

速いリコネクションから 遅いリコネクションへの 連続遷移と構造変化

新田 伸也

(電気通信大学／国立天文台)

速いリコネクション (← 局所化した異常抵抗)

⇔ 異常抵抗の実態は未解明！

MHDシミュレーションで仮定される

$10^6 \times \text{Spitzer抵抗}$ ($\text{Rem}^* \sim 10$)は

本当に実現されるのか？



高磁気レイノルズ数 ($\text{Rem}^* \gg 10$)

でのリコネクションとは？

(← シミュレーションは困難)

解析的に調べてみよう！

何がりコネクション レイトを決めるのか？

説 1) 境界条件

外部環境が支配的

外部駆動型リコネクション

Petschek, Vasyliunas, Sato&Hayashi, Priest&Forbes, etc.

説 2) 拡散領域

システム自身が支配的

自発的リコネクション

Ugai&Tsuda, etc.

新説) アウトフロー領域

システム自身が支配的

自発的リコネクション

素過程としてのリコネクションの
理解はまだ不十分！

天体リコネクションの特徴

巨大なダイナミックレンジで拡大

例) 太陽フレア

初期：電流シート厚み $\sim 10^0$ [m]

終期：磁気ループ幅 $\sim 10^7$ [m]



- ・本質的に時間依存
- ・広大な空間での自由な自発的发展

従来のモデルでは記述できない！

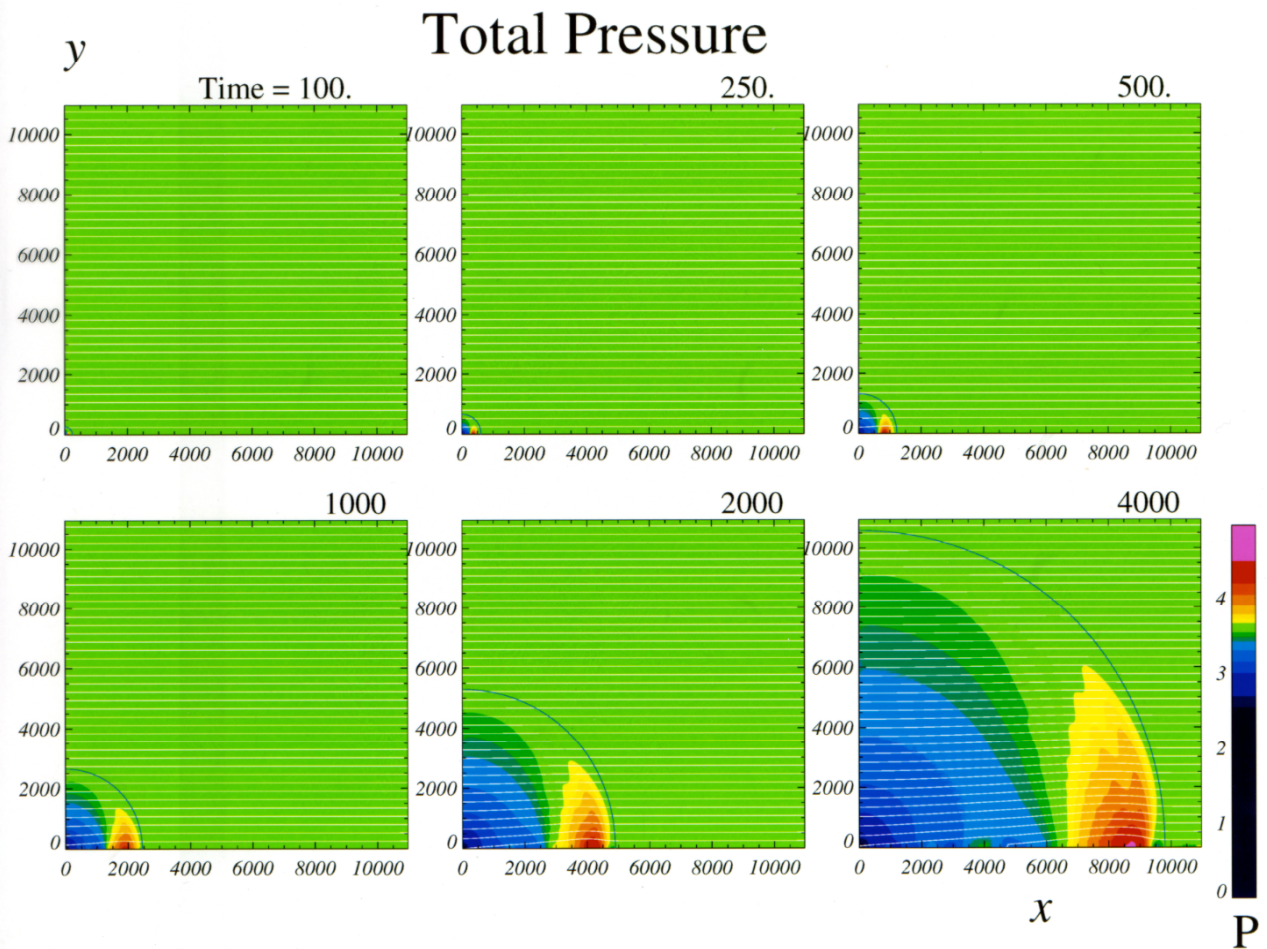
本研究の目的

天体リコネクションモデルとして
ふさわしい新しいモデルの構築



自己相似時間発展モデル

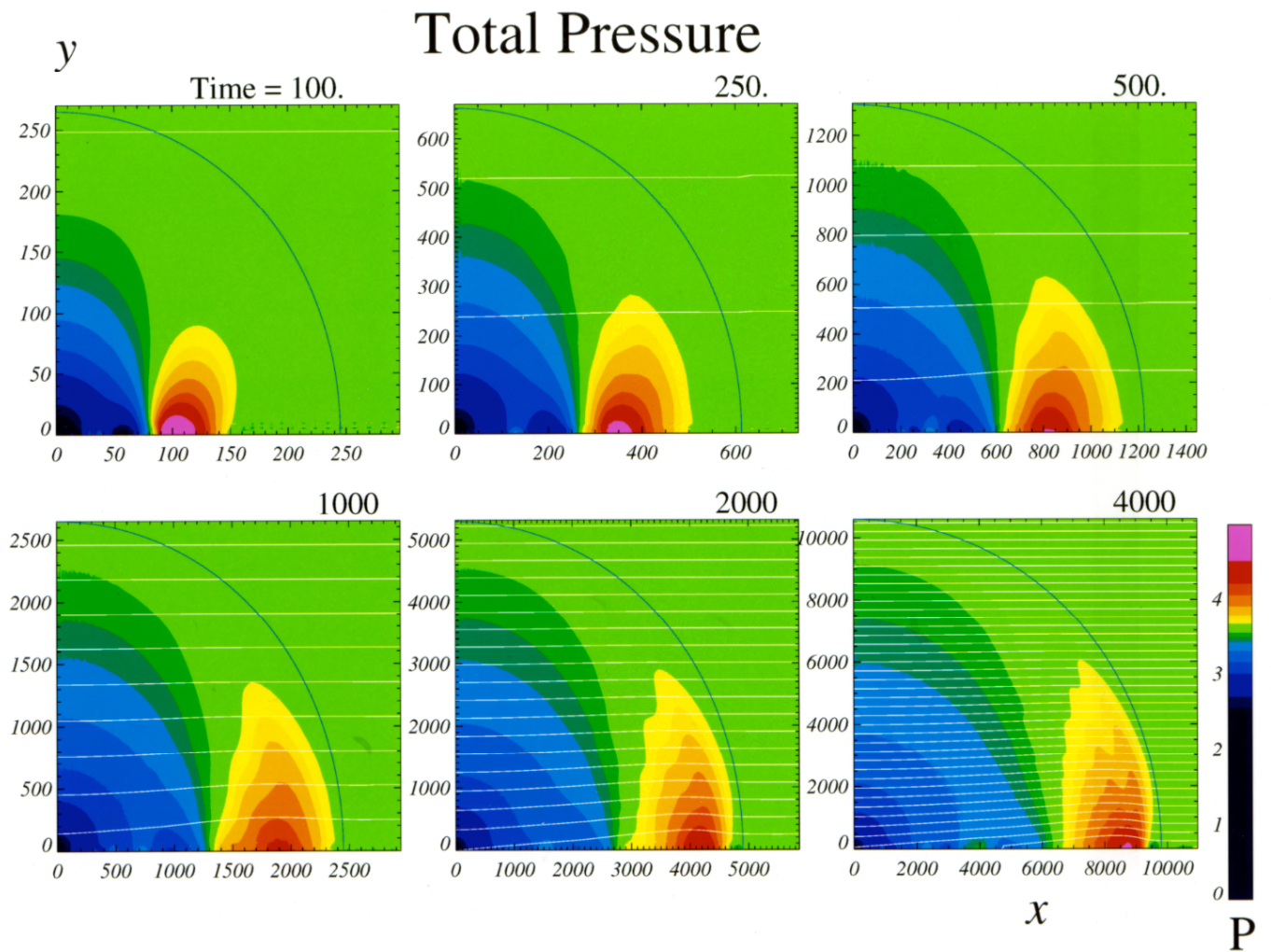
MHDシミュレーション



固定座標での時間発展

形を保って拡大しているように見える

Zoon-outしながら再プロット



相似座標での時間発展

たしかに相似座標で定常解に漸近

→ 自己相似的拡大

研究方法

天体現象の素過程としての
2D-MHDリコネクション・モデル

アウトフロー領域：衝撃波管近似
(Newton=Raphson法: Nitta 04、06a)

+

インフロー領域：Grad=Shafranov法
(SOR法: Nitta et al. 02)



