

R009-14

B会場：11/24 PM2 (15:30-18:15)

17:00~17:15

## 火星 GCM でシミュレーションされた水循環におけるレゴリス - 大気間の相互作用の役割

#古林 未来<sup>1,2)</sup>, 黒田 剛史<sup>1,3)</sup>, Forget François<sup>2)</sup>, 鎌田 有紘<sup>1)</sup>, 黒川 宏之<sup>4,5)</sup>, 青木 翔平<sup>6)</sup>, 中川 広務<sup>1)</sup>, 寺田 直樹<sup>1)</sup>

<sup>(1)</sup> 東北大学大学院理学研究科地球物理学専攻, <sup>(2)</sup> ソルボンヌ大学 LMD/IPSL, <sup>(3)</sup> 東北大学高等研究機構, <sup>(4)</sup> 東京大学大学院総合文化研究科, <sup>(5)</sup> 東京大学大学院理学系研究科地球惑星科学専攻, <sup>(6)</sup> 東京大学大学院新領域創成科学研究科

## Role of the regolith-atmosphere interaction on the water cycle simulated with a Mars GCM

#Mirai Kobayashi<sup>1,2)</sup>, Takeshi Kuroda<sup>1,3)</sup>, François Forget<sup>2)</sup>, Arihiro Kamada<sup>1)</sup>, Hiroyuki Kurokawa<sup>4,5)</sup>, Shohei Aoki<sup>6)</sup>, Hiromu Nakagawa<sup>1)</sup>, Naoki Terada<sup>1)</sup>

<sup>(1)</sup>Department of Geophysics, Graduate School of Science, Tohoku University, <sup>(2)</sup>LMD/IPSL, Sorbonne Université,

<sup>(3)</sup>Organization for Advanced Studies, Tohoku University, <sup>(4)</sup>Graduate School of Arts and Sciences, The University of Tokyo,

<sup>(5)</sup>Department of Earth and Planetary Science, Graduate School of Science, The University of Tokyo, <sup>(6)</sup>Graduate School of Frontier Sciences, The University of Tokyo

The Martian regolith exchanges water vapor with the atmosphere via adsorption (Fanale & Cannon, 1971; Zent et al., 1993). Diurnal variations in adsorption and desorption correspond to changes in ground temperature, and water vapor is thought to be trapped on regolith grains at night and released into the atmosphere during the day (Savijärvi et al., 2020, 2021). According to one-dimensional models that account for water vapor exchange between the regolith and the atmosphere (the regolith-atmosphere interaction), the diurnal variations in relative humidity near the surface observed by the Curiosity rover and Phoenix lander are well reproduced when this interaction is considered (Savijärvi et al., 2016, 2019, 2020). However, the impact of this interaction on the seasonal water cycle has not been well explored. Previous global climate modeling studies have shown that the regolith-atmosphere interaction is significantly influenced by the initial subsurface water amount, which in turn affects the atmospheric water vapor amount (Houben et al., 1997; Richardson & Wilson, 2002; Tokano, 2003; Böttger et al., 2005). In other words, relatively dry regolith at the start of the calculation ultimately dries out the atmosphere, while wet regolith makes the atmosphere too wet, making it impossible to quantitatively discuss the role of the regolith-atmosphere interaction on the seasonal water cycle on Mars. In this context, we investigate the effects of the regolith-atmosphere interaction on the Martian water cycle with a quasi-steady state of adsorbed water mass as an initial condition, which is obtained by long-term calculations. This makes the calculated water cycle comparable to the observations and the effects of the regolith-atmosphere interaction can be quantitatively evaluated. In this study, we use a Mars Global Climate Model (MGCM) coupled with a regolith model. Our MGCM traces the Martian seasonal water cycle, including seasonal caps, frost formation, turbulent fluxes in the atmospheric boundary layer, and simple cloud microphysics that have been considered in previous MGCMs (Kuroda et al., 2005, 2013; Montmessin et al., 2004). We have developed a regolith model that includes the water vapor exchange between the regolith and the atmosphere, water diffusion, adsorption, and condensation in the regolith. Our regolith model has been developed based on several previous models (Böttger et al., 2005; Steele et al., 2017; Kamada et al., 2024) and uses an adsorption coefficient as a free parameter. In this study, in order to obtain the quasi-steady state of the adsorbed water mass in the regolith, we perform “spin-up” calculations for several decades with the regolith-atmosphere interaction turned off in advance. In this case, the total atmospheric water vapor amount is conserved, while the total subsurface water amount can be changed. The regolith-atmosphere interaction is then turned on (active regolith simulation) to compute the Martian water cycle. Conventional water cycle, except for the regolith model, is also calculated (inactive regolith simulation). Our results show that the active regolith simulation results in 5 pr- $\mu$  m wetter mid- and low-latitude atmosphere during the northern fall and winter ( $L_s=210^\circ - 320^\circ$ ) compared to the inactive regolith simulation when the atmospheric water vapor masses over the polar cap in the northern summer are similar (100 pr- $\mu$  m) in both cases. The seasonal variations in water vapor flux exchanged between the regolith and the atmosphere show a water supply from the regolith at mid-latitudes in the northern hemisphere in  $L_s=180^\circ - 240^\circ$ . This suggests that the mid- and low-latitude regolith releases water vapor into the atmosphere during the fall and winter in the northern hemisphere. Thus, while the regolith-atmosphere interaction does not have drastic effects as previously suggested (Tokano, 2003; Böttger et al., 2005), it moistens mid- and low-latitudes, indicating that the regolith is a seasonal water source.

