

放射によって調節された二酸化炭素氷雲の 散乱温室効果：惑星質量への依存性

光田 千紘^{1*}, 横畠 徳太², 倉本 圭¹

1. 北大, 理, 宇宙理学 2, 国立環境研

2007/09/25 - 27

日本惑星科学会 2007 年秋季講演会 @ 高知大学朝倉キャンパス, 講演番号 P48

二酸化炭素氷雲の散乱温室効果は habitable zone 外側境界を広げる可能性を持つが, 惑星への依存性は調べられていない. 本研究では二酸化炭素氷雲による温室効果の温度構造の惑星質量依存性を二酸化炭素の凝結を考慮した次元放射対流凝結平衡モデルを用いて調べた. 重力加速度が大きい場合には温室効果が生じにくく, 大気圧 2 気圧の場合では月質量程度の惑星しか温暖な気候は再現されなかった. すなわち, 大きな惑星ほど温暖な気候を再現するためには高い大気圧が必要である.

生命の存在は普遍的か

◆ 惑星系の存在は普遍的

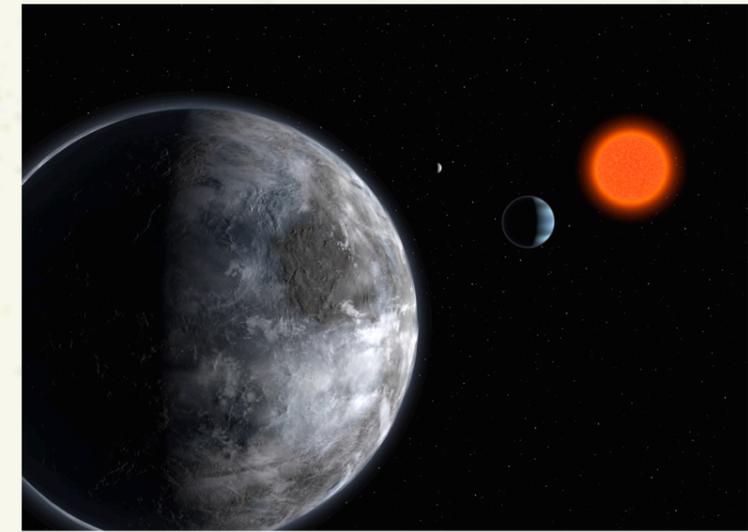
- ❖ 200 以上もの系外惑星系が発見
 - ◆ 5 地球質量? の惑星発見 (Udry et al. 2007)
- ❖ 惑星系形成論による予言 (Ida and Lin 2004)

◆ 地球型惑星 = habitable ?

- ❖ 現在は「habitable planets = 地表面で液体の水が存在可能な惑星」と定義して議論
 - ◆ 生命の誕生には液体の物質が必要

◆ Habitable Zone (Kasting et al. 1993)

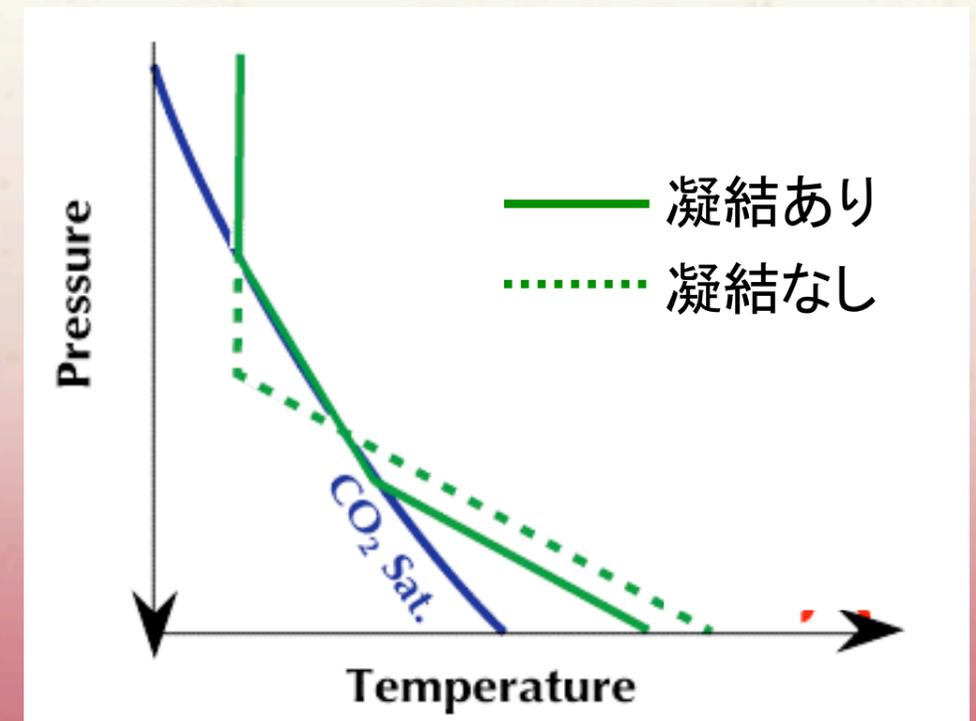
- ❖ Habitable planets が存在可能な軌道半径幅
- ❖ 内側境界: H_2O 散逸
- ❖ 外側境界: 大気中の CO_2 凝結
 - ◆ 対流圏上部での大気凝結による温度上昇は惑星を寒冷化
 - ◆ ただし, 雲の吸収/散乱の効果は無視



