

令和 5 年 6 月 18 日現在

機関番号：32685

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2020～2022

課題番号：20K04114

研究課題名(和文) 液体金属対流の定量可視化実験から見た地球流体核における熱物質輸送

研究課題名(英文) Heat and mass transport process in the Earth's liquid core viewed from quantitative visualization experiments of thermal convection in a liquid metal layer

研究代表者

熊谷 一郎 (Kumagai, Ichiro)

明星大学・理工学部・教授

研究者番号：50597680

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,300,000円

研究成果の概要(和文)：地球流体核内部の熱物質輸送を理解するため、液体金属を用いたレイリー・ベナール対流実験を行った。本研究では、定量的な温度場と速度場を得るため、準2次元的な液体金属層の表面の2次元温度場と流体層内部の1次元速度場について、感温液晶シートと超音波流速分布計を用いた定量可視化実験を行った。その結果、対流パターンはRa数に大きく依存することが明らかになった。低Ra数では、流体層全域を定期的に循環する流れが観察されたが、Ra数の増加と共に上昇および下降するブルームの相互干渉によって、流れ場の周期変動が現れ、やがて非周期的な流れ場へと変化することが明らかになった。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究では、液体金属対流の2次元温度場について感温液晶シートを用いることで可視化し、また複数のUVPによる速度場計測と組み合わせることで、液体金属対流の速度場についても同時に可視化することに成功した。これにより、Prandtl数(Pr数)が1よりも十分小さな領域における対流場の変遷(Rayleigh数の増加に伴う定常的な流れから、周期性、非定常性の出現に至るまでの変遷)が明らかになった。これらの結果は、Pr数が1以上の流体で得られた現象とは異なり、低Pr数領域の熱対流による熱物質輸送の理解に役立つ成果である。工学的な応用分野においても、質の良い金属結晶の生成の際、本研究の知見が重要となる。

研究成果の概要(英文)：We have conducted Rayleigh-Benard convection experiments in a liquid metal layer at high Ra numbers aimed at understanding heat and mass transport in the Earth's fluid core. In this study, the two-dimensional temperature field on the surface of a quasi-two-dimensional liquid metal layer was obtained by a sheet of TLCs (thermochromic liquid crystals) and velocity fields inside the fluid layer were analyzed by UVPs (Ultrasonic velocity profiling). Our quantitative visualization techniques have revealed that the convective pattern strongly depends on the Ra number. While a steady circulating flow is observed at low Ra numbers, periodic oscillation of convection pattern is observed at the higher Ra numbers due to interactions between hot and cold plumes, and at the same time the irregularity of the convective motion increases with the Rayleigh number.

研究分野：地球惑星科学

キーワード：可視化 液体金属 熱対流 超音波流速分布計 感温液晶 地球 外核

### 1. 研究開始当初の背景

地球の外殻は液体金属で構成されており、水よりも運動学的にサラサラ（動粘性係数が小さい）である。液体金属の対流は磁場の発生や変動特性と密接な関係があると考えられ、我々の生活にも大きな影響を与えているが、活発な対流運動ともなう複雑な流れに対する我々の理解は十分ではなかった。その理解を妨げている最も大きな原因は、単純に、液体金属対流の様子が我々の目に見えないため、熱対流現象の実態を直感的に掴みにくいことにある。従って、液体金属の流れの「物理」を理解するための可視化実験の進展が国内外で強く望まれていた。これまで、液体金属対流実験の多くは、サーミスタなどを用いた点計測によって系全体の熱輸送量や乱流スペクトルを調べたものがほとんどであったため、対流構造や熱輸送を担うプルームなどの挙動に関する知見に乏しく、外核における流れの物理の理解を遅らせてきた。

### 2. 研究の目的

本研究は、流体工学分野の高度な可視化技術を導入することによって、液体金属対流の2次元温度場と速度場を定量的に可視化することを目的とした。そして、低プラントル数（低  $Pr$  数）流体の熱対流現象の物理を理解し、地球流体核の熱物質輸送に関し、流体力学的な新たな視点を与えることを目的とする。

### 3. 研究の方法

図1に実験装置の概略を示す(田坂・熊谷, 2023)。透明な薄型矩形水槽（高さ200 mm, 幅200 mm, 奥行約6 mm）に液体金属（液体ガリウム： $Pr \sim 0.03$ , 融点 $\sim 30^\circ\text{C}$ ）を満し、恒温循環水槽を用いて上部冷却、下部加熱のレイリー・ベナール対流の実験を行った。液体金属の流体層表面の温度場を計測するために、矩形水槽の内壁に防水処理を施した感温液晶シート（日本カプセルプロダクツ社製）を設置した。前方右斜め27度から白色パネルによって液晶シートを照らし、水槽正面からデジタルカメラで撮影した。液体金属内部の速度場の計測には、超音波流速分布計（UVP）を用いた。2つの超音波トランスデューサーを水槽の上部と下部にそれぞれ設置し、流体層上下の熱境界層付近の水平方向の速度分布を計測した。実験では、上下の温度差 $\Delta T$ を変えて以下に定義したRayleigh数を変化させた。

