

3.2 太陽嵐現象

3.2.1 太陽嵐の観測網

花岡 庸一郎 (国立天文台)

(2019年11月29日受付、2021年5月31日公開)

太陽表面の磁気現象の中でも、規模の大きなフレアやコロナ質量放出のうち特に地球を含む惑星間空間に多大な影響を与えるものを、太陽嵐と称している。フレアの電磁放射（特にX線と電波）の桁違いの増大、通常の太陽系空間よりはるかに密度の高い磁気プラズマ雲の到達、多量の高エネルギー粒子の飛来、といった現象が起こるのが太陽嵐である。

そのため太陽表面の磁気現象の監視が長く続けられている。最初は地上光学観測から始まり、現在では様々な波長での宇宙からの太陽の監視観測や、宇宙空間でのその場の磁気プラズマ・高エネルギー粒子の捕捉へと発展している。最初は先端的な科学観測として始まったものも、時代とともに定常的な太陽嵐監視へと進展し、社会的要請に対する科学の貢献にもなっている。

3.2.1.1 フレアからの電磁波の放射をとらえる

a) 地上からのH α 線監視観測

Carrington らによって 1859 年に最初にとらえられたフレアは白色光で見えた巨大なものであったが、これは例外的なものである。フレアは彩層の現象として頻繁にとらえられるので、H α 線などの観測が日常的に行われるようになって以降、太陽フレアと磁気嵐や突発性電離層擾乱との関係が明らかになってきた。このため、H α 線での系統的なフレアの監視が早くから行われ、フレアリボンの輝度や面積が記録されてきた。

現在も多くの観測所でH α 線での監視観測が行われている。発生したフレアを逃さず捉えられるよう、24時間切れ目なく観測を継続するために、世界各地の望遠鏡によるネットワーク観測も組織されている。もともとアメリカは独自のH α 観測ネットワークを持っていたが、現在では世界の6カ所においた日震学の観測装置群 Global Oscillation Network Group (GONG) にH α の観測装置を加えて監視観測を行っている (Hill et al. 2018)。また、5か国7カ所の機関の協働によるH α 観測網である Global High-Resolution H α Network (Steiniger et al. 2000) も運用中である。日本では国立天文台と京都大学で観測が行われているが、H α 線ではコロナ質量放出の一部でもあるフィラメント噴出をとらえることもできるため、精細なH α 画像の取得に加え、ドップラー効果による視線速度測定が行われている

のが特徴である。京都大学ではこのような観測をさらに進めるため、国外2か国でH α 望遠鏡を展開し (Continuous H-Alpha Imaging Network; CHAIN, UeNo et al. 2009)、観測網の充実を図っている。

b) スペースからの X 線などの観測

フレアは本来コロナ中の高いエネルギーの現象であり、H α で見えるフレアは、その副産物としての彩層加熱を見ている。高温・高エネルギーの成分は、電子と太陽表面磁場との相互作用で放射される電波で最初に直接観測された。スペースからの X 線観測が始まってからは、フレアの高温プラズマからの熱的放射そのものである軟 X 線の測定がより直接的な情報として使われており、現在は電波の中ではメートル波が後述のはるか上空の太陽大気におけるフレア高エネルギー粒子のふるまいを示すものとして活用されている。

太陽の軟X線フラックスの定常観測はアメリカの気象衛星により1970年代には既に始まっており、Synchronous Meteorological Satellites、及び現在まで続く衛星シリーズである Geostationary Operational Environmental Satellite (GOES) に搭載された Space Environment Monitor (SEM, <https://www.ngdc.noaa.gov/stp/satellite/goes/>) によって継続的に観測がなされている。1975年以降は検出されたフレアの時刻・規模が公表されるようになり (<https://www.ngdc.noaa.gov/stp/satellite/goes/index.html>)、現在ではH α に代わってこれがフレアリストの世界的標準となっている。本来地球を向いているはずの気象衛星で太陽を観測することになるので、太陽用の機器は、衛星本体ではなく常に太陽を向く太陽電池パネルに搭載されている。

