

非対称磁気リコネクションの 大規模磁気流体計算

愛媛大 宇宙進化研究センター

近藤 光志

contents

- 2D非対称磁気リコネクション

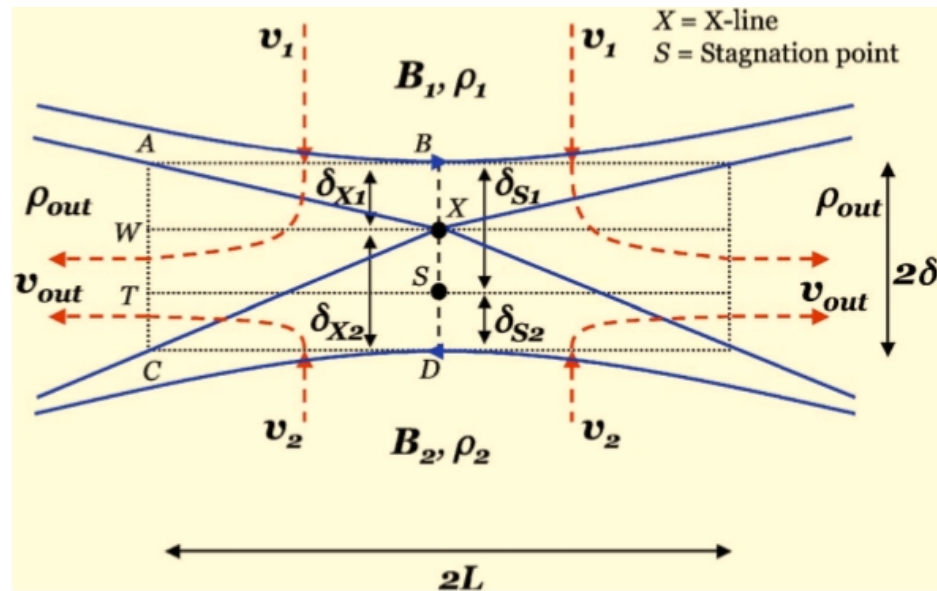
- 磁気拡散領域内のX(リコネクション)点とS(スタグネーション)点の振る舞い

- X点・S点の分離と分離後の振る舞い

- プラズマの加速

- リコネクションジェット

- 新しい加速域？



Cassak&Shay 2007

拡散領域内の構造

・先行研究

“Scaling of asymmetric reconnection: General theory and collisional simulations”

Cassak&Shay 2007

- ・Sweet-Parkerタイプの非対称リコネクション
- ・定常状態におけるmass, magnetic fluxとenergy fluxの流入&流出量の関係を解析的に解く
- ・拡散領域内部構造を調べる

magnetic flux

$$v_1 B_1 = v_2 B_2$$

energy balance

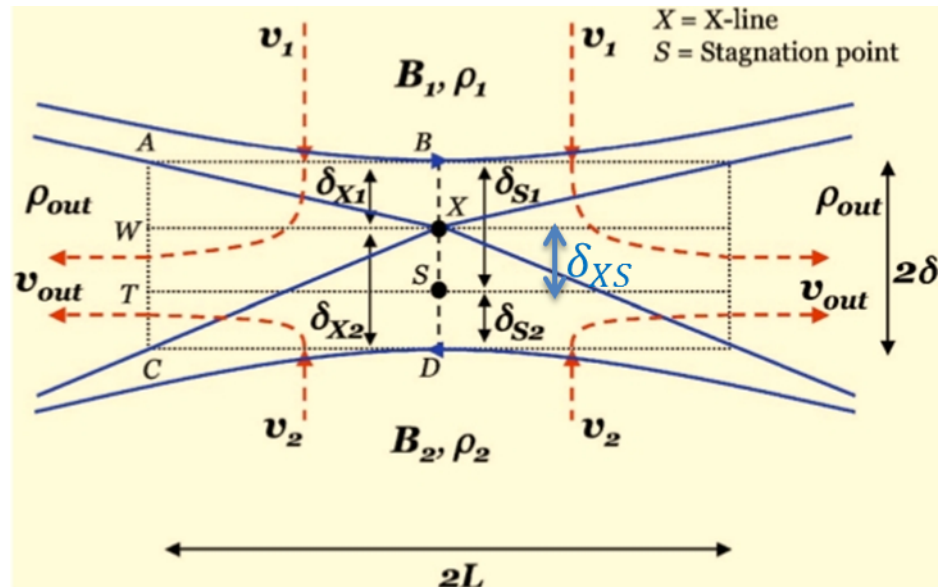
$$L \left(\frac{B_1^2}{8\pi} v_1 \right) \sim \delta_{X1} \left(\frac{1}{2} \rho_{out} v_{out}^2 \right) v_{out}$$

$$L \left(\frac{B_2^2}{8\pi} v_2 \right) \sim \delta_{X2} \left(\frac{1}{2} \rho_{out} v_{out}^2 \right) v_{out}$$

mass conservation

$$L(\rho_1 v_1) \sim \delta_{S1} (\rho_{out} v_{out})$$

$$L(\rho_2 v_2) \sim \delta_{S2} (\rho_{out} v_{out})$$



$$\frac{\delta_{X2}}{\delta_{X1}} \sim \frac{B_2}{B_1}, \quad \frac{\delta_{S2}}{\delta_{S1}} \sim \frac{\rho_2 B_1}{\rho_1 B_2}$$

X点とS点の分離

X点は弱磁場側へ、
S点はρ/Bの小さい側へ

$$\frac{\delta_{XS}}{\delta_{X1}} \sim \frac{\rho_1 B_2 - \rho_{out} B_1}{\rho_{out} B_1}$$

基礎方程式と初期条件

$$\frac{D\rho}{Dt} = -\rho \nabla \cdot \mathbf{u}$$

$$\rho \frac{D\mathbf{u}}{Dt} = -\nabla P + \mathbf{J} \times \mathbf{B}$$

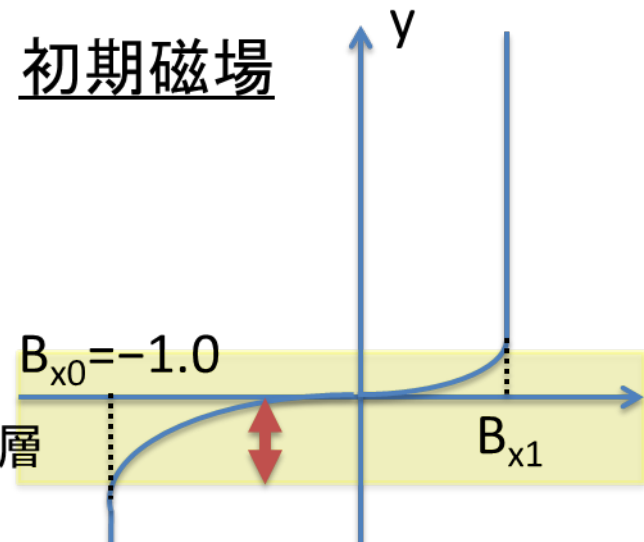
$$\rho \frac{De}{Dt} = -P \nabla \cdot \mathbf{u} + \eta \mathbf{J}^2$$

$$\mathbf{J} = \nabla \times \frac{\mathbf{B}}{\mu_0}, \nabla \cdot \mathbf{B} = 0$$

$$\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} - \nabla \times (\mathbf{u} \times \mathbf{B}) = -\nabla \times (\eta \mathbf{J})$$

$$\frac{D}{Dt} \equiv \frac{\partial}{\partial t} + \mathbf{u} \cdot \nabla$$

ρ : プラズマ密度
 \mathbf{u} : プラズマ流速
 P : プラズマ圧
 \mathbf{J} : 電流密度
 \mathbf{B} : 磁場
 e : 単位体積あたりの内部エネルギー
 η : 抵抗率
 μ_0 : 真空の誘電率



