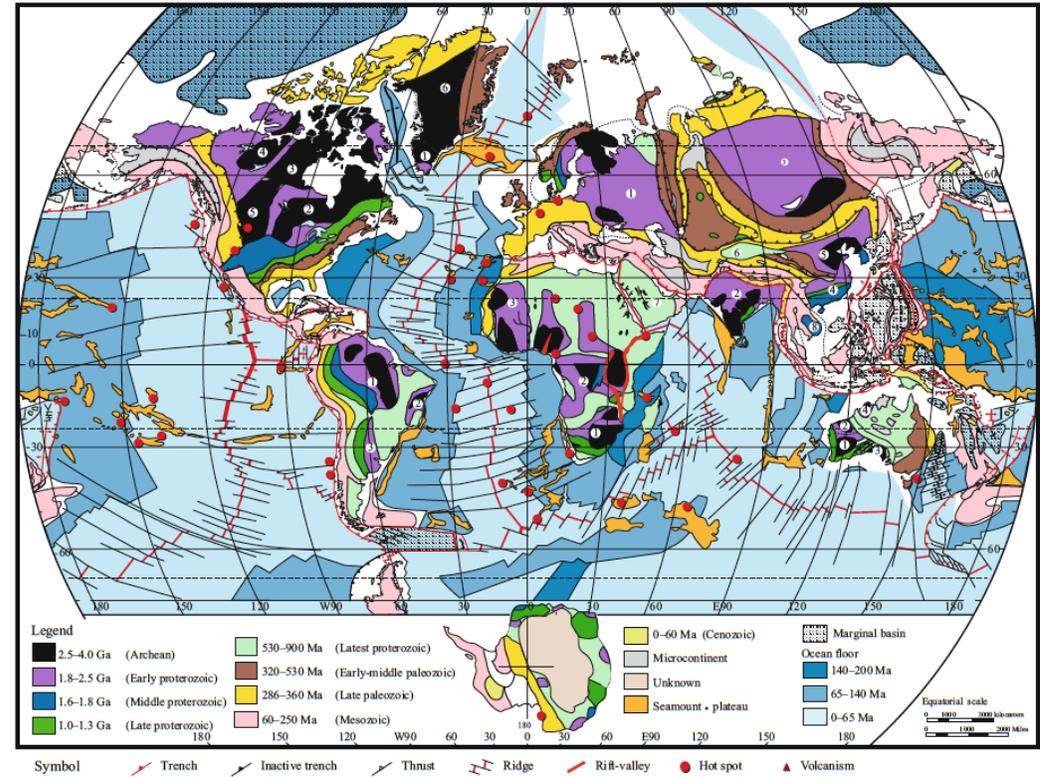


第一部 マントル・ダイナミクスの基礎

どうやったら地球型惑星をわかったという気になれるか？

第1章 地球を「わかる」?

1-1. テクトニクス史概観



2.5Gaは地球史の節目？

2.5 Gaにマントル急冷？ マントル対流のパターン変化？

コマチアイト

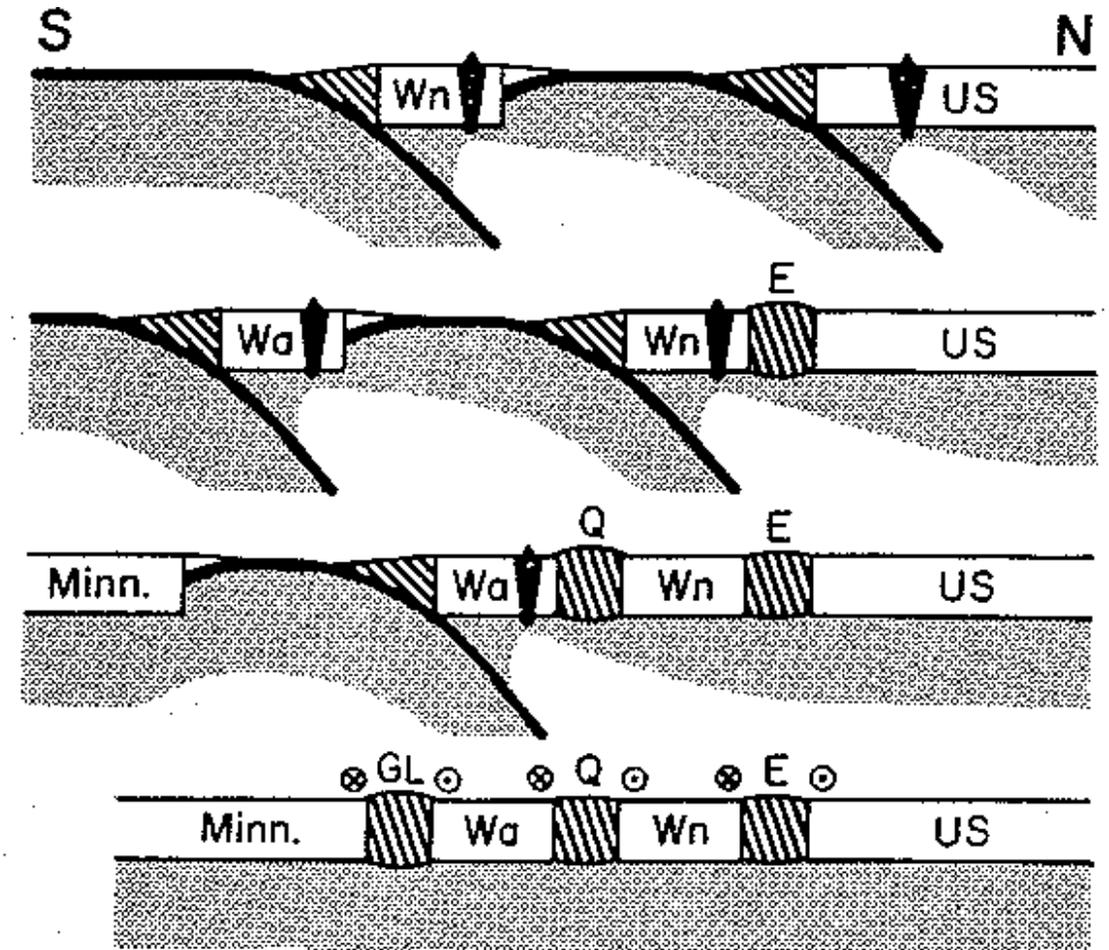
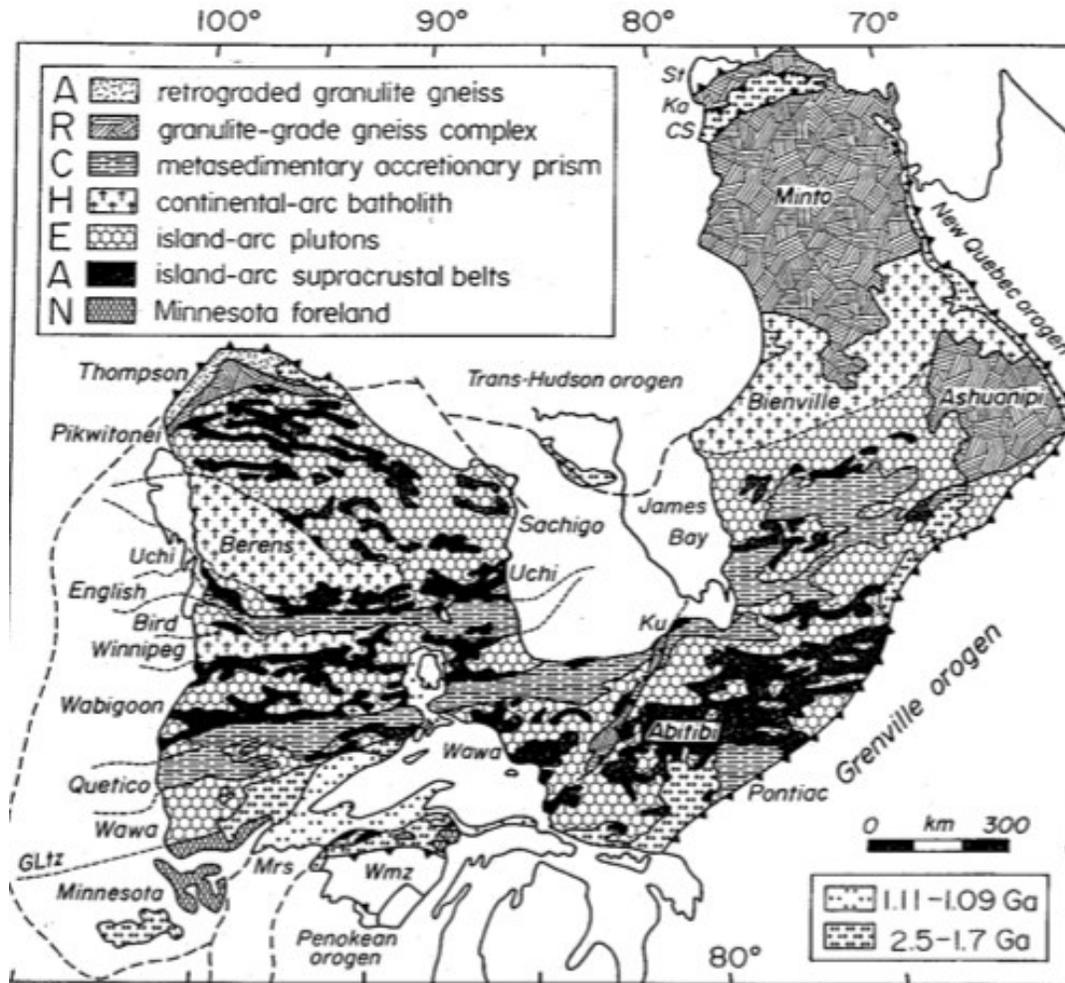
S THROUGH TIME

507

プルーム？ — the conduit, so that T_p of the plume axis is close to that of the plume source (Loper and Stacey 1983; Griffiths and Campbell 1990). Further, it has been shown by Davies (1990), that a mantle plume only draws material from a thin ~ 15 km deep zone of high temperature and low viscosity material at the base of the plume. That is, if we can measure the potential temperature of the plume axis when it begins melting near the top of its ascent, we are also measuring, to a good first approximation, the

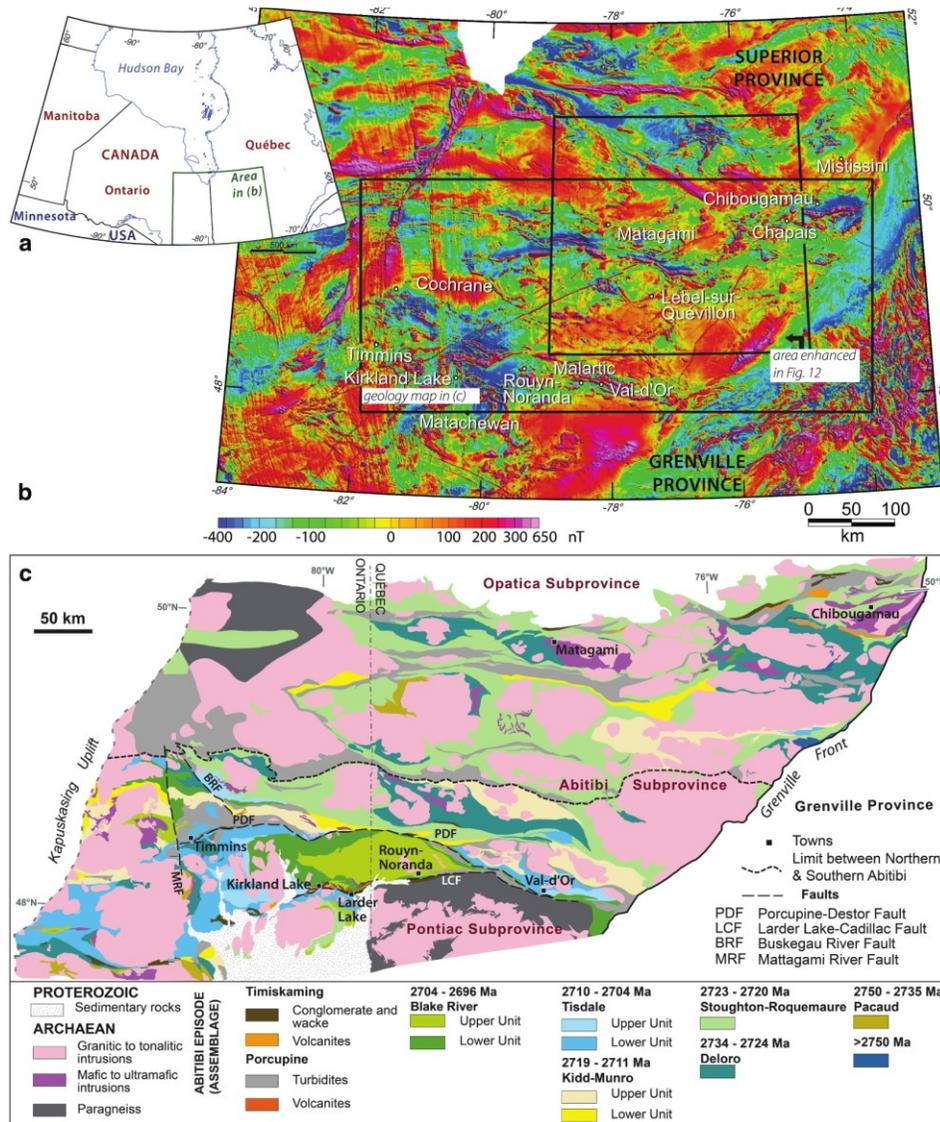
現在の上部マントル

25億年以上前の地球:カオティックなプレートテクトニクス?

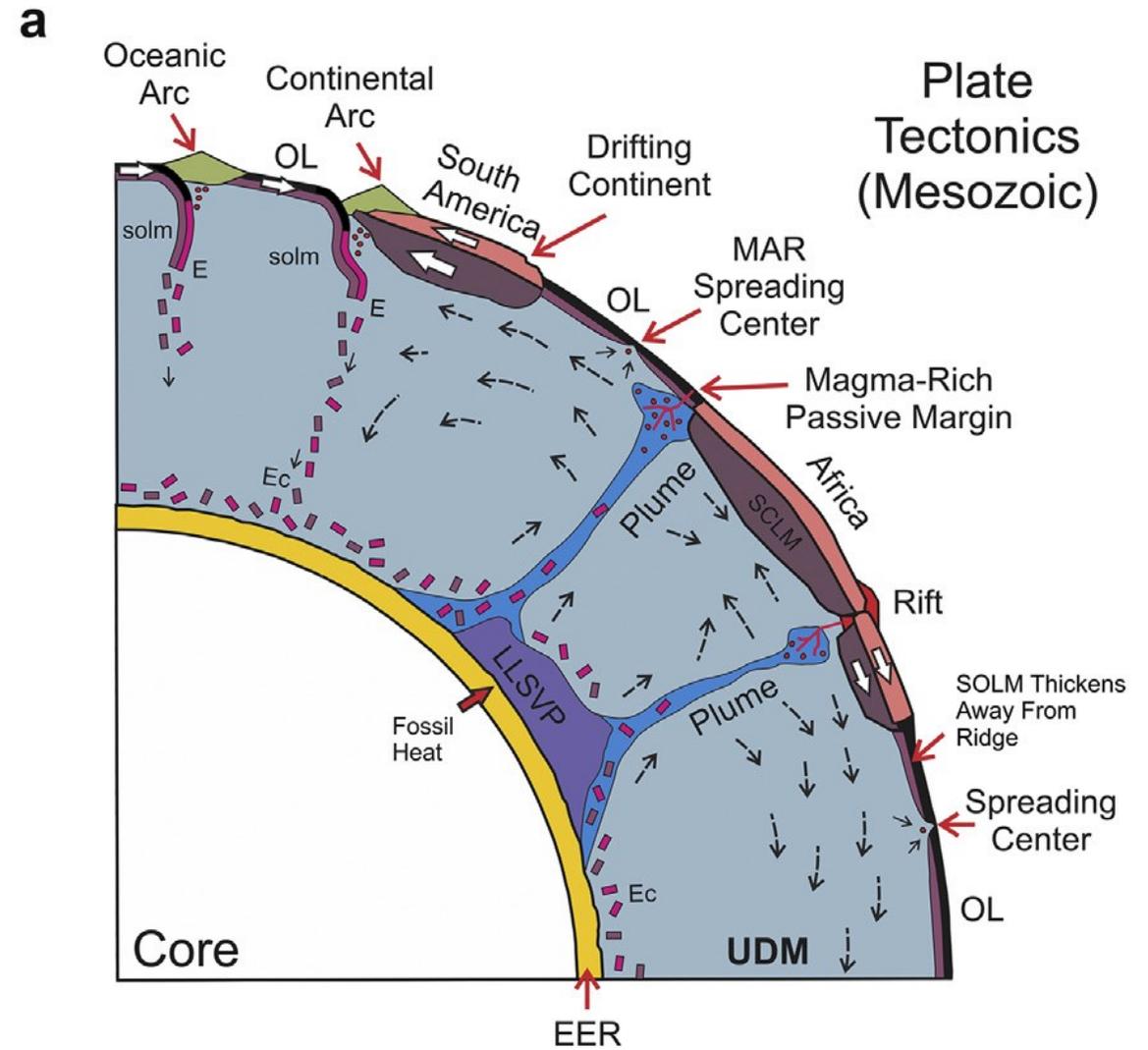


(Hoffman, 1989)

25億年以上前の地球：活発なプルームが支配？



(Harris & Bedard, 2014)



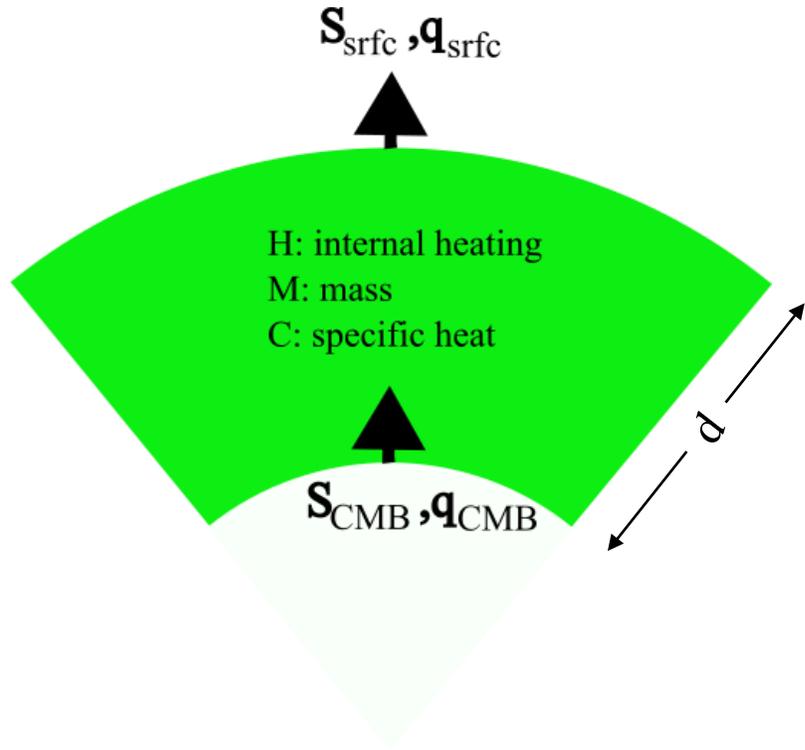
b

(Bedard, 2020)

1-2. 準静的熱史モデル

マントル進化の「なんとなく」のイメージ
初期地球は高温・活発なマントル対流 → 冷却によるマントル対流の沈静化

マントルの平均温度 T_m の時間変化



$$MC \frac{dT_m}{dt} = -S_{srffc} q_{srffc} + S_{CMB} q_{CMB} + MH$$

Annotations for the equation:

- Below $-S_{srffc} q_{srffc}$: 地表面から逃げる熱 (Heat escaping from the surface)
- Below $S_{CMB} q_{CMB}$: コアから入ってくる熱 (Heat coming from the core)
- Below MH : 内部発熱 (Internal heating)

熱流量 q_{srfc} の見積: parameterized convection model

伝導による熱流量

$$q_{srfc} = Nu \boxed{k \frac{T_m - T_{srfc}}{d}}; \quad Nu \propto Ra^\beta \quad (\beta = 0.05 \sim 0.3)$$

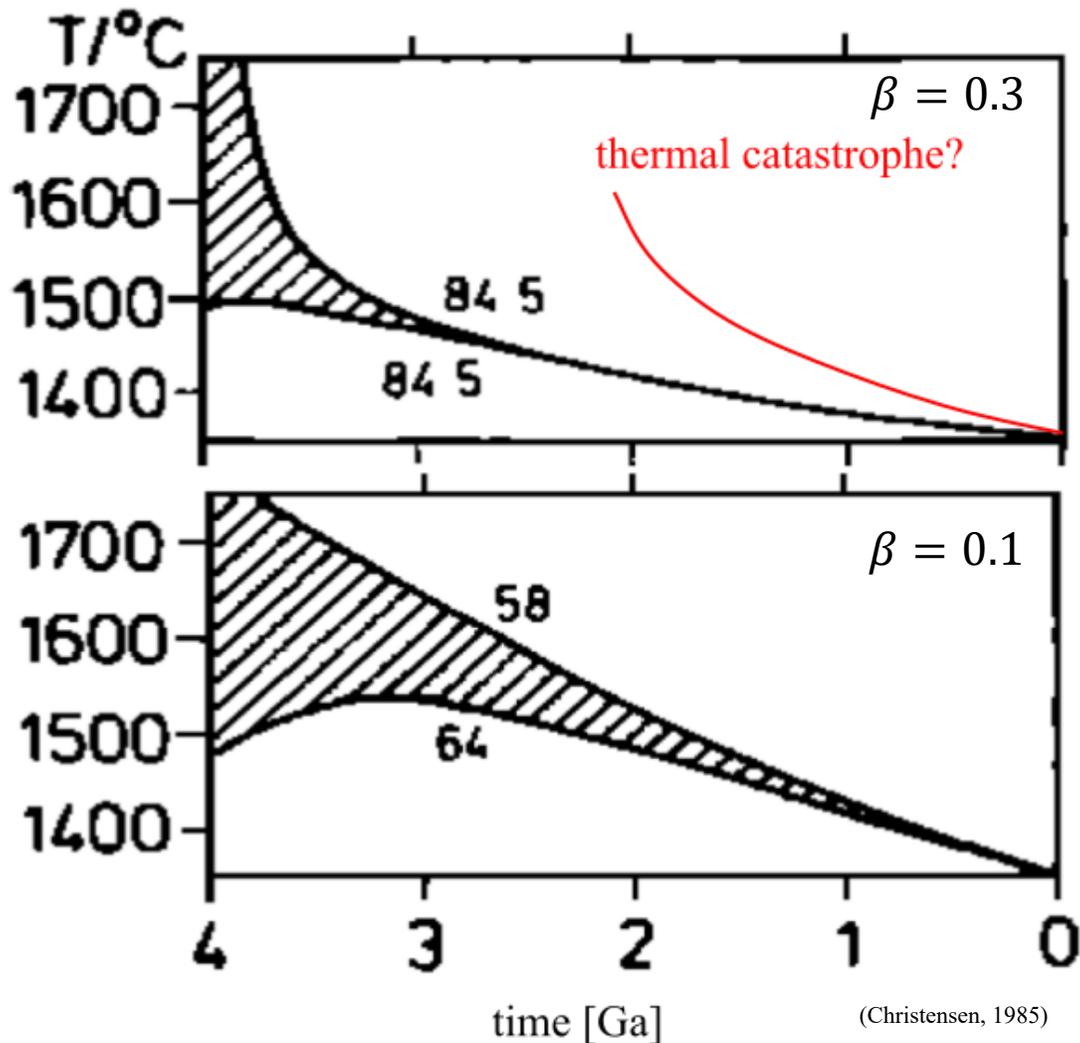
$$Ra \propto d^3 / \eta(T_m, H_2O, etc)$$

Ra : レイリー数 = 対流の強さを表すパラメーター

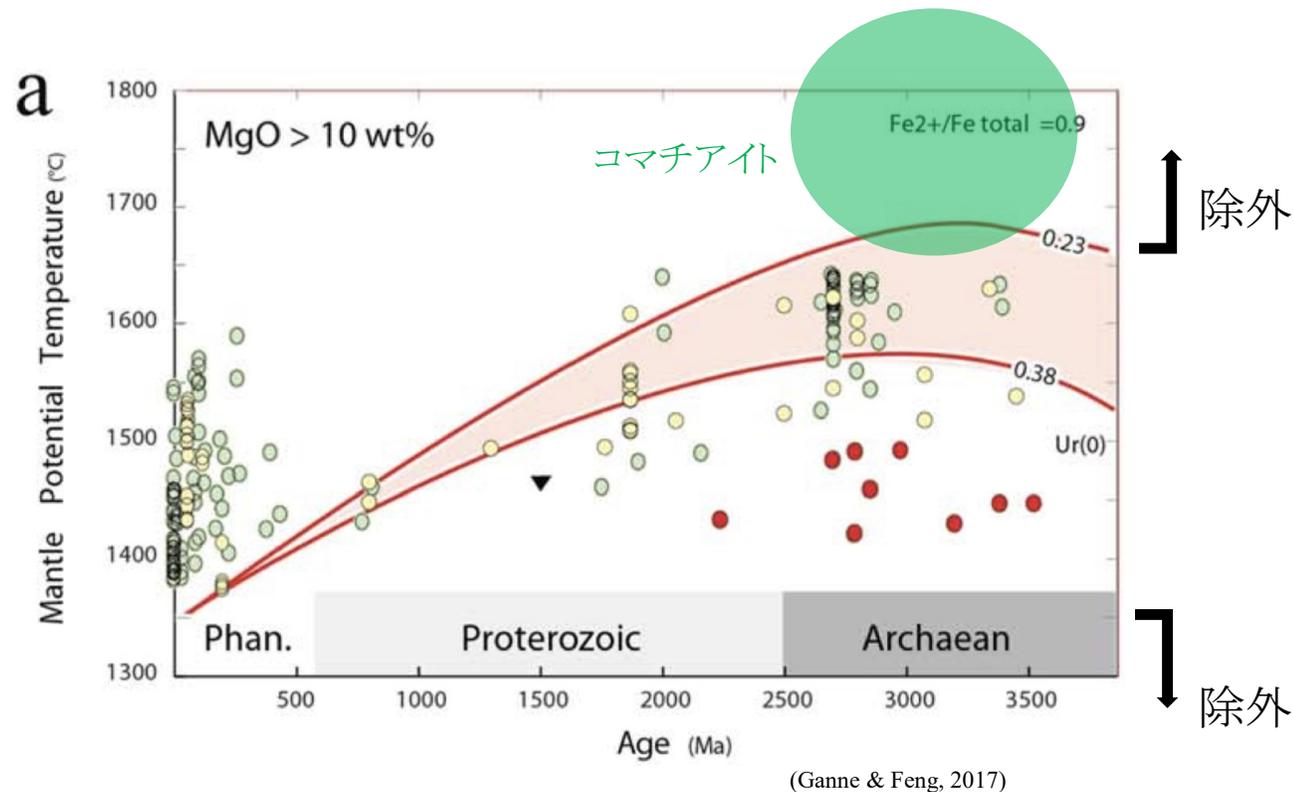
higher T_m → 低い粘性率 → 活発な対流 → マントルを強く冷却

暗黙の仮定

マントルは T_m が規定する力学的平衡状態にある。この状態が準静的に変化。
対流の循環時間 ≪ 進化の時間スケール(地球の年齢、 ^{40}K , ^{235}U の半減期) → マントルはよく攪拌され均質



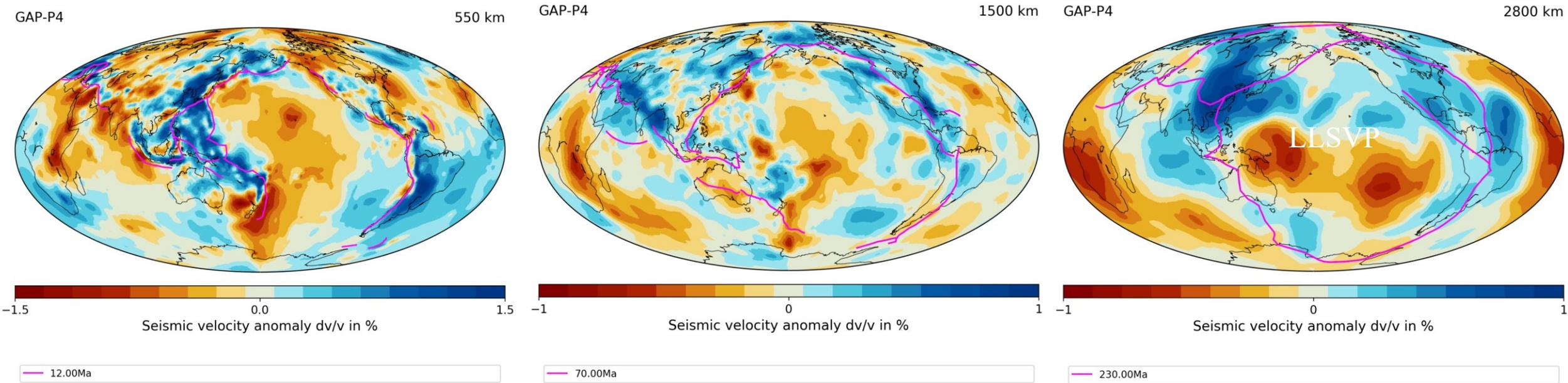
岩石学的な T_m の見積り



準静的モデルの問題点

- (1) T_m と現実の地球の乖離: 間を繋ぐ(地質学的)モデルの必要性 → 検証可能?
- (2) モデルの信頼性: 観測との整合性? モデルの粗雑さ?

