

熱源駆動型乱流輸送モデルによる L/H 遷移シミュレーション研究

Simulation Study on L/H Transition by Source-driven Turbulence Model

原子力機構
瀬戸春樹

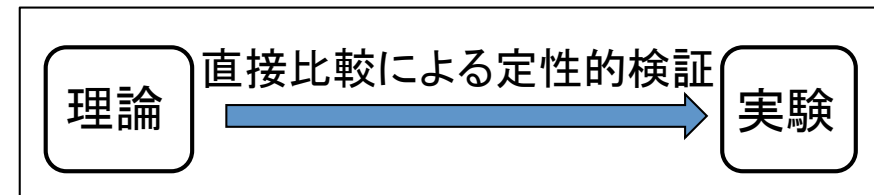
ITER・原型炉の炉心性能予測の高度化を目指す上で、L/H遷移物理の理解が重要

従来の乱流輸送モデルと実験の直接比較に変わるL/H遷移モデルの検証手法の構築が必要

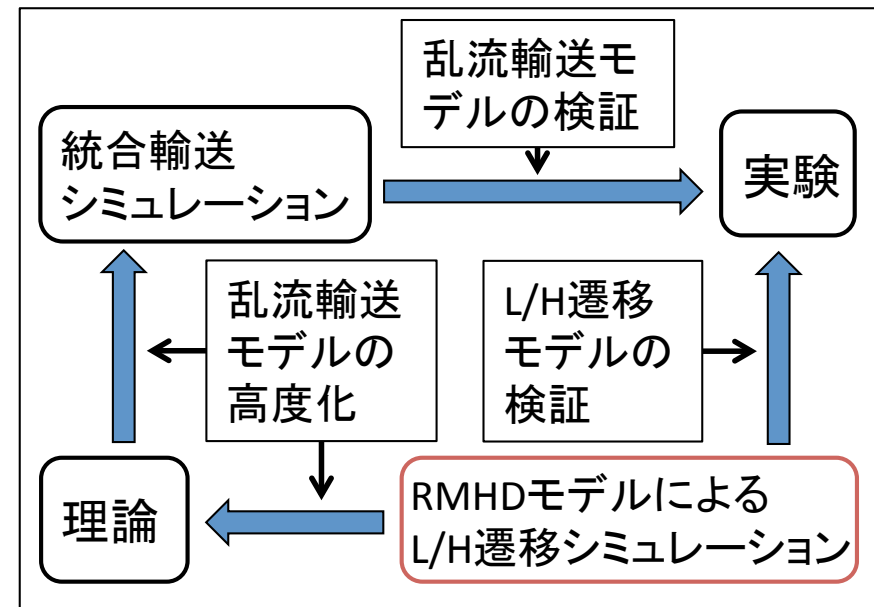
周辺乱流コードBOUT++を用いて
 簡約化MHD(RMHD)モデルによる
 L/H遷移シミュレーション手法を構築し、
 周辺乱流輸送モデルの改良に向けた指針を得る

- プラズマ乱流モデル
- 平均/帯状流シアによる乱流抑制
- 開放系を含めた幾何形状効果
- 不純物・中性粒子輸送

従来のL/H遷移モデルの検証手法

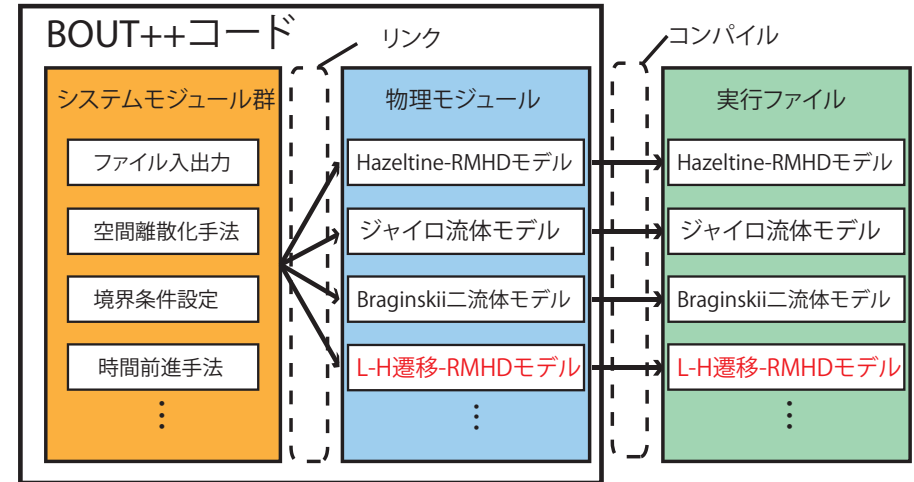


本研究が目指すL/H遷移モデルの検証手法



- 任意の軸対称磁場配位を解析対象とする**プラズマ流体シミュレーションフレームワーク**
(実空間3次元、初期値問題)
- システム/物理モジュールから構成**任意の物理モデルの実装が可能**
- トカマクの周辺MHD/乱流物理モジュール用の微分演算子関数は**Field-Aligned座標系(x,y,z)を仮定**

