

火星勉強会

Lammer et al., 2013, Outgassing history and escape of the martian atmosphere and water inventory, Space Sci. Rev., 174, pp.113-154, doi:10.1007/s11214-012-9943-8の前半

1 Introduction

2 Origin and Delivery of Volatiles to Mars

3 Outgassing and Growth of a Secondary Atmosphere

4 Atmosphere Erosion and Delivery by Large Impacts

原田裕己

Abstract

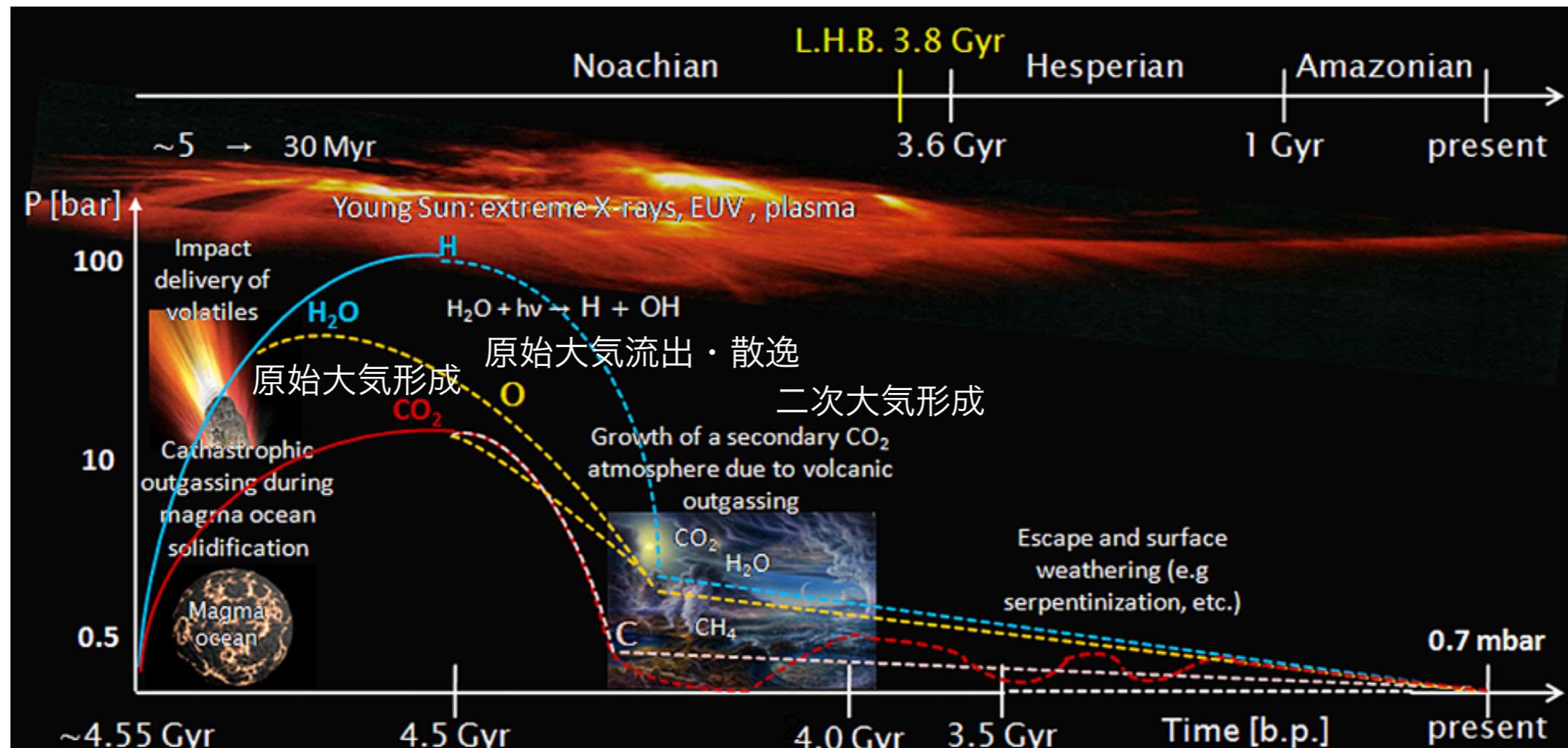
- 火星の大気と水の散逸と変遷

- 前半の時代：誕生から500 Myr後まで

- 若い太陽の高いEUVフラックス+火星の小さい重力 -> Hの流体力学的散逸、OやCの熱的散逸
- 衝突天体によってもたらされた揮発性成分、マントルからのガス放出 -> 二次CO₂大気形成

