

放射加熱によって調節された 二酸化炭素氷雲の散乱温室効果と 古火星の温暖化

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 博士後期課程 3年

光田 千紘

chihiro@ep.sci.hokudai.ac.jp

<http://www.ep.sci.hokudai.ac.jp/~chihiro/>

2007/05/10 (Thu)

惑星大気研究会 オンラインセミナー / DM seminar

目次

- はじめに
 - 生命の普遍性
 - 地形が示唆する温暖な火星古気候
 - 二酸化炭素氷雲による散乱温室効果
- 雲パラメタの見積もり
- 一次元放射対流凝結平衡モデル
- 計算結果
- 仮定の検証
- 温暖湿潤な気候の必要条件
- まとめと今後の課題

目次

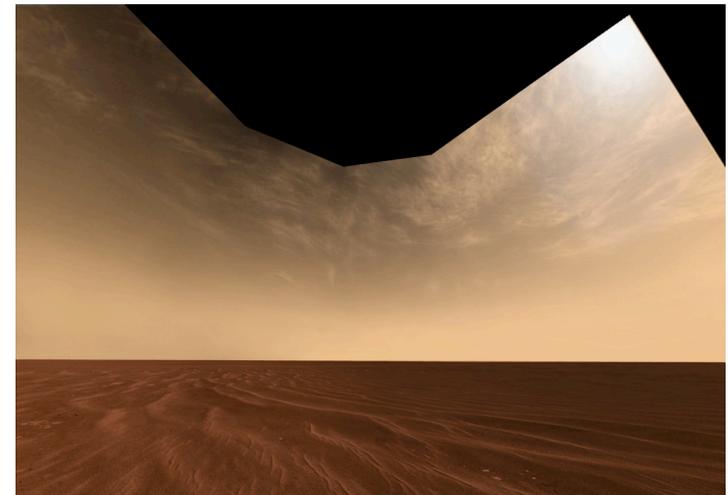
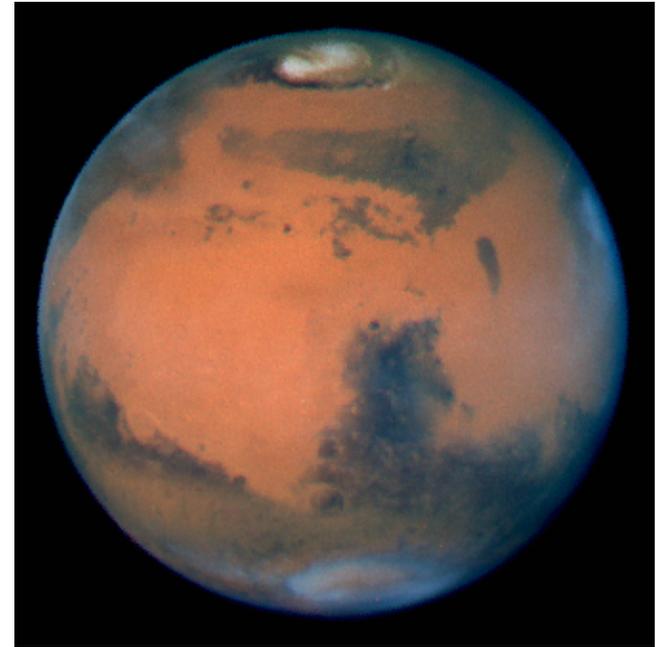
- **はじめに**
 - 生命の普遍性
 - 地形が示唆する温暖な火星古気候
 - 二酸化炭素氷雲による散乱温室効果
- 雲パラメタの見積もり
- 一次元放射対流凝結平衡モデル
- 計算結果
- 仮定の検証
- 温暖湿潤な気候の必要条件
- まとめと今後の課題

生命の存在は普遍的か

- 惑星系は普遍的
 - 200 以上もの系外惑星系が発見
 - 5 地球質量? の惑星発見 (Udry et al. 2007)
 - 地球型惑星も普遍的であると期待できる
- 地球型惑星 = habitable ?
 - 液体の物質が必要 (H_2O , NH_3 , CH_4 , ...)
- 太陽系内での地球型惑星における H_2O water の存在条件をまず押さえることが重要
 - 本発表はその 1 例として古火星を取りあげる

現在の火星環境

- 太陽放射入射：
地球の 0.43 倍
- 有効放射温度：216 K
 - 地球: 256 K
- 大気成分：**CO₂** (96%)
- 大気圧　　： 6 hPa
- 地表面温度：220 K
 - 赤道直下では 273 K まで上昇
- 乾燥寒冷な気候
 - **H₂O water** は存在不可



地形が示唆する温暖な火星古気候

- バレーネットワーク

- 数 100 km も続く谷地形
- 38 億年前頃に形成
 - クレータ年代より
- 形成要因
 - 降水？
 - 地下水の流出？



Valley Networks

当時の地表面温度は

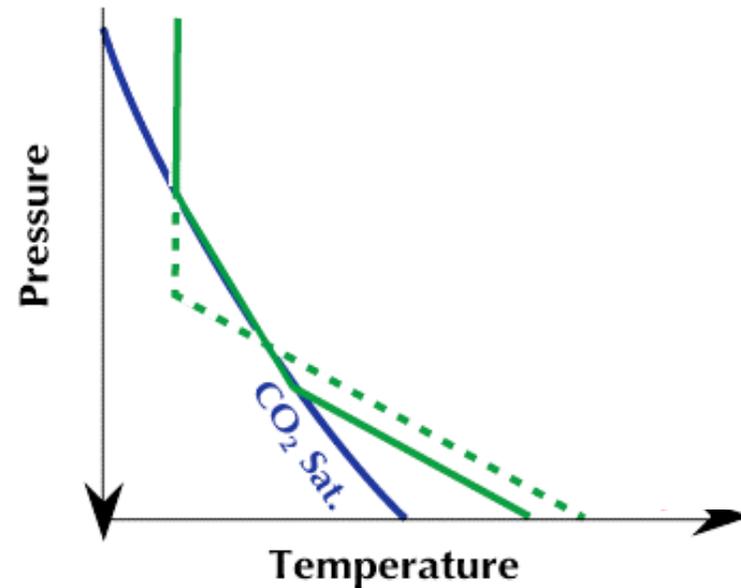
* 平常時は氷点下

* ときどき氷点下前後まで上昇

であったことを示唆

CO₂-H₂O 大気による温室効果の限界 (Kasting 1991)

