

火星水循環の季節的变化の考察
– Haberle et al. (2019) の紹介 –

青木 龍一

神戸大学 理学部 惑星学科
流体地球物理学教育研究分野

2022/03/25

要旨

本論文では火星水循環の季節変化について Haberle et al. (2019) の紹介をする。残留北極冠が水源と仮定した場合、火星水循環の季節変化のシミュレーションが可能であり、夏の極冠上に雲がなく、可降水量の季節変化が観測と一致し、遠日点期雲帯の光学的厚さが観測と一致する。一方でモデルの問題点として主に三つの問題点がわかった。一つ目はモデルの乾燥である。二つ目は遠日点期雲帯の高度が低いことである。三つ目は、低緯度帯の高高度の雲と極域に雲が存在しないことである。

目次

第1章	はじめに	1
第2章	火星大気の観測	2
2.1	可降水量	2
2.2	遠日点期雲帯	3
2.3	極雲	5
第3章	モデルの概要	6
3.1	力学過程	6
3.2	物理過程	7
3.3	計算の条件	7
第4章	モデルと観測の比較	8
4.1	可降水量	8
4.2	遠日点期雲帯	10
4.3	極雲	11
第5章	結論	13

謝辭 14

参考文献 15

第1章 はじめに

地球では大気中に最大 4 % 程度含まれる水分であるが, 火星では大気はほとんどを CO_2 占めており, 水分の量はモル分率で約 0.03 % である. また, 地球では地表面圧力が 1013 hPa 程度であるのに対して, 火星では地表面圧力が 6 hPa 程度と大気量も地球と火星では大きく異なる. このように異なる環境である火星で水がどのように存在しているのだろうか. 火星では極冠と呼ばれる極を覆う水や CO_2 の氷が存在しており, 水氷を CO_2 氷が覆っている. 水循環については残留北極冠の水氷の表面堆積やレゴリスに吸着した水分が水の供給源となっている. このようにして供給された水蒸気や雲が輸送され火星の季節や緯度に応じて大気中の水蒸気量変動する. このような火星水循環の季節変化について Haberle et al. (2019) の NASA/ エイムズ火星全球気候モデルを参考に考察する.

2 章では火星大気の観測結果について説明する. ここで用いられている観測器としては, 熱放射分光器 (TES), 火星気候観測装置 (MCS), 火星用小型偵察画像分光器 (CRISM), 火星カラーイメジャー (MARCI) が主なものである. 3 章では使用したモデルである NASA/ エイムズ火星全球気候モデル (GCM) について解説する. 4 章では観測結果とモデルで計算された結果とを比較し, モデルの問題点を考える. 最後に 5 章で全体を総括し結論を述べる.

第2章 火星大気の観測

まずは火星大気の水循環に関する観測結果について可降水量, 遠日点期雲帯, 極雲の三つを見る.

2.1 可降水量

まずは火星の可降水量の観測結果を見る. 可降水量とは, 大気中に含まれている水分が全て液体の水になって降水したと仮定した時の降水量である. 春の終わりに CO_2 冠が消え, 残留北極冠が露出し水が昇華する. 夏至付近 $L_s = 90^\circ$ に北極点で可降水量がピークに達し, 秋に南半球へ赤道方向に水が輸送され, 南半球で後退する氷冠に蓄積される. 冬になると南半球では CO_2 冠が消え, 冬至付近 $L_s = 270^\circ$ で南極点の可降水量がピークに達している. これが現在の火星水循環の基本的なパターンである (図 2.1).

