

第37回 火星勉強会 (2014/09/02)

Outgassing History and Escape of the Martian Atmosphere and Water Inventory

Lammer et al. [2013, SSR] の後半

5. The EUV-Powered Blow-Off of the Protoatmosphere and the Change of a Secondary CO₂ Atmosphere by Escape Processes
6. Environmental Effects of the Late Heavy Bombardment
7. Escape and Surface Weathering of the Secondary Atmosphere Since the End of the Noachian
8. Surface Sinks of CO₂ and H₂O
9. Conclusions

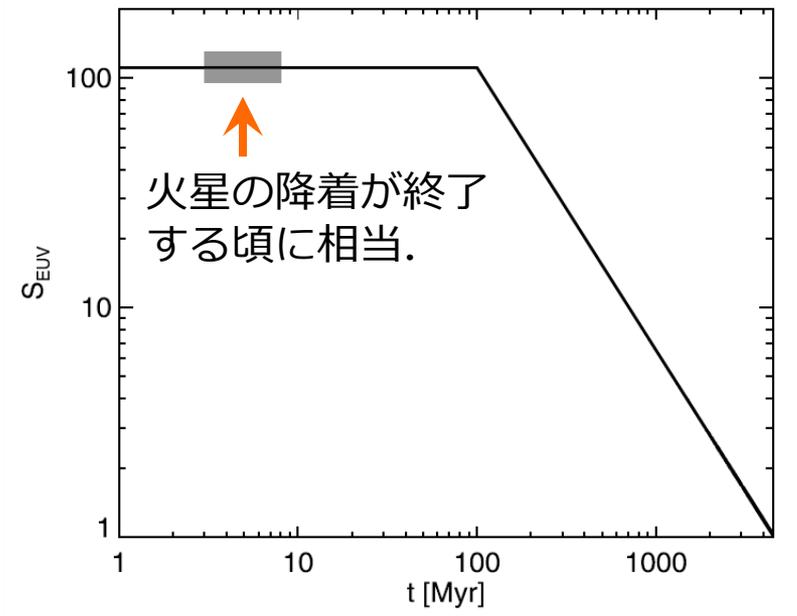
原 拓也 (UCB-SSL).

5. The EUV-Powered Blow-Off of the Protoatmosphere and the Change of a Secondary CO₂ Atmosphere by Escape Processes

- 若い太陽は、明るさとしては現在よりも暗かったが、X線やEUV放射は現在よりもはるかに強かった [e.g., Newkirk, 1980; Güdel+, 1997].
- 1990年代以降からは、上述の傾向を支持する結果が太陽に似た恒星の観測から得られる [e.g., Dorren+, 1995; Ribas+, 2005].
- $\lambda \geq 1000 \text{ \AA}$ の放射は電離、解離、熱圏の加熱に寄与する [Hunten+, 1987; Hunten, 1993].
- 太陽－火星間距離では、初期の火星にとって、X線よりEUV放射の方が熱圏の加熱に重要な役割を果たした。
- 過去のEUV放射強度は、最初の100Myr頃までは現在の太陽の~100倍程度で飽和していたが、それ以降は指数関数的に減衰する[e.g., Ribas+, 2005].

$$S_{\text{EUV}} = \left(\frac{t_{\text{Gyr}}}{t_0} \right)^{-1.23}, \quad (7)$$

t_0 (t_{Gyr}): 現在(過去)の太陽の年齢。



5. The EUV-Powered Blow-Off of the Protoatmosphere and the Change of a Secondary CO₂ Atmosphere by Escape Processes

- 他の惑星胚子(planetary embryo)との衝突/合体がなければ、火星は太陽系が誕生してから 2~4 Myr 以内にほとんど完成したはず [Dauphas and Pourmand, 2011; Brasser, 2012].
(↑ 惑星胚子の平均寿命が約3Myrであることに合致する.)
- 惑星雲(planetary nebula)の寿命が<10Myrなため[e.g., Lunine+, 2011], 星雲起源の水素が主成分の火星原始大気は、最初の数十~150Myrの間に、現在の太陽の約50~100倍程度強いEUV放射に曝されていた [e.g., Ribas+, 2005; Claire+, 2012].
- 過激なEUV放射条件下では、熱圏のH₂, H₂O, CO₂の分子大気は原子に解離し、水素原子が主に上層部を占める。
- 外圏底(exobase)高度が、EUV放射強度が現在よりも数倍程度高いだけで、惑星の数倍程度まで膨張する [Watson+, 1981; Kasting and Pollack, 1983; Tian+, 2005].
→ EUV加熱によって原始大気が宇宙空間へと**流体力学的散逸**する (blow-off).



