

# 厚い古火星大気中に形成される 二酸化炭素氷雲の鉛直構造

光田 千紘 (北大理・宇宙理学)

横畠 徳太 (国立環境研究所)

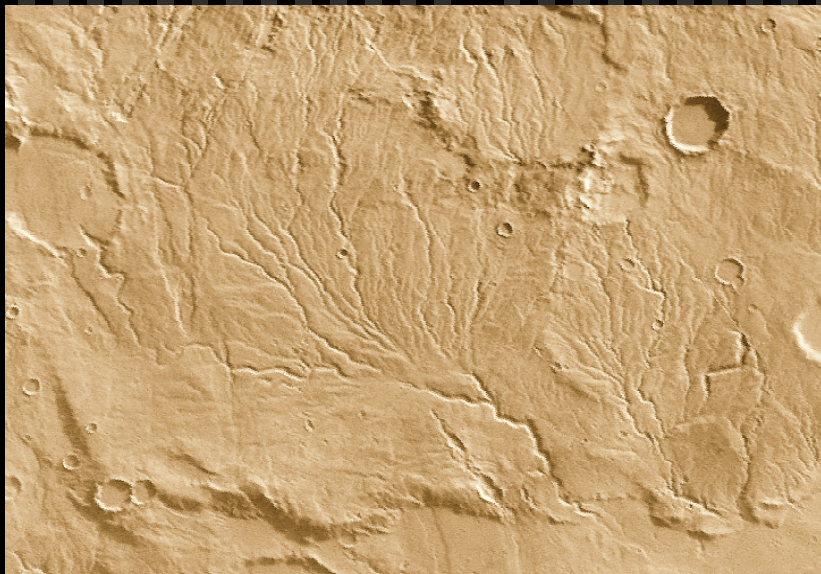
倉本 圭 (北大理・宇宙理学)

2006/05/17

地球惑星科学連合 2006 年大会 @ 幕張メッセ  
「火星の科学と将来探査」 P230-002

# 火星古気候の謎

- ✓ 当時の温暖湿潤な気候を示唆する流水地形の存在



Valley Networks

## 当時の環境

- ✓ 大気主成分: CO<sub>2</sub>
- ✓ 太陽光度: 現在の75%

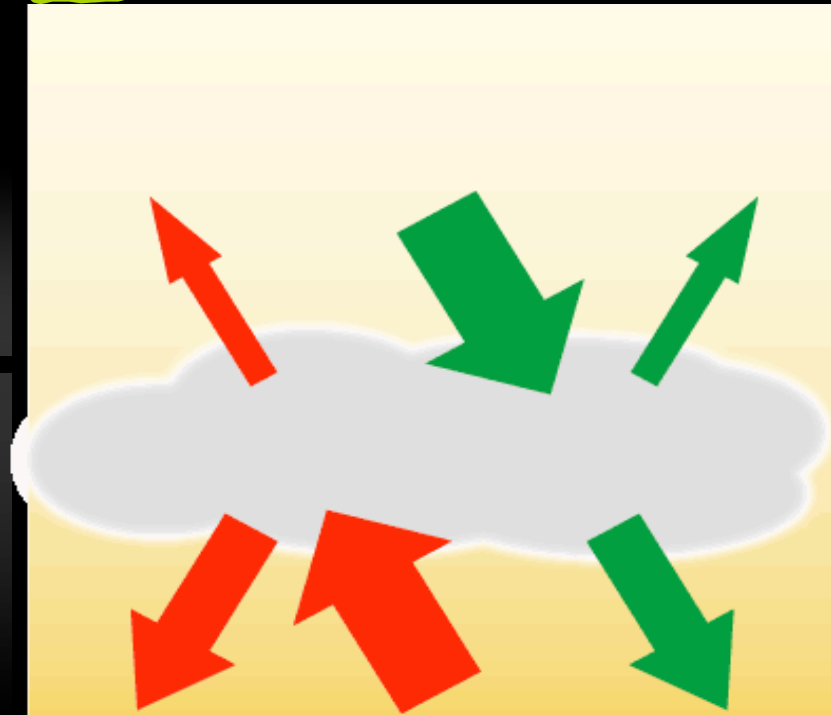
温暖湿潤な気候は  
再現されない

(Kasting, 1991)

\* ただし、雲の放射特性は無視

# 二酸化炭素氷雲の散乱温室効果

(e.g. Pierrehumbert and Erlick 1998)



赤外放射反射 > 太陽放射反射

**散乱温室効果**

- ✓ 温室効果は雲パラメタに強く依存
  - ✓ 雲粒径, 光学的厚さ
  - ✓ ただし, シンプルモデル
- ✓ 理想的な雲をおけば強い温室効果が生じる(e.g. Mischna *et al.* 2000)
- ✓ 雲パラメタの見積もりは困難
  - ✓ 散乱温室効果研究の障壁

# 本研究: これまでの取り組み

- ✓ 雲の形成消失過程の解析
  - ✓ 雲の質量収支は放射冷却(加熱)を受けることによる凝結(蒸発)が支配的
  - ✓ 雲粒は放射平衡を満たす(= 正味の  $\text{CO}_2$  凝結蒸発が 0 となる)ように自発的に成長消失する.
- ✓ 雲パラメタの評価
  - ✓ 散乱温室効果研究に新展開
- ✓ ただし, 簡単化したモデルで解析
  - ✓ 鉛直温度構造は仮定
  - ✓ 雲は一層を仮定

# 本研究の目的

- ✓ 放射対流平衡な大気構造の下における雲の鉛直構造と温室効果の評価
- ✓ 大気の変遷を考慮した次元放射対流凝結平衡モデルの構築
  - ✓ 自律的に雲の鉛直構造が決まるか?

