

IFERC-CSC

第16回若手科学者によるプラズマ研究会

2013.03.4-6

ジャイロ運動論コードを用いた
電子エネルギー閉じ込め改善に関する乱流輸送研究

阪大院工 成田絵美

$T_e/T_i > 1$ の領域において $H_{H98(y,2)} > 1$ となるデータを確認

背景

核燃焼プラズマにおいてアルファ粒子による加熱が予想されるため、 $T_e > T_i$ となる場合での輸送現象の理解が求められている

□ $T_e < T_i$ 領域 : T_i/T_e 増加 \Rightarrow 閉じ込め改善 [1]

□ $T_e > T_i$ 領域 : T_e/T_i 増加 \Rightarrow 閉じ込め劣化?

輸送シミュレーションでは劣化の傾向が見られた
イオン温度勾配/捕捉電子モード (ITG/TEM) に起因する乱流輸送
の促進が原因 [2]

しかしながら、Hモードのデータベースでは $T_e/T_i > 1$ の領域に
おいて $H_{H98(y,2)} > 1$ が得られているデータが存在している

目的

- $T_e > T_i$ となる領域のデータを対象として、 $H_{H98(y,2)} > 1$ が得られる場合の特徴を調査
- 乱流輸送の観点からどのような条件下で閉じ込めが改善されるのか探索

電子の熱エネルギー閉じ込め性能の改善による $H_{H98(y,2)} > 1$ の取得

公開データベース：The International Global Confinement Database[3]

- $T_{e0}/T_{i0} > 1$ において $H_{H98(y,2)} > 1$ となるデータ (主にJETの放電で確認)

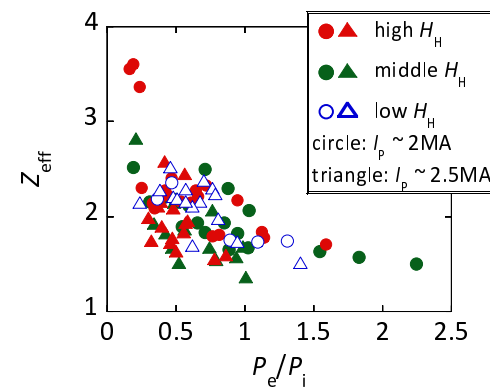
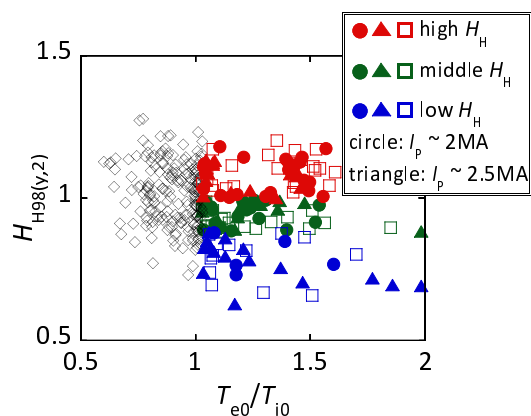
主なプラズマパラメータ

$$0.8 < I_p [\text{MA}] < 4.0 \quad 2.8 < q_{95} < 4.5$$

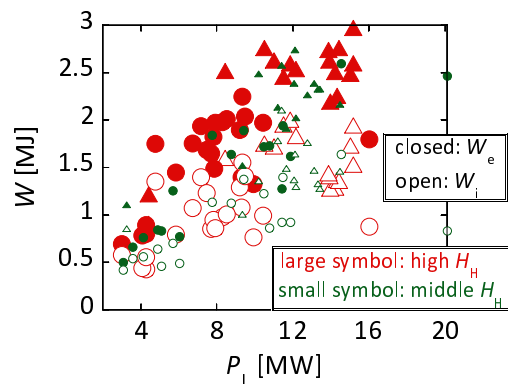
$$1 < B_t [\text{T}] < 4 \quad 1.5 < \kappa_a < 1.7$$

$$2.1 < \bar{n}_e [10^{19} \text{m}^{-3}] < 6.6 \quad 0.3 < \bar{n}_e/n_{GW} < 0.8$$

