

# IFERC-CSC 大型計算機利用報告書(プロジェクト枠)

2020 年度

研究課題名	Gyro- & Drift-Kinetic simulations for multi-species plasma transport in Tokamak and HELical plasmas
上記の頭文字	GDKTHEL

\* 申請時のタイトル、略称を記載してください

## 研究代表者 (PI):

研究代表者名	沼波 政倫
--------	-------

### 1. 成果の概要 (200字程度)

原型炉や ITER における燃焼プラズマの輸送と分布を予測・制御するために必須となる炉心プラズマの輸送現象の理解を目指し、運動論的シミュレーション研究を遂行した。2020 年度は、2019 年度に実施した課題で少しずつ明らかになってきた多成分プラズマの粒子輸送現象や不純物輸送の物理機構を足掛かりとして、複数粒子種プラズマの乱流輸送や大域的輸送や衝突効果評価の改善、データ科学に基づく乱流シミュレーションの計算量低減法の開発を進めた。

### 2. 成果の詳細 (図、表等を含めて A4 で 2~3 ページ程度)

#### 大域的古典輸送シミュレーションの不純物イオン輸送計算への応用

LHD 実験で観測された、高  $T_i$  プラズマにおいて不純物イオン( $C^{6+}$ )のコア領域からの吐き出し現象(不純物ホール現象)は従来の新古典輸送理論では説明ができない。これは、 $T_i > T_e$  の条件では通常、負の両極性電場  $E_r$  が形成されると想定され、 $Z_i E_r$  に比例する内向き新古典粒子フラックスは、電荷  $Z_i$  の大きい不純物ほど温度勾配によるスクリーニングの効果より強くなると考えられてきたためである。一方、これまでの我々の研究で、いわゆる  $1/\nu$  領域のイオン新古典フラックスの予測は、 $E_r$  の絶対値が小さく、高  $T_i$ ・低衝突領域において、従来の新古典輸送計算の磁気ドリフト項を無視する近似が正しくなくなることが分かってきた。そのため、不純物ホールプラズマの新古典輸送解析に、磁気ドリフト項を正しく反映させた大域的シミュレーションが不可欠ではないかという予想が立てられた。これを検証すべく、2020 年度は、一昨年度から大域的古典輸送コード FORTEC-3D を多粒子種プラズマに拡張したコードを用いて LHD 実験で観測された不純物ホールプラズマ中の新古典輸送と両極性電場を 3 イオン種 ( $H^+$ ,  $He^{2+}$ ,  $C^{6+}$ ) プラズマで評価した。従来は、電子のみ局所近似の解を使った計算が行われてきたが、今回初めて電子・イオン間衝突を含めて電子まで全て大域的シミュレーションで計算を行った。これはヘリ

カルプラズマの多粒子種新古典輸送計算としては世界初の試みである。図 1 は大域的シミュレーションで求められた径電場分布を、電子のみ局所近似、電子とイオン全て大域的シミュレーション、従来の局所近似(PENTA コード)の 3 通りとで比較した結果である。PENTA コードの計算では  $r < 0.8a$  の領域で負電場のルートしか現れないが、大域的シミュレーションでは  $r > 0.25a$  に正電場のルートが現れた。これは、この計算のケースと似た他の不純物ホールプラズマにおける観測結果[Ido et al. PPCF 2010]と定性的に一致している。図 2 では各粒子種の新古典フラックス  $Z_a \Gamma_a$  の径方向分布を示した。重要な発見として、炭素のフラックスが、負電場となっている磁気軸付近を含め外向きになっており、従来の新古典理論と逆の結果が得られたことである。ジャイロ運動論シミュレーションによる計算から、炭素イオンの乱流粒子束は内向きになることが分かっており[Nunami et al. PoP 2020]、不純物ホール現象を説明するには外向きの新古典フラックスが必要であるが、本シミュレーションによってその可能性が世界で初めて示された。また、図 1, 2 から明らかなように、電子については局所近似でも大域的シミュレーションでも結果にほとんど差がないことが分かった。この大域的シミュレーションに、磁気面上のポテンシャル非一様性を入れた計算も現在進めており、FEC2020 で発表予定である。

