©NASA

ジャイアントインパクト後の 地球型惑星の初期進化

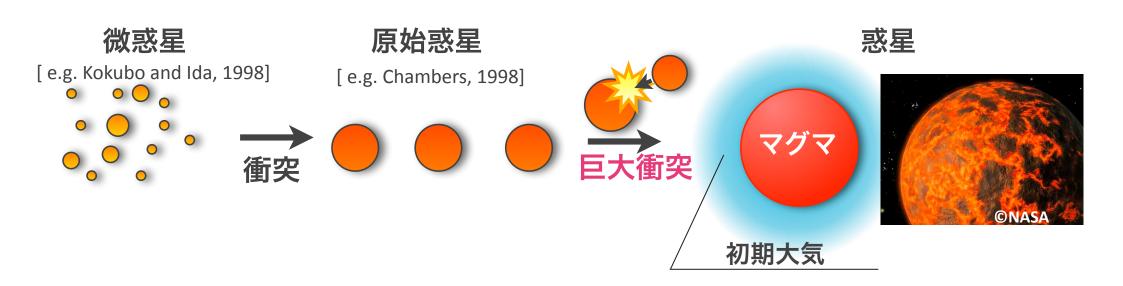
濱野景子 東京工業大学ELSI

共同研究者:

阿部豊(東大), 玄田英典(ELSI), 大西将徳(神戸), 倉本圭(北大)

2016/04 宇宙生命計算科学連携拠点 第2回WS@筑波計算科学研究センター

惑星形成と初期大気の形成



- 微惑星・原始惑星中の揮発性元素⇒初期大気の形成
- 初期大気の温室効果はマグマオーシャンの形成・熱進化に影響 H₂O - CO₂大気とマグマオーシャンの共進化

Abe & Matsui (1985), Matsui and Abe (1986), Zahnle et al. (1988) Elkins-Tanton (2008,2010), Lebrun et al. (2013), Hamano et al. (2013)

酸化的な大気:現在の惑星大気、地球の火山ガスの主成分

初期大気の酸化還元度

様々な酸化還元度をもつ複数のリザーバー

- ネビュラガス (H₂) [e.g. Hayashi et al. 1979]
- 小惑星(隕石) [Hashimoto et al. 2007; Schaefer & Fegley 2007] 始原的な隕石からの脱ガス組成
- 金属鉄・マグマ・流体相での分配 [Kuramoto & Matsui 1996] Fe-FeOによりバッファ, H₂/H₂O ~ 10
- Ice-richな酸化的な天体の集積(H2O)
- 連続的な集積・ジャイアントインパクトによるFeのばらまき Feのばらまかれ方,ふるまいにより様々

