



# 古火星大気の温暖化問題

光田 千紘(北大・理・宇宙理学)

chihiro@ep.sci.hokudai.ac.jp

2007/05/12 (Sat)

惑星大気研究会「火星研究の現状」  
国立オリンピック記念青少年総合センター

# 目次

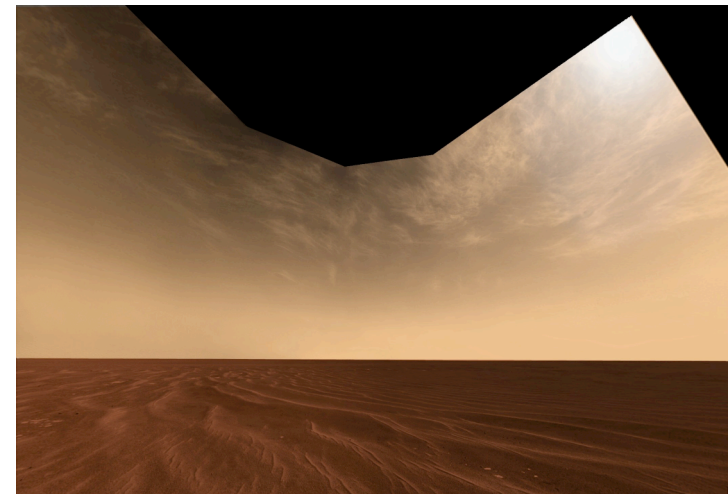
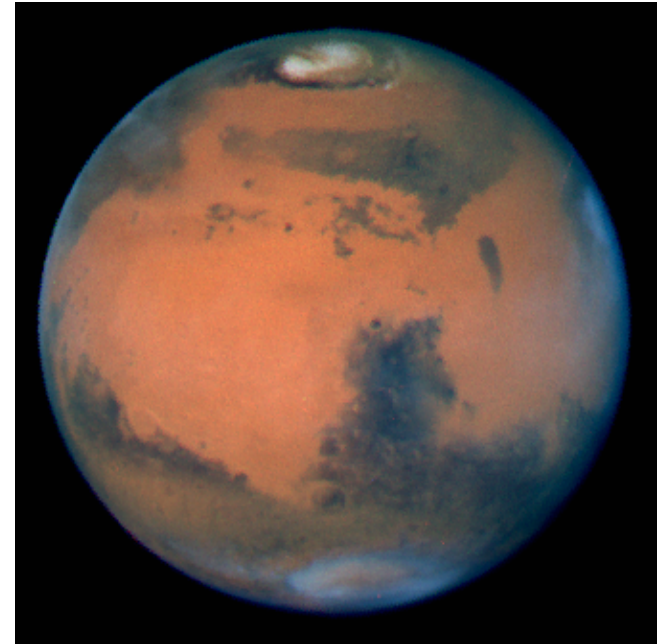
- **はじめに**
  - 生命の普遍性
  - 火星版暗い太陽のパラドックス
  - CO<sub>2</sub>-H<sub>2</sub>O大気による温室効果の限界
- **二酸化炭素氷雲による散乱温室効果**
  - 研究1 雲の放射強制力
  - 研究2 雲による温度構造の変化
- **雲パラメタの見積もり**
  - 研究1 放射対流凝結平衡モデルによる検討
  - 研究2 雲微物理モデルによる検討
  - 研究3 雲解像モデルによる検討
- **散乱温室効果研究 NEXT STEP**

# 生命の存在は普遍的か

- 惑星系は普遍的
  - 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 )
  - 地球型惑星の存在も普遍的であると期待できる
- 地球型惑星 = habitable ?
  - 液体の物質が必要 (候補:  $\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{NH}_3$ ,  $\text{CH}_4$ , ...)
    - $\text{H}_2\text{O}$  が最も有望(化学反応が進みやすい高温で液体)
- 太陽系内での地球型惑星における  $\text{H}_2\text{O}$  water の存在条件をまず押さえることが重要
  - 本発表はその 1 例として古火星を取りあげる

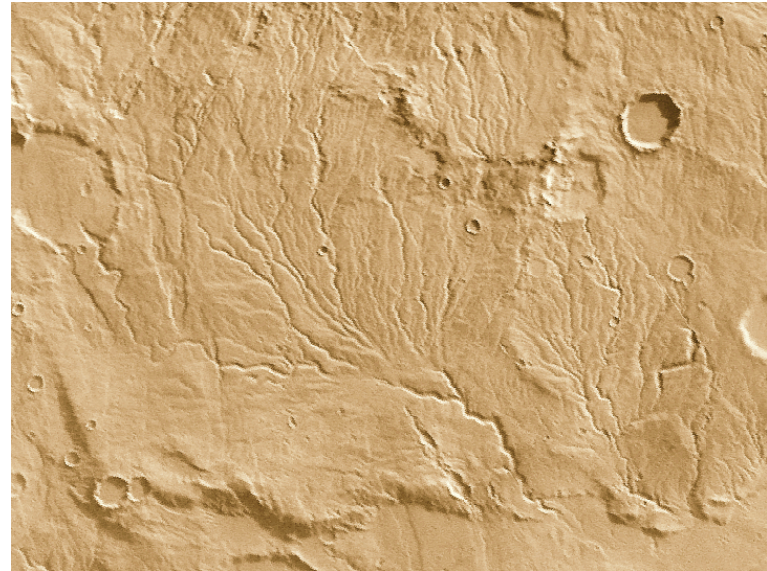
# 現在の火星環境

- 太陽放射入射：  
地球の 0.43 倍
- 有効放射温度：216 K
  - 地球: 256 K
- 大気成分：**CO<sub>2</sub>** (96%)
- 大気圧　　： 6 hPa
- 地表面温度：220 K
  - 赤道直下では 273 K まで上昇
- 乾燥寒冷な気候
  - **H<sub>2</sub>O water** は存在不可