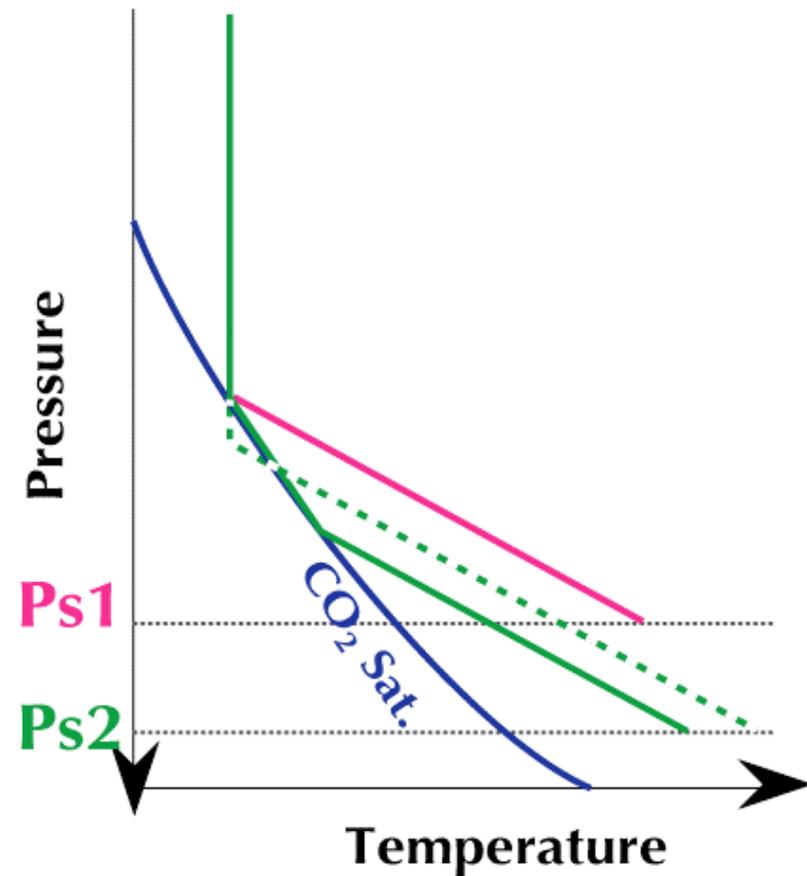
- CO₂ 凝結による温室効果の弱化
 - 潜熱加熱による対流圏上部の温度上昇
 - 地表面温度低下
- 最大地表面温度 230 K
 - 大気圧 2 気圧
- 雲の放射特性は無視
 - 凝結物はすぐ落下



