

放射によって調節された 二酸化炭素氷雲と 古火星大気の温室効果

* 光田 千紘 (北大院宇宙)
横畠 徳太 (国立環境研)
倉本 圭 (北大院宇宙)

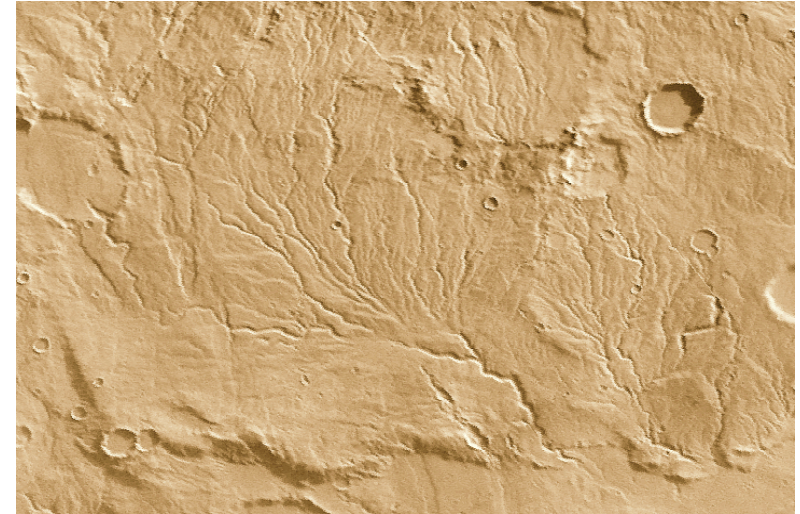
2007/02/27(Tue)

第 21 回大気圏シンポジウム

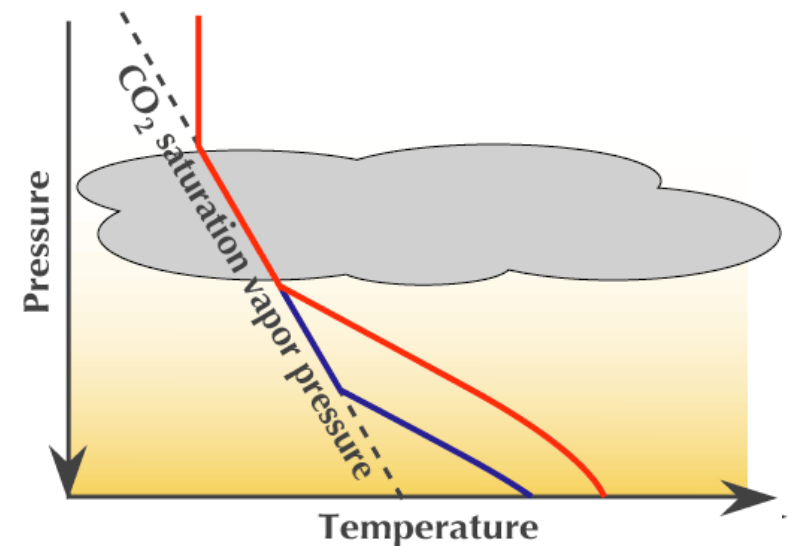
講演番号 I-1

火星古気候の謎 (~ 38 億年前)

- 温暖湿潤な気候
 - 多数の流水地形 (e.g. Carr 2000)
- 温暖化メカニズムは?
 - 厚い (~ 数気圧) CO₂ 大気の温室効果 (Pollack et al. 1989)
 - 暗い太陽下では**大気凝結**による温室効果弱化 (Kasting 1991)
 - + CO₂ 氷雲の温室効果
 - **雲粒径/光学的厚さ次第**で温室効果強 (e.g. Forget and