# 地形が示唆する温暖な火星古気候

- 残存するクレーター
  - 水循環は不活発？
- バレーネットワーク
  - 数 100 km も続く谷地形
  - 形成には水が関連
    - 降水？
    - 地下水の流出？



Valley Networks

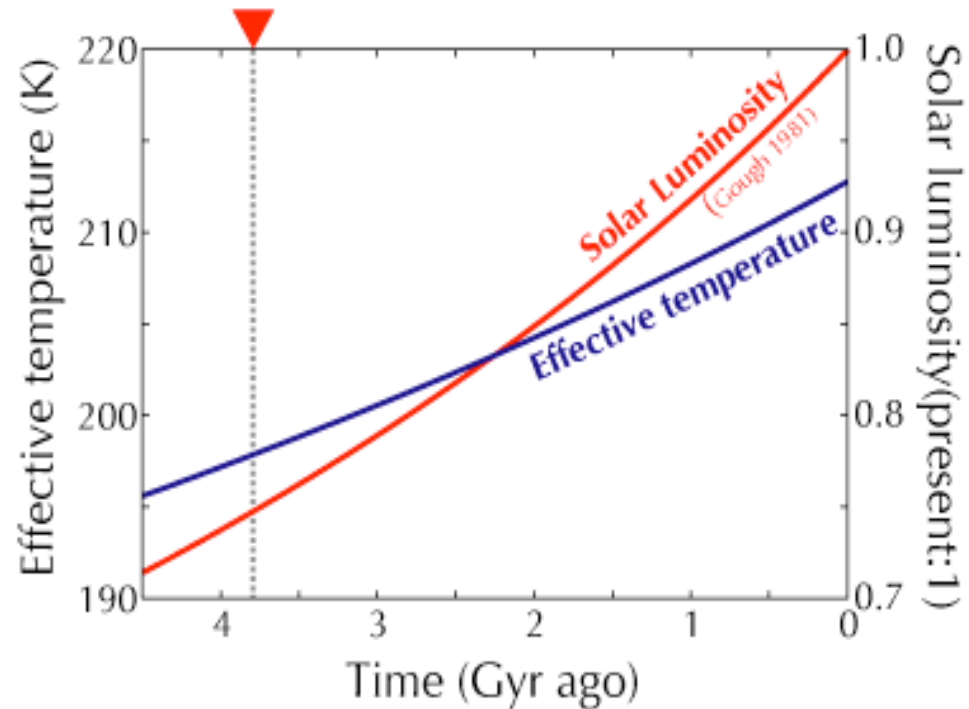
当時の気候は

\* 平常時は寒冷

\* ときには液体の水の存在を許容するほど温暖  
であったことを示唆

# 火星版 暗い太陽のパラドックス

- 当時の太陽光度  
現在の 75% 程度
  - 恒星進化の理論  
(Gough 1981)



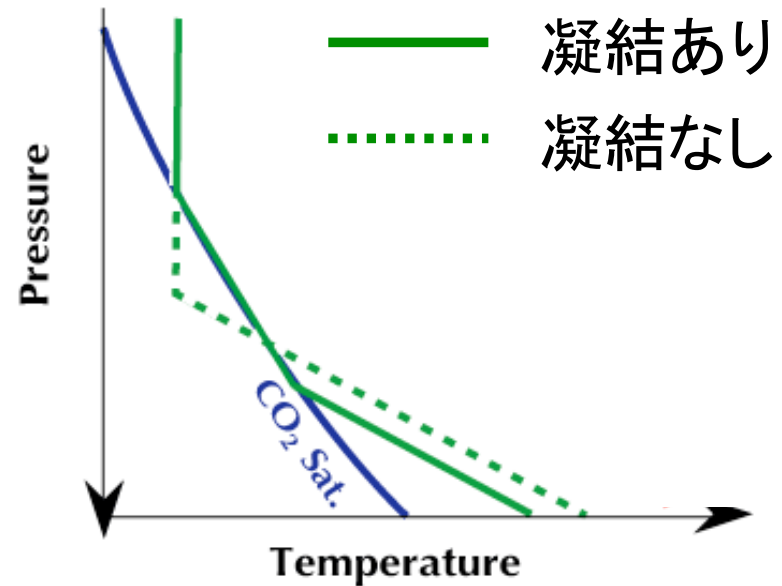
- 温暖湿潤な気候を得るためには、**75 K** もの温室効果が必要(惑星アルベド 0.216 の場合)
  - 参考 ) 現在の地球型惑星の温室効果
    - 火星: 2K, 地球: 30K, 金星: 520K

# 参考) 地球版 暗い太陽のパラドックス

- 暗い太陽の下でも海が存在していた？
  - 形成時に海の存在が必要となる岩石がおおよそ40億年前に形成
    - 堆積岩, 枕状溶岩
  - 現在と同程度の地表面温度が地球史の間、維持されていた可能性を示唆
- 当時,  $\text{CO}_2$  の分圧が高かった場合, 理論的に説明可能 (Kasting 1993)
  - 38億年前で1気圧

# CO<sub>2</sub>-H<sub>2</sub>O 大気による温室効果の限界 (Kasting 1991)

- CO<sub>2</sub> 凝結による温室効果の弱化
  - 潜熱加熱による対流圏上部の温度上昇
  - 地表面温度低下
- 最大地表面温度 230 K
  - 大気圧 2 気圧
- ただし, 雲の放射特性は無視
  - 凝結物はすぐ落下

