深いマグマオーシャンの固化と大気進化





2024/03/07 CPS/WTK & ABC ワークショップ「生命の起源と進化を規定した惑星表層環境を考える」@CPS, 神戸



[Zahnle et al. 2007,2010]





粘性に応じた2つのレジーム

[Abe 1993]



深いマグマオーシャン上の大気量と組成:溶解平衡



脱ガスによる大気量・組成の変化:ΔIW一定



脱ガスによる大気量・組成の変化:結晶化によるΔIWの増加



内部へのvolatileの取り込み



- ►Hard MOにうつる段階で7-9割のH₂Oは まだマグマオーシャンに溶解
- 後期脱ガス速度が地表H₂O量・海洋体積に影響
- ▶取り込み量を左右する過程
 小河さんのお話
 分別結晶 or 平衡結晶 (+メルトのトラップ)
 浸透流 v.s. Solid state convection
 - 地表の岩石層の成長・内部からの噴出過程

▶H₂Oに富むことで、粘性が低下し、

マントル対流やプレート運動に影響?

[Miyazaki & Korenaga 2022; Bower et al. 2022; Maurice et al. 2023]

地表fO2の惑星質量依存性?

Atmosphere

Magma ocean

[Deng et al. 2020]



脱ガス大気組成についてのまとめ

- ▶ 固化の初期段階では大気は溶解度の低い気体(CO, CO₂, H₂ etc.)で構成
- ▶幅広いΔIWでH₂Oの7-9割は後期段階までマグマオーシャンに溶解
- ▶ 複数のマグマオーシャンの酸化過程(Fe³⁺/Fe²⁺の増加)が提案
 - 高圧下での金属鉄ーシリケイトの平衡化
 結晶化に伴う固液間の分配:地表マグマのFe³⁺/Fe²⁺を増加
 酸化的な大気の形成
 (- Hの流体学的散逸)

還元過程は?

コア形成後の還元的/始原的な物質の集積

[e.g. Dauphuas 2017]

大気進化によるマグマオーシャン固化へのフィードバック

大気進化によるマグマオーシャン固化へのフィードバック





大気進化によるマグマオーシャン固化へのフィードバック











Implications for occurrence rates of MO with H₂ atmospheres



H₂O 大気は?

高温水蒸気大気からの惑星放射



水蒸気大気を持つ惑星の固化過程:軌道による二分性



The lifetime of magma oceans with H₂O atmospheres



マグマオーシャンからの熱フラックスが極端に低い場合の大気構造



▶内部熱フラックスが0の大気構造 - 最下層(地表付近)は放射層 - 恒星放射が下層まで届かない ▶同じ惑星放射・大気量では、 全対流と比べ地表温度は低下 - 脱ガスが追いつかない場合は大気構造 の変化に伴い冷却 ▶F型→G型→K型→M型の順に 地表温度は低下は顕著に 小河さんのお話: マグマオーシャン運ぶ熱フラックスが

追いつかない場合は?

Recent 3D simulations for Venus (slowly-rotating planets)



複数の気体種からなる大気では?

- ▶ C-O-H-(N)大気: 1 AU では<数百万年で固化
 - H inventory: 1-10 Earth's ocean - C/H : 0.5-5

[Bower et al. 2022, Maurice et al. 2023]

▶ H₂-H₂O大気







H₂-H₂O大気:初期fO₂による依存性



[Hamano et al. 2013, Hamano & Genda, Under review]

Total H inventory: 5 Earth's ocean masses

H₂-H₂O大気:初期fO₂による依存性



[Hamano et al. 2013, Hamano & Genda, Under review]

H₂-H₂O大気:初期fO₂による依存性



- ► On Type I planet, the remaining outgassed atmosphere reflects the initial redox state
- ► On Type II planet, initial f_{O2} has little effects on the MO lifetime and atmosphere remained [Hamano et al. 2013, Hamano & Genda, Under review]

大気進化と保温効果のまとめ

- ▶保温効果の強さによって、固化を律速する過程が変わる
 - ① 惑星放射 >> 正味恒星放射:保温効果の強さに応じて固化時間が長くなる
 - ② 惑星放射 ~ 正味恒星放射:大気散逸が固化速度を律速
- ▶ H₂O大気以外(H₂, CO, CO₂, N₂ etc.)
 - 大気量の増加に伴い、①から②へ切り替わる(と予想)
 - ②では大気散逸により固化の間にvolatile量が減少
 - ▶H₂Oに富む大気
 - 射出限界の存在によって、臨界距離の外側では常に①(Type I)
 - 臨界距離を境に、固化速度・残存するH₂O量が変わる

Future issues

マグマオーシャン

惑星進化

▶惑星形成過程の違いに由来する違い 初期条件がどう決まっているのか?

- (今日の話)マグマ(材料物質)組成(fO₂), H₂獲得量, hot/cold start, etc.
- Giant impactの有無によってコア形成過程も異なる [Jacobsen et al. 2017]
- 惑星質量や軌道位置, 材料物質と形成過程の相関は?
- ▶ 非平衡過程:コア形成(metal-silicate equilibration), 脱ガス etc.
- ▶ 固化後の表層環境にcriticalなものは?

惑星形成過程