

二酸化炭素氷雲による初期火星の温暖化：液体の水は存在可能か？

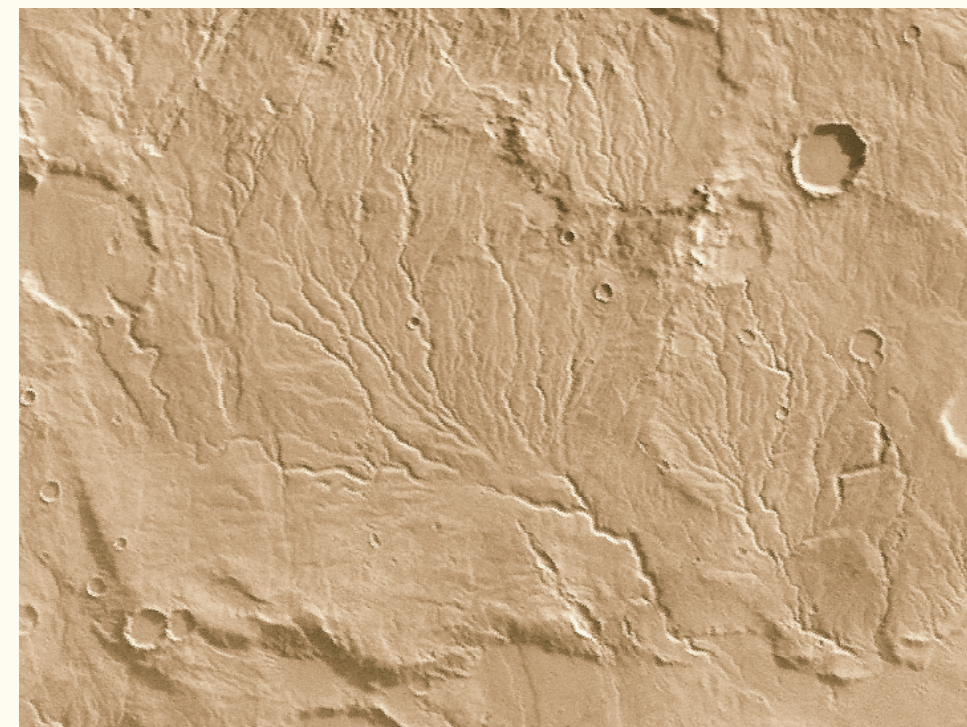
光田千紘 (北大・理・地球惑星), 横畠徳太 (国立環境研究所), 倉本圭 (北大・理・地球惑星)

chihiro@ep.sci.hokudai.ac.jp

1. 背景：火星版「暗い太陽のパラドックス」

現在の気候：乾燥寒冷

大気主成分：二酸化炭素
大気圧 0.006 atm, 地表面温度 216 K
液体の水が安定に存在できない



バレーネットワーク
地下水を含んだ土砂 / 水によって
形成された地形

38 億年前の気候：温暖湿潤？

大気主成分：二酸化炭素 (光化学的に安定)
バレーネットワークの存在：
液体の水が安定に存在できる程, 大気圧, 地表面温度は高い

昔, 太陽は暗かった。『暗い太陽のパラドックス』

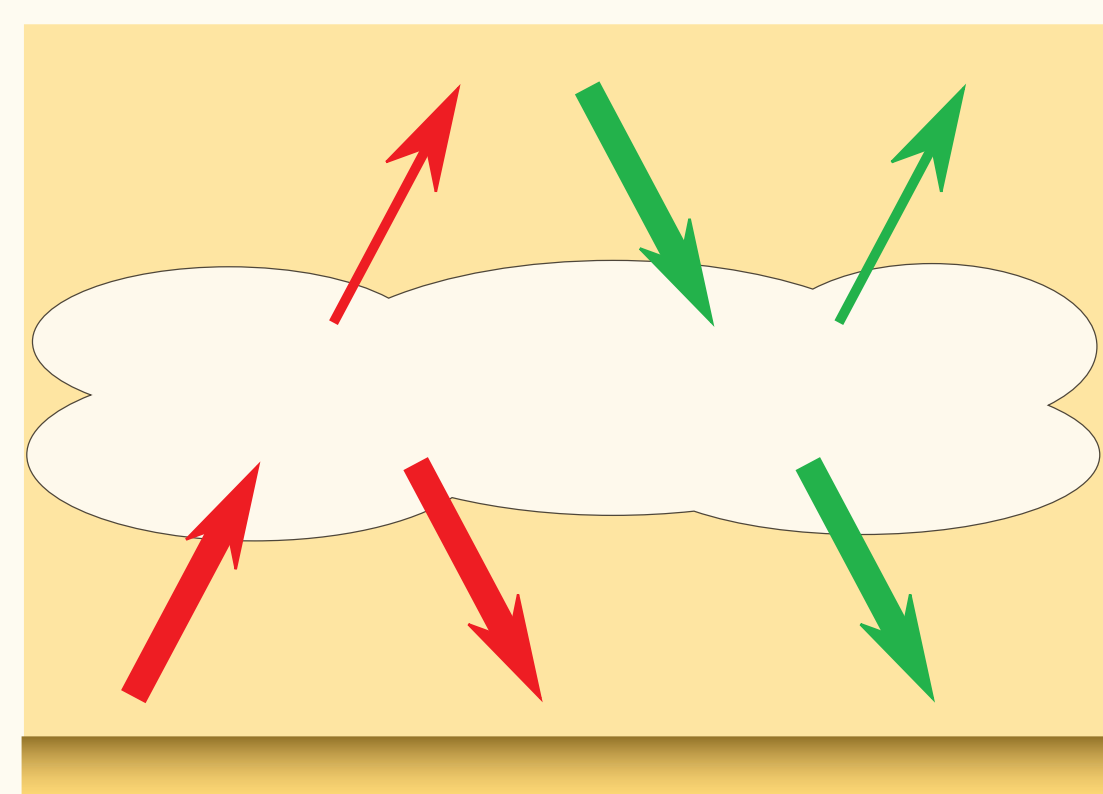
地球：二酸化炭素分圧が高かったとすると説明可能 (Kuhn and Kasting, 1983)

