

古火星における 二酸化炭素氷雲の散乱温室効果と 気候の安定性

*光田 千紘 (北大・理・地惑)
横畠 徳太 (国立環境研究所)
倉本 圭 (北大・理・地惑)

火星古気候の謎

バレーネットワーク



- 温暖湿潤な気候?
 - 地表に流水の痕跡
 - 高い地表風化率
- 二酸化炭素-水蒸気大気
- 太陽光度: 現在の 75%

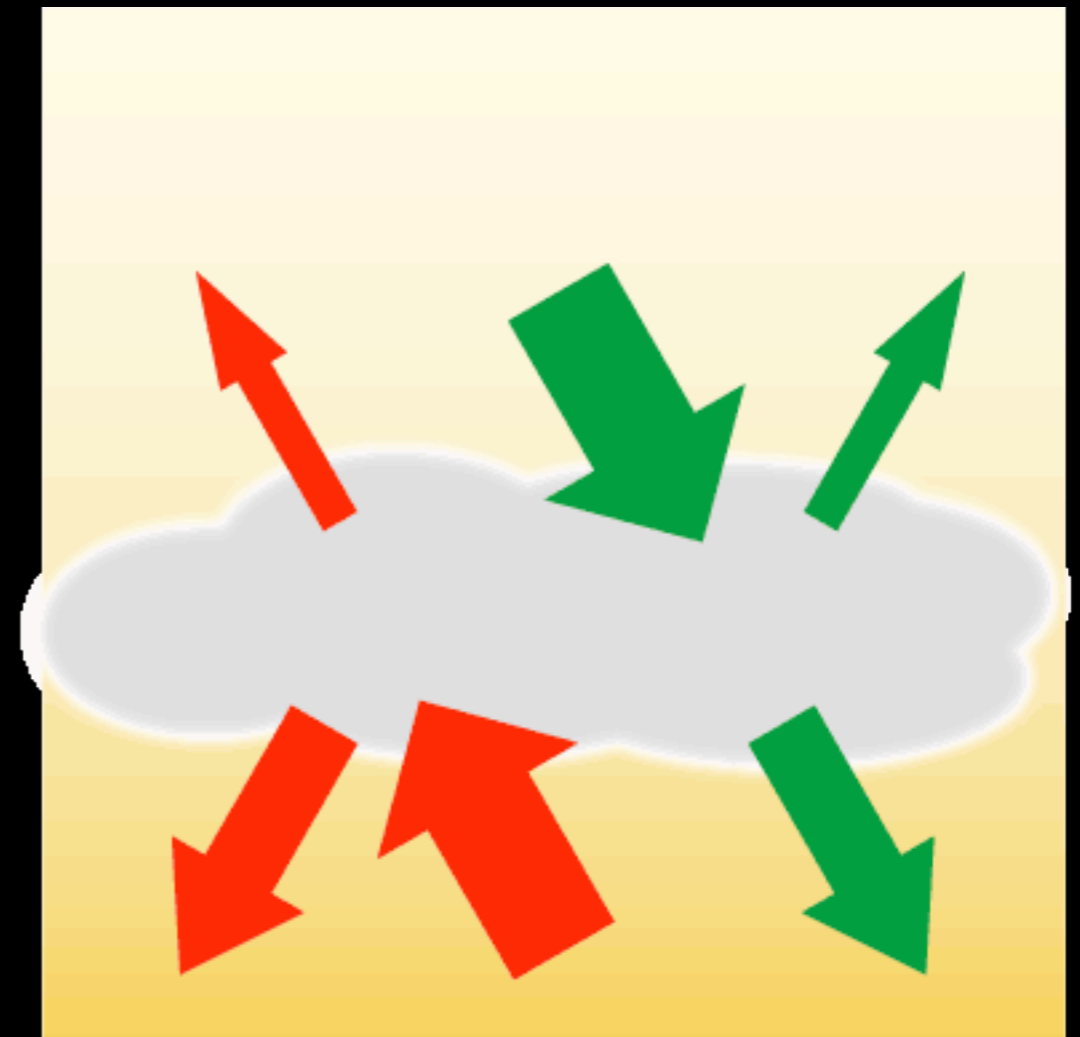
温暖湿潤な気候は
再現されない

(Kasting, 1991)

氷雲の散乱による温室効果

- 理想的な雲の粒径・面密度であれば温暖湿潤な気候が再現可 (e.g. Mischna et al, 2000)

- 理想的な雲の形成・維持は可能か??



赤外放射反射 > 太陽放射反射

散乱温室効果

粒径・面密度の決定機構

- 雲の粒径, 面密度を変化させるメカニズム
 - 衝突合体
 - 雲粒の重力沈降による雲層外への脱出
 - 放射過程における正味加熱(冷却)による蒸発(凝結)

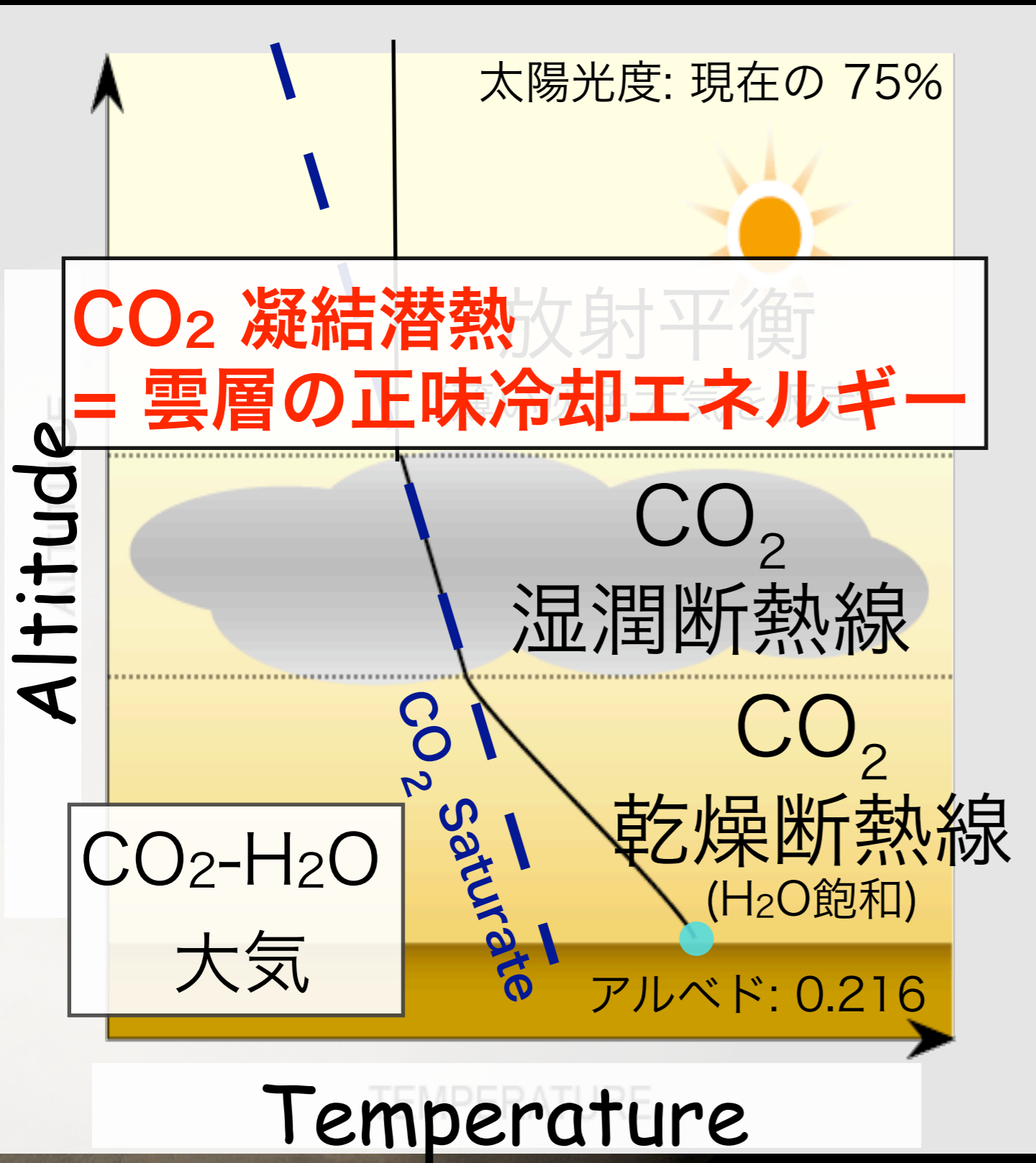
粒径・面密度の決定機構

- 雲の粒径, 面密度を変化させるメカニズム
 - 衝突合体
 - 雲粒の重力沈降による雲層外への脱出
 - 放射過程における正味加熱(冷却)による蒸発(凝結)

本研究の目的

雲面密度と温室効果の評価

鉛直一次元放射モデル



二方向近似

(雲層: δ -エディントン近似)

雲粒の光学係数

* ミー理論(球形粒子を仮定)

* CO₂ 複素屈折率(Warren, 1986)

* 凝結核面数密度及び粒径を
パラメータ, 粒径分布は無視

大気の光学係数(赤外のみ)