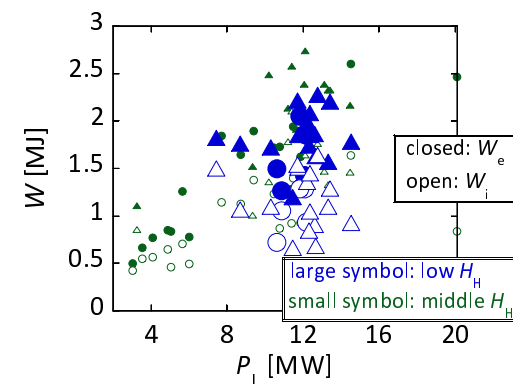
- NBIによる加熱パワー比 P_e/P_i や Z_{eff} の値に違いは見られない
- $H_{H98(y,2)}$ の値が高い場合、イオン・電子共に閉じ込め性能が改善されている
- $W_e \sim 2W_i$ より、電子の方がより改善されていることがわかる



high and middle H_H



low and middle H_H



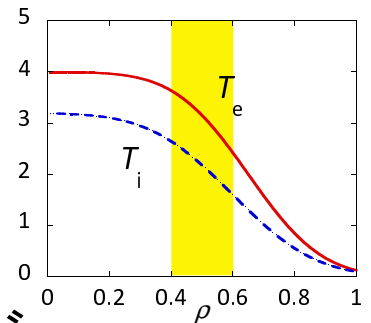
GS2を用いた熱輸送に関する研究

- データベースにおける $T_e > T_i$ 領域での熱エネルギーの閉じ込め改善は数値計算からも考えられることなのか？
⇒ 乱流輸送の観点から電子熱輸送の閉じ込め改善条件を調べる

- フラックス・チューブ配位を用いたジャイロ運動論コードGS2[4,5]
 - 分布関数の摂動部分 δf を扱う初期値問題コード
 - 線形・非線形が可能(本研究では主に線形計算を行った)
- 平衡には $s - \alpha$ モデルを使用 ($r/R, a/R, q, s, \alpha$ によって平衡を決める)
- Lorentz 衝突演算子を用いたブラソフ方程式をイオンと電子に対して解き、静電揺動に加え電磁揺動の効果も考慮した計算

着目点

- 温度勾配長： R/L_{T_e} と R/L_{T_i}
 $T_{e0}/T_{i0} < W_e/W_i \Rightarrow T_e$ の方が T_i より分布の広がりがある？
- 電流分布：磁気シア s
閉じ込め性能に強く影響 \Rightarrow どのような電流分布が電子の閉じ込め改善に有効？



温度勾配長の変化による不安定性モードの違い

主なプラズマパラメータ

$$R/a = 3 \quad \beta = 0.5\%$$

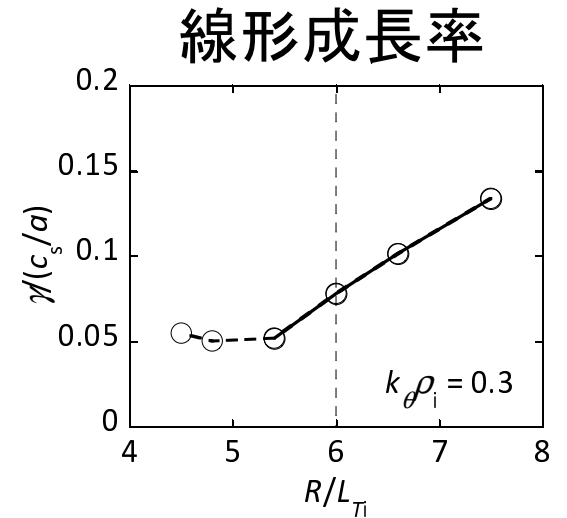
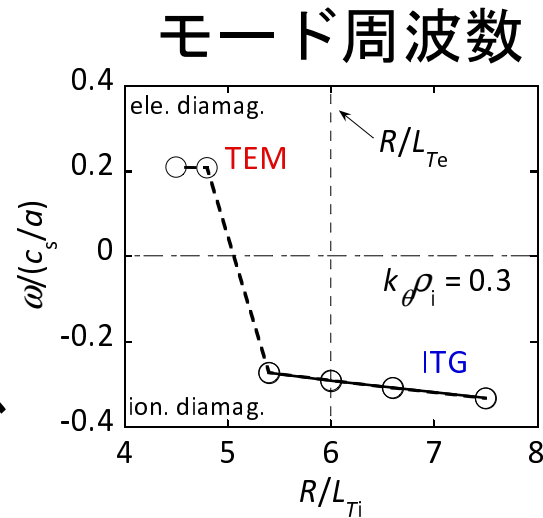
$$\rho = 0.5 \quad s = 1.0$$

