

初期火星気候の3次元モデリング : Forget et al.(2013) のレビュー

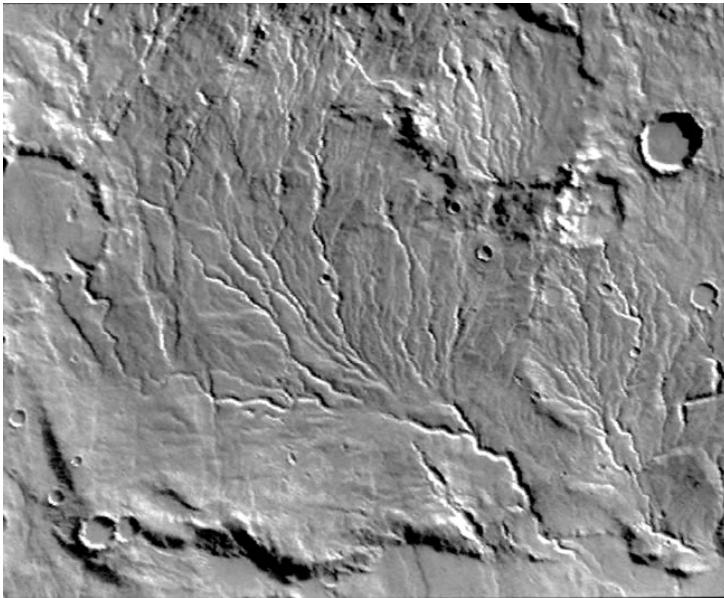
山下 達也 (北大・理)

2013年4月8日 (月)

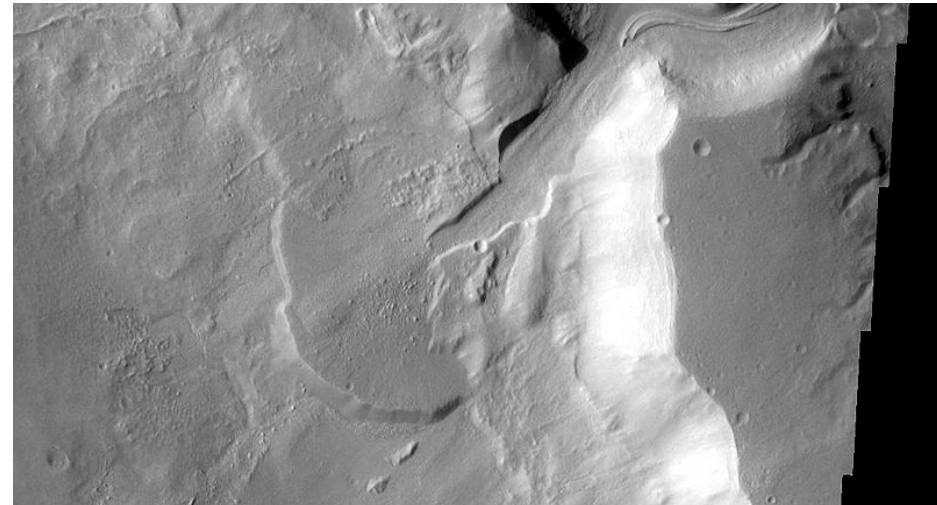
惑星大気研究会オンラインセミナー

初期火星の温暖気候

- 初期火星は液体の水が存在するほど温暖だった
 - バレーネットワーク(Carr, 1996)
 - 三角州に類似した堆積地形(Malin and Edgett, 2000, 2003)
 - 液体の水が存在しないと形成されない鉱物: 粘土鉱物・蛋白石質シリカ etc (Squyres et al., 2008 など)



http://www.lpi.usra.edu/publications/slidesets/redplanet2/images/sred2_s26.jpg



<http://themis-data.asu.edu/#/planetview/inst/themis/V11845005>

提唱されている様々な温暖化メカニズム

- CO₂ガス
 - Pollack et al.(1987) など
- CO₂氷雲の散乱温室効果
 - Forget and Pierrehumbert(1997) など
- その他の温室効果ガス
 - H₂O, CH₄, NH₃, SO₂, ...
- ...

CO₂ ガス・氷雲に着目した初期火星気候研究

- 1D放射対流平衡モデルを用いた研究

	273K を超えるか	CO ₂ 氷雲の放射	備考
Pollack et al. (1987)	○	×	
Kasting (1991)	×	×	CO ₂ 凝結を考慮
Forget and Pierrehumbert (1997)	○	○	雲の粒径・光学的厚さ・高度・雲量を仮定
Mischna et al. (2000)	○	○	雲の粒径・光学的厚さ・高度・雲量を仮定
Colaprete and Toon (2003)	×	○	詳細な雲微物理を考慮

Forget et al.(2013)の問題意識

- 散乱温室効果はCO₂氷雲の分布に強く依存
- 雲の分布を調べるには大気の運動を考慮することが不可欠
 - 従来の研究では1D放射対流平衡モデルを適用
- 大気の運動を考慮したとき, 初期火星において温暖な気候は実現されるのか?
- CO₂ガス・氷雲の放射を考慮したGCM を用いて気候を推定

モデル(LMD GCM)の概要

- 力学コア
 - プリミティブ方程式
- 放射過程
 - CO₂ガス・CO₂氷雲・ダストの可視・赤外領域の散乱・吸収
- CO₂ 氷雲物理過程
 - 飽和調節・重力落下(Stokes則)を考慮
- ダスト分布: Forget et al.(1999), 後述
- 大気乱流過程
 - Mellor and Yamada(1982) level 2.5 モデル
- 地表面温度
 - 放射熱フラックス, 顕熱フラックス, 土壌の熱拡散を考慮

標準実験の計算設定

- 平均地表気圧: 2.0 bar
- 熱慣性: $250 \text{ J s}^{-1/2} \text{ m}^{-2} \text{ K}^{-1}$
- 地表面アルベド: 0.22
- 凝結核数密度([CCN]): $1.0\text{e}5 \text{ /kg}$
- 臨界飽和比: 1.0
- 離心率: 0.0
- 自転軸傾斜角: 25度
- ダスト混合比: 0.0
- 太陽光度: 現在の 75%
- 積分時間: 10 火星年
- 時間ステップ: 凝結・落下は92.5 sec, それ以外は1850 sec
- 計算領域: 全球, 鉛直約 45 km
- 解像度: 水平 32x24 or 64x48, 鉛直 15 層