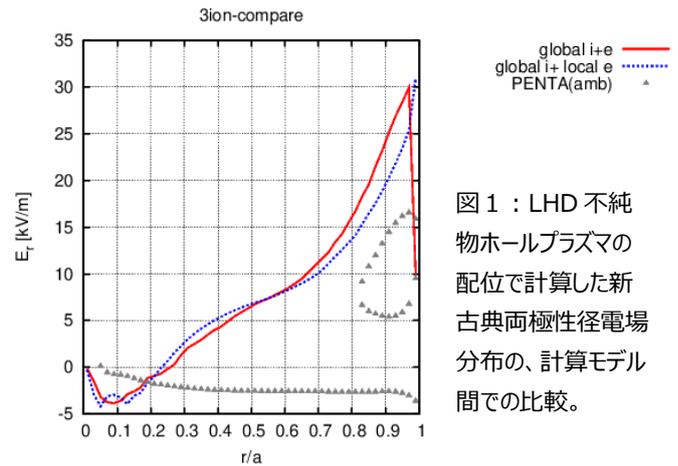


図 1 : LHD 不純物ホールプラズマの配位で計算した新古典両極性径電場分布の、計算モデル間での比較。

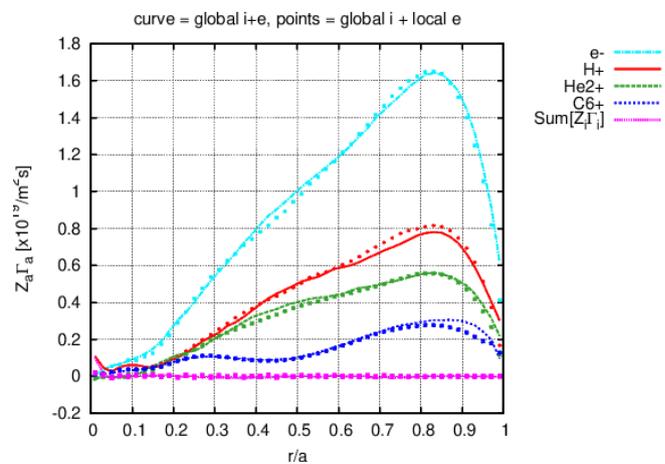


図 2 : 不純物ホールプラズマにおける各粒子種の新古典フラックスの分布。曲線が電子・イオンとも大域的シミュレーションで計算した場合、点が電子を局所近似モデルで計算した場合。

### 多粒子系新古典輸送評価の改善に向けたモデル衝突項

ITER 等における高温プラズマ内の不純物輸送を考えた場合、燃料である水素イオンや電子の衝突周波数が低衝突のバナナ領域にある一方で、タングステン等の質量の大きな不純物では高衝突の Pfirsch-Schlüter (PS) 領域にあると考えられる。高衝突周波数領域にある粒子種では相対的に衝突の重要性が増すことから、運動論シミュレーションにおいて用いる衝突項モデルの選択が重要となる。近年、これまで広く用いられてきた洲鎌衝突項における不備が指摘され、それが新古典輸送評価や乱流輸送に影響を与えることから、運動論シミュレーションにおける衝突項の改良は重要な課題となっていた。ここでは、上記の不備を改善することを目的として新たに提案された修正版洲鎌衝突項を大域的 full-f ジャイロ運動論コードである GT5D に実装し、修正版洲鎌衝突項の性質について調べるとともに、さらにその新古典輸送評価への影響について検証した。修正版洲鎌衝突項の検証として、まず、特に衝突項によ

る影響が顕著となる PS 領域における新古典輸送シミュレーションを行った。ここで、磁場配位としては円形断面トカマク配位を用い、また新古典輸送評価における衝突項の違いを明確化するため、重水素イオンを用いた単一粒子種プラズマを対象とした。その結果、流体モデルに基づく Braginskii により得られた理論評価式で得られたものとよく一致することを確認した。続いて、修正版衝突項により新古典輸送評価がどの程度改善するのかを調べるため、同じ配位を用いて熱拡散係数の衝突周波数依存性を調べた。その結果を図 3 に示す。GT5D において修正版衝突項を用いることで、従来の洲鎌衝突項で見られていた熱拡散係数における 20% 程度の過大評価傾向が、広い衝突周波数領域で改善されるとともに、参考値であるモーメント法との一致も改善している。ここで示されている衝突項モデルの改善による過大評価の削減は、既に新古典コード NEO (米国) やジャイロ運動論コード GENE (欧州) で厳密だが計算コストの高い線形化衝突項を用いて報告された結果と定量的にも一致している。以上の結果から、修正版洲鎌衝突項は厳密な衝突項の振る舞いを再現しており、新古典輸送シミュレーションの観点からその利用が有効であることを示した。

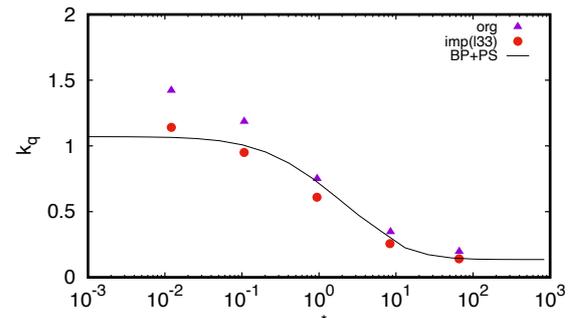


図 3 衝突周波数で規格化した熱拡散係数の衝突周波数依存性。GT5D において従来の洲鎌衝突項 (三角) および修正版衝突項 (丸) を用いて得られたもの。また、参考値としてモーメント法に基づいた理論評価値を実線で示している。

