

運動論的輸送シミュレーションによる原型炉級プラズマにおける 電磁乱流中のイオン輸送解析

Ion transport analysis in electromagnetic turbulence in DEMO class plasma by kinetic transport simulation

村上定義¹, 安齋亮慶¹, 福山淳¹, 矢木雅敏², 相羽信行²
S. Murakami¹, A. Anzai¹, A. Fukuyama¹, M. Yagi², N. Aiba²

京都大学工学研究科¹, 量研機構 六ヶ所研²
Dpt. of Nuclear Eng., Kyoto Univ.¹, QST Rokkasho²

1 序論

核融合原型炉においては、核燃焼により高温プラズマを維持するため、その制御法の構築が必要である。このため核燃焼効率の評価を精度良く行うことが出来る予測シミュレーションコードの開発が課題となっている。特に、プラズマ点火のため中性粒子入射 (NBI) 加熱などの追加熱が行われ、高エネルギーイオンが発生するため、運動論的効果を取り入れた核燃焼効率の評価を行う必要がある。本研究では、運動論的効果を含む輸送を解くことが出来る運動論的統合輸送シミュレーションコード TASK/FP[1] をベースとして、核燃焼効率評価のための統合シミュレーションコードの開発を進めて来ている。本講演では、これまでの開発状況について報告する。

2 運動論的統合コード

統合輸送シミュレーションコード TASK/FP コードでは、バウンス平均されたフォッカープランク輸送方程式を解くことができ、高エネルギーイオンの核燃焼への影響を評価することができる。しかしながら、TASK/FP においては、径方向の運動を考慮していないため、イオンの径方向拡散においては、物理モデルを導入する必要がある。

核燃焼プラズマにおいて径方向輸送係数 D について運動量 p のべき乗の依存性 $D \propto p^\alpha$ を仮定し、ITER プラズマにおける実効粒子拡散係数と実効熱拡散係数の比によって運動量依存性の妥当性を評価した。このため径方向拡散係数に新たな運動量依存性を導入した。

$$D_r(p, \theta) = \frac{\left(\frac{p}{p_{th}}\right)^\alpha}{\sqrt{1 + \left(\frac{p \sin \theta}{p_{th}}\right)^2}} \times D_{r0} \quad (1)$$

通常のトカマク実験では実効温度拡散係数 χ_{eff} と実効粒子拡散係数 D_{eff} の比が $3 \leq \chi_{eff}/D_{eff} \leq 10$ という関係を満たす傾向がある。変数 α の値を変化

させ χ_{eff}/D_{eff} の値を評価した。プラズマパラメータは ITER を想定し、重水素イオンと電子からなるプラズマを仮定した。NBI の吸収パワーを 300MW とし、粒子源として 3keV の重水素イオンを 30×10^{20} /s 入射するペレット入射を想定した。

Fig. 1 はパラメータ α の値を変化させた場合の粒子束と実効粒子拡散係数を示した。 α が増加すると径方向の拡散が大きくなったことで密度が小さくなり、実効粒子拡散係数が大きくなった。また、粒子束は α に大きく依存しないことが分かった。次に、実効温度拡散係数を評価した。結果として、熱流束は α に大きく依存することが分かった。また、 $\alpha = 1.5$ において温度分布が平坦になり、実効温度拡散係数が非常に大きな値となった。最後に、実効温度拡散係数と実効粒子拡散係数の比を評価した。 α 1.1 1.3 において χ_{eff}/D_{eff} が 3 10 となり、実験の観測から得られる傾向とおおよそ一致する結果が得られた。

本研究では、TASK/FP に有限軌道幅効果の導入した FOW のモデル改善を進めた。トカマクにおける

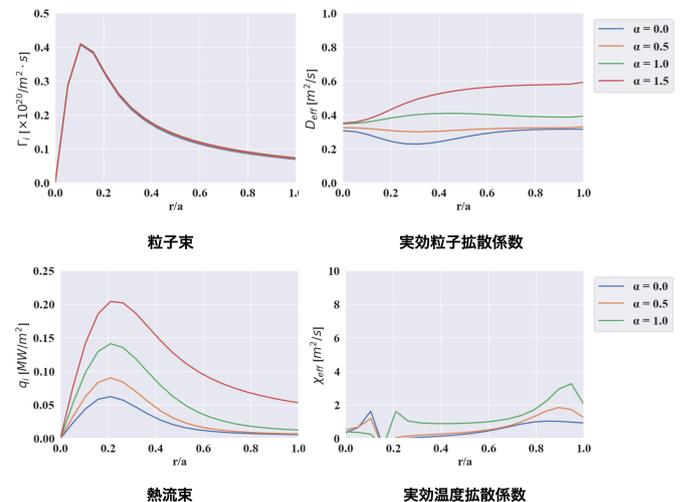


Fig. 1: 粒子束および実効拡散係数（上）と熱流束および実効温度拡散係数（下）のパラメータ α 依存性。

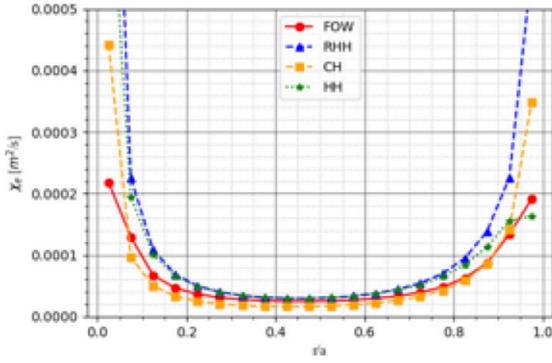


Fig. 2: FOW 効果を導入した TASK/FP と新古典輸送理論の電子熱拡散係数の比較.