BOUT++コードの概念図



- Field-Aligned座標系

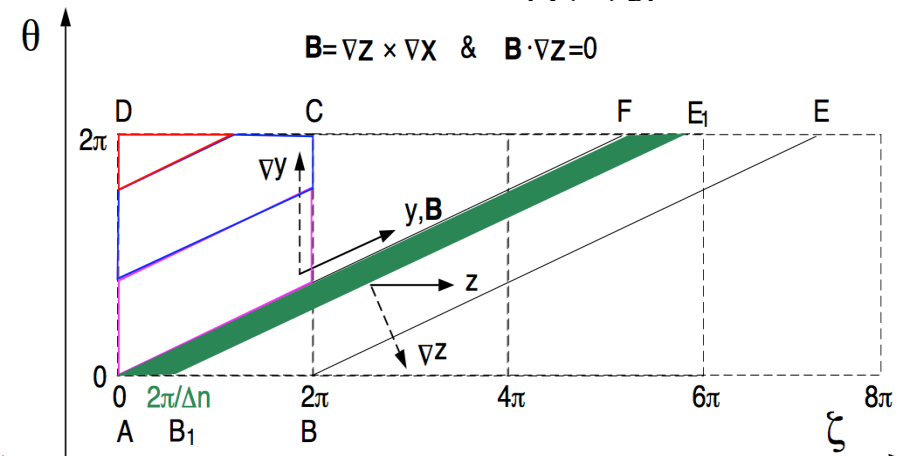
$$x = \psi - \psi_0, \quad y = \theta, \quad z = \zeta - \int_{\theta_0}^{\theta} \nu d\theta, \quad \nu = \frac{B^\zeta}{B^\theta}$$

- LCFS内部における周期境界条件

$$f(\psi, \theta, \zeta + \frac{2\pi}{\Delta n}) = f(\psi, \theta, \zeta) \rightarrow f(x, y, z + \frac{2\pi}{\Delta n}) = f(x, y, z)$$

$$f(\psi, \theta + 2\pi, \zeta) = f(\psi, \theta, \zeta) \rightarrow f(x, y + 2\pi, z - \int_{\theta_0}^{\theta} \nu d\theta) = f(x, y, z)$$

BOUT++コードのField-Aligned座標(x,y,z)と局所直交トーラス座標(ψ,θ,ζ)の対応



- BOUT++コードによるRBM不安定性の線形計算
- 静電RBM乱流のL/H遷移モデルの物理背景
- 静電RBM乱流のL/H遷移モデルを用いた予備計算

線形電磁RBM方程式

$$\frac{\partial U_1}{\partial t} = -B_0^2 \partial_{\parallel} J_{\parallel 1} + \mathbf{b}_0 \times \boldsymbol{\kappa} \cdot \nabla_{\perp} p_1$$

$$\frac{\partial \psi_1}{\partial t} = -\frac{1}{B_0} \partial_{\parallel} (B_0 \phi_1) + \eta J_{\parallel 1}$$

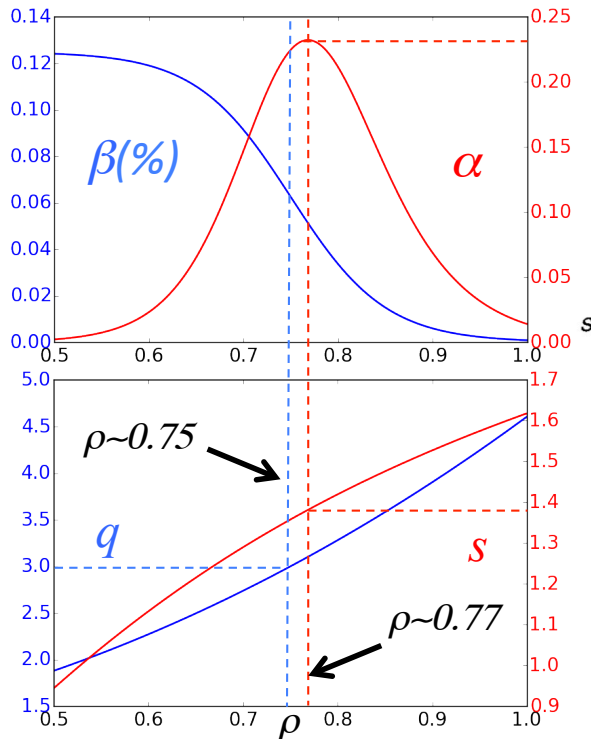
$$\frac{\partial p_1}{\partial t} = -\mathbf{b}_0 \times \nabla_{\perp} \phi_1 \cdot \nabla p_0$$

$$\partial_{\parallel} = \mathbf{b}_0 \cdot \nabla, \quad U_1 = \nabla_{\perp}^2 \phi_1, \quad J_1 = \nabla_{\perp}^2 \psi_1$$

