

最終講義、2012年3月1日、高等研究館1階会議室

# 宇宙天気研究をふり返って

太陽地球環境研究所総合解析部門(SSt)

菊池 崇

# 電波伝搬研究から宇宙天気研究へ

## 大学院時代

MC: VLF電波伝搬・下部電離圏(内部重力波、高エネルギー電子)

DC: 極域電離圏電場の赤道伝搬・磁気嵐急始SC(導波管モデル)

1976年 郵政省電波研究所(RRL)に入所

VLF電波観測・サブストーム電子降下

1981年 RRL電波部電波伝搬研究室

HF Doppler観測・SC電場

1986年 南極越冬

イメージングリオメータ(銀河電波吸収)観測・オーロラ電子降下

1988年 CRL平磯宇宙環境センター

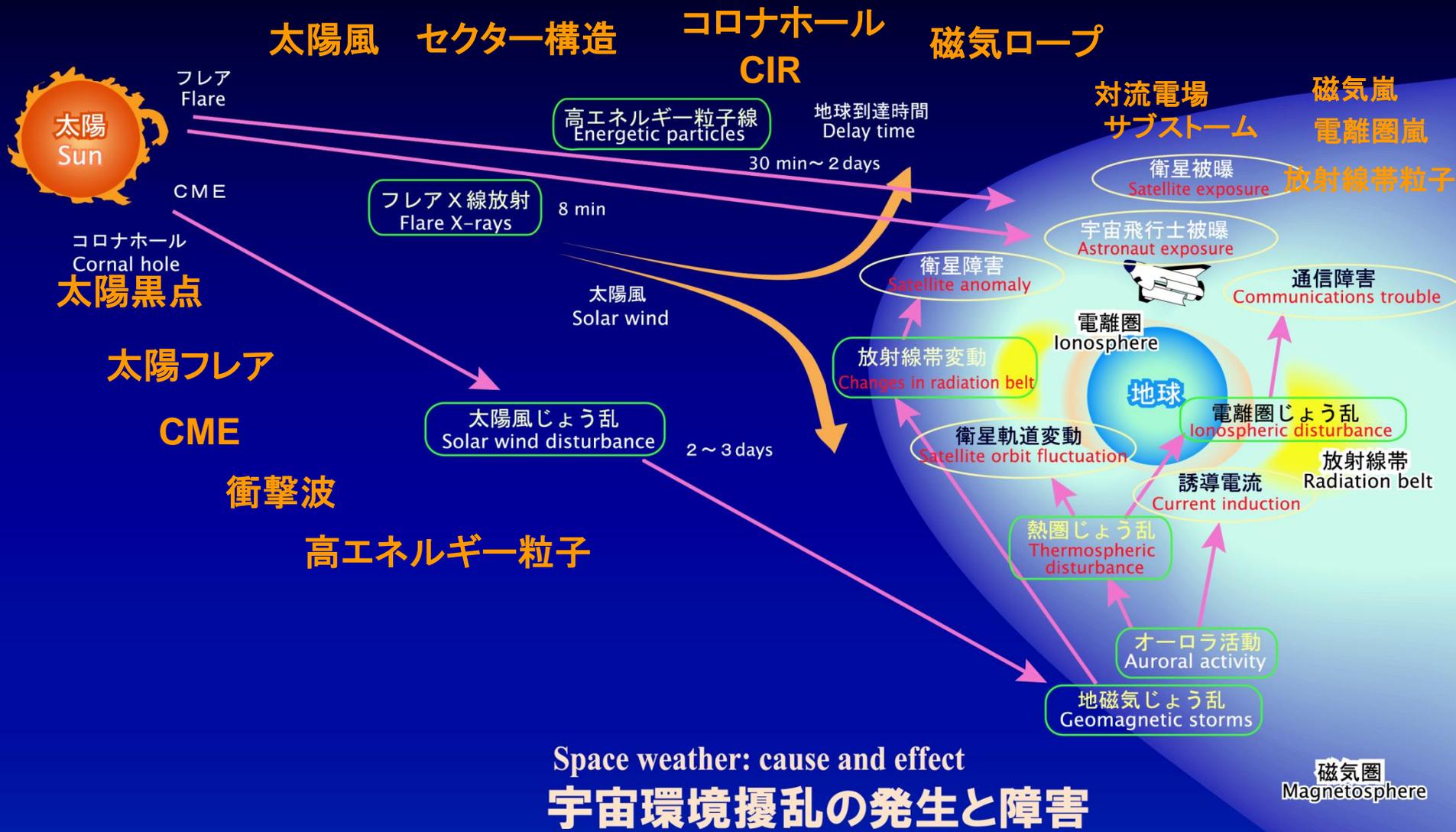
宇宙天気予報プロジェクト・太陽フレア磁気嵐予報(北海道オーロラ)

2001年 CRL/NICT電磁波計測部門

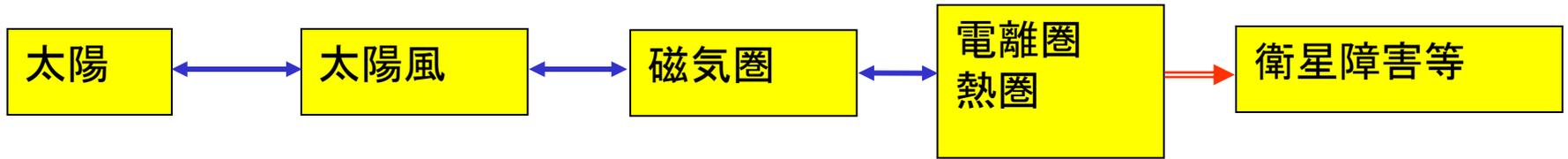
宇宙天気予報センター、モニタリングシステム(磁力計・レーダ)整備

2005年 名古屋大学太陽地球環境研究所

磁気圏電離圏複合系研究・磁気嵐、サブストームの電流系



# 太陽地球複合システム



フレアX線  
(8分)

高エネルギー  
粒子(プロトン)  
(30分)

CME  
(プラズマ塊)  
(2日)

(観測衛星)

SOHO  
GOES

衝撃波による  
加速

太陽風磁場、  
密度、速度

ACE  
WIND

高エネルギー  
一粒子

プラズマ対流  
サブストーム  
磁気嵐  
放射線帯

THEMIS,  
GEOTAIL,  
GOES

電離層異常  
電離

極域電離層  
異常電離

電離圏嵐、  
熱圏嵐  
プラズマ対流  
大気波動

DMSP  
NOAA

船舶航空機通信

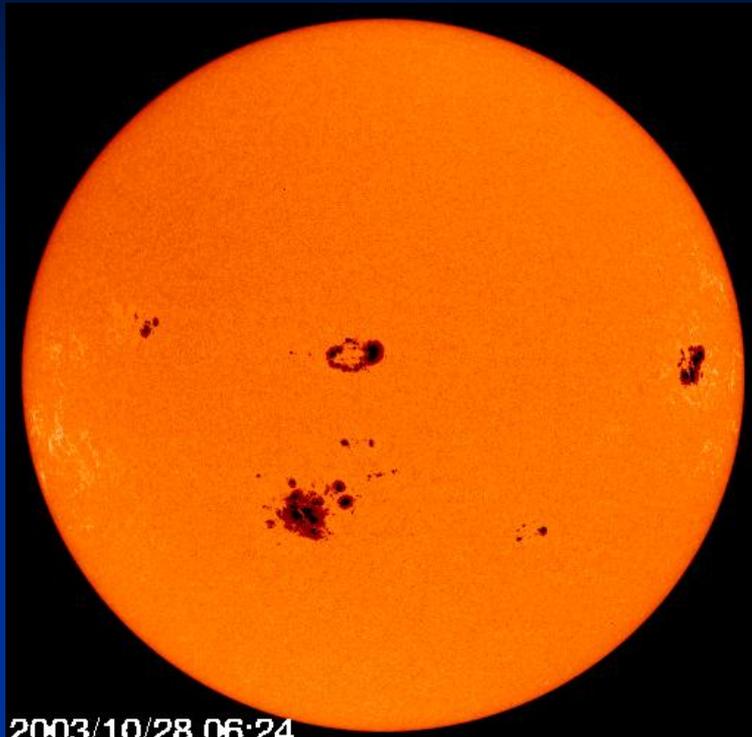
衛星機器障害  
人体放射線被爆  
航空通信障害

衛星機器障害  
放射線被爆  
地上・航空通信障害  
電力線誘導障害

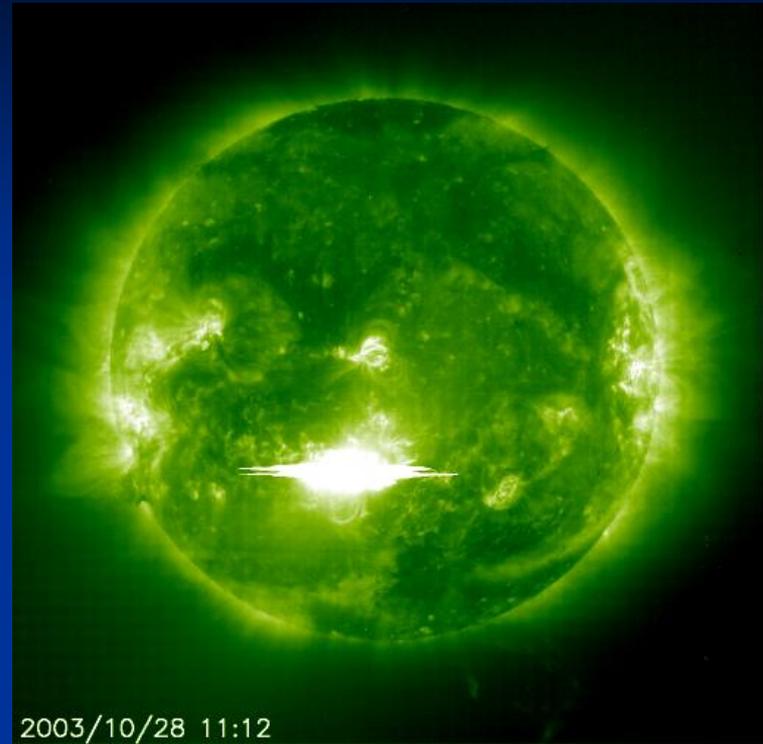
(故障した衛星)