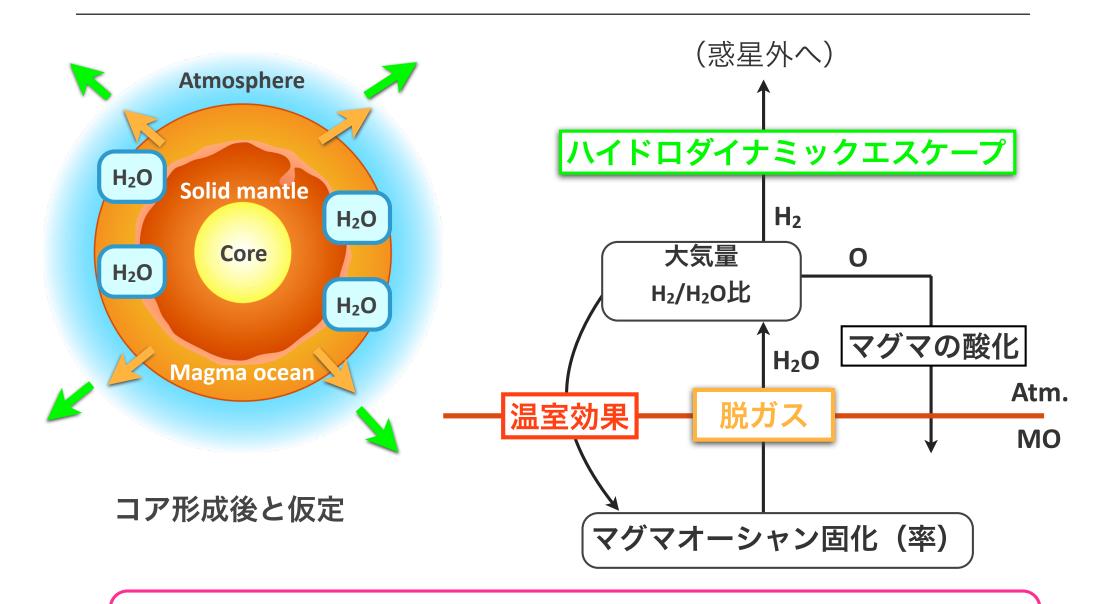
月(IW~IW-2)や火星(IW-0.7)の内部は還元的

H2-H2O大気とマグマオーシャンの進化

H₂OだけでなくH₂を含むことで進化シナリオがかわるか? マグマオーシャン-大気間での水の分配, 温室効果,水の散逸タイミング

初期の酸化還元度 (H₂量) の影響はどこにあらわれるか? 固化時間, 固化後に残る大気組成

マグマオーシャン-大気の共進化モデル概要



各過程を単純化し、システム全体としてのふるまいをみる

モデル: エネルギーバランス

$$C_{\mathrm{pl}}\left(T_{m}\right)\frac{dT_{m}}{dt}=-4R_{\mathrm{pl}}^{2}F_{\mathrm{MO}}$$

冷却率(固化率)

熱容量

エンタルピーから計算

マグマオーシャンからの 熱フラックス

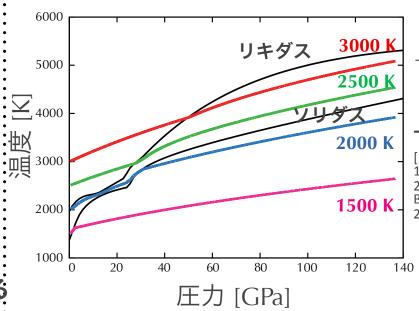
地表での放射収支で与える

MOの典型的なレイリー数:Ra~10²²-10³⁰

粘性:<0.01 Pa s,距離スケール:100-1000 km

[e.g. Solomatov 2015, Elkins-Tanton 2011]

内部に断熱温度構造を仮定:熱容量の最大見積もり



断熱温度構造の計算

[Abe, 1995, 1997]

- ソリダス・リキダス

[Takahashi (1986); Zhang & Herzberg, 1994;Tronnes & Frost, 2002; Fiquet +, 2010;Zerr & Boehler,1993; Zerr & Boehler,1994;Herzberg+,2000; Ito + 2004]

 $F_{\text{MO}} = F_{\text{pl}}(p_s, T_s) - F_{\text{sl}}(p_s, T_s, a, t)$

MO内部での熱輸送効率は良いと仮定

モデル:非灰色1次元放射対流平衡計算

$$F_{\text{MO}} = F_{\text{pl}}(p_s, T_s) - F_{\text{sl}}(p_s, T_s, a, t)$$
 惑星放射 正味中心星放射 (アルベド)

二方向近似,相関k分布法

計算波数域:0-30,000 [cm⁻¹]を100バンドに分割

k分布のノード・重み:double gauss quadrature

水蒸気:8 term, 水素:1 term

気体分子吸収とレイリー散乱 (雲は無視)

水蒸気の線吸収:HITEMP2010 [Rothman et al., 2010]

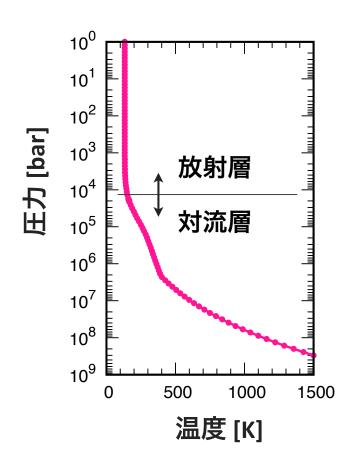
連続吸収:MT-CKD 2.5 (self/foreign)

[Mlawer et al., 2012]