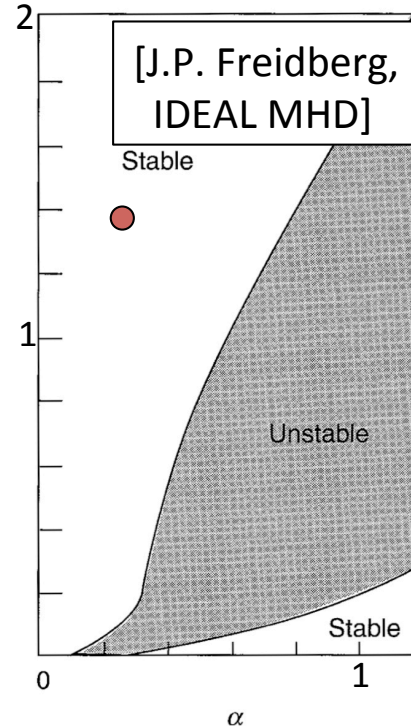
同心円磁気面配位の1/15トーラス ($0 \leq z \leq 2\pi/15$) においてRBM不安定性 ($n=15$) の線形成長率の η 依存性を評価

高 η 領域において線形成長率の η 依存性が理論($\gamma \propto \eta^{1/3}$)より小さい

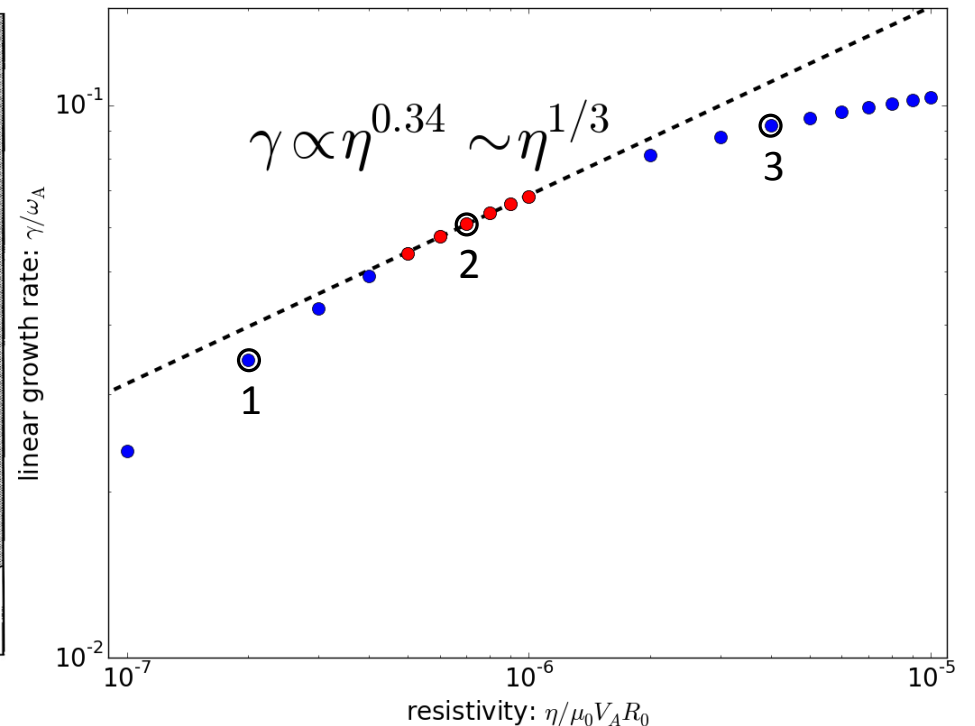
圧力/磁気シアの空間構造



IBM不安定性の s - α 図

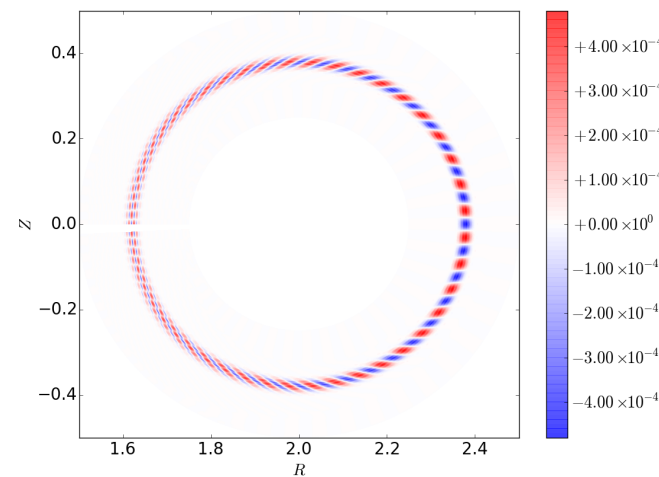


線形成長率($n=15$)の抵抗率依存性

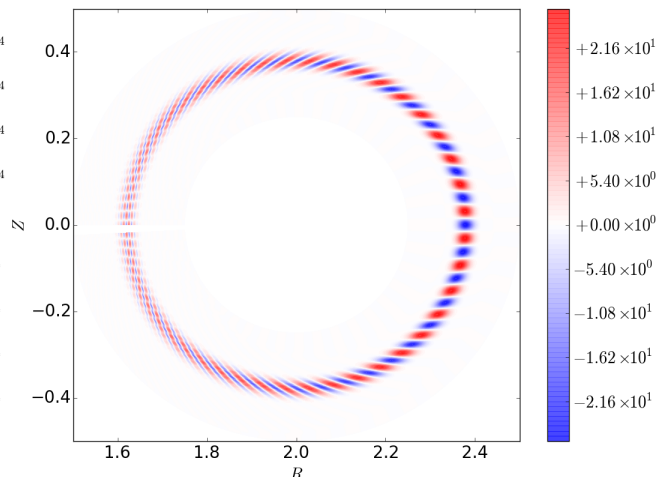


高 η 領域における固有関数のバルーニング構造と成長率の理論($\gamma \propto \eta^{1/3}$)からのずれが径方向領域端の影響でないことを確認

