

火星水循環の季節変化の考察

- Haberle et al. (2019) の紹介 -

神戸大学理学部惑星学科
流体地球物理学教育研究分野
青木龍一

はじめに

- 目的
 - Haberle et al. (2019) のNASA/Ames 火星全球気候モデルを参考に火星水循環の季節変化について考察する
- 発表内容
 - 火星大気の概況
 - 火星大気の観測結果
 - モデルの概要
 - 観測とモデルとの比較
 - まとめ

火星大気の概況

• 大気組成

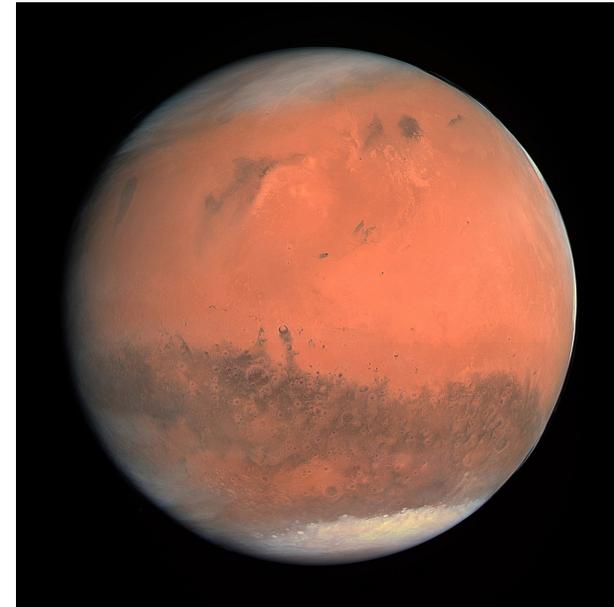
化合物	モル分率
二酸化炭素	95.32%
窒素	2.7%
アルゴン	1.6%
酸素	0.13%
一酸化炭素	0.07%
水	0.03%

• 水

- 極冠では水氷を CO_2 氷が覆っている
- 極冠の水氷やレゴリスに吸着した水が大気中の水の供給源
- 火星の季節や緯度に応じて大気中の可降水量が変動する
 - 地球…mm オーダー
 - 火星… μm オーダー

• 大気量

- 火星…地表面圧力が 6 hPa 程度
- 地球…地表面圧力が 1013 hPa 程度



火星の探査機「ロゼッタ」による撮影

火星大気の観測

- 可降水量

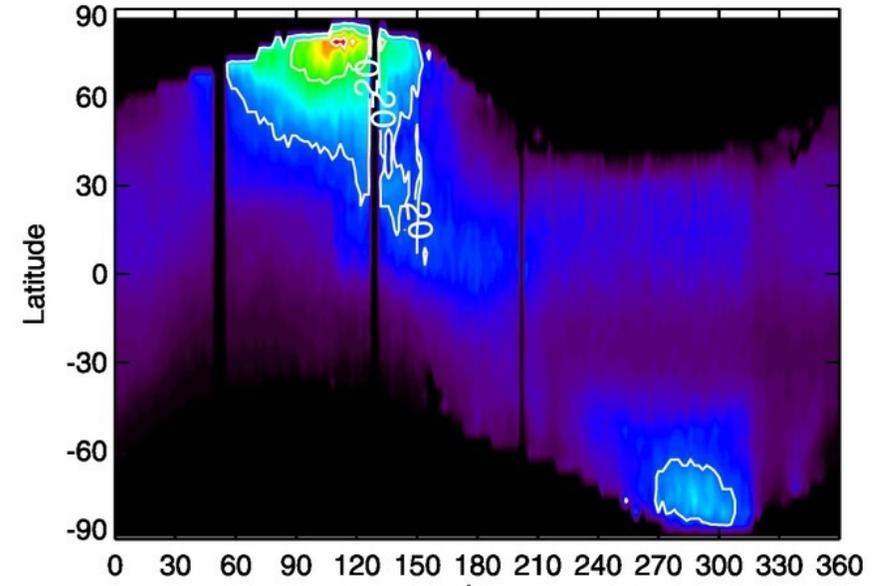
- 夏…北極点で可降水量がピーク
- 秋…南半球へと赤道方向に輸送
- 冬…南極点で可降水量がピーク

- 遠日点期雲帯

- 春の前半から夏にハドレーセルの大気大循環によって生じる雲
- ピークは夏至の直後

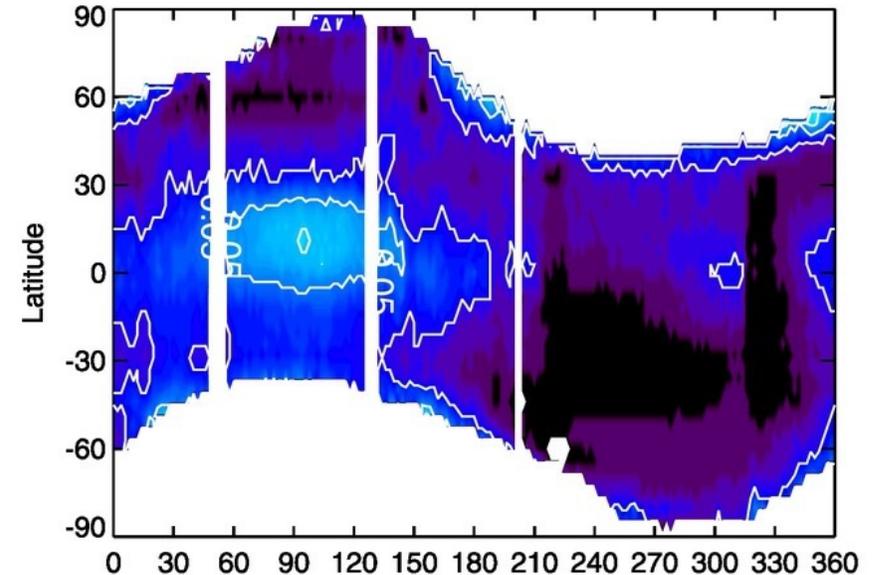
Ls (Deg)	0	90	180	270
北半球	春分	夏至	秋分	冬至
南半球	秋分	冬至	春分	夏至

