



核燃焼プラズマ統合コード構想とその進展

福山 淳, 矢木雅敏¹⁾

(京都大学大学院工学研究科, ¹⁾九州大学応用力学研究所)

Burning Plasma Simulation Initiative and Its Recent Progress

FUKUYAMA Atsushi and YAGI Masatoshi¹⁾

Graduate School of Engineering, Kyoto University, Kyoto 606-8501, Japan

¹⁾Research Institute for Applied Mechanics, Kyushu University, Kasuga 816-8580, Japan

(Received 10 June 2005)

The purpose and recent progress of the Burning Plasma Simulation Initiative (BPSI) are discussed. Simulation of burning plasmas requires integrated modeling of various physics phenomena with wide-ranging spatial and time scales. The activities of the BPSI are of three types: development of the framework for integrated simulation codes, development of integrated modeling of multi-scale physics, and implementation of distributed parallel processing. Similar activities have been reported in the United States and the European Union. Features of the integrated transport code, TASK, being developed as a reference code for BPSI, are also described. Finally, a summary is given and future issues are discussed.

Keywords:

tokamak, transport, transport barrier, reversed magnetic shear, steady state operation

1. はじめに

ITER や核融合炉において実現される核燃焼プラズマは、非常に自律性の高いプラズマであり、空間的にはプラズマ全体にわたって、時間的には放電時間全体にわたって、さまざまな物理過程が密接に結びついている開放系である。核融合によるエネルギー源を早期に実現する上で、このような核燃焼プラズマの振る舞いを定量的に予測し、それを制御する手法を開発することは、最重要研究課題の一つとなっている。そのためには、炉心・周辺・ダイバータを含めた装置内のプラズマ全体について、立ち上げ・維持・突発事象・立ち下げを含めた放電時間全体にわたって、自己完結的な時間発展シミュレーションを実現することが必要となる。

核燃焼プラズマが関与する現象は、Fig. 1 に示すように、100 GHz から 1,000 s にわたる広い時間スケールと、10 μm から 10 m にわたる広い空間スケールに広がっており、単一のシミュレーションコードで記述することは当面不可能である。したがって、物理現象に応じて複数のコードを相互に結合させたシミュレーションが必要となる。これまでの核融合プラズマの大規模シミュレーションは、MHD 不安定性、乱流輸送現象、波-プラズマ相互作用をはじめとするさまざまな非線形物理現象の解明に大きな成果をあげてきた。その多くは、個々の現象を詳細に解析し、その物理機構を解明しようとするシミュレーションであったが、最近異なる時間空間スケールが関与する多階層プラズマシミュレーションの研究が進展しつつある[1]。しかしながら

author's e-mail: fukuyama@nucleng.kyoto-u.ac.jp

ら、プラズマ中に生じるさまざまな現象を記述する多数のコードを連携させ、プラズマ全体を系統的に記述するための手法はまだ確立されていない。

さらに、核燃焼プラズマの定量的予測や制御手法開発は、ITER における実験計画の検討や運転シナリオの作成を進める上で戦略的にも非常に重要であり、利用可能な計算機資源の範囲で、できるだけ早期に実現することが望まれている。

このような核燃焼プラズマ統合シミュレーションの実現に向けて、国内の大学、核融合科学研究所、日本原子力研究所等の研究協力の形で、核燃焼プラズマ統合コード構想の活動が2002年から進められている。ここでは、その現状と今後について解説する。次章では核燃焼プラズマ統合コード構想の目標と活動について、第3章では欧米での同様の取り組みについて、そして、第4章では本構想のコア

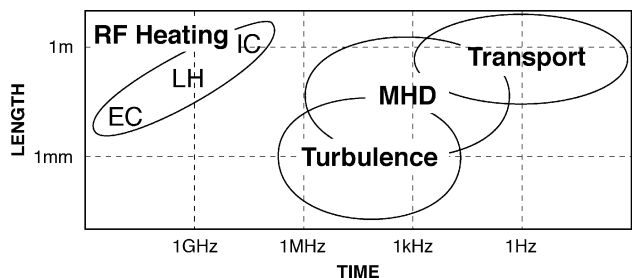


Fig. 1 The range of time and spatial scales of the phenomena in fusion plasmas.

コードとして開発されている TASK コードについて説明する。そして第 5 章ではまとめと今後の課題を述べる。

2. 日本の統合コード構想とその特徴

2.1 背景

核融合反応が持続的に維持されている核燃焼プラズマでは、核融合反応によって生成されたアルファ粒子によるプラズマ加熱が支配的であり、主に外部加熱によって温度分布が制御されている現在のプラズマとは質的に異なる振る舞いを示す可能性がある。また、トカマクプラズマの長時間運転を実現するためには、圧力勾配とポロイダル磁界に敏感な自発電流がプラズマ電流の大部分を占めることが必要となり、その精密な制御が要求される。さらに、高温のプラズマ中心部における核融合反応は、そこでの燃料イオン密度に依存するとともに、生成されたヘリウム灰を通して燃料イオン密度に影響を与える。一方、ダイバータ領域を含めた周辺プラズマは、閉じ込め領域のコアプラズマに対して境界条件として大きな影響を与えるとともに、コアプラズマから流入する粒子束および熱流束に強く依存する。加えて、プラズマ立ち上げ時には多くの誘導磁束が消費されるとともに、核燃焼プラズマでは電流拡散時間が非常に長くなるため、立ち上げ時の電流分布は長時間にわたってプラズマの振る舞いに影響を与える。