火星：保持できる大気量には上限が存在, 説明不可能 (Kasting, 1991)

- 鉛直一次元放射対流平衡モデル (二酸化炭素 - 水蒸気大気)
- 大気凝結による鉛直構造の変化を考慮 (凝結物の放射特性は無視)
- 上限以上の大気を持つと地表面凍結, 大気崩壊へ。

2. 二酸化炭素氷雲による散乱温室効果

Pierrefumbert and Erlick (1998)



雲が太陽放射を後方散乱するよりも赤外放射を強く後方散乱すれば, 温室効果が生じる

雲の散乱温室効果

雲粒の粒径が赤外放射を効率的に散乱する
10 ~ 20 μm であれば, 強い温室効果

従来の研究 (Mischna, et al 2002; Yokohata, et al, 2002; Colaperete and Toon, 2003)

- ・ 温室効果は強く雲パラメータ (雲面密度, 粒径) に依存
- ・ 適切な雲パラメータをもった場合には地表面温度 > 273 K

しかし

- ・ 地表面温度の粒径パラメータスタディは行われていない
- ・ 与えられた雲パラメータ値の実現可能性についてほとんど調べられていない。

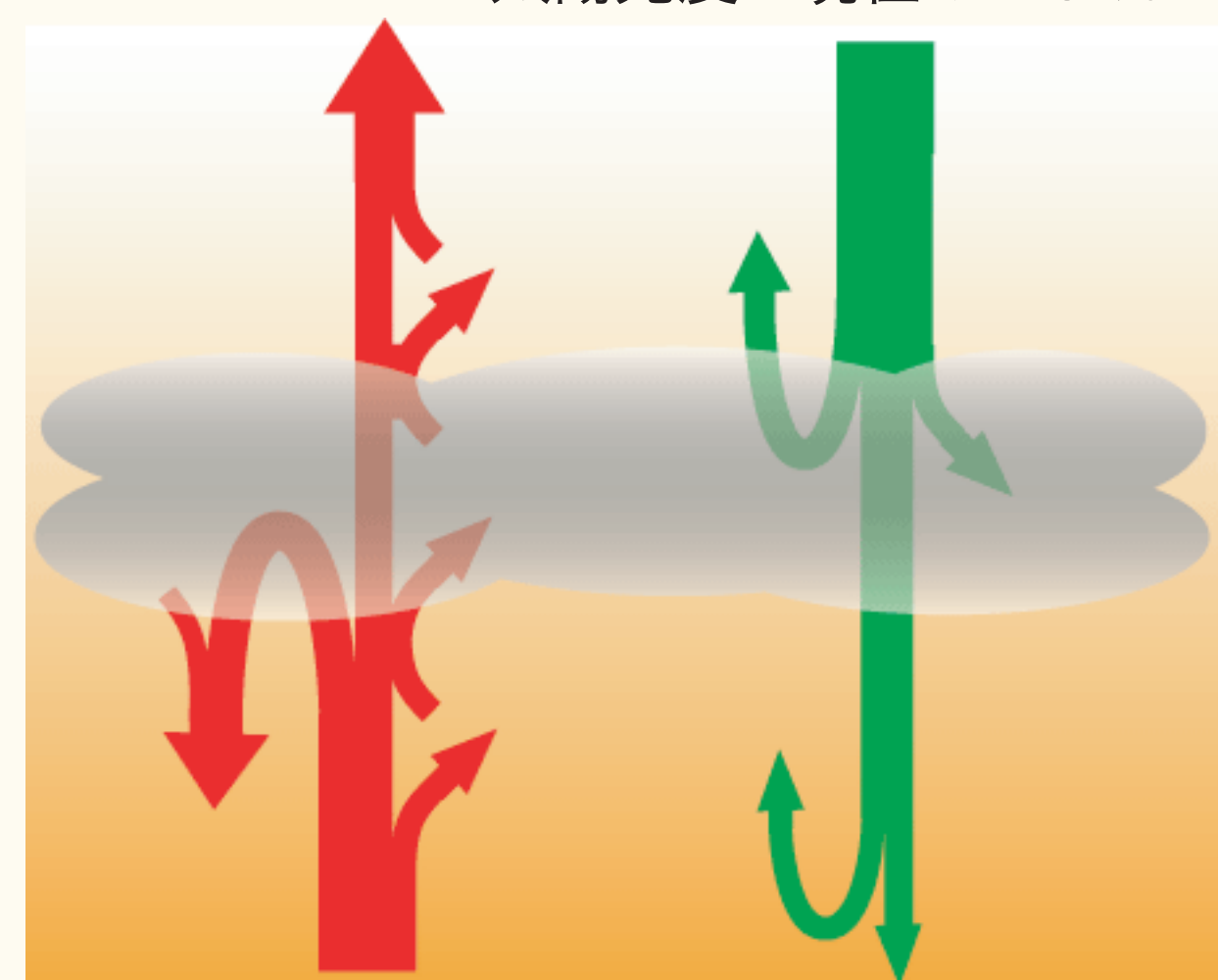
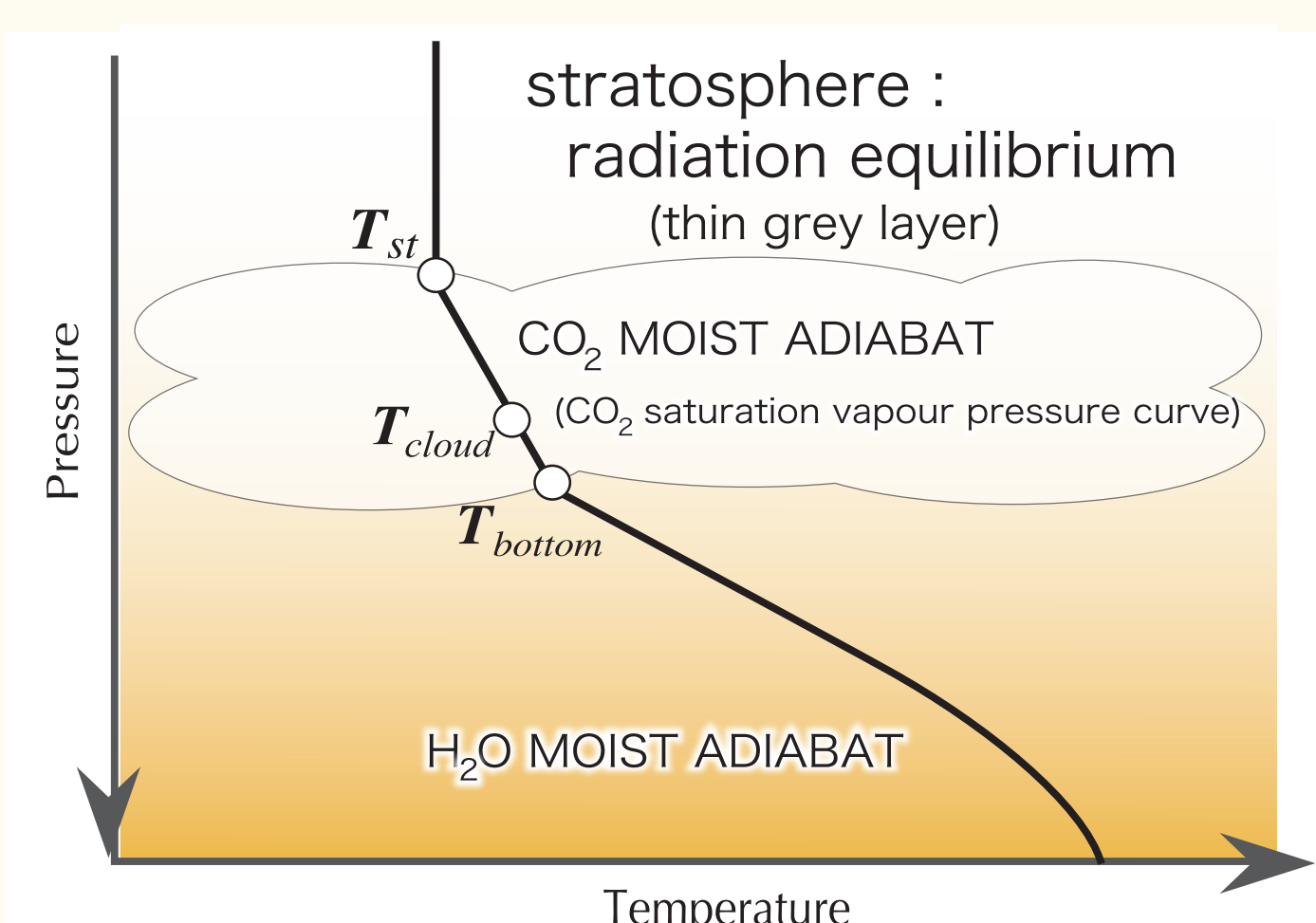
本研究の目的：