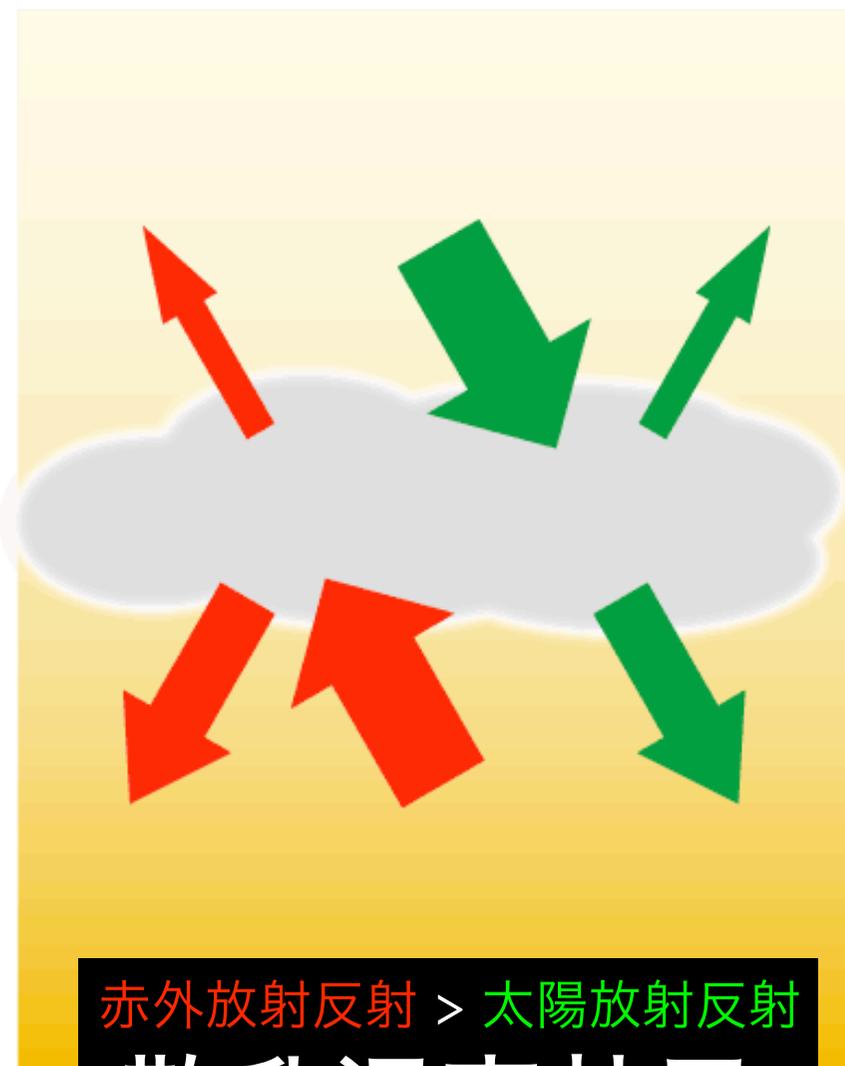
CO₂ 凝結が温度構造に与える影響の模式図

CO₂ 凝結による鉛直構造の変化

- 大気構造
 - 成層圏; 放射平衡
 - 対流圏: 放射対流平衡
 - 対流中立になるように傾きが決まる
- 大気圧 ↑
 - 地表面温度 ↑
 - ある気圧での温度 $T(p)$ ↓
 - CO₂ 凝結
- CO₂ が凝結すると
 - 対流圏上部温度 ↑
 - 地表面, 対流圏温度 ↓
 - 更に CO₂ が凝結...



二酸化炭素氷雲の散乱温室効果



散乱温室効果

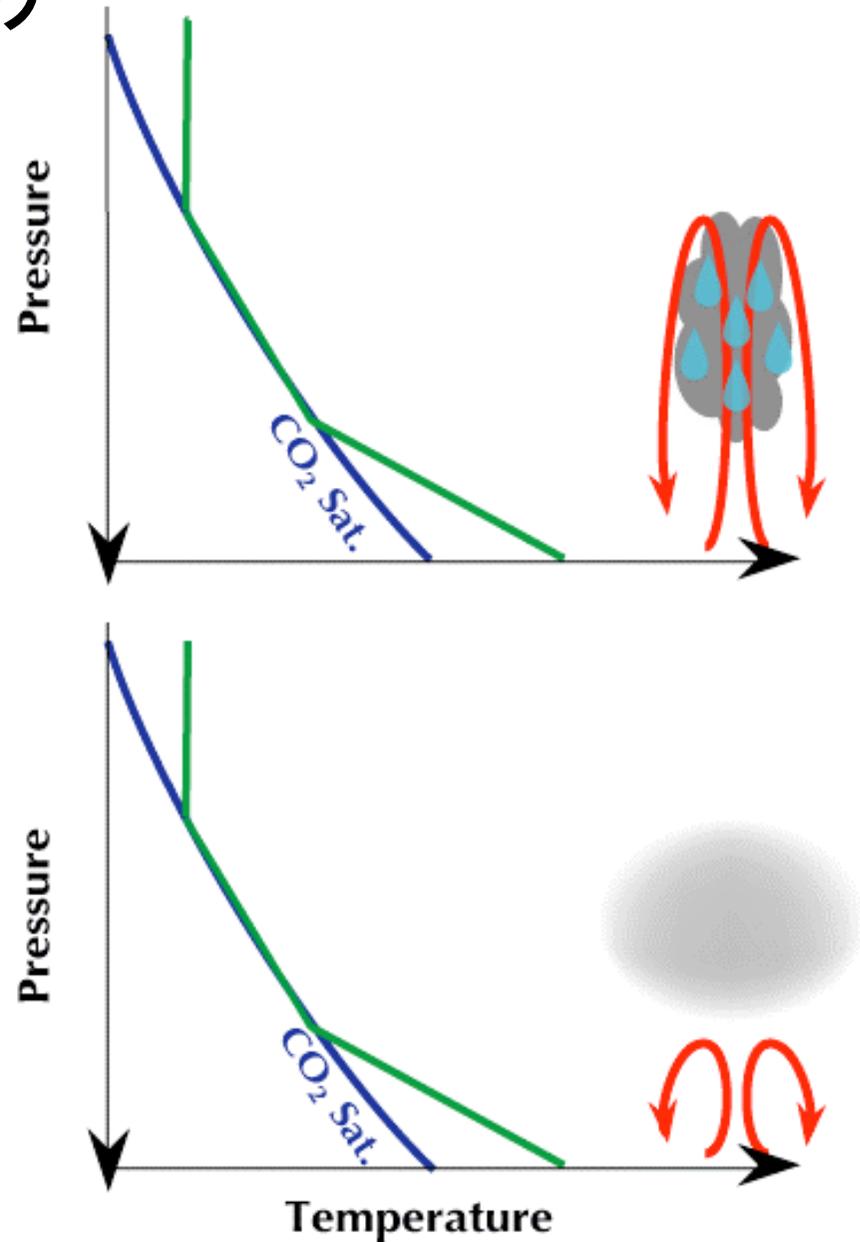
- 温室効果は雲パラメタに強く依存 (Pierrehumbert and Erlick 1997)
 - 粒径/光学的厚さ
- 条件次第では強い温室効果を生じさせる (Mischna *et al.* 2000)
 - 粒径: ~ 赤外放射波長(10 μ m)
 - 光学的厚さ: 1 ~ 20
- 雲パラメタの見積りはあまり行われていない

