

統合トカマクモデリングコード TASK の開発と統合シミュレーションの展望

Development of Integrated Tokamak Modeling Code TASK and Prospect of Integrated Simulation

福山淳

Atsushi FUKUYAMA

京都大学

Kyoto University

核融合炉心プラズマの予測、運転シナリオの開発、核融合炉の概念設計にあたっては、既存装置における実験結果や第一原理シミュレーションを用いた計算結果によって検証された信頼性の高い炉心プラズマ統合シミュレーションが必要となる。そのためには、MHD 平衡、コア・周辺・ダイバータを含めた輸送現象、NBI や波動による加熱・電流駆動、高速イオンの生成と閉じ込め、巨視的安定性等、炉心プラズマ中のさまざまな物理現象をできるだけ自己無撞着に解析することが必要である。しかしながら、炉心プラズマでおこる現象の時間スケールと空間スケールは非常に幅が広い。電子サイクロトロン波による加熱や輻射の周波数は 100 GHz 以上となるが、放電時間は 1000 s を超える。電子のサイクロトロン半径やデバイ長は 0.1 mm 以下であるのに対して、装置サイズは 10 m を上回る。したがって単一の物理モデルでは記述することはできないため、多数の解析モジュールを組み合わせた統合モデリングコードによるシミュレーションが求められている。また、リアルタイムに近い簡易な解析から、物理現象解明のための詳細な解析まで、目的に応じたさまざまな解析レベルのシミュレーションが必要とされる。そのため、炉心プラズマの統合モデリングには個々の現象を記述するモジュールとそれらを結合するフレームワークが必要となり、それらの研究と開発が世界的に進められている [1]。

統合トカマクモデリングコード TASK[2,3] は、1992 年頃から当初は岡山大学で、現在は京都大学で開発が進められてきた。波動加熱に向けて開発されていた波動伝播解析と速度分布関数解析に、プラズマの時間発展を記述するための輸送解析と MHD 平衡解析が加えられ、統合モデリングコードとして開発が進められるようになった。当初は解析モジュール間の共通のデータ設定およびデータ交換を行うために

PL モジュールが開発された。その後 2003 年から始まった核燃焼プラズマシミュレーション構想 (BPSI) [1] の一環として、より汎用性が高い標準データモデル BPSD が開発され、TASK に組み込まれた。また、ITER 物理 R&D 活動で開発された国際トカマク分布データベースや、実験装置固有のデータとのインターフェースも開発されている。

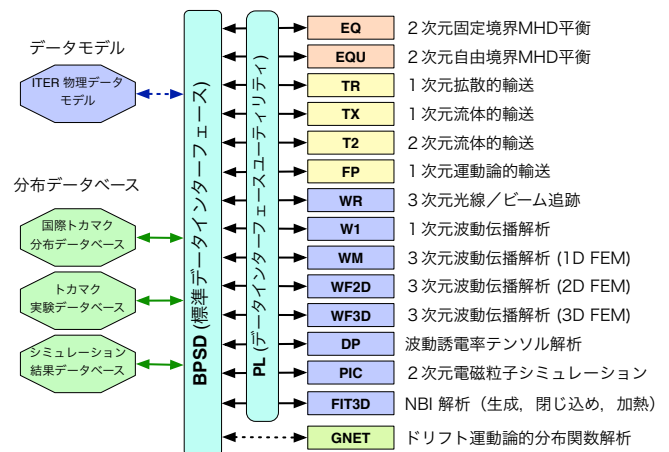


図 1: 統合トカマクモデリングコード TASK の現在の構成

TASK の現在の主な構成を図 1 に示す。平衡解析には、プラズマ境界形状をあらかじめ与える固定境界条件とポロイダルコイル電流とプラズマ中の圧力・電流分布からプラズマ境界形状を定める自由境界条件の MHD 平衡解析モジュールが用意されており、EFIT 等の他の平衡コードからの出力データを読み込むこともできる。プラズマの密度や温度等の時間発展を記述する輸送解析としては、通常の拡散型輸送方程式を解く TR、多流体の運動方程式を解くことにより過渡的な現象も記述できる TX、ドリフト運動論に基づき運動量分布関数 $f(p_{\parallel}, p_{\perp}, \rho, t)$ でプラズマを記述する FP による 1次元解析に加えて、周

辺プラズマを含めた2次元輸送解析 T2 の開発も視野に入れている。波動伝播解析には、電子サイクロトロン波や低域混成波の伝播を光線追跡法やビーム追跡法により記述する WR, イオンサイクロトロン波やアルヴェン固有モード等を記述するためにマクスウェル方程式の定常境界値問題として波動光学的解析を行う WM, WF2D, WF3D, 誘電率テンソルを求める DP 等が用意されている。NBI 加熱に関しては, TR にペンシルビームモデルが組み込まれており, より詳細な解析は FIT3D で可能である。