地表面温度の粒径パラメータスタディ
面密度および粒径値の推定

3. 鉛直温度構造と一次元放射モデル

大気成分 二酸化炭素, 水蒸気

太陽光度：現在の 75 %

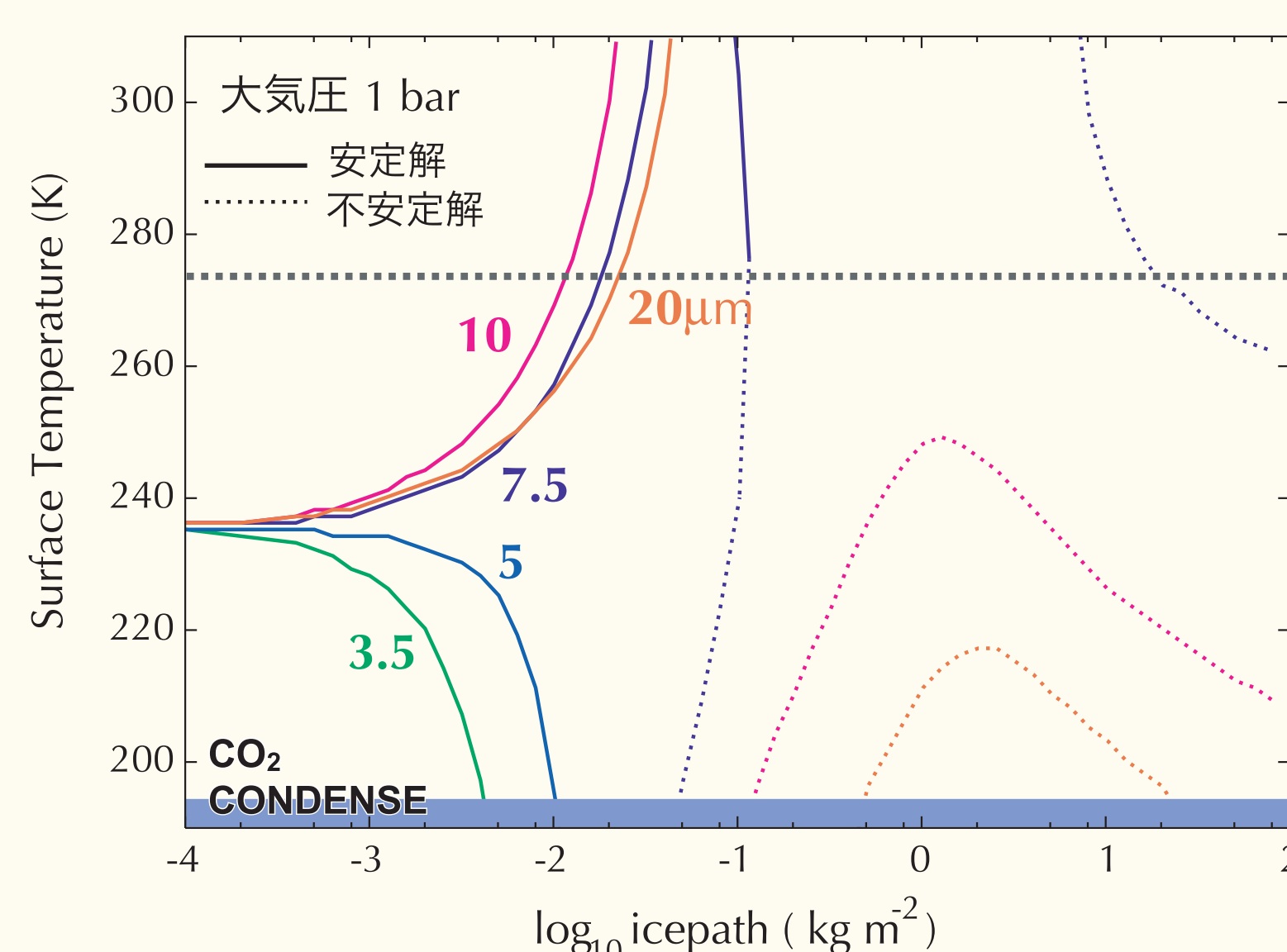


地表面アルベド：0.216

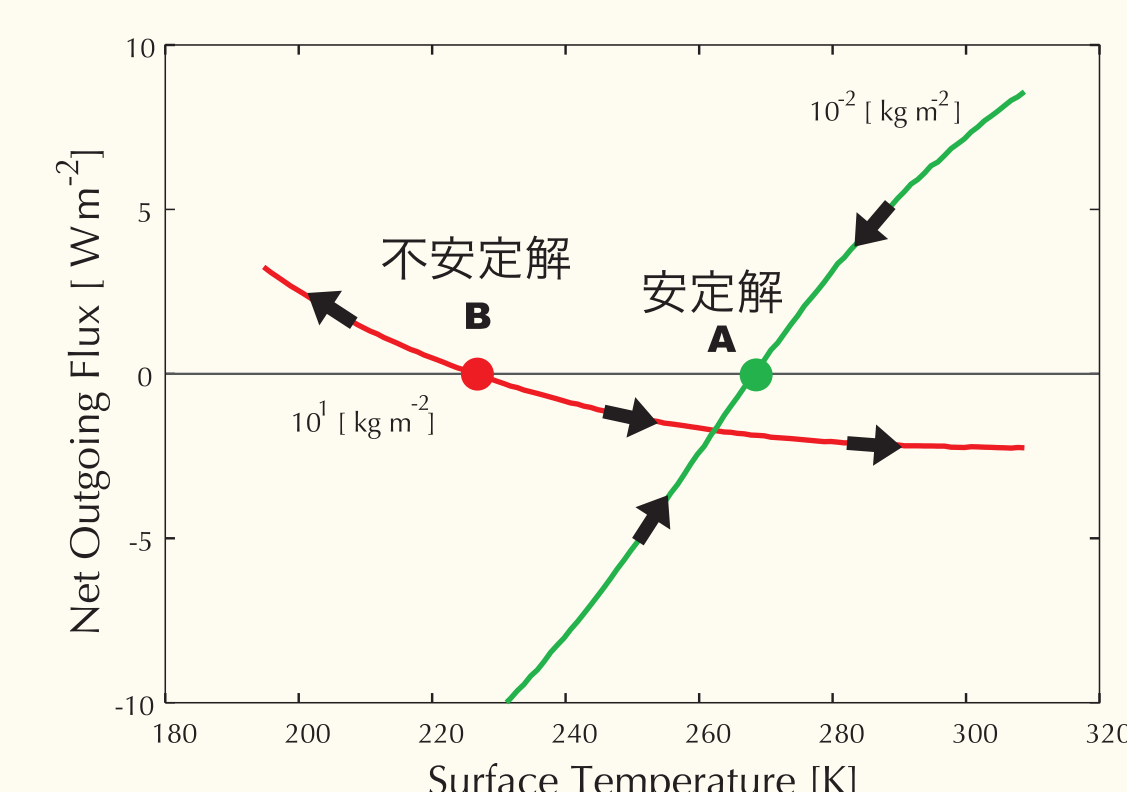
雲層：δエディントン近似
雲粒：ミー理論 (球形粒子を仮定)
CO₂氷の複素屈折率 (Warren, 1986)
大気：ランダムモデル
バンドパラメータ (Houghton, 2002)
大気層：二方向近似
line-by-line 法 (二酸化炭素, 水蒸気吸収)
吸収線パラメータ：(HITRAN 2000)

