

要旨

太陽風は太陽コロナを起源とする超音速のプラズマ（音速 ~ 100 km/s）で、速度の違いから高速風（ ~ 750 km/s）、低速風（ ~ 350 km/s）の二種類に分けられる。また、太陽風はおよそ 5 から 10 太陽半径という遠方のコロナで急激に加速されており、この急激な加速には太陽表面からコロナ中を外向きに伝搬する電磁流体波動がコロナを加熱し生じる圧力勾配や磁気圧の勾配が重要な役割を果たしていると考えられているが、太陽風が加速されるような領域では、プラズマが希薄で暗く光学観測を行うのが難しいため、観測による検証が不十分である。電波掩蔽観測はこの太陽風の加速領域を網羅的に観測できるほぼ唯一の観測手段である。

電波掩蔽観測は地球から見て太陽の反対側を通過する際に探査機から送信された電波を通過する太陽風中のプラズマ密度濃淡によって生じる地上局での受信信号の強度変動、周波数変動から太陽風の速度や波動の振幅などの物理量を推定できる。本研究では、2016 年の 5 月 30 日から 6 月 15 の期間で JAXA の金星探査機あかつきが地球から見て太陽の反対側を通過する際に行われた電波掩蔽観測から得られた掩蔽データを用いて解析を行った。2016 年の観測ではおよそ 2 から 10 太陽半径の領域を観測し、11 回に分けて計測が行われた。解析には地上局で受信された周波数変動と強度変動の時系列データを用いた。

我々は受信電波の強度変動のパワースペクトルから太陽風速度、密度変動スペクトルの傾き、乱流が散逸するスケールを示す inner scale 動径分布を推定した。我々の解析によって得られた太陽風速度と同時期に行われた惑星間空間シンチレーション観測によって得られた太陽風速度との比較から、今回の観測では、コロナホール起源と考えられる太陽風（高速風）とそうでない領域を起源とする太陽風（低い速風）を捉えたことが分かった。また、得られた inner scale は距離とともに増加し、コロナホール起源の太陽風はそうでない太陽風より大きな inner scale を持つことを確かめ、この挙動が理論モデル(the inertial length model)と整合していることを示した。

周波数変動の時系列データについては、wavelet 解析を行うことで音波に伴った密度揺らぎと考えられる準周期的な密度変動を検出し、検出した音波の周期、振幅、継続時間を導出した。さらに、Miyamoto et al. (2014) の手法に倣い、検出した音波の密度振幅とエネルギー流束の距離依存性を導出した。背景の対気に対する相対的な密度変動が距離とともに増加し ~ 6 太陽半径という遠方で 1 に近づき、エネルギー流束が ~ 6 太陽半径あたりまで距離とともに増加することから、2011 年に行われた金星探査機あかつきによる電波掩蔽観測の観測結果と同様に、太陽表面から伝播した Alfvén 波に由来の音波が遠方で碎波し、コロナの外層でもエネルギーが注入されていることを示唆した。また、 ~ 4 太陽半径あたりでコロナホール起源の太陽風がそうでない太陽風に比べ大きなエネルギー流束を持つことからコロナホール起源の太陽風ではコロナ中でより大きなエネルギーの注入があることを示した。

Abstract

The solar wind is the supersonic plasma (sound speed ~ 100 km/s) streamed from the corona, which is an outer atmosphere of the sun, and there are two types of the solar wind called the fast wind (~ 750 km/s) and the slow wind (~ 300 km/s). It is also known that the solar wind is accelerated rapidly in the outer corona about $5\text{--}10 R_S$ ($=$ solar radii). The coronal heating by magnetohydrodynamic waves and the wave-induced magnetic pressure are thought to play major roles in this rapid acceleration. However, confirmation by observations has been insufficient because physical properties of the solar wind acceleration region, whose plasma is thin and dark, are difficult to observe by optical methods.

In radio occultation observations, coronal plasma disturbs received radio wave's amplitudes and frequency from which we can derive physical parameters such as the flow speed and wave's amplitudes. In this research, we analyze data taken in JAXA's Venus orbiter Akatsuki's radio occultation observations carried out during the superior conjunction periods from May 30, 2016 to June 15, 2016 as well as the observations in 2011. Solar offset distances of about 2 to $10 R_S$ were probed intermittently 11 times.

Physical parameters (flow velocity, power-law exponent, axial ratio, inner scale, and the magnitude of the power) were retrieved from the intensity scintillation time series by fitting a theoretical spectrum to the observed power spectra. The radial distribution of the derived solar wind velocity clearly showed a difference between the two types of the solar wind. We also found that the inner scale increases with the heliocentric distance and that the fast solar wind has larger inner scales than the slow solar wind. This behavior is consistent with the theoretical model (the inertial length model) both qualitatively and quantitatively.

We applied wavelet analysis to the frequency time series to detect quasi-periodic fluctuations (QPC), that are thought to represent acoustic waves, and quantify the amplitude, the period, and the coherence time of each wave event. The density amplitude and the wave energy flux were also estimated following the method of Miyamoto et al. (2014). We confirmed that the fractional density amplitudes increase with distance up to $\sim 6 R_S$. The amplitude reaches tens of percent, suggesting a possibility of wave breaking. The energy fluxes increase with distance up to $\sim 6 R_S$, suggesting local generation of waves. It is probable that these radial distributions indicate that the Alfvén waves propagating from the photosphere generate acoustic waves in the outer corona, and the generated acoustic waves dissipate to heat the corona, as suggested by Miyamoto et al. (2014). Furthermore, the energy fluxes in the fast solar wind were larger than the slow wind. The results suggest that the fast solar wind originating from the coronal hole is powered by a larger injection of wave energy than the slow wind originating from other regions.