

大気大循環モデルによる 火星大気での水循環の数値計算

神戸大学 大学院理学研究科

地球惑星科学専攻 M2

関友也

目次

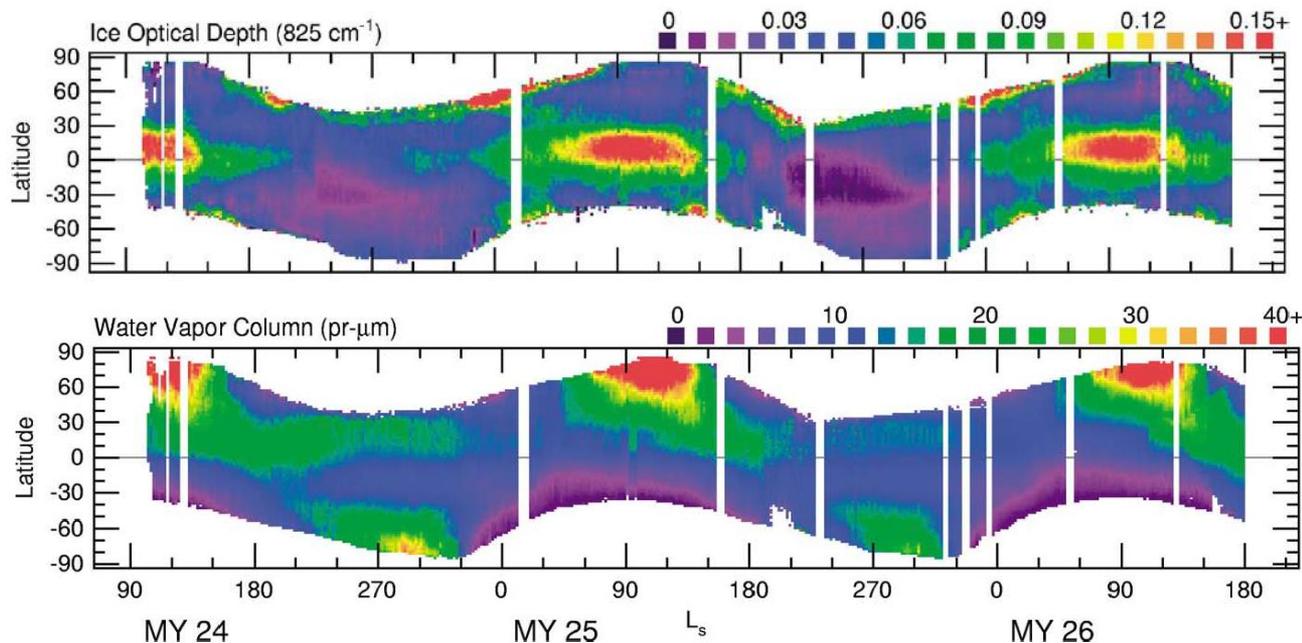
- はじめに
- モデルの解説
- モデルの設定
- 結果1 (1次元計算)
- 結果2 (3次元計算)
- まとめ
- 参考文献

はじめに

はじめに

- 過去の観測の結果から, 火星に存在する水として両極冠に堆積する氷, 大気中の水蒸気と水氷雲, 地下水などが知られている.
- 本研究では特に大気中の水蒸気と水氷雲に着目する, 火星に存在する水蒸気量は地球と比較して非常に少なく, 火星の全球にわたって多量に分布するダストと比べると, 火星の気候に与える影響は限定的であると考えられてきた.
- しかし, 水蒸気がダストを核とした凝結をすることにより, ダストの放射特性を変化させ火星の温度構造に影響を及ぼす可能性がある. また, 水氷雲の存在は火星のダスト分布に影響を及ぼす可能性がある.
- このような理由から, 火星の水循環を考察することは, 火星の気候を考える上でも重要である.

TES(Thermal Emission Spectrometer)の観測結果



TES(Thermal Emission Spectrometer) の観測で得られた結果. 上は水氷雲の光学的厚さ, 下は水蒸気量の鉛直積分量 (Smith et al. 2004)

- 観測の結果から, 火星の大気には固体の水 (水氷雲), と気体の水 (水蒸気) が存在することが知られている.
 - 北半球夏の季節に北極冠から水蒸気が昇華している様子や, 赤道域に厚い水氷雲が存在している様子が見える.

過去の研究

- 火星の水蒸気の季節変化や、水氷雲の存在が火星の水循環過程に及ぼす影響について、モデルによるシミュレーション研究が行われている。
 - Richardson and Wilson (2002) では、3次元大気大循環モデルを用いて、観測された火星の水循環を再現した。また表土 (レゴリス) に含まれる水についても考慮した実験を行い、表土 (レゴリス) の存在が火星の水循環に与える影響は少ないという結果を得た。
 - Richardson et al. (2002) では、Richardson and Wilson (2002) で用いられたものと同じモデルを用いて、観測された火星大気の水氷雲を再現した。ただし、観測と整合的な結果を得るために、非現実的な大きさの粒子半径をもつ水氷雲を規定している。
 - Montmessin et al. (2004) では、ダストを核とした凝結を考慮し、粒子半径を予測するスキームを取り入れたモデルを用いて、観測された火星の水循環を再現した。また、水氷雲の沈降速度が、火星水氷雲の分布に与える影響についても論じた。

本研究の目的

- 大気大循環モデル dcpam を用いて, 過去の観測や, 過去の数値シミュレーションで得られた火星大気の水循環の再現を行う.
- そして実験結果を考察し, 現在の火星の水循環がどのような過程で成り立っているのかについて考察を行う.

