

古火星湿潤大気における 散乱温室効果

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

光田 千紘

chihiro@ep.sci.hokudai.ac.jp

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 : CO₂ (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)

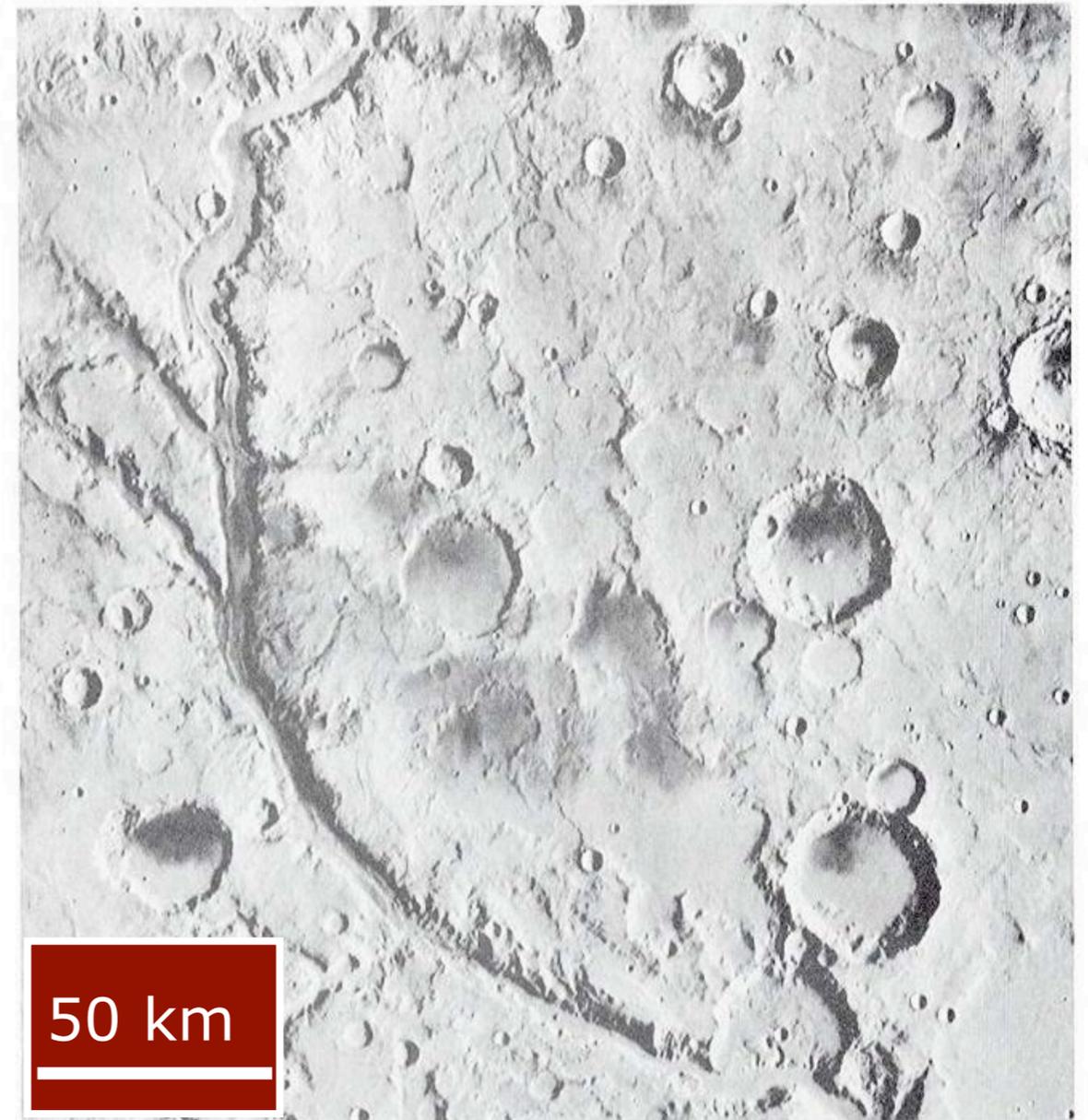


<http://photojournal.jpl.nasa.gov/catalog/PIA05049>(BY SPIRIT)

38 億年前の火星環境

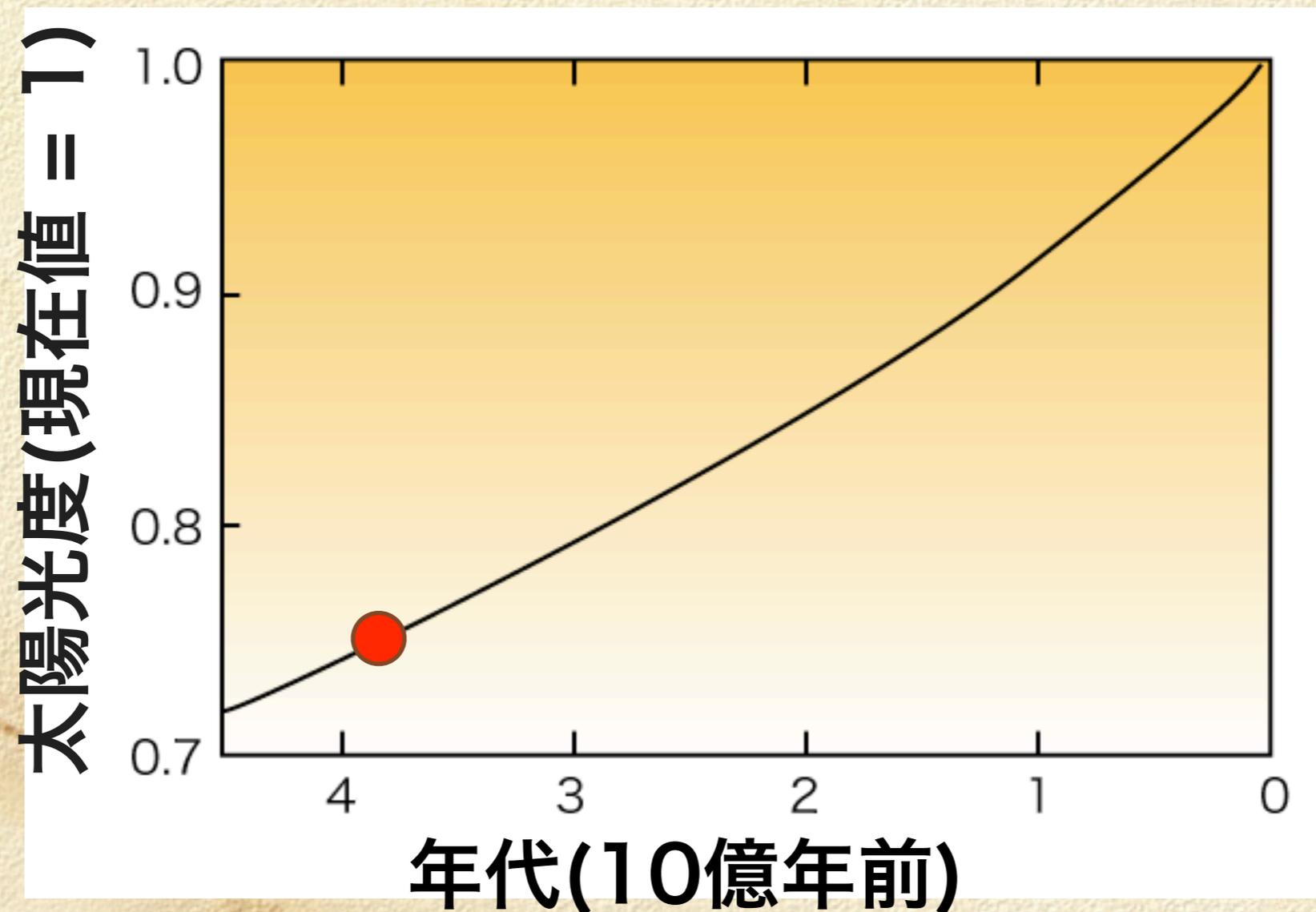
- 温暖湿潤な気候を示唆する地形的証拠
 - 浸食率が高い
 - 海が存在??
 - バレーネットワーク
 - 地下水によって形成?

