

## 小特集 統合コードによる磁場閉じ込め核融合プラズマシミュレーションの現状と今後の展望

### 3. 国内外の統合コード開発状況

#### 3. Status of Integrated Code Development in Japan and Overseas

福山 淳, 林 伸彦<sup>1)</sup>, 村上定義, 横山雅之<sup>2,4)</sup>, 藤田隆明<sup>3)</sup>

FUKUYAMA Atsushi, HAYASHI Nobuhiko<sup>1)</sup>, MURAKAMI Sadayoshi,

YOKOYAMA Masayuki<sup>2,4)</sup> and FUJITA Takaaki<sup>3)</sup>

京都大学大学院工学研究科, <sup>1)</sup>量子科学技術研究開発機構, <sup>2)</sup>自然科学研究機構核融合科学研究所,

<sup>3)</sup>名古屋大学大学院工学研究科, <sup>4)</sup>統合研究大学院大学

(原稿受付: 2019年5月20日)

磁気閉じ込め核融合プラズマの包括的シミュレーションに向けて, 世界各国で統合コードの開発が進められるとともに, 多くのモジュールを連携させるためのコードインターフェースの標準化を含む統合コードフレームワークの試みも進展しつつある. 本章では, まず国内で開発が進められている TOPICS (量研), TASK (京大), TOTAL (名大), TASK3D (核融合研, 京大) について, その構成と主な特徴を説明する. 引き続いて, 欧米の統合コード開発の現状を紹介するとともに, ITER プラズマ実験に向けて, コード間連携とデータの標準化をめざして開発・普及が進められている IMAS を説明し, 日米におけるコード間連携の試みについても報告する.

#### Keywords:

integrated code, comprehensive simulation, integrated modeling framework, data structure, data interface

#### 3.1 はじめに

磁気核融合炉心プラズマにおいては, 様々な物理現象が相互に影響を及ぼし合いつつ時間発展している. その振る舞いを記述するためには, 第2章で紹介された個々の物理現象を記述する解析コード(モジュール)を組み合わせて, 炉心プラズマ全体の時間発展を自己無撞着にシミュレートする必要がある. そのために多数の解析モジュールを内包する多くの統合コードが開発されてきた. 主要な磁気閉じ込め装置においてはその運転性能を予測し, 実験結果を解析するための統合コードが開発され, 新しい実験装置の性能予測や解析モジュールの機能向上を図る上でも統合コードが利用されている. 国内で開発されている代表的な統合コードには TOPICS (量子科学技術研究開発機構(量研)), TASK (京都大学(京大)), TOTAL (名古屋大学), TASK3D (核融合科学研究所, 京大) があり, 以下ではそれらの特徴を紹介するとともに, 主要な機能を比較し, 国外の統合コードについても簡単に説明する.

統合コードとして多数の解析モジュールの連携を体系的に実現するためには, 連携のフレームワークを構築することが重要である. そのフレームワークには, モジュール間でやりとりするデータのデータ構造, データ交換インターフェース, そしてモジュールの実行を制御する仕組み等が含まれる. 現在国際熱核融合実験炉 ITER プラズマ実験のモデリングと実験解析に向けた統合フレームワーク IMAS (Integrated Modelling and Analysis Suite) の開発が欧州を中心に進められており, 日米におけるモジュール間連携標

準化の試みとともにその概要を説明する.

#### 3.2 統合コード TOPICS

TOPICS (TOkamak Prediction and Interpretation Code System) は, 元々は日本原子力研究所で安積正史氏が開発した1.5次元輸送コードであり, 統合コードという概念がない時代でも, 内包する物理モジュールは小規模ながら作りそのものは既に統合コード的なものであった. TOPICS は, JT-60 実験のプラズマ分布等を評価する実験解析ツールと連携するインターフェースが整備され[1,2], 組織名が量研に変わった現在に至るまで JT-60 の標準の輸送解析コードとして使われてきた. プラズマの時間発展を予測するシミュレーションコードとしても開発が進められ, 統合コードの概念が現れた時に, TOPICS-IB (TOPICS extended for Integrated simulations for Burning plasma) に呼称を一時変更していたが[3,4], 統合コードが一般的になるとともに呼称を元の TOPICS に戻した[5]. ただし, 当初 TOPICS という名称であった1.5次元輸送ソルバー部分は, 図1に示すように統合コード TOPICS のコア部分になり, 他の研究機関の研究者とも協力して様々な規模の物理・工学モジュールが導入・結合されている. コア部分は, 1次元の熱/粒子/運動量/電流輸送と2次元の自由境界 MHD 平衡を, プラズマ電流立ち上げ/下げ時の体積変化も考慮して解き[6], 新古典理論と整合したトロイダル・ポロイダル回転と径電場を評価できる[7].