$$\text{密度勾配 } R/L_n = 2 \quad q = 1.5$$

$$\text{電子温度勾配 } R/L_{T_e} = 6 \quad T_e/T_i = 1.2$$

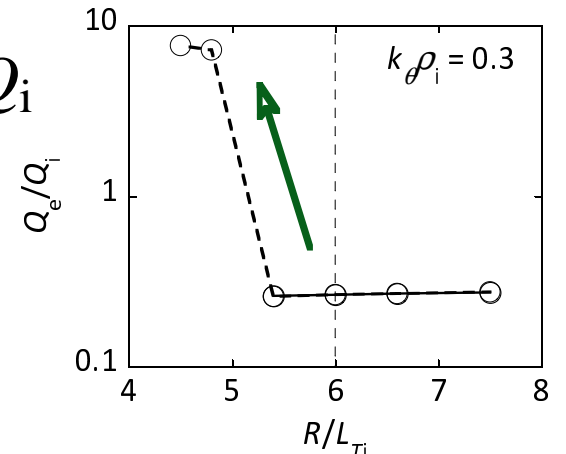
- R/L_{T_i} の増加によって、優勢なモードがITGからTEMに変化
- R/L_{T_i} の増加に伴い成長率は減少傾向

- ITG/TEMが支配的な波数 $k_{\theta}\rho_i = 0.3$ における計算結果



静電揺動により駆動される電子とイオンの熱流束比 Q_e/Q_i

- ITG: $Q_e < Q_i$
- TEM: $Q_e > Q_i$



⇒ 線形計算では熱流束に関して Q_e/Q_i の計算のみが行われるため、準線形モデルにより電子とイオンそれぞれの拡散係数を評価

準線形モデルによる熱輸送の計算

準線形モデル [6]

$$\frac{Q_i}{n_i T_i / R} = C \max_{k_\theta} \left[\frac{\gamma}{\langle k_\perp^2 \rangle} \right] \frac{R}{L_{T_i}}$$

$$\langle k_\perp^2 \rangle = k_\theta^2 (1 + s^2 \langle \theta^2 \rangle), \quad \langle \theta^2 \rangle = \frac{\int \theta^2 |\phi_{k_\theta}(\theta)|^2 d\theta}{\int |\phi_{k_\theta}(\theta)|^2 d\theta}$$

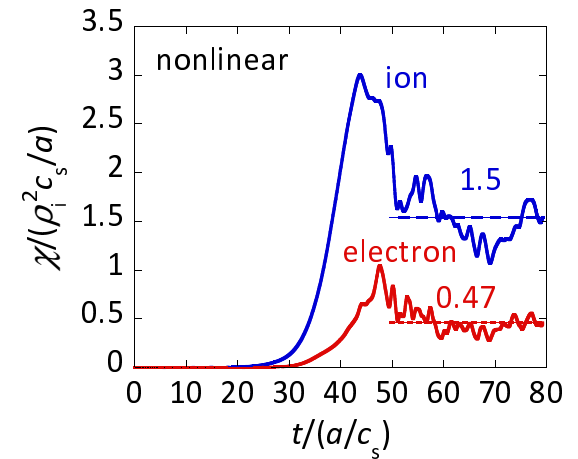
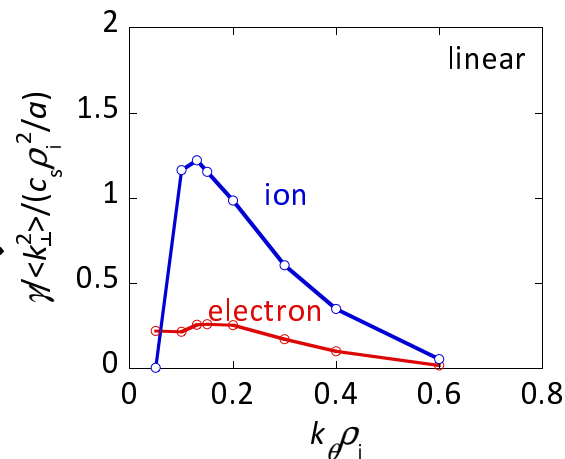
磁力線方向における静電揺動の大きさ $|\phi_{k_\theta}(\theta)|^2$ を用いて重みづけをして波数 $\langle k_\perp^2 \rangle$ を求めることで、非線形計算による熱流束を線形計算から再現できる

