

## 多層構造における熱対流パターンの時間発展

### The time evolution of convection pattern in layered system

# 柳澤 孝寿[1], 栗田 敬[2]

# Takatoshi Yanagisawa[1], Kei Kurita[2]

[1] 東大・理・地球惑星物理, [2] 東大・地球惑星

[1] Earth and Planetary Phys., Univ. of Tokyo, [2] Dep. Earth & Planet. Phys., Univ. of Tokyo

地球・惑星のマントルやコア,あるいはマグマ溜まり等では,重なり合った対流層という構造とその進化に関わる現象が重要である.このような構造のダイナミクスを探るため,グリセリン水溶液の濃度差で二層あるいは三層に成層させた熱対流層の時間発展を室内実験により調べた.互いに混じり合う流体なので最終的には全層の対流になるが,混合の途中段階で各層の対流パターンはその結合形態を変化させていき,同時に層間の物質輸送量も変化することが観察された.初期のレーリー数を増加させると層構造の崩壊までに要する時間は系統的に短くなることがわかった.

地球・惑星のマントルやコア,あるいはマグマ溜まり等では,上下に重なった熱対流層という構造とその進化に関わる現象が重要である.例として,マントルでは上部マントルと下部マントルとの関係,コアでは軽元素に富んだ層の役割,マグマ溜まりでは組成の分化や異なるマグマの流入,というような現象があげられる.本研究では上下温度差を固定した混じる液体の多層系で実験を行い対流パターンの結合状態と組成の時間的な変化を調べた.温度差を与え続けるので熱的な不安定による流れは常に生じており,その状況で各層の組成がどのように一様化されるかということに着目する.ここで扱うのは地球・惑星の内部ダイナミクスへ適用するための比較的高粘性つまり高プラントル数での現象である.実験系の特徴としては側壁に影響されない対流パターンを観察するため,容器の横幅を十分大きくとってある.

実験に用いた容器は側面がアクリル製で上下の加熱冷却面は金属製であり,サイズは横500mm・奥行き30mm,高さは調節可能となっている.対流させる流体にはグリセリン水溶液を用い,その濃度の差によって成層構造を作る.この実験でのレイ数 $100$ 程度,プラントル数は $10 \sim 100$ 程度である.つまり温度の拡散は濃度の拡散より十分速く,運動量の拡散は温度の拡散より速い系ということになる.まず一様な温度の条件で,上下層がなるべく混じらないように静かに初期の層構造を作り,実験の開始とともに上下面に温度差を与える.実験開始時には上下層の液体の濃度差による密度差は熱膨張による密度低下より十分に大きいので,界面を越えての上昇・下降運動は妨げられ,各層で完全に分離した対流セルが形成される.時間の経過とともに,界面を通しての物質交換により,徐々に濃度差が小さくなっていく.そしてある段階から全層の熱対流に遷移し,最終的に系は一様な濃度を持った対流構造に落ち着く.このように進化していく系で,温度・流速・濃度・界面の形状などの時間的変動を計測した.

一般に上下層の対流パターンの関係としては熱的結合および力学的結合がある.実験で観察された重要な点是对流パターンの結合様式が系の進化とともに変化していくことであり,典型的には以下のような3つのステージを経過して最終的に一層の対流に至る.

(1) 上下面の加熱冷却を開始すると各層内で対流運動が生じる.上下の対流層は相互作用をしながら,それぞれの上昇流同士・下降流同士が同じ位置にくる熱的結合の状態になる.二層の界面に形成される境界層は比較的厚い.そのため界面での水平流間の相互作用は小さい.このような結合状態は長時間継続し,境界面を通しての拡散により濃度差は徐々に小さくなる.

(2) 上下層の熱的結合の状態が解けて,界面での流れの方向が同じである力学的結合の状態が見られるようになる.二層界面の境界層は薄くなっていて,力学的結合状態にある部分では上下層の水平流速はほぼ同程度である.そのため界面での速度勾配は非常に小さい.

(3) 前2つのステージと比べて短時間であるが,再び上下層の熱的結合状態となり,界面には層厚の1割程度の振幅をもつ凹凸ができる.混合が活発に起き,濃度差は急速に小さくなる.さらに,

高粘性の場合: 界面の凹凸は振動せずに固定された場所でゆっくりと大きくなり,そのまま上下の境界まで達する.凹凸の成長する速さは対流の垂直流速よりは遅い.

低粘性の場合: 復元力が働いて界面は振動し,伝搬する波動現象が観察される.上下動の速さは対流の垂直流速と同程度である.

(4) どちらの場合もこの後に短時間で全層の熱対流に遷移して,層構造の消滅後まで残されていた小規模な濃度の不均質は,活発な対流により一様化される.

この系には全層対流に崩壊するまで定常状態というのは存在しない.各ステージを通して時間の進行とともに対流流速は増大し,温度の変動周期は短くなり,また濃度の時間変化量も大きくなる.これらは層構造崩壊に向けて対流運動が活発化すること,すなわち各層の実質的なレーリー数が増加することを意味している.一方,用い

る水溶液の粘性率を変えて初期状態のレーリー数を増加させると、同じ初期密度差の成層においても崩壊までに要する時間は短縮された。ここで見られるような層構造の寿命は、二重拡散による中間境界層の成長時間および、温度と組成の差を浮力源とする対流運動による混合、の両者を考慮することで説明できることがわかった。