

# 太陽・地球磁気圏の磁気リコネクションの モデリングとシミュレーション

荻野竜樹、増田 智、家田章正、関華奈子、  
品川裕之

(名古屋大学太陽地球環境研究所)

## 1. 研究目的

太陽フレアにおける磁気リコネクションの役割、地球磁気圏における磁気リコネクションの役割とサブストーム / 磁気嵐の関係、及び太陽フレアとサブストーム / 磁気嵐との比較を、観測データ総合解析とモデリング / シミュレーションの連携的かつ統合的研究により調べる。

### 研究課題

- ・グローバルな条件が磁気リコネクションに及ぼす影響とリコネクションの役割
- ・観測とシミュレーションデータを駆使した磁気リコネクションの総合解析
- ・太陽とジオスペースにおけるエネルギー解放過程に対する磁気リコネクションの役割

## 2. 研究内容

### 2.1. 太陽フレアにおける磁気リコネクションアウトフロー(ジェット)

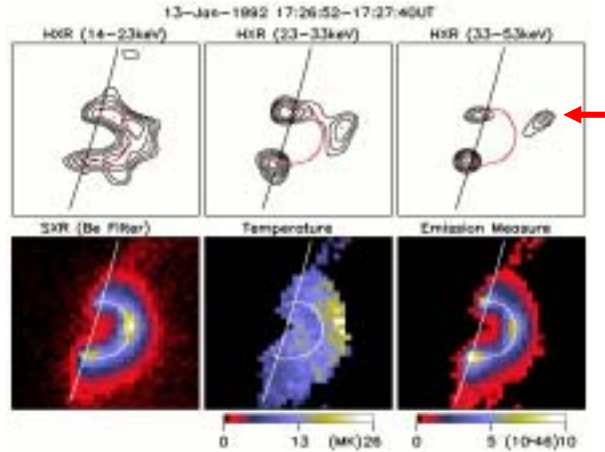
下流域での粒子加速 / 加熱: 太陽とジオスペースにおけるエネルギー解放過程に対する磁気リコネクションの役割

- ・ 太陽フレアのエネルギーは、コロナ中での磁気リコネクション過程によると考えられている。カスプ型(CSHKP型)のリコネクションモデルでは、高速のリコネクションフローが下方に向かい、閉じた磁気ループ(磁力線)上空に吹き付ける。
- ・ リコネクションアウトフローが閉じた磁力線(磁気ループ)に吹き付けるループ上空の領域は、電子の加速 / 加熱を考える上で重要な領域である。直接、プラズマや磁場の観測が可能な地球磁気圏尾部の高速プラズマフローと地球のダイポール磁場との関係と結び付けて、磁気ループ上空での電子の加速 / 加熱機構の理解を進める。

# Discovery of a Hard X-ray Source above the Corresponding Soft X-ray Loop

looptop impulsive source

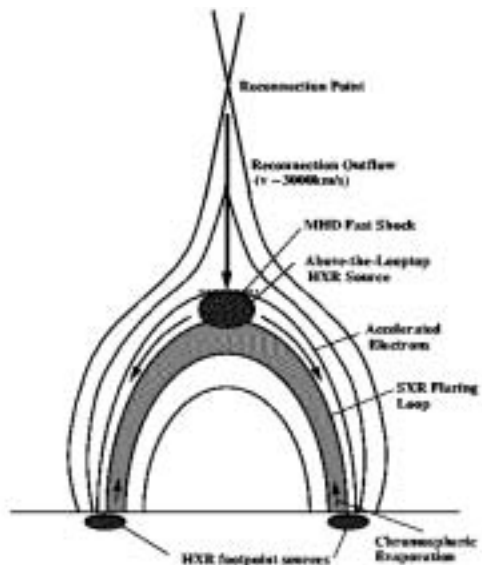
above-the-looptop source (13-Jan-92: Masuda *et al.* 1994)



Characteristics:

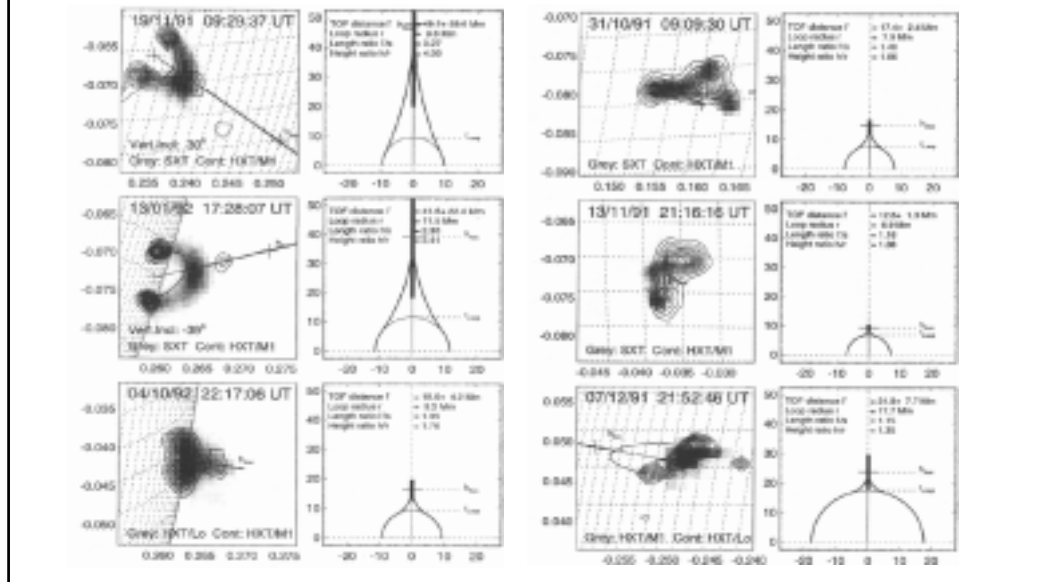
- **impulsive**  
time-behavior
- **hard** spectrum
- located **above** the  
SXR loop

