Magnetic Dissipation Mechanism Supporting A Fast Reconnection

Keizo Fujimoto 総合解析・センター合同セミナー on April 10, 2008

Introduction of myself

1997年4月-2001年3月 気象大学校

藤田茂先生 "太陽風impulseに対する磁気圏構造の過渡的な変化"

2001年4月-2006年3月 京都大学理学研究科

<u>町田忍先生</u> 運動論的2流体不安定性による電子加熱(修士) 磁気リコネクションの2次元大規模粒子シミュレーション(博士)

2006年4月-2008年3月 情報通信研究機構(学振PD) 小原隆博先生 磁気リコネクションの3次元大規模粒子シミュレーション 2006年6月-2007年11月 アルバータ大学理学部 Richard Sydora先生 2008年1月-2008年3月 名古屋大学STE研 荻野竜樹先生

2008年4月- 名古屋大学STE研ジオスペース研究センター(学振PD) <u>荻野竜樹先生</u> 磁気リコネクションの3次元大規模粒子シミュレーション

Contents

- 1. Introduction
- 2. EM-PIC model with adaptive mesh refinement
- 3. Large-scale evolution of reconnection in 2D system
- 4. Large-scale evolution of reconnection in 3D system
- 5. Summary

宇宙空間における磁気リコネクション [太陽フレア] [地球磁気圏におけるサブストーム]

07.7min^{+Z}









(<u>http://www2.</u> <u>nict.go.jp/dk/</u> <u>c232/</u>)

4



(*Cowley*, 1985)

Ion and electron-scale processes are coupling and determine the MHD-scale structure.

Non-MHD processes can affect MHD-scale dynamics.



合同セミナー@STEL

磁気リコネクションは起こすのも維持するのも難しい、、、

<u>テアリング不安定性による励起</u>

 $\lambda = 2 \text{ Re}, \tau_g \sim 2\pi (\lambda/V_A) R_m^{3/5} = 5.6 \text{ months} >> a \text{ few min}$

(Substorm expansion phase)

小さな磁気島で飽和する。

ダイポール磁場(縦磁場)によって安定化する。

準定常リコネクション

 $E = \eta J$

電気抵抗 η を生み出す物理メカニズムは?

電子の慣性抵抗だけで良いか?異常抵抗の可能性は?

Sweet-Parker or Petschek?

効率の良い磁気リコネクション(fast reconnection)とは、、、

リコネクション効率(reconnection rate)

 $\partial \Phi_{rec} / \partial t = E_{rec} \sim 0.1 V_{A0} B_0$ (~ a few mV/m) (V_{A0} : ローブにおけるアルヴェン速度、 B_0 : ローブ磁場の強さ)

- ▶ 地球磁気圏尾部において、10分間にローブにある厚さ15Reの磁束 がつなぎ変わる。
- 太陽フレアにおいて、50秒間で10¹⁸cm²×10⁹cmの領域にある磁束の 大部分がつなぎ変わる。

磁気リコネクションの準定常モデル

Hall mediated reconnection (GEM Reconnection Challenge, 2001)

$$\frac{E_{rec}}{V_{A0}B_0} \simeq \frac{\sigma}{l} \sim 0.1 \left[\begin{array}{c} \sigma \sim \lambda e \\ 1 < \lambda i \end{array} \right]$$

(σ,1:電子磁気拡散領域の縦と横の長さ)

$$E_y + (V \times B)_y = \frac{1}{n_e e} (J \times B)_y$$

Hall term

ホール効果さえあれば効率の良いリ コネクションが実現される。[e.g., Birn et al., 2001]







境界条件の影響で準定常的なリコネクションが実現できない。

- 境界条件が問題にならないほど大きな計算領域でシミュレーション すればよい。
- → 計算機資源の制約からそう簡単にはできない。
- → 既存のコードよりも計算効率の良いコードを作ればよい。

2. EM-PIC model with adaptive mesh refinement



10



2. EM-PIC model with adaptive mesh refinement

Detour





$m_i/m_e = 100$, Maximum resolution: 1024×1024

Fujimoto(2006): $m_i/m_e=100$, $122.9 \times 30.7 \lambda_i^2 (8192 \times 2048)$



