

## 【学位論文審査の要旨】

### 1. 研究の目的

二枚の平行平板間に流体を満たし、底面を加熱、上面を冷却した場合、上下に密度差が生じ、ある条件を超えると対流が生じる。このように発生する対流はレイリー・ベナール対流と呼ばれ、1成分系においては浮力と粘性の比に対応するレイリー数をパラメータとして、臨界レイリー数を超えると伝導状態から対流に変化する。さらにレイリー数を大きくしていくと、振動パターン、カオス、乱流へと流動状態が遷移することが解っており、また対流の理論的な理解もかなり進み、多くの現象が明らかにされてきている。

しかしながら、作動流体が2成分系における場合、この非平衡現象は一気に複雑化する。代表的な2成分混合系における対流は食塩水やエタノール・水混合系であり、このような系では対流形成の閾値である臨界レイリー数が1成分系とは異なることが知られている。これは、温度勾配によって濃度輸送（ソレー効果）が起こるためであり、上下の温度勾配によって上下方向に濃度勾配が形成され、2成分の密度差が浮力項に影響を与える。ソレー効果によって、軽い成分が高温側に行きやすい場合、大きな密度差が誘起される。そのため、不安定化が促進され、対流は起きやすくなる。一方、逆の場合は、不安定化が抑制され、臨界レイリー数は大きくなる。このような密度の温度依存性と濃度依存性の競合は、分離比というレイリー数とは異なるパラメータによって臨界レイリー数の変化が記述されている。しかしながら、定常状態や乱流についてはまだ完全に理解されているとは言えない。

さらに、混合する2成分間には、密度以外にも粘性など色々な物理量に差が生じる。特に、粘性は非平衡現象に重要なエネルギー散逸に関わっており、重要なパラメータである。濃度差に対する対流現象の研究も多くはないが、粘性差に着目した対流現象の研究例はほとんどなく、対流現象への影響は明らかになっていない。申請者は2成分間の粘性差が対流挙動へ及ぼす影響を明らかにすることを目的として研究を行ってきた。

### 2. 研究の方法および結果

対流を観察するセルは（横幅，奥行き，高さ）=（56 mm, 2.4 mm, 12 mm）のガラス製容器を用いた。この容器は奥行き方向の厚みを薄くした Hele-Shaw セルであり、これによって渦の構造や流れを正確に解析できる。下面はガラスヒーター(S100, Blast Co.)によって加熱し、上面は空冷した。対流による流動場は流れに対して追従性の良い粒子（トレーサー粒子）を液体内部に注入することで可視化を行った。申請者はトレーサー粒子として、アルミニウム粉末およびラテックス粒子を用い、作動流体に応じて使い分けた。温度場の定量的解析には温感液晶マイクロカプセル（日本カプセルプロダクツ）を用いた。この粒子はトレーサー粒子としての役割も同時に果たすことができるため、温度場だけでなく速度場の可視化も同時に行うことができる。

シリンドリカルレンズを通してシート光をセルの上面から照射し、切り出された断面にお

けるトレーサー粒子により可視化された流動場をデジタルカメラ (Model HC-V520M, Panasonic Co.)で 1 秒ごとに記録した。これらのデータから、PIV 解析(Particle image velocimetry : 粒子画像流速測定法)のプログラムを自作して速度の定量的解析を行った。

申請者は、まず、ゼラチンというある温度以下に冷却すると、ゲル状態に転移する物質の対流を調べた。系の内部にゾルゲル転移温度が存在するとき、ロール対流が形成後、局所的に流れが消失し、その空間の影響によって全体の流れがなくなる現象を見出した。さらに、その後は系が不安定化し、元のロール対流に戻っていくという、熱対流・熱伝導の過渡的遷移が繰り返し起こることを見出した。流れがなくなる空間の形成を過渡的停滞領域 (Transient Stagnant Domain : TSD) と名付け、この形成機構に着目した研究を次に進めることになった。

申請者は、TSD の形成の普遍性を調べるため、ゼラチン以外の物質における対流を調べた。物理ゲルはゾルゲル転移近傍で粘性の温度変化が大きいことに着目し、同じく粘性の温度依存性が強いゴールデンシロップ、グリセロールを用いて対流を調べた。実験のしやすさのため、ゴールデンシロップは水で希釈した。対流を観察したところ、ゴールデンシロップではゼラチンと同様に TSD が形成されることを見出した。ゴールデンシロップは、粘弾性流体のゼラチンと異なり、単純流体 (ニュートン流体) であり、TSD の形成はゼラチン特有の現象ではなく、普遍的に起こり得る現象であることを示唆している。一方、グリセロールでは、TSD の形成は見られず、単純に粘性の温度依存性だけでは、TSD が起こらないことが分かった。

