

二酸化炭素大気を持つ古火星の気 候メカニズムと雲による影響

惑星物理学研究室 D1

光田千紘

D&M2 Seminar, 2006/01/19(Thu)

目次

✓ イントロダクション

✓ 火星

✓ 二酸化炭素大気の特徴, 気候メカニズム

✓ 火星古気候

✓ 火星版暗い太陽のパラドックス

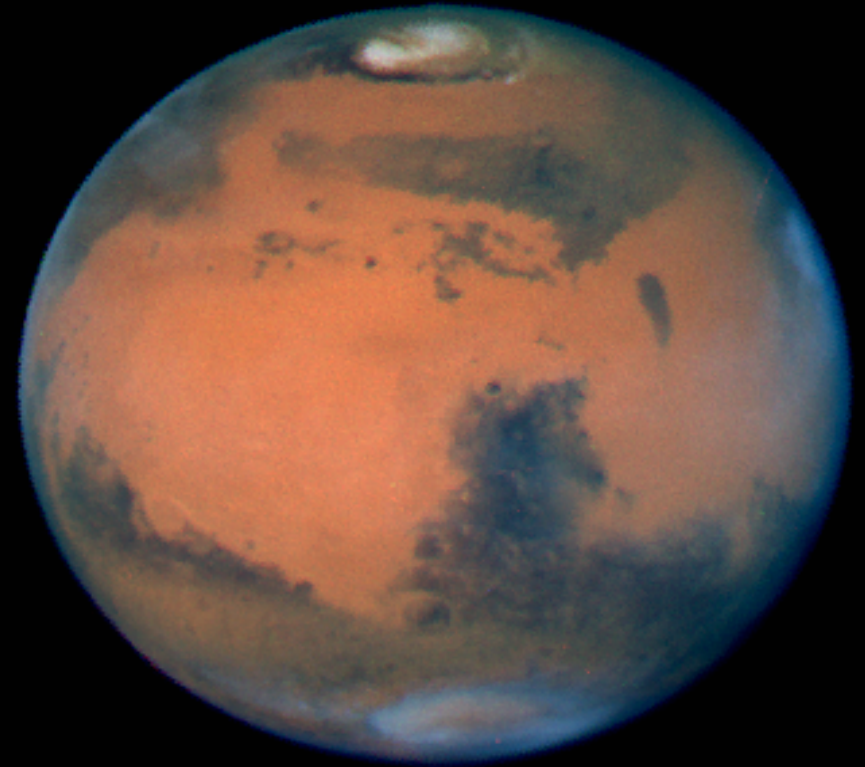
✓ 二酸化炭素氷雲の散乱温室効果

✓ 従来の研究とその問題点

✓ 本研究のアプローチと現状報告

砂の惑星; 火星

- ✓ 太陽定数 : 地球の 0.43 倍
- ✓ 大気成分 : CO_2 (96%)
- ✓ 大気圧 : 6 [hPa]
- ✓ 有効放射温度 : 216 [K]
- ✓ 地表面温度 : 220 [K]
- ✓ 乾燥寒冷な気候



地球型惑星の大気組成

	火 星	地 球	金 星
大気主成分(%)	CO₂ (96) N ₂ (2.7)	N ₂ (78) O ₂ (21)	CO₂(96) N ₂ (3.5)
大気圧[bar]	0.006	1	92

地球型惑星の大気組成

	火 星	地 球	金 星
大気主成分(%)	CO₂ (96) N ₂ (2.7)	N ₂ (78) O ₂ (21)	CO₂(96) N ₂ (3.5)
大気圧[bar]	0.006	1	92

- ✓ 地球ではおよそ **70 気圧分の CO₂** が石灰石として海底に固定(e.g. 松井 1997)
- ✓ CO₂ 大気：地球型惑星の一般的な大気

二酸化炭素大気の特徴1

✓ 大気主成分が凝結可能

✓ @ 地表面

✓ 大気圧減少

✓ アルベド増加(極冠)

✓ @ 対流圏上層

✓ 温度構造変化

✓ 対流圏上部：温度↑

✓ 地表面：温度↓

✓ アルベド増加(雲)

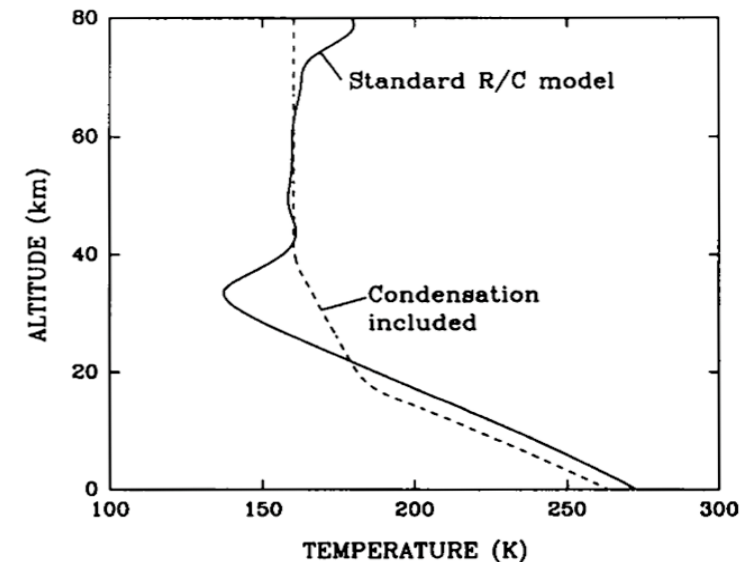
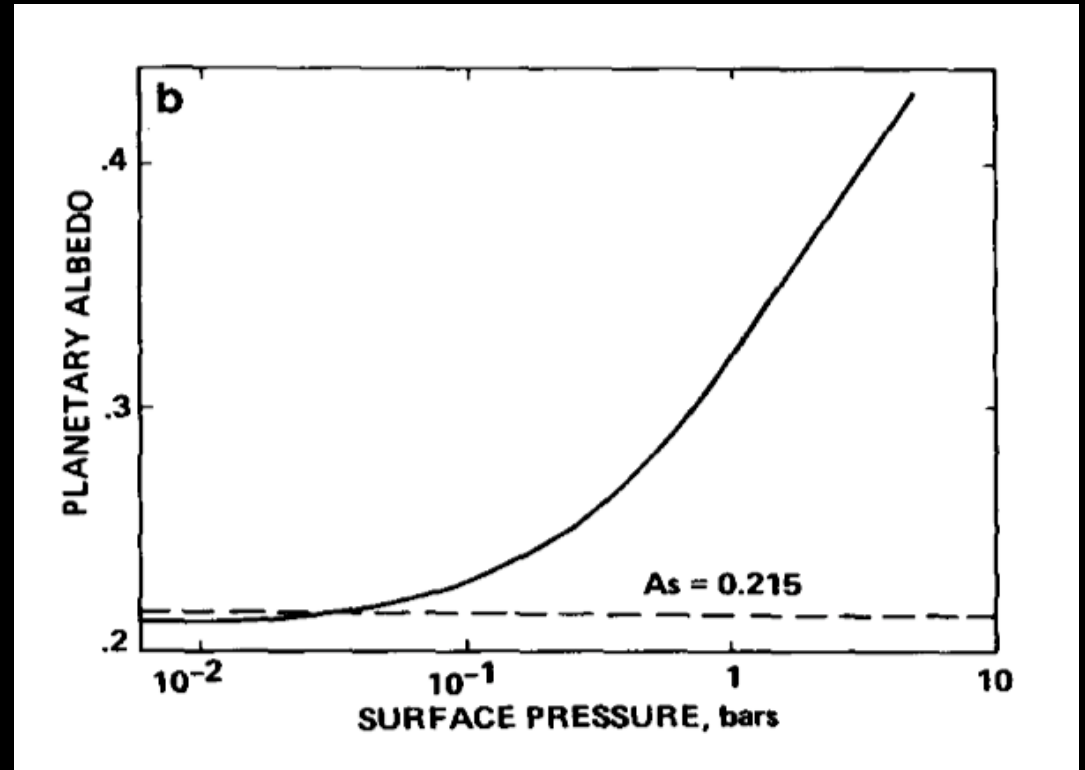


FIG. 6. Vertical temperature profiles calculated at 2 bars surface pressure and present solar luminosity for the standard, radiative-convective (R-C) model (which neglects CO₂ condensation) and for the simplified climate model (which includes it). The standard R-C model is greatly supersaturated with CO₂ in the 20- to 40-km region.