帯状平均可降水量の季節・緯度変化



L_s Haberle et al. (2019)より引用

帯状平均雲光学的厚さの季節・緯度変化

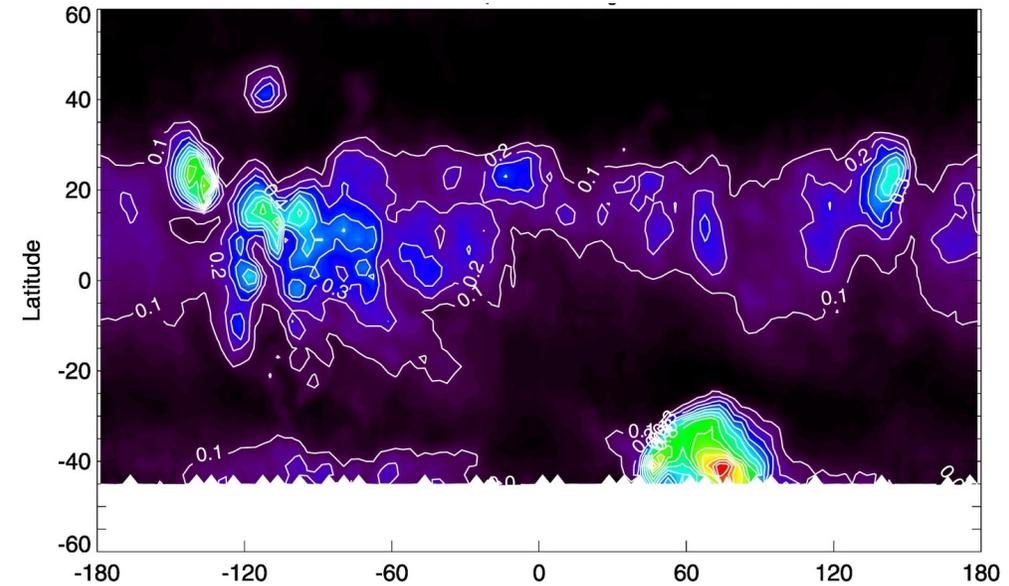


L_s Haberle et al. (2019)より引用

火星大気の観測

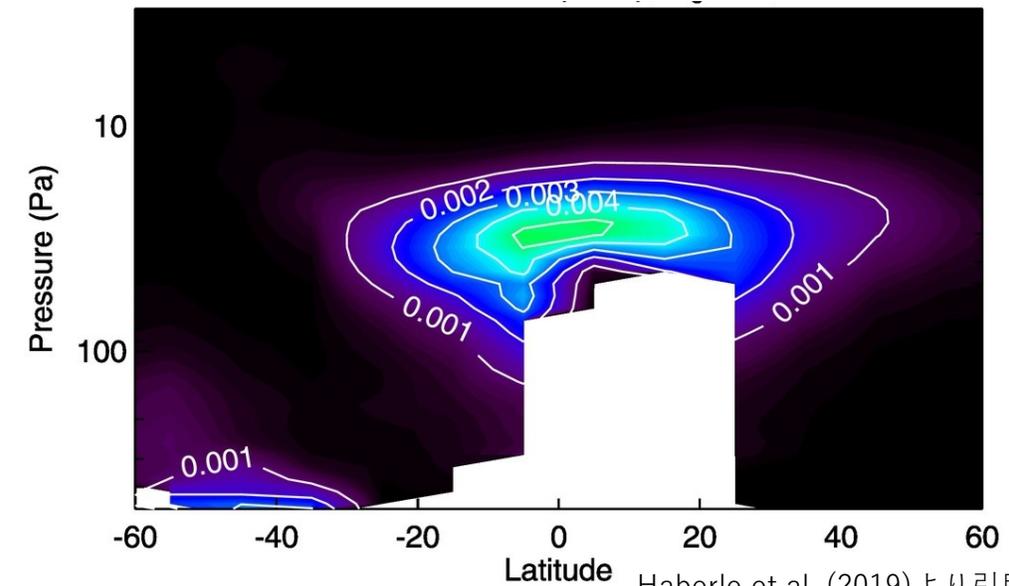
- 遠日点期雲帯
 - 水平構造
 - 北緯30° 以北に雲がほとんど無い
 - 南半球に広がりがある
 - 火山地帯に多く見られる
 - 鉛直構造
 - 雲の頂部の圧力が 20 Pa
 - 下層大気が光学的厚さにより見えない

