

## Study of turbulent dynamics in a linear magnetized plasma

河内, 裕一

<https://hdl.handle.net/2324/4784665>

---

出版情報 : Kyushu University, 2021, 博士 (理学), 課程博士  
バージョン :  
権利関係 :

氏名 : 河内 裕一

Name

論文名 : Study of turbulent dynamics in a linear magnetized plasma

Title (直線磁化プラズマにおける乱流ダイナミクスの研究)

区分 : 甲

Category

## 論文内容の要旨

### Thesis Summary

持続可能な社会の実現へ向けて脱炭素エネルギーが求められている昨今、その解決策の一つである核融合発電炉の実現を目指して、国際熱核融合実験炉(ITER)が建設中である。核融合炉では、高温高密度のプラズマを閉じ込めて核融合反応を引き起こすので、プラズマ中に強い圧力勾配が生じ乱流が励起する。励起したプラズマ乱流は非線形過程を経て複雑なパターンを形成し、衝突輸送よりも遥かに大きいプラズマ輸送を駆動する。この乱流輸送は核融合発電の成否に直結する。プラズマ乱流の基礎物理過程を理解し乱流を制御することは核融合発電の実現や性能向上において極めて重要である。

プラズマ乱流の基礎過程を理解するためには、実験にて乱流の時空間発展を高い時間分解能で計測・解析することが必要不可欠である。これまでに乱流ダイナミクスを計測・解析するために多くの計測器や解析手法が開発され多くの成果を上げてきたが、依然として課題が残っている。例えば、密度乱流揺動の計測は比較的容易である一方で、温度揺動の計測は困難であり、多くの制限が存在する。データ解析にも制限がある。一般に乱流は非定常現象であるため、定常フーリエスペクトル解析が適用できない現象がある。このように、プラズマ乱流の基礎過程の理解へ向けて、新たな乱流ダイナミクスの観測・解析手法の開発が求められている。

本研究では、乱流ダイナミクスを明らかにするために、既存の計測や解析の時間分解能を向上させる新たなデータ解析手法を開発した。開発した手法を直線磁化プラズマ装置 PANTA で観測される乱流揺動へ適用し、これまでに観測が困難であった、瞬時周波数揺らぎ、電子温度揺動を含む乱流揺動の時空間ダイナミクス、異種揺動間の非線形エネルギー移送ダイナミクスの観測に成功した。以下に本論文の構成をまとめる。

第一章では、核融合における乱流基礎過程の理解の重要性、及び現在の乱流の観測・解析の問題点について述べた。第二章では、本研究で用いた実験環境及び解析手法について述べた。実験環境として、研究に利用した実験装置 PANTA の概要及び計測器である静電プローブアレイについて説明した。解析手法として、パワースペクトルを始めとするフーリエ解析や、デジタルフィルター、ヒルベルト変換について解説した。第三章では、乱流揺動の計測・解析の問題について考察し、その問題を解決するために本研究で開発した、揺動の出現時間を精度良く検知するテンプレート法について説明した。さらに、テンプレート法の利点と手法の検証についてまとめた。第四章では、PANTA で観測される乱流揺動に対してテンプレート法を適用して得られた解析結果とその物理的な解釈についてまとめた。解析結果は大きく分けて、乱流揺動の時空間ダイナミクスの同定、異種揺動間の間欠的非線形ダイナミクスの発見としてまとめている。前者については、

はじめにテンプレート法を用いた条件付き抽出法による電子温度揺動の解析方法について解説し、電子温度揺動が静電プローブ計測に与える影響について述べた。その後、PANTA で観測される周方向に回転する2種類の揺動に対してテンプレート法で評価した密度・電位・温度ゆらぎの時空間ダイナミクスを解析した結果、及びそこから評価した揺動駆動輸送について報告した。更に、得られた時空間ダイナミクス及び輸送を元に2種類の揺動の元となる不安定性について議論した。後者については、2種の揺動の競合関係を瞬時波数スペクトル解析によって観測し、テンプレート法により競合の特性を評価した結果について報告した。また、テンプレート法と非線形エネルギー移送解析を組み合わせ、競合における非線形エネルギーの時間変化を評価した結果について述べた。得られた結果を元に、競合の物理的な背景について議論した。第5章では、本研究結果を元に議論を総括した。

本研究を通じて、以下のことが成果として示された。

- 1) テンプレート法が従来手法の閾値法に比べて揺動の出現時間を精度良く検知できることを示した。また、フーリエ変換による揺動駆動輸送評価法と比べて、テンプレート法によって評価した揺動駆動輸送が精度良く一致することを示した。テンプレート法は、高調波も成分もまとめて抽出できるため、フーリエ変換と比べて自由度を減らして輸送を評価できるという利点がある。
- 2) テンプレート法を用いて高い時間分解能で瞬時周波数を評価することに成功し、平均 9.4kHz の揺動の瞬時周波数が 1.7kHz で揺らいでいることを示した。本手法は、フーリエ変換よりも高い時間分解能でかつ、ヒルベルト変換と比べて低ノイズで瞬時周波数の評価できる。
- 3) 2種類の揺動の、密度・電子温度・電位のゆらぎの時空間ダイナミクス及び二次元断面構造の再構成に成功した。得られた構造から、揺動波面の歪みや固有関数、各物理量の振幅比等が明らかとなった。特に、テンプレート法をダブルプローブ計測に適用することで、観測が困難とされている電子温度揺動の観測を実現した。
- 4) 異種揺動の間欠的な競合を観測し、競合時に揺動間で非線形相互作用を介してエネルギーをやり取りしていることを発見した。また、この間欠的競合は周方向に対称な電位揺動と同期していることがわかった。このような3種類の揺動が関わる相互作用や、非線形エネルギー移送のダイナミクスを実験的に観測した例はなく、この研究で初めて示された。

このように、本研究では新規解析手法の開発から始まり、手法の検証し、様々な乱流のダイナミクスの観測に成功した。これらの成果は、プラズマ乱流基礎過程の理解の発展に大きく寄与した。