

火星勉強会第9回

二酸化炭素氷雲等による古火星大気の温室効果 ～光田千紘さんD論を中心に

中川広務 (東北大学), 22 Feb., 2011.

目的

「古火星が温暖化するのに必要な大気条件とは？」 CO₂大気散逸量
を見積もる意義・インパクトを上記論文等のレビューから探る.

1. これまでに提案された温暖化メカニズム

厚い二酸化炭素大気, ダスト, 他大気微量成分による温室効果

- *Pollack et al.* (1987) : **5気圧以上**の大気圧があれば, 地表面温度が水の凝固点を越える⇒対流圏上部の二酸化炭素凝結を考慮すると, 十分な温室効果が得られない可能性が (*Kasting*, 1991).
- *Squyres and Kasting* (1994) : 自転軸傾斜角の増加によって高緯度域が一時的に温暖化する説⇒広範囲に広がるバレーネットワークを説明できず.
- *Kasting* (1991) : 浮遊ダストによる温室効果⇒古火星大気中のダスト濃度・光学的特性未知のため未解明.
- *Pollack et al.* (1987); *Sagan and Mullen* (1972); *Kasting* (1997) : メタン・アンモニア・二酸化硫黄等による温室効果⇒紫外線分解のため温暖化に必要な濃度維持が困難.

2. 二酸化炭素氷雲による温暖化効果

二酸化炭素は光化学的に安定, 温室効果気体として最も有望.

- *Kasting* (1991) : 二酸化炭素の凝結に伴う大気の鉛直温度勾配の変化を仮定. 雲は存在せず凝結物は即落下を仮定 (晴天大気) .
- *Forget and Pierrehumbert* (1997) : 二酸化炭素氷雲は水雲と異なり惑星放射をあまり吸収しないが, 粒径や光学的厚さ次第では外向き惑星放射を太陽放射よりも効率良くはね返し, 温室効果が生じる (散乱温室効果) .
- *Pierrehumbert and Erlick* (1998) : 二酸化炭素氷雲の散乱温室効果は, 雲粒径**7-20um(後方散乱が効果的に効く)**のときに温暖化に寄与する.
- *Mischna et al.* (2000); *Yokohata et al.* (2002) : 雲粒径が温暖化に適した値であっても, 雲層の光学的厚さが大きくなると温室効果は生じない.
- *Colaprete and Toon* (2003) : 散乱温室効果では古火星の温暖気候の説明は困難. (未知の凝結核の物性や数濃度に依存)

3. 二酸化炭素氷雲による温暖化効果

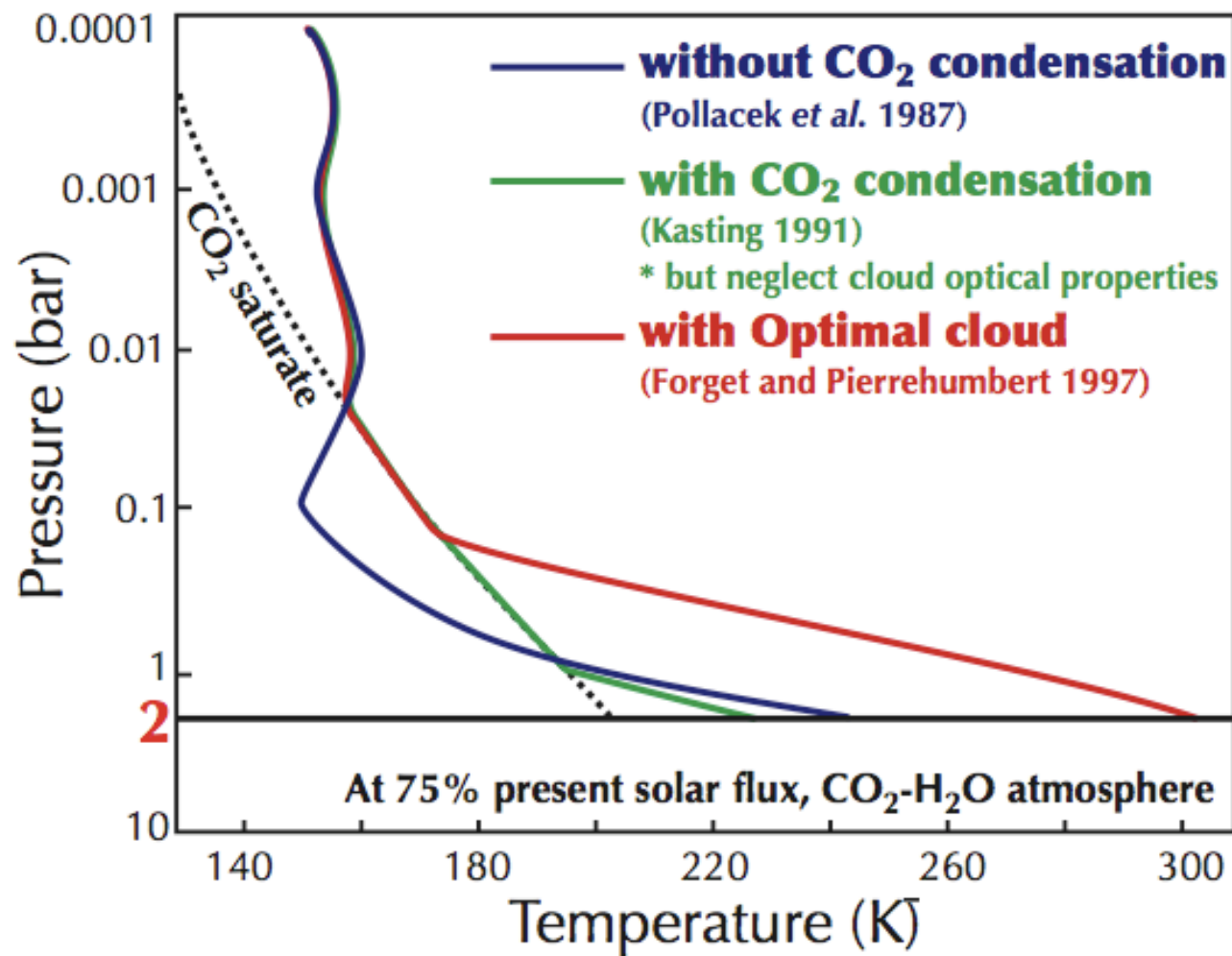


図 1.4 二酸化炭素の凝結の有無や雲の有無による大気構造の変化. Colaprate and Toon (2003), Fig 9 を改変.