軟 X 線フラックスの観測では太陽全体から来る軟 X 線を積分して測定しているため、フレアの発生場所を知ることができず、2次元的な情報はH α 観測に頼っていた。一方、かつては断片的にしかなかった X 線や極端紫外線でのコロナ画像の取得は、1990年代以降、次々に打ち上げられた科学目的の太陽観測衛星により継続的に行われるようになっていく。それらは宇宙天気監視を目的にしたものではなかったが、上記 GOES 衛星でも2001年からは Solar X-ray Imager、2016年からは Solar UltraViolet Imager というコロナ撮像装置が搭載され、フレアについての X 線・極端紫外線での2次元的な情報取得が、監視観測の中で定期的に行われるようになっていく。

c) 太陽表面磁場の観測

フレアは太陽表面の磁場進化の過程で発生するものであるため、太陽フレアの直接観測では無いものの、磁場の観測も太陽嵐をそのエネルギー蓄積段階から追跡する上で重要である。太陽表面磁場をとらえるための偏光観測は、装置・解釈の両面で今でもまだ発展途上であり、基本的に科学的観測として様々な観測所・衛星で最新の技術を次々に投入して行われてきた。その中でも、先に述べた GONG、米欧が1995年に打ち上げた Solar and Heliospheric Observatory (SOHO, Domingo et al. 1995、地球から太陽方向に150万 km 離れたラグランジュ点 L1 に置かれた太陽観測用宇宙機) の Michelson Doppler Imager (MDI, Scherrer et al. 1995)、アメリカが2010年に打ち上げた Solar Dynamics Observatory 衛星 (SDO, Pesnell et al. 2012) の Helioseismic and Magnetic Imager (HMI, Scherrer et al. 2012) による、日

震学的観測と並行での太陽全面の光球磁場観測、ひので衛星 (Kosugi et al. 2008) の Solar Optical Telescope (SOT, Tsuneta et al. 2008) による高空間分解能磁場観測では、長期間にわたって継続してデータが得られており、宇宙天気の側面でも貢献してきている。

また、光球よりも上空にある彩層の磁場を測ることが、フレアを引き起こすコロナ磁場の推定に極めて重要であることが認識され、将来の宇宙天気監視目的の磁場観測で必須となるであろう定常的な彩層磁場観測も、アメリカ Synoptic Optical Long-term Investigations of the Sun (SOLIS)・日本の太陽フレア望遠鏡によって赤外域の吸収線を用いて試みられてきた実績がある (Keller et al. 2003, Sakurai et al. 2018)。特に、太陽フレア望遠鏡で行っているヘリウムの吸収線の偏光観測では、フィラメント磁場の定常的な測定が可能になり、PSTEP の研究の中ではその磁場パターンの南北半球依存性が明らかになる (Hanaoka and Sakurai 2017) などの成果が挙げられている。フィラメント磁場を知ることは、そのフィラメントが CME として噴出したときに、それが磁気嵐の原因となり得るような磁場を持っているかどうかをあらかじめ知ることにつながり (Hanaoka et al. 2020)、宇宙天気の予測のひとつの鍵となる。このことから、現在検討されている GONG を発展させた次世代のネットワーク観測装置 (ngGONG, Hill et al. 2019) でも、ヘリウム吸収線での彩層磁場の常時測定を導入し、新たな宇宙天気予報として磁気嵐の磁場予測を行うことが計画されている。

3.2.1.2 太陽からの質量放出をとらえる

a) コロナ質量放出を撮像する

太陽から大量のプラズマが飛来することが磁気嵐の原因となることは 1930 年頃には推定されていたが (e.g., Cliver 2006)、太陽コロナ物質がプラズマ雲として惑星間空間に放出される様子が実際に観測されたのは、1960 年代以降、電波や地上コロナグラフ、そしてスペースでの可視光観測によるものである。特にアメリカの宇宙ステーション Skylab によるコロナグラフ観測では、コロナ質量放出は頻繁に起こるありふれた現象であることが明確になった (e.g., Gopalswamy 2016)。