夏の時間平均紫外線雲光学的厚さ



Haberle et al. (2019)より引用

Ls 90° における遠日点期雲帯の帯状時間平均水氷消散係数



Haberle et al. (2019)より引用

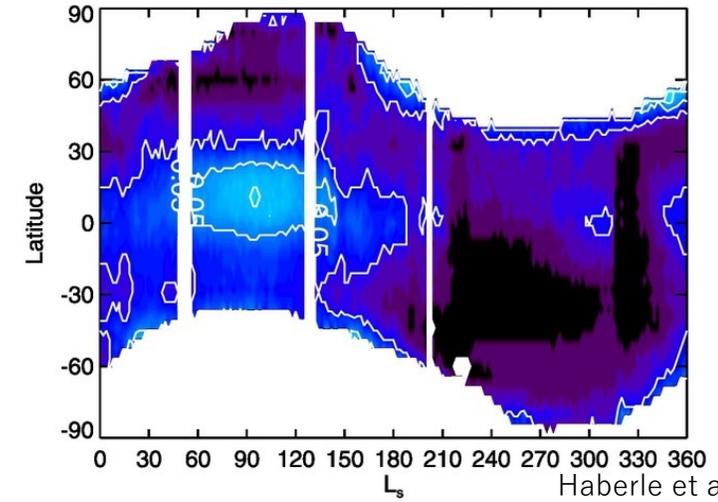
火星大気の観測

- 極雲

- 冬の極域の内部に雲
- 北半球の冬の場合

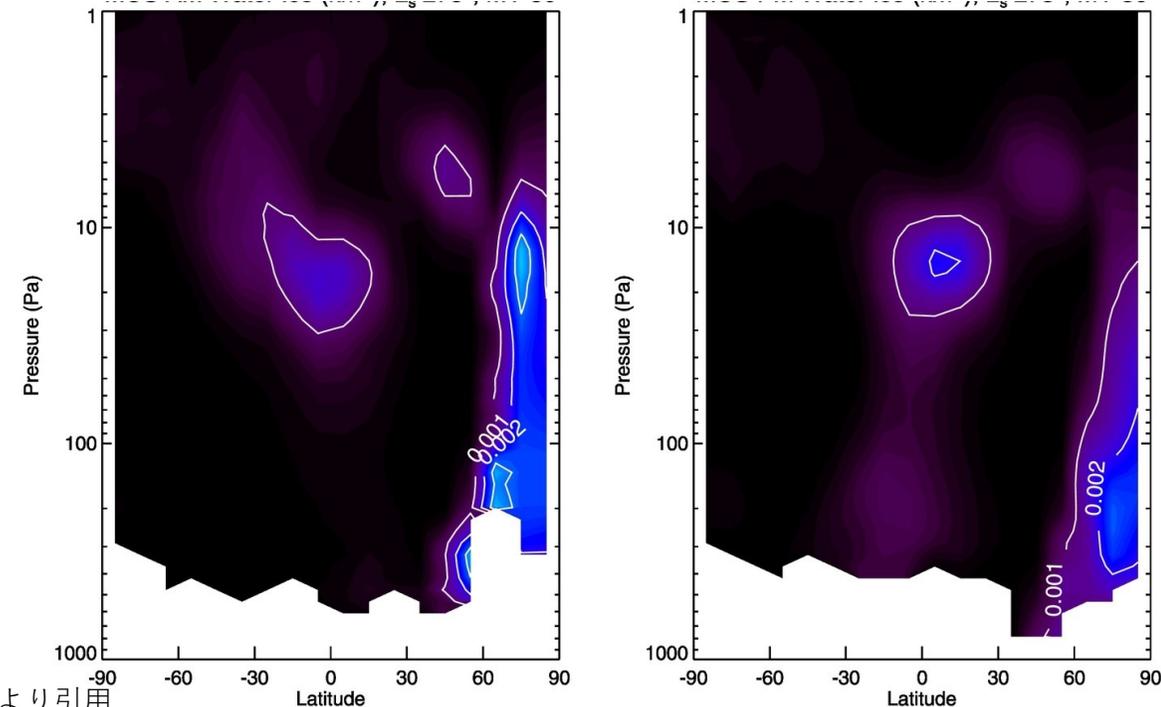
北緯75 ~ 80° の極側の
300 ~ 400 Pa 以上の高度
で雲が顕著に観測される

帯状平均雲光学的厚さの季節・緯度変化



Haberle et al. (2019)より引用

Ls 275° における帯状時間平均水氷消散係数, AM (左), PM (右)



Haberle et al. (2019)より引用

NASA/Ames 火星全球気候モデルの概要

火星全球大気の風速, 温度, 密度, 水蒸気量, 水氷曇量, ダスト量を計算

- 力学過程(流体力学の計算)

- プリミティブ方程式

- 東西, 南北方向の運動方程式
 - 静水圧平衡の式
 - 連続の式
 - 熱力学エネルギー方程式

$$\frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} = -\mathbf{u} \cdot \nabla \mathbf{u} - \dot{\sigma} \frac{\partial \mathbf{u}}{\partial \sigma} - f \mathbf{k} \times \mathbf{u} - \nabla \Phi + \frac{RT}{p_s} \nabla p_s + \mathbf{F}$$

$$\frac{\partial \Phi}{\partial \sigma} = -\frac{RT}{\sigma}$$

$$\frac{\partial p_s}{\partial \sigma} = -\nabla \cdot (p_s \mathbf{u}) - \frac{\partial}{\partial \sigma} (p_s \dot{\sigma})$$

$$\frac{\partial T}{\partial t} = -\mathbf{u} \cdot \nabla T - \dot{\sigma} \frac{\partial T}{\partial \sigma} + \frac{RT}{p C_p} \frac{dp}{dt} + Q$$

変数	物理量
t	時間
\mathbf{u}	水平速度
$\dot{\sigma}$	σ 座標系における鉛直速度
σ	惑星表面気圧と気圧の比
f	コリオリパラメータ
Φ	ジオポテンシャル
R	気体定数
T	温度
p_s	地表面気圧
\mathbf{F}	外力
p	気圧
C_p	定圧比熱
Q	非断熱加熱