The Planetary System in Gliese 581
(Artist's Impression)
ESO Press Photo 22a/07 (25 April 2007)
This image is copyright © ESO. It is released in connection with an ESO press release and may be used by the press on the condition that the source is clearly indicated in the caption.

発見された巨大地球型惑星のイメージ図

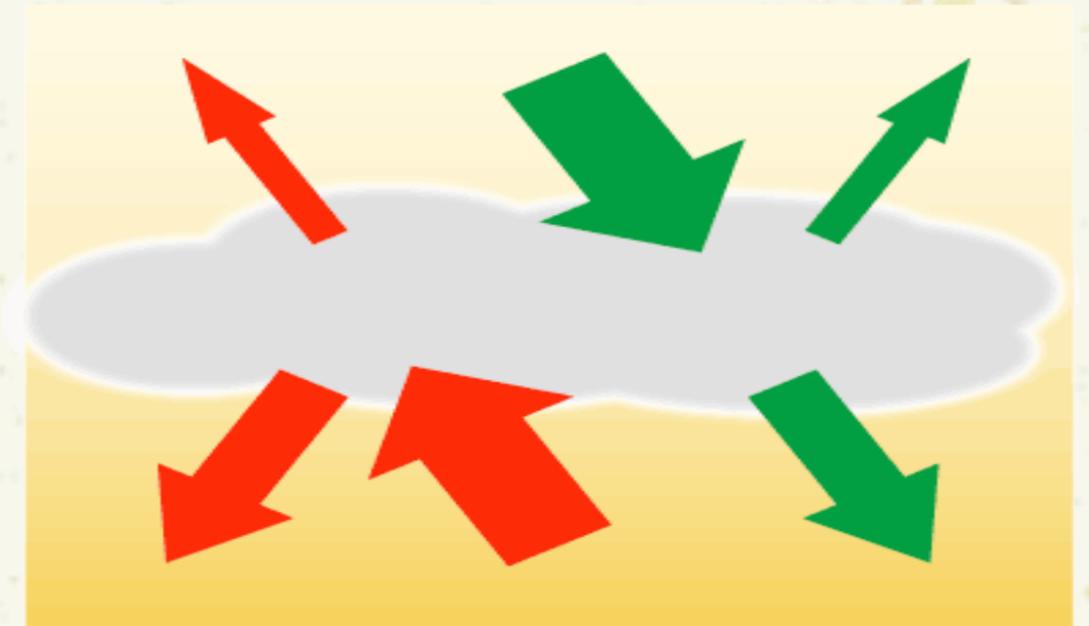
<http://www.eso.org/public/outreach/press-rel/pr-2007/images/phot-22a-07-fullres.jpg>



