

強い圧縮性をもつ高粘性流体の熱対流の 2次元数値シミュレーション: スーパー地球のマントル対流に関する考察

亀山 真典

愛媛大学 地球深部ダイナミクス研究センター

2024年5月9日

論文の宣伝 (その1) Miyagoshi et al. (2018)

Miyagoshi et al. *Earth, Planets and Space* (2018) 70:200
<https://doi.org/10.1186/s40623-018-0975-5>

 Earth, Planets and Space

EXPRESS LETTER

Open Access



Effects of adiabatic compression on thermal convection in super-Earths of various sizes

Takehiro Miyagoshi^{1*} , Masanori Kameyama² and Masaki Ogawa³

Abstract

We present two-dimensional numerical models of thermal convection of a compressible fluid in the mantles of super-Earths calculated under the truncated anelastic liquid approximation to discuss how adiabatic compression affects the thermal convection, depending on planetary mass. The convection is driven by basal heating, the viscosity depends on temperature, and the thermal expansivity and the reference density depend on the depth. We varied all of the magnitude of adiabatic heating, the Rayleigh number, the depth profile of the thermal expansivity, and that of the reference density in accordance with the planetary mass. The effects on thermal convection become substantial, when the planetary mass normalized by the Earth's mass M_p exceeds a threshold M_c , about 4. Hot plumes ascending from the core–mantle boundary become thinner with increasing M_p ; they become almost invisible except around the core–mantle boundary, when $M_p > M_c$. The lithosphere that develops along the surface boundary due to the temperature dependence of viscosity becomes thicker with increasing M_p and is about twice as thick as that at $M_p = 1$ when $M_p = 9.4$. The convective velocity is almost independent of M_p . These results are in a striking contrast with earlier predictions that are made based on the models where the effects of adiabatic compression are neglected; it is important to take account of the effects of adiabatic compression properly in the exploration of mantle dynamics such as plate tectonics and hot spot volcanisms in massive super-Earths. Further researches are necessary to clarify the dependence of M_p on the surface temperature and the material properties of the convection mantle.

続編を書こうとしているのですが…(気持ちを奮い立たせ中)

論文の宣伝 (その2) 三戸卒論 (2022年3月)

2次元円環状モデルによる様々なサイズの スーパー地球のマントル対流シミュレーション

生態環境科学コース 亀山研究室 4回生 三戸 俊典

【はじめに】

スーパー地球とは、太陽系外に存在する地球の数倍程度の質量を持つ地球型惑星である。天文学研究の発展により、スーパー地球は宇宙にありふれている惑星であり、木星型惑星よりも多く存在すると考えられるようになった。それに伴い、近年においてはスーパー地球のマントル対流の研究も数多く行われている。本研究では2次元円環状モデル(図1)を用いたマントル対流シミュレーションを行い、スーパー地球のプレートテクトニクスについて議論していく。

【研究手法】

本研究では、2次元円環状モデルにおける質量の1倍、2倍、4倍、6倍、8倍の計5

ンを行い、本研究の2次元円環状モデルのシ

2次元長方形モデル(図2)の結果を比較した

【結果・考察】

シミュレーションの結果、本研究の2次元長方形モデルと同様に、スーパー地球の質量が大きくなることがわかった。しかし、2次元円環

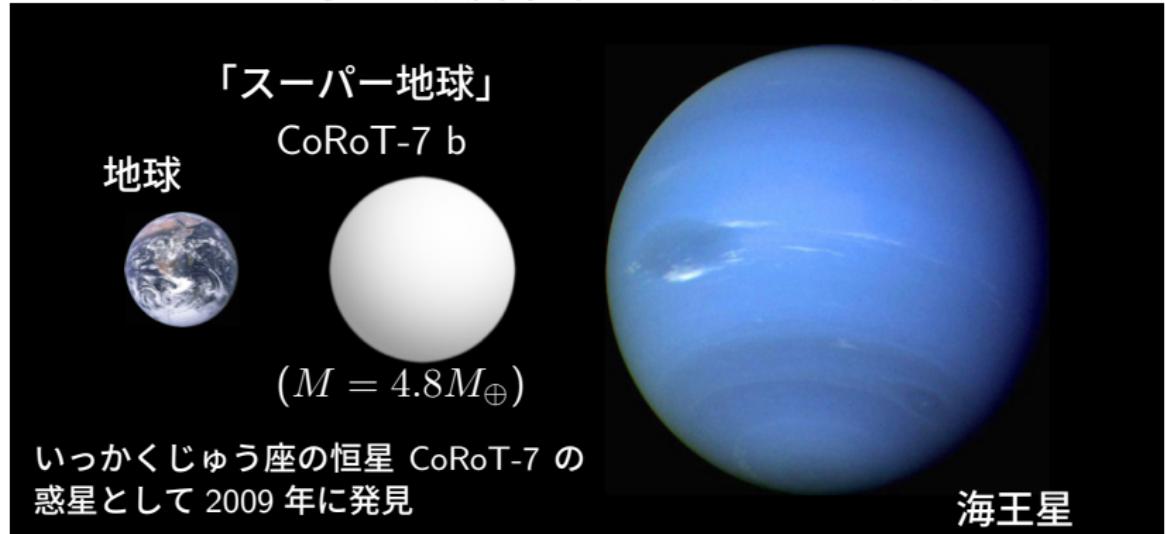


Section 1

はじめに: 「スーパー地球」のマントル対流?

地球より大きな地球型惑星「スーパー地球」の発見

2005 年の初報告以降、地球の質量の 10 倍程度以下の
小さい太陽系外惑星がいくつか発見されている。



これらは地球型惑星と考えられている。

(\therefore 巨大ガス惑星と比べて質量が小 + 平均密度が高)

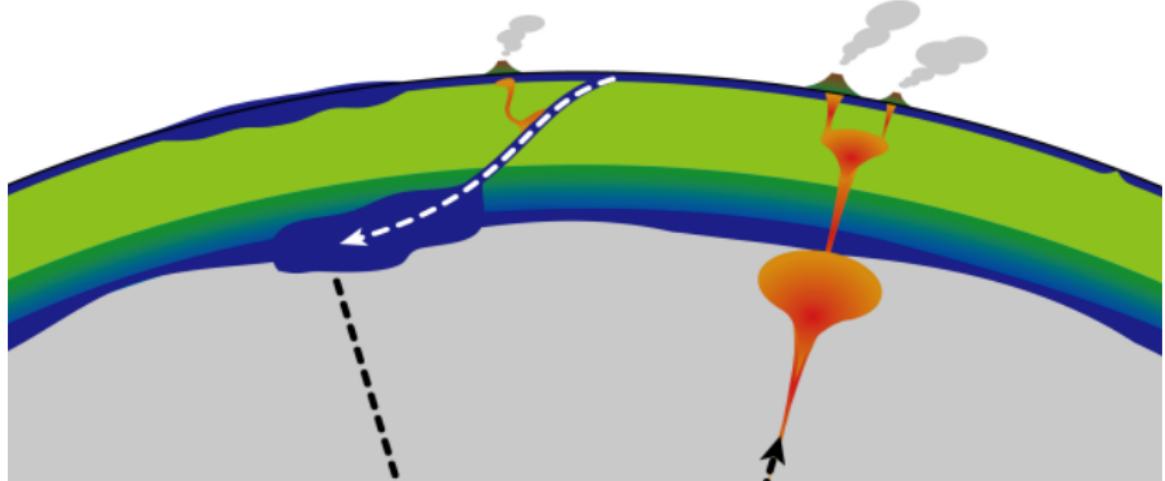
これら「スーパー地球」の中はどうなっているの?

中身はどんなもの? 中でどんなことが起こっているの?

動機: プレートテクトニクス on スーパー地球?

スーパー地球の発見直後から、活発に議論されている問題

もしプレートテクトニクスが起こっているならば...



{ 表面と深部の物質循環の効率化により、大気の質・量を維持
金属核を効果的に冷却し、ダイナモ作用を駆動させ磁場が発生
...

⇒ 居住可能性 (habitability) が向上 !!

「スーパー地球人」がいるといいのになあ!?

スーパー地球のサイズは対流にどう効くか? (in 2007)

プレートテクトニクスが起こる可能性の検討

based on 非圧縮 マントル対流

THE ASTROPHYSICAL JOURNAL, 670: L45–L48, 2007 November 20
© 2007. The American Astronomical Society. All rights reserved. Printed in U.S.A.