**magnetic reconnection**  
**above the loop**



# Particle acceleration: Site

Electron Time of Flight (CGRO/BATSE) Aschwanden *et al.* 1996



## Summary: remaining problems

### Emission mechanism

accurate spectrum (RHESSI)

### Its relationship with footpoint sources

higher time resolution

### Acceleration site

direct precipitation vs trapping component

(radio observation with a high spatial resolution)

### Universality

statistical study using data

with a higher dynamic range (RHESSI)

## 2.2. オーロラ爆発と太陽フレアの比較: 太陽 - ジオスペース比較観測による実証的磁気リコネクション研究

- ・ リコネクションが起ころうとしても、オーロラ爆発・太陽フレアが起ころない。リコネクションはオーロラ爆発の必要条件であるが、オーロラが爆発的に発達するかどうかは、地球近傍(8Re)での電流消失の発達とも考えられる。これは、リコネクションで生じた地球向き高速流が、dipole-likeな磁場と相互作用することが鍵である。太陽でプラズモイドが観測される時、硬X線源があるならばフレアがあり、硬X線源がなければフレアは起きているかを調べる。
- ・ オーロラ爆発および太陽フレアの前兆現象の比較。オーロラ爆発と太陽フレアの物理機構の共通性と相違を調べて、磁気リコネクションの役割を理解する。更に、ブッシュドブレイクアップとプリフレアと呼ばれる前兆現象の原因と役割及び大規模なオーロラ爆発・太陽フレアとの関係を調べる。
- ・ 尾部リコネクションの位置の、太陽風によるコントロール。尾部ではリコネクションは真夜中ではなくやや夕方側で、また、夜側20-30Re、および100Reのところで起こる。尾部リコネクションの位置をコントロールするパラメータを、シミュレーションにより太陽風に見つけ、ジオテイルで確認する。

## 尾部リコネクション観測時に オーロラ爆発は起きている？

### 現在までの観測結果:

Pseudo-breakup(PB)の時も、高速流などが観測される。(Sergeev, 1986)。

→ PB と breakup の違い？

→ PB PS-rec. で、breakup Lobe-rec.  
(Baker, 1990, 1993; Russell, 2000)。

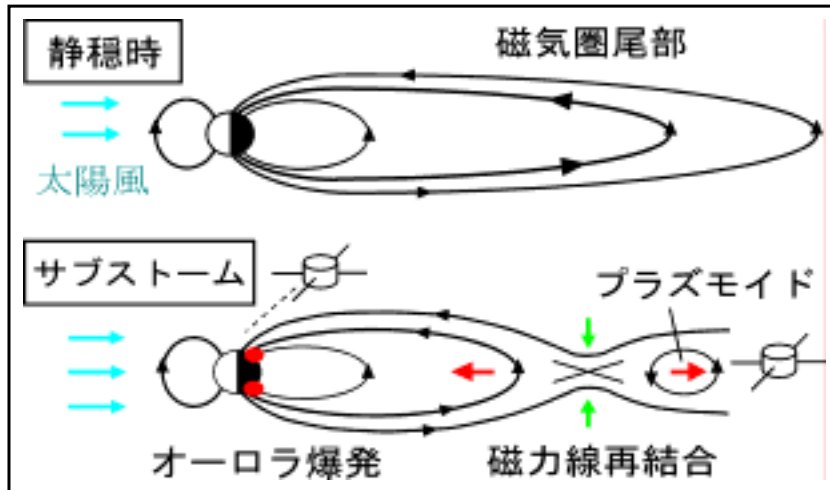
→ Lobe rec. が起こるが、breakup は無い例。  
(small brightening/PBはある)。

◆ PPPSだからlobe-rec.: Ieda, 2001.

◆ 高速流だからlobe-rec.: Ohtani, 2002.

→ 現段階では、リコネクションを観測していても、  
オーロラ爆発が起きているかどうか分からない。

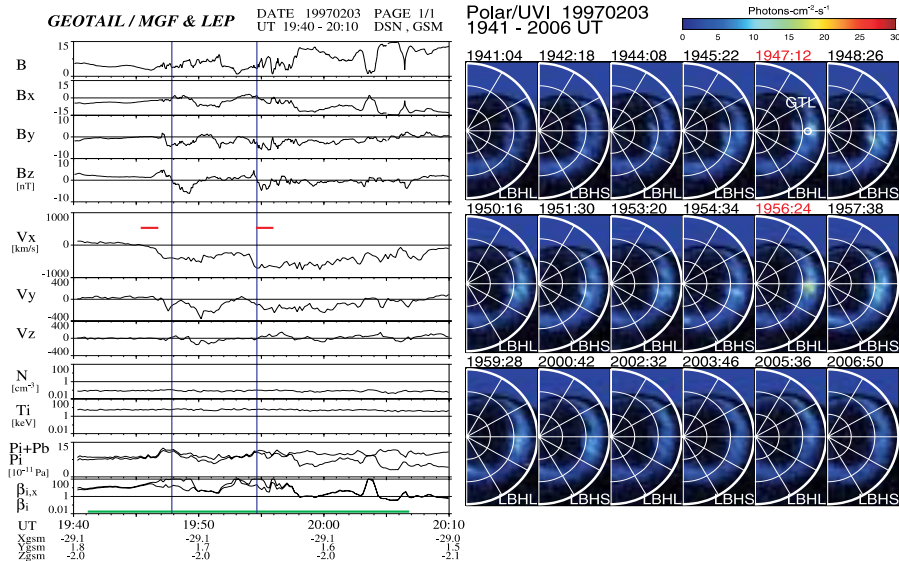
# オーロラ爆発と磁力線再結合



## 2. 因果関係をどう解明するか

- オーロラ爆発と、磁力線再結合に、有意な相関があることは、確立されたと思われる。  
但し、個別の反例？は多い。
- タイミング：  
磁力線再結合が先という、convincingな観測は無い。衛星の位置が悪いと解釈。
- 必要十分条件：  
そもそも対応しているのか？