5. The EUV-Powered Blow-Off of the Protoatmosphere and the Change of a Secondary CO₂ Atmosphere by Escape Processes

- Energy-limited方程式から求めたBlow-off formula:

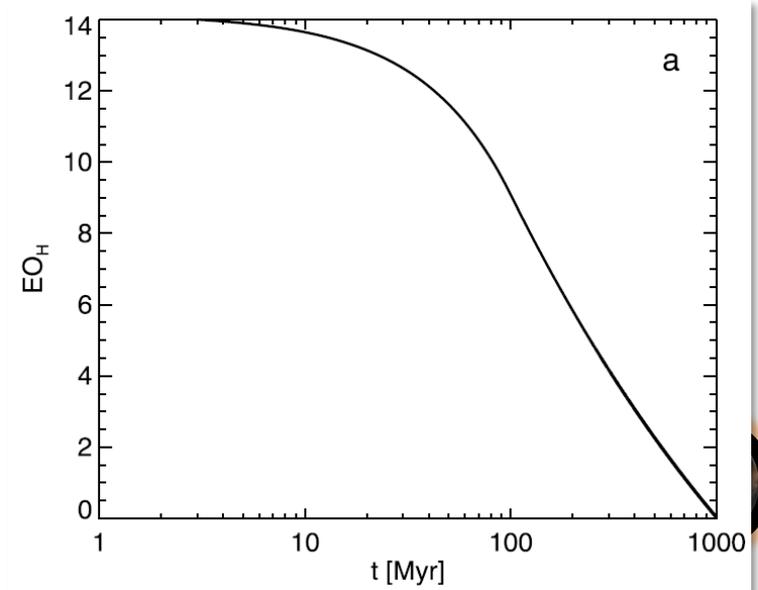
[Hunten+, 1987; Hunten, 1993]

$$\underbrace{\frac{dM_{\text{esc}}}{dt}}_{\text{大気流出による質量損失率}} = \frac{3\eta \overset{\text{EUV放射による加熱効率}}{S_{\text{EUV}}} \overset{\text{現在の太陽のEUV放射強度}}{F_{\text{EUV}}}}{4 \underset{\text{万有引力定数}}{G} \overset{\text{惑星の平均質量密度}}{\rho_p l}}, \quad (8)$$

- $\eta \sim 15\text{--}40\%$ が使われることが多い

[Chassefière, 1996; Lammer+, 2009; Koskinen+, 2012].

- $\eta=40\%$ の場合, 最大で14EOHに相当する水素が, 最初の1Gyrの間に, 流体力学的散逸する(Figure 8a).
- η を更に高い値にすれば $\sim 30\text{EOH}$ に達する.



5. The EUV-Powered Blow-Off of the Protoatmosphere and the Change of a Secondary CO₂ Atmosphere by Escape Processes

- **流体力学的散逸は**, 軽い(水素)原子が引きずり出すことによって, (酸素, 炭素等の)**重い原子を宇宙空間に散逸させることができる**.
- 重い原子の流体力学的散逸による流出フラックス F_{heavy} :

[Hunten+, 1987; Chassefière, 1996]

$$F_{\text{heavy}} = \frac{X_{\text{heavy}}}{X_{\text{H}}} F_{\text{H}} \left(\frac{m_c - m_{\text{heavy}}}{m_c - m_{\text{H}}} \right), \quad (9)$$

水素・重原子のモル混合比

水素原子の流出(上向き)フラックス

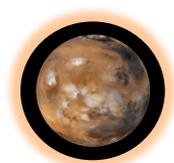
- “Cross over” Mass m_c :

$$m_c = m_{\text{H}} + (kT F_{\text{H}}) / (bg X_{\text{H}}), \quad (10)$$

k : ボルツマン定数, T : 熱圏平均温度, g : 重力加速度,

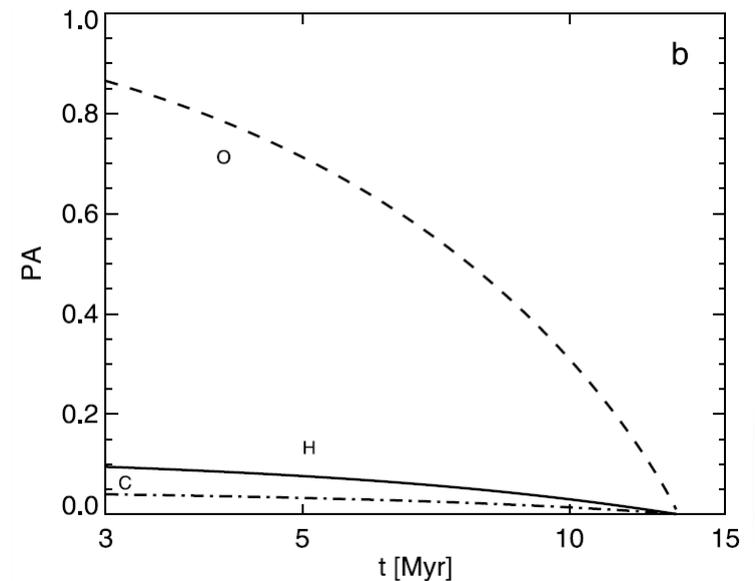
b : 分子拡散パラメータ(水素個数密度×分子拡散係数)

- $m_{\text{heavy}} < m_c$ を満たす質量の粒子種は, 流体力学的散逸によって流出させることができる.



