

# 火成活動とプレートテクトニクスの3次元モデリング： 岩石惑星マントルの熱化学進化の解明に向けた取り組み

亀山 真典 © 愛媛大学地球深部ダイナミクス研究センター

2019年10月15日

MCK is conducting this study in part as a visiting principal scientist of Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology (JAMSTEC), under close collaboration with:



This work was supported by JSPS KAKENHI Grant Numbers JP25287110, JP15H05834, a joint research program at Geodynamics Research Center, Ehime University, and “Exploratory Challenge on Post-K computer” (Elucidation of the Birth of Exoplanets [Second Earth] and the Environmental Variations of Planets in the Solar System).

MCK also acknowledges financial support from Grant-in-Aid for Scientific Research (C) from Japan Society for the Promotion of Science (#26400457 and #18K03724).

> 謝辞

What to do

> なぜ火成活動?

> プレート運動

> ToDo/NeedToDo

プレート

Moon

月の熱進化

# Scientific Goals of This Work: Magmatism and Plate Tectonics in Mantle Convection?

# なぜ「火成活動」つきマントル対流モデルが必要か？

> 謝辞

What to do

> なぜ火成活動？

> プレート運動

> ToDo/NeedToDo

プレート

Moon

月の熱進化

マントル内  
火成活動

=

上昇中内の  
マグマの生成

+

固相マントル内中の  
液相マグマの移動

マントル内火成活動とは ...

1. マントル内の熱輸送・物質輸送を担う主要なメカニズム  
⇒ マントルの熱・化学進化の過程に大きく影響する!!
2. 固相マントルの対流との相互作用が起こりうる  
⇒ 正のフィードバックの可能性が!! (Ogawa, 2014)



# なぜ「プレート運動」つきマントル対流モデルが必要か？

> 謝辞

What to do

> なぜ火成活動？

> プレート運動

> ToDo/NeedToDo

プレート

Moon

月の熱進化

プレート  
テクトニクス

=

冷たくて固い  
「板」が形成

+

冷たくて固い  
「板」の沈み込み

プレートテクトニクスとは ...

1. 岩石惑星内部の熱進化に重要な役割をもつ  
冷たい「板」が惑星内部に沈み込むことにより、マントルや核を効果的に冷却することができる!!
2. 岩石惑星内部の化学進化に重要な役割をもつ  
冷たくて固い「板」による「かき混ぜ」が、マントル内の化学的不均質構造の分布に大きく影響する!!

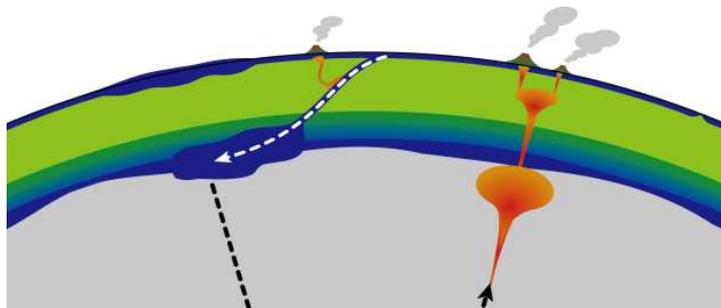


figure by courtesy of GRC, Ehime University

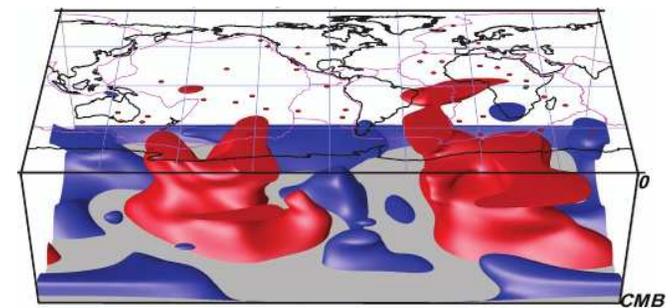


figure from Garnero et al. (2007)

# 解決したい科学的課題 + 要求される技術的課題

> 謝辞

What to do

> なぜ火成活動?

> プレート運動

> ToDo/NeedToDo

プレート

Moon

月の熱進化

(3次元) 数値シミュレーションにより、岩石惑星内部のマントルの熱的・化学的進化の過程を追究したい。

高粘性かつ非圧縮 (非弾性) な流体のストークス流として、固相マントルの流動を **多重格子法** で解くことに加えて、

1. **液相マグマの流動 (+生成・消滅)** や **固相マントルの流動との力学的結合** を適切に取り扱いたい
  - 局所的な湧き出し・吸い込みを伴うストークス流
2. 岩石惑星表面の冷たくて **「かたい」プレートが「動く」挙動** を、矛盾なく再現して取り扱いたい
  - 局所的な粘性率の低下を伴うストークス流

**局所的** な構造を **多重格子法** で扱う、ってのが (泣)...  
であったが、ようやく **技術的困難を克服** できた (つもり) !!

➤ 謝辞

What to do

プレート

- なぜ地球を？
- 必要なもの
- 流れ場の概略
- 流れ場の詳細 1
- 流れ場の詳細 2
- 流れ場の詳細 3
- 流れ場の詳細 4
- プレートまとめ

Moon

月の熱進化

# (Too) Brief Summary of Our Technical Development

## 1. Plate Tectonics on Earth

# 「科学的ターゲット」としての地球の位置づけ

➤ 謝辞

What to do

プレート

➤ なぜ地球を？

➤ 必要なもの

➤ 流れ場の概略

➤ 流れ場の詳細 1

➤ 流れ場の詳細 2

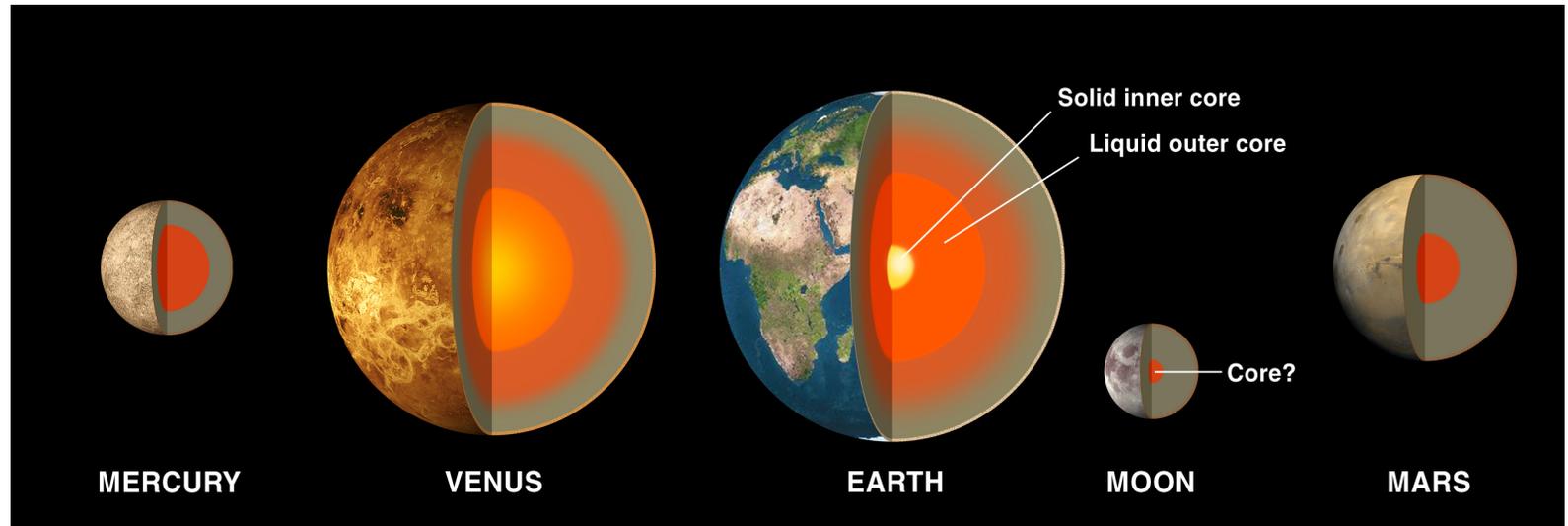
➤ 流れ場の詳細 3

➤ 流れ場の詳細 4

➤ プレートまとめ

Moon

月の熱進化



地球型惑星・衛星はいろいろあれど、その中でも**地球**は

1. 進化の過程を検証するのに有用な観測事実が最も豊富
  2. 対象とする地球型惑星・衛星のうち**最も複雑**な例
    - 最も大きい (~ マントル内の熱対流が最も激しい)
    - **プレートテクトニクスあり** (他にはない特徴)
- ⇒ 両方の効果が入り混じった状態で進化  
(その中でもプレートテクトニクスが優位だが)

# プレート運動つきマントル対流モデルに必要なもの

➤ 謝辞

What to do

プレート

➤ なぜ地球を？

➤ **必要なもの**

➤ 流れ場の概略

➤ 流れ場の詳細 1

➤ 流れ場の詳細 2

➤ 流れ場の詳細 3

➤ 流れ場の詳細 4

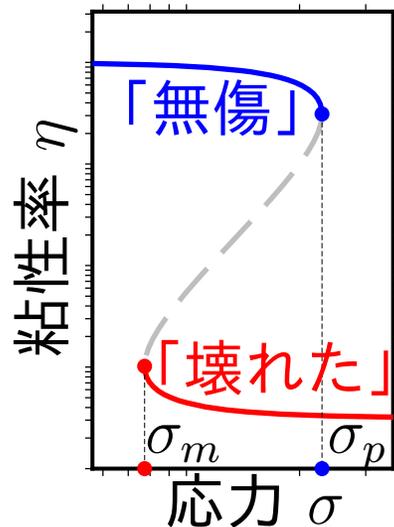
➤ プレートまとめ

Moon

月の熱進化

1. **局所的な粘性率の変化** に頑健なマントル対流ソルバー
2. **プレートの挙動を適切に表現する流動特性** モデル

本研究で使用するモデル: **応力履歴にも依存する粘性率**



粘性率  $\eta$  は応力  $\sigma$  の多価関数であるべし!!

- ❑ 壊れて**弱いプレート境界**  
狭い領域内で速度の大きな食い違い
- ❑ 無傷で**強いプレート内部**  
境界から十分離れると剛体的な「板」

本研究では「過去に**受けたダメージの程度**」を表わすパラメータ  $\omega$  を用いて

$$\eta \equiv \underbrace{\eta_{\text{標準}}(T, p)}_{\text{温度・圧力依存性}} \times \underbrace{F(\omega)}_{\text{応力履歴依存性}} \quad \text{とした。}$$

