Plasma Turbulence
Itoh Project 2004-2008

磁気島によるポロイダル流の生成

西村征也、矢木雅敏1）、伊藤早苗1)、安積正史2)、伊藤公孝3)
九州大学大学院総合理工学府、1)九州大学応用力学研究所
2)日本原子力研究開発機構システム計算機センター、3)核融合研究所

Acknowledgement
S. Benkadda(Province Univ.), A. Fukuyama(Kyoto Univ.), P. H. Diamond(UCSD)

目次

- 研究の目的と背景
- 解析モデル
  - 簡約2流体モデル
  - 解析手法
- 解析結果
- 結論

研究の背景と目的

- 高βトカマクプラズマにおける磁気島: ブートストラップ電流発生の抑制(圧力勾配平坦化) 定常運転への障害
- 未解明の問題(制御の困難): 早いタイムスケールでの成長 プラズマパラメータに対する確率的振る舞い 鋸歯状振動やELMによる励起(およびBack Interaction)
- ドリフト-テアリングモード: 磁気島とドリフト波乱流の共存 有用な理論モデル 磁気島発生-消滅のヒステリシス ポロイダル流の生成
- ポロイダル流: 磁気島の成長への影響は無い 詳細な解析はほとんど無い 乱流-帯状流の重要性の高まり
- 磁気島の回転周波数の輸送係数依存: ホットな話題

ドリフト-テアリングモードの非線形シミュレーション

ポロイダル流 回転周波数 熱流束

簡約2流体モデル

Tearing mode

Resistive Drift mode

渦度方程式: $$\frac{D}{Dt}\nabla_\perp^2\phi = \nabla_{//} j_{//} + \mu\nabla_\perp^4\phi$$

オームの法則: $$\frac{\partial A}{\partial t} = -\nabla_{//}(\phi - \delta p) - \eta_{//} j_{//} + \alpha_T \delta \nabla_{//} T$$

密度発展則: $$\frac{Dn}{Dt} + \beta\frac{Dp}{Dt} = \beta\delta\nabla_{//} j_{//} + \eta_\perp \nabla_\perp^2 p$$

電子温度発展則: $$\frac{3}{2}\frac{DT}{Dt} - \frac{Dn}{Dt} = \alpha_T \delta\beta\nabla_{//} j_{//} + \varepsilon^2 \chi_{//}\nabla_{//}^2 T + \chi_\perp \nabla_\perp^2 T$$

ただし

$$\alpha_T = 0.71 \qquad \frac{D}{Dt} = \frac{\partial}{\partial t} + [\phi,\ ] \qquad \nabla_\perp = \hat{\mathbf{r}}\frac{\partial}{\partial r} + \hat{\theta}\frac{1}{r}\frac{\partial}{\partial\theta}$$

$$p = nT$$

$$j_{//} = -\nabla_\perp^2 A \qquad [f,g] = \hat{\mathbf{z}}\cdot\nabla f \times \nabla g \qquad \nabla_{//} = \frac{\partial}{\partial z} - [A,\ ]$$

規格化： $r/a \to r,\ \ z/R_0 \to z,\ \ v_A t/R_0 \to t$

エネルギー保存関係

ハミルトニアン:

$$H = \underbrace{\frac{1}{2}\left\langle \left|\nabla_\perp \phi\right|^2 \right\rangle}_{\text{速度場（静電場）}} + \underbrace{\frac{1}{2}\left\langle \left|\nabla_\perp A\right|^2 \right\rangle}_{\text{ポロイダル磁場}} + \underbrace{\frac{1}{2\beta}\left\langle n^2 \right\rangle + \frac{3}{4\beta}\left\langle T^2 \right\rangle + \frac{\beta_s}{2\beta}\left\langle (n+T)^2 \right\rangle}_{\text{密度、温度場}}$$

ハミルトニアンの時間発展:

$$\frac{\partial}{\partial t} H = -\mu \left\langle \left(\nabla_\perp^2 \phi\right)^2 \right\rangle - \eta_{//} \left\langle \left(\nabla_\perp^2 A\right)^2 \right\rangle - \eta_\perp \left\langle \left|\nabla_\perp p\right|^2 \right\rangle - \frac{\varepsilon^2 \chi_{//}}{\beta} \left\langle \left|\nabla_{//} T\right|^2 \right\rangle - \frac{\chi_\perp}{\beta} \left\langle \left|\nabla_\perp T\right|^2 \right\rangle$$

無散逸極限 → 保存

数値解析法

円柱配位：

r方向に有限差分

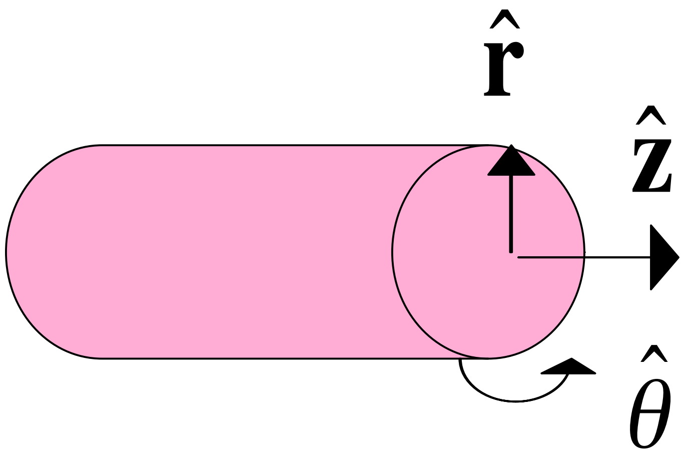
θ,z方向にフーリエ展開

$$f(\mathbf{r}) = f_0(r) + \varepsilon \sum_{m,n} \tilde{f}_{mn}(r) e^{i\{(m\theta - nz) - \omega t\}}$$