みどり、あすか  
Tellstar401, Anik、  
Galaxy4

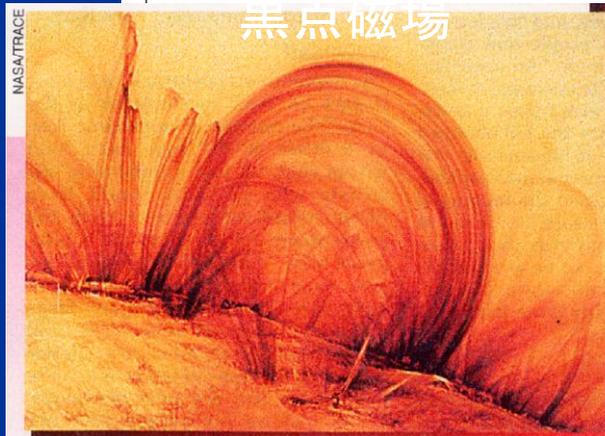
# 2003年10月28日大規模フレア (SOHO衛星)



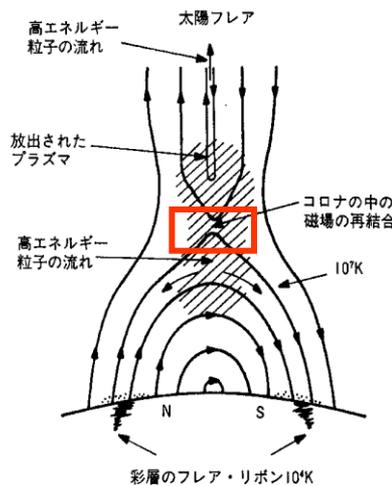
2003/10/28 06:24



2003/10/28 11:12



26 January 2004 Physics Today



結合

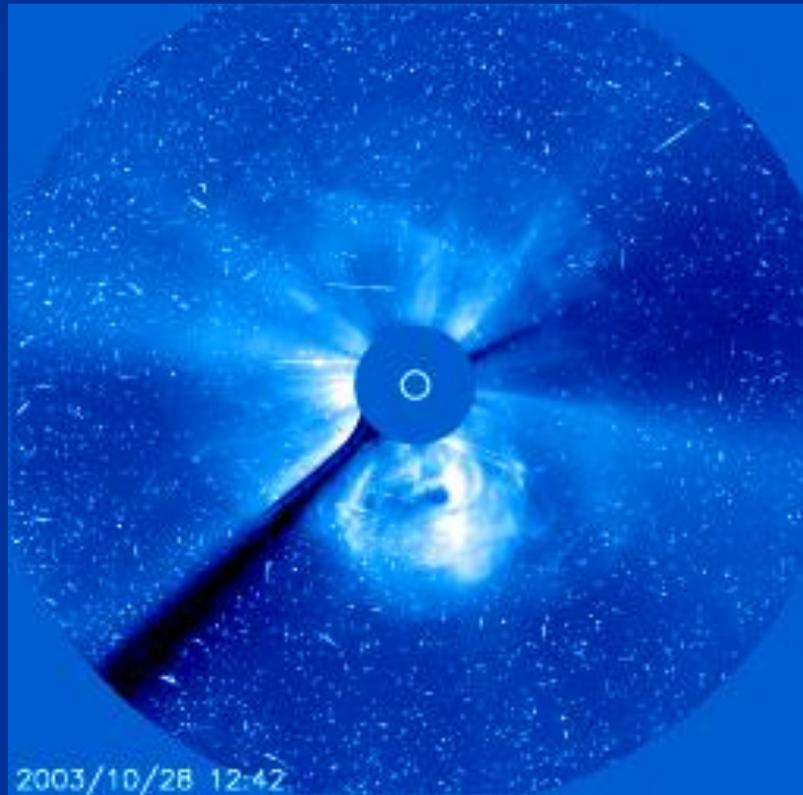
太陽フレア

高エネルギー粒子

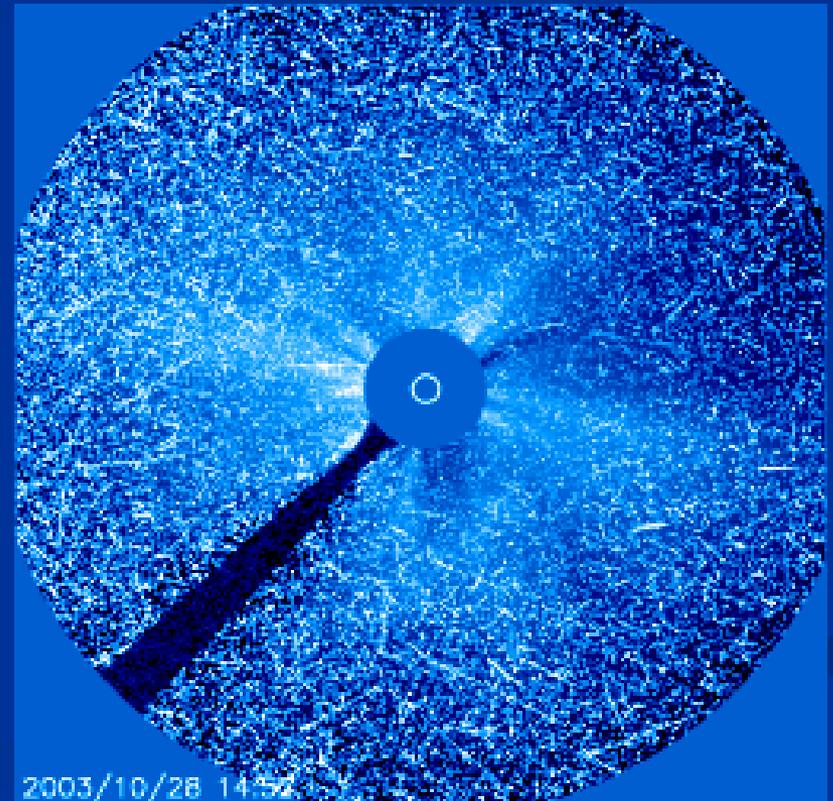
CME(コロナプラズマ放出)