# Lobe-Rec. and Brightening



## オーロラ爆発のまとめと課題

- オーロラ爆発と、磁力線再結合の、相関は確かめられたが、因果関係は分かっていない。
- オーロラ爆発の、位置・タイミング・大きさなどの情報は、事前に、電離層に現れているのではないかと？
- 電気伝導度を算出することにより、このような情報を得られる空間スケールまで、モデリングを行う。

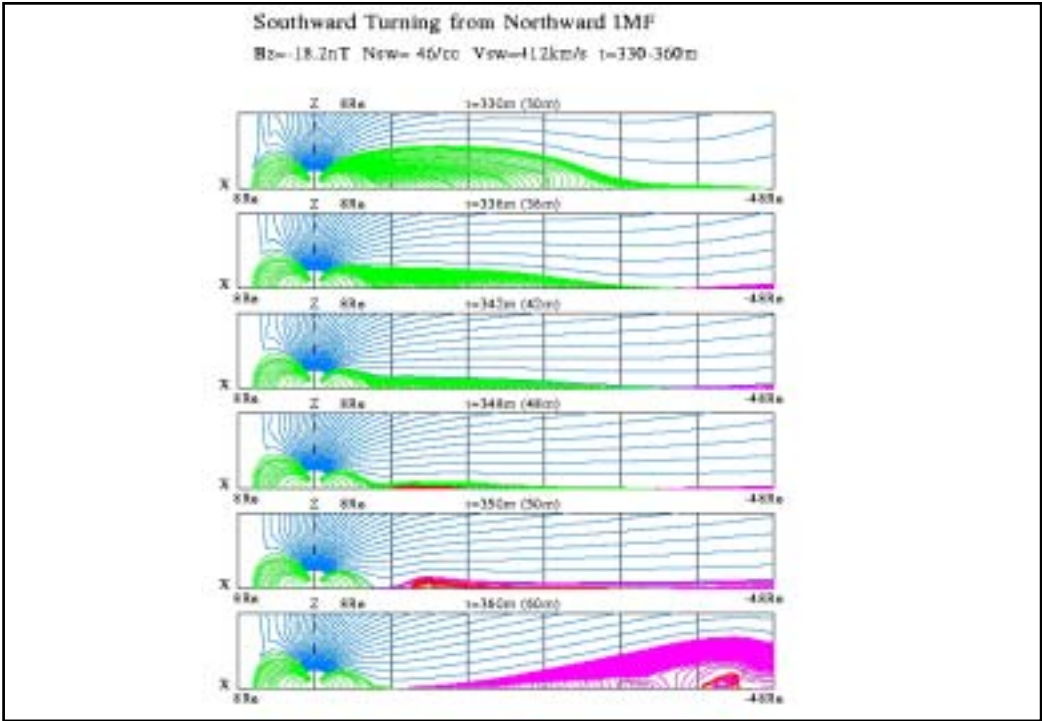
### 2.3. 地球磁気圏の磁気リコネクショングローバルな条件が磁気リコネクションに及ぼす影響とリコネクションの役割

- ・ 地球磁気圏の磁気リコネクションは、いつ、どこで、なぜ、どのように起こるのか？太陽直下リコネクション(Subsolar Reconnection)と反平行磁場リコネクション(Anti-parallel Field Reconnection)はどちらがより強く起きているか。
- ・ 磁気リコネクションは激しい過程で、一旦起こるとその後のダイナミクスを支配するので、最初の状態がどのようなものであるのか、最初にどこでコネクションが始まるかが重要である。太陽直下点は特別な領域か？停留点ではあるが、IMFは衝撃波を経て曲がり、マグネトシースから磁気圏境界に近づくにつれて、磁気圏境界を覆い包むように変形されるので、太陽直下点はIMFが地球磁場と最初に出合う特別な点であるという意味は弱まる。
- ・ 地球磁気圏の昼側磁気圏境界のリコネクションの問題を複雑にしている原因は、マグネトシースでのIMFの流れが局所的なAlfven速度を容易に越すことである。従って、リコネクションがどれだけの割合で起こるかは、反平行磁場リコネクションの条件がどれだけよく満足されるかとIMFのマグネトシースでの移動速度との競合関係より決まる。即ち、反平行磁場条件と流れの競合の結果、リコネクションレートが決まる。

- ・ これは、プラズマ不安定のAbsolute InstabilityとConvective Instabilityの関係と同じである。Absolute Instabilityでは成長率が重要なものに対してConvective Instabilityでは不安定領域にモードがどれだけの時間滞在するか、即ち成長率を群速度で割ったAmplification Factorが重要になる。

- ・ 現実的な地球磁気圏の条件下で磁気リコネクションは、どのように起こるのか？ダイポール磁気軸の傾きの効果やIMFの $B_x$ 、 $B_y$ 、 $B_z$ 成分は磁気リコネクションにどのような影響を持っているのか。より現実的な太陽風とIMFの条件は、磁気リコネクションや地球磁気圏構造・ダイナミクスにどのような影響があるのか？遠尾部磁気リコネクションはグローバルMHDシミュレーションからどのように起こるのか？あるいは、遠尾部磁気中性線を伴う地球磁気圏構造は、定常的には存在しないのか。