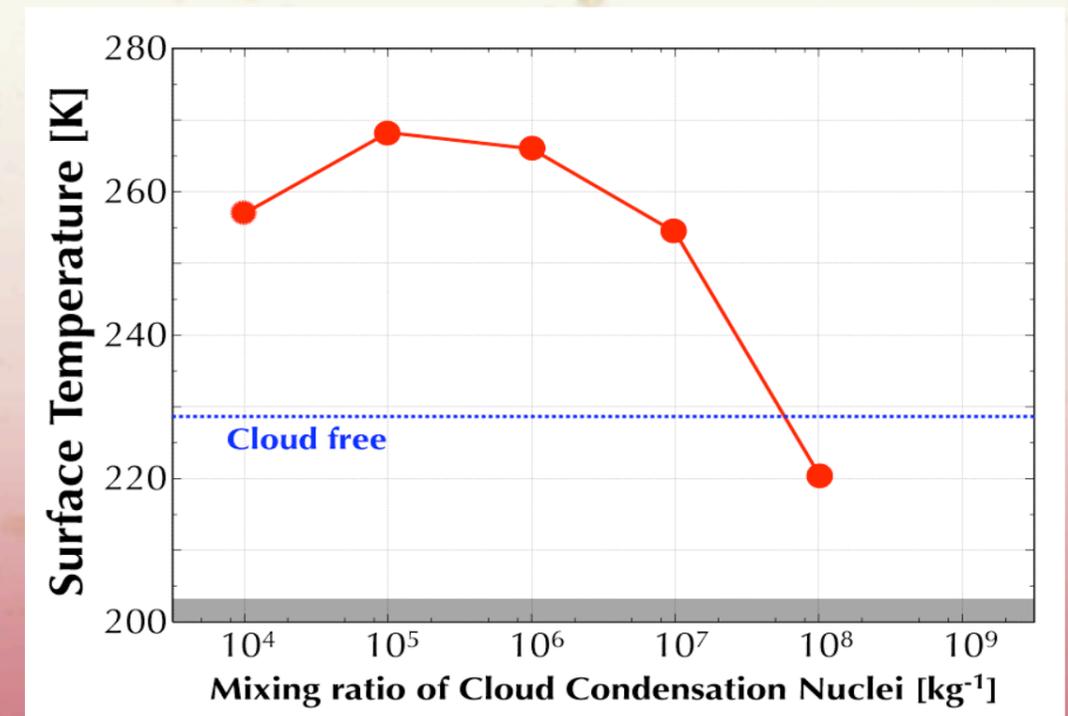
CO₂凝結による温度構造への影響

二酸化炭素氷雲の散乱温室効果

- ◆ Habitable Zone 外側境界を広げる機構
 - ❖ 雲による反射率が 赤外放射 > 太陽放射の場合に生じる, 散乱による温室効果
- ◆ 古火星温暖化機構の一つとして提案
(Forget and Pierrehumbert 1997)
 - ❖ 凝結核混合比が 10^6 - 10^7 kg^{-1} であれば温暖化が生じる (本研究, 連合大会)
 - ❖ ただし古火星条件(重力加速度, 惑星軌道...) でしか見積もられていない
- ◆ 火星以外の惑星でも散乱温室効果は生じるか?