着目するパラメータ

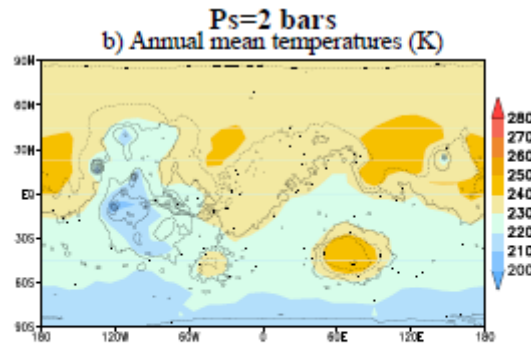
パラメータ	範囲	参考文献
平均地表気圧	0.1 – 7 bar	Phillips et al.(2001) など
熱慣性	250, 1000	
地表面アルベド	0.22, 0.4	
凝結核数密度	1.0e2 – 1.0e8 /kg	Hudson and Yum(2002) など
臨界飽和比	1.0, 1.35	Glandorf et al.(2002)
自転軸傾斜角	10 – 60 度	Laskar et al.(2004)
離心率	0.0 – 0.1	Laskar et al.(2004)
ダスト光学的厚さ	0.0 – 10.0	
ダスト層の厚さ zmax	30, 100 km	

標準実験

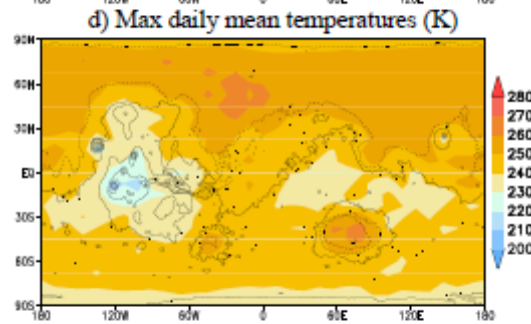
年平均地表面温度

- 年平均地表面温度は273Kを超えない
- 地表面温度の最大値は高緯度で273Kを超える

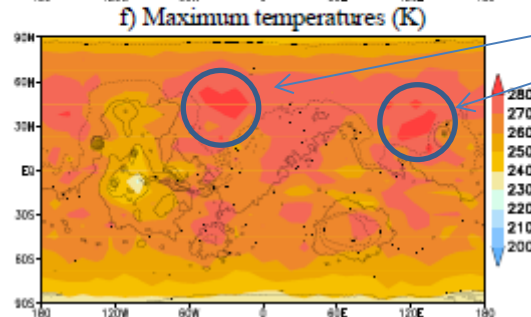
年平均



日平均の
最大値



最大値



273K超

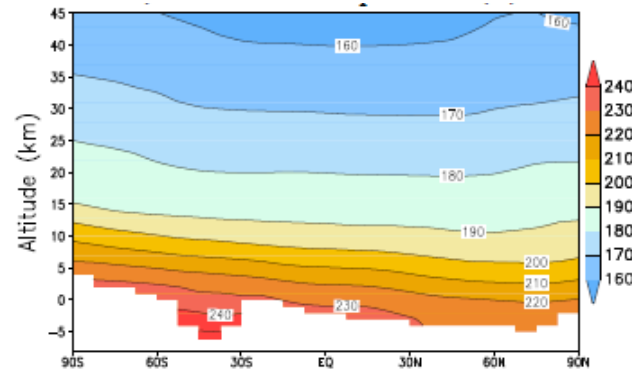
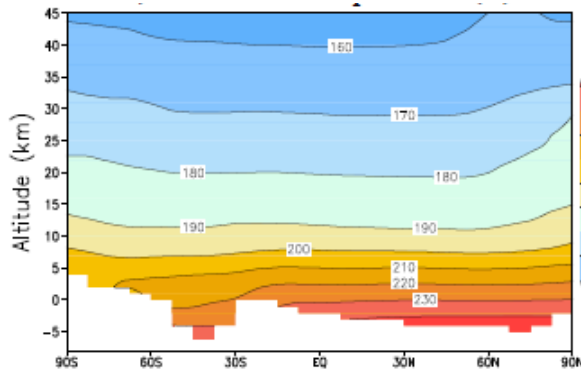
平均温度・東西風

- 温度の南北勾配は小さい
- 高度0-15km にハドレー循環

北半球の夏
($L_s=90-120$)

北半球の冬
($L_s=270-300$)

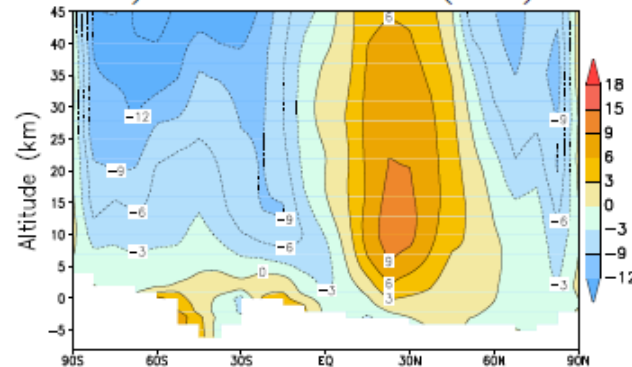
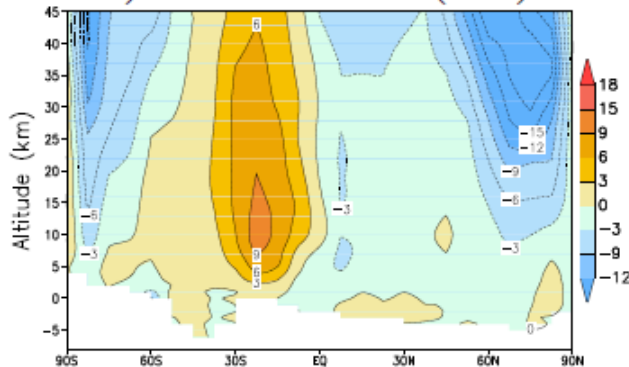
平均温度



c) Zonal mean zonal wind ($m s^{-1}$)

d) Zonal mean zonal wind ($m s^{-1}$)