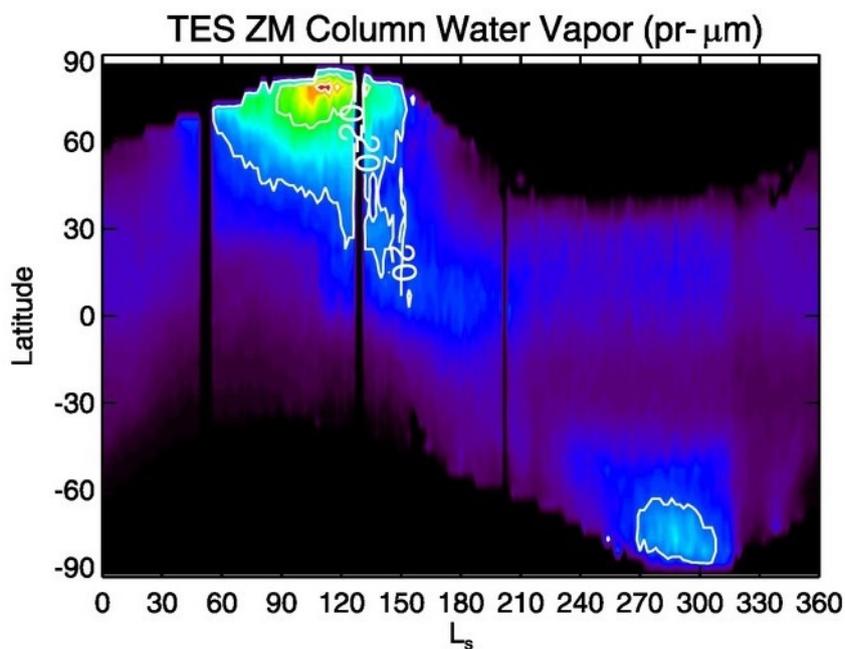


図 2.1: 帯状平均可降水量の季節緯度変化の TES による観測結果. 縦軸は緯度, 横軸は火星の黄経上での角度 L_s で季節を表す. 北半球において $L_s = 0^\circ$ が春分, $L_s = 90^\circ$ が夏至, $L_s = 180^\circ$ が秋分, $L_s = 270^\circ$ が冬至である. カラーバーは可降水量を示す. 黒色の部分はデータがないことを示す. Haberle et al. (2019) より引用.

2.2 遠日点期雲帯

次に遠日点期雲帯について観測結果を見る. 遠日点期雲帯とは, 火星の北半球の春の前半とそれに続く夏の大部分の期間中ハドレーセルの大気大循環によって生じる白雲の活動である. 火星では単一のハドレーセルが卓越しており, 図 2.2 を見ると, 確かに春から夏にかけて低緯度帯に雲が発生しており, ピークが夏至の直後にある.

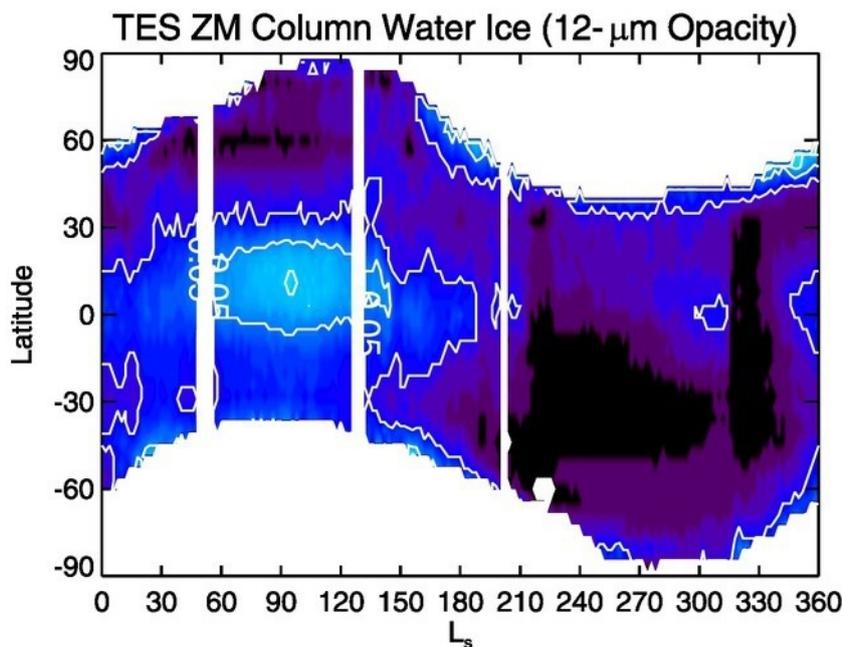


図 2.2: 帯状平均雲光学的厚さの季節緯度変化の TES による観測結果. 縦軸は緯度, 横軸は火星の黄経上での角度 L_s で季節を表す. 白色の部分はデータがないことを示す. Haberle et al. (2019) より引用.

また, 遠日点期雲帯の水平構造について, 図 2.3 を見る. ピークはモデル, 観測ともに 0.15 程度である. このピークはどちらも赤道から北緯 10 度付近にずれており, 夏至の直後に発生する. 30°N 以上に雲がほとんど無く, 南半球に広がりがあり, Tharsis ($-60^\circ\text{E} \sim -120^\circ\text{E}$) と Elysium ($120^\circ\text{E} \sim 180^\circ\text{E}$) の火山地帯に最も

