

惑星内部ダイナミクス

宮腰 剛広

国立研究開発法人 海洋研究開発機構
地球深部ダイナミクス研究分野

[共同研究者]

(コア対流、地球ダイナモ)

陰山 聡 (神戸大学)

浜野 洋三 (JAMSTEC)

柳澤 孝寿 (JAMSTEC)

(マントル対流)

小河 正基 (東京大学)

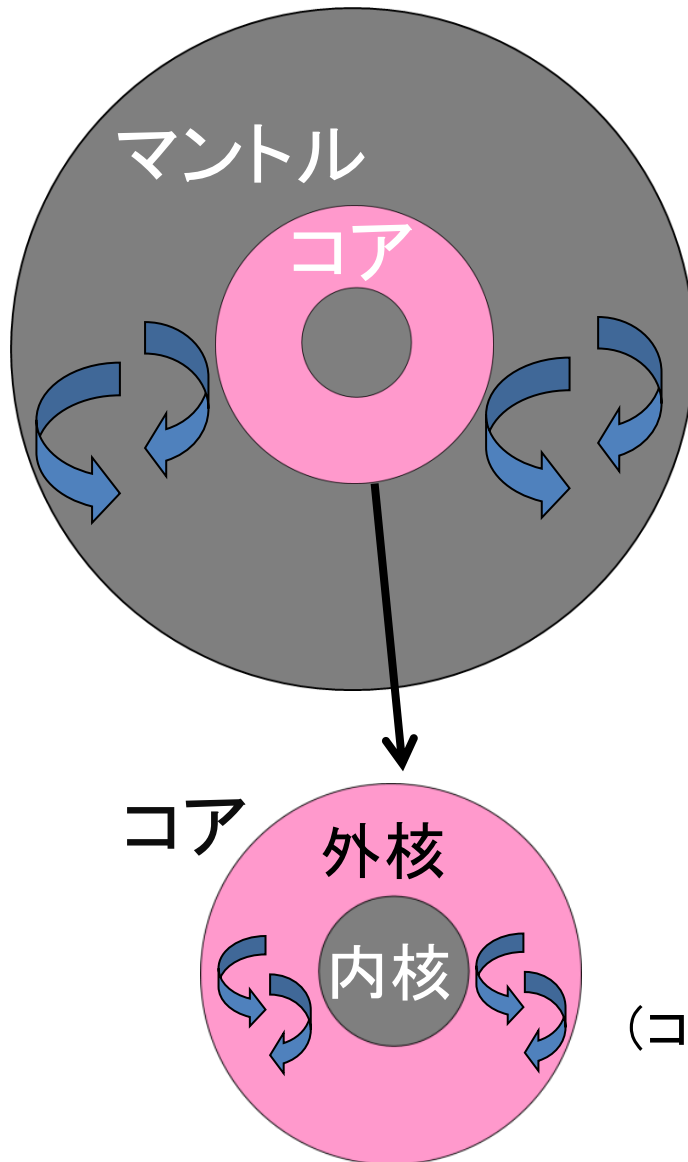
亀山 真典 (愛媛大学)

地球型惑星内部の構造

- ・ マントル（岩石）
- ・ コア（金属、主に鉄）

- 外核：液体金属
- 内核：固体金属

※大きさは不変ではなく、内部の冷却が進むにつれて徐々に大きくなっていく



マントルと外核で対流

— 様々な惑星活動現象を引き起こす

— おそらくその惑星のハビタビリティに関わる要因の一つである

(コア対流：～数千年、マントル対流：～10億年)

惑星内部のダイナミクス

マントル対流

マントル：地球では体積の8割以上を占める

惑星表層に対して

プレート運動・火山活動 → 物質
循環

例) 二酸化炭素

ー地表温度を安定させ、数十億年に渡って安定に海が存在できる環境に寄与していると考えられる

ー内部ダイナミクスがどのようなものかが、大気の状態にも関係する

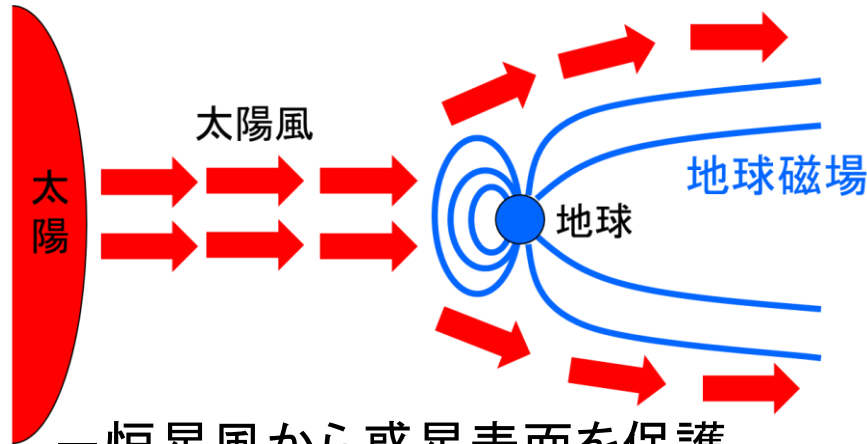
地球中心に対して

コアを冷却 → コア対流駆動
→ 惑星磁場発生

ー恒星風から惑星表面を保護

コア対流

惑星ダイナモを駆動 → 惑星磁場発生



- 恒星風から惑星表面を保護
- 大気、水（水蒸気）の散逸を防ぐ効果

（系外惑星で、もし中心星の活動が太陽より活発な場合は、さらに重要になるのでは）

惑星内部ダイナミクスの研究→

どういう系外惑星であれば、地球のような快適なハビタブル環境を実現できる内部ダイナミクスが生じるか？

その条件は何か？

コア vs. マントル

コア

マントル

Ekman数

(粘性力 / コリオリ力)

