第三部 次世代への期待

- (1) 惑星形成過程とその後の進化のつながり?
- (2)表層環境と内部進化の相互作用?
- (3) コア・ダイナモ?

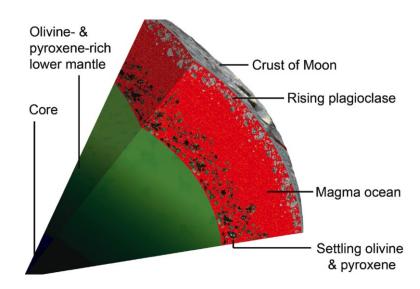
第9章 惑星の形成と初期進化

9-1. マグマ・オーシャンとマントルの進化



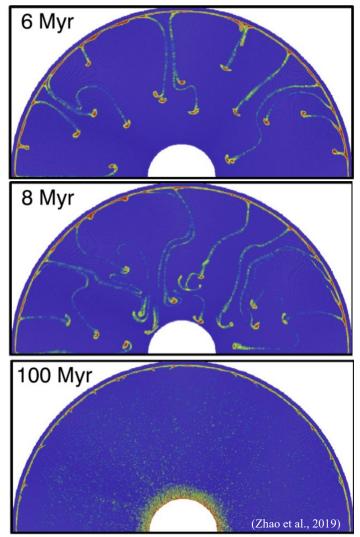
MOでの結晶分化

Septended Sept

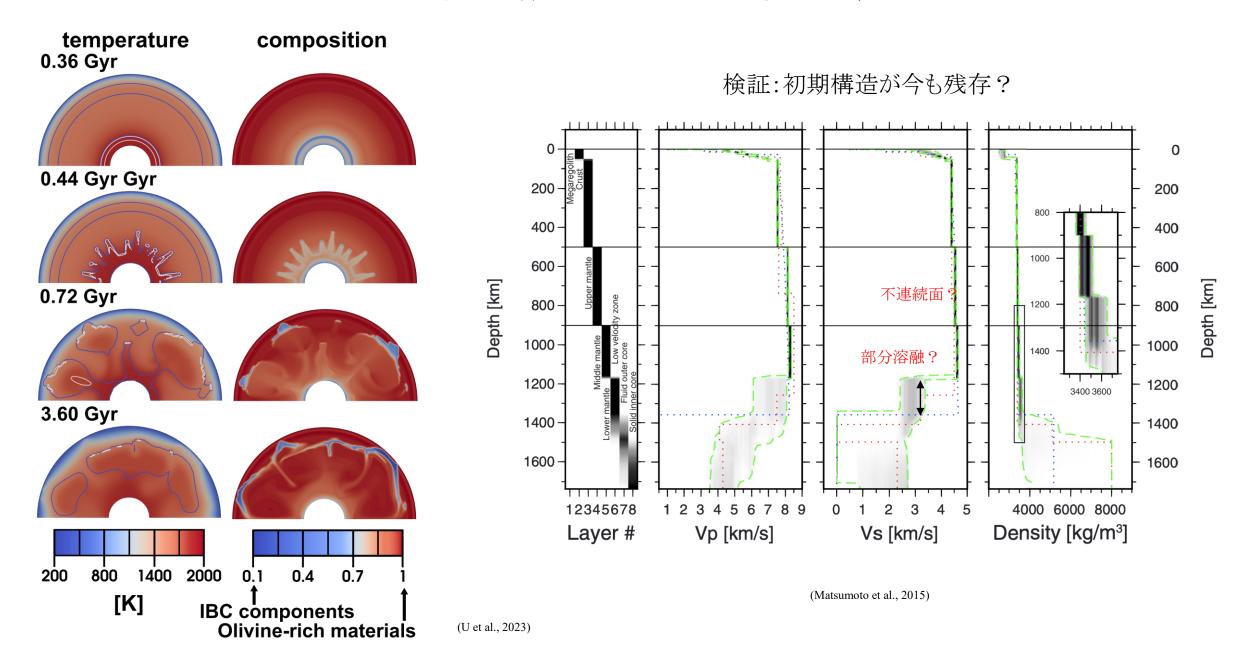


http://www.lpi.usra.edu/exploration/training/illustrations/planetaryInteriors/

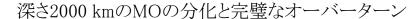
MO固化後のオーバーターン

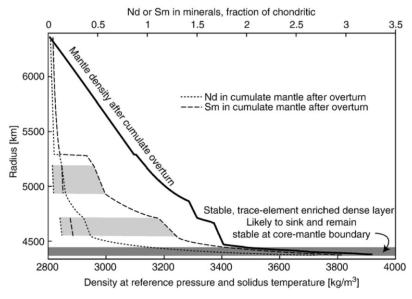


マグマ・オーシャンが作った構造がその後の進化を支配

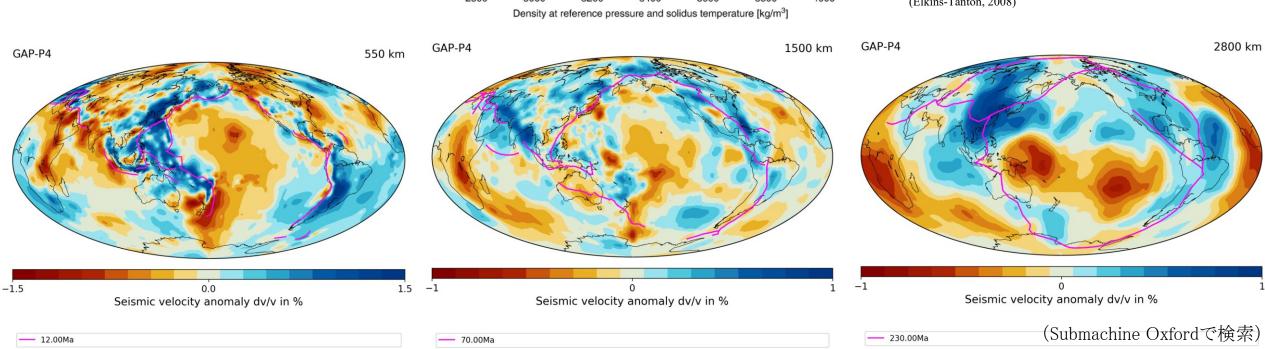


地球に適用すると?:マグマ・オーシャンから期待される構造と現実





(Elkins-Tanton, 2008)

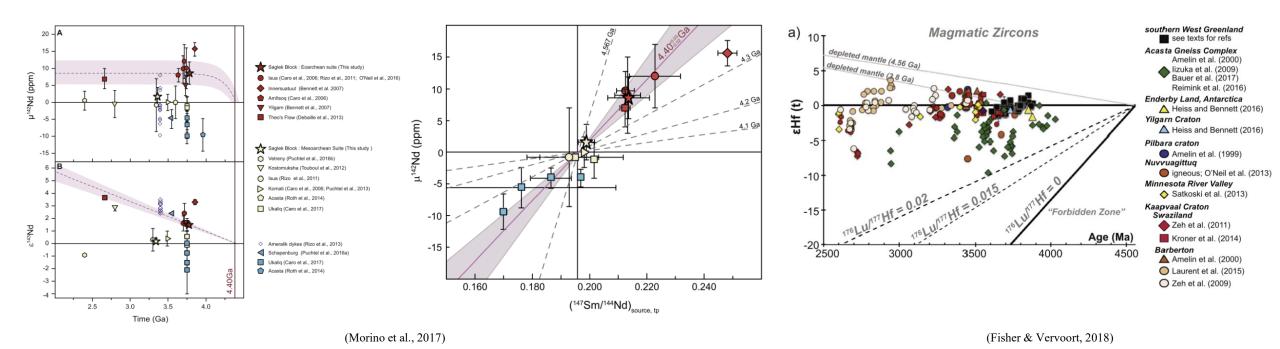


マグマ・オーシャンによる分化の痕跡?

地球化学のジャングルから拾ってきた論文:この程度の痕跡しか残らない?

MOで4.4Gaに分化?

3.8 Ga以前にマントルが分化した証拠なし?



地球でマグマ・オーシャンから期待されるマントル分化の確認は可能?→過去の姿を留める月・火星?

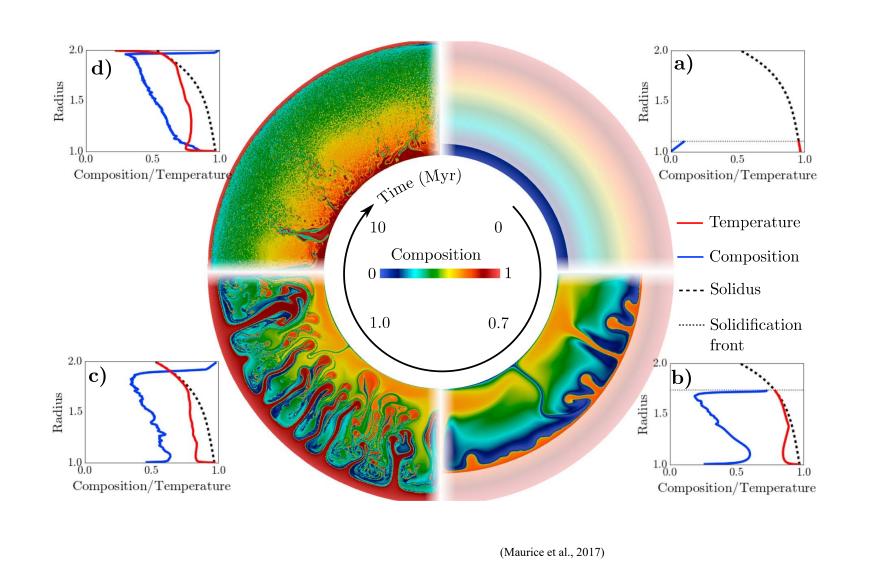
問題

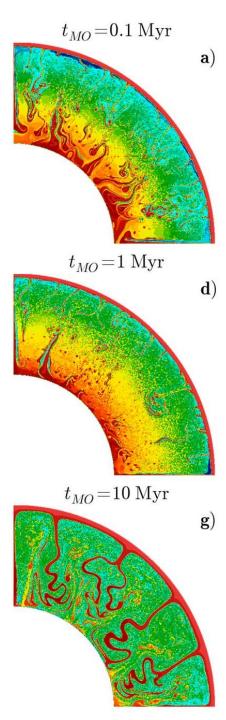
- (1) そもそもマグマ・オーシャンでマントルは分化する? → 月
- (2)月から地球へ外挿できる? 月の進化:形成期→マグマ・オーシャンの冷却・固化→その後の進化 火星では三つのステージは同時進行?

