

プラズマコヒーレント構造における微視的ダイナミクス研究の進展 Progress of Study of Microscopic Dynamics in Plasma Coherent Structures

長谷川 裕記^{1,2}, 石黒 静児^{1,2}
HASEGAWA Hiroki^{1,2} and ISHIGURO Seiji^{1,2}

核融合研¹, 総研大²
NIFS / NINS¹, SOKENDAI²

1. はじめに

磁場閉じ込めプラズマ装置の周辺領域では、その装置形状（トカマク型、ヘリカル型、直線型等）によらず、非拡散的な動径方向のプラズマ輸送が、近年観測されている（例えば、文献[1]など）。そして、この非拡散的動径方向輸送を担っている物理機構として、周辺領域で間歇的に発生する磁力線に沿ったフィラメント状のコヒーレント構造（plasma blob）が考えられている[2, 3]。このコヒーレント構造の伝播過程については、流体的な描像に基づく2次元の簡約化モデルを用いた研究が盛んになされてきたが[3, 4]、このような巨視的モデルによる研究では、固体壁とプラズマとの間の電位構造やイオンと電子の速度差の効果などの微視的なダイナミクスは無視されている、もしくは、ある仮定されたモデルから導かれた簡易的なパラメタとして繰り込まれており、その妥当性の検証に不十分な点があった。特に、その伝播過程を考える際には、コヒーレント構造内部の電流クロージャの扱いが重要となるが、上述のような理由から、磁力線方向の電流については、なんらかのモデルを仮定せざるを得なかった。そこで、我々は、コヒーレント構造の伝播過程を計算するための3次元静電粒子シミュレーションコードを開発し[5]、同コードを用いた大規模計算によって、コヒーレント構造における微視的ダイナミクスの研究を進めてきた[6-8]。本講演では、これまでの研究の進展について述べるとともに、今後の展望について概観する。

2. コヒーレント構造の粒子シミュレーション

本研究では、粒子吸収境界を取り入れた3次元静電粒子シミュレーションコード（Particle-in-Cell 3-dimensional Simulation Code for Boundary Layer Plasma Dynamics（p3bdコード））を開発し、それを用いて、コヒーレント構造における

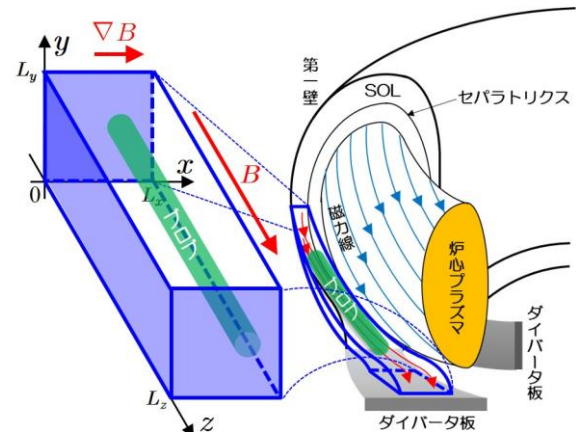


図 1: p3bd コードのシステム概観図. シミュレーションボックス（左）は、Scrape-off Layer (SOL)（右）を模擬している。

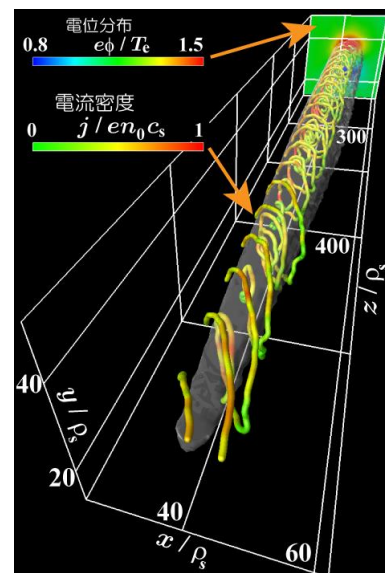


図 2: コヒーレント構造内部の電流系。

微視的ダイナミクスについて調べている。シミュレーションでは、図1に示したように、 z 軸に平行な外部磁場を与え、 x 方向に磁場勾配 ∇B を設定している。また、 $x=0$ の境界面（第一壁に相当）、 $z=0$ 、及び、 L_z の境界面（ダイバータ

に相当)を粒子吸収境界とし、電位を $\phi = 0$ としている。そして、初期に z 軸に平行な円柱状の高密度領域(blob),もしくは、低密度領域(hole:背景プラズマよりも密度の低いコヒーレント構造)を与え、その挙動を追う。そして、これまでの一連の3次元粒子シミュレーションにより、次のような結果が得られている。