このように自律性の高い核燃焼プラズマ中のさまざまな現象を定量的かつ自己完結的に記述するためには、(1)理論をベースにした信頼できる物理モデルに基づき、(2)実験との系統的な比較によって検証され、(3)大規模な直接数値シミュレーションの結果によって裏づけられた、シミュレーションモジュールを開発し、(4)それらを系統的に組み合わせ、(5)効率的に計算することができる、統合コードを構成することが必要である。

そのような統合シミュレーションコードの開発を目指して、京都大学、九州大学、山口大学等の各大学と核融合科学研究所および日本原子力研究所の研究者が協力して、核燃焼プラズマ統合コード構想 (Burning Plasma Simulation-Initiative: BPSI) の活動を進めている [2]。2002年に最初の準備会合を開催し、2003年からはさまざまな形で研究会を開催して研究討論を行うとともに、欧州からの参加者も含む日米ワークショップを開催して国際協力を進めている。

2.2 基本的な考え方

核燃焼プラズマ全体の時間発展を記述する統合コードに対しては、いろいろな考え方・開発の進め方があり得る。BPSI では、数年で基礎的な統合コードを開発した上で、さらに改善・拡張を進めていく方向で進めている。その理由の一つは、国際トカマク物理活動 (ITPA) 等において欧米に対抗できる解析ツールを早急に開発することが迫られているからである。それとともに、利用者の拡大が必須であると考え、新しい理論モデルを容易に検証でき、大規模シミュレーションの成果を組み込むことができ、実験家が容易に利用できることを目指している (Fig. 2)。また、計算環境としては、パソコンでの簡易な計算から、計算機クラスターによる並列高速処理を中心に考え、ベクトル型スー

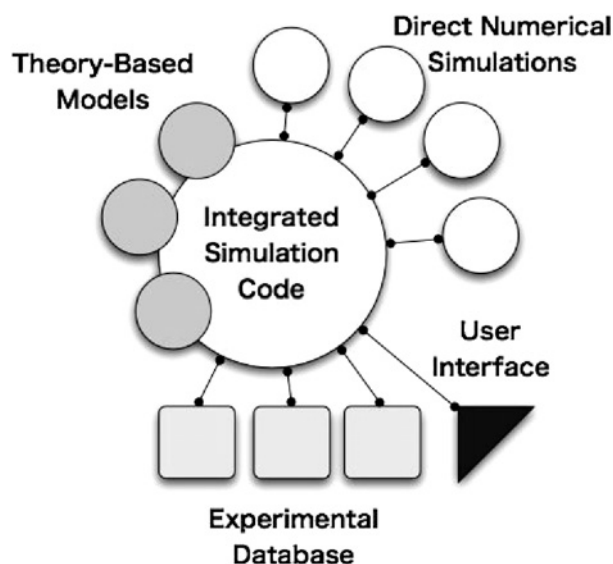


Fig. 2 Structure of Integrated Simulation Code.

パーコンピュータ用に開発されたコードとの結合も視野に入れている。さらに、トカマクだけでなく、ヘリカル系プラズマの解析にも利用できるように開発を進めている。

核燃焼プラズマ統合コード構想の活動は、(1)統合コードのフレームワーク開発、(2)統合コードに必要な階層型物理モデルの開発、(3)効率的な分散並列処理の実現、の3つに集約されている。

2.3 統合コードのフレームワーク開発

統合コードによるシミュレーションを実現するためには、多数の解析コードの連携を図るためにコード間のインターフェース仕様を共通化すること、解析コードおよびそれらに用いられている物理モデルを検証するために実験データとの比較や第一原理に基づく大規模シミュレーションの結果との比較を行うこと、これらの作業を円滑に進めるために輸送解析コードをベースにしたコアコードを開発することが必要と考えている。

複数の解析コードをモジュールとして統合シミュレーションに組み入れるためには、モジュール間でやりとりするデータの標準化が必要である。例えば、輸送解析モジュールで計算された密度や温度の空間分布を加熱・電流駆動解析や安定性解析等のモジュールに用いる場合、各モジュール間で直接データをやりとりするように設計すると、モジュールが増えるたびに新たなデータインターフェースを作成する必要が生じる。標準的なデータセット仕様とデータ交換のためのプログラムインターフェース仕様を定めることによって、解析コードのモジュール化が容易になるとともに、モジュールの開発や交換の促進が期待できる。

解析コードを検証するためには、解析解等との比較に加えて、類似の解析コードとのベンチマークテストが重要である。また、用いられている物理モデルの妥当性を評価するためには、実験データとの比較が必要である。最近、トカマクにおける空間分布等の測定データが、国際トカマク物理活動 (ITPA) における「閉じ込めデータベースとモデ

