

MGS 探査機の長期間電離圏磁場観測に基づく火星電離圏 ULF 波動の特性と長期トレンドの調査

#今田 馨¹, 原田 裕己¹

¹京大・理,²京大・理

Investigation of Characteristics and Long-Term Trends of ULF Waves in the Martian Ionosphere: MGS Observations

#Kaworu Imada¹, Yuki Harada¹

¹Graduate School of Science, Kyoto University, ²Graduate School of Science, Kyoto University

The solar wind directly interacts with the low-altitude plasma environment of Mars because the planet lacks a global intrinsic magnetic field. Waves that are left-hand polarized with a frequency similar to the local proton cyclotron frequency in the spacecraft reference frame are called proton cyclotron waves (PCWs), and they could have a long-term impact on the Martian ionosphere. For instance, several events have been reported in which the Mars Atmosphere and Volatile Evolution (MAVEN) spacecraft observed upstream PCWs driving ("ringing") new compressive magnetosonic waves in the ionosphere with an ultralow frequency (ULF) close to upstream proton gyrofrequency (Collinson et al., 2018; Fowler et al., 2018, 2021). In particular, the event reported by Fowler et al. (2018) strongly suggests that PCWs-driven waves in the ionosphere heat planetary heavy ions such as O^+ and O_2^+ , contributing to ion escape to space. Romeo et al. (2021) determined the PCW occurrence rate based on the MAVEN spacecraft observations over almost three Martian years, and the results show that it is about 20% during the southern summer (L_s [degree]=[215, 315]). In addition, Fowler et al. (2021) visually identified the presence of compressive magnetosonic waves with a frequency below 0.1 Hz at altitudes below 1,000 km for 101 orbits of the MAVEN spacecraft from August 7, 2020 to August 22, 2020 (L_s [degree]=[253, 263]), and in 28% of the total orbits the waves were present. Considering these previous studies, the occurrence of upstream PCWs and the resultant ringing process are not uncommon, and its long-term impact on planetary ion heating and ionospheric dynamics may not be negligible. However, no statistical characterization has been made for the properties and spatial distribution of PCW-driven waves in the ionosphere.

In this study, we characterize them based on magnetic field data from April 1999 to November 2006 obtained by the magnetometer on board the Mars Global Surveyor (MGS) spacecraft. The MGS spacecraft was placed into Mars orbit in September 1997 and by March 1999 its orbit had transferred through aerobraking to a sun-synchronous orbit with an orbital inclination of 92.96 degrees and an average altitude of 378 km (Albee et al., 2001). The MGS spacecraft possesses an onboard magnetometer that provides vector magnetic field measurements with a sampling frequency of up to 16 Hz (Acuna et al., 1992, 1998), and therefore the PCW-driven waves in the ionosphere at an ultralow frequency can be detected. We calculate power spectral densities (PSD) based on magnetic field data observed at a quasi-constant altitude for about eight years and develop an algorithm that can automatically detect ULF waves from PSD at each time. Based on the results of the automatic detection of ULF waves, we investigate periodicities and long-term trends corresponding to the solar rotation period, solar cycle, and Martian year in the occurrence rate of the waves, statistical characteristics of the wave amplitude, and spatial distributions of the wave occurrence attributed to crustal magnetic field magnitude.

火星は非磁化惑星であるため、火星-太陽風相互作用が低高度のプラズマ環境に直接、大きな影響を及ぼしうる。バウショックの上流で発生する、衛星系で局所的なプロトンサイクロトロン周波数に近いピークを持ち、左回りの楕円偏波の波動はプロトンサイクロトロン波動 (PCW) と呼ばれており、長期的に電離圏に影響を及ぼしうると思われる現象である。例えば、上流で発生した PCW が電離圏に新たな圧縮性の ULF 磁気音波を駆動する (ringing) 現象を Mars Atmosphere and Volatile Evolution (MAVEN) 探査機が観測したイベントがいくつか報告されている (Collinson et al., 2018; Fowler et al., 2018, 2021)。特に、Fowler et al. (2018) で報告されたイベントは、駆動された電離圏波動が惑星由来の重イオン加熱とそれに伴う散逸に寄与していることを強く示唆するものである。Romeo et al. (2021) は PCW の上流での発生率を MAVEN 探査機の 3 火星年にわたる観測データから推定し、南半球の夏の季節 ($L_s = 215^\circ - 315^\circ$) では、およそ 2 割となることを報告している。また、Fowler et al. (2021) では 2020 年 8 月 7 日から 2020 年 8 月 22 日までの期間 ($L_s = 253^\circ - 263^\circ$ に対応) に観測された MAVEN 探査機の 101 軌道分の電離圏観測データに対して、高度 1,000 km 以下の領域に 0.1 Hz 以下の圧縮性の磁気音波が存在するかどうかを目視で確認している。その結果として全体の 28% の軌道で波動が存在していたという。これらの先行研究を踏まえると、上流で PCW が発生することと、それが電離圏に圧縮性の磁気音波を駆動することは珍しい現象ではなく、惑星イオン加熱や電離圏ダイナミクスへの長期的な寄与は無視できない可能性がある。しかし、現在まで PCW が駆動した電離圏波動の特性や空間分布に対する統計的な特徴づけは行われてこなかった。

本研究ではこの課題に対して、Mars Global Surveyor (MGS) 探査機が 1999 年 4 月から 2006 年 11 月までの期間に観測した電離圏磁場データの解析によってアプローチをする。MGS 探査機は 1997 年 9 月に軌道投入され、エアロブレーキングを行うことで 1999 年 3 月までに軌道傾斜角 92.96° 、平均高度 378 km、14:00/2:00LT を通る太陽同期軌道に遷

移した (Albee et al., 2001)。また、探査機は最大サンプリング周波数が 16 Hz の磁力計 (Acuña et al., 1992, 1998) を搭載しているため、研究対象となる ULF 磁気音波を観測できると考えられる。本研究では、一定高度でおよそ 8 年間観測された磁場データに対して周波数解析を行い、適切なアルゴリズムを開発することによって各時刻において波動の自動検出を試みる。また、波動の自動検出結果から、発生率の周期変動 (太陽自転周期、太陽活動周期、火星年) の有無や、波動の統計的特性 (振幅)、空間分布 (地殻磁場の強弱による発生率の違いなど) を調査する予定である。