

平成 22 年 6 月 7 日現在

研究種目：基盤研究（B）
 研究期間：2007 年度～2009 年度
 課題番号：19340124
 研究課題名（和文） マントルダイナミクスの新しい描像
 研究課題名（英文） New picture of mantle dynamics

研究代表者

栗田 敬（Kurita Kei）
 東京大学・地震研究所・教授
 研究者番号：00111451

研究成果の概要（和文）：

「地球のマントルの運動は上下境界に存在する熱的・組成的不均質によって駆動されている」というモデルを実験に基づいて示すことが本研究の目的である。地球のマントルには本質的な熱的な不均質性（局所化加熱）や組成的不均質性（境界層の地形）によって生じる対流運動があり、その中でグローバルな対流場とローカルな対流場（ブルーム）がどのような相互作用を行うか、という点に焦点を合わせて研究を行った。

研究成果の概要（英文）：

A new model:the dynamics of the Earth's mantle is driven by thermal/compositional heterogeneities existing in the upper/lower boundaries is proposed based on laboratory experiments on model mantle. The compositional heterogeneities control the global convective flow through actions of topography of the boundary layer. The thermal heterogeneities by localized heat source/heat transfer also control the global convective thermal field. The convective system in turn is responsible for generation of these heterogeneities. We have focused on how the interactions between these processes organize the system.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2007 年度	10,600,000	3,180,000	13,780,000
2008 年度	1,900,000	570,000	2,470,000
2009 年度	1,900,000	570,000	2,470,000
年度			
年度			
総計	14,400,000	4,320,000	18,720,000

研究分野：固体地球物理学

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：マントル対流、熱対流、組成対流、構造不均質、境界層、マントルトモグラフィ、ブルーム、自己組織化現象

1. 研究開始当初の背景
 現在のマントルダイナミクスモデルが抱えている最大の矛盾・問題点は対流の空間スケールに関する問題である。地震波トモグラフィ

イーが描き出すマンツルの対流は低次の空間波数が卓越する大規模な運動である。このような構造が示唆する Ra 数は 10^5 - 10^6 の領域にある。一方物性値等から予想されるマンツルでの Ra 数 (10^7 - 10^8) では期待される熱対流構造は高次の波数が卓越する小規模な乱流的なものである。この観測とモデルの間の不一致の原因が何であるのかは未だ統一的な解釈はない。また低次空間波数をもつトモグラフィ構造とホットスポット火山活動のようなきわめて高次の局所化構造が共存していることも既存のフレームワーク内では理解することができない。空間スケールに関するモデルと現実との不一致がマンツルダイナミクスに残された最大の謎であり、未だ我々が十分には理解していない要因が存在していることを示している。

2. 研究の目的

本研究ではこれらの矛盾を解決するものとして「**変形境界駆動型熱対流**」と言う新しい概念を導入し、マンツルダイナミクスに統合的な視点を導入することを目指している。

従来のレーリー・ベナル型対流では特徴的な空間構造は全くの自発的要因によって決まるものと考えられてきた。しかし地球のマンツルのような場では上下境界には大きな構造的な不均質（熱・組成）が存在し、それが対流構造を作り出す要因となっている。しかもその不均質構造は対流運動による火成活動（融解）や沈み込みにより作り出されたものであり、対流運動に本質的に内在したものである。明らかにすべき点は、

- 1) 水平・上下境界の不均質がどのような対流運動を作り出すのか？
- 2) 異なった空間波数を持つ対流構造がどのようなメカニズムで併存するのか？

これらを合理的なフレームワークの中で統合的に理解する道を探り、地球・惑星の進化の諸現象との関連を探る。

3. 研究の方法

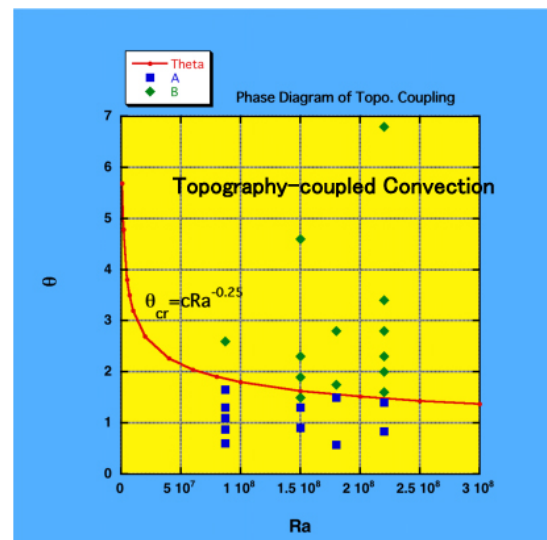
研究は室内実験とシミュレーションの手法に基づく。室内実験では粘性流体をもちいた対流実験において、温度場（感温液晶粒子可視化法）、速度場（PIV）、組成場（LIF）の同時マッピングシステムを開発した。これにより熱組成対流場の進化を定量的に追跡することが可能となった。また境界の不均質構造として作業流体よりもわずかに密度の大きな微細粒子を用い、対流運動と相互作用しダイナミックにその構造を変える「アクティブな境界層」を作り出すことに成功した[6]。このような実験条件設定により対流場を作り出す境界層と対流場の相互作用の観察が可能となった。実験計測計の開発・キャリブレーションは A.Davaille 教授（仏）の研究グループと共同で行った。シミュレーションでは融解の熱輸送への影響や粒子・粘性流体のサスペンション系の対流運動を記述する手法としての粒子法の開発を行った[4]。