5. The EUV-Powered Blow-Off of the Protoatmosphere and the Change of a Secondary CO₂ Atmosphere by Escape Processes

- T=500Kと仮定した場合 [Zahnle and Kasting, 1986; Chassefière, 1996], 脱ガスによって供給された70barのH₂Oと12barのCO₂を流体力学的散逸によって流出させることができる(Figure 8b).
- 初期に火星が獲得した**原始大気を~10Myrの間に, ほぼ全てを流体力学的散逸によって流出させることができる。**
- 火星が濃いCO₂大気を再び保有することは, Noachian初頭の間は不可能であった。
- MEX/OMEGAの観測で炭酸(carbonates)が検出されないことは, 初期のCO₂大気の大部分は, 表層に固着したのではなく, 宇宙空間に流出したことを示唆している [Bibring+, 2005].
- Noachian後期の2次CO₂大気は, EUV加熱による流体力学的散逸が終わった後, 後期重爆撃期にもたらされた。



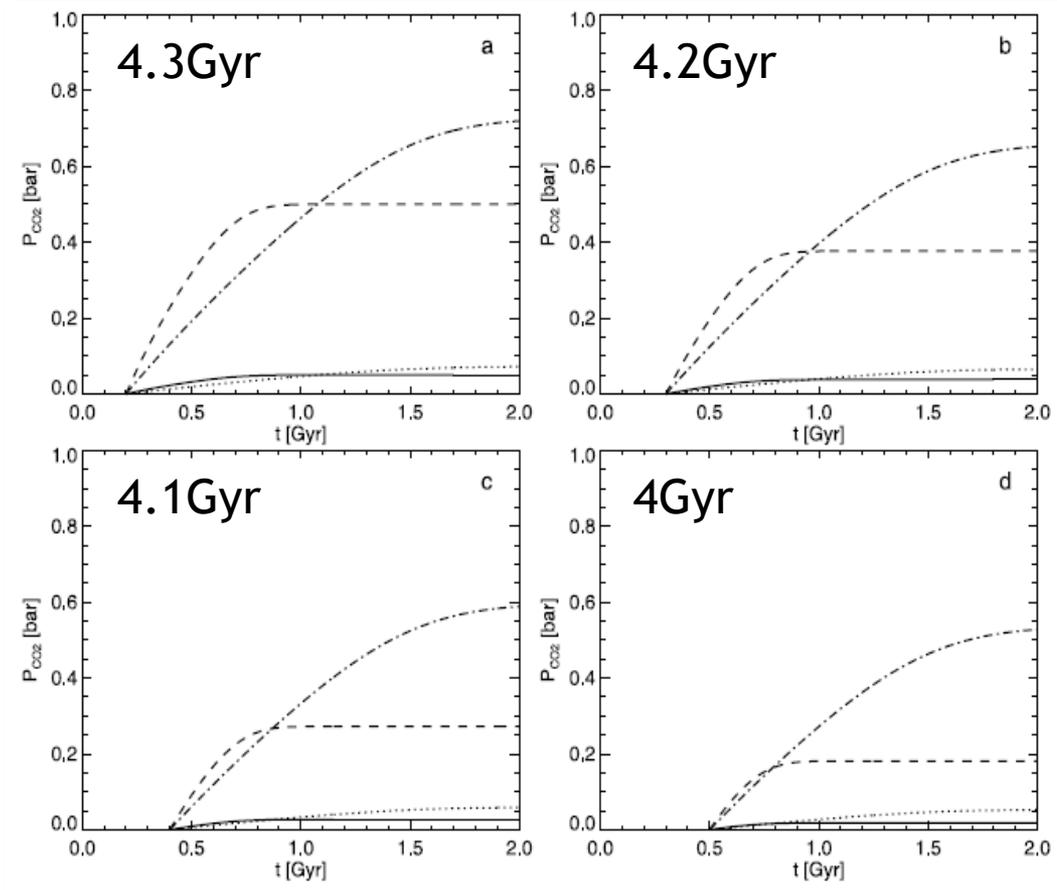
5. The EUV-Powered Blow-Off of the Protoatmosphere and the Change of a Secondary CO₂ Atmosphere by Escape Processes

- Tian+ [2009]の1次元多流体熱圏-電離圏結合モデル:
 - EUV放射強度が現在の太陽よりも10倍以上高いと、CO₂分子は効率よく解離する。
 - 熱圏CO₂分子の赤外冷却作用が弱まり、EUV強度飽和期が終わって以降のCO₂大気が不安定になる。
 - CO₂の解離で生成されたCとOのフラックスは、~4Gyr前で約 10^{11} で、火山活動の脱ガスで供給される量と同程度である。
 - 2次大気を生み出す脱ガス放出率に不確定性がある。
- 次スライド以降に、脱ガスによって供給される2次CO₂大気とH₂Oの量について、脱ガスによる供給量が宇宙空間に散逸量を上回るタイミングごとに示す(Figures 9, 10; Tables 3, 4).