モデルの解説

モデルの解説

- 3次元惑星大気大循環モデル dcpam5
- 力学過程
 - プリミティブ方程式系
- 物理過程
 - 放射過程
 - 火星大気放射モデル
 - CO₂ とダストの射出・吸収・散乱を考慮
 - 混合過程
 - 乱流混合過程
 - Mellor and Yamada level 2.5
 - バルク法による地表面フラックス
 - » Beljaars and Holtslag (1991)
 - 乾燥対流調節
 - Manabe et al. (1965)
 - 凝結過程
 - 大規模凝結
 - Manabe et al. (1965)

力学過程

• プリミティブ方程式系 (鉛直 σ 座標)

運動方程式

$$\begin{aligned}\frac{dv}{dt} + fu + \frac{u^2}{a} \tan \phi &= -\frac{1}{a} \frac{\partial \Phi}{\partial \phi} - \frac{RT}{a} \frac{\partial \pi}{\partial \phi} + \mathcal{F}_\phi \\ \frac{du}{dt} - fv - \frac{uv}{a} \tan \phi &= -\frac{1}{a \cos \phi} \frac{\partial \Phi}{\partial \lambda} - \frac{RT}{a \cos \phi} \frac{\partial \pi}{\partial \lambda} + \mathcal{F}_\lambda\end{aligned}$$

熱力学の式

$$\frac{dT}{dt} = \frac{RT}{C_p} \left\{ \frac{\partial \pi}{\partial t} + \mathbf{v}_H \cdot \nabla_\sigma \pi + \frac{\dot{\sigma}}{\sigma} \right\} + \frac{Q^*}{C_p^d}$$

静水圧の式

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

連続の式

$$\frac{d\pi}{dt} + \nabla \cdot \mathbf{v}_H + \frac{\partial \dot{\sigma}}{\partial \sigma} = 0$$

(r, λ, ϕ) 球座標

$\pi \equiv \ln p_s$

$\sigma = p/p_s$

p_s 地表面気圧

Φ ジオポテンシャル

$\mathcal{F}_\lambda, \mathcal{F}_\phi$ 外力項

C_p 定圧比熱

水蒸気の扱い

- 水蒸気の比湿 q_{vap} , 水氷雲の比湿 q_{ice} の時間変化は以下の式で与えられる.

$$\frac{dq_{vap}}{dt} = \frac{1}{\rho} \left(-\frac{\partial F_{vap}}{\partial z} + S - L \right)$$
$$\frac{dq_{ice}}{dt} = \frac{1}{\rho} \left(-\frac{\partial F_{ice}}{\partial z} - S + L \right)$$

- ここで, S は水氷の昇華による水蒸気の生成量, L は水氷への凝結による水蒸気の消滅を表している. F は乱流による鉛直混合で, 以下のように与えられる.

$$F_{vap} = -K\rho \frac{\partial q_{vap}}{\partial z}$$
$$F_{ice} = -K\rho \frac{\partial q_{ice}}{\partial z}$$

- K 拡散係数
- ρ 大気の密度
- g 重力加速度

物理過程

- 水の大規模凝結
 - 過飽和した水蒸気は粒子半径 $2\mu\text{m}$ の水氷となり, 逆に飽和していない空気は水蒸気に戻る.
- 水蒸気と水氷雲の鉛直方向の運動として, 乱流混合過程と重力沈降を考える
 - 浮力拡散の効果は考慮していない.
 - 重力沈降の式は Conrath 1975 に従う.
- 水蒸気の放射効果は無視する

モデルの設定

計算設定

- 解像度 : T21L36
 - 水平格子点数
 - 緯度方向 : 64 , 経度方向 : 32
 - 鉛直層数
 - 36層
- 積分時間 5 年
 - 最後の1年について解析を行う.
- 初期条件
 - 水蒸気
 - なし
 - 水氷
 - 北緯80°より北の地表面に十分な量を置いておく
 - ここで, 十分な量とは, 計算終了までに氷が全て昇華しない量

計算設定

- 地形
 - MOLA (The Mars Orbiter Laser Altimeter) データ
- 表面特性
 - アルベド
 - MGS TES (Christensen et al. 2001)
 - 熱慣性
 - MGS TES (Putzig et al. 2005)
- ダスト
 - 分布を与えている
 - 水とダストの相互作用は考慮しない

結果1 (1次元計算)

結果1 (1次元計算)

- dcpam 5 を用いた1次元計算を行い, 水氷雲の凝結過程について考察を行った.
- 本実験の目的は, 北半球夏の季節に赤道域に発生する雲の発生起源について考察することである.

計算設定

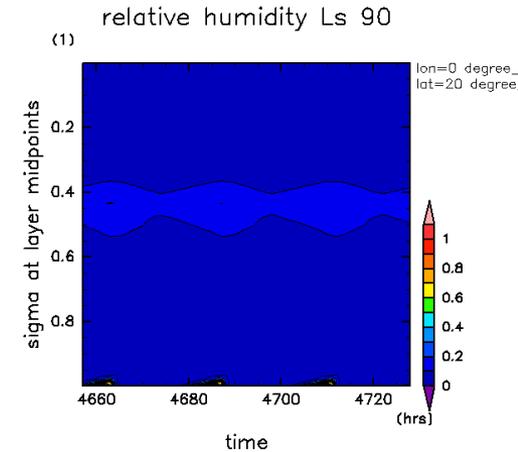
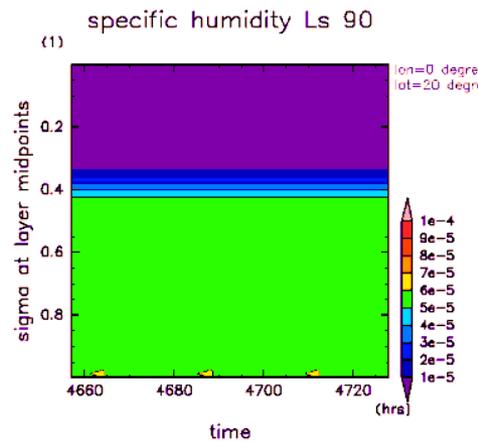
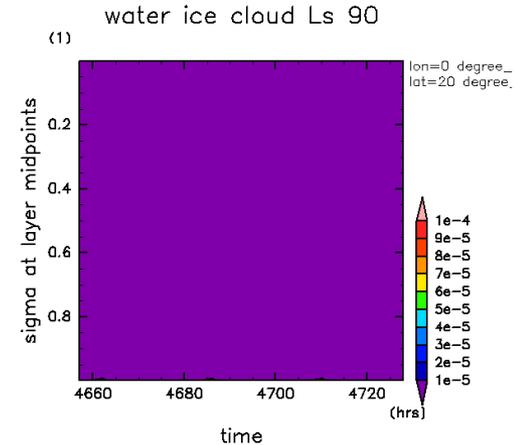
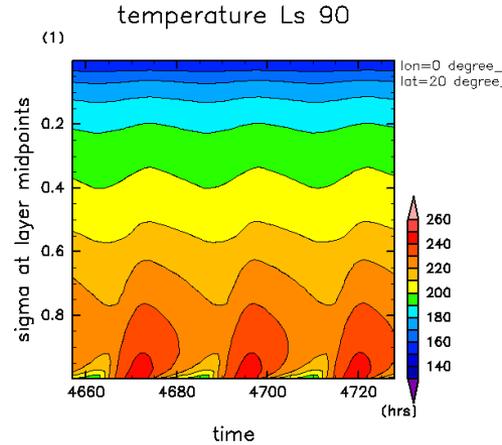
- 計算を行う地点
 - 経度 0° 緯度 20°
 - 北半球夏の季節に、水氷雲が発生する地点
- 最下層の水蒸気の比湿を固定
 - 与える値は Montmessin et al.(2004) の結果から示唆される値を使う
- 時間に対して変化しない鉛直流 w を与える
 - 観測されるようなハドレー循環による上昇を再現するため
- 計算期間
 - 1年
- 解析を行う期間
 - Ls 90° 付近の3日間