	惑星形成時間	マントル対流開始の時間	地殼
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

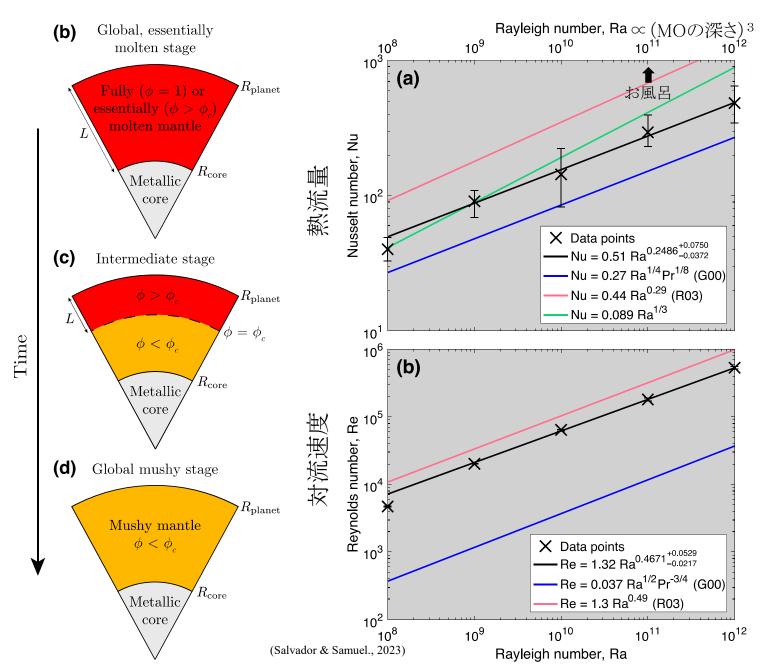
9-2 マグマ・オーシャンによるマントル分化

MOの固化時間とマントル・オーバーターン





マグマ・オーシャン固化の時間スケール; 見積りの信頼度?

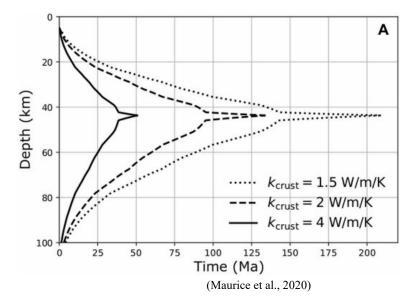


マグマ・オーシャン(Ra~10²⁷)への外挿

	月	地球
熱流量 [kW/m²]	5	7
冷却時間 [y]	10^4	3×10^4
対流速度 [cm/s]	1	4

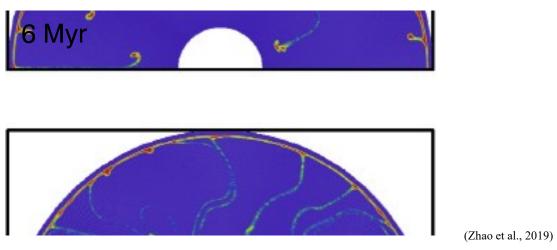
海の深層水循環($Ra \sim 10^{23}$): $U_{rms} \approx 6 \ cm \ s^{-1}$ Overestimate ($\sim 10^{-4} \ cm \ s^{-1}$)

斜長岩地殻下のMOの固化時間 > 100 Myr?



マグマ・オーシャンの固化時間= $10^6 \sim 10^8$ yr? あまりマグマ・オーシャンでは分化は起きない?

月の高地地殻はglobal MOの産物? PAN?後期重爆撃によるserial MOの産物?

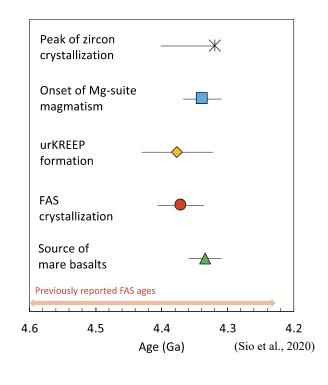


マグマ・オーシャンからの熱流量 = O(10) W/m^2 ? < 水蒸気大気の射出限界? 地球では海が最初からあった?

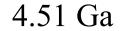
マグマ・オーシャンの信頼できるモデリング → 絶望的

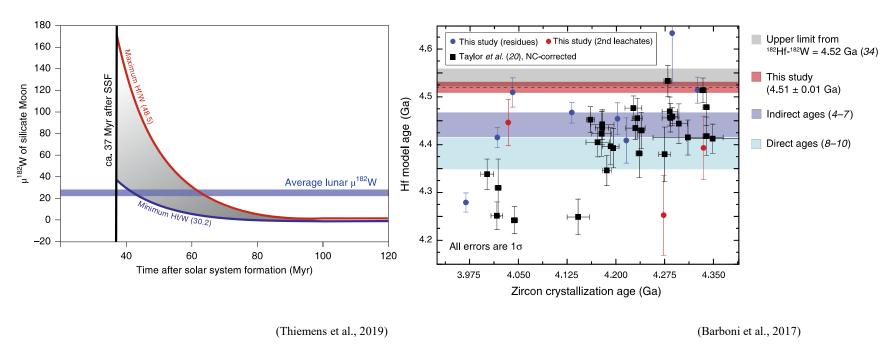
月の地殻年代測定によるMO冷却・固化の時間スケール推定?





50 Myr after SSF(Cf. 火星)





MOの冷却時間 << 測定誤差 4.34 Ga = 月の年齢

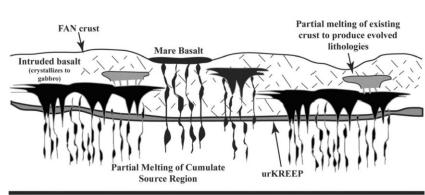
こんなに遅くに巨大衝突? 長寿命のMO?

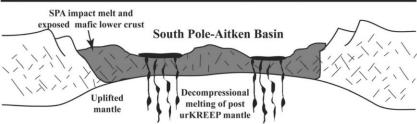
なんの年齢?(W-同位体:鉄・シリケイト分離のタイミング、Hf-同位体??) 原始地球・巨大隕石・微惑星の事象? 月は前世の記憶をとどめている? Story-dependent?

素朴な転石の年代測定は不十分、地殻・マントルの構造発達史という文脈が必要

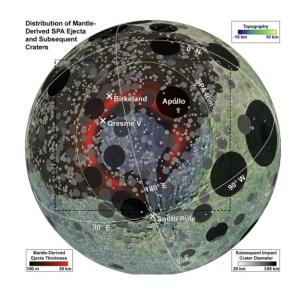
例 South Pole Aitken: 地殻形成 → 海の火山活動までの時期の記録?

衝突前の地殻?

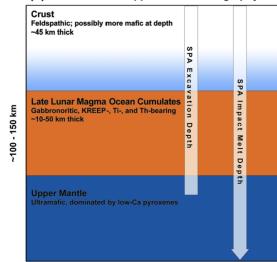




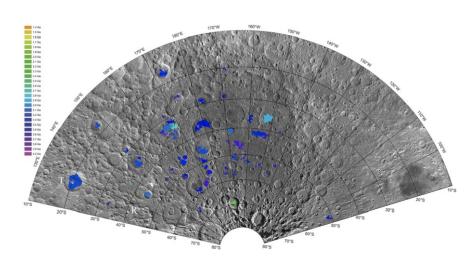
(Hagerty et al., 2011)



(a) Pre-SPA Crust/Upper Mantle Stratigraphy



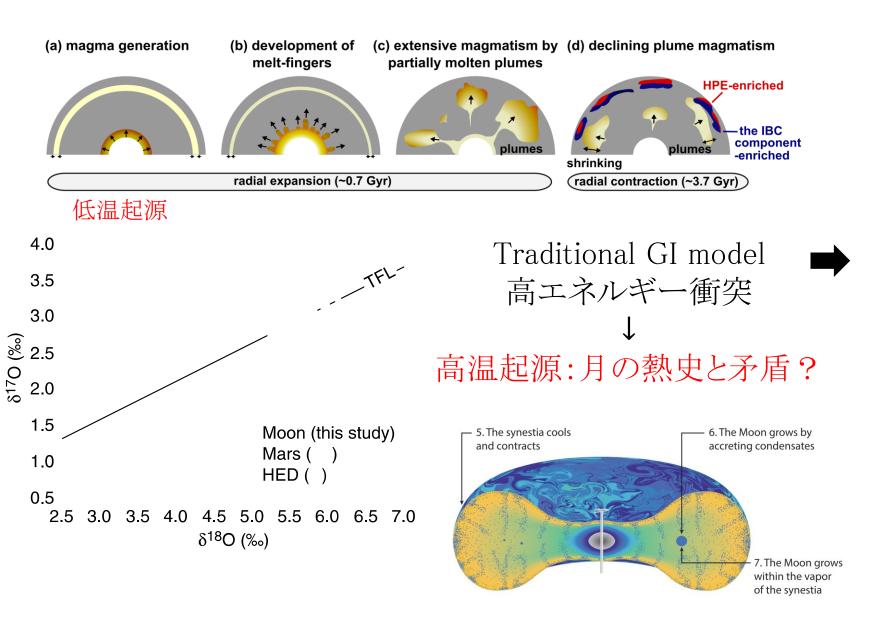
海の火山活動 (3.5 Ga頃)



(Pasckert et al., 2018)

(Moriarty III et al., 2021)

9-3 月の形成過程と進化



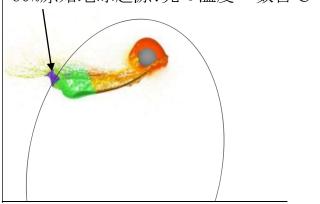
最近の高分解能GIモデル 比較的低温起源?

