

第15回若手科学者によるプラズマ研究会  
那珂核融合研究所  
2012年3月14-16日

## 核燃焼プラズマ閉じ込め性能の予測精度向上を目指した 乱流特性に対する温度比の寄与

---

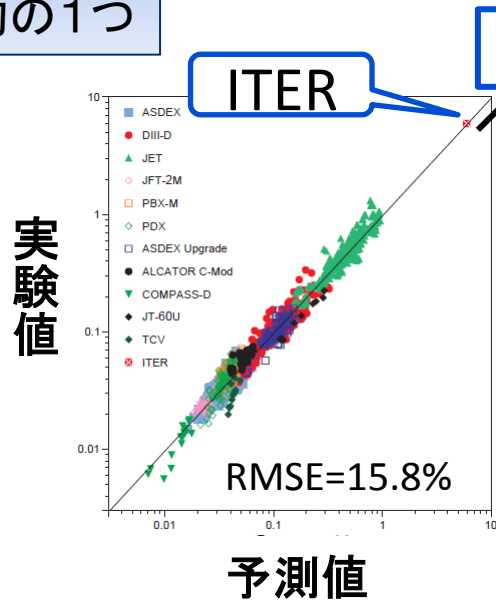
成田絵美<sup>1</sup>、滝塚知典<sup>1,2</sup>、林伸彦<sup>2</sup>、藤田隆明<sup>2</sup>、井手俊介<sup>2</sup>、本多充<sup>2</sup>、  
諫山明彦<sup>2</sup>、伊丹潔<sup>2</sup>、向井清史<sup>1</sup>、田中靖之<sup>1</sup>、福田武司<sup>1</sup>

<sup>1</sup>阪大院工、<sup>2</sup>原子力機構

# 核燃焼プラズマの性能予測の現状

ITER計画の  
目的の1つ

実証炉に繋げるための、閉じ込め時間比例則(閉じ込め時間の予測式)の検証



実証炉

$$\tau_{thIPB98(y,2)} = 0.0562 I^{0.93} B^{0.15} n^{0.41} P^{-0.69} R^{1.97} K_{\alpha}^{0.78} \epsilon^{0.58} M^{0.19}$$

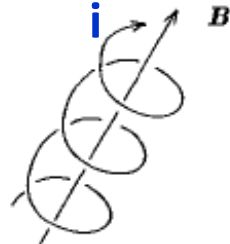
乱流物理の理解が不十分  
→ 比例則は11台のトカマク装置から経験的構築

[1] ITER Physics Expert Group on Confinement and Transport *et al* Nucl. Fusion 39 2175 (1999)

比例則の構築に用いられた実験データ

イオン加熱主体

- 工学的理由
- 揺らぎに対して鈍い
- 閉じ込め性能が高い



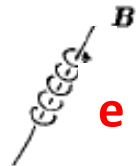
ITER等核燃焼プラズマ

電子加熱主体

- 高エネルギーのアルファ粒子による加熱
- 揺らぎに対して敏感

$T_e/T_i$ が上昇 →

乱流の物理が  
変化する?



目的  $T_e/T_i$ の閉じ込め性能への寄与の理解し、  
核燃焼プラズマにおける性能向上の条件を探索する

核燃焼プラズマの予測精度向上のためには

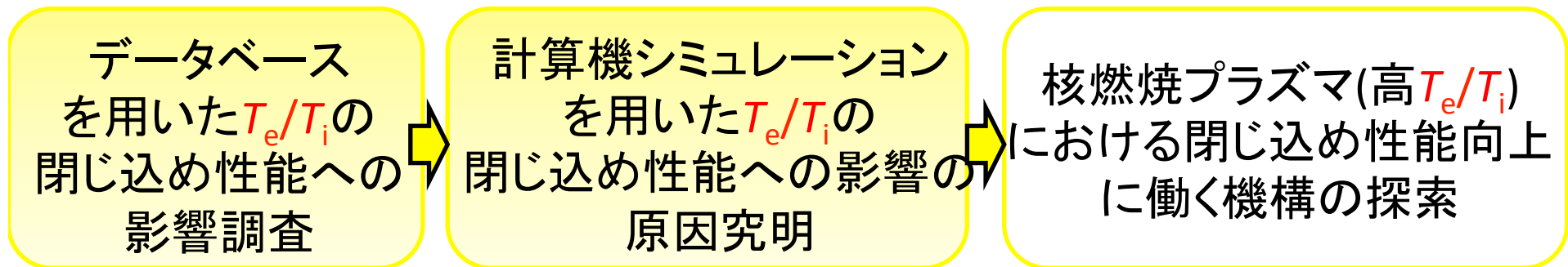
炉心プラズマ性能に顕著な影響を及ぼす  
乱流輸送の物理機構

の解明が必要である



$T_e/T_i$ ,  $R/L_n$ ,  $\rho^*_{e,i}$ ,  $\beta_{e,i}$ ,  $v^*_{e,i}$ ,  $s$ ,  $q$ ,  $Z$ ,  $\kappa$ ,  $\delta_{U,L}$ ,  $\varepsilon$ ,  $M$ ,  $R/L_{Te,i}$ などが関与

$T_e/T_i$ に加えて**密度分布**に着目



# 国際Hモードデータベースにおいて 密度分布は予測精度に影響を与える

- 国際Hモード閉じ込めデータベースを用いる<sup>[3,4]</sup>

19台のトカマク装置から得られた  
実験データで構成

- ASDEX Upgrade (AUG), JETのデータを選択

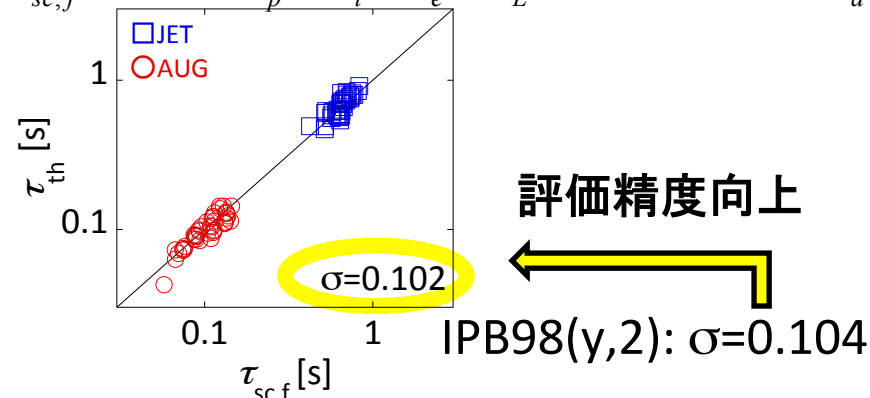
←注目した $T_e/T_i$ ,  $R/L_n$ (ここでは $n_{e0}/\langle n_e \rangle$ を用いる)の値が広く存在していたため  
( $0.5 < T_e/T_i < 1.5$ ,  $1.0 < n_{e0}/\langle n_e \rangle < 1.6$ )

	$I_p$ [MA]	$B_t$ [T]	$n_e$ [ $10^{19}m^{-3}$ ]	$q_{95}$	$K_a$	$\delta$
AUG (79)	0.59~1.3	1.5~3.1	3.3~9.7	3.0~6.9	1.5~1.7	0.10~0.29
JET (317)	1.5~5.1	1.2~3.8	1.1~5.6	2.8~5.7	1.5~1.8	0.29~0.58