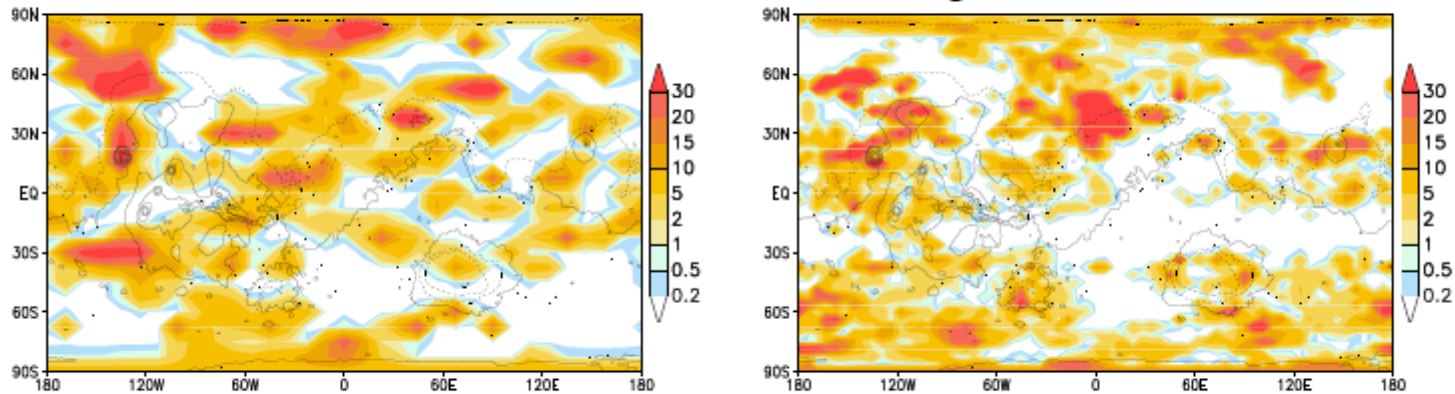
平均
東西風



雲分布

- 雲はあらゆる緯度・経度に存在
- 雲量は約50%
- 解像度を2倍にしても地表温度はほとんど変わらず

CO₂ ice clouds visible opacity, $L_s = 270^\circ$, noon at 0°E
Low resolution 32 × 24 High resolution 64 × 48



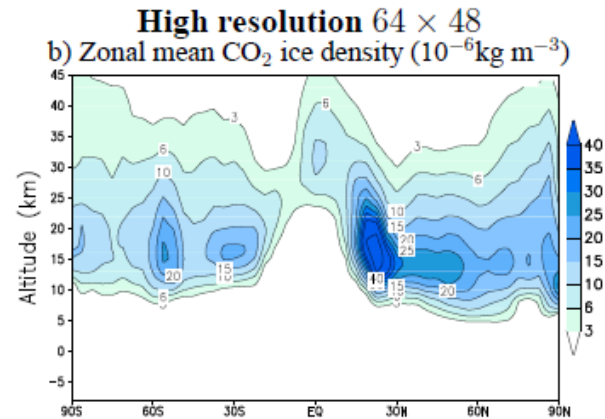
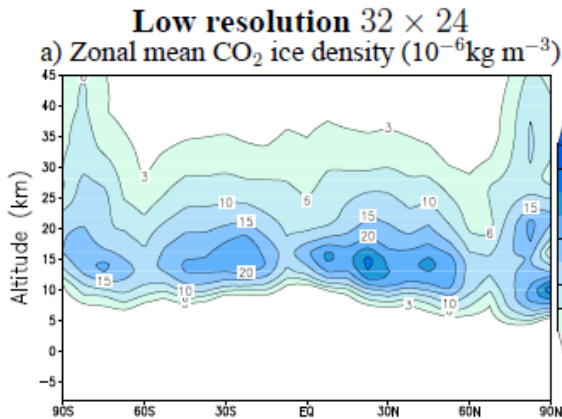
雲の可視
領域の光
学的厚さ

Figure 11: An example of the instantaneous CO₂ ice clouds coverage for two simulations with different horizontal resolution (mean surface pressure 2 bar, obliquity=25°, [CCN]=10⁵ kg⁻¹, circular orbit)

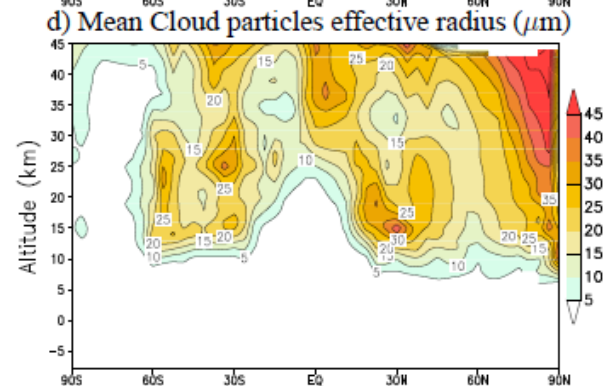
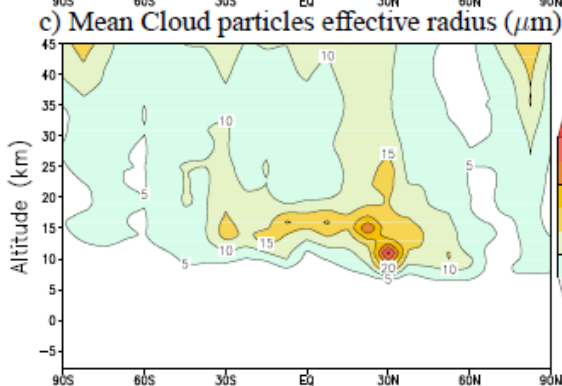
雲分布

- 雲はあらゆる緯度・季節に存在
- 雲粒はほど良いサイズ(~10ミクロン)だが, 雲の光学的厚さが小さく(~4), 温室効果は思ったほど大きくない
 - 雲粒半径~10ミクロン, 光学的厚さ~10 が最適(Mischna et al., 2000)

雲密度
(年平均・
経度平均)