0.1 h



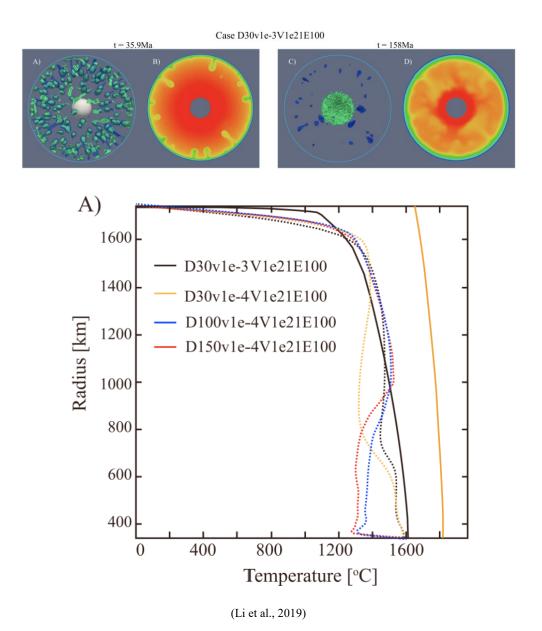
2.1 h

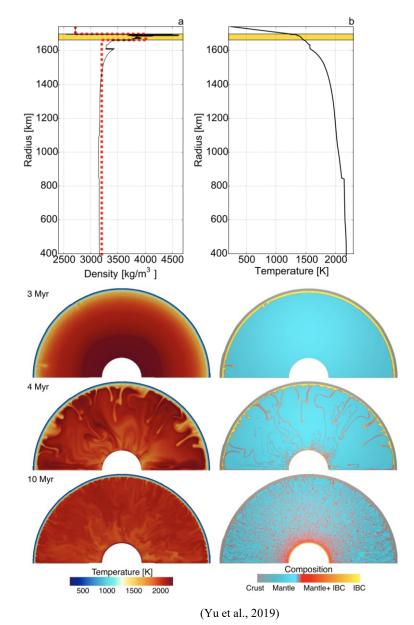
60%原始地球起源:元の温度 + 数百℃



(Wiechert et al., 2001) (Lock et al., 2018) (Kegerreis et al., 2022)

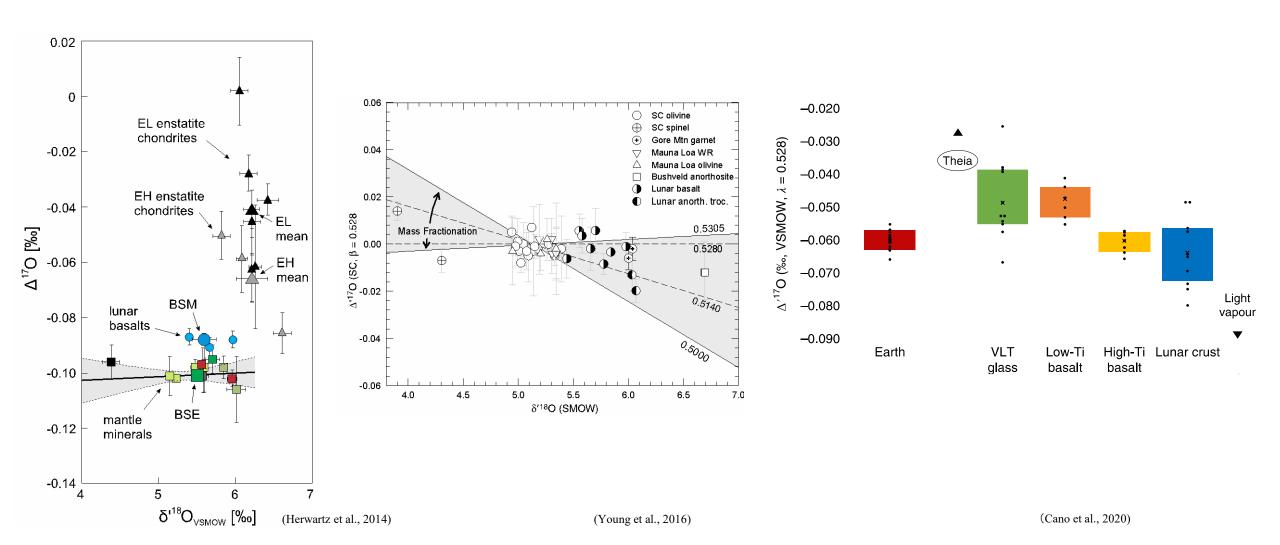
Kegerreis et al. (2022)なら熱史的につながる? モデルの信憑性?





物質科学的に形成モデルと進化モデルはつながっている? 同位体的に月=地球?

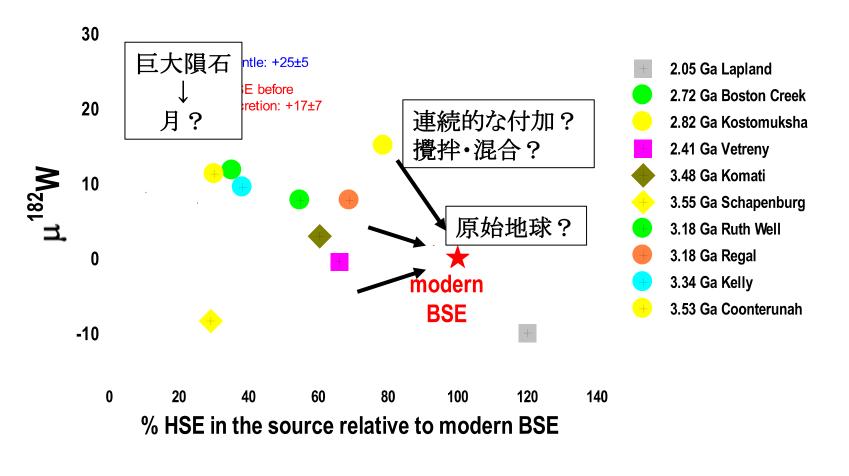
原始地球 ≈ 巨大隕石ならどうなる?→素性の知れた月試料の広範な同位体分析



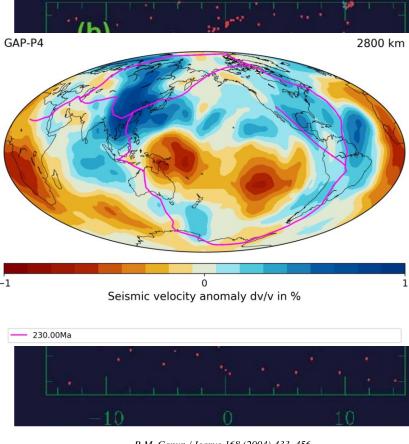
月の起源物質とLate Veneer⇒地球の水の起源?

地球にのみLate Veneer ⇒ Late Veneer = a giant impact?: 2-3.5Gaのデータと矛盾

I.S. Puchtel et al./Geochimica et Cosmochimica Acta 320 (2022) 238-278



Cf. supplement



R.M. Canup / Icarus 168 (2004) 433-456

9-4 月から火星へ:地殻に残された記録?

(1) そもそもマグマ・オーシャンでマントルは分化する? → 月探査

(2)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 火星では三つのステージは同時進行? → 火星探査

	惑星形成時間	マントル対流開始の時間	地殼
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

火星の進化モデル:一次地殻と二次地殻

(a) T & magma

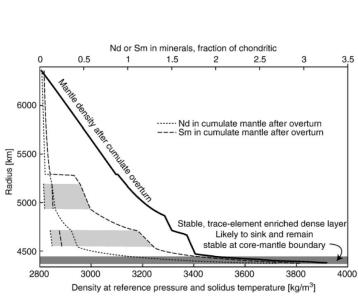
(b) composition

0.001Gyr primary crust secondary crust 0.004Gyr 0.010Gyr 0.015Gyr

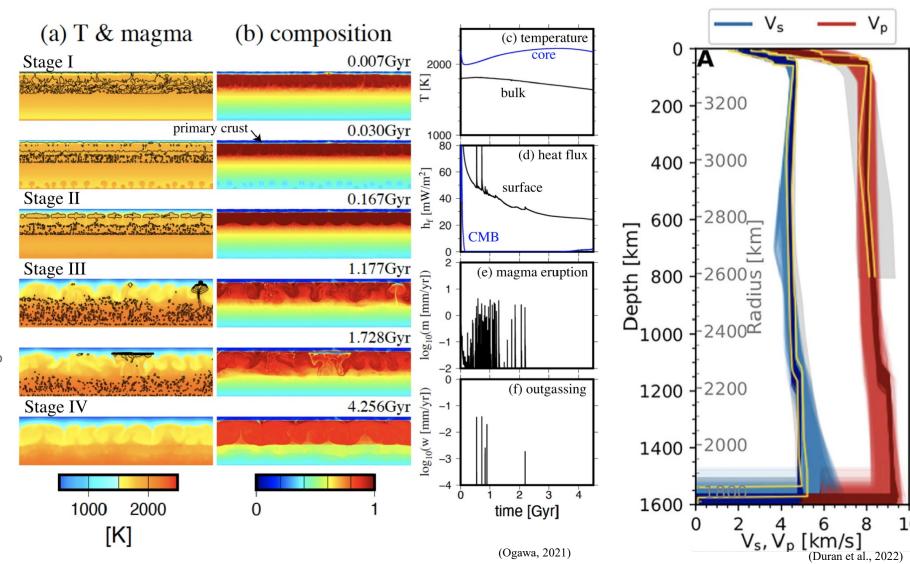
MOがマントルを分化しと仮定した場合

MOによる化学成層

進化モデルの例($\Delta \rho_{MO} = 132 \ kg \ m^{-3}$): 深部は初期構造を保存、地殻はprimary

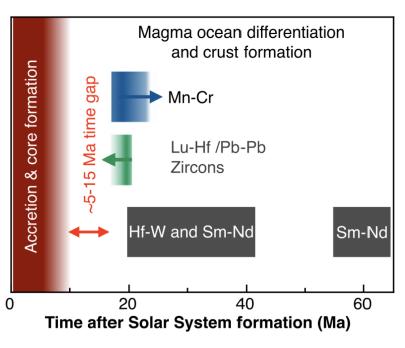


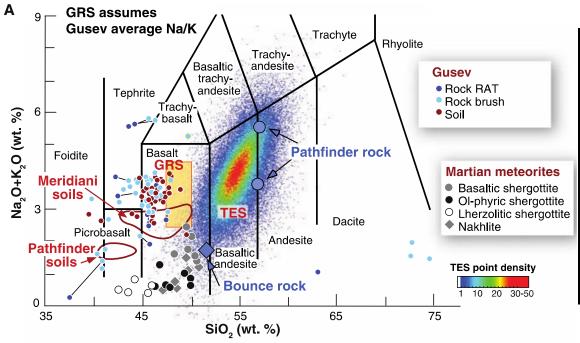
(Elkins-Tanton, 2008)

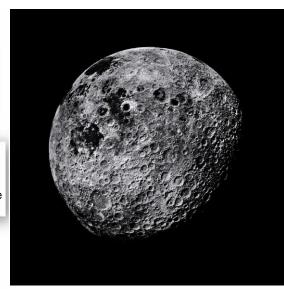


火星隕石から推測される初期史

MOの冷却•固化時間 ≒ 10 Myr?