前提条件？：地震波トモグラフィーによる検証



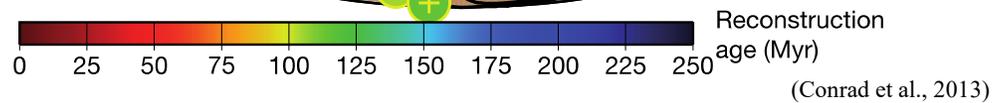
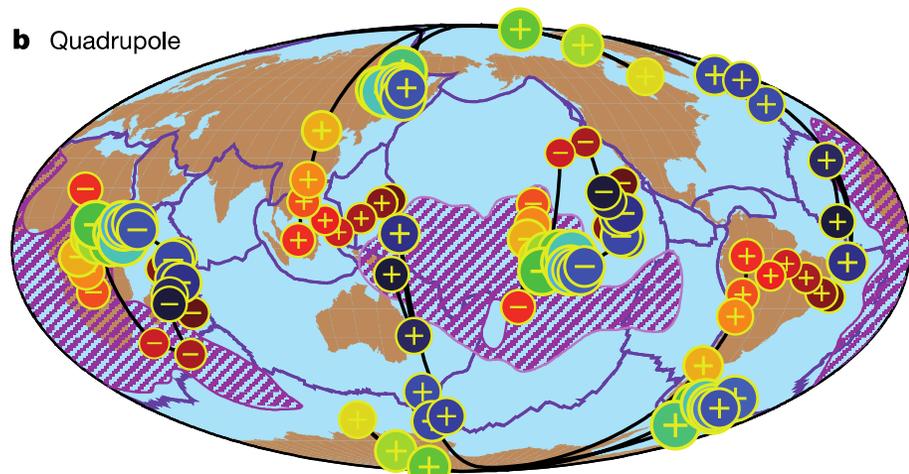
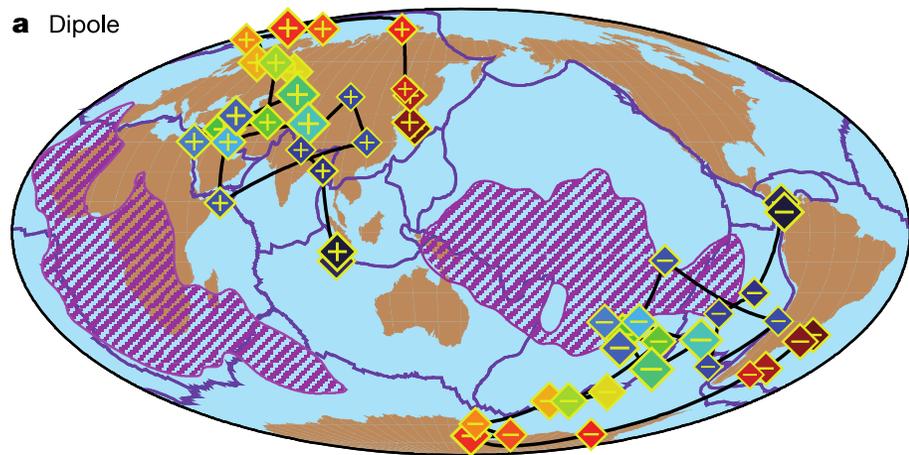
submachine oxfordで検索； GAP-P4 (Fukao & Obayashi, 2013)

- (a) マントルは不均質：平均温度の物理的意味？ 力学的平衡状態？
- (b) マントル対流の循環時間 ~ 2 Gyr：マントル進化は本質的にダイナミクスの問題
(thermal catastrophe は現実の地球では起きない)

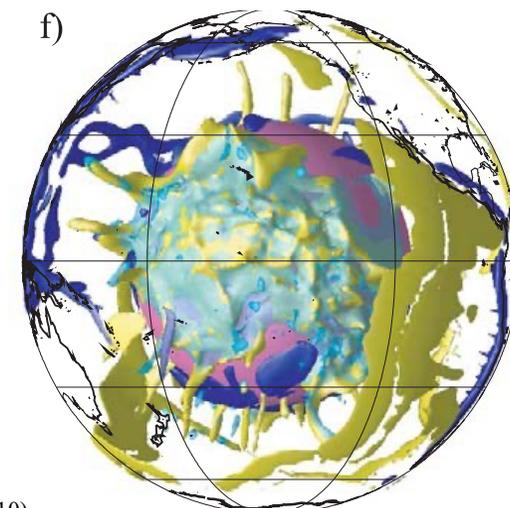
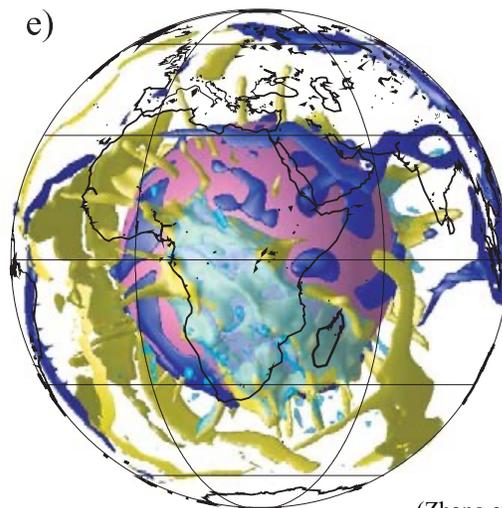
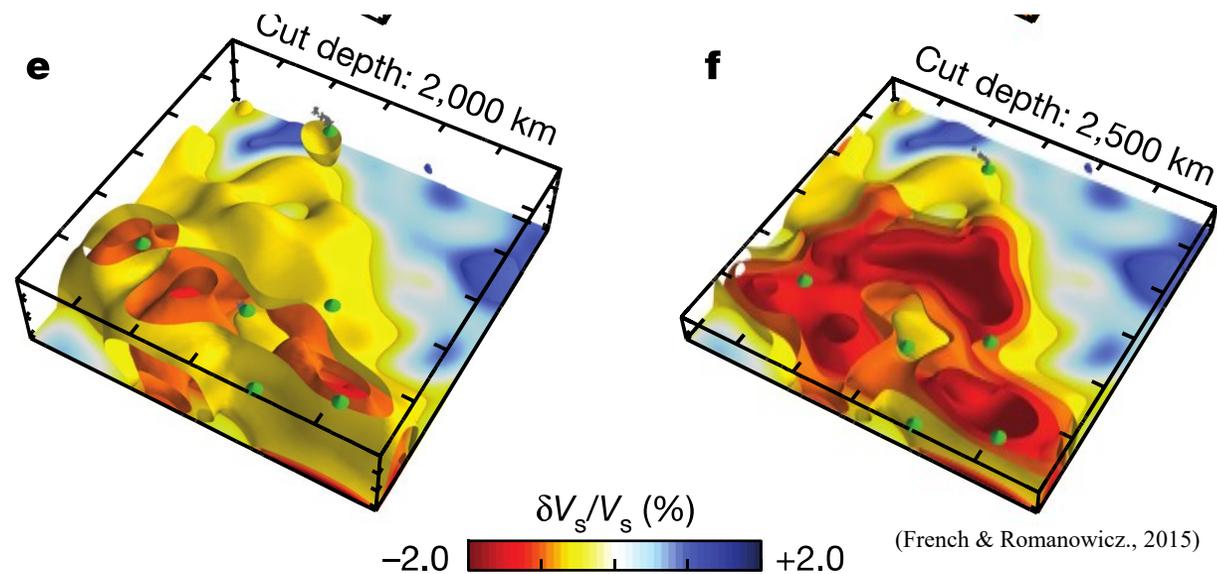
反論: LLSVP = スーパープルーム; プレートは漂流する筏

(1) マントル対流の速度 \gg プレート速度

(2) コアを強く冷却



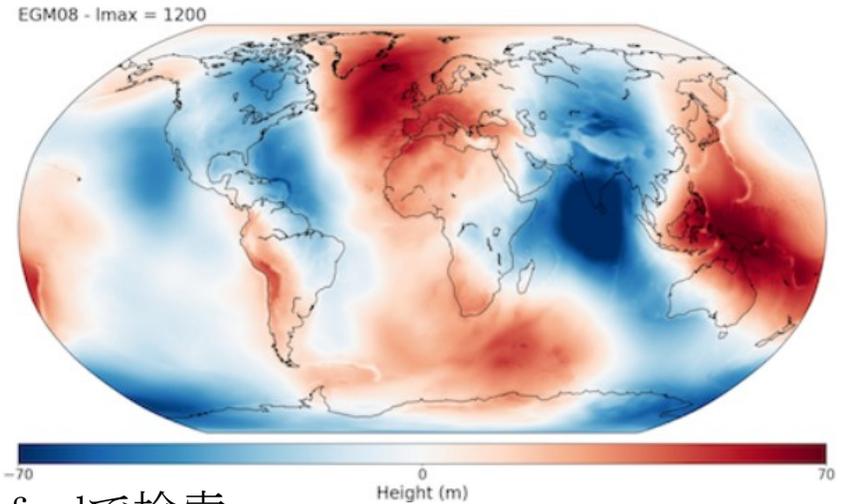
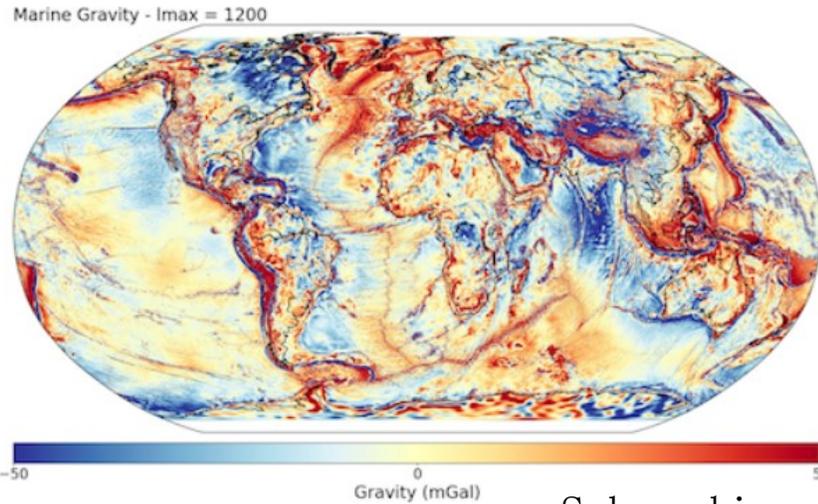
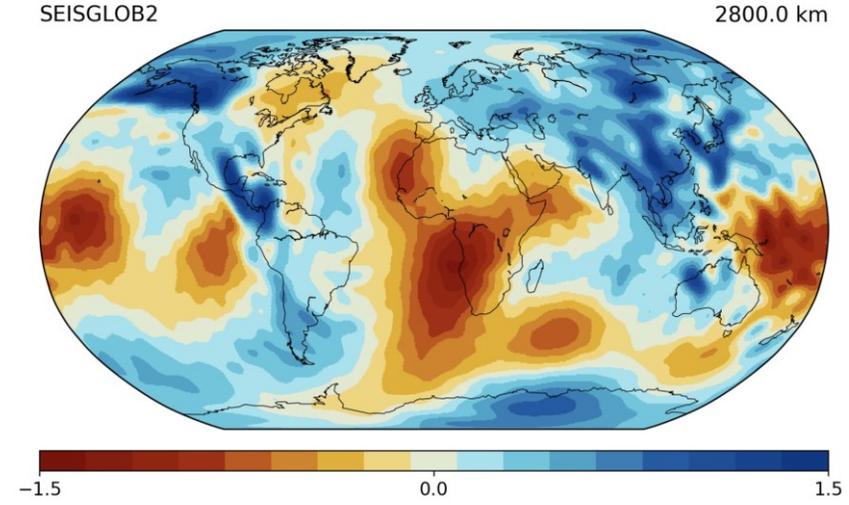
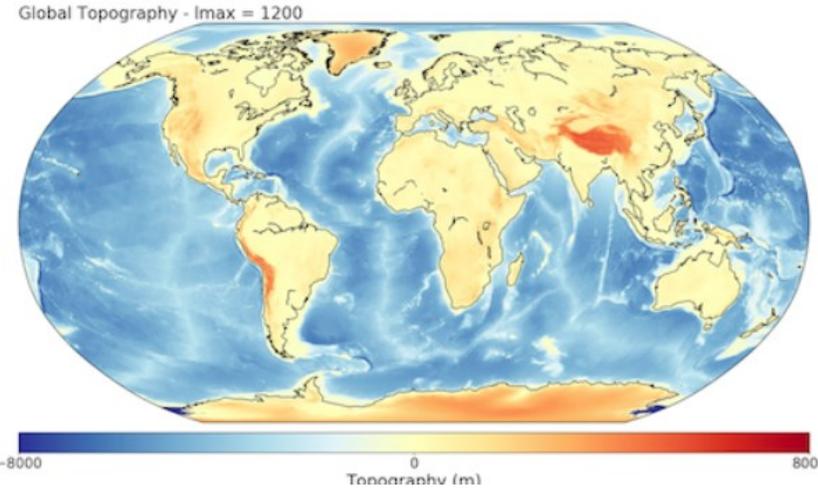
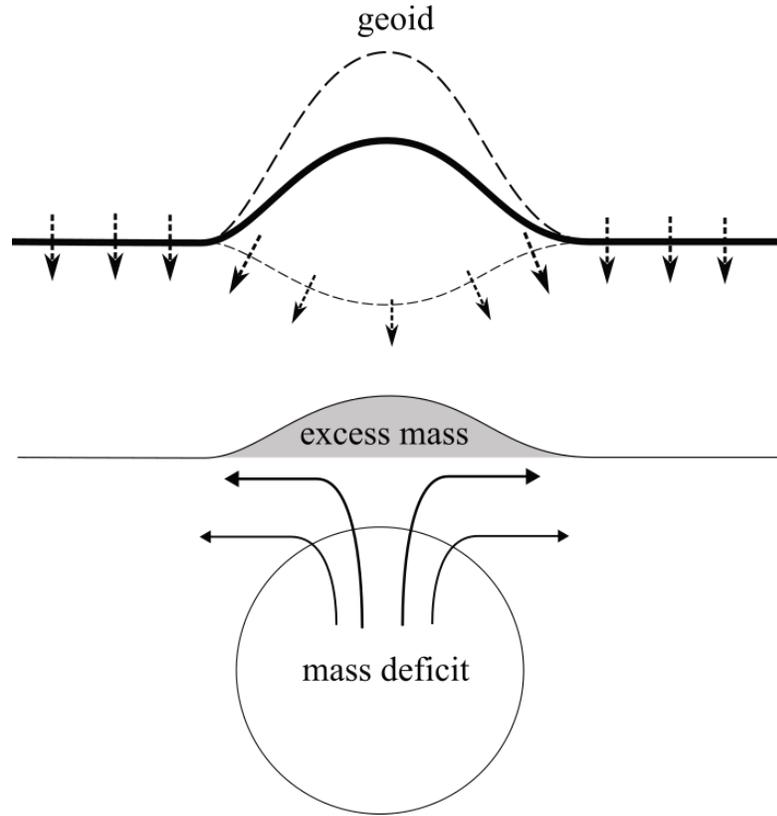
LLSVPの形態 \rightarrow 熱組成的パイル \rightarrow 浮力を持たない



(Zhang et al., 2010)

浮力を持つ「スーパールーム」という概念は誤り

プレート運動は能動的 → マントル対流の長い循環時間； コア・マントル境界の熱流量？ ダイナモ？



Submachine oxfordで検索

~~マントル進化の準静的モデル~~

どうやったら地球や地球型惑星のマントル進化を理解できる？

1-3. マントル・ダイナミクスの相転移

定量的モデルから定性的モデルへ

「2.5Gaの地球と今日の地球は違う、月と地球の歴史は違う」

非線形力学系の相転移 (bifurcation)

$$\frac{dx}{dt} = f(x, t, Ra, \dots)$$

という方程式の解は、パラメーター Ra, \dots を連続的に変化させた時、定性的特徴が突然変化することがある。

惑星進化 = 力学系としてのマントルの相転移
惑星間の違い: 異なる相 (レジーム) の発現

例：高粘性流体の熱対流とレイリー数 Ra

半無限空間：パラメーターなし

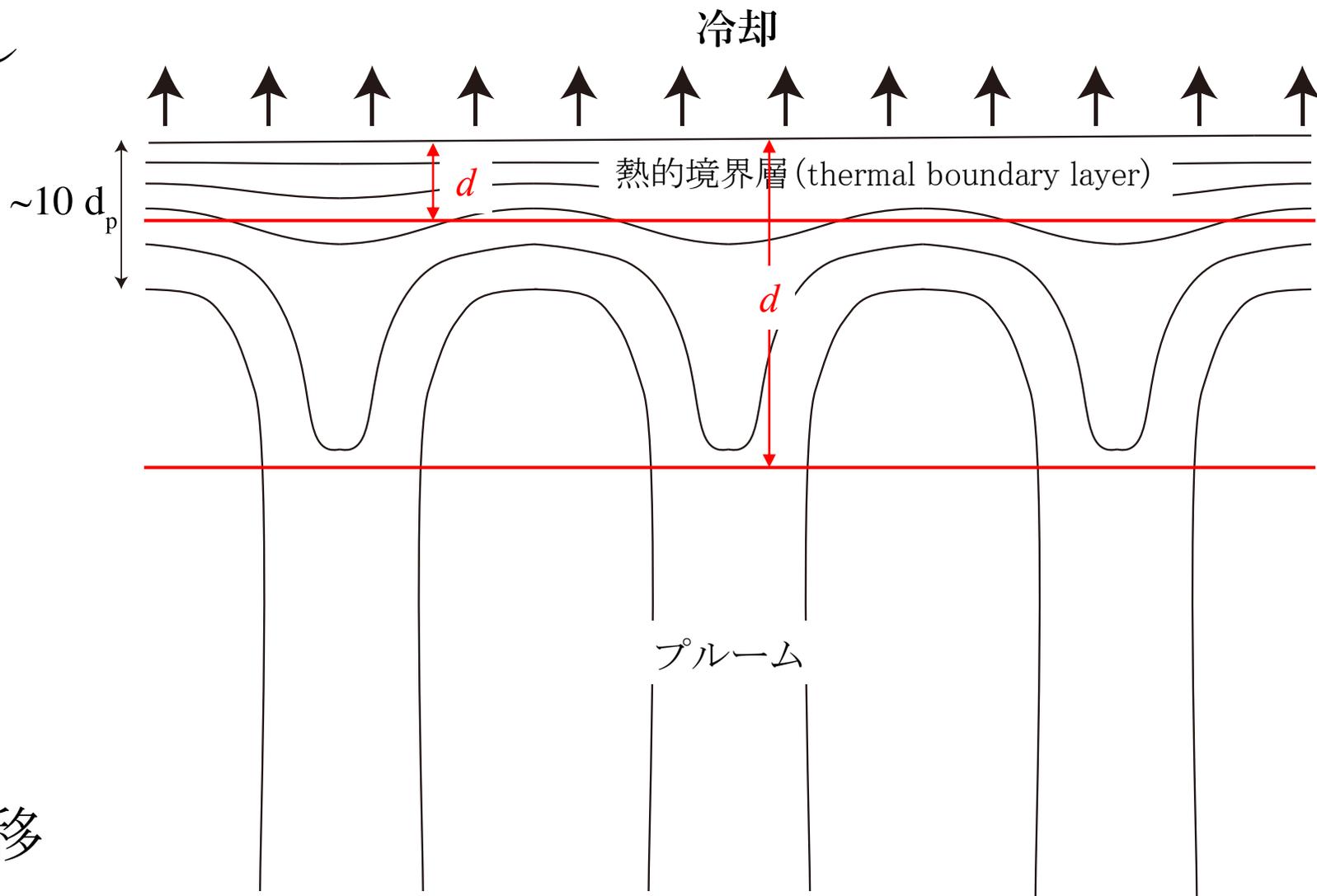
$$d_p = \left(\frac{\eta \kappa}{\Delta \rho g} \right)^{\frac{1}{3}}$$

器の中の対流？

熱対流は起きない

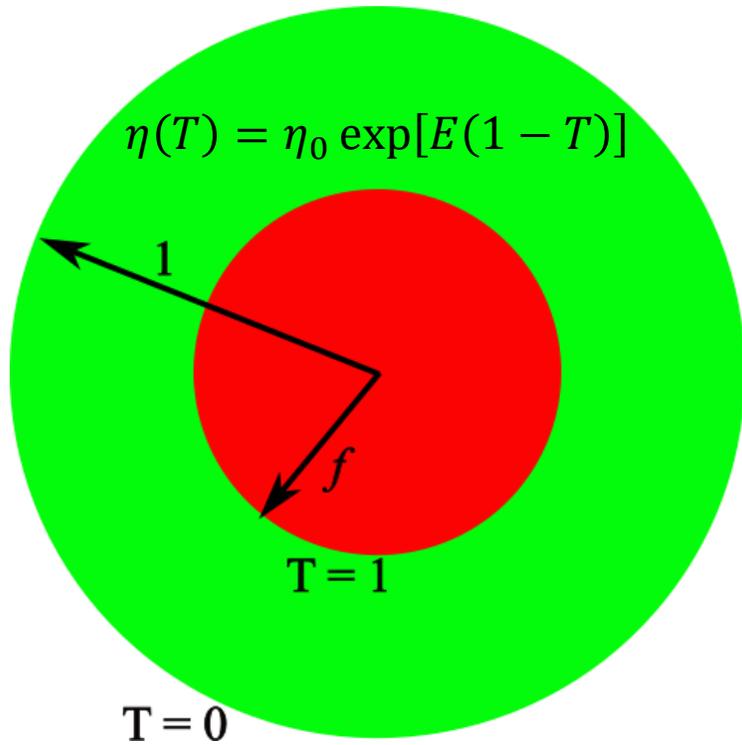
$$Ra = \left(\frac{d}{d_p} \right)^3 > R_c \approx 1000$$

で対流相というレジームに転移

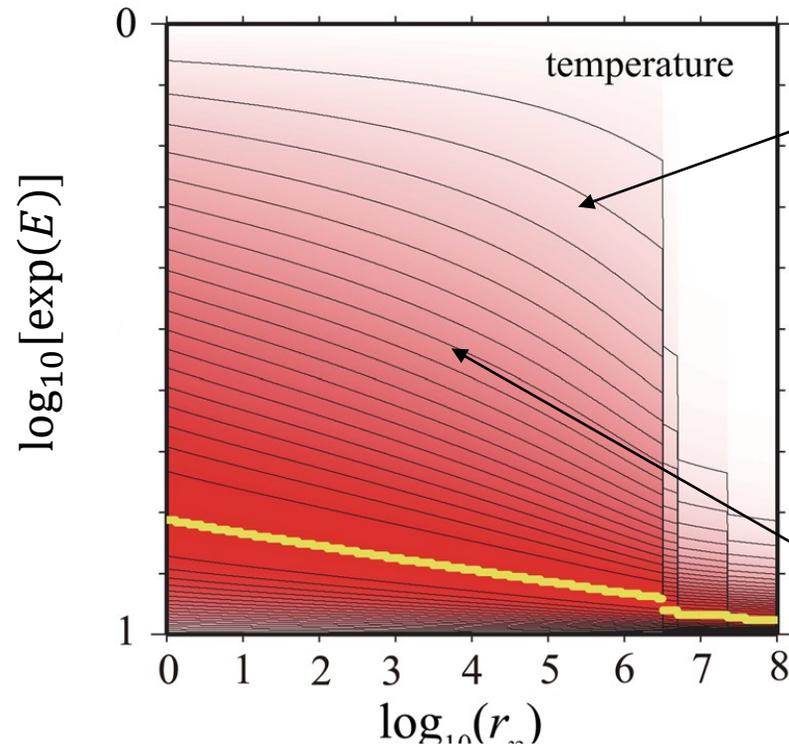


レイリー数 Ra は器の大きさの指標、対流の強さの指標ではない。

3次元球殻マントルの対流安定性 粘性率の温度依存性

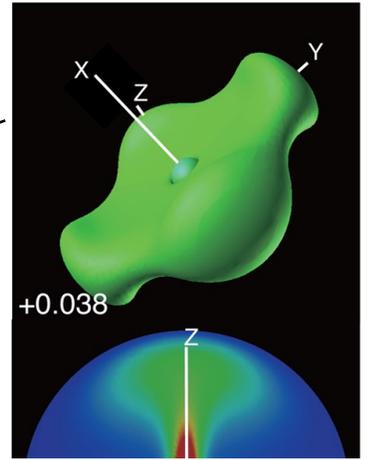


(c) relative amplitude of eigen functions for the most ν



(Yanagisawa et al., 2016)

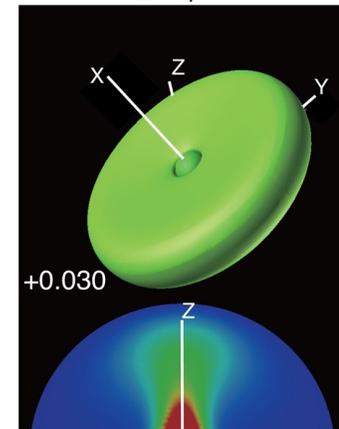
(b) $R_t = 1.0 \times 10^4$
 $Ra = 4.0 \times 10^6$
 $\log_{10}(r_\eta) = 2.6$



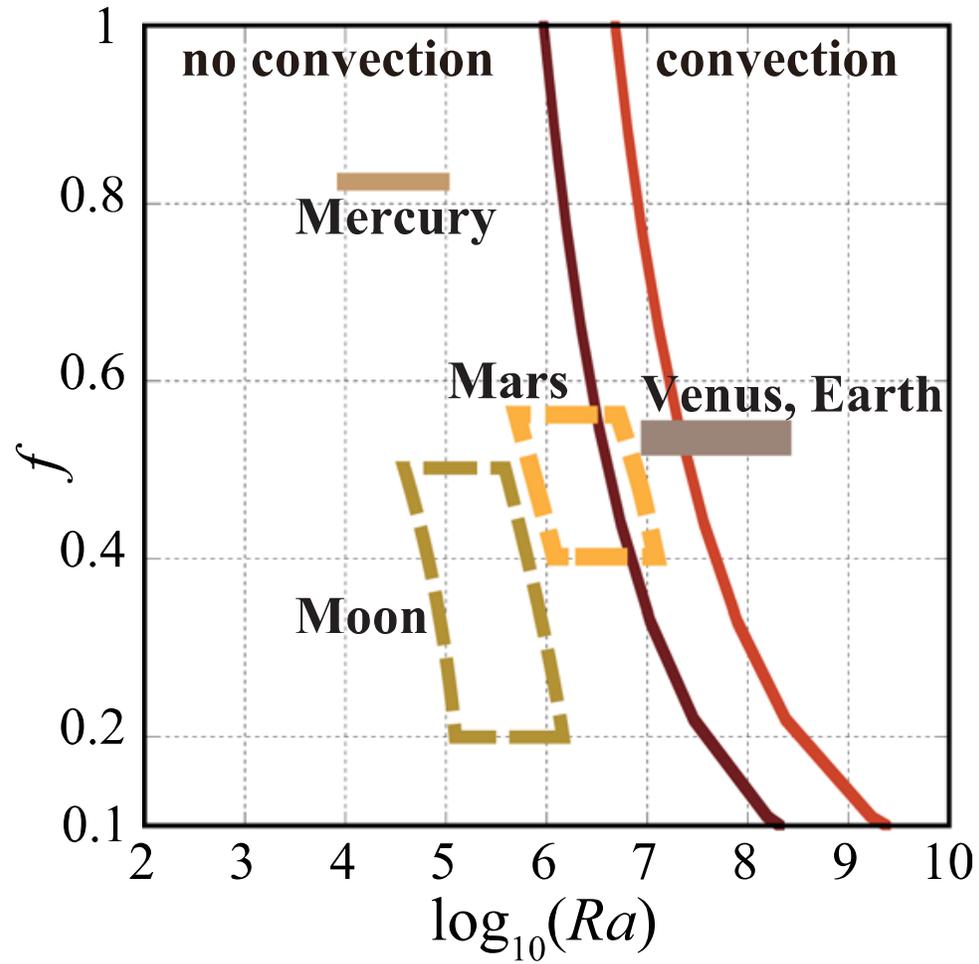
$f = 0.11$

(a) $R_t = 1.0 \times 10^4$
 $Ra = 1.0 \times 10^4$
 $\log_{10}(r_\eta) = 0$

$f = 0.55$

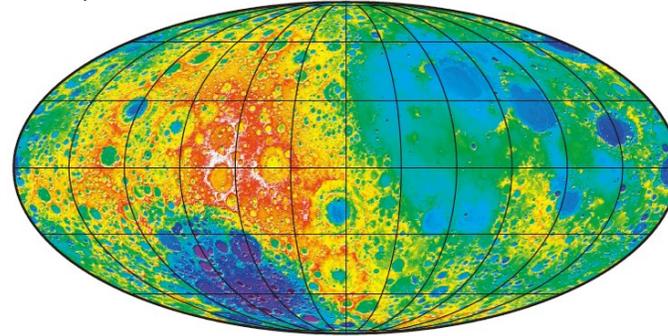


対流安定性とホットスポット火山

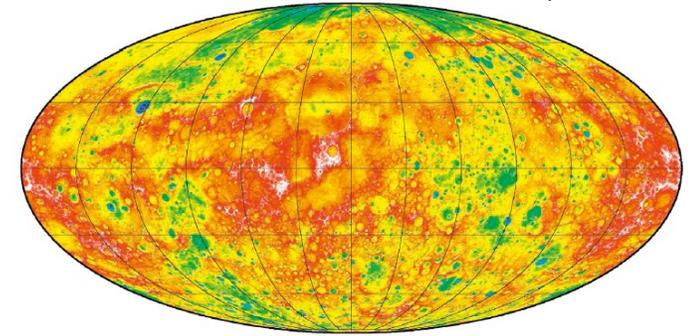


(Yanagisawa et al., 2016)