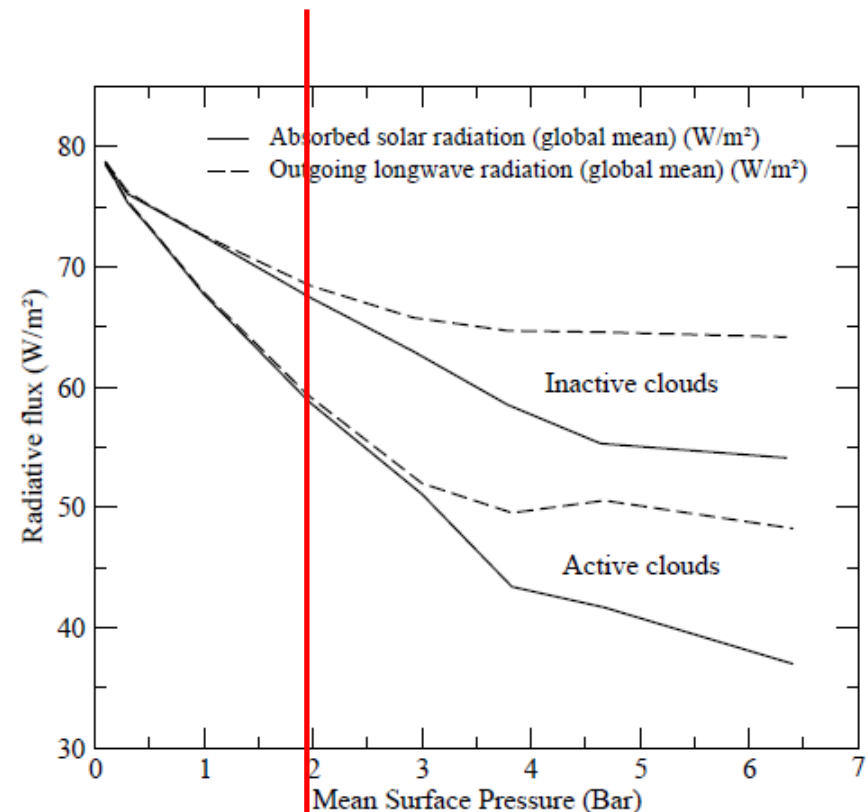
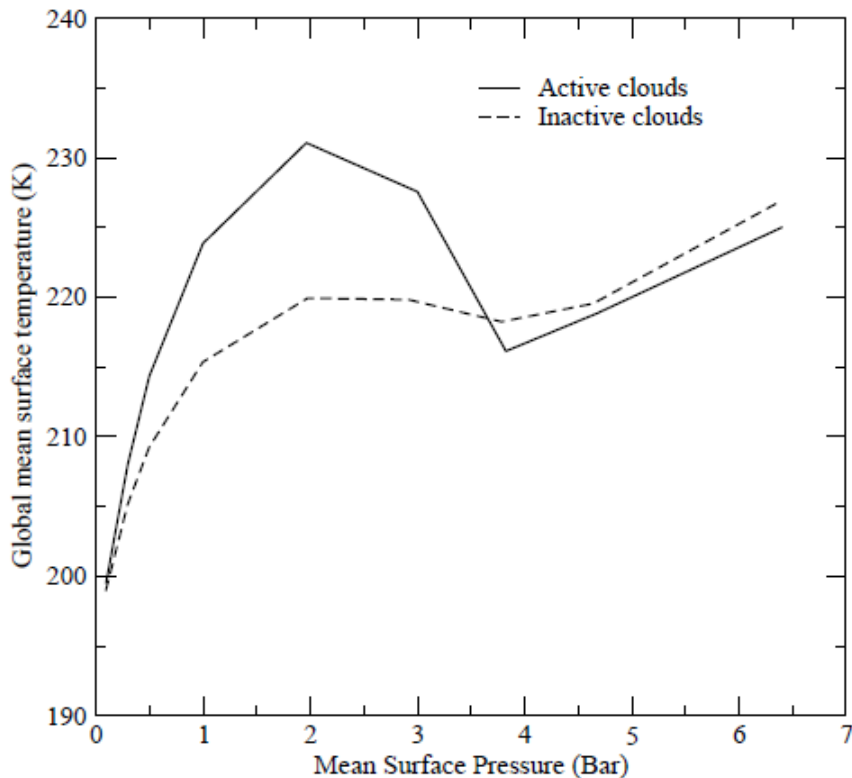
雲粒半径
(年平均・
経度平均)



パラメータ実験

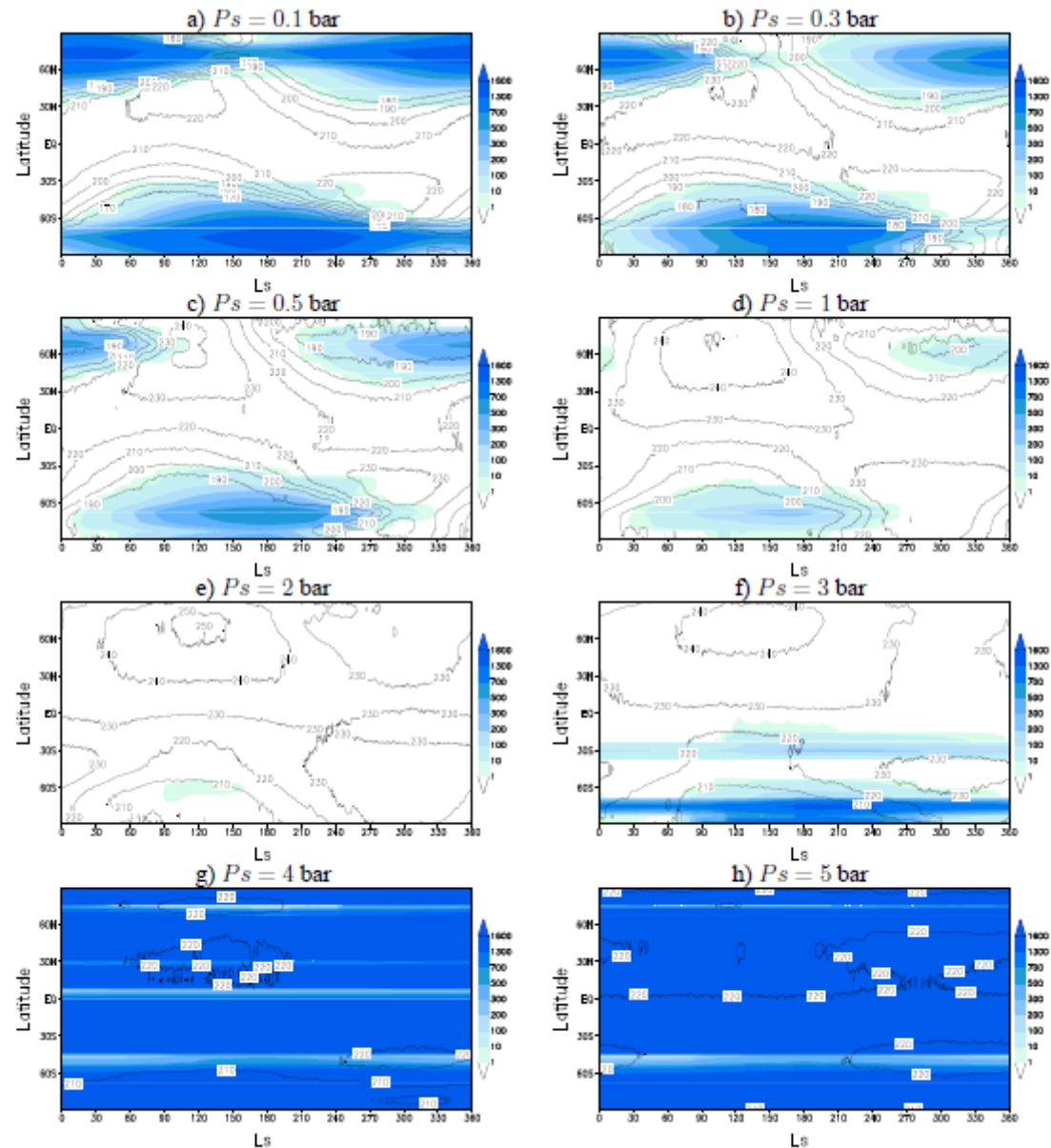
平均地表気圧に対する依存性

- 地表面温度は 2 bar のときに最大
- いずれの地表圧力でも273Kを超えることはない
- 3 bar 以上の場合, 放射平衡が成立せず(大気崩壊)



