

二酸化炭素氷雲による 古火星の温暖化

火星エアロノミー勉強会 @ ISAS

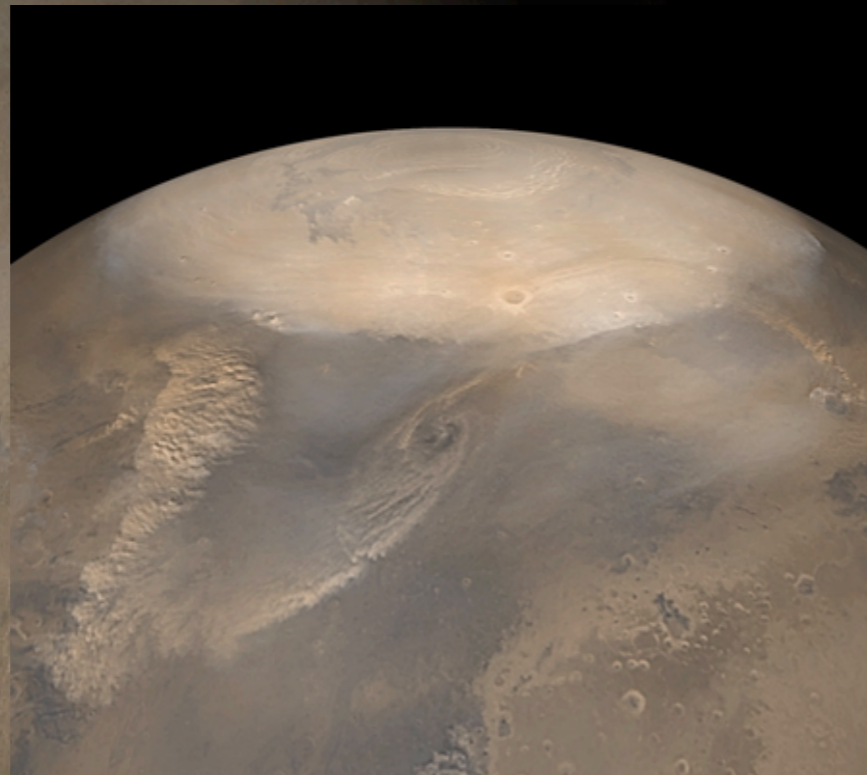
2005/11/17

*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)

現在の火星

- ☉ 太陽放射 : 地球の 43 %
- ☉ 大気主成分 : 二酸化炭素
- ☉ 大気圧 : 0.006 atm
- ☉ 地表面温度 : 215 K

乾燥寒冷な気候



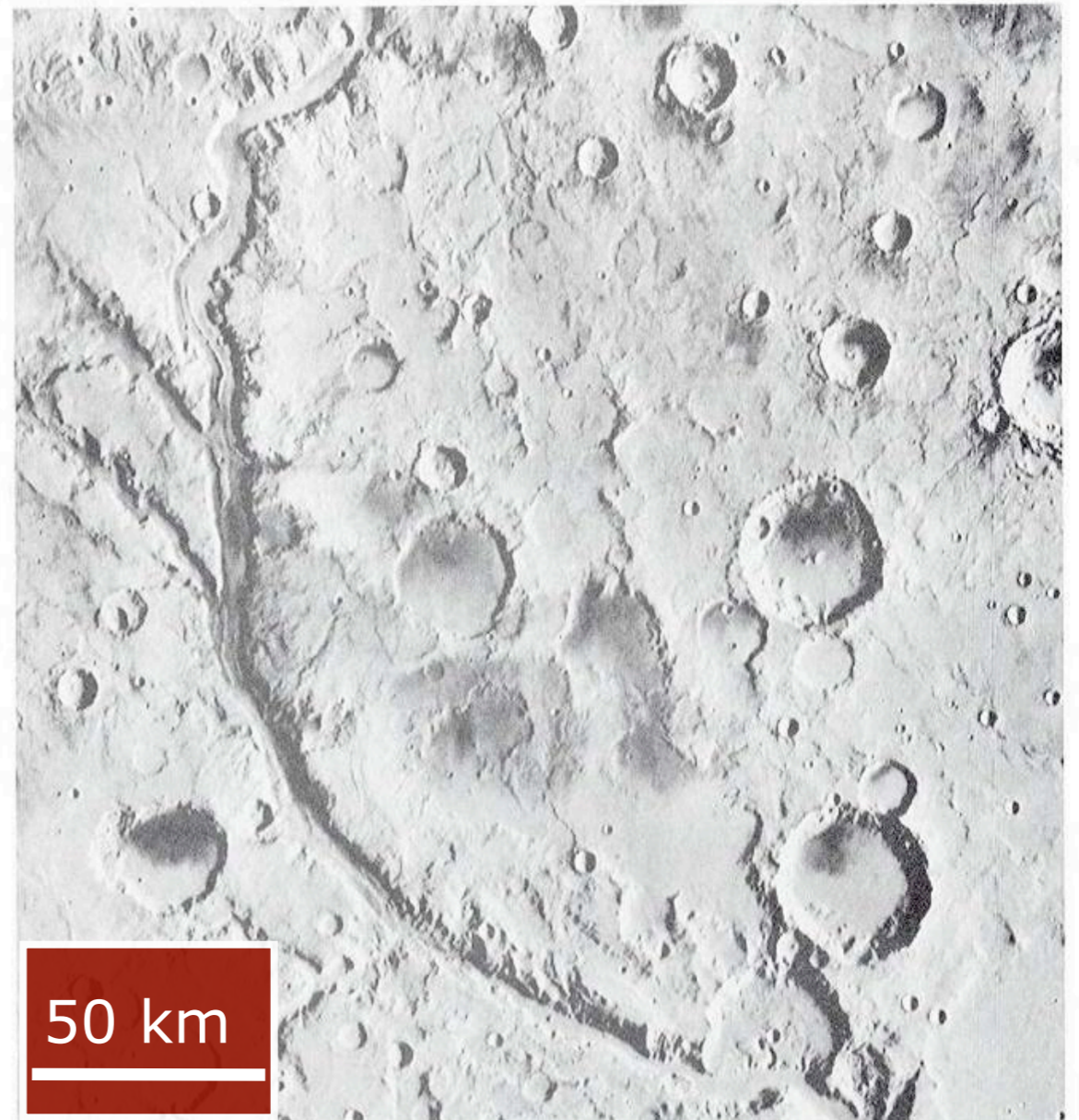
地形から示唆される古気候

- ノアキス期後期(38億年前)の地形

- 流水の痕跡(右図)
 - 地下水の流出？
 - 水循環(降雨)??

