

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て

亀山 真典 © 愛媛大学地球深部ダイナミクス研究センター

2018年5月23日

> 謝辞

能書

> LLSVPs

> 火成活動

> プレート運動

> ToDo/NeedToDo

> 発表の分業体制

MMU coupling

結語

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。

本研究では **火成活動** と **プレートテクトニクス** の2つに注目

□ 火成活動はどうエライのか?

火成活動

= 岩石の部分溶融
(化学組成を変化)

+

生成した液相の分離
(固相と独立に移動)

1. マントル内の**熱・物質輸送**を担う主要なメカニズム
2. **固相マントルの対流との相互作用**が起こり得る
positive feedback between **M**agmatism and **M**antle **U**pwelling (Ogawa, 2014)

> 謝辞

能書

> LLSVPs

> 火成活動

> プレート運動

> ToDo/NeedToDo

> 発表の分業体制

MMU coupling

結語

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。

本研究では **火成活動** と **プレートテクトニクス** の2つに注目

□ プレートテクトニクスはどうエライのか？

$$\boxed{\text{プレートテクトニクス}} = \boxed{\text{低温の固い「ふた」の形成}} + \boxed{\text{固い「ふた」の沈み込み}}$$

1. マントル (+その下の核) の**冷却効率**が大きく変わる
低温塊が深部へ、高温塊が浅部へ速やかに移動できる
2. マントル内の**物質の「かき混ぜ」**の度合に影響
冷たくて固い「板」の動きによる効果的な攪拌

科学的にやりたいこと + 技術的にやらんといかんこと

> 謝辞

能書

> LLSVPs

> 火成活動

> プレート運動

> ToDo/NeedToDo

> 発表の分業体制

MMU coupling

結語

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**」**拳動**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)

科学的にやりたいこと + 技術的にやらんといかんこと

➤ 謝辞

能書

➤ LLSVPs

➤ 火成活動

➤ プレート運動

➤ ToDo/NeedToDo

➤ 発表の分業体制

MMU coupling

結語

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
 - **この発表 (MGI28-03)**
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
 - **ポスター発表 (MGI28-P03)**

火成活動つきシミュレーションプログラムの基本構造

> 謝辞

能書

MMU coupling

> プログラム構造

> 流れ場解法 1

> 流れ場解法 2a

> 流れ場解法 2b

> ACuTE エライ

> 3次元計算例

結語

do 時間発展ループ

1. solve 相平衡関係 (マンツルの溶融)

2. solve 液相マグマの移動 (浸透流)

$$\mathbf{V}_l - \mathbf{V}_s = -\frac{k_\phi}{\mu\phi} (1 - \phi) (\rho_s - \rho_l) \mathbf{g}$$

3. solve 固相マンツルの流動 (ストークス流)

$$\nabla \cdot \mathbf{V}_s = -\nabla \cdot [\phi (\mathbf{V}_l - \mathbf{V}_s)]$$

$$0 = -\boxed{\text{圧力勾配}} + \boxed{\text{粘性抵抗}} + \boxed{\text{浮力}}$$

4. solve 熱エネルギーの輸送

end do 時間発展ループ

□ 液相マグマの移動 (非零な $\mathbf{V}_l - \mathbf{V}_s$)

□ 固相マンツルの流動 (\mathbf{V}_s)

の両者の力学的結合が流れに影響する!!

固相マントルの流動をどう解くか? (その1)

> 謝辞

能書

MMU coupling

> プログラム構造

> 流れ場解法 1

> 流れ場解法 2a

> 流れ場解法 2b

> ACuTE エライ

> 3次元計算例

結語

ふつうは固相マントルの流れ場は非圧縮なのだが、
局所的に $\nabla \cdot \mathbf{V}_s \neq 0$ な速度ベクトル \mathbf{V}_s をどう解くか?

1. ベクトル解析の Helmholtz 分解 を援用

$$\mathbf{V}_s \equiv \mathbf{U}^S + \mathbf{U}^A \quad \text{ただし} \quad \mathbf{U}^S \equiv -\nabla S \quad (\nabla \cdot \mathbf{U}^S \neq 0)$$
$$\mathbf{U}^A \equiv \nabla \times \mathbf{A} \quad (\nabla \cdot \mathbf{U}^A = 0)$$

(i) 連続の式から $\mathbf{U}^S = -\nabla S$ を解く

$$-\nabla \cdot \boxed{\text{マグマ移動}} = \nabla \cdot \mathbf{V}_s = \nabla \cdot \mathbf{U}^S = -\nabla^2 S$$