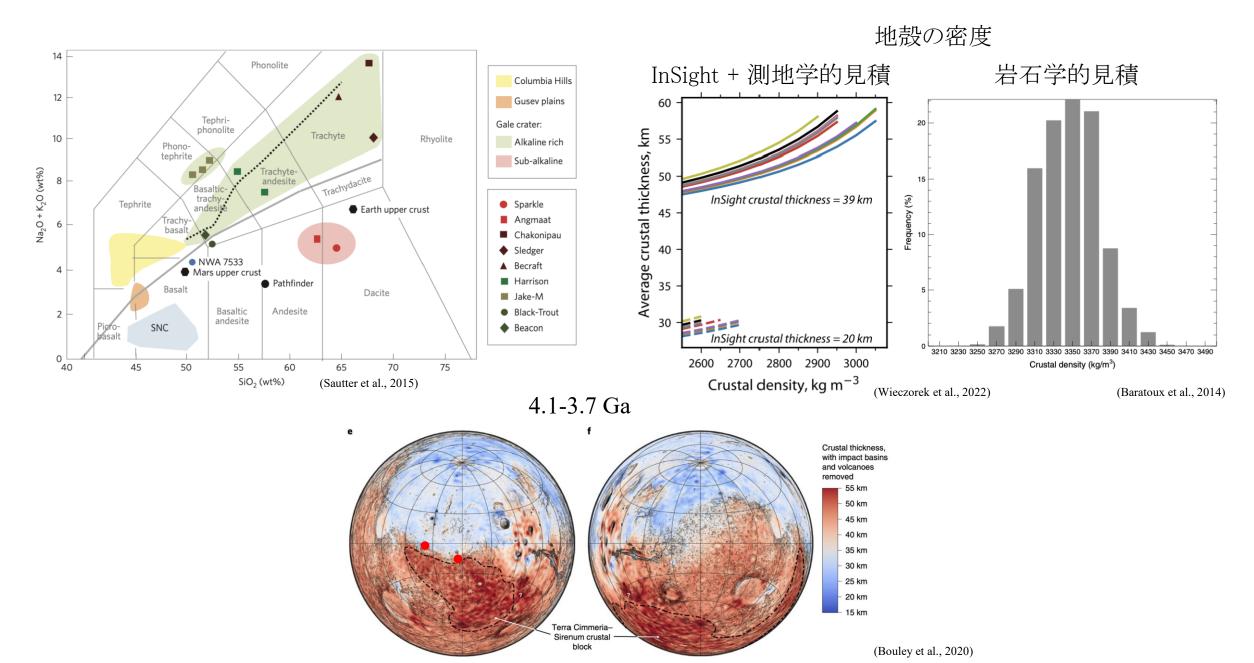




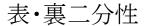


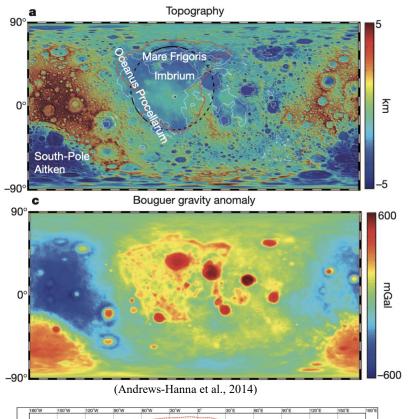
(Kruijer et al., 2020) (McSween et al., 2009)

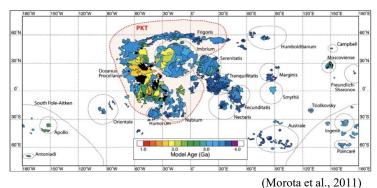
火星の地殻はもつと複雑:大陸地殻?シリカに富む地殻?



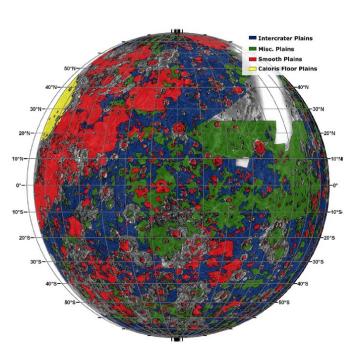
9-5. 二分性・地域性:惑星形成過程への制約





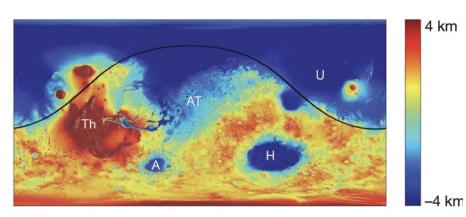


北半球のsmooth plain

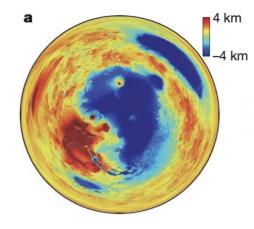


(Head et al., 2009)

タルシス・エリジウム火山



南北二分性は衝突起源



(Andrews-Hanna et al., 2008)

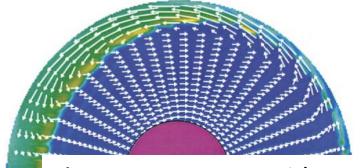
火山活動局在化の原因:後天的?

1=1のマントル対流?

1=1のマントル・オーバーターン Parmentier ∈ "et al."

粘性率の成層構造 Tackley[俺は諦めた]

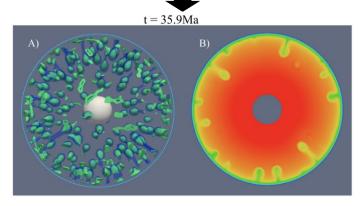
火星:CMB直上の相転移の効果? このパターンに落ち着くのに数Gyr コア半径1850 km

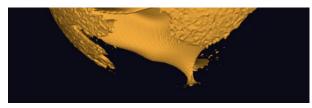






水星でマントル対流によりグローバルなスケールで局在化させるのは不可能



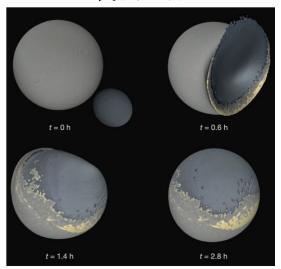


(Keller & Tackley, 2009)

火山活動局在化の原因: 先天的? 惑星形成期に二分性の種が必要

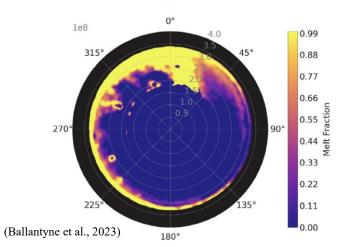
巨大衝突?

月:裏側に付加

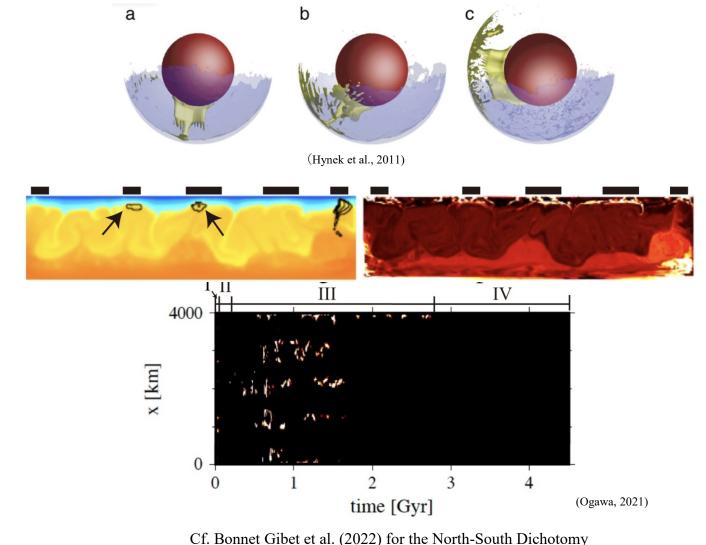


(Jutzi & Asphaug, 2011)

