

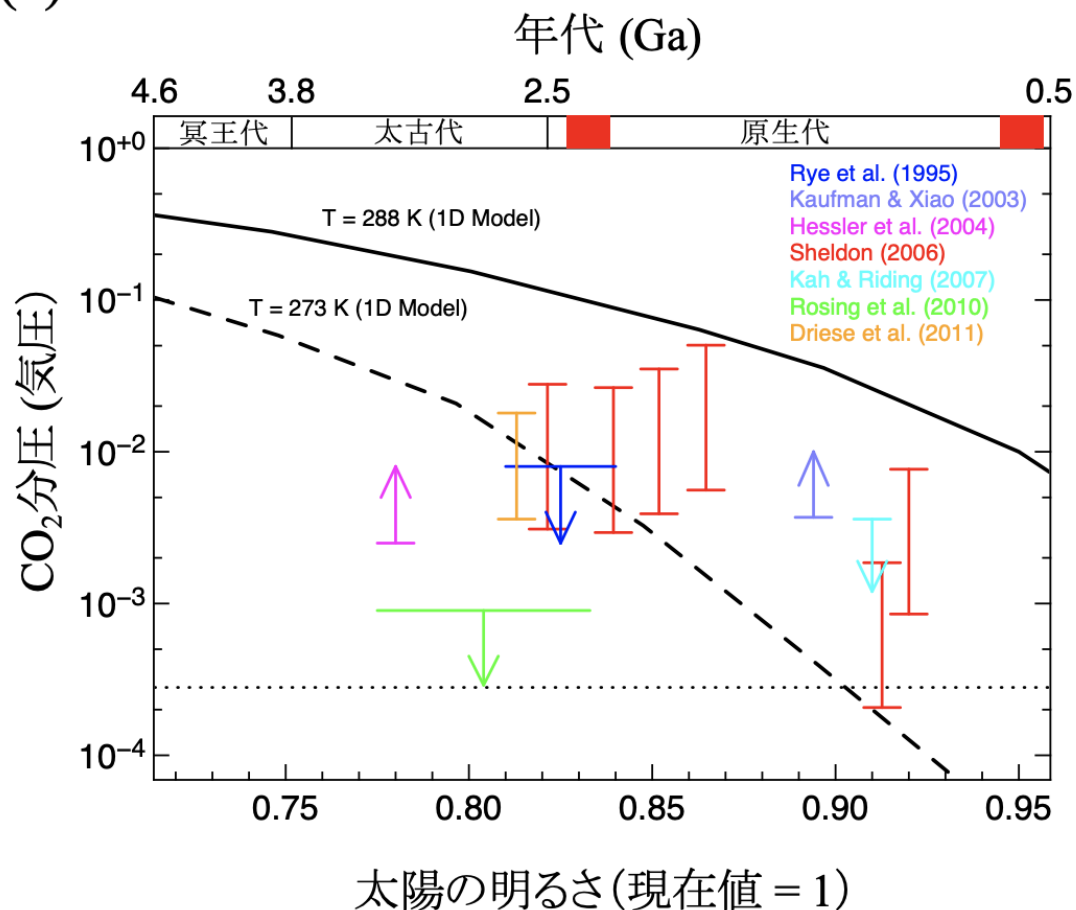
惑星のマントル進化と表層環境

ABCセミナー，神戸CPS, 2024.3.7

小河正基
(隠居)

(1) 暗い太陽のパラドックスとカーボン・サイクル

(a)



(b)

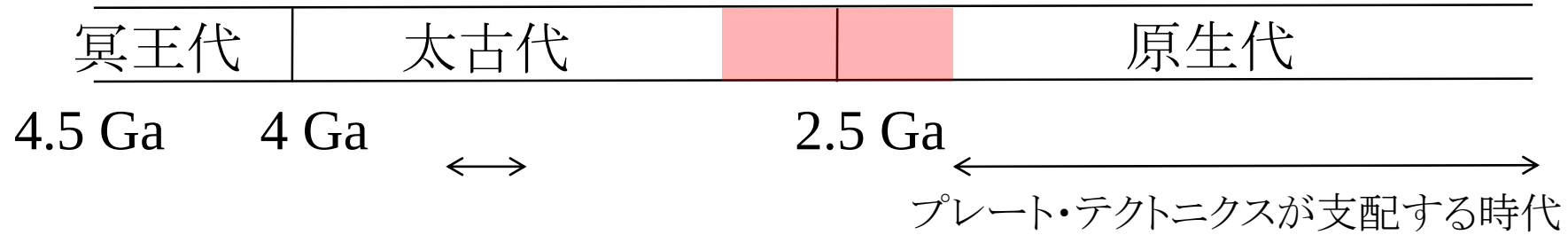
カーボン・サイクルによる説明



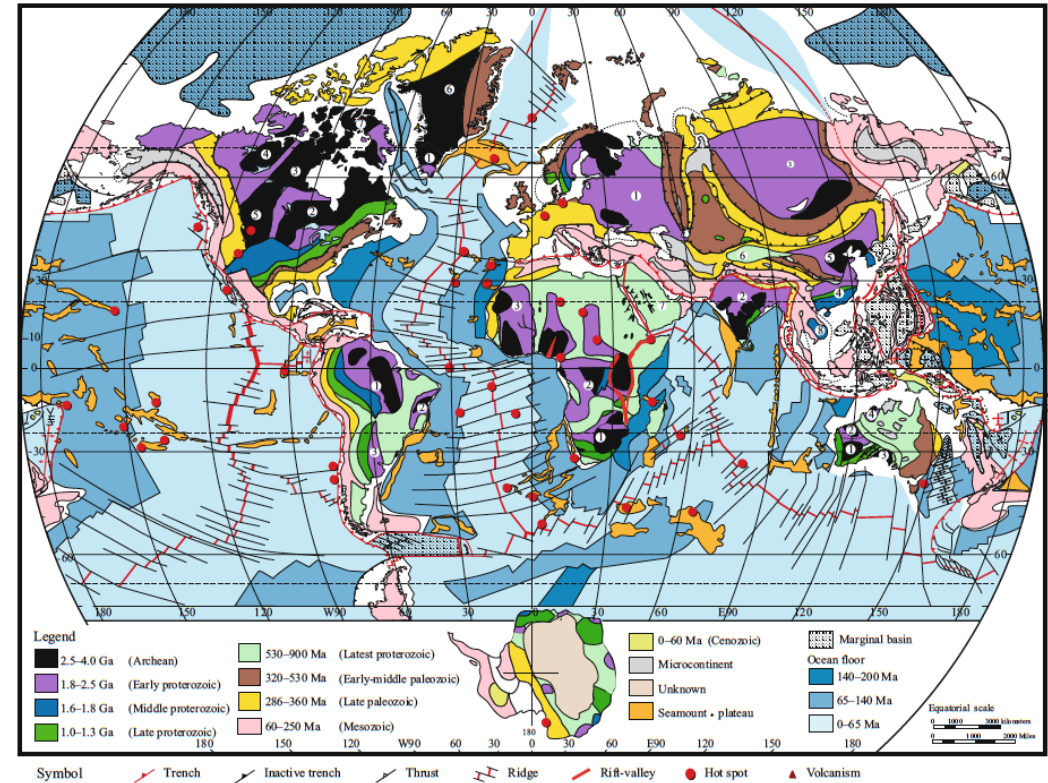
$$\text{風化率} \propto P_{CO_2}^{0.3} \exp(ET)$$

暗い太陽→気温低下→風化率低下→ P_{CO_2} 上昇→温室効果

地球のテクトニクスの変遷

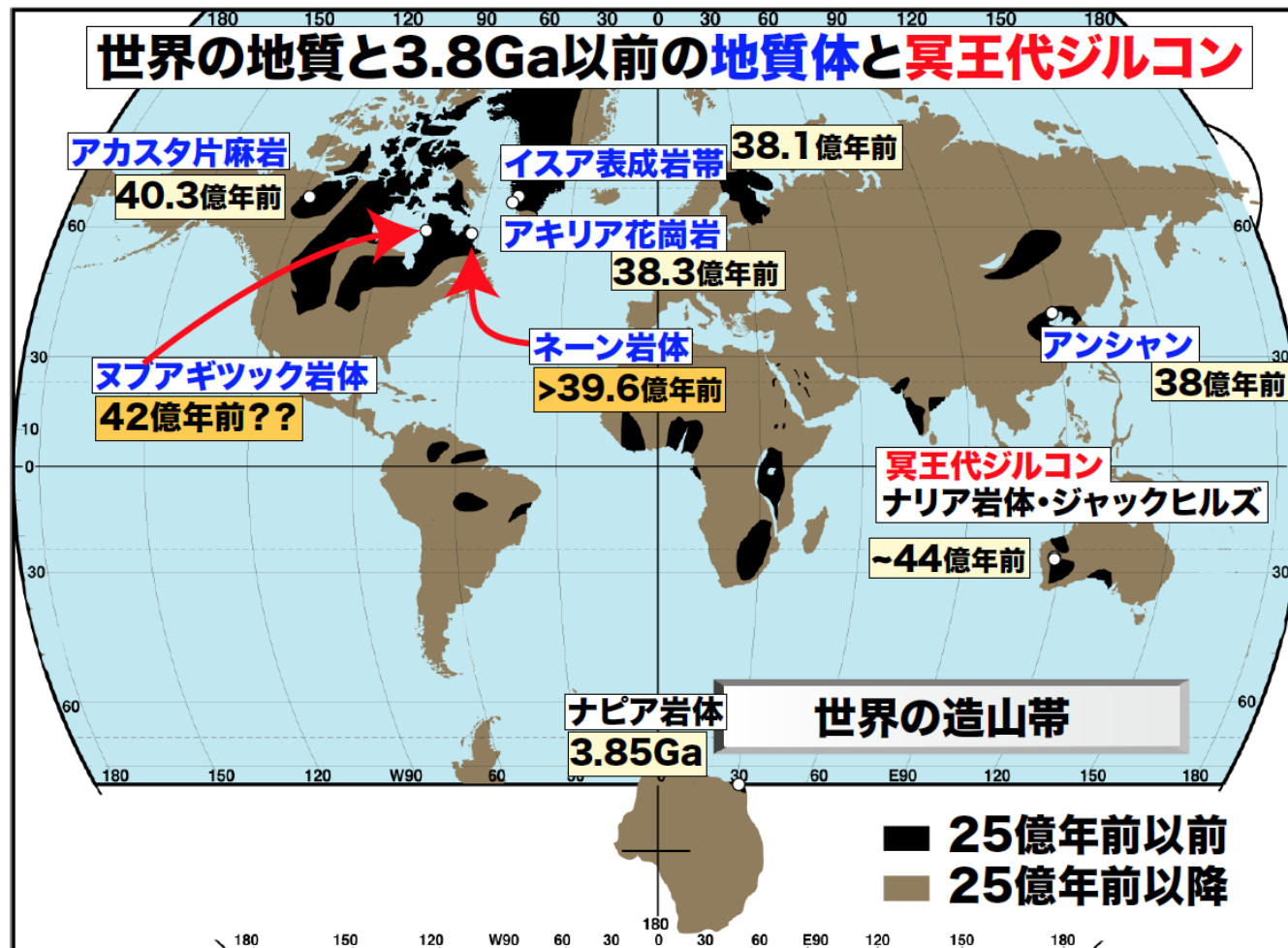


Google earth マイル 100 200 km



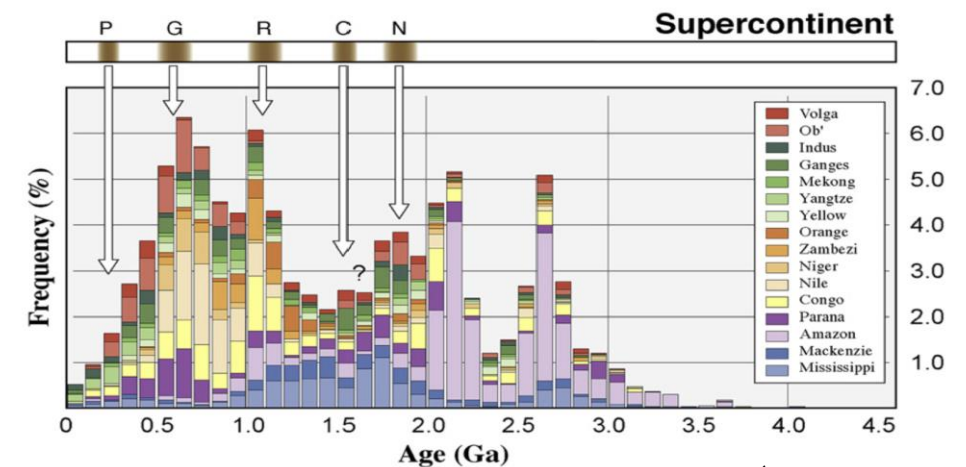
暗い太陽のパラドックスは本当に存在？

大陸がない → 海がずっと凍っていなかったことは証明できない

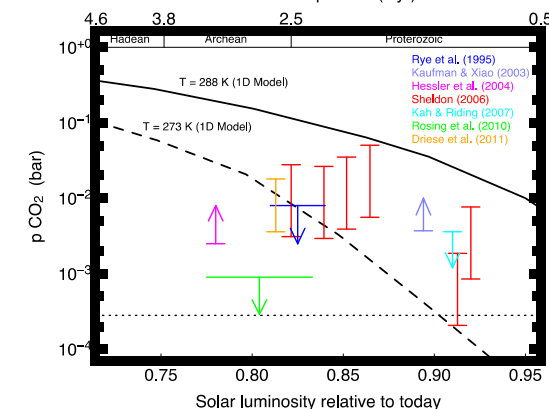


(小宮、2014)

現存する大陸の年代別頻度



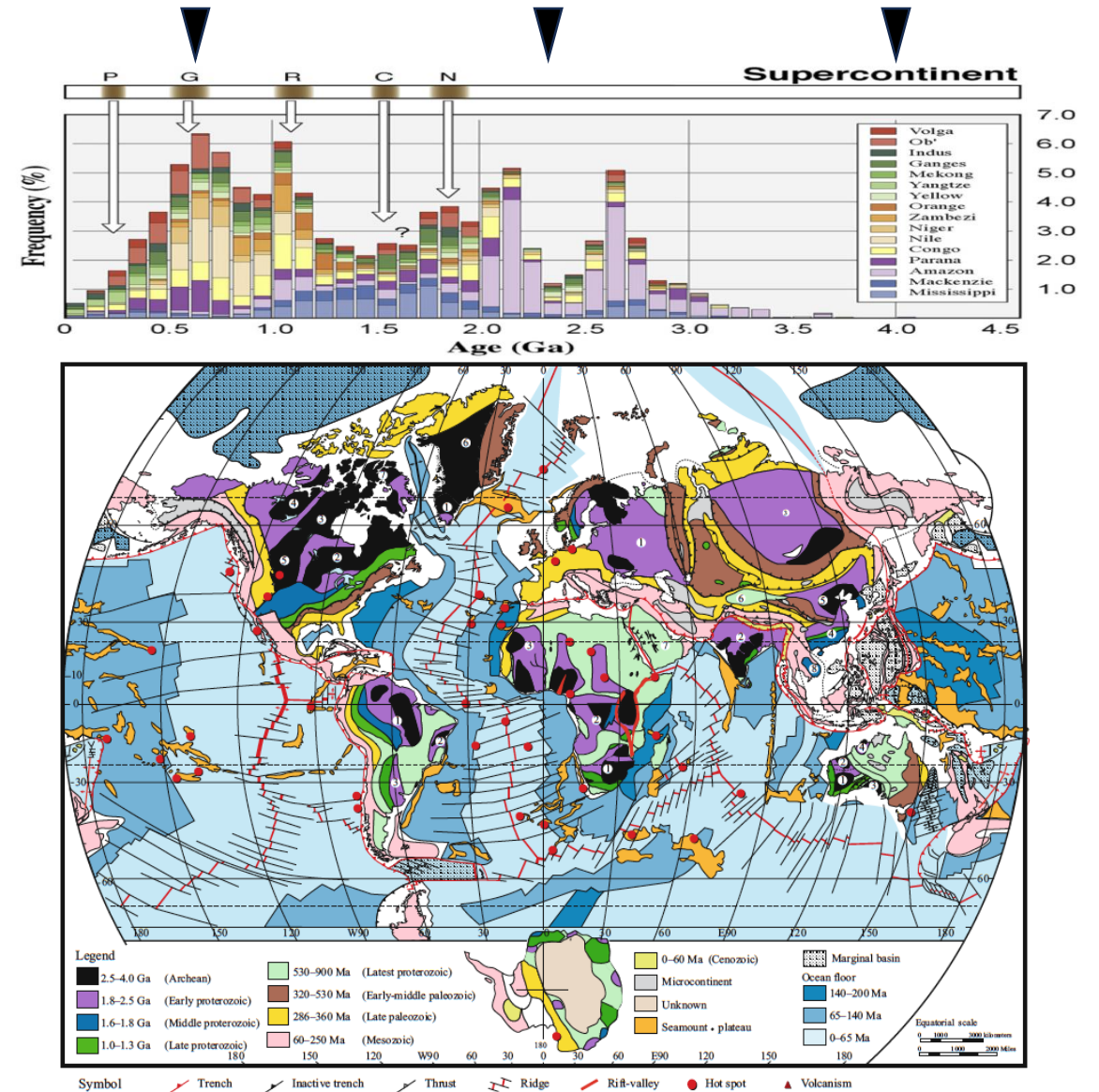
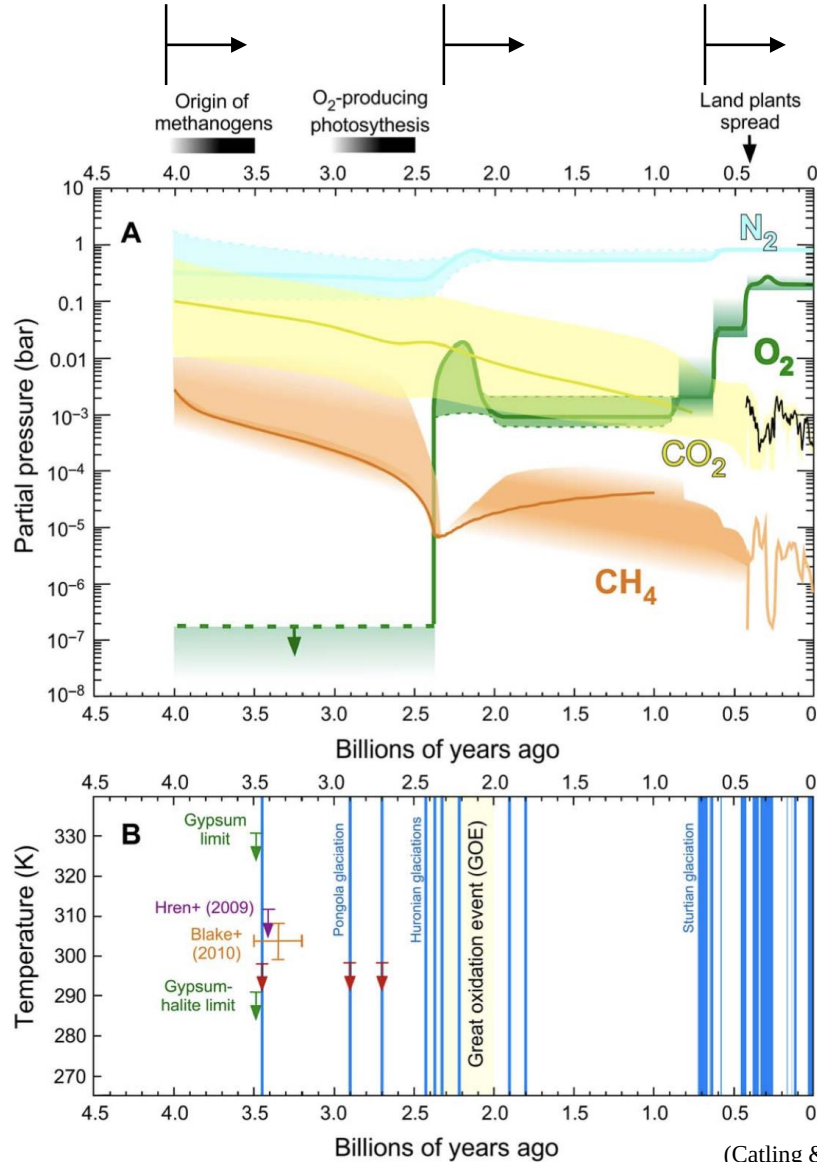
(Rino et al., 2008)