NASA/Ames 火星全球気候モデルの概要

火星全球大気の風速, 温度, 密度, 水蒸気量, 水氷曇量, ダスト量を計算

- 物理過程(流体力学以外の計算)
 - 乱流混合過程
 - 鉛直拡散 (Mellor and Yamada, 1982, レベル 2)
 - 地表面フラックスはバルク法により評価
 - 雲微物理過程
 - 核生成, 拡散成長, 重力沈降を考慮
 - ダスト供給過程
 - 計算されたダストの光学的厚さが観測と合うように地面からダストを注入
 - 放射過程
 - 二流近似した放射伝達方程式を用いて加熱冷却率を評価
 - 地表面, 地下熱伝導過程
 - 熱収支の式, 拡散方程式

計算の条件

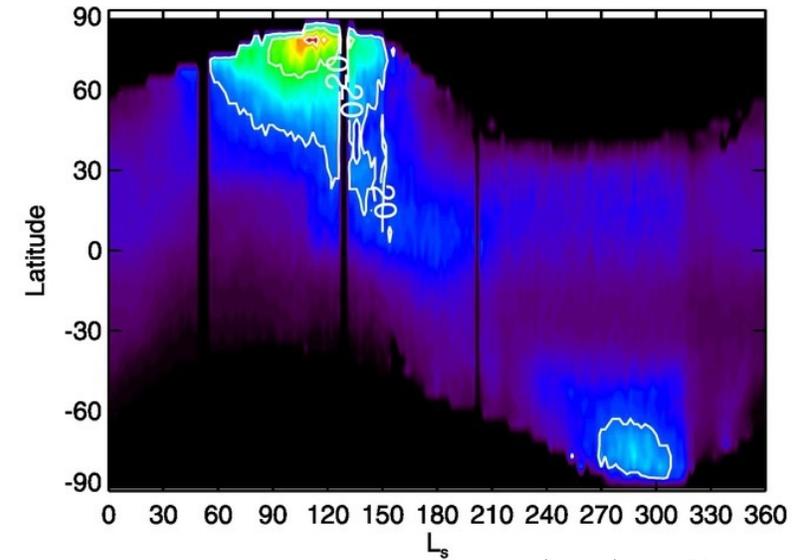
- 緯度・経度 $5^{\circ} \times 6^{\circ}$ の格子
- 鉛直方向に 24 層
- 雲の放射を考慮する
- ダスト供給は MY 24 の観測値を使用
- 2 年のスピニングアップ運転からウォームスタート
- シミュレーションの 10 年目を観測と比較する

可降水量

- 北半球の夏ではピークが観測値より小さい
 - 南半球の冬ではピークが観測値より大きい
- 半球間の水平輸送の過大評価

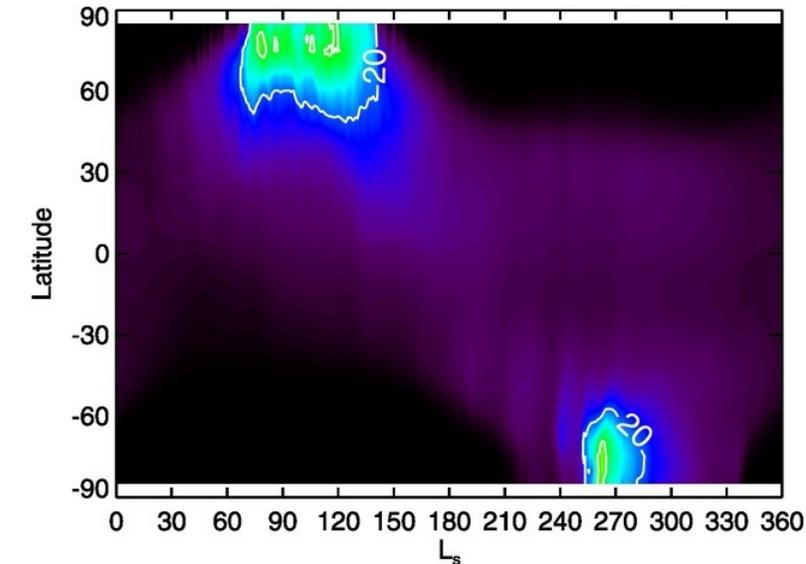
- 南半球のピークが早く, 短い
- 様々な要因

带状平均可降水量の季節・緯度変化 (観測)



Haberle et al. (2019) より引用

带状平均可降水量の季節・緯度変化 (モデル)



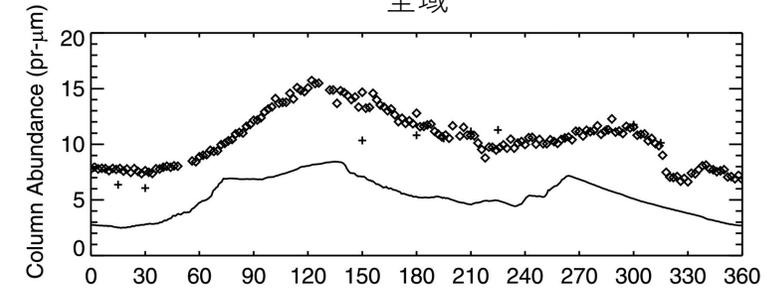
Haberle et al. (2019) より引用

可降水量

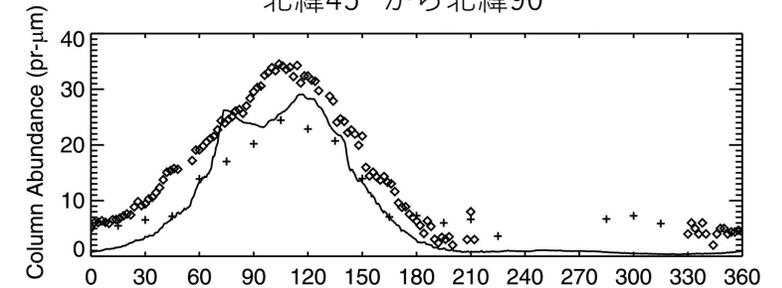
- モデルの乾燥
 - 全球の可降水量が約半分
 - 乾燥のほとんどが $\pm 45^\circ$ の間に起因
- ピークが複数
 - 移動性の高層雲の温暖化効果が原因