目次

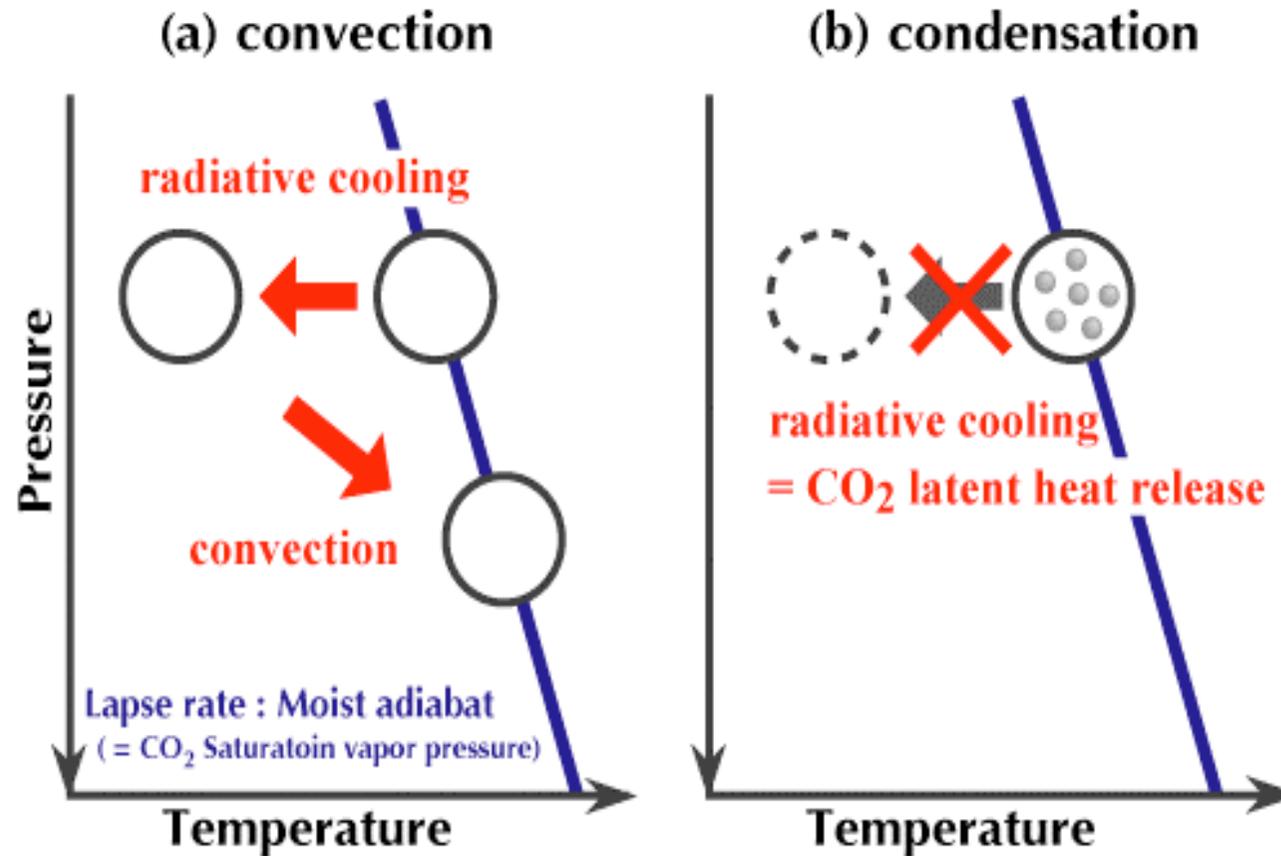
- はじめに
 - 生命の普遍性
 - 地形が示唆する温暖な火星古気候
 - 二酸化炭素氷雲による散乱温室効果
- 雲パラメタの見積もり
- 一次元放射対流凝結平衡モデル
- 計算結果
- 仮定の検証
- 温暖湿潤な気候の必要条件
- まとめと今後の課題

雲パラメタの見積もり

- 古火星大気:
主成分が凝結する系
 - どのような雲対流が起きるかは明らかにされていない
- 我々の主張:
雲層が対流しない解もあり得る
 - 凝結が対流よりも素早く生じればよい。



凝結時間 \ll 対流時間 とすると...



- 放射冷却が潜熱加熱で打ち消され、対流は駆動されない
- 雲粒径は放射平衡を満たすように自律的に調節される

本研究では...

- 放射による雲の形成消失過程を考慮した一次元放射対流平衡モデルを用いて
 - 放射平衡を満たす雲層構造
 - その雲による散乱温室効果を調べる

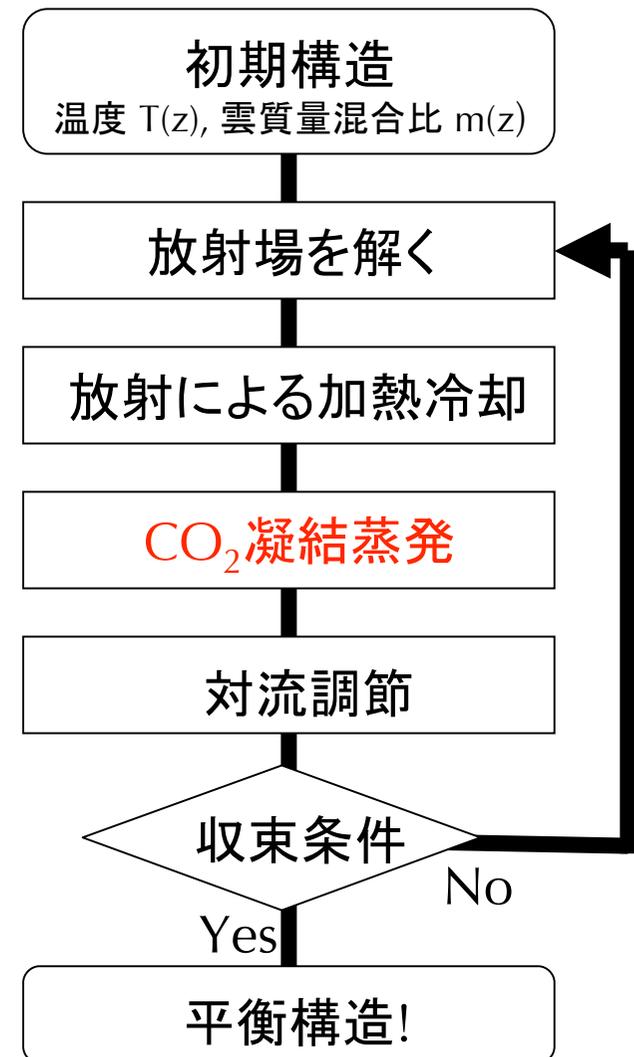
目次

- はじめに
 - 生命の普遍性
 - 地形が示唆する温暖な火星古気候
 - 二酸化炭素氷雲による散乱温室効果
- 雲パラメタの見積もり
- 一次元放射対流凝結平衡モデル
- 計算結果
- 仮定の検証
- 温暖湿潤な気候の必要条件
- まとめと今後の課題

