

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成 25 年 6 月 21 日現在

機関番号：16301

研究種目：若手研究（B）

研究期間：2010～2012

課題番号：22740297

研究課題名（和文）粒子法による多相流粘弾性流体数値計算コードの開発とマグマへの応用

研究課題名（英文）Development of numerical code for multi-phase flow with viscoelasticity using particle method and its application to magma transport

研究代表者

市川 浩樹（ICHIKAWA HIROKI）

愛媛大学・地球深部ダイナミクス研究センター・グローバル COE 助教

研究者番号：50570503

研究成果の概要（和文）：多相流の数値計算コードの作成を行い、地球初期に存在したマグマオーシャンでの金属の液滴の落下を模した数値計算を行った。その結果、珪酸塩の熔融液体中において、金属の液滴が落下しつつ、分裂や衝突合体を行う様子が再現できた。計算結果をマグマオーシャン全体の鉄と珪酸塩の分離の問題に適用することにより、地球の中心核の形成にかかる時間をより正確に見積もることができるようになった。

研究成果の概要（英文）：The numerical code of multiphase flow was created and it was applied to the falling metal droplets in a magma ocean. The code can successfully calculate the system including interaction of many droplets in a silicate melt such as fragmentation and coalescence. By applying the calculation results to the whole magma ocean, the time scale of core formation of the earth can be more correctly estimated.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2010年度	800,000	240,000	1,040,000
2011年度	500,000	150,000	650,000
2012年度	500,000	150,000	650,000
年度			
年度			
総計	1,800,000	540,000	2,340,000

研究分野：数物系科学

科研費の分科・細目：地球惑星科学、固体地球惑星物理学

キーワード：火山現象・数値地球連続体力学

1. 研究開始当初の背景

(1) マグマやマグマオーシャンにおいて、粘性力が大きく、かつ表面張力が重要になる系で、数値誤差の少ない実用的な計算例はほとんどなかった。

(2) 地球科学では、物理量が空間上の固定された点に存在するオイラー的な計算手法が主に使われていたが、その手法では、相境界の移動に伴い生ずる数値誤差が大きく、長時間の時間積分を行うと、誤差が累積されてしまう。それに対し、計算点が流体とともに動くラグランジュ的な粒子法では、境界の移動に伴う誤差を劇的に少なくすることができ、長時間の時間積分が必要となる計算に向いている。その粒子法を用いた計算手法が最近地球科学にも適用されつつあった。

2. 研究の目的

(1) 固体、液体、気体を統一的に扱うことのできる粒子法に基づいた多相流流体計算コードを開発する。このコードは、弾性体への流体の貫入現象や溶岩流、マントルへの水の浸透現象、マグマオーシャンでの金属メルトと岩石メルトの分離などの計算が可能な汎用的なコードである。この作成したコードを用いて、マグマの中の気泡の核形成や合体、成長の問題を計算する。このコードの適用段階で、実験結果等と比較することにより、数値計算法をベンチマークしつつ、火山の噴火様式（爆発的か非爆発的か）の分岐の原因を明らかにする。

