

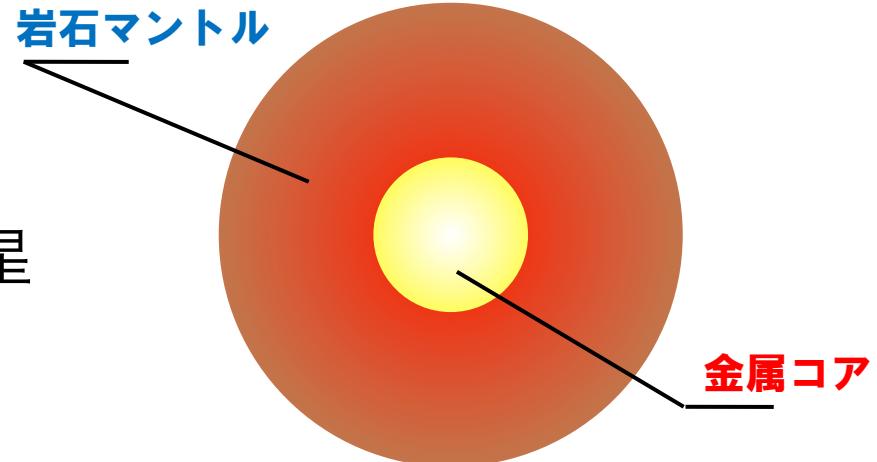
スーパー地球の熱進化と 磁場の寿命

立浪千尋、千秋博紀、井田茂

地球型惑星

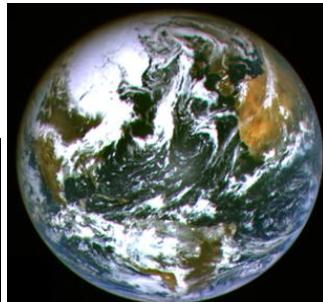
主に **岩石マントル** と **金属コア**

により構成される惑星



太陽系

水星 金星 地球 火星



太陽系外

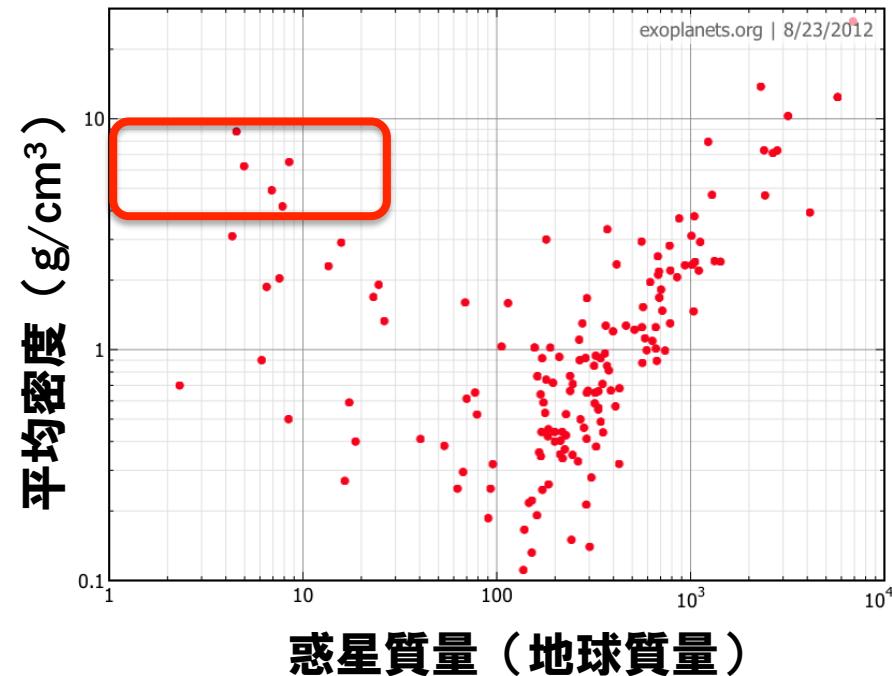
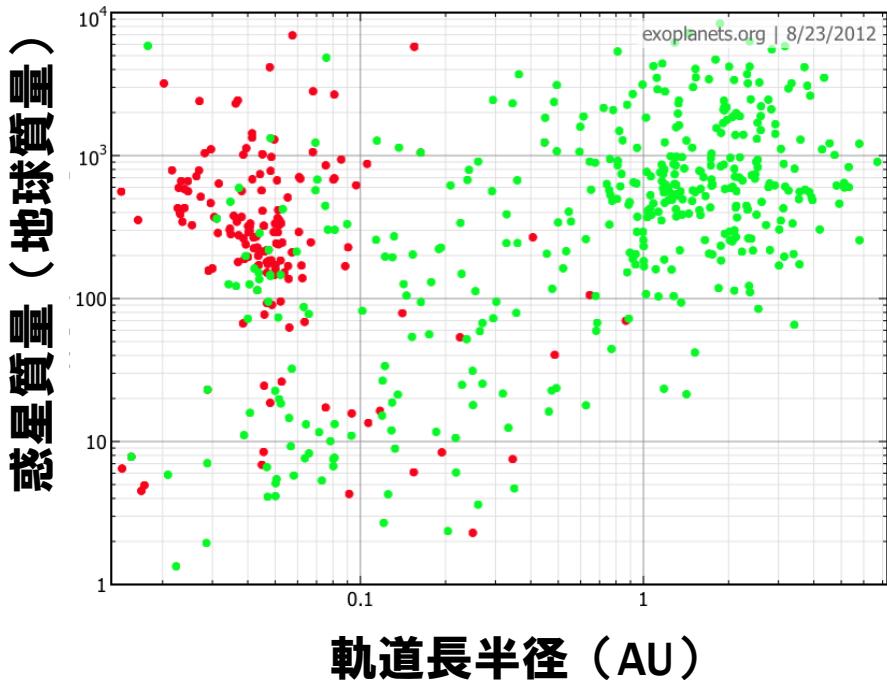
惑星形成理論(e.g. Ida and Lin, 2008)