リング」グループ等によってデータベースに収集され、その一部は一般に公開されている[3]。このITPAトカマク分布データベースを用いると、輸送シミュレーション結果と実験結果を容易に比較することができ、物理モデルの定量的な検証が実現できる。また、トカマク以外の装置での実験データベースへの拡張も比較的容易である。

標準データセット仕様やデータ交換インターフェース仕様の策定とその検証にあたっては、リファレンスとなる解析コード群の存在が重要な役割を果たす。また、分布データベースの利用やベンチマークテストのためのデータ作成等を容易に実現するためには、利用しやすい解析ツールの存在も重要である。そのようなコア解析コード群として、京都大学ではトカマク輸送解析統合コード(TASK)[4]を開発してきた。このコードは、平衡、輸送、波動伝播、速度分布等の解析モジュールを含んでおり、それらを連携させて、トカマクプラズマの時間発展シミュレーションを行うことができる。また、統一された利用者インターフェースを備えており、実験研究者でも容易に利用できることを目指している。さらにその利用を促進するため、ソースコードを公開するOpen Source化に向けて現在整備中である。現在のところ、このTASKコードが統合シミュレーションのコアコードとして開発されているが、将来的には、原研で開発されている輸送シミュレーションコードTOPICS(Tokamak Prediction and Interpretation Code System)やそのモジュールとの置き換えも可能となることを目指している。

2.4 統合コードに必要な階層型物理モデルの開発

核燃焼プラズマでは、時間・空間スケールの異なるさまざまな現象が相互に強い影響を与えながら、時間発展している。これまでの理論・シミュレーションにおいては、それらの現象の間の相互作用を切り離して、個々の現象を詳細に解析する場合が多かった。しかしながら、核燃焼プラズマの時間発展シミュレーションにおいては、時間・空間スケールの異なる現象の間の相互作用や、異なる空間領域の間の相互作用を、落とすことなく取り入れていく必要がある。そのため、本構想では、まだ十分解析されていないそれらの相互作用を検討し、新しい物理モデルを提案するための研究会を開いている。

具体的なテーマとしては、(1)乱流輸送の効果を取り入れたMHD現象の解析、(2)MHD事象発生中および発生後の輸送現象、(3)磁気島が存在する平衡配位における輸送現象、(4)セパトトリクスをはさんだコアプラズマと周辺プラズマの相互作用、(5)プラズマ中に流れが存在する場合の平衡と輸送現象、(6)高速イオンに起因する現象とそれらが高速イオンに与える影響等があげられている。将来的には、提案された物理モデルを、すみやかに統合コードに取り込んでいく必要があり、そのためにもモジュール構造をもつ統合コードの開発が急務である。

2.5 効率的な分散並列処理の実現

統合コードにおいては、各モジュールが同じ計算機で動くとは限らない。モジュールによっては計算機クラスターにおける分散並列処理が有効な場合があり、大規模なスー

パーコンピュータを用いた並列ベクトル処理を必要とする場合もある。また、独立性の高いモジュールについては、離れた計算機クラスターをネットワークを介して利用することが有効な場合もある。そのため、本構想では、新しい計算技術を積極的に取り入れて、並列処理による高速化を実現し、計算機クラスター間の連携による計算資源の有効利用を図ることを予定している。

また、計算結果の可視化についても、並列化や遠隔利用を目指したVizGrid等の活動と連携を図るとともに、OpenGL等の3次元グラフィック汎用規格を用いた図形ライブラリの開発等も進めている。

3. 欧米の活動の進展状況

本構想と同様な活動は、トカマクプラズマの統合シミュレーションの実現を目指して、欧米でも始まっている。

3.1 米国の活動

米国では、従来から輸送シミュレーションを中心とするNTCC(National Transport Code Collaboration[5])活動が進められており、トカマク輸送コードのために開発されてきたさまざまなサブルーチンを検証し、モジュールライブラリとして公開してきた。

一方、2001年からDOEが推進しているSciDAC(Scientific Discovery through Advanced Computing[6])では、核融合エネルギー科学分野として、磁気リコネクション、計算原子科学、波-粒子相互作用、拡張MHD、微視的プラズマ乱流の大規模シミュレーションが組織的に進められている。また、米国内の核融合研究機関の研究連携を図るNational Fusion Collaborationにも力が入れている。これらの研究は、DOEの計算科学分野と密接に協力していることが特徴である。

SciDACにおける大規模シミュレーションの成果を受ける形で、核融合プラズマの統合シミュレーションと最適化を目指すFSP(Fusion Simulation Project[7])が2002年に提案され、2005年から活動を始めている。第一の目標はITERプラズマを予測し、制御する能力を備えたFusion-Plasma Simulatorを15年で開発することであり、そのために組織的な(project的な)コード開発を重視している。2005年には、複数の研究機関にまたがった2つの研究プロジェクト(核融合プラズマにおける周縁領域の統合シミュレーション、電磁波がプラズマの分布と安定性に与える影響の統合的理解)が立ち上がろうとしている。