* Line-by-line 法

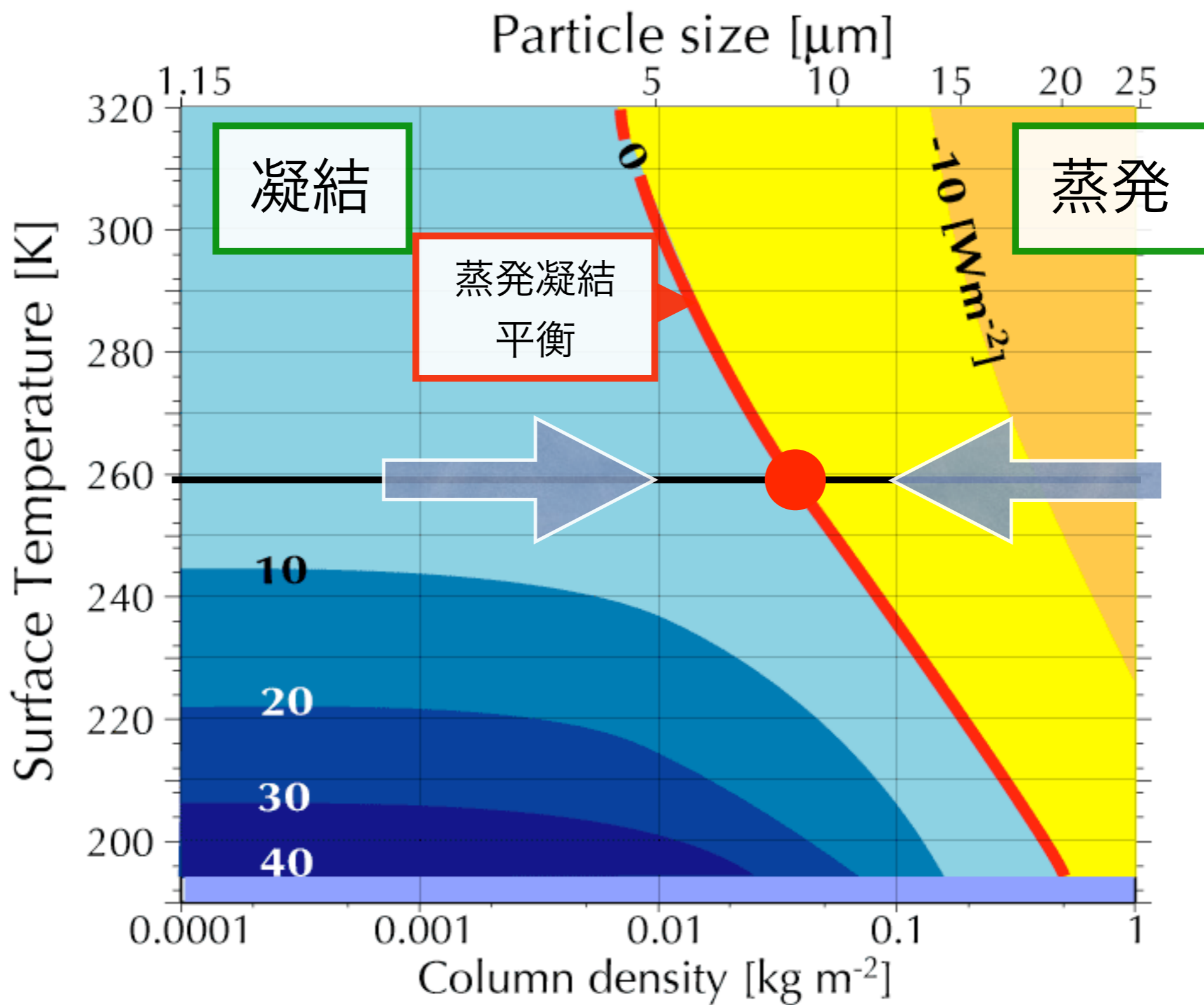
* 吸収線 DB (HITRAN 2000)

* ただし, 雲層ではランダムモデル

* バンドパラメータ(Houghton 2002)

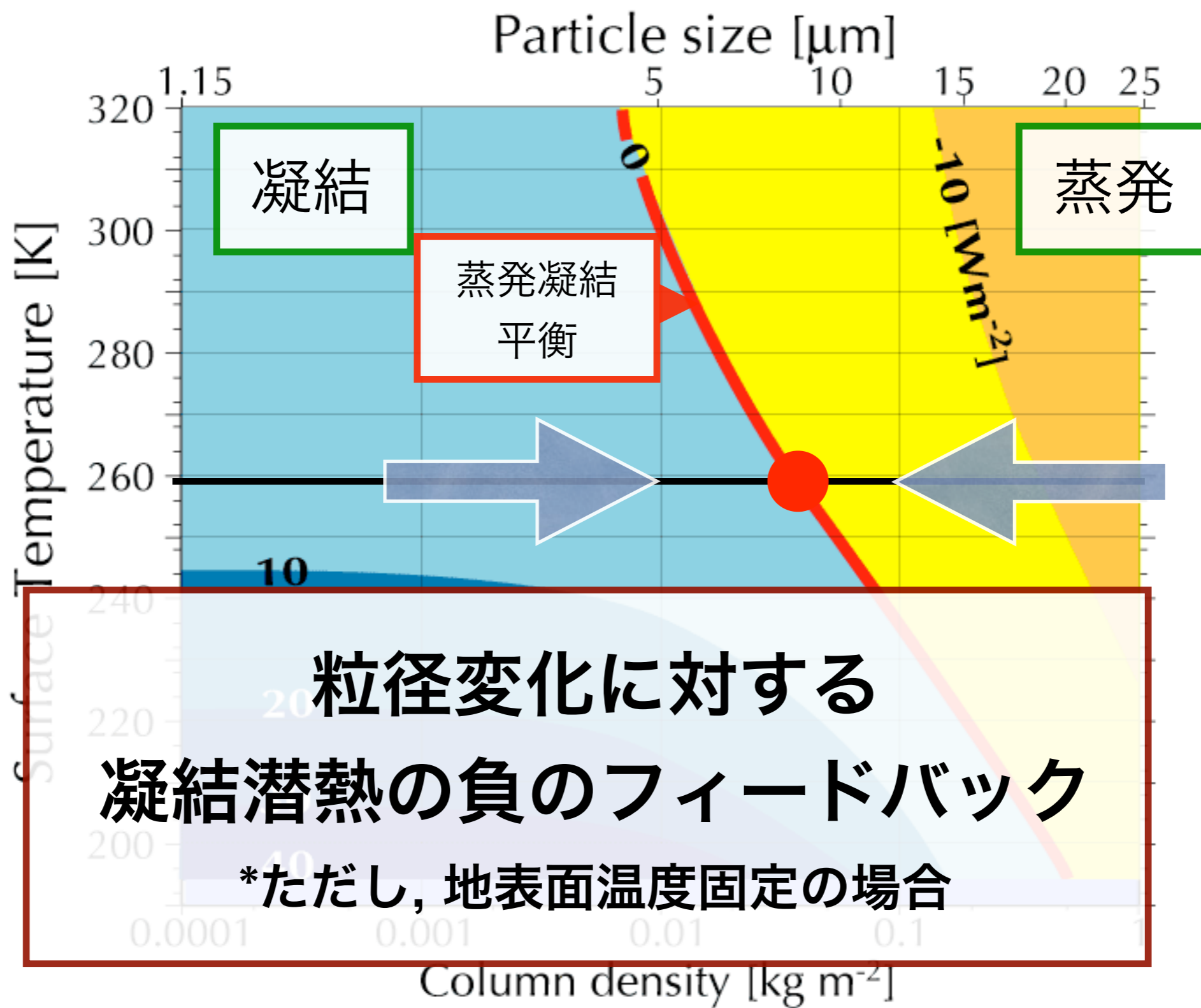
CO₂ 凝結潛熱

(大気圧 1bar, 凝結核面数密度 10^{10} m^{-2})



CO₂ 凝結潜熱

(大気圧 1bar, 凝結核面数密度 10^{10} m^{-2})