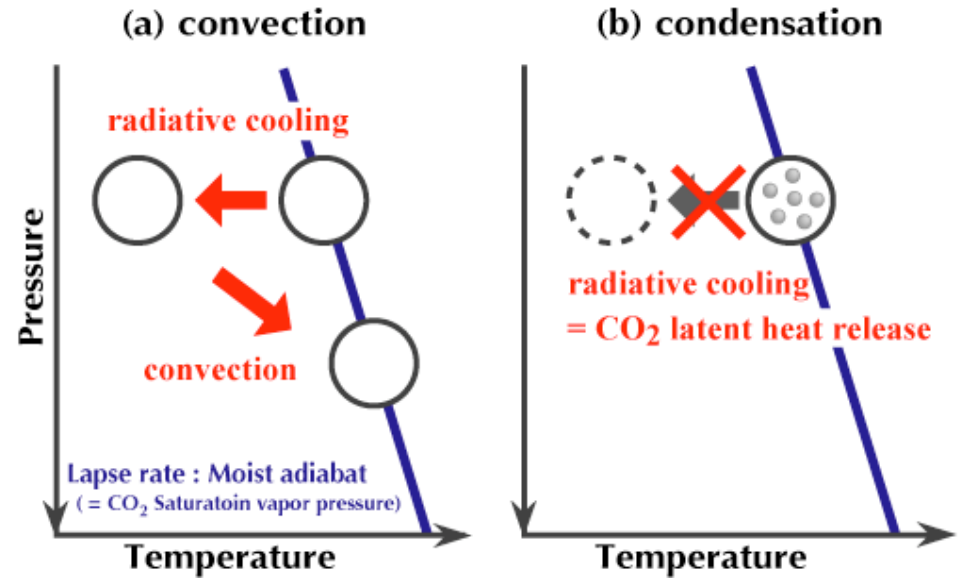
Valley Networks



雲パラメタの
定量的評価が重要

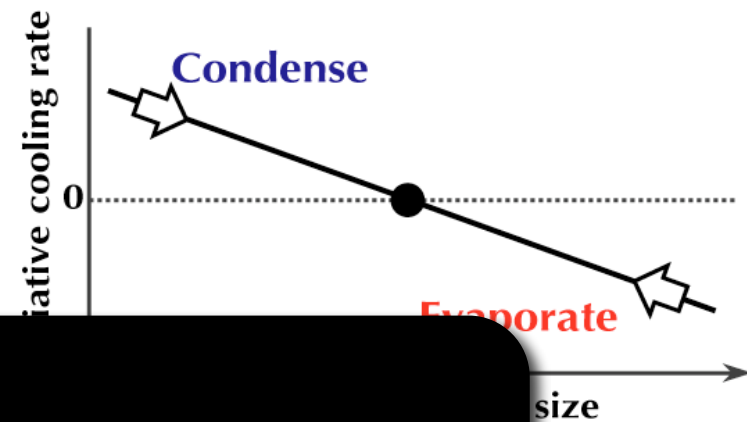
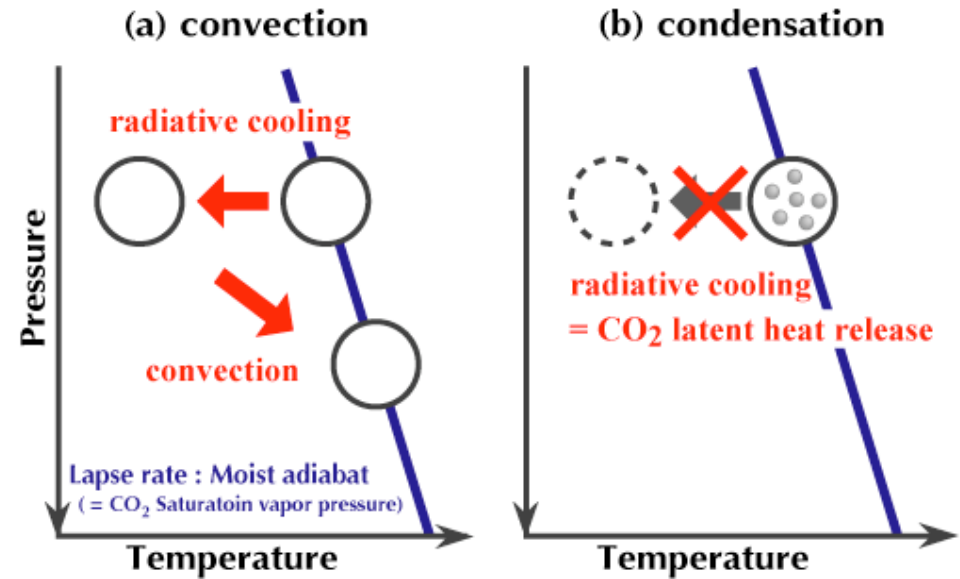
雲パラメタの見積り

- 雲層 = 活発な湿潤対流??
 - 対流の励起源; 放射冷却
 - 放射冷却 = 凝結潜熱であれば, 対流は駆動されない



雲パラメタの見積り

- 雲層 = 活発な湿潤対流??
 - 対流の励起源; 放射冷却
 - 放射冷却 = 凝結潜熱であれば, 対流は駆動されない
- 雲成長に伴い, 雲が正味加熱を受ければ...
 - 雲層は放射平衡構造へと収束
 - CO₂降雨降雪なしに雲構造を決定可能

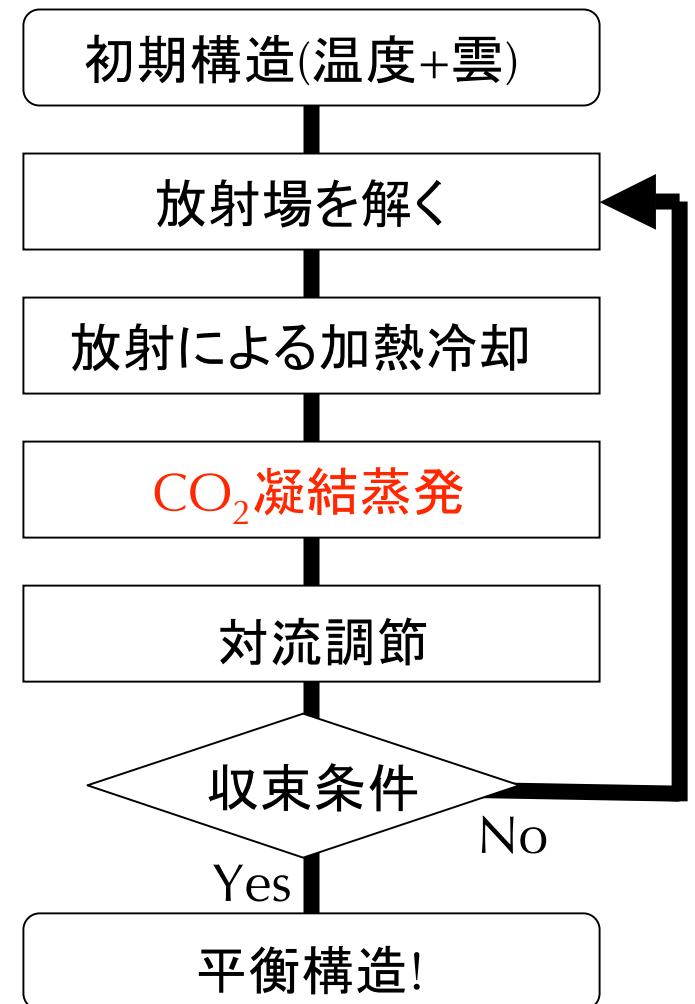


本研究:
放射平衡を満たす雲構造と
その温室効果の見積り

一次元放射対流凝結平衡モデル

- 放射対流平衡
- 大気と雲の相平衡
を同時に満たす温度-雲構造
を求める
- 大気成分: CO₂, H₂O (飽和蒸気圧)
- 鉛直 50 層
- タイムステップ: 10² ~ 10⁴ sec
- 収束条件: $dT/dt < 10^{-8}$ K/sec

-- 計算の流れ --



仮定と計算条件

- 仮定

- 雲層で対流は生じない

- 放射冷却を受けた分, 雲粒が成長する

- 雲粒の運動は無視

- 凝結核混合比は一定値を保つ
 - 雲粒落下, 併合成長の効果は考えない

- 各層内は単一粒径

- 粒径は凝結量から決定

- 計算条件

- 太陽光度: 0.75 x 現在値 (Gough 1981)

- 地表面アルベド: 0.2 (Mischna *et al.* 2000)

- パラメータ:

- 大気圧: 0.5, 1.0, 2.0, 5.0, 10.0 気圧

- 凝結核混合比: 10^5 , 10^6 , 10^7 , 10^8 , 10^9 個/大気1kg

放射コード

- 放射伝達

- 二方向近似(Toon *et al.* 1989)