境界条件：

$$\tilde{f}_{m,n}(0) = 0, \tilde{f}_{m,n}(1) = 0$$

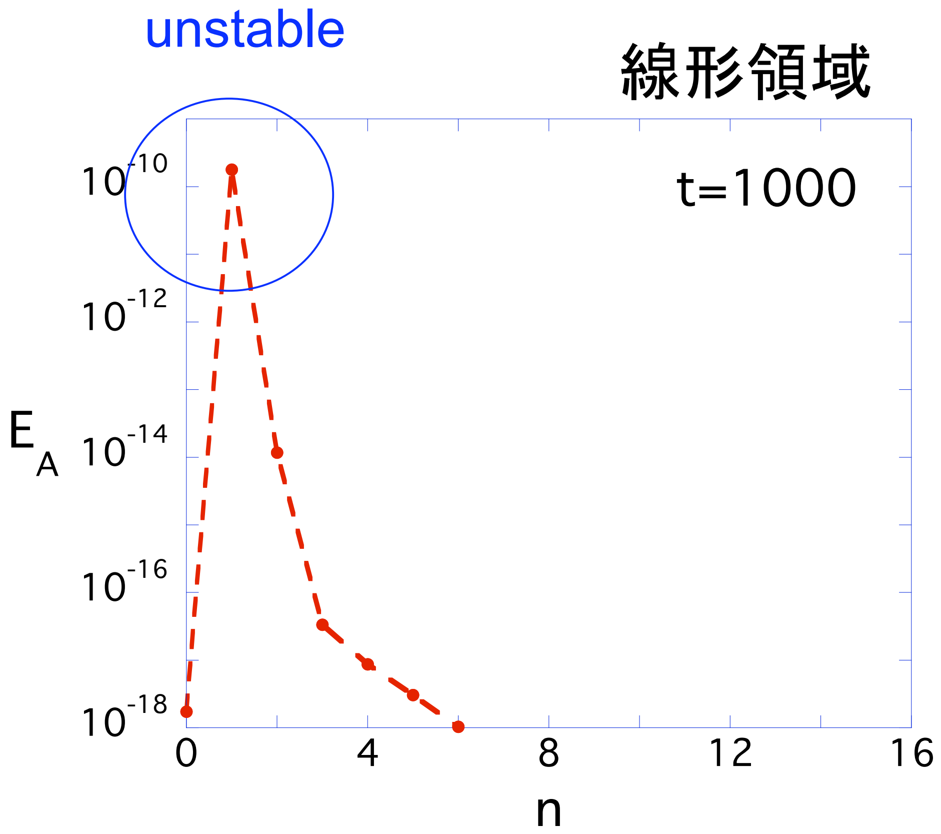
シングルヘリシティ: $\dfrac{m}{n} = 2$

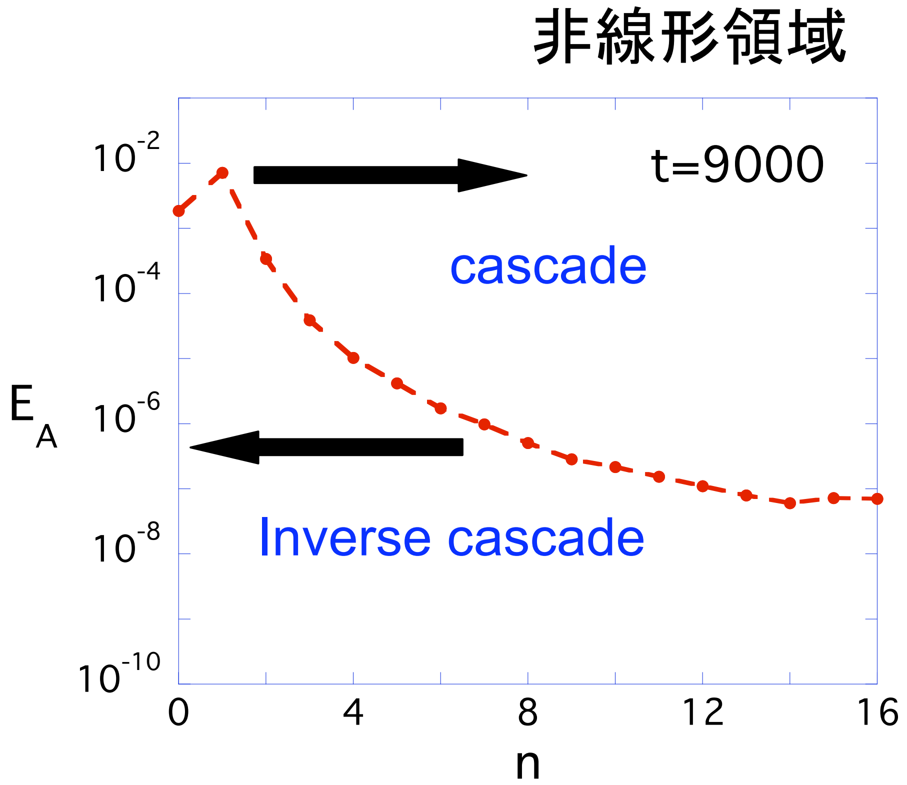