3. 研究の方法

(1) 粒子法による粘弾性体の気液混合流体計算コードを開発する。そのコードを用いると気泡核形成や、気泡同士の相互作用を扱う

ことができる。

(2) 適宜、ベンチマークを行い改良することによって、高い粘性率を持った媒質中での気泡や液滴同士の合体を、精度良く扱えるようにする。

(3) 火山のマグマや地球初期のマグマオーシャンを模した数値計算を行う。

4. 研究成果

(1) 多相流の数値計算コードの作成を行った。このコードは固体地球科学でよく用いられているオイラー的な手法ではなく、ラグランジュ的な手法である粒子法に基づいている。本研究で開発される粒子法による粘弾性流体のレオロジーを取り扱える多相流コードには様々な適用例が考えられる。オイラー的な計算法では計算が困難な問題として、例えば、マグマの中の気泡や、地球のコアの形成問題など粒子法に適した問題を扱うことができる。これまでのオイラー的な手法では、必然的に相境界に非物理的な数値拡散が生じてしまうが、粒子法を使うことにより、相境界の数値拡散を実質ゼロにすることができ、相境界をシャープに保ちながら長時間の計算をすることができる。従って、気泡や液滴の合体や成長を精度良く取り扱うことができる。その計算コードは、マグマオーシャンでの鉄とシリケートの分離を取り扱うために作成した多相流体用の計算コード[Ichikawa et al., 2010, JGR]を改良したもので、一般的な多相流体を取り扱える粒子法の計算コードを二種類開発した。これらのコードは表面張力や慣性力、粘性力を含む多相流体系を計算することができる。その二つのコードはそれぞれ、MPS法とSPHに基づいており、SPHのコードはEllero et al., 2002, JNNFMに従って、弾性体を含むマクスウェルの粘弾性流体への対応を可能にしている。数値的な不安定性は人工粘性で抑えることにより、液滴同士の合体も安定に計算ができるようになった（図1）。具体的には、フォン・ノイマンの人工粘性に少し改良を加えることにより、数値的に安定な計算を実現している。最後に、このコードのベンチマーク計算を行い、精度良く計算できていることが確かめられた。

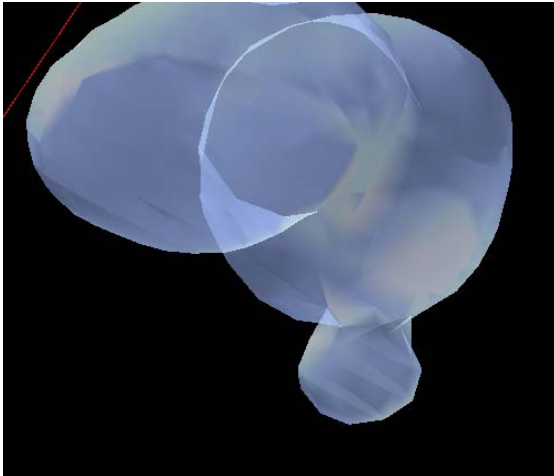


図1 三つの液滴が衝突合体する様子

(2) 開発したコードを用い、地球初期のマグマオーシャンでの金属の液滴の落下を模した数値計算を行った。シリケイトの液体中において、半径約1mmの金属の液滴を512個用意して、初期条件とし、定常状態となるまで、時間積分をした。金属の液滴が落下しつつ、衝突合体を行う、非常に複雑な流れを形成している様子が再現できた(図2)。

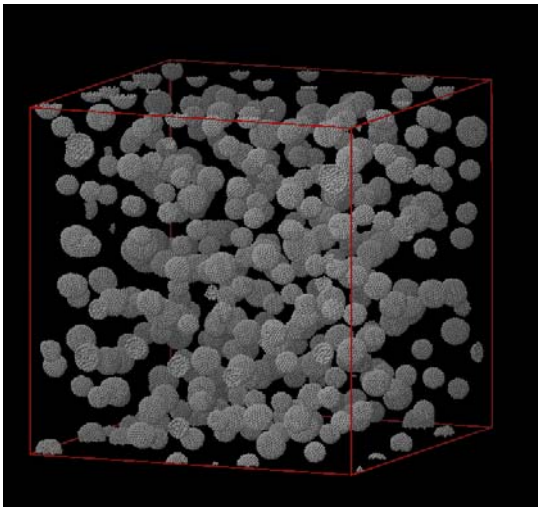


図2 初期状態で、512個の液滴を置いた数値計算

(3) その計算結果により、落下する微少な金属の液滴の合体にかかるタイムスケールを見積もることができるようになった。地球の材料物質であるコンドライトには微少な鉄の固まりが含まれているが、地球のマントルからは見つかっていない。このことから、微少な金属の液滴も中心核形成時にマントルから取り除かれたことが推察されている。その衝突合体のタイムスケールと液滴の落下速度やサ