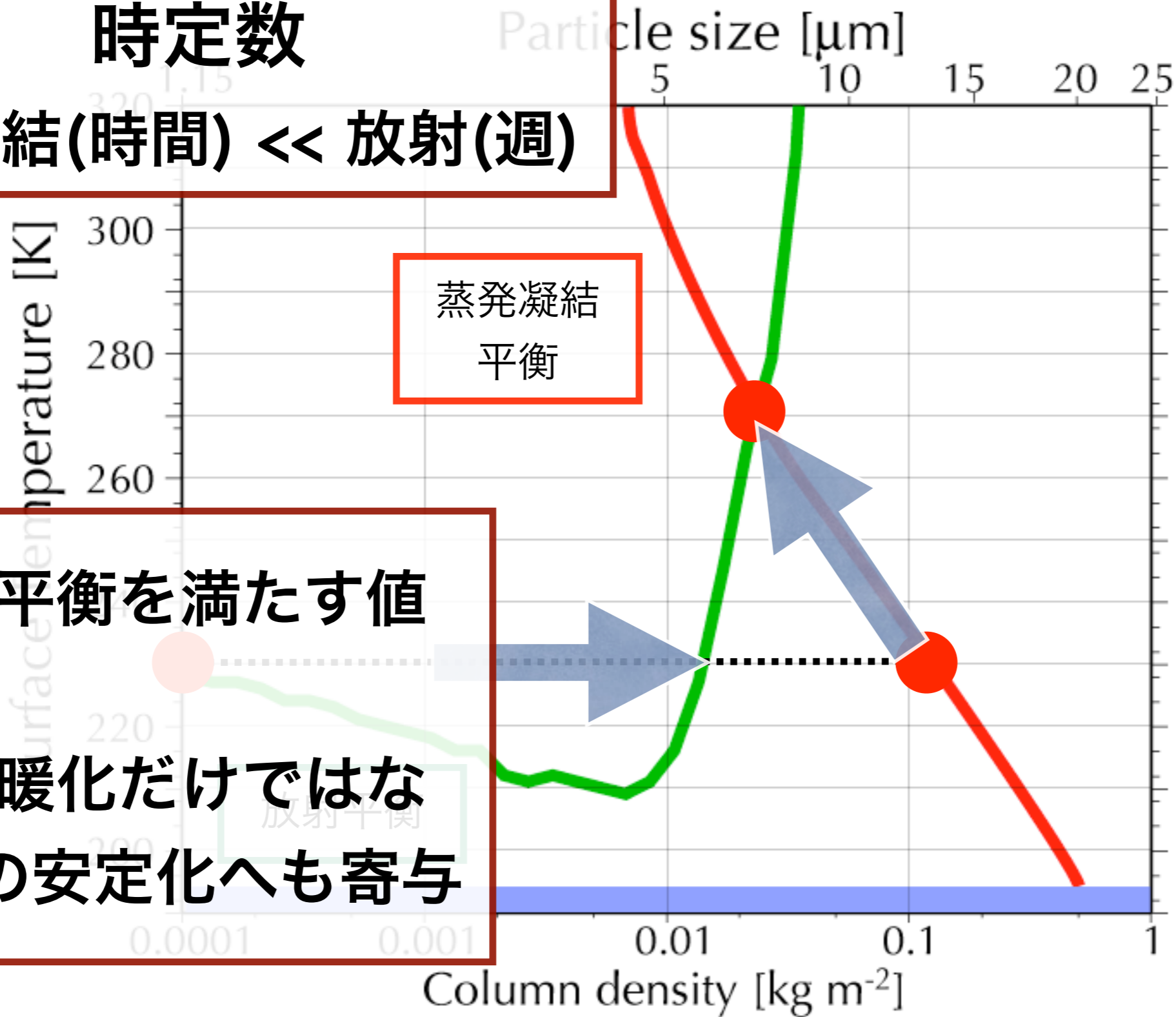


地表面温度の見積もり

(大気圧 1bar, 凝結核面数密度 10^{10} m^{-2})

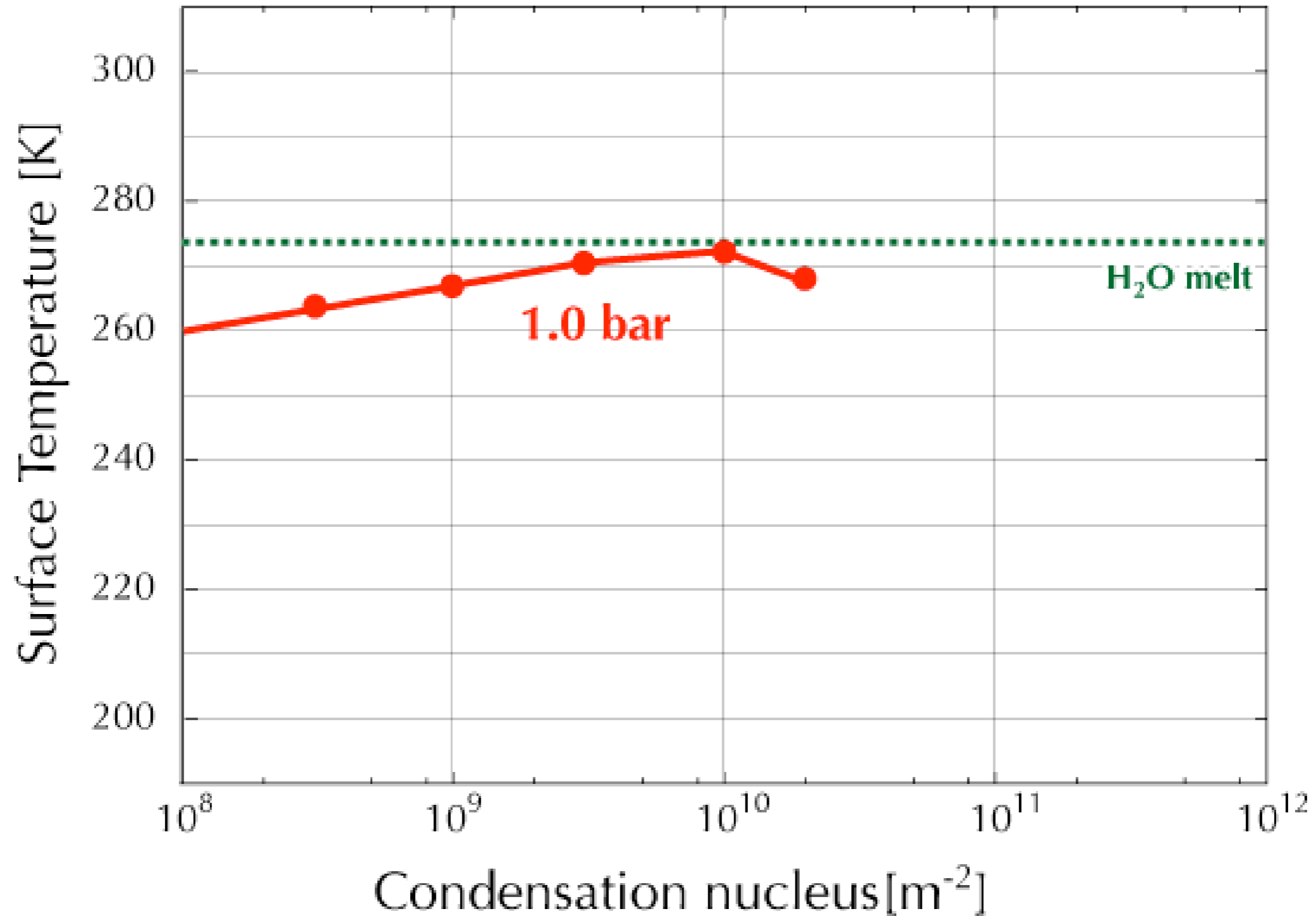
時定数

蒸発凝結(時間) \ll 放射(週)