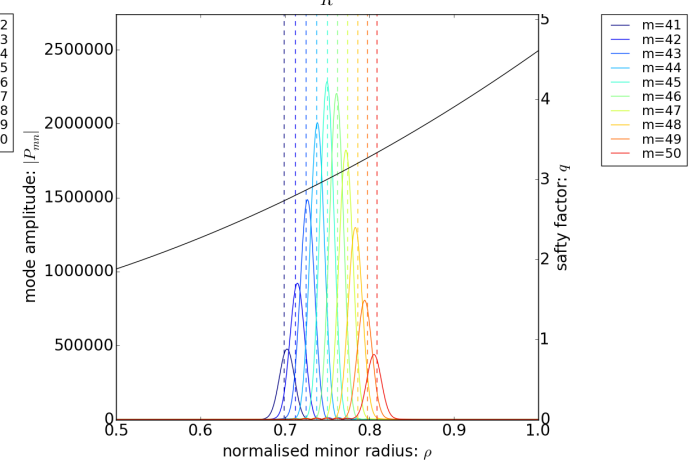
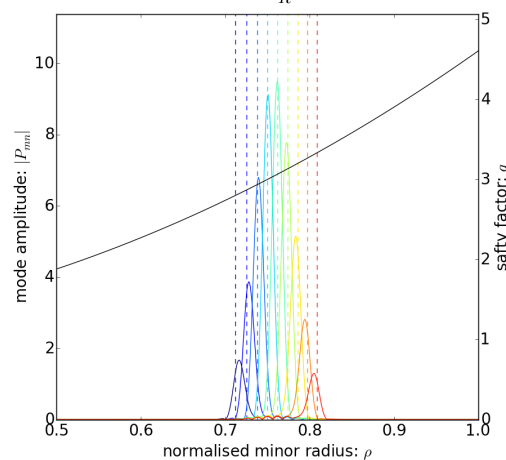
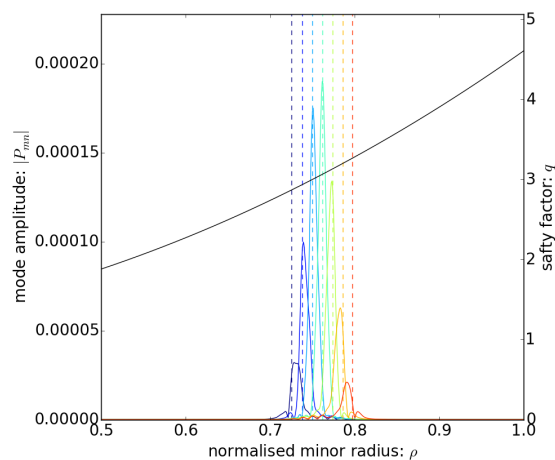
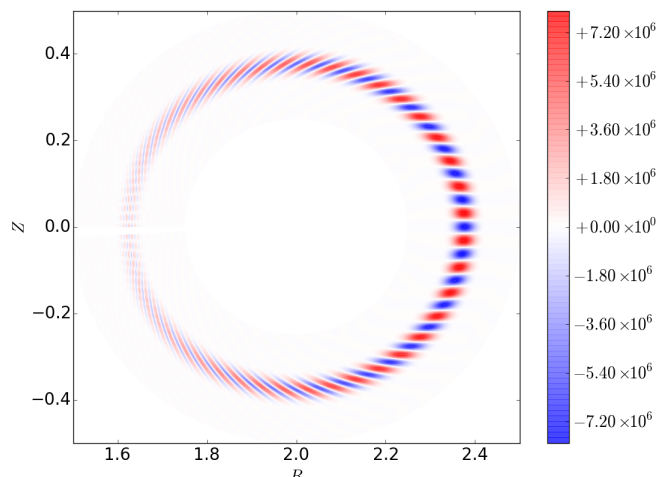
1. 低 η 領域($\eta=2 \times 10^{-7}$)



2. $\gamma \propto \eta^{1/3}$ 領域($\eta=7 \times 10^{-7}$)



3. 高 η 領域($\eta=4 \times 10^{-6}$)



