

# Thermal escape of carbon from the early Martian atmosphere

Tian et al., 2009, Geophys. Res.  
Lett., 36, L02205

東北大学惑星大気研究室

修士1年

古橋尚典

# 論文概要

- 1-D多成分、流体力学的、惑星熱圏-電離圏モデル(GLOWモデル)を使って、早期火星(〜41億年前)におけるCO<sub>2</sub>(炭素原子)の散逸率を調べた。  
[Tian et al., 2008a,2008b]
- その結果、炭素(C)の熱散逸が早期Noachianの時代(41億年前)に非常に効果的であり、濃密なCO<sub>2</sub>大気が維持できず、火星地表面に液体の水が存在できないことを示した
- 中期-後期Noachianの時代(41億年前〜37億年前)では、太陽EUV fluxが十分弱くなり、濃密なCO<sub>2</sub>大気を蓄積することが可能になる  
→従って、この期間、火星は暖かく湿った環境を維持できた

# Introduction

## ○先行研究

- 火星は〜37億年前まで、温暖湿潤な環境であったことが、地形学的・地球化学的な特徴から提案されている。  
[Baker,2001;Jakosky and Phillips,2001;Solomon et al.,2005]
- 火星の全球平均温度が水の凝固点以上の温度を維持するためにはCO<sub>2</sub>大気で1-5barsほどの気圧を要求する  
[Kasting,1991;Forget and Pierrehumbert, 1997]  
→けれども、これが実際に、有効であると、実証されてはない  
[Mischna et al., 2000]
- 火星はその歴史の最初の数千万年の間は、両惑星の環境が安定的に液体の水が存在するという意味で、地球のそれと類似していたと推論されている。2つの惑星の間の相違は、後の時代、火星の固有磁場が消失した後に太陽風との相互作用とそれに関連する非熱的散逸の結果として、起きたと考えられている。  
[Jakosky and Phillips, 2001; McKay and Stoker, 1989]

# Assumption

(1) 熱圏全体を平均質量の変化していく単一流体として扱う。

→ [Kasting and Pollack, 1983] の取り扱いに類似

(2) イオンと中性の大気粒子

## 短期存在種

$O_3$ ,  $HO_2$ ,  $OH$ ,  $H_2^+$ ,  $H_3^+$ ,  $O^+(^2P)$ ,  $O^+(^2D)$ ,  $N_2^+$ ,  $CO^+$ ,  $CO_2^+$ ,  $O_2^+$ ,  $NO^+$ ,  $OH^+$ ,  $N(^2D)$ ,  $O(^1D)$ ,  
 $H_2O_2$ ,  $O_2(^1\Sigma_g)$ ,  $O_2(^1\Delta_g)$

## 長期存在種(exobase速度=ジーンズの流出速度)

$O$ ,  $He$ ,  $H$ ,  $H_2$ ,  $N(^4S)$ ,  $O^+$ ,  $N^+$ ,  $H^+$

## 長期存在種(exobase速度=0)

$O_2$ ,  $N_2$ ,  $CO_2$ ,  $CO$ ,  $NO$ ,  $H_2O$

→ 短期存在種に対して化学平衡(chemical equilibrium) を適用(Appendix 参照)

→ 長期存在種に対して、時間に依存しない拡散方程式を解く

[Schunk and Nagy, 2000]

# Assumption

電荷的には準-中性、化学反応は以下より

現代地球[Roble, 1995; Smithtro and Sojka, 2005a]

金星/火星[Nagy et al., 1983; Barth et al., 1992; Fox and Delgarno, 1979]

外惑星[Yelle, 2004]

+原子炭素の反応[Fox and Sung [2001]]

(3)中性大気の体積加熱率は以下を含めて、計算

[Roble et a., 1987; Roble, 1995]

- ・EUV放射の吸収による加熱
- ・熱的な電子・イオン・中性粒子との衝突加熱
- ・ジュール加熱
- ・光電子による加熱
- ・シューマン-ルンゲ連続体、シューマン-ルンゲバンド、Lyman  $\alpha$
- ・分子熱伝導冷却率
- ・O( $^3P$ )(微細構造からの冷却率)、NO(5.3 $\mu\text{m}$ 放射)、CO<sub>2</sub>(15 $\mu\text{m}$ 放射)、CO(4.7 $\mu\text{m}$ 放射)

# Assumption

(4)イオン化・解離率、イオン化断面積など

→[Solomon and Qian, 2005]、[Fennelly and Torr, 1992]、[Avakyan et al., 1998]、  
[Schunk and Nagy, 2000]、[Yan et a., 1998]

+CO<sub>2</sub> 及び COの電子衝突断面積[Sawada et al.,1972 ]

(5)太陽放射

太陽からのEUV fluxはRibas et al. [2005]の表現(以下の式)を用いて決定

$$F = 29.7 * t^{-1.23} \text{ [ergs cm}^{-2} \text{ s}^{-1}\text{]}$$

→これは、地球地点のfluxなので、計算ではこれを火星地点のfluxに修正して用いている。

→t: 火星形成後の時間(Gyer)

→41億年前で、現代値 × 20

→38億年前で、現代値 × 10

# Assumption

## ○下部境界条件

〜95km、 $\rho, T$ はこの地点で固定

→下層境界気圧:  $P_s = 6\text{mbar}$ (現代火星の大気圧)、1bar、3barとする

## ○上部境界条件

〜exobase

→上部境界がexobaseより低い位置にある場合、上部境界をそれぞれの time step ごとに1/4スケールハイト拡張し、エグゾベースが組み合わされるまで拡張を繰り返す。

①亜音速に制限された風速を適用

→風速=長期存在種のジーンズの散逸速度 × 各種の質量混合比を平均

→この亜音速近似は[Chassefiere, 1996 and Yelle, 2004]の近似に類似

②中性ガス: 温度勾配0

③電子: 下方熱フラックスを固定(全球平均モデルより、 $3 \times 10^9 [\text{eVcm}^{-2}\text{s}^{-1}]$ )

# Equation

## ○流体の方程式

背景ガスの巨視的な性質( $\rho, T, u$ )が得るために、1-D・時間依存・非粘性、流体方程式[Tian et al., 2005a]を解く

$$\begin{aligned} \frac{\partial(\rho r^2)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u r^2)}{\partial r} &= 0, \\ \frac{\partial(\rho u r^2)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u^2 r^2 + p r^2)}{\partial r} &= -\rho G M + 2 p r, \\ \frac{\partial(E r^2)}{\partial t} + \frac{\partial[(E + p) u r^2]}{\partial r} &= -\rho u G M + q r^2 + \frac{\partial}{\partial r} \left( \kappa r^2 \frac{\partial T}{\partial r} \right), \end{aligned} \quad (1)$$