液体の水が存在可能な程
温暖な気候が生じていた？

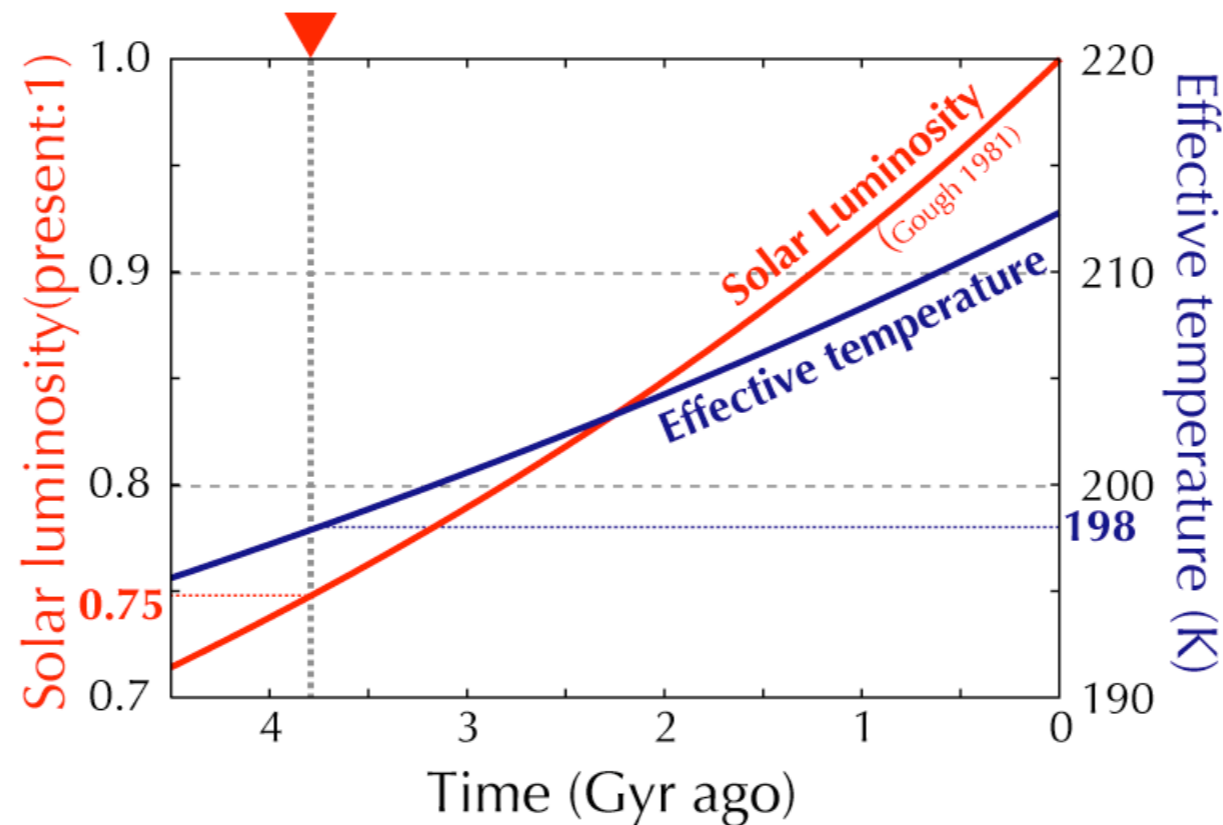
バレーネットワーク
(~ 38 億年前)



火星版

”暗い太陽のパラドックス”

- 太陽光度は火星史を通じて増加 (Gough 1981)
- 暗い太陽の下で現在よりも温暖な気候



Solar luminosity and effective temperature evolution

* We assume planetary albedo have been constant, 0.216. (Kieffer *et al.* 1977)

地球版 暗い太陽のパラドックス

- 暗い太陽の下では、海は凍っていたはず...
 - 45 億年間海は存在
 - 様々な形成年代の堆積岩
- 二酸化炭素分圧が高ければ説明可能
 - 38 億年前：～ 1 気圧程度

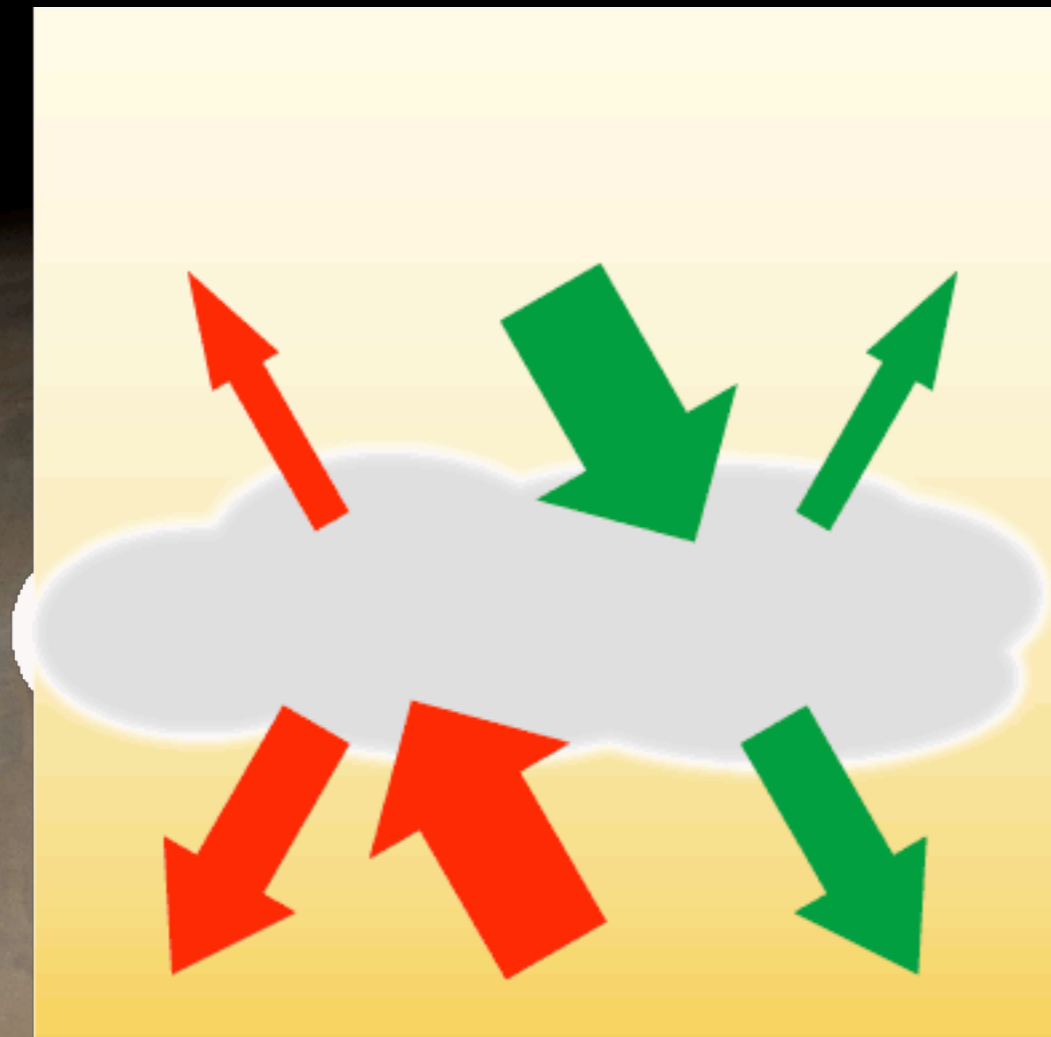
古火星温暖化メカニズム候補

- 75 K の温室効果を得るには? -

- 厚い二酸化炭素大気による温暖化 (Pollack et al., 1989)
 - 大気圧 > 0.35 気圧では対流圏上部で大気凝結, 温室効果が弱まる (Kasting, 1991)
 - 最大温室効果 **25 K** (@2気圧)
- CH₄, NH₃, SO₂ による温暖化 (e.g. Kasting, 1997)
 - 紫外線によって~数百万年で光解離
 - CH₄ 0.1 %で温室効果 **50K** (@ 2気圧)
- **二酸化炭素氷雲の散乱温室効果**

