

# 火星古気候における 二酸化炭素氷雲の安定性

北海道大学 大学院理学研究科

地球惑星科学専攻 惑星物理学研究室

修士課程 2年

光田 千紘

# 現在の火星

---

- ❑ 軌道半径 : 1.52 [AU]
- ❑ 太陽放射 : 地球の 43 %
- ❑ 大気主成分 : CO<sub>2</sub> (95%)
- ❑ 大気圧 : 0.006[atm]
- ❑ 地表面温度 : 215 [K]
- ❑ 乾燥, 寒冷な気候

<http://photojournal.jpl.nasa.gov/catalog/PIA03154>(BY HST)



<http://photojournal.jpl.nasa.gov/catalog/PIA05049>(BY SPIRIT)

# 過去の火星(38億年前)

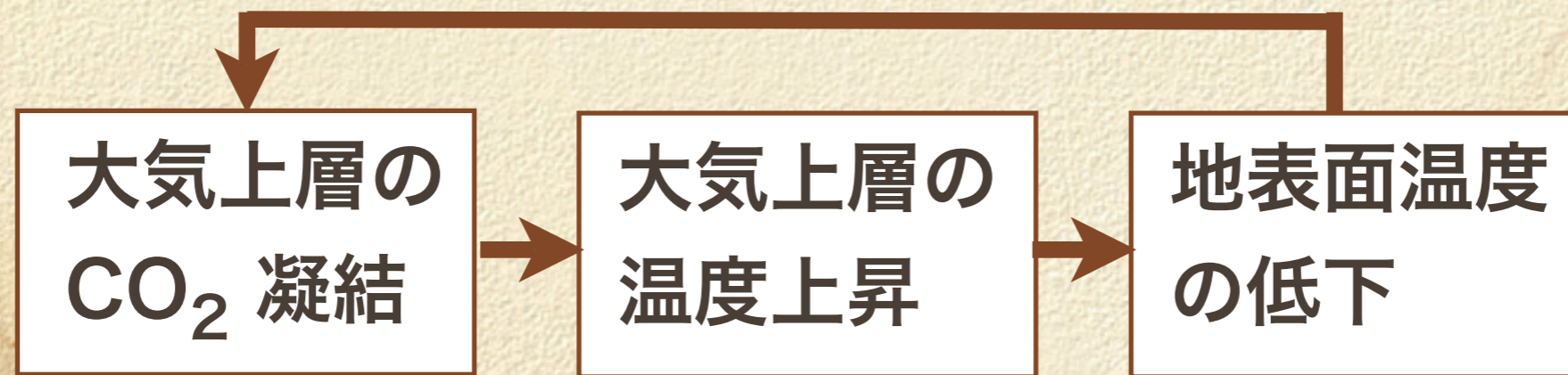
---

- 温暖湿潤な気候
  - 水が安定に存在した地形的証拠
  - 理論からの支持
    - 5[atm]以上の  $\text{CO}_2\text{-H}_2\text{O}$  大気を持っていれば再現可能 (Pollack, 1987)
    - 鉛直 1D 放射対流平衡モデル



# 理論の再検討: 温暖気候否定

- CO<sub>2</sub>-H<sub>2</sub>O 大気では温暖な気候を再現できない.  
(Kasting, 1991)
- 当時の太陽光度: 現在の 0.75 倍
- 大気上層で CO<sub>2</sub> 凝結, 暴走冷却
- **ただし, CO<sub>2</sub> 氷雲の放射特性を無視**



正のフィードバック

# 散乱温室効果：従来の研究



赤外放射反射 > 太陽放射反射

散乱温室効果

Pierrehumbert and Erlick 1998

- ☐ 雲の散乱過程の重要性を指摘
- ☐ 適当な粒径をもてば強い温室効果

Yokohata et al. 2002

- ☐ 雲が蒸発する可能性を指摘
- ☐ 安定に存在する条件:自己冷却>放射加熱
  - ☐ 定量的な解析は不十分
    - ☐  $H_2O$  の効果を無視
    - ☐ 下層からの赤外放射：黒体近似

# 本研究の目的

---

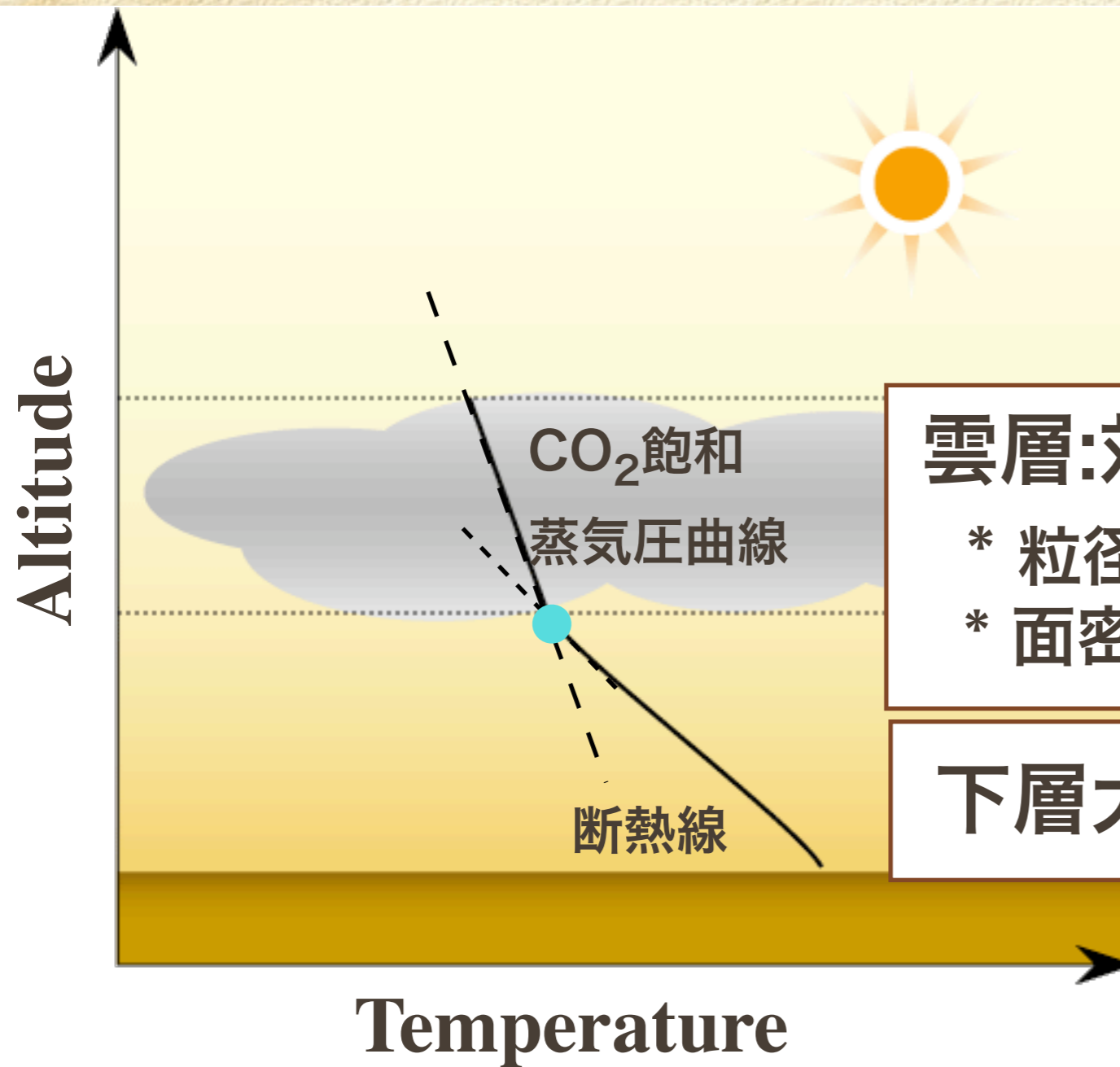
- 氷雲安定性に対する下層大気からの赤外加熱の役割を明らかにする.
- CO<sub>2</sub> 氷雲が安定に存在できる条件をより定量的に求める.
  - 大気の放射伝達過程を厳密に解く
  - 地表面圧力,温度への依存性
  - H<sub>2</sub>O の効果