- 密度分布によってデータを2群に分け、それぞれのデータ群に適した比例則を再構築

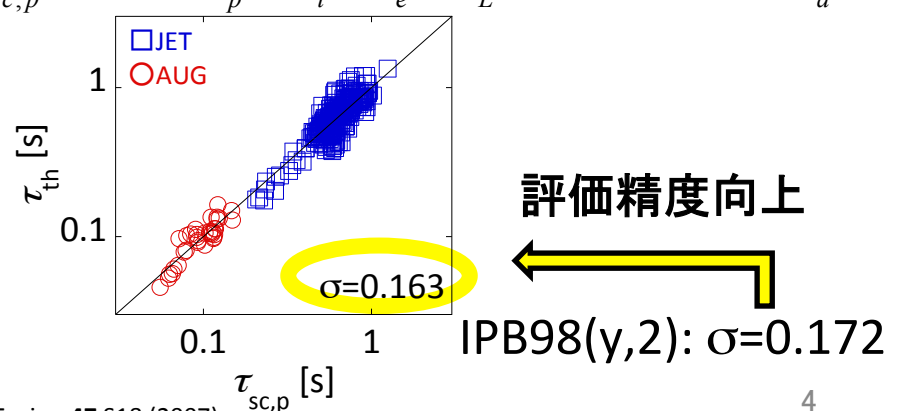
$1.0 < n_{e0}/\langle n_e \rangle < 1.1$  : 平坦な密度分布

$$\tau_{sc,f} = 0.0808 I_p^{0.91} B_t^{0.11} n_e^{0.28} P_L^{-0.59} R^{1.73} M^{0.27} \varepsilon^{0.54} K_a^{0.41}$$



$1.1 < n_{e0}/\langle n_e \rangle < 1.6$  : 尖頭化した密度分布

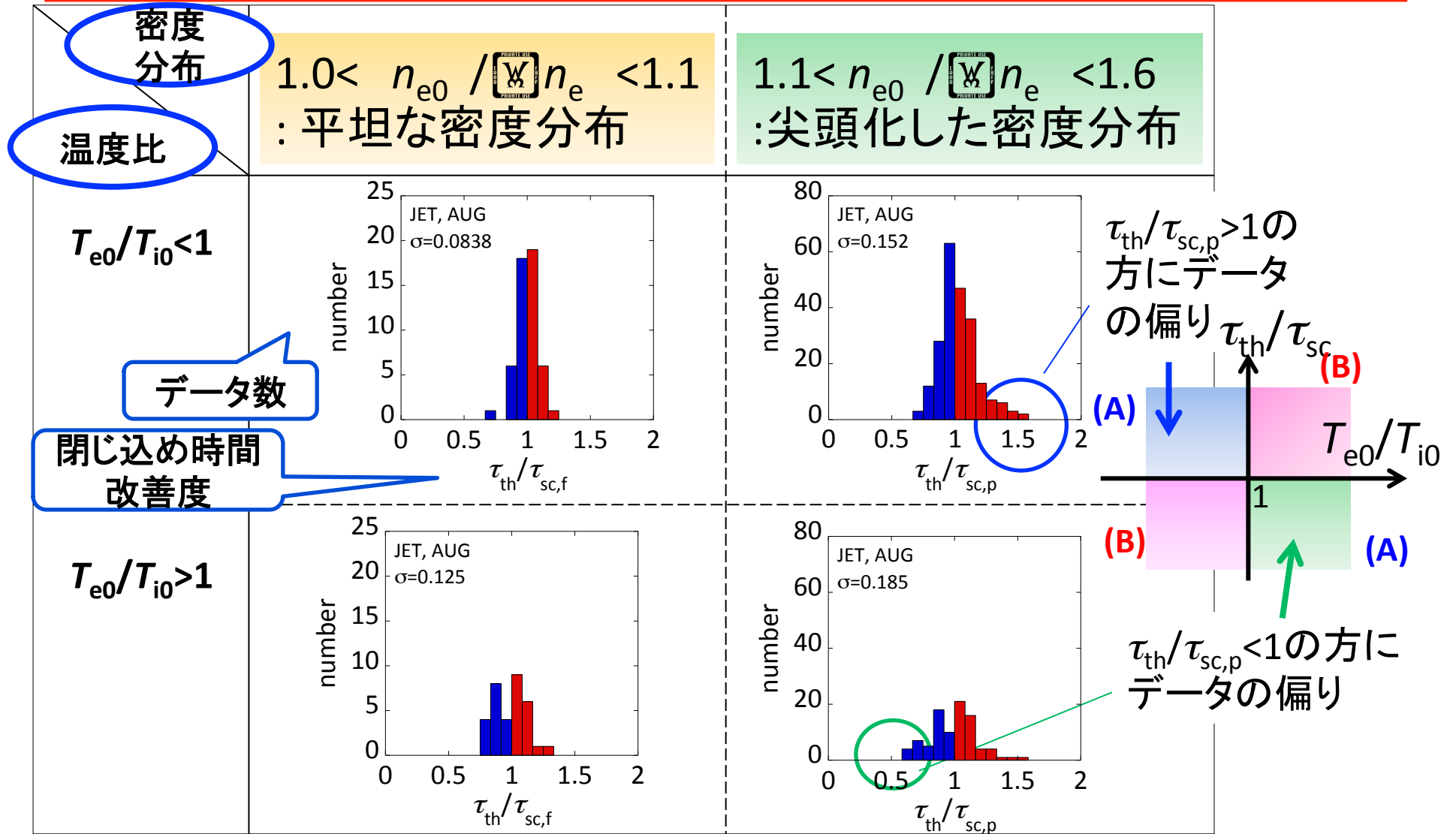
$$\tau_{sc,p} = 0.0653 I_p^{0.90} B_t^{0.08} n_e^{0.34} P_L^{-0.63} R^{1.78} M^{0.16} \varepsilon^{0.41} K_a^{0.72}$$



[3]Progress in the ITER Physics Basis, Chapter 2: Plasma confinement and transport, Nucl. Fusion **47** S18 (2007)

[4]The international global H-mode confinement database <http://efdsql.ipp.mpg.de/hmodepublic>

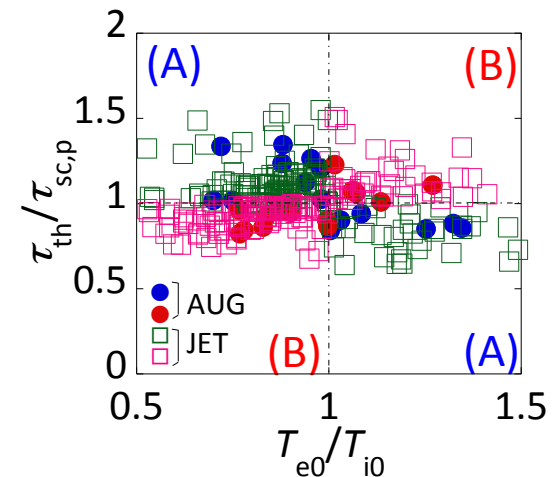
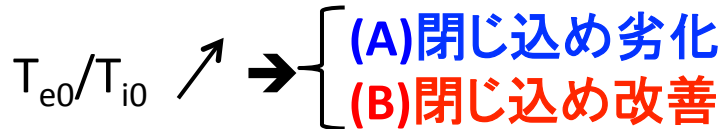
# 尖頭化した密度分布で $T_e/T_i$ の影響がある示唆を得た



- $1.1 < n_{e0} / \langle n_e \rangle < 1.6$  となるデータを用いて $T_e/T_i$ の閉じ込め性能に対する影響を考える

# $T_e/T_i$ の比例則への導入により 閉じ込め時間の評価精度が向上

- 右図は尖頭化した密度分布( $1.1 < n_{e0} / n_e < 1.6$ )のデータを用いた $\tau_{th}/\tau_{sc}$ の $T_{e0}/T_{i0}$ への依存性



