

# 3次元GlobalMHDシミュレーションの 磁力線追尾可視化技術

久保田康文<sup>1</sup>、村田健史<sup>1</sup>、山本和憲<sup>1</sup>、深沢圭一郎<sup>2</sup>、坪内健<sup>3</sup>

1 NICT、2 九州大学、3 東京大学

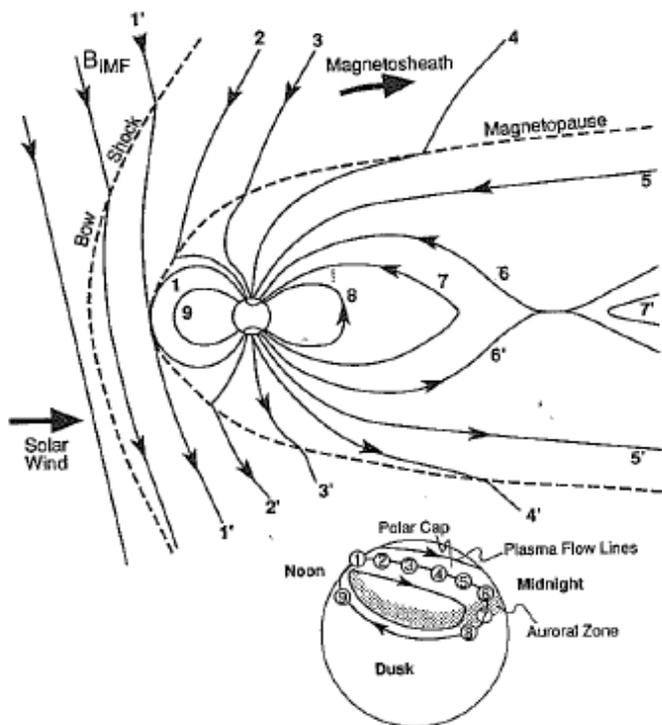
# 話す内容

- 磁力線追尾について
- 磁場凍結の評価
- 拡散領域とリコネクションの対応
- 拡散領域の可視化

# はじめに 磁力線追尾の必要性

- 磁気圏対流を理解することは、太陽風-磁気圏-電離圏のエネルギー輸送を知る上で重要である。
- 特に北向きIMFの時、磁気圏の対流は複雑である。

[Tanaka et al., 1999] [Watanabe et al., 2009]

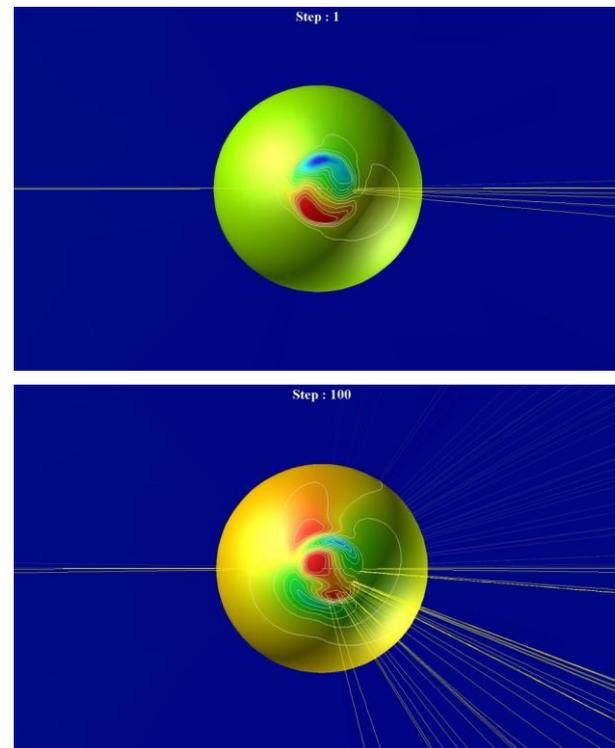


IMF南向きの場合のDungey typeの対流

太陽方向  
←  
IMF南向き

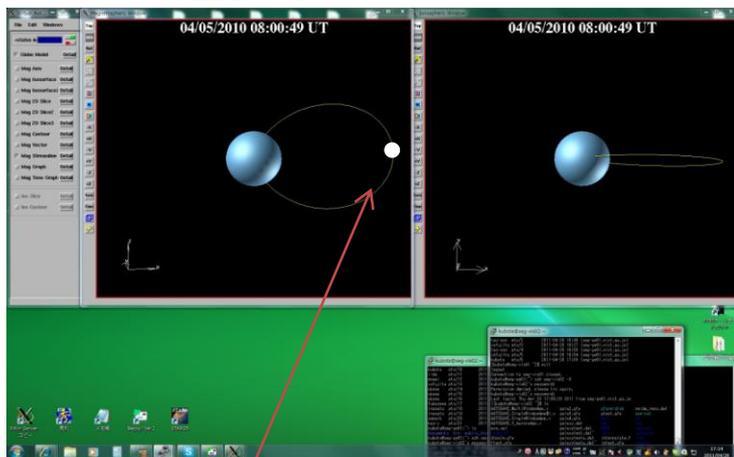
IMF北向き

## 電離圏のポテンシャル

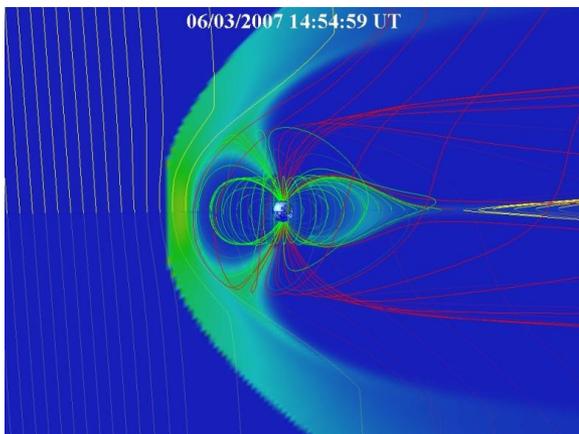


# はじめに 磁力線追尾の必要性

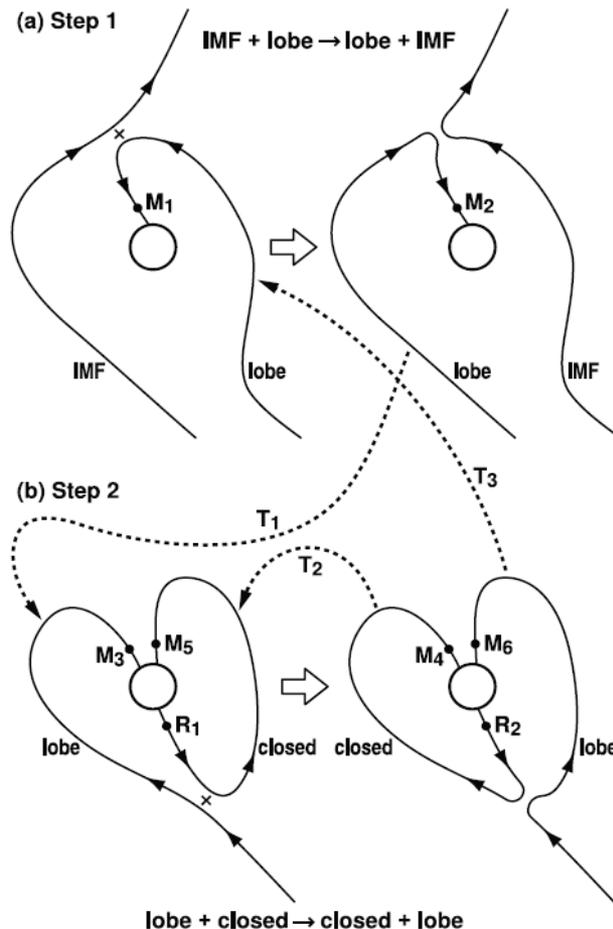
- グローバルMHDシミュレーションの結果から磁力線を可視化し、磁気圏の対流を調べたい。



ある点(始点)から、磁場に沿って積分し磁力線を描く



始点を固定した可視化ではどこから来た磁力線なのか分からない



IMF北向きの場合のリコネクションの概念図  
[Watanabe et al., 2009]

# はじめに 磁力線を追尾するためには

- Frozen-inが成り立つ必要がある。
- Frozen-inが成り立たない場合は磁場が拡散し、磁力線を追尾することができない。
- Global MHD シミュレーションでは、安定に計算をするため、数値的な拡散項を付加しており、実際の惑星間空間より磁気レイノルズ数が小さい。

$$\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} = \nabla \times (\vec{V} \times \vec{B}) + \frac{\eta}{\mu_0} \nabla^2 \vec{B} + \alpha \nabla^2 \vec{B}$$

物理的な拡散

シミュレーションを安定に解くための拡散

→ 追尾をすると同時に、磁束の保存を調べる必要がある。

# 目的

- 磁力線追尾の手法を確立する。磁力線を追尾するためには、磁場凍結が成り立っている必要があり、磁束の保存を確かめることで検証する。
- また磁場の拡散領域を可視化する。

# プラズマの磁力線凍結 (Frozen-in) の検証方法

- Frozen-in が成り立っているか調べる方法

Frozen-inが成り立つ

→ プラズマのある面を通過する磁束が時間方向に一定

$$\Delta\Phi = \vec{B} \cdot \vec{n} \Delta S$$

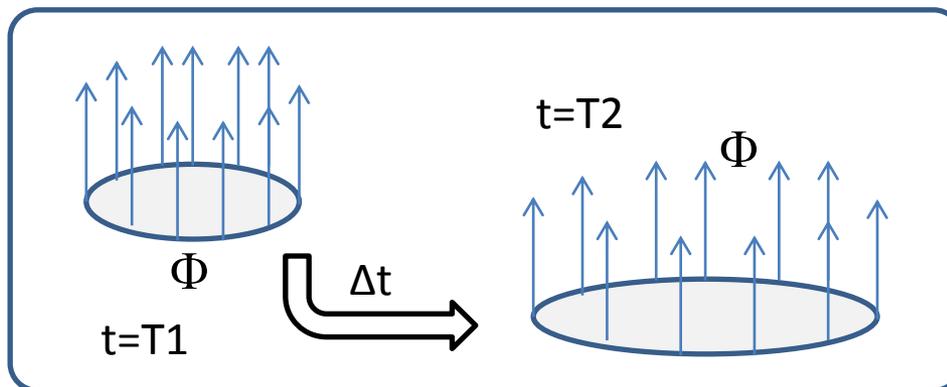
$$\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} = \nabla \times (\vec{V} \times \vec{B}) + \frac{\eta}{\mu_0} \nabla^2 \vec{B}$$

$$\frac{d}{dt} \Delta\Phi = \frac{\eta}{\mu_0} \nabla^2 \vec{B} \cdot \vec{n} (\Delta S)$$

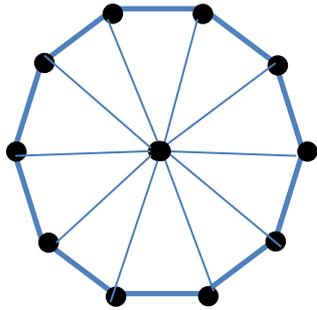
→ 拡散項が0なら磁束は一定

ある面を通過する磁束 ( $\phi$ ) が時間的に保存されているか？  $\phi(T1) = \phi(T2)$ ？

→ **fluxtube**を追尾する。



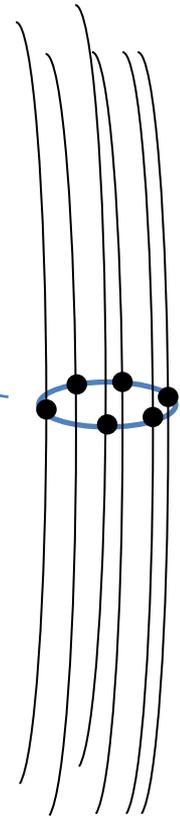
# MHDシミュレーションのFlux tubeの追尾



30点の始点  
29個の三角形

$$\vec{x}_{t+dt} = \vec{x}_t + \vec{v}_t dt$$

- 30点の始点(流体要素)をMHDシミュレーションの時間発展する速度場にそって追尾する。(流跡線)
- 精度よく追尾するために、MHDシミュレーションの全時間ステップデータを用いた。



Flux tube

# 大規模データの並列分散処理過程

シミュレーションデータ全ステップを出力  
1.3GB × 14400個ファイル(0.5s刻みで2時間) = 約20TB

HDFフォーマットに変換

流跡線追尾

HDFデータ

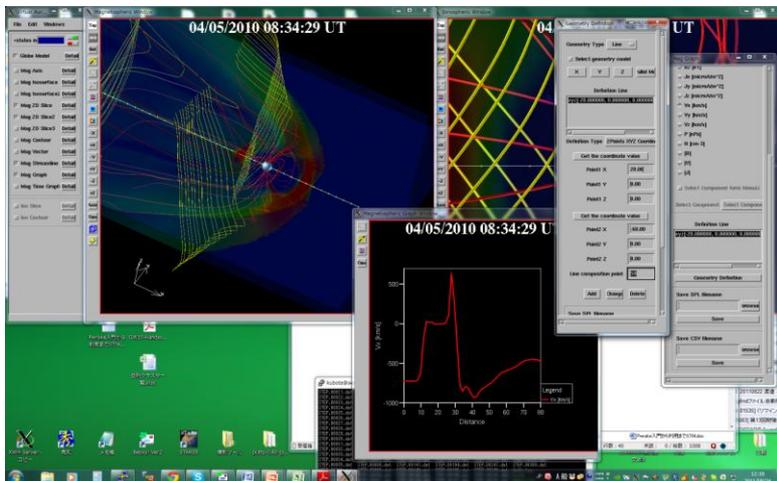
追尾点データ

バーチャルオーロラ可視化

HDF\_objectデータ

GFAファイルに結合

・バーチャルオーロラ

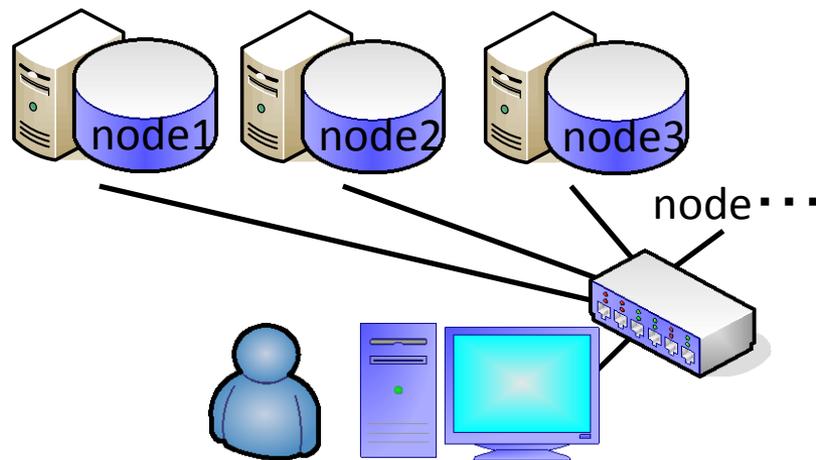


・Pwrake

Parallel Workflow extension for Rake  
分散ワークフロー実行ツール

Rake = Ruby版make

Ruby言語による柔軟なワーク  
フロー記述が可能



Client machine

使用したマシン

8台クラスタ seg-gfarm-n01~n08

+

6台クラスタ seg-gfarm-n73~n78

# MHDシミュレーション

## ・MHD方程式

$$\partial\rho/\partial t = -\nabla \cdot (\vec{v}\rho) + D\nabla^2\rho$$

$$\partial\vec{v}/\partial t = -(\vec{v} \cdot \nabla)\vec{v} - \nabla P/\rho + (\vec{J} \times \vec{B})/\rho + \vec{g} + \Phi/\rho \quad \Phi = \mu\nabla^2\vec{v}$$

$$\partial P/\partial t = -(\vec{v} \cdot \nabla)P - \gamma P\nabla \cdot \vec{v} + D_p\nabla^2 P \quad \gamma = 5/3$$

$$\partial\vec{B}/\partial t = \nabla \times (\vec{v} \times \vec{B}) + \eta\nabla^2\vec{B} \quad \eta = \underline{0.0001}$$

$$\vec{J} = \nabla \times (\vec{B} - \vec{B}_d),$$

磁場の拡散係数は一定

## ・解像度

デカルト座標系: 450(x) × 300(y) × 300(z)    等方格子 dx=0.2Re

## ・境界条件

外側境界

太陽風側: 太陽風の値で固定

テール側: 自由境界

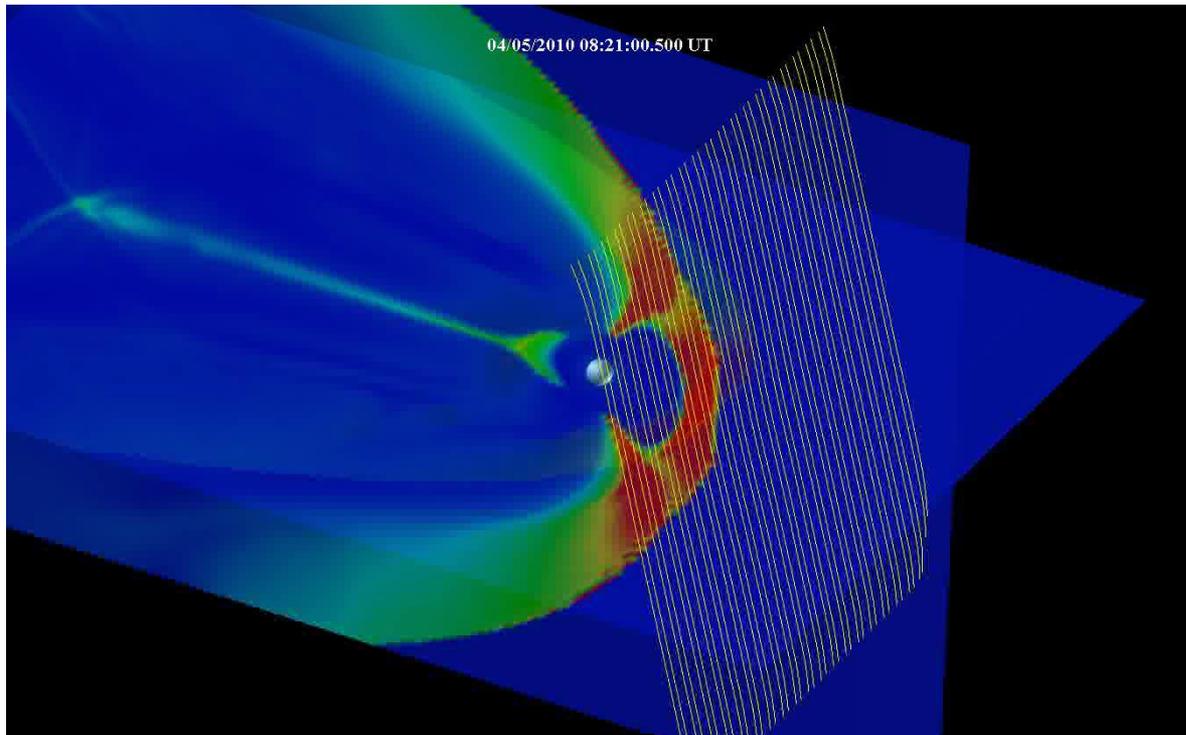
内側境界: 4Re以内は初期値。4-5Reで初期値と計算値をマージ。

## ・太陽風パラメータ

8/cc, 720 km/s,  $10^7$  K, Bz=-12nT, By=5nT

# 大規模3Dオブジェクト

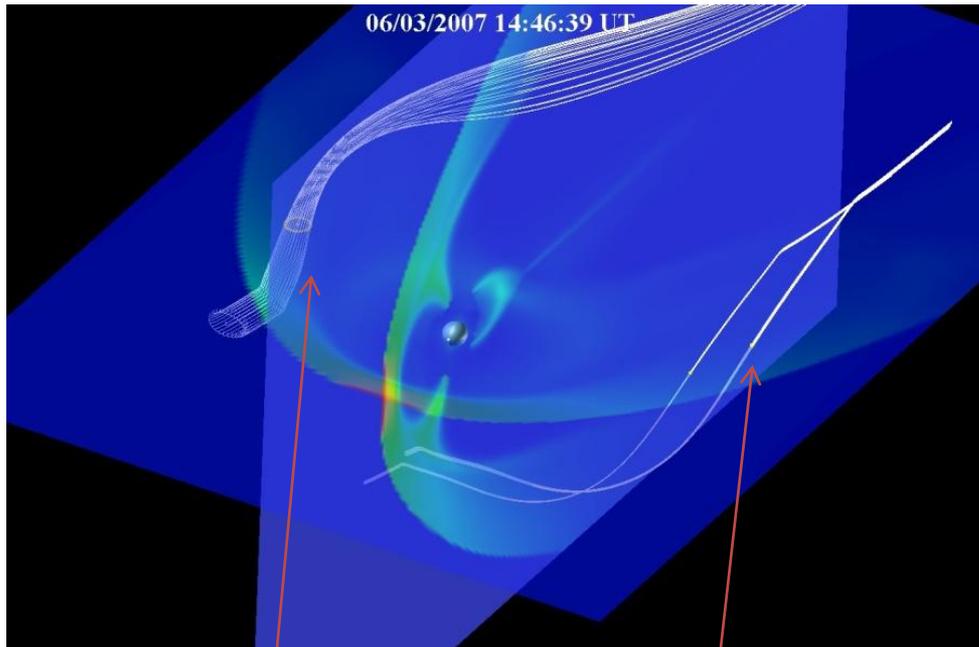
- 2000stepGFA(3GB)の紹介 8:21:00.000 UT から 8:37:40.000 UTまで0.5秒刻みで16分
  - ・昼側でリコネクション、拡散領域の幅
  - ・flank側でKHによるリコネクションが見える
  - ・磁力線追尾ができているのか
- 64bitGFAプレーヤー（展開するのに時間がかかる。展開後、12GB）



