

# レゴリスの粒径を考慮した火星GCMにおける レゴリス-大気間の水蒸気交換が火星水循環に与える影響



東北大学大学院理学研究科  
地球物理学専攻

古林未来<sup>1</sup>, 鎌田有紘<sup>1</sup>, 黒田剛史<sup>1</sup>, 黒川宏之<sup>2</sup>, 青木翔平<sup>3</sup>, 中川広務<sup>1</sup>, 寺田直樹<sup>1</sup>

1: 東北大学大学院理学研究科, 2: 東京工業大学地球生命研究所, 3: 東京大学大学院新領域創成科学研究科

謝辞: この研究はJST創発的研究支援事業(助成番号JPMJFR212U)の支援を受けています

## 地下に水を溜め込むレゴリス

火星のレゴリスは高い空隙率(20-50%)と吸湿性を持つ

レゴリス-大気間で水蒸気が交換され、レゴリス中の空隙を拡散した水蒸気が地下で吸着と凝結を起こすことによって地下に水が蓄えられている

**地下水の観測** 北半球の中高緯度と南半球の高緯度に確認(図2右の◇)

隕石の衝突によって地下水が地表に露出(図2左)

地下数メートル以内に氷の層が存在することが示唆されている

**本研究の目的** 地下と大気を繋ぐレゴリスが地下環境への理解の鍵に

レゴリス-大気間の水蒸気交換が大気に与える影響を調べる

レゴリスの粒径が火星の地下水分布の推定に及ぼす影響を調べる

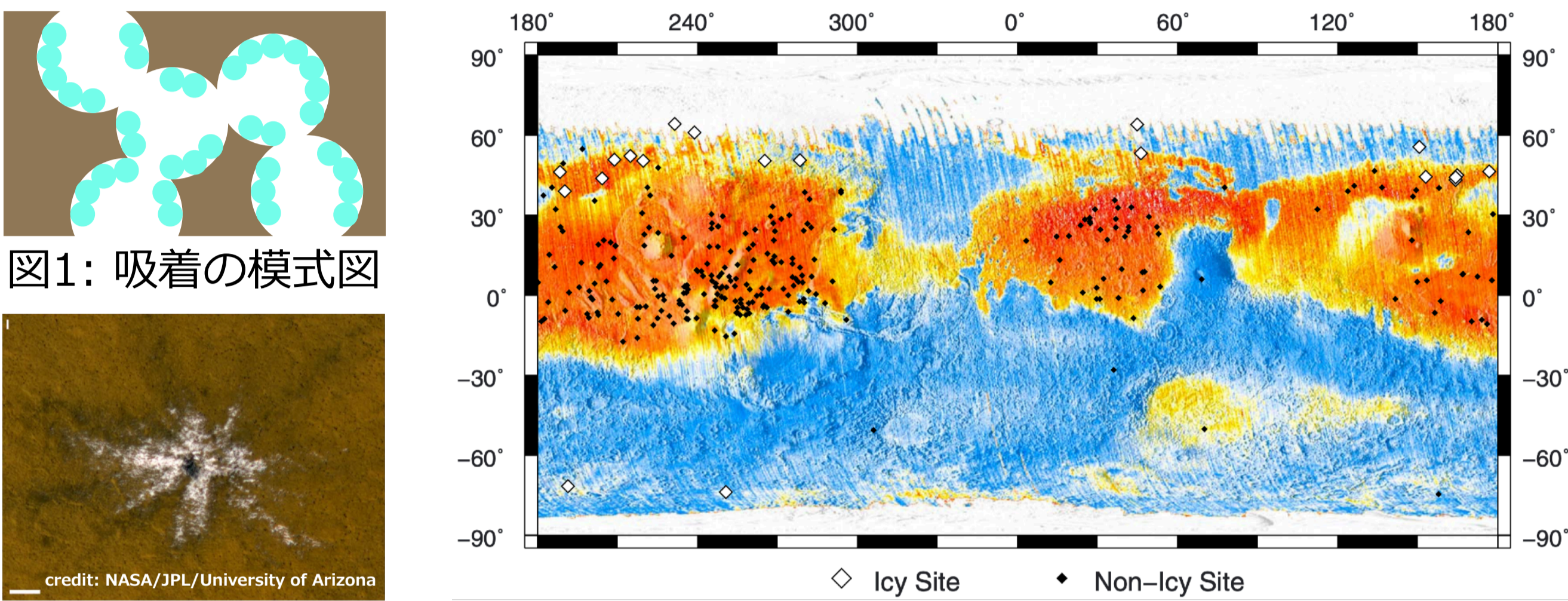


図1: 吸着の模式図

図2: 隕石衝突後に地表に露出した水氷とそれらの分布(Dundas et al., 2013)