$O(10^{-15})$

$O(10^{15})$

Prandtl数

(運動拡散率 / 熱拡散率)

$O(10^{-1})$

$O(10^{24})$
(Stokes流)

(Reynolds数)

$(O(10^9))$

$(O(10^{-20}))$

Rayleigh数

(熱的な浮力 / 粘性抵抗)

$(\sim O(10^{30}))$

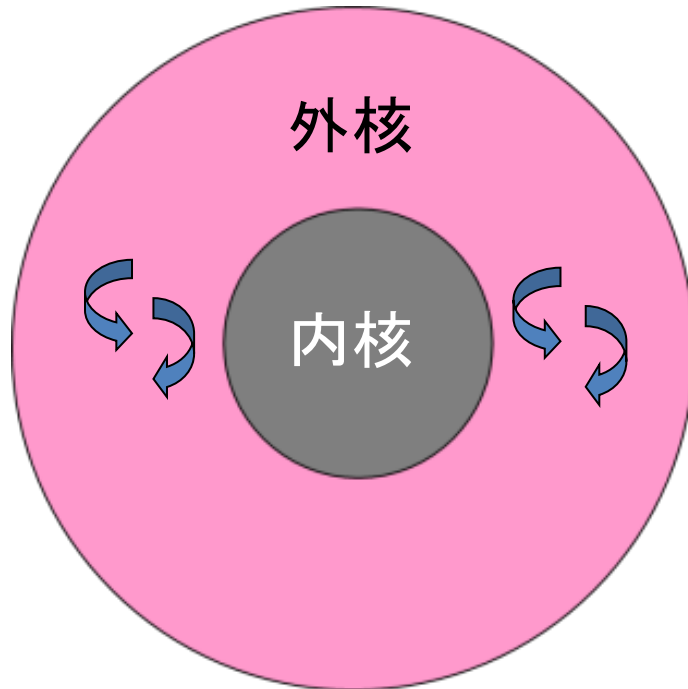
$O(10^7)$

- ・コア対流: MHD
- ・マントル対流: ナビエーストークスだがStokes流

粘性率(温度に最も強く依存)の空間変化が非常に大きい
(数桁以上)

コア対流・ダイナモシミュレーション

ダイナモシミュレーション



対流運動エネルギー→磁気エネルギー

- ・惑星磁場を発生、維持するメカニズムは？
- ・どういう対流の時にどのような磁場構造、磁場強度になるのか？
- ・双極子磁場の卓越、磁場強度変動、磁極反転、等々は説明できるのか？

...

→どんな惑星が、どんな強さの、
どんな構造の磁場を持つか？

- ・外核は自転の影響を極めて強く受ける。

コリオリ力 >>>>>>>>>>> 粘性力

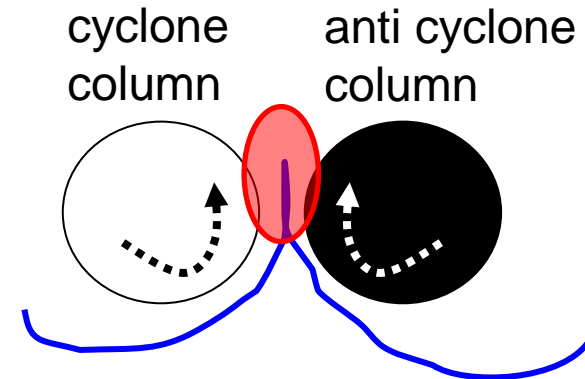
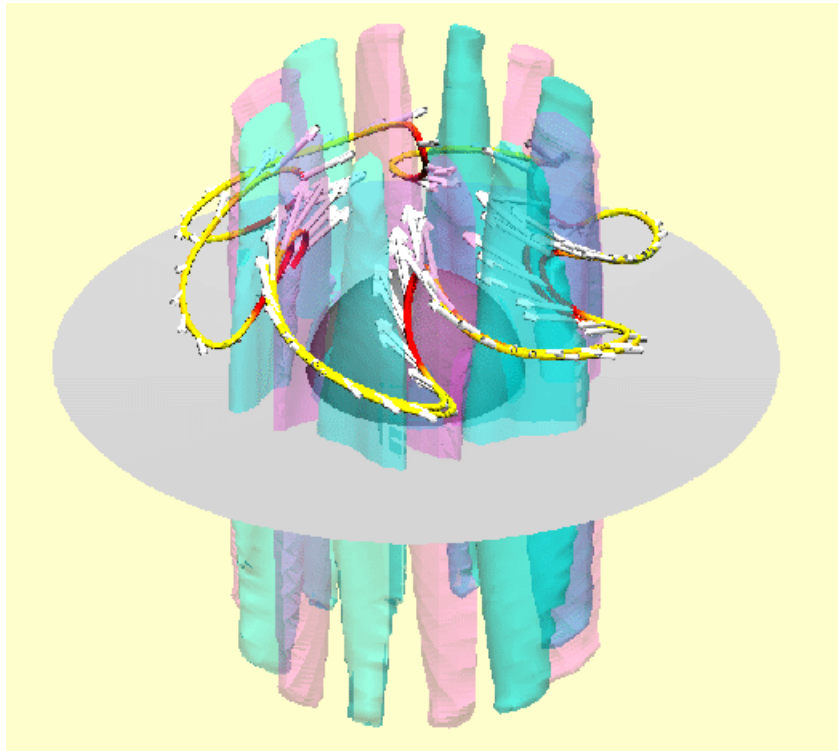
(10^{15} 倍)