- ・ 磁気リコネクションに伴う地球磁気圏のエネルギー分配とエネルギー輸送はどのように変わっているのか？極端な太陽風とIMFのパラメータの場合はどう変化するか？



# 1. Introduction

Subsolar reconnection (component reconnection) versus anti-parallel reconnection

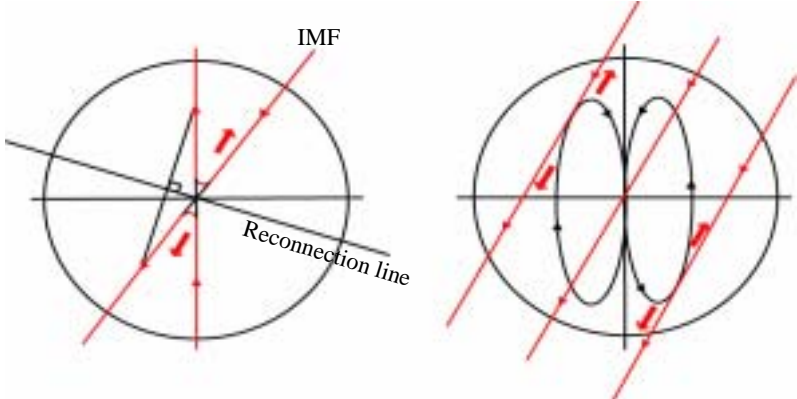
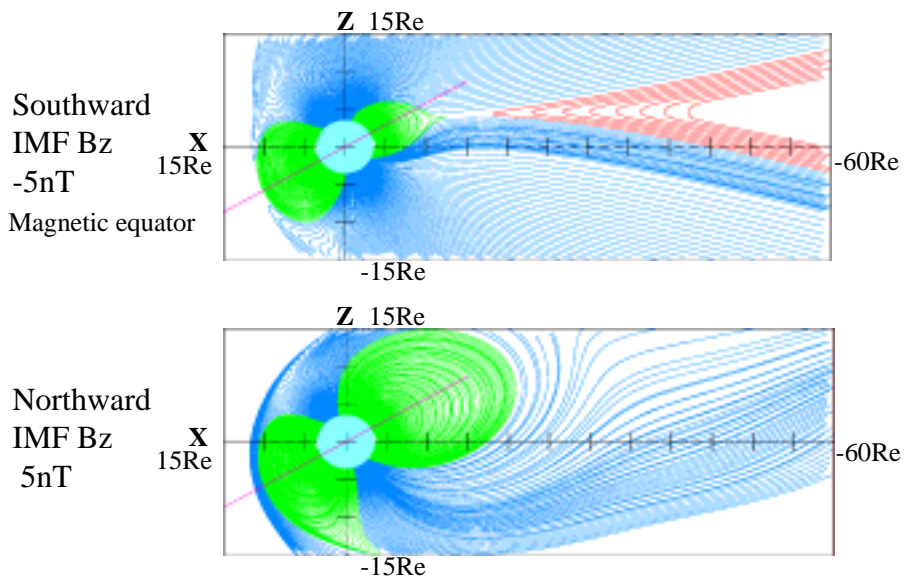


Figure 1. Schematic diagram of two magnetic reconnection models.

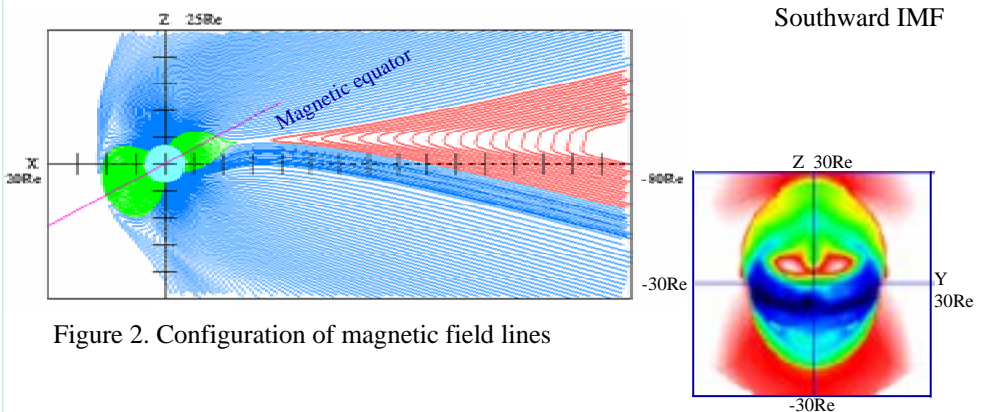


Tilt Angle =  $30^\circ$  **3D Magnetic Field Line**

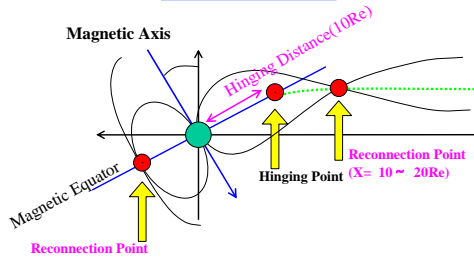


## 2. Simulation Results

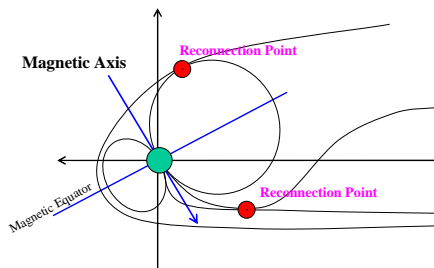
2.1 Magnetic field lines for dipole tilt angle =  $30^\circ$  and IMF =  $270^\circ$