多く見られる。

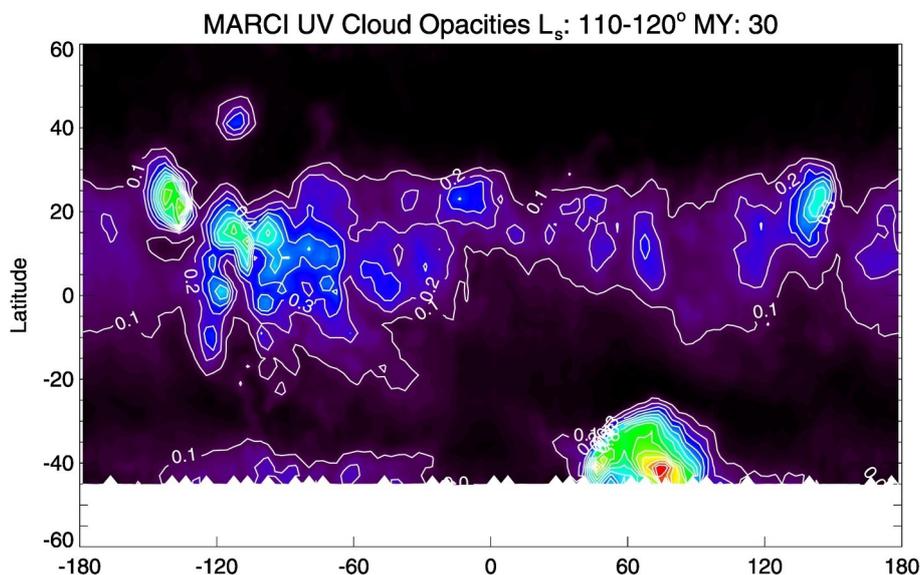


図 2.3: $L_s = 110 - 120^\circ$ における時間平均紫外線雲光学的厚さの MARCI による観測結果. 縦軸は緯度, 横軸は経度. Haberle et al. (2019) より引用.

鉛直構造については図 2.4 を見る. 遠日点期雲帯の雲の頂部の圧力が 20 Pa であり, 下層大気は光学的厚さによって観測ができていない. 緯度方向の分布に関して, MARCI の観測結果と同様に北半球の高緯度帯に雲がなく南半球に雲の広がりがあることがわかる.

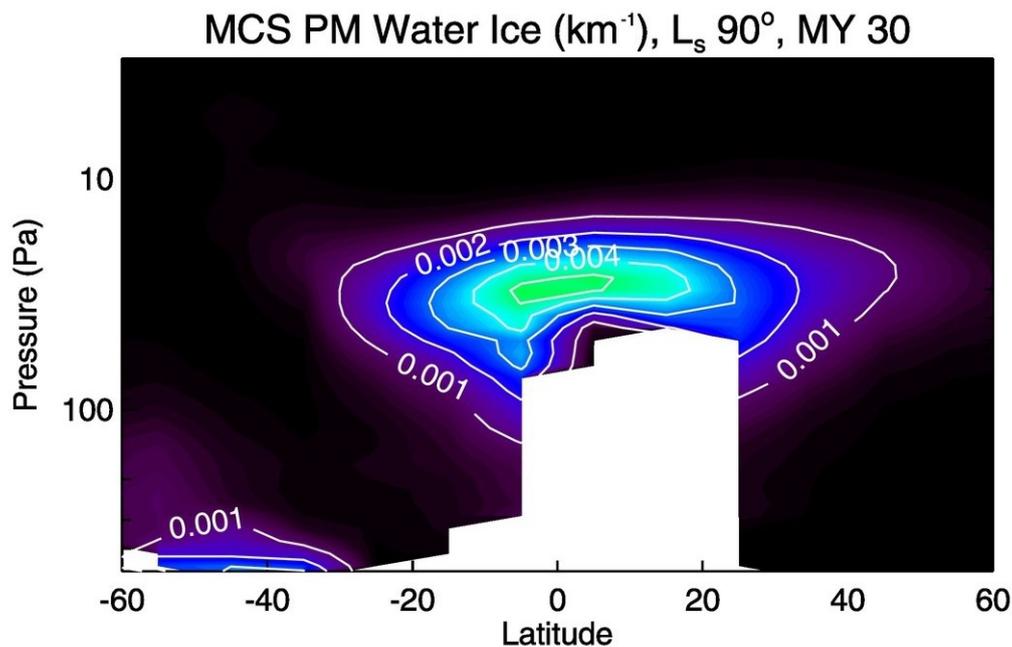


図 2.4: $L_s = 90^\circ$ における遠日点期雲帯の帯状時間平均水氷消散係数の MCS の観測結果. 縦軸は圧力, 横軸は緯度. 白色の部分はデータがないことを示す. Haberle et al. (2019) より引用.

2.3 極雲

火星では極雲と呼ばれる雲が冬に極の内部で見られる. 図 2.2 の TES では冬の極での雲光学的厚さが観測できていないが, MCS では両半球ともに冬の極域の内部の雲を観測できる. 図 2.5 では北半球の冬の極雲が $75-80^\circ\text{N}$ の極側の $300-400\text{ Pa}$ 以上の高度で雲が顕著に観測される.

