

## 論文の内容の要旨

論文題目      **Simulation study of scrape-off-layer plasmas by a virtual divertor model  
incorporating ion temperature anisotropy**  
(非等方イオン温度に基づいた仮想ダイバータモデルによる  
スクレイプオフ層プラズマのシミュレーション研究)

氏 名      東郷 訓

トカマク型核融合炉の商用化に向け、ダイバータ板にかかる熱負荷を低減することが最重要課題の一つとされている。特に核融合出力が大きい DEMO 炉では ITER に比べてスクレイプオフ層(SOL)に流入する熱流束が 5~6 倍になると見込まれる一方で、放射化の観点から冷却管に熱伝導性に優れた銅合金が使用できない関係で、ダイバータ板への許容熱負荷が低下するため、95%以上の熱流束を不純物放射などによって分散する必要がある。ダイバータ熱負荷を著しく低減させるために、ダイバータ板への粒子束が減少する非接触プラズマ現象の利用が期待されており、その制御に向けて必要な物理機構の解明のために実験やシミュレーションによる研究が進められている。ダイバータ板への熱負荷の定量的な予測には SOLPS や SONIC に代表される空間二次元以上の SOL-ダイバータプラズマコードパッケージが使用されている。実験結果との比較によるコードのバリデーション研究も並行して進められているが、実験結果と満足に一致しない場合があることが報告されている。そこで我々はこの問題の解決のためにプラズマ流体モデルに着目することにした。コードパッケージに用いられている流体モデルは一般的に Braginskii が導出したものであり、温度がほぼ等方であるという仮定を用いている。非等方圧力の効果が粘性流束で近似されているので、磁力線平行方向の運動量輸送方程式が空間二階微分方程式で記述されている。そのため一般的には Bohm 条件に基づいてシース入り口のマッハ数を 1 で与える。一方で非等方温度の導入により一般化された流体モデルも提案されてきたが、SOL-ダイバータプラズマコードへの応用はなされていない。その理由は、一般化流体モデルでは磁力線平行方向の運動量輸送方程式が空間一階微分方程式で記述されているため、シース入り口を自由端にしておく必要があるが、この境界条件の取り扱いが困難であったためであると考えられる。この問題の解決のため我々は仮想ダイバータモデルを開発した。このモデルは、ダイバータ板がプラズマ粒子にとってシンクになっているという基本的な考え方に基づいて、シース入り口の奥に仮想的な領域(仮想ダイバータ領域)を設け、そこにプラズマの粒子・運動量・エネルギーの人工的なシンクを設置することでシース入り口の境界条件を再現するというものである。我々としては非等方温度と仮想ダイバータモデルをコードパッケージにいきなり導入

するのではなく、比較的計算時間が短いという点で有利な一次元コードを開発し、それに非等方温度を導入した流体モデルと仮想ダイバータモデルを実装することで、それらの重要性を示し、将来コードパッケージへの採用が標準的となるようにすることを目指す。

2章では非等方イオン温度を導入したプラズマ流体方程式と仮想ダイバータモデルについて説明する。仮想ダイバータ領域によって計算領域を周期境界とすることで、プラズマと壁の境界の取り扱いが容易になる。周期境界条件を用いる場合の数値解法についても説明する。

3章ではまず仮想ダイバータモデルでシース入り口の境界条件が満たされるかどうかを示す。まず Bohm 条件について、粒子シミュレーションの結果から冷却なしの条件ではシース入り口でのマッハ数が1になることが示されているので、この条件に我々の流体モデルを当てはめた。一次精度風上差分の影響による誤差はメッシュサイズを小さくするにつれて小さくなり、マッハ数1に収束する様子が示された。次に仮想ダイバータ領域のエネルジーシンクを調整することで、シース熱伝達係数がシース理論による値に制御可能であることが示された。また3章後半ではプラズマモデルを用いた初期結果も紹介した。まず衝突周波数が高い場合と低い場合の物理量の分布と、イオン温度非等方度と衝突周波数との関係を示し、定性的な説明や粒子シミュレーションの結果ともよく一致することを示した。また放射冷却の効果によって超音速流が発生するという粒子シミュレーションの結果が我々の流体コードでも再現できることと、それが解析解と良く一致することを示した。さらに粘性流束とイオン応力テンソルを直接比較することで、粘性近似の妥当性について議論した。粘性流束リミタとして妥当な値を選択することが難しいことから、非等方イオン温度の導入の優位性を主張する。