鉛直一次元放射対流凝結平衡モデル概要

- 放射対流平衡, CO_2 気固平衡を同時に満たす温度-雲構造を求める
- 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
 - 粒径は凝結量から算出
 - ・ 雲質量混合比 (予報変数)
 - ・ 凝結核混合比 (パラメタ)

-- 計算の流れ --



仮定と計算条件

- 大気成分: CO_2 , H_2O (飽和蒸気圧)
- 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:
 10^4 , 10^5 , 10^6 , 10^7 , 10^8 , 10^9 個/大気1kg
- 鉛直解像度 50 層
- タイムステップ: $10^2 \sim 10^4$ sec
- 収束条件: $dT/dt < 10^{-8}$ K/sec

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

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

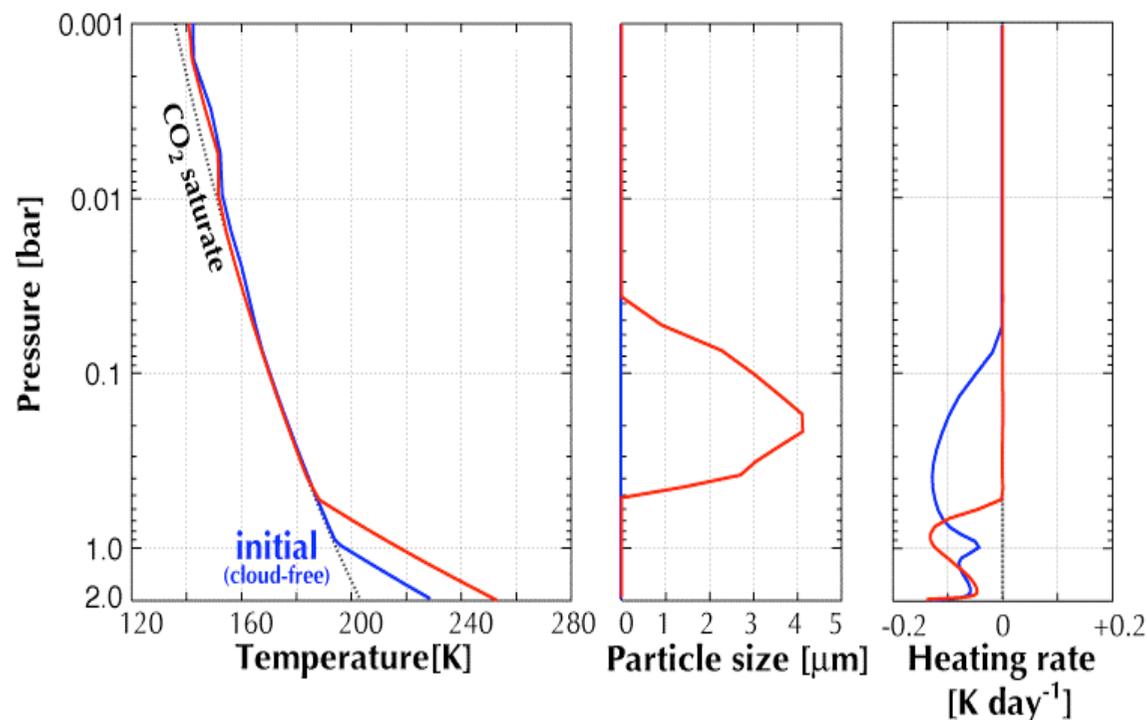
目次

- はじめに
 - 生命の普遍性
 - 地形が示唆する温暖な火星古気候
 - 二酸化炭素氷雲による散乱温室効果
- 雲パラメタの見積もり
- 一次元放射対流凝結平衡モデル
- 計算結果
- 仮定の検証
- 温暖湿潤な気候の必要条件
- まとめと今後の課題