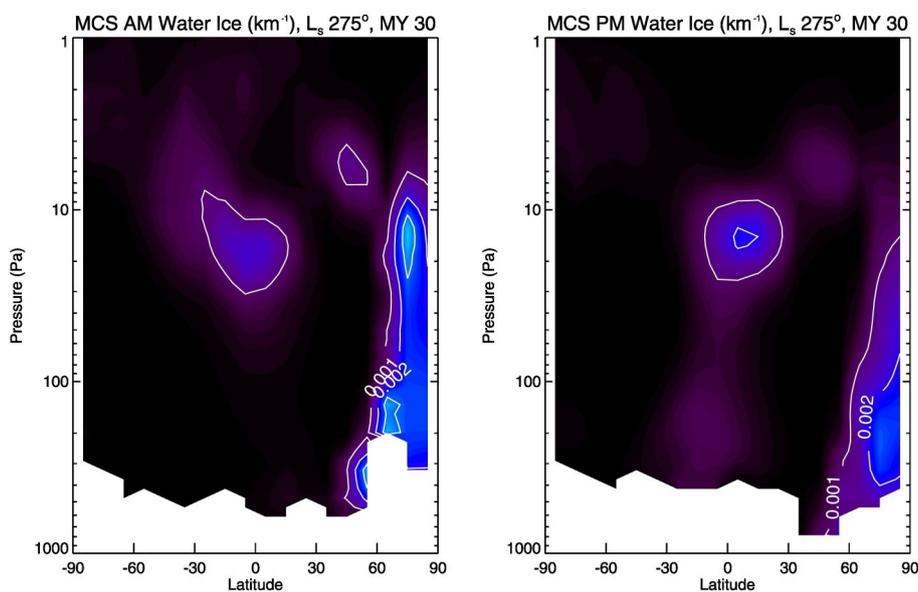


図 2.5: $L_s = 275^\circ$ における帯状時間平均水氷消散係数の MCS の観測結果. 左は AM, 右は PM である. 縦軸は圧力, 横軸は緯度. 白色の部分はデータがないことを示す. Haberle et al. (2019) より引用.

第3章 モデルの概要

Haberle et al. (2019) で用いられた NASA/ エイムズ火星全球気候モデルの概要について述べる. NASA/ エイムズ火星全球気候モデルでは火星全球大気の流れ、温度、密度、水蒸気量、水氷量、ダスト量を計算する. 詳細については NASA/ エイムズ火星全球気候モデルの資料を参照されたい^{*1}.

3.1 力学過程

流体力学に関連する計算についてはプリミティブ方程式系を用いる. この方程式系の東西、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は以下のように記述される.

東西、南北方向の運動方程式

$$\frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} = -\mathbf{u} \cdot \nabla \mathbf{u} - \dot{\sigma} \frac{\partial \mathbf{u}}{\partial \sigma} - f \mathbf{k} \times \mathbf{u} - \nabla \Phi + \frac{RT}{p_s} \nabla p_s + \mathbf{F} \quad (3.1)$$

静水圧平衡の式

$$\frac{\partial \Phi}{\partial \sigma} = -\frac{RT}{\sigma} \quad (3.2)$$

連続の式

$$\frac{\partial p_s}{\partial \sigma} = -\nabla \cdot (p_s \mathbf{u}) - \frac{\partial}{\partial \sigma} (p_s \dot{\sigma}) \quad (3.3)$$

熱力学エネルギー方程式

$$\frac{\partial T}{\partial t} = -\mathbf{u} \cdot \nabla T - \dot{\sigma} \frac{\partial T}{\partial \sigma} + \frac{RT}{p C_p} \frac{dp}{dt} + Q \quad (3.4)$$

^{*1}URL: https://www.nasa.gov/sites/default/files/atoms/files/gcm_lecture_0.pdf

ここで, t は時間, u は水平速度, $\dot{\sigma}$ は σ 座標系における鉛直速度, σ は惑星表面気圧と気圧の比, f はコリオリパラメータ, Φ はジオポテンシャル, R は気圧定数, T は温度, p_s は地表面気圧, F は外力, p は気圧, C_p は定圧比熱, Q は非断熱加熱である.

3.2 物理過程

流体力学以外の計算としては乱流混合過程, 雲微物理過程, ダスト供給過程, 放射過程, 地表面・地下熱伝導過程がある. 乱流混合過程は鉛直拡散 (Mellor and Yamada, 1982, レベル 2) を用いて, 地表面フラックスはバルク法により評価する. 雲微物理過程は, 核生成, 拡散成長, 重力沈降を考慮する. ダスト供給過程では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する. 放射過程では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する. 地表面, 地下熱伝導過程では熱収支の式, 拡散方程式を用いる.

3.3 計算の条件

モデルは緯度・経度方向に $5^\circ \times 6^\circ$ の格子, 鉛直方向に 24 層で計算を行う. 力学過程, 物理過程の計算条件としては, 雲の放射を考慮し, ダスト供給は MY24 の観測値を用いる. 水源としては, レゴリスに吸着している水を考慮せず, 残留北極冠のみを水の供給源と仮定する. また, 2 年のスピナップ運転からウォームスタートを行い, シミュレーションの 10 年目の計算結果と観測結果を比較する.

