

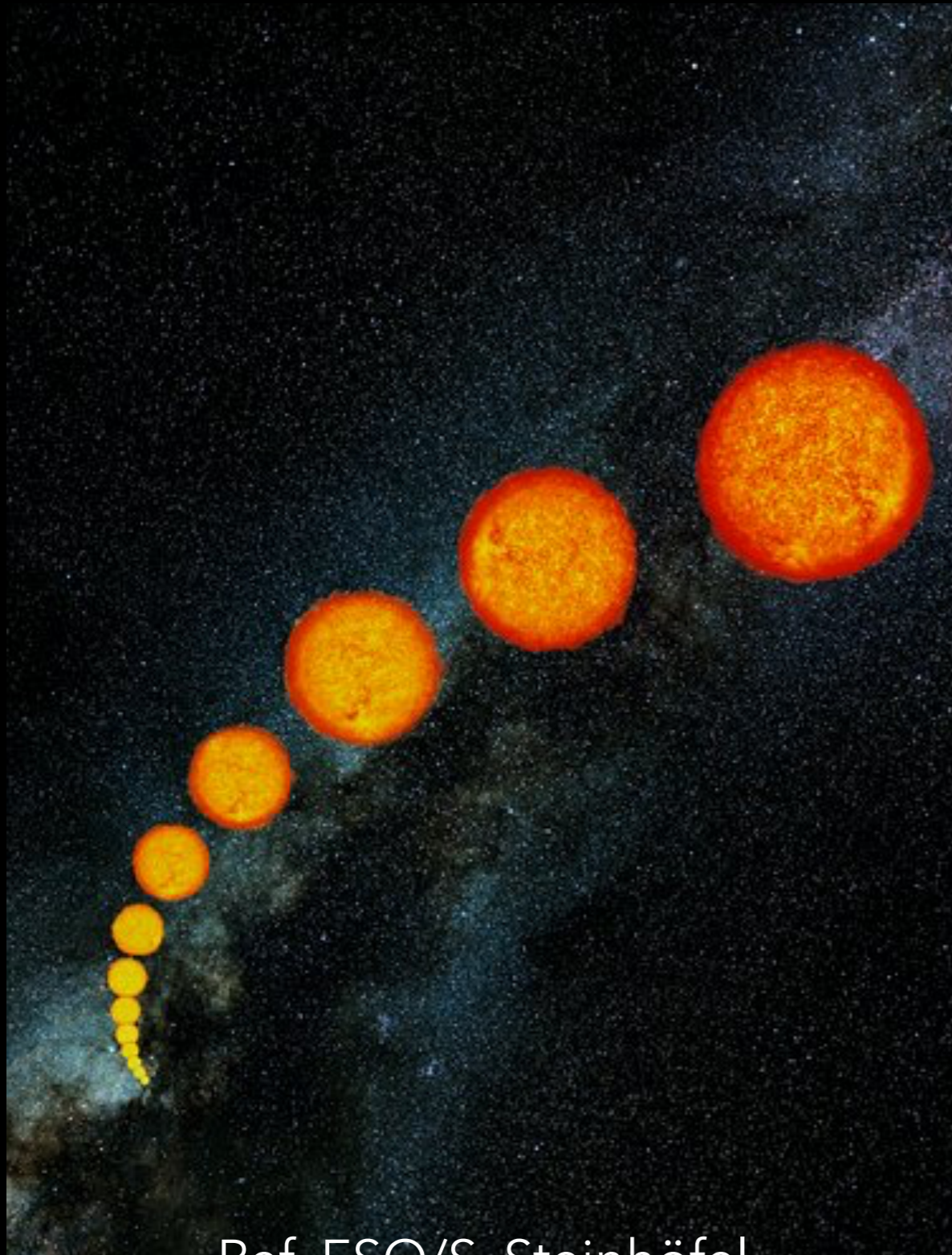
過酸化水素による 酸化的古火星環境における温暖化

伊藤祐一 (University College London)、

共同研究者: はしもとじょーじ¹、高橋芳幸²、石渡正樹³、倉本圭³

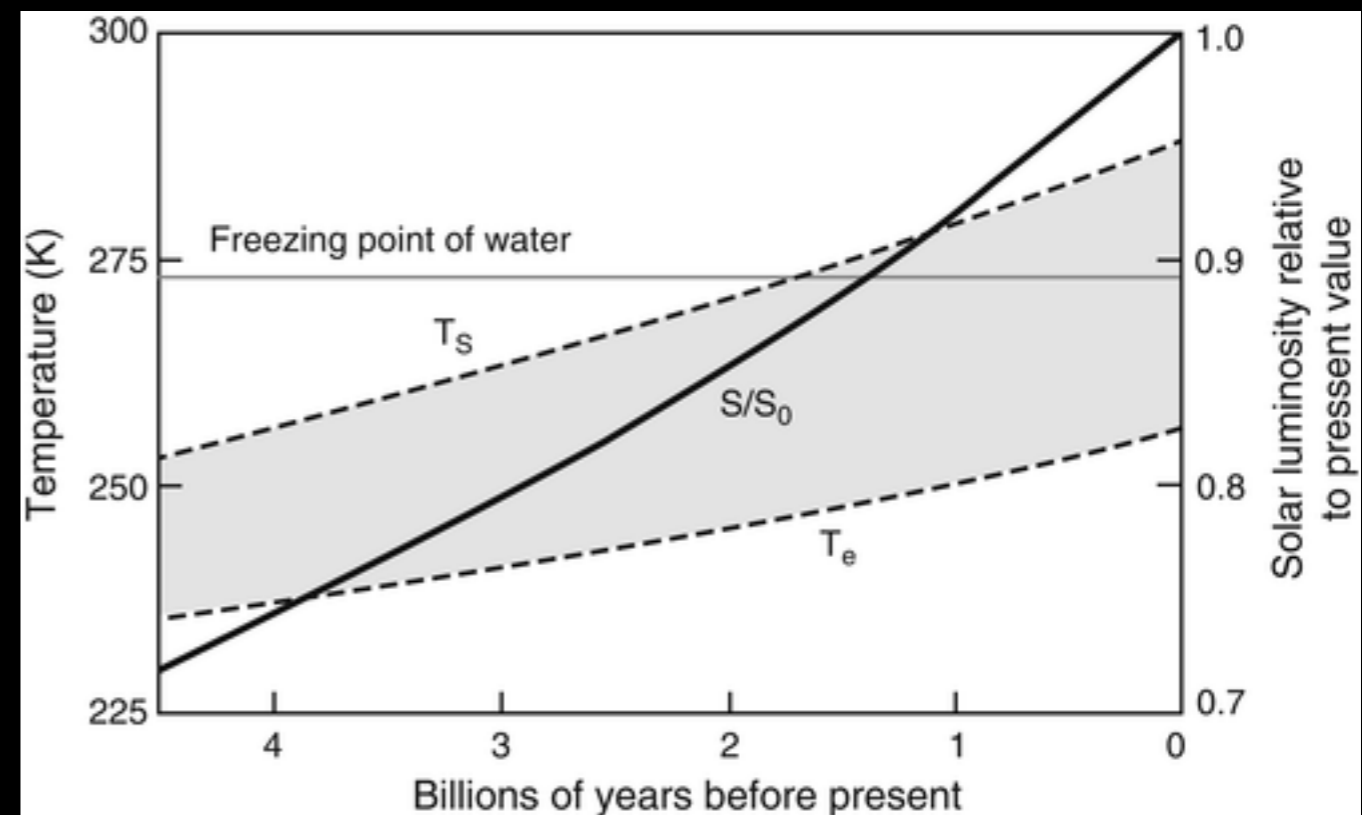
(1 岡山大学、2 神戸大学、3 北海道大学)

暗い太陽のパラドックス



Ref. ESO/S. Steinhöfel

太陽光度進化に伴う地球表面温度変化



Ref. Catling & Kasting 2017

火星における暗い太陽のパラドックス

昔は液体の水が存在する程、温暖(>273K)

数多くの火星流水地形

流線の筋、侵食クレーター、沖積土、
三角州、海岸線(北半球)、Valley network

(e.g., Tanaka et al. 2014)

- 約30-40億年前(クレーター年代)

(e.g., Bibring et al. 2006)

- 粘土鉱物(Fe-Mg, Al)



40億年前の太陽光度は現在の75%

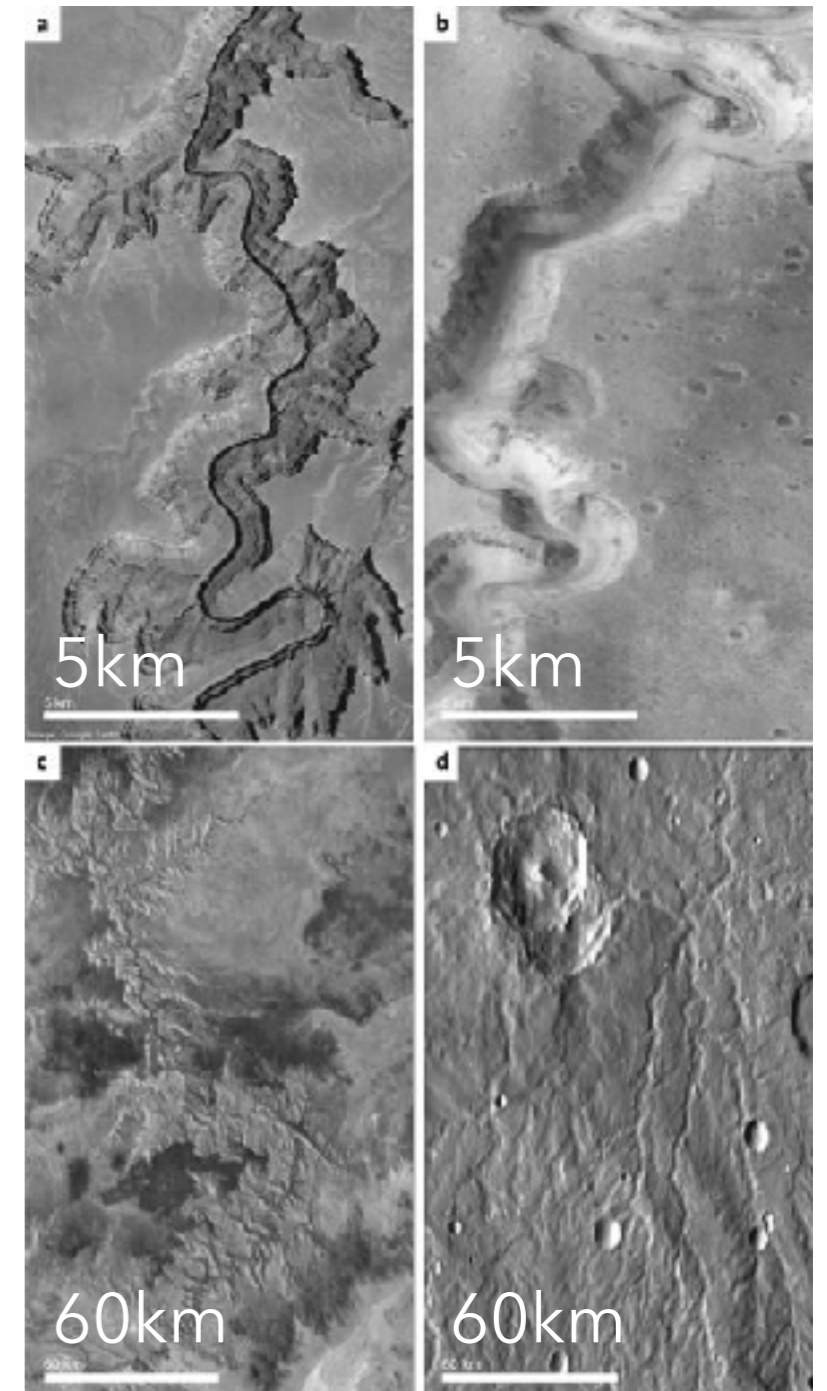
Ex. 火星表面温度~205K at 4Ga

(75%の太陽光を受けた現在の火星大気条件)

地球(a,c)/火星(b,d)

