

## 学位論文題名

## MHD チャネル流れの解析的研究

## — 2次元磁場をよぎる MHD 流れと乱流境界層 —

## 学位論文内容の要旨

オープンサイクルMHD発電機は、在来の汽力あるいはガスタービン発電に比べ、高温流体に接触しながら高速回転しなければならないタービン翼を必要とせず、導電性流体(MHD流体)と磁場との相互作用に基づいて直接的に発電することで、作動流体の最高温度を高くでき、さらに環境に排出する $\text{NO}_x$ 、 $\text{SO}_x$ 、 $\text{CO}_2$ を抑制できる発電システムとして日本、米国、ロシア、インド、中国などを中心に研究開発が進められている。

これまでMHD発電機システムの実用化における最大の技術的課題は、電極材料の耐久性にあると考えられていたが、近年では日本および米国における耐久試験により商用化にあたっての目標である8000時間連続運転が可能であるとの評価がなされている。残された課題は発電効率の向上による発電機の高効率化・小型化である。

オープンサイクルMHD発電での作動流体は乱流状態にあり、その工学的特性を解析するには乱流モデルを必要とする。しかし現状では、高温・高速の乱流ガスプラズマ流に対してその普遍性・有効性が検証されている乱流モデルは存在しない。そのため、これまで定格発電時に電気的諸特性、特に電極電流、電極間電圧、全電気出力などの積分量の定量的予測に主眼をおいた解析手法がとられてきたため、流体力学的特性についての予測精度はある程度犠牲にされ、実験事実の定性的説明にとどまっている。このため、この手法が想定していない場合、すなわち、無負荷時など負荷が軽く電極電流や発電出力が非常に低い状況での流体力学的諸特性の予測にはほとんど役に立たないことが実験的に明らかにされている。これは、流体と電磁場の相互作用を、平均流れと電磁場の相互作用と流体変動と電磁場の相互作用に分けて考えた場合に、定格負荷時には前者が支配的であり、無負荷時には後者が流体特性を規定しているためである。

このような観点から本論文は、定格負荷時の高効率・高性能のMHD発電機に関しては、電極境界層損失を低減するために提案されているSFC磁場配位の有効性を三次元数値解析により調べ、無負荷時の流体的特性に関しては、著者が導出した一般化オーム則の乱流モデルとの関連を研究したものであり、全7章から構成されている。以下に、各章の概要述べる。

第1章は、MHD発電技術に関する在来の研究と、現在認識されている問題点を整理し、本研究の目的と意義について述べている。

第2章では、電磁流体が従う電気場及び熱流体場の支配方程式系を示し、それらに対する数値解析手法について概説している。

第3章では、冷電極を持ったMHD発電機に対して内部抵抗及び放電特性の観点から有効であると考えられている2次元2成分の印加磁場分布形状、いわゆるSFC型磁場配位が理想的に実現された場合の基本特性について説明している。また、理想的なSFC磁場

配位は、電子の数密度磁場（の発電有効成分）が空間的に相似であることが必要でため実際に発生させることが困難であることから、近似発生法を超伝導電磁石を用いる場合と、通常の鋼鉄マグネットのギャップ空間に強磁性体を配置させその減磁・増磁効果を用いる場合の2通りの方法を示し、磁場計算法について説明している。

第4章では、電気場と熱流体場に対する3次元解析によるSFC型MHD発電機の電氣的及び流体力学的特性に関する評価を行っている。本解析により、SFC型MHD発電機は、従来型の一様磁場印加の場合に比較して、ホール効果によって発生し、発電機としては無効電流成分であるホール電流の抑制、電極壁への熱及び電流集中の緩和、MAT不安定性あるいは、電極境界層剥離現象の抑制などの効果があることについて示した。また、一様磁場印加の場合について知られていた絶縁壁（側壁）境界層での速度が主流部よりも速くなる、いわゆる速度オーバーシュート現象が、SFC型MHD発電機では電極境界層においても生ずることを示し、そのメカニズムについてSFCとUFCの違いについて説明している。

オープンサイクルMHD発電機は、クローズドサイクルの場合と異なり大型機ほど効率が高くなり、電磁場と流体の相互作用も強くなる。そこで第5章では、小型の実験機を用いて商用規模の大型機でのみ生ずるとされている強相互作用条件を模擬するため提案されている方法を概説し、その中からカーボン燃焼を用いた高導電率プラズマを利用した場合の3次元解析結果について述べている。高導電率プラズマは、一般に高移動度プラズマとなるため、電極近くでのホール効果を抑制する事を目的としたSFC型MHD発電機では、通常の石炭・石油などの炭化水素系燃料を用いた場合よりもUFC型に較べた電気出力の増大傾向が強くなることが明らかになった。