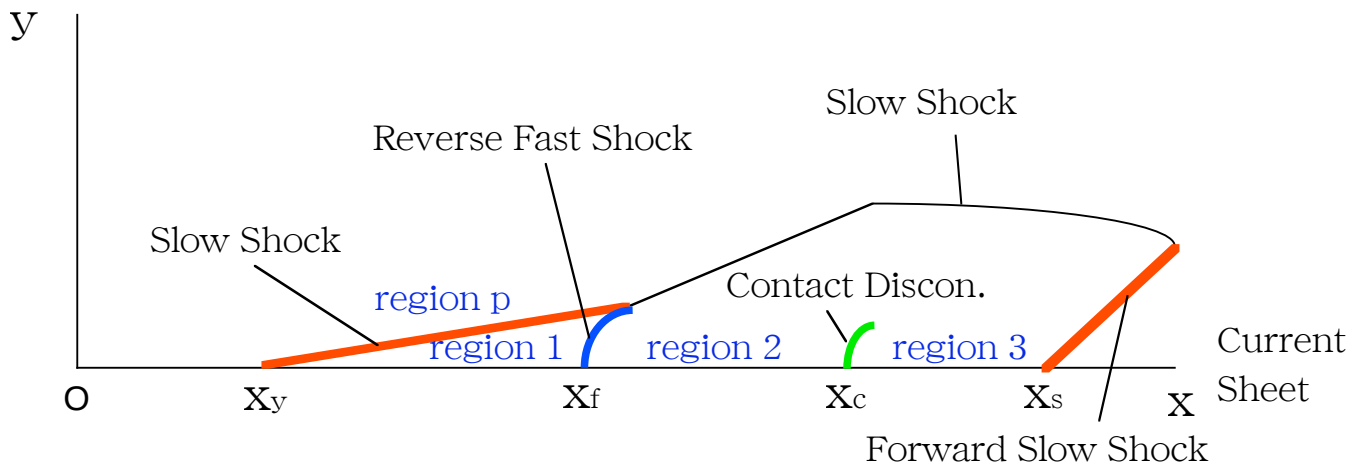
自己相似時間発展モデル

- β 値-依存性 (Nitta 04)
- 磁気Reynolds数-依存性 (Nitta 06a、今回)

$Rem^* \equiv \text{Alfven速度} / \text{磁気拡散速度}$

(注：通常の磁気レイノルズ数より 7 桁小さい)

アウトフロー領域



衝撃波管近似

各不連続を跨いでの接続条件

(2 3 個の未知量と 2 2 元非線形連立代数方程式)

→ 未知量の 1 つを手で与える



Newton=Raphson法で解く



- ・ 各不連続両側の全ての物理量
- ・ 各不連続の配置



インフロー領域(G-S方程式)の境界条件

- ・ **最大の仮定** : Petschek-type slow shockが常に存在する
- ・ **理想MHD領域**での電場 ($\mathbf{V} \times \mathbf{B}$) を求めると、**磁気拡散速度**が求まる $\Rightarrow$ **磁気レイノルズ数**

インフロー領域

(Nitta et al. 2002の方法)

線形近似でのGrad=Shafranov法

0 次：初期平衡（カレントシート）

1 次：リコネクションによる変化

+

Zoom-Out座標系でのMHD方程式系



インフロー領域の 1 次量に関する

2 階PDE(Grad=Shafranov方程式)

←アウトフロー領域との境界条件



SOR法で解く



インフロー領域の物理量

解の変遷 ($\beta=0.01$)