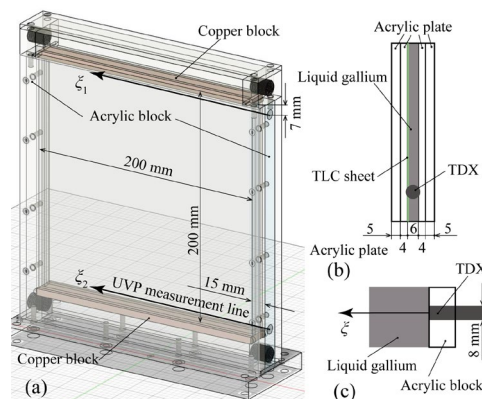


図1. 実験装置概要 (田坂・熊谷, 2003)

$$Ra = g\alpha\Delta TH^3/\kappa\nu$$

ここで  $g$ ,  $\alpha$ ,  $H$ ,  $\kappa$ ,  $\nu$  は、それぞれ、重力加速度、流体の熱膨張率、流体層の高さ、流体の熱拡散係数と動粘性係数である。本実験は、 $Ra = 4.2 \times 10^6$  から  $1.4 \times 10^7$  の範囲で行った。

### 4. 研究成果

図2に、発色温度域が  $35 \sim 40^\circ\text{C}$  の感温シートで可視化された瞬時温度場の結果例を示す。上下の温度差 $\Delta T$ の違い（ $Ra$ 数の違い）によって、対流パターンに違いが認められる。最も温度差が小さい図2(a)の場合（ $\Delta T = 1.6^\circ\text{C}$ ）、対流層の右の壁側に高温域（青色に発色）、左側の壁際に低温域（赤色に発色）があり、左回りの1つの定常的な対流セルとなっている。他方、図2(b)-(d)では、対流層下部の両端の壁際に高温域があり、対流層の上部の両壁際には低温部が存在する。これらの場合には、壁際に相対する上下のプルームがせめぎ合っており、対流パターンの振動現象が観察された。

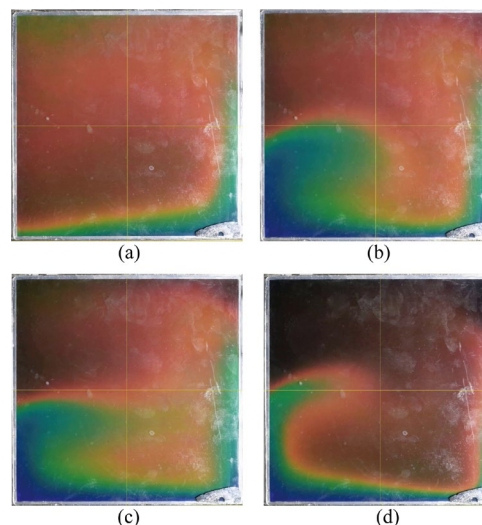


図2. 感温液晶シートによる液体金属対流層の温度場の可視化例: (a)  $\Delta T = 1.6^\circ\text{C}$ , (b)  $3.3^\circ\text{C}$ , (c)  $4.7^\circ\text{C}$ , (d)  $5.5^\circ\text{C}$ . (田坂・熊谷, 2003)

図3は、図2で撮影された動画の鉛直中央1ピクセルを時間方向に並べた時空間展開画像である。  $Ra$  数が低い図3(a)の実験 ( $\Delta T = 1.6^\circ\text{C}$ ) では、時間変化のない定常的な温度場になっていることがわかる。一方、  $Ra$  数が増加すると ( $\Delta T = 3.3^\circ\text{C}$ )、図3(b)のように、周期的な振動現象が生じていることがわかる。この例の場合、約700秒の間に5回の振動現象が生じている。この振動現象の周波数は  $Ra$  数の増加とともに高くなるとともに、不規則性も顕著になってくる (図3(c),  $\Delta T = 4.7^\circ\text{C}$ )。

一方、超音波流速分布計による流体層内の速度場計測については、感温液晶で得られた温度場の結果と整合的な結果が得られている。例えば、図4は流体層内部の速度変動のスペクトルを示した結果であるが、最も  $Ra$  数の小さい実験では、特徴的な周波数成分が見られず、ノイズに対応した低レベルの速度変動が幅広い範囲で見られている。一方、図3(b)の周期的な温度場の変動が見られた実験では、周波数  $f = 0.015\text{ Hz}$  (周期 68 sec) の特徴的なピークが得られた。この周波数は、先ほどの温度場の変動周波数の約2倍程度となっている。また、これより高  $Ra$  数の場合 ( $\Delta T = 4.7^\circ\text{C}$ ) には、特徴的な周波数のピークが高周波側にシフトするとともに、スペクトルがブロードになっていることがわかる。これらの結果についても、先の温度場の画像解析結果と整合的となっている。