観測
HARPS
CoRoT
Kepler

観測された系外惑星と スーパー地球候補

赤：トランジット法
緑：視線速度法

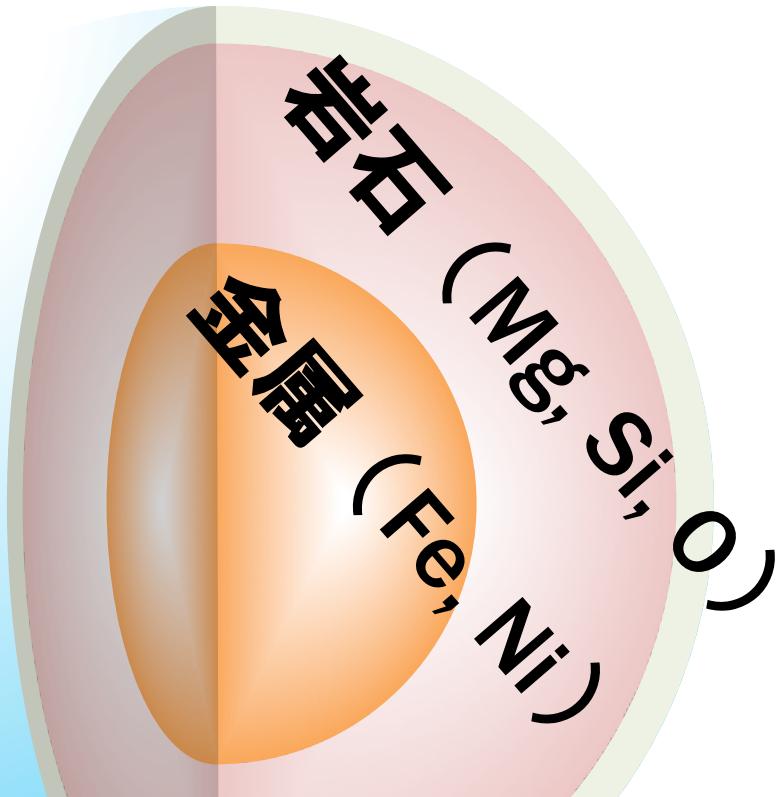


CoRoT-7b, Kepler 10b, 55 Cnc e...

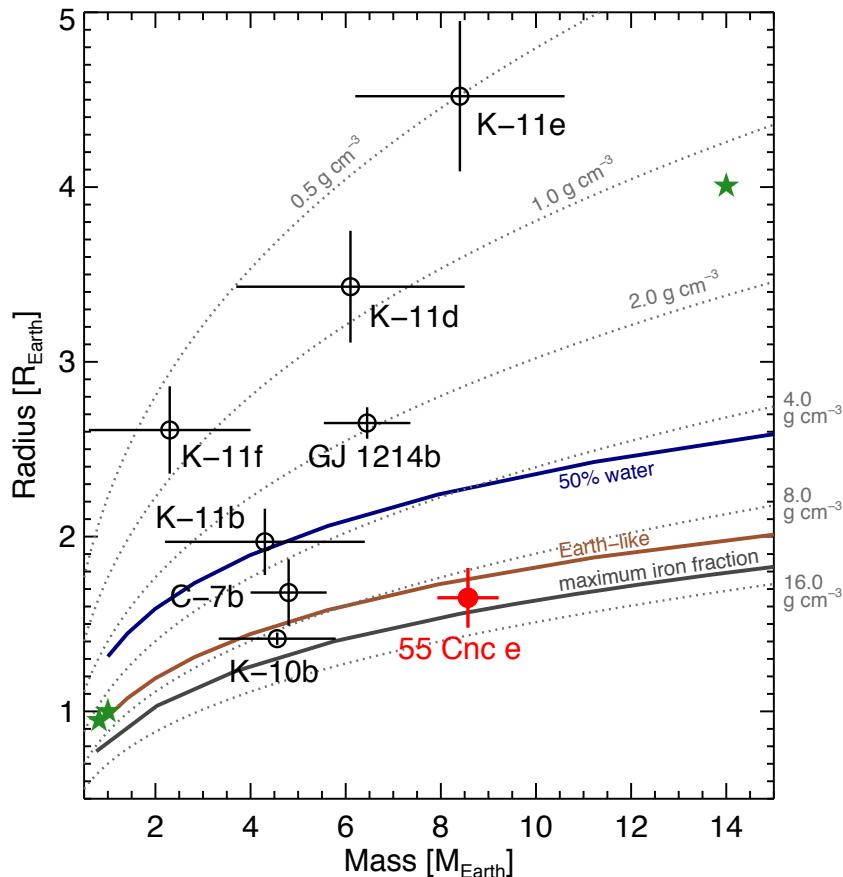
低質量で高い平均密度→地球型惑星を示唆

スーパー地球

~10 地球質量の惑星
岩石+鉄でできている可能性



トランジットしている惑星の半径

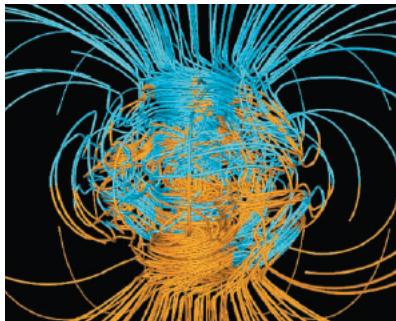


地球型惑星の固有磁場

固有磁場の生成

ダイナモ作用

金属核中における
固有磁場を自発的
に生成する作用



シミュレーション結果
(Buffett, 2000より)



液体金属核中の
対流が必要

可居住性への寄与

地球



強力で安定な磁場



危険な太陽風から表面
の大気や生命を守る働き



可居住性を考える上でも重要

太陽系の地球型惑星の磁場

各惑星の磁場に関する観測事実

水星



現在ダイナモ起源
の磁場を持つ

金星



現在ダイナモ起源
の磁場を持たない

火星



現在ダイナモ起源
の磁場を持たない
地殻に残留磁化

これらの違いの原因是？

惑星の内部熱進化

(Stevenson et al., 1983)

地球型惑星の内部熱進化

マントル

初期熱の獲得(集積、分化)