2.1. 構造内部の自己無撞着な電流系

図2に示したように、コヒーレント構造の内部にらせん状の電流系が形成されることを確認した[7]。コヒーレント構造の内部では、 ∇B ドリフトによる荷電分離により、その断面において、ダイポール型の電位構造が形成されるが、正の電荷が溜まっている側である高電位側では、中央部からダイバータ方向に、低電位側では、ダイバータから中央部方向に、それぞれ、沿磁力線電流が流れる。一方、磁力線に垂直な断面内では、コヒーレント構造の密度勾配にともなう反磁性電流が流れており、それらが合わさって、らせん状の電流系が形成される。この粒子シミュレーションでは、ダイバータ近傍のシース電位も自己無撞着に解くことができるため、一連のシミュレーションで再現された電流系はシース電位と無矛盾なものであり、このことは、粒子シミュレーション手法が、上述の電流クロージャ問題を解決できる可能性を示している。

2.2. 電位構造にともなう温度構造

コヒーレント構造内部における粒子の速度分布を調べたところ、低電位側の電子温度に比して高電位側の電子温度が高い(すなわち、電位分布に合わせて温度分布を持つ)ことが明らかになった[7]。これは、高電位側の電子のほうにダイバータ方向に逃げにくくなっているためであると考えられる。さらに、ダイバータ近傍においては、高電位側のイオンのほうが、低電位側のイオンよりも、より強く加速されていることも明らかになった[7]。これも、高電位側のほうが、シース電位の大きさがより大きくなっているためであると考えられる。

2.3. 不純物イオンを含むプラズマでの挙動

コヒーレント構造については、不純物を輸送する可能性が指摘されており[3, 9]、本研究では、不純物イオンを含むプラズマ中におけるコヒーレント構造の挙動についても調べている。これまでの計算では、構造内部にある不純物イオンが分極ドリフトによってダイポール型の密

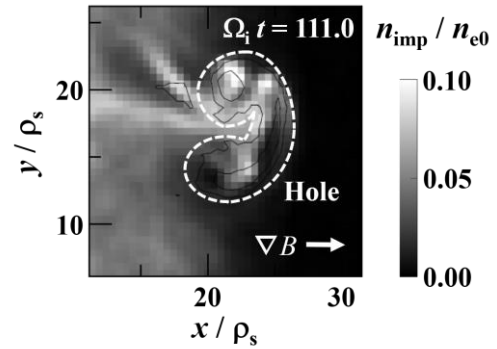


図 3: Hole 構造による不純物輸送. 図は不純物イオンの密度分布を示している. 白い破線で囲まれた領域が hole の断面を表している. Hole は、図左側の不純物が存在する領域から、不純物イオンを ∇B 方向に輸送していることがわかる. その実効的な拡散係数は、Bohm 拡散と同程度となる。

度分布を持つようになること、そして、不純物イオンが動径方向(x 方向)に密度勾配を持つ場合には、構造の伝播によって不純物イオンが輸送されることが示されている[8] (図3)。

3. 今後の展望

本研究では、上述の結果の他にも、粒子運動が構造の伝播過程に与える効果などについても調べており、これら一連の研究をさらに進展させ、多階層シミュレーション手法も取り入れながら、不純物を含む周辺プラズマの動径方向輸送ダイナミクスの理解を目指したい。

- [1] M. V. Umansky *et al.*, Phys. Plasmas **5**, 3373 (1998).
- [2] S. I. Krasheninnikov, Phys. Lett. A **283**, 368 (2001).
- [3] S. I. Krasheninnikov, D. A. D'Ippolito, and J. R. Myra, J. Plasma Phys. **74**, 679 (2008) and references therein.
- [4] D. A. D'Ippolito *et al.*, Phys. Plasmas **18**, 060501 (2011) and references therein.
- [5] S. Ishiguro and H. Hasegawa, J. Plasma Phys. **72**, 1233 (2006).
- [6] H. Hasegawa and S. Ishiguro, Plasma Fusion Res. **7**, 2401060 (2012).
- [7] H. Hasegawa and S. Ishiguro, Phys. Plasmas **22**, 102113 (2015).
- [8] H. Hasegawa and S. Ishiguro, Proc. 26th IAEA Fusion Energy Conference, TH/P6-17 (2016).
- [9] S. I. Krasheninnikov *et al.*, Proc. 19th IAEA Fusion Energy Conference, IAEA-CN-94/TH/4-1 (2003).