計算コスト ∝ (m_i/m_e)^{5/2} 計算領域はGEM(2001)の11.5倍 最大解像度はGEM(2001)の128倍









- ホール効果があっても準定常的なfast reconnectionは実現されない。
 - 電子磁気拡散領域が伸長するため、電子の流れが阻害され リコネクションの効率は減衰する。

伸長を止めるためには新たな電気抵抗が必要。

ホール効果がなくても準定常的なfast reconnectionが実現される ときがある。

ホール効果がない場合(m_i/m_e=1)でも効率的な準定常リコネ クションが実現される。

▶計算領域の設定



 $L_x \times L_y \times L_z$ = 30.7 $\lambda_i \times 7.7 \lambda_i \times 30.7 \lambda_i$ 最大解像度: $N_x \times N_y \times N_z$ =1024 × 256 × 1024 $m_i/m_e = 25$ 超粒子の数: < 1.5 × 10⁹

▶ YZ平面における電流層の時間発展



▶ リコネクション効率の時間変化







(a) Without kink mode



(b) With kink mode





合同セミナー@STEL





合同セミナー@STEL





▶ 2次元YZ平面におけるシミュレーション





> キンクモードには磁場を散逸する効果がある。

[e.g., Ozaki et al., 1996; Shinohara et al., 2001; Morioka et al., 2007]

合同セミナー@STEL

0.01

▶ キンクモードによる磁気拡散メカニズム



$$-en_{e}E + (-n_{e}m_{e}V_{ec}\nu_{e}) = n_{e}m_{e}\frac{\partial V_{e}}{\partial t} \sim 0$$
$$en_{i}E + (-n_{i}m_{i}V_{ic}\nu_{i}) = n_{i}m_{i}\frac{\partial V_{i}}{\partial t} \sim 0$$
$$JE \simeq \frac{1}{2}n_{e}m_{e}V_{ec}^{2}\nu_{e} + \frac{1}{2}n_{i}m_{i}V_{ic}^{2}\nu_{i}$$
$$\rightarrow \partial(n_{e}T_{e} + n_{i}T_{i})/\partial t$$

プラズマが電場によって得たエネ ルギーはキンクモードを介して熱エ ネルギーに変換される。

合同セミナー@STEL

$$\begin{array}{c} 0.008 \\ - & \partial (nT) / \partial t \\ 0.006 \\ 0.004 \\ 0.002 \\ 0 \\ 10 \\ 12 \\ 14 \\ 16 \\ 18 \\ 20 \\ 22 \\ 24 \end{array}$$

24

$$- \langle E_{y'} \rangle_{xline} = \eta^{eff} \langle j_{y'} \rangle_{xline}$$

$$= \frac{1}{\langle n_e \rangle} (\langle n_e \vec{V}_e \rangle \times \langle \vec{B} \rangle)_{y'}$$

$$+ \frac{1}{\langle n_e \rangle} \langle \nabla' \cdot \vec{P}_e \rangle_{y'}$$

$$+ \frac{1}{e \langle n_e \rangle} \langle (n_e \vec{V}_e) \cdot \nabla' V_{ey'} \rangle$$

$$+ \frac{1}{\langle n_e \rangle} (\langle \delta n_e \delta E_{y'} \rangle$$

$$+ \eta^{an} \langle j_{y'} \rangle$$

2Dシミュレーションで得られた値



サブストームや太陽フレアにともなう爆発的なエネルギー変換を磁気リ コネクションで説明するためには、E_{rec}~0.1程度の効率の良いリコネク ションが数分~数十分持続する必要がある。

電子慣性による等価電気抵抗を介した従来の磁気拡散モデルでは、 効率の良いリコネクションを長時間持続させることは困難であるため、 何らかの3次元的な効果が期待されていた。

今回、キンクモードによる異常電気抵抗が磁気リコネクションに必要な 磁気拡散を与えその効率を維持することがわかった。(マクロな構造に あわせてミクロなプロセスが自動調節されてE_{rec}=0.1を維持しているの かもしれない。)

今後は、もう少し大きな計算領域で3Dシミュレーションを実施することによって、準定常リコネクションを実現させる。