

プラズマ乱流計測シミュレータ

糟谷直宏

核融合プラズマは多くの渦が入り乱れた乱流という状態にあります。面白いことにプラズマは乱れながらも構造を作ります。例えばある方向に長く伸びた渦や短い距離で流れの方向を変えるパターンで、「乱流構造」と呼ばれます。近年この乱流構造がプラズマの熱や粒子の輸送にもたらす効果が重要であるとわかり、世界的に研究が進められています。理論の進展とともに、実験でも高い精度の計測器が開発されたことにより、プラズマの状態が明らかになってきています。本稿ではその理論と実験の研究の橋渡しを担うべく、現在開発を進めている「乱流計測シミュレータ」について紹介します。

プラズマ中では多くの粒子が互いに力を及ぼしあっています。その振る舞いをモデル化して、計算機シミュレーションで予想することで、複雑な現象を理解することができます。近年の計算機性能の向上から、多くのデータ数を持つ計算が可能になりました。そのような空間3次元

の時間変化のデータに対して、実験計測を模擬した操作を行うのが乱流計測シミュレータです。解析の手順は以下の通りです。まず、プラズマを流体として扱うモデルを用いてプラズマの圧力、電位などの時間変化をスーパーコンピュータで計算します。得られたデータを時刻ごとに3次元空間の全領域にわたって大容量ハードディスクへ保存し、解析します。解析には多くの時刻についてのデータが必要となり、全データはひとつのプラズマ条件に対して数テラバイトの大きさとなります。解析は手元のコンピュータで行います。実験でいうプラズマを作る装置がスーパーコンピュータで、プラズマを測る機器がコンピュータにあたるといえます。様々な計測法を模擬してデータを数値化し、シミュレーションで得られている乱流構造が実際の実験ではどのように見えるのか実験計測への指針を示します。

ここで乱流構造の解析例を示します。乱流構造が形成される時の特徴を明らかにするために、図1(a)のような軸方向に磁場がかけられた円筒形プラズマで、密度の勾配によって駆動される不安定性のシミュレーションを行いました。そして不安定なモードの結合から帯状流や半径方向に伸びた強い渦(ストリーマ)といった乱流構造の形成を得ました。図1(b)にストリーマの断面図を示します。強い渦が方位角方向に局

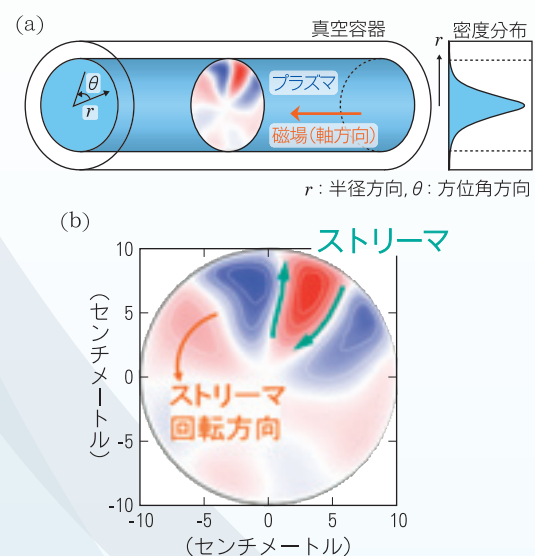


図1 (a)円筒形プラズマの模式図。軸方向に磁場がかけられています。(b)シミュレーションで得られた、円筒断面上での電位分布。半径方向に伸びた強い渦(ストリーマ)が形を保ちながら回転します。

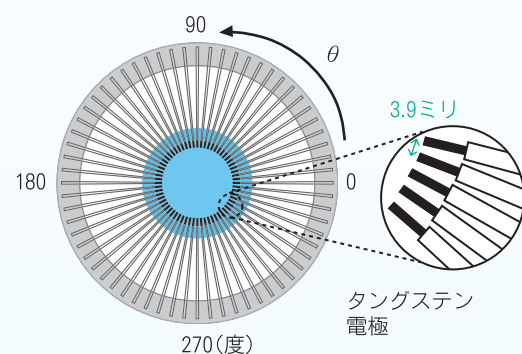


図2 LMD-U装置に備えられた方位角方向に並んだ64個の探針列

在しており、形を保ったままこの場合は反時計回りに回転します。このストリーマの存在は理論的に予想されていましたが、実験での明確な観測はありませんでした。そこでシミュレーションで得られた構造が、実験ではどのように観測されるべきかを検討しました。九州大学のLMD-U装置は円筒形のプラズマを生成し、磁化プラズマの物理的な特性を研究する実験装置です。プラズマ中に挿入することで密度や電位を測定できる探針を多数備えており、詳細なプラズマ分布計測ができます。図2のような64個の探針列により方位角方向の密度分布の測定を行う場合を考えます。シミュレーションデータ上でこの測定を模擬するとストリーマは図3(a)のように見えます。LMD-U装置で測定した結果が図3(b)で、特徴的なパターンの存在からストリーマが形成されていることがわかります。このように、乱流計測シミュレータによる予測が世界初のストリーマの実験観測につながりました。