4. 凝結層の放射平衡と凝結核調整

粒径や鉛直分布などの構造は, 主に放射過程によって調整される可能性

- 雲粒数が一定の場合,
 - ➡ 雲粒サイズが増して雲が厚くなる
 - ➡ それによる散乱吸収の効果によって凝結層が放射加熱を受ける
 - ➡ 雲粒が蒸発し, 逆に雲粒サイズが減少
 - ➡ 雲が薄くなると凝結層は放射冷却を起こして雲粒の凝結が起こる
- ❖ 雲粒成長 (蒸発) と凝結層の放射冷却 (加熱) との間に負のフィードバックが生じ, 雲粒径は凝結層が放射平衡を満たすように自動的に調整される → 凝結層の放射冷却は雲の散乱によって打ち消され, 雲は持続する.

4. 一次元放射対流凝結平衡モデル

基本的な仮定

- 大気は二酸化炭素に飽和水蒸気圧分の水蒸気が混合.
- 凝結核数濃度の時間変化は無視.
- 二酸化炭素氷雲の落下は無視, 凝結した二酸化炭素はその場に留まり雲を生成.
- 雲粒径は, 凝結核数濃度を用いて, 雲質量混合比から算出.
- 放射冷却によって生じる二酸化炭素の過飽和は凝結により即座に解消.
- 凝結層での対流は無視.
- 想定される雲は対流起源の積乱雲ではなく, 放射冷却起源の霧や霞のような雲である.
- 水雲による放射場への影響を考慮しない (対流の影響を受けるため見積もり困難).
- 二酸化炭素水和物の効果は考えない.

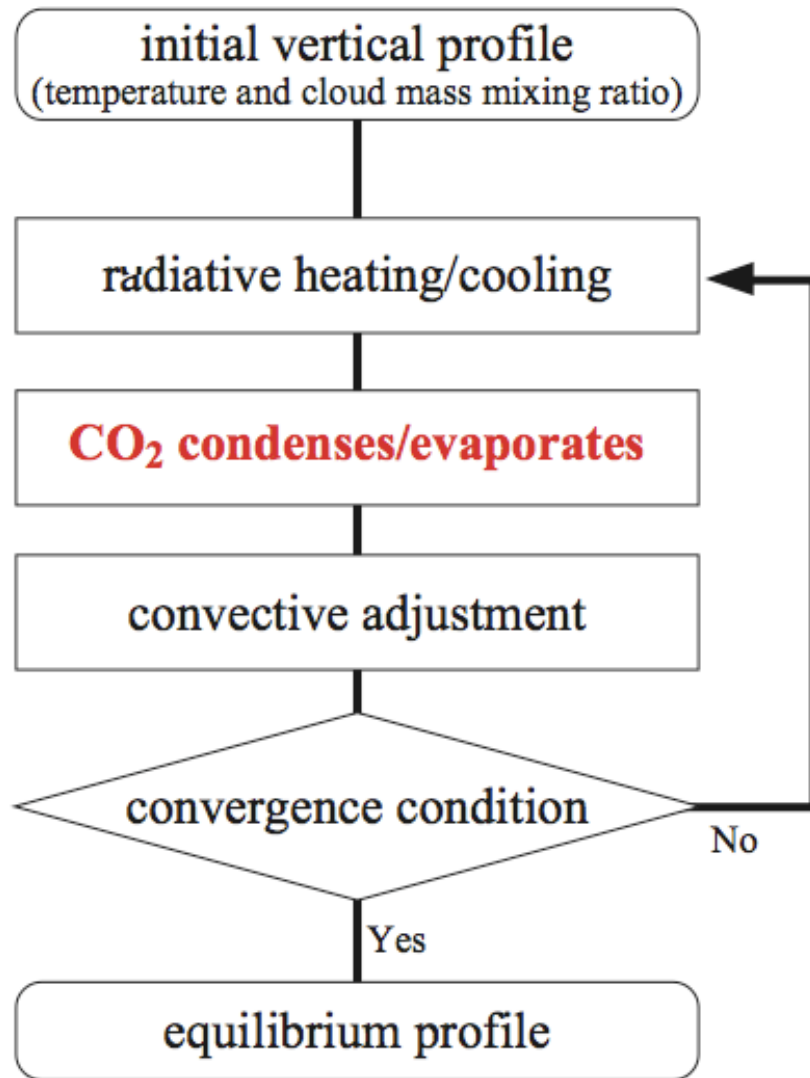


図 2.1 モデルでの計算の流れの模式図

4. 一次元放射対流凝結平衡モデル

表 2.2 モデルで用いたパラメタ

物理量 (単位)	記号	標準値	計算範囲
大気圧 (気圧)	P_s	2.0	0.1 – 10.0
凝結核数濃度 (kg^{-1})	N_{CCN}	10^7	$10^3 - 10^9$
重力加速度 (m s^{-1})	g	3.72	1.29 – 17.4
太陽 (中心星) 放射入射 (W m^2)		1.11×10^2	$1.11 \times 10^2 - 1.6 \times 10^1$
太陽 (中心星) 表面温度 (K)	$T_{\odot}$	5.379×10^3	3900 – 7200
地表面アルベド	A_s	0.2	同左
太陽放射入射天頂角 (°)	θ	60	同左