## Introduction

表: レゴリススキーム概要

変数	レゴリス中の水蒸気 $n$ , 吸着水 $a$ , 水氷 $\zeta$ , 水の総和 $\sigma$ , 空隙率 $\phi$ , 大気中の水蒸気混合比 $q$ , 地中温度, 地表温度, 熱拡散係数, 地表面圧力
計算	レゴリス-大気間の水蒸気交換/地下での水蒸気拡散/吸着/凝結
拡散	分子拡散とクヌーセン拡散を考慮(Steele et al., 2017)
初期条件	2 kg m <sup>-3</sup> の地下水を全球一様に配置

Mars GCM: DRAMATIC (Kuroda et al., 2005; 2013; 2015; 2017)

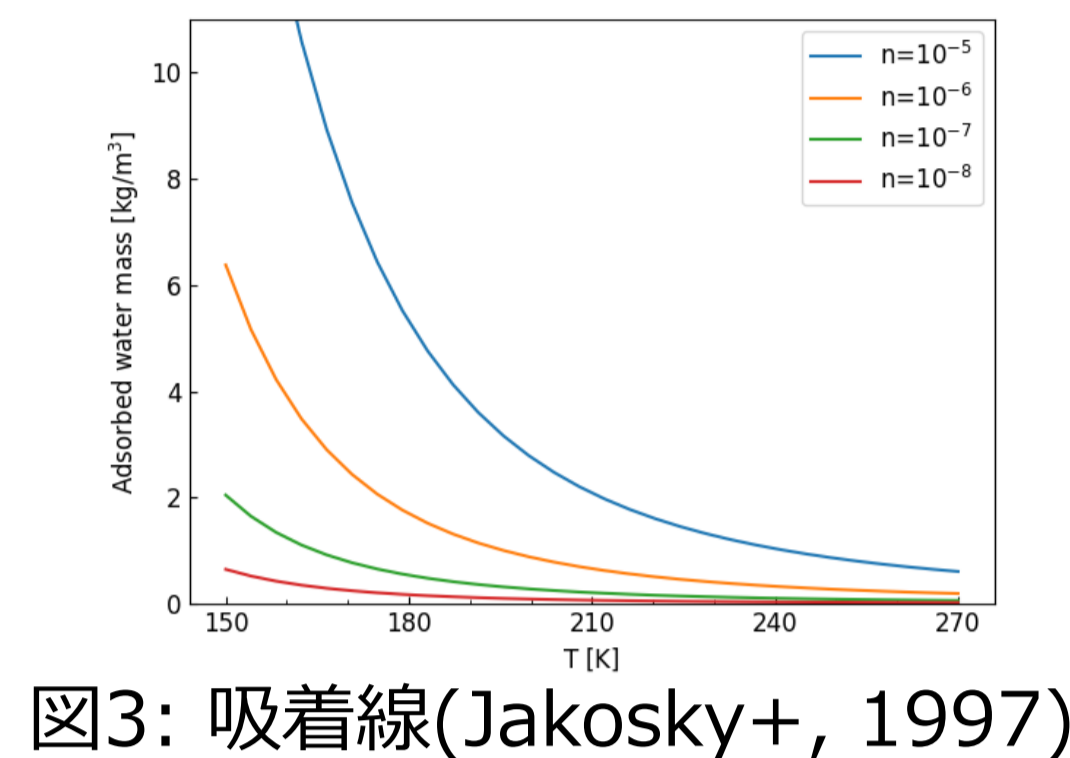


図3: 吸着線(Jakosky+, 1997)

