

学 位 論 文 題 名

MHD プラズマの乱流スペクトル解析と
その計測への応用に関する基礎研究

学位論文内容の要旨

MHD プラズマは、アルカリシード高温燃焼、衝撃撃破管、アークジェットなどで得られる圧力 1 気圧、温度 2500～3000 K 程度の熱平衡弱電離プラズマであり、近年 MHD 発電などの高温エネルギー技術、プラズマ推進、製鋼・精錬、宇宙関連技術などの分野で重要性を増している。これら MHD プラズマの流れ場と温度場は時空間で不規則な揺らぎをともなう乱流状態にあることが多くその解明は学術上のみならず工業上重要である。これまで導電性流体の乱流は液体金属に関して多く研究が行われスペクトル特性、2 次元乱流構造などが逐次明らかにされつつある。しかし MHD プラズマの乱流特性に関する研究はほとんど先例がない。MHD プラズマは液体金属と異なり磁気レイノルツ数が一般に小さく、さらに熱流体場と電磁場は温度に対して強い非線形関数性を持つ電気伝導率を介して結合しており、その乱流場は電気伝導率が乱流揺らぎと無関係な液体金属とは異なる物理過程に支配されていると考えられる。また MHD プラズマの流れ場の解析も少なくないがそこでは通常の非導電性流体の乱流モデルが仮定されている。すなわち種々の基本変数の平均値からの揺らぎの相関の影響は現在のところ不明であって乱流 MHD プラズマの巨視的方程式系自体が不完全な現状である。

本研究は、MHD プラズマの乱流巨視的方程式系を明らかにすることを目的にした研究の一貫として、炭酸カリウム微粉末をシードしたアルゴンを衝撃波で加熱して得られる熱平衡プラズマを具体的な対象として、MHD 発電チャネル内から速度場、温度場、輻射場、粒子密度場、電気場の揺らぎ自身の性質を統計的観点から調べ、さらに揺らぎの性質と解析手法を応用した 2、3 の高速 MHD 乱流プラズマの計測法に関する研究を取りまとめたものであり、全 7 章から構成されている。

第 1 章は序論であり、関連する従来の研究の概説、本研究の背景、目的、工学的意義について述べている。また、衝撃波管で発生する短時間のプラズマを対象として乱流の性質を論じる立場から統計的定常性と平均操作について著者の見解をまとめている。

第2章では、本研究に関連する乱流の統計理論について、現在までの発展の経過、MHD プラズマにおける理論の適用の現状について述べ、本研究で MHD プラズマに適用したいいくつかの統計流体理論について説明している。

第3章では、本論文のスペクトル解析法である最大エントロピー法（MEM：Maximum Entropy Method）について説明している。まず、計算式、方法を述べた後、MEM 解析法が衝撃波プラズマのように短時間現象に対しても正しいパワースペクトルを与え得ることを強調している。

第4章では、本研究に使用した実験装置と測定方法、数値解析方法を述べている。まず、実験に使用した衝撃波管および MHD 発電チャネル体系を説明し、次に誘導ポテンシャルにより流速、加速度、渦度の測定法、半導体圧力変換器による圧力の測定、偏光ラインリバーサル法による温度、放射光、電子密度の高速測定法を説明している。次に、それらのデータのスペクトルに現れた MHD プラズマ特有の乱流構造を説明するために行った数値解析法（スペクトル法）について説明している。

第5章は、実験結果、スペクトル解析結果、数値解析結果の説明と統計流体理論に立脚した考察である。その結果、流速、加速度、渦度、電子密度のいずれのパワースペクトルにも低波数領域に $k^{-5/3}$ の等方性 3 次元乱流構造、それより高波数領域に k^{-3} の 2 次元乱流構造を持つこと、および両者の波数領域配分が外部磁場に依存して変化することを示した。液体金属が 2 次元乱流構造を持つことは既に表示されているが、ここでの結果は気体プラズマでも同様な構造を持つことを示したものであり、また在来統計流体力学で思考モデルとして位置づけられていた 2 次元乱流がプラズマでは現実の現象であることを示した新しい知見である。さらに本結果によって本研究の前提とした現象の統計的定常性が衝撃波プラズマのような短い現象でも成り立つことを結果的に示したことになっている。また本章では 2 次元構造を数値的に示すために行ったスペクトル法による渦度方程式の解析結果をまとめ、3 次元等方性乱流から 2 次元乱流へ移行していく様子を示し、2 次元乱れ構造を特徴的に示す面を特定することにも成功している。