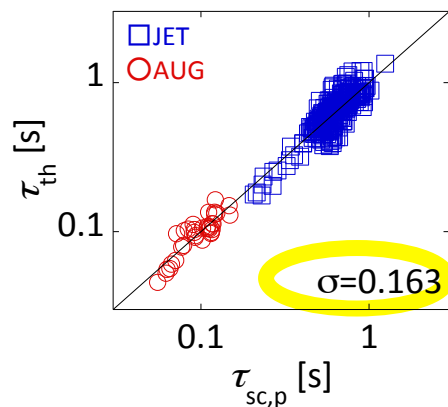
- (A)と(B)の2通りの $T_e/T_i$ の寄与を仮定し、 $T_{e0}/T_{i0}$ の影響を無次元変数を用いて予測式へ導入

$$\frac{(\tau_{th} / \tau_{sc2} - 1) / (T_{e0} / T_{i0} - 1)}{C \times (BR^{1.25})^\alpha \times n_e / n_{GW} * \beta \times q^\gamma} = 1$$

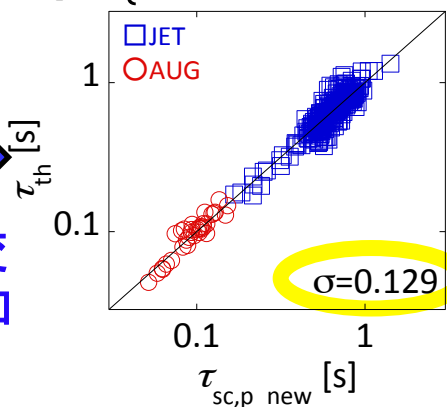
$T_{e0}/T_{i0}$ による閉じ込め改善度

$(\beta v^{*-1} \rho^{*-6})^{1/4}$  Greenwald密度制限割合 安全係数 無次元変数

$$\tau_{sc,p\_new} = \begin{cases} \tau_{sc,p} \times \left\{ 1 - 0.157(T_{e0}/T_{i0} - 1)(B_i R^{1.25})^{0.59} \right\} : (A) \\ \tau_{sc,p} \times \left\{ 1 + 0.913(T_{e0}/T_{i0} - 1)(B_i R^{1.25})^{-0.81} \right\} : (B) \end{cases}$$



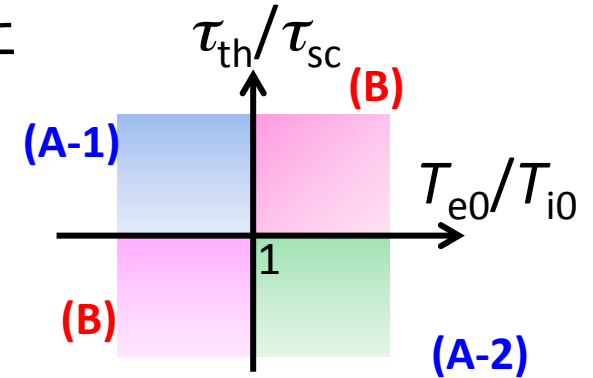
$T_e/T_i$ を変数に追加



標準偏差 $\sigma$ が低下  
→(A)と(B)の2通りの温度比の閉じ込め性能への寄与が存在する

# $T_e/T_i$ の領域別に異なる密度分布の乱流への働き

- ヒストグラムにおいてデータの偏りが見られた領域(A)について、温度比の補正項を用いて、温度比の閉じ込め性能に対する寄与の原因を考える



$$\tau_{sc,p\_new} = \begin{cases} \tau_{sc,p} \times \left\{ 1 - 0.157(T_{e0}/T_{i0} - 1)(B_t R^{1.25})^{0.59} \right\} & : (A) \\ \tau_{sc,p} \times \left\{ 1 + 0.913(T_{e0}/T_{i0} - 1)(B_t R^{1.25})^{-0.81} \right\} & : (B) \end{cases}$$

温度比の補正項

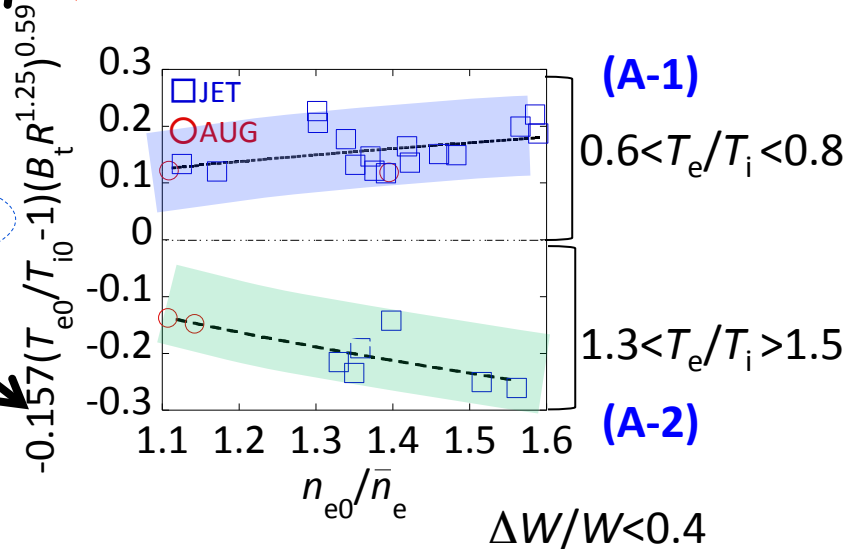
(A-1)

- 密度分布の尖頭化で閉じ込め性能  $\nearrow$   
 $\rightarrow$  ITGが抑制されている？

$$\text{ITGモード } \eta_i = \frac{dT_i/dr}{T_i} \frac{n}{dn/dr}$$

(A-2)

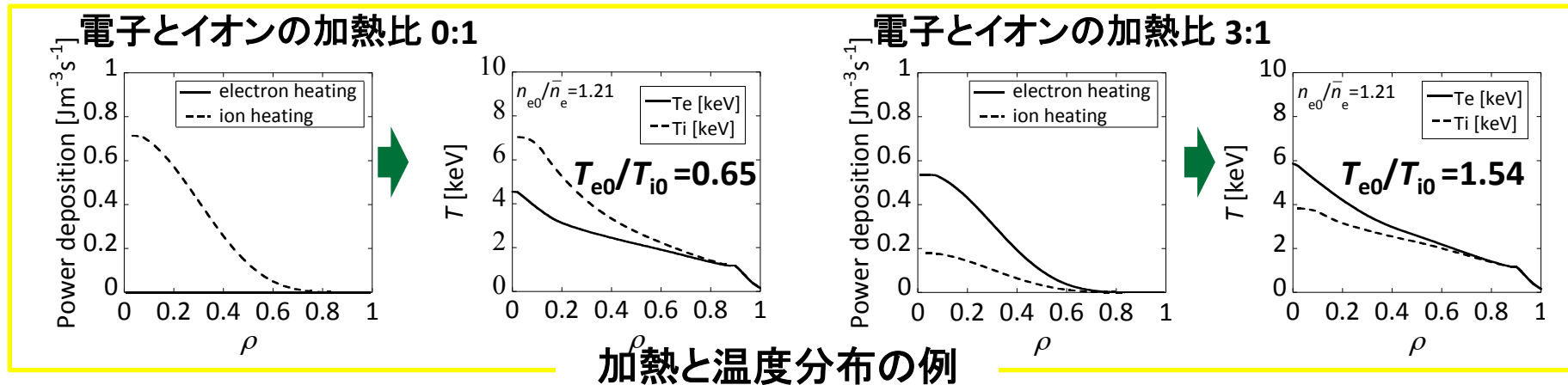
- 密度分布の尖頭化で閉じ込め性能  $\searrow$   
 $\rightarrow$  TEMが促進されている？



# 計算機シミュレーションを用いた $T_e/T_i$ と $R/L_n$ の閉じ込め性能への寄与の原因究明

## ● GLF23(gyro-Landau-fluid model)コード<sup>[5]</sup>

- ITGやTEMなどの乱流モデルが導入された輸送モデル
- プラズマパラメーター:  $I_p=2.3$  MA,  $B_t=1.7$  T,  $q_{95}=4.7$ ,  $\kappa=1.9$ ,  $\delta=0.49$
- 15MWの中心加熱



## ● GS2(Gyrokinetic Turbulence Simulator)コード<sup>[6,7]</sup>

- プラズマの局所安定性や輸送構造の計算に用いられ、電子系複合乱流に  
適応性が高い
- プラズマパラメーター:  $q_{95}=3.03$ ,  $R=2.69$ m,  $\kappa=1.66$ ,  $\delta=0.429$

[5] R. Waltz *et al.*, Phys. Plasmas **4**, 2482(1997). Source program is downloaded from <http://w3.pppl.gov/ntcc/GLF/>.