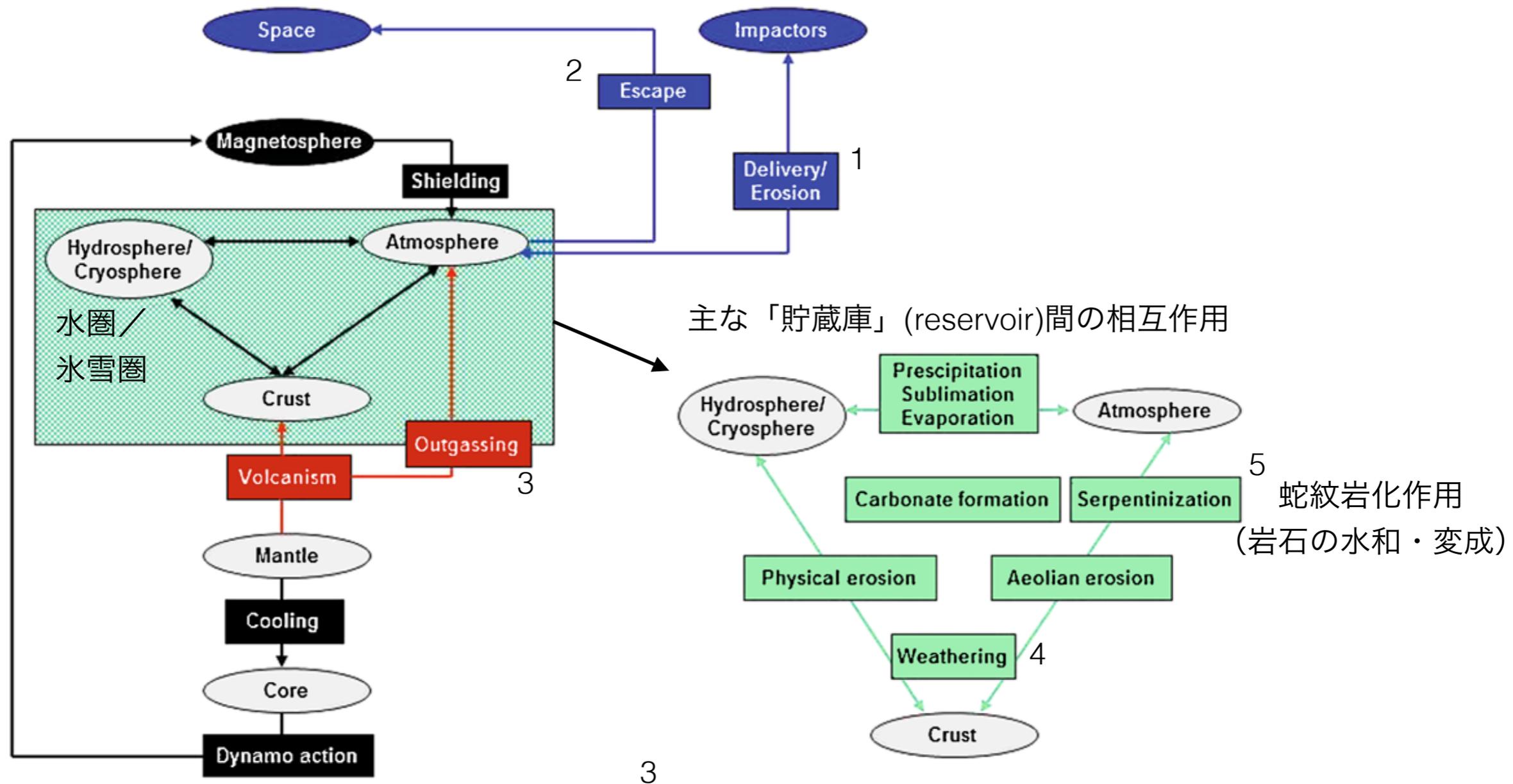
- 後半の時代：ノアキス紀の終わりから現在まで

- 非熱的散逸や地殻への二酸化炭素・水の取り込みなどの複合作用



1 Introduction

- 大気の消失過程：天体衝突による剥ぎ取り(erosion)¹、熱的・非熱的散逸、EUV、太陽風の影響による散逸²、等々
- 大気の供給源：火山活動によるガス放出³、天体衝突による持ち込み(delivery)¹、等々
- 大気と地殻の相互作用：地表または地殻内でのCO₂風化(weathering)⁴・水和(hydration)⁵



2 Origin and Delivery of Volatiles to Mars

- 火星大気を構成する揮発性成分(volatiles)の供給源と変遷についてはあまりよくわかっていない
 1. 初期の火星に大量の**水**をもたらした**供給源**は？ -> **原始大気**の形成へ
 2. **同位体**の変化 -> 地球型惑星の起源や変遷過程について何かわかるかも (火星大気は地球や金星に比べて**希ガス**が少ないことと関係？)