散乱温室効果の模式図



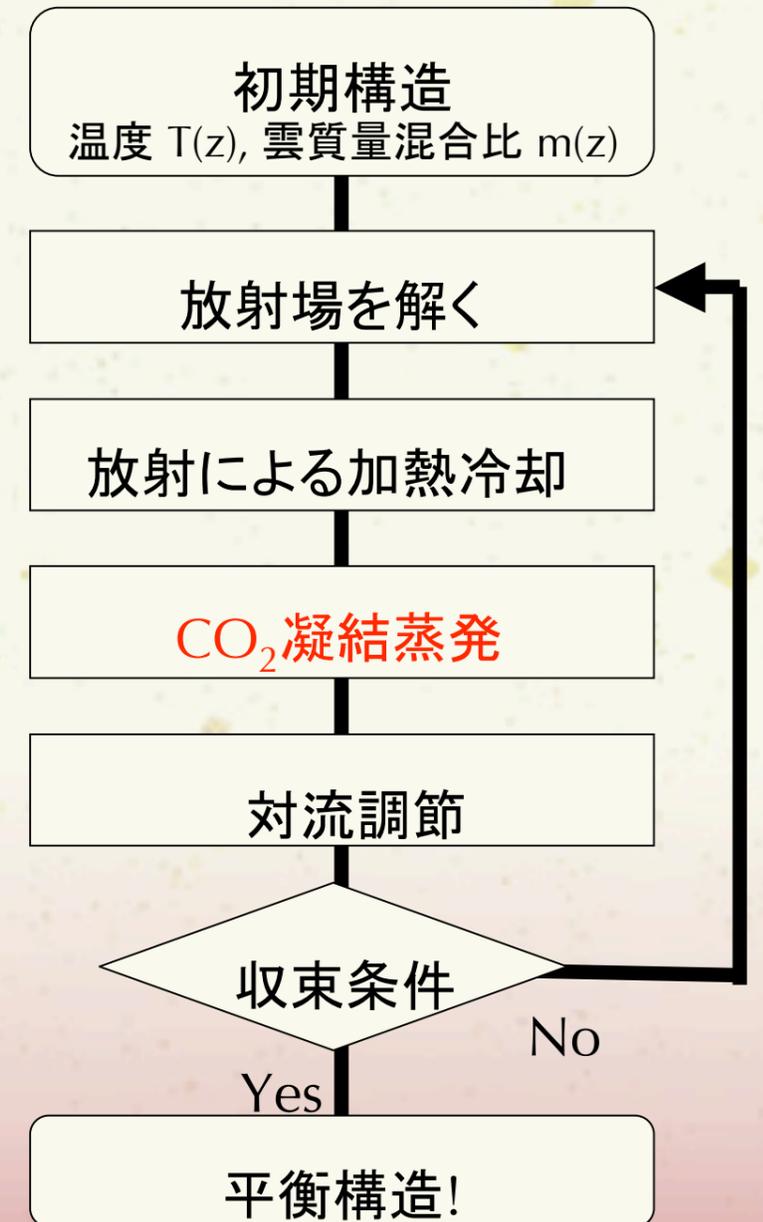
古火星条件での散乱温室効果の計算例,
大気圧 2 気圧の場合

本発表: 散乱温室効果の重力加速度 (惑星質量) 依存性を調べる

鉛直一次元放射対流凝結平衡モデル

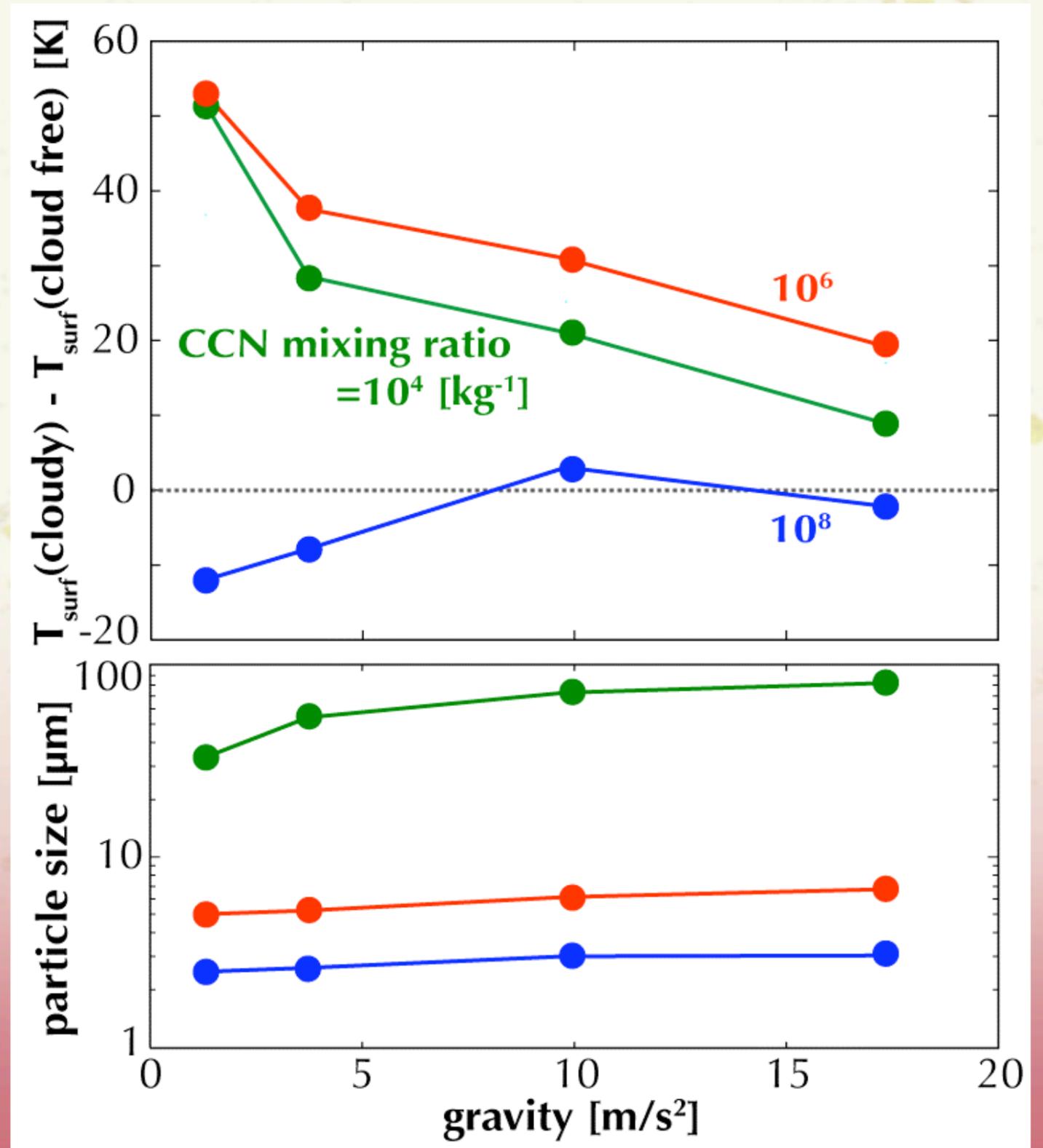
- ◆ 放射対流平衡かつ CO_2 気固平衡を満たす温度および雲粒径の鉛直構造を求める
- ◆ 仮定:
 - ❖ 雲層では CO_2 気固平衡 が常時成立, 過飽和は生じない
 - ❖ 雲粒の 落下速度 は十分小さい, 併合成長は考慮しない
 - ❖ 粒径は各層単一粒径を仮定して算出
- ◆ 大気成分: CO_2 , H_2O (飽和蒸気圧)
- ◆ パラメータ
 - ❖ 重力加速度: $1.29 - 17.35$ (5 地球質量) m/sec^2
 - ❖ 凝結核混合比: $10^4 - 10^9$ 個/大気1kg
- ◆ 大気圧 : 2 atm
- ◆ 太陽放射入射量: $0.75 \times$ 現在の火星軌道での値
- ◆ 放射伝達: 多重散乱を考慮した二方向近似 (Toon et al. 1989)
- ◆ 気体透過率: 相関 k 分布法