平均地表気圧に対する依存性

- 0.3 bar 以下の場
合, CO₂ 氷の永久
氷冠形成



平均地表気圧に対する依存性

- 4 bar以上の場合、極域以外でも永久氷冠形成

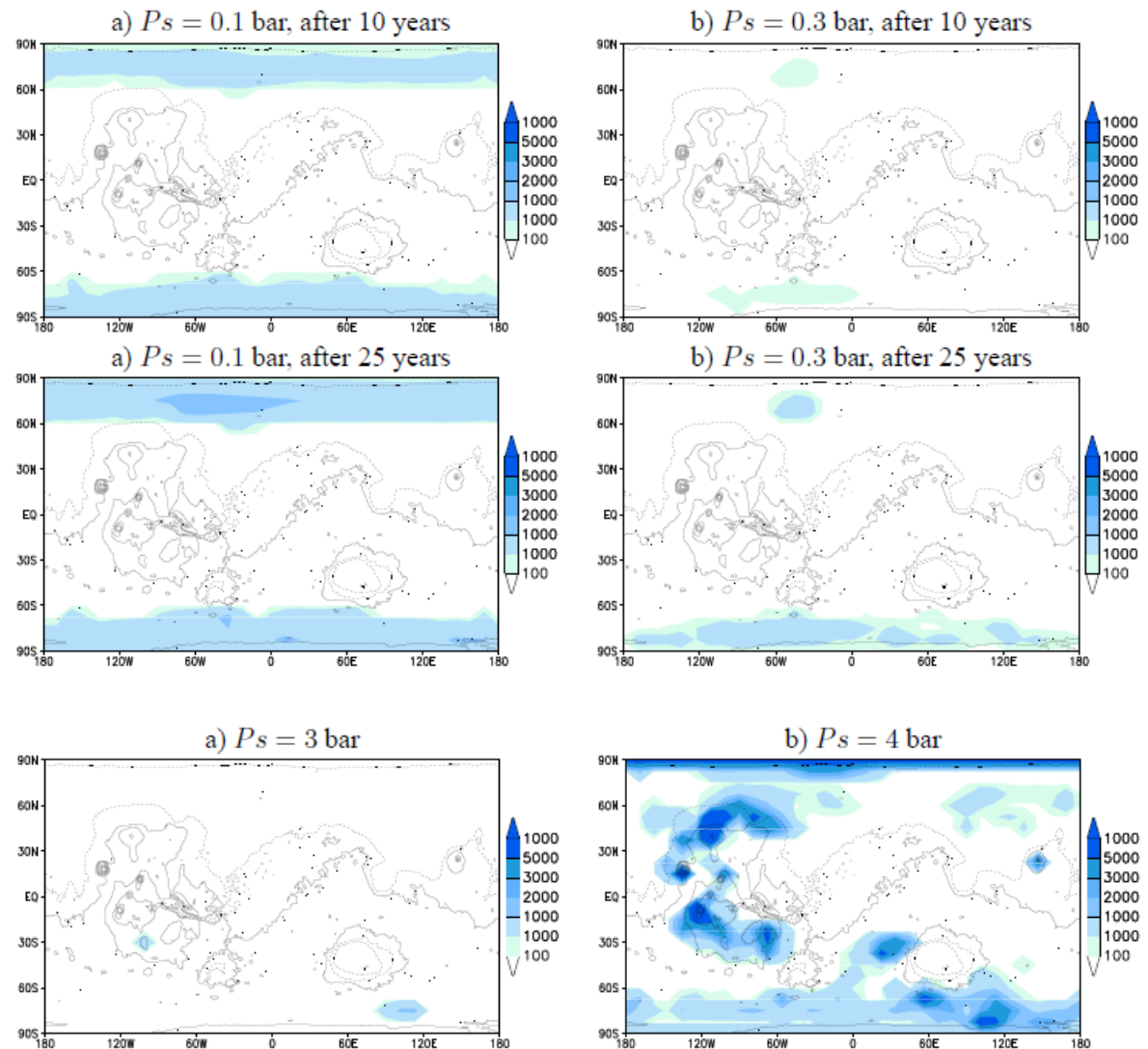
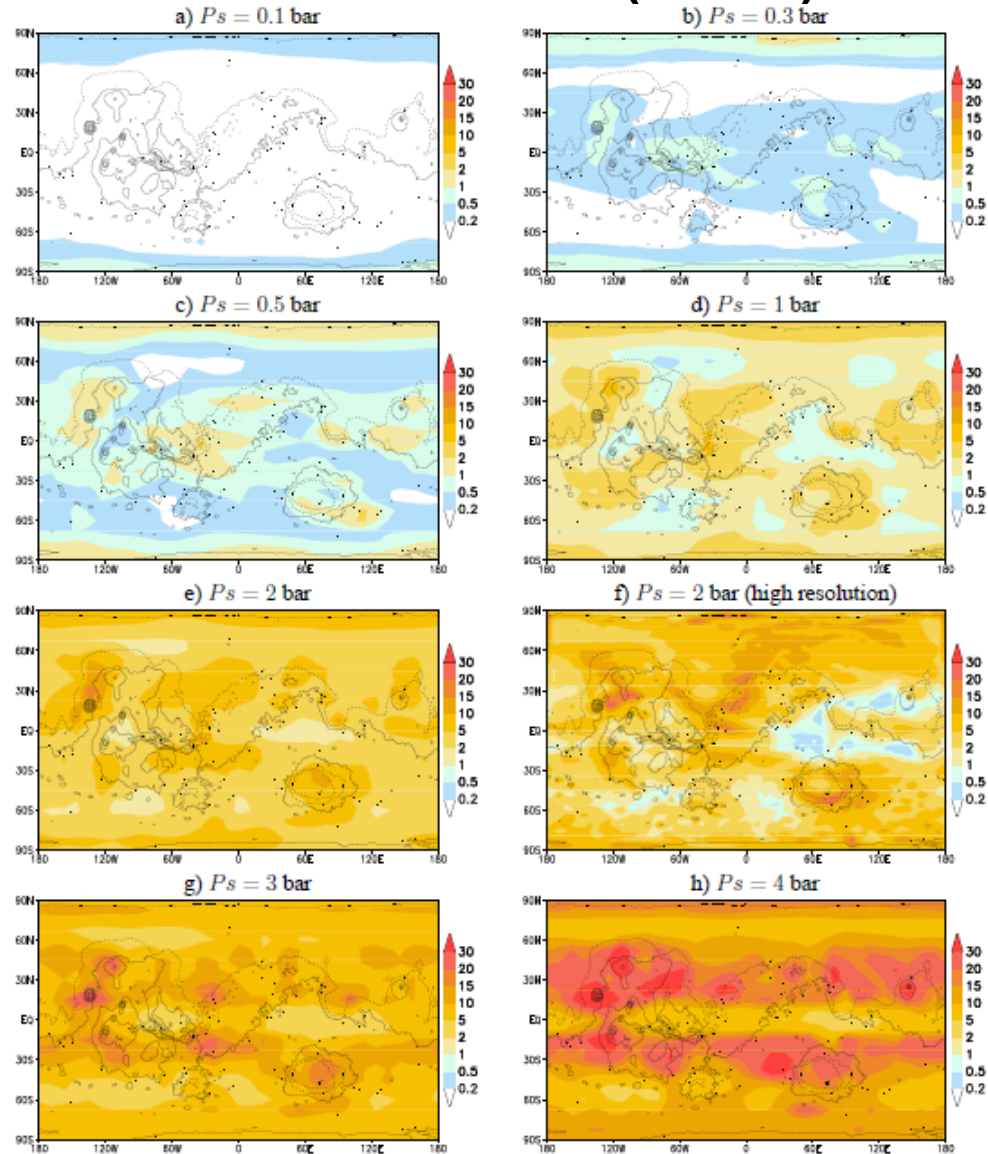