4. 結果と議論

4.1 平衡地表面温度 - 粒径依存性 -



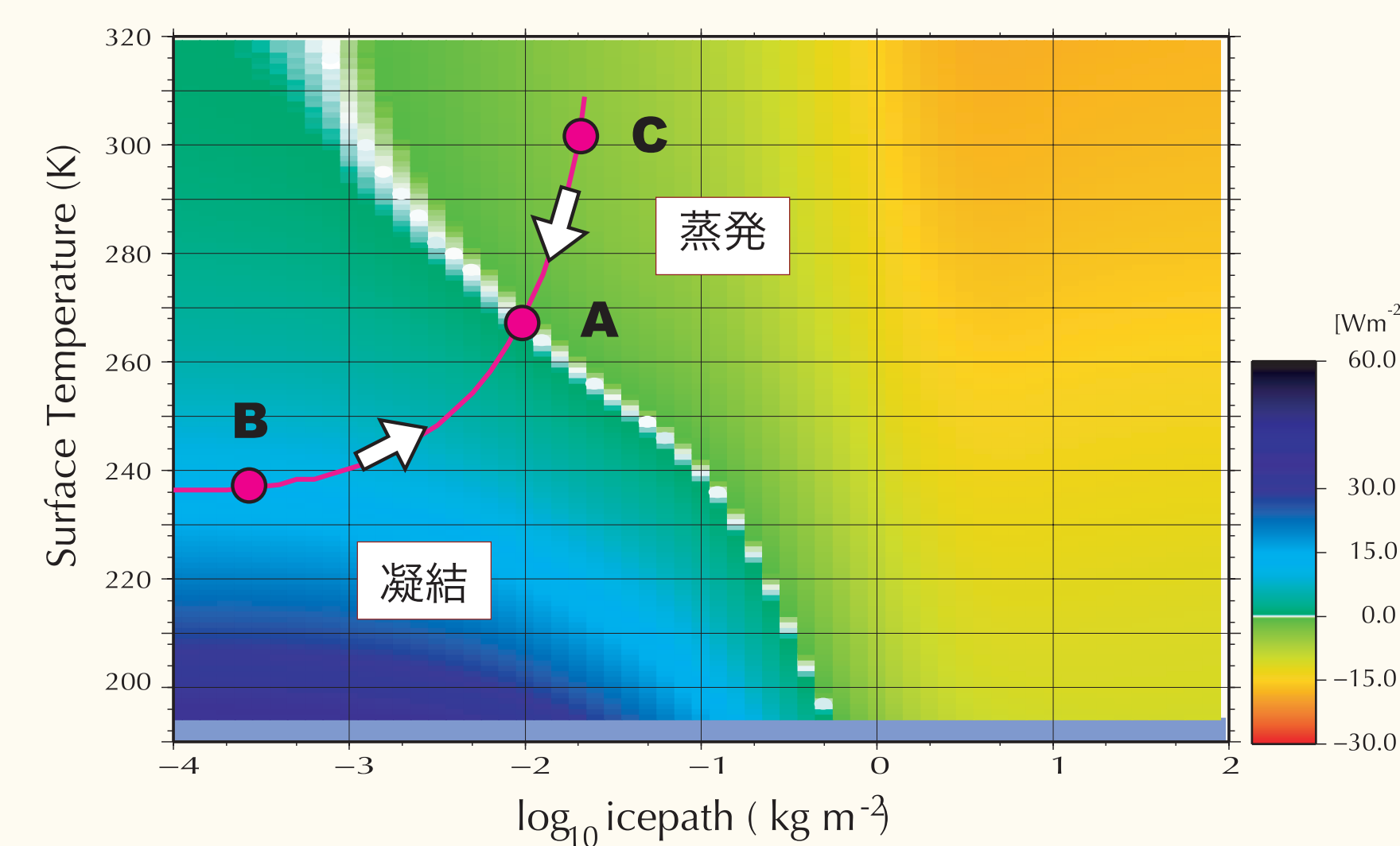
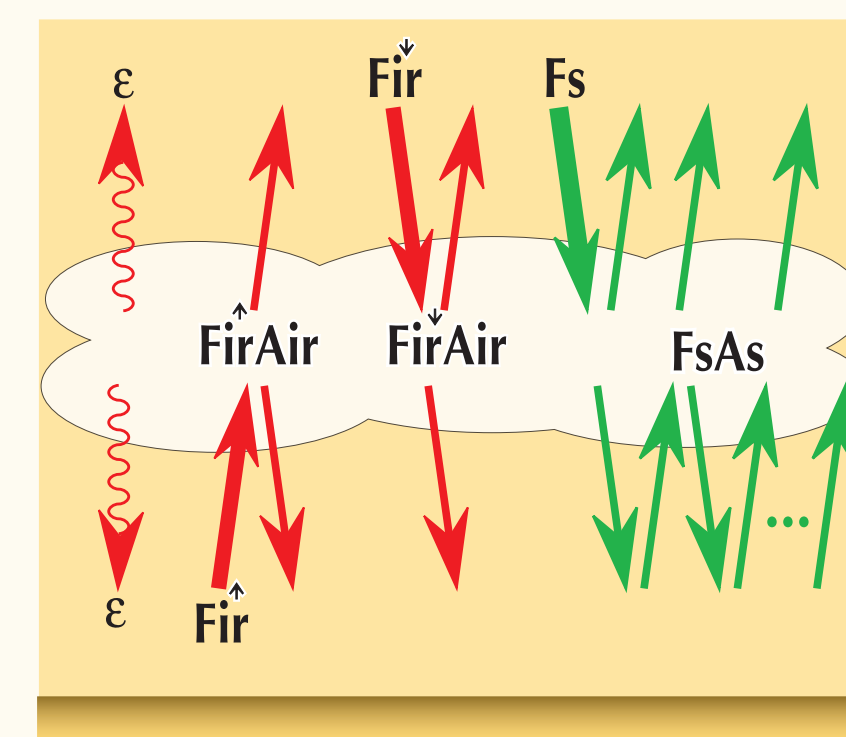
~ 5 μm : 反温室効果
7.5 μm ~ 20 μm : 温室効果,
面密度 > 10⁻¹ kg m⁻² で不安定解



