

乱流プラズマにおけるマルチスケール・マルチフィジックスシミュレーション研究

矢木雅敏^{1,2}

Masatoshi YAGI^{1,2}

¹原子力機構、²九大伊藤極限プラズマ研究連携センター

¹JAEA, ²Itoh Research Center for Plasma Turbulence, Kyushu Univ.

1. はじめに

核融合プラズマにおいてはマルチスケール・マルチフィジックスに支配される現象が多く存在する。例えば時間スケールは波動現象(1 psec)から閉じ込め時間(1000sec)に及び空間スケールは電子のスキン長(10 μ m)から装置サイズ(10m)に及ぶ。さらにプラズマ・壁相互作用により複雑な原子分子過程を考慮する必要性が生じる。

核燃焼プラズマ統合コード(BPSI)プロジェクト(平成 14~)は統合輸送モデルを構築する国内の研究活動であり、異なる時空間スケールの現象を記述するモデルをコード化し、それらを連結するモジュールの開発に力点を置いている[1]。モデル構築・検証においては、第1原理に基づくシミュレーション研究が車の両輪として重要な役割を演じている。

原子力機構においては数値トカマク(NEXT)計画(平成 8~)が進行中であり、基本原理に基づく大規模シミュレーションにより、炉心プラズマおよびダイバータプラズマの多面的で複雑な振る舞い(マルチスケール・マルチフィジックス)の解明を目指している[2]。

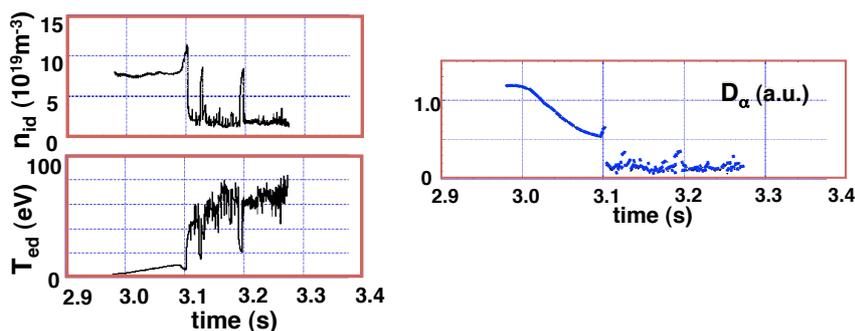
九州大学においては「乱流プラズマの動的応答と動的輸送の総合研究」(平成 21~平成 25)が現在進行中であり、マルチスケール乱流理論や非局所輸送の研究が精力的に進められている[3]。

本講演ではこれらのプロジェクト研究で得られた成果の一部を紹介し、今後のシミュレーション研究の展望を述べる。

2. コアとエッジ結合モデルによるL-H遷移のシミュレーション

先行シミュレーション研究によれば、L-H遷移はプラズマ境界での温度、密度の値に敏感であることが報告されている[4]。従って、境界での温度、密度の評価が重要となる。1.5次元の輸送コード TOPICS-IB と 2次元のダイバータコード SONIC を連結することにより、輸送コードで与えられる粒子・熱フラックスを境界条件として、ダイバータ領域における中性粒子や不純物の挙動を計算し、それをもとにプラズマ周辺部における粒子・熱源やシンクをつじつまのあった方法で評価する手法を確立した。これによりプラズマ境界における温度、密度を精度よく評価することが可能となった。あわせて電流拡散バルーニングモード乱流による周辺乱流輸送モデルを改良し、L-H遷移の閾値近傍でExBシェリングによる乱流抑制機構により乱流がクエンチし、Hモードへ遷移するモデルを構築した。この統合輸送コードを用いてつじつまのあったL-H遷移のシミュレーションに初めて成功した[5]。

図1：ダイバータ板におけるイオン密度、電子温度の時間発展(左図)、 D_{α} の時間発展(右図)



統合輸送コードではダイバー領域を同時に解いているのでダイバータ板近傍での $D\alpha$ を評価することが可能となり、実験との直接的な比較が容易となった。シミュレーション結果の例として図1にL-H遷移におけるダイバータ板での密度と温度、 $D\alpha$ の時間変化を示す。

