プロミネンスは暗く見える。このときは名前が変わり、日本語では暗条、英語ではfilament（フィラメント）と呼ばれる。プロミネンスとフィラメント、太陽面に対する位置で名前が変わるが、物理的には完全に同一な物体・構造である。

プロミネンスは磁気中性線上空に発生し、磁気エネルギーを蓄えている。磁気エネルギーが突発的に解放されることがあり、プロミネンスは重力に逆らって上昇、プロミネンス噴出（放出）になる<sup>2)</sup>。同時に上昇するプロミネンスの下で太陽フ

レア（多波長における突発的な増光現象）が発生する。プロミネンスが惑星間空間まで到達するとコロナ質量放出<sup>3)</sup>（Coronal Mass Ejection; CME）になる。これらは磁気エネルギーが解放される過程で発生する一連の現象であり、最近では総称して太陽嵐（Solar Storm）と呼ばれている。

タイトルにある「掩蔽」とは、ウィキペディアによると「ある天体が観測者との天体の間を通過するために、その天体が隠される現象」とある。近年SDO衛星（Solar Dynamic Observatory）搭載のAIA望遠鏡（Atmospheric Imaging Assembly）により多数の減光現象が観測されており、掩蔽もその一種として注目されている。

今回紹介するのは、太陽面で発生した噴出プロミネンス（フィラメント）が観測者と太陽フレアの間を通過したため、太陽フレアが隠された掩蔽現象である。野辺山電波ヘリオグラフはその高い時間分解能でプロミネンスとフレアの両者を観測し、電波で観測される掩蔽現象の描像を明らかにした<sup>4)</sup>。噴出プロミネンスはその後コロナ質量放出となりさまざまな宇宙天気現象を引き起こしたので、それも併せて紹介を行う。

## 2. イベント詳細

2002年5月21日から翌22日にかけて、太陽の西側縁付近でフレアが連続して発生した。活動領域9948が太陽座標S25W64にあり、南北に長いフィラメントがS20W34 (図1a白矢印FILA) に位置していた。電波では活動領域9948の黒点上空が磁気共鳴放射のため明るくコンパクトに輝いていた (図1a青矢印)。

最初のフレア (フレア1) は21日23:14 UTから開始、翌22日の00:30 UTにGOES衛星測定 of 軟X線強度 (1-8 Å) がピークに達した (図1s矢印F1)。フレア1に伴い速度1,246 km/sの高速なコロナ質量放出が発生、噴出型によく見られる長寿命フレアとなった。ピークの2時間後 (02:30 UT) でも軟X線強度は高く、その時間の電波画像図1gとフレア発生前の図1aと比較すると黒点電波源のすぐ右側に明るい領域があり、活動領域9948でフレア1が継続しているのが確認できる。

02:36 UTになると、画面中央に位置していた

フィラメントがゆっくりと上昇 (画面右へと移動) を始めた。黒点電波源を頼りに図1gと図1hを比較すると、フィラメントが右に移動しているのがわかるだろう。このときの見かけの速度は2.5 km/s、太陽表面に対して鉛直に上昇していると仮定すると、フィラメントの上昇速度は4.0 km/sであった。そしてフィラメントは加速上昇しながら02:53 UTから03:29 UTにかけてフレア1の前 (フレアと観測者の間) を通過した。03:14 UT (図1i) では黒点電波源は半分ほどかくれており、そして03:17 UT (図1j) では完全に見えなくなった。3分後の03:20 UT (図1k) では明るさを取り戻し始めて、さらに3分後の03:23 UT (図1l) には掩蔽前の明るさに戻った。

上昇したフィラメントの下部ではフレア2が発生した。X線強度は03:18 UTから上昇を始め、03:54 UTにピークに達した (図1s矢印F2)。電波では、噴出前にフィラメントがあった場所の南端付近が明るくなっており (図1o-r)、ここがフレア2の発生場所である。フィラメントの上昇か

