

Natural Convection induced by Internal Heat Generation

(内部発熱により誘起される自然対流)

学位論文内容の要旨

内部発熱により誘起される自然対流は、大気、海洋、地下のマントルなど自然界のいたる所に存在する。また、原子炉内の除熱や電子線による液体の加熱など、熱工学の分野においてもこの現象が支配的となる系は多い。その一方で、1970 年代初頭以降、この問題が自然対流の基礎研究として扱われることはなく、主として数値計算を用いた、実機に近い立場での応用研究が行われてきた。その結果として、内部発熱対流の特徴的な現象についての議論は進んでおらず、対流セルの拡大についての理論との不一致など、未解決の問題も多い。そこで本研究では、内部発熱対流についての系統的な実験研究を行い、その特徴的な現象を明らかにすることを第一の目的とした。

内部発熱と同様に、自然対流における低プラントル数流体の効果も、重厚な自然対流研究の歴史のなかで取り残されてきた要素である。これは、作動流体である液体金属の扱いにくさに加え、液体が不透明であるため光学的な可視化手法が使えないことに起因している。本研究では、超音波を用いて液体金属層内の速度分布を計測し、低プラントル数自然対流中の流動場を捕捉することを第二の目的とした。

内部発熱対流については、高さに対して十分な水平方向長さを有する水平流体層を想定し、研究を行った。内部発熱が鉛直方向に分布を持つ場合の影響を調べるため、線形安定性解析による、簡単な対流臨界状態の見積もりを行った。実験では、流体層内の流れ場と温度場を可視化し、これまでに示された内部発熱対流の特徴的な現象について検証を行った。その結果として、内部レイリー数に対する対流セルの拡大は、発熱分布の非一様性や内部発熱対流に特有の現象であることを示した。また、感温液晶を用いて温度場を計測し、内部発熱対流の定量的な議論を行った。低プラントル数の自然対流については、形成される対流セルの形状を制限するため、また、超音波計測の容易さを考え、箱形の流体層を用いた。作動流体には液体ガリウムを用い、超音波によりその対流運動を可視化した。

本論文は全6章で構成されており、各章の概要は以下のとおりである。

第1章は序論であり、自然対流、特に内部発熱対流および低プラントル数自然対流に関する従来の研究を総括し、本研究の背景と目的について述べた。

第2章では、内部発熱源が鉛直方向に分布している場合を想定し、流体層の線形安定性解析を行った。単純な指数関数により発熱分布を表し、分布形状の変化に対する臨界状態の変化を見積もった。その結果、発熱源が上面付近に集中する場合には、一様な分布に比べ、臨界レイリー数や形成される対流セルのサイズが大幅に変化することを示した。また、内部発熱に加え下面加熱がある場合についても同様の解析を行い、内部レイリー数が外部加熱によるレイリー数よりも大きい場合、流体層下部に形成される局所的な安定層の影響により、流れが大きく変化することを示唆した。

第3章では、板状の微粒子である Kalliroscope と、温度に対して光の屈折率が変化する感温液晶を用いて、内部発熱対流の流れ場と温度場を可視化・観察した。塩化カリウム水溶液に交流電流を流すことにより生じるジュール熱を用いて、流体層を一様に発熱させた。流体層の下面には真空断熱ガラスを用い、従来の実験装置に比べ、より理想的な断熱境界条件を実現した。各内部レイリー数における可視化写真から、これまでの研究により示された、対流セルの形状や、内部レイリー数に対するセルの拡大を検証した。可視化画像を解析することにより、対流セルの拡大を定量化した。過去の実験結果と比較し、流体層の下面断熱の不完全さが、セル拡大に与える影響を示した。流れ場および温度場の可視化結果から、セルの拡大が従来の安定性解析では記述できない理由について議論した。

第4章では、前章で得た温度場の可視化写真を実際の温度に変換し、内部発熱対流中の温度場を定量的に調べた。可視化画像を温度場に変換するため、較正用実験装置を設計・製作した。色相法により、可視化画像中の色情報を温度に変換するための較正曲線を求め、それを用いて画像を温度場に変換した。温度場から個々の対流セルを抜き出し、対流セル内の温度分布を解析した。温度場から統計量を計算し、理論値との比較を行った。