# モデル設定

\* 太陽放射入射は全球年平均値  
太陽光度は現在値の 0.75 倍

## ■ 大気成分

1.  $\text{CO}_2$
2.  $\text{CO}_2\text{-H}_2\text{O}$



雲層:対流平衡( $\text{CO}_2$  湿潤断熱減率)

\* 粒径:  $10\mu\text{m}$ (温室効果最大)

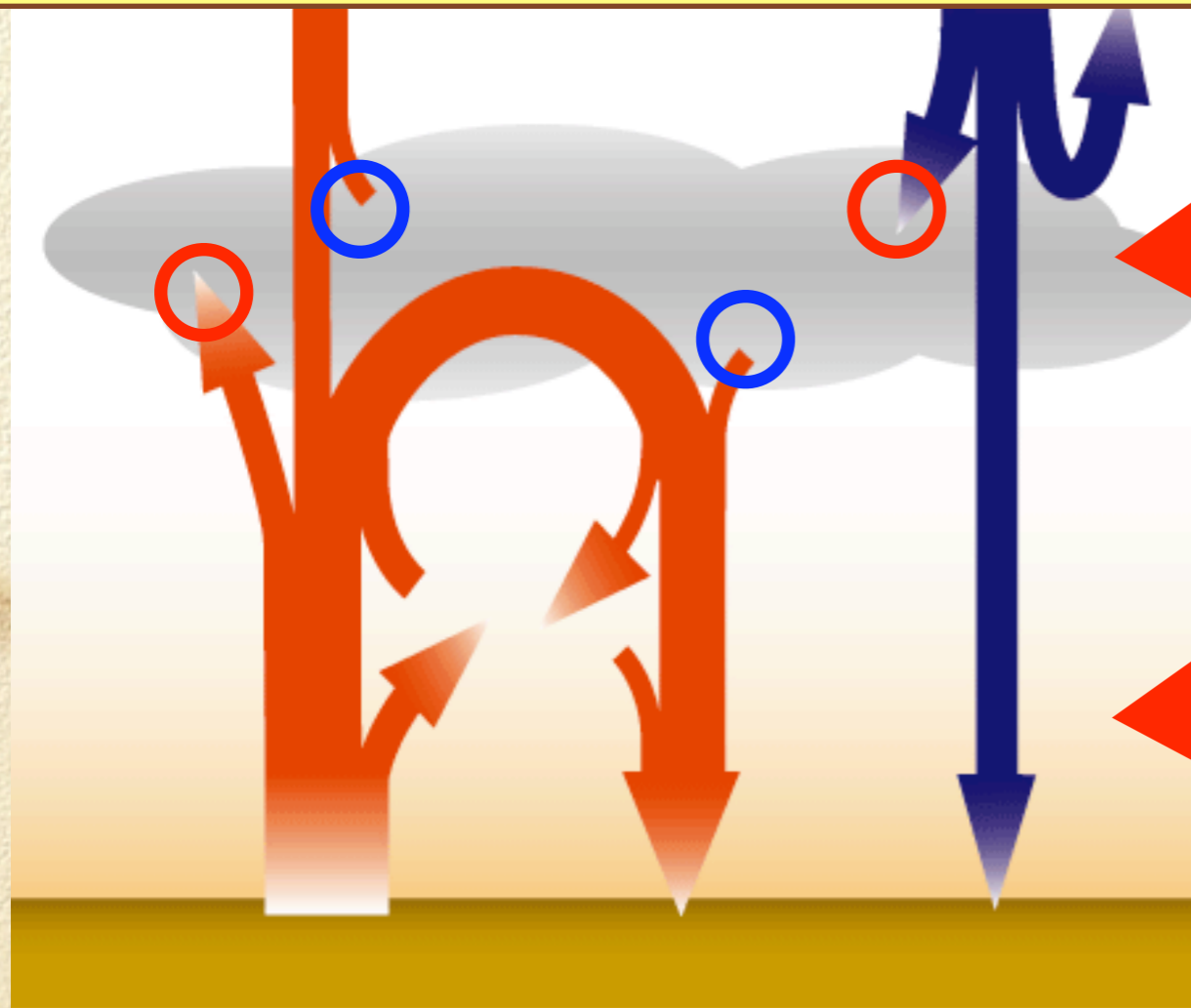
\* 面密度: パラメータ(3通り)

下層大気:対流平衡(断熱減率)

# 鉛直一次元放射モデル

安定に存在できる条件

雲の冷却率 = (射出量 - 吸収量) > 0 近似



吸収/散乱(赤外/太陽)

\* ミー理論(球形粒子を仮定)

CO<sub>2</sub>復素屈折率(Warren, 1986)