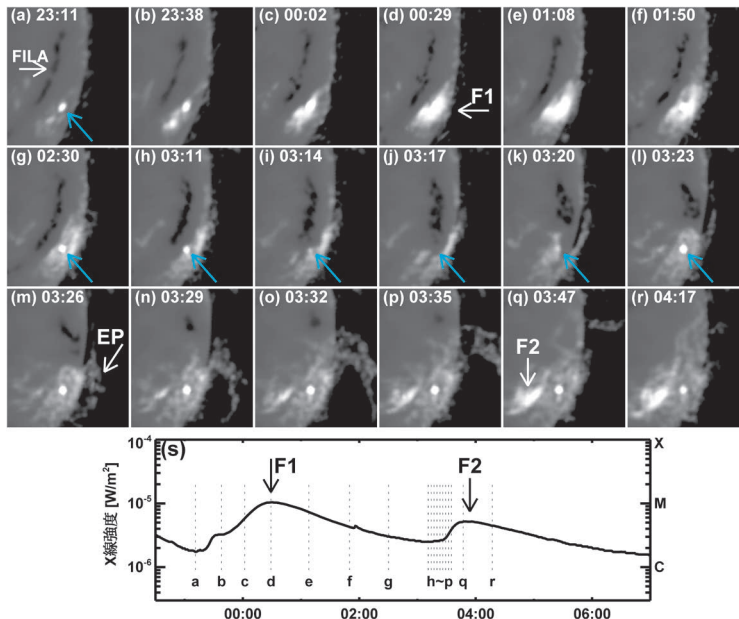


図1 野辺山ヘリオグラフで観測された2002年5月21日-22日の太陽電波画像 (a-r) とGOES衛星で取得された軟X線強度の時間変化グラフ (s)。パネルs中の破線は、パネルa-rの電波画像が撮像された時刻に対応する。

らフレアの発生にいたる過程は、典型的な噴出型フレアの発展であり、ようこう衛星時代に確立された太陽フレアの磁気リコネクションモデルの描像と一致する。

その後フィラメントは上昇を続け太陽の縁の外に出て、背景の空と比較して明るい物体、すなわち噴出プロミネンス (eruptive prominence; EP) として見えるようになった (図1 m-p)。

### 3. 太陽フレア電波の時間変化

次にフレア1とフレア2の電波強度の時間変化を詳しく調べよう。図2aにあるボックスR1とR2はそれぞれフレア1とフレア2に対応し、ボックス内の平均輝度温度を図2b, 2cにそれぞれ示す。領域R1の輝度温度は00:17 UTに最大 $4.1 \times 10^4$  Kに達し、その後は非常に緩やかに減少、掩蔽発生前の02:53 UTでは $2.4 \times 10^4$  Kであった。掩蔽が発生すると電波で減光が始まり、急激に輝度温度を下げた (図2bで青でハイライトされた期間)。最も減光されたとき輝度温度は $1.4 \times 10^4$  Kで、フレア1発生前の輝度温度 ( $1.2 \times 10^4$  K) 近くまで下がった。フィラメントが領域R1を通過し掩蔽は終了、領域R1の平均輝度温度は掩蔽発生前と

同じ $2.4 \times 10^4$  Kまで戻った。掩蔽の前後で輝度温度が変化していないことから、青色ハイライトの期間の減光は完全に掩蔽に由来することになる。

イベントの発生前、領域R2の平均輝度温度は、静穏領域の典型的な温度である1万度であった。掩蔽 (青ハイライトの期間) と同時に領域R2の輝度温度は上昇を開始したが、これはフィラメントの上昇運動が磁気エネルギーの解放と密接に関連しているからである。フィラメント上昇に伴い磁気リコネクションが発生、磁気エネルギーは解放され、フレア2が発生した。電波 (図2c実線) と比較して、軟X線強度 (図2c破線) は数分遅れで上昇し始め、C5.0クラス\*1のフレアとなった。

### 4. 太陽嵐と宇宙天気

最後に今回紹介したプロミネンス噴出の地球への影響を紹介する。太陽嵐1の2時間前に別の領域で太陽嵐が発生しているので、それを太陽嵐0と呼ぶことにする。太陽嵐0, 1, 2のフレアはそれぞれN17E38 (図3aのS0), S25W64 (同S1), S20W34 (同S2) で発生した。フレアクラスはそれぞれM1.5 (図3eのF0), C9.7 (同F1), C5.0 (同F2)