緑: detached  
赤: closed  
黄: open

# プラズマの磁力線凍結 (Frozen-in) の検証例

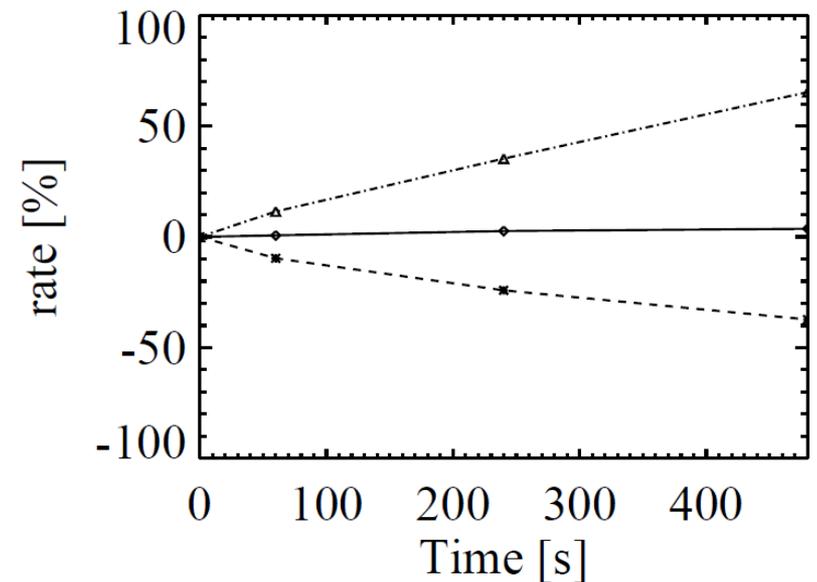
## T=0s のスナップショット



半径1Re

半径0.1Re

## 初期状態からの変化率



— · — · —

面積

—————

磁束

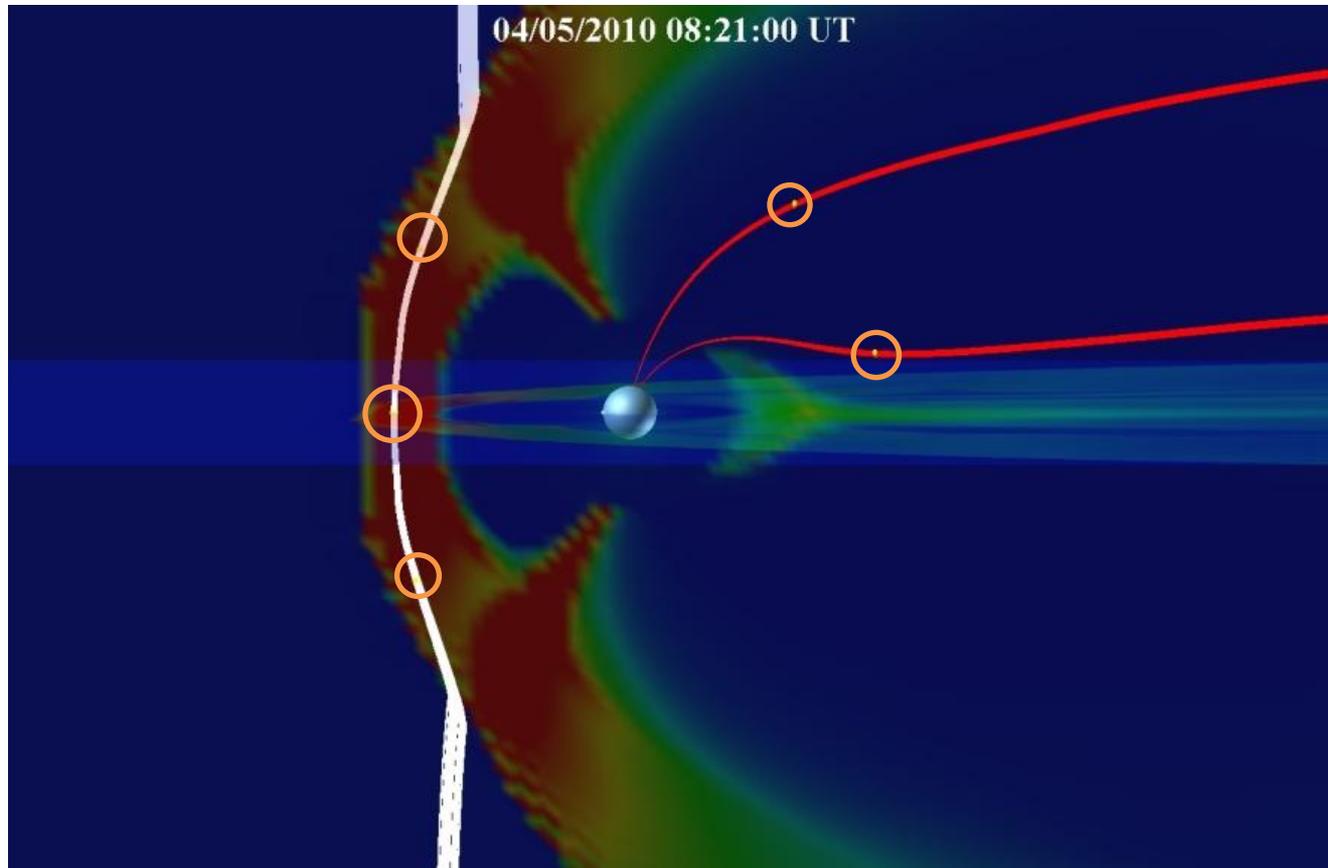
-----

法線方向の磁場強度

# Flux tube追尾

## 太陽風パラメータ

- ・昼側リコネクション
- ・ローブ
- ・プラズマシート通過

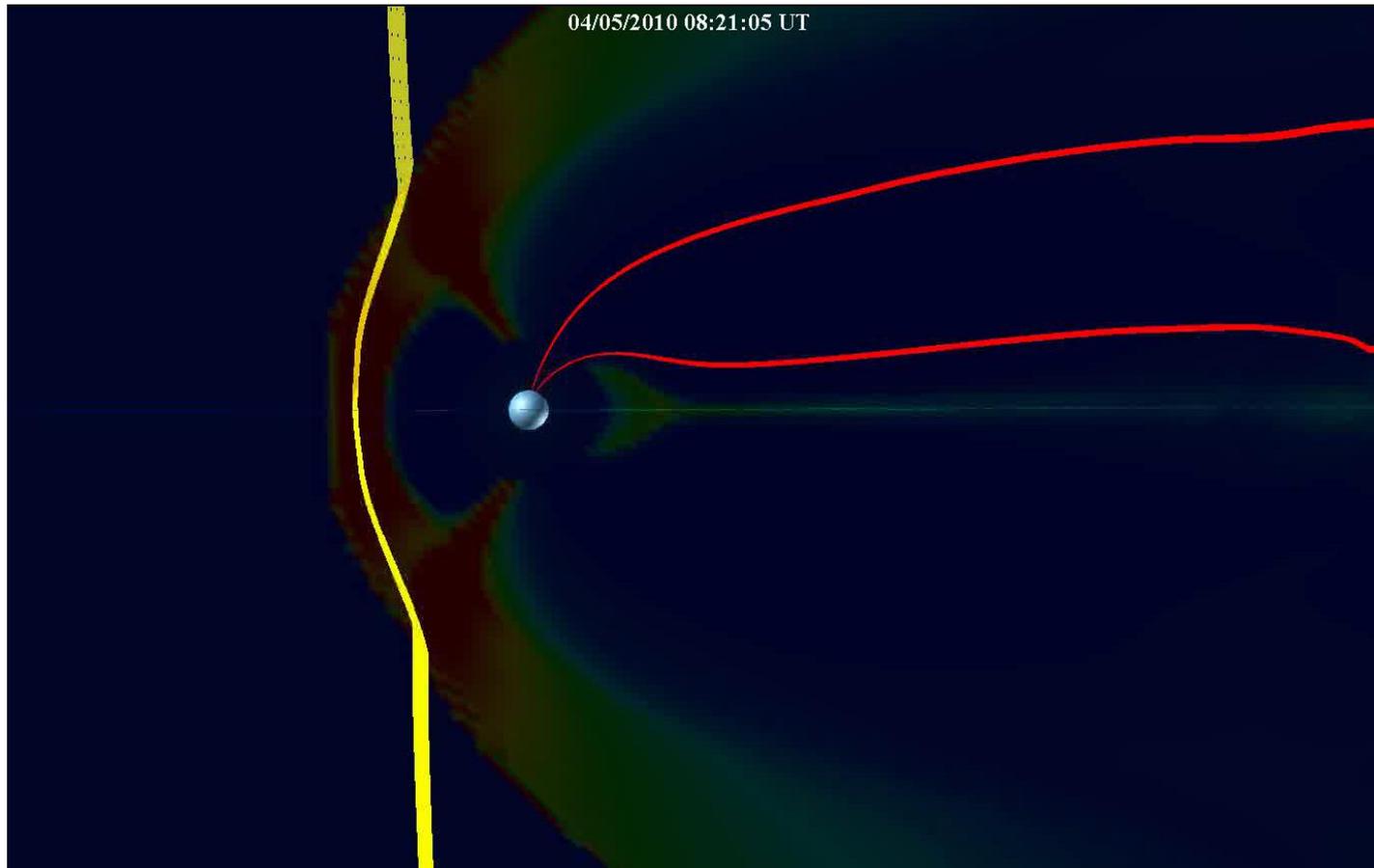


# Fluxtube追尾

緑: closed

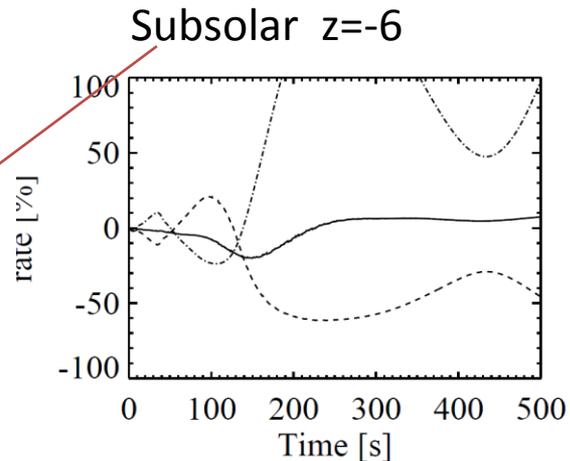
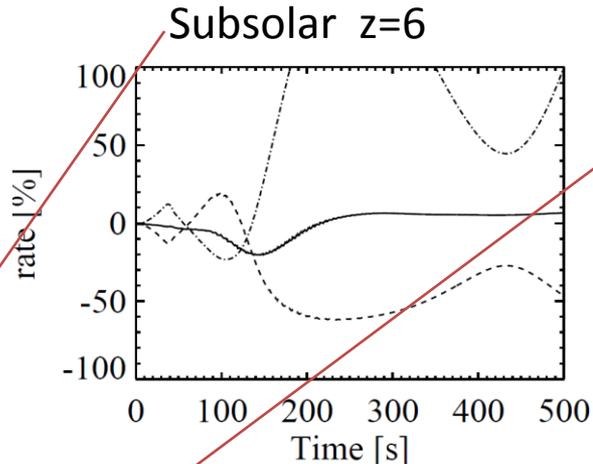
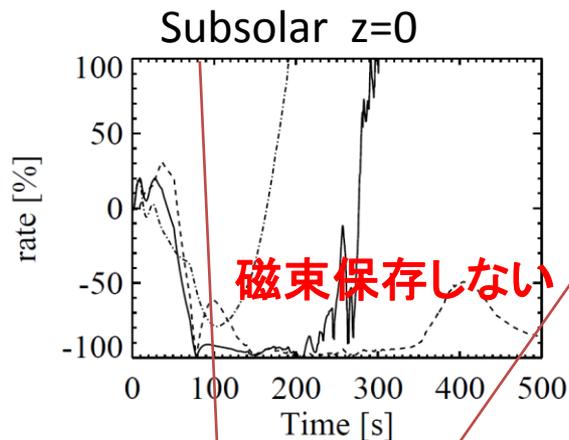
赤: open

黄: detached

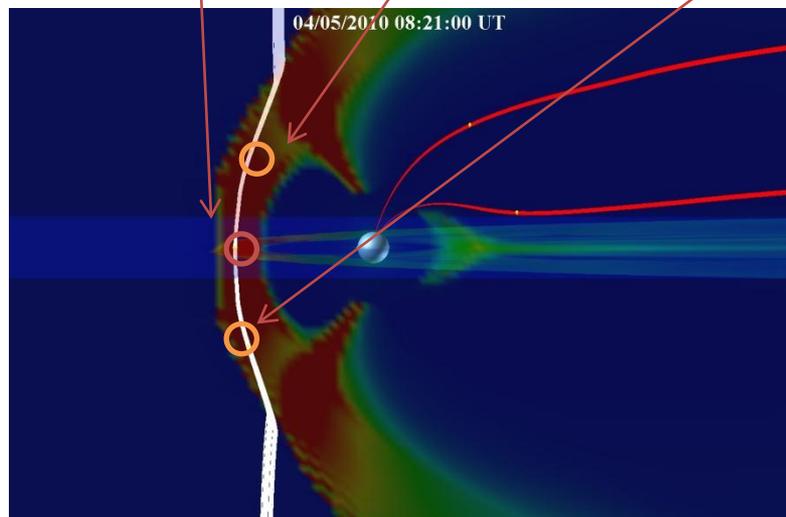


# 昼側リコネクション Flux tube

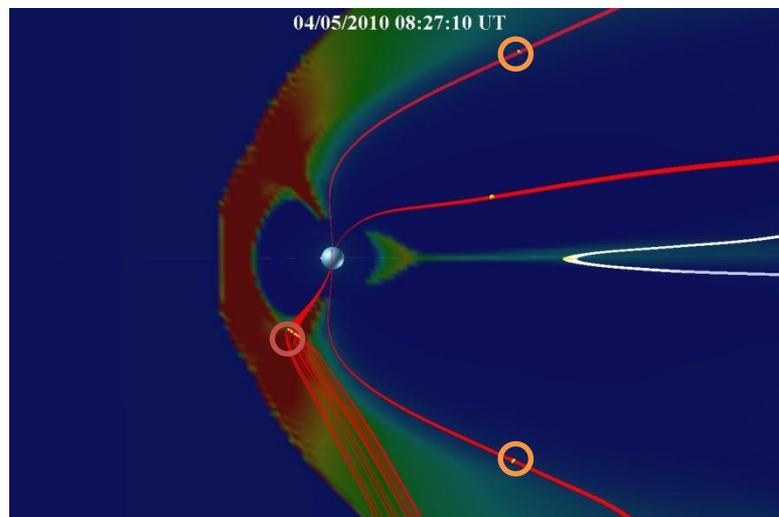
————— 磁束  
 - - - - - 法線方向の磁場強度  
 - · - · - 面積