火星:南半球に付加



最初に二分性があれば(衝突起源?)火山活動は局在化するかも



そうだ月と火星へ行こう

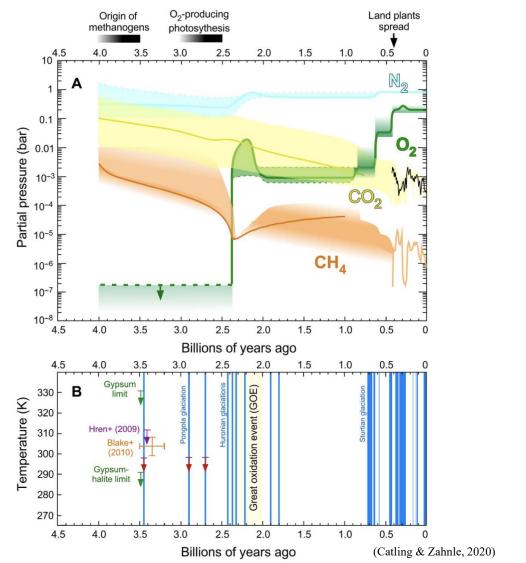


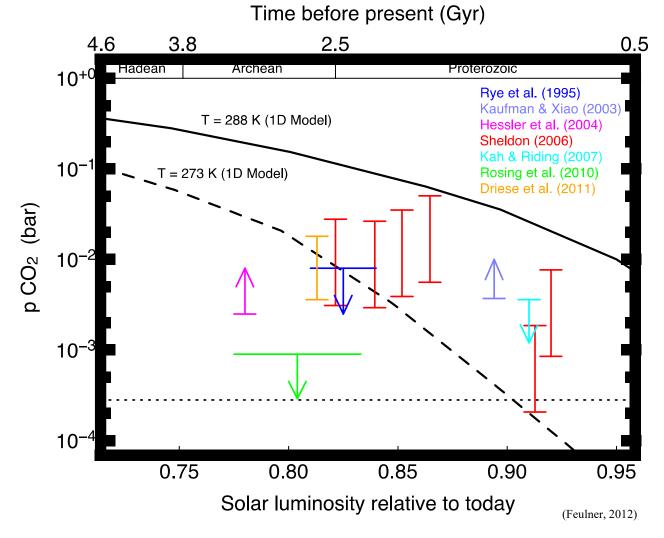
地殻・マントル構造発達史の比較

第10章 表層環境と内部進化

暗い太陽のパラドックスとSnowball

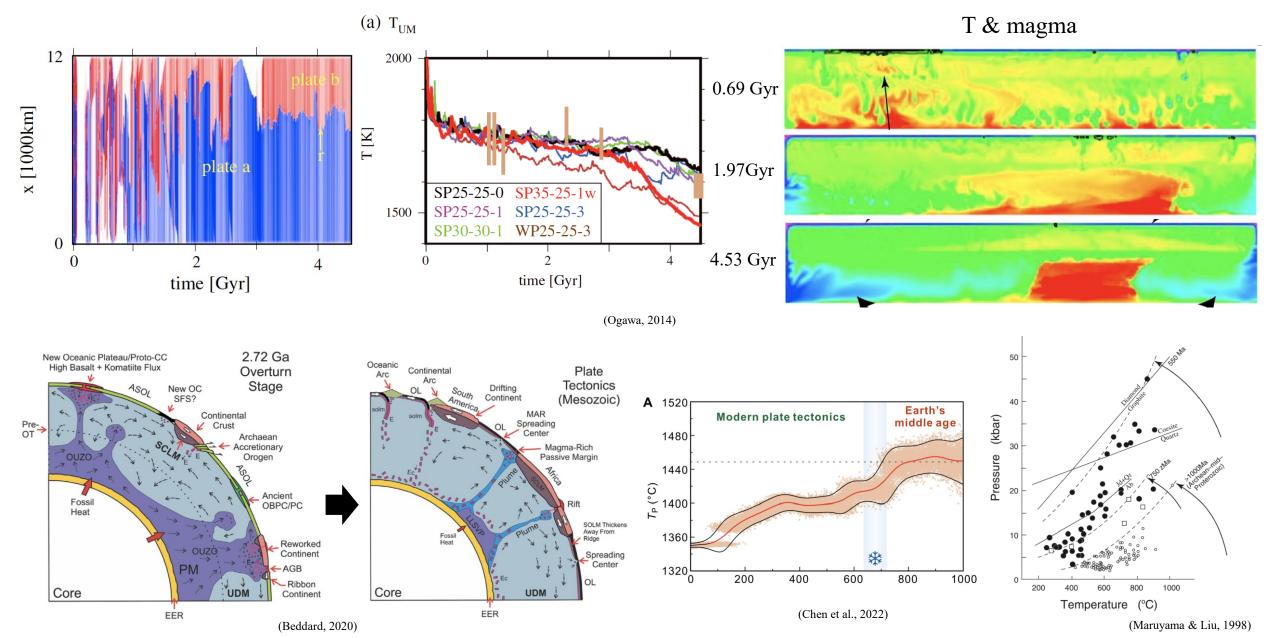
地球内部と表層の揮発性物質循環?





10-1 表層・内部相互作用のモデリング

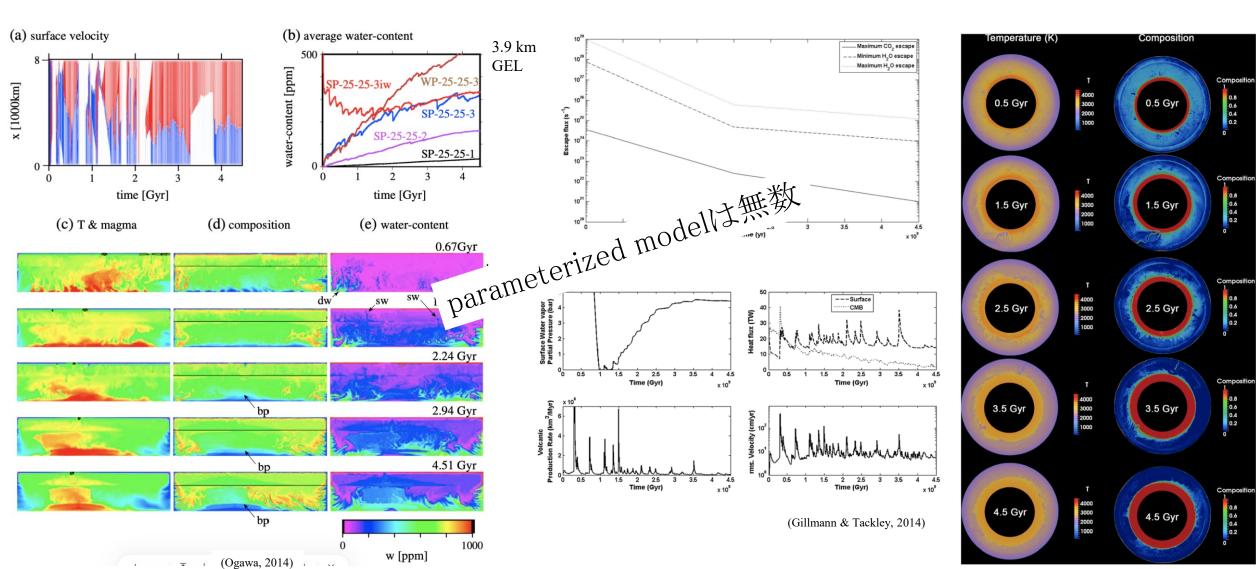
Snowballの2.3Ga, 0.7Gaというタイミング?



水循環を取り入れたマントル対流の一応それらしいモデル

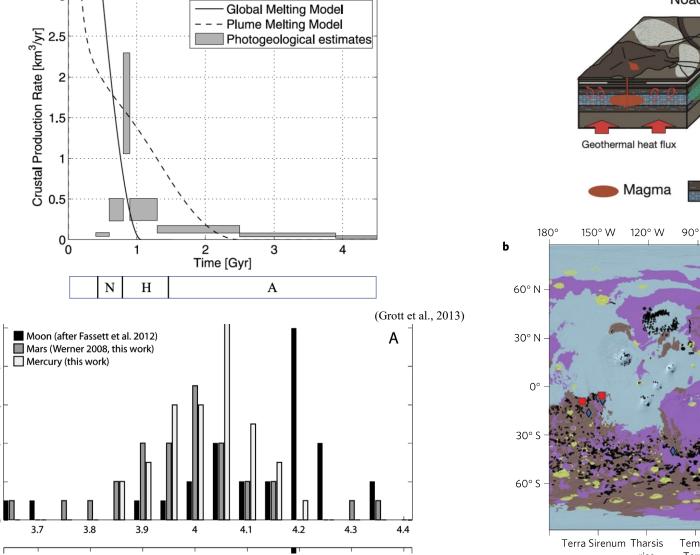


金星(内部進化・脱ガス+大気散逸)