単なるスカラー変数のポアソン型方程式を解けばOK

(ii) 運動方程式から $\nabla \cdot \mathbf{U}^A = 0$ を満たす \mathbf{U}^A を解く
ふつうのマントル対流問題とそっくりな問題に化ける

(iii) $\mathbf{V}_s = \mathbf{U}^S + \mathbf{U}^A$ により速度場を求める

問題を2段階に分けたけれど、手間の増加はごくわずか
(S の求解に要する手間が十分小さい)

固相マントルの流動をどう解くか? (その2の1)

> 謝辞

能書

MMU coupling

> プログラム構造

> 流れ場解法 1

> 流れ場解法 2a

> 流れ場解法 2b

> ACuTE エライ

> 3次元計算例

結語

ふつうは固相マントルの流れ場は非圧縮なのだが、
局所的に $\nabla \cdot \mathbf{V}_s \neq 0$ な速度ベクトル \mathbf{V}_s をどう解くか?

2. そんな速度場 \mathbf{V}_s を基礎方程式から直に求める
(**亀山謹製 ACuTE 法**ならば、実は**軽微な修正で可能**)

ACuTE 法では、運動方程式と連続の式の双方の定常解で
与えられる固相マントルの流れ場を

$$M \frac{\partial \mathbf{V}_s}{\partial \tau} = -\nabla p + \boxed{\text{粘性抵抗}} + \boxed{\text{浮力}}$$
$$-K \frac{\partial p}{\partial \tau} = \nabla \cdot \mathbf{V}_s$$

という擬似的な時間発展方程式の定常状態として求める。

固相マントルの流動をどう解くか? (その2の2)

> 謝辞

能書

MMU coupling

> プログラム構造

> 流れ場解法 1

> 流れ場解法 2a

> 流れ場解法 2b

> ACuTE エライ

> 3次元計算例

結語

ふつうは固相マントルの流れ場は非圧縮なのだが、
局所的に $\nabla \cdot \mathbf{V}_s \neq 0$ な速度ベクトル \mathbf{V}_s をどう解くか?

2. そんな速度場 \mathbf{V}_s を基礎方程式から直に求める
(**亀山謹製 ACuTE 法**ならば、実は**軽微な修正で可能**)

ACuTE 法では、運動方程式と連続の式の双方の定常解で
与えられる固相マントルの流れ場を

$$M \frac{\partial \mathbf{V}_s}{\partial \tau} = -\nabla p + \boxed{\text{粘性抵抗}} + \boxed{\text{浮力}}$$
$$-K \frac{\partial p}{\partial \tau} = \nabla \cdot \mathbf{V}_s + \nabla \cdot [\phi(\mathbf{V}_\ell - \mathbf{V}_s)]$$

という擬似的な時間発展方程式の定常状態として求める。
 $\nabla \cdot \mathbf{V}_s \neq 0$ な速度場であっても、**圧力の擬似時間発展方程式を適切に設定してやりさえすればOK**