(Feulner, 2012)

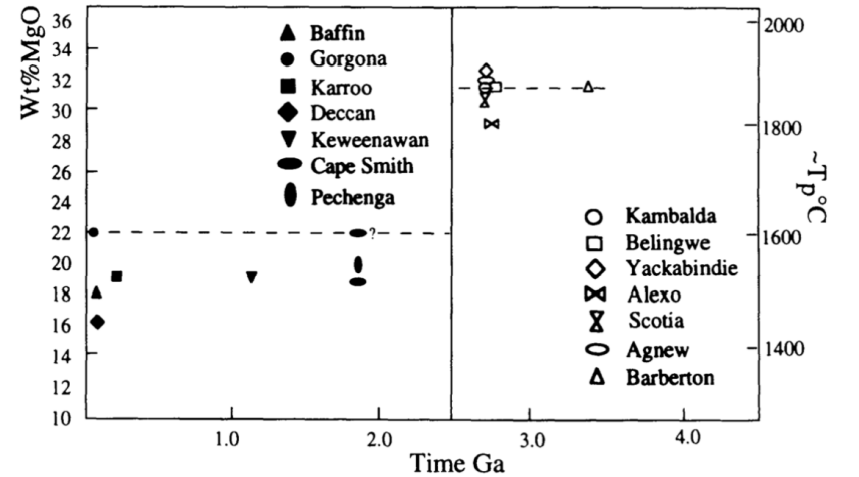
(2) スノーボール：テクトニクスと関係あるようなないような

生命の誕生？ 真核生物 多細胞生物

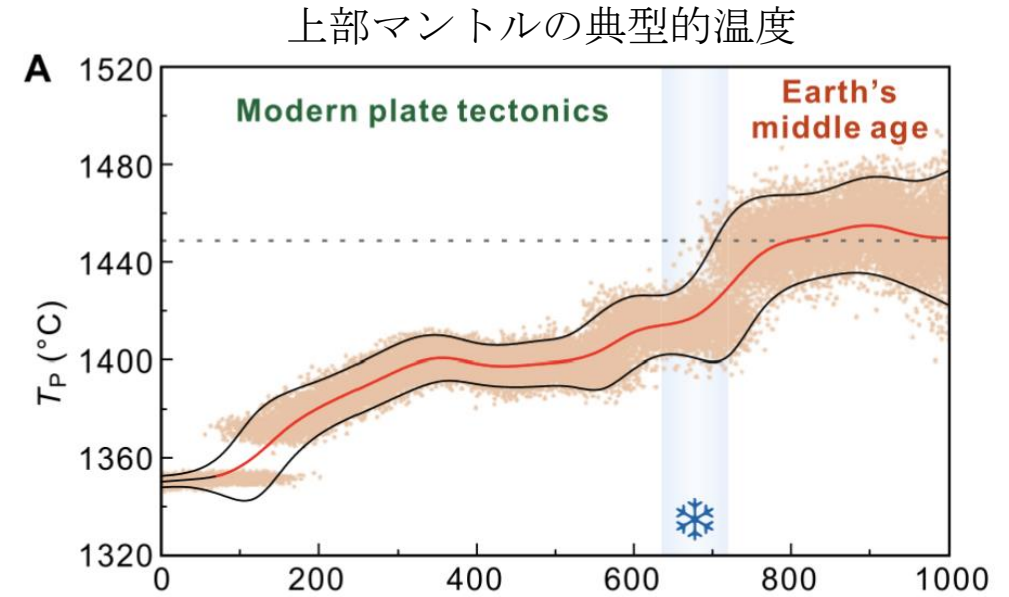


(Utsunomiya et al., 2007; Rino et al., 2008)

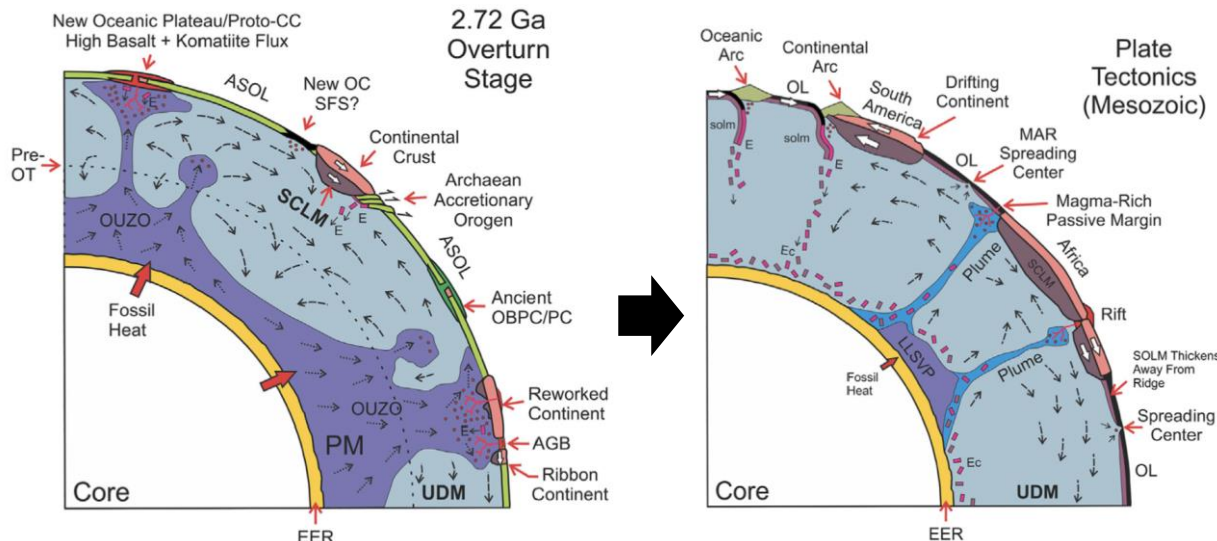
やっぱりありそう



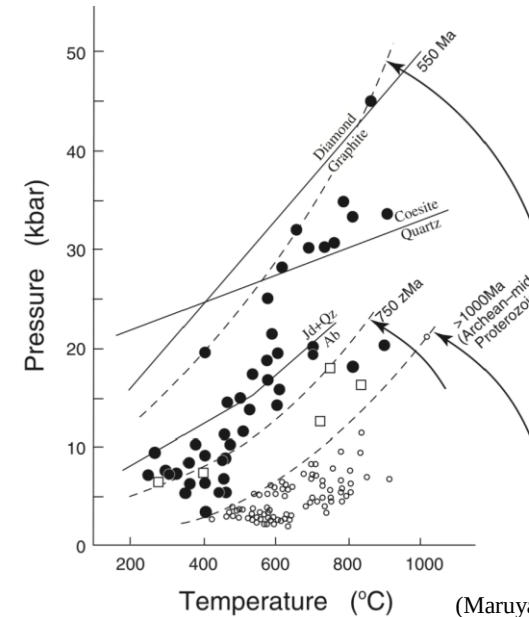
(Campbell & Griffiths, 1992)



(Chen et al., 2022)

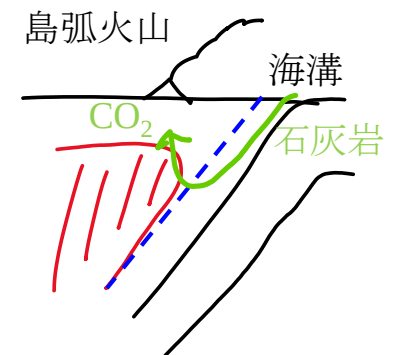


(Beddard, 2020)



(Maruyama & Liu, 1998)

ウェッジマンタルの温度



地球の内部と表層のカップリング？

地球で証拠を探す

小宮さんがreview ! ! !

火星

40億年前以降の地表面が残っている.
着陸探査の時代

35億年前頃に温暖な気候 & 火星の太陽フラックスは地球の1/2



地球のパラドックスなんて可愛いもの

内部進化が地球より単純

プレート・テクトニクスがない

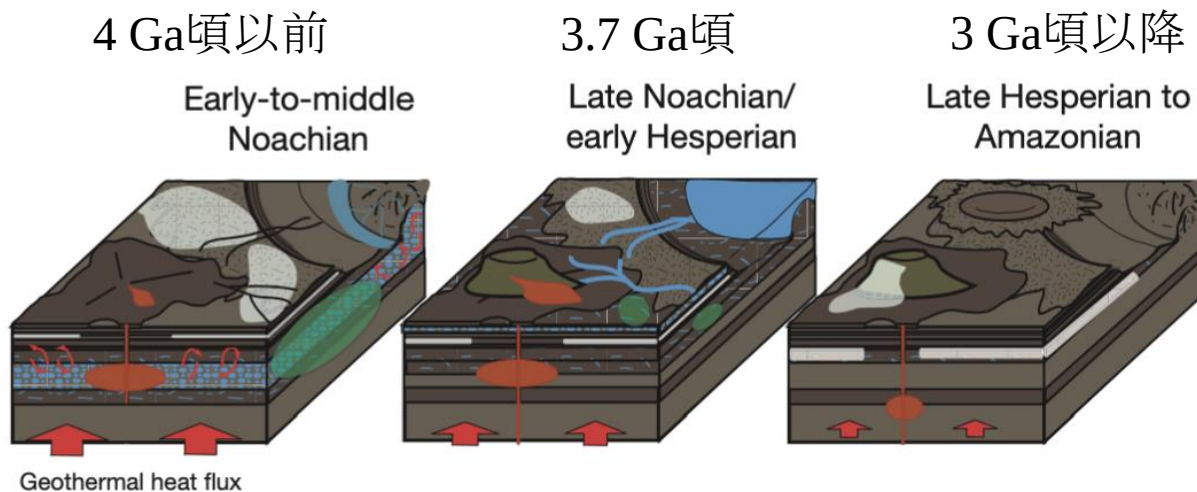


モデル化しやすい

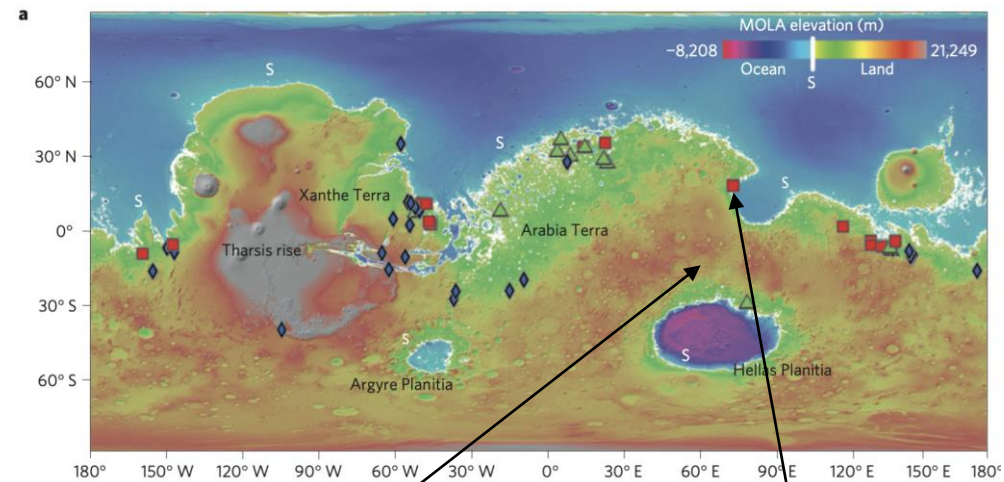


地球へ外挿

温暖な環境：Late Noachian to Hesperian

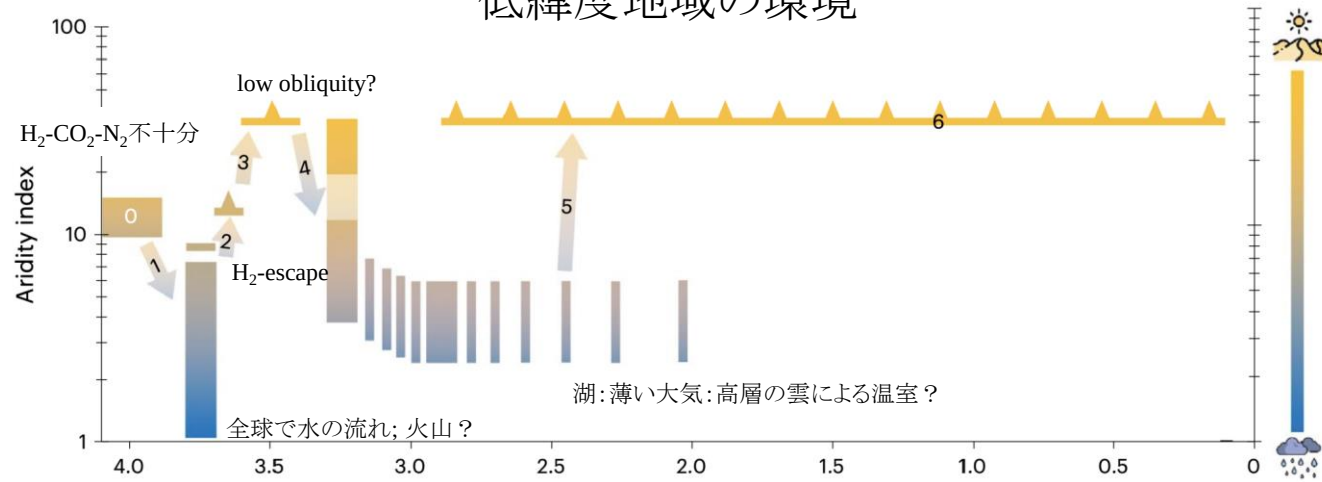


(Ehlmann et al., 2013)