# 一次元放射対流凝結平衡モデル

✓ 放射対流平衡と、雲粒と周辺大気の蒸気圧平衡を同時に満たす構造を求める

✓ 計算の流れ

0. 初期値の温度, 雲構造を与える
1. 放射場を解く
2. 放射による加熱冷却
3. 雲の凝結蒸発
4. 対流不安定成層を調節
5. 1 へ戻る

# モデル: 放射コード

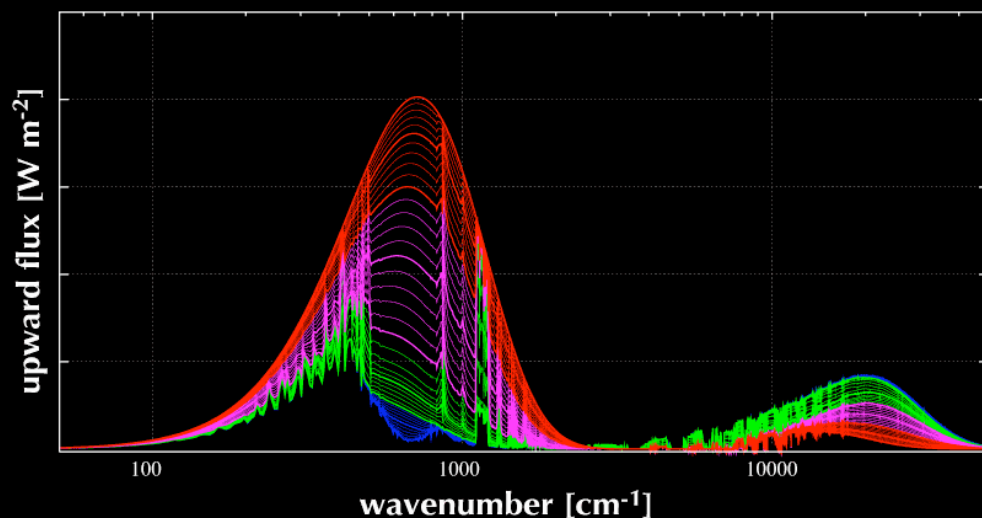
1. 初期値を与える
2. 放射場を解く
3. 放射による加熱冷却
4. 雲の凝結蒸発
5. 不安定成層を中立
6. 2へ戻る

## ✓ 放射伝達: 二方向近似

(Toon *et al.* 1989)

- ✓ 太陽:  $\delta$ -Eddington 近似
- ✓ 赤外: Hemispheric mean 近似

\* 複数層の雲による多重散乱を考慮



## ✓ 大気光学係数

✓ Random バンドモデル  
(ローレンツ線形)

- ✓ 吸収線DB: HITRAN2004
- ✓ H<sub>2</sub>O 連続: Roberts *et al.* 1976

## ✓ 氷雲光学係数

- ✓ ミー理論 (球形粒子)
- ✓ 複素屈折率: Warren 1986

✓ 波数解像度: 5 cm<sup>-1</sup>

# モデル: 雲モデル

1. 初期値を与える
2. 放射場を解く
3. 放射による加熱冷却
4. 雲の凝結蒸発
5. 不安定成層を中立
6. 2へ戻る

- ✓ 凝結温度よりも気温が低い層では, エネルギーバランスから雲の凝結量を算出
  - ✓ 対流によるエネルギー流入は考えない
- ✓ 雲の粒径は, 雲の質量密度, 凝結核混合比から算出
  - ✓ 凝結核混合比はパラメータ
  - ✓ 層内の粒径分布は考えない
- ✓ 雲粒の落下や併合成長による雲パラメータの変化は考えない



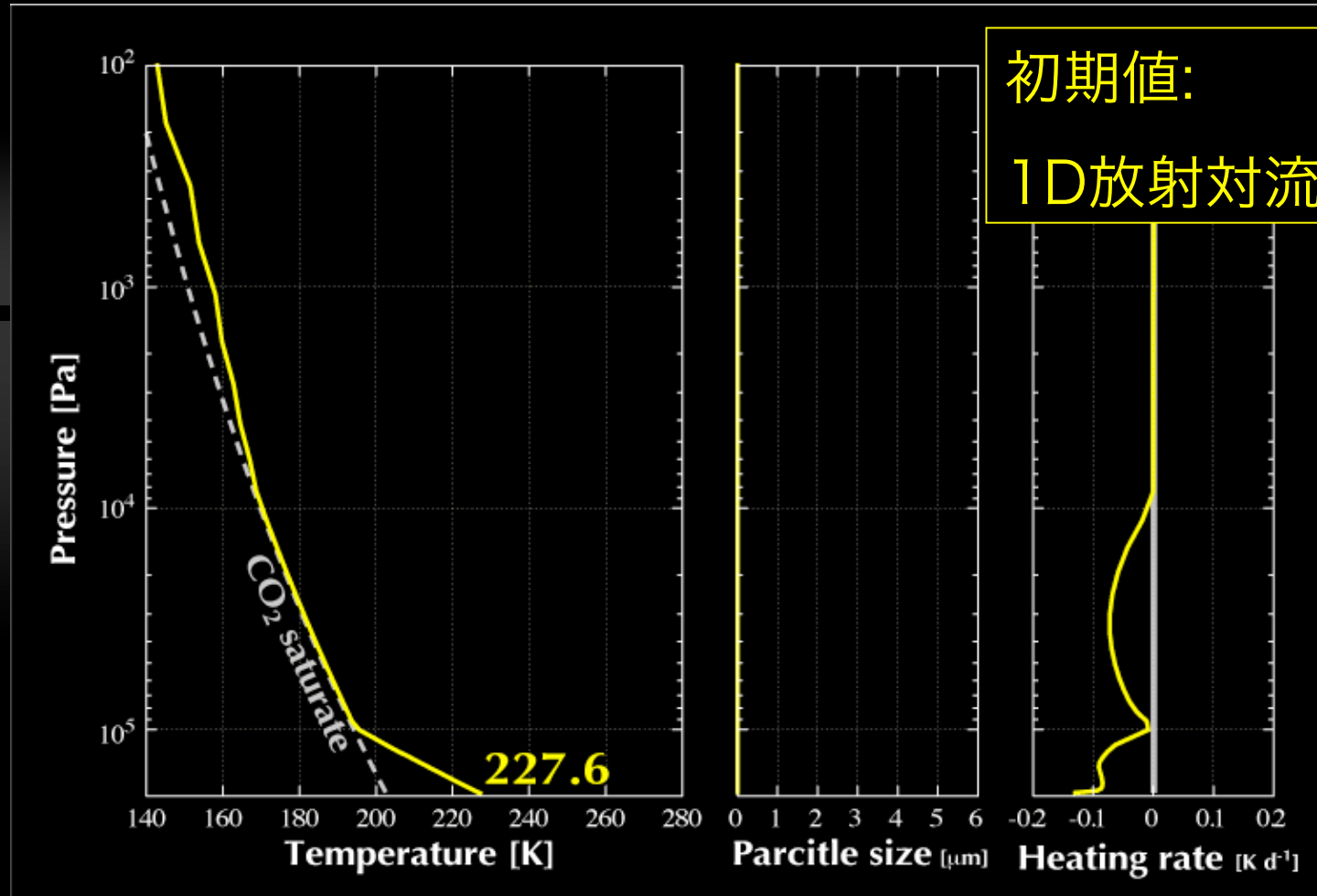
# 結果: 平衡大気雲構造

太陽光度 0.75 倍

大気圧 2 気圧

CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O (湿度100%)

凝結核混合比: 10<sup>7</sup> 個/kg



初期値:

1D放射対流平衡構造

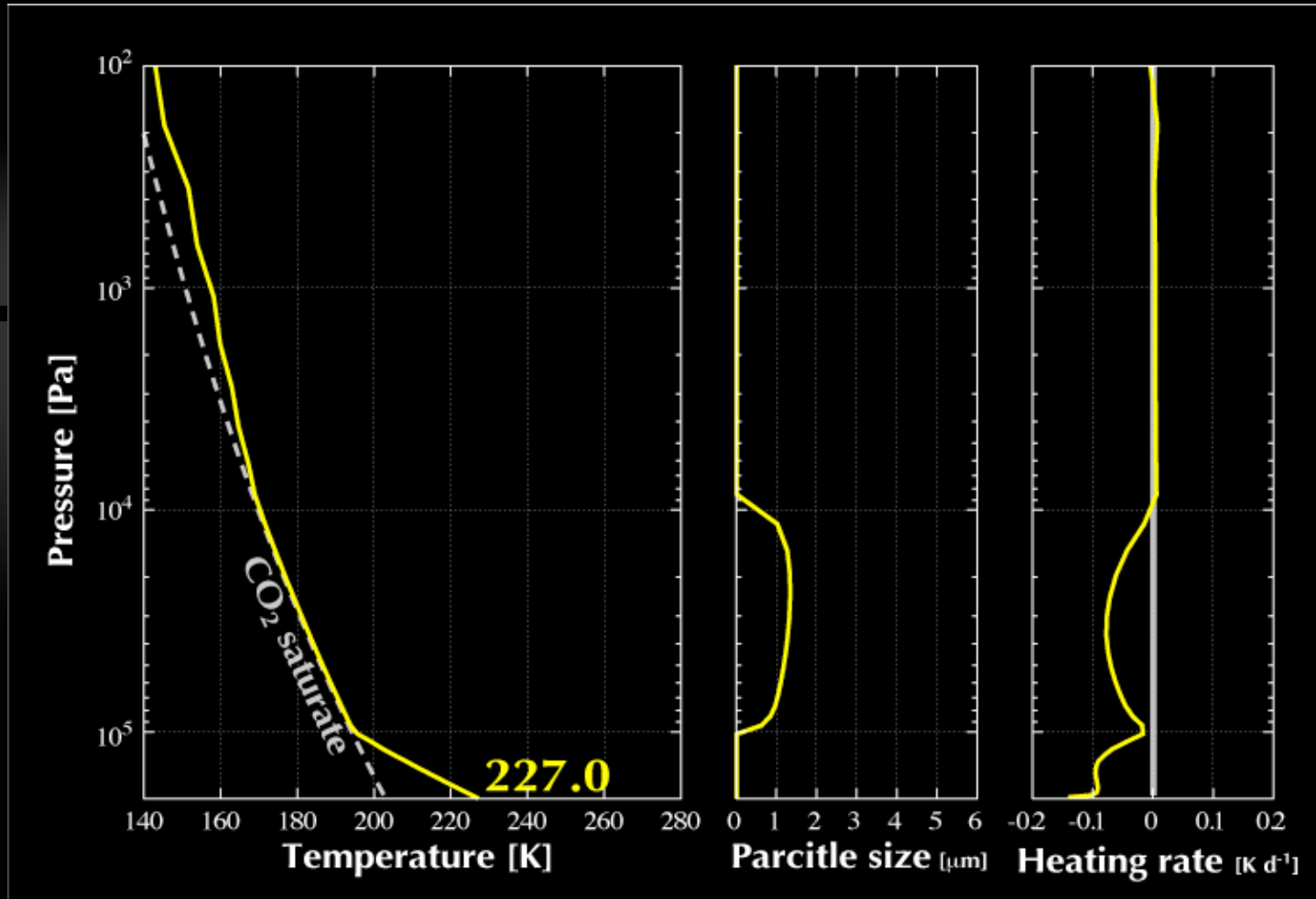
# 結果: 平衡大気雲構造

太陽光度 0.75 倍

大気圧 2 気圧

CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O (湿度100%)

凝結核混合比: 10<sup>7</sup> 個/kg



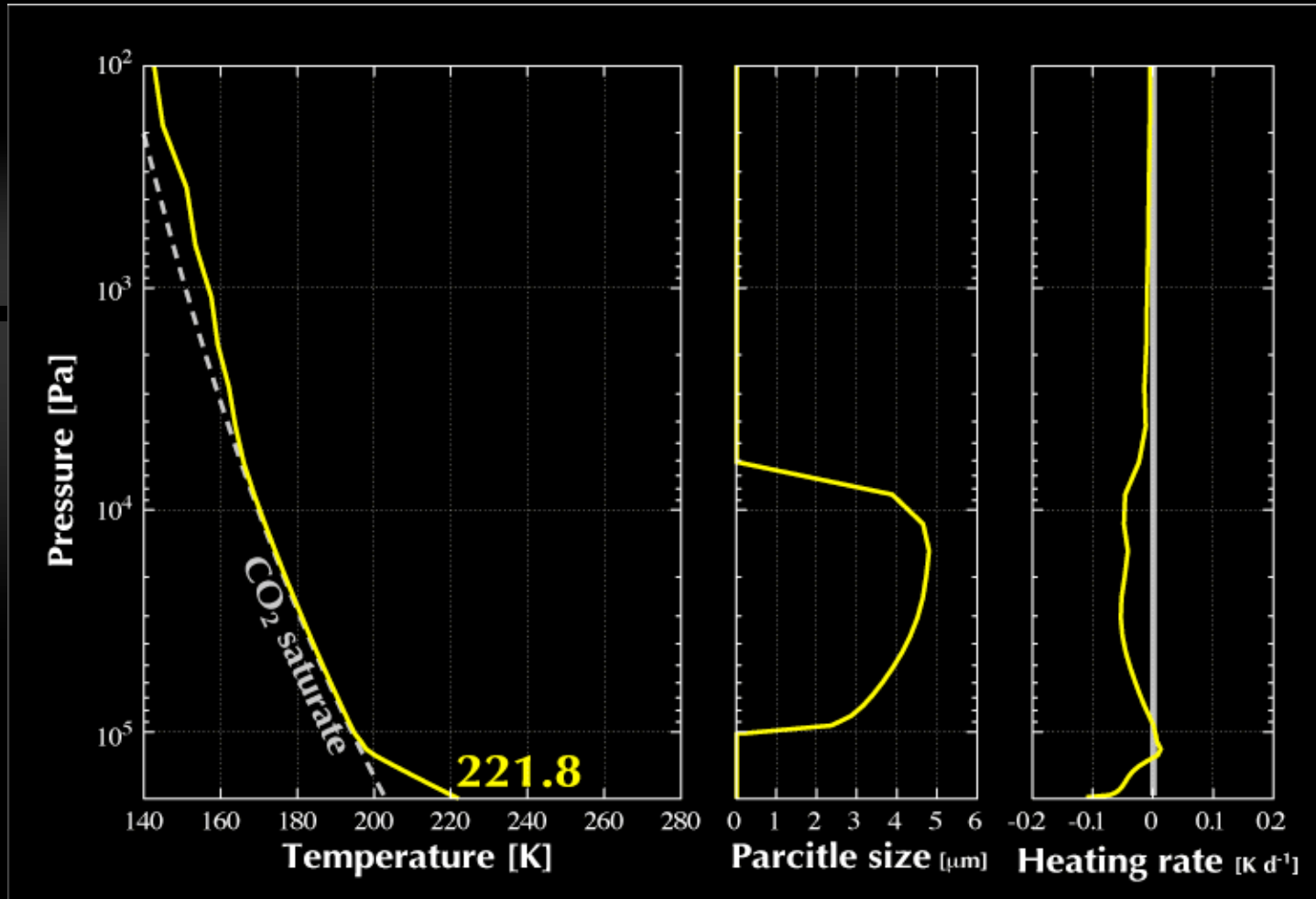
# 結果: 平衡大気雲構造

太陽光度 0.75 倍

大気圧 2 気圧

CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O (湿度100%)