非対称度
 ロープ磁場強度比
 $k = \frac{B_{x0}}{B_{x1}}$

圧力

$$P = (B_{x0}^2 - B_x^2) + \beta_0$$

密度

$$\rho = \frac{P}{1 + \beta_0} \quad (\text{温度一定})$$

下側ローブ領域 $\beta_0 = 0.2$

シミュレーション領域の設定

X方向に固定した異常抵抗モデル

$$t < 4.0$$

$$\eta(\mathbf{r}) = \eta_0 \exp \left[- \left(\frac{x}{k_x} \right)^2 - \left(\frac{y}{k_y} \right)^2 \right]$$

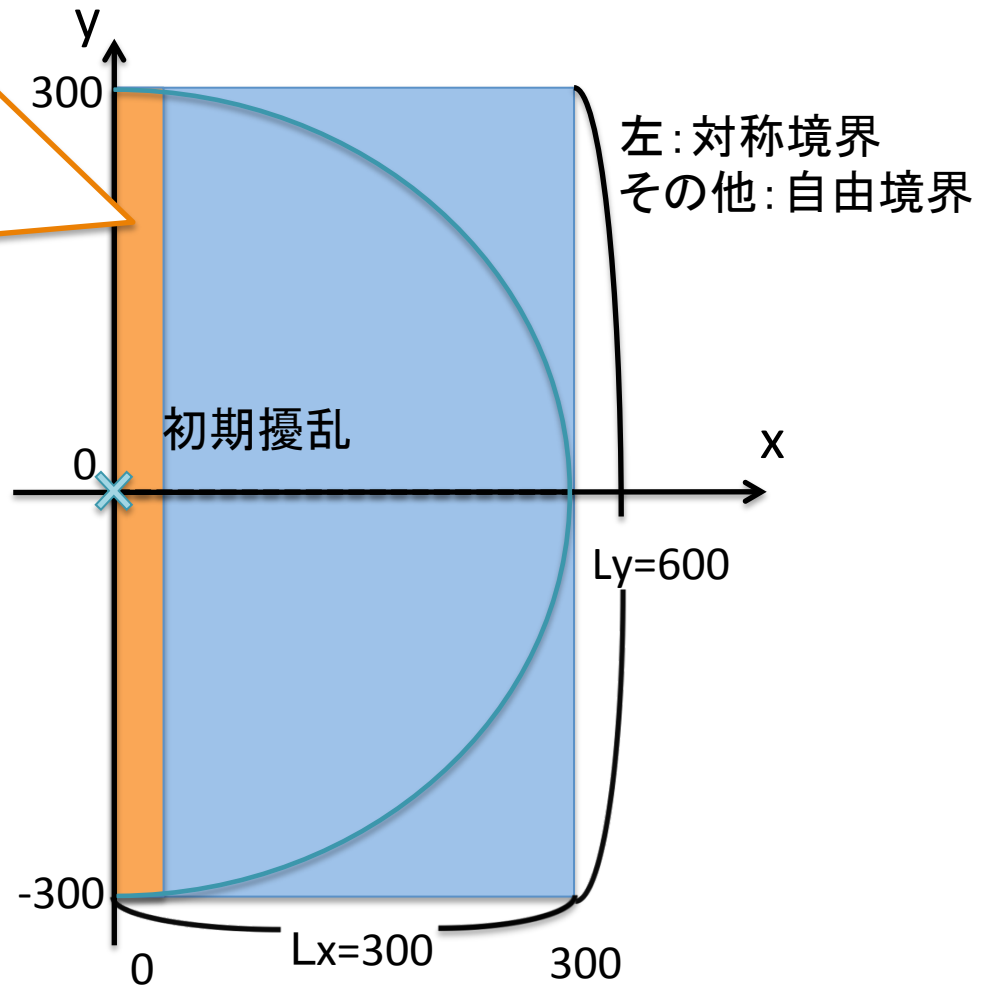
$\eta_0 = 0.04, k_x = k_y = 0.8$

$$t \geq 4.0$$

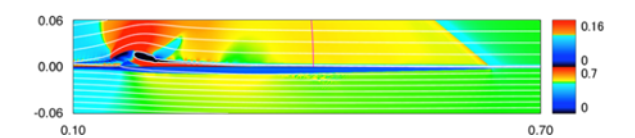
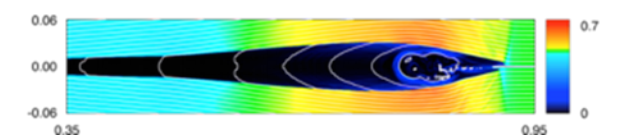
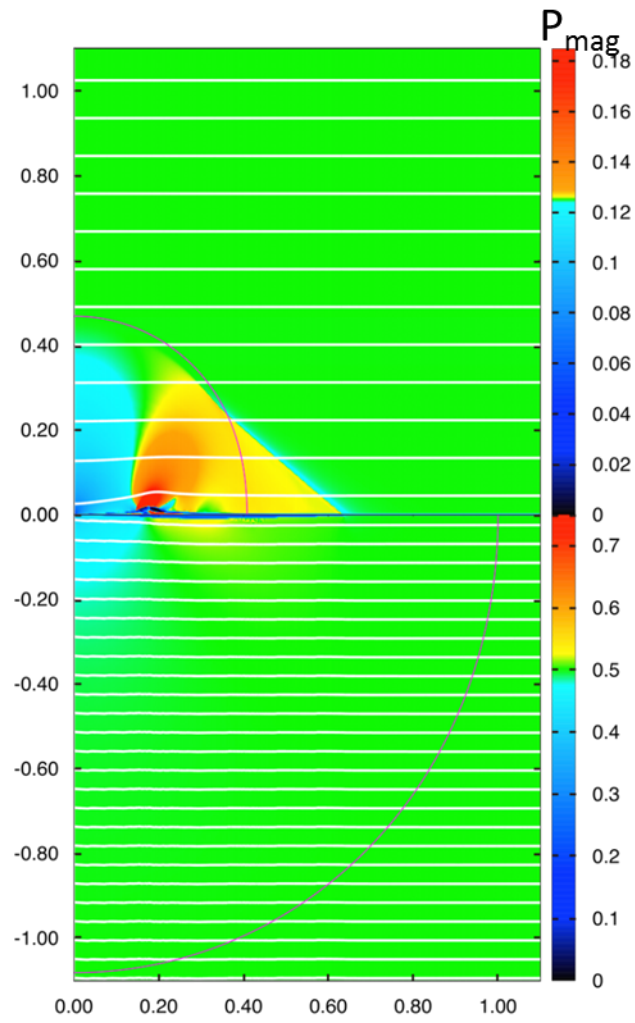
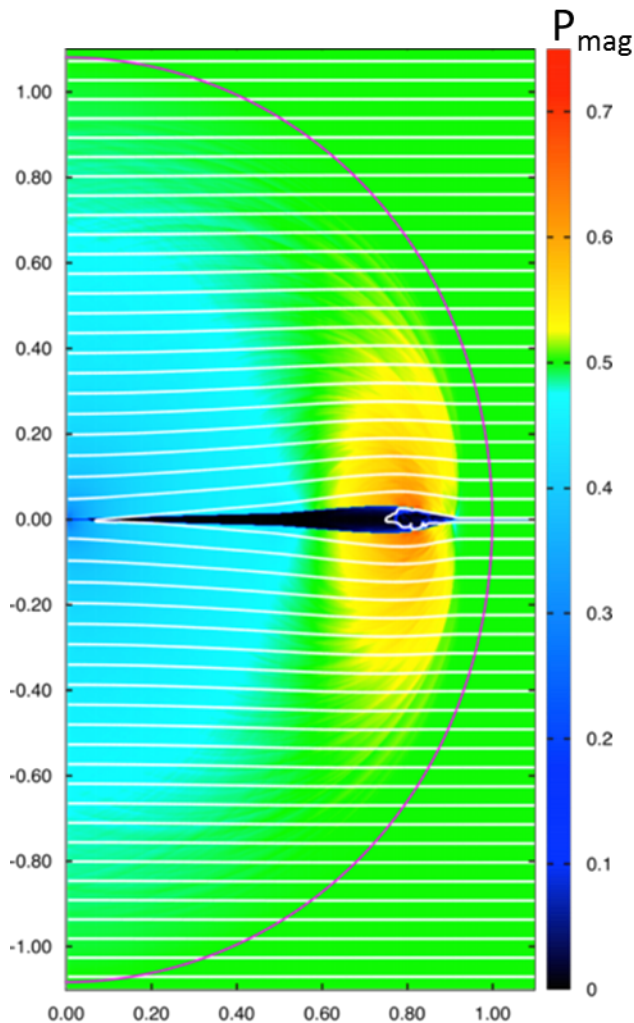
$$\eta_D(0, y, t) = \begin{cases} k_d [V_d(0, y, t) - V_c] & (V_d \geq V_c) \\ 0.0 & (V_d < V_c) \end{cases}$$