 - ❖ CO_2 : 線吸収, 圧力励起帯(Kasting et al. 1984), $15\mu\text{m}$ 帯 wing (Mitsuda et al. 2006)
 - ❖ H_2O : 線吸収, 連続吸収(Roberts et al. 1976)
- ◆ 雲光学係数: Mie 理論 (CO_2 ice 複素屈折率 : Warren 1986), 球形と仮定
- ◆ 鉛直解像度 25 層, タイムステップ: $10^2 \sim 10^4$ sec
- ◆ 収束条件: $dT/dt < 10^{-8}$ K/sec

-- 計算の流れ --



結果: 温室効果の重力加速度依存性

- ◆ 温室効果 or 反温室効果: 重力加速度にあまり依存しない
 - ❖ 雲粒径は重力加速度にほぼ独立
 - ◆ 粒径は気体の放射冷却率に依存
 - ◆ 放射冷却率は光学的に薄い波長域が支配的
= 雲層の温度が決定
- ◆ 重力加速度小: (反)温室効果強化
 - ❖ 大気の柱密度増
 - ◆ 光学的に厚い雲が形成
 - ❖ 厚い冷却層の消失



上) 雲の温室効果による地表面温度の上昇,
下) 雲の平均粒径の重力加速度依存性. それぞれの線の色は雲の凝結核混合比が異なる.