$\rho$ : ガスの質量密度     $r$ : 惑星中心からの距離     $u$ : 背景ガスの速度  
 $p$ : 圧力     $G$ : 万有引力定数     $M$ : 惑星質量  
 $E$ : 合計エネルギー密度(ガスの運動エネルギー密度+内部エネルギー密度)  
 $\kappa$ : 熱伝導率     $T$ : 温度     $\gamma$ : 断熱定数     $R$ : 気体定数  
 $q$ : 体積加熱率

# Equation

実際に解く方程式は、

→連続・運動方程式に対して、 $\partial/\partial t = 0$  (定常状態の近似) として書き直す

→エネルギー方程式は平均分子質量の時間的・空間的な変化を無視できるとして書き直す

$$\frac{1}{\rho} \frac{d\rho}{dr} = -\frac{1}{T} \frac{dT}{dr} + \frac{1}{m} \frac{dm}{dr} - \frac{g}{u_0^2} - \frac{u}{u_0^2} \frac{du}{dr} \quad (2)$$

$$\frac{1}{u} \frac{du}{dr} \left( 1 - \frac{u^2}{u_0^2} \right) = \frac{1}{T} \frac{dT}{dr} - \frac{1}{m} \frac{dm}{dr} + \frac{g}{u_0^2} - \frac{2}{r}. \quad (3)$$

$$\frac{1}{\gamma} \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{1}{\rho C_p} \left[ \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} \left( \kappa r^2 \frac{\partial T}{\partial r} \right) + q \right] - u \left( \frac{\partial T}{\partial r} - \frac{1}{\rho C_p} \frac{\partial p}{\partial r} \right). \quad (4)$$

→ $u_0^2 = kT/m$ ,  $g = GM/r^2$

→最後の項が、断熱冷却の項

# Equation

## ○拡散方程式

中性の長期存在種の濃度を得るために、[Kasting and Pollack, 1983]のように、マイナーな大気粒子の拡散近似を用いる

→マイナー粒子の速度  $u_i$  = 拡散速度 + 平均分子の体積速度  $u$

→この近似は熱圏構造の大きなスケールの計算に対しては十分である

$$u_i - u = -D_i \left[ \frac{1}{n_i} \frac{\partial n_i}{\partial r} - \frac{1}{n} \frac{\partial n}{\partial r} + (1 - m_i/m) \frac{1}{p} \frac{\partial p}{\partial r} + \frac{\alpha_i}{T} \frac{\partial T}{\partial r} \right] - K \left[ \frac{1}{n_i} \frac{\partial n_i}{\partial r} - \frac{1}{n} \frac{\partial n}{\partial r} \right] \quad (5)$$

$$\frac{\partial n_i}{\partial t} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} (r^2 n_i u_i) = P_i - L_i n_i \quad (6)$$

Ci : 質量混合比      Ni : 数密度      Mi : 分子質量      Pi : 生成率  
Li : 損失率      Di : 分子散乱定数      K : エディ散乱定数      Hi : スケールハイト  
 $\alpha_i$  : 熱散乱係数 = -0.25(H), =0.3(H2), =-0.4(He)=0(other)  
[Hunten and Strobel, 1974; Banks and Kockarts, 1973]

# Equation

実際に解く方程式は、(5)と(6)を組み合わせて他ものを使う

$$\frac{\partial C_i}{\partial t} = \frac{m_i P_i}{\rho} - L_i C_i - \frac{1}{\rho r^2} \frac{\partial}{\partial r} \left[ \rho r^2 (K + D_i) \frac{\partial C_i}{\partial r} \right. \\ \left. + \rho r^2 (K + D_i) \frac{1}{m} \frac{\partial m}{\partial r} C_i + \rho r^2 (\tilde{H}_i - u) C_i \right] \quad (7)$$

$$\tilde{H}_i = D_i \left[ (1 - m_i/m) \frac{1}{p} \frac{\partial p}{\partial r} + \frac{\alpha_i}{T} \frac{\partial T}{\partial r} \right]$$

# Equation

## 計算手順

- ①まず、短期存在種の化学平衡を解く
- ②それから、定常状態に対する**三重対角解法**(すなわち、(7)方程式の左辺にある時間微分を無視する)を使って長期存在種に対する散乱方程式を解く
- ③計算された解を0.1倍し、それに古い解を0.9倍したものを足し合わせる  
→ノイズが乗る可能性があるので、情報を薄める
- ④長期存在種の質量混合比の合計を1に直し、平均分子質量を再計算
- ⑤固定された温度の下部境界条件を使って中性ガスと電子に対するエネルギー方程式を解く
- ⑥風速の方程式(3)を解く
- ⑦密度方程式(2)は固定されている下部境界値 $\rho$ から計算
- ⑧タイムステップサイズを、 $T$ と $\rho$ の時間変化に割合に基づいて調整
- ⑨長期存在種の数密度はそれぞれのイタレーションの終わりに計算