核融合科学研究所の大型ヘリカル装置(LHD)のようなヘリカルプラズマの解析も進めています。磁場の曲率や圧力の勾配によって駆動される不安定性について乱流シミュレーションを行いました。そしてそのデータに対してLHDで密度や電位などのゆらぎの計測に威力を発揮している計測器を模擬した解析を行っています。

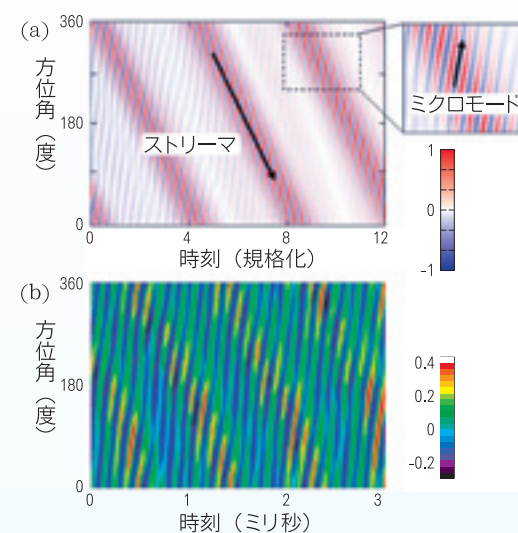


図3 ストリーマを方位角方向の探針列で観測した時の密度揺らぎ分布の時間変化。(a)がシミュレーション、(b)が実験観測の結果です。

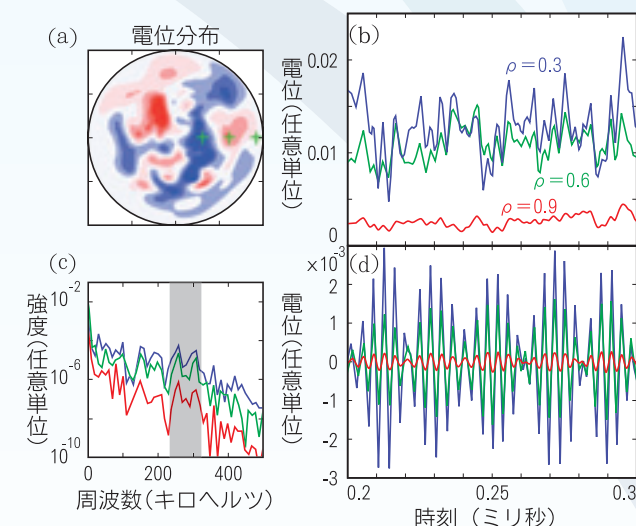


図4 電位揺らぎ(a)とその異なる半径位置3点(a)上に十字で示された点、 ρ は規格化小半径での時間変化(b)、および周波数スペクトル(c)。図(c)のグレー領域のゆらぎを取り出したものが図(d)です。

図4にシミュレーションデータの解析例として、一見ばらばらな時間変化のデータから隠れたモードを検出する方法を示します。図4(a)の断面図にあるような電位ゆらぎに対して異なる半径位置3点での電位の信号を取り出します(図4(b))。これだけではそれぞれに関係があるのかわかりません。そこで周波数を分解し、領域を区切って各成分を取り出して比較します。すると図4(c)のグレー部分の成分は図4(d)のように強度変化が同期しており、半径方向に広がった構造が存在することがわかります。この周波数帯に存在する複数のモードが結合して同期をもたらしています。シミュレーションデータからはこのように特徴的なパターンをきれいに抜き出すことができ、その観測の仕方を検討できます。重イオンビームプローブでは電位分布を高い時間分解能で測定できるので、上記の解析が適用できます。

以上、乱流シミュレーションと実験計測を比較することで乱流構造の形成機構を研究する乱流計測シミュレータについて述べました。今後は実際の装置の磁場配位を反映したシミュレーションによる実験との比較やエネルギー伝達の定量的な評価により乱流構造の形成が熱や粒子の輸送へもたらす効果の解明につなげていきたいと考えています。

(核融合理論シミュレーション研究系 助教)