(Pierrehumbert and Erlick 1998)

氷雲の散乱による温室効果



赤外放射反射 > 太陽放射反射

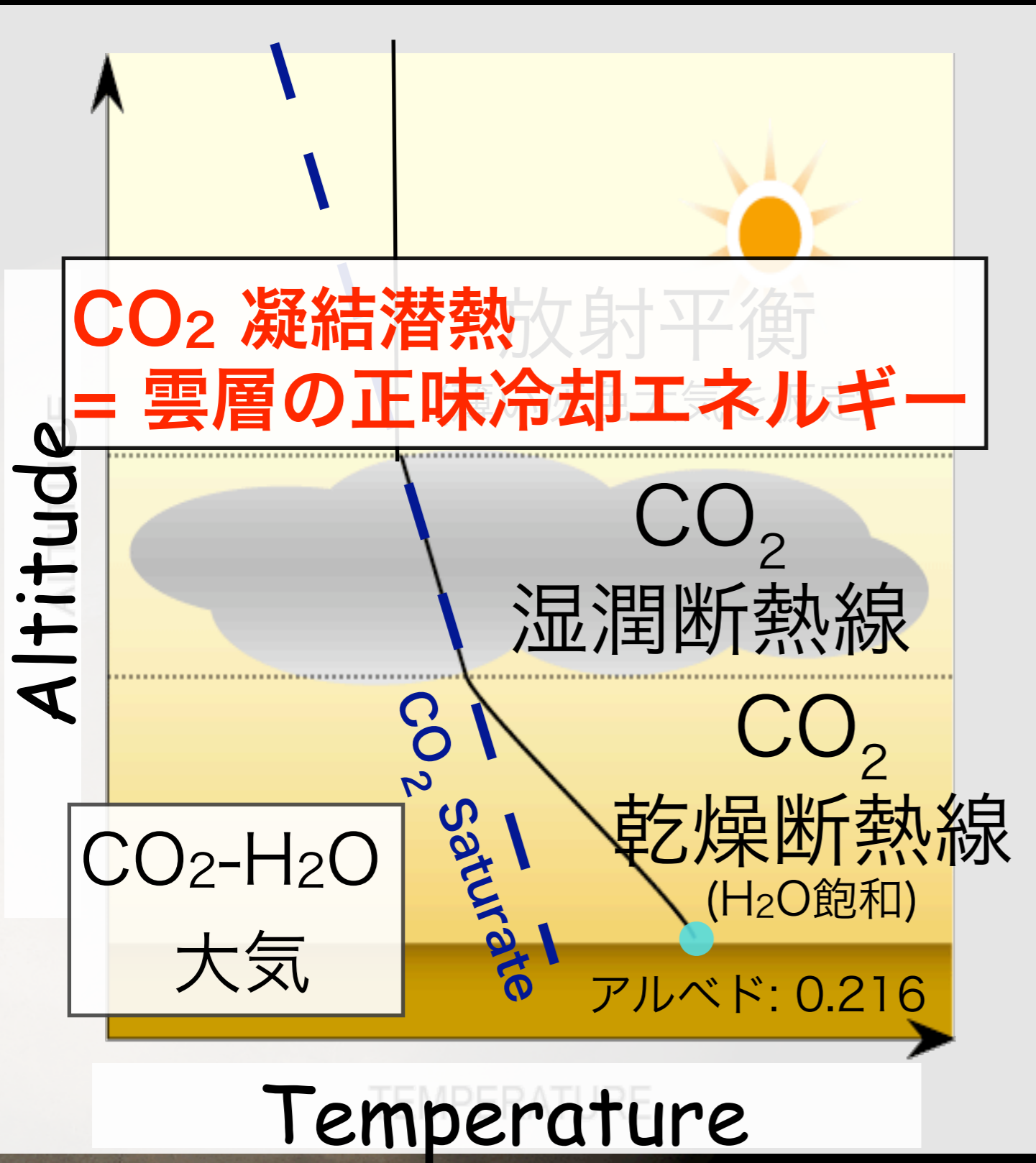
散乱温室効果

- 理想的な雲の粒径・面密度が存在すれば温暖湿潤な気候が再現可能
 - 雲粒径：～ 10 micron
 - 質量面密度：～ 1 kg m⁻²
(e.g. Mischna et al., 2000)
- 理想的な雲の形成・維持は可能か??
- 放射加熱を受けて蒸発してしまわないか?

本研究の目的

- 持続可能な雲の粒径, 面密度の見積もり
 - 鉛直一次元放射モデルを用いたパラメータスタディ
 - パラメータ：地表面温度, 大気圧, 太陽光度,
雲の粒径, 個数(=凝結核個数)
 - 雲層における凝結蒸発平衡を満たす条件を探す
- 温暖湿潤な気候が得られる大気圧条件

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)

* 粒径分布は無視

大気の光学係数(赤外のみ)