残留北極冠からの水の鉛直・水平方向輸送が遅い
← 乱流混合過程は拡散で表されるため、
非局所的な混合が考慮されていない

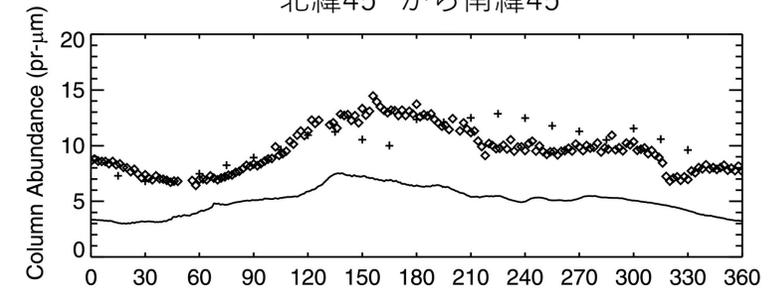
特定の緯度帯における可降水量の季節変化
全域



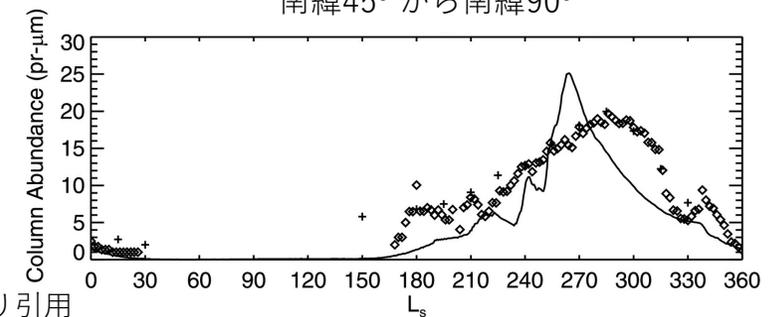
北緯45°から北緯90°



北緯45°から南緯45°



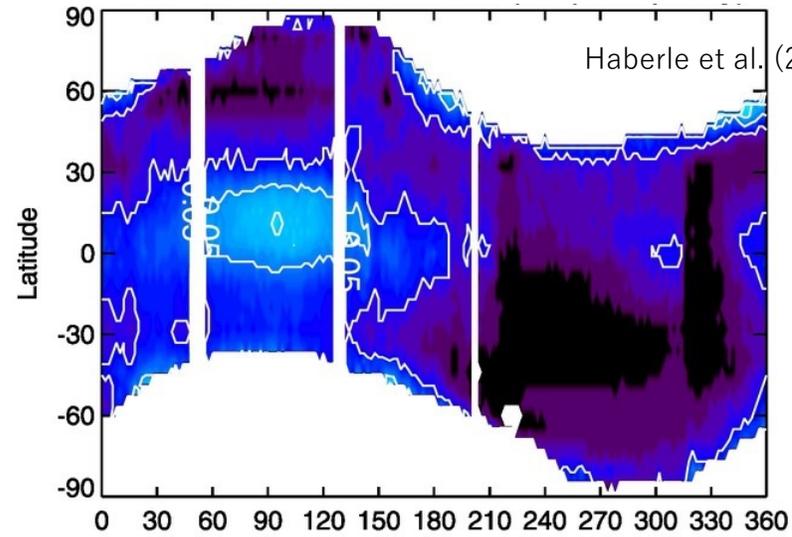
南緯45°から南緯90°