- BOUT++コードによるRBM不安定性の線形計算
- 静電RBM乱流のL/H遷移モデルの物理背景
- 静電RBM乱流のL/H遷移モデルを用いた予備計算

静電RBM乱流のL/H 遷移モデル

[slab: L. Chône PoP2014, NF2015, torus: G.Y. Park PoP2015 (BOUT++)]

$$\partial_t \nabla_{\perp}^2 \phi + \{\phi, \nabla_{\perp}^2 \phi\} = -\nabla_{\parallel}^2 \phi - Gp + \partial_x F_{neo} + \nu_{\perp} \nabla_{\perp}^4 \phi$$

$$\partial_t p + \{\phi, p\} = \delta_c G\phi + \chi_{\parallel} \nabla_{\parallel}^2 p + \chi_{\perp} \nabla_{\perp}^2 p + S$$

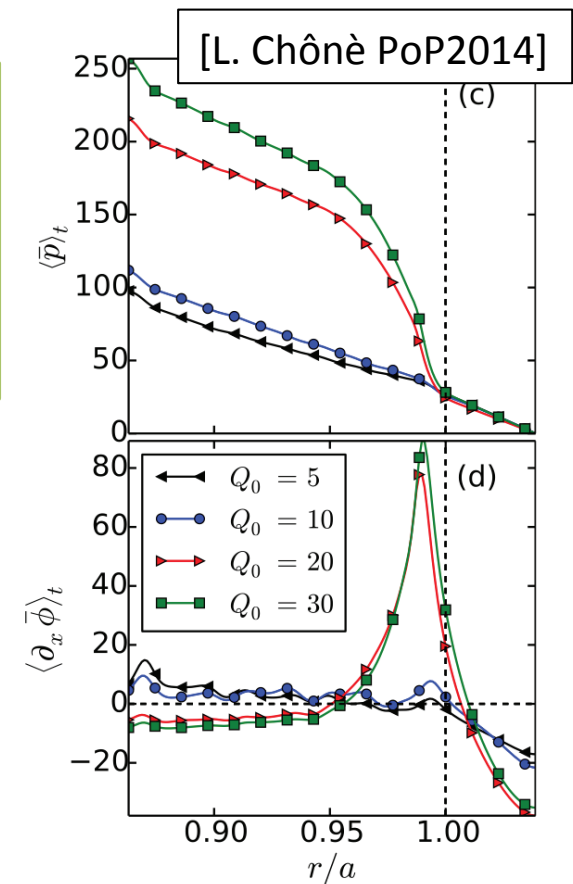
$$F_{neo} = -\mu_{neo}(\bar{p})[\partial_x \bar{\phi} - K_{neo}(\bar{p})\partial_x \bar{p}], \quad [L. Chône PoP2014]$$

- 二場のRMHDモデルで記述される**静電RBM乱流**
- **新古典ポロイダル回転のある径方向の力の釣り合い**
- 乱流輸送、コア側エネルギーソースとSOL側エネルギーシンクの釣り合いで決定される**動的圧力分布**

径方向の力の釣り合いを通して**周辺領域に径電場シアが生成**

径電場シアにより乱流輸送が抑制され**周辺領域の堆積エネルギーが増加**

周辺圧力勾配が成長して**ポロイダル回転のシアが局在化**



ポロイダルダンブ項 $\partial_x F_{neo}$ は平行粘性項の平均流成分から導出される ($n_i = \text{const.}$)

- 平行粘性のad-hocクロージャー [T.A. Gianakon PoP2002]

$$\nabla \cdot \vec{\Pi}_{\parallel i} = m_i n_i \frac{\langle B^2 \rangle}{B_\theta^2} \left(\mu_{i1} \bar{V}_{i\theta} + \mu_{i2} \frac{2\bar{q}_{i\theta}}{5\bar{p}_i} \right) e_\theta, \quad e_\theta = \sqrt{g} \nabla \zeta \times \nabla \psi, \quad \mathbf{B} = \nabla \zeta \times \nabla \psi + B_\zeta \nabla \zeta$$

- 径方向の力の釣合から決定されるポロイダル回転 ($\bar{V}_{i\perp} \gg \bar{V}_{i\parallel}$)

$$\nabla \bar{P}_i \cdot \nabla \psi = e_i n_i (\bar{\mathbf{E}} + \bar{\mathbf{V}}_i \times \mathbf{B}) \cdot \nabla \psi \rightarrow \bar{V}_{i\theta} = \frac{\sqrt{g} |\nabla \psi|^2}{B_\zeta} \left[\frac{d}{d\psi} \left(\bar{\phi} + \frac{\bar{P}_i}{e_i n_i} \right) + \cancel{\bar{V}_i \cdot \nabla \zeta} \right]$$

- 平行方向の力の釣合から決定されるポロイダル熱流束

$$\frac{2\bar{q}_{i\theta}}{5\bar{p}_i} = -\frac{\mu_{i1}}{\mu_{i2}} V_{i\theta}^{\text{nc}}, \quad V_{i\theta}^{\text{nc}} = \frac{\sqrt{g} |\nabla \psi|^2}{B_\zeta} k_i \frac{d}{d\psi} \left(\frac{\bar{P}_i}{e_i n_i} \right) \quad k_i = -\frac{\mu_{i2}}{\mu_{i1}}$$