* Line-by-line 法

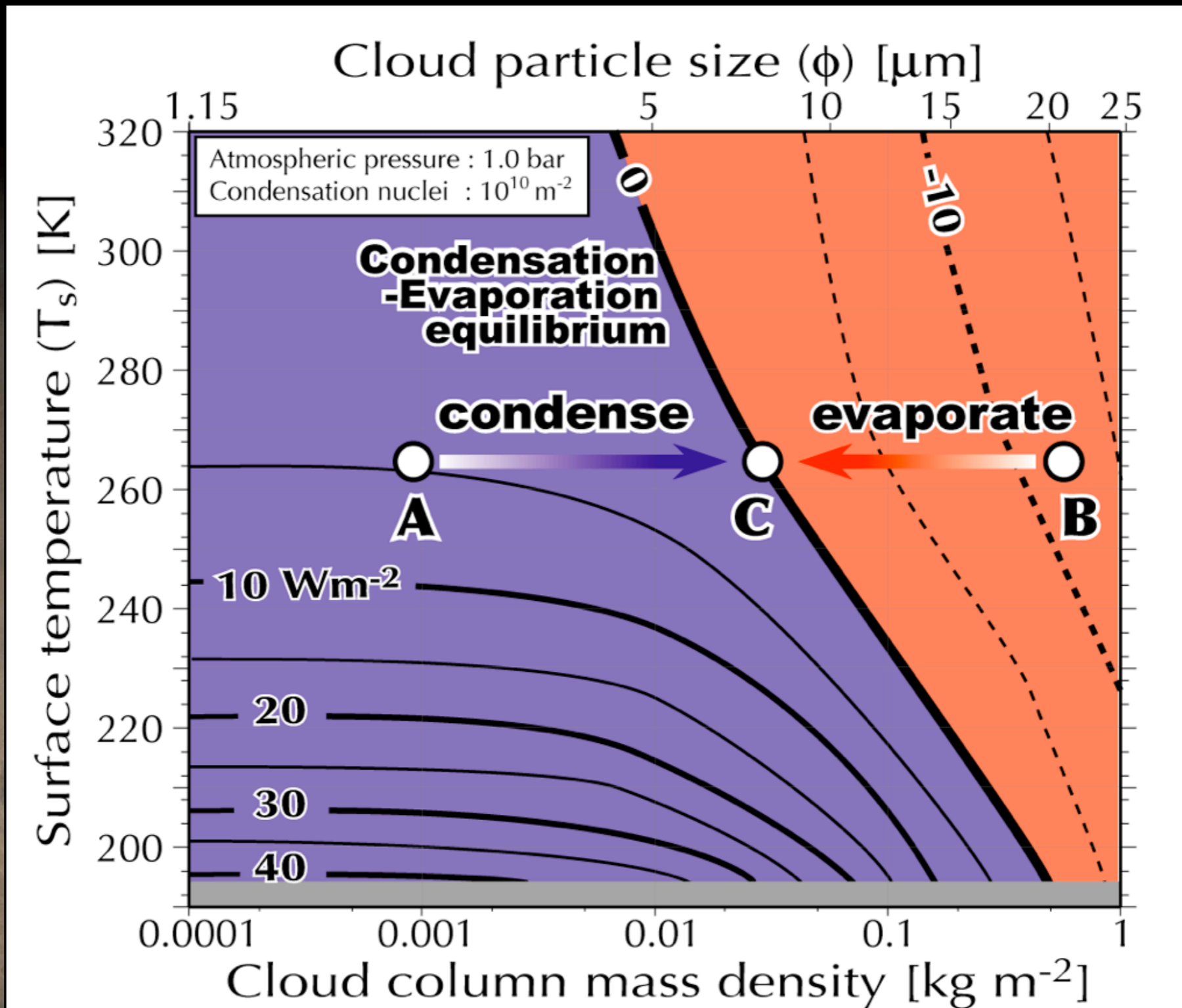
* 吸収線 DB (HITRAN 2000)

* ただし、雲層ではランダムモデル

* バンドパラメータ(Houghton 2002)

二酸化炭素の凝結潜熱

(大気圧 1bar, 凝結核面数密度 10^{10} m^{-2} , 太陽光度 75%)