バレーネットワーク



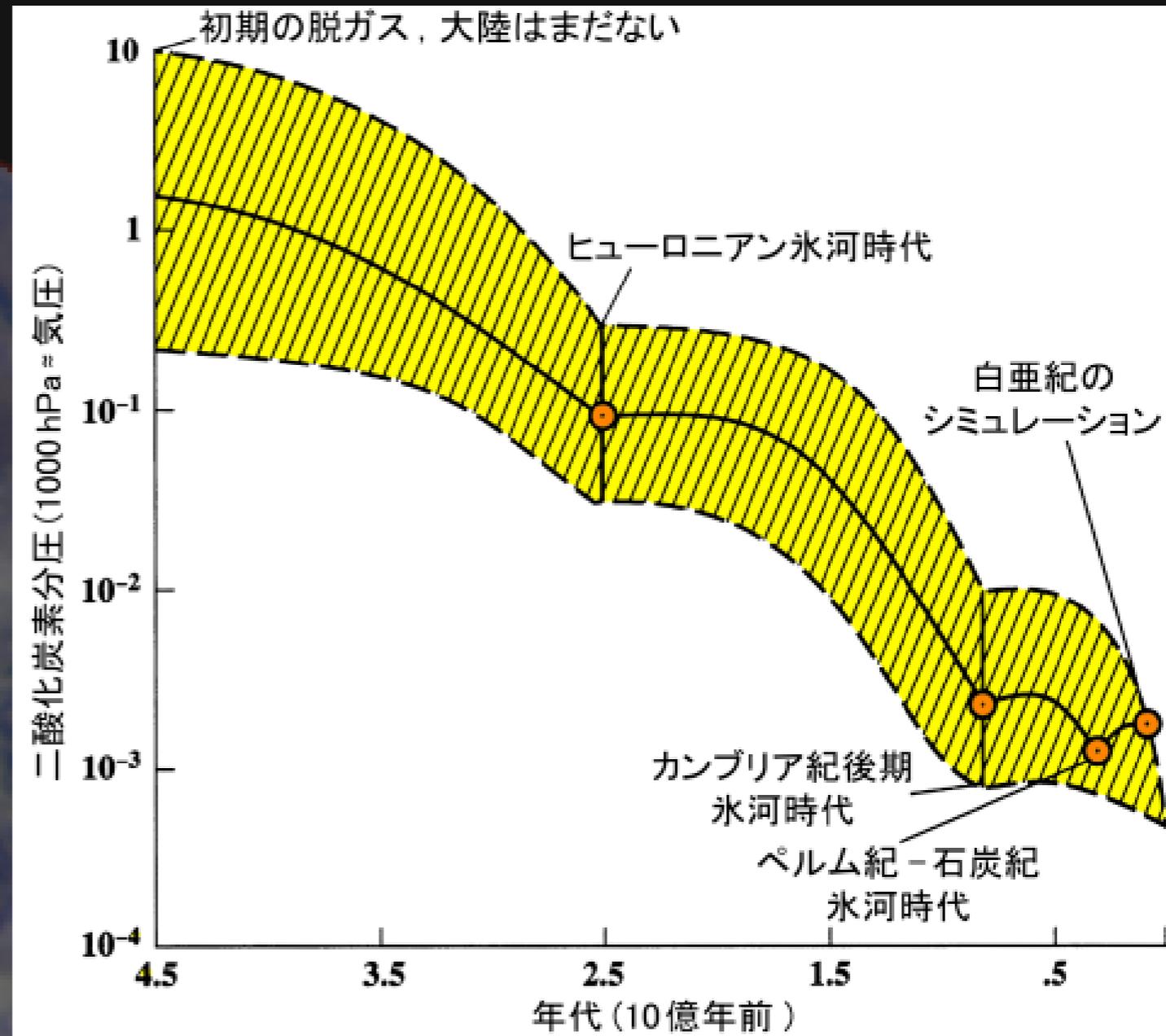
暗い太陽のパラドックス

- 太陽光度は徐々に増加してきた
 - 過去は今よりも寒かったはず



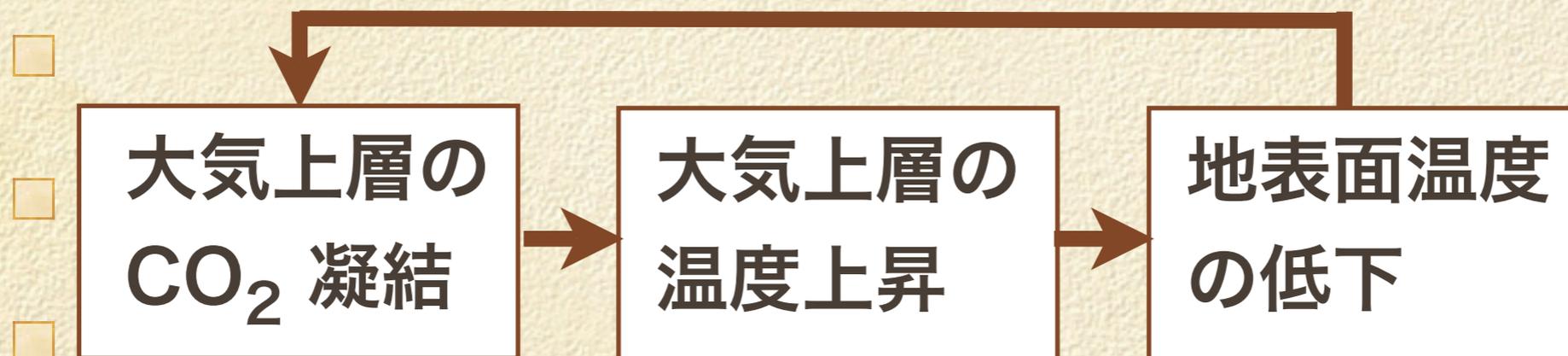
暗い太陽のパラドックス (地球の場合)

- 過去, 海は凍っていたはず...
- 45 億年間海は存在
-
- 二酸化炭素分圧が高ければ再現可能 (Kasting, 1993)



暗い太陽のパラドックス (火星の場合)

- 高い二酸化炭素分圧を維持できない
(Kasting, 1991)
- 大気上層で CO_2 凝結, 暴走冷却



* ただし, CO_2 氷雲の放射特性を無視

パラドックスを解くには...

1. 光学活性ガスの温室効果

- CH_4 , NH_3 , SO_2 etc.

2. ダストの温室効果

- ダストは太陽放射, 赤外放射を吸収

3. 雲による温室効果

- 雲の放射特性を考慮

パラドックスを解くには...

1. 光学活性ガスの温室効果

- CH_4 , NH_3 , SO_2 etc.

2. ダストの温室効果

- ダストは太陽放射, 赤外放射を吸収

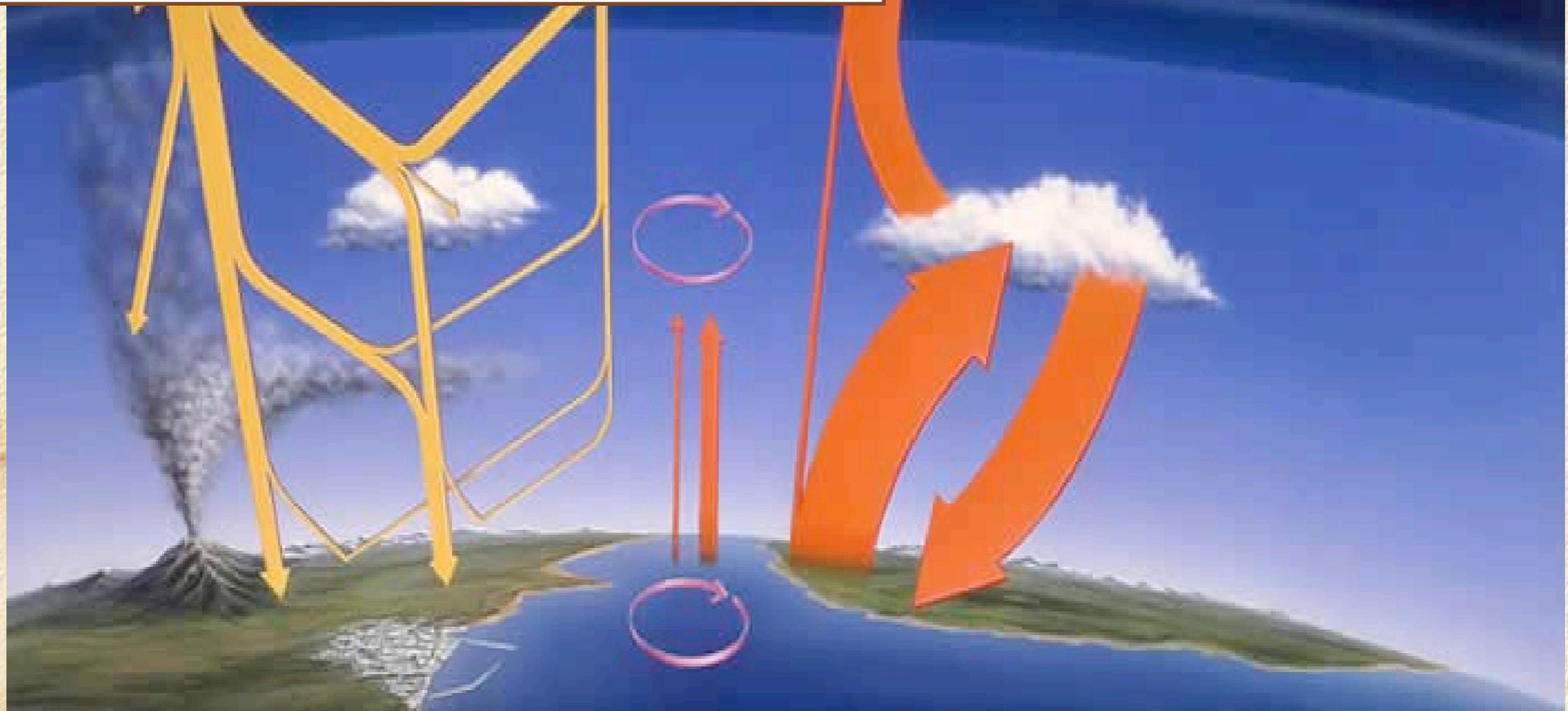
3. 雲による温室効果

- 雲の放射特性を考慮

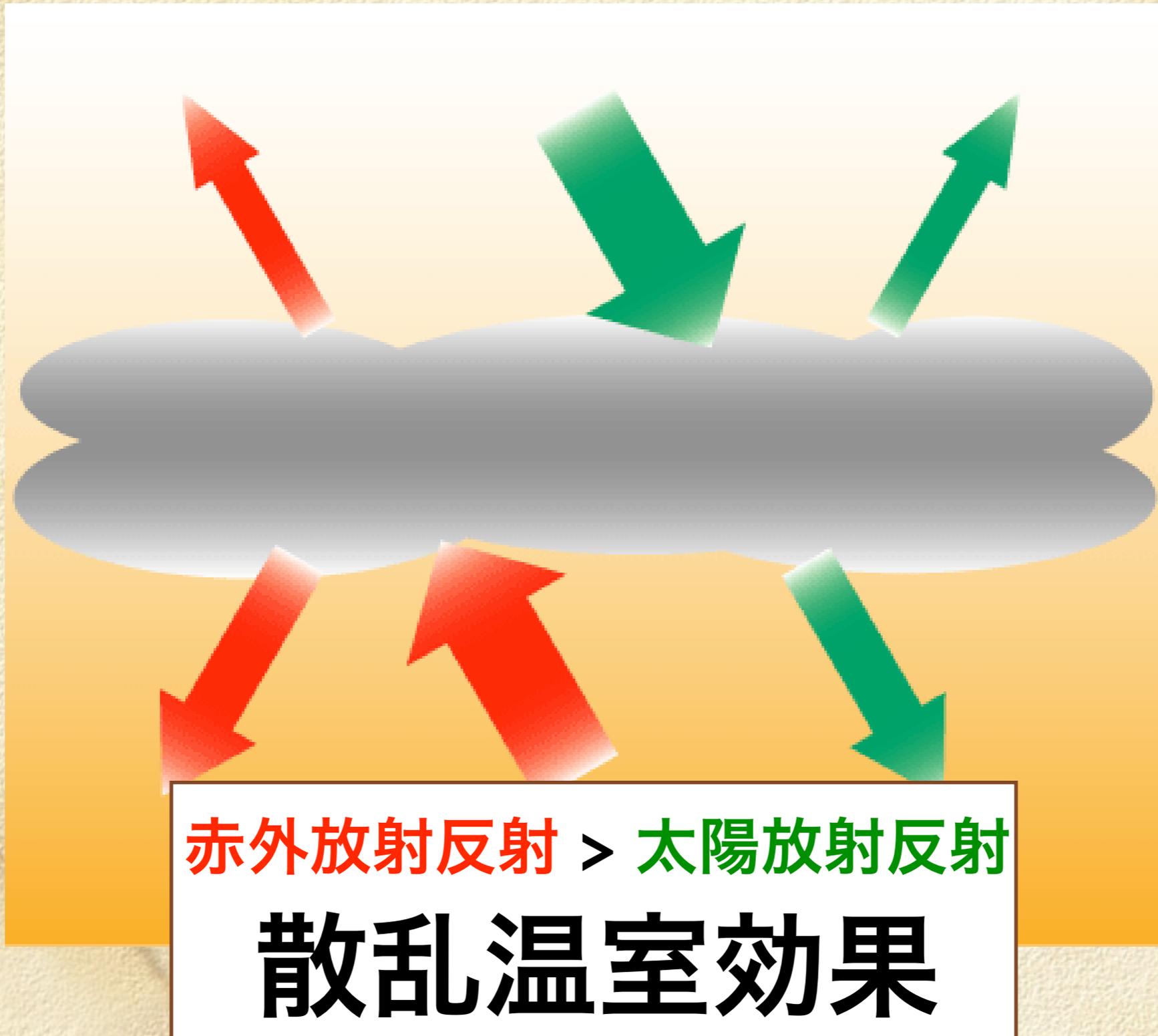
雲による温室効果(水雲)