[6] Sources downloaded from <http://www.gs2.sourceforge.net/>

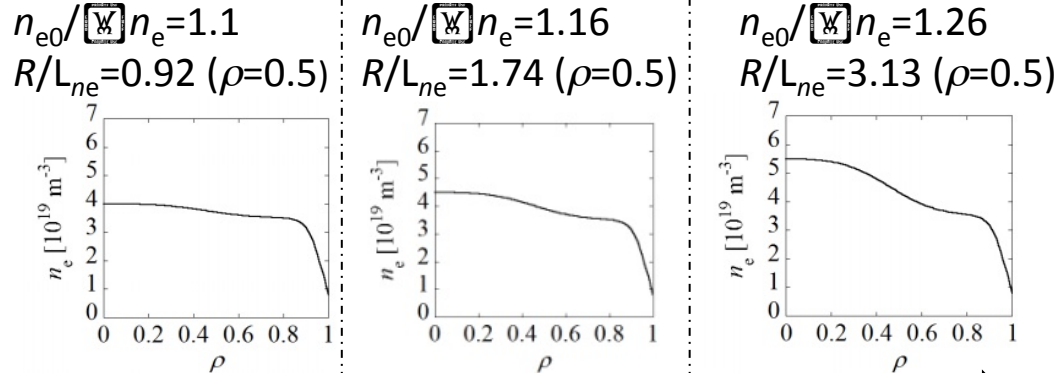
[7] M. Kotschenreuther, G. Rewoldt, and W.M. Tang, Comp. Phys. Comm. **88**, 128 (1995).



# 尖頭化した密度分布で $T_e/T_i$ の閉じ込め性能への影響が現れた

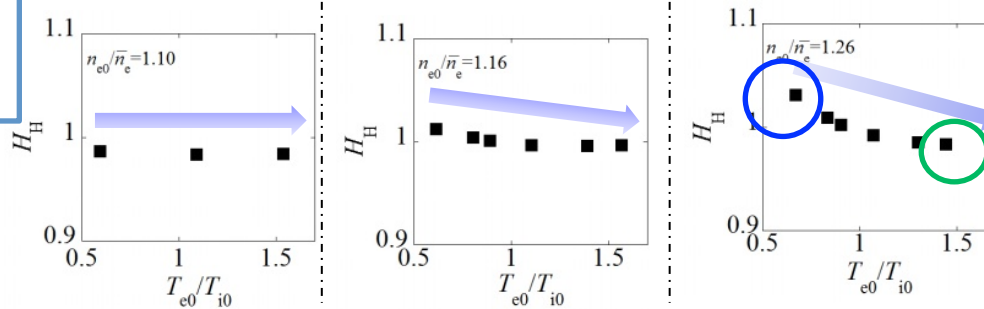
GLF23

密度分布



$H_H$ の $T_{e0}/T_{i0}$ への依存性

$$H_H = \tau_{th}/\tau_{thIPB98(y,2)}$$



- 密度の尖頭化に伴い、 $T_e/T_i$ の増加で閉じ込め改善度減少の傾向

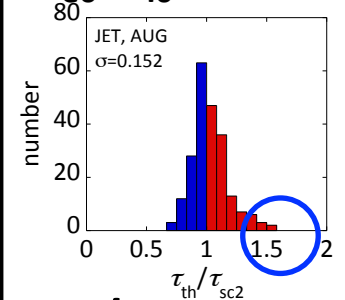
データベースと同様の傾向が得られた

→  $T_e/T_i$ と $R/L_{ne}$ に起因する乱流が与える不安定性から  
 $T_e/T_i$ の閉じ込め性能への影響の原因を調べる

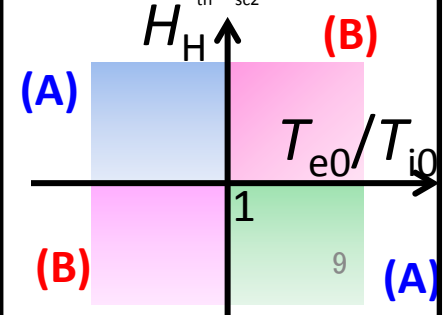
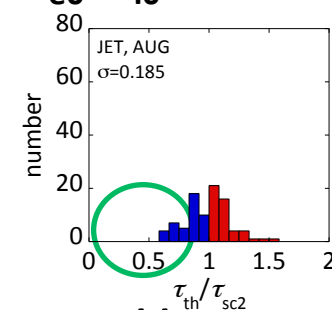
データベース解析

尖頭化した密度分布

$T_{e0}/T_{i0} < 1$



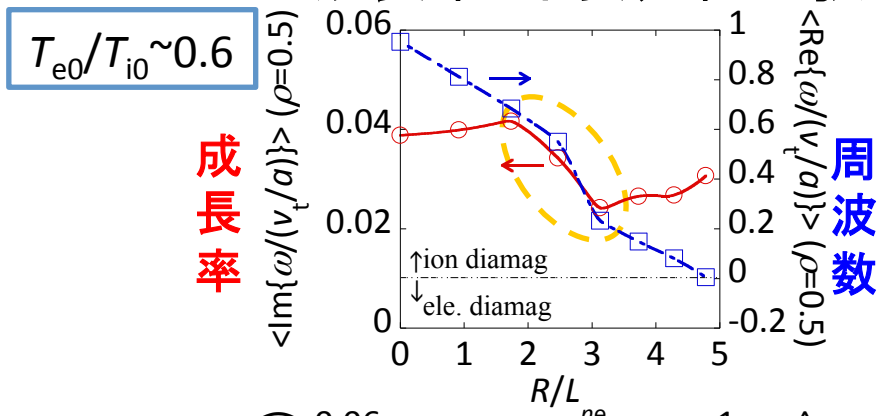
$T_{e0}/T_{i0} > 1$



# 優勢となる乱流機構が $T_e/T_i$ と $R/L_{ne}$ によって異なる

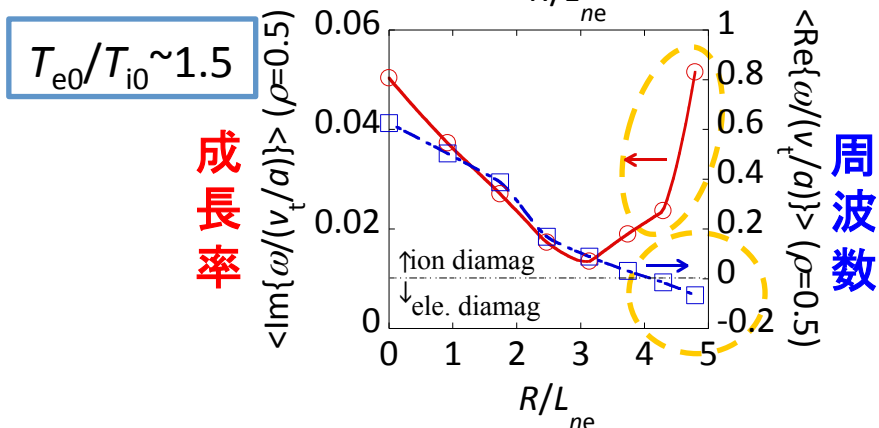
- GLF23 • 電子とイオンの加熱の比が0:1 ( $T_{e0}/T_{i0} \sim 0.6$ )と3:1 ( $T_{e0}/T_{i0} \sim 1.5$ )となる場合において、乱流が与える不安定性を調査
- $\rho=0.5$ での最も強い不安定性の成長率(揺動周波数の虚数部)と周波数(実部)注目