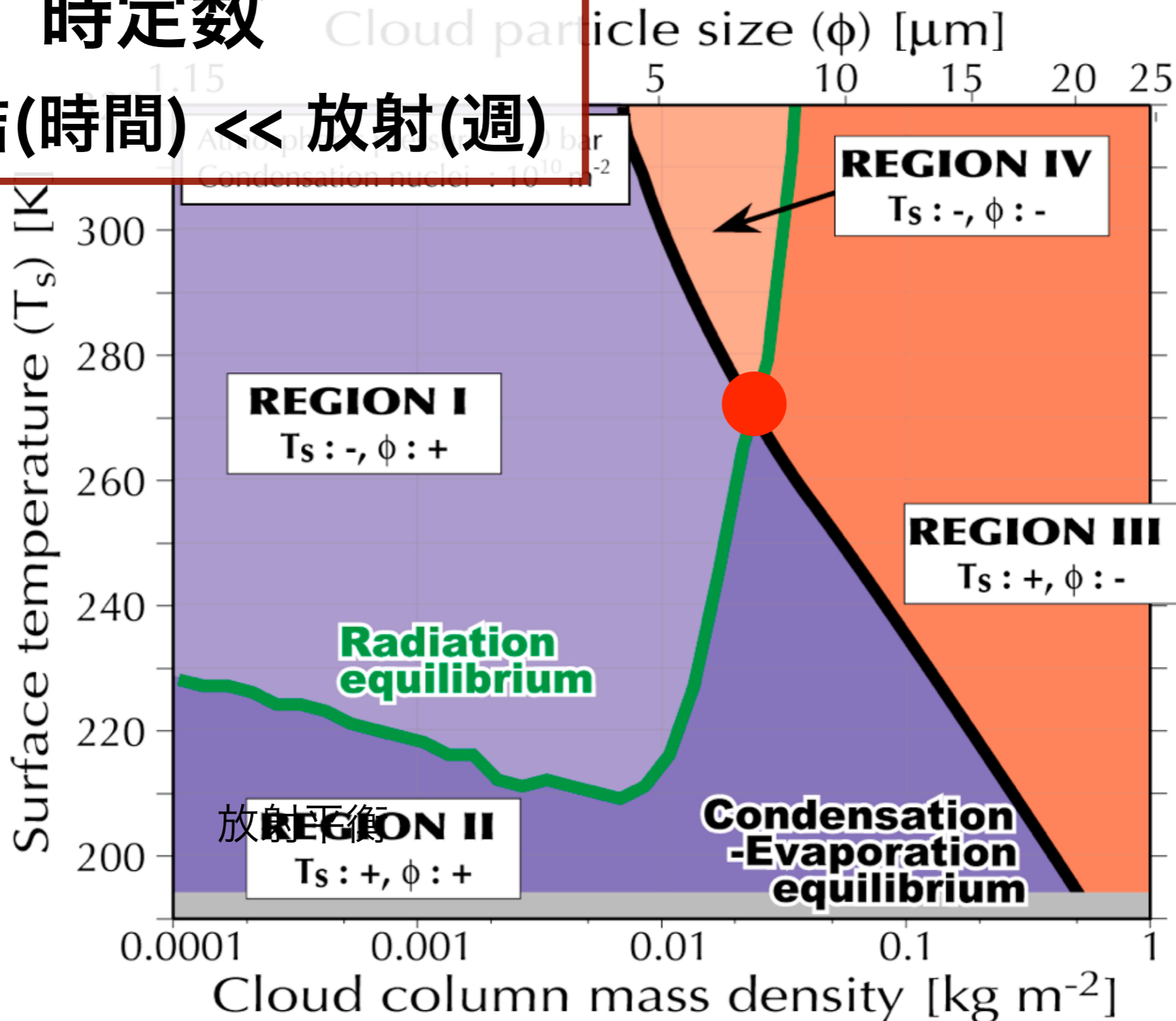


地表面温度の見積もり

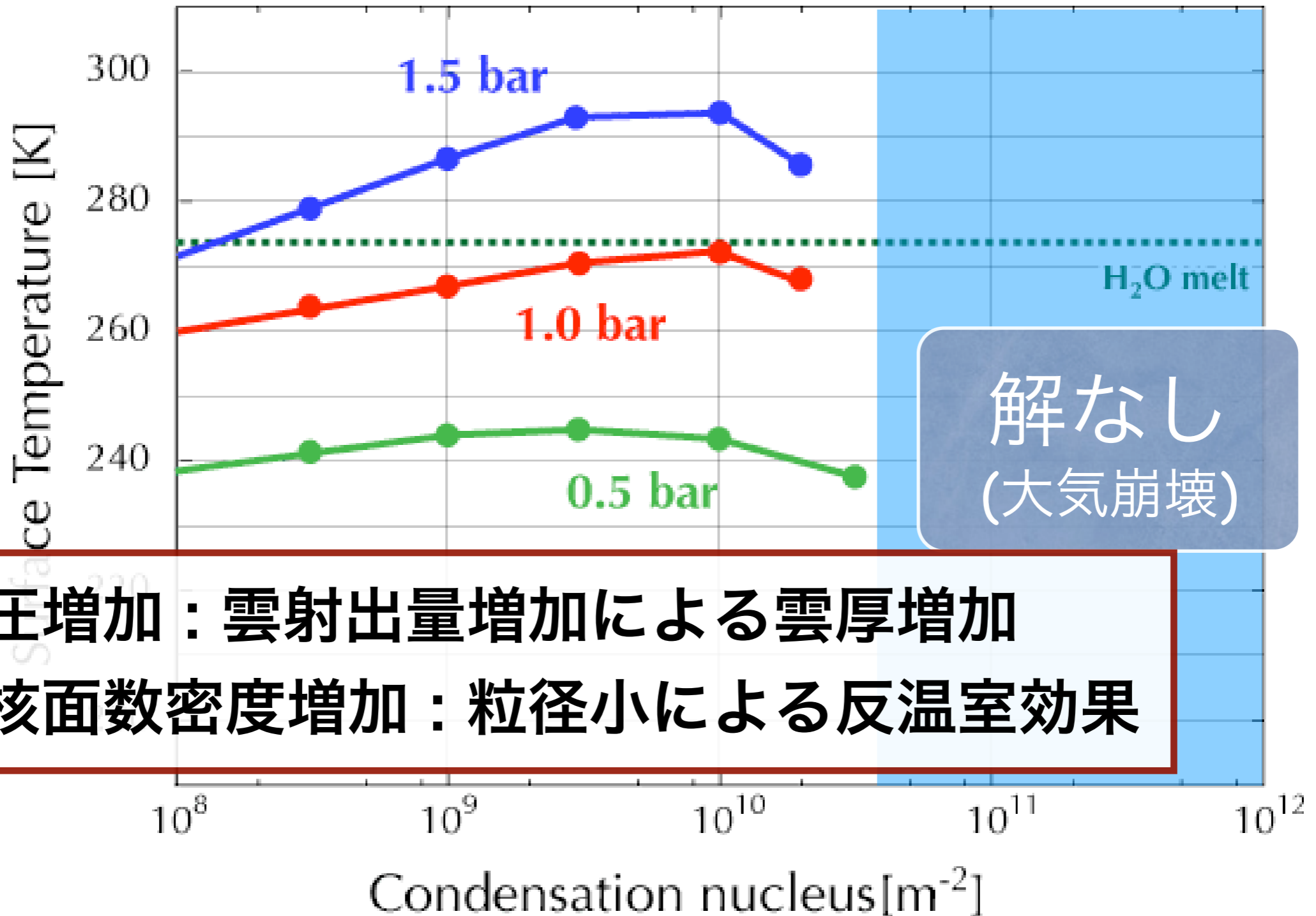
(大気圧 1 bar, 凝結核面数密度 10^{10} m^{-2} , 太陽光度 75%)

時定数

蒸発凝結(時間) \ll 放射(週)



平衡地表面温度の見積もり (太陽光度 75 %)