第6章では、これまでMHD発電機の数値解析分野において全く考慮されていなかった作動流体の乱流特性を考慮した一般化オーム則の乱流モデル化を行っている。導出された一般化オーム則より、磁場印加時には、温度勾配が定常電流を駆動しその電流に対するローレンツ制動力によって温度勾配に反平行な乱れ速度成分が選択的に減衰を受け、その結果温度勾配に平行な定常流が駆動されることを明らかにし、電極境界層での温度及び速度を減少させることを示した。またこの効果を支持する測定結果を併せて示している。

最後に、第7章では本研究で得られた成果を総括している。

# 学位論文審査の要旨

主 査 教 授 粥 川 尚 之  
副 査 教 授 石 黒 亮 二  
副 査 教 授 榎 戸 武 揚  
副 査 教 授 本 間 利 久

学 位 論 文 題 名

## MHD チャネル流れの解析的研究

— 2次元磁場をよぎる MHD 流れと乱流境界層 —

近年、環境保全と省資源の要請を満たし得る新型発電技術として、MHD 発電の実用化に関する研究が盛んに行われている。MHD 発電は磁場中のプラズマの運動による起電場  $\mathbf{V} \times \mathbf{B}$  を基本とする直接発電であり、プラズマの運動と印加磁場の形態はその性能に重要な影響を持つ。しかし、在来の研究の多くは外部印加磁場として一様磁場を想定しており、非一様磁場による電気的および流体力学的諸特性の改善については未解決の問題であり、その効果を明らかにすることはきわめて重要な意味を持つ。

本論文は、MHD 発電機内の電磁流体现象を、平均流と電磁場の相互作用および流体変動と電磁場の相互作用の2つの観点で捉え、それぞれの場合の電気的および流体力学的特性についての解析的および理論的考察を加えた研究をとりまとめたものであり、主要な成果は次のように要約される。

①電極近傍において磁束密度を低減する SFC 磁場分布を持つ MHD 発電機は、ホール効果による発電無効電流を抑制し、発電機の内部抵抗ならびに電極電位降下を低減させる。著者は、流体力学方程式と電磁場の方程式を結合した3次元解析により、2次元2成分磁場下の電磁流体の平均運動を詳細に解析し、電気的特性の改善効果を定量的に明らかにした。

②SFC 磁場配位を持つ MHD 発電機では、熱電気不安定性および電磁空力的不安定性などの不安定性現象や、境界層剥離現象を抑制し、流体力学的特性を向上することができることを明らかにした。

③SFC 磁場のもとでの断面内二次流れは、従来の一様磁場印加では6個の渦セルを持つ構造であるのに対し、10個のセル構造を持ち、電極近くでの渦の流速が遅くなることが電磁空力的不安定性の抑制につながることを示した。

④SFC 型 MHD 発電機では、絶縁壁境界層だけでなく電極境界層にも速度オーバシュート現象が発生し、これによる電極面への熱伝達の促進効果により集中アークの発生

を抑え得ることを明らかにした。以上②、③、④の効果は壁面の熱的電氣的ストレスを低減させMHD発電機の耐久性を向上させる効果を持つ。

⑤従来の研究では無視されていた熱流体変動と電磁場変動の相関を考慮した一般化オーム則の乱れモデルを構成し、温度勾配に沿った方向の磁場による非等方的な乱流減衰の結果、低温電極から高温の主流へ向かう定常流れが発生することを初めて示し、この流速の定量的な見積もりを行った。さらに、在来の実験結果の調査研究により、著者が予測した乱流駆動境界層流れが、温度計測結果に示されていることを明らかにした。また、この流れの導入により、在来平均流のみを考慮したMHD 2次流れでは説明できなかった負荷開放状態での電極近傍の熱境界層の振舞いに妥当な解釈を与えることに成功した。

以上のように本論文は、SFC磁場配位の導入による電磁流体力学的諸特性の改善に関する有益な知見を得ている。さらに流体力学の分野で確立されている変動の相関量に関する乱流モデルの構成手法を、電氣的基礎方程式の一つである一般化オーム則に適用し、これまで妥当な説明が与えられてなかった実験事実初めて合理的な説明を加えた。

これを要するに、著者は、電磁流体方程式の3次元解析により、MHD発電機の出力特性と壁面ストレスが、非一様な印加磁場の採用により大幅に改善されることを明らかにすると共に、乱流相関を考慮した一般化オーム則を初めて提案したもので、プラズマ理工学の基礎と応用分野に貢献するところ大なるものがある。

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あるものと認める。