

R009-29

Zoom meeting D : 11/2 AM2 (10:45-12:30)

11:00~11:15

太陽高エネルギー粒子が火星オゾンに与える影響の評価

#晝場 清乃¹⁾, 中川 広務²⁾, 中村 勇貴³⁾, 寺田 直樹⁴⁾, 堺 正太郎⁵⁾, 村田 功^{1,6)}, 二穴 喜文⁷⁾

(¹⁾ 東北大学, (²⁾ 東北大・理・地球物理, (³⁾ 東北大・理・地物, (⁴⁾ 東北大・理・地物, (⁵⁾ 東北大・理・地球物理, (⁶⁾ 東北大院・環境, (⁷⁾ IRF

Influences of solar energetic particles on the Martian ozone

#Sayano Hiruba¹⁾, Hiromu Nakagawa²⁾, Yuki Nakamura³⁾, Naoki Terada⁴⁾, Shotaro Sakai⁵⁾, Isao Murata^{1,6)}, Yoshifumi Futaana⁷⁾

(¹⁾Tohoku University, (²⁾Dep. Geophysics, Grad. Sch. Sci., Tohoku Univ., (³⁾Geophysics, Tohoku Univ., (⁴⁾Dept. Geophys., Grad. Sch. Sci., Tohoku Univ., (⁵⁾Dept. Geophys., Science, Tohoku Univ., (⁶⁾Environmental Studies, Tohoku Univ., (⁷⁾IRF

Solar energetic particles (SEPs) consist of protons, electrons and heavy ions in the energy range between a few tens of keV and GeV. SEPs are originated from solar flares, shock waves driven by coronal mass ejections.

SEPs penetrate the Earth's atmosphere down to tens of kilometers at high geomagnetic latitudes. The penetrating SEPs can change the composition in the middle atmosphere. During the large solar flare that occurred in October 2003, penetrating SEPs caused NO₂ enhancement by several hundred percent, accompanied by ozone depletion of tens of percent between 36 and 60 km altitudes (e.g., Seppala et al., 2004; Rohen et al., 2005).

The SEP penetration imposes a critical influence on deep atmospheres and impacts on surfaces of various planets, as Martian Radiation Environment Experiment (MARIE) onboard Mars Odyssey was disabled in the 2003 event (Zeitlin et al., 2010) and a global diffuse-aurora was reported on the entire Martian night side due to the SEP precipitation associated with a solar flare in September 2017 (Schneider et al., 2018). Considering the increasing human activities in space, such as future international missions to the Moon and Mars, it is important to understand the behavior of SEPs in planetary environments in order to assess their impacts on missions and human bodies. In addition, the ozone layer is essential for understanding how NO_x increases in the Martian environment, and the increases in NO_x can have implications for aspects of astrobiology and the past Martian greenhouse effect.

In this study, we aim to identify the response of the Martian ozone layer to SEP events. We use vertical profiles of ozone number densities observed by stellar occultation measurements by IUVS onboard MAVEN, and the energy fluxes of electrons and ions monitored by Solar Energetic Particle onboard MAVEN (MAVEN/SEP). MAVEN/IUVS has regularly conducted stellar occultation campaigns (1-2 days per campaign) once every ~2-3 months (Groller et al., 2018). MAVEN/SEP can detect electron's and ion's energy spectra from 20 keV to 1 MeV and from 20 keV to 6 MeV in the differential flux range of 3-3x10⁶ eV/cm² s sr eV (Larson et al., 2015).

As the first step of this study, we focus on a SEP event at Mars on 3-4 November 2015, when ozone was observed simultaneously by stellar occultation measurements by MAVEN/IUVS. Comparing the data during this SEP event with data during another period of quiet solar activity with similar seasons and latitudes, there was no significant difference in the ozone profile.

We estimated the production rate of CO₂⁺ induced by the SEP flux using a Monte-Carlo model. We then considered the process of ozone depletion by OH increased by SEP, and estimated the amount of ozone depletion using a photochemical model (Nakamura et al., this issue). As a result, no ozone depletion was observed during the November 2015 event. On the other hand, the model suggests that OH increase by a factor of 10-100 at around 40 km compared to the quiescent state, and ozone decrease by a factor of 100 during the large flux SEP event in the September 2017 event. The results of the Monte-Carlo model suggest that particles above 5 MeV for protons and 200 keV for electrons effect on the production rate of CO₂⁺ at below 60 km. The reason for this result is that the SEP flux in that energy band is three to four orders of magnitude larger in September 2017 than in November 2015. However, there is concern about cross contamination in the SEP flux data during the SEP event in September 2017, the estimated ozone variation can be assumed as an upper limit.

Since the MAVEN data are only available after 2014, we analyze the data from Mars Express (MEX). The ozone column densities can be obtained from the observation by nadir observation of Spectroscopy for the Investigation of the Characteristics of the Atmospheric of Mars (SPICAM) and the SEP flux is from the background counts of energetic particles observed by the Analyzer of Space Plasma and Energetic Atoms (ASPERA-3). MEX/SPICAM nadir observations are applied to retrieve the ozone profiles since 2004. MEX/ASPERA-3 can record the penetrating energetic particles through the instrument structure as background counts (Ramstad et al., 2018).