非線形シミュレーション：

フーリエスペクトル法

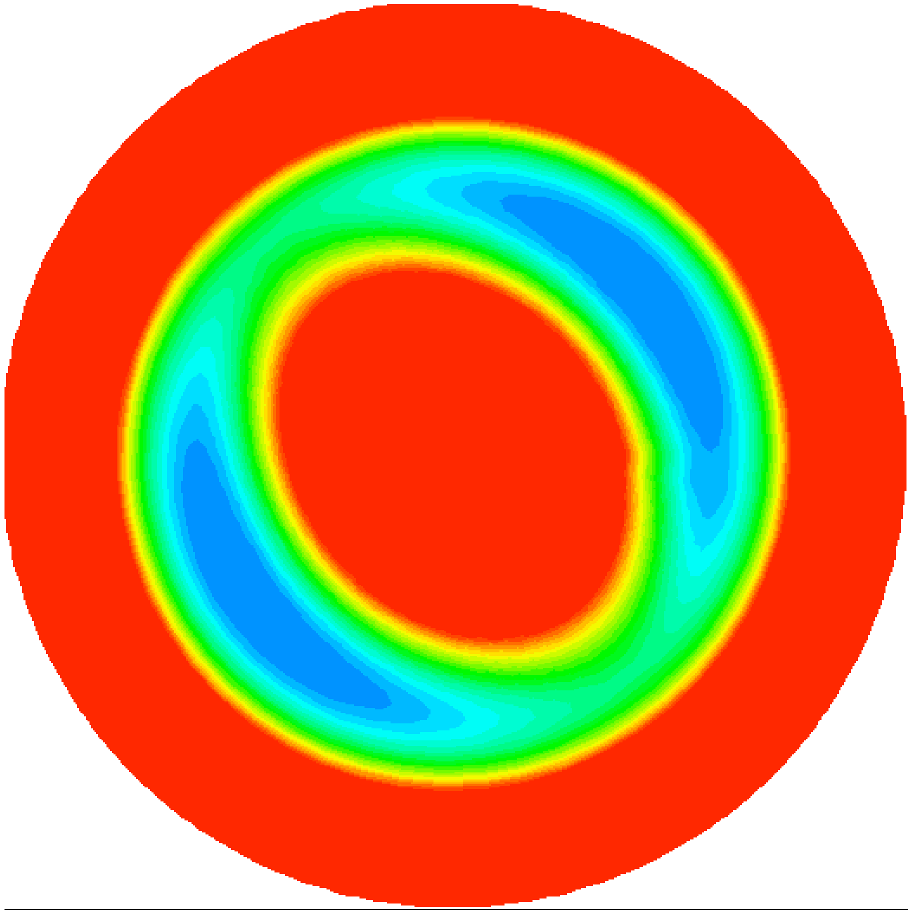
不安定なモード





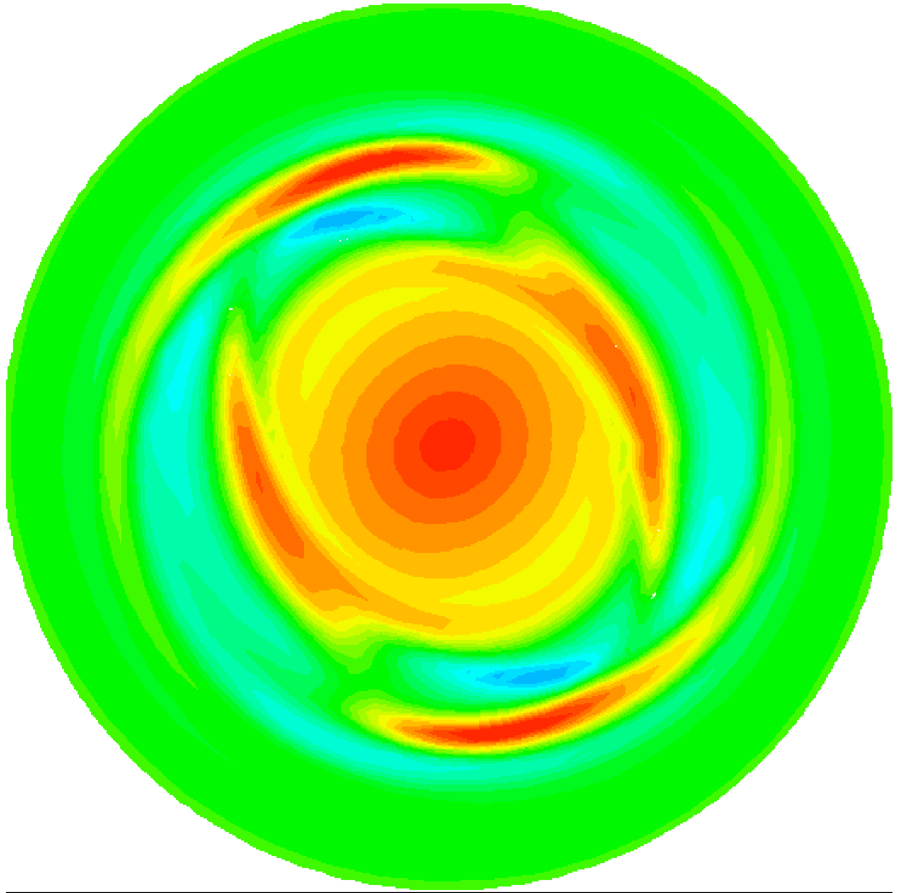
線形領域では(2,1)のテアリングモードのみ不安定
（線形の抵抗性ドリフトモードは安定）