TOPICS の物理モジュールには, 燃料ペレットの入射と

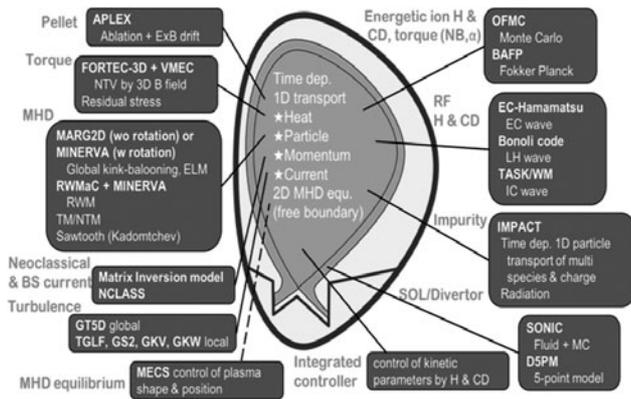


図1 量研で開発されている統合コード TOPICS の構成図。

溶発および溶発プラズマの大半径外側へのドリフトを考慮した APLEX[8], 新古典トロイダル粘性によるトルクを評価する第一原理 3 次元新古典コード FORTEC-3D[9,10], 線形 MHD 安定性コード (回転なし: MARG2D, 回転あり: MINERVA), RWM 安定性解析コード MINERVA/RWMaC, 新古典輸送係数やブートストラップ電流を評価する Matrix Inversion モデル[1,11], NBI (Neutral Beam Injection) や核融合反応で生成される高エネルギー粒子の加熱・電流駆動やトルクを評価するモンテカルロ粒子コード OFMC と 2 次元フォッカープランクコード BAFP, 電磁波による加熱・電流駆動を評価するコード (EC: EC-Hamamatsu, LH: Bonoli コード[12], IC: TASK/WM), 炉心の不純物 1 次元輸送コード IMPACT[13], SOL/ダイバータプラズマの統合コード SONIC と動的 5 点モデル D5PM, 等が結合されている。SONIC はそれ自身が統合コードであるが, 別の小特集[14]で既に紹介されているので詳細はそちらをご覧ください。上記の内のいくつかのモジュールは第 2 章で (上記で参考文献がないものは第 2 章を参照), それらを利用した研究は第 4 章で紹介されている。一方, TOPICS の工学モジュールには, 加熱・電流駆動による規格化ベータ値や周回電圧等の複数パラメータの統合 PID 制御モジュール[5]等があり, JT-60SA で使用する MHD 平衡制御シミュレータ MECS[15]とも結合する予定である。

TOPICS の計算は, 使用するモジュールが小規模であれば単一の PC クラスタ計算機で行われ, モジュールが大規模並列計算を必要とする場合はそのモジュール部分だけスーパーコンピュータ (スパコン) で実行し, TOPICS 本体は PC クラスタで実行してモジュールの実行をリモートで自動制御することが可能である。もちろん全ての計算をスパコン上で実行することも可能であるが, 現状のシミュレーションでは数日以上かかる場合もあり, スパコンのジョブクラスの時間制限によってリスタート作業が複雑になったり, スパコンの障害に直接影響されてしまう (TOPICS 本体の計算を PC クラスタで継続していれば, 他の正常なスパコンでの計算に切り替えることができる)。モジュールのリモート制御のためスパコン上にインストールした監視プログラムは, TOPICS 本体から入力ファイルが転送されるとそのファイルを認識してモジュールを実行

し, 終了して出力ファイルが現れたら TOPICS 本体に転送する。この機能は, グリッドミドルウェア AEGIS (Atomic Energy Grid Infrastructure) に基づいた統合計算フレームワーク SOAF (Simple Orchestration Application Framework) [16]でも実装され TOPICS で利用された。一方, SONIC ではファイルによるデータ交換でなく並列計算の MPI (Message Passing Interface) に基づいた MPMD (Multiple-Program Multiple-Data) システムの統合計算機能を実装しており[17], 両者を融合した統合計算機能の開発を進めている。

### 3.3 統合コード TASK

統合コード TASK (Transport Analyzing System for tokamaK) [18]の出発点は, 当時 JT-60 で実験が始まろうとしていた低域混成波加熱を解析するために 1977 年に開発された光線追跡法による波動伝播解析コード[19]である。その後, イオンサイクロトロン波を記述する波動光学的伝播解析[20], 高速イオンの生成と電流駆動を記述する速度分布関数解析[21], プラズマの時間発展を記述する輸送・平衡解析が加わり, 波動による加熱と電流駆動の自己無撞着なシミュレーションを実現する統合コードへと発展し, 1992 年頃から TASK と呼ばれるようになった。

統合コード TASK の特徴の一つは, 当初からモジュール構成で開発されてきたことである, 現在のモジュール構成を図 2 に示す。各モジュールは単体でも動作可能であるが, 他のモジュール内からの実行も可能であり, 全体統括モジュール TOT から時間シーケンスに従って各モジュールを実行させることも可能である。各種物理量の空間分布はデータ交換モジュール PL に保存されてデータ交換を行うが, 後述のデータ交換フレームワーク BPSD を利用することも可能である。

平衡, 輸送, 加熱等の基本的な解析モジュールに加えて, 先進的なモデリングの試みが行われている。輸送については, 従来の拡散型輸送方程式による解析 (TR, TI) に加えて, 磁気面平均された流体方程式とマクスウェル方程式を解く TASK/TX[22]はより短い時間スケールの輸送現象を