米国の活動は、大規模シミュレーションをベースにして、それらを徐々に統合し、最終的に一つのSimulatorを開発する計画である。核融合以外の大規模シミュレーションプロジェクトの経験を生かして、プロジェクトとして組織的に進められようとしている。また、計算科学との密接な連携も特徴である。しかしながら、時間スケールに差があるコード間の連携、実験との比較による検証の実現等、課題も多いように見える。

3.2 欧州の活動

一方、欧州においても、EFDA-JETにおけるTask Force D(TFD[8])を中心に統合輸送コードの開発が進められて

いるが、新たに EFDA 自体の活動として Integrated Tokamak Modelling Task Force (ITM-TF[9]) が2003年末に発足し、2004年初めから活動を開始している。その目標は、ITER プラズマの総合的シミュレーションを実現するために、現在のトカマク実験によって検証されたシミュレーションツールを首尾一貫した形で開発できるように連携させることである。そのためには、物理現象の統合的理解、計算コードの統合的開発、理論・実験・モデリングの統合的活動が重要であるとし、それに向けて、コード統合、データ整備、平衡と安定性の3つのプロジェクトが立ち上がり、さらに物理課題毎の4つのプロジェクトを予定している。

欧州の活動は、大規模シミュレーションがそれほど活発ではないこともあり、当面は、輸送コードをベースとした統合シミュレーションコードの開発を目指している。欧州では、ASTRA, CRONOS, JETTO 等、複数の輸送コードが利用されており、それら既存のコードとの整合等、具体的なコード統合化の活動はこれから始まる場所である。

3.3 国際協力

このように日米欧で動き始めた核融合プラズマ統合シミュレーション活動は、相互に連絡を取りつつ、協力関係を保っている。2003年12月に京都で開催された「核燃焼プラズマの理論モデリングと統合シミュレーション」に関する日米 JIFT ワークショップ[10]では、FSP に関する米国の研究者に加えて、欧州からも2名の研究者が参加した。引き続き2004年9月にプリンストンで開催された日米 JIFT ワークショップ[11]においても、日本から BPSI 関係者を中心に8名、欧州からも ITM-TF 関係者を中心に2名の参加があり、それぞれの活動の進展状況が報告されている。さらに、統合コード活動の国際協力を議論する会合が2004年11月にポルトガルで開催された核融合エネルギー国際会議のサテライト会合として開かれ、多数の関係者が集まった。

本年9月には第3回の日米ワークショップ[12]が九州大学で開催され、欧州からに加えて、韓国からの参加者も予定されている。今後も日米ワークショップあるいは国際会議のサテライト会合等の形で、モジュールインターフェースの標準化等も含めた情報交換を継続する予定であるが、ITER の建設開始に伴って新しい枠組みの国際協力が立ち上がる可能性もある。

4. 統合輸送解析コード：TASK

多数のモジュールからなる統合コードを実現するためには、モジュール間のデータ交換および実行制御の標準化が必要である。例えば、MHD 安定性の解析では、プラズマの密度、温度、電流、トロイダル回転等の分布データが必要であり、それらを輸送モジュールあるいは実験データベースモジュールから取得することになる。同じ MHD 安定性を解析するモジュールであっても、モジュールによって必要なデータの種類、位置、個数は異なる。それらをモジュール毎に準備するのではなく、解析しようとする現象の記述に必要なデータセットを標準化し、交換するデータ

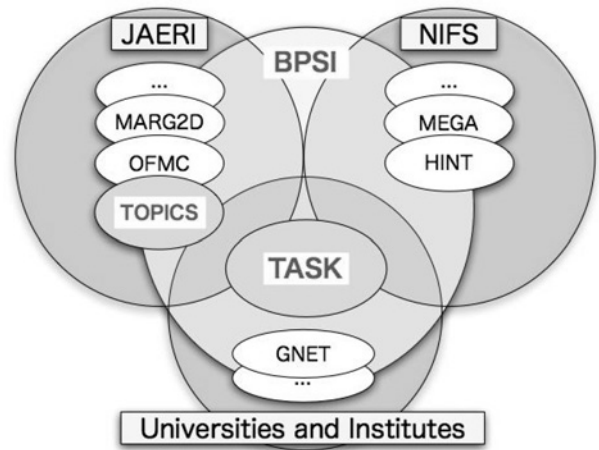


Fig. 3 Structure of BPSI.