<http://www.sanyo.co.jp/cc/power/html/energy/04.html>

CO₂ 氷:
吸収よりも散乱が卓越



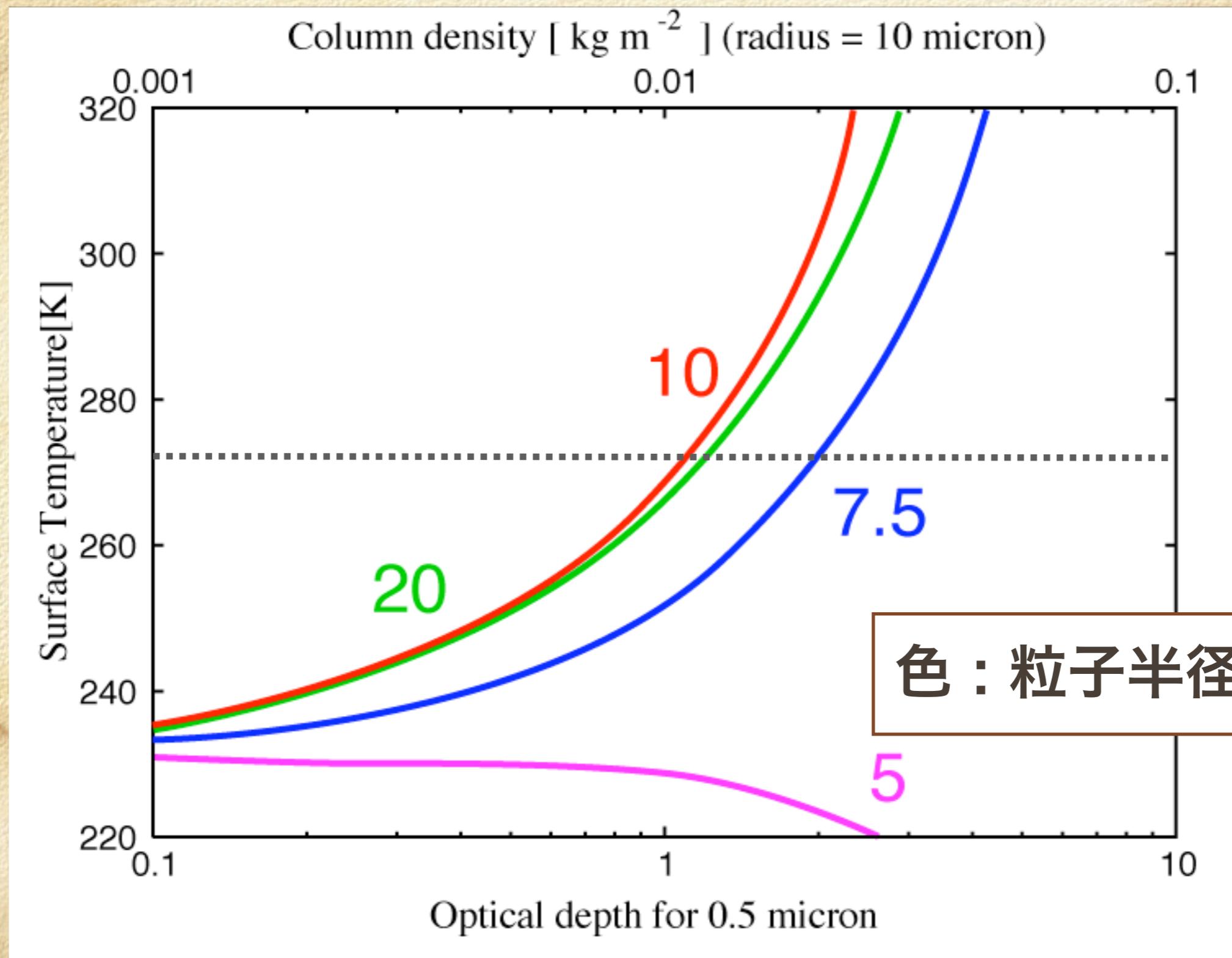
散乱による温室効果



散乱温室効果問題の現状

- 適切な雲粒半径, 雲面密度をもてば, 温暖湿潤な気候は再現可能.
 - Mischna et al. (2000)
 - Colaprete and Toon (2003)
 - 大朝・菊池(惑星科学会, 秋季講演会)
- 雲粒半径, 面密度をどう見積もるか?
 - 温暖な気候を再現できるような値を持つことは可能??

放射平衡時の地表面温度 ($P_s = 10^5 \text{ Pa}$)



散乱温室効果問題の現状

- 適切な雲粒半径, 雲面密度をもてば, 温暖湿潤な気候は再現可能.
 - Mischna et al. (2000)
 - Colaprete and Toon (2003)
 - 大朝・菊池(惑星科学会, 秋季講演会)
- **雲粒半径, 面密度をどう見積もるか?**
 - 温暖な気候を再現できるような値を持つことは可能??

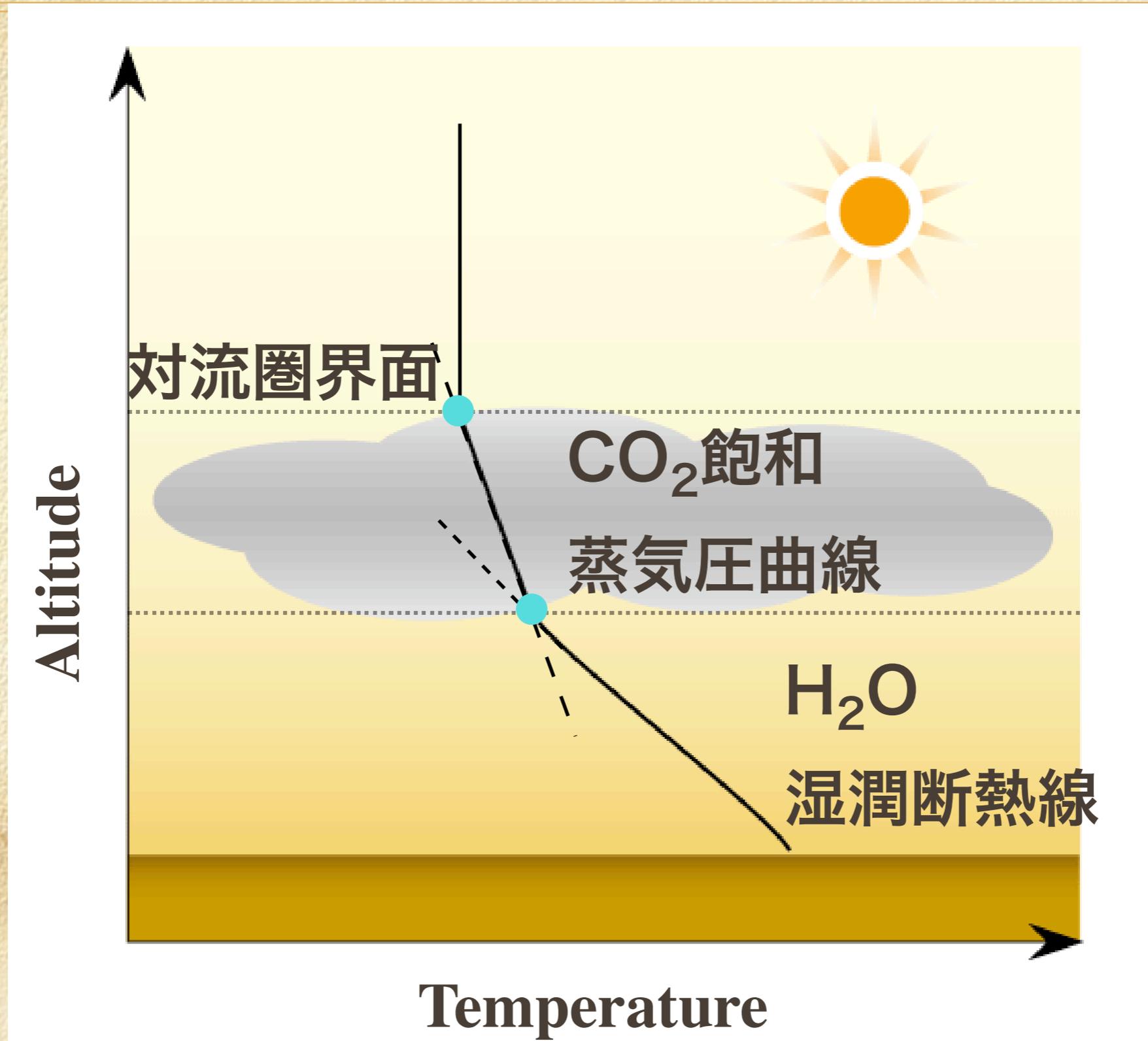
雲パラメータの見積もり

- 雲粒径, 面密度を変化させるメカニズム
 - 雲粒の成長(拡散, 衝突)
 - 雲粒の沈降などによる雲層外への脱出
 - 雲層外へでた雲粒は蒸発するものとする
 - 放射過程における正味加熱(冷却)による蒸発(凝結)

雲パラメータの見積もり

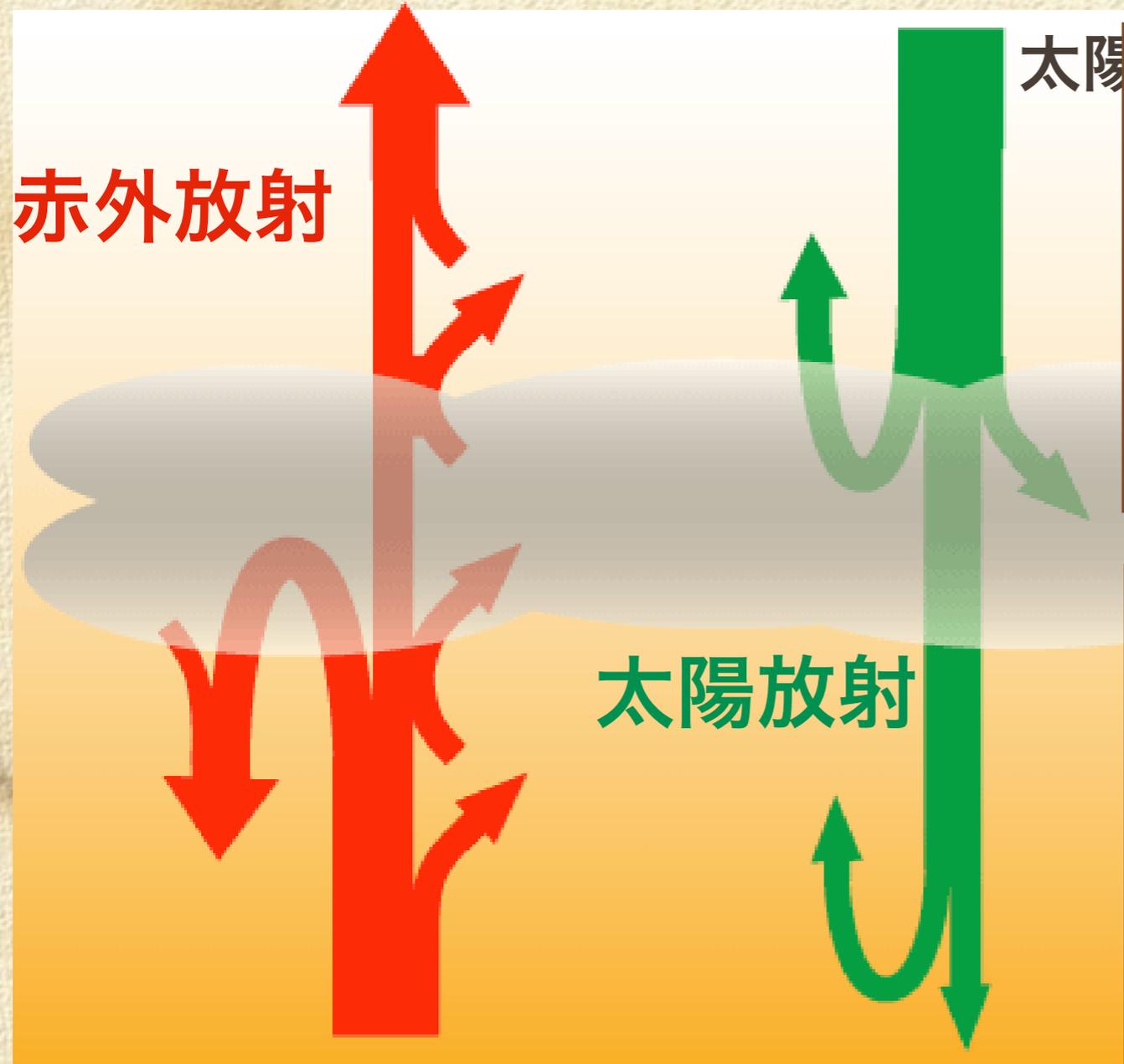
- 雲粒径, 面密度を変化させるメカニズム
 - 雲粒の成長(拡散, 衝突)
 - 雲粒の沈降などによる雲層外への脱出
 - 雲層外へでた雲粒は蒸発するものとする
 - 放射過程における正味加熱(冷却)による蒸発(凝結)