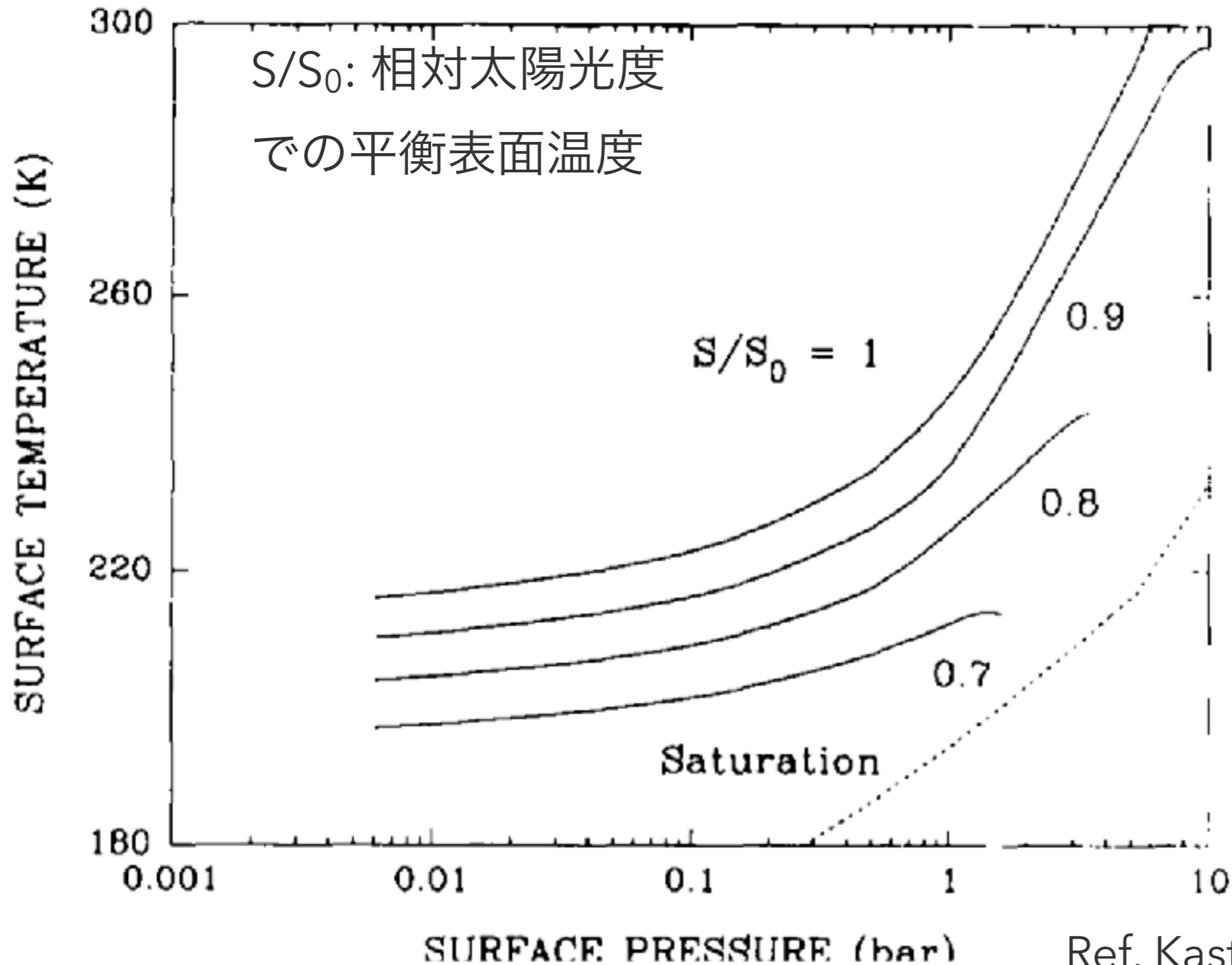
の流水地形

(Ramirez & Craddock, 2018)



大気モデルによる古火星の温暖環境推定

CO₂のみでは温暖環境にならない→他の温室効果物質の存在を示唆



約40億年前の
太陽光度は
現在の約75%

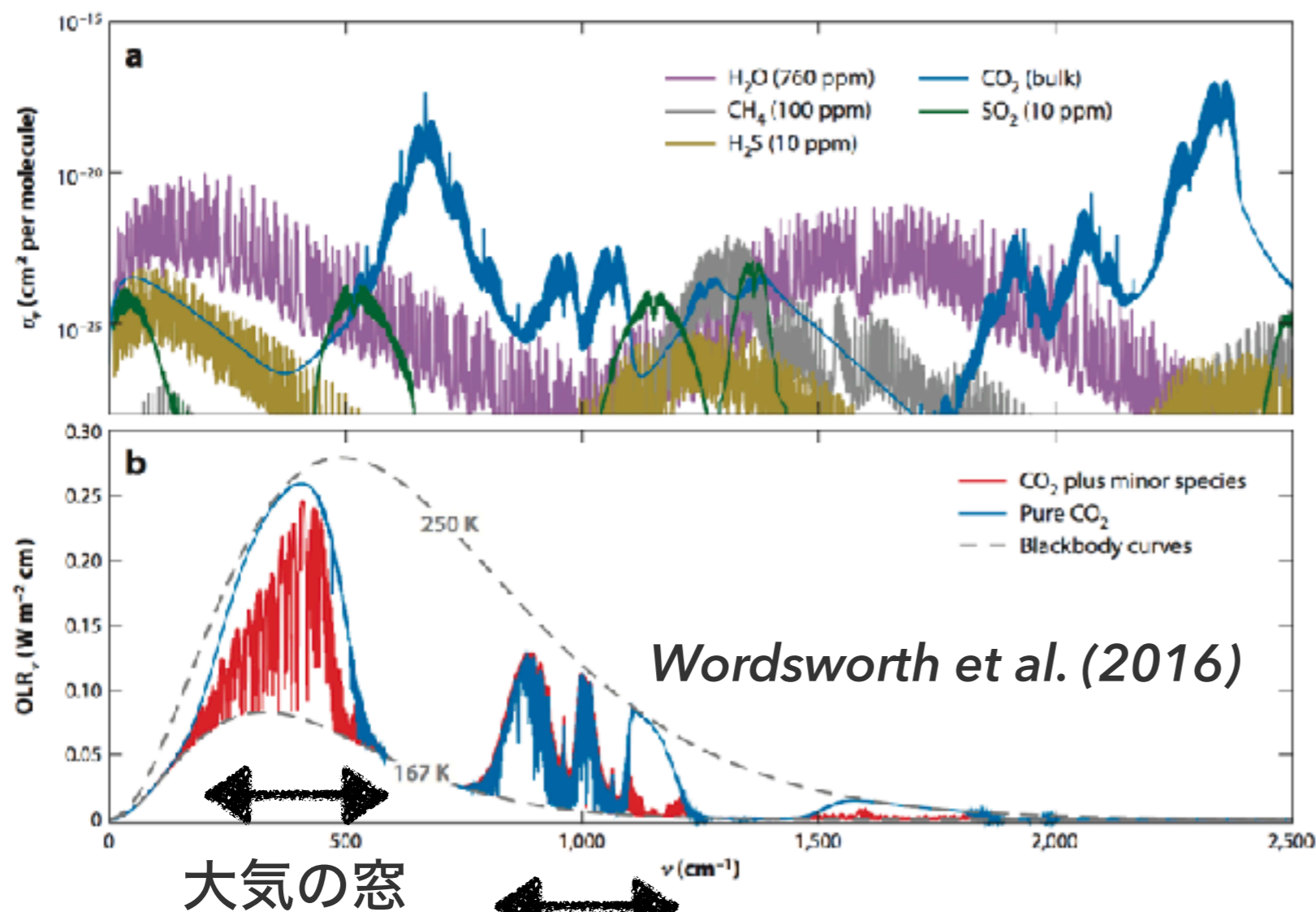
Ref. Kasting (1991)

CO2大気の窓/ 提唱された温室効果ガス

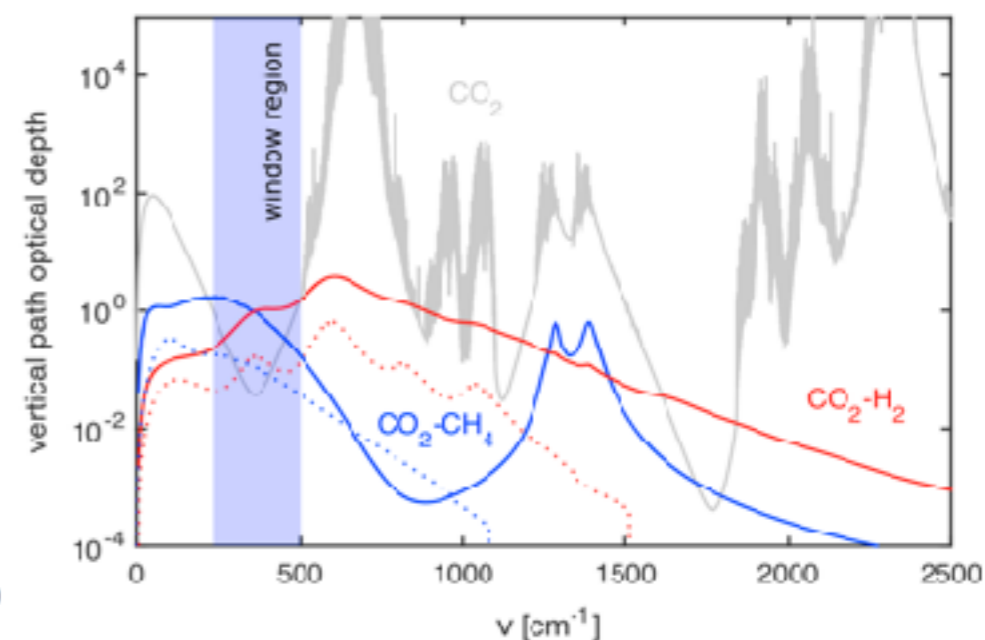
- 提唱された温室効果気体(現在観測値→温暖環境に必要な値)
 - ◆ 還元的ガス：NH3(<5ppb→>500ppm), CH4(10ppm→>10%), H2(10ppm→>1%)
 - ◆ 火山性ガス：SO2(<0.3ppb→>10ppm)

(e.g., Kasting+1992, Tian+2011, Ramirez2017)

温室効果ガスの吸収断面積 (上) /CO2大気の窓 (下)



CO2とCH4, H2のCIA



古火星の酸化還元環境

古火星は、酸化的/還元的な表層環境の両方を経験？

ローバーの探査結果：**高濃度酸化マンガン**、有機物ヘイズ

(at Gale crater [age of 3-4Gyr], Lanza et al., 2016, Eigenbrode et al., 2018)

高濃度酸化マンガンの形成条件

- 液体の水
- 非常に酸化的環境

(e.g., 初期地球での検討： Maynard, 2010,
Johnson et al., 2013;)