Figure 5: Same as Figure 4, but for the $P_s = 3$ and 4 bar simulations (also shown in Figure 3). These show the yearly minimum CO_2 ice mass (kg m^{-2}) recorded during the 10th year of the simulation.

平均地表気圧に対する依存性

- 地表圧力の増加とともに雲の光学的厚さは増加, 雲底高度は低下
 - 光学的に厚い低層雲は寒冷化をもたらす (Mischna et al., 2000)

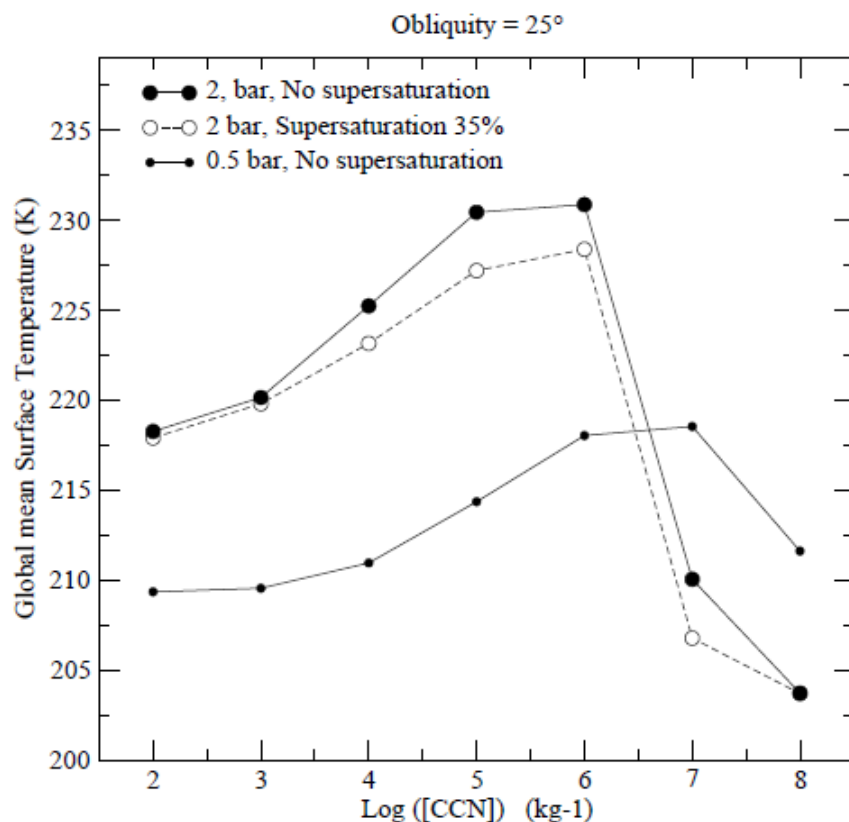
雲の光学的厚さ(年平均)