INEVITABILITY OF PLATE TECTONICS ON SUPER-EARTHS

DIANA VALENCIA¹ AND RICHARD J. O'CONNELL

Department of Earth and Planetary Sciences, Harvard University, Cambridge, MA; valenc@fas.harvard.edu, oconnell@geophysics.harvard.edu

AND

DIMITAR D. SASSELOV

Harvard-Smithsonian Center for Astrophysics, Cambridge, MA; dsasselov@cfa.harvard.edu

Received 2007 July 20; accepted 2007 September 28; published 2007 October 22

ABSTRACT

The recent discovery of super-Earths (masses $\leq 10 M_{\oplus}$) has initiated a discussion about conditions for habitable worlds. Among these is the mode of convection, which influences a planet's thermal evolution and surface conditions. On Earth, plate tectonics has been proposed as a necessary condition for life. Here we show that super-Earths will also have plate tectonics. We demonstrate that as planetary mass increases, the shear stress available to overcome resistance to plate motion increases while the plate thickness decreases, thereby enhancing plate weakness. These effects contribute favorably to the subduction of the lithosphere, an essential component of plate tectonics. Moreover, uncertainties in achieving plate tectonics in the $1 M_{\oplus}$ regime disappear as mass increases: super-Earths, even if dry, will exhibit plate tectonic behavior.

Subject headings: Earth — planetary systems — planets and satellites: general

1. INTRODUCTION

Until recently, Earth was the largest terrestrial object known

parameterized convection models to show that the condition for deformation and subsequent subduction is easily met by planets more massive than Earth. A second condition necessary

スーパー地球のサイズは対流にどう効くか? (in 2007)

熱対流のレイリー数 Ra の見積もり

based on 非圧縮 マントル対流

$$Ra = \frac{\rho_{\text{top}} \alpha_{\text{top}} \Delta T g d^3}{\eta_{\text{bot}} \kappa_{\text{top}}} \propto \frac{\text{熱的浮力}}{\text{粘性抵抗} \times \text{熱拡散}}$$
$$\propto \boxed{\text{重力加速度}} \times \boxed{\text{流体層の厚さ}}^3 \times \boxed{\text{粘性率}}^{-1} \dots$$

- マントル対流の Ra は惑星質量 M とともに増加

$Ra \approx 10^7$ for 地球サイズの惑星 ($M = M_{\text{Earth}}$) のマントル

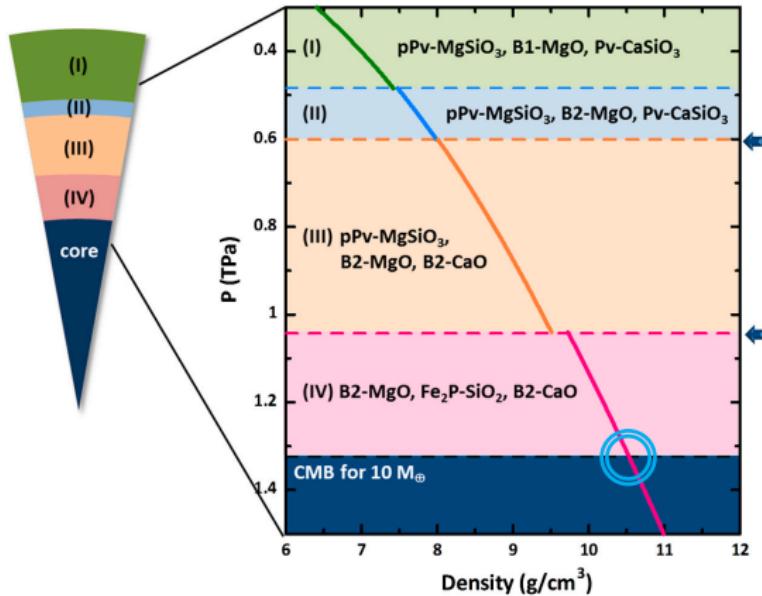
$Ra \approx 10^9$ for $M = 10M_{\text{Earth}}$ のスーパー地球のマントル

…ただし $g \propto M^{0.5}$ かつ $d \propto M^{0.28}$ と仮定 (Valencia et al., 2007)

この見積もり (外挿) によると、

大きなスーパー地球ほど、マントル対流が活発になるから、
プレートテクトニクスも起こりやすい?

スーパー地球のマントルが「非圧縮」って本当か ??



図は Tsuchiya and Tsuchiya (2011) より

地球より大きなスーパー地球の中では、
圧力はものすごく高い (~ TPa; 岩石の体積弾性率よりも大 !?)

巨大な地球型惑星の内部で、マントル物質が「非圧縮」(incompressible; 密度変化なし) であるはずがない !!

Section 2

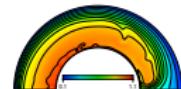
数値シミュレーションモデルの概略:
 $M \leq 10M_{\text{Earth}}$ なスーパー地球のマントル対流

2次元熱対流シミュレーションモデルの概略

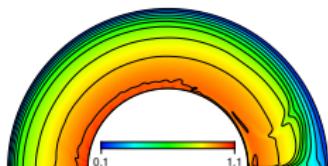
M/M_{Earth}

2-D 部分円環

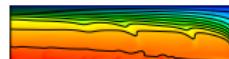
1



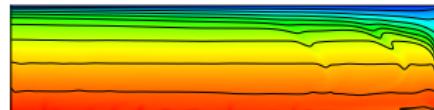
10



2-D 箱型



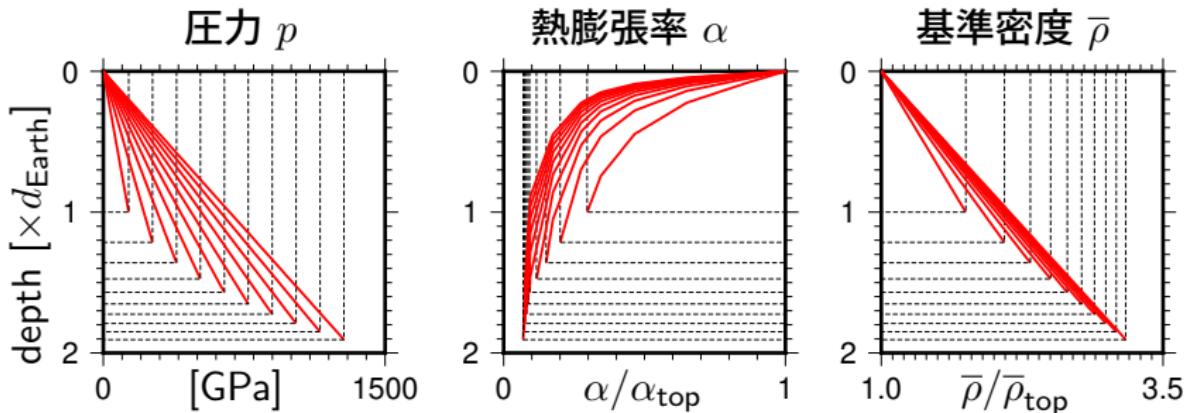
⋮



⋮

- (打ち切り版) 非弾性流体近似 (TALA)
- 内部発熱なし (対流は下部加熱により駆動) $T_{\text{top}} \equiv 0.1(T_{\text{bot}} - T_{\text{top}})$
- マントルの厚さ d と重力加速度 g は惑星サイズ (質量 M) とともに増加 (\rightarrow その分だけレイリー数 Ra と散逸数 Di も増加)
 $M/M_{\text{Earth}} = 1$ で $Ra \approx 4.6 \times 10^7$ 、 $Di \approx 0.83$
 $M/M_{\text{Earth}} = 10$ で $Ra \approx 10^9$ 、 $Di \approx 5$
- 熱膨張率 α 、基準密度 $\bar{\rho}$ の深さ (\approx 壓力) 依存性
その変化の度合も M とともに増加
- 粘性率 η の温度依存性 (圧力依存性は無視) $\eta_{\text{top}}/\eta_{\text{bot}} = 10^5$

熱力学量の深さ変化のモデル化 for $M \leq 10M_{\text{Earth}}$



- 圧力 p と基準密度 $\bar{\rho}$ は深さとともに線形に増加
マントル底面での値は Valencia et al. (2006) のスケーリング
則に基づいて、惑星質量 M に依存して変化

$$p_{\text{bot}} [\text{GPa}] = 7.241 + 127.4 \times (M/M_{\text{Earth}})$$

$$\bar{\rho}_{\text{bot}}/\bar{\rho}_{\text{top}} = 1.75 \times (M/M_{\text{Earth}})^{0.258}$$