二方向近似

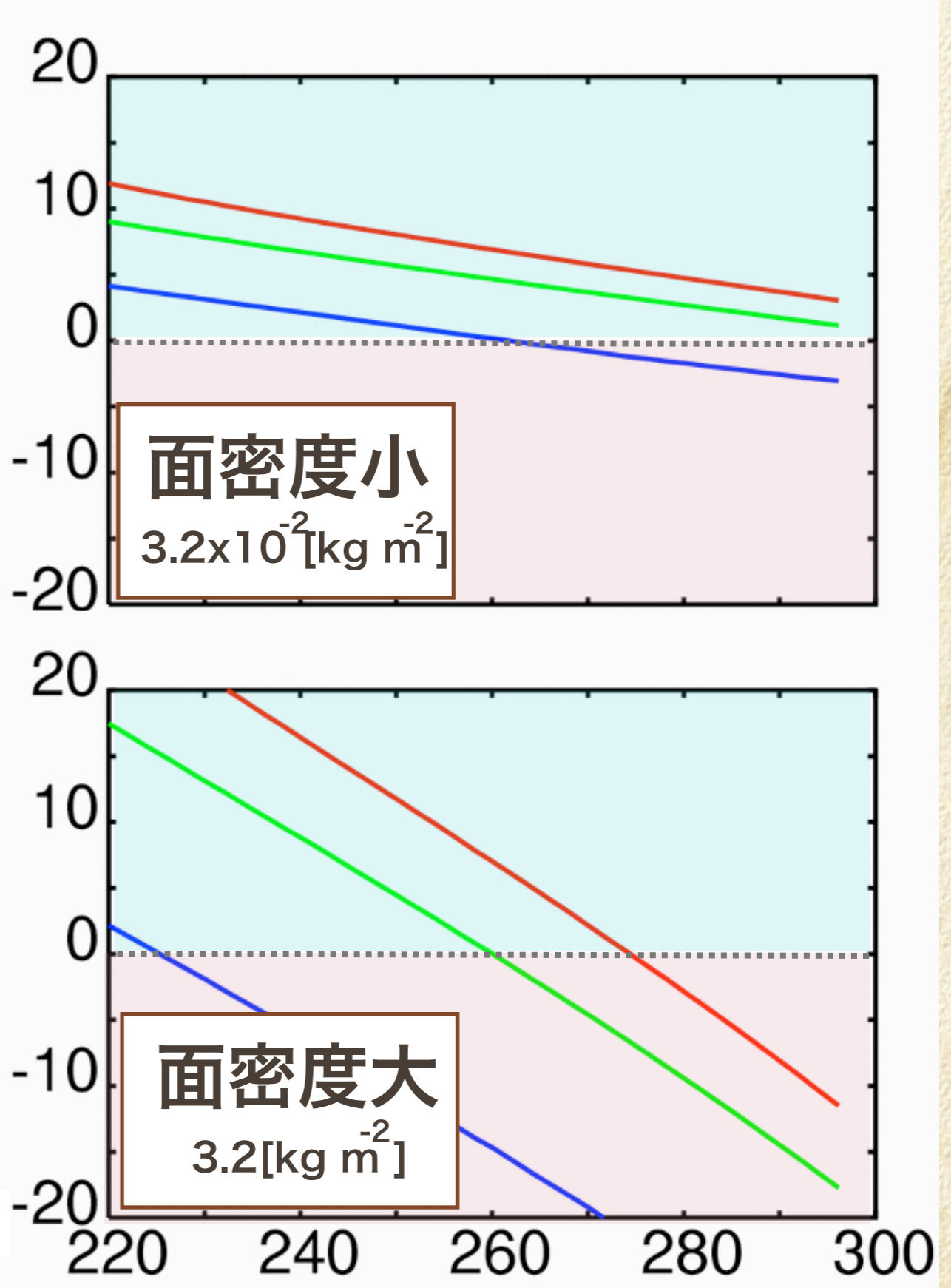
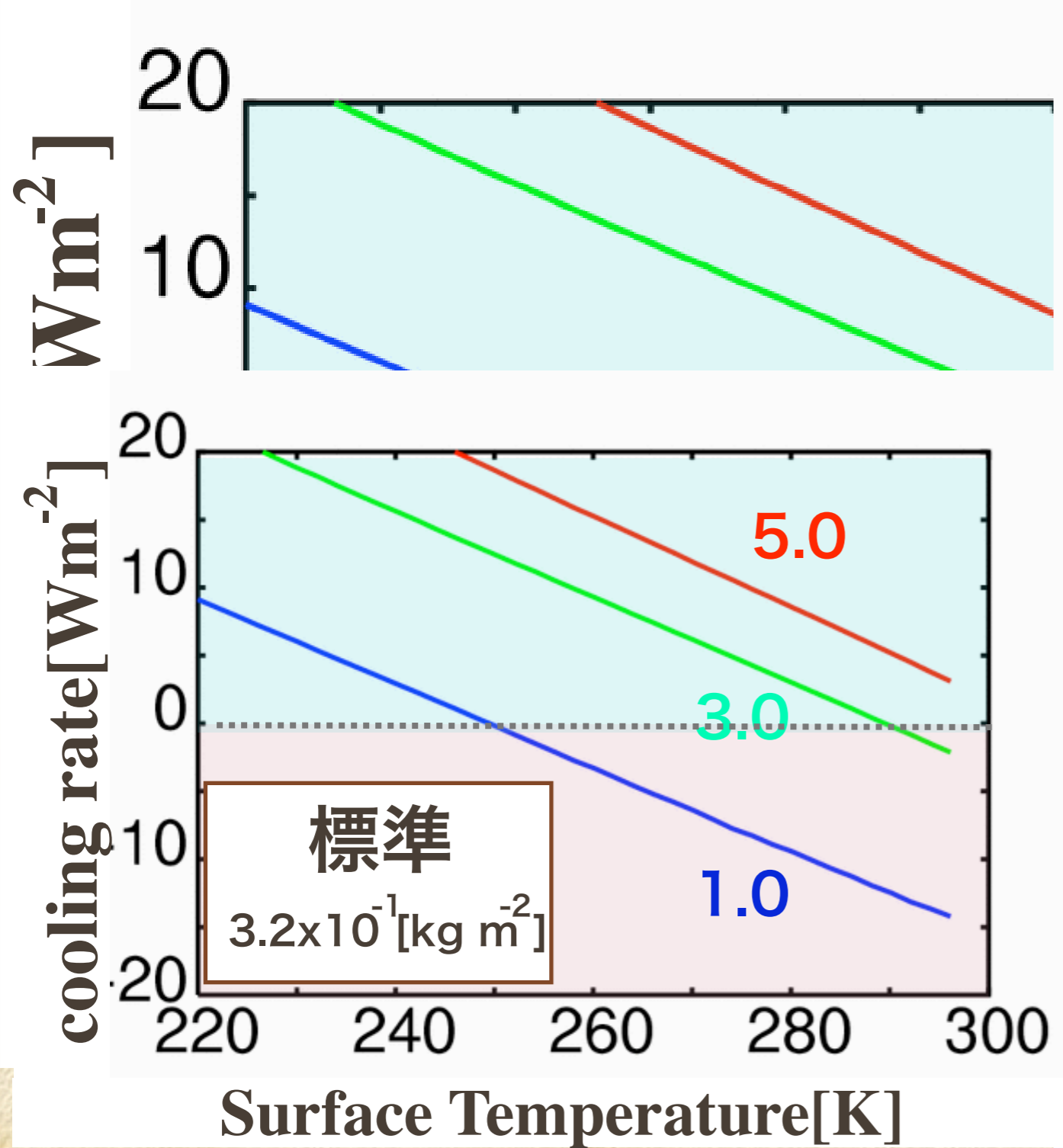
吸収(赤外のみ)

\* ランダムモデル

吸収係数(Houghton, 2002)