- $Q_i = -n_i \chi_i \nabla T_i$ より

$$\chi_i = C \max_{k_\theta} \left[\frac{\gamma}{\langle k_\perp^2 \rangle} \right]$$

- 因子 C は非線形計算と矛盾しない値 (ここでは $C = 1$ とした)

線形・非線形計算の比較



revision 2059

温度勾配長が熱輸送に及ぼす影響

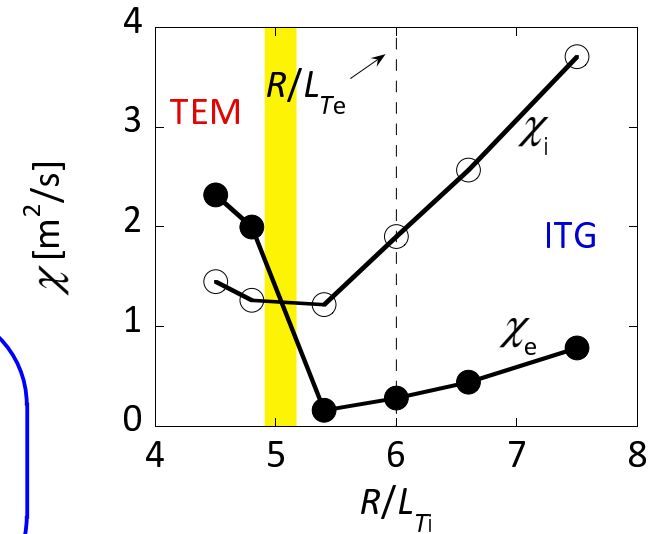
データベースにおける平均値から、以下の変数を仮定して、規格化している値 $c_s \rho_i^2 / a$ を計算

$$\Rightarrow c_s \rho_i^2 / a = 3.0$$

- ITG: χ_e は χ_i に比べて十分小さい
- TEM: χ_e は急増し χ_i を上回る
このとき $W_e \sim 2W_i$ は考えられない

電子の閉じ込めが改善されるためには、TEMが抑制され、ITGが優勢となる R/L_{Te} と R/L_{Ti} の関係 (ここでは $R/L_{Ti} \gtrsim \frac{5}{6} R/L_{Te}$) が必要である

- $B_t = 2.3T$
- $a = 0.93m$
- $T_e = 2.2keV$



温度勾配長が熱輸送に及ぼす影響

データベースにおける平均値から、以下の変数を仮定して、規格化している値 $c_s \rho_i^2 / a$ を計算

$$\Rightarrow c_s \rho_i^2 / a = 3.0$$

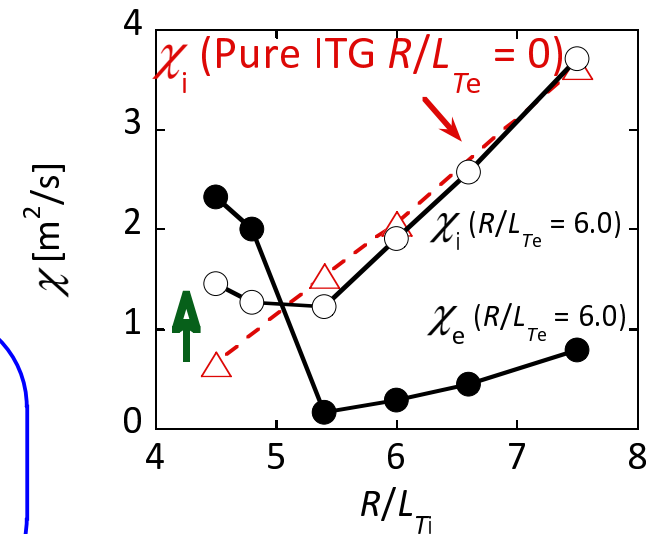
- ITG: χ_e は χ_i に比べて十分小さい
- TEM: χ_e は急増し χ_i を上回る
このとき $W_e \sim 2W_i$ は考えられない