火星表層を構成するレゴリスは、吸着を介し、大気との間で水蒸気を交換している (Fanale & Cannon, 1971; Zent et al., 1993)。吸着・脱着の日変動は地温の変化に対応しており、水蒸気は夜間にレゴリス粒子表面に捕捉され、日中に大気中へ放出されると考えられている (Savijärvi et al., 2020, 2021)。火星のレゴリス-大気間の水蒸気交換を考慮した一次元モデルによれば、キュリオシティ・ローバーやフェニックス・ランダーによって観測された地表面付近 (1.5 m) の相対湿度の日内変動は、レゴリス-大気間の水蒸気交換を考慮する場合にとても良く再現される (Savijärvi et al., 2016, 2019, 2020)。しかし、この相互作用が火星の季節的な水循環に与える影響は十分に検討されているとは言えない。これまでの全球気候モデルによる研究では、レゴリス-大気間の水蒸気交換は計算開始時の地下水量が大気中の水蒸気総量に

大きく影響を与えることが示されている。つまり、初期条件の時点で比較的乾燥したレゴリスは最終的に大気を乾燥させ、湿ったレゴリスは大気を湿潤にしすぎてしまうという問題があり、観測された大気中の水蒸気量を再現しながらレゴリス-大気間の水蒸気交換の役割を定量的に議論することができなかった (Houben et al., 1997; Richardson & Wilson, 2002; Böttger et al., 2005)。これを踏まえ、本研究ではレゴリス中の吸着水量の準定常状態を予め計算することにより、大気中の水蒸気量を再現しながらレゴリス-大気間の水蒸気交換が火星の水循環に与える影響を調べる。本研究では、レゴリスモデルと結合された火星全球気候モデル (MGCM) を用いる。我々の MGCM は、これまでの MGCM で考慮されてきた、季節的なキャップや地表面における霜の形成、大気境界層における乱流フラックスおよび単純な雲微物理を含み、火星の季節的な水循環をトレースする (Kuroda et al., 2005, 2013; Montmessin et al., 2004)。そこに新たにレゴリス-大気間の水蒸気交換、水蒸気拡散、吸着および凝結を含むレゴリスモデルを開発した。我々のレゴリスモデルは、いくつかの過去のモデルに基づいて開発され (Böttger et al., 2005; Steele et al., 2017; Kamada et al., 2024)、吸着係数をフリーパラメータとしている。また、レゴリス-大気間の水蒸気交換のオン・オフを切り替えることができる。本研究では、レゴリス中の吸着水量の準定常状態を求めるために、事前にレゴリス-大気間の水蒸気交換をオフにして数十年間の「スピンアップ」計算を行う。このとき、大気中の水蒸気総量は保存し、地下水の総量は変化する。その後、レゴリス-大気間の水蒸気交換をオンにして (アクティブ・レゴリス・シミュレーション)、火星の水循環を計算する。また、レゴリスモデルを除いた従来の水循環過程も同様に計算を行った (インアクティブ・レゴリス・シミュレーション)。その結果、アクティブ・レゴリス・シミュレーションでは、北半球の秋から冬にかけて ( $L_s=210^\circ - 320^\circ$ )、中・低緯度の大気を湿潤にすることがわかった。従来の水循環過程では、北半球の夏における極冠上空の水蒸気量が少ないとき、中・低緯度の供給される水蒸気も同時に減少していた。しかし、アクティブ・レゴリス・シミュレーションでは、北半球の夏における極冠上空の水蒸気量がインアクティブ・レゴリス・シミュレーションと同程度 ( $100 \text{ pr-}\mu \text{ m}$ ) であっても湿潤な中・低緯度 ( $25 - 30 \mu \text{ m}$ ) を実現でき、中・低緯度はインアクティブ・レゴリス・シミュレーションと比較して約  $5 \text{ pr-}\mu \text{ m}$  湿潤になる。また、レゴリス-大気間で交換された水蒸気フラックスの季節変動を見ると、 $L_s=180^\circ - 240^\circ$  に北半球の中緯度でレゴリスからの水の供給が見られる。これは、中・低緯度のレゴリスが北半球の秋から冬にかけて大気中に水蒸気を放出していることを示唆している。従って、レゴリス-大気間の水蒸気交換は従来のモデルで示唆されたほど季節的な水循環に対して劇的な影響を持つわけではないが、中・低緯度を湿潤にしており、レゴリスが季節的な水の供給源となっていることを示している。