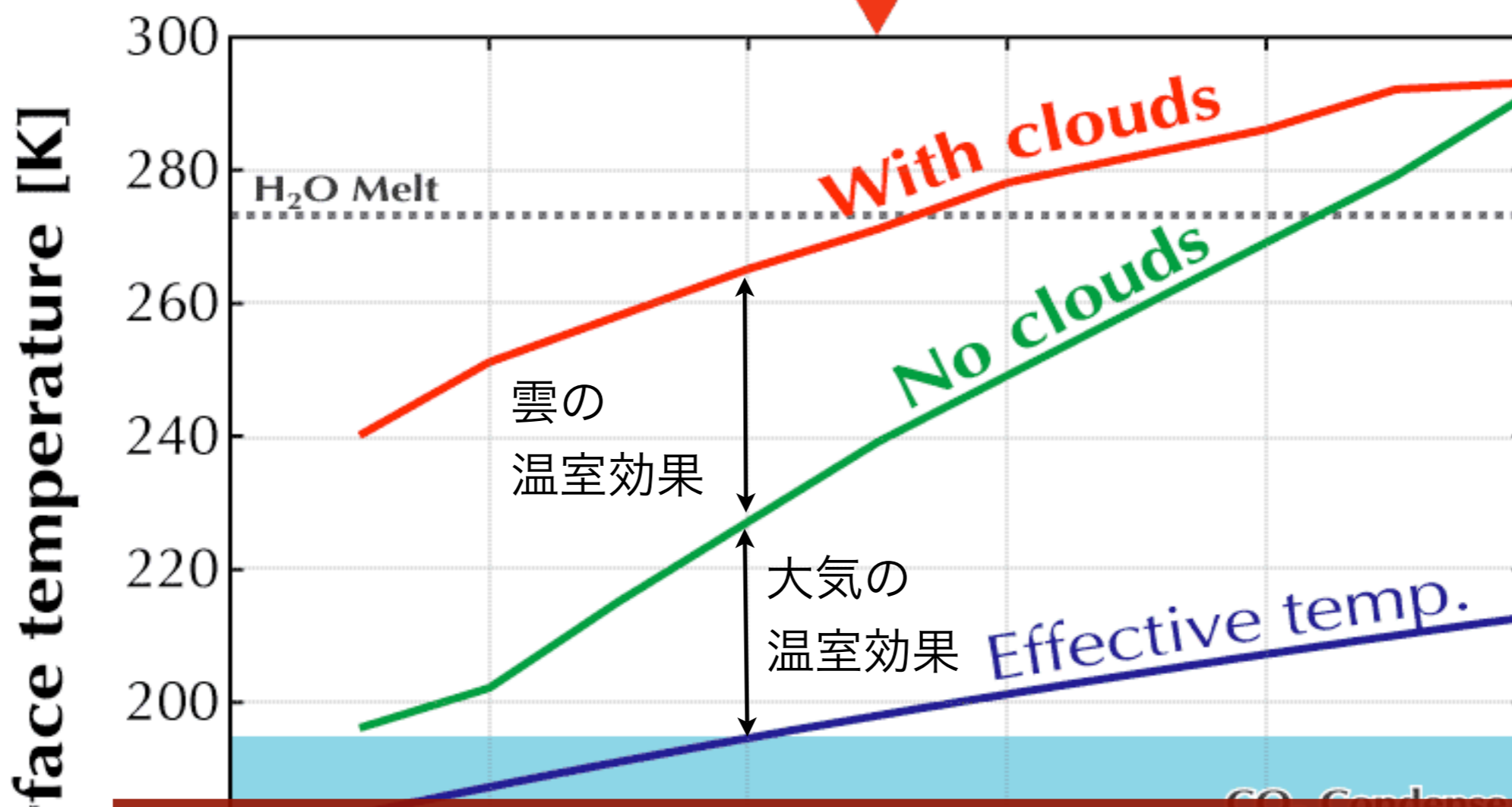


大気圧増加：雲射出量増加による雲厚増加

凝結核面数密度増加：粒径小による反温室効果

太陽光度依存性

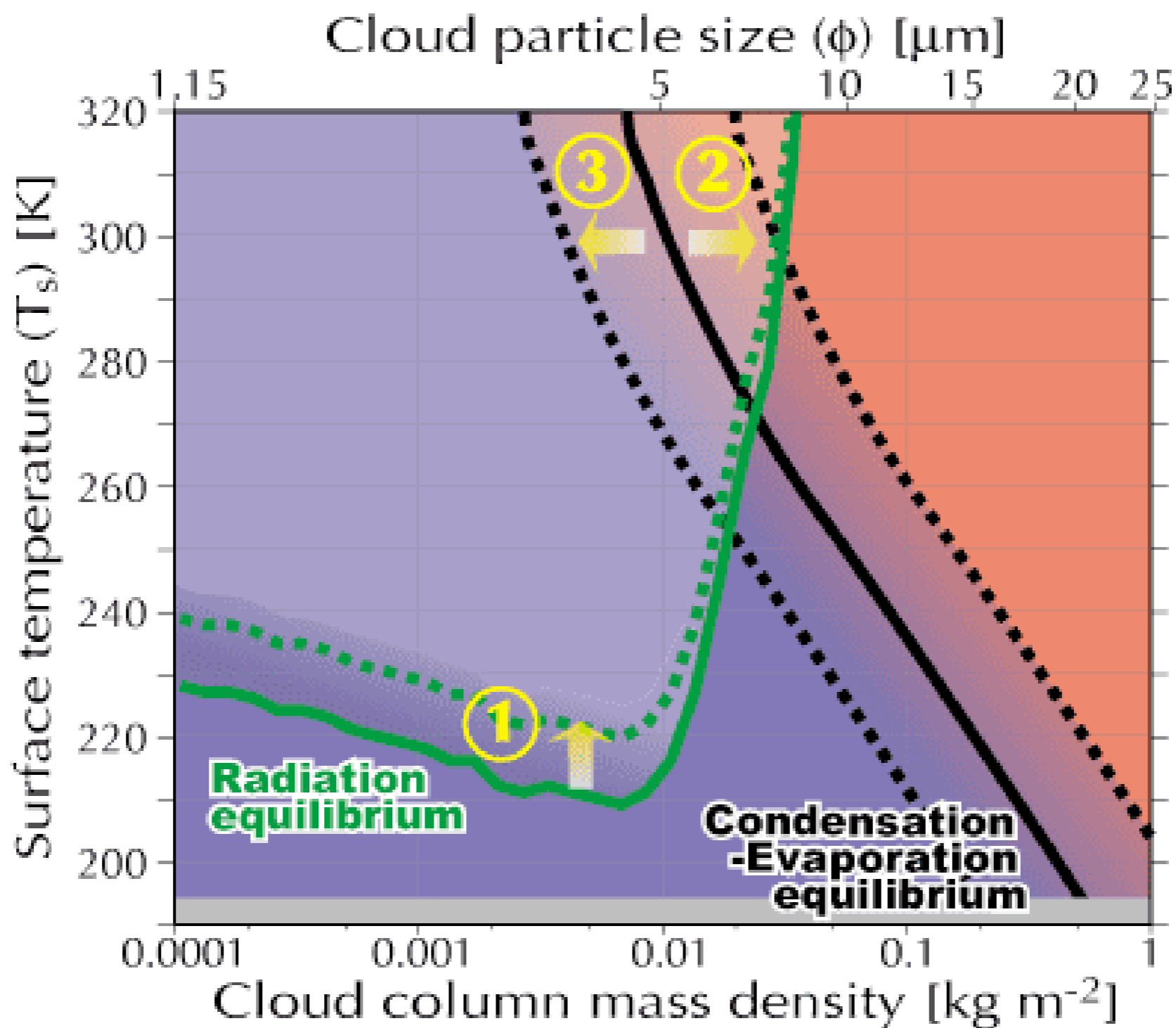
(大気圧 1 bar, 凝結核面数密度 10^{10} m^{-2})



太陽光度増加: 大気温度増加によって雲が薄くなる
雲の温室効果は、太陽光度の増加による
地表面温度の変化を弱める

CH₄ の影響

(大気圧 1 bar, 凝結核面数密度 10^{10} m^{-2})



まとめ

- 二酸化炭素氷雲の散乱温室効果：雲の粒径, 面密度の見積もりが重要
 - 雲層の凝結蒸発平衡を仮定
- 全球平均地表面温度 $> 273 \text{ K}$ の条件 (@太陽光度 75%)
 - 大気圧 $> 1 \text{ atm}$ かつ 凝結核面数密度 $\sim 10^{10} \text{ m}^{-2}$
- 太陽光度増加 \rightarrow 雲の温室効果は減少
- CO_2 凝結潜熱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

質疑応答1

- メタンが MEX によって観測されたが、それは気候に影響を与えない?
 - 精密なスペクトル解析でないとうからない程度の濃度なので、現在の気候への影響は無視できる。気候へ影響があるとしたら、おおざっぱなスペクトル解析でもわかる程度赤外放射を賞賛させる必要があるはず。
- メタンは解離時間が確かに短いが、インパクトが生じ、それによって一時的にメタンが供給され温暖化したとは考えられるか?
 - バレーネットワークの地形は、10 km x 1000 km 程度であり、それが形成されるタイムスケールはわからないが、メタンの解離時間と同程度でできてもおかしくないというのは素人の直感。ただし、ノアキス紀後期に形成されたと考える海については、温暖な気候が”ある程度の”期間、継続していた必要があるのではないか？
 - また、メタンが一時的に供給されたとしても、その後解離によってメタンが減少し、温室効果が弱まれば雲が形成される。そういう観点からも雲の気候メカニズムを調べることには意義がある。

質疑応答2

- 過去、太陽の質量が重く、太陽が暗くなかった可能性も指摘されているが、その場合に温暖湿潤な気候を得るために必要な条件は?(寺田さん)
 - 現在の太陽光度の場合、温暖湿潤な気候を得るためにおよそ 60 K の温室効果が必要であり、0.1 気圧程度の二酸化炭素大気では難しい。他の微量成分の効果を考える必要がある。
- 火星大気の消失メカニズムとしては何がよいと考えているか?
 - 正直なところわからないが、寺田さんの発表で挙げられた散逸メカニズムのほかに、二酸化炭素極冠下で二酸化炭素がクラスレイト化し、地底に移送されたというアイデアもあがっている。
- このモデルにおいて、一番の欠点はなにか?
 - 鉛直温度構造をまじめに解いていないこと。これによって圧力が数気圧程度まで増加したときの解の信頼性がない。
 - ...そういえば雲層の鉛直構造っていうのもあったな...