$$k_d = 0.002, V_c = 4.0, V_d(0, y, t) = \left| \frac{J(0, y, t)}{\rho(0, y, t)} \right|$$

$$\eta(\mathbf{r}) = \eta_D(0, y, t) \exp \left\{ - \left(\frac{x}{k_x} \right)^2 \right\}$$



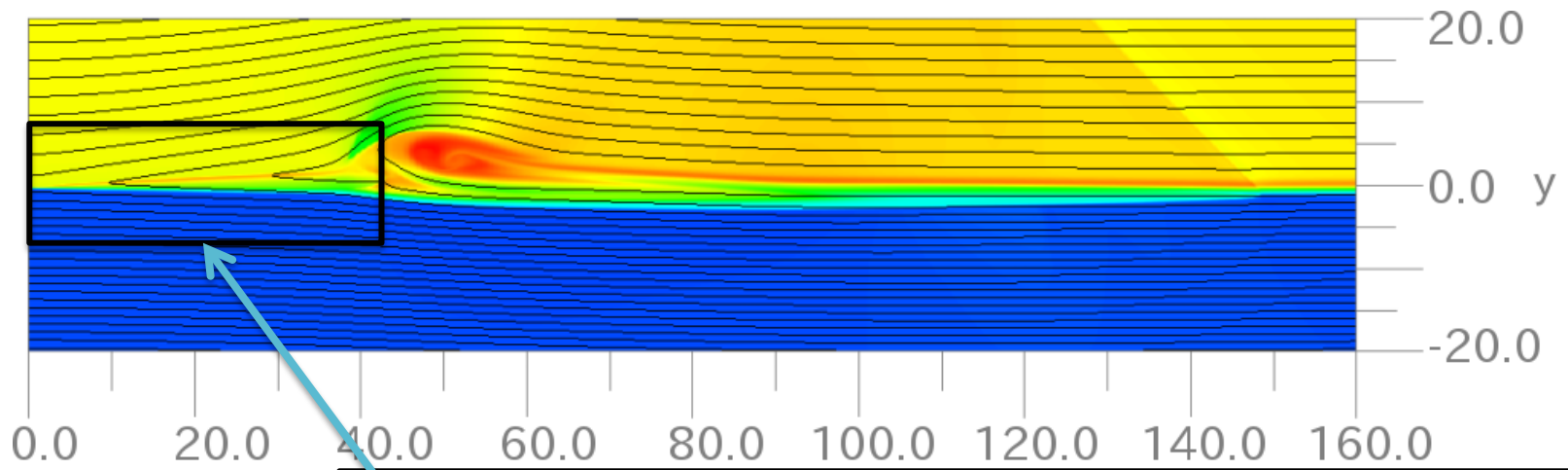
シミュレーション結果



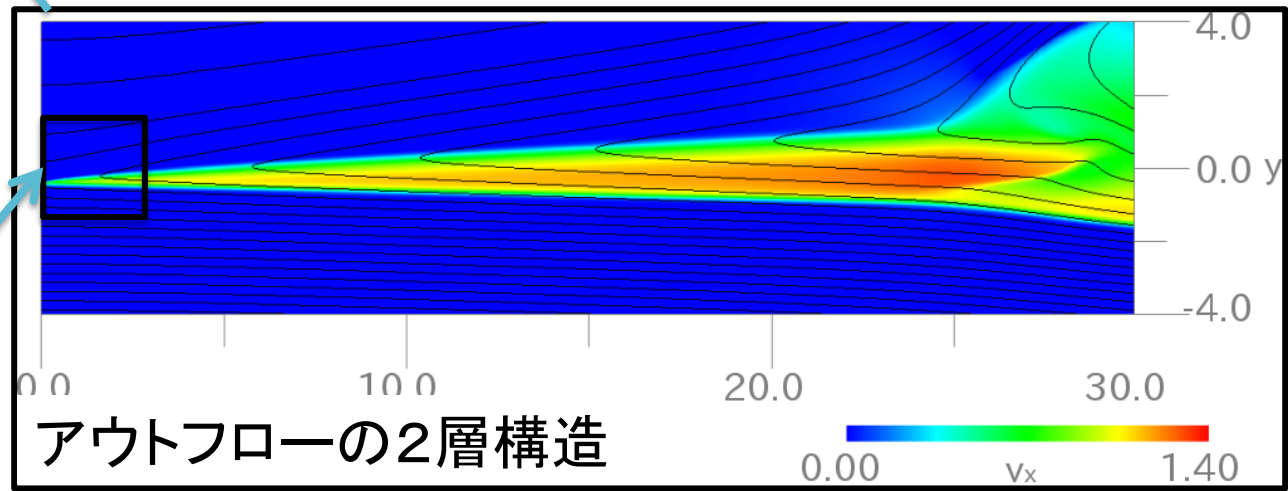
大規模:
FRWF (fast-mode rarefaction wave front)が外側境界に達する前に準定常に落ち着く程度まで計算領域を確保

シミュレーション結果 (k=2.0)