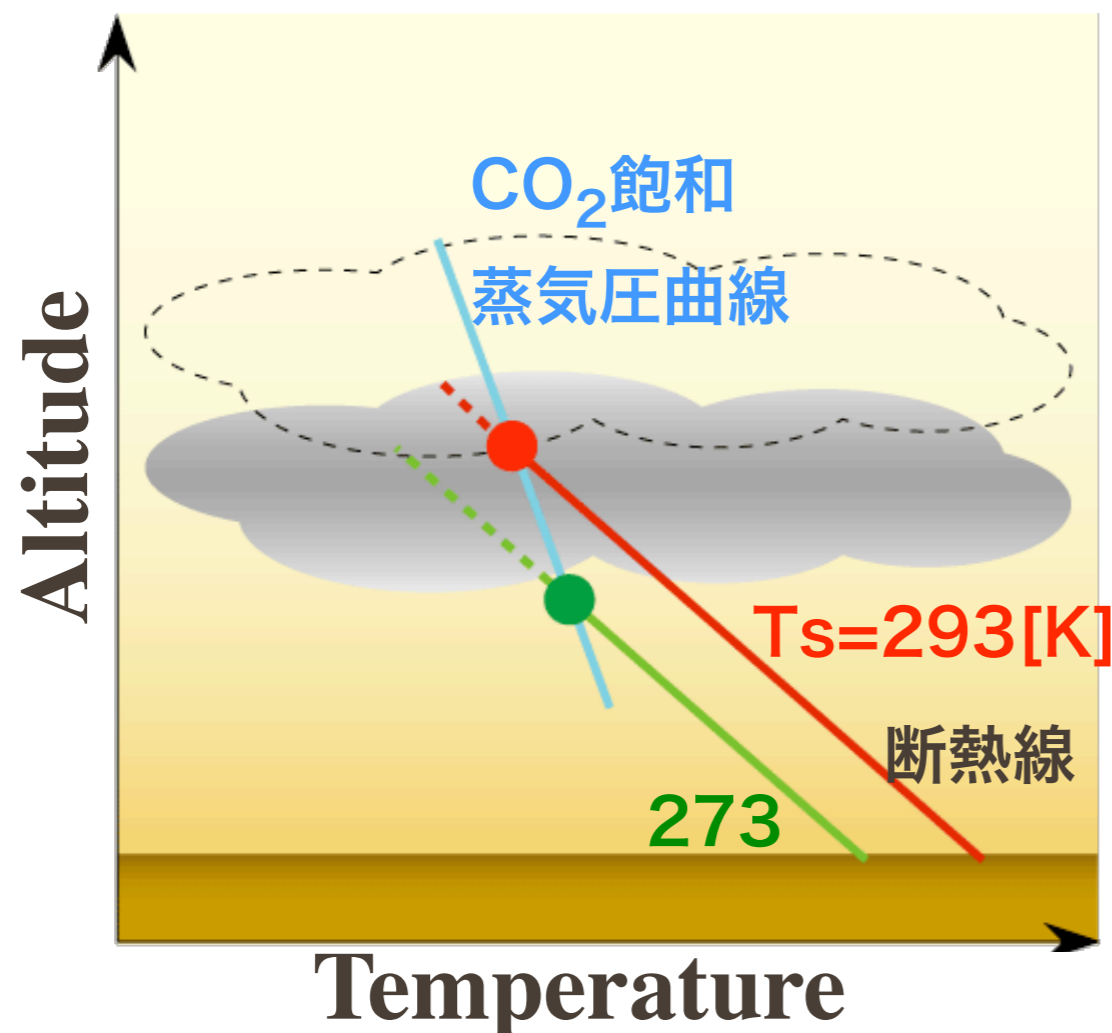


# 冷却率の地表面温度・気圧依存性: 大気成分 CO<sub>2</sub>

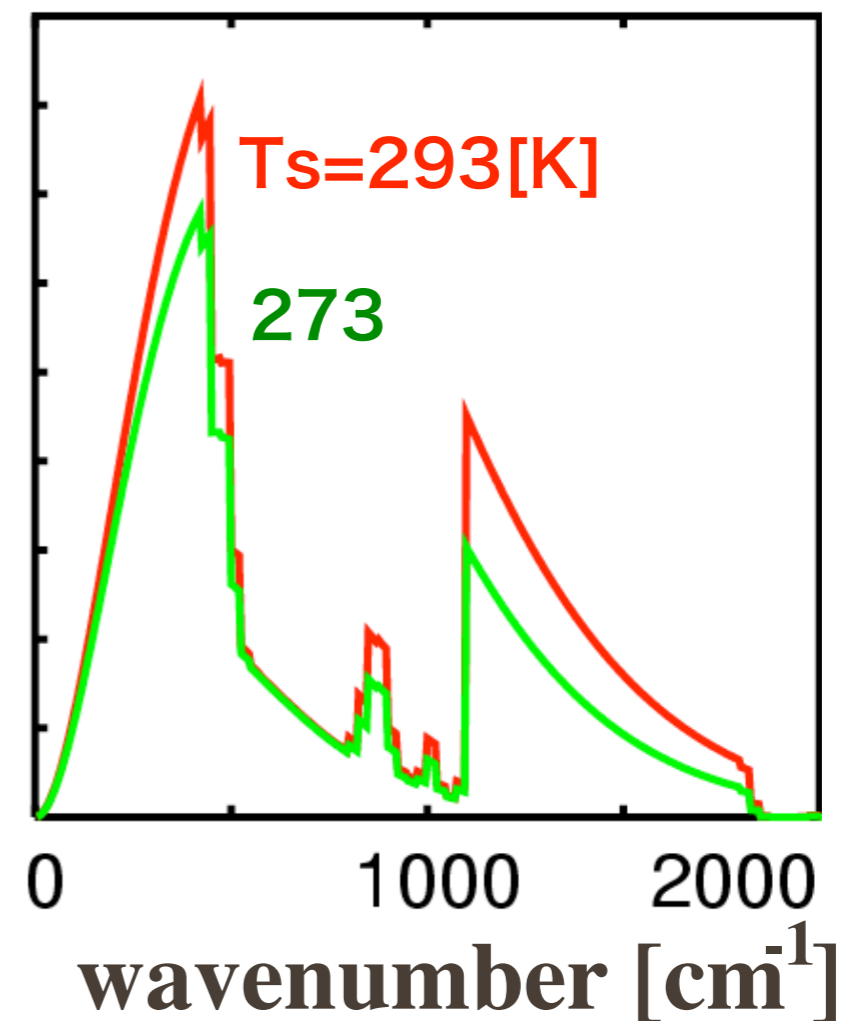


# 地表面温度依存性の解釈

- 温度が下がると…
