

スーパーコンピュータで探るプラズマ乱流

沼波 政 倫

大型ヘリカル装置(LHD)のような磁場閉じ込めプラズマ装置では、非常に高温のプラズマを磁場によって閉じ込めていますが、プラズマの温度や密度は均等には分布していません。これが曲者で、密度や温度の不均一性に伴い、プラズマは乱流と呼ばれる複雑なゆらぎを持つ状態になることがあります。このとき、プラズマの熱や粒子がプラズマ内部から外部に向けて運ばれる現象(これを輸送といいます)を引き起こしてしまいます。この輸送の強さは非常に大きく、プラズマの閉じ込め性能を大きく左右します。従って、乱流による輸送現象の仕組みを理解し、輸送の強さを正しく予測することは、核融合炉の実現には不可欠です。このプラズマ乱流の理解には、プラズマ中の荷電粒子の運動の効果をとり入れた細かいスケールでの解析が必要になるため、大規模な計算機シミュレーションが必須になります。今回は、スーパーコンピュータを用いて行っているプラズマ乱流シミュレーション研究と、将来の核融合炉に向けた取り組みについてお話しします。

大規模計算が必要なプラズマ乱流

磁場閉じ込めプラズマでは磁場の影響で、荷電粒子は旋回運動をします。プラズマ乱流のスケールはこの旋回半径と同程度で、水素イオンだと数ミリメートル程です。このスケールで粒子と電磁場は相互作用し、最終的に乱流状態を引き起こします。従って、プラズマ乱流を理論的・数值的に解析するには、粒子運動の効果を含める必要があります。これを正直に取り扱おうとすると、3次元空間上のプラズマ粒子の分布だけでなく、どの方向にどの程度の速度を持った粒子がどれくらい存在するかを考慮し、速度の空間にも3次元分の自由度を用意した合計6次元空間上のプラズマ粒子分布の時間変化を解かなくてはなりません。最近のコンピュータの性能は非常に高いのですが、さすがにこのままでは、どんなに速くて大きな計算機をもってしても太刀打ちできる規模ではありません。しかし、幸運なことに、磁場閉じ込めプラズマでは、

強力な磁場による旋回運動の性質を利用して、速度の空間次元を一つ少なくした5次元空間上に近似することができます。これにより、計算機による数値シミュレーションが可能になります。可能になったといっても、例えばLHDのような磁場構造を持つ場合、5次元空間上に500億点を超える計算格子点を用意する必要があります。これをスーパーコンピュータの能力を最大限に使って計算し、研究を進めています。

スーパーコンピュータで再現されたLHDプラズマ乱流

LHD実験で実際に観測される乱流現象を計算機上で扱うには、実験で用いられている様々な条件をできる限り正確に考慮しておく必要があります。そのため、実験結果から磁場構造を正確に推定し、シミュレーションに反映させます。以前は計算機の能力が非力であったため、考慮できる磁場構造も制限されていました。しかし、核融合科学研究所にあるスーパーコンピュータ「プラズマシミュレータ」を駆使することで、LHDのように複雑に曲がりくねった磁場構造も正確に取り込んだ計算が可能になり

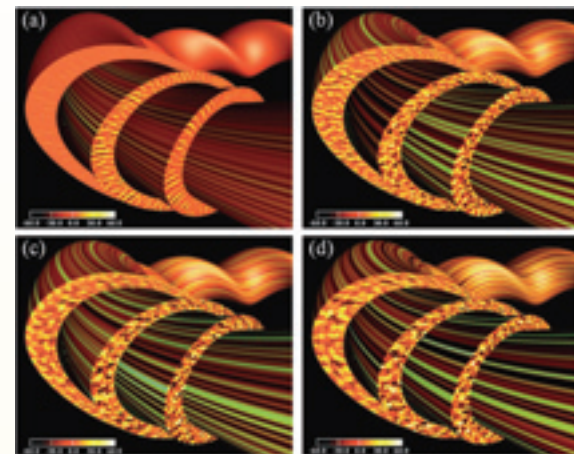


図1 大規模シミュレーションによって得られたLHDプラズマにおけるプラズマ乱流の時間変化。色の濃淡で示されたプラズマ密度のゆらぎが、(a)→(d)の順に複雑な乱流構造を伴って変化していきます。