# シミュレーションモデル + 流れ場・温度場の概要

➤ 謝辞

What to do

プレート

➤ なぜ地球を？

➤ 必要なもの

➤ 流れ場の概略

➤ 流れ場の詳細 1

➤ 流れ場の詳細 2

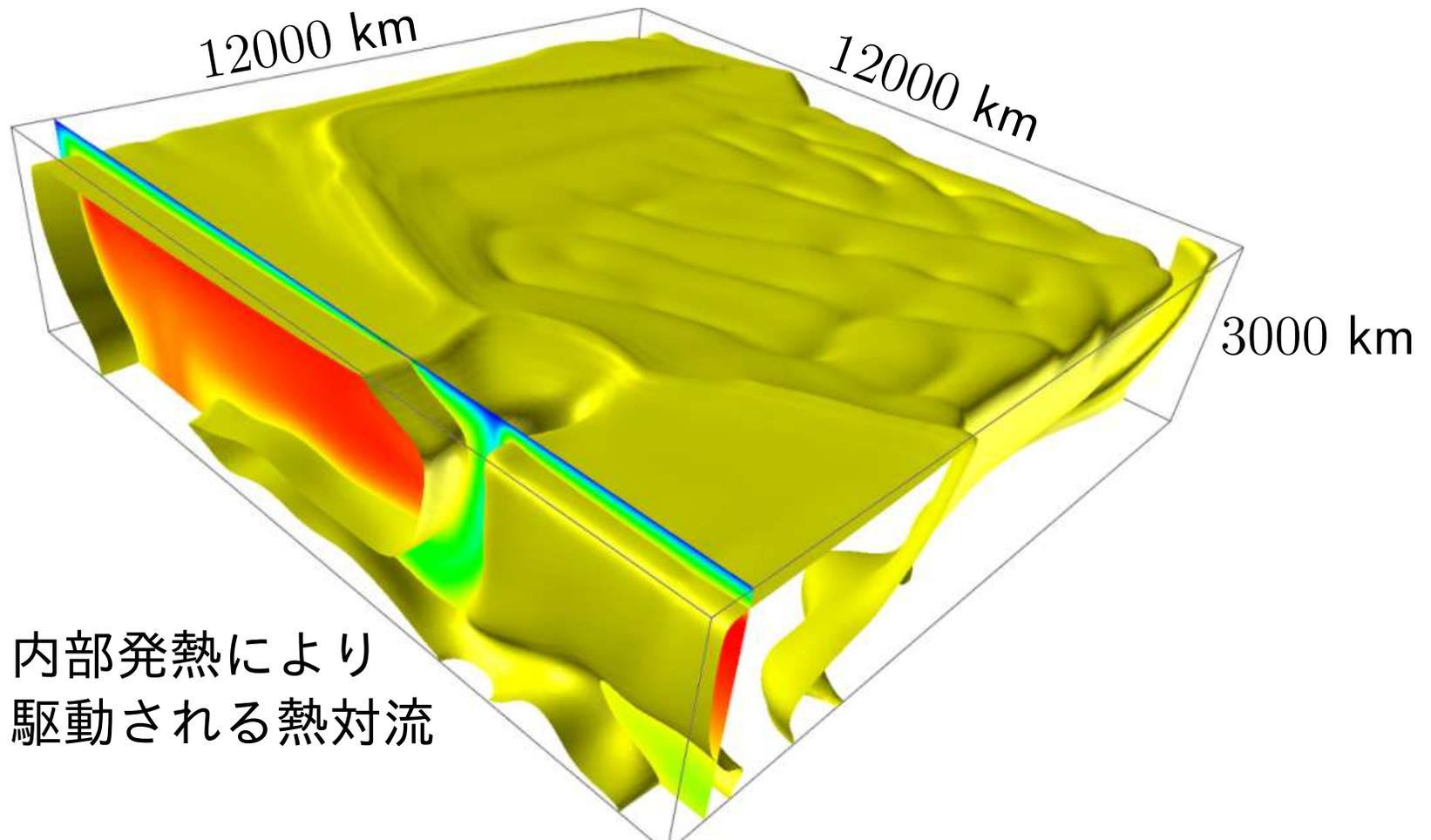
➤ 流れ場の詳細 3

➤ 流れ場の詳細 4

➤ プレートまとめ

Moon

月の熱進化

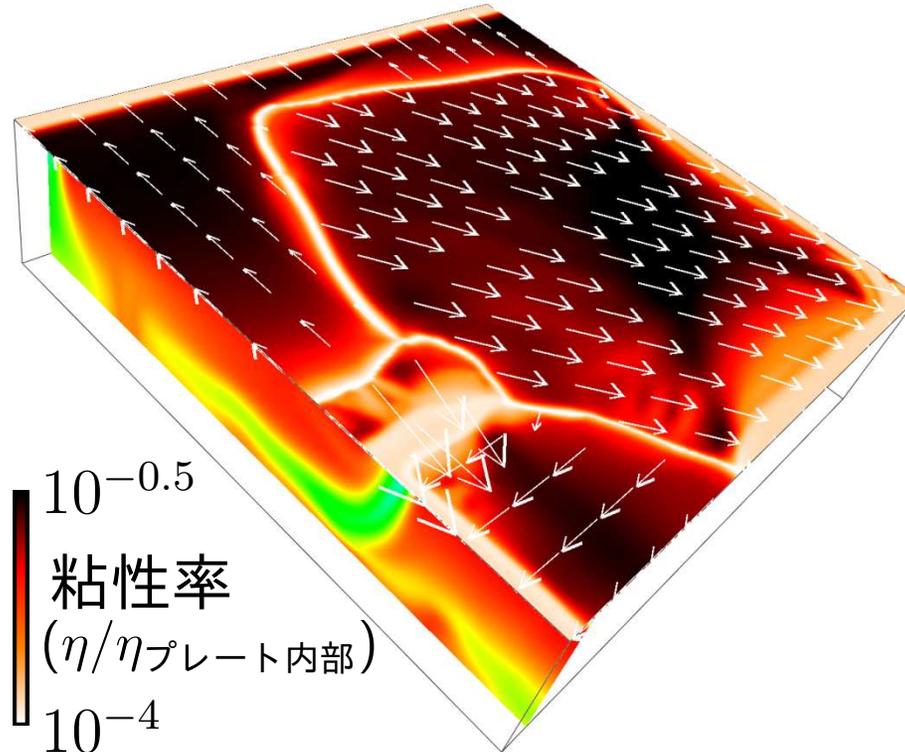


内部発熱により  
駆動される熱対流

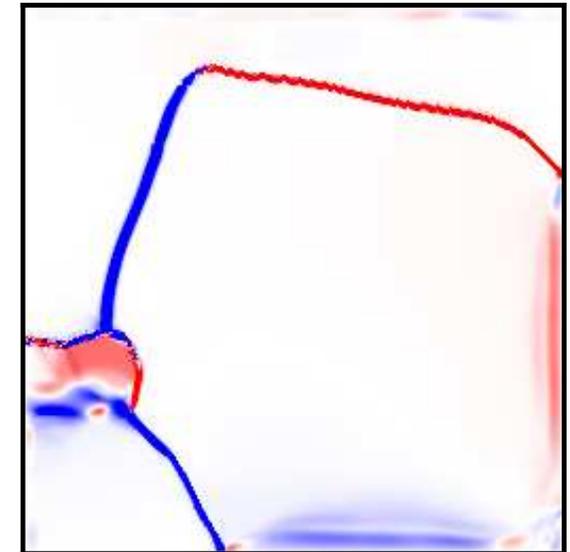
- ❑ 沈み込むスラブ:  
「沈み込み帯」で片側の「プレート」だけが沈んでいく

# 流れ場の詳細 1: 「強い」プレート内部と「弱い」境界部

上面付近の低温部分の流れ場をよく観察してみると...



渦度の鉛直成分



- ❑ 「弱い」プレート境界が線状につながって発達
  - ⇒ プレート境界のごく狭い部分にのみ変形が集中
- ❑ 境界によって区切られた「強い」プレートが発達
  - ⇒ プレートの内部はほぼ剛体的な「一枚岩」で運動

> 謝辞

What to do

プレート

> なぜ地球を?

> 必要なもの

> 流れ場の概略

> 流れ場の詳細 1

> 流れ場の詳細 2

> 流れ場の詳細 3

> 流れ場の詳細 4

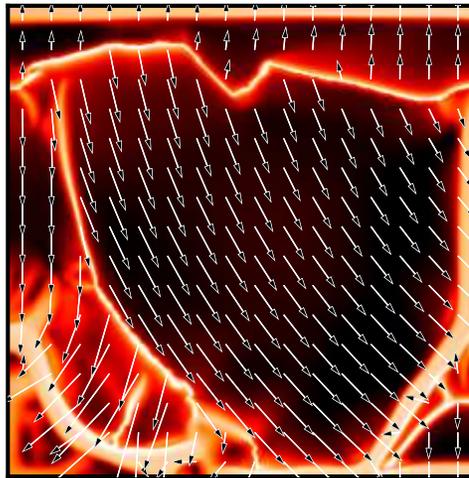
> プレートまとめ

Moon

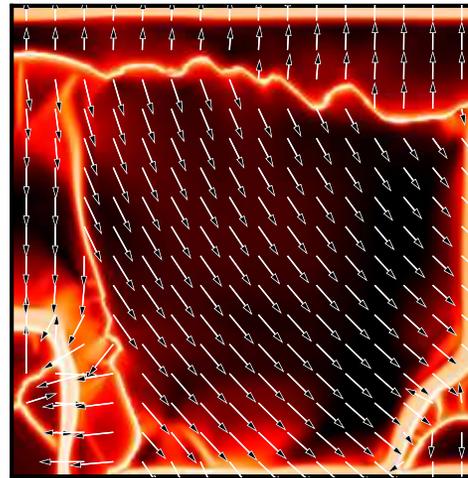
月の熱進化

# 流れ場の詳細 2: 地質学的時間スケールでの「安定性」

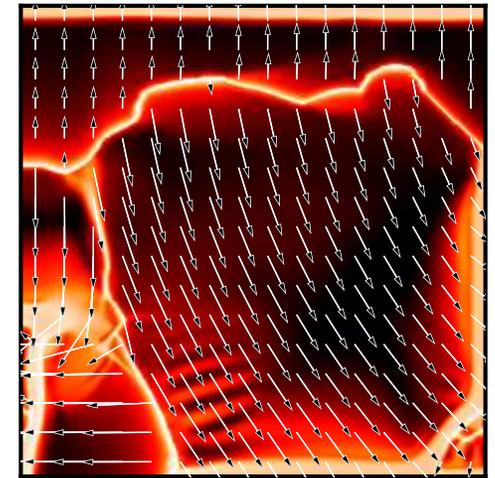
低温の上面付近の流れ場の時間変化を観察してみると...



$$t = 4.419 \times 10^{-2}$$



$$t = 4.635 \times 10^{-2}$$



$$t = 5.069 \times 10^{-2}$$

- プレート境界は 10 億年程度以上 (無次元で  $O(10^{-3})$ ) の時間スケールで安定に存在
  - ⇒ 突然できたり、消えたりしない ( $\because$  履歴依存性)
- プレートの剛体的運動も同程度の時間スケールで安定

> 謝辞

What to do

プレート

- > なぜ地球を?
- > 必要なもの
- > 流れ場の概略
- > 流れ場の詳細 1
- > 流れ場の詳細 2
- > 流れ場の詳細 3
- > 流れ場の詳細 4
- > プレートまとめ

Moon

月の熱進化

# 流れ場の詳細 3: プレーートの成長と地殻熱流量の分布

➤ 謝辞

What to do

プレート

➤ なぜ地球を?

➤ 必要なもの

➤ 流れ場の概略

➤ 流れ場の詳細 1

➤ 流れ場の詳細 2

➤ 流れ場の詳細 3

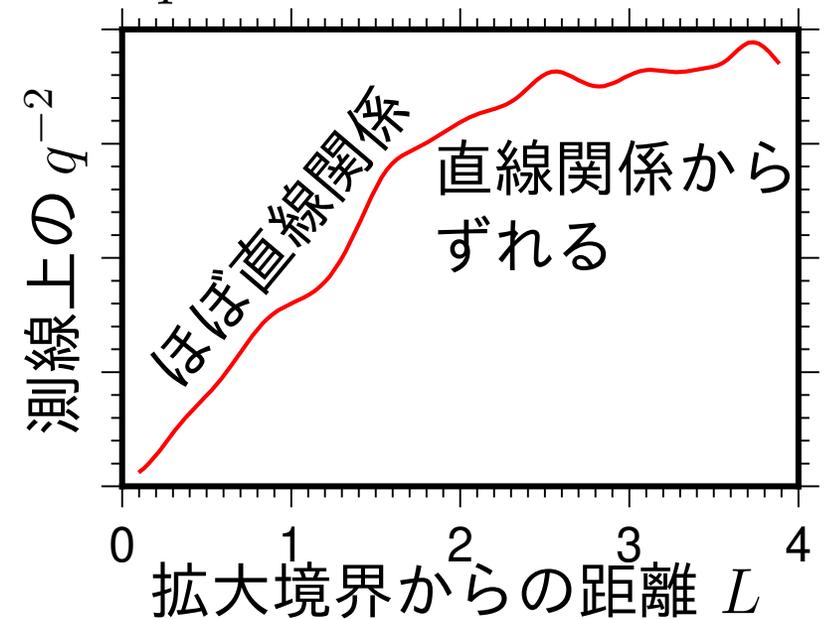
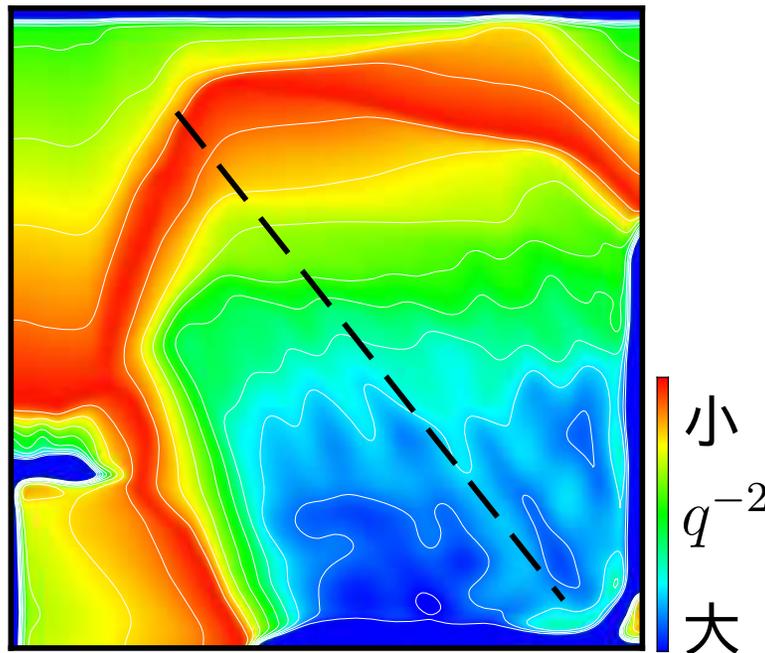
➤ 流れ場の詳細 4