5. 鉛直構造の時間発展

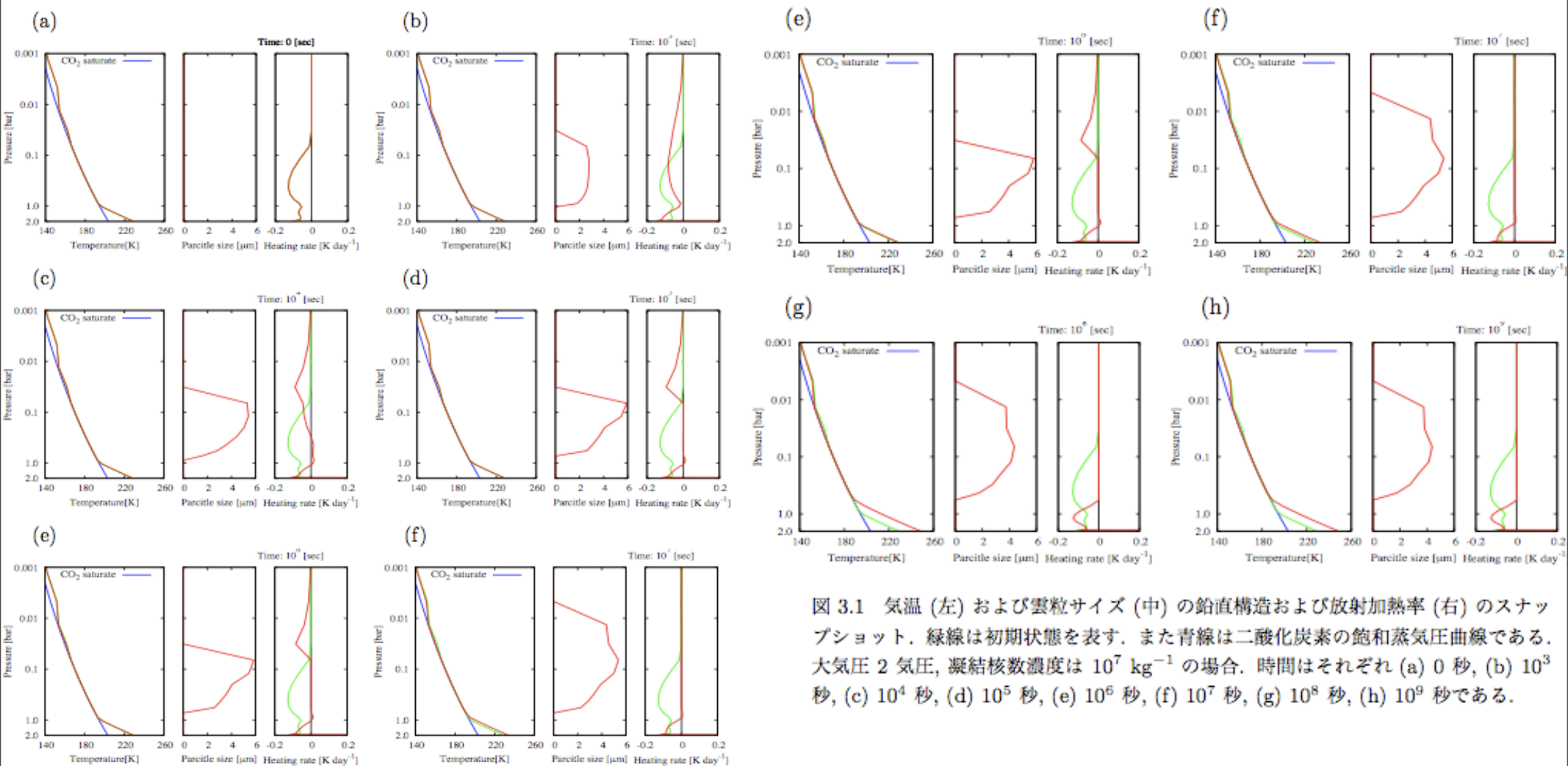


図 3.1 気温 (左) および雲粒サイズ (中) の鉛直構造および放射加熱率 (右) のスナップショット。緑線は初期状態を表す。また青線は二酸化炭素の飽和蒸気圧曲線である。大気圧 2 気圧, 凝結核数濃度は 10^7 kg^{-1} の場合。時間はそれぞれ (a) 0 秒, (b) 10^3 秒, (c) 10^4 秒, (d) 10^5 秒, (e) 10^6 秒, (f) 10^7 秒, (g) 10^8 秒, (h) 10^9 秒である。

放射過程を介した氷雲構造の調整

(b)凝結層は放射冷却を受け, 即座に雲形成, 凝結層下部では放射冷却率が減少, 上部では増加. (d)凝結層放射加熱を受け, 雲の蒸発, 放射平衡状態へ.

5. 鉛直構造の時間発展

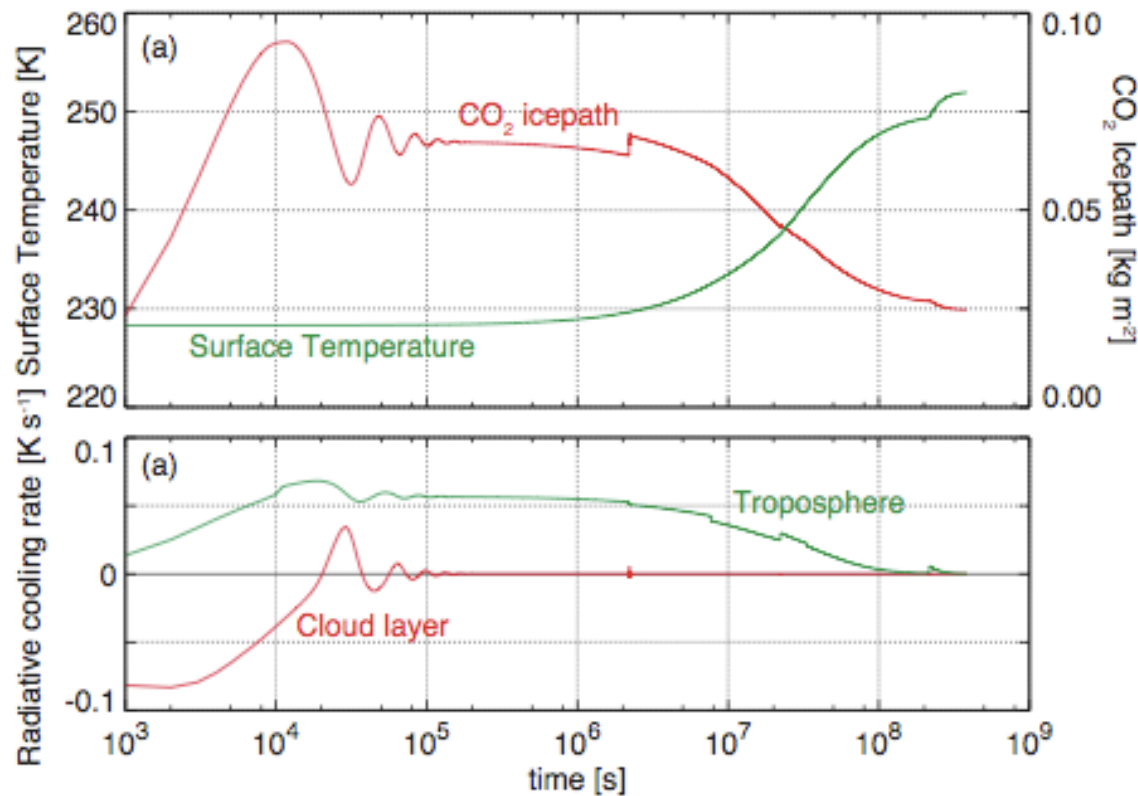


図 3.2 (a) 雲柱密度 (赤) および地表面温度 (緑) の時間変化. (b) 雲層 (赤) および対流圏全体の放射加熱率 (緑) の時間変化. 対流調節を行った層を対流圏とし, 地表面を含む対流圏への正味放射入射量を対流圏の大気質量で割った値を対流圏の放射加熱率と定義する. 大気圧 2 気圧, 凝結核混合比 10^7 kg^{-1} の場合. 値の不連続は鉛直離散化の影響で生じたものである.