以上、本研究によって、液体金属対流の2次元温度場の可視化実験に成功した。  $Ra$  数の増加とともに、定常的な対流から周期的な対流場の振動現象が出現した。また  $Ra$  数が高くなるにつれて、不規則で非定常的な流れに遷移していくことが明らかになった。

#### 【参考文献】

田坂裕司・熊谷一郎，感温液晶と超音波流速分布計による準二次元液体金属層熱対流の可視化，可視化情報シンポジウム2023，講演論文集。

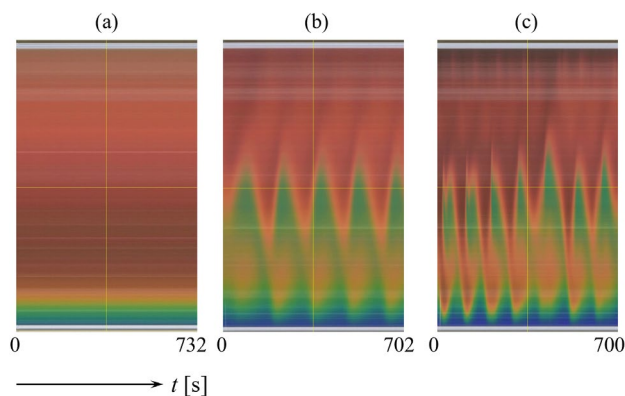


図3. 流体層の中心における鉛直方向の時空間展開画像：(a)  $\Delta T = 1.6^\circ\text{C}$ , (b)  $3.3^\circ\text{C}$ , (c)  $4.7^\circ\text{C}$ . (田坂・熊谷, 2003)

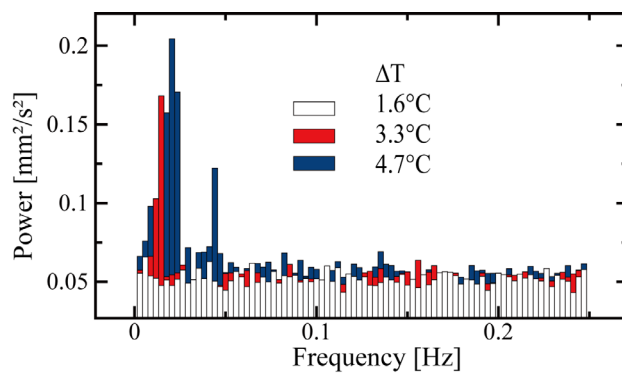


図4. 流体内部の速度変動のスペクトル (田坂・熊谷, 2003)

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計2件（うち査読付論文 1件/うち国際共著 1件/うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Sgreva, N.R., Davaille, A., Kumagai, I., and Kurita K.	4. 巻 284
2. 論文標題 Interaction between a falling sphere and the structure of a non-Newtonian yield-stress fluid	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics	6. 最初と最後の頁 104355 ~ 104355
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1016/j.jnnfm.2020.104355	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 熊谷 一郎, 市原 美恵, 久利 美和, 栗田 敬	4. 巻 34
2. 論文標題 地球惑星科学の混相流	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 混相流	6. 最初と最後の頁 389-394
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計6件（うち招待講演 1件/うち国際学会 3件）

1. 発表者名 熊谷一郎
2. 発表標題 密度成層中における熱組成ブルームの形成過程
3. 学会等名 日本流体力学会年会 2021
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Sgreva, N.R., Davaille, A., Kumagai, I., and Kurita K.
2. 発表標題 Probing the characteristics of mush-magma transition: insights from laboratory experiments
3. 学会等名 EGU General Assembly 2020（国際学会）
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Davaille, A., Romanowicz, B.A., Kumagai, I., and Kurita, K.
2. 発表標題 Deflating the LLSVPs: bundles of mantle thermochemical hot instabilities rather than thick stagnant "piles"
3. 学会等名 AGU Fall Meeting 2020 (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 田坂裕司、熊谷一郎
2. 発表標題 感温液晶と超音波流速分布計による 準二次元液体金属層熱対流の可視化
3. 学会等名 第51回可視化情報シンポジウム
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 熊谷一郎、赤井俊哉、栗田敬
2. 発表標題 吸水性ゲル粒子を用いた非ニュートン流体中を落下する球体の相互作用に関する実験
3. 学会等名 日本流体力学会 年会2022
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Ichiro Kumagai, Shuya Akai, Kei Kurita
2. 発表標題 Irregular motion of a falling sphere in a hydrogel suspension
3. 学会等名 The 10th Academic Exchange and Cooperative Research Symposium (AECOR-X) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2023年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究 分担者	田坂 裕司  (Tasaka Yuji)  (00419946)	北海道大学・工学研究院・准教授   (10101)	
研究 分担者	益子 岳史  (Mashiko Takashi)  (70415917)	静岡大学・工学部・准教授   (13801)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------