成長率: 不安定性の強さ、周波数: 電子系・イオン系の判別



- モードの周波数は常に正であり、ITGが最も活発である
- ITGの成長率は $R/L_{ne}=2 \rightarrow R/L_{ne}=3$ で低下

$R/L_{ne}$ の上昇によるITGの抑制で  
閉じ込め性能改善



- $R/L_{ne} > 4$ で活発になる不安定性がITGからTEMに入れ替わり、成長率は上昇

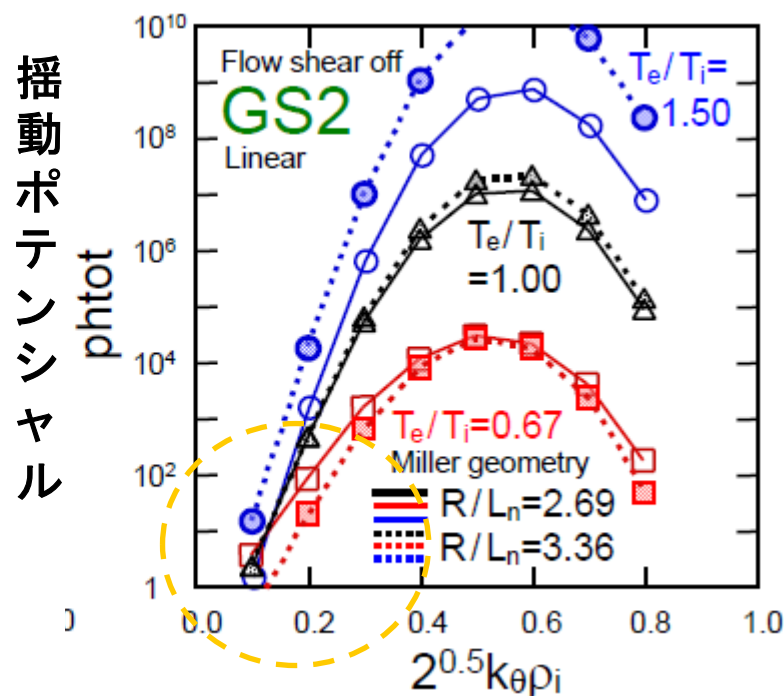
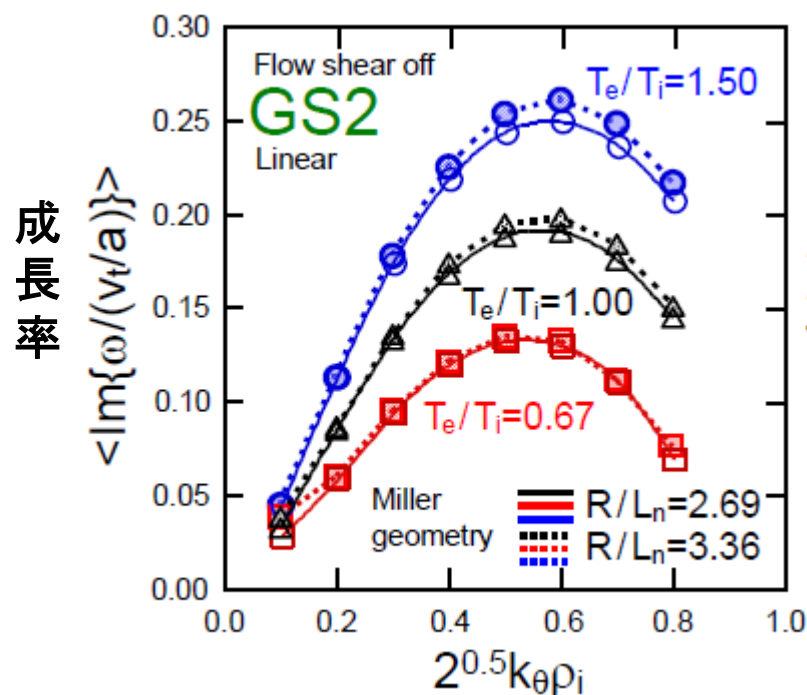
$R/L_{ne}$ の上昇によるTEMの促進で  
閉じ込め性能劣化

# 高 $T_e/T_i$ 領域において短波長の乱流の促進

GS2 • 広い波数空間で乱流が与える不安定性を調査

- $T_e/T_i$ の増大によって、**成長率が増加し**、成長率の極大値が**短波長側に移動**
- $T_e/T_i=1.00$ と $T_e/T_i=1.50$ の場合で、 $R/L_n$ の増大が揺動の**成長率増加**に繋がる
- $T_e/T_i=0.67$ の場合に $R/L_n$ が2.69から3.36に変化するとポテンシャル揺動が長波長側で減少(**ITGの特徴**)