従来考えられてきた散乱温室効果よりも,むしろ氷雲による散乱吸収がもたらす凝結層の放射平衡化の効果が強く寄与.

凝結層がほぼ放射平衡に達した時点では, 地表面温度は初期値から変化無.

対流圏の放射時定数 10^7 のスケールで地表面温度上昇, 雲粒径減少.

平衡状態では, 高度**18-50km**に平均雲粒径**3um**, 全光学的厚さ ~ 0.05 をもつ雲形成, 地表面は**251K**まで上昇. 晴天大気条件下と比べて**26K**の温室効果.

6. 凝結核濃度依存性

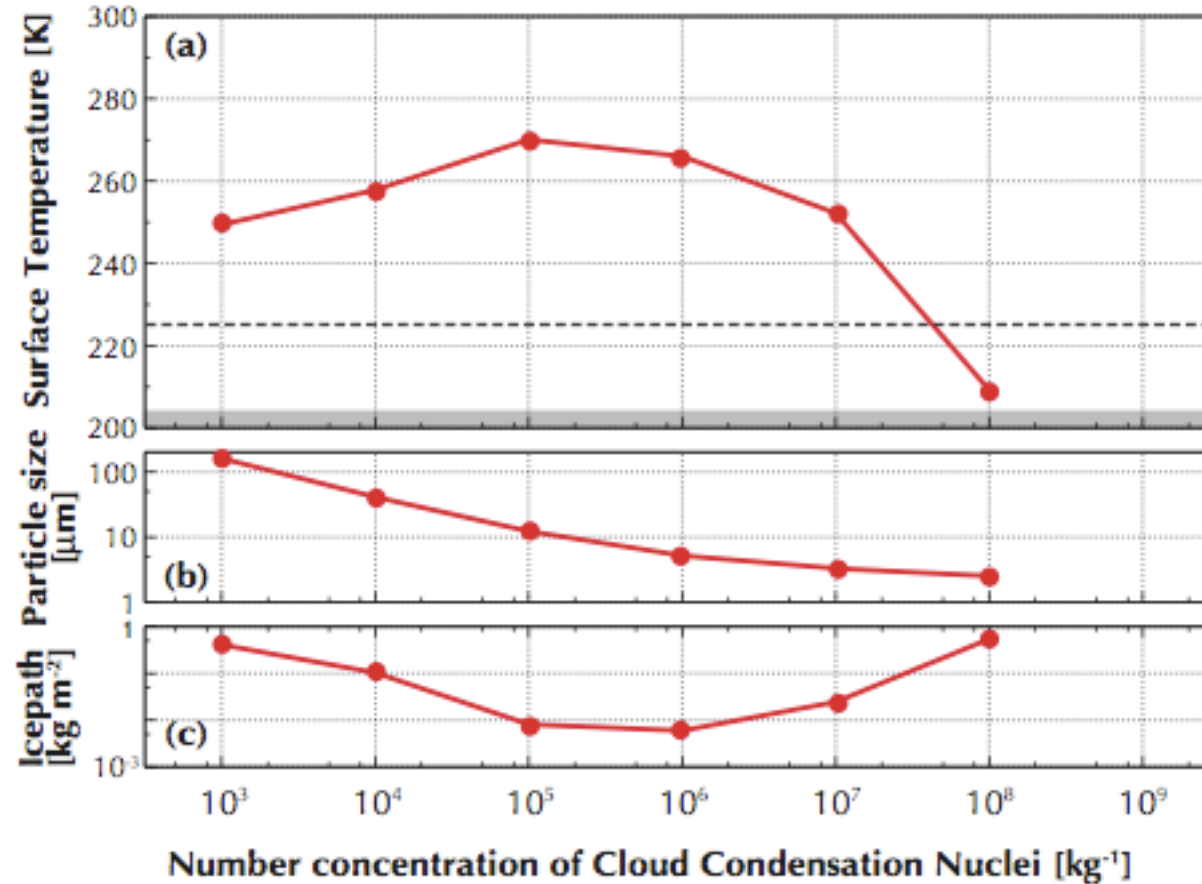


図 3.3 放射対流凝結平衡状態にある大気構造の凝結核数濃度への依存性。凝結核数濃度以外のパラメタは標準値を用いた。(a) は地表面温度, (b) は平均雲粒半径, (c) は雲氷量, (d) は落下による雲消失時間を示す。(a) での破線は雲の放射特性を無視した場合の地表面温度を示した。

