

3-8 トカマク周辺プラズマ流の複雑構造の解明 —第一原理先進的粒子シミュレーションが拓くプラズマ物理—

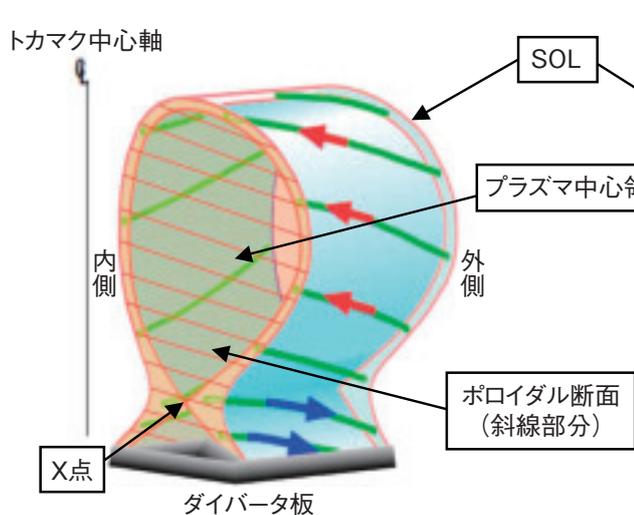


図 3-21 トカマクの周辺プラズマ流
トカマクプラズマを包み込む SOL (細い赤線で囲まれた領域) におけるプラズマは主に磁力線 (緑色の線) に沿って流れます。しかし、その向きは赤と青の矢印で示すように逆向きの流れが観測されました。

トカマクプラズマ周辺のスクレイプオフ層 (SOL) のプラズマ流は、核融合炉における熱と粒子の制御にとって重要な役割を持っています。プラズマ中心の高温領域で核融合反応により生成されたエネルギーとヘリウム灰は、プラズマ周辺の SOL 領域まで拡散していきます。もし SOL 中の流れがダイバータ板に向かっていけば (図 3-21 青矢印)、ヘリウム灰を効率良く排出でき、不純物をダイバータ板近傍に留めることにより放射による冷却を効率良く行うことができます。しかし実験では、図 3-21 に示すように、外側の SOL 領域でダイバータ板へ向かう流れとは逆のダイバータ板から離れる流れ (図 3-21 赤矢印) が観測されることがあります。この流れの構造を解明するため、流体モデルを用いた数値シミュレーションが数多く行われてきましたが、実験を十分説明する結果は得られませんでした。

そこで、プラズマの粒子的振る舞いを正確に求めていなかったことが原因のひとつではないかと考え、第一原理に基づく粒子シミュレーションコード PARASOL を用いて、SOL における流れのパターンについて調べました。その結果、ダイバータ板 (あるいは X 点) が上側にあるときと下側にあるときで、プラズマ流が変化するこ

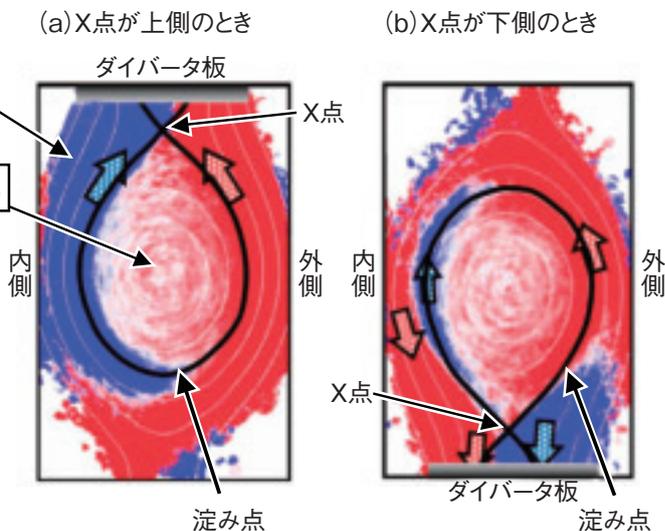


図 3-22 プラズマ流のポロイダル断面上の二次元構造
(a) のとき、プラズマ流はダイバータ板に流れる構造となり、(b) のとき (図 3-21 の場合) は、外側 SOL 領域でダイバータ板から離れる方向の逆流構造が見られます。黒実線は図 3-21 のプラズマ中心領域と SOL の境界です。

とを見だし、その物理機構を解明することができました。PARASOL コードは、プラズマ中心領域と SOL 領域の全領域を扱い、その領域に存在する非常に多数のイオンと電子の振る舞いを模擬することができます。粒子の軌道は、粒子シミュレーションによって自己無撞着に計算される電場の中で、旋回運動や粒子間の二体衝突モデルにより正確に求められます。図 3-22 にシミュレーションによる、磁力線平行方向のプラズマ流 ($V_{||}$) のポロイダル断面上に投影した二次元構造を示します。図 3-22 (a) のとき (上側に X 点)、内側 SOL 領域 (図中青色) でも外側 SOL 領域 (図中赤色) でも流れはダイバータ板に向かい、淀み点 ($V_{||}=0$) は下底側に得られました。一方、図 3-22 (b) (図 3-21 の場合で下側に X 点) のとき、外側の SOL 領域 (赤色) で逆流パターン (反時計回り流れ) となりました。このシミュレーション結果は、実験と比較すると定性的にも定量的にも非常に良く似た流れとなっていることが分かりました。さらに、プラズマの流れの複雑なパターンは、主にトロイダル形状を持つ磁場中のイオン粒子軌道の効果によりもたらされることが分かりました。

●参考文献

Takizuka, T. et al., Two-Dimensional Full Particle Simulation of the Flow Patterns in the Scrape-Off-Layer Plasma for Upper- and Lower-Null Point Divertor Configurations in Tokamaks, Nuclear Fusion, vol.49, no.7, 2009, p.075038-1-075038-9.