T=0s のスナップショット



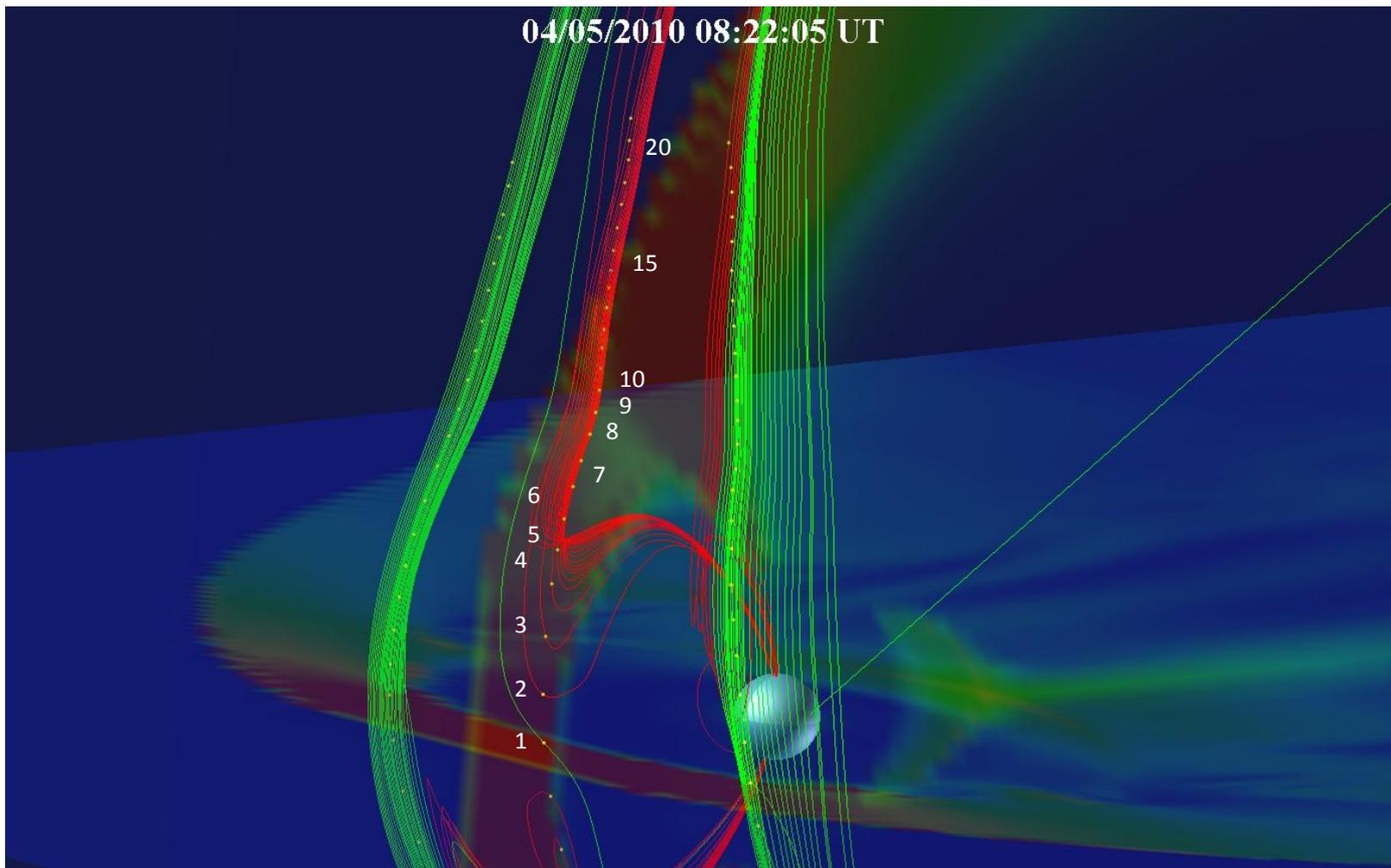
T=370s のスナップショット



・リコネクションするfluxtubeで、拡散領域を通過する微小面の磁束は時間に対して初期からの変化率が100%を超える。→磁場凍結が成り立たない。

・リコネクションするfluxtubeで、拡散領域を通過しない微小面の磁束は変動が20%程度。

# どの程度拡散するとリコネクションするか。

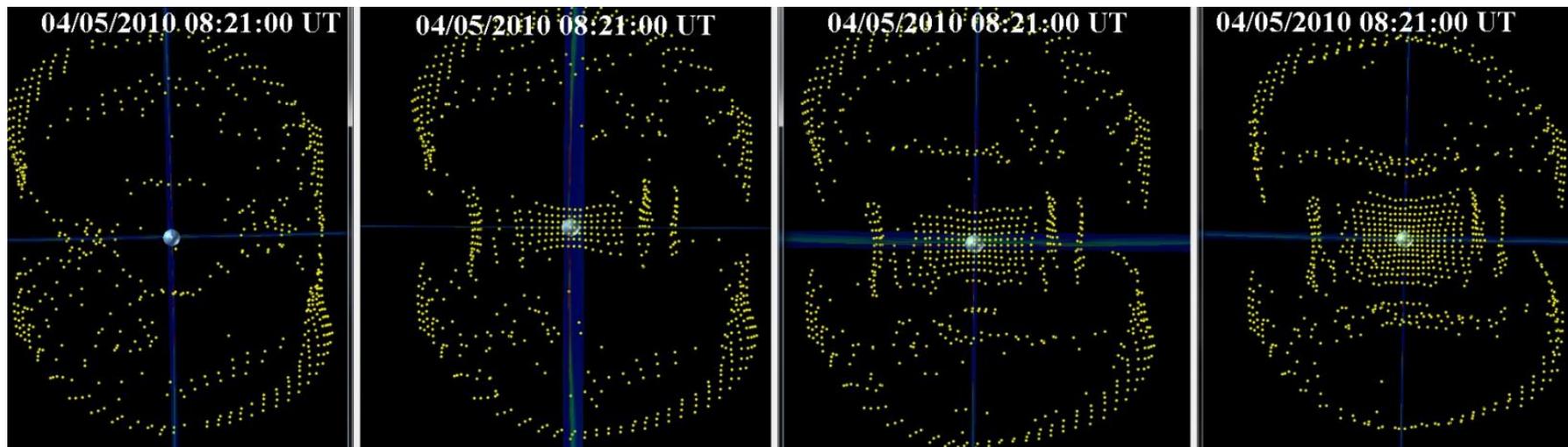


点番号1について初期からの変化が70%になった時の点から磁力線を引いた。

磁力線がリコネクションをしかけている。→ 70%以上でリコネクションする

# 拡散領域の可視化

前面から、たくさんの点(900×30個)を流し込み、初期からの変化率がある%以上の領域を可視化した。



100%

80%

60%

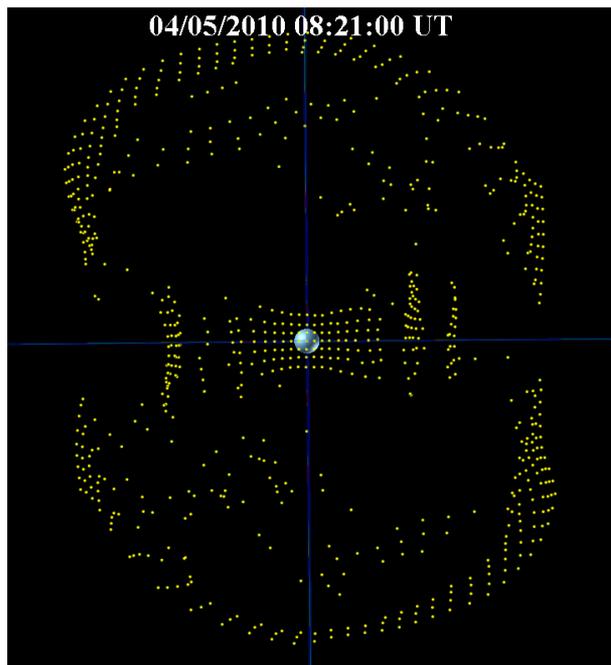
40%

太陽から地球を見た図

- 変化率が大きい領域は面積が小さくなる。
- 80%程度でリコネクションが起きる。
- 80%の図で昼側マグネットポーズでdown-dusk方向に拡散領域が分布する。拡散領域を磁力線が通過すると、リコネクションをする。
- Frankに不連続に分部している拡散領域は、KH不安定と対応する。

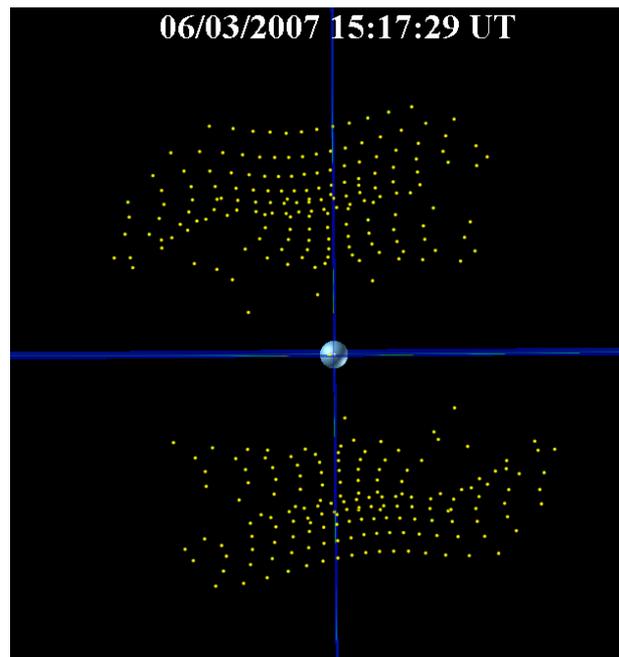
# 拡散領域のIMF依存性

$B_z = -12 \text{ nT}$ ,  $B_y = 5 \text{ nT}$



IMF南向き

$B_z = 5 \text{ nT}$ ,  $B_y = -5 \text{ nT}$



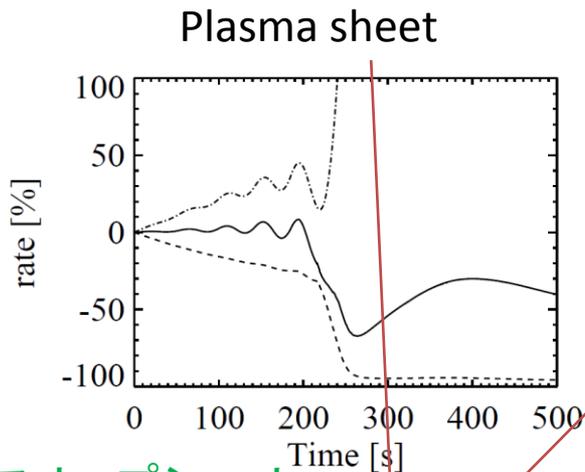
IMF北向き

変化率80%

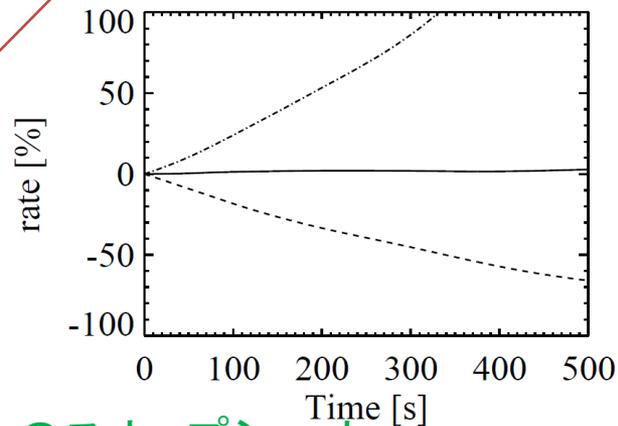
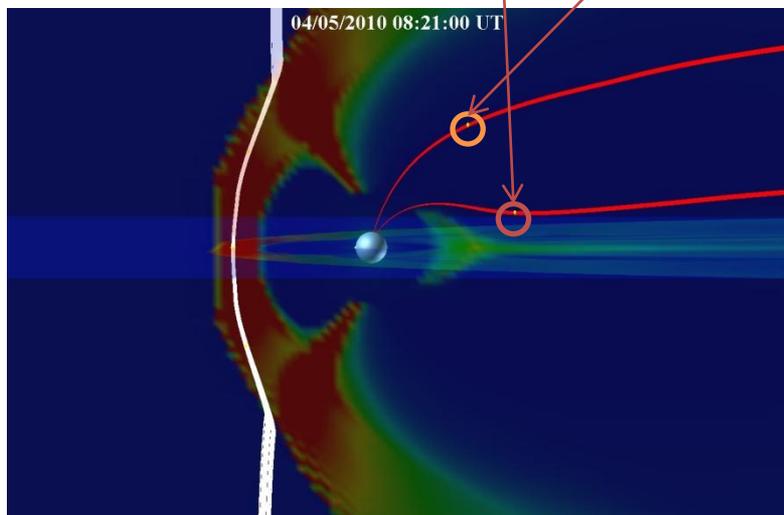
- IMFの向きによって、拡散領域が変化する。
- IMF南向きの場合、低緯度に分布する。
- IMF北向きの場合、高緯度に分布する。
- 拡散領域内でリコネクションする。

# 夜側の Flux tube

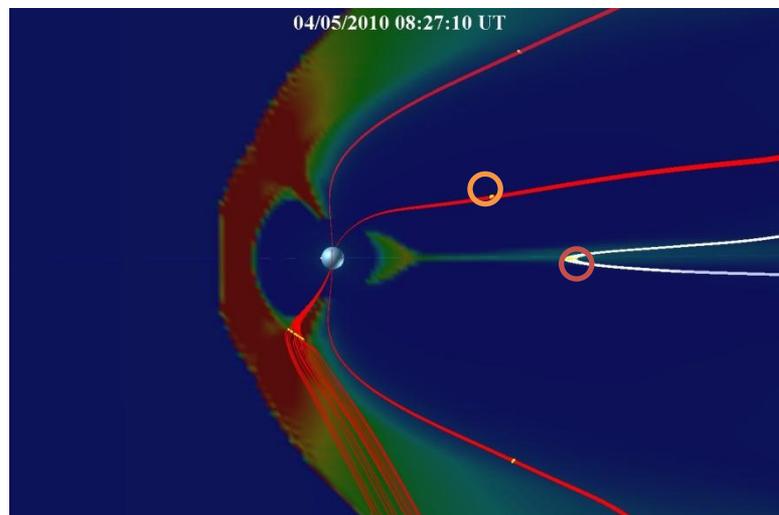
磁束  
 法線方向の磁場強度  
 面積  
 lobe



T=0s のスナップショット



T=370s のスナップショット

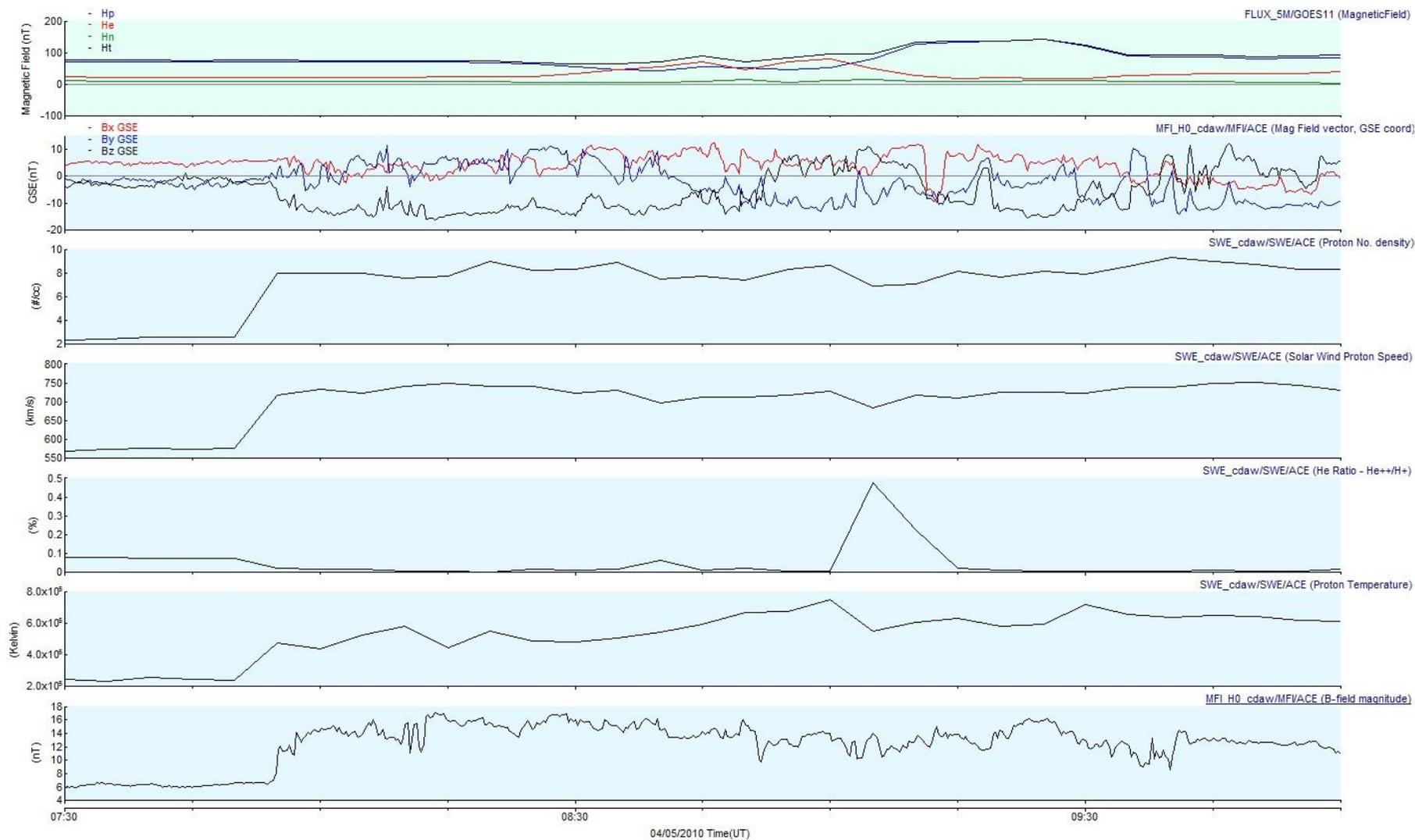


- ・プラズマシートを通過する微小面の磁束は時間に対して初期からの変化率が60%ある。  
→磁場凍結が成り立たない。
- ・ローブ領域の微小面の磁束は変動が5%以下である。

# まとめ

- 磁力線を追尾し、磁束の保存を調べることで、昼側の拡散領域を3次元的に可視化することに成功した。
- 拡散領域をモニターして磁力線を追尾することでリコネクションの可視化が可能となる。
- IMF北向きの場合、夜側のリコネクションの可視化を行い、磁気圏の対流を調べる予定である。

# 太陽風パラメータ



# 地球磁気圏Global MHDシミュレーション

## ・MHD方程式

$$\partial\rho/\partial t = -\nabla \cdot (\vec{v}\rho) + D\nabla^2\rho$$

$$\partial\vec{v}/\partial t = -(\vec{v} \cdot \nabla)\vec{v} - \nabla P/\rho + (\vec{J} \times \vec{B})/\rho + \vec{g} + \Phi/\rho$$

$$\partial P/\partial t = -(\vec{v} \cdot \nabla)P - \gamma P \nabla \cdot \vec{v} + D_p \nabla^2 P$$

$$\partial\vec{B}/\partial t = \nabla \times (\vec{v} \times \vec{B}) + \eta \nabla^2 \vec{B}$$

$$\vec{J} = \nabla \times (\vec{B} - \vec{B}_d),$$

$$\Phi = \mu \nabla^2 \vec{v}$$

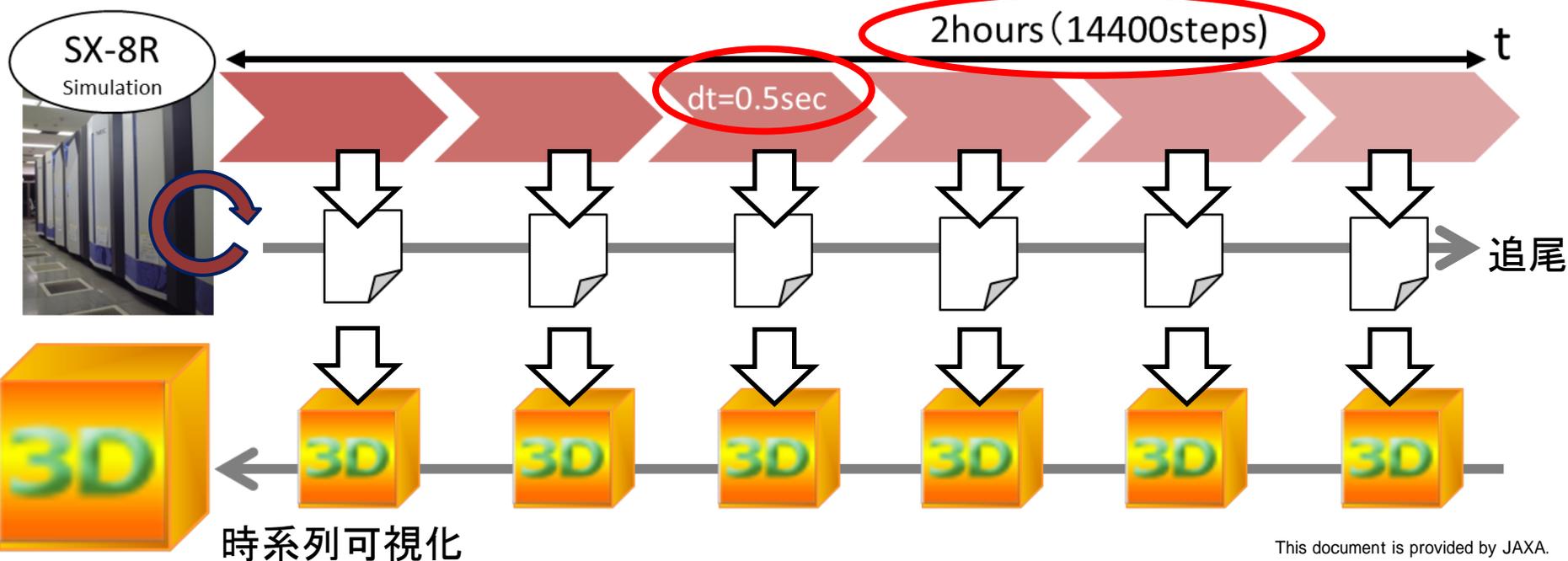
$$\gamma = 5/3$$

$$\eta = 0.0001$$

磁場の拡散  
係数一定

## ・解像度

デカルト座標系: 450(x) × 300(y) × 300(z) 等方格子 dx=0.2Re dt=0.5sec



# シミュレーションから可視化まで

これまでの一般的な手法(70日)