行った実験

- 与える鉛直流 w の値を変更した実験を行った
 - 鉛直流 w の大きさ
 - 0 m/s (鉛直流なし), 0.002 m/s (3次元計算の結果から示唆される大きさ), 0.05 m/s (3次元計算より大きい鉛直流)
 - 高度 0 m でゼロ, 高度 1000m までは線形に増加, 高度 1000m 以上では一定値

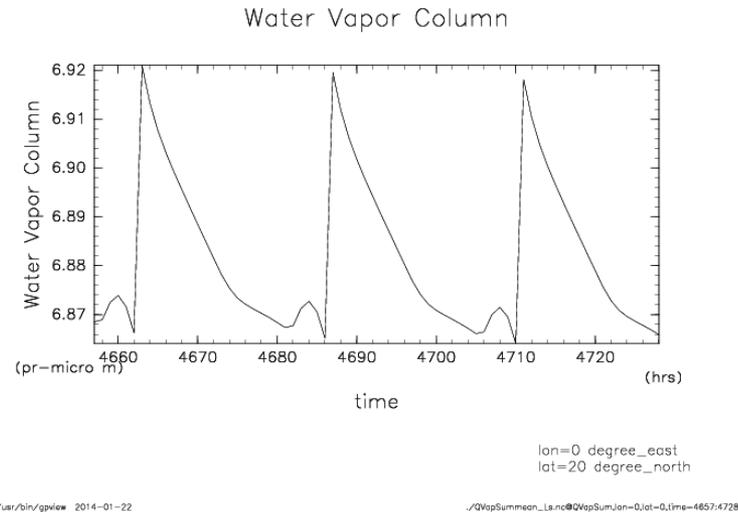
実験 1 $W = 0$

- 乱流混合によって、最下層に置かれた水蒸気が混合し, $\sigma=0.4$ 付近まで巻き上がっている
 - しかし相対湿度は1にはならず, 水氷雲は発生しない



左上 : 温度, 左下 : 水蒸気の比湿,
右上 : 水氷雲の比湿, 右下 : 相対湿度

実験 1 $W = 0$

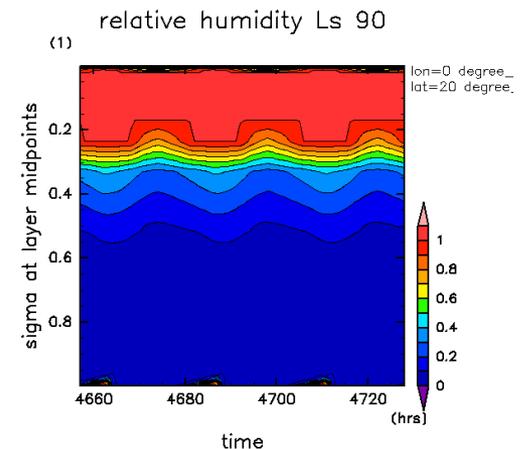
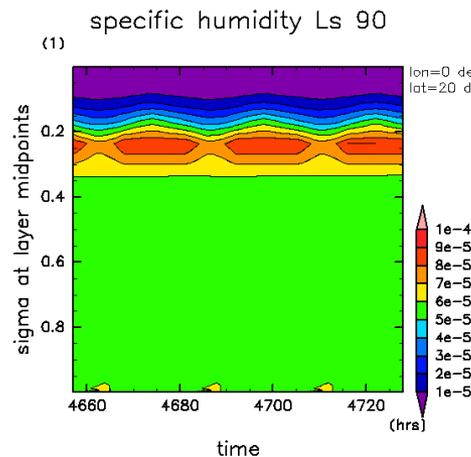
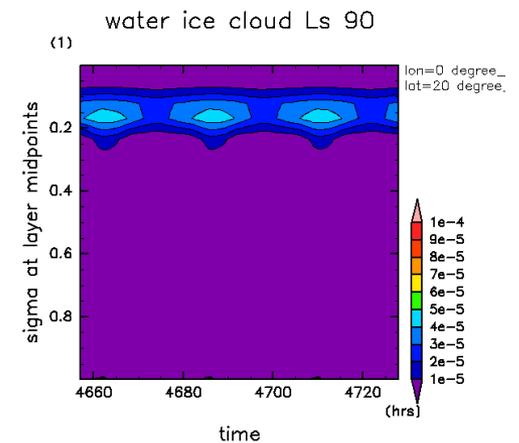
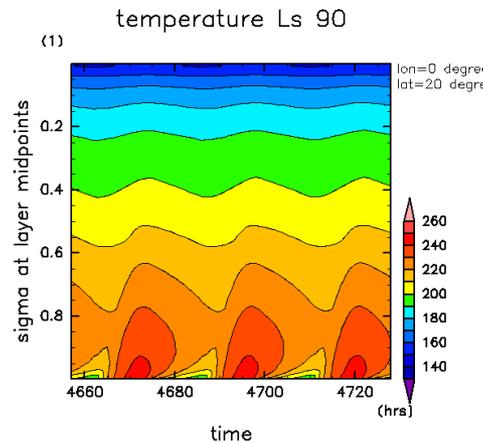