➤ プレートまとめ

Moon

月の熱進化

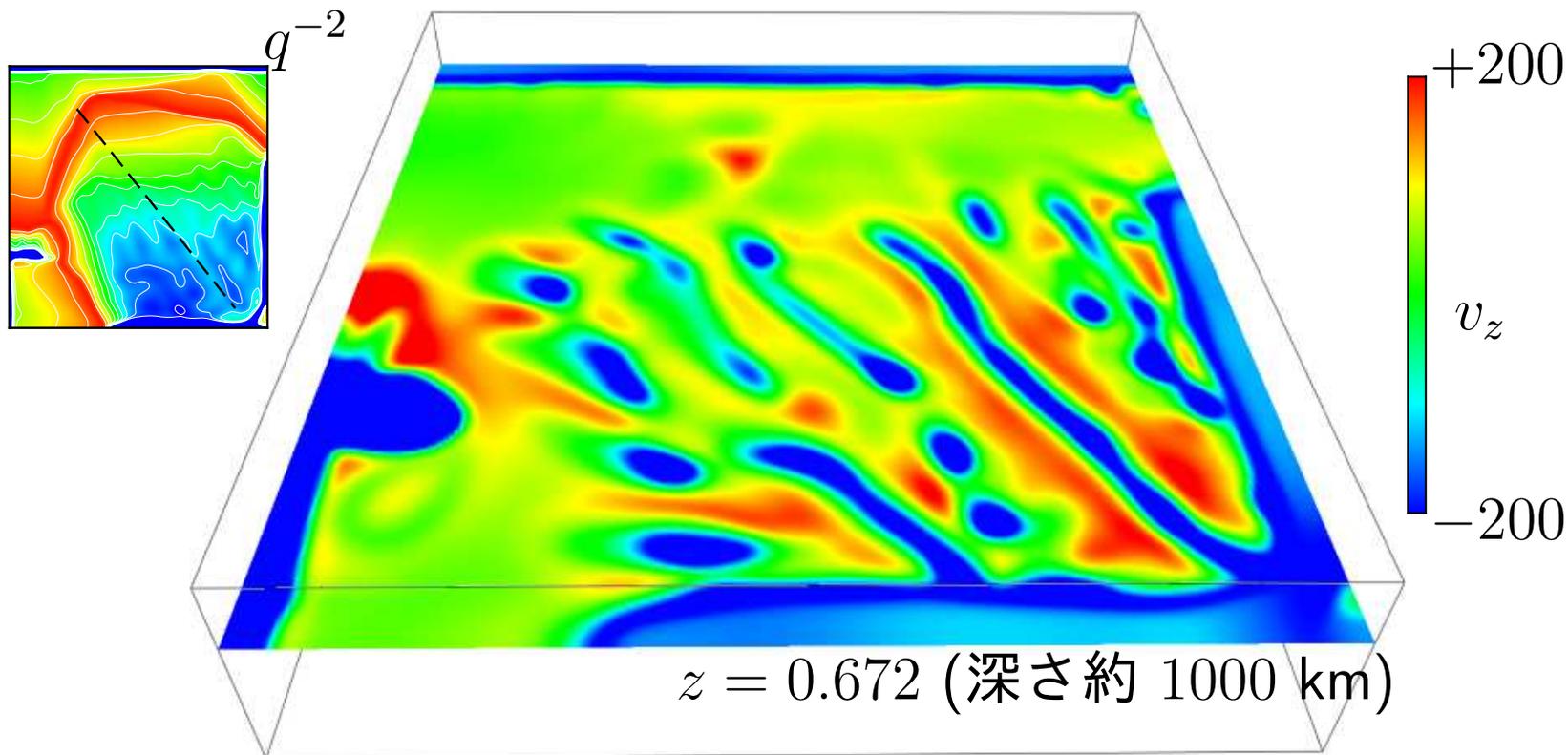
大きいプレート上での地殻熱流量  $q$  を観察してみると...



- ❑ 拡大境界の十分近くではほぼ  $q \propto$  境界からの距離<sup>-1/2</sup>
  - ⇒ 「半無限体冷却モデル」による予測と実に調和的
- ❑ 拡大境界から大きく離れると、この関係からずれる
  - ⇒ ほぼ一定の値に収束 + 場所による乱れ

# 流れ場の詳細 4: 地殻熱流量の分布と 2 次的対流の存在

マンツルの流れの鉛直速度  $v_z$  を観察してみると...



- ❑ 古いプレートの下で 2 次的な対流が発生
  - ⇒ プレート運動の方向に軸をもつ 2 次元のロール状構造
- ❑ 2 次的対流による熱輸送が、地殻熱流量の分布にも影響

➤ 謝辞

What to do

プレート

➤ なぜ地球を?

➤ 必要なもの

➤ 流れ場の概略

➤ 流れ場の詳細 1

➤ 流れ場の詳細 2

➤ 流れ場の詳細 3

➤ 流れ場の詳細 4

➤ プレートまとめ

Moon

月の熱進化

# 結果のまとめ

➤ 謝辞

What to do

プレート

➤ なぜ地球を？

➤ 必要なもの

➤ 流れ場の概略

➤ 流れ場の詳細 1

➤ 流れ場の詳細 2

➤ 流れ場の詳細 3

➤ 流れ場の詳細 4

➤ プレートまとめ

Moon

月の熱進化

□ 粘性率が応力履歴にも依存するレオロジーを用いた3次元箱型マントル対流シミュレーションにより、プレート運動の基本的な特徴をうまく再現することに成功!!

1. 「強い」プレートの内部と「弱い」境界部
2. 地質学的時間スケールで安定的なプレートの運動
3. 拡大境界からの距離に伴う地殻熱流量の変化
4. 古いプレートの下のマントルで2次的ロール状対流
5. ...

□ プレート運動を再現する上での技術的なカギは、

1. 過去の変形の履歴を記憶するレオロジーモデルの採用
  - ⇒ 長時間にわたって「弱い」プレート境界を安定化
2. 粘性率の空間変化に対する流れ場ソルバの頑健の向上
  - ⇒ 高精度 (+許容しうる実時間内) で計算を実現

➤ 謝辞

What to do

---

プレート

---

Moon

- なぜ月を？
- 月の地図
- 内部 1 次元構造
- 火成活動史
- lobate scarps 露頭
- lobate scarps 分布
- 初期の膨張
- 月の熱進化の特徴

月の熱進化

---

# 月の熱進化：大急ぎで復習

# 「科学的ターゲット」としての月の位置づけ

> 謝辞

What to do

プレート

Moon

> なぜ月を?

> 月の地図

> 内部 1 次元構造

> 火成活動史

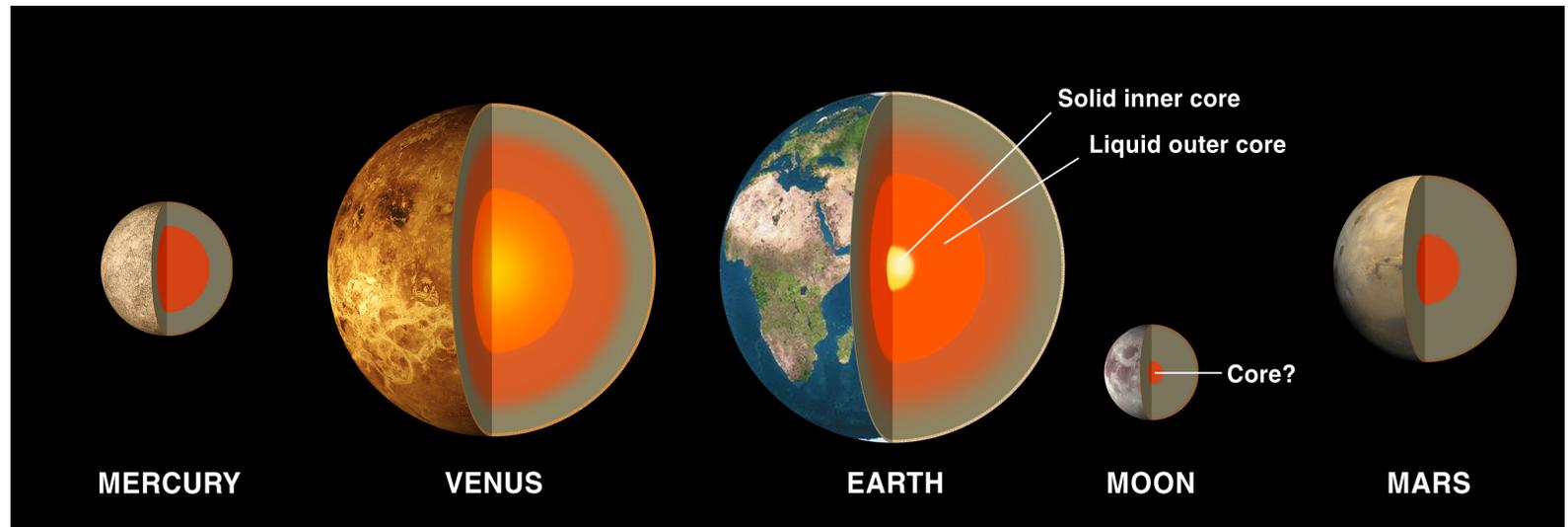
> lobate scarps 露頭

> lobate scarps 分布

> 初期の膨張

> 月の熱進化の特徴

月の熱進化



地球型惑星・衛星はいろいろあれど、その中でも月

1. 対象とする地球型惑星・衛星のうち最も単純な例

□ プレートテクトニクスなし

□ 最も小さい (~ マントル内の熱対流が最も穏やか)

⇒ 火成活動の効果がよく強調されているはず!!