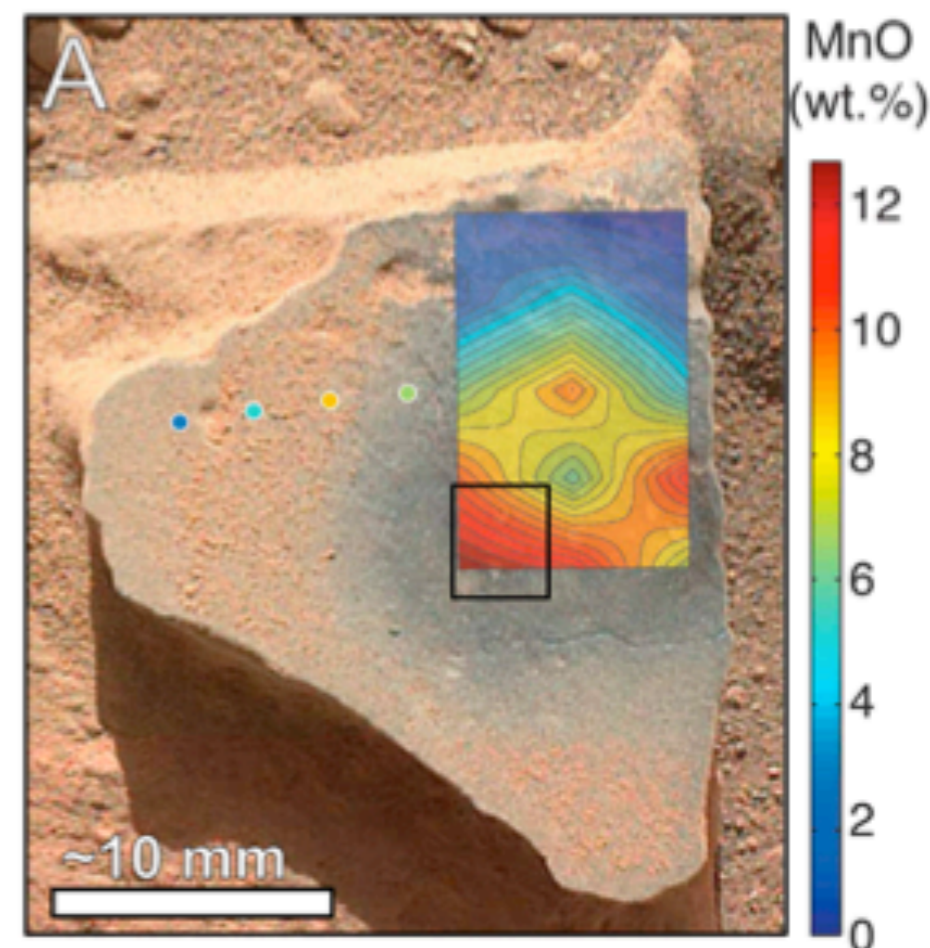


古火星は現在より

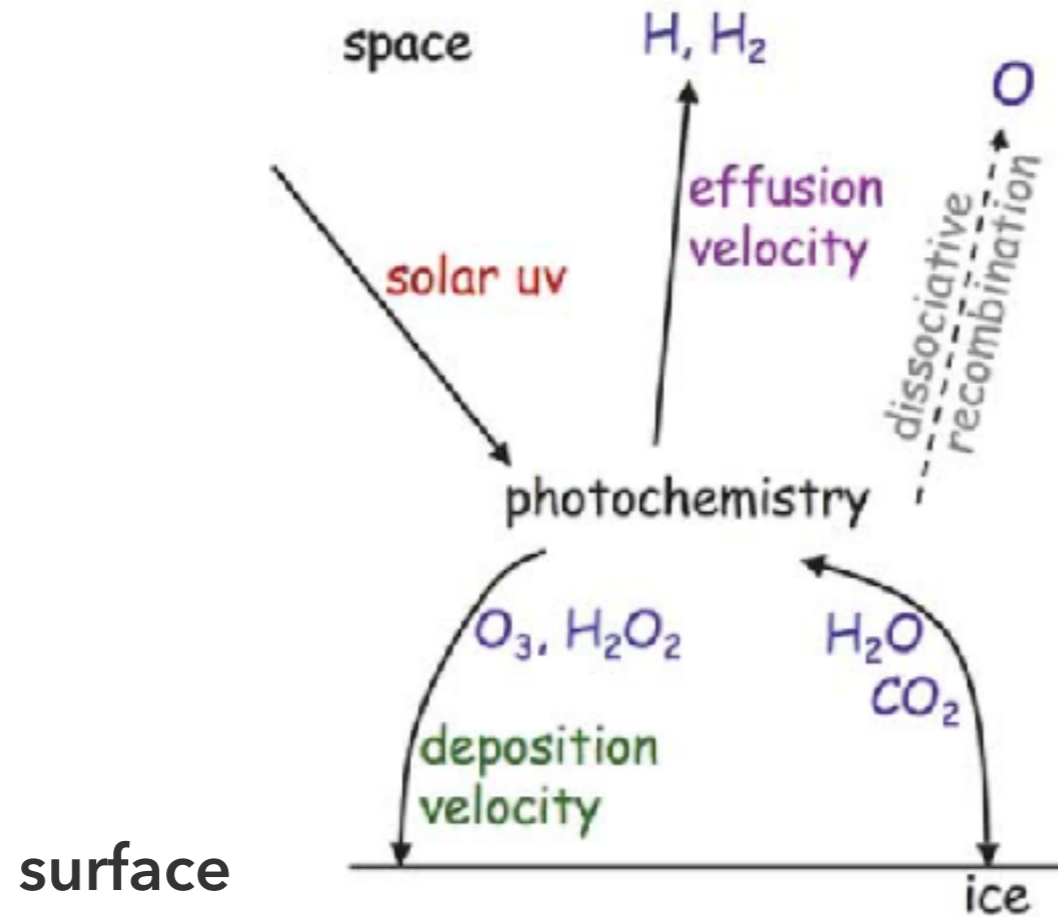
酸化的/温暖大気*を持ったことを示唆

(*全球的か不明)

Gale crater 岩石のMn map
(Lanza et al., 2016)



火星大気の酸化還元システム

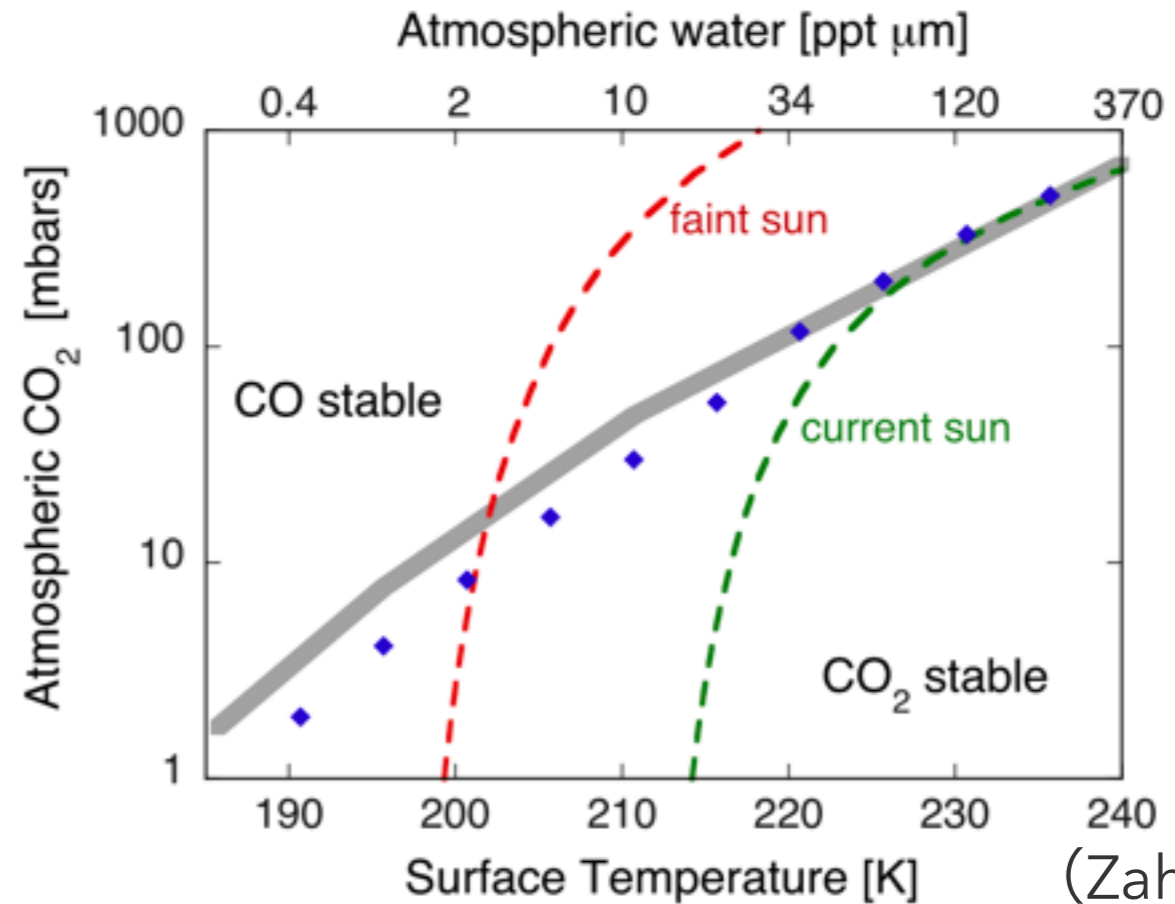
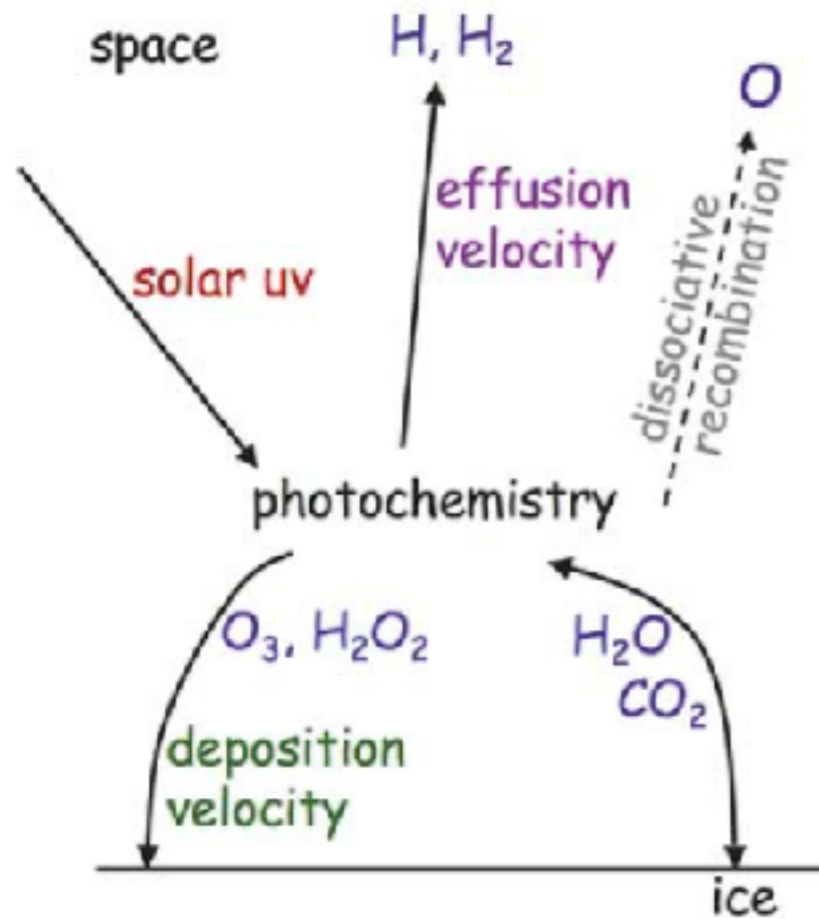


(Zahnle+2008)

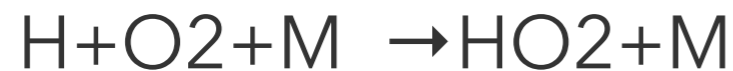
現在の火星



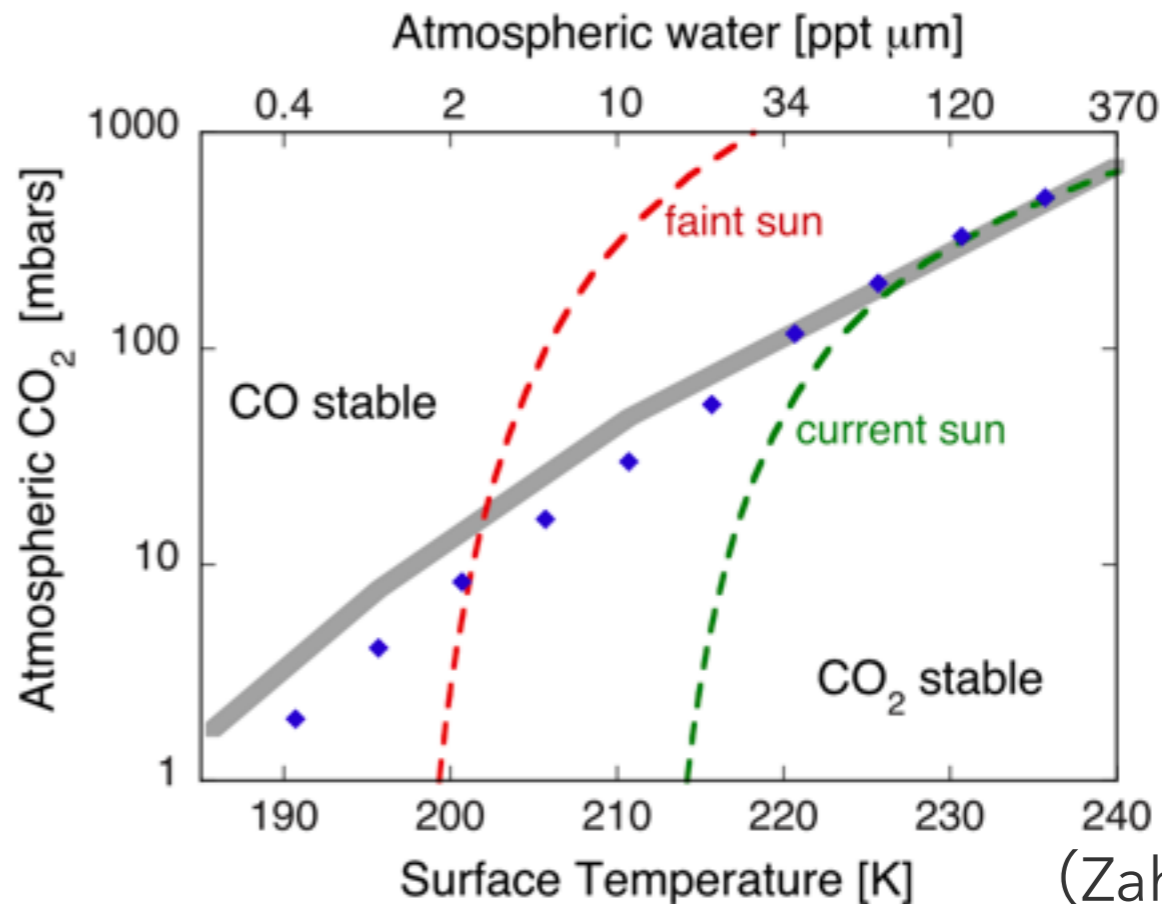
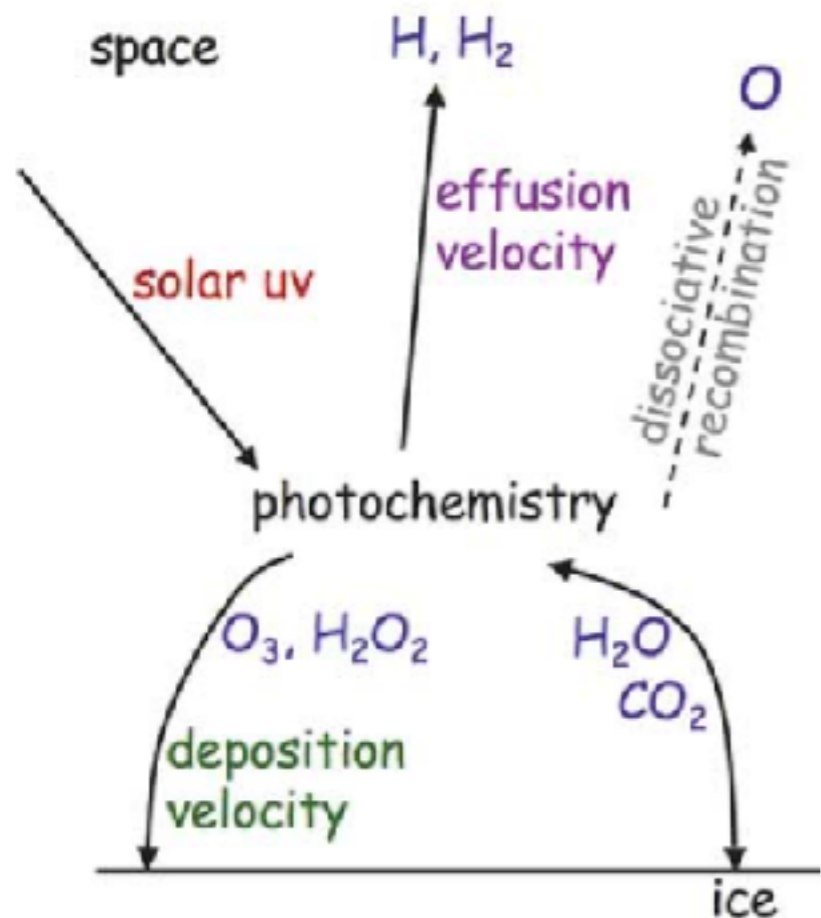
火星大気の酸化還元システム: CO₂大気的不安定性