スパコンシミュレーション(14400ステップ)  
1週間

スパコンディスク⇒解析ディスク伝送  
1週間

標準データ形式(HDF5)変換  
30日間

合計26日

磁力線追尾(14400ステップ)  
10日

時系列3次元可視化  
16日

3000ステップの場合は5.5日

サイエンスクラウド高速処理技術(8日)

スパコンシミュレーション(14400ステップ)  
1週間

スパコンディスク⇒解析ディスク伝送  
0時間

標準データ形式(HDF5)変換  
0時間

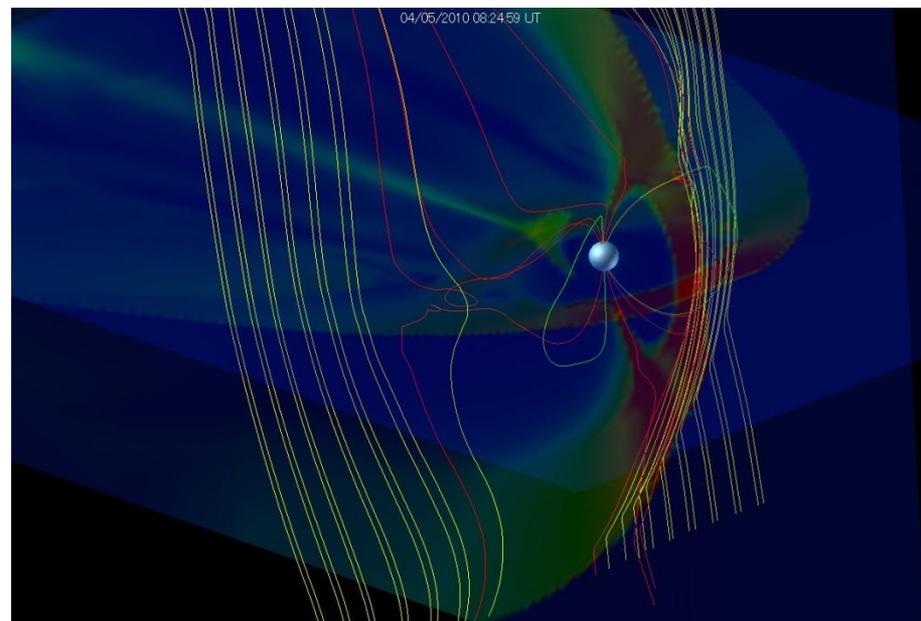
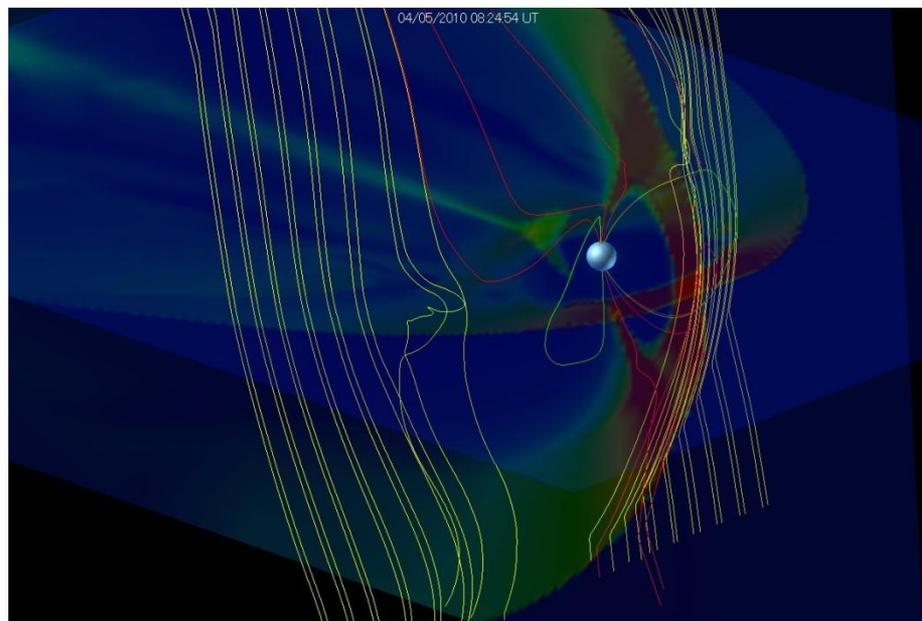
合計14時間

磁力線追尾(14400ステップ)  
10時間

時系列3次元可視化  
4時間

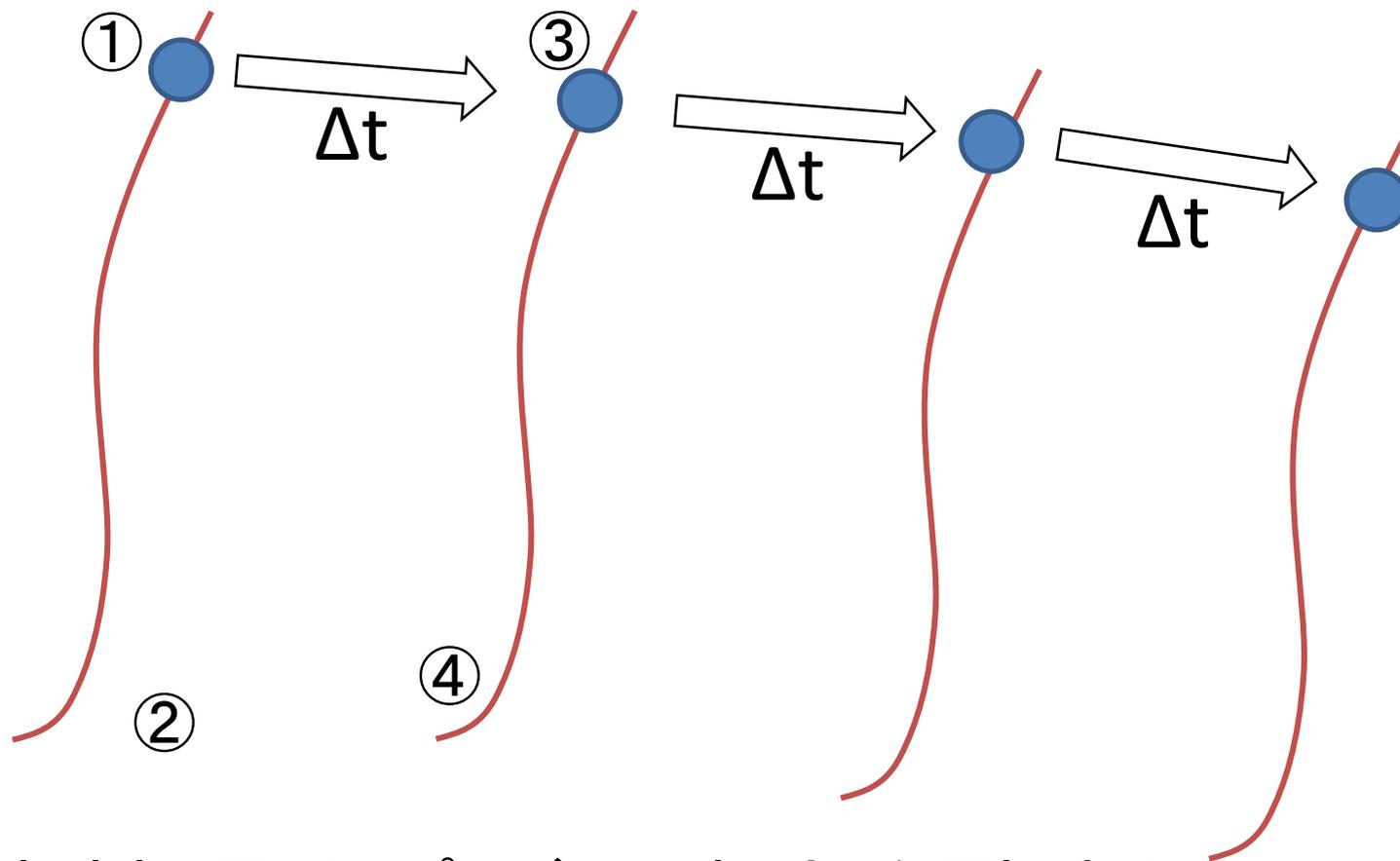
3000ステップの場合は3時間

# KHによるリコネクションの可視化



磁気圏のflankでリコネクションをする

# 磁力線追尾可視化手法



- ①任意時刻・場所のプラズマ要素(点)を選択する。
- ②要素点を通る磁力線を3D可視化する。
- ③プラズマ速度により $\Delta t$ 後の要素点の位置を求める。
- ④要素点を通る磁力線を3D可視化する。

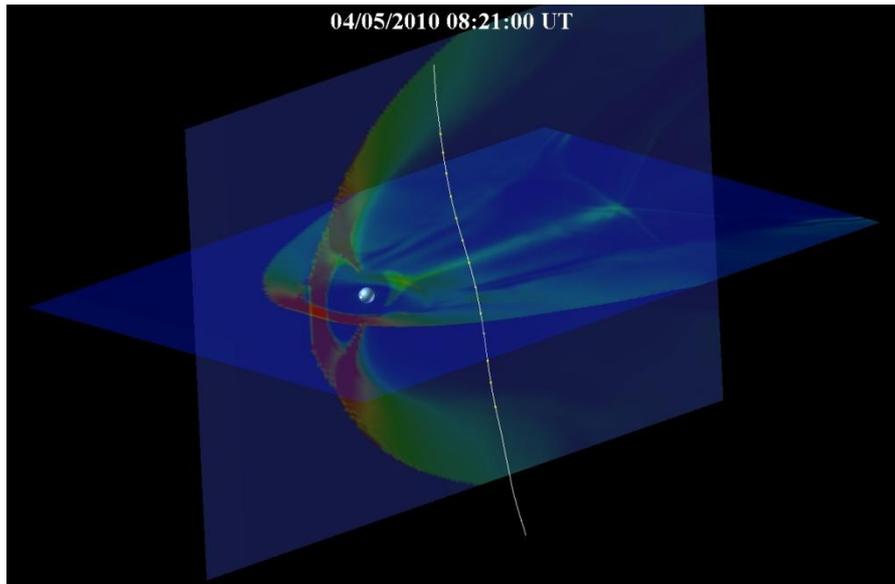
# 磁力線追尾可視化

前例がない可視化技法のため、**試行錯誤中**...

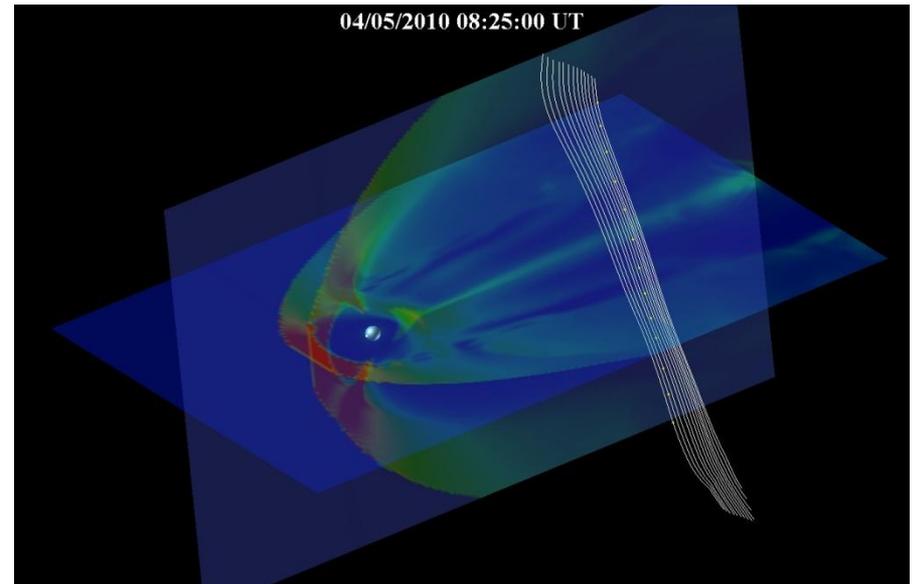
1. プラズマの磁力線凍結 (Frozen-in) を仮定してもよいか？
2. 数値誤差 (シミュレーション誤差・可視化誤差) による“磁力線可視化のずれ”はあるか？
3. “磁力線”で可視化するか？“磁束管 (チューブ)”で可視化するか？
4. リコネクション (交差する2本の磁力線のつながり換え) は可視化できるか？

一本の磁力線上に複数点始点を置き追尾した。

T=0s のスナップショット



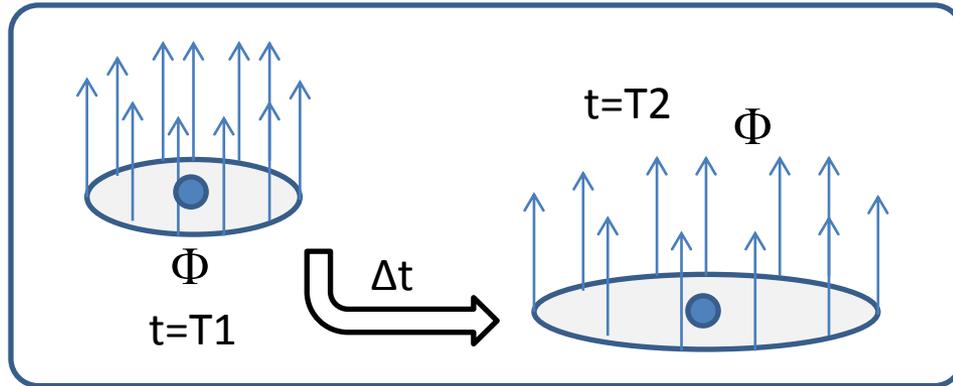
T=240s のスナップショット



・シース内では磁束がほぼ保存するが(初期からの磁束の変化が5%以内)磁力線上で始点を追尾すると磁力線が数Re程度にばらけてしまう。

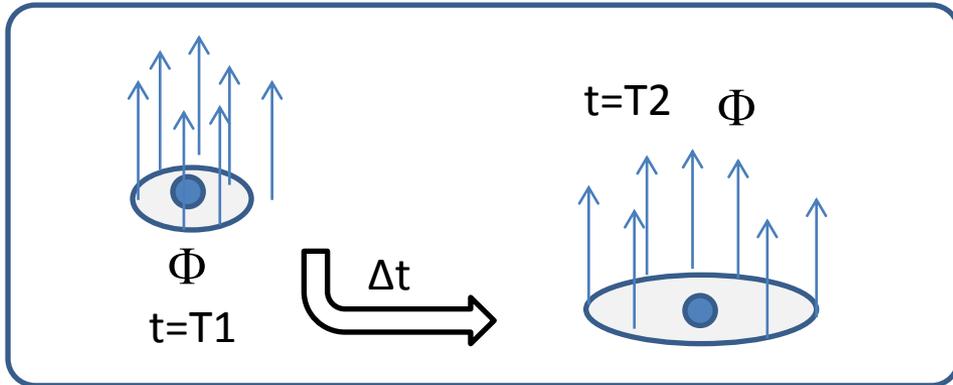
・磁束の保存と磁力線がばらけることについて結果が矛盾しているように見える理由は、磁力線を書く際に磁場に沿って積分していくので、積分した距離だけ磁場の誤差(拡散やdivBなど)がたまっていくためと考えられる。

# 3次元可視化：“磁束管”か？“磁力線”か？



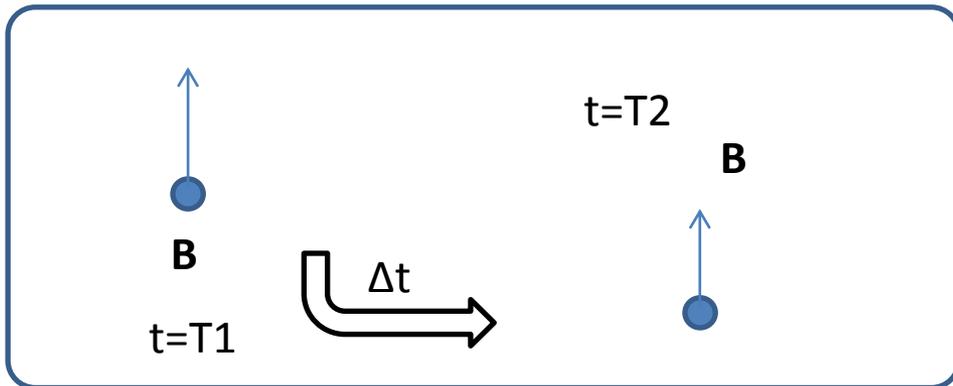
$\Phi(T1) \neq \Phi(T2)$   
 管内に磁場の散逸(数値粘性・数値誤差・リコネクションなど)があるために、磁束が保存しない。  
 $\Rightarrow$  管の面積を小さくする。

管の面積を小さくする。



$\Phi(T1) = \Phi(T2)$   
 管内の磁束が保存している。  
 $\Rightarrow$  “Frozen-in”が仮定できる。  
 “磁束管”を可視化する。

管の面積を無減小にする。

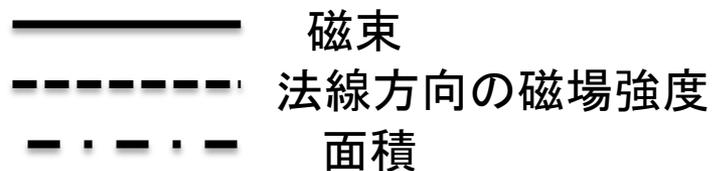


$B(T1) \Rightarrow B(T2)$   
 $\Rightarrow$  “Frozen-in”が仮定できる。  
 管中心を通る“磁力線”を可視化する。

どちらもよい。

# T=0sからの物理量の変化率

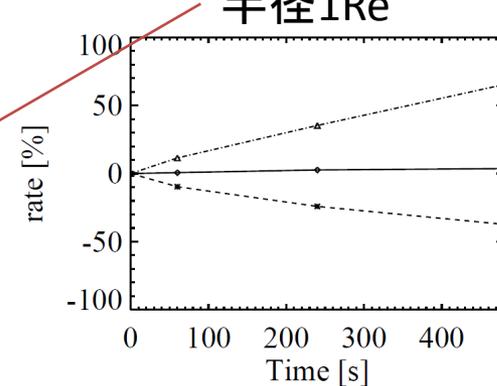
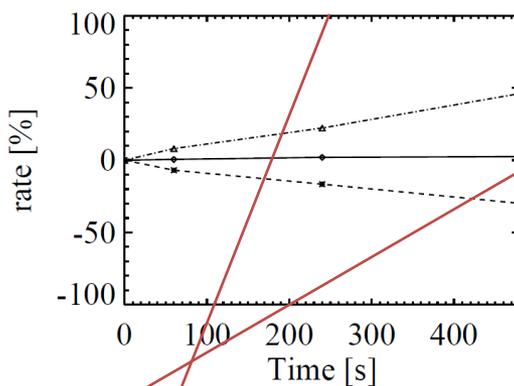
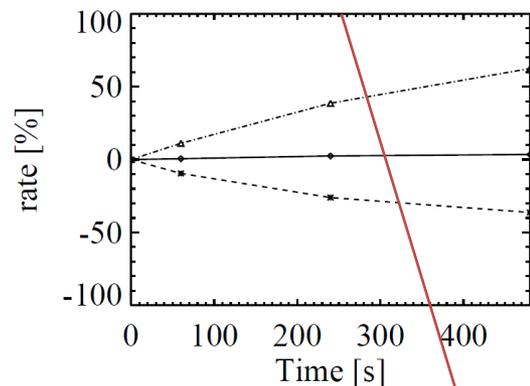
## 初期状態の面積依存性