4.2 凝結フラックス：大気凝結に使われるエネルギーフラックス

放射過程における
雲層の冷却エネルギーフラックス
||
雲の凝結フラックス

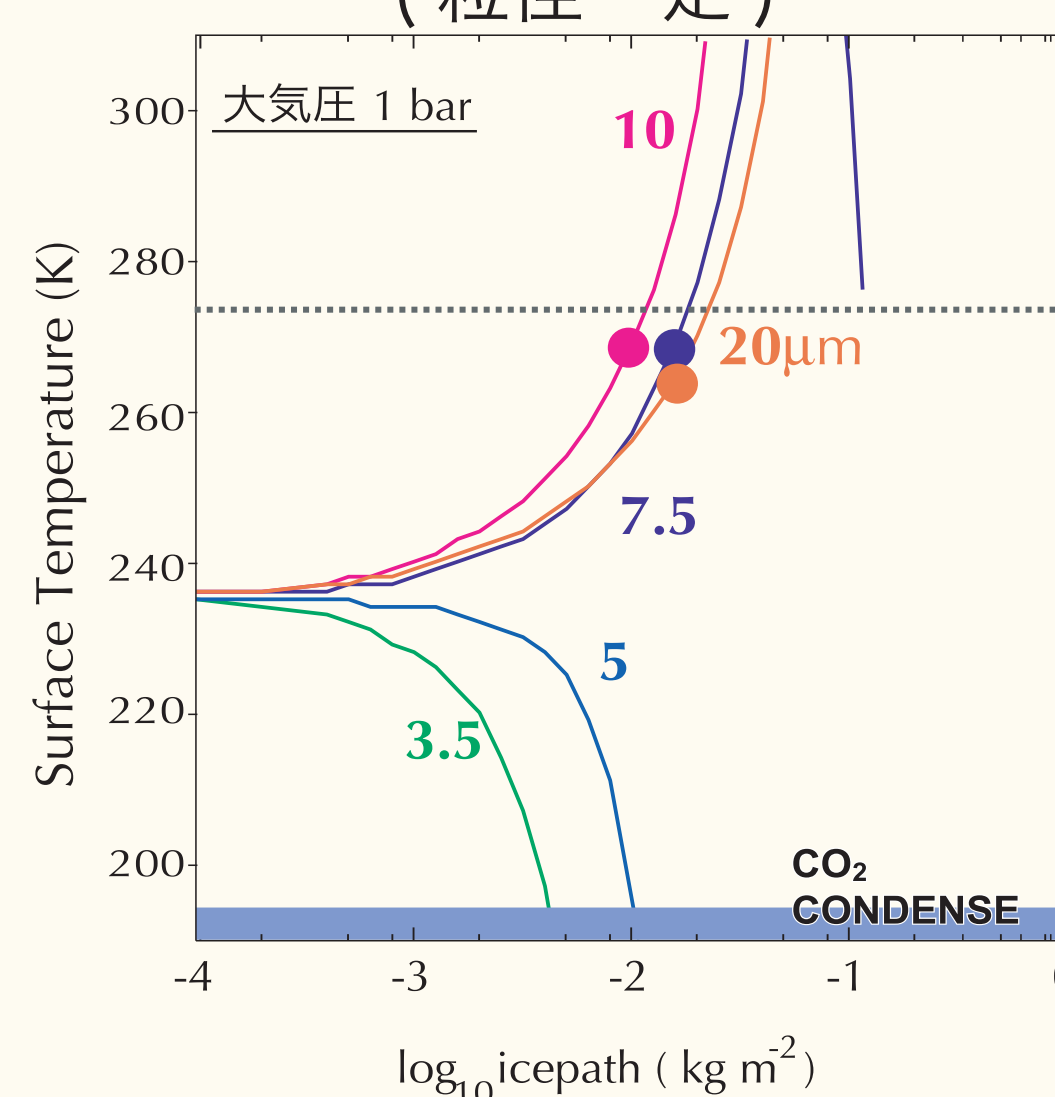
$$F_L = 2\epsilon - (\text{Fir} + \text{Fir}^*) \text{Air} - \text{FsAs}$$



