

R009-24

Zoom meeting D : 11/2 AM1 (9:00-10:30)

09:30-09:45

#晝場 清乃¹⁾, 中川 広務¹⁾, 中村 勇貴¹⁾, 堺 正太郎¹⁾, 村田 功¹⁾²⁾, 寺田 直樹¹⁾

¹⁾東北大・理・地球物理, ²⁾東北大院・環境

MAVEN/IUVS observation of the Martian ozone layer during solar energetic particle events

#Sayano Hiruba¹⁾, Hiromu Nakagawa¹⁾, Yuki Nakamura¹⁾, Shotaro Sakai¹⁾, Isao Murata¹⁾²⁾, Naoki Terada¹⁾

¹⁾Geophysics, Tohoku Univ., ²⁾Environmental Studies, Tohoku Univ.

Solar Energetic Particles (SEP) consist of protons, electrons and heavy ions in the energy range between a few tens of keV and GeV, which are originated from solar flares in the low corona, shock waves driven by coronal mass ejections (CME), planetary magnetospheres, and bow shock. SEPs are well known to damage not only spacecraft and detectors but also human body. For future international space explorations in the 2020s, the human activity is going to expand to the Moon and Mars. Thus, the impact of SEP on future explorations on Mars needs to be addressed. However, the effect of SEP on the Martian atmosphere and surface environment is not well understood. In addition, SEP penetrates into Earth's atmosphere down to tens of kilometers at high geomagnetic latitudes, which affects the composition in the middle atmosphere. During the large solar flare in October 2003, SEP caused NO₂ enhancement of several hundred percent and tens of percent ozone depletion between 36 and 60 km altitudes (e.g., Seppala et al., 2004; Rohen et al., 2005). In contrast, the vertical distribution of ozone on Mars was extensively observed by SPICAM onboard Mars Express from 2004 to 2014. Results of previous studies show that the ozone layer was located around 50 km altitude in the southern polar winter, and around 30-40 km altitude in low to middle latitudes in both hemispheres at aphelion season (Montmessin et al., 2013, Maattanen et al., 2019).

Mars has a thin atmosphere, less than 1% of that on Earth. The surface and atmosphere are heavily affected by energetic photons and particles that easily penetrate it owing to insufficient magnetospheric and atmospheric shielding. The Imaging UltraViolet Spectrograph (IUVS) spectroscopy onboard Mars Atmosphere and Volatile Evolution (MAVEN) detected diffuse aurora, suggesting widespread occurrences with increased SEPs (Schneider et al., 2015; Schneider et al., 2018). Schneider et al. (2018) reported the low-altitude, "diffuse" aurora spanning across Mars' nightside hemisphere, coincident with a SEP outburst. The emission extended down to an altitude of ~60 km. Deep precipitation in the middle atmosphere requires extremely energetic electron fluxes up to 100 keV. This fact suggests that SEP may have additional effects on global atmospheric structures in the Martian atmosphere. Incident particles ionize and dissociate atmospheric species deeply, as well as heat the target atmosphere.

The purpose of this study is to investigate the effects of SEP on the Martian atmosphere, especially on ozone, which will help us to understand the study of astrobiology and the greenhouse effect of the early Martian atmosphere.

In this study, we use vertical profiles of ozone, carbon dioxide, and oxygen number densities observed by stellar occultation measurements by Imaging UltraViolet Spectrograph (IUVS) on board Mars Atmosphere and Volatile Evolution (MAVEN), and the energy fluxes of electrons and ions by Solar Energetic Particles onboard MAVEN (MAVEN/SEP). Since March 2015, MAVEN/IUVS has generally conducted stellar occultation campaign for 1-2 days on average for every 2-3 months. MAVEN/IUVS observations cover whole longitudinal area, and wide range of latitudes from 80° S to 75° N. MAVEN/SEP detects an energy spectrum of electrons from 30 keV to 1 MeV and ions from 30 keV to 12 MeV up to 10⁻¹⁰ eV/[cm² s sr eV].

The distribution of ozone observed by MAVEN/IUVS confirms the seasonal, latitudinal and altitudinal characteristics of the ozone distribution observed by MEX/SPICAM. MAVEN/IUVS observations show the peak number density of ozone to be the order of 10⁸/cc at the southern polar winter and the order of 10⁹/cc for both hemispheres at aphelion season. These peak number densities are generally well in agreement with the SPICAM observation, but some data are not quantitatively consistent in detail.

Using the MAVEN/SEP, we analyzed the energy fluxes of solar energetic particles observed between March 2014 and January 2020 in order to identify the periods of strong solar energetic particle arrival events, related to the IUVS observations. Here, we focus on two events; One occurred in 25-26th March 2015 for 39 hours before and after the arrival of electrons of SEP, with 20 occultation profiles, and the other occurred in 3-4th November 2015 for 27 hours after the arrival of electrons to the arrival of ions, with 34 profiles. The effect of SEP on the atmosphere is addressed by comparing with 26 profiles in 8-9 October 2017 during the quiet period.