- 太陽放射: δ -Eddington 近似

- 赤外放射: Hemispheric mean 近似

* 複数の雲層による多重散乱を考慮

- 光学定数

- 気体(CO₂ & H₂O): 相関 k 分布法

- 吸収線DB: HITRAN2004+HITEMP

- CO₂ 圧力励起帯(@0-350, 1150-1800cm⁻¹): Kasting *et al.* 1984

- CO₂ wing(@300-600cm⁻¹): 500cm⁻¹ cutoff

- Sub Lorentzian: Winters *et al.* 1961

- H₂O 連続吸収: Roberts *et al.* 1976

- 雲(CO₂ ice): Mie 理論

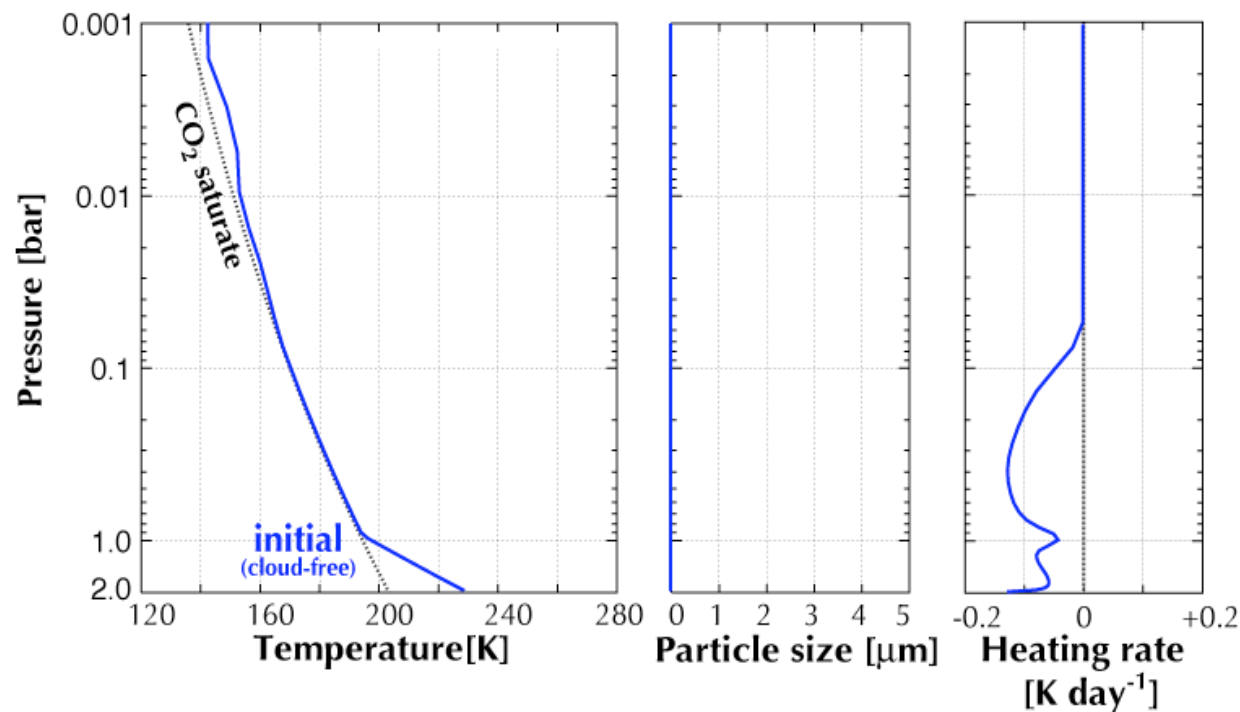
- 複素屈折率: Warren 1986

厚い CO₂ 大気に対応

結果1: 平衡大気-雲鉛直構造

大気圧: 2 気圧
凝結核混合比: 10^7 kg^{-1}

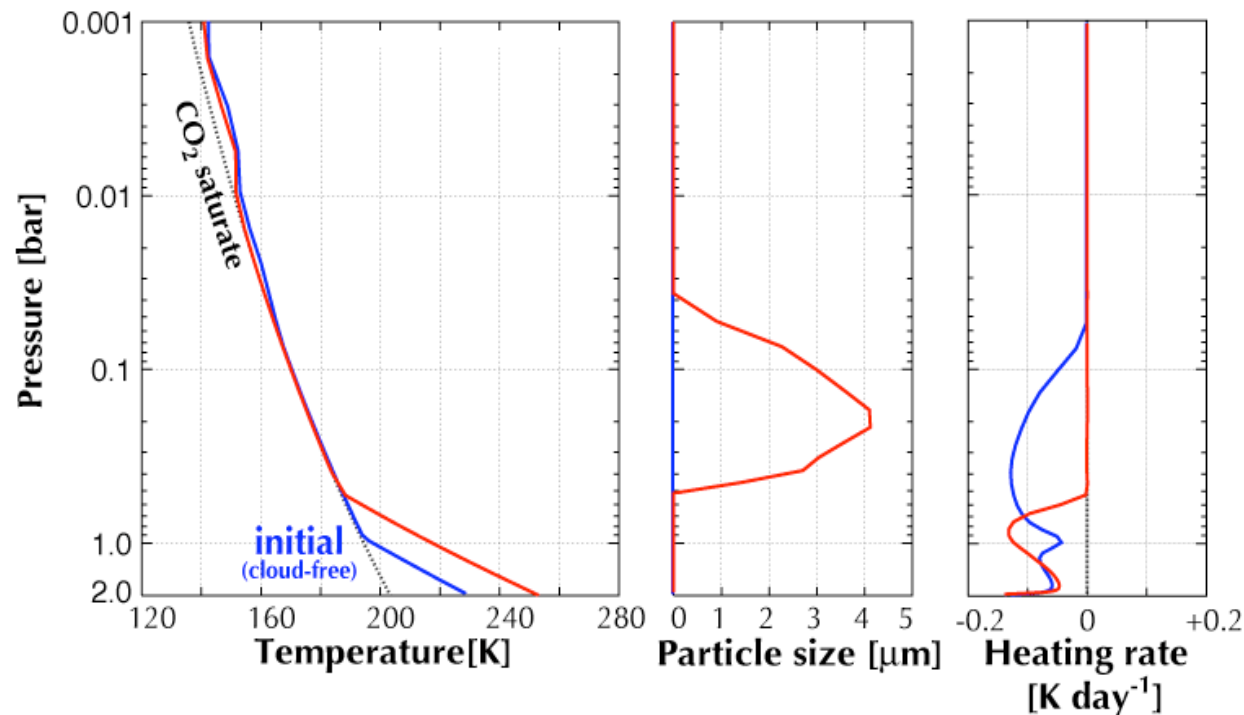
- 初期構造:
 - 雲の放射特性を無視した場合の平衡構造
 - 地表面温度 **227 K**