H₂-H₂の衝突誘起吸収(CIA):HITRAN2012

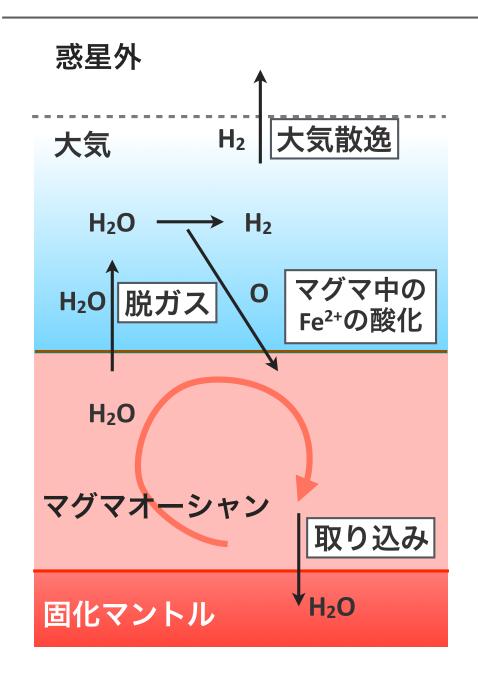
[Richard et al., 2012]

Peng-Robinson状態方程式 Newton-Raphson 法

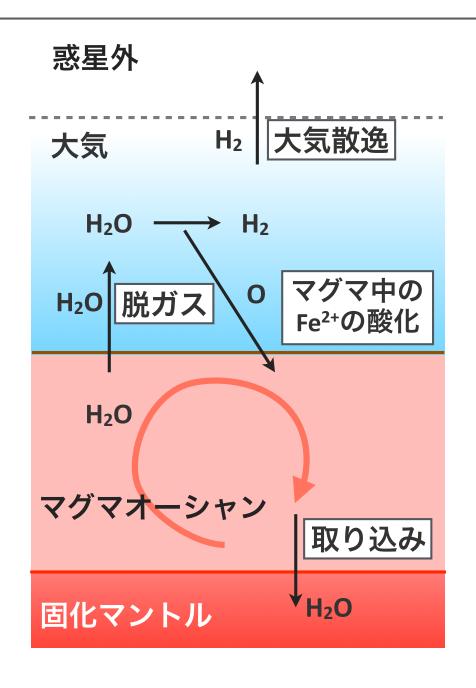


計算例 1500[K], p_{H2O}=300 [bar], x_{H2O}=0.1

モデル:リザーバー間でのHとOの収支



モデル:リザーバー間でのHとOの収支



H₂:大気散逸

エネルギー律速散逸フラックス [Watson, 1981]

∝XUV強度S^{XUV} x 加熱効率η(0.1)

$$\Gamma_{\rm H} = 4\pi R_{\rm pl}^2 \frac{R_{\rm pl}}{GM_{\rm pl}} \frac{\eta S_{\star}^{\rm XUV}}{4} \left(\frac{a}{1 \text{ AU}}\right)^{-2}$$

 $R_{\rm pl}$, $M_{\rm pl}$:惑星半径・質量

a:軌道半径

H₂O:取り込み

- 固相への分配

分配係数:10⁻³-10-⁴,最大容量:1000 ppm

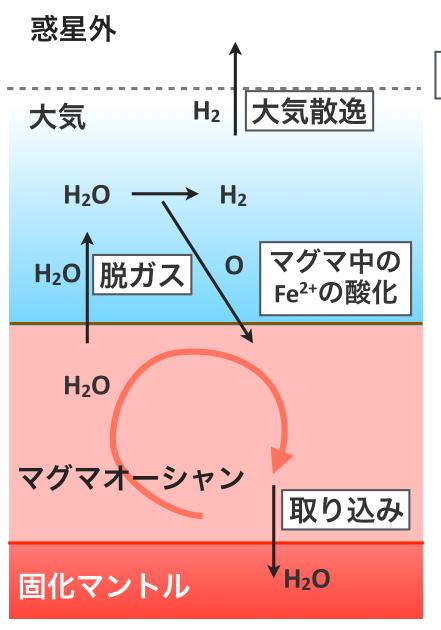
- メルトの粒間トラップ

1wt%を仮定

[e.g. Grant et al. 2006; Auband et al. 2004; Hauri et al. 2004; Bolfan-Casanova et al. 2000;Litasov et al. 2003]

[e.g., Elkins-Tanton 2010; Johnson and Dick 1992)]