を限定することによって、モジュール連携の開発を容易にすることができる。

このようなデータ交換の標準化を検討し、実際に実装してその妥当性を確かめるためには、参照コードとなるモジュール群が公開されていることが望ましい。BPSI の参照コードとして開発されているのが、TASK (Transport Analyzing System for tokamaK) コードである。

このコードは、Fig.3 に示すように、BPSI のコアコードであり、原研、核融合研、大学等で開発された計算コードを他のコードと組み合わせる際のインターフェースであると同時に、プラズマの分布やその時間発展を計算し、得られた分布データを他のコードに供給する役割を果たすことになる。

4.1 TASK コードの特色

TASK コードは、主としてトカマクの時間発展を解析するシミュレーション体系として、開発されてきた。その特徴は、(1)モジュール構造をもつ統合コードを目指していること、(2)様々な加熱・電流駆動機構の解析モジュールを含んでいること、(3)外部ライブラリに依存せず、高い移植性を備えていること、(4)MPI ライブラリを用いた並列分散処理が可能であること、(5)実験分布データベースを利用することが可能であること、(6)3次元ヘリカル系への拡張が進められていること、等があげられる。

また、核燃焼プラズマ統合コード構想(BPSI)のコアコードとして開発が進められており、(1)最小限の統合コードを構成するとともに、(2)すべてのモジュールは交換可能であり、(3)データ交換およびインターフェースの標準化およびその実装の検証が進められており、(4)利用者の拡大を図るため、マニュアル等の整備も進んでいる。

4.2 TASK コードの構成

現在、TASK コードは以下のモジュールから構成されている。

EQ	2次元平衡解析	固定境界
TR	1次元輸送解析	拡散型輸送方程式

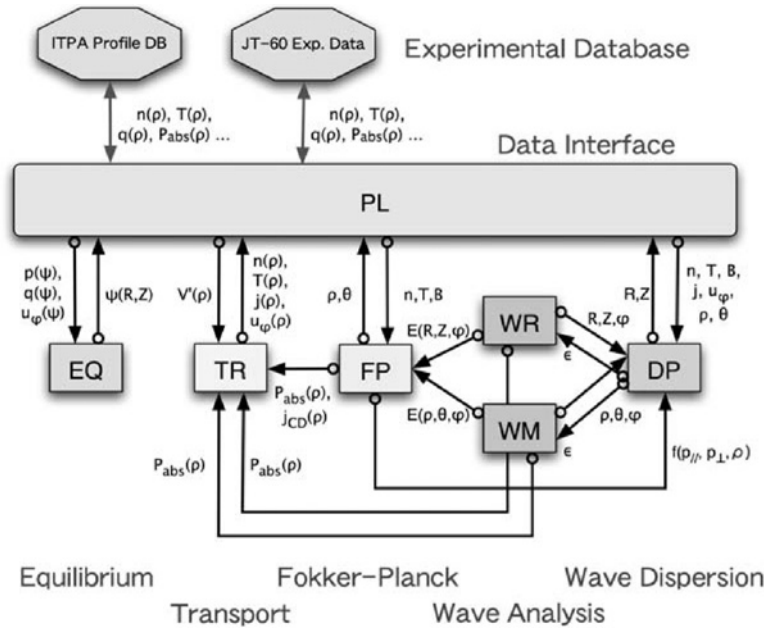


Fig. 4 Old structure of TASK code.

WR	3次元波動解析 幾何光学, 光線・ビーム追跡法
WM	3次元波動解析 波動光学, 外部励起, 固有モード
FP	速度分布解析 相対論的, 軌道平均
DP	波動分散解析 局所誘電率, 任意速度分布
PL	データ交換 座標変換, 分布データベース
MTX	行列解法
LIB	共通ライブラリ

さらに、有限要素法を用いた自由境界の平衡解析、流体型の輸送方程式を用いた輸送解析、運動論的效果を含めた巨視的線形安定性解析等のモジュールの開発が進行中である。

これらのモジュールは、Fig. 4に示すように、互いにデータ交換を行って計算できるように構成されている。例えば、平衡モジュール(EQ)は圧力分布 $p(\psi)$ 、磁力線方向の電流密度分布 $j(\psi)$ あるいは安全係数分布 $q(\psi)$ 、そしてトロイダル回転速度分布 $u(\psi)$ 等を用いて、Grad-Shafranov方程式を満たすポロイダル磁束 $\psi(R, Z)$ を計算する。輸送モジュール(TR)は、ポロイダル磁束 $\psi(R, Z)$ から計算される $V'(\rho)$ 等の幾何形状因子、波動モジュール(WR, WM)によって計算される吸収パワー $P_{\text{abs}}(\rho)$ 、速度分布モジュール(FP)によって計算される駆動電流密度 $j_{\text{CD}}(\rho)$ 等を用いて拡散型輸送方程式を解き、プラズマの密度 $n(\rho)$ 、温度 $T(\rho)$ 、トロイダル回転速度 $u_\phi(\rho)$ 、磁力線方向の電流密度 $j(\rho)$ 等の空間分布の時間発展を計算する。ここで ρ は規格化された小半径であり、トロイダル磁束の平方根によって定義される。

加熱や電流駆動に用いられる波動は、Fig. 1に示したように他の現象に比べて周波数が高いので、その伝播や吸収の解析にあたっては、粒子密度や温度あるいは速度分布関数等で表されるプラズマの状態は大きく変化しないと考えることができる。電子サイクロトロン波や低域混成波については、その波長が大型トカマクの装置サイズに比べて十