結果1: 平衡大気-雲鉛直構造

大気圧: 2 気圧
凝結核混合比: 10^7 kg^{-1}

- 初期構造:
 - 雲の放射特性を無視した場合の平衡構造
 - 凝結物は地面へ落下
 - 地表面温度 **227 K**
- 放射対流凝結平衡構造
 - 高度 15-35 km
 - 平均雲粒径 $3.0 \mu\text{m}$
 - 雲氷量 0.026 kg m^{-2}
 - 光学的厚さ 0.5 (@波長 $20\mu\text{m}$)
 - 地表面温度 **252 K**
 - 雲の温室効果 **25 K**



系が収束: 雲粒径と成長率の負のフィードバック

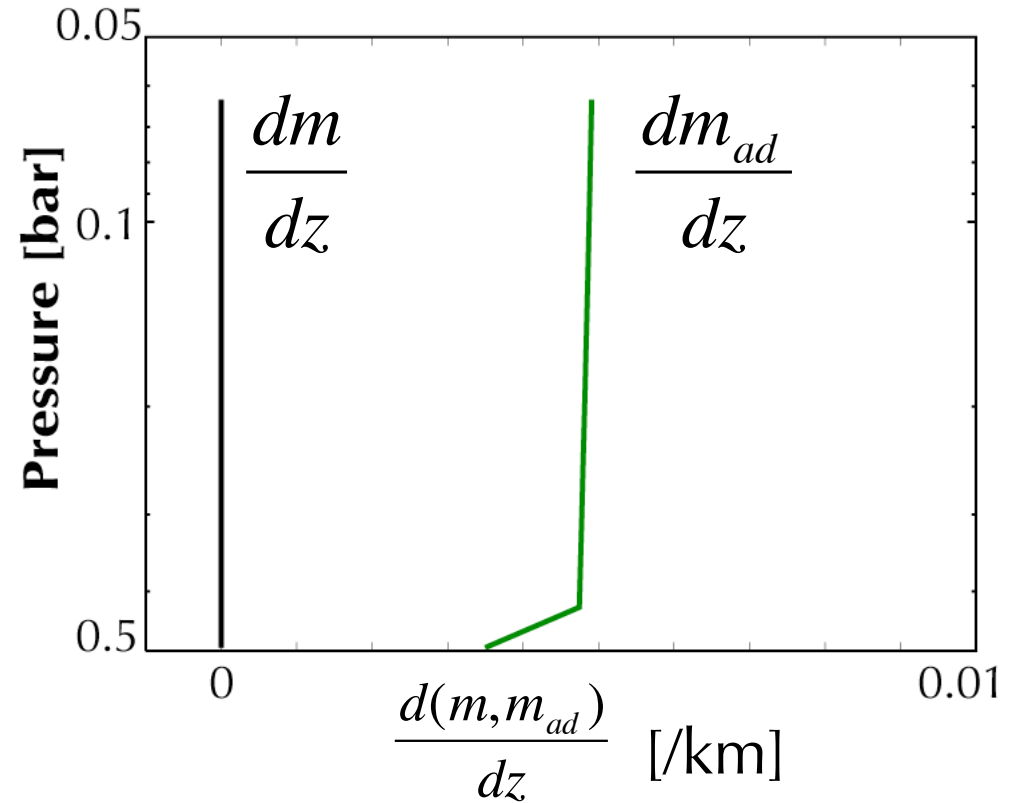
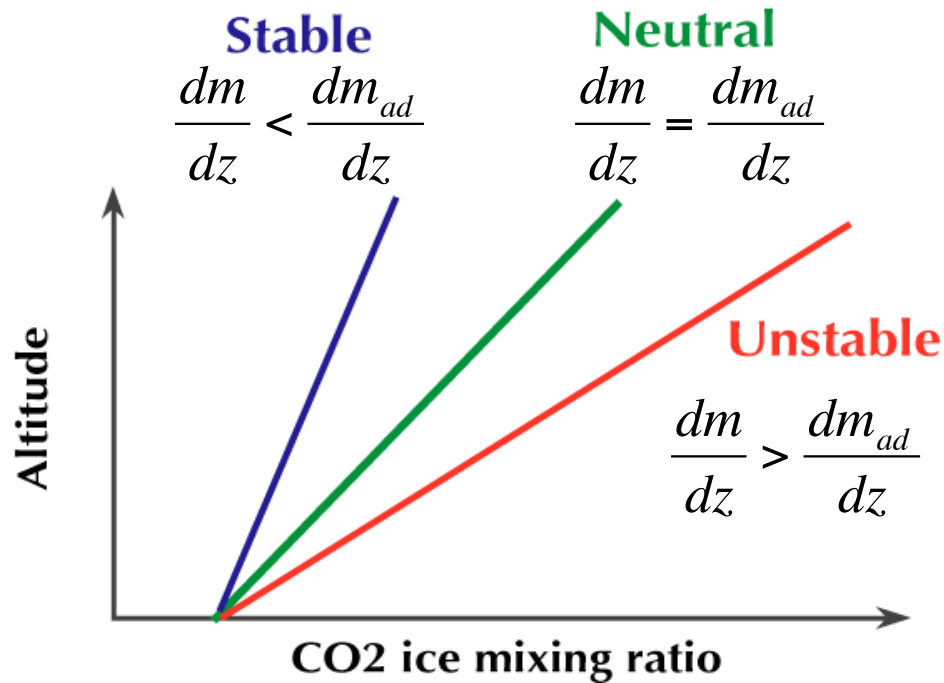
* 雲の成長に伴って