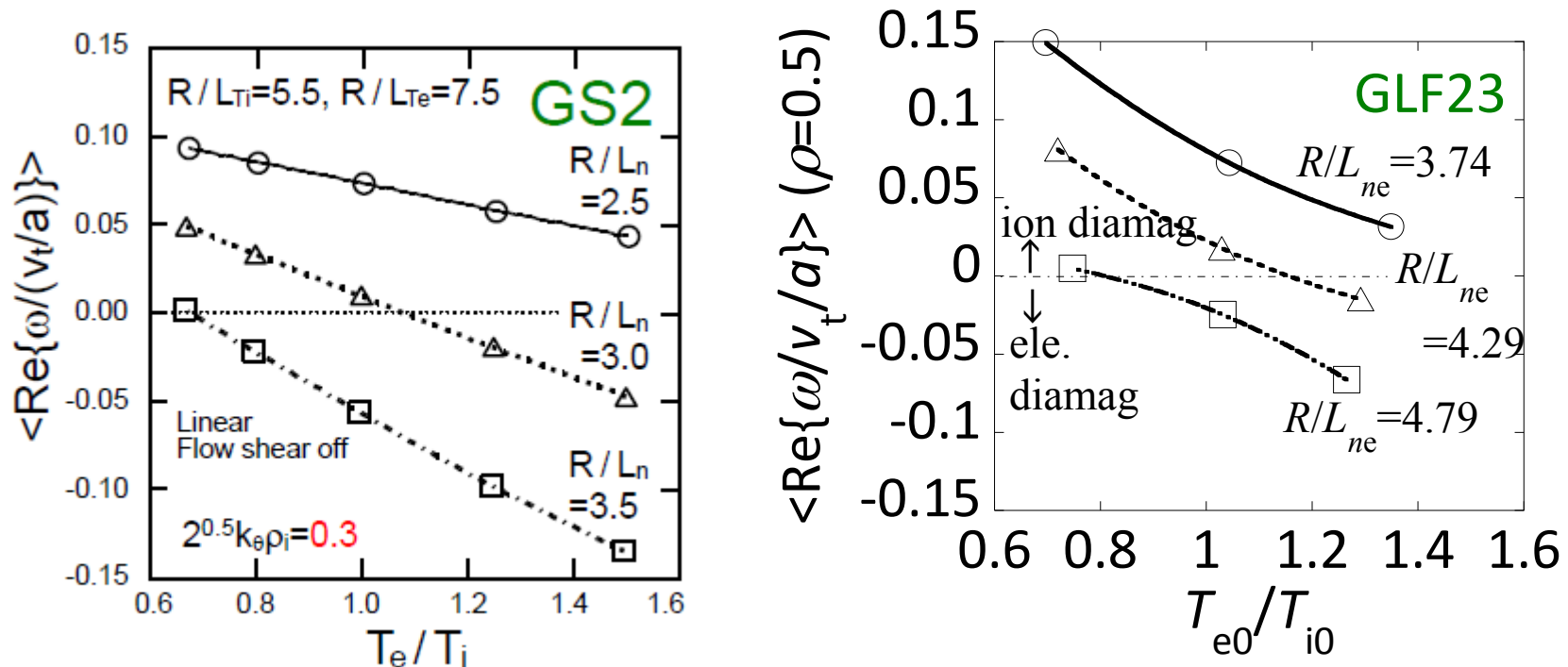
→ GLF23と同様の傾向



# GS2とGLF23で $T_e/T_i$ と $R/L_{ne}$ による 乱流構造の変化の傾向が定量的に一致

GS2, GLF23 • GS2とGLF23を用いた $T_e/T_i$ と $R/L_{ne}$ による乱流構造の変化

- $T_e/T_i$ と $R/L_{ne}$ 増加で周波数は電子系に向かう  
→ $R/L_{ne}$ の上昇により、高 $T_e/T_i$ 領域でTEMが活発になる



定量的に一致する結果を示した  
データベースの統計解析にも整合する

# まとめ

## 背景

炉心プラズマ性能に顕著な影響を及ぼす  
乱流輸送の物理機構

$T_e/T_i$ ,  $R/L_n$ ,  $v_{e,i}^*$ ,  $s$ ,  $q$ ,  $Z$ ,  
 $K$ ,  $\delta_{U,L}$ ,  $R/L_{Te,i}$  ...

## 国際データベースの 回帰解析

GLF23とGS2による  
計算機シミュレーション

優勢となる乱流機構が $T_e/T_i$ と $R/L_{ne}$ によって異なる

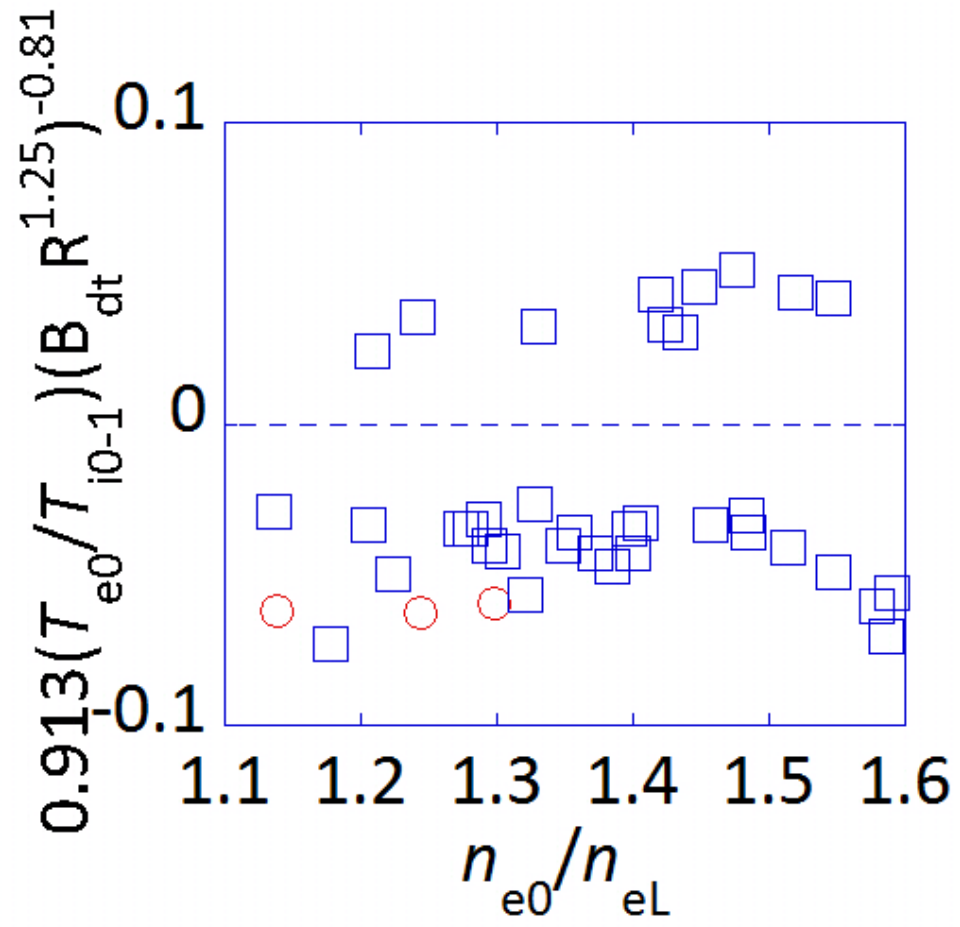
- 尖頭化した密度分布で【 $T_e/T_i$ の上昇により閉じ込め性能が劣化する】傾向が現れる
- $T_e/T_i > 1$ で密度勾配の増大によるETGの促進
- $T_e/T_i < 1$ で密度勾配の増大によるITGの抑制

## 今後の課題

核燃焼プラズマの目標は、 $T_e/T_i > 1$ において $H_H > 1$ を得ること

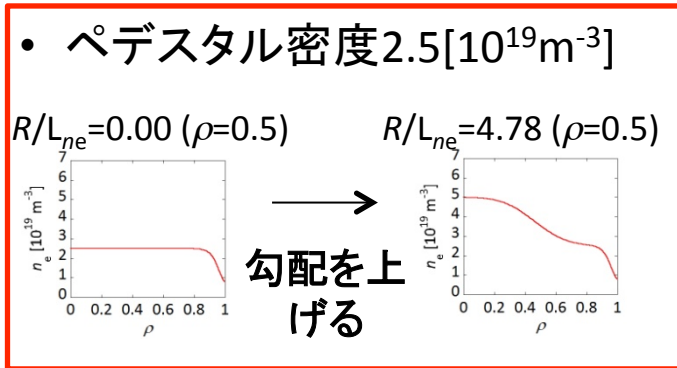
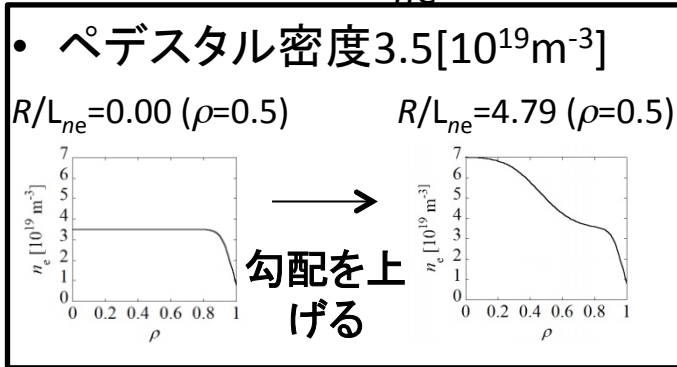
- 高 $T_e/T_i$ において不安定性の成長率が小さくなる条件の探索
- $R/L_n$ に加えて衝突度 $v_{e,i}^*$ や磁気シア $s$ についても解析を行う