対流圏上層による大気凝結を考慮した場合と無視した場合の鉛直構造 (Kasting 1991, fig 6)

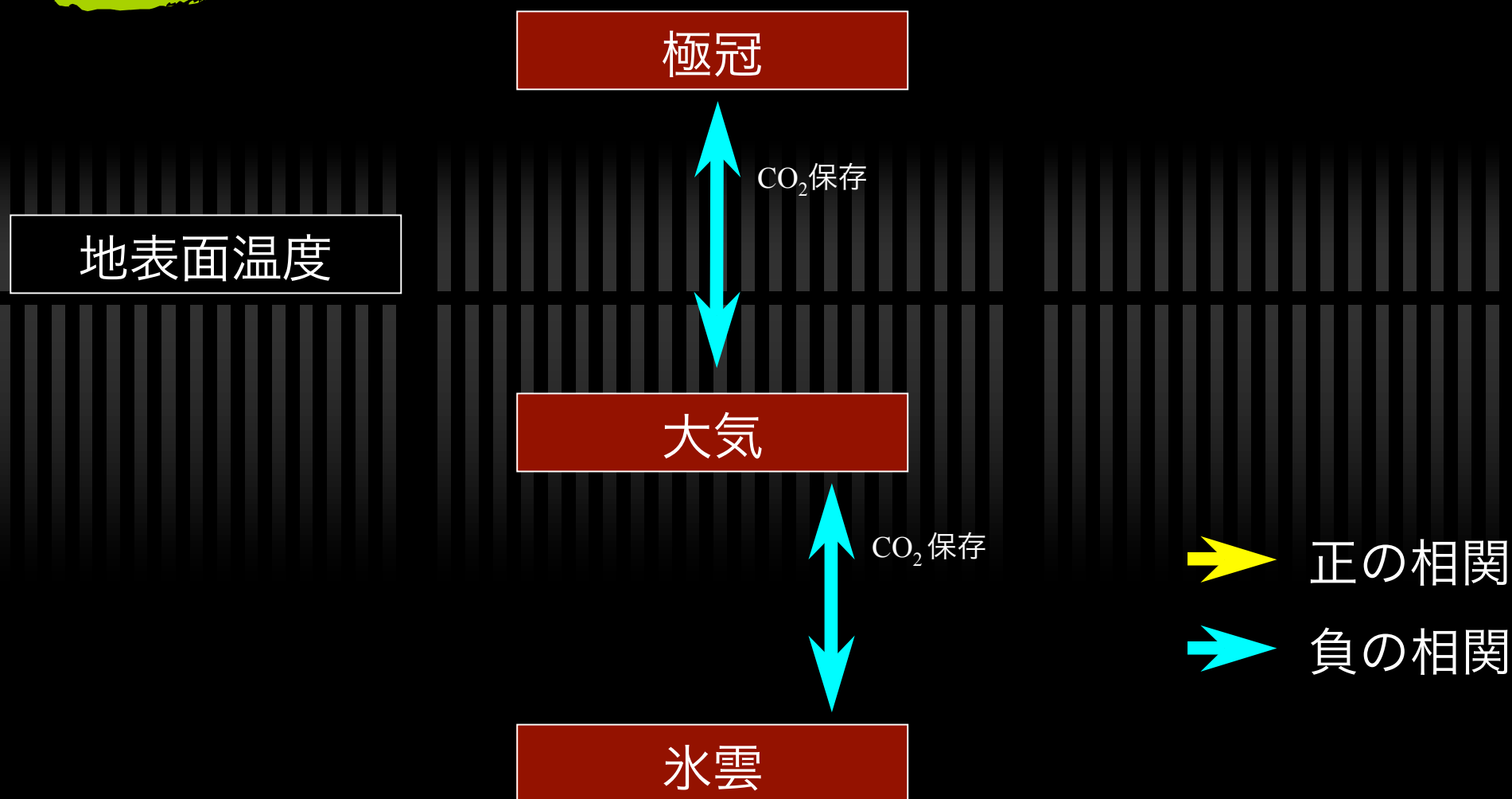
二酸化炭素大気の特徴2

- ✓ 光学活性気体
 - ✓ 大気圧増加
→ 温室効果増加
- ✓ 大気分子径大 (散乱効果強)
 - ✓ 大気圧増加
→ アルベド増加

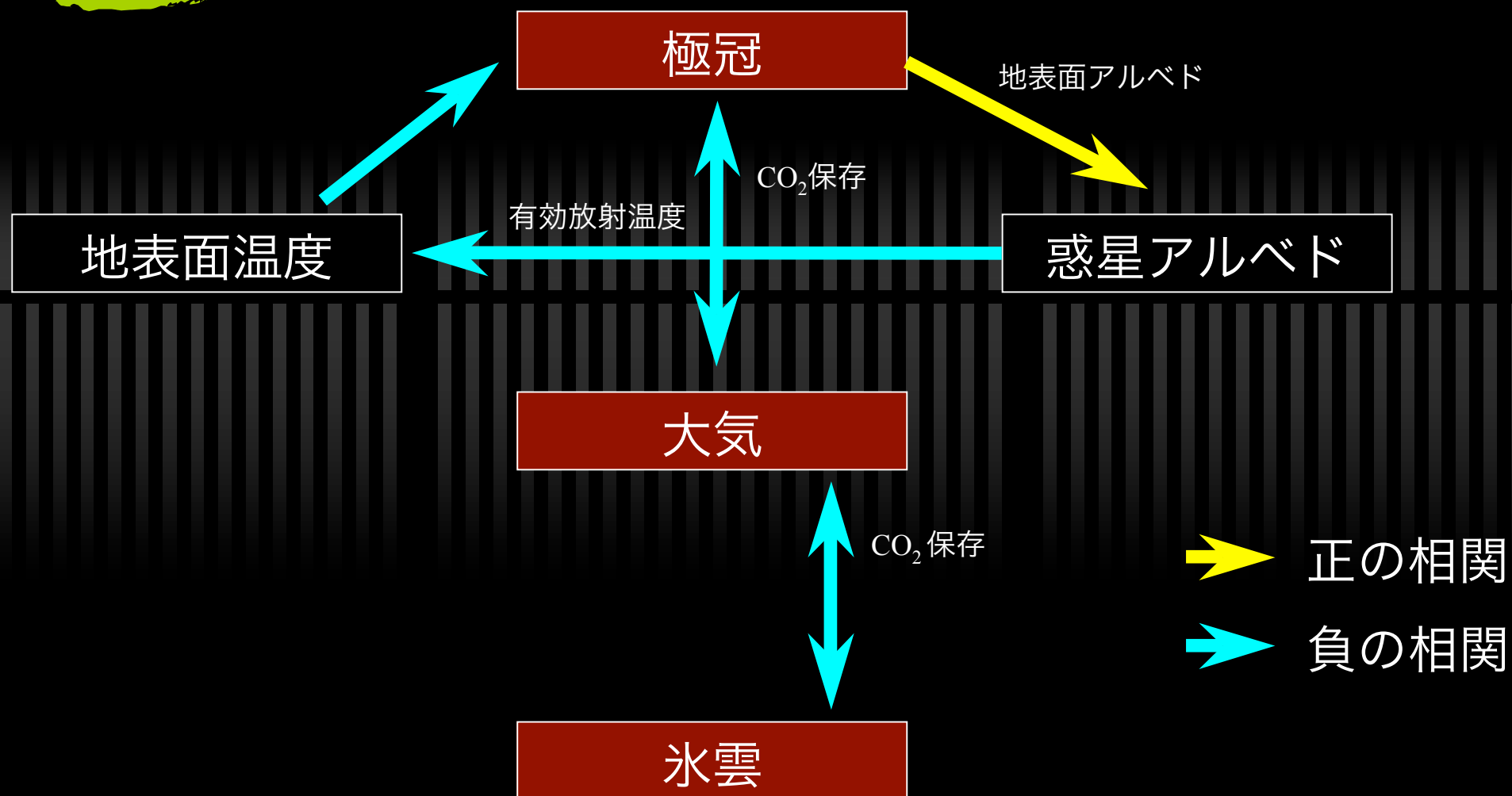


大気圧増加による惑星アルベド変化. 地表面アルベドを 0.215 とした場合. 10^{-2} bar 付近では大気の反射よりも吸収(@近赤外波長)の効果が強く効き, 惑星アルベドは地表面アルベドを下回る.
(Pollack et al. 1987, fig 1b)