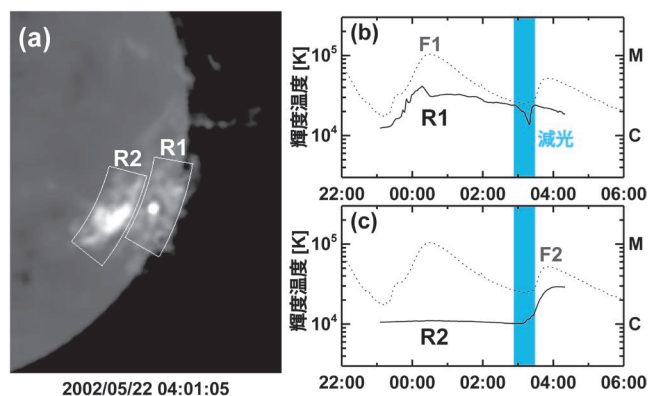


図2 二つのフレアの電波像 (a) とその電波強度の時間変化。左パネル (a) に示したボックスR1およびR2内の平均輝度温度の時間変化をパネル (b) および (c) にそれぞれ示す。破線はGOES衛星観測のX線強度。

\*1 太陽フレアの大きさ (強さ) を示す分類で、最大時のX線強度によりA, B, C, M, Xの5クラスに分けられる。順に10倍ずつ強くなり (Xクラスが最大)、英字に続く係数で各クラスがさらに細かく分類される。

であり、フレア0のX線強度が最も強かった。SOHO衛星搭載のLASCOコロナグラフによる観測では、コロナ質量放出の速度はそれぞれ853 km/s (CME0; 図3b) 1,246 km/s (CME1; 図3c), 1,557 km/s (CME2; 図3d) であり、X線強度の最も低かったフレア2が、最も速いCME2を伴った。統計的には強いフレアほど速いコロナ質量放出を伴うが<sup>5)</sup>、相関は弱いので(相関係数0.5程度)、少ないイベント数では逆相関となっても不思議ではない。CME2はコロナグラフの遮蔽盤の周囲360°すべてに明るい塊が見える高速ハロー型コロナ質量放出<sup>3)</sup>となった。

Wind衛星は5月22日04:10 UTから23日10:40 UTにかけて、周波数が500 kHzから30 kHzへと移動するII型電波バーストを観測した<sup>6)</sup>(図3e)。II型電波バーストは衝撃波で加速された電子がコロナや惑星間物質のプラズマ振動を励起し、プラズマ振動が電磁波に変換されることで発生する。

そのため電波バーストの周波数は電波源のプラズマ周波数に対応している。平均的な太陽風の電子密度を用いると、500 kHzは0.05 AU (10 R<sub>☉</sub>)、30 kHzは0.8 AU付近に対応する。LASCOコロナグラフの観測によれば5月22日04:18 UTにCME2の先端は8.5 R<sub>☉</sub>にあり、CME2の前面に衝撃波が発生し、電子が加速されたと考えて間違いない。

プロトン加速も確認されており、GOES衛星計測の>10 MeVプロトンフラックスは、5月22日の07 UTごろから上昇を始めた(図3f黒線)。これはプロトンイベント、もしくはSEPイベント(Solar Energetic Particle Event)と呼ばれている。高エネルギープロトンは人工衛星の障害を引き起こすので宇宙天気研究にとって非常に重要な研究テーマである。プロトンフラックスは緩やかに上昇を続け、そして23日10 UT頃から急激にフラックスが上昇し、ピーク値は820 pfu (particle flux

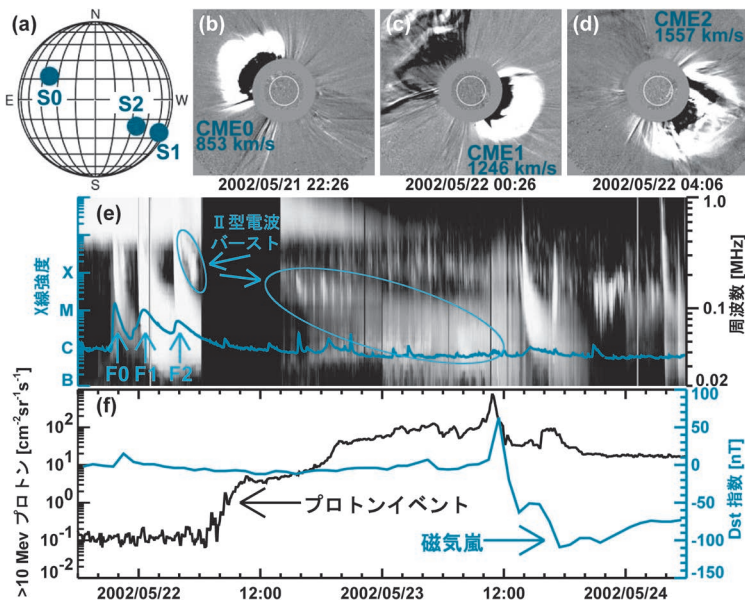


図3 2002年5月21日から22日にかけて発生した太陽嵐とそれに続く宇宙天気現象。(a) 太陽フレア0, 1, 2の発生場所。(b-d) それぞれのフレアに伴い発生したコロナ質量放出(CME0, CME1, CME2)。(e) Wind衛星観測の電波ダイナミクススペクトル(グレースケール)とフレアのX線強度(青線)。(f) GOES衛星計測の>10 MeVプロトンフラックス(黒線)と地磁気の変動を示すDst指数(青線)。CME2によって、II型電波バースト、プロトンイベント、磁気嵐が引き起こされた。