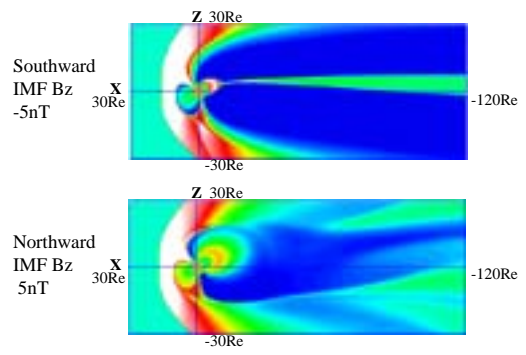
Southward IMF **Dipole Tilt**



Northward IMF **Dipole Tilt**



Tilt Angle = 30° **Plasma Pressure**



**Plasma Pressure**

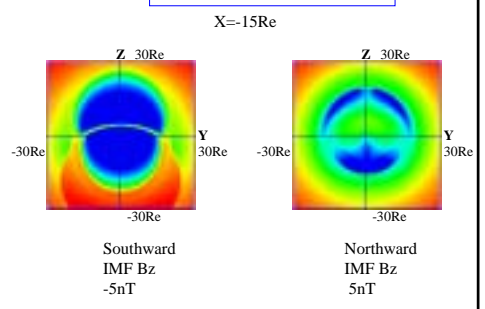


Figure 7. Configuration of magnetic field lines in a view from sun  
 $20 R_e$

$= 30^\circ$   
 $= 315^\circ$

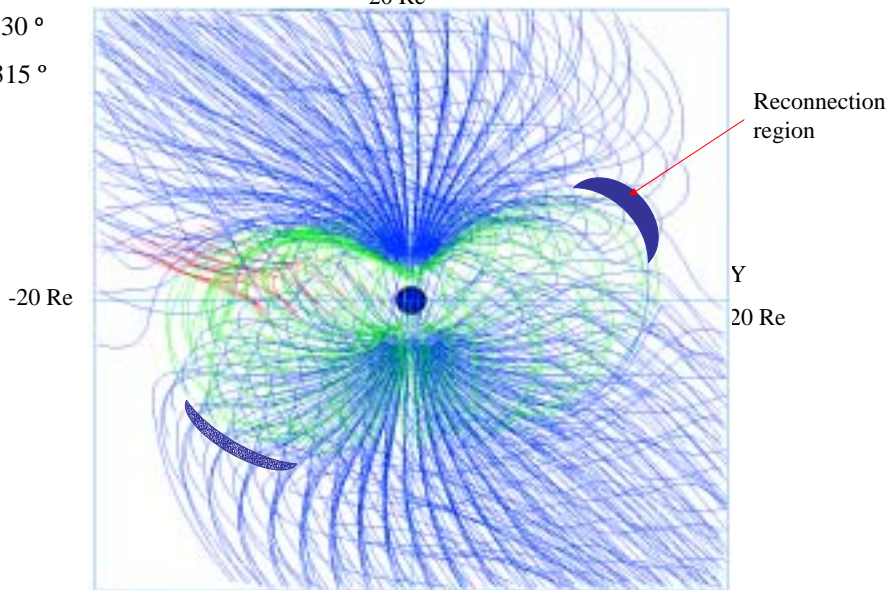
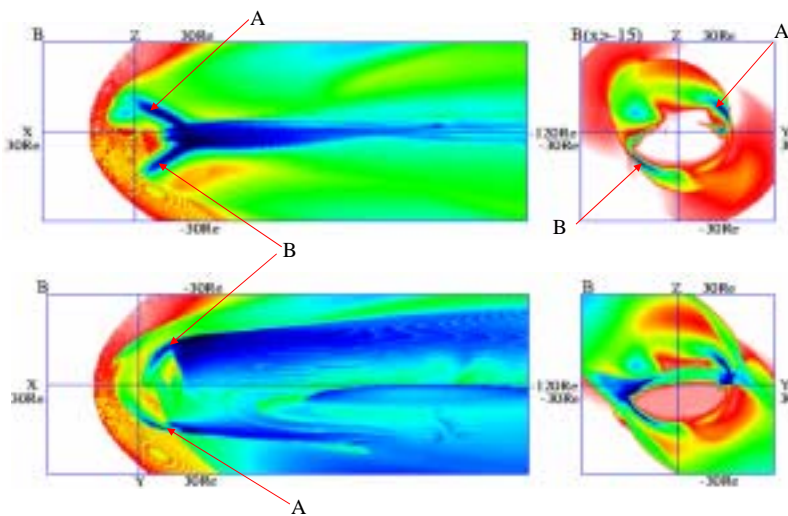