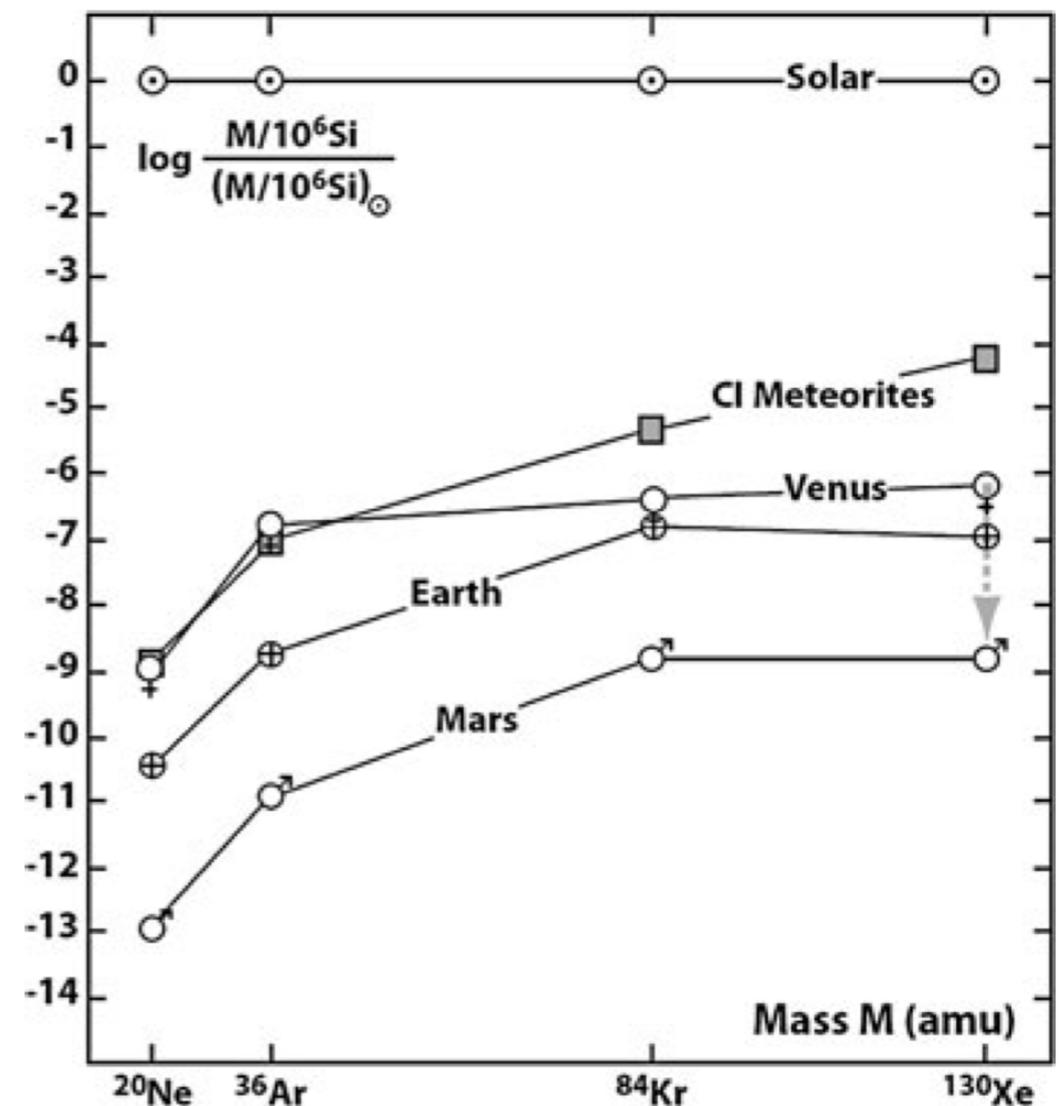
2.1 Water Delivery and Formation of the Martian Protoatmosphere

- 大気の初期形成過程：惑星雲(planetary nebula)から気体を捕獲・蓄積¹、マグマオーシャン固化による大規模なガス放出³、天体衝突²、後の火山活動による脱ガス(degassing)
- 1. 質量 $0.1M_{\text{Earth}}$ の惑星胚子(planetary embryo)は、惑星雲から3 Myrの間に最大で地球の海に現存する55倍の水素を捕獲することができる (Hayashi et al. 1979)
- 2. 微惑星(planetesimal)、惑星胚子、小惑星(asteroid)、彗星(comet)との衝突から水^水を獲得
 - 火星の水の初期貯蔵量は地球の海の0.06--0.27倍程度、地表圧~10—100 barに相当 (Lunine et al. 2003)
 - もっと水が少ないという見積り (Horner et al. 2009) や、初期の火星は地球や金星よりも水が豊富で (Walsh et al. 2009)、0.1–0.2 wt% (質量パーセント濃度) 程度の水を有していた (Brasser 2012) という説も

3. 初期に蓄えられた揮発性成分の多くは、**マグマオーシャンの固化**に伴って放出 (Elkins-Tanton 2008)
- 水や二酸化炭素は固化する鉱物にはほんの少ししか取り込まれず、固化が進むにつれて液状のマグマオーシャンに濃縮され、低圧の表面付近で大気に放出される
 - 地表圧30—800 bar程度の水蒸気を含んだ大気を放出
 - 固体内に残った少量の水は、マントル物質の粘性や融点を下げ、後の火山活動を促進
 - 初期の**水蒸気大気**は数10 Myrに渡って安定して存在
 - 初期段階では地表温度は1500 Kにも達する (e.g., Matsui and Abe 1986)
 - 水蒸気大気が**冷却**に際して失われなければ、凝縮して**液体の水**を生成 (寒いと氷)
 - マグマオーシャンから放出された**温室効果ガス** (H_2O , CO_2 , CH_4 , NH_3) と H_2 温室効果の影響で、**数10 Myr**に渡って**温暖湿潤**な状況が存在していた可能性
 - 未知・不確実な要素が多く、水の供給機構や原始大気形成について得られている知識は不十分

2.2 The Apparent Noble Gas Deficiency of the Martian Atmosphere

- 大気中の**希ガス存在量**は金星、地球、火星と外側に映るにつれて数桁減少
- 地球型惑星形成のN体シミュレーション (Horner et al. 2009) -> 地球は火星の3.4倍の彗星が衝突： $N_E/N_M \sim 3.4$
- ▶ 彗星から供給される希ガス存在量（惑星の総質量に対する割合）の比 $X_E/X_M = (N_E/N_M)(M_M/M_E) \sim 0.37$
- 観測された2桁の違いとは大きく異なる
- ▶ **大気散逸によって組成が変化**した？
- ✓ 実際に地球と火星のXe**同位体**は、元の供給源に比べて大きく分別(fractionation = 同位体比が変化すること)している -> 初期大気からのXeや他の希ガスの消失