(渦粘性を考慮すると、 10^9 倍?)

- ・この比の逆数はEkman数と呼ばれている
- ・現在のスパコンを持ってしても達成できていない ($O(1E-7)$)
- ・しかし可能なパラメータからの研究の積み重ねにより、ダイナモ機構の物理が少しずつ明らかになってきている
- ・太陽系内の地球型惑星で他に磁場を持つのは水星
- ・系外惑星(手付かず) もし大きいとまずレイリー数が高いが、こういう計算は難しい

強回転系 ($Ek \ll 1$) で対流柱が形成される場合の、ダイナモメカニズムとダイポール磁場形成

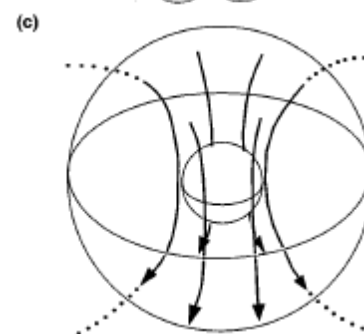
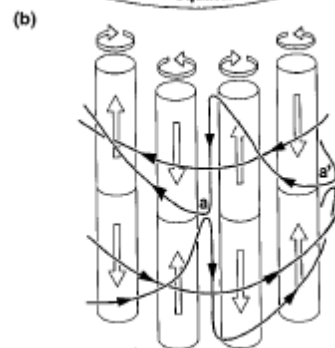
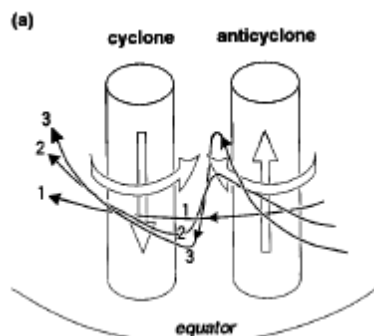
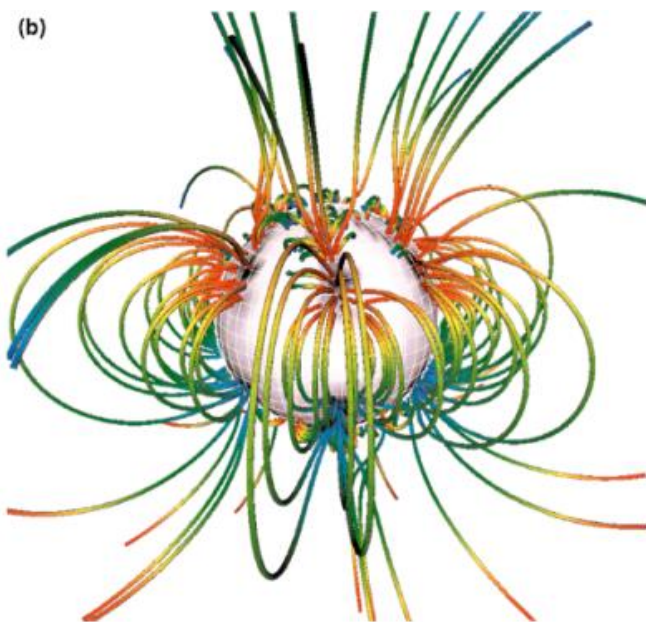
Kageyama, A., and Sato, T., *Phys. Rev. E*,
55, 4617 (1997)



▪ Ekman number: $Ek = 2 \times 10^{-4}$

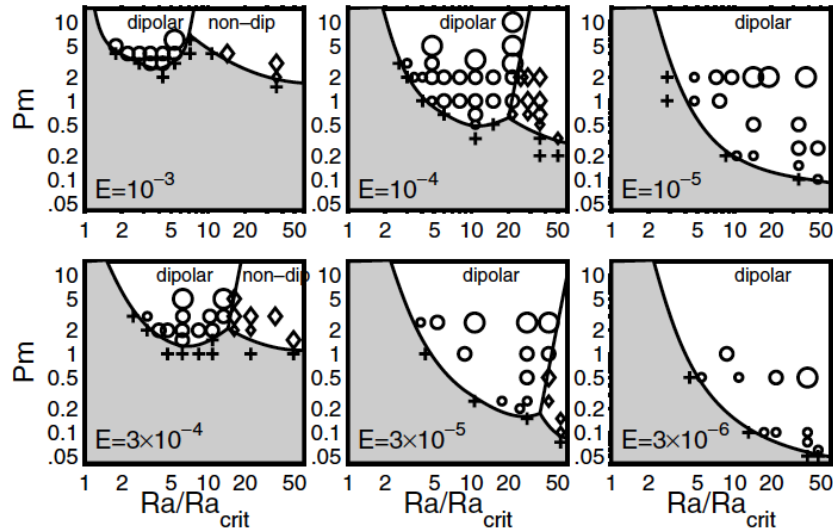
・ダイポール磁場の形成とそのメカニズム

Kageyama, A., and Sato, T., *Phys. Rev. E.*,
55, 4617 (1997)