# 2003年10月28日大規模フレア (SOHO衛星)

CME



高エネルギー粒子による白斑

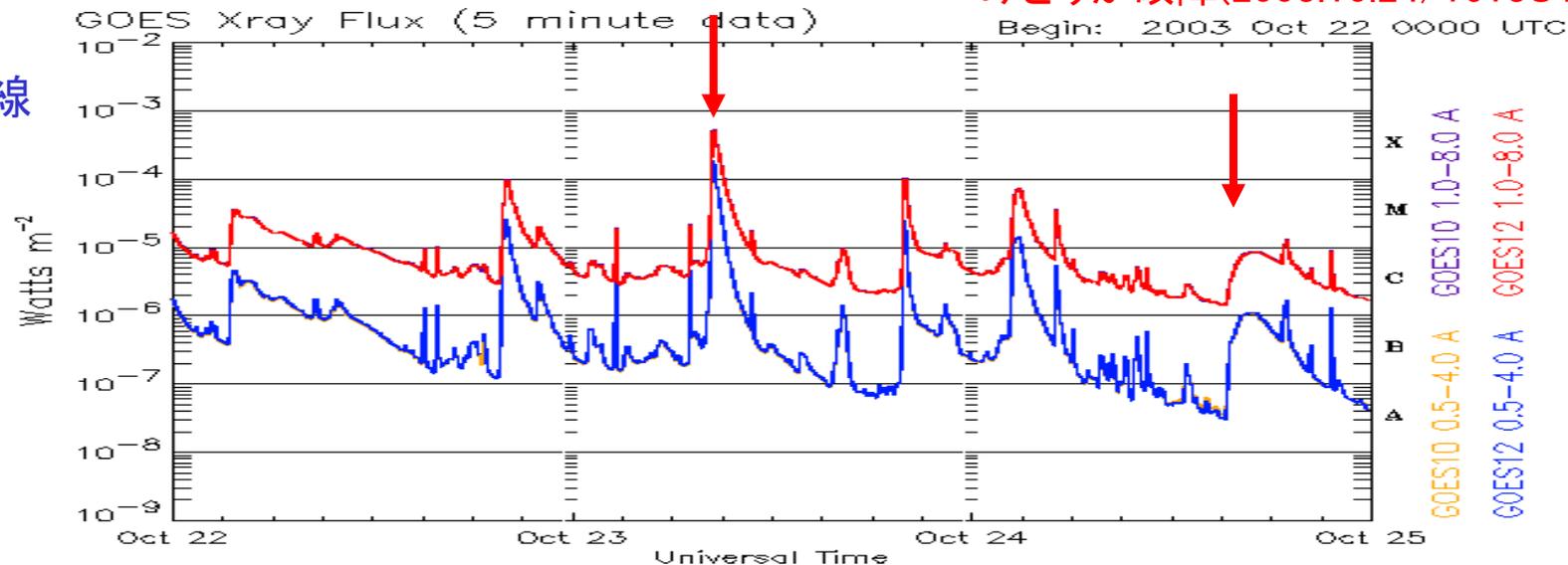


# フレアX線とプロトン (GOES衛星)

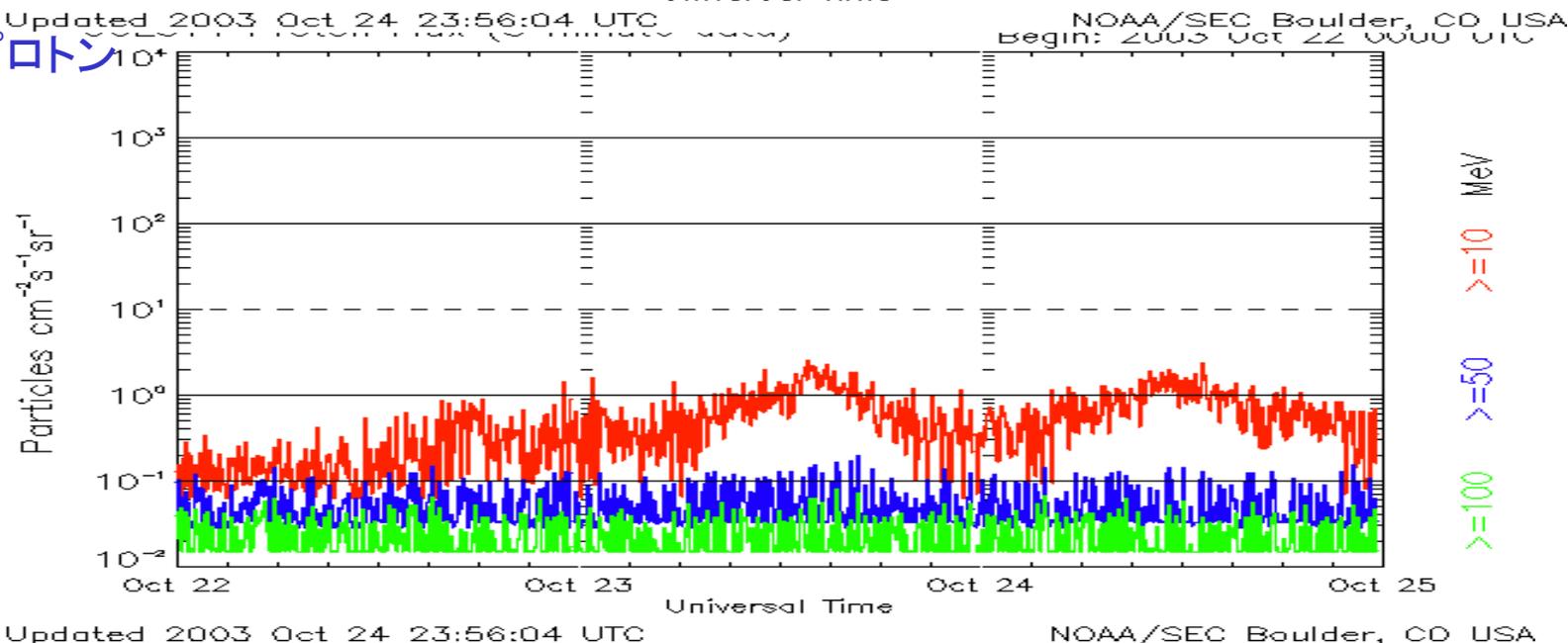
2003年10月23日0819UT太陽フレア(X5.6 1B)  
太陽風衝撃波が発生

みどりが故障(2003.10.24/1613UT)。

太陽X線



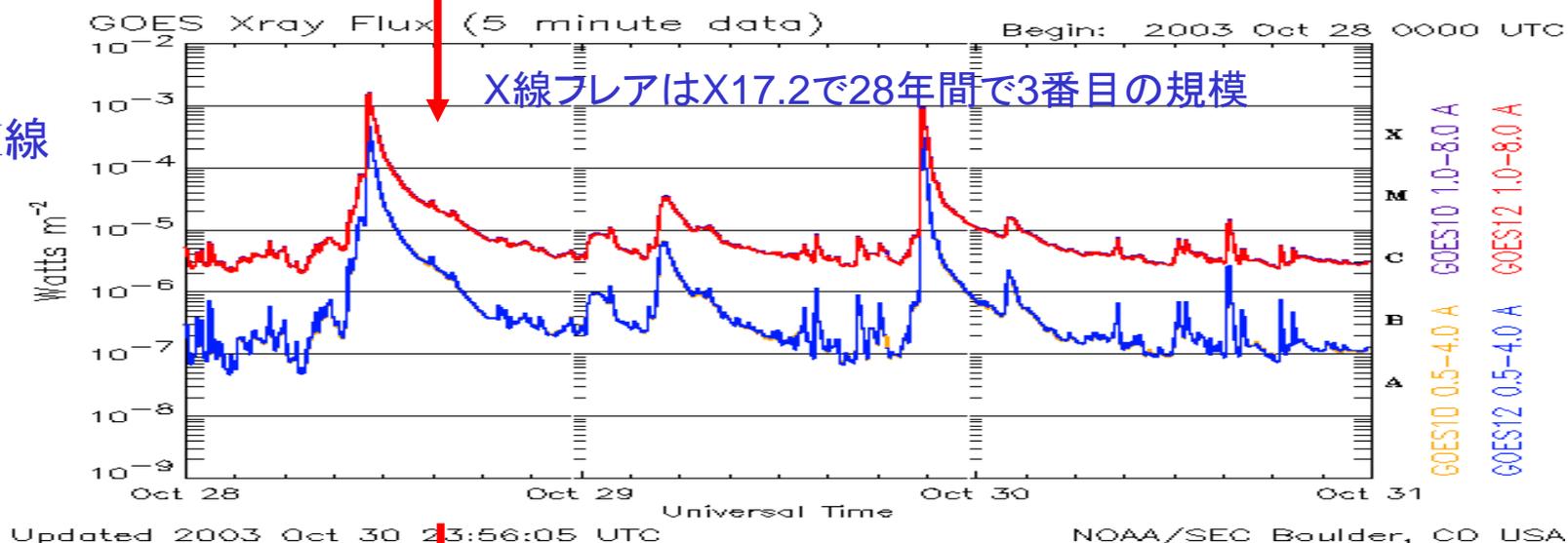
太陽プロトン



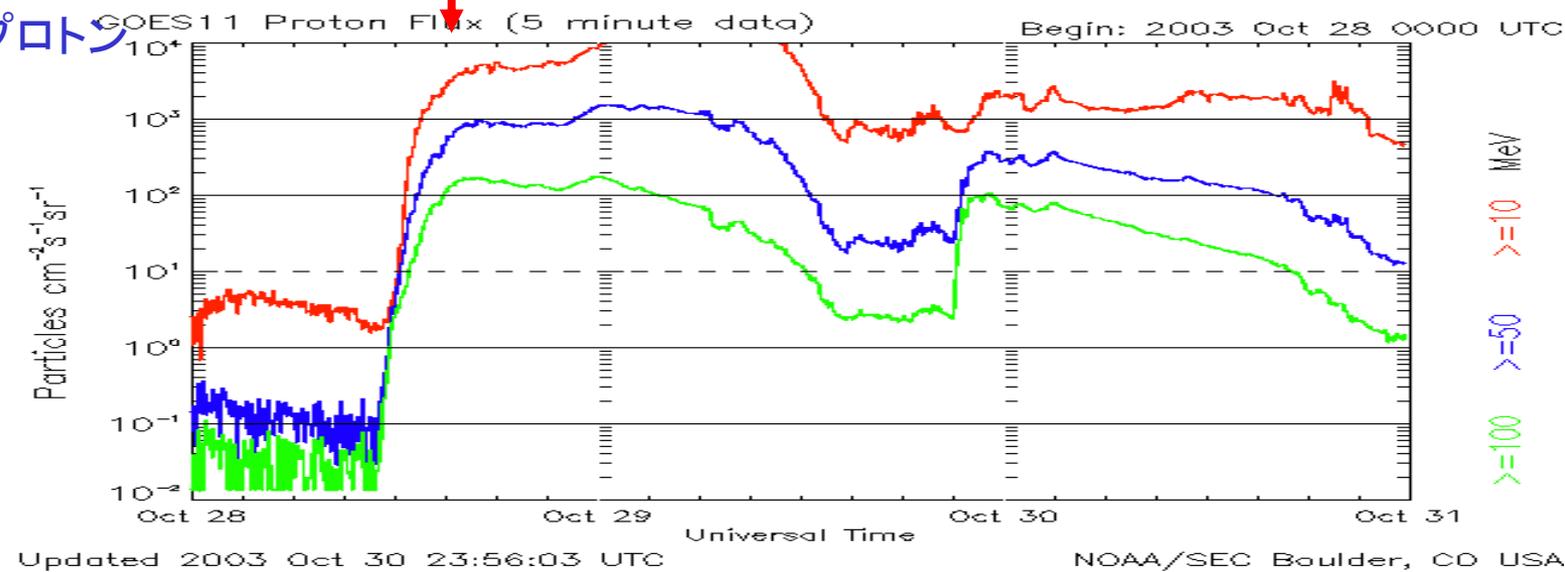
# フレアX線とプロトン (GOES衛星)