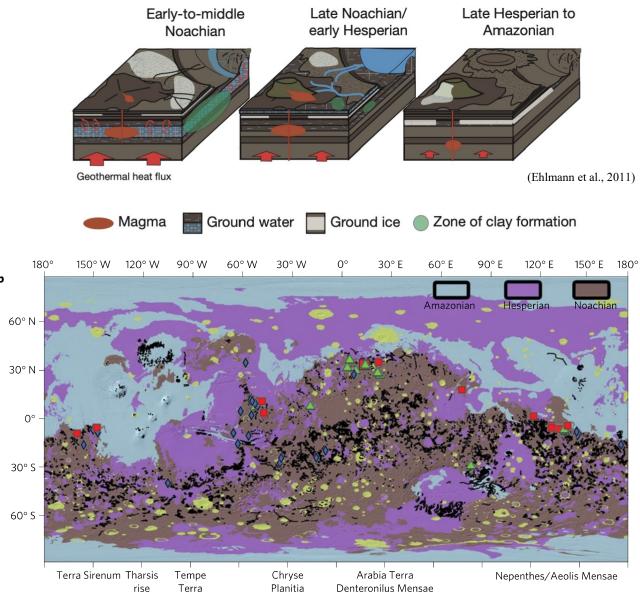


10-2. 火星の表層環境

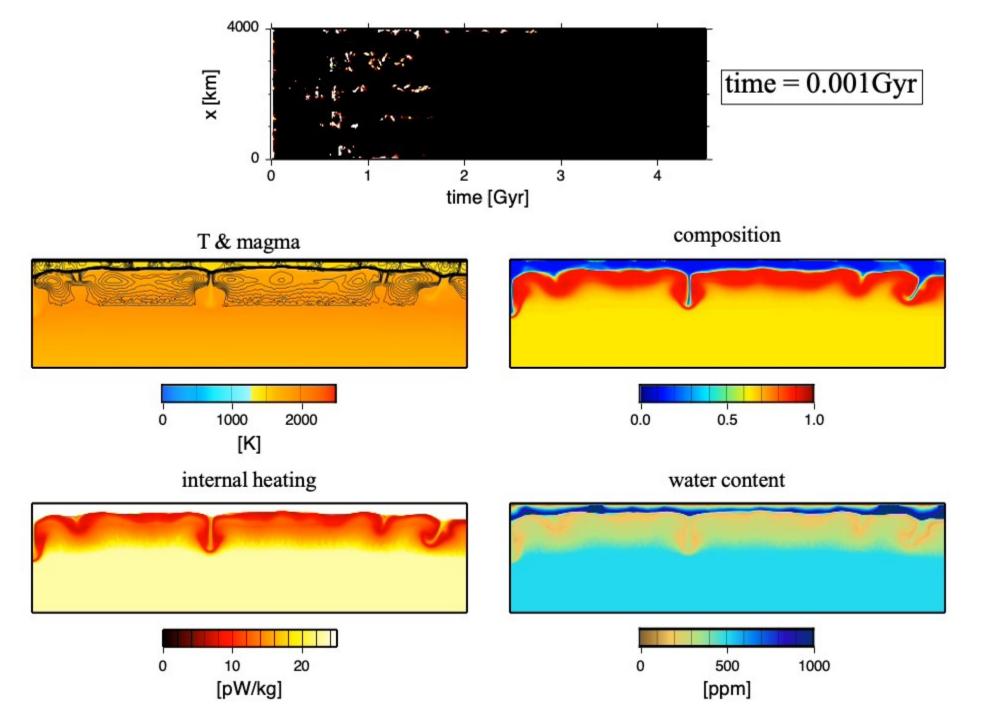
Frequency

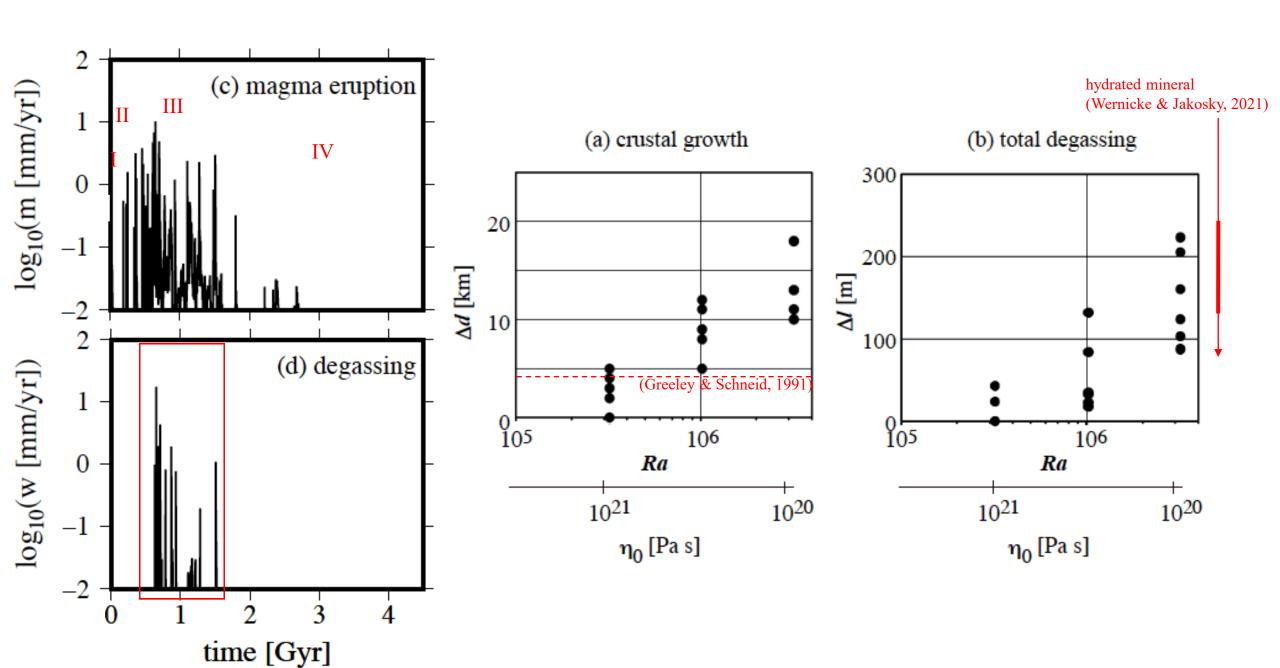


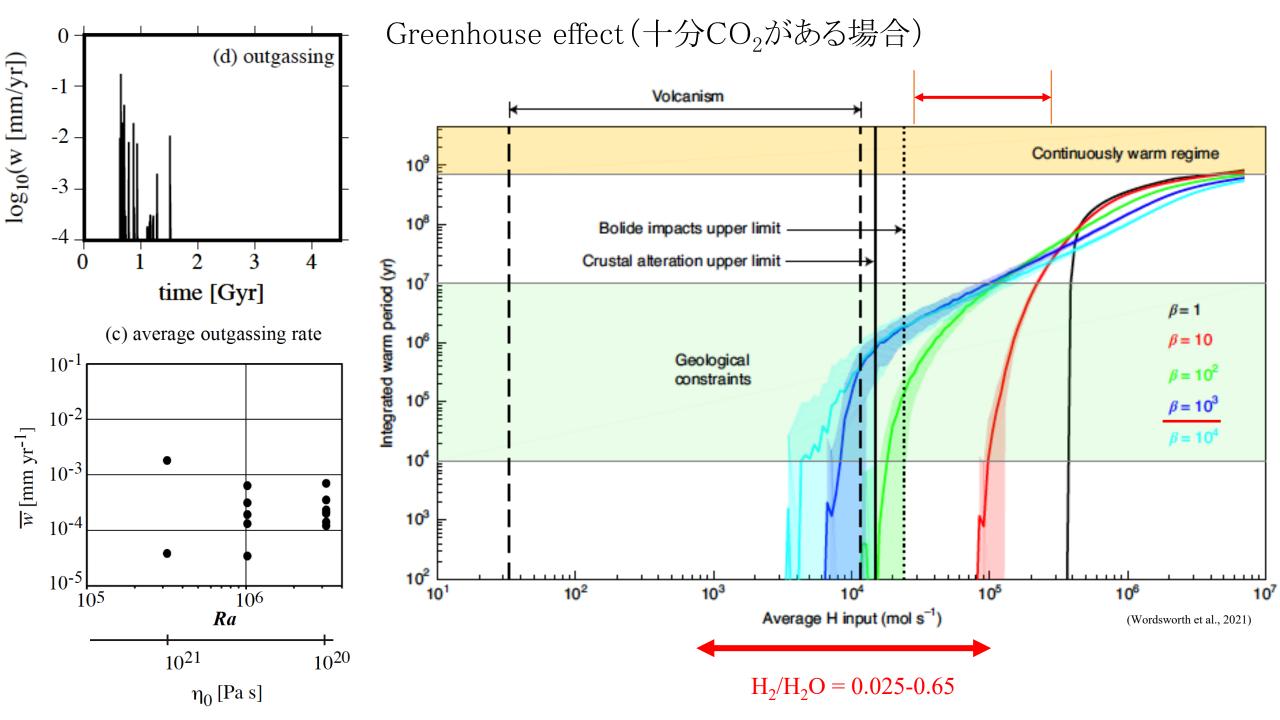
(Werner, 2014)



(Di Achille & Hynek, 2010)



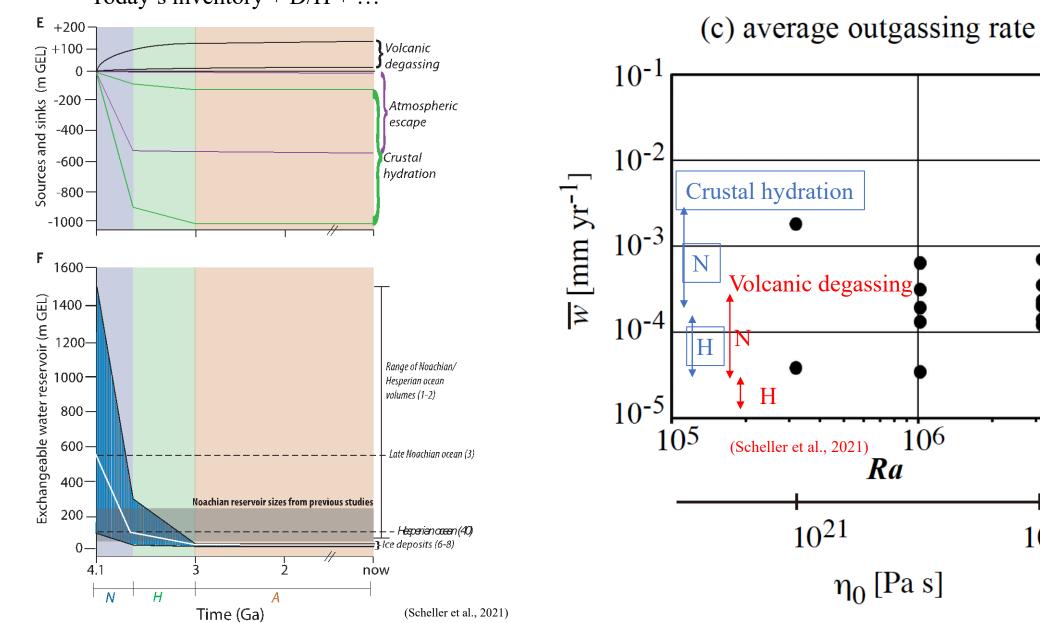




Water Inventory

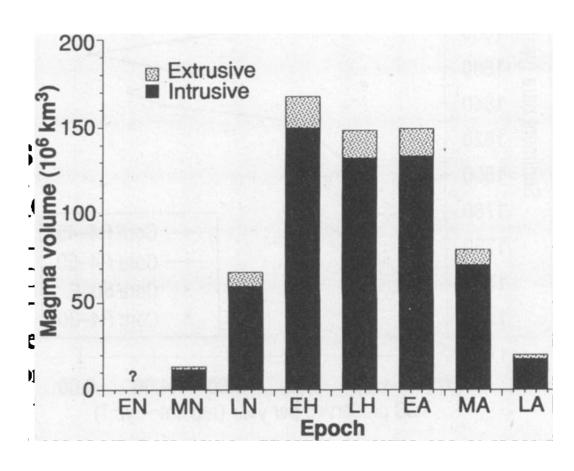
 10^{20}

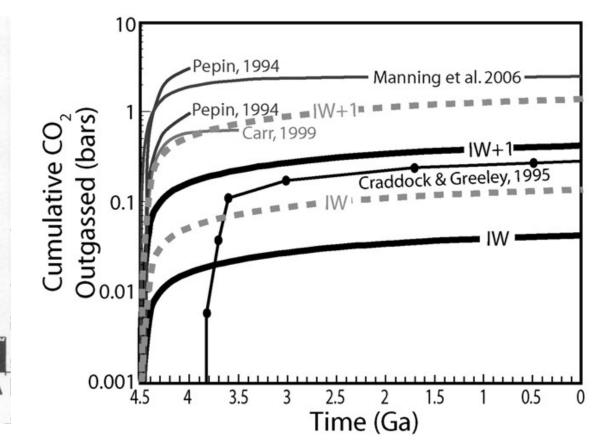
Today's inventory + D/H + ...