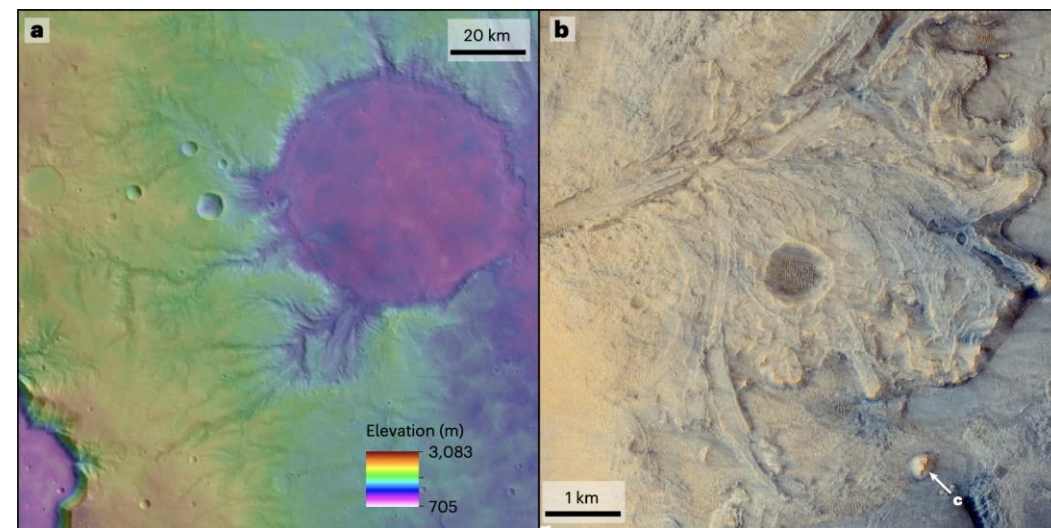


(Di Achille & Hynek, 2010)

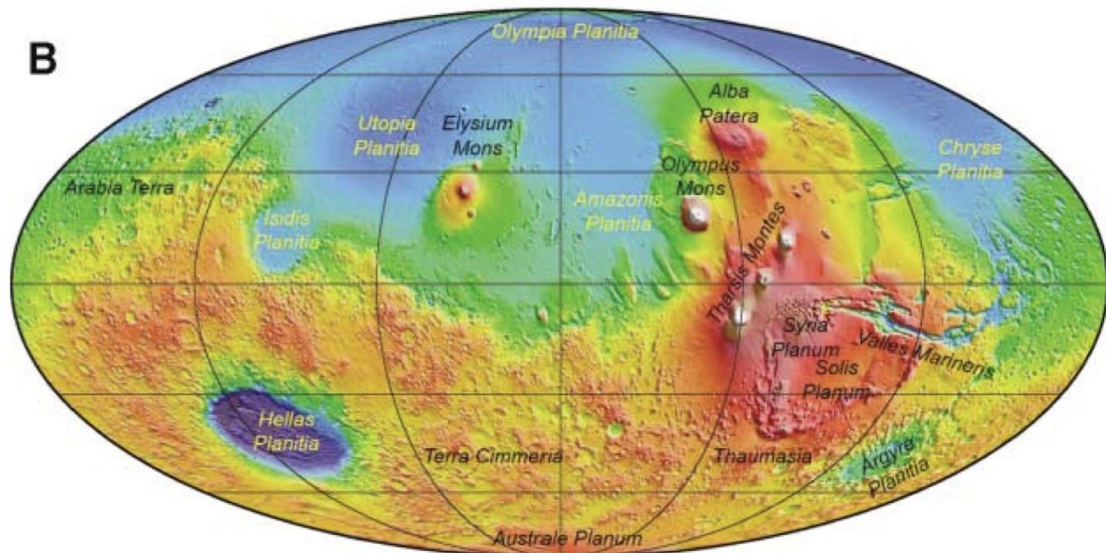
低緯度地域の環境



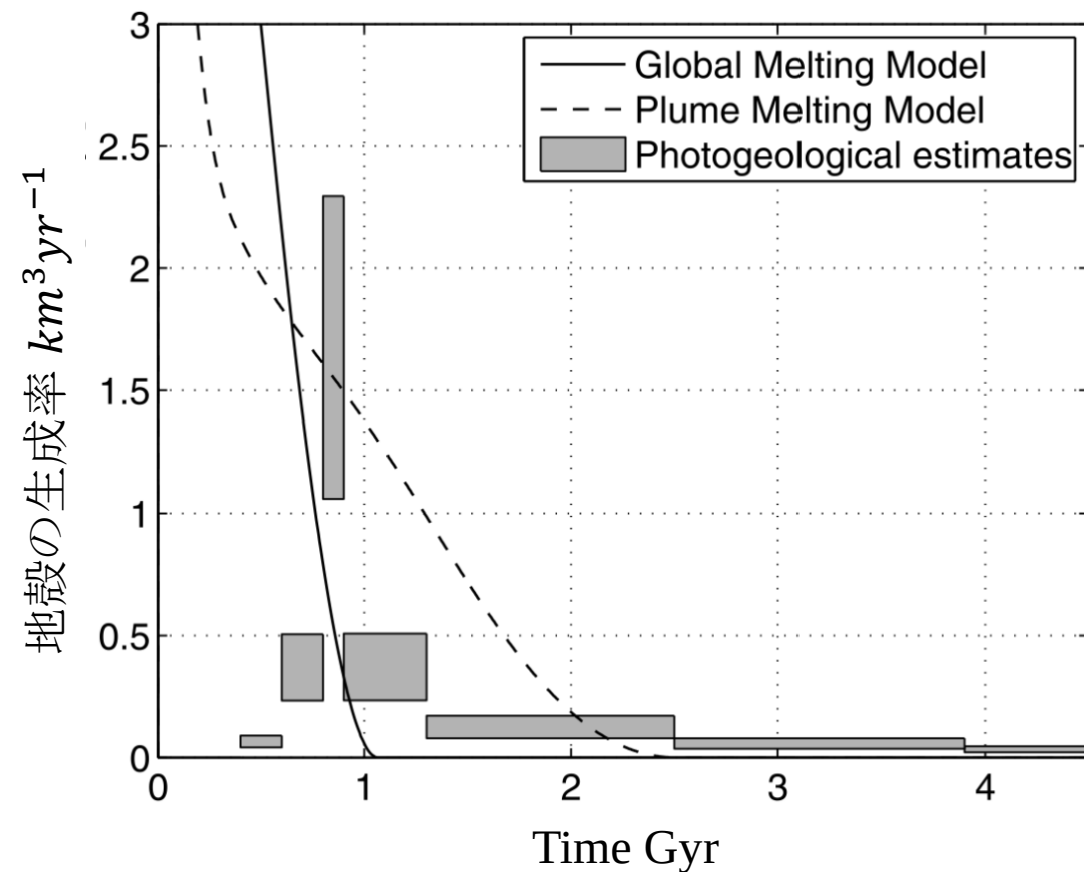
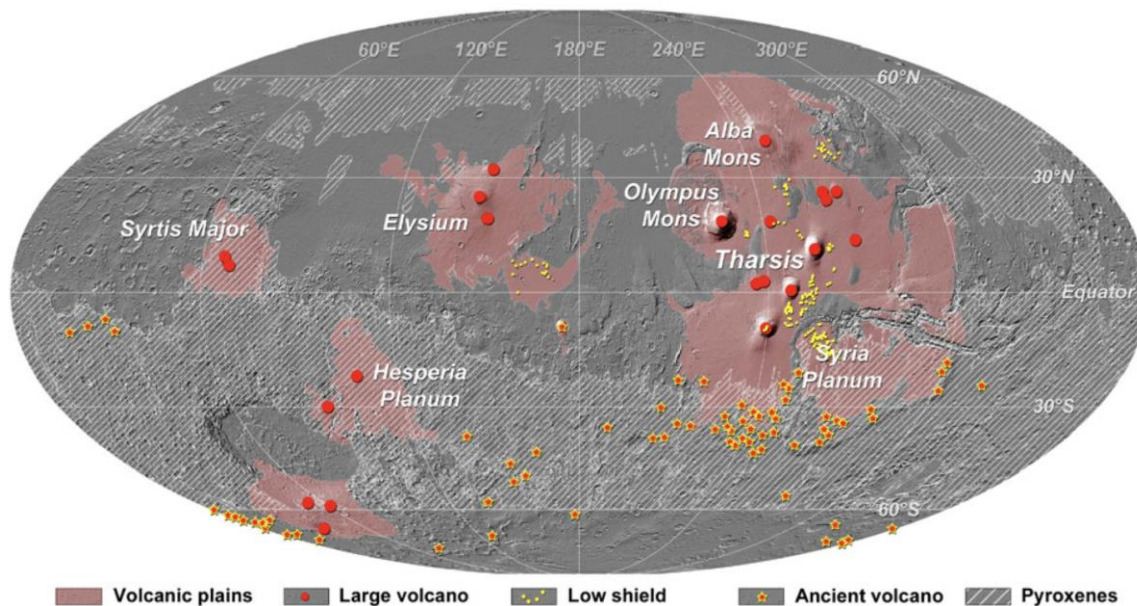
(Kite & Conway, 2024)



火山活動



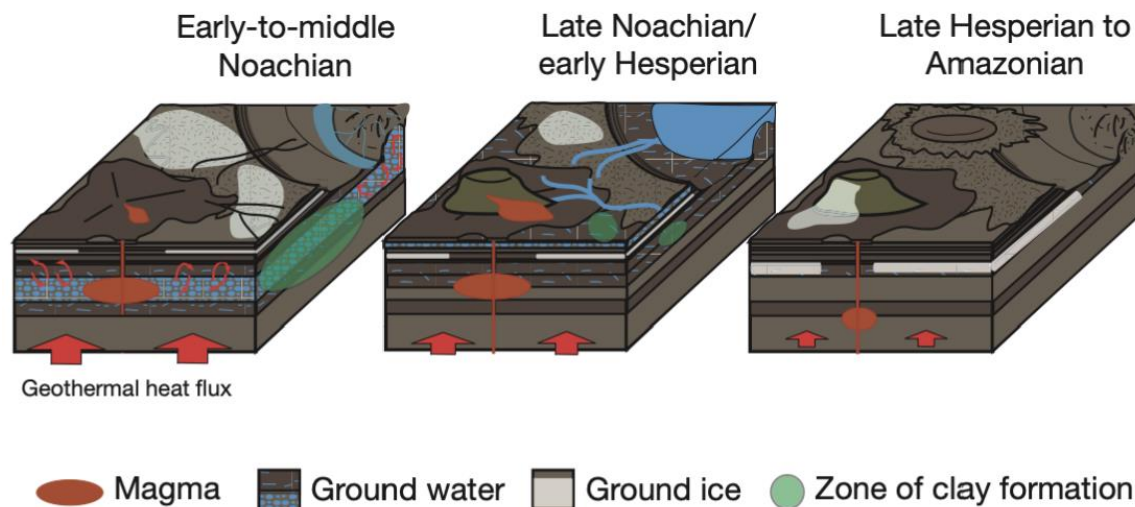
(Solomon et al., 2005)



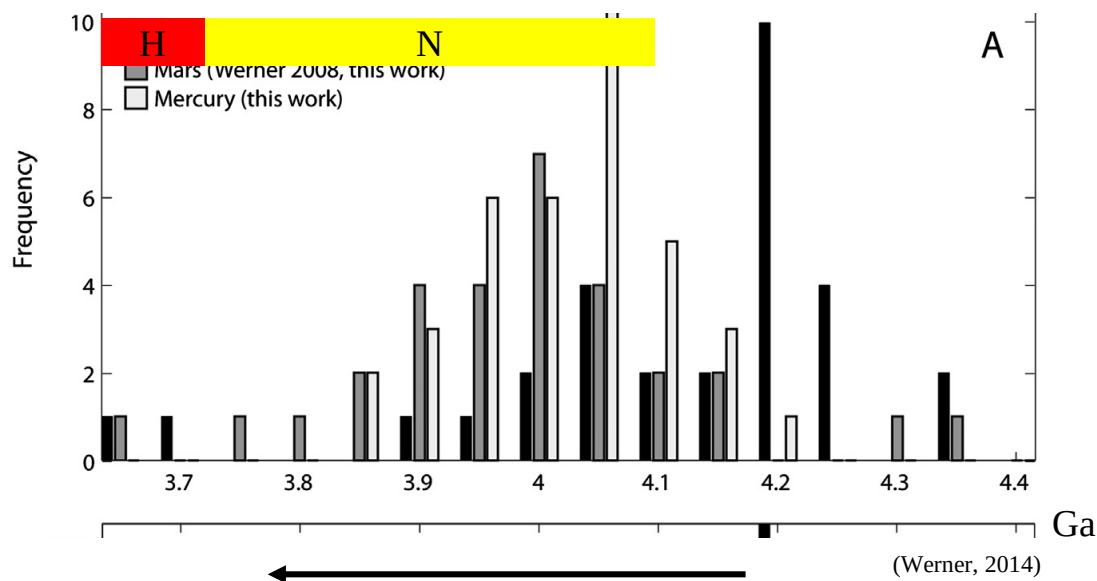
	N	H	A	
--	---	---	---	--

(Grott et al., 2013)