気圧 (bar)	光学的厚さ	雲底高度(km)
0.5	0.7	14
1	1.8	11
2	4.5	8
3	9	5
4	16	0

凝結核数密度・臨界飽和比に対する依存性

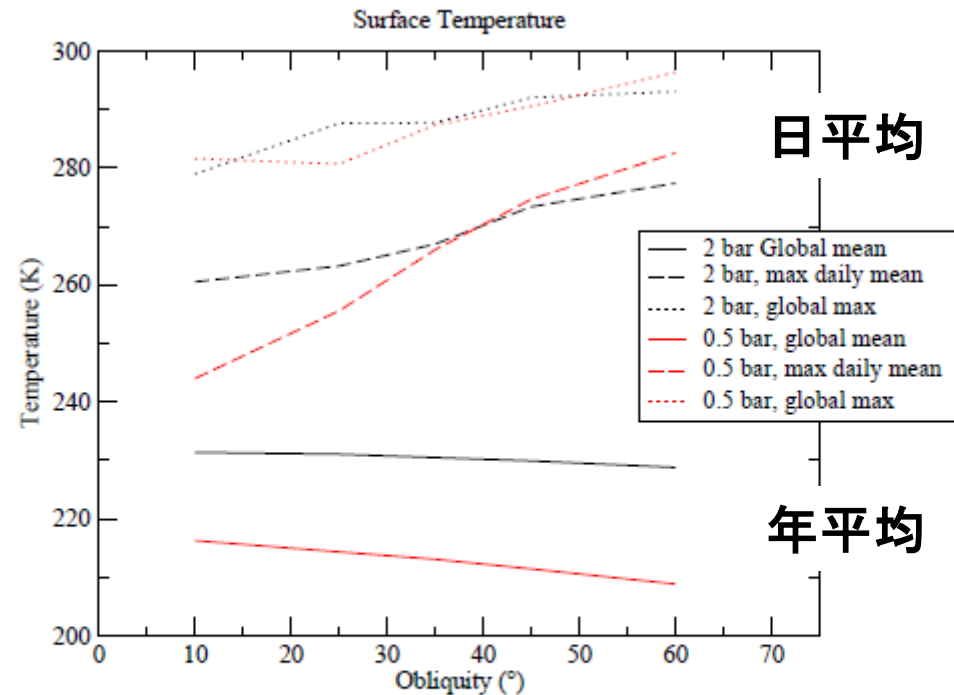
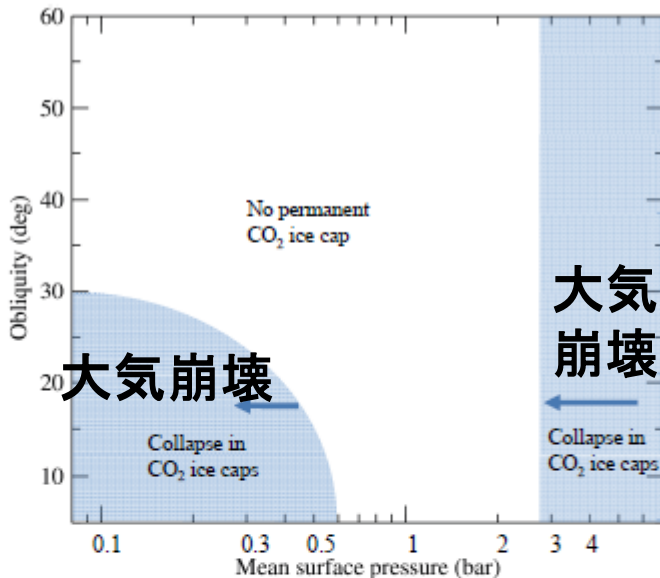
- 凝結核が多過ぎると雲の光学的厚さが大きくなり過ぎ、寒冷化
- 臨界飽和比が1.35の場合, 地表面温度は数K低下



Log [CCN]	光学的厚さ
5	4.5
6	16
7	67
8	156

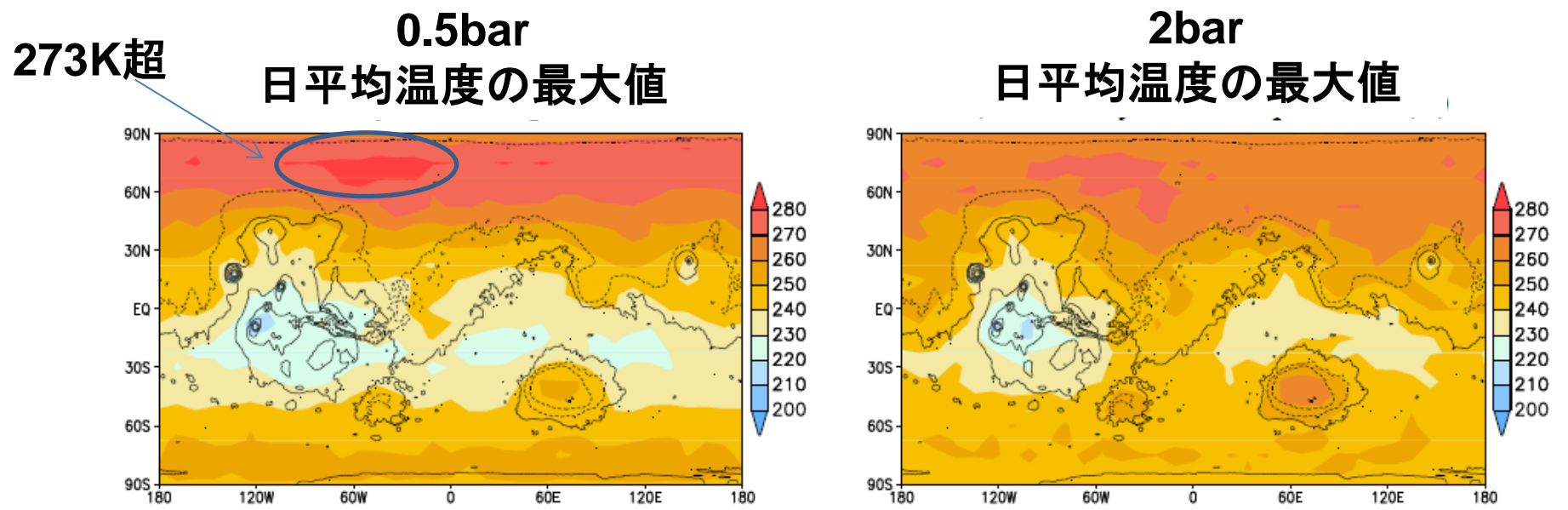
自転軸傾斜角に対する依存性

- 35度以上の場合, 0.3bar以下でも永久極冠は生じない
- 自転軸傾斜角が大きくなると, 年平均地表温度は若干低下, 日平均最大地表温度は上昇
 - 年平均値が小さくなるのは季節性極冠が拡大する為



離心率に対する依存性

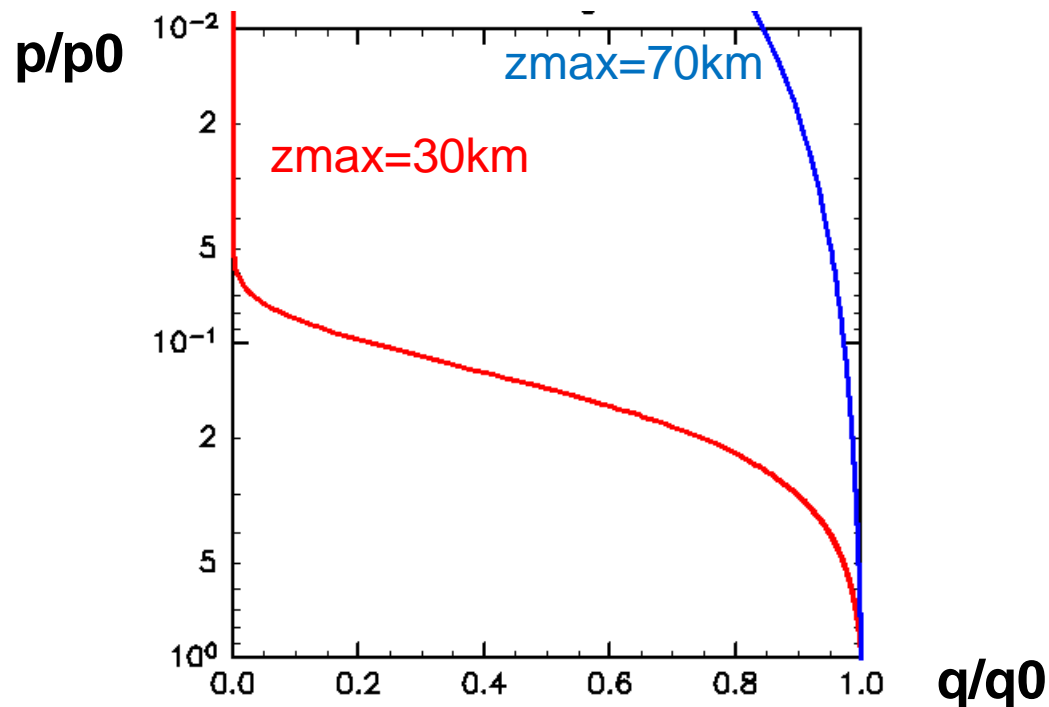
- 離心率0.1, 自転軸傾斜角41.8度(Laskar et al., 2004)の場合について実験
- 0.5barの場合, 日平均温度の最大値は北緯70度以北で273K超
 - 離心率が大きいと近日点付近の太陽入射が増加