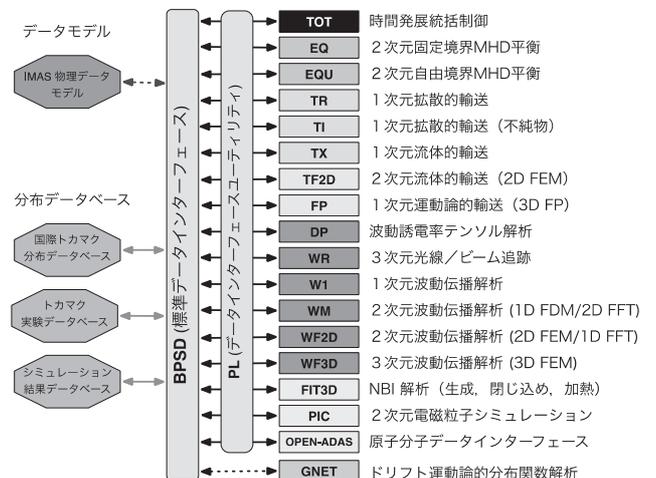


図2 統合コード TASK の構成図。

記述することができる。さらに3次元速度分布関数の時間発展を解析するTASK/FP[23]は、波動加熱やNBI加熱による速度分布関数の変形を含めた運動論的輸送解析が可能である(5.5節参照)。統合コードTASKはその起源から波動伝播解析は充実しているが、MHD安定性解析は手薄である。しかしながら、ICRF波加熱のために開発されたTASK/WMを複素周波数に拡張して固有モードを計算することにより、高速イオンによって励起されるアルヴェン固有モードの成長率を計算することができる[24]。

TASKのその他の特徴としては、ソースコードが公開されていてgitサーバーから入手可能であること[25]、計算資源を要するモジュールをMPIにより並列処理できること、同一コードでラップトップパソコンからクラスター、スーパーコンピュータまで処理が可能であること等があげられる。

今後は運動論的波動伝播解析の拡張、運動論的輸送解析の整備、周辺プラズマ輸送との結合等に加えて、ITER物理データモデルとのインターフェースの開発を進める予定である。

### 3.4 統合コード TOTAL

TOTAL (TOroidal Transport Analysis Linkage) コードは、ヘリカルプラズマ用のコード(HSTR)[26]をベースとして、ヘリカル、トカマクのいずれにも対応できるコードとして開発が進められてきた。これまでに、LHDプラズマの性能予測[26]、LHDプラズマにおける電子熱輸送障壁の解析[27]、ITERにおけるタンゲステン不純物輸送の予測[28]などに用いられた。

TOTALコードの構成をフローチャート形式で図3に示す。ヘリカルプラズマの解析においてはVMECコード[29]により3次元平衡を計算し、トカマクプラズマの解析においてはAPOLLOコード[30]で自由境界2次元平衡を計算する。得られた平衡における1次元輸送がHTRANSコードにより解析される。

トカマクプラズマにおける新古典輸送およびヘリカル

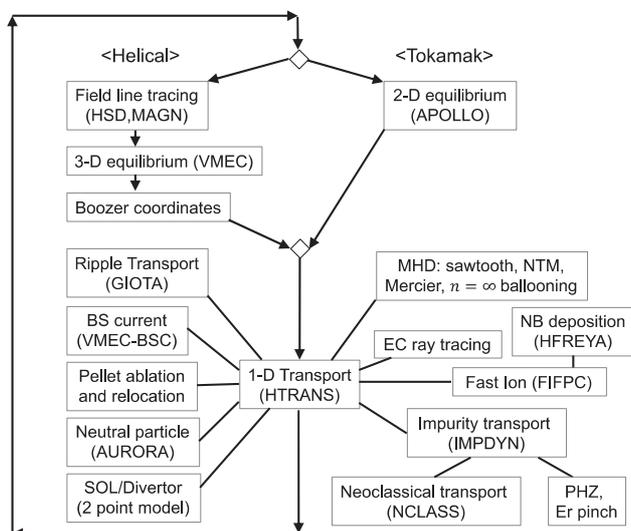


図3 TOTALコードの構成(フローチャート)。

ラズマにおける新古典輸送の軸対称成分は、文献[31,32]の式に基づいて評価される。ヘリカルプラズマにおける新古典輸送の非軸対称成分はGIOTIAコード[33]によりマルチ成分のヘリカルリップルの効果を含めて求められ、イオンと電子の粒子束が等しくなる条件から径電場が決定される。異常輸送としては、GLF23[34]、Bohm[35]、GyroBohm[27]、Mixed Bohm/GyroBohm[36]、CDBMなどのモデルが導入されている。 $E \times B$ シアによって異常輸送を低減させる式により内部輸送障壁の形成をモデル化している[27,36]。Hモードについては、プラズマ境界部で人為的に異常輸送を低減させて境界輸送障壁を模擬している。不純物輸送はNCLASS[37,38]による新古典輸送に基づいてIMPDYN[39]で解析される。

