

# 支笏湖GFDセミナー：マントル対流

小河正基

## 第一部：マントル・ダイナミクスの素過程

### 1成分1相系（熱対流）

スタグナント・リッドとリソスフェア

球殻熱対流の安定性：プルームとホットスポット火山

プレート・テクトニクス

断熱圧縮の効果：スーパー地球

### 1成分2相系（固相・固相）

ポスト・スピネル転移とフラッシング

### 1成分2相系（固相・液相）

火成活動・マントル湧昇流フィードバック（1）：原理

### 2成分2相系（固相・液相）

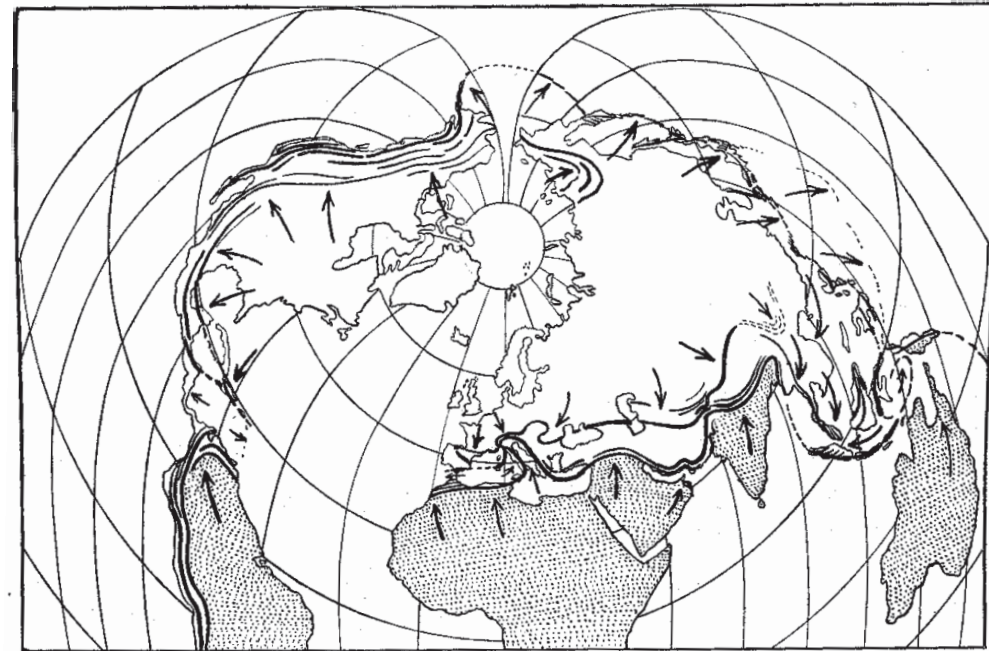
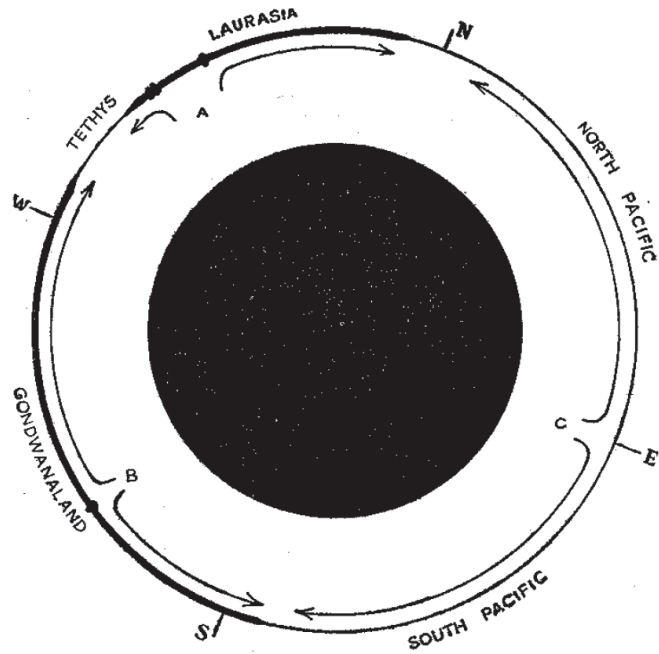
火成活動・マントル湧昇流フィードバック（2）：マントルの分化と攪拌

### 2成分3相系（固相2相・液相：下部マントルの効果）

玄武岩バリアとバースト

## 第二部：惑星内部進化各論

# 内部で発生した熱の解放メカニズムとしてのマントル対流



(Holms, 1931)

マントル対流とは、“軽い物は浮き重い物は沈む”、ただそれだけの現象。

熱を運ぶ義務はない。

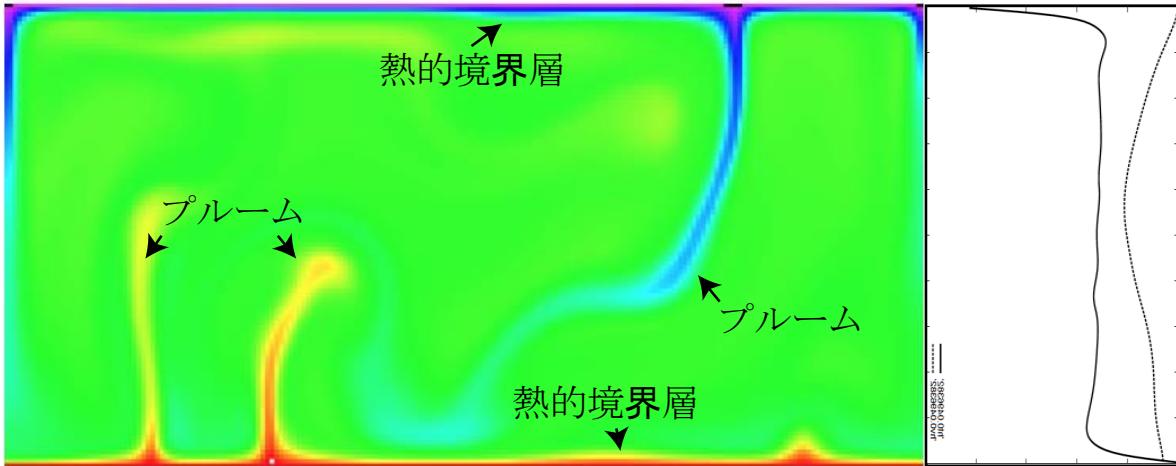
レイリー数とはスケーリング・ファクターである。対流の馬力を表す量ではない

# マントル対流のスケーリング

温度分布

水平平均温度・速度

マントル熱対流と等価な水の熱対流



$$\frac{3000 \text{ km}}{100 \text{ km}} = \frac{d}{1 \text{ mm}} \rightarrow d = 3 \text{ cm}$$

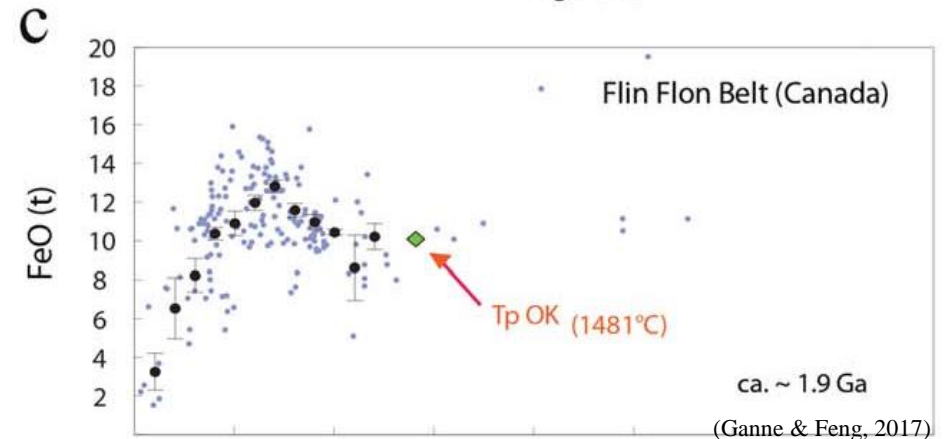
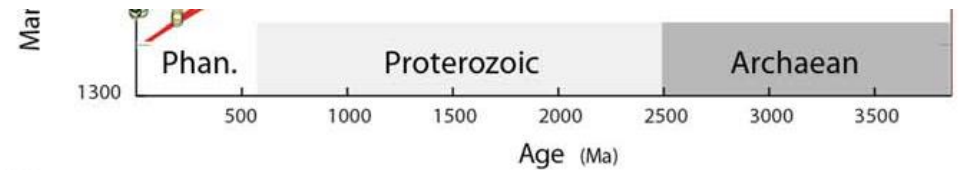
$$4.5 \text{ Gyr} / (d_{\text{Earth}}^2 / \kappa_{\text{mantle}}) = t / (0.03^2 / \kappa_{\text{water}}) \rightarrow t = 100 \text{ sec}$$

地球の進化 = 熱史? or 対流の時間発展?

$$Ra = (d/d_p)^3$$

10  $d_p$  の値

| マントル   | マグマ  | 水    |
|--------|------|------|
| 100 km | 1 cm | 1 mm |



# 地球はまちがいなく進化した→どうやって？

相轉移

Hadean

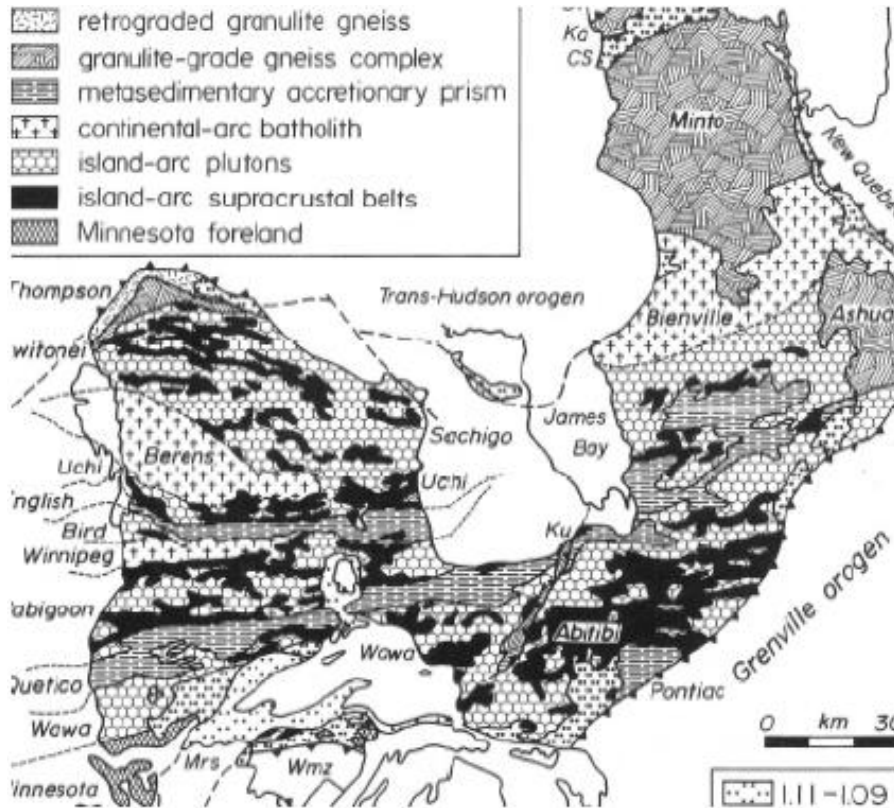
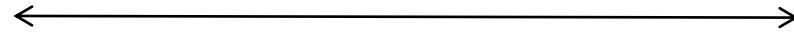
Archean

Proterozoic

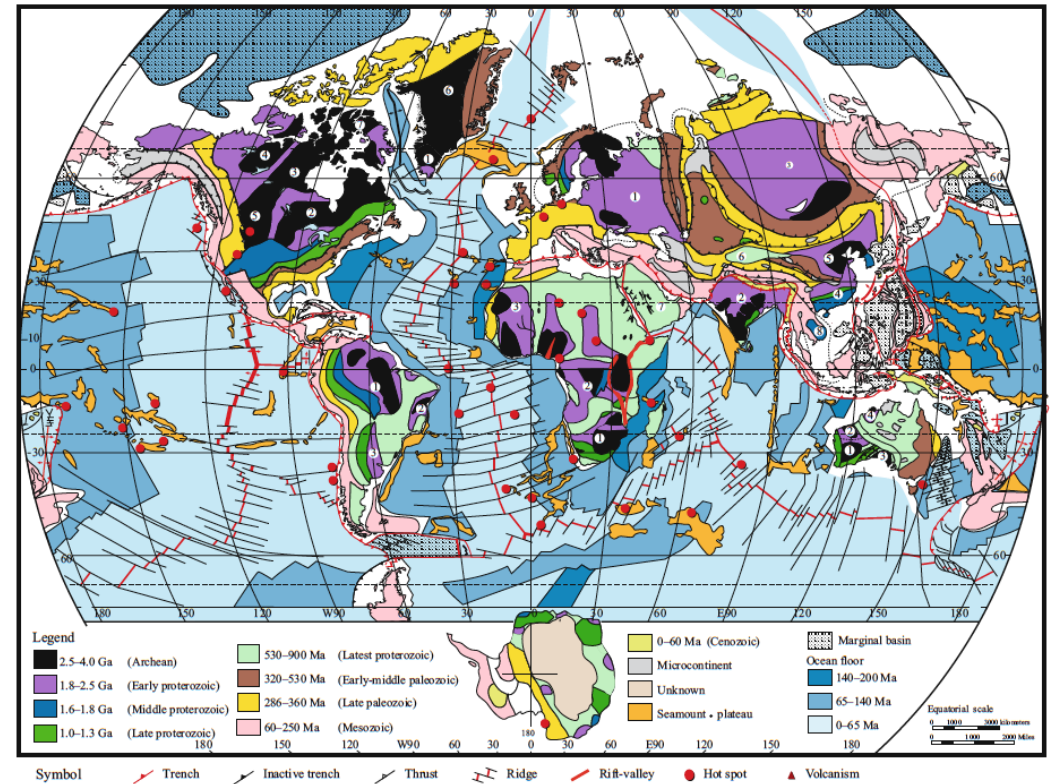
4.5 Ga

4 Ga

2.5 Ga



(Hoffman, 1989)



(Utsunomiya et al., 2007)



# マグマ・オーシャンの痕跡がない

月



1成分1相系（熱対流）

スタグナント・リッドとリソスフェア

球殻熱対流の安定性：ブルームとホットスポット火山  
プレート・テクトニクス

断熱圧縮の効果：スーパー地球

1成分2相系（固相・固相）

ポスト・スピネル転移とフラッシング

1成分2相系（固相・液相）

火成活動・マントル湧昇流フィードバック（1）：原理

2成分2相系（固相・液相）

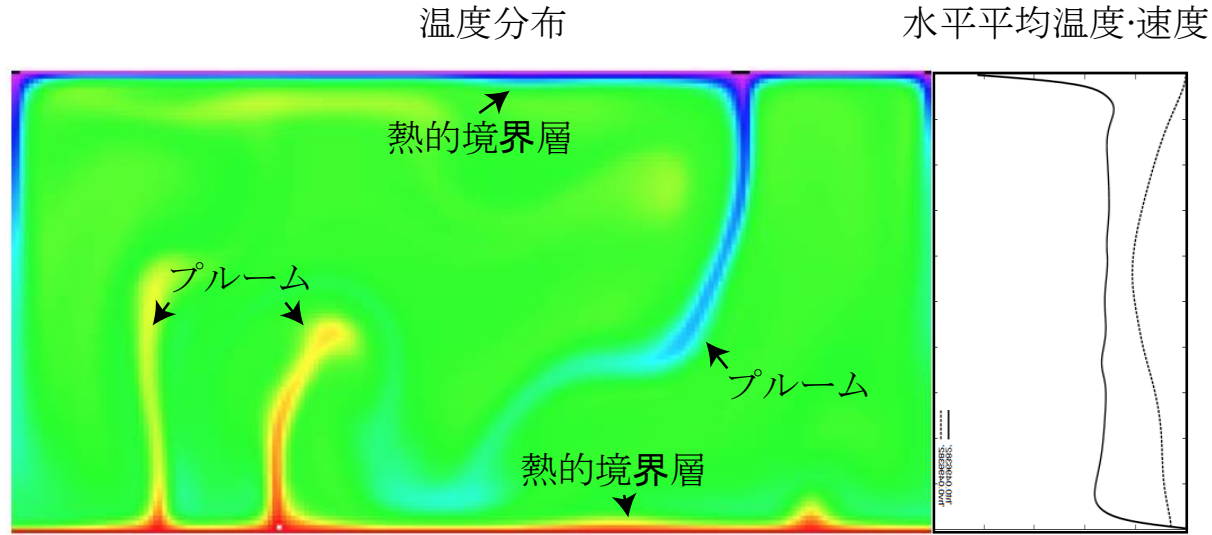
火成活動・マントル湧昇流フィードバック（2）：マントルの分化と攪拌

2成分3相系（固相2相・液相：下部マントルの効果）

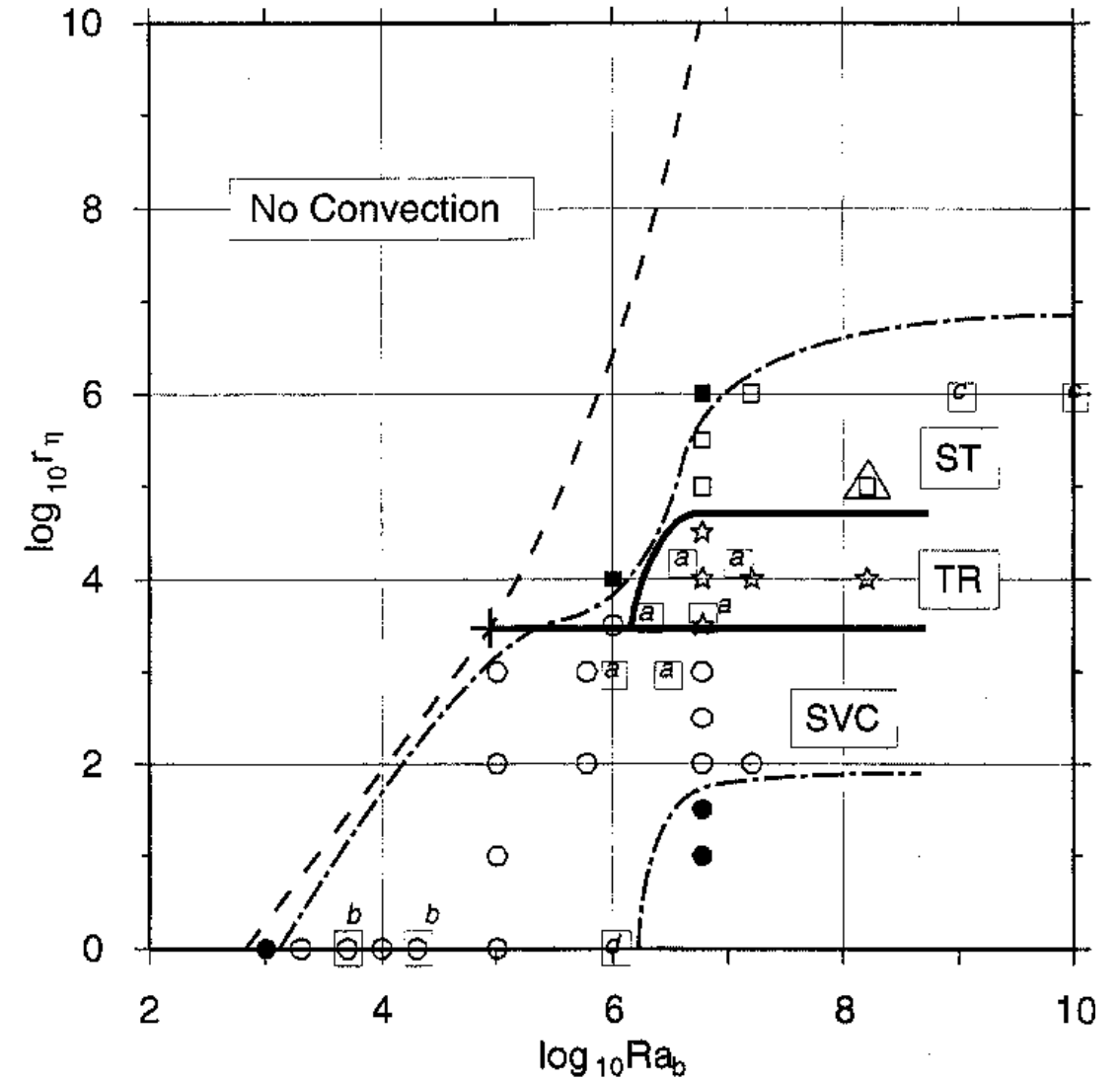
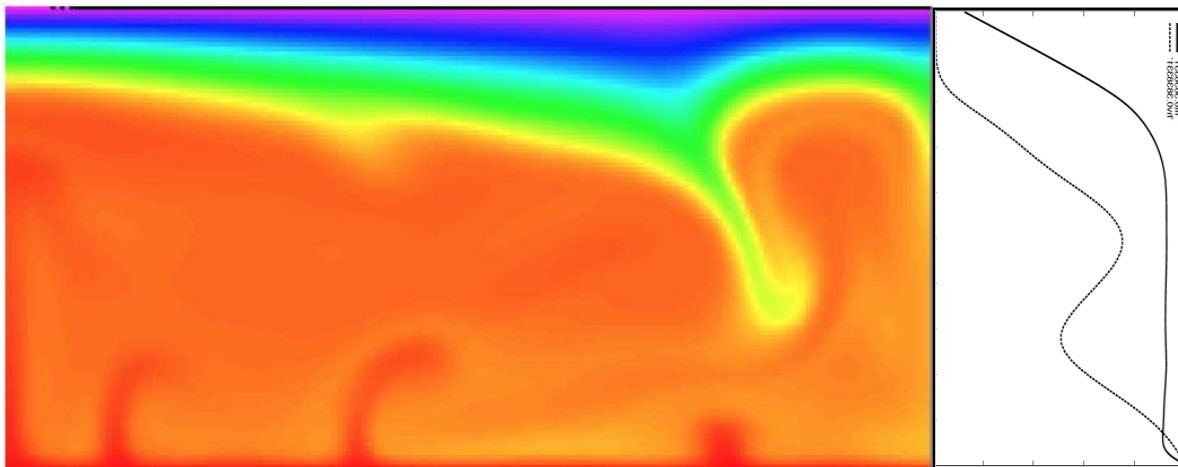
玄武岩バリアとバースト

# 粘性率の温度依存性とリソスフェア

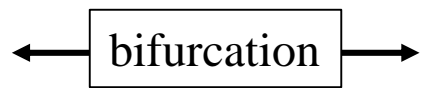
(a) 粘性率一定の熱対流



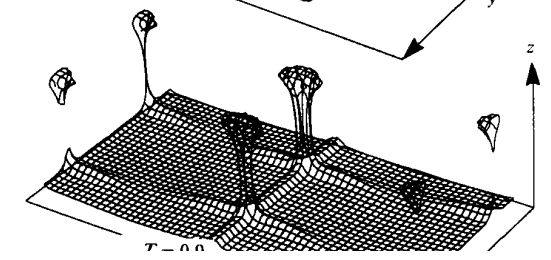
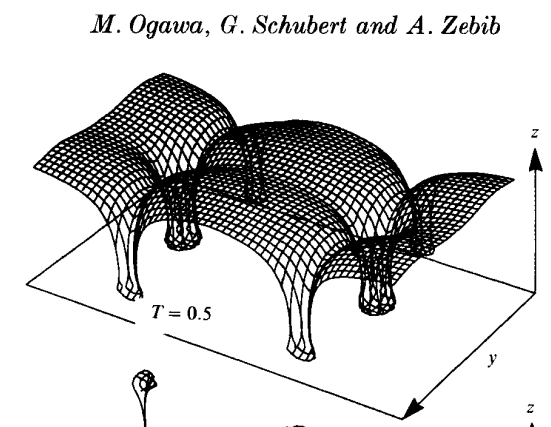
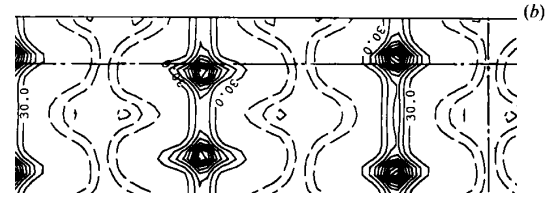
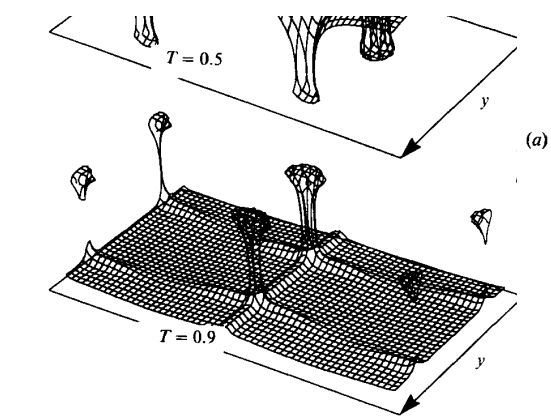
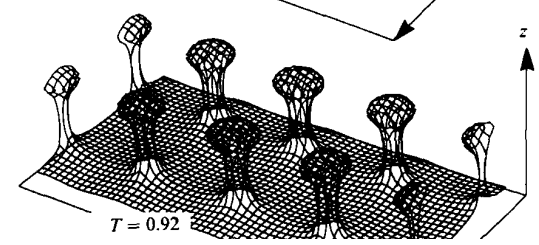
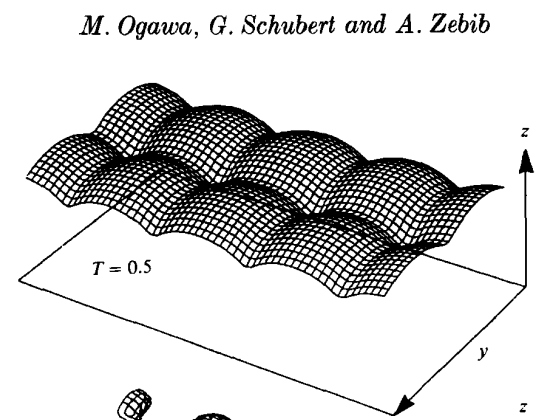
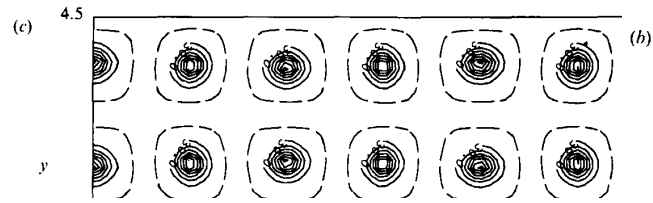
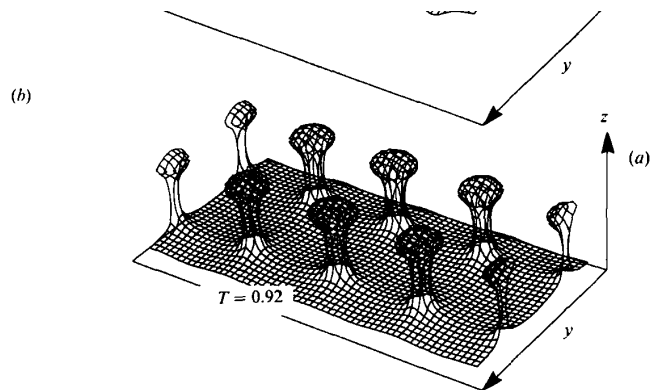
(b) リソスフェアのある熱対流



Stagnant lid regime  
リソスフェアあり



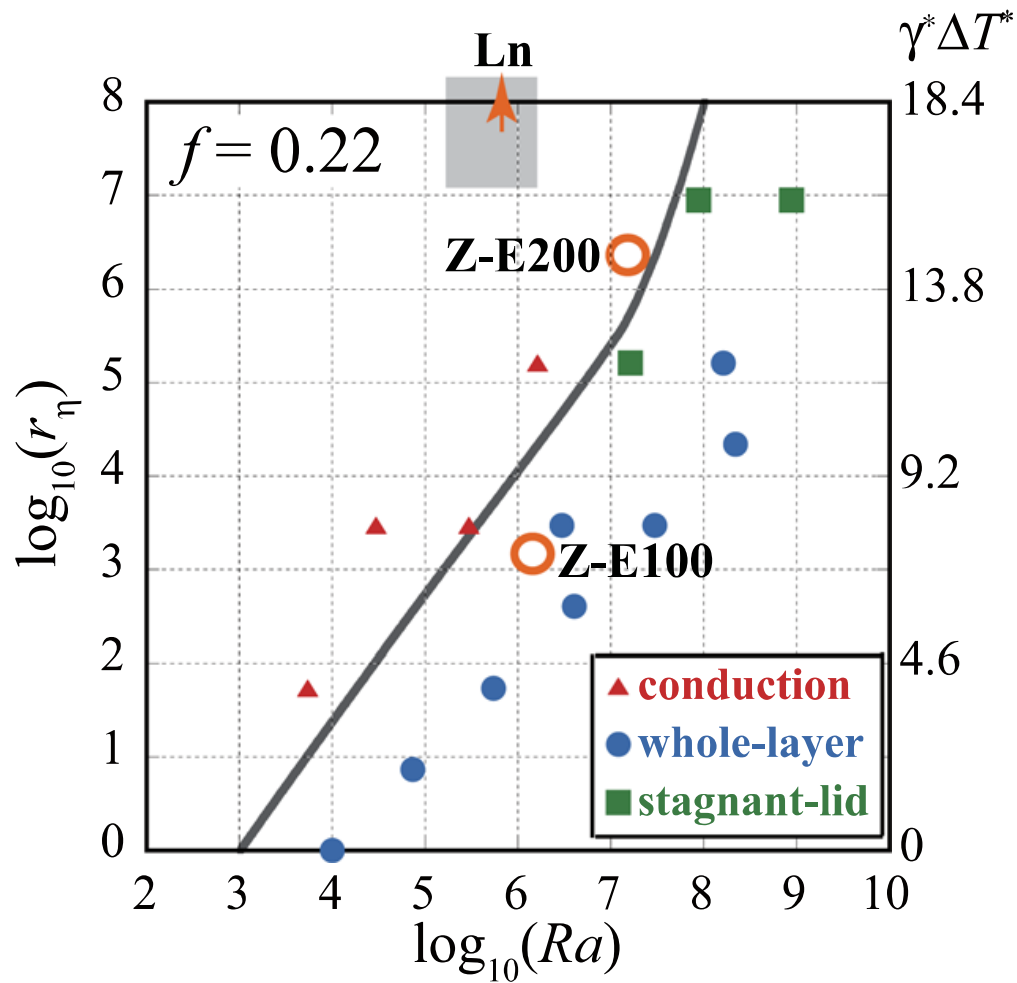
Small viscosity contrast regime  
リソスフェアなし



