

核融合プラズマを予測する — 統合輸送シミュレーション研究 —

山口 裕之

磁力線のカゴに閉じ込められた核融合プラズマは、その内部でいくつもの物理現象が互いに影響を及ぼし合いながら全体が変化してゆく、典型的な複雑系としてとらえることができます。ここでは、様々なシミュレーションを有機的に組み上げる=統合することで核融合プラズマ全体の振る舞いを予測しようという研究について紹介します。

核融合炉を設計する際には、プラズマの密度・温度を核融合反応が起こるレベルにまで高めることができることと、核融合反応のエネルギーによってプラズマの温度を維持できることが、保証されなければなりません。このため、プラズマの密度・温度を高い信頼性で予測する手法を開発することが、核融合炉を設計する上で欠かせないのです。しかし、核融合プラズマの振る舞いを予測することは簡単ではありません。そのことを説明するために、核融合プラズマの中で起きている現象とその相互のつながりを整理してみたのが図1です。外からの粒子供給や加熱を通じてプラズマに吸収された熱・粒子は、輸送と呼ばれる現象によってじわじわと運ばれ、プラズマの中に密度・温度分布が形成されます。図の中で「密度・温度分布」から「熱・粒子の吸収」「輸送」「磁場構造の変化」

という3つの現象へ矢印が伸びています。これは、密度・温度分布の変化に応じて、これらの現象の特性が変化するということを表しています。例えば、一般にプラズマの温度が高くなると、それに伴って熱の輸送も大きくなり、温度が上がりにくくなるという性質があります。こういった経路は他にいくつも存在します。また、「輸送」に限ってみても、その中身をいくつかの要素に切り分けて考えてみれば、図のような要素間の相互依存、相互統御の関係が存在しています。

核融合プラズマの密度・温度を高い信頼性で予測する物理モデルは、複雑な相互依存関係を矛盾なく記述するものでなければなりません。そのためにはコンピュータプログラムを使ったシミュレーションが必要不可欠となりますが、一つのプログラムだけでこの複雑な依存関係全体を記述することは、到底できません。そこで、異なる物理現象を記述するプログラム同士が、計算結果を互いに受け渡し合うことで、現象間の依存関係を矛盾なく取り入れるという方法が考えられます。このような方法でプラズマ全体の振る舞いを模擬するシミュレーション方法を「統合シミュレーション」と呼びます。

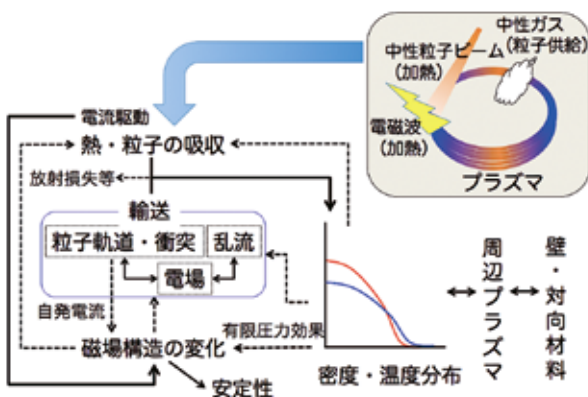


図1. 核融合プラズマの構成要素やその中で起こる現象間の関係性。矢印は、ある要素や現象から別の要素や現象への影響を表す。

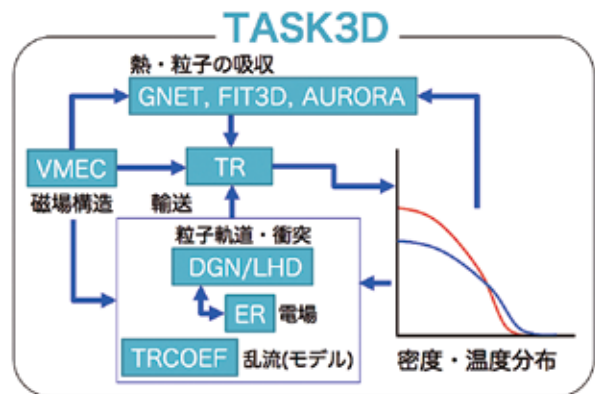


図2. 統合輸送コードTASK3Dの概念図。矢印は計算結果（数値データ）の流れを表す。

核融合科学研究所では、京都大学との共同研究を通じて、密度や温度の変化を支配する方程式（輸送方程式といいます）を解くプログラムを中核とした統合輸送シミュレーションコード、TASK3Dの研究を進めています。TASK3Dというのはプログラム全体の名前であり、その中には、図2のように、いくつかのプログラムが含まれています。アルファベットで書かれているのが各プログラム名前で、TRというのがプラズマの輸送方程式を解くメインのプログラムです。その他に熱・粒子の吸収、磁場構造、輸送現象の一部などを記述するプログラムが含まれています。このTASK3Dを使って、我々は、まずは大型ヘリカル装置（LHD）の実験結果を再現できるよう、それぞれのプログラムやモデルの改良を進めています。