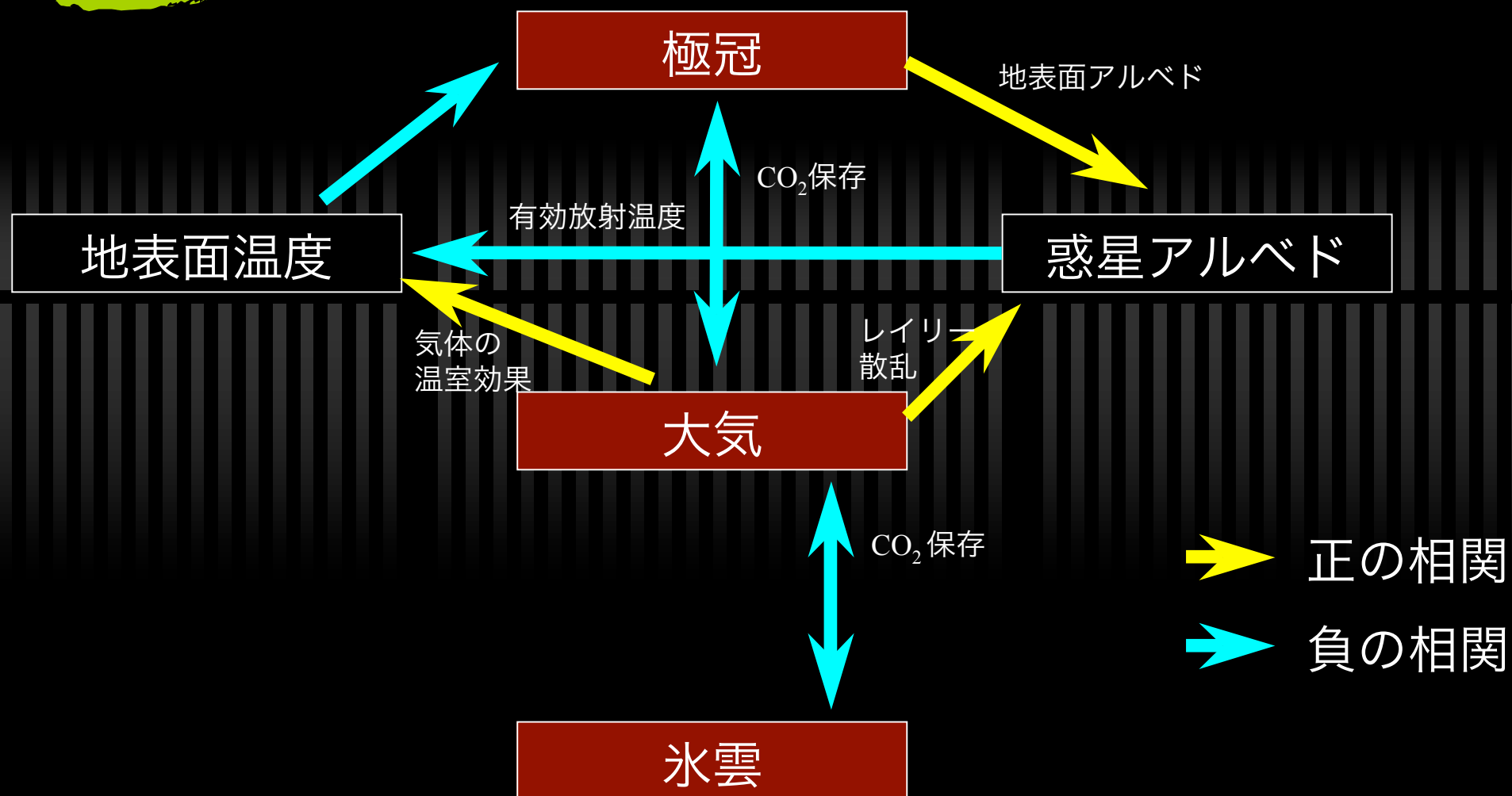
二酸化炭素相変化の気候への影響



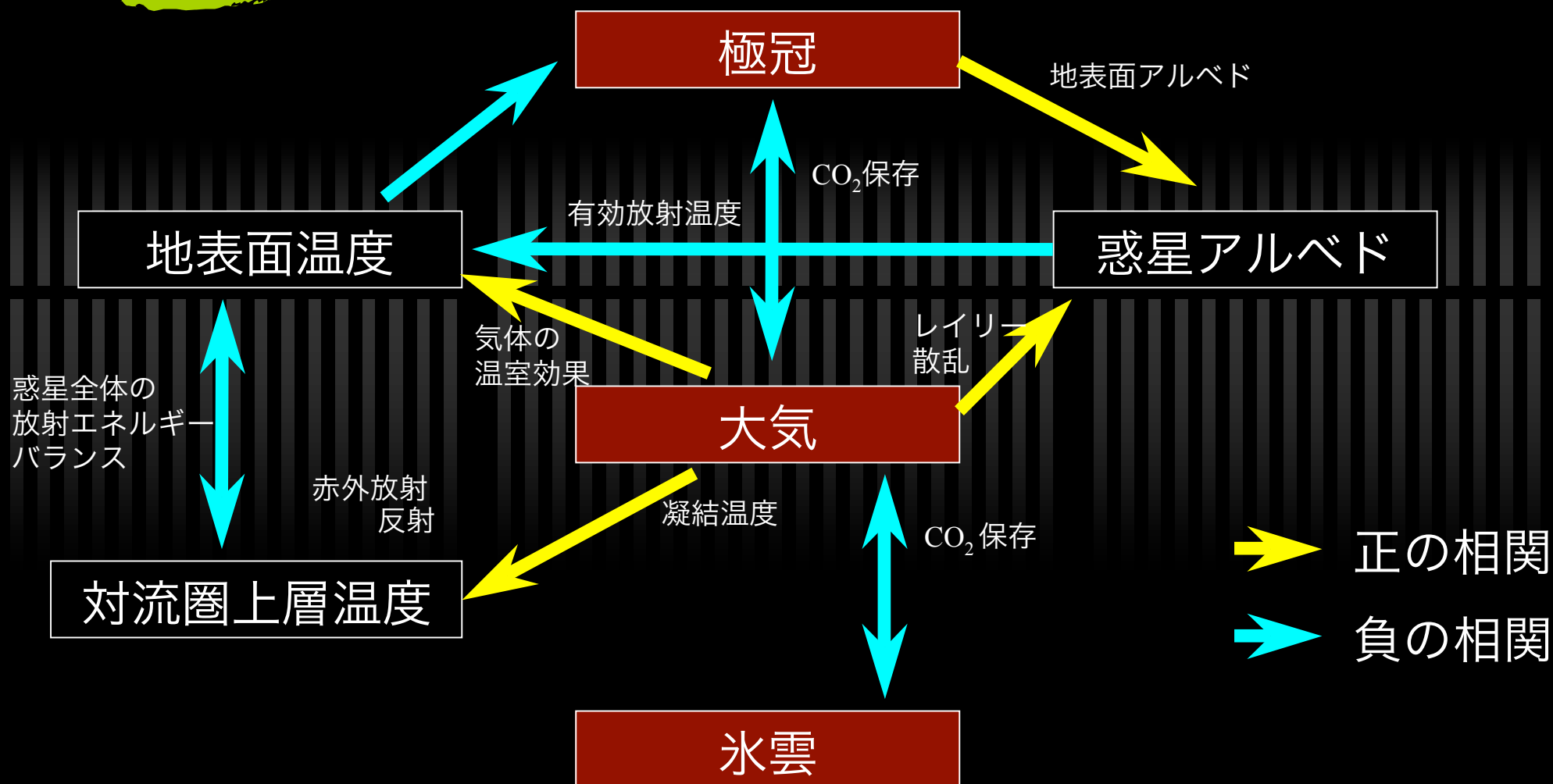
二酸化炭素相変化の気候への影響



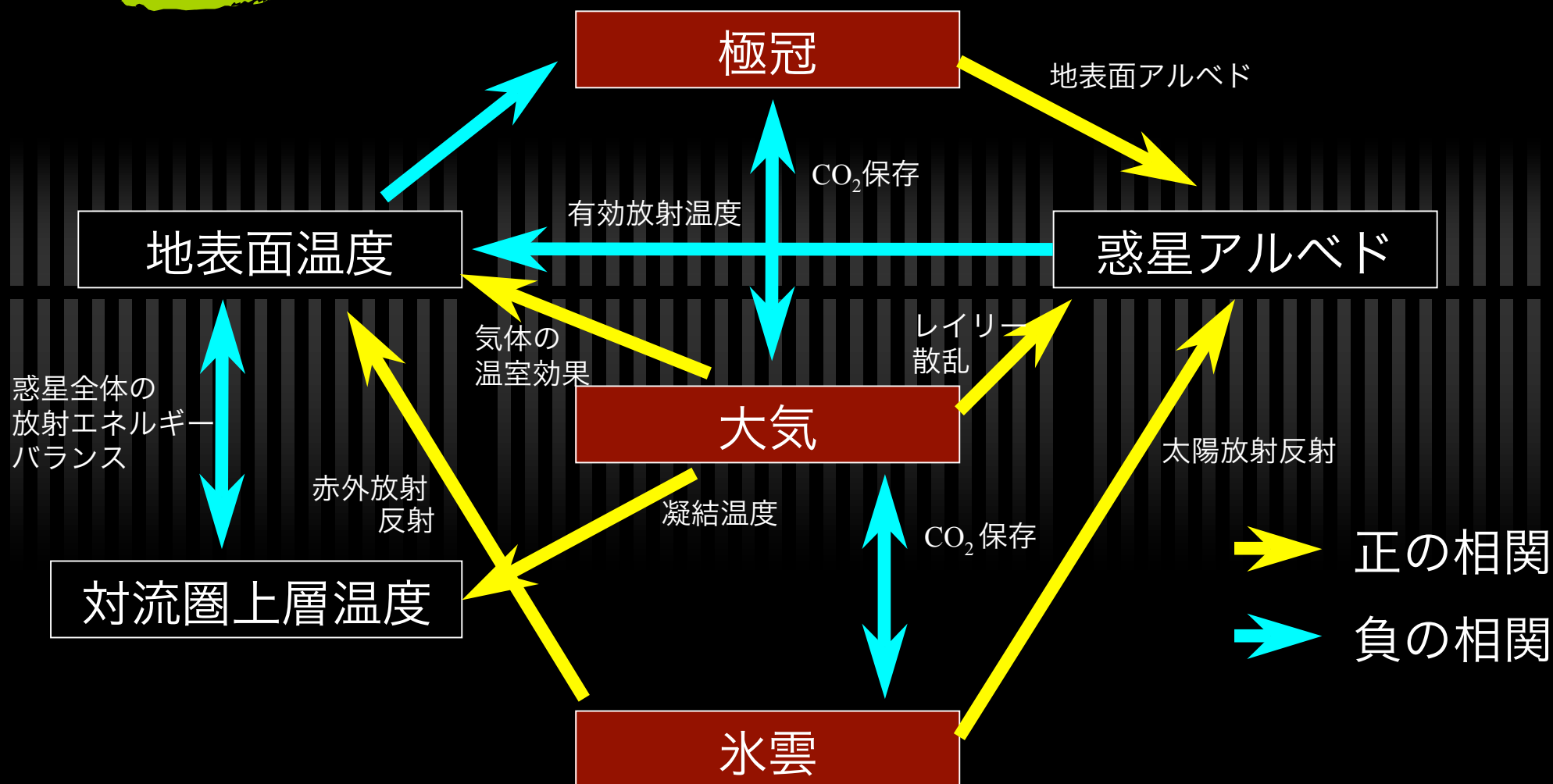
二酸化炭素相変化の気候への影響



二酸化炭素相変化の気候への影響

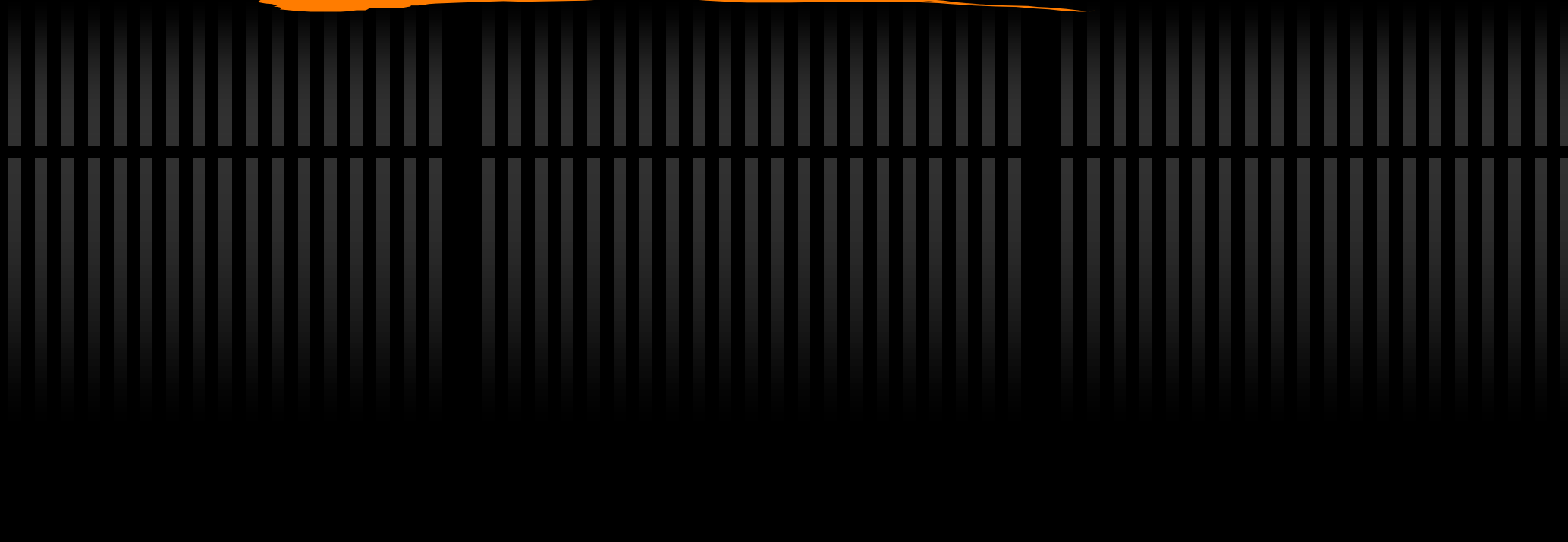