# Result(現代環境に対して適応)

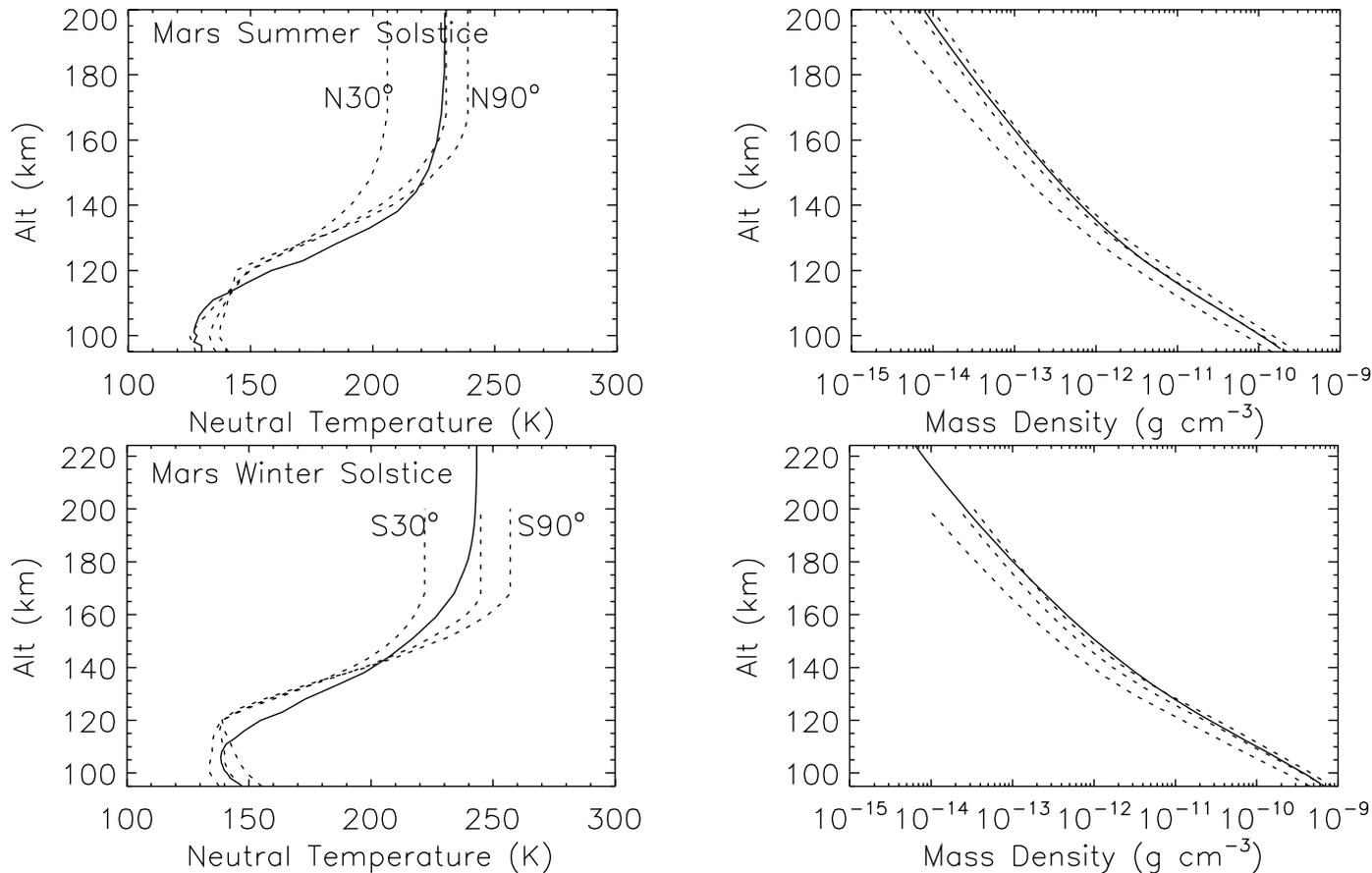


図2.モデルと観測  
の比較

→夏期最高点(Ls=90)と冬期最高点(Ls=270)の両方の条件下、中緯度域での火星上部大気構造に類似。[Stewart,1987]

→計算モデルの使用は妥当であると言える

# Result(早期火星)

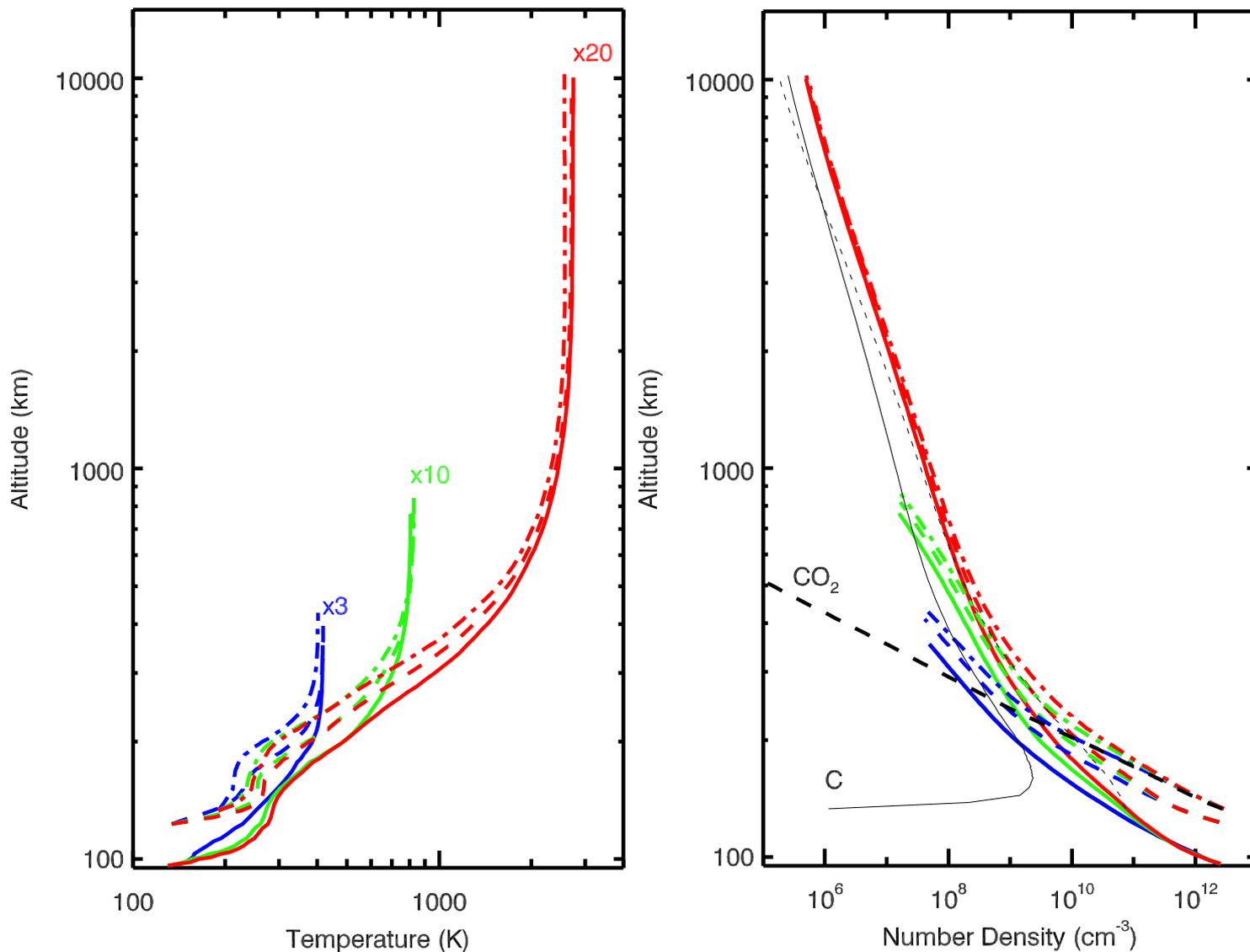


図3.早期火星  
の温度・密度  
プロフィール

# Result(早期火星)

## ○下層境界条件での比較

- solid curveは $P_s = 6\text{mbar}$ (現代火星の表面気圧と同等)と仮定
- dashed curveは $P_s = 1\text{bar}$ の場合
- dot-dashed curveは $P_s = 3\text{bar}$ の場合

→上部熱圏の振る舞いは3つの表面気圧の場合全てで類似

→原理的に、太陽EUV放射が強い = 大気温度が高ければ、 $\text{CO}_2$ は $4.3\mu\text{m}$ 放射を通して、熱圏を冷やす

→しかし、 $\text{CO}_2$ 密度が高い領域(<200km)では、大気は低温のままである

→ $\text{CO}_2$ - $4.3\mu\text{m}$ 赤外冷却はあまり重要でない。これは、先行研究[Smithtro and Sojka, 2005]と一致。