  - 雲温度上昇, 放射加熱減少 → 冷却率増加



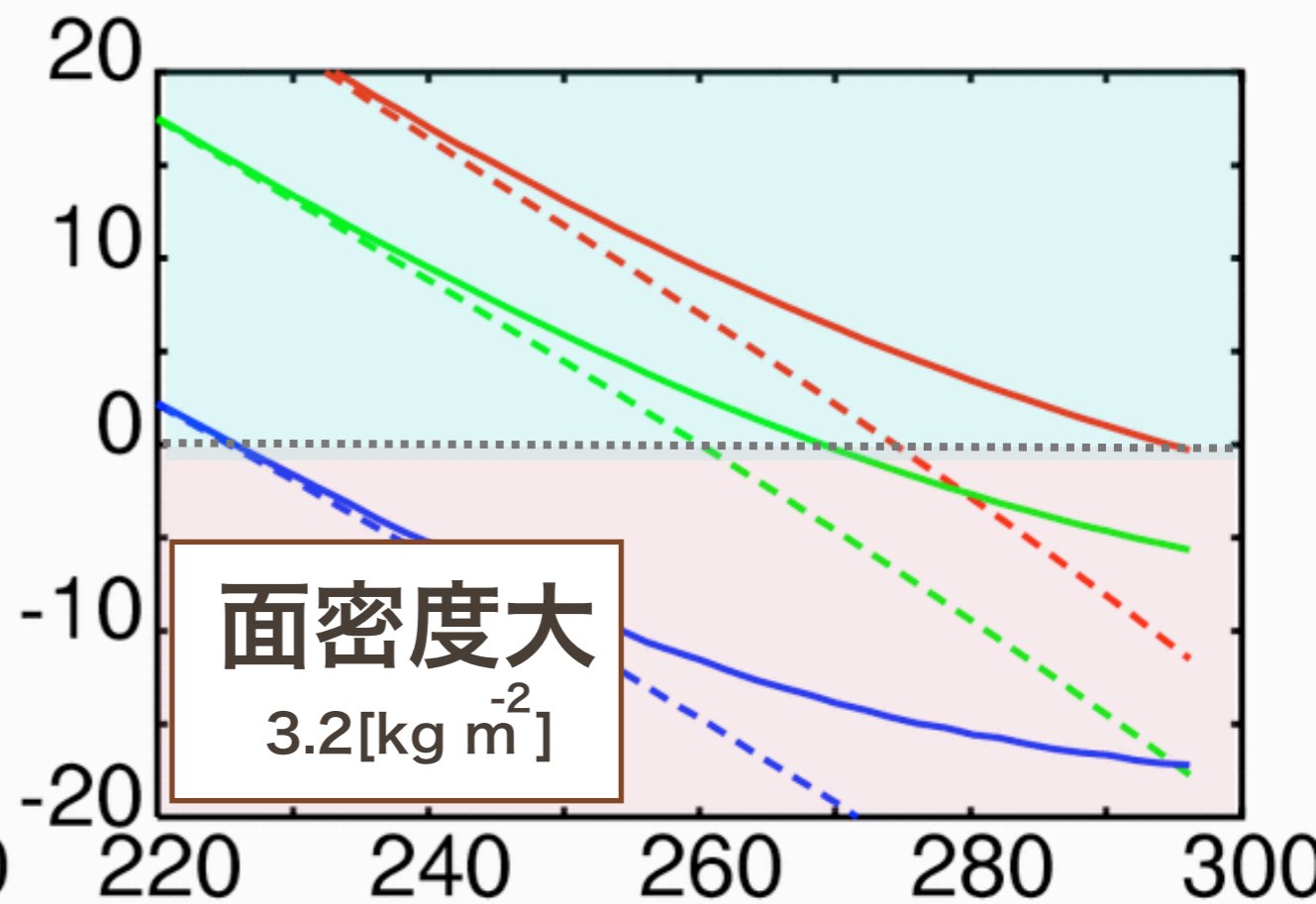
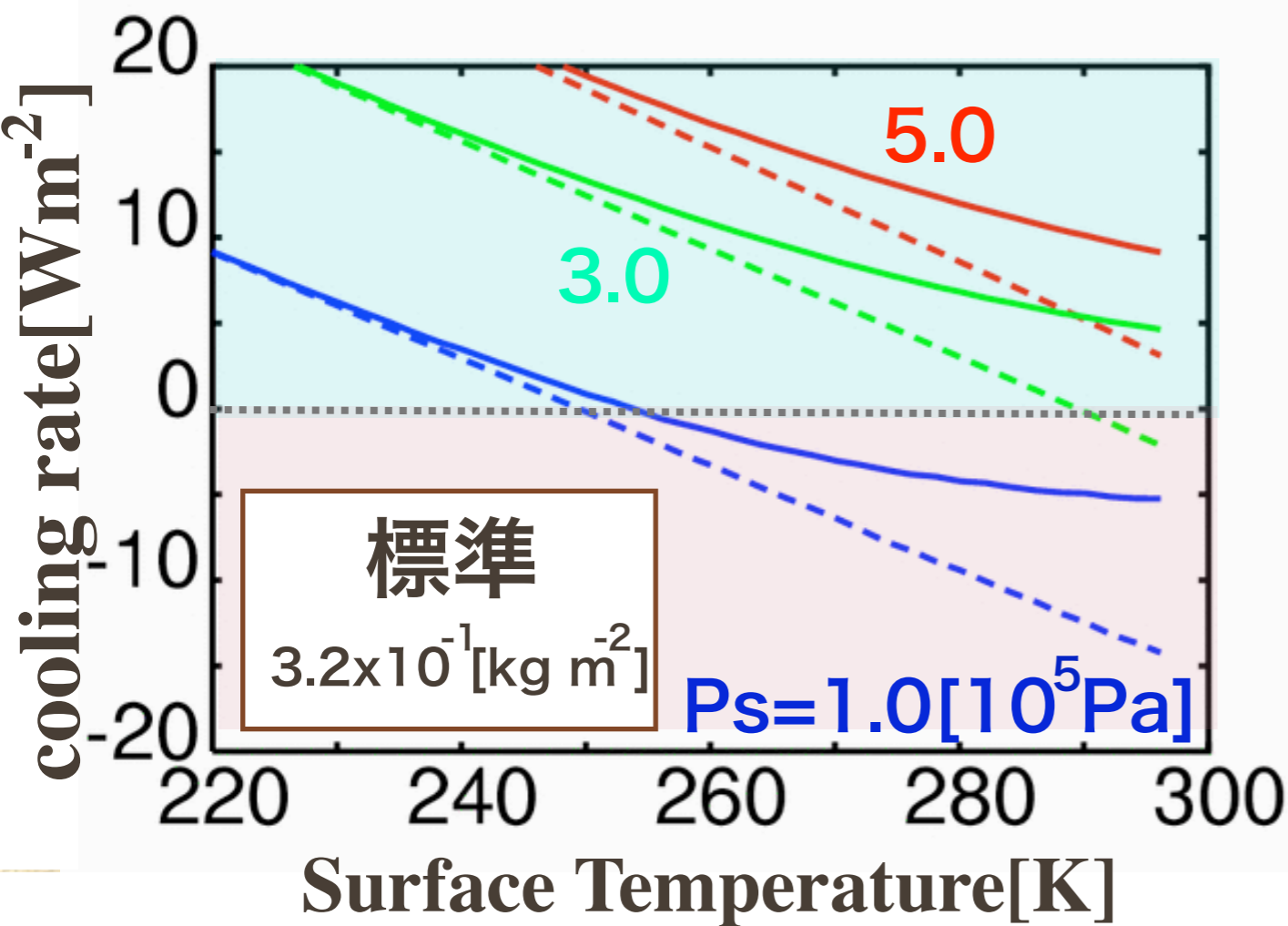
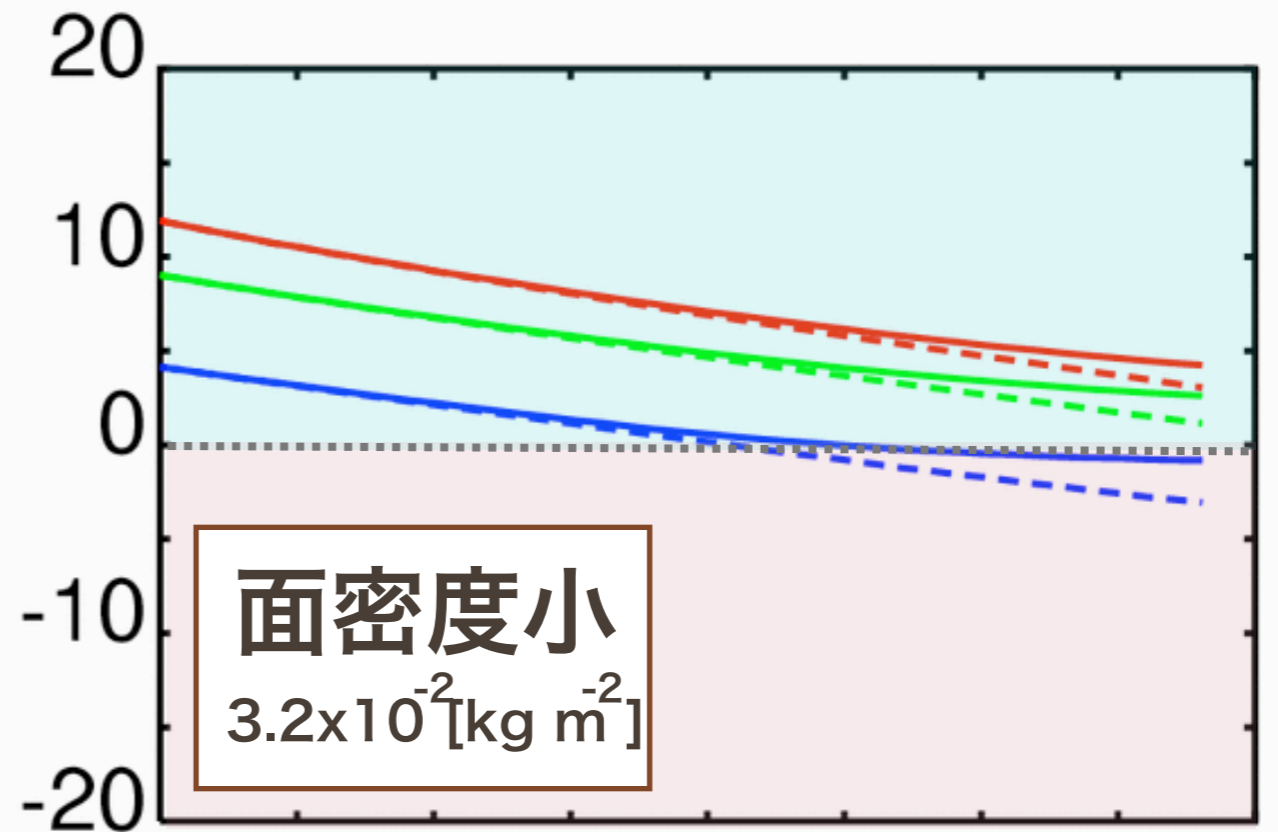
## 赤外放射の入射スペクトル