分短いため、幾何光学近似を用いた波動解析モジュール(WR)が利用できる。このモジュールでは、波束の位置と波数を追いかける従来からの光線追跡法に加えて、波動ビーム径と波面曲率の空間変化をも含めたビーム追跡法による解析が可能である。局所的な誘電率テンソル $\epsilon(\omega, \mathbf{k}; R, Z, \phi)$ を波動分散モジュール(DP)で計算し、ビーム径路に沿って波動電界 $E(R, Z, \phi)$ と吸収パワー $P_{\text{abs}}(\rho)$ の空間分布を求めることができる。一方、イオンサイクロトロン周波数帯およびそれ以下の周波数の波動は、波長が装置サイズと同程度であるので、一定周波数の波動電界に対するマクスウェル方程式を境界値問題として解く波動解析モジュール(WM)が利用できる。やはり波動分散モジュール(DP)で計算された誘電率テンソル $\epsilon(\omega, \mathbf{k}; \rho, \theta, \phi)$ を用いて、波動電界 $E(\rho, \theta, \phi)$ と吸収パワー $P_{\text{abs}}(\rho)$ の空間分布を求めることができる。

波動分散モジュール(DP)では、平衡モジュール(EQ)で計算された磁気面形状 $\psi(R, Z)$ や磁場強度 $\mathbf{B}(\mathbf{r})$ 、輸送モジュール(TR)で計算された密度分布 $n(\rho)$ や温度分布 $T(\rho)$ 等を用いて、任意の位置における誘電率テンソル $\epsilon(\omega, \mathbf{k}; \mathbf{r})$ が計算される。冷たいプラズマモデル、運動論モデル、ジャイロ運動論モデル等、さまざまなプラズマモデルを利用することができ、マクスウェル速度分布だけでなく、速度分布解析モジュール(FP)によって求められた運動量分布関数を含め、任意の運動量分布関数に対して相対論効果を取り入れた誘電率テンソルを計算することができる。

速度分布解析モジュール(FP)は、軌道平均された運動量分布関数 $f(p_{\parallel 0}, p_{\perp 0}, \rho, t)$ の時間発展を記述する。波と粒子の共鳴相互作用を表す準線形拡散項は、波動解析モジュール(WR, WM)によって計算された波動電界の軌道平均により計算される。線形衝突項は輸送解析モジュールによって計算された密度分布や温度分布を用いて計算され

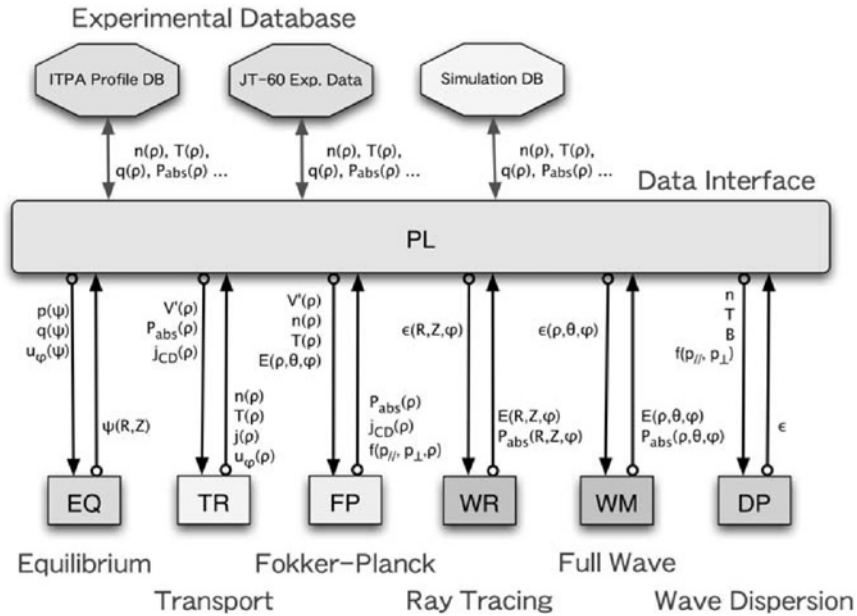


Fig. 5 New structure of TASK code

るが、運動量やエネルギーが保存する非線形衝突項を用いる場合は、衝突相手の速度分布関数から計算することができる。

輸送解析(TR)によって求められた密度や温度の空間分布を用いて局所誘電率が計算され(DP), それを用いた波動解析(WR, WM)によって波動電界の空間分布が計算され、さらにそれを用いて速度分布関数の時間発展が解析され(FP), その結果が輸送解析に用いられるとともに、局所誘電率の計算に用いられる。このようなデータ交換を経て、自己無撞着な時間発展のシミュレーションが実現する。しかしながら、このようなモジュール間のデータ交換は、モジュールの数が増えるにつれて種類が増加し、個々に対応することは困難になることが予想される。そのため、モジュール間のデータ交換を標準化し、Fig. 5に示すように、すべてのモジュールはPLモジュールを通してのみデータ交換を行うように改造中である。これによって、新しい物理モデルの組み込みが容易になることが期待される。