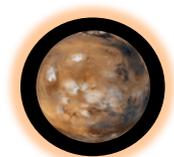


5. The EUV-Powered Blow-Off of the Protoatmosphere and the Change of a Secondary CO₂ Atmosphere by Escape Processes

○ 脱ガスによって供給される2次CO₂大気:

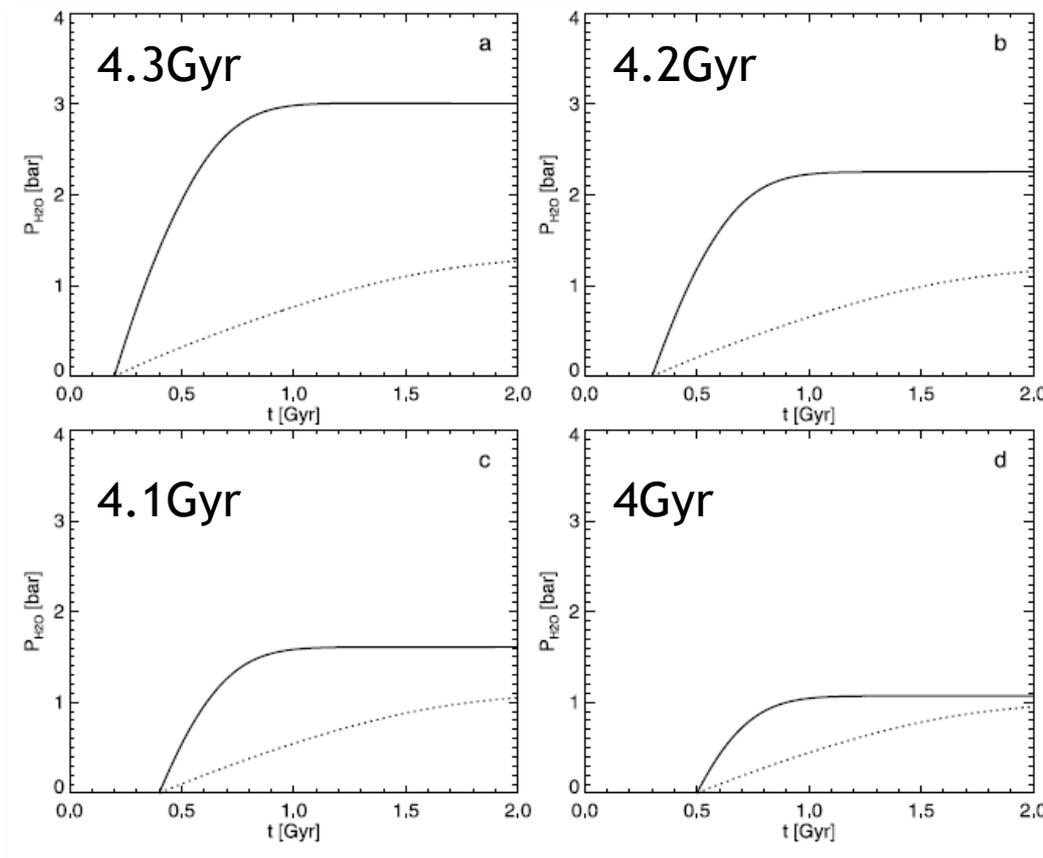


- 最大で、4.3Gyrで0.7bar (現在の火星と比べて100倍高い)、4Gyrで0.5barの2次CO₂大気が形成する。
- 少なく見積もったとしても、~50–100mbarは供給される。

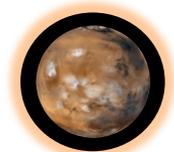


5. The EUV-Powered Blow-Off of the Protoatmosphere and the Change of a Secondary CO₂ Atmosphere by Escape Processes

- 脱ガスによって供給されるH₂O:



- 1–3bar(20–60m EGL相当)程度が供給される。
- これ以外にも、彗星衝突で、数–数十barのH₂Oが、数100mbarのCO₂がNoachian後期まで(あるいは、後期爆撃期中)に供給される可能性がある。
- いずれの場合でも、**現在の火星大気(7mbar)に比べて濃い2次大気が供給されるはず。**



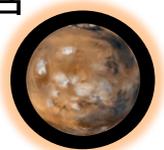
6. Environmental Effects of the Late Heavy Bombardment

- もし天体衝突だけで、現在の7mbarという火星を実現させようとする、初期の大気圧が~0.1–1barであった場合、過去38億年の間に、~8,000–15,000回の臨界質量以上の天体衝突が必要である。
- 天体衝突モデル(exponentially decaying impactor flux model)だと、臨界質量以上の天体衝突回数は、100~500倍少ない。
→ 天体衝突だけで、0.1bar以上の大気を流出させるのは難しい。
- 後期爆撃期(LHB)は38億年前ごろに~50–300Myrという短い期間に多くの天体衝突が起きた時代を指す。
- 天体衝突による大気の剥ぎ取り/持ち込みを考える場合、 $n = m_{\text{crit}} / m_{\text{tan}}$ という比率が重要である(先週のレジюме参照).
 - n が小さければ、流出に寄与する。LHBの0.3Gyrにおいて、150mbar($n=10$), ~400mbar($n\sim 3$), ~1bar($n=1$)を散逸させうる。
 - $n=30$ 以上では、大気を持ち込む方向に作用する。
- Noachianの間に液体の水が流れたという地質学的証拠がある [Baker 2001; Squyres and Knoll] ため、LHB期の天体衝突が、大量の水の持ち込みに寄与した可能性がある [Segura+, 2002; Toon+ 2010].