こだま姿勢制御センサーにノイズ(2003.10.28/1530UT頃)。

太陽X線



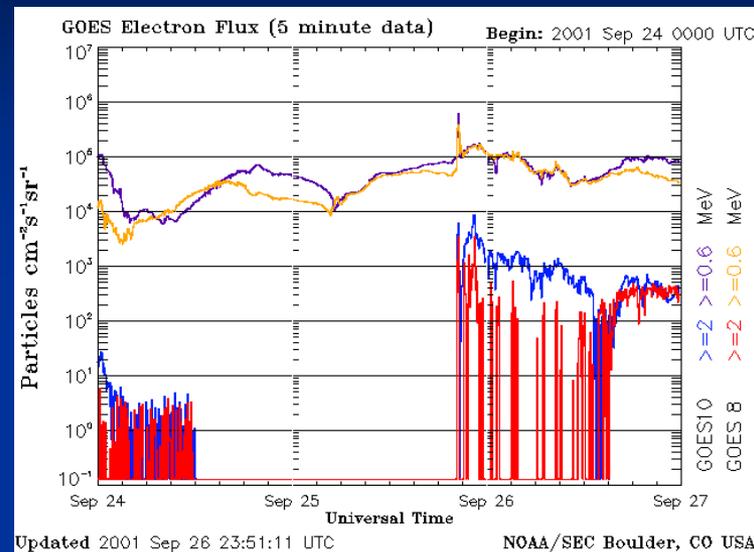
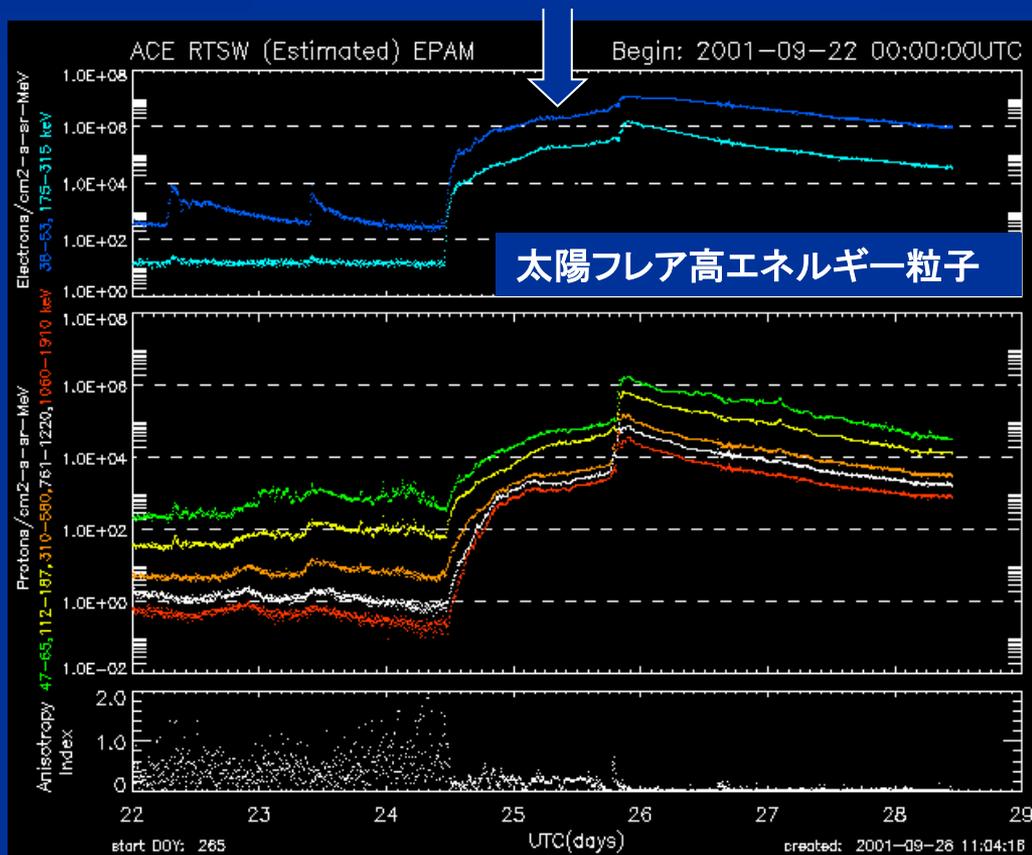
太陽プロトン



# BS放送の中断（姿勢制御に不具合）

## 2001年9月24日のX2.6/2Bフレア高エネルギー粒子

BSAT-2a衛星の姿勢制御に不具合が生じ、BSデジタル放送が一時中断した。



読売新聞2001年9月26日朝刊

◆BSデジタル一時中断 BSデジタル放送のテレビ、ラジオ、データ放送の全チャンネルが、25日午後4時17分ごろから、最大1時間にわたって受信不能となった。同放送に使用されている衛星「BSAT-2a」を運用している放送衛星システムによると、衛星の向きがずれたのが原因。同社は予備機に順次切り替えて放送を再開させた。昨年12月のBSデジタル放送開始以来、衛星の事故による放送中断は初めて。

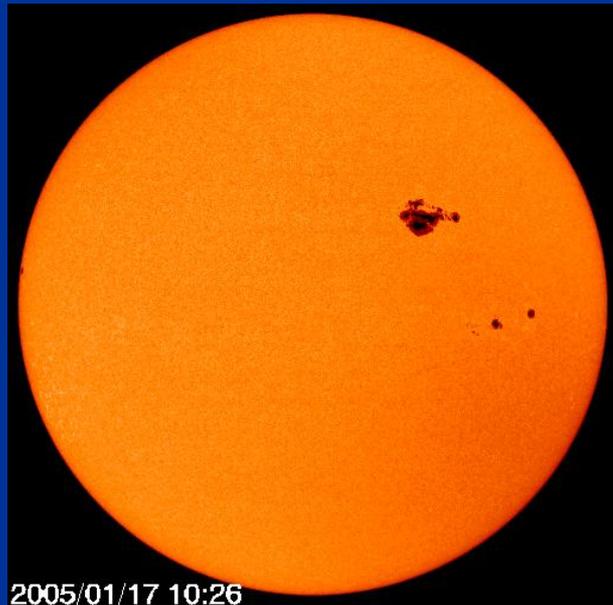
# JSAT社が保有するJCSAT-1B衛星の障害



JCSAT-1B

1月17日21時26分JST (12時26分UT)軌道制御中に衛星の姿勢及びテレメトリ信号を喪失 (JSAT報道発表資料)

スカパーJSAT(株)HPより

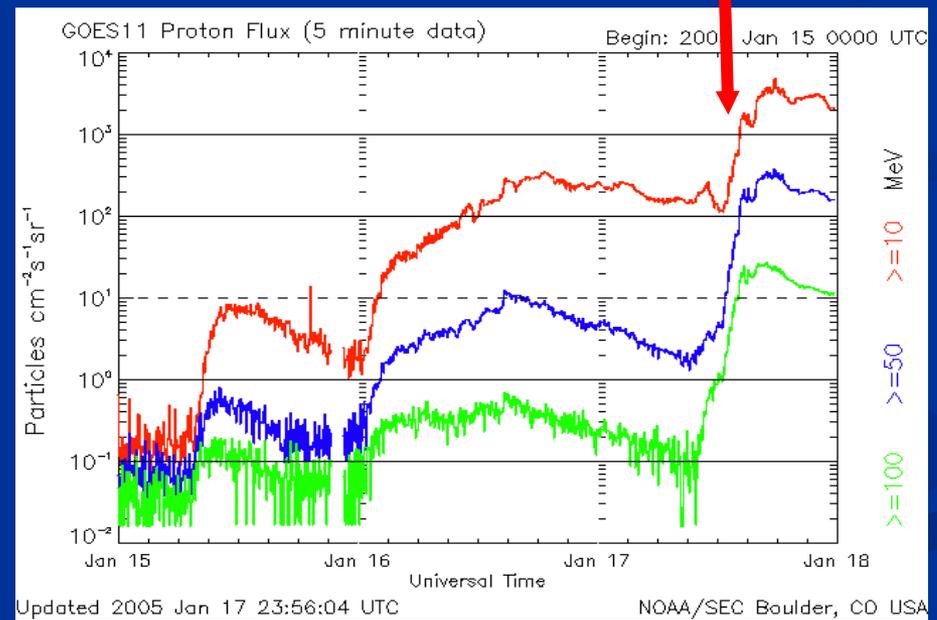


2005/01/17 10:26

この現象の原因となった大きな黒点群 (SOHO衛星による観測)

読者新聞の「大規模フレア発生 観測衛星など不調」との関連が疑われる人工衛星の不具合が各地で発生している。情報通信研究機構によると十七日午後六時五十二分、大規模フレアが発生。米国の気象衛星ゴースト12号や科学衛星エースの一部の観測機器が使用できない状態になった。

一方、日本の民間衛星通信会社JSATが所有する静止衛星「JCSAT-1B」は衛星の姿勢を制御する小型ジェット十二基のうち一基に異常が発生、十七日夜から衛星を監視するための信号が受信できない状態。衛星を利用する約五十社の通信サービスなどが停止している。同社では十九日午前三時ごろまでに復旧させる予定。