2. 熱進化に関する観測的な制約条件 が得られている

(see later)

# 月の「見た目」：嵐の大洋

➤ 謝辞

What to do

プレート

Moon

➤ なぜ月を？

➤ 月の地図

➤ 内部 1 次元構造

➤ 火成活動史

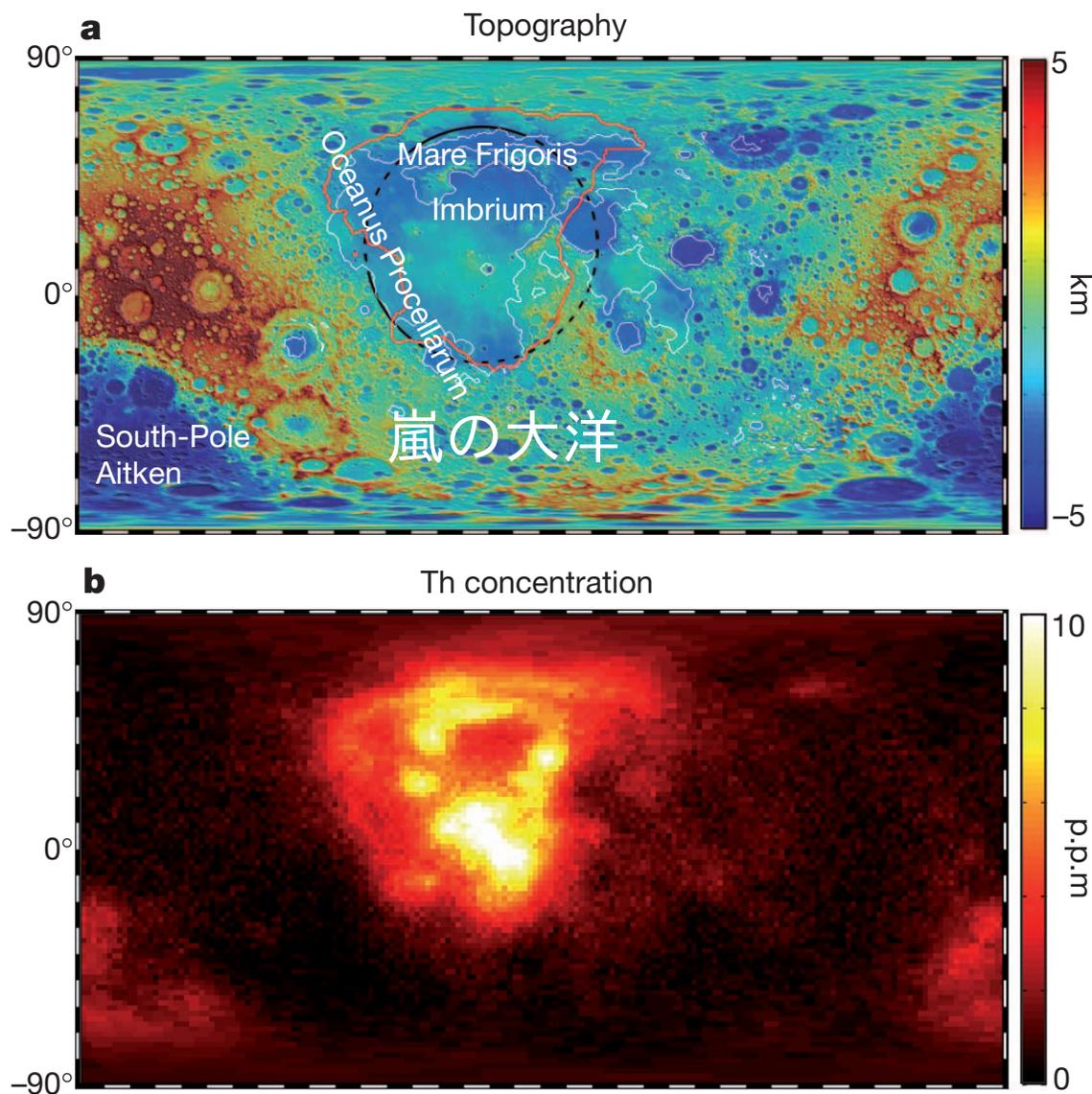
➤ lobate scarps 露頭

➤ lobate scarps 分布

➤ 初期の膨張

➤ 月の熱進化の特徴

月の熱進化



High concentration of KREEP elements (K, REE, P)

Procellarum KREEP Terrane ("PKT")

from Andrews-Hanna et al. (2014)

# 1-D radial structure of present Moon's interior

➤ 謝辞

➤ What to do

➤ プレート

➤ Moon

➤ なぜ月を？

➤ 月の地図

➤ 内部 1次元構造

➤ 火成活動史

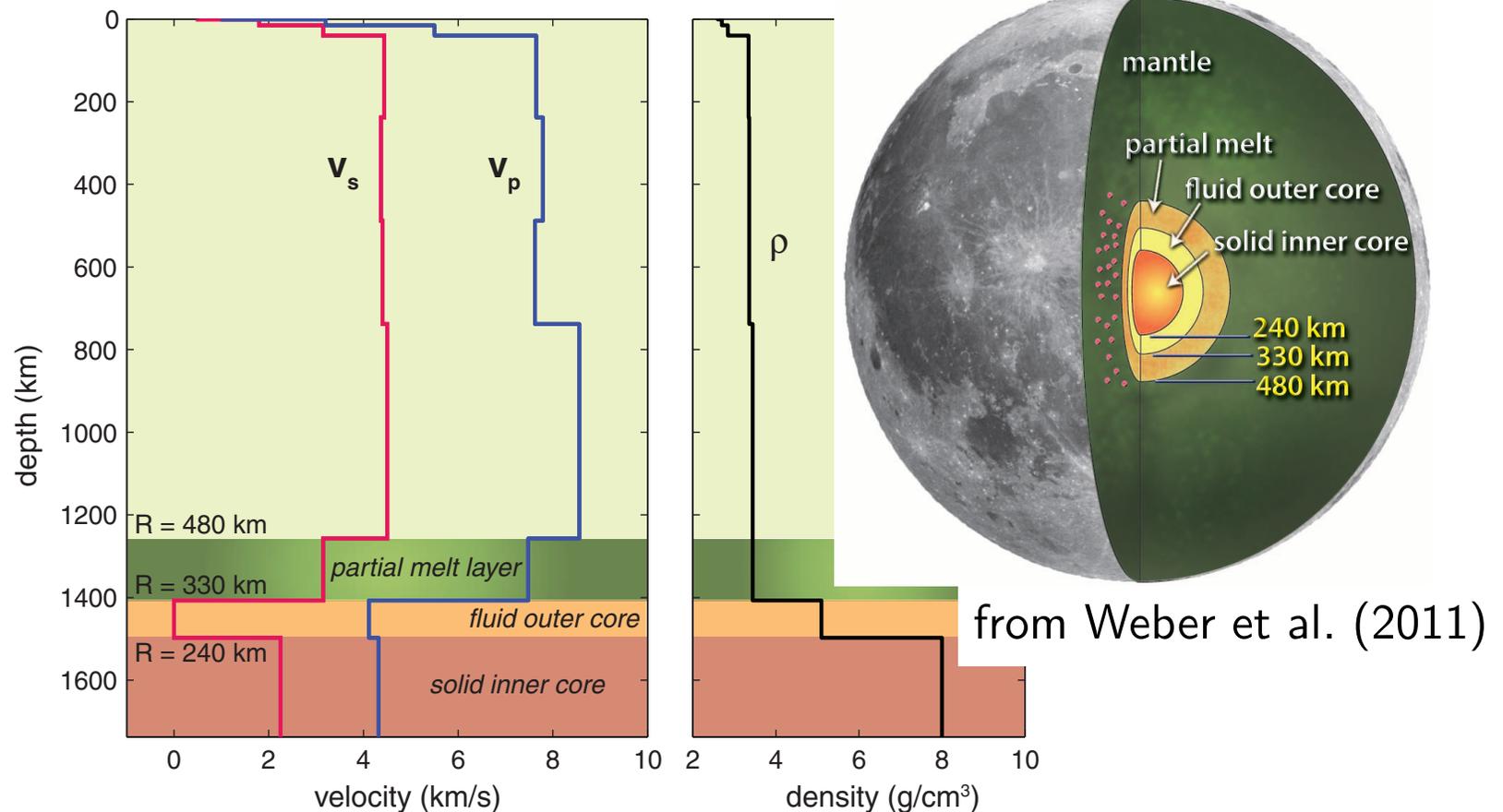
➤ lobate scarps 露頭

➤ lobate scarps 分布

➤ 初期の膨張

➤ 月の熱進化の特徴

月の熱進化



- ❑ Small core → very thick mantle
- ❑ Presence of (partially) molten regions in lunar interior → not thoroughly cooled down (despite its small size?)

# History of magmatism on Moon

➤ 謝辞

What to do

プレート

Moon

➤ なぜ月を?

➤ 月の地図

➤ 内部 1 次元構造

➤ 火成活動史

➤ lobate scarps 露頭

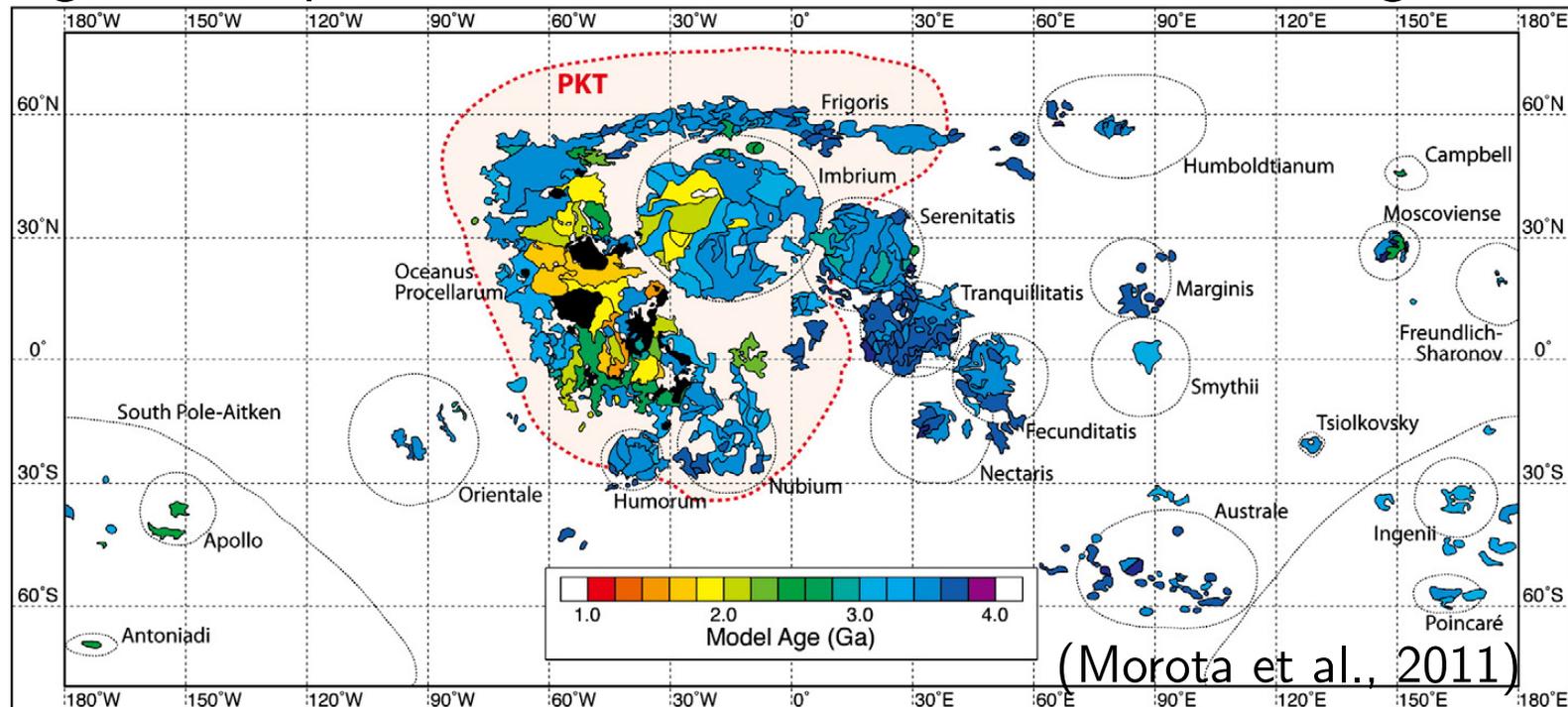
➤ lobate scarps 分布

➤ 初期の膨張

➤ 月の熱進化の特徴

月の熱進化

## Ages of erupted lavas estimated from “crater counting”



- ❑ Magma eruption globally ceased at 2.5–3.0 Ga
- ❑ In PKT, eruption continued until  $\sim 1.5$  Ga
- ❑ Mare volcanism was active by  $\sim 4.35$  Ga (from lunar meteorite)
- ... Long-lived ( $\sim 2$  Gy) magmatism (at least locally at PKT)