- 光学的に厚くなった雲がより赤外加熱を受ける
- 温室効果が増加し、下層からの赤外加熱が強まる

雲層での対流安定性

大気圧: 2 気圧
凝結核混合比: 10^7 kg^{-1}

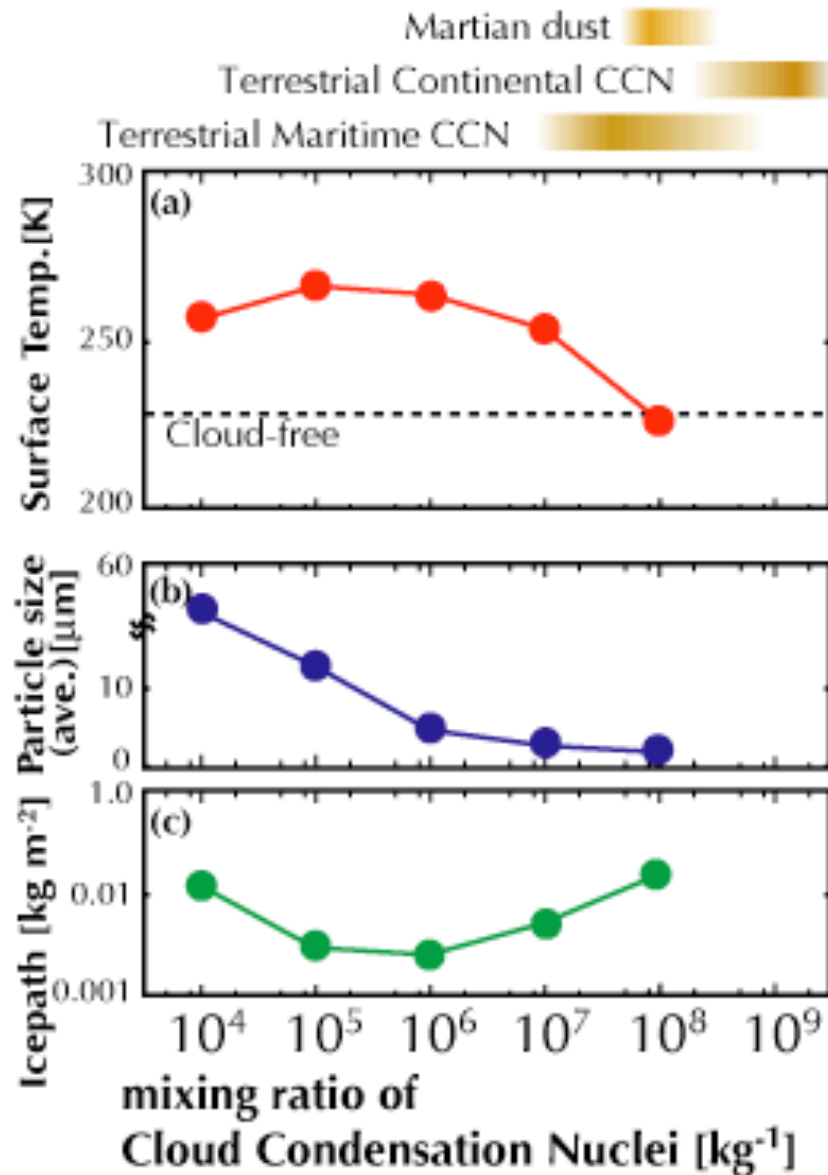
- 雲層: CO_2 相平衡
- CO_2 凝結物混合比(m)の鉛直分布による判定



雲層は対流安定:

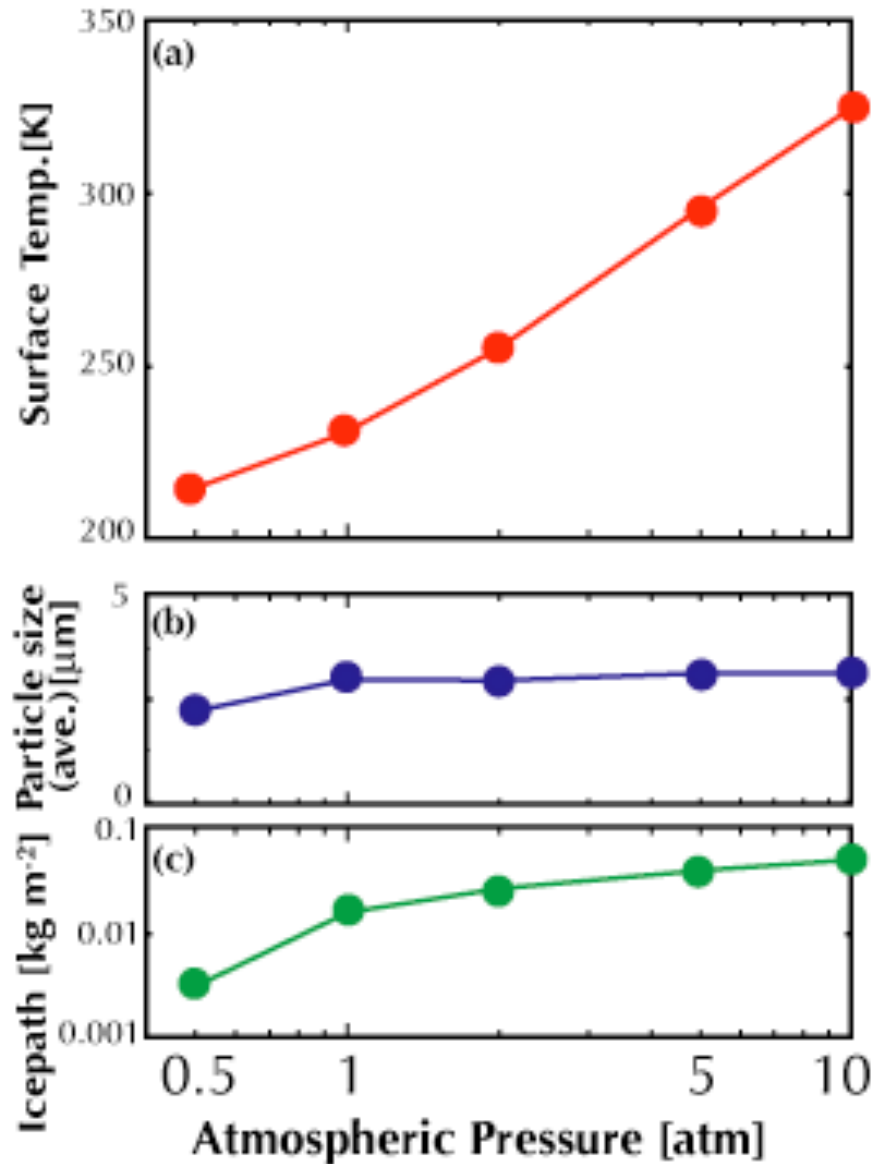
*雲層が対流しないという仮定と矛盾しない

結果2: 凝結核混合比依存性(大気圧2気圧)