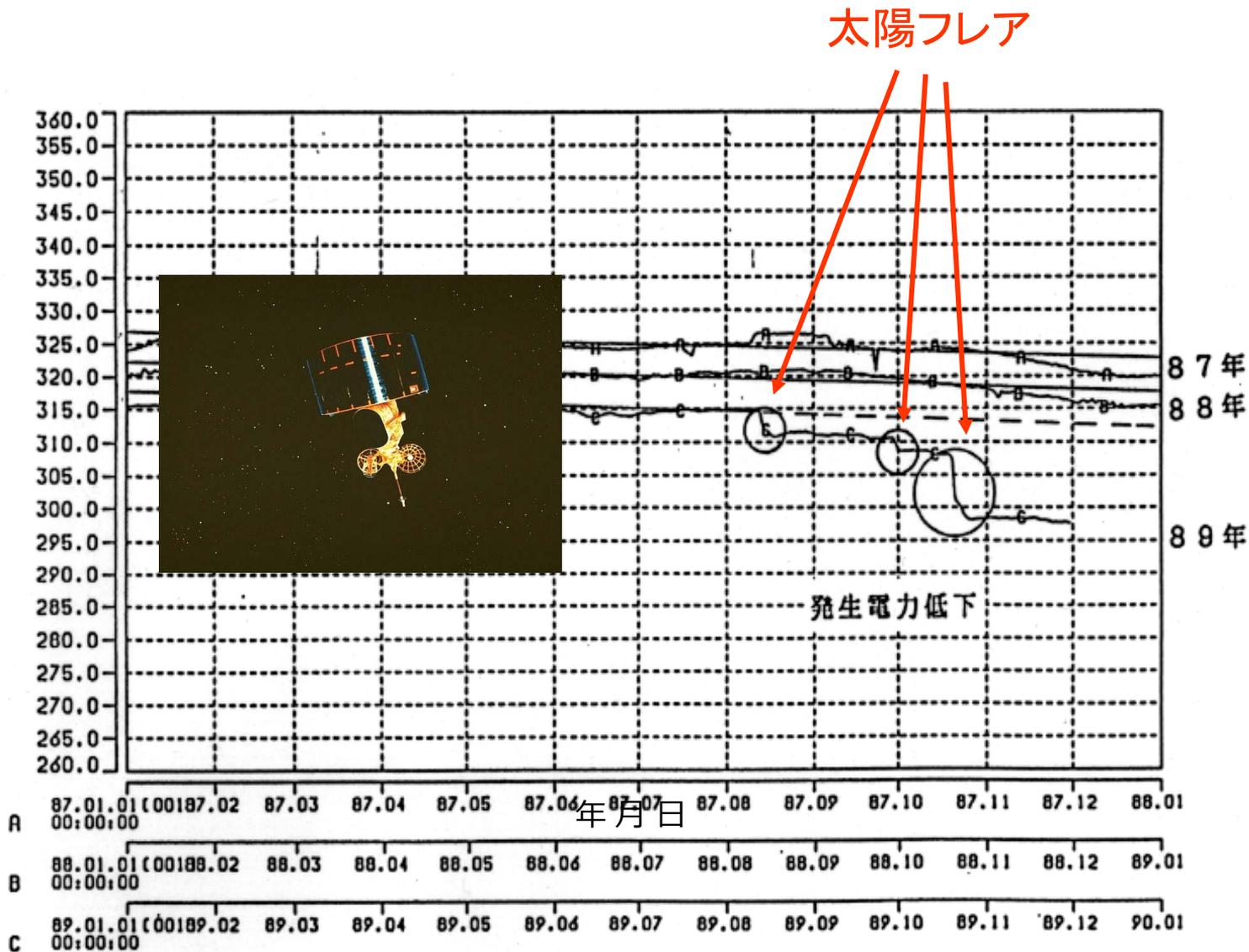
米国の気象衛星GOES高エネルギー粒子フラックス観測データ

# 高エネルギー粒子による気象衛星「ひまわり」の太陽電池の劣化

宇宙航空研究開発機構(JAXA)より

(蔵方晴夫、1990)

GMS-3 (ひまわり) の発生電力 (正規化後)



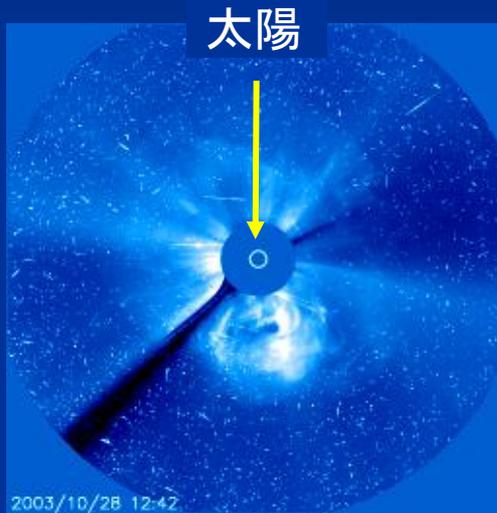
# 太陽風と磁気圏との相互作用

太陽風磁場が南向きのとき磁気再結合によりエネルギーが磁気圏へ注入される

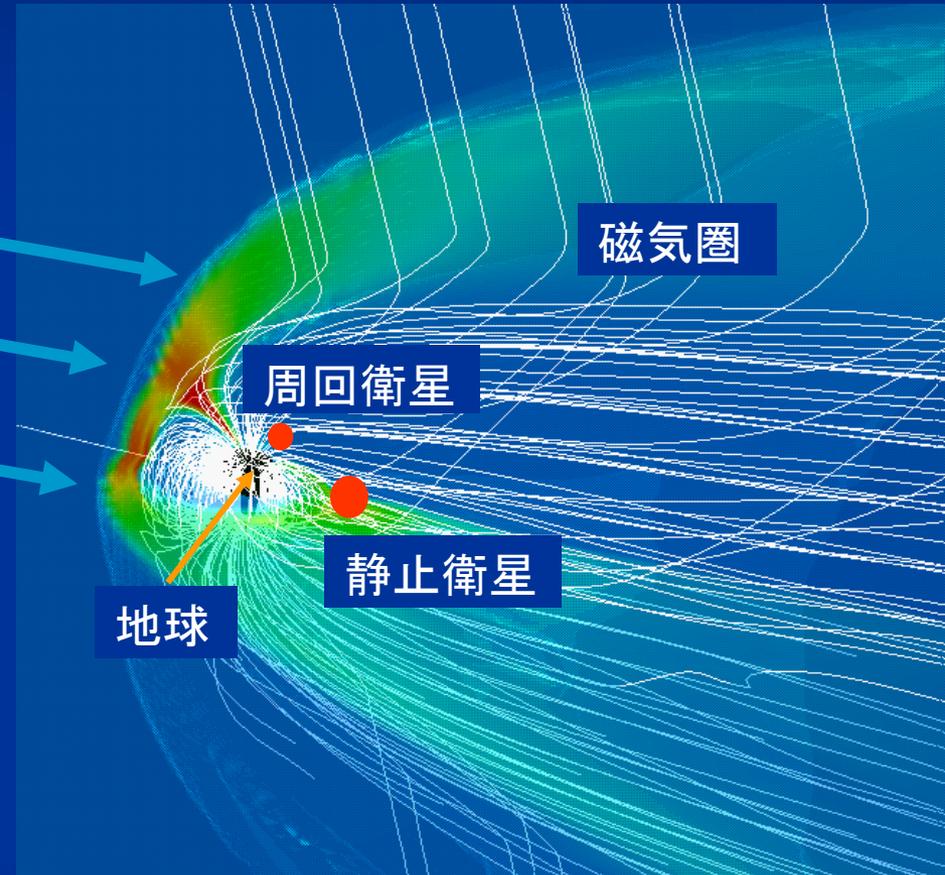


サブストーム  
磁気嵐

SOHO衛星で観測されたCME



太陽風



地球の磁場は太陽風(速度400km/s)によって彗星のように吹き流されている。CME(コロナガス噴出)の前面の衝撃波が磁気インパルスを発生させる。

MHDシミュレーションにより創られた磁気圏  
(T. Tanaka)

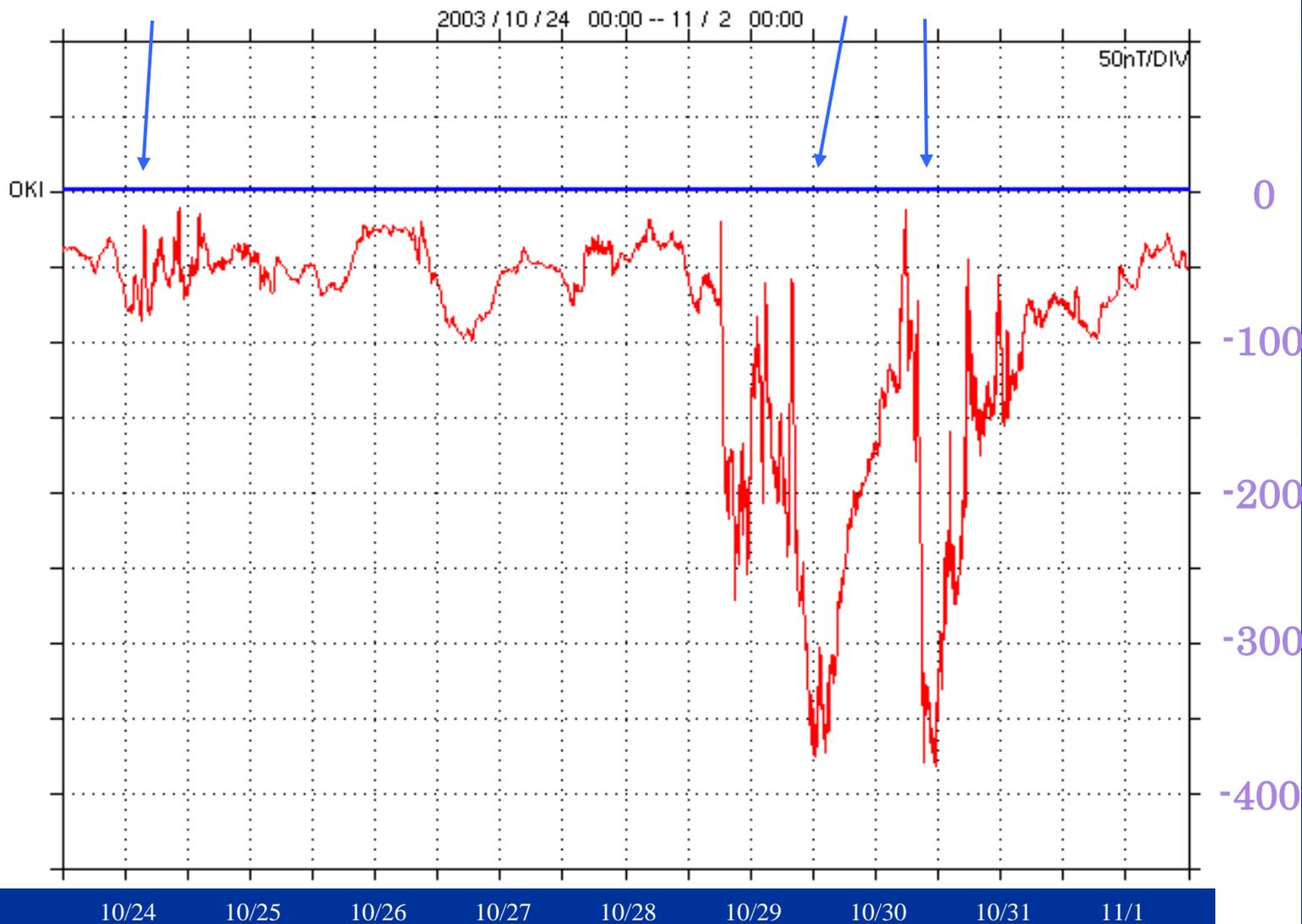
# 磁気インパルス/磁気嵐と宇宙災害

2003/10/24 1523UT 磁気インパルス

10/29-31磁気嵐

(みどり衛星故障)