第4章 モデルと観測の比較

NASA/ エイムズ火星全球大気モデルによる結果と TES, MCS, CRISM, MARCI による観測結果を比較し, どのような問題点があるか調べる.

4.1 可降水量

まずは可降水量についてモデルの観測を比較する. 図 4.1 から帯状平均可降水量の季節緯度変化の夏に北極点で可降水量がピークがあり, 秋に南半球へと赤道方向に輸送, 冬に南極点で可降水量がピークという大まかなパターンは共通している. 可降水量のピークに着目すると, 夏の北極のピークが観測値より大きく, 冬の南極のピークが観測値より大きい. これは, 半球間の水平輸送の過大評価が主な要因であると考えられている. また, 南極のピークが早く, 短くなっている. これは, 非極性表面氷のアルベド依存性がないこと, 脱離するレゴリスの存在, 後退する CO_2 氷冠を適切にシミュレーションしていないこと, 過剰な急速混合など, 様々な要因が関係していると考えられる.

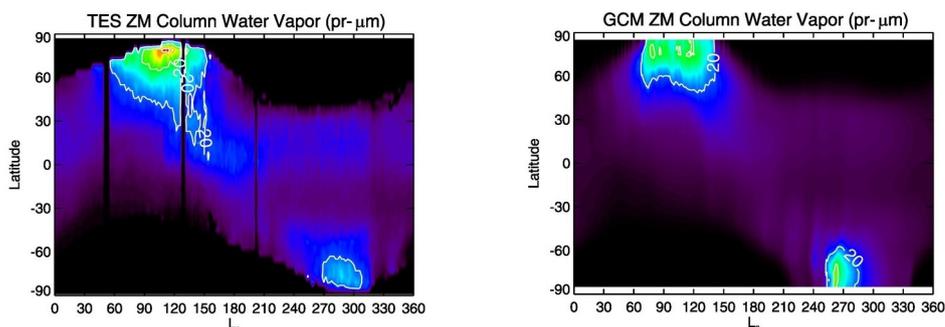


図 4.1: 帯状平均可降水量の季節緯度変化の TES による観測結果 (左) とモデルの計算結果 (右). 縦軸は緯度, 横軸は火星の黄経上での角度 L_s で季節を表す. カラーバーは可降水量を示す. 黒色の部分はデータがないことを示す. Haberle et al. (2019) より引用.

また, 図 4.2 から主に二つのことがわかる. 一つはモデルの全球の可降水量が観

測の約半分であることである。緯度帯ごとの可降水量の季節変化から乾燥のほとんどが $\pm 45^\circ$ の低緯度の間に起因している。これは、本来流れである乱流を拡散として扱っているため、局所的な混合しか考慮できておらず、非局所的な混合が考慮されていないため、残留北極冠からの水の鉛直・水平方向輸送が遅いからである。もう一つはモデルの可降水量に二つのピークがあることである。これは、TES と CRISM のいずれの観測でも見られず、モデルの移動性の高層雲の温暖化効果が原因であると考えられている。