10^5 : 選外放射の選択的な後方散乱が起こる。

$<10^5$: 散乱温室効果があまり生じず, $>10^5$: 太陽放射の後方散乱が増加。

7. 大気圧依存性

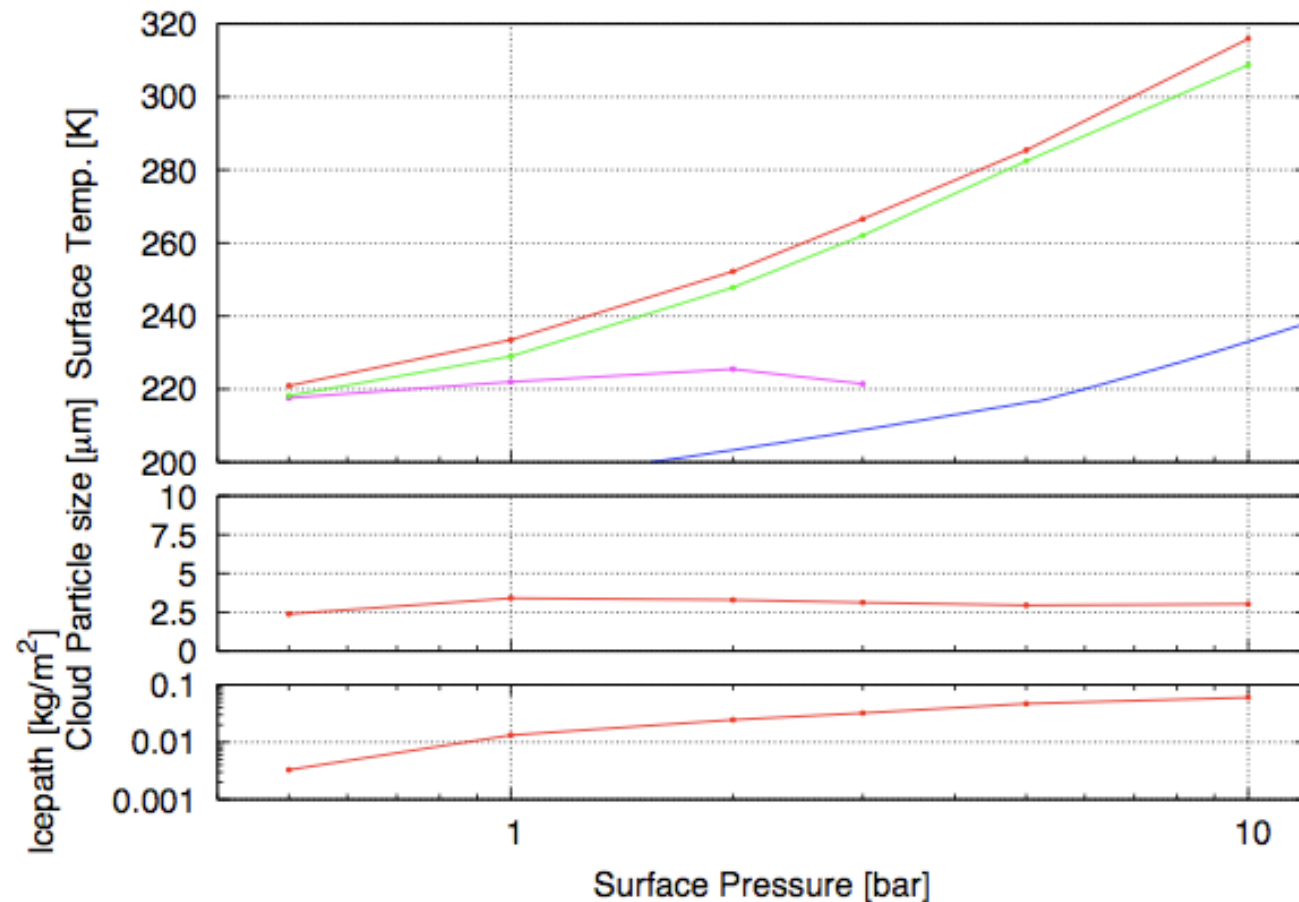


図 3.7 放射対流凝結平衡状態にある大気構造の大気圧依存性. 大気圧以外のパラメタは標準値を用いた. (a) は地表面温度であり, 赤線は雲を考慮した場合, 紫線は晴天大気での場合, 緑線は晴天大気において凝結層に放射冷却を打ち消す加熱を加えた場合の値である. 青線は二酸化炭素の飽和蒸気圧曲線である. (b) 雲粒平均粒径, (c) 雲柱密度である.

**10気圧では315Kに達する (放射平衡による温暖化が上昇の大部分を担).
雲粒半径は大気圧にほとんど依存せず. 対流圏の透過率も減少するため.**

7. 大気圧依存性

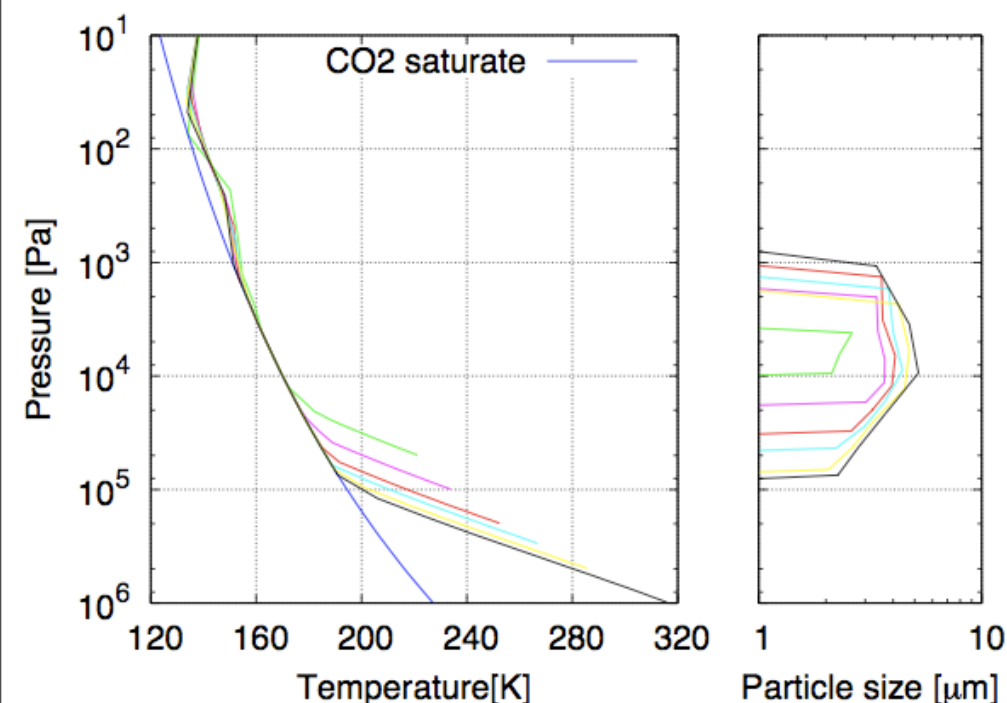


図 3.8 放射対流凝結平衡構造の大気圧依存性. 大気圧以外のパラメタは標準値を用いた. 各線はそれぞれ大気圧が異なり, 0.5 気圧 (緑), 1 気圧 (紫), 2 気圧 (赤), 3 気圧 (水色), 5 気圧 (黄), 10 気圧 (黒) の値を示している. 青線は二酸化炭素の飽和蒸気圧曲線である.