- ・対流柱による磁場の引き込み
- ・南北方向への引き伸ばし
- ・南北両半球間での、磁気リコネクション
- ・ダイポール磁場形成
- ・西向き経度方向成分の流れ
- ・ポロイダル磁場→トロイダル磁場→ポロイダル磁場

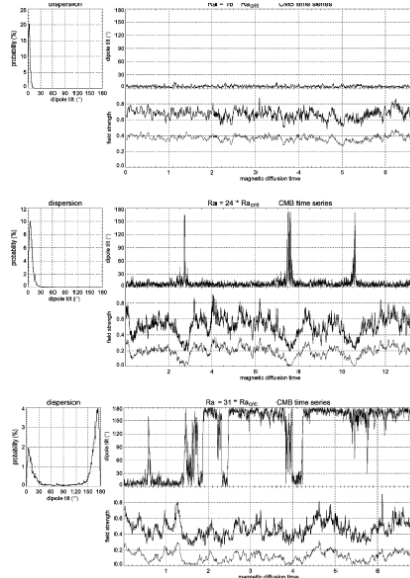
どういう時にダイポール磁場になるか



(Christensen, U. R., & Aubert, J.,
Geophys. J. Int., 166, 97-114, 2006)

- Ra(移流) vs. 回転
- 回転が支配的→ダイポール
- Ra大→小スケールの流れが支配的→高次モードの磁場が強くなる傾向
- 地球: $Ek=10^{-15}$

磁場極性反転



(Kutzner, C., &
Christensen, U. R.,
Phys. Earth Planet Int.,
131, 29-45, 2002)

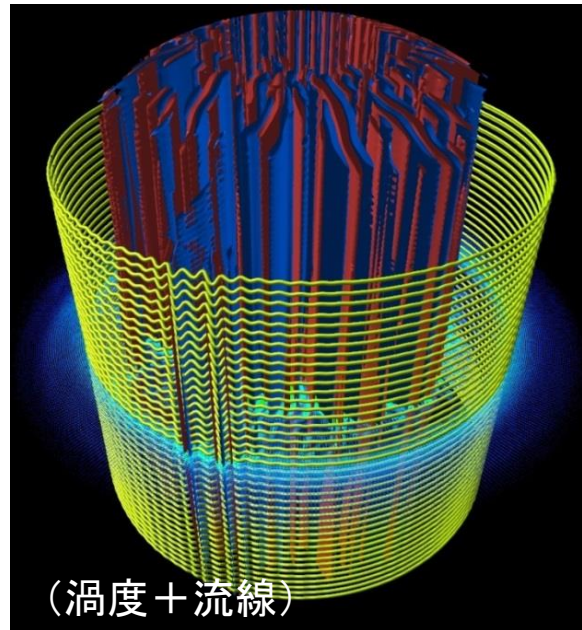
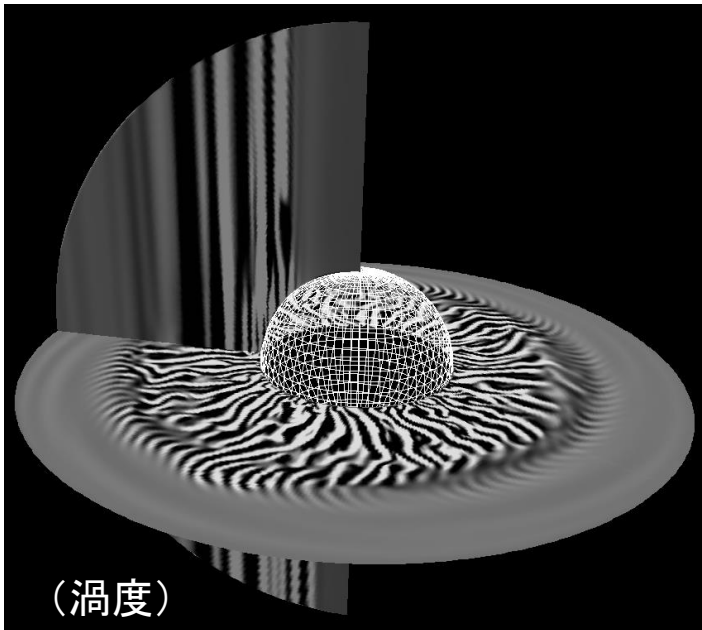
▪ Raの大きさ(→マントルによるコアの冷却の強さ)がコントロールしている事を示唆

低Ra: 反転せず安定、強dipole
高Ra: 頻繁な反転、弱dipole

↓
(Ra増加)

低Ekman数モデル (O (1E-7))

- Kageyama, A., Miyagoshi, T., & Sato, T. *Nature*, 454, 1106-1109, 2008
- Miyagoshi, T., Kageyama, A., & Sato, T. *Nature*, 463, 793-796, 2010