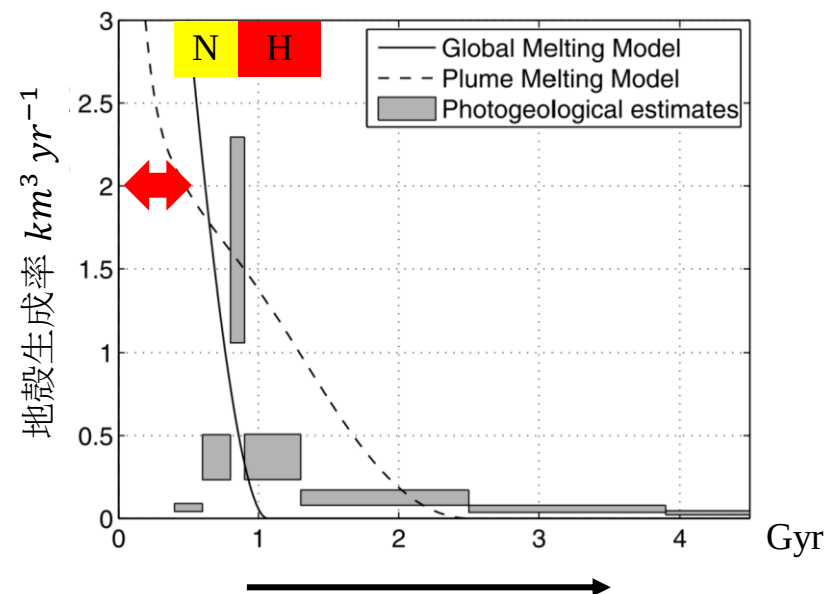
タイミング→火山活動 → ガスによる温暖化？



隕石衝突？



火山ガス？



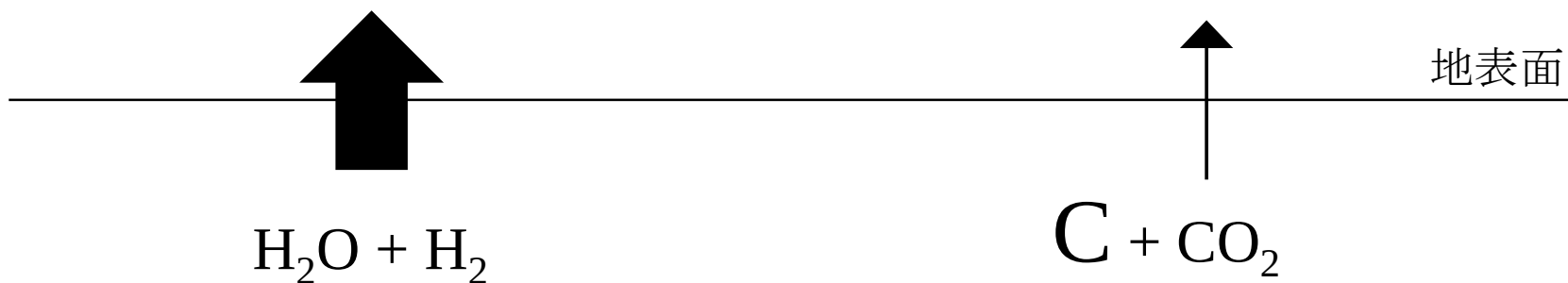
火星の温室効果ガス

火星での太陽フラックス = 地球の1/2 → CO_2 単独では不十分, + H_2 が有効

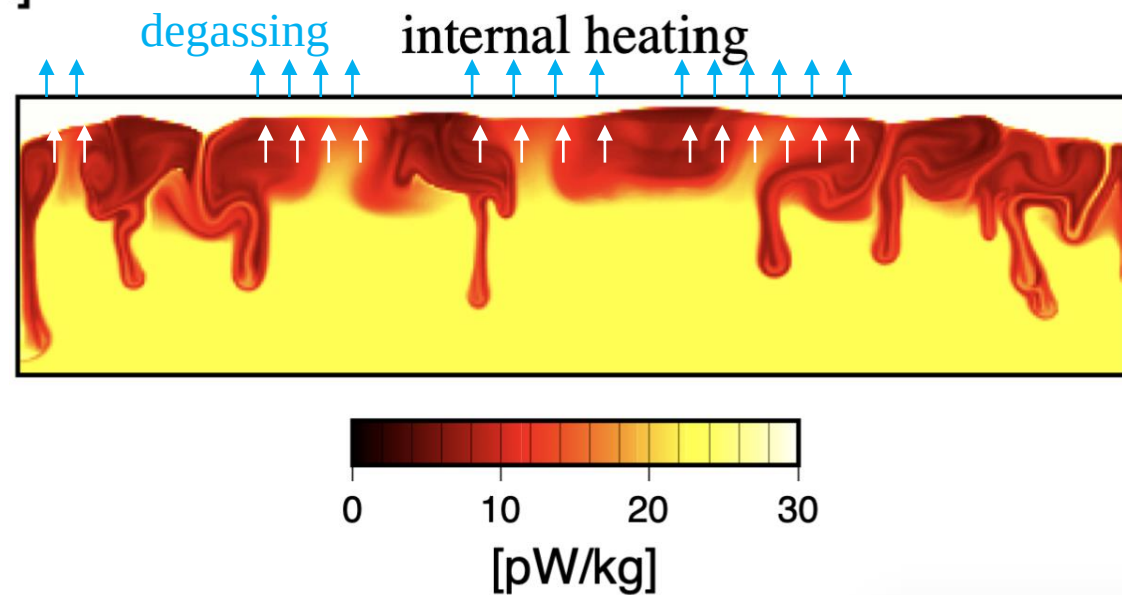
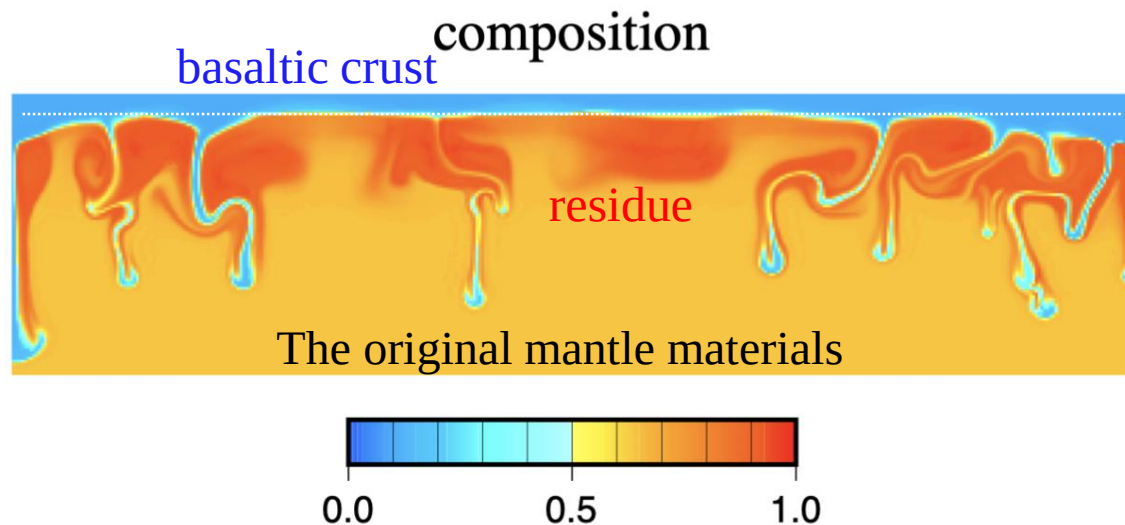
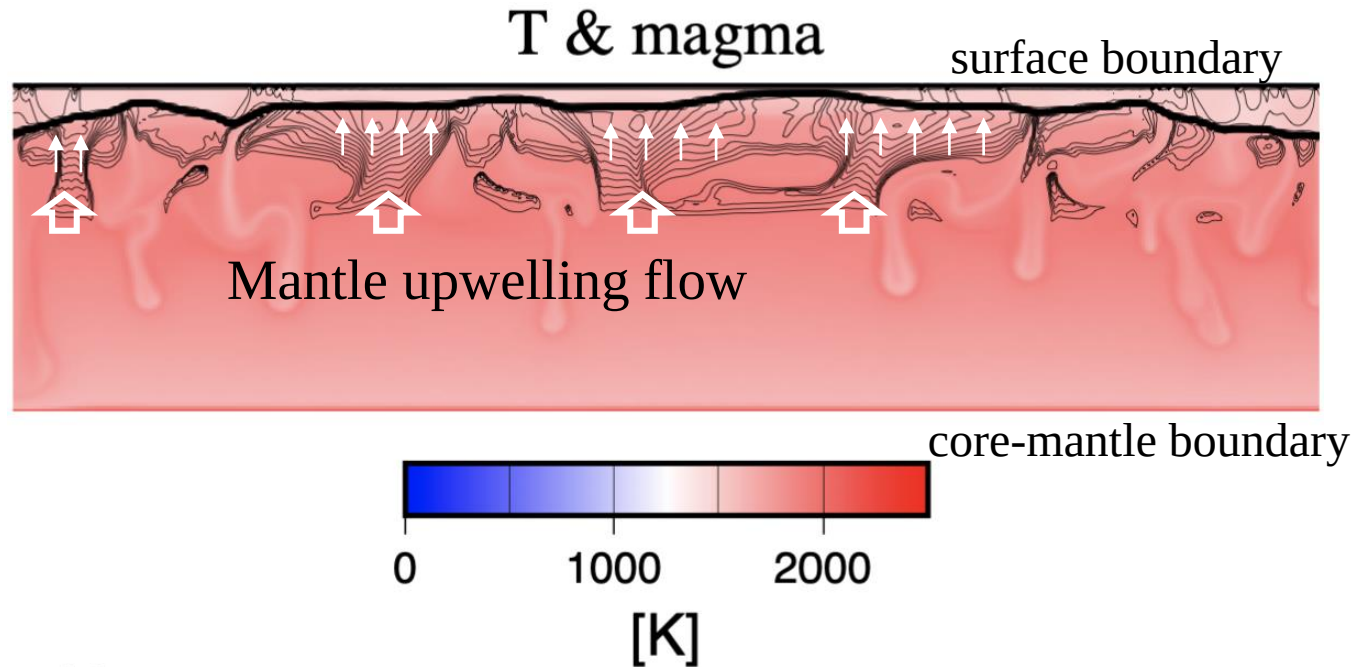
モデルの前提

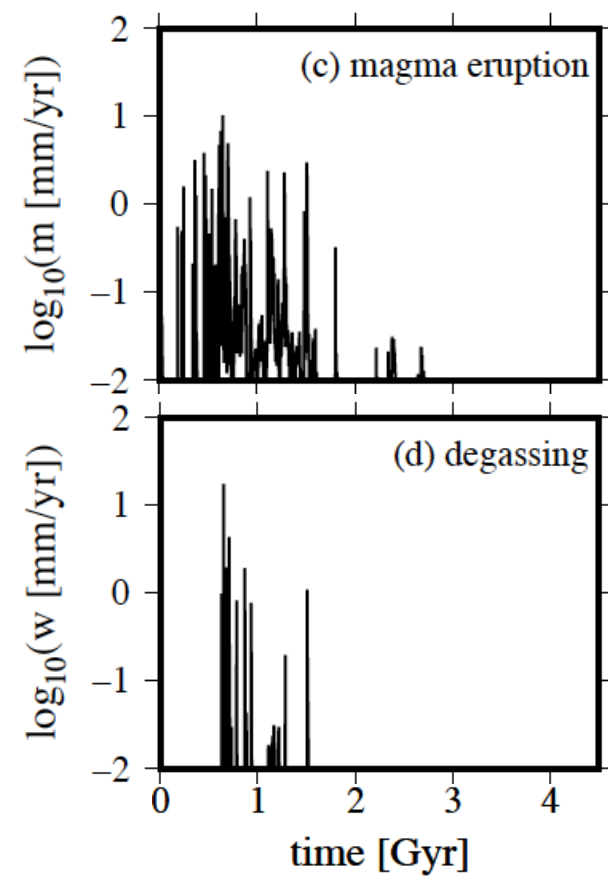
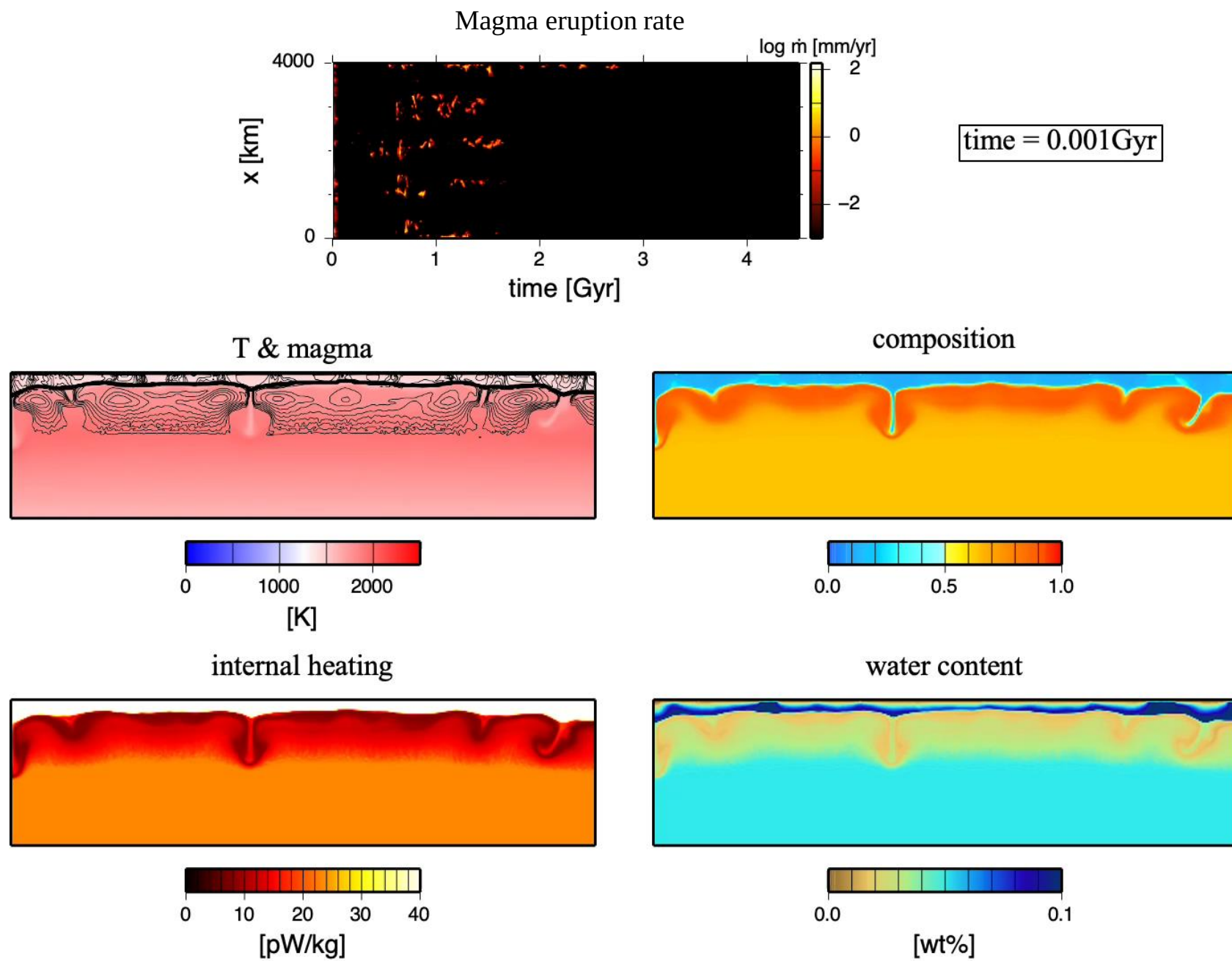
惑星形成期から大気中に CO_2 は豊富にある
マントルは還元的 → マントル中のCはグラファイト, CO_2 はほとんどなし

温暖化？

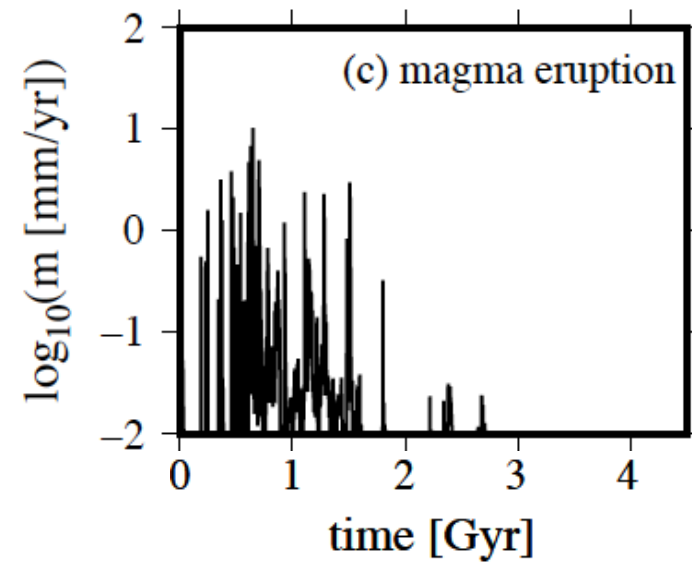
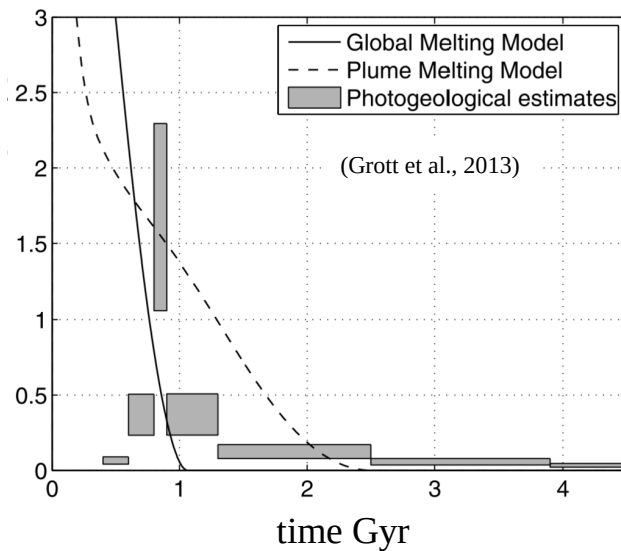