コアから受け取った熱を表層へ

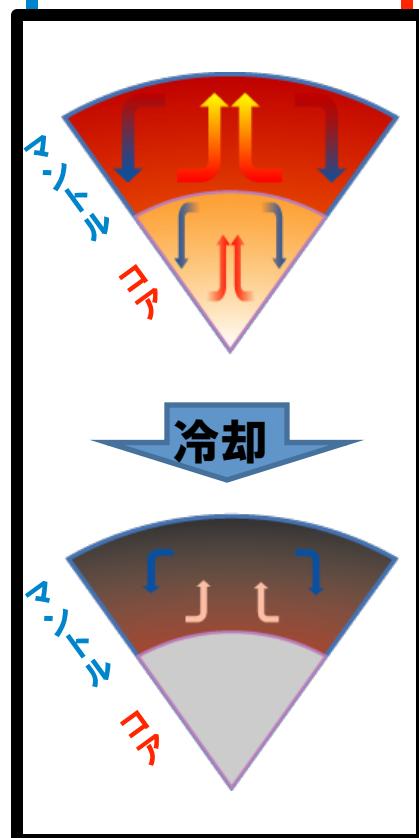
対流で熱輸送

放射性熱源により加熱される

マントルの粘性率は強く温度に依存する

冷却に伴う粘性率の上昇

対流強度、熱流速の低下



コア

初期熱の獲得(集積、分化)

マントルに熱を奪われ、

熱を輸送するために対流

→ダイナモ作用を駆動

熱源がないため冷却される一方

固体内核の析出

潜熱、重力エネルギーの解放

コアは冷えにくくなる

熱流量が下がり対流停止

→固有磁場の消滅

地球型惑星の内部熱進化と磁場の関係

内部熱進化

マントル対流による熱輸送

集積・分化による初期熱や放射性熱源による熱が表層へ



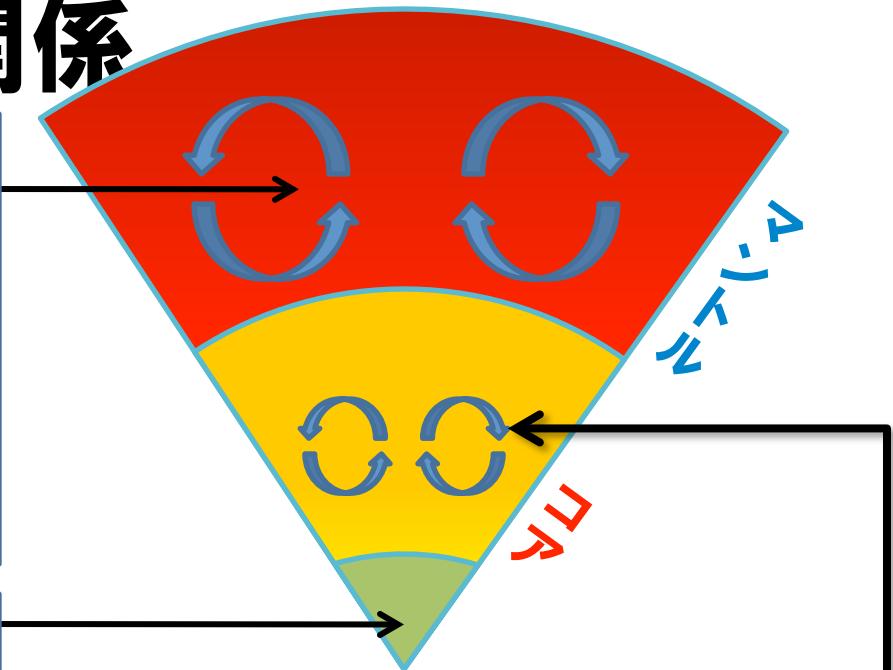
惑星内部の冷却

内核の析出

コア中心の温度が融点を割り込むことにより固体の内核が析出



重力エネルギーと潜熱の解放



外核の対流に関して
(ダイナモ作用に必要)

マントル対流

→ 上から冷やす

内核の析出

→ 下から温める

先行研究 (Stevenson et al., 1983)

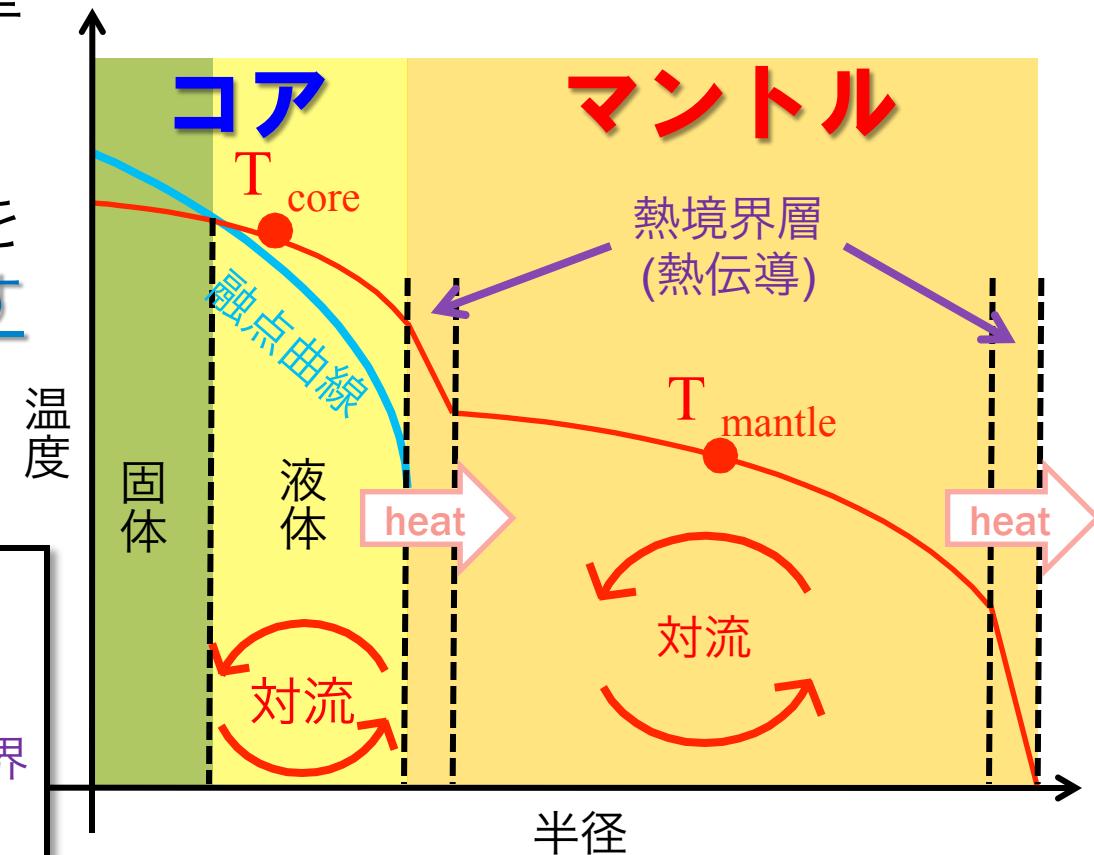
熱境界層モデルを用いて、太陽系の4つの地球型惑星の熱進化をシミュレート

コアからの熱フラックスを条件に各惑星の磁場に関する違いを説明

モデル

コアとマントルは断熱構造
それぞれの温度は一点で代表
(ボックスモデル、0次元)
熱はマントルの上下にある熱境界層中の熱伝導で受け渡される
コア中の融点を圧力の関数とし、内核の成長を表現