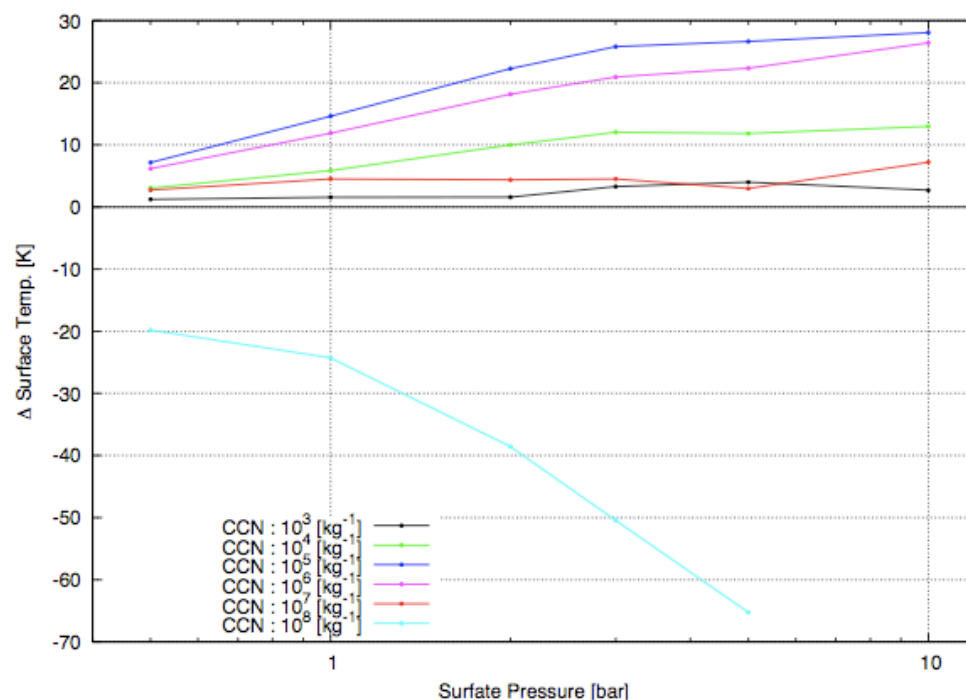


図 3.9 雲の赤外放射の後方散乱による温室効果の大気圧依存性. 各線はそれぞれ凝結核混合比が異なり, 10^3 kg^{-1} (黒), 10^4 kg^{-1} (緑), 10^5 kg^{-1} (青), 10^6 kg^{-1} (紫), 10^7 kg^{-1} (赤), 10^8 kg^{-1} (水色) の値を示している. 大気圧, 凝結核数濃度以外のパラメタは標準値を用いた.

雲柱密度は大気圧とともに増加, 光学的に厚くなり,
散乱温室効果も強まる.

8. 凝結層の対流安定性, 雲粒落下の影響

放射冷却による鉛直対流の励起と凝結の競合

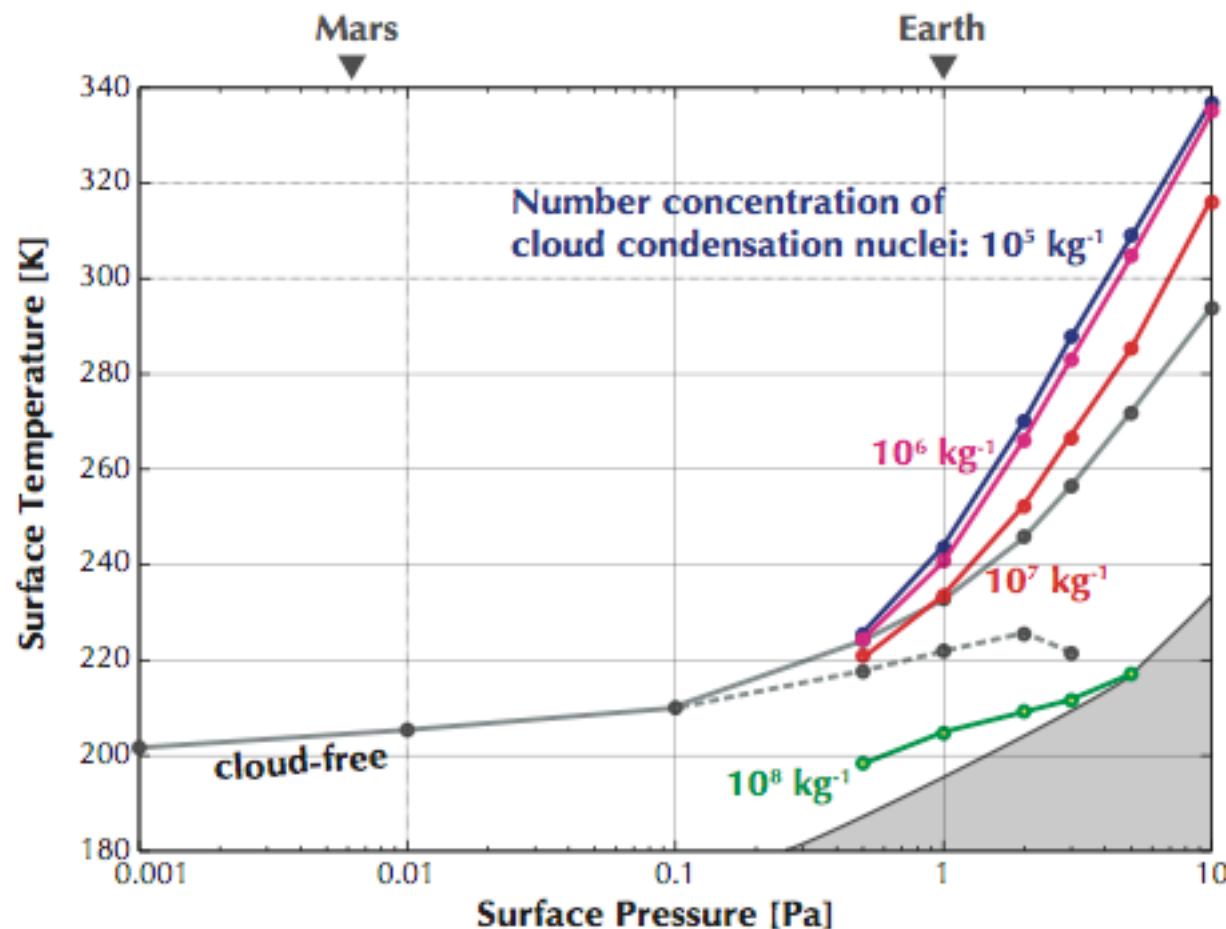
➡古火星の条件では凝結時間(200秒以下)は対流時間(10^4 秒)と比較して十分小さい.

雲粒落下の影響

➡古火星の条件で数気圧の大気全体の放射時定数は 10^7 -8秒, 凝結層が放射平衡を満たす構造が保たれる時間がこれ以上であればよい.