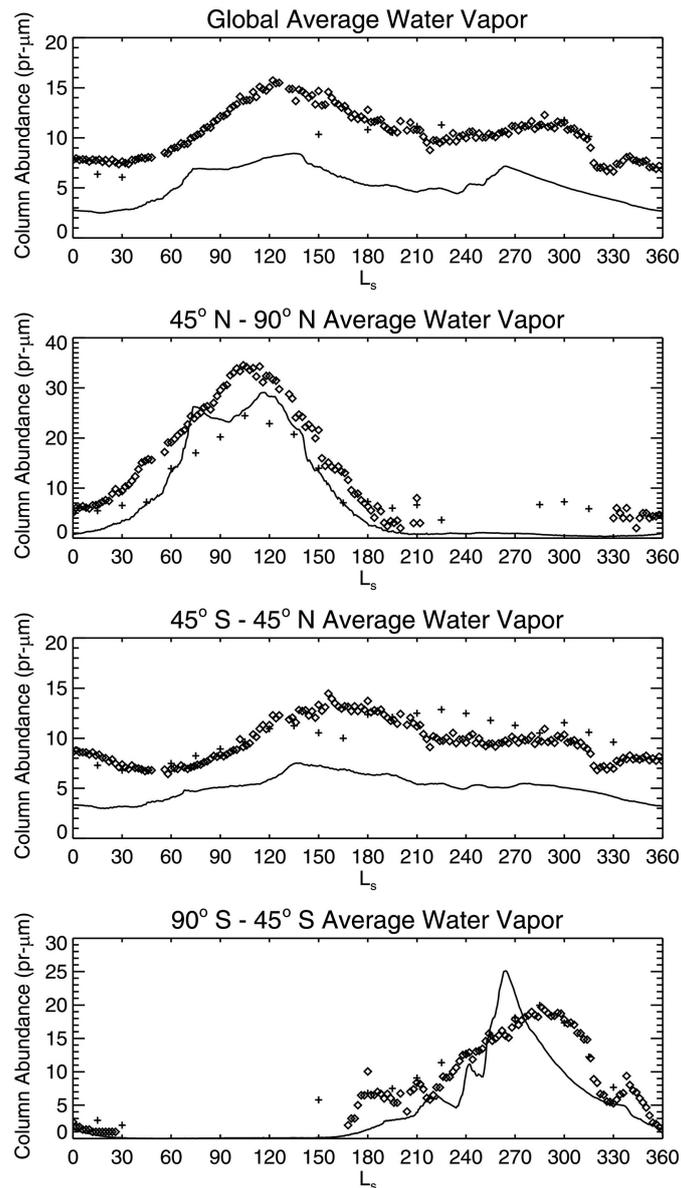


図 4.2: 特定の緯度帯における可降水量の季節変化。縦軸は可降水量, 横軸は L_s 。開いた菱形の記号は TES MY26 の観測データ, プラスの記号は CRISM MY29 の観測データ, 細い実線はモデルによるもの。平均値は面積加重。Haberle et al. (2019)

より引用.

4.2 遠日点期雲帯

遠日点期雲帯の季節変化についてモデルと観測を比較すると、春に短い雲の隙間がある (図 4.3). これは中層の気温を観測よりも低くする要因である. また, 水平構造については, モデルは観測の結果に比べて雲が拡散していて MARCI の観測で見られるようなシャープな輪郭を持っていない (図 4.4). これは, 水平方向と鉛直方向の両方の解像度の問題である. 解像度が荒いため, 雲を生成する山に関連した斜面の流れをモデルでは十分に表現できないからである.

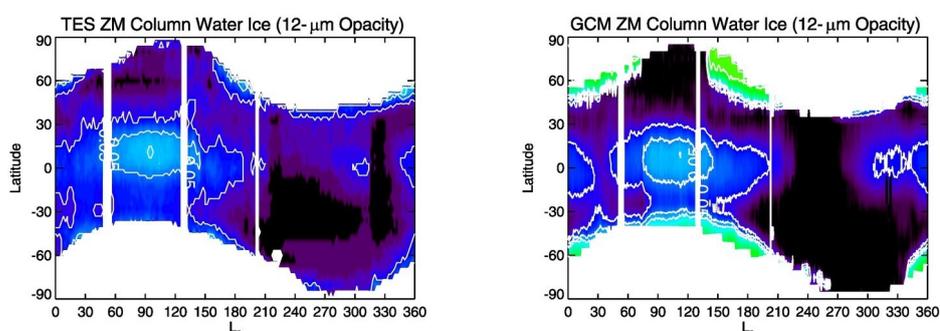


図 4.3: 带状平均雲光学的厚さの季節緯度変化の TES による観測結果 (左) とモデルの計算結果 (右). 縦軸は緯度, 横軸は火星の黄経上での角度 L_s で季節を表す. 白色の部分はデータがないことを示す. Haberle et al. (2019) より引用.

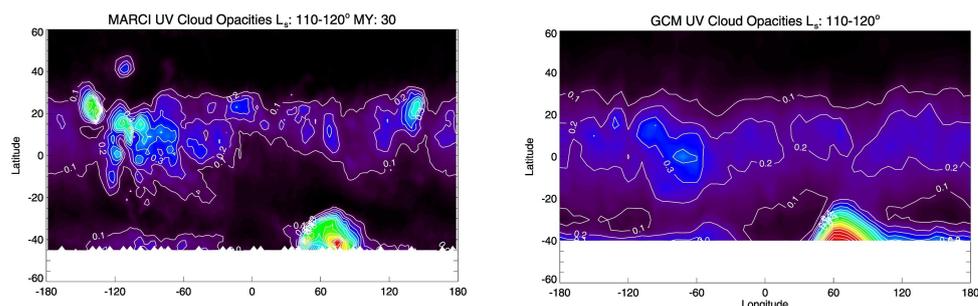


図 4.4: $L_s = 110 - 120^\circ$ における時間平均紫外線雲光学的厚さの MARCI による観測結果 (左) とモデルの計算結果 (右). 縦軸は緯度, 横軸は経度. Haberle et al. (2019) より引用.