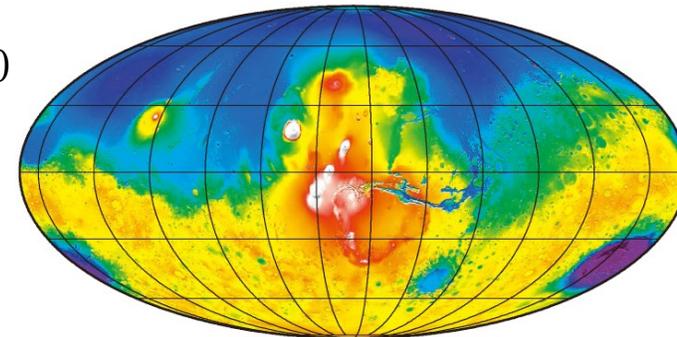
月; 1/100



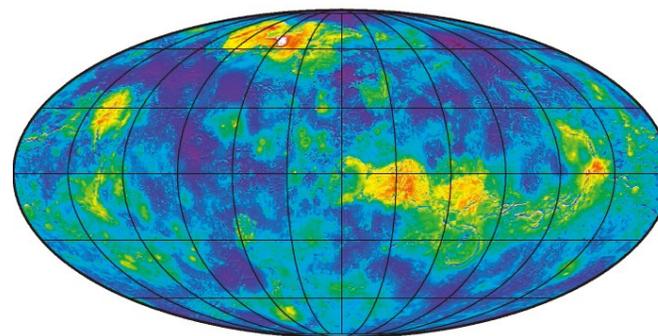
水星; 1/20



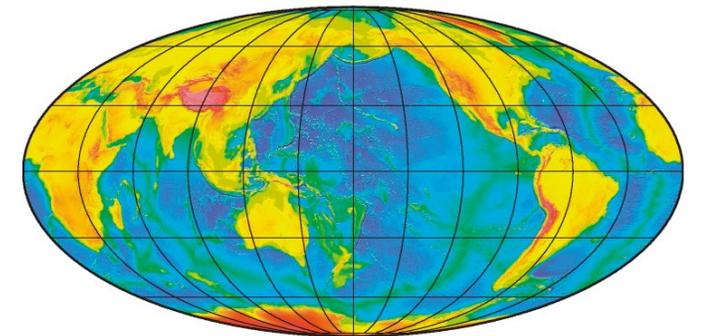
火星; 1/10



金星; 0.8



地球; 1

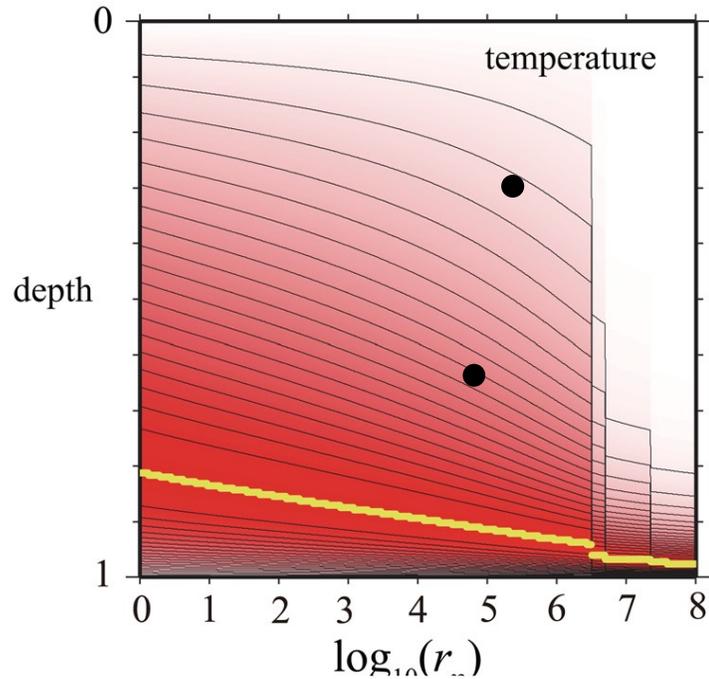


(Wieczorek, 2015)

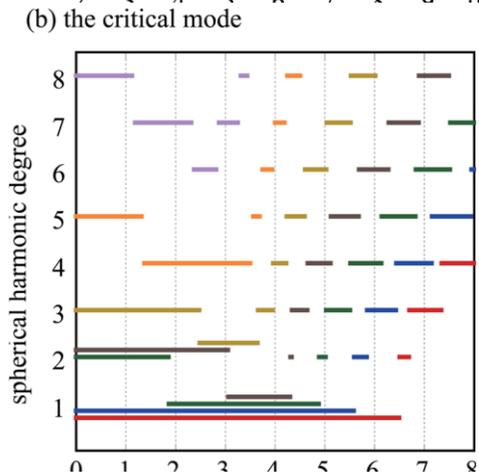
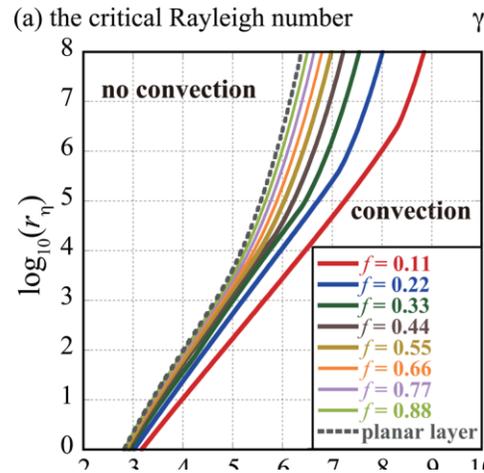
第2章 リソスフェア

2-1. リソスフェアの起源: Stagnant lid regime

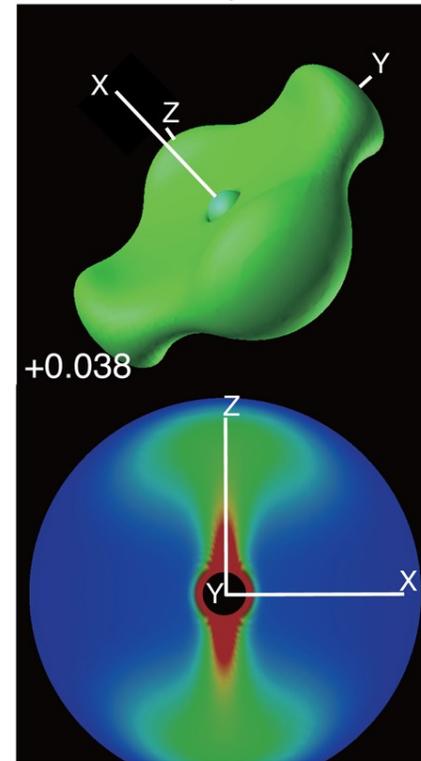
(c) relative amplitude of eigen functions for the most u



(Yanagisawa et al., 2016)

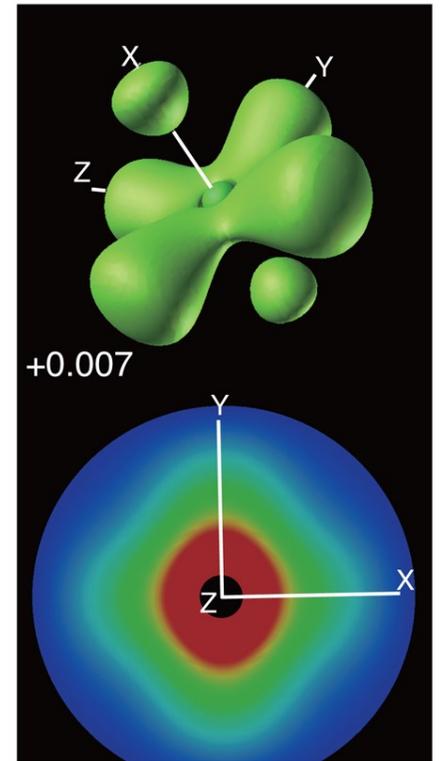


(b) $R_t = 1.0 \times 10^4$
 $Ra = 4.0 \times 10^6$
 $\log_{10}(r_\eta) = 2.6$



$f = 0.55$

(c) $R_t = 1.0 \times 10^4$
 $Ra = 2.2 \times 10^8$
 $\log_{10}(r_\eta) = 4.3$



Stagnant lid regime: 粘性率コントラスト $> 10000 \rightarrow$ リソスフェア

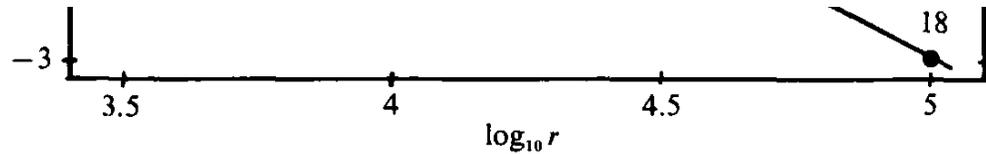
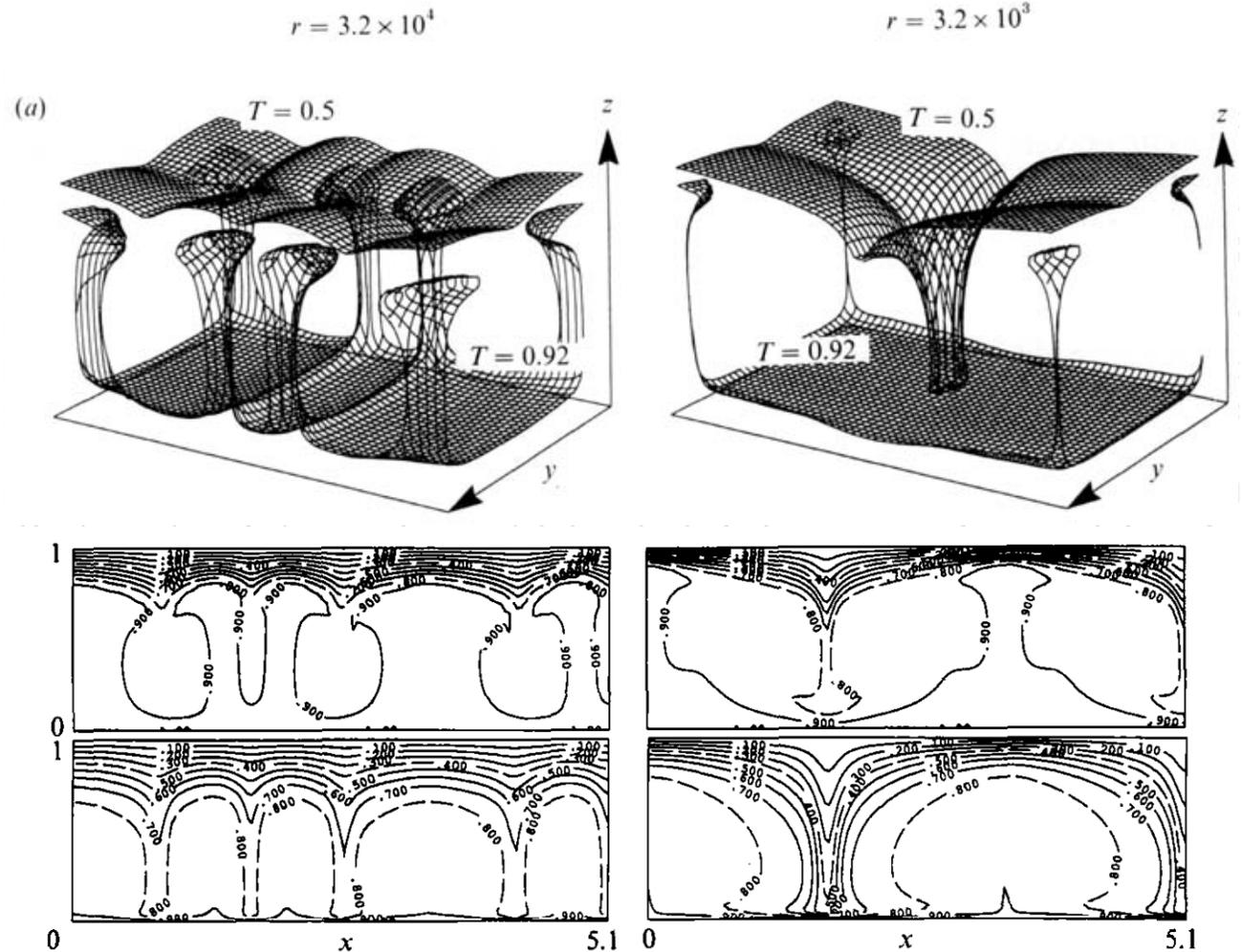


FIGURE 3(a, b). For caption see facing page.

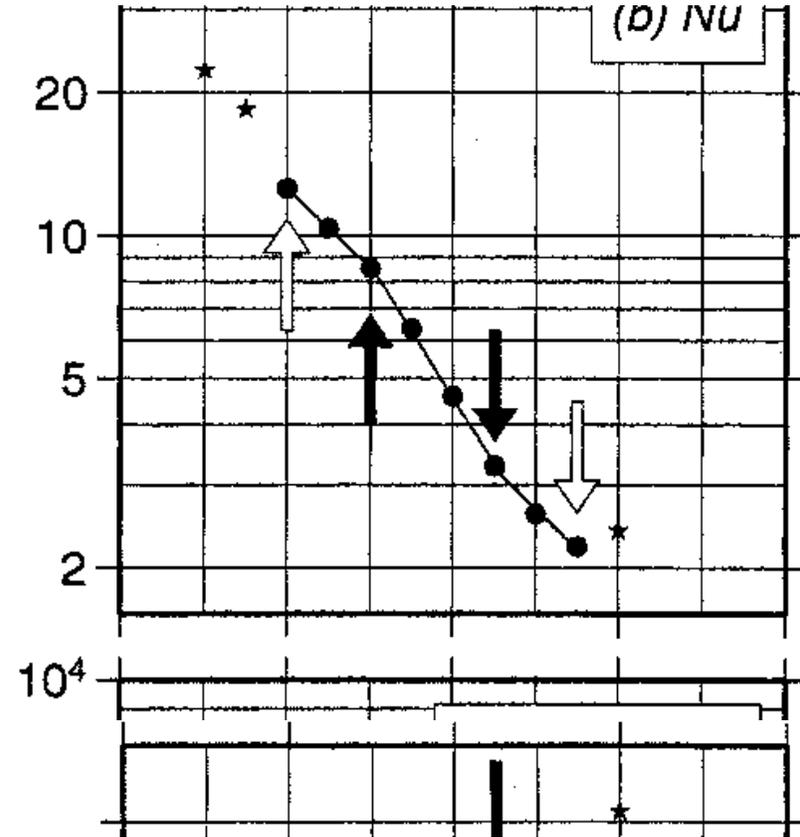
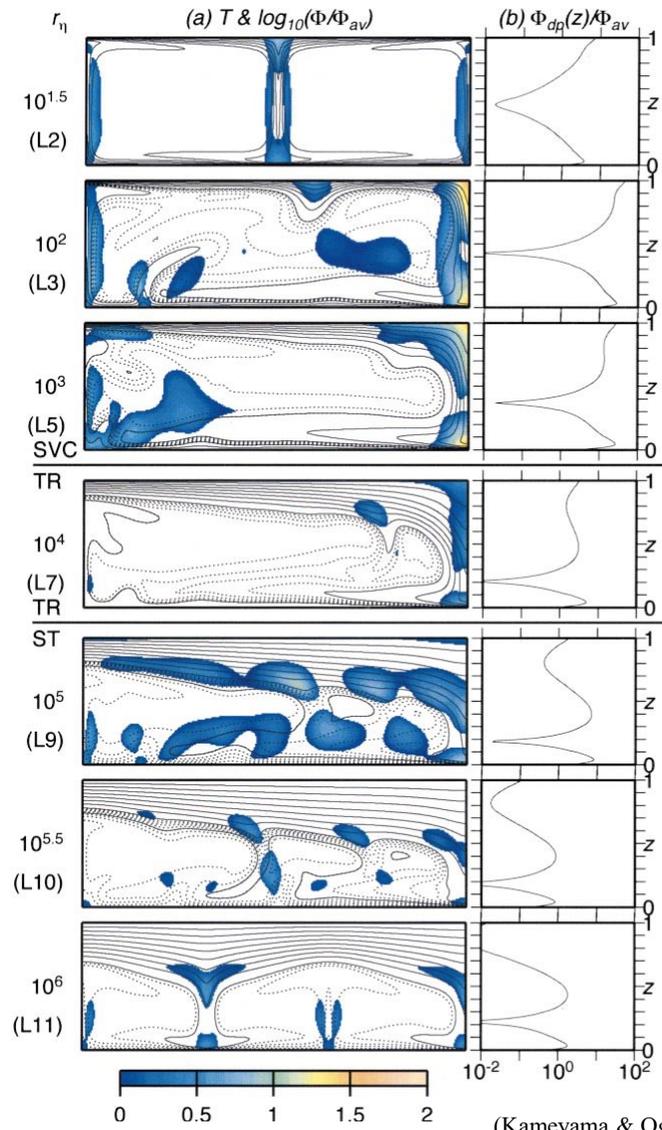
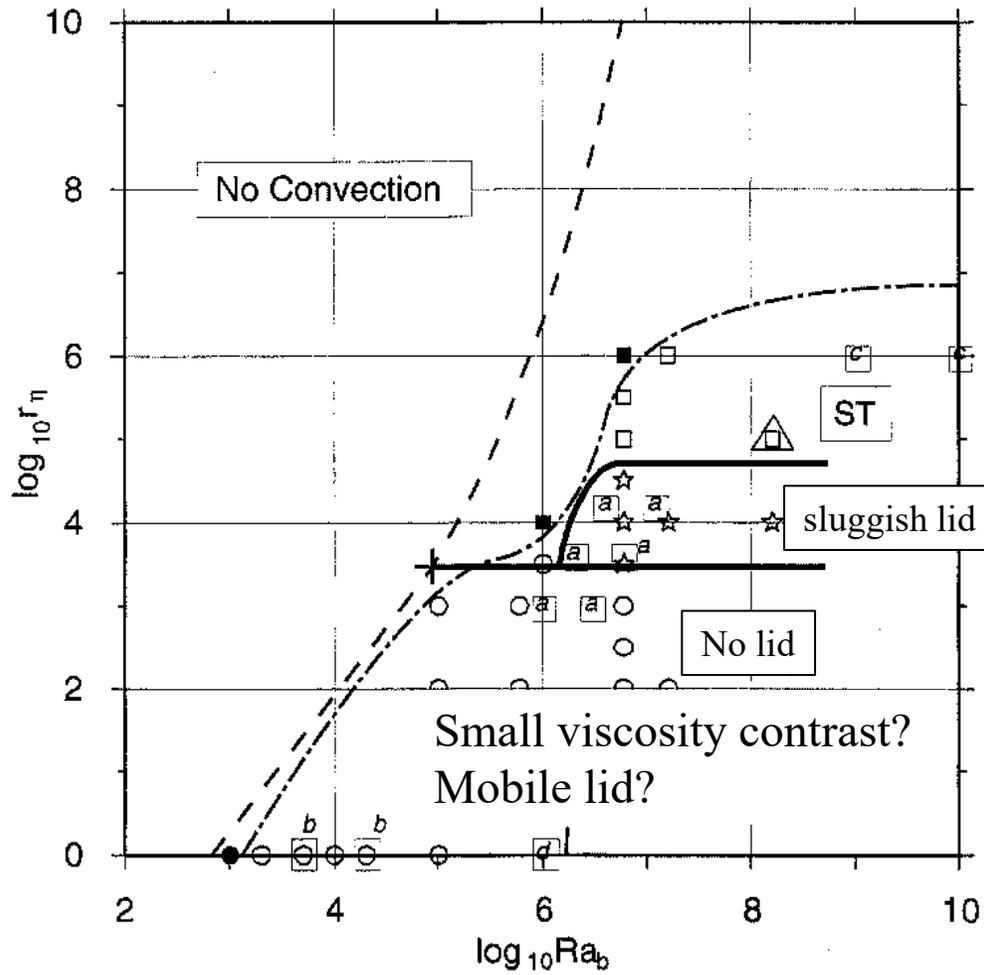


Boundary layer mode of convection occurs when r is smaller than $r_{c1} \approx 10^4$.

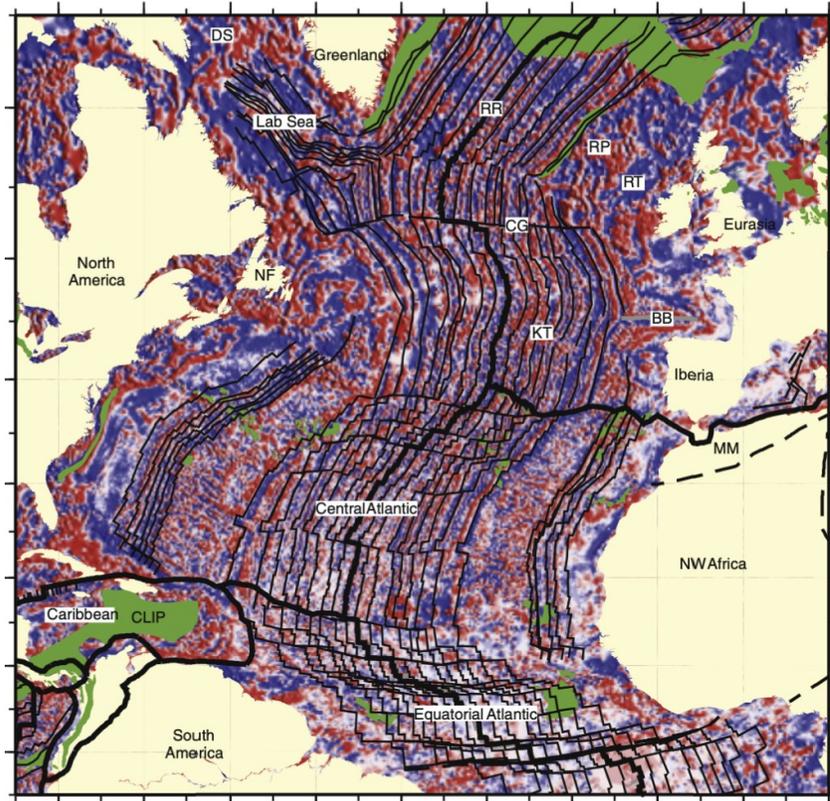
We confirmed the reliability of the above calculations by repeating the calculation with 10^3 with a coarser mesh and with time marching (case 14, table 1). We found the same structure of convection and a Nusselt number only slightly smaller than the value obtained in the above calculation, as can be seen from the figure. This indicates that this solution is truly steady, i.e. it does not show time-dependent behavior.

$U_{srfc} / U_{rms} < 0.1$ という定義は無意味

Sluggish lid regime: リソスフェアが定義できて自重で動く → プレート・テクトニクス？

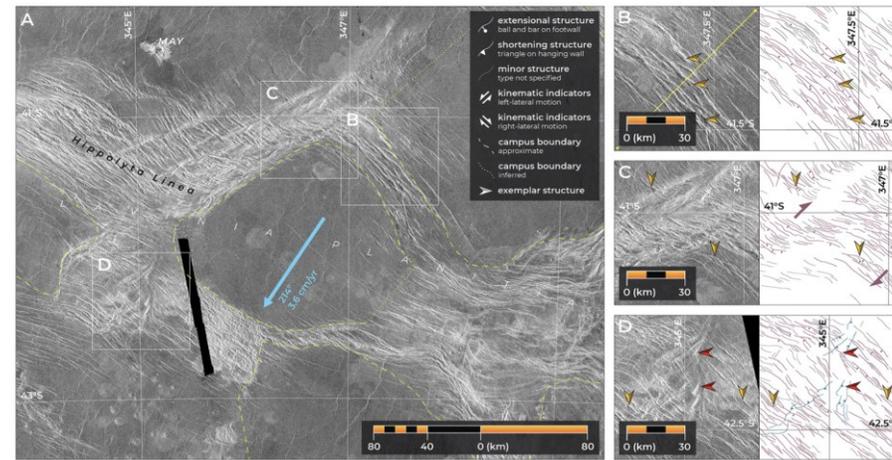
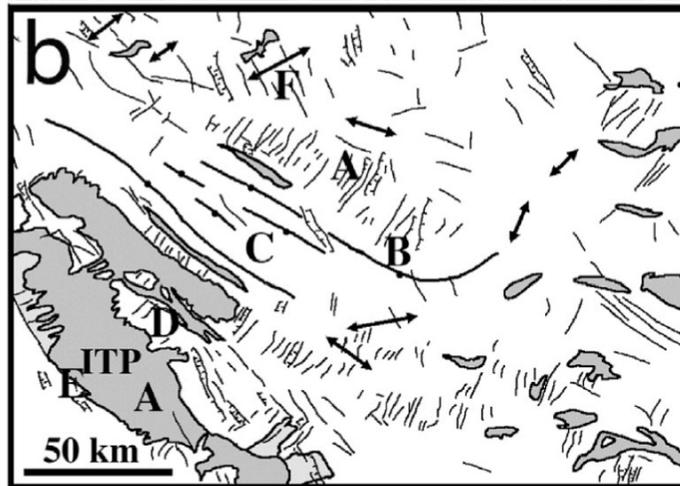
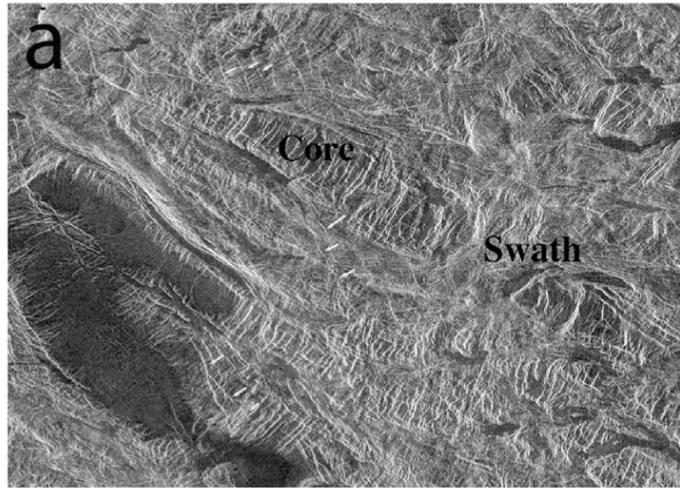


地球:リソスフェアあり



(Seton et al., 2012)

金星: sluggish lid ?