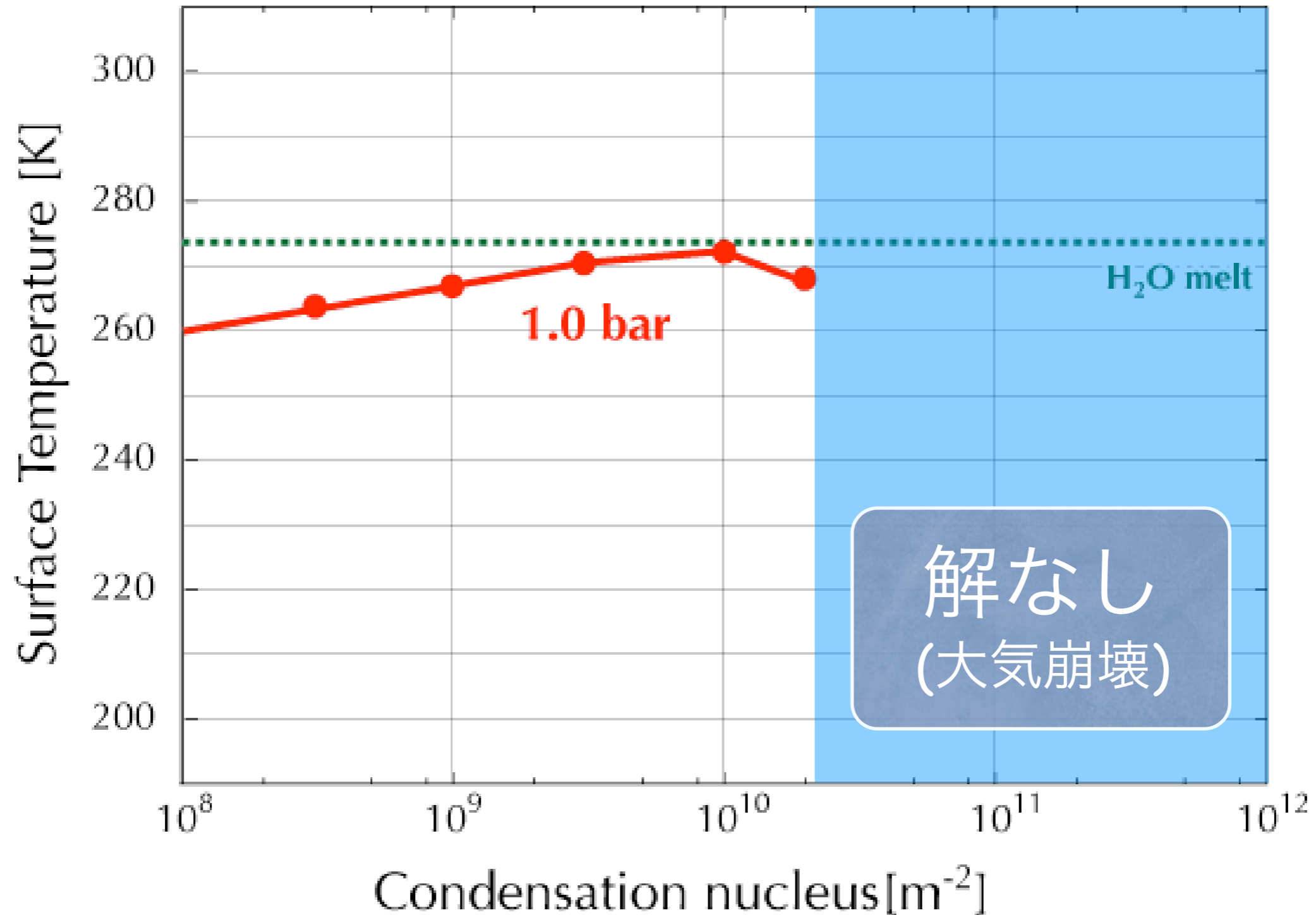


系は両平衡を満たす値
へ収束
雲は温暖化だけではなく、
系の安定化へも寄与

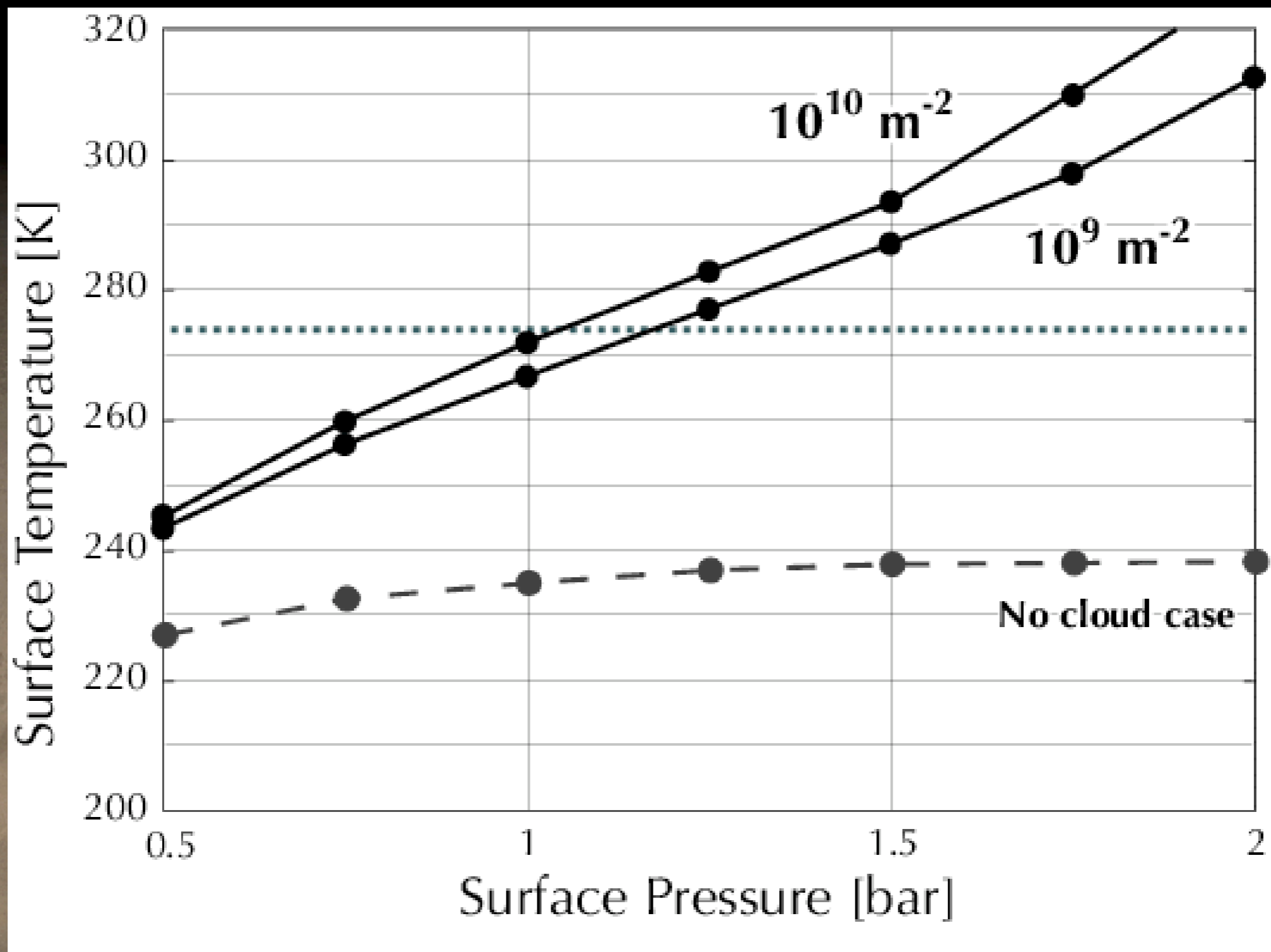
地表面温度の見積もり (大気圧 1 bar)



地表面温度の見積もり (大気圧 1bar)