モデル:リザーバー間でのHとOの収支



H₂O:脱ガス

o:マグマ中のFe²+の酸化

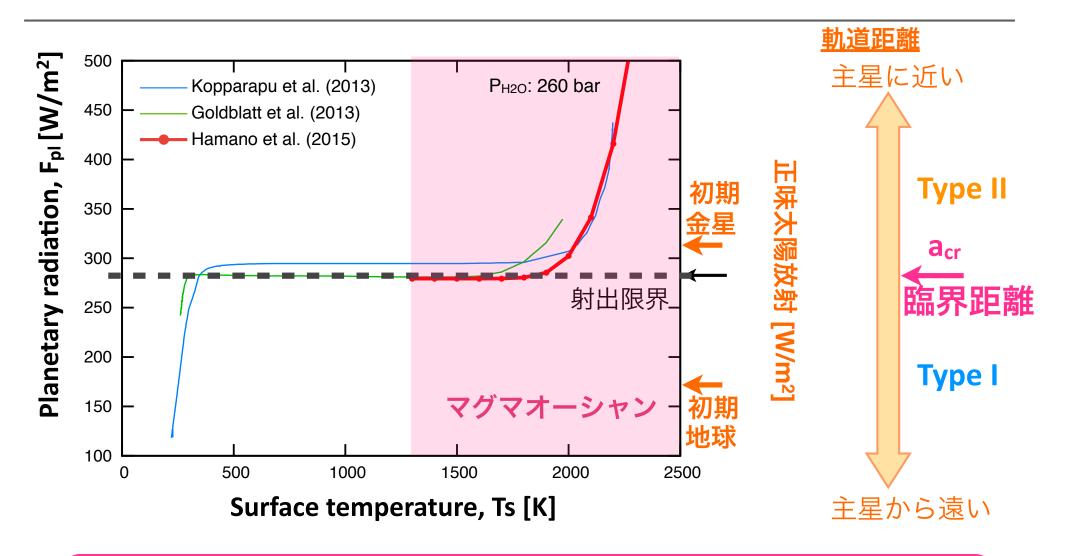
大気-マグマ間で物質交換効率がよいと仮定 地表の熱境界層の厚さ:1-10cmのオーダー

脱ガス量は大気-マグマの溶解平衡より計算 玄武岩質マグマへの溶解度を採用

[Papale, 1997]

大気の酸素フガシティーが Magnetite-Wustite(MW)バッファのレベル (0.9-1) に達する ⇒その後,大気中のx_{H2O}はMWバッファで固定

H₂O大気の放射フラックス



臨界距離を境に固化・水散逸率を決定づける過程が異なる

[Hamano et al. 2013]

初期条件・パラメータ

初期条件

地表温度:3000 K (~1370 Kに達したところで計算ストップ)

初期水蒸気分圧:大気-マグマオーシャン間での溶解平衡

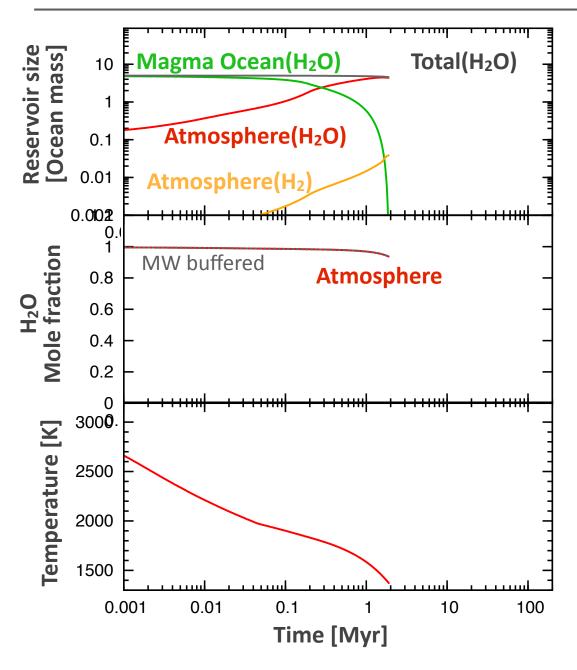
パラメータ

軌道半径:0.4-3 [AU]