- 天体衝突、EUV加熱による流体力学的散逸(hydrodynamic escape)、惑星脱ガス(?? planetary degassing)、非熱的大気散逸による同位体分別の影響で現在の火星の希ガス量が決定？「上に逃げた説」
- 別の仮説 (Mousis et al. 2010, 2012)：火星地殻内のCO₂クラスレート(clathrate)が効率的に希ガスを取り込んだ (sequester)？「下に取り込まれた説」 -> この場合、大気内の ³⁶Ar, ⁸⁴Kr, ¹³⁰Xe量は惑星全体の希ガス量を表していない
- 地球と火星のNe, Ar量の違いを説明するMousis et al. (2010)シナリオ 1：
 - 一次大気(primary atmosphere)存在時に彗星爆撃 -> 彗星からAr, Kr, Xeが供給、Neは重力捕獲
 - NeとArのみが熱的・非熱的大気散逸によって分別；重いKr, Xeは大気散逸の影響をほとんど受けず、地殻に取り込まれる効果によって地球と火星の違いを説明
 - 原始大気は最初の数10 Myrしか存在せず、年代的な問題がある
- Mousis et al. (2010)シナリオ 2：
 - 後期重爆撃期(LHB)に彗星によってKrとXeが供給；NeとArは一次大気重力捕獲
 - Kr・Xeを供給する彗星爆撃は原始大気形成のずっと後；Ne・Ar量のみが大気散逸で説明可能

3 Outgassing and Growth of a Secondary Atmosphere

- **火山活動によるガス放出**：火星大気の揮発性成分の主な供給源のひとつ、マントル・大気の reservoir 間を繋ぐ
- 元素の大気同位体比 R から、異なる reservoir 間の交換過程についての情報が得られる
- **軽い同位体は重い同位体に比べて宇宙空間に散逸しやすい**ため、 R は時間変化する
- 同位体分別の効率は reservoir の大きさ S 、全散逸フラックス ϕ 、および分別係数 f で表される相対散逸効率に依存

3.1 Estimation of the Martian Water-Ice Reservoir by the Atmospheric D/H Ratio

- それぞれの同位体比がわかれば、**過去と現在の reservoir サイズ比**を計算することができる

$$\frac{S_t}{S_p} = \left(\frac{R_p}{R_t} \right)^{1/(1-f)}$$

p: 現在
t: 過去

- 初期同位体比 R_t を仮定 -> 同位体比がこの値に最後にリセットされた時のサイズ S_t が得られる
- この方法を用いれば、火星起源の隕石の同位体比から、結晶化時の reservoir サイズが得られる

- D/H比 -> 水 reservoir のサイズ

✓ 火星の初期同位体比 R_t の推定

1. 降着後の地球と火星の同位体比は同一と仮定し、地球の海水中の同位体比の変化は0.2%以下 (Donahue 2001) であることから、現在のSMOW (Standard Mean Ocean Water)の値を初期 D_0/H_0 として採用
2. 動的降着モデルから火星原始組成を計算 -> SMOWの1.2—1.6倍の D_0/H_0 (Lunine et al. 2003)

Reservoir	D/H [1×10^{-4}]	D/H [SMOW]	Cryst. age [Myr]	Ejection age [Myr]
Mars atmosphere	8.0	5.13		
Terrestrial sea water (SMOW)	1.56	1.00		
Comets	~3.2	~2.05		
Martian meteorites				
AH 84001	2.45	1.57	3920 ± 40	15.0 ± 0.8
Chassigny	1.49–1.6	0.96–1.03	1340 ± 50	11.3 ± 0.6
Nakhla	2.24–2.73	1.44–1.75	1270 ± 50	10.75 ± 0.4
Lafayette	2.47–2.8	1.58–1.79	1320 ± 20	11.9 ± 2.2
Governador Valadares	1.97	1.26	1330 ± 10	10.0 ± 2.1
Zagami	3.28	2.10	177 ± 3	2.92 ± 0.15
Shergotty	3.39	2.17	165 ± 4	2.73 ± 0.2
Elephant Moraine 79001	3.86	2.47	173 ± 3	0.73 ± 0.15