イズの結果をマグマオーシャン全体における、金属メルトと珪酸塩メルトの分離の問題に適用することにより、地球の金属コアの形成に関わる重要なタイムスケールの一つをより正確に見積もることができるようになった。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 4 件)

- ① Hiroki Ichikawa, Masanori Kameyama, and Kenji Kawai, Mantle convection with continental drift and heat source around the mantle transition zone, Gondwana Research, 査読あり, in press, DOI: 10.1016/j.gr.2013.02.001
- ② Arata Miyauchi, Masanori Kameyama, and Hiroki Ichikawa, Linear stability analysis on the influences of the spatial variations in thermal conductivity and expansivity on the flow patterns of thermal convection with strongly temperature-dependent viscosity, Journal of Earth Science, 査読あり, in press
- ③ Hiroki Ichikawa, Kenji Kawai, Shinji Yamamoto, and Masanori Kameyama, Supply Rate of Continental Materials to the Deep Mantle through Subduction Channels, Tectonophysics, 査読有, 596, 2013, 46-52, DOI: 10.1016/j.tecto.2013.02.001
- ④ Masanori Kameyama, Hiroki Ichikawa, and Arata Miyauchi, A Linear Stability Analysis on the Onset of Thermal Convection of a Fluid with Strongly Temperature-dependent Viscosity in a Spherical Shell,

Theoretical and Computational Fluid Dynamics, Theoretical and Computational Fluid Dynamics, 査読有, 27, 2013, 21-40. DOI: 10.1007/s00162-011-0250-x

[学会発表] (計 9 件)

- ① Ichikawa, H., Kameyama, M., and Kawai, K., Mantle convection simulation with subducted continental materials as a heat source, Japan Geoscience Union Meeting 2013, 2013 年 5 月 19 日～2013 年 5 月 24 日, Chiba, Japan
- ② Ichikawa, H., Kameyama, M., and Kawai, K., Mantle convection simulation with heat source around the mantle transition zone, The 3rd Global-COE international symposium on Deep Earth Mineralogy in conjunction with TANDEM 2013, 2013 年 3 月 4 日～2013 年 3 月 6 日, Matsuyama, Japan
- ③ Ichikawa, H., Kameyama, M., and Kawai, K., Mantle convection with continental drift and heat source around the mantle transition zone, AGU Fall Meeting 2012, 2012 年 12 月 03 日～2012 年 12 月 7 日, San Francisco, CA, USA
- ④ Ichikawa, H., Kameyama, M., and Kawai, K. Contribution of heat source around the mantle transition zone on continental drift, Japan Geoscience Union Meeting 2012, 2012 年 5 月 20 日～2012 年 5 月 25 日, Chiba, Japan
- ⑤ Hiroki Ichikawa, Kenji Kawai, Shinji Yamamoto and Masanori Kameyama, Supply Rate of Continental Materials to the Deep Mantle, AGU fall meeting

2011, 2011 年 12 月 9 日, San Francisco, USA

- ⑥ 市川浩樹、河合研志、亀山真典、土屋卓、マントル深部へ沈み込む大陸地殻の量の推定、日本地球惑星科学連合 2011 年度連合大会、2011 年 5 月 23 日、千葉
- ⑦ Ichikawa, Labrosse, and Kameyama, Self consistent model of core formation and the effective metal-silicate partitioning, AGU fall meeting 2010, 2010 年 12 月 10 日, サンフランシスコ (アメリカ)
- ⑧ Ichikawa, Labrosse, and Kameyama, Self consistent model of core formation and the effective metal-silicate partitioning, Second TANDEM symposium, 2010 年 11 月 5 日, 武漢 (中国)
- ⑨ 市川、ラブロッセ、亀山、マグマオーシャン中での鉄、シリケイトの分離過程における熱と化学元素の分配過程のシミュレーション、日本地球惑星科学連合 2010 年度連合大会、2010 年 5 月 23 日、千葉

6. 研究組織

(1) 研究代表者

市川 浩樹 (ICHIKAWA HIROKI)

愛媛大学・地球深部ダイナミクス研究センター・グローバル COE 助教

研究者番号 : 50570503