考察: 落下時間 vs 雲形成時間

◆ 落下による雲の消失時間の概算

雲層厚

雲粒の重力落下速度

(\sim 平均粒径雲粒のStokes 沈降速度)

◆ 雲落下時間 \propto 重力 $^{-2}$

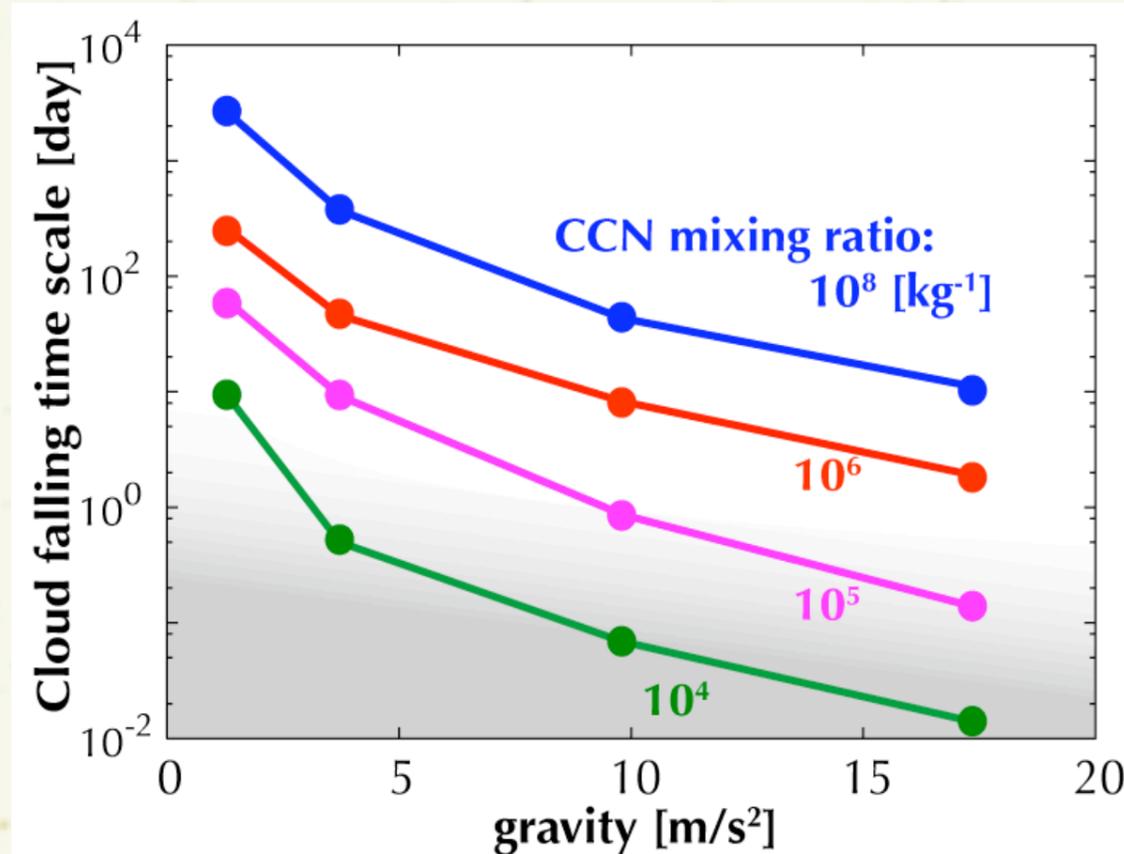
❖ 雲層厚 \propto 重力 $^{-1}$

❖ 落下速度 \propto 重力

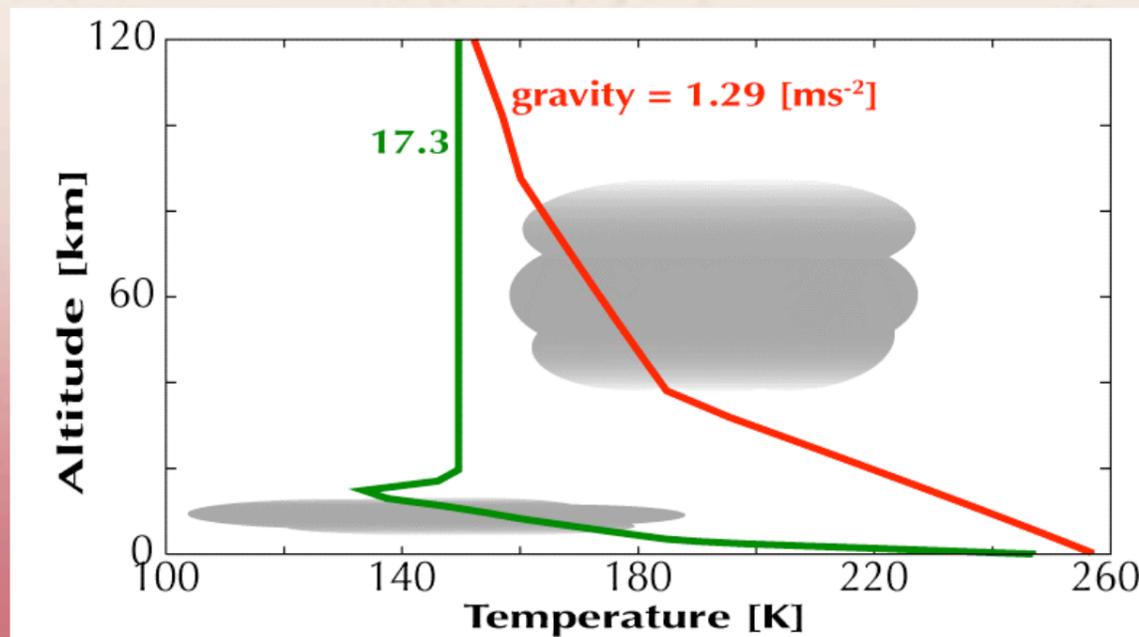
◆ 雲形成時間 \propto 重力 $^{-1}$

❖ 雲層の放射時定数 \propto 大気質量
 \propto 重力 $^{-1}$

重力加速度が大きいほど
雲は維持されにくい



雲の落下時間の重力加速度依存性。
線の色は雲凝結核混合比が異なる。

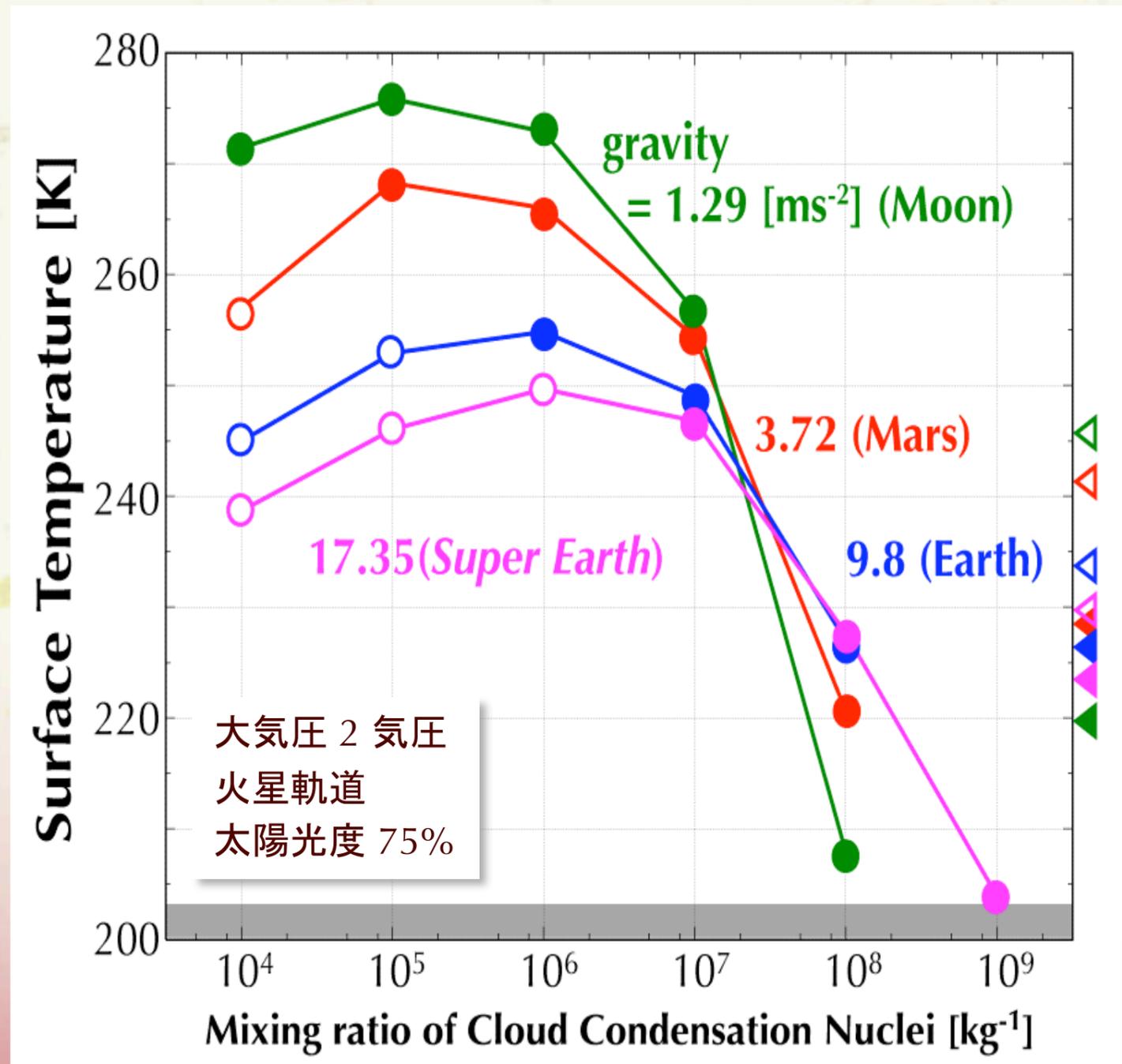


鉛直構造の重力加速度依存性。

地表面温度の重力加速度-凝結核混合比依存性

- ◆ 重力加速度が小さいと...
 - ❖ 小さな凝結核混合比で大気崩壊
 - ◆ 凝結核混合比 $> 10^9 \text{ kg}^{-1}$: 重力加速度が地球以下だと地表面凍結
 - ❖ 気候の変動が激しい可能性