MHD不安定性としては、鋸歯状振動(sawtooth)[35]、新古典テアリングモード(NTM)[40]、メルシエ条件、短波長バルーニングモード[30]を評価するモジュールが組みこまれている。

ペレットについて中性ガス遮蔽モデル(NGSモデル)と $E \times B$ ドリフトによるリロケーションモデル[41]、ガスパフおよびリサイクリング粒子についてモンテカルロ法によるAURORAコード[42]が組み込まれている。SOLおよびダイバータプラズマに関しては2点モデル[43]が用いられている。中性粒子ビーム(NB)入射についてフォッカープランクコードFIFPC[44]での解析、電子サイクロトロン波入射について光線追跡による解析が可能である。加熱分布、駆動電流分布を関数形で与えることもある[45]。

核燃焼プラズマの予測計算においては、核融合出力としてはサーマル成分によるもののみが考慮され、プラズマパラメータに応じてアルファ粒子のイオン加熱パワー・電子加熱パワーが評価される。核融合出力の制御として、ペレット入射周波数あるいは外部加熱パワーによる帰還制御が用いられる。

近年、プラズマのトロイダル回転に伴う高価数不純物のピンチモデル(PHZ, Erピンチ)[46]の式が導入され実験データの解析が行われた(第4章に記述)。それらのピンチ速度を案内中心軌道の解析により求めるコードも最近組み込まれている。Hモードについて、LH遷移・HL逆遷移の導入やEPED1比例則に基づくペDESTAL圧力限界の導入も行われている。さらにNB電流駆動解析のためのフォッカープランクコードの作成・導入も進行中である。TOTALコードの特徴の一つとして、比較的簡易なモデルを用いて高速に計算を行える点があり、それを活かした原型炉等におけるプラズマの実時間制御への適用などが開発の方向として考えられている。

### 3.5 統合コード TASK3D

LHDをはじめとしたヘリカル系プラズマを主な対象とした統合輸送解析スイートTASK3Dの開発・運用が進んでいる。トカマクプラズマを対象とした統合解析コードTASK[25]を基盤として、3次元磁場構造に起因・関連する物理を記述するモジュールの追加、改良などが進められている。TASK3Dの開発戦略は以下の2通りである。LHD

実験データに基づいた【LHD 実験データ解析型 (TASK3D-D-Analysis, TASK3D-a シリーズ)】は、輸送現象に関するLHD実験解析の基盤となっており、各種モジュールの実験検証や高精度化などが行われている。一方、【到達パラメータ予測型】は、輸送モデルを導入して到達パラメータ(温度など)を予測するものである。以下の節では、それぞれについて記述する。

**LHD 実験データ解析型統合輸送解析コード：TASK3D-a**

3次元平衡、NBI加熱、熱輸送過程といった各種要素解析コード(モジュール)の統合作業を経て、2012年9月に、初版であるTASK3D-a01がリリースされた[47]。TASK3D-a01の構築によって、熱輸送解析の自動化が進化した。温度分布や密度分布の時間変化も考慮したダイナミック輸送解析の結果も提供することができるようになった。

より広範なLHD実験条件への適用を図るため、モジュールの追加や高精度化を行い、TASK3D-a02としてリリースした。新古典熱・粒子拡散フラックスを評価するGSRAKEコード[48]を組み込んだ。これにより、a01での実験的なエネルギーバランス解析とともに、新古典エネルギーフラックス解析が同時に行われることになった。また、ECH加熱分布を評価するLHDGaussコード[49]およびTRAVISコード[50]も導入したことで、ECH吸収パワーを取り込んだエネルギーバランス解析が行えるようになり、a01段階でのNBIプラズマ解析から解析対象の格段の拡張が実現した。

さらに、計算規模や必要資源の違いから統合が困難である大規模シミュレーションコードについても、TASK3D-aからLHDプラズマの平衡や温度・密度分布などを提供するという連携を確立した。その一例として、GNET[51]に

よるNBI加熱計算への必要データ提供を挙げることができ(4.10節参照)。これにより、大規模シミュレーションによるLHDプラズマ解析の実施や国際コードベンチマーク活動[52]が円滑にできるようになったこともTASK3D-aの成果であると言える。

複数イオン種から成るLHDプラズマや、LHD重水素実験への対応をさらに進めて、軽水素、重水素、ヘリウム存在下でのNBI加熱計算[53]に対応した第3版a03、第4版a04へと次々と機能拡張が行われた[54]。この機能拡張により、同位体効果研究の基盤となる解析データベースの作成が大きく進展している[55,56]。また、LHD重水素実験における中性子計測、高エネルギー粒子挙動の定量評価の基盤としての役割も果たしている(4.9節参照)。

このようにTASK3D-aは、要素モジュールの追加や高精度化が次々と進められ、多様な研究課題や系統的検証研究のための統合解析基盤として運用が行われている。今後の課題は枚挙に暇がないが、喫緊のものとしては、ICHモジュールの導入、モジュールとしての導入が可能な不純物輸送コードの検討と導入、周辺プラズマ解析との連携などが挙げられる。

