

粘性差が大きい2成分混合系の対流

小林 和也 〈首都大学東京大学院理工学研究科 kobayashi-kazuya1@ed.tmu.ac.jp〉

栗田 玲 〈首都大学東京大学院理学研究科 kurita@tmu.ac.jp〉

温度勾配によって駆動される流体の流れは自然界においてよく見られる現象である。特に対流現象はその代表例であり、日常的なプロセスから海洋、大気、地球内部のマントルに至るまで、様々な分野と密接に関わっている。水平な流体層を下面から加熱した時、上面・下面の流体に密度差が生じ、浮力が粘性応力に打ち勝つことによって対流が発生する。このような対流はレイリー・ベナル対流と呼ばれ、これまでに様々な研究が理論的・実験的に行われている。レイリー・ベナル対流の発生や分岐・遷移現象は、熱輸送現象を特徴づける無次元数であるレイリー数 Ra の変化によって記述される。レイリー数が小さい時は熱伝導によって熱が上面から放出されるが、臨界レイリー数を超え、レイリー数が大きくなっていくと、規則的なロールパターン形成、その崩壊と不規則な流動、カオス・乱流のように流動状態が遷移する。このような分岐現象、時間的振動、カオス・乱流現象などにおいて、今日までの研究の進展は大変めざましく、様々なメカニズムが解き明かされている。

ここで作動流体が2成分混合系となった場合、その対流現象は1成分系とは異なり、より複雑化する。2成分系の代表例は食塩水やエタノール・水混合系であり、その対流現象は二重拡散対流とも呼ばれている。1成分系と大きく異なる点として、ソレー効果と呼ばれる温度勾配による濃度輸送が起こる。この上下境界間の温度勾配によるソレー効果によって、上下方向に濃度勾配が形成され、この濃度差が浮力に影響を与える。軽い成分が高温側（下面側）に移動される場合、浮力と同方向に輸送が起こり不安定化が促進されるため、対流は起きや

すくなる。逆の場合には浮力と逆方向への輸送のため対流が起きにくくなる。従って、この効果は臨界レイリー数に大きく影響を与えることがわかる。このようなソレー効果の対流現象への影響は分離比と呼ばれるパラメータによって結ばれる。ソレー効果が伴う2成分系対流は、臨界レイリー数についてはよく理解されているが、定常状態や乱流についてはまだ十分理解されているとは言えない状態であり、現在も研究が行われている。

さて、一般的に非平衡現象においてエネルギー散逸は重要な役割を果たしている。対流においても粘性によるエネルギー散逸が深く関わっている。そこで、混合する2成分間に運動性の違いがある場合における対流現象に着目して、粘性の濃度依存性がある場合の対流現象を明らかにするために実験研究を行った。筆者らは、臨界レイリー数直上において、対流形成初期では1成分系で知られているようなロール対流中に流れが過渡的になくなるという“過渡的停滞領域” (Transient Stagnant Domain, TSD) が形成されることを発見した。さらに、様々な物質の組み合わせで調べたところ、このTSDは前述のソレー効果の影響ではなく、2成分間の粘性差が大きい時にだけ起こるということを見出した。このような対流中における“過渡的停滞領域形成”は1成分系ではもちろん、他の2成分系でも報告されていない新奇な現象である。本研究では2成分間に粘性差がある作動流体に対して、臨界レイリー数近傍の定常ロール領域に着目し観察を行った。今後の研究発展として、同様の系がカオス・乱流領域においてどのような振る舞いを示すかは興味深い対象となるであろう。

—Keywords—

レイリー・ベナル対流：
重力方向に対して流体層に温度勾配をかけた時、上面および下面との間で密度差が形成され、レイリー数がある臨界値を超えた時に浮力が粘性に打ち勝ち流れが生じる現象。六角形の美しいセルパターンを形成することは有名であり、お味噌汁や雲の模様などは典型例として知られている。

エネルギー散逸最小原理：
流体において、速度の空間勾配に応じて、粘性によってエネルギーが散逸される。非平衡現象の変分原理において、散逸は重要な役割を果たす。

過渡的停滞領域：
対流中において、特に上昇流付近に形成される、一時的に流れが消滅して停滞する領域。この領域が形成されることによって、速度場や温度場の変動が引き起こされる。

ソレー効果：
混合溶液系に外場として温度勾配を作用した時、その温度勾配を駆動力とする物質の拡散によって安定的な濃度勾配が形成される現象。ロードヴィッチ・ソレー効果と呼ばれる場合もある。