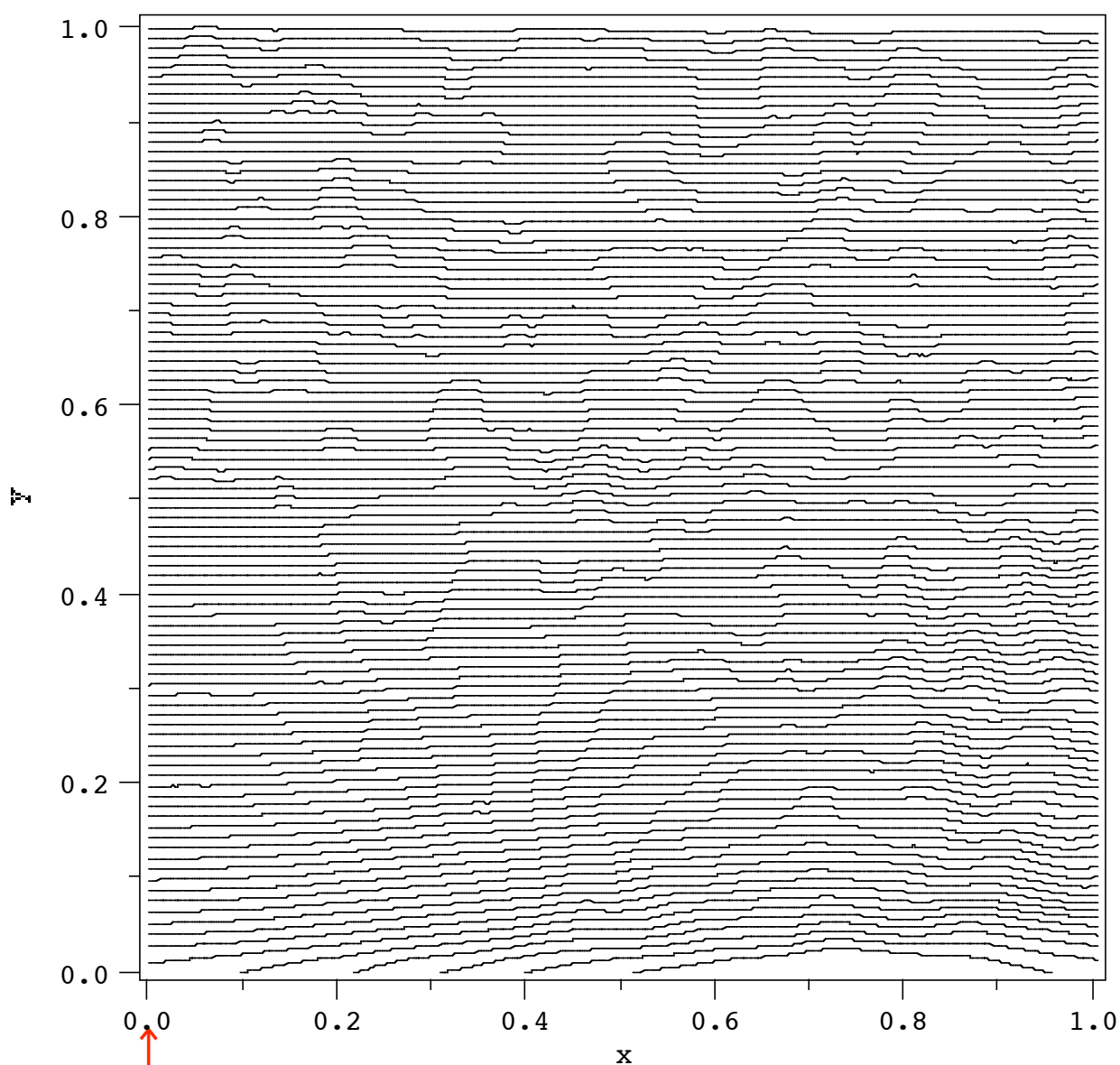
Petschek type

$\text{Rem}^*=15.63$

$\chi y=0.$

$R=0.0504$

inflow領域
の磁力線



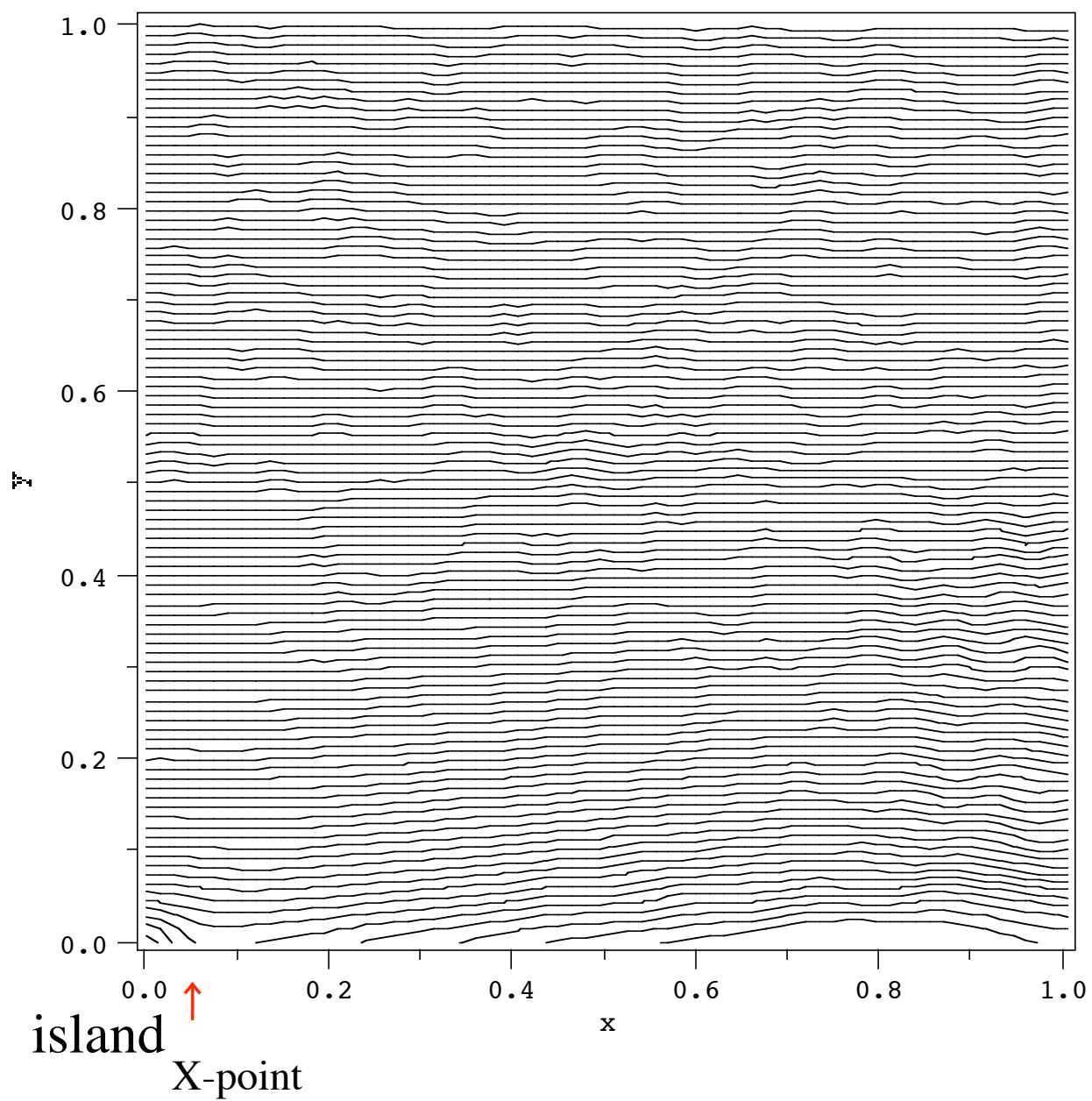