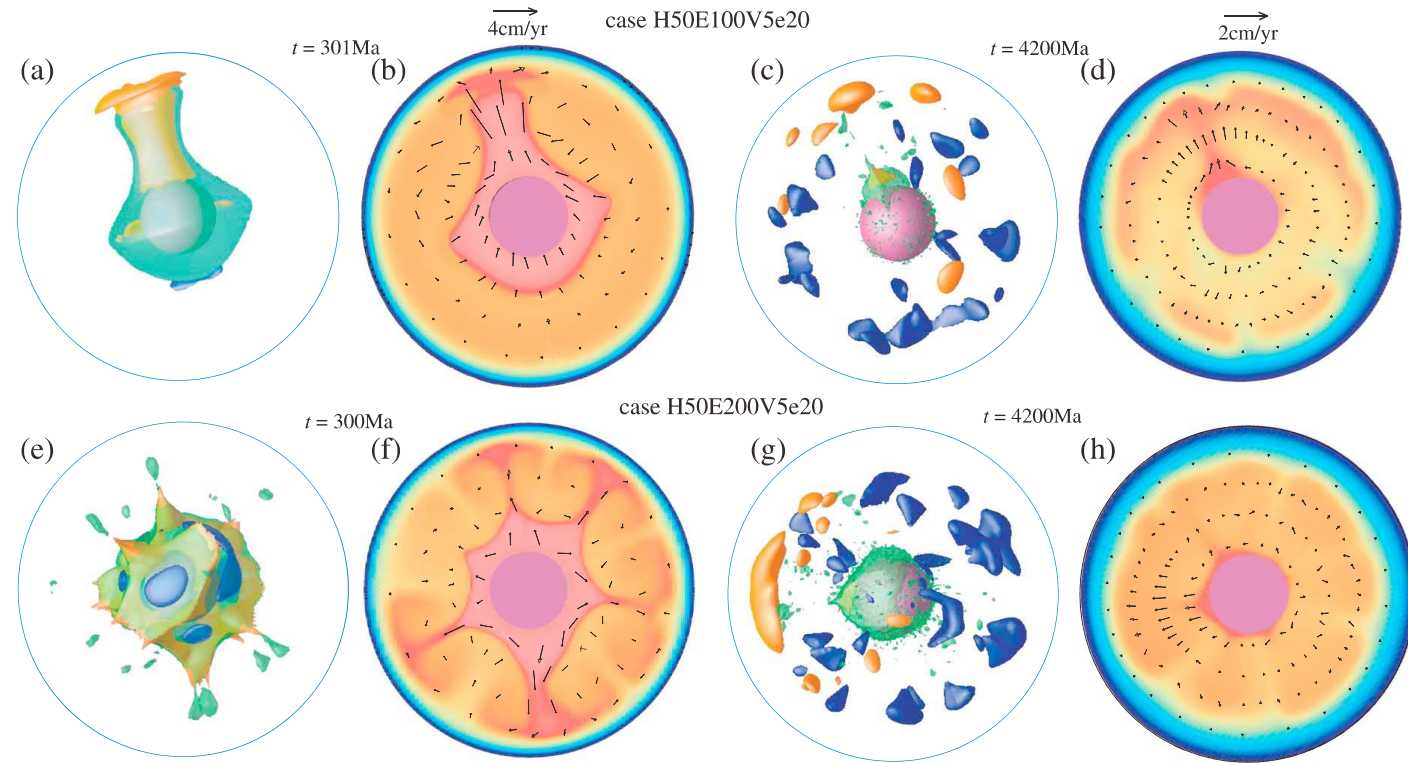
(Ogawa et al., 1991)



# Degree-1 の対流パターン？：月・火星



(Yanagisawa et al., 2016)



(Zhang et al., 2013)

## 1成分1相系（熱対流）

スタグナント・リッドとリソスフェア

球殻熱対流の安定性：ブルームとホットスポット火山

プレート・テクトニクス

断熱圧縮の効果：スーパー地球

## 1成分2相系（固相・固相）

ポスト・スピネル転移とフラッシング

## 1成分2相系（固相・液相）

火成活動・マントル湧昇流フィードバック（1）：原理

## 2成分2相系（固相・液相）

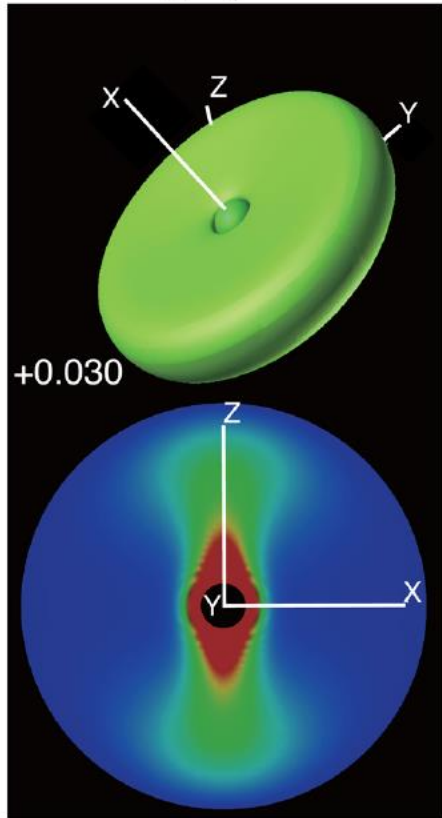
火成活動・マントル湧昇流フィードバック（2）：マントルの分化と攪拌

## 2成分3相系（固相2相・液相：下部マントルの効果）

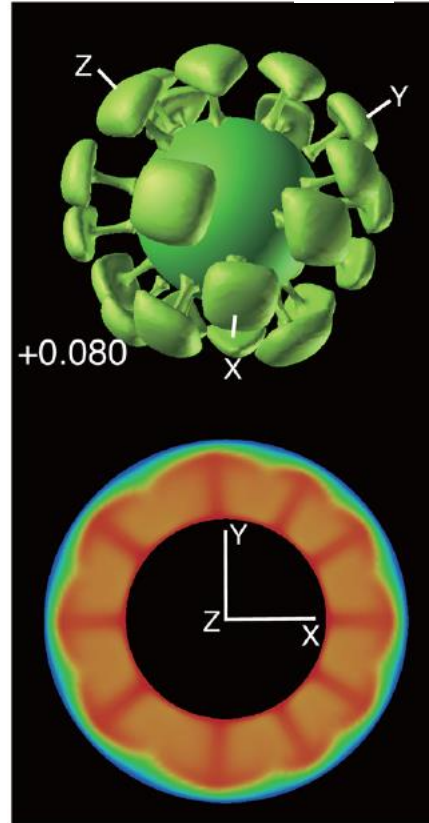
玄武岩バリアとバースト

# 下からの加熱による球殻熱対流の臨界レイリー数

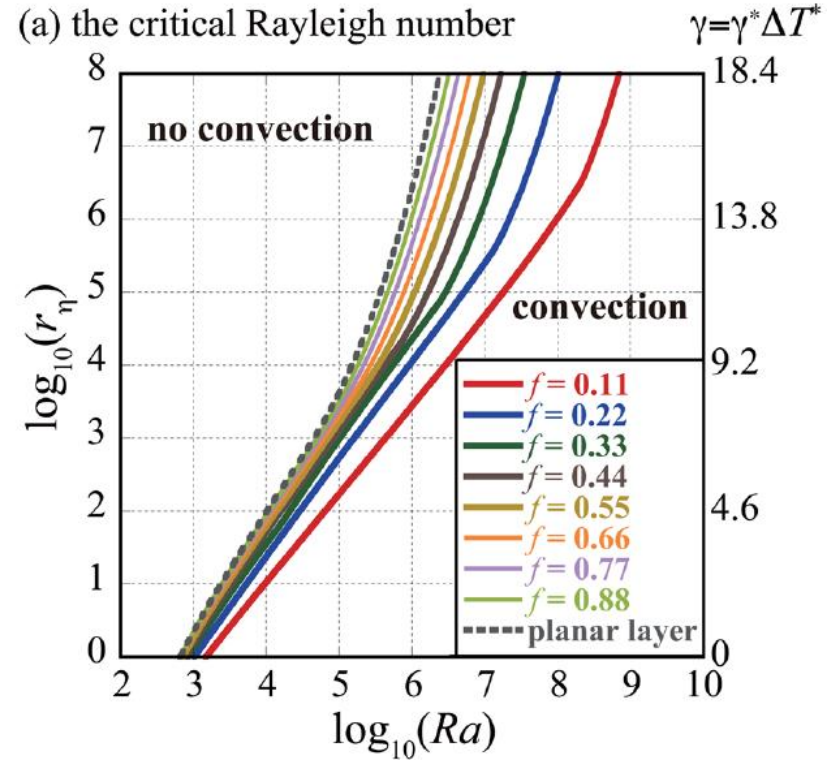
(a)  $R_l = 1.0 \times 10^4$   
 $Ra = 1.0 \times 10^4$   
 $\log_{10}(r_\eta) = 0$



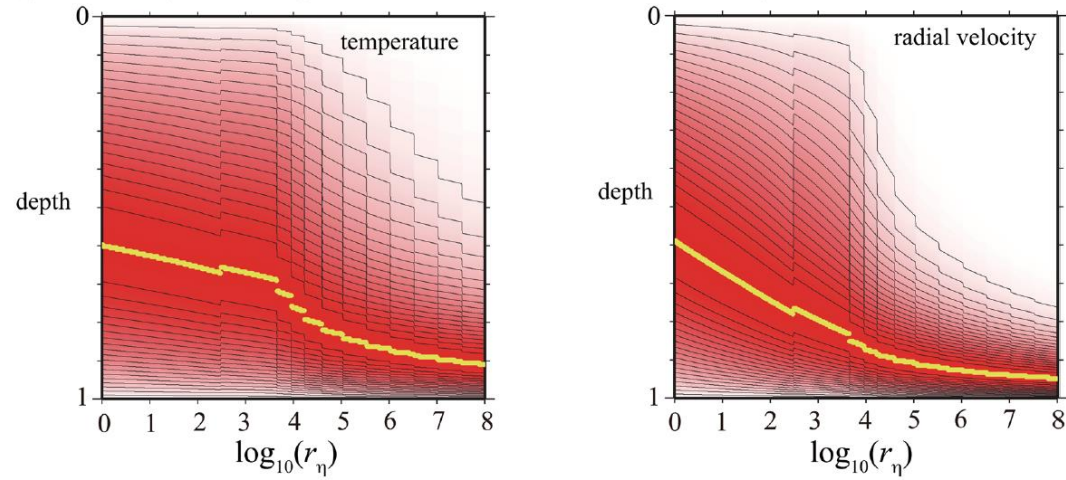
(f)  $R_l = 1.0 \times 10^2$   
 $Ra = 1.6 \times 10^6$   
 $\log_{10}(r_\eta) = 4.2$



(Yanagisawa et al., 2016)

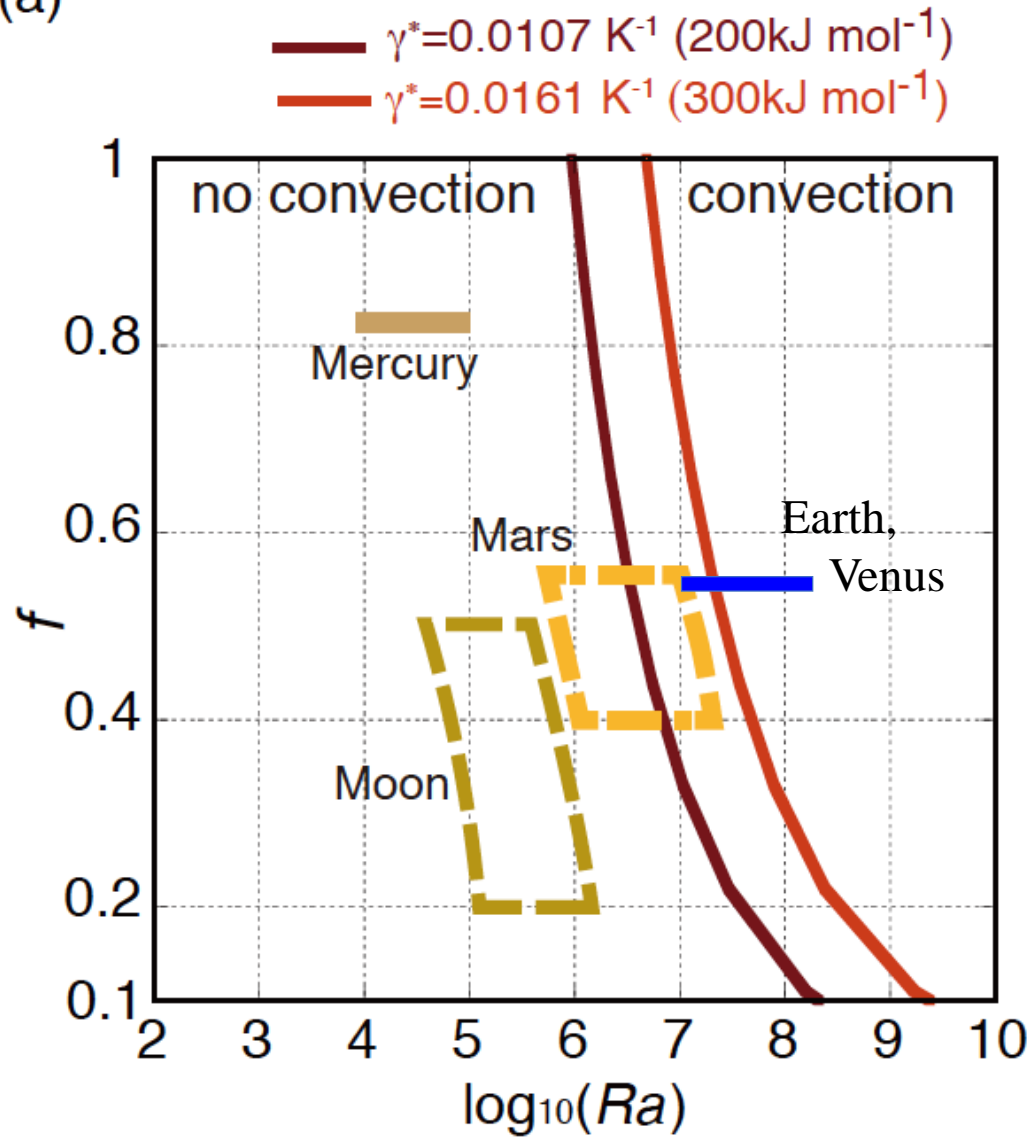


(d) relative amplitude of eigen functions for the most unstable mode:  $f = 0.55$

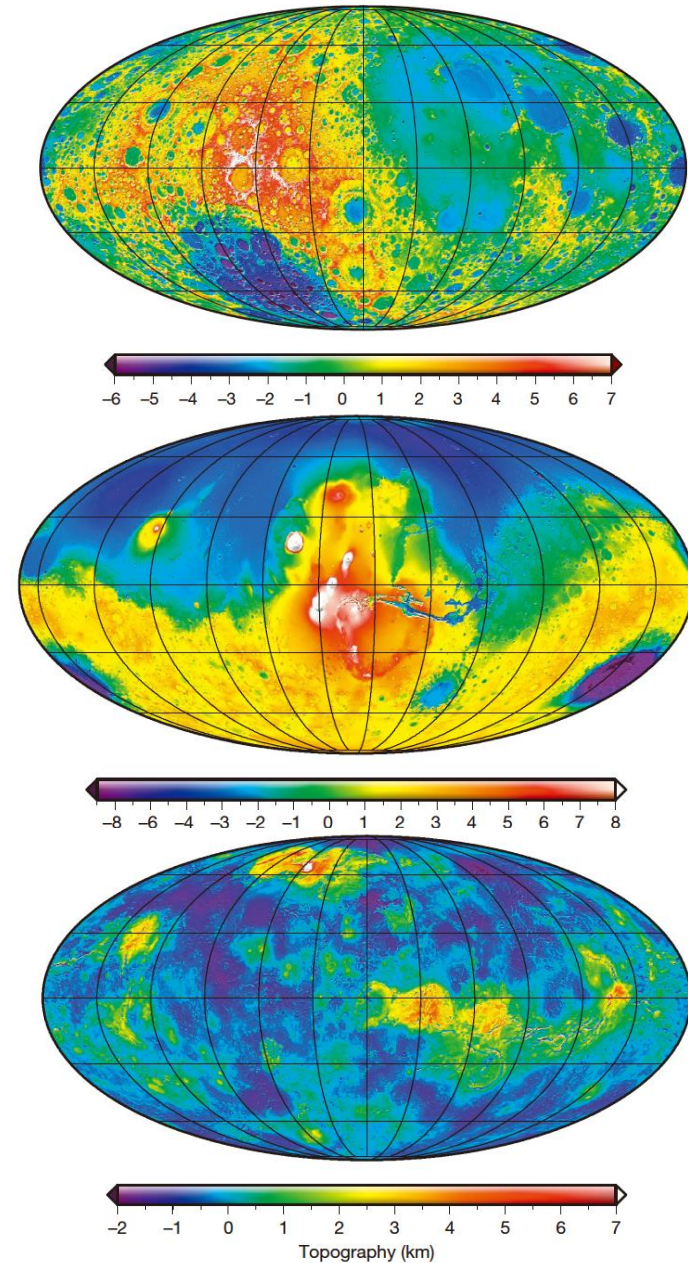




(a)



(Yanagisawa et al., 2016)



(Wieczorek, 2015)



## 1成分1相系（熱対流）

スタグナント・リッドとリソスフェア

球殻熱対流の安定性：プルームとホットスポット火山

プレート・テクトニクス

断熱圧縮の効果：スーパー地球

## 1成分2相系（固相・固相）

ポスト・スピネル転移とフラッシング

## 1成分2相系（固相・液相）

火成活動・マンテル湧昇流フィードバック（1）：原理

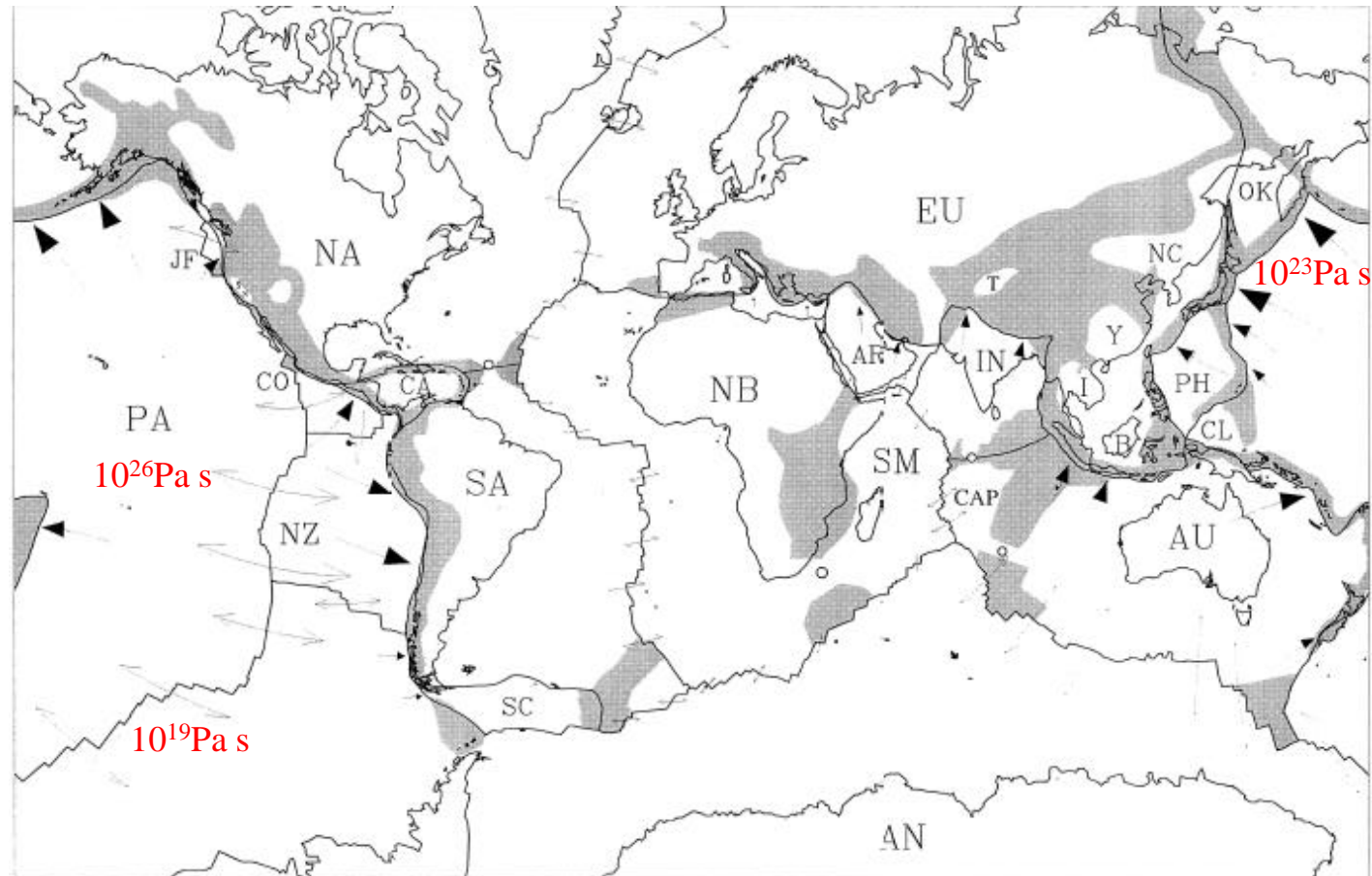
## 2成分2相系（固相・液相）

火成活動・マンテル湧昇流フィードバック（2）：マンテルの分化と攪拌

## 2成分3相系（固相2相・液相：下部マンテルの効果）

玄武岩バリアとバースト

# リソスフェアの破壊によるプレート境界の形成



(Gordon, 2000)

# Yieldingモデル

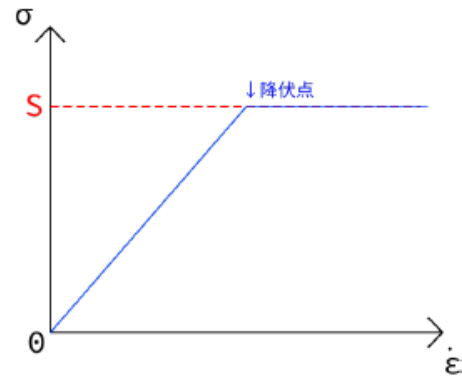


図 1.7: Yielding モデルにおける降伏応力の設定

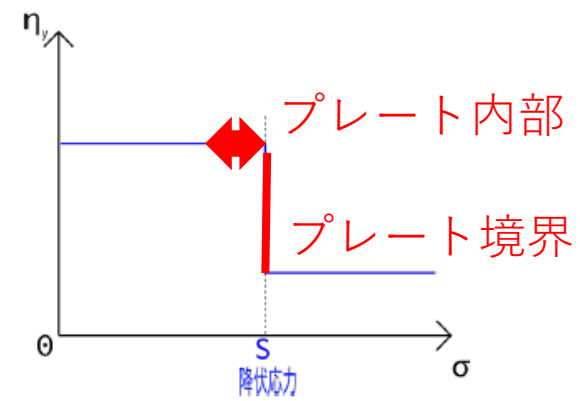
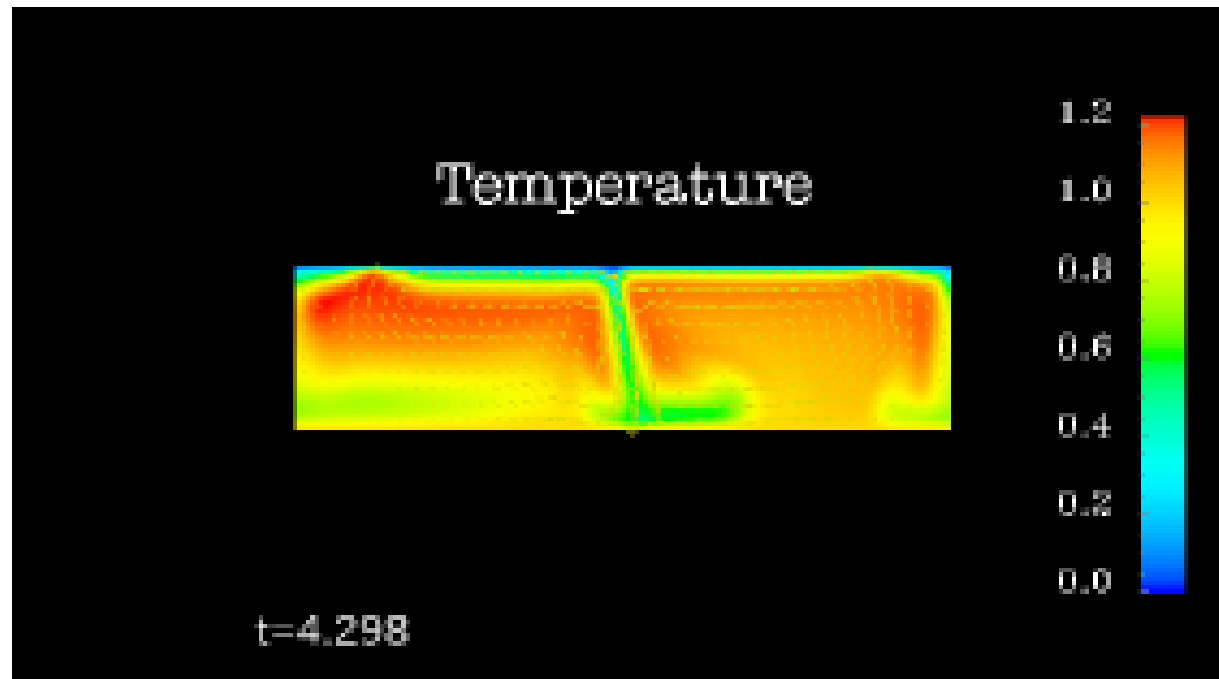
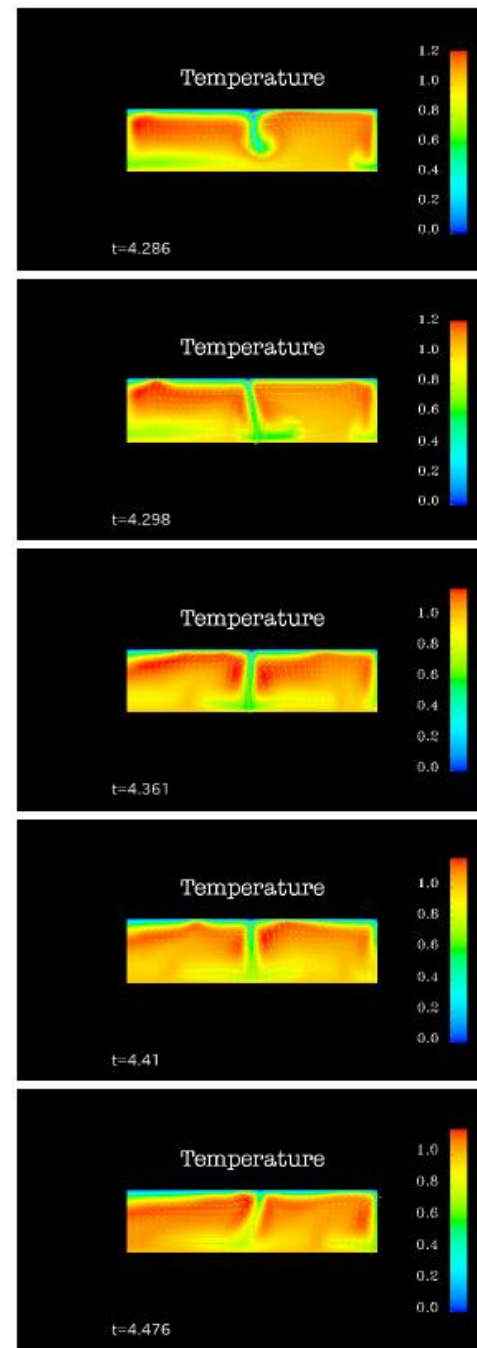
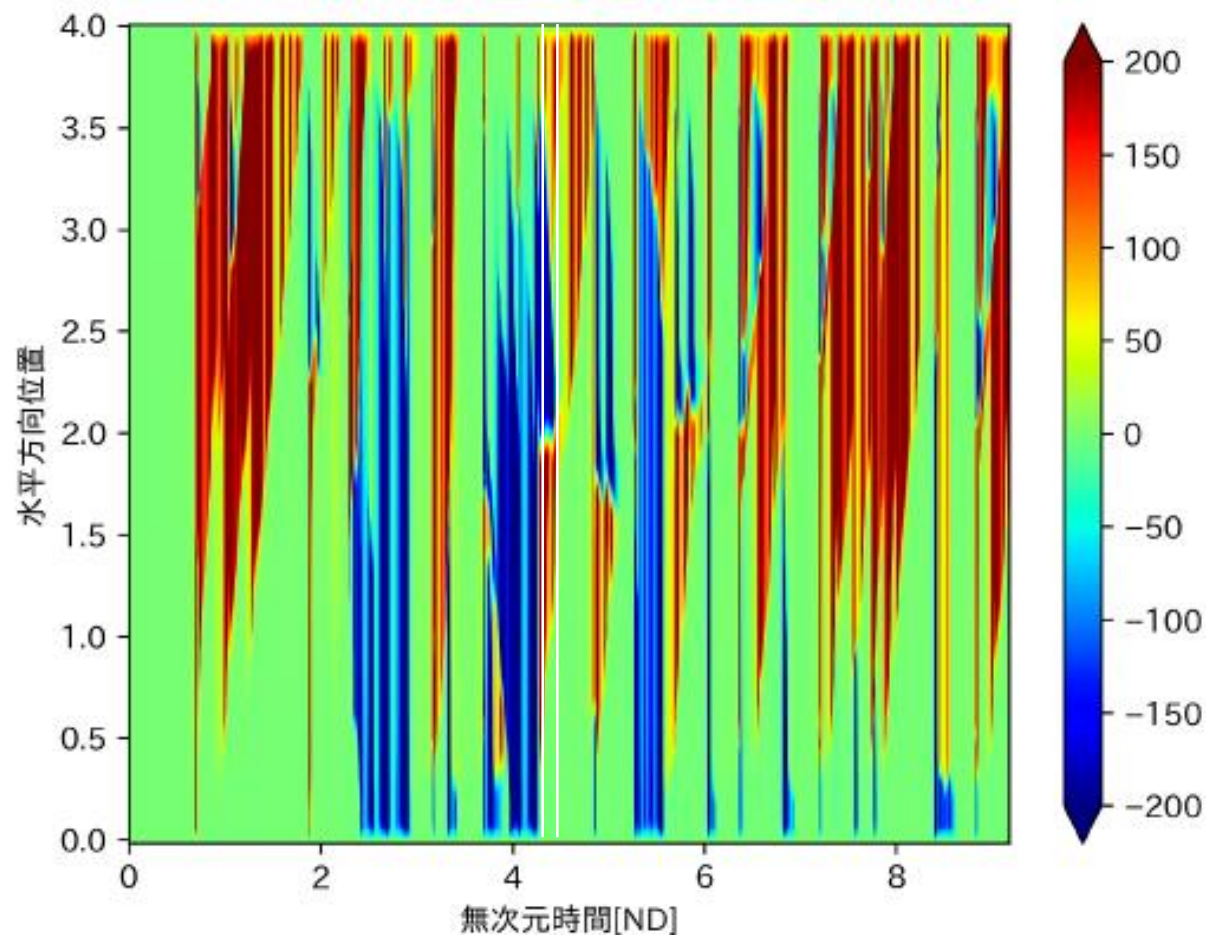


