#### 資料2-3は後日掲載



# 地球惑星科学分野の研究開発動向について ~マントルダイナミクス研究~



### 中久喜伴益

#### 広島大学大学院先進理工学系研究科地球惑星システム学プログラム

98

### 研究の意義

マントル対流:地球の長期変動の原動カー地球惑星システムと人類・日本人の立ち位置

- プレート運動・地震・火山などほとんどの地学現象を力学的・熱的に駆動
- 岩石・水・炭素循環を駆動:環境・生命の進化への影響・長期未来の予測
- 沈み込み帯の形成:日本列島の成因



地球惑星システム

## マントルダイナミクスの課題

#### マントル対流の構造

- マントル鉱物の相転移と対流の層構造:全層対流・二層対流
- マントル深部の化学的不均質

#### マントル対流による熱・物質輸送

- マグマの発生と物質分化・混合
- 揮発成分:水・炭素の輸送
- マントル対流による熱輸送速度と地球の熱史

### マントル対流とプレートテクトニクス

- プレートテクトニクスの成因
- 沈み込み帯テクトニクス・マグマ生成の再現

![](_page_3_Picture_11.jpeg)

## マントルダイナミクスの研究方法

![](_page_4_Figure_1.jpeg)

地球内部:直接見ることができない 間接的な方法を組み合わせていろいろな視点から検討

モデルの作り方・2つの方法

![](_page_5_Figure_1.jpeg)

マントル対流:物理パラメータ・基礎方程式の理解が不完全 単純なモデルに少しずつ様々な機構を取り入れ,それがどのような マントル対流の性質を作り出すのか調べる物理モデル

## マントル対流のモデリング

![](_page_6_Figure_1.jpeg)

単純なモデルから出発してどうすれば地球に近づくのかを考える

# マントル対流シミュレーションの困難な点

#### マントルの粘性が大きい

• 各タイムステップで運動方程式の定常解が必要:計算時間が膨大

#### 粘性率の変化が大きい

• 運動方程式の数値的な性質を悪化: 計算不安定を発生

#### 空間スケールの異なる構造が混在

•小スケールの構造がマントル対流全体に影響:計算時間・記憶容量が膨大

![](_page_7_Figure_7.jpeg)

Primary: 5000×1000, Secondary: 1676×308

Secondary mesh: 最小2km・最大20km

### 研究の動向

- マントル対流シミュレーションコードの開発
- (1) 2次元: 箱型・円筒・球環(spherical anulus), 3次元: 箱型・球殻
- (2) 粘性変化: 2次元の場合は安定, 3次元は粘性変化が小さい場合のみ高速かつ安定
- (3) 離散化の方法—FEM (CITCOM,...), FVM (StagYY, ACuTEMan,...), FDM (Gerya)
- 地球深部の大規模構造とマントルプルームに関する研究
- (1) 地球深部の化学的不均質構造の物性の影響とトモグラフィーとの比較
- (2) マグマ分化結合モデルによる化学的不均質生成と混合
- (3) 地球深部の化学的不均質構造とマントルプルームの発生
- (4) マントル対流中におけるマントルプルーム運動:ホットスポット不動の原因
- プレートテクトニクスの発生とプレート運動に関する研究
- (1) プレートの強度・自由表面や弱い海洋地殻;大陸地殻の影響
- (2) 3次元球殻モデルを用いたプレートテクトニクス生成や大陸移動メカニズム
- (3) トモグラフィーを用いたプレート運動速度の予測に関する研究
- プレート沈み込みに関する研究
- (1) 沈み込むスラブとマントル遷移層や下部マントルとの相互作用
- (2) 沈み込み帯の水・揮発成分輸送とマグマの成因
- (3) 沈み込み帯の構造と水やマグマとの相互作用

### プレートの水平運動に対する大陸の影響

Celtic et al. (2019)

![](_page_9_Figure_2.jpeg)

- プレートの水平運動やプレート境界の再編が生起するメカミズムを調べる
- 地球と同程度大陸が地表面積を占める場合にはマントルドラッグの効果が増大
- スラブの沈降がマントルを引きずり、その運動がさらに大陸プレートを駆動 プレートテクトニクスの特徴が人工的な仮定なしに再現され始めている