鉛直構造については, 観測に比べてモデルの緯度分布が狭くなっている. また, 雲の頂部が観測では 20 Pa であるのに対してモデルでは 50 Pa であり, 雲のピークは観測では 30 Pa であるのに対してモデルでは 100 Pa である. このように, 雲の高さがモデルでは観測より低くなっている. これは, 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おらず、雲が形成するための十分な水分の供給が不足しているためである。

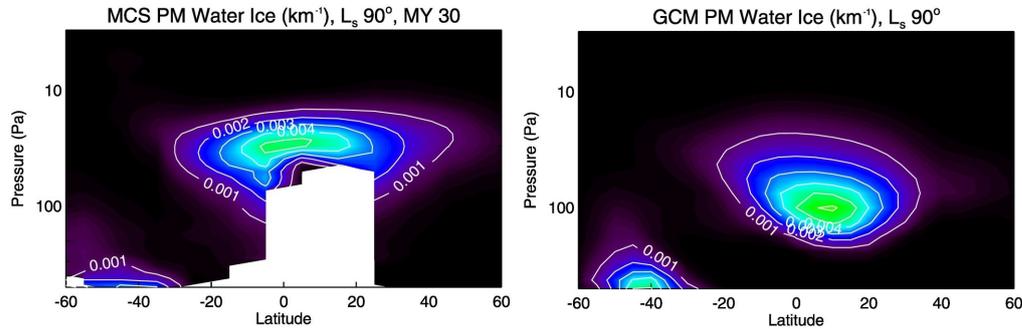


図 4.5: $L_s = 90^\circ$ における遠日点期雲帯の帯状時間平均水氷消散係数の MCS の観測結果. 縦軸は圧力, 横軸は緯度. 白色の部分はデータがないことを示す. Haberle et al. (2019) より引用.

4.3 極雲

極雲についても観測とモデルの比較をすると、モデルでは極雲の形成が早く、厚くなっている。これは吸着声のレゴリスが水の一部を貯蔵する役割があることを示唆している。また、各半球の冬に雲の最大の厚さを氷冠の端で持ち、極付近には雲のない領域ができる。

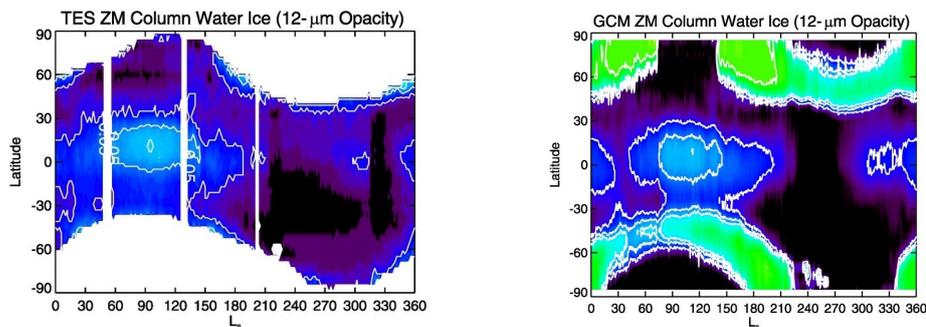


図 4.6: 帯状平均雲光学的厚さの季節緯度変化の TES による観測結果 (左) とモデルの計算結果 (右). 縦軸は緯度, 横軸は火星の黄経上での角度 L_s で季節を表す. 白色の部分はデータがないことを示す. Haberle et al. (2019) より引用.

図 4.7 で冬の鉛直構造を見ても、観測では北極の上空に雲が存在し、低緯度帯の高高度にも雲が存在するが、モデルでは 85°N 以北に雲が存在せず、低緯度帯の高高度にも雲が存在しない。これは、極付近の高高度の雲は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るという別の仕組みで形成されたと考えられる。