第5章では、超音波を用いた流速分布測定法 (Ultrasonic Velocity Profiler, UVP) により、液体ガリウム層内の対流速度分布計測を試みた。液体ガリウムの流れ、およびグリセリン水溶液の低速流れに対して UVP による試験的な計測を行い、その妥当性を示した。超音波計測に適した液体ガリウム用対流容器を考案・製作した。容器の上面を冷却、下面を加熱することにより対流運動を引き起こし、UVP によりその速度分布を測定した。レイリー数を変化させ実験を行い、対流パターンの時間変化を示した。

第6章は結論であり、本研究で得られた結果を総括した。

学位論文審査の要旨

主 査 教 授 武 田 靖

副 査 教 授 藤 川 重 雄

副 査 教 授 佐 野 雅 己

(東京大学理学系研究科物理学専攻)

学 位 論 文 題 名

Natural Convection induced by Internal Heat Generation

(内部発熱により誘起される自然対流)

内部発熱により誘起される自然対流は自然界に遍在しており、流体力学、伝熱工学ならびに地球物理学などの幅広い分野において重要な問題である。その一方で、1970 年代初頭以降、この問題が自然対流の基礎研究として扱われることはなく、理論研究による結果との不一致など、未解決の問題が多い。内部発熱と同様に、自然対流における低プラントル数流体の効果も、重厚な自然対流研究の歴史のなかで取り残されてきた要素である。これは、作動流体である液体金属の扱いにくさに加え、液体が不透明であるため、従来の光学的可視化手法が使えないことに起因している。

このような背景の下に、本論文は、自然対流における内部発熱の効果を明らかにすること、および超音波を用いて液体ガリウム層内の流動場を計測することを目的としてなされている。内部発熱対流では、従来の手法である流れパターンの可視化を行うとともに、感温液晶を用いることにより温度場の可視化を行い、流れ場と温度場から定性的な議論を行っている。また、流れ場と温度場の画像解析、および可視化した温度場を実際の温度に変換することにより、さらに定量的な議論を加えている。液体ガリウムの超音波計測では、二種類の検証実験により計測法の妥当性を確認するとともに、液体ガリウム槽内の Rayleigh-Bénard 対流についてその流動場を計測し、異なる流れのパターンが存在することを示している。本論文で得られた結果は以下のように要約できる。

- (1) 内部発熱対流において形成される対流セルは、中心に下降流を持つ、いびつな六角形状であり、セル内部の循環方向は、熱伝導状態の温度分布形状から説明できる。下面の断熱特性や内部発熱の非一様性が改善されているにもかかわらず、対流セルは、内部レイリー数の増加に対して膨張する。これは、従来の実験的研究の結果を肯定す

るものであり、安定性解析による理論的研究の結果とは異なる。対流セルは、臨界レイリー数の20倍程度のレイリー数で、膨張したセルの中にもう一つのセル構造を有する、二重セル構造に遷移する。

- (2) 水平温度場から求められた統計値は、臨界値の4倍から5倍程度で、内部レイリー数に対する変化の傾向が変化する。流れの安定性に関するこれまでの研究から、このようなレイリー数において、流れが遷移していることが類推できる。実験により観察されたセル形状は、線形論で与えられる正六角形のセル形状に近い。しかしながら、実験により得られたセル内の温度分布は、線形論により与えられる分布から大きくずれている。よってこの流れの遷移は、可視化で観察されるような対流セル形状に現れる遷移ではなく、セルの内部構造が変化する遷移である。実験と理論における相違は、このような対流セルの形状に現れない、強い非線形効果によって生じていることが示唆される。
- (3) 超音波流速分布測定法により、液体ガリウムの流動、特に数 mm/s 程度の遅い流れの瞬時速度分布を計測する手法が確立された。これを直方体容器内に封入された液体ガリウムの熱対流流動計測に適用することにより、これまでの研究より指摘されていた、対流ロールセルが振動するパターンが、速度分布の時間変化として可視化された。その振動には、ロールが水平方向に周期的に揺動するパターンと、ロールが膨張と収縮を繰り返すパターンの2種類が存在する。

これを要するに、著者は、内部発熱対流において未解決であった、理論的研究と実験的研究の結果における相違について、定量的な実験結果を背景とした著者独自の見解を示している。これにより、これまで見過ごされてきた内部発熱対流の問題が、再考されることが期待できる。また本研究により、液体金属である液体ガリウムの流動場計測法が確立されたことは、流体力学の基礎研究のみならず、熱工学や原子炉の安全管理など、工学の実務的な分野に対し大きく貢献するものである。よって、著者は北海道大学博士（工学）の学位を授与される資格があるものと認める。