3.1.4 コロナと太陽風 — 磁場が支配する高温大気

清水 敏文（宇宙航空研究開発機構宇宙科学研究所）

（2020 年 3 月 10 日受付、2021 年 5 月 31 日公開）

太陽コロナは、6000 度の太陽表面（光球）の上空に形成された 100 万度以上の温度を持つ太陽外層大気である。このコロナでは、太陽磁場とプラズマがつくる多様なダイナミクスに満ち溢れている。本節では、太陽コロナに関して焦点を当てて解説する。

コロナのダイナミクスのなかで、最も大規模なものがフレア現象である。そのエネルギーの源は、コロナなど太陽表面上空にある磁場に蓄えられた磁気エネルギーである。これが熱や運動エネルギーに短時間に変換されることで、突発的なプラズマ加熱が起き、X 線や紫外線の突発的な増光としてフレアが認識される。また、フレアには、プラズマ噴出（ジェットやコロナ質量放出 CME）が付随することがある（3.2.1 参照）。

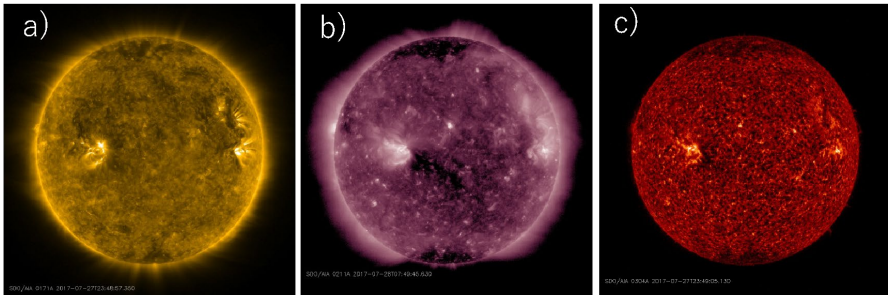

図 1. Solar Dynamics Observatory （SDO）搭載の観測望遠鏡 AIA が取得する紫外線画像。a）Fe IX 輝線を含んだ 17.1nm バンド画像（約 80 万度）や b）Fe XIV 輝線を含んだ 21.1nm バンド画像（約 200 万度）は、コロナプラズマの温度を捉える。c）紫外線域には彩層プラズマを起源とする He II 30.4nm 輝線（5 万度）が存在し、AIA はそれを含んだ 30.4nm バンド画像も取得している。 (c)NASA/SDO

フレアの発生は、GOES 衛星による軟 X 線の強度が増加することから認識できる。紫外線や軟 X 線で２次元空間情報として撮像される画像からは、太陽面上のどこで、どのような形態（モロフォロジー）で発生したかが分かる。さらに、プラズマ噴出といった動的な運動についても、画像のタイムラプス撮影から捉えることができる。図 1 は、2010 年から常時観測を行う NASA の Solar Dynamics Observatory （SDO）搭載の観測望遠鏡 AIA が取得する極端紫外線画像の例である。Fe IX （17.1nm, 60 万度）や Fe XIV （21.1nm, 200 万度）をはじめ、コロナ大気を構成するプラズマ温度から発生する輝線多数が極端紫外線域（10～120nm）に存在する。SDO は、多層膜が特定の波長バンドのみを反射選択する性質を用いて、様々な波長バンドで撮像している。これらの紫外線画像は、ある温度に限定

したコロナプラズマの分布を捉えることに長けている。一方で、100 万度から 1000 万度を超える広い温度を捉えることは、軟 X 線望遠鏡が得意である。図 2 は、太陽観測衛星「ひので」搭載の X 線望遠鏡（XRT）が撮影した例である。

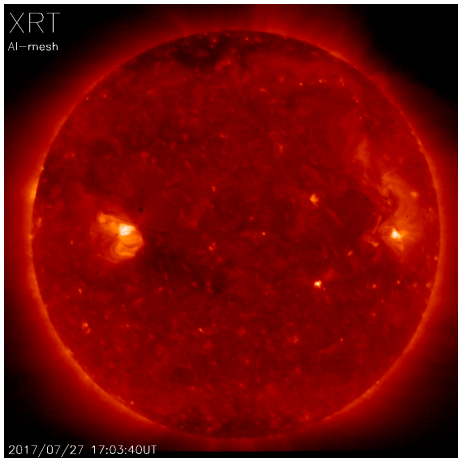

図 2. 軟 X 線コロナ画像。太陽観測衛星「ひので」搭載の X 線望遠鏡 （XRT）による撮影。 (c)JAXA/NAOJ/モンタナ州立大学/SAO

紫外線や軟 X 線のコロナ画像から、太陽コロナは、のっぺりとした太陽表面から想像し難いほど、構造化されていることが分かる。明るい領域を「活動領域」コロナと呼び、コロナの放射がほとんど見られない領域を「コロナホール」と呼ぶ。その中間の領域は「静穏領域」コロナと呼ぶ。