ポロイダル断面図



ヘリカルフラックス

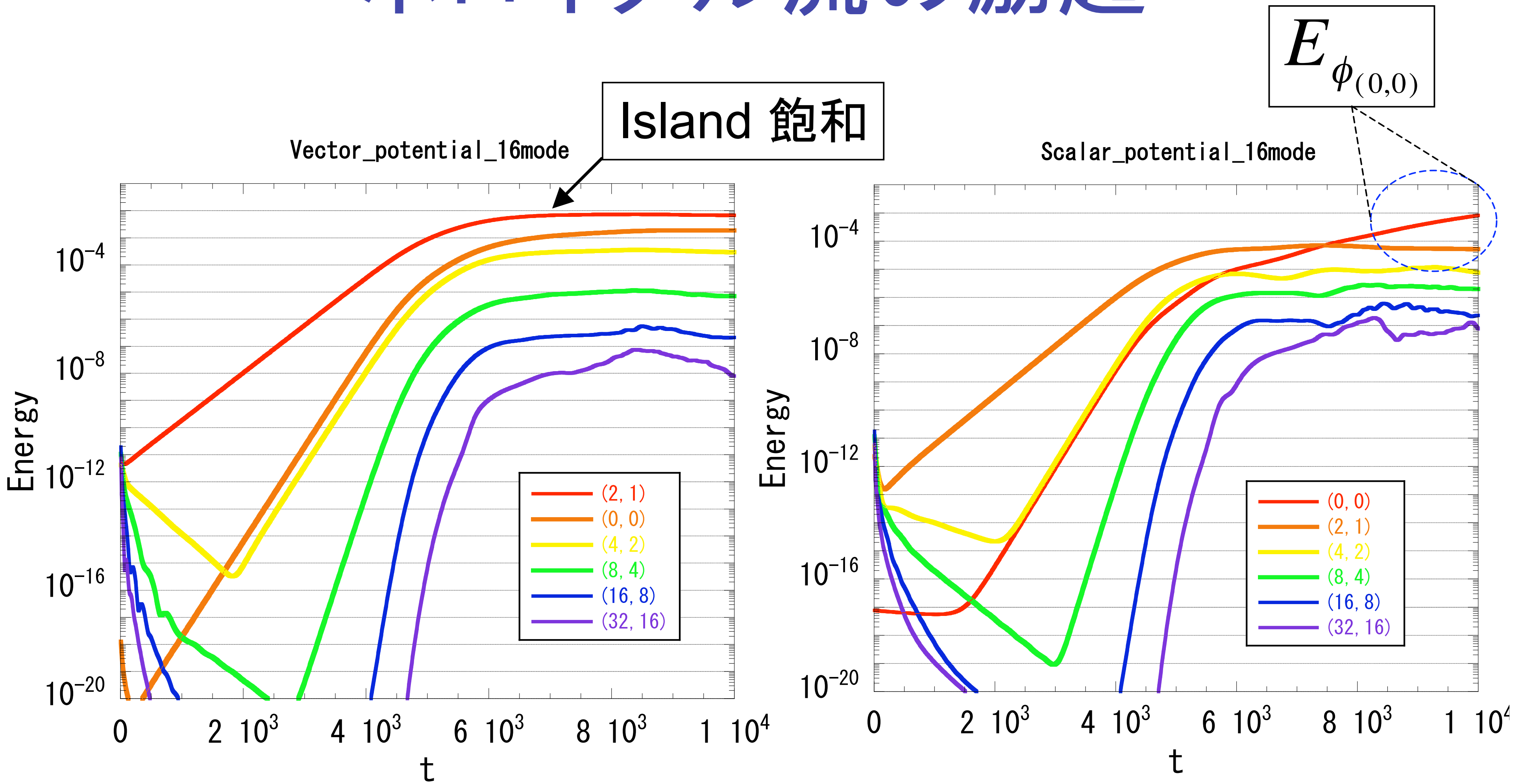
$$A_0 + r^2/4 + \sum A_{m,n} e^{i(m\theta - nz)}$$



E×Bドリフト速度

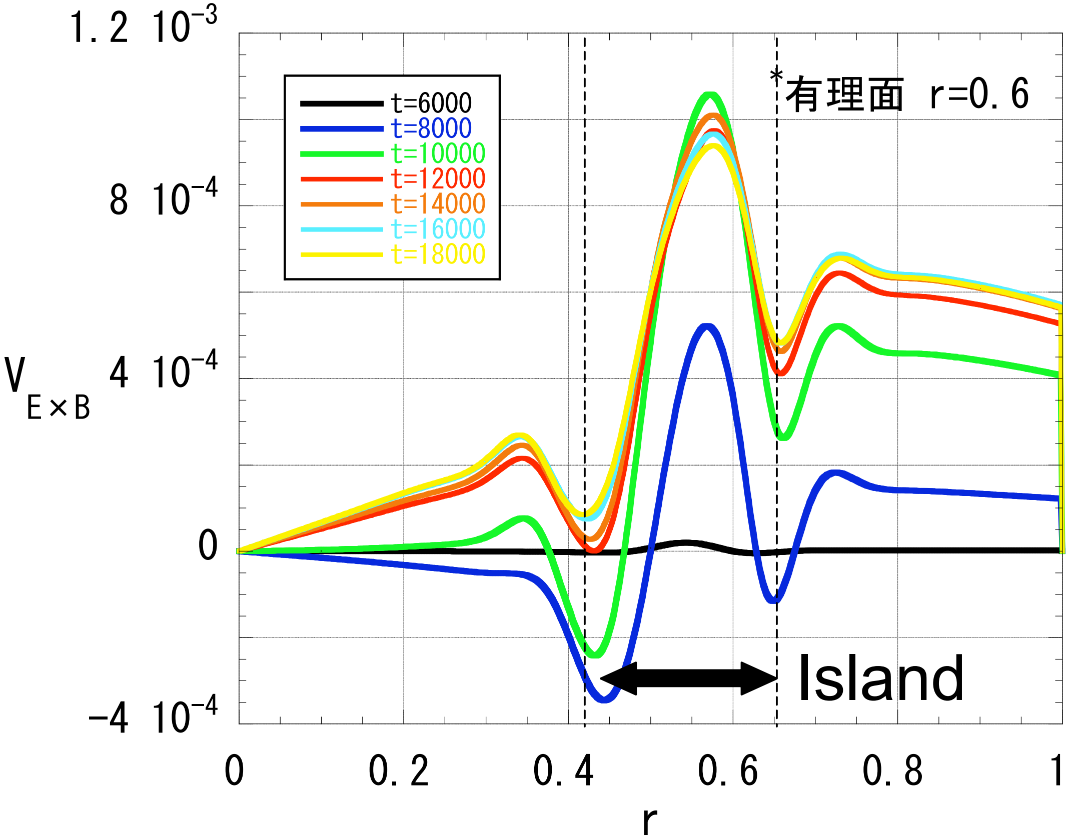
$$V_{E\times B} = \sum \partial\phi_{m,n} / \partial r$$