![](_page_10_Picture_0.jpeg)

Celtic et al. (2019)

![](_page_10_Picture_2.jpeg)

1670K 等温面深さ (0-100km), 薄紫:大陸, 薄緑: 歪速度大

温度 (不透明:高温)

- プレート境界再編のほうが内部のマントルの変動よりも速く起こる
- スラブの沈降に伴う沈み込み口の移動が顕著に見られる
- プレートテクトニクスのようなスラブプルによる駆動の効果はまだ弱い
  粘性率の温度依存性や降伏強度を大きくすれば、よりプレートらしくなる?

## マントルプルームのダイナミクス

![](_page_11_Figure_1.jpeg)

- 3次元球殻マントル対流中でのマントルプルームの形状や安定性を調べる
  - プルームがマントル中に孤立してある場合、傾きや水平方向の運動は小さい
  - 沈み込むスラブ・他のプルームと相互作用すると、高速に移動
    ホットスポットが移動しないことやその継続時間を説明

### グローバルプレート運動の再現

Alisic et al. (2012)

![](_page_12_Figure_2.jpeg)

粘性率分布

プレート速度一緑:観測・黒:予測

高粘性のマントル対流では浮力と応力が釣り合う:密度・粘性→現在の流速 密度・粘性率分布をプレート冷却モデルや深発地震分布・トモグラフィーから推定 プレート境界は粘性の低い薄い層で表現

大きなプレートの運動速度がよく予測されている

## **Earthbyte Project**

![](_page_13_Picture_1.jpeg)

Müller et al. (2022)

- テクトニクスやマントルダイナミクスに関する研究を行う
- 理論からデータ解析まで幅広い手法で研究
- ●可視化ソフトウェアGplatesを開発

ディジタル化したデータやシミュレーションの結果を可視化し公開

### 私のこれまでの研究内容

- マントル対流シミュレーションコードの開発
- (1) 粘性変化に対する安定性
- (2) 大小の構造が混在するモデルへの対応
- (3) マントル対流と水輸送の動的結合
- マントルプルームに関する研究
- (1) プルームとマントル遷移層との相互作用
- (2) プルームと大陸リソスフェアとの相互作用
- プレート・マントル対流結合系の数値シミュレーション
- (1) プレート運動生成に対する水の役割
- (2) 沈み込むプレートとマントル遷移層との相互作用
  - ~滞留スラブと背弧海盆生成のメカニズム
- 地球深部へのプレート沈み込みと水輸送
- (1) 地球内部の水が沈み込み帯の構造に与える影響
- (2) スラブ強度や下部マントル粘性率のプレート運動への影響
- (3) マントルの水循環と海水の行方

## 沈み込んだプレートの行方

![](_page_15_Figure_1.jpeg)

after Fukao et al. (2009)

after Li et al. (2008)

- 西太平洋の多くの場所で、沈み込んだプレートはマントル遷移層付近に滞留
- 背弧海盆もほとんど西太平洋周辺のみに存在

滞留スラブの発生や地域性の原因・背弧海盆との関連性

# プレート沈み込みとマントル遷移層との相互作用

![](_page_16_Figure_1.jpeg)

Nakakuki and Mura (2013)

- 660km相境界の浮力により沈み込み速度が低下
- スラブの後退が起き、滞留スラブと背弧海盆を同時形成

滞留スラブと背弧海盆の関連性を説明

![](_page_17_Figure_0.jpeg)

●日本・千島・カムチャッカでは日本海拡大の頃速度が遅くなりその後増加

プレートの負の浮力に対して速度が低下したときに背弧拡大

ture.com/nature

● 沈み込み速度が遅くなるとWFは低下し、スラブの後退でRBとバランス

海溝は沈み込み速度が遅いと後退・速いと前進または固定

## マントルの構成鉱物と水

#### マントルの鉱物組成:無水と含水

![](_page_18_Figure_2.jpeg)

### 輝石系列 (40%): 輝石→ざくろ石→ブリッジマナイト

カンラン石系列 (60%): カンラン石→ウォズリアイト→リングウッダイト →ブリッジマナイト+マグネシオウスタイト

![](_page_18_Picture_5.jpeg)