✓ 火星大気の**現在のD/H比 R_p**

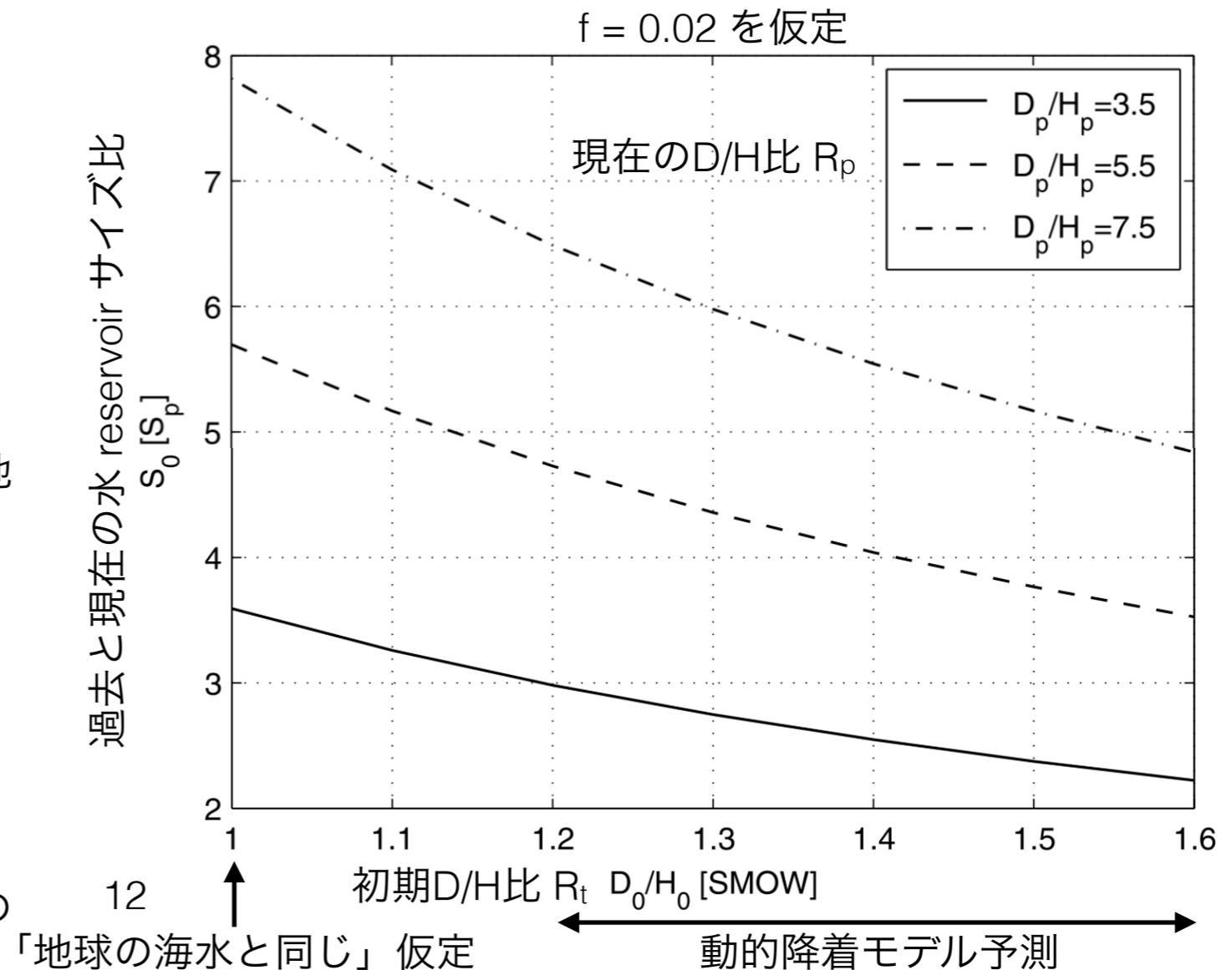
- $R_p = 5.5 \pm 2$ SMOW ← キットピーク国立天文台4 m反射望遠鏡+フーリエ変換分光器 (Krasnopolsky et al. 1997)

✓ $f \sim 0.016\text{—}0.02$ ← HSTによるH α のD・Hライマン α 観測 (Krasnopolsky et al. 1998, Krasnopolsky 2000)

- 理論計算値 $f = 0.32$ (Yung et al. 1988)よりもかなり低く、それまで考えられていたよりも大きなreservoirに

✓ 過去の水reservoirサイズは**現在の2—8倍**：**50—88%の水が失われた**

- 総大気散逸フラックスを仮定 → 過去の水reservoirの絶対量を推定：0.2 m — 800 m EGL (equivalent global layer)
- 蛇紋岩化作用によって最大で400 m EGLの水が地殻に取り込まれた説 (Chassefière and Leblanc 2011)
- 初期に蓄えられたH・Dは、高EUVフラックスの影響で4.0 — 4.5 Gyaの間に分別されずに流体力学的散逸 → 推定された水の量は4 Gyaまでに天体衝突と火山ガス放出によってもたらされたもの



3.2 Volcanic Outgassing of CO₂ and H₂O

- 火山活動による**ガス放出率**

$$\frac{dM_i^{\text{atm}}}{dt} \propto \frac{dM_{\text{cr}}}{dt} \eta X_i^{\text{melt}}$$

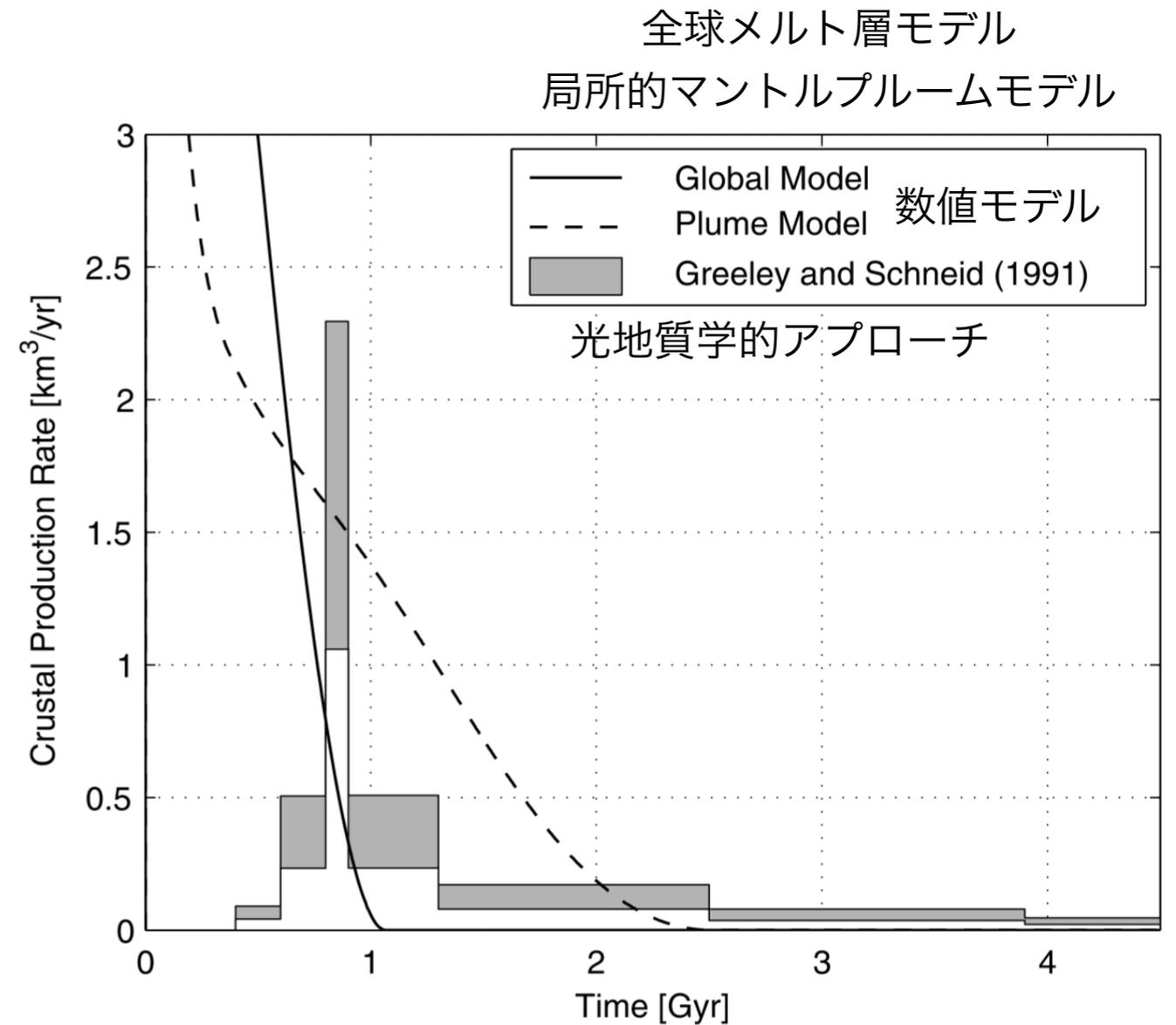
地殻生成率 ← $\frac{dM_{\text{cr}}}{dt}$ 引き出されたマグマ量
 η ← ガス放出効率
 X_i^{melt} ← マグマ内の揮発性成分*i*の濃度