X-point

X-O-X type

$\text{Rem}^*=16.88$

$xy=0.048$

$R=0.0489$



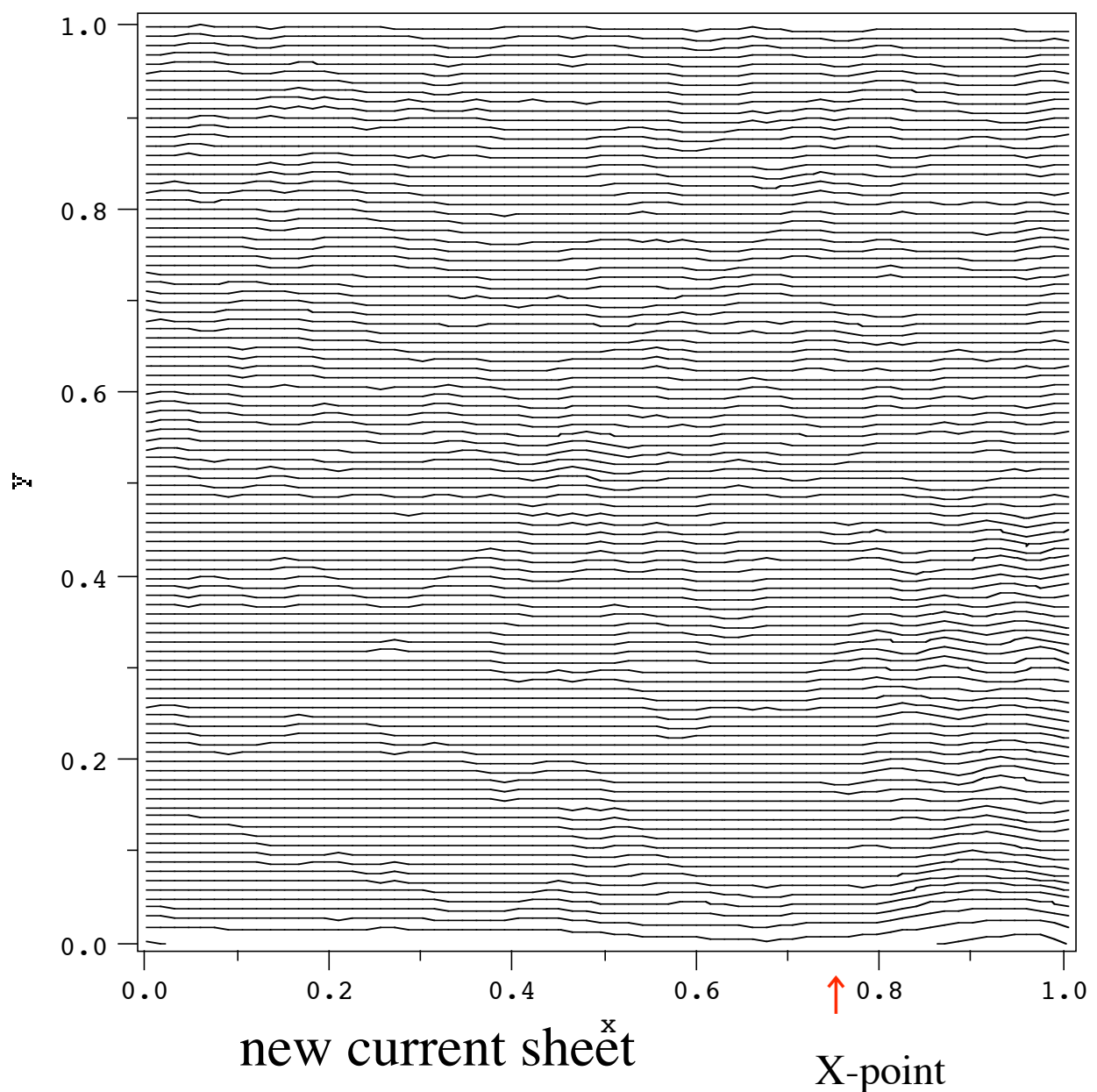
Sweet-Parker type

(collapsed island+double Y-point)