電子の閉じ込めが改善されるためには、TEMが抑制され、ITGが優勢となる R/L_{Te} と R/L_{Ti} の関係 (ここでは $R/L_{Ti} \gtrsim \frac{5}{6} R/L_{Te}$) が必要である

- TEMの効果でイオンの拡散係数も増加する

$\Rightarrow T_e/T_i = 1.2$ の値が変化した場合でも、 $\chi_e \ll \chi_i$ の関係は保たれるのか？

- $B_t = 2.3T$
- $a = 0.93m$
- $T_e = 2.2keV$



熱輸送の T_e/T_i 依存性

主なプラズマパラメータ

$$R/a = 3 \qquad \beta = 0.5\%$$

$$\rho = 0.5 \qquad s = 1.0$$

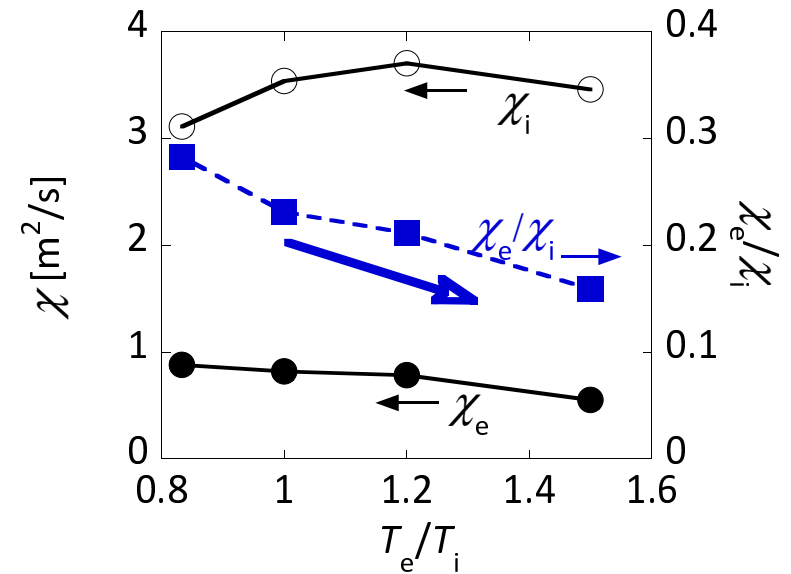
$$\text{密度勾配 } R/L_n = 2 \qquad q = 1.5$$

$$\text{電子温度勾配 } R/L_{T_e} = 6$$

$$\text{イオン温度勾配 } R/L_{T_i} = 7.5$$

- T_e/T_i の値によらず、ITGが優勢なモードである
- T_e/T_i の増加によって χ_e/χ_i の値は減少
- この減少は主にイオンの熱拡散係数の増加のためである

- R/L_{T_e} に対して R/L_{T_i} が十分大きく、ITGが優勢となった条件下で χ_e は低減する
- 実験データベースでの $R/L_{T_i} > R/L_{T_e}$ という予測と一致する

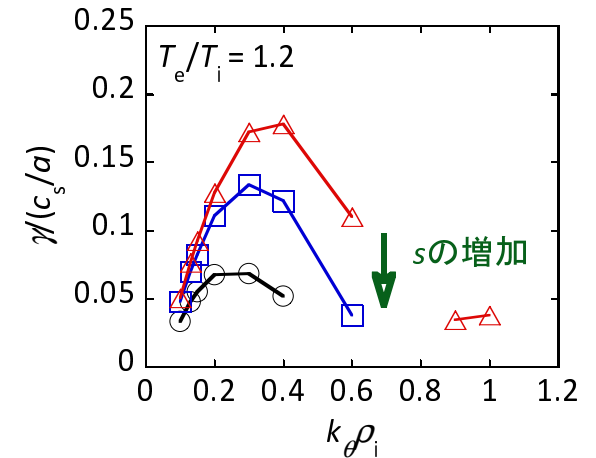
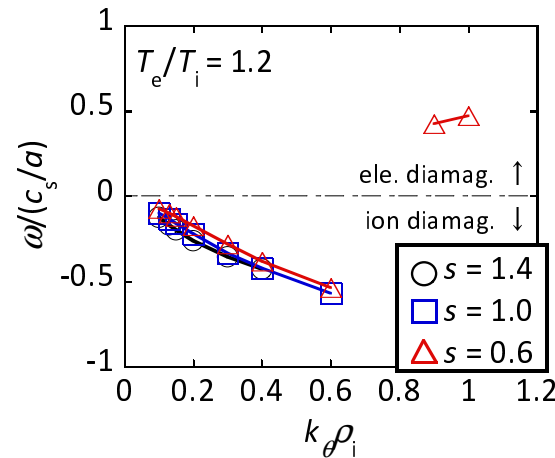