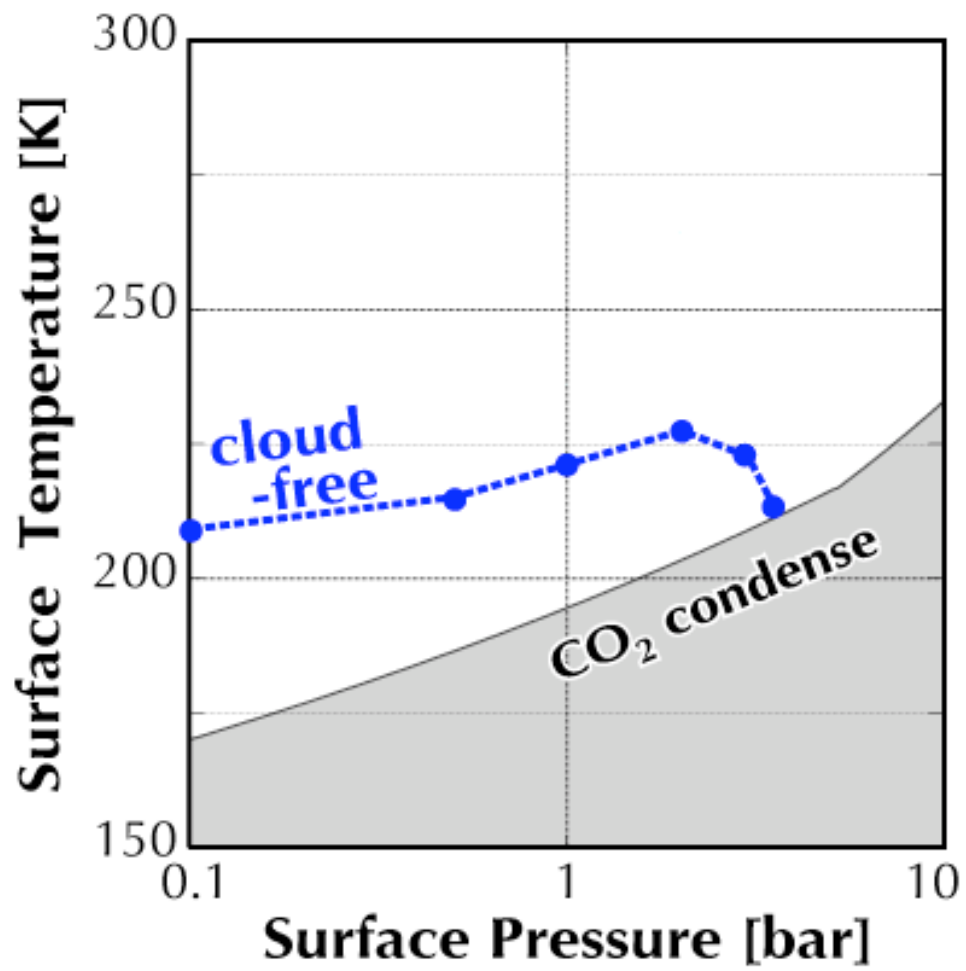
- 地表面温度は凝結核混合比に強く依存
 - 粒径の凝結核混合比依存性
- 地表面温度に極大値
 - 大気の窓(9, 20 micron)を効率よく後方散乱できる粒径(5, 15 micron)の雲が形成
- 凝結核混合比 $> 10^9 \text{ kg}^{-1}$
 - 平衡解なし
 - 1micron の雲粒による強い反温室効果
 - 地表面凍結, 大気崩壊へ

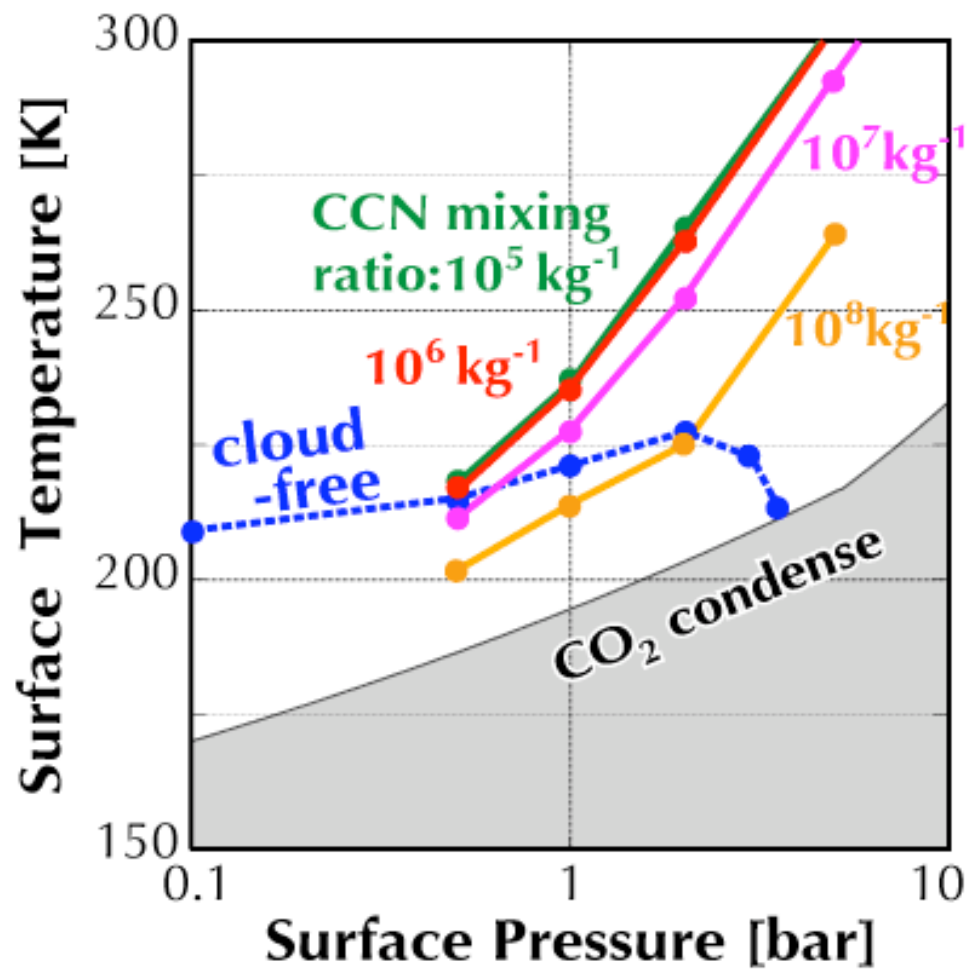
結果3: 大気圧依存性 (凝結核混合比 10^7kg^{-1})