Figure 5. Projection of minimum B region  $= 30^\circ$ ,  $= 315^\circ$



Configuration of 3D magnetic field lines for dipole tilt and IMF By-component

$\theta = 315^\circ$

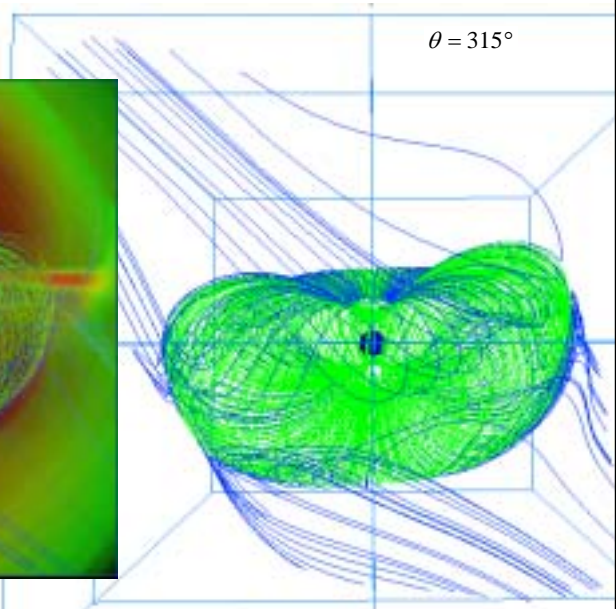
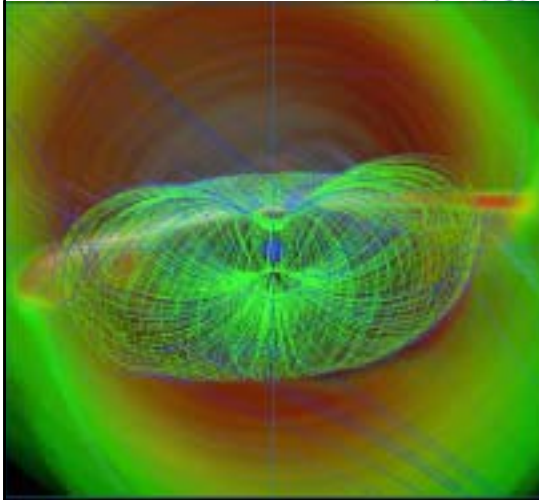
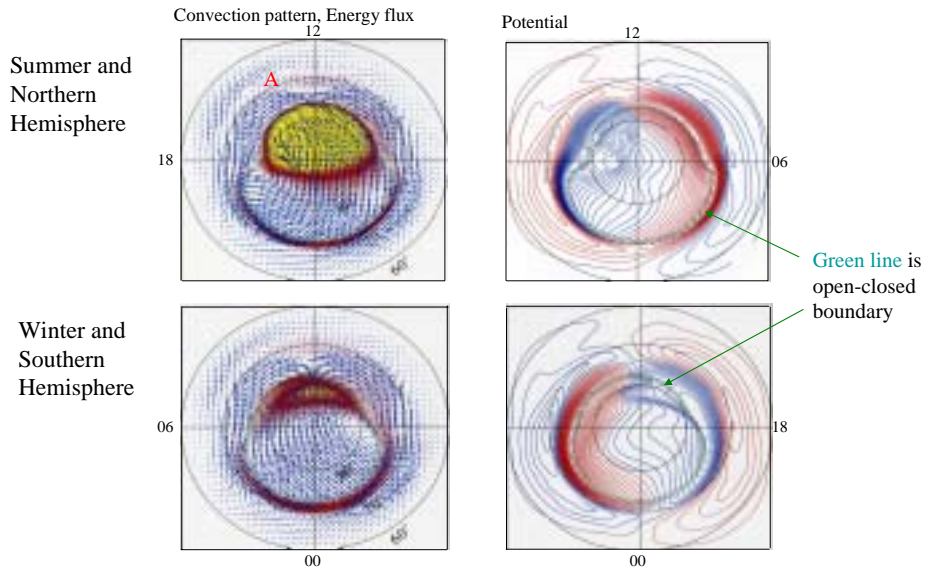
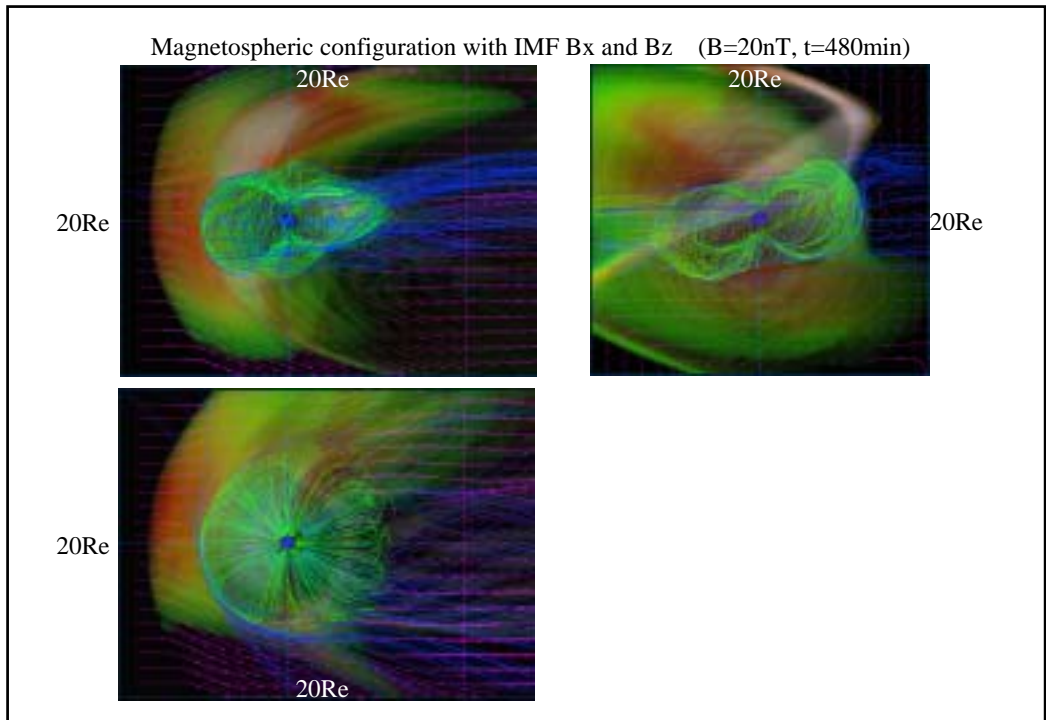
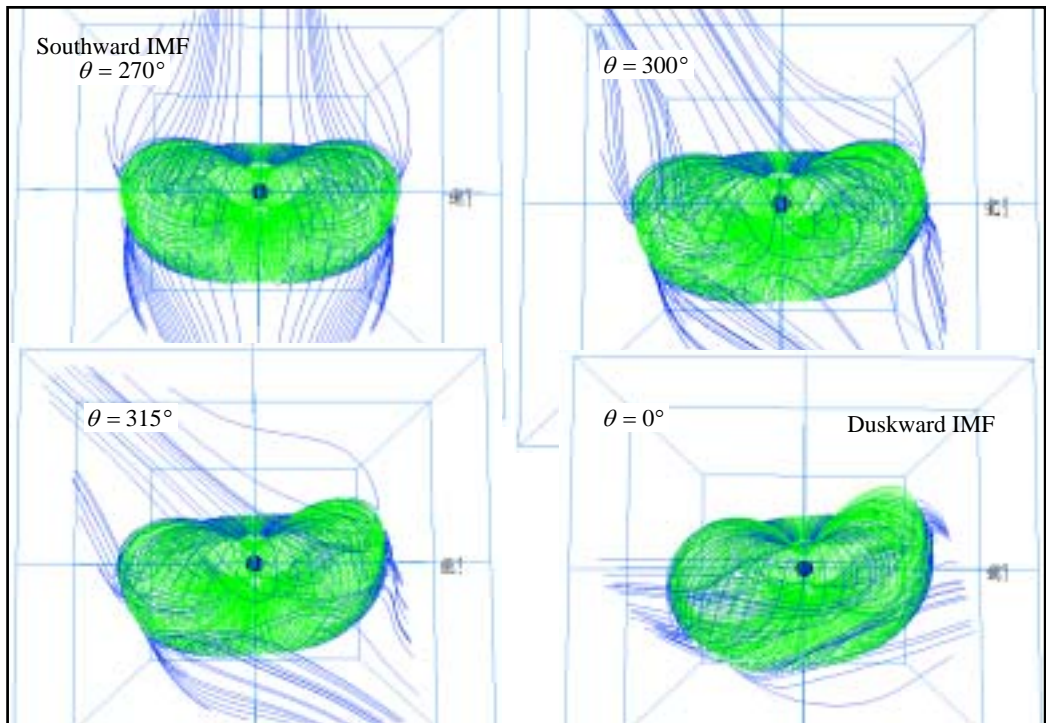