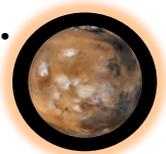
7. Escape and Surface Weathering of the Secondary Atmosphere Since the End of the Noachian

- LHB期を終え, EUV放射強度も低下して以降は, 火星大気を宇宙空間へと散逸させるには, (現在の火星でも起きている)非熱的散逸が主要な役割を担う.
- MEX/ASPERA-3の観測に基づくNoachian以降で, 火星が固有磁場を失ったからのCO₂+の流出量は, ~0.2–4mbarに相当する[Barabash+, 2007].
- 数値実験から推定される, 非熱的散逸過程によるCO₂+の流出総量は, ~0.8–100mbar程度である [e.g., Ma+, 2004; Modolo, 2005; Chassefière+, 2007; Lammer +, 2008; Manning+, 2010].
- しかし, これらのモデルが過去のEUV放射強度が高い条件下での, 火星の熱圏・電離圏をモデル化できてないため, 見積もられる散逸量が過小評価している可能性がある.
- 最近のMEX/ASPERA-3の観測によると, 5–20eV(実際はもっと低い)の低エネルギー電離圏起源イオンが大量に流出している[Lundin+, 2011].
- そのほかには, KH不安定性によって形成された, 電離圏起源イオンを含んだ磁気雲(or flux rope)が, 荷電粒子の形態で宇宙空間に散逸させる非熱的散逸過程として挙げられる[e.g., Wolff+, 1980; Penz+, 2004].



7. Escape and Surface Weathering of the Secondary Atmosphere Since the End of the Noachian

- スパッタリング(モデルによる推定値):
 - 約3.6-4Gyrの時代に(EUV放射強度は3-6倍高い), 光化学反応で生成された非熱的原子と背景に存在する分子との衝突によって引き起こされるスパッタリングによる流出量は, ~50-60mbarに相当する [Leblanc and Johnson, 2002].
 - ピックアップイオンの降り込みで引き起こされる, 過去40億年のスパッタリングによる流出の総量は, 1mbar以下である [e.g., Chassefière, 2007; Chassefière and Leblanc, 2011].
- 光化学反応(+解離的再結合反応)による散逸:
 - 火星の重力は小さいため, 化学反応によって生じた余剰エネルギーが脱出エネルギーを超えていれば, 大気を剥ぎ取ることができる.
 - 過去40億年におけるCO₂流出総量は, 100mbar以下[Tian+, 2009], or 10mbar以下[Chassefière and Leblanc, 2011] 程度と推定される.



7. Escape and Surface Weathering of the Secondary Atmosphere Since the End of the Noachian

Table 5 Estimated min. and max. outgassed (VO: volcanic outgassing) CO₂ in units of bar ~4 Gyr ago and the expected min. and max. range of impact eroded (IE) or delivered (ID) atmosphere during the late heavy bombardment (LHB) period. CO₂ escape of various atmospheric loss processes (IL: ion loss; KH: Kelvin Helmholtz instability triggered ionospheric detached plasma clouds; SP: sputtering; DR: dissociative recombination; PD: photo dissociation) from observations and models integrated since that time

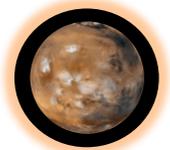
Sources and loss processes	CO ₂ [bar]
供給 { VO ~4 Gyr ago, max. : 火山活動による脱ガス VO ~4 Gyr ago, min. :	~0.2–0.5 bar
	~0.05 bar
ID ~ LHB : 天体衝突による持ち込み/剥ぎ取り IE ~ LHB	~0–0.3 bar
	~0–0.15 bar
散逸 { IL since ~4 Gyr ago } KH since ~4 Gyr ago } 非熱的過程による散逸 SP since ~4 Gyr ago } DR since ~4 Gyr ago } PD since ~4 Gyr ago }	~0.001–0.1 bar
	~0.001 bar
	≤0.001–0.05 bar
	~0.001–0.1 bar
	≤0.005–0.05 bar

- CO₂の流出総量は、過去40億年間で10mbar以下から100mbar程度である。
- **供給された量の方が、宇宙空間に散逸させた量に比べて多いはず。**
 → 現在の火星を実現するには、残りを大気中からなくす必要がある。