- ◆ 大気圧 2 気圧では, 月サイズの惑星でしか温暖化できない.

重力加速度が大きいほど Habitable になるためには 高い大気圧が必要



地表面温度の雲凝結核混合比依存性. それぞれの線の色は重力加速度が異なる. 丸は計算点であり, 白抜きになっているものは落下による雲の消失が無視できない場合(雲形成時間より短い時間で雲が落下)である. 下部の灰色の領域は CO_2 の凝結が起きる範囲である. 参考として雲の光学特性を無視した場合および CO_2 凝結を無視した場合の値をそれぞれグラフ右の三角, 白三角にて示す.

まとめ

- ◆ 放射冷却によって形成される CO₂ 氷雲の鉛直構造とその散乱温室効果を様々な重力加速度を与えて見積もった.
- ◆ 雲粒径は重力加速度にあまり依存しない.
- ◆ 重力加速度が大きいと温暖な気候を得るためにはより高い大気圧が必要となる.
- ◆ 特に 5 地球質量の惑星の場合, 雲粒落下による対流圏冷却の効果が大きく, 温室効果が生じにくい可能性がある

参考文献

- ◆ Ida and Lin, 2004, *ApJ*, **604**, 388-413
- ◆ Kasting et al. 1984, *JAC*, **1**, 403-428
- ◆ Kasting, 1991, *Icarus*, **91**, 1-13
- ◆ Kasting et al., 1993, *Icarus*, **101**, 108-128
- ◆ Mitsuda et al., 2006, *Proceedings of the 39th ISAS Lunar and Planetary Symposium*, 128-131
- ◆ Pierrehumbert and Erlick, 1998, *JAS*, **55**, 1897-1903
- ◆ Robert, et al. 1976, *Appl. Opt.*, **15**, 2085-2090
- ◆ Toon et al., 1989, *J. Geophys. Res.*, **94**, 16287-16301
- ◆ Udry et al., 2007, The HARPS search for southern extra-solar planets. XI. Super-Earths (5 and 8 M_⊕) in a 3-planet system, *AA*, **469**, L43-L47
- ◆ Warren, 1986, *Appl. Opt.*, **25**, 2650-2674