# H<sub>2</sub>Oの効果

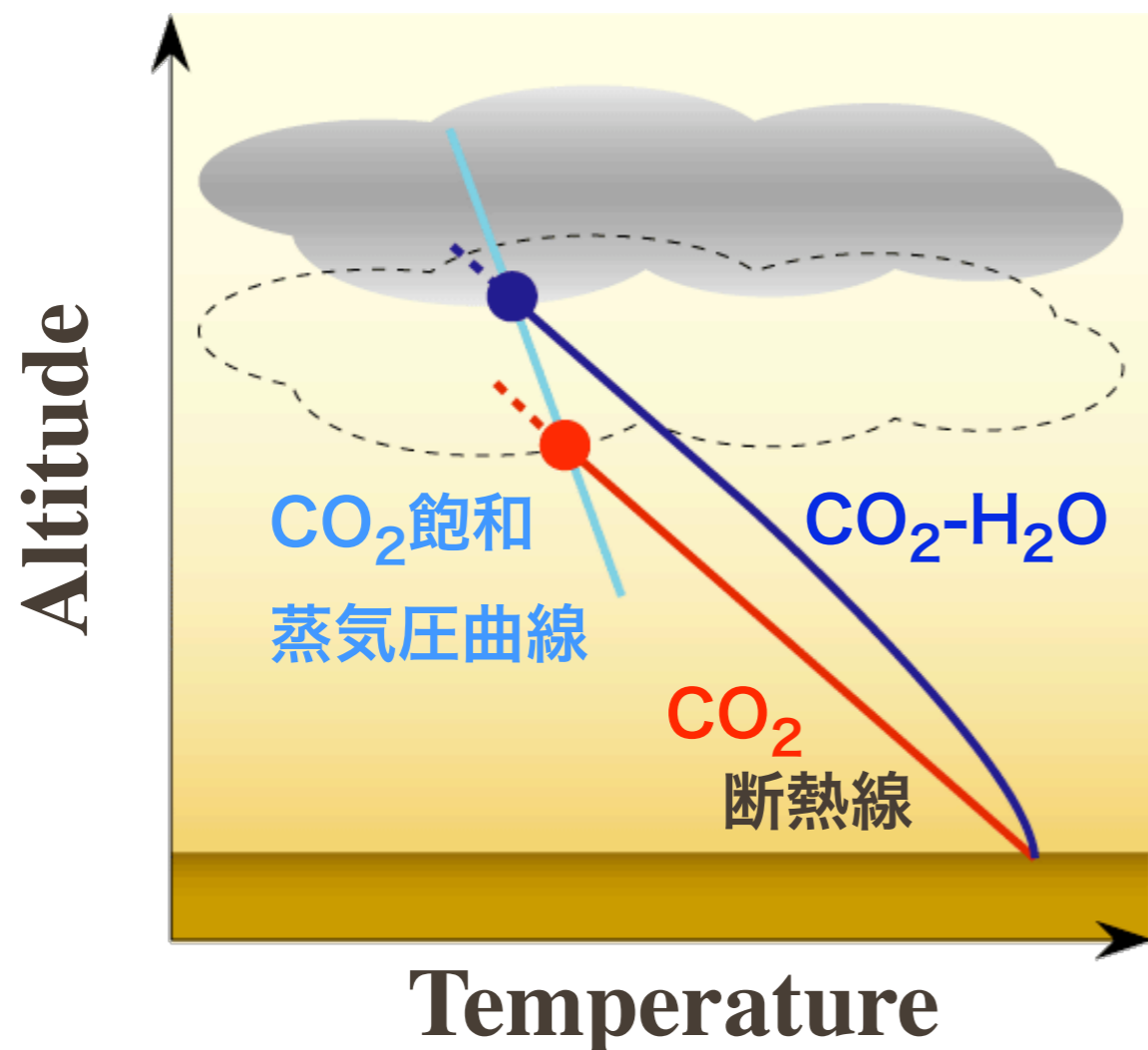
H<sub>2</sub>O の効果 -> 冷却率増加

実線 : CO<sub>2</sub>-H<sub>2</sub>O  
点線 : CO<sub>2</sub>

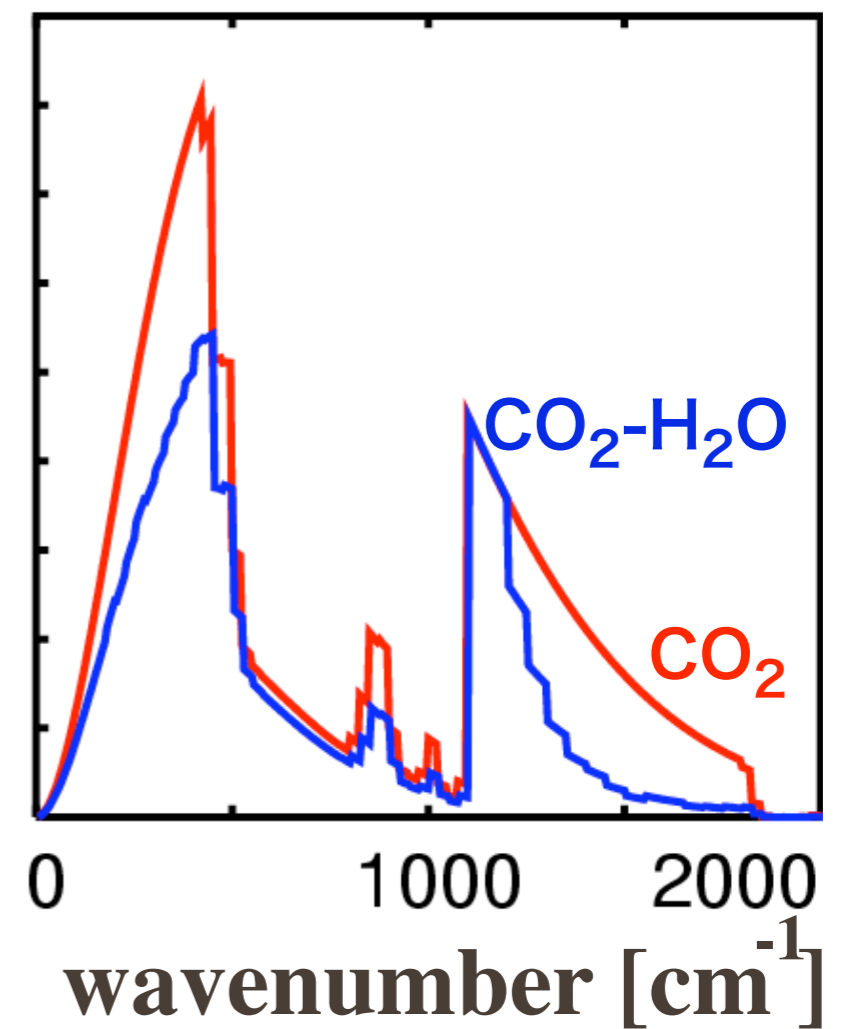