水蒸気の可降水量 (μm)

- 観測と比較して, 水蒸気量は少ない (観測は $20 \mu\text{m}$ 程度)
- 水氷雲は発生していない

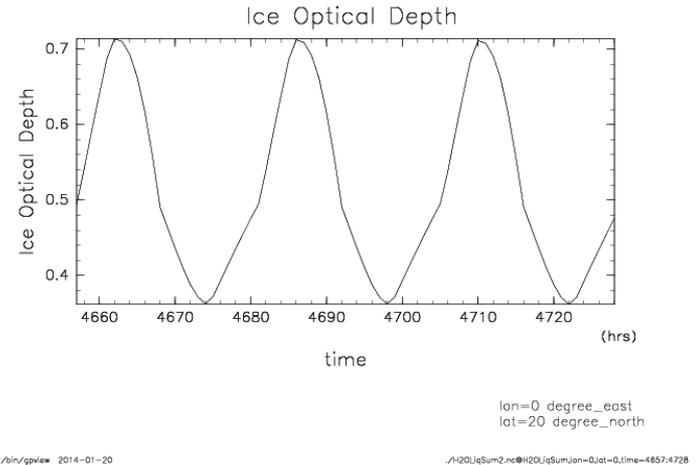
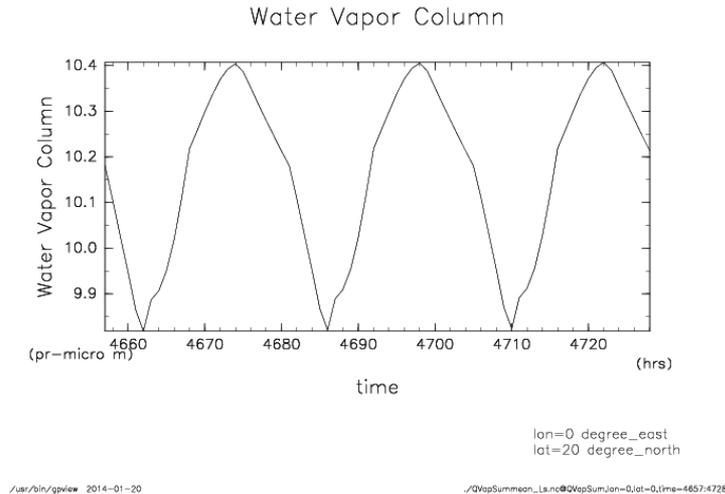
実験 2 $W = 0.002$

- 温度分布は実験1とほぼ変わらない
- 鉛直流の存在によって、実験1と比べてより高くまで水蒸気が巻き上げられる
- その結果、より温度の低い領域まで水蒸気が達し、水氷雲が発生する。



左上：温度, 左下：水蒸気の比湿,
右上：水氷雲の比湿, 右下：相対湿度

実験 2 $W = 0.002$

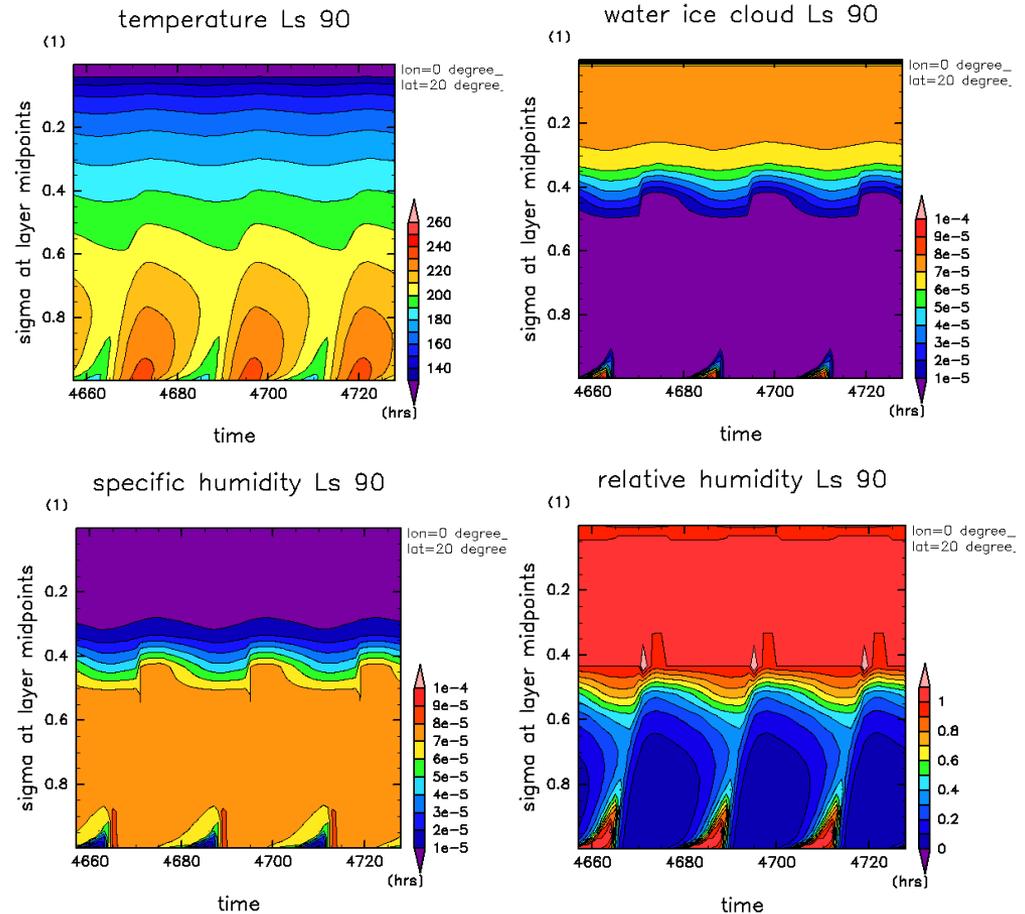


左：水蒸気の可降水量 (μm) 右：水氷雲の光学的厚さ

- 水蒸気は全層にわたって積分,
- 水氷雲はsig=0.0:0.8 にわたって積分
 - 下層で水蒸気が過飽和したことによって生成した雲の寄与を無視するため
- 観測と比較して, 水蒸気量は少ない (観測は $20\mu\text{m}$ 程度)
- 観測と比較して, 水氷雲は多い (観測は 0.15 程度)