全体構造に関して



拡散領域付近を
拡大

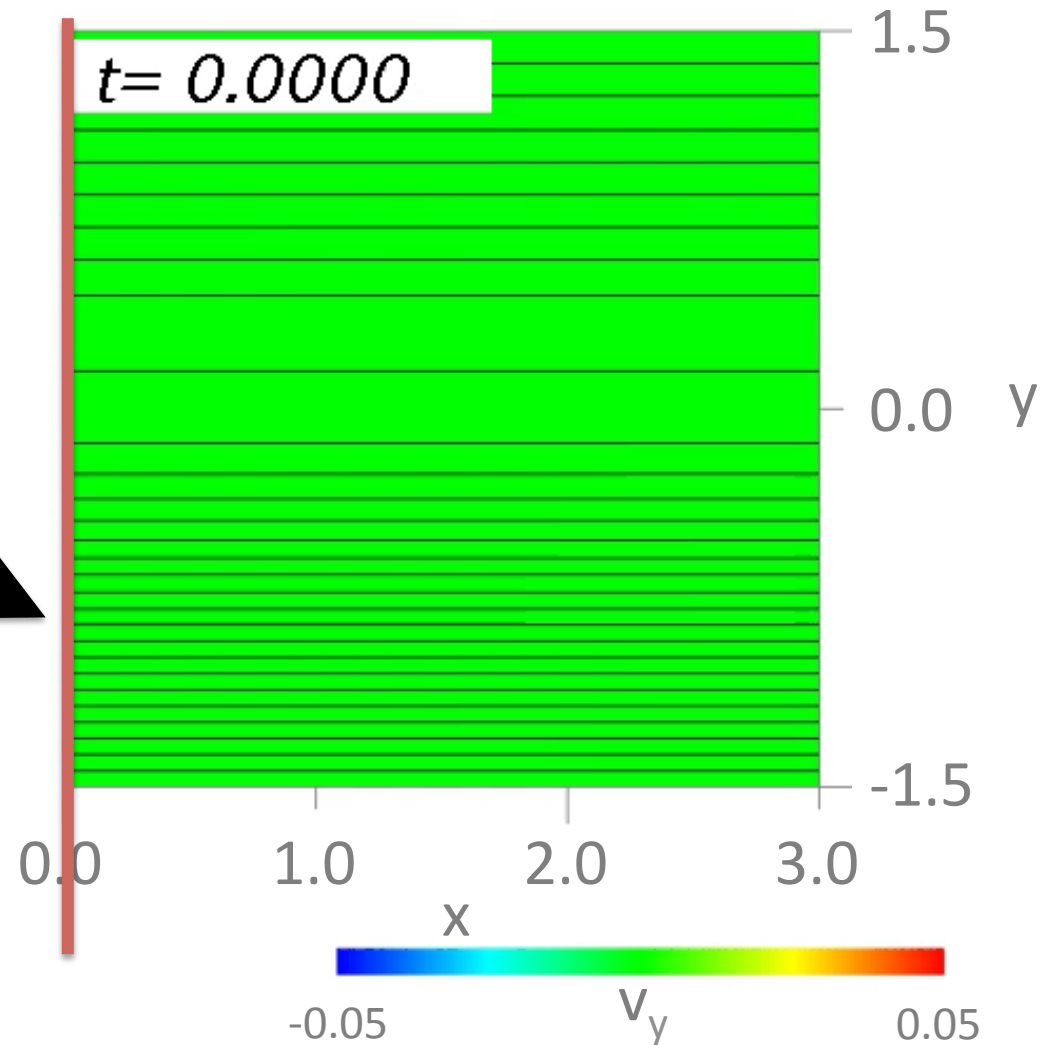


アウトフローの2層構造

シミュレーション結果(k=2.0)

拡散領域内部の構造

y軸上の
プロファイル



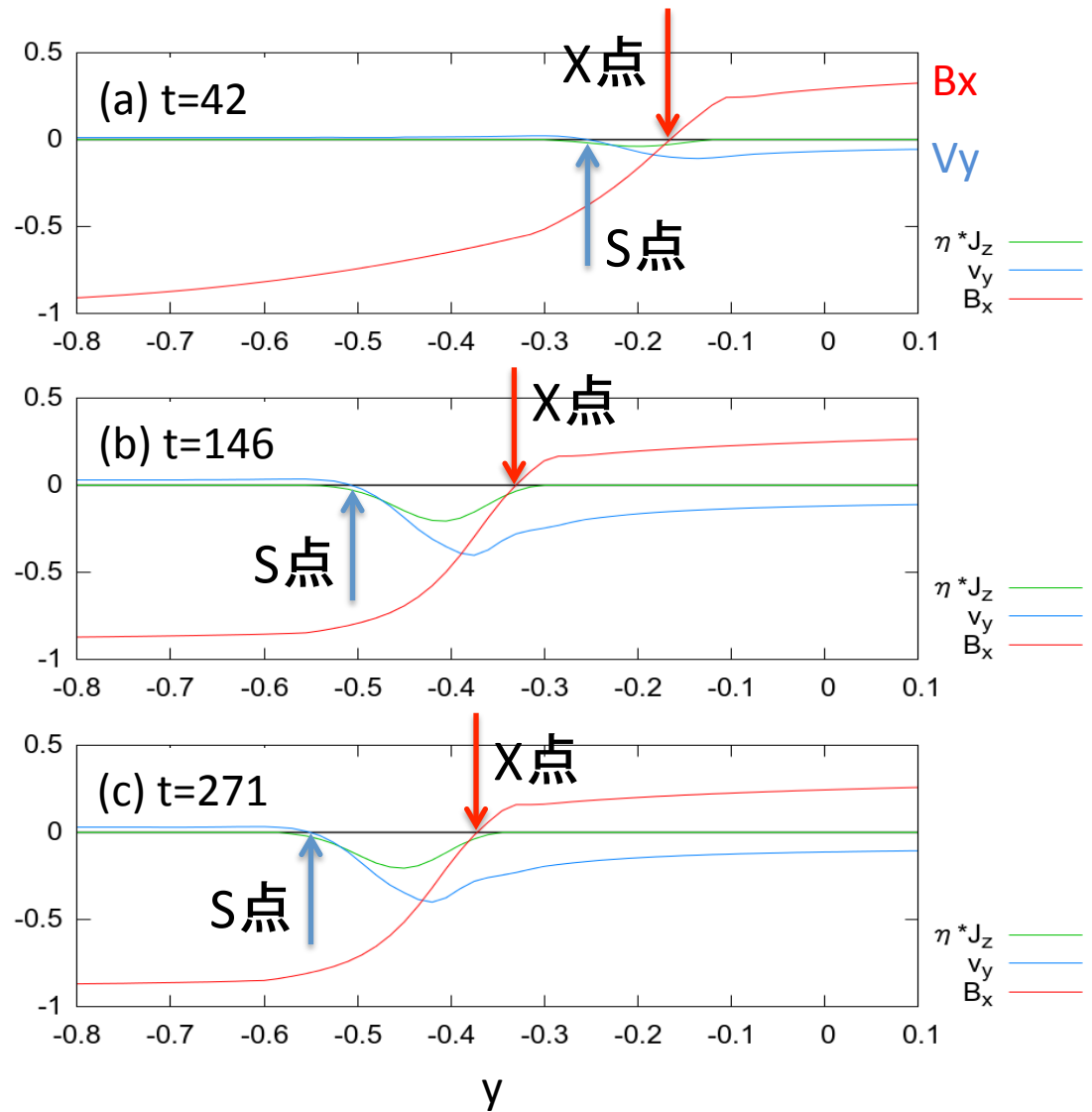
シミュレーション結果(k=2.0)