8. Surface Sinks of CO₂ and H₂O

8.1 Sequestration of CO₂ in Carbonates

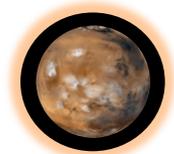
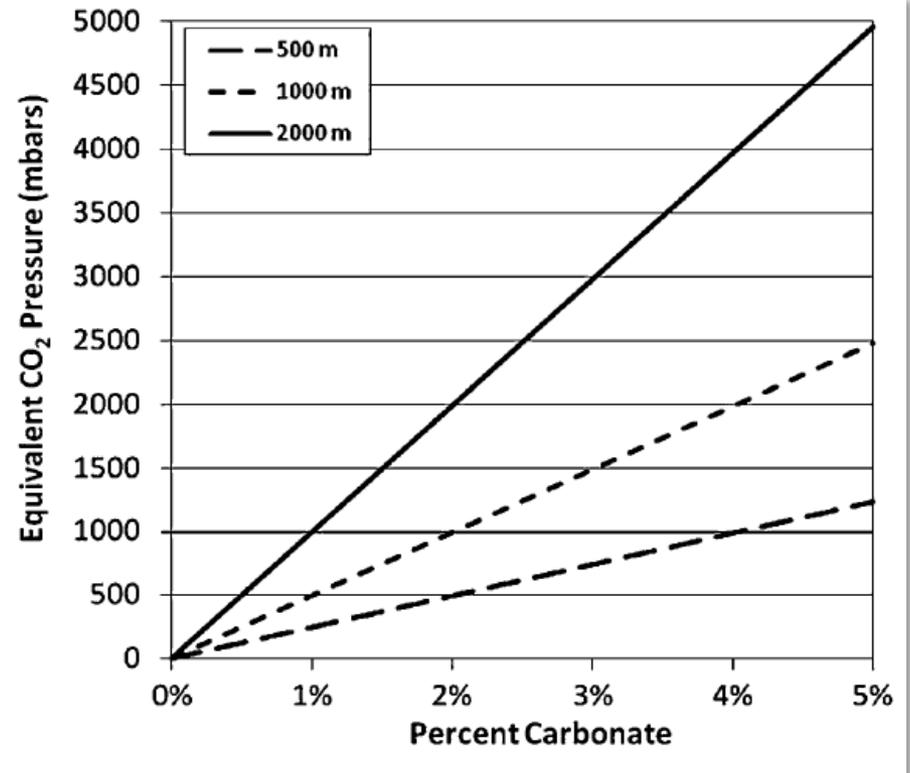
- 宇宙空間への散逸以外で、火星のCO₂大気を「なくす」方法は、
 - レゴリスに吸収させる、
 - ドライアイスとして溜め込む(deposit),
 - 炭酸塩を含む鉱物として溜め込む... のいずれか。
- レゴリスに吸収させうるCO₂の最大量は、~30–40mbar以下である [Zent and Quinn, 1995].
- 極域のドライアイスに溜め込める量は、~20–30mbar程度である [Phillips+, 2011].
- **残りの大部分を炭酸塩を含む鉱物として溜め込まなければならない。**
- しかし、これまでの観測では**炭酸塩を含む鉱物を発見できていない** [e.g., Bibring+, 2006].
- 検出できない原因としては、地中に埋まっているか、検出できないレベルで広範囲に分散している可能性が高い [Ehlmann+, 2008; Michalski and Niles, 2010; Morris+, 2010].



8. Surface Sinks of CO₂ and H₂O

8.1 Sequestration of CO₂ in Carbonates

- もし火星の地表から地下2kmまでに5%の炭酸塩を含んだ鉱物が存在していた場合, 最大で~5barのCO₂を溜め込むことが原理的には可能である(右図: Figure 13).
- 火星の炭酸塩を含んだ鉱物に関する解決すべき課題:
 - 炭酸塩を含む鉱物の正体は何で, 5kmより深いところにどれくらい存在しているか?
 - 炭酸塩を形成する上で, 気候変遷がいかに作用したか?
 - Noachian以降, どれくらい炭酸塩が形成され, どのように分布したか?
 - どのような物理機構によって, どの程度効率的に, 炭酸塩が大気中に放出されたか?



8. Surface Sinks of CO₂ and H₂O

8.2 CH₄ as a Clue to an Active Long-Term Carbon Cycle

- 地上観測やMEX/PFS, MGS/TESによる火星周回軌道における観測から、火星大気中にメタンが平均で~10–20ppb程度存在していることが判明した [Krasnopolsky+, 2004; Formisano+, 2004; Mumma+, 2009; Fonti and Marzo, 2010].
- メタンの寿命が300yrにもかかわらず[e.g., Krasnopolsky+, 2006], 衛星観測で検出されるメタンは、200(90)日程度の寿命で時空間的に変動している[Lefèvre and Forget, 2002].
- これまでの衛星観測の結果から、現在のメタンの放出フラックスを推定すると、 $10^8 \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ 程度である。
- メタンの起源としては、隕石由来や火山活動の結果とは考えにくく [Atreya+, 2006], 熱水活動や生物由来かもしれない。



8. Surface Sinks of CO₂ and H₂O

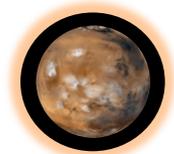
8.2 CH₄ as a Clue to an Active Long-Term Carbon Cycle