火成活動によるマンツルの進化と脱ガス

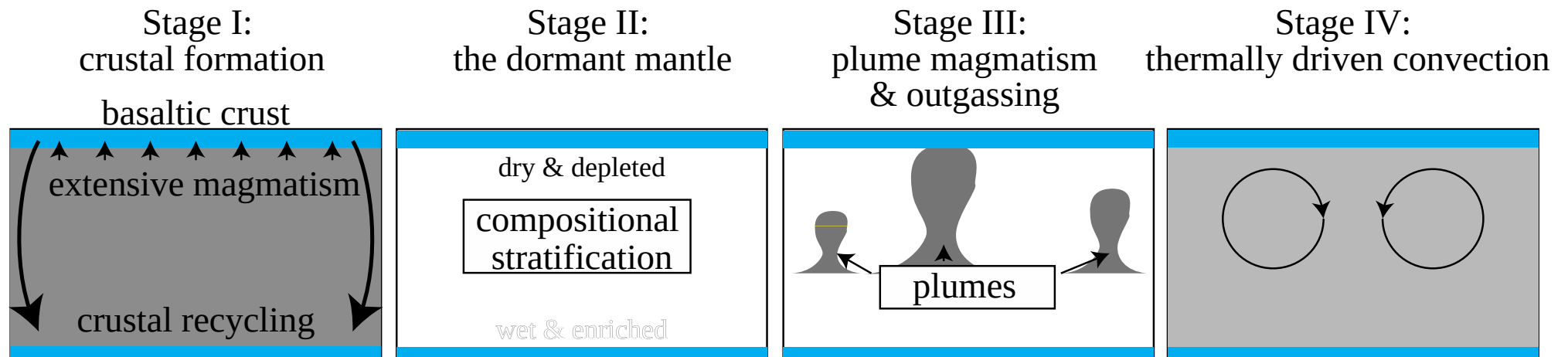




火成活動と対流によるマンタルの構造進化

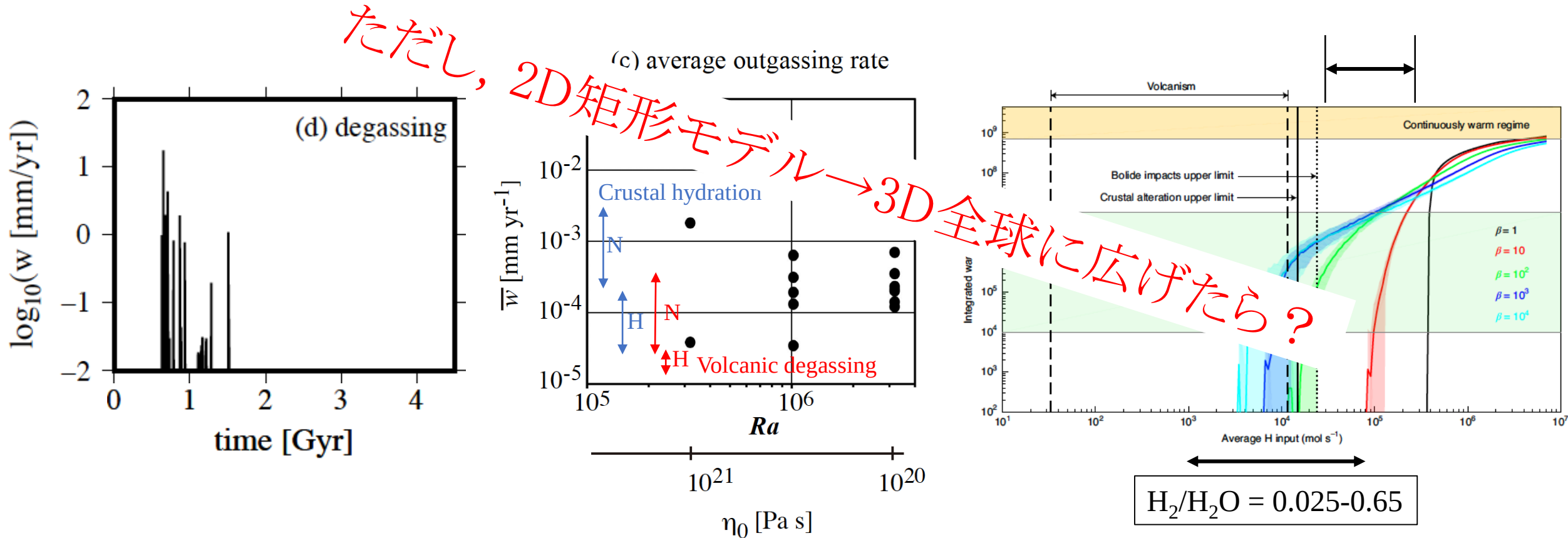


The four-stage evolution (FSE) model of Mars



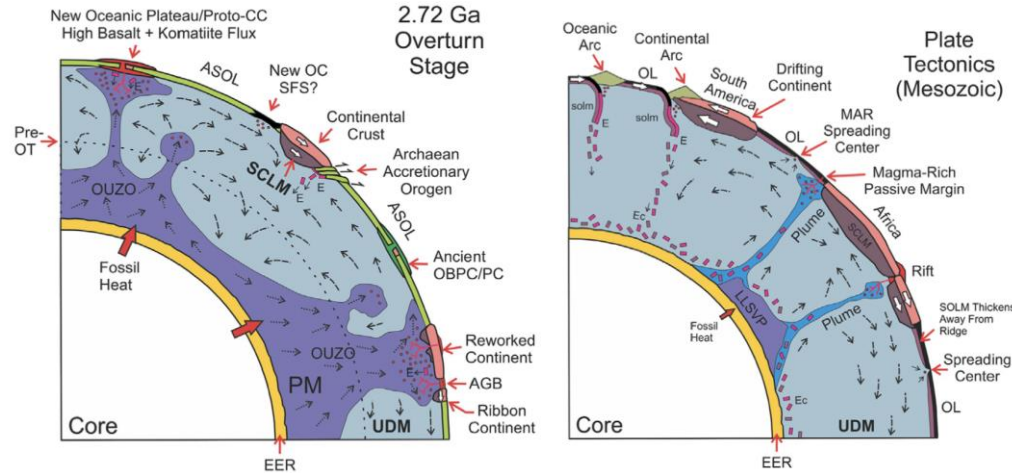
ステージIIIの表層環境

必要なH₂は供給できそう → 内部進化と表層環境はカップリング

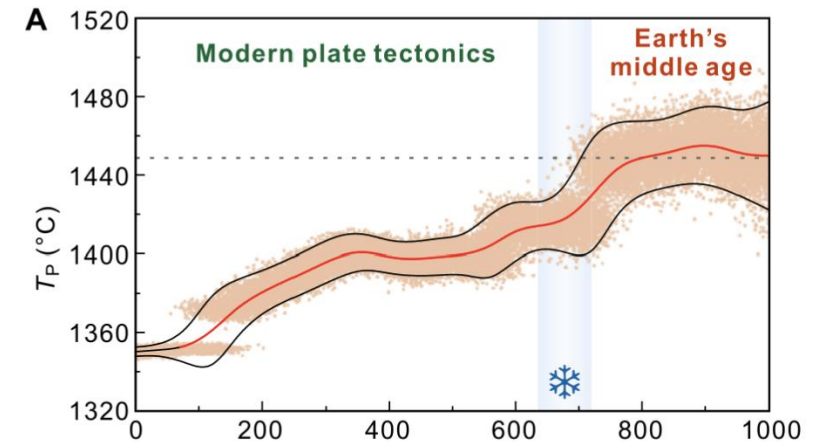


火星から地球へ

地球 = 火星 + 下部マントル + プレート・テクトニクス



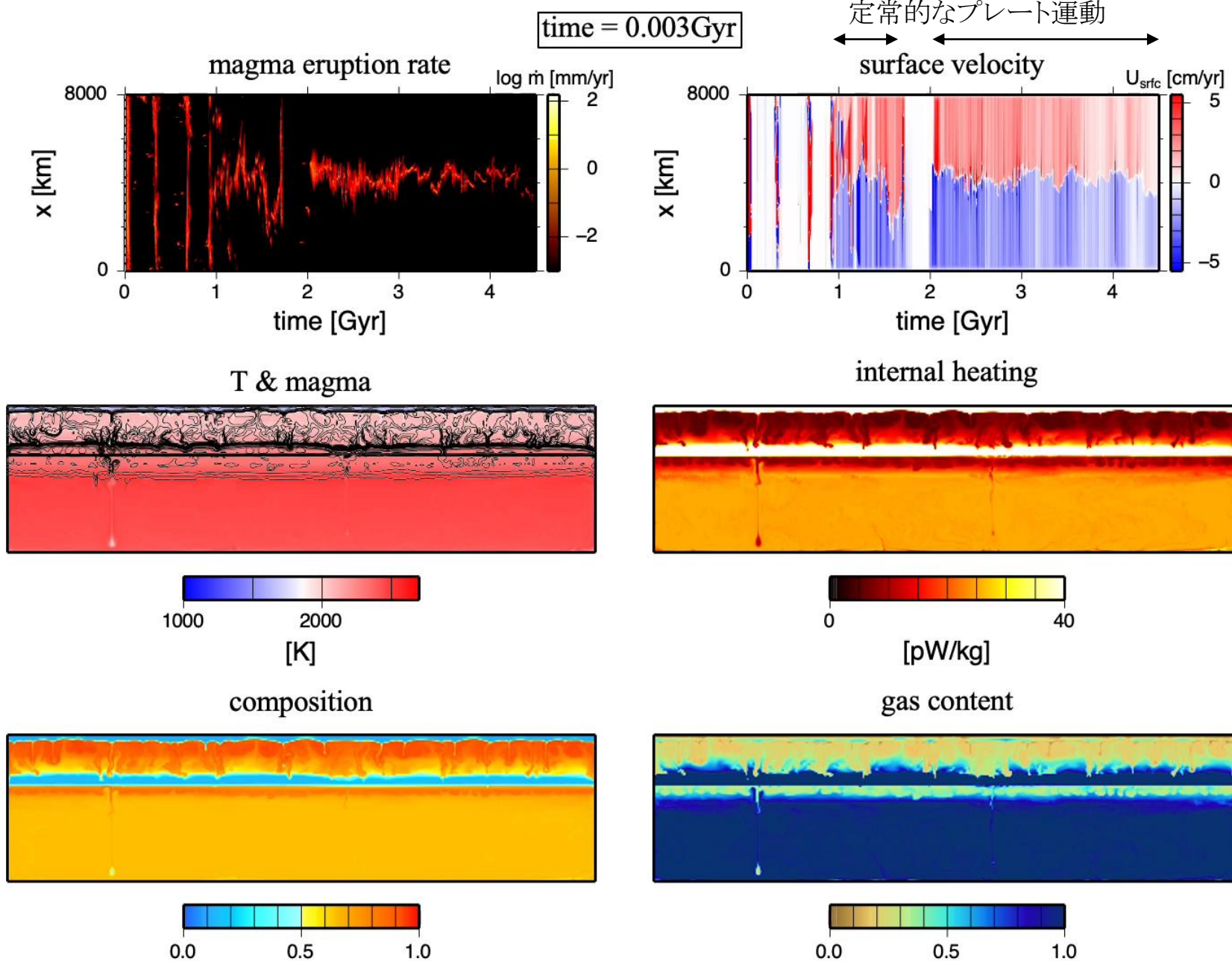
(Beddard, 2020)



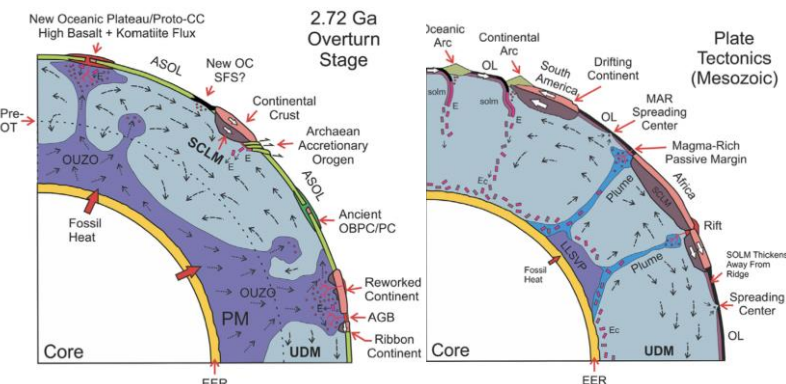
(Chen et al., 2022)

最初に持っていた不活性ガスの火山による放出

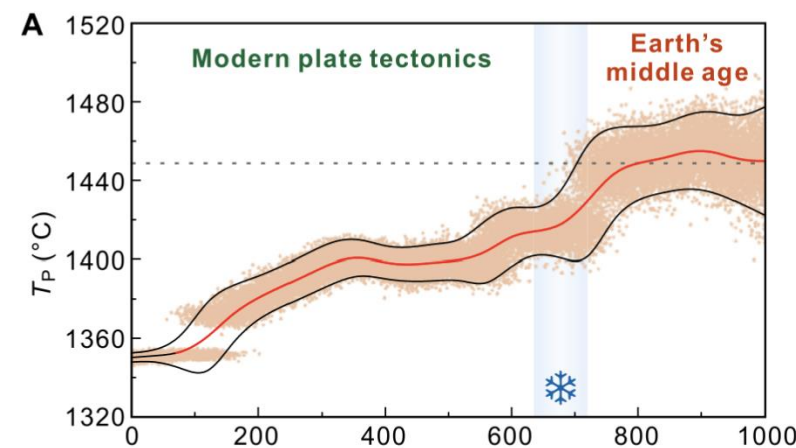
「バースト」の時代からプレート・テクトニクスの時代へ



地質学的モデル



(Beddard, 2020)



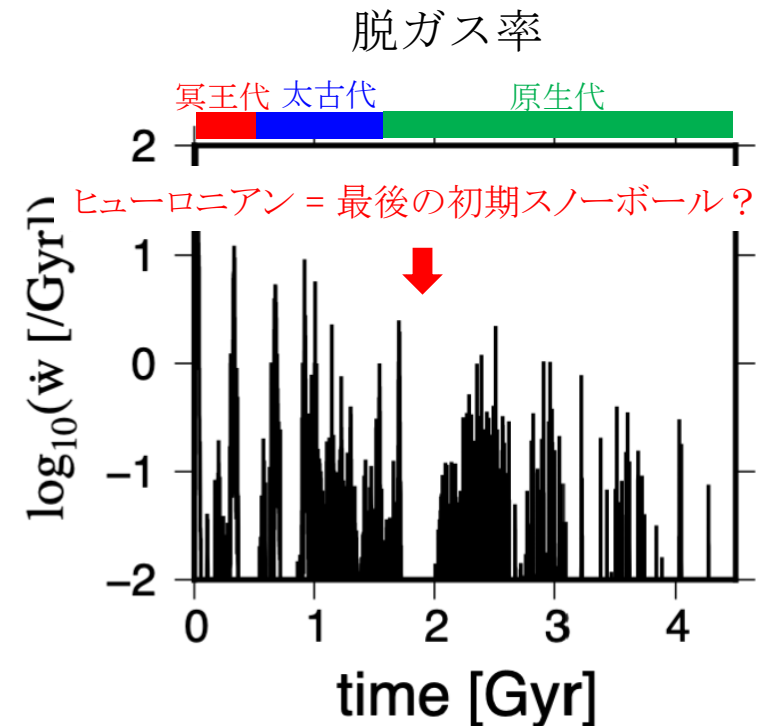
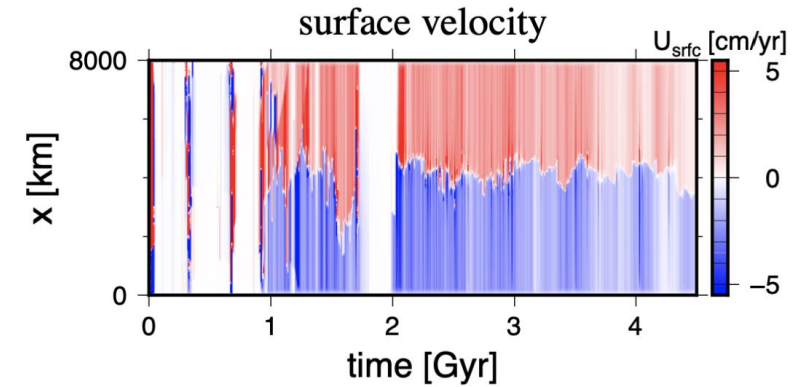
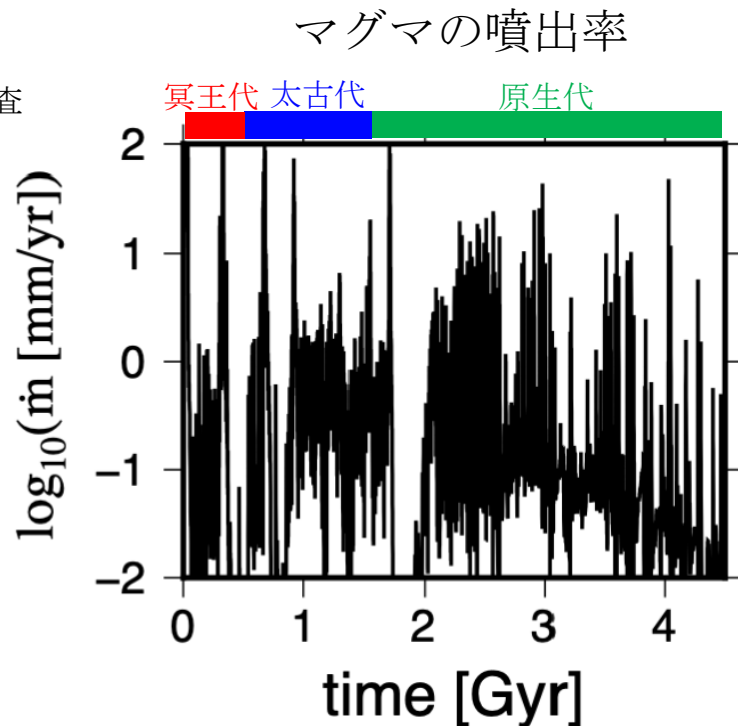
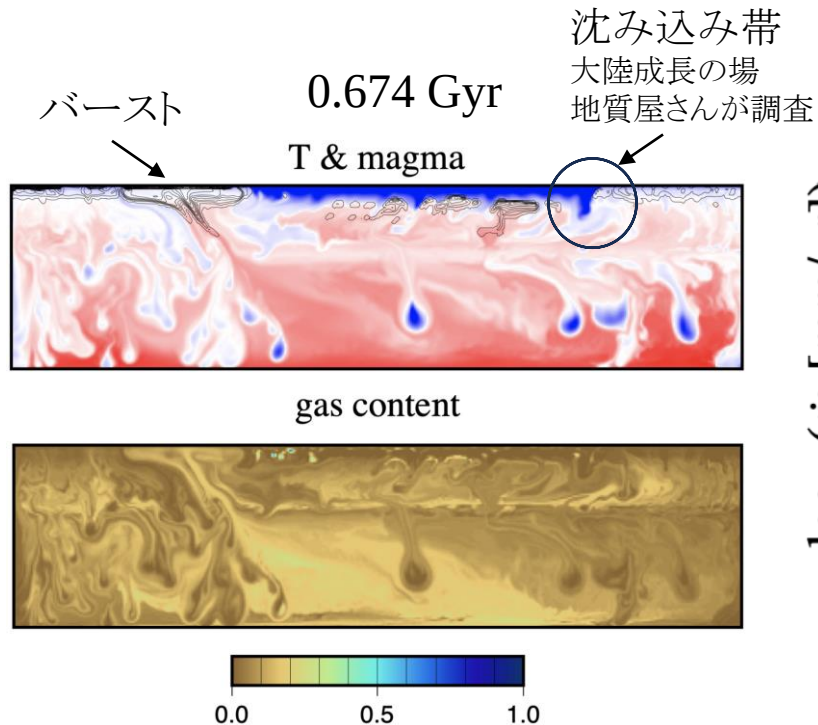
(Chen et al., 2022)

初期地球: バーストによる不安定な脱ガスとプレート

スノーボールの中で間欠的な温暖期 ?



暗い太陽のパラドックスは存在しない?