現在の火星



火星大気の酸化還元システム: CO₂大気の不安定性



(Zahnle+2008)

現在の火星



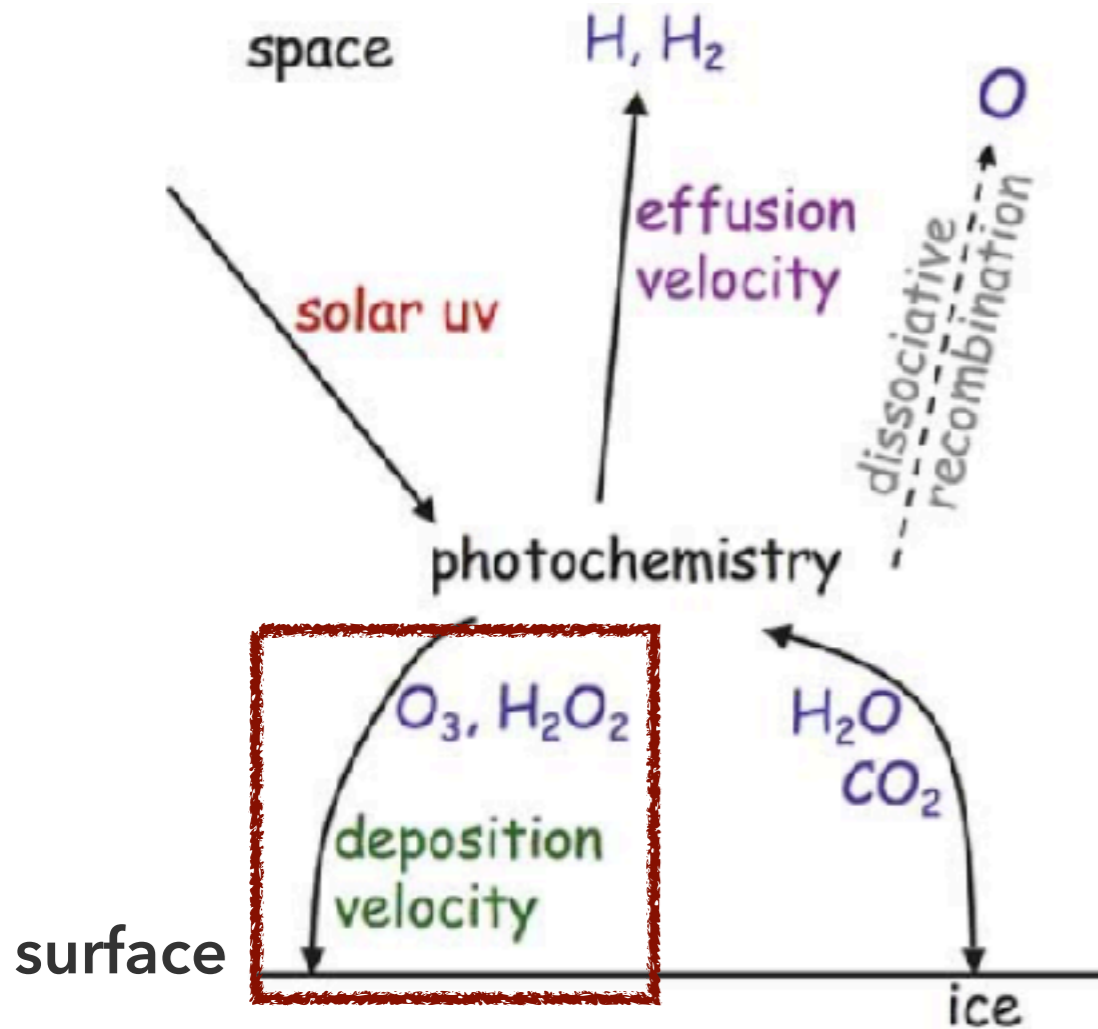
H₂Oが多い(=温暖)場合



酸化的 & 温室効果気体：過酸化水素

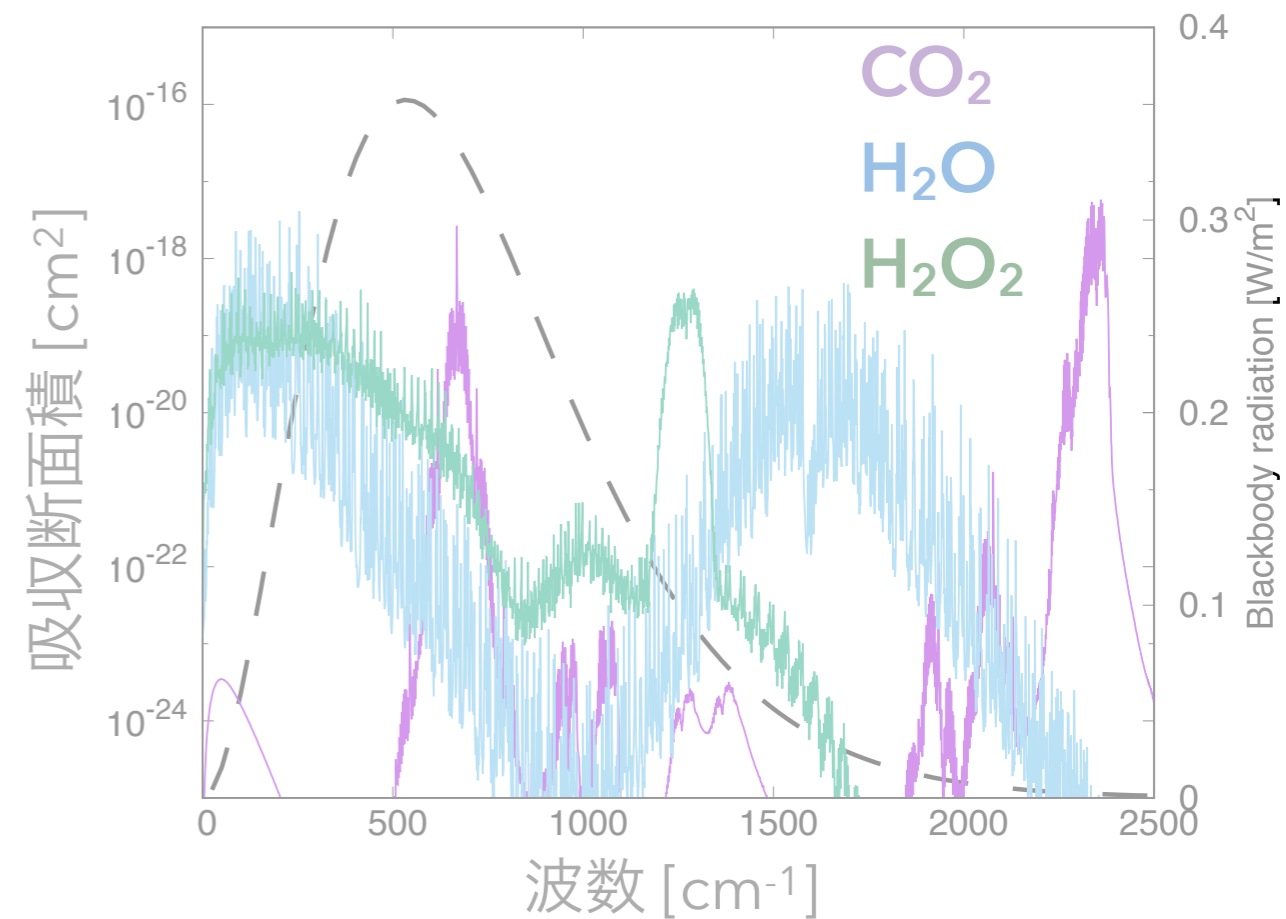
地表面酸化剤

火星大気の酸化還元システム
(Zahnle et al., 2008)



温室効果気体

H_2O_2 の遠赤外での強い吸収
(黒破線は273Kでの黒体放射)



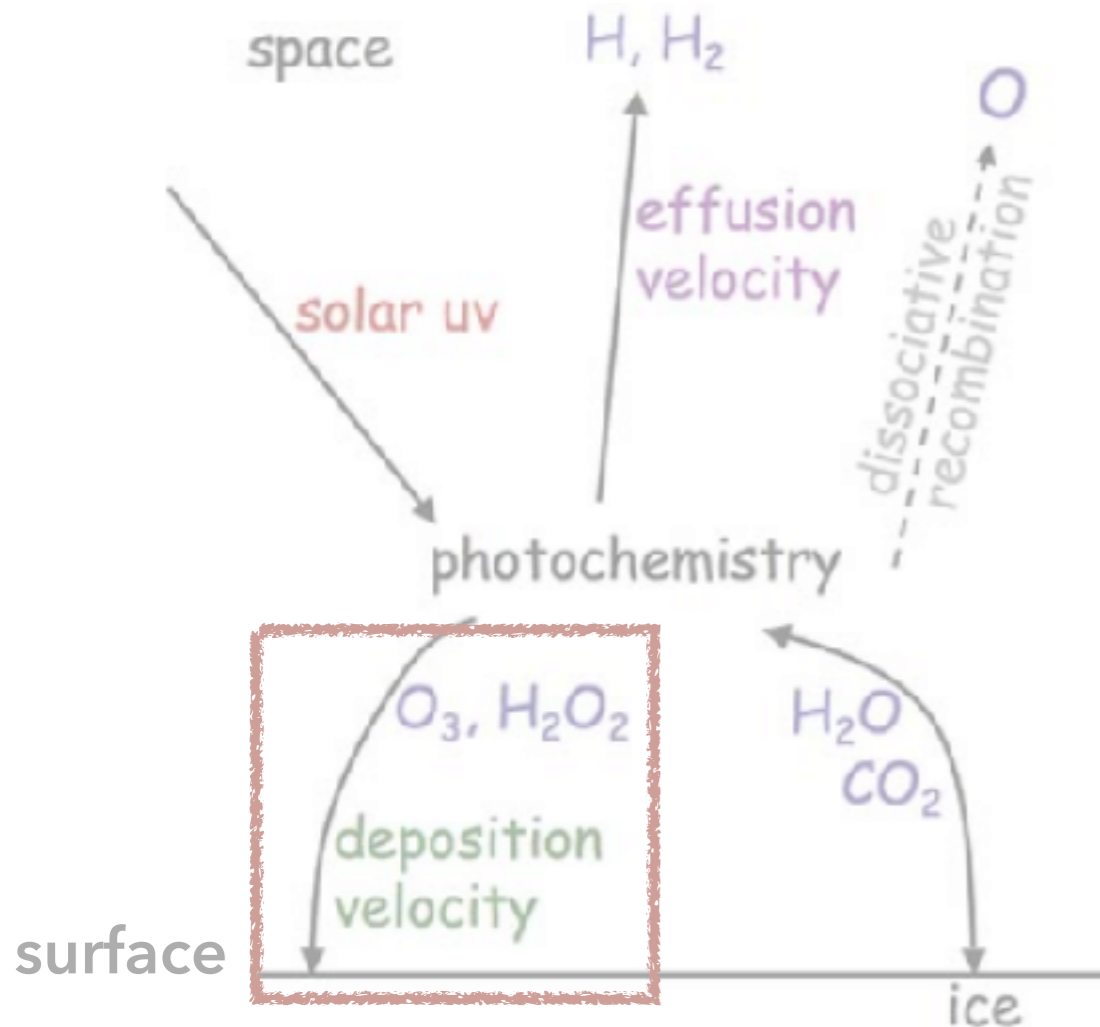
現在の火星で微量成分である H_2O_2 (~20ppb, 光分解寿命~数時間)は、
表層酸化だけでなく、古火星を温暖化可能なのか？