# H<sub>2</sub>O が冷却率を上昇させる理由

- H<sub>2</sub>O をまぜると…
  - 雲温度低下 < 放射加熱減少 → 冷却率増加

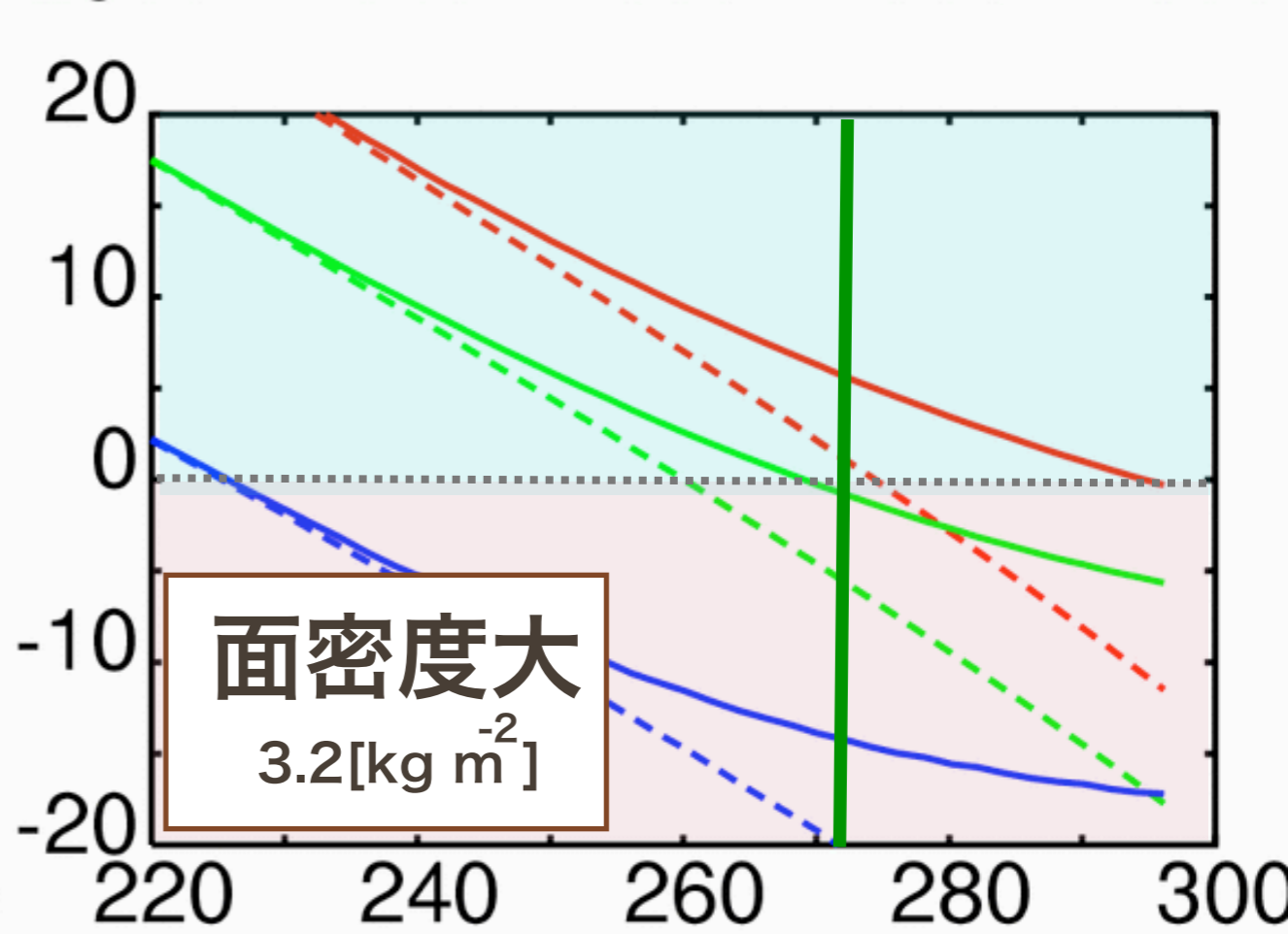
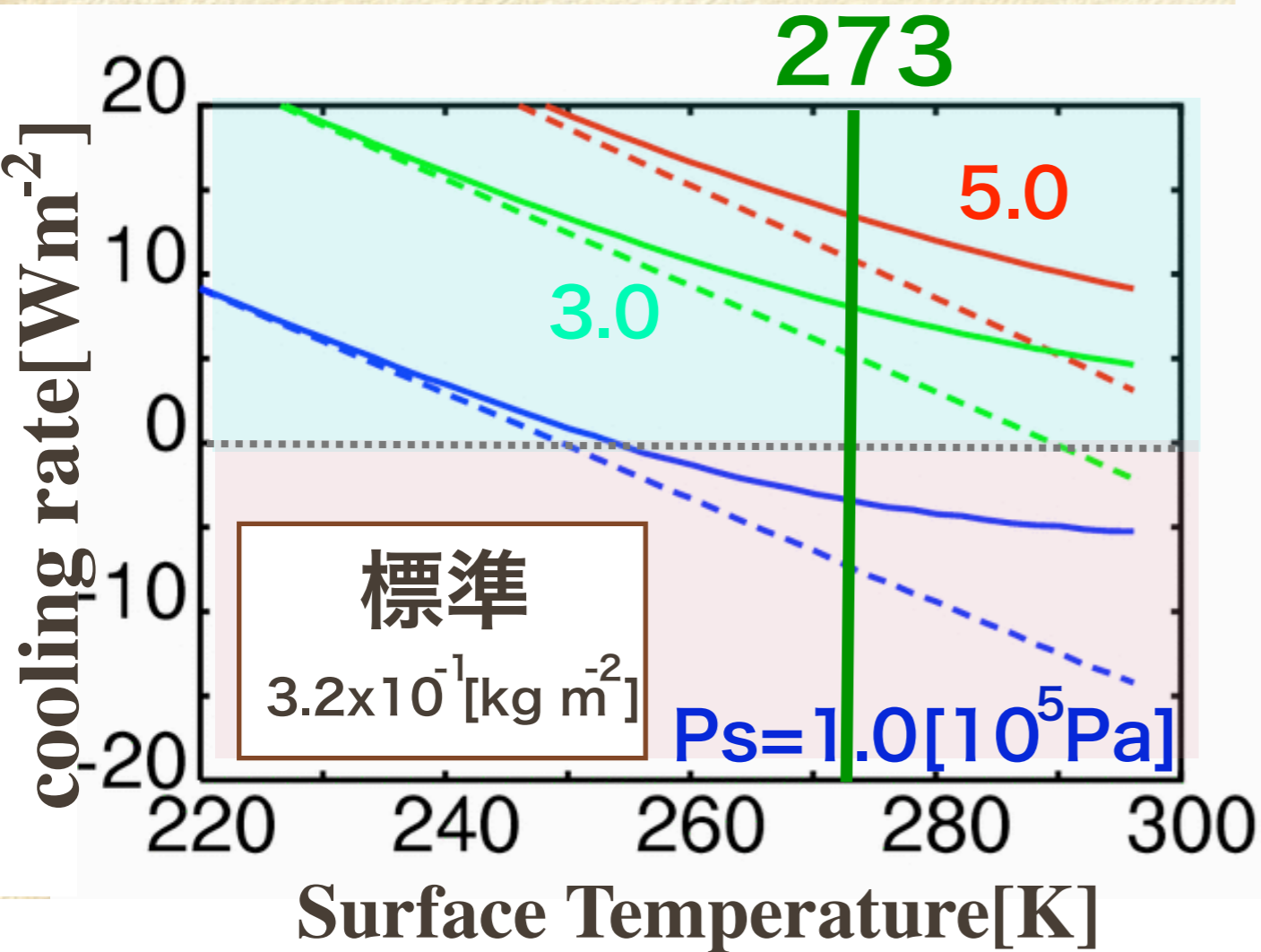
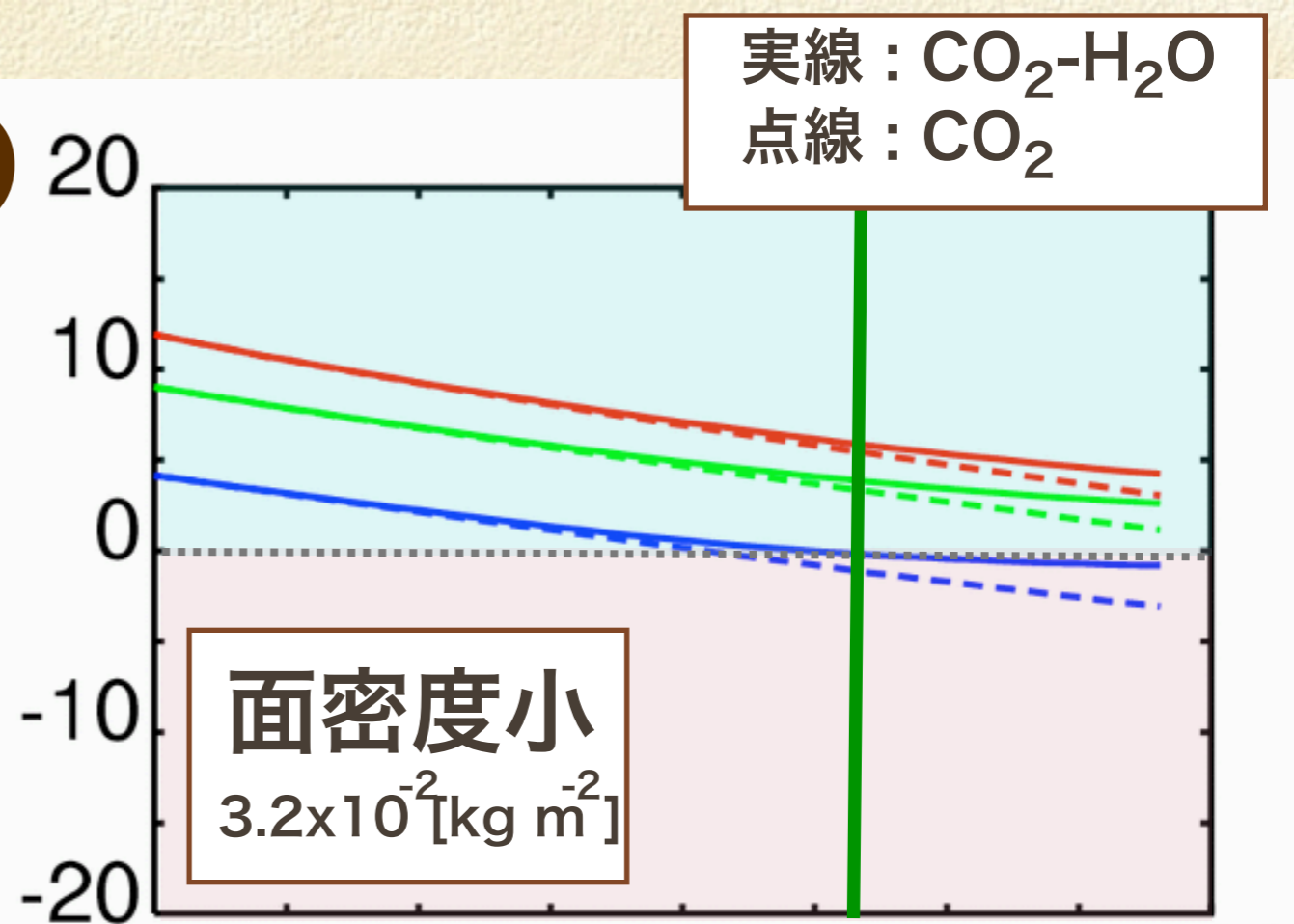