平行粘性項は新古典ポロイダル回転を取り入れた径方向の力の釣合を記述する摩擦項へと帰結 ($\langle B^2 \rangle \sim B_t^2 \sim B_0^2 \gg B_p^2$)

$$\nabla \cdot \vec{\Pi}_{\parallel i} = m_i n_i \frac{\langle B^2 \rangle}{B_\theta^2} \mu_{i1} (\bar{V}_{i\theta} - \bar{V}_{i\theta}^{\text{nc}}) e_\theta \simeq m_i n_i \mu_{i1} \frac{B_0^2}{B_p^2} \left[\frac{\mathbf{B}_0 \times \nabla \bar{\phi}}{B_0^2} + (1 - k_i) \frac{\mathbf{B}_0 \times \nabla \bar{P}_i}{e_i n_i B_0^2} \right]$$

トラス系におけるポロイダルダンブ項

$$\begin{aligned}
 \mathbf{b}_0 \cdot \nabla \times (\nabla \cdot \vec{\Pi}_{i\parallel}) &= m_i n_i \mu_{nc} \left[\nabla_{\perp}^2 \frac{\bar{\phi}}{B_0} - k_{nc} \nabla_{\perp}^2 \frac{\bar{P}_i}{e_i n_i B_0} - \nabla_{\perp} k_{nc} \cdot \nabla_{\perp} \frac{\bar{P}_i}{e_i n_i B_0} \right] \\
 &+ m_i n_i \nabla_{\perp} \mu_{nc} \cdot \left[\nabla_{\perp} \frac{\bar{\phi}}{B_0} - k_{nc} \nabla_{\perp} \frac{\bar{P}_i}{e_i n_i B_0} \right], \quad \mu_{nc} = \mu_{i1} \frac{B_0^2}{B_p^2}, \quad k_{nc} = k_i - 1
 \end{aligned}$$

スラブ極限において Chône の表式と一致

- 新古典平行粘性係数

[Callen IAEA 1986]

$$\mu_{i1} = \frac{0.66 \epsilon^{1/2} \nu_{*i}}{(1 + 1.03 \nu_{*i}^{1/2} + 0.31 \nu_{*i})(1 + 0.66 \nu_{*i} \epsilon^{3/2})}$$

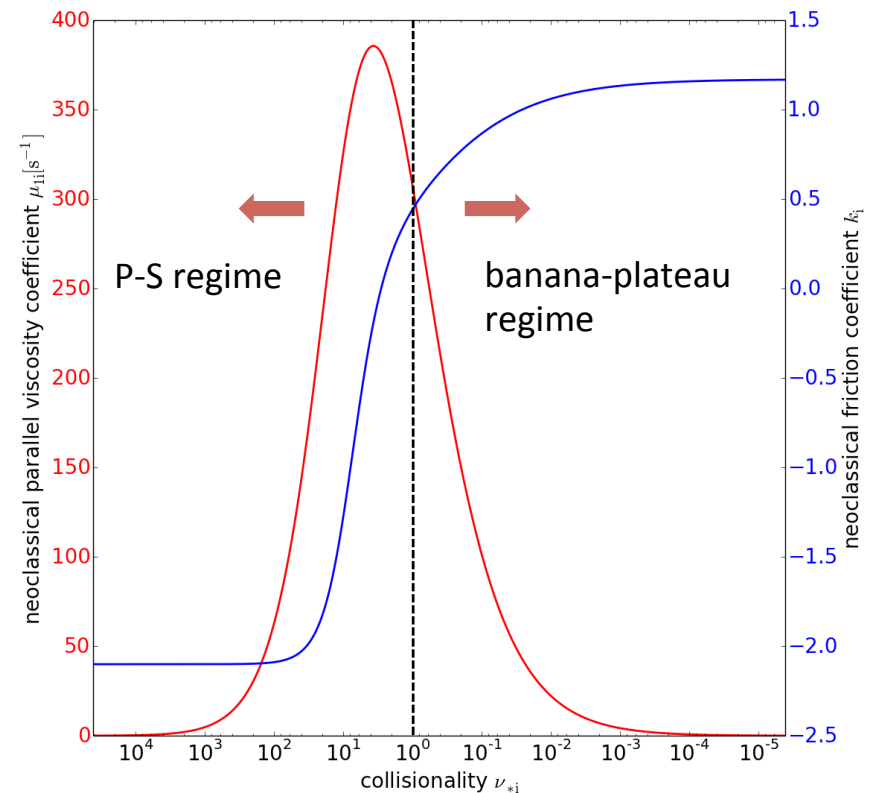
- 新古典平行摩擦係数

[Hinton & Hazeltine RMP1976]

$$k_i = \frac{1}{1 + \nu_{*i}^2 \epsilon^3} \left(\frac{1.17 - 0.35 \nu_{*i}^{1/2}}{1 + 0.7 \nu_{*i}^{1/2}} - 2.1 \nu_{*i}^2 \epsilon^3 \right)$$