高エネルギーイオンの旋回中心はポロイダル面内で周期的な運動を行うがその軌道が径方向に有限の幅を持つため、衝突などによる速度空間の拡散によって生じる軌道の遷移が径方向の輸送をもたらす。従来の TASK/FP は軌道幅 0 の近似的な軌道を仮定していたが、新たに TASK/FP に有限軌道幅効果を導入した。有限軌道幅版 TASK/FP では、Fokker-Planck 方程式の軌道平均の際に、旋回中心のドリフト運動を表す方程式を解いて得られた軌道を用いることで、径方向輸送を物理的に記述できる。

有限軌道幅版 TASK/FP が新古典輸送を記述できているか確認するために、電子の径方向拡散係数 $D^{\rho_m \rho_m}$ の積分値

$$D(\rho) = \int D^{\rho_m \rho_m}(p, \theta_m, \rho_m) \frac{f}{\rho_m} d\vec{p} / \int \frac{f}{\rho_m} d\vec{p} \quad (2)$$

と新古典拡散係数の理論値との比較を行った。ベンチマークとして FOW 効果を導入した TASK/FP と新古典輸送理論の熱拡散係数比較を行なった。ITER のプラズマパラメータ等を使用し、電子とイオンの 2 粒子による輸送計算を行なった。電子の熱拡散係数はプラズマ中心付近を除き理論と良い一致を示している。イオンの熱拡散係数は中心部を除き、理論値と同じ傾向を持ち、周辺部にかけて値の一致が見られた。

3 電磁揺動によるイオン輸送の検討

本研究では、エネルギー減衰により中間的なエネルギーとなったイオンの乱流による輸送を評価するため GNET コードを用いた研究を進めている。乱流モデルとしては磁場および静電ポテンシャル揺動を仮定した。円形断面トカマクを仮定し、試験的に実験で観測される程度の電磁場揺動を導入し、高エネルギー粒子輸送への影響について評価を行った。揺動のモードとしては、安全係数 $q(\psi_{res(m,n)}) = m/n$ となる半径位置でモード振幅が最大となる径方向分布を仮定した。

磁場揺動 $\delta \vec{B}$, および静電揺動 $\delta \phi$ は

$$\delta \vec{B} = \nabla \times \alpha_B \vec{B}_0, \quad \delta \phi = \alpha_\phi \quad (3)$$

$$\alpha_s = \epsilon_s \sum_{m,n} f_{m,n}(\psi) \cos(m\theta - n\zeta + \omega t + \chi_{m,n}) \quad [s = B, \phi] \quad (4)$$

$$f_{m,n}(\psi) = \exp\left(-\frac{\psi - \psi_{res(m,n)}}{4w^2}\right), \quad (5)$$

で与えた。今回はテスト研究として ECH 高速電子について径方向輸送を調べた。また、高速電子はモードに対し、十分早いとして $\omega = 0$ を仮定した。

結果として、磁場揺動により加熱位置から内側および外側に向かう高速電子の流束が得られた。また、流束の大きさは揺動強度の 2 乗に比例するなど、強い磁場強度および高速電子初期エネルギー依存性が得られた。本研究では、これらの結果を説明するため高速捕捉電子と乱流磁場との関係から酔歩運動を基に拡散係数モデルを構築した。

$$\begin{aligned} D_{\delta B}(E_0) &\sim \frac{(\delta r)^2}{2} \nu_b \\ &= \frac{\pi \sqrt{mk_\perp^2} \sqrt{r} \delta B^2}{16 e^2 k_\parallel^2 q R^{3/2} B^4} \frac{E_0^{3/2} \sin^5 \bar{\theta}_p}{\cos^2 \bar{\theta}_p} \\ &\propto \delta B^2 E_0^{3/2}, \end{aligned} \quad (6)$$

得られたモデルにより、強い磁場強度および高速電子初期エネルギー依存性を説明することができた。

次に我々は、静電揺動を導入し、ECH による高速電子の流束を評価した。結果として、磁場揺動とは反対の流束が得られ、揺動強度の 2 乗に比例するなど、強い磁場強度および高速電子初期エネルギーが得られた。静電揺動の場合にも同様な拡散係数モデルを構築した。

$$D_{\delta \phi} = \frac{\pi \sqrt{mk_\perp^2} \sqrt{r} \delta \phi^2}{4 B^2 k_\parallel^2 q R^{3/2}} \frac{\sin \bar{\theta}}{E_0^{1/2} \cos \bar{\theta}} \propto \delta \phi^2 E^{-1/2}. \quad (7)$$

得られたモデルから、拡散係数が速度に反比例することが得られ、低速電子が高速電子に比べ拡散係数が小さいことが分かった。

今後は得られた速度空間異存モデルを TASK/FP コードに導入し、シミュレーションを行う予定である。また、高エネルギーイオンについてモデルの妥当性を GNET コードを用いて検討する。

References

- [1] A. Fukuyama, <http://bpsu.nucleng.kyoto-u.ac.jp/task/>
- [2] Y. Yamamoto et al., Nuclear Fusion **62** (2022) 064004.
- [3] S. Murakami et al., Nuclear Fusion **40** (2000) 693.