## 赤外放射の入射スペクトル



# 温暖な気候下での雲の冷却率

温暖湿潤な気候かつ  
雲が安定に存在：可能



# これまでの成果：まとめ

---

- 鉛直一次元放射モデルを用いて詳細に赤外加熱を考慮し、 $\text{CO}_2$  氷雲の安定性を調べた。
  - 冷却率は地表面温度が低く、地表面気圧が高いほど増加する
  - $\text{H}_2\text{O}$  の吸収によって冷却率は増加する
- 
- 273 [K] 以上の地表面温度下でも、雲は安定に存在できる

# 解像度の問題

---

- 大気光学係数の解像度
  - $25 \text{ cm}^{-1}$  ( $>$  氷雲 :  $5 \text{ cm}^{-1}$ )
  - 氷雲の吸収量を求めるには  $5 \text{ cm}^{-1}$  以下
- より解像度の高い光学係数の導出
  - Line by Line 法
    - 各吸収線ごとの効果を考慮
      - 吸収線パラメータ (HITRAN, 2002)
    - 解像度  $0.5 \text{ cm}^{-1}$
    - 現在チューニング中...

# 今後の方針

---

- 温室効果を定量的に評価
  - 放射平衡時の地表面温度を導出
  - 雲の粒径, 面密度の変化を考慮
  - 雲層内の大気の放射吸収を考慮
- 鉛直-南北二次元モデルへ拡張
  - 季節変化
  - 軌道傾斜角変化



# 参考文献

---

- Houghton J. 2002 : The Physics of Atmospheres third edition, Cambridge Univ. Press.,pp320
- NASA/JPL Planetary Photojournal, <http://photojournal.jpl.nasa.gov/>
- Kasting J. F.,1991 : CO<sub>2</sub> condensation and the climate of early mars, *Icarus*, Vol. 94, pp. 1-13
- Pierrehumbert R. T. and Erlick C., 1998 : On the scattering greenhouse effect of CO<sub>2</sub> ice cloud, *J. Atmos. Sci.*, Vol.55, pp.1987-1903
- Yokohata T., Kosugita K., Matatsugu O.,and Kuramot K., 2002 : Radiative absorption by CO<sub>2</sub> ice cloud on early mars: Implication on the stability and greenhouse effect of clouds, *Proceedings of 35th ISAS Lunar and Planetary Science Conference*, pp.13--16
- Warren, S. G. 1986 : Optical constraints of carbon dioxide ice, *Appl. Opt*, VOL.95,pp.2650-2674