モデル設定:鉛直温度構造



鉛直一次元放射モデル

* 太陽放射入射は全球年平均値



雲層： δ -エディントン近似
吸収/散乱(赤外/太陽)

* ミー理論(球形粒子を仮定)
CO₂復素屈折率(Warren, 1986)

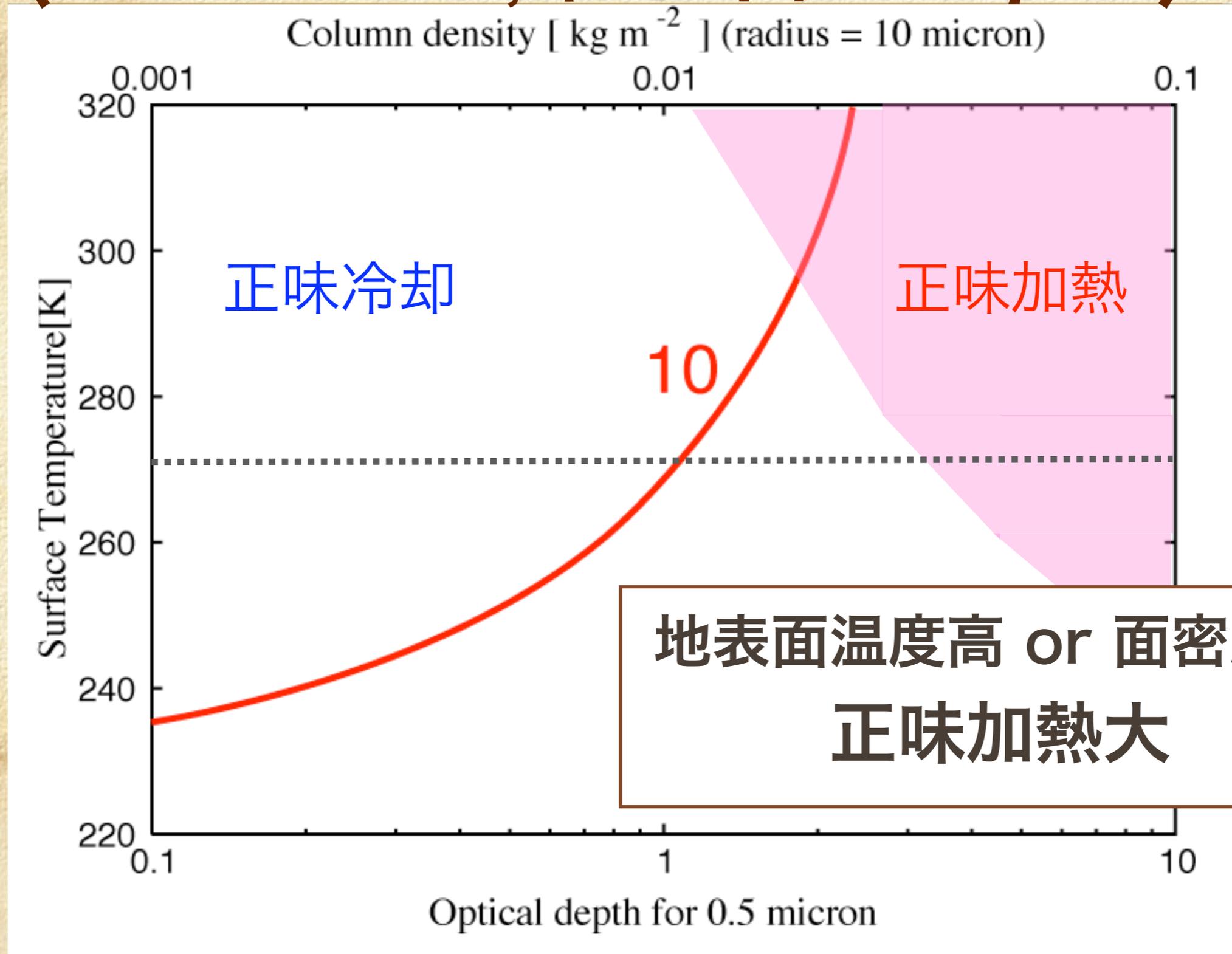
大気層：二方向近似
吸収(赤外のみ)

* line by line 法
吸収線パラメータ(HITRAN)

地表面アルベド: 0.2
(対太陽放射のみ)

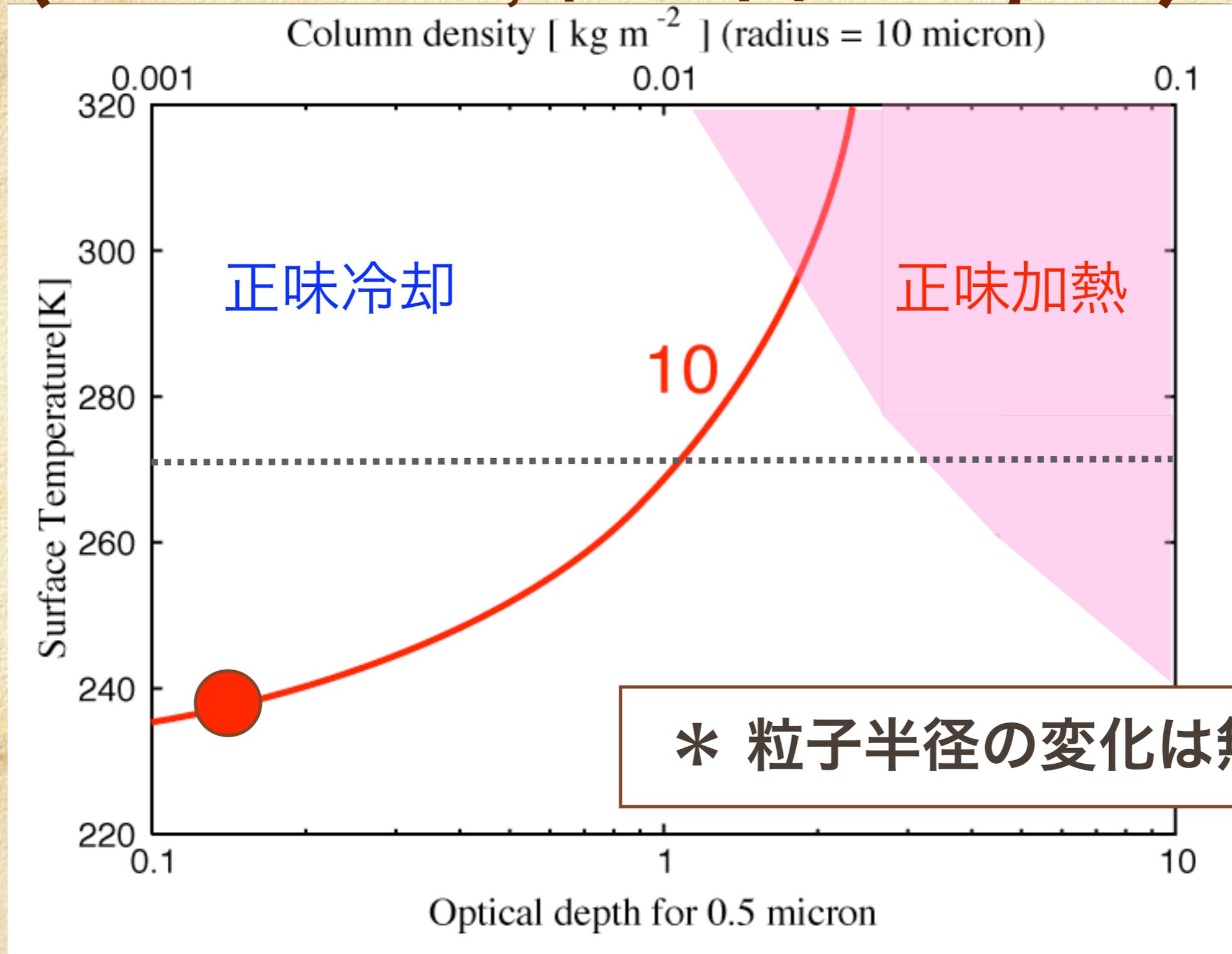
面密度の見積もり

($P_s = 10^5 \text{ Pa}$, 粒子半径 $10 \mu\text{m}$)