ITER統合モデリング専門家会合において、大型実験において実験データと密に連携して運用されている統合解析スイートとしてTASK3D-aが認知されていることを最後に述べておきたい

**到達パラメータ予測型統合輸送解析コード：TASK3D**

トカマク輸送解析を対象とするTASK/TRをベースに、3次元MHD平衡、新古典輸送、径電場効果、3次元磁場加熱解析等を取り入れてヘリカル系輸送解析に拡張された統合コードであり、TASK3D-aと区別するためTASK3D-pと呼ばれることもある[57,58]。主に、加熱によって生成された高速粒子の振る舞いを記述する分布関数解析コードGNET[59]、GNET-TD[60]と組み合わせて、LHD、HSX等のヘリカル系プラズマの時間発展の予測に用いられている。また、LHD実験結果との比較により熱・粒子輸送モデルの構築やヘリカル型核融合炉の検証が進められている。

**3.6 統合コードの機能**

各統合コードに含まれる解析モジュールの主な機能を一覧を表1に示す。TOPICSはトカマクプラズマにおける物理現象を幅広くカバーしており、TASKは波動加熱・電流駆動の解析に、TOTALはヘリカル系を含めた輸送解析にウェイトがある。TASK3D (TASK3D-a, TASK3D-p)もヘリカル系プラズマの主要な物理現象をカバーしており、TASK3D-aは実験解析との連携に特徴がある。

**3.7 海外の統合コード**

欧米においても、多数の統合コードが開発されている。JINTRAC (JET Integrated Transport Code) [61]はJETで開発された輸送コードJETTO[62]をベースにしており、最近ではCore-SOL結合を含めた解析を行っている。ASTRA (Automated System for TRANsport Analysis) [63]はIPP-Garchingで開発された輸送コードをベースにした統合コー

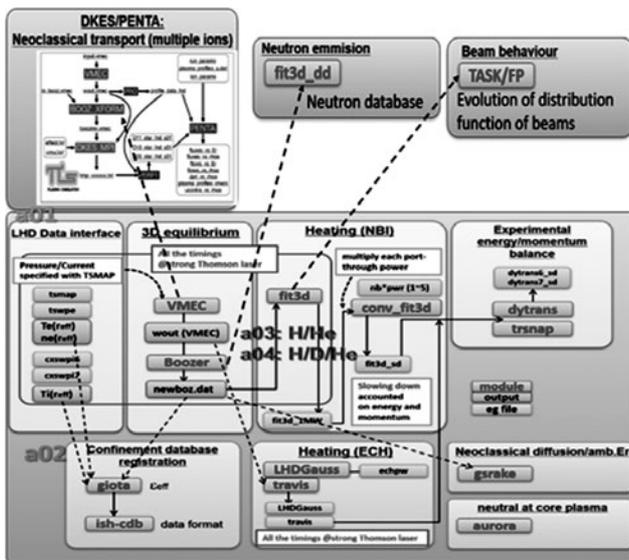


図4 LHD 実験データ解析型 (TASK3D-a シリーズ) の機能拡張の進展。中央部横一列で示された a01 版から、下段に記された機能拡張 (a02 版)、NBI 加熱モジュールを中心とした複数イオン種 (軽水素、ヘリウム、重水素) 対応 (a03, a04)、さらに、複数イオン種の新古典輸送解析に関する大規模シミュレーションコードとの連携や高エネルギー粒子挙動に関する機能拡張 (上段部) などの進展を述べている。

表1 各統合コードの機能一覧.

		TOPICS	TASK	TOTAL	TASK3D
MHD 平衡	固定境界平衡	○	○	○	○
	自由境界平衡	○	○	○	○
平衡データ 読込	EFIT 形式	○	○		
	MECS 形式	○	○		
	VMEC 形式	○	○	○	○
MHD 安定性	鋸歯状振動	○	○	○	
	NTM	○		○	
	RWM	○			
	ELM	○			
	AE	△	○		
	Mercier/n = ∞BM	○		○	△
輸送	バルクイオン	○	○	○	○
	高速イオン		○		○
	不純物イオン	○	○	○	
	中性粒子	○	○	○	○
	トロイダル回転	○			
	径方向電界	○	○	○	○
	新古典輸送 (2D)	○	○	○	
	新古典輸送 (3D)	○		○	○
	乱流輸送	○	○	○	○
高エネルギー 粒子	軌道追跡	○			○
	FP 方程式	○	○	○	○
NBI 加熱	高速イオン生成	○	○	○	○
波動加熱	光線追跡法	○	○	○	○
	ビーム追跡法		○		
	波動光学的解析	○	○		
ベレット入射	NGS モデル	○	○	○	○
	ドリフト効果	○		○	○
ダイバータ	簡易モデル	○		○	
	ダイバータコード	○			