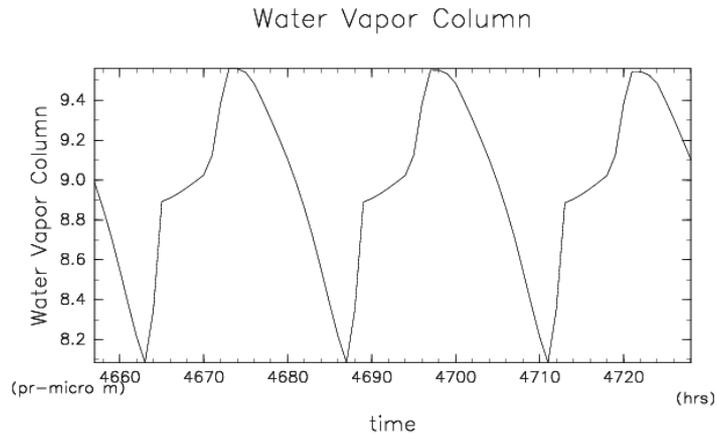
実験 3 $W = 0.05$

- 鉛直流がより強くなったことにより, 上昇した空気塊が断熱膨張し, 実験1や2と比べると低温になっている
- 結果として, 実験2と比べるとより低い高度で比湿は1になり, 水氷雲が発生する.



左上 : 温度, 左下 : 水蒸気の比湿,
右上 : 水氷雲の比湿, 右下 : 相対湿度

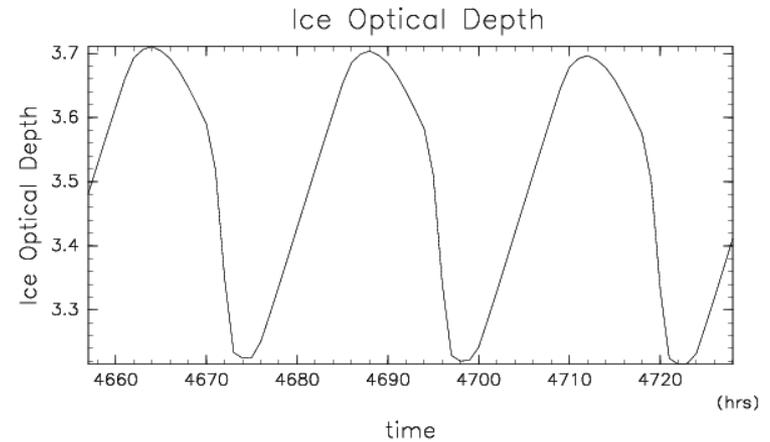
実験 3 $W = 0.05$



lon=0 degree_east
lat=20 degree_north

/usr/bin/gpview 2014-01-20

/QVapSummean_Ls.nc@QVapSumJan=0,lat=0,time=4657:4728



lon=0 degree_east
lat=20 degree_north

/usr/bin/gpview 2014-01-20

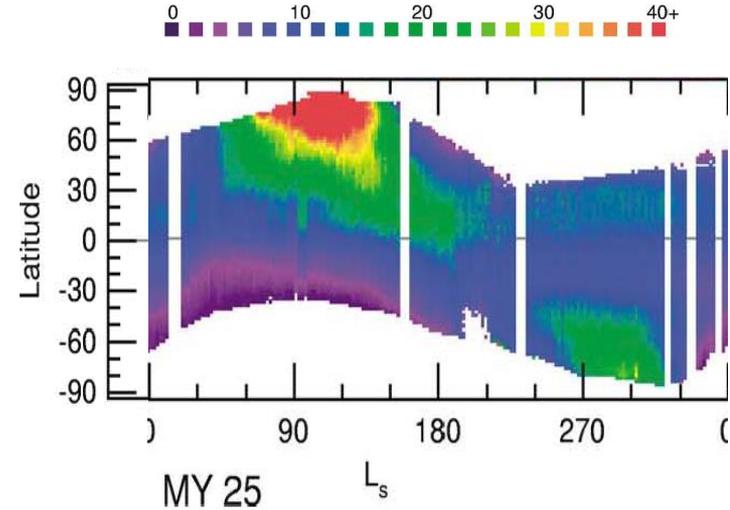
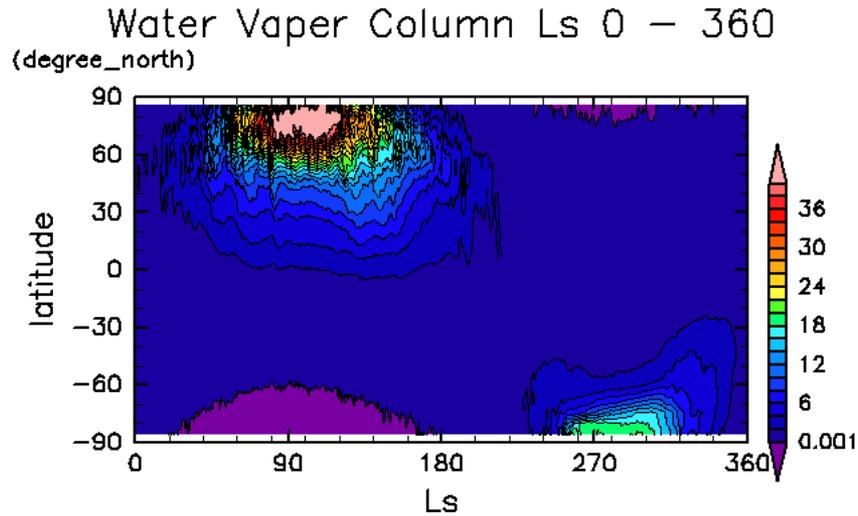
/H2OiqSum2.nc@H2OiqSumJan=0,lat=0,time=4657:4728

