

大振幅プロミネンス振動の励起過程を用いた コロナ衝撃波としての EUV 波の性質の研究

高橋 卓也 (京都大学大学院 理学研究科)

Abstract

2012 年 3 月 7 日に発生した巨大フレアに伴い、コロナ中を伝搬する擾乱現象が観測された。これは EUV 波として知られる現象である。EUV 波はフレアを引き起こした活動領域から 70 万 km 離れた太陽極域のプロミネンスに衝突し、大振幅のプロミネンス振動を引き起こした。我々は、EUV 波の衝突によって振動が励起される過程で、5 万度の EUV 波長帯においてプロミネンスが強く増光することを発見した。いくつかの観測的性質から、観測された EUV 波はコロナ中を伝わる磁気流体ファストモード衝撃波であると結論した。さらに、観測されたプロミネンス振動の励起過程を用いて、定量的な議論が困難であるコロナ中の衝撃波の性質について定量的に議論する新しい方法を提案した。

1 イントロダクション

太陽フレアに伴う衝撃波は、太陽高エネルギー粒子の主要な加速源である。そのため、太陽フレアに伴う衝撃波の物理的性質を理解することは、地球周囲の宇宙空間の放射線レベルの上昇など宇宙天気現象を理解する際に不可欠である。そして、太陽コロナは、宇宙天気の理解にとって重要な衝撃波の時間発展に、撮像観測から迫ることの出来る貴重な観測対象である。その一方で、太陽コロナは非常に希薄なため、磁場やプラズマ密度といった物理量を直接観測から決定することが出来ないという弱みがある。そのため、コロナ中を伝播する衝撃波の物理量を定量的に議論することはとても難しい。

極端紫外線 (EUV) で観測した際に見られる、太陽フレアに伴いコロナ中を伝わる擾乱現象は EUV 波と呼ばれる。EUV 波は、発見当初、コロナ中を伝搬する磁気流体 (MHD) ファストモード衝撃波であると考えられていた。しかし、最近の観測研究により、一部の伝播速度の早い EUV 波は確かに衝撃波であることが確かめられた一方、衝撃波としては説明の難しい EUV 波が多くあることが指摘されている。現在は、太陽フレアに伴う EUV 波は、実際の衝撃波であるものと、衝撃波ではなく噴出に伴う擾乱が波のように見えるものの 2 種類あると考えられている。

太陽フレアに伴って遠方のフィラメント (プロミネ

ンスを太陽ディスク上で観測したもの) が揺らされる現象 (フィラメント振動) が以前から知られていた。H 線のウィングで観測した際、まるでフィラメントがウィングをしているように明滅して見えることから、この現象はウィンキングフィラメントと名付けられた。ウィンキングフィラメントはコロナ中を伝わった衝撃波によって励起されると考えられたため、この現象はコロナ中に衝撃波が伝搬しているという間接的な証拠と考えられた。

最近の EUV 観測で、太陽フレアに伴い発生した EUV 波がコロナ中を伝搬し、フィラメントに衝突してフィラメント振動を励起することが発見された。このフィラメント振動は、直接観測の難しいフィラメントの密度、磁場構造を解く鍵と考えられ、周期解析などの手法を用いて研究されて来た。一方で、フィラメント振動の励起過程については、ほとんど研究されていなかった。

本研究では、2012 年 3 月 7 日に発生した X5.4 クラスという巨大な太陽フレアに伴って発生した EUV 波が、コロナ中を伝搬し、遠方のプロミネンスに衝突する様子を調べた。EUV 波の衝突により、プロミネンスは一瞬強く増光したあと、プロミネンス振動を始めた。可視光、電波での観測と照らし合わせた結果、観測された EUV 波は、コロナ中を伝わる衝撃波であると考えられた。プロミネンス振動の励起が、衝撃波の入射によるものであるとして物理モデ