ドリフト-テアリングモードによるポロイダル流の励起



※ ドリフト波が共存しない場合、励起は小さい。

ポロイダル流の径分布



- 径分布 時間発展
- 弱いシアフロー

$$V_{E\times B} = \frac{\partial}{\partial r}\tilde{\phi}_{0,0}$$

ポロイダル流エネルギーの時間変化

$$\left\langle \tilde{\phi}_{0,0}\nabla_{\perp}^{4}\tilde{\phi}_{0,0}\right\rangle = \left\langle \left(\nabla_{\perp}^{2}\tilde{\phi}_{0,0}\right)^{2}\right\rangle > 0$$

$$\frac{1}{2}\frac{\partial}{\partial t}\left\langle \left|\nabla_{\perp}\tilde{\phi}_{0,0}\right|^{2}\right\rangle = \left\langle \tilde{\phi}_{0,0}\left[\tilde{\phi},\nabla_{\perp}^{2}\tilde{\phi}\right]_{0,0}\right\rangle + \left\langle \tilde{\phi}_{0,0}\left[\tilde{A},\tilde{j}_{//}\right]_{0,0}\right\rangle - \mu\left\langle \tilde{\phi}_{0,0}\nabla_{\perp}^{4}\tilde{\phi}_{0,0}\right\rangle$$

静電揺らぎによる生成

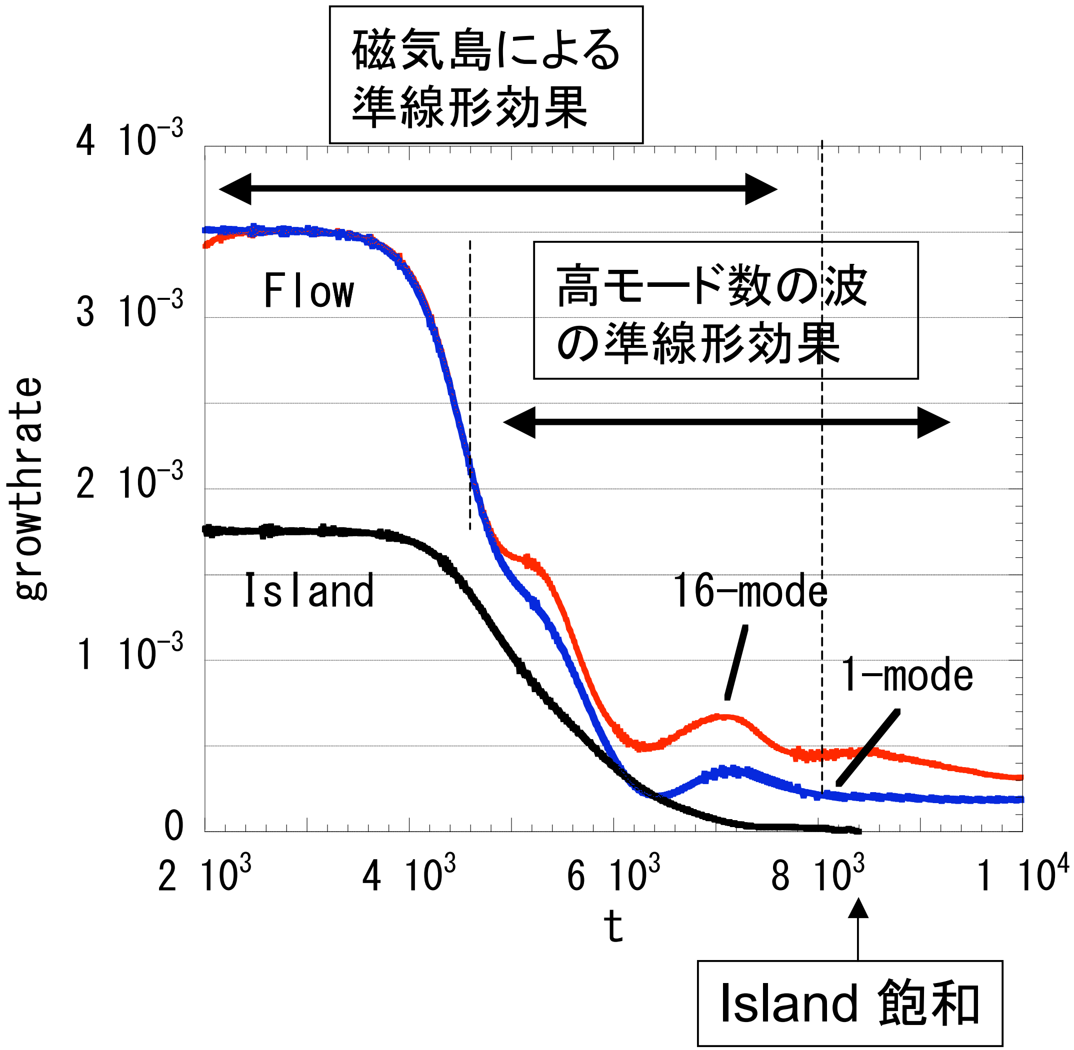
磁場エネルギーの流入

粘性による減衰効果

飽和レベル　粘性がこれらを上回るとき

$\langle\ \rangle$: 体積積分

ポロイダル流の成長率



$$\frac{1}{2}\frac{\partial}{\partial t}\left\langle \left|\nabla_\perp \tilde{\phi}_{0,0}\right|^2 \right\rangle = \underline{\left\langle \tilde{\phi}_{0,0}\left[\tilde{\phi}, \nabla_\perp^2 \tilde{\phi}\right]_{0,0}\right\rangle}$$

$$+ \underline{\left\langle \tilde{\phi}_{0,0}\left[\tilde{A}, \tilde{j}_{//}\right]_{0,0}\right\rangle} - \mu\left\langle \tilde{\phi}_{0,0}\nabla_\perp^4\tilde{\phi}_{0,0}\right\rangle$$

