

R009-16

B会場：9/27 AM1 (9:00-10:30)

9:30~9:45

MAVENとMEXの多点観測に基づく上流プロトンサイクロトロン波動が火星電離圏に圧縮性のULF磁気音波を駆動するプロセスの統計的研究

#今田 馨¹⁾, 原田 裕己¹⁾, Fowler Christopher M.²⁾, Collinson Glyn³⁾, Halekas Jasper S.⁴⁾, Ruhunusiri Suranga⁴⁾, DiBraccio Gina A.³⁾, Romanelli Norberto³⁾

(¹京大・理,²ウエストバージニア大学,³NASAゴダードスペースフライトセンター,⁴アイオワ大学)

Statistical Study of Processes of Upstream PCW Driving ULF Waves in the Martian Ionosphere: MAVEN and MEX Multi-Point Observations

#Kaworu Imada¹⁾, Yuki Harada¹⁾, Christopher M. Fowler²⁾, Glyn Collinson³⁾, Jasper S. Halekas⁴⁾, Suranga Ruhunusiri⁴⁾, Gina A. DiBraccio³⁾, Norberto Romanelli³⁾

(¹Graduate School of Science, Kyoto University,²Department of Physics and Astronomy, West Virginia University,³NASA Goddard Space Flight Center,⁴Department of Physics and Astronomy, University of Iowa)

Proton cyclotron waves (PCWs) generated upstream of the Martian Bow shock (BS) have been studied in detail in terms of Mars-solar wind interactions since the first observation by Phobos-2 (Riedler et al., 1989; Russell et al., 1990, 1992) because they could have a significant impact on the ionosphere. In the presence of newborn pickup protons resulting from Mars' hydrogen corona extended beyond the BS and solar wind protons, the resultant proton velocity distribution function is often unstable to drive the electromagnetic ion/ion right-hand (RH) and left-hand (LH) resonant instabilities (Gary, 1991, 1993; Romeo et al., 2021). The dominant mode of the two depends on the angle between the solar wind velocity and the interplanetary magnetic field (cone angle), among other plasma parameters. For instance, the LH (RH) instability is predominant for large (small to moderate) cone angles (Gary, 1991). When the excited waves are observed in the spacecraft reference frame, their frequencies are Doppler-shifted due to the relative motion between the spacecraft and the solar wind, and these waves resulting from both instabilities are left-hand and elliptically polarized with a frequency close to the local proton gyrofrequency (Romanelli et al., 2013; Romeo et al., 2021). Case studies based on Mars Atmosphere and Volatile Evolution (MAVEN) revealed that the PCWs are advected back to the BS by the solar wind flow, and "ring" the induced magnetosphere as the associated pressure pulses drive compressive magnetosonic waves in the ionosphere at an ultralow frequency (ULF) similar to that of the upstream PCW (Collinson et al., 2018; Fowler et al., 2018, 2021). Furthermore, if the waves propagate to altitudes at which planetary heavy ions (mainly O^+ , O_2^+) are dominant components, the waves are thought to be capable of heating these ions via wave-particle interactions (Andersson et al., 2010; Ergun et al., 2006). Indeed, Fowler et al. (2018, 2021) reported some events in which MAVEN presumably observed wave-heated ions.

However, since there have been few analyses based on multi-point observations of the upstream of the BS and the ionosphere, the probability at which the upstream PCWs drive the new ULF magnetosonic waves in the ionosphere (defined as ringing probability in this study) has not been derived yet. Accordingly, it has been also unclear how much the ringing process contributes to long-term Mars' atmospheric loss.

In this study, we estimate the ringing probability by analyzing multi-point observations of local magnetic fields based on MAVEN and Mars Express (MEX) obtained between October 2014 and December 2018. First, we identify a number of events in which the Mars Advanced Radar for Subsurface and Ionosphere Sounding (MARSIS) instrument on board MEX operated in the ionosphere while MAVEN confirmed the PCWs with its magnetometers in the upstream region. Then, we estimate the local magnetic field magnitude at MEX for each event from ionograms obtained by MARSIS (Akalin et al., 2010; Gurnett et al., 2005), and automatically identify whether compressional fluctuations were detected in the ionosphere at frequencies close to those of the upstream PCWs, thereby estimating the ringing probability.