ループと共同で行った。シミュレーションでは融解の熱輸送への影響や粒子・粘性流体のサスペンション系の対流運動を記述する手法としての粒子法の開発を行った[4]。

4. 研究成果

(1) サスペンション対流系の進化

モデル系として取り扱ったスチレンビーズ・粘性流体系では下部にスチレン粒子層が形成され、上部の対流系に対してアクティブな境界層の役割を果たす。この層内では熱は浸透対流として輸送され、境界での流体の運動によって粒子は移動させられて「地形」を形成する。この系を支配する無次元数は対流の活動度の指標である Ra 数と粒子の移動度の指標である Sh 数（シールド数）である。この組み合わせにより対流運動に応じてアクティブに反応する境界層の役割が変わる；小さな Sh 数・小さな Ra 数では境界層はリジッドで対流とのカップリングが起きない。対流の構造は境界層に状態によらずに、上部対流層の Ra 数におおじた空間波長を有する。大きな Sh 数・大きな Ra 数では粒子は対流により容易に移動させられ、熱構造に調和的な境界層が形成される。この時には対流の空間構造はおおきな Ra 数であるにもかかわらず長波長の構造が安定化される。

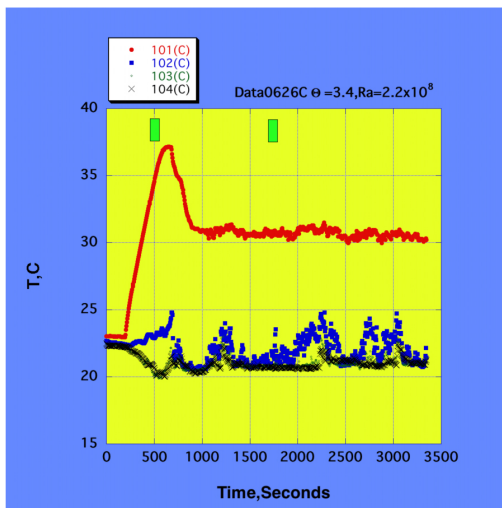


上図において縦軸は Sh 数、横軸 Ra 数の図中に対流運動の状態を記入したものであり、赤線よりも上の領域で境界の地形と対流構造がカップリングしている。

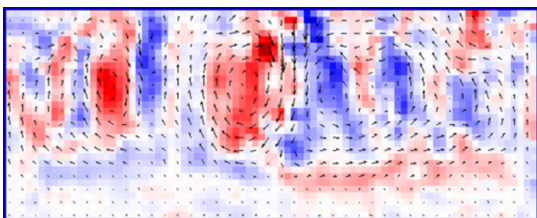
(2) 境界駆動型対流の構造進化

上記のダイアグラムで境界の地形と対流熱構造がカップリングする領域では、対流の熱的な進化は以下の2つの競合プロセスによって進む；①対流運動による境界層粒子の移動、それによる「地形」の形成、②境界層の「地形」と concordant な対流熱構造の形成。この2つのフィードバック系により、最終的に安定な長波長構造が維持される。

地球のマントルでは沈み込んだスラブが核・マントル境界に蓄積し、D''層を作り出す。過去の沈み込みの活動度を反映し、大きな地形の不均一を作り出していることが地震学的探査で明らかになっている。マントルでの Sh 数に対応する現象がどのようなものか、明らかではないがマントル Ra 数でスケールされる対流速度と密度差からは推定される Sh 数は十分大きな値を持つ。

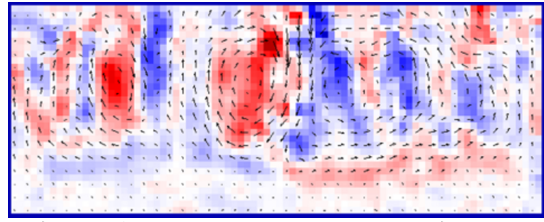


上図は境界層駆動型対流の温度場の時間発展を示したものであり、赤色は境界層下部の温度、青色は境界層上部の温度計測値である。境界層の上部が何度も崩壊/形成を繰り返し、構造が決まっていく過程を示している。1750秒後の時点での PIV 法で決定した流れ場の



