

モンテカルロ軌道計算コードによるタングステンイオンの
ピンチ速度と拡散係数の評価

Evaluation of pinch velocity and diffusion coefficient of impurity ions by Monte-Carlo orbit calculation

*小林京平 1), 藤田隆明 1), 岡本 敦 1), 林 伸彦 2)

* KOBAYASHI Kyohei 1), FUJITA Takaaki 1), OKAMOTO Atsushi 1), HAYASHI Nobuhiko 2)

1) 名大、2) 量研

1) Nagoya Univ., 2) QST

トロイダル回転しているトカマクプラズマにおけるタングステンイオンのピンチについて、先行研究により、軌道上でのイオンの電離・再結合にともなうPHZピンチ、径電場により変形した軌道上でのクーロン衝突に伴うErピンチの評価式が開発されている[1]が、Erピンチの評価式が、実際にクーロン衝突が起きた場合に対しても使用できるかどうかは十分には確認されていない。本研究では、クーロン衝突を含む粒子軌道のモンテカルロ計算によりピンチ速度を評価することを目的とし、コードの開発・改良を行っている。

円筒座標系(R, ϕ, Z)をとる。トロイダル角速度 Ω_{ref} で回転する回転系において、以下のドリフトを考慮した運動方程式を4次のルンゲクッタ法で解くことにより旋回中心軌道を求める。

イオンの旋回中心の速度 \mathbf{v}_g および磁力線に平行な方向の速度 v_{\parallel} の時間発展は

$$\mathbf{v}_g = v_{\parallel} \frac{\mathbf{B}}{B} + \mathbf{v}_{curv} + \mathbf{v}_{gradB} + \mathbf{v}_E + \mathbf{v}_{cori} + \mathbf{v}_{cent}$$

$$v_{\parallel} \frac{dv_{\parallel}}{dt} = -\frac{\mu}{m_z} \frac{dB}{dt} + \Omega_{ref}^2 R v_g \cdot \mathbf{e}_R + \frac{Ze}{m_z} \mathbf{v}_g \cdot \mathbf{E}^{rot}$$

で与えられる。ここで \mathbf{v}_{curv} : 湾曲ドリフト、 \mathbf{v}_{gradB} : 磁場勾配ドリフト、 \mathbf{v}_E : $\mathbf{E} \times \mathbf{B}$ ドリフト、 \mathbf{v}_{cori} : コリオリ力によるドリフト、 \mathbf{v}_{cent} : 遠心力によるドリフトである。

テスト粒子の背景粒子とのクーロン衝突による速度変化はモンテカルロ計算で模擬する。クーロン衝突後のテスト粒子の速度の大きさ v' 及び磁力線方向速度 v'_{\parallel} は以下の式(1)(2)で与えられる。

$$v' = \sqrt{(v + \Delta v_L)^2 + \Delta v_T^2} \quad (1)$$

$$v'_{\parallel} = v_{\parallel} + \Delta v_L \frac{v_{\parallel}}{v} + \Delta v_T \frac{v_{\perp}}{v} \sin \Omega \quad (2)$$

Δv_L は衝突前の速度方向の変化、 Δv_T は衝突前の速度に垂直な方向の変化である。解析においては Δv_L 、 Δv_T を、 $\langle \Delta v_L \rangle = -v_s v \Delta t$ 、 $\langle \Delta v_T \rangle = 0$ 、 $\langle \Delta v_L^2 \rangle = v_{L2} v^2 \Delta t$ 、 $\langle \Delta v_T^2 \rangle = v_D v^2 \Delta t$ の平均値と分散をもつ正規分布乱数として与える。ここで v_s 、 v_{L2} 、 v_D は、それぞれ減速、速度拡散、等方化周波数である。

コードの妥当性の検証のためにトロイダル回転および径電場のない条件で重水素イオンの計

算を行い、径方向位置の平均二乗変位 $\langle \Delta r^2 \rangle$ から拡散係数を求め新古典理論と比較した(図1)。電子密度を変化させることで衝突周波数をスキャンした。ここで、時刻 $t = 10$ msまでのデータ全てを切片ありの直線 $\langle \Delta r^2 \rangle = at + b$ で近似したときの傾きより $D_1 = a/2$ 、時刻 $t = 10$ msでのデータ点と原点の2点を通る直線 $\langle \Delta r^2 \rangle = ct$ の傾きより $D_2 = c/2$ の二種類の拡散係数を求めた。幅広い衝突周波数領域で理論値とほぼ一致する結果が得られた。また、軌道の磁気面からのずれの影響を無衝突計算で評価し除くことで低周波数域での改善が見られた。

講演ではタングステンイオンについて、トロイダル回転および径電場がある場合の拡散係数およびピンチの計算結果、ピンチ速度とErピンチの理論式との比較も報告する予定である。

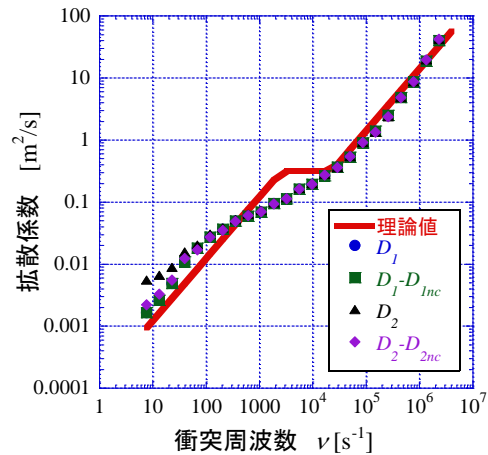


図1 拡散係数の衝突周波数依存性。モンテカルロ計算と新古典理論の比較。添え字ncは無衝突の計算における軌道の広がりから求めた拡散係数。

本研究は、量研原型炉研究開発共同研究および量研トカマク炉心プラズマ共同研究の支援のもとで実施された。

[1] K. Hoshino, et al., Nucl. Fusion **51**, 083027 (2011)