ルを立て、プロミネンス振動の初速度を観測とモデルで照らし合わせることで、観測から直接決定することの難しいコロナ衝撃波の強度に制限を課す方法を議論した。

2 観測の概要

図 1 は GOES 衛星による軟 X 線フラックスの時間変化である。2012 年 3 月 7 日 00:04UT に活動領域 11429 で発生したフレアは 00:24UT にピークをとり、X5.4 クラスの巨大フレアとなった。その 1 時間後に二発目のフレアが発生し X1.3 クラスの巨大フレアになった。これらはともに、速いコロナ質量放出 (CME) を伴った。今回は、一発目のフレアに伴い発生したコロナ擾乱現象に焦点を当てて調べた。

図 2 は SDO 衛星 AIA による 193\AA 波長帯の差分画像である。フレアに伴いコロナ中を伝播する擾乱が見える。ドーム状の擾乱が広がっていった後で、低層コロナ中を北向き (右上向き) に伝播する擾乱が見える。これらはともに EUV 波と呼ばれるが、今回は北向きに伝播した後者に絞って調べた (以降「EUV 波」というときは、後者を指すことにする)。SDO/AIA193 \AA 画像で観測された EUV 波は、フレアを起こした活動領域から約 70 万 km 場所に 00:23UT に現れ、そこから北向きに強い擾乱を伴って平均速度 670km/s で伝播し、北極のプロミネンスに 00:33UT に到達した。一方で、STEREO 衛星 COR1 による可視散乱光観測では、00:25UT に CME の周りに伝わる擾乱が見え始め、00:31UT と 00:36UT の間に極域を通過した (図 3 参照)。また、HiRS による電波のダイナミックスペクトルでは、Type 電波バーストという、コロナ衝撃波の存在の直接証拠となる現象が EUV 波の発生とほぼ同時刻に現れた。これらの観測から、観測された EUV 波はコロナ中を伝わる衝撃波 (CME 前面の衝撃波の足元) であると考えたと観測を統一的に説明出来る。この EUV 波は 00:18UT に現れてから、北向きに速度 670km s^{-1} そのまま伝播し、00:33UT に北極近くにあったプロミネンスに衝突し、大振幅のプロミネンス振動を引き起こした。

図 4 は SDO 衛星 AIA の 304\AA 波長帯の画像である。振動した北極のプロミネンスがよく見える。図 5

は図 4 のプロミネンスを拡大した図である。(a) から (d) はそれぞれ、EUV 波が衝突する前、衝突した直後、衝突してプロミネンスを加速している途中、通り抜けた後のプロミネンスの様子である。衝突の瞬間、プロミネンスが強く増光する様子が分かる。そして、EUV 波が通り過ぎる間に、波面に垂直な方向に運動量を受けて加速している様子が分かる。これらのプロミネンスの増光・加速は、衝撃波の入射によってプロミネンスが圧縮され、運動量を受け取ったと考えることで自然に説明することが出来る。以降では観測された EUV 波は MHD ファストモード衝撃波面であると仮定して議論を進める。

3 プロミネンス振動を用いたコロナ衝撃波の強度の推定

観測された EUV 波が衝撃波であると仮定すると、励起されたプロミネンス振動の初速度は、コロナ中からプロミネンスに入射した透過衝撃波のプラズマ速度であると考えられる。プロミネンスの強い増光は、透過衝撃波によってプロミネンスが強い圧縮を受けた結果である。

衝撃波によるプロミネンス振動の励起過程を定量的に議論するため、ここでは単純化した衝撃波透過の一次元のモデルを考える。ここでは周囲のコロナに対し密度が a 倍大きなプロミネンスに垂直衝撃波が入射する場合を考える。衝撃波伝播速度を、コロナ中 (入射波)、プロミネンス中 (透過波) でそれぞれ V_{sh1} 、 V_{sh2} とする。また、衝撃波プラズマ速度をコロナ中、プロミネンス中でそれぞれ V_{pl1} 、 V_{pl2} と表す。このとき、コロナ中の衝撃波圧縮率は $V_{sh1}/(V_{sh1} - V_{pl1})$ と表される。