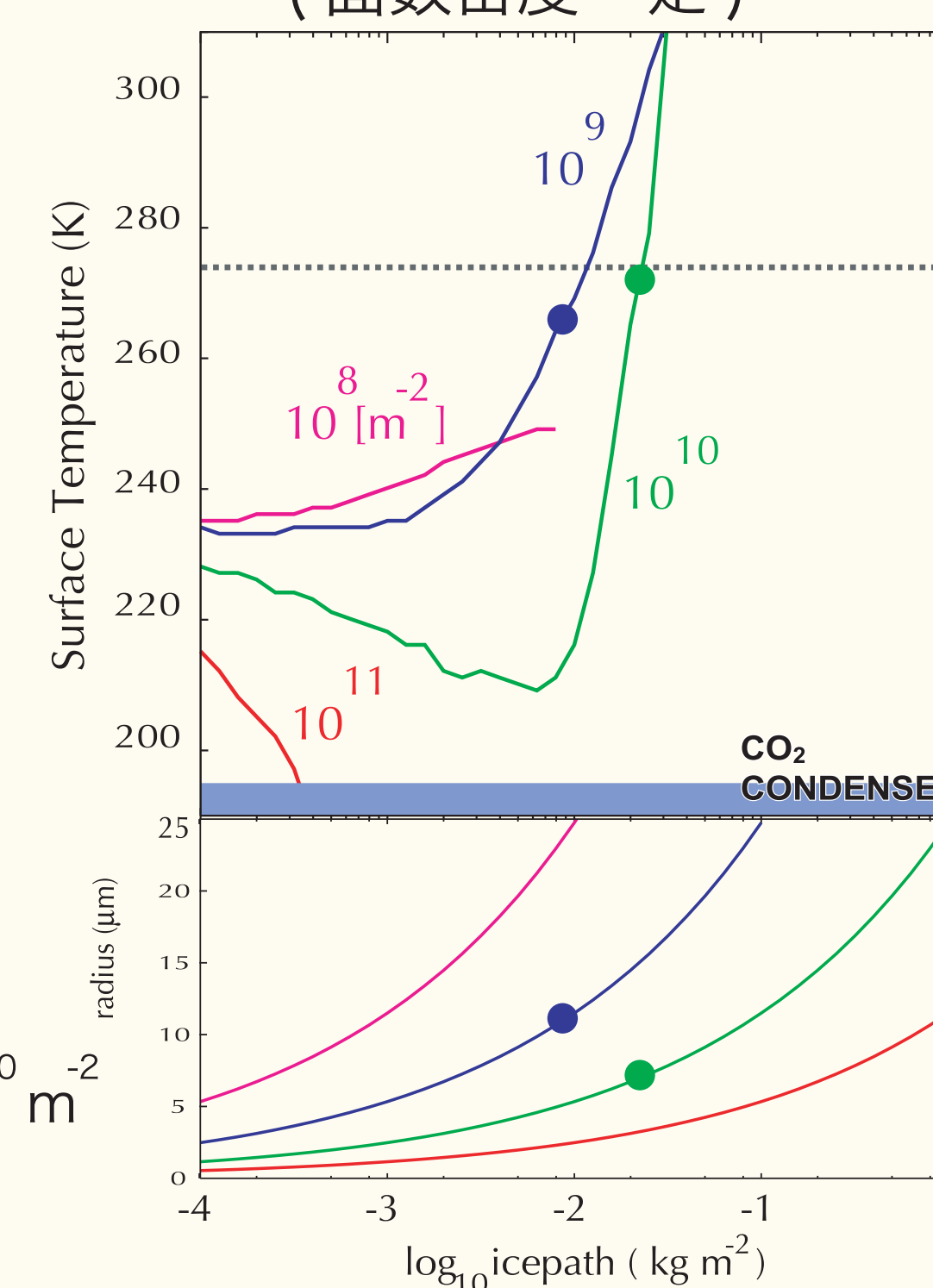
- ・ 地表面温度高, 面密度大で凝結フラックス減
- ・ A 点で蒸発と凝結の釣り合った平衡状態となる。
(ただし, ここでは凝結による粒径の変化は無視)
- ・ 面密度 - 凝結フラックスの負のフィードバック
- ・ 平衡点の面密度は粒径 (もしくは面数密度) に依存

