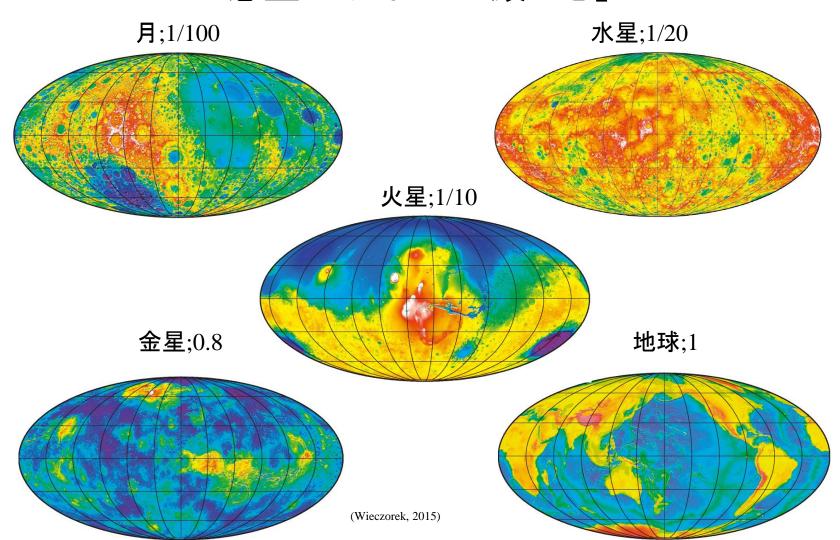
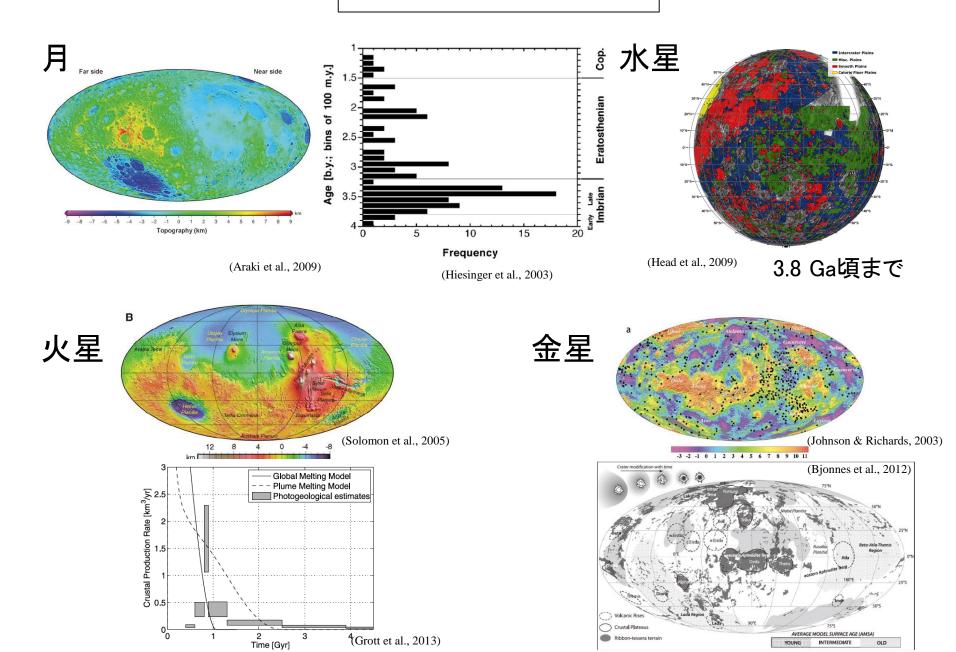
# 岩石惑星の進化 火成活動・マントル対流結合系のダイナミクス

#### 惑星のサイズと「顔つき」



# 火成活動の歴史



# 「顔つき」とその変遷:どうやって理解する?

数理モデル = 微分方程式 = 定量的

非線形力学系の相転移という理解の仕方

例:レスラー系

惑星間の違い = 力学系が属する「相(レジーム)」の違い

惑星の進化 = 力学系が経験する「相転移」

# レスラー系

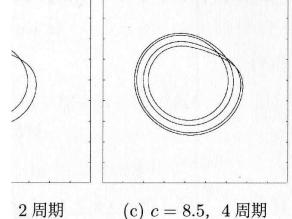
$$\dot{x} = -y - z$$

$$\dot{y} = x + 0.1y$$

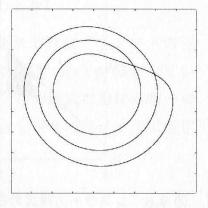
$$\dot{z} = 0.1 + (x - c)z$$

惑星の中の力学系? (1)マントル対流

(2)火成活動



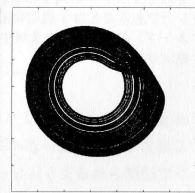




カオス

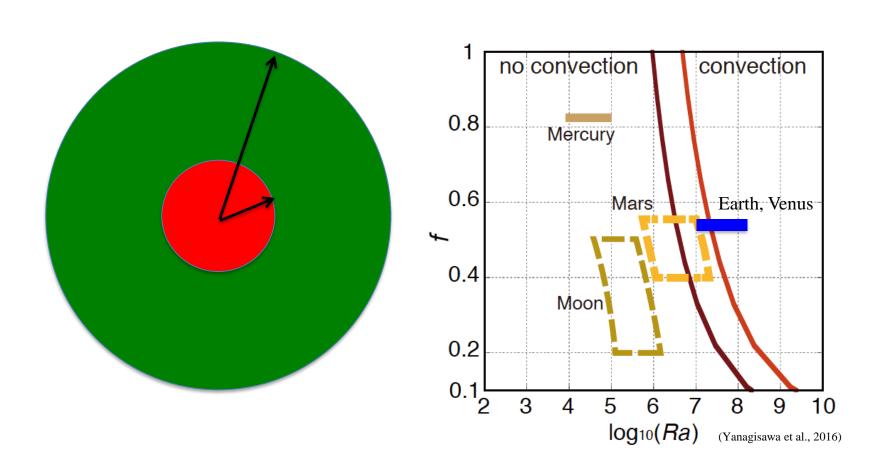
(f) c = 12, 3周期





## 力学系(1);マントル対流

臨界レイリー数:内部熱源なし、粘性率の温度依存性



# レイリー数

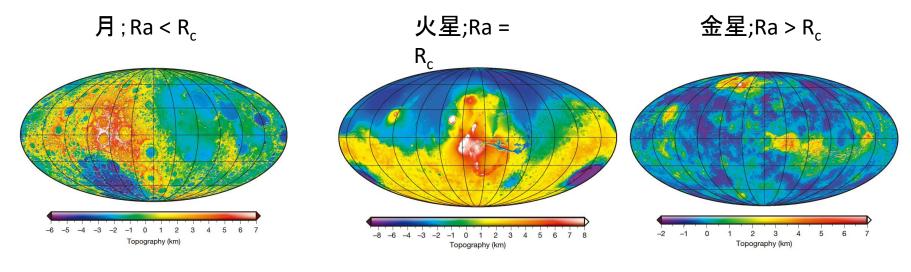
対流の強さの指標?→X マントルにプルームが幾つ入るか

$$Ra = (d/d_p)^3, \qquad d_p = (hk/Drg)^{1/3}$$

プルームサイズ 
$$\approx 10d_p$$

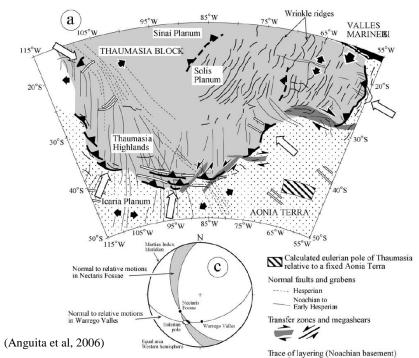
	水	マグマ	マントル岩石
$10 d_p$	1 mm	1 cm	100 km

対流が起こる条件:  $d > 10d_p \rightarrow \text{Ra} > R_c = 1000$ 

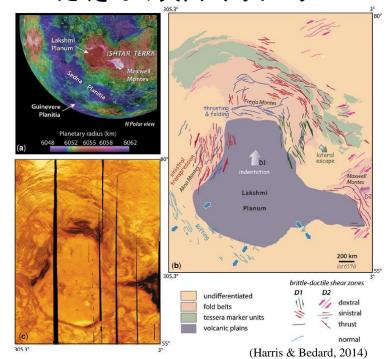


(Wieczorek, 2015)

#### タルシス火山+テクトニクス?

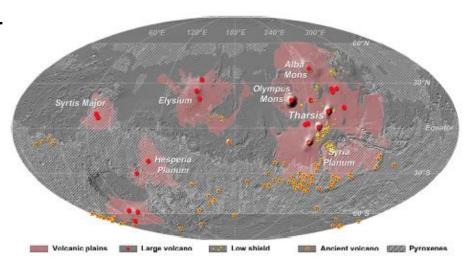


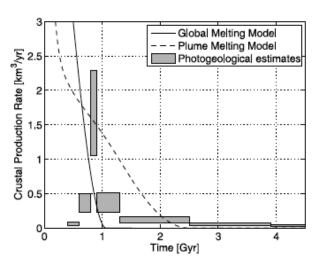
#### たくさんの火山+テクトニクス



### 本当に、めでたしめでたし?

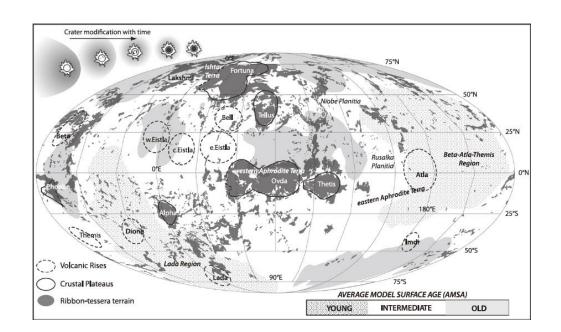
火星





(Grott et al., 2013)