二酸化炭素相変化の気候への影響



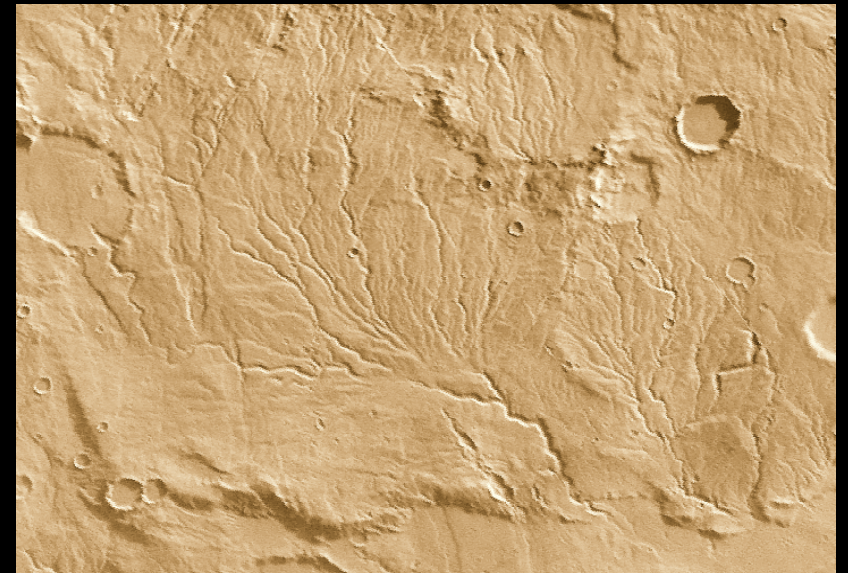


火星古氣候研究



火星古気候の謎

- ✓ 温暖湿潤な気候を示唆する流水地形の存在
 - ✓ Ex. 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
 - ✓ 地下水の流出or降水によって生成(e.g. 佐々木 1997)