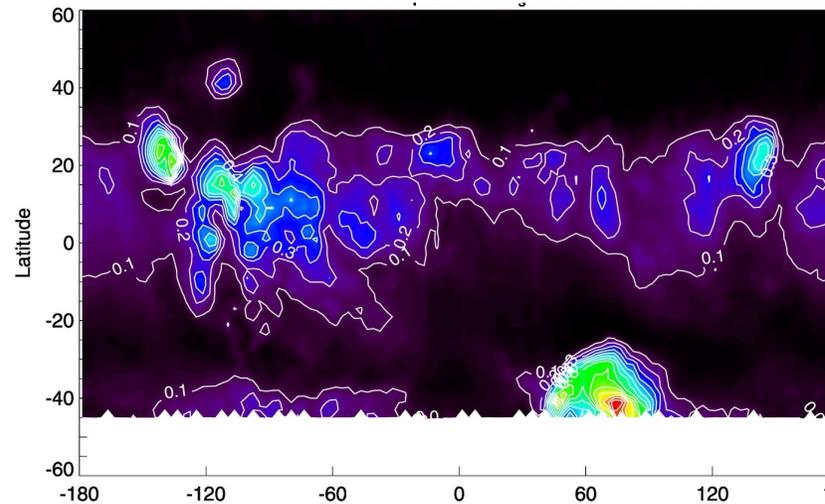
遠日点期雲帯

- 季節変化
 - 春に短い雲の隙間
- 水平構造
 - モデルの雲は拡散
→ 解像度の問題

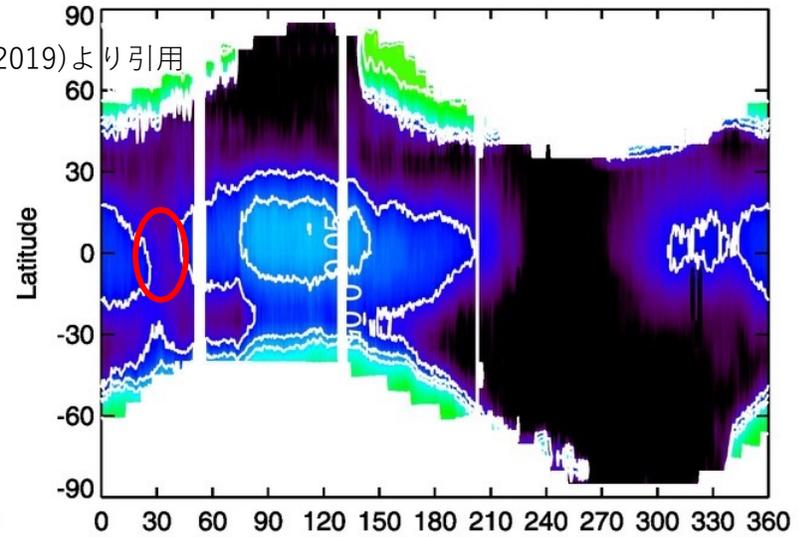
带状平均雲光学的厚さの季節・緯度変化 (観測)



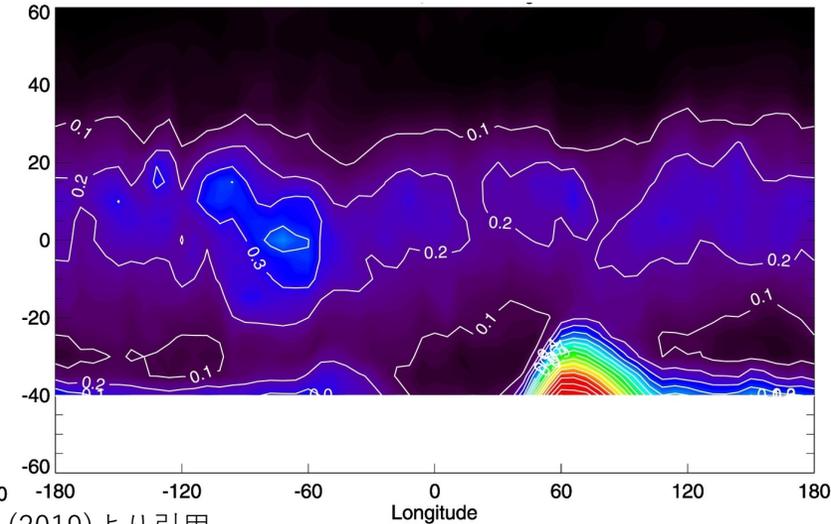
夏の時間平均紫外線雲光学的厚さ (観測)



带状平均雲光学的厚さの季節・緯度変化 (モデル)



夏の時間平均紫外線雲光学的厚さ (モデル)



