

## トロイダルプラズマの乱流と帯状流の実験研究

## Experimental Studies of Turbulence and Zonal Flow in a Laboratory Plasma

# 藤澤 彰英 [1]

# Akihide Fujisawa[1]

[1] 核融合研

[1] NIFS

磁場閉じ込めプラズマ中の乱流は粒子・運動量・エネルギーの輸送を決定しプラズマの熱的構造を決定する。1982年にHモードが発見されて以来、乱流輸送が分岐することで生じる様々なトロイダルプラズマの構造が観測されてきた。20年以上に渡る研究の成果として、プラズマ中の内部電場(流れ)構造が乱流および輸送に影響を与え、プラズマの熱構造を遷移させることが示されている。巨視的な電場のシア構造(マクロ)が乱流(ミクロ)を安定化する効果をもつ。この効果がHモードに代表される輸送障壁(局所的に輸送が減少する領域)形成の主要なメカニズムでありうる事が確かめられている。

一方、最近の研究では、プラズマ乱流は自身の非線形結合を通じて帯状流(メソスコピックな流れ)を生成すること、また、両者の相互作用が乱流の飽和レベルや輸送に根源的な影響をもつこと、がシミュレーションや理論によって示されている。帯状流は、 $m=n=0$ の対称性をもつ流れで、有限の径方向の端数をもつ。また、対称性のために輸送には寄与しない。乱流と、輸送に寄与しない帯状流の間に近似的なエネルギーの保存関係が成立する。そのため両者のバランスによってプラズマの輸送が決定される。現在、プラズマの輸送と構造の研究は、乱流、帯状流、電場と3つの要素から考える新しいパラダイムへと向かい発展しつつある。

「帯状流の存在」の実験的確認は、このパラダイム転換を支えるための重要な要件となっていた。2004年に、CHS(コンパクト・ヘリカル・システム)では、トロイダル方向の2カ所を観測する重イオンビームプローブによって径方向電場の長距離相関を計測し「帯状流」を実験的に検証した[1]。帯状流の同定に必要な条件である電場揺らぎの長距離相関あるいは対称性を示し、帯状流のダイナミクスおよび径方向の構造(図1参照)を得ている。また、同計測システムから、乱流と帯状流の非線形関係(因果関係)を示すデータも得られている。ウェーブレット解析を用いることで、乱流の間欠的な振舞が見いだされ帯状流の振動の位相と相関していることが示される。また、同解析法を用いて粒子束の時間変化を評価すると、輸送障壁崩壊前後のマクロな電場構造が輸送(ミクロ)に与える影響が明快に示されている。

他の実験室プラズマにおいて、乱流と帯状流および両者の関係についての観測や解析も行われている。帯状流の振動分岐であるGeodesic acoustic mode(GAM)については多数の装置から多くの観測が蓄積されつつあり先進的な解析法も適用され理解も進んでいる。たとえば、乱流と帯状流の非線形過程を定量化するための方法としてバイコヒーレンスが有力である。JFT-2Mでは実際に最近バイコヒーレンス解析によりGAMと背景乱流との相互作用を定量化することに成功している。

おわりに、乱流に関係する構造や現象は自然界に普遍的である。たとえば、木星をはじめとする惑星の縞模様や地球のジェット気流、太陽のタコクラインなどである。実験室では、帯状流の構造とダイナミクスおよび乱流との相互作用の観測を通して、磁場閉じ込めプラズマの構造形成のメカニズムに踏み込むところへと進展している。このような実験室プラズマでの観測は、天体にて起こる様々な乱流現象の解明につながるものであろう。本講演では、3つの要素、乱流、ゾーナル流、巨視的流れ、それらの結合関係に関するCHSで得られた最近の実験結果について報告する。