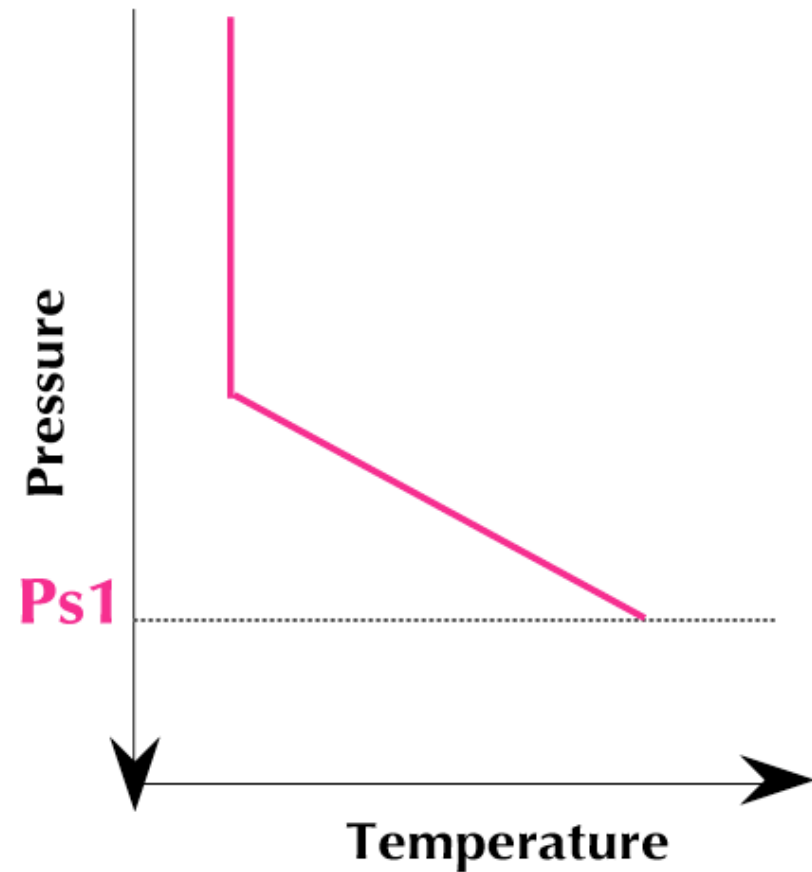


CO<sub>2</sub> 凝結が温度構造に与える影響の模式図



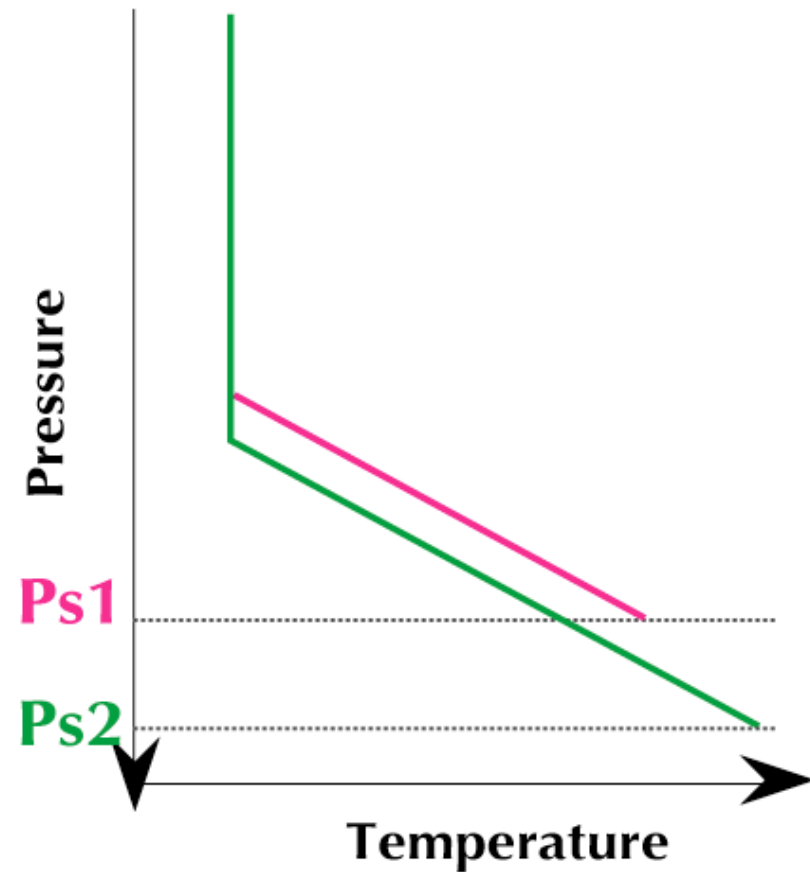
# CO<sub>2</sub> 凝結による鉛直構造の変化

- 大気構造
  - 成層圏; 放射平衡
  - 対流圏: 放射対流平衡
    - 対流中立になるように傾きが決まる
- 大気圧 ↑
  - 地表面温度 ↑
  - ある気圧での温度  $T(p)$  ↓
  - CO<sub>2</sub> 凝結
- CO<sub>2</sub> が凝結すると
  - 対流圏上部温度 ↑
  - 地表面, 対流圏温度 ↓
  - 更に CO<sub>2</sub> が凝結...