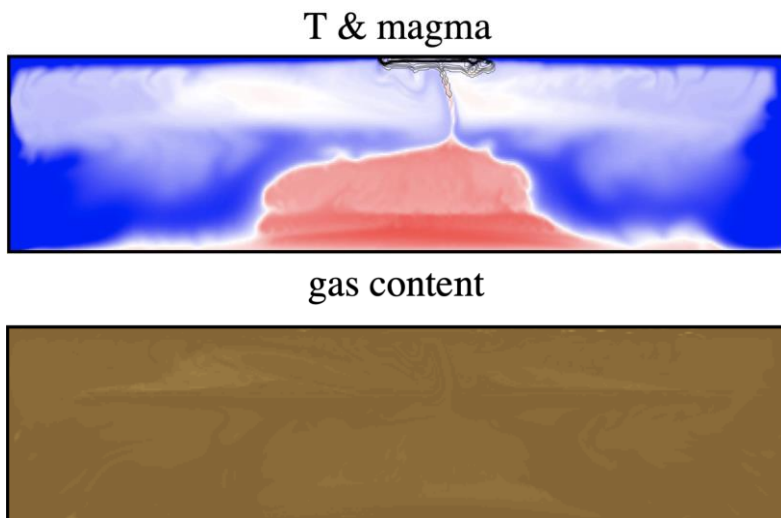


原生代以降のバースト (Large Igneous Province) による脱ガス

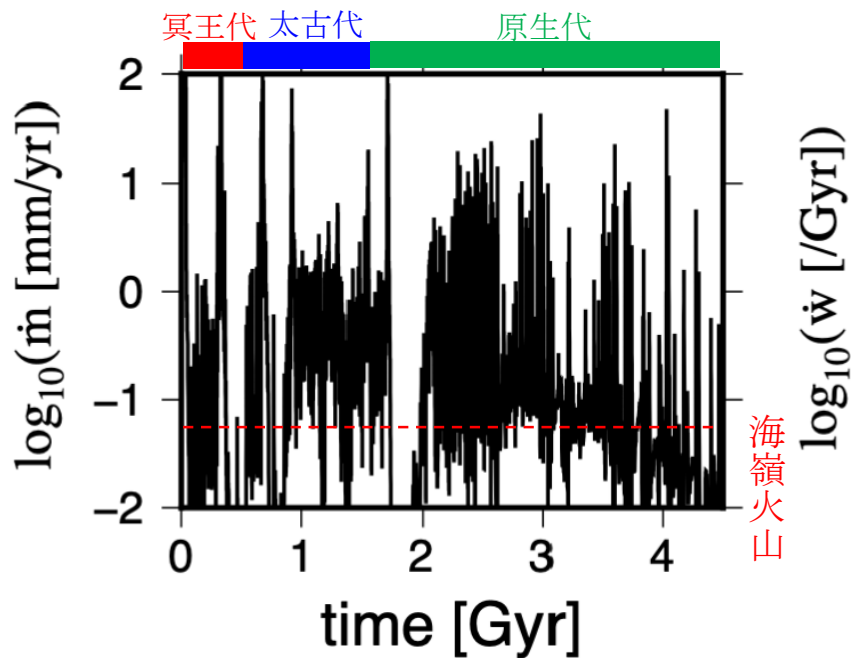


お話がいっぱい(生物の大量絶滅…)

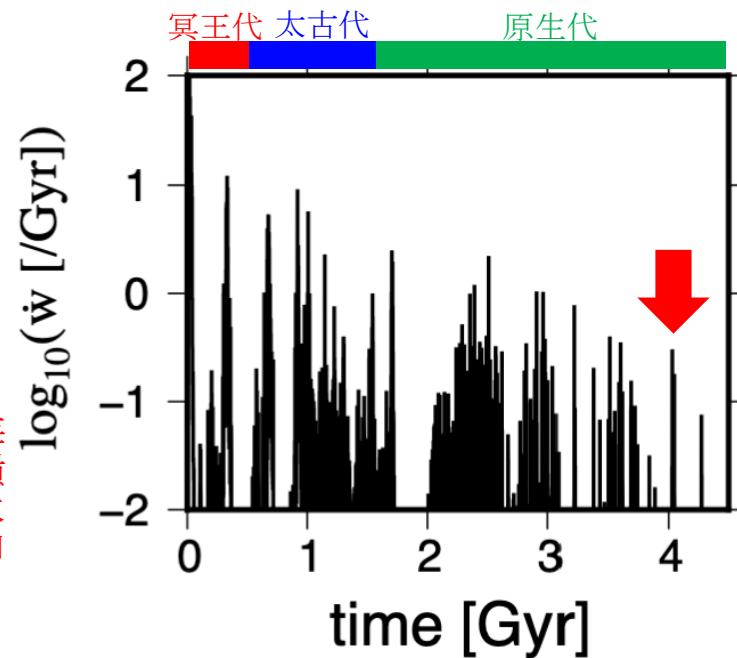
4.027 Gyr



マグマの噴出率



脱ガス率



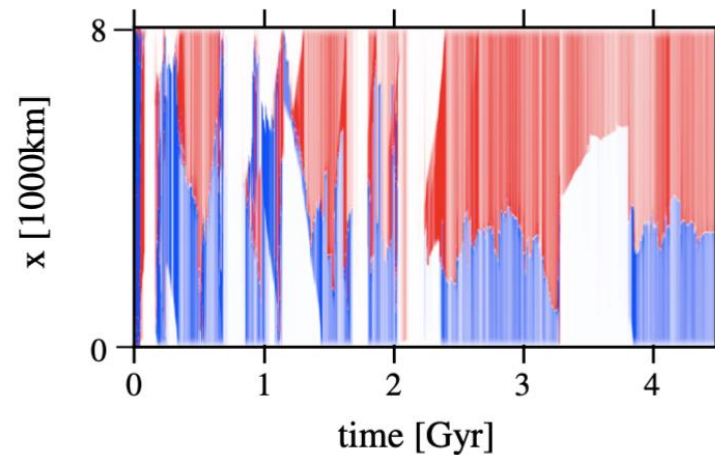
地球の表層環境を知る上で抜けている要素

プレート沈み込み:

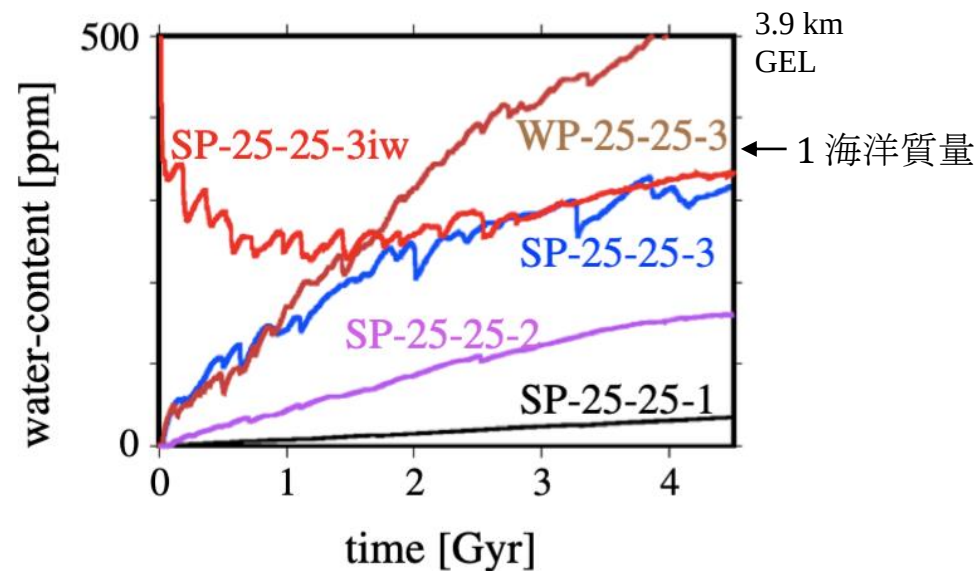
- (1) 表層から内部への水の還流 (リガッシング)
- (2) 島弧火山→カーボン・サイクル

水の循環 (リガッシングと融点低下)

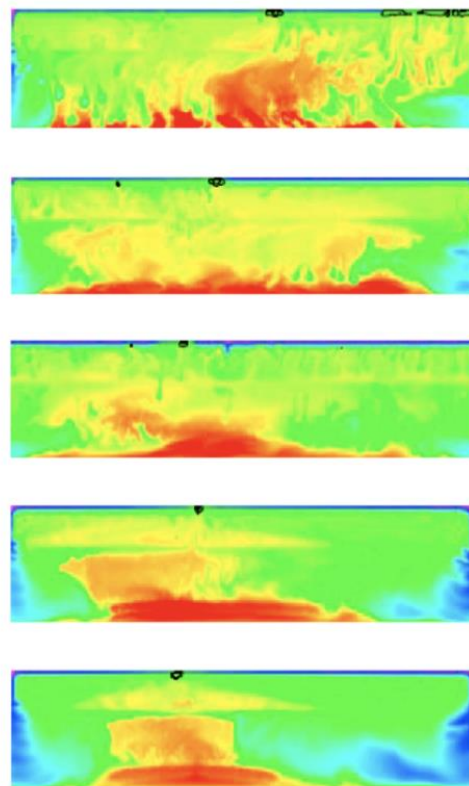
(a) surface velocity



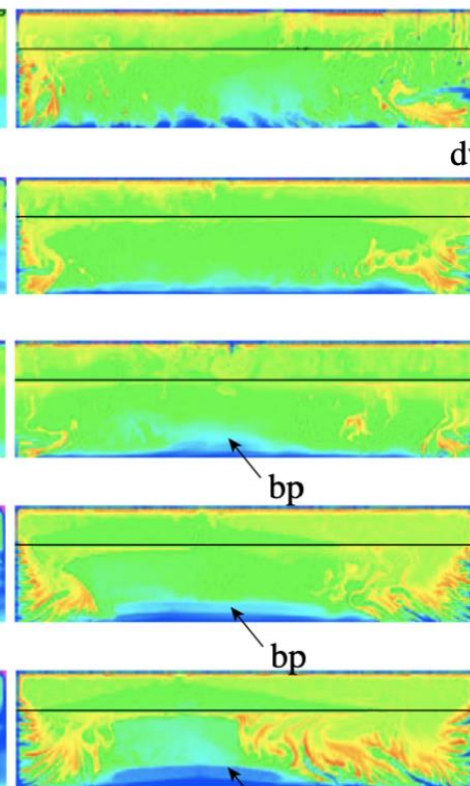
(b) average water-content



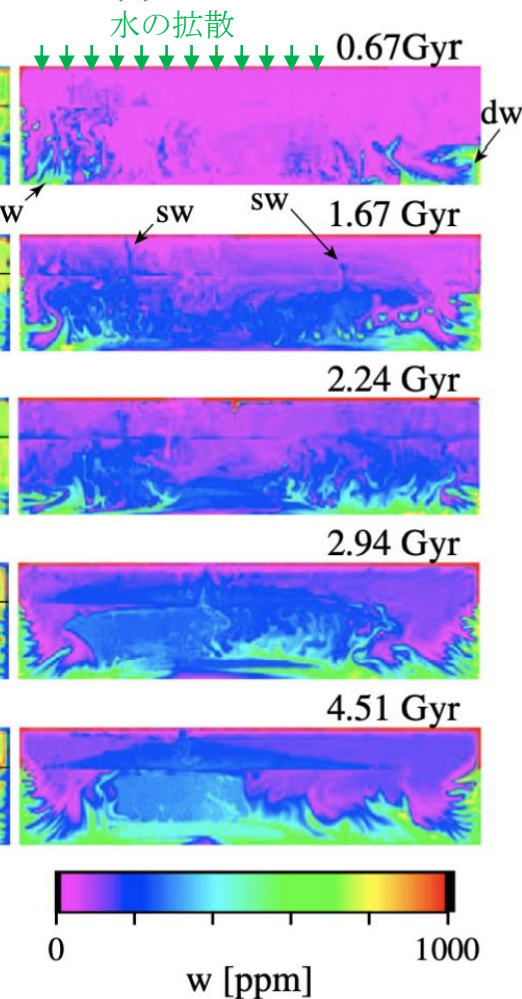
(c) T & magma



(d) composition



(e) water-content

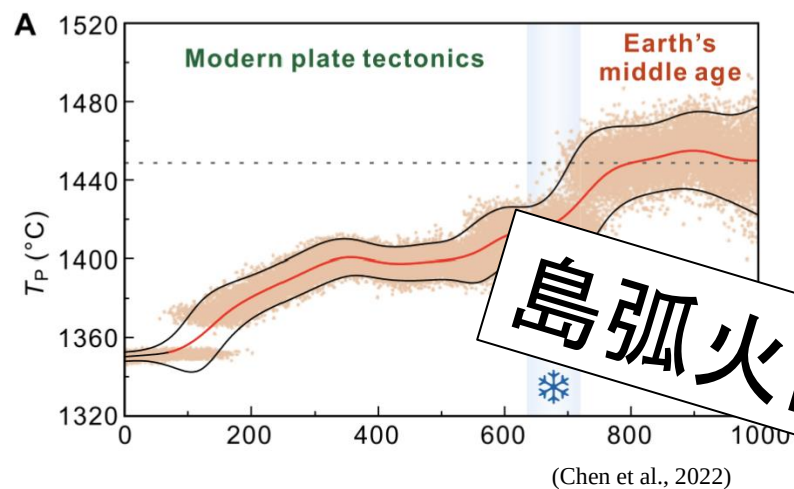


(Ogawa, 2014)

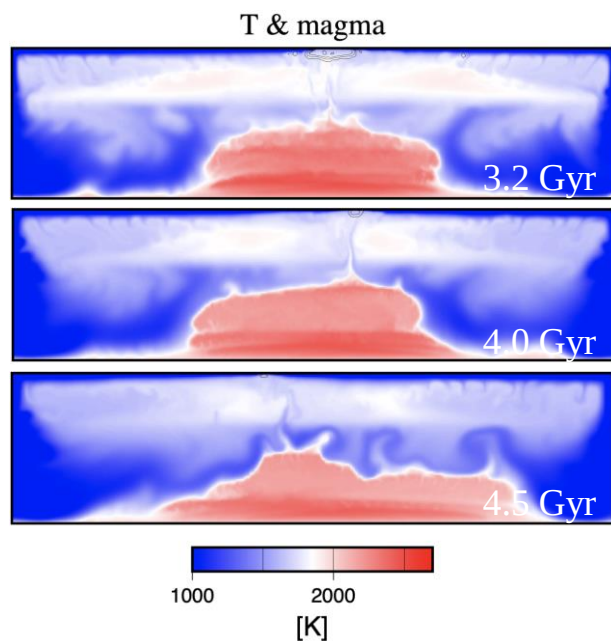
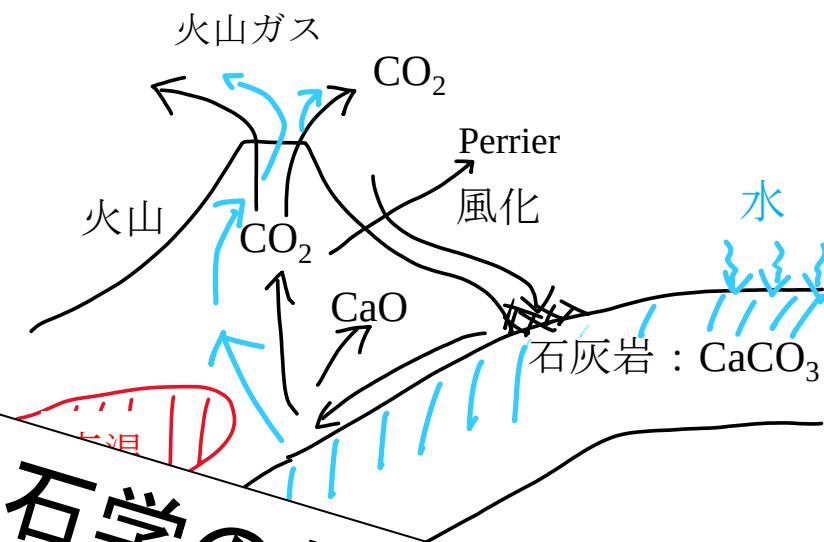
含水率の観測データ：上部マントル 100~150 ppm
下部マントル 500 ppm~2000 ppm?