4章ではダイバータ領域のプラズマを再現する上で欠かせない中性粒子の流体モデルについて説明する。高密度プラズマにおいては荷電交換反応によって十分に熱化されるために拡散モデルで中性粒子を記述することが妥当である。しかしながらダイバータ板から放出され、まだ荷電交換反応をしていない中性粒子は熱化していないため、拡散モデルで記述することが出来ない。よって低密度プラズマにおいて誤差が大きくなると考えられる。そこで **first-flight corrected diffusion (FFCD)** モデルが提案された。このモデルはダイバータ板から放出され、荷電交換を経験していない中性粒子を、熱化した中性粒子と区別して取り扱うものである。境界条件として、拡散によって輸送される中性粒子はダイバータ板に当たると反射せずに全て **first-flight** としてリサイクリングすると仮定する。我々のコードでもこの **FFCD** モデルを標準的に用いることにした。一方、プラズマと壁の境界の取り扱いを容易にするという目的で中性粒子についても仮想ダイバータモデルを用いることは有意義である。拡散中性粒子にとってダイバータ板はイオンにとってのそれと同様にシンクとして働くので、仮想ダイバータ領域に人工的な粒子シンクを置く。**first-flight** の中性粒子については、仮想ダイバータ領域の人工シンクで取り除いたイオンや拡散中性粒子を変換して人工ソースを置く。拡散中性粒子の密度は仮想ダイバータ領域の人工シンクの強さに依存するが、それを制御することによって境界条件を満たすことができることを4章の後半で示した。また中性粒子モデルを用いた初期結果も紹介する。中性粒子によってイオン温度非等方性が緩和される傾向にあることが示された。拡散モデルで用いる拡散係数について、

径方向輸送による粒子損失周波数の効果が含まれるかどうかでプラズマ密度分布にどの程度差が生じるのかについても調べた。普通の拡散モデルの場合、荷電交換反応よりも径方向輸送損失の周波数が高い領域では中性粒子の拡散の割合に差が生じ、プラズマ密度分布もそれに応じて広がりが変化した。FFCD モデルの場合ではそのような領域では拡散中性粒子よりも first-flight の中性粒子が卓越しており、差はほとんど見られないことが分かった。なおこの計算は、拡散係数の修正によって中性粒子の運動論モデルと流体モデルの差が説明できることを期待して行ったものであるが、将来的には運動論モデルとの直接比較が必要である。また 4 章では不純物について簡易放射冷却モデルでの取り扱いが説明されている。

5 章ではコードの応用として、粒子シミュレーションの結果からの「超音速流の発生によって接触状態から非接触状態への遷移がスムーズになる」という予測について検証を行うことにした。コアプラズマからの粒子束を増加させることによって、ダイバータ板への粒子束が減少するロールオーバーが生じる非接触領域を再現することに成功した。しかし粒子束増倍率の最大値が 2.5 程度に留まっており、実験や数値計算で存在が知られている高リサイクリング領域が再現されていないことが分かった。粒子束の熱流束、ダイバータ領域のフラックスチューブ幅、不純物放射への依存性が調査されたが、いずれも高リサイクリング領域の再現には至らなかった。またこのときの超音速流は観測されなかった。次にプラズマの径方向粒子・熱拡散の効果を導入した。初期結果として中性粒子を考慮しない条件では径方向粒子拡散が増加するにつれて超音速流が生じるという結果を示した。また先の粒子束についての調査に径方向粒子拡散の効果を加味することで、高リサイクリング領域が生じるという結果が示された。次に不純物放射モデルを炭素の放射効率に切り替えて径方向粒子・熱拡散の効果を詳細に調べた。まず径方向拡散がない場合でも不純物モデルの切り替えによって高リサイクリング領域が再現された。径方向拡散が強くなるにつれ粒子束増倍率の最大値が上昇する様子が見られた。また径方向拡散の効果により運動量流束増倍率が 0.5 程度に残っていても粒子束のロールオーバーが生じる様子が見られた。しかしながらこの場合でも超音速流は観測されなかった。さらに不純物放射を放射領域の拡大や不純物割合の増加によって強くした場合に、非接触フロントが上流に向けて移動する様子が観測された。このとき定常解を得るためには径方向熱ソースなどを加える必要があるが、シース入り口のマッハ数が 1 を超える傾向が確認された。

以上の計算は簡単のために一様磁場やプラズマ電流なしを仮定しているが、より一般的なプラズマの再現のためには非一様磁場の効果やプラズマ電流の効果を導入する必要がある。また仮想ダイバータ領域の人工シンクの時定数は、非定常現象のシミュレーションを行う際には着目している物理現象の時定数よりも十分に短くとる必要があり、同時に短いメッシュサイズが要求される。計算時間の抑制のため、可変メッシュの導入が必要である。