### 蛇紋岩など水を含む数多くの相 マントル遷移層は大量の水を持つことが可能 その量は海4~5個分

含水相の影響: 含水可能量をマントル対流モデルに 取り入れる

## マントル全体モデルによる沈み込み帯微細構造再現

Water content, Temperature, Viscosity

![](_page_19_Picture_2.jpeg)

Nakakuki (2015), unpublished result

- ↑ モデル領域: 10,000×2000 km 分解能: 2 km
- →東北の沈み込み速度とスラブ形状を考慮

![](_page_19_Figure_6.jpeg)

Water content & ejection, Temperature

- グローバルスケールモデルで沈み込み帯の微細構造を再現することは可能
- 沈み込むスラブの形状や速度を合わせると、震源分布と合う脱水位置を再現
  地域毎の地学的特徴が再現できる可能性

# 片側沈み込みを持つ円筒マントルモデル

![](_page_20_Figure_1.jpeg)

1023.23 Myr

a.

-5

-10

150

120

- 地球の曲率の効果をスケーリング
- 沈み込むプレートと同様な粘性構造
- 粘性構造を固定して計算時間を短縮

沈み込み帯の構造とその数が少ないことに よって,粘性率一定のモデルよりも水の増加 速度は小さい

マントル対流により水がよく混合される場 合,輸送経路上にある最小の含水率がマン トルが持つ水の量を決める

![](_page_20_Figure_7.jpeg)

# 水の粘性への影響と同位体分別

![](_page_21_Figure_1.jpeg)

Model: 2-D spherical anulus

Nakagawa et al. (2019), in prep.

- 含水率による粘性変化の強さがマグマ生成による同位体分化に与える影響を計算
- •水輸送が元素分別に与える影響は考慮していない
- 粘性の含水率依存が強いと地表の運動が活発になり、マントルが早く冷却する
  液相固相間分配係数の大きなRe/Osにのみ影響あり・他の同位体への影響は少ない<sup>118</sup>

## 今後の課題

- 1. 地球の冷却を考慮した水輸送モデル 過去の地球の温度が海水吸収量に与える影響
- 2. マグマ生成を組み込んだモデル 背弧拡大の拡大中心決定メカニズム
- 3. 粘弾性のモデルへの組み込み 沈み込み側・上盤側プレートの応力分布・降伏応力推定
- 4. 地球深部での水の移動速度を考慮したモデル
  地球深部や全マントルへの水分配の影響
  地球深部から上昇してくる水のマグマ生成への影響
- 5. スラブの形状や沈み込み速度のコントロール・3次元化 火山や震源分布などの地域毎の特徴の再現

![](_page_22_Picture_6.jpeg)

参考文献

#### 図を引用した論文・レビュー論文

L.Alisic et al. (2012): J. Geophys. Res. 117, B10402.

M.Arnould et al. (2020): Earth Planet. Sci Lett. 547, 116439.

J. Chen (2016): Science 351, 122-123.

N. Coltice et al. (2019): Sci. Adv. 5, eaax4295.

F. Crameri et al. (2012): Geophys. Res. Lett. 39, L03306.

S. Goes et al. (2008): Nature 451, 981-984.

S. Goes et al. (2017): Geosphere 13, 1-21.

M Faccenda and L. D. Zilio (2017): Lithos 268-271, 198-224.

Y. Fukao et al. (2009): Ann. Rev. Earth Planet. Sci. 37, 19-46.

T. Gerya (2022): Geosphere 18, 503-561.

C. Li et al. (2008): Geochem, Geophys, Geosyst 9, Q05018

C. Mallard et al. (2016): Nature 535, 140-143.

D. Müller et al. (2022): Nature 605, 625-639.

T. Nakakuki et al. (2010): Phys. Earth Planet. Int. 183. 309-320.

T. Nakakuki and E. Mura (2013): Earth Planet. Sci. Lett. 361, 287-297.

Y. Ricard (2015): Mantle dynamics, Treatise on Geophysics 2nd ed.