左 : 水蒸気の可降水量 (μm) 右 : 水氷雲の光学的厚さ

- 水蒸気は鉛直層全層にわたって積分,
- 水氷雲はsig=0 から 0.8 にわたって積分
 - 下層で水蒸気が過飽和したことによって生成した雲の寄与を無視するため
- 観測と比較して, 水蒸気量は少ない (観測は $20\mu\text{m}$ 程度)
- 観測と比較して, 水氷雲は非常に多い (観測は0.15程度)

実験2 (3次元計算)

水蒸気分布

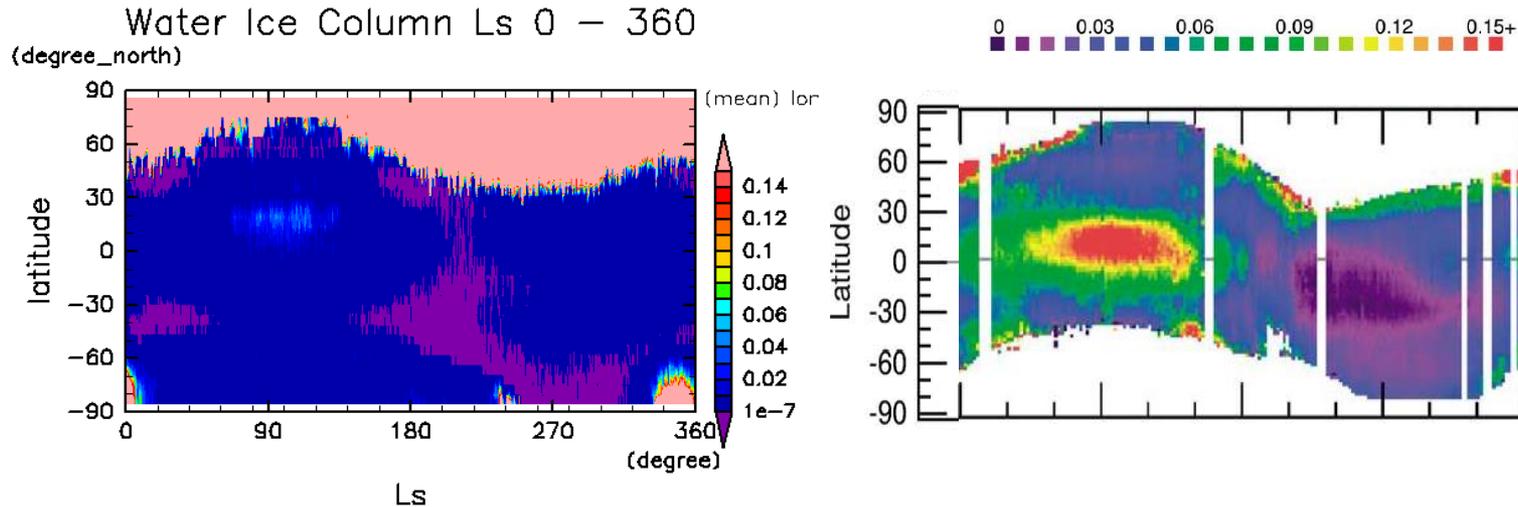


可降水量(μm) の季節変化 (Ls 0 - 360)

左 : dcpam の計算結果, 右 : TES による観測結果 (Smith et al. 2004)

- 観測で示唆されるような、両極冠からの水蒸気の昇華がモデルの結果でも確認できる。ただしピーク値は観測が $90\mu\text{m}$ に対してモデルでは $50\mu\text{m}$ 。
- 北極冠から昇華した水蒸気は、観測結果と同じように低緯度へと輸送される。
- 観測と同じく、南極冠に降り積もった水氷が昇華している

水氷雲分布



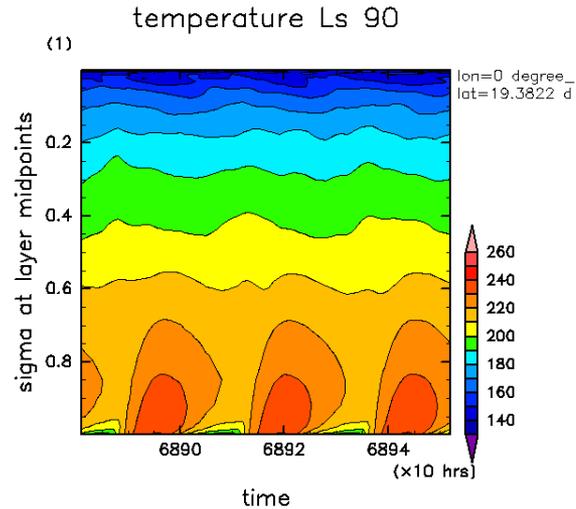
水氷雲の光学的厚さの季節変化 (Ls 0 - 360)

左 : dcpam の計算結果, 右 : TES による観測結果 (Smith et al. 2004)

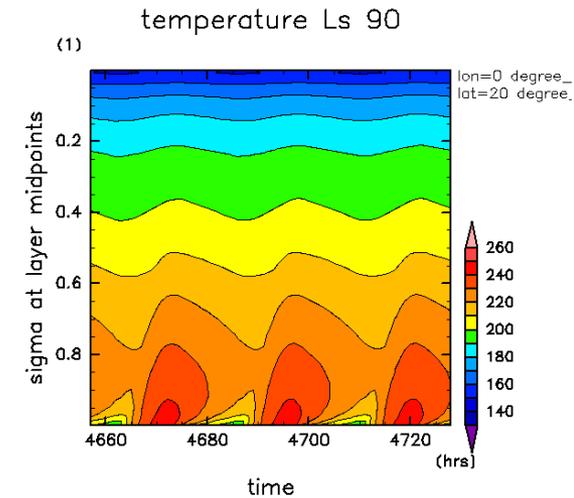
- dcpam の計算結果で, 北半球夏の季節に赤道域で発生する雲が確認できる.
 - ただし雲の光学的厚さは観測と比べて小さい.
 - ピークで 1/3 程度, 季節・緯度によっては 1/10 以下