- 热膨張率 α の深さ変化は、Tsuchiya and Tsuchiya (2011) による MgO の α の圧力依存性に基づいて推定

基礎方程式系 (無次元)

■ 热輸送方程式 (热エネルギーの保存)

$$\bar{\rho} \frac{\partial T}{\partial t} + \underbrace{\alpha T v_z \bar{\rho} Di}_{\text{断熱温度变化}} = \underbrace{-\nabla \cdot (\rho T \mathbf{v} - k \nabla T)}_{\text{顯熱輸送 (移流+伝導)}} \\ + \underbrace{(Di/Ra) \tau_{\text{II}} \dot{\varepsilon}_{\text{II}}}_{\text{粘性散逸}} + \underbrace{\bar{\rho} H}_{\text{内部発熱}}$$

ただし本研究では簡単のため、内部発熱を無視した。

■ 運動方程式 (運動量の保存)

$$0 = -\nabla p + \boldsymbol{\tau} \cdot \nabla + Ra \bar{\rho} \alpha T e_z$$

マントル対流問題では「高粘性流体の極めて遅い流れ」を扱うので、一般に慣性項 ($\partial \mathbf{v} / \partial t$) と速度の非線形項 ($\mathbf{v} \cdot \nabla \mathbf{v}$) は無視する。

■ 連続の式 (質量の保存)

$$0 = \nabla \cdot (\bar{\rho} \mathbf{v})$$

音波の発生を抑制するため、非弾性流体近似かつ $\partial \bar{\rho} / \partial t = 0$ にとる。

基礎方程式系 (無次元)

- 状態方程式 (熱膨張率 α と基準密度 $\bar{\rho}$ の深さ依存性)
- 構成方程式

- 粘性率の温度依存性 ($\eta_{\text{top}}/\eta_{\text{bot}} = 10^5$)

- 歪速度テンソルの成分 $\dot{\varepsilon} = (\dot{\varepsilon}_{ij})$

$$\dot{\varepsilon} = \frac{1}{2} (\nabla \otimes \mathbf{v} + \mathbf{v} \otimes \nabla) \quad \text{note } \text{tr}(\dot{\varepsilon}) = \nabla \cdot \mathbf{v} \neq 0$$

- 偏差応力テンソルの成分 $\tau = (\tau_{ij})$

$$\tau = 2\eta \underbrace{\left[\dot{\varepsilon} - \frac{1}{3} (\nabla \cdot \mathbf{v}) \mathbf{I} \right]}_{\equiv \hat{\dot{\varepsilon}}} \quad \text{note } \text{tr}(\hat{\dot{\varepsilon}}) = 0$$

- 偏差歪速度テンソルの第 2 不变量

$$\dot{\varepsilon}_{\text{II}} = \sqrt{\frac{1}{2} \left[\text{tr}(\hat{\dot{\varepsilon}})^2 - \text{tr}(\hat{\dot{\varepsilon}}^2) \right]} = \sqrt{\frac{1}{2} \left[\frac{(\nabla \cdot \mathbf{v})^2}{3} - \text{tr}(\dot{\varepsilon}^2) \right]}$$

デカルト座標系では

$$\dot{\varepsilon}_{\text{II}} = \sqrt{\dot{\varepsilon}_{xx}^2 + \dot{\varepsilon}_{yy}^2 + \dot{\varepsilon}_{zz}^2 + 2\dot{\varepsilon}_{xy}^2 + 2\dot{\varepsilon}_{yz}^2 + 2\dot{\varepsilon}_{zx}^2 - \frac{(\nabla \cdot \mathbf{v})^2}{3}}$$

散逸数 Di って?

圧縮性の効果の強さを表わす無次元量

$$Di \equiv \frac{\alpha_{\text{top}} g d}{C_p} = \frac{\text{流体層の厚さ } (d)}{\text{断熱温度変化のスケールハイト } (C_p / \alpha_{\text{top}} g)}$$
$$\propto \boxed{\text{重力加速度}} \times \boxed{\text{流体層の厚さ}}$$

- 断熱温度勾配は Di に比例して増加

$$\left| \frac{dT}{dz} \right|_s = \underbrace{\left| \frac{dp}{dz} \right|}_{\rho g} \underbrace{\left| \frac{dT}{dp} \right|_s}_{(\alpha T / \rho C_p)} = \frac{\alpha g T}{C_p} = Di \frac{\alpha(z)}{\alpha_{\text{top}}} \frac{T}{d}$$

- マントル中の Di は惑星質量 M とともに増加
 - $Di \approx 0.8$ for 地球サイズの惑星 ($M = M_{\text{Earth}}$) のマントル
 - $Di \approx 5$ for $M = 10M_{\text{Earth}}$ のスーパー地球のマントル
 - ただし $g \propto M^{0.5}$ かつ $d \propto M^{0.28}$ と仮定 (Valencia et al., 2007)
- **非圧縮** な流体の層では $Di = 0$

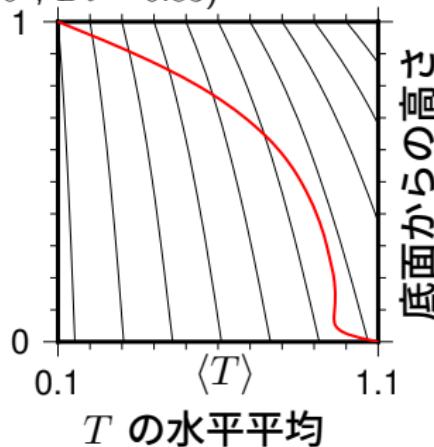
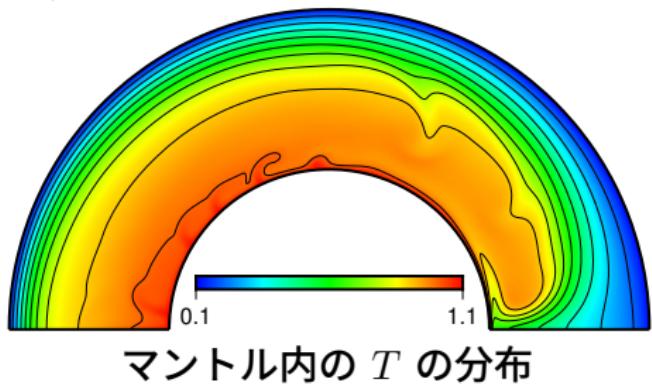
Section 3

結果その 1: マントル対流に与える惑星サイズ
の効果の概観

地球とサイズ (質量 M) が同じ惑星のマントル対流って?

「生の」温度 T の分布を見てみると

$$M/M_{\text{Earth}} = 1 \quad (d = 2900 \text{ km}, Ra = 4.6 \times 10^7, Di = 0.83)$$

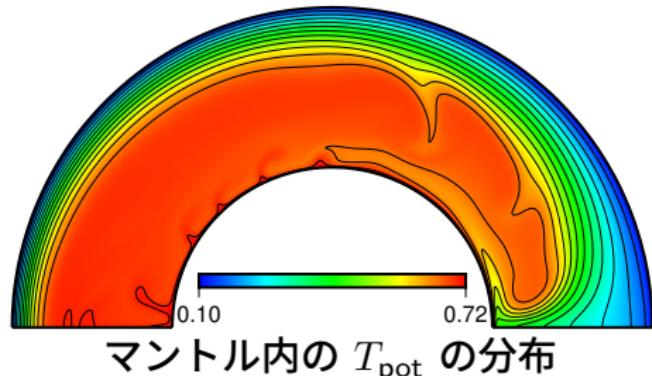


「生の」温度 T の分布より

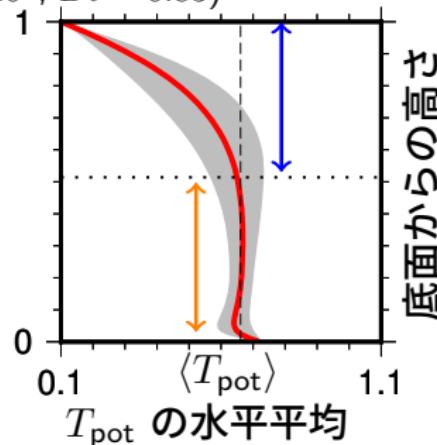
- { 高温の上昇プルーム、低温の下降プルーム
- 断熱温度勾配に沿って温度が深さとともに上昇している領域
- 表面の冷たくて「かたい」板 (\equiv リソスフェア) の存在が観察できる (けど、そんなに明瞭ではない)

地球とサイズ (質量 M) が同じ惑星のマントル対流って?