参考文献

- HITRAN2000 ; <http://www.hitran.com>
- Houghton J. 2002 : The Physics of Atmospheres third edition, *Cambridge Univ. Press.*,pp320
- Kasting J. F.,1991 : CO₂ condensation and the climate of early mars, *Icarus*, **94**, 1-13
- Kasting J. F.,1997 : Warming early Earth and Mars, *Science*, **276**, 1213-1215
- NASA/JPL Planetary Photojournal, <http://photojournal.jpl.nasa.gov/>
- Pierrehumbert R. T. and Erlick C., 1998 : On the scattering greenhouse effect of CO₂ ice cloud, *J. Atmos. Sci.*, **55**, 1987-1903
- Mischna, M. A., Kasting, J. F., and Freedman, R., 2000, Influence of carbon dioxide clouds on early Martian climate, *Icarus*, **145**, 546–554
- Mitsuda C., Yokohata T. and Kuramoto K., 2005 : Scattering greenhouse effect of the CO₂ ice cloud and climate stability, *Proceedings of 38th ISAS Lunar and Planetary Science Conference*, in press
- Yokohata T., Kosugita K., Odaka M.,and Kuramoto 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*, 13--16
- Warren, S. G. 1986 : Optical constants of carbon dioxide ice, *Appl. Opt.*, **95**, 2650-2674

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 :

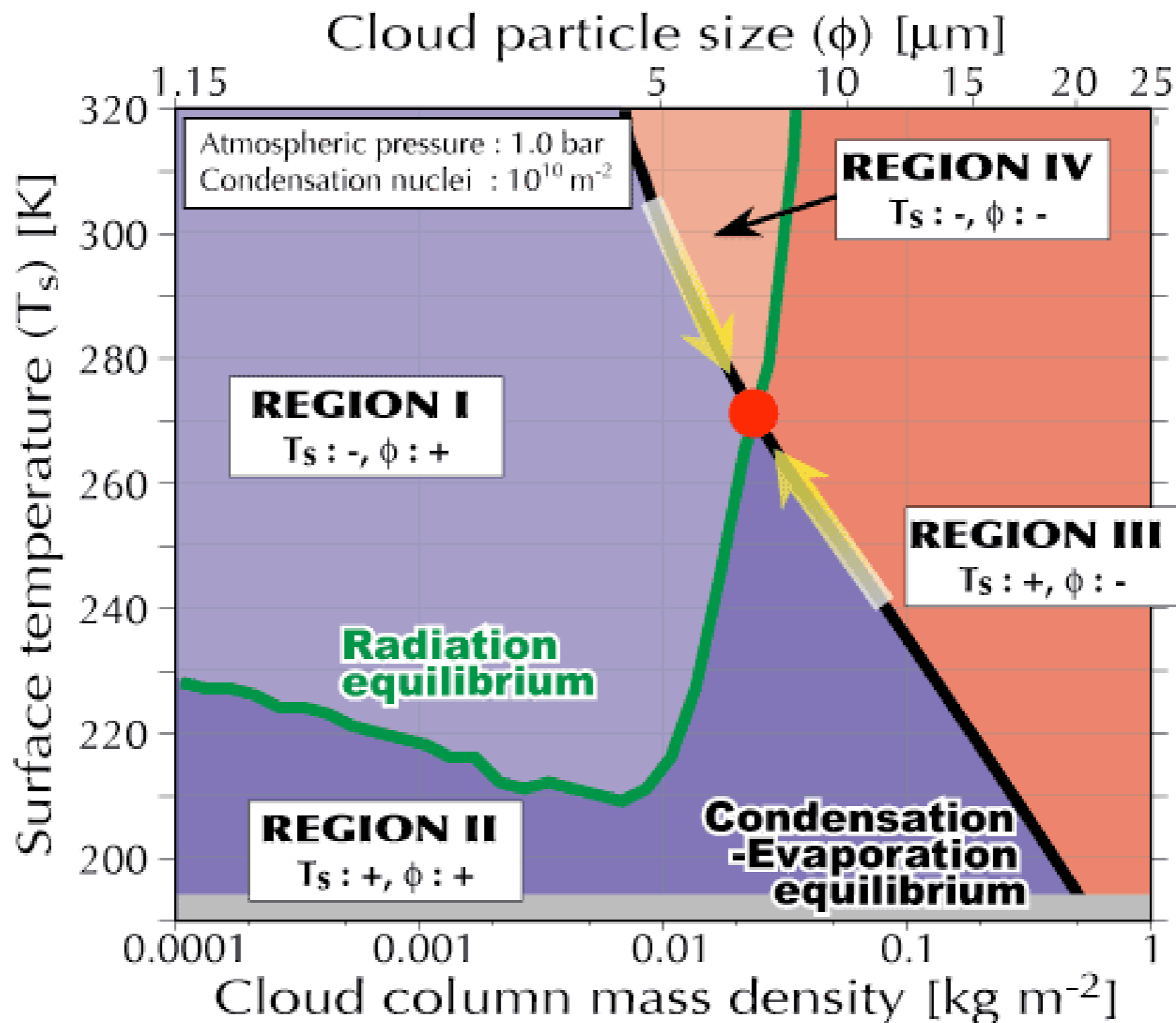
雲の温室効果増加

凝結潜熱減少 :