TASK は主にトカマクプラズマを対象としているが, 波動伝播解析は様々な配位のプラズマに適用可能であり, プラズマプロセシングのための円柱プラズマ配位, 3次元ヘリカル配位, 球状トカマク配位, 非軸対称ミラー配位, 磁気圏型プラズマ配位等に用いられている。ヘリカル配位における輸送解析については, 径電場形成や新古典輸送のモデルを付け加えた予測解析 TASK3D, 実験解析 TASK3Da の開発が京大と核融合研の共同で進められている。また, 国内では九大, 筑波大, 東大, 国外ではタイ, インド, 中国等との共同研究も進展している。

近年は加熱や核融合反応によって生成された高速イオンや高速電子の振る舞いに着目した運動論的統合モデリングへの拡張が進められている。各粒子種の位相空間分布関数(運動量2次元, 実空間1次元)の時間発展を解析する FP では, 並列処理の拡張により, ITER の燃焼立ち上げがシミュレーションでできるようになった。図2に α 粒子加熱(He)が支配的になる前となった後の分布関数の例を示す。燃焼立ち上げを支配する高速イオンとバルク成分との衝突緩和に, 分布関数の形状が大きく影響を与えることが確認されている。また, 高速イオンによるアルヴェン固有モードの励起を解析するため, 任意の運動量分布関数に対して固有モードを計算できるようになった(図3)。さらにディスラプション時の逃走電子の生成についても解析が進展している。

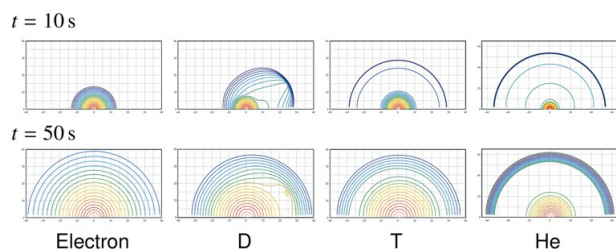


図2: ITER 燃焼立ち上げ時の運動量分布関数 ($\rho = 0.15$)

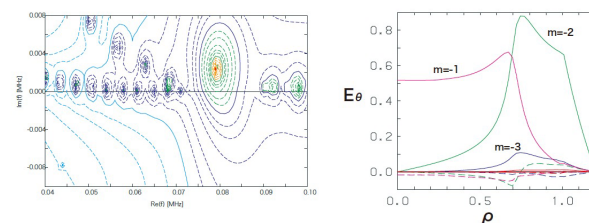


図3: 任意運動量分布関数を用いて計算された TAE 固有周波数と固有関数

同様な統合シミュレーションコードは, 国内では量研機構が TOPICS を開発しており, 欧米でも JETTO, CRONOS, ASTRA, TRANSP, ONETWO 等の輸送コードをベースに統合コードが開発されている。欧州では EFDA のタスクフォースが統合モデリングのフレームワーク (CPO/UAL) を開発し, 米国でも最近 OMFIT が統合フレームワークとして開発されている。一方, ITER では各極が開発したコードを結合して統合シミュレーションを行うためのフレームワーク IMAS を欧州が開発したフレームワークをベースに開発している。IMAS のデータモデルは, 解析モジュール間のデータ交換にとどまらず, コードのベンチマークテストや装置データや実験データの格納にも利用されつつあり, その重要性は高まってきている。TASK で使用している BPSD データモデルも IMAS データモデルに対応させる作業を進めているが, IMAS データモデルは仕様が大きいので, 通常データの交換は BPSD で行い, 必要に応じて IMAS データモデルに変換する形とする予定である。

統合トカマクモデリングにはまだ課題が多く残されている。輸送モデリングにおいては, コアプラズマ輸送と周辺プラズマ輸送の結合がダイバータ熱負荷制御の観点からも優先課題である。乱流輸送や巨視的不安定性等の第一原理の大規模非線形シミュレーションの結果をどのように取り入れるか, ビッグデータである実験データとの比較による妥当性検証をどのように進めるかは, 今後多くの試みを進める必要がある。今後も各解析モジュールの高度化・高性能化を進めるとともに, 原型炉設計に向けた効率化・制御系との結合の開発を進めることが必要であろう。

- [1] 福山淳, 矢木雅敏, プラズマ・核融合学会誌, **81** 747 (2005).
- [2] 福山淳, プラズマ・核融合学会誌, **85** 597 (2009).
- [3] <http://bpsl.nucleng.kyoto-u.ac.jp/task/>