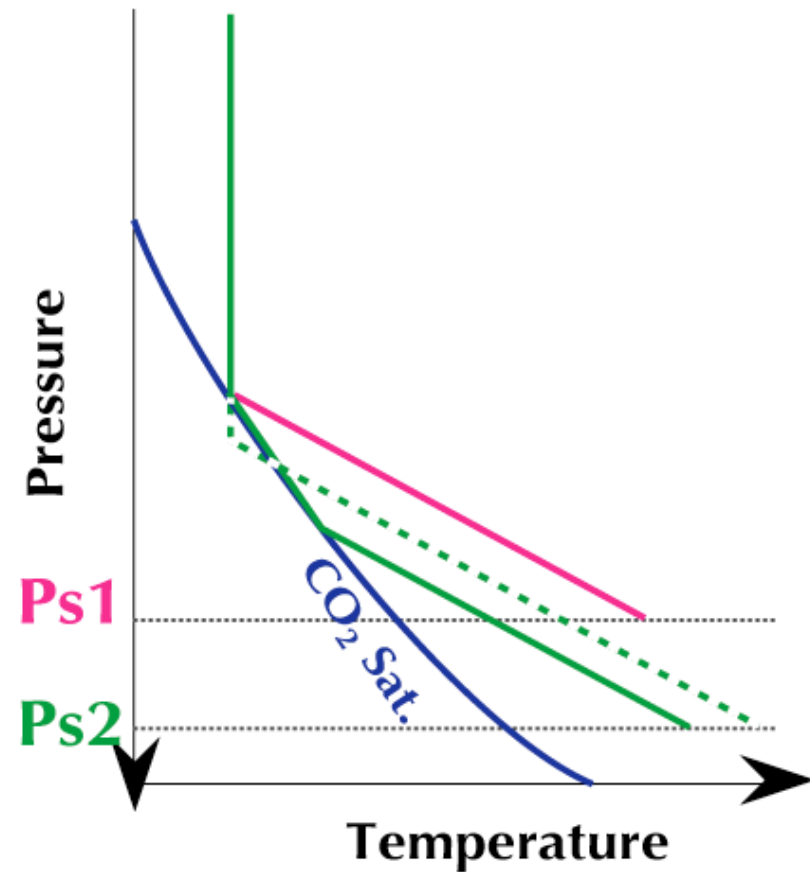
# CO<sub>2</sub> 凝結による鉛直構造の変化

- 大気構造
  - 成層圏; 放射平衡
  - 対流圏: 放射対流平衡
    - 対流中立になるように傾きが決まる
- 大気圧 ↑
  - 地表面温度 ↑
  - ある気圧での温度  $T(p)$  ↓
  - CO<sub>2</sub> 凝結
- CO<sub>2</sub> が凝結すると
  - 対流圏上部温度 ↑
  - 地表面, 対流圏温度 ↓
  - 更に CO<sub>2</sub> が凝結...



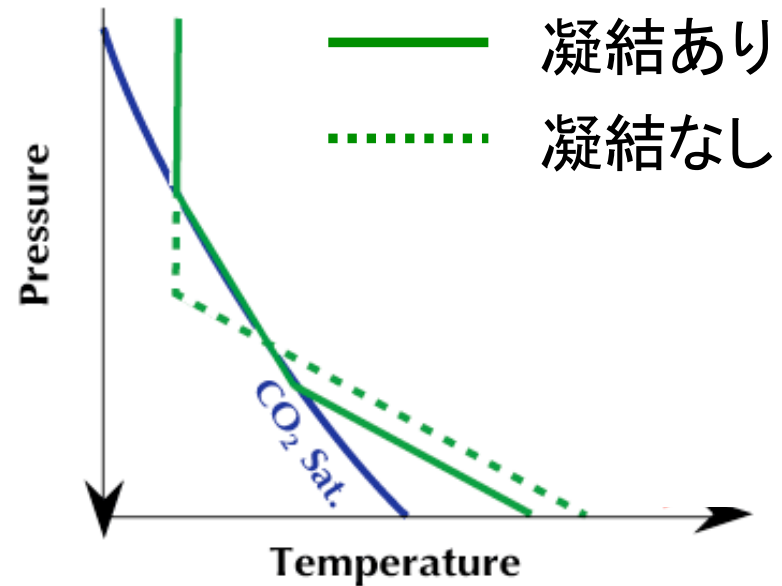
# CO<sub>2</sub> 凝結による鉛直構造の変化

- 大気構造
  - 成層圏; 放射平衡
  - 対流圏: 放射対流平衡
    - 対流中立になるように傾きが決まる
- 大気圧 ↑
  - 地表面温度 ↑
  - ある気圧での温度  $T(p)$  ↓
  - CO<sub>2</sub> 凝結
- CO<sub>2</sub> が凝結すると
  - 対流圏上部温度 ↑
  - 地表面, 対流圏温度 ↓
  - 更に CO<sub>2</sub> が凝結...



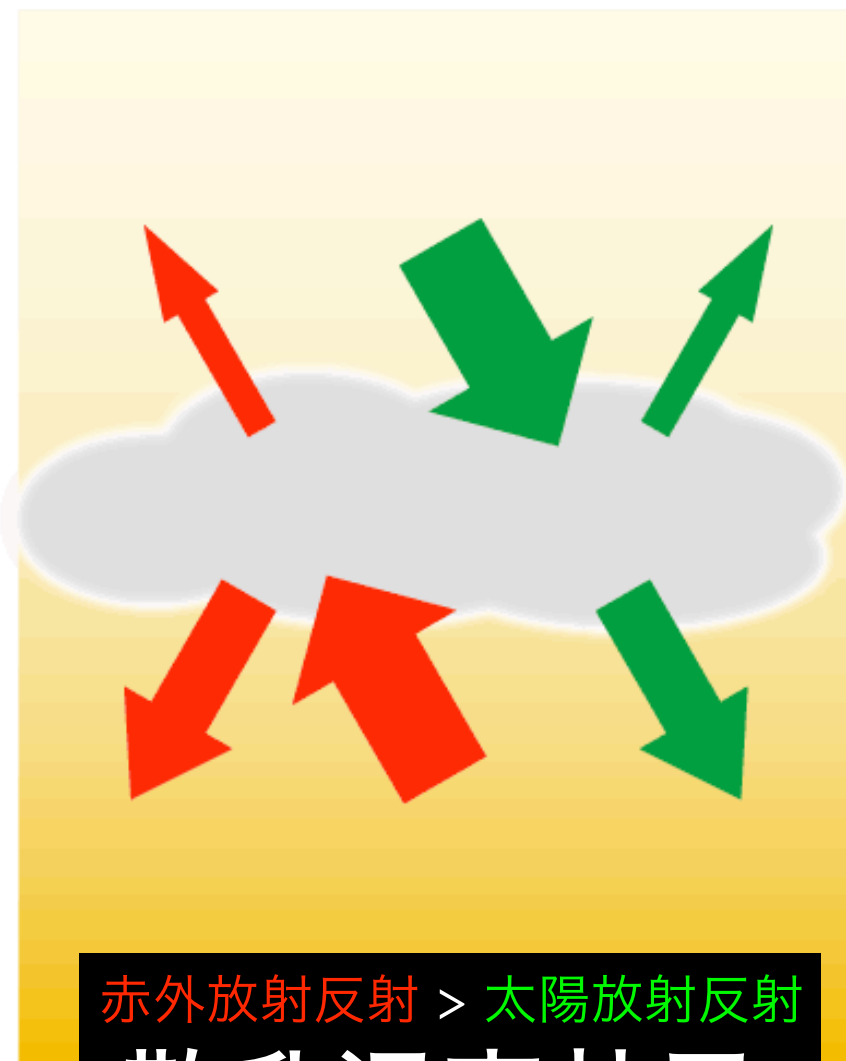
# CO<sub>2</sub>-H<sub>2</sub>O 大気による温室効果の限界 (Kasting 1991)