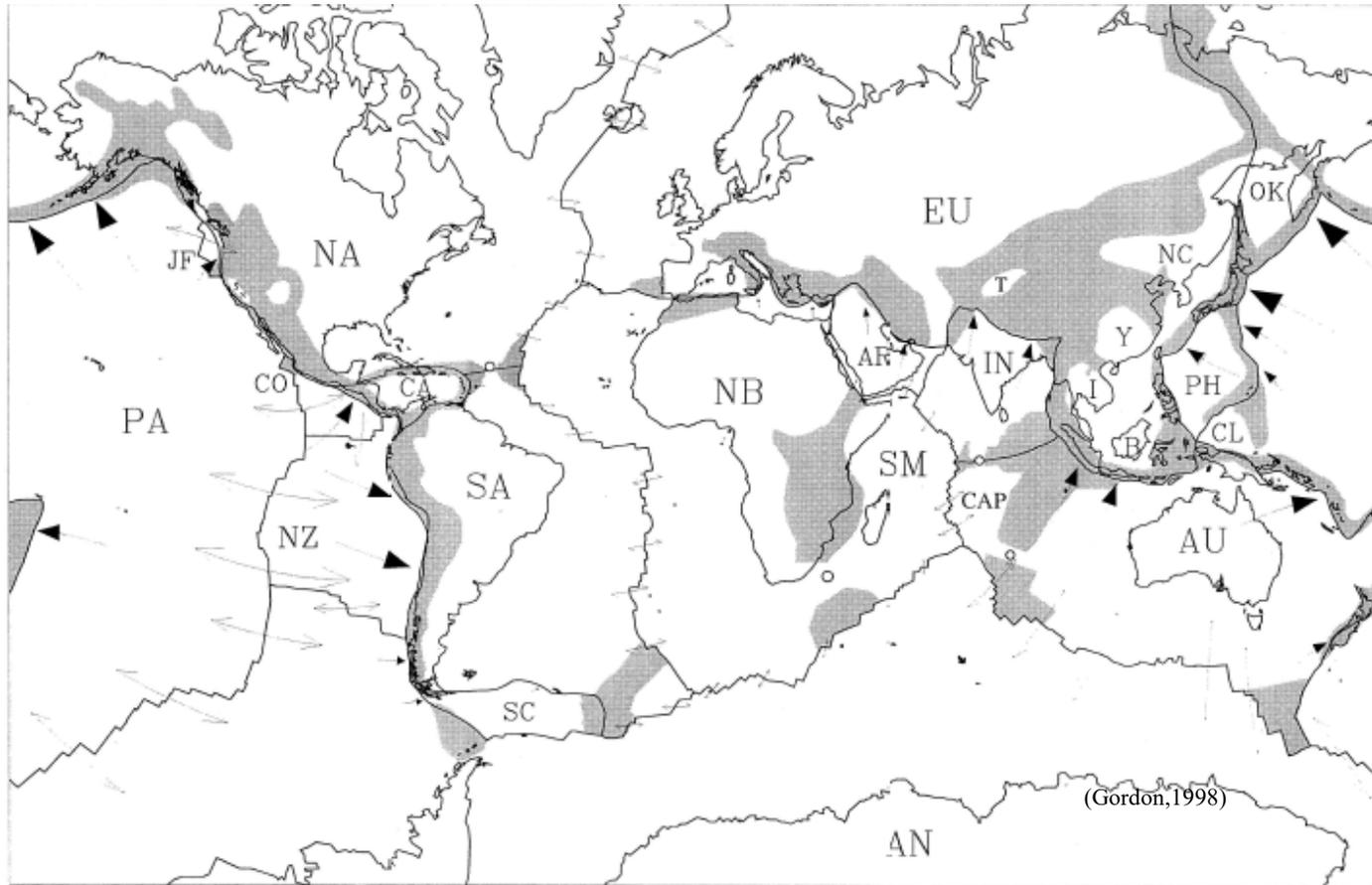


(Byrne et al., 2021)

(Gilmore & Head, 2018)

2-2. プレート・テクトニクスの起源

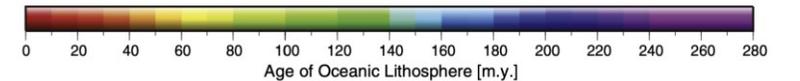
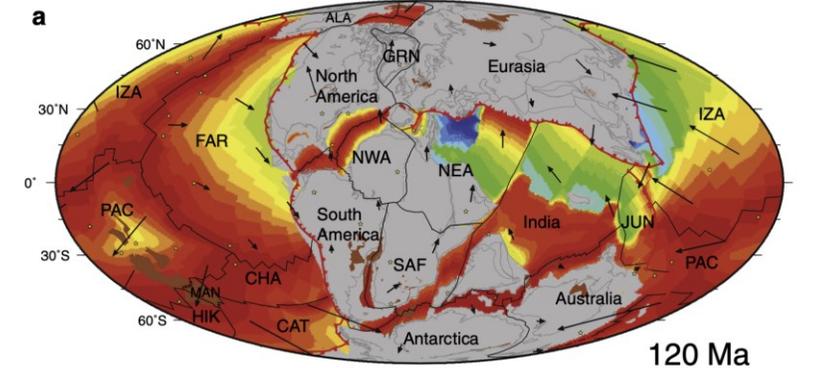
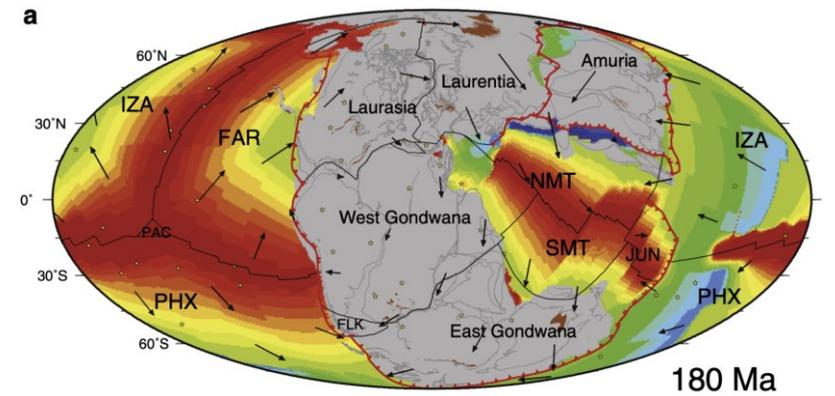
プレート境界:これといった理由もなくプレート内部に自然に生まれることはない



(Gordon, 1998)

リソフェアの実効粘性率
プレート内部: 10^{24} – 10^{27} Pa s、プレート境界: 10^{17} – 10^{23} Pa s

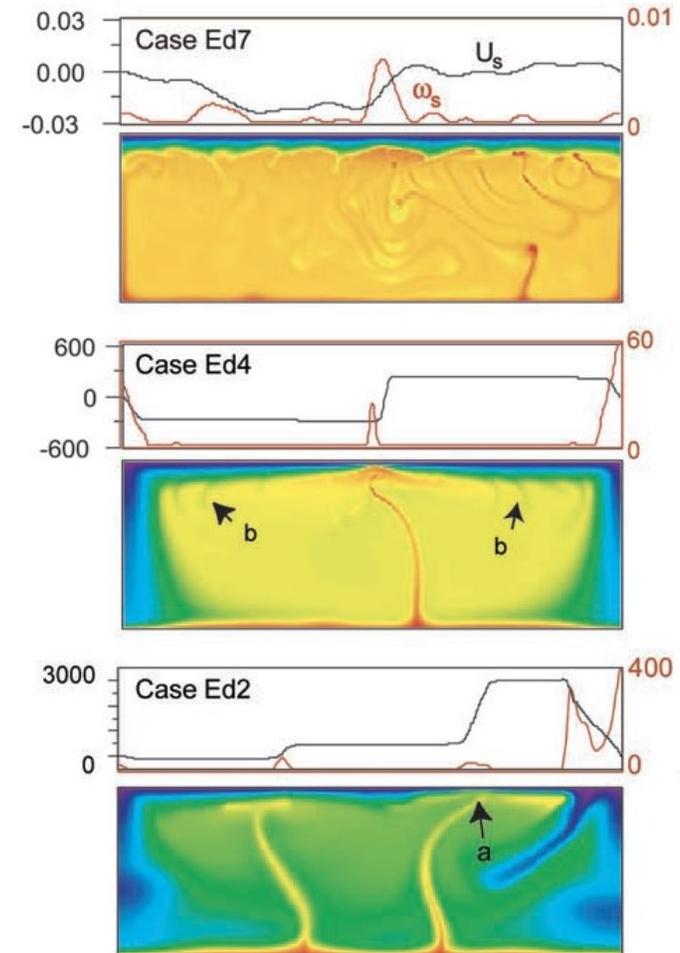
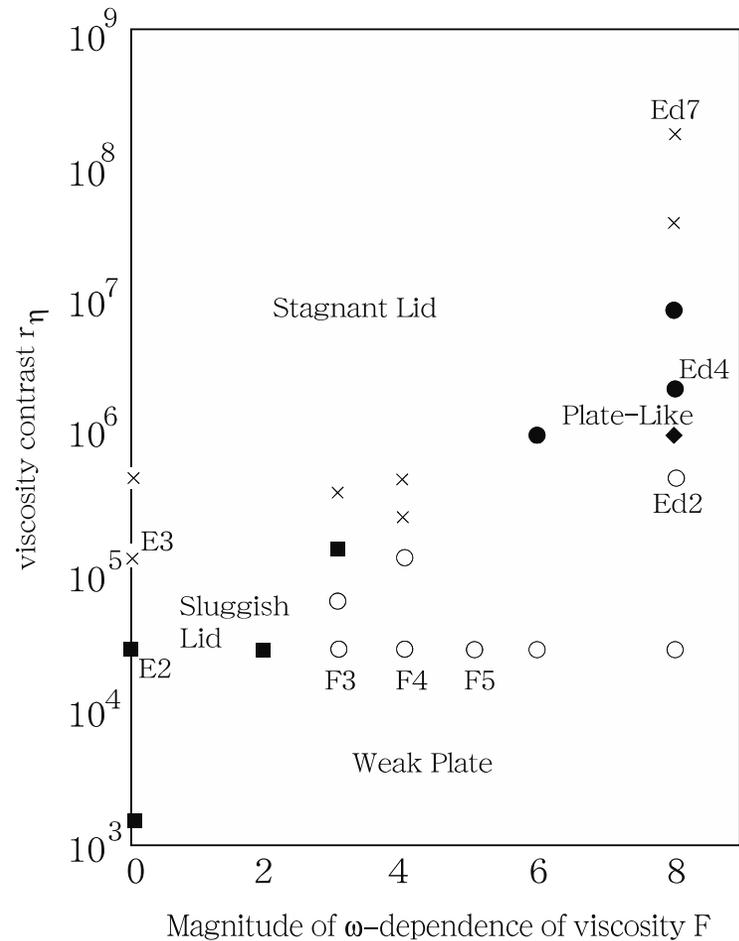
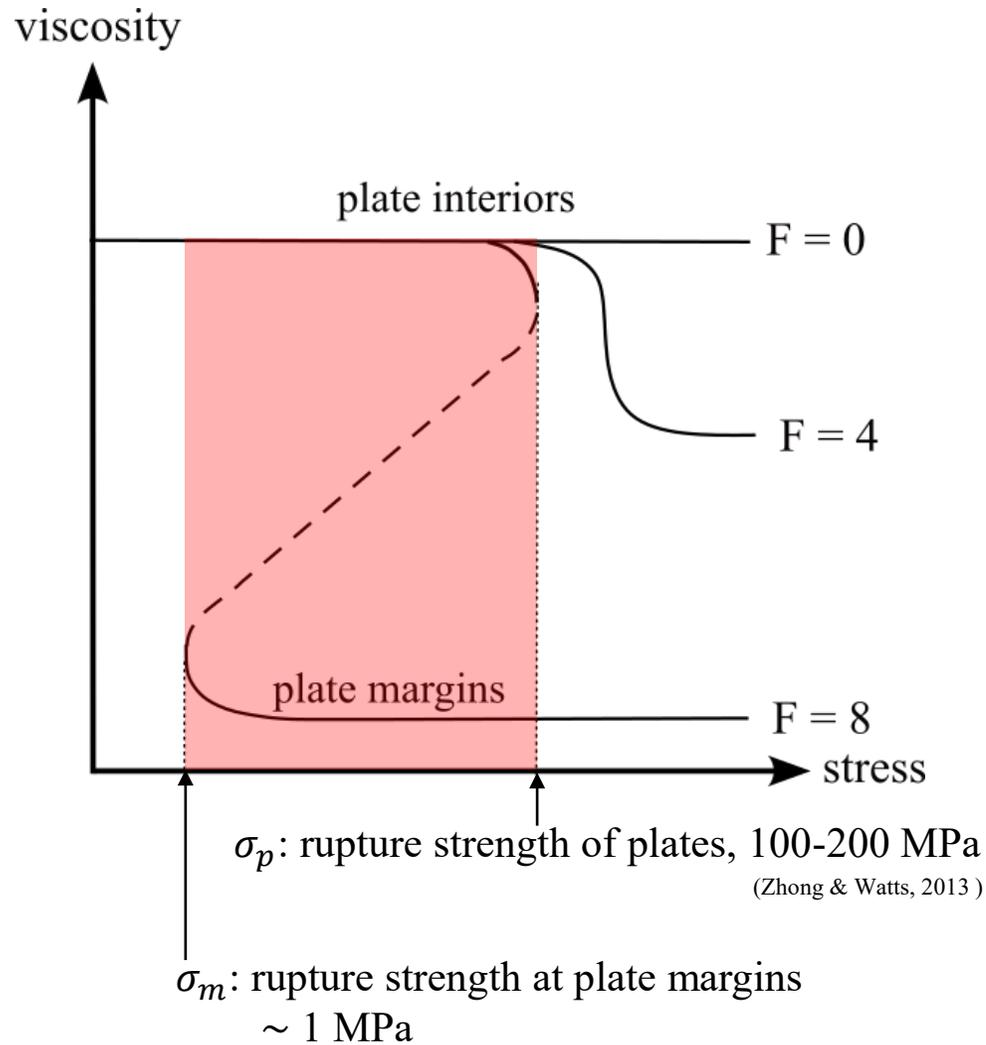
大規模な火山活動によるプレートの分裂



(Seton et al., 2012)

プレートは過去の破壊によって生じた境界を記憶→ 応力履歴依存性

$\sigma_m < \sigma < \sigma_p$ が Plate-like regime の条件



(Ogawa, 2003)

No lid regime

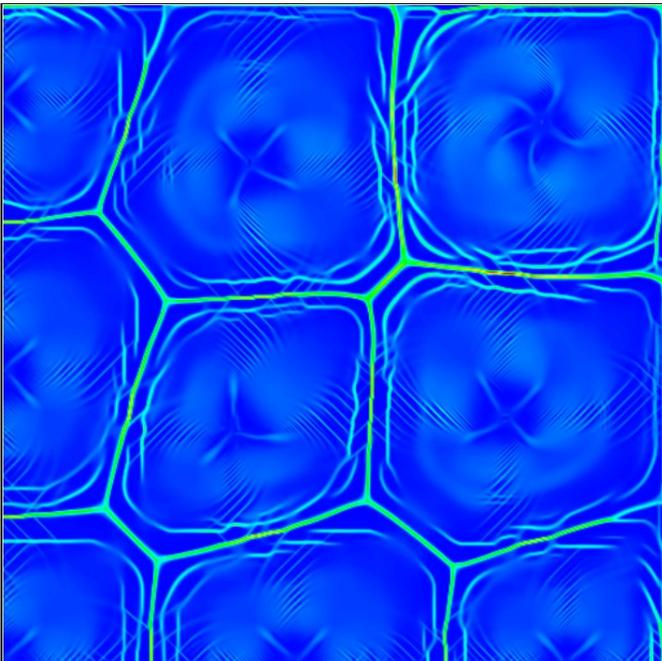
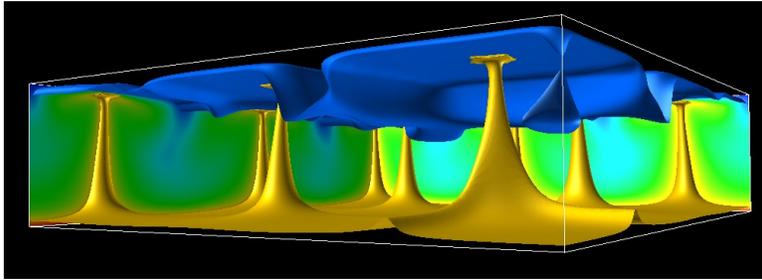
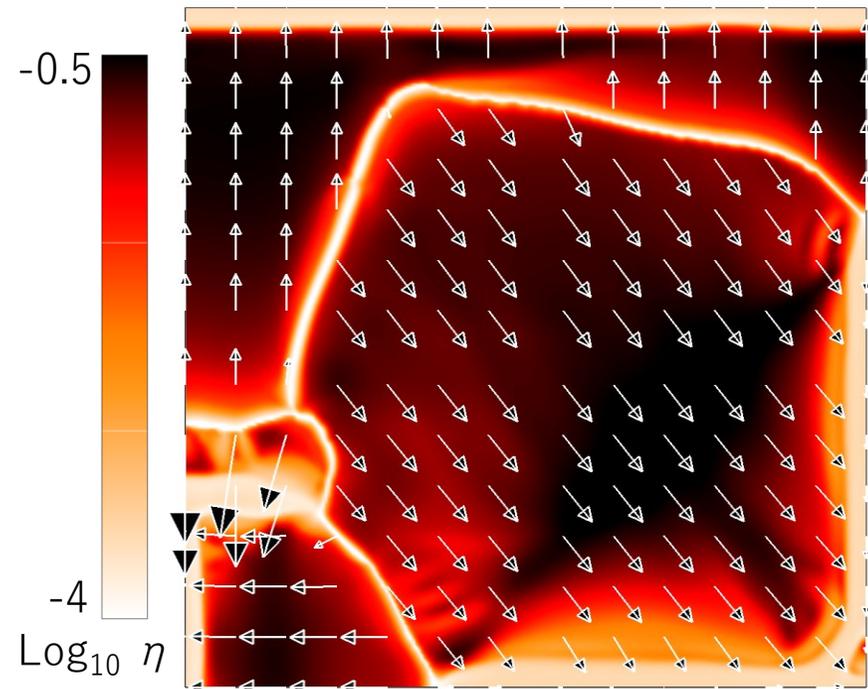
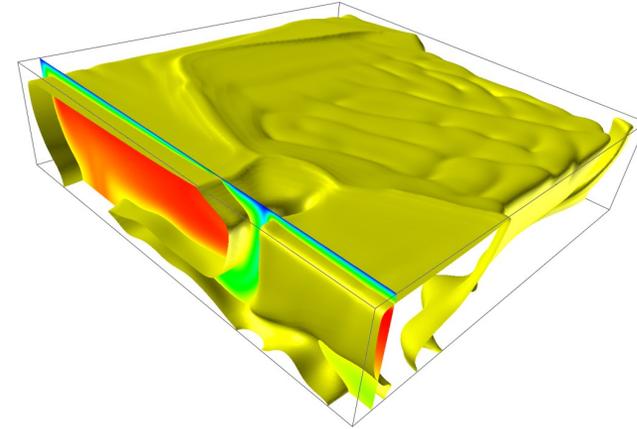
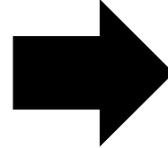


Plate-like regime

剛体運動するプレートとシャープな境界

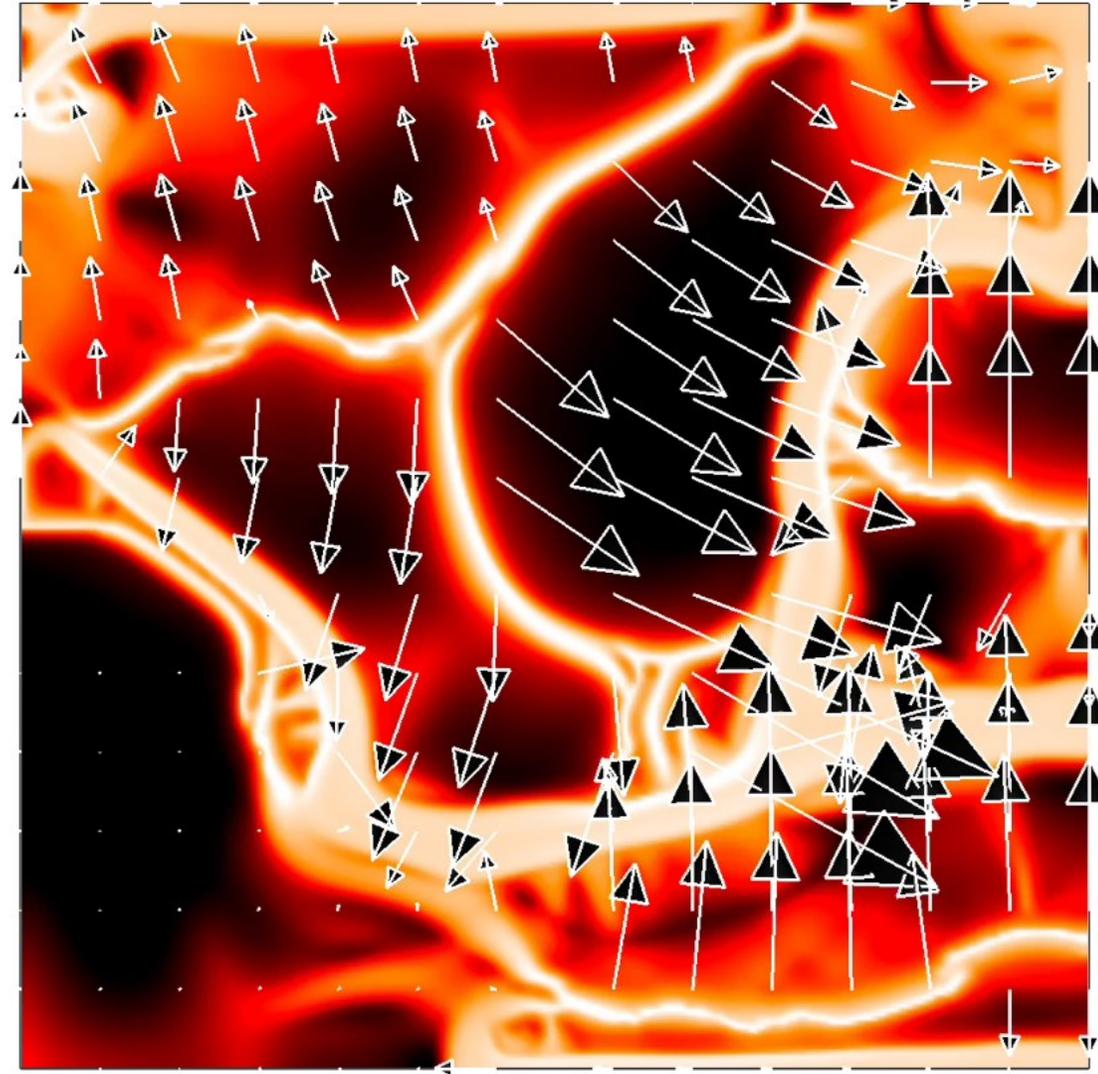


計算不安定
を克服

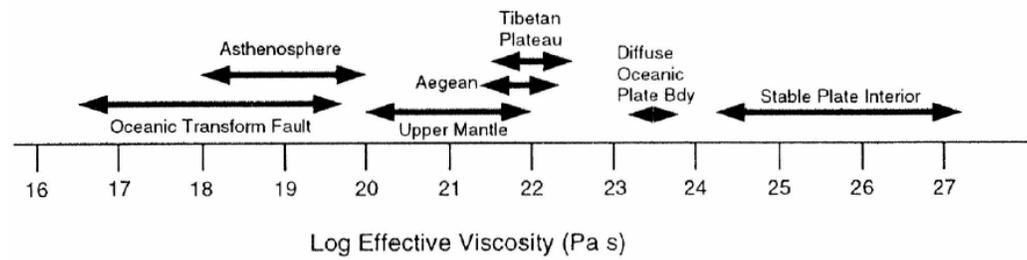
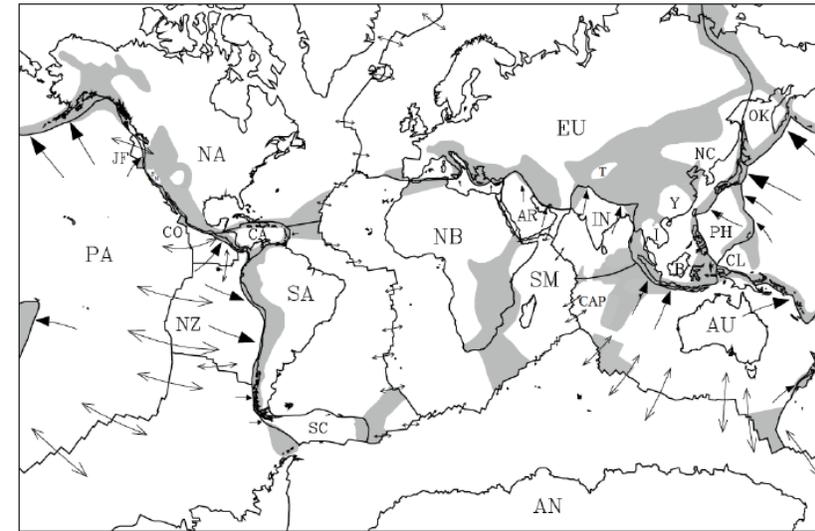
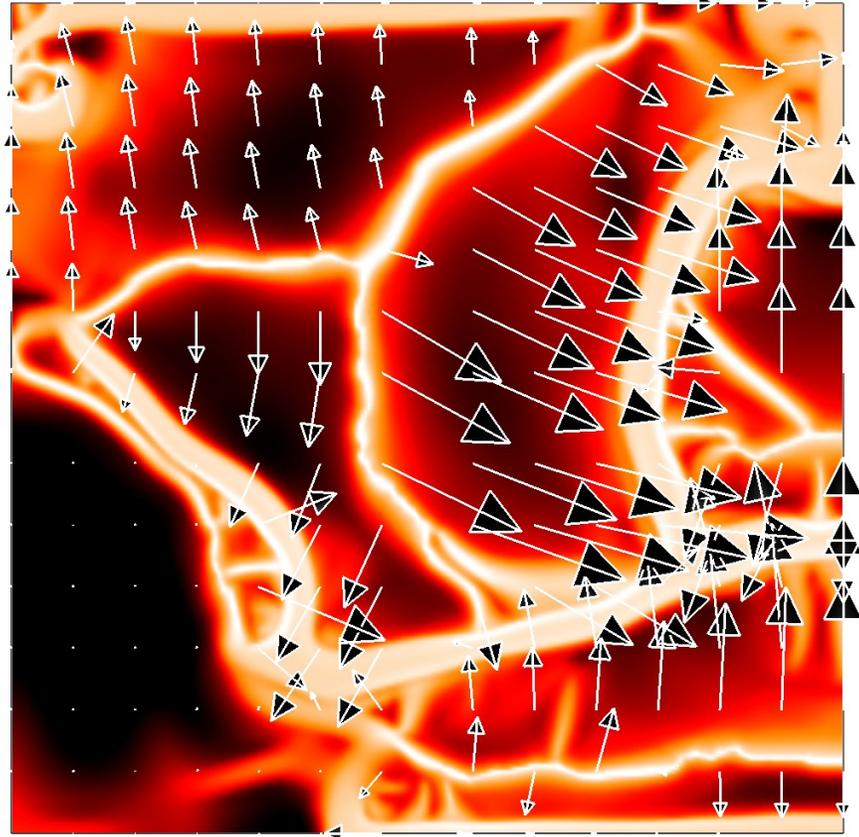


プレート境界はプレートが輸送; プレート運動は安定

velocity & viscosity

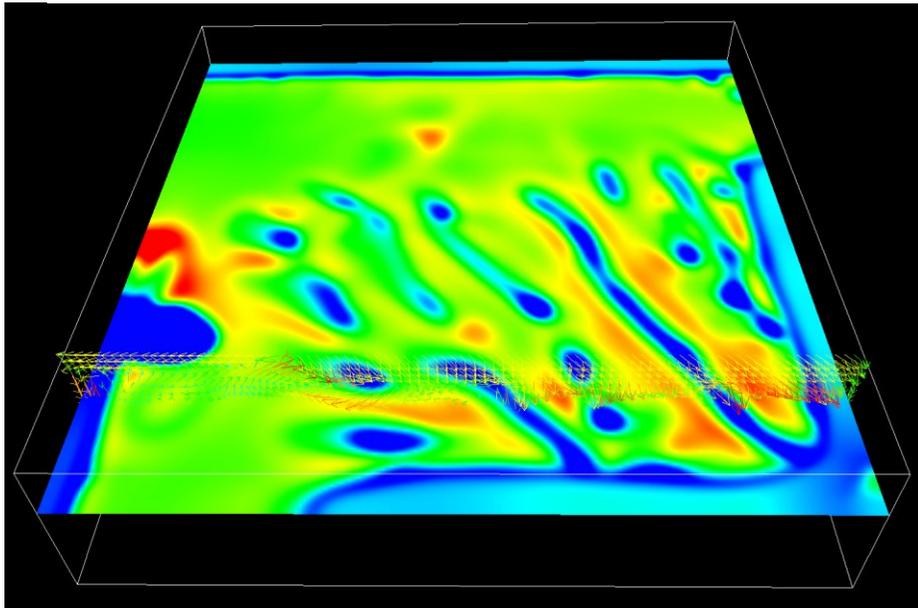
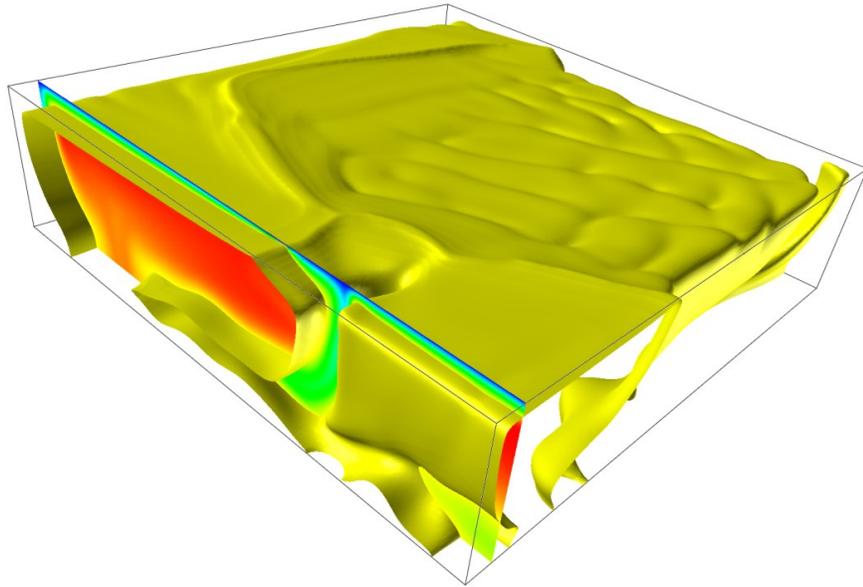


単純な海嶺と複雑な沈み込み帯:沿海?