unit, or 粒子数/( $\text{cm}^2 \text{sr s}$ )) に到達した。この急激な上昇はCME2に伴う衝撃波がGOES衛星、すなわち地球近傍に到達し、衝撃波付近にトラップされている高エネルギープロトンが観測されるため発生する。この現象はESP イベント (Energetic Storm Particle Event) と呼ばれている。

太陽嵐2の発生からおよそ32時間後、CME2は地球近傍まで到達した。CME1との速度差を考慮すると ( $1,246 \text{ km/s}$  vs.  $1,557 \text{ km/s}$ )、太陽から地球に移動する間にコロナ質量放出は一部衝突、一体化したと思われる。CME2の衝撃波は地球に衝突、地球磁場を圧縮し、Dst 指数\*2は一端上昇する (5月23日12 UT)。その後CME2の南向き磁場が地磁気に作用し、Dst 指数  $-109 \text{ nT}$  の巨大磁気嵐が引き起こされた。

連続して3件の太陽嵐が発生したが、地球に到達し大きな影響を与えたのは太陽嵐2であった。これは太陽嵐2のコロナ質量放出が最も速かったことと、太陽嵐2が地球への影響を与えやすい場所で発生したことに起因する。統計的研究によれば、プロトンイベントは  $W45^\circ$ – $W60^\circ$  付近で、磁気嵐は太陽面中心で発生した場合に地球への影響が最も出やすい<sup>7)</sup>。太陽嵐の規模 (X線強度やコロナ質量放出の速度) も大切な指標だが、宇宙天気予報のためには、その発生場所も不可欠な情報である。

野辺山電波ヘリオグラフは、太陽フレアとプロミネンス噴出の両者を天候に関係なく監視することが可能で、多くの宇宙天気関連研究で利用された<sup>8)</sup>。太陽嵐発生の数分後には像合成を終え、電波画像を世界中に配信している。宇宙天気研究へのさらなる活用が期待される。

## 謝 辞

本稿はN. Gopalswamy氏との共同研究<sup>4)</sup> に基づきまとめられた。

## 参考文献

- 1) 柴崎清登, 2014, 天文月報107, 304
- 2) 下条圭美, 2014, 天文月報107, 404
- 3) 八代誠司, 2005, 天文月報98, 409
- 4) Gopalswamy N., Yashiro S., 2013, PASJ 65 (SP1), S11
- 5) Yashiro S., Gopalswamy N., 2009, in IAU Symp. 257, Universal Heliophysical Processes, ed. N. Gopalswamy, D. F. Webb (Cambridge Univ. Press), p. 233
- 6) [http://www-lep.gsfc.nasa.gov/waves/data\\_products.html](http://www-lep.gsfc.nasa.gov/waves/data_products.html)
- 7) 総説宇宙天気, 柴田一成・上出洋介 編著, 京都大学学術出版会
- 8) たとえば, Gopalswamy N., et al., 2004, JGR 109, 12105

### Flare Obscuration and Space Weather Phenomena Caused by an Eruptive Prominence on 2002 May 22

Seiji YASHIRO

*The Catholic University of America, Washington, D.C. 20064, USA*

Abstract: Two solar flares occurred successively on May 21–22, 2002 and an eruptive prominence that associated with the second flare transited in front of the first flare. Nobeyama radio heliograph observed obscuration of flare emission in microwave due to the transit. The eruptive prominence was accelerated rapidly and became a fast coronal mass ejection (CME). A shock wave formed by the CME produced an interplanetary type II radio burst and solar energetic particle event. The CME arrived at Earth 32 hours after the eruption and produced an intense geomagnetic storm with Dst index of  $-109 \text{ nT}$ . A series of space weather phenomena caused by the eruptive prominence are summarized.

\*2 地球赤道付近で観測された平均的な地磁気変動量から算出した地磁気変動指数。磁気嵐の指標として用いられる。