# Changes in Moon's radius (contraction)

➤ 謝辞

What to do

プレート

Moon

➤ なぜ月を？

➤ 月の地図

➤ 内部 1 次元構造

➤ 火成活動史

➤ lobate scarps 露頭

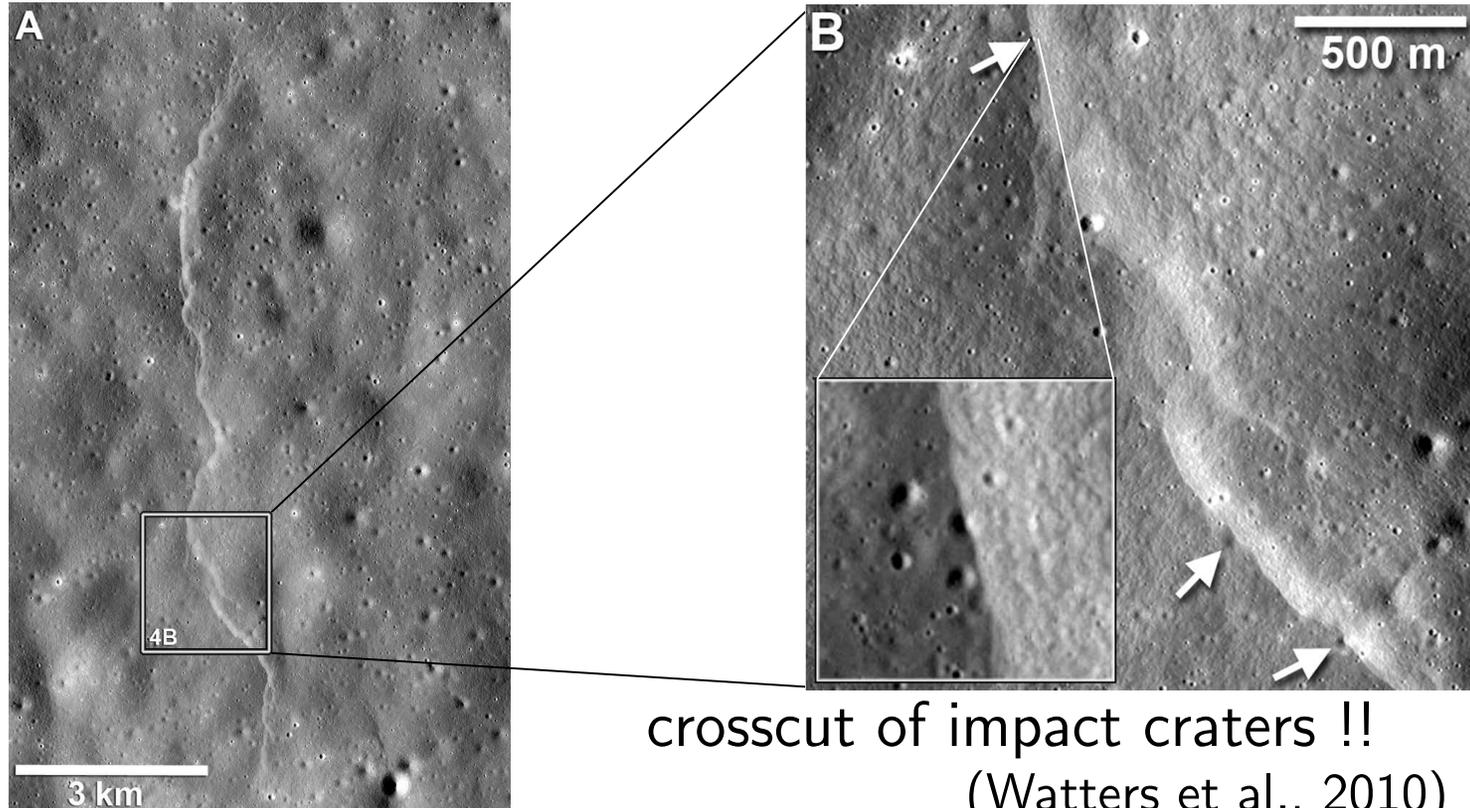
➤ lobate scarps 分布

➤ 初期の膨張

➤ 月の熱進化の特徴

月の熱進化

Lobate scarps 舌状の崖 = surface expressions of shallow thrusts

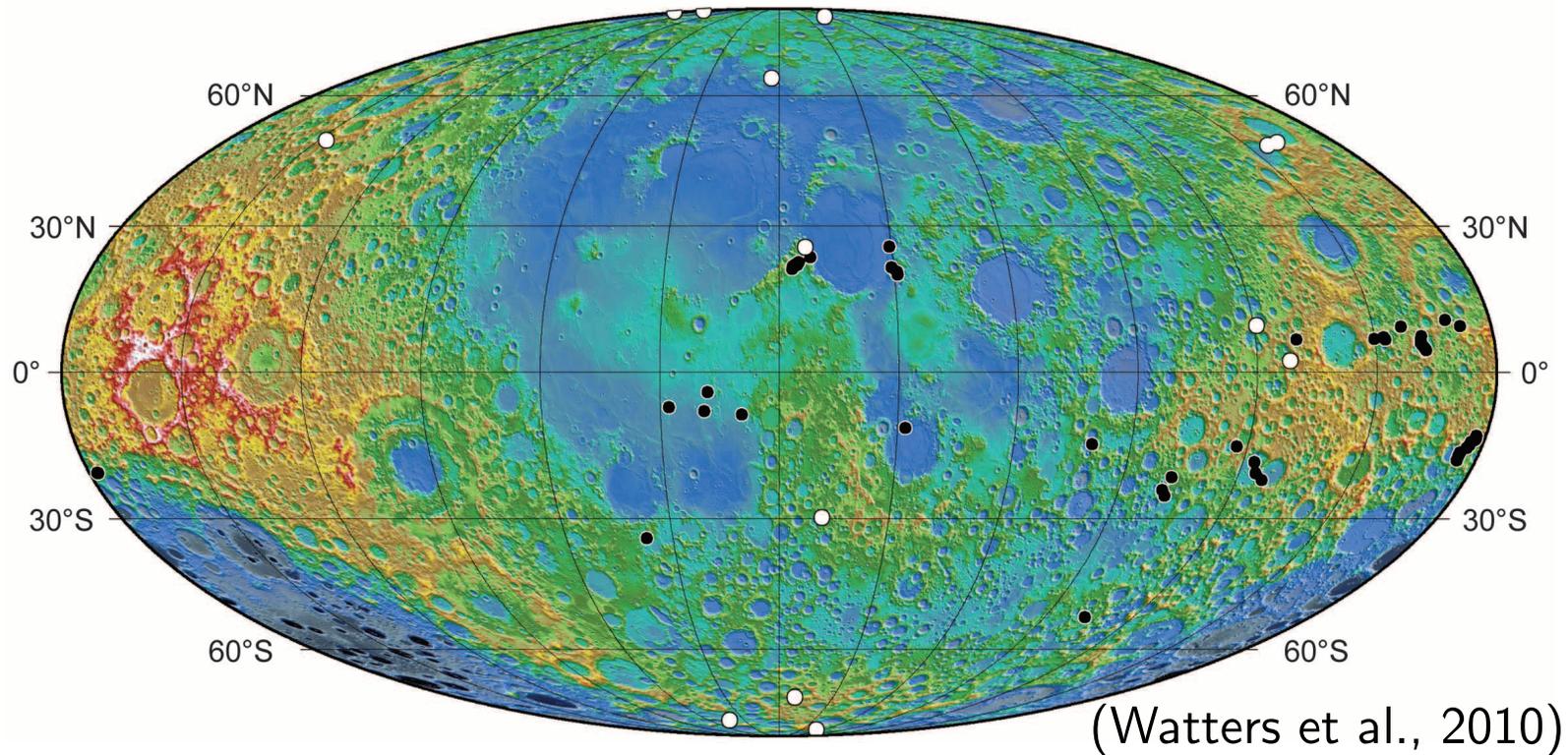


crosscut of impact craters !!  
(Watters et al., 2010)

- ❑ small spatial scales (relief of  $< 100$  m; length of  $\lesssim O(10^1)$  km)
- ❑ some scarps are formed after small cratering events  
→ these scarps are **young** ( $< 1$  billion years old)

# Changes in Moon's radius (contraction)

## Distribution of lobate scarps on Moon



- ❑ globally distributed (on farside/nearside, high/low latitudes)
- ❑ lacking in large-scale ones (such as those in Mercury or Mars)
- ... Late-stage global contraction (only  $< 1$  km in radius)

➤ 謝辞

What to do

プレート

Moon

➤ なぜ月を?

➤ 月の地図

➤ 内部 1 次元構造

➤ 火成活動史

➤ lobate scarps 露頭

➤ lobate scarps 分布

➤ 初期の膨張

➤ 月の熱進化の特徴

月の熱進化

# Changes in Moon's radius (expansion)

➤ 謝辞

What to do

プレート

Moon

➤ なぜ月を？

➤ 月の地図

➤ 内部 1 次元構造

➤ 火成活動史

➤ lobate scarps 露頭

➤ lobate scarps 分布

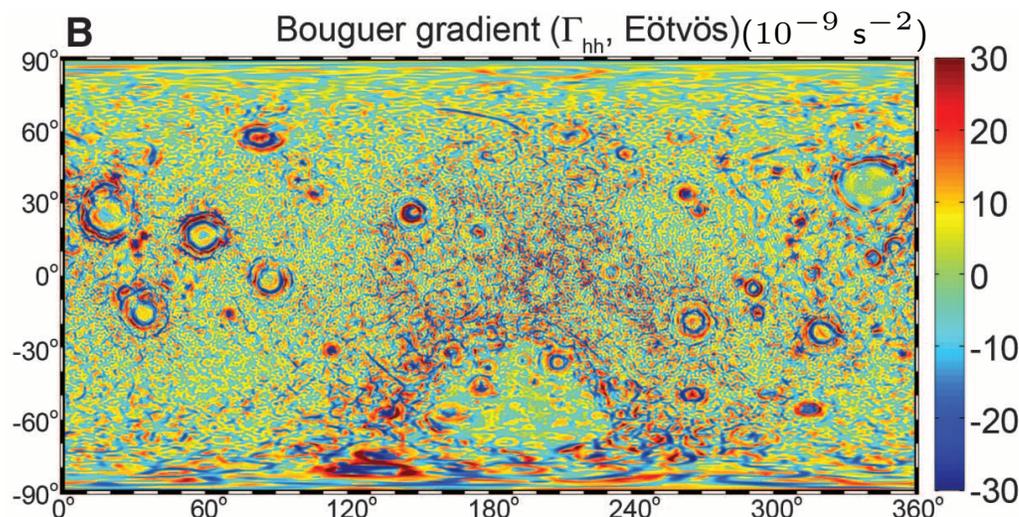
➤ 初期の膨張

➤ 月の熱進化の特徴

月の熱進化

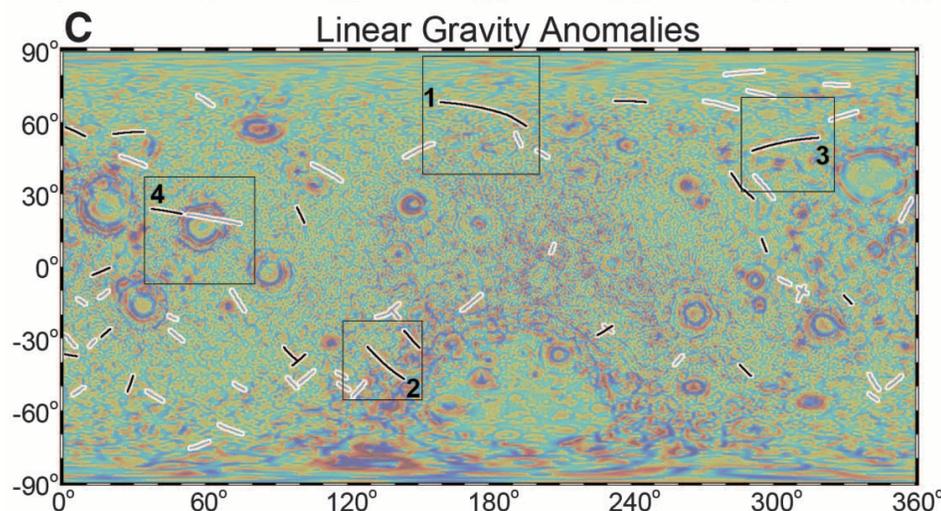
## Linear gravity anomalies

(Andrews-Hanna et al., 2013)



❑ caused by tabular intrusions of dense igneous rocks

❑ distributed globally



❑ formed after South-Pole Aitken impact ([2])

❑ formed before Crisium impact ([4])

... Early-stage global expansion (up to  $\sim 5$  km,  $\sim 3.8$  Ga)

# Moon: its enigmatic thermal evolution

> 謝辞

What to do

プレート

Moon

> なぜ月を?