熱境界層モデル概要



先行研究 (Stevenson et al., 1983)

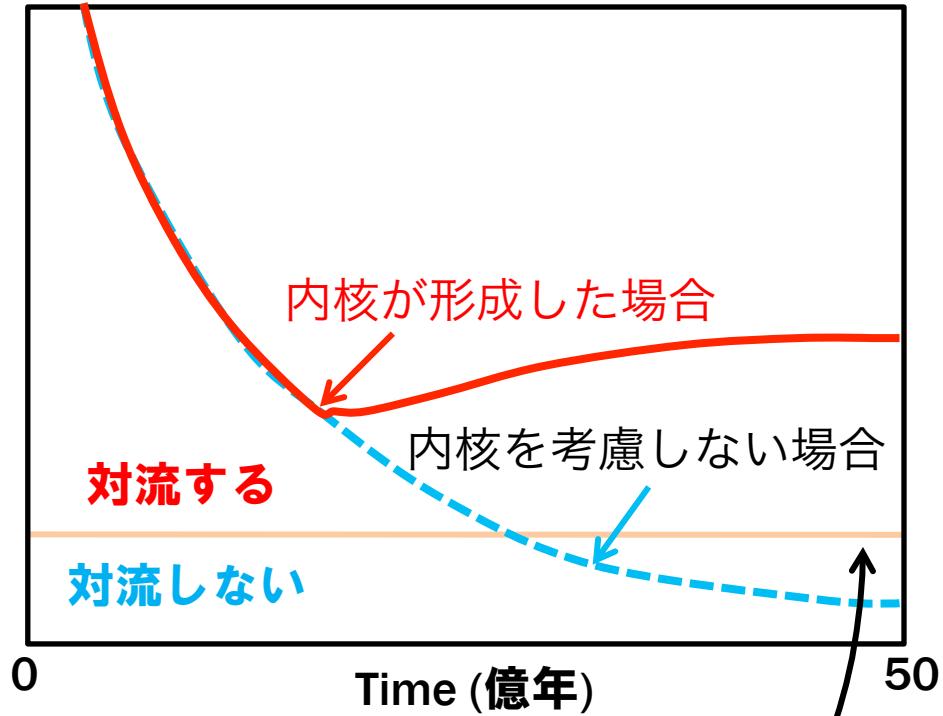
コアからの熱フラックスが F_{cond} を超えていれば... 外核は対流する

ダイナモ作用により
磁場が形成される

コアからの熱フラックスが F_{cond} を下回ると...
外核の対流停止

ダイナモ作用が止まり
磁場は消滅する

コアの熱フラックスの進化



F_{cond}
コアの断熱構造に沿った
熱伝導フラックス

先行研究 (Stevenson et al., 1983)

熱進化計算の結果に基づき
惑星の磁場に関する違いを議論

水星



現在ダイナモ起源
の磁場を持つ



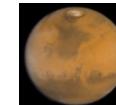
金星



現在ダイナモ起源
の磁場を持たない



火星



現在ダイナモ起源
の磁場を持たない
地殻に残留磁化



現在でも磁場を持つ
条件は見つからない

コア中の硫黄濃度が
10wt%以上であれば
磁場は消滅

コア中の硫黄濃度が
25wt%以上であれば
磁場は消滅

本研究の目的

系外スーパー地球

の内部熱進化を調べ、磁場の寿命を求める

Stevenson et al.(1983) : ボックスモデル(0次元)

本研究



- 1.惑星内部の密度構造
- 2.コアの熱的状態
- 3.マントル対流による熱輸送

} の計算を組み合わせた
1次元モデルを使用

熱進化モデル

1. 1次元密度構造の計算(Valencia et al., 2006)

静水圧平衡 + 質量保存 + Vinet EOS

反復的解法を用いて解く

2. コアの熱的状態

内核半径

断熱曲線と融点曲線の交点

純鉄の融点 (Alfeらによる第一原理計算結果)
+ 硫黄による融点降下 (1気圧の相図を外挿)