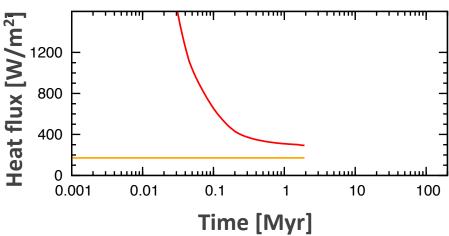
初期水総量:5倍の海洋質量(fixed)

初期大気xH2O:0.99(MW), 0.28(IW-1), 0.11(IW-2)

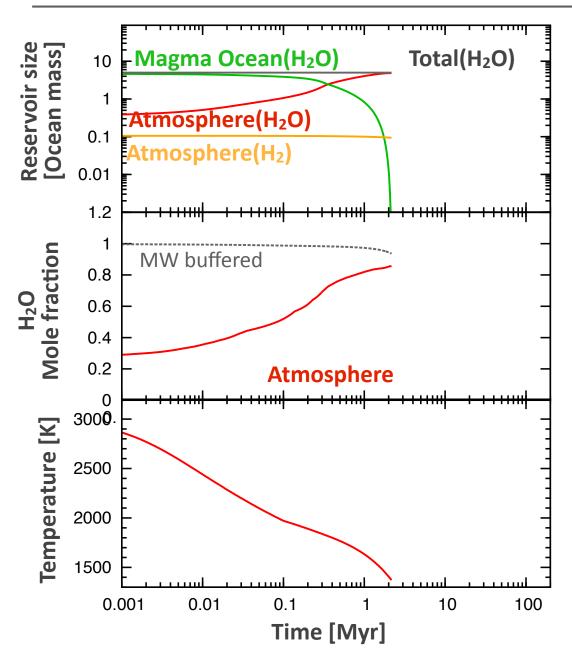
結果:Type I, 1AU, x_{H2O}=1 (MW)



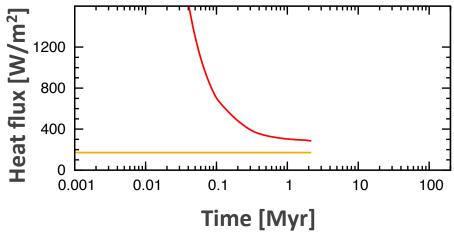
- 脱ガスによって大気量が増加
- MWバッファ:水蒸気大気
- 惑星放射は射出限界で律速 →固化時間<~2 Myr
- H₂, H₂Oともに残る



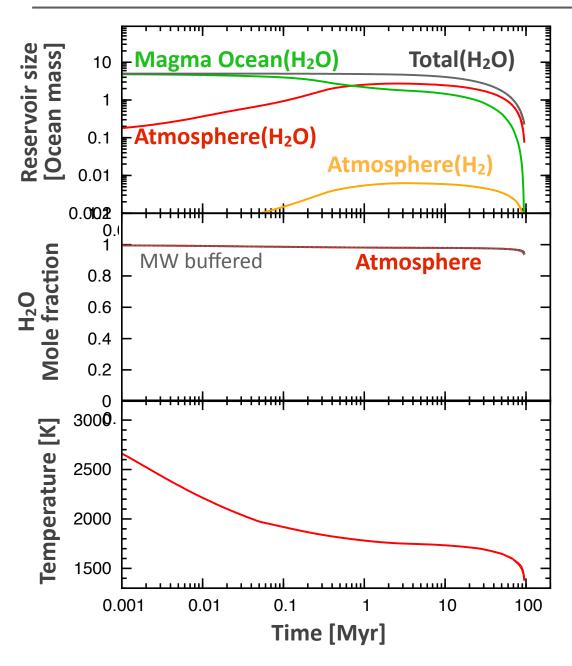
結果:Type I, 1AÜ, x_{H2O}=0.28 (IW-1)



- H₂が加わることで大気中のH₂O 量は増加
- 脱ガスによりH₂O-rich大気へ →ほぼ同じ固化時間<~2 Myr
- 初期のH₂がほぼ残り、固化後の 大気組成へ影響

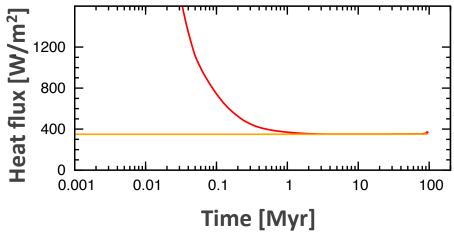


結果:Type Ⅱ, 0.7AU, x_{H2O}=1 (MW)