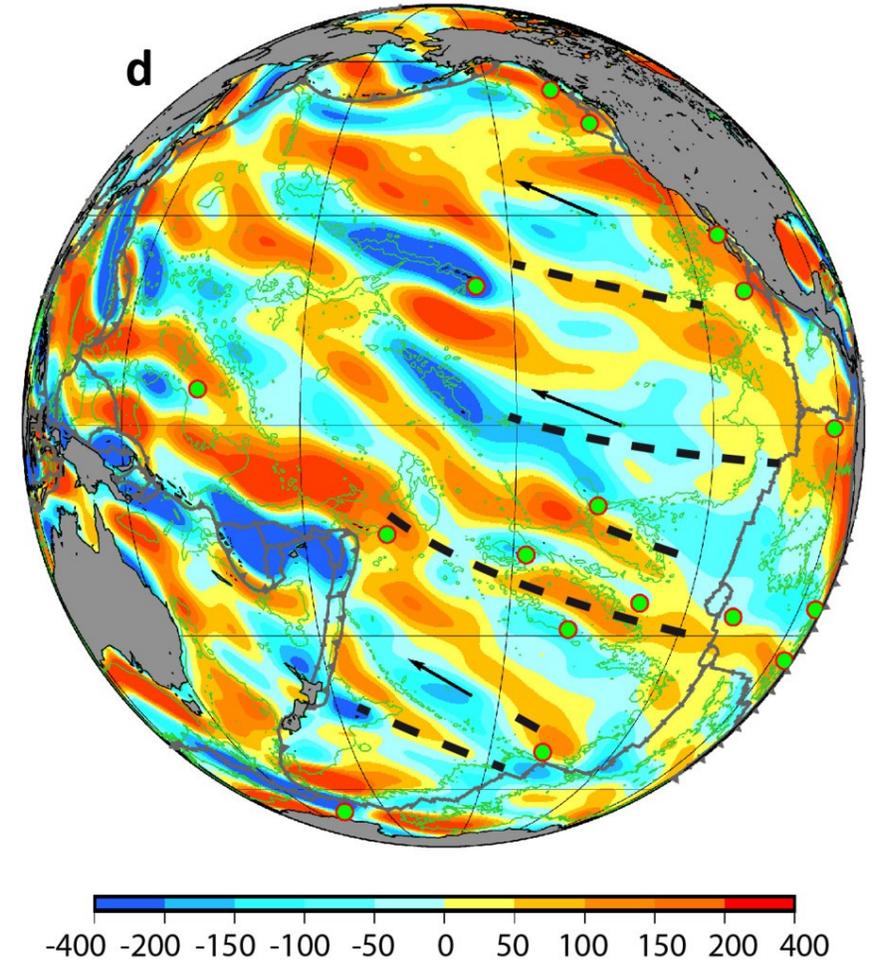
(Gordon, 1998,2000)

古いプレートの下の二次対流



(Miyagoshi et al., 2020)

GRACE gravity gradients

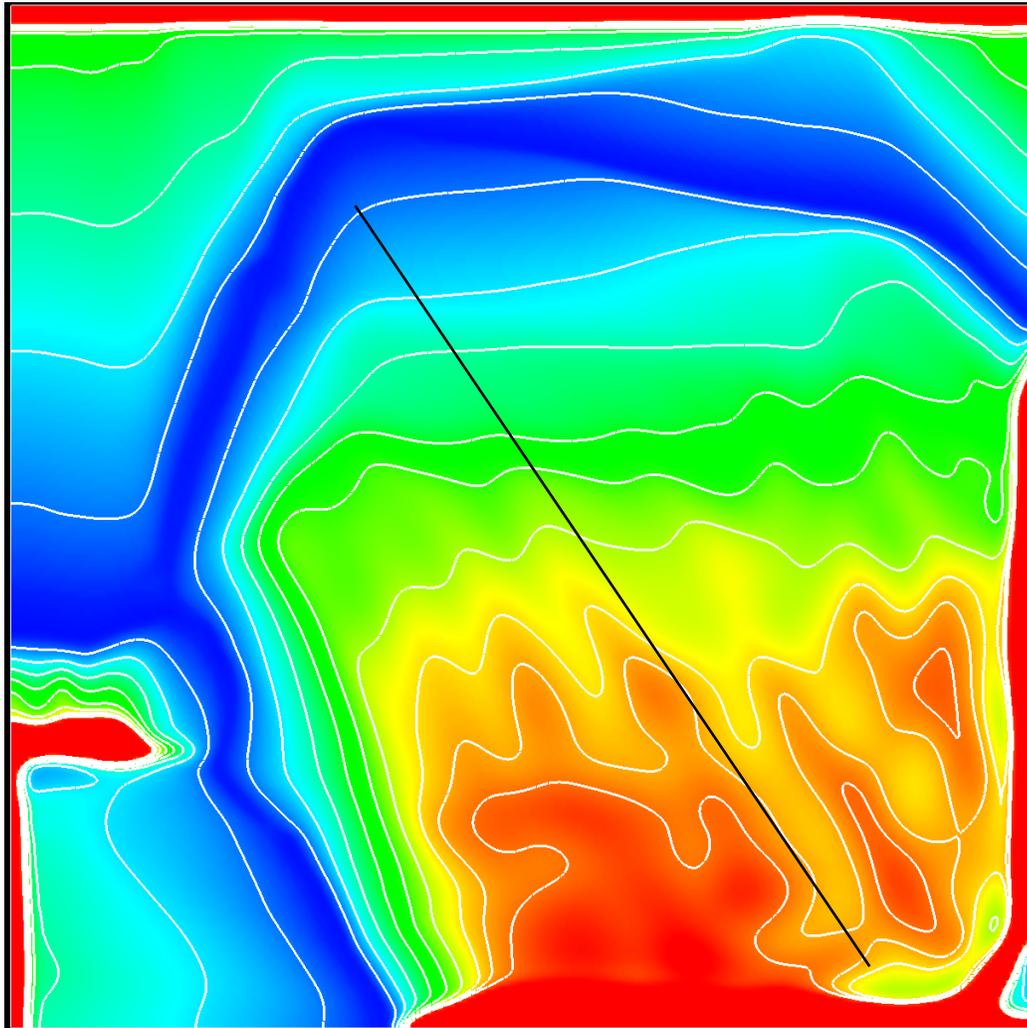


mEötvös

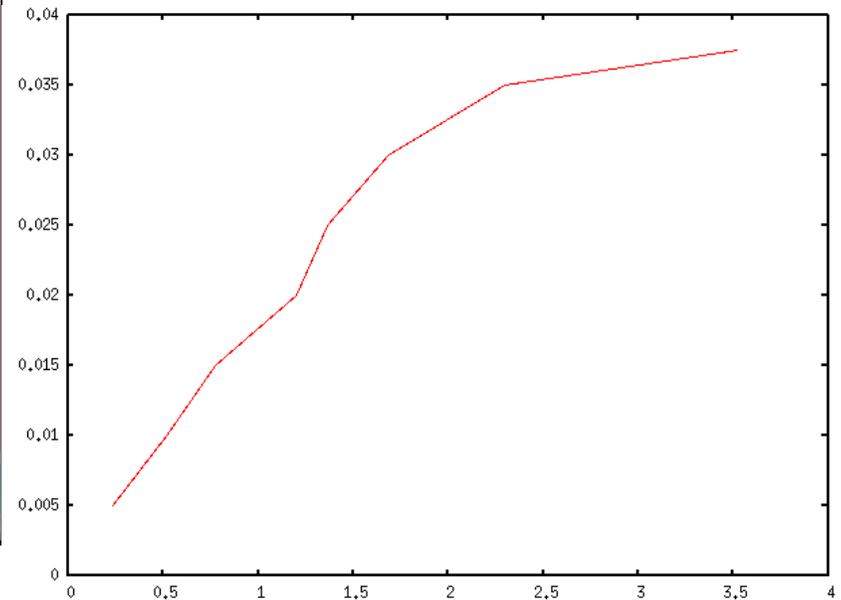
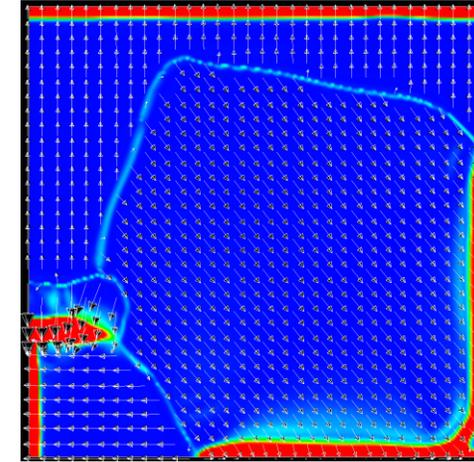
(Panet et al, 2022)

熱流量:海嶺近傍 $q \propto 1/\sqrt{t}$

1 / (heat flux)**2



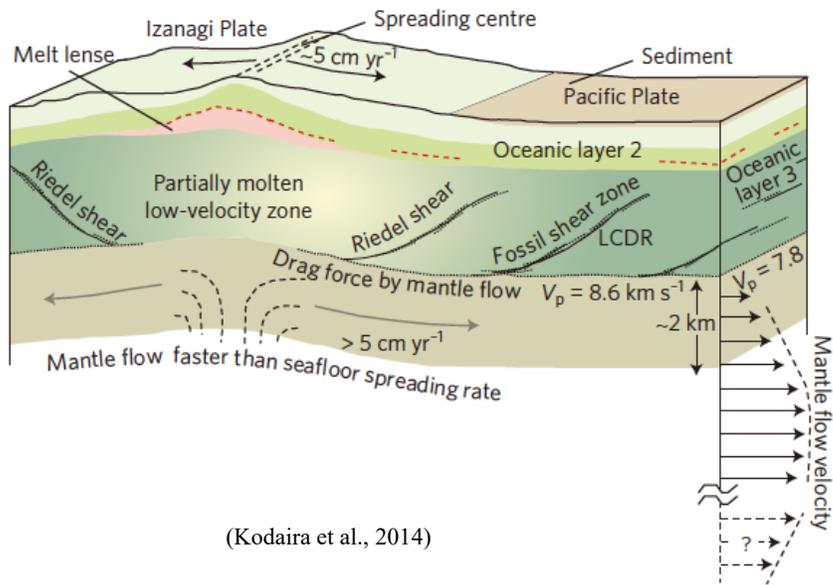
velocity & damage



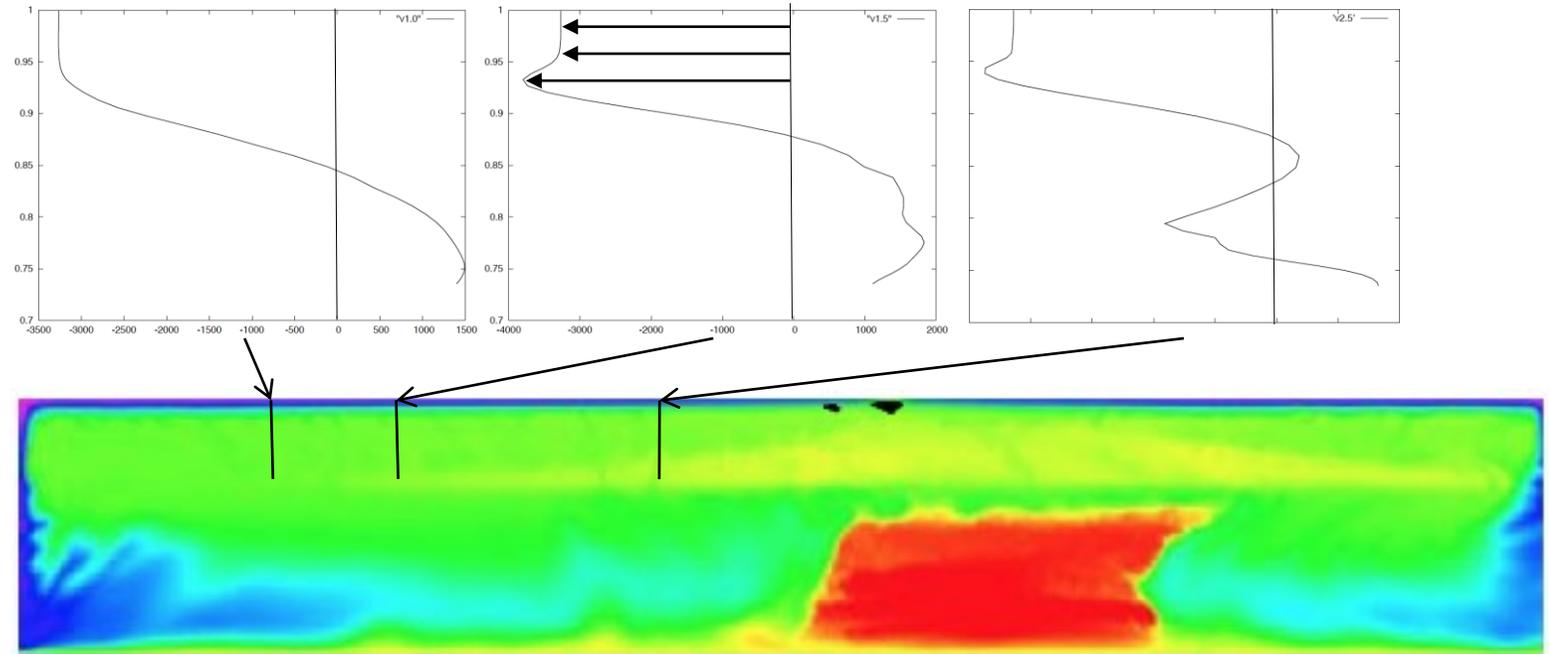
(Miyagoshi et al., 2020)

プレート運動はアクティブ

アセノスフェアの速度 > プレート速度 → ~~プレート運動はpassive?~~

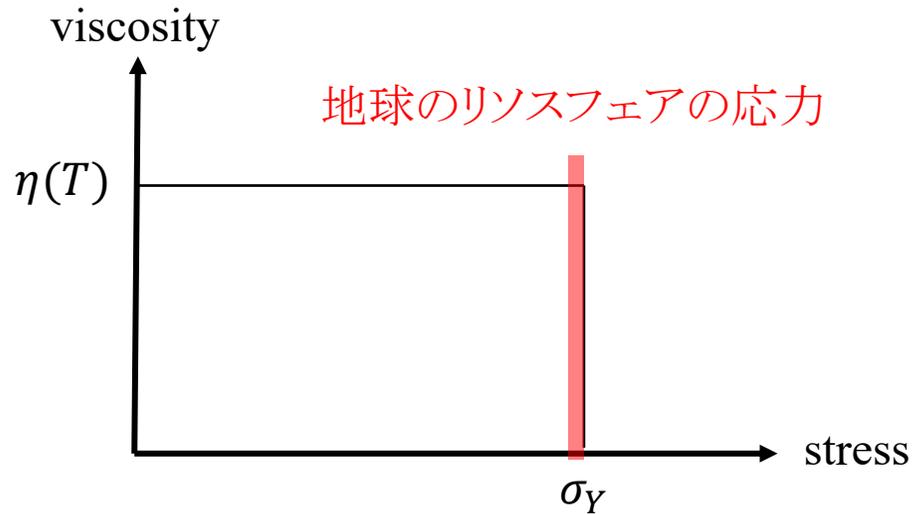
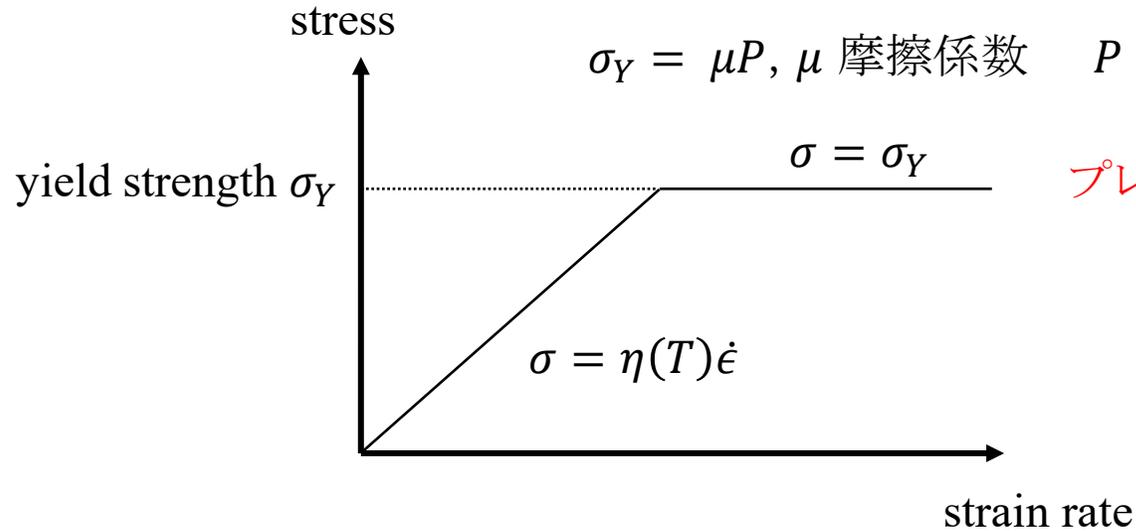


(Kodaira et al., 2014)

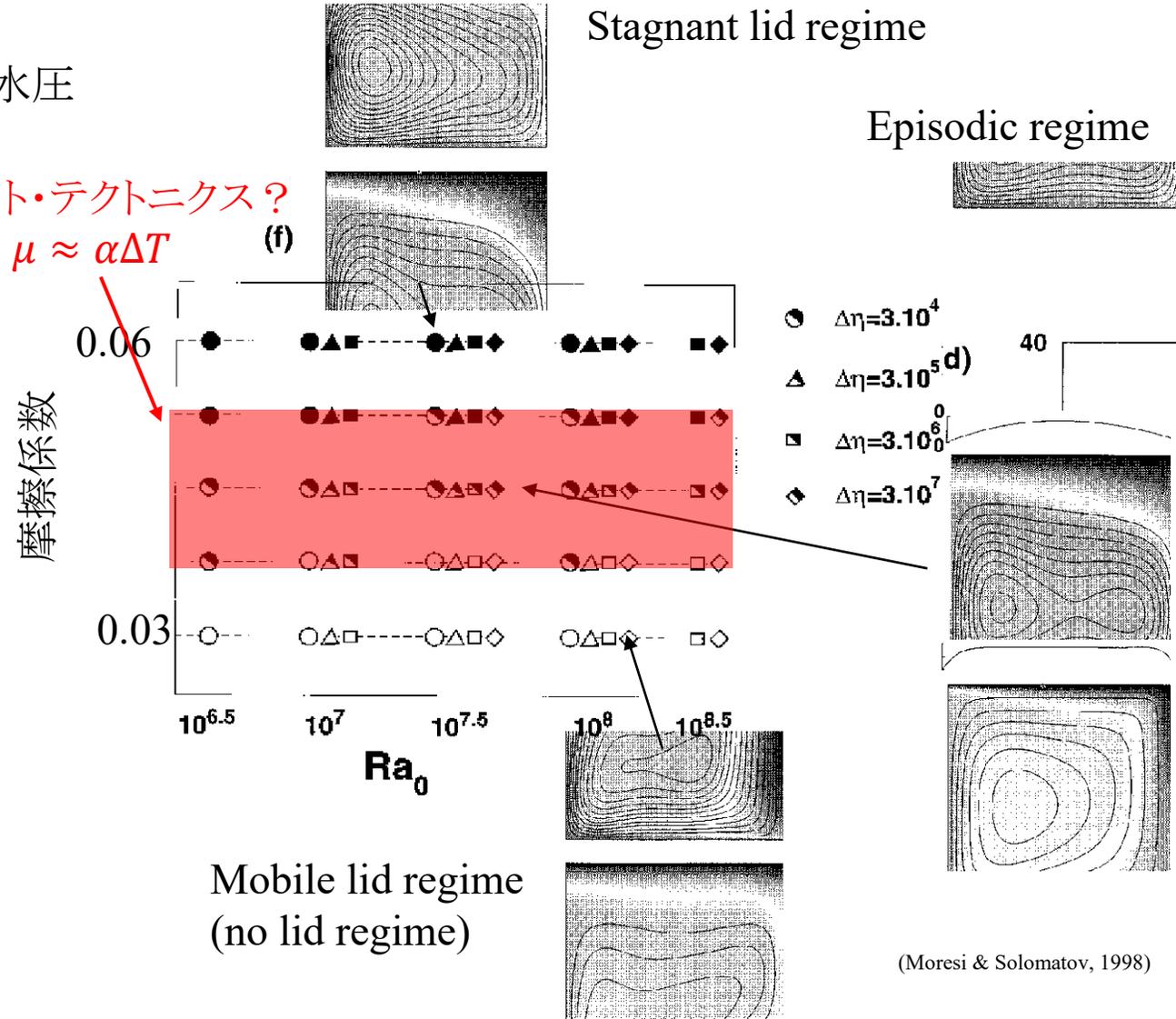


2-3. リソスフェアのYieldingモデル

粘性率がその瞬間の応力に依存する場合: 応力の高いところ → リソスフェアの破壊 → プレート境界



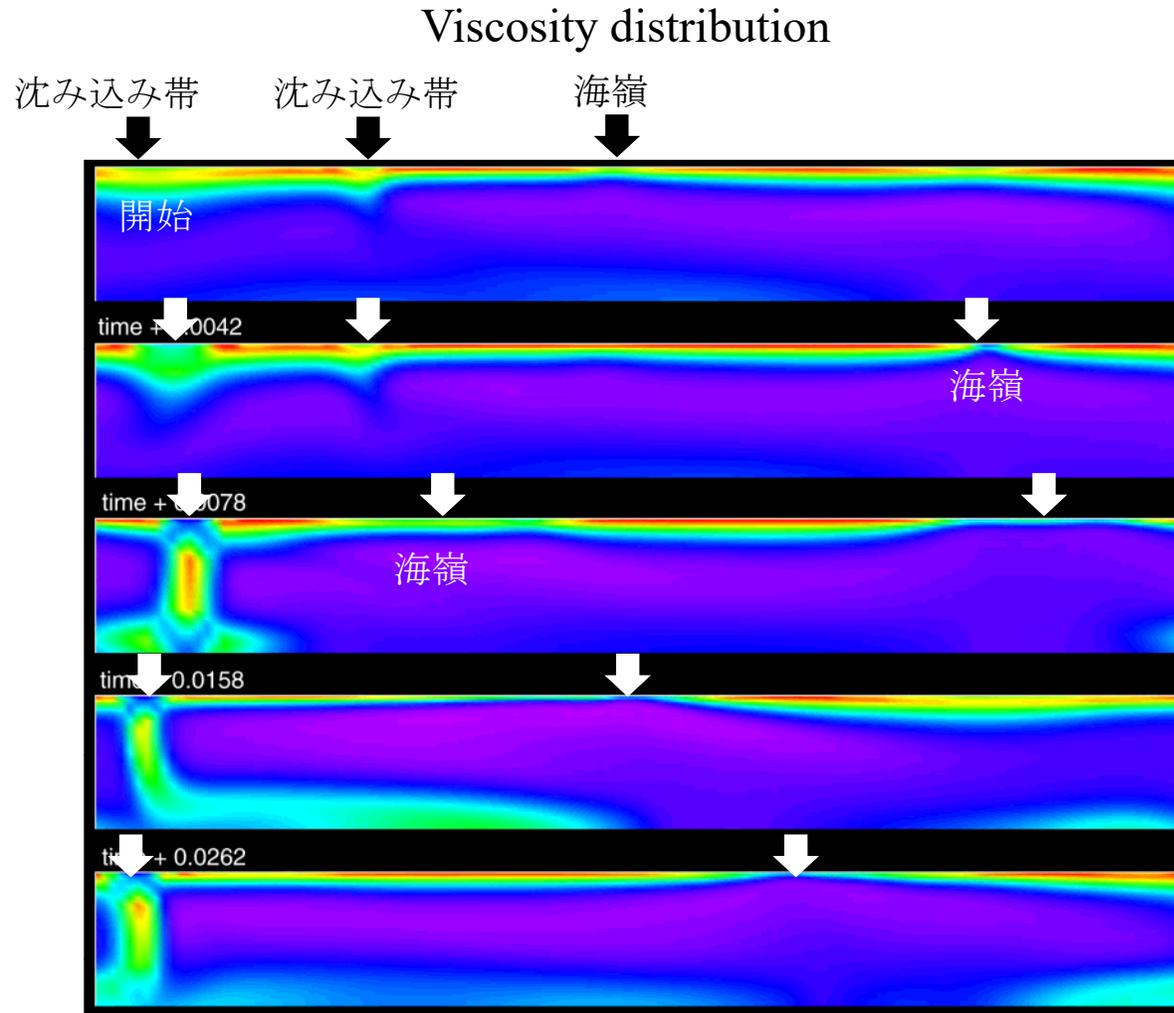
プレート・テクトニクス?
 $\mu \approx \alpha \Delta T$



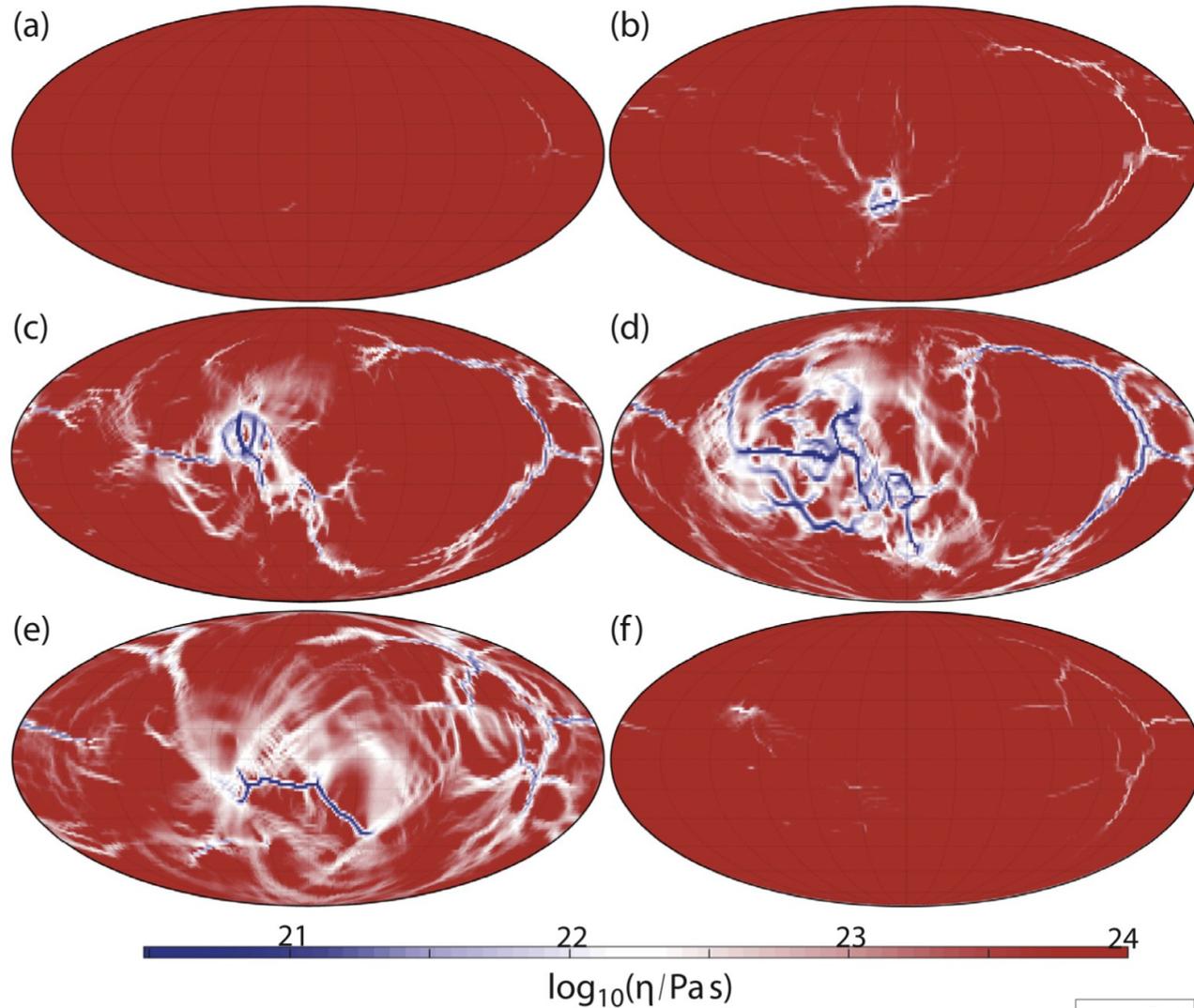
プレート境界の位置は応力分布が決定

リソフェア内の応力分布の僅かな変化→プレート境界生成・消滅・移動 → 対流パターンを不安定化

原理的にプレート・テクトニクスではない



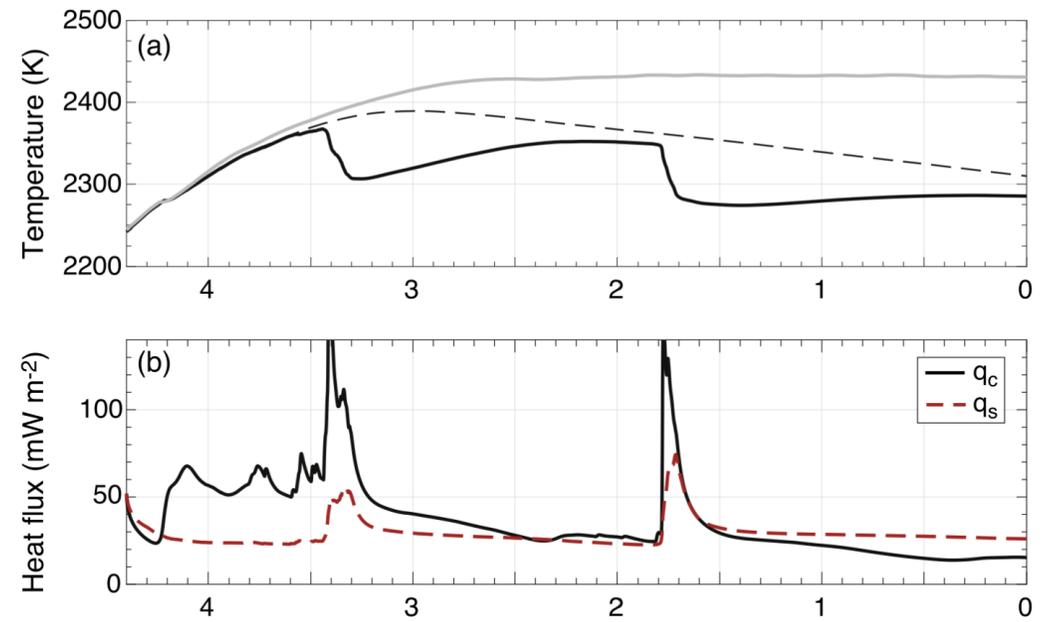
金星: リソスフェアの崩落による火山平原の形成?