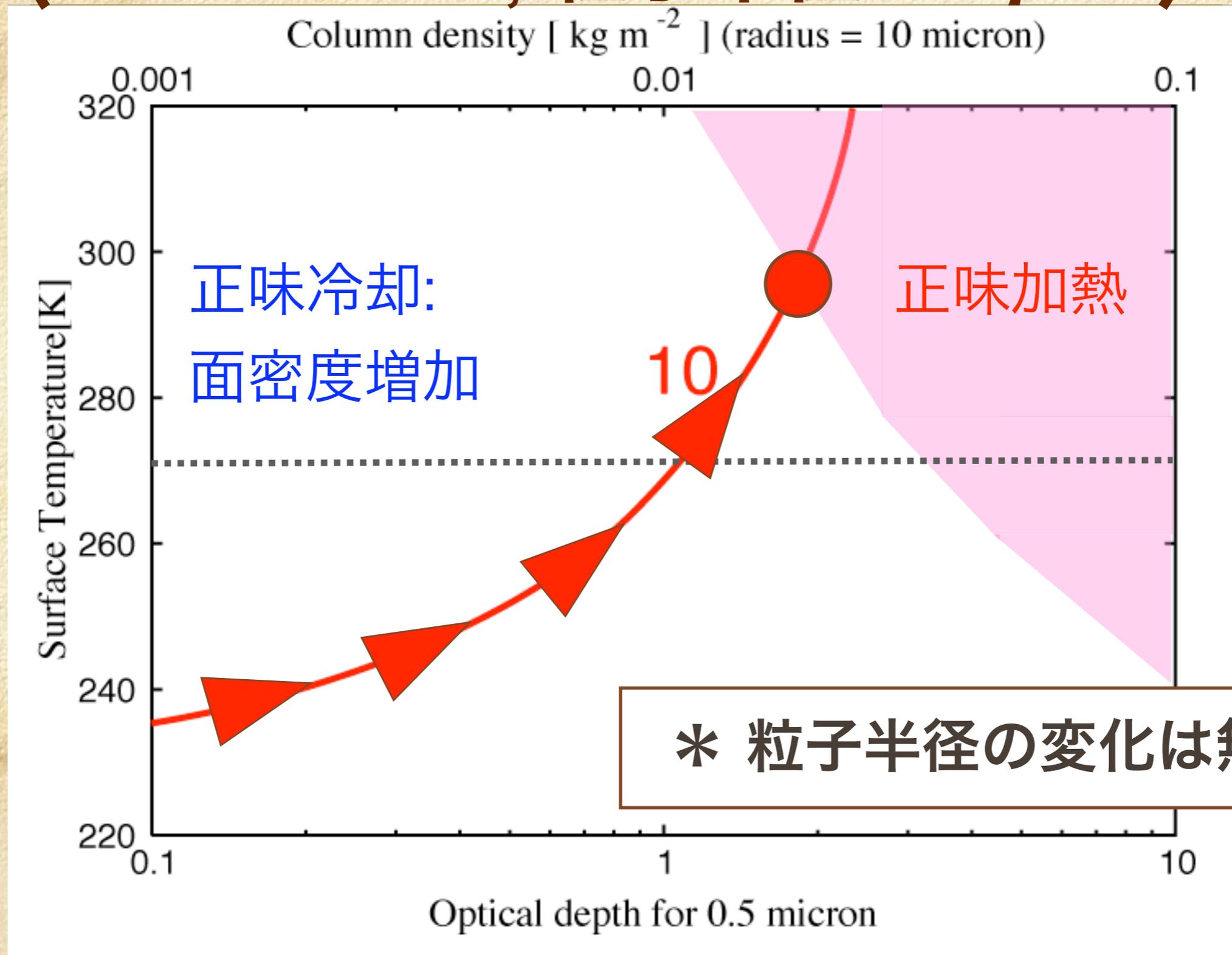
面密度の見積もり

($P_s = 10^5 \text{ Pa}$, 粒子半径 $10 \mu\text{m}$)



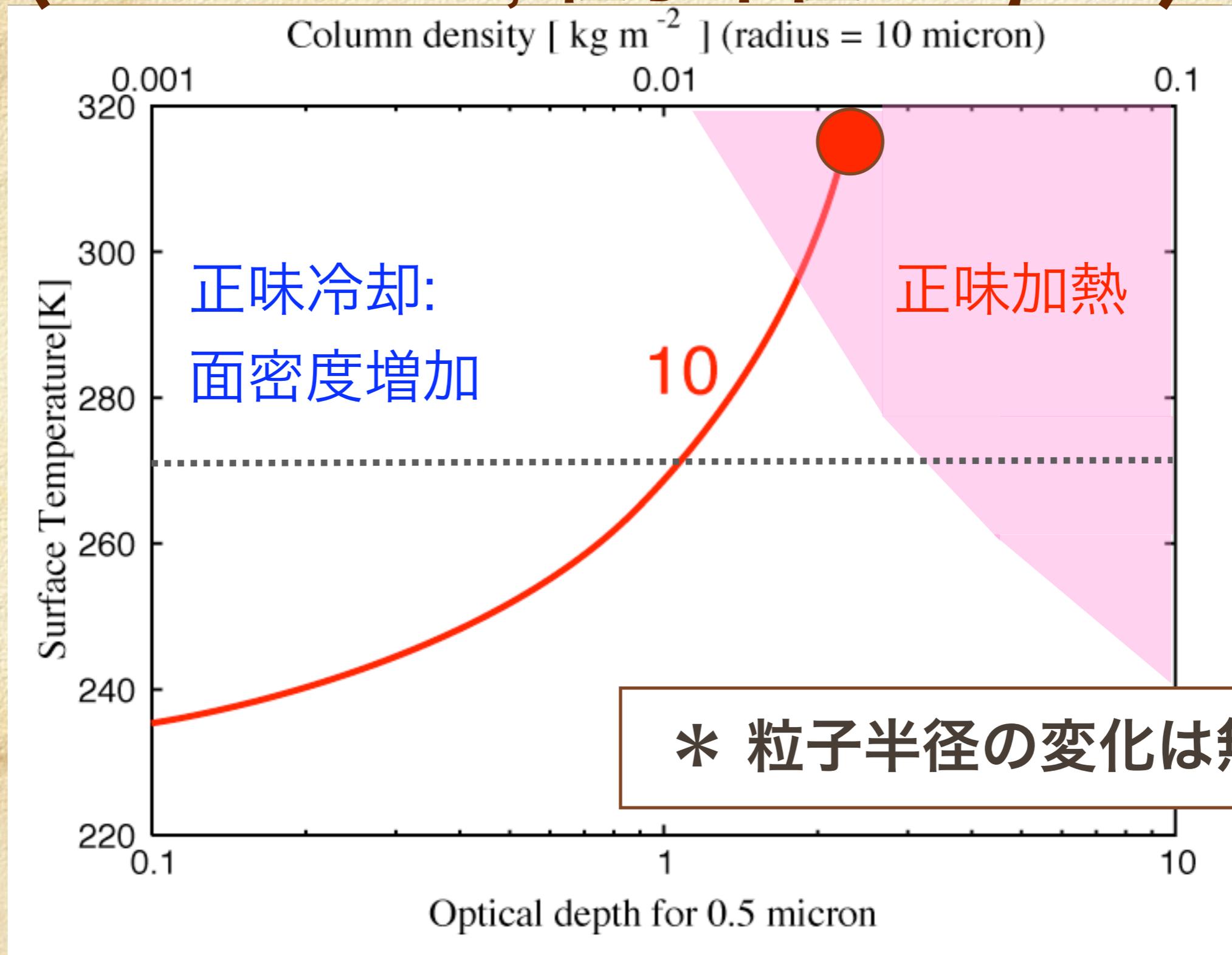
面密度の見積もり

($P_s = 10^5 \text{ Pa}$, 粒子半径 $10 \mu\text{m}$)



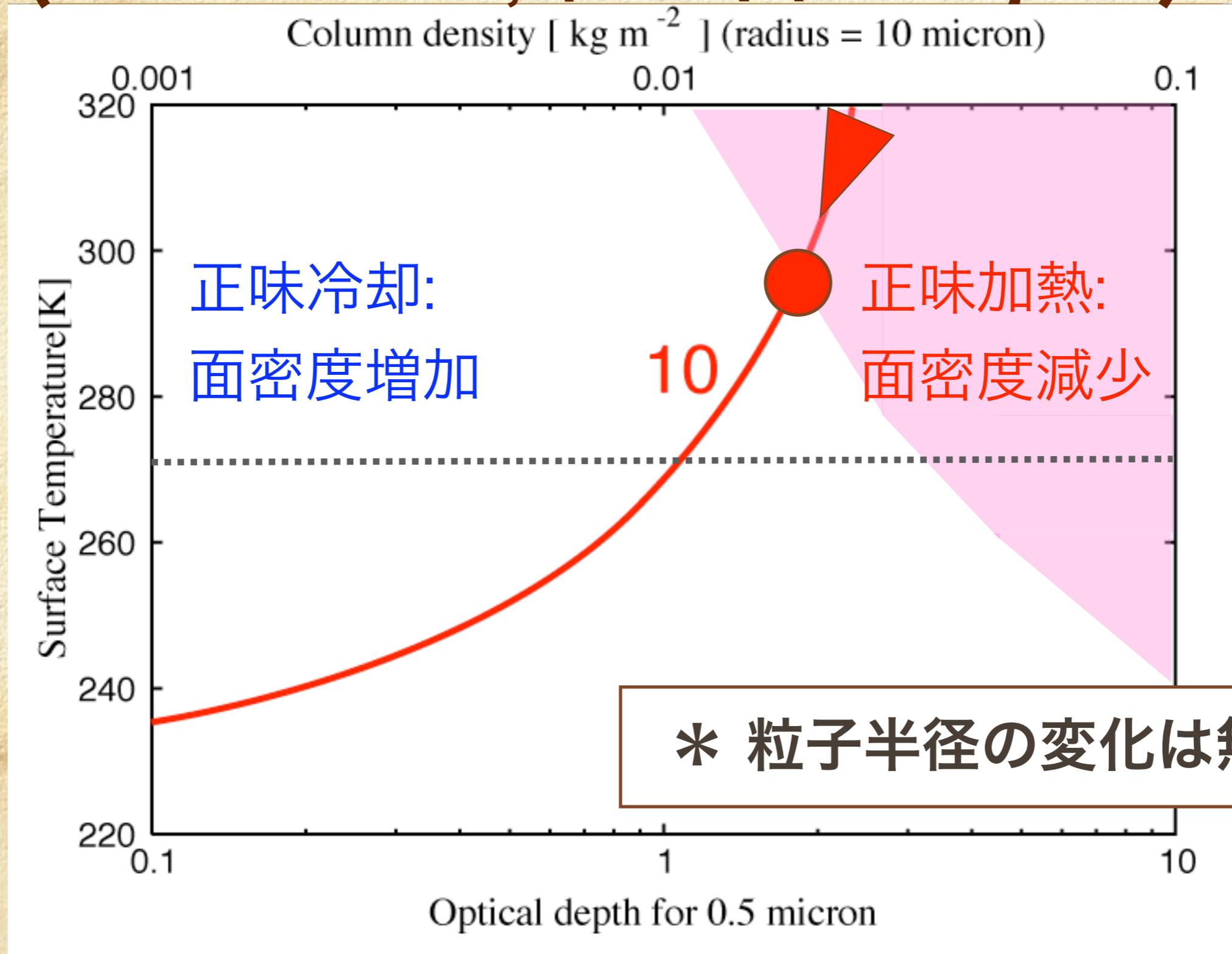
面密度の見積もり

($P_s = 10^5$ Pa, 粒子半径 $10\mu\text{m}$)