凝結核混合比: 10<sup>7</sup> 個/kg



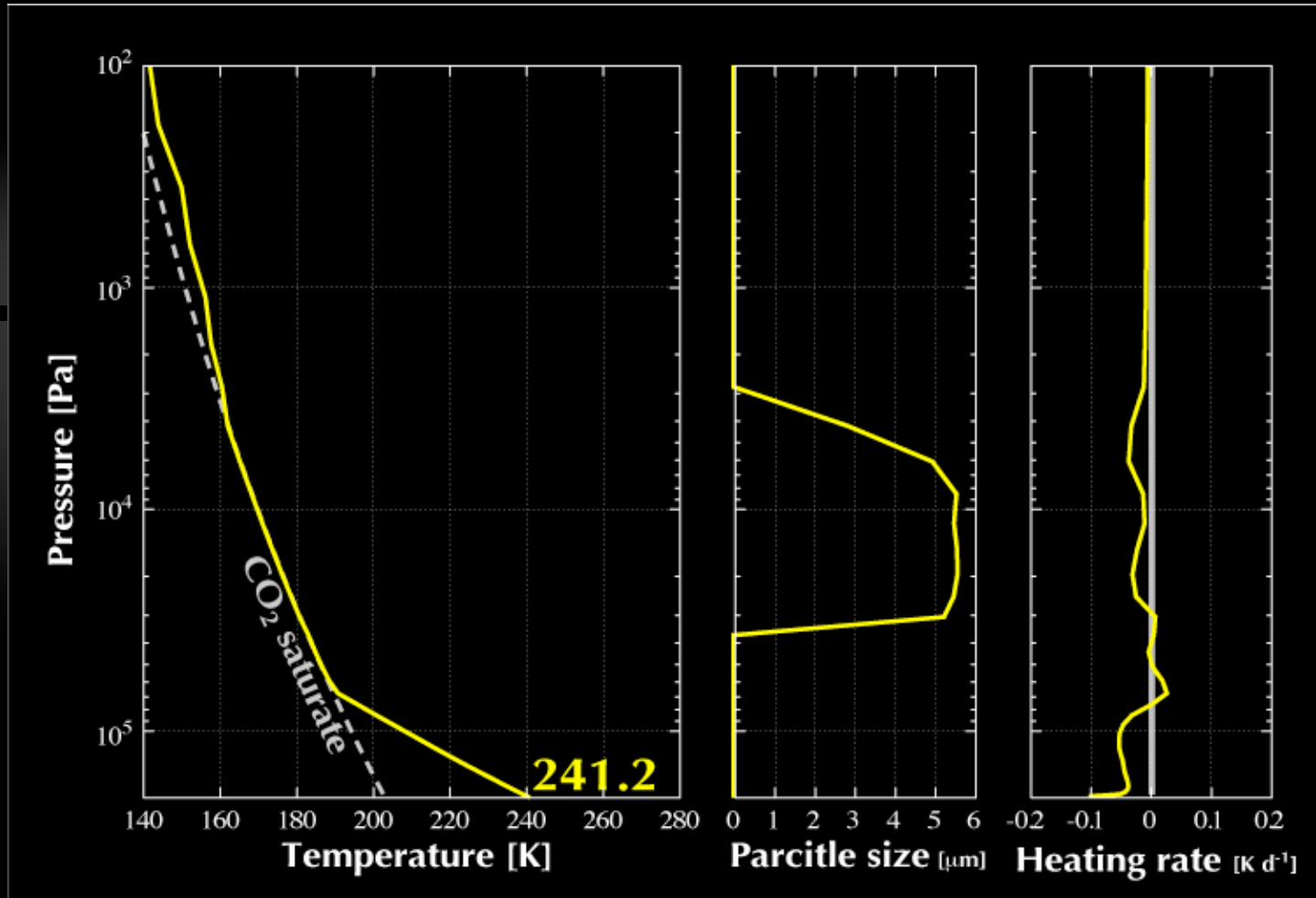
# 結果: 平衡大気雲構造

太陽光度 0.75 倍

大気圧 2 気圧

CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O (湿度100%)