- シート状流 (強い)
 - 西向き帯状流 (弱い)
- から成る対流構造

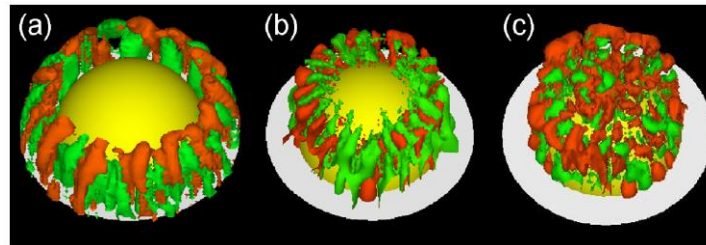
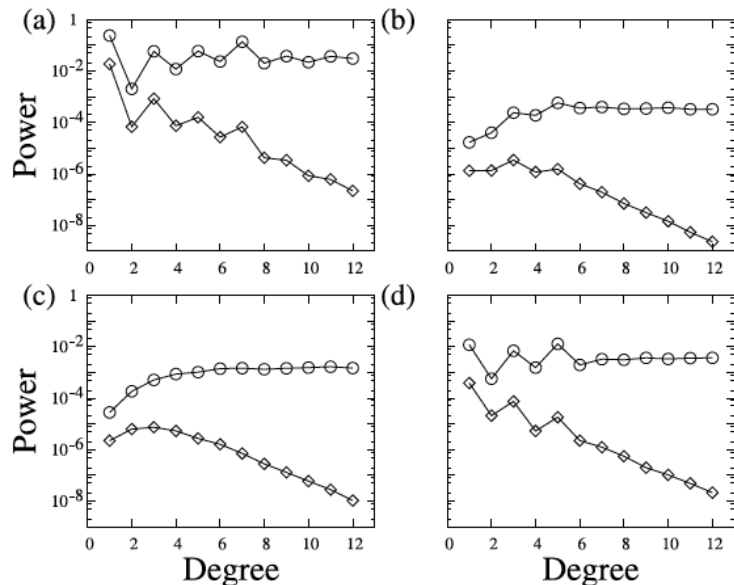
(内側に強い流れ、外側に弱い流れの対流構造—いくつかの観測事実を説明するのに都合がよい) (cf. Yukutake, T., *Phys. Earth Planet Int.*, 24, 253-258, 1981)

- 観測から、低緯度の(非双極子成分)磁場は sectorial ($l=m$) な構造を持ち、西方向に drift
- sectorial 構造の部分は対流が弱いはず (強いとそのような構造を壊してしまうので)

水星(内核が相対的に大きい)ダイナモ

地球以外に磁場を持つ地球型惑星、水星: 磁場が弱い(エルザッサー数 <0.1)

Takahashi, F., et al., *Geophys. Res. Lett.*, 33, L10202, 2006



$r_i/r_o = 0.7$

- a \rightarrow c: レイリー数が低い場合はTCの外側のみで対流柱、ダイポール卓越
- レイリー数が高くなるにつれてTC内で対流が発生。
- そこでの対流は小スケール \rightarrow 高次モードの強い磁場が発生。ダイポールは相対的に弱い。惑星の外では高次モードは急激に減衰するため、弱いダイポール磁場が観測される。

d: 内核の磁場拡散もきちんと解くことが巨大内核の場合には必要(大規模構造の低モード磁場構造を安定させる)

こういった計算例はまだ少ない

ある系外惑星を見た時、どのくらいの強さの磁場が、どういう構造で存在するか？

ー自転速度(エクマン)

ーレイリー数(惑星サイズ等)

ー内核の大きさ(惑星年齢と地球のケースから推定？)

...

さらに系統的な理解が必要
(地球のパラメータでもまだまだ...)

惑星サイズ？ 火星、水星

地磁気変動(様々な周期、原因がはっきりと分かっているものはない)

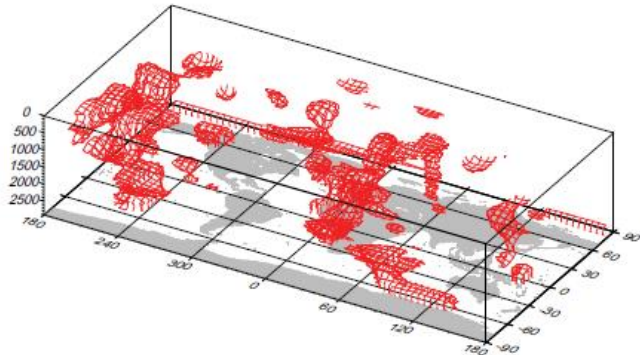
マントル対流シミュレーション

地球マントル対流の特徴

(1) プレート(表面の“堅いふた”)

- ・プレート: 地球の表面を構成する岩盤。十数枚存在する。
- ・一枚の板のように、剛体的に運動する。

(2) 大規模な水平対流構造



- ・高温領域: 2つ程度に見えるモード2位の大規模構造が卓越

(Obayashi et al., *Earth Planet. Sci. Lett.*, 243, 149-158, 2006)