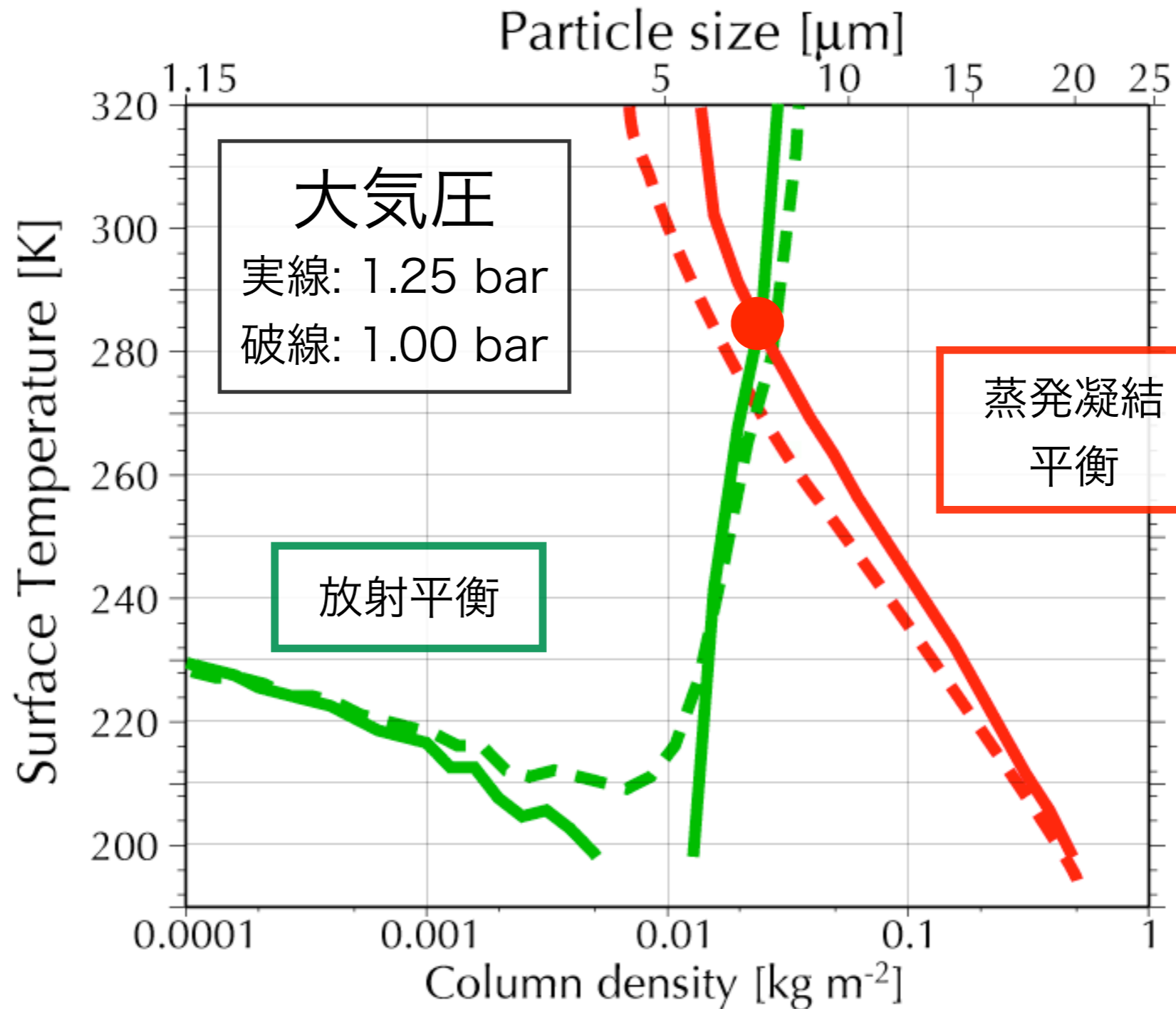


地表面温度の大気圧依存性



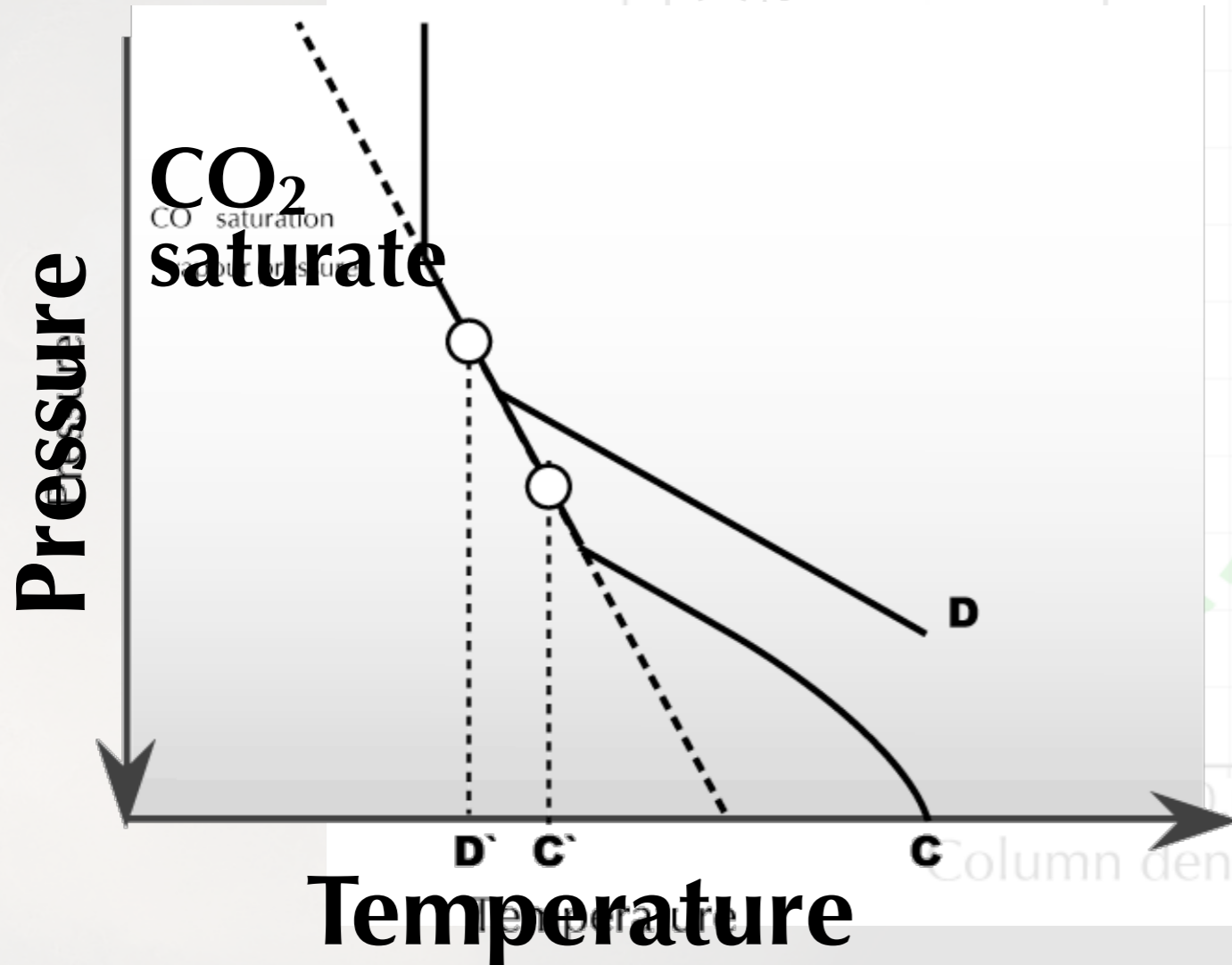
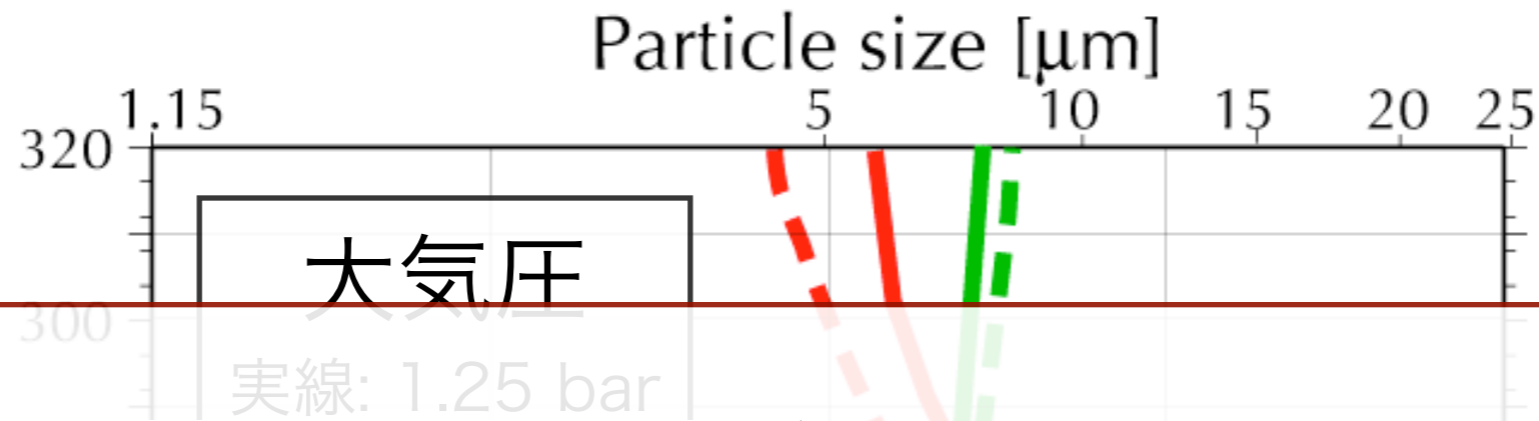
地表面温度の圧力依存性

(凝結核面数密度 10^{10} m^{-2})



地表面温度の圧力依存性

(凝結核面数密度 10^{10} m^{-2})

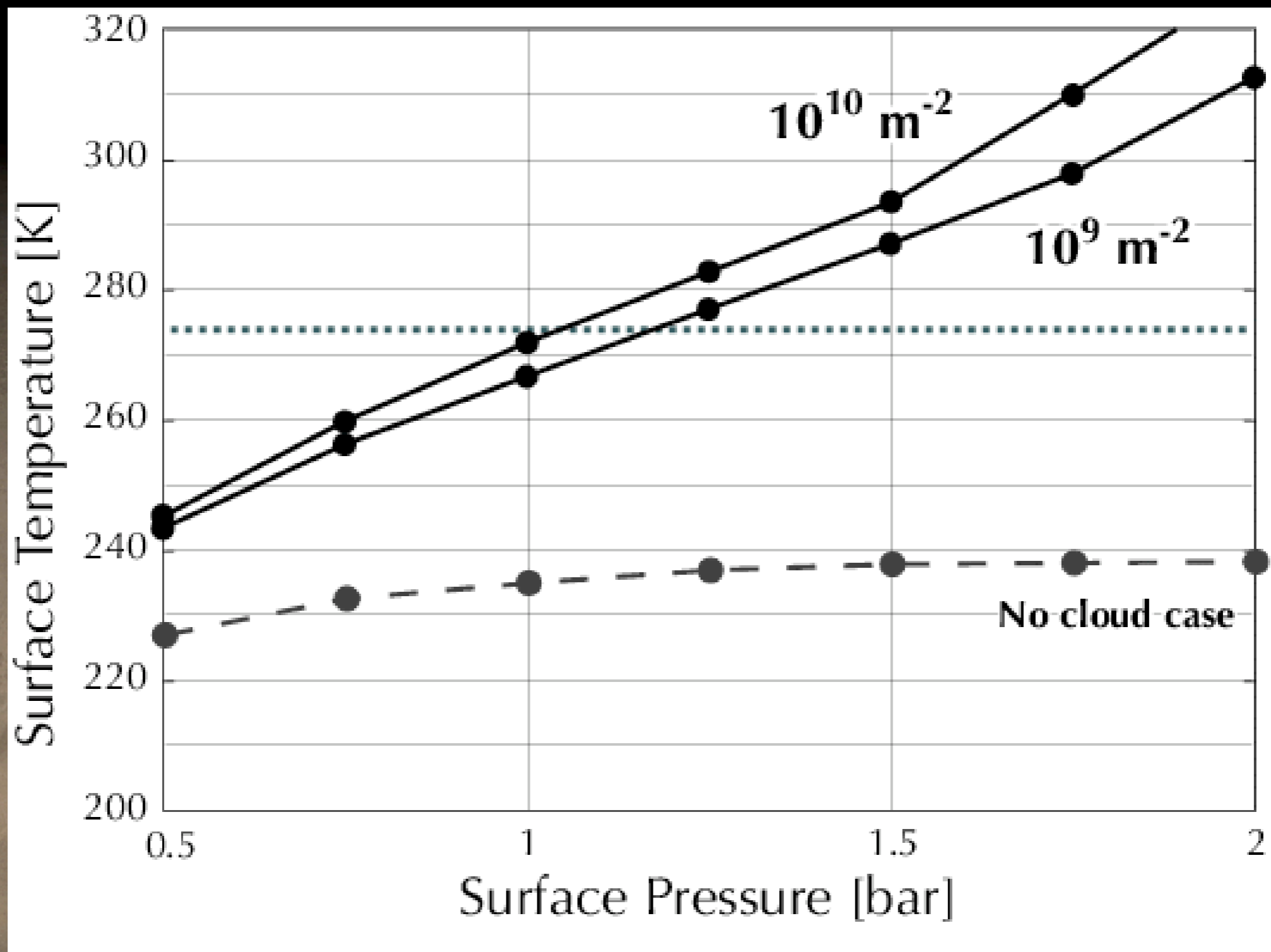


大気圧の増加に伴う

- * 雲層温度増加
- * 雲層射出率増加

-> 凝結潜熱増加

地表面温度の大気圧依存性



CO₂ 以外の気体成分の影響

- CH₄ : 最も重要な気体種
- 赤外放射, 太陽放射吸収
 - より強い大気の温室効果
 - CO₂ 凝結潜熱増加? 減少?

CO₂ 以外の気体成分の影響

- CH₄ : 最も重要な気体種
- 赤外放射, 太陽放射吸収
 - より強い大気の温室効果
 - CO₂ 凝結潜熱増加? 減少?