コア中の熱エネルギー、潜熱、重力エネルギー
をコアマントル境界温度の関数として計算

3. マントル対流による熱輸送

混合距離理論を用いて
マントル中の1次元の熱輸送を計算

粘性率の温度・圧力依存性を考慮

磁場の寿命の定義

コアからの熱フラックスが
コアの断熱構造に沿った熱
伝導フラックス(F_{cond})を超
えている期間

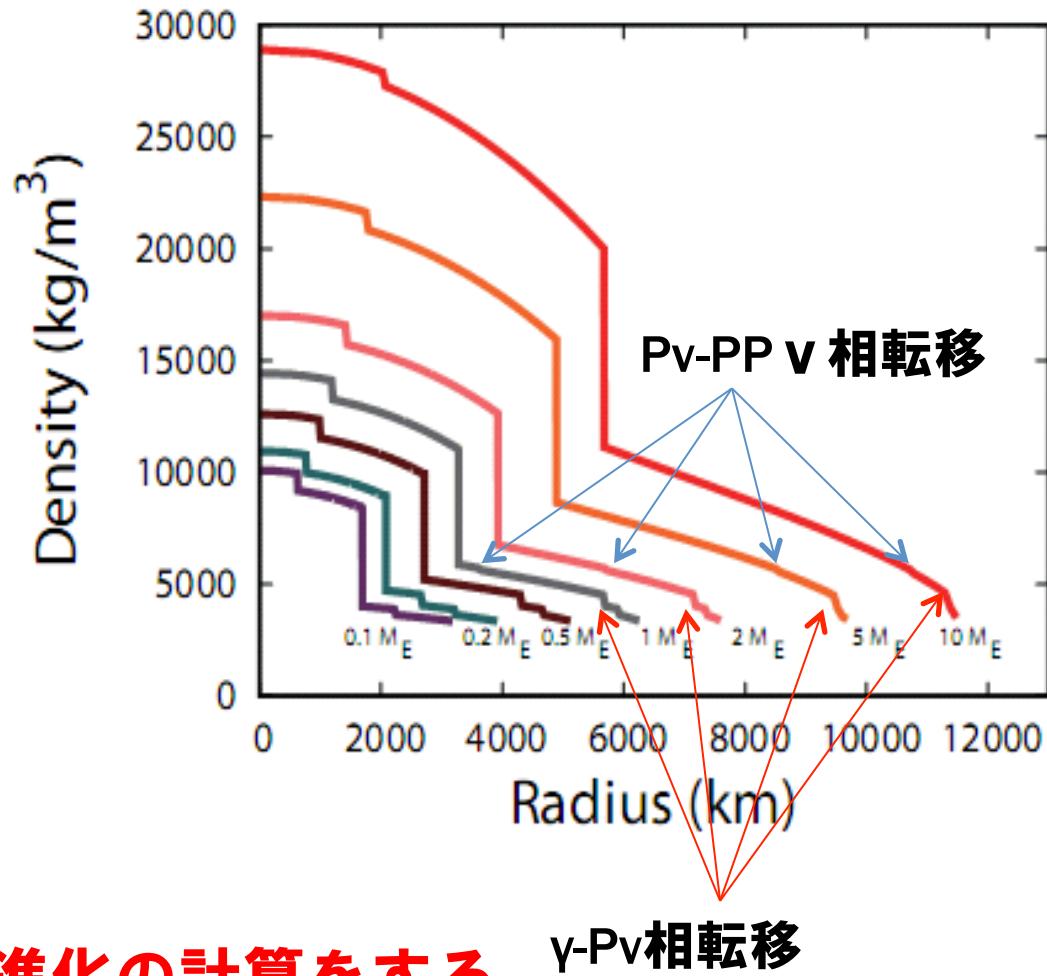
スーパー地球の内部構造

内部構造のモデリング

- 静水圧平衡
- Vinet EoS (岩石、鉄)

スーパー地球のマントル

- 上部マントル薄
- PP v 層が大部分
- さらに高圧の相転移



得られた構造を元に内部熱進化の計算をする

コア中のエネルギー源と内核

内核成長の効果

- 不純物の外核への濃集

$$x(M_{ic}) = x_0 \frac{M_{core}}{M_{core} - M_{ic}}$$

- エネルギー源

- 热エネルギー

$$U = T_{CMB} \int_0^{M_{core}} C_p \int_{r_{CMB}}^{r(m)} \frac{g \rho \gamma_G}{K_s} dr dm$$

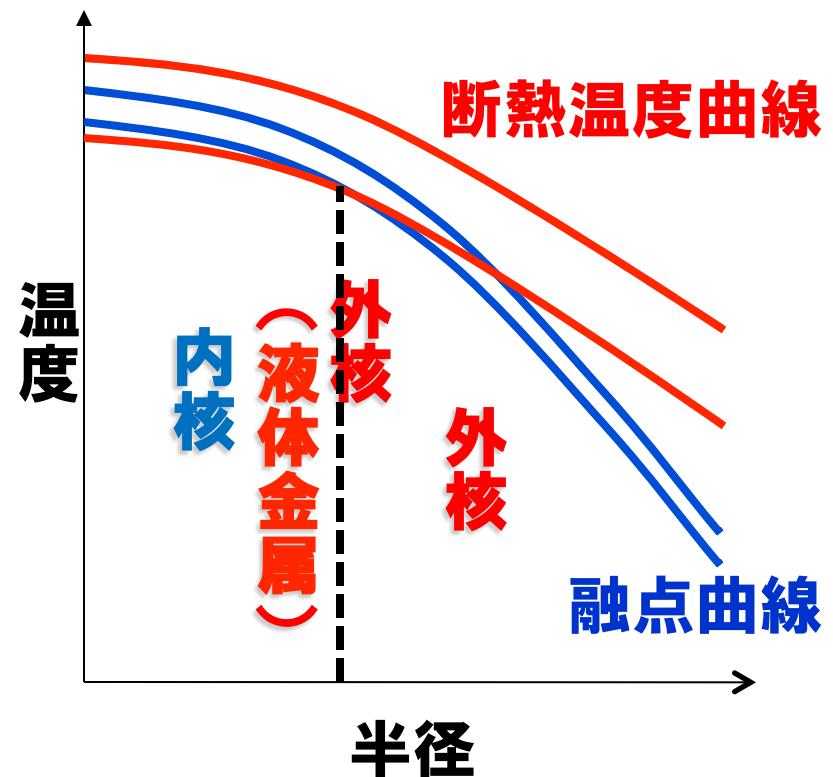
- 潜熱

$$H = -LM_{ic}$$

- 重力エネルギー

$$W = - \int_0^{M_{core}} g r dm$$

内核析出のイメージ



マントル対流による熱輸送

対流と熱伝導による熱輸送方程式

$$\rho C_p \frac{dT}{dt} = \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} \left[r^2 k_c \frac{\partial T}{\partial r} + r^2 k_v \left\{ \left(\frac{\partial T}{\partial r} \right) - \left(\frac{\partial T}{\partial r} \right)_S \right\} \right] + \rho Q$$

熱伝導 対流 発熱

$$k_v = \frac{\alpha g \rho^2 C_p \ell^4}{C \eta} \left\{ \left(\frac{\partial T}{\partial r} \right) - \left(\frac{\partial T}{\partial r} \right)_S \right\} \quad (\text{対流不安定な場合})$$

対流による熱伝導係数(混合距離理論、

Sasaki & Nakazawa, 1986)

内部構造計算で得られたローカルなパラメタを使用

マントルの粘性率

拡散クリープモデル

温度、圧力依存性 (Ranalli, 2001)

$$\eta \propto \exp\left(\frac{E + PV}{nRT}\right)$$

| 領域 | n | E(10^3Jmol^{-1}) | V($10^{-6} \text{m}^3 \text{mol}^{-1}$) |
|--------|-----|------------------------------|---|
| 上部マントル | 3.0 | 430 | 10 |
| 下部マントル | 3.5 | 500 | 10 |