火山によるCO2の供給???

火星のマントルは還元的→ Cはグラファイト→マグマ中のCO₂はごく僅か マントルが還元的であるかぎり困難





期待するデータ

Noachian, Hesperianの「温暖な気候」の実態温暖な気候と火山活動のタイミング火山活動の活動度、温室効果ガスの種類?現在の水・石灰岩etc.のinventory

モデルの検証の可能性 → 他の惑星(地球への外挿)?

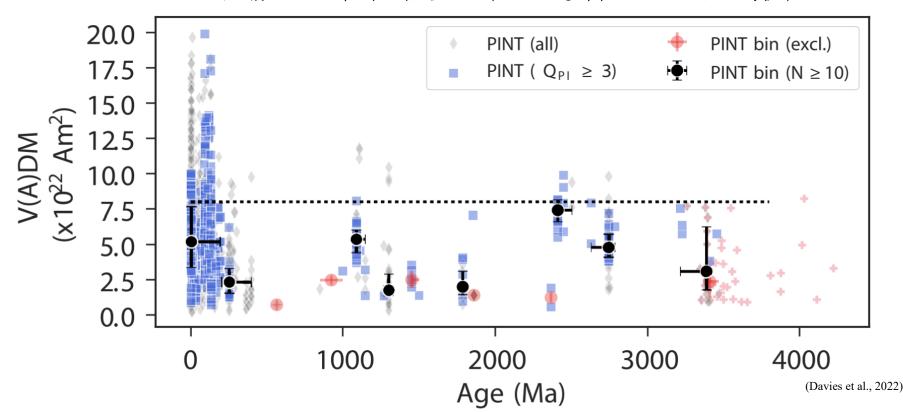
生命の起源もいいけど、表層環境とその原因の解明も大事

第11章 コア・ダイナモ:お茶を濁してはいけない

惑星磁場はその惑星の熱史を制約する?

11-1 惑星の磁場と熱史

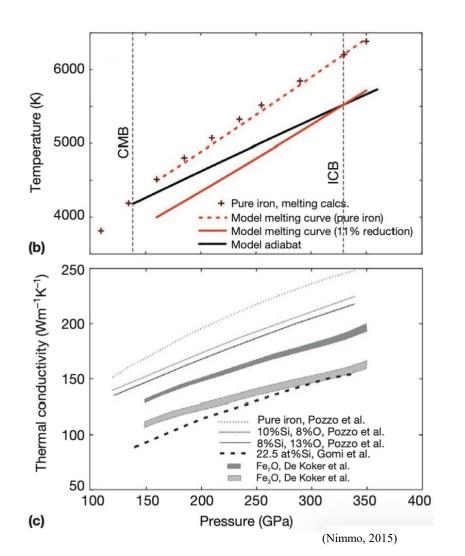
磁場=コア冷却の証拠? (3.5 Ga以降は全マントル対流)

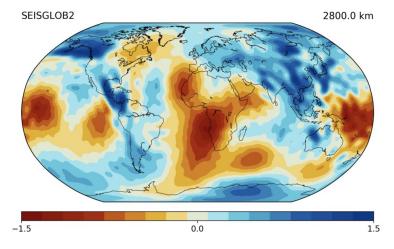


コアのエネルギー収支(ダイナモには触らない) コアで対流が起きる条件 $Q_{CMB} >$ 断熱流量

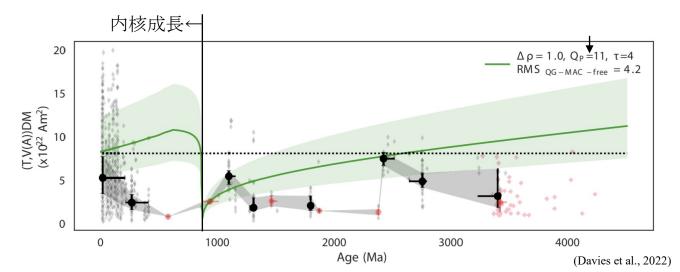
大きな熱伝導率 \rightarrow 大きな Q_{CMB} :地球で > 9TW (4.5 pW/kg)

スーパープルームによる強力なコアの冷却?



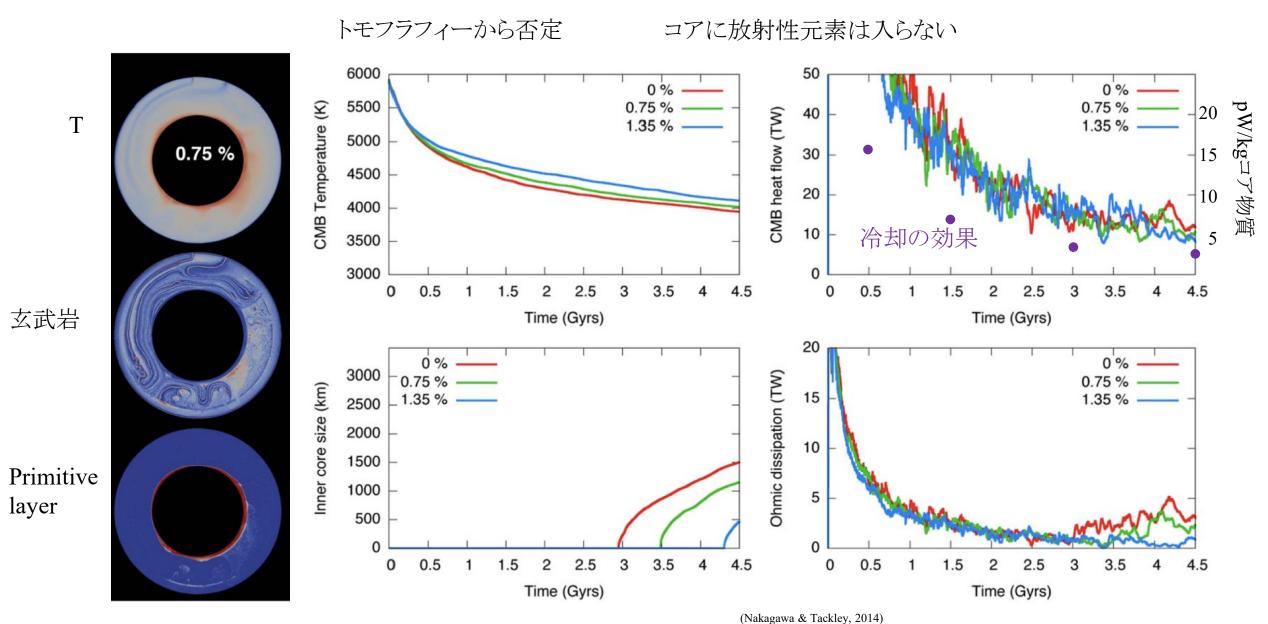


 $Q_{CMB}=Q_{p}\exp\left[rac{4.5-t}{ au}
ight]$; $Q_{p}=11~TW$, au=4~Gyr~ と仮定。 $(Q_{CMB}=33 o11~TW)$

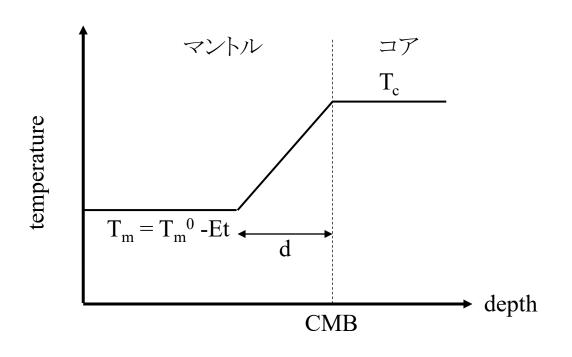


これだけの Q_{CMB} を維持するのは大変;コアはあっという間に冷えてしまう

CMB直上の化学成層による保温 + コアの内部加熱(BSEの半分程度)



コアに熱源を入れたくなる理由



$$CM\frac{dT_c}{dt} = -\frac{Sk(T_c - T_m)}{d}$$

M: core mass, C: specific heat of the core

S: surface area of the core, k: thermal conductivity

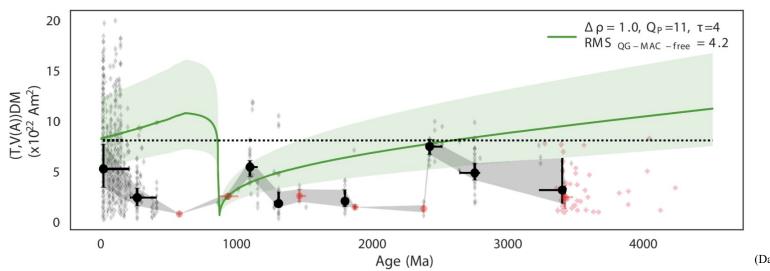
E: the cooling rate of the mantle

$$q_{CMB} = \frac{k(T_c - T_m)}{d} = k \frac{\Delta T_0}{d} \exp\left(-\frac{t}{\tau}\right) + \frac{k}{d} E \tau$$
$$\tau = \frac{CMd}{kS}$$

	$\tau [Myr]$	第二項 [mW/m²] (E = 50 K/Gyrのとき)
地球	66d [km]	$0.33E [K/Gyr] (16.5 mW/m^2 \rightarrow 2.5 TW)$
火星	14d [km]	$0.071E \text{ [K/Gyr] } (3.5 mW/m^2 \rightarrow 0.15 \text{ TW})$
月	5 <i>d</i> [<i>km</i>]	$0.02E \text{ [K/Gyr] } (1 mW/m^2 \rightarrow 0.0015 \text{ TW})$

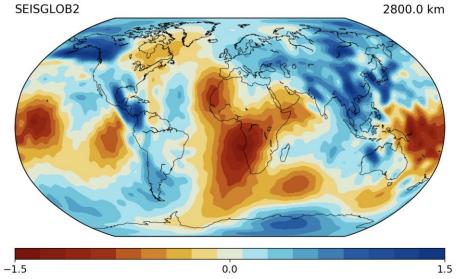
$d = 60 \, km, \Delta T_0 = 2500 \, K, E = 0 に対応$

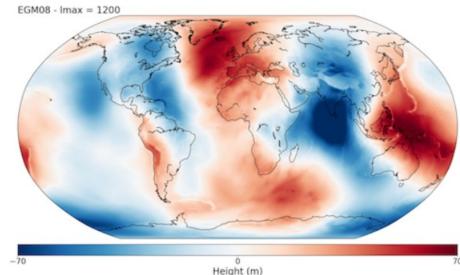
形成直後にこれほど大きなコア・マントルの温度コントラスト?(N.B. MOの冷却効率?)