## データ科学と第一原理シミュレーションによる新しい輸送予測法

乱流輸送レベルの評価はジャイロ運動論に基づく第一原理シミュレーションによって確立されつつあり、JFRS-1 に代表される大型計算機の性能向上で、これまでにない高精度の計算にも手が届くようになってきた。しかし、定量的な輸送評価には、フラックスマッチングに基づいて、広範囲の分布パラメータ空間上で大規模計算を多数回実行する必要がある。一方で、輸送係数に対する簡約モデルも検討されているが、一定の予測誤差が存在する。2020 年度は、データ科学における数理最適化手法を利用した新しいモデル最適化法を開発した。数理最適化手法により分布パラメータを推測し、その値でジャイロ運動論シミュレーションを実行、その結果を用いて簡約モデルの修正・最適化することで、対象とするプラズマに応じて高精度の輸送モデルが得られる(図 4)。本手法と TASK3D とを組み合わせることで、ジャイロ運動論シミュレーションを必要最小限に抑えながら、大域温度分布の発展計算が可能になった。

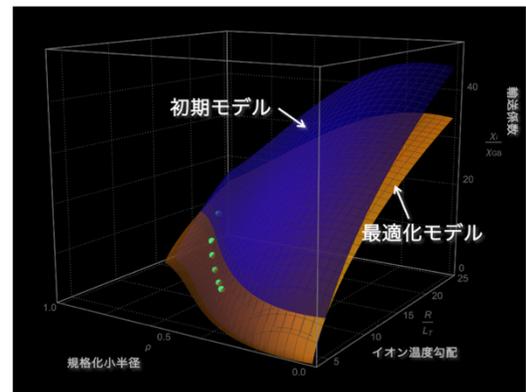


図 4 開発手法を用いた輸送モデルの最適化。初期モデル (青面) に対して、各位置で一回ずつのジャイロ運動論計算 (緑点) を行い、最適化されたモデル (橙面) が得られる。

## 多次元非線形フィッティングを用いた乱流輸送の高精度縮約モデルの構築

乱流輸送の縮約モデルは、実験データ解析、性能評価・予測、運転シナリオ構築、配位最適化など、様々な局面で重要となる。ここでは局所ジャイロ運動論コード GKV を用いて、トカマク磁場配位において、

乱流の非線形効果が組み込まれた縮約乱流輸送モデルの構築と精度検証を実施した。縮約乱流輸送モデルの構築手法は、大型ヘリカル装置(LHD)に対して成された先行研究(M.Nunami et al.,PoP2013)での手法を踏襲しつつ、パラメータ数やモデルの関数形に関するより幅広い検討を行った。まず非線形計算により乱流輸送解析を行い、輸送フラックス、乱流振幅 (T)、ゾーナルフロー振幅(Z)を取得した後、TとZに関する非線形関数フィッティングによって、縮約乱流輸送モデルにおける最適なフィッティング係数を決定する。ここでは、乱流振幅、ゾーナルフロー振幅について2種類の定義、そして2種類の関数形について比較を行い、GKVでの乱流輸送係数に対する再現精度を検証した。フィッティング係数は2乗残差 $\sigma^2$ を最小化する非線形最適化問題として決定した。上述の比較により、残差 $\sigma = 0.0187$ の良好な再現精度を示す係数が同定された(図1)。今後は、このモデルをトカマク系とヘリカル系の両方に適合させる拡張を進めるとともに、連成大域輸送シミュレーションコードへの実装を行う。また、現在のモデリングはイオン熱輸送に留まっているため、今後は電子熱輸送にも拡張を行い、多粒子種のシミュレーション解析へと繋げていく。

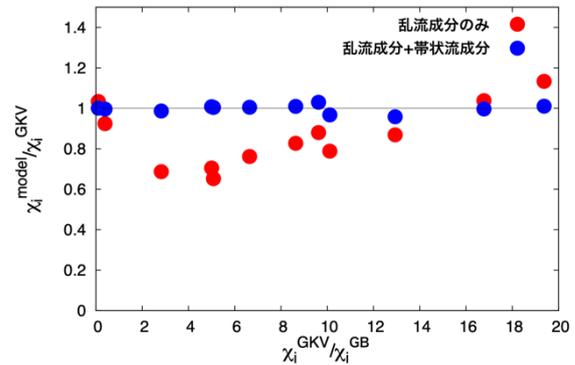


図1: トカマク磁場配位における縮約熱輸送モデルとGKV非線形計算によって得られた規格化イオン熱輸送係数の比較。乱流のみを考慮する場合に対して、ゾーナルフロー(帯状流)による輸送抑制効果を組み入れたモデルでは再現精度が向上している。

### 3. 研究のキーワード

1.多粒子種プラズマ	2.新古典輸送	3.乱流輸送	4.不純物輸送	5.分布形成
------------	---------	--------	---------	--------