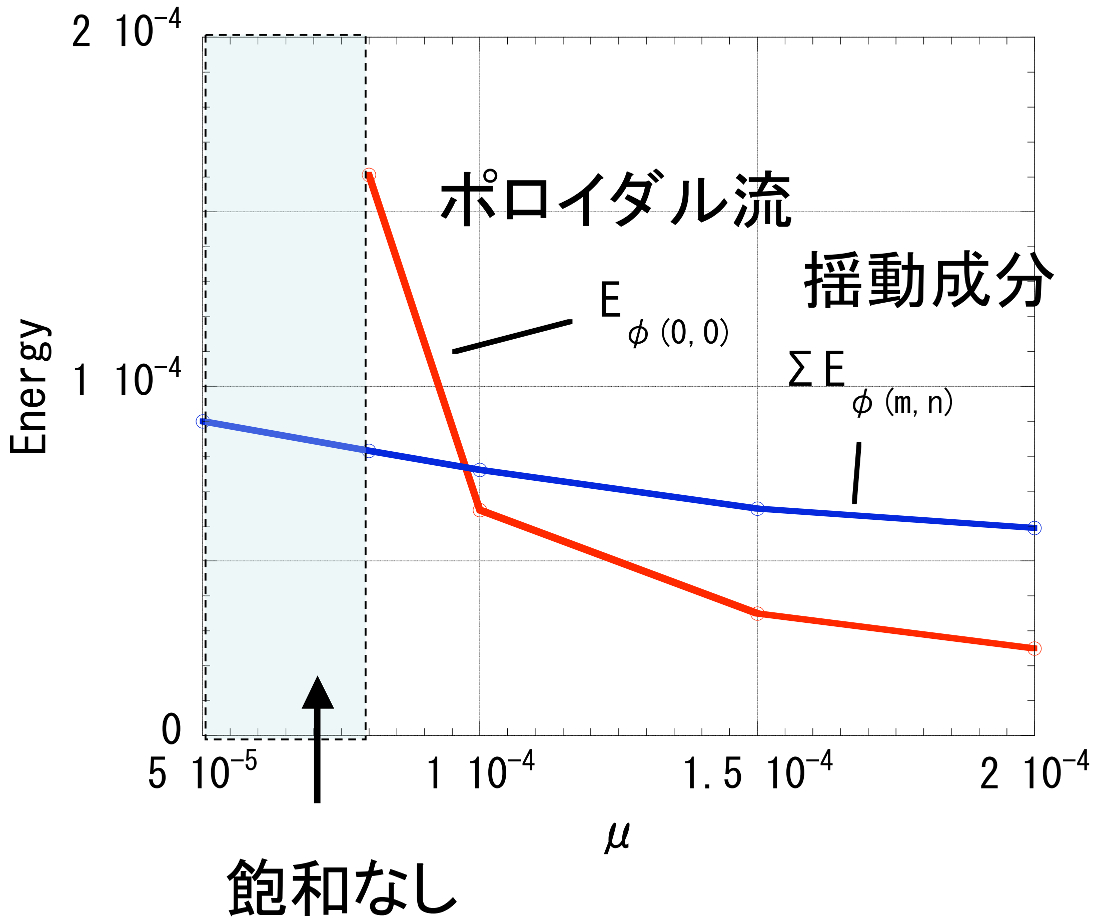
- 準線形効果

$$\gamma_{Flow} \approx 2\gamma_{Island}$$

$$\left(E_{Flow} \propto E_{Island}^2 \right)$$

モード数を多く取る
→エネルギー流入増加

ポロイダル流のイオン粘性への依存性

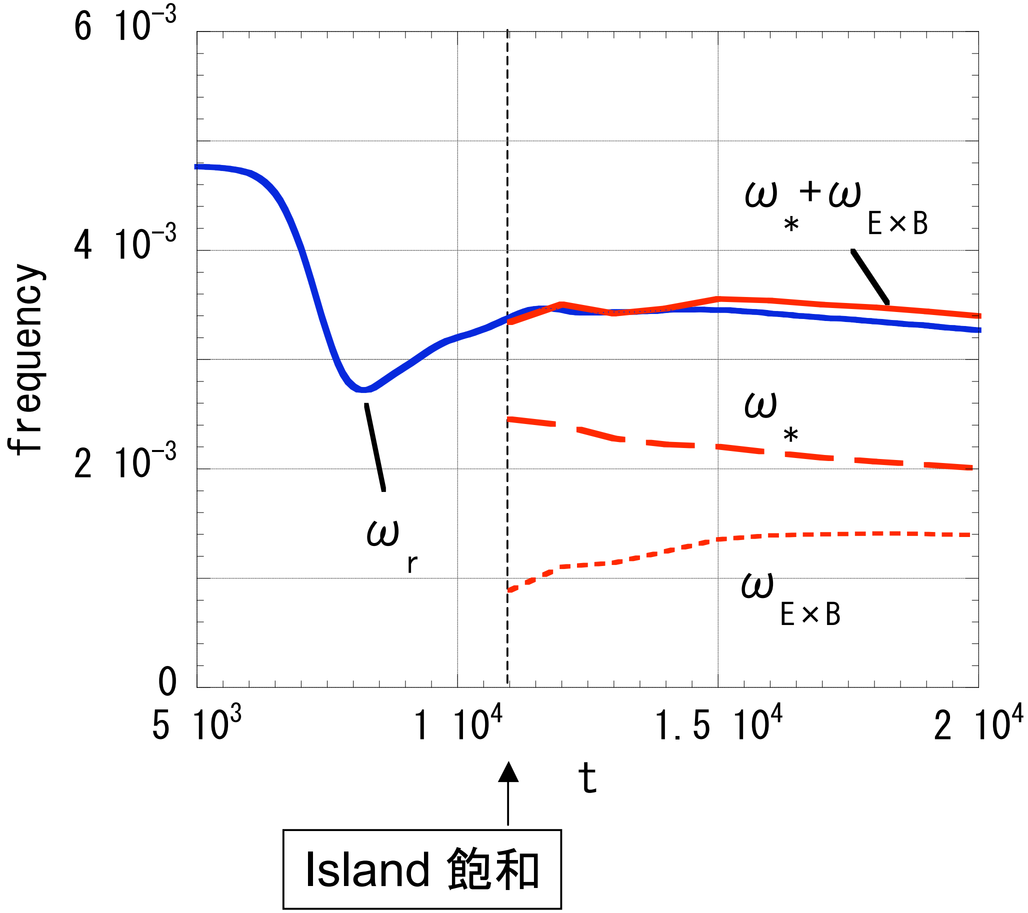


$$\frac{1}{2}\frac{\partial}{\partial t}\left\langle\left|\nabla_\perp \tilde{\phi}_{0,0}\right|^2\right\rangle = \left\langle \tilde{\phi}_{0,0}\left[\tilde{\phi}, \nabla_\perp^2 \tilde{\phi}\right]_{0,0}\right\rangle + \left\langle \tilde{\phi}_{0,0}\left[\tilde{A}, \tilde{j}_{//}\right]_{0,0}\right\rangle - \underline{\mu\left\langle \tilde{\phi}_{0,0}\nabla_\perp^4 \tilde{\phi}_{0,0}\right\rangle}$$

- ポロイダル流
  強い依存性
- ポテンシャルの揺動成分
  比例関係

※ 飽和するケースは最大値をプロット

回転周波数の時間発展



E×Bドリフト:

$$\omega_{E\times B} = -\delta k_{\perp}\left\langle \tilde{\phi}_{0,0} \right\rangle$$

反磁性ドリフト:

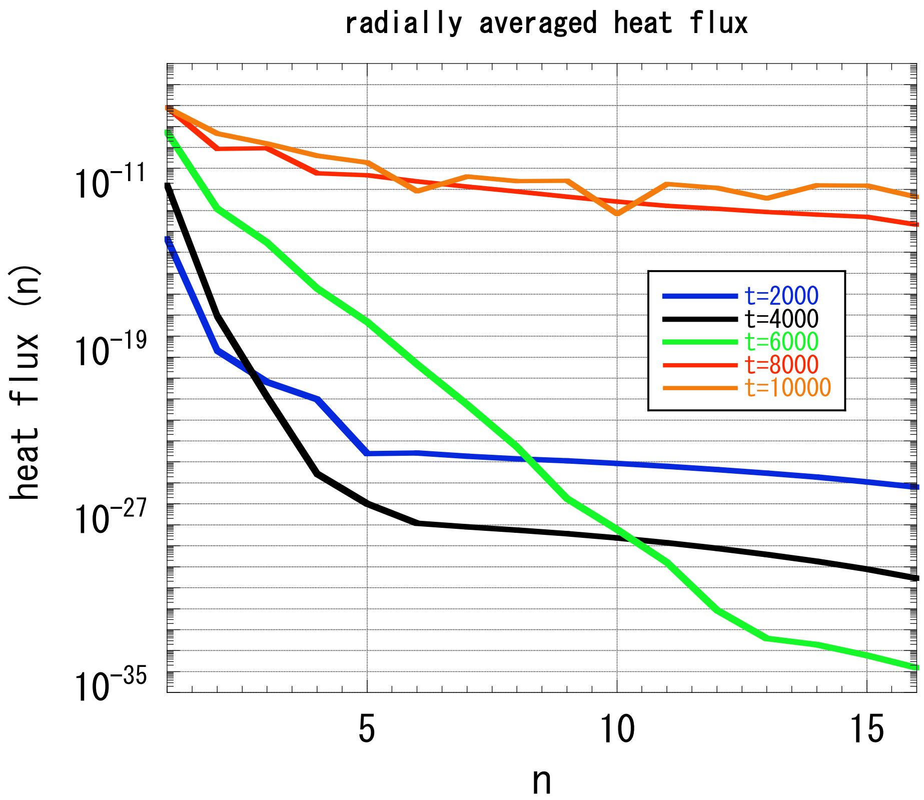
$$\omega_{*} = -\delta k_{\perp}\left\langle n_0' + 1.71 T_0' \right\rangle$$