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**

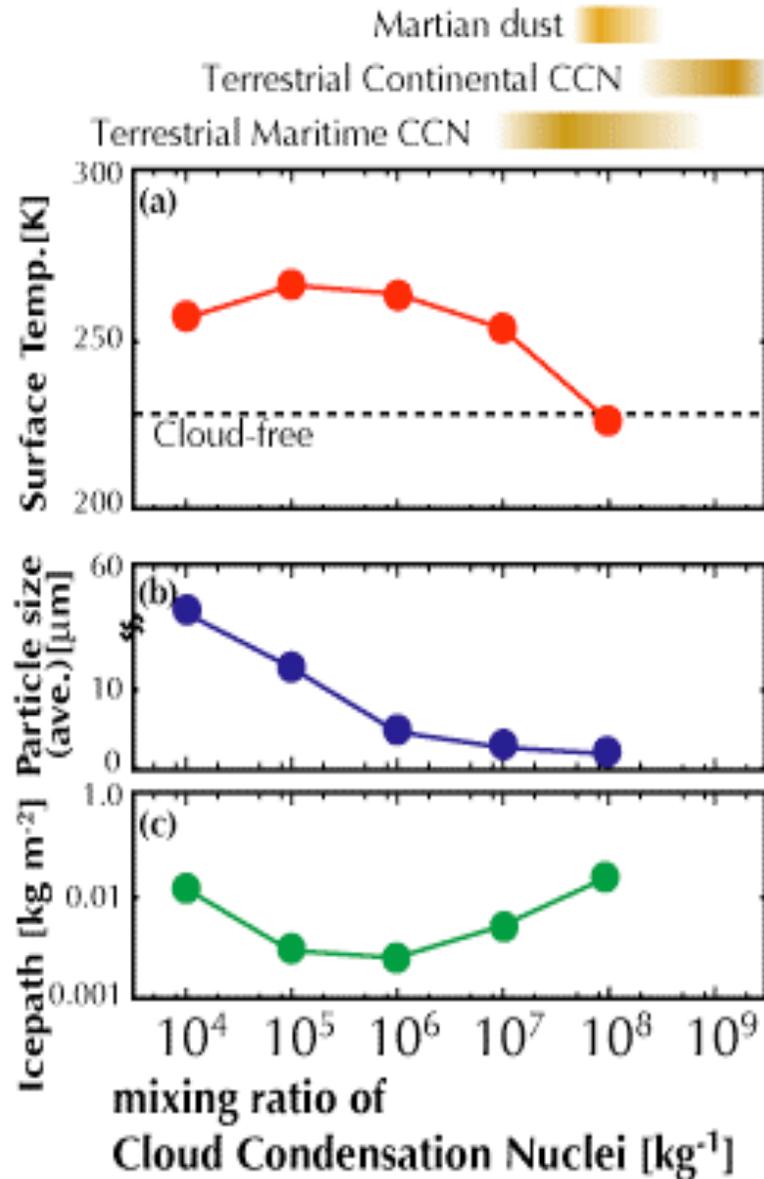


雲粒径と成長率の負のフィードバック

* 雲の成長に伴って

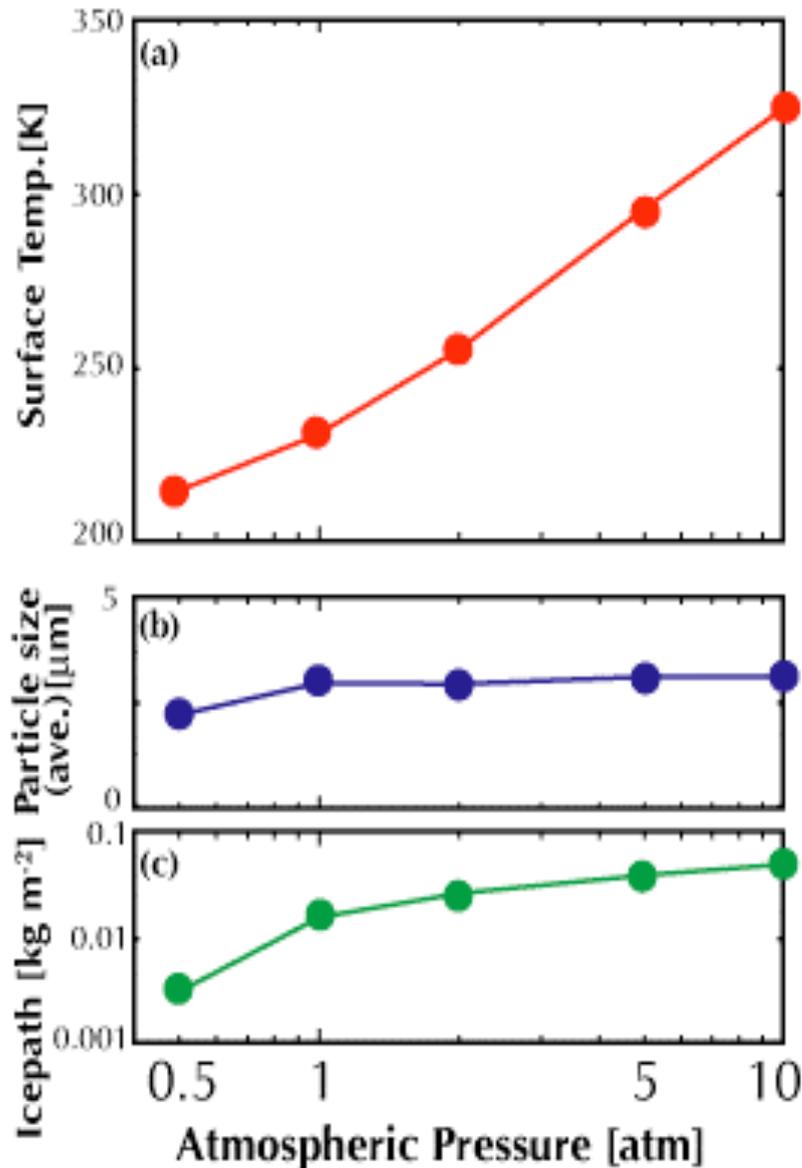
- 光学的に厚くなった雲がより赤外加熱を受ける
- 温室効果が増加し、下層からの赤外加熱が強まる

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 > 10⁹ 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.