- 噴出 (extrusive: 地表に出た) マグマからは全ての揮発性成分が放出
- 貫入 (intrusive: 地下の岩石中に入り込んだ) マグマはガス放出に寄与しないと仮定すれば、 R_i (η_i ?) は貫入/噴出比に依存
- ただし、液状マグマ内に濃縮された揮発性成分は地下でもガス放出し、地表に届く可能性も -> 貫入した深さの地殻にある程度の空隙率 (porosity) があればガスが地表に達すると仮定
- ✓ 時系列の**地殻生成率** <- 地殻生成量 (光地質学、photogeological record) & その場所の年代 (クレータ年代学)
- 溶岩の体積 <- 部分的に埋められたクレーターの深さを、深さ—直径スケーリングから得られる理論的な値と比較
- 噴出のみが評価可能なので、生成された地殻の総体積を得るには、噴出/貫入比は推測するしかない
- 古い噴出物は新しい噴出で覆われてしまうため、初期の地殻生成率を過小評価してしまう可能性

- 火星の熱化学進化の数値モデルから、全球平均地殻生成率を計算する方法も

- ただし、若い局所的な火山活動を分解するには2 / 3次元モデルが必要

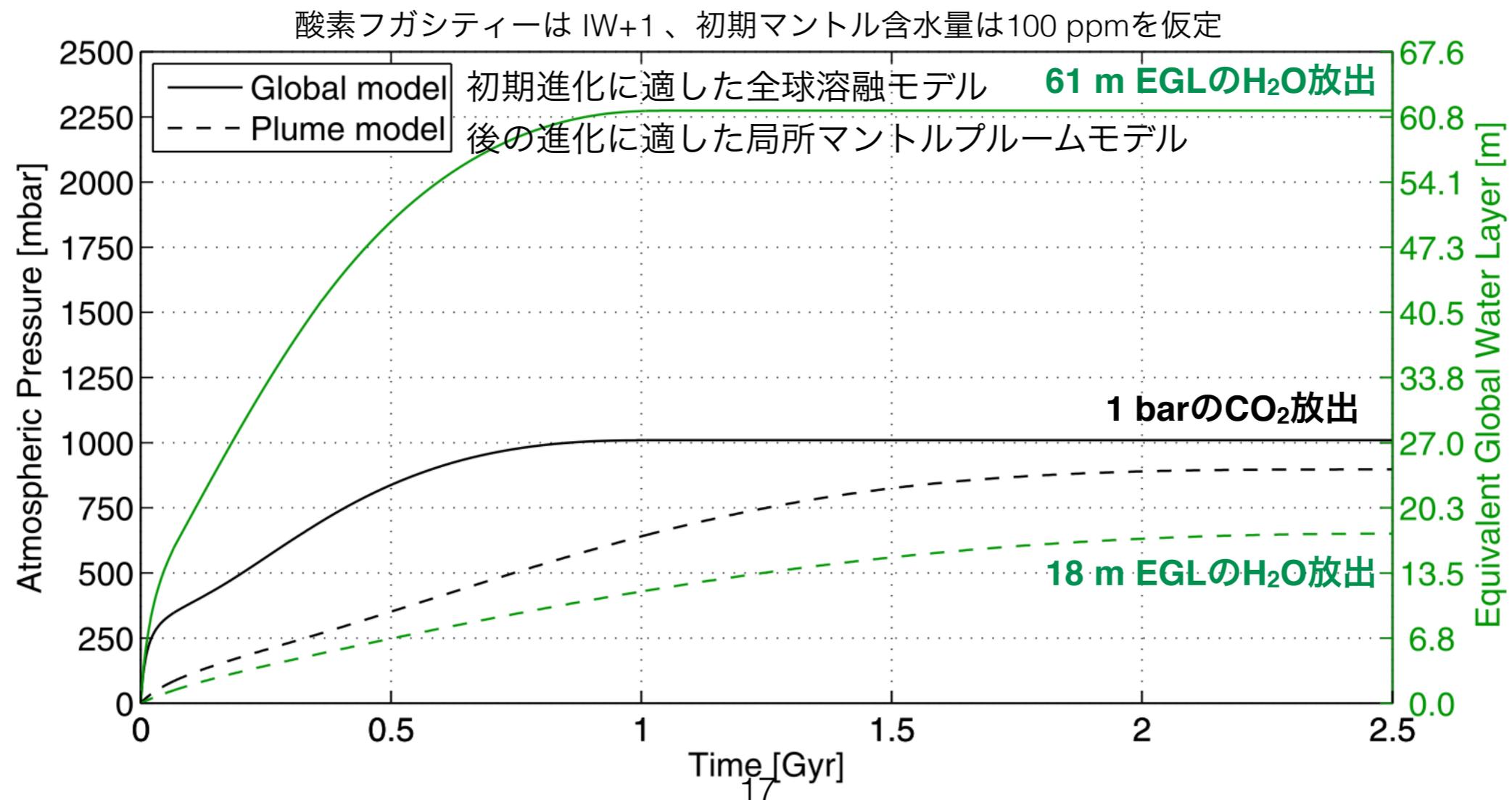
✓ 光地質学からの推定と数値モデルは、中間の年代ではそこそこ一致するものの、光地質学的アプローチでは古い地殻生成率を過小評価し、数値モデルでは最近の火山活動を評価できない