- 現在のCH₄の放出率がいつまで持続していたか？：
 - HとOの流出フラックスの非平衡に CH₄の酸化が関与していた場合、CH₄の放出率は、少なくとも過去数千年(H₂の光化学寿命に相当する)は持続した。 [*Chassefière and Leblanc, 2011*].
 - 南極のドライアイスの表面に含まれる炭素の量が、CH₄放出量と同程度であり、これが熱水活動によるCH₄が起源だった場合、数~数十Myrは継続していた。
 - CH₄の起源が、CH₄ clathrate-rich cryosphere(メタンハイドレート?)であった場合、CH₄ cryosphereが大気中に完全に分解される10⁸~9⁹ yrの間、放出率は継続されることになる [*Mousis+, 2012*].
- 熱水活動によってCH₄が放出された場合、酸化還元反応の結果、Noachian以降で~2barのCO₂供給に寄与する [*Chassefière and Leblanc, 2011a*].
- 蛇紋岩化作用によってCH₄が放出された場合、~0.4bar程度のCO₂を供給したことに相当する [*Chassefière and Leblanc, 2011c*].
- このような熱水活動が、CH₄を大気中に放出することと同時に、大気中のCO₂を炭酸塩の形態で地殻に取り込むという、大気の循環が大気中からCO₂を「なくす」ことに重要な役割を果たしたかもしれない [*Chassefière and Leblanc, 2011a*].

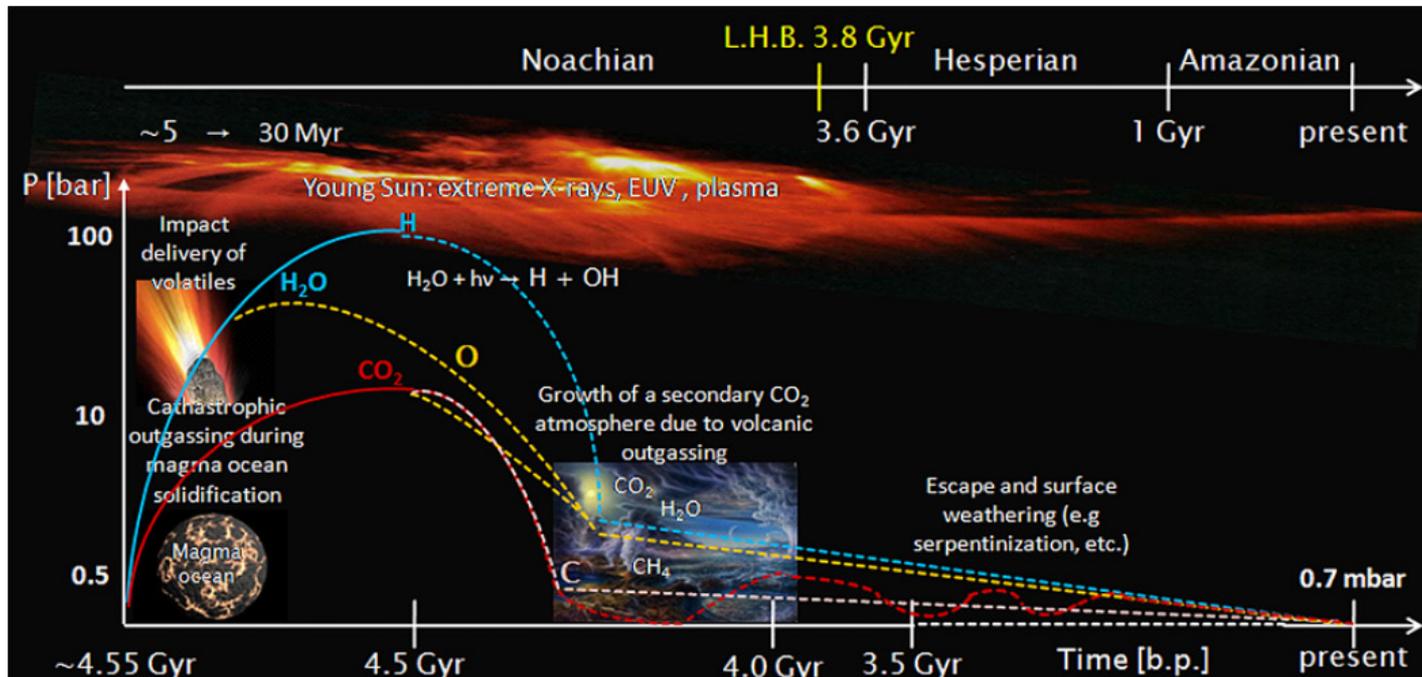
8. Surface Sinks of CO₂ and H₂O

8.3 Storage Capability of H₂O in the Martian Crust

- 火星の極冠に残る水の量は、16 m EGLに相当する[Smith+, 2001].
- 液体の水が流れた痕跡から、少なくとも~500m EGL相当の水が流れる必要がある[Carr, 1986].
- 火星の水和鉱物が存在していることから、地殻の~5wt%が水合鉱物であった場合、地殻の上層10km に存在する水合鉱物に、数百m EGL相当の水を貯蔵することが可能である。
- 現在の火星のD/H比から、~300–400mGEL相当の水が、マグマ活動に伴う熱水化(hydrothermalism)によって蛇紋岩に取り込まれた可能性がある[Chassefière and Leblanc, 2011a, b c].
- 地表付近に氷・水合鉱物(+氷雪圏下で液体の水)として保有されているH₂Oをすべてあわせると、最大で~1km EGLに匹敵するかもしれない。
- (いずれの場合も観測的証拠は不十分である.)