目次

- はじめに
 - 生命の普遍性
 - 地形が示唆する温暖な火星古気候
 - 二酸化炭素氷雲による散乱温室効果
- 雲パラメタの見積もり
- 一次元放射対流凝結平衡モデル
- 計算結果
- 仮定の検証
- 温暖湿潤な気候の必要条件
- まとめと今後の課題

雲層での対流安定性

- 静的安定度 N^2

- N : 浮力振動数

- $N^2 > 0$ で対流安定

$$N^2 = g \left(\frac{dm_{ad}}{dz} - \frac{dm}{dz} \right)$$

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

g : 重力加速度

m : 雲質量混合比

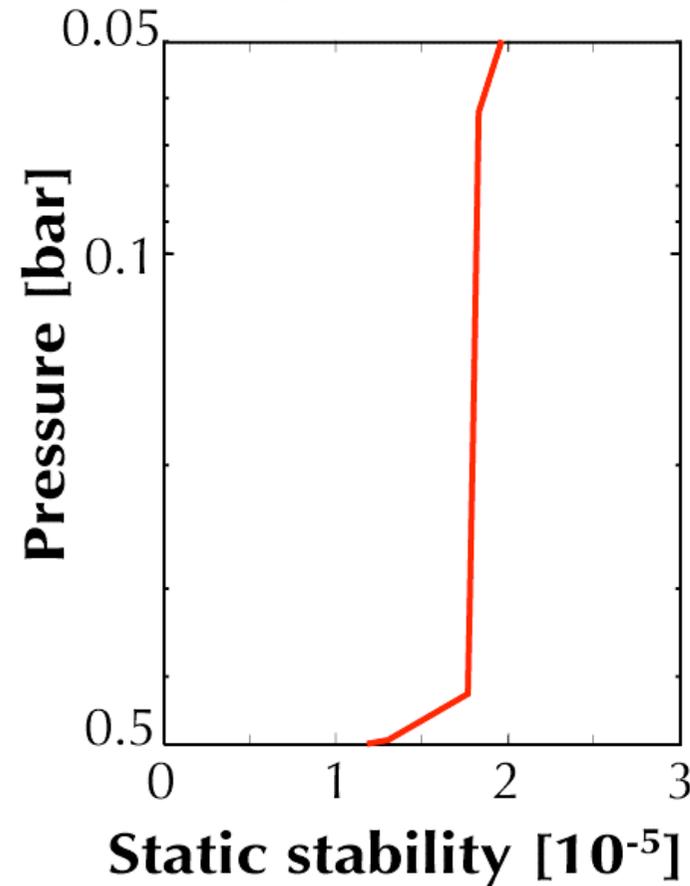
z : 高度

L : CO_2 潜熱

C_p : 定圧比熱

T : 温度

大気圧: 2 気圧
凝結核混合比: 10^7 kg^{-1}



平衡状態雲層は対流安定:

* 雲層が対流しないという仮定と矛盾しない

落下による雲の消失時間

- 落下による雲の消失時間

$$\frac{\text{雲面密度}}{\text{落下による質量消失率}}$$

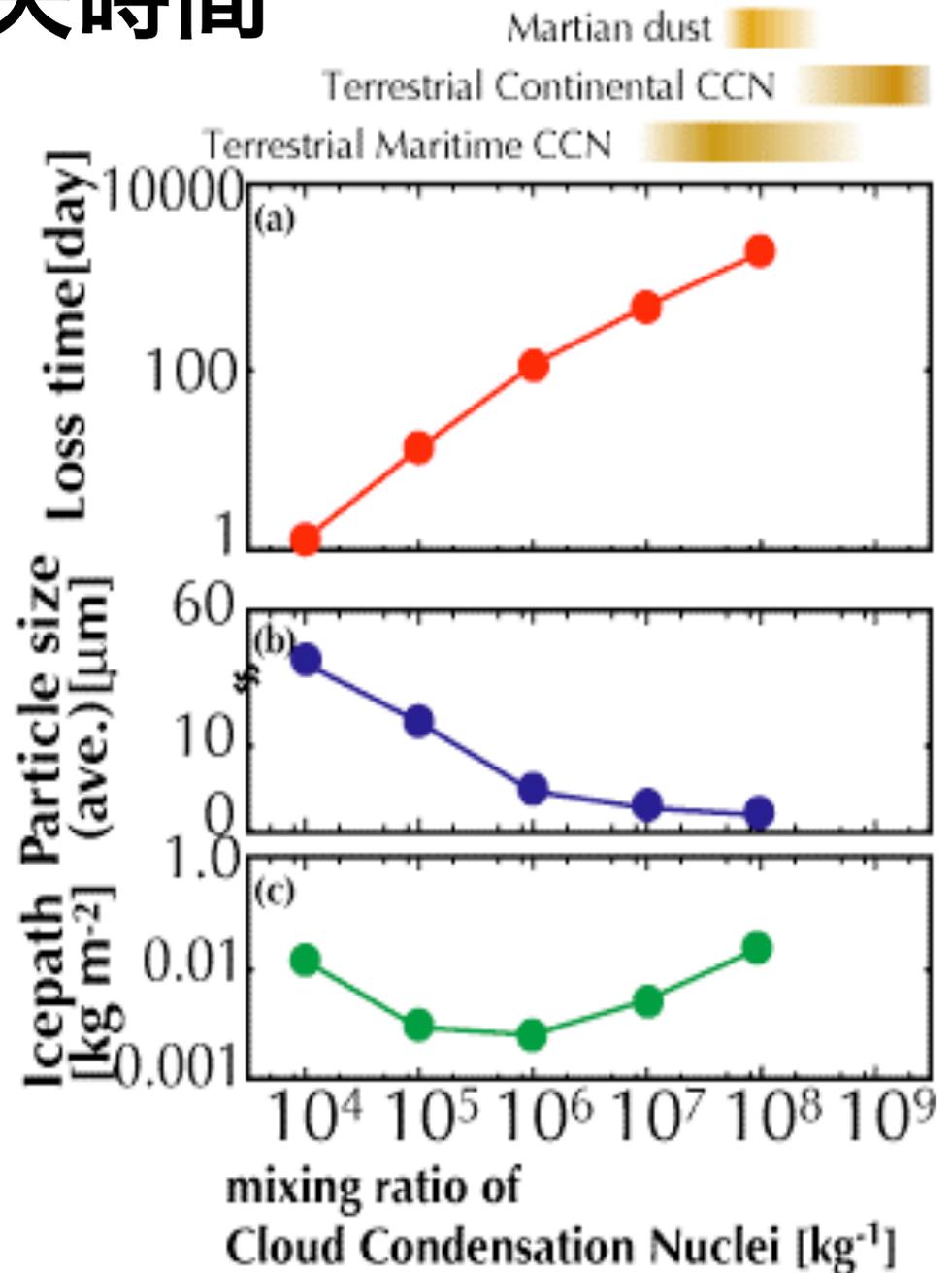
- 質量消失率 [kg/m²/sec]