半径0.05Re

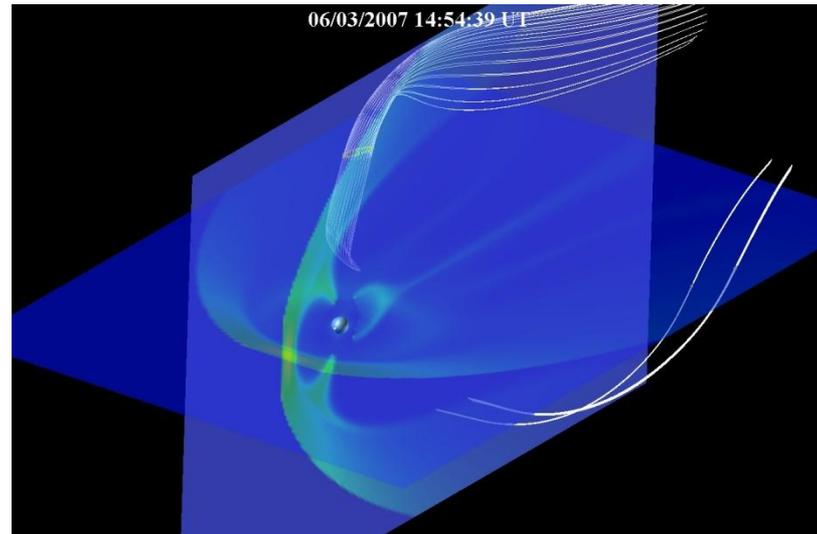
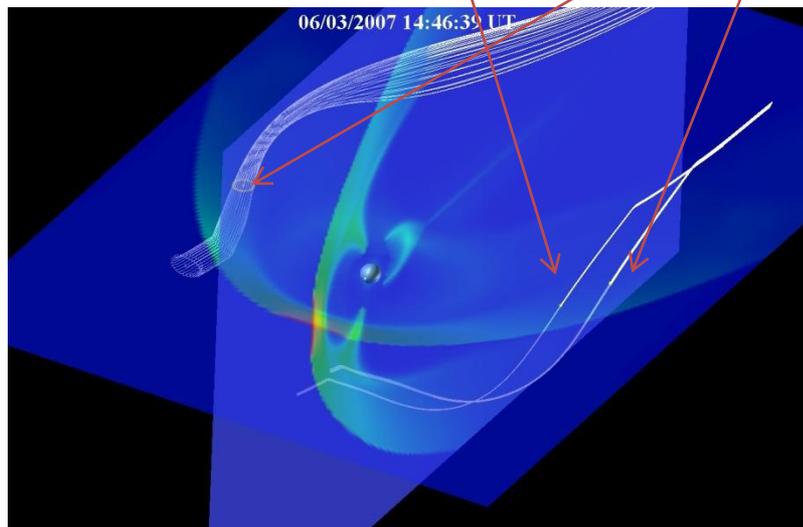
半径0.1Re

半径1Re



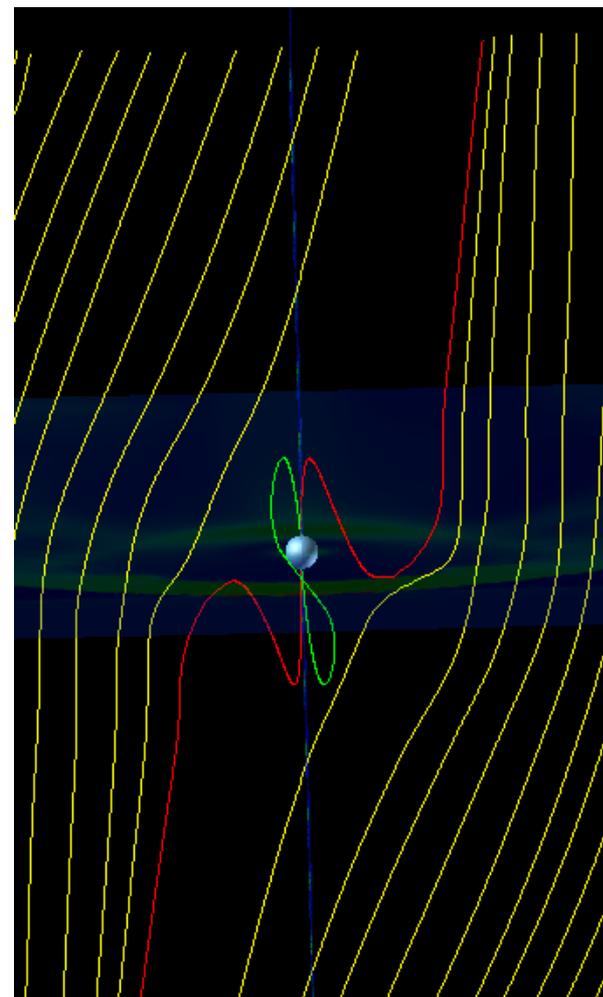
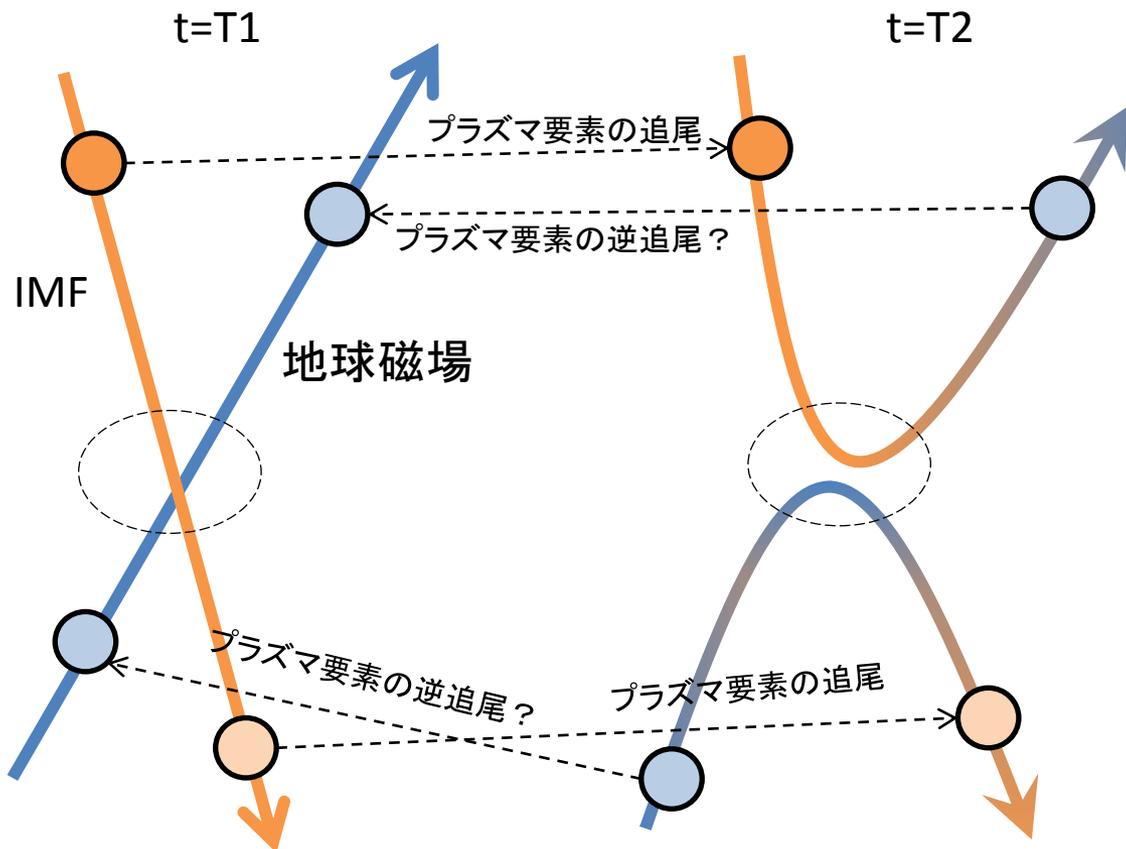
## T=0sのスナップショット

## T=480sのスナップショット



- どの面積の磁束も時間に対して初期からの変化率が5%以内である。  
→ ほぼ磁場凍結が成り立っている。
- 一番変化率が小さいのは半径0.1Reの場合である。(計算格子と同程度の面積)

# リコネクション(磁力線のつなぎ換え)を可視化できるか？(例：南向きIMFの場合)



- IMFでリコネクション点を“挟む”2点を選択できるか？
- “逆追尾”は容易ではない。⇒“つなぎ換わる地球磁場”は予測が難しい。

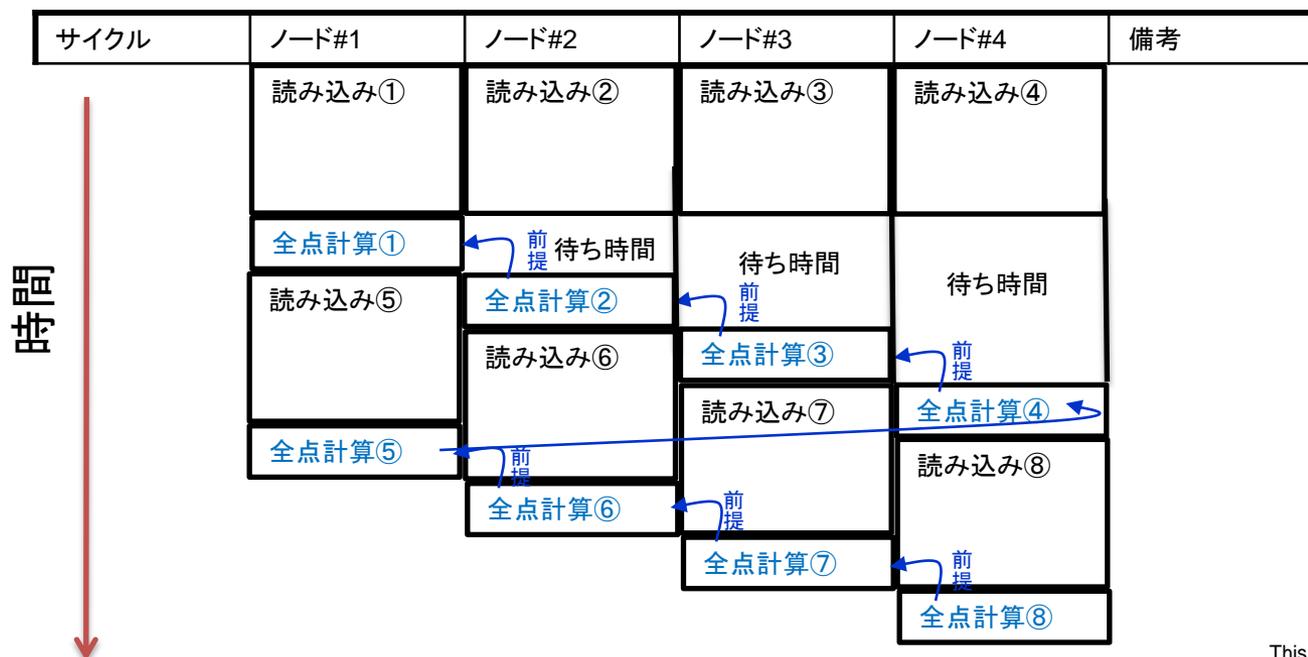
# 流跡線追尾方法

- ①ある時間  $T_0$  の、追尾する点  $\vec{x}_0$  とシミュレーションデータを読み込む
- ②シミュレーションデータから追尾する点の速度  $\vec{v}$  を線形に補間
- ③時間方向に発展させる
- ④次の時間  $T_1$  の、点を求める



シミュレーションデータのHDF変換、流跡線追尾ともにI/Oに時間がかかる

※処理ノードが4つで、追尾点が200個(全点)、それぞれが処理するデータが8個(8step①~⑧)の場合の処理の流れ(例)



# Galaxy15のMHDシミュレーション

## ・MHD方程式

$$\partial\rho/\partial t = -\nabla \cdot (\vec{v}\rho) + D\nabla^2\rho$$

$$\partial\vec{v}/\partial t = -(\vec{v} \cdot \nabla)\vec{v} - \nabla P/\rho + (\vec{J} \times \vec{B})/\rho + \vec{g} + \Phi/\rho \quad \Phi = \mu\nabla^2\vec{v}$$

$$\partial P/\partial t = -(\vec{v} \cdot \nabla)P - \gamma P\nabla \cdot \vec{v} + D_p\nabla^2 P \quad \gamma = 5/3$$

$$\partial\vec{B}/\partial t = \nabla \times (\vec{v} \times \vec{B}) + \eta\nabla^2\vec{B} \quad \eta = \underline{0.0001}$$

$$\vec{J} = \nabla \times (\vec{B} - \vec{B}_d),$$

磁場の拡散係数は一定

## ・解像度

デカルト座標系: 450(x) × 300(y) × 300(z) 等方格子 dx=0.2Re

## ・境界条件

外側境界

太陽風側: 太陽風の値で固定

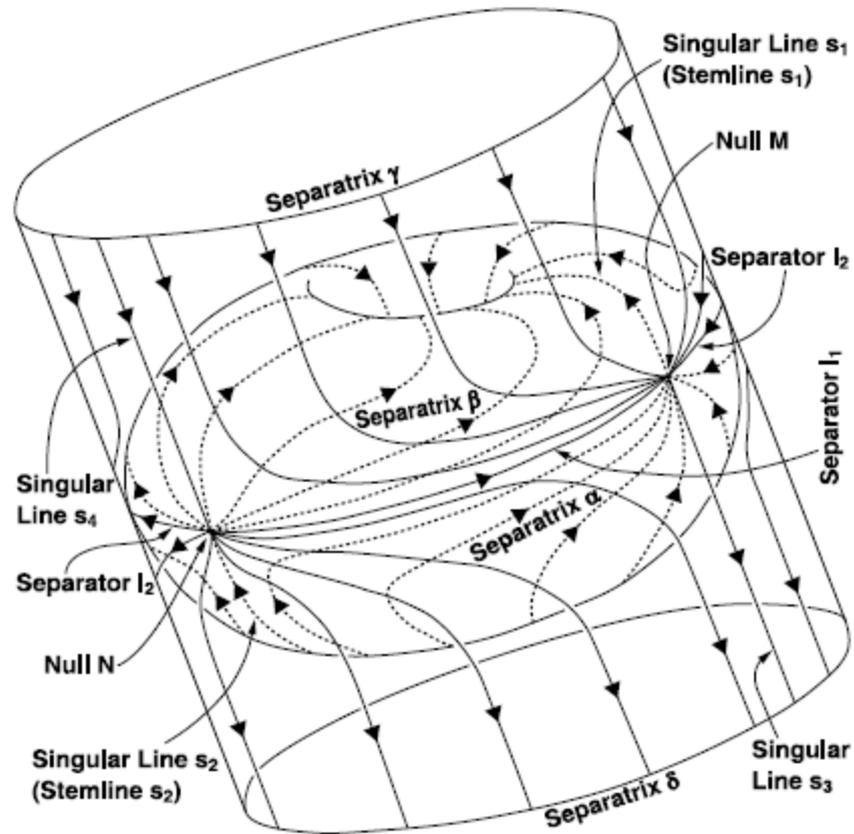
テール側: 自由境界

内側境界: 4Re以内は初期値。4-5Reで初期値と計算値をマージ。

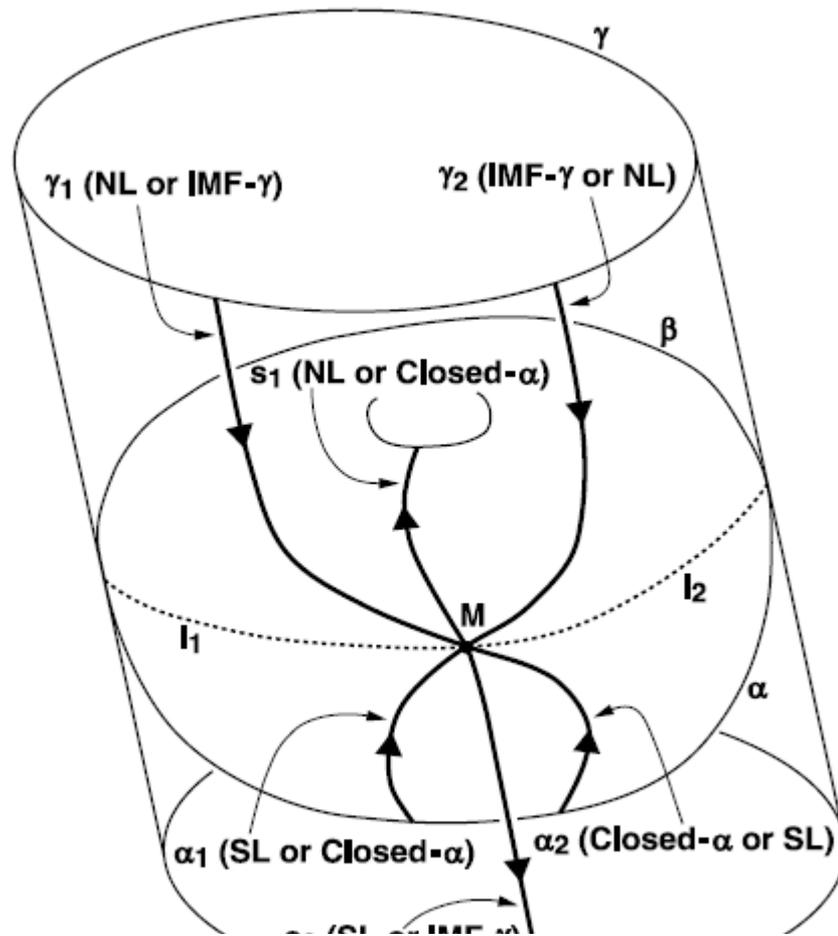
## ・太陽風パラメータ

Galaxy10の時(8:00から10:00 UT)の太陽風を5分値で入れてシミュレーションをした。

→fluxrope生成と昼側リコネクションを可視化した。



**Figure 2.** The separatrix surfaces (topologically a torus and a cylinder) resulting from superposition of a dipole field and a uniform IMF, with the arrowed lines representing magnetic field lines on the separatrix surfaces (not all kinds of field lines are shown). Field lines on the torus surface are shown by dotted lines, while field lines on the cylinder surface are shown by solid lines.