ドである。CRONOS[64]はCEA-Saint-Paul-lez-Duranceで開発された統合コードであるが、粒子・熱輸送モデリングを簡略化して高速化を図ったMETIS[65]も開発されている。一方、統合モデリングのフレームワークを開発するために、EFDA ITM-TF (Integrated tokamak modeling - task force) が設置され、European ITM[66]が開発された。European ITMは、モジュール間でやり取りするデータを定義するCPO (Consistent Physical Object) とそのデータをやり取りするプログラムインターフェースを定義するUAL (Universal Access Layer) から構成され、モジュールの連携を定義するワークフローマネージャーとしてKepler[67]が採用された。そして、ITM-TFの活動として、既存の輸送コードとは独立に新しい輸送コードETS (European Transport Solver) [68]も開発されている。

米国PPPLにおいて開発された輸送解析用統合コードTRANSP[69, 70]は世界的に広く利用されているが、時間発展を予測するための統合コードPTRANSP[70]にも拡張されている。GAでは輸送コードONETWO[71]をベースとして統合シミュレーションが行われていたが、最近では後述の統合化フレームワークOMFIT[72]に基づいて統合コードが開発されている。また、LLNLで開発された統合コードCORSICA [73]は、ITERの制御プログラム開発に

利用されている。

### 3.8 統合モデリング解析フレームワーク

統合コードは多数の解析モジュールから構成され、それらの間でデータをやり取りする。従来の多くの統合コードは、特定の平衡・輸送コードをベースとし、それがMHDや加熱等の個々の解析モジュールとデータをやり取りする形で構成されていた。そのため、ある解析モジュールを別の統合コードに移植するたびに、新しいデータインターフェースを開発する必要があった。また、統合コードもその利用目的に応じて多様な解析レベルがあり、それに合わせて適切な解析レベルと必要計算負荷の解析モジュールを使用する必要がある。これらの多様性に対応するために、共通の統合化フレームワークを構築する試みが行われてきた。

統合コードを構成するためのフレームワークは、1) 解析モジュール間でやり取りするデータの種類とその構造、2) データをやり取りするためのプログラムインターフェース (API)、3) 解析モジュールの実行を制御するワークフロー管理等から構成される。

国内では、データ構造とデータ交換APIを定義するBPSD (Burning Plasma Simulation Data) [74]が開発され、統合コードTASKで利用されている。その開発方針は1) データ量を抑えた必要十分なデータセットであること、2) 並列処理に対応したデータ構造であること、3) 単純かつ適応性の高いデータ交換APIであることである。

ITER機構では、新しい統合コードを開発するのではなく、既存の解析モジュールを組み合わせた統合コードパッケージIMAS (Integrated Modelling and Analysis Suite) [75]を構築している。IMASに基づいて開発される統合コードにはさまざまなレベルがあり、その対象は即時のプラズマ再構成、制御システム開発のためのプラズマシミュレータ、運転シナリオ開発等の運転支援から、実験結果との比較による物理モデルの検証や物理機構の解明等の研究支援まで幅広く、解析モジュール間のデータのやりとりだけでなく、実験データの取り込みや蓄積を視野に入れている。そのため、IMASのデータモデルは、密度や温度などの物理量だけでなく、実験装置や計測装置の装置パラメータ、生データに近い計測データ等を記述する50種類以上のIDS (Interface Data Structure) を定義し、さらに増えつつある。

IMASのデータモデルやAPIはEFDA ITM-TFが開発したCPOとUALをベースとして開発され、改良が加えられている。そのため、EUが開発しているコードの多くにIMAS APIが実装され、相互接続の検証が行われている。また、ITER物理研究活動 (ITPA: International Tokamak Physics Activity) におけるコード間ベンチマークテスト等で、シミュレーションデータや実験データの交換にIMASのデータ形式IDSが用いられることも多くなってきている。また、EUにおける実験装置のデータをIMAS形式に変換するプロジェクトも進行している。ただ、データモデル仕様がかなり大きく、一つのIDSの全てのデータを設

定するには手間がかかるため、シミュレーションにおける頻繁なデータ交換には適さない面がある。部分的なデータ設定も許容されているが、必須項目が定義されていないため、その場合には相手モジュールのデータ設定・利用仕様を十分に理解する必要がある。

IMASにおけるワークフローマネージャーには、欧州と同じく Kepler[67]が採用されている。Fortran から Kepler へのインターフェースも開発され、そのインターフェースを通してのデータ交換を、GUI (Graphic User Interface) を用いて設定することができる。EU を中心に広く使われるようになりつつあるが、今後の課題としては、並列処理への対応、多様な計算環境 (バッチ処理、遠隔処理、多数ユーザー等) への適応性向上等が挙げられている。

米国では、GA を中心に統合コードフレームワーク OMFIT [72] が開発されている。OMFIT では Python を使用したファイルベースのデータ交換を行っており、IMAS をそのまま OMFIT に組み入れるには多くの問題点があるため、IDS のデータ構造に基づく Python ライブラリ OMAS を開発し、性能向上ならびに機能向上 (データ一貫性チェック、エラーハンドリング、動的ツリー生成、可変データ切り出し、データベースの多様化) を実現している。