$$F_{fall} = \rho_{cloud} v(r)$$

凝結核混合比 > 10⁵ kg⁻¹

で

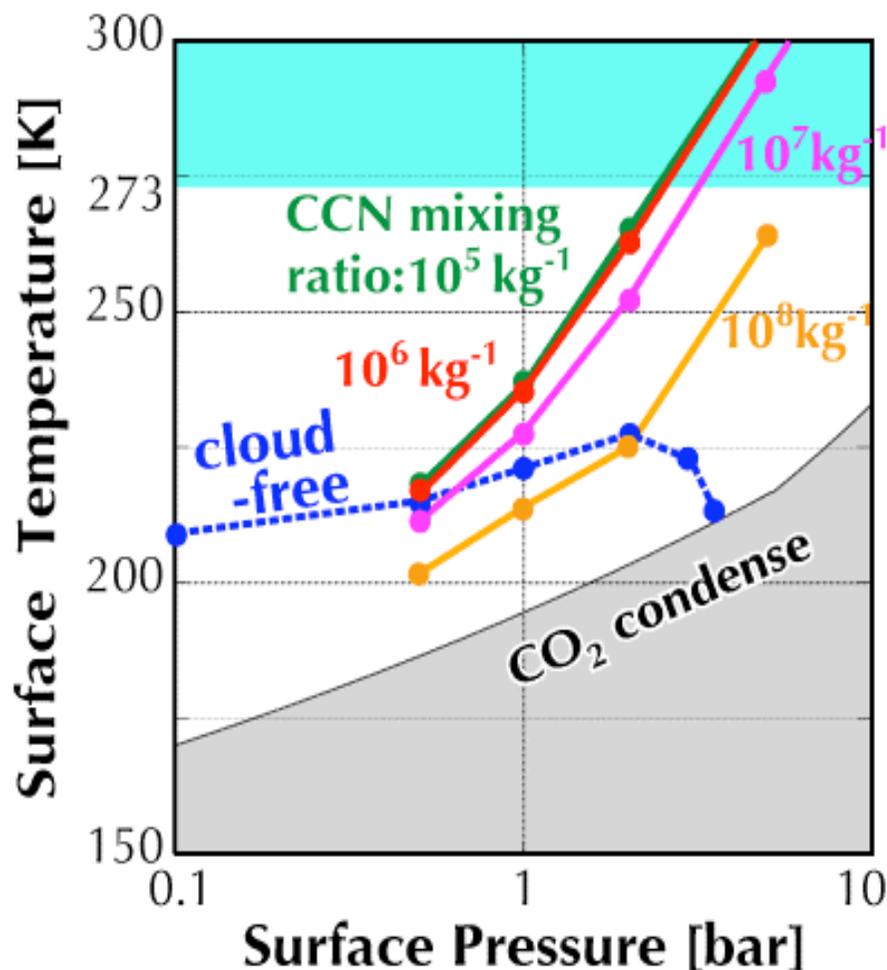
形成時間 < 消失時間



目次

- はじめに
 - 生命の普遍性
 - 地形が示唆する温暖な火星古気候
 - 二酸化炭素氷雲による散乱温室効果
- 雲パラメタの見積もり
- 一次元放射対流凝結平衡モデル
- 計算結果
- 仮定の検証
- 温暖湿潤な気候の必要条件
- まとめと今後の課題

温暖湿潤な気候の必要条件



- 温暖湿潤な気候の必要条件

- 大気圧 > 数気圧
凝結核混合比 10⁵-10⁷ kg⁻¹

- 地表面温度の凝結核混合比依存性

- 温暖化の一時性と調和的
- 観測的にも 1,2 オーダ程度の変動が示唆 (Twomey and Wojciechowski 1969; Pollack et al. 1979)

凝結核混合比の
定量的評価が重要

目次

- はじめに
 - 生命の普遍性
 - 地形が示唆する温暖な火星古気候
 - 二酸化炭素氷雲による散乱温室効果
- 雲パラメタの見積もり
- 一次元放射対流凝結平衡モデル
- 計算結果
- 仮定の検証
- 温暖湿潤な気候の必要条件
- **まとめと今後の課題**

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.
- 古火星での habitable condition
 - 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
 - 雲対流を陽に解くモデル (→ 北大, 小高グループ)
 - 大気微量成分(CH₄, NH₃, SO₂) の影響

参考文献1

- Gough, D. O., 1981, Solar interior structure and luminosity variations, *Sol. Phys.*, **74**, 21-34
- Kasting, J. F., 1991, CO₂ condensation and the climate on early Mars, *Icarus*, **91**, 1-13
- Kasting, J. F., 1993, Early Earth's atmosphere, *Science*, **259**, 5097, 920-926
- 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 CO₂ ice clouds, *J. Atmos. Sci.*, **55**, 1897-1903
- 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., 2006, Vertical structure and greenhouse effect of radiatively controlled CO₂ ice cloud layer in a Martian paleoatmosphere, *Proc. of the 39th ISAS Lunar and Planetary Science Conference*, 128-131

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