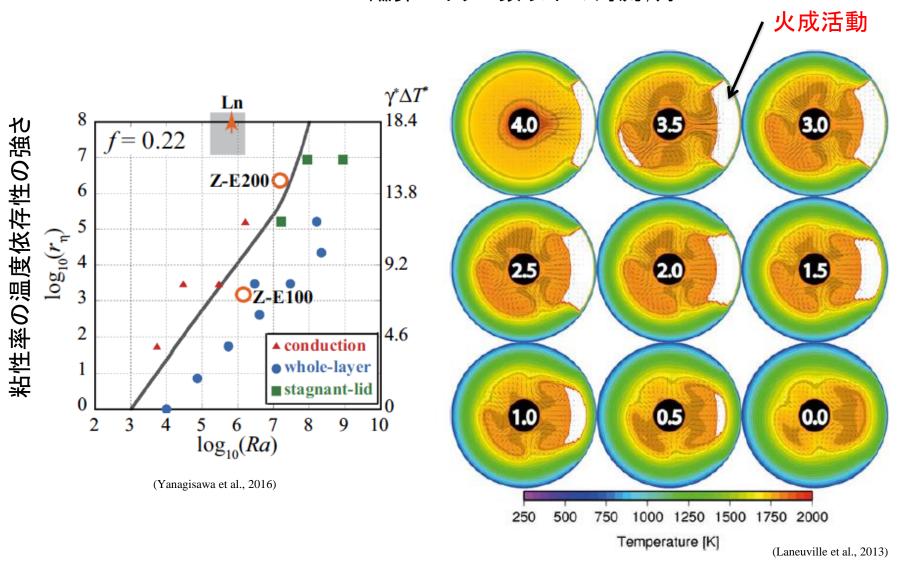
金星



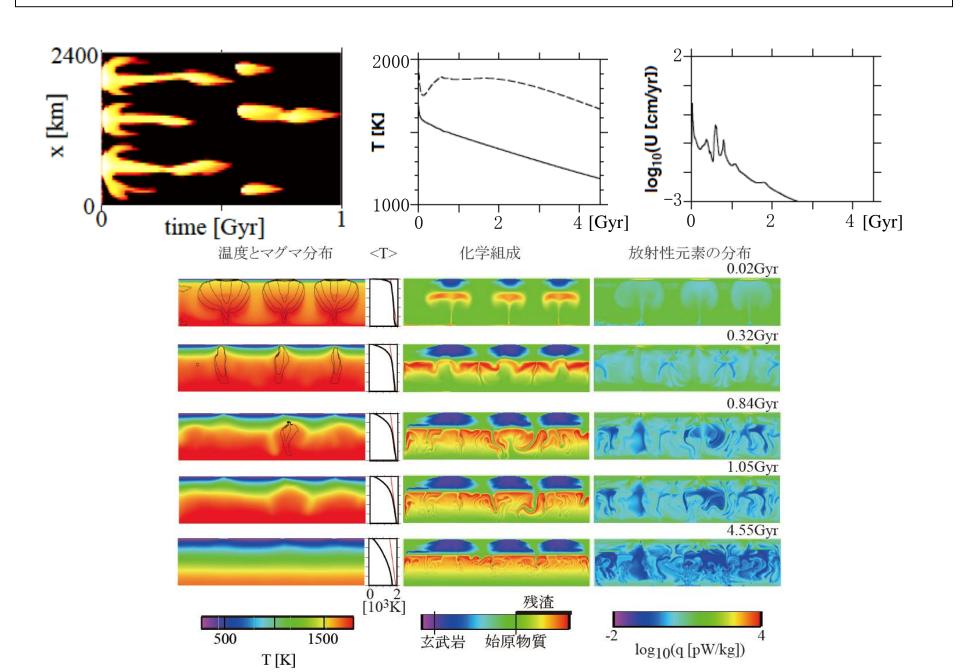
(Bjonnes et al., 2012)

#### 放射性元素による内部加熱とマントル対流

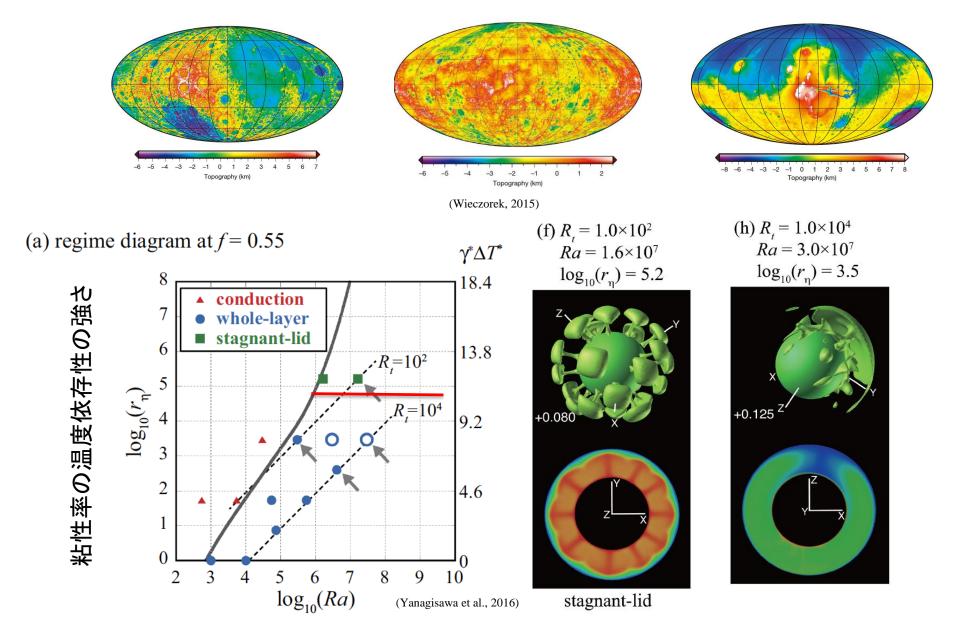
臨界レイリー数以下の対流;月



#### 火成活動による放射性元素の地殻への濃集;月のモデルの失敗作

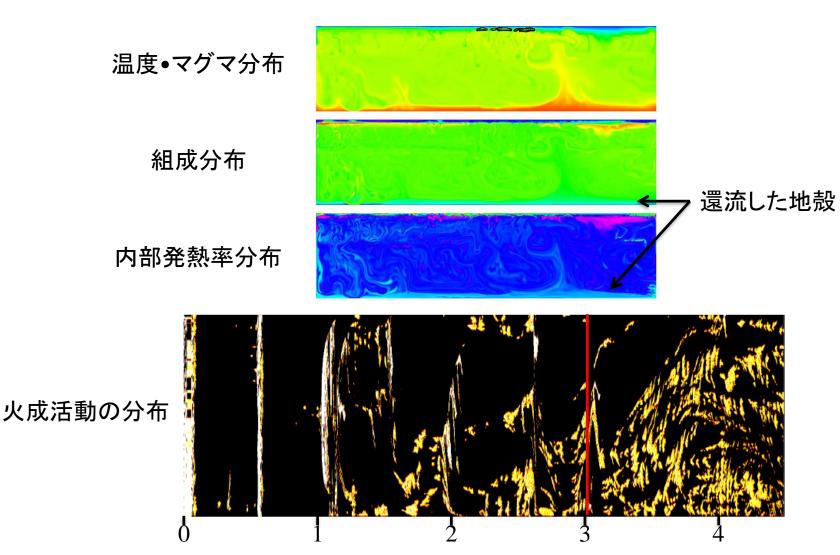


# スタグナント・リッドレジーム



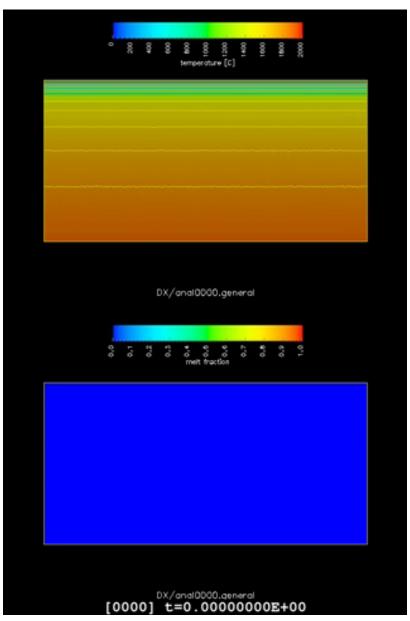
#### 中型惑星の長寿命の活動:地殻のマントルへの還流が鍵

#### 金星のモデル



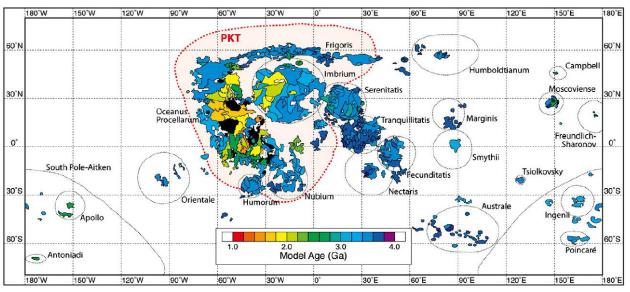
Time [Gyr]

# 力学系(2);火成活動

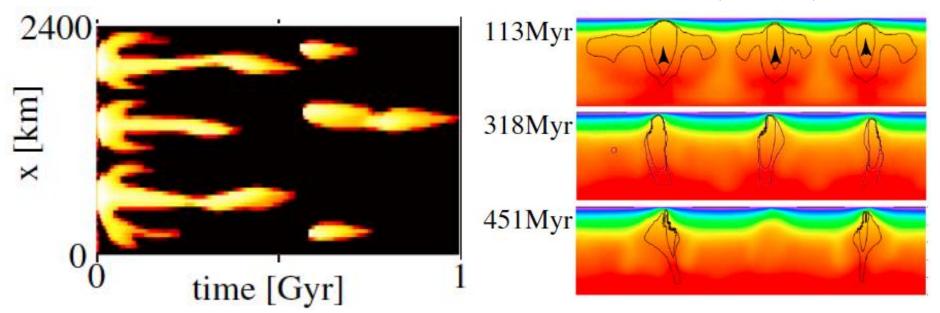


(Kameyama, 提供)

# 月の例



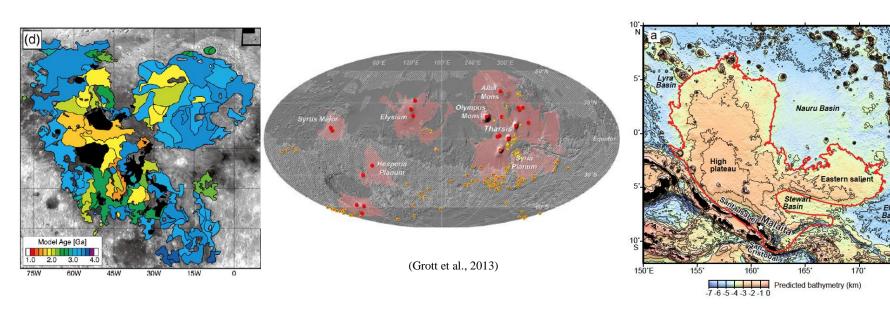
(Morota et al., 2011)



月

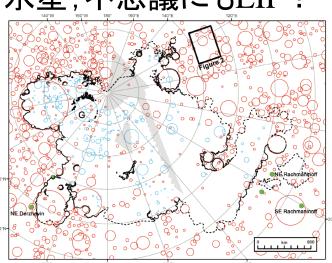
#### 火星(LIP)?;敷居值

#### 地球(LIP)



(Morota et al., 2011)

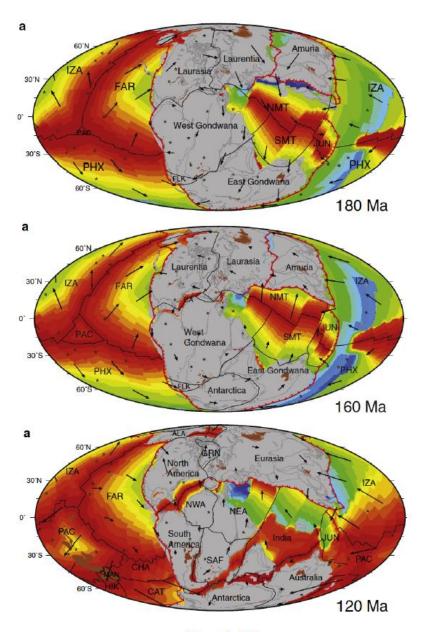
水星;不思議にもLIP?

