

氏名	益田 卓哉
所属	システムデザイン研究科 システムデザイン専攻
学位の種類	博士（工学）
学位記番号	シス博 第157号
学位授与の日付	令和3年9月30日
課程・論文の別	学位規則第4条第1項該当
学位論文題名	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
論文審査委員	主査 准教授 田川 俊夫 委員 教授 金崎 雅博 委員 准教授 稲澤 歩 委員 准教授 田坂 裕司（北海道大学）

【論文の内容の要旨】

電磁流体力学（MHD）は、水銀や熔融金属ナトリウムをはじめとする液体金属のような導電性を持つ液体の流れを取り扱う学問である。熱移動を伴う液体金属の対流は、高い熱伝導性を活かして、原子炉の冷却機構、液体金属MHD発電、コンピューターのCPUの冷却材などに応用されている。なかでも、液体金属MHD発電は、太陽熱から電気エネルギーを取り出すことが出来るため、宇宙空間のような極地での利用が期待されている。

浮力を駆動源とする流れは自然対流と呼ばれ、重力に対して垂直な壁面を加熱した系では、わずかな温度差があっても対流が発生する。液体金属のような低プラントル数流体では運動方程式の移流項が粘性項に卓越するため、矩形断面を有する容器内において3次元周期構造の出現が示唆されているが、系統的な研究は未だ報告されていない。加えて、一般的には磁場を印加することにより液体金属の熱伝達を抑制することが可能であるが、磁場が弱い場合にはむしろ熱伝達が促進されることがある。

本研究では、円環状容器内の液体金属の自然対流について数値的に解析した。この容器の断面は正方形であり、これを重力に対して鉛直方向に置き、内周と外周の壁面を示差的に等温に保持した。さらに、方位角方向に静磁場を印加した。このような自然対流に対して有限差分法による数値シミュレーションおよび線形安定性解析を実施した。そして、対流の遷移形態に着目し、熱伝達との関連性を検証した。

本論文は以下の7章から構成されている。

第1章では、上述の本論文の目的、背景および概要について説明している。

第2章では、問題の構成、支配方程式と無次元化、ならびに数値解法について詳述するとともに、変数の時間と空間に対する分離操作について説明している。

第3章では、軸対称性を仮定した2次元数値シミュレーションを用い、 10^4 乗から7乗までのレイリー数にわたり、自然対流の形態と熱伝達特性について調査している。この自然対流は低レイリー数では定常であり、高レイリー数になると非定常に変化するが、強い磁場を印加した高ハルトマン数では再び定常状態に戻る。これらの熱伝達特性について、ヌセルト数の分布をハルトマン数とレイリー数との関数として整理すると、その分布形状は相似である。加えて、電流密度により生じるジュール熱は微小である。

第4章では、方位角方向に周期性を仮定した3次元線形安定性解析により取得された、位相速度が0の3次元線形攪乱について検証している。基本流は時間平均された2次元軸対称流れと一致するが、2次元流れが非定常であるレイリー数でも線形攪乱は取得される。それによると、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。ある角波数および臨界角波数の中立ハルトマン数は、それらの中立レイリー数によって整理されたレイリー数の $1/3$ 乗に比例する。すなわち、磁場の印加は攪乱の安定化に寄与する。そして、線形攪乱は壁面に沿って伸びる渦対によって構成される。

第5章では、3次元数値シミュレーションにより、レイリー数が20,000までの範囲で磁場を印加しない条件下での遷移形態を調査するとともに、対流の状態をヌセルト数だけでなく運動エネルギーによっても定量的に評価している。最小角波数が20となる20等分円解析領域においては、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次元周期振動流れ、3次元非周期振動流れの順で遷移する。ただし、3次元定常流れから周期振動流れに変化する周辺では、振動状態が不定になる。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。3次元対流構造が形成される過程で3次元攪乱構造が増幅するが、増幅率および攪乱形状の比較により、この攪乱構造は線形安定性解析により取得される線形攪乱と同一であるといえる。全円解析領域においては、3次元定常流れ、もしくは3次元非周期振動流れのいずれかが出現する。対流の形成過程で生じた僅かな不均一さに起因して、流れ場が不規則な振動状態に陥るためである。しかし、四半円解析領域においては周期的な対流構造が再形成される。このことは、規則的な対流構造の維持に角波数の選択可能性が影響することを示している。

第6章では、3次元数値シミュレーションを用いることで、レイリー数10,000および20,000において磁場の増加に伴う流れの変化を検証している。20等分円解析領域において、流れの状態は、ハルトマン数の増加に伴い、3次元非周期振動流れ、3次元周期振動流れ、3次元定常流れ、2次元定常流れの順で遷移する。これはレイリー数の増加に伴う遷移の逆パターンに相当する。3次元状態のヌセルト数および運動エネルギーが2次元状態のそれらよりも小さいが、磁場なしの場合とは異なり、これらは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。

第7章では、上述の主要な結果をまとめ、本論文の成果を総括している.