ダスト混合比に対する依存性

- 定常的な分布を与える(Forget et al.,1999)
 - ダスト層の厚さ(z_{max}), 光学的厚さをパラメータとする
 - $z_{max}=30,100\text{km}$, 光学的厚さを0-10とする

$$q/q_0 = \exp\{0.007[1 - (p_0/p)^{70\text{km}/z_{max}}]\}$$



ダスト混合比に対する依存性

- ダストの光学的厚さが5の場合に地表面温度は最大
 - ダストの光学的厚さ~1の高度が上昇, 外向き赤外放射が減少
 - ダスト層の厚さが30kmの場合の方が地表面温度が高い
 - 上空の温度が上昇し過ぎると, 雲の光学的厚さが減少
- 年平均温度(2bar)

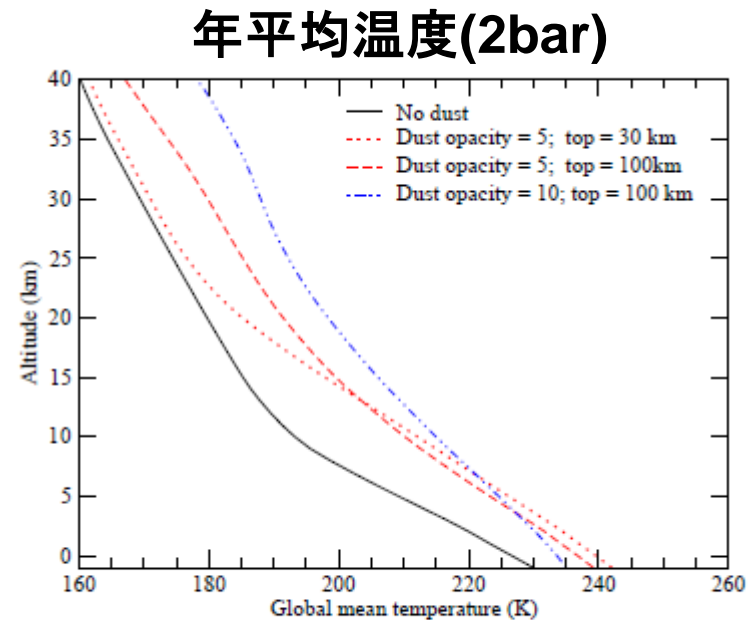
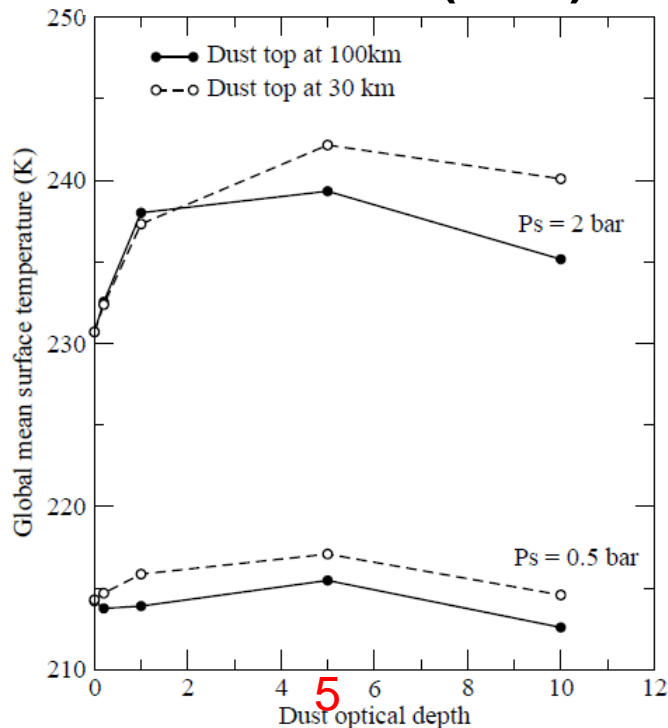


Figure 18: Global average temperature profile in the 2 bar mean surface pressure case, and with varying dust loading and vertical distribution

結論・議論

計算結果のまとめ

- どの実験においても, 地表面温度が**定常的に273Kを超えることはない**
 - 自転軸傾斜角が40度以上の場合, 夏季の日平均地表面温度が273Kを超える場所は存在
 - 局所的・一時的にH₂Oが存在していた可能性
- 大気崩壊により地表面気圧は3 bar 以下に維持される可能性
- 散乱温室効果の寄与はそれなりに大きいですが, 273Kを上回るには**その他の寄与との合わせ技が必要**

議論：CO₂以外の温室効果

- H₂O
 - 実現される温度が低く, H₂Oの量が少ない為, 温室効果は数K程度 (Wordsworth et al., 2012)
- NH₃
 - 光学的に不安定 (Kuhn and Atreya, 1979)
- CH₄
 - 光学的に不安定
- SO₂
 - 火山活動により供給されるが, 定常的に存在出来ない
- CO₂, H₂O 以外の温室効果は無視できないものの, 定常的な寄与は期待できなさそう

議論: 初期太陽は暗くなかった?

- 初期太陽が現在より数%重かったとすれば, 現在と同じ程度の明るさになる
 - 若くて重い恒星において, 元素組成の観測値と標準モデルの間にずれ(Guzik and Mussack 2010, Turck-Chieze et al. 2011)
 - 若い恒星の質量損失を測ってみると思ったほど大きくない (Wood et al. 2005, Minton and Malhotra, 2007)
- 現時点では結論は出ていない

Appendix

地表面の熱慣性・アルベドに対する依存性

- 地表面が氷に覆われた場合を想定
- 地表面温度は10K程度低下