新古典輸送係数は衝突率(圧力)の関数であり、衝突領域の遷移域傍で強いシア構造を持つ

新古典輸送係数の衝突率依存性 @ r/a=1



- BOUT++コードによるRBM不安定性の線形計算
- 静電RBM乱流のL/H遷移モデルの物理背景
- 静電RBM乱流のL/H遷移モデルを用いた予備計算

静電RBM乱流によるL/H遷移モデル

$$\frac{\partial U}{\partial t} = - [\phi, U] - B_0^2 \nabla_{\parallel} J + \mathbf{b}_0 \times \boldsymbol{\kappa} \cdot \nabla_{\perp} p + \mu_{\perp} \nabla_{\perp}^2 U - \mu_{nc} [\nabla_{\perp}^2 \bar{\phi} - \delta_i k_i^{nc} \nabla_{\perp}^2 \bar{p} - \delta_i \nabla_{\perp} k_i^{nc} \cdot \nabla_{\perp} \bar{p}]$$

$$\frac{\partial p}{\partial t} = - [\phi, p] + \chi_{\perp} \nabla_{\perp}^2 p + \chi_{\parallel} \nabla_{\parallel}^2 p + \alpha_S(t) S - \bar{p} L$$

$$U = \nabla_{\perp}^2 \phi, \quad J = \frac{1}{\eta B_0} \partial_{\parallel} (B_0 \phi)$$

$$\eta = 1.0 \times 10^{-5}, \quad \mu_{\perp} = \chi_{\perp} = 1.0 \times 10^{-6}$$

$$\chi_{\parallel} = 1.0 \times 10^{-1}, \quad n_0 = 1.0 \times 10^{19} [\text{m}^{-3}]$$

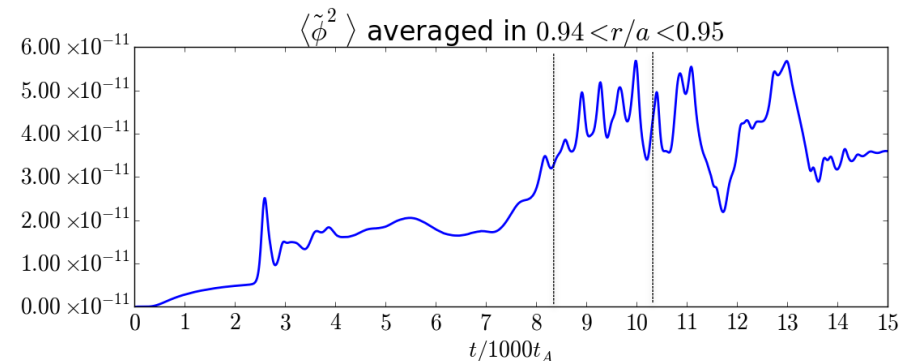
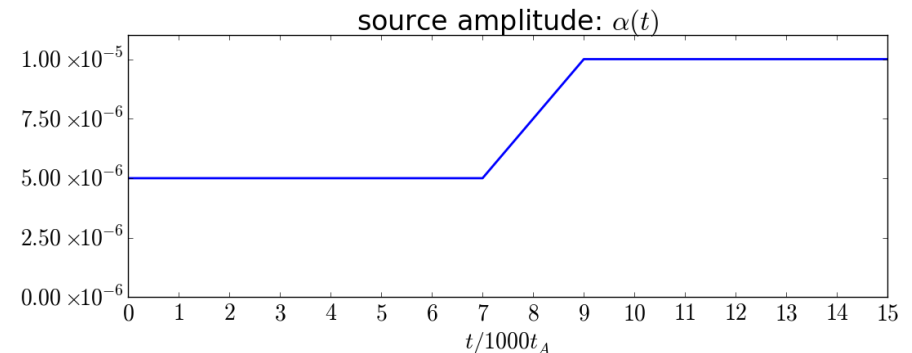
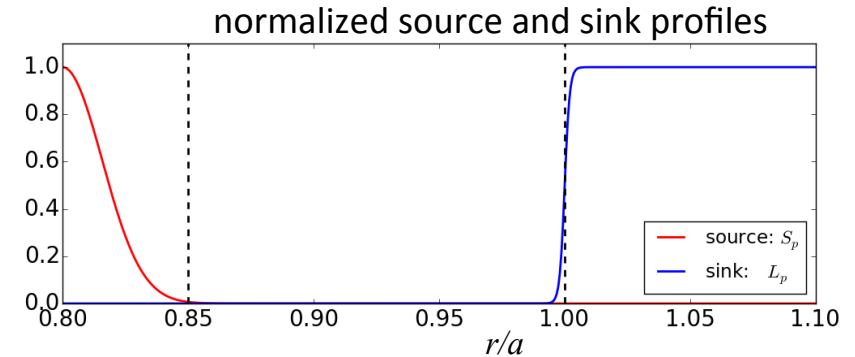
円形断面解析平衡($\beta_p=0$)

$$q(\rho) = 1.0 + 2.0(\rho/0.95)^3, \quad q = 3 \text{ at } \rho = 0.95$$

$$a_0 = 0.5[\text{m}], \quad R_0 = 2.0[\text{m}], \quad \bar{B} = 2.0[\text{T}]$$