(Rolf et al., 2018)

$$\sigma \approx \sigma_Y?$$

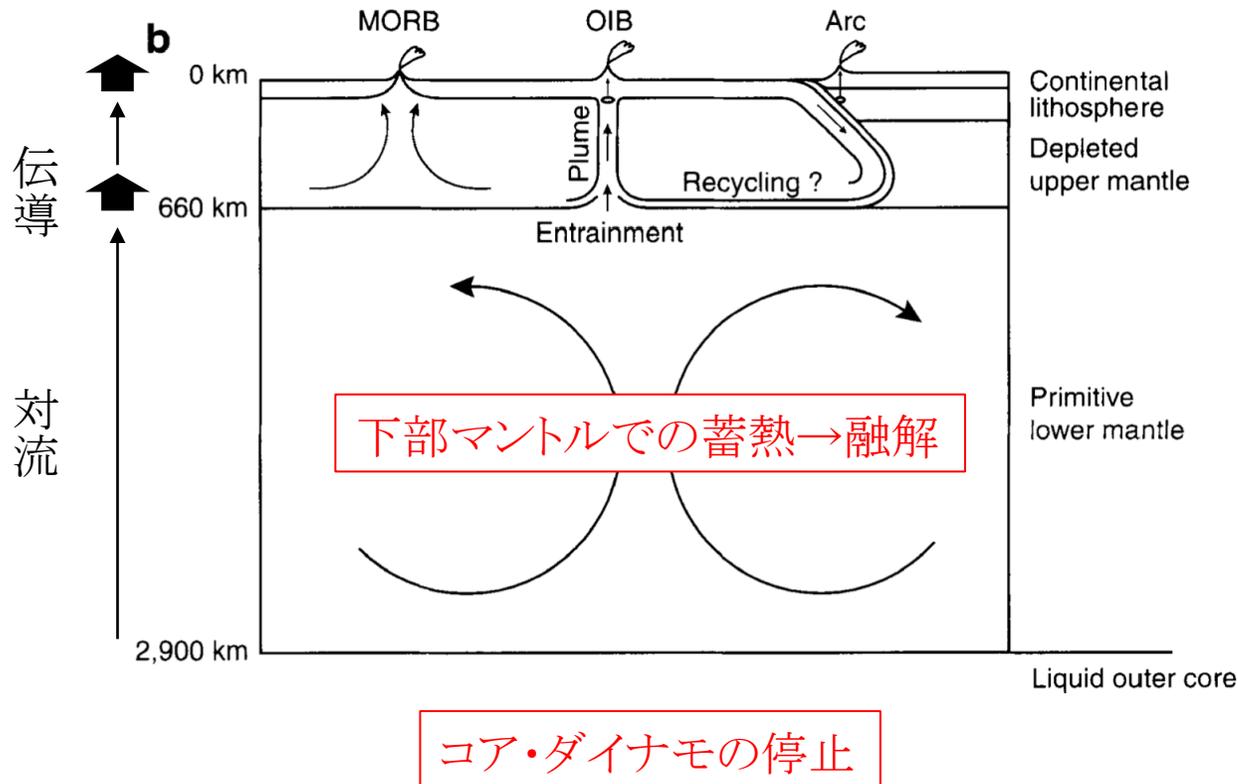
Dryな惑星では非現実的
地球のプレート・テクトニクスとの違い?



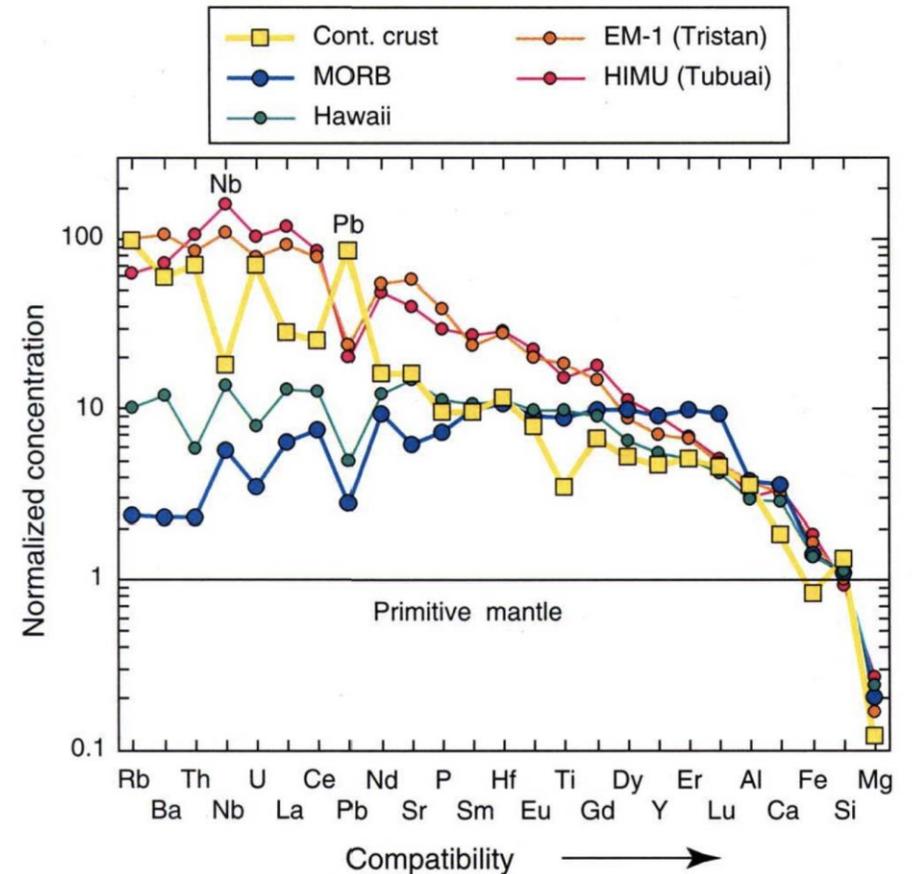
第3章 火成活動・マントル対流結合系

3-1. 二つのマントル・リザーバーと熱史

Mg/Si比: 上部マントル1.26、コンドライト1.07



MORB: mid ocean ridge basalt
OIB: ocean island basalt

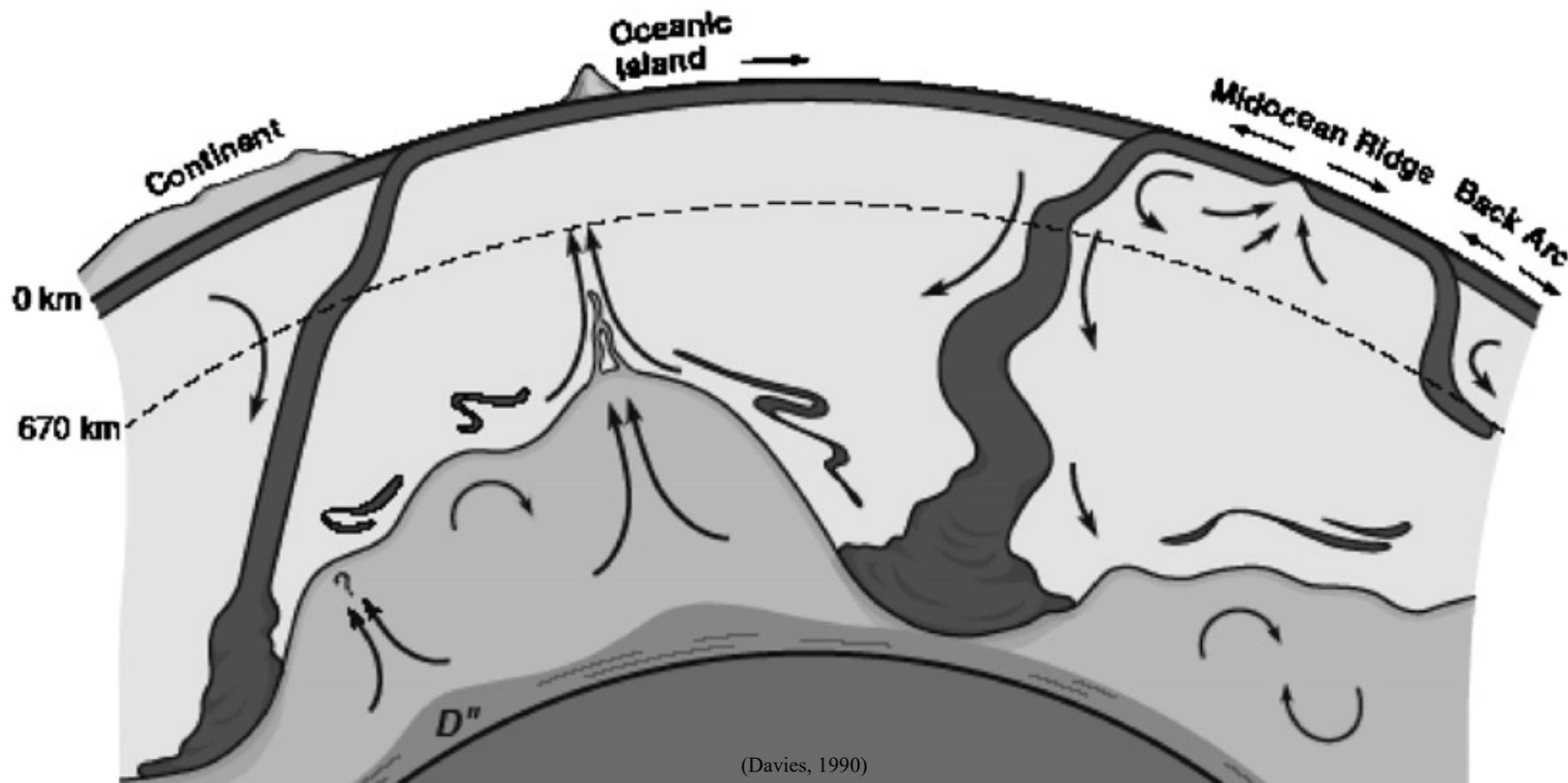


マントル不均質構造は火成活動による分化と対流攪拌のバランスの結果？



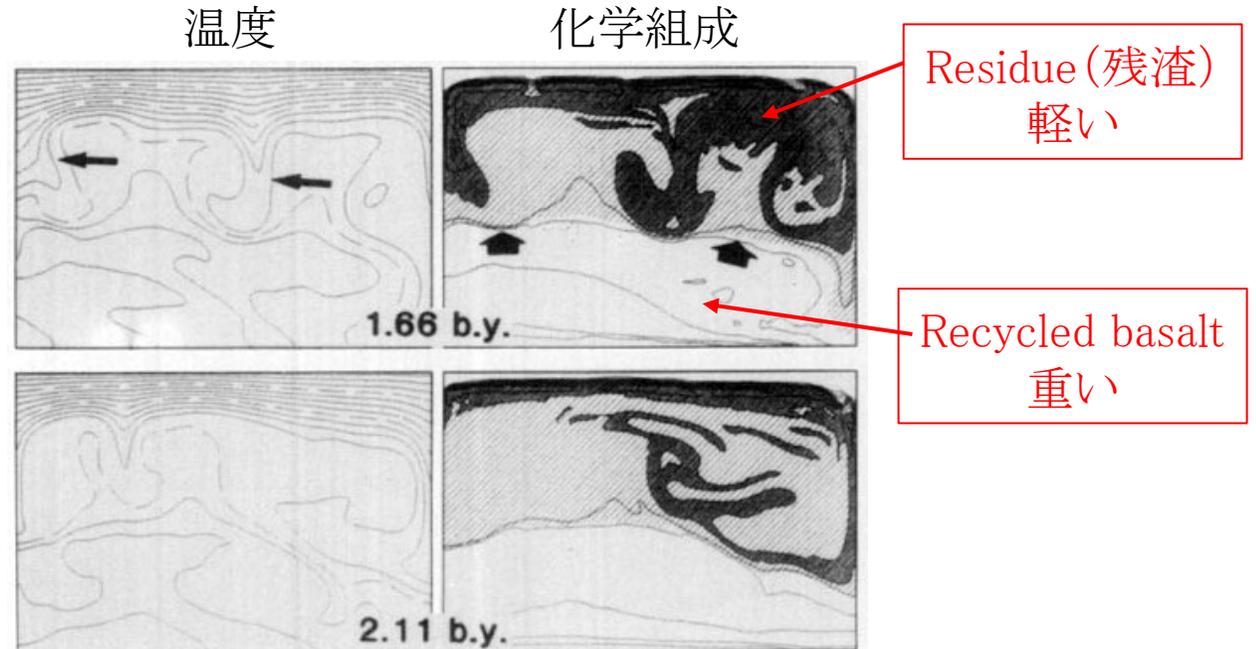
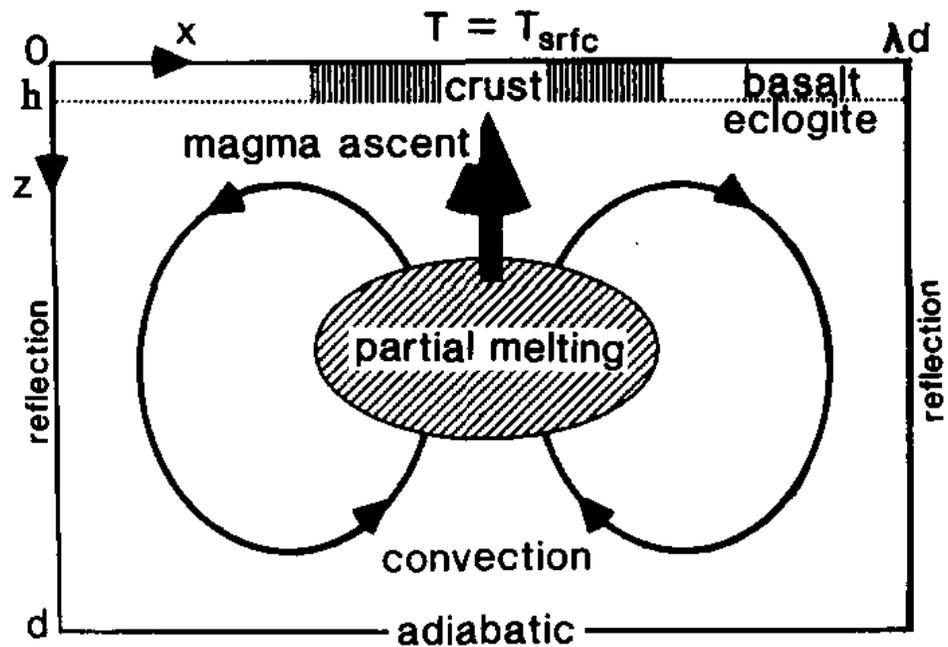
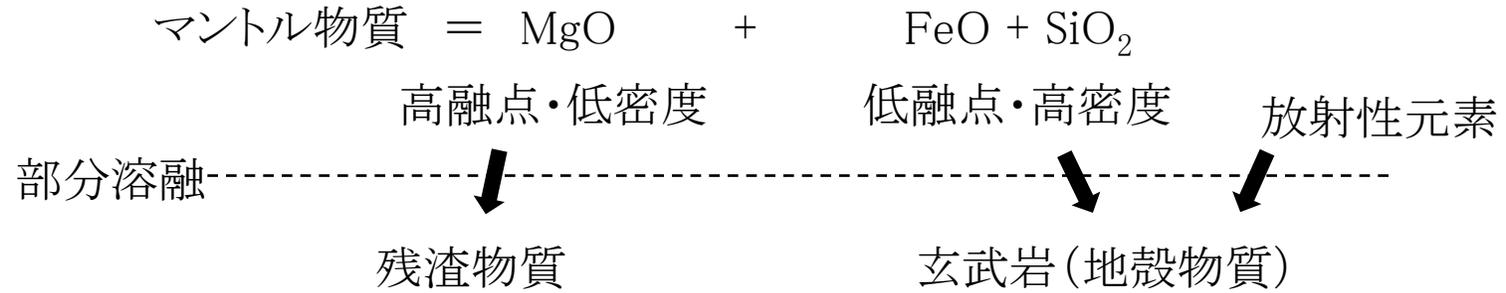
モデル化

a



(Davies, 1990)

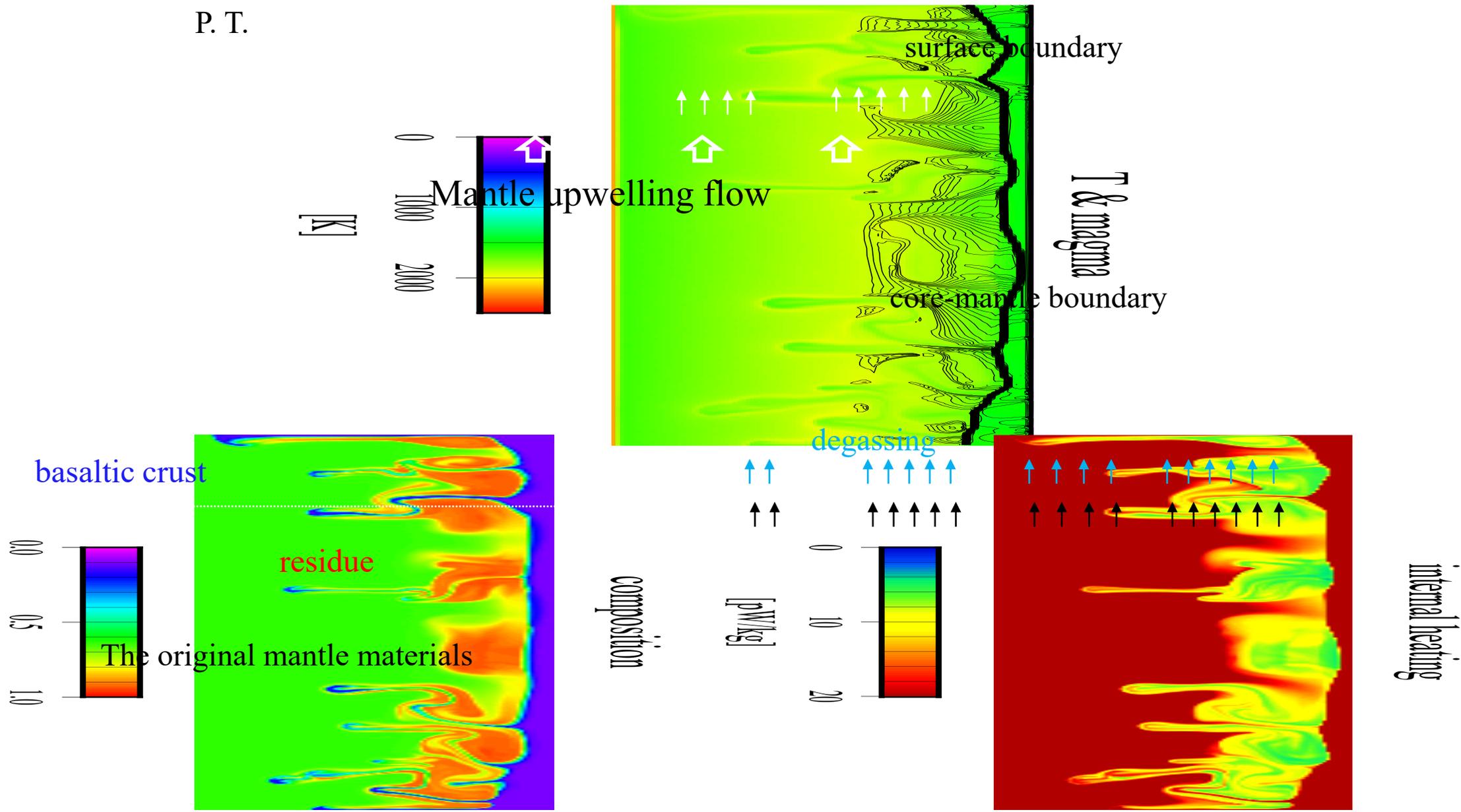
マントル・ダイナミクス = 火成活動・マントル対流結合系



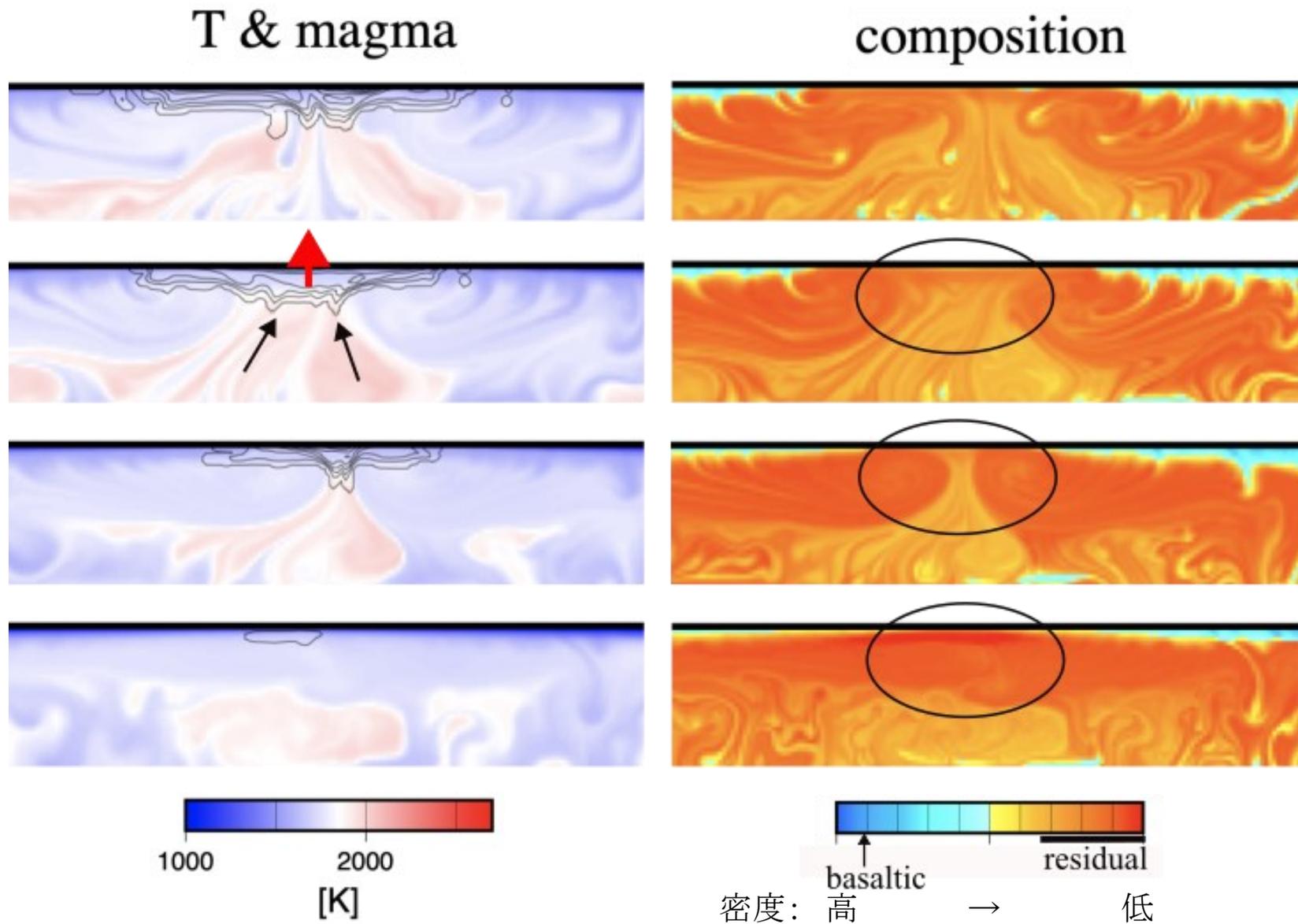
3-2. 火成活動・マントル湧昇流フィードバック

anonymous reviewer のコメント: マグマ生成・移動(浸透流)をシミュレートしないと意味がない

P. T.



The magmatism-mantle upwelling (MMU) feedback

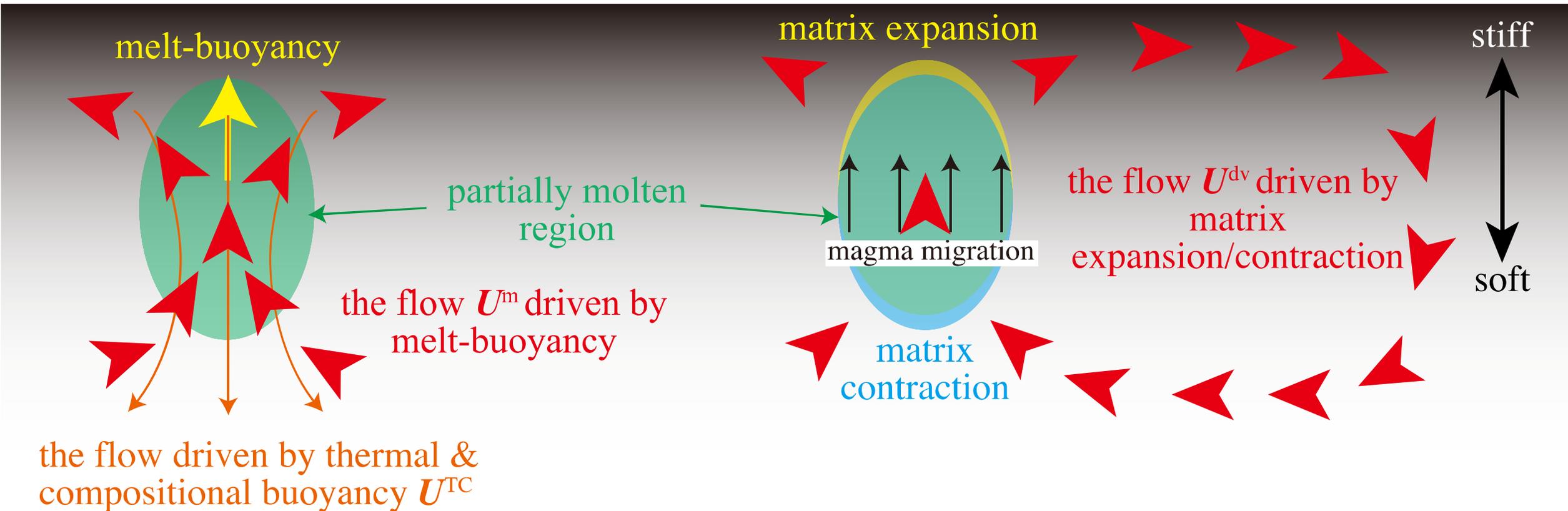


the Magmatism-Mantle Upwelling (MMU) feedback

(a) the MMU_b feedback

(b) the MMU_c feedback

the surface boundary

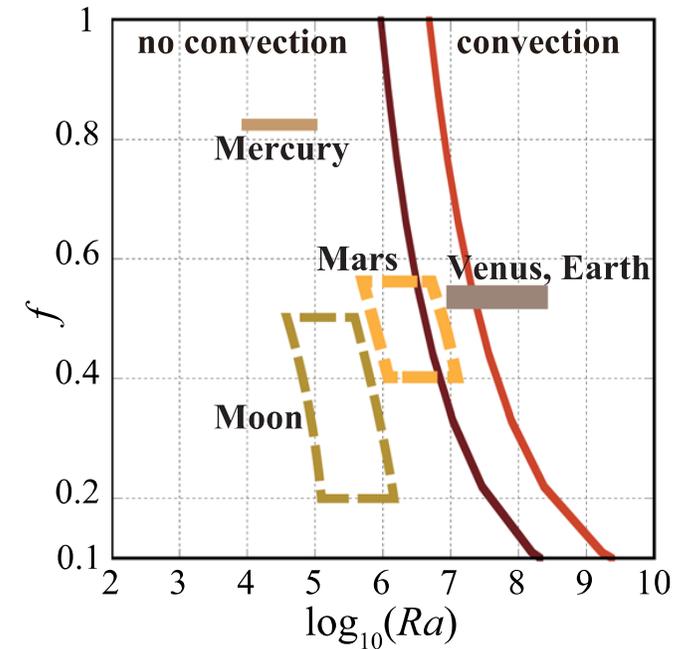


MMU_bフィードバック

$Ra > 10^6 \sim 10^7$ で重要 (火星より大きな惑星)
浸透率 P_m が小さいほど重要
マントルを効率的に攪拌 (第3-3節)