→なので、 $\text{CO}_2$ - $4.3\mu\text{m}$ 放射は計算に含めていないのは妥当である

## ○EUV fluxの違いで比較

・・・下部境界圧力  $P_s = 3\text{bar}$ で固定

青: 現代太陽EUV flux × 3(→Case 1)

緑: × 10(→Case 2)

赤: × 20(→Case 3)

# Discussion

ガスの熱的散逸能力はJeans escape parameter( $\lambda=GMm/kTr$ )によって考える

## Case 1: ~27億年前

- エグゾベース温度は約400K、高度400km程度
- 原子酸素に対して、 $\lambda_0=54$ 、熱的な散逸は起こらない

## Case 2: ~38億年前

- エグゾベース高度は約900kmまで拡張、温度は800Kまで上昇
- 原子酸素に対して、 $\lambda_0=23$ 、に落ちるがまだ、熱的散逸は起きない

## Case 3: ~41億年前

- エグゾベース高度は~10,000kmに達し、温度は2,500K以上
  - 原子炭素に対して、 $\lambda_c=1.8$ 、十分に小さく、素早く散逸
  - 原子酸素に対して、 $\lambda_o=2.4$ 、十分に小さく、素早く散逸
- 火星では、炭素・酸素の熱的な散逸が効果的に起きていた
- 対照的に、地球・金星は強い重力のため、この時代でも、散逸が起きない

# Result(早期火星)

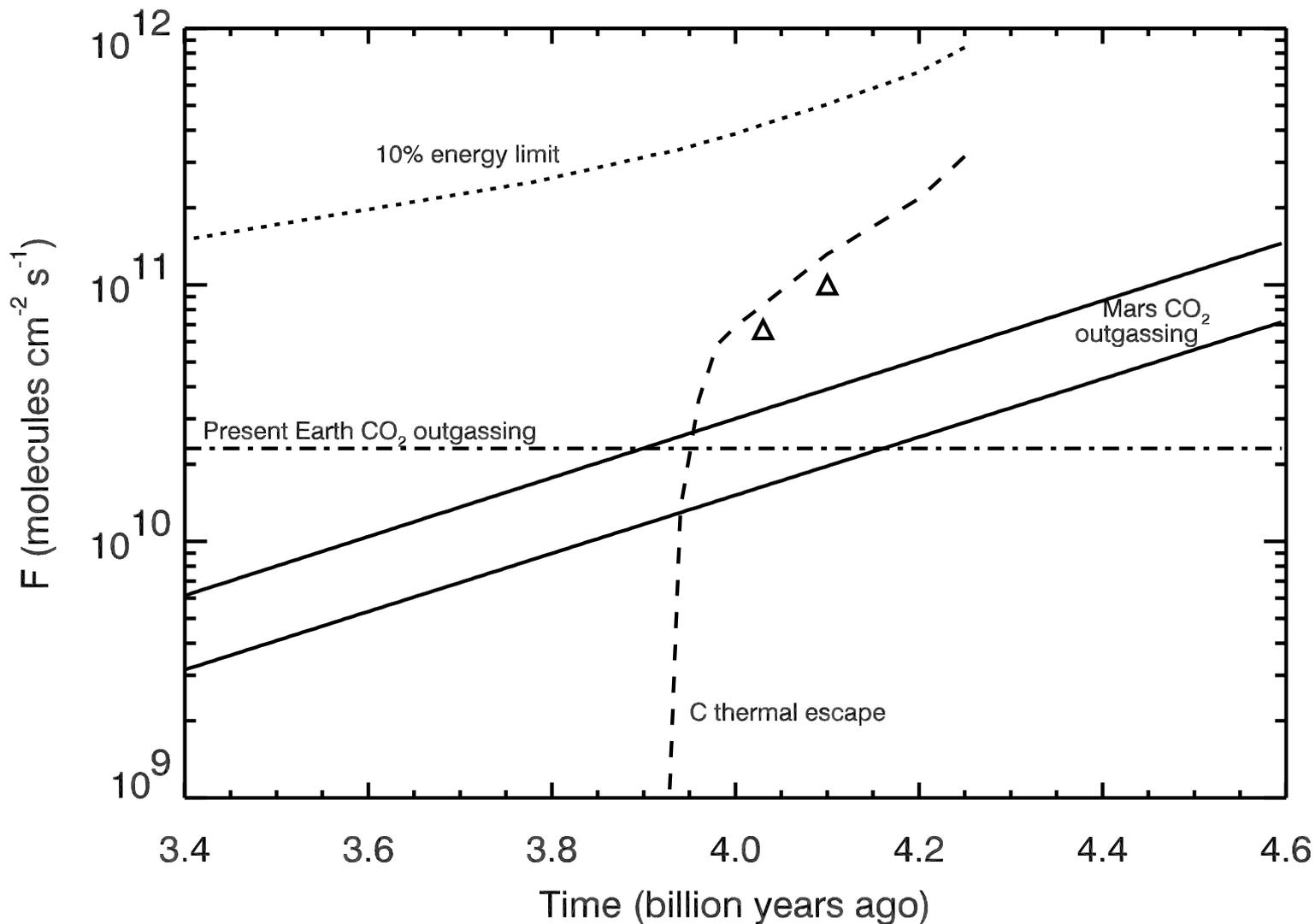


図4. 散逸とアウトガスのシナリオ

# Discussion

モデルを火星の歴史の異なった時期に適用

## ○散逸率の見積もり

- 41億年前(図4のdashed curve)、 $F_c \sim 10^{11} \text{cm}^{-2} \text{s}^{-1}$ 、 $T_c \sim 1000$ 万年
- 45億年前、 $F_c \sim 10^{12} \text{cm}^{-2} \text{s}^{-1}$ 、 $T_c \sim 100$ 万年

$F_c$  : 計算される火星大気からの原子炭素の熱的な散逸flux

$T_c$  : 火星からの1barのCO<sub>2</sub>( $3.7 \times 10^{43}$ 原子炭素)の損失に必要なタイムスケール

→従って、もしCO<sub>2</sub>の火山性アウトガスがなければ、それらの濃密な大気は早期Noachianの間維持されることはできなかった

# Discussion

## ○火星内部のCO<sub>2</sub>蓄積量

- 現代地球と金星の両方がそれらの惑星の表面において約100barのCO<sub>2</sub>を持っているとする。地球における100barのCO<sub>2</sub> =  $\sim 7 \times 10^{45}$ 分子。
- 火星は地球質量の約1/10であり、表面積は1/5、重量は40%ほどである。
- 従って、もし火星が地球と同じ素材から形成されたとすれば、その合計CO<sub>2</sub>蓄積量は $7.5 \times 10^{44}$ [molecules] or 20barsくらいになる。

→これは地形学的特徴に基づく見積もりとも矛盾しない [Carr, 1986]