修正版 ACuTE 法を用いた流れ場解法の威力

> 謝辞

能書

MMU coupling

> プログラム構造

> 流れ場解法 1

> 流れ場解法 2a

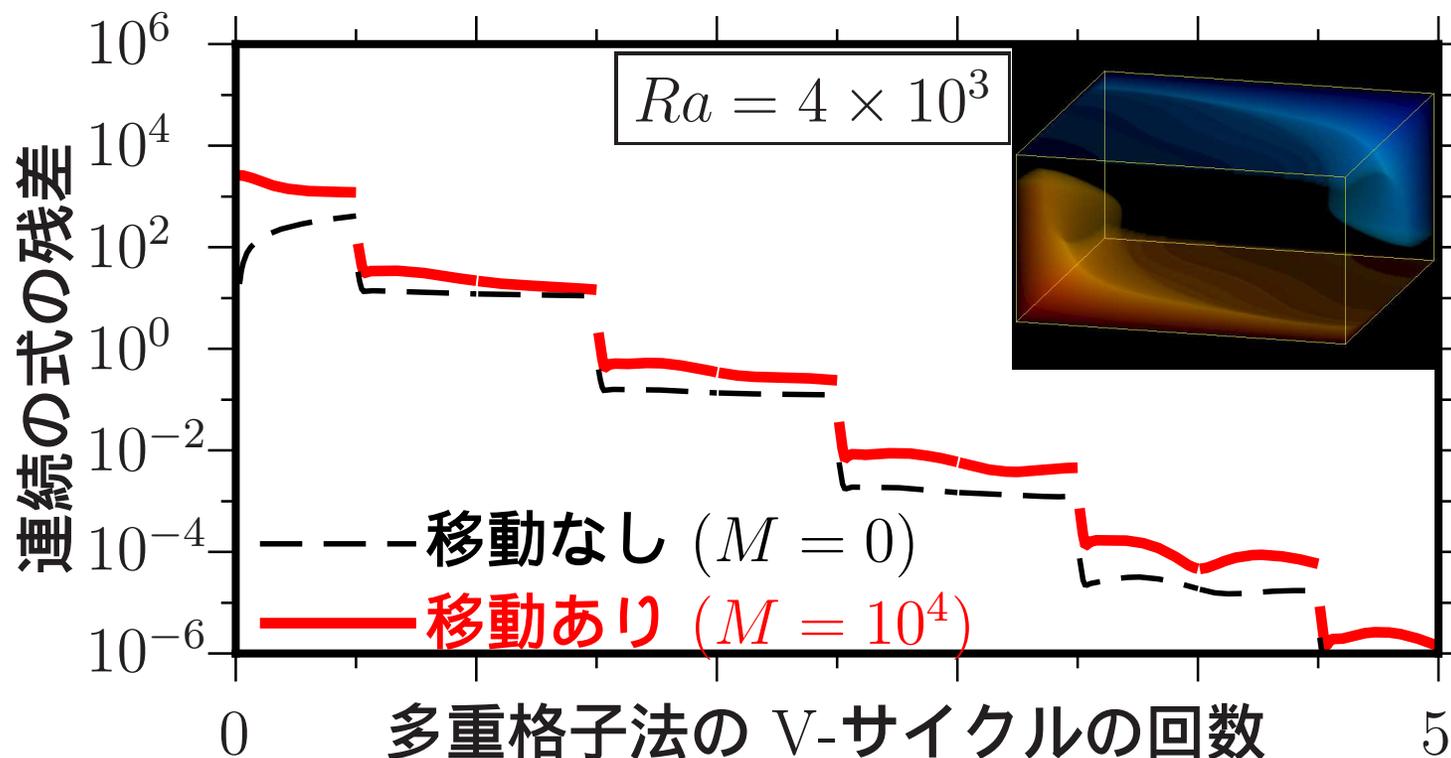
> 流れ場解法 2b

> ACuTE エライ

> 3次元計算例

結語

反復計算の過程における連続の式の残差の減少のようすを、液相移動の **ある** 場合と **ない** 場合で比較



□ 液相の移動による速度場の発散があっても、**連続の式を非常によい精度で満足させることが可能**

ただし、液相の移動速度が大だと、収束性はちょっとだけ落ちる

まとめのつもり (その1)

> 謝辞

能書

MMU coupling

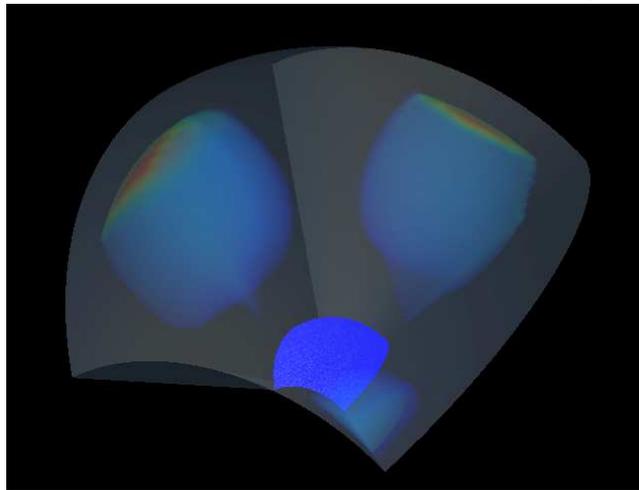
結語

> 安心して下さい

> はいてますよ

マントル対流-火成活動結合系のシミュレーション:

- **局所的に non-solenoidal ($\nabla \cdot V_s \neq 0$) な速度場を解く手法を確立** (場合によって2通りの解法を使い分け)
これにより、技術的な困難は (たぶん) 克服できた。
- 3次元箱型モデルで確立した手法を流用することにより、月を目指した **3次元 (部分) 球殻モデル** へ発展させる



3次元部分球殻マントル対流モデルに適用してみた例
内径/外径の比 = 0.22 (月のマントルとほぼ同じ)

- 「(too) メニーコア」環境で動かしてどこまで大規模3次元計算がスピードアップできるか? の検証を進める