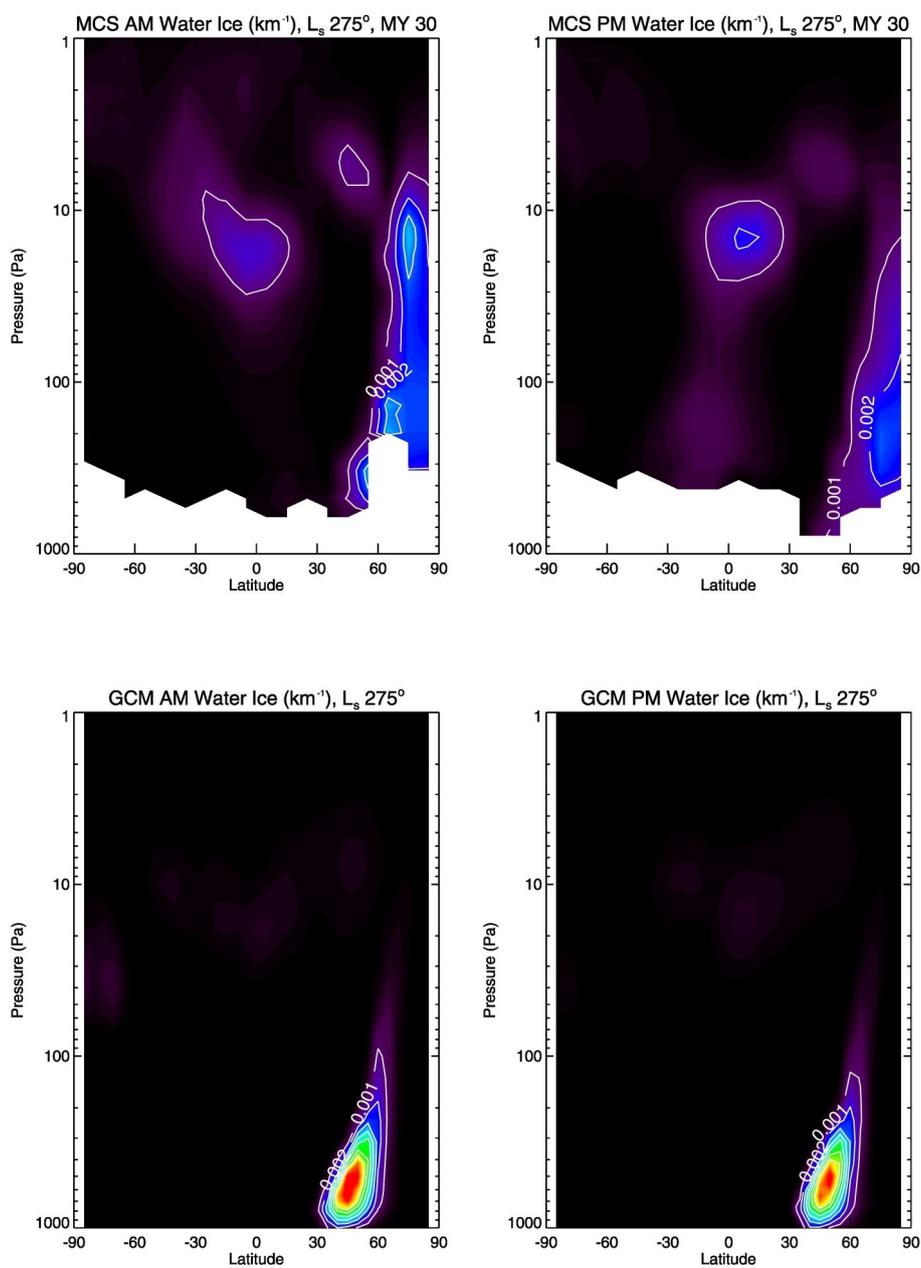


図 4.7: $L_s = 275^\circ$ における帯状時間平均水氷消散係数の MCS の観測結果 (上) とモデルの計算結果 (下). 左は AM, 右は PM である. 縦軸は圧力, 横軸は緯度. 白色の部分はデータがないことを示す. Haberle et al. (2019) より引用.

第5章 結論

本論文では火星水循環の季節変化について Haberle et al. (2019) の紹介をした。残留北極冠が水源と仮定した場合、火星水循環の季節変化のシミュレーションが可能であり、夏の極冠上に雲がなく、可降水量の季節変化が観測と一致し、遠日点期雲帯の光学的厚さが観測と一致する。

モデルの問題点として主に三つの問題点があった。一つ目はモデルの乾燥である。残留北極冠からの水の鉛直・水平方向輸送が遅すぎることが原因である。二つ目は遠日点期雲帯の高度が低いことである。これは解像度の問題で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ことが原因である。三つ目は、低緯度帯の高高度の雲と極域に雲が存在しないことである。これは、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するという別の仕組みが実際には存在するからであると考えられている。

謝辞

本研究を行うにあたって、林祥介教授には基礎理論講義を通して乱流について基礎的な内容からご教授いただきありがとうございました。高橋芳幸准教授には研究内容の指針を示していただき、研究内容に関することからセミナー資料や本論文の添削等非常にたくさんのご指導して頂きました。檜村博基講師には、大気セミナーで研究発表の内容についてご指導いただき大変お世話になりました。また、神戸大学地球流体研究室の皆様には、セミナーの際に、よりよい研究、発表にするための助言を頂き、感謝申し上げます。

参考文献

- [1] Robert M. Haberle et al., 2019: Documentation of the NASA/Ames Legacy Mars Global Climate Model: Simulations of the present seasonal water cycle
- [2] GCM Overview: Lecture
URL: https://www.nasa.gov/sites/default/files/atoms/files/gcm_lecture_0.pdf
- [3] Geoffrey, K. Vallis, 2017: Atmospheric and Oceanic Fluid Dynamics: Fundamentals and Large-scale Circulation, 2nd edn. Cambridge University Press.