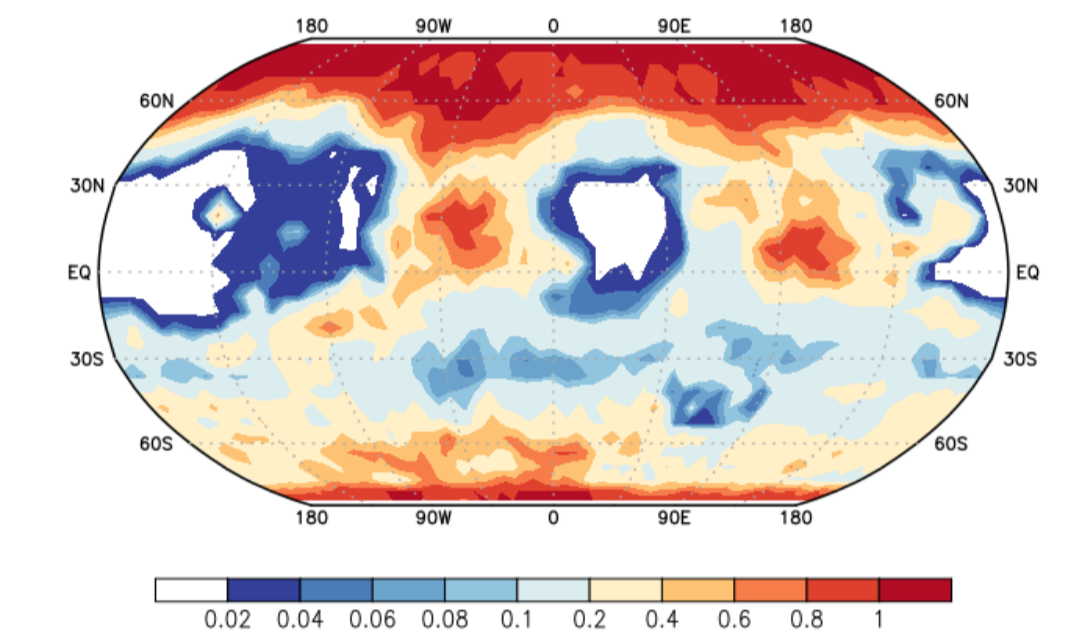


図4: 粒径マップ [mm]