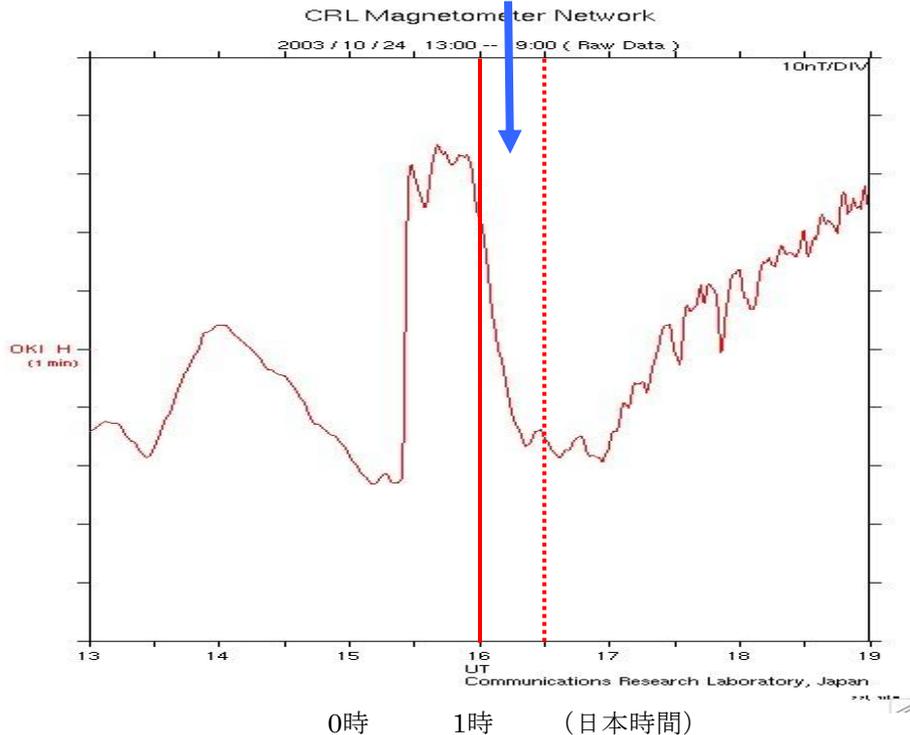
北海道オーロラ発生(10/30,31)



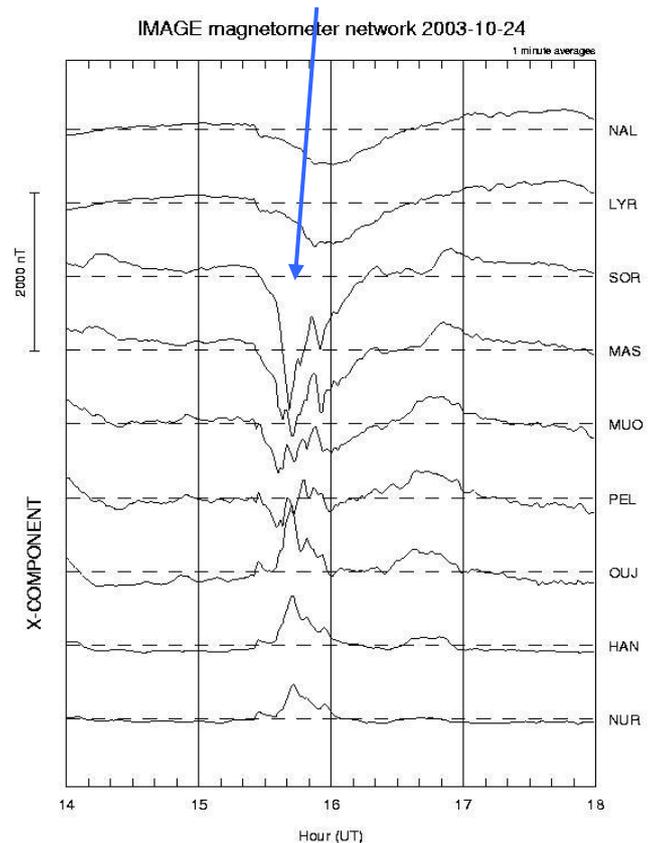
# みどり衛星障害発生直前の 2003/10/24 1525UT(0025JST) 磁気インパルス