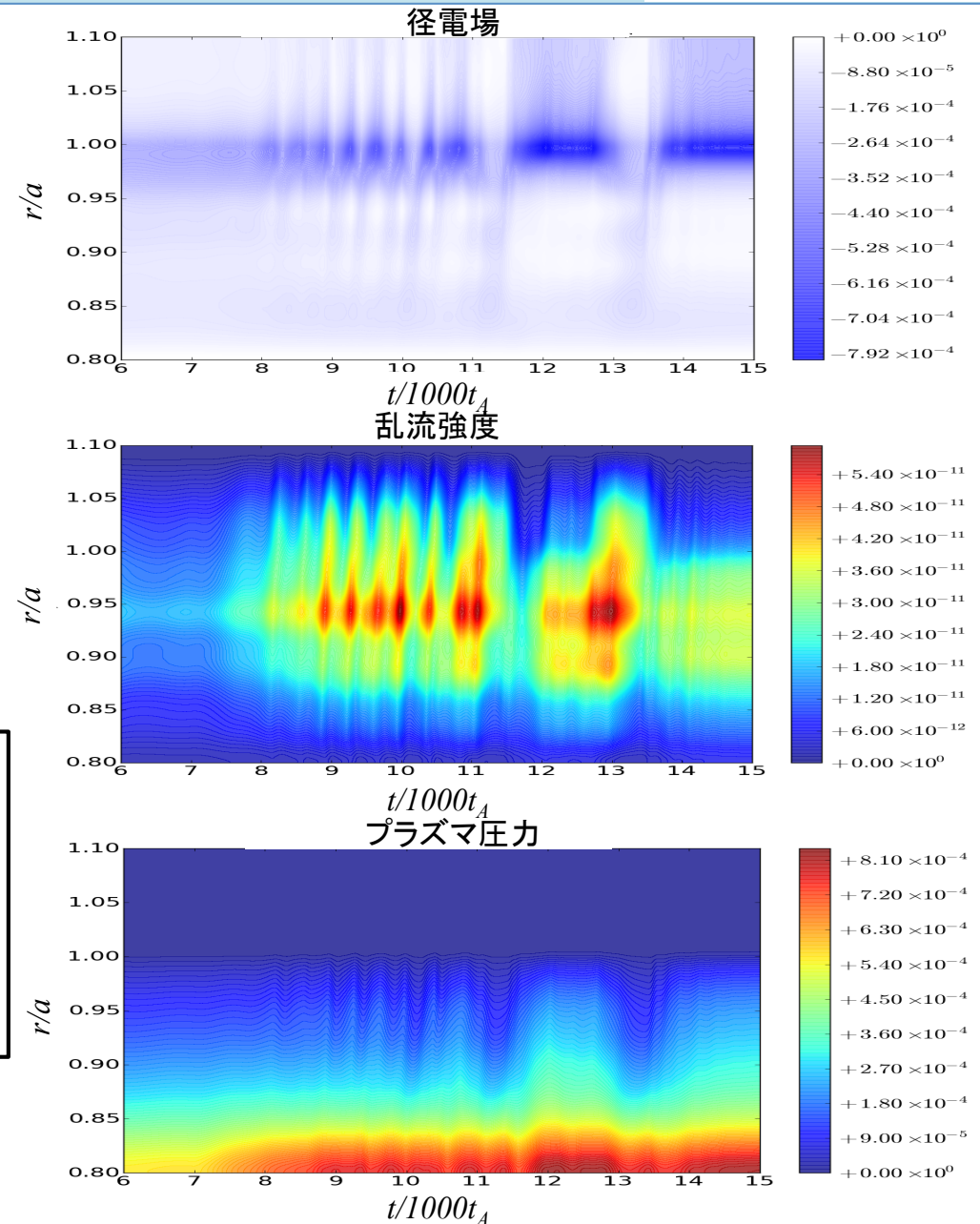
エネルギーソース/シンクモデル

- ソース強度 $\alpha_S(t)$ を 5.0×10^{-6} に固定して乱流強度の飽和を得た後、 1.0×10^{-5} まで線形に増加させる
- エネルギーシンク強度 L は 1.0 で固定



- 周辺領域において強いシア構造を持つ径電場の形成
- 有理面($q=3, r/a \sim 0.95$)における乱流の発達及び、径電場シアによる乱流抑制
- 乱流輸送とソース/シンクの釣合で決定される圧力分布

今後詳細なパラメータ設定について検討を行い、静電RBM乱流によるL/H遷移の再現と乱流モデルの高度化を進める



RBM不安定性の線形成長率の抵抗率依存性(追試)

- 成長率の高 η 領域における理論からのずれが径方向領域端の影響でないことを確認した

固有関数の空間構造がより局在化する高 n モードにおける成長率の η 依存性の調査と他コードによる追試を検討する

静電RBM乱流によるL/H遷移モデルの予備計算

- L/H遷移の再現に必要な以下の3つの機構を確認
 - 周辺領域において強いシア構造を持つ径電場の形成
 - $q=3$ 面における乱流の発達と径電場シアによる乱流抑制
 - 乱流輸送とソース/シンクの釣合による動的圧力分布

今後詳細なパラメータ設定について検討を行い、静電RBM乱流によるL/H遷移の再現と乱流モデルの高度化を進める