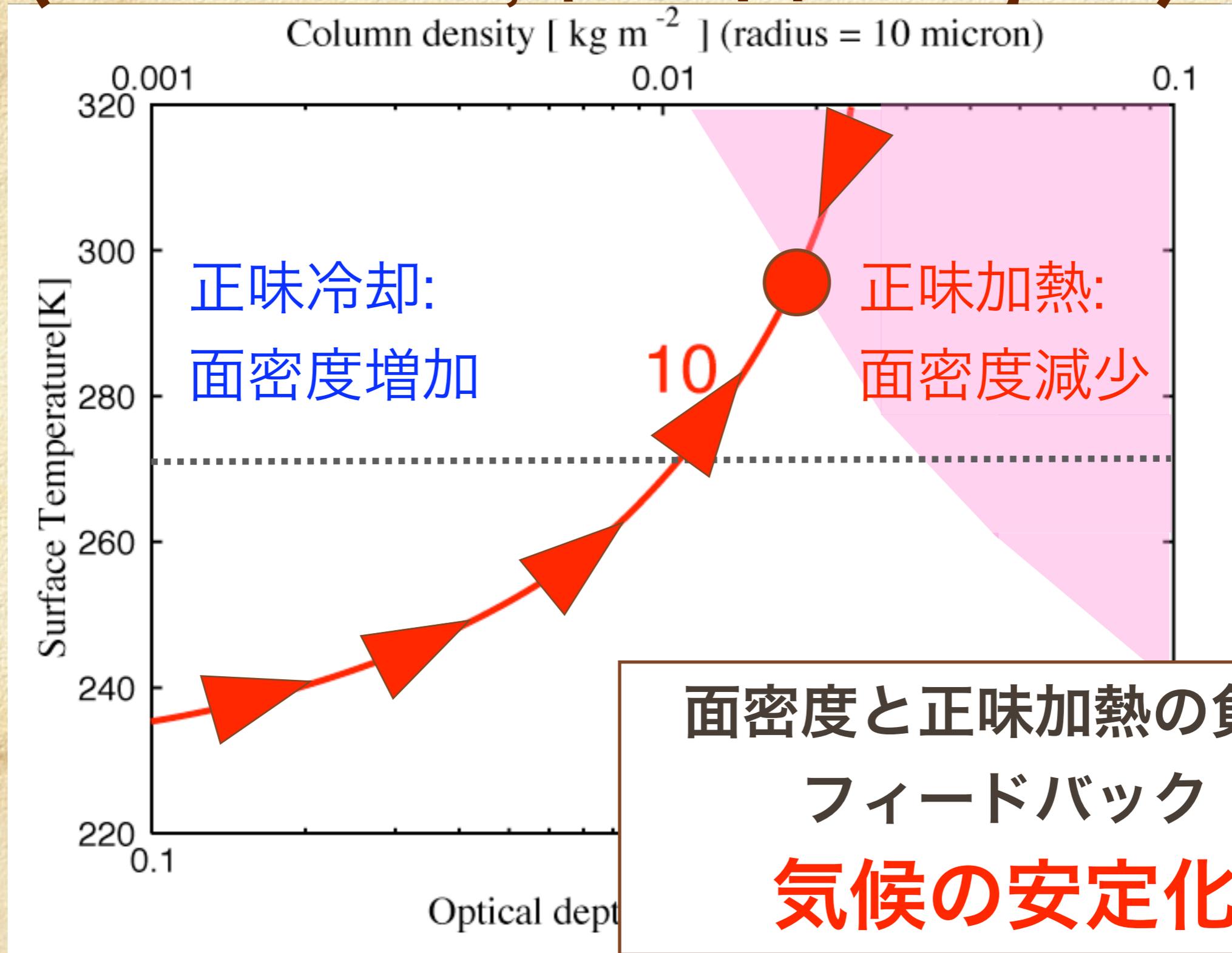
面密度の見積もり

($P_s = 10^5 \text{ Pa}$, 粒子半径 $10 \mu\text{m}$)

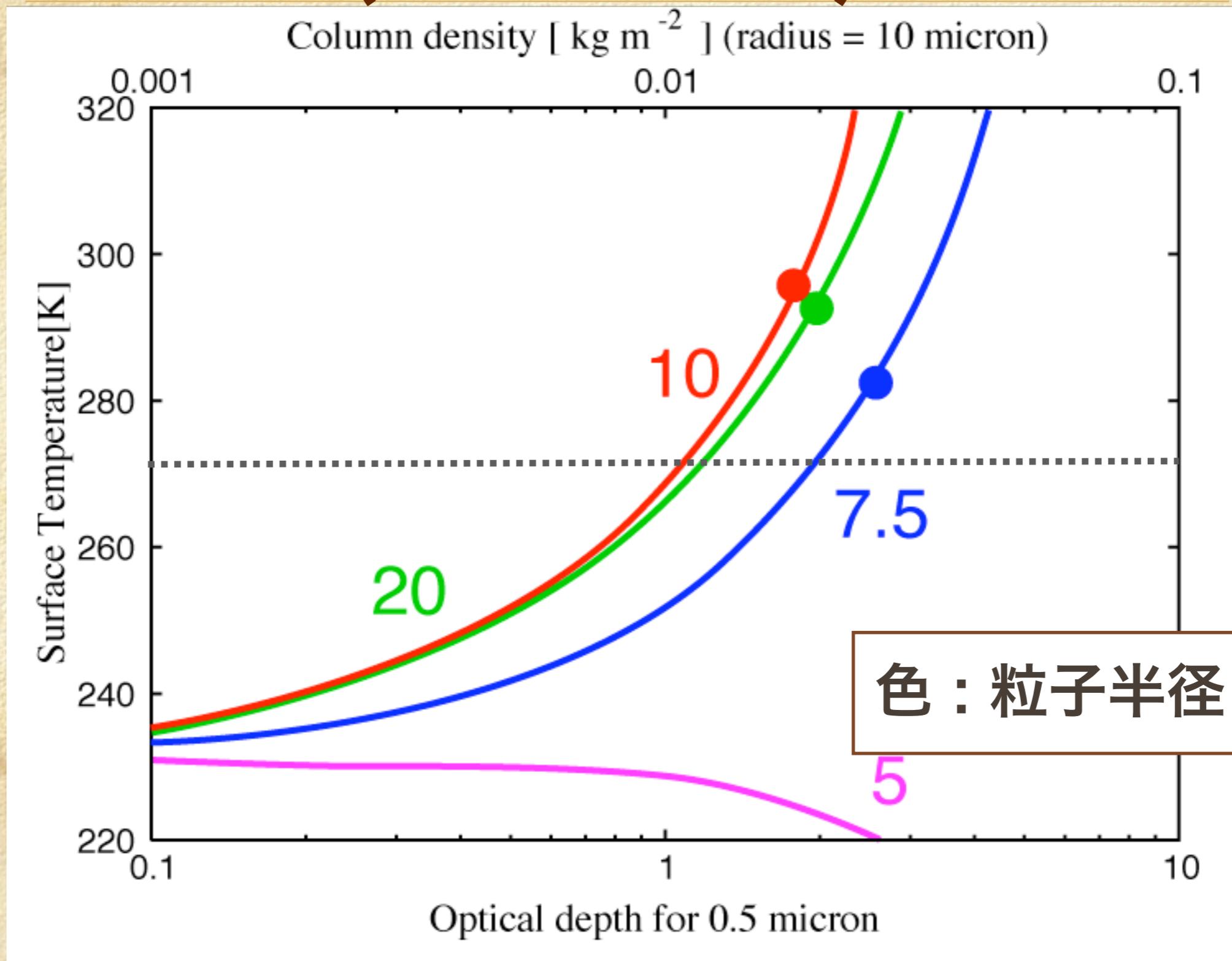


面密度の見積もり

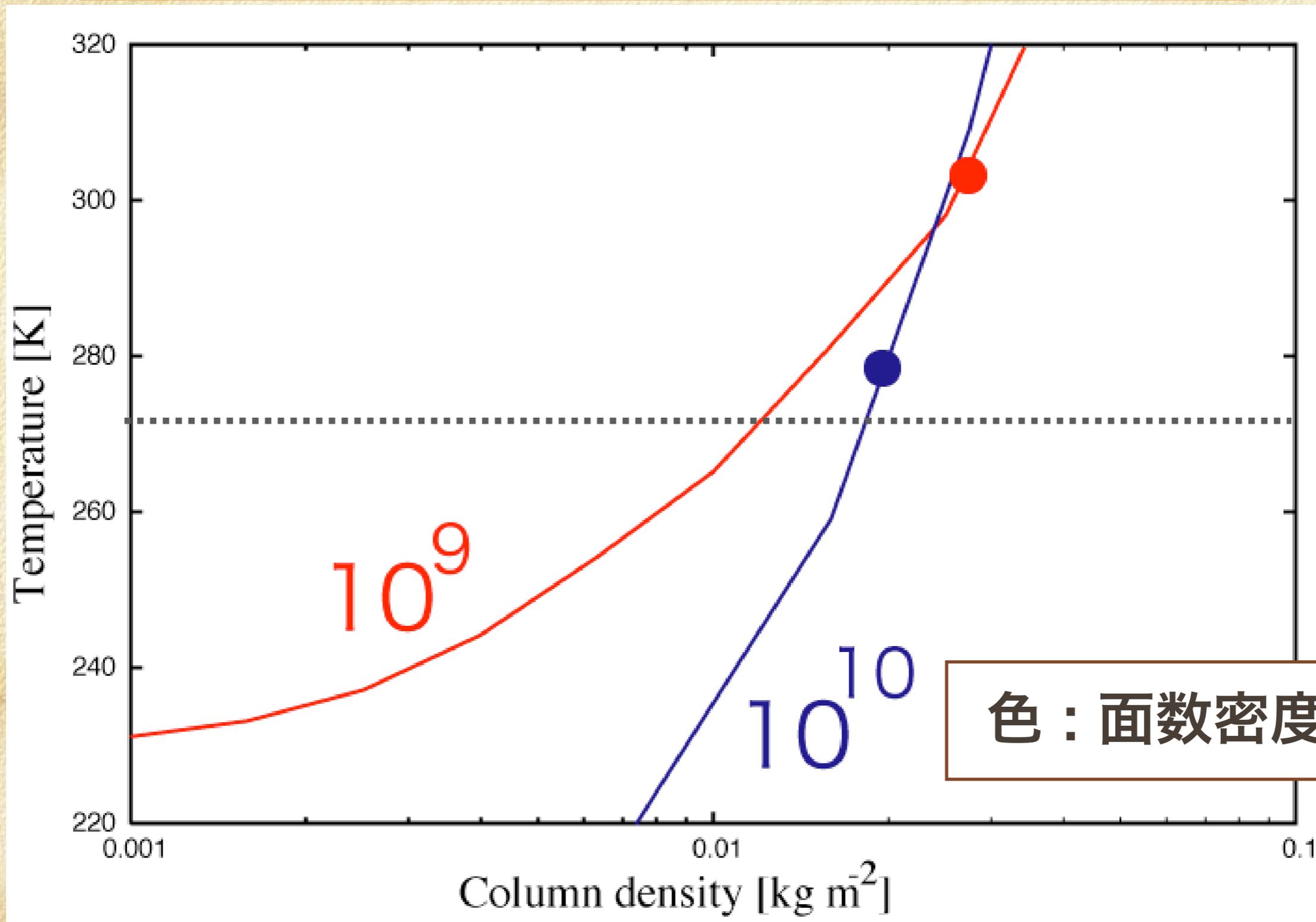
($P_s = 10^5 \text{ Pa}$, 粒子半径 $10 \mu\text{m}$)



面密度の見積もり ($P_s = 10^5 \text{ Pa}$)



面密度の見積もり ($P_s = 10^5 \text{ Pa}$)