第6章では、MEM スペクトル推定法を MHD プラズマの流れ場と輸送定数の計測に応用した実験研究をまとめている。ここで検討した測定法は、相互相関関数法による速度測定、高速 NMR 法による MHD 乱流の可視化の基礎的実験、強制電流ゆらぎ印加による導電率・移動度測定であり、それぞれの測定結果と問題点、改良点を論じている。

第7章は結論であり主な知見は以下のようにまとめられる、(1)従来液体金属でのみ観測されていた 2 次元等方性乱流が MHD プラズマでも存在することを広いパラメータについて実験的に

示した。(2)数値解析により実験結果を確認すると共に2次元渦面を特定した。(3)MEMスペクトル解析法を適用し信頼性の高いMHDプラズマ輸送定数の測定法を開発すると共に、高速NMR法によるプラズマ乱流場の可視化の可能性を示した。

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	木谷勝
副査教授	山崎初男

MHDプラズマは、圧力1気圧、温度2500～3000K程度の熱平衡弱電離プラズマであり、近年MHD発電などの高温エネルギー技術、プラズマ推進、製鋼・精錬、宇宙関連技術などの分野で重要性を増している。これらの流れ場と温度場は時空間で不規則な揺らぎをともなう乱流状態にあることが多いが、乱流モデル化に必要な乱流構造に関する研究は通常流体と比べて十分とは言えない。これまで導電性流体の乱流は液体金属に関して多く研究が行われスペクトル特性、2次元乱流構造などが逐次明らかにされつつある。しかしMHDプラズマに関する研究はほとんど先例がない。MHDプラズマは液体金属と異なり磁気レイノルズ数が一般に小さく、さらに熱流体場と電磁場が、温度に対して強い非線形関数性を持つ電気伝導率を介して結合している特徴を有する。従って、その乱流場は電気伝導率が速度と温度に無関係な液体金属とは異なる物理過程に支配されていると考えられる。

本研究は、磁場中のMHDプラズマの乱流構造を明らかにすることを目標に、炭酸カリウム微粉末をシードしたアルゴンを衝撃波で加熱して得られる熱平衡プラズマを対象として、MHD発電チャンネル内の速度場、温度場、輻射場、粒子密度場、電気場の揺らぎ自身の性質を統計的観点から実験と数値解析により調べ、さらに揺らぎの性質とスペクトル解析手法を応用した2、3の高速MHD乱流プラズマの計測法に関する研究を取りまとめたものである。対象としたプラズマは1ミリ秒程度の短時間の系であるが、それにより在来障害とされた高い熱流束による計測上の困難さが除かれていることと、統計的な定常性が保障されにくい時系列データに対して最大エントロピー法(MEM)を採用し得られるスペクトルの信頼性を高めていることが特徴である。

本研究で著者が明らかにした知見は以下の4点である。

- (1) 磁場下の MHD プラズマ揺らぎには、低波数領域にコルモゴロフの 3 次元等方性乱流スペクトル、 $k^{-5/3}$ モード、高波数領域に 2 次元等方性乱流スペクトル k^{-3} モードが混在する。この 2 次元スペクトルモードは磁場強度の増加と共に低波数から出現し始め k^{-3} 領域が広がることを観測した。
- (2) 速度と温度乱れの動的シミュレーションより初期状態として与えた 3 次元等方的な揺らぎが時間と共に 2 次元構造化することを解析的に示した。また 2 次元渦は磁場ベクトルを含む内面にあることを明らかにした。
- (3) 電気場に与えた外乱揺らぎに対応するプラズマの応答信号の MEM スペクトル解析によりプラズマのバルク導電率、ホール係数、平均流速を精度よく測定できることを示した。
- (4) 高速 NMR 法を初めてプラズマの流れ場に適応し乱れ場の可視化の可能性を示した。
これを要するに、本論文は、これまで思考モデルであった 2 次元乱流が MHD プラズマで実在であることを初めて実験と数値解析により明らかにすると共に、MEM スペクトル解析法に基づく新しいプラズマ計測の可能性を示したもので電磁流体力学およびプラズマ工学に寄与するところ大なるものがある。よって著者は、博士（工学）の学位を授与される資格あるものと認める。