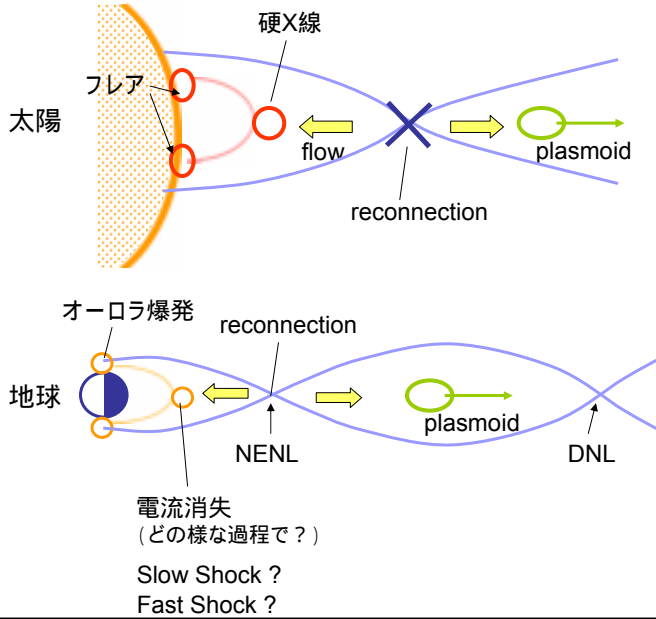
Figure 6. Ionospheric convection and potential in polar region  
Comparison of throat regions in summer and winter