コロナ質量放出で噴出したプラズマ塊は、その中の電子が太陽光を Thomson 散乱するため、衛星コロナグラフを使えば太陽からかなり離れたところまで可視光で追跡することができる。SOHO 宇宙機の Large Angle and Spectrometric COronagraph (LASCO, Brueckner et al. 1995) 装置は、3 台のコロナグラフを搭載し、30 太陽半径までのコロナ質量放出をとらえられる装置である。この装置の登場で、磁気嵐を起こすようなコロナ質量放出はほとんど全てとらえられるようになり、コロナ質量放出の観測研究に革命をもたらした。2021 年現在なお 2 台のコロナグラフは稼働中である。さらに、Solar TErrestrial Relations Observatory (STEREO、2006 年打ち上げのアメリカの宇宙機, Kaiser et al. 2008) はやはりコロナグラフを搭載し、2 機が地球軌道上を地球から反対方向に離れながら惑星間空間を広視野でとらえることで、太陽から地球へ向かうプラズマ雲の様子を横からとらえることに成功した。LASCO など地球方向だけからコロナ質量放出をとらえる場合、視線方向の運動がわからないという

弱点があるが、限られた期間とはいえ、3次元的速度場を得ることができたのである。

これらの衛星はもともと太陽の研究観測を主目的としており、GOESの太陽観測装置のように、監視目的の観測を中断なく継続することは想定されていない。そこで、宇宙天気監視を最重要目的とした新たな宇宙機をL5（地球から見て太陽より60°東側にあるラグランジュ点）に置く計画が提案されている（https://www.esa.int/Safety_Security/Lagrange_mission2）。

b) プロミネンス噴出の運動を捉える

コロナ質量放出の観測では、直接撮像は有力な手段ではあるものの、視線速度の情報を定常的に得るのは難しく、またプラズマ雲が惑星間空間に噴出してからでないとはとらえることができない。一方H α 線ではフィラメントを視線速度も含めてとらえることにより、噴出開始前から噴出初期における3次元的な進化をとらえることができる。上述のように日本ではこのような3次元速度場をとらえる観測が充実している。特にPSTEPの研究の中で新たにフィラメントの速度場を $\pm 400\text{km/s}$ の広範囲で3次元的にとらえるSolar Dynamics Doppler Imager（SDDI, Ichimoto et al., 2017）が開発され、フィラメント噴出前の前兆現象の検出（Seki et al. 2017）や、CMEに発展するフィラメント噴出の特徴の抽出（Seki et al. 2019）といった成果を挙げており、速度場を含むH α 線観測の宇宙天気現象の早期予報への貢献が期待される。

c) 電波で見る Type II burst

前述のように、コロナ質量放出はメートル波帯の電波でもとらえることができるが、現在特に有用なのは、プラズマ雲の前面にできる衝撃波面から放射されるType II burstと呼ばれる電波の動スペクトル（スペクトルの時間変化）による観測である。放射される電波の周波数はその場のプラズマ周波数で決まるが、プラズマ周波数を決めるコロナ中の電子密度は太陽表面からの高さに依存するため、電波のスペクトルを高速に得ることで、周波数とその時間変化から衝撃波面の高さを知ることができる。コロナグラフの観測のような2次元の空間分解能は無いが、コロナ質量放出の方向によらず、高さ方向の情報を直接得ることができる。世界各地で観測が行われてきており、現在日本においては情報通信研究機構の山川動スペクトル計（70-9000MHz）が稼働中である（Iwai et al. 2017）。この装置では、およそ2太陽半径の高さまでType II burstの追跡ができる。地上での観測は電離層の影響を受けるおよそ30MHz以下の周波数では不可能であるため、さらに低周波（つまり太陽のより上空）での観測は飛行体観測によって行われ、アメリカのWind衛星（1994年打ち上げ、L1点に位置する）では20kHzという低周波までType II burstを追跡することができる。

d) Interplanetary Scintillation

太陽を遥かに離れて惑星間空間を移動していくプラズマ雲は、interplanetary scintillation（IPS）の観測によってもとらえることができる。惑星間空間は太陽風の存在のため有限の電子密度を持っており、またそれが変動している。安定した宇宙の電波源からの電波は、惑星間プラズマによる屈折に起因す