国内では BPSD [74] と IMAS の間のデータインターフェースを開発し、モジュール間のデータ交換は BPSD で行い、必要に応じて IMAS IDS を通じてデータを交換・蓄積する方向で作業が進められている。

### 3.9 おわりに

統合コード開発は欧米と日本で進められており、ITER 運転に向けた国際連携も進みつつある。国内では 4 つの統合コードが開発されており、今後 ITER の運転や DEMO の設計に向けて、それぞれのコードの機能向上とともに、限られた人的資源を有効に利用するため、コード間連携を系統的に進める必要がある。また開発に必要な人材の育成に向けて、大学レベルでの解析モジュール開発をどのように進めるかが課題である。一方 ITER 機構で開発されている IMAS への国内の対応はやはり人的資源不足のためにかなり遅れている。国内で開発した解析モジュールの IMAS への提供や JT-60SA 実験環境における IMAS の利用をどのように進めるかは今後の課題である。また、周辺プラズマを含めた統合シミュレーションは一層重要な課題となりつつあり、高い信頼性をもつ周辺・統合コードの開発が望まれる。

### 参考文献

[ 1 ] M. Kikuchi and M. Azumi, Plasma Phys. Control. Fusion **37**, 1215 (1995).  
 [ 2 ] H. Shirai *et al.*, Plasma Phys. Control. Fusion **42**, 1193 (2000).  
 [ 3 ] N. Hayashi and JT-60 Team, Phys. Plasmas **17**, 056112 (2010).  
 [ 4 ] N. Hayashi *et al.*, Plasma Fusion Res. **6**, 2403065 (2011).  
 [ 5 ] N. Hayashi *et al.*, 42nd EPS Conf. on Plasma Physics (Lisbon, Portugal, 22-26 June 2015) P5.145 ( <http://ocs.ciemat.es/>

EPS2015PAP/pdf/P5.145.pdf ).  
 [ 6 ] M. Honda, Comput. Phys. Commun. **92**, 181 (2010).  
 [ 7 ] M. Honda *et al.*, Nucl. Fusion **53**, 073050 (2013).  
 [ 8 ] N. Hayashi *et al.*, Nucl. Fusion **53**, 123009 (2013).  
 [ 9 ] S. Satake *et al.*, Plasma Fusion Res. **3**, S1062 (2008).  
 [ 10 ] M. Honda *et al.*, Nucl. Fusion **55**, 073033 (2015).  
 [ 11 ] M. Honda, Phys. Plasmas **21**, 092508 (2014).  
 [ 12 ] P.T. Bonoli and R.C. Englade, Phys. Fluids **29**, 2937 (1986).  
 [ 13 ] N. Hayashi *et al.*, Nucl. Fusion **58**, 066001 (2018).  
 [ 14 ] K. Hoshino, J. Plasma Fusion Res. **92**, 882 (2016).  
 [ 15 ] Y. Miyata *et al.*, Plasma Fusion Res. **9**, 3403045 (2014).  
 [ 16 ] T. Tatekawa *et al.*, 3rd Int. Joint Conf. on Comput. Sci. Opt., IEEE Computer Society, DOI 10.1109/CSO.2010.162 (2010).  
 [ 17 ] K. Hoshino *et al.*, Plasma Fusion Res. **9**, 3403070 (2014).  
 [ 18 ] A. Fukuyama *et al.*, Proc. 20th IAEA FEC (Villamoura, Portugal, 2004) IAEA-CSP-25/CD/TH/P2-3.  
 [ 19 ] 百田 弘 他 : JAERI-M 6964 (1977).  
 [ 20 ] A. Fukuyama *et al.*, Comp. Phys. Rep. **4**, 137 (1986).  
 [ 21 ] T. Morishita *et al.*, J. Phys. Soc. Jpn. **57**, 1238 (1988).  
 [ 22 ] M. Honda and A. Fukuyama, J. Comp. Phys. **227**, 2808 (2008); M. Honda and A. Fukuyama, Comp. Phys. Comm. **208**, 117 (2016).  
 [ 23 ] H. Nuga and A. Fukuyama, Prog. Nucl. Sci. and Tech. **2**, 78 (2011).  
 [ 24 ] A. Fukuyama and T. Akutsu, Proc. 19th IAEA FEC (Lyon, France, 2002) IAEA-CN-94/TH/P3-14.  
 [ 25 ] TASK, <https://bps.nucleng.kyoto-u.ac.jp/task/>  
 [ 26 ] K. Yamazaki and T. Amano, Nucl. Fusion **32**, 633 (1992).  
 [ 27 ] J. Garcia *et al.*, Phys. Rev. Lett. **96**, 105007 (2006).  
 [ 28 ] Y. Murakami *et al.*, J. Nucl. Mater. **313-316**, 1161 (2003).  
 [ 29 ] S.P. Hirshman *et al.*, Comput. Phys. Commun. **43**, 143 (1986).  
 [ 30 ] K. Yamazaki *et al.*, Nucl. Fusion **25**, 1543 (1985).  
 [ 31 ] F.L. Hinton and R.D. Hazeltine, Rev. Mod. Phys. **48**, 239 (1976).  
 [ 32 ] C.S. Chang and J.D. Callen, Phys. Fluids **26**, 3315 (1982).  
 [ 33 ] M. Yokoyama *et al.*, NIFS-810 (2005).  
 [ 34 ] R.E. Waltz *et al.*, Phys. Plasmas **4**, 2482 (1997).  
 [ 35 ] H. Natsume *et al.*, Plasma Fusion Res. **9**, 3403048 (2014).  
 [ 36 ] Y. Hori *et al.*, Plasma Fusion Res. **5**, S2034 (2010).  
 [ 37 ] W.A. Houlberg *et al.*, Phys. Plasmas **4**, 3230 (1997).  
 [ 38 ] [https://w3.pppl.gov/ntcc/NCLASS/readme\\_nclass\\_pt.html](https://w3.pppl.gov/ntcc/NCLASS/readme_nclass_pt.html)  
 [ 39 ] T. Amano *et al.*, Internal report IPPJ-616, Institute of Plasma Physics, Nagoya Univ. (1982).  
 [ 40 ] S. Taniguchi *et al.*, Plasma Fusion Res. **5**, S2035 (2010).  
 [ 41 ] T. Yamakami *et al.*, Plasma Fusion Res. **8**, 2403079 (2013).  
 [ 42 ] M.H. Huges and D.E. Post, J. Comput. Phys. **28**, 43 (1978).  
 [ 43 ] K. Borrass *et al.*, Nucl. Fusion **31**, 1035 (1991).  
 [ 44 ] R.H. Fowler *et al.*, Comput. Phys. Commun. **13**, 323 (1978).  
 [ 45 ] H. Natsume *et al.*, Plasma Fusion Res. **10**, 3403051 (2015).  
 [ 46 ] K. Hoshino *et al.*, Nucl. Fusion **51**, 083027 (2011).  
 [ 47 ] M. Yokoyama *et al.*, Plasma Fusion Res. Special Issue **7**, 2403011 (2012).  
 [ 48 ] C.D. Beidler and W. D. D'haeseleer, Plasma Phys. Contr. Fusion **37**, 463 (1995).  
 [ 49 ] T. Ii, Tsujimura *et al.*, Nucl. Fusion **55**, 123019 (2015).  
 [ 50 ] N. Marushchenko *et al.*, Plasma Fusion Res. **2**, S1129