**Figure 3.** The elements of reconnecting field lines associated with null  $M$ . The annotation “SL or Closed- $\alpha$ ” or “Closed- $\alpha$  or SL” means that when  $\alpha_1$  represents a field line in South Lobe (or Closed- $\alpha$ ),  $\alpha_2$  represents a field line in Closed- $\alpha$  (South Lobe). Similarly, the annotation “NL or IMF- $\gamma$ ” or “IMF- $\gamma$  or NL” means that when  $\gamma_1$  represents a field line in North Lobe (or IMF- $\gamma$ ),  $\gamma_2$  represents a field line in IMF- $\gamma$  (North Lobe). Singular line  $s_1$  ( $s_3$ ) belongs to either North Lobe or Closed- $\alpha$  (either South Lobe or IMF- $\gamma$ ).

$$\begin{aligned} \nabla \cdot \sigma \nabla \Phi_I &= G_m(\text{rot} \mathbf{B}_1 \cdot \mathbf{n}_b) = J_{\parallel}, \\ \sigma &= \sigma_{\text{EUV}} + k_2 \sigma_{\text{Diff}}(P, \rho) + k_3 \sigma_J(J_{\parallel}), \\ \Phi_m &= \Phi_I - k_4 f_2(J_{\parallel}) |J_{\parallel}|, \\ \mathbf{m} - (\mathbf{m} \cdot \mathbf{n}_b) \mathbf{n}_b &= -\rho \nabla \Phi_m \times \mathbf{B} / B^2, \end{aligned}$$

$$\frac{\partial(\mathbf{m} \cdot \mathbf{n}_b)}{\partial l_b} = 0,$$

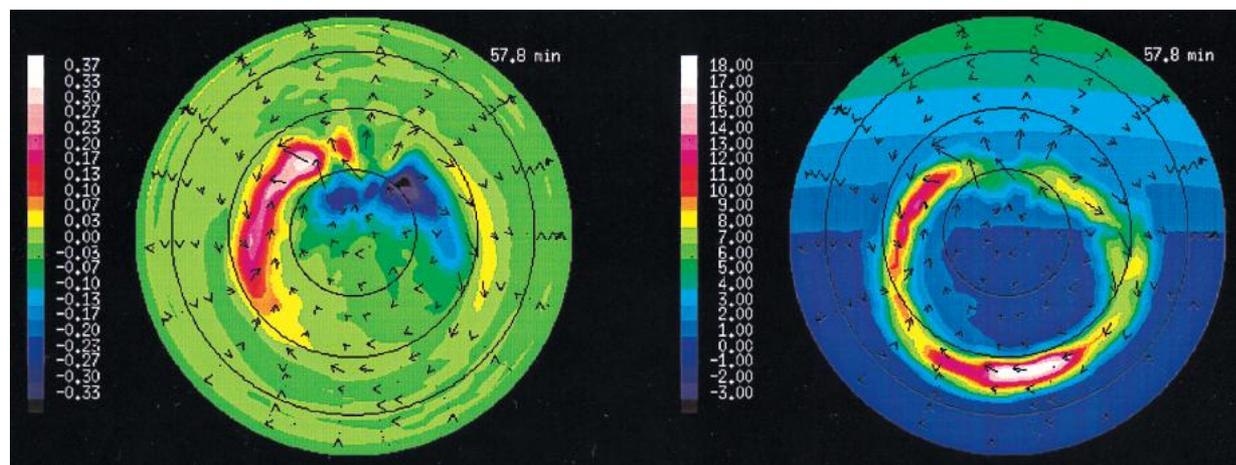
$$\begin{aligned} \rho &= \rho_b, \\ P &= P_b, \quad (\mathbf{m} \cdot \mathbf{n}_b > 0) \end{aligned}$$

$$\frac{\partial \rho}{\partial l_b} = \frac{\partial P}{\partial l_b} = 0, \quad (\mathbf{m} \cdot \mathbf{n}_b < 0)$$

磁気圏で計算された沿磁力線電流から電気伝導度と電離層の電場ポテンシャルを求める。

電離層の電場ポテンシャルから磁気圏のポテンシャルを求め、磁場と垂直方向の運動量を求める。

磁場と平行方向の運動量は自由境界。



沿磁力線電流

電気伝導度

Merging cells : open-closed境界を2回横切る

Lobe cells : open領域

Viscous cells : closed領域

round cells : a merging cell and a lobe cell

crescent cells : a merging cell and viscous cell

Siscoe et al., 2001b

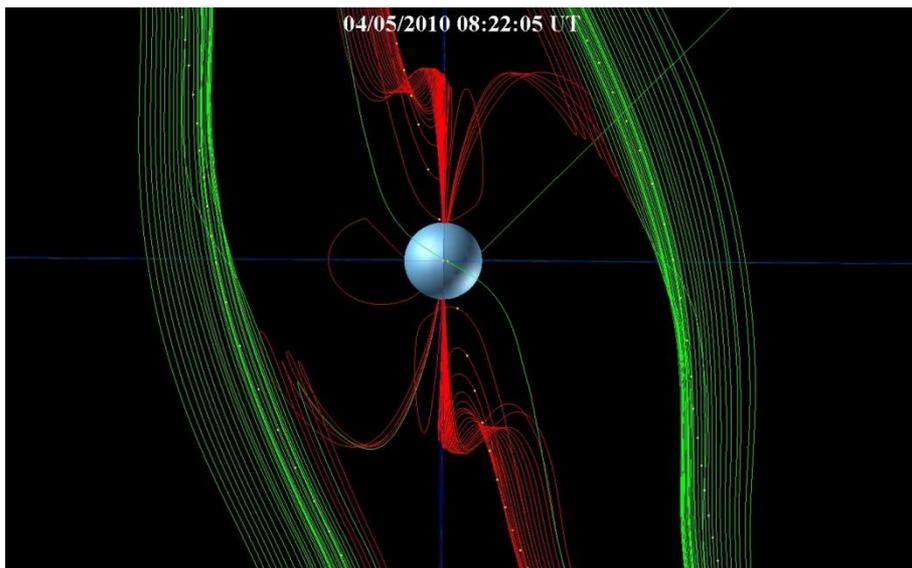
Separator line: dayside reconnection was expected to occur  
along a field line on the

separatrix : open-closed field line boundary

surface connecting the magnetic null in one hemisphere  
and the ionosphere in the other hemisphere