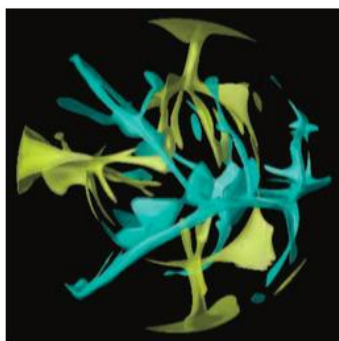
マントル対流の重要な特徴

1. 高 $Pr(O(1E24))$ 。浮力と粘性抵抗が常に釣り合うように流れる (Stokes流)
 2. 粘性率の空間変化が大きい (何桁にもわたって変化する。) 最も影響が大きいのが温度に対する依存性。
-

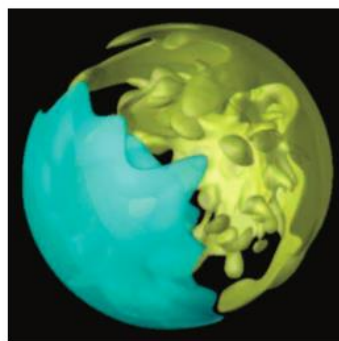
粘性率の温度依存性の変化を考慮したマントル対流モデル

(1) 対流の水平スケールが変化する

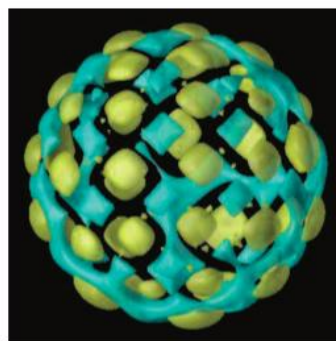
弱 ← 粘性率の温度依存性 → 強



$$\frac{\eta_{\text{top}}}{\eta_{\text{bot}}} = 10^0$$



$$\frac{\eta_{\text{top}}}{\eta_{\text{bot}}} = 10^4$$



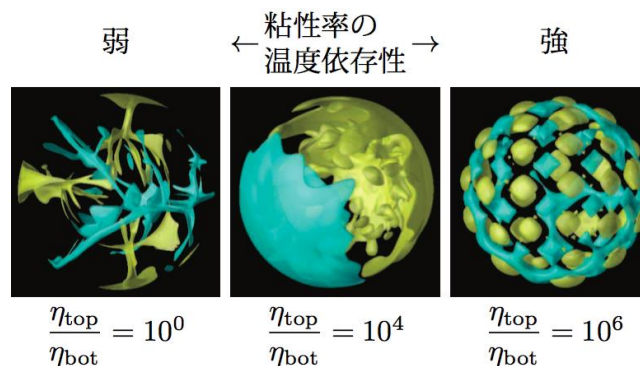
$$\frac{\eta_{\text{top}}}{\eta_{\text{bot}}} = 10^6$$

・粘性率の温度依存性が強くなるにつれて、水平スケールが小さい → 大きい → 小さい

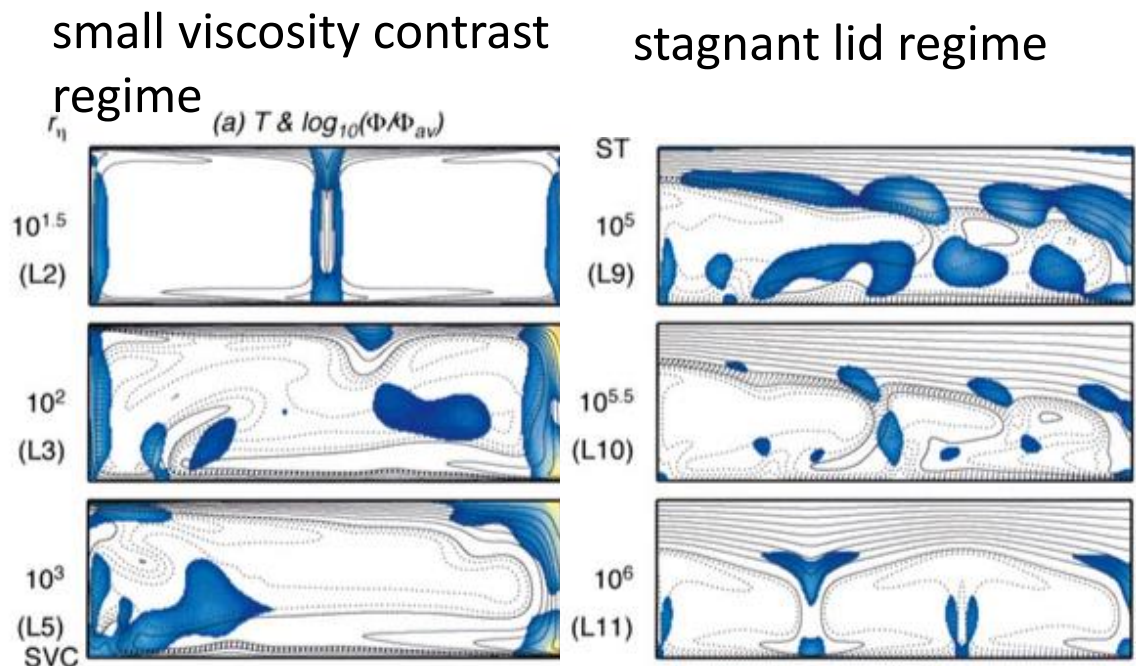
(亀山真典、ながれ、30, 305-310, 2011)