凝結核混合比: 10<sup>7</sup> 個/kg



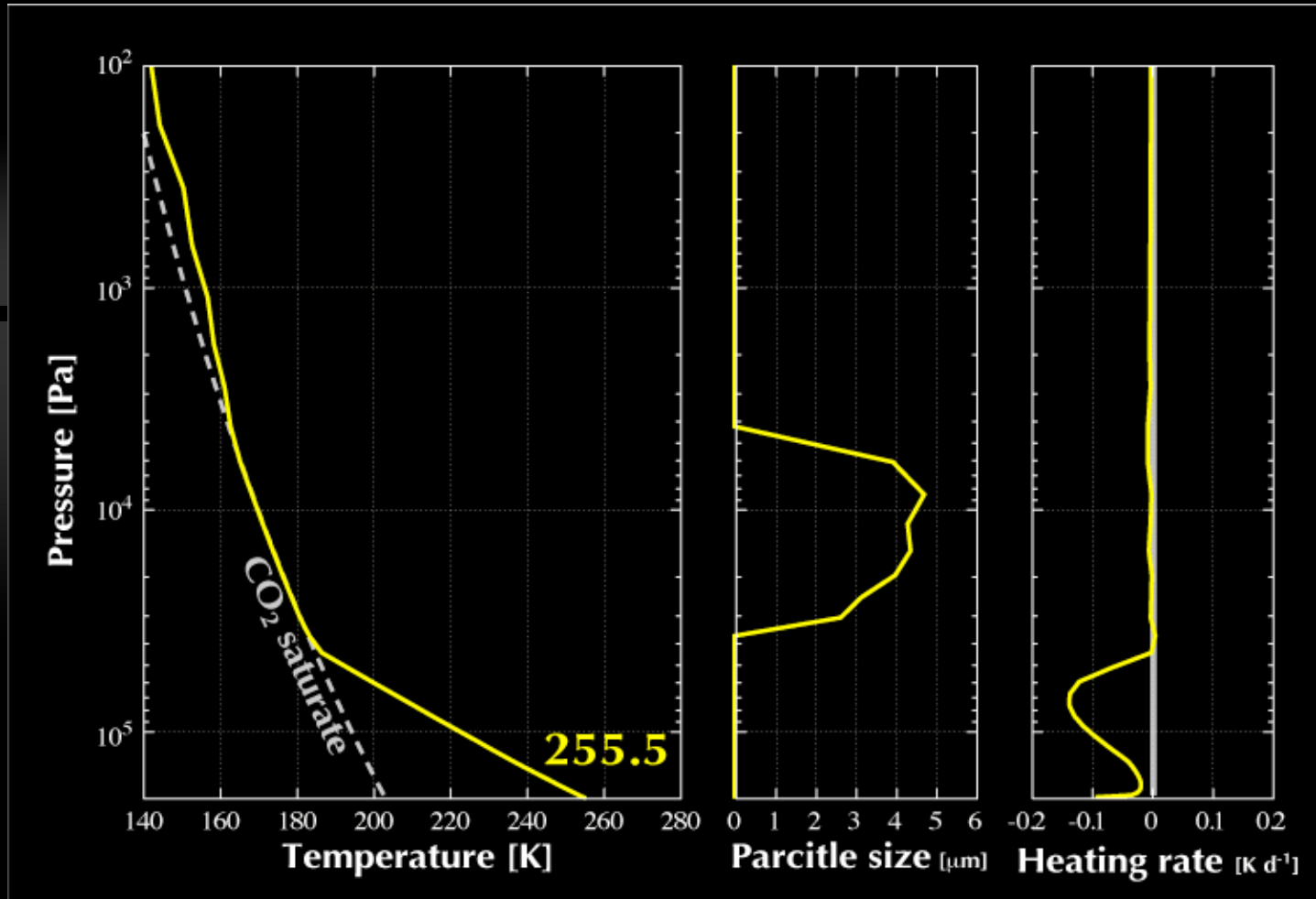
# 結果: 平衡大気雲構造

太陽光度 0.75 倍

大気圧 2 気圧

CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O (湿度100%)