- 大気圧 \uparrow : 地表面温度 \uparrow
 - 大気圧 $> 3 \text{ atm}$ で
地表面温度 $> \text{H}_2\text{O}$ 凝固点

- 大気圧の増加に伴って
 - 粒径; ほぼ一様
 - 雲氷量; 増加
 - 雲の形成高度範囲が広がったため。

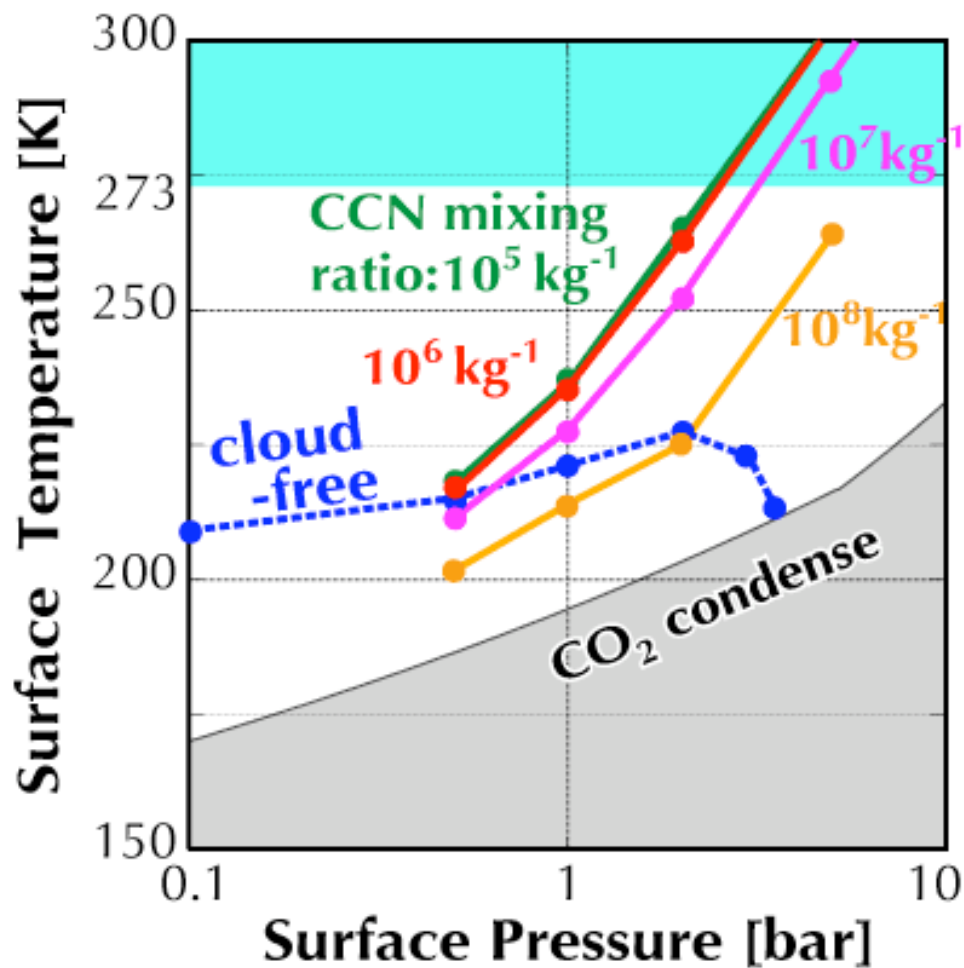




- 温暖湿潤な気候の必要条件

- 大気圧 > 数気圧

- 凝結核混合比 10^5 - 10^7 kg^{-1}



まとめと今後の課題

- 放射冷却によって形成される CO₂ 氷雲の鉛直構造とその散乱温室効果を見積もった.
- 雲粒径と成長率との負のフィードバックにより, 放射収支のみによって雲の構造を決定可能. さらにこの構造は対流安定.
- 温暖湿潤な気候が再現される必要条件
 - 大気圧: ~ 数気圧, 凝結核混合比: ~ 10⁵-10⁷ kg⁻¹
- 地表面温度の強い凝結核混合比依存性より, 地形より示唆される温暖化の一時性を説明可能.
- 今後の課題
 - 凝結核混合比の決定機構
 - 地表からの巻き上げ/隕石衝突/火山噴火/宇宙線 ...
 - 対流/雲粒落下の効果
 - 大気微量成分(CH₄)の影響

今後の課題

- 凝結核混合比の決定機構
 - 非均質核生成の”核”の供給源は?
 - ダスト巻き上げ
 - 隕石衝突
 - 火山噴火
 - 宇宙線
 - 雲層の上部(高度 35 km)まで核は巻き上がるか?
 - 成層圏まで含めた大気の循環を調べる必要がある
- 対流/雲粒落下の効果
- 大気微量成分(CH₄)の影響