活動領域は、多くのフレアが発生する領域である。その表面には、黒点が存在することが多く、太陽磁場がとりわけ集積した領域である。正極と負極が分布する表面磁場の上空には、それをつなぐように筋状のコロナ構造が存在する。この構造を「コロナループ」と呼ぶ。図 3 のように、円弧状の安定した（ポテンシャル的な）コロナループの他に、エネルギーが蓄積されたと推定されるねじれた構造などが可視的に捉えることができ、フレアや CME 発生の源にある磁場構造を推定するのに有用である。

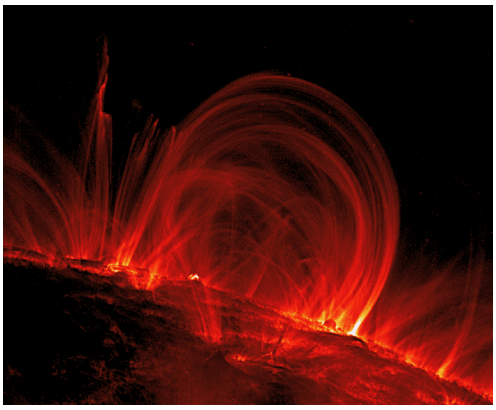

図 3. TRACE 衛星 （NASA）が高解像度の紫外線画像で捉えたコロナループ

図 2 で、静穏領域コロナには、多数の小さな輝点が存在することが分かる。これらは「X 線輝線」（X-ray Bright Point; XBP）と呼ばれ、数時間から数十時間の寿命の現象である。その太陽表面では、短命な小双極磁場 （ephemeral region）の形成や正負の磁極が接近して消滅する現象（magnetic cancellation）が観測される場合がある。

コロナホールは、太陽の極域で大規模な例が見られることが多いが、中低緯度でも観測される。太陽風の流源として宇宙天気を考える上で重要な構造と考えられている （詳細は次節で解説される）。

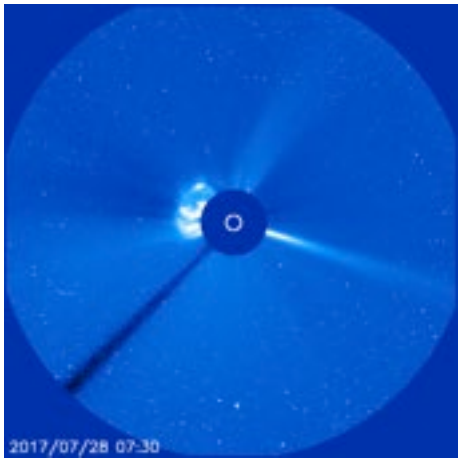

図 4. SoHO 衛星（ESA/NASA）に搭載されたコロナグラフ（LASCO, Large Angle and Spectrometric COronagraph experiment）による画像。

太陽コロナから太陽圏に噴出するプラズマの様子は、コロナグラフで捉えることができる。コロナグラフは、非常に明るく輝く太陽光球を取り除いた人工の”皆既日食”を作る特殊な望遠鏡であり、太陽周辺のコロナからの淡い可視光を観測することができる。図 4 は、SoHO 衛星 （ESA/NASA）に搭載されたコロナグラフ（LASCO, Large Angle and Spectrometric COronagraph experiment）による画像である。太陽から噴出するコロナプラズマの様子を太陽の何十倍の距離まで捉えることができる。

3.1.3 節にあるように、約 6000 度の太陽光球から上空に向かうと、温度が上昇に転じ、コロナの温度が 100 万度を超える。高温なコロナの存在は、熱力学的なエネルギーの流れでは説明できない。コロナでは、熱放射（主に紫外線や軟 X 線波長域）や太陽表面への熱伝導、磁場構造が太陽圏に開いた領域では、太陽風の加速によってエネルギーの損失が絶えずあり、遅かれ早かれ冷えてしまう。常に存在するコロナを形成するために、これらの損失に見合うエネルギーがコロナに非熱的な手段によって注入され、プラズマ加熱が起きている。活動領域で 10^4 J/m^2/s、静穏領域で 10^2 J/m^2/s のエネルギー注入であり、この物理的な機構が何であるかが「コロナ加熱問題」である。エネルギーの根源は光球に見られる対流の乱流運動であり、磁場を介して運動エネルギーの一部を上空コロナに持ち上げ・散逸させると想像される。大別して、波動がエネルギーの伝播・散逸に寄与する説（波動加熱説）と非常に多数の小さなフレア（ナノフレア）のエネルギー散逸が寄与する説（ナノフレア加熱説）があり、様々なアプローチで観測や理論的研究が進められている。

参考文献

Golub, L. and Pasachoff, J.M. (eds.): The Solar Corona, Cambridge University Press (2009)

Phillips, K.J.H., Feldman, U., and Landi, E (eds.): Ultraviolet and X-ray Spectroscopy of the Solar Atmosphere (Cambridge Astrophysics, Series Number 44), Cambridge University Press (2008)

桜井隆, 小島正宜, 小杉健郎, 柴田一成 （eds.）: 太陽 （シリーズ現代の天文学 [第２版] 第 10 巻）,日本評論社 （2018）