弱い衝撃波に対しては、解析的な計算により、波の透過率 $V_{pl2}/V_{pl1} = 2/(1 + \sqrt{a})$ が成り立つことが導かれる。観測から、衝撃波面の伝播方向と、視線方向のなす角度を θ とすると、 $V_{sh1}/\sin\theta = 380\text{km s}^{-1}$ 、 $V_{pl2}/\sin\theta = 48\text{km s}^{-1}$ が得られる。 a の値の範囲を 10 から 30 の間であると仮定すると上の透過率の式を用いてコロナ中の衝撃波圧縮率として 1.26 - 1.53 と直接計算出来る。さらにコロナ中のプラズマベータ (ガス圧と磁気圧の比) を仮定すれば、コロナ中の

衝撃波のマッハ数の範囲についても評価することが出来る。また、解析的な計算から、弱い衝撃波の場合、プロミネンス中の衝撃波圧縮率は、コロナ中の $2\sqrt{a}/(1+\sqrt{a})$ 倍に増加することが示せる。これは、プロミネンスの強い増光を説明すると考えられる。

4 まとめ

我々はこの研究の中で 3 月 7 日に R11429 で起きた X5.4 クラスフレアに伴う EUV 波がコロナ中を伝搬しプロミネンス振動を励起する過程を調べた。可視光観測で見た際の CME 前面の衝撃波との位置関係や、電波フラックスのダイナミックスペクトル観測データから、衝撃波の発生とほぼ一致する時刻、場所で EUV 波が伝搬したことが示せた。これらから、観測された EUV 波はコロナ中を伝播する衝撃波であると考えられる。

コロナ中を伝搬した衝撃波がプロミネンスに '衝突' すると、プロミネンスは強く輝き、明るい部分は EUV 波の進行方向に伝搬した。それと同時に極域プロミネンスは EUV 波の波面と垂直方向に加速された。このように、EUV 波の衝突によってプロミネンスが運動量を受け取り、同時に圧縮されることは、コロナ中の衝撃波がプロミネンスに入射した結果として自然に説明することが出来る。

本研究では、衝撃波入射によるプロミネンス振動の励起を説明する 1 次元の物理モデルを考え、観測されたプロミネンス振動の初速度とコロナ中の EUV 波の伝播速度から、コロナ中の衝撃波強度を定量的に評価する方法について議論した。