凝結核混合比: 10<sup>7</sup> 個/kg



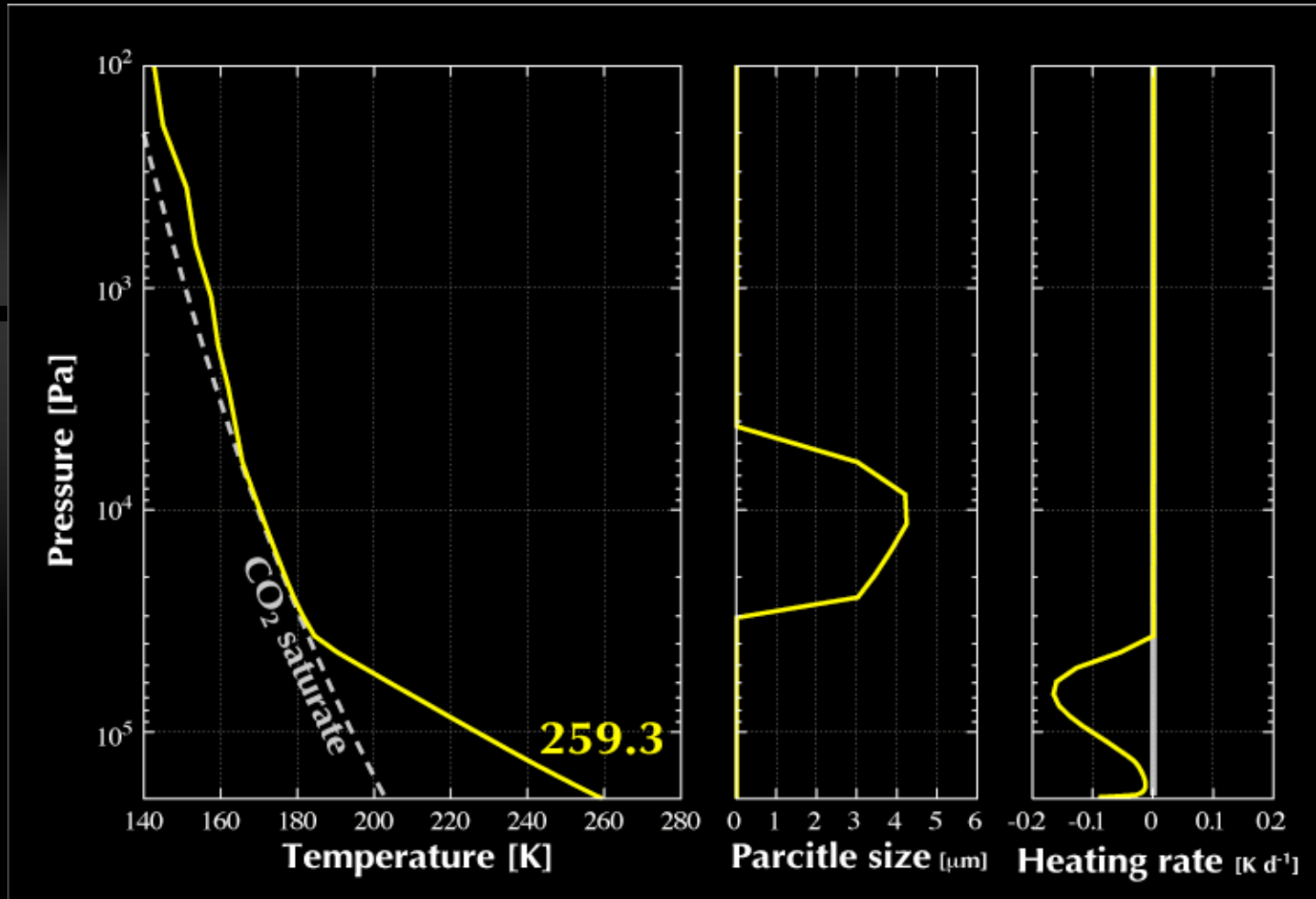
# 結果: 平衡大気雲構造

太陽光度 0.75 倍

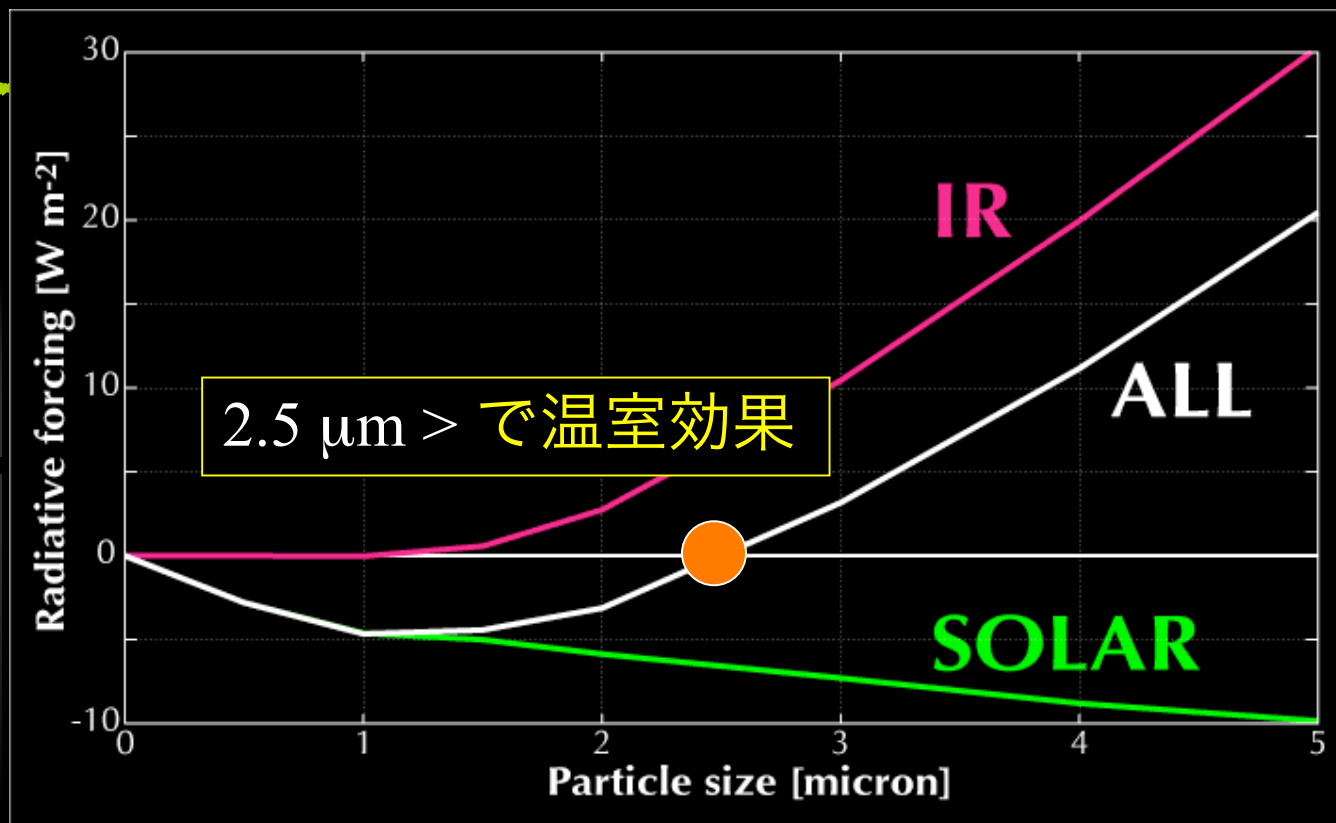
大気圧 2 気圧

CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O (湿度100%)

凝結核混合比: 10<sup>7</sup> 個/kg

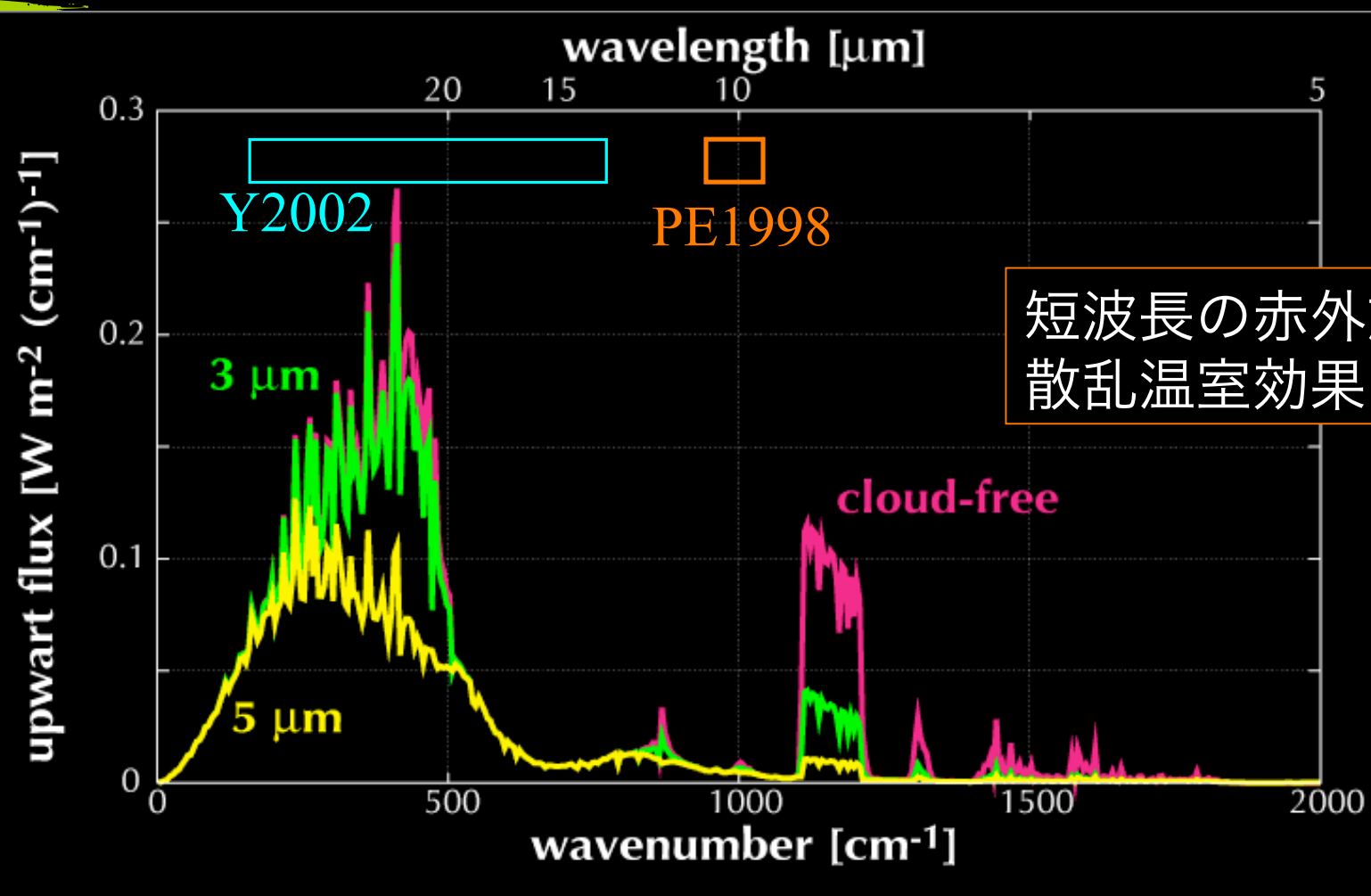


# 解析: 温室効果の粒径依存性



- ✓ 従来の研究における温室効果を得る粒径の下減値の見積もり
  - ✓ 3.5 μm (Pierrehumbert and Earlick, 1998)
  - ✓ 10 μm (Yokohata *et al.* 2002)