> 月の地図

> 内部 1 次元構造

> 火成活動史

> lobate scarps 露頭

> lobate scarps 分布

> 初期の膨張

> 月の熱進化の特徴

月の熱進化

月は奇妙な熱進化の歴史をたどっているようだ

- ❑ 初期に膨張 (最大  $\sim 5$  km)、その後にごくわずかだけ ( $\lesssim 1$  km) 収縮
- ❑ 海 (mare) の火成活動が 40 億年以上前から始まり、局所的には約 15 億年前まで継続
- ❑ 発熱物質を大量に含んだ Procellarum KREEP Terrane (PKT) が月の表側に存在
- ❑ 40 億  $\sim$  35 億年前頃にのみ固有の磁場が生成

... 月の熱進化は簡単 (単調) な冷却の過程ではない?

- ❑ 小さい割にはまだ十分に冷えきってない?
- ❑ 初期に温度が上がった時期があった?

➤ 謝辞

What to do

プレート

Moon

月の熱進化

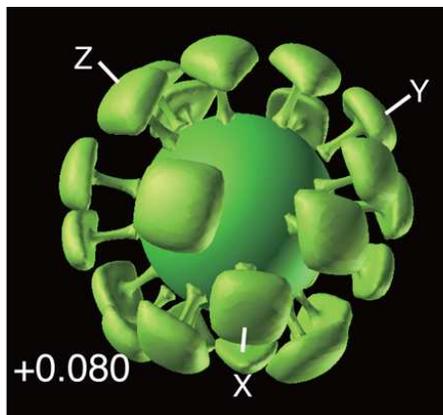
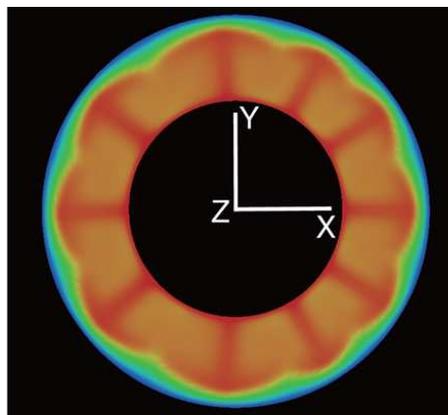
- 3 次元球殻 1
- 3 次元球殻 2
- モデルと能書き
- 部分円環結果 1
- 部分円環結果 2
- 部分円環結果 3
- 部分円環結果 4
- 部分円環まとめ
- 巨大衝突説は?
- 2 成分系
- 部分球殻

# (Too) Brief Summary of Our Struggle 2. Magmatism and Thermal evolution of Moon

# 3次元球殻内熱対流シミュレーション: 「容器」の「形」

## 3次元球殻の内径/外径比 $f$ と粘性の温度依存性の影響

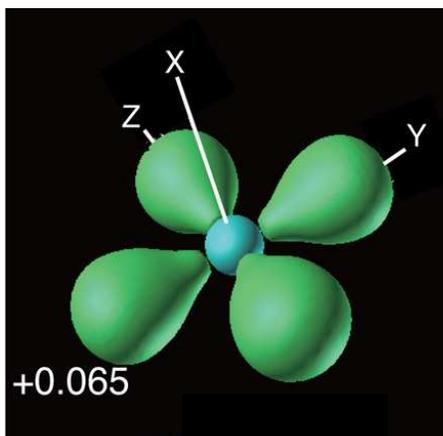
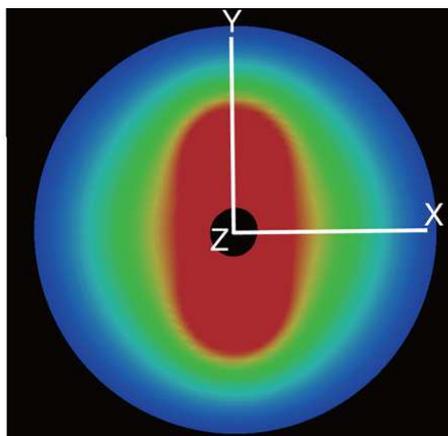
Yanagisawa, Kameyama, Ogawa (2016)



薄い球殻 ( $f = 0.55$ )

$$Ra = 1.6 \times 10^7$$

$$\eta_{\text{top}}/\eta_{\text{bot}} = 10^{5.2}$$



厚い球殻 ( $f = 0.11$ )

$$Ra = 8.9 \times 10^8$$

$$\eta_{\text{top}}/\eta_{\text{bot}} = 10^{6.9}$$

ぶ厚い球殻の中では、対流のようすがかなり特異になる

□ 上面と下面での表面積が大きく違っているのが原因

➤ 謝辞

What to do

プレート

Moon

月の熱進化

➤ 3次元球殻 1

➤ 3次元球殻 2

➤ モデルと能書き

➤ 部分円環結果 1

➤ 部分円環結果 2

➤ 部分円環結果 3

➤ 部分円環結果 4

➤ 部分円環まとめ

➤ 巨大衝突説は?

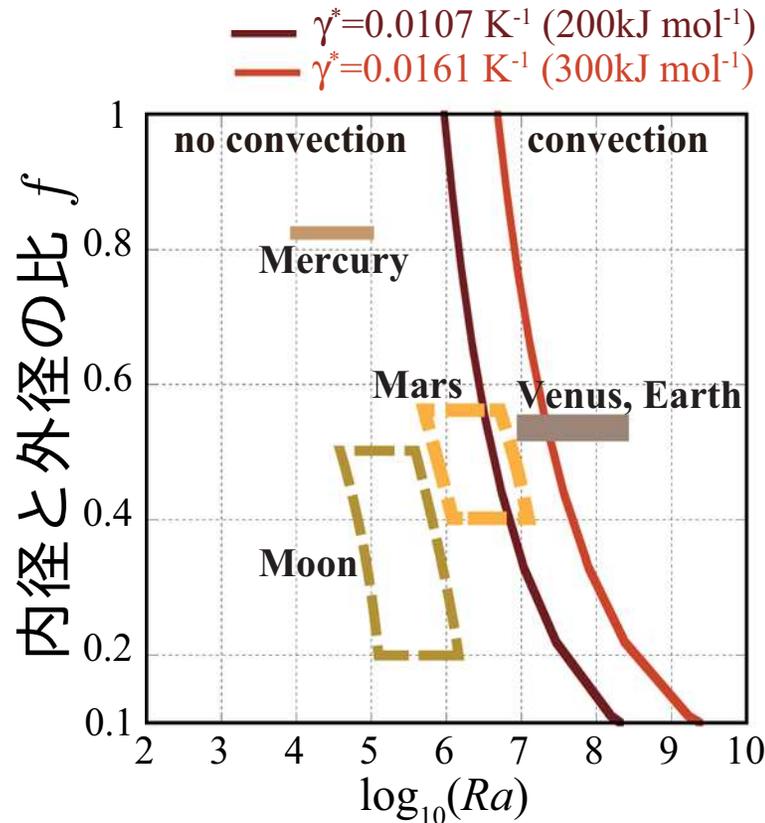
➤ 2成分系

➤ 部分球殻

# 3次元球殻内熱対流シミュレーション: 「容器」の「形」

熱対流が起こり始める「臨界レイリー数」  $Ra_c$

Yanagisawa, Kameyama, Ogawa (2016)



下部加熱による3次元球殻熱対流の臨界レイリー数  $Ra_c$

ここでは粘性率の温度依存性が強い(クリープの活性化エネルギーが大)条件を考えている

球殻がぶ厚くなる( $f$ 小)ほど臨界レイリー数が大きくなる

- 下部からの加熱の効果だけでは、月(+水星)のマントルでは対流が起こりそうにない  
⇒ 内部発熱物質(放射性元素)の効果が重要になる

> 謝辞

What to do

プレート

Moon

月の熱進化

> 3次元球殻 1

> 3次元球殻 2

> モデルと能書き

> 部分円環結果 1

> 部分円環結果 2

> 部分円環結果 3

> 部分円環結果 4

> 部分円環まとめ

> 巨大衝突説は?

> 2成分系

> 部分球殻

# 具体的な科学目標 + 使用するモデルの特徴

➤ 謝辞

What to do

プレート

Moon

月の熱進化

➤ 3次元球殻 1

➤ 3次元球殻 2

➤ モデルと能書き

➤ 部分円環結果 1

➤ 部分円環結果 2

➤ 部分円環結果 3

➤ 部分円環結果 4

➤ 部分円環まとめ

➤ 巨大衝突説は?

➤ 2成分系

➤ 部分球殻

月のたどった奇妙な熱進化のモデルを構築したい!!

月を模した厚い球殻 (円環) 領域内で、

- マントル上昇流内で固相マントルの減圧融解
  - 液相マグマが固相マントル中を浸透流として移動
  - マグマの移動に伴う固相マトリックスの膨張・収縮
  - 部分融解に伴う (不適合元素など) 化学種の分別・再分配
- を考慮したマントル対流-火成活動結合系のシミュレーションを実施したい

ひとまずはモデルを簡単 (かつお手軽) にするため、2次元 (半) 円環領域、1成分系の溶融関係を仮定。

...これにより、初期温度構造の影響を調査してみると?