凝結潜熱増加 :

雲の温室効果増加

凝結潜熱減少 :

CH₄ の温室効果を打ち消す可能性有

まとめ

- 散乱温室効果問題：雲の粒径, 質量面密度の見積もりが重要
- 凝結核の面数密度を与えると, 雲面密度及び地表面温度が決定
 - CO₂ 凝結潜熱が雲の質量面密度を支配
 - 大気圧 > 1 bar, 凝結核の面数密度 $\sim 10^9$ -- 10^{10} m^{-2} で **地表面温度 > 273 K**
- CO₂ 凝結率と雲の粒径の負のフィードバックが気候の安定化に寄与
- CH₄ による影響: 定量的な評価が必要

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
- Mischna, M. A., Kasting, J. F., and Freedman, R., 2000, Influence of carbon dioxide clouds on early Martian climate, Icarus, 145, pp.546-554
- 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

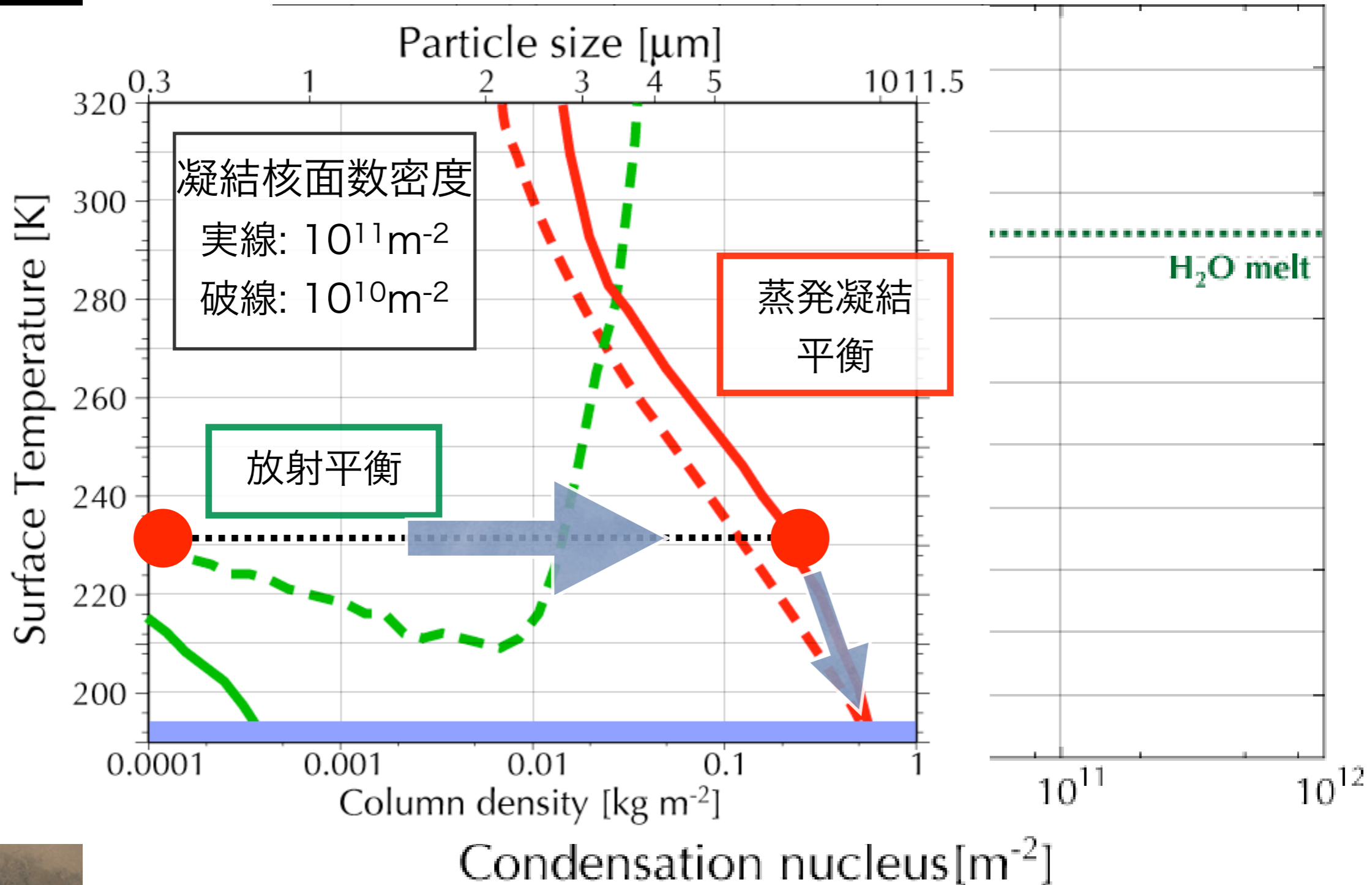
質疑応答 1

- 雲粒の温度をどうしているのか？ 大気の温度と同じではだめだよねぇ？(向井さん)
 - ...大気温度と一緒にです。はい。
 - でも大気温度と同じなのはそんなに悪い事ではない。もし、雲粒の温度が大気温度よりも高かったならば蒸気圧平衡を満たそうと雲粒は蒸発するだろう。そのタイムスケールと放射収支による温度変化のタイムスケールを比較してみて、どの程度の影響かどうかを確認する必要がある。地球の場合では雲と大気の温度は等しいとしていて、その論拠は大気が厚く十分に衝突による熱伝導が効くから。(倉本さん)
 - あと、小さい(~1 ミクロンサイズ) 粒子の場合は、雲粒の表面の圧力が蒸気圧だけでなく、表面張力の力も効いてくるはずで、温度構造は蒸気圧曲線から少しずれるはず。

質疑応答 2

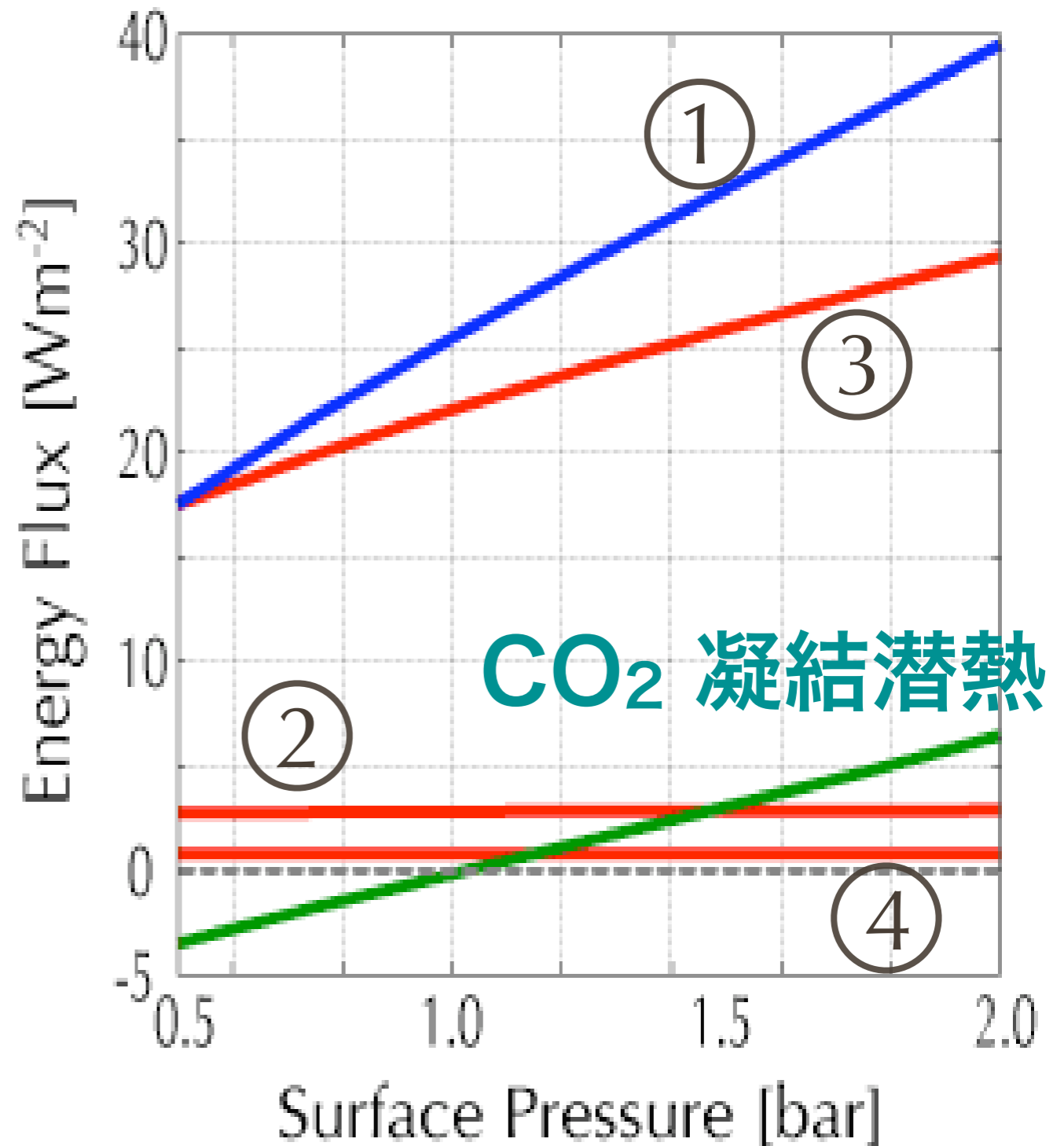
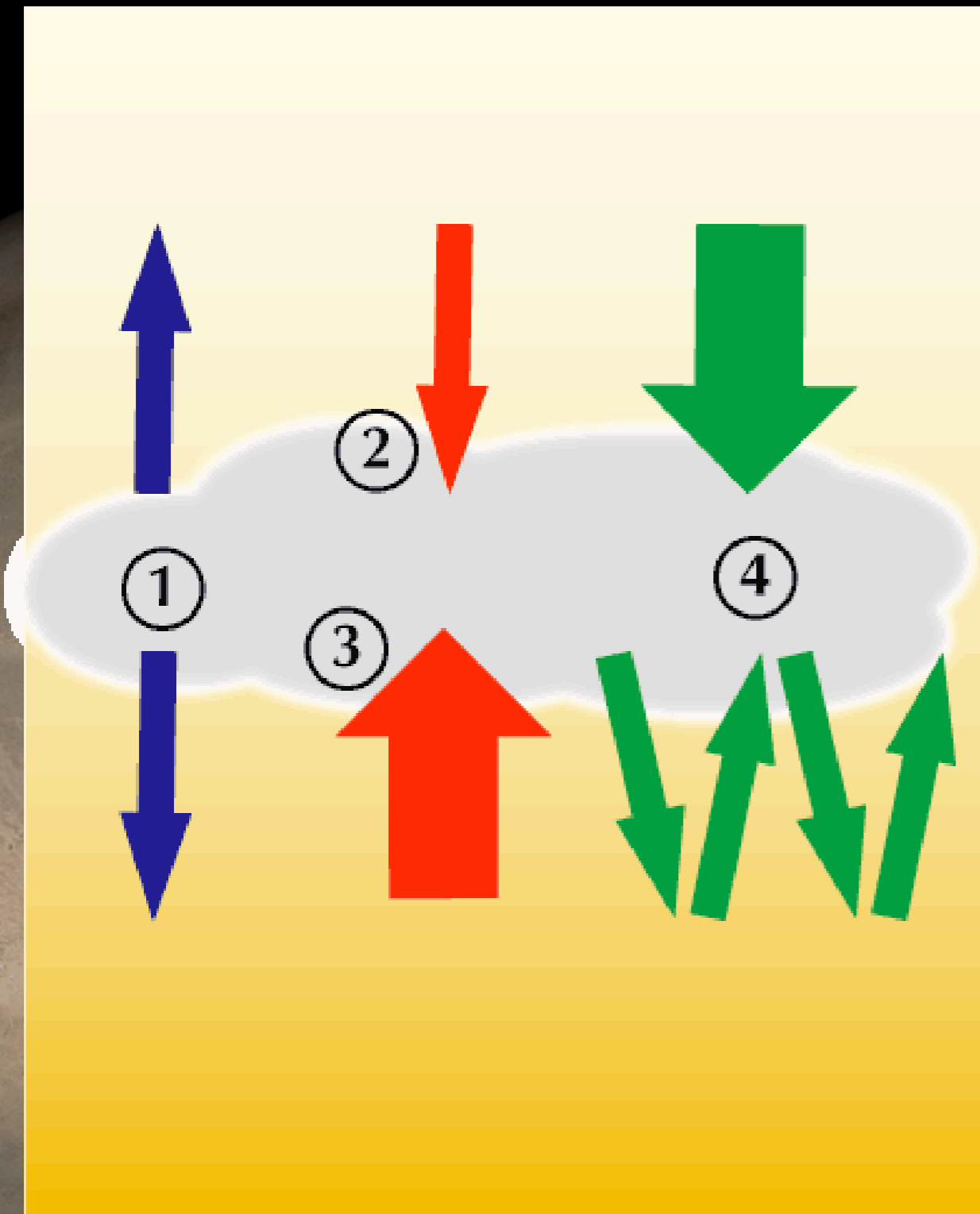
- 凝結蒸発させる場合の粒径変化は?(阿部さん)
 - 粒径分布は全く考えていない. 雲層の凝結潜熱は各粒子に等分配している. 粒子成長の分布も考えていない.
 - おそらく雲粒があったらそれぞれの凝結潜熱を得られる縄張りがあるはず. 今は雲粒の分布を考えていない(正確には大気の密度分布と等しいとしている)ので各粒子に潜熱を等分配している. そういう意味では雲粒の数密度の分布を考えると等分配じゃ理屈が合わなくなる可能性はある?
 - この質問は, 粒径はすべて一定で凝結核個数, すなわち雲粒個数を固定し, 雲の質量密度と粒径が一対一対応していることを説明し損ねた事で聞かれた質問. その解説を次からは加えよう(倉本さん)
- 雲の光学的厚さとかのむらむらがあったらどうなるか? 今出している光学的厚さはその最小値に相当している?(千秋さん)
 - うーん, よくわからない. 粒径の分布は平均光学係数を用いる事で表現できるけど?