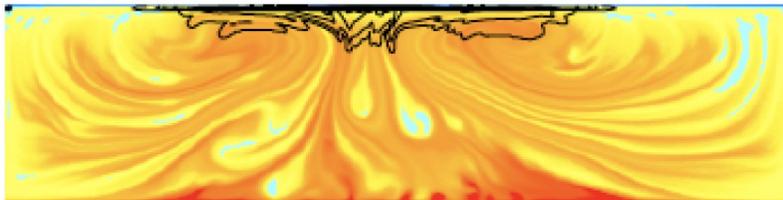
MMU_cフィードバック

原理的に粘性率が非一様の場合にのみ働く (特に地表面付近に高粘性層が発達する場合)
浸透率 P_m が大きい時に効果大
事実上、最初期のマグマ・オーシャンがあった時にのみ重要

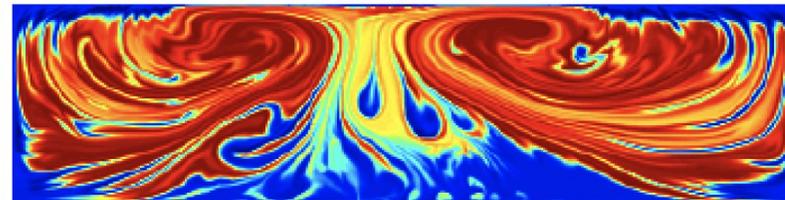


(Yanagisawa et al., 2016)

T & magma

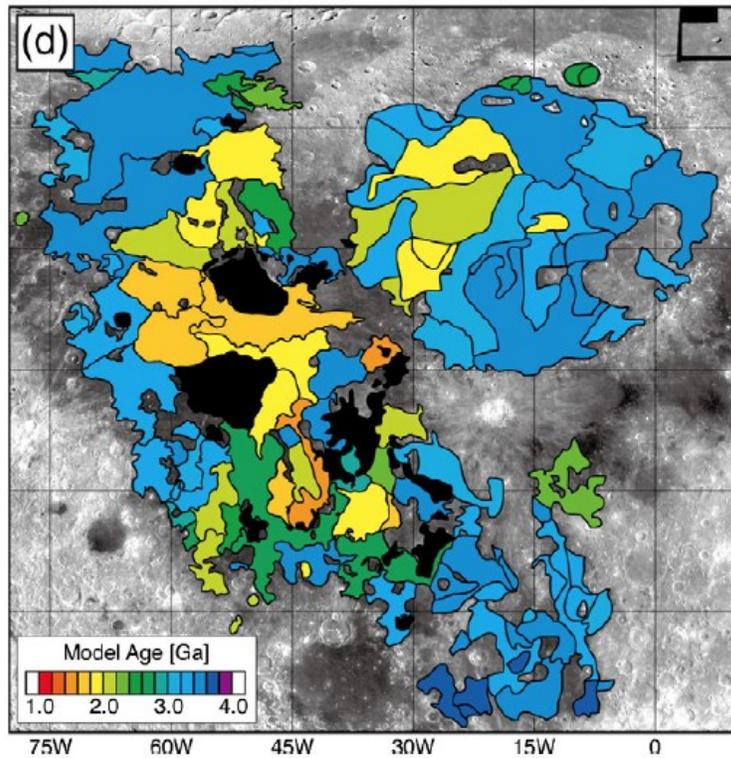


composition



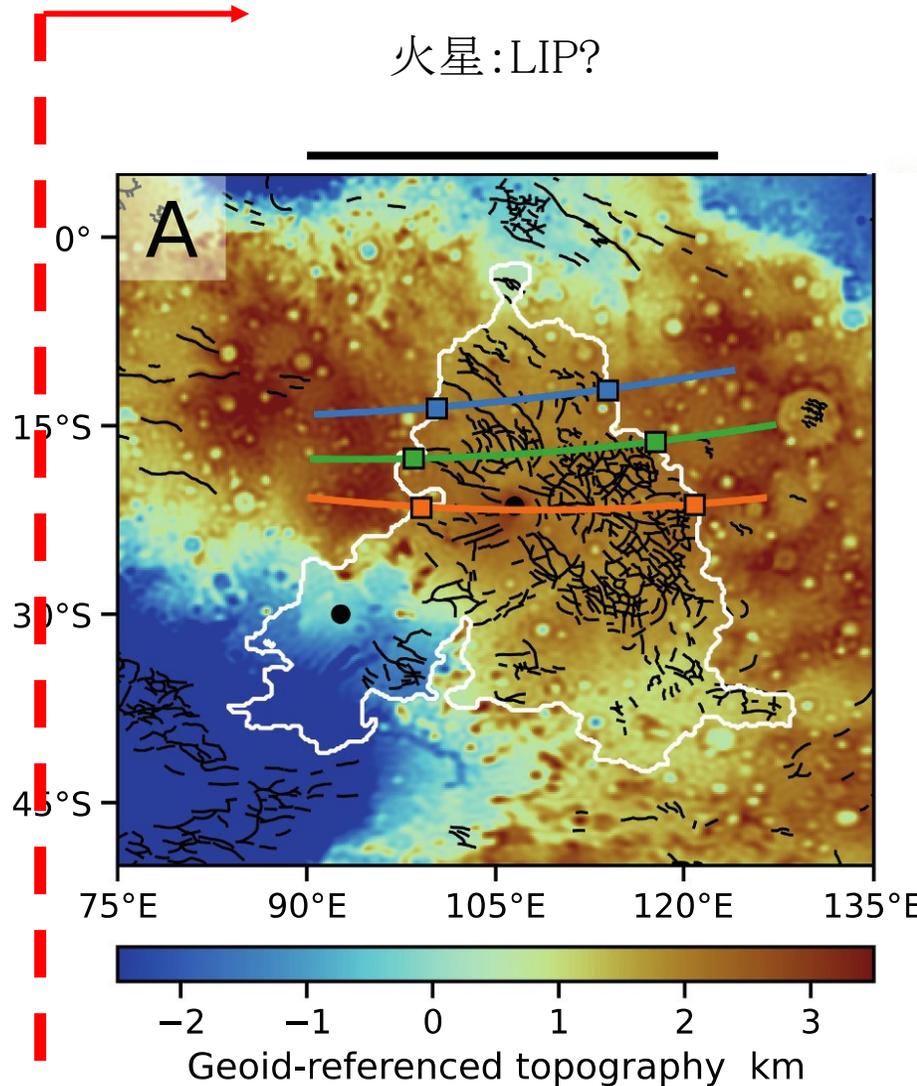
効果(1): Large Igneous Province (LIP): 大規模でパルス的な火山活動 時間スケール数百万年

月: 数億年



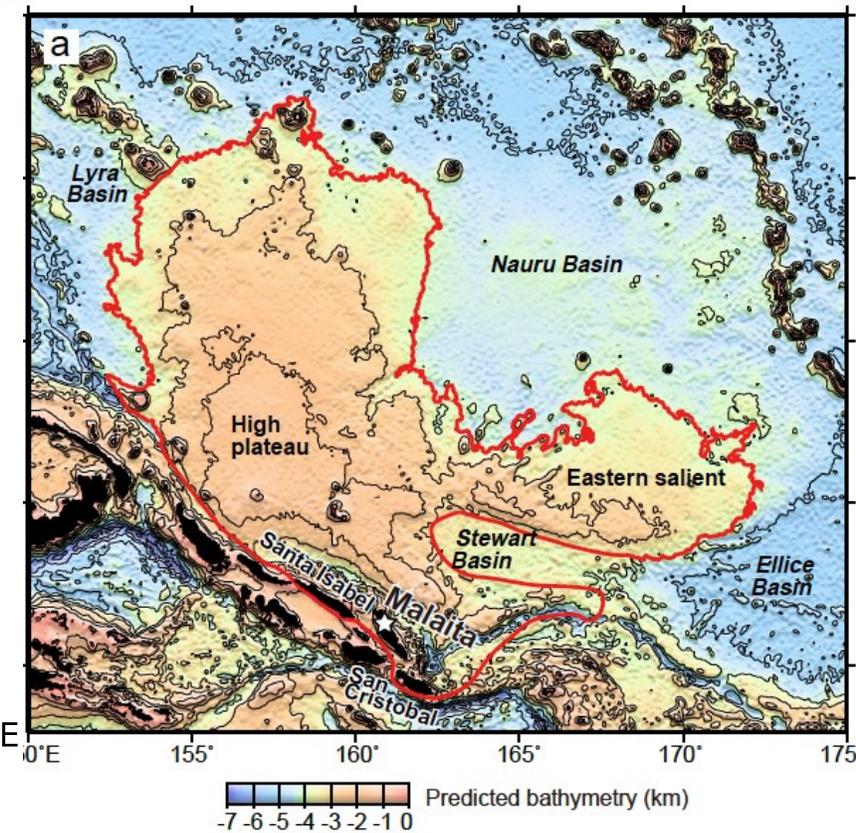
(Morota et al., 2011)

火星: LIP?



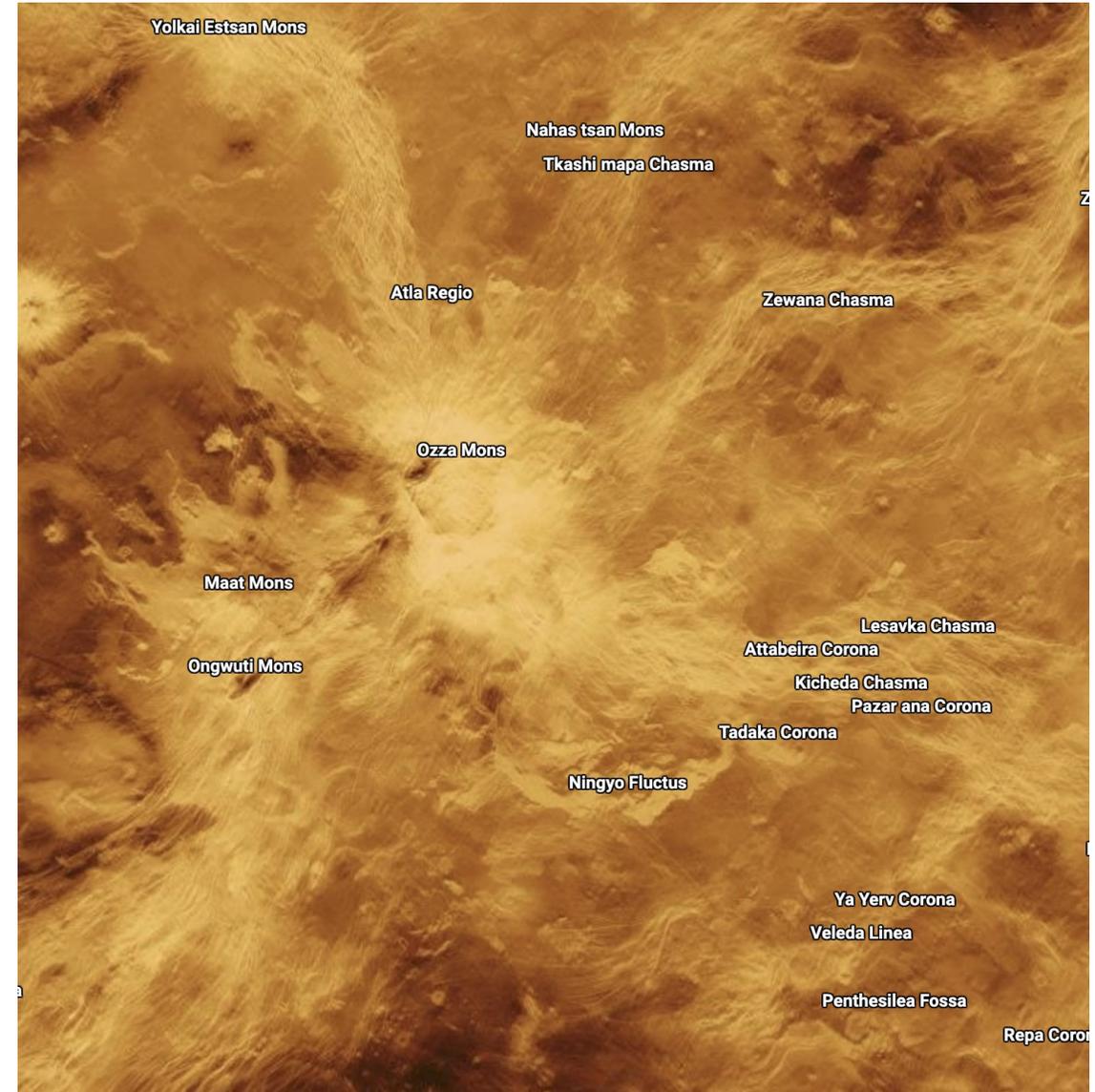
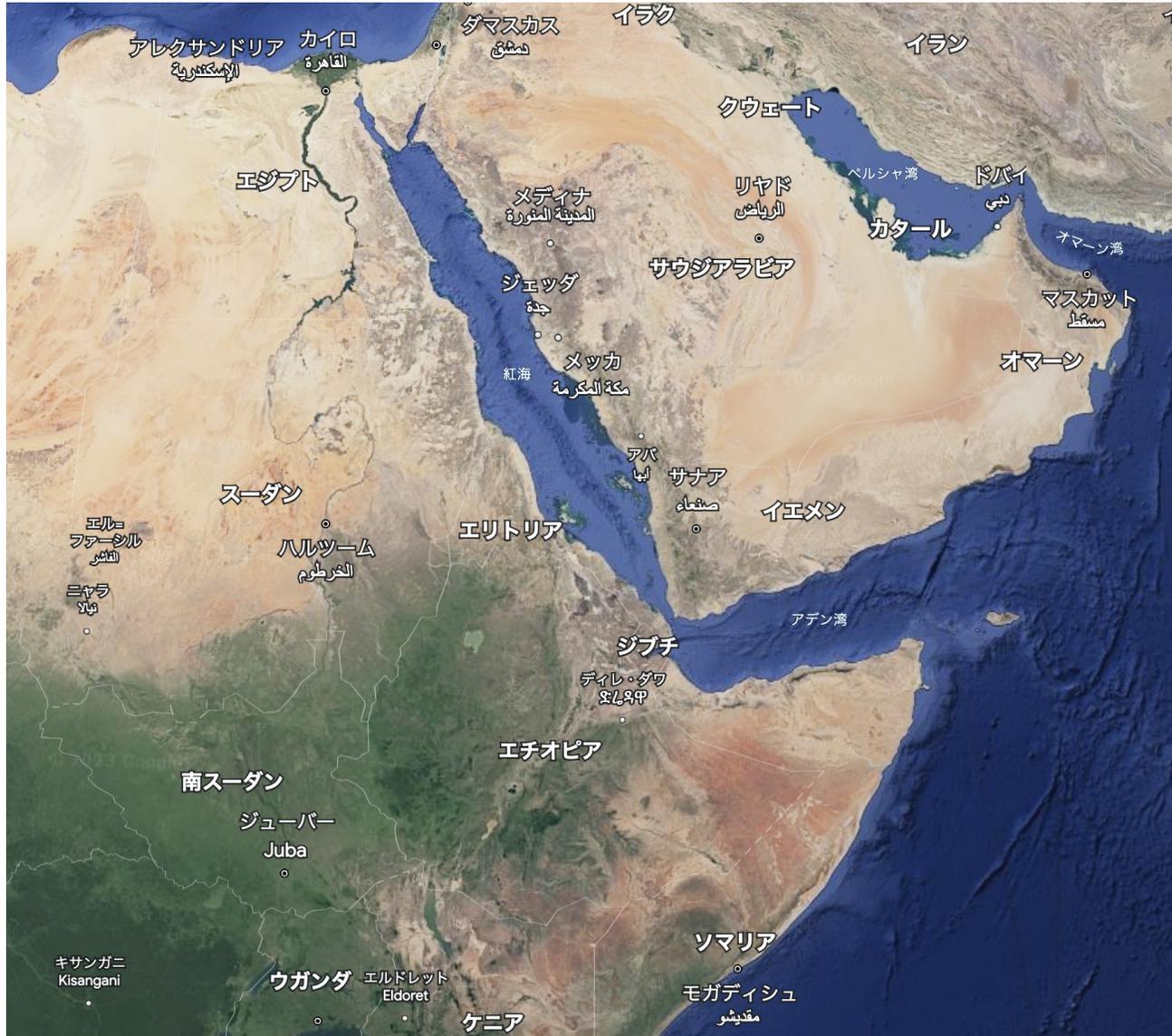
(Broquet & Andrews-Hanna, 2023)

地球: 数百万年 → LIP

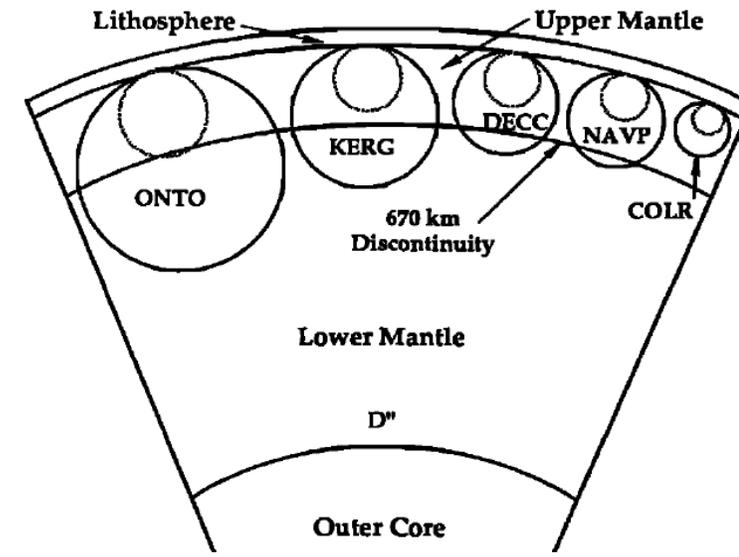
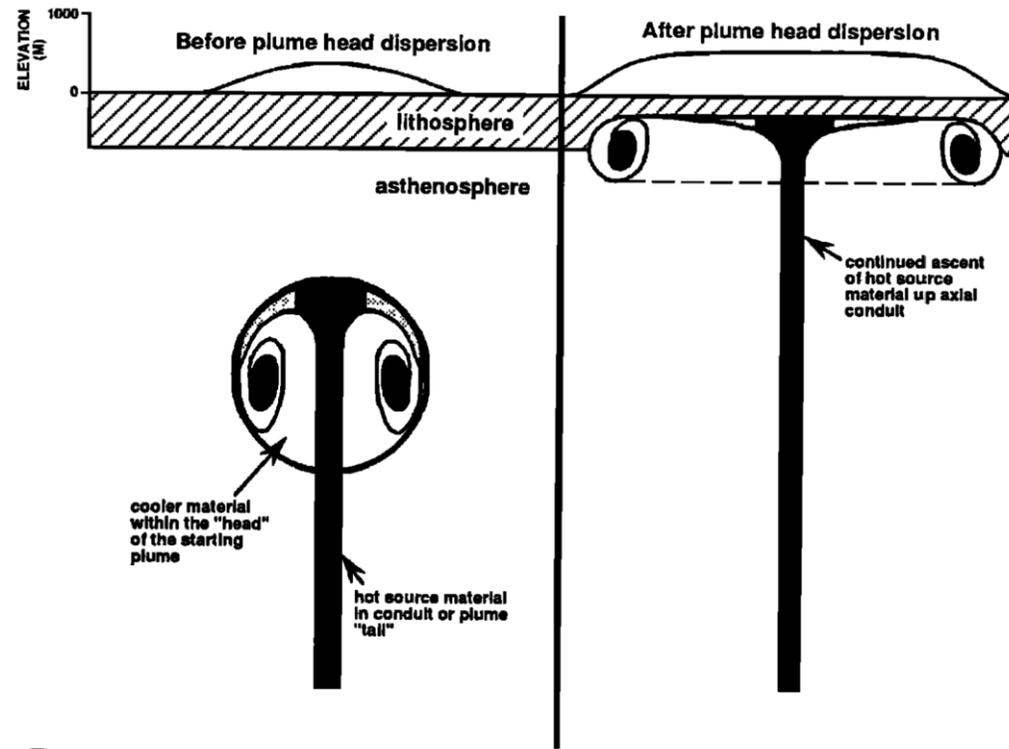


(after Smith and Sandwell, 1997)

LIPによるリソスフェアの分裂



忘れられた疑問: LIP by plume head, hot spot by plume stem?
the diameter of plume head > 1000 km? time scale Myrs ?

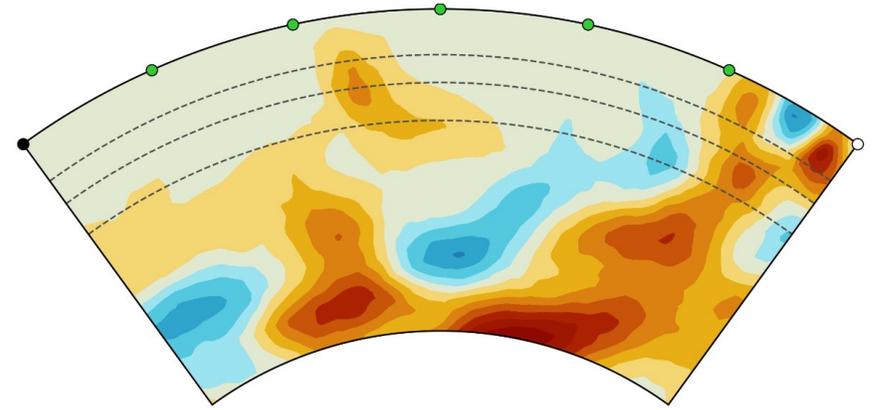
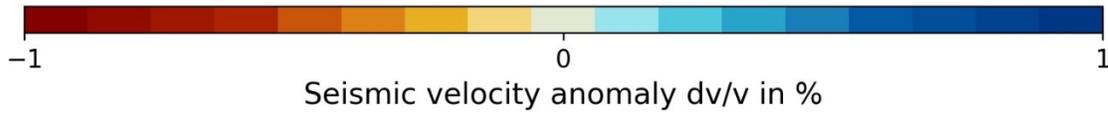
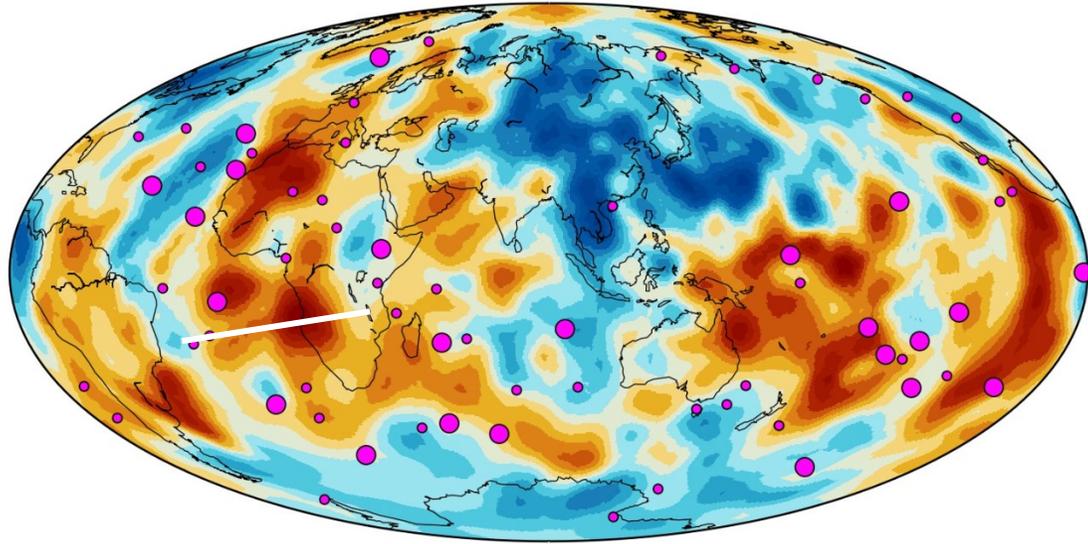


(Coffin & Eldholm, 1994)

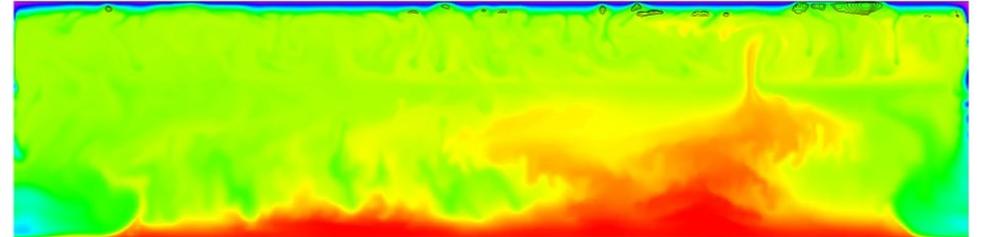
LIP by MMU

DETOX-P3

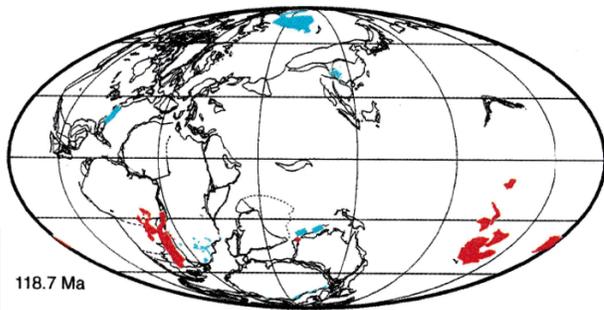
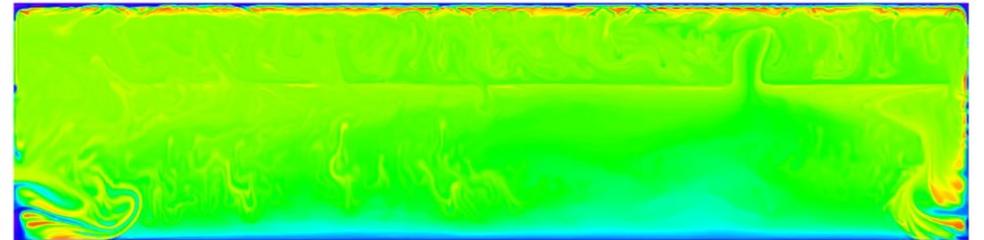
2800 km