# 結果 1: マントル深部の初期温度が高い場合の進化

➤ 謝辞

What to do

プレート

Moon

月の熱進化

➤ 3次元球殻 1

➤ 3次元球殻 2

➤ モデルと能書き

➤ 部分円環結果 1

➤ 部分円環結果 2

➤ 部分円環結果 3

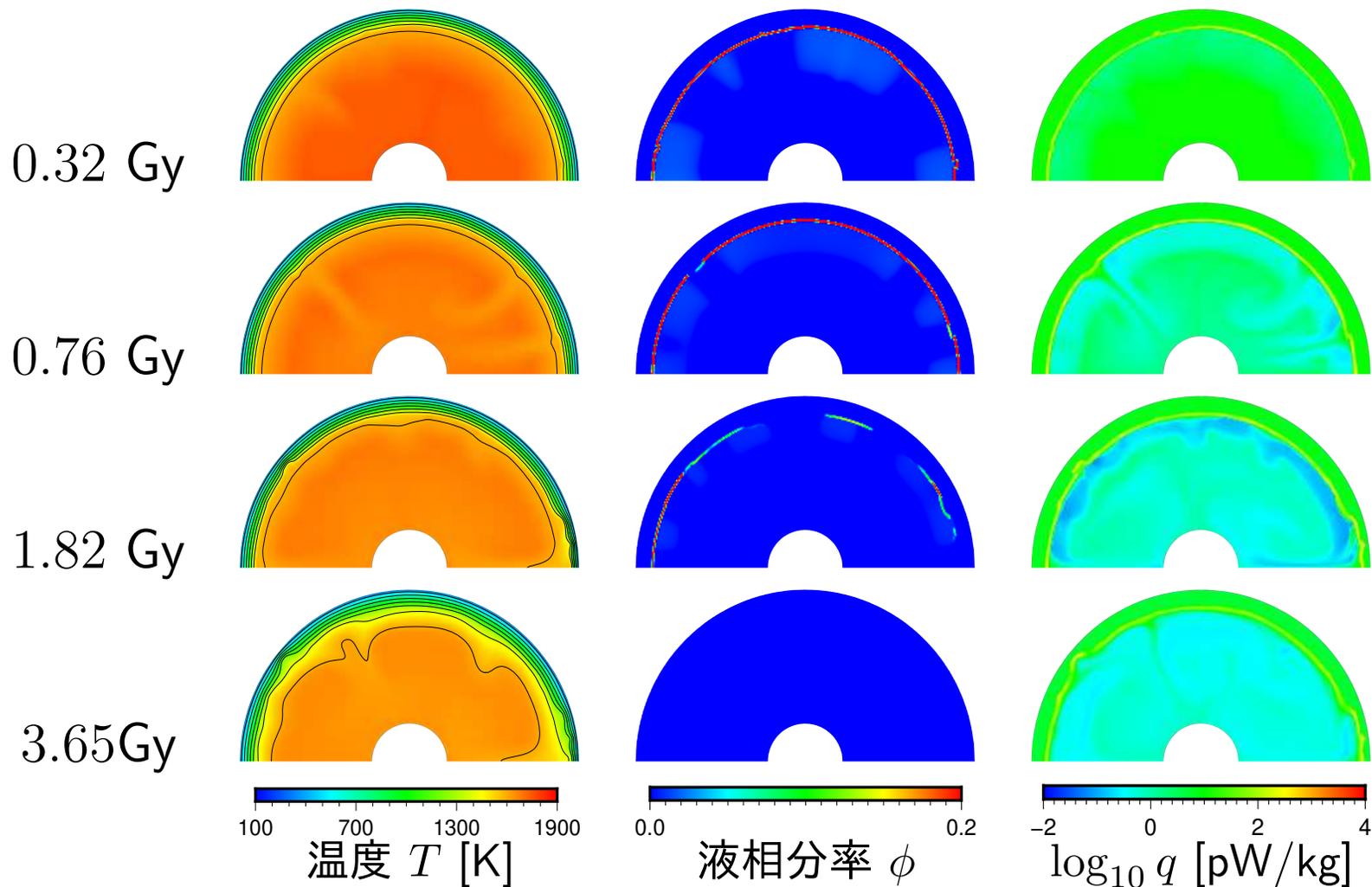
➤ 部分円環結果 4

➤ 部分円環まとめ

➤ 巨大衝突説は？

➤ 2成分系

➤ 部分球殻



初期の火成活動が大規模で活発

⇒ 内部発熱物質がマントル中から効率的に除去される

⇒ 火成活動が短期間で収束

## 結果 2: マントル深部の初期温度が低い場合の進化

➤ 謝辞

What to do

プレート

Moon

月の熱進化

➤ 3次元球殻 1

➤ 3次元球殻 2

➤ モデルと能書き

➤ 部分円環結果 1

➤ 部分円環結果 2

➤ 部分円環結果 3

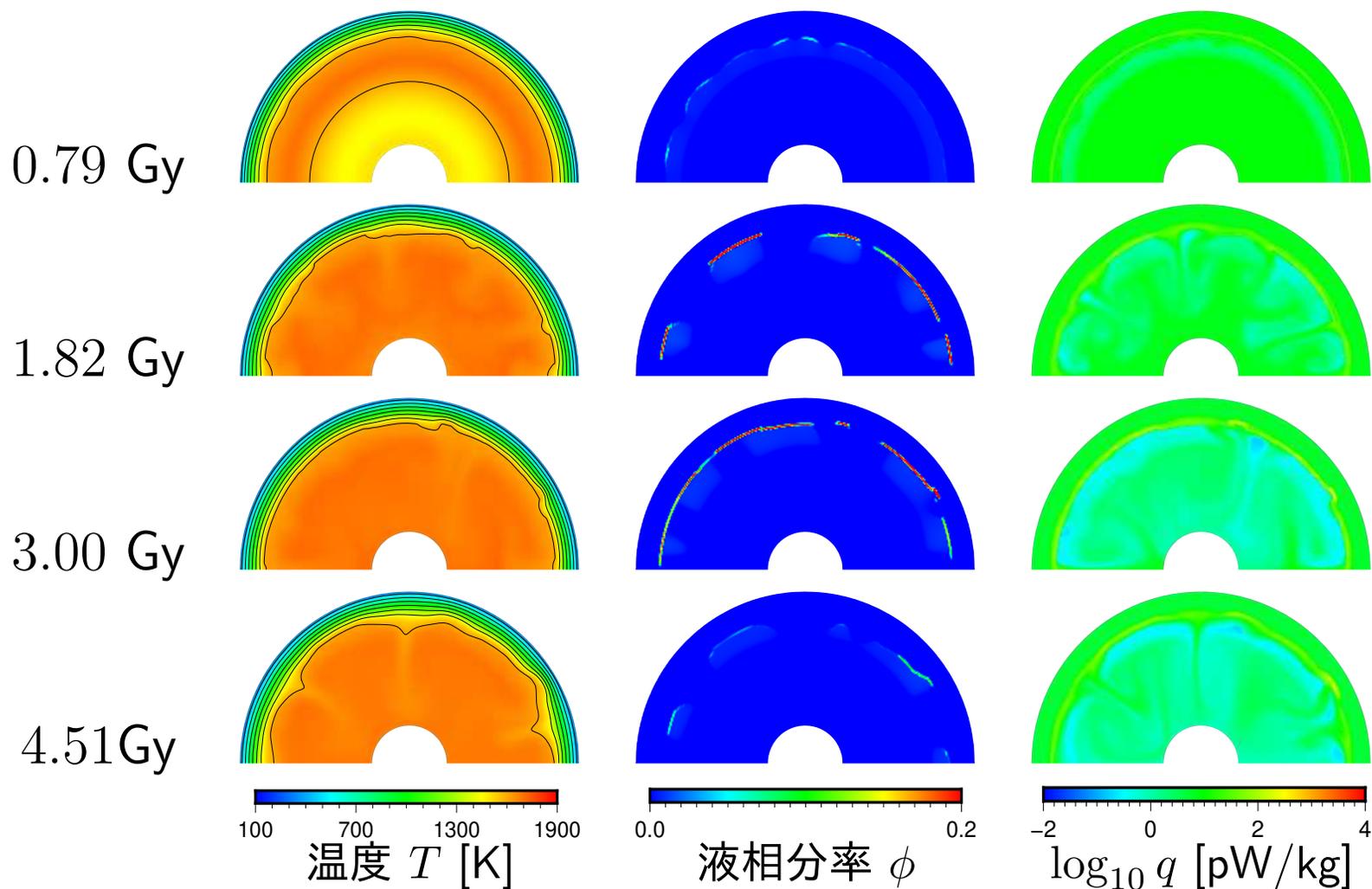
➤ 部分円環結果 4

➤ 部分円環まとめ

➤ 巨大衝突説は?

➤ 2成分系

➤ 部分球殻



初期の火成活動が小規模で穏やか

⇒ 内部発熱物質の多くが長期間マントル内部に留まる

⇒ 火成活動が長期間で維持

# 結果 3: 表面に内部発熱物質濃集領域がある場合の進化

➤ 謝辞

What to do

プレート

Moon

月の熱進化

➤ 3次元球殻 1

➤ 3次元球殻 2

➤ モデルと能書き

➤ 部分円環結果 1

➤ 部分円環結果 2

➤ **部分円環結果 3**

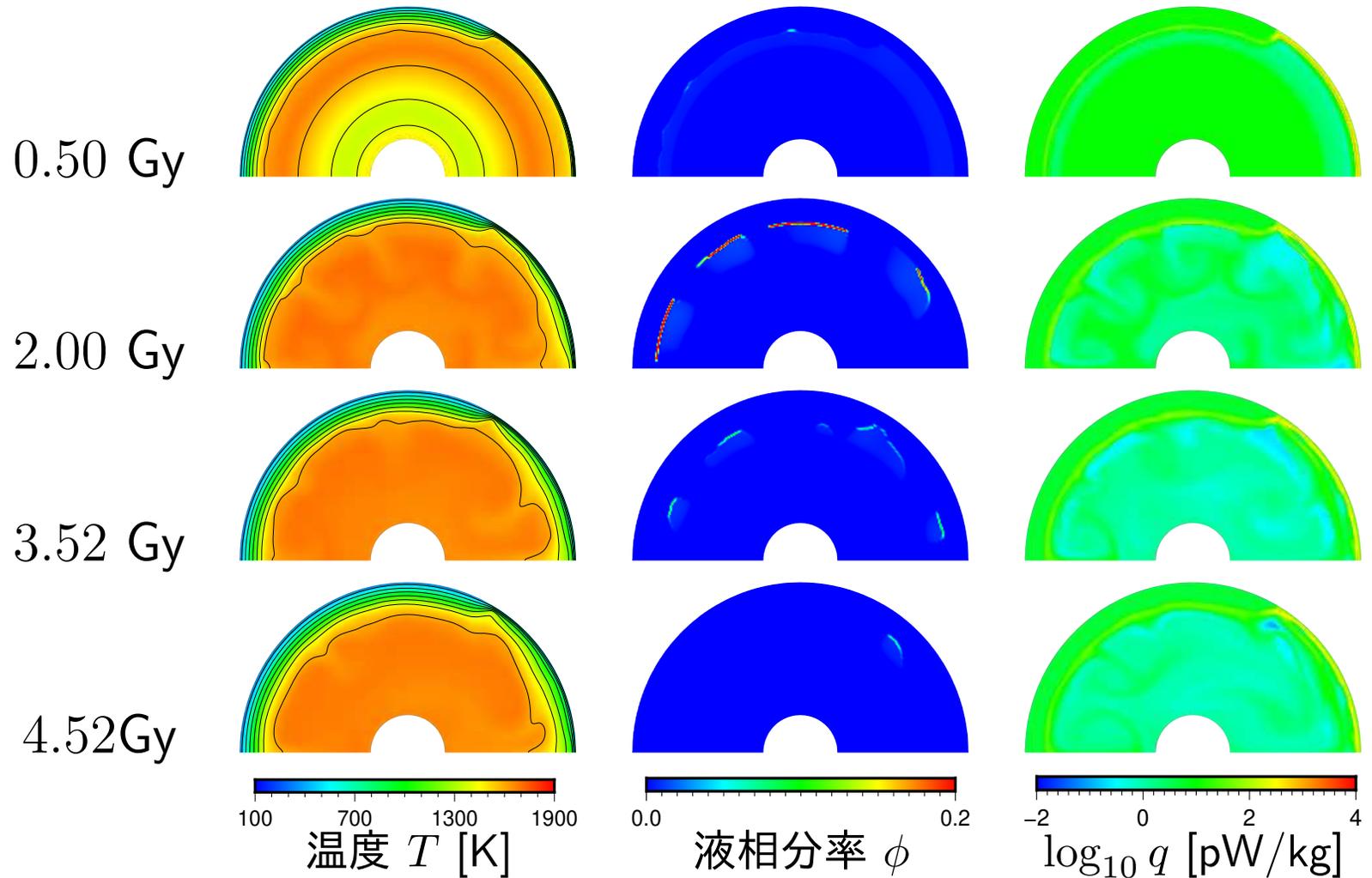
➤ 部分円環結果 4

➤ 部分円環まとめ

➤ 巨大衝突説は?

➤ 2成分系

➤ 部分球殻



表面付近に高温の領域が局所的に発生

⇒ 上昇流の表面への「通り道」を形成

⇒ 高温領域を通して火成活動が局地的に長期間維持

## 結果 4: 月の (膨張・) 収縮の経過

➤ 謝辞

What to do

プレート

Moon

月の熱進化

➤ 3次元球殻 1

➤ 3次元球殻 2

➤ モデルと能書き

➤ 部分円環結果 1

➤ 部分円環結果 2

➤ 部分円環結果 3

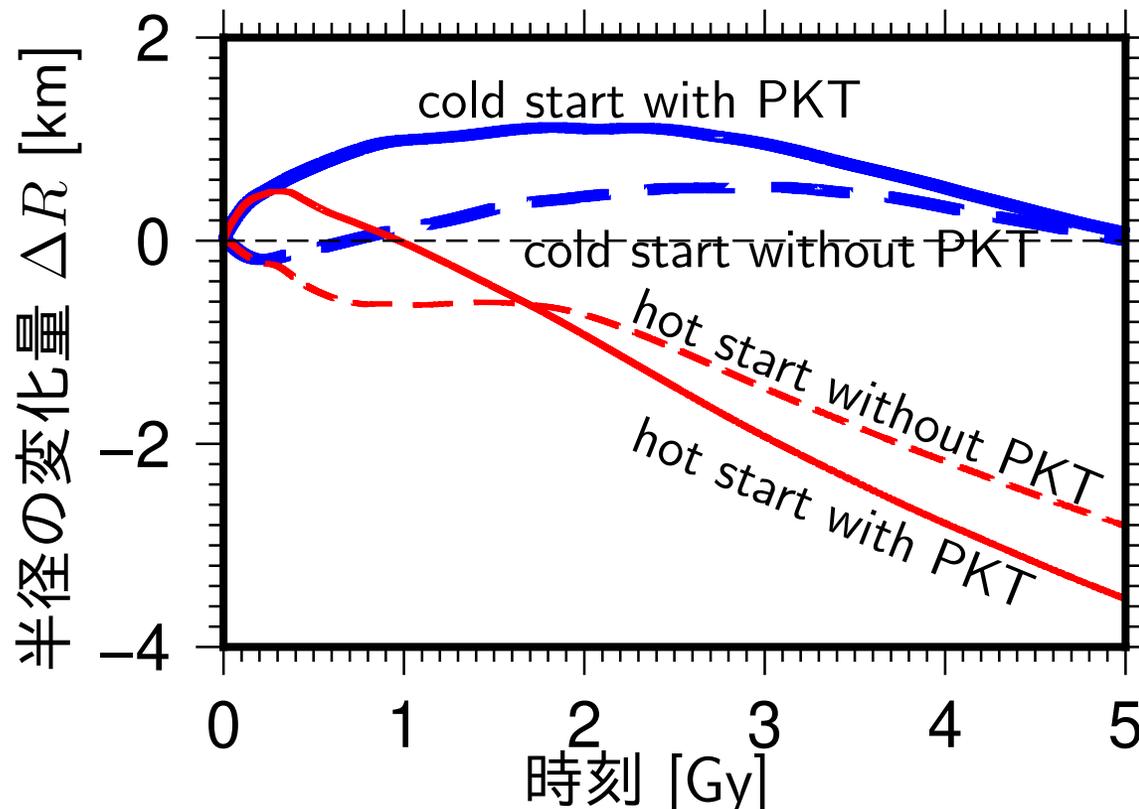
➤ 部分円環結果 4

➤ 部分円環まとめ

➤ 巨大衝突説は?