地表面温度の見積もり (大気圧 1bar)

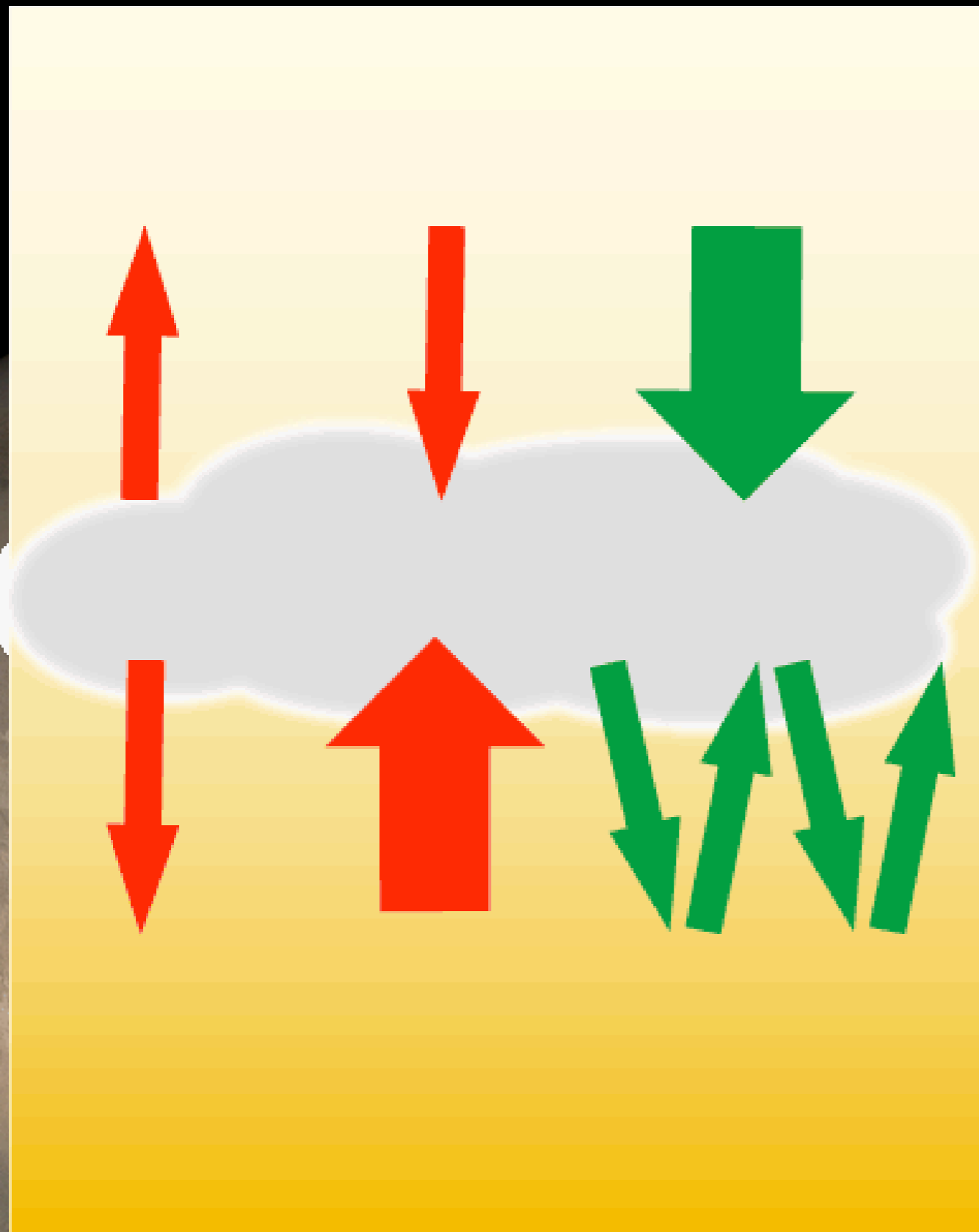


凝結潜熱の圧力依存性

(凝結核面数密度 10^{10} m^{-2})