Valley Networks

火星版 暗い太陽のパラドックス

- ✓ 38億年前の太陽光度: 現在の 75%
 - ✓ 恒星進化の理論(e.g. Gough 1981)
 - ✓ 地表面温度 200K (大気圧, 大気成分は現在値を適用)
- ✓ 温暖湿潤な気候を得るためには, **75 K** もの温室効果が必要(惑星アルベド 0.216 の場合)
 - ✓ 参考) 現在の地球型惑星の温室効果
 - ✓ 火星: 2K, 地球: 30K, 金星: 520K

参考)

地球版 暗い太陽のパラドックス

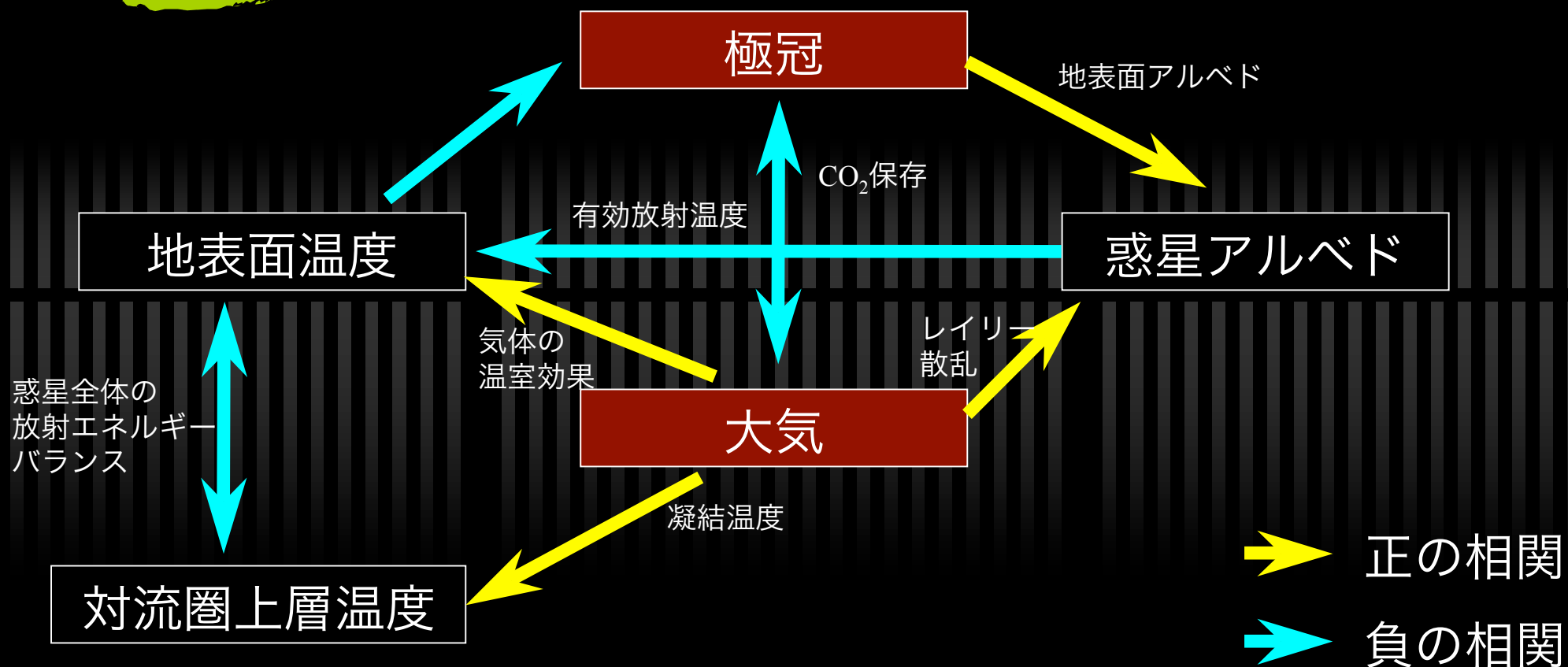
- ✓ 暗い太陽の下でも海が存在が示唆
 - ✓ 古いの形成年代を持つ堆積岩の発見
 - ✓ 現在と同程度の地表面温度が長期的に維持されていた可能性
- ✓ 当時, CO_2 の分圧が高かった場合, 理論的に説明可能 (Kasting 1993)
 - ✓ 38 億年前でおよそ 1 気圧程度

厚いCO₂大気による温室効果

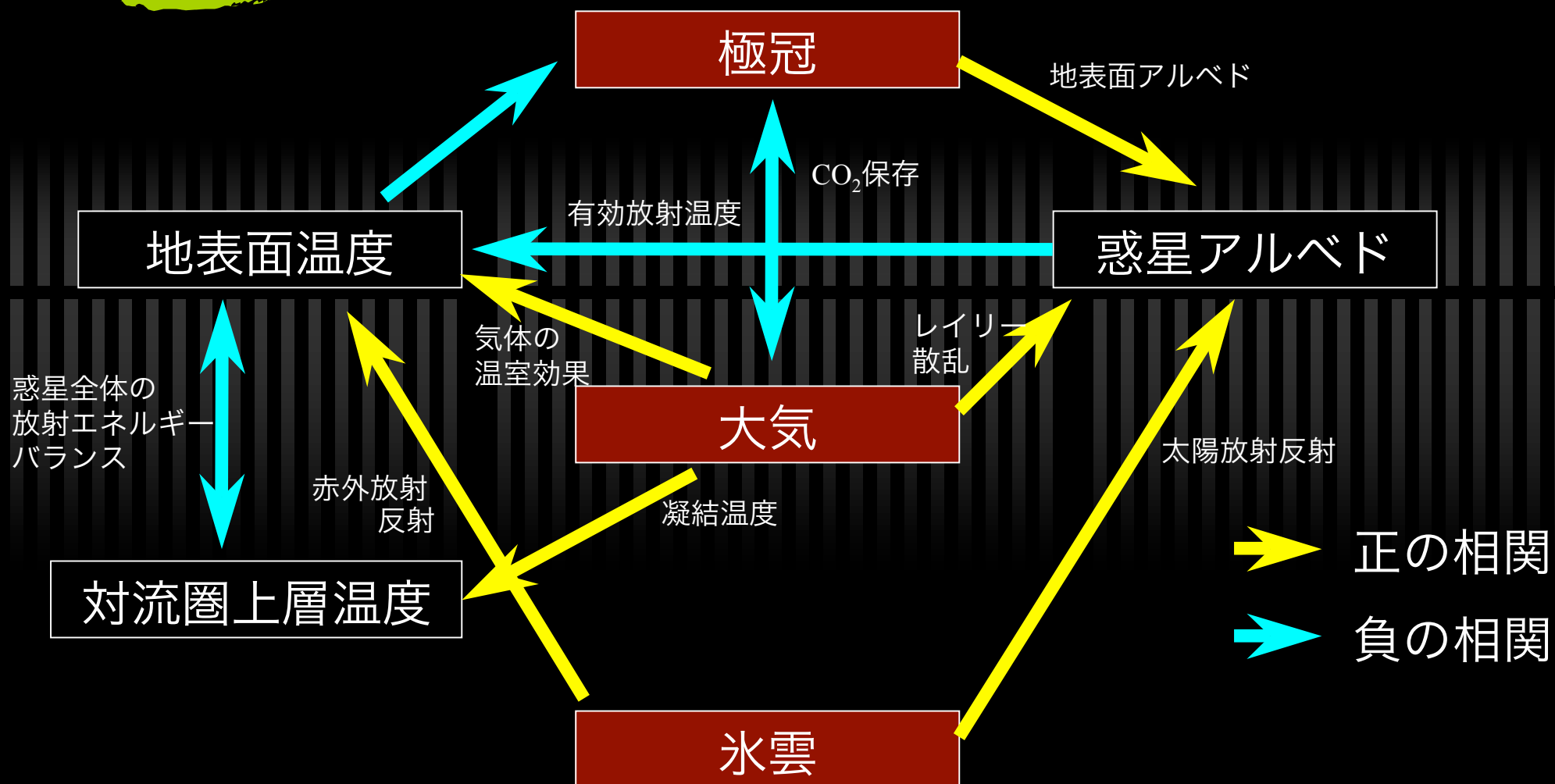
(Kasting, 1991)