➤ 2成分系

➤ 部分球殻



$\Delta R$  は温度の変化に伴う熱膨張(収縮)による体積歪から算出

- ❑ **hot start** モデルでは、**急速かつ顕著な収縮**  
内部発熱物質がマントルから除去、内部の冷却が促進
  - ❑ **cold start** モデルでは、歴史を通して**ごくわずかな収縮**  
内部発熱物質マントル中に残存、内部の冷却を抑制
- ... やっぱり **cold start** モデルのほうがもっともらしい!?

# 結果のまとめ

➤ 謝辞

What to do

プレート

Moon

月の熱進化

➤ 3次元球殻 1

➤ 3次元球殻 2

➤ モデルと能書き

➤ 部分円環結果 1

➤ 部分円環結果 2

➤ 部分円環結果 3

➤ 部分円環結果 4

➤ 部分円環まとめ

➤ 巨大衝突説は?

➤ 2成分系

➤ 部分球殻

1. 火成活動による内部発熱物質の再分配の効果を考えれば、月の熱進化は **cold start** モデルによるもののほうがもっともらしい?
  - ❑ **hot start** モデルではごく初期の激しい火成活動によって内部発熱物質がマントルから効果的に除去され、急速な冷却と過剰な熱収縮、および火成活動の短期間での収束に至る。
  - ❑ **cold start** だと温度上昇による熱膨張が起こりやすい
2. Procellarum KREEP Terrane (PKT) のように、**表面に内部発熱物質の濃集した領域**を伴って起こる熱進化のほうがもっともらしい?
  - ❑ PKT 領域の高い発熱率により、**上昇流の表面への「通り道」**が形成され、PKT 周辺で**局地的に火成活動が長期間維持**される。

# 結果のまとめ: それはそうだと...?

➤ 謝辞

What to do

プレート

Moon

月の熱進化

➤ 3次元球殻 1

➤ 3次元球殻 2

➤ モデルと能書き

➤ 部分円環結果 1

➤ 部分円環結果 2

➤ 部分円環結果 3

➤ 部分円環結果 4

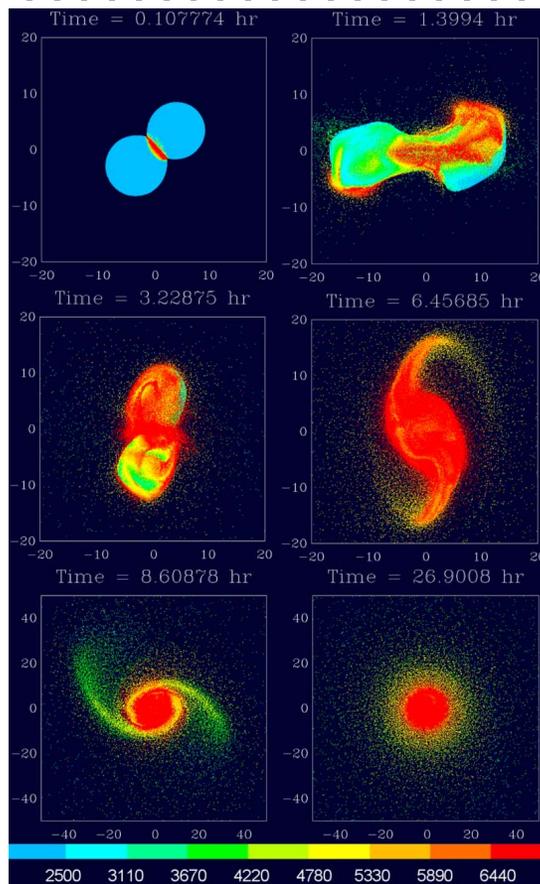
➤ 部分円環まとめ

➤ 巨大衝突説は?

➤ 2成分系

➤ 部分球殻

1. 火成活動による内部発熱物質の再分配の効果を考えれば、月の熱進化は **cold start** モデルによるもののほうがもっともらしい?



とはいうものの、  
Giant Impact 説から普通に考えたら、  
月は **hot start** になるのが自然だろう

{ 月の形成の Giant Impact 説  
{ 月の熱進化の cold start モデル  
これら2つの間に、何が足りないの  
だろうか? (... sigh)

Figure from Canup (2012)

# 今後やるべき課題: (1) 2成分系の溶融関係への拡張

➤ 謝辞

What to do

プレート

Moon

月の熱進化

➤ 3次元球殻 1

➤ 3次元球殻 2

➤ モデルと能書き

➤ 部分円環結果 1

➤ 部分円環結果 2

➤ 部分円環結果 3

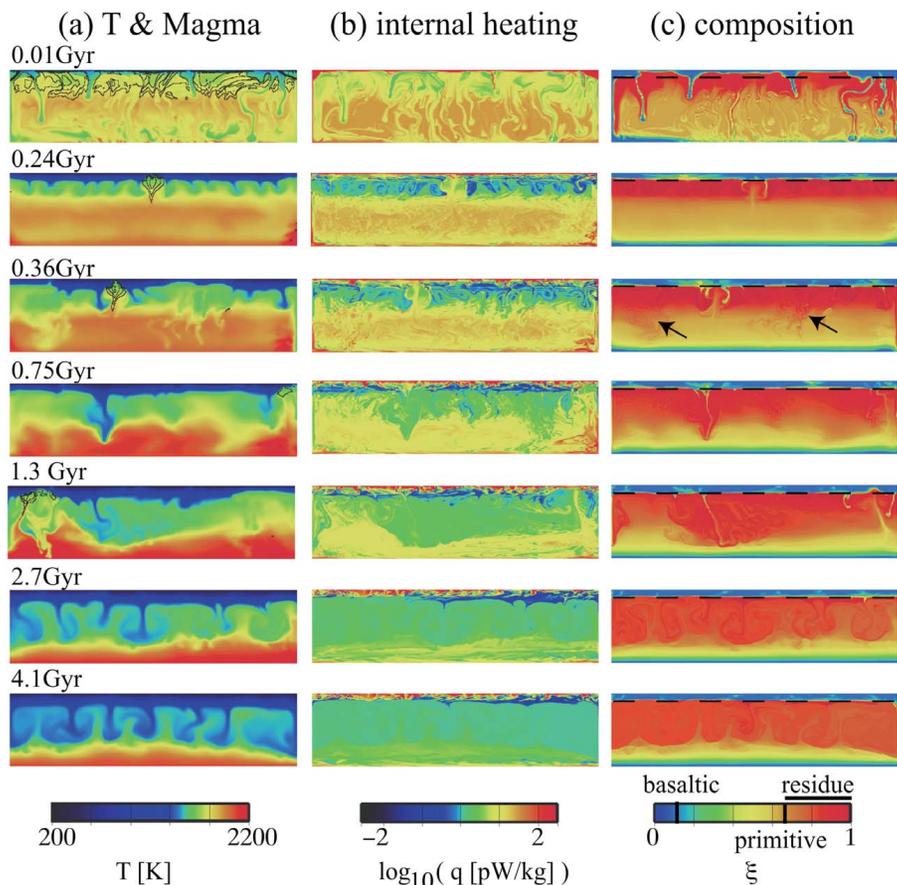
➤ 部分円環結果 4

➤ 部分円環まとめ

➤ 巨大衝突説は?

➤ 2成分系

➤ 部分球殻



火星を模した2次元箱型領域内で、2成分系の溶融関係を採用したモデル

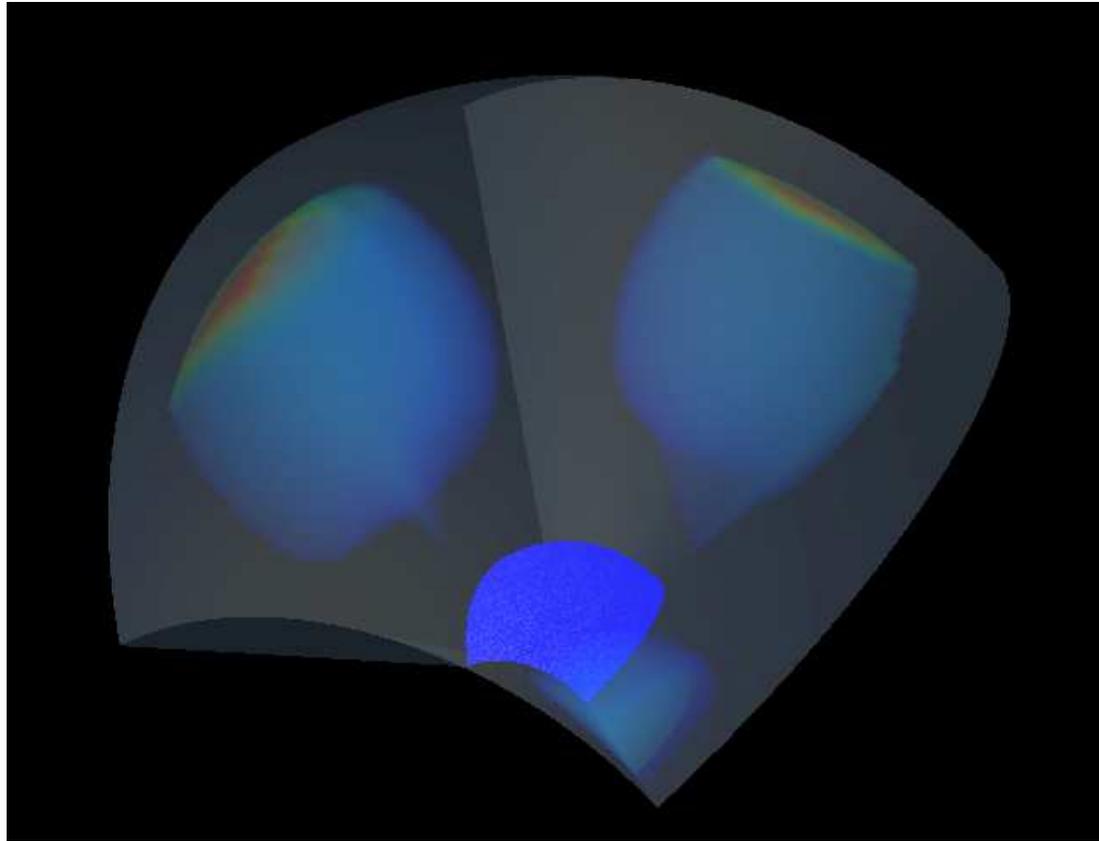
Figure and movie from Ogawa and Yanagisawa (2011)

微量元素の分配だけでなく、溶融に伴う主要元素の組成の変化を取り入れる ( $\text{マントル} = \text{マグマ成分} + \text{残りかす}$ )

ただし同じ2次元箱型モデルを月のつもりで回してみたところでは、やっぱり cold start のほうがいいらしいのだが (Ogawa, 2018)

# 今後やるべき課題: (2) 3次元球殻モデルへの拡張

(全 and/or 部分) 球殻モデルへの拡張に向けた作業が  
現在 (順調に遅滞しながら) 進行中



ぶ厚い球殻領域内でのマンツルのダイナミクスや熱進化を、より定量的 and 適切にモデル化しよう!!

乞うご期待!?

➤ 謝辞

What to do

プレート

Moon

月の熱進化

➤ 3次元球殻 1

➤ 3次元球殻 2

➤ モデルと能書き

➤ 部分円環結果 1

➤ 部分円環結果 2

➤ 部分円環結果 3

➤ 部分円環結果 4

➤ 部分円環まとめ

➤ 巨大衝突説は?

➤ 2成分系

➤ 部分球殻