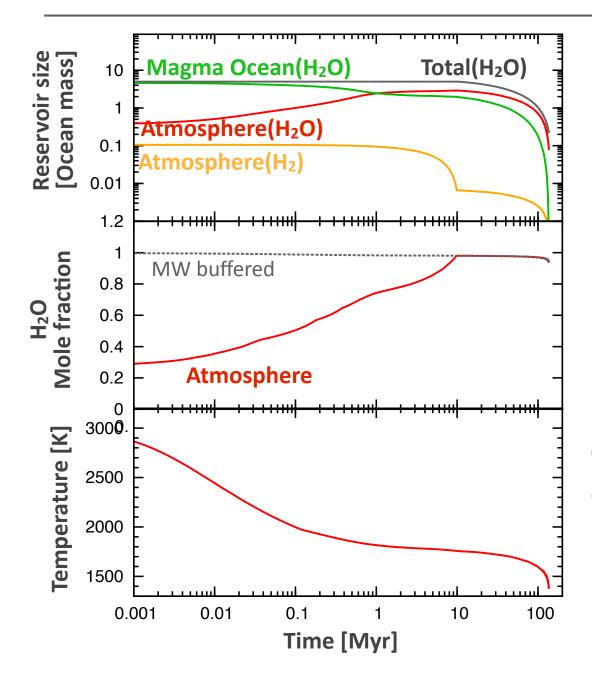


- 惑星放射が正味恒星放射にほぼ 等しくなる
- それ以降はH₂, H₂OともにMW バッファの値を保ちつつ減少 H→散逸, O→マグマ

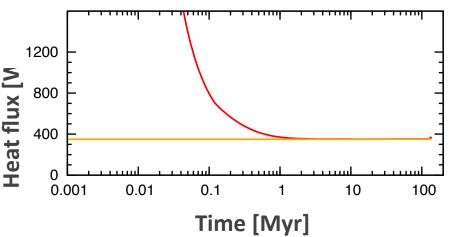
- H散逸が固化時間を決める



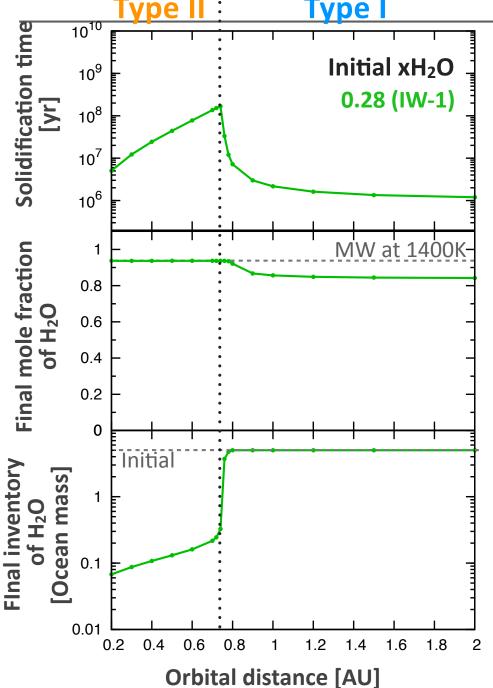
結果:Type II, 0.7AU, x_{H2O}=0.28 (IW-1)



- 初期はH₂散逸により大気が酸化
- 十分酸化的になるとマグマによりバッファされH₂, H₂Oともに減少
- H₂を加えたことで固化時間が増加←総Hが増加したため



結果:軌道依存性, x_{H2O}=0.28 (IW-1)



初期条件:

H₂O総量:5海洋質量

大気H₂Oモル分率xH₂O: 0.28 (IW-1)

軌道に依存した二分性は生じる

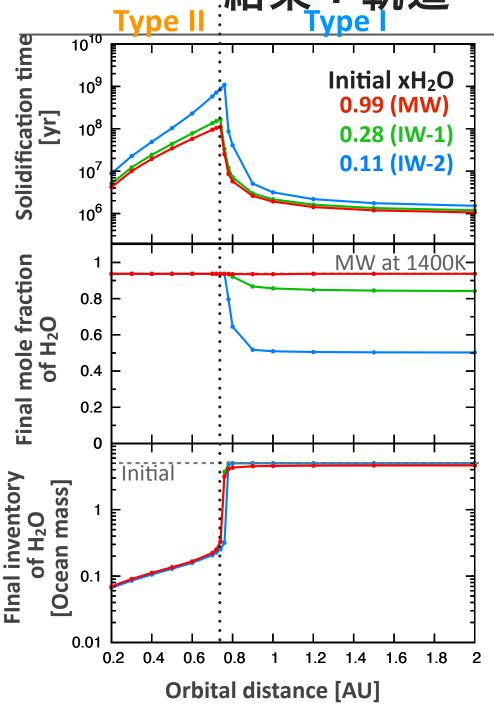
Type I:

固化時間への影響は小さい H₂は残り固化時の大気組成に影響

Type II:

総H量と散逸率が固化時間を決める 固化時は酸化的な大気が形成

結果:軌道·初期x_{H2O}依存性



初期条件:

H₂O総量:5海洋質量

大気H₂Oモル分率xH_{2O}: 0.28 (IW-1)

軌道に依存した二分性は生じる

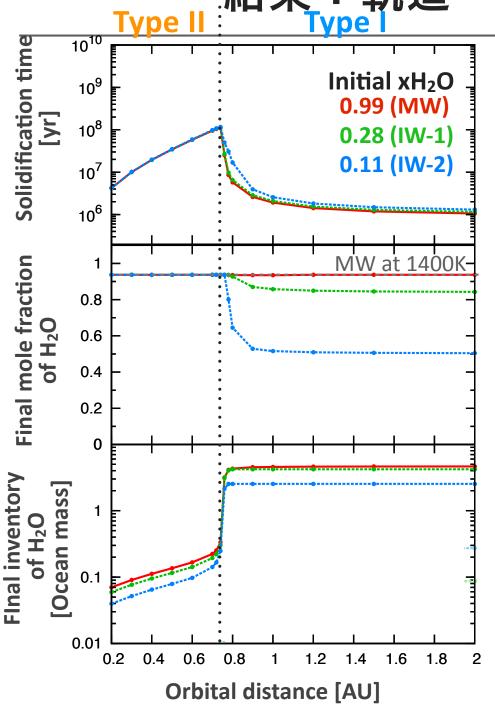
Type I:

固化時間への影響は小さい H₂は残り固化時の大気組成に影響

Type II:

総H量と散逸率が固化時間を決める 固化時は酸化的な大気が形成

結果:軌道·初期x_{H2O}依存性



初期条件:

H₂総量(H₂+H₂O):5海洋質量相当

大気H₂Oモル分率x_{H2O}: 0.28 (IW-1)

軌道に依存した二分性は生じる

Type I:

固化時間への影響は小さい H₂は残り固化時の大気組成に影響

Type II:

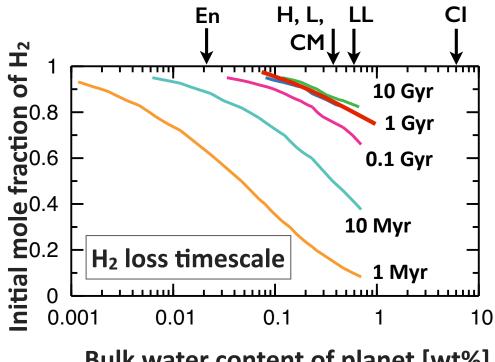
総H量と散逸率が固化時間を決める 固化時は酸化的な大気が形成

初期の地球と金星



地球: Type I

- 数百万年のタイムスケールで固化 [e.g. Caro et al. 2007]
- 固化時には初期のH2・H2Oを保持 形成時に獲得したH2量が 初期の大気組成・気候へ影響
- H₂ が2.5 Gaまでに散逸という制約 →初期にの水量とモル分率へ制約



Bulk water content of planet [wt%]



金星: Type I or II

固化時には酸化的、固化時間は揮発性物質量に強く依存

まとめ

- ・ 惑星形成時には水素を含む還元的な大気が形成されうる
- ・水素が加わることで、軌道によらず惑星の固化は遅くなる
- ・地球を含むType Iの惑星では、水素の大部分が固化後に残り、 海洋の形成・成長時間を遅くする
- Type IIの惑星では、総H量が固化のタイムスケールを決める。
 また、水素は失われ、固化後には少量(10bar以下)の水蒸気大気が残る