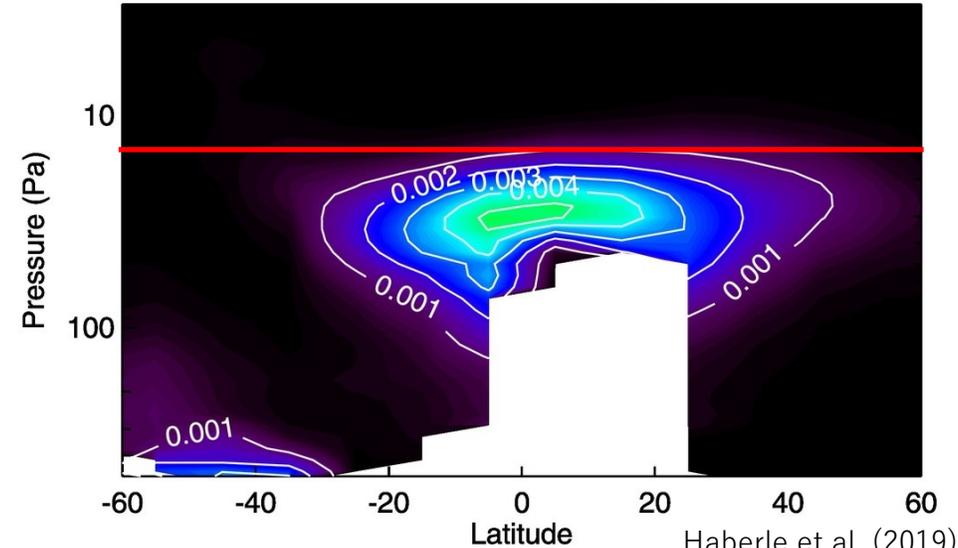
Haberle et al. (2019)より引用

遠日点期雲帯

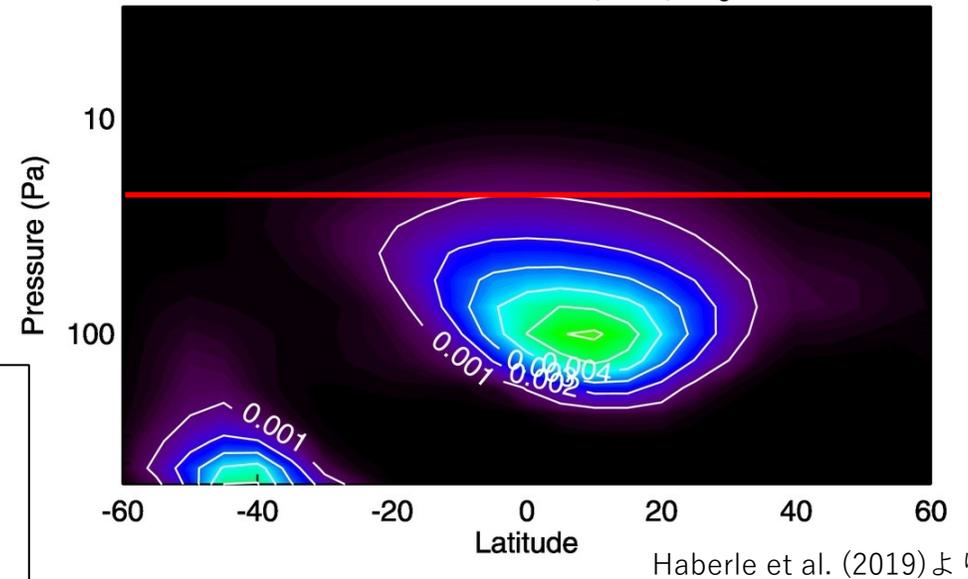
- 鉛直構造
 - 緯度分布が狭い
 - 雲の頂部
観測… 20 Pa
モデル… 50 Pa
 - 雲のピーク
観測… 30 Pa
モデル… 100 Pa

雲が形成するための十分な水分の供給が不足
←火山が大気大循環に及ぼす鉛直輸送が十分に表現されていない

Ls 90°における遠日点期雲帯の帯状時間平均水氷消散係数 (観測)



Ls 90°における遠日点期雲帯の帯状時間平均水氷消散係数 (モデル)

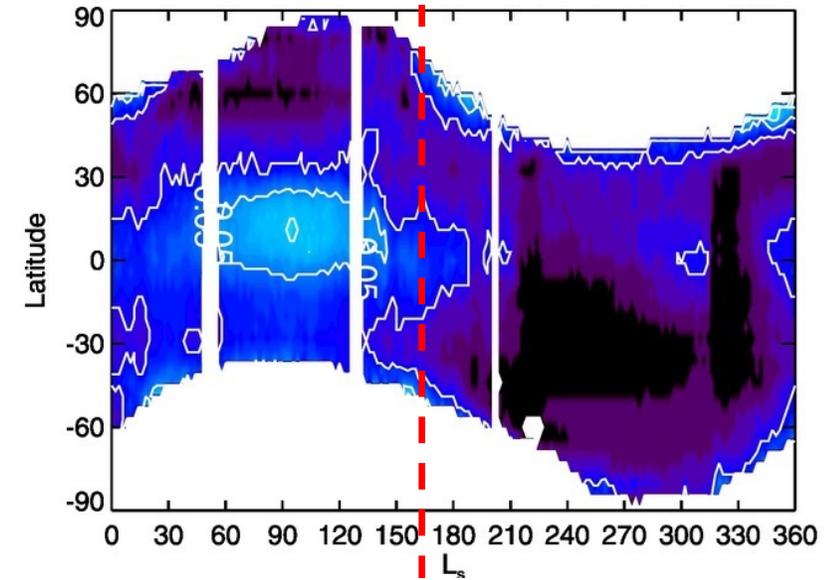


Haberle et al. (2019)より引用

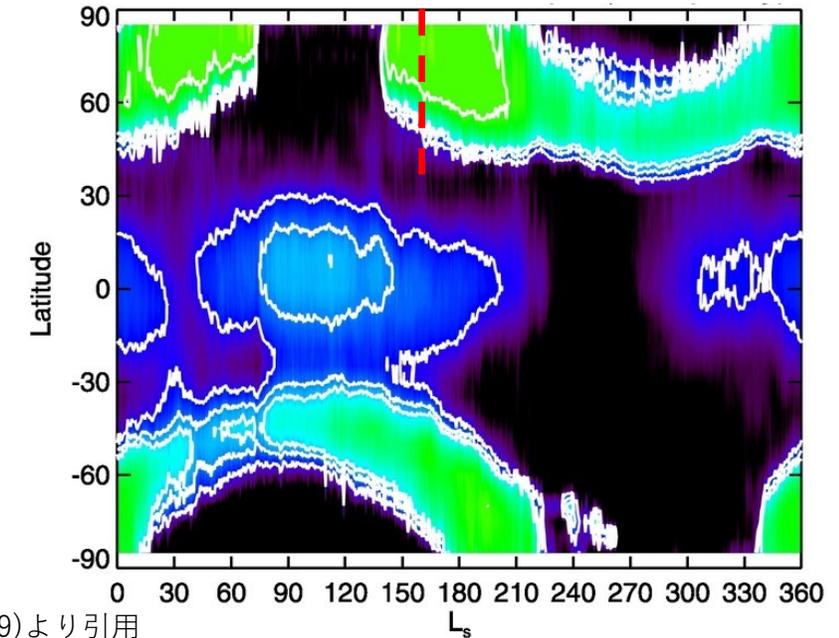
極雲

- 極雲の形成が早く、厚い
→吸着性のレゴリスが水の一部を貯蔵
- 冬に最大の厚さを氷冠の端で持つ
- 極付近には雲のない領域あり

帯状平均雲光学的厚さの季節・緯度変化 (観測)