拡散領域内部の構造

ηJ ; リコネクション電場

v_y ; プラズマ速度のy方向成分

B_x ; 磁場のx成分



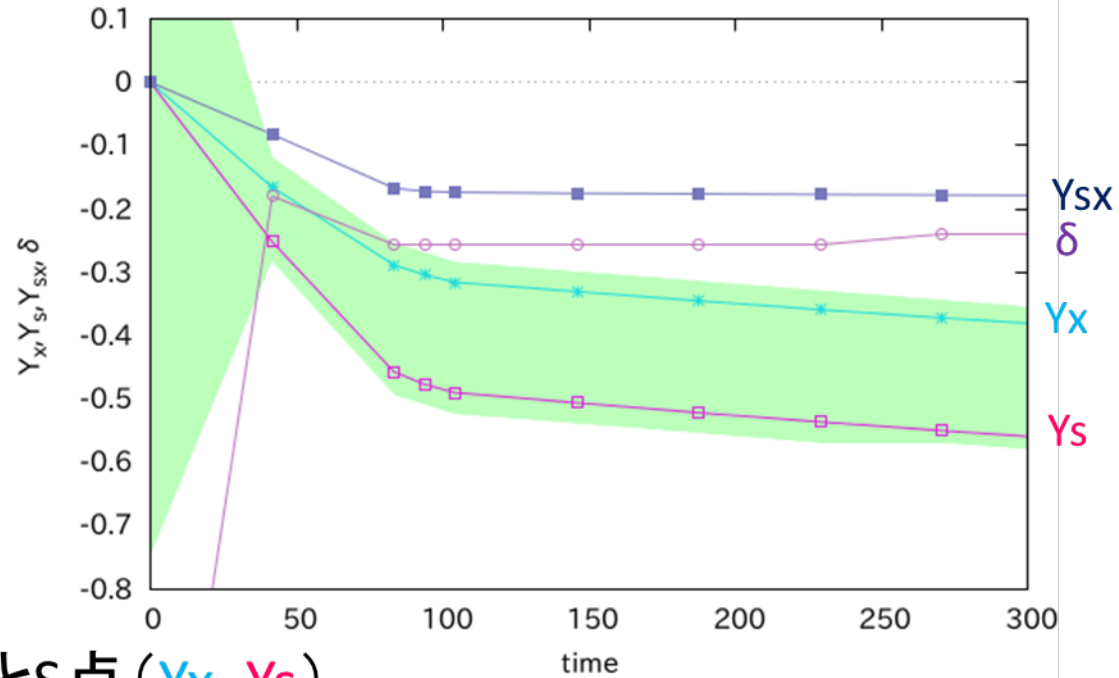
シミュレーション結果(k=2.0)

X点とS点の位置(Y_x, Y_s)の時間変化

Y_x, Y_s ; シミュレーション座標系でのX点とS点の位置

Y_{sx} ; X点とS点間の距離

δ ; 拡散領域厚み
網掛け; 拡散領域

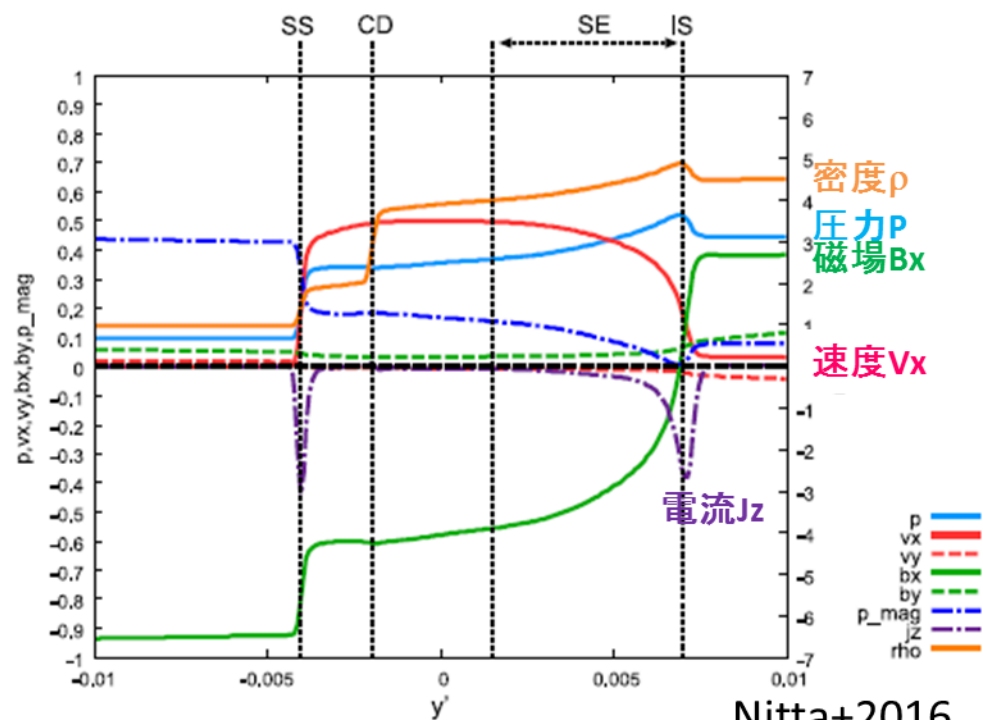
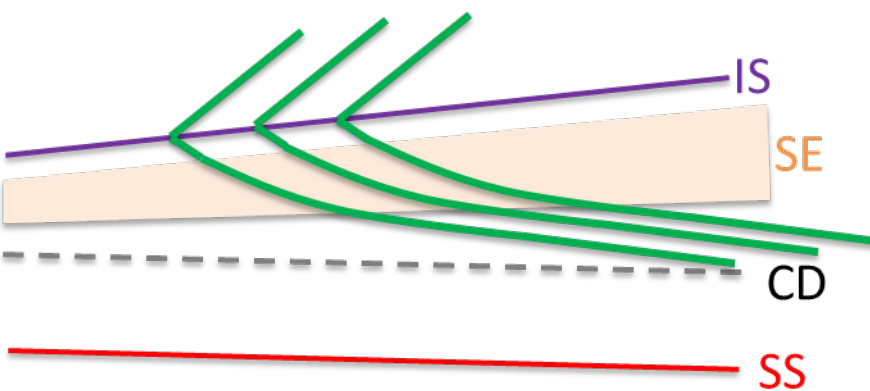
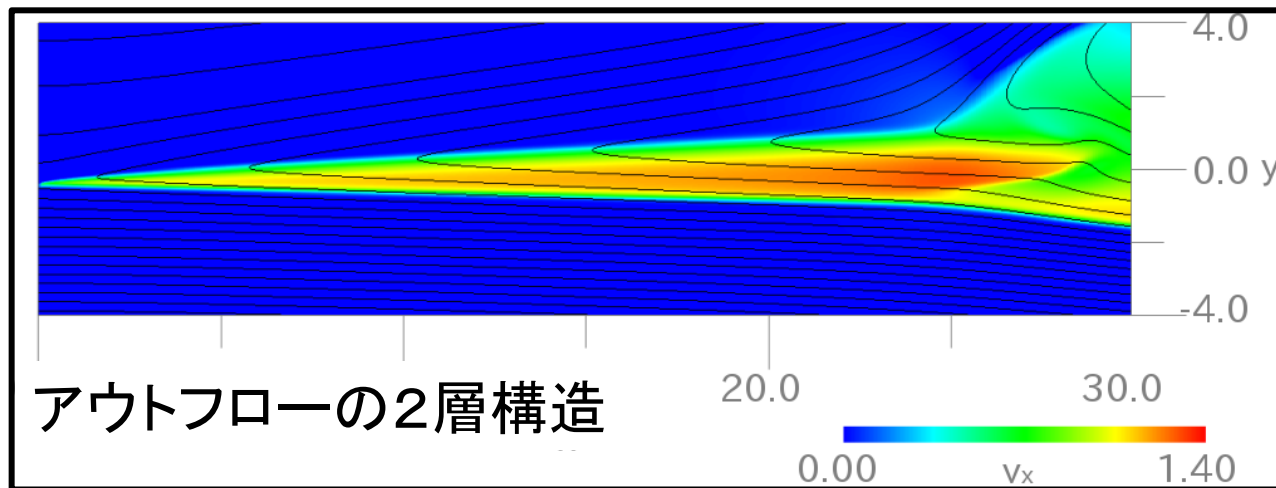