T_e/T_i の増加による閉じ込め性能の劣化

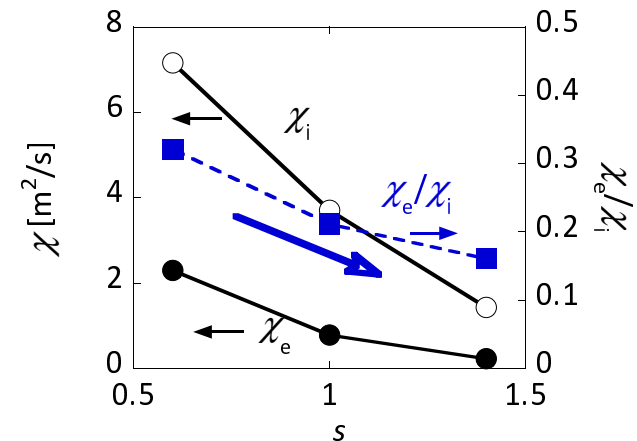
$T_e/T_i = 1.2$ における磁気シアの増加による熱拡散係数の低下

主なプラズマパラメータ

$R/a = 3$	$\beta = 0.5\%$
$\rho = 0.5$	$q = 1.5$
密度勾配 $R/L_n = 2$	$T_e/T_i = 1.2$
電子温度勾配 $R/L_{T_e} = 6$	
イオン温度勾配 $R/L_{T_i} = 7.5$	



- s の増加によりITG/TEMによる不安定性が抑制される
- 磁気シア s の上昇により電子とイオンの拡散係数が低下
- 熱拡散係数の低下の割合は電子の方が大きいため χ_e/χ_i の値は s の増加によって減少する



⇒ 温度勾配を変えた場合でも s の増加で χ_e 、 χ_i は減少するのか？

磁気シアの不安定性モードによる効果と 電流分布が熱輸送に与える大域的な影響に関する理解の必要性

主なプラズマパラメータ

$$R/a = 3$$

$$\beta = 0.5\%$$

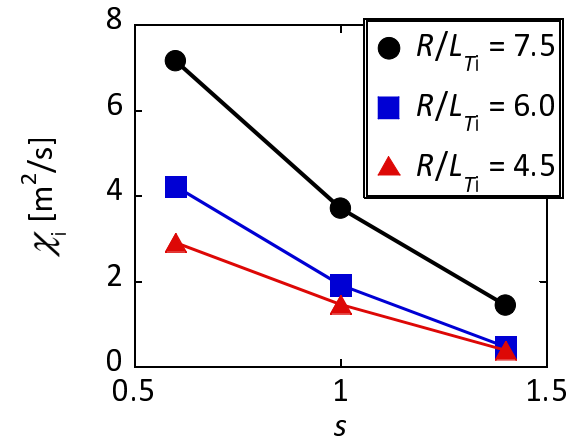
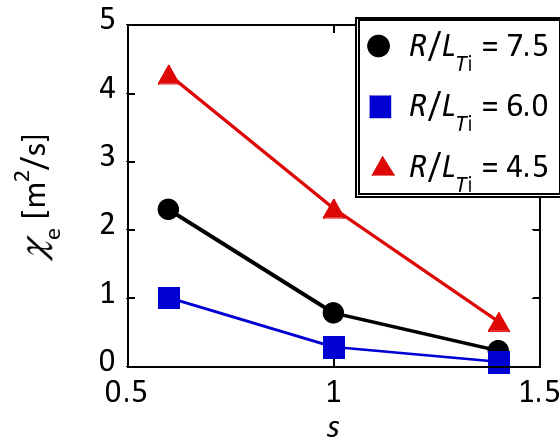
$$\rho = 0.5$$