火星が地球よりも太陽から離れた場所で形成されたため、地球よりも2倍以上豊富な揮発性物質を素材として含有できることを考慮すると、

- 最大で40-bar( $1.5 \times 10^{45}$ 分子)の合計CO<sub>2</sub>量が可能

→もし火星CO<sub>2</sub>の大半が45億年前の時点(惑星形成直後)で大気中にあるとすると、散逸タイムスケールの見積もりから全含有量は4,000万年ほどで損失してしまう

# Discussion

## ○散逸とアウトガスのシナリオ

後期Noachianの間のThasis bulgeの形成を通して、火山活動によって、1.5barのCO<sub>2</sub>が解放されると見積もられている。[Phillips et al., 2001]

もし、火星マグマがより多くの揮発性物質を含むとすれば、3barのCO<sub>2</sub>がThasis systemによって解放されることができたらろう。

図4について、

- solid line(上) : 総CO<sub>2</sub>量40barsとし、Thasis CO<sub>2</sub>量3barsと仮定した場合
- solid line(下) : 総CO<sub>2</sub>量20barsとし、Thasis CO<sub>2</sub>量1.5barsと仮定した場合
- dot-dashed lineは現代地球に対するCO<sub>2</sub>アウトガス率  
[Sleep and Zahnle, 2001]

→その見積もりは約40億年前の火星アウトガスとほぼ同じ

→火星からの炭素原子の損失率は、早期Noachianを通して、CO<sub>2</sub>アウトガス率よりも大きかったため、濃密なCO<sub>2</sub>大気を作られることはなかった。

→それでも、炭素原子の散逸には多少の時間(1barに100~1000万年)がかかるため、濃密なCO<sub>2</sub>大気が41億年以上前の時代でも、短い期間維持されることは可能

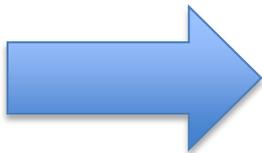
# Conclusion

## ○早期Noachian(〜41億年前)

- 早期火星大気は濃密なCO<sub>2</sub>大気が維持できないため寒冷・乾燥状態のままだったはず
- そのために、相対的に短い火山活動の大きなアウトガス or 衝突イベントが起こる短い期間を除いて、大量のH<sub>2</sub>OとCO<sub>2</sub>は地表面において氷として存在し、宇宙空間への散逸は起こらない

## ○後期Noachian(〜41億年前→37億年前)

- 太陽EUV fluxは早期の極端な値から減少
  - 早期火星からの炭素原子の熱的散逸を弱める
  - 火山活動で解放されるCO<sub>2</sub>により、濃密なCO<sub>2</sub>大気を形成
- 一時的に暖かい気候となり、地表面にトラップされている大量の揮発性物質(0.5-数barsのCO<sub>2</sub>)を解放、大気の温室効果を強める
- 湿潤温暖な火星は、後期Noachianにおいて数千万年の間、維持できた
  - それは、広範囲に及び存在する火星地表面の水による浸食特徴を形成するのに十分な期間である



先行研究と異なり、この論文では、地球と火星はその進化の歴史のかなり早期に異なっていたことが示された。

# Appendix

## ○化学平衡式のリスト

**Table 2.** Chemical Reactions, Reaction Rates, Energy Associated, and the References<sup>a</sup>

No.	Reaction	Reaction Rate, cm <sup>3</sup> s <sup>-1</sup>	Reference
1	N( <sup>4</sup> S) + O <sub>2</sub> = NO + O + 1.40 eV	4.4E-12 exp(-3220/T)	A
2	N( <sup>4</sup> S) + NO = N <sub>2</sub> + O + 2.68 eV	1.6E-10 exp(-460/T)	B
3	N( <sup>2</sup> D) + O = N( <sup>4</sup> S) + O + 2.38 eV	6.90E-13	C
4	N( <sup>2</sup> D) + O <sub>2</sub> = NO + O( <sup>1</sup> D) + 1.84 eV	6.2E-12 × v(T/300) × 0.1	Estimated
5	N( <sup>2</sup> D) + O <sub>2</sub> = NO + O + 3.76 eV	6.2E-12 × v(T/300) × 0.9	Estimated
6	N( <sup>2</sup> D) + NO = N <sub>2</sub> + O + 5.63 eV	7E-11	B
7	N( <sup>2</sup> D) = N( <sup>4</sup> S) + hν	1.06E-05	B
8	O( <sup>1</sup> D) + N <sub>2</sub> = O + N <sub>2</sub> + 1.96 eV	1.8E-11 exp(107/T)	B
9	O( <sup>1</sup> D) = O + hν	8.33E-03	D
10	O( <sup>1</sup> D) + H <sub>2</sub> O = OH + OH + 1.23 eV	2.20E-10	B
11	O + O + M = O <sub>2</sub> + M + 5.10 eV	9.59E-34 exp(480/T) [M]	B
12	O + O <sub>2</sub> + M = O <sub>3</sub> + M + 1.10 eV	6E-34 (300./T) × 2.3 [M]	E
13	O + O <sub>3</sub> = O <sub>2</sub> + O <sub>2</sub> + 4.06 eV	8E-12 exp(-2060/T)	B
14	CO + O + M = CO <sub>2</sub> + M + 5.51 eV	6.6E-33 exp(-1103/T) [M]	B
15	H <sub>2</sub> + O( <sup>1</sup> D) = H + OH + 1.88 eV	1E-10	B
16	H <sub>2</sub> + O = H + OH + 0.08 eV	1.6E-11 exp(-4570/T)	B
17	H <sub>2</sub> + M = H + H + M + -4.52 eV	1.5E-9 exp(-4.8E4/T)	F
18	H + O <sub>2</sub> = O + OH + -0.72 eV	3.7E-10 exp(-8450/T)	G
19	H + O <sub>3</sub> = OH + O <sub>2</sub> + 3.34 eV	1.4E-10 exp(-470/T)	B
20	H + H + M = H <sub>2</sub> + M + 4.52 eV	5.7E-32 (300/T) <sup>1.6</sup> [M]	B
21	H + H <sub>2</sub> O = H <sub>2</sub> + OH + -0.65 eV	1.5E-10 exp(-10,250/T)	G
22	OH + N( <sup>4</sup> S) = NO + H + 2.10 eV	5E-11	B
23	OH + O = H + O <sub>2</sub> + 0.72 eV	2E-11 exp(117/T)	B
24	OH + CO = CO <sub>2</sub> + H + 1.07 eV	1.5E-13 (1. + 0.6 PATM)	E
25	OH + H <sub>2</sub> = H <sub>2</sub> O + H + 0.65 eV	7.7E-12 exp(-2100/T)	B
26	OH + OH = H <sub>2</sub> O + O + 0.73 eV	4.2E-12 exp(-240/T)	B
27	OH + H + M = H <sub>2</sub> O + M + 5.17 eV	6.1E-26 T <sup>-2</sup> [M]	G
28	OH + H = H <sub>2</sub> + O + 0.08 eV	1.4E-14 T exp(-3500/T)	G
29	N <sub>2</sub> <sup>+</sup> + O <sub>2</sub> = O <sub>2</sub> <sup>+</sup> + N <sub>2</sub> + 3.52 eV	5E-11 (300/Ti)	D
30	N <sub>5</sub> <sup>+</sup> + O = NO <sup>+</sup> + N( <sup>2</sup> D) + 0.70 eV	K30	B