- CO<sub>2</sub> 凝結による温室効果の弱化
  - 潜熱加熱による対流圏上部の温度上昇
  - 地表面温度低下
- 最大地表面温度 230 K
  - 大気圧 2 気圧
- ただし、雲の放射特性は無視
  - 凝結物はすぐ落下



CO<sub>2</sub> 凝結が温度構造に与える影響の模式図

# 二酸化炭素氷雲の散乱温室効果



散乱温室効果

- 地球の水雲; 惑星を寒冷化
- 雲の放射特性は雲粒径や光学的厚さなどに強く依存
- 雲による太陽放射の反射よりもその赤外放射の反射が強ければ、雲による温室効果が始まる

# 散乱温室効果研究1

- Pierrehunbert and Erlick, 1998
- Yokohata *et al.*, 2002

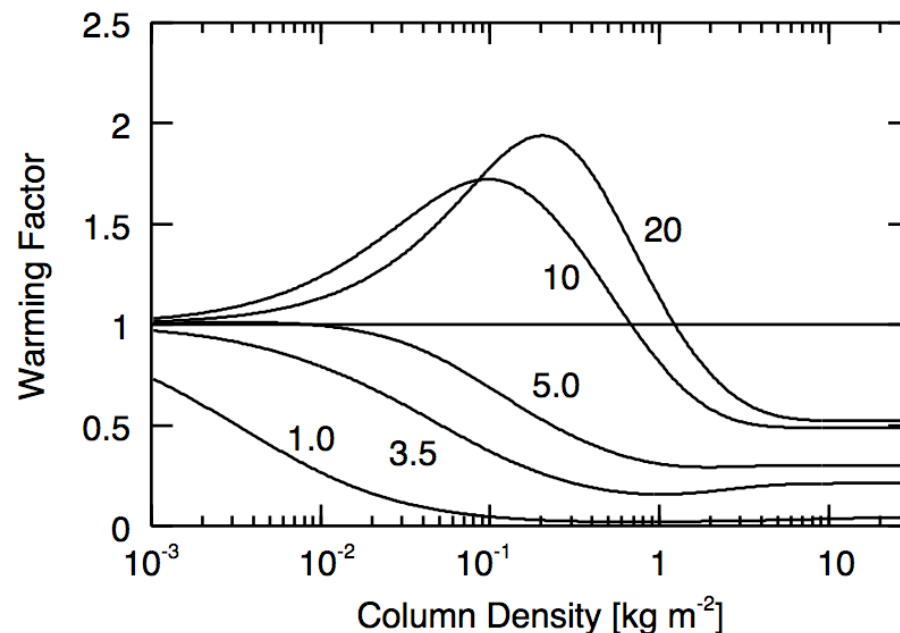
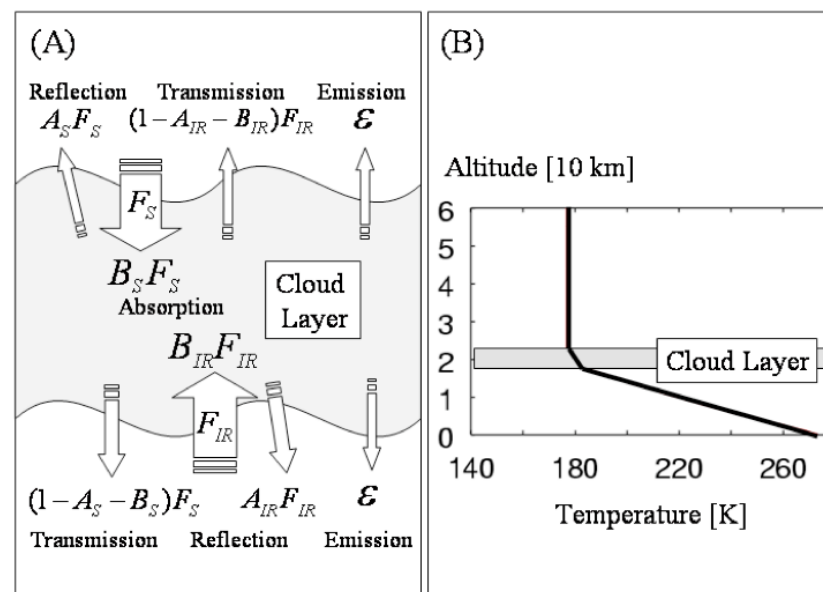
- 雲の放射強制力の解析

- 1D 放射モデル

- Input:

- 大気構造
- 雲粒径
- 雲面密度

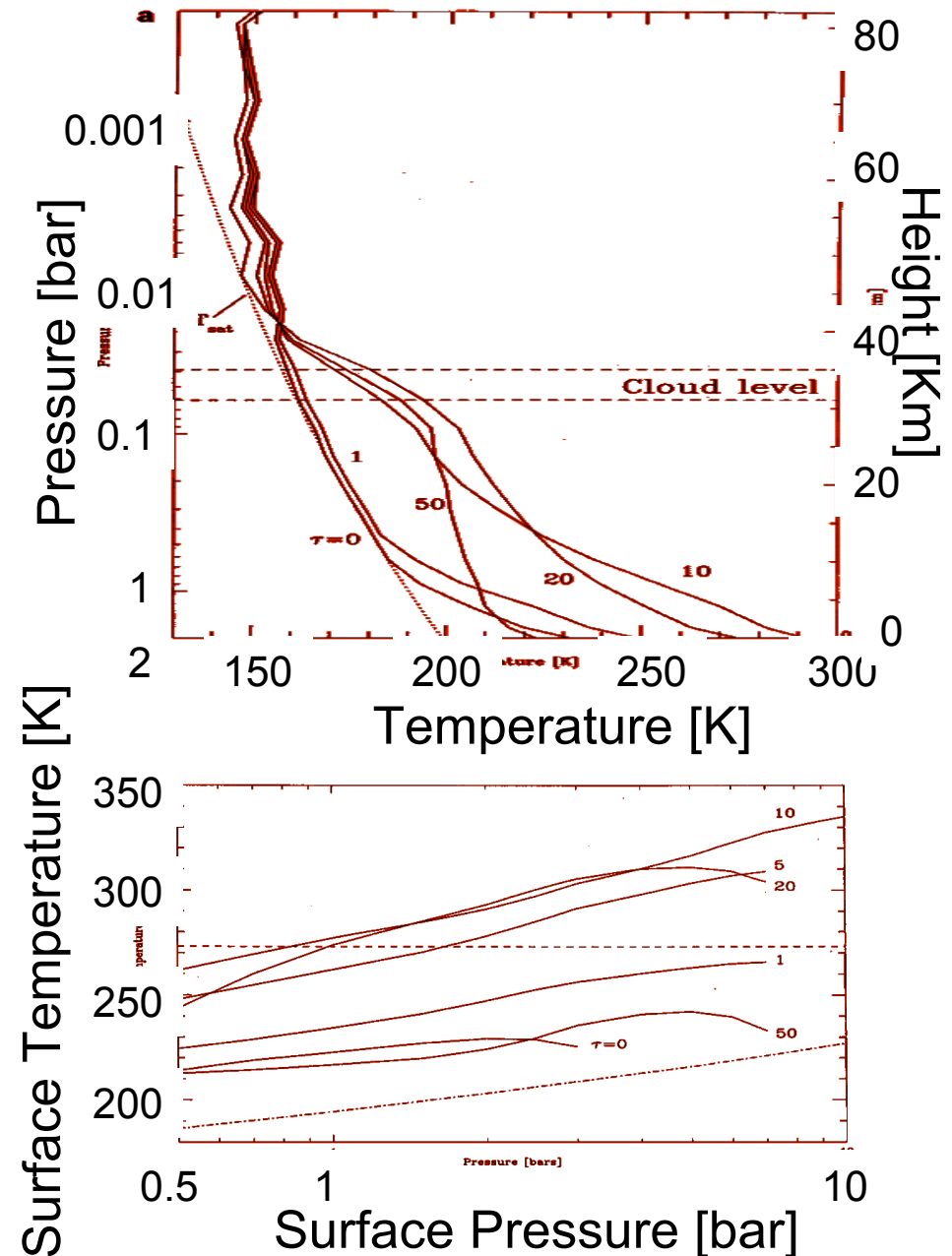
- 粒径 10 - 20 micron, 雲面密度 0.1 - 1 kg m<sup>-2</sup> で雲の放射強制力は強くなる



# 散乱温室効果研究2

- Forget and Pierrehumbert, 1997
- Mischna *et al.*, 2000

- 温度構造の解析
- 1D 放射対流平衡モデル
  - Input;
    - 雲の高度
    - 雲粒径
    - 雲面密度
  - 雲の形成消失は無視
- 雲粒径 10 micronでは  
1 気圧あれば温暖湿潤  
な気候が得られる