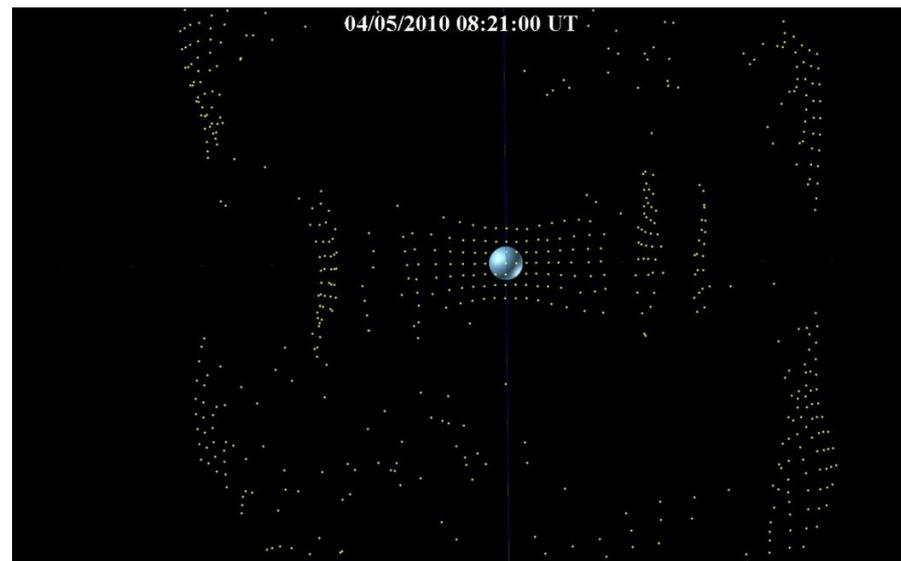
Field –aligned potential drop

# 拡散領域とリコネクションの対応関係



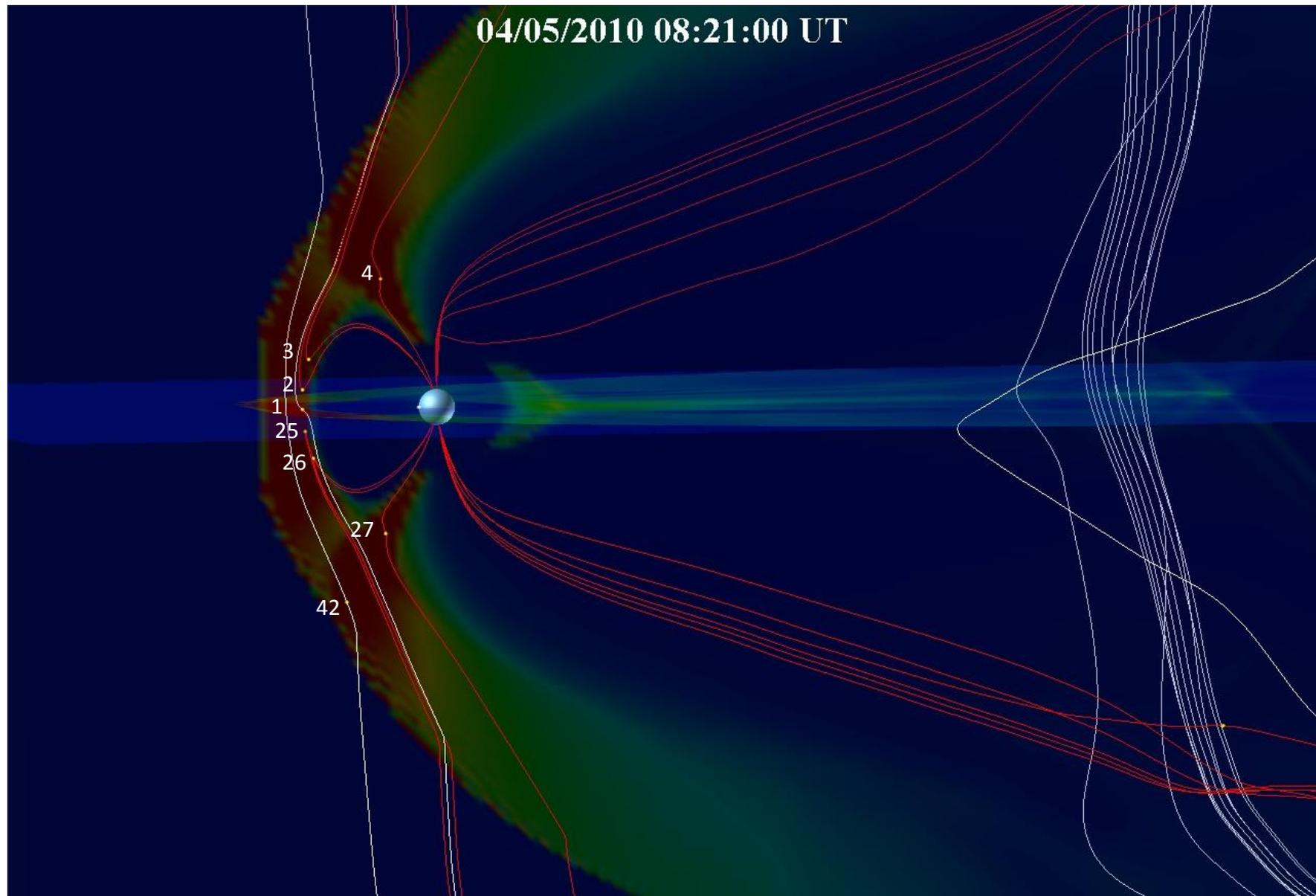
磁束の変化が70%~80%の間は  
リコネクションする閾値がある。

リコネクションは拡散領域全体で  
磁力線が繋ぎ変わる。



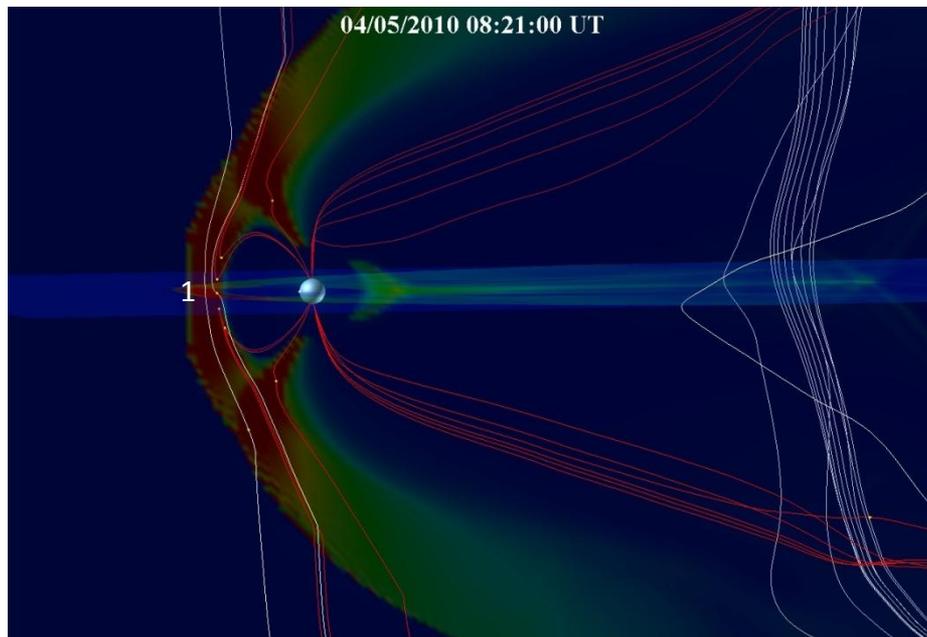
磁束の変化が80%以上の領域

この領域を通過すると、リコネクションする。



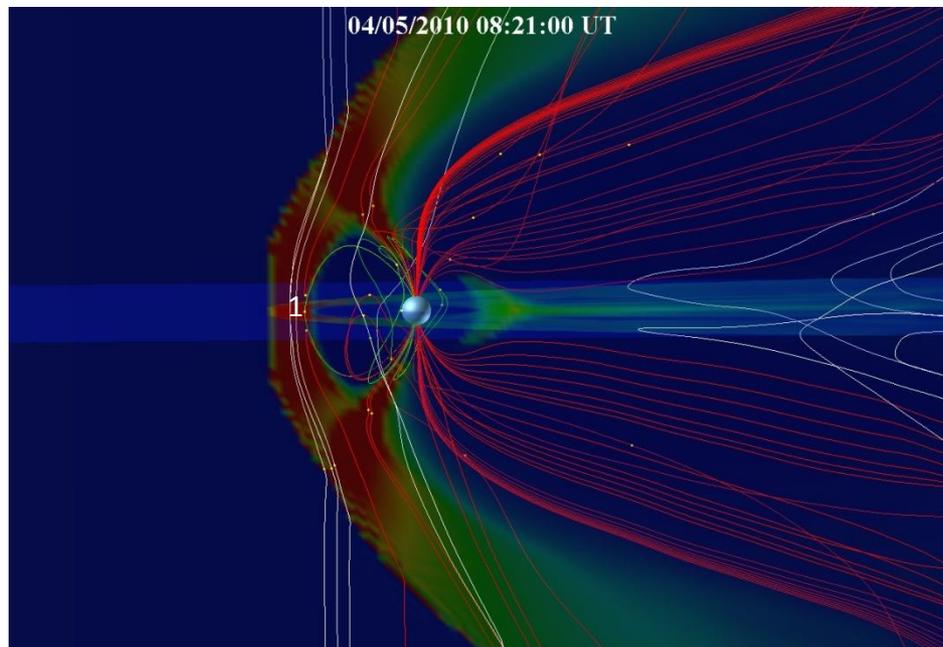
line1s70.gfaの図

70%以上の点から磁力線を引いた。  
点番号1の磁力線がリコネクションをしかけている。



70%以上

点番号1の磁力線  
detached



80%以上

点番号1の磁力線  
closed

→  
70%~80%の間で  
リコネクションする閾  
値がある。

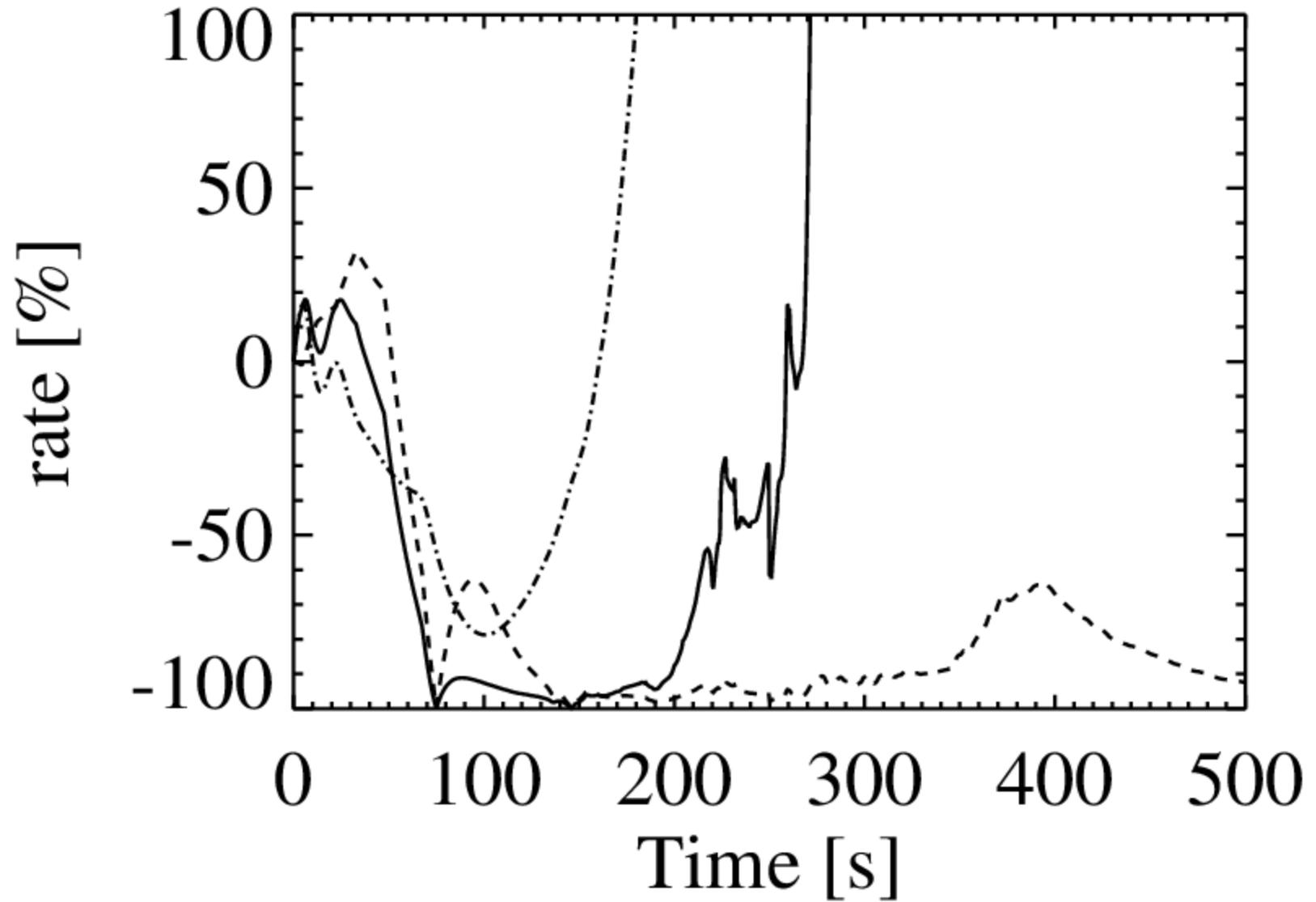
# PSファイルと点番号の対応

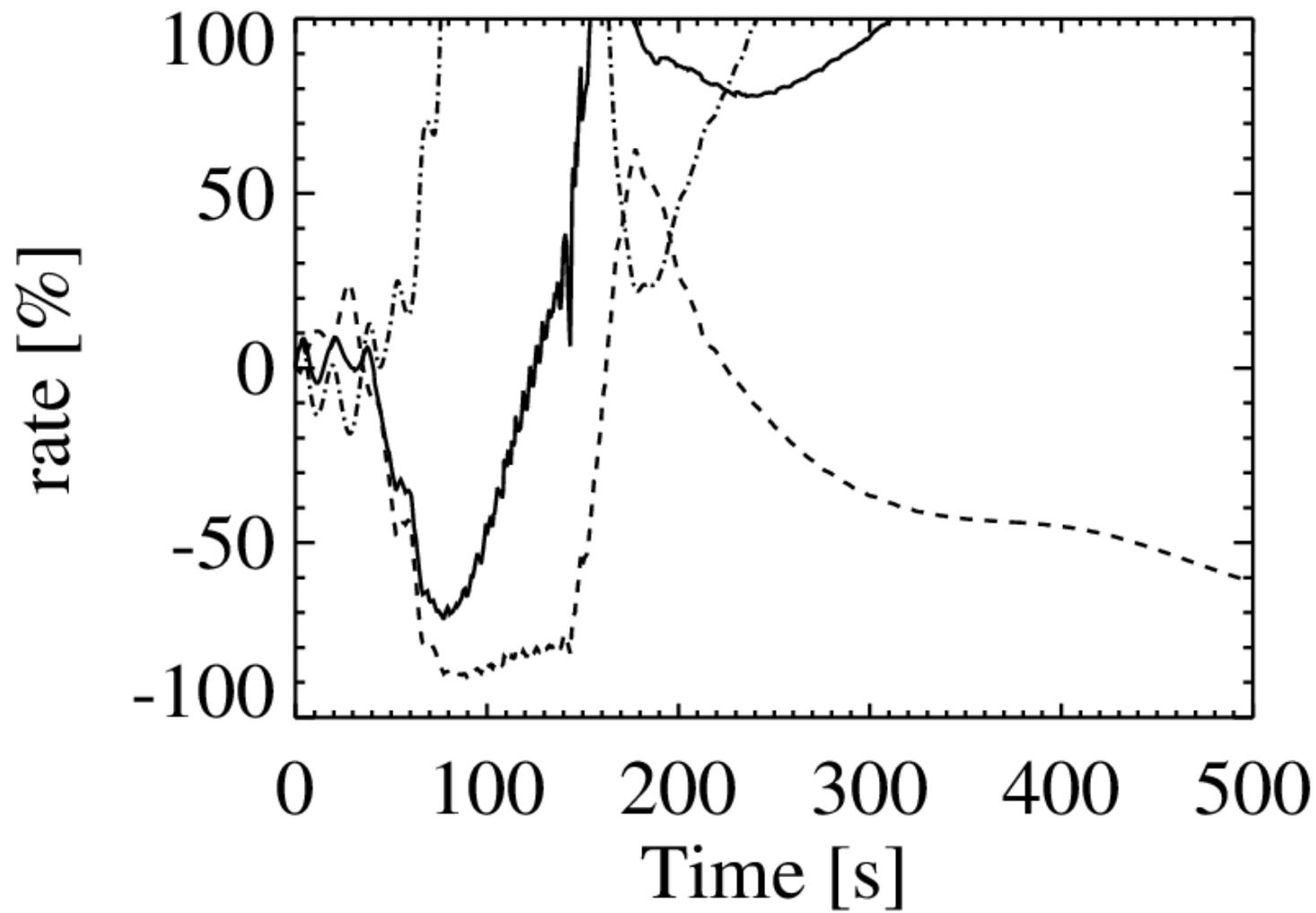
nidl3\_点番号.ps

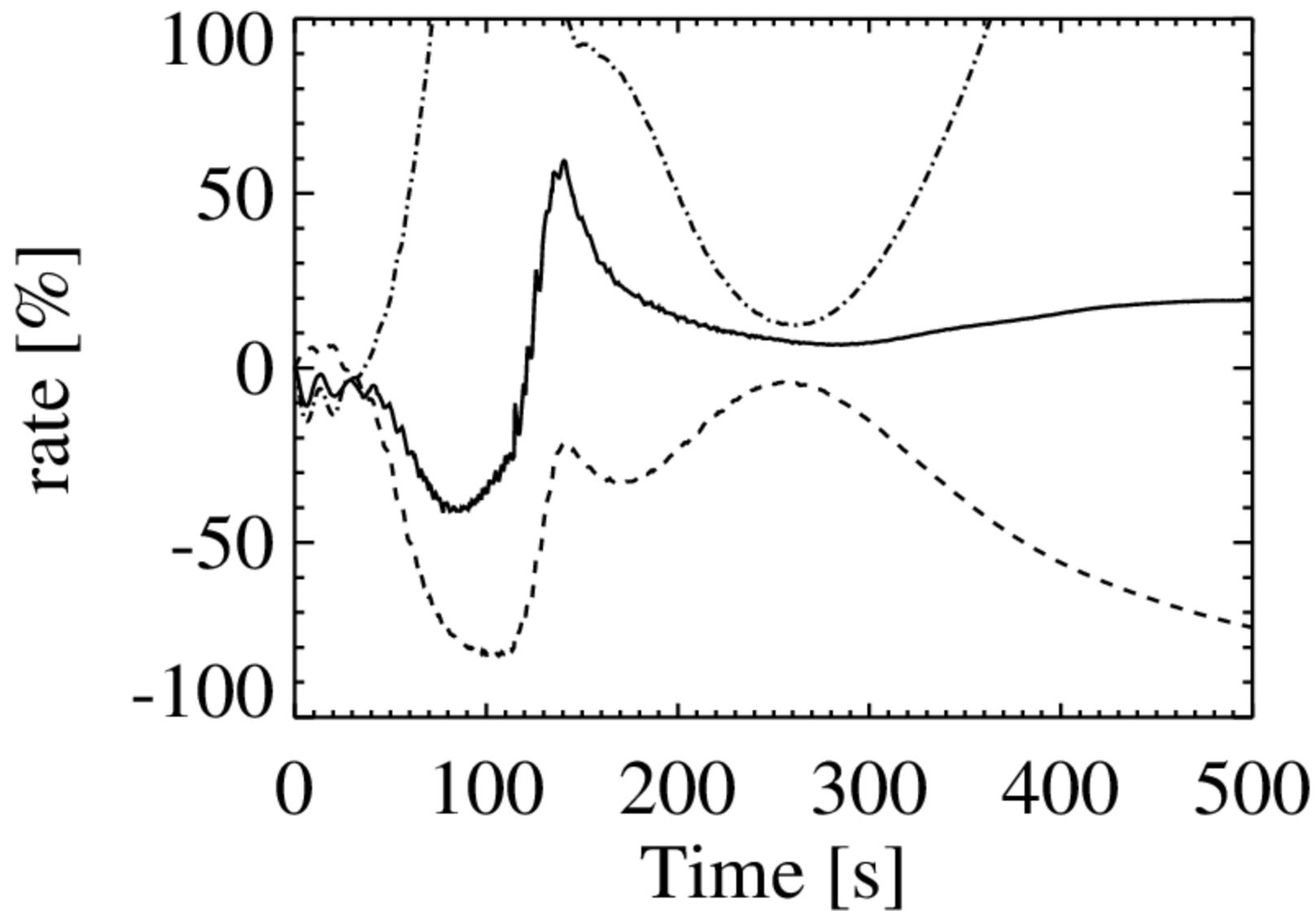
時間 {(step-2521)*0.5秒後},	点番号,	x,	y,	z,	初期からの変化率	PSファイルがあるディレクトリ
2529	42	0.5846867085E+001	0.3218153000E+001	-0.1049670982E+002	0.7502177429E+002	ショック通過による
2649	2	0.7461172104E+001	-0.1155396029E+000	0.1062803030E+001	0.7077864075E+002	最初のリコネクション領域通過
2650	25	0.7434258938E+001	0.3616333008E+000	-0.1207507968E+001	0.7016730499E+002	
2651	1	0.7522755146E+001	0.1038341969E+000	-0.8811950684E-002	0.7044766235E+002	
2666	26	0.7064517975E+001	0.6422882080E+000	-0.2675322056E+001	0.7013359833E+002	
2672	3	0.7033833027E+001	-0.4208754897E+000	0.2721842051E+001	0.7013373566E+002	
2796	27	0.3143332005E+001	0.1065680027E+001	-0.6868597031E+001	0.7142364502E+002	カスプ
2804	4	0.2892777920E+001	-0.8661766052E+000	0.7060239792E+001	0.7122463226E+002	
3868	44	-0.5850888062E+002	0.1014957047E+002	-0.2766995049E+002	0.1997906860E+004	テールへ流される
3885	24	-0.5862622070E+002	-0.9660490036E+001	0.2790712929E+002	0.2115540039E+004	
3889	43	-0.5856842041E+002	0.9989152908E+001	-0.2751299095E+002	0.1442674072E+004	
3908	23	-0.5863343811E+002	-0.9518825531E+001	0.2766810036E+002	0.3401620117E+004	
3930	22	-0.5866619110E+002	-0.9445301056E+001	0.2742439079E+002	0.3723012451E+004	
			:			