# Appendix

31	$N_2^+ + O = O^+ + N_2 + 1.96 \text{ eV}$	K31	D
32	$N_2^+ + NO = NO^+ + N_2 + 6.25 \text{ eV}$	4.1E-10	H
33	$N_2^+ + CO_2 = CO_2^+ + N_2 + 1.81 \text{ eV}$	8E-10	H
34	$N_2^+ + CO = CO^+ + N_2 + 1.57 \text{ eV}$	7.40E-11	I
35	$N^+ + O_2 = O^+ + NO + 1.28 \text{ eV}$	4.60E-10	H
36	$N^+ + O_2 = O_2^+ + N(^2D) + 0.10 \text{ eV}$	$3.07E-10 \times 0.66$	C
37	$N^+ + O_2 = O_2^+ + N(^4S) + 2.49 \text{ eV}$	$3.07E-10 \times 0.33$	C
38	$N^+ + O_2 = NO^+ + O + 6.70 \text{ eV}$	2.32E-10	D
39	$N^+ + O = O^+ + N(^4S) + 0.98 \text{ eV}$	1E-12	B
40	$N^+ + NO = NO^+ + N(^4S) + 5.29 \text{ eV}$	9E-10	J
41	$N^+ + CO_2 = CO_2^+ + N(^4S) + 0.78 \text{ eV}$	9.2E-10	H
42	$N^+ + CO_2 = CO^+ + NO + 1.57 \text{ eV}$	2E-10	H
43	$N^+ + CO = CO^+ + N(^4S) + 0.54 \text{ eV}$	4E-10	J
44	$N^+ + H = H^+ + N(^4S) + 0.90 \text{ eV}$	3.6E-12	C
45	$O_2^+ + N_2 = NO^+ + NO + 0.93 \text{ eV}$	5E-16	D
46	$O_2^+ + N(^4S) = NO^+ + O + 4.21 \text{ eV}$	1.5E-10	H
47	$O_2^+ + NO = NO^+ + O_2 + 2.81 \text{ eV}$	4.4E-10	B
48	$O^+ + NO = NO^+ + O + 4.36 \text{ eV}$	8E-13	H
49	$O^+ + CO_2 = O_2^+ + CO + 1.20 \text{ eV}$	1.1E-09	H
50	$O^+ + H_2 = OH^+ + H + 0.36 \text{ eV}$	2E-09	B
51	$O^+ + H = H^+ + O + 0.02 \text{ eV}$	6E-10	B
52	$O^+ + N_2 = NO^+ + N(^4S) + 1.09 \text{ eV}$	K52	B
53	$O^+ + O_2 = O_2^+ + O + 1.56 \text{ eV}$	K53	B
54	$O^+ + N(^2D) = N^+ + O + 1.45 \text{ eV}$	1.3E-10	B
55	$O^+(^2P) + N_2 = N_2^+ + O + 3.02 \text{ eV}$	4.8E-10	C
56	$O^+(^2P) + N_2 = N^+ + NO + 0.70 \text{ eV}$	1E-10	C
57	$O^+(^2P) + O = O^+ + O + 5.20 \text{ eV}$	5.2E-11	C
58	$O^+(^2P) = O^+ + h\nu$	0.047	C
59	$O^+(^2P) = O^+(^2D) + h\nu$	0.171	C
60	$O^+(^2D) + N_2 = O^+ + N_2 + 3.31 \text{ eV}$	8E-10	C

# Appendix

61	$O^+(^4D) + N_2 = N_2^+ + O + 1.33 \text{ eV}$	1E-10	C
62	$O^+(^2D) + O = O^+ + O + 3.31 \text{ eV}$	1E-11	C
63	$O^+(^2D) + O_2 = O_2^+ + O + 4.87 \text{ eV}$	7E-10	C
64	$O^+(^2D) = O^+ + h\nu$	7.7E-05	C
65	$H_2^+ + O = OH^+ + H + 2.17 \text{ eV}$	1.5E-09	K
66	$H_2^+ + H_2 = H_3^+ + H + 1.70 \text{ eV}$	2E-09	F
67	$H_2^+ + H = H^+ + H_2 + 1.83 \text{ eV}$	6.4E-10	F
68	$H^+ + O = O^+ + H + -0.02 \text{ eV}$	K68	B
69	$H^+ + NO = NO^+ + H + 4.34 \text{ eV}$	1.9E-09	J
70	$H^+ + H_2 = H_2^+ + H + -1.83 \text{ eV}$	1E-9 exp(-2.19E4/T)	F
71	$H_3^+ + H = H_2^+ + H_2 + -1.70 \text{ eV}$	2E-09	Estimated in F
72	$CO_2^+ + O = O_2^+ + CO + 1.33 \text{ eV}$	1.6E-10	I
73	$CO_2^+ + O = O^+ + CO_2 + 0.13 \text{ eV}$	1E-10	I
74	$CO_2^+ + NO = NO^+ + CO_2 + 4.51 \text{ eV}$	1.2E-10	I
75	$CO_2^+ + H = H^+ + CO_2 + 0.17 \text{ eV}$	1E-10	J
76	$CO^+ + O = O^+ + CO + 0.39 \text{ eV}$	1.4E-10	J
77	$CO^+ + NO = NO^+ + CO + 4.75 \text{ eV}$	3.3E-10	J
78	$CO^+ + CO_2 = CO_2^+ + CO + 0.24 \text{ eV}$	1.1E-09	I
79	$N_2^+ + e = N(^4S) + N(^4S) + 5.82 \text{ eV}$	2.2E-7 (300/Te) <sup>0.39</sup> 0.1	D
80	$N_2^+ + e = N(^4S) + N(^4D) + 3.44 \text{ eV}$	2.2E-7 (300/Te) <sup>0.39</sup> 0.9	D
81	$N^+ + e = N(^4S) + h\nu$	3.6e-12 (250/Te) <sup>0.7</sup>	H
82	$O_2^+ + e = O + O + 6.99 \text{ eV}$	k82	D
83	$O_2^+ + e = O + O(^1D) + 5.02 \text{ eV}$	k83	D
84	$O_2^+ + e = O(^1D) + O(^1D) + 3.06 \text{ eV}$	k84	D
85	$O^+ + e = O + h\nu$	3.7e-12 (250/Te) <sup>0.7</sup>	H
86	$NO^+ + e = N(^4S) + O + 2.75 \text{ eV}$	4.2E-7 (300/Te) <sup>0.85</sup> 0.2	B
87	$NO^+ + e = N(^2D) + O + 0.38 \text{ eV}$	4.2E-7 (300/Te) <sup>0.85</sup> 0.8	B
88	$H^+ + e = H + h\nu$	4.2e-7 (300/Te) <sup>0.64</sup>	F
89	$H_2^+ + e = H + H + 10.91 \text{ eV}$	2.4E-8 (300/Te) <sup>0.4</sup>	F
90	$H_3^+ + e = H_2 + H + 9.21 \text{ eV}$	2.9E-8 (300/Te) <sup>0.65</sup>	F

