

# Experimental Study on Structure Formation of Plasma Turbulence

金, 史良

<https://hdl.handle.net/2324/2236281>

---

出版情報 : Kyushu University, 2018, 博士 (理学) , 課程博士  
バージョン :  
権利関係 :

氏 名 : 金 史良  
論文名 : Experimental Study on Structure Formation of Plasma Turbulence  
          プラズマ乱流と構造形成の実験観測  
区 分 : 甲

## 論 文 内 容 の 要 旨

乱流プラズマは普遍的に存在し、その物理学は自然の理解や現代技術の進展に欠かせないものである。特に、プラズマ乱流は、核融合を目指した磁場閉じ込めプラズマの性能を決定するもので、半世紀以上にわたり国際的に研究されてきた。近年のプラズマ乱流の計測器や計算機の進歩によって、一点計測であったプラズマ乱流の計測は多点計測へと発展し、プラズマ乱流内には微視的揺らぎがメソスケールや巨視的スケールの構造を作り出すことが判明するなど新たな研究時代が到来している。これまでは磁場閉じ込めプラズマの性能はスケーリング則などの経験則に基づいて評価されてきたが、現在ではプラズマ乱流の基礎過程から、基本的かつ体系的な理解を目指し、乱流プラズマの輸送特性や構造形成、閉じ込め性能を理解しようという機運が高まっている。そして、核融合を目指した装置では困難な多点かつ詳細な計測を、大学研究室レベルのプラズマを使い、その機動性を活かしたプラズマ乱流の物理過程の解明を目指した研究が国際的にも盛んに行われている。

このような国際的な動向の中で、機動性に優れた直線装置 PANTA では、プローブを用いた多点計測 (100チャンネル程度) を行い、乱流の基礎過程の実験研究を行ってきた。特にドリフト波と呼ばれる微視的揺らぎがフルート型イオンモード (メディエータと呼ぶ) と結びつきストリーマと呼ばれる構造を創り上げることを確認し高く評価されている。ここで、ストリーマとは円周方向に局在し径方向には中心とプラズマの端を結ぶように長く伸びたメソスケール構造で、乱流輸送を増加させ閉じ込め性能を劣化させることが予想されている。そのため、閉じ込めの観点からシミュレーションや理論では盛んに研究されている重要な課題である。

本研究は、PANTA 装置において、多点計測と多様な解析手法を用いて、ストリーマの諸性質、例えば、外部電場に対する応答、非線形波動としての特性、その構造に伴う輸送特性を明らかにしたものである。その成果としては、畳み込み抽出法を用いて、ストリーマが「波の尖度が振幅の  $1/2$  乗に比例する」というソリトンとしての性質をもつこと、ストリーマのみならずストリーマと相互作用しその形成に大きな役割を果たすメディエータも同様な性質を持つことを示した。「互いに非線形相互作用する 2 種のソリトン波の共存」の発見は国際的に高く評価されている。また、ストリーマに伴う粒子束を実験的に評価し、ストリーマと同様に、それに伴う粒子束も径方向に伸びた形状を示しプラズマ中心と端を結びつけ弾道的輸送を引き起こすこと、また、その輸送量について、テイル部分にあたる大きな輸送が冪則に従って出現することを示した。ストリーマによって中心の熱い部分のエネルギーが直接プラズマ周辺にまで運ばれることを示した核融合研

究にとっても重要な結果である。さらにストリーマの制御法を探るために、バイアス電極を用いて外部電場をプラズマに印加し、ストリーマの応答を観測した。その結果、5000 を超えるデータを解析し、高い統計を以ってドリフト波とメディエータの非線形結合が減少しストリーマ構造が壊れること、自己結合が支配的となるメディエータについては、振幅の変化は少ないが密度-電位揺動の位相差が  $90^\circ$  以上変化し、粒子束が内向きから外向きへと大きく変化することを示した。電場によるストリーマの制御可能性を示唆する実験結果も得た。

本論文は以下のように構成されている。第1章では、磁場閉じ込めプラズマの研究史の紹介し、乱流輸送そして本論文の主要なテーマのストリーマについて解説と論文の目的について述べた。第2章では、研究に使われた実験装置 PANTA と乱流計測に用いられたプローブほか、トモグラフィーなどの計測法も説明した。第3章では、本研究で用いた、スペクトル解析、数値フィルター、ヒルベルト変換、条件付き平均法などのデータ解析法について解説した。特に、テンプレート相関法を用いた条件付き平均法については、PANTA データのみならず ASDEX-U トカマクにおいても活用した結果について述べた。そこで捉えることに成功した突発現象の時空間発展についても簡潔に報告した。第4章では、本論文の主題であるストリーマの実験と解析の結果について報告した。特に、ストリーマおよびメディエータの観測について報告し、条件付き平均法を用いて両者が非線形波として性質をもつことを示した。また、ストリーマに伴う輸送を評価し、その輸送の特徴について詳述した。第5章では、外部電場の印加によるストリーマの応答について実験結果を報告し、電場によるストリーマの制御可能性について議論した。第6章では、以上の結果について総括した。

以上要するに、本論文では、九州大学にある直線プラズマ PANTA において、多チャンネルプローブを用いストリーマ現象を精密に観測した。その結果、ストリーマおよびメディエータがソリトンとしての性質を持つこと示し、「互いに非線形相互作用する2種のソリトン波の共存」、ストリーマ構造の出現に伴う輸送特性を調べ、プラズマ中心と端を直接的に結びつける弾道性、冪則に従う輸送量のテイル部分の統計的性質を示した。また、ストリーマの電場による制御性についても言及した。プラズマ乱流の基礎過程であるストリーマの実験研究を通して、乱流プラズマの構造と輸送の理解に大きく貢献した。