# 解析: 温室効果の粒径依存性



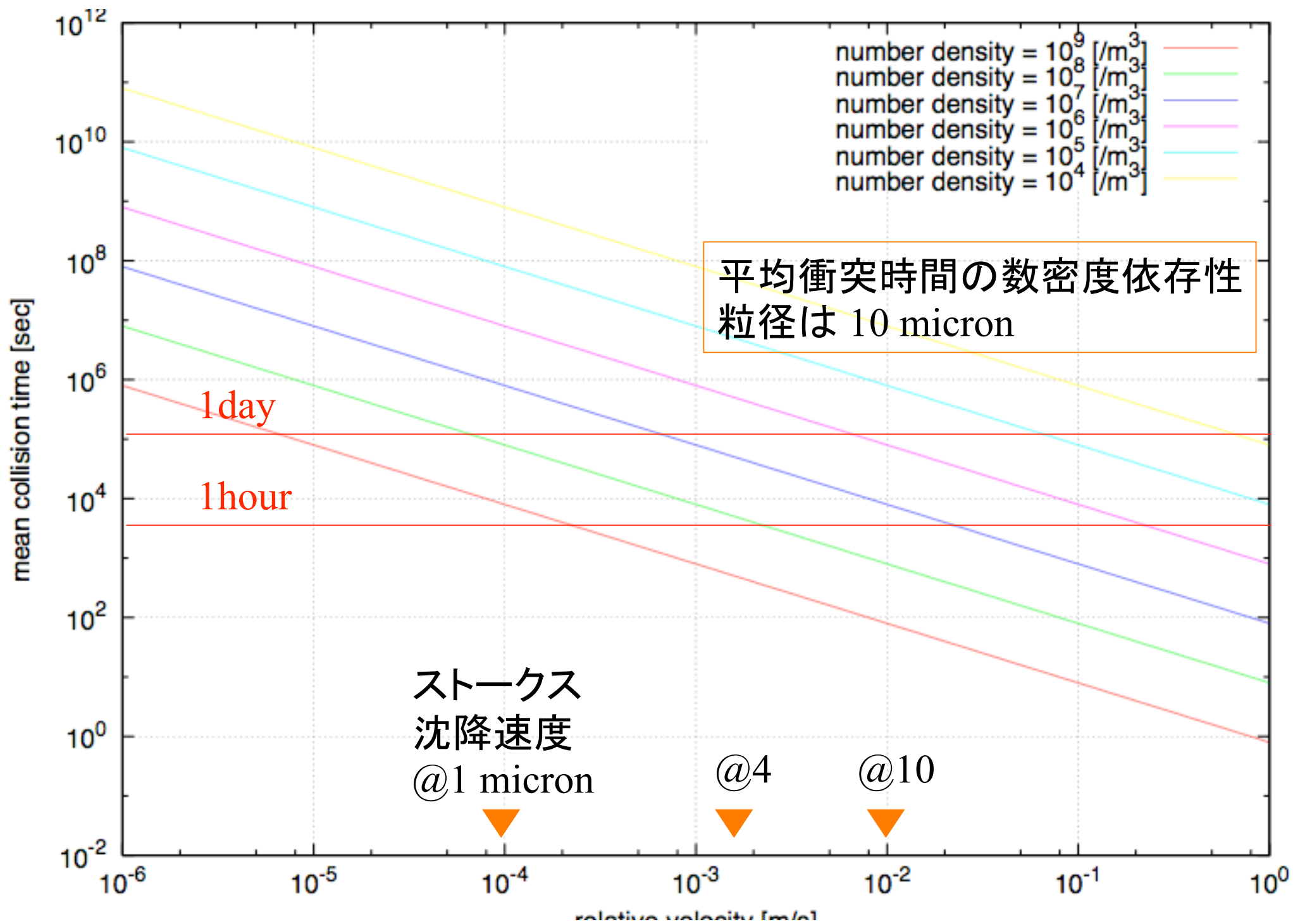


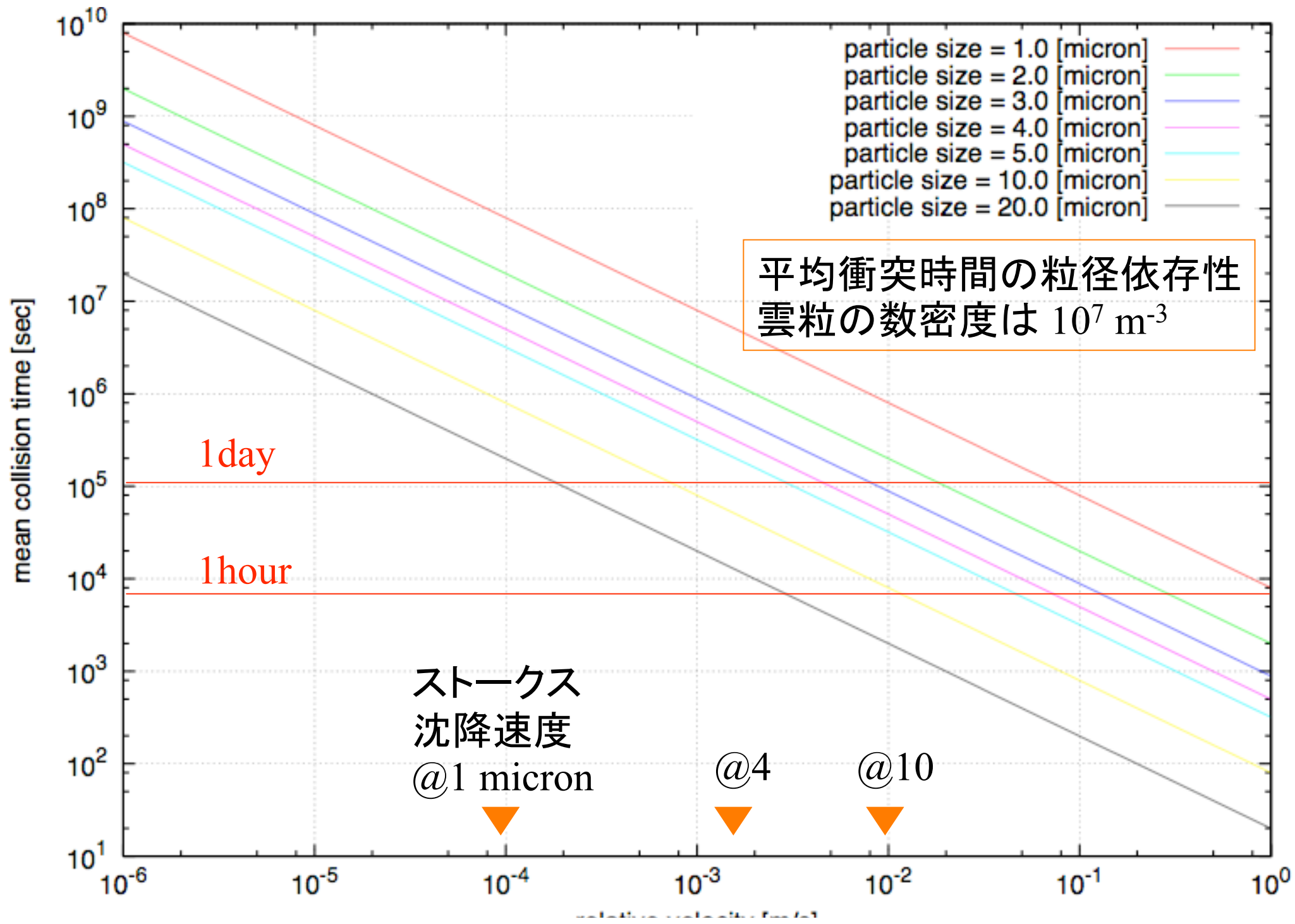
# まとめと今後の課題

- ✓ 自律的に雲構造が決まることが確認できた
- ✓ 凝結核混合比  $10^7 \text{ kg}^{-1}$ , 大気圧 2 気圧では
  - ✓ 地表面温度: 260 K まで上昇
  - ✓ 雲の粒径: 2 - 4  $\mu\text{m}$
- ✓ 粒径  $> 2.5 \mu\text{m}$  で散乱温室効果
- ✓ 初期値依存性とパラメータスタディは今度の課題
  - ✓ 凝結核混合比, 大気圧, 大気微量成分( $\text{CH}_4$ )

# 質疑応答 1

- ✓ 併合成長するんじゃないの?(秀和さん)
  - ✓ 粒子間がすかすかなので, そもそも衝突しないという見積もり. ただ相対速度が  $1 \text{ cm/sec}$  のオーダー(=ストークス沈降速度)とすると, 平均衝突時間は時間~日オーダー.
  - ✓ 併合成長考えないといけない?
    - ✓ 最短だと放射に律速された大気凝結のタイムスケールに匹敵.
    - ✓ その場合に最も効いてくるのは? 粒径の変化? 粒子数の減少?
    - ✓ 凝結核の放出は素早く起きるのか?
    - ✓ 真面目に解こうとすると大変そうな気配. ... 他の雲の微物理モデルではその辺どう計算してるんだろう??





# 質疑応答 2

- ✓ 雲がむらむらの場合は? (千秋さん)
  - ✓ 対流が雲に与える影響は小さく、初期にむらむらした雲があったとしても太陽放射の入射量と凝結核混合比さえ一様分布していれば放射冷却によって一様な雲が形成されるというのが基本的な理解.
  - ✓ もっと雲が”対流(=積乱雲)”ではなく、“放射(巻雲)”で形成されることを強調すべき.
    - ✓ 地球の常識では湿潤断熱な温度構造をしている領域では対流性の雲が形成されると考えてしまう.
    - ✓ 小高さんの計算結果では凝結層で熱対流が抑制されている事を示すとかね.
  - ✓ 雲層下端から乾燥断熱領域に流出する下降流は周囲よりも温位が低く、対流が生じやすいセンスにある. とはいえ、CO<sub>2</sub> 氷がすべて凝結したところで大気温度は  $10^{-3}$  Kしか下がらないため、その効果は小さい.

# 参考文献1

- ✓ Goody, R. M. and Yung, S. A., 1989, *Atmospheric radiation*, Oxford Univ. Pres, 519pp
- ✓ Gough, D. O., 1981, Solar interior structure and luminosity variations, *Sol. Phys.*, **74**, 21-34
- ✓ Houghton, J., 2002, *The physics of atmospheres third edition*, Cambridge Univ. press, 360pp
- ✓ Kasting, J. F., 1991, Early Earth's atmosphere, *Science*, **259**, 5097, 920-926
- ✓ Kasting, J. F., 1993, CO<sub>2</sub> condensation and the climate on early Mars, *Icarus*, **91**, 1-13
- ✓ Kieffer, H. H., Martin, T. Z., Peterfreund, B. M., Miner, E. E. and Paulluconi, F. D., 1977, Thermal and albedo mapping of Mars during the Viking Primary mission, *J. Geophys. Res.*, **82**, 4249-4291