4.3 TASK コードによる解析例

各モジュールの解析例をFig. 6に示す。Fig. 6(a)は平衡モジュールEQによって計算されたITERの標準的な等磁束面、Fig. 6(b)はJT-60の配位で電流拡散性バルーニングモード(CDBM)乱流輸送モデル[13]を用いて輸送モジュールTRにより計算された密度分布と温度分布を示し、 $r=0.5\text{m}$ 付近に内部輸送障壁が形成されている。Fig. 6(c)は波動伝搬モジュールWRによる電子サイクロトロン波電流駆動の解析例で、ポロイダル断面に射影した波動軌跡と吸収パワーの径方向分布を示している。Fig. 6(d)は波動伝播モジュールWMによる速波電流駆動の解析例で、波動電界と吸収パワーのポロイダル分布をそれぞれ示している。

4.4 TASK コードの今後の課題

BPSIのコアコードとして開発されているTASKコードは、現在、新しいモジュール構造に改造中であり、2005年

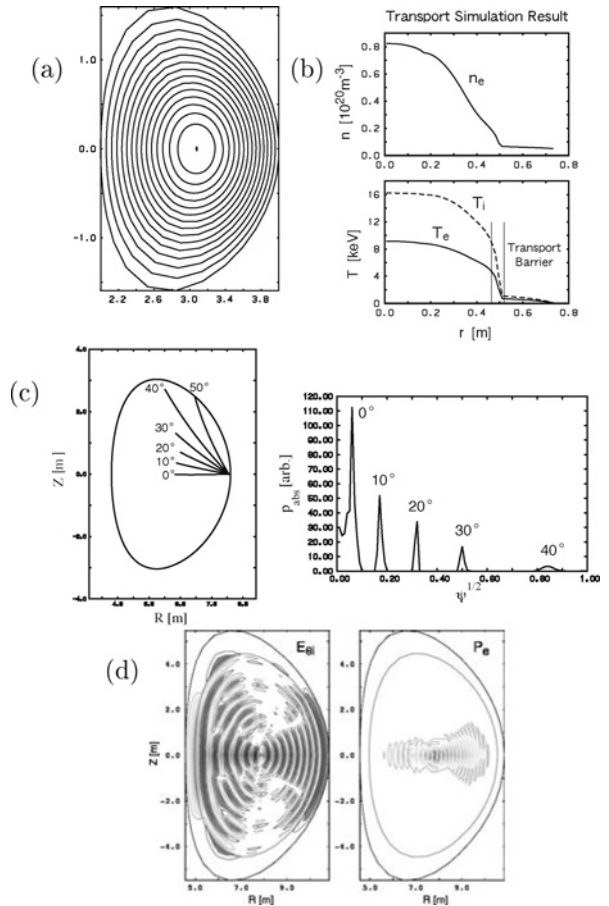


Fig. 6 Example of analyses by the modules EQ, TR, WR and WM.

10月にはソースコードを[14]で公開する予定である。それと並行して、すべてのモジュールを連携させたトカマクプラズマの時間発展シミュレーションを進めている。

今後、データ交換および実行制御のインターフェース仕様を、他の計算コード開発者の考えも取り入れて、新たに

策定し公開していく必要がある。さらに利用を拡大するためには TASK コードのマニュアルおよび解説書が不可欠であり、作成の準備を進めている。さらに、FORTRAN 95仕様への変更、並列処理の拡大、クラスター間連携、モジュール連携の整備、新しいモジュールの開発を進めていく予定である。

もう一つの大きな課題は、3次元ヘリカル配位への拡張である。VMEC コードによって計算された3次元MHD平衡配位を用いて、WM モジュールによる3次元波動伝播解析は可能になっている。さらに輸送解析等の他のモジュールについてもヘリカル配位の解析ができるようにモジュールの改造ならびに新規開発をする必要がある。この作業は、主に核融合研のLHD計画共同研究(代表:京大 中村祐司)として進められている。

5. 今後の活動

今後の活動の課題としては、標準データおよびインターフェース策定のための作業会や新しい物理課題抽出のための作業会を引き続き開催するとともに、国内で利用されているおよび開発中の計算コードの調査が必要と考えている。そして、中期的にはトカマクやヘリカル系プラズマの統合シミュレーションを実現すること、国内の小型トカマクにおける解析に利用者を拡げること、新しい物理モデルの統合コードへの組み込みを推進すること、そして大規模数値シミュレーションとの連携を図ること等があげられる。

核燃焼プラズマ統合コード構想は、これまで自発的な研究活動として、九州大学応用力学研究所共同研究、核融合科学研究所一般共同研究、日米JIFTワークショップ、京都大学エネルギー科学研究科21世紀COEプログラム等、さまざまな形で旅費等の支援を受け、国内会合や国際ワークショップを開催してきた。平成16年度からは、科学研究費補助金・基盤研究B「核燃焼プラズマ統合コードによる構造形成と複合ダイナミクスの解析」(代表者:九大 矢木雅敏)の支援を受け、部分的には科学研究費補助金・特別推進研究「乱流プラズマの構造形成と選択則の総合的研究」(代表者:九大 伊藤早苗)の支援も受けている。また、協同研究やNEXT研究会への参加等を通して、日本原子力研究所と協力している。さらに、計算機クラスターによる並列処理に関しては、核融合科学研究所のLHD計画協同研究が重要な役割を果たしてきた。