おおよそ

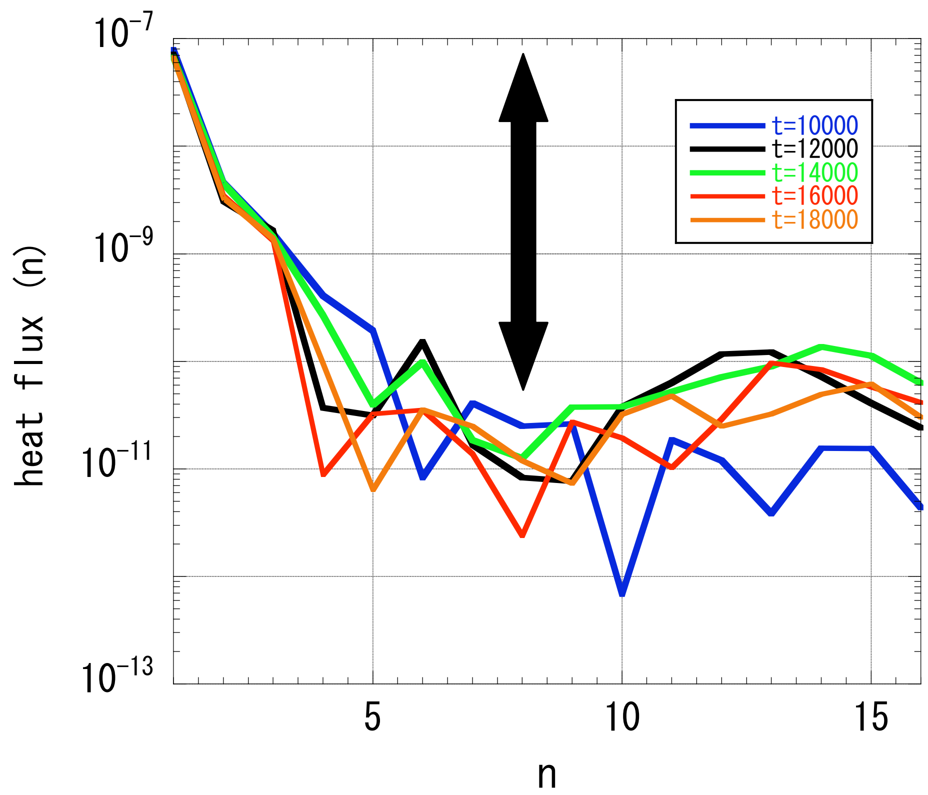
$$\omega_r \approx \omega_{E\times B} + \omega_*$$

各時刻における波数ごとの熱流束

t=2000-10000



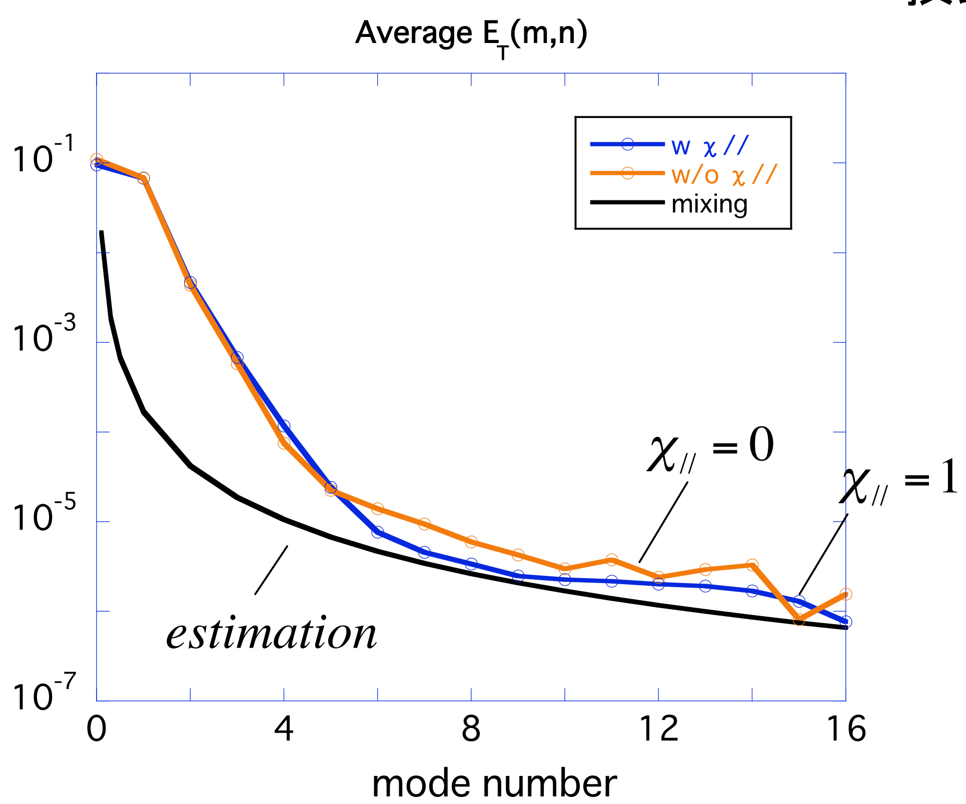
t=10000-18000



$$\Gamma_{heat} = \sum_{n} \left\langle \tilde{T} \cdot \left(\tilde{v}_{E\times B} \right)_r \right\rangle_n$$

それぞれ成分の径方向の平均値についての絶対値をプロット。

摂動温度の飽和レベル



摂動温度エネルギーの概算

Mixing length:

$$\frac{\tilde{T}}{T_0} \approx \frac{1}{k_\perp L_T}$$

$$k_\perp \approx k_\theta = \frac{m}{r_s}$$

$$E_T = \frac{3}{4}\left|\tilde{T}\right|^2 \approx \frac{3}{4}\left(\frac{\beta r_s}{\varepsilon}\right)^2 m^{-2}$$

安定なドリフト波であるが、不安定なドリフト波と同じ程度の値まで成長して飽和する。

結論

- 簡約2流体モデル　ドリフト-テアリングモードの非線形シミュレーション
- ポロイダル流（E×B）の生成

  磁場エネルギーの流入　飽和エネルギーの強いイオン粘性依存（流れ場の緩い径分布と関連（示唆））
- 回転周波数

  反磁性ドリフトとE×Bドリフトの和と良い一致
- 熱流束

  熱流は低モード数（磁気島）が支配
- ドリフト波の飽和レベル

  混合長理論と良い一致（成長率は負にも関わらず）

今後の研究（短期的）　他の輸送係数への依存性

（長期的）　インターチェンジやバルーニング乱流との共存