- ✓ 鉛直一次元放射対流平衡モデル
- ✓ 厚い二酸化炭素-水蒸気大気
 - ✓ 大気圧 0.35 気圧以上の場合, 対流圏上部で二酸化炭素凝結, 鉛直温度構造変化
 - ✓ 地表面温度 ↓
 - ✓ 雲の放射特性を無視すると, 大気圧 3.8 気圧以上で地表面温度 = 凝結温度
 - ✓ 最大温室効果: 40 K @ 大気圧 2 気圧

Kasting 1991



Kasting 1991



二酸化炭素氷雲の散乱温室効果

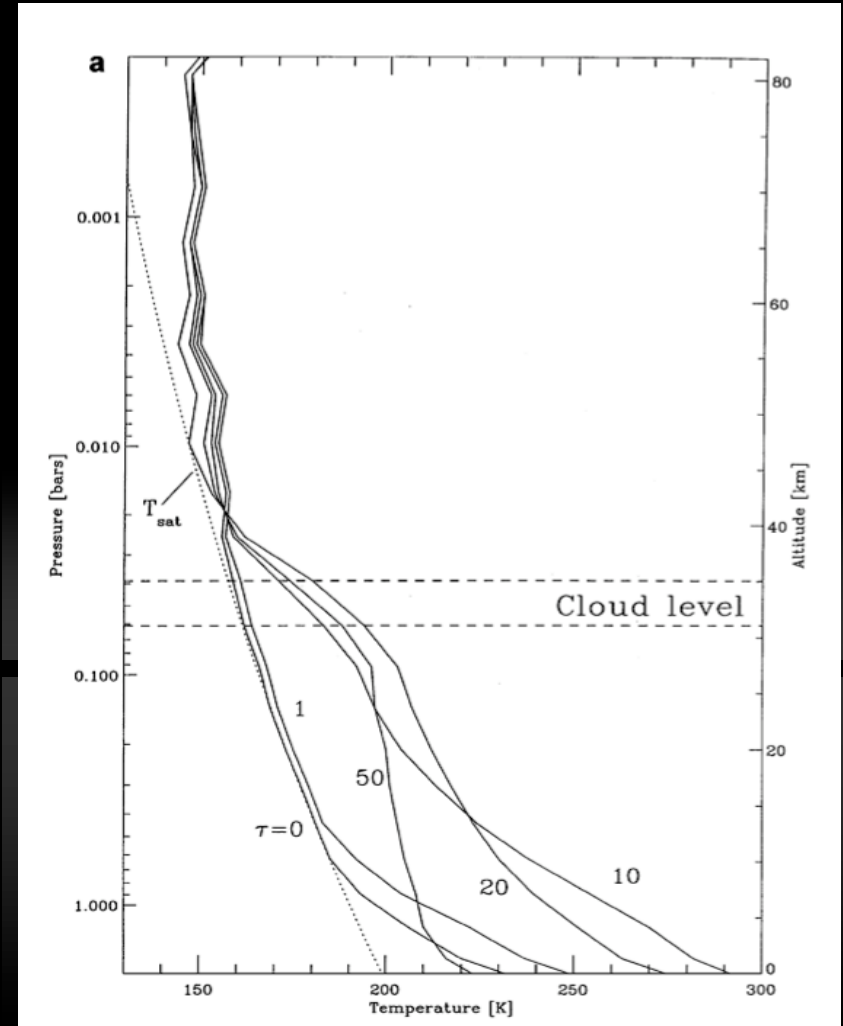
(e.g. Pierrehumbert and Erlick 1998)



- ✓ 温室効果は雲パラメータに強く依存
 - ✓ 雲粒径, 光学的厚さ
- ✓ あるパラメータ範囲では強い温室効果(地表面温度 $> 0^{\circ}\text{C}$)が生じ得る
 - ✓ 粒径 ~ 10 micron
 - ✓ 光学的厚さ ~ 1

CO₂氷雲の散乱温室効果の研究例1

- ✓ 一次元放射対流平衡モデル (Mischna et al. 2000)
- ✓ 粒径および光学的厚さ, 形成高度は仮定
- ✓ 大気温度 > 凝結温度でも大気凝結

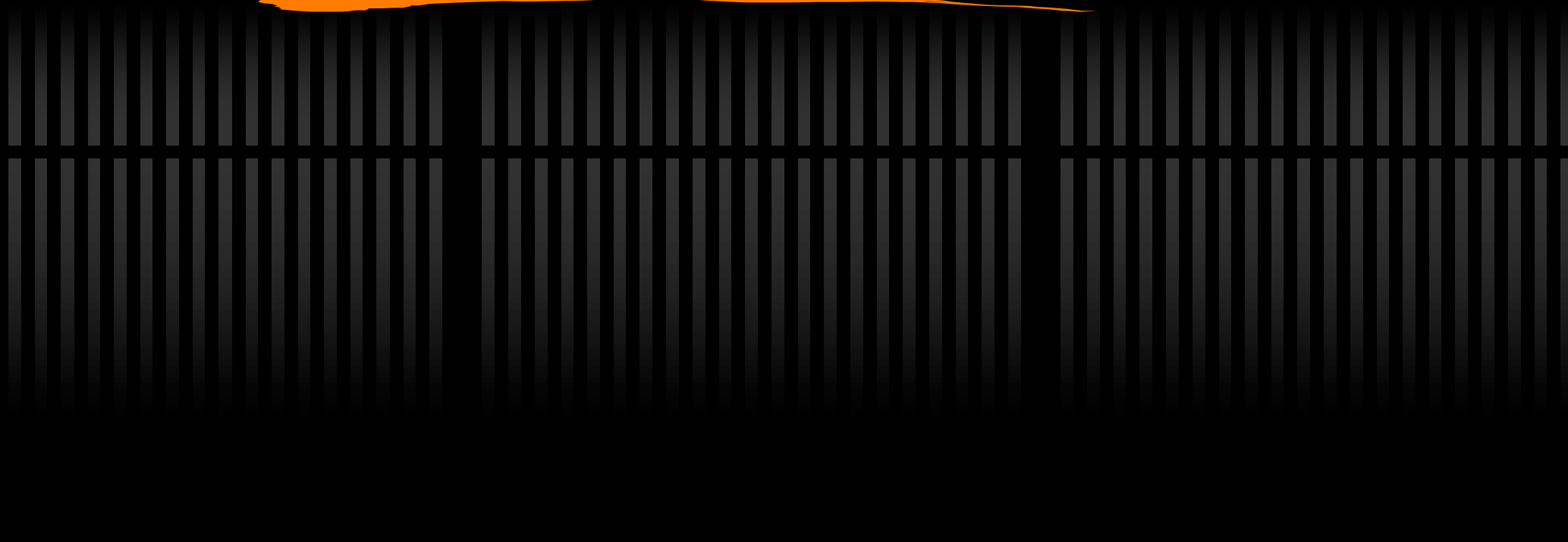


雲の光学特性を考慮した放射対流平衡モデルの結果. 雲粒の有効半径は $10 \mu\text{m}$, 雲の高度は 31-35 km (大気圧 0.06 - 0.04 気圧) と, 最も温室効果の効きやすい値をそれぞれ仮定している. 光学的厚さ ($5 \mu\text{m}$) は図中に示されている. (Mischna et al. 2000, fig 2a)

CO₂氷雲の散乱温室効果の研究例2

- ✓ 一次元放射モデル(Mitsuda et al. 2005)
 - ✓ 粒径および光学的厚さ, 形成高度を自律的に決定(ただし, 凝結核面数密度は given)
 - ✓ 雲層の温度は凝結温度に fix
 - ✓ 雲層内のエネルギーバランスモデル
 - ✓ 放射冷却エネルギーと凝結潜熱がバランス
 - ✓ 対流によるエネルギー輸送は無視
 - ✓ ただし, 雲層を 1 層として取り扱う
 - ✓ 雲パラメータの鉛直分布は不明

研究の目標と現状



目標:放射対流“凝結”平衡モデル

- ✓ 各層で放射 + 対流 + 凝結潜熱がバランスする
ようなモデルの構築
 - ✓ 凝結潜熱より雲粒径, 質量密度を自律的に導出
- ✓ 雲層を多層で扱い, 雲パラメータの鉛直構造を求める