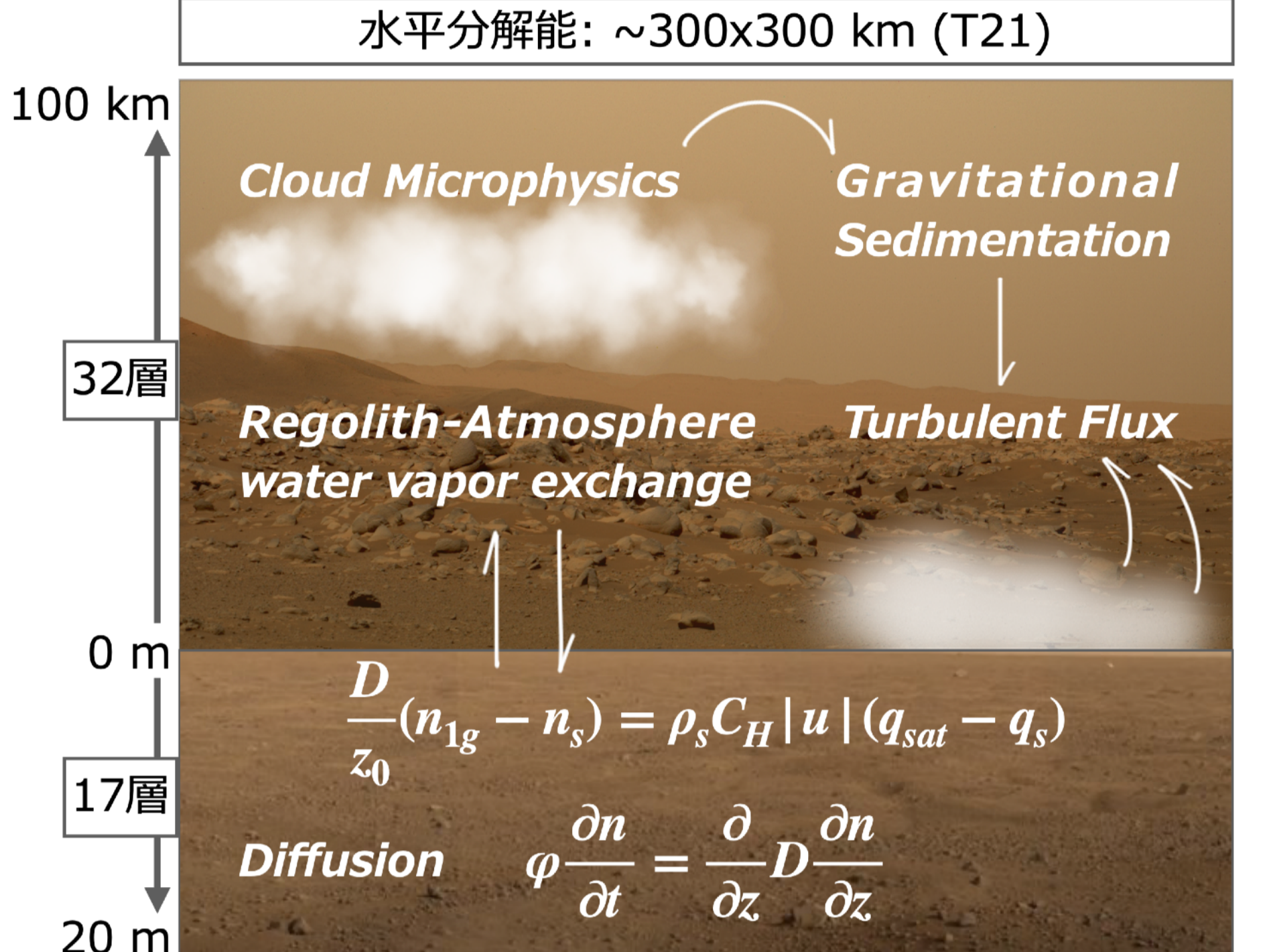


図5: モデル内で考慮した火星の水循環

## Result (10年目)

レゴリス-大気間の水蒸気交換を考慮すると、大気中の水蒸気量は全球的に減少した(図6)

特に南半球の夏の水蒸気量が減少し、同時期に赤道域へ輸送された水蒸気量も減少した(図6)

粒径分布を考慮したとき、南半球の夏の水蒸気量がさらに減少した

大気中から取り除かれた水蒸気は主に赤道域に分布した(図7)

観測では水が観測されていないタルシス高地でも水が蓄積した(図7&8)

粒径分布を考慮すると、南半球の高緯度などの粒径が大きい地域で地下水が減少し、観測と整合的な結果が得られた(図7)

粒径が地下水分布に与える影響は?

## Discussion

粒径分布を考慮すると、拡散係数のレンジが大きくなり、粒径が大きい場所で拡散係数が大きくなる; このとき、レゴリス-大気間の水蒸気交換が活発になるため、地下水の分布のコントラストが大きくなった(図7&9)

観測により地下水の存在可能性が低いと考えられている赤道域~北半球中緯度にも地下水が分布したのは、気圧が小さくなる Ls=100-220° での水蒸気の上向きフラックスが小さいためである(図10)

これらの領域は粒径および熱慣性が小さく、日中の地表面温度は上がりやすいが、地下まで熱は浸透せず地温が低いいため、地下水を閉じ込めている; この問題の解決には、地温計算の改善や空隙率の鉛直分布の考慮、透気率の実装が有効な可能性がある(図11)