$\theta = 30^\circ, \theta = 315^\circ$



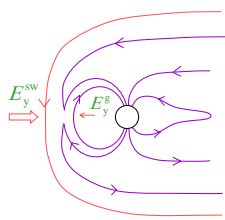


# 太陽と地球の磁気リコネクション

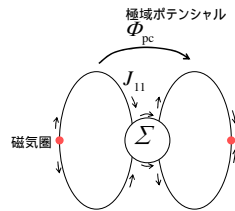


## 磁気圏と電離圏の結合 極域ポテンシャルの飽和

磁気圏と電離圏の  
大域的と局所的な  
関係を調べる



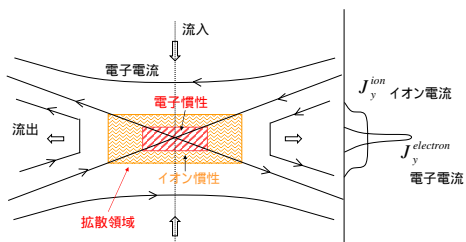
昼側リコネクションレートの飽和



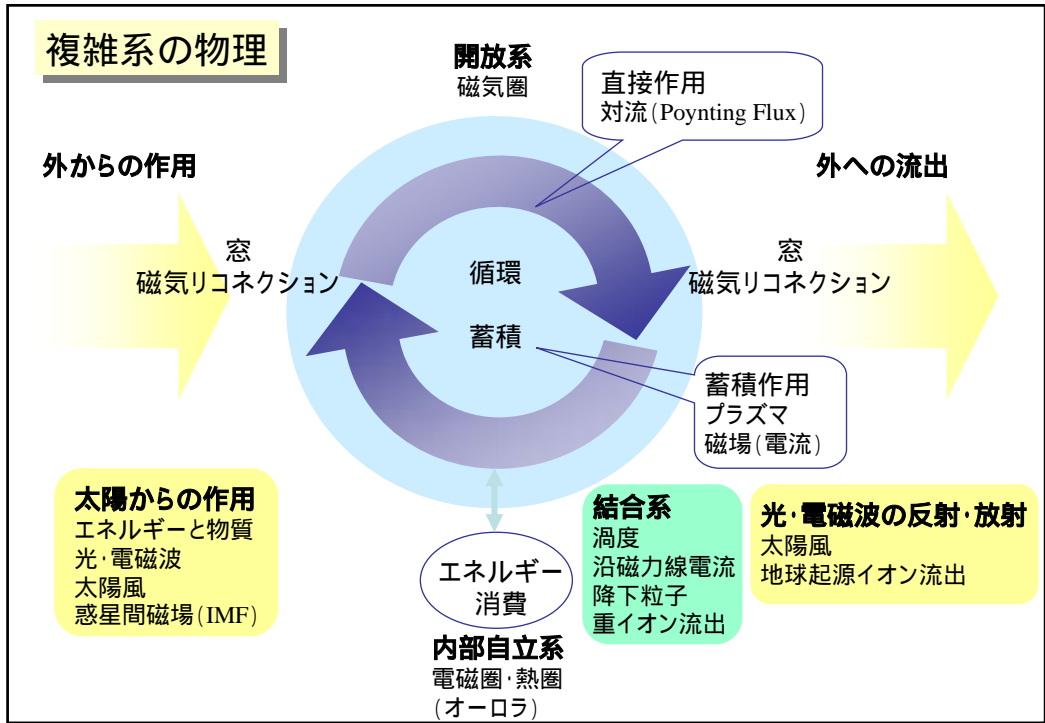
リージョン1沿磁力線電流の飽和  
電離圏電気伝導度の効果

## 磁気リコネクション セパトリックスの構造 電子慣性スケールは重要?

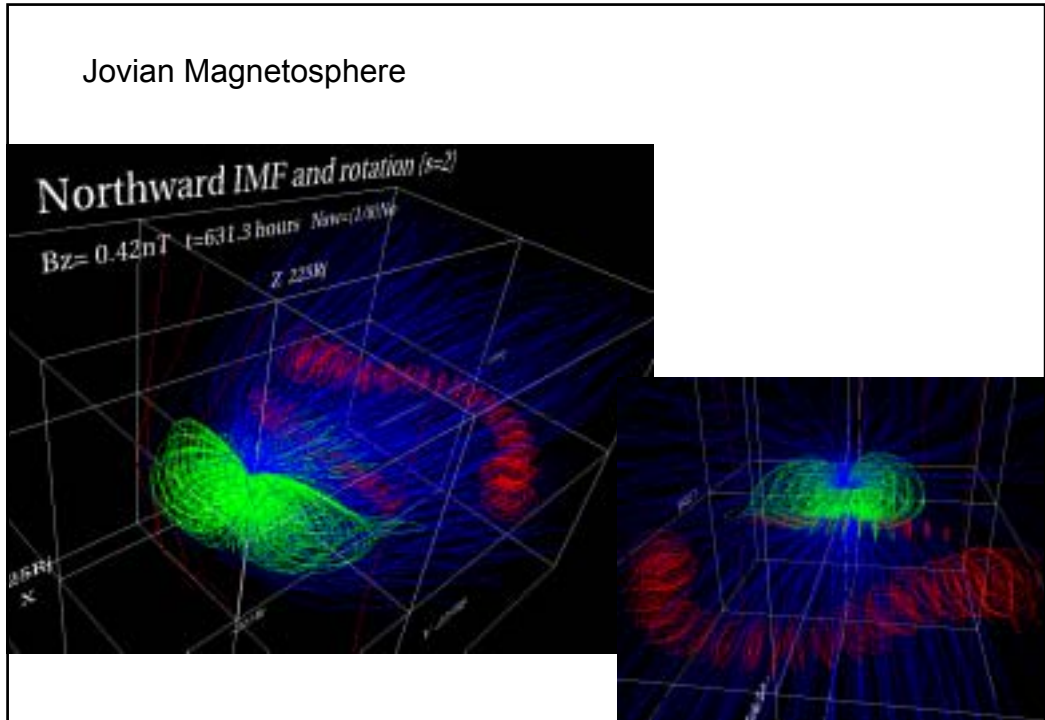
磁気圏エネルギー  
輸送をマクロとミクロな  
物理から調べる

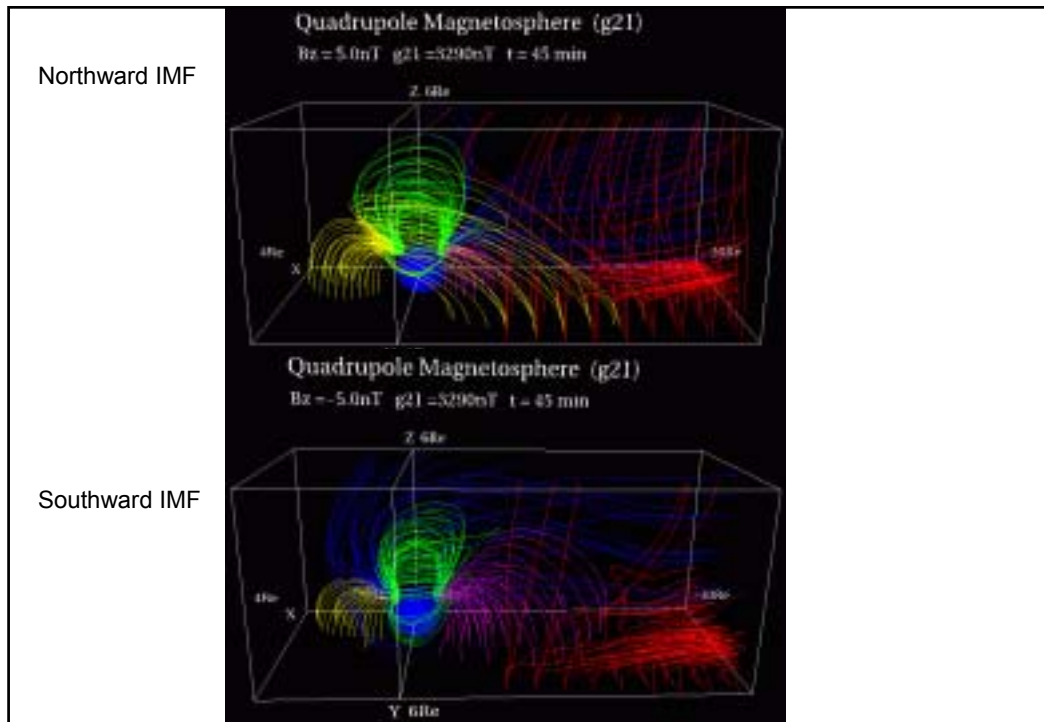


# 複雑系の物理



## Jovian Magnetosphere





## 予算

	設備備品費	消耗品費	国内旅費	国外旅費	謝金	その他(計算機使用料)
1年目	1,000	1,200	500	800	1,000	4,000 千円
2年目	1,000	1,200	500	800	1,000	4,000
3年目	500	1,200	500	800	1,000	4,000
4年目	0	1,200	500	800	1,000	4,000
5年目	0	1,200	500	800	1,000	4,000

- ・ 設備備品: クラスター型PC、ハードディスク
- ・ 計算機使用料: 名古屋大学情報連携基盤センターの使用時間をこのプロジェクトのために買い取る(約3000 cpu 時間/年)