As of this writing, we have completed analyses for 99 orbits of MEX and the results show that the ringing probability is about 30% on the dayside ($SZA < 80$ [degree]) and about 23% just above 200 – 300 km on the dayside, at which the ULF waves can heat planetary ions (Ergun et al., 2006; Fowler et al., 2018). In this presentation, we will report the results of the analysis with an increase in the number of orbits to about 130. In addition, we will discuss the global ion escape rate possibly driven by the ringing process in the context of previous studies such as Andersson et al. (2010), Ergun et al. (2006), Fowler et al. (2018, 2021), and Romeo et al. (2021).

火星のバウショック上流で発生するプロトンサイクロトロン波動(PCW)は、惑星電離圏にまで影響を与えることが知られている現象であり、Phobos-2による初観測(Riedler et al., 1989; Russell et al., 1990, 1992)以降、火星-太陽風相互作用の観点から詳しく研究されてきた。火星が近日点付近に位置するときバウショック上流を超えて広がる水素外圏コロナ由来の新生ピックアッププロトンと、太陽風プロトンによって構成される速度分布は不安定であり、electromagnetic ion/ion right-hand (RH) および left-hand (LH) resonant instabilities を駆動する (Gary, 1991, 1993; Romeo et al., 2021)。どちらのモードが支配的かは惑星間空間磁場 (IMF) コーン角に依存しており、大きい場合は LH が支配的となり、小-中程度ではもう一方のモードが支配的になる (Gary, 1991)。これらのモードの波動を衛星系で観測すると、波動はドップラーシフトの影響を受け、どちらも局所的なプロトンサイクロトロン周波数にピークを持つ左回りの楕円偏波として観測さ

れる (Romanelli et al., 2013; Romeo et al., 2021)。Mars Atmosphere and Volatile Evolution (MAVEN) の観測に基づく事例解析によって、上流 PCW はその特性を変化させながら太陽風によって吹き流されていき、圧力パルスとして誘導磁気圏を打ち鳴らすことによって電離圏内に PCW と近い周波数にピークを持つ圧縮性の ULF 磁気音を駆動することが明らかにされた (Collinson et al., 2018; Fowler et al., 2018)。さらに、惑星重イオン (主に O^+ , O_2^+) が支配的な高度まで波動が伝播すると、波動-粒子相互作用によってイオンの加熱に寄与しうると考えられており (Andersson et al., 2009; Ergun et al., 2006)、実際に MAVEN が波動によるイオン加熱を観測したと考えられるイベントも報告されている (Fowler et al., 2018, 2021)。

しかし、これまでの研究では太陽風領域と電離圏の多点観測に基づく解析が少なかったため、PCW が電離圏に ULF 波動を駆動する確率 (本研究で *ringing probability* と定義) が明らかにされてこなかった。それに伴い、一連のプロセスが長期的にどの程度火星の大気散逸に寄与しているのかも十分に議論されてこなかった。

本研究ではこれらの課題に対して、Mars Express (MEX) と MAVEN による波動の多点観測によってアプローチした。まず、2つの探査機が同時に運用されていた 2014 年 10 月から 2018 年 12 月までの期間において、MEX が電離圏に位置していた時間帯に、MAVEN が磁力計観測によってバウショック上流に PCW が存在していることを確認しているイベントを多数同定した。その後、MEX に搭載されている観測装置 Mars Advanced Radar for Subsurface and Ionosphere Sounding (MARSIS) の観測データから MEX の局所的な磁場強度を推定し (Akalin et al., 2010; Gurnett et al., 2005)、電離圏に上流 PCW の周波数に近いピークを持つ磁場強度の変動が存在するかどうかを、アルゴリズムを開発することによって各時刻で自動判定した。この判定結果を統計解析することで *ringing probability* とそのパラメータ依存性を推定した。予稿投稿時点までに、MEX の 99 軌道に対して解析を完了させており、昼側 ($SZA < 80^\circ$) では約 3 割の確率で *ringing* が検出されることや、惑星重イオンの加熱に寄与しうる高度である 200 – 300 km (Ergun et al., 2006; Fowler et al., 2018) の直上 (300 – 350 km) では、昼側で約 23% の確率で *ringing* が検出されることが結果として得られた。本講演では、対象とする軌道を 130 個程度に増やした解析結果を報告する。さらに、得られた *ringing probability* と先行研究 (Andersson et al., 2009; Ergun et al., 2006; Fowler et al., 2018; Romeo et al., 2021) の結果や議論を組み合わせることで、一連のプロセスの長期的な大気散逸への寄与について議論する。