- 火星のマントル対流は停滞リッド型 (stagnant-lid mode) なので、地球のプレート内部での火山活動と関連付けて、**火星マグマ内の揮発性成分含有量**としてざっくり地球の値が仮定されてきた
 - 最近ではもっとちゃんとした方法がある (この節の最後に紹介)
 - ✓ ハワイのマウナロアとキラウエアでのマグマ内のCO₂, H₂O濃度 0.65 wt%, 0.30 wt% (Gerlach and Graeber 1985; Greenland 1987a, 1987b) を火星に適用すると、
 - タルシス台地形成時に1.5 barのCO₂を排出 -> ノアキス紀の終わりに強い温室効果&気候変動 (Phillips et al. 2001)
 - 中期ノアキス紀に400 mbarのCO₂と8m EGLのH₂O等を含む800 mbarの大気放出 (Craddock and Greeley 2009)

- 火星隕石もマグマ中の揮発性成分量のプロキシとして使える
 - SNC(Shergotty, Nakhla, Chassigny)隕石グループの解析から、脱ガス前のマグマ含水量を1.4—1.8 wt%と推定(McSween and Harvey 1993; McSween et al. 2001; Johnson et al. 1991)
 - ▶ タルシス形成時に最大120 m EGLのH₂O放出 (Phillips et al. 2001)
 - ただし、塩素含有量を考慮すると含水量は0.3 wt%以下に落ちる (Filiberto and Treiman 2009) -> 水放出量は18 m EGLに
- SNC含水量は2倍程度の不確実性がある
- メルト (melt: マグマの液体部分、マグマは気相 | 火山ガス、液相 | メルト、固相 | 結晶の混合物) への水の分配(partitioning)はマントル溶融**モデル** (分別溶融: fractional melting / バッチ溶融: batch melting) から計算できる
 - 分配係数、メルトの割合、マントルの全含水量がメルト内の含水量を決定
 - マグマの含水量は全マントル含水量の10—16倍程度
 - 全マントル含水量は36—1400 ppmと不確か

- 火星マグマへの CO_2 の溶解度は酸素のフガシティー(fugacity)に依存
 - 火星隕石中の酸素フガシティーは IW-1 から IW+1程度 (IW: 鉄=ウスタイト緩衝系)
 - ▶ 最大でも 1000 ppm程度の CO_2 しか溶解せず、キラウェアの 0.65 wt%と比べるとはるかに小さい
- CO_2 溶解度の化学モデルと熱進化モデルを合わせた自己無頓着な CO_2 放出モデル
- 4 Gyaに ≤ 1 barの火山ガス放出により CO_2 の**二次大気を形成**? ← ただし、大規模な衝突や大気散逸が二次大気形成に影響を与える可能性



4 Atmosphere Erosion and Delivery by Large Impacts

- **天体衝突**による大気の**剥ぎ取り**と**持ち込み** ← 衝撃解析コード(**hydrocode**)を用いた**シミュレーション**
 - 計算結果は用いる物理モデルに依存
 - 大規模な計算資源が必要
 - ▶ 主なメカニズムをパラメータ化した解析モデル
- **“tangent plane model”** (Melosh and Vickery 1989)
 - 衝撃解析コードのシミュレーション結果に基づいてスケーリング
 - 少ないパラメータ数で計算時間を短縮しつつも、衝突による剥ぎ取りと持ち込みに関連した全球的な大気質量進化を調べることができる

- 臨界質量 m_{crit} を超える質量の天体が衝突した場合、衝突点の表面に平行な平面より上の大気（全質量 $m_{tan} = m_{atm} H/2R_{pl}$ ）が散逸

- 全質量進化 M_{atm} は、剥ぎ取られた質量 M_{esc} と持ち込まれた質量 M_{del} を用いて

臨界質量を超える衝突天体のフラックス

$$\frac{dM_{atm}}{dt} = \frac{dM_{del}}{dt} - \frac{dM_{esc}}{dt}$$

$$\frac{dM_{esc}}{dt} = \frac{\partial N_{cum}[>m_{crit}(t), t]}{\partial t} 4\pi R^2 m_{tan}(t) f_{vel} f_{obl}$$

$$\frac{dM_{del}}{dt} = \frac{\partial N_{cum}[>m_{crit}(t), t]}{\partial t} 4\pi R^2 \frac{b}{1-b} m_{crit}(t) y_{imp} f_{vap} + \frac{\partial N_{cum}[>m_{crit}(t), t]}{\partial t} 4\pi R^2 m_{crit}(t) y_{imp} (1 - f_{vel} f_{obl} g_{vap})$$