ポテンシャル温度 (対流の駆動に効く温度; 温位) T_{pot} で見てみると
 $M/M_{\text{Earth}} = 1$ ($d = 2900 \text{ km}$, $Ra = 4.6 \times 10^7$, $Di = 0.83$)



マントル内の T_{pot} の分布

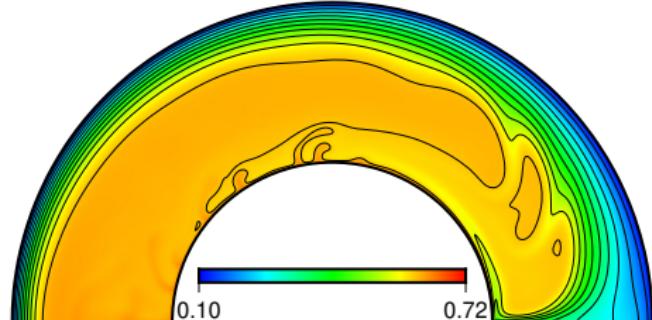


ポテンシャル温度 T_{pot} の分布より

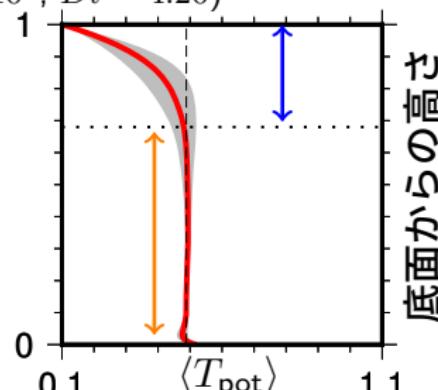
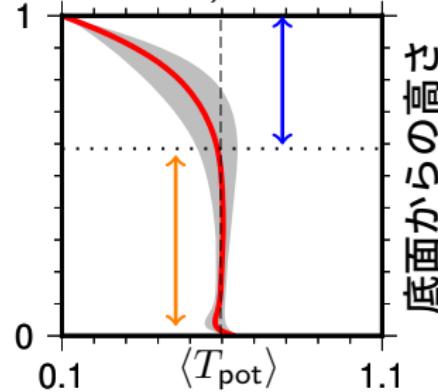
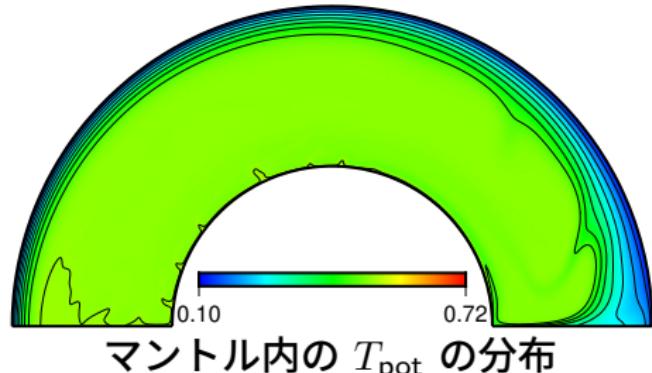
- { 高温の上昇プルーム、低温の下降プルーム
 - 内部に T_{pot} がほぼ一定の領域 (\approx 等温核)
 - 表面の冷たくて「かたい」板 (\equiv リソスフェア)
- の存在が明瞭に観察できる

地球よりサイズ (質量 M) が大きくなると?

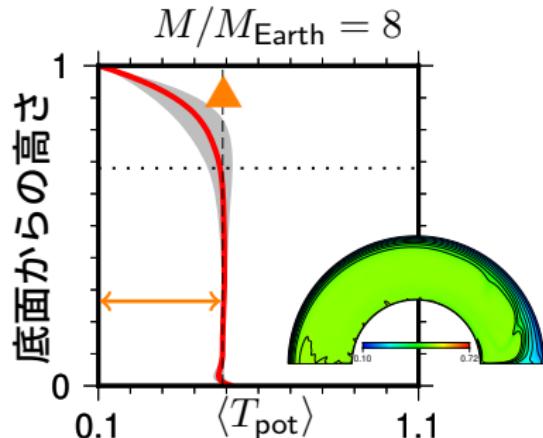
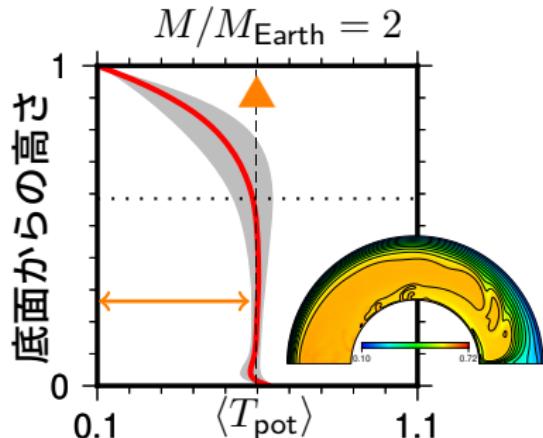
$$M/M_{\text{Earth}} = 2 \ (d = 3500 \text{ km}, Ra = 1.2 \times 10^8, Di = 1.42)$$



$$M/M_{\text{Earth}} = 8 \ (d = 5200 \text{ km}, Ra = 7.4 \times 10^8, Di = 4.20)$$



地球よりサイズ (質量 M) が大きくなると?



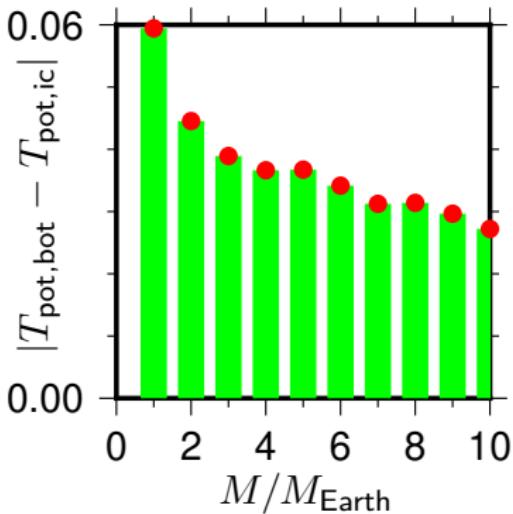
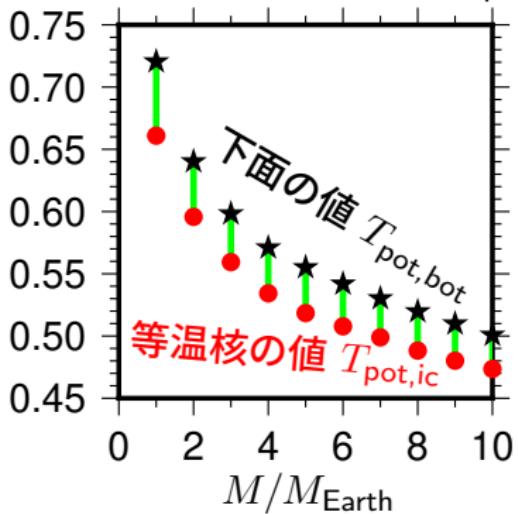
- マントル深部のポテンシャル温度 T_{pot} が低くなる
断熱温度変化 (上昇・下降の際に起きる温度変化) が強すぎて、対流を駆動するのに使える温度が減ってしまう

流体が
上昇 \Rightarrow 周囲の
圧力 ↓ \Rightarrow 流体が
膨張 \Rightarrow 流体の
温度 ↓ \Rightarrow 流体の
浮力 ↓

固体の岩石なのに、まるで空気のような性質になっている!?

地球よりサイズ (質量 M) が大きくなると? (2D 円環)

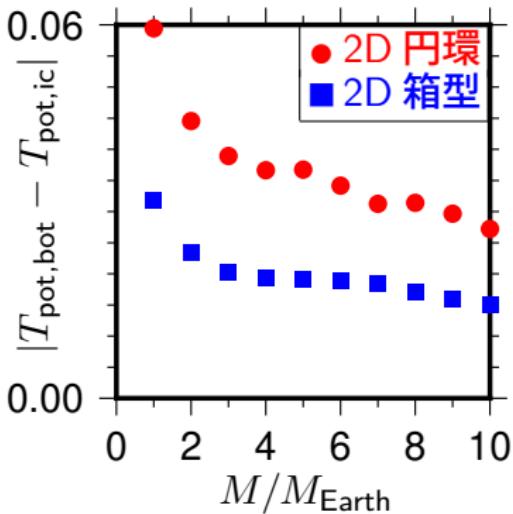
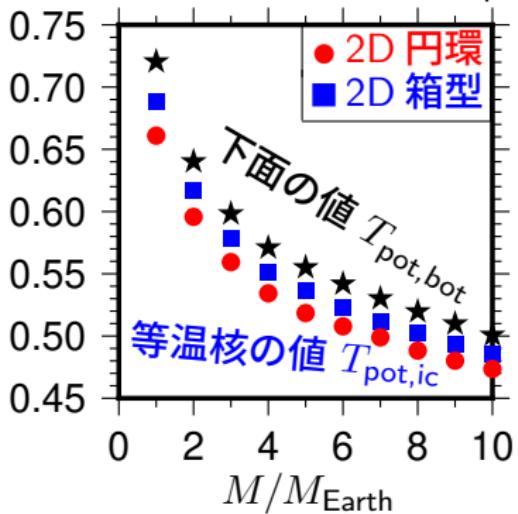
深部のポテンシャル温度 T_{pot} は M とともにどう変化するか?