- X点とS点 (Y_x, Y_s)
下降しながら分離
- X点とS点間距離 (Y_{sx})と拡散領域の厚み(δ)
一定に

contents

- 2D非対称磁気リコネクション
 - 磁気拡散領域内のX(リコネクション)点とS(スタグネーション)点の振る舞い
 - X点・S点の分離と分離後の振る舞い
 - 両点の距離が広がりながら下降
 - 拡散領域厚みの一定化に伴い、両点の距離も一定化
 - プラズマの加速
 - リコネクションジェット
 - 新しい加速域？

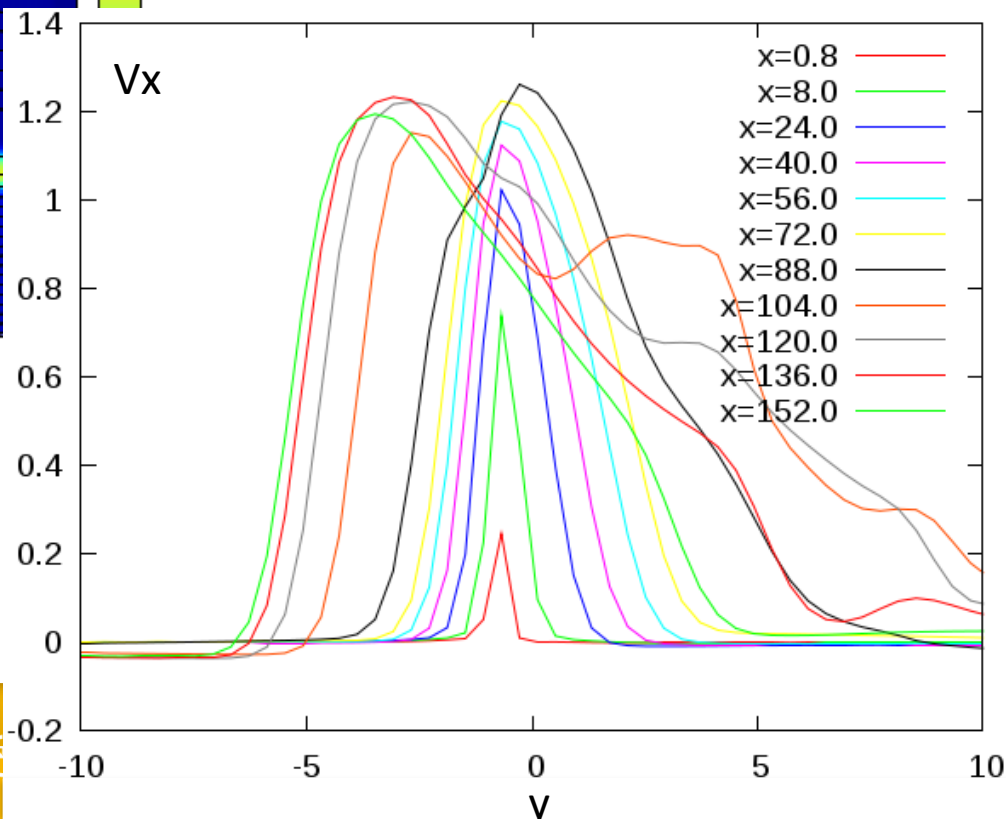
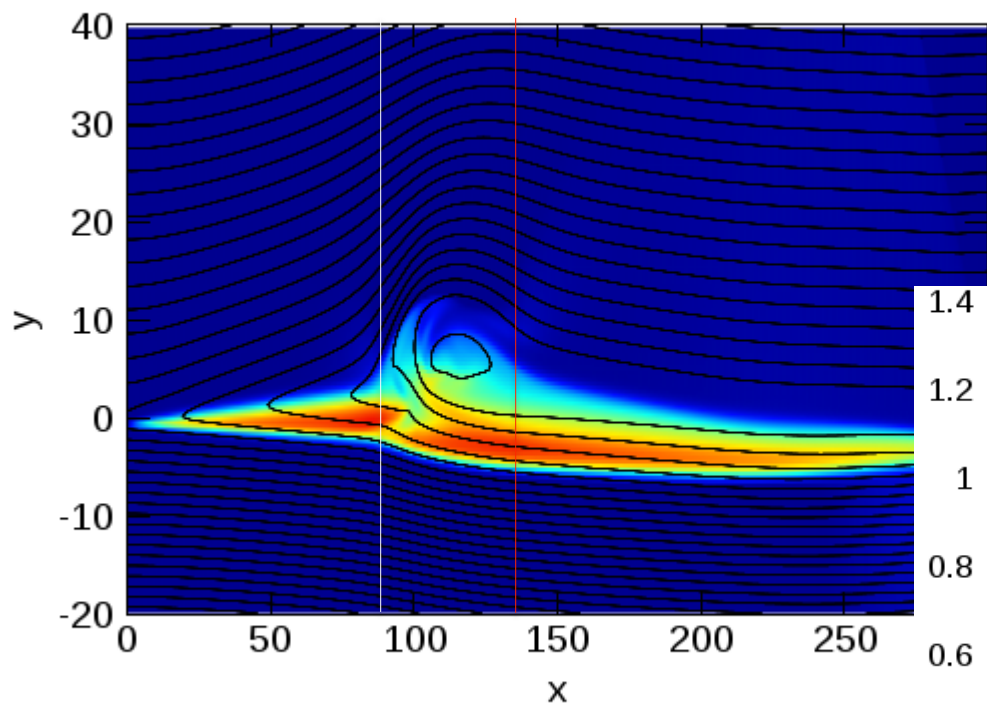
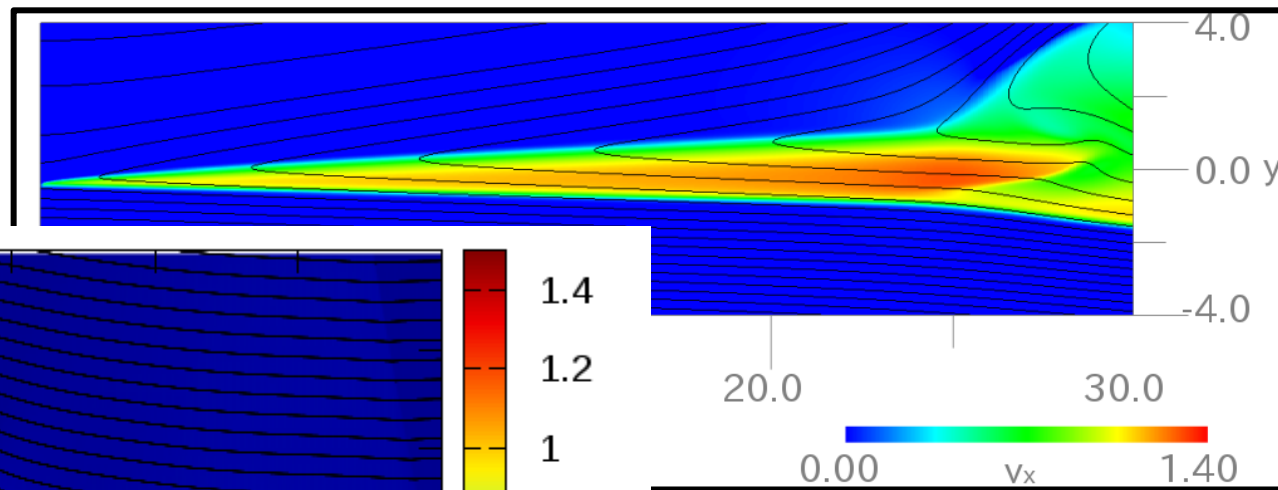
リコネクションジェット領域