NICT沖縄の磁力計により記録された磁気インパルス。  
この磁気インパルスはサブストームを発生させた。

## みどり障害発生(1613UT(0113JST))



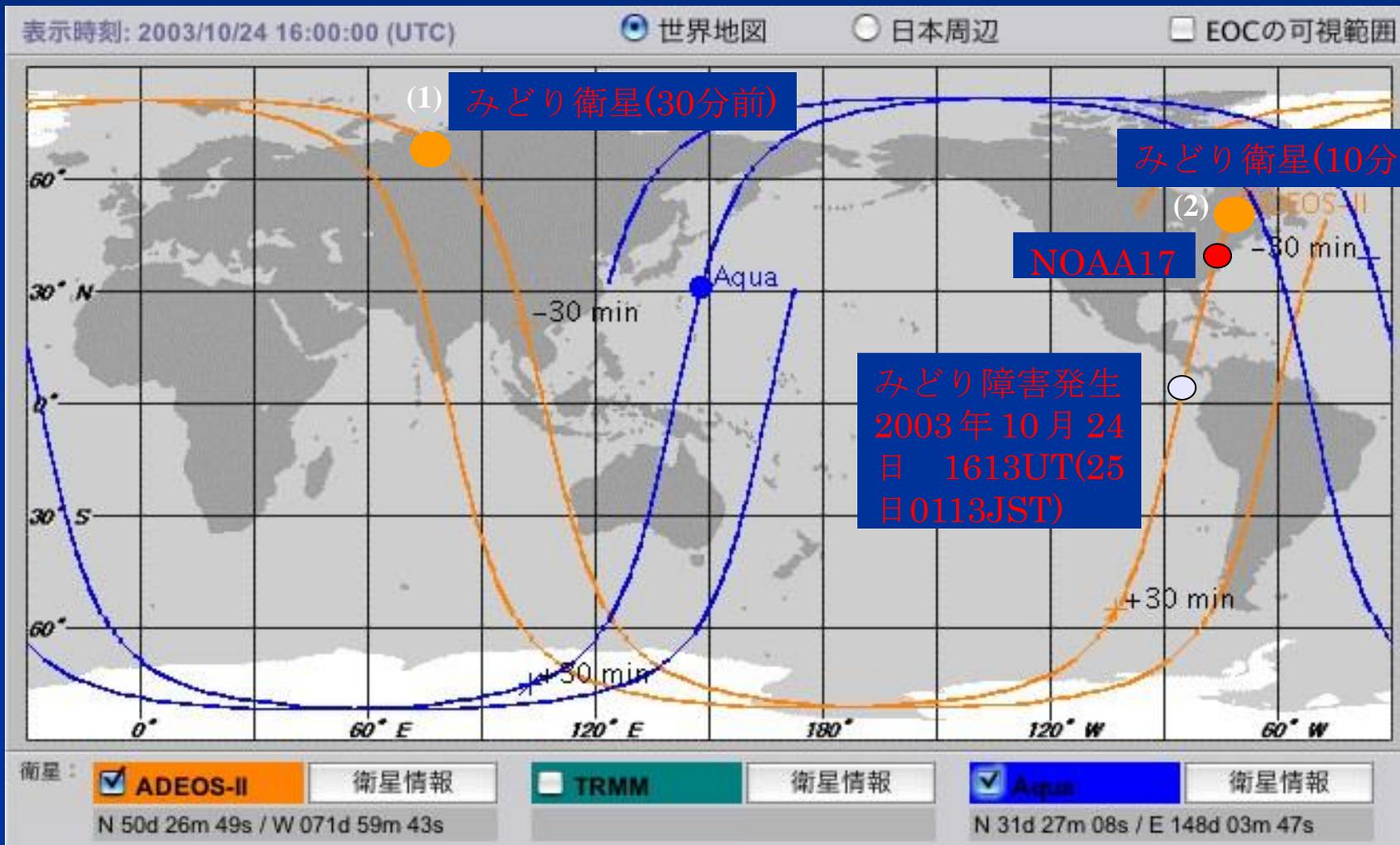
## 北極域オーロラジェット電流



# みどり-IIの軌道 (軌道図はJAXAホームページより)

- (1) 30分前にロシア極域を通過
- (2) 10分前にカナダ東部を通過

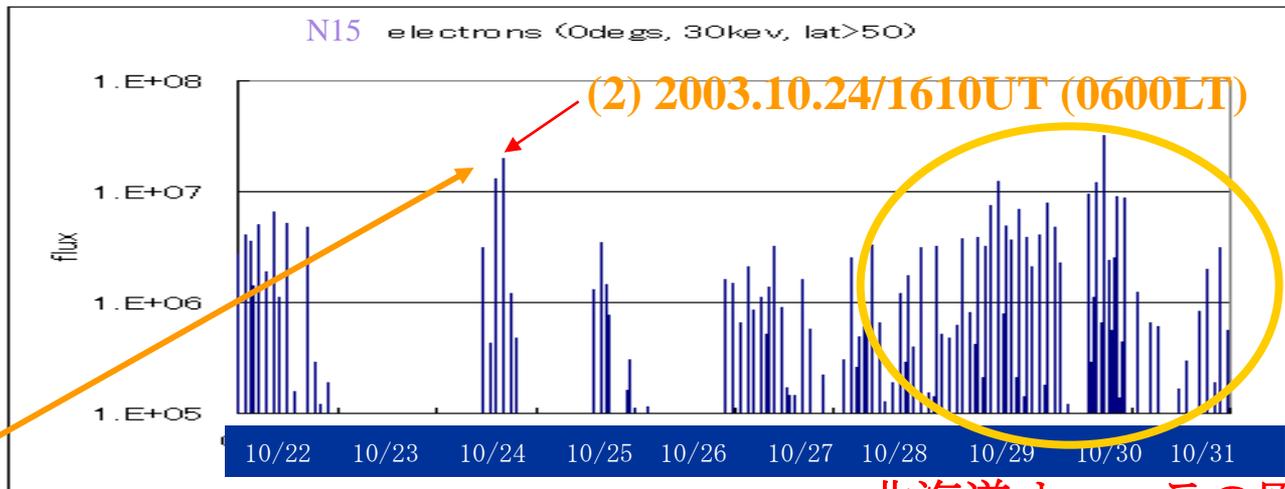
NOAA17(41N,78W)



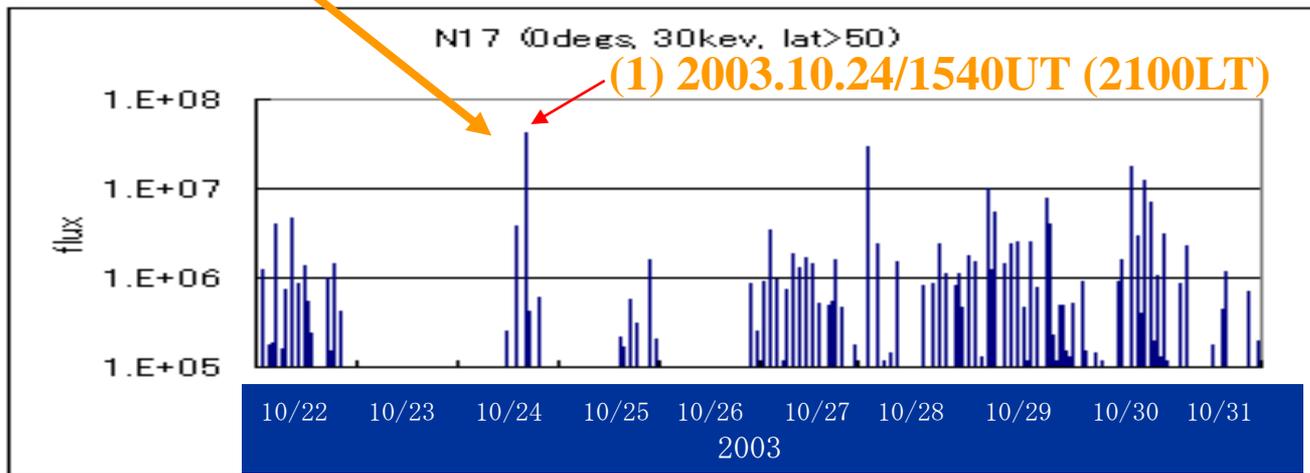
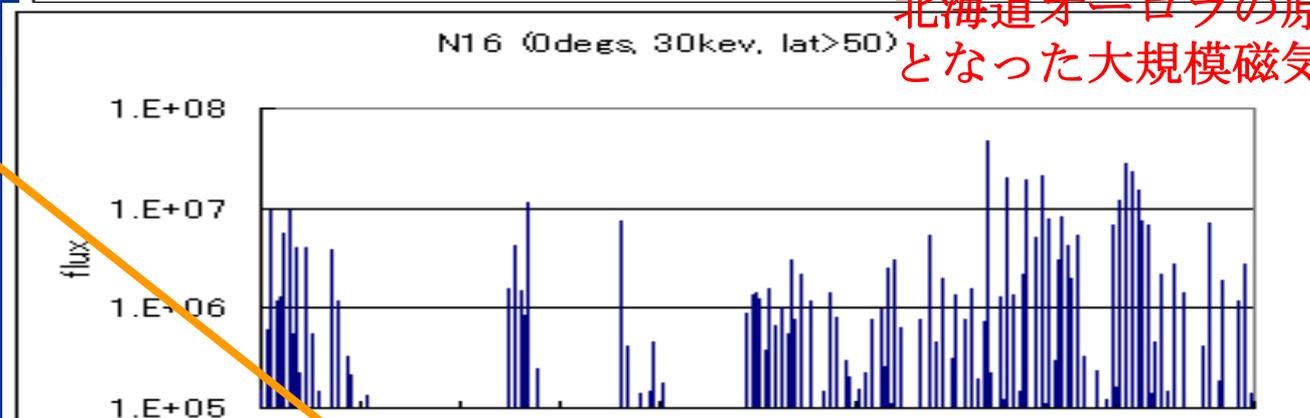
NOAA衛星が観測した高エネルギー電子( $E > 30\text{keV}$ ) (緯度  $> 50$ 度) (高度  $800\text{km}$ )

磁気インパルスに伴い大量の高エネルギー電子がオーロラ帯に降下した

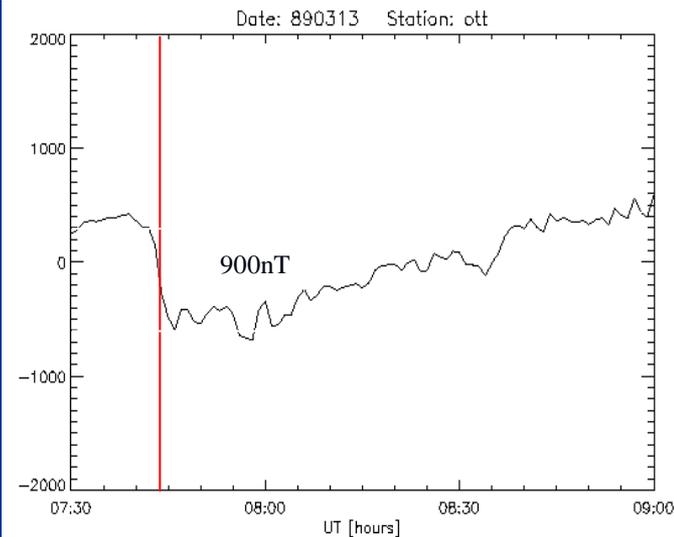
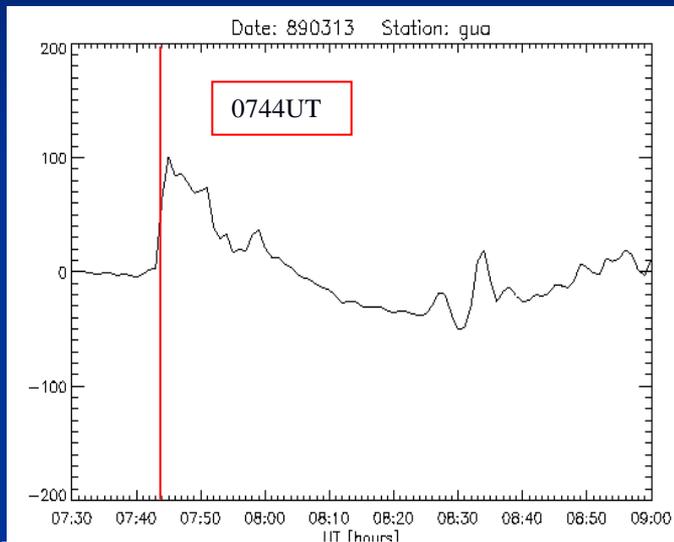
NOAA17衛星はみどりとはほぼ同じ軌道を先行し、強いオーロラ電子束を観測した。その規模は大規模磁気嵐時の電子束を上回った。高エネルギー電子は衛星帯電の原因となることが知られている。



北海道オーロラの原因となった大規模磁気嵐



# 1989年3月13日磁気嵐によりカナダ東部からアメリカ東部で大規模停電が発生した



米国東部の発電所で焼損した変圧器

磁気嵐の開始を告げる磁気インパルス

# 送電網の変圧器の中性点は地面に接地されているため、地面に誘導電流が流れ、複数の変圧器中性点間に電位差が生じると、送電線に電流が流れる。

電力網において、発電所や変電所の変圧器の中性点は安全のため、通常、地面に接地されている。このため、地磁気変動によって中性点の間に電位差が生じると、図1に示したように中性点を通して電流が流れることになる。この電流を地磁気誘導電流 (GIC : Geomagnetically Induced Current) と呼んでいる [1] - [3]。中性点にゆっくりと変動する電流が流れると変圧器の動作点がずれ、変圧器でのロスにより変圧器が過熱したり、高調波が発生して、保護用リレーの誤動作を起こしたりすることが知られている。