# 散乱温室効果研究の認識

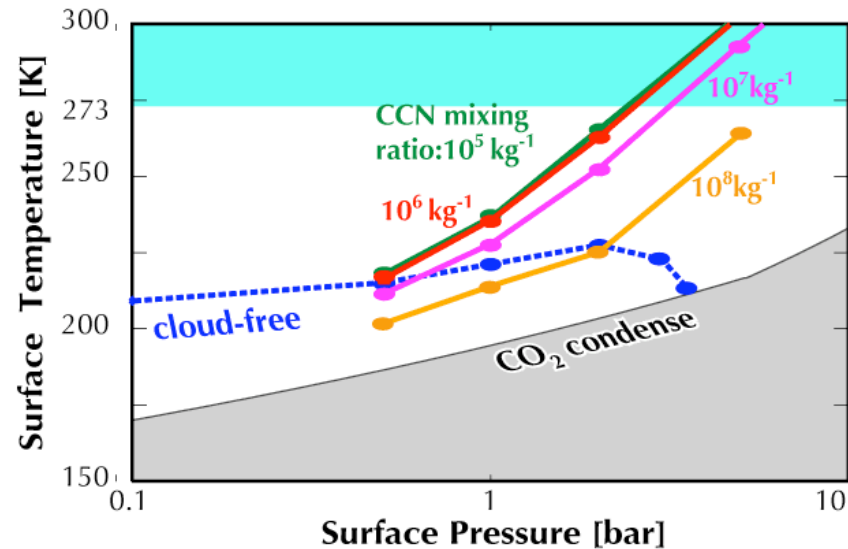
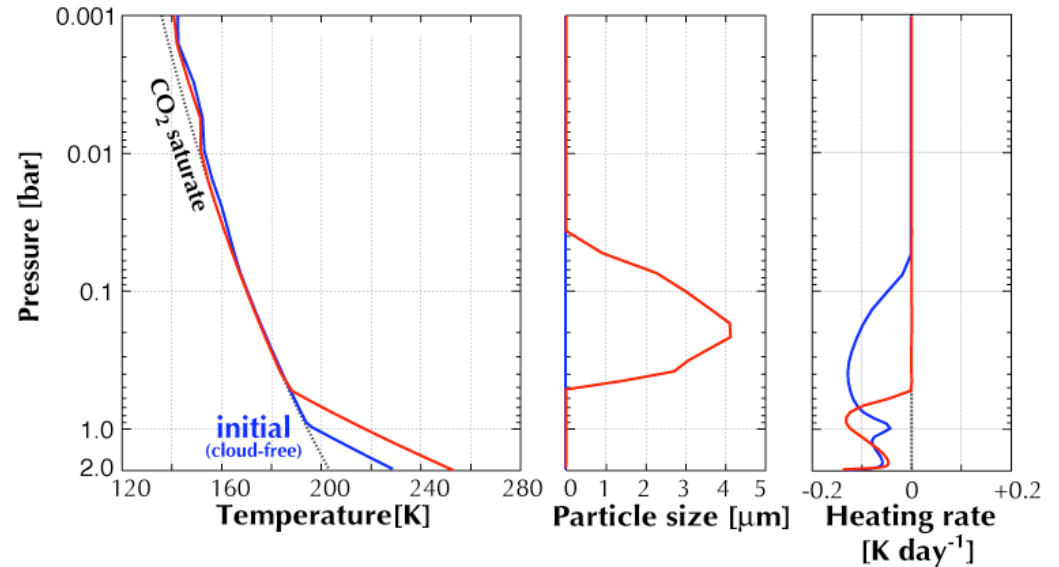
- 温室効果は雲粒径/光学的厚さに依存
- 雲によっては大気圧数気圧程度で地形を説明するのに十分な温室効果が得られる
- 雲パラメタはどう決まる??



# 雲パラメタの見積り 1

- Mitsuda *et al.*, 2006
- 連合大会 2007 年火星セッション

- 一次元放射対流平衡モデル + CO<sub>2</sub> 相平衡
  - 凝結核混合比を仮定
  - 凝結層での鉛直運動は生じない
    - 放射冷却による雲成長
    - 臨界過飽和度 1
  - 凝結層は放射平衡を満たすような雲を形成
  - 凝結核混合比  $10^5 - 10^7 \text{ kg}^{-1}$  では数気圧で温暖
  - およそ 100 日程度で雲は重力沈降で落下



# 雲パラメタの見積り 2

- Colaportate and Toon, 2003

## ● 1D 雲微物理モデル

○ 雲の成長と消失を陽に計算

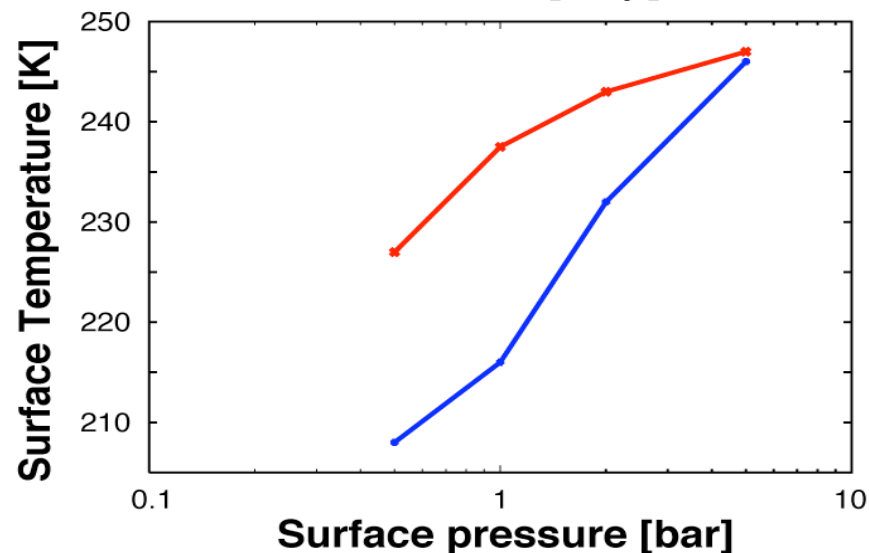
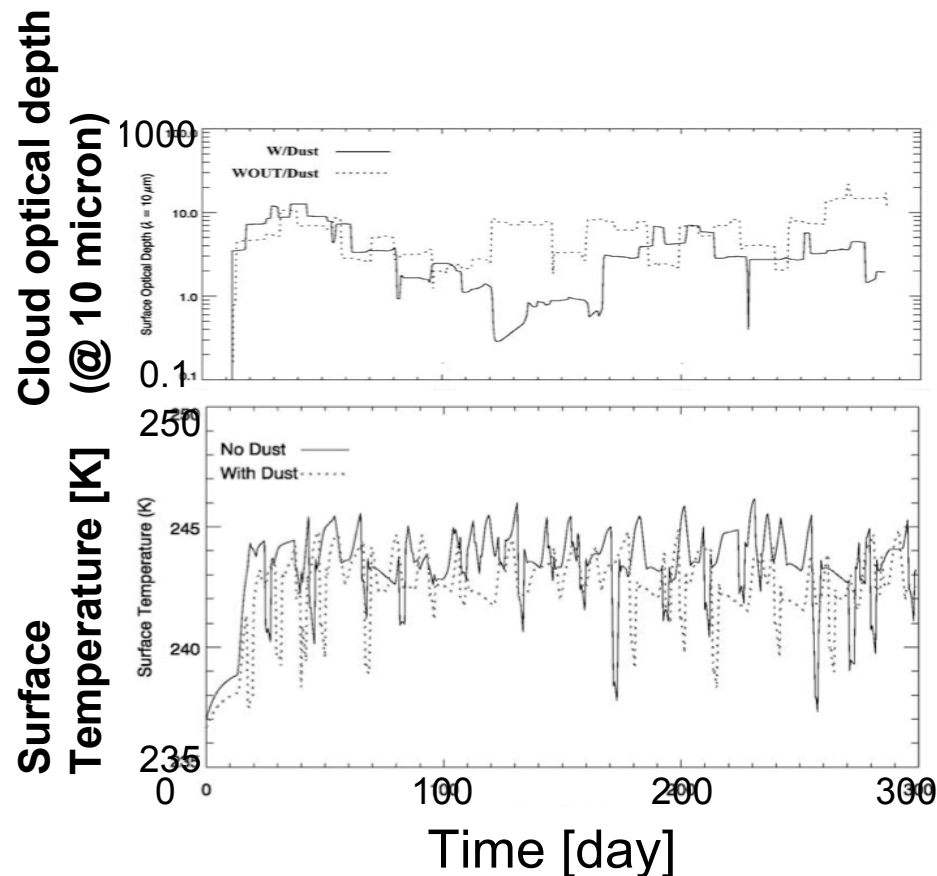
● 臨界過飽和度 1.35