Nitta+2016

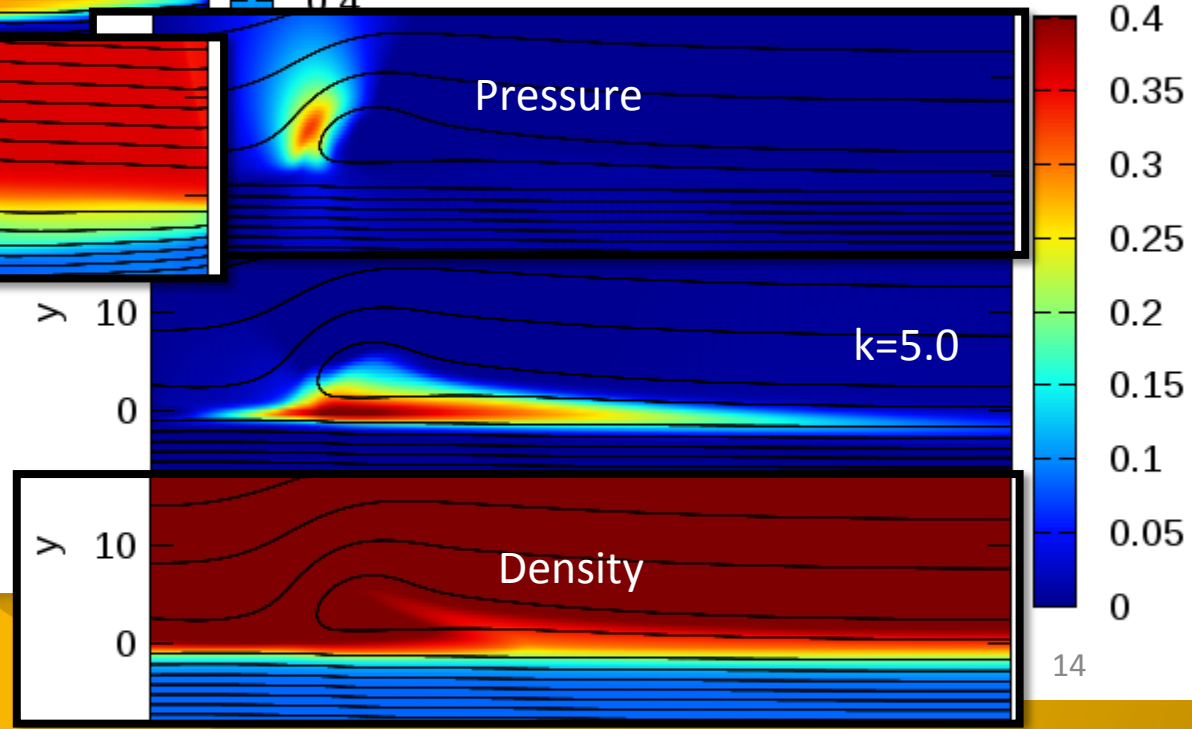
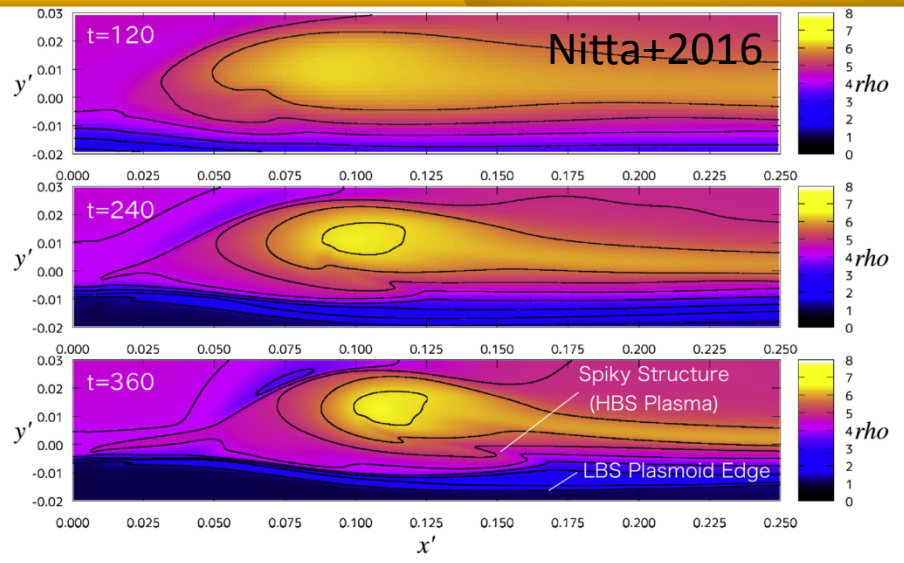
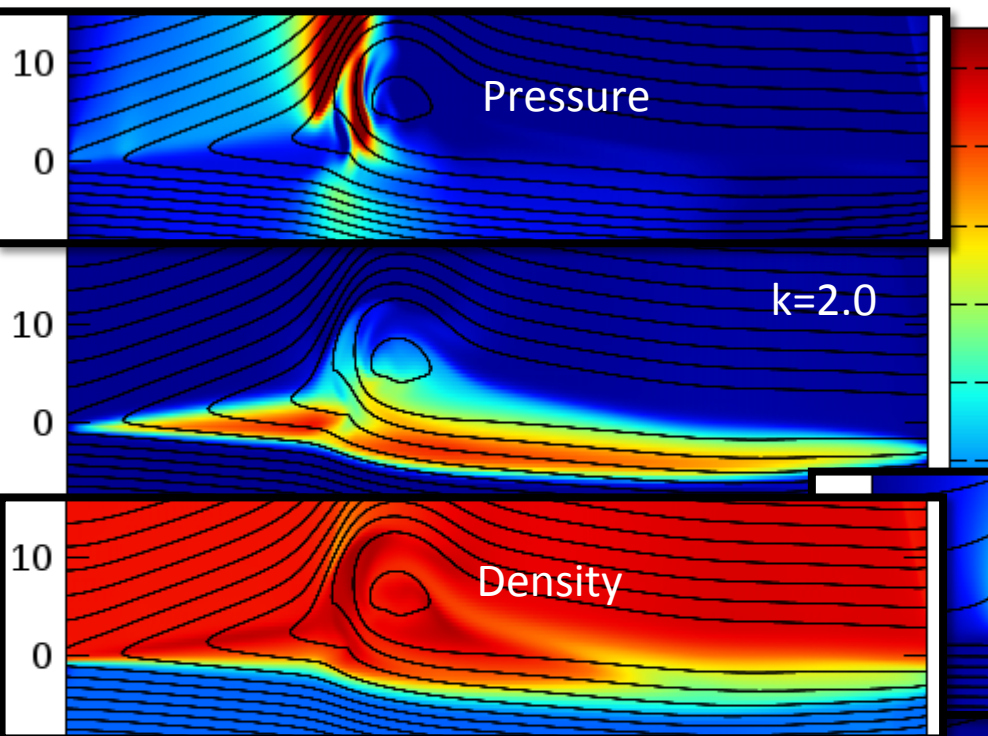
シミュレーション結果(k=2.0)