3. 乱流計測シミュレータを用いたソース変調に対するプラズマの非局所応答

乱流構造の形成機構を解明することはプラズマ輸送現象の定量的理解のために必要である。さらに、詳細化した磁場閉じ込めプラズマ実験計測データとシミュレーションの比較により現象の理解を加速できる。乱流計測シミュレータ[6]は、大域的な3次元乱流シミュレーションにより乱流場の時系列データを生成し、その上で実験計測を模擬することで乱流構造形成の数値診断を行う。ここではソース変調に対するプラズマの非局所応答シミュレーション結果を紹介する。近年、トロイダルプラズマに摂動を加え、密度や温度の応答を観測することで、非局所的なプラズマ応答の様相を明らかにする研究が進められ

ている。ヘリカルプラズマにおけるドリフト交換型不安定性による乱流飽和状態に圧力ソース項の変調を加え、圧力分布の応答とそれをもたらす動的なモード結合の様相を調べた。揺動に隠れた特徴的な変化は応答の繰り返しを平均することで現れる(図2)。揺動強度変化の時間スケールは圧力およびその勾配変化のスケールの半分以下と早いものであった。得られた飽和状態では径方向に広がったモードが励起されており、そのモード結合が介在して、広い半径領域で広い周波数領域の揺動が同期した応答が見られた。この同期が拡散項による拡散よりも早い熱輸送に寄与していると考えられる。このように乱流計測を模擬した時系列データの抽出から非線形結合の同定を行うことで、実験結果の相互検証の場として活用ができる。

さらに非局所輸送の別の事例として周辺乱流シミュレーションにおける弾道的な伝搬現象の統計性質に関する研究成果[7]もあわせて紹介する予定である。

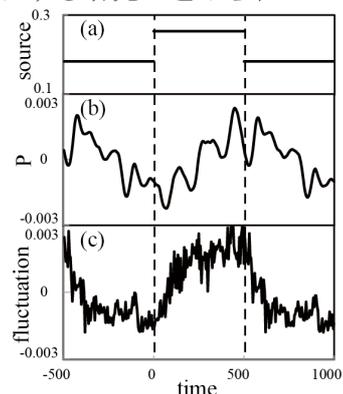


図2 : (a)体積積分圧力ソース、および小半径 $\rho = 0.5$ における(b)圧力、(c)揺動強度の時間変化。

謝辞： 本研究発表の準備に於いて、伊藤早苗、伊藤公孝、福山淳、糟谷直宏、杉田暁、滝塚知典、清水勝宏他の方々との議論に感謝します。科学研究費基盤研究(21224014, 23246163)、日本原子力研究開発機構共同研究、核融合科学研究所共同研究及び九州大学応用力学研究所共同研究の援助を受けました。

[1] A. Fukuyama and M. Yagi, ‘Burning Plasma Simulation Initiative and Its Recent Progress’, J. Plasma Fusion Res. Vol. **81**, No. 10 (2005) 747-754 (in Japanese).

<http://bpsu.nucleng.kyoto-u.ac.jp/bpsi/>

[2] M. Yagi, ‘NEXT Project and Theory/Simulation Research in BA CSC’, RIST NEWS No. 49 (in Japanese).

<http://www-jt60.naka.jaea.go.jp/theory/intro/index.html>

[3] S.-I. Itoh, Grant-in-Aid for Scientific Research (S), ‘Integrated Research on Dynamic Response and Transport in Turbulent Plasmas’

<http://tokusui.riam.kyushu-u.ac.jp/S/home.html>

[4] A. Fukuyama et al., ‘Transport modelling of L-H transition and barrier formation’, Plasma Phys. Control. Fusion **38** 1319(1996).

[5] M. Yagi, et al., ‘Simulation Study of L/H Transition with Self-Consistent Integrated Modelling of Core and SOL/Divertor Transport’, Contrib. Plasma Phys. **52**, No. 5-6, 372(2012).

[6] N. Kasuya, et al., ‘Heavy Ion Beam Probe Measurement in Turbulence Diagnostic Simulator’, Plasma Sci. Tech. **13** (2011) 326; N. Kasuya 本学会講演 **28PA10**

[7] S. Sugita et al., ‘Ballistic propagation of turbulence front in tokamak edge plasmas’, Plasma Phys. Control. Fusion **54** (2012) 125001; S. Sugita 本学会講演 **27E08P**