る変動（すなわち IPS）を示す。コロナ質量放出のような通常より電子密度の高いプラズマ雲が移動すると、さらに大きな電波の擾乱が観測される。天球上の様々な場所の電波源からの電波の擾乱を観測していると、それら電波源を背景にプラズマ雲が動いていく様子もとらえることができる。このような IPS 観測により太陽風・コロナ質量放出をとらえる装置は、日本では名古屋大学宇宙地球環境研究所が 327MHz の電波をとらえる装置を 3 カ所で運用している（Kojima & Kakinuma 1990）他、世界各地で稼働している。

e) 惑星間空間におけるその場観測

上述のような、遠方からの電磁波を通した観測だけでなく、惑星間空間にある宇宙機による、まさにその場（in situ）を吹き過ぎるコロナ質量放出のプラズマ雲の、電子密度や磁場の観測も行われている。上述の GOES、Wind といった宇宙機にも測定装置が搭載されているが、特に 1997 年アメリカが打ち上げ、L1 点にて現在も運用中の Advanced Composition Explorer（ACE, Stone, et al. 1998）宇宙機は、太陽風の粒子や磁場を測定する充実した装置群を持っている。通常は太陽風を測定しているが、急激に密度が上がるなど宇宙機にコロナ質量放出のプラズマ雲が到来したことも検知できる。L1 点は地球から太陽方向に 150 万 km のところなので、このような時にはプラズマ雲はじきに地球にも到来し、磁気嵐を起こすことも想定されるので、宇宙機のデータに基づいてそれをあらかじめ予想することも可能である。2015 年打ち上げのアメリカの Deep Space Climate Observatory（DSCOVR, <https://www.nesdis.noaa.gov/content/dscovr-deep-space-climate-observatory>）宇宙機は、地球観測に加えて宇宙天気・宇宙気候監視を目的としていて、やはり L1 点に位置し、コロナ質量放出のプラズマ雲の到来をいち早く検出することを一つの目的としている。このように、宇宙天気監視を主眼にした装置も整備されつつある。

3.2.1.3 太陽からの高エネルギー粒子をとらえる

地球の外から飛来する高エネルギー粒子は、まず銀河宇宙線として発見された。その後、地上での銀河宇宙線観測の副産物として、太陽フレアの発生時に太陽からも高エネルギー粒子、すなわち太陽宇宙線が飛来することが明らかになった。ただ、地上で太陽宇宙線が検出される（Ground Level Enhancement）頻度は低く、1942 年以降現在（2021 年）まで、72 例しかない（<https://gle.oulu.fi/#/>）。観測例が少ないのは地球大気による減衰の効果であるが、人工衛星などが数多く飛翔し、人も宇宙空間で活躍する現在は、これらに降り注ぐ、減衰なしの高エネルギー粒子が問題となる。このため、現在では人工衛星上に高エネルギー粒子の観測装置が搭載され、常に監視が行われている。

その代表的なものが、先にも述べた GOES 衛星の SEM である。SEM は、X 線の測定装置に加え、高エネルギー粒子（陽子など）の測定装置も搭載している。GOES の X 線フレア検出情報が決まった形式で公表されているのと同様、高エネルギー粒子（陽子フラックス）の測定値も、10MeV 以上、

50MeV 以上、100MeV 以上の3つのランクで公表され、さらにフラックスが決まった閾値を超えると警報が出される、というように、既に気象警報のような運用がなされている。