計算領域全体のVx



シミュレーション結果(k=2.0, 5.0)

計算領域全体のVx



まとめ

- 2D非対称磁気リコネクション
 - 磁気拡散領域内のX(リコネクション)点とS(スタグネーション)点の振る舞い
 - X点・S点の分離と分離後の振る舞い
 - 両点の距離が広がりながら下降
 - 拡散領域厚みの一定化に伴い、両点の距離も一定化
 - プラズマの加速
 - リコネクションジェット
 - 新しい加速域
 - 接触不連続面のHBSプラズマのLBSプラズマ領域への浸入
 - プラズマ圧力勾配によるHBSプラズマの加速
 - » テスト粒子でチェック

シミュレーション結果 (k=2.0, 5.0)

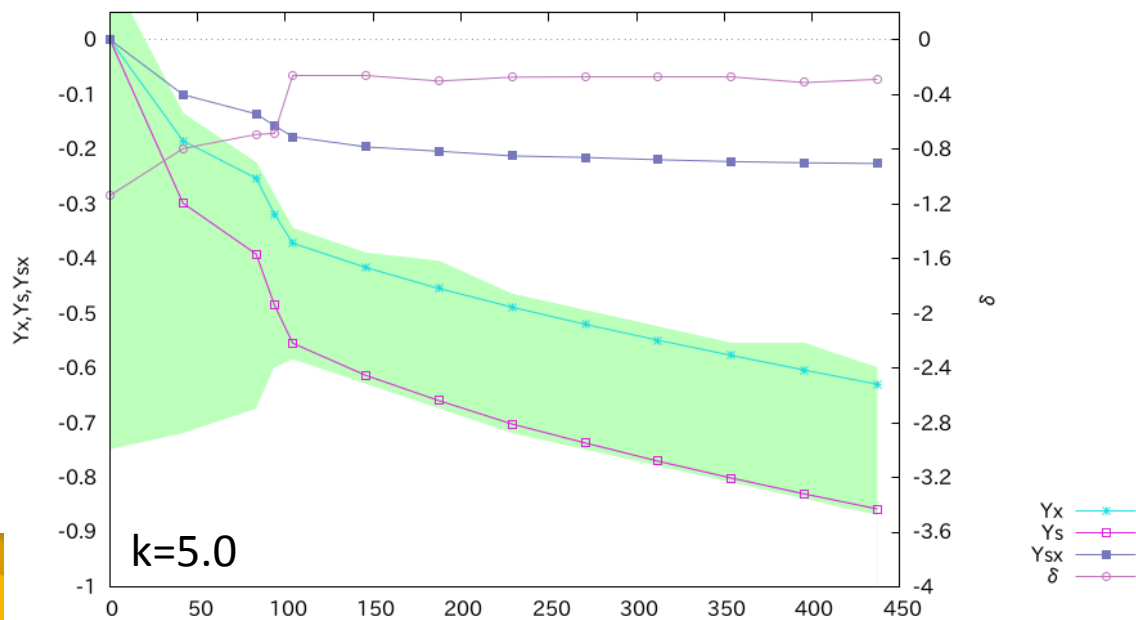
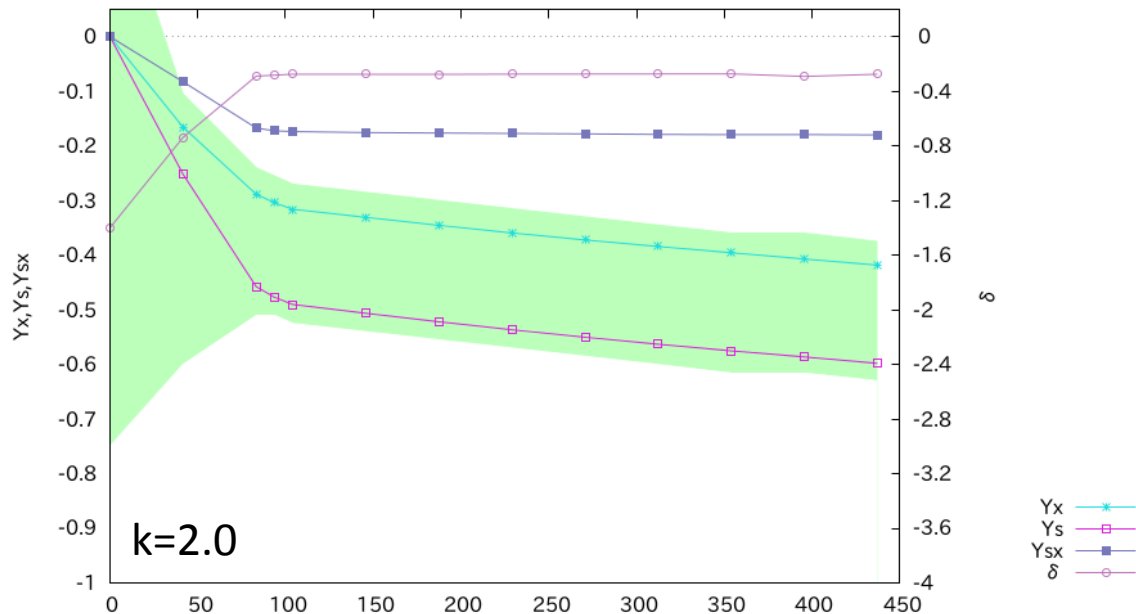
非対称度k依存

Y_x, Y_s ; シミュレーション座標系でのX点とS点の位置

Y_{sx} ; X点とS点間の距離

δ ; 拡散領域厚み

網掛け部分; 拡散領域



time

シミュレーション結果 (k=2.0)

異常抵抗閾値依存

Y_x, Y_s ; シミュレーション座標系でのX点とS点の位置

Y_{sx} ; X点とS点間の距離

δ ; 拡散領域厚み

網掛け部分; 拡散領域