酸化的 & 温室効果気体：過酸化水素

地表面酸化剤

火星大気の酸化還元システム

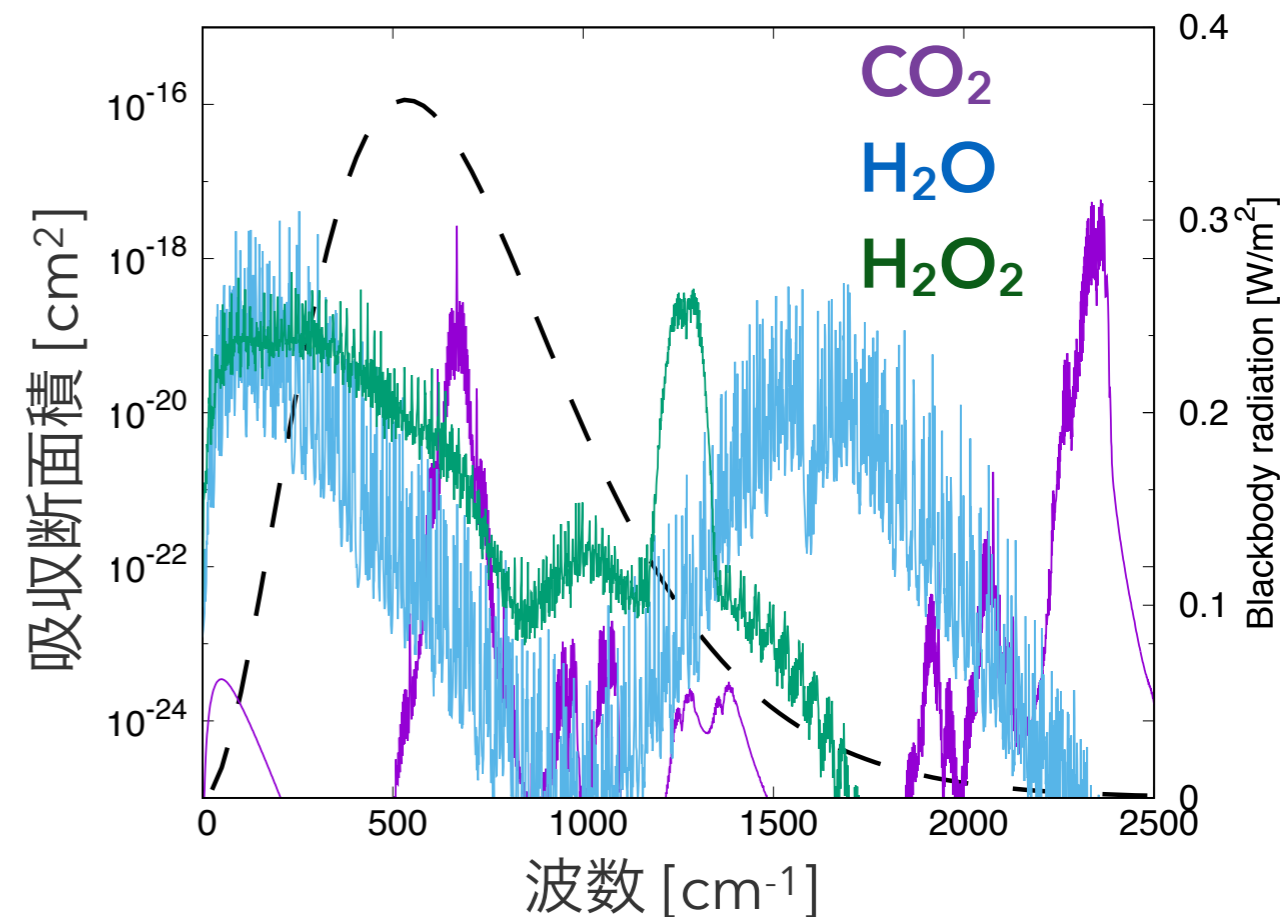
(Ref. Zahnle et al., 2008)



温室効果気体

H_2O_2 の遠赤外での強い吸収

(黒破線は273Kでの黒体放射)



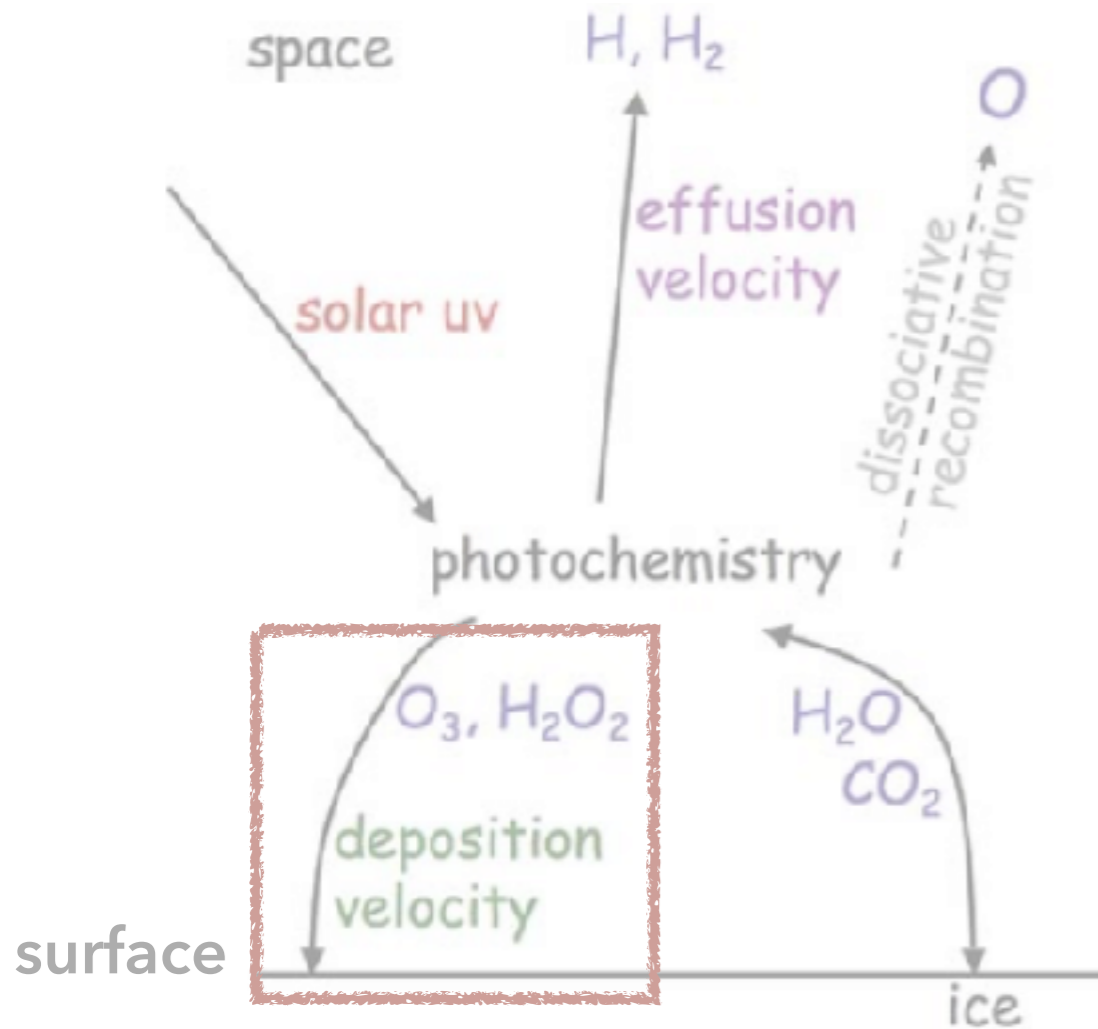
現在の火星で微量成分である H_2O_2 (~20ppb, 光分解寿命~数時間)は、
表層酸化だけでなく、古火星を温暖化可能なのか？

酸化的 & 温室効果気体：過酸化水素

地表面酸化剤

火星大気の酸化還元システム

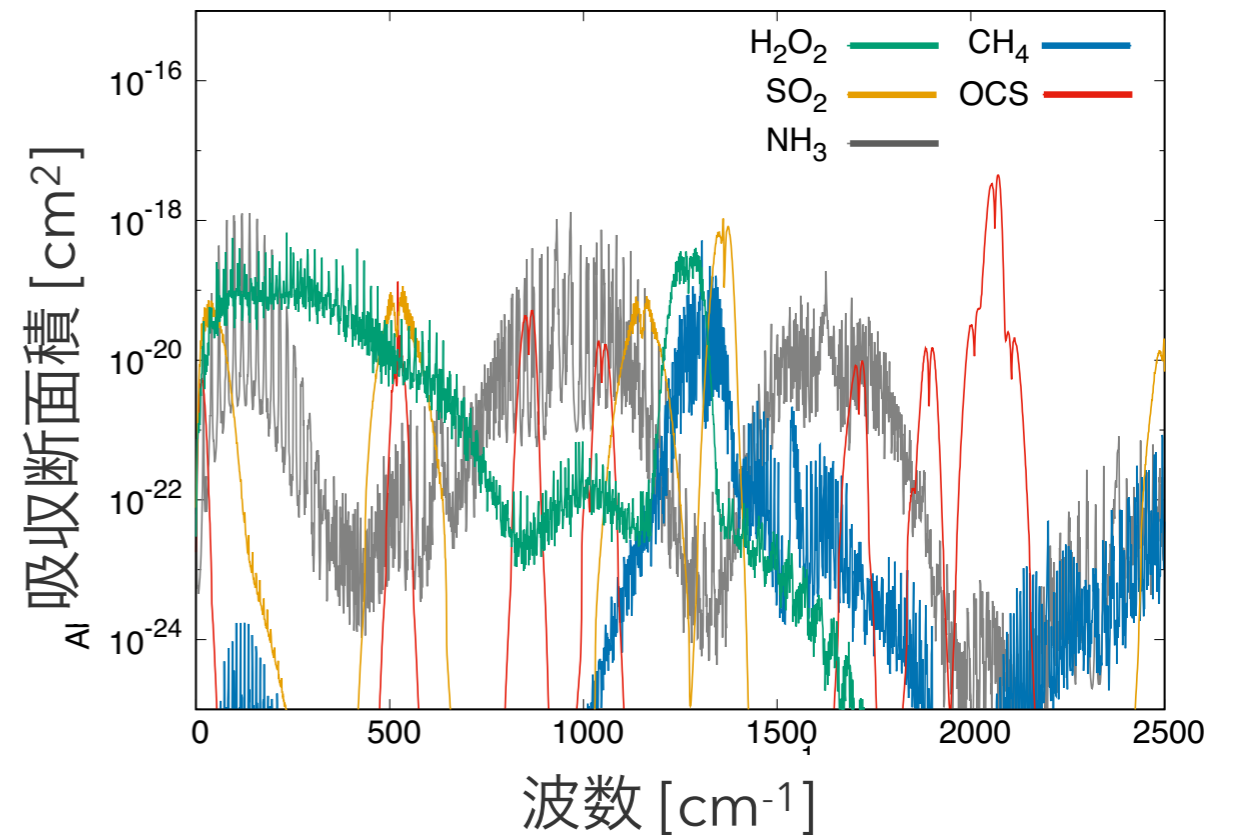
(Ref. Zahnle et al., 2008)



温室効果気体

H_2O_2 の遠赤外での強い吸収

(黒破線は273Kでの黒体放射)



現在の火星で微量成分である H_2O_2 (~20ppb, 光分解寿命~数時間)は、
表層酸化だけでなく、古火星を温暖化可能なのか？

研究目的 (Ito et al. 2020)

背景：火星における暗い太陽のパラドックス

- ▶ 近年の探査から、古火星が酸化的環境を経験していたことが示唆
- ▶ 過去の大気モデルでは、酸化的大気による古火星温暖化は未提案

酸化的成分 H_2O_2 の増加によって、
古火星が温暖化された可能性はないのか？

- ▶ 飽和蒸気圧分あったとしても温暖化に寄与しない
- ▶ 過飽和であるが、1ppm以上の濃度があれば表層温暖

大気モデル：大気場

Line by Line の表面温度推定 (e.g., Schaefer et al.2016, Wordsworth et al. 2017)