CO₂ 凝結潜熱の導出



雲層のエネルギーバランス

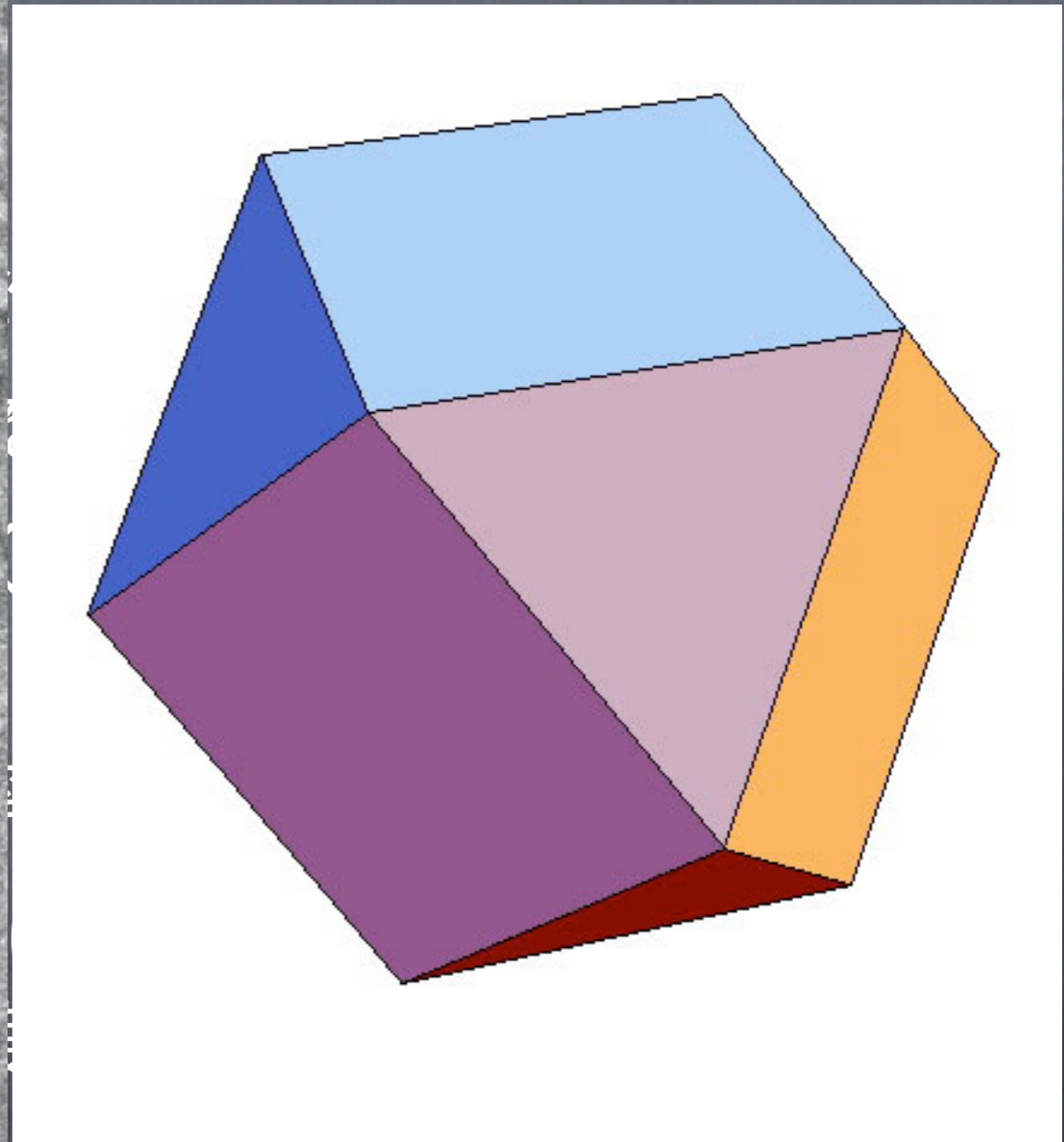
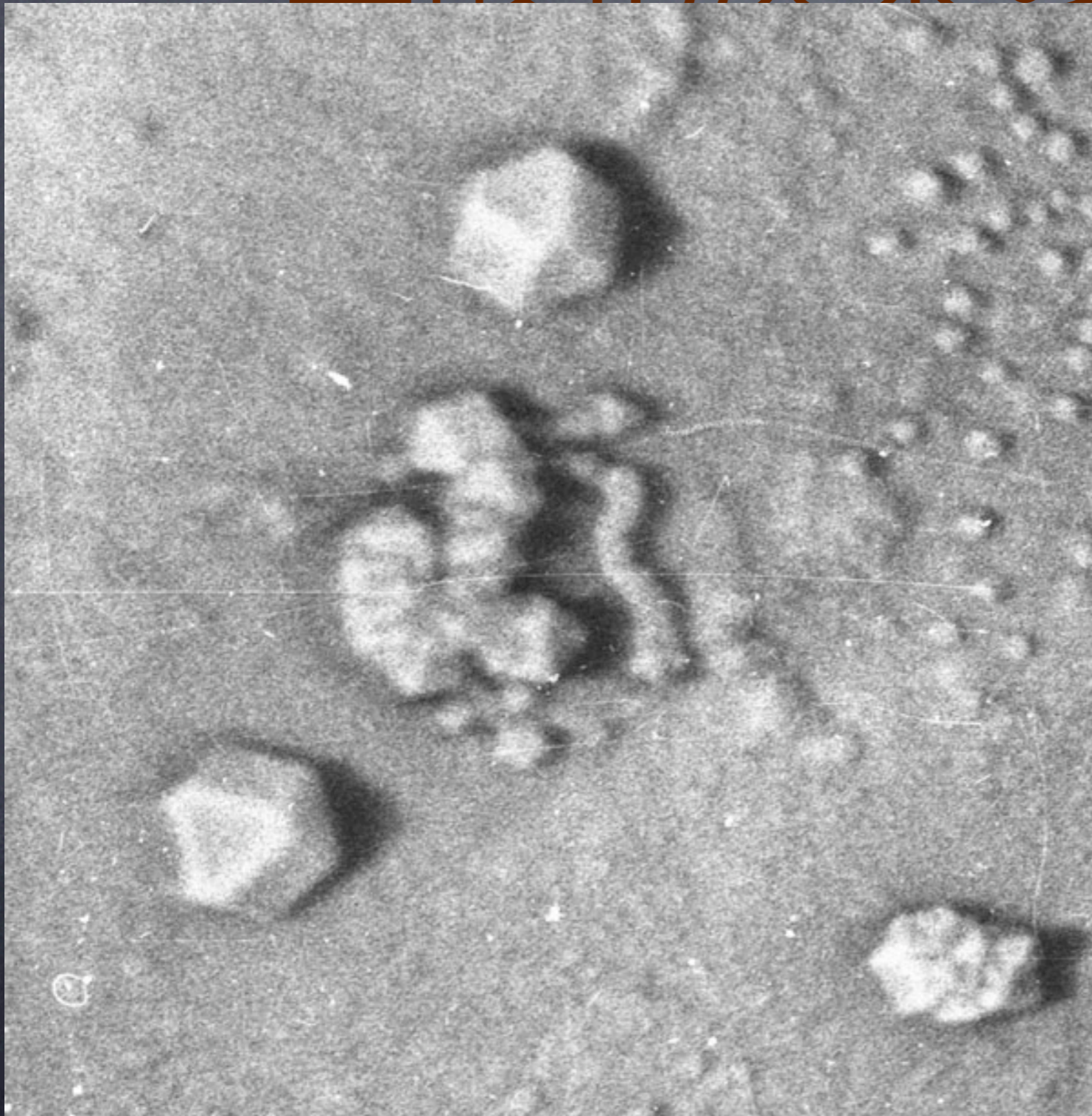
CO₂ 凝結潜熱

= 雲層の冷却エネルギー

= 射出による自己冷却

- 太陽, 赤外加熱

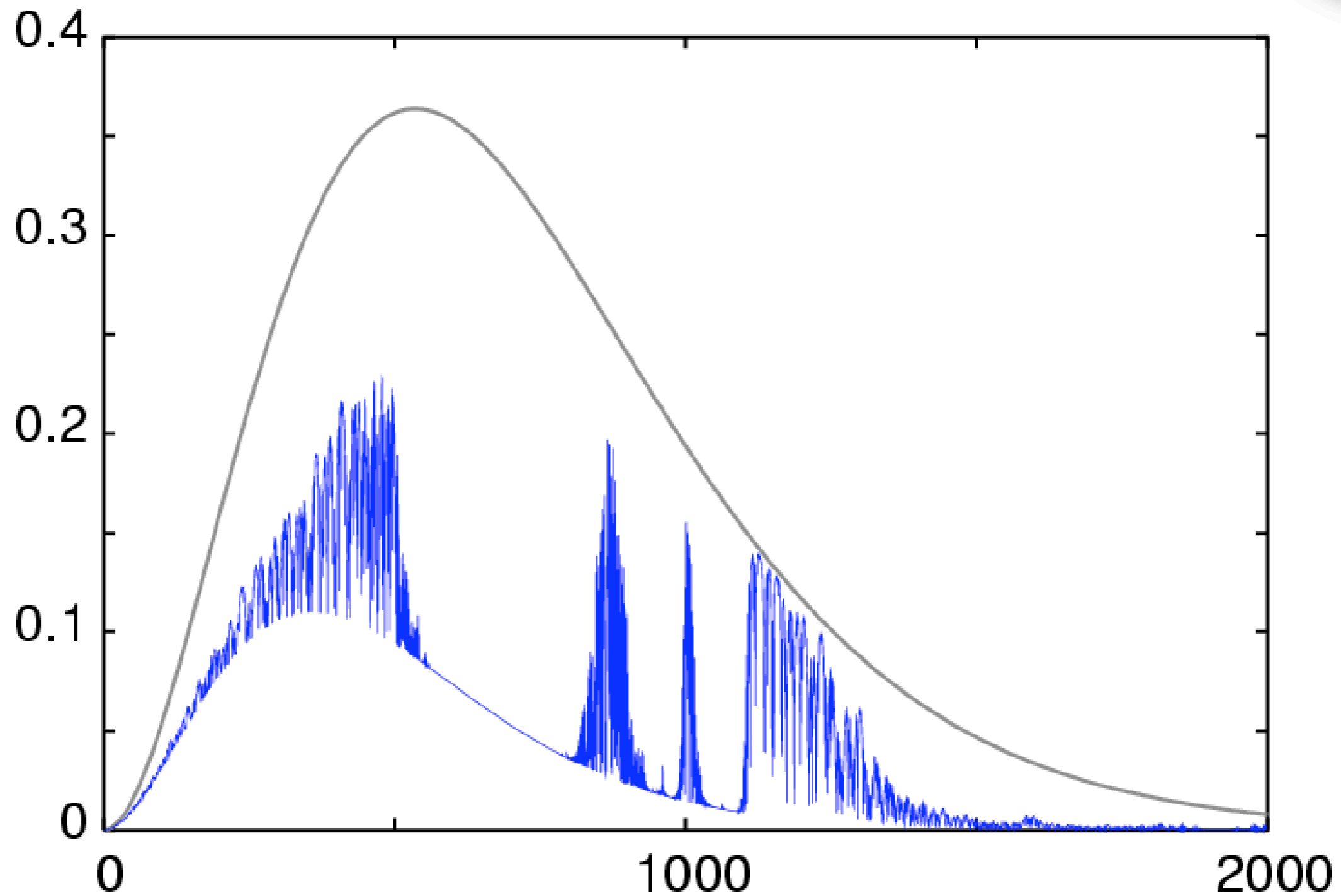
二酸化炭素の結晶構造



4snowflakes/cuboctahedronrh400.jpeg

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

雲への入射スペクトル



地球型惑星の比較

| | 火星 | 地球 | 地球 (堆積岩) | 金星 |
|-----------------|--------------------|-----------|-------------|------|
| 大気組成 | | | | |
| N2 | 2.7 | 78.1 | 1.0 | 1.8 |
| O2 | - | 20.9 | - | - |
| Ar | 1.6 | 0.9 | 0.01 | 0.02 |
| CO2 | 95.3 | 0.035 | 99.0 | 98.1 |
| CO2 分圧 [bar] | 6×10^{-3} | 10^{-4} | 80 | 90 |