島弧火山と上部マントルの熱史

島弧を介した炭素・水循環



島弧火山活動 → 岩石学の核心的利益



水

膨大な数のモーレツに複雑なモデル

火星モデルの批判

(e.g., Kite & Conway, 2024)

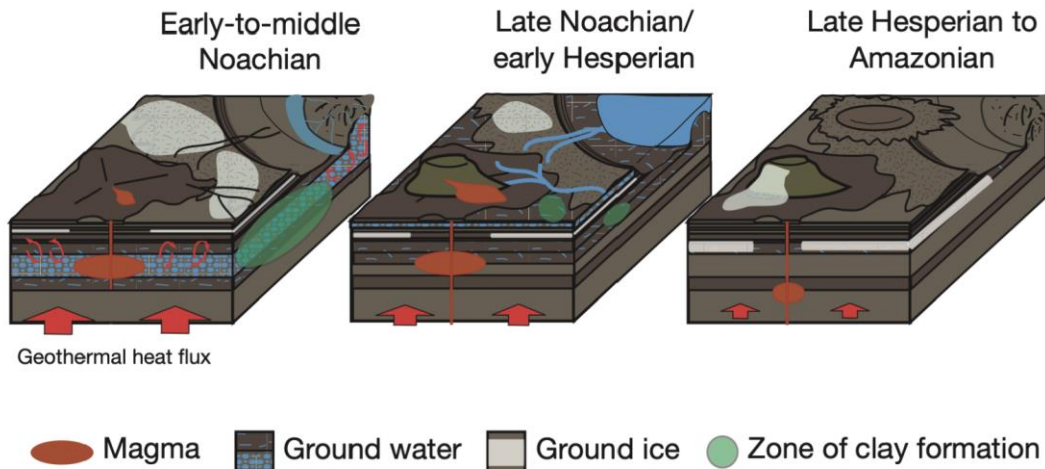
火山が供給する水が表層環境を支配？ $\Leftrightarrow$ 供給量 < 表層水の総量？

CO₂の起源？

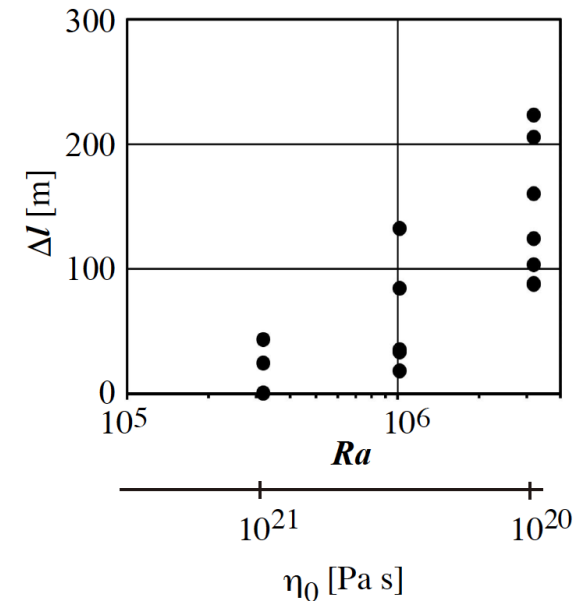
その他の温室効果ガス？

気象の詳細？（高層雲の温室効果？ obliquityの効果？...）

地下で熱水循環

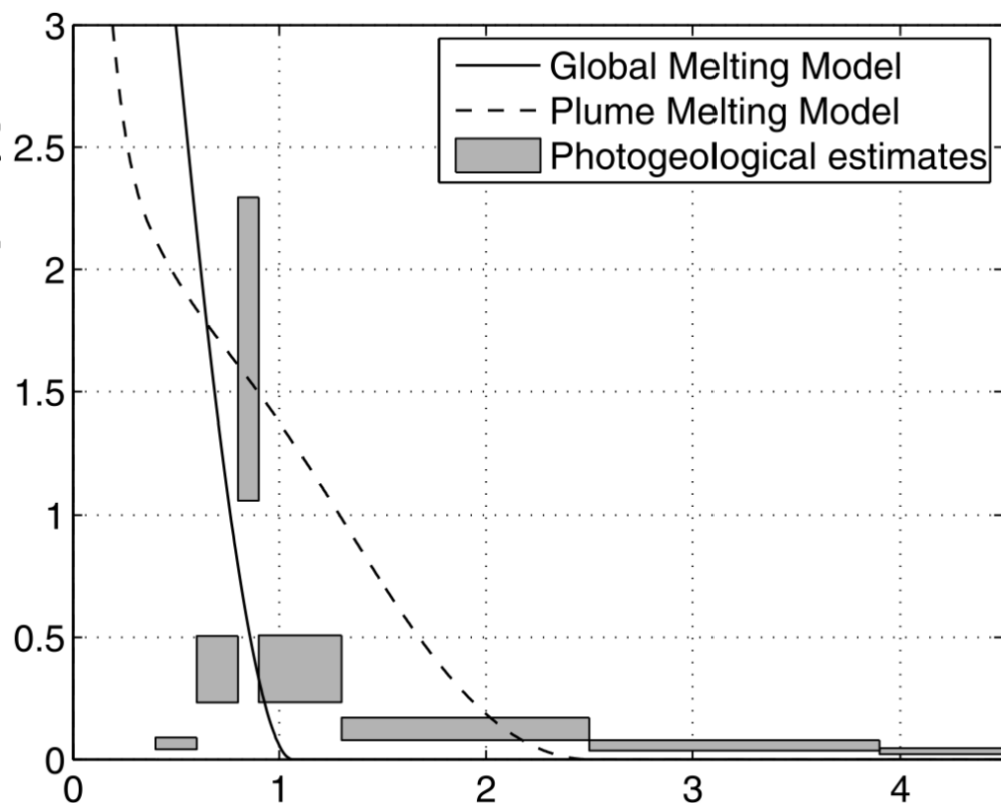


(Ehlmann et al., 2011)

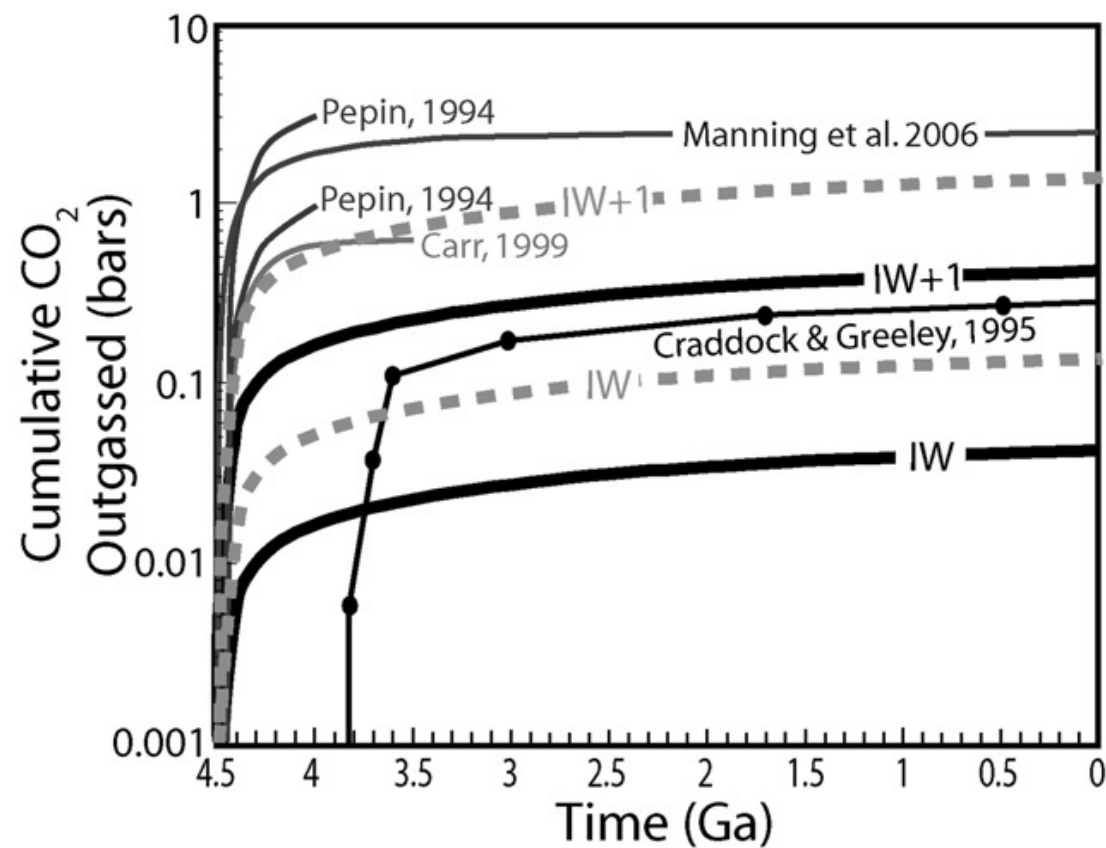


Noachianの表層水量
400~2000 mGEL?
(e.g., Jakosky & Hallis, 2024)

火星の火山ガスは CO_2 をあまり含まない→不十分な温室効果



(Grott et al., 2013)



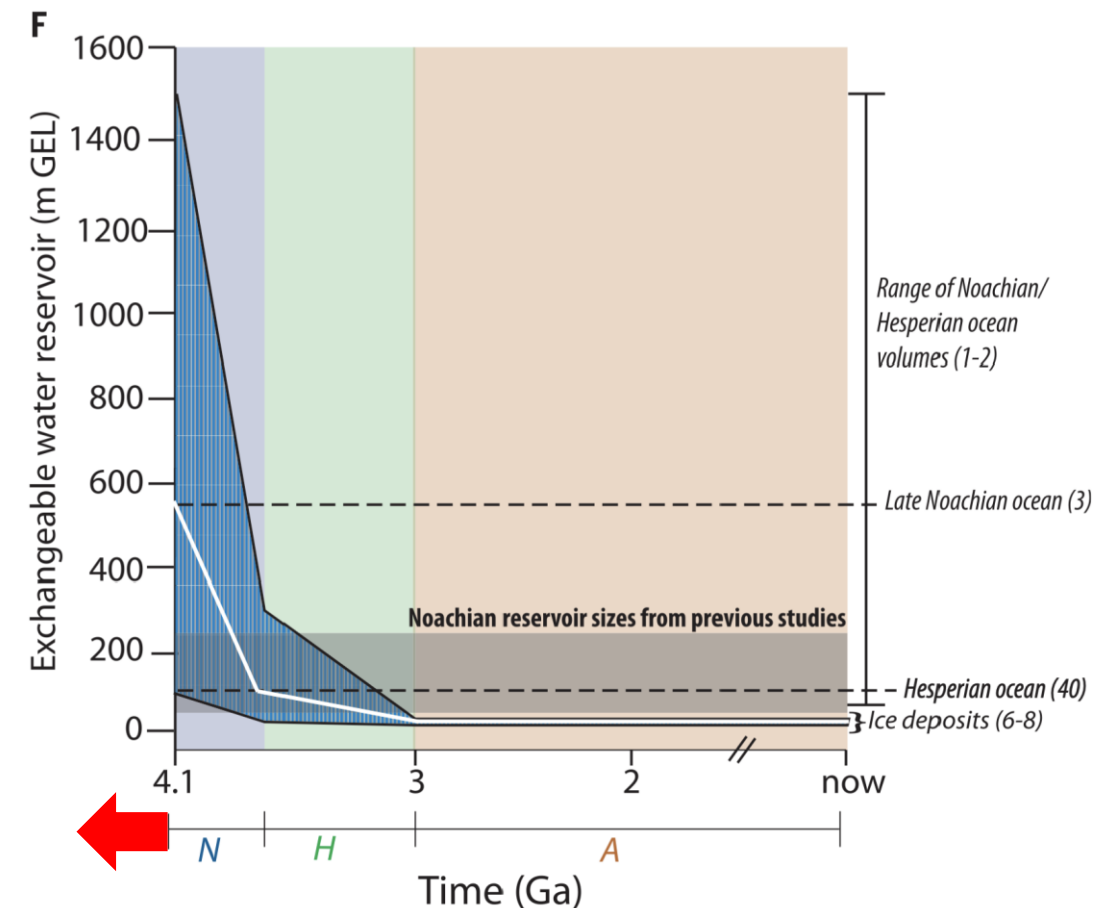
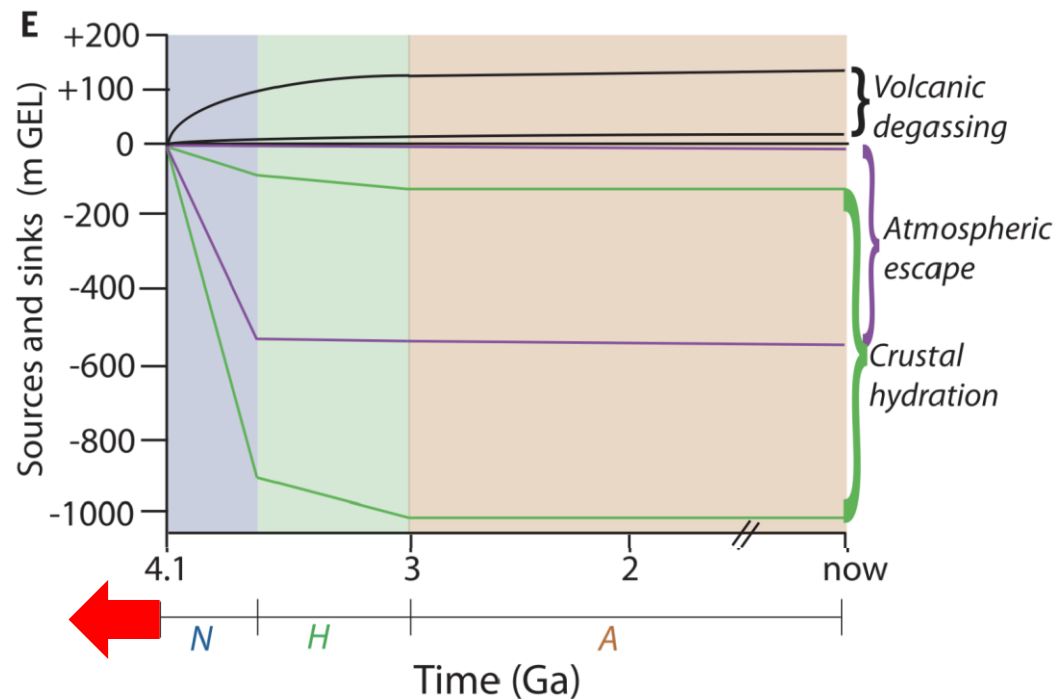
(Hirschmann & Withers, 2008)

惑星形成時に CO_2 を獲得→あまり散逸しなかった？

その後どこへ行った？

(1) 水, CO₂その他のガスの起源 (2) 獲得したガスの散逸?

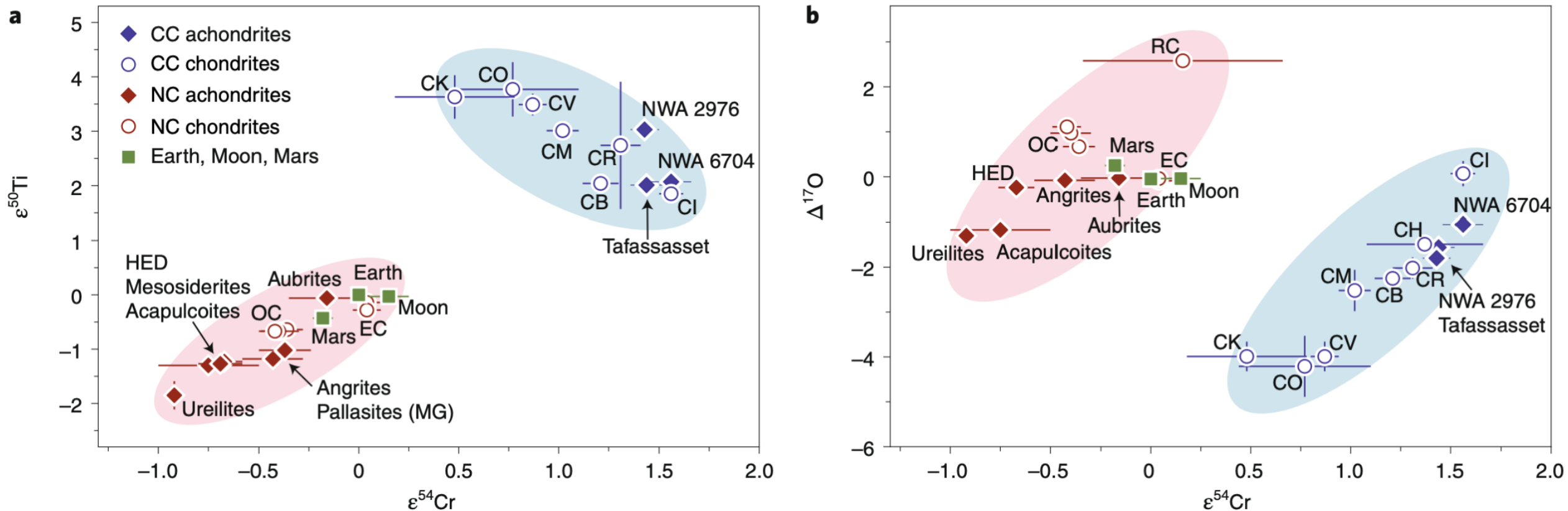
例: Noachian以降の表層水の量 (D/H比より)