# Appendix

91	$\text{H}_3^+ + e = \text{H} + \text{H} + \text{H} + 4.69 \text{ eV}$	$8.6\text{E-}8 (300/\text{Te})^{0.65}$	F
92	$\text{OH}^+ + e = \text{O} + \text{H} + 8.74 \text{ eV}$	2E-07	K
93	$\text{CO}_2^+ + e = \text{CO} + \text{O} + 4.56 \text{ eV}$	1.4E-4/Te	L
94	$\text{N}(2\text{D}) + e = \text{N}(^4\text{S}) + e + 2.38 \text{ eV}$	$5.5\text{E-}10 (300/\text{Te})^{0.5}$	C
95	$\text{O}^+(^2\text{P}) + e = \text{O}^+ + e + 5.00 \text{ eV}$	$4\text{E-}8 (300/\text{Te})^{0.5}$	C
96	$\text{O}^+(^2\text{P}) + e = \text{O}^+(^2\text{D}) + e + 1.69 \text{ eV}$	$1.5\text{E-}7 (300/\text{Te})^{0.5}$	C
97	$\text{O}^+(^2\text{D}) + e = \text{O}^+ + e + 3.31 \text{ eV}$	$7.8\text{E-}8 (300/\text{Te})^{0.5}$	C
98	$\text{H} + \text{O}_2 + \text{M} = \text{HO}_2 + \text{M} + 2.11 \text{ eV}$	$5.5\text{E-}32 (300/\text{T})^{1.6*}[\text{M}]$	B
99	$\text{HO}_2 + \text{H} = \text{H}_2\text{O} + \text{O} + 2.34 \text{ eV}$	$8.1\text{E-}11 \times 0.02$	E
100	$\text{HO}_2 + \text{H} = \text{H}_2 + \text{O}_2 + 2.41 \text{ eV}$	$8.1\text{E-}11 \times 0.08$	E
101	$\text{HO}_2 + \text{H} = \text{OH} + \text{OH} + 1.61 \text{ eV}$	$8.1\text{E-}11 \times 0.9$	E
102	$\text{HO}_2 + \text{OH} = \text{H}_2\text{O} + \text{O}_2 + 3.06 \text{ eV}$	$4.8\text{E-}11 \exp(250/\text{T})$	E
103	$\text{OH} + \text{O}_3 = \text{HO}_2 + \text{O}_2 + 1.73 \text{ eV}$	$1.6\text{E-}12 \exp(-940/\text{T})$	E
104	$\text{HO}_2 + \text{O} = \text{OH} + \text{O}_2 + 2.33 \text{ eV}$	$3\text{E-}11 \exp(200/\text{T})$	E
105	$\text{HO}_2 + \text{O}_3 = \text{OH} + \text{O}_2 + \text{O}_2 + 1.23 \text{ eV}$	$1.1\text{E-}14 \exp(-500/\text{T})$	E
106	$\text{HO}_2 + \text{HO}_2 = \text{H}_2\text{O}_2 + \text{O}_2 + 1.71 \text{ eV}$	$2.3\text{E-}13 \exp(600/\text{T})$	E
107	$\text{H}_2\text{O}_2 + \text{OH} = \text{HO}_2 + \text{H}_2\text{O} + 1.35 \text{ eV}$	$2.9\text{E-}12 \exp(-160/\text{T})$	E
108	$\text{H}_2\text{O}_2 + \text{O} = \text{HO}_2 + \text{OH} + 3.44 \text{ eV}$	$1.4\text{E-}12 \exp(-2000./\text{T})$	E
109	$\text{O}(^1\text{D}) + \text{O}_2 = \text{O}_2(^1\Sigma_g) + \text{O} + 0.33 \text{ eV}$	$3.2\text{E-}11 \exp(70/\text{T}) 0.75$	E
110	$\text{O}(^1\text{D}) + \text{O}_2 = \text{O}_2 + \text{O} + 1.96 \text{ eV}$	$3.2\text{E-}11 \exp(70/\text{T}) 0.25$	E
111	$\text{O}(^1\text{D}) + \text{O} = \text{O} + \text{O} + 1.96 \text{ eV}$	8E-12	B
112	$\text{O}(^1\text{D}) + \text{H}_2 = \text{H} + \text{OH} + 1.88 \text{ eV}$	1E-10	B
113	$\text{O}(^1\text{D}) + \text{CO}_2 = \text{O} + \text{CO}_2 + 1.96 \text{ eV}$	$7.4\text{E-}11 \exp(120/\text{T})$	E
114	$\text{O}(^1\text{D}) + \text{O}_3 = \text{O}_2 + \text{O}_2 + 6.03 \text{ eV}$	1.2E-10	E
115	$\text{O}(^1\text{D}) + \text{O}_3 = \text{O}_2 + \text{O} + \text{O} + 0.87 \text{ eV}$	1.2E-10	E
116	$\text{N}(^2\text{D}) + \text{CO}_2 = \text{NO} + \text{CO} + 3.41 \text{ eV}$	3.5E-13	M
117	$\text{N}(^2\text{D}) + \text{N}_2 = \text{N}(4\text{S}) + \text{N}_2 + 2.38 \text{ eV}$	1.7E-14	M
118	$\text{O}_2(^1\Sigma_g) + \text{N}_2 = \text{O}_2(^1\Delta_g) + \text{N}_2 + 0.65 \text{ eV}$	2.1E-15	E
119	$\text{O}_2(^1\Sigma_g) + \text{CO}_2 = \text{O}_2(^1\Delta_g) + \text{CO}_2 + 0.65 \text{ eV}$	4.2E-13	E
120	$\text{O}_2(^1\Sigma_g) + \text{O}_3 = \text{O}_2(^1\Delta_g) + \text{O}_3 + 0.65 \text{ eV}$	2.2E-11	E