$$Re_m^*=139.8$$

$$xy=0.75$$

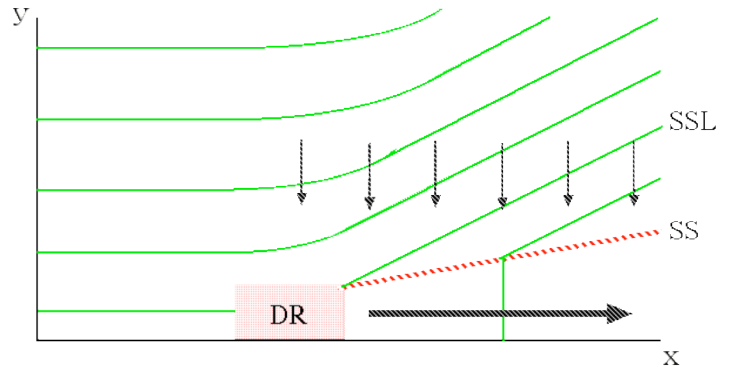
$$R=0.00713$$



リコネクションレイト

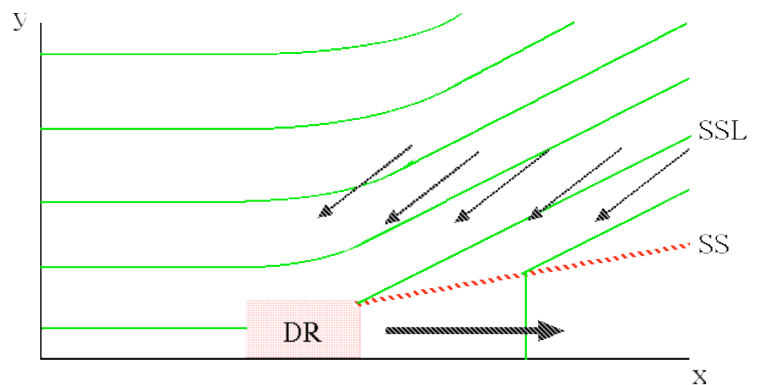
固定座標

真下に流入

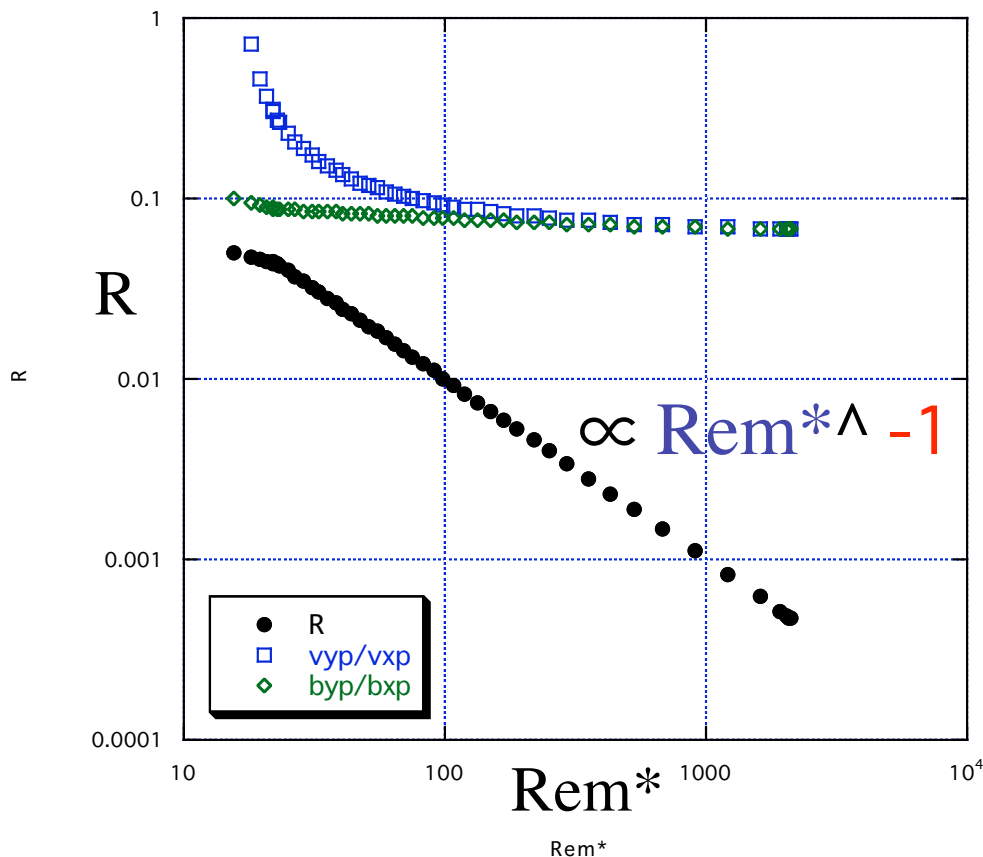


相似座標

リコネクション点
に斜めに流入



$V \times B$ 減少



$$R \neq V_{in}/V_{A0}$$

$$\sim 0.06$$

磁気エネルギー変換率

リコネクション点が二つに分離



island／カレントシートが残る

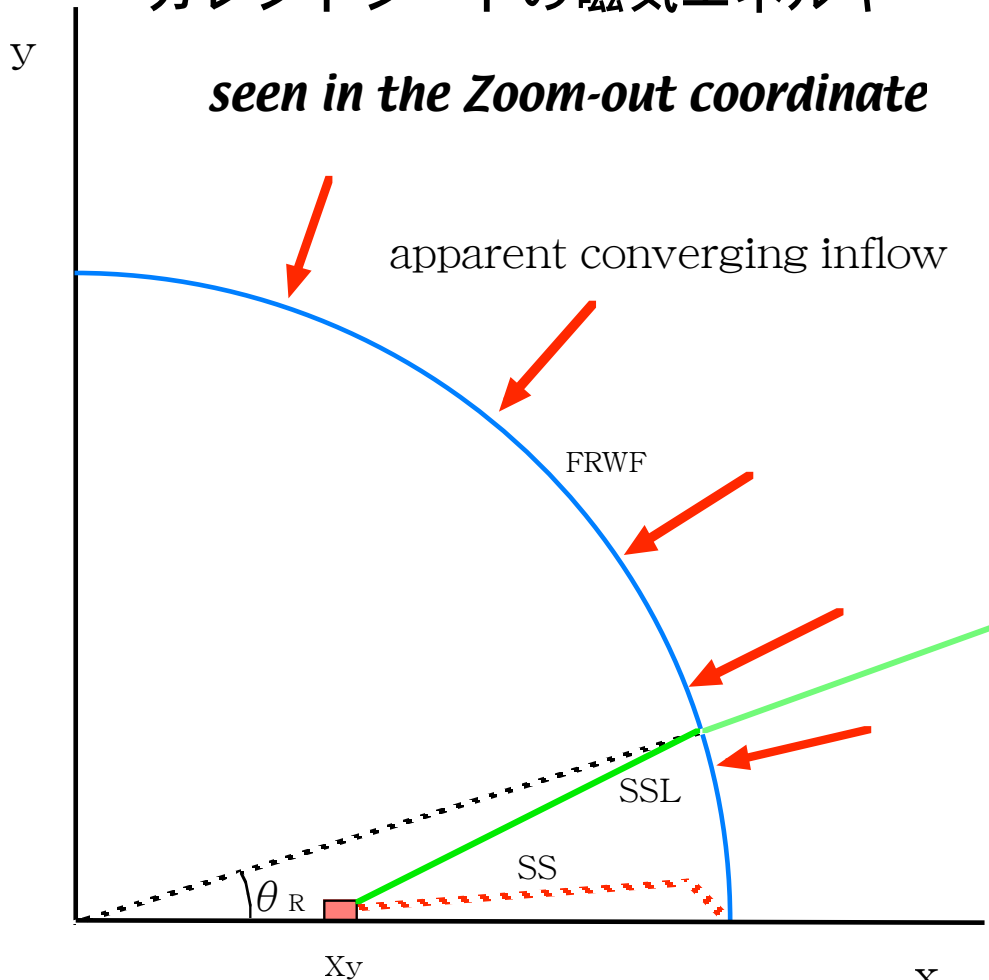


磁気エネルギーの**一部のみ解放される**

変換率