(Davies et al., 2022)

「スーパープルーム」という概念は誤り; Q_p= 11TWはoverestimate 2800.0 km EGM08 - Imax = 1200

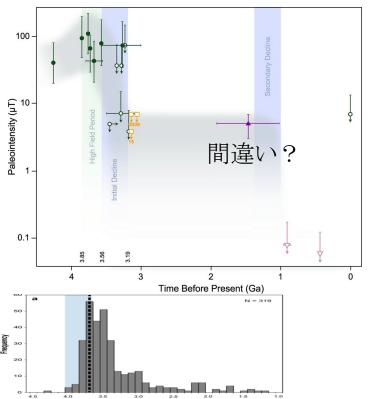




いずれの惑星も説明困難

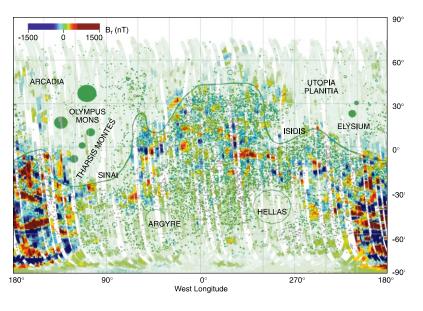
月:非常に小さなコア、強い磁場

Precession-driven?

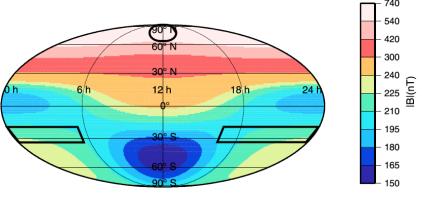


(Strauss et al., 2021; Whitten & Head, 2015)

火星:4 Ga頃まで磁場存続



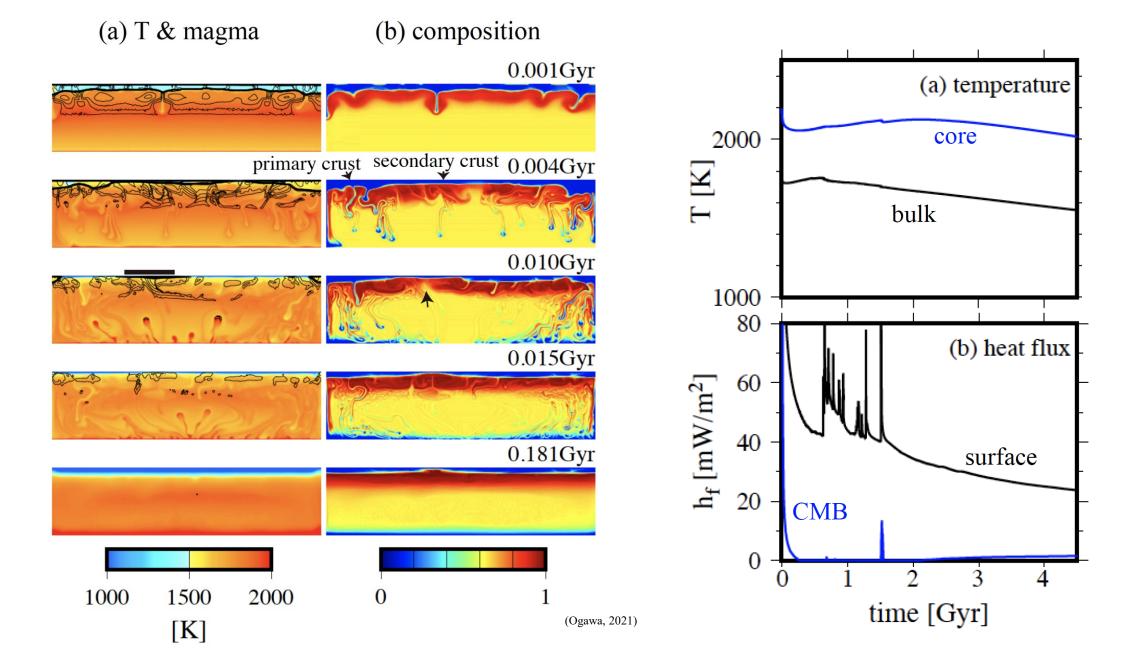
水星:弱い磁場/ダイポールの偏り 二分性と関係???



(Acuna et al. 1999)

(Winslow et al., 2014)

火星の Q_{CMB} :放射性元素に富む地殻物質のリサイクリング \rightarrow 急速な減衰



11-2 ダイナモ理論の必要性

Secular coolingでは惑星磁場は維持できない?

球殻という形状と熱流量?境界条件(水平不均質)?歳差運動?内核成長によるダイナモ(特に $q_{CMB} < q_{adiabat}$ で)?

ダイナモ理論の見直し

断熱圧縮?

$$\frac{\partial T}{\partial t} + \boldsymbol{u} \cdot \nabla \boldsymbol{T} = \kappa \nabla^2 T \quad \rightarrow \quad \frac{\partial T}{\partial t} + \boldsymbol{u} \cdot \nabla \boldsymbol{T} - \frac{T\alpha}{\rho C_p} \boldsymbol{g} \cdot \boldsymbol{u} = \kappa \nabla^2 T + \frac{\Phi}{\rho C_p}$$

内核成長?flux formulationは本当?

$$\frac{\partial \xi}{\partial t} + \boldsymbol{u} \cdot \nabla \xi = \kappa_{\xi} \nabla^{2} \xi$$

$$\frac{\partial f}{\partial t} + \boldsymbol{u} \cdot \nabla f = \kappa \nabla^2 f$$
: $f = -\alpha T - \beta \xi$ tate $\frac{\delta \rho}{\rho_0} = -\alpha T - \beta \xi$

乱流の効果?

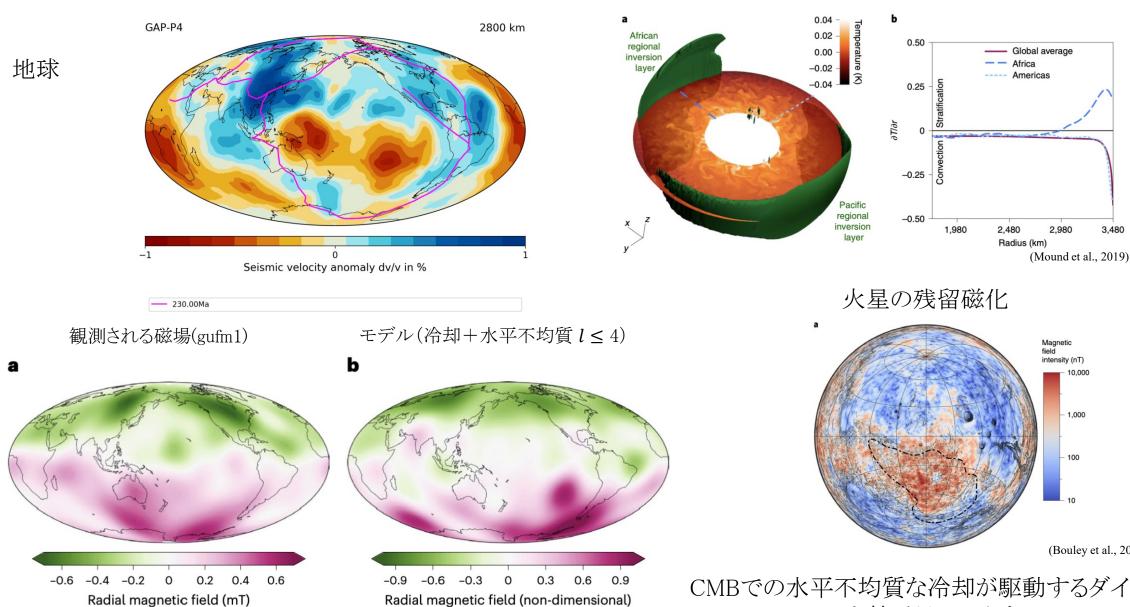
例:magnetic Prandtl number = 0?

ダイナモモデルはほとんどが無次元→スケーリング?

断熱圧縮の効果を入れて、乱流拡散を考慮して次元量でダイナモ計算したらどうなる?

水平不均質が駆動するダイナモ?

(Mound & Davies, 2023)



CMBでの水平不均質な冷却が駆動するダイナモ? 文献が見つからない

2,980

Magnetic field intensity (nT) 3,480

(Bouley et al., 2020)

次世代への期待

惑星探查

リモートセンシング + スポット的な着陸探査 → 面的な地質学的研究 + 詳細な内部探査 ↓

アポロ時代に作られた惑星科学の大枠の再構築 熱史、マグマ・オーシャン、ジャイアント・インパクト、etc

現場に翻弄される惑星科学?

地質学的研究の困難:「総花的な惑星探査では何も見えない。仮説に立脚した目標設定が重要」?
→ 恣意的なデータの選択と解釈

惑星内部科学が本当の意味で近代科学になる時代

素性の知れた月試料(e.g., マントル物質)の精密な同位体分析