CH₄ の温室効果を打ち消す可能性有

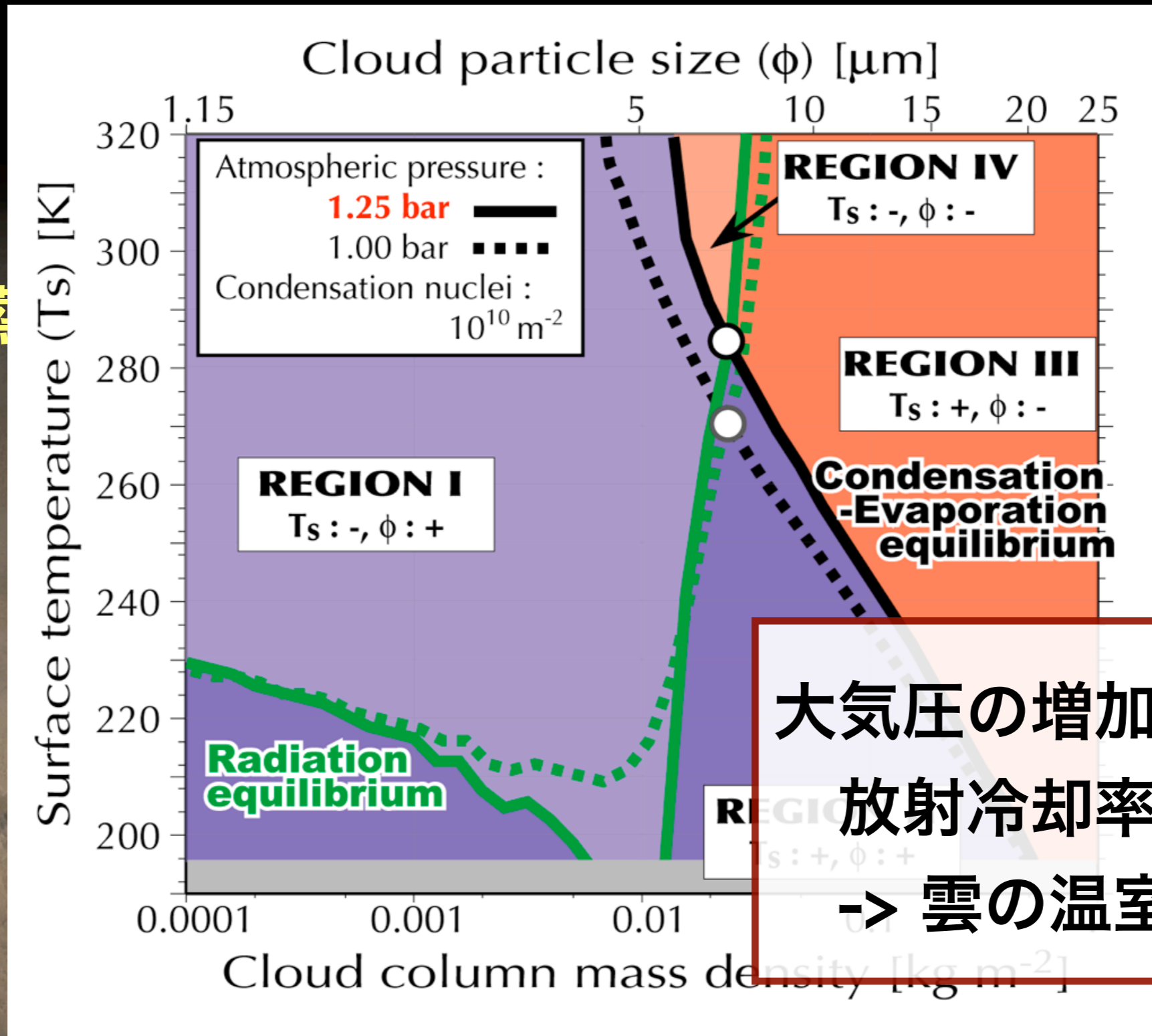
CO₂ 凝結潛熱

(大氣压 1 bar, 凝結核面数密度 10^{10} m^{-2})



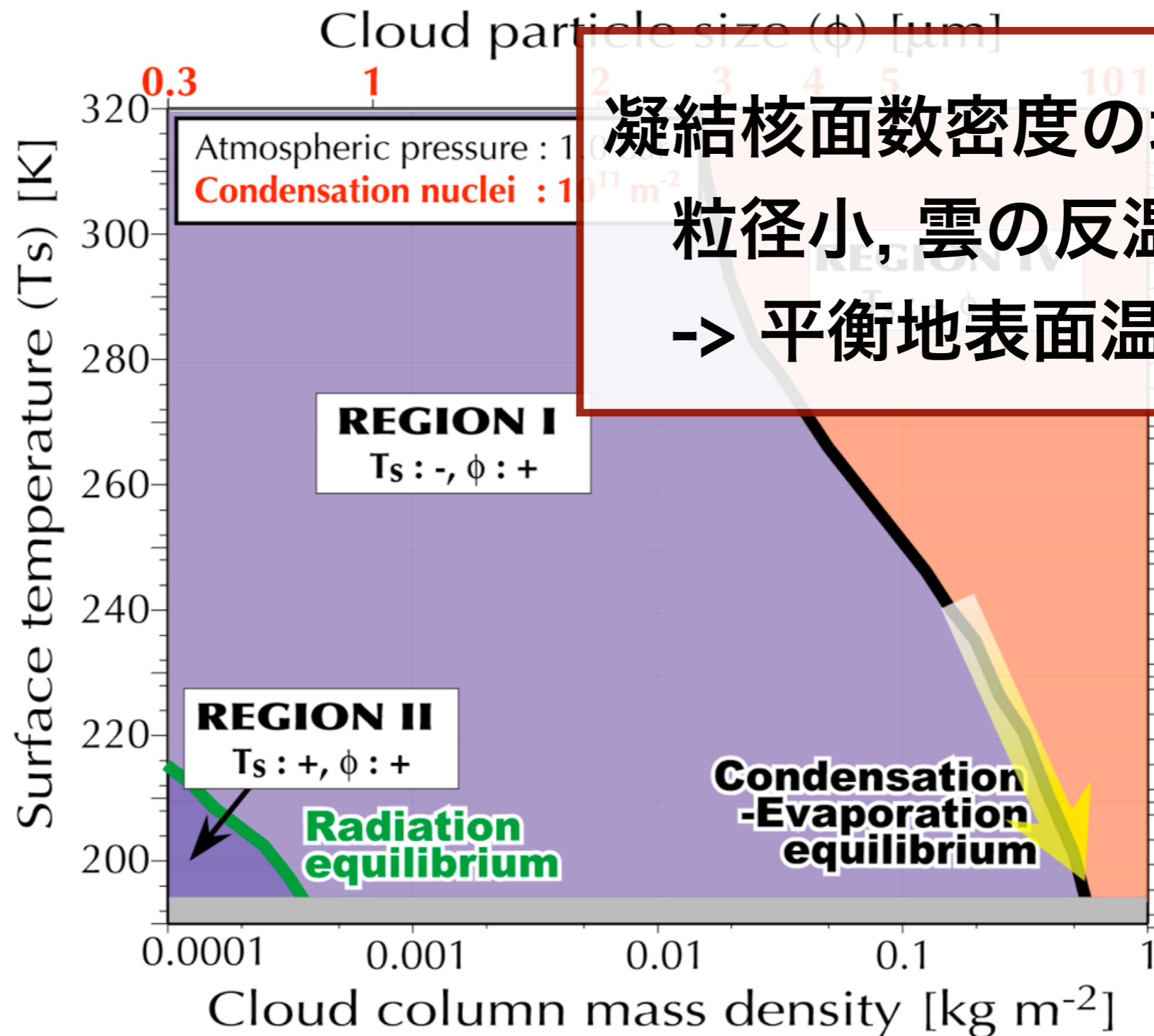
地表面温度の圧力依存性

(凝結核面数密度 10^{10} m^{-2} , 太陽光度 75%)



凝結核面数密度依存性

(大気圧 1bar, 太陽光度 75%)



凝結核面数密度の増加

粒径小, 雲の反温室効果

-> 平衡地表面温度存在せず

太陽光度依存性

(大気圧 1 bar, 凝結核面数密度 10^{10} m^{-2})