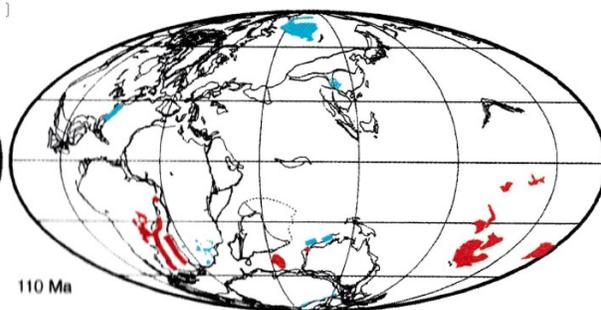
T & magma



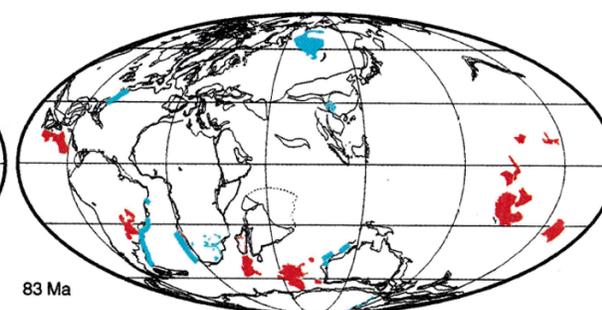
composition



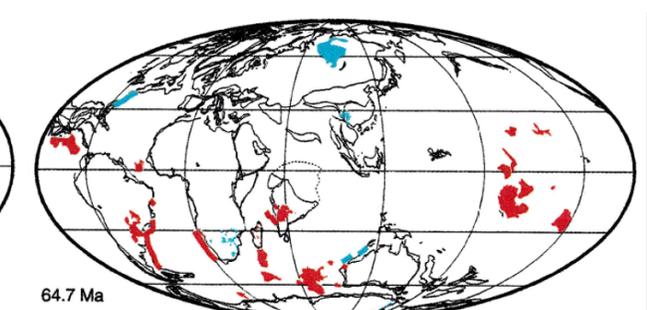
118.7 Ma



110 Ma



83 Ma



64.7 Ma

効果(2):サーモスタット効果

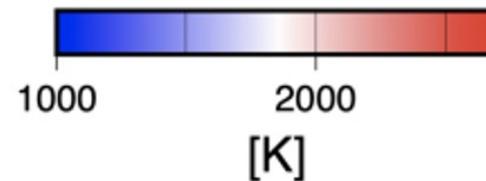
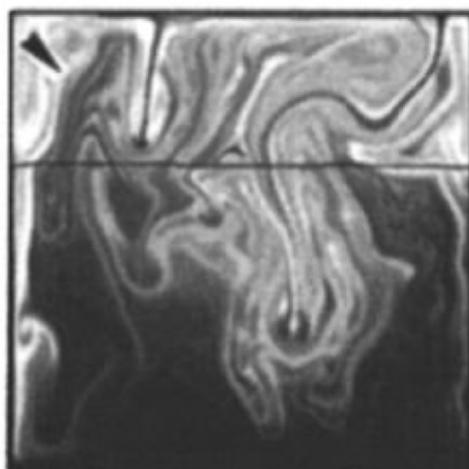
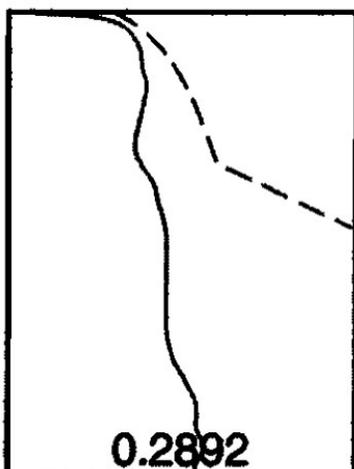
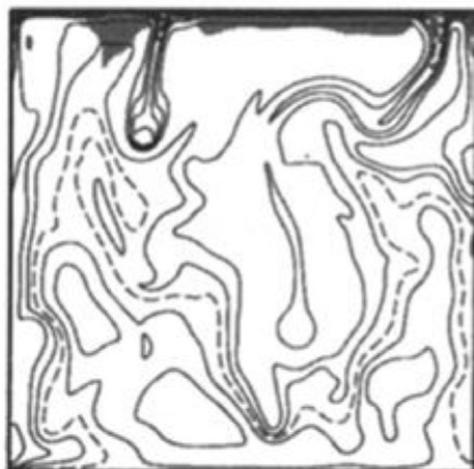
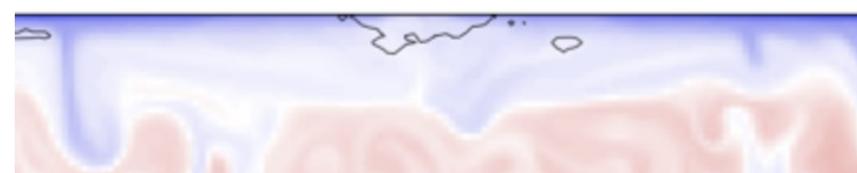
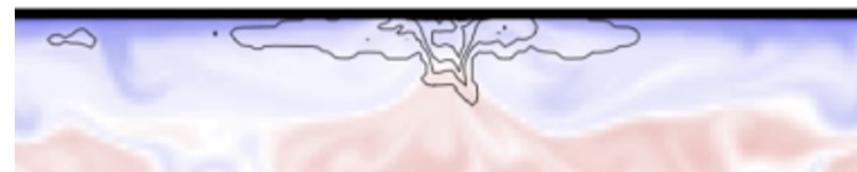
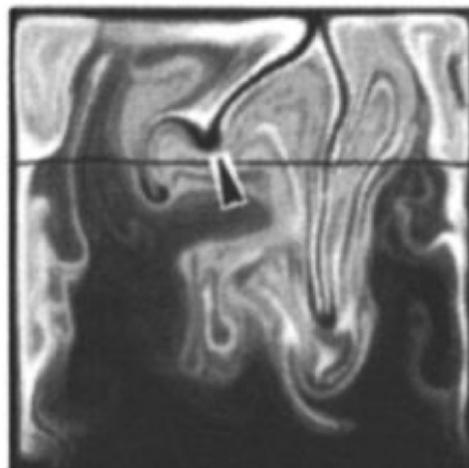
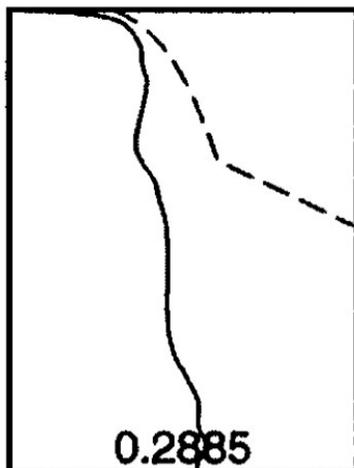
マントル最上部の温度はリソスフェアの底のソリダス温度を超えない

T & magma

H.-averaged T

composition

T& magma



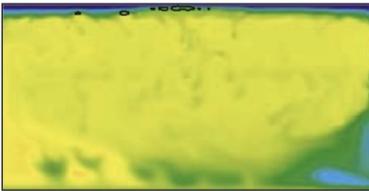
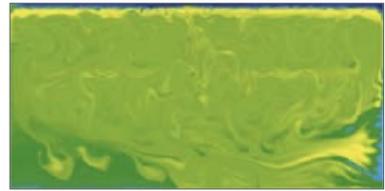
3-3. マントルの分化と攪拌・混合

プレート(海嶺火山)によるマントル分化

沈み込み帯固定

composition ξ

temperature & magma

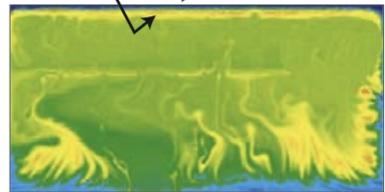


residual layer

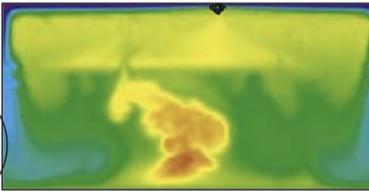
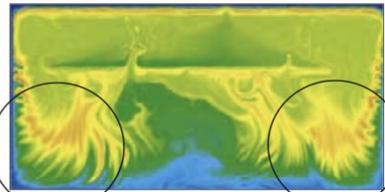
basaltic crust

ridge magmatism

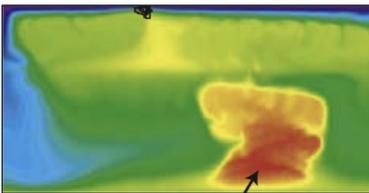
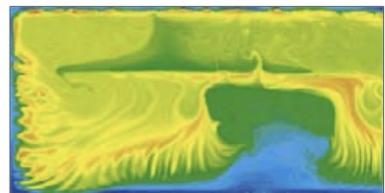
1.1 Gyr



1.7 Gyr



2.5 Gyr



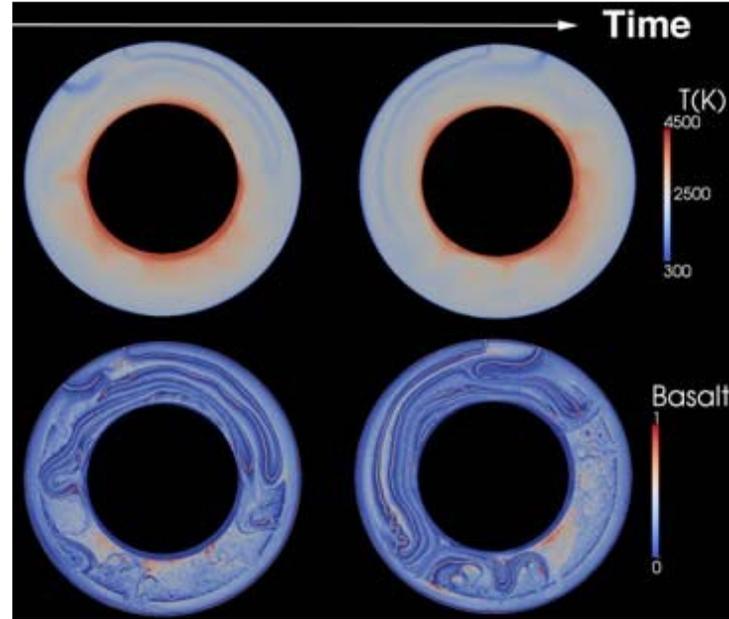
8 Gyr

(Ogawa, 2007)

su

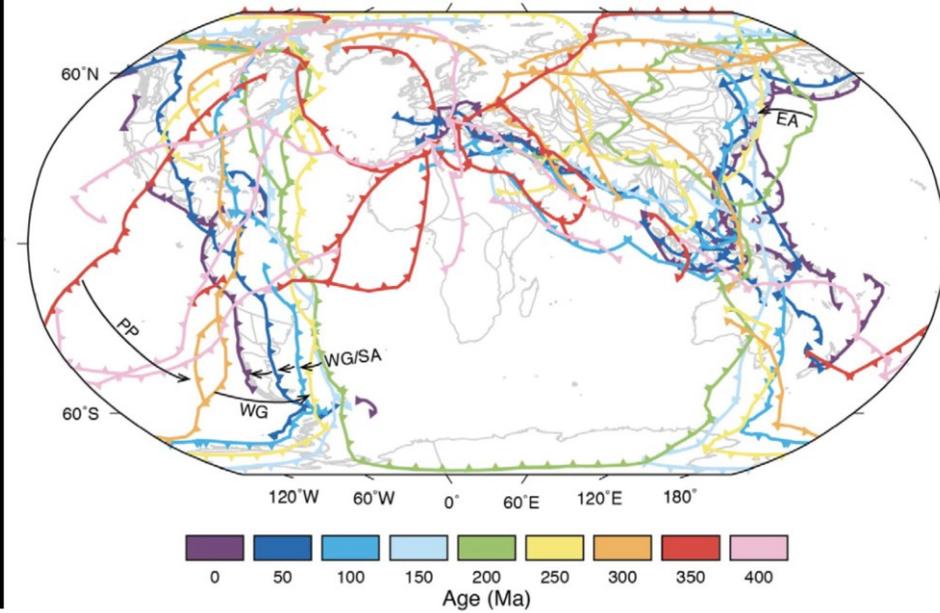
沈み込み帯不安定

Yielding model



(Nakagawa & Tackley, 2014)

実際の沈み込み帯



(Mathews et al., 2016)

MMU_bによる攪拌・混合 (詳しくは「第5章 火星」で)

無次元浸透率 P_m = マントルの分化の程度をコントロールする実効パラメータ
Lower P_m → より強いMMU_bによる攪拌・混合

$P_m = 20$

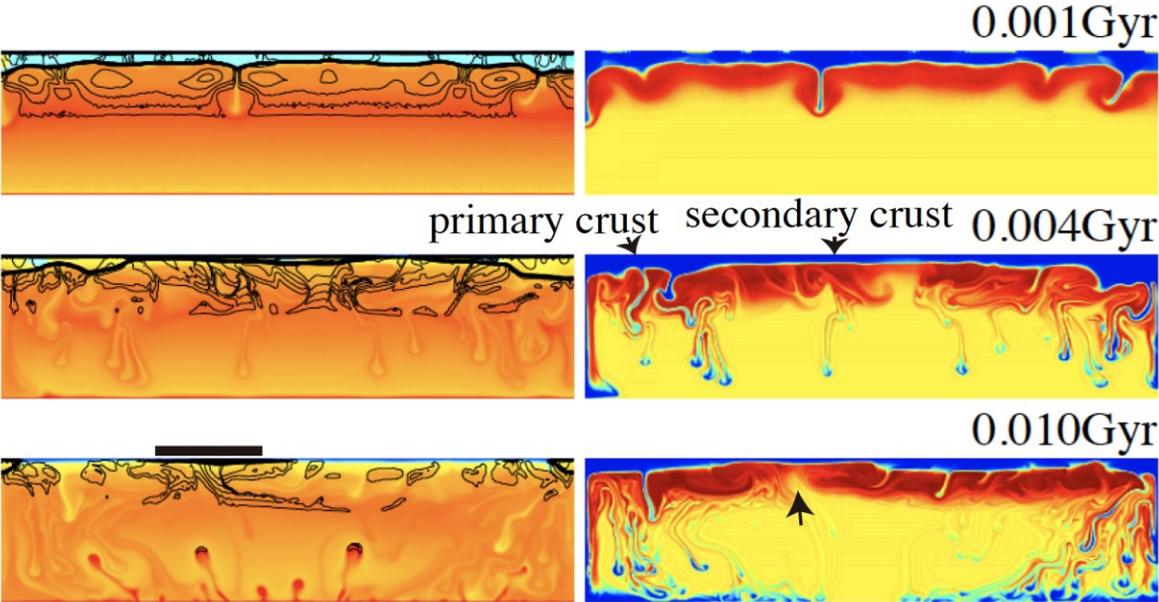
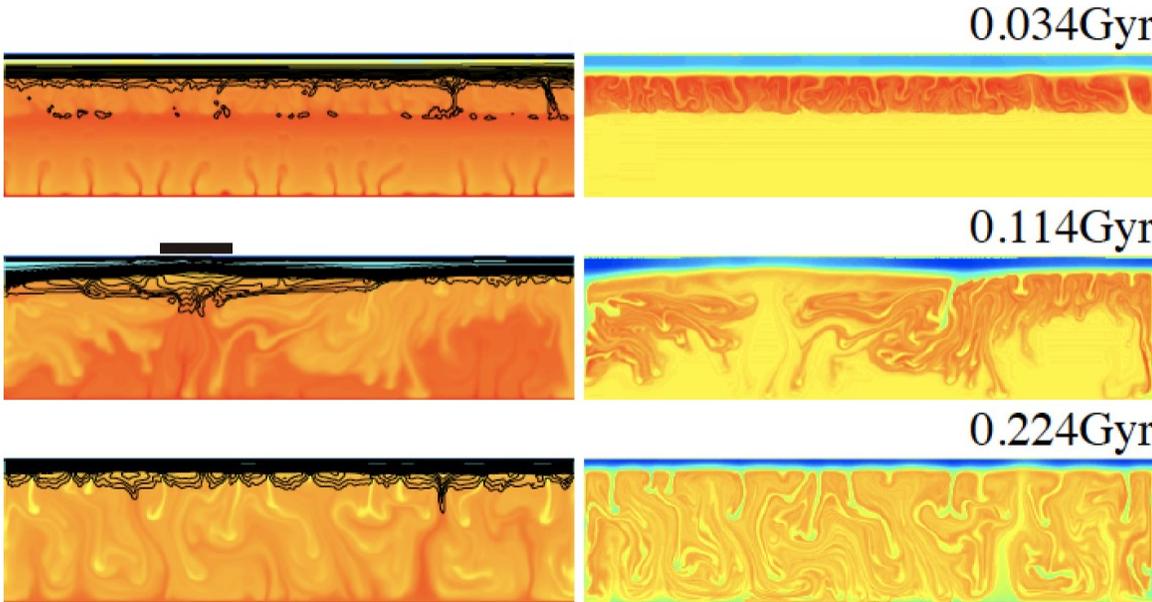
$P_m = 200$

(a) T & magma

(b) composition

(a) T & magma

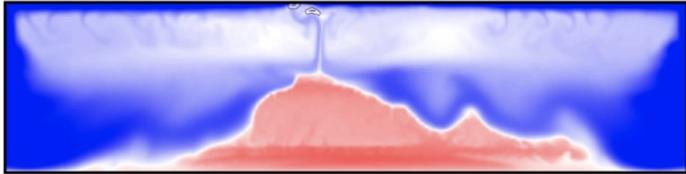
(b) composition



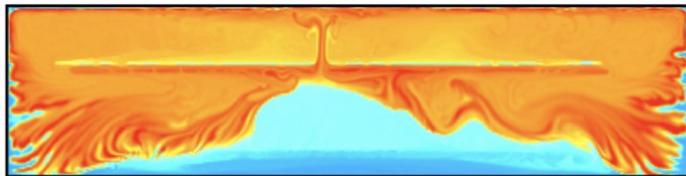
(Ogawa, 2021)

地球における玄武岩パイルの安定性 (詳しくは「第6章金星と地球」で)

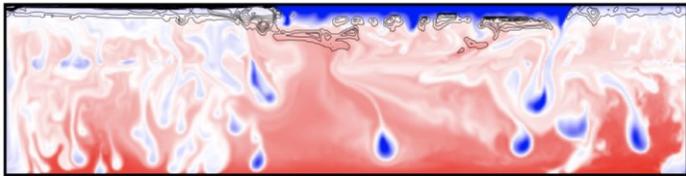
T & magma 5.3 [pW/kg]



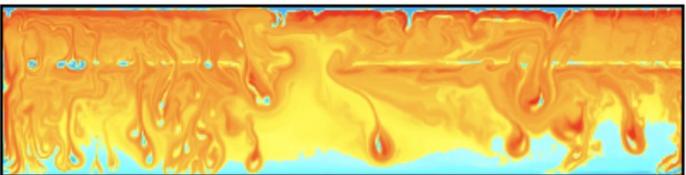
composition



T & magma 18 [pW/kg]

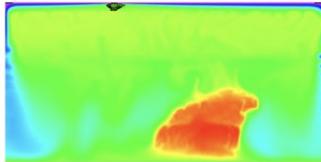


composition

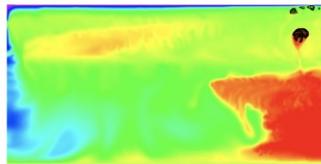


(a) temperature & magma

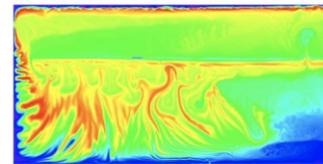
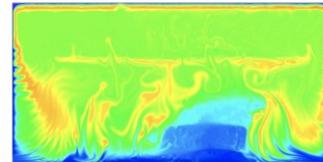
H = 8 [pW/kg]



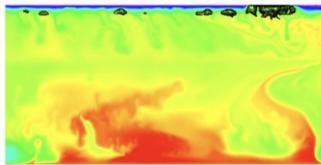
H = 18 [pW/kg]



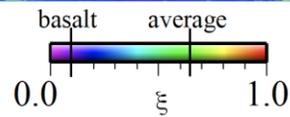
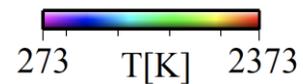
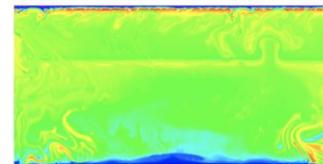
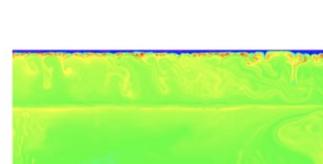
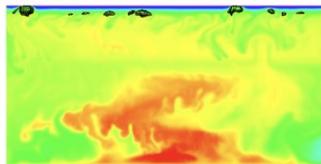
(b) composition



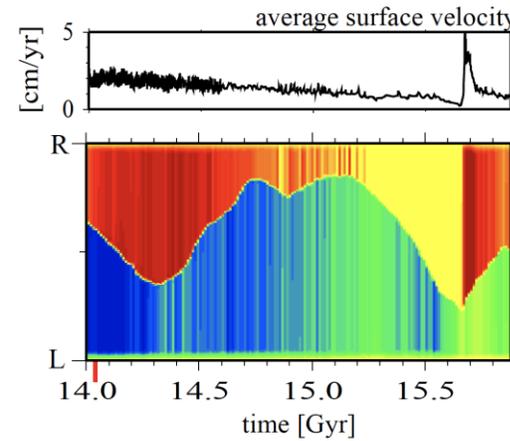
H = 21 [pW/kg]



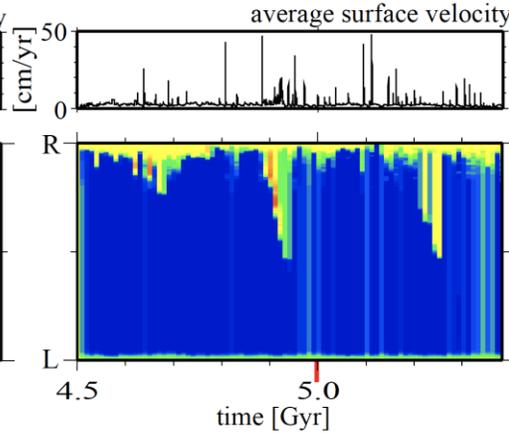
H = 25 [pW/kg]



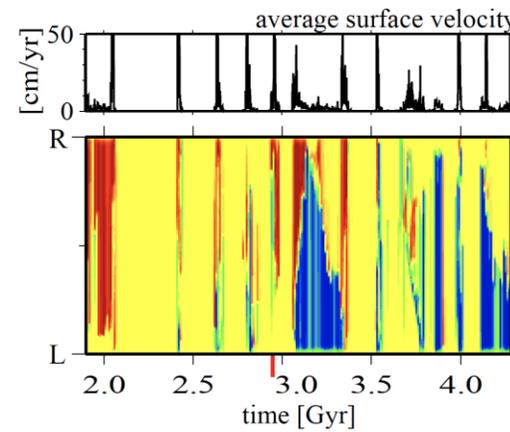
(a) H=8 [pW/kg]



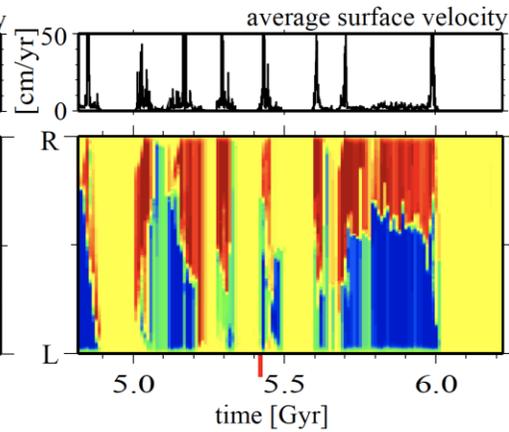
(b) H=18 [pW/kg]



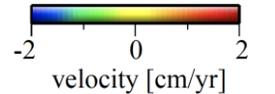
(c) H=21 [pW/kg]



(d) H=25 [pW/kg]



(Fujita & Ogawa, 2009)



第一部まとめ

マンツルの歴史は本質的にダイナミクスの問題。準静的地球観は誤り。

マンツル・ダイナミクス = 火成活動・マンツル対流結合系

そのレジームによる理解

(1) 対流不安定 → 火星より大きな惑星におけるブルーム火山

(2) Stagnant lid regime → リソスフェアの存在

(3) Plate-like regime → プレート・テクトニクスの発現

(4) Magmatism-Mantle Upwelling feedback → 火星より大きな惑星におけるLIP
サーモスタット効果

(5) ブルーム (MMUb) はマンツルを均質化、プレート (海嶺火山) はマンツルを分化

惑星内部の研究におけるモデリングの意味

岩石は複雑

岩石学者にしかわからない相図・力学特性 → マントルの粘性率？ 10^{20} Pa s？ マグマの浸透率？
コンピュータの中で再現不可能 (特に定量的モデル)

物理学をやろう

数値モデルは架空の世界 (お話しモデルはなおさら)

マントル・ダイナミクスの問題

日常経験がないから直感もなく、「わかった」という気になれない。



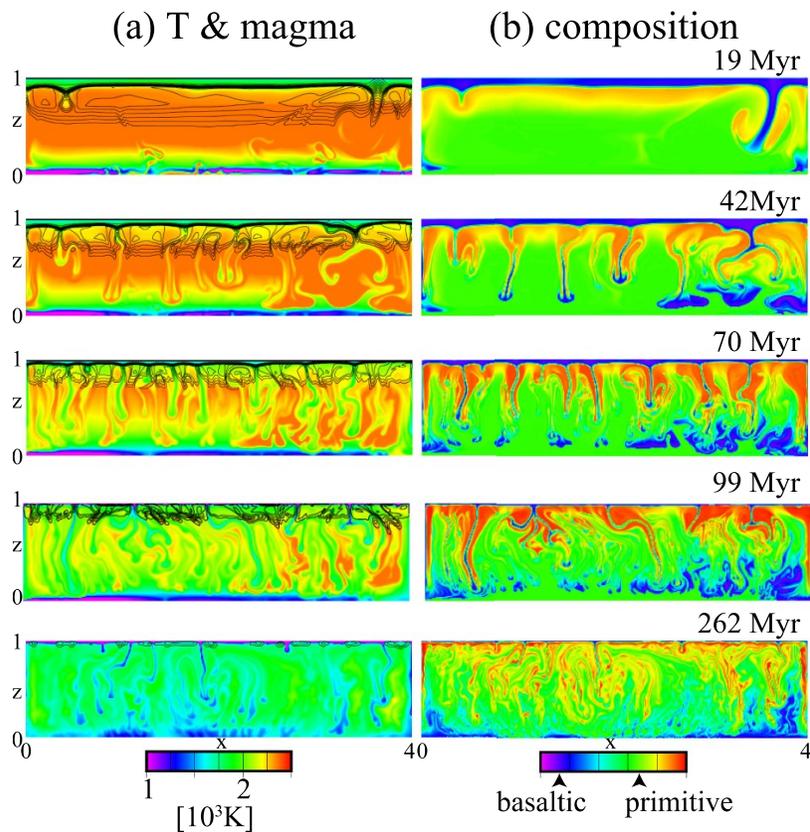
数値モデルの役割: 架空の世界で経験を蓄積することによる直感の形成

あらかじめ「直感」のある現象を数値モデル化する必要はない
コンピューターは入れたものしか出てこない

MMUbフィードバックが重要となる条件: $Ra > Ra_{MMU} = 10^6 \sim 10^7$ (粘性率一定の場合)

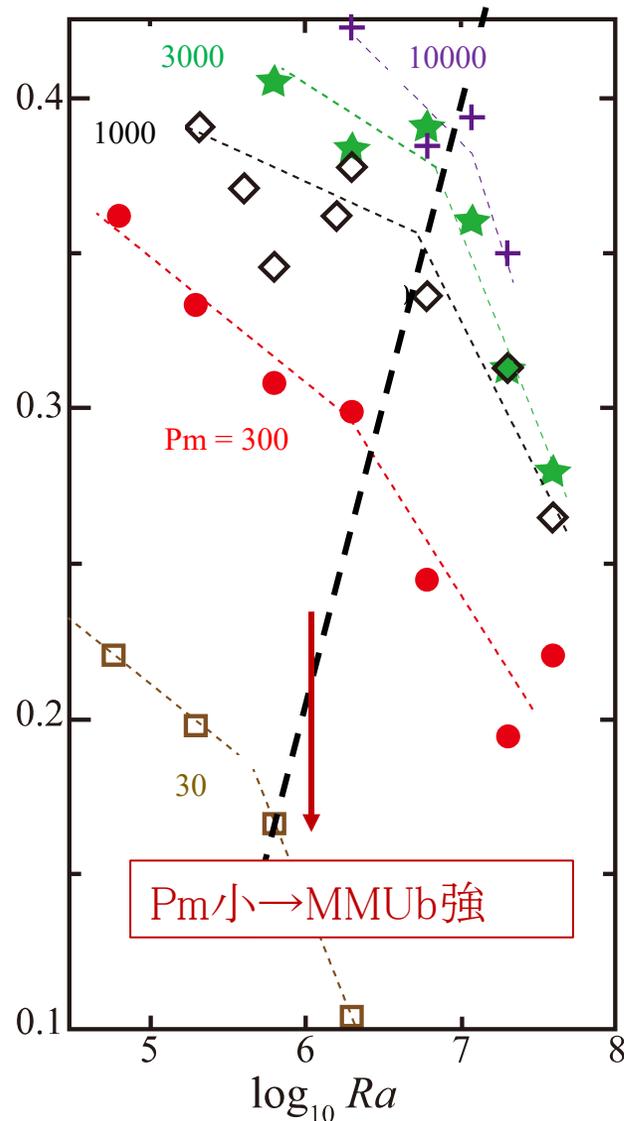
火星サイズより大きな惑星で重要

MMUbによる攪拌



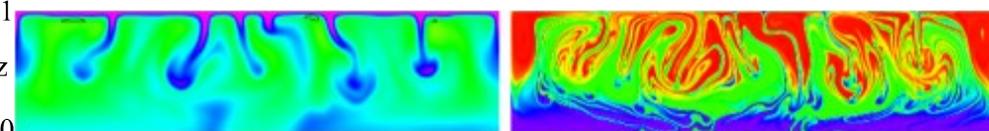
(Ogawa, 2018)

(a) rms-average of $(\xi - \xi_{init})$ at depths

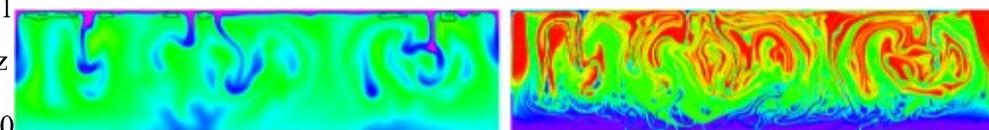


(b) temperature & magma

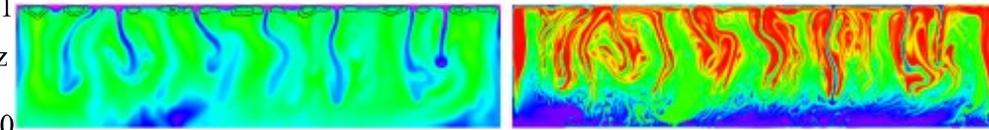
Case M300-2: $Ra = 2 \times 10^5$



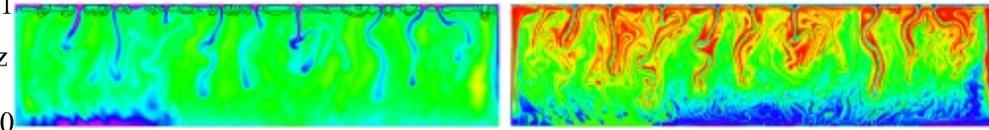
Case M300-3: $Ra = 6 \times 10^5$



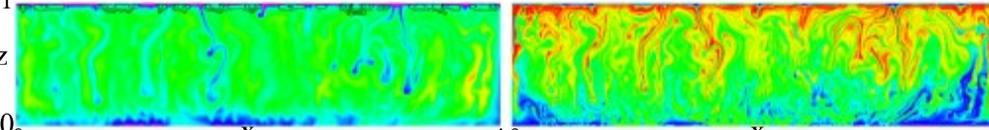
Case M300-4: $Ra = 2 \times 10^6$



Case M300-5: $Ra = 6 \times 10^6$



Case M300-6: $Ra = 2 \times 10^7$



1 2 3 4
[10³K]

basaltic primitive