研究の現状

- ✓ 計算コード開発中...
 - ✓ ミー散乱理論 (小杉田コード)
 - ✓ 1D 放射対流平衡
 - ✓ 散乱大気の放射伝達 (Toon et al. 1989)
 - ✓ 計算効率の良いナローバンドモデル
 - ✓ バンド幅変更可能
 - ✓ 強/弱吸収に対応

構築中のモデル紹介

- ✓ 一次元放射対流平衡モデル
 - ✓ $\text{CO}_2 / \text{H}_2\text{O}$ の凝結による温度構造の変化を考慮
 - ✓ ただし、凝結物の光学特性は無視
- ✓ 鉛直 51 層, 大気上端 : 1 Pa
- ✓ 放射伝達 : 二方向近似
 - ✓ 解法 : Toon et al. 1989
 - ✓ 太陽放射 : δ -Eddington 近似
 - ✓ 赤外放射 : Hemispheric mean 近似
 - ✓ 波数解像度 : 5 cm^{-1} (計算範囲 $0 - 50000 \text{ cm}^{-1}$)
 - ✓ CO_2 ice の複素屈折率データの波数依存性(Warren, 1986)を再現可能な程度に細かい.
 - ✓ ナローバンド法の適度な波数幅: $5 - 20 \text{ cm}^{-1}$ (関口 2004)

構築中のモデル紹介

✓ 光学係数

✓ CO₂ ice

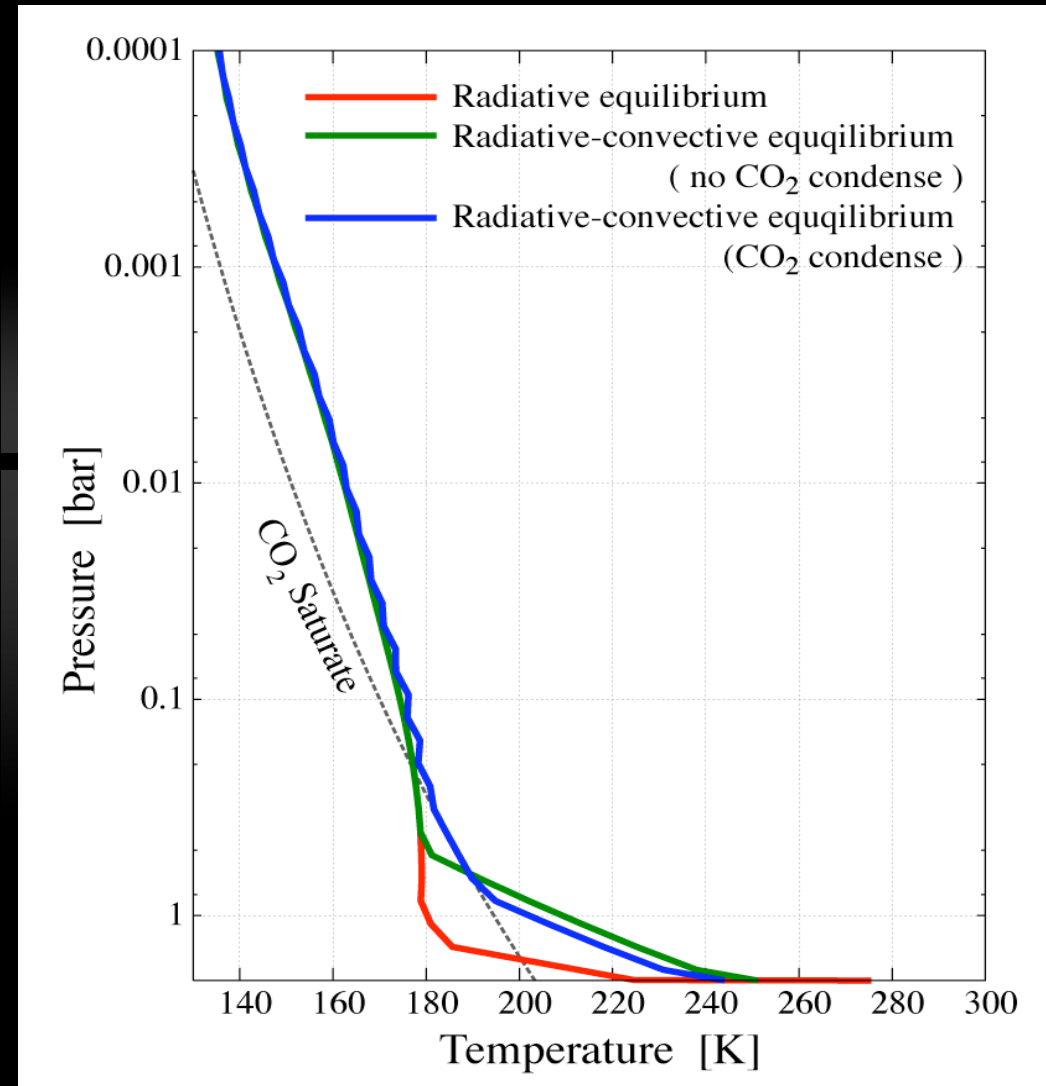
- ✓ ミー理論 (球形粒子を仮定)
- ✓ 複素屈折率 : 実験データ Warren (1986)

✓ 大気 (CO₂ / H₂O)

- ✓ ローレンツ線形 (ドップラー効果は無視)
- ✓ ランダムバンドモデル
- ✓ バンドパラメータは吸収線データベース HITRAN2004 (Rothman et al. 2005) をもとに作成
 - ✓ 温度 4 (150, 200, 250, 300[K])
 - ✓ 吸収線強度 8 (1.0E-21, 1.0E-22, 1.0E-25, 1.0E-27, 1.0E-29, 1.0E-31, 1.0E-33, 1.0E-35 [molecule / m² / cm⁻¹])

初期結果

- ✓ 太陽光度：現在の0.75 倍 (38億年前; Gough 1981)
- ✓ CO₂-H₂O 大気
 - ✓ H₂O の相対湿度は圧力と線形比例, 地表面では 77% (Manabe and Wetherald 1967)
- ✓ 大気圧 2 気圧
 - ✓ レイリー散乱の効果は惑星アルベドの増加で表す.

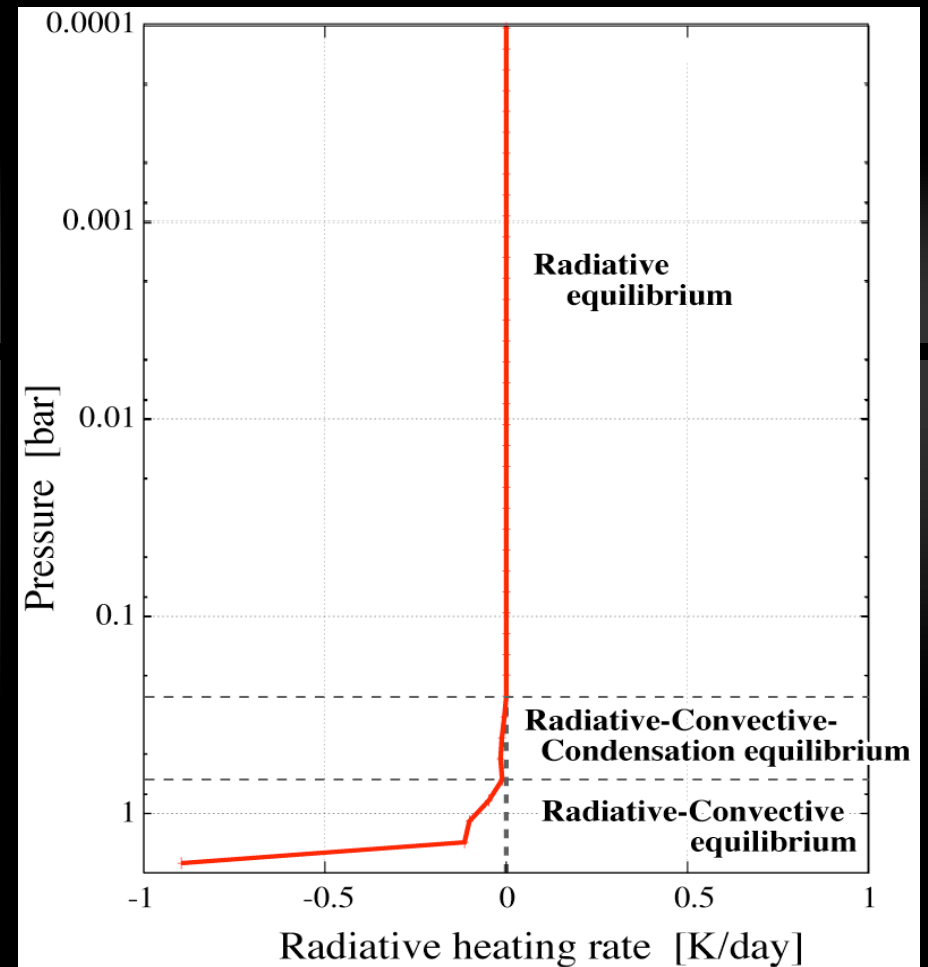


まとめ

- ✓ 二酸化炭素大気を持つ惑星の気候は、その相変化によって強く影響を受ける。
- ✓ 二酸化炭素氷雲の温室効果は古火星温暖化メカニズムとして提案されているが、雲パラメータの決定機構を議論した研究は少ない。
- ✓ 雲パラメータの鉛直構造を自律的に決定すべく、放射対流凝結平衡モデルを開発中である。
 - ✓ 現時点では放射対流平衡モデルまで構築を終えた。