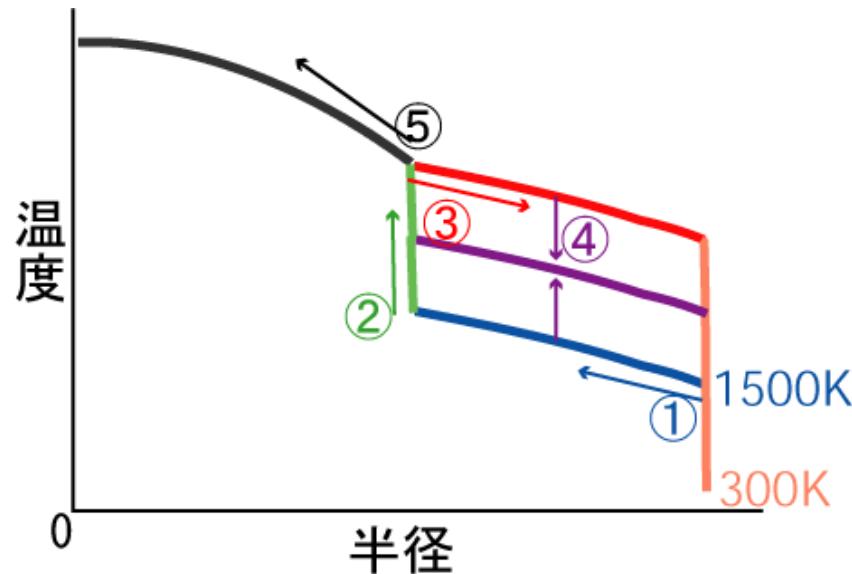
n : クリープ指数、E : 活性化工エネルギー、P : 活性化体積

温度上昇で粘性率↓ 圧力上昇で粘性率↑

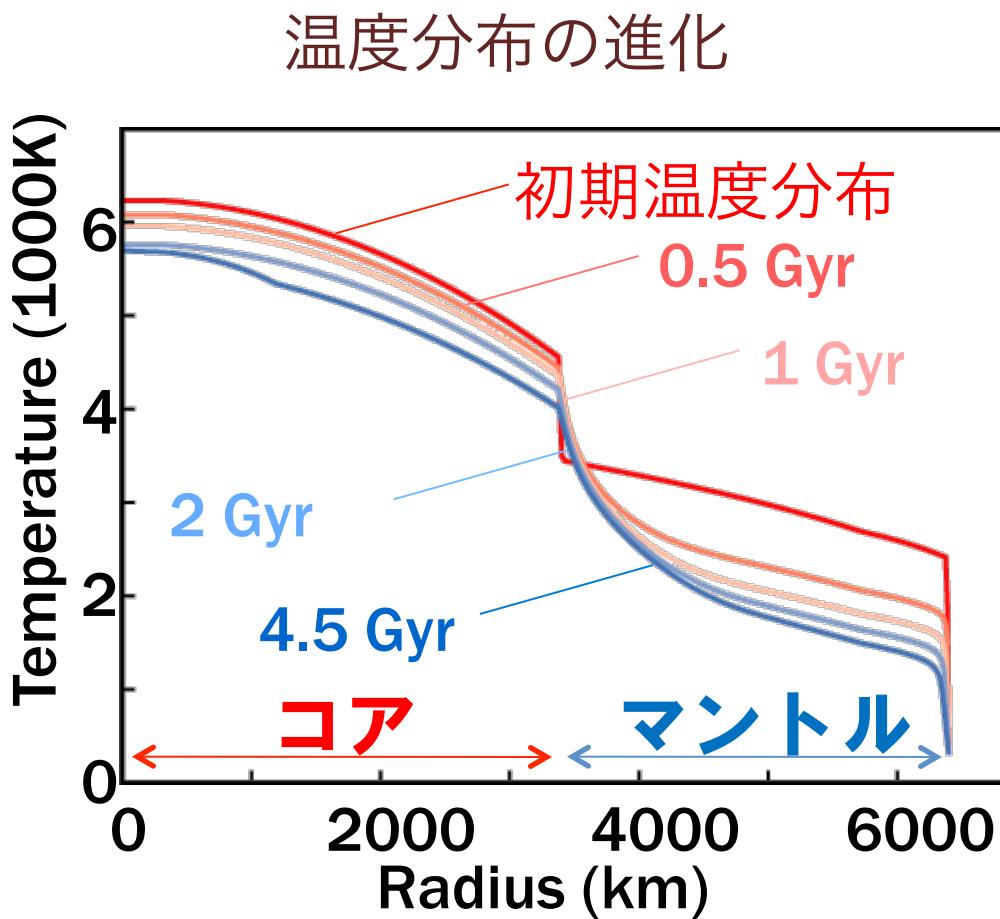
指数に入っているため、桁で変化する

初期条件

- ① 1500Kから断熱温度曲線を求める(下降流)
- ② 求めた分布のCMBの温度に温度差を加える
- ③ その温度から表層への断熱温度曲線を求める(上昇流)
- ④ 上昇流と下降流の平均をとる(マントルの初期温度分布)
- ⑤ コアの温度分布は2で与えたCMBの温度をとおる断熱温度曲線とする。



計算例 ($1M_{\text{Earth}}$, 1000K)