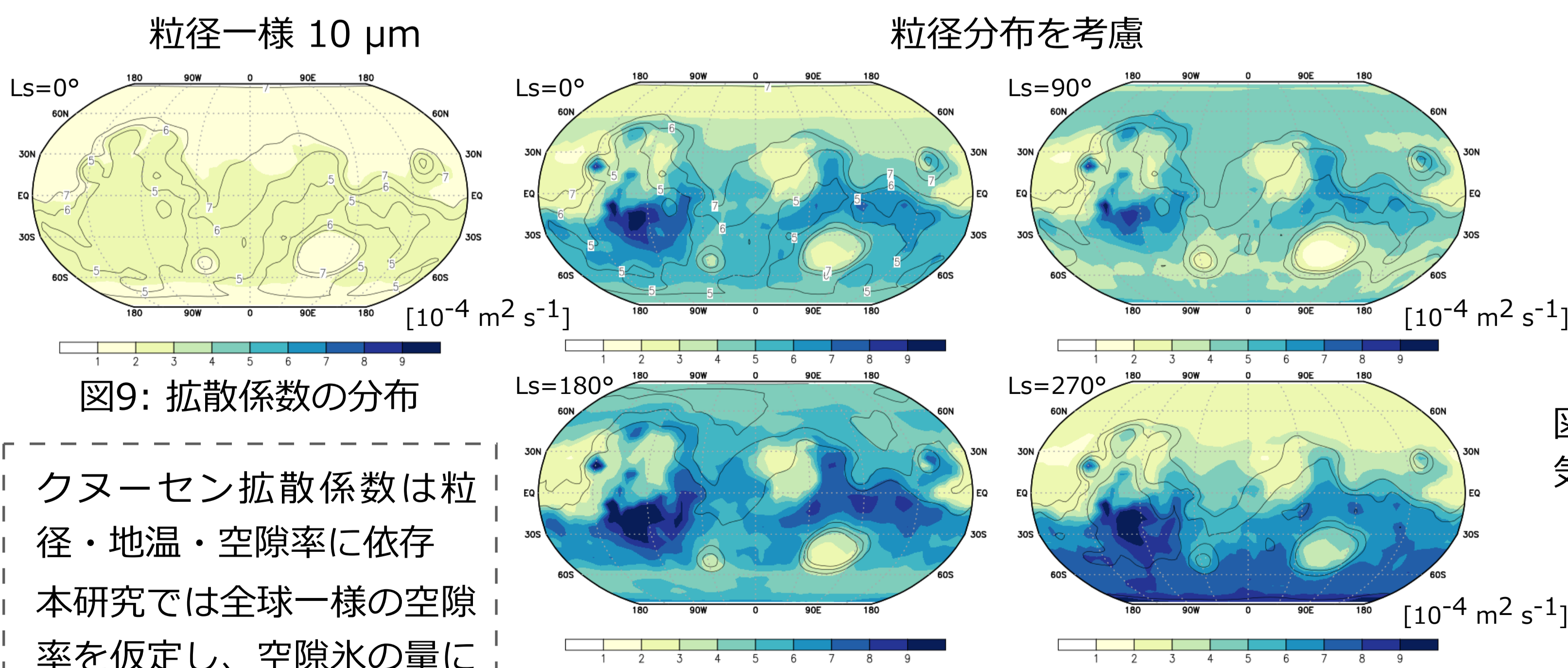


図9: 拡散係数の分布

クヌーセン拡散係数は粒径・地温・空隙率に依存  
本研究では全球一様な空隙率を仮定し、空隙水の量に応じて小さくなる

$$D_K [m^2 s^{-1}] = \frac{\pi}{8 + \pi} \frac{\phi}{1 - \phi} \frac{r}{\tau} \left( \frac{8RT_g}{\pi m} \right)^{1/2}, \quad \tau = \tau_0 \left( 1 - \frac{\zeta}{\rho_c \phi_0} \right)^{-1}$$

$\phi$ : Porosity ( $\phi_0 = 0.4$  Ice-free);  $r$  [m]: Grain size;  $\tau$ : Tortuosity ( $\tau_0 = 1.36$  Ice-free)  
 $R$  [J mol<sup>-1</sup> K<sup>-1</sup>]: Gas constant;  $T_g$  [K]: Ground temperature;  $m$  [kg mol<sup>-1</sup>]: Molar mass of H<sub>2</sub>O  
 $\zeta$  [kg m<sup>-3</sup>]: Amount of water ice;  $\rho_c = 917$  [kg m<sup>-3</sup>]: Density of ice