- 凝結層への凝結核の再供給がないとすると, 古火星条件では初期の凝結核が $\sim 10^7 \text{kg}^{-1}$ 以上. (10^8 を越えると反温室効果が生じる)
- 凝結核の再供給が持続的に起こり, 凝結層での凝結核数濃度が 10^5kg^{-1} 以上に保持されれば, 雲粒落下が生じつつも平衡状態へ, 温暖な気候をもたらす.

3. 古火星気候の温暖化 - 光田D論の結論



従来の散乱温室効果に加え、凝結層の放射平衡化による温室効果を考慮. 未知の多い凝結核パラメータを広範囲で検討.

● **3気圧**の二酸化炭素-水蒸気大気があれば地表面は液体の水が存在する温暖気候が説明可能に.

● 温暖な気候が生じるために必要な凝結核数濃度条件は 10^5-7 kg^{-1} .

図 3.13 雲を考慮した場合の地表面温度の大気圧依存性. 各線は凝結核数濃度が異なり、 10^{-5} kg^{-1} (青)、 10^{-6} kg^{-1} (紫)、 10^{-7} kg^{-1} (赤)、 10^{-8} kg^{-1} (緑) である. また、灰色の線は雲が存在しない場合の値を示しており、実線は Pollack *et al.* 1989 と同様に二酸化炭素の凝結を考慮しない場合、破線は Kasting 1991 と同様に凝結による熱構造の変化のみを考慮した場合 (晴天大気条件) である. 現在の地球および火星の大気圧を参考のために上に示した. 大気圧および凝結核数濃度以外のパラメータは標準値を用いた.

- Forget et al., DPS 2010 & - Wordsworth et al., PSS, 2010 の結論

- 厚い二酸化炭素大気中の放射伝達, 特に”collision-induced absorption in dense CO₂ atmosphere”の効果の重要性を指摘
- Line profileの取り方によって, 結果は大きく変化(右図).
- これまでのパラメータは温室効果の過大評価につながる恐れ.
- 大気圧**2bar以下**では年平均で0°Cを超える事は困難だが, 一時的に凝固点を越える事は可能.

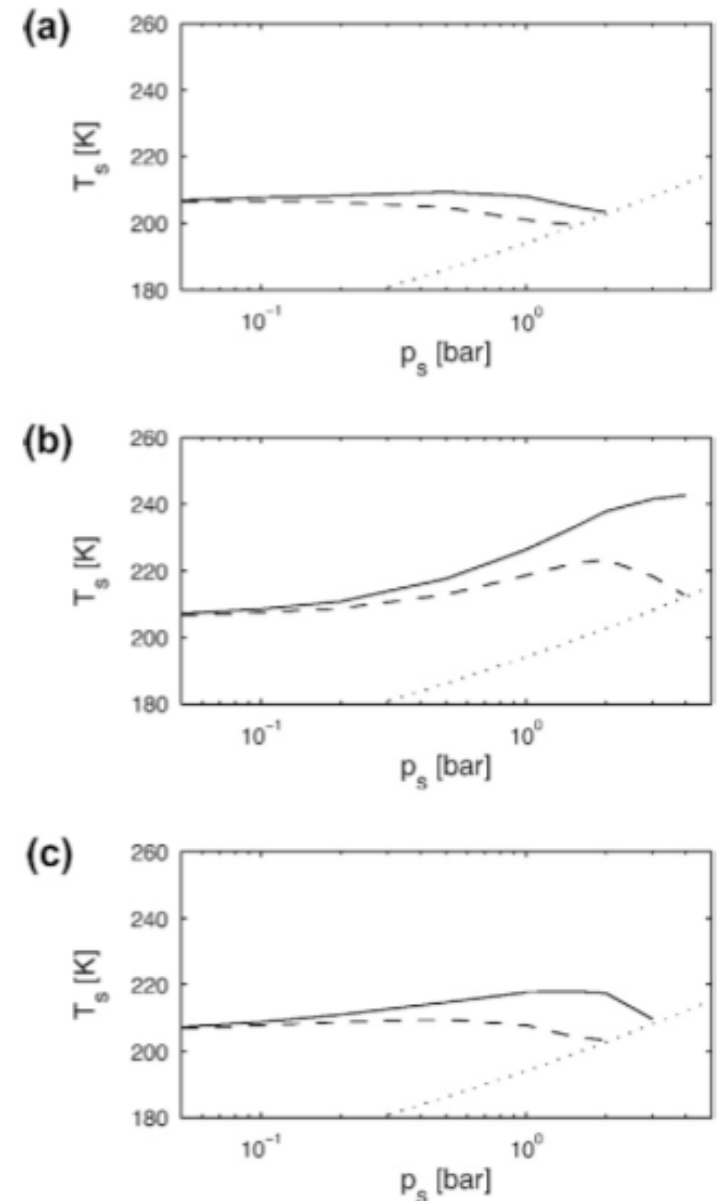


図1. 各パラメータ下における地表面圧力と温度. [Wordsworth et al., 2010]

- Wordsworth et al., Mars WS, 2011の結論

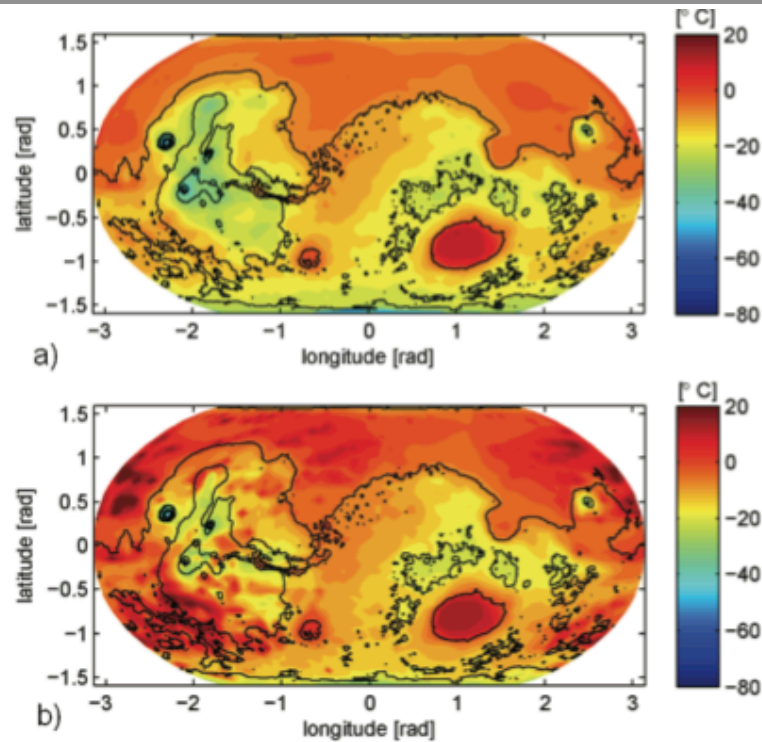


Figure 2: a) Annual mean and b) annual maximum temperature on a dry Mars with a 5-bar CO₂ atmosphere and 25° obliquity.