雲層での対流安定性

- 雲質量混合比の鉛直勾配による成層の判定
- 雲層での熱力学第一法則より $1 \gg m$ では

$$dq = C_v dT + pdV + Ldm = 0$$

- これに静水圧の式を組み合わせて解くと、気塊を断熱変化させた場合の雲質量混合比の鉛直勾配が導かれる

$$\frac{dm_{ad}}{dz} = -\frac{1}{L} \left(C_p \frac{dT}{dz} + g \right)$$

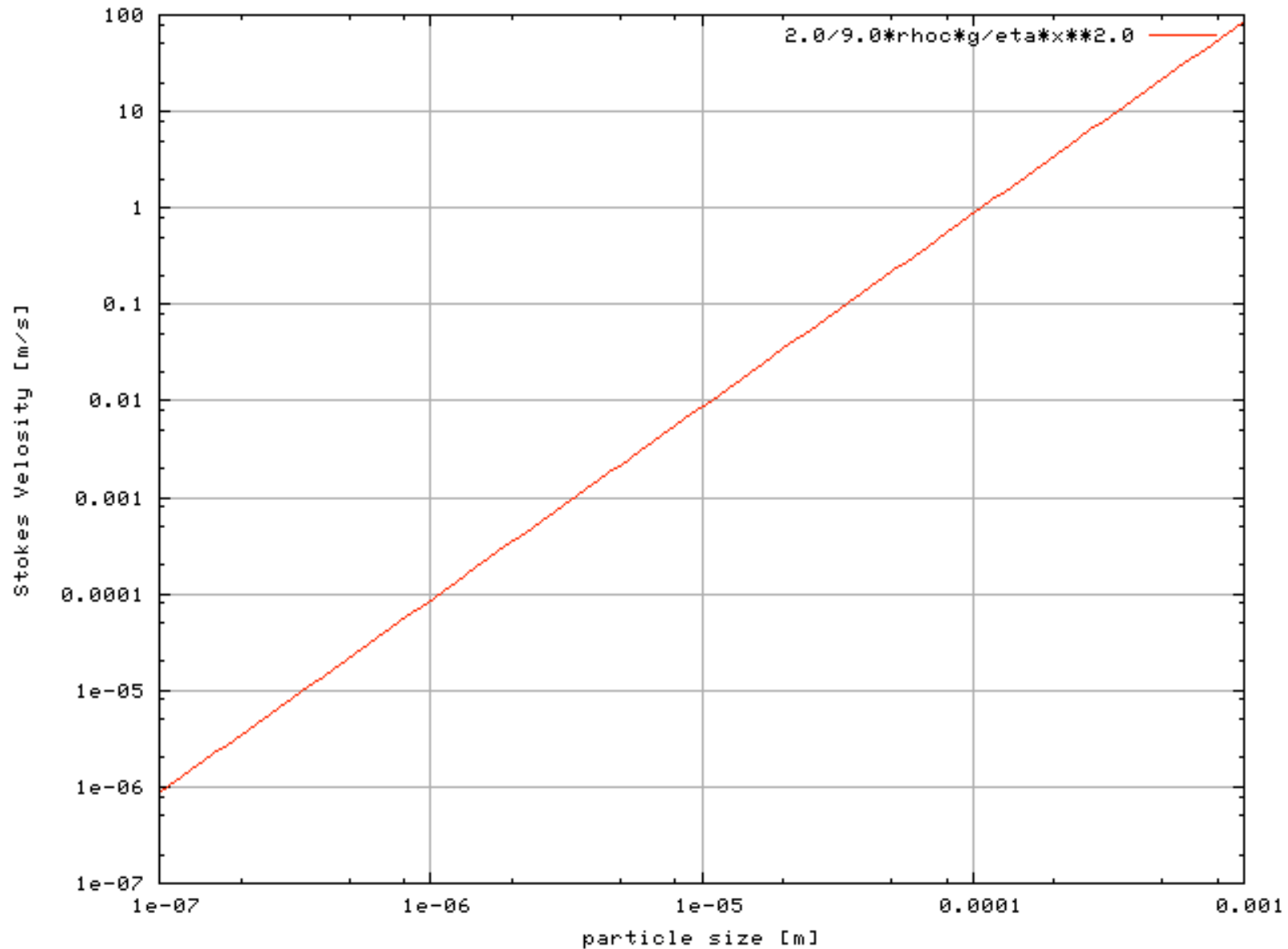
- 成層条件

$$\frac{dm}{dz} < \frac{dm_{ad}}{dz}$$

タイムスケール

- 雲の放射時定数: ~ 1 日
 - 大気の凝結率は雲層の放射冷却率に律速される
 - 放射冷却率: 0.1 K/day
 - ただし, 雲粒径が大きくなると光学特性の時間変化が小さくなり, 時定数は長くなる
- 大気バルクでの放射時定数: \sim 数週間
- 雲層の日変化
 - 雲層の放射冷却率は赤外放射で決まるため, 地表温度の日変化に対応した雲層の日変化が存在
 - ただし, 平衡解がずれるのみで, 平衡状態へ収束するのは変わらない

ストークス沈降速度 $v(r) = \frac{9}{2} \frac{\rho_{ice} g}{\eta_{air}} r^2$ $\rho_{ice} = 1.565E + 3[kgm^{-3}]$
 $\eta_{air} = 1.47E - 5[Pa * s]$



併合成長の影響の見積り

- 大きい雲粒の粒径を R , 小さい雲粒の粒径を r とするとその相対速度は

$$v'(r) = \frac{9}{2} \frac{\rho_{ice} g}{\eta_{air}} (R^2 - r^2)$$

$$F_{fall} = m \rho_{air} \frac{9 \rho_{ice} g}{2 \eta_{air}} r^2$$

雲粒落下フラックスの見積り

- 雲粒の落下フラックス [kg/m/sec]

$$F_{fall} = n_{cloud} v(r) \rho_{ice} \frac{4\pi r^3}{3} = m \rho_{air} v(r)$$

- 雲粒の落下速度はストークス沈降速度とすると

$$F_{fall} = m \rho_{air} \frac{9\rho_{ice}g}{2\eta_{air}} r^2 \quad v(r) = \frac{9}{2} \frac{\rho_{ice}g}{\eta_{air}} r^2$$

$$\rho_{ice} = 1.565 E + 3 [kgm^{-3}]$$

$$\eta_{air} = 1.47 E - 5 [Pa * s]$$