そこで、申請者は、ゴールデンシロップは水で希釈した 2 成分系であることに着目した。2 成分系の場合、1 成分系と異なり、密度以外に濃度の変数が存在する。ゼラチンやゴールデンシロップ溶液は、粘性が濃度に強く依存する系になっている。そこで、申請者は粘性が濃度に強く依存する場合の対流を調べた。まず、グリセロールを水で希釈したところ、TSD が起こることを見出した。さらに、粘性の大きく異なるシリコンオイルを混合したところ、同様に TSD が形成された。シリコンオイルは粘性の温度依存性が小さく、前述の粘性の温度依存性は重要ではないという結果を支持している。さらに、申請者は粘性があまり変わらないシリコンオイル混合系や水・エタノール混合系、粘性の濃度依存性が小さい組成比など、様々な条件で実験を行った。その結果、粘性の濃度依存性が大きい系の対流では、臨界レイリー数付近において、TSD が普遍的に起こることを実験的に見出した。さらに、申請者はこの現象において、これまで研究の主流であったソレー効果は重要でないことも示した。申請者は対流現象における粘性の濃度依存性を示し、カオスや乱流といった状況における熱輸送ダイナミクスにおいて、粘性の濃度依存性の効果など今後の発展性が大きく期待できる成果をあげた。

### 3. 審査の結果

申請者は、ゼラチンの対流の観察から“過渡的停滞領域 (TSD)” の形成という新しい現象

を発見し、その現象が粘性の濃度依存性が強い系において普遍的に見られることを実験的に示した。

まず、申請者は、対流の可視化装置をゼロから組み立て、解析手法も市販の高価なプログラムを使用せずに、自分で理解した上でプログラムを作成した。そのため、実験の本質的な理解、高い技術力を身につけるとともに、自由度の高い実験が可能となった。この自由度の高さは、申請者の成果に深く結びついている。

次に、申請者は、ゼラチン溶液における熱対流・熱伝導の過渡的遷移現象が、TSD 形成によることを見出し、その TSD 形成の起源を実験的に解明することに尽力した。対流現象は非平衡・非線形現象であり、様々な要素が複雑に絡み合っている難しい系である。一般的に、そういった状況において重要なパラメータを見つけるためには、実験技術だけではなく、深い考察や他の非平衡現象の基礎知識などの基礎力が必要である。申請者は、TSD 形成をゼラチンで発見したことから、ゼラチンの特性から他の物質でおこる可能性を考えて物質の選択を行い、TSD 形成を見出した。さらに、TSD が形成される条件として、粘性の温度依存性を考え、その可能性を否定する実験結果を得た。ここで、申請者は対流現象は非平衡現象の典型例であり、2成分系の非平衡現象では粘性が重要であることに着眼した。この着想には、“ずり誘導相分離”や“粘弾性相分離”といった他の非平衡現象を参照しており、自分の分野だけでなく、他の分野を取り入れる柔軟性を申請者が有していることを示している。この着眼点は、TSD 形成の解明を大きく進めることとなり、粘性の濃度依存性が強い系では普遍的に TSD 形成が起こることを示す結果につながった。

申請者は2成分系の対流現象において粘性の濃度依存性が重要であることを明らかにし、カオスや乱流といった状況における熱輸送ダイナミクスにおいて、粘性の濃度依存性の効果など今後の発展性が大きく期待できる成果をあげた。また、これらの成果は、申請者の地道な努力や高い実験技術だけでなく、知識力や、可能性を考察し、実験で確かめるという研究プロセスにおいても研究者としての基礎力が高いことを示しており、高く評価できる。

以上の結果、本論文は博士（理学）の学位に充分値するものと判定した。

#### 4. 試験および試問の結果

本学の学位規定にしたがって、最終試験を行った。公開の席上で論文内容の発表を行い、物理学専攻教員による質疑応答を行った。また、論文審査委員による本論文および関連分野の試問を行った。これらを総合的に審査した結果、合格と判定した。