

# 核融合プラズマシミュレーションとその大規模並列ベンチマーク

渡邊 智彦

自然科学研究機構 核融合科学研究所 シミュレーション科学研究部

## [アブストラクト]

磁気核融合研究における中心的課題の一つは、高温プラズマの閉じ込め性能を左右する乱流輸送機構の理解と評価・予測である。そのためにプラズマ乱流輸送の大規模な運動論的シミュレーションが進められている。そこでは、粒子分布関数の5次元位相空間上の挙動を取り扱う。講演ではその概略を述べるとともに、核融合プラズマを扱う運動論的シミュレーション・コードについて種々の大規模並列計算機システム上で実行性能評価を行った結果、および将来の方向性などについてあわせて紹介する。

## [キーワード]

核融合、プラズマ、数値シミュレーション、大規模並列計算

## [講演要旨]

### 1. はじめに

磁気核融合は、1億度を超えるプラズマ(電子とイオンに電離した超高温気体)を磁場によって閉じ込め、そこで発生する核融合反応からエネルギーを取り出そうというものです。ドーナツ型の装置中心部と周辺部では密度や温度に大きな差ができます。水や空気などの通常の流体と同様に、プラズマでもこの温度差をもとに一種の対流が発生します。その対流は複雑に乱れた乱流となり、装置中心部の高温度・高密度領域から周辺部へと向けて熱や粒子が運ばれる「異常輸送」と呼ばれる現象を引き起こします。こうした輸送がどのようにして発生するかを理解し、またその評価と予測を行うことがプラズマ閉じ込め特性の改善に重要であり、そのために大規模なシミュレーション研究が各国で進められています。講演の前半ではその取り組みの一例をシミュレーション結果とともに簡単に紹介します。

一方、こうしたシミュレーションには大規模かつ高性能なスーパー・コンピュータの利用が不可欠であり、その研究計画を考える際に、実際のコードを用いた実行性能評価が有用です。講演の後半では、日米欧の複数の大規模システムを利用して実行性能評価を行った結果を紹介します。

### 2. プラズマ乱流輸送シミュレーションについて

私たちの身の回りの水や空気の流れは、しばしば乱流となっています。静かな流れに比べて乱流は非常に活発に熱や粒子の輸送・混合を起こすことが知られています。イオンや電子などの荷電粒子からなるプラズマでは、電磁場と影響を及ぼしあいながら流れや渦が発生します。さらに、高温プラズマは、水や空気のように流体として扱うことができず、「個々の粒子がどのような運動をするか」ということを考える運動論的アプローチが必要となります。磁場閉じ込め核融合プラズマの運動論的シミュレーションでは、現実の3次元空間に加えて、異なる粒子速度を考慮するために2次元の速度空間を扱い、計5次元の位相空間においてどのような粒子分布が生ずるかを計算します。

こうした大規模なシミュレーションは、「地球シミュレータ」クラスのスーパー・コンピュータを使うことで、最近ようやく可能となりました。核融合科学研究所では、大型ヘリカル装置(LHD)を使って、ヘリカル状にねじれたドーナツ型のプラズマを発生させる実験を行っています。私たちは、そこで生じるプラズマ

乱流輸送のシミュレーション研究を進めています。シミュレーションでは、5次元座標空間を500億以上の格子点を使って表現し、それぞれの点での粒子分布を評価して、そこから作り出される乱流輸送を調べます。その結果、不均一な温度分布をもとに多数の渦が発生し、乱流輸送を引き起こす様子が明らかになってきました。なかでも特に興味深いのは、磁場で閉じ込められたプラズマ内部に、乱流を抑える働きをもつ大規模な流れが自然に発生することです。これはゾーナルフローと呼ばれ、木星や地球大気のジェット気流とよく似た性質をもっています。一連のシミュレーションにより、ヘリカル磁場分布を工夫することで強いゾーナルフローを作り出し、異常輸送を減少させることができることが分かってきました。

こうした事例にみられるように、核融合プラズマ閉じ込めの理論研究には大規模シミュレーションの活用が必須となっています。ITER計画や将来の核融合装置設計に向けて、プラズマ性能の定量的な評価と予測は、今後さらに重要となるでしょう。

### 3. 大規模並列ベンチマークについて

上述したように、核融合プラズマの運動論的シミュレーションは、膨大な計算機資源を必要とします。その進展には、大規模並列スーパー・コンピュータの効果的な利用が不可欠です。私たちは、核融合科学研究所で開発されてきた2つのシミュレーション・コードを、地球シミュレータ、東大のSR11000、米国NERSCのFranklin、テキサス大学のRangerなどで実行し、その実行性能評価を行ってきました。一つは、2で紹介した乱流輸送シミュレーションに用いたGKVコードで、5次元位相空間上のスカラー関数についての非線形移流拡散方程式を解くものです。二つ目は、高エネルギー粒子とプラズマ流体との非線形相互作用を扱うハイブリッド・モデルを用いたコードです。両者とも、10,000コアを超える高い並列度においても、その実行性能に良好なスケールリングを見ることができました。ただし、いずれの場合もメモリー性能への要求が比較的高く、特にGKVコードではその特徴が顕著に現れました。

こうして行われた実行性能のベンチマーク結果は、核融合科学研究所に導入された新プラズマ・シミュレータ(日立製作所製SR16000 128ノード)の性能評価にも役立てられました。導入された新システムにおいては、Simultaneous Multi Threadingとコンパイラによる自動並列化機能を積極的に活用しています。特にGKVコードにおいては、MPIとのハイブリッド並列が、通信量の削減と移植の容易さの点で有効に機能しています。

こうしたベンチマーク評価は、より最近の計算機システムにおいても継続的に進めており、今後の研究計画のための基礎データとして役立てたいと考えています。

### 4. おわりに

ここで紹介した磁気核融合プラズマの乱流輸送シミュレーションは、大規模なスーパー・コンピュータと並列プログラム技術を用いることではじめて可能になり、この数年で大きく進展してきた分野です。ITERをはじめとした今後の核融合プラズマ性能の予測に向け、より包括的な核融合プラズマ・シミュレーションの進展が期待されています。そのためには、計算モデルや手法の拡張・改良が不可欠であると同時に、計算機性能のさらなる向上が必要となります。計算機技術の進歩と相まって、この分野の研究は今後もより一層進展していくことでしょう。

以上