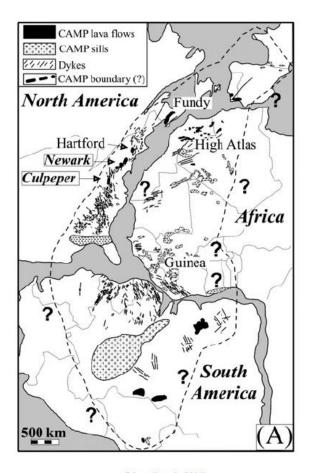


(Smith and Sandwell, 1997)

(Head et al., 2011)

# 地球の大規模な火成活動

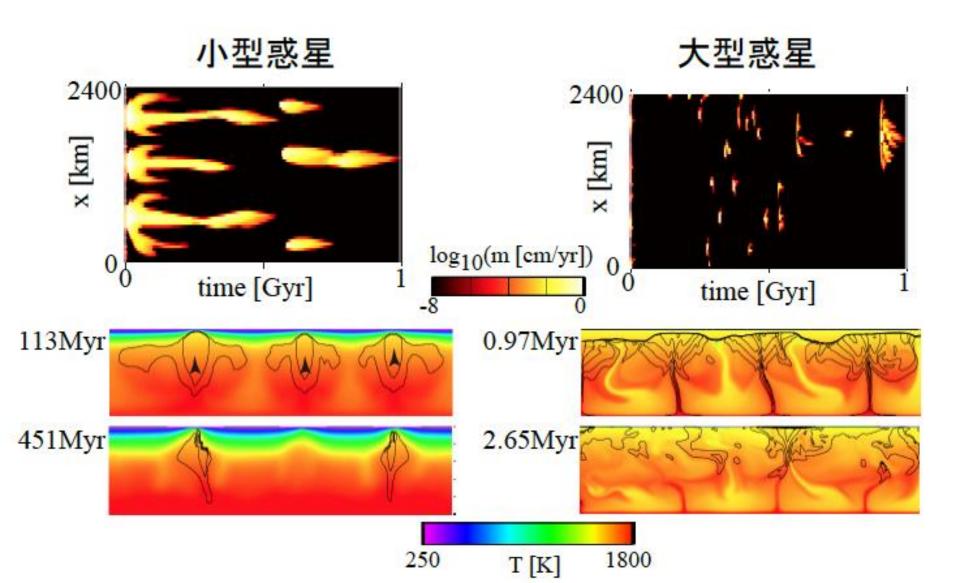


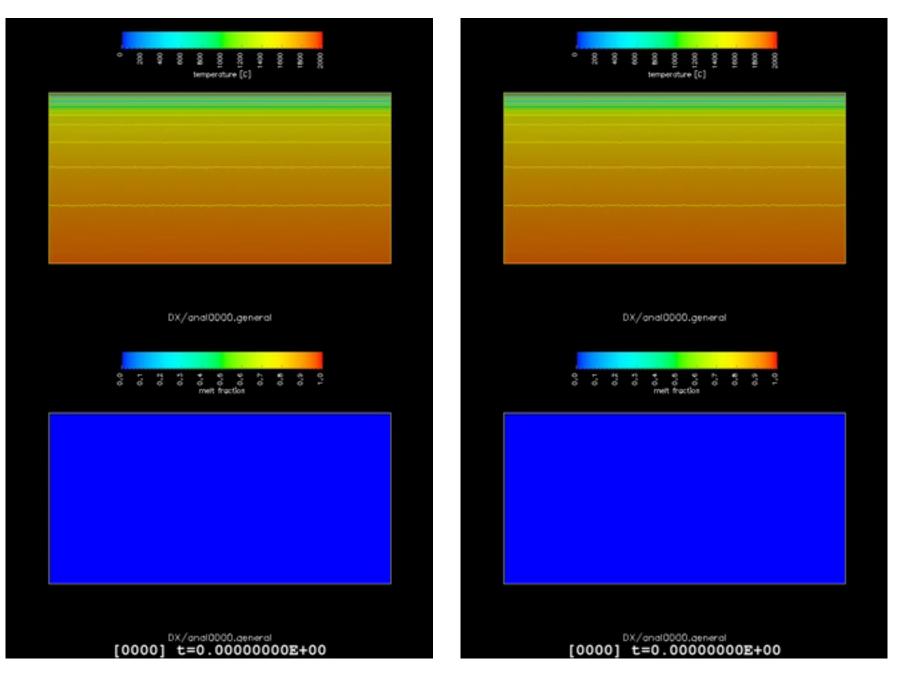


(Marzoli et al., 2011)

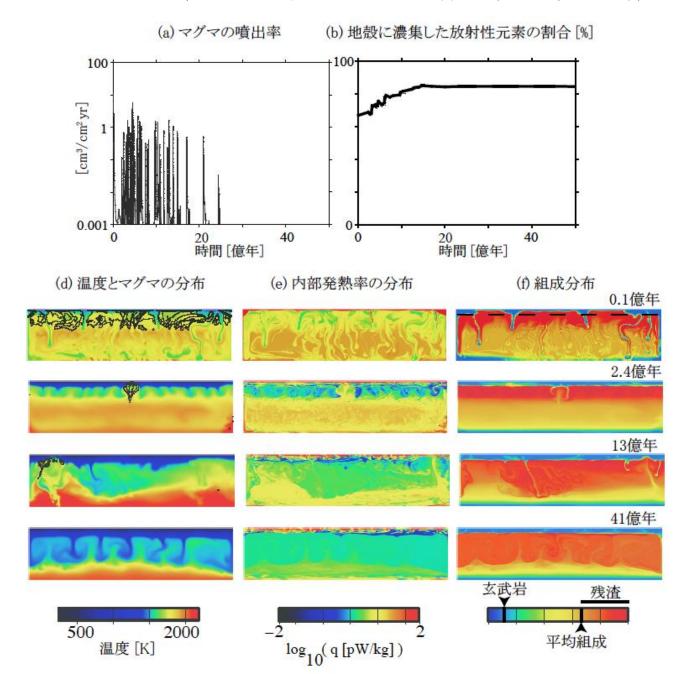
(Seton et al., 2011)

# 火成活動と惑星サイズ(1) 火成活動・マントル湧昇流フィードバック

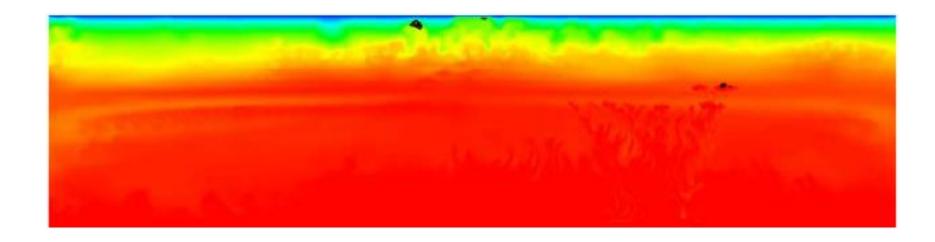




#### 火星のマントル進化モデル; MMUフィードバック+放射性元素の地殻への濃集

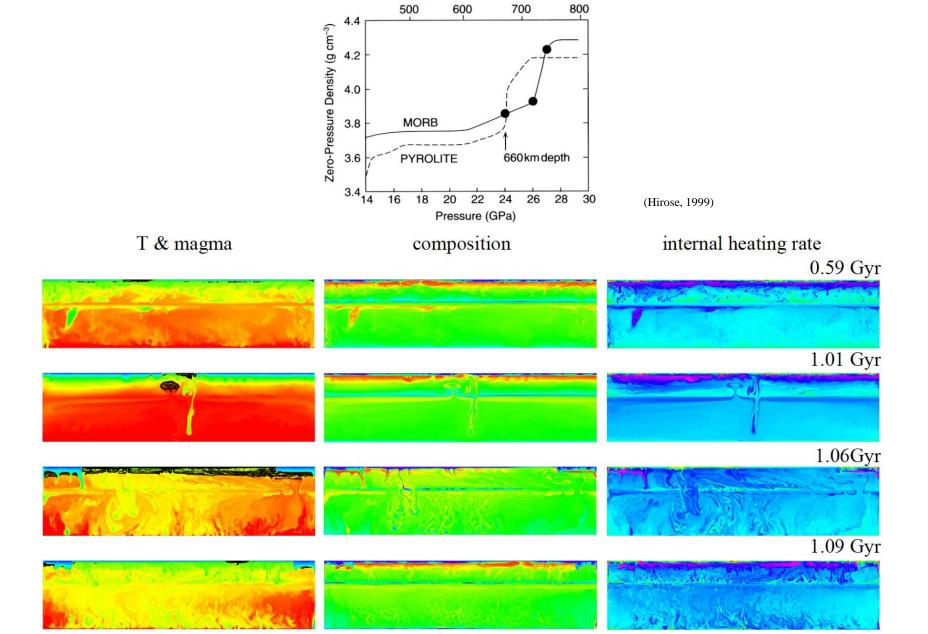


# 火成活動と惑星サイズ(2) 金星と地球のバースト

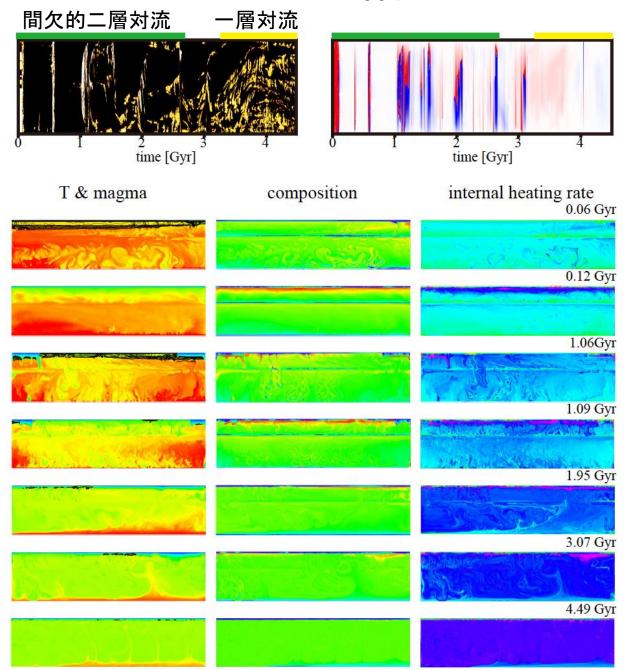


# バーストと地殻のリサイクリング

Depth (km)



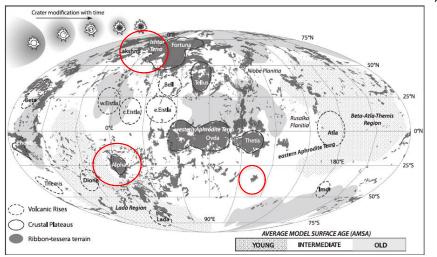
# 金星の2段階進化



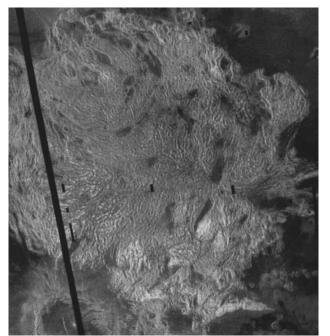
### テセラテレン 火山平原

7億

(年前)

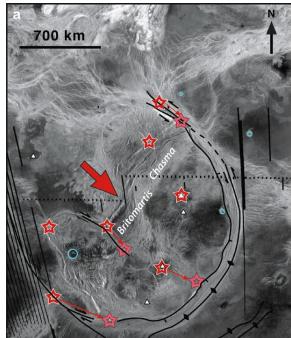


(Bjonnes et al., 2012)