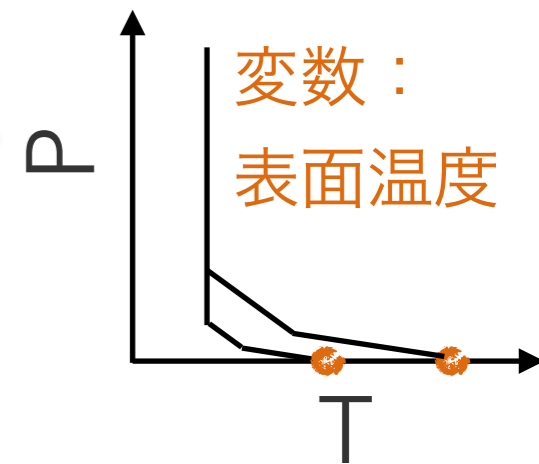
惑星放射

$$F^+ = 2\pi B(T_{\text{surf}}) \int_0^1 \mu e^{-\tau_\infty/\mu} d\mu + 2\pi \int_0^{\tau_\infty} \int_0^1 B(\tau) e^{-t_\nu/\mu} d\mu dt$$

吸収された恒星放射

$$(1 - A) F_{\text{stellar}}/4$$

両者が等しい
解を探す



- 大気圧：0.01-3 bar

- 大気組成

▶ CO₂ (95%), N₂ (5%), H₂O(飽和蒸気量) + H₂O₂(パラメータ)

- 1D温度構造

▶ 成層圏：等温155K、対流圏：CO₂の、H₂Oの蒸気圧曲線

(各物性データ：Kasting 1991、A;Ramirez 2017の結果、F; 0.75*630W/m²)

大気モデル：吸収係数

- CO₂の吸収

- ▶ Sub-Lorentz profile (Perrin & Hartmann 1989): cutoff $\Delta v < 500 \text{ cm}^{-1}$
- ▶ CO₂-CO₂ CIA (Gruszka & Borysow 1998, Baranov et al., 2004)

- H₂O/H₂O₂の吸収

- ▶ Voigt profile : cutoff $\Delta v < 50 \text{ cm}^{-1}$

- 計算コード

ExoCross code
(Yurchenko et al. 2018)

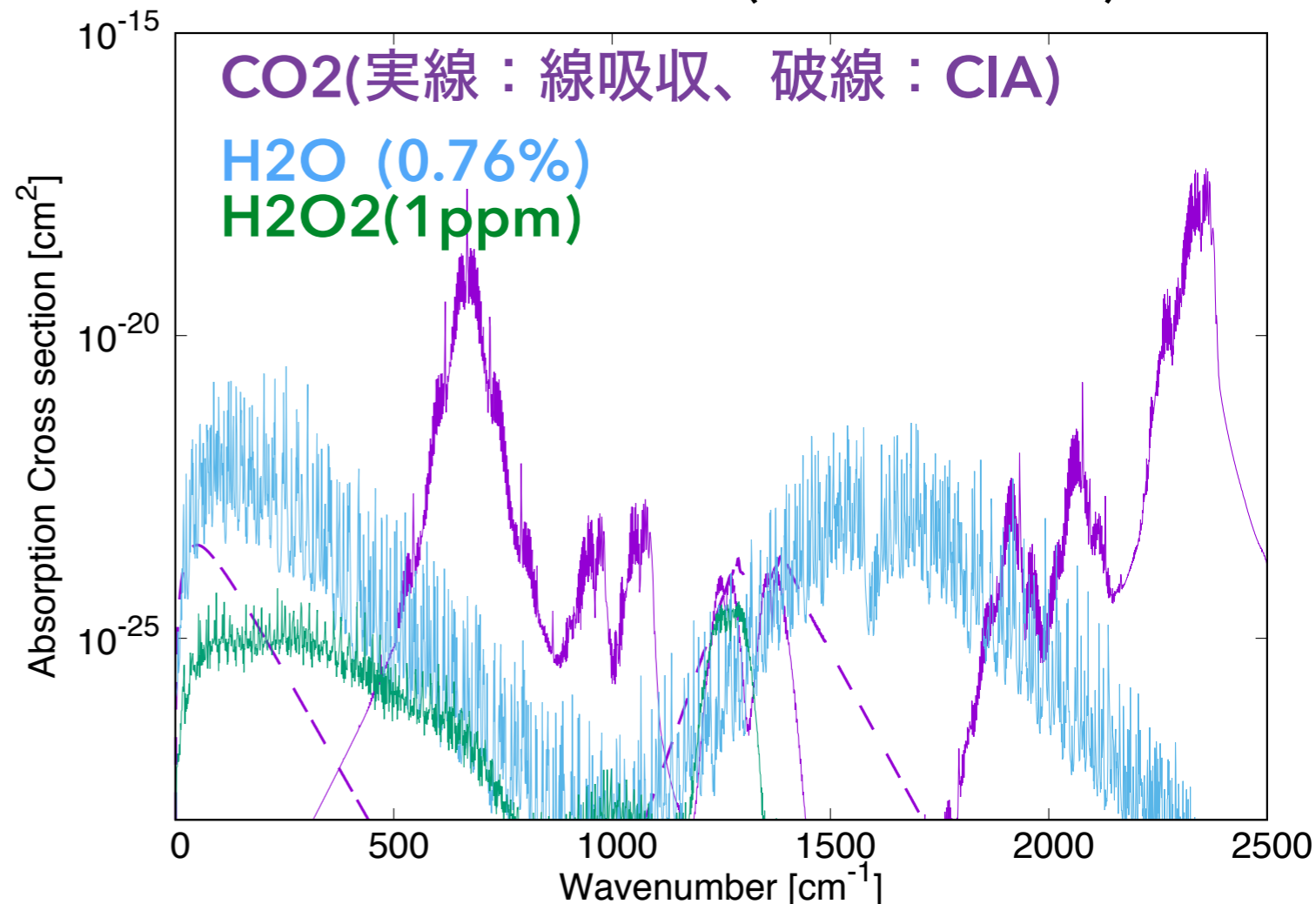
- 吸収線データ

HITRAN 2012

- Validation

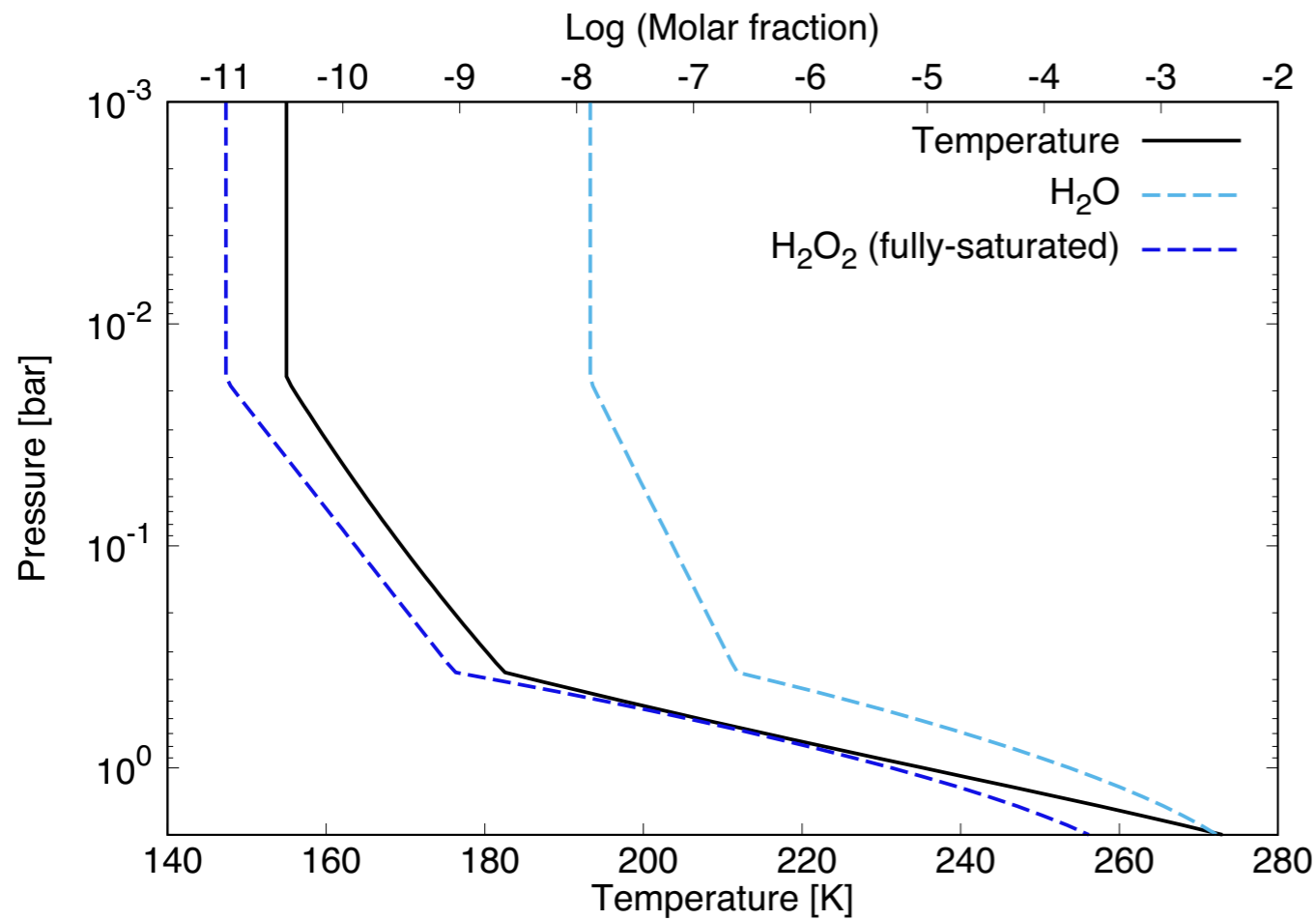
放射対流モデル Ramirez (2017) の
惑星放射量を1%以内で再現

吸収断面積 (1bar/250K)

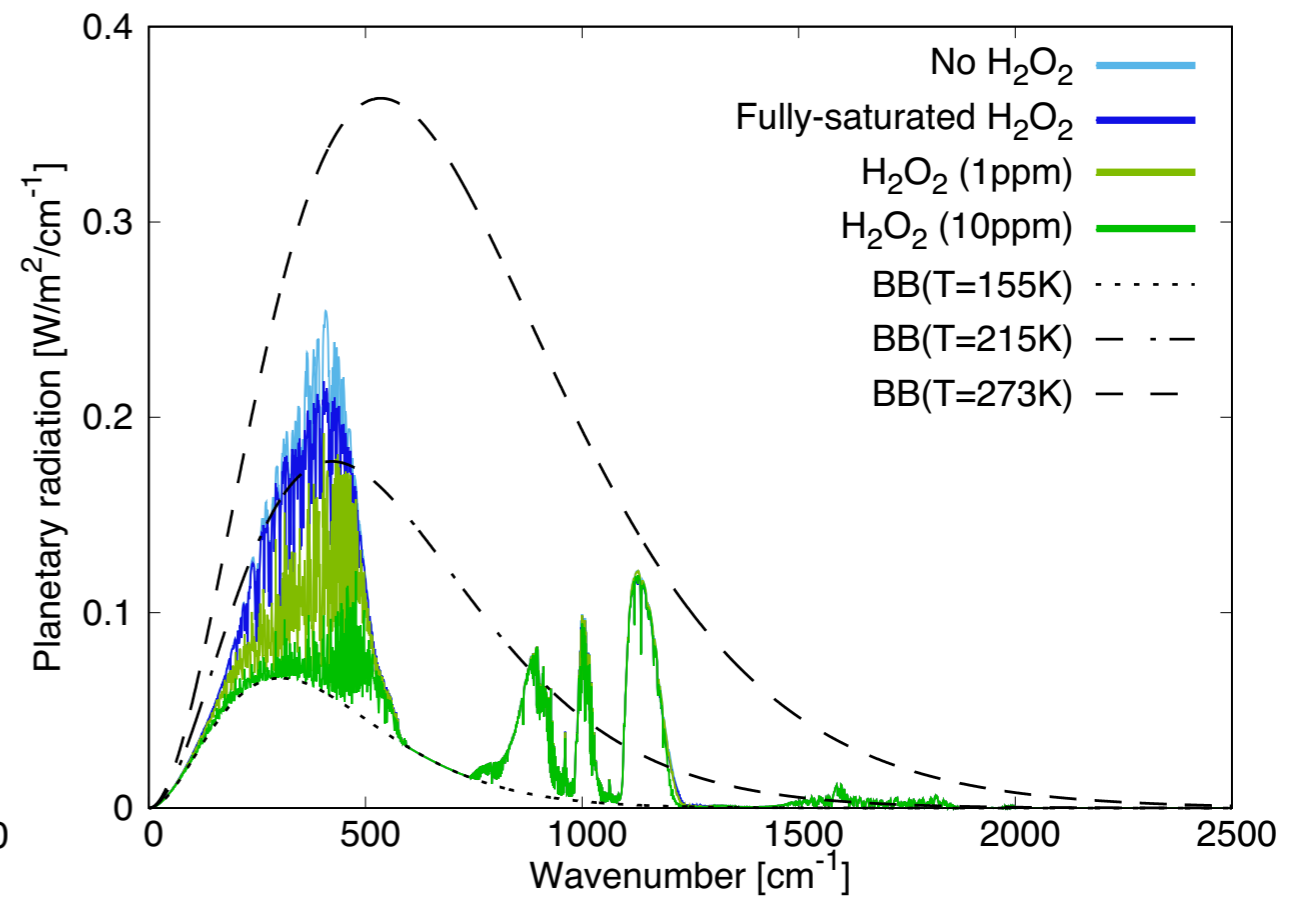


結果：H₂O₂の温室効果

大気構造 (P=2bar, T_s=273K)