まとめ

- 鉛直一次元放射モデルを用いて二酸化炭素氷雲の散乱温室効果を検討
 - 273 [K]以上の地表面温度となるケースが存在
 - 雲面密度-放射に対する正味加熱の負のフィードバック
 - 大気圧 1 atm, 粒径 7.5-20 μm : ~ 280 K
 - 大気圧 1 atm, 雲粒の面数密度 10^9 m^{-2} :

今後の展開

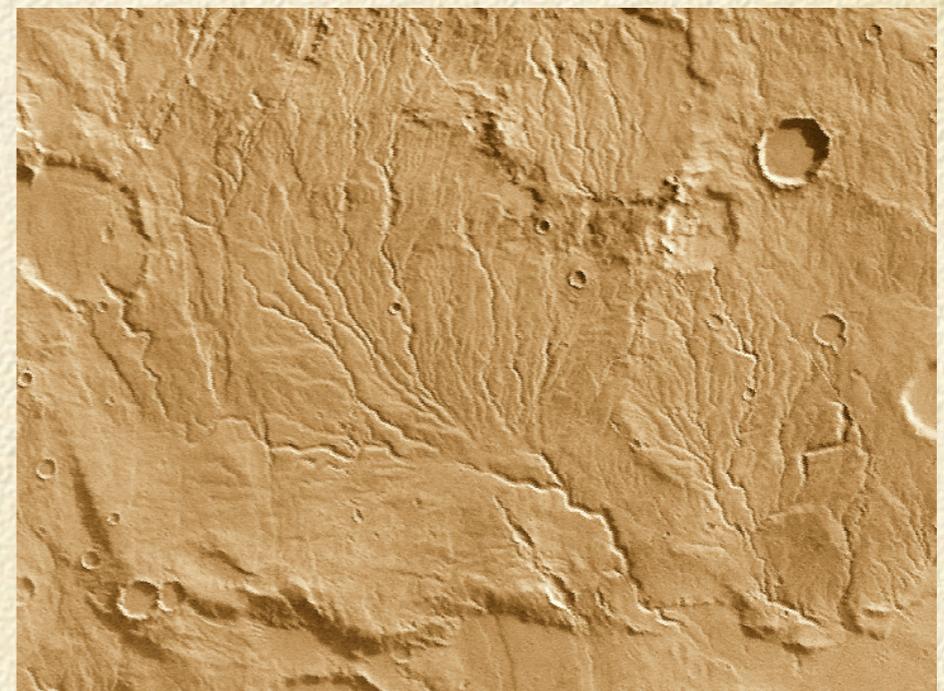
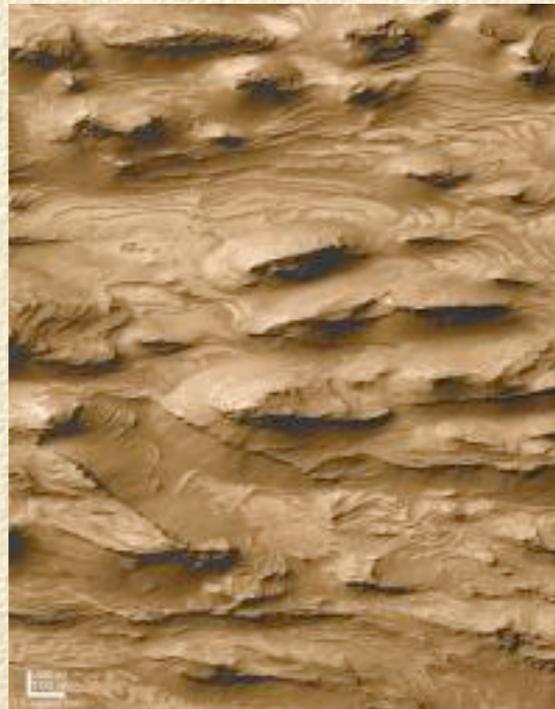
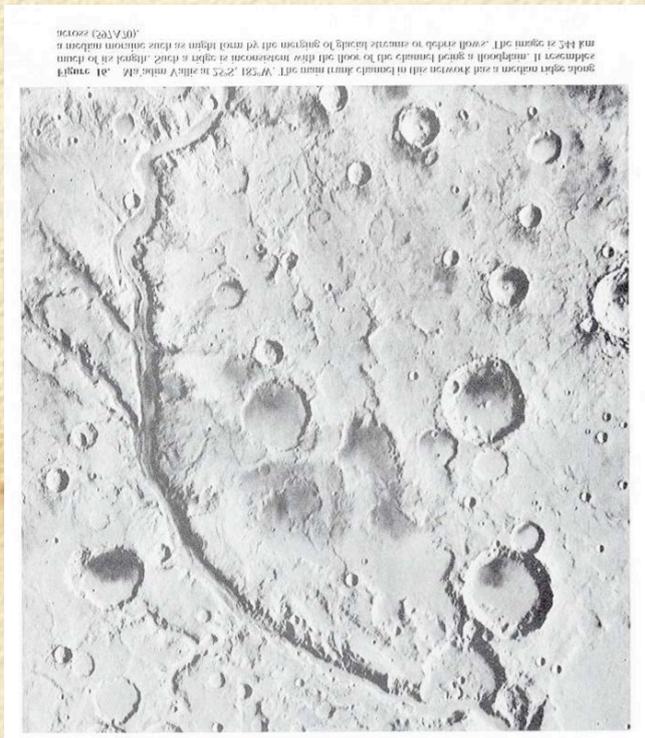
- 現状：雲層の放射モデルの改良中
 - 雲粒による消散, 散乱, 射出
+ 大気による消散, 射出
 - 最終的には Discrete-Ordinate method
- 考えてみたいトピックス
 - 雲粒成長/落下過程, 対流圏での対流
 - 雲の鉛直構造(粒子/面密度/温度)
 - habitable zone の外側境界問題

参考文献

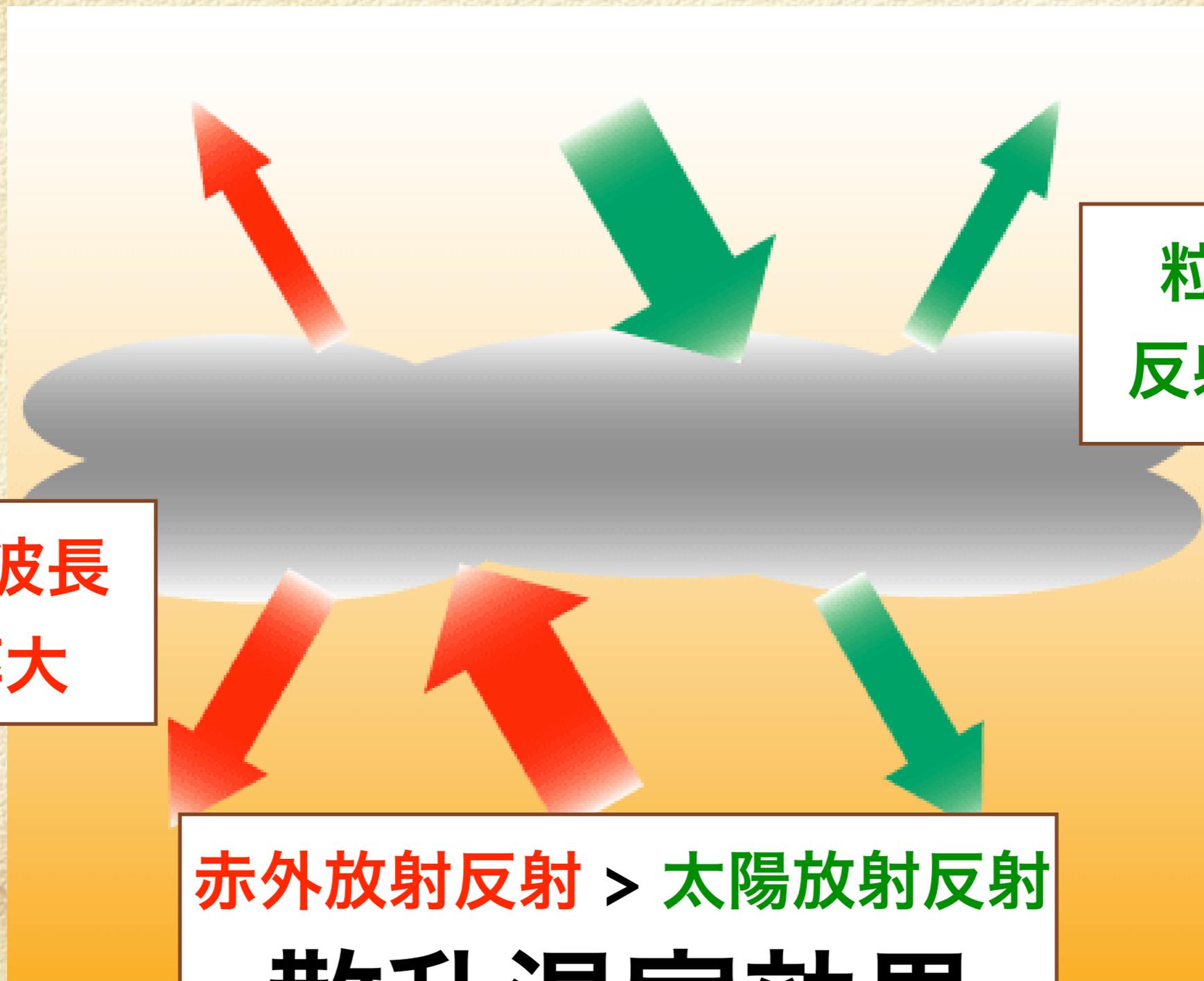
- Houghton J. 2002 : The Physics of Atmospheres third edition, Cambridge Univ. Press.,pp320
- NASA/JPL Planetary Photojournal, <http://photojournal.jpl.nasa.gov/>
- Kasting J. F.,1991 : CO₂ condensation and the climate of early mars, *Icarus*, Vol. 94, pp. 1-13
- Pierrehumbert R. T. and Erlick C., 1998 : On the scattering greenhouse effect of CO₂ ice cloud, *J. Atmos. Sci.*, Vol.55, pp.1987-1903
- Yokohata T., Kosugita K., Matatsugu O.,and Kuramot K., 2002 : Radiative absorption by CO₂ 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