今後の展開: 対流によるエネルギー輸送の概算

- ✓ どのようなパラメータに依存しているのか?
 - ✓ 大気の安定度 (不飽和度)
 - ✓ 対流の慣性力
 - ✓ etc...



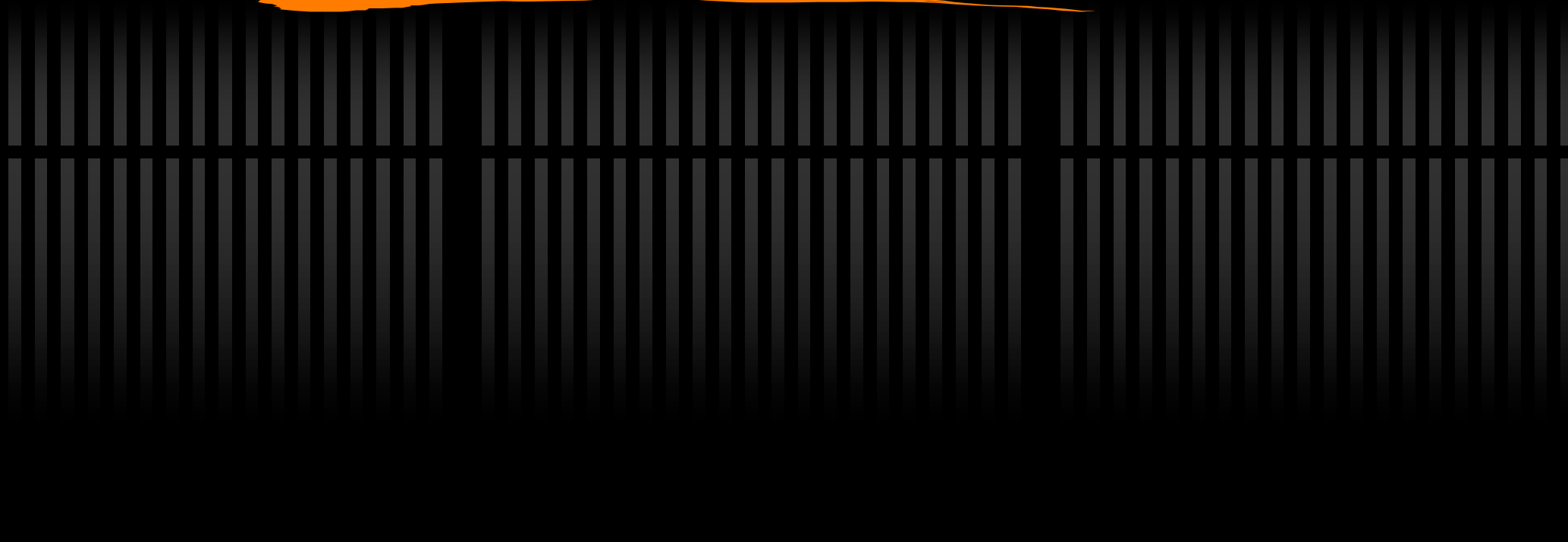
参考文献1

- ✓ Goody, R. M. and Yung, S. A., 1989, *Atmospheric radiation*, Oxford Univ. Press, 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, CO₂ 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 CO₂ 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 CO₂ 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

Appendix



放射スキーム： δ -Eddington 近似

✓ δ 近似

- ✓ 散乱位相関数を δ 関数 + ルジャンドル関数で表記する方法. $\Theta = 0$ のピークを表現.

✓ Eddington 近似

- ✓ 放射強度の天頂角方向の分布をルジャンドル関数展開し, 二項目まで考慮したもの
 - ✓ $I(\tau, \mu) \sim I_0(\tau) + I_1(\tau) \mu$ (μ : 天頂角余弦)
- ✓ 光学的に薄い場合や, 天頂角が 90 度に近づく場合, 精度が落ちる (e.g. Goody, 1989)
 - ✓ よりよい精度が欲しい場合(観測屋さん)は adding 法など.

放射スキーム : Hemispheric mean

- ✓ Hemispheric mean 近似

- ✓ 散乱位相関数を以下で表現.

- ✓ $1 + g \quad (0 < \Theta < 90)$

- ✓ $1 - g \quad (90 < \Theta < 180)$

- ✓ 赤外放射では, δ -Eddington 近似と比較してよい精度を得る(Toon et al. 1989)

ローレンツ線形の等価幅(e.g. Houghton 2002)

✓ 温度, 吸収線強度の値ごとに, $\Sigma S_i, \Sigma(S_i \gamma_{i0})^{0.5}$ を
テーブル化

✓ 弱吸収近似 $W_{\text{weak}} = m \Sigma S_i(T)$

✓ 強吸収近似 $W_{\text{strong}} = 2 (m p/p_0)^{0.5} \Sigma(S_i(T) \gamma_{i0}(T))^{0.5}$

✓ S: 吸収線強度, g: ローレンツ半値幅, m: 経路長, T: 温度

✓ I: 吸収線, 0: 標準状態 ($T = 296\text{K}, P = 1\text{bar}$)

✓ 各吸収線強度帯の $W_{\text{weak}}, W_{\text{strong}}$ うち, 小さいものをバンド値として採用

鉛直一次元放射対流モデル

- ✓ 放射平衡 + 対流調節

- ✓ 惑星大気の平均的/本質的構造をよく表現

- ✓ 数値計算計算手法

- ✓ 放射平衡温度分布を求める
- ✓ 対流中立かつ正味射出エネルギーが温度構造変更前後で等しくなるように地表面-対流圏下部の温度分布を計算
- ✓ 再び成層圏が放射平衡になるように調節
- ✓ 繰り返し...
- ✓ 大気温度が凝結温度を下回ったら凝結温度に調整
- ✓ 繰り返し...

鉛直一次元放射モデル

- ✓ 惑星大気の平均的な構造を記述するモデル
- ✓ 年・全球平均値を用いる
 - ✓ 日・季節変化, 経度/緯度分布は無視
- ✓ 温度, 物質の分布は与える
 - ✓ 水蒸気分布は地球の平均的な値(Pollack et al 1989; Manabe and Wetherald 1967)

$$h = 0.77 * P/P_s$$

h: relative humidity, P: pressure, s:Surface

鉛直温度構造

- ✓ 成層圏, 雲層, 対流圏の 3 層構造
 - ✓ 対流圏下部(H₂O can saturate)
 - ✓ CO₂ 乾燥断熱減率
 - ✓ 対流圏上部(CO₂ can saturate)
 - ✓ CO₂ 湿潤断熱減率
 - ✓ 成層圏
 - ✓ 放射平衡温度(薄い灰色大気近似)
 - ✓ $sT^4 = 0.5 * 0.25 *$
 - ✓ 等温構造

地球型惑星の大気組成

	火 星	地 球	金 星
大気主成分(%)	CO₂ (96) N ₂ (2.7)	N ₂ (78) O ₂ (21)	CO₂(96) N ₂ (3.5)
大気圧[bar]	0.006	1	92
表面付近にある揮 発性物質(%)	CO₂ (98) N ₂ (1.7)	CO₂ (98) N ₂ (1.9)	CO₂(96.5) N ₂ (1.7)
相当する気圧[bar]	~2	~70	88±3

二酸化炭素相変化の気候への影響