粘性率の温度依存性の変化

(2) 対流レジームの変化



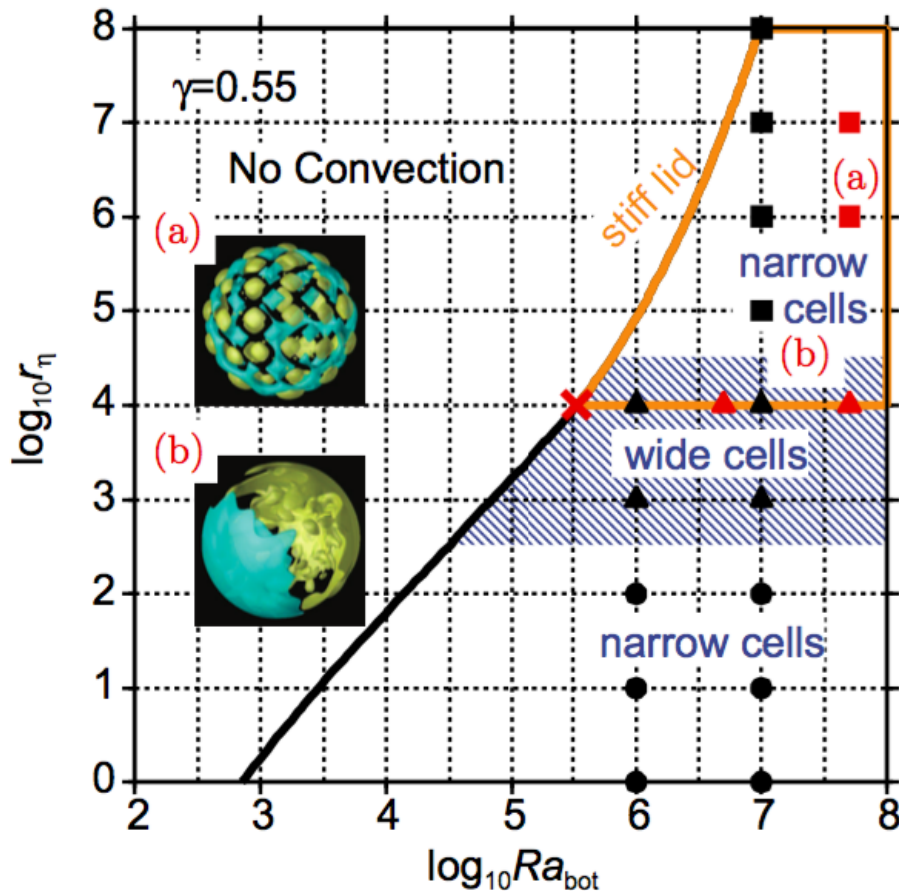
(亀山真典、ながれ、30, 305-310, 2011)



(Kameyama, M., & Ogawa, M., *Earth Planet. Sci. Lett.*, 180, 355-367, 2000)

- small viscosity contrast regime (表層と惑星内部は一体となって運動)
- stagnant lid regime (表層は「堅いふた」 下層でのみ対流)

対流レジームダイアグラム



- ・大規模な水平構造を持つ
- ・プレート “堅いふた”

地球のマントル対流の特徴の両方を備えた対流様式が、あるパラメータ範囲で存在し得る

(系外惑星の場合は、他の対流様式の場合も考える)

(亀山真典、ながれ、30, 305-310, 2011)

- ・これらの研究成果で、マントル対流の基本的な枠組みは押さえられたが、重要な特徴が全て再現された訳ではない。

- ・地球表面には確かに「堅いふた」→しかし「動かないふた」。
「剛体的に動くプレート運動」は再現できていない。

- ・「プレートの局所的な破壊、剛体的な運動と沈み込み」を再現し調べるためには、応力が集中した局所部分に、柔らかいプレート境界を生じさせる事が必要となる。

- 例えば水の存在などで、プレートカップリング強度<プレート自重で発生する応力、となっていると考える

- ・しかしながら、局所的に薄い低粘性層→数値シミュレーションが著しく困難に

- ・火成活動(マグマ)、内部発熱、...

火星・金星・地球 プレート運動・火成活動、内部発熱を考慮したシミュレーション(2次元モデル)

(Ogawa & Yanagisawa, 2011、Ogawa & Yanagisawa, 2014、Ogawa, 2015)

(各惑星の熱史)

火星: かなり昔で活発な火山活動が終わり(40-35億年前)、その後急速に衰えた

金星: 最近まで(現在も?) 活発な火山活動ある (地表面の平均年齢5億年)

地球: プレート運動が初期のカオティックから現在のより定常的な運動への変化、プレートの溜まりと高温の玄武岩(密度>マントル平均物質)溜まり(LLSVP)

ポイント:

- ・相転移があるか、そうでないか(火星一浅いので相転移なし、金星一起こる)
- ・プレート運動、プレートの沈み込みがあるか(金星と地球)

火星:

マグマオーシャン、初期から火山活動活発、効率よく惑星内部冷却、地殻(放射性元素)は惑星内部に還流されない、火山活動は短命に終わる (Ogawa & Yanagisawa, 2011)

金星:

相転移による境界がしばらく存在する事により、バーストで地殻を内部に還流できる (Ogawa & Yanagisawa, 2014)

地球:

バースト時はカオティックなプレート運動、バーストが収まると定常的なプレート運動、CMBに沈んだプレート(玄武岩溜まりと内部発熱) (Ogawa, 2015)

10倍地球質量スーパーアースのマントル対流シミュレーション

- Miyagoshi, T., Kameyama, M., & Ogawa, M. *Astrophys. J. Lett.*, 780, L8 (2014)
- Miyagoshi, T., Kameyama, M., & Ogawa, M. *J. Geophys. Res.*, 120, 1267 (2015)
- 巨大スーパーアースのマントル対流はどのようなものか？

- 散逸数 (Dissipation number) 断熱圧縮の効果の目安

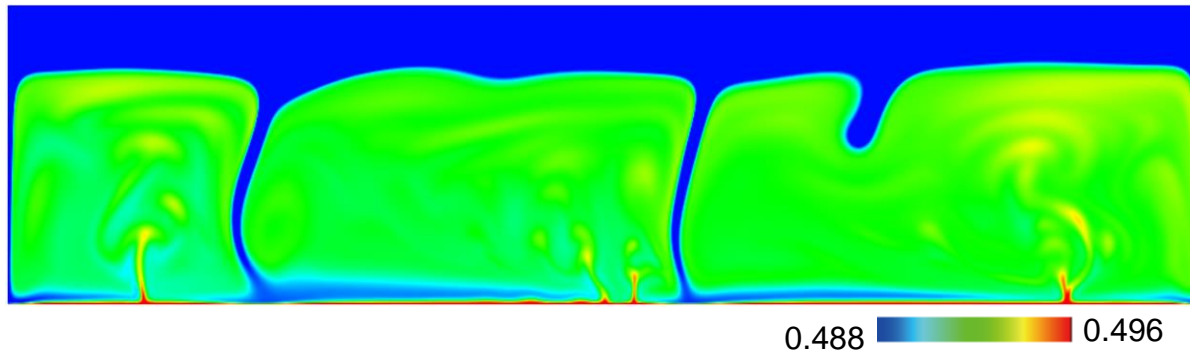
$$Di \equiv \frac{\alpha g d}{C_p} = \frac{\text{対流層の厚さ}}{\text{断熱温度変化のスケールハイト}}$$

- ブジネスク近似: 0
- 地球マントル(表面): ~0.8
- 10倍質量スーパーアース(表面): ~5

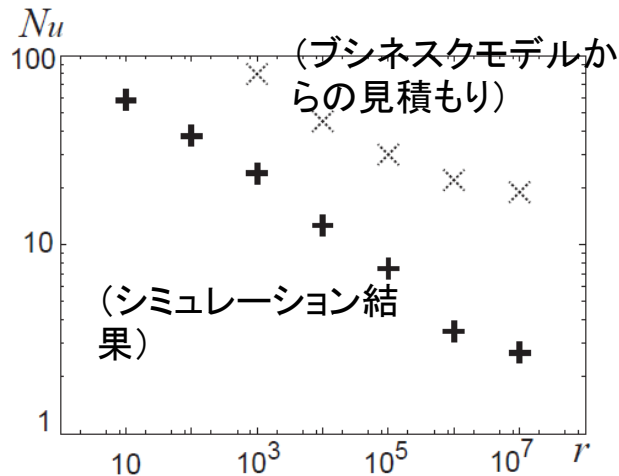
10倍地球質量スーパーアースのマントル対流シミュレーション

potential temperature

($Ra = 10^{10}$, $r = 10^6$)



(ヌッセルト数)



(粘性率の温度依存性の強さ)

(断熱圧縮効果が無い場合との違い)

- ・ホットプルーム活動が弱められる
- ・対流の熱輸送効率が低くなる
- ・プレートが厚くなる

- $\sim 1200\text{km}$ ($\sim 20\%$ of mantle depth) ($Ra = 10^{10}$ and $r = 10^6$)

-(参考) 地球: $\sim 100\text{km}$, less than 5%

Implications for massive super-Earths

- 低い Nu 、厚いリソスフェア、弱いホットプルーム活動
 - 火成活動でプレート割るのは困難なのではないか
 - 巨大スーパーアースにおいては、プレート運動は生じづらい可能性
-
- ・低い $Nu \rightarrow$ 弱い惑星磁場を示唆
 - ・これらは、ハビタビリティに対してネガティブな効果と考えられる
 - ・地球のような、ハビタブル環境を長期間維持可能なプレートテクトニクスが生じるためには、惑星の大きさに制限がある？（小さすぎても大きすぎてもダメ？）

- ・火成活動: まだ2次元モデルに限られている
- ・プレート運動、水の影響、...

(物質循環(水循環含む)を正確に理解するためには、これらの3次元球殻モデルが必要)

- ・スーパーアースの3次元計算もまだ難しい (ポスト京萌芽)

ある系外惑星を見たときに(惑星サイズ、、、)、

どのようなマントル対流の様式になっているか？

プレート運動の有無は？ 表層の様子は？

マントル対流のある様式と発生する惑星磁場の関係、もしくは大気組成との関係など、マントルとコアや表層とのカップリングについて信憑性のある予言ができるモデルは未だ存在せず、今後の挑戦

(気候変動と磁場変動？

Miyagoshi & Hamano, *Phys. Rev. Lett*, 2013)

End