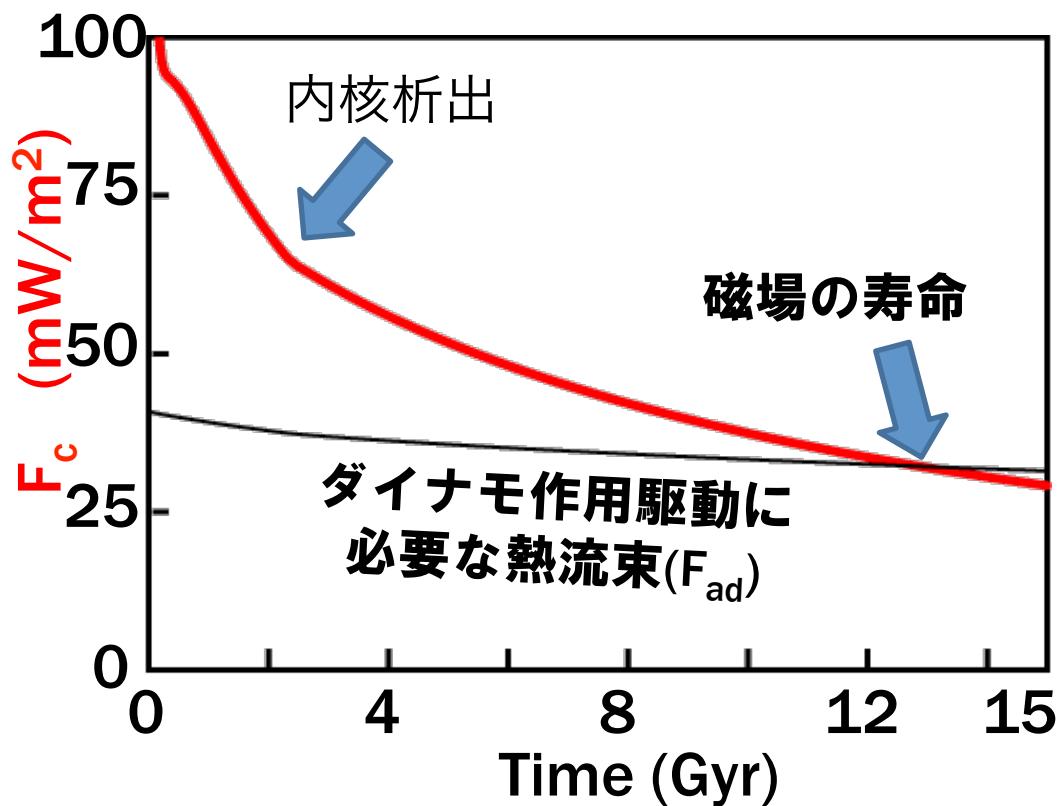


マントル
5億年で急速な冷却
冷却率の減少
↓
粘性率の温度依存性

コア
固体内核の析出
1200kmまで成長
(45億年後、現在の地球)

計算例 ($1M_{\text{Earth}}$, 1000K)