図6: 経度平均した大気の水蒸気カラム量の季節変化

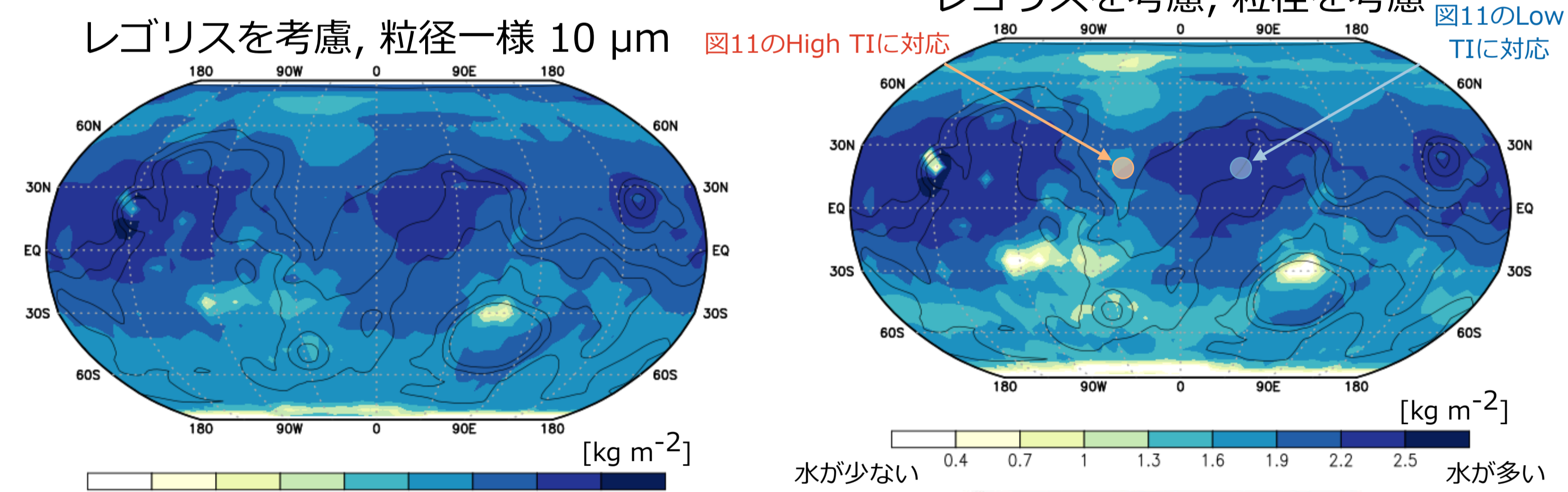


図7: 地下 65 cm までの吸着水と水氷の和

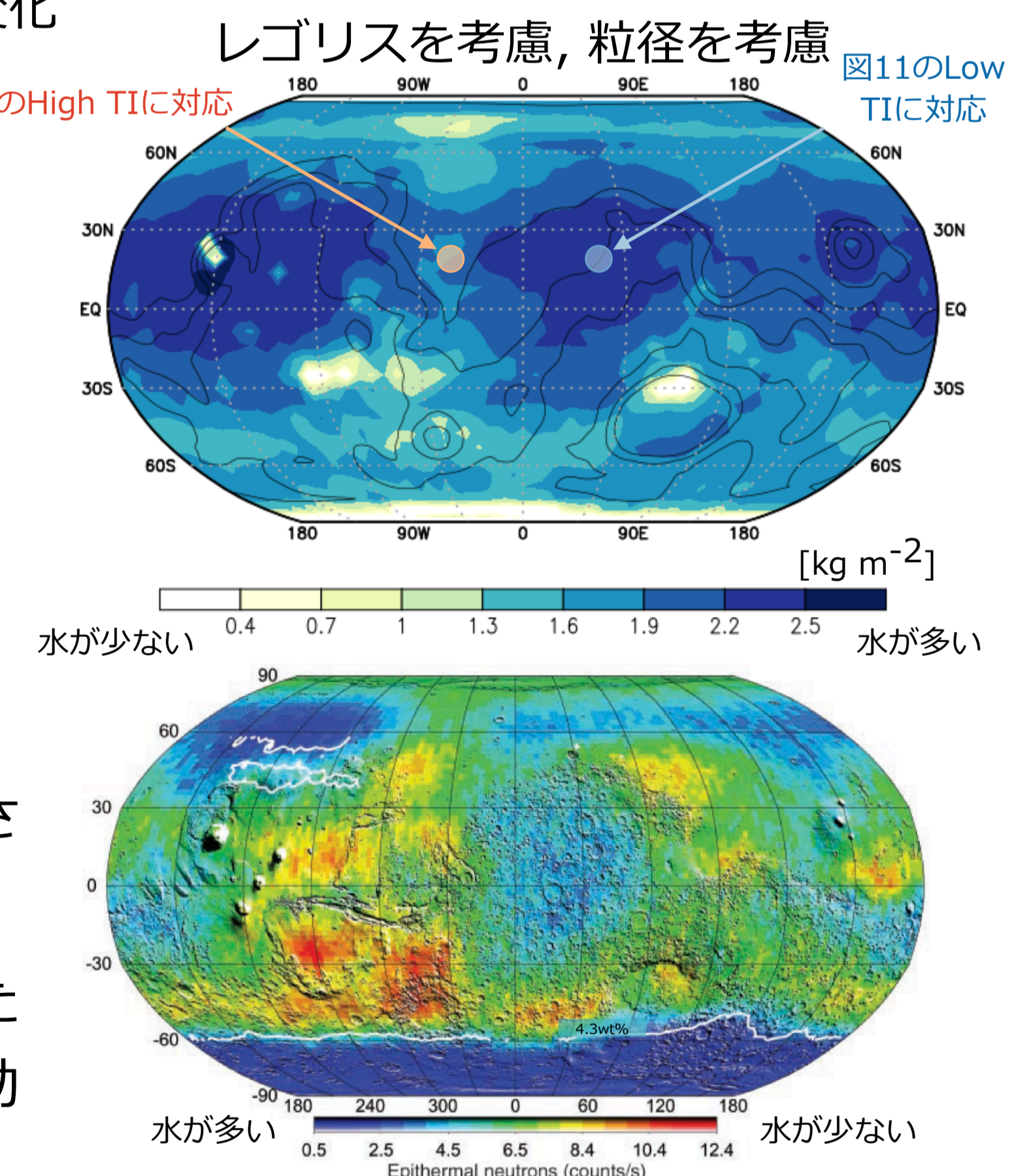


図8: 非熱的中性子線の観測(Boynnton et al., 2002)