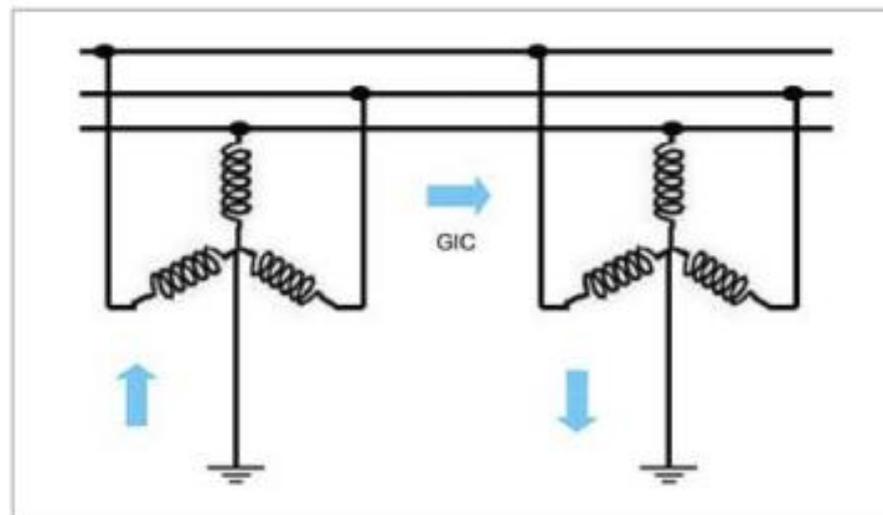


図1 地磁気変動に伴って電力網に流れる地磁気誘導電流 (GIC)

電離層電流によって地上につくられた磁場が実線のような変化をしているとき、これが地面に流す誘導電流は破線のような変化をする。磁場の変化が急なところで誘導電流が強い。また、磁場変動の振幅が大きいところが電流も強い。

SC、脈動、サブストームなど原因は異なっても、上の2つの要因で誘導電流の強さが決まる。SCの振幅は小さいが時間変化が大きい。

磁場

$$v(x, t) = \mathcal{L}^{-1} \left[ \frac{1}{s} e^{-x\sqrt{RCs}} \right] = \operatorname{erfc} \left( \frac{x}{2} \sqrt{\frac{RC}{t}} \right). \quad (11-111)$$

The response  $v(x, t)$  in Eq. (11-111) is usually plotted versus the square of the reciprocal of the argument,  $4t/x^2RC$ ; it is shown as the solid curve in Fig. 11-4.

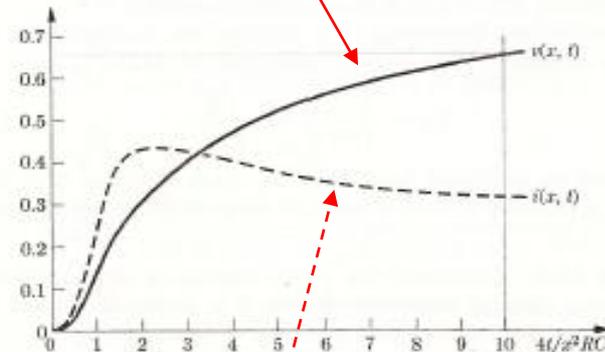


FIG. 11-4. Voltage and current responses of an infinite leakage-free, non-inductive cable to a unit step voltage.

to the transform pair in (11-107):

$$\mathcal{L}^{-1} \left[ -\frac{2}{a} \frac{d}{ds} e^{-a\sqrt{s}} \right] = \mathcal{L}^{-1} \left[ \frac{1}{\sqrt{s}} e^{-a\sqrt{s}} \right] = \frac{e^{-a^2/4t}}{\sqrt{\pi t}}. \quad (11-114)$$

Therefore, from Eqs. (11-112) and (11-114) we have

$$i(x, t) = \sqrt{\frac{C}{R}} \mathcal{L}^{-1} \left[ \frac{1}{\sqrt{s}} e^{-x\sqrt{RCs}} \right] = \sqrt{\frac{C}{\pi R t}} e^{-x^2 RC/4t}. \quad (11-115)$$

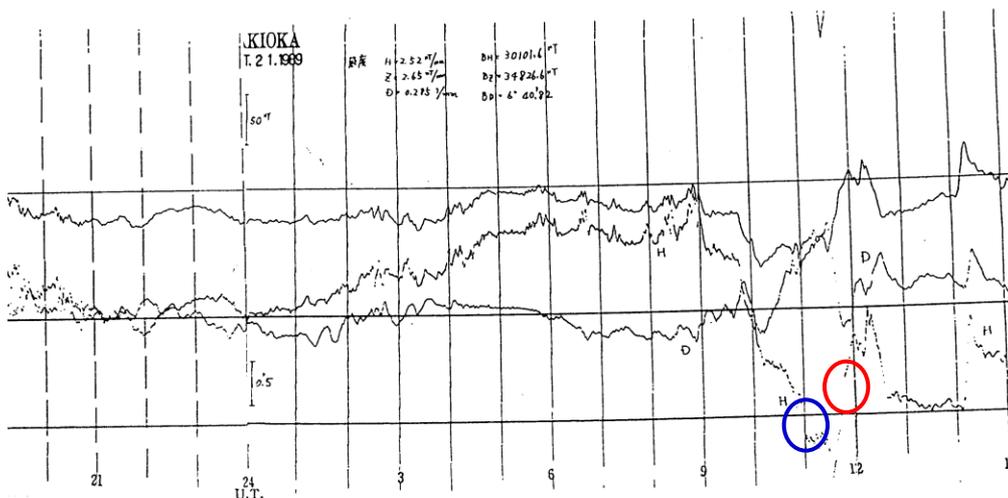
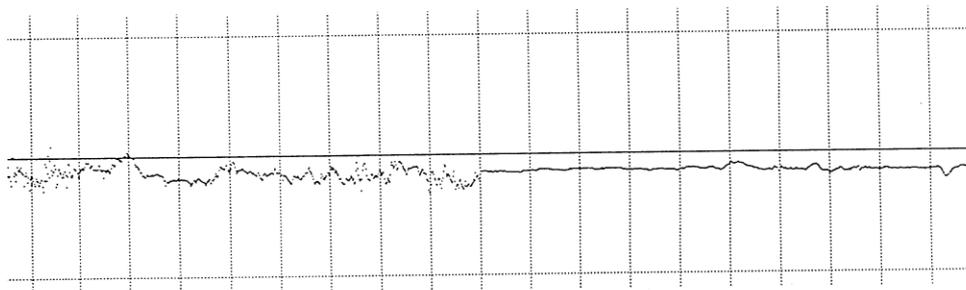
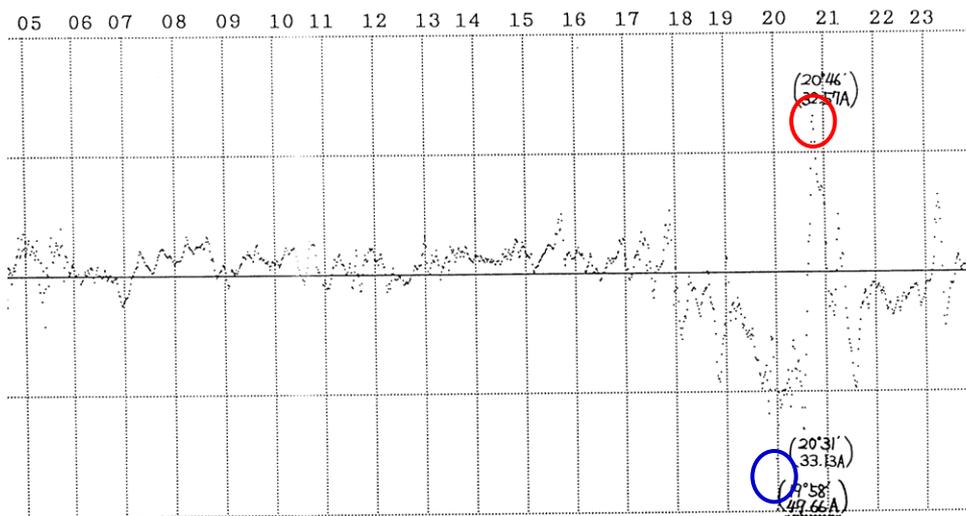
The graph for  $i(x, t)$  is sketched as the dashed curve in Fig. 11-4 versus the reciprocal of the exponent,  $4t/x^2RC$ , for a fixed distance  $x$ . We can

電流

# 1989年10月21日 磁気嵐時に日本 国内の送電線を 流れた誘導電流 (Peak-to-peak 83 A)

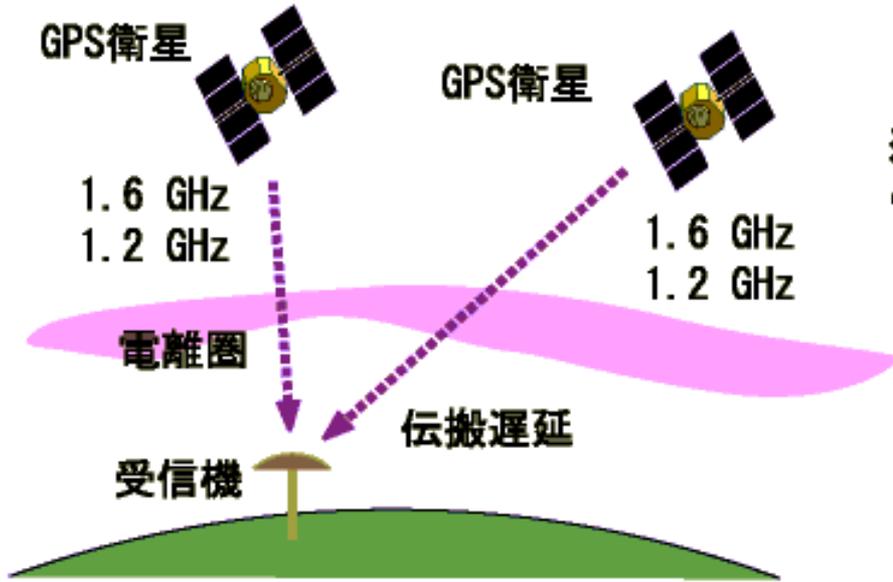
誘導電流のピークが 磁場H成分の急  
激な変化に対応している。

誘導電流は変圧器を加熱させて寿命  
を短くする。



