

### 3.1.5 太陽風と太陽圏

岩井 一正 (名古屋大学)

(2020 年 11 月 12 日受付、2021 年 5 月 31 日公開)

前節で述べた通り、太陽コロナは何らかの物理的な機構によって絶えず加熱され、高温に保たれている。そのため、コロナのプラズマ大気の一部は、その熱的圧力で太陽の重力を振り切り、超音速の風「太陽風」となって宇宙空間へと流出する (Parker 1958)。太陽風の速度は 300km/s から 800km/s 程度まで領域によって大きく変化し、300-400km/s の低速風と 700km/s 以上の高速風に大別される二様態構造をなしている。高速風は低速風に比べて低密度・高温な特徴がある。高速風はコロナホールと呼ばれる磁力線が宇宙空間に向かって開いた状態の領域から流出していることがわかっている。コロナホールは周囲より低温・低密度であるが、この領域から流出する高速風は高温であることは注意が必要である。

太陽風を加速するメカニズムは詳しく分かっておらず、太陽物理学・宇宙空間物理学における共通の問題として活発に研究が行われている。どのように太陽風を加速するのか、という素過程的な問題から、どのような領域からそのような速度の太陽風が流出するのか、という構造的な問題まで様々な階層で未解明の問題が残されており、それらの未解決問題は相互に関係し合っている (Viall & Borovsky 2020)。太陽風の風速は流源におけるコロナの磁場構造が関係していると考えられている。主に地球軌道の飛翔体によって太陽風をその場観測し、伝搬を逆算することで、その太陽風が流出したと考えられる領域を導出する試みが数多く行われてきた。ここから太陽風速度と太陽表面の磁場構造の特徴が経験的に求まる。太陽風速度は流源のコロナ磁場の開き角 (expansion factor:  $f$ ) の逆数やコロナホールの面積 ( $A$ ) と正の相関があることがわかっている (Wang and Sheeley 1990; Nolte et al 1976)。一方、惑星間空間シンチレーション観測からは、磁場強度 ( $B$ ) と expansion factor の比 ( $B/f$ ) の方が太陽風速度と相関が高いことが示唆され (Fujiki et al. 2005)、その理論的説明も行われている (Suzuki 2006)。様々な観測データの蓄積に伴い、現在も経験則の改良の試みが行われている。

太陽風は基本的に動径方向に進行するが、加えて太陽は約 25 日で自転している。太陽風中では磁場はプラズマに凍結されているため、太陽風中の磁場は、太陽風の動径方向の進行と太陽の自転が足し合わさった螺旋構造になる (Parker スパイラル)。この螺旋構造と動径方向のなす角度は地球軌道では約 45 度で、太陽から遠ざかるほど大きくなっていく。太陽表面の西側に低速風の流源があり、東側に高速風の流源があると、同じ経度上の動径方向前方に低速風が、後方に高速風が並ぶ場合が発生する。このとき、高速風は前方の低速に追いつき、後ろから押し込む領域が形成される。この領域では、太陽風の密度・温度が上昇した領域が形成され、このような領域が地球に到来すると地磁気擾

乱の原因になる。

太陽風が影響を及ぼす領域を「太陽圏」と呼ぶ。太陽風は恒星間を流れる星間物質と相互作用することで減速し、亜音速になる領域に終端衝撃波が形成される。さらに、外側で太陽風と星間物質の境界にヘリオポーズが形成され、ヘリオポーズの外側が星間空間となる。また、終端衝撃波とヘリオポーズの間の領域をヘリオシースと呼ぶ。1970年代に打ち上げられた Voyager 1 号機および 2 号機は惑星探査の後に、太陽圏外縁部まで飛翔した。Voyager 1 は 2004 年に 94AU の領域で、2 号機は 2007 年に 84AU の領域で終端衝撃波を通過したとみられる。両探査機はその後さらに太陽圏外部へと飛翔を続け、2012 年に Voyager 1 号機が、2018 年に 2 号機が太陽から約 120 太陽半径の位置でヘリオポーズを通過し、人工の探査機として初めて星間物質の中に到達した (Burlaga et al. 2013; 2019)。