一方、核融合プラズマ中の輸送現象には未解明の部分もあり、あらゆる実験結果をうまく説明できる理論というもの、世界的にも見つかりません。特に、プラズマ中の揺らぎが引き起こす乱流による輸送は大きな謎の一つです。近年のコンピュータ性能の発達に伴って、乱流シミュレーションの技術は、LHDのように複雑な形状のプラズマにおける乱流を模擬できるレベルにまで発展しています。その成果を統合シミュレーションに取り入れられない手はありません。しかし、乱流シミュレーションは、一般的に膨大な時間を要します。そこで、いくつかの密度・温度、磁場構造のパターンに対してあらかじめ乱流シミュレーションを行っておき、その結果をよく再現する数式モデル（簡約化モデルと呼ばれます）を作ることで、乱流による熱や粒子の流れを瞬時に評価する手法が核融合科学研究所において開発されてきています。

また、輸送方程式の「答え」であるところの密度・温度分布にLHDの実験結果を当てはめることで、熱の輸送を逆算するシステムも整備されてきています。この実験解析システムTASK3D-a（aはanalysis=解析という意味）は、実験結果の体系的な理解やデータベース化に貢献するだけでなく、理論研究者と実験研究者の橋渡し役としても大きな役割を果たしてきています。さらに、膨大な実験データベースを基にLHDプラズマの輸送を予測するという、データ駆動型科学へ踏み込む新たな試み（実験データベースモデル）も可能となりま

した。

我々はこういった最新の成果をTASK3Dに取り入れて、シミュレーションによる予測結果と実験結果との比較を進めています。図3は、TASK3Dによって予測されたLHDのイオン温度の分布と実験結果との比較の例です。この実験結果に対しては、実験データベースモデルを用いて、実験で観測されたイオン温度分布をよく再現できていることがわかります。残念ながら現段階では、あらゆる実験結果を再現することのできるレベルには至っていません。今後、モデルの拡張や改良を図っていく必要があります。図2に戻ると、今は図1に示した矢印のうち、特に重要なものや優先度の高いものを取り入れたという段階で、一方通行や未開通となっている経路もあります。今後、矢印に対応したシミュレーションを増やしていくことで、より矛盾のない、あるいはこれまでよりも幅広い実験条件に対応したシミュレーションを可能としていきます。

統合シミュレーション研究は、単なるプログラムの統合ではなく、多くの研究者たちの研究活動そのものの統合という側面があります。このような「知の統合」により、LHDにおける輸送現象の全容を明らかにするとともに、核融合プラズマの振る舞いに対する信頼性の高い予測手法を確立していきたいと考えています。

（核融合理論シミュレーション研究系 助教）

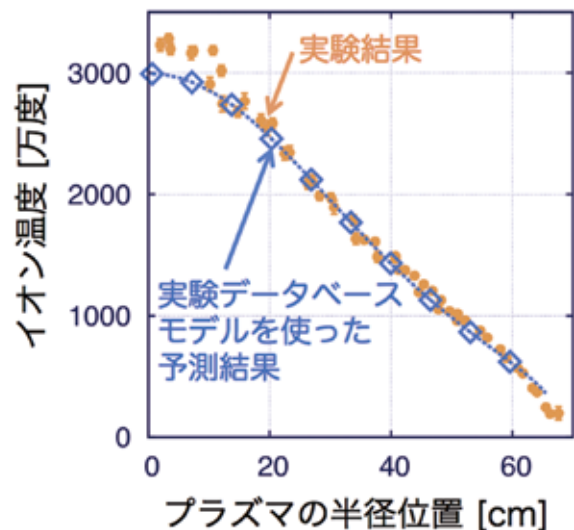


図3. TASK3Dによって予測されたLHDにおけるイオン温度と実験結果との比較の例。このケースでは、実験データベースモデルにより実験結果がよく再現されている。