4.3 凝結フラックスからの面密度および粒径の推定

1) 凝結による粒径変化を無視 (粒径一定)



2) 凝結による粒径変化を考慮 (面数密度一定)



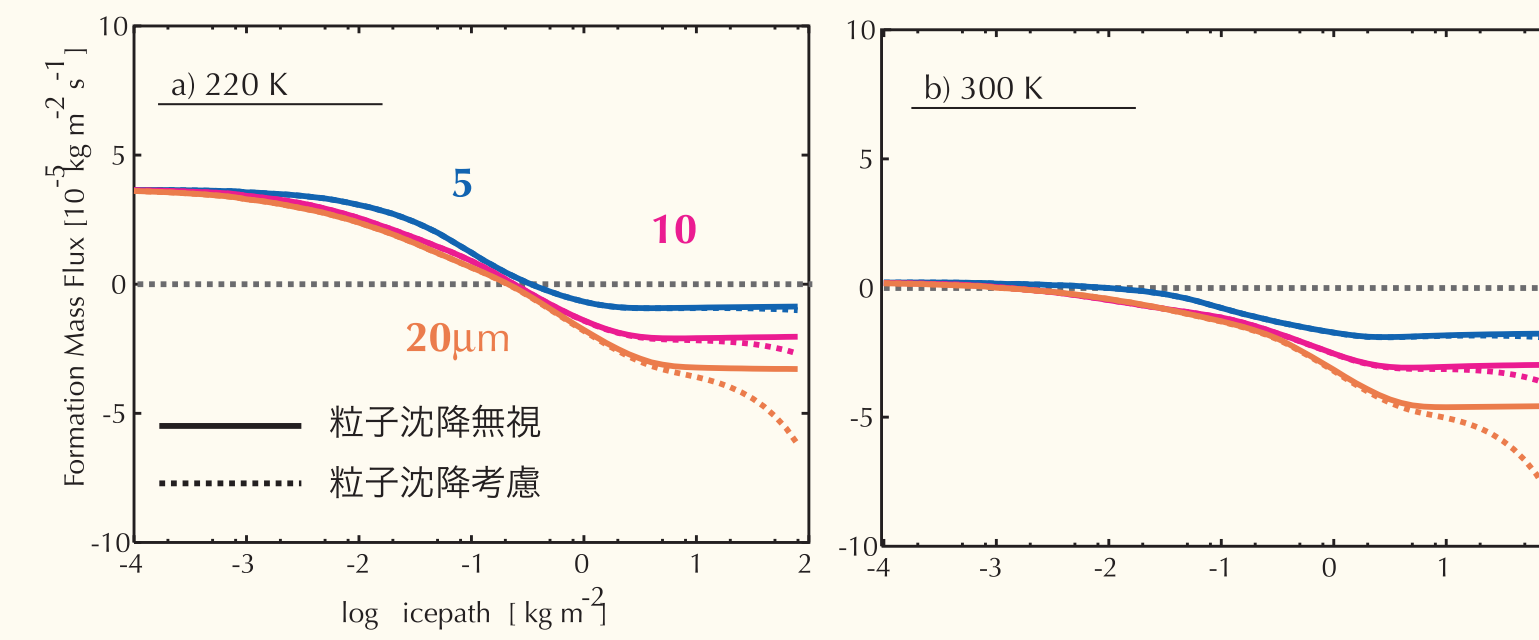
粒径 7.5 ~ 20 μm もしくは面数密度 10⁹ ~ 10¹⁰ m⁻²
地表面温度 ~ 270 K

4.4 粒子の沈降による面密度減少

Yokohata et al (2002) の見積もり

- ・ 雲粒の密度分布, 粒径分布は無視
- ・ 雲粒は雲層内をストークス沈降

粒子沈降を無視しても
面密度見積もりへの影響は小さい



5. まとめ

古火星を想定した二酸化炭素 - 水蒸気大気を仮定し, 鉛直一次元放射モデルを用いて散乱温室効果とその雲パラメータの推定を行った。

雲面密度 - 凝結フラックスは負のフィードバックの関係にあり, 気候を安定化させる。

- 粒径もしくは面数密度をの関数として面密度の推定が可能
- 大気圧 1 気圧では
+ 面密度 1.0 x 10⁻² kg m⁻² : (@ 粒径 10 μm) → 地表面温度 268 K
+ 面密度 2.0 x 10⁻² kg m⁻² : (@ 面数密度 10¹⁰ m⁻²) → 地表面温度 270 K
- 粒子の沈降による面密度減少の効果も考慮しても推定値は変わらない。

温暖湿潤な気候が再現される必要条件：

大気圧 1 気圧以上, 面数密度が 10⁹ ~ 10¹⁰ m⁻² 程度