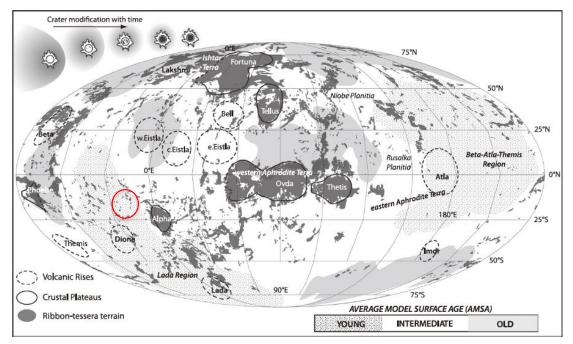


sinistral thrust tessera marker units normal / graben

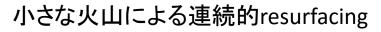
(Harris & Bedard., 2014)



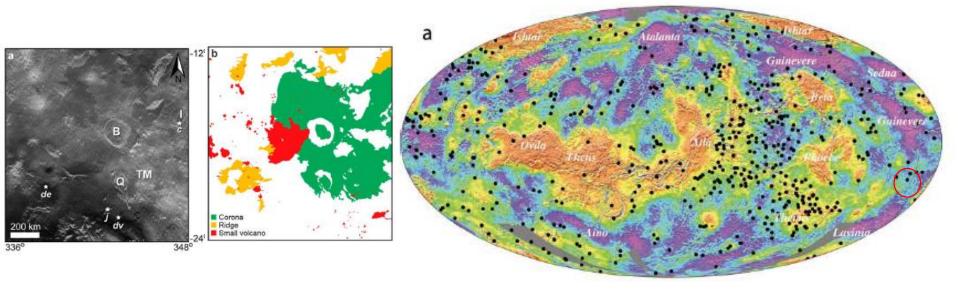
(Bindschadler et al., 1992)



(Bjonnes et al., 2012)

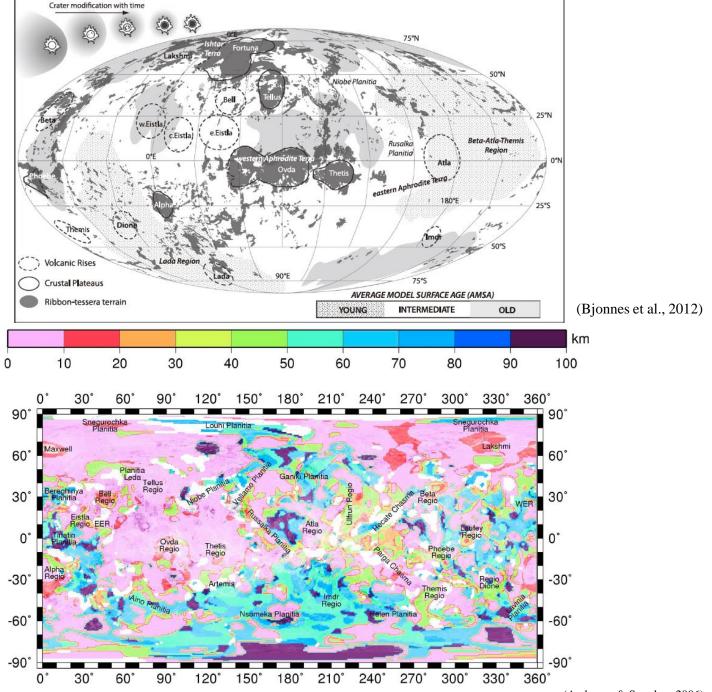


#### コロナの分布

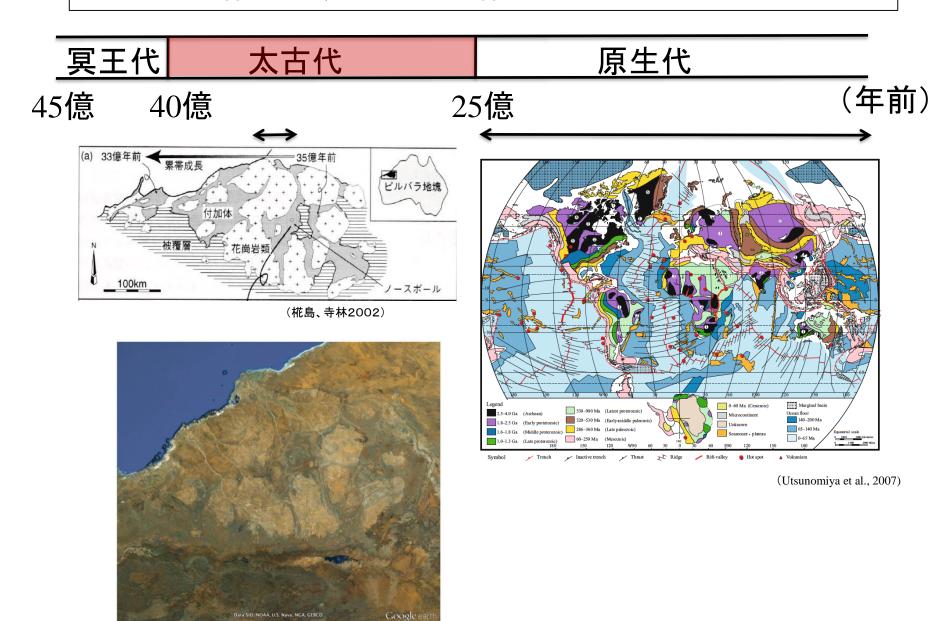


(Grindrod et al., 2010)

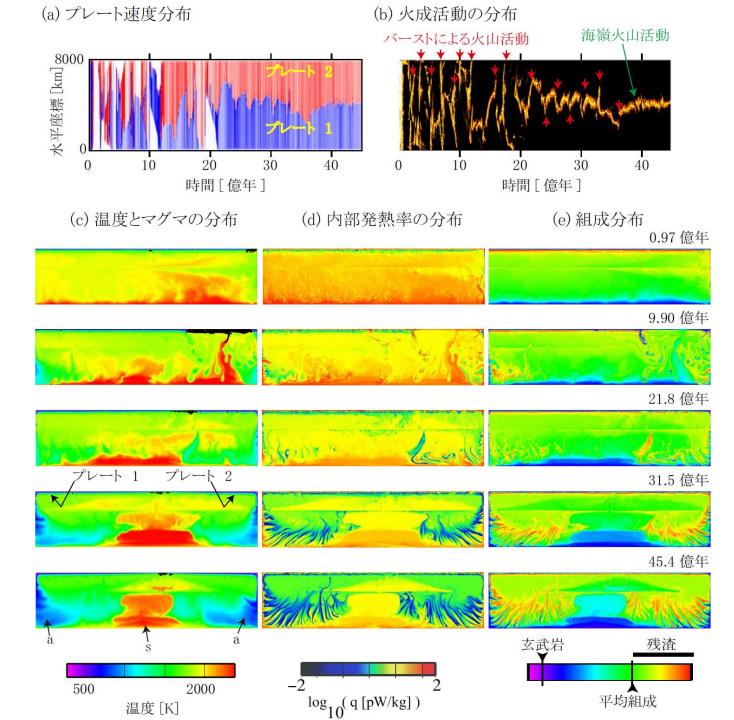
(Johnson & Richards., 2003)



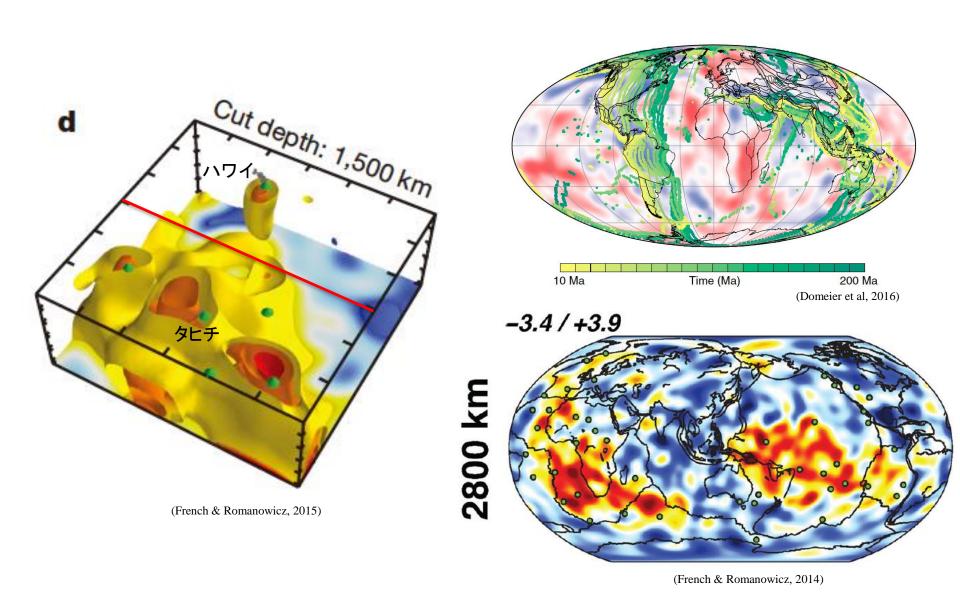
#### 地球の2段階進化;金星の2段階進化+プレートテクトニクス

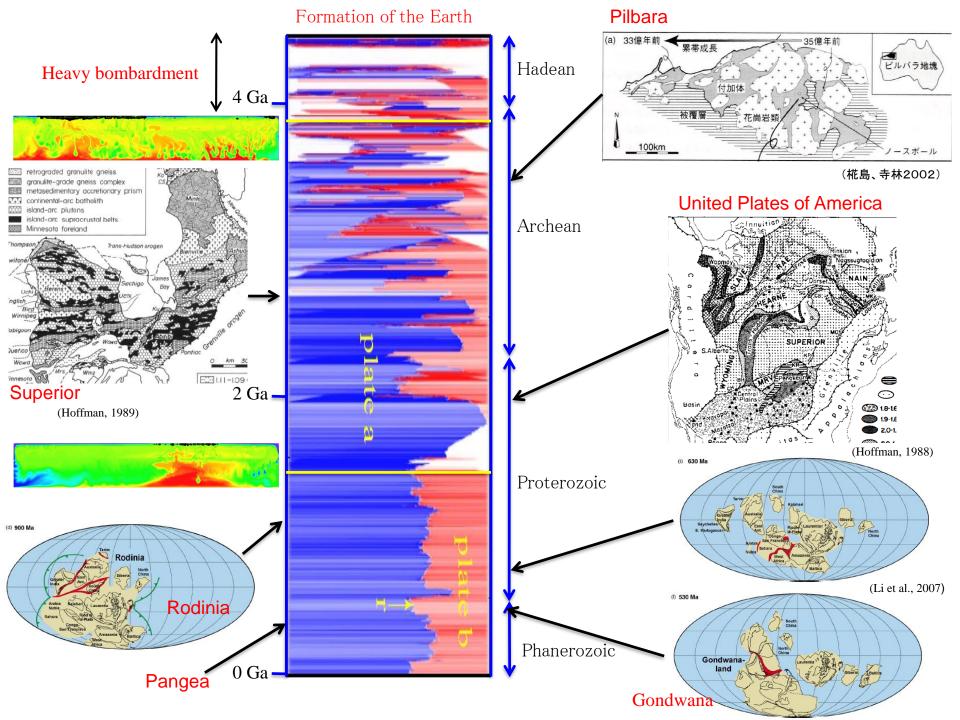


Google earth



#### 沈み込んだ地殻の掃き溜め + 沈み込んだスラブの墓場





第一段階; 冥王代(> 4 Ga)

バースト(プルーム)が支配する時代

→マントルは均質化

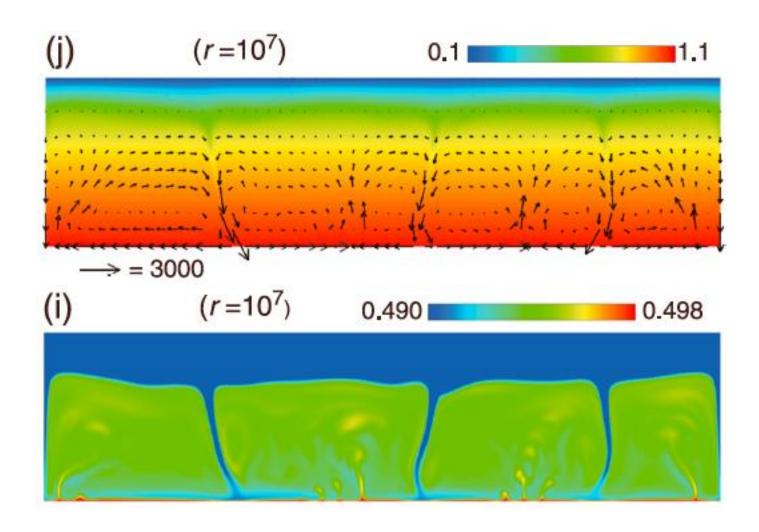
第二段階;原生代以降(< 2.5 Ga)

プレートが支配する時代

→マントルは不均質化

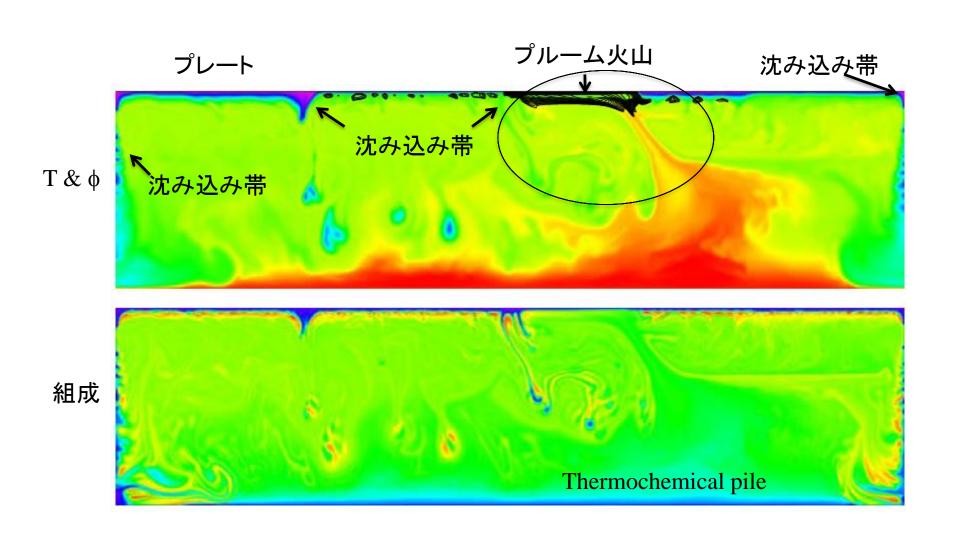
太古代; 二つのレジームの間の遷移的な時代?

# 大型惑星;断熱圧縮の効果による弱い対流 厚いリソスフェアと弱い高温プルーム

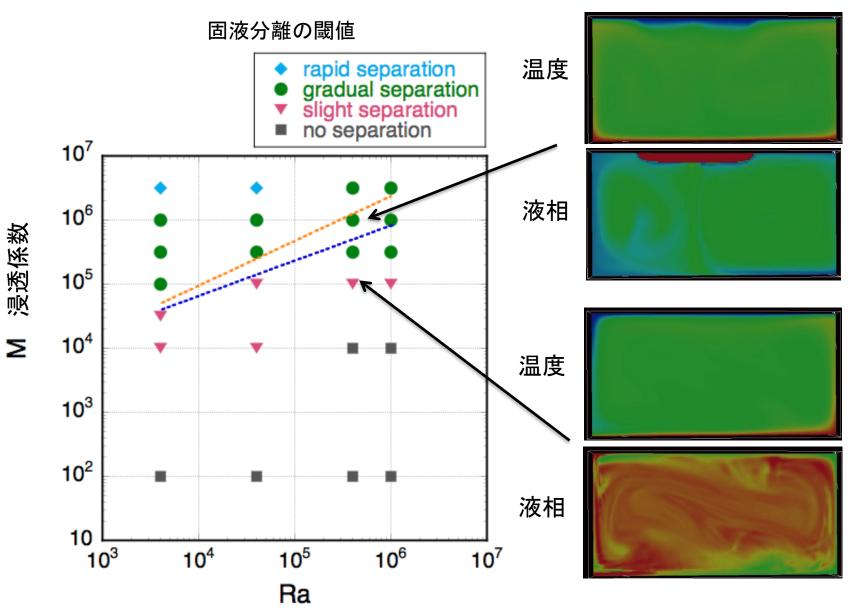


#### 今後の課題(1):モデルの3次元化

バースト+火成活動・マントル湧昇流フィードバックは起こる?

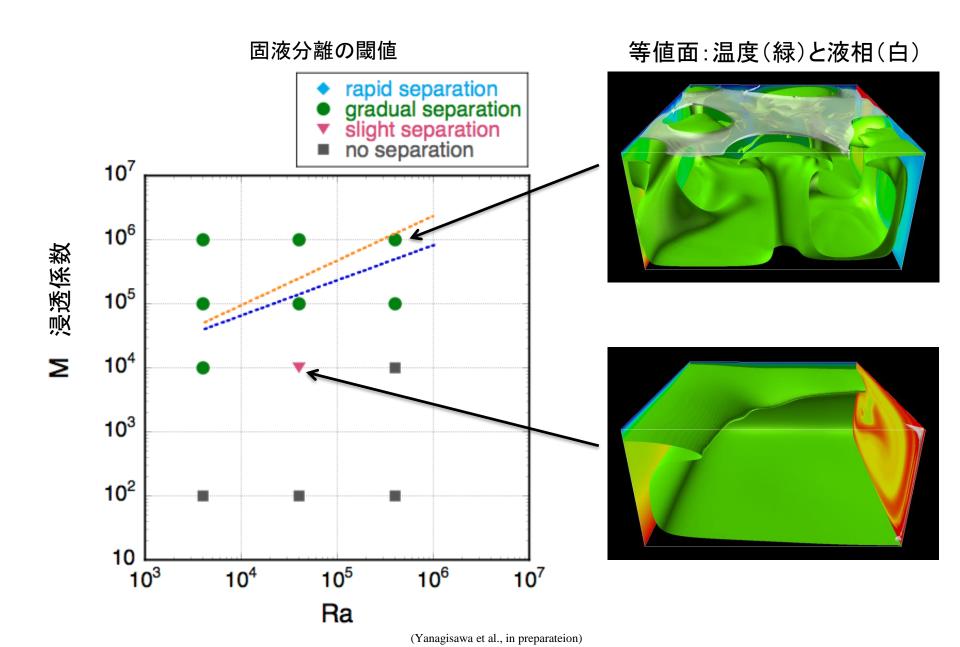


#### 対流しつつある固相中の液相の移動(2次元)



(Yanagisawa et al., in preparateion)

#### 対流しつつある固相中の液相の移動(3次元);より分離が進む



### 今後の課題(2);惑星形成過程とマントル進化

#### マグマオーシャンによる結晶分化⇒マントルは化学成層⇒惑星の運命?

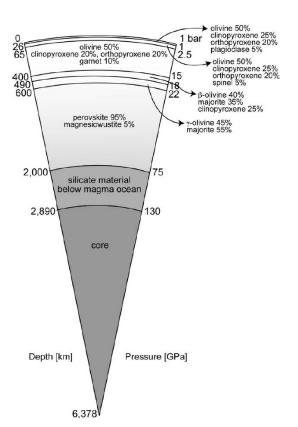
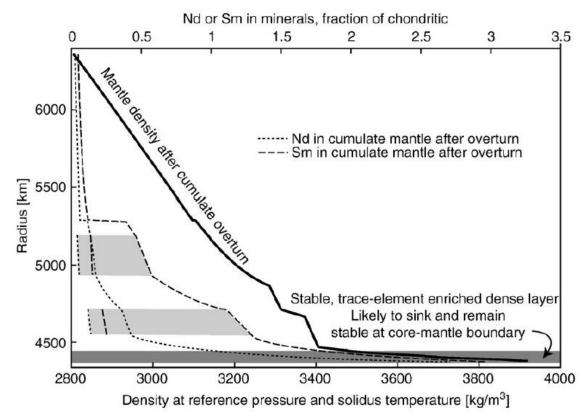
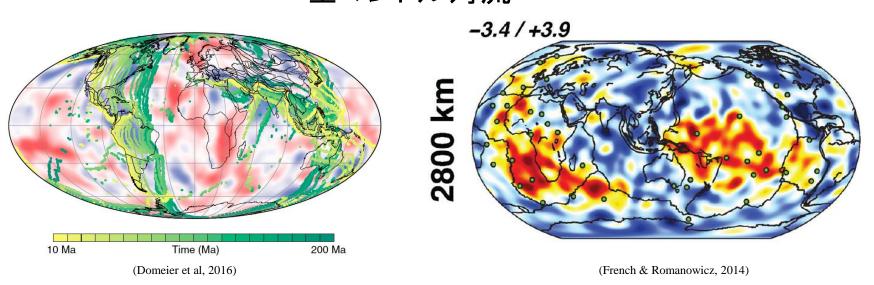


Fig. 1. Mineral assemblages assumed to solidify from a 2000-km deep terrestrial magma ocean. For other models, see Table 2.

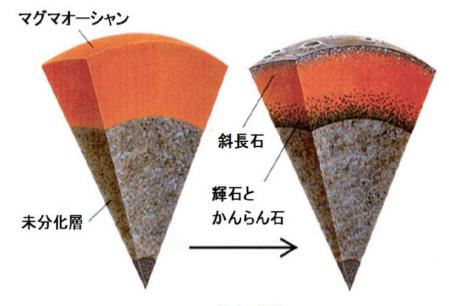


# そうは見えない

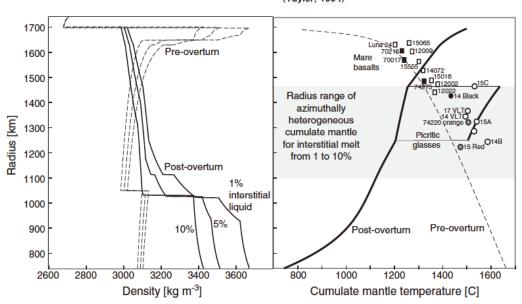
#### 全マントル対流

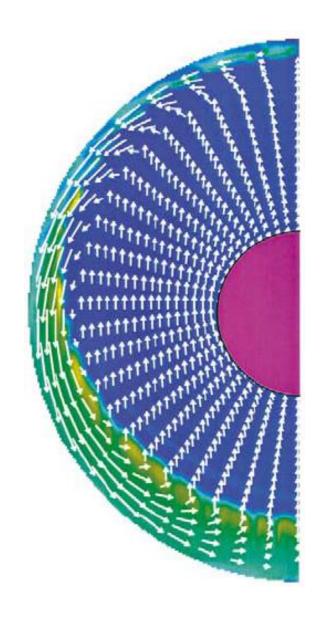


#### マントルオーバーターンモデル



(Taylor, 1994)



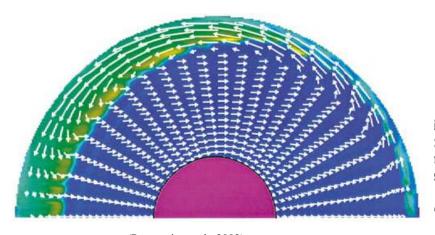


(Elkins-Tanton et al., 2011)

(Parmentier et al., 2002)

#### 地球のマグマオーシャンは結晶分化した?

#### 月のマントルオーバーターンモデル;2派



A dynamic model for mare basalt petrogenesis

igh abundances of incompatible elements, high Rb/Sr ratios, high-FeO and Tientents, and low Mg, Cr and Ni abundances. The REE pattern would have nown a strong negative Eu anomaly (and low Sr) reflecting the earlier extender paration of plagioclase.

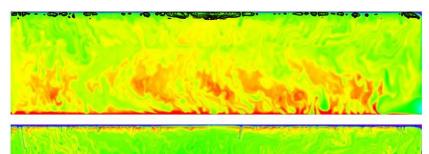
During the later stages of the 4.6-4.4 b.y. differentiation, the residual liquidially would have formed a thin global shell between the crust and the

(Parmentier et al., 2002)

(Ringwood & Kesson., 1976)

#### 火成活動・マントル湧昇流フィードバックと強い対流撹拌

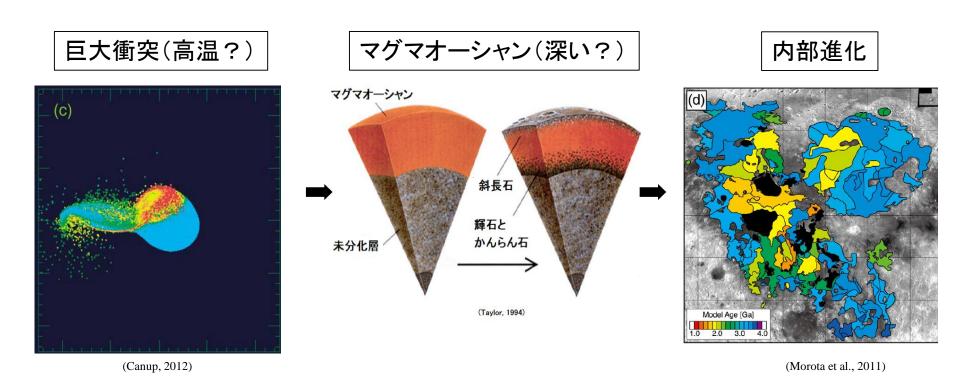
温度とマグマ



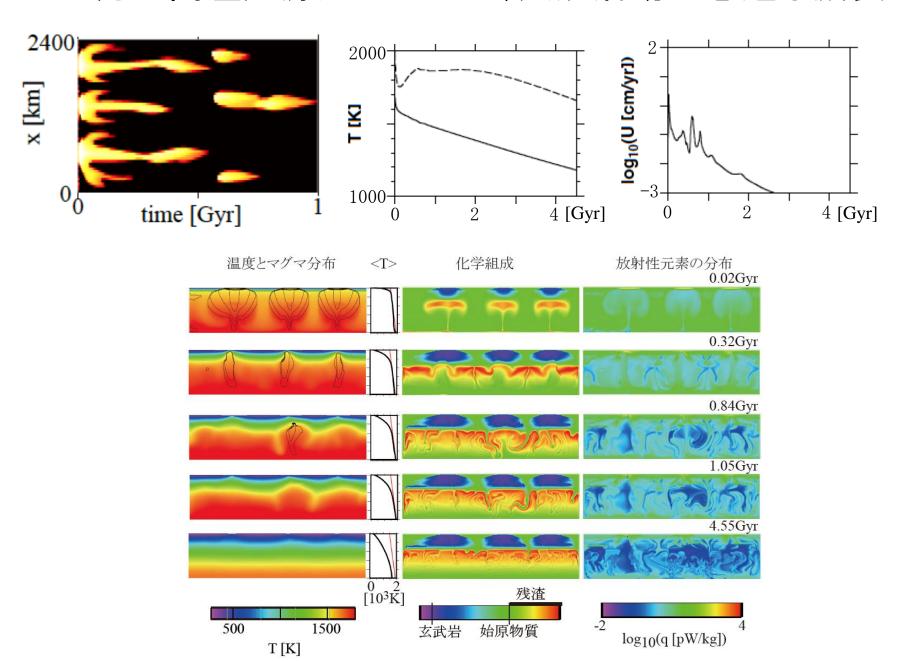
組成

## 再び月(地球との顔つきの違いにも関わらず)

#### 形成から現在まで全て観測から制約されている唯一の天体



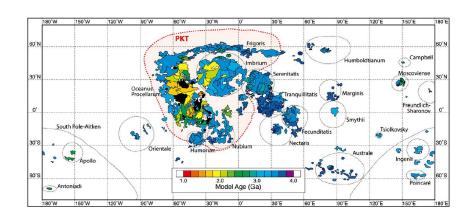
## 月の高温起源進化モデル;火成活動の急速な減衰



#### +

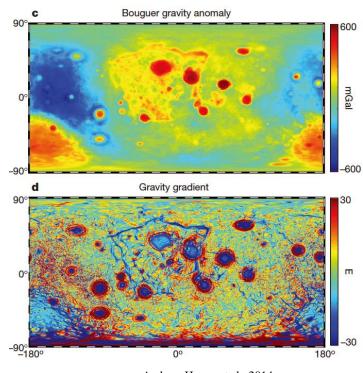
#### 大幅なマントルの冷却 → 大きな熱収縮

#### 火成活動史 = 局在化+長期間持続



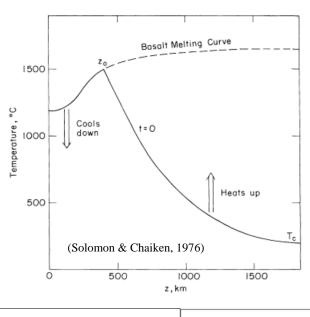
(Morota et al., 2011)

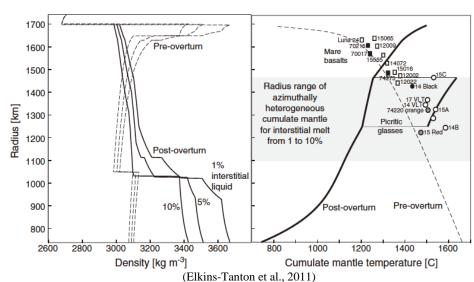
#### 初期の熱膨張 ↓ その後のわずかな熱収縮

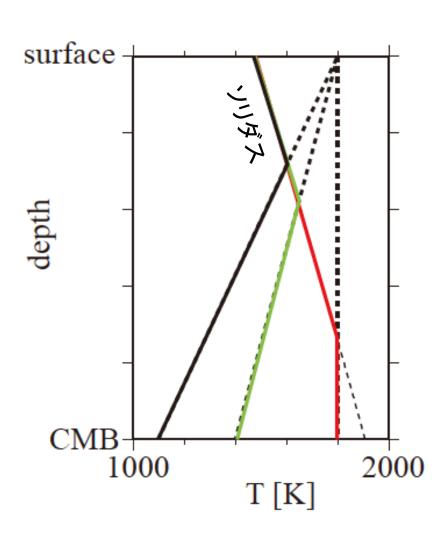


Andrew-Hanna et al., 2014

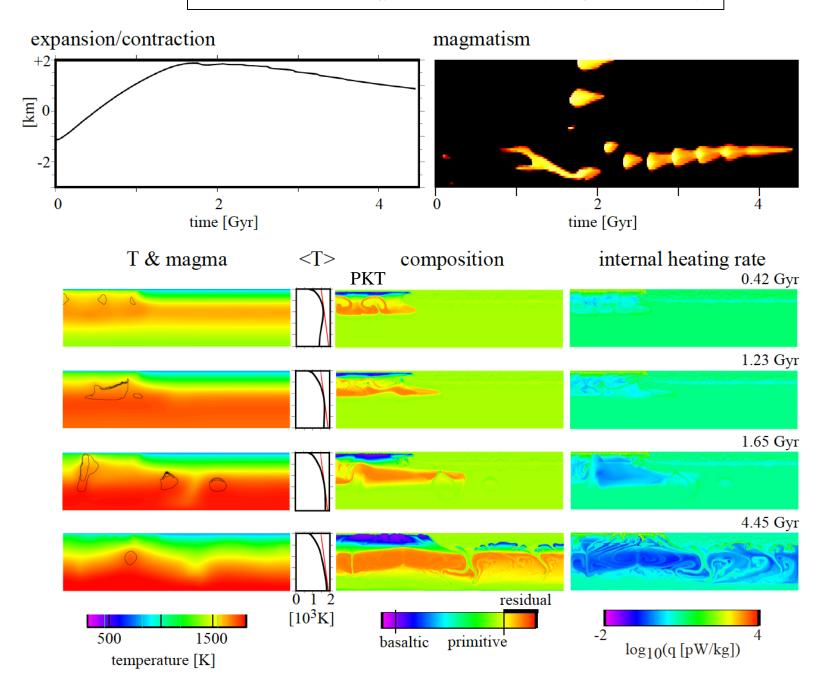
# 放射性元素をマントルに長くとどめる算段 月の低温起源?



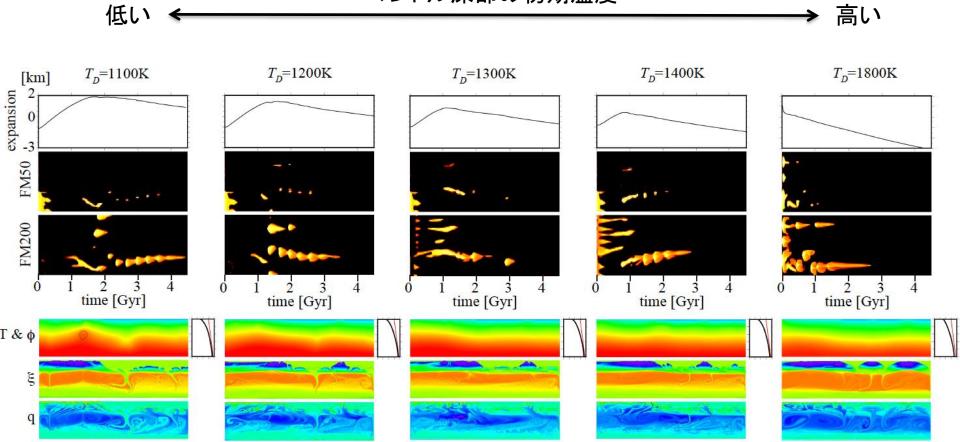




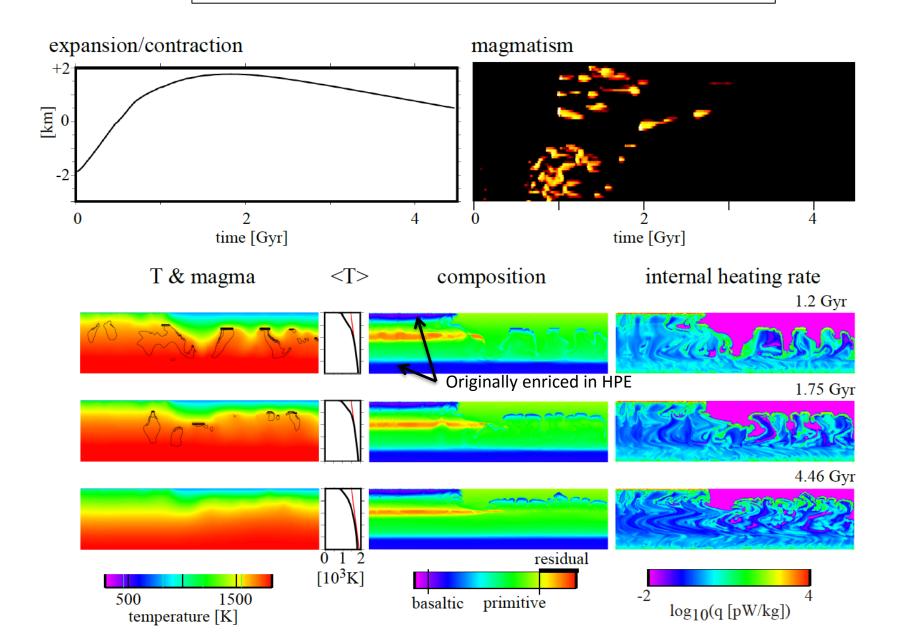
#### 局所的でより持続的な火成活動と初期の膨張



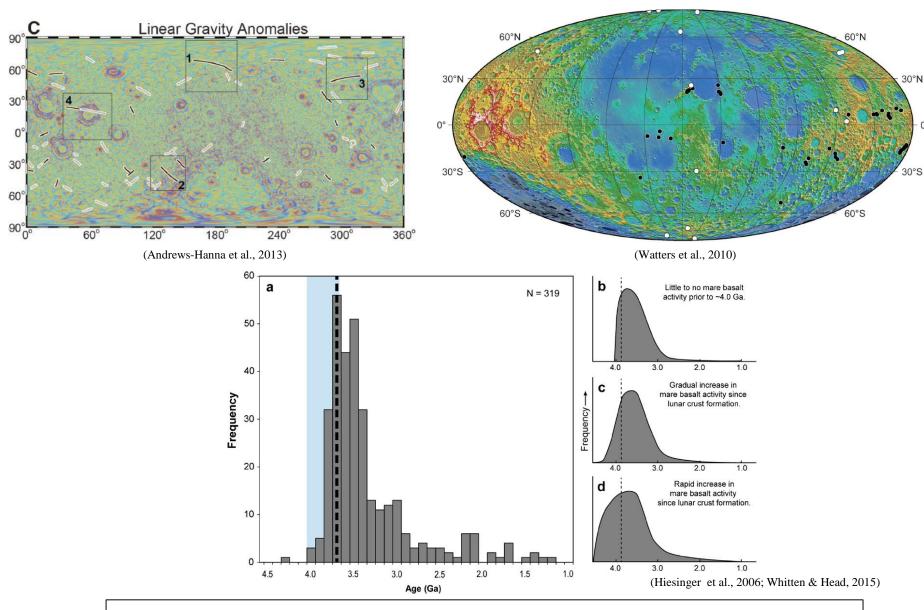
#### マントル深部の初期温度



#### 初期マントルを化学成層させた場合



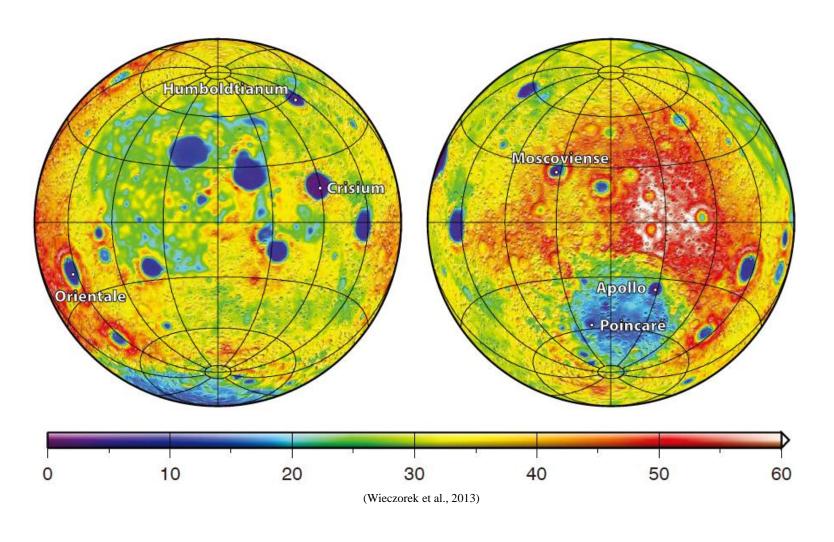
#### 熱史と火成活動史



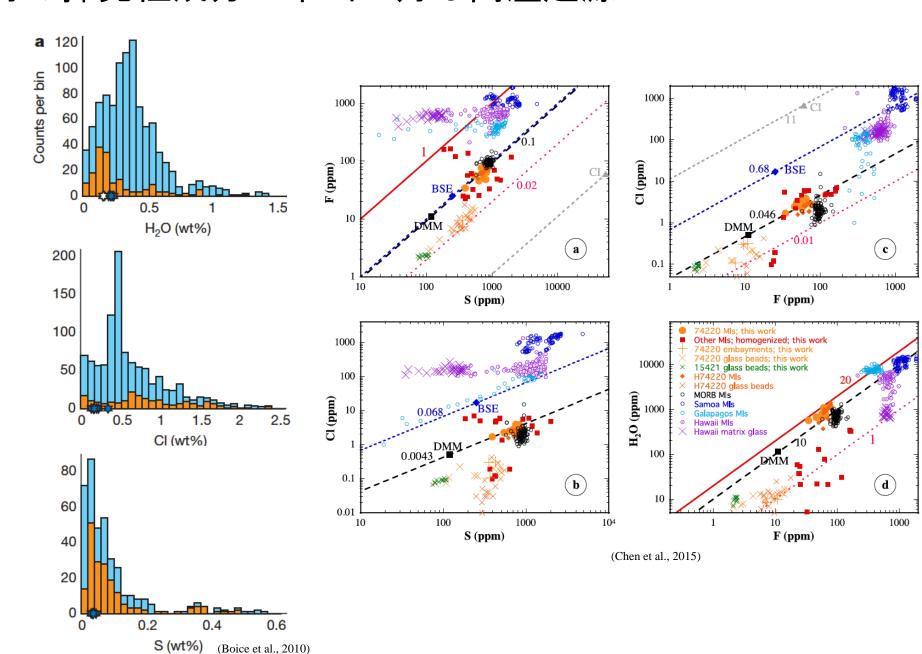
形成直後の月はそれほど熱くなかった?

## 月の初期温度の見積り

地殻の厚さ34-43 km→マグマオーシャンの深さ200-300km

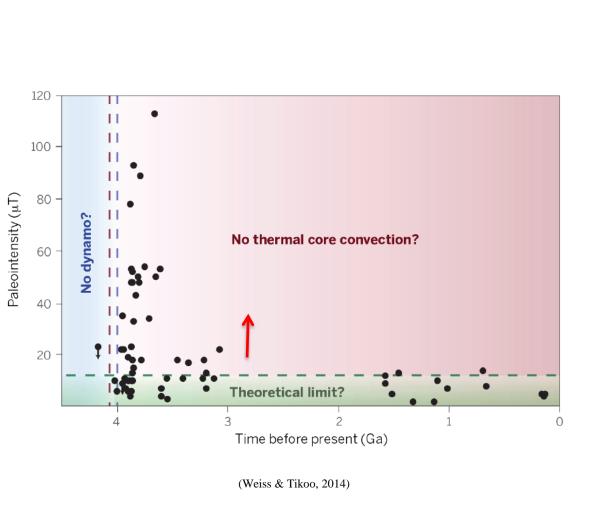


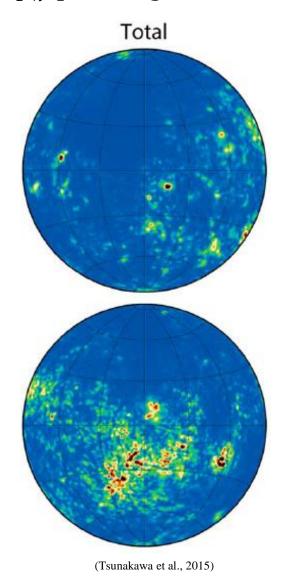
## 月の揮発性成分➡本当に月は高温起源?or Late Veneer?



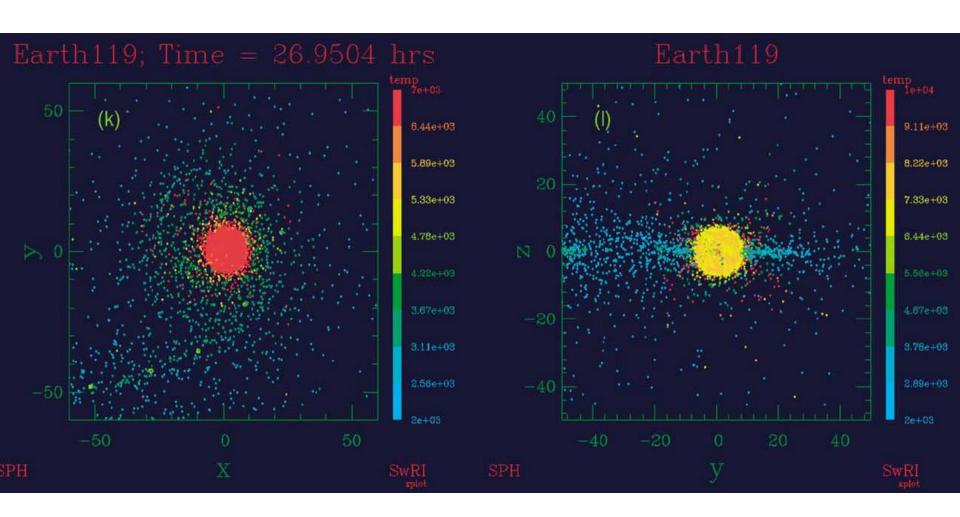
## 低温起源だとすると(1)

## 月の磁場;ダイナモの駆動源は熱対流ではない?

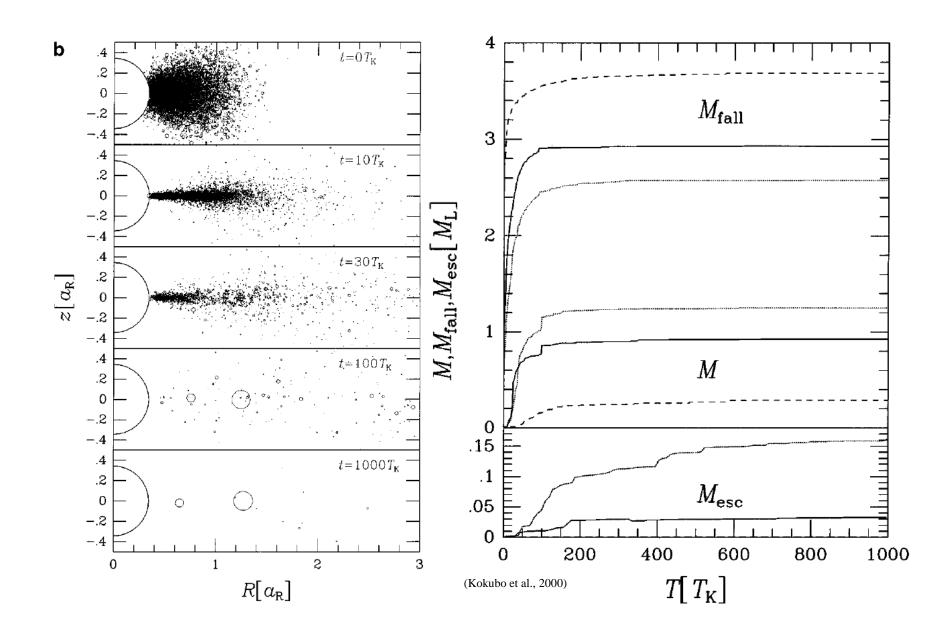




## 低温起源だとすると;巨大衝突説?



#### 月の形成時間700時間?→冷えている暇がない→月は高温起源



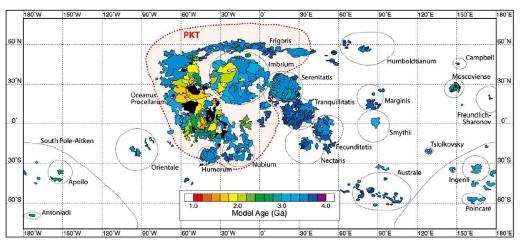
# 月の形成・マグマオーシャン・進化 の一貫したモデルが必要

他の惑星でも

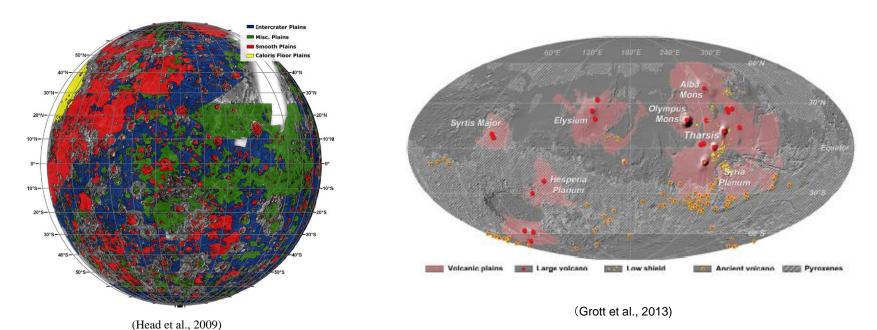
初期地球の化学成層 月•水星•火星のDichotomy

Runway growth vs. Oligarchic growth と火星の磁場

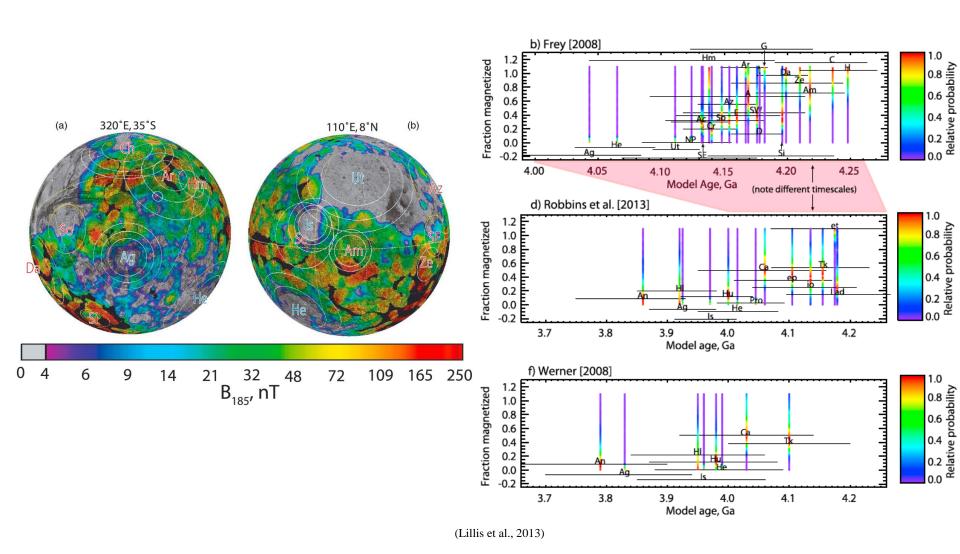
## 惑星形成過程と内部進化のしがらみの例; Dichotomy



(Morota et al., 2011)

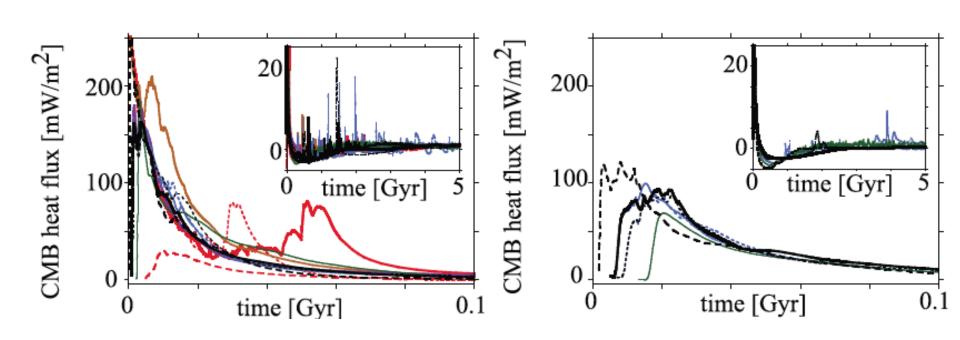


## 火星の磁場と初期進化?

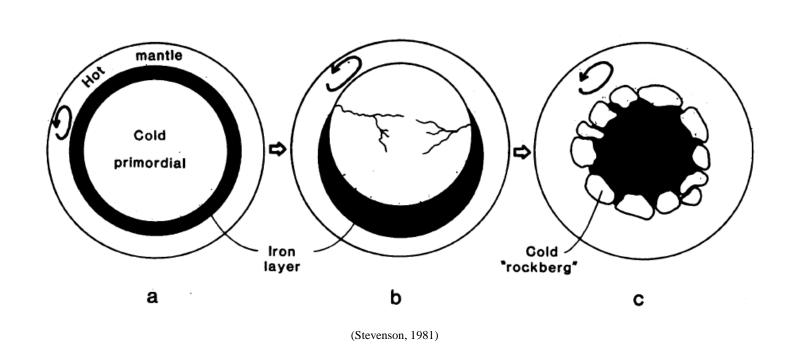


## 火星の高温起源モデル

コア・マントル境界の熱流量;5億年は持たない
↓
火星の形成過程・マグマオーシャンの問題?

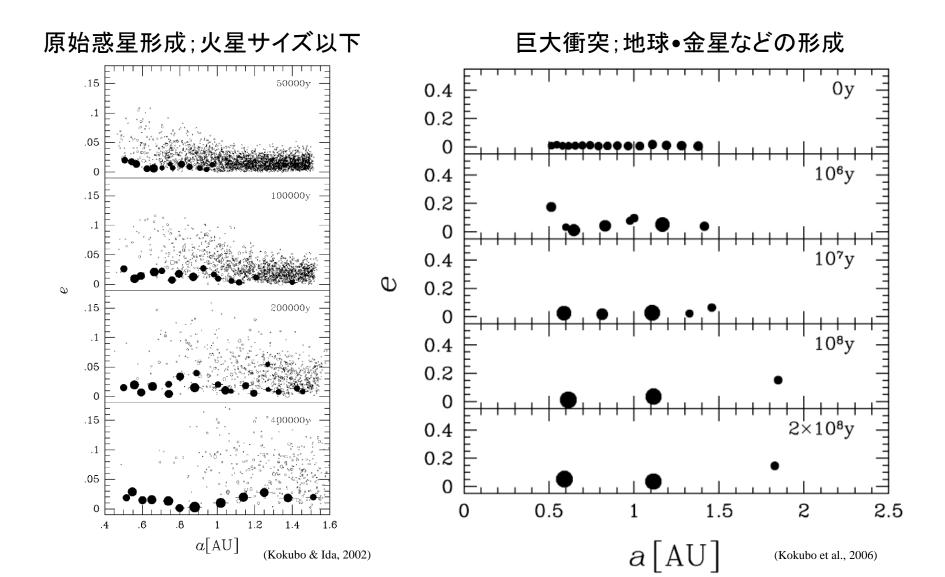


# Runaway growthで形成された惑星の初期進化問題 例:火星



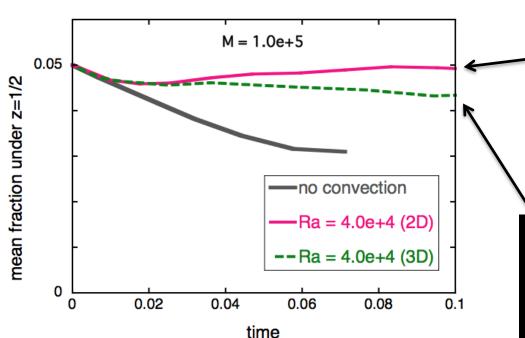
地球・金星では"Cold primortial"は巨大衝突でなんとでもなる。

#### Runaway growth vs. Oligarchic growth

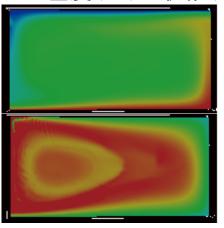


## 3次元は重要

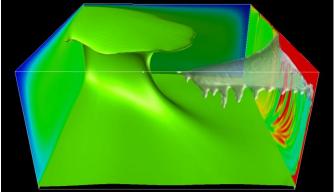
分離の様式や時間スケールに差がある (3次元のほうが液相が分離しやすい) <sub>2次元:温度(上)と液相(下)</sub>



系の下半分における液相の比率の時間変化 0.05からの減少は分離の進行を示す 固相対流のない場合(黒い線)との比較



3次元:温度(緑)と液相(白)



#### 固体マントル中のマグマの移動; 浸透流のモデル化

連続の式 
$$\nabla \cdot \left[ \int \mathbf{u} + (1 - j) \mathbf{U} \right] = 0$$

運動方程式 
$$-\nabla P + \underline{Ra} d\Gamma \mathbf{g} + \nabla \cdot \left[ h \left( \nabla \mathbf{U} + {}^t \nabla \mathbf{U} \right) \right] = \mathbf{0}$$

固液相対速度 
$$\mathbf{u} - \mathbf{U} = -\mathbf{M} \mathbf{j}^2 \mathbf{e}_z$$

液相の移動 
$$\frac{\partial j}{\partial t} + \nabla \cdot (j \mathbf{u}) = 0$$

+ エネルギー方程式

Ra; レイリー数、M;浸透係数

## 火成活動・マントル湧昇流フィードバックと初期進化



#### フィードバックあり