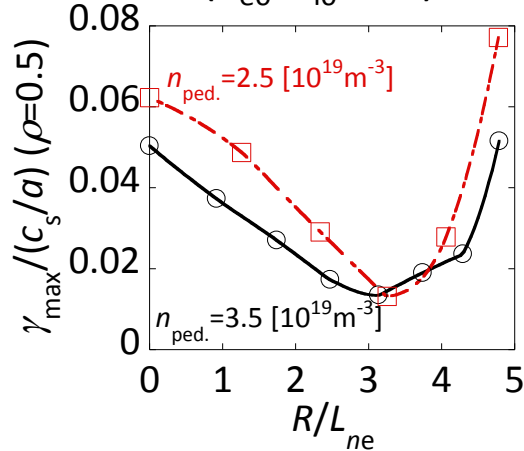
# 衝突度が下がると 不安定性の成長率が增加する

- 密度を変化させたときの、 $\rho=0.5$ における成長率とモード周波数の $R/L_{ne}$ 依存性の違い

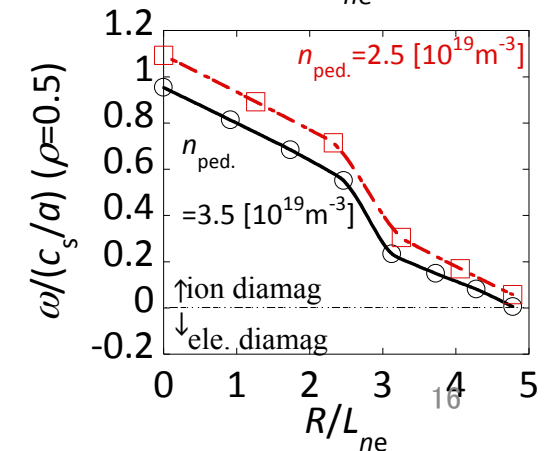
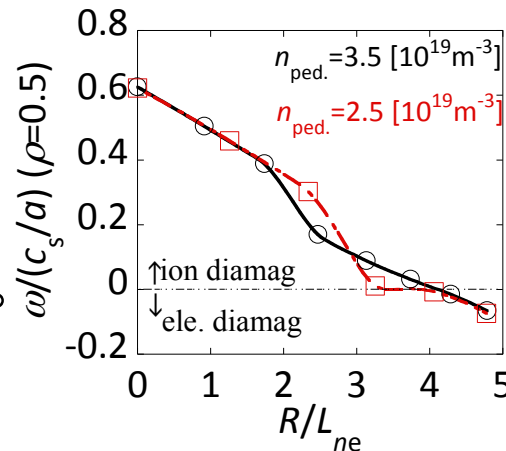
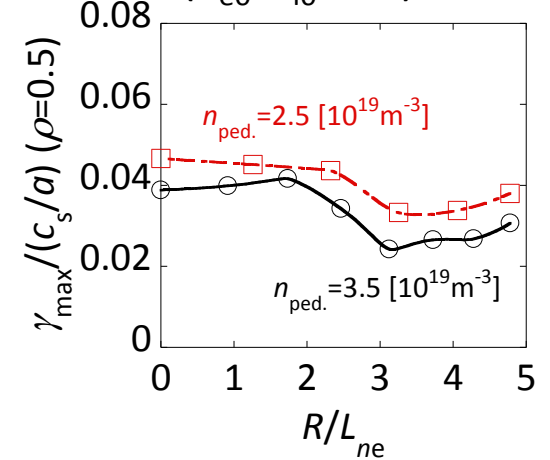


- 周波数は特に  $T_{e0}/T_{i0} \sim 0.6$  の場合で、衝突度の影響が見られる。
- 成長率の極小値をとる  $R/L_{ne}$  の値は衝突度の影響を受けない。

電子とイオンの加熱比 3:1  
( $T_{e0}/T_{i0} \sim 1.5$ )



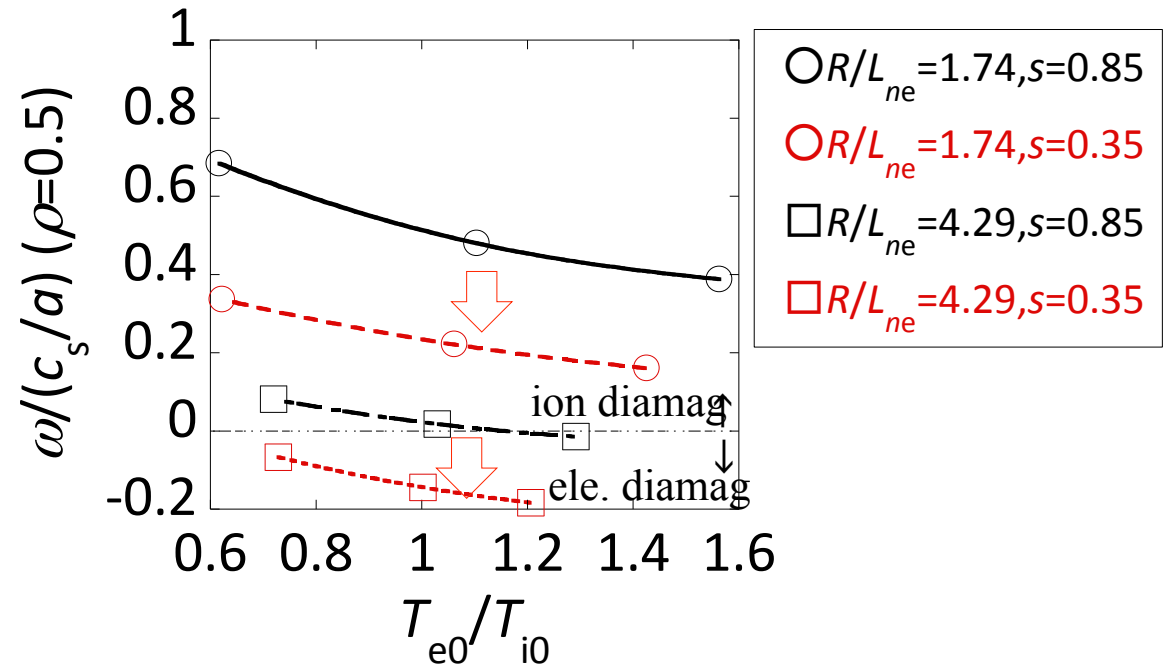
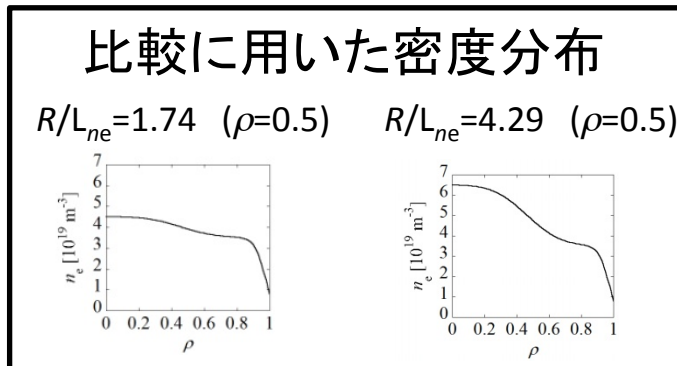
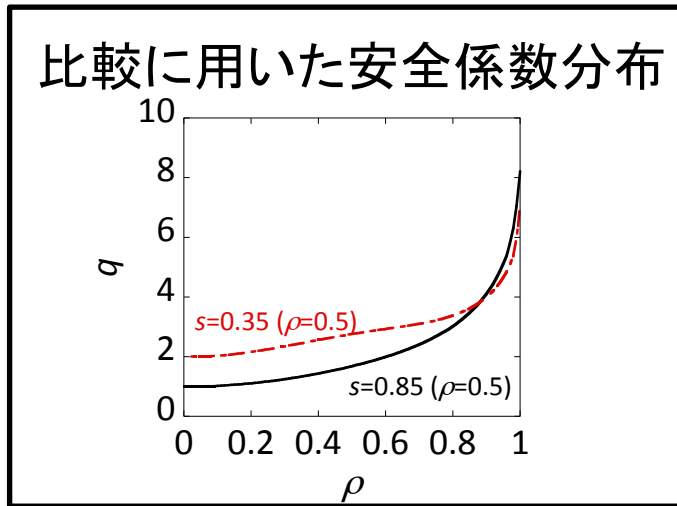
電子とイオンの加熱比 0:1  
( $T_{e0}/T_{i0} \sim 0.6$ )