1次元計算との比較 (温度)

- 3次元計算の温度分布は一次元計算で鉛直流 $w = 0.002$ km/s を与えた計算とほぼ同じ



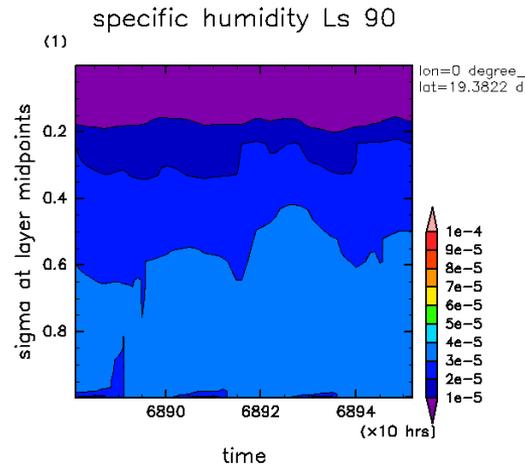
温度 (3次元計算)



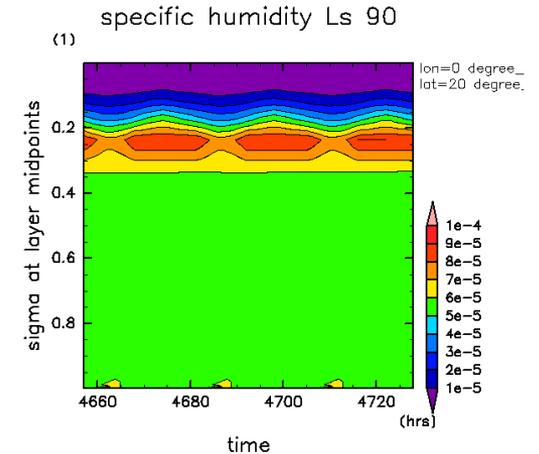
温度 (1次元計算, $w=0.002$)

1次元計算との比較 (水蒸気)

- 3次元計算の水蒸気の比湿は, 一次元計算で鉛直流 $w = 0.002 \text{ km/s}$ を与えた場合よりも少ない



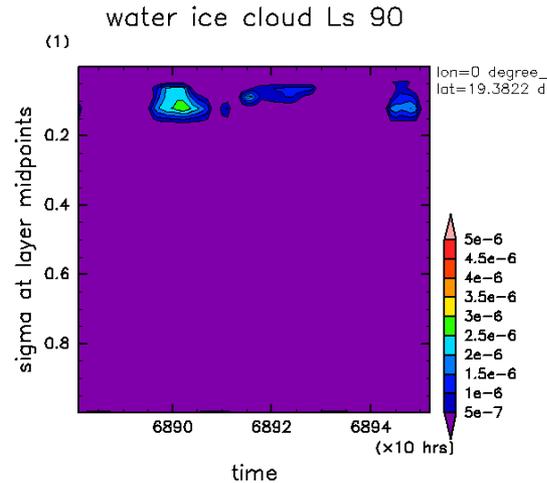
水蒸気の比湿
(3次元計算)



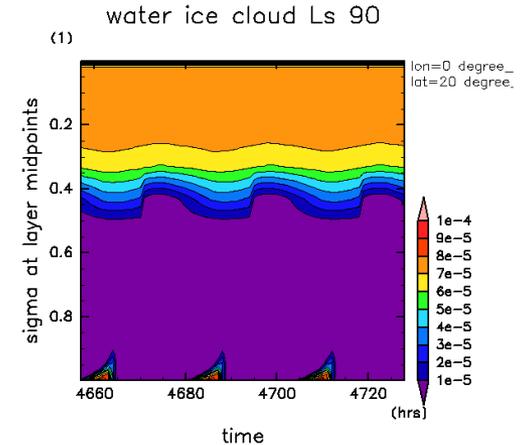
水蒸気の比湿
(1次元計算, $w=0.002$)

1次元計算との比較 (水氷雲)

- 3次元計算の水氷雲の比湿は, 1次元計算で鉛直流 $w = 0.002 \text{ km/s}$ を与えた場合よりも非常に少ない



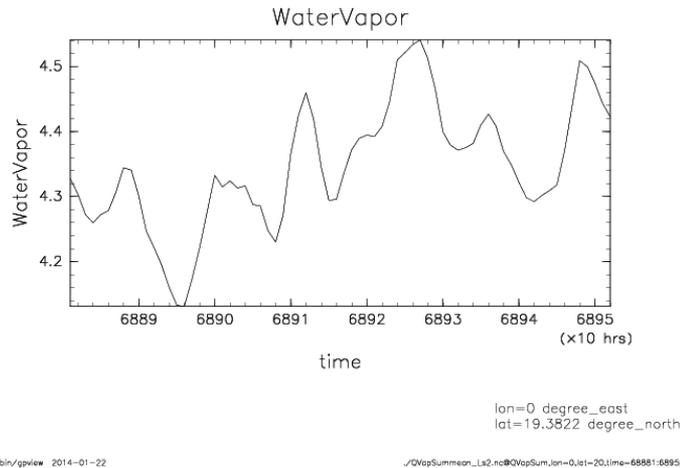
水氷雲の比湿
(3次元計算)