暗い太陽のパラドックス

- 火星の場合：
 - 形成初期は温暖湿潤な気候
 - それ以降もたびたび温暖な気候が出現



散乱による温室効果



粒径小
反射率大

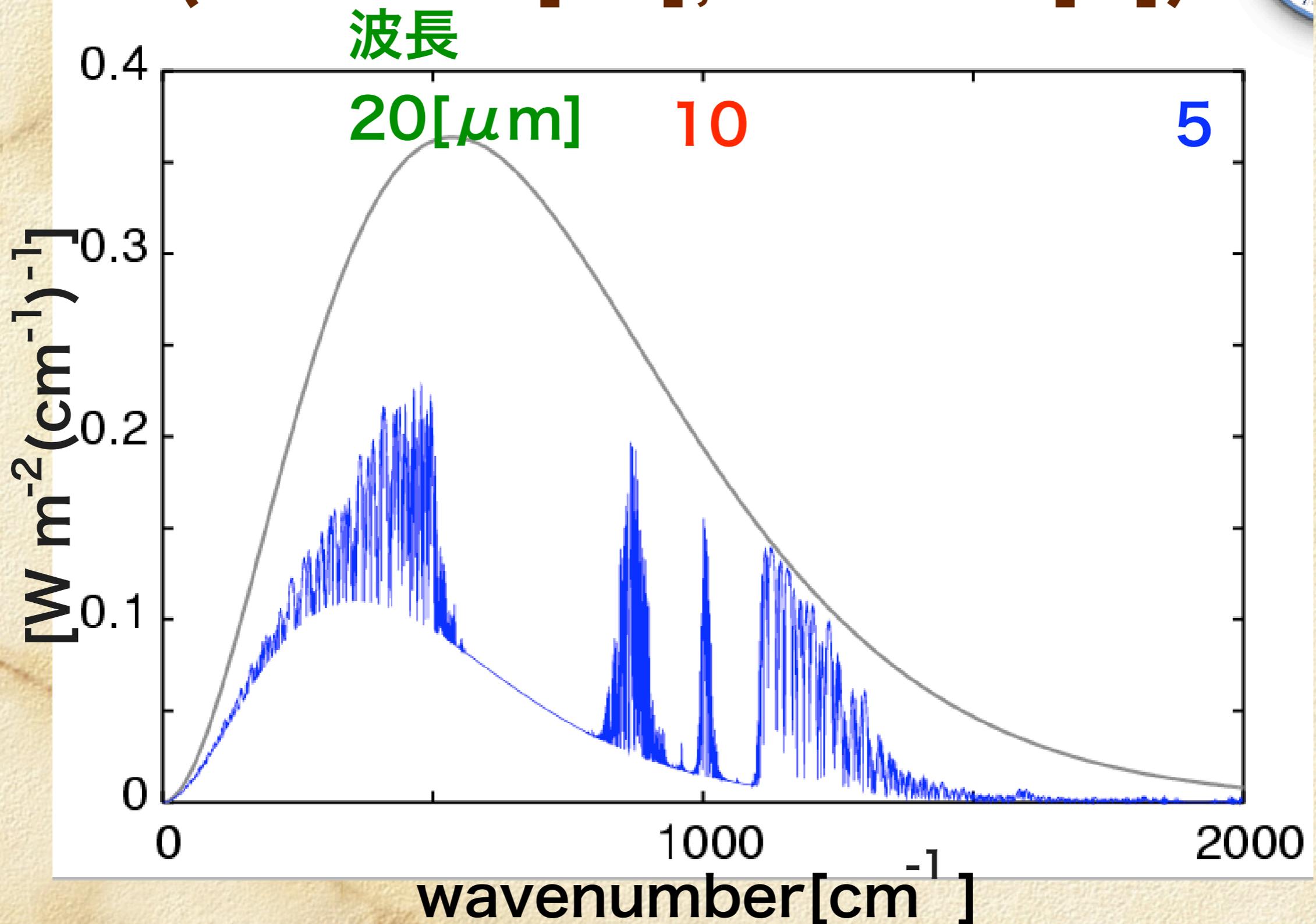
粒径 ~ 波長
反射率大

赤外放射反射 > 太陽放射反射

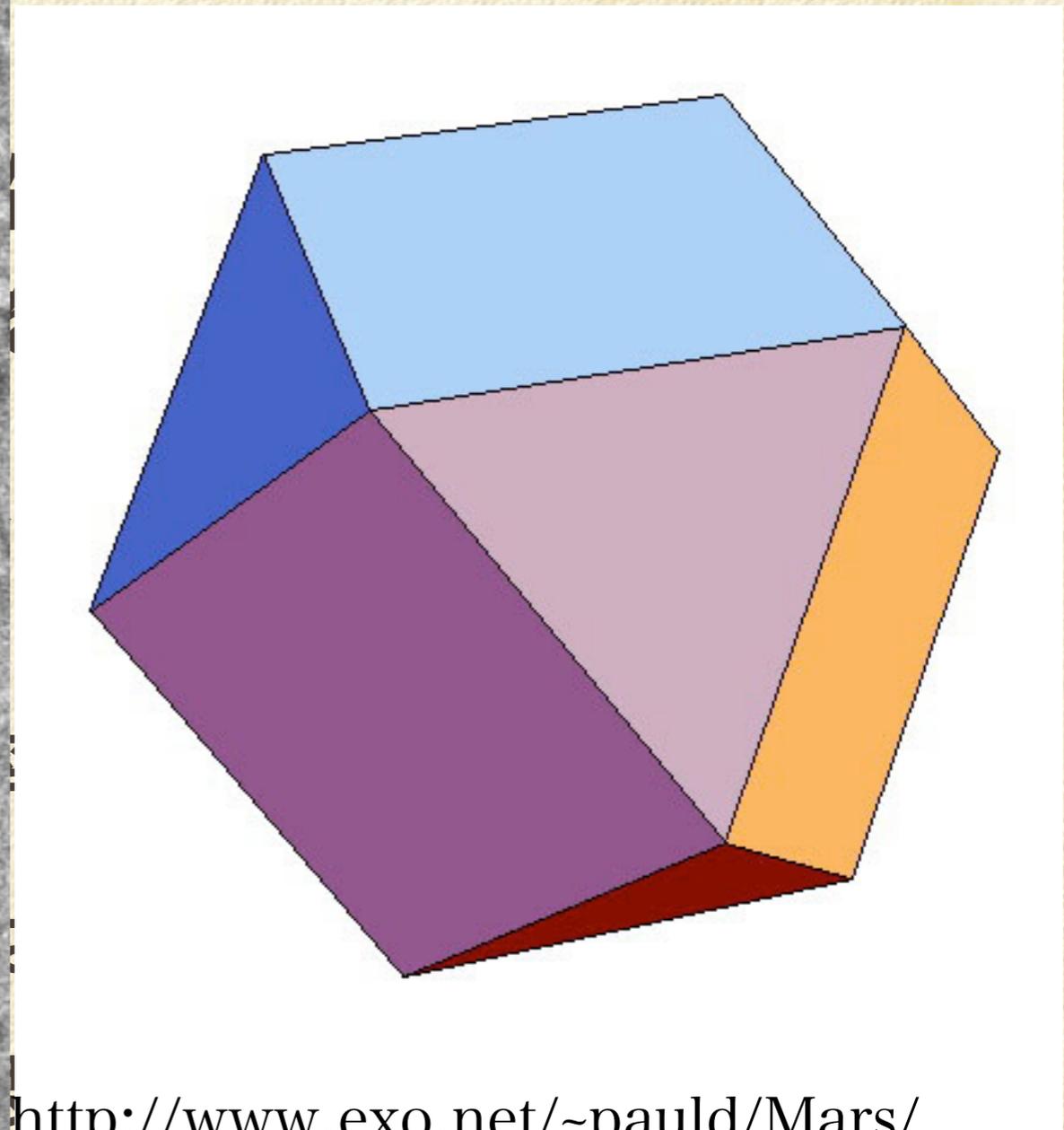
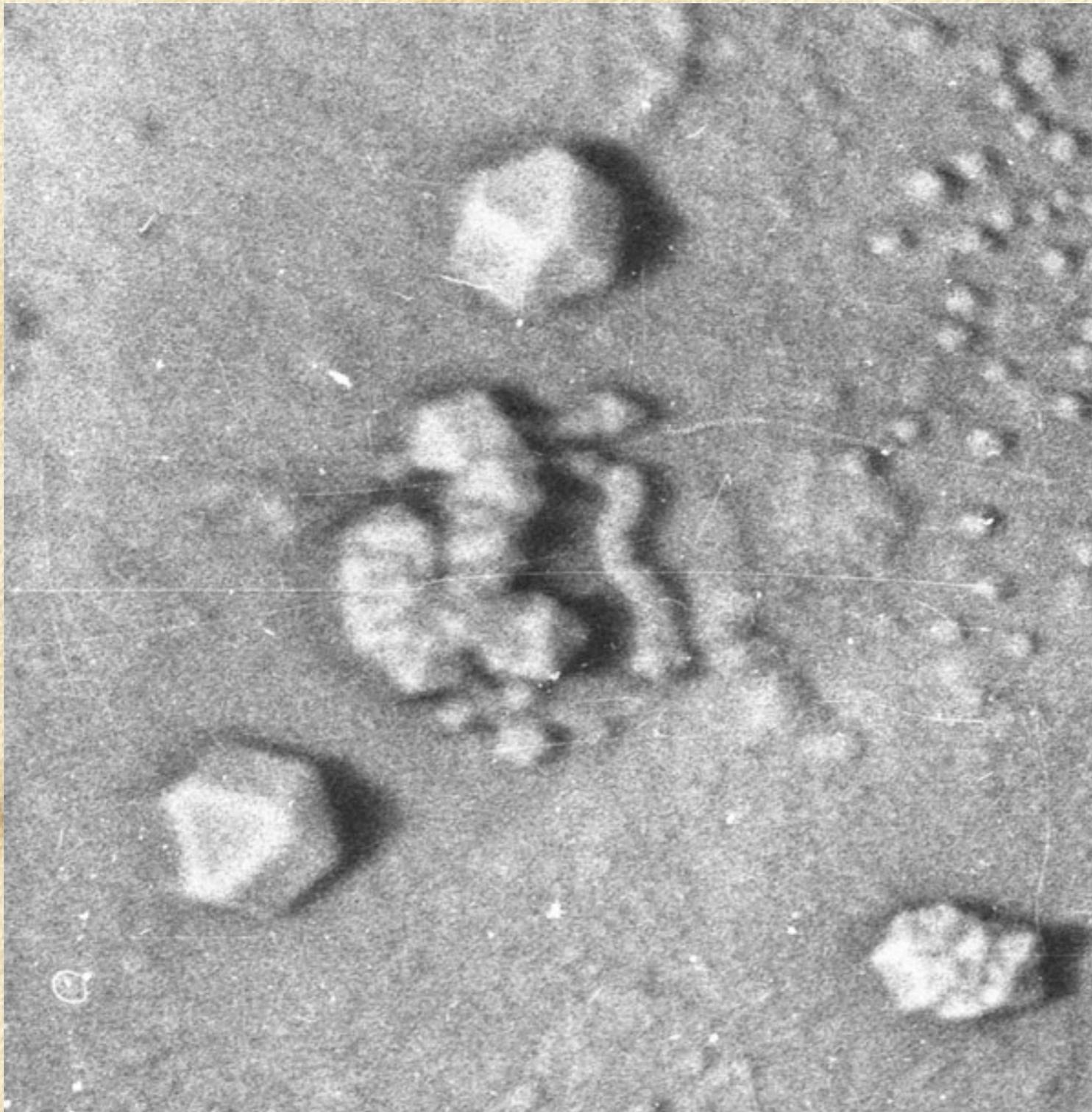
散乱温室効果

雲への入射スペクトル(赤外)

($P_s = 10^5$ [Pa], $T_s = 273$ [K])



二酸化炭素の結晶構造



<http://www.exo.net/~pauld/Mars/4snowflakes/cuboctahedronrh400.jpeg>

<http://www.exo.net/~pauld/Mars/4snowflakes/snowflakes200.jpeg>