本構想の成果は、学会、国際会議において発表されるようになってきているが、国際トカマク物理活動(ITPA)専門家会合においても積極的に報告する必要がある。核融合フォーラムプラズマ物理クラスターによるITPA国内活動や誘致が検討されているITERおよびブロードバンドアプローチとしてのシミュレーションセンターとの連携をどのように図るかも今後の検討事項である。

これまでは研究会が主要な活動であり、コード開発は自発的に行われているのが現状である。しかしながら、統合コード開発を組織的かつ継続的に進めるためには、コード開発を支える人的支援が必要であり、人材育成の面からも重要と考えている。

6. まとめ

核燃焼プラズマの予測と制御に向けて、統合シミュレーションの重要性が高まってきている。広い空間時間スケールにまたがる複合的な物理現象のモデリングは、さまざまな新しい課題を内包しており、大規模シミュレーションと合わせて、強力に推進する必要がある。核燃焼プラズマ統合コード構想(BPSI)は、統合シミュレーションに向けて、物理モデル、ソフトウェア、ハードウェア、それぞれの枠組みの構築を目指して活動を進めており、一定の成果を上げてきた。特に全国的な大学、核融合研、原研にわたる研究協力の組織化が進んでいる。

一方、世界的にみれば、米国の核融合シミュレーション計画(FSP)や欧州の統合輸送モデリング部会(ITM-TF)では、組織的な構想検討やコード開発が開始されつつある。特に米国はITERの統合シミュレーションを実現して、その運転に大きな影響力をもつことを目指しており、日本においても独自の統合コード開発を進める必要がある。したがって、国際協力と国際競争の両面からそれらとの連携を進める必要があり、ITER機構におけるシミュレーション研究との整合性も考慮しなければならない。

統合コードの開発には、新たな物理モデルや計算コードの開発に加えて、多くの研究者に利用されることが重要である。実験研究者による実験データの解析、理論研究者による新しい理論モデルの検証、大規模な直接数値シミュレーションとの連携等に利用され、それらからのフィードバックを取り入れることによって、より使いやすく、新しい可能性を秘めたツールに成長していくと期待される。関心のある方には、ぜひ活動への参加をお願いしたい。

参考文献

- [1] 小特集「異なった時空間スケールが関与する多階層プラズマシミュレーション研究」J. Plasma Fusion Res. 79, 460 (2003).
- [2] <http://bpsl.nucleng.kyoto-u.ac.jp/bpsi/>
- [3] The ITER 1D Modelling Working Group, Nucl. Fusion 40, 1955 (2000); <http://tokamak-profiledb.ukaea.org.uk/>
- [4] A. Fukuyama *et al.*, Proc. of 20th IAEA Fusion Energy Conf. (2004)IAEA-CSP-25/TH/P2-3;
- [5] <http://w3.pppl.gov/NTCC/>
- [6] <http://www.osti.gov/scidac/fes/index.html>
- [7] Fusion Simulation Project, Integrated Simulation & Optimization of Fusion Systems, Final Report of the FESAC ISOFS Subcommittee, (Nov,2002) http://www.ofes.fusion.doe.gov/News/FSP_report_Dec9.pdf; <http://w3.pppl.gov/theory/bin/PSACI-PAC04-Post.pdf>
- [8] <http://www.jet.efda.org/pages/focus/009modelling/>
- [9] <http://www.efda-taskforce-itm.org/>
- [10] <http://bpsl.nucleng.kyoto-u.ac.jp/bpsi/usjws/>
- [11] <http://w3.pppl.gov/usjapanim/>
- [12] <http://bpsl.nucleng.kyoto-u.ac.jp/bpsi/usjws3/>
- [13] A. Fukuyama *et al.*, Plasma Phys. Control. Fusion, 37, 611 (1995).
- [14] <http://bpsl.nucleng.kyoto-u.ac.jp/task/>



ふく やま あつし
福 山 淳

京都大学大学院工学研究科教授。1977年京都大学大学院工学研究科電子工学専攻博士課程1年中退。工学博士。岡山大学工学部助手，助教授を経て，1999年より現職。主な研究分野は，核融合プラズマの理論・モデリング・シミュレーション，特に波とプラズマの相互作用，輸送現象，プラズマ生成。趣味：計算機は半分趣味，半分仕事。暇があれば，ミステリーを読むこと，写真を撮ること，音楽を聴くこと，美術館に行くこと，自転車に乗ること，歩くこと。



や き まさ とし
矢 木 雅 敏

九州大学応用力学研究所助教授。1990年京都大学大学院工学研究科原子核工学専攻博士後期課程退学。その後，日本原子力研究所，九州大学応用力学研究所講師を経て現職に至る。主な研究分野：プラズマの異常輸送の研究，小数自由度カオスの研究。最近，プラズマ乱流シミュレーションのための初期値設定に関連して遺伝的アルゴリズムによる解探索に関心をもっている。