$$q = 1.5$$

$$\text{密度勾配 } R/L_n = 2$$

$$T_e/T_i = 1.2$$

$$\text{電子温度勾配 } R/L_{T_e} = 6$$



- 磁気シア s の値によらず、
 $R/L_{T_i} = 7.5, 6.0$ ではITG、 $R/L_{T_i} = 4.5$ ではTEMが優勢なモードである
- ETGが支配的になると電子の拡散係数は増加する
- ITG, TEMによる電子・イオンの熱輸送は s も増加によって抑制される
⇒ どのような電流分布が閉じ込め性能の改善に有効であるのか？
- プラズマ小半径のどの位置において磁気シアの高い電流分布が閉じ込め改善に有効となるのか？
→ 分布形状を考慮した研究が今後の課題

$\chi_e \ll \chi_i$ は実験データにおいて妥当であるのか

エネルギーバランス

electron

ion

$$\frac{W_e}{\tau_E} = P_e - \frac{(T_e - T_i)e}{\tau_{eq}} n_e V$$

$$\frac{W_i}{\tau_E} = P_i + \frac{(T_e - T_i)e}{\tau_{eq}} n_e V$$

$$\tau_e = \frac{3.5 \times 10^4}{\ln \Lambda_e / 10} \frac{T_e^{3/2}}{Zn}$$

$$\tau_{eq} = \frac{1}{3} \tau_e \frac{m}{M}$$

- GS2の結果から $\chi_e \ll \chi_i$ なので $\frac{W_e}{\tau_E} = 0$ と仮定
- データベースにおける電子とイオンの加熱入力比から $0.5 < P_e/P_i < 1$ を仮定

$$T_e = 2.2 \text{keV}$$

$$m/M = 1/(1836)$$

$$n_e = 4.1 \times 10^{19} \text{m}^{-3}$$

$$W_e = 1.8 \text{MJ}$$

$$W_i = 1.1 \text{MJ}$$

$$\tau_e = 350 \text{ms}$$

- 左の変数(データベースにおける平均値)を用いると、 $1.2 < T_e/T_i < 1.3$ となり実験データと矛盾しない結果である
- したがって、このとき電子はエネルギーをイオンに移すことでバランスしていると言える

まとめ

データベース

- $T_e/T_i > 1$ の領域では電子とイオンのエネルギー閉じ込めが改善されること
によって $H_{H98(y,2)} > 1$ が達成されている
- 特に電子の閉じ込めが改善されているため $W_e \sim 2W_i$ が得られている
 - 温度勾配長: $R/L_{T_i} > R/L_{T_e}$? 電子の熱輸送にどのような影響を与えているのか、乱流輸送の観点から調査
 - 電流分布: 磁気シア s ?

GS2

- R/L_{T_e} に対して R/L_{T_i} が十分に大きいとき ITG が優勢
- このとき $\chi_e < \chi_i$ となる
 - ⇒ 実験データでの $R/L_{T_i} > R/L_{T_e}$ という予測と一致
- 磁気シア s の上昇により電子とイオンの拡散係数は低減される
- この低減において、イオンと比較して電子の拡散係数の減少割合が大きい
 - ⇒ 磁気シアの上昇は特に電子のエネルギー閉じ込め改善に効果がある

今後の課題

本研究

- ITG/TEMが優勢な長波長領域で、温度・電流分布が熱輸送に与える局所的な影響を調査
- 電子熱輸送の低減に関する概要を理解

問題点

- 分布形状が考えられていない
- 平衡にはシンプルな $s - \alpha$ モデルが用いられている
- 短波長領域における電子温度勾配モード (ETG) を考慮していない

今後

- GLF23[7] や TGLF[8] などの輸送モデルが組み込まれた輸送コード TOPICS[9] を用いて、乱流輸送・分布形状・平衡が矛盾しない輸送解析を行う

[7] R. E. Waltz *et al*, Phys. Plasmas **4**, 2482 (1997). [8] G. M. Staebler *et al*, Phys. Plasmas **14**, 055909 (2007). [9] N. Hayashi and JT-60 Team, Phys. Plasmas **17**, 056112 (2010).