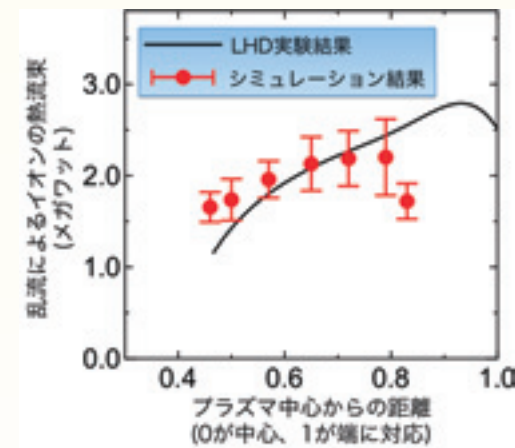


図2 LHD実験及びシミュレーションから得られた乱流による水素イオンの熱流束の分布。実験結果(実線)とシミュレーション結果(赤点)の大部分が誤差の範囲内でよく一致しています。

ました。シミュレーションでは、図1のように複雑な乱流構造の時間変化を追いながら解析を進め、実験結果と照らし合わせていきます。乱流による水素イオンの熱流束(熱がプラズマ外部へ流れる強さ)の実験結果と、シミュレーションによる計算結果を比較したものが図2です。以前の小規模な乱流シミュレーションでは、乱流輸送現象の定性的な説明までが限界でしたが、この精密な計算では、大部分の領域で実験結果を定量的に再現できていることがわかります。全てのプラズマ実験に対して同様の結果を得るには、まだ課題も多いのですが、計算機シミュレーションによりプラズマ中の熱の伝わり方の定量的な評価ができることが示され、今後の理解が格段に進むと期待しています。

プラズマ乱流の予測に向けて

これまで述べてきたように、スーパーコンピュータによる大規模シミュレーションはプラズマ乱流の解析にはとても有効です。しかし、残念ながら、計算量が極端に多いという大きな欠点があります。例えば、先ほどのLHDプラズマでの計算では、図2の一点のシミュレーションデータを得るために、プラズマシミュレータで1万個を超えるCPUを同時並列的に利用しても、実に百時間を超える計算時間を要します。将来の核融合炉を念頭にして、実験に先んじてプラズマ輸送を予測しようと思っても、このように長い計算時間を要する大規模シミュレーションでは、現実的な解析方法にはなり得ません。何とかして、このプラズマ乱流シミュレーションと同様の計算結果を、もっと計算量の少ない

方法で再現することが必要です。そのような中、これまでに蓄積された膨大なシミュレーションデータを解析し直してみると、簡単な線形解析(プラズマの乱流が発達し始める初期的な振る舞いの解析)と、長時間の乱流シミュレーションを継続して得られる物理量との間に明らかな関係性が存在していることがわかりました。そして、乱流による熱対流を抑制する物理機構について着目することで、この関係性を説明できる数理モデルを構築することに成功し、乱流シミュレーションでは膨大な計算量を要していた熱輸送係数(熱の伝わりやすさを表します)の結果を、僅か数パーセントの計算量で再現することが可能になりました(図3)。実際の炉の解析に必要な全ての物理効果を含めた予測方法を開発するには、それらの効果を組み込んだ大規模な乱流シミュレーションがまだまだ必要ですが、適用範囲が限定できる場合には、プラズマの閉じ込め性能予測の研究にも既にこの予測手法が活用され始めています。

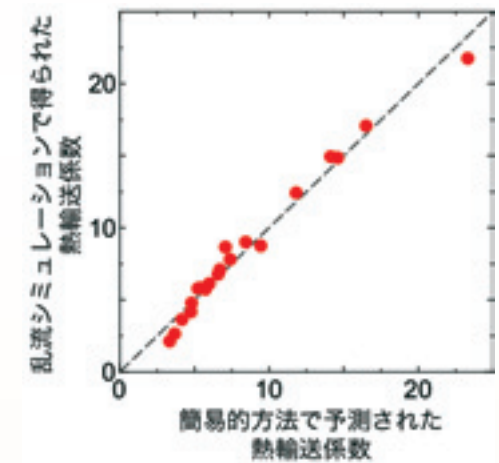


図3 簡易な方法で予測されたイオンの熱輸送係数と乱流シミュレーションの結果との比較。簡易的方法により、計算量の高いシミュレーション結果をほぼ等しく予測できています。

スーパーコンピュータの性能は急速に発展しています。日本で最も高速な計算機である「京コンピュータ」も勿論、我々のプラズマ乱流研究には大いに役立っています。近い将来、核融合炉のプラズマをスーパーコンピュータ上に完全に再現して、様々な炉の性能予測が簡単にできる日が来るかもしれません。その日ができるだけ早く来るように、シミュレーション研究者は日々研究に励んでいます。

(核融合理論シミュレーション研究系 助教)