コア表面の熱流束の進化



コアの熱流束

なだらかに低下



コアの温度低下

マントルの粘性率の上昇

磁場の寿命=13 Gyrs

パラメータスタディ

フリー parameter

惑星質量

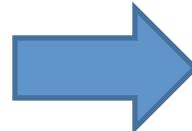
初期の温度分布（コア表面の温度差）

他のパラメータ

表面温度

コア中の不純物濃度

放射性熱源の濃度



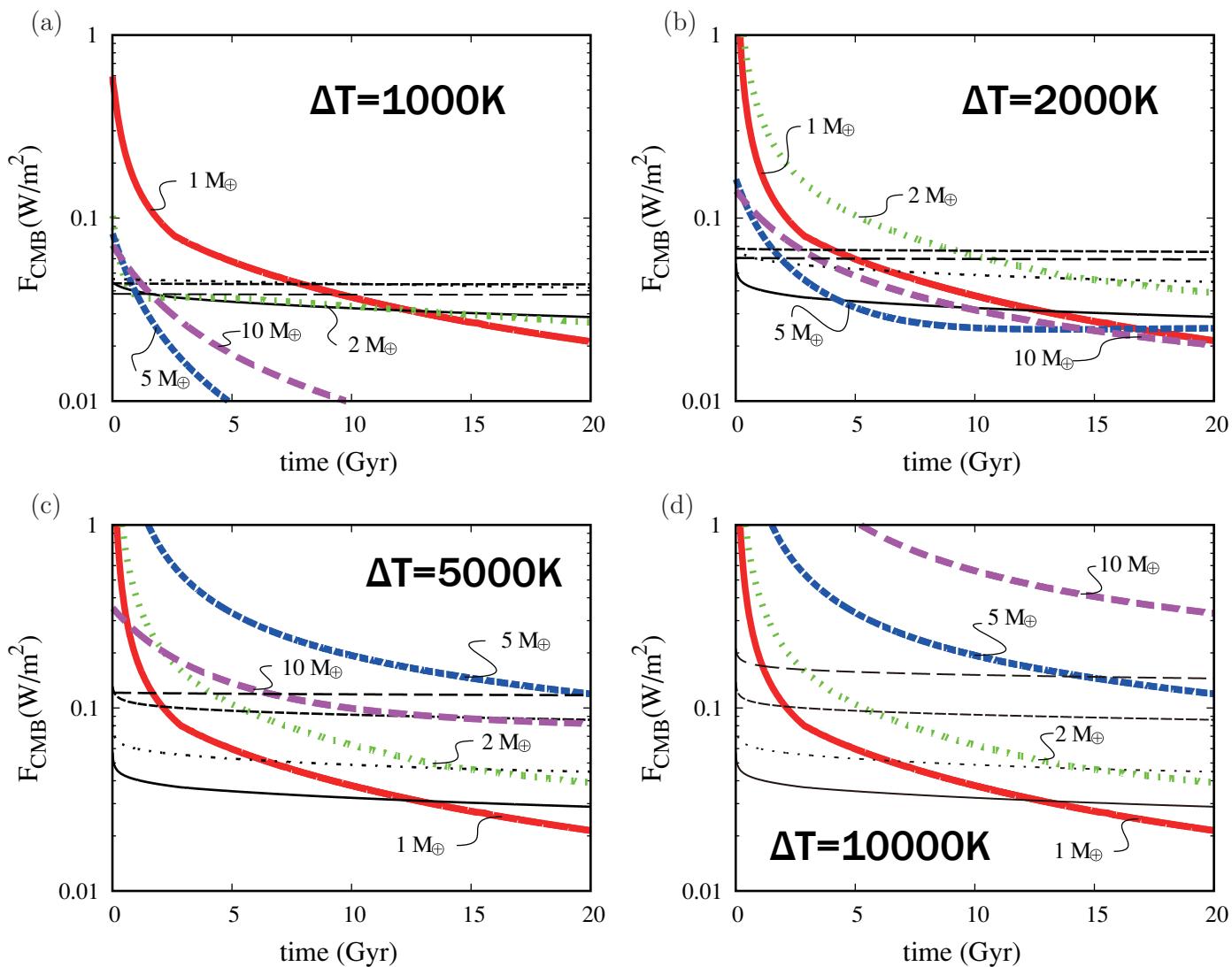
地球と同じに設定

固有磁場の寿命

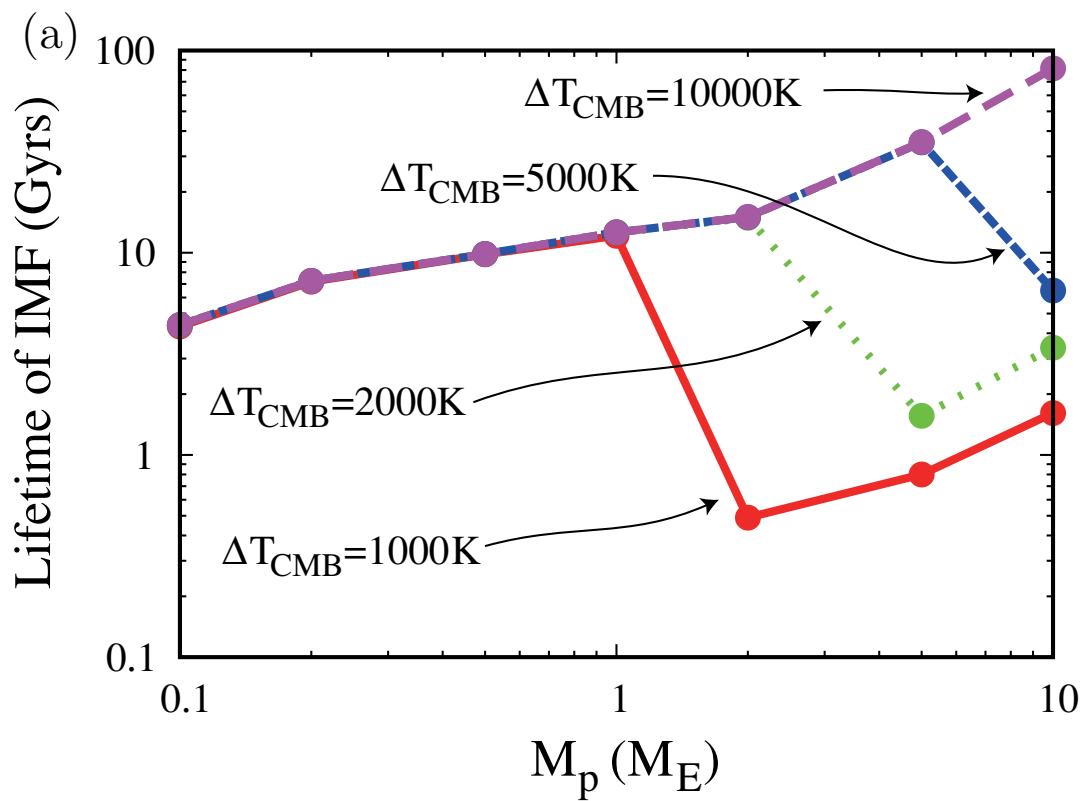
$$F_c > F_{ad}$$

が満たされている期間

各パラメータのフラックスの進化



磁場の寿命



小さい惑星

→初期条件によらない

地球より大きい惑星

→初期条件の依存性が強い

粘性率の
圧力依存性 vs 温度依存性

十分高温から始まれば
熱フラックスが稼げる

議論：マントル粘性率について

高压で上がる場合 (Stamenkovic+, 2011)

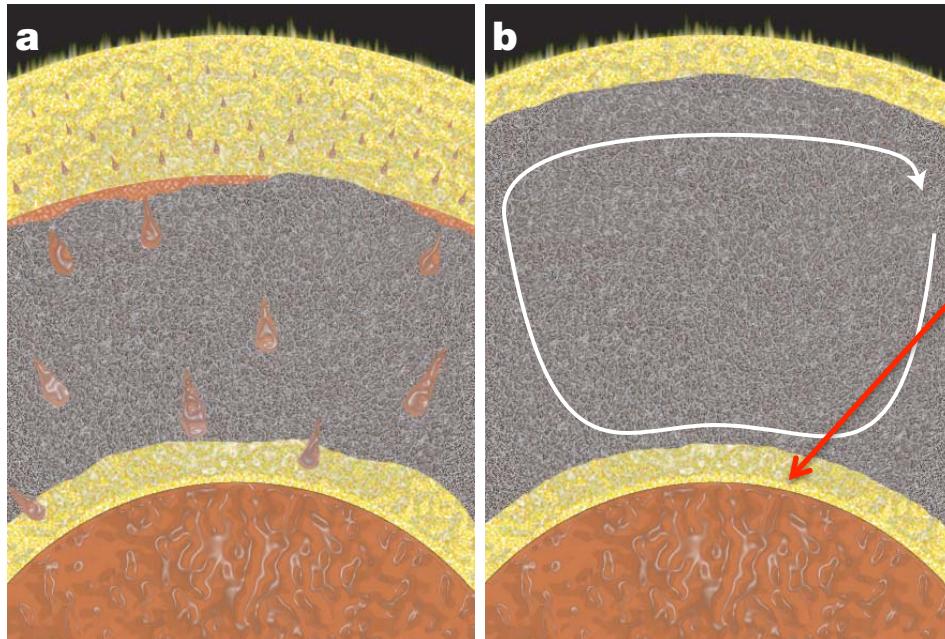
ダイナモを駆動するには高温を保つ必要
→コアも高温、内核ができない

高压で下がる場合 (Karato, 2011)

冷却率が高く急速に冷える
→コアが冷却し大部分が固まる？

議論：マントルの融点と 断熱温度曲線

ベーサルマグマオーシャン説 (Labrosse+, 2007)



融点曲線と断熱温度曲線が交差

高圧メルトに鉄が濃集

マントルの底に溶融した
マグマオーシャンが出来る

固まるまでは潜熱が捨てられ
コアは冷えることが出来ない

スーパー地球では巨大なベーサルマグマオーシャンが蓋に？

まとめ

スーパー地球の熱進化モデルを使い固有磁場の寿命を見積もった

スーパー地球の磁場の寿命：

マントルの粘性率の温度依存性と圧力依存性の兼ね合い
→初期状態に依存する

十分高温からスタートすれば長期間維持
温度が足りないとフラックスが稼げない

初期進化（集積時のエネルギー獲得、マグマオーシャンの固化など）を調べる必要あり