# Appendix

121	$O_2(^1\Sigma_g) + O = O_2(^1\Delta_g) + O + 0.65 \text{ eV}$	8E-14	E
122	$O_2(^1\Sigma_g) + O_2 = O_2(^1\Delta_g) + O_2 + 0.65 \text{ eV}$	3.9E-17	E
123	$O_2(^1\Delta_g) + O_2 = O_2 + O_2 + 0.98 \text{ eV}$	$3.6E-18 \exp(-220/T)$	E
124	$O_2(^1\Delta_g) + N_2 = O_2 + N_2 + 0.98 \text{ eV}$	1E-20	E
125	$O_2(^1\Delta_g) + O = O_2 + O + 0.98 \text{ eV}$	1.3E-16	E
126	$O_2(^1\Delta_g) = O_2 + h\nu$	$2.58E-4 \text{ s}^{-1}$	B
127	$O_2(^1\Sigma_g) = O_2 + h\nu$	$0.085 \text{ s}^{-1}$	B
128	$N_2 + h\nu = N(^4S) + N(^2D)$		
129	$O_2 + h\nu = O + O(^1D)$		
130	$O_2 + h\nu = O + O$		
131	$O_3 + h\nu = O_2 + O(^1D)$		
132	$O_3 + h\nu = O_2 + O$		
133	$NO + h\nu = N(^4S) + O$		
134	$CO_2 + h\nu = CO + O$		
135	$CO_2 + h\nu = CO + O(^1D)$		
136	$H_2O + h\nu = H + OH$		
137	$H_2O + h\nu = H_2 + O$		
138	$H_2O_2 + h\nu = OH + OH$		
139	$O_3 + h\nu = O_2(^1\Delta_g) + O(^1D)$		
140	$N_2 + h\nu = N_2^+ + e$		
141	$N_2 + h\nu = N^+ + N(^4S) + e$		
142	$N_2 + h\nu = N^+ + N(^2D) + e$		
143	$N(^4S) + h\nu = N^+ + E$		
144	$O_2 + h\nu = O_2^+ + E$		
145	$O_2 + h\nu = O^+ + O + e$		
146	$O_2 + h\nu = O^+(^2P) + O + e$		
147	$O_2 + h\nu = O^+(^2D) + O + e$		
148	$O + h\nu = O^+ + E$		
149	$O + h\nu = O^+(^2P) + E$		
150	$O + h\nu = O^+(^2D) + E$		
151	$NO + h\nu = NOI + E$		
152	$H_2 + h\nu = H_2^+ + E$		
153	$H_2 + h\nu = H^+ + H + e$		
154	$H + h\nu = H^+ + E$		

# Appendix

- ・先行研究[Tian et al., 2008a]で使用された太陽データ

太陽放射スペクトルは0.5nm〜400nmを使用

[<105nm](X線とEUV)は低解像度EUVACモデル[Solomon and Qian, 2005]から

[105-175nm]の波長は[Woods and Rottman, 2002]から

[175-400nm]の波長は[Rottman et al., 1986]から

太陽活動の指標(solar proxy)は[Richards et al., 1994]の表現を使用

- ・・・実際に使用されたデータは次ページ参照

# Appendix

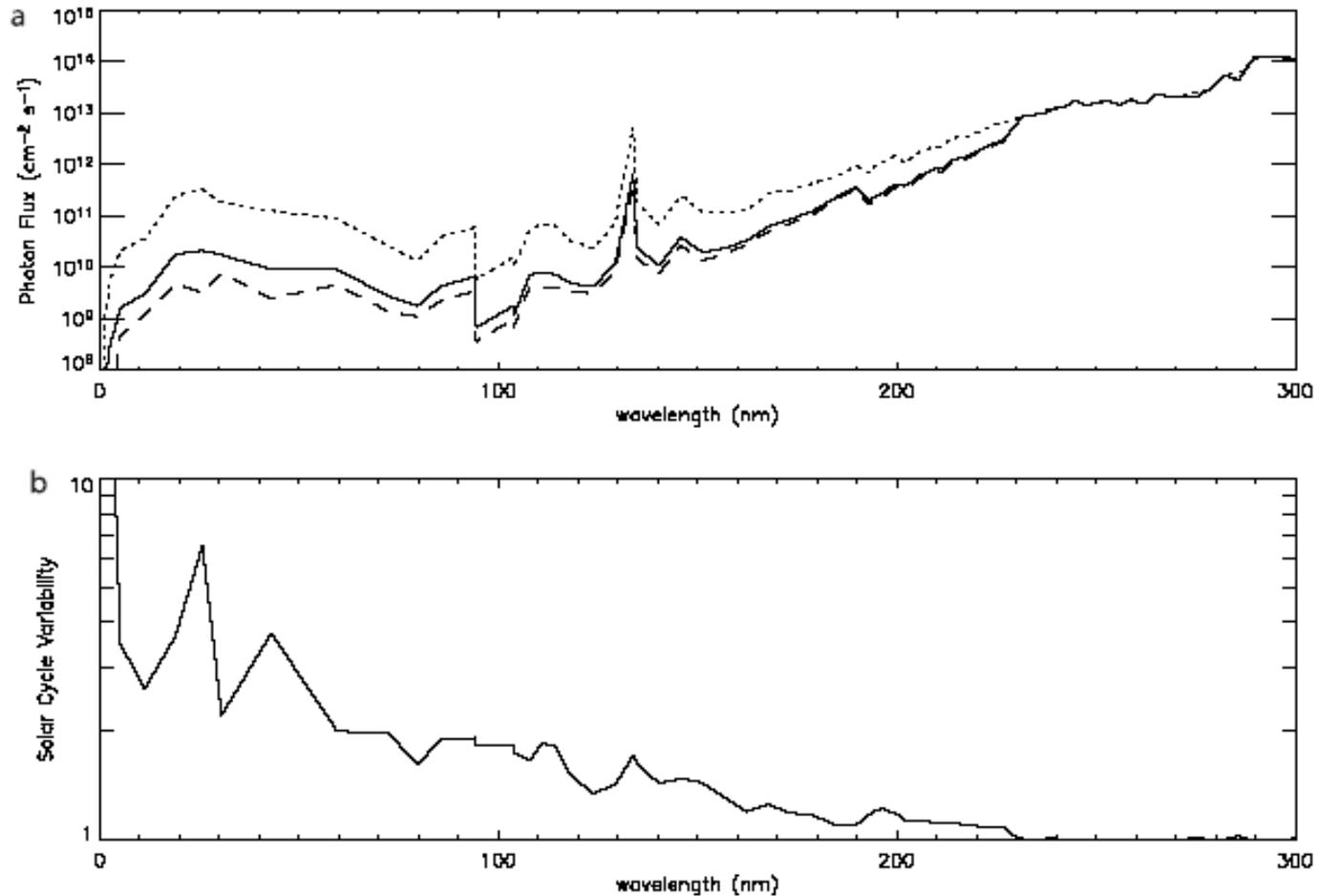


図1aは活動極大期・極小期・現代EUV×20に対する太陽スペクトル  
図1bは太陽サイクルにおける太陽スペクトルの変化