● 凝結核はダストと仮定

○ 対流は渦拡散で表現

○ 雲の温室効果は圧力の増加とともに減少

● 光学的厚さ 0.25 のダストの影響？

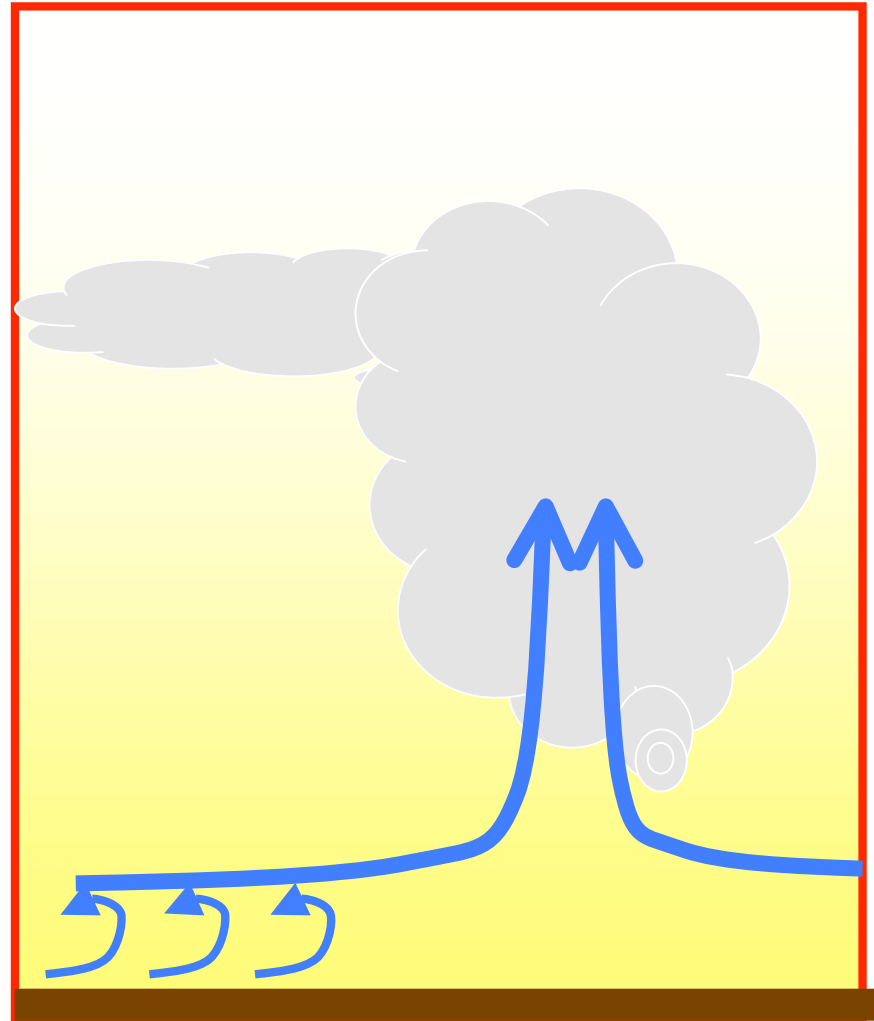


# 雲パラメタの見積りにむけて

- 小高ら, 気象学会 2006 年度春季大会, 2006 年連合大会火星セッション

## ● 2D 雲解像モデル

- 雲層の内外の対流を陽に計算
- 雲の形成と消失はパラメタ化
  - パラメタは観測や微物理モデルの結果から
- 現在の火星極域を想定したテスト計算を実施
- 放射モデル, 微物理過程の検討中?



# 散乱温室効果 Next Step

- 雲の微物理過程

- 非均質核形成のもとになるのは?

- ダスト? 隕石衝突時のちり? 火山灰? 宇宙線?
- Order estimate ぐらいは出来るかもしれない.

- 雲に伴う対流の効果

- 雲解像モデル

- 北大小高グループ
- 現在の火星に関しては PlanetWRF など.

- 雲の水平分布

- 2D モデル: 雲解像モデル(上述)

- 3D モデル: 大気大循環モデル, 全球雲解像モデル

- まだ誰もやっていない (はず).