

## 【学位論文審査の要旨】

現代の基幹産業である鉄鋼業における連続鋳造プロセスや半導体製造装置などにおいては、熔融金属の流れを磁場印加により制御することで、固化される際の金属材料の品質向上がなされている。これは、外部から磁場を印加することにより、流動する熔融金属内に生じる電流が外部磁場と相互作用することで発生する電磁力（ローレンツ力）を利用したものである。特に、半導体単結晶引き上げ装置のチョクラスキー法を模擬するような先行研究は多数見られるものの、これらの装置においては、熱による浮力などの影響も顕著となるため、流れ場、電磁場、温度場がそれぞれ関わり合い、現象はより複雑化する。そのため、磁場下の熱対流（自然対流）に対して、円筒形や矩形といった基本形状の容器内の対流現象についての知見の積み重ねが必要とされる。

一般に、液体金属の自然対流は、プラントル数の値が小さいために、慣性力支配の流れになりやすく、レイリー数の増加にともなって振動流や乱流を呈する傾向にある。このとき、外部から印加される磁場の方向や強度に依存して、流れ場や温度場が大きく異なることが知られている。その中でも特に学術的に興味深いのは、ある方向から静磁場を中程度の強度で印加することにより、常識に反して熱伝達率が上昇するという奇妙な現象である。これはハルトマン境界層（印加磁場に直交する壁面近傍に形成される非常に薄い境界層）に、コア領域で生じた電流が集中して流れこむ場合（あるいは流れの主渦度成分に対して平行な磁場を印加する場合）に相当し、オームの法則の中の誘導起電力項と電位勾配項がほぼ均衡状態になるため、その結果として流れ場が2次元的に変化することにより、熱伝達率が多少上昇すると理解されている。先行研究において、このような報告は幾つか見つけられるものの、ハルトマン境界層の発生しない系に対する先行研究は論文申請者が調べた限りでは存在しない。

そこで本論文では、ハルトマン境界層の存在しない系として、矩形断面を持つ環状容器内における液体金属の自然対流を想定し、方位角方向の磁場を印加した数値的研究を行った。特に磁場強度に応じて、自然対流の遷移現象および熱伝達率の上昇に着目した。本論文の成果は、以下に要約される。

1. 軸対称性を仮定した2次元数値シミュレーションにおいて、広範囲のレイリー数とハルトマン数に対する調査を行い、磁場印加によるヌセルト数の減少率は、あるハルトマン数とレイリー数の組み合わせた無次元数を用いることで、ほぼ単一の曲線で示されることを明らかにした。また、高レイリー数のケースにおいては、ある磁場強度で最大のヌセルト数（熱伝達率）を取ることが示唆された。さらに、流線と電位分布の類似性、強磁場下においては電流の流線と圧力分布にも類似性があることを示した。（博士論文 第3章）

2. 方位角方向に流れの周期性を仮定した線形安定性解析を実行したところ、磁場の印加は流れ場の2次元化に寄与することを示し、最も不安定なモードである臨界角波数は、レイリー数のべき乗に比例して高くなることを示した。また、臨界角波数に対する中立ハルトマン数は、修正レイリー数（磁場なしの臨界レイリー数を差し引いたもの）の1/3乗に

比例することを示した。(博士論文 第4章)

3. 無磁場の場合について、20等分円解析領域において、3次元数値シミュレーションを実施したところ、レイリー数の増加に伴い、2次元定常流れ、3次元定常流れ、3次元単周期振動流れ、3次元非単周期振動流れの順に遷移することを示した。また、3次元流れのヌセルト数および運動エネルギーは、同条件における2次元流れのそれらに比べて小さいことを明らかにした。さらに、本系における自然対流の遷移に関して、定常攪乱と非定常攪乱の2種類を提起した。特に後者は、半対称性を有しており、線形安定性解析では特定できないものである。(博士論文 第5章)

4. 磁場印加の場合について、20および28等分円解析領域において、3次元数値シミュレーションにより、磁場の増加に伴う流れの変化を検証したところ、ハルトマン数の増加に伴い、3次元非単周期振動流れ、3次元単周期振動流れ、3次元定常流れ、2次元定常流れの順に遷移することを示した。ヌセルト数および運動エネルギーは、3次元周期振動流れから3次元定常流れに遷移する周辺で最大となることを明らかにした。(博士論文 第6章)

以上、本論文では、環状容器内における液体金属の自然対流の遷移および熱伝達に及ぼす磁場印加効果について、線形安定性解析ならびに3次元数値シミュレーションにより明らかにしたもので、学術的に高く評価でき、工学的にも寄与するところが大きい。よって本論文は、博士(工学)の学位を授与するに十分な価値があるものと認められる。

(最終試験又は試験の結果)

本学の学位規則に従い、最終試験を行った。公開の席上(オンラインを含む)で論文発表を行い、流体力学を専門とする教員による質疑応答を行った。また、論文審査委員により本論文及び関連分野に関する試問を行った。これらの結果を総合的に審査した結果、専門科目についても十分な学力があるものと認め、合格と判定した。