H₂O₂増加に伴う惑星放射減衰

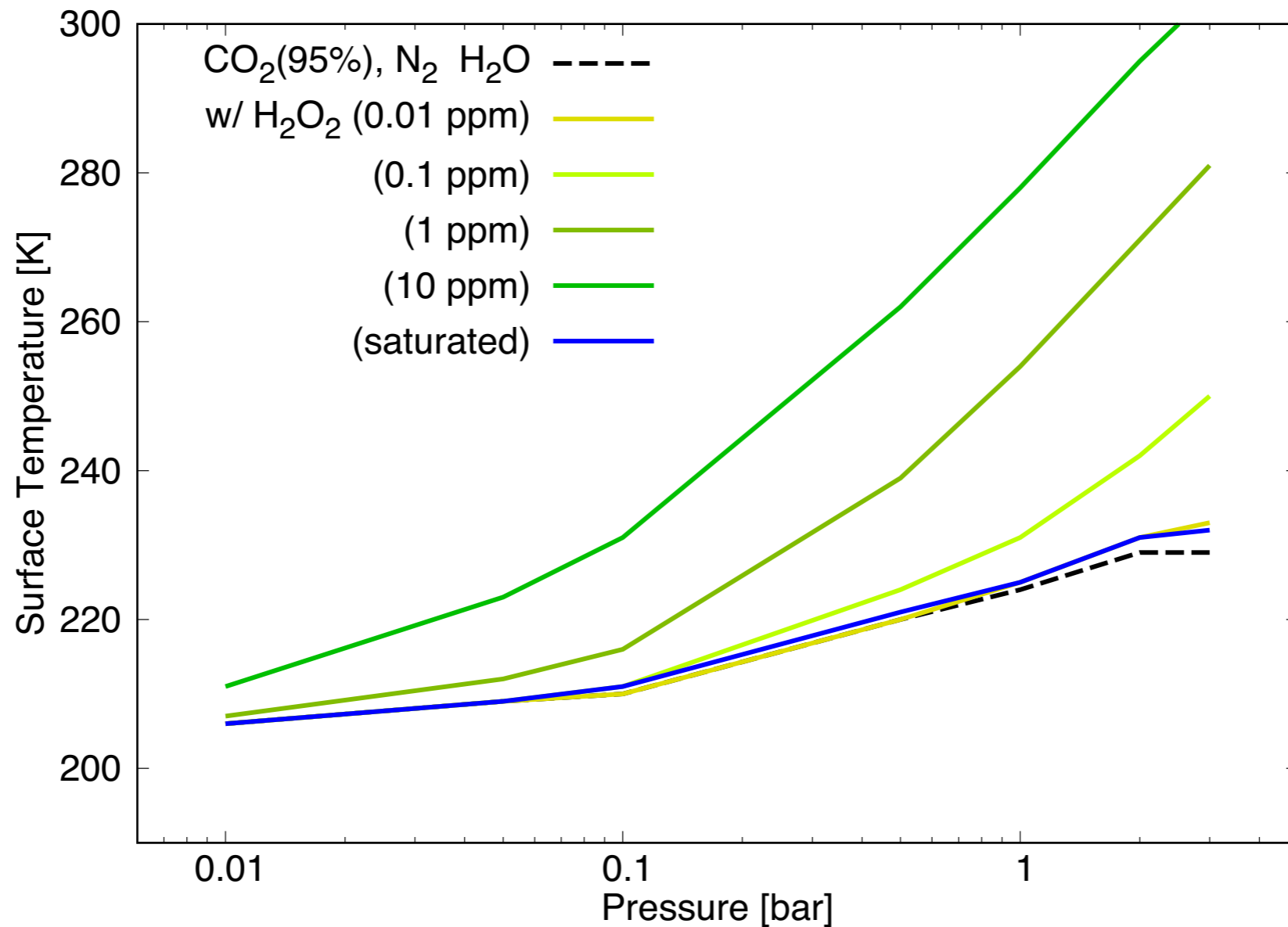


惑星放射は**87.6W/m²**から、

84.2W/m² (飽和), **68.8 W/m²**(1ppm), **56.5W/m²** (10ppm) へと減衰

結果：H₂O₂による表面温度増加

古火星の大気圧と表面温度の平衡解



飽和条件：~3Kしか表面温度増加させない

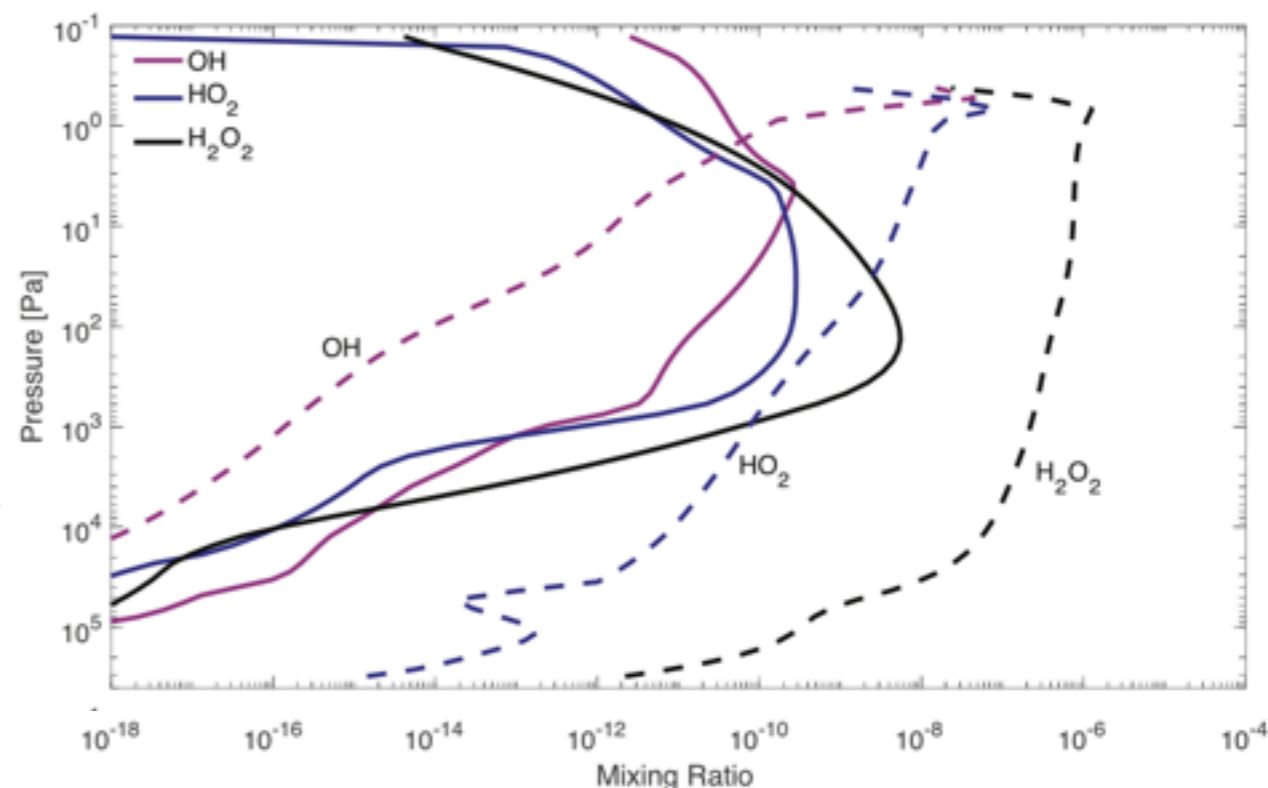
高度一定濃度（上層過飽和）：表面温度>273K (>1 ppm)

議論：酸化/温暖な大気での多量なH₂O₂生成の可能性1

CO₂量：0.01 bar (実線)、0.1 bar (破線)

最近の光化学計算(Hu et al. 2020)
M型星周りのハビタブル惑星が持つ
CO₂大気に1ppmレベルのH₂O₂
(同時にCO₂安定化)

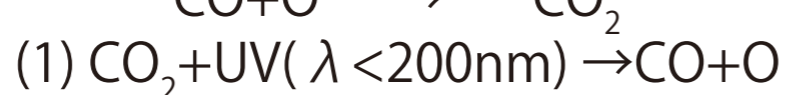
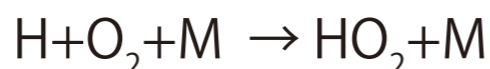
*火星条件で1ppmレベルが示された例なし



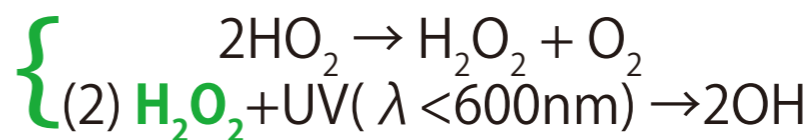
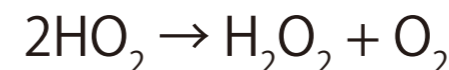
光化学生成 (e.g., Nair et al., 1994, Zahnle et al., 2008, Gao et al., 2015)