太陽活動が約 11 年で変動するのに呼応し、グローバルな太陽風の分布も変動する。一般的に、太陽活動極小期には太陽極域のコロナホールが発達し、高速風の領域が中・低緯度まで拡大し、低速風の領域は赤道付近の細い帯状の領域に限られる。太陽活動極大期には極域コロナホールの領域が縮小し、それに伴い、高速風の領域が高緯度へと縮小し、低速風の領域が拡大する (図 1)。太陽活動の低下が見られた 23 活動周期の終盤から 24 活動周期にかけては、太陽風の構造にも変化が示唆され (Tokumaru et al. 2015)、今後の詳細な観測が求められる。

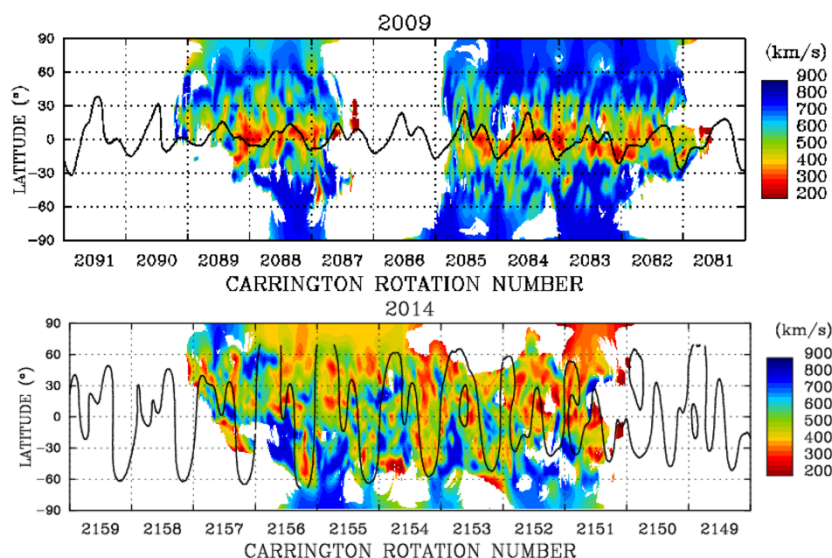


図 1. 惑星間空間シンチレーション観測から得られた太陽風速度の分布の太陽活動依存性。太陽活動極小期 (2009 年、上) と太陽活動極大期 (2014 年、下)。赤から青になるにつれて、高速の太陽風に対応する。

太陽風は宇宙空間を飛翔する探査機による直接観測に加えて、太陽風中のプラズマが電波を散乱する「惑星間空間シンチレーション」を利用して、地上からも観測できる (Hewish 1964)。探査機によるその場観測では、その場所の詳細なプラズマパラメータが得られる一方、探査領域に限られる。特に地球軌道から大きく外れた太陽圏の高緯度領域や太陽近傍の観測は難しい。一方、惑星間空間シン

チレーション観測では地上から様々な方向の電波天体を観測することで、高緯度領域を含む太陽圏のグローバルな構造を導出することができ、探査機によるその場観測と相補的關係にある。国内では名古屋大学が 1980 年代から 327MHz で観測を行っており (Tokumaru et al. 2011, 図 2)、太陽風や (Tokumaru et al. 2010) 太陽嵐 (Iwai et al. 2019) の観測的研究に用いられている。2020 年代には、10 太陽半径程度まで太陽に近づく Parker Solar Probe や Ulysses 以来の高緯度領域の探査を行う Solar Orbiter など多くの探査機によって内部太陽圏の観測データが飛躍的に増加することが期待される。一方、太陽圏外縁部では太陽風と星間物質との相互作用によって高エネルギー中性粒子 (ENA) が生成される。これを地球軌道で観測する IBEX 衛星は太陽圏の構造において多くの知見をもたらした (McComas et al. 2009)。その後継機で 2020 年代に計画される IMAP にもさらなる期待がかかる。これら飛翔体観測、地上からの惑星間空間シンチレーション観測、そして太陽風のモデル・シミュレーションとが一体となった研究が求められる。



図 2. 名古屋大学宇宙地球環境研究所が所有する惑星間空間シンチレーション観測用電波望遠鏡 (愛知県豊川市)