参考文献

- Brueckner, G. E.; Howard, R. A.; Koomen, M. J.; Korendyke, C. M.; Michels, D. J.; Moses, J. D.; Socker, D. G.; Dere, K. P.; Lamy, P. L.; Llebaria, A.; Bout, M. V.; Schwenn, R.; Simnett, G. M.; Bedford, D. K.; Eyles, C. J.: The Large Angle Spectroscopic Coronagraph (LASCO). *Sol. Phys.* 162, 357-402 (1995)
- Cliver, E.W.: The 1859 space weather event: Then and now. *Adv. Sp. Res.* 38, 119-129 (2006)
- Domingo, V., Fleck, B., Poland, A.I.: The SOHO Mission: an Overview. *Sol. Phys.* 162, 1-37 (1995)
- Gopalswamy, N.: History and development of coronal mass ejections as a key player in solar terrestrial relationship. *Geosci. Lett.* 3, 8 (2016).
- Hanaoka, Y., Sakurai, T.: Statistical Study of the Magnetic Field Orientation in Solar Filaments. *Astrophys. J.* 851, 130 (2017)
- Hanaoka, Y., Sakurai, T., Otsuji, K., Suzuki, I. and Morita, S.: Synoptic solar observations of the Solar Flare Telescope focusing on space weather. *J. Space Weather Space Clim.* 10, 41 (2020)
- Hill, F.: The Global Oscillation Network Group Facility - An Example of Research to Operations in Space Weather. *Space Weather*, 16, 1488-1497 (2018)
- Hill, F., Hammel, H., Martinez-Pillet, V., de Wijn, A., Gosain, S. et al.: ngGONG: The Next Generation GONG - A New Solar Synoptic Observational Network. In *Astro2020: Decadal Survey on Astronomy and Astrophysics*, APC white papers, no. 74; *Bulletin of the American Astronomical Society*, 51, 74 (2019)
- Ichimoto, K., Ishii, T.T., Otsuji, K., Kimura, G., Nakatani, Y., Kaneda, N., Nagata, S., UeNo, S., Hirose, K., Cabezas, D., Morita, S.: A New Solar Imaging System for Observing High-Speed Eruptions: Solar Dynamics Doppler Imager (SDDI). *Sol. Phys.*, 292, 63 (2017)
- Iwai, K., Kubo, Y., Ishibashi, H., Naoi, T., Harada, K., Ema, K., Hayashi, Y., Chikahiro, Y.: OCTAD-S: digital fast Fourier transform spectrometers by FPGA. *Earth, Planets and Space* 69, 95 (2017)
- Kaiser, M.L., Kucera, T.A., Davila, J.M., St. Cyr, O.C., Guhathakurta, M., Christian, E.: The STEREO mission: An introduction. *Space Sci. Rev.* 136, 5-16 (2008)
- Keller, C.U., Harvey J.W., Giampapa, M.S.: SOLIS: an innovative suite of synoptic instruments, *Proc. SPIE* 4853, 194-204 (2003)
- Kojima, M., Kakinuma, T.: Solar Cycle Dependence of Global Distribution of Solar Wind Speed. *Sp. Sci. Rev.* 53, 173-222 (1990)
- Kosugi, T., Matsuzaki, K., Sakao, T., Shimizu, T., Sone, Y., Tachikawa, S., Hashimoto, T., Minesugi, K., Ohnishi, A., Yamada, T., Tsuneta, S., Hara, H., Ichimoto, K., Suematsu, Y., Shimojo, M., Watanabe, T., Shimada, S., Davis, J.M., Hill, L.D., Owens, J.K., Title, A.M., Culhane, J.L., Harra, L.K., Doschek, G.A., Golub, L.: The Hinode (Solar-B) Mission: An Overview. *Sol. Phys.* 243, 3-17 (2007)
- Pesnell, W.D., Thompson, B.J., Chamberlin, P.C. The Solar Dynamics Observatory (SDO). *Sol. Phys.* 275, 3-15 (2012)