$f \equiv$ 解放される磁気エネルギー／元の
カレントシートの磁気エネルギー

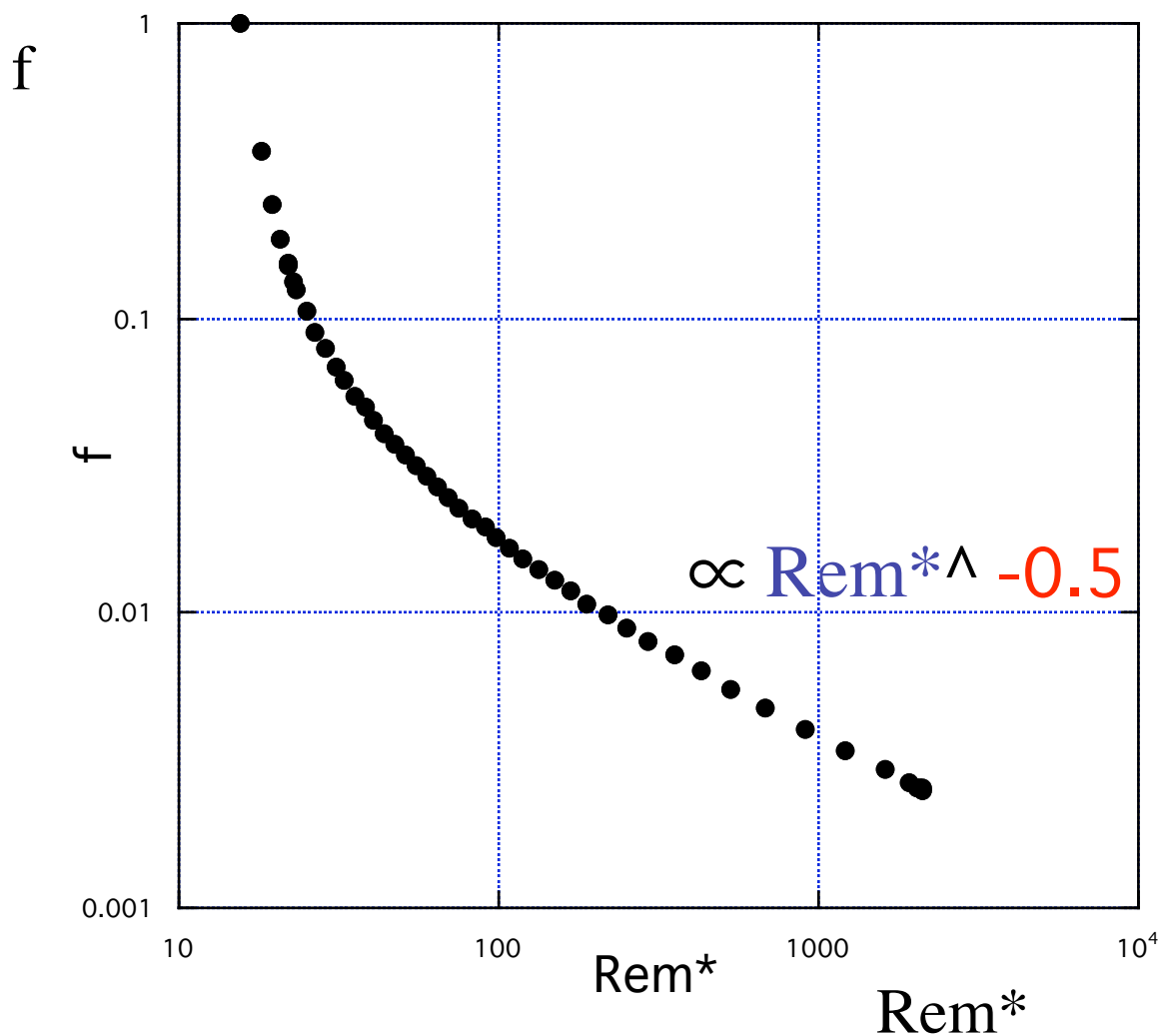
seen in the Zoom-out coordinate



$$\therefore f = \theta_R / (\pi / 2)$$

磁気エネルギー変換率

1 発のリコネクションで解放
できる磁気エネルギーの割合



まとめ

自己相似時間発展モデル

Rem* $\sim$ 15-2200 (Spitzer抵抗の
10³-10⁶倍) でのシステムの
応答を解析的に調べた



FastからSlow regimeへの連続遷移

- ・ 構造の変化
(single-X $\rightarrow$ X-O-X $\rightarrow$ double-Y)
- ・ Rec. Rate減少
- ・ エネルギー解放できる割合減少