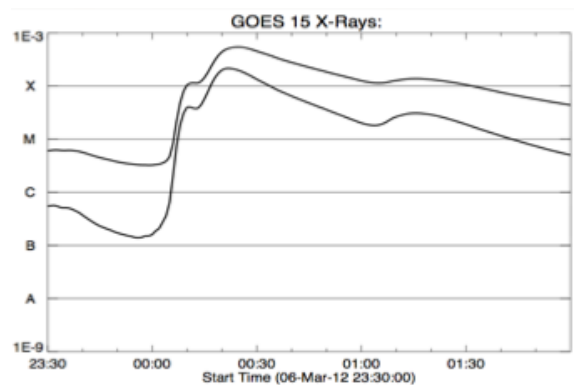


図 1: GOES 衛星による軟 X 線ライトカーブ。

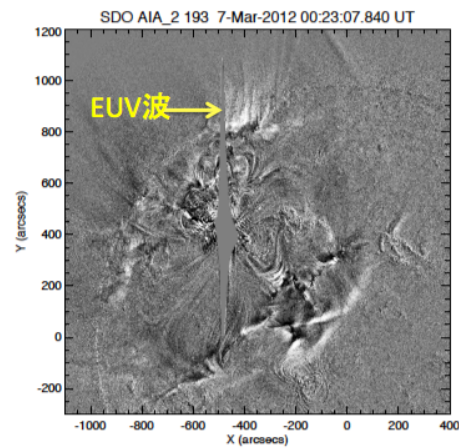


図 2: SDO 衛星 AIA による 193Å 差分画像。北向きに EUV 波が伝播する様子が見える。

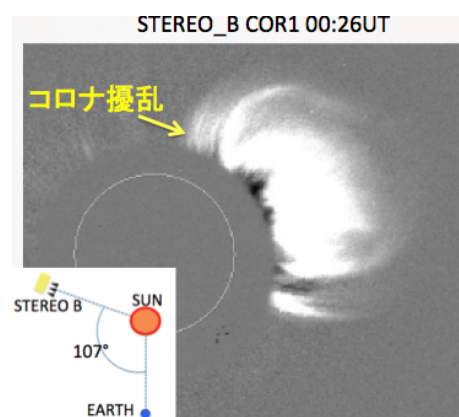


図 3: STEREO B 衛星による可視散乱光差分画像。コロナ質量放出の前面に形成されたコロナ擾乱が見える。

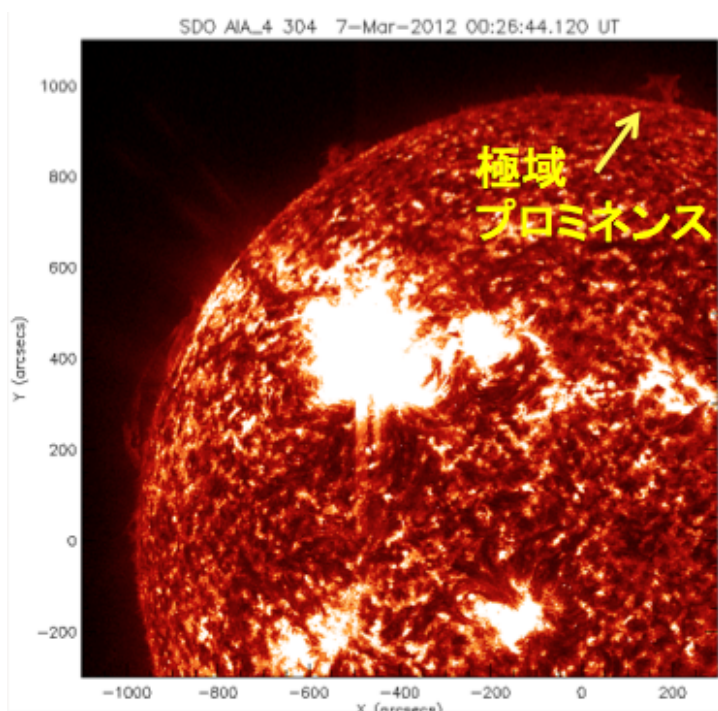


図 4: SOD 衛星 AIA による 304\AA 画像。矢印で振動した極域プロミネンスが示されている。

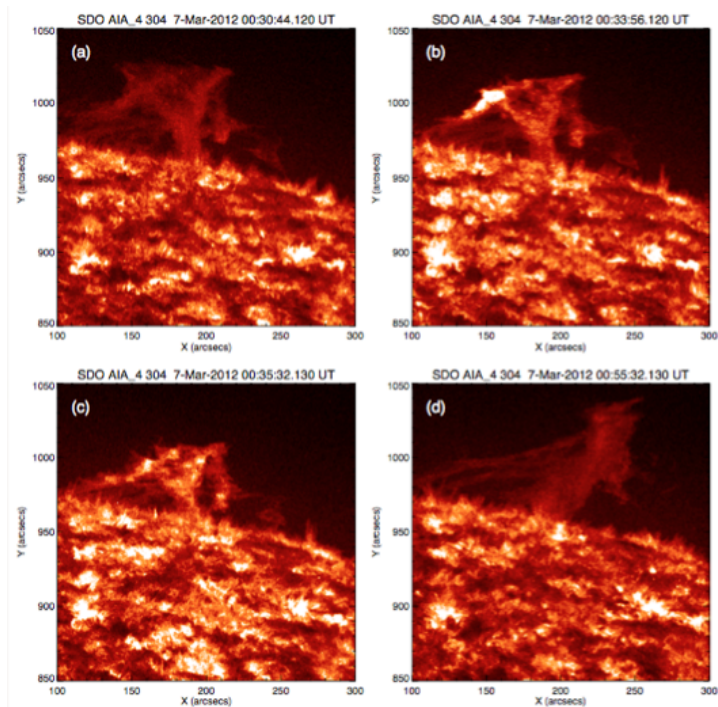


図 5: EUV 波が衝突して極域プロミネンスの振動が励起される様子。