火星大気のCO₂安定化システム

現在の火星

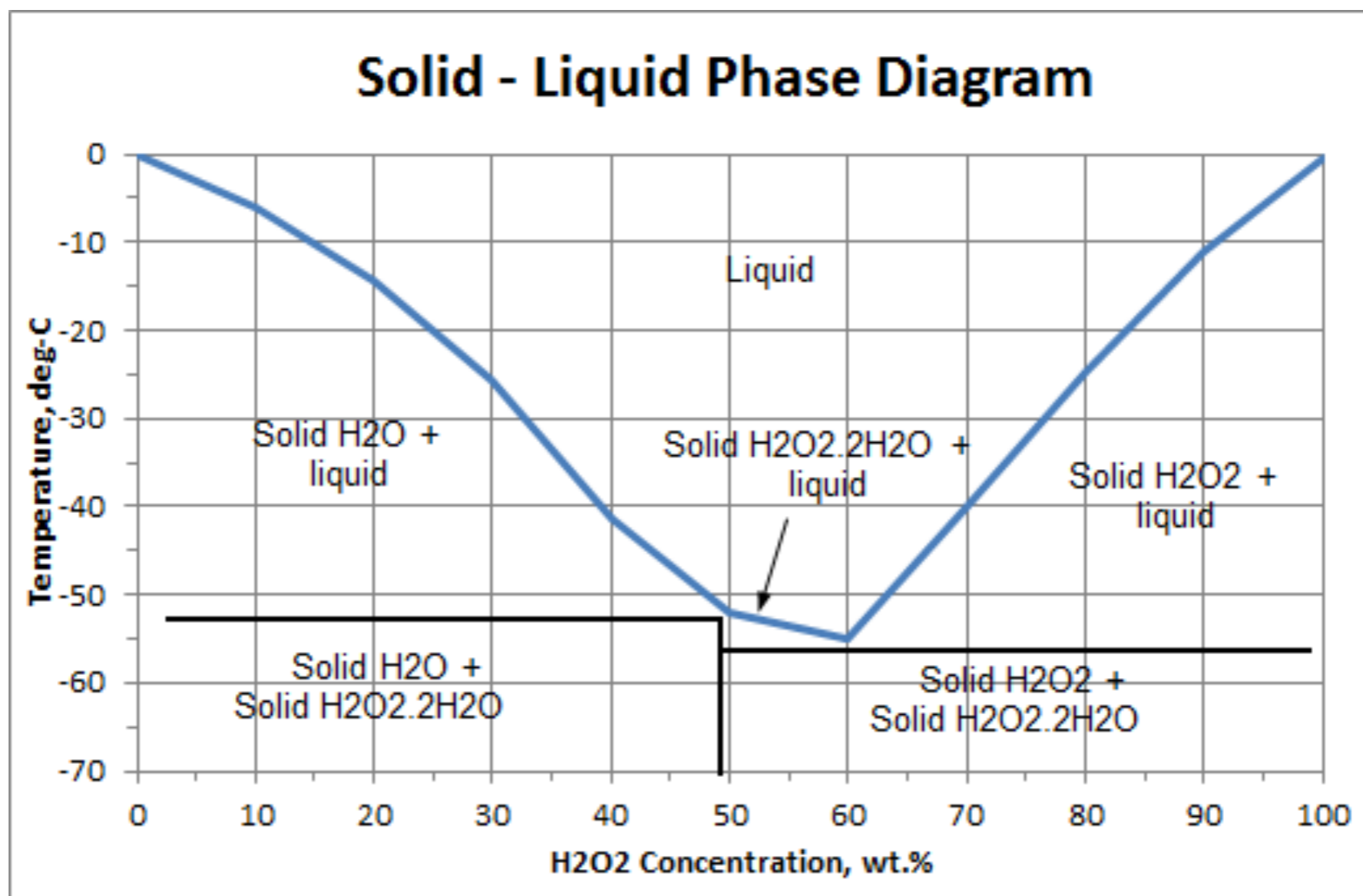


H₂Oが多い(温暖)場合



→ H₂O₂量 ~ 0.1-1 μbar (1 と 2 の釣り合い: 生成 / 消滅時間 ~ 数時間)
~ τ at 500cm⁻¹ > 10 相当の量

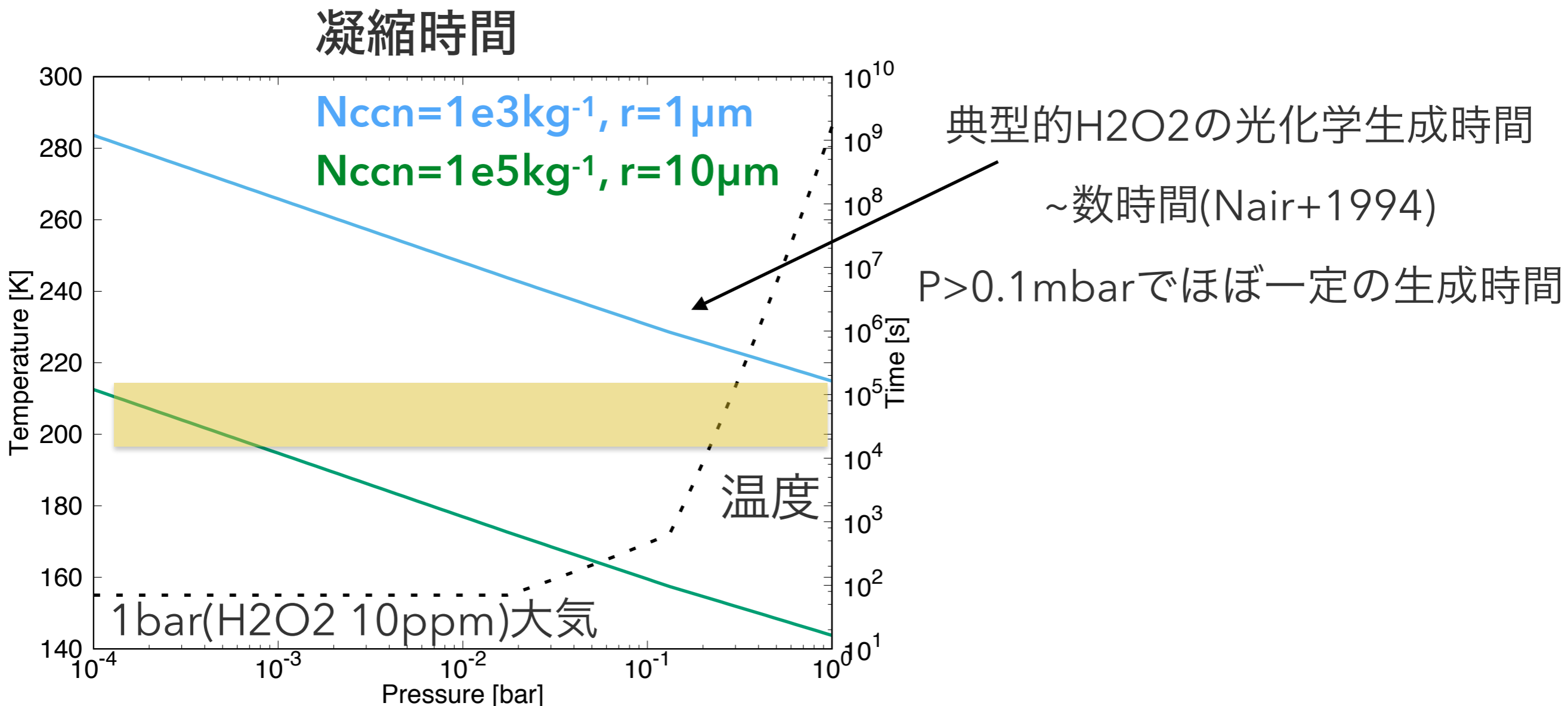
議論：酸化性/温暖な大気での多量なH₂O₂生成の可能性2



(Ref. Peroxyde d'Hydrogene et Polyoxydes d'Hydrogene" Paris, Masson 1975(181 p), <http://www.h2o2.com>)

- 地球では、大気上層での雨粒への溶け込みがH₂O₂の主な除去過程
- 220Kより高温の大気中（下層領域）では、素早く除去されてしまう

議論：酸化性的/温暖な大気での多量なH₂O₂生成の可能性3



凝縮の時間スケール

$$T_{cond} \sim (4\pi r^2 N_{ccn} \rho v_T)^{-1}$$

r ; 核サイズ [m], N_{ccn} ; 凝縮核濃度 [個/kg],
 ρ ; 大気密度 [kg/m³], v_T ; 熱速度 [m/s]

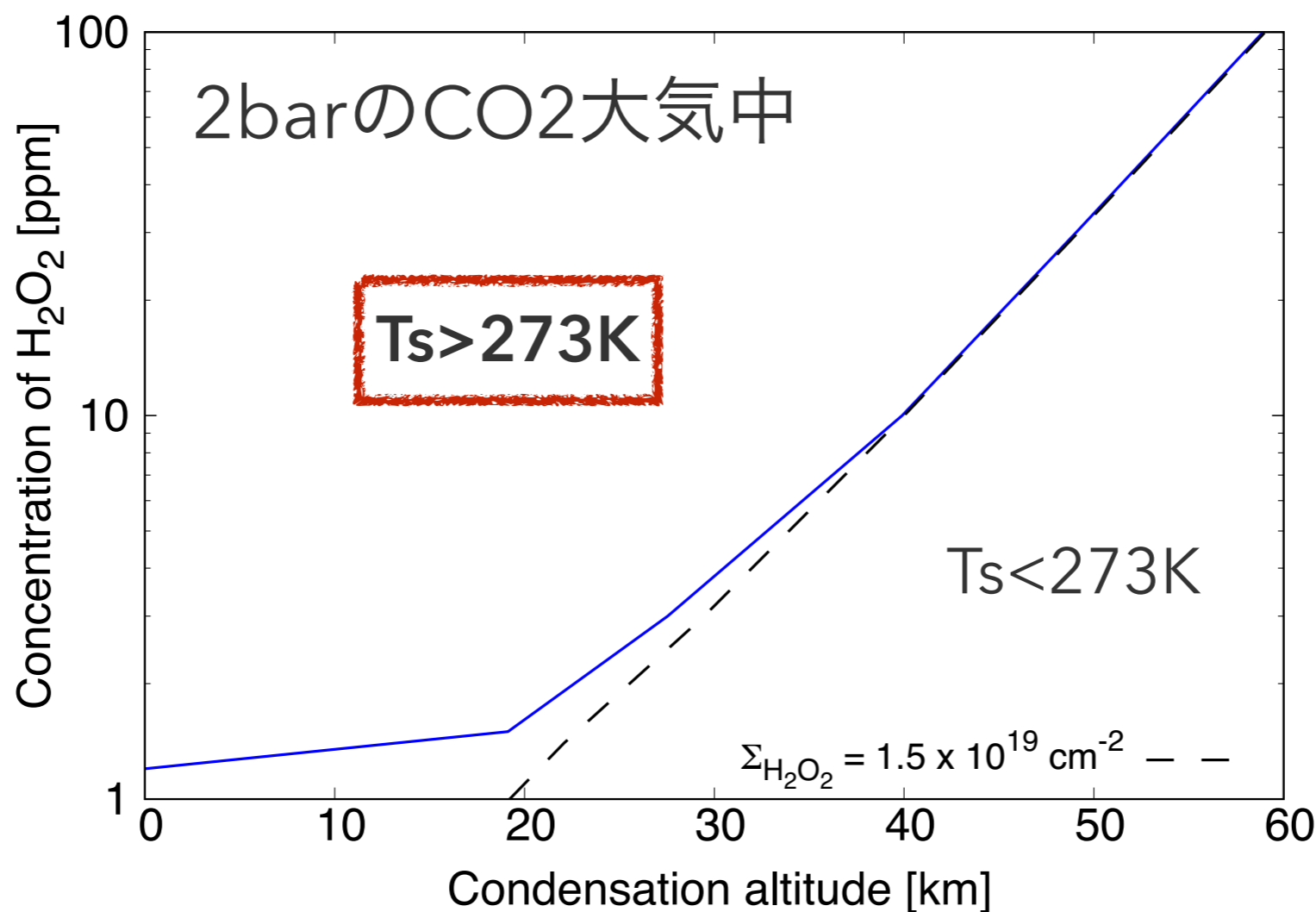
$$\sim 50 \text{ 時間} \left(\frac{N_{ccn}}{10^4 kg^{-1}} \right)^{-1} \left(\frac{P}{0.1 bar} \right)^{-1} \left(\frac{T}{200 K} \right)^{1/2} \left(\frac{r}{1 \mu m} \right)^{-2}$$

→ 凝縮核が少ない・雲粒が小さい場合、過酸化水素が過飽和状態となりうる

議論：大気上層のH₂O₂による温暖化条件まとめ

- ・ 大気上層での過飽和状態：凝縮核が少ない($10^4/\text{kg}$)なら $P < 0.1 \text{ bar}$
- ・ H₂O₂量を減らすもの：SO₂, NO_x；増やすもの：O₃ (i.e., O₂-rich)

温暖化させるH₂O₂の濃度・高度条件

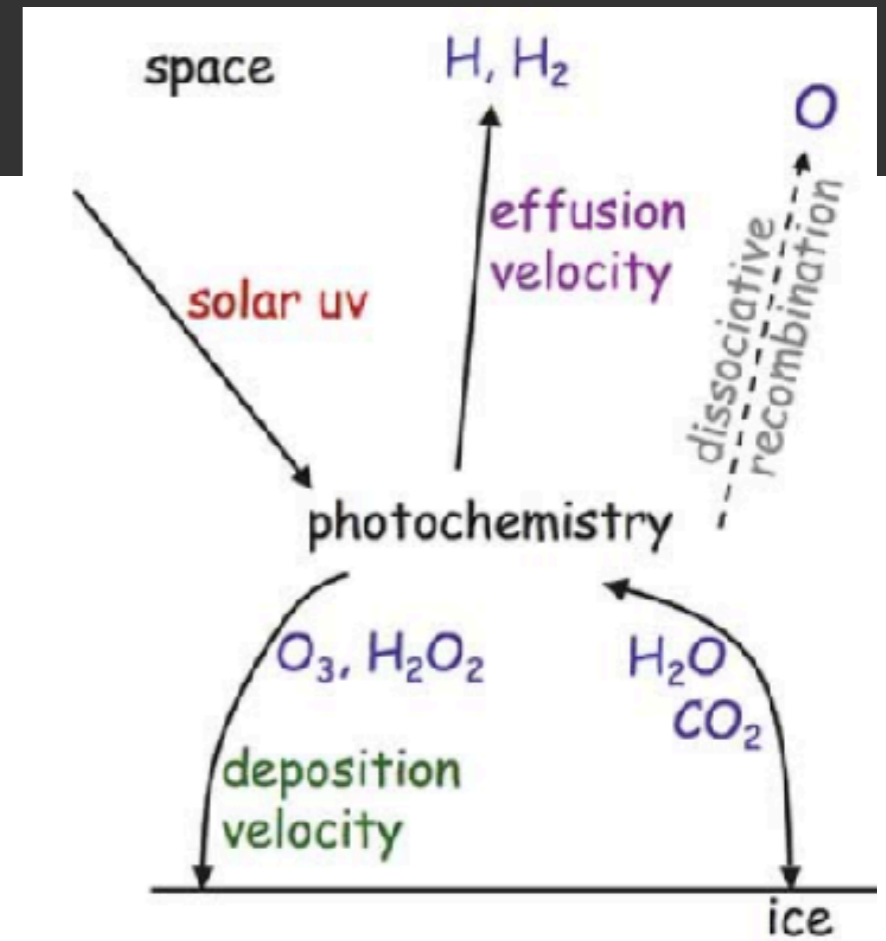


*Condensation altitude: この高度より高高度にのみH₂O₂が存在する高度

課題：酸化的大気環境の形成

持続的な酸化的大気環境

- HやCの散逸
- 酸化的气体の供給/脱(還元)ガス小
- 表面酸化の鈍化



一時的温暖化によるH2O2放出/酸化的大気

- スノーボール状態による表面酸化の鈍化

H₂O iceにH₂O₂は堆積可能(Liang+2005)

(15 ppmのH₂O₂はアルベド0.5であっても $T_s > 273K$ に温暖化)

まとめ

背景：火星における暗い太陽のパラドックス

- ▶ 探査から、古火星は酸化性的/還元的环境を経験したことが示唆
- ▶ 過去の大気モデルでは、酸化的大気による古火星温暖化は未提案

本研究

酸化的成分 H_2O_2 の温室効果に着目

古火星が酸化的大気によって温暖化された可能性を検討

- ▶ 飽和蒸気圧量：温暖化に寄与しない
- ▶ 1ppm以上の濃度：表層温暖(273K)

将来的課題

- ▶ 古火星の酸化的大気形成（過酸化水素が豊富なら温暖化可能）