衝突天体フラックスの質量分布

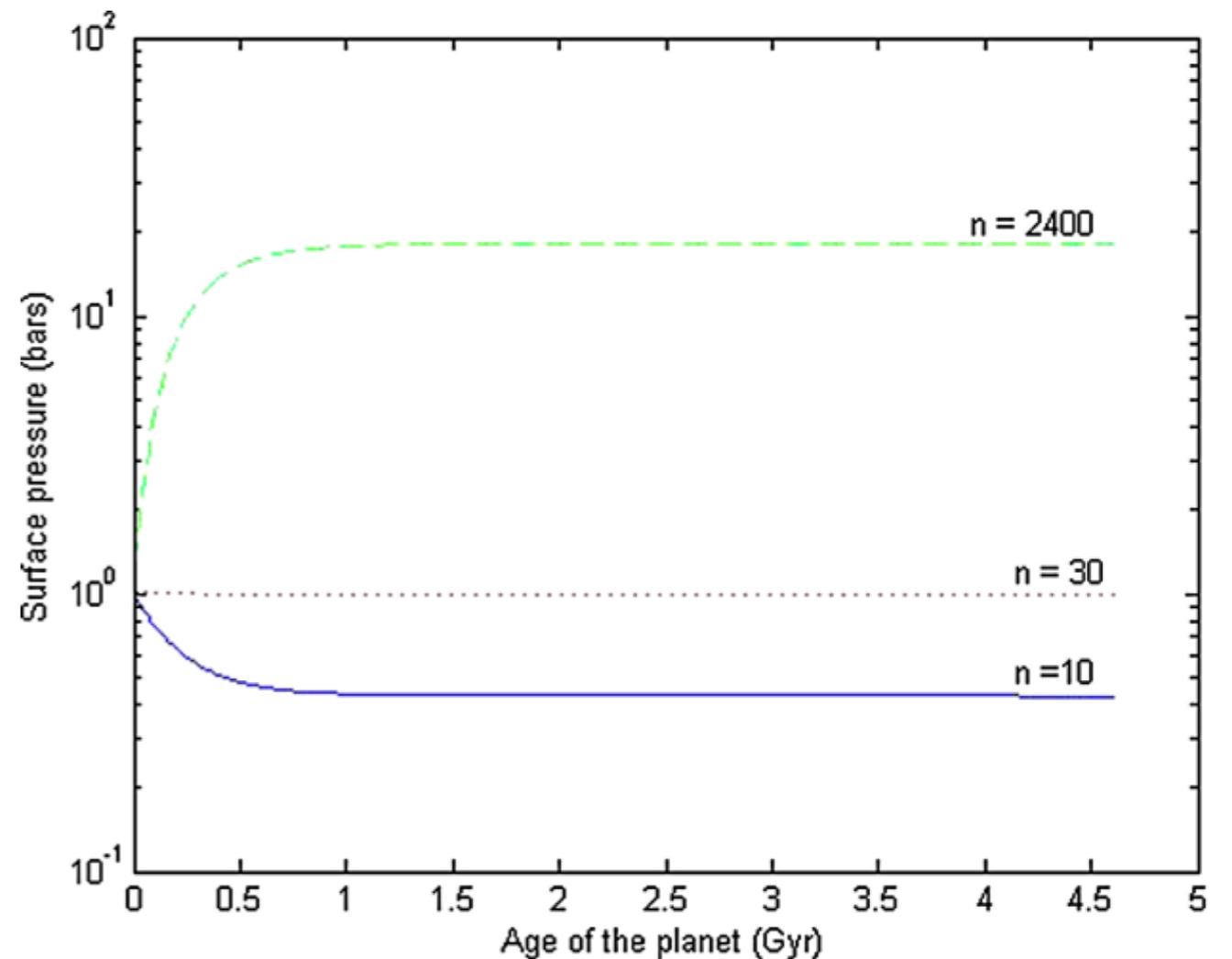
$m_{imp} < m_{crit}$ の場合の持ち込まれた質量変化率

$m_{imp} > m_{crit}$ の場合

- 速い衝突係数 f_{vel} ，斜め衝突係数 f_{obl} ，小惑星と彗星で異なる揮発性成分濃度 y_{imp} ，揮発質量/衝突質量比 f_{vap} および g_{vap} は後から追加された項

Factor	Asteroids	Comets	
		SP comets	LP comets
f_{vel}	0.08	0.83	0.99
f_{obl}	7.54		2.16
y_{imp}	0.01		0.3
f_{vap}	0.34		1
g_{vap}	0.21		1

- 衝突による大気の剥ぎ取りと持ち込みの効率は係数 $n = m_{\text{crit}}/m_{\text{tan}}$ で決まる
 - n は不確か： 最初の研究では $n = 1$ 、最近では $n = 10$ や $50 < n < 2000$
- 全大気質量進化の計算結果
 - 最近のシミュレーションでは $n > 30$ が多い
 - ▶ 衝突は大気を剥ぎ取るよりもむしろ**供給源**に
 - たとえ n が小さくても、**剥ぎ取りの効率は悪く**、現在の火星大気圧まで減らすことはできない



(図6のキャプションおかしい?)

次週は後半

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