火星と地球の水の起源

non-carbonaceous chondrite的

もともと水はごくわずか → でも十分？

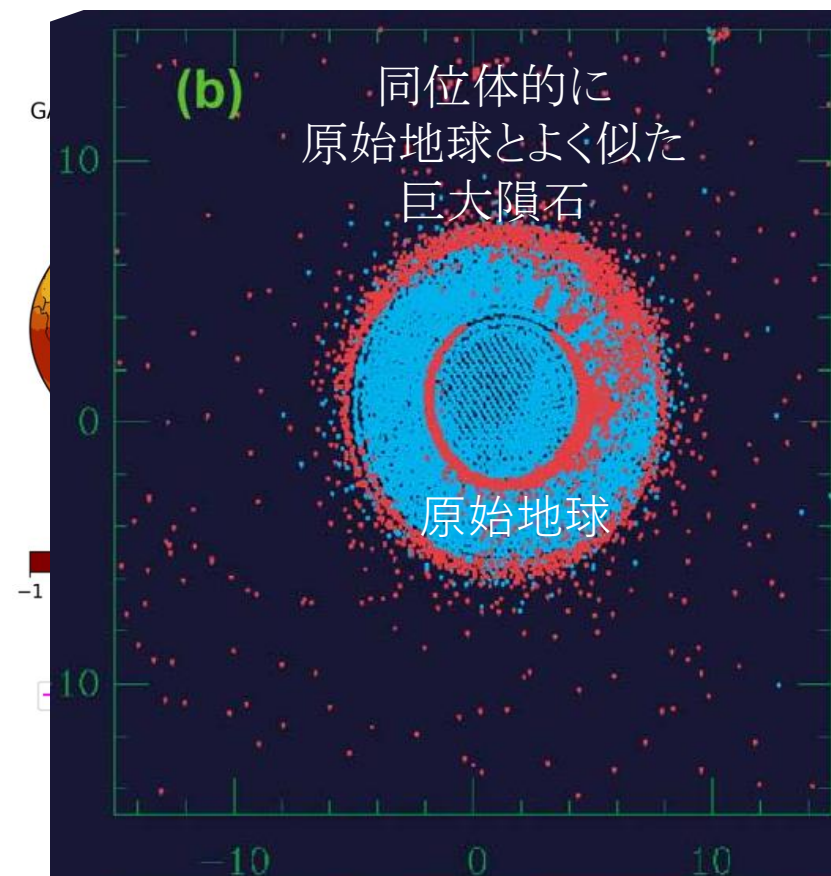
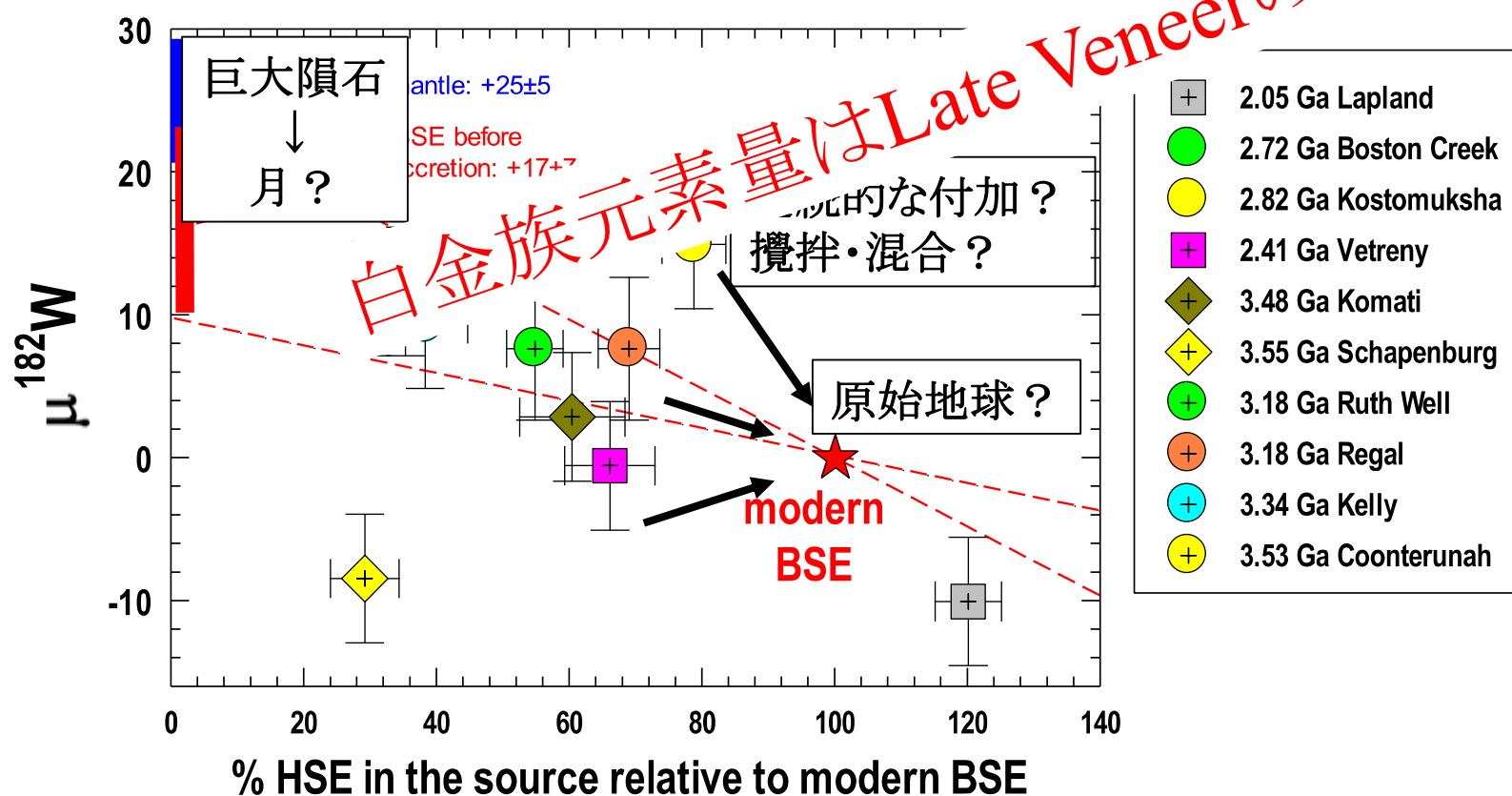


Late Veneerによる水の持ち込み？

火星：表層環境史のタイミングと矛盾

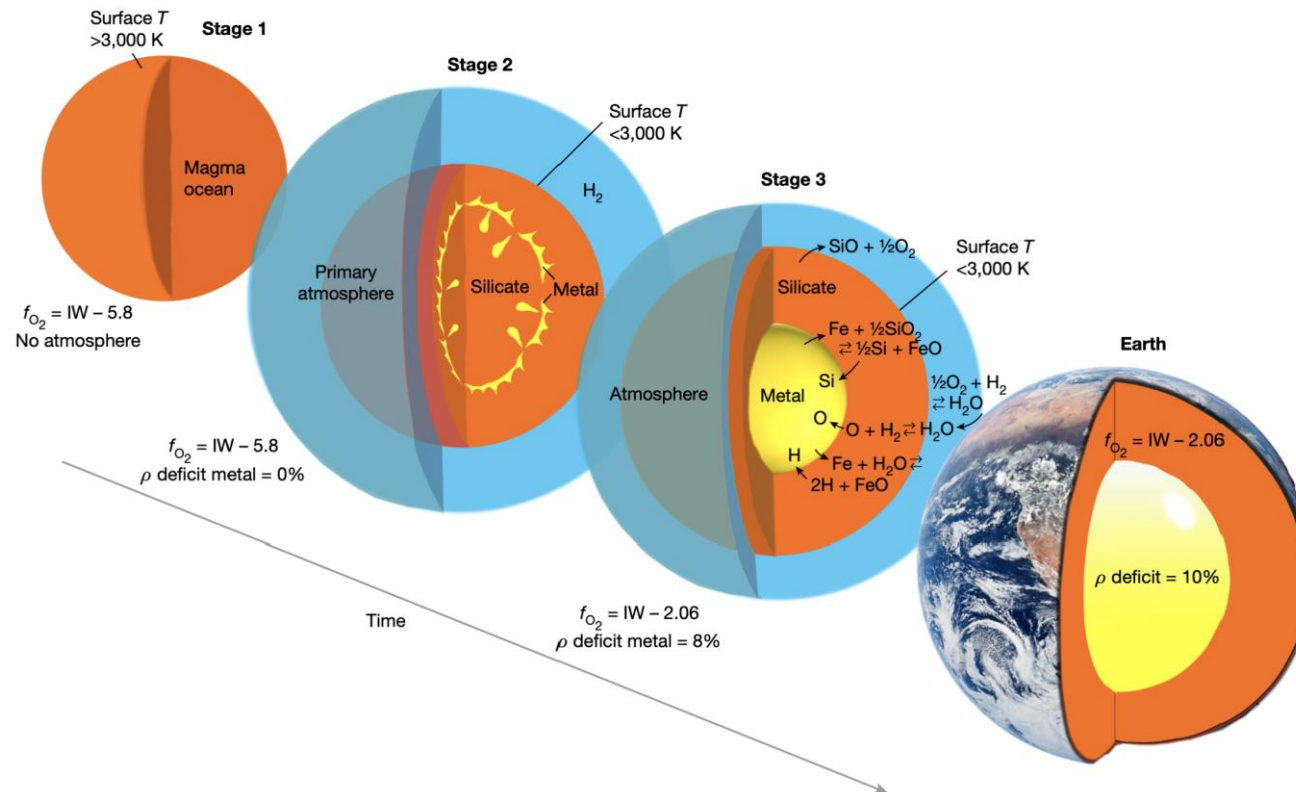
地球・月系：Late Veneer：無数の小隕石が静々と？ Impact?

I.S. Puchtel et al. / *Geochimica et Cosmochimica Acta* 320 (2022) 2230



太陽系の一次大気由来の水素＋マンツルの酸化物(岩石)

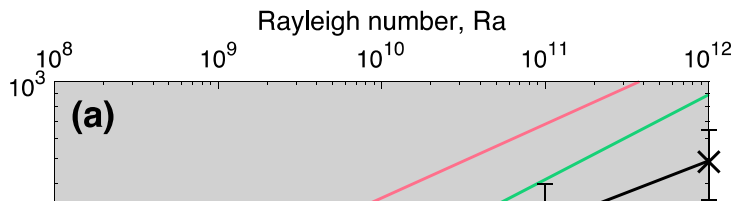
Earth shaped by primordial H_2 atmospheres



(Young, Shahr, Schlichting, 2023)

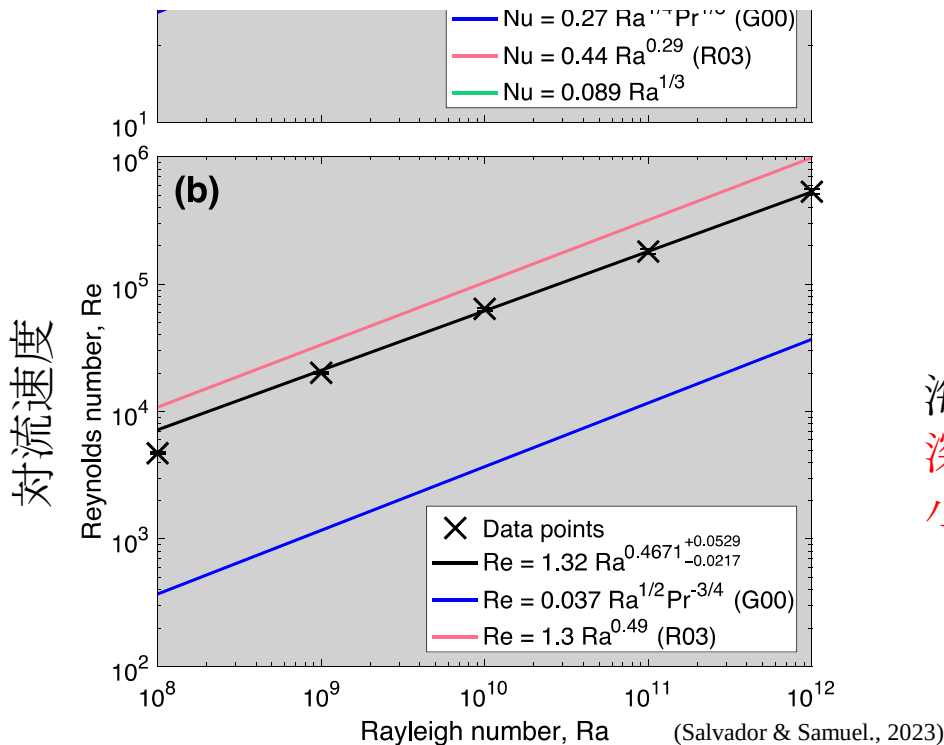
火星も同様？

マグマ・オーシャンの対流モデルに依拠(地表面温度, H₂の拡散…)



お風呂 ($Ra \sim 10^{11}$) から
マグマ・オーシャン ($Ra \sim 10^{27}$) への外挿は無謀

濱野さん頑張っ！！！



冷却時間 [y]	10^4	3×10^4
対流速度 [cm/s]	1	4

自然現象をうまく使ったスケーリング則の検証

海の深層水循環($Ra \sim 10^{22}$): $U_{rms} \approx 2 \text{ cm s}^{-1}$
深層水循環のturnover time 3000年? $U_{rms} \sim 0.4 \text{ mm s}^{-1}$?
小氷河期の海水の沈降200年で5000 m? $U_{rms} \sim 0.001 \text{ mm s}^{-1}$?

マグマ・オーシャンからの熱流量と大気の射出限界?

火星がわかれば初期地球の表層環境もわかる

火星探査に期待する観測

内部進化に関するデータ(地殻の構造発達史, 内部構造, ...)

+

Pre-Noachianの水, CO₂, ...の量

Noachian, Hesperianの「温暖な気候」の実態

本当に温暖だった?

温暖な気候と火山活動のタイミング

温室効果ガスの種類

日本の惑星科学は間違っ とる！

水を手がかりに太陽系・惑星の形成と進化をイモづる式に解明

太陽系・惑星形成と進化の全体像 → 水の起源や循環の解明は可能

その逆はできっこない

水さえわかればいいってもんじゃない. CO_2 , SO_2 ...

最終目標は生命の起源：水は生命に必須 → 水の起源の解明

こじつけ

地球では4 Gaに海が存在 → その水がどこから来ようと最初のRNA合成とは無関係

最近のニュース番組の決まり文句

「***探査は将来の 地震予知 への重要な手がかりとなります」

表層環境はそれ自体が価値のある研究対象

アポロによる着陸点の探査＋リモート・センシング

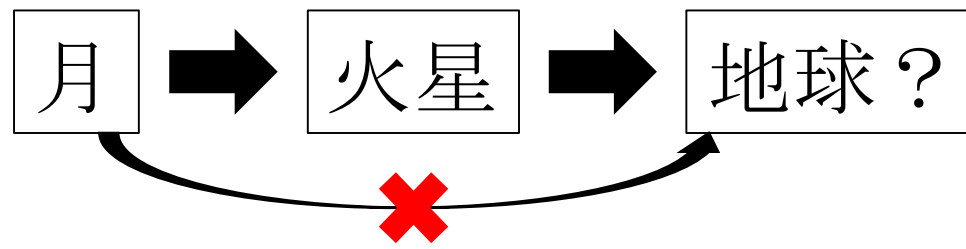


惑星科学の基礎概念

マグマ・オーシャン，クレーター年代，巨大衝突…

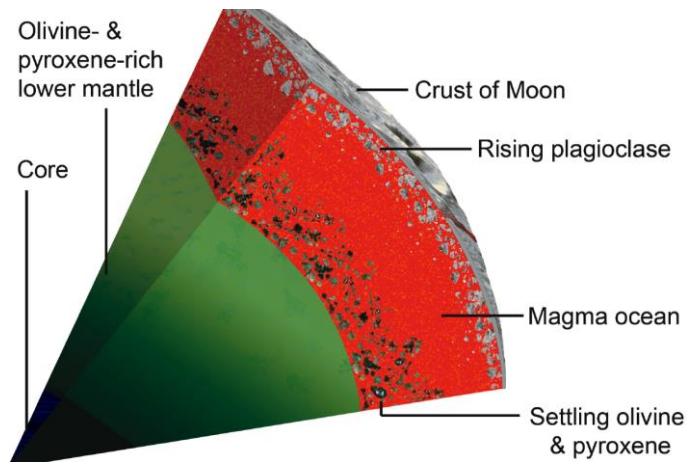
月・火星基地からの面的探査→基礎概念の再構築

地殻の構造発達史，地震波トモグラフィー，露頭で素性を押さえたサンプルの分析…

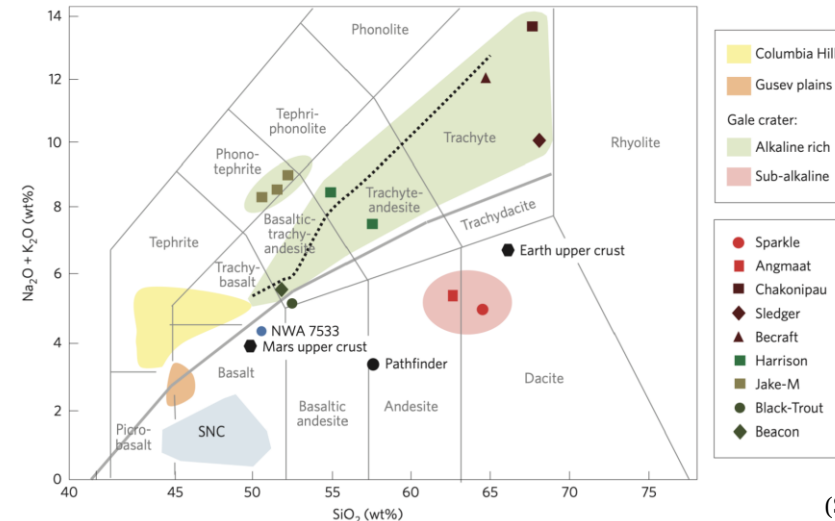


月の進化: 形成期→マグマ・オーシャンの冷却・固化→その後の進化
 火星: 三つのステージが同時進行？

	惑星形成時間	マントル対流開始の時間	地殻
月	数時間～200年	数億年	斜長岩: マグマ・オーシャンの結晶分化
火星	200～300万年 太陽周りの長い惑星形成時間	200～300万年 MMUフィードバックによるマントル対流の早い立ち上がり	玄武岩: 火山活動による二次地殻



<http://www.lpi.usra.edu/exploration/training/illustrations/planetaryInteriors/>



(Sautter et al., 2015)