様子を上図に示す。

この条件下では Ra 数は 10^8 以上の大きなものであるが、流れ場は容器全体を巻き込んだ

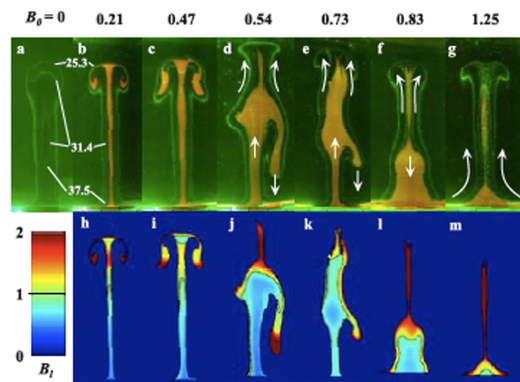


長波長構造が出現している。これは境界層の崩壊・再構築が起きる以前の短波長成分が卓越した状態（上図）と対照的である。

上図は境界層の崩壊直前の流れ場（500秒後）、対流場は短波長の複数のセルから成っている。

(3) 熱組成プルームの構造と進化

境界層の温度場不均質がどのように対流運動に結びつくのかを明らかにするために熱組成プルームの進化を明らかにした。また密度（粘性）境界とどのような相互作用を行うかという点にも注目をした。下部境界の組成構造（組成に起因する密度構造）に応じて様々な熱組成プルームが形成されることが明らかになった。興味深いのはその進化であり、過剰な温度異常に起因する浮力が上昇過程の冷却でプルームの分解（上昇する熱プルームと下降する組成プルーム）が生じる点である。このようなものはマントルにも存在する可能性があり、地震波トモグラフィーでみると下降する組成プルームが最大のコントラストを有するので、目立つ存在である。現在我々がトモグラフィー的に認識しているプルームは下降しているものかも知れないという結果は衝撃的で、AGU Fall Meetingなどで Invited Talk, GRL の Highlight Paper に



選ばれた。

図は様々な buoyancy factor, Bu を有したプルームの進化/形状の違いを示している。赤色部は下部境界に置かれた大きな密度を有する液体相 (LIF により発色して可視化されている)、白色のラインが感温液晶による等温線である。上昇の過程で温度場と組成場の乖離が生じていることがわかる [4], [5]。

(4) 地球・惑星のマントルの進化への応用
このような対流による熱輸送は地球や惑星の熱・構造進化をコントロールしてきた。その例を地球初期マントルにおける鉄・シリケート分離過程（コア形成イベント）[1]、アイスランドプルームの構造[5]、ガニメデのマントルの熱輸送とコアの冷却保護[2]、火星のマグマ活動[3] などの理解に応用した。

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 15 件)

[1] Ichikawa, H., K. Kurita and S. Labrosse, Direct numerical simulation of iron rain in the magma ocean, *J. Geophys. Res.* 116, B01404, 2010 (査読有り)

[2] J. Kimura, K. Kurita and T. Nakagawa, Size and compositional constraints on Ganymede's metallic core for driving an active dynamo, *Icarus* 202, 216-224, 2009 (査読有り)

[3] Vaucher, J., D. Baratoux, Mangold, P. Pinet, K. Kurita and Gregoire, The volcanic history of central Elysium Planitia: implications for martian volcanism, *Icarus* 204, 418-442, 2009 (査読有り)

[4] 熊谷一郎, 栗田敬, A. Davaille, 流体実験から観たマントルプルームの多様性, 日本流体力学会誌 28, 421-430, 2009 (査読有り)

[5] Kumagai, I., A. Davaille, K. Kurita and E. Stutzmann, Mantle plumes: thin, fast, successful or failing?, constraints to explain hot spot volcanism through time and space, *Geophys. Res. Lett.*, 35, L16301, 2008 (査読有り)

[6] S. Takashima & K. Kurita, Permeability of granular aggregate of soft gel, *Earth Planet. Sci. Lett.*, 267, 83-92, 2008 (査読有り)

[7] Kumagai, I., A. Davaille & K. Kurita, On the fate of thermally buoyant mantle plumes at density interface, *Earth Planet. Sci. Lett.*, 254, 180-193, 2007 (査読有り)

[学会発表] (計 12 件)

K. Kurita and I. Kumagai, Boundary-modulated thermal convection model in the Earth's mantle, AGU Fall

Meeting, GP43A-0792, 2008.12.12

I. Kumagai, A. Davaille, E. Stutzmann and K. Kurita, Delivery system in the Earth's mantle: fluid dynamic modeling of thermochemical plumes, AGU Fall meeting San Francisco GP34A-04 Invited 2008.12.10

6. 研究組織

(1) 研究代表者

栗田 敬 (Kurita Kei)
東京大学・地震研究所・教授
研究者番号: 00111451

(2) 研究分担者

なし

(3) 研究協力者

実験的研究
熊谷 一郎
FAST, Orsay, France PostDoc Researcher
(現在: 北海道大学工学系・任期付き研究員)
Anne Davaille
FAST, Orsay, France 教授

シミュレーション、他
Stephane Labrosse
ENS de Lyon, France, 教授

David Baratoux
MPO, Toulouse, France, 准教授

市川 浩樹
ENS de Lyon, France, PostDoc Researcher
(現在 愛媛大学・GCOE 研究員)