

# プラズマにおける統合シミュレーションの進展

京都大学大学院工学研究科

福山 淳

プラズマは個々の荷電粒子としての性質と連続的な電磁流体としての性質を合わせ持ち、それらの記述には多様な手法が用いられている。プラズマ中に現れる現象の時間・空間スケールは非常に幅が広く、単一のシミュレーションモデルでは記述できない。そのため、これまでは個々の現象がそれぞれに適切な時間・空間スケールをもつシミュレーションによって解析され、理論や実験との比較を経て、新しい物理的知見が得られてきた。しかしながら、複雑な振る舞いを示すプラズマ全体を生成から消滅に至る維持時間すべてにわたって記述するためには、個々の現象を記述するシミュレーションモデルを連携させ、それらの現象間の相互作用を適切に取り入れる総合的な枠組みが必要となる。本講演では、磁気閉じ込め核融合と高周波生成プラズマを例として、統合シミュレーションコードの進展について述べる。

国際熱核融合実験炉 (ITER) や将来の核融合炉を視野に入れて、磁気閉じ込め核融合研究においては、核燃焼プラズマの制御や運転シナリオが注目を集めている。核燃焼プラズマにおいては、プラズマ加熱の大部分が核融合反応によって生成されたアルファ粒子加熱であり、現在の実験装置のように外部からの加熱によって維持されているプラズマとは大きく異なる。また、プラズマの高い圧力勾配によって駆動される自発電流が、閉じ込め磁場配位に必要なプラズマ電流の大部分を占めるようになり、その制御には精密さが要求される。アルファ粒子加熱とそれに伴う自発電流が支配的なプラズマは現在の装置では実現できないため、その振る舞いの予測には、理論モデルに基づき、実験データによって検証されたシミュレーションを必要とする。磁気閉じ込めプラズマにおける物理現象は、時間・空間スケールによって、波との相互作用、乱流現象、電磁流体的安定性、輸送現象、周辺プラズマ等に大別される。それら個々の現象を解析するシミュレーションコードあるいはその結果を取り入れて、プラズマ全体の時間発展を記述する統合コードの開発が急務である。統合コードにはいくつかのレベルが考えられ、順次発展していくことが予想されるが、その発展に対応するためには、コード間のデータインターフェースの標準化、分散処理等の実行形態の標準化等が必要と考えられ、その検討が「核燃焼プラズマ統合コード」活動として、国内の大学・研究機関の共同研究の形で進められている。

核燃焼プラズマ統合コードの基盤となるコアコードとして、また現在のトカマクプラズマを記述するシミュレーションコードとして、トカマク統合輸送解析コード TASK が開発されている。このコードには、平衡、輸送、速度分布、波動伝播、実験データインターフェース等がモジュールとして含まれ、相互のデータのやりとりが標準化され、いくつかのモジュールは MPI ライブラリによる並列処理が可能である。図1にその構成図を示す。炉心プラズマについてはかなりの部分を解析することが可

能であるが、巨視的な安定性解析、周辺プラズマ解析等のシミュレーションと連携を図るとともに、各モジュールの拡張を図ることが必要である。また、国際トカマク物理活動(ITPA)の一環として構築されている空間分布実験データベースとの比較による輸送モデルの検証も進められており、大規模乱流シミュレーションによる裏付けと合わせて、統合コードの信頼性を高めていくことが必要である。さらに国内では大型ヘリカル装置(LHD)等にも適用するため、3次元配位への拡張も始まっている。

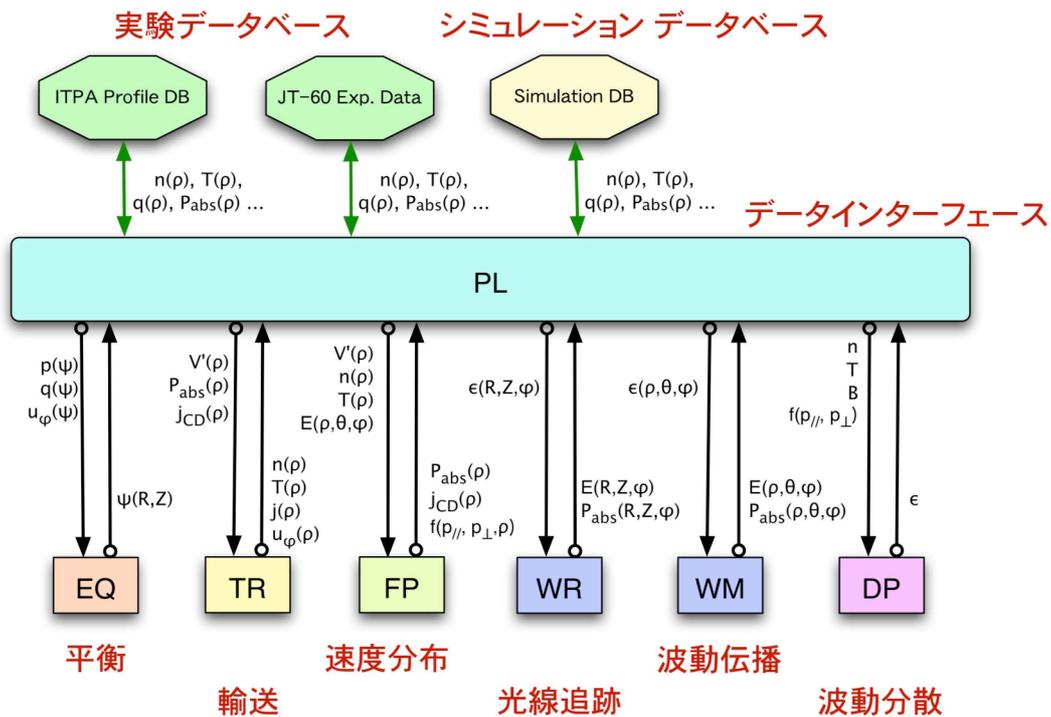


図1. トカマク統合輸送解析コード TASK の構造

もう一つのプラズマ統合コードの例として、プロセスプラズマや基礎プラズマ実験における高周波とプラズマの相互作用を総合的に解析するために開発されている有限要素法プラズマ解析統合コード PAF コードを紹介する。このコードでは、プラズマ中の波動伝播、輸送解析、流体解析、粒子シミュレーションのすべてが、境界形状適応性の高い三角形要素を用いた有限要素法で解析できる。現在のところ、主に2次元解析であるが、波動伝播解析については既に3次元解析が可能であり、並列化が進められている。講演では、解析例と今後の課題について述べる。