We analyze ozone data observed by SPICAM/MEX during several SEP events identified using ASPERA-3/MEX. We also evaluate the effect of SEPs on atmospheric chemistry on Mars using the aforementioned photochemical model and the Mars Climate Database (MCD).

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、また、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変化を引き起こすことが知られて

いる。例えば、2003年10月の大型フレア時には、太陽高エネルギー粒子到来に伴って地球大気中のNO₂増加と、それに伴って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)。同じく2003年のイベントでは火星探査機 Mars Odyssey の Martian Radiation Environment Experiment(MARIE)が大規模な太陽嵐で機能を停止し(Zeitlin et al., 2010)、加えて2017年9月に起きた太陽フレアに伴って放出された太陽高エネルギー粒子は火星に到達し、粒子降り込みに伴って火星夜側全球でオーロラのような発光現象が報告されたことから(Schneider et al., 2020)、太陽高エネルギー粒子の惑星大気深部への侵入・表層への影響が無視できないことが明らかである。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、太陽高エネルギー粒子の大気・表層環境でのふるまいを解明することは、人体への影響やミッションへの影響を評価する上で非常に重要である。また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の定量的理解は、火星環境でNO_xがどのように増大するのかを理解する上でも重要であり、アストロバイオロジーの観点や過去火星の温室効果の観点において示唆を与える。

火星におけるオゾン鉛直分布は、2004年から 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、冬の南極では高度約50 kmにオゾン層が約1.5ppm程度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で高度30-40 kmでオゾン層が観測されており、季節・緯度によって高度や密度が大きく変動する様子が捉えられている(Montmessin et al., 2013, Maattanen et al., 2019)。近年では、TGO(Trace Gas Orbiter)による観測からLs = 0, 180°において両半球で高緯度(>±55°)、高高度(40-55km)でのオゾン量の増加が報告されている(Patel et al., 2021)。

本研究で、我々は、火星大気中のオゾン密度の高度分布が、太陽高エネルギー粒子イベントに対してどのように応答するのかを同定することを目指す。まずNASA火星探査衛星 Mars Atmosphere and Volatile Evolution(MAVEN)に搭載された Imaging UltraViolet Spectrograph(IUVS)による星掩蔽観測から得られたオゾン数密度の鉛直分布に加え、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(Groller et al., 2018)。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20 keV~1 MeV、イオンは20 keV~6 MeVのエネルギースペクトルを $3\sim 3 \times 10^6 \text{ eV}/[\text{cm}^2 \text{ s sr eV}]$ の範囲で観測することができる(Larson et al., 2015)。

これらの観測データから、まず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用い、SEPイベント時にIUVSの星掩蔽観測も同時に行われた1つのイベントに着目した。このイベントは2015年11月3-4日に起こったものであり、このデータと季節・緯度が似ている太陽活動静穏時のデータとを比較した結果、オゾン高度分布に優位な違いはみられなかった。

次にモンテカルロモデル(Nakamura et al., this issue)を用いて観測された太陽高エネルギー粒子到来に伴うCO₂+の生成率を推定し、それに伴い増加したOHがオゾン破壊するプロセスを考え、光化学モデル(Nakamura et al., this issue)を用いてオゾンの減少量を見積もった。結果として2015年11月のイベントではオゾンの減少は見られなかった。しかし、比較的規模の大きな2017年9月のSEPイベントにおいては、静穏時と比較して高度約40 kmにおいてOHが10~100倍増え、それに伴ってオゾンが1/100に減少する可能性が示唆された。モンテカルロモデルの結果からは、高度60 km以下のCO₂+の生成率に効くのは陽子では5 MeV以上、電子では200 keV以上であることが示唆されている。2015年11月と比べて2017年9月ではそのエネルギー帯のフラックスが3桁4桁大きいことが今回の結果の要因だと考えられる。しかしながら、2017年9月のSEPイベントでは、高エネルギー粒子のエネルギーフラックスにクロスコンタミネーションの懸念があるため、このイベントにおいて見積もったオゾン変化量は上限値と考えられる。

MAVENのデータは2014年以降に限られるため、我々は、2014年以前について、ESA火星探査衛星 Mars Express(MEX)のデータ解析にも着手した。具体的にはMEX搭載の Spectroscopy for the Investigation of the Characteristics of the Atmospheric of Mars(SPICAM)による直下観測から得られたオゾンの気柱密度を用いた。また太陽高エネルギー粒子の到来時刻の同定には、同探査機搭載の Analyzer of Space Plasma and Energetic Atoms(ASPERA-3)による、高エネルギー粒子のバックグラウンドカウントのデータを使用した。SPICAM/MEXは2004年以降の長期間において断続的に星掩蔽観測により、オゾン、二酸化炭素、気温、エアロゾルを観測している。また、ASPERA-3/MEXは、非常に大きなエネルギーを持つ粒子は装置の壁や内部構造を貫通してバックグラウンドカウントとして記録される(Ramstad et al., 2018)。

我々はASPERA-3/MEXのデータを用いて同定したいいくつかのSEPイベントについて、SPICAM/MEXから得られたオゾンについて解析を行った。また、前述の光化学モデルや Mars Climate Database(MCD)を用いて、火星における太陽高エネルギー粒子の大気化学への影響を捉えることを試みる。