- ✓ Pierrehumbert, R. T. and Erlick, C., 1998, On the scattering greenhouse effect of CO<sub>2</sub> ice clouds, *J. Atmos. Sci.*, **55**, 1897-1903
- ✓ Manabe, S., and Wetherald, R. T. 1967. Thermal equilibrium of the atmosphere with a given distribution of relative humidity. *J. Atmos. Sci.* **24**, 241-259
- ✓ 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 CO<sub>2</sub> cloud and climate stability on early Mars, *Proc. of the 38th ISAS Lunar and Planetary Science Conference*, in press

# 参考文献2

- ✓ Pollack, J. B., Kasting, J. F., Richardson, S. M. and Poliakov, K. 1987, The case for a wet, warm climate on early Mars, *Icarus*, **71**, 203-224
- ✓ Rothman, L. S., and A. Barbe, D. Chris Benner, L. R. Brown, C. Camy-Peyret, M. R. Carleer, K. Chance, C. Clerbaux, V. Dana, V. M. Devi, A. Fayt, J.-M. Flaud, R. R. Gamache, A. Goldman, D. Jacquemart, K. W. Jucks, W. J. Lafferty, J.-Y., Mandin, S. T. Massie, V. Nemtchinov, D. A. Newnham, A. Perrin, C. P. Rinsland, J. Schroeder, K. M. Smith, M. A. H. Smith, K. Tang, R. A. Toth, J. Vander Auwera, P. Varanasi, K. Yoshino, 2005, *J Quant. Spectrosc. Radiat. Transfer*, **95**, 139-204
- ✓ 関口美保, 2004, ガス吸収大気中における放射フラックスの算定とその計算最適化に関する研究, 東京大学博士論文
- ✓ 佐々木晶, 1997, 火星の表層環境とその歴史, *遊星人*, **6**, 10, 70-79
- ✓ Toon, O. B., McKay, C. P., Ackerman, T. P. and Santhanam, K., 1989, Rapid calculation of radiative heating rates and photodissociation rates in inhomogeneous multiple scattering atmospheres, *J. Geophys. Res.*, **94**, 16287-16301
- ✓ Yokohata, T., Kosugita, K., Odaka, M. and Kuramoto, K., 2002, Radiative absorption by CO ice clouds on early Mars: Implication to the stability and greenhouse effect of the clouds, *Proc. of the 35th ISAS Lunar and Planetary Science Conference*, 13-16
- ✓ Warren, S. G., 1986, Optical constants of carbon dioxide ice, *Appl. Opt.*, **25**, 2650-2674