- $T_{\text{pot},\text{bot}}$ (★) も $T_{\text{pot},\text{ic}}$ (●) も M とともに減少
- $M \gtrsim 3M_{\text{Earth}}$ だと、 $|T_{\text{pot},\text{bot}} - T_{\text{pot},\text{ic}}|$ の値が非常に小
 - 下面の熱境界層が保持できる T_{pot} の差が小さい
 - マントル最深部からの上昇ブルームが弱くなる

地球よりサイズ (質量 M) が大きくなると? (2D 箱型)

深部のポテンシャル温度 T_{pot} は M とともにどう変化するか?



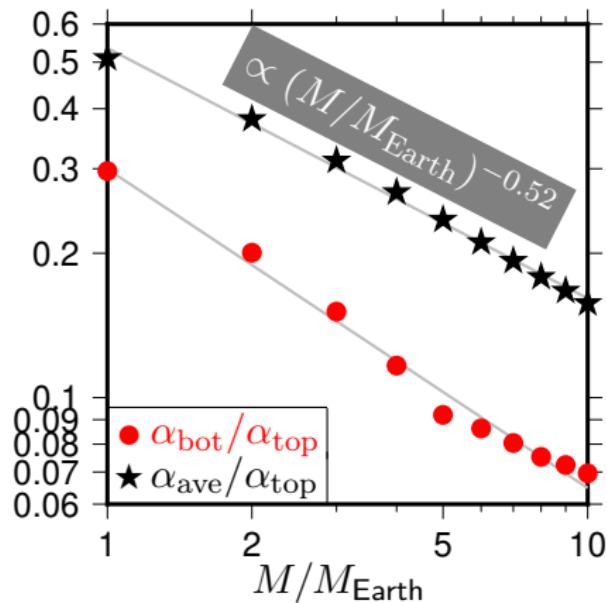
- $T_{\text{pot}, \text{bot}}$ (★) も $T_{\text{pot}, \text{ic}}$ (■) も M とともに減少
- $M \gtrsim 3M_{\text{Earth}}$ だと、 $|T_{\text{pot}, \text{bot}} - T_{\text{pot}, \text{ic}}|$ の値が非常に小
 - 下面の熱境界層が保持できる T_{pot} の差が小さい
- 箱型よりも円環のほうが $|T_{\text{pot}, \text{bot}} - T_{\text{pot}, \text{ic}}|$ 大 (\because 底面積の違い)

Section 4

結果その2、の前に:
マントル全域にわたる圧縮性の効果の強さの
見積もり

圧縮性の効果をマントル全域で積分してみたら? (1)

熱膨張率 α が深さとともに減少する効果を考慮してみる



マントル全域にわたる断熱温度変化の程度は

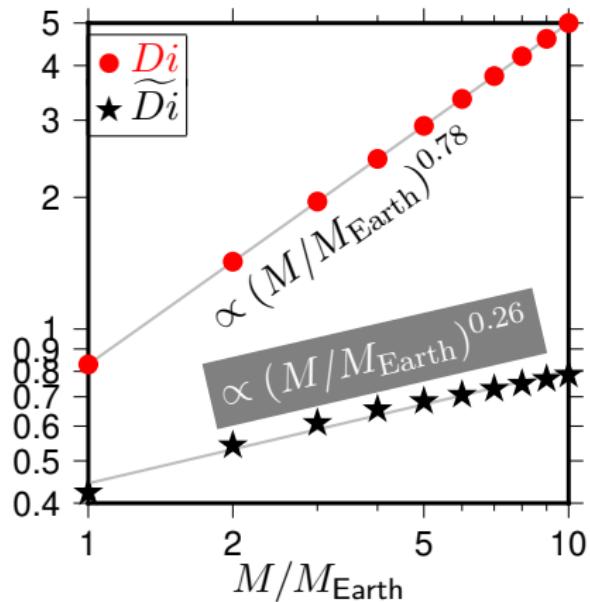
$$\int_{z=0}^{z=d} \frac{1}{T} \left| \frac{dT}{dz} \right|_s dz = Di \frac{1}{d} \int_{z=0}^{z=d} \frac{\alpha(z)}{\alpha_{\text{top}}} dz \equiv Di \frac{\alpha_{\text{ave}}}{\alpha_{\text{top}}}$$

により見積もられる

- マントル全域で平均した熱膨張率 α_{ave} は、マントル上面での値 α_{top} よりもかなり小さくなる
- 惑星質量 M が大きくなるほど α_{ave} は小さくなる

圧縮性の効果をマントル全域で積分してみたら? (2)

熱膨張率 α が深さとともに減少する効果の程度はいかほどか?



マントル全域にわたる断熱温度変化の程度は

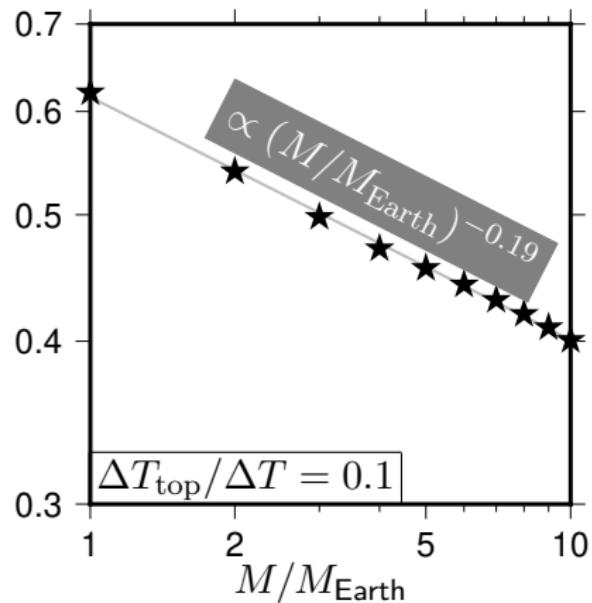
$$\begin{aligned} & \int_{z=0}^{z=d} \frac{1}{T} \left| \frac{dT}{dz} \right|_s dz \\ &= Di \frac{1}{d} \int_{z=0}^{z=d} \frac{\alpha(z)}{\alpha_{\text{top}}} dz \equiv Di \frac{\alpha_{\text{ave}}}{\alpha_{\text{top}}} \end{aligned}$$

により見積もられる

上面で定義した散逸数 Di と比べて、
全域で平均した散逸数 $\widetilde{Di} \equiv Di(\alpha_{\text{ave}}/\alpha_{\text{top}})$ は小さく ($\widetilde{Di} < 1$)、
惑星質量 M の増加による増加もゆるやか

圧縮性の効果をマントル全域で積分してみたら? (3)

断熱温度変化により深部の温度が上昇する程度はいかほどか?