図 1.8: Yielding モデルにおける粘性率



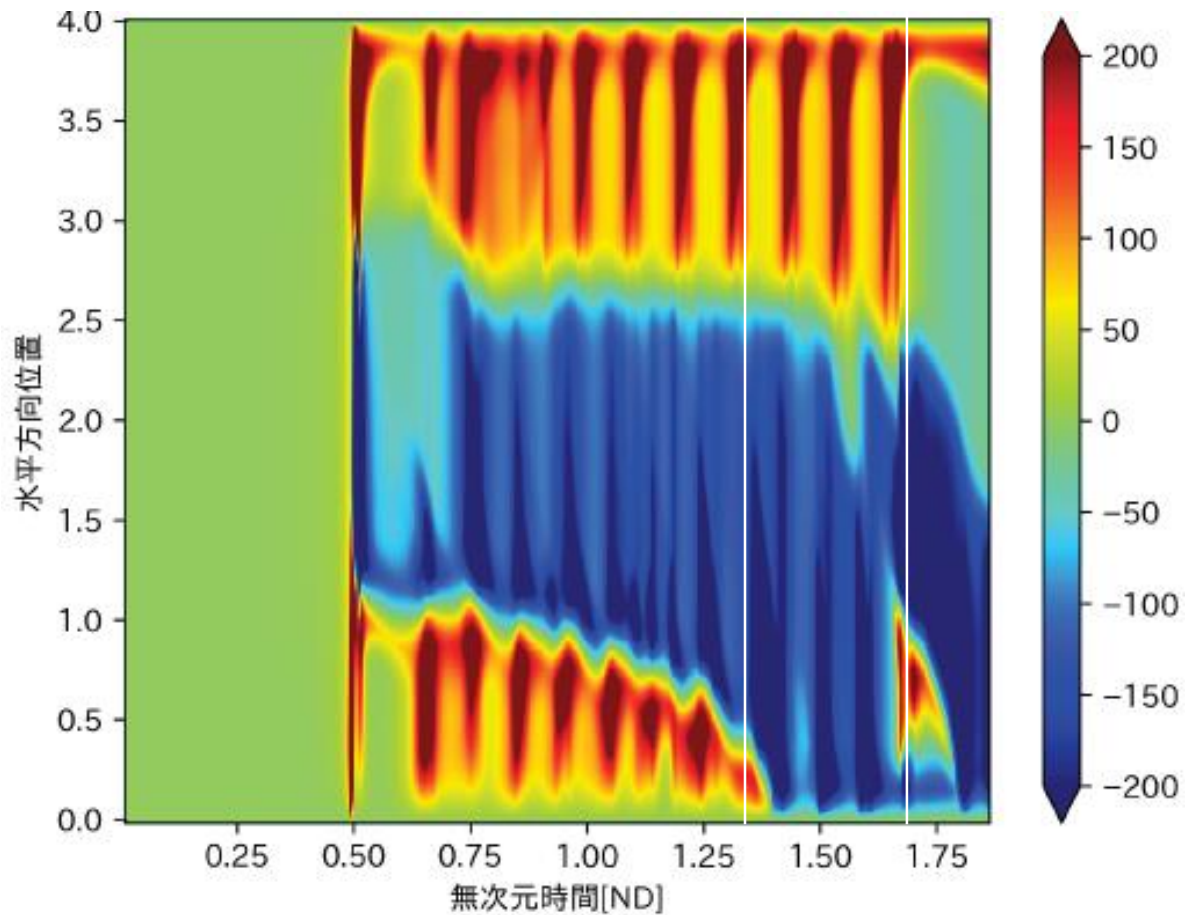
# 連続的な対流



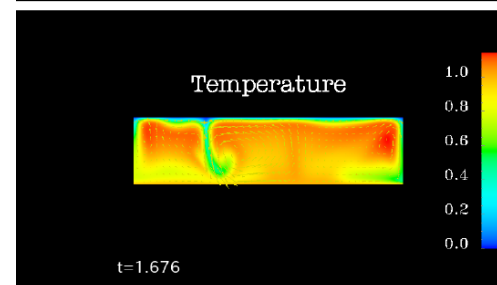
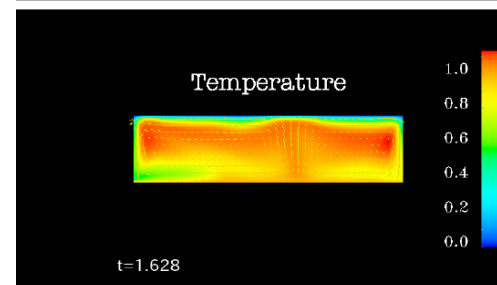
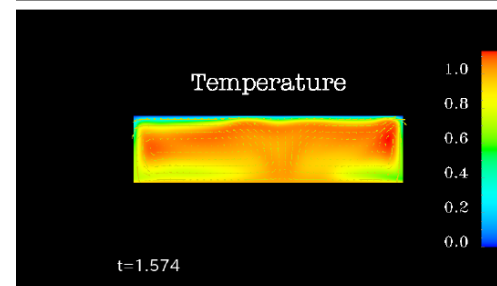
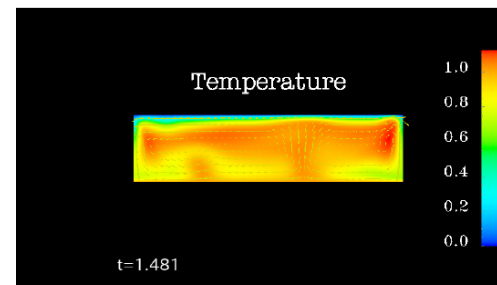
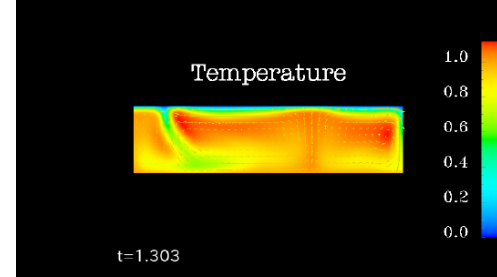
(橋本修論, 2019)

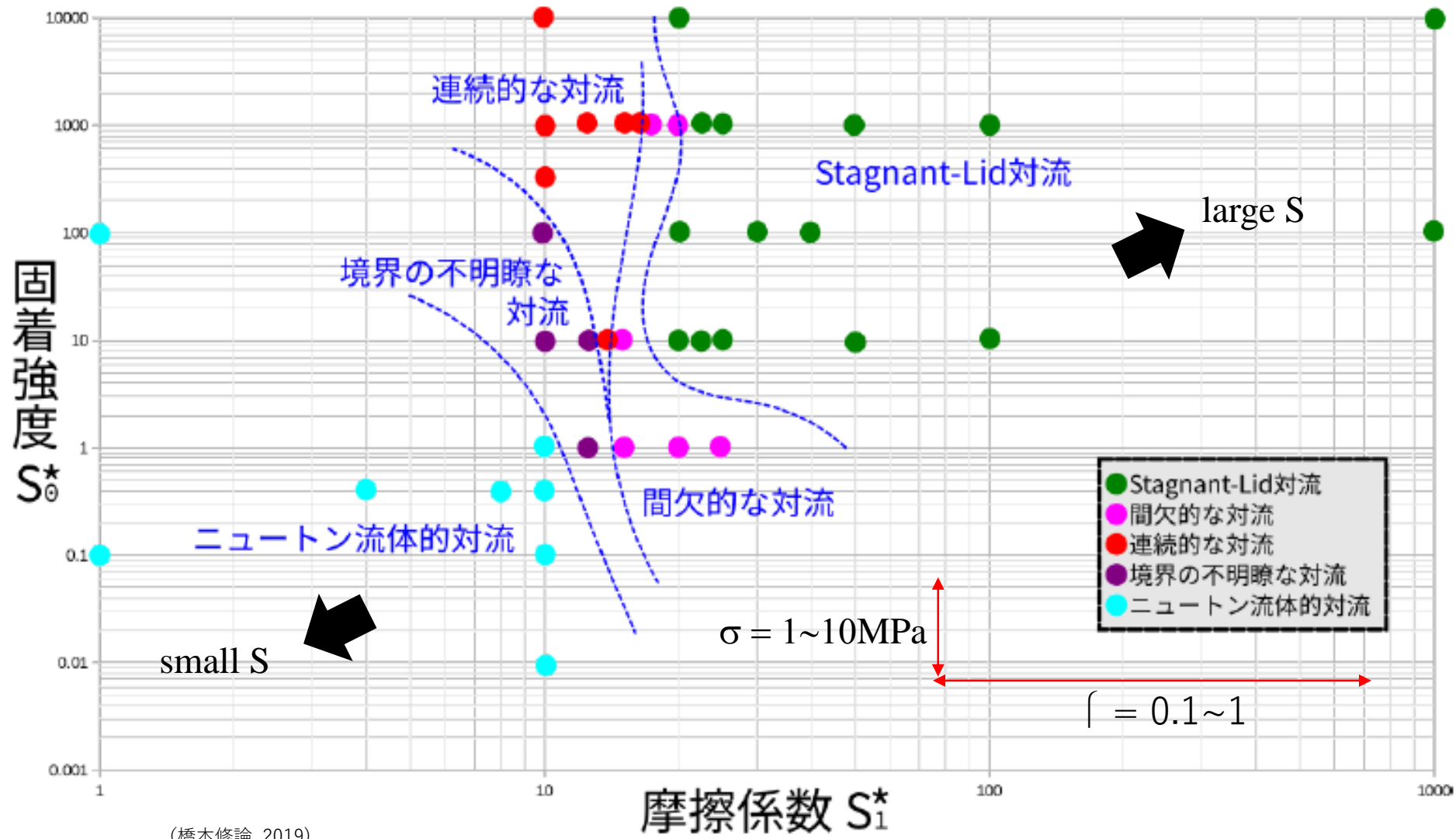
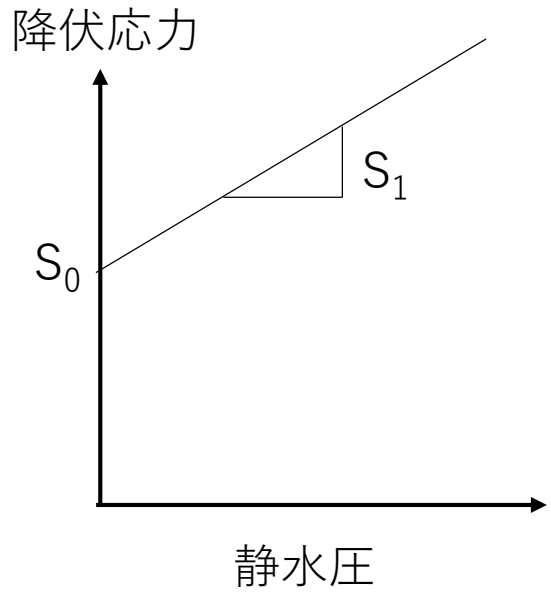


# 境界が不明瞭な対流

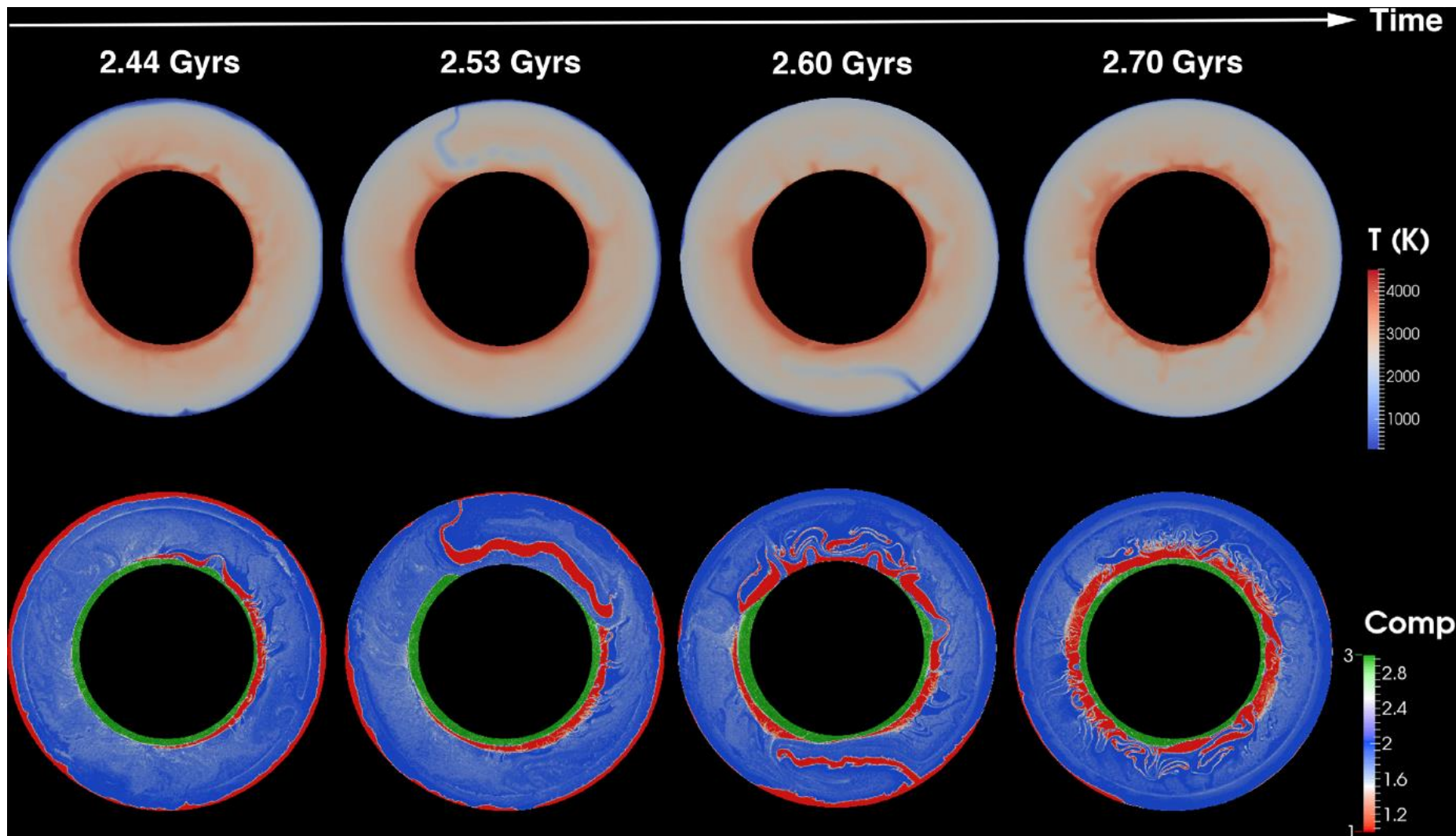


(橋本修論, 2019)

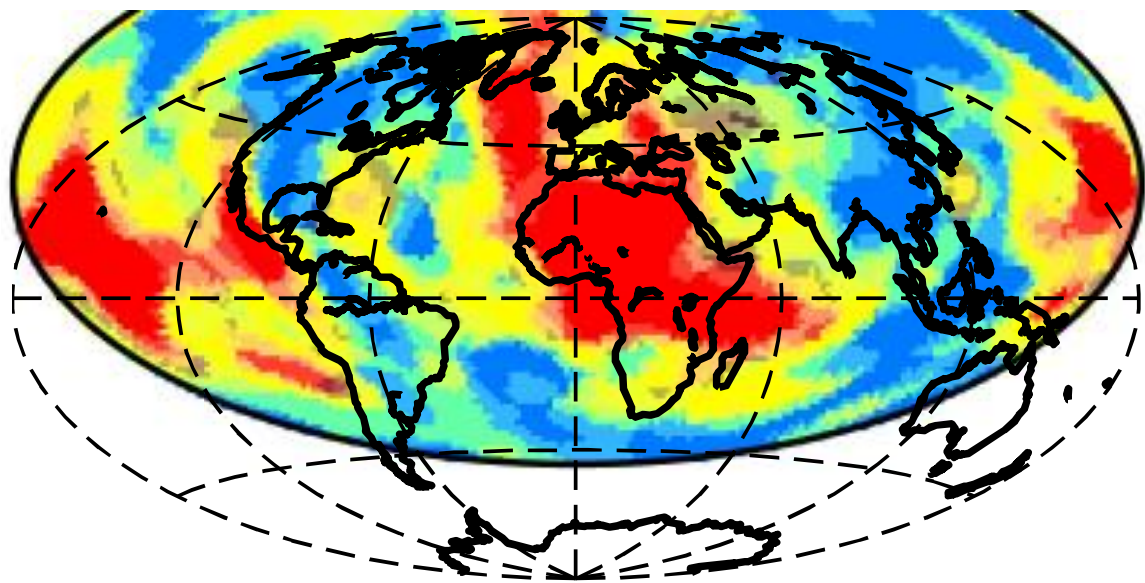




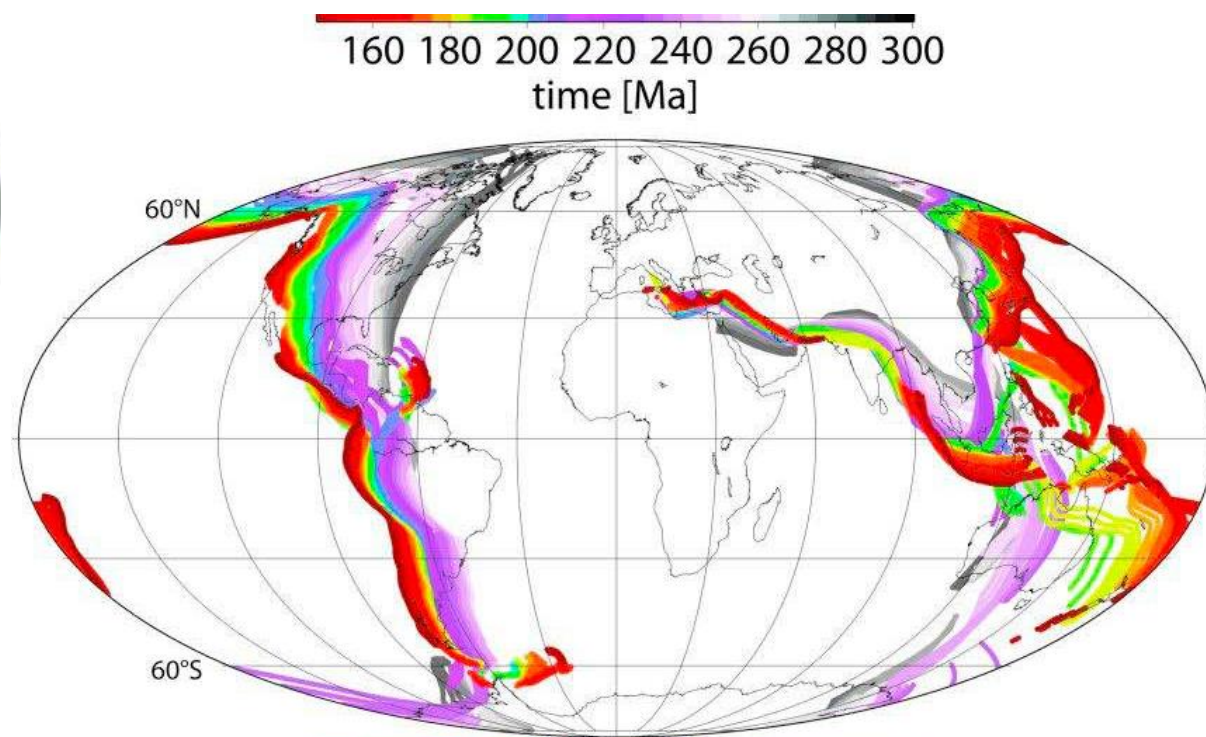
不明瞭なプレート境界  
プレート境界の生成・消滅  
プレート境界の移動速度  $\gg$  プレート速度



# CMB直上



(Cottaar & Letic, 2016)



(Steinberger & Torsvik, 2012)



# プレート運動の安定性

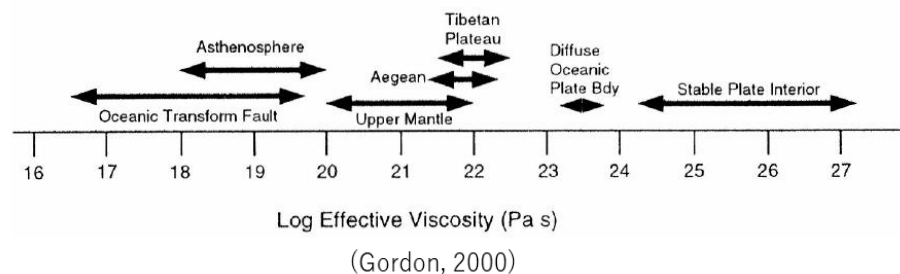
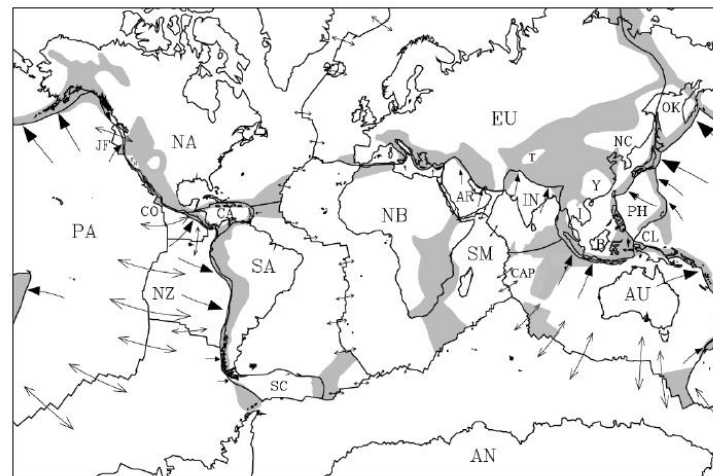
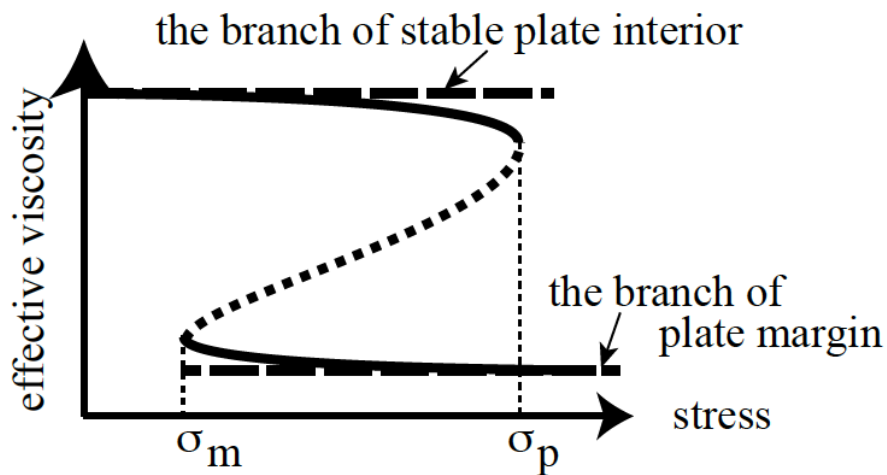
プレート境界はむやみに消滅しない (大陸衝突・海嶺の沈み込みetc)  
プレート境界はプレート運動そのものにより移流される

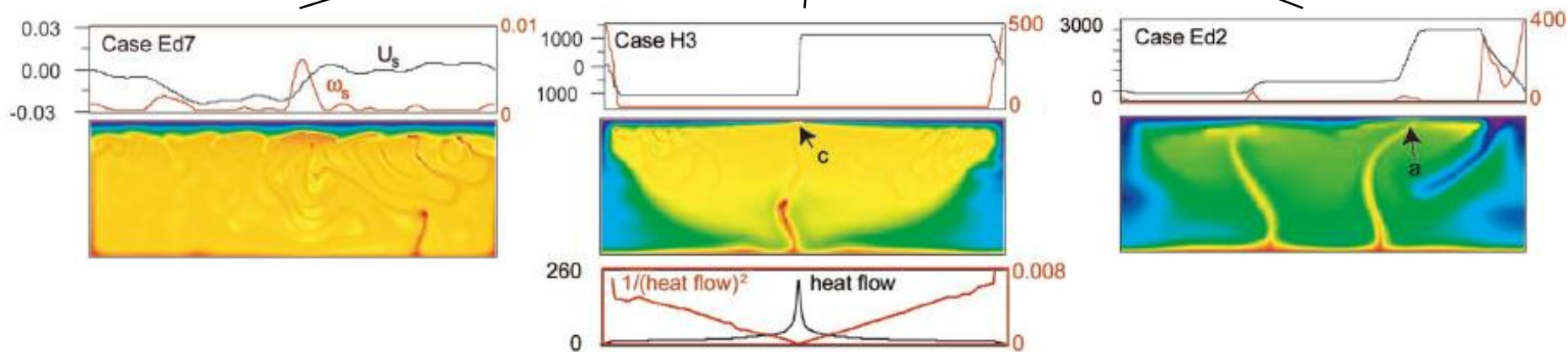
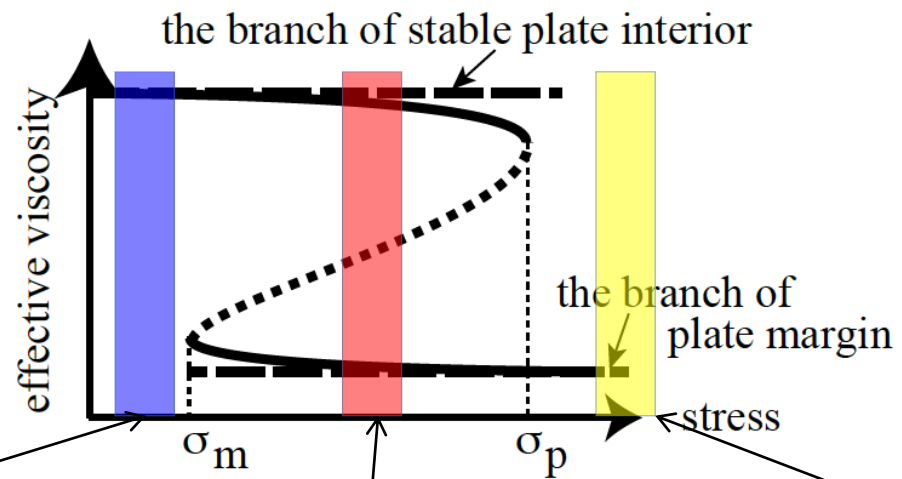


過去の破壊により生じたプレート境界を記憶



## 粘性率の応力履歴依存性





stagnant lid regime

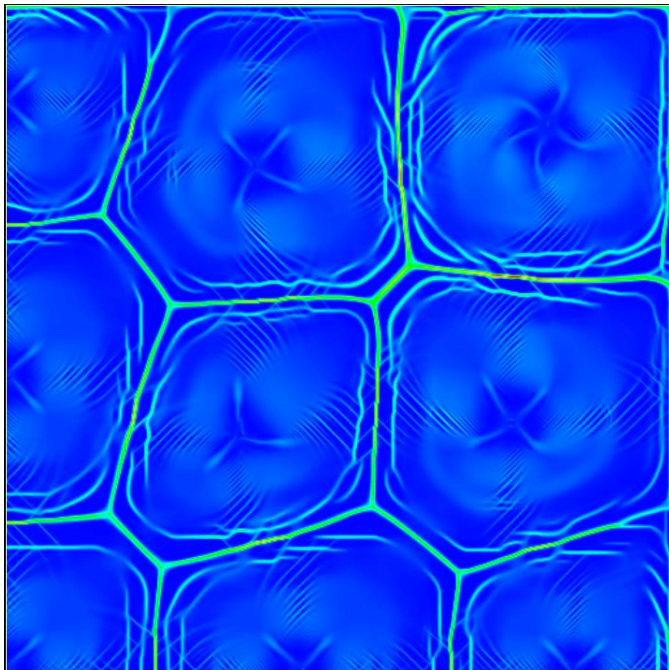
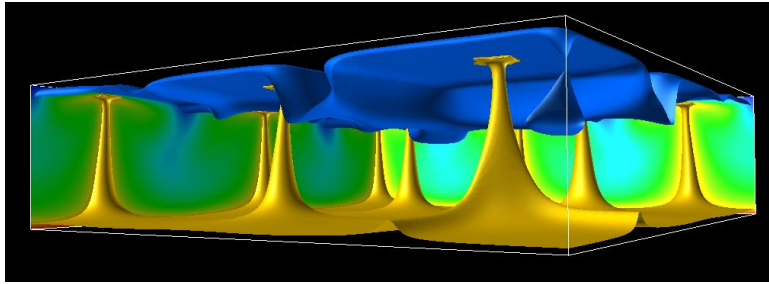
火星·金星

strong plate regime

地球

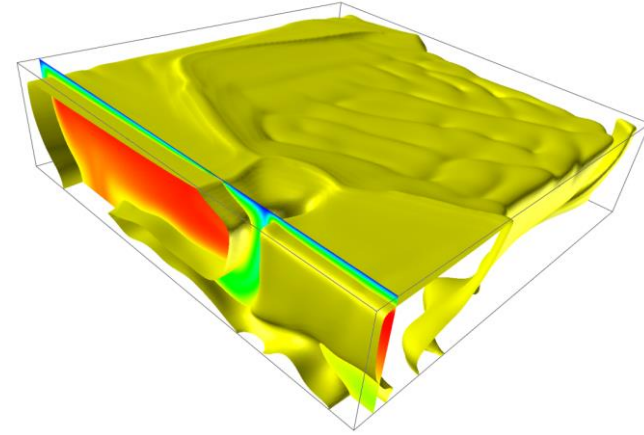
weak plate regime

# Weak plate regime

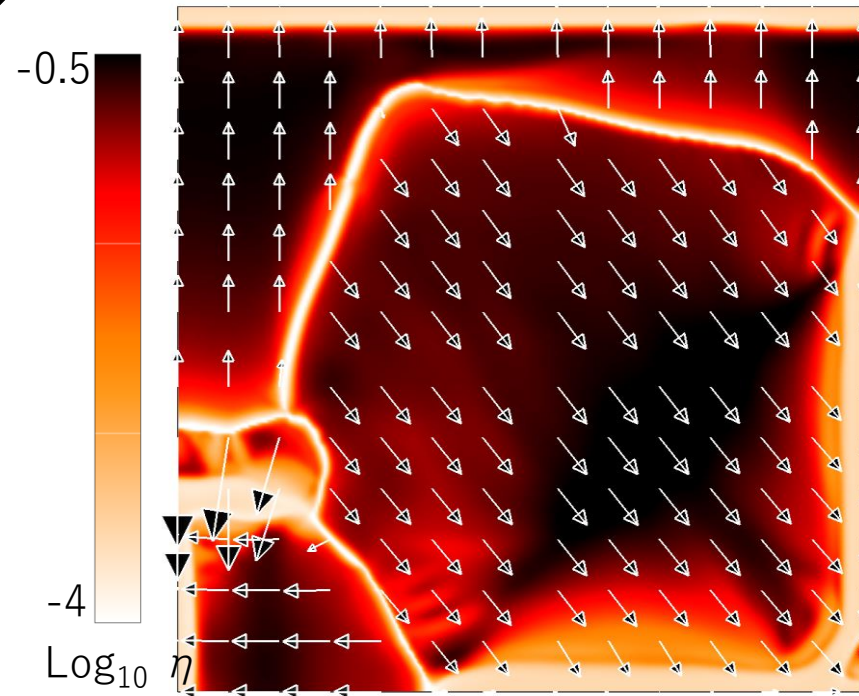
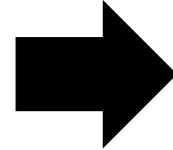


# Plate-like regime

剛体運動するプレートとシャープな境界

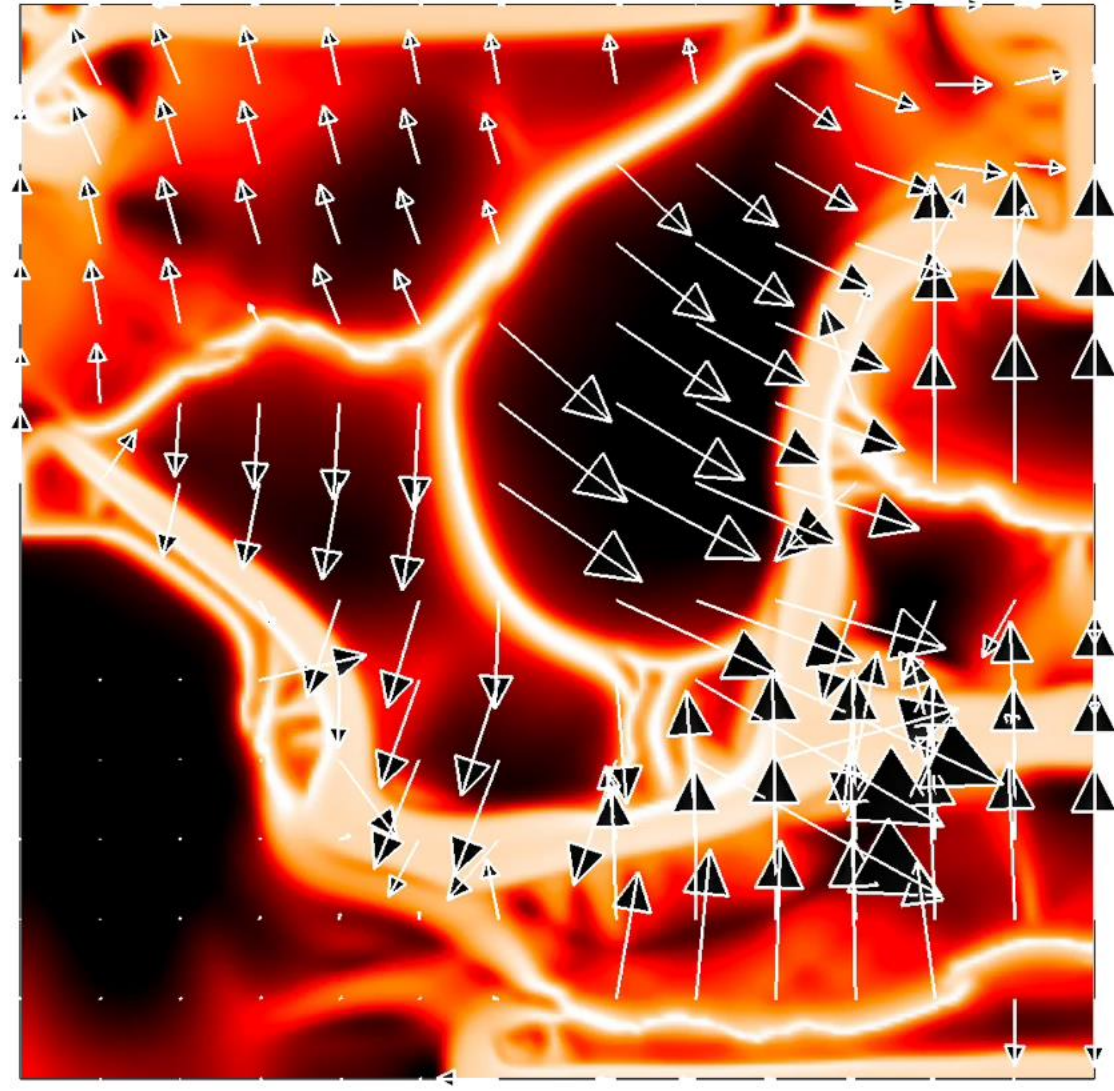


計算不安定  
を克服





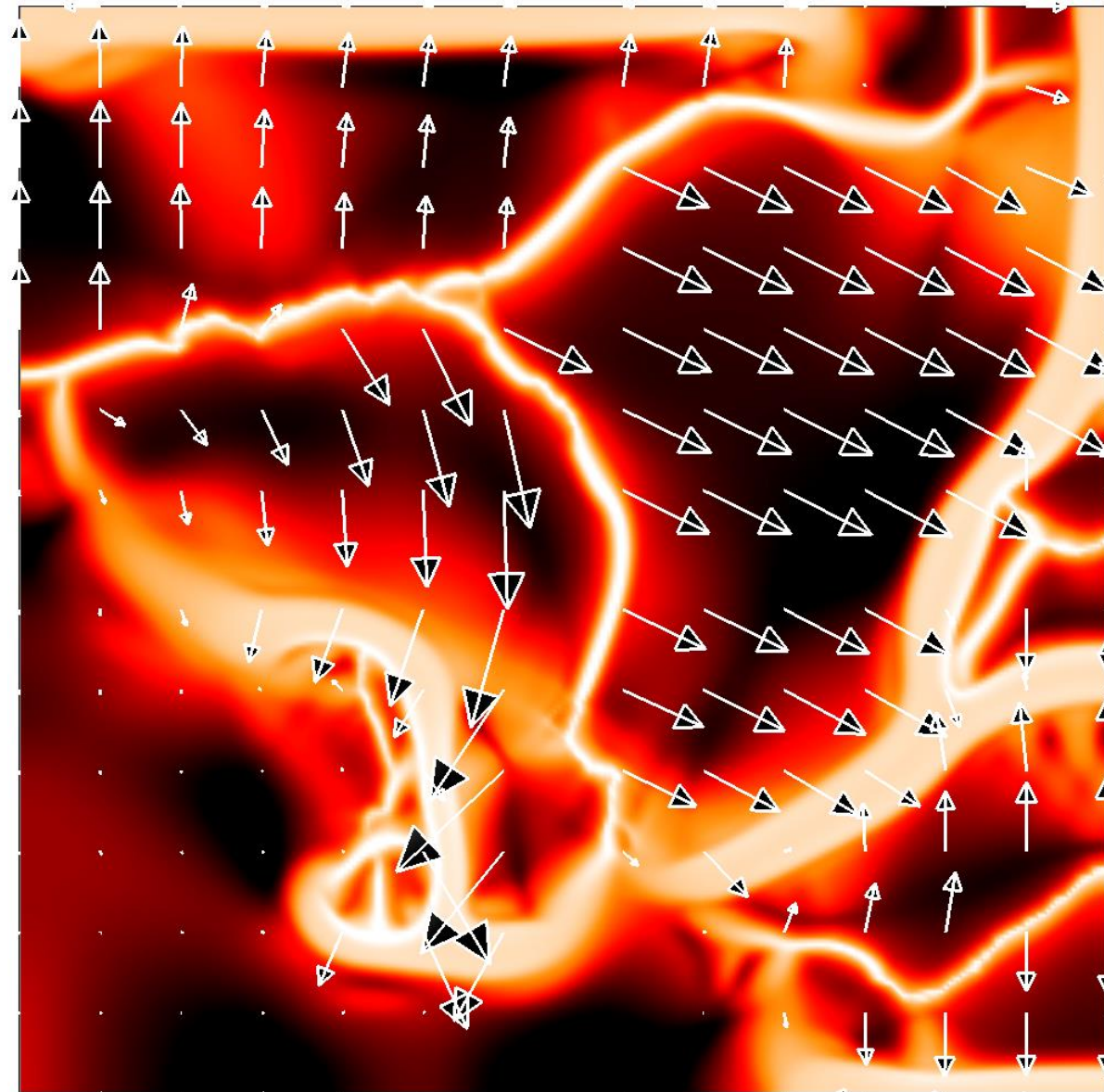
velocity & viscosity



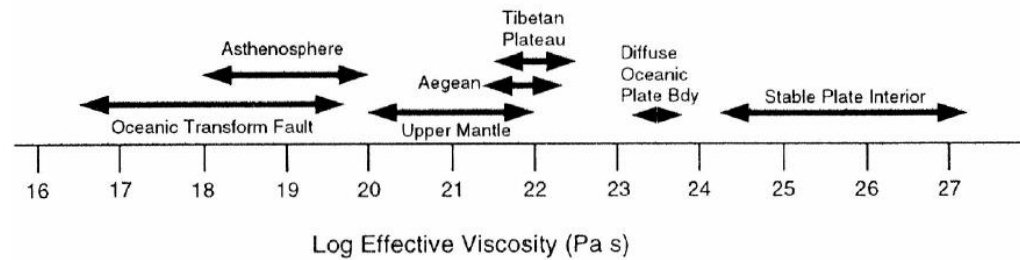
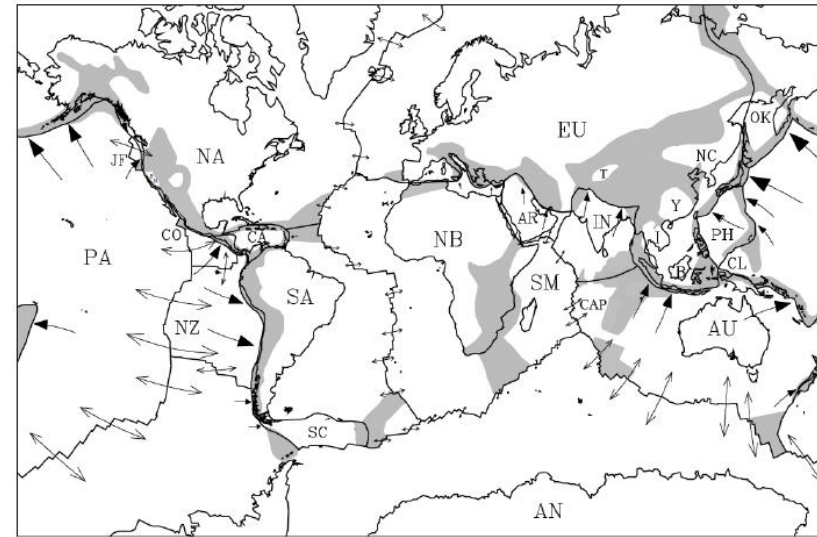
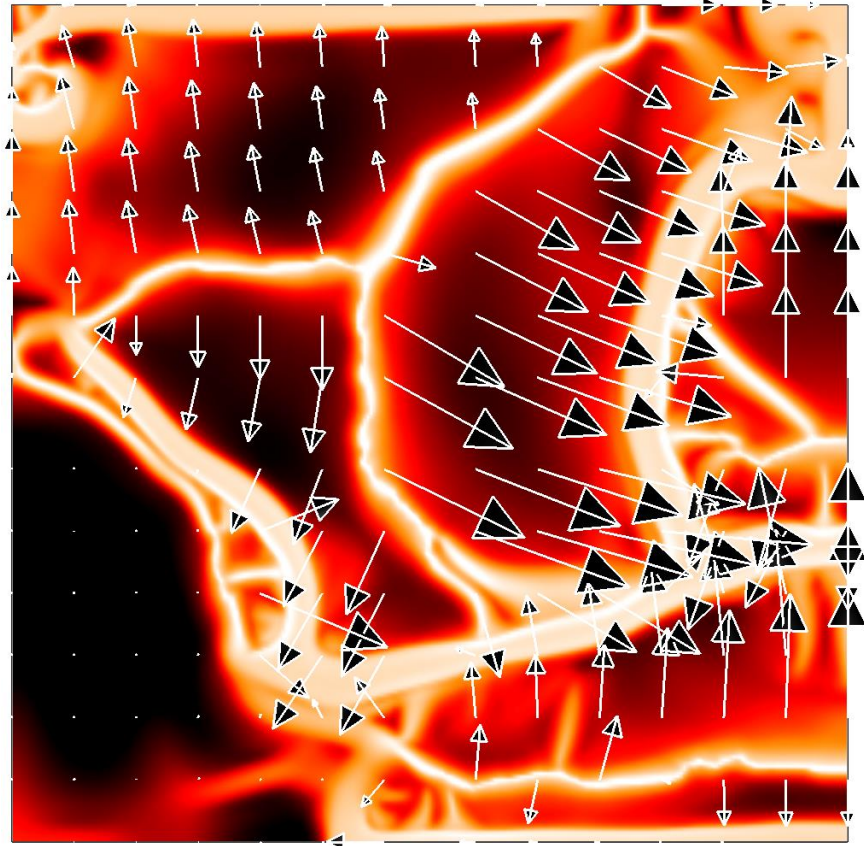
$t = 2.770E-2$



# 剛体プレートの並進・回転



# 単純な海嶺と複雑な沈み込み帯：沿海？

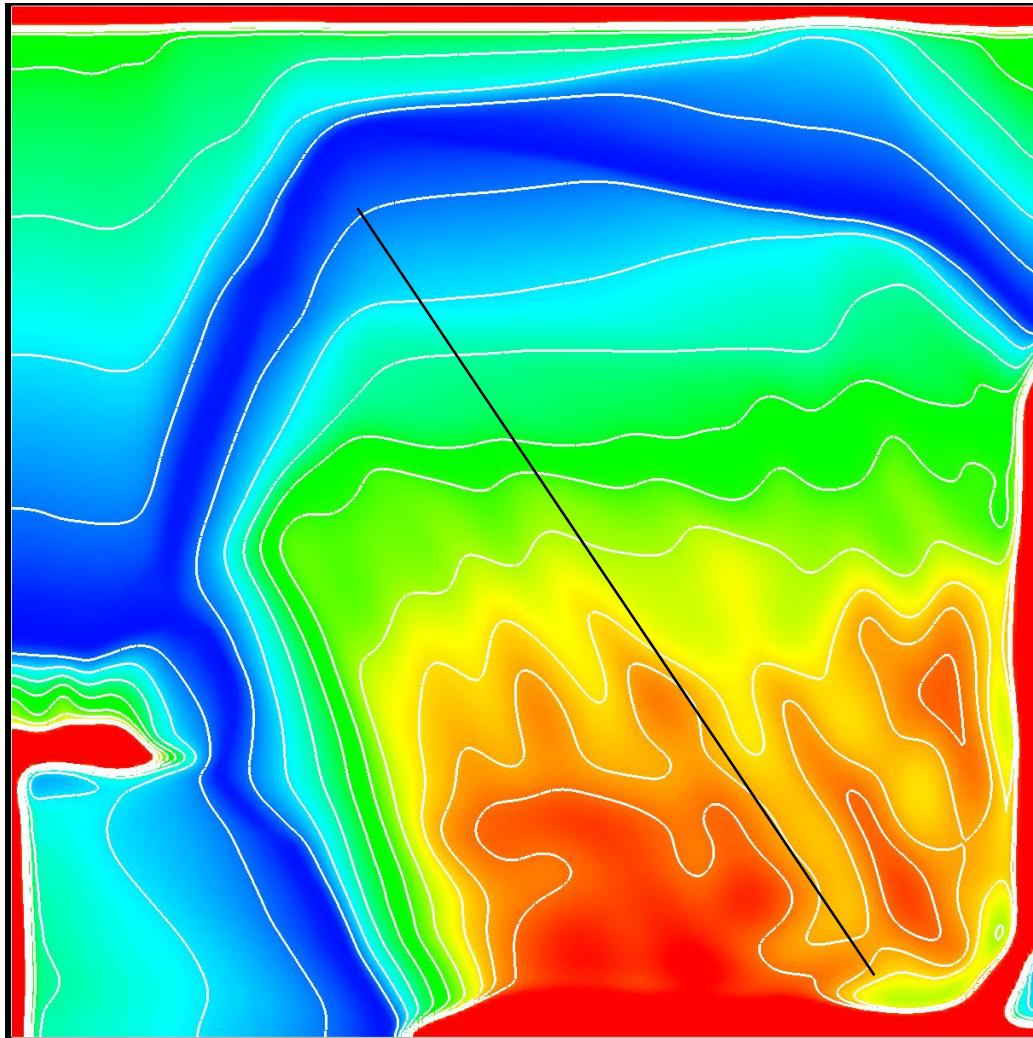


(Gordon, 2000)

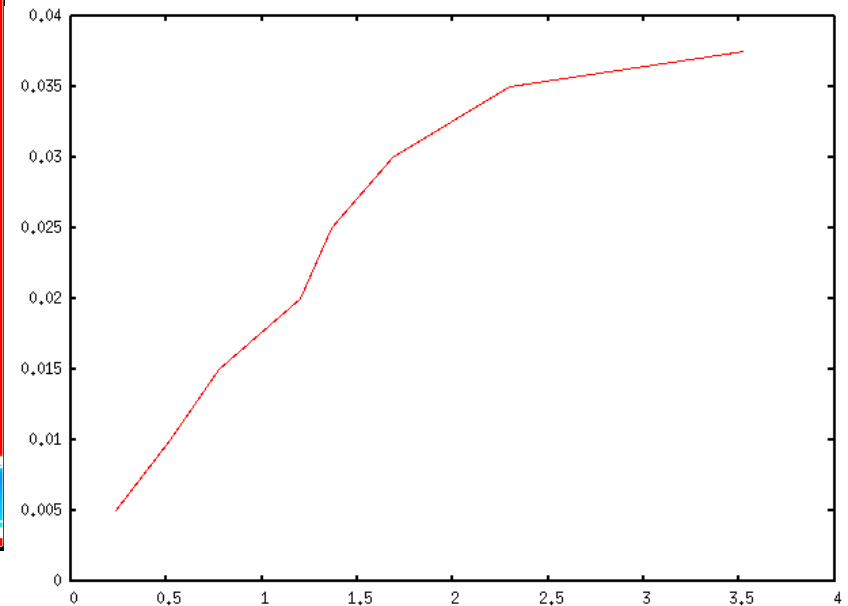
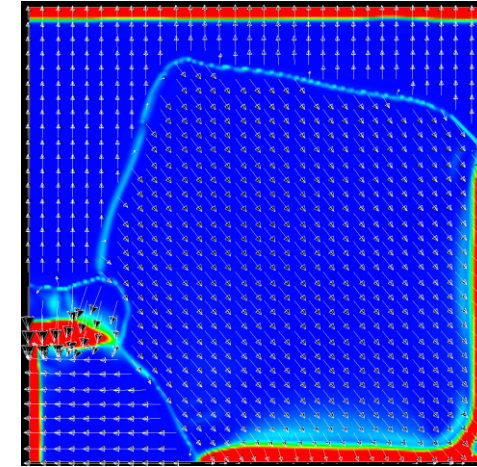


熱流量：海嶺近傍  $q \propto 1/\sqrt{t}$

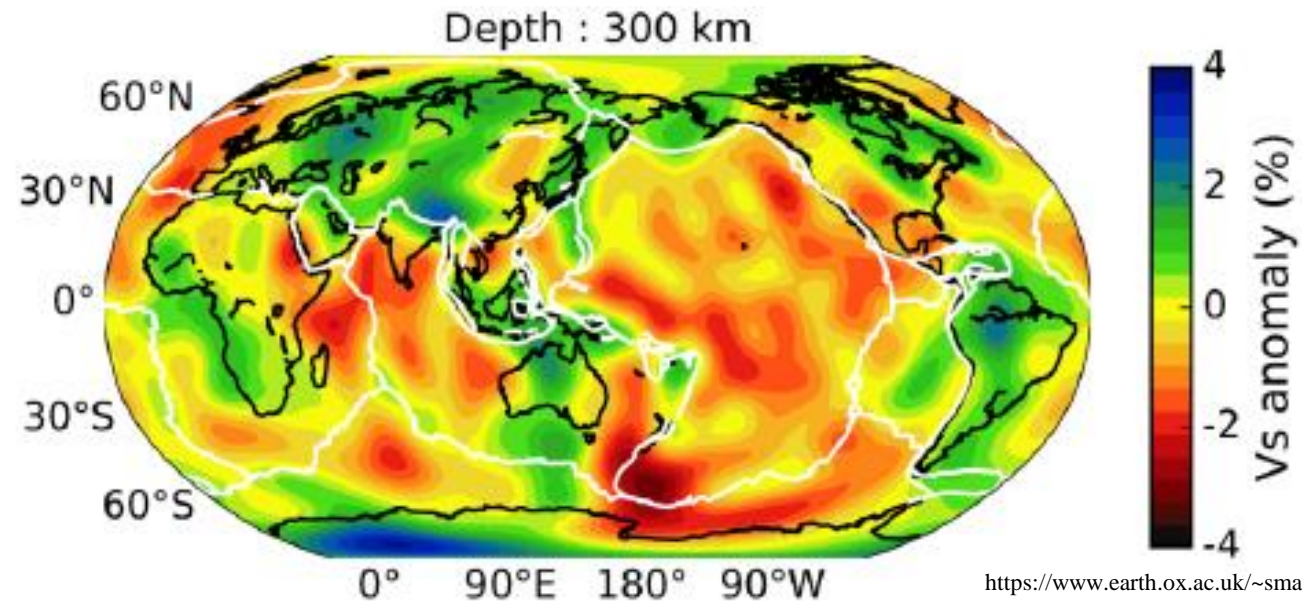
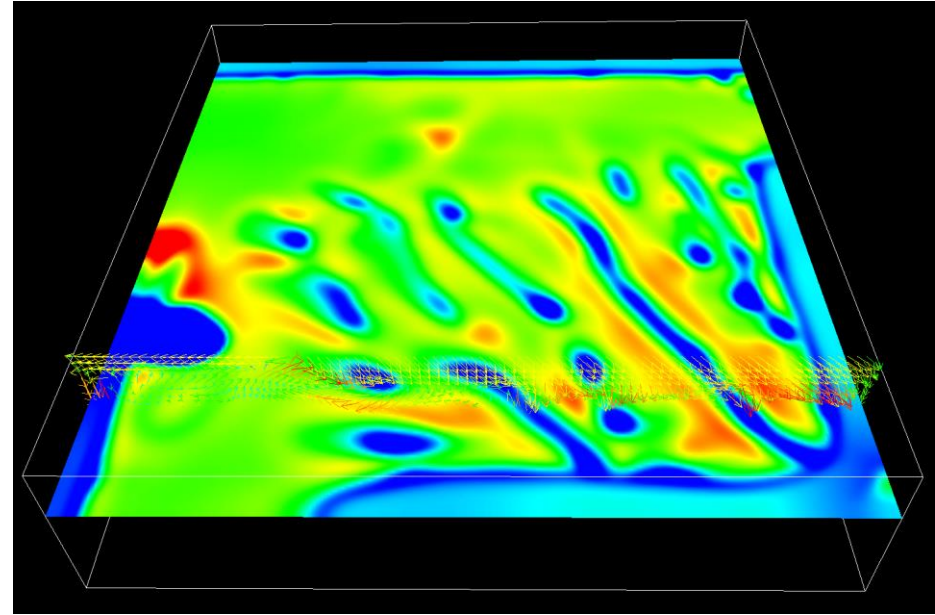
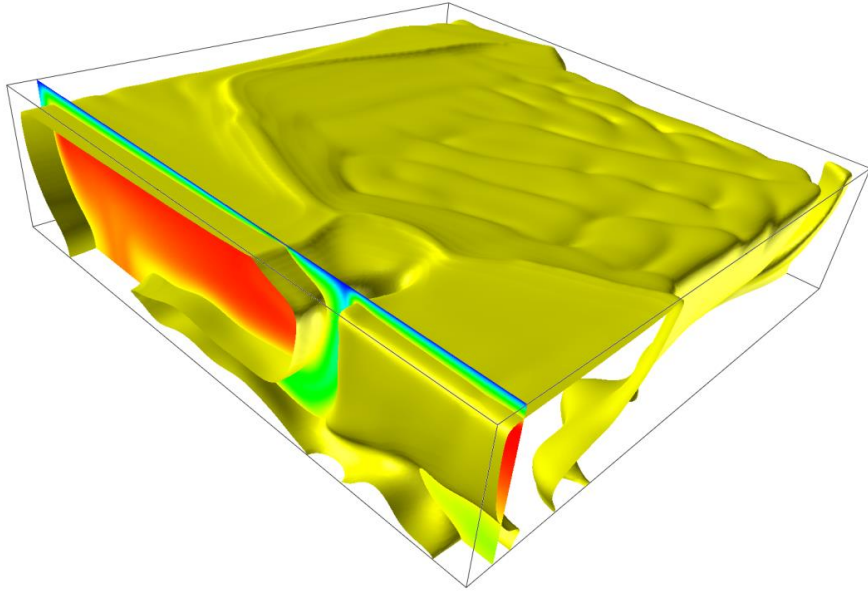
$1 / (\text{heat flux})^{**2}$



velocity & damage



# 古いプレートの下の二次対流





## 1成分1相系（熱対流）

スタグナント・リッドとリソスフェア

球殻熱対流の安定性：プルームとホットスポット火山

プレート・テクトニクス

断熱圧縮の効果：スーパー地球

## 1成分2相系（固相・固相）

ポスト・スピネル転移とフラッシング

## 1成分2相系（固相・液相）

火成活動・マンテル湧昇流フィードバック（1）：原理

## 2成分2相系（固相・液相）

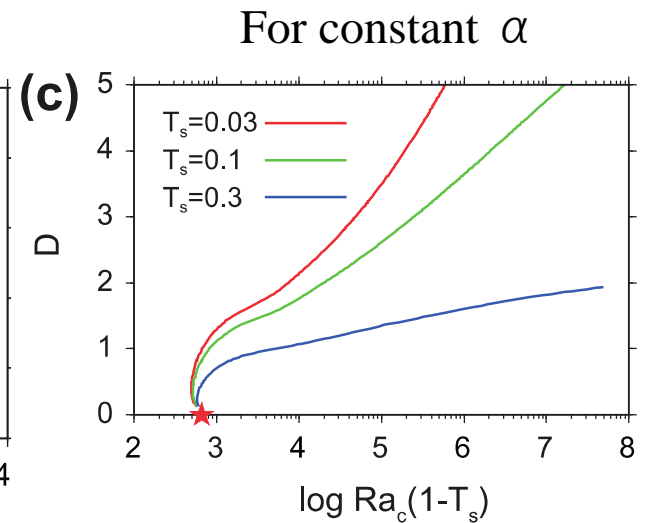
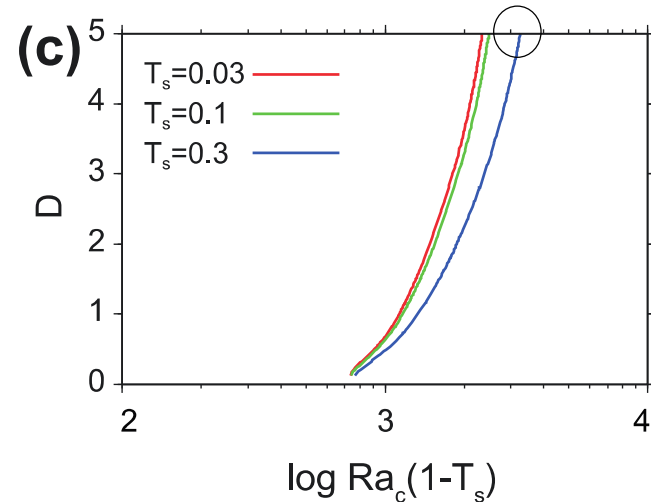
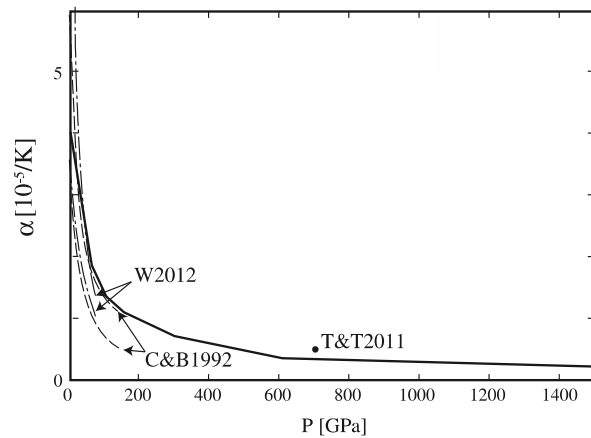
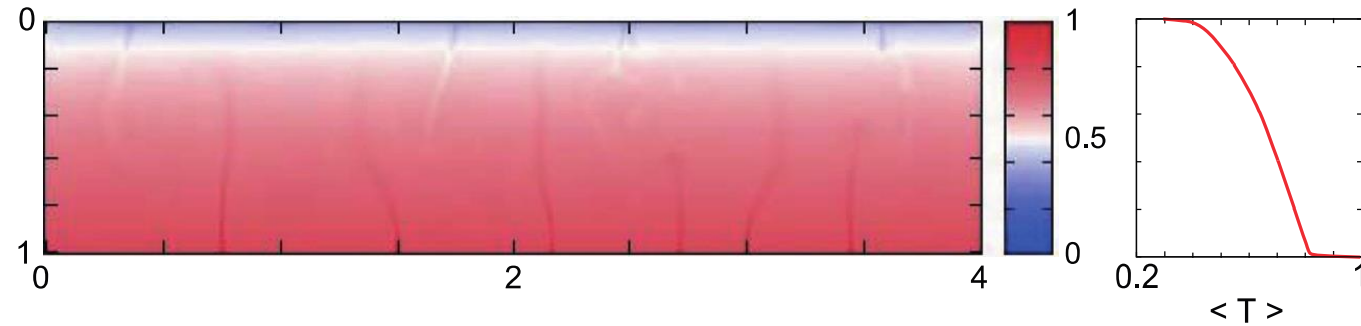
火成活動・マンテル湧昇流フィードバック（2）：マンテルの分化と攪拌

## 2成分3相系（固相2相・液相：下部マンテルの効果）

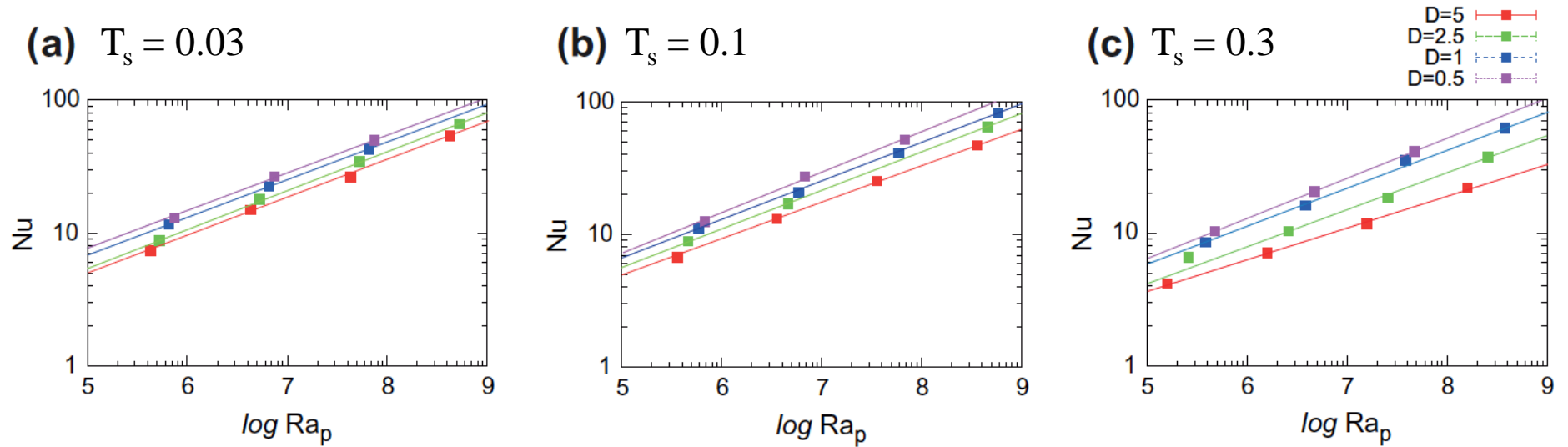
玄武岩バリアとバースト

# The effects of adiabatic compression

$$\bar{\rho} \left[ \frac{dT}{dt} - D\alpha(z)wT \right] = \nabla^2 T + \frac{D}{Ra} \tau_{ij} \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \quad D = \alpha g d / C_p$$



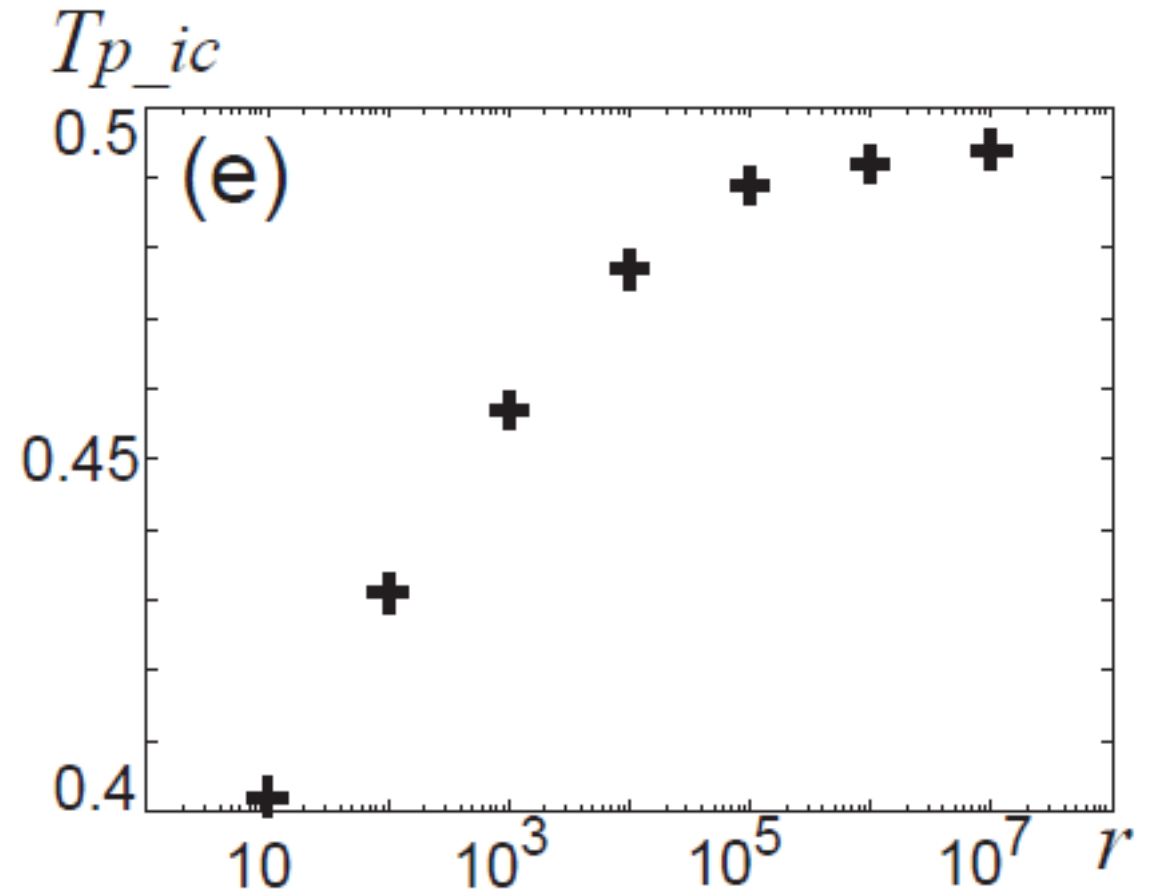
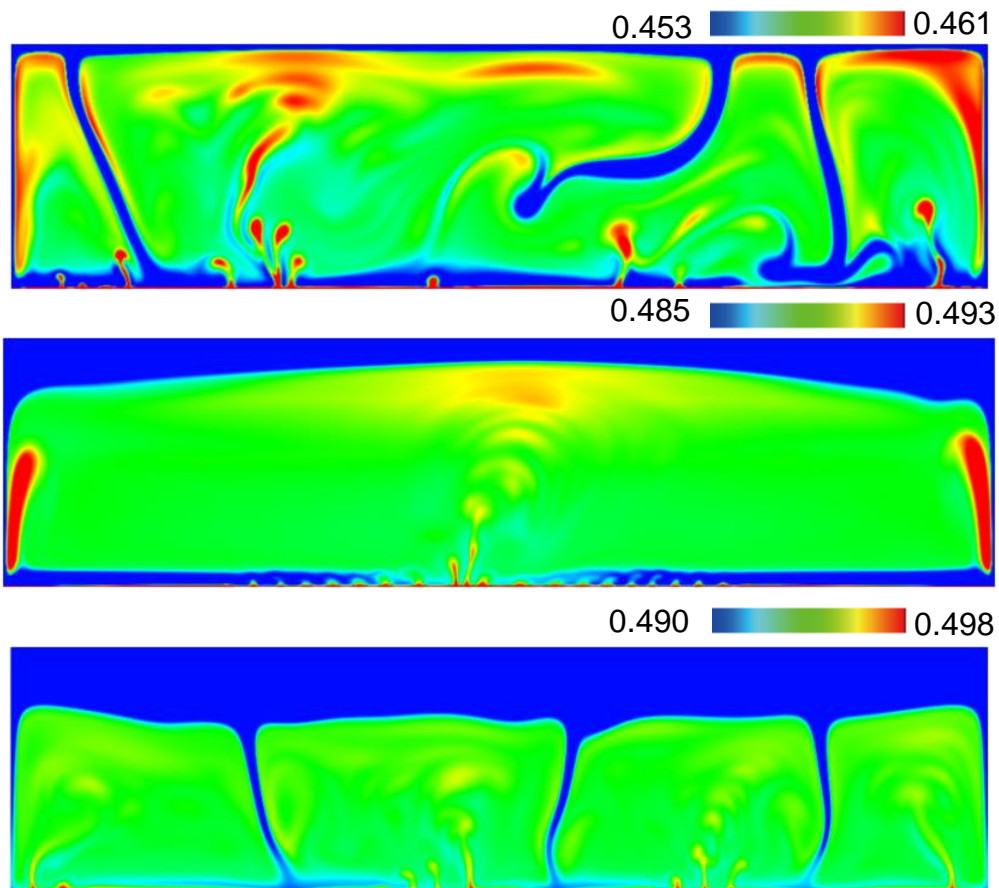
# Substantial dependence of the efficiency of convective heat transport on the surface T



(Tachinami et al., 2014)

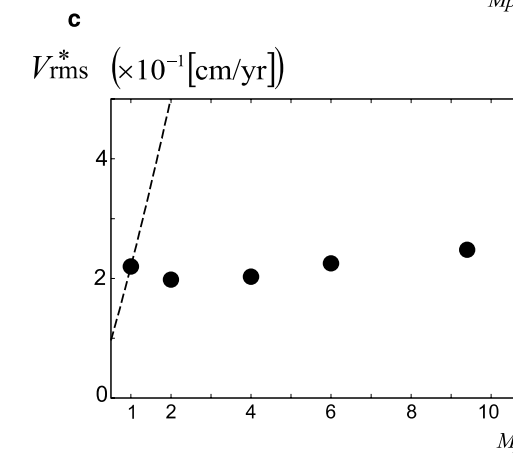
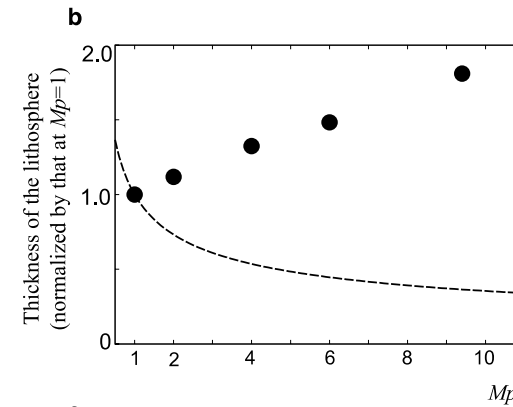
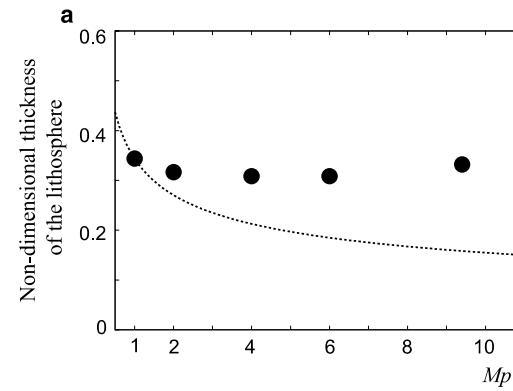
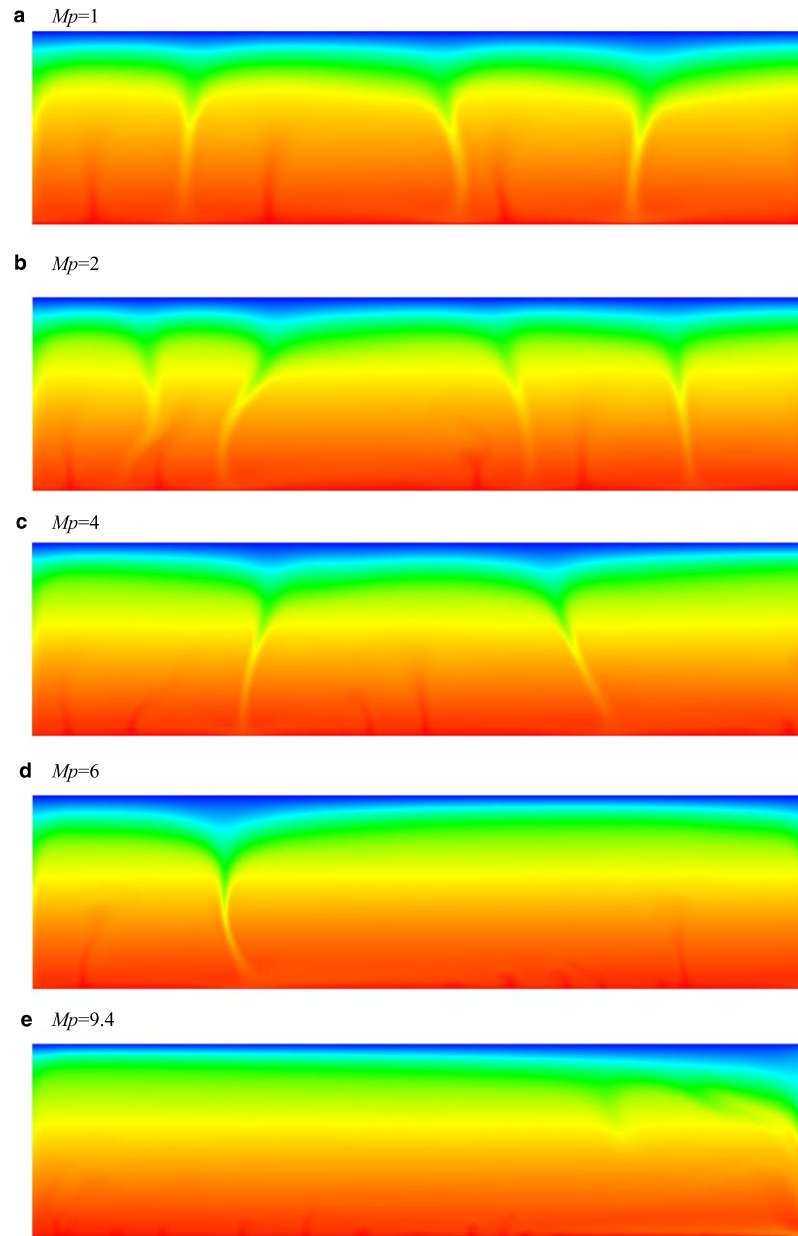
# An effect of the T-dependence of viscosity: A higher effective surface temperature

(potential temperature)

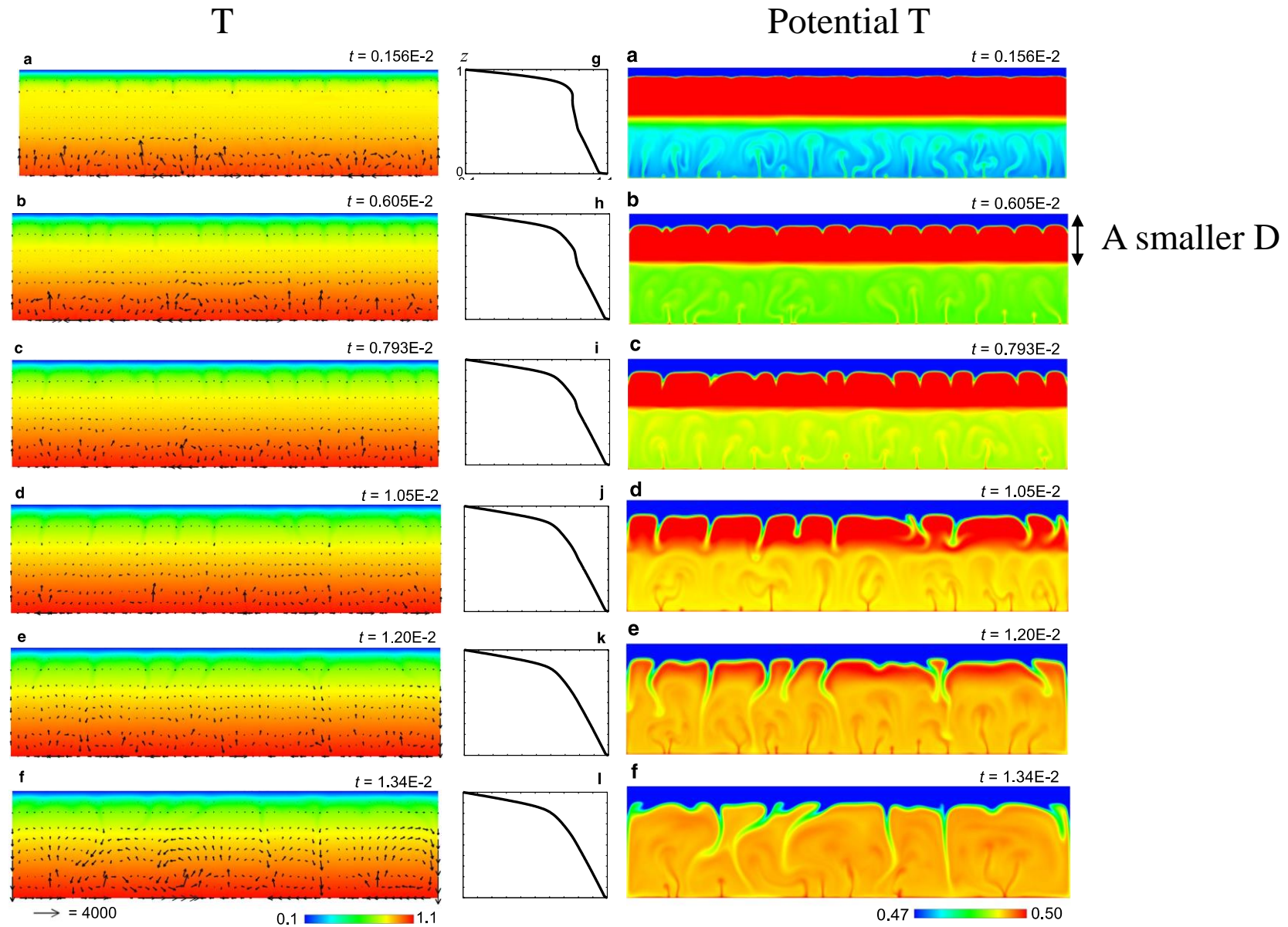




# The convective flow pattern in planets of various sizes.



# An effect of the initial condition; a temporarily layered convection



## 1成分1相系（熱対流）

スタグナント・リッドとリソスフェア

球殻熱対流の安定性：プルームとホットスポット火山

プレート・テクトニクス

断熱圧縮の効果：スーパー地球

## 1成分2相系（固相・固相）

ポスト・スピネル転移とフラッシング

## 1成分2相系（固相・液相）

火成活動・マンテル湧昇流フィードバック（1）：原理

## 2成分2相系（固相・液相）

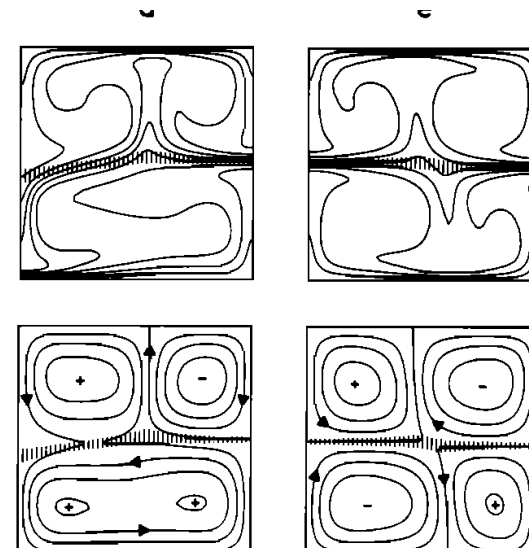
火成活動・マンテル湧昇流フィードバック（2）：マンテルの分化と攪拌

## 2成分3相系（固相2相・液相：下部マンテルの効果）

玄武岩バリアとバースト

# 660 km相転移とマントル対流

grams) for convection with  $ka = 4 \times 10^{-7}$  and  $DI = 0.0$ . The phase buoyancy parameter  $P = \bar{\gamma} Rb/Ra$  is  $+0.3$  in Figure 1a,  $0.0$  in Figure 1b,  $-0.3$  in Figure 1c,  $-0.4$  in Figure 1d, and  $-0.6$  in Figure 1e. The region in which  $0.2 \leq \Gamma \leq 0.8$  is marked by vertical bars. In Figures 1a, 1b, and 1c, steady state results are displayed, while Figures 1d and 1e show the situation approximately  $2.5 \times 10^{-2}$  nondimensional time units after the flow was started with a single-layer convection temperature profile. Contour lines for the temperature are 0.05 (+0.10) 0.95 in Figures 1a, 1b, and 1c and 0.10 (+0.10) 0.90 in Figures 1d and 1e. Isolines for the stream function are drawn every 20 units in Figures 1a, 1b, and 1c and every 8 units in Figures 1d and 1e.



ing  $d\Gamma/d\pi$  from (6) in each Gaussian integration point. The same applies to the modified energy equation (19). The temperature in (19) is calculated implicitly during the time step

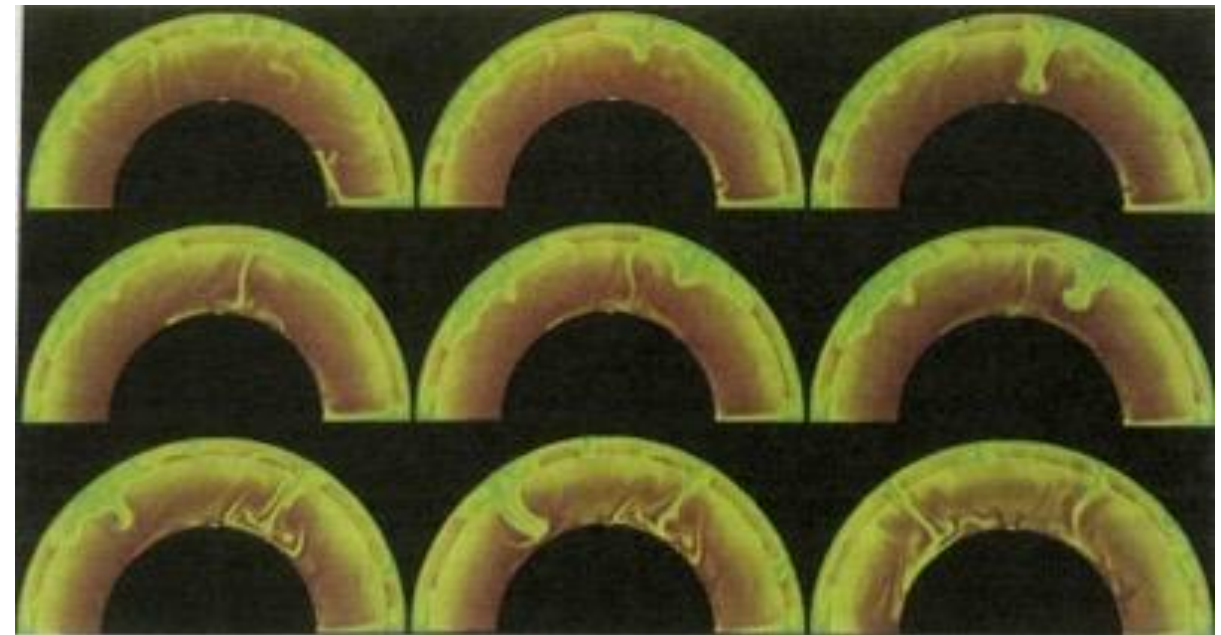
(Machetel & Weber, 1991)

## CONVECTION BY PHASE TRANSITIONS

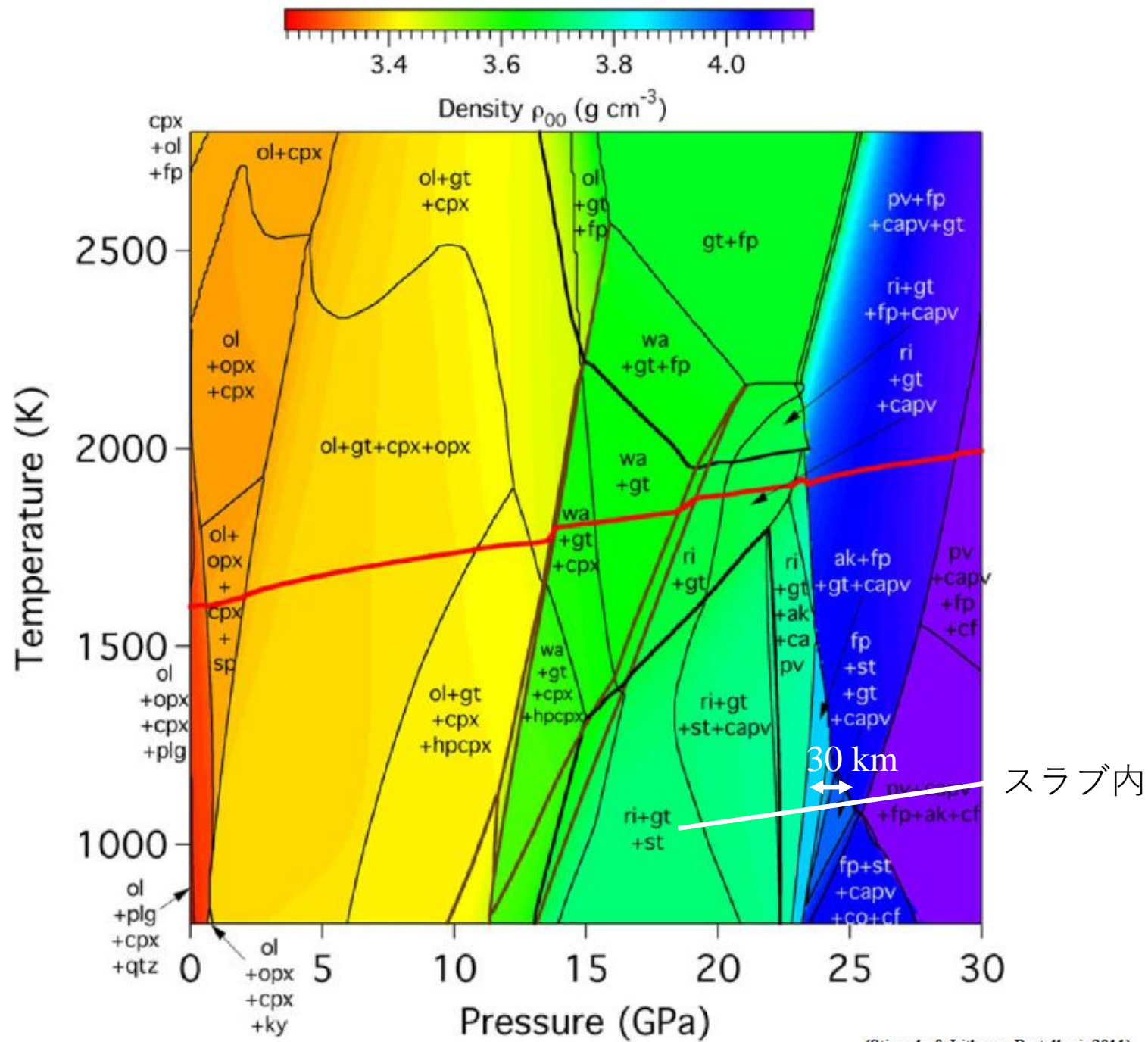
on, which should be equal:

$$\int (Ra wT - Rb w\Gamma) dV = \int \sigma_{ij} \frac{\partial u_i}{\partial x_j} dV \quad (2)$$

equality is fulfilled to better than 1%. The second consistency check is to compare the heat flow through the top ( $Q_{\text{top}}$ ) and bottom ( $Q_{\text{bot}}$ ); the difference must be made up by the change of volumetrically stored heat. To determine this quantity is somewhat complicated because some of the energy is locked up as latent heat which depends intrinsically on the absolute temperature at which the transition takes place. To simplify the calculation, we assume that the average transition temperature is  $T_s + 0.5$ . The energy balance can then be written in nondimensional units







## 1成分1相系（熱対流）

スタグナント・リッドとリソスフェア

球殻熱対流の安定性：プルームとホットスポット火山

プレート・テクトニクス

断熱圧縮の効果：スーパー地球

## 1成分2相系（固相・固相）

ポスト・スピネル転移とフラッシング

## 1成分2相系（固相・液相）

火成活動・マンテル湧昇流フィードバック（1）：原理

## 2成分2相系（固相・液相）

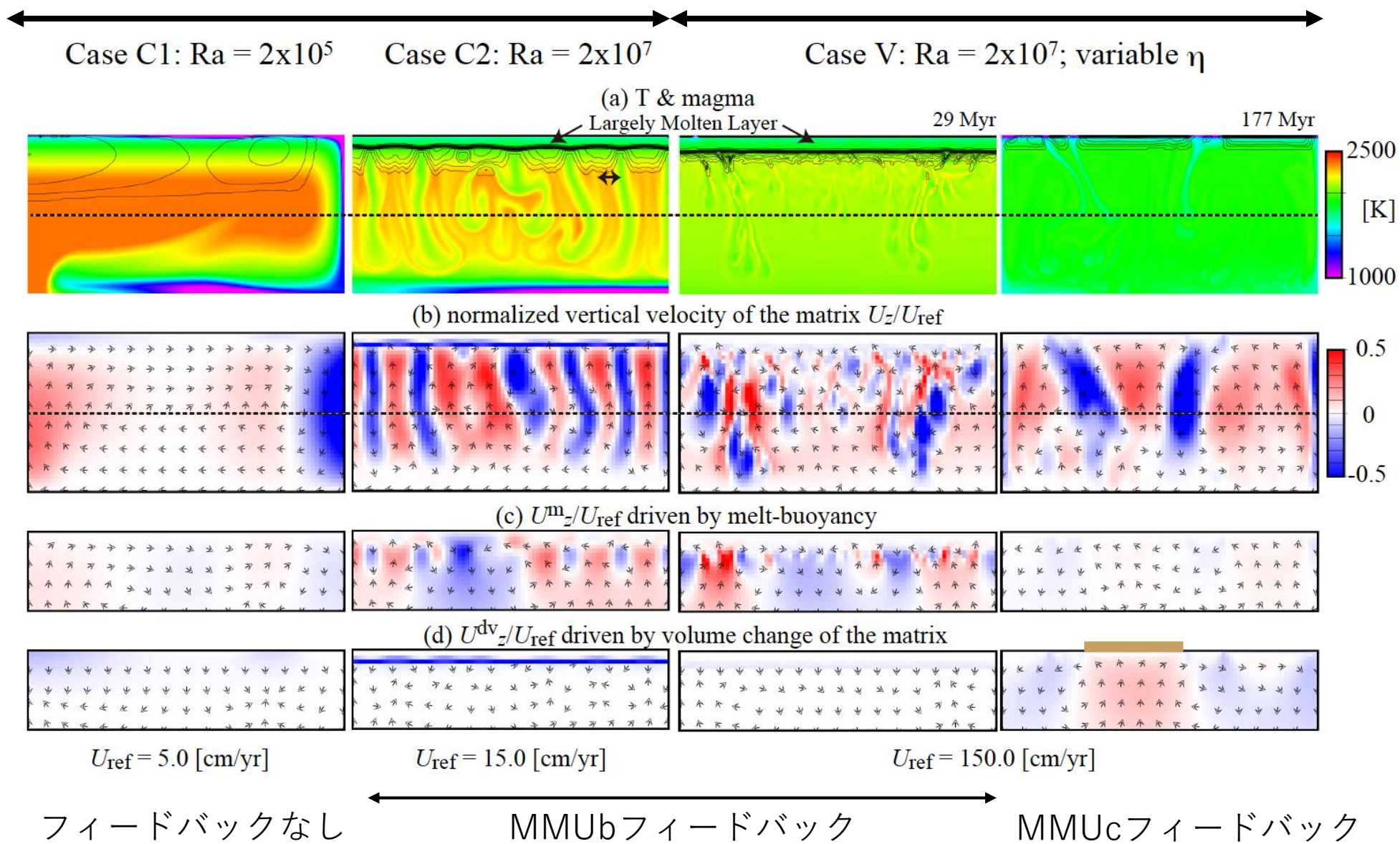
火成活動・マンテル湧昇流フィードバック（2）：マンテルの分化と攪拌

## 2成分3相系（固相2相・液相：下部マンテルの効果）

玄武岩バリアとバースト

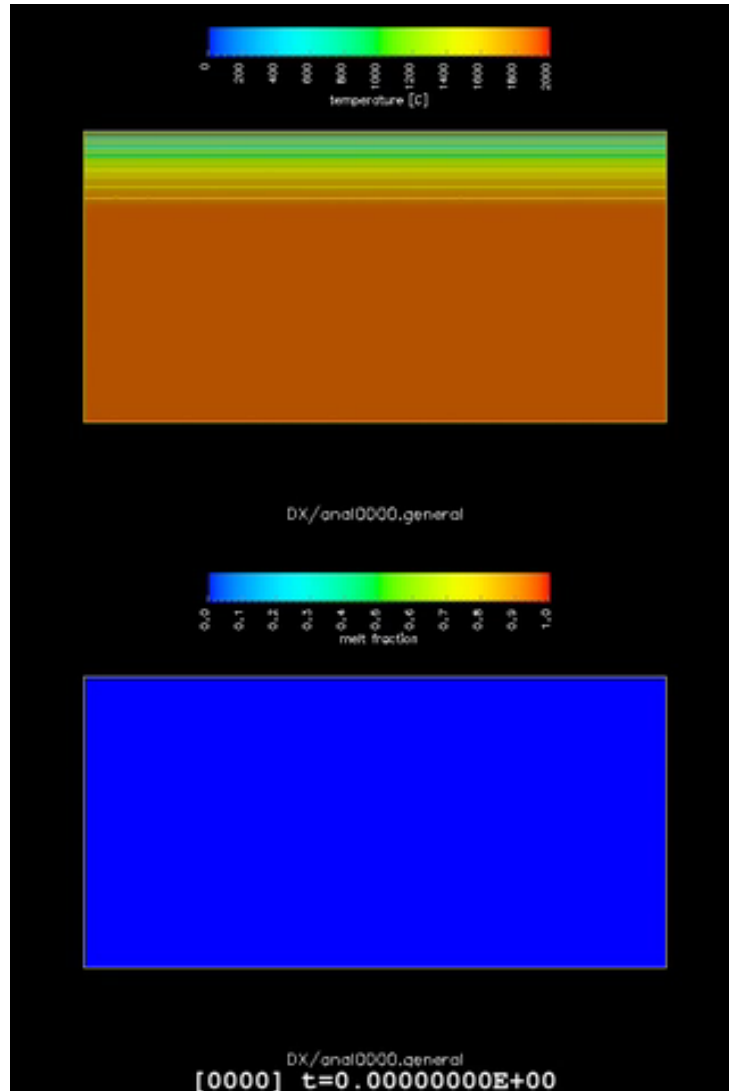
粘性率一定

温度依存型粘性率

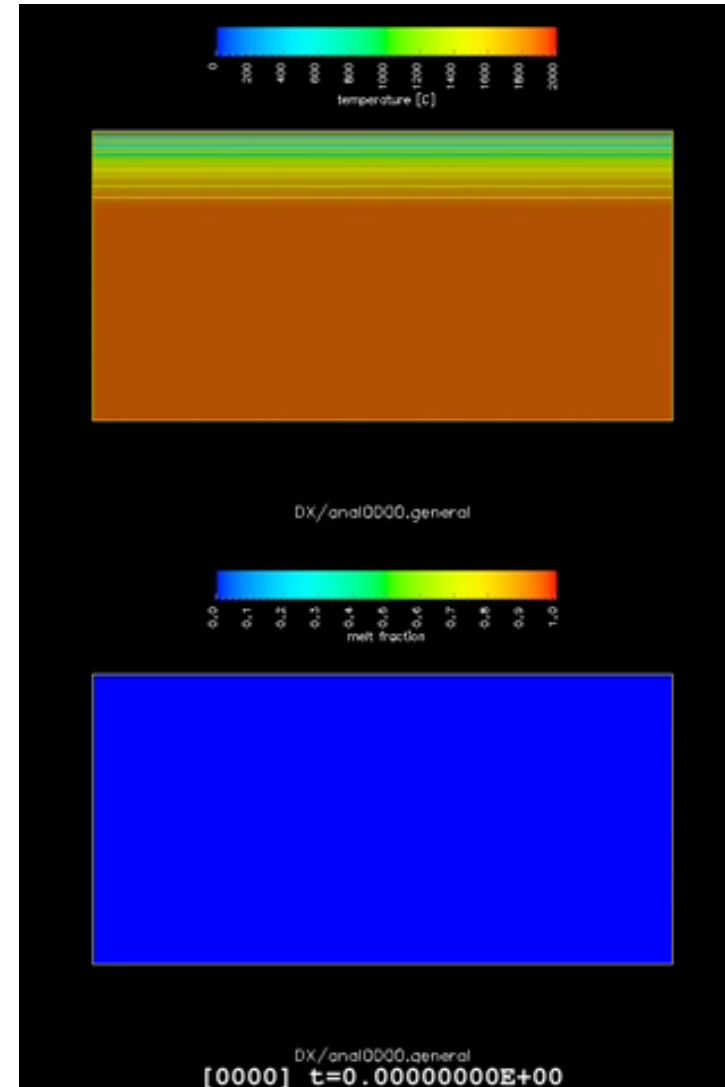


# 浮力を介したMMU feedback

フィードバックなし

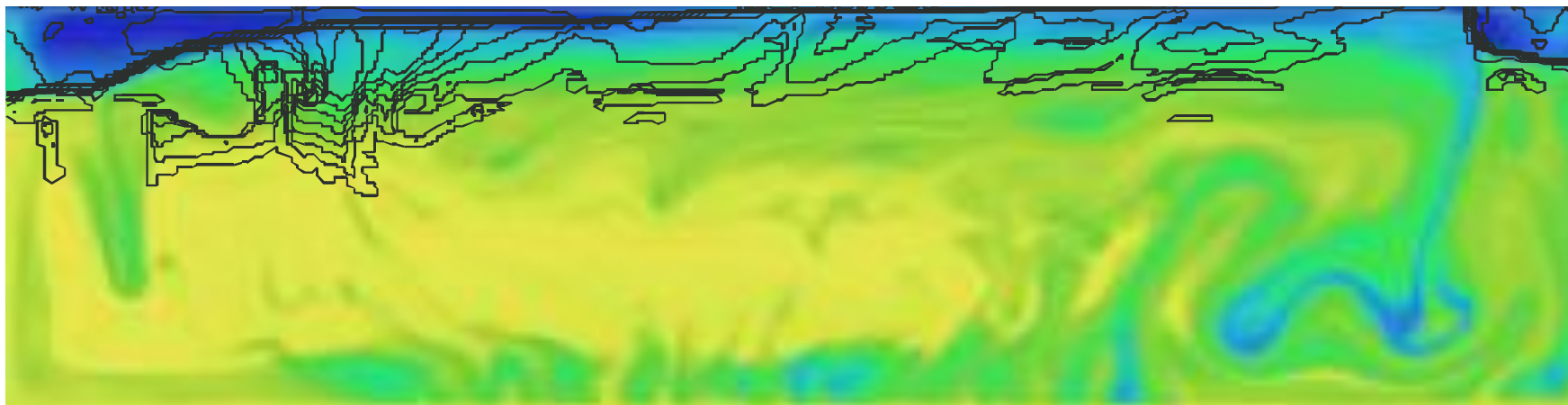
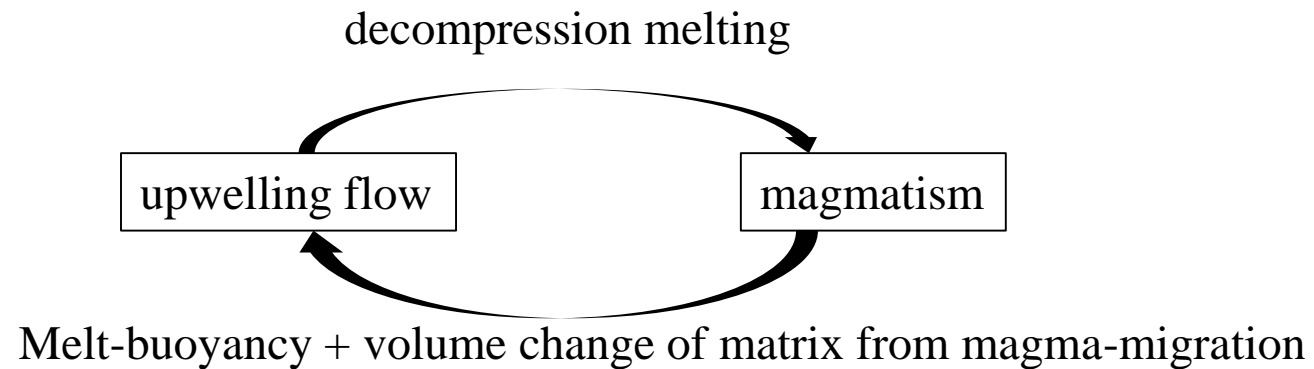


フィードバックあり





# The Magmatism-Mantle Upwelling feedback



## 1成分1相系（熱対流）

スタグナント・リッドとリソスフェア

球殻熱対流の安定性：プルームとホットスポット火山

プレート・テクトニクス

断熱圧縮の効果：スーパー地球

## 1成分2相系（固相・固相）

ポスト・スピネル転移とフラッシング

## 1成分2相系（固相・液相）

火成活動・マンテル湧昇流フィードバック（1）：原理

## 2成分2相系（固相・液相）

火成活動・マンテル湧昇流フィードバック（2）：マンテルの分化と攪拌

## 2成分3相系（固相2相・液相：下部マンテルの効果）

玄武岩バリアとバースト

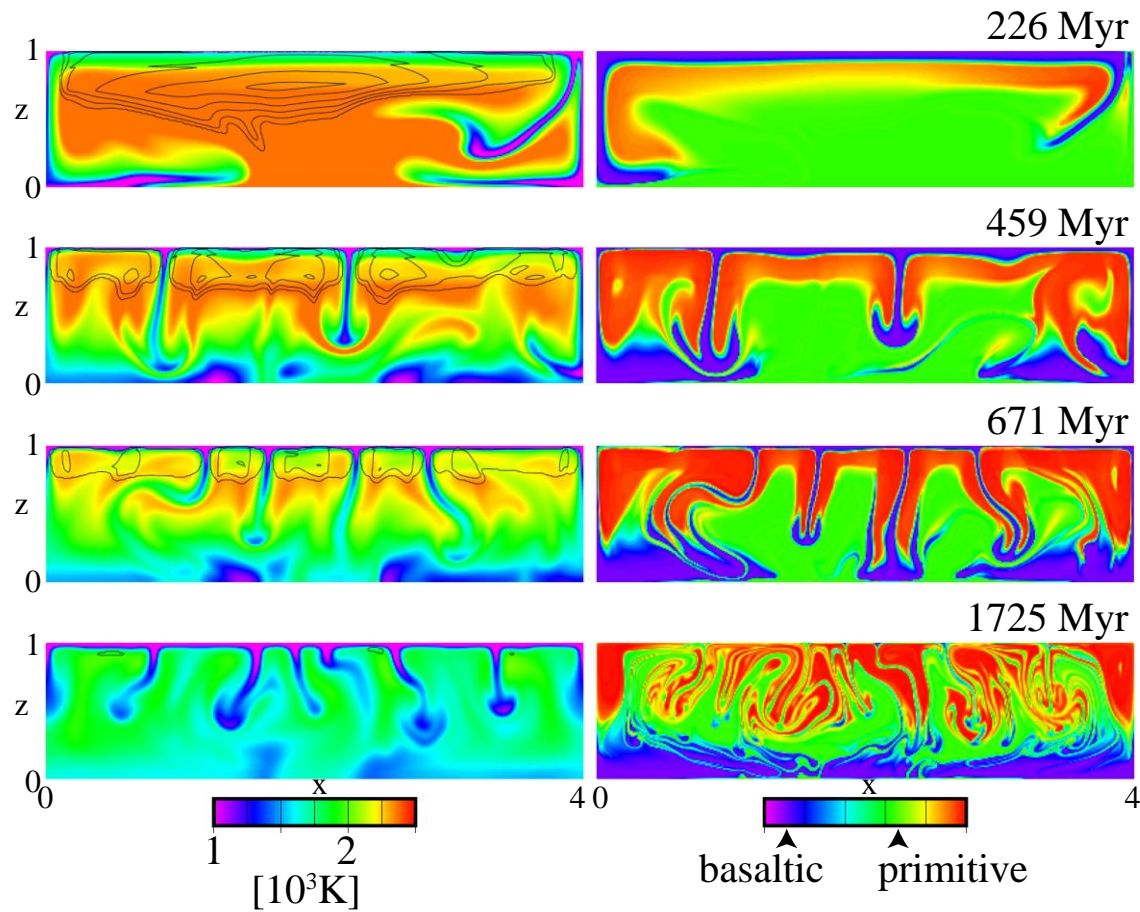
# 粘性率一定のMMUbフィードバックとマンツルの攪拌

フィードバックなし:  $Ra = 2 \times 10^5$

フィードバックあり:  $Ra = 2 \times 10^7$

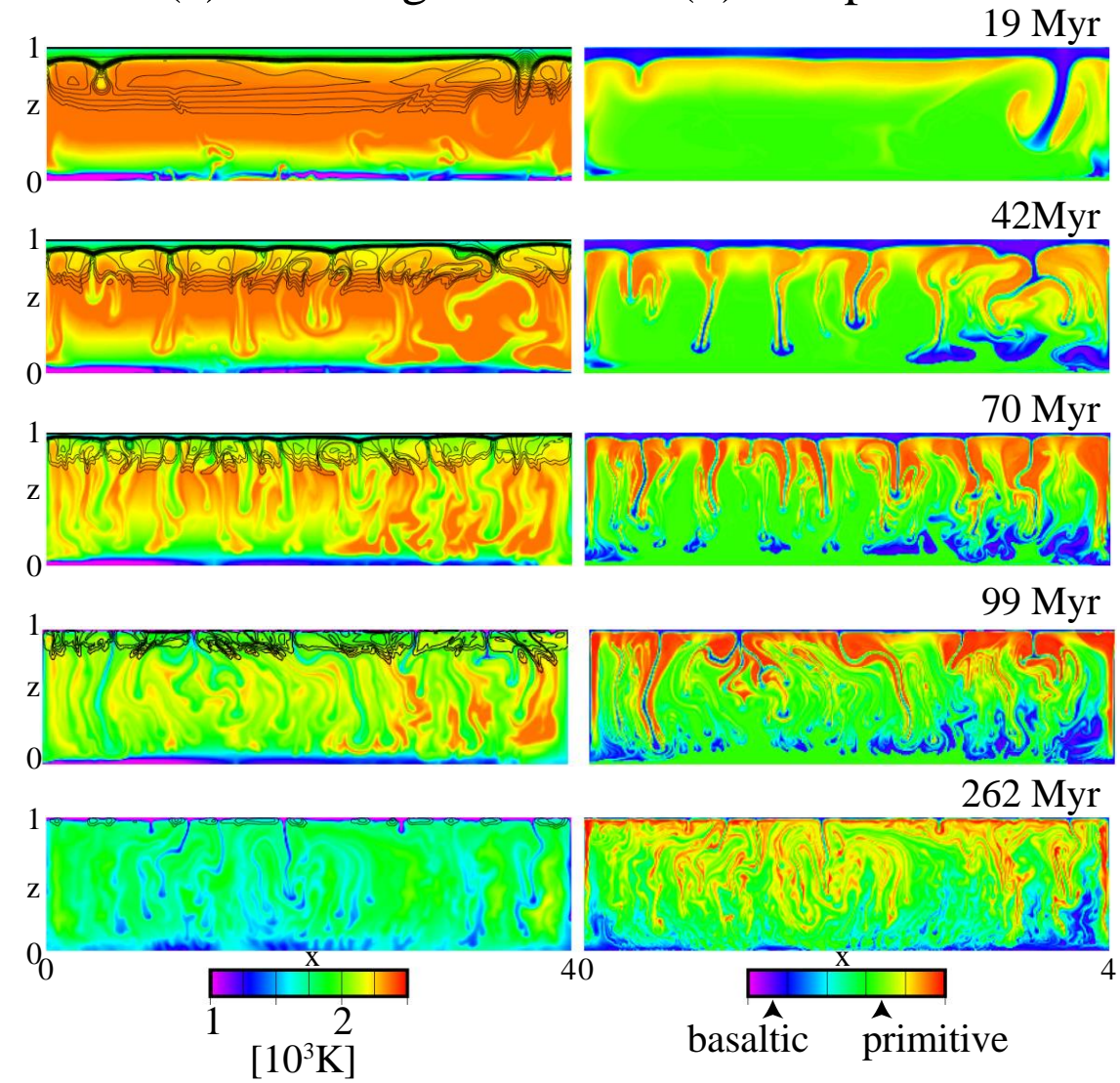
(a) T & magma

(b) composition



(a) T & magma

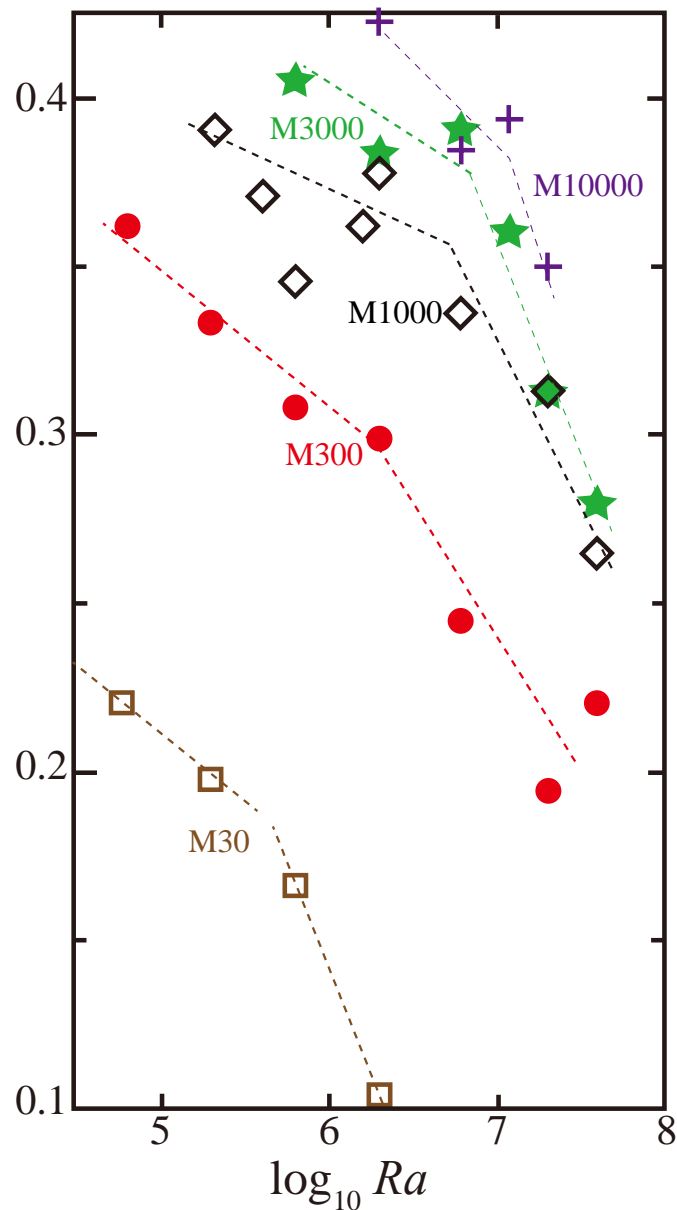
(b) composition





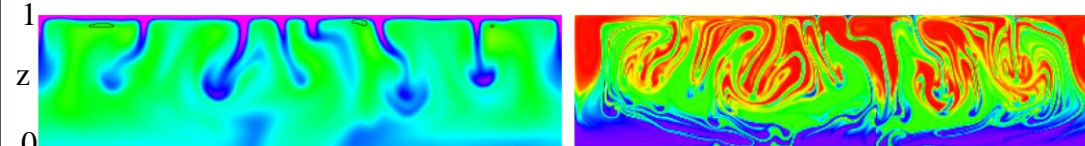
# MMUbフィードバックとマンツルの攪拌・混合

(a) rms-average of  $(x - x_{\text{init}})$  at depths

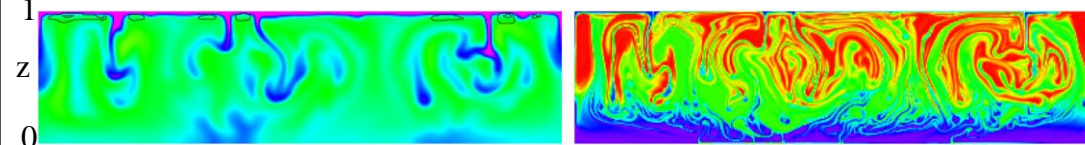


(b) temperature & magma

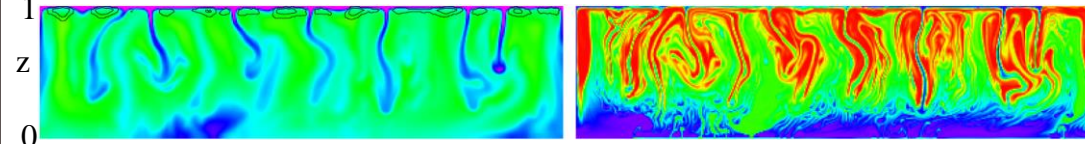
Case M300-2:  $Ra = 2 \times 10^5$



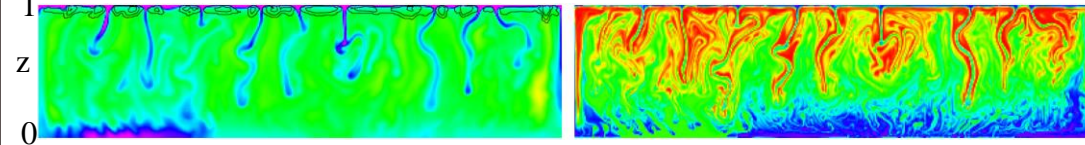
Case M300-3:  $Ra = 6 \times 10^5$



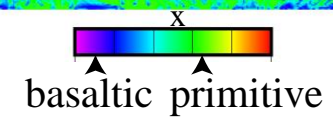
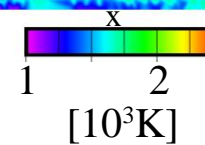
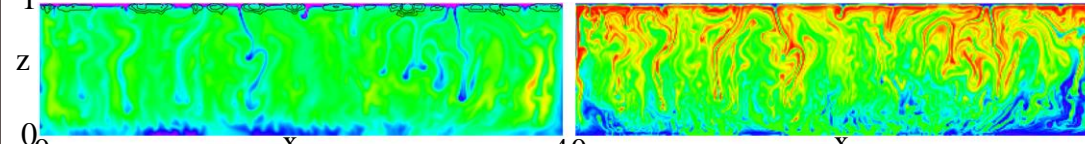
Case M300-4:  $Ra = 2 \times 10^6$



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



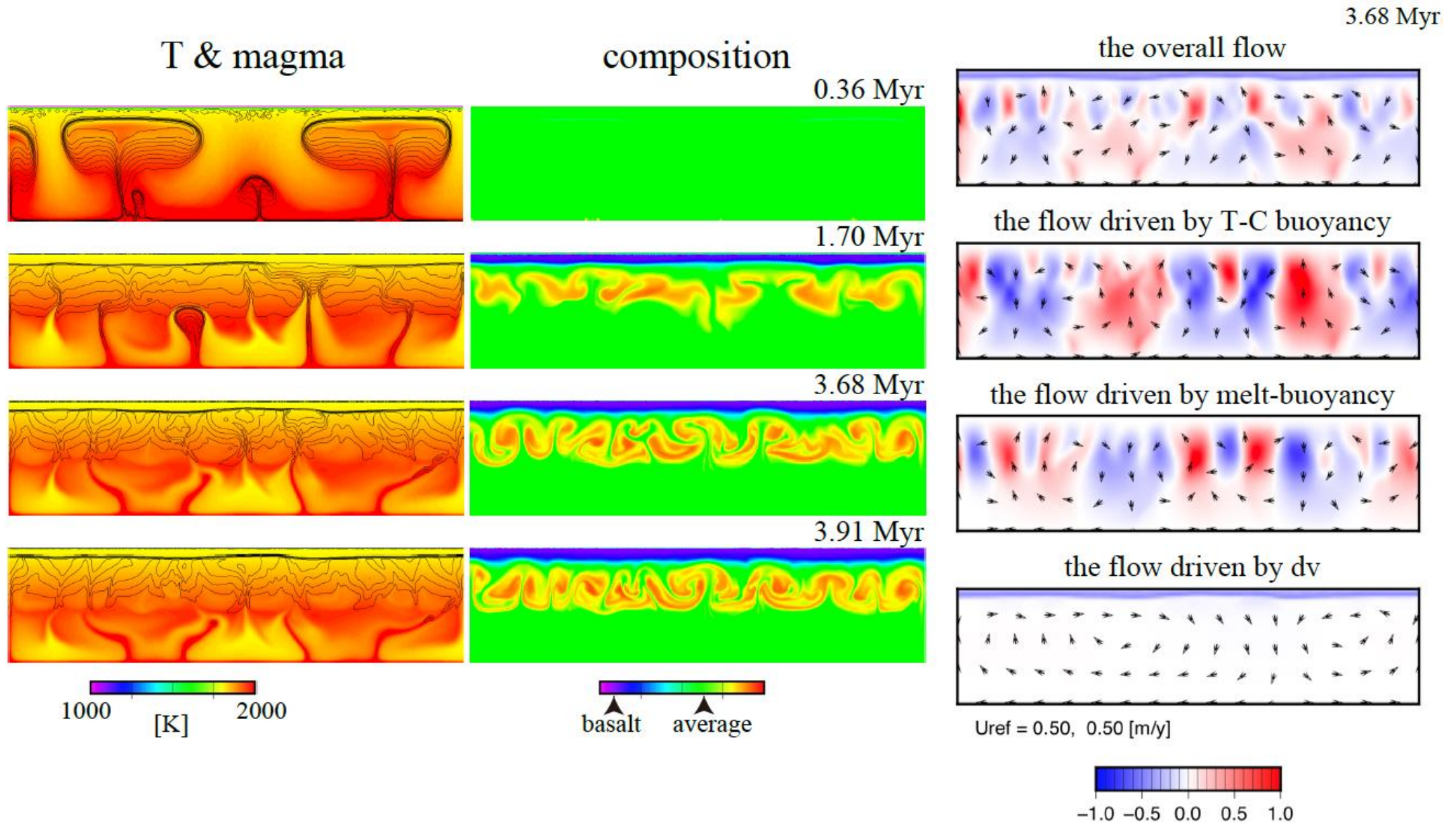
Case M300-6:  $Ra = 2 \times 10^7$



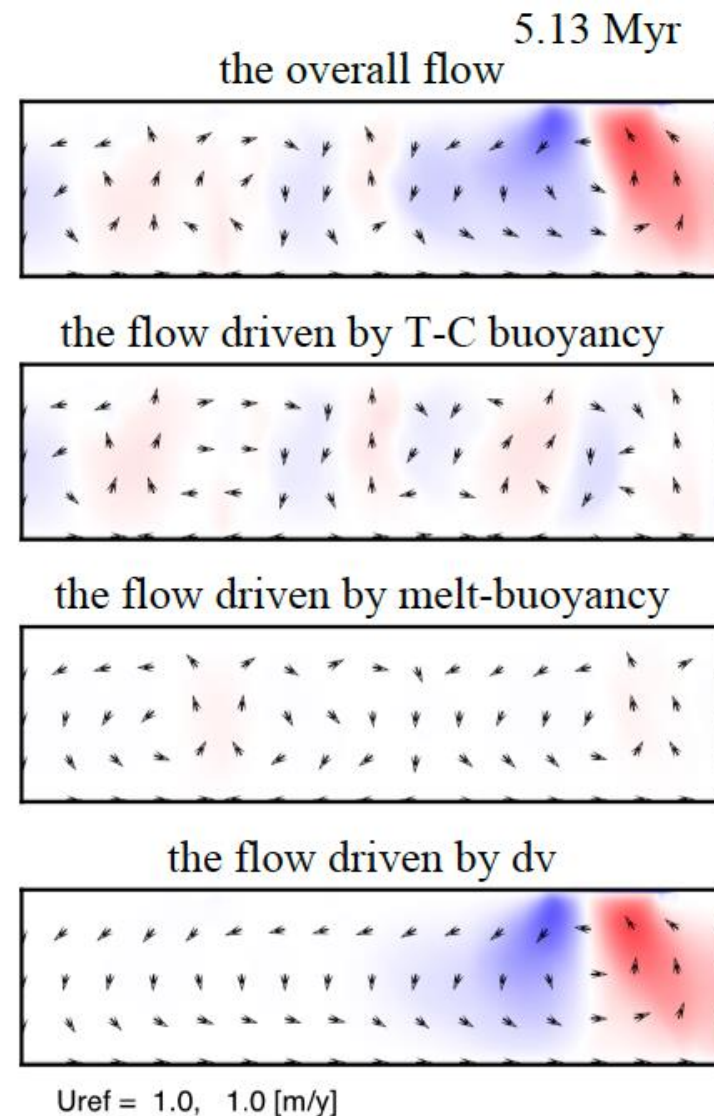
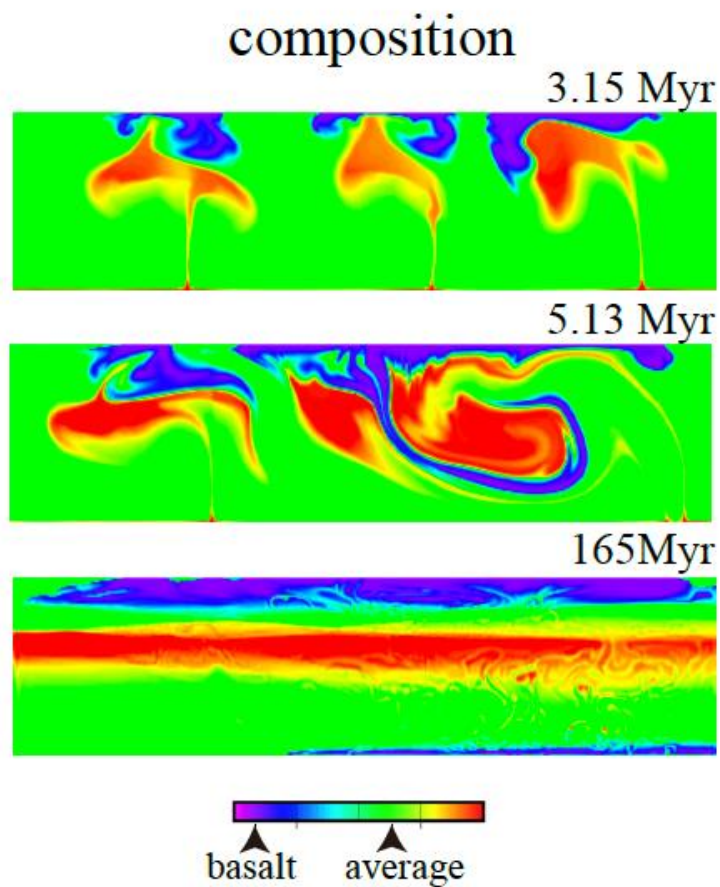
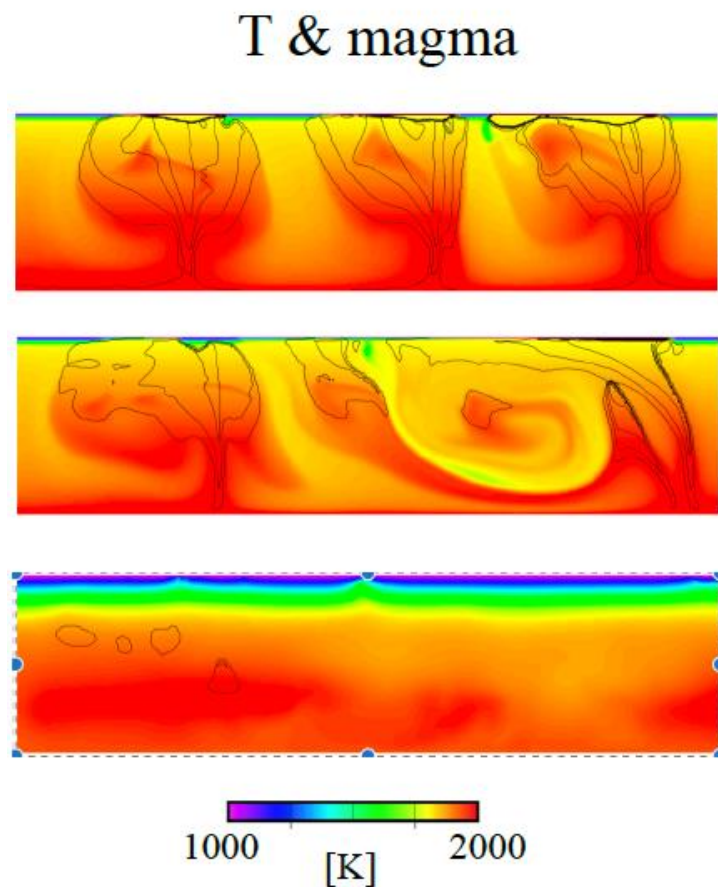
(Ogawa, 2018)



# MMUb feedback with $\eta$ (T): $Ra > R_{MMU}$

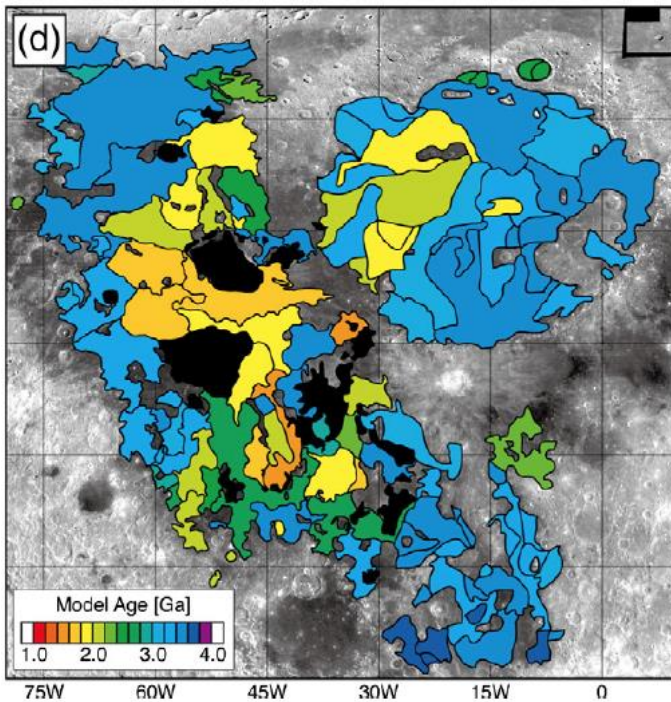


# MMUc feedback with $\eta(T)$ : $Ra < R_{MMU}$

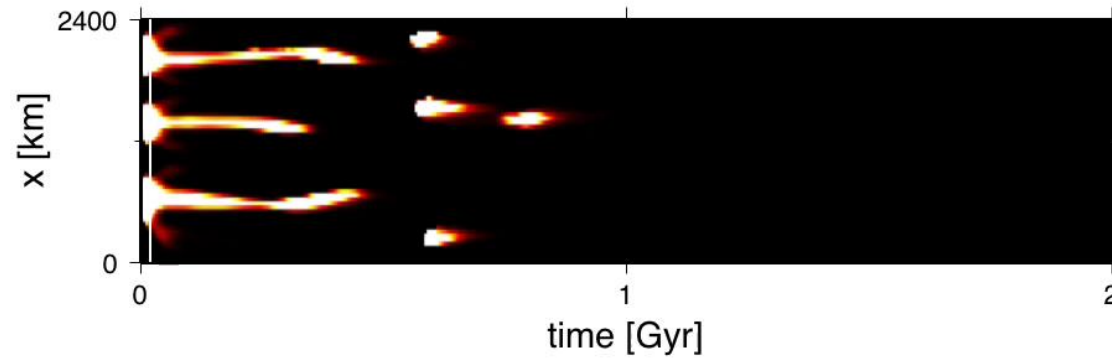




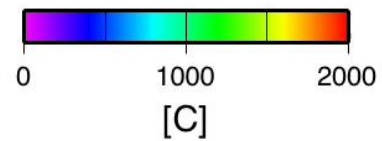
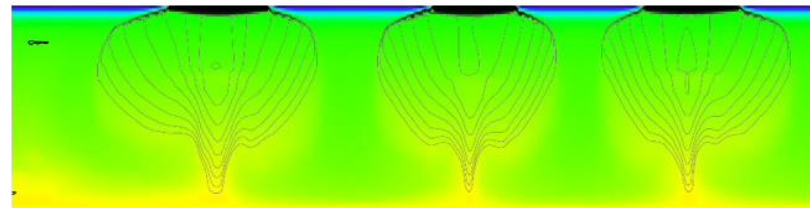
# Magmatism in a two-component system: without the MMU-feedback



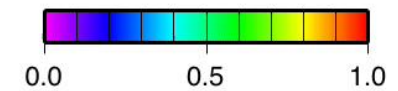
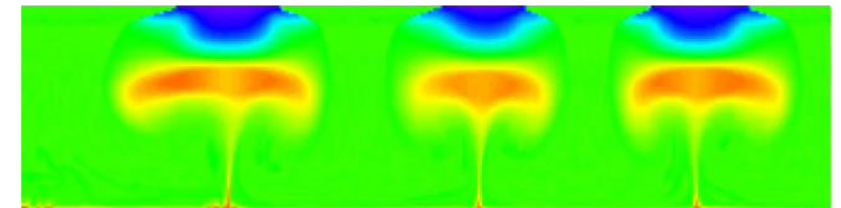
(Morota et al., 2011)



T & magma



composition

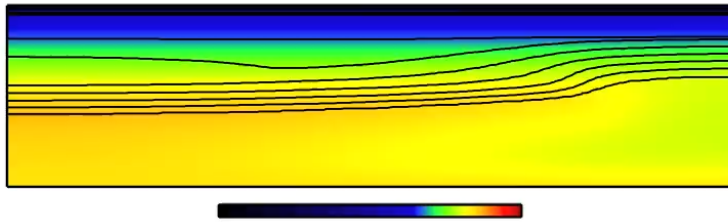


# Magmatism in two-component system: with the MMU-feedback

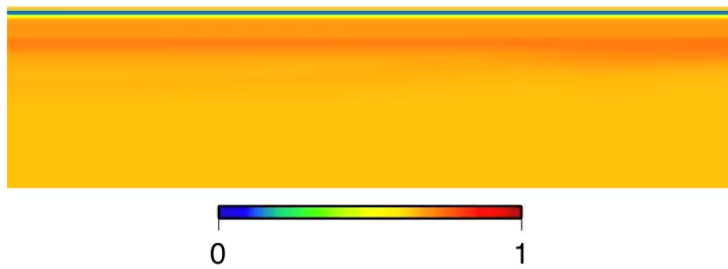
wetmars S7-18-1

0.18 My

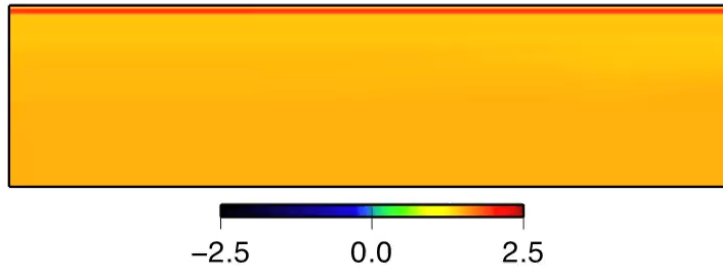
Flood basalt of 3.7 Ga



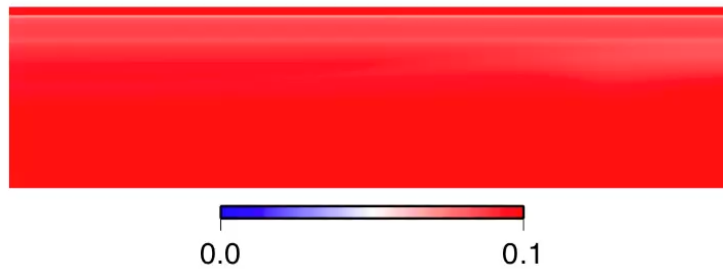
temperature & magma



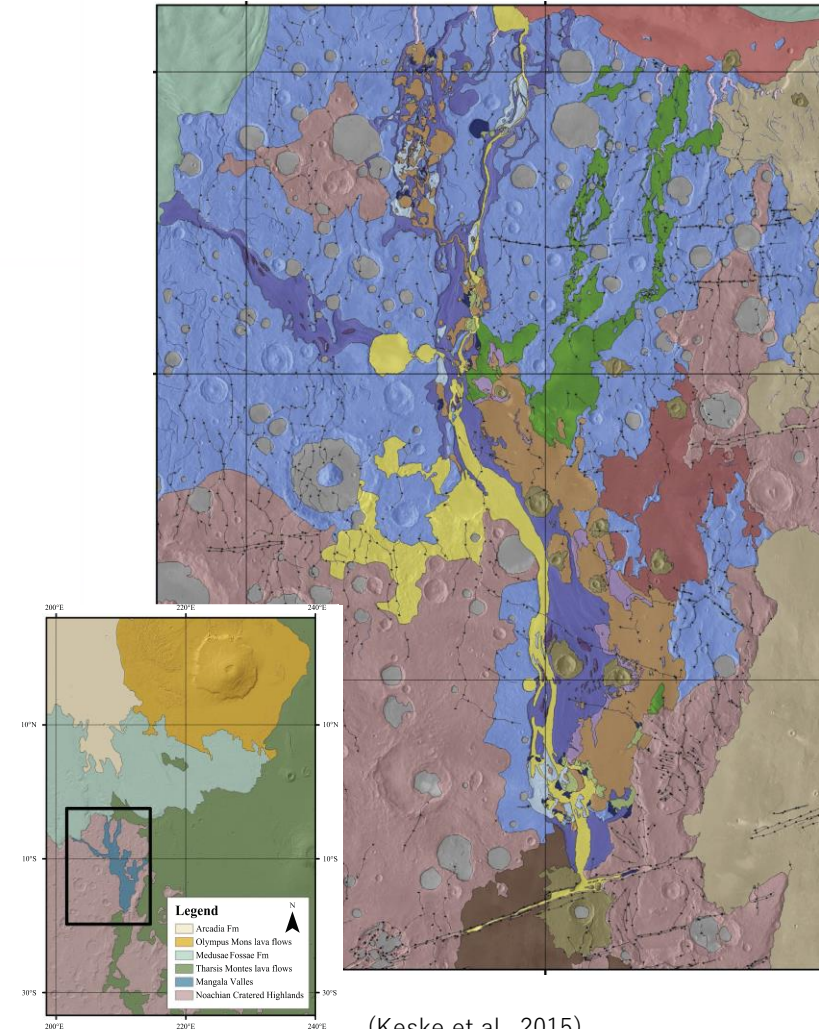
composition



log10(internal\_heating [pW/kg])



water\_content (%)



(Keske et al., 2015)



## 1成分1相系（熱対流）

スタグナント・リッドとリソスフェア

球殻熱対流の安定性：プルームとホットスポット火山

プレート・テクトニクス

断熱圧縮の効果：スーパー地球

## 1成分2相系（固相・固相）

ポスト・スピネル転移とフラッシング

## 1成分2相系（固相・液相）

火成活動・マンテル湧昇流フィードバック（1）：原理

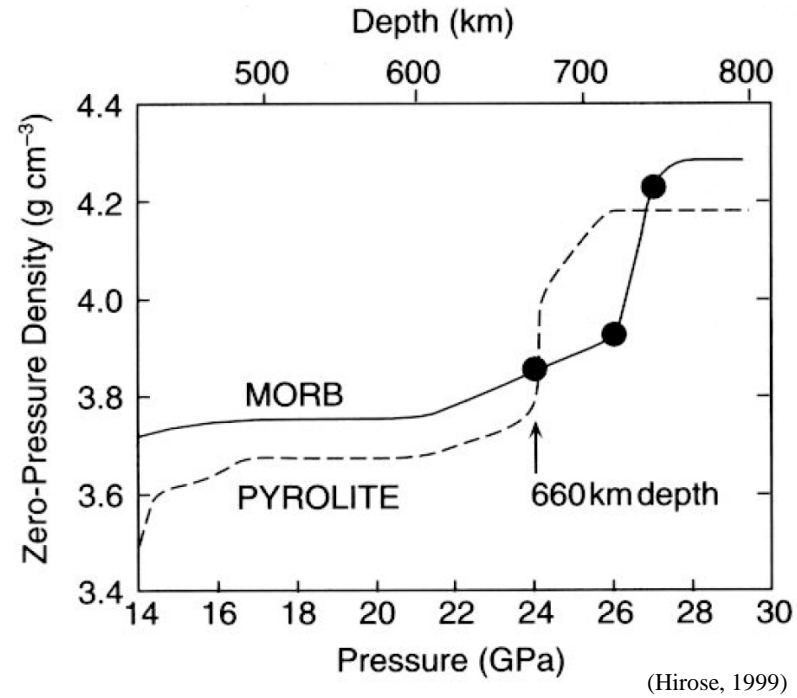
## 2成分2相系（固相・液相）

火成活動・マンテル湧昇流フィードバック（2）：マンテルの分化と攪拌

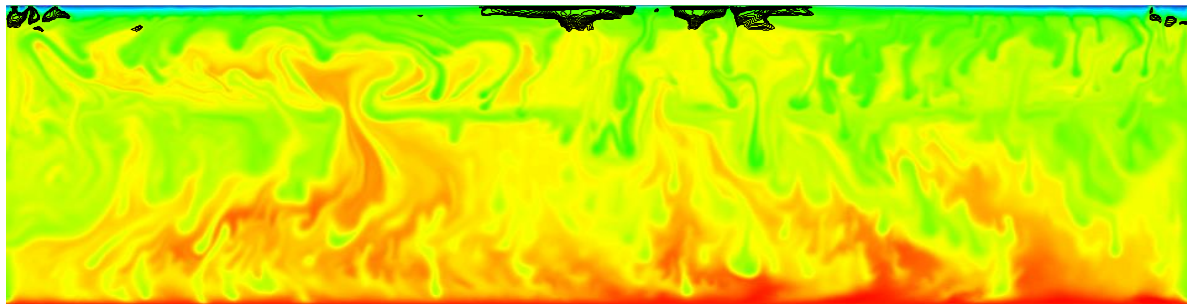
## 2成分3相系（固相2相・液相：下部マンテルの効果）

玄武岩バリアとバースト

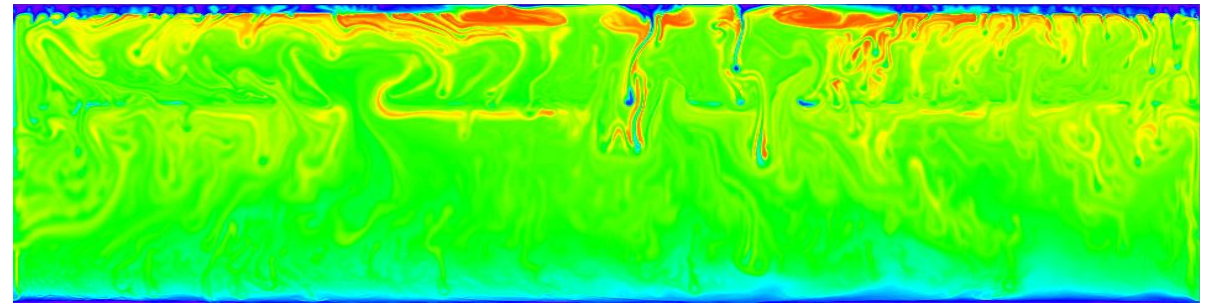
# 玄武岩バリアー



T & magma



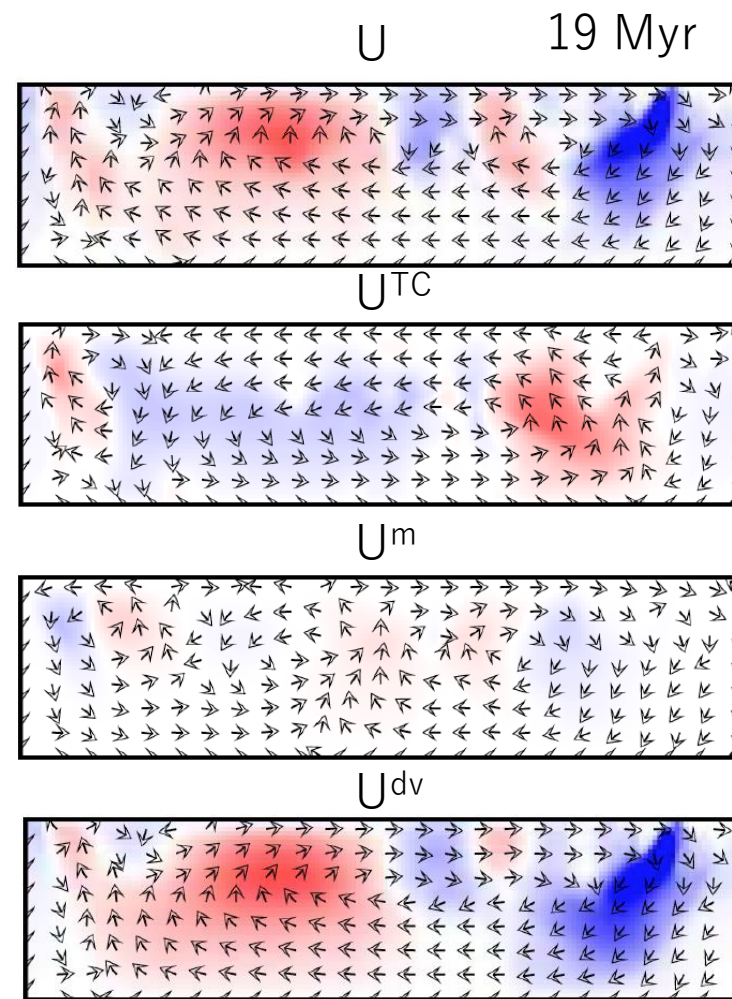
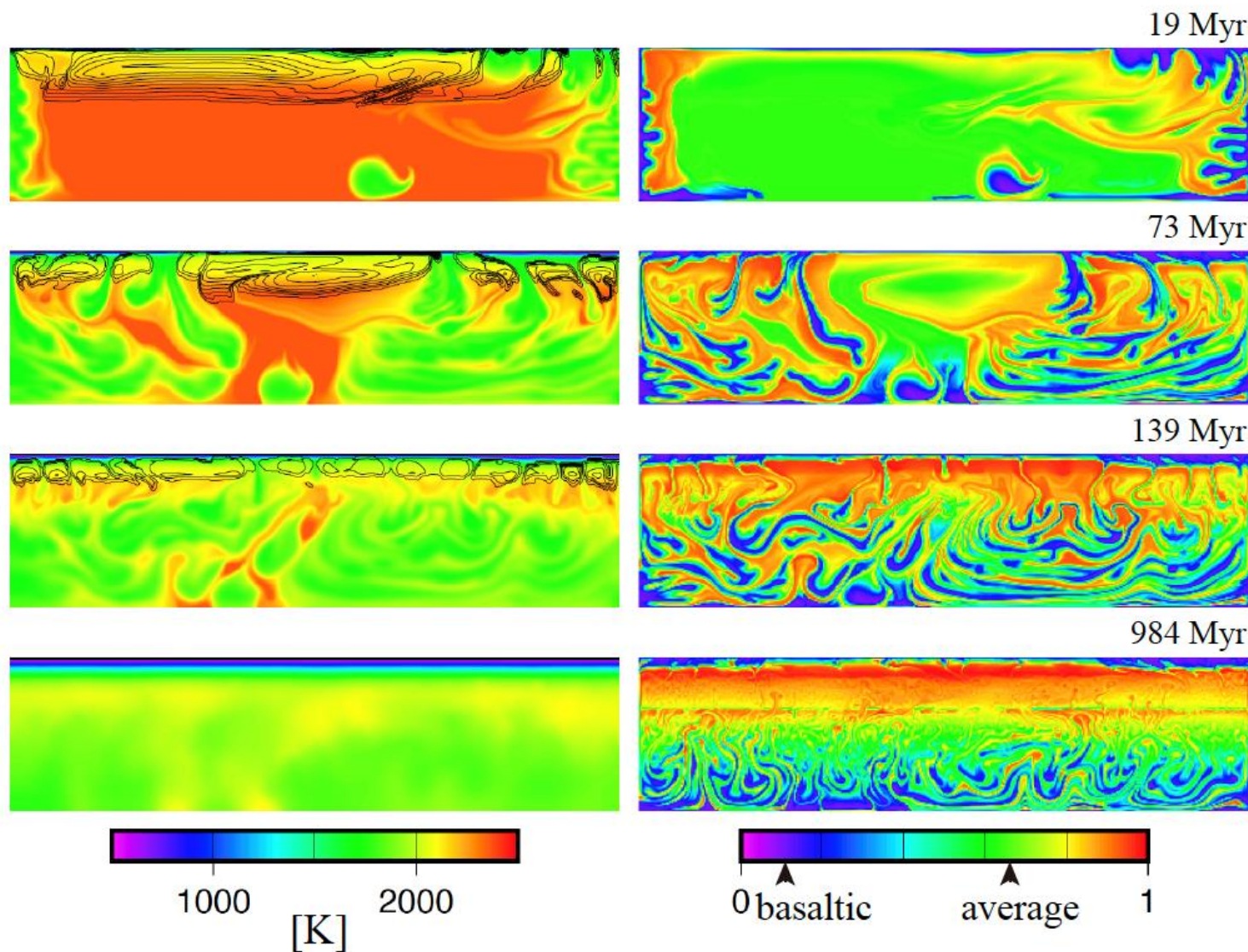
composition



# 玄武岩バリアーとMMUcフィードバック

(a) T & magma

(b) composition

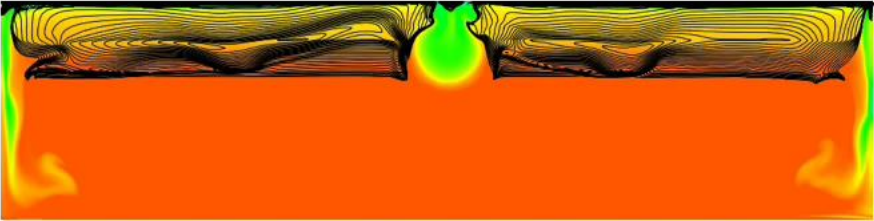


スケール 1 [m/yr]



10 Myr

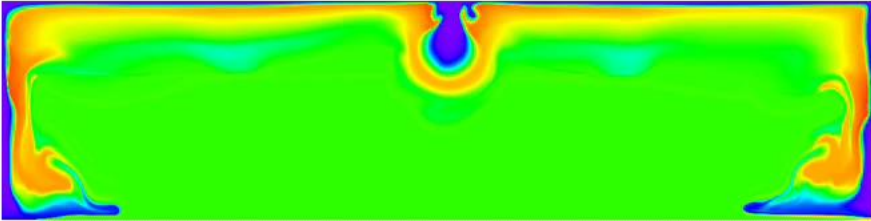
T & magma



1000 2000

[K]

composition



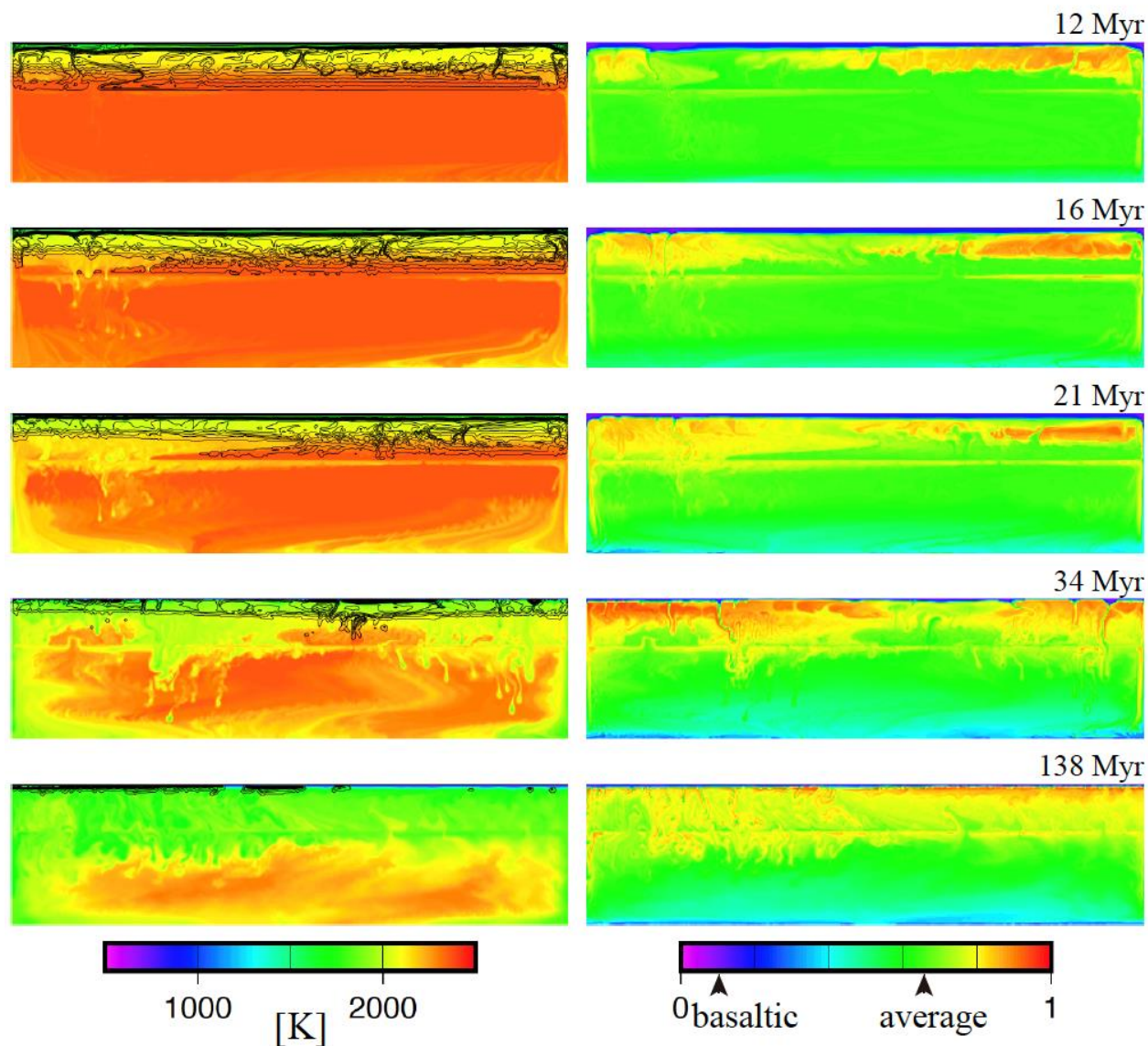
0.0 0.5 1.0



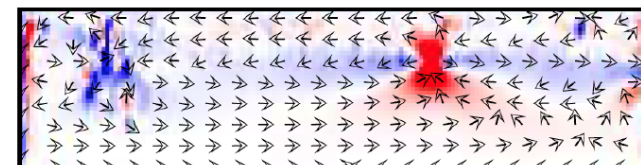
# 玄武岩バリアーとMMUbフィードバック

(a) T & magma

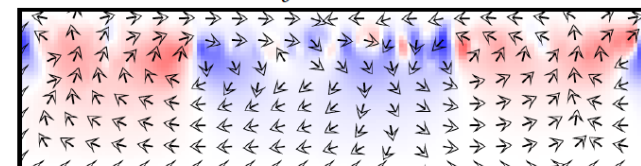
(b) composition



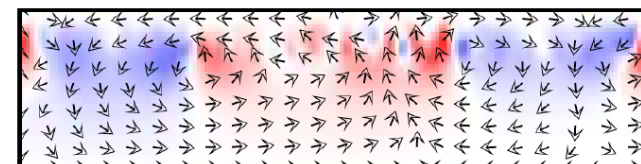
(b)  $U/U_{ref}$  ( $U_{ref}=2$  m/yr) 16 Myr



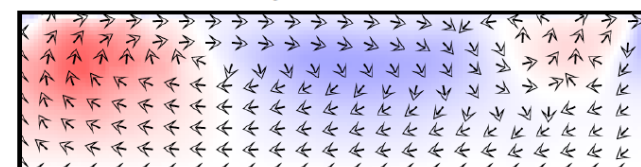
(c)  $U^{TC}/U_{ref}$  ( $U_{ref}=50$  m/yr)



(d)  $U^m/U_{ref}$  ( $U_{ref}=50$  m/yr)

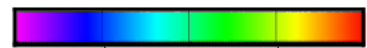


(e)  $U^{dv}/U_{ref}$  ( $U_{ref}=2$  m/yr)



0 Myr

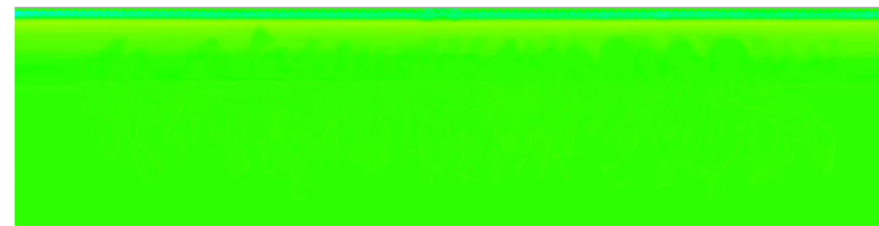
T & magma



1000 2000

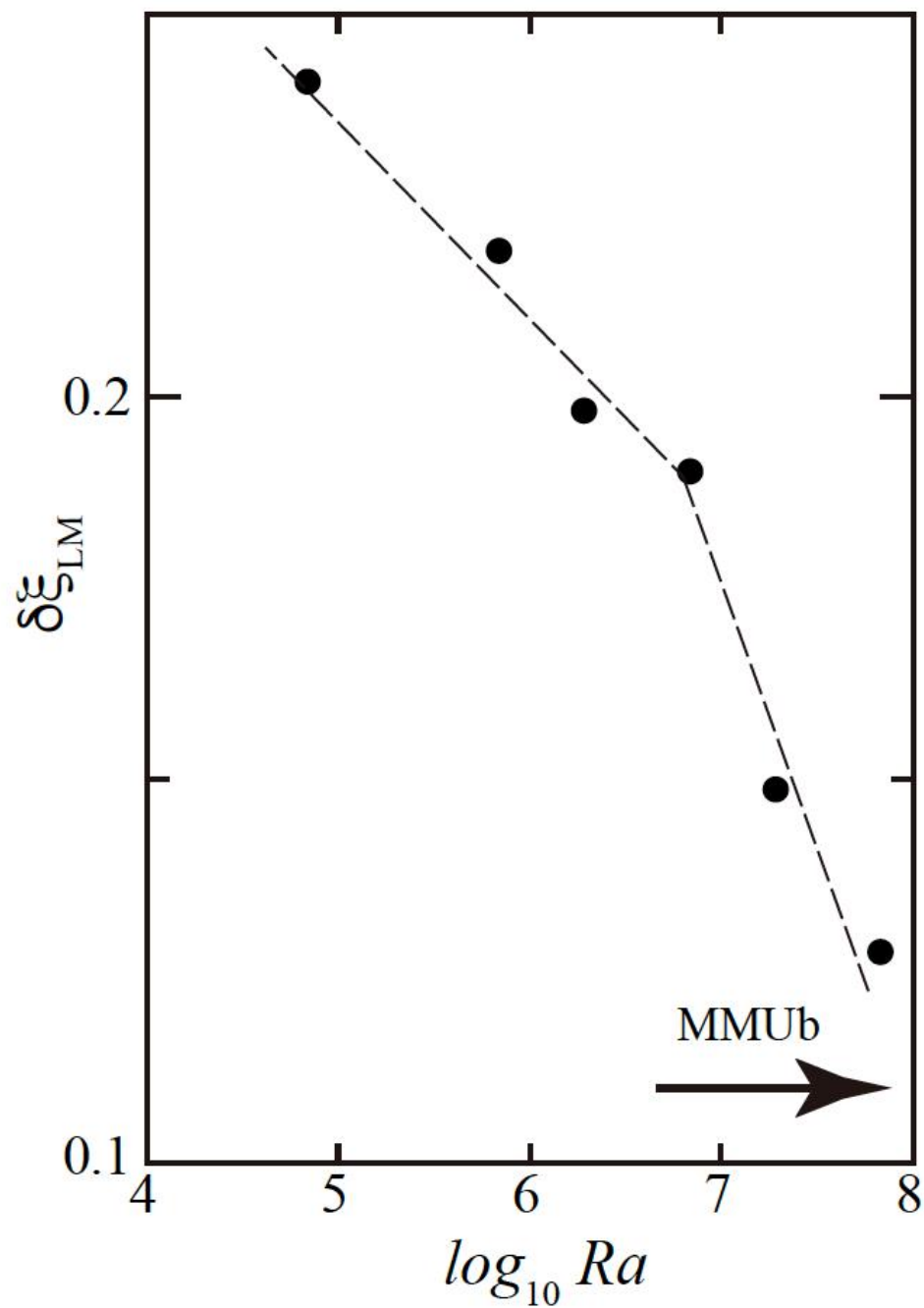
[K]

composition

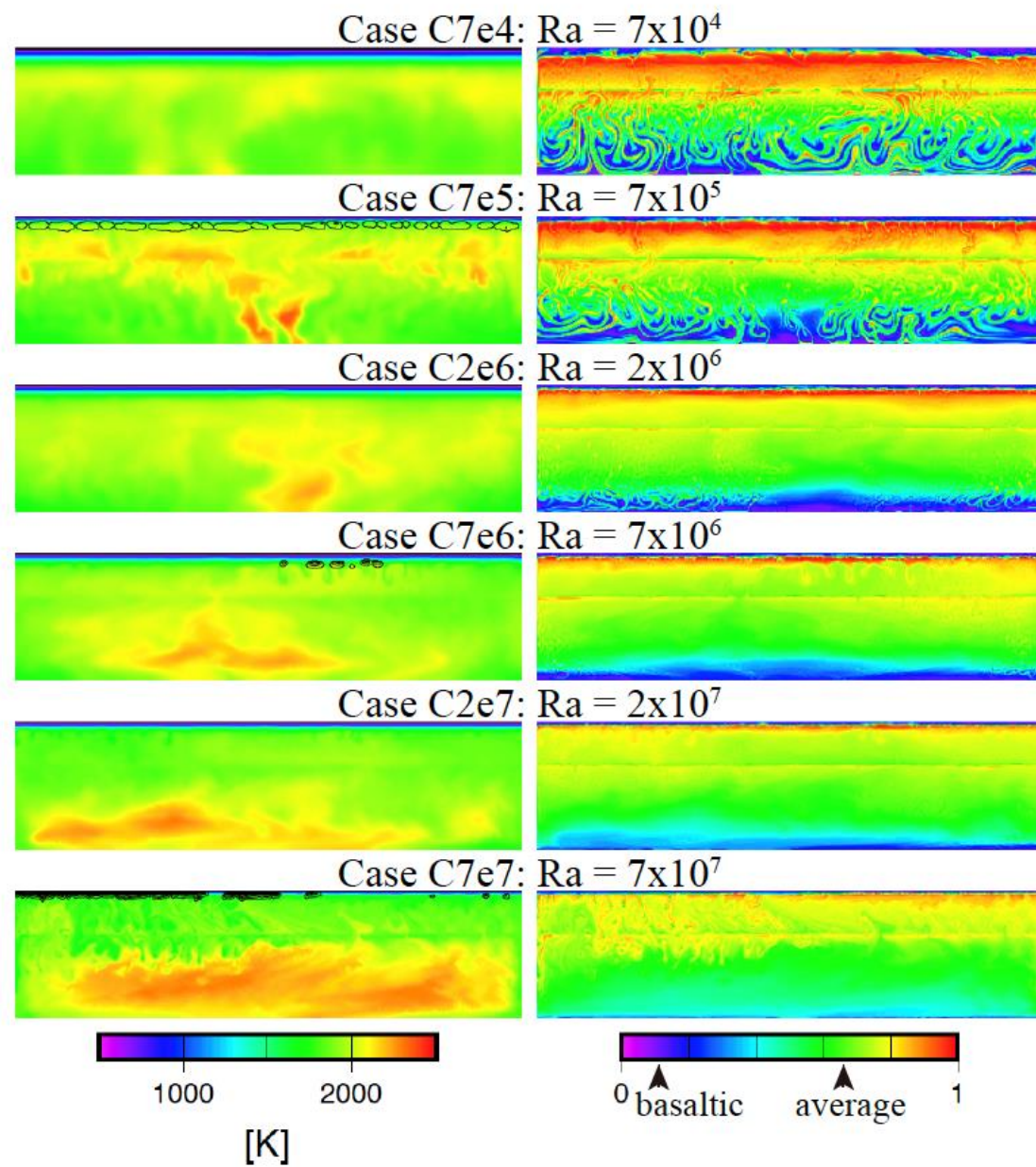


0.0 0.5 1.0

(a) degree of mantle stratification



(b) T & magma



(c) composition

バリアー効果



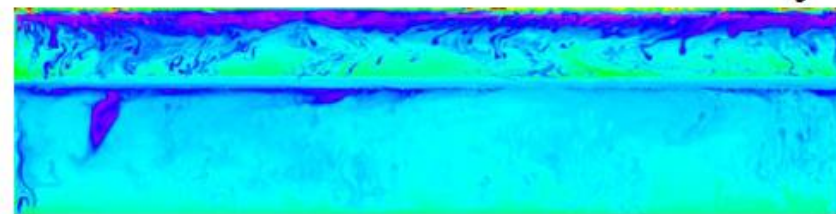
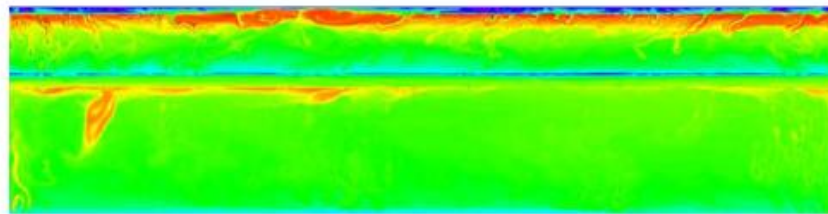
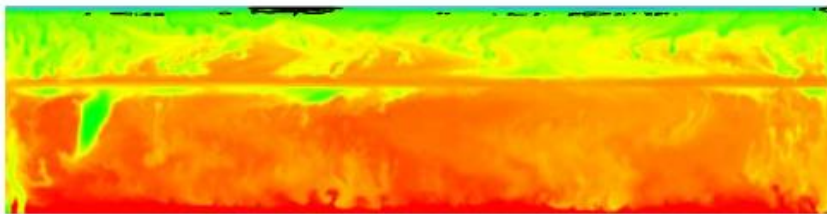
バースト

T & magma

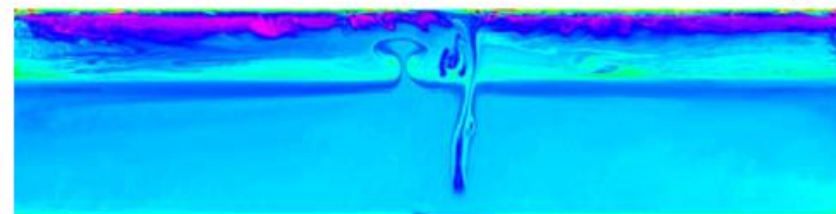
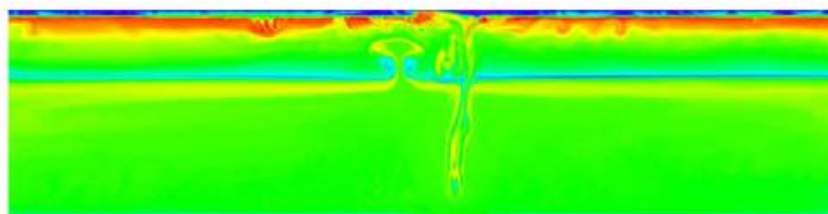
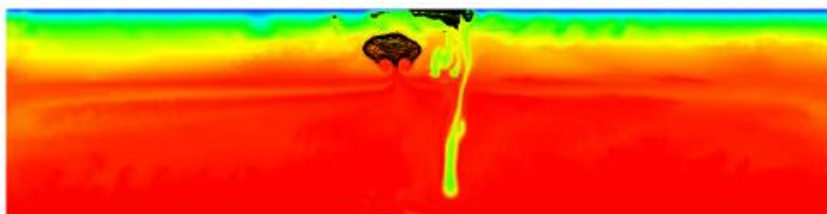
composition

internal heating rate

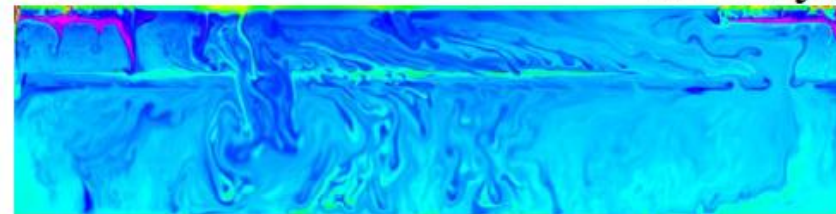
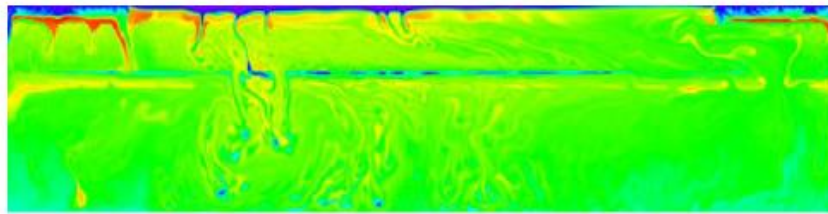
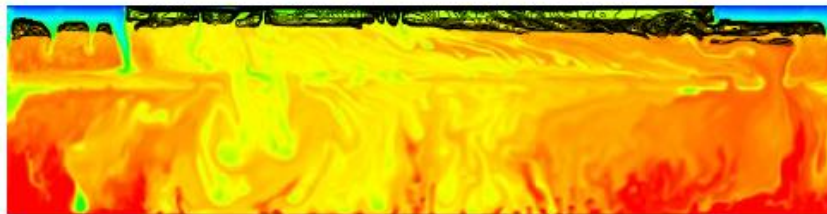
0.59 Gyr



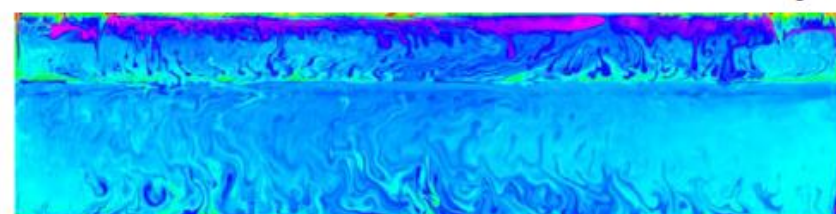
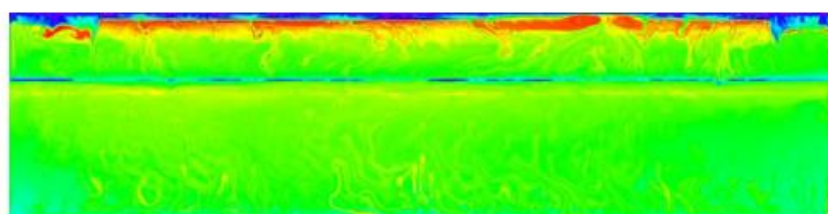
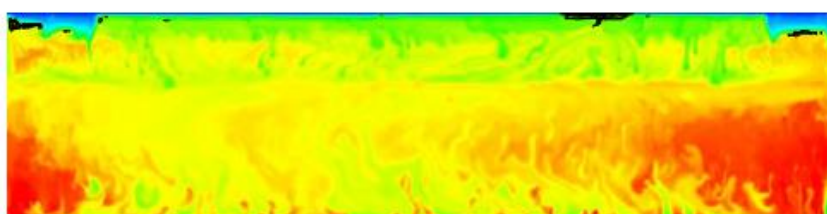
1.01 Gyr



1.06 Gyr



1.09 Gyr





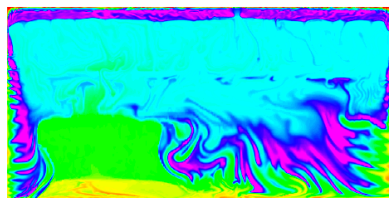
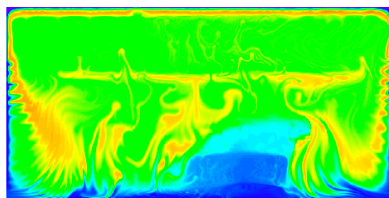
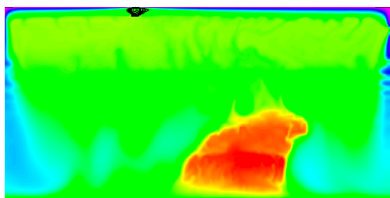
# 内部熱源とバースト

(a) temperature  $T$  & magma  $\phi$

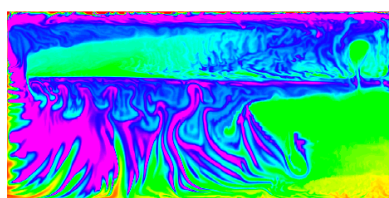
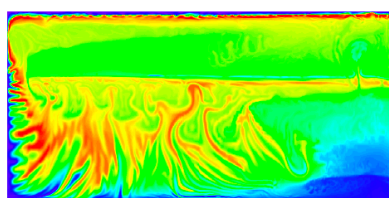
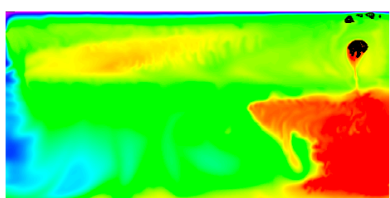
(b) composition  $\xi$

(c) heating rate  $q/H$

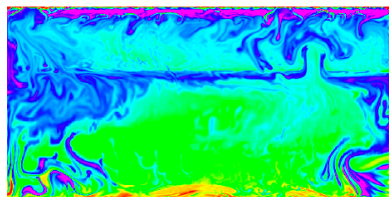
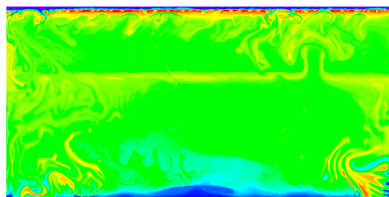
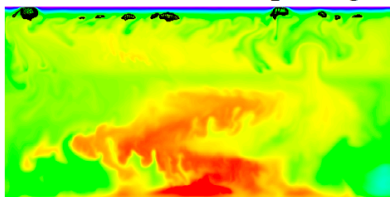
Case N8:  $H = 8$  [pW/kg]



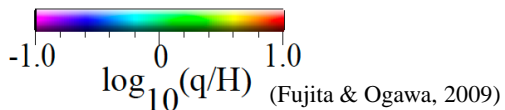
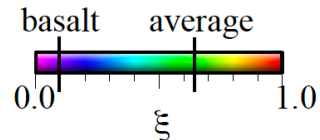
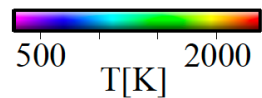
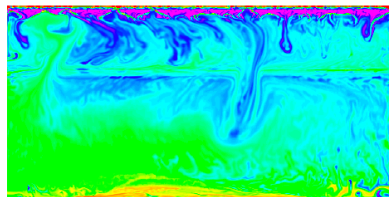
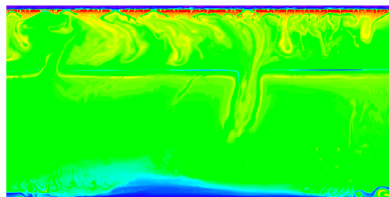
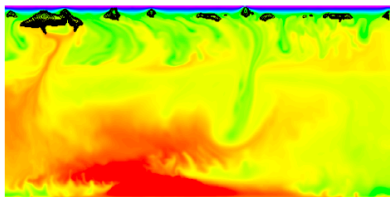
Case N18:  $H = 18$  [pW/kg]



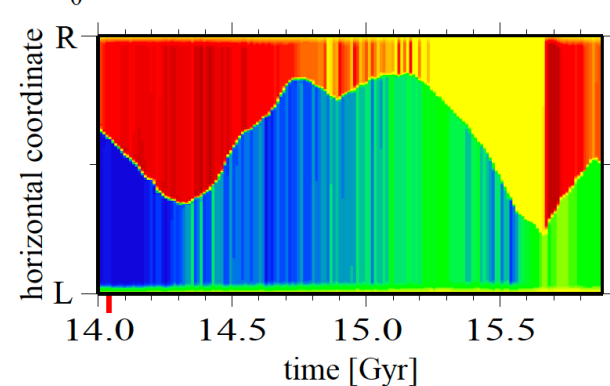
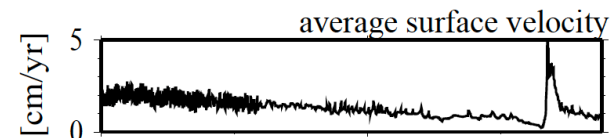
Case N25:  $H = 25$  [pW/kg]



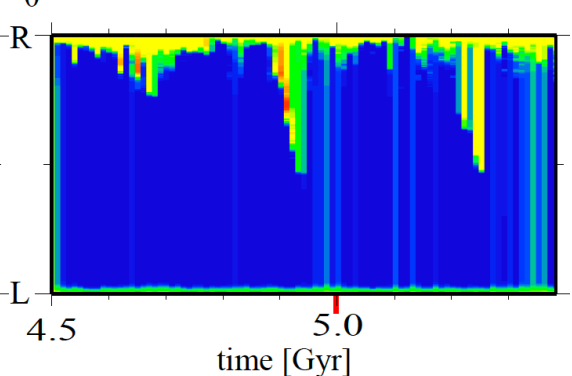
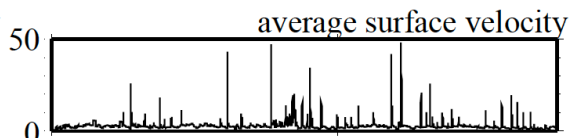
Case N30:  $H = 30$  [pW/kg]



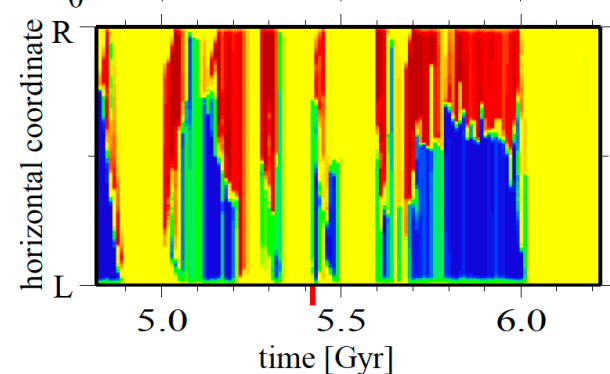
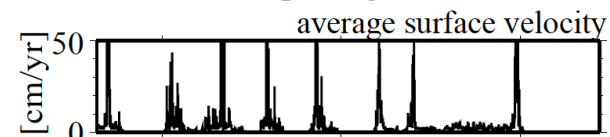
Case N8:  $H=8$  [pW/kg]



Case N18:  $H=18$  [pW/kg]



Case N25:  $H=25$  [pW/kg]



Case N30:  $H=30$  [pW/kg]