太陽高エネルギー粒子(Solar Energetic Particles : SEP)は陽子や電子、重イオンから構成される数十 keV から数 GeV の粒子である。これらはコロナ質量放出や太陽フレアと呼ばれる爆発現象に伴って惑星間空間に大量に放出され伝搬していくことが知られている。太陽高エネルギー粒子は探査機・検出器などに損傷を起こすことでも知られているだけでなく、人体にも被曝により悪影響を及ぼす。2020 年代の国際宇宙探査到来とともに人類の活動領域が月、そして火星へと急速に広がりつつある中で、火星で有人あるいは無人活動を行う際に、太陽高エネルギー粒子の影響は極めて大きい。しかし、火星周辺における太陽高エネルギー粒子が火星大気・表層環境にどのような影響を与えるのか解明されていないため、その予測は困難である。またその影響は宇宙空間にとどまらず、地球の高磁気緯度領域の高度数十 km にまで侵入し中層大気の大気組成の変化をも引き起こす。2003 年 10 月の大型フレア時には、太陽高エ

エネルギー粒子到来に伴って地球大気中の NO₂ 増加と、それに伴うオゾン層の半減が報告されている (e.g., Seppälä et al., 2004; Rohen et al., 2005)。

一方、火星におけるオゾン鉛直分布は、2004 年から 2014 年まで Mars Express 搭載の SPICAM が精力的に観測を実施してきた。この先行研究の結果によると、冬の南極では約 50 km にオゾン層が存在することが分かっている。加えて遠日点では、両半球とも低中緯度にて 30~40 km でオゾン層が観測されている (Montmessin et al., 2013, Maattanen et al., 2019)。

火星は大気圧が地球の約 1/100 かつ固有磁場をもたないため、太陽高エネルギー粒子の影響は地球磁気圏内に比べて甚大である。それは、2017 年 9 月の SEP イベント時に、火星夜側全球が大気化学反応を介してオーロラのように発光する現象が発見されたことから明らかであり、100 keV 以上の太陽高エネルギー粒子が高度 70 km 程度まで降り込んでくることが示唆された (Schneider et al., 2018)。太陽高エネルギー粒子が火星大気において中性大気の電離や加熱、大気化学反応による組成変化など、全球的に大気構造に大きく影響を与える可能性があると考えられる。本研究の目的は、太陽高エネルギー粒子が火星大気、特にオゾンに与える影響を調べることであり、これによってアストロバイオロジーの観点や過去火星の温室効果について解明することに繋がると考える。本研究で我々は、NASA 火星探査衛星 Mars Atmosphere and Volatile Evolution (MAVEN) 搭載 Imaging UltraViolet Spectrograph (IUVS) による星掩蔽観測から得られたオゾン、二酸化炭素、酸素の数密度鉛直分布に加え、同衛星搭載 Solar Energetic Particles (SEP) から火星周回軌道上における太陽高エネルギー粒子の電子・イオンのエネルギーフラックスのデータを用いた。IUVS は 2015 年 3 月から、平均で 2~3 ヶ月ごとに 1 度の頻度で 1~2 日間の星掩蔽観測キャンペーンを継続的に行ってきた。この星掩蔽観測は南緯 80 度から北緯 75 度までと、経度全範囲を広くカバーしている。SEP は、電子は 30 keV~1 MeV、イオンは 30 keV ~12 MeV のエネルギースペクトルを 10~10⁶ eV/[cm² s sr eV] の範囲で観測することができる。

MAVEN/IUVS で観測されたオゾンの分布から、MEX/SPICAM で観測されたオゾン分布の季節・緯度・高度の特徴を確認することができた。また、IUVS の観測では南極の冬でのピーク高度では 10⁸ /cc のオーダーの数密度をとり、遠日点においては両半球共に約 10⁹ /cc のオーダーをとっている。この数密度に関しては、SPICAM の観測と概ね一致するものの、詳細には量的に一致しないデータも存在する。

2014 年 3 月から 2020 年 1 月までに MAVEN/SEP が観測した太陽高エネルギー粒子のエネルギーフラックスを解析し、大規模な SEP イベントで、IUVS の星掩蔽観測から得られた大気密度データが存在する 2 つのイベントに着目して解析を行った。1 つ目は、2015 年 3 月 25~26 日の太陽高エネルギー電子の到来前から到来後までの約 39 時間のデータ、2 つ目は、2015 年 11 月 3~4 日の電子到来後からイオン到来までの約 27 時間のデータである。本発表では、大規模 SEP イベント時のデータ解析を行い、比較的季節・緯度が同じ 2017 年 10 月 8~9 日の静穏時データとを比較することで、太陽高エネルギー粒子が大気に与える影響を明らかにする。