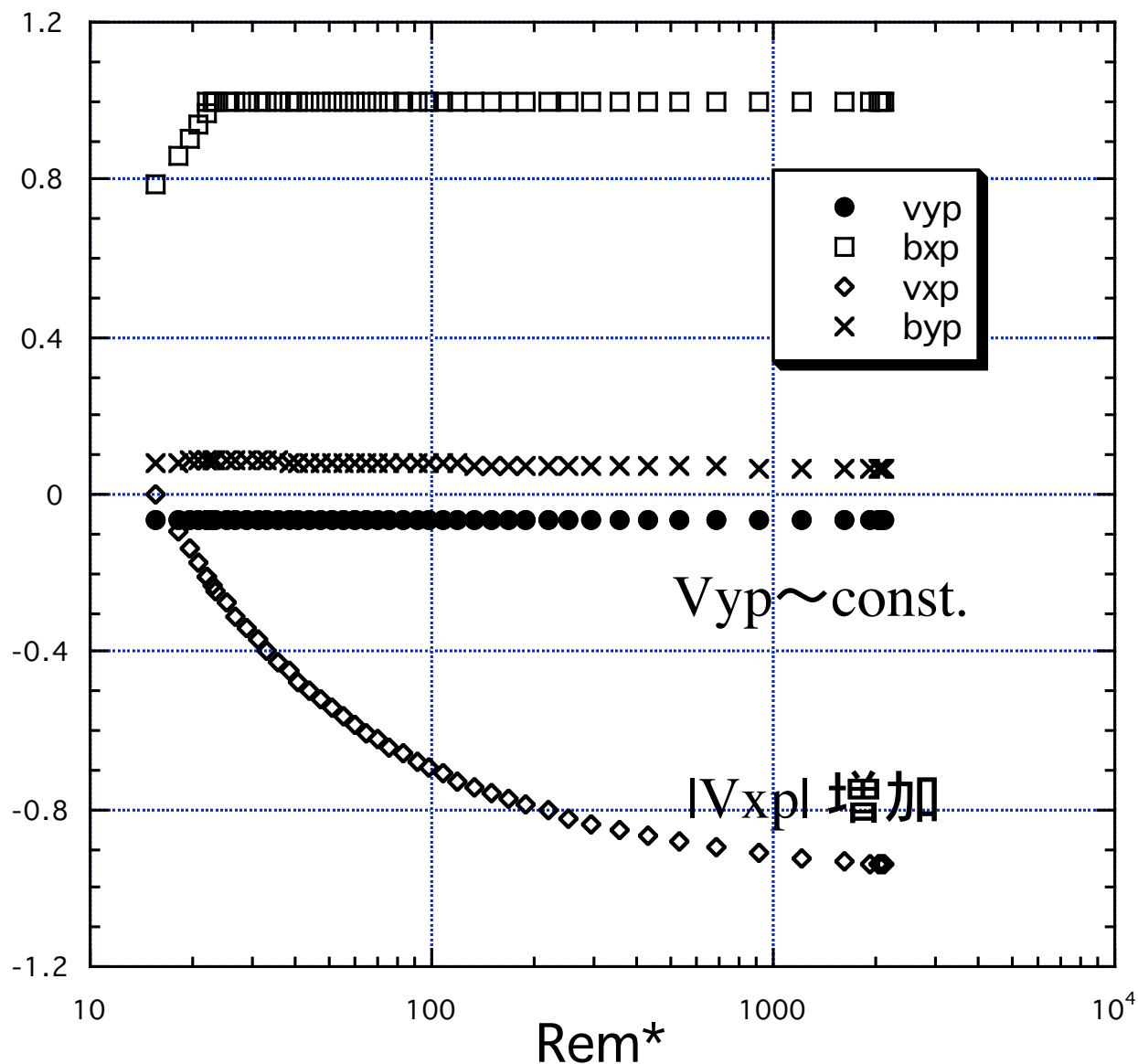
- ・ Rec. Rateの観測的見積もり時の注意
- ・ ナノ／マイクロフレアとの関連
- ・ 多重連発リコネクション
 $\rightarrow$ コロナ加熱

Rec. rateの観測的見積もり への提言

$$R \equiv |\mathbf{v} \times \mathbf{B}| / (V_{A0} B_0)$$

- Rec. pointが静止している時
($\mathbf{v}$: vertical, $\mathbf{B}$: horizontal, $|\mathbf{B}| \sim B_0$)
 $R \sim |\mathbf{v}| / V_{A0}$ (Alfven Mach num.)
- Rec. pointが動く時は要注意！
(Apparent converging inflow)
 $\Rightarrow \mathbf{v}$ と $\mathbf{B}$ は平行に近づく！
 $\Rightarrow R$ 減少
 $R \neq$ Alfven Mach num.

諸量の Rem^* 依存性



$$V_{yp} \sim -0.063 \sim \text{const.}$$

しかし

$$R \propto \text{Rem}^{*-1}$$