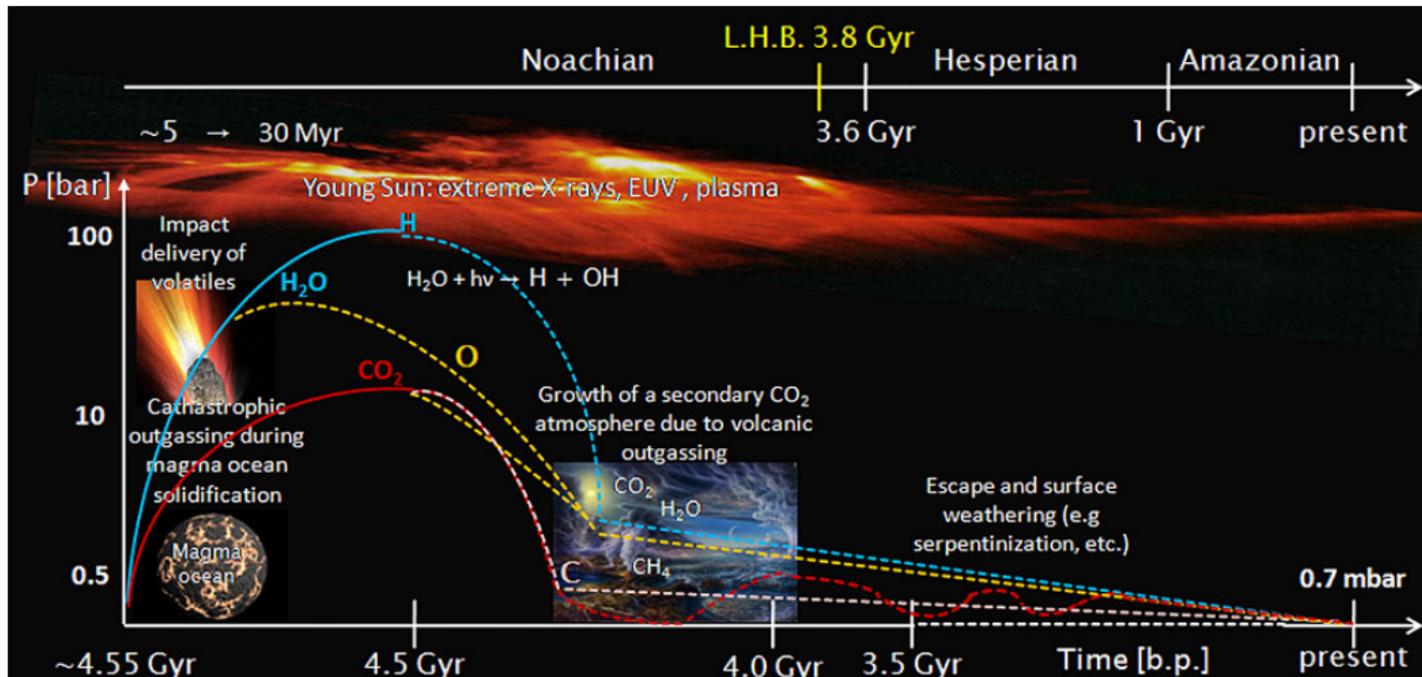


9. Conclusion



- 火星の降着が終了して以降、最初の数十~数百Myrのうち、若い太陽の過激なEUV放射加熱によって、水素が支配的である火星の原始大気は、重い酸素・炭素原子も一緒に流体力学的散逸させてしまう。
- EUV放射強度の低下に伴って流体力学的散逸がおさまってくると、天体衝突、火山活動による脱ガスによって供給される量とバランスする。
- 後期爆撃期の天体衝突によって、およそ1bar未満の2次CO₂大気と、10bar未満のH₂Oが35~40億年前にもたらされる。

9. Conclusion



- 過去35億年の間に、非熱的散逸過程で最大で150mbarのCO₂が宇宙空間へと流出する。
- Noachianの終わりに数百mbarのCO₂が大気中に残っていた場合、宇宙空間に散逸した分を除いて、残りの大部分は炭酸塩を含む鉱物として地殻に取り込まれる。一部の大气-地殻の間を酸化還元反応しながら循環する。
- Noachian中に数十~数百m EGL相当のH₂Oは、氷・水和鉱物の形態で地表付近に、あるいは冰雪圏の下で液体の水として保有されている可能性がある。