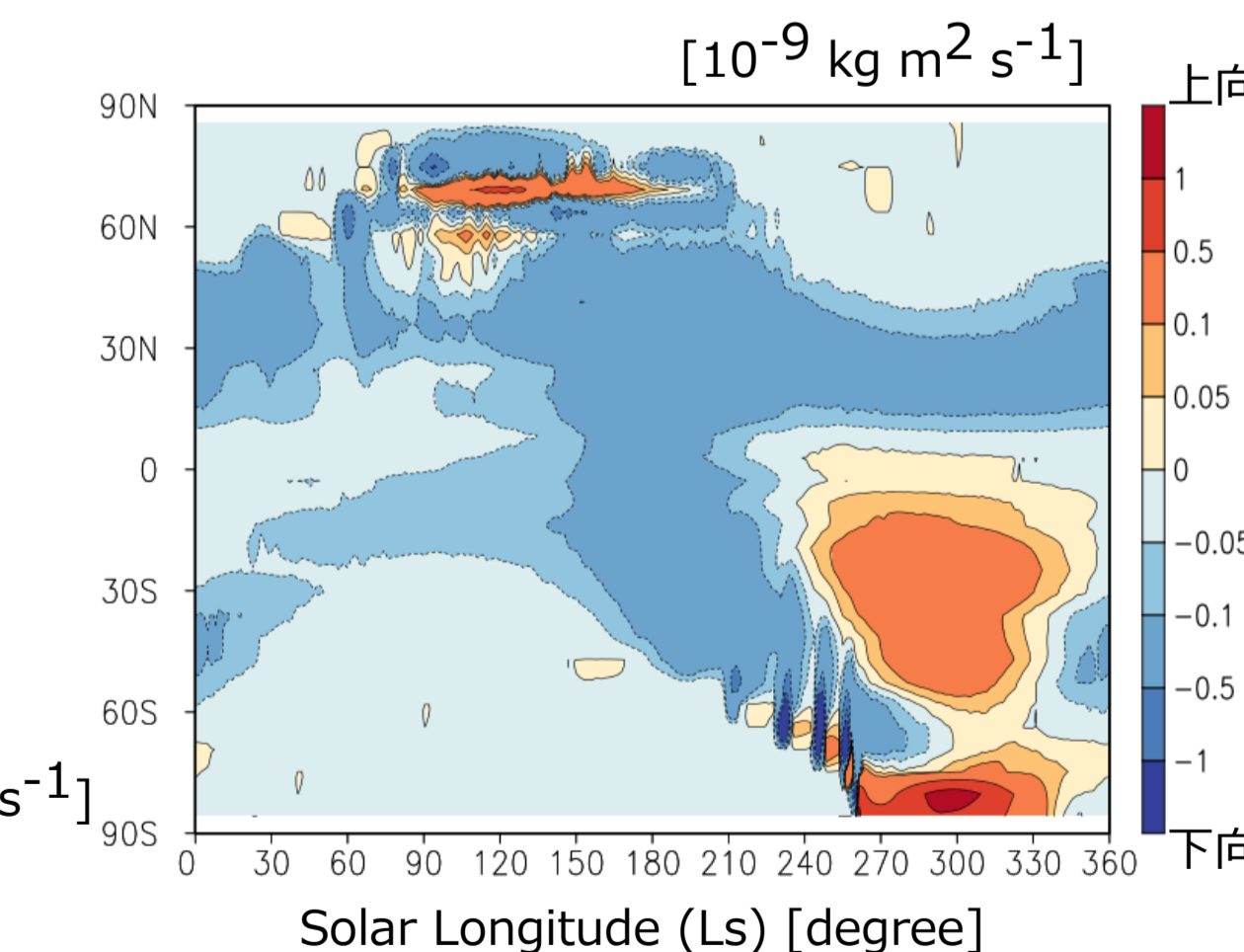


図10: 地表で交換された正味の水蒸気フラックス

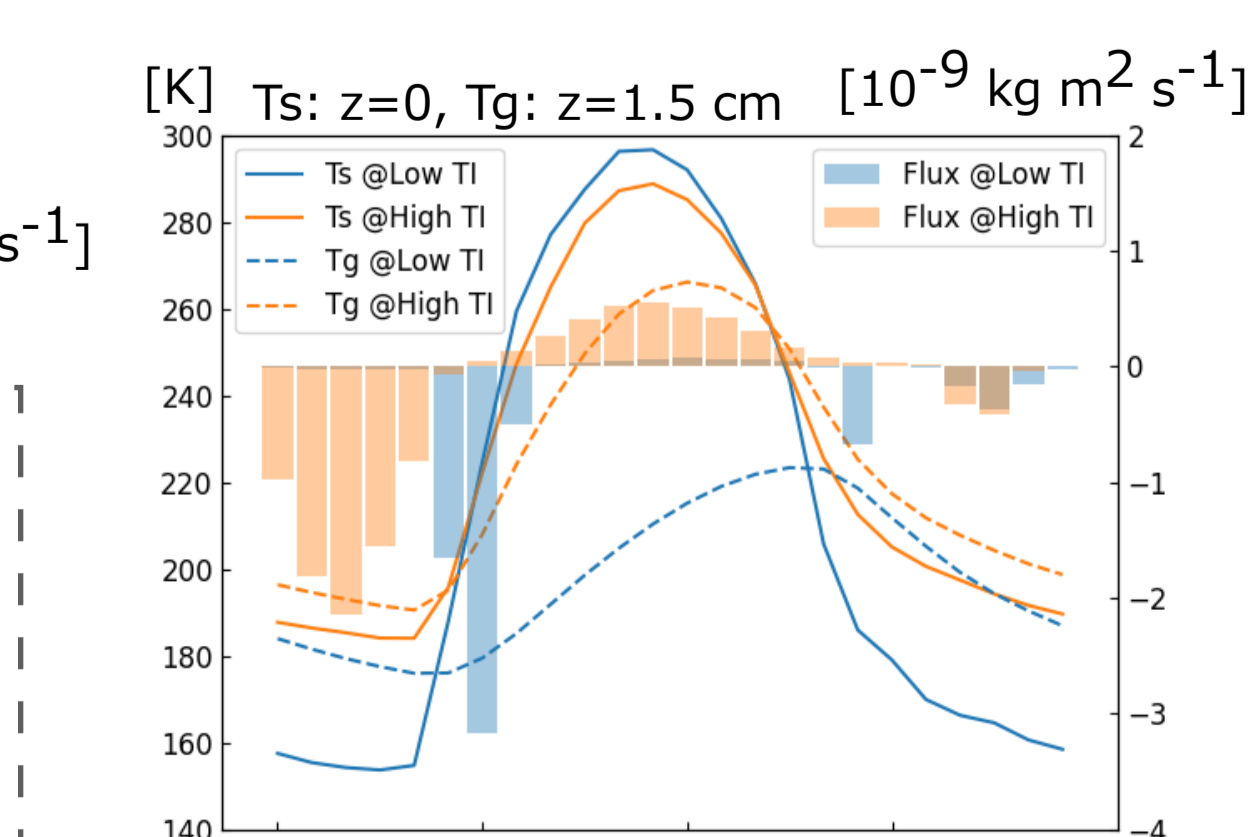


図11: 地温と水蒸気フラックスの日変動(Ls=180°); 図7の位置に対応

## Summary

本研究では、レゴリス-大気間の水蒸気交換が大気に与える影響と火星の地下水分布を推定することを目的とし、火星GCMにレゴリススキームを導入して計算を行った; レゴリス-大気間の水蒸気交換を考慮すると、南半球の夏の水蒸気量が特に減少し、全球的にもドライになった; 大気中から取り除かれた水蒸気は主に北半球の中緯度に分布した; 粒径分布を考慮すると、粒径が大きい領域で水蒸気交換が活発になり地下水の量が減少した結果、観測と整合的な分布が得られた; 観測では水が観測されていないエリアに地下水が分布したのは、熱慣性が小さい場所の地温が低いため、地下水が地中に閉じ込められたためであり、観測と整合的な分布を得るためには地温計算の改良等を行う必要がある