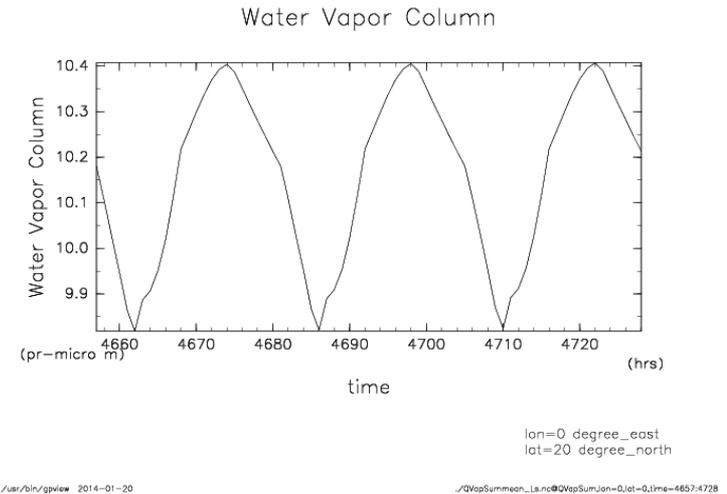
水氷雲の比湿
(1次元計算, $w=0.002$)

* カラーバーの値は左右で異なる
(3次元計算は1次元計算の1/20)

1次元計算との比較 (水蒸気の可降水量)



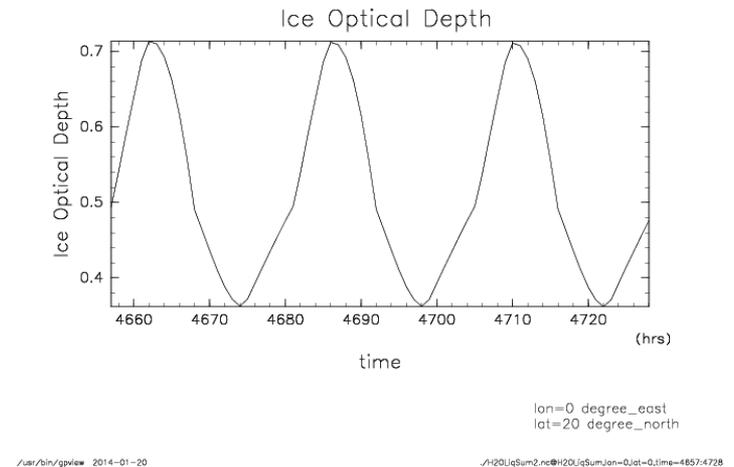
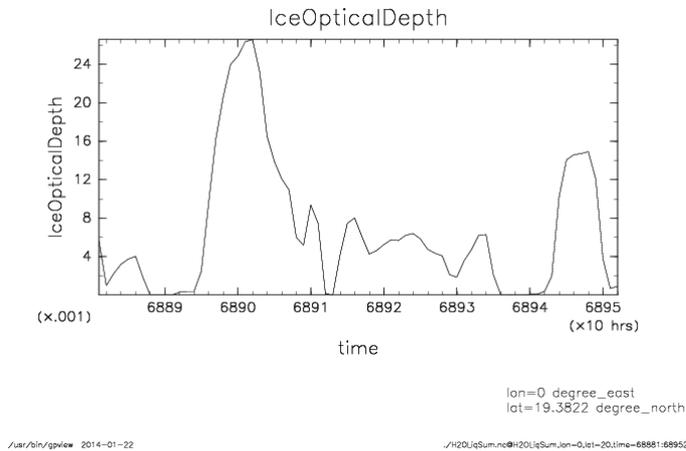
水蒸気の可降水量
(3次元計算)



水蒸気の可降水量
(1次元計算)

- 1次元計算と比較して, 水蒸気量は半分程度

1次元計算との比較 (水氷雲の光学的厚さ)



水氷雲の光学的厚さ
(3次元計算)

水氷雲の光学的厚さ
(1次元計算)

- 1次元計算と比較して, 水氷雲の光学的厚さは 1/30 程度

まとめ

まとめ

- 火星水循環を組み込んだ大気大循環モデル dcpam5 で計算を実行し, TES の観測結果と比較した
 - 水蒸気量
 - 北極冠から昇華した水蒸気は低緯度へと輸送されているが, 全体的に量は半分程度
 - 水氷雲
 - 観測結果と同じく, 北半球夏の季節の低緯度に雲が見られる.
 - モデルの結果の光学的厚さは, 観測の 1/3 – 1/10 程度
- dcpam5 で1次元計算を行い, 水蒸気の凝結過程を3次元計算と比較した
 - 3次元計算で水氷雲が少ない原因は, 水蒸気量が少ないため

現在行っている計算

- 地表面水氷のアルベドを低くした計算を実行中
 - 過去の実験から, 地表面水氷のアルベドが昇華する水蒸気量に強く影響を及ぼすことが確認されている

参考文献

- Madeleine, J.-B., F. Forget, E. Millour, T. Navarro, and A. Spiga (2012), The influence of radiatively active water ice clouds on the Martian climate, *Geophys. Res. Lett.*, 39, L23202, doi:10.1029/2012GL053564.
- Smith, M. D. (2004), Interannual variability in TES atmospheric observations of Mars during 1999– 2003, *Icarus*, 167, 148– 165.
- Richardson, M. I., R. J. Wilson, and A. V. Rodin (2002), Water ice clouds in the Martian atmosphere: General circulation model experiments with a simple cloud scheme, *J. Geophys. Res.*, 107(E9), 5064, doi:10.1029/2001JE001804.
- Richardson, M. I., R. J. Wilson, and A. V. Rodin (2002), Water ice clouds in the Martian atmosphere: General circulation model experiments with a simple cloud scheme, *J. Geophys. Res.*, 107(E9), 5064, doi:10.1029/2001JE001804.
- Clancy, R. T., M. J. Wolff, and P. R. Christensen (2003), Mars aerosol studies with the MGS TES emission phase function observations: Optical depths, particle sizes, and ice cloud types versus latitude and solar longitude, *J. Geophys. Res.*, 108(E9), 5098, doi:10.1029/2003JE002058.

参考文献

- Curran, R. J., B. J. Conrath, R. A. Hanel, V. G. Kunde, and J. C. Pearle, Mars: Mariner 9 spectroscopic evidence for H₂O ice clouds, *Science*, 182, 381– 383, 1973.
- Conrath, B. J., Thermal structure of the Martian atmosphere during the dissipation of the dust storm of 1971, *Icarus*, 24, 36– 46, 1975.