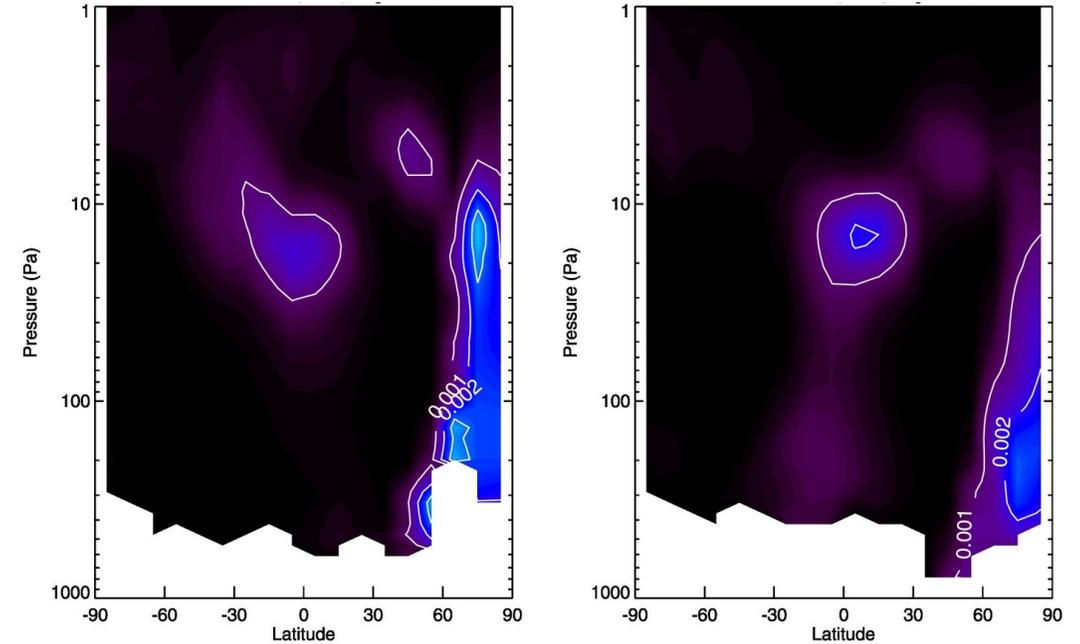


帯状平均雲光学的厚さの季節・緯度変化 (モデル)

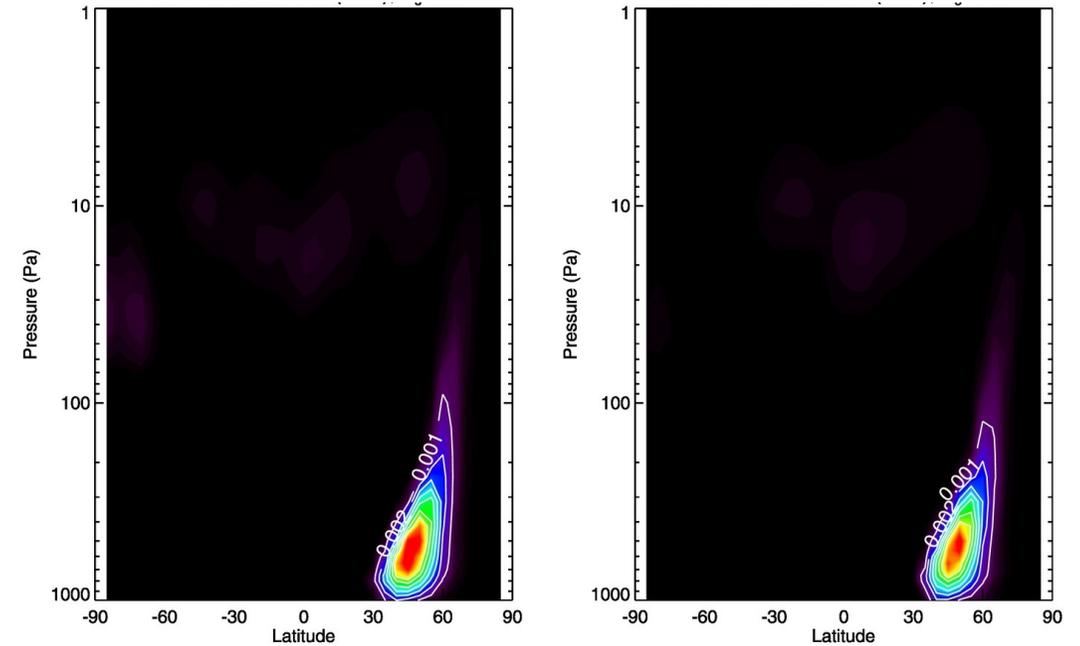


極雲

- 低緯度帯高高度での雲がない
- 北緯85° 以北に雲がない



Ls 275° における帯状時間平均水氷消散係数, AM (左), PM (右) (モデル)



極付近の高高度の雲は別に形成される
← 平均子午線循環の上側の分岐によって
ダストや水分が極域に運ばれて形成

まとめ

- 残留北極冠が水源と仮定
→水循環の季節変化のシミュレーションが可能
- 夏の極冠上に雲がない
- 可降水量の季節変化が観測と一致
- 遠日点期雲帯の光学的厚さが観測と一致

- モデルの乾燥
 - 残留北極冠からの水の鉛直・水平方向輸送が遅すぎる
- 遠日点期雲帯の高度
 - 火山が大気大循環に及ぼす鉛直輸送が十分に表現されていない
- 高高度の雲
 - 平均子午線循環の上側の分岐によってダストや水分が極域に運ばれて形成

参考文献

- Haberle et al. (2019). Documentation of the NASA/Ames Legacy Mars Global Climate Model: Simulations of the present seasonal water cycle.
Icarus Volume 333, 15 November 2019, Pages 130-164
doi:10.1016/j.icarus.2019.03.026