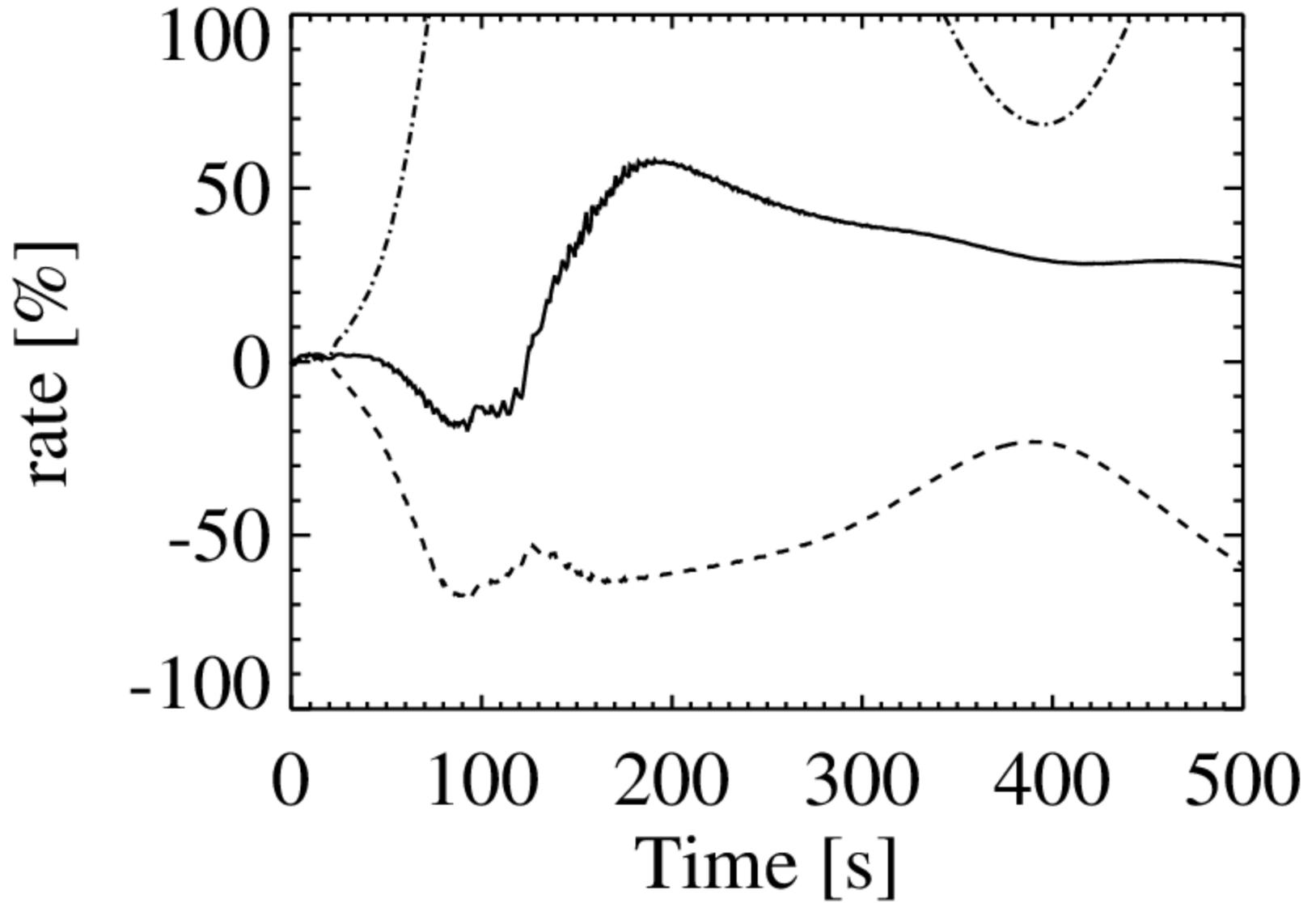


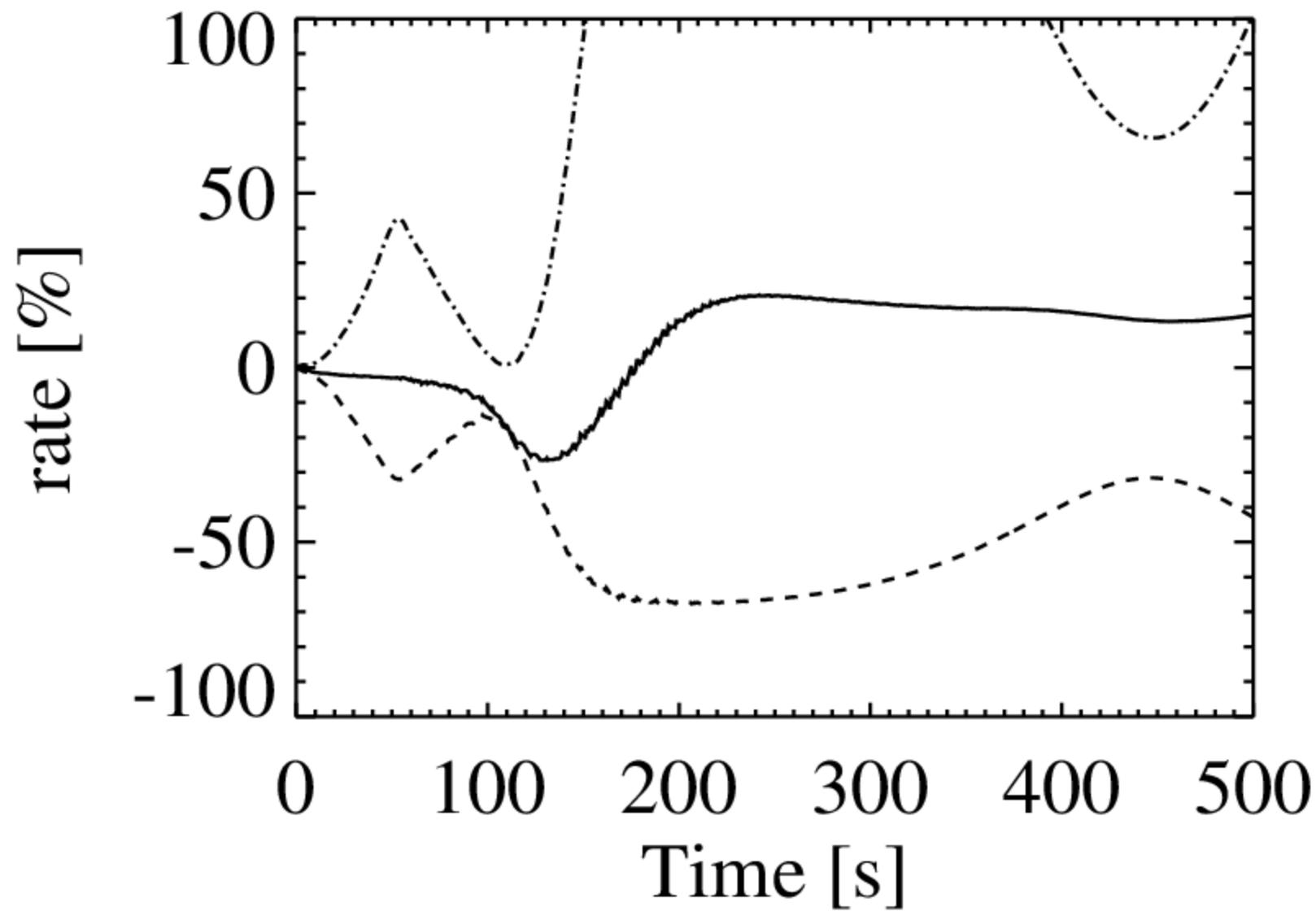
上から磁束の変化が70%  
以上になったstep(時間)順

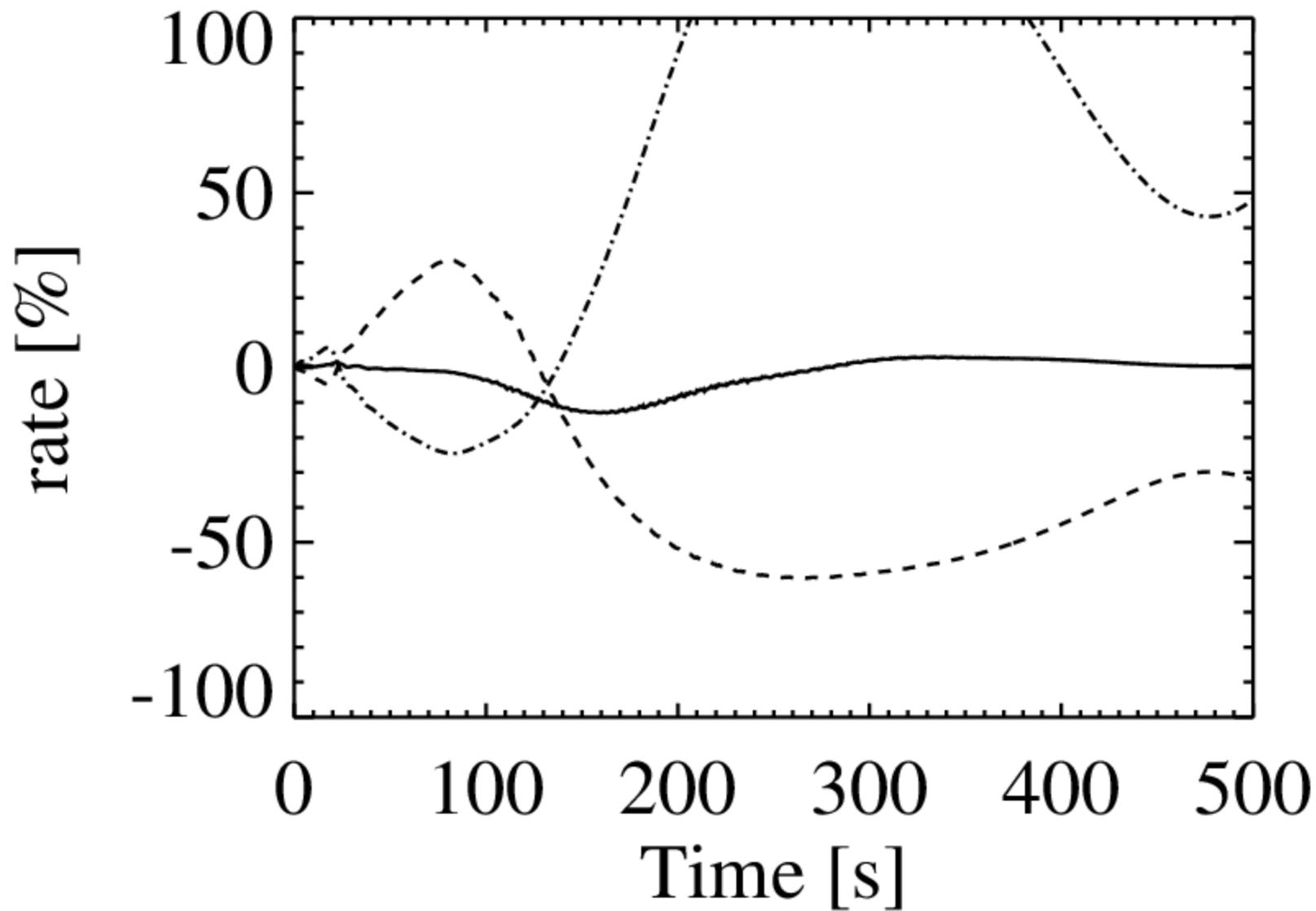


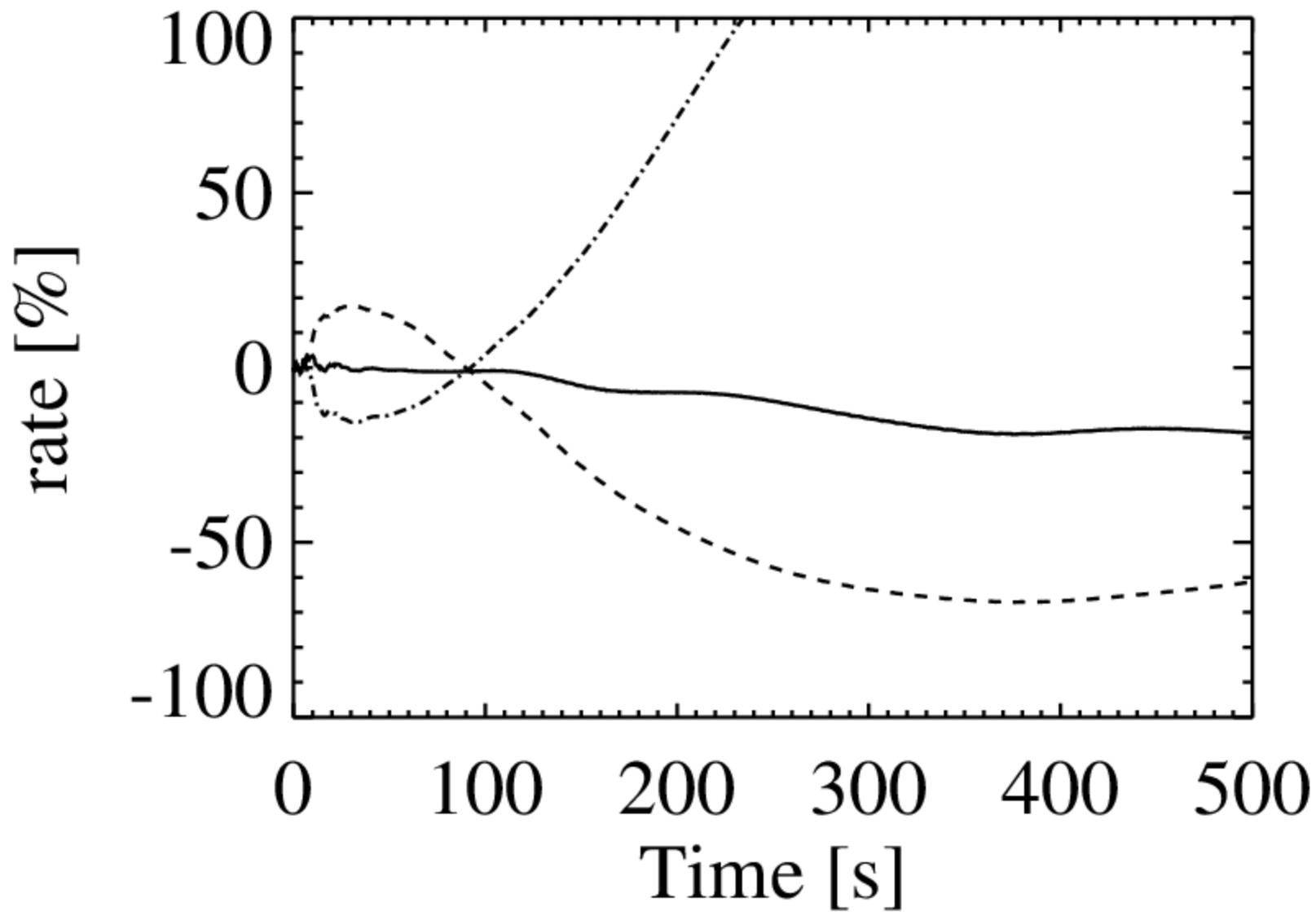


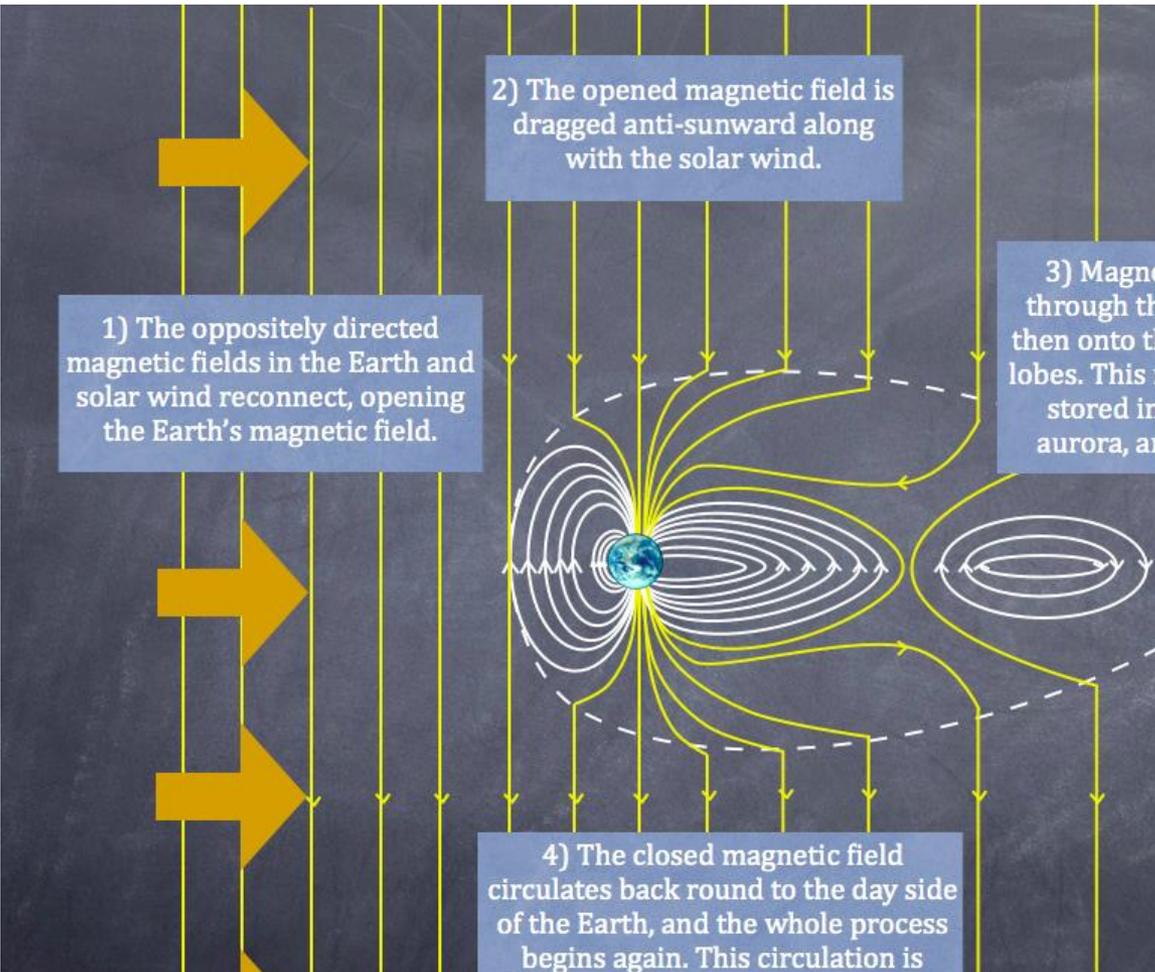










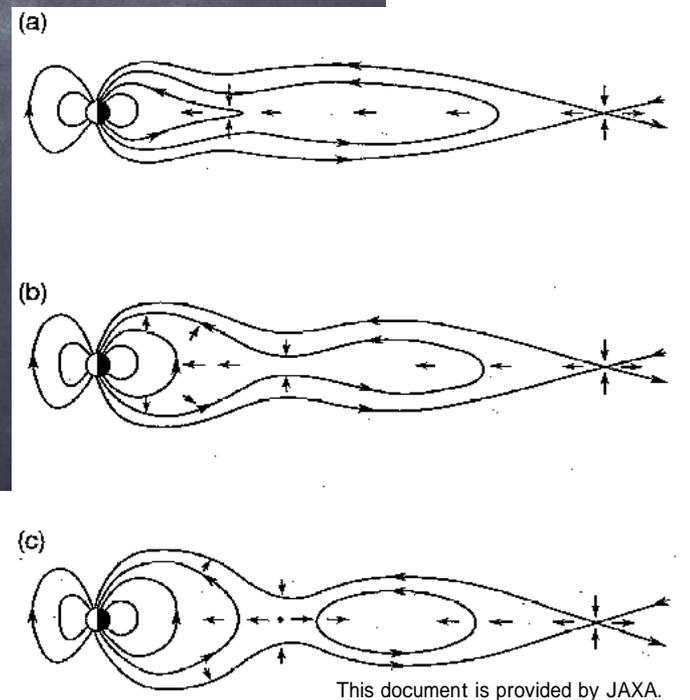
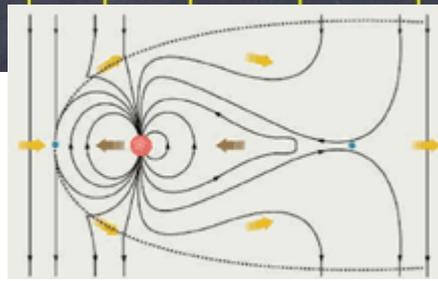
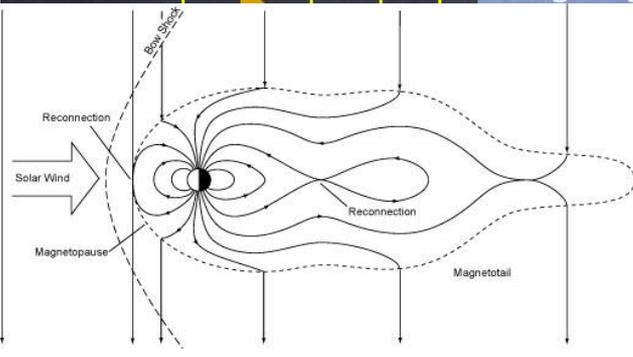
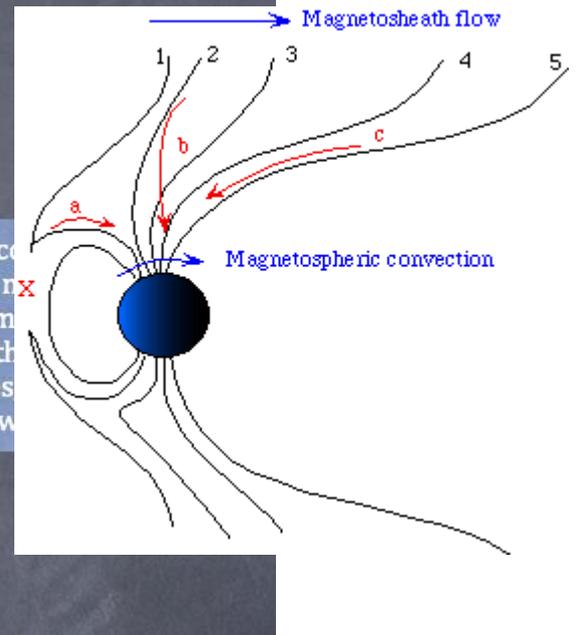


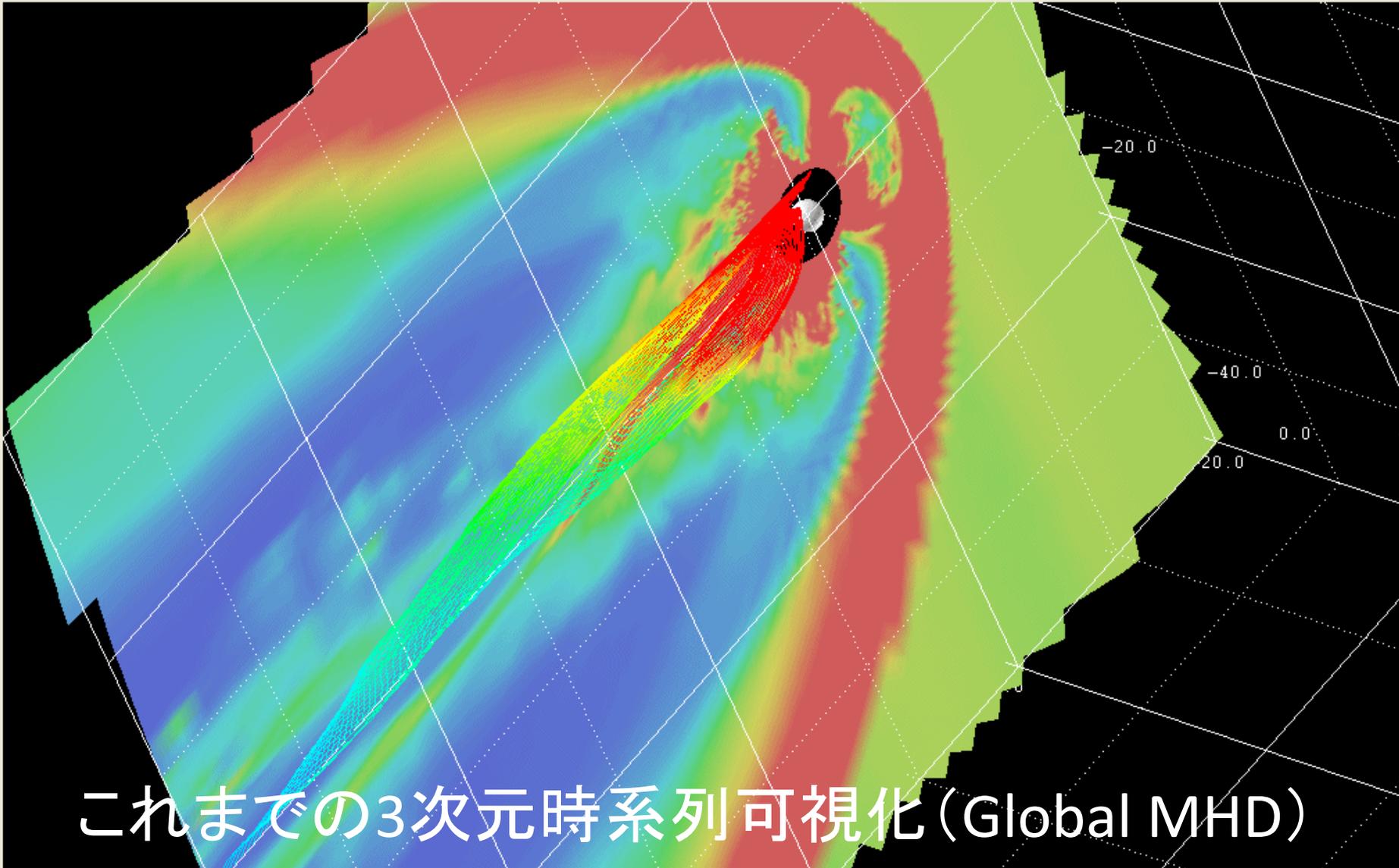
1) The oppositely directed magnetic fields in the Earth and solar wind reconnect, opening the Earth's magnetic field.

2) The opened magnetic field is dragged anti-sunward along with the solar wind.

3) Magnetotail reconnection through the closed magnetic field lines then onto the open magnetic lobes. This releases the energy stored in the lobes as aurora, and is known as the substorm.

4) The closed magnetic field circulates back round to the day side of the Earth, and the whole process begins again. This circulation is the Dungey Cycle, after physicist Jim Dungey.



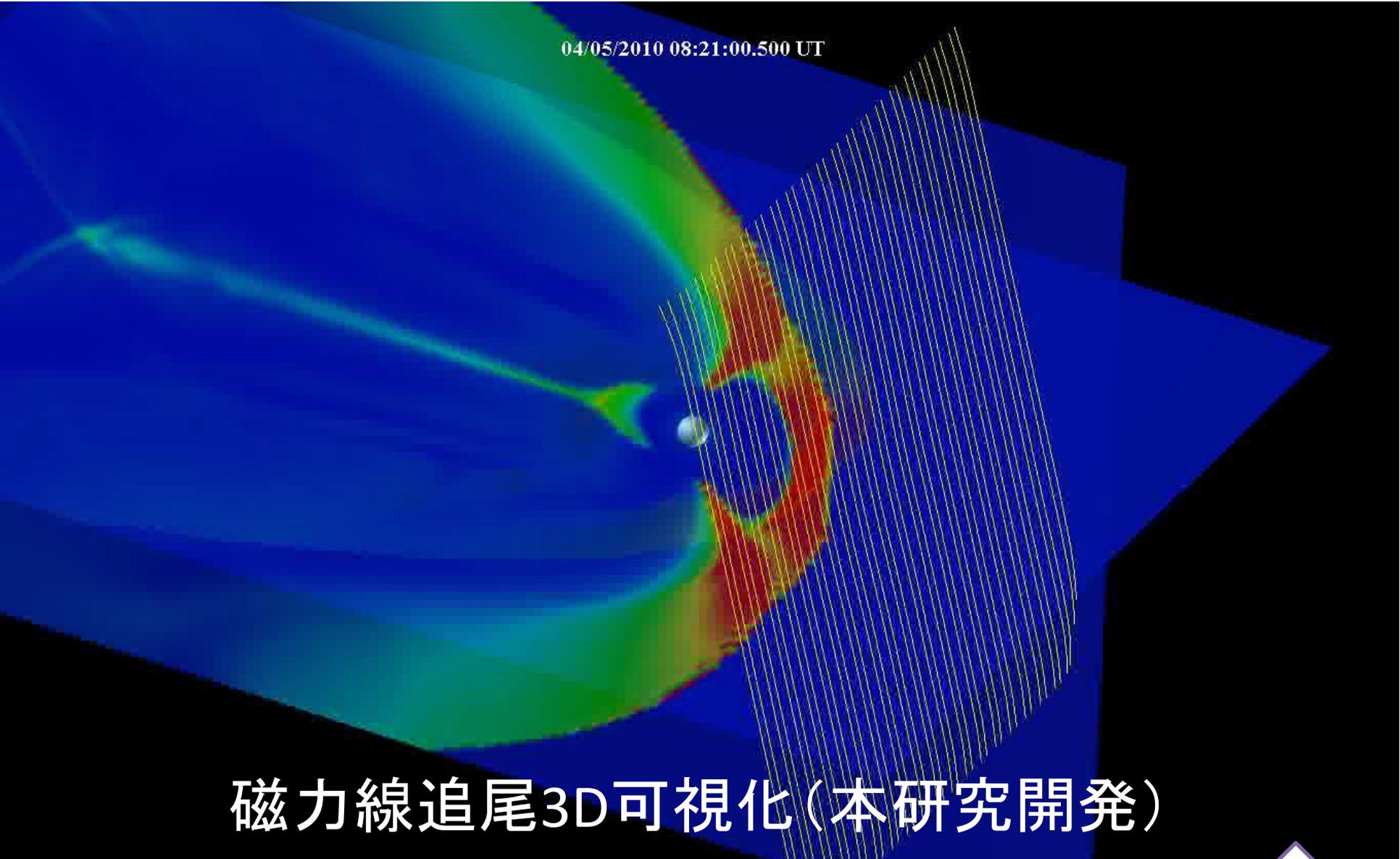


# これまでの3次元時系列可視化 (Global MHD)

コントロールパネル

ファイル選択

04/05/2010 08:21:00.500 UT



# 磁力線追尾3D可視化(本研究開発)

Global MHD simulation

64bit 3D player  
developed by  
NICT

This document is provided by JAXA.