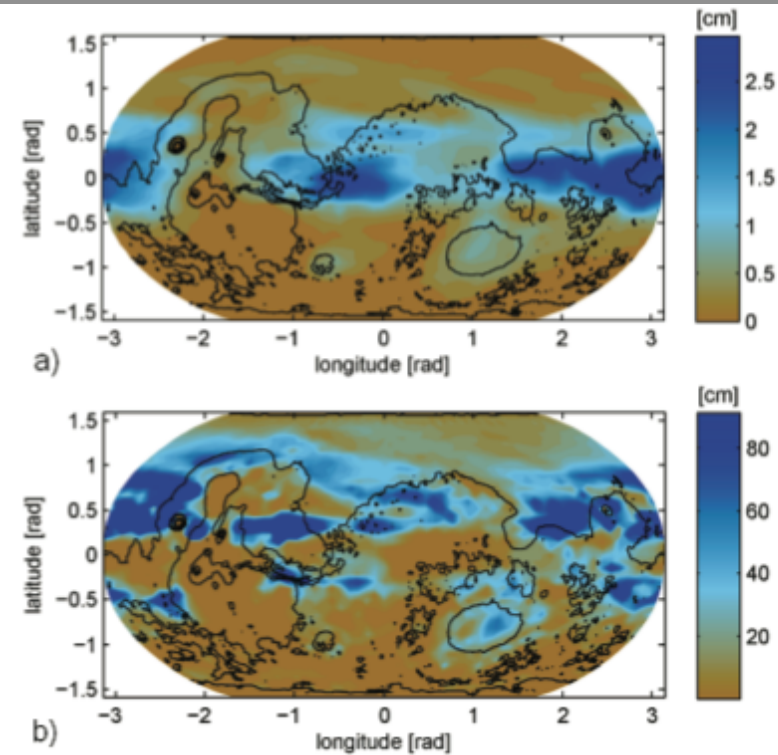


Figure 4: Warm, wet Mars. a) Annual mean water column amount and b) annual total rainfall after 5 years for a Mars simulation starting with a northern ocean, 5-bar CO₂ atmosphere, and 25° obliquity.

- 比較的安定な温暖湿潤気候が達成可能か(バレーネットワーク形成につながる降雨や北半球海化の可能性)およびその水循環の検討を目標に。
- **5bar**まで上げれば十分海ができる. 水蒸気の放射効果を入れればさらに温度上昇. 北半球に海が存在すれば赤道域のバレーネットワークも説明可能. 微視的物理・水循環素過程の検討ならびにダスト効果は今後の課題.

6. 結論

「古火星が温暖化するのに必要な大気条件とは？」CO₂大気散逸量を見積もる意義・インパクトを光田千尋さんD論等のレビューから探る.それぞれの結論は以下のとおりである.

- (光田D) **3気圧**の二酸化炭素-水蒸気大気があれば地表面は液体の水が存在する温暖気候が説明可能に. 特に二酸化炭素氷雲効果が重要.
- (Forget, DPS, 2010他) 二酸化炭素氷雲効果が重要だが, 2bar以下では年平均0°C以上に押し上げるのは困難. **2-5bar**で液体水達成可能.
- (Wordsworth, Mars Workshop, 2011) 2barでは難しいにしても**5bar**まで上げれば十分海ができる. 水蒸気の放射効果を入れればさらに温度上昇. ダスト効果は今後の課題.

(感想) 衝突によるLine profileの変化・それによる吸収の変化等が重要なのは誰でも知っているが, 古火星大気環境下での諸パラメータ検証は不可能なため不確定性は払拭できない?

7. 参考文献

- Colaprete, A., and O. B. Toon, Carbon dioxide clouds in an early dense Martian atmosphere, *J. Geophys. Res.*, **108**, E4, 5025, 2003.
- Colaprete, A., R. M. Haberle, and O. B. Toon, Formation of convective carbon dioxide clouds near the south pole of Mars, *J. Geophys. Res.*, **108**, E7, 5081, 2003.
- Forget, F., and R. T. Pierrehumbert, Warming early Mars with carbon dioxide clouds that scatter infrared radiation, *Science*, **278**, 1273, 1997.
- Haberle, R. M., D. Tyler, C. P. McKay, and W. L. Davis, A model for the evolution of CO₂ on Mars, *Icarus*, **109**, 102, 1994.
- Mishna, M. A., J. F. Kasting, and R. Freedman, Influence of carbon dioxide clouds on early Martian climate, *Icarus*, **145**, 546, 2000. Squyres, S. W., and J. F. Kasting, Early Mars: How warm and How wet?, *Science*, **265**, 744, 1994.
- Pierrehumbert, R. T., and C. Erlick, On the scattering greenhouse effect of CO₂ ice clouds, *J. Atmos. Sci.*, **55**, 1897, 1998.
- Pollack, J. B., J. F. Kasting, S. M. Richardson, and K. Polliakoff, The case for a wet, warm climate on early Mars, *Icarus*, **71**, 203, 1987.
- Sagan, C., and C. Chyba, The early faint Sun paradox: Organic shielding of ultraviolet-labile greenhouse gases, *Science*, **276**, 1217, 1997.
- Sagan, C., and G. Mullen, Earth and Mars: Evolution of atmospheres and surface temperatures, *Science*, **117**, 4043, 52, 1972.
- Wordsworth, R. D., F. Forget, V. Eymet, Infrared collision-induced and far-line absorption in dense CO₂ atmosphere, *Icarus*, **210**, 992, 2010.
- Wordsworth, R. D., F. Forget, E. Millour, J.-B. Madeleine, B. Charnay, and R. Haberle, Modeling the past Mars climate and water cycle with a thicker CO₂ atmosphere, *Fourth International workshop on the Mars Atmosphere: modeling and observations*, Feb. 8-11, 2011, Paris, France.

7. 参考文献

- Yokohata, T., M. Odaka, and K. Kuramoto, Role of H₂O and CO₂ ices in Martian climate changes, *Icarus*, **159**, 439, 2002.
- 北大 光田千紘さん博士論文 http://www.cosmo.sci.hokudai.ac.jp/~pplab/doc2008/mitsuda_D/mitsuda_D.pdf