- (2007).
- [51] H. Yamaguchi *et al.*, Nucl. Fusion **56**, 026003 (2016).
- [52] 佐藤雅彦 他：プラズマ・核融合学会誌 **93**, 67 (2017).
- [53] P. Vincenzi *et al.*, Plasma Phys. Control. Fusion **58**, 125008 (2016).
- [54] M. Yokoyama *et al.*, Nucl. Fusion **57**, 126016 (2017).
- [55] H. Yamada *et al.*, 27th IAEA Fusion Energy Conference, EX/P3-5 (Ahmedabad, Oct. 2018).
- [56] K. Tanaka *et al.*, *submitted to* Nucl. Fusion (2019).
- [57] A. Sakai *et al.*, Plasma Fus. Res. **10**, 3403048 (2015).
- [58] S. Murakami *et al.*, Plasma Phys. Control. Fusion **57**, 054009 (2015).
- [59] S. Murakami *et al.*, Nucl. Fusion **46**, S425 (2006).
- [60] H. Yamaguchi *et al.*, Nucl. Fusion **56**, 026003 (2016).
- [61] M. Romanelli *et al.*, Plasma Fus. Res. **9**, 3403023 (2014).
- [62] G. Cenacchi and A. Taroni, JET-IR (88) 03 (1988).
- [63] G.V. Pereverzev, P.N. Yushmanov, IPP-Report, IPP 5/98 (2002).
- [64] J.F. Artaud *et al.*, Nucl. Fusion **50**, 043001 (2010).
- [65] J.F. Artaud *et al.*, Nucl. Fusion **58**, 105001 (2018).
- [66] G.L. Falchetto *et al.*, Nucl. Fusion **54**, 043018 (2014).
- [67] <https://kepler-project.org>
- [68] D. Coster *et al.*, IEEE Trans. Plasma Sci. **38**, 2085 (2010).
- [69] R.J. Hawryluk, Physics of Plasmas Close to Thermonuclear Conditions, ed. by B. Coppi, *et al.*, (CEC, Brussels) **1**, 19 (1980).
- [70] <https://transp.pppl.gov>
- [71] W. Pfeiffer *et al.*, GA-Report GA-A-16178 (1980).
- [72] O. Meneghini *et al.*, Nucl. Fusion **55**, 083008 (2015).
- [73] J.A. Crotinger *et al.*, LLNL Report UCRL-ID-126284; NTIS #PB2005-102154 (1997).
- [74] 福山 淳：プラズマ・核融合学会誌 **85**, 597 (2009).
- [75] F. Imbeaux *et al.*, Nucl. Fusion **55**, 123006 (2015)