## 参考文献

- Burlaga, L. F., Ness, N. F., Berdichevsky, D. B., Park, J., Jian, L. K., Szabo, A., Stone, E. C., Richardson, J. D.: Magnetic field and particle measurements made by Voyager 2 at and near the heliopause, *Nature Astronomy*, 3, 1007-1012, (2019)
- Burlaga, L. F., Ness, N. F., Stone, E. C.: Magnetic Field Observations as Voyager 1 Entered the Heliosheath Depletion Region, *Science*, 341, 147-150, (2013)
- Fujiki, K., Hirano, M., Kojima, M., Tokumaru, M., Baba, D., Yamashita, M., Hakamada, K.: Relation between solar wind velocity and properties of its source region, *Advances in Space Research*, 35, 2185-2188, (2005)
- Iwai, K., Shiota, D., Tokumaru, M., Fujiki, K., Den, M., Kubo, Y.: Development of a coronal mass ejection arrival time forecasting system using interplanetary scintillation observations, *Earth, Planets, and Space*, 71, 39, (2019)
- Kojima, M., Breen, A. R., Fujiki, K., Hayashi, K., Ohmi, T., Tokumaru, M.: Fast solar wind after the rapid acceleration, *Journal of Geophysical Research (Space Physics)*, 109, A04103, (2004)
- McComas, D. J., Allegrini, F., Bochsler, P., Bzowski, M., Christian, E. R., Crew, G. B., DeMajistre, R., Fahr, H., Fichtner, H., Frisch, P. C., Funsten, H. O., Fuselier, S. A., Gloeckler, G., Gruntman, M., Heerikhuisen, J., Izmodenov, V., Janzen, P., Knappenberger, P., Krimigis, S., Kucharek, H., Lee, M., Livadiotis, G., Livi, S., MacDowall, R. J., Mitchell, D., Möbius, E., Moore, T., Pogorelov, N. V., Reisenfeld, D., Roelof, E., Saul, L., Schwadron, N. A., Valek, P. W., Vanderspek, R., Wurz, P., Zank, G. P.: Global Observations of the Interstellar Interaction from the Interstellar Boundary Explorer (IBEX), *Science*, 326, 959, (2009)
- Nolte, J. T., Krieger, A. S., Timothy, A. F., Gold, R. E., Roelof, E. C., Vaiana, G., Lazarus, A. J., Sullivan, J. D., McIntosh, P. S.: Coronal holes as sources of solar wind., *Solar Physics*, 46, 303-322, (1976)
- Parker, E. N.: Dynamics of the Interplanetary Gas and Magnetic Fields., *The Astrophysical Journal*, 128, 664, (1958)
- Suzuki, T. K., Inutsuka, S.-. ichiro.: Making the Corona and the Fast Solar Wind: A Self-consistent Simulation for the Low-Frequency Alfvén Waves from the Photosphere to 0.3 AU, *The Astrophysical Journal*, 632, L49-L52, (2005)
- Suzuki, T. K.: Forecasting Solar Wind Speeds, *The Astrophysical Journal*, 640, L75-L78, (2006)
- Tokumaru, M., Kojima, M., Fujiki, K., Maruyama, K., Maruyama, Y., Ito, H., Iju, T.: A newly developed UHF radiotelescope for interplanetary scintillation observations: Solar Wind Imaging Facility, *Radio Science*, 46, RS0F02, (2011)
- Tokumaru, M., Kojima, M., Fujiki, K.: Solar cycle evolution of the solar wind speed distribution from 1985 to 2008, *Journal of Geophysical Research (Space Physics)*, 115, A04102, (2010)
- Tokumaru, M., Fujiki, K., Iju, T.: North-south asymmetry in global distribution of the solar wind speed during 1985-2013, *Journal of Geophysical Research (Space Physics)*, 120, 3283-3296, (2015)
- Viall, N. M., Borovsky, J. E.: Nine Outstanding Questions of Solar Wind Physics, *Journal of Geophysical Research (Space Physics)*, 125, e26005, (2020)
- Wang, Y.-M., Sheeley, N. R.: Solar Wind Speed and Coronal Flux-Tube Expansion, *The Astrophysical Journal*, 355, 726, (1990)