# 磁気シアが優勢となる 乱流構造に影響を与えている

- 磁気シアを変化させたときの、 $\rho=0.5$ におけるモード周波数の $R/L_{ne}$ 依存性の違い



支配的な乱流揺動がITGからTEMに切り替わる $R/L_n$ の値が、 $s$ の低下と共に下がる。

# 優勢となる乱流機構が $T_e/T_i$ と $R/L_{ne}$ によって異なる

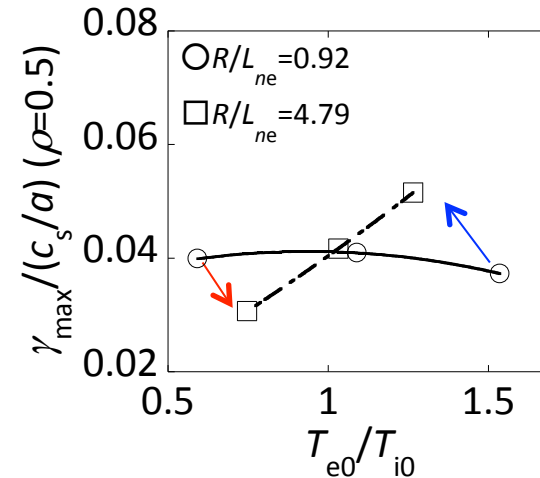
## GLF23

- ドリフト波揺動周波数の実部 $\omega$ と虚部(成長率) $\gamma$ から $T_e/T_i$ の寄与の原因を調べる

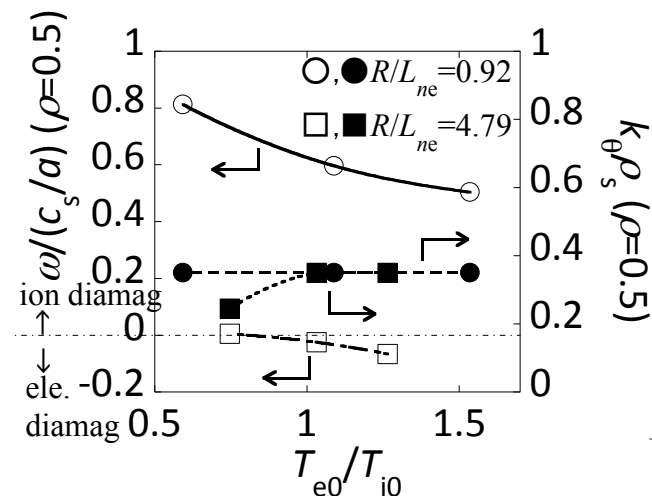
$R/L_{ne}$ の増加で

- $T_e/T_i \sim 0.6$ のとき、ITGモードが抑制される。
- $T_e/T_i \sim 1.5$ のとき、ITGモードが抑制される一方で、TEMが促進される。

### 1番目に強い不安定性の成長率



### 1番目に強いモードの周波数



## 平成23年度研究経過のまとめ

---

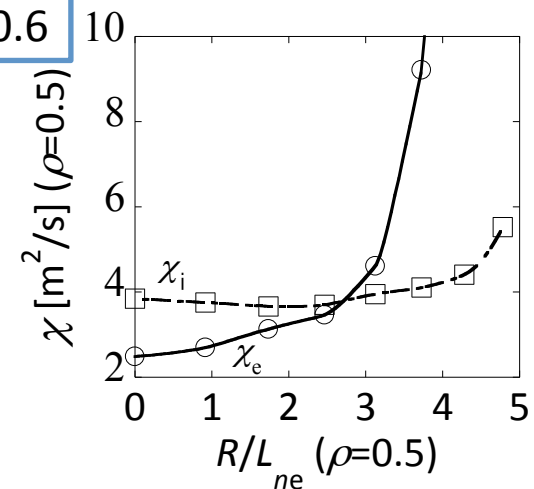
- GLF23コードとGS2コードを用いた、 $T_e/T_i$ の寄与に係わる統計解析の結果の検証を行った
- GLF23とGS2を用いた数値解析の結果が概ね国際データベースの統計解析に整合することを確認した
- 低 $T_e/T_i$ 領域と高 $T_e/T_i$ 領域における閉じ込め特性にITGとTEMならびに $R/L_{ne}$ が明確な役割を果たすことを明らかにした

## $T_e/T_i$ の領域別の熱拡散係数

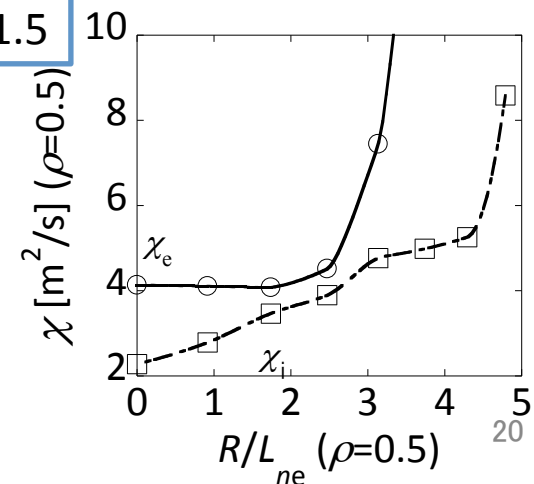
GLF23 •  $T_e/T_i$ の領域別の乱流機構を熱拡散係数を用いて確認する。

- $T_{e0}/T_{i0} \sim 0.6$ の場合、 $R/L_{ne} < 3.8$ の範囲でイオンの拡散係数が高いが、 $R/L_{ne}$ の上昇で減少傾向→ITGの抑制(不安定性の成長率と一致)
- $T_{e0}/T_{i0} \sim 1.5$ の場合、 $0 < R/L_{ne} < 5$ の範囲で常に電子の拡散係数が高い
- どちらの $T_e/T_i$ 領域でも、 $R/L_{ne} > 2.5$ で電子の拡散係数が急増→、 $R/L_{ne} > 2.5$ でTEMの促進される？
- $T_e/T_i \sim 0.6$ の場合と比較し、 $T_e/T_i \sim 1.5$ の場合では $R/L_{ne}$ の増加によるイオンの拡散係数上昇幅が大きい→TEMがイオンの拡散にも影響を与えるのか？ITG以外のイオン系の不安定性がはたらいっているのか？

$T_{e0}/T_{i0} \sim 0.6$



$T_{e0}/T_{i0} \sim 1.5$



# 平成24年度作業計画

---

- 高 $T_e/T_i$ の条件下においても電子系とイオン系の乱流揺動が共に抑制され、IPB(y,2)比例則を越える優れた閉じ込め性能を得るのに必要な分布形状を探る性検証

密度に加え、磁気シアや衝突度、回転速度などを検討

- GLF23とGS2の整合性検証
- GLF23とGS2から得られた結果をもとに再びデータベースの統計的解析を行う