マントルの上面と下面でのポテンシャル温度の差 ΔT_{pot} は

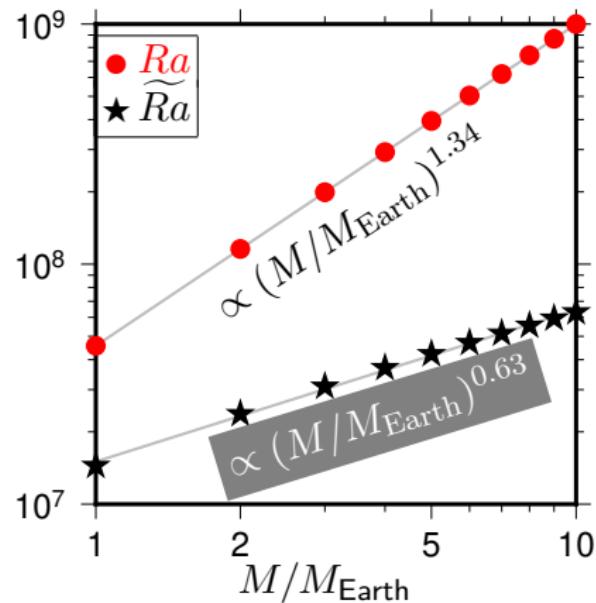
$$\begin{aligned}\Delta T_{\text{pot}} &\equiv T_{\text{pot,bot}} - T_{\text{top}} \\&= (T_{\text{top}} + \Delta T) e^{-\widetilde{D}i} - T_{\text{top}} \\&= \Delta T \left[\left(\frac{T_{\text{top}}}{\Delta T} + 1 \right) e^{-\widetilde{D}i} - \frac{T_{\text{top}}}{\Delta T} \right]\end{aligned}$$

により見積もられる

- マントル上下でのポテンシャル温度の差 ΔT_{pot} は、「生の」温度の差 ΔT よりもかなり小さくなる
- 惑星質量 M が大きくなるほど ΔT_{pot} は小さくなる

圧縮性の効果をマントル全域で積分してみたら? (4)

これら 2 つの効果を考慮して、対流の駆動力を見積もってみる



これまでに考慮した点を踏まえて、実効的なレイリー数 \widetilde{Ra} を新しく定義してみると、

$$\begin{aligned}\widetilde{Ra} &\equiv \frac{\rho_{\text{top}} \alpha_{\text{ave}} \Delta T_{\text{pot}} g d^3}{\eta_{\text{bot}} \kappa_{\text{top}}} \\ &= Ra \frac{\alpha_{\text{ave}}}{\alpha_{\text{top}}} \frac{\Delta T_{\text{pot}}}{\Delta T} \\ &\propto (M/M_{\text{Earth}})^{1.34 - 0.52 - 0.19}\end{aligned}$$

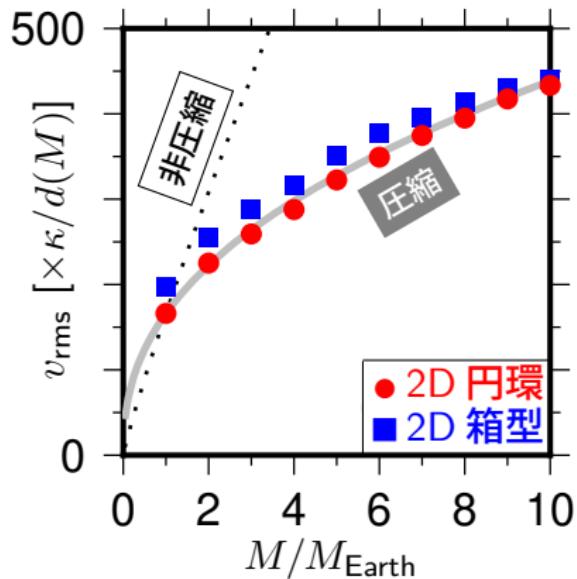
名目上のレイリー数 Ra と比べて、
実効的なレイリー数 $\widetilde{Ra} = Ra(\alpha_{\text{ave}}/\alpha_{\text{top}})(\Delta T_{\text{pot}}/\Delta T)$ は小さく、
惑星質量 M の増加による増加もゆるやか

Section 5

結果その 2: 圧縮性のある熱対流のスケーリング則の見積もり

地球よりサイズ (質量 M) が大きくなると?

熱対流の平均速度 v_{rms} はどう変化するか?



ここでは $v_{\text{rms}} \propto Ra^{2/3}$ と仮定

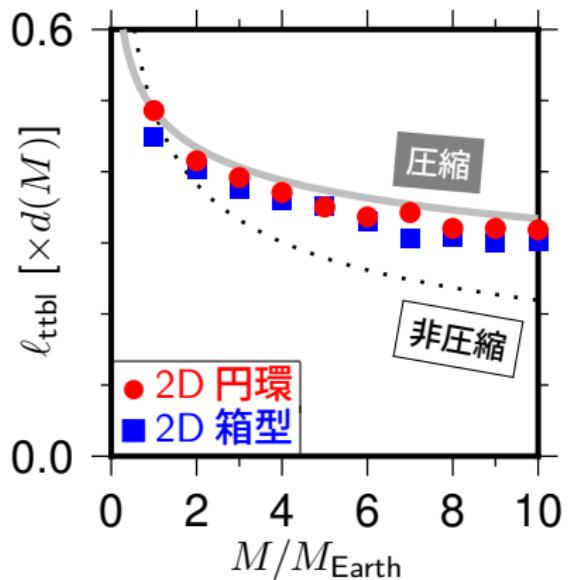
非圧縮 は $v_{\text{rms}} \propto Ra^{2/3}$
 $\propto M^{1.34 \times 2/3} \approx M^{0.893}$

圧縮 は $v_{\text{rms}} \propto \widetilde{Ra}^{2/3}$
 $\propto M^{0.63 \times 2/3} \approx M^{0.42}$

- 非圧縮 の場合 (断熱温度変化の効果なし) と比べて、増加の度合
いが著しく弱くなる
- Ra の代わりに \widetilde{Ra} を使うと、うまくスケーリングできる

地球よりサイズ (質量 M) が大きくなると?

低温熱境界層の厚さ ℓ_{ttbl} (\approx 熱輸送効率) はどう変化するか?



ここでは $\ell_{\text{ttbl}} \propto Nu^{-1}$ かつ
 $Nu \propto Ra^{0.258}$ (Deschamps and Sotin, 2000) と仮定

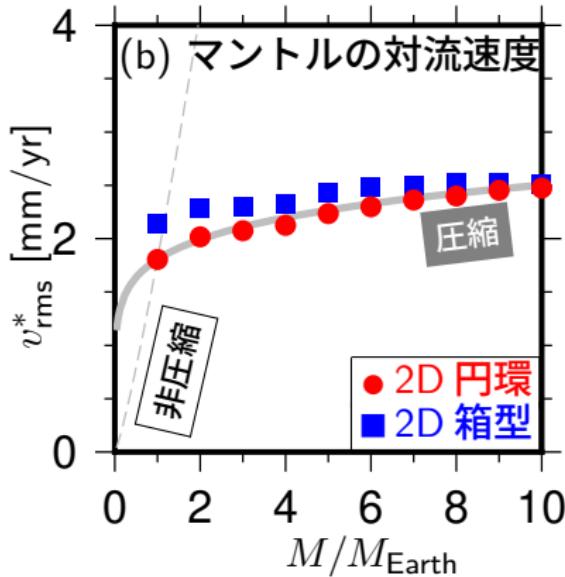
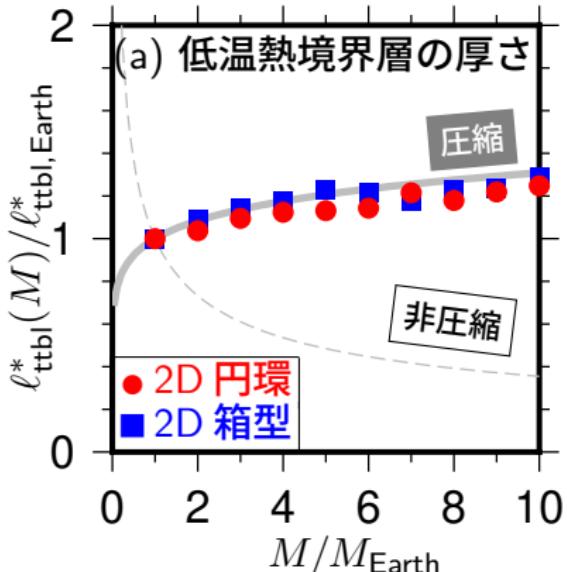
非圧縮 は $\ell_{\text{ttbl}} \propto Ra^{-0.258}$
 $\propto M^{-0.258 \times 1.34} \approx M^{-0.346}$

圧縮 は $\ell_{\text{ttbl}} \propto \widetilde{Ra}^{-0.258}$
 $\propto M^{-0.258 \times 0.63} \approx M^{-0.163}$

- 非圧縮 の場合 (断熱温度変化の効果なし) と比べて、減少の度合
いがやや弱くなる
- Ra の代わりに \widetilde{Ra} を使うと、まずまずスケーリングできる

地球よりサイズ (質量 M) が大きくなると?

長さや時間のスケールが M に依存していることを考慮すると?



ℓ_{tbl}^* も v_{rms}^* も M とともに (ごくわずかだけ) 増加

$$\blacksquare \quad \ell_{tbl}^* = \ell_{tbl} \times d \propto (M^{-0.163})(M^{0.28}) \propto M^{0.117}$$

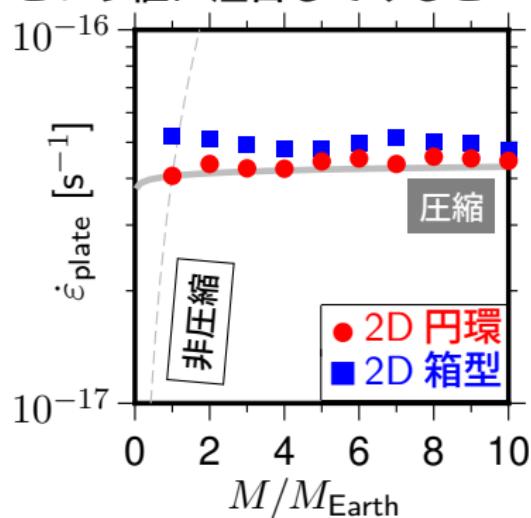
$$\blacksquare \quad v_{rms}^* = v_{rms} \times \kappa/d \propto (M^{0.42})/(M^{0.28}) \propto M^{0.14}$$

地球よりサイズ (質量 M) が大きくなると?

「プレート」の動きやすさに直接関係しそうな量として

$$\dot{\varepsilon}_{\text{plate}}^* \equiv \frac{v_{\text{rms}}^*}{\ell_{\text{ttbl}}^*} \propto \frac{\text{その下のマントル対流による引きずり}}{\text{下からの引きずりに対する抵抗}}$$

という値に注目してみると?



- モデル形状が「まるい」ほど $\dot{\varepsilon}_{\text{plate}}^*$ はわずかに小 ($\because \ell_{\text{ttbl}}^* \uparrow$)
- $\dot{\varepsilon}_{\text{plate}}^*$ は M によらずほぼ一定 ($\propto M^{0.14-0.117} \propto M^{0.023}$)

地球より大きい惑星だからといって
「プレートテクトニクスが起こりやすい」なんてことにはならない

Section 6

結語

まとめ (1) 圧縮性のあるマントルの熱対流について

地球型惑星のサイズが大きくなるほど、断熱圧縮の効果がマントルの熱対流に大きく影響するようになる。

- 地球の約 3 倍以上の質量をもつスーパー地球では、マントル深部からの上昇流の活動が顕著に弱くなる。

圧縮性を考慮したマントル熱対流の活発さと惑星質量との間のスケーリング則は、Boussinesq (あるいは非圧縮性) の熱対流に断熱圧縮の効果を適切に取り入れることによって構築が可能である。

- マントル全域にわたる熱膨張率 α の平均値 α_{ave}
in place of 熱膨張率の代表値
- マントルの上下でのポテンシャル温度の差 ΔT_{pot}
in place of 温度差の代表値

基準密度 $\bar{\rho}$ の深さ変化の効果は考慮しなくても十分 OK そう

まとめ (2) スーパー地球のプレートテクトニクス?

マントルの熱対流に及ぼす断熱圧縮の効果によって、惑星表層のかたいリソスフェアの動きやすさも影響を受ける。

- 惑星サイズが大きくなると、リソスフェアの厚さ ℓ_{ttbl} とマントルの対流速度 v_{rms} はいずれも（ごくわずかながら）増加
- リソスフェア内部の大局的な歪速度 $\dot{\varepsilon}_{\text{plate}}$ ($\equiv v_{\text{rms}}/\ell_{\text{ttbl}}$) は惑星サイズによらずほぼ一定

地球より大きな地球型惑星であっても、地球と比べてプレートテクトニクスが起こりやすくなったりする訳ではない。

惑星サイズが小さいほど冷却が速くなることを考えたら、
地球サイズの惑星が最も「居住可能性」が高いってこと?

だから、地球ってやっぱり「かけがえのない」ものなのかも。

という、実に「とってつけた」まとめを、一般向けの講演ではやってます。

現在進行中 and/or 今後の課題 (1)

もっと現実的な岩石惑星の内部構造

(物性、鉱物の構造相転移の効果など) を考えると ?

■ 極限条件における粘性率 ?

The image shows the journal cover of Icarus. At the top, it says "Contents lists available at ScienceDirect". Below that is the journal title "Icarus". To the right is the journal cover image featuring a colorful cross-section of a planet's interior. At the bottom left is the Elsevier logo, and at the bottom center is the journal homepage URL: www.elsevier.com/locate/icarus. A "Check for updates" button is also present.

Vacancies in MgO at ultrahigh pressure: About mantle rheology of super-Earths

Sebastian Ritterbex*, Takafumi Harada, Taku Tsuchiya

Geodynamics Research Center, Ehime University, 2-5 Bunkyo-cho, Matsuyama 790-8577, Japan

■ 極限条件における熱伝導率 ?

マントル深部の熱伝導率が非常に高い場合には、 $M/M_{\text{Earth}} = 10$ 程度のスーパー地球のマントルの底に安定な温度成層ができるかも。

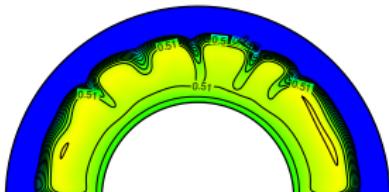


Figure from Kameyama (2022)

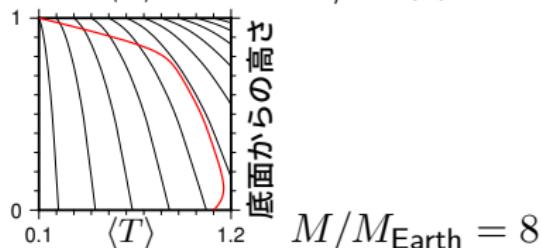
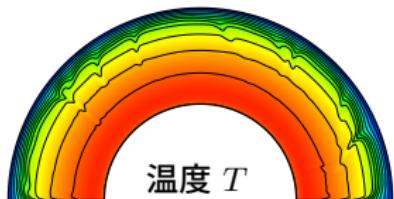
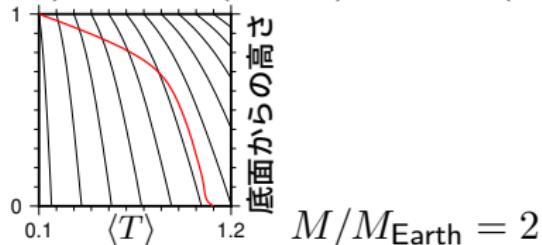
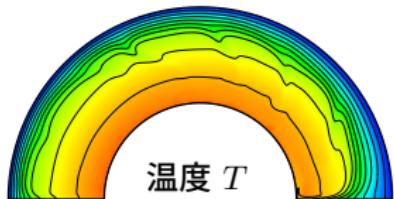
現在進行中 and/or 今後の課題 (2)

もっと現実的な岩石惑星の内部構造

(物性、鉱物の構造相転移の効果など) を考えると?

- (放射性元素の崩壊などによる) **内部発熱** の影響

木下美卒論 (FY2016)、村田卒論 (FY2018)、藤森卒論 (FY2023)



マントル物質がもつ単位質量あたりの内部発熱率が同じであっても、惑星サイズが大きくなるほど影響が大

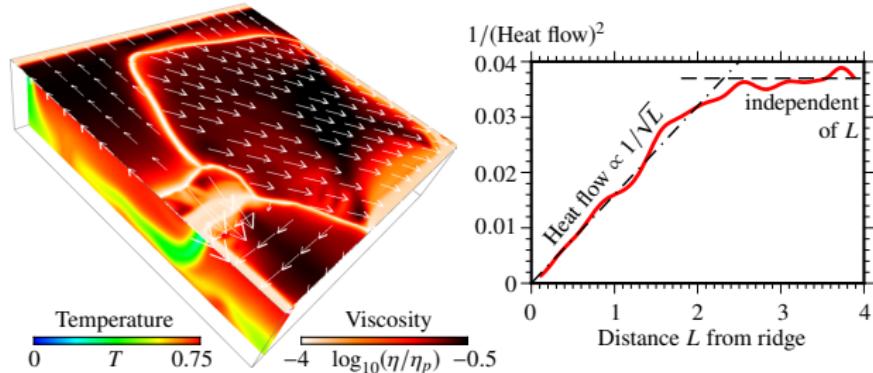
(\because 総発熱量↑、かつマントルの厚さ↑により冷却効率↓)

現在進行中 and/or 今後の課題 (3)

応力履歴依存粘性 (Ogawa, 2003) モデルにより、もっとマジメに
「プレート」を岩石惑星の表層に作りたい!!

- 非圧縮 熱対流による「プレートらしい」表層の挙動の例

3D 箱型版 Miyagoshi, Kameyama and Ogawa (2020)



粘性率に ヒステリシス を持たせることで、

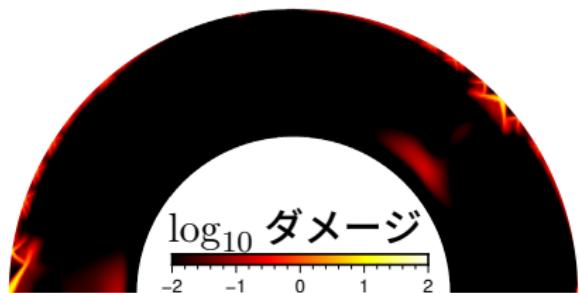
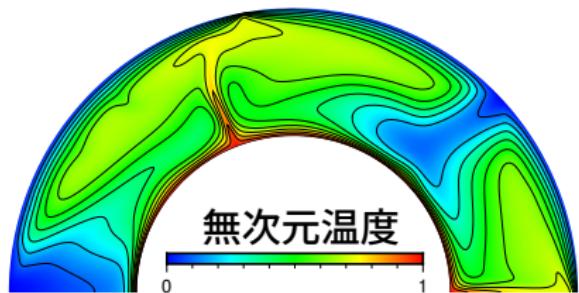
- 「壊れた」 状態 (~ 強度の低い プレート境界)
- 「無傷の」 状態 (~ 強度の高い プレート内部)

の共存が可能になっている

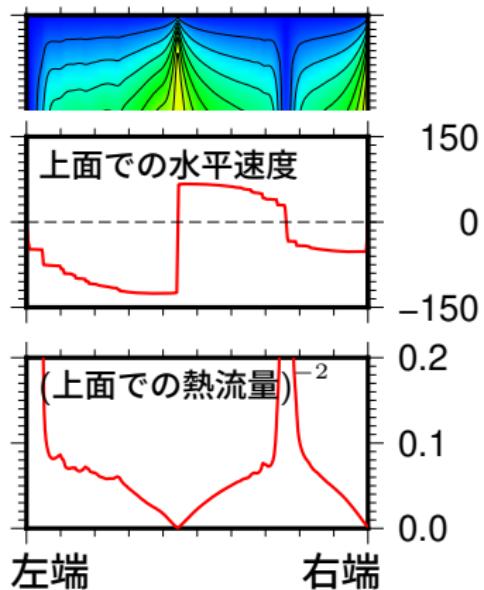
現在進行中 and/or 今後の課題 (3)

応力履歴依存粘性 (Ogawa, 2003) モデルにより、もっとマジメに
「プレート」を岩石惑星の表層に作りたい!!

- 非圧縮 熱対流による「プレートらしい」表層の挙動の例



2D 円環版 田井東修論 (FY2023)



現在進行中 and/or 今後の課題 (3)

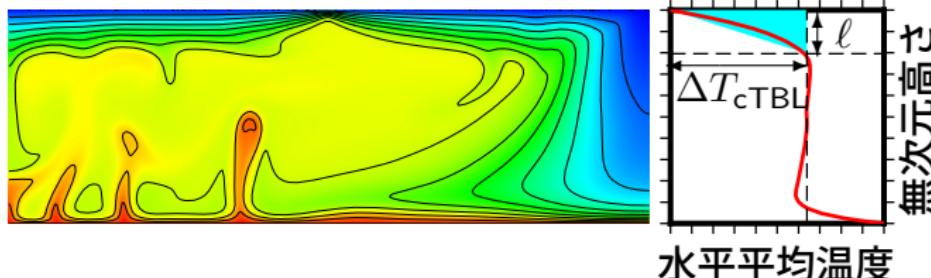
応力履歴依存粘性 (Ogawa, 2003) モデルにより、もっとマジメに
「プレート」を岩石惑星の表層に作りたい!!

- 非圧縮 熱対流による「プレートらしい」表層の挙動の例

2D 箱型版 + 2D 円環版 田井東修論 (FY2023)

低温熱境界層の内部に発生する応力 σ_{cTBL} の源として、それ
自身がもつ負の浮力を考える (ridge push に相当) と

$$\sigma_{cTBL} \simeq Ra \frac{\Delta T_{cTBL} \ell}{2}$$

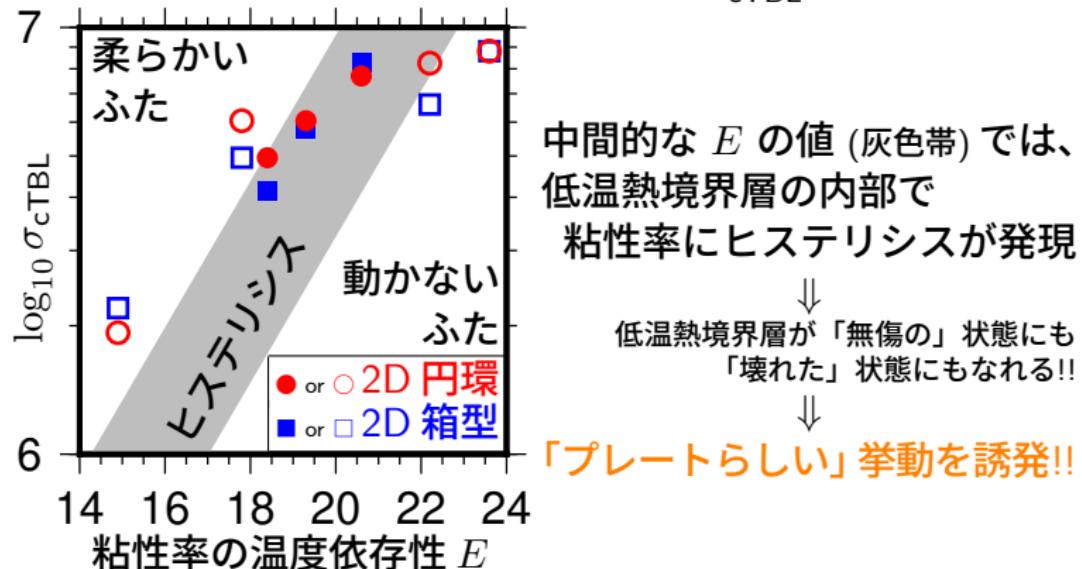


現在進行中 and/or 今後の課題 (3)

応力履歴依存粘性 (Ogawa, 2003) モデルにより、もっとマジメに
「プレート」を岩石惑星の表層に作りたい!!

- 非圧縮 熱対流による「プレートらしい」表層の挙動の探索
田井東修論 (FY2023)

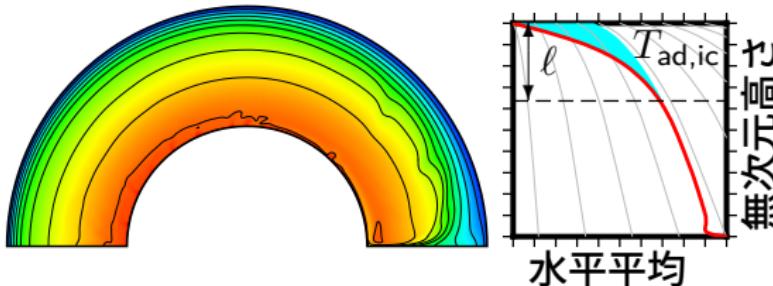
応力履歴依存粘性で誘発される挙動と σ_{cTBL} との関係は?



現在進行中 and/or 今後の課題 (3')

応力履歴依存粘性 (Ogawa, 2003) モデルにより、もっとマジメに
「プレート」を岩石惑星の表層に作りたい!!

- **圧縮性** のある場合には、 $\sigma_{c,TBL}$ をどう見積ればいいの?
 - 基準密度 $\bar{\rho}$ や熱膨張率 α に深さ変化がある
 - 深さ方向の温度変化に断熱温度勾配が乗っかっている



たぶんこういうこと、でいいのか?? (for 2D 円環)

$$\boxed{\text{負の浮力}} = \frac{1}{r_{\max}} \int_{r_{\max}-\ell}^{r_{\max}} \bar{\rho}_{(r)} \alpha_{(r)} (T_{ad,ic(r)} - \langle T \rangle_{(r)}) g_{(r)} r dr$$

これから本格的に解析してみます。