- Sakurai, T., Hanaoka, Y., Arai, T., Hagino, M., Kawate, T., Kitagawa, N., Kobiki, T., Miyashita, M., Morita, S., Otsuji, K., Shinoda, K., Suzuki, I., Yaji, K., Yamasaki, T., Fukuda, T., Noguchi, M., Takeyama, N., Kanai, Y., Yamamuro, T.: Infrared spectro-polarimeter on the Solar Flare Telescope at NAOJ/Mitaka. *Publ. Astron. Soc. Japan*, 70, 58 (2018)
- Scherrer, P. H., Bogart, R. S., Bush, R. I., Hoeksema, J. T., Kosovichev, A. G., Schou, J., Rosenberg, W., Springer, L., Tarbell, T. D., Title, A., Wolfson, C. J., Zayer, I., MDI Engineering Team: The Solar Oscillations Investigation - Michelson Doppler Imager. *Sol. Phys.* 162, 129-188 (1995)
- Scherrer, P.H., Schou, J., Bush, R.I., Kosovichev, A.G., Bogart, R.S., Hoeksema, J.T., Liu, Y., Duvall, T.L., Zhao, J., Title, A.M., Schrijver, C.J., Tarbell, T.D., Tomczyk, S.: The Helioseismic and Magnetic Imager (HMI) Investigation for the Solar Dynamics Observatory (SDO). *Sol. Phys.* 275, 207-227 (2012)
- Seki, D., Otsuji, K., Isobe, H., Ishii, T.T., Sakaue, T., Hirose, K.: Increase in the Amplitude of Line-of-sight Velocities of the Small-scale Motions in a Solar Filament before Eruption. *Astrophys. J. Let.* 843, L24, 5 pp. (2017).
- Seki, D., Otsuji, K., Ishii, T., Hirose, K., Iju, T., UeNo, S., Cabezas, D., Asai, A., Isobe, H., Ichimoto, K., Shibata, K.: SMART/SDDI Filament Disappearance Catalogue. *Sun and Geosphere*, 14, 95-103 (2019)
- Stone, E.C., Frandsen, A.M., Mewaldt, R.A., Christian, E.R., Margolies, D., Ormes, J.F., Snow, F.: The Advanced Composition Explorer. *Sp. Sci. Rev.* 86, 1-22 (1998).
- Steiniger, M., Denker, C., Goode, P. R., Marquette, W. H., Varsik, J., Wang, H., Otruba, W., Freislich, H., Hanslmeier, A., Luo, G., Chen, D., Zhang, Q.: The New Global High-Resolution H α Network: First Observations and First Results. In ESA-SP 463, A. Wilson ed., *The Solar Cycle and Terrestrial Climate, Solar and Space weather*, 617-622 (2000)
- Tsuneta, S.; Ichimoto, K.; Katsukawa, Y.; Nagata, S.; Otsubo, M.; Shimizu, T.; Suematsu, Y.; Nakagiri, M.; Noguchi, M.; Tarbell, T.; Title, A.; Shine, R.; Rosenberg, W.; Hoffmann, C.; Jurcevich, B.; Kushner, G.; Levay, M.; Lites, B.; Elmore, D.; Matsushita, T. Kawaguchi, N.; Saito, H.; Mikami, I.; Hill, L. D.; Owens, J. K.: The Solar Optical Telescope for the Hinode Mission: An Overview. *Sol. Phys.* 249, 167-196 (2008)
- UeNo, S., Shibata, K., Kitai, R., Ichimoto, K., Nagata, S., Isobe, H., Kimura, G., Nakatani, Y., Kadota, M., Ishii, T.T., Morita, S. and Otsuji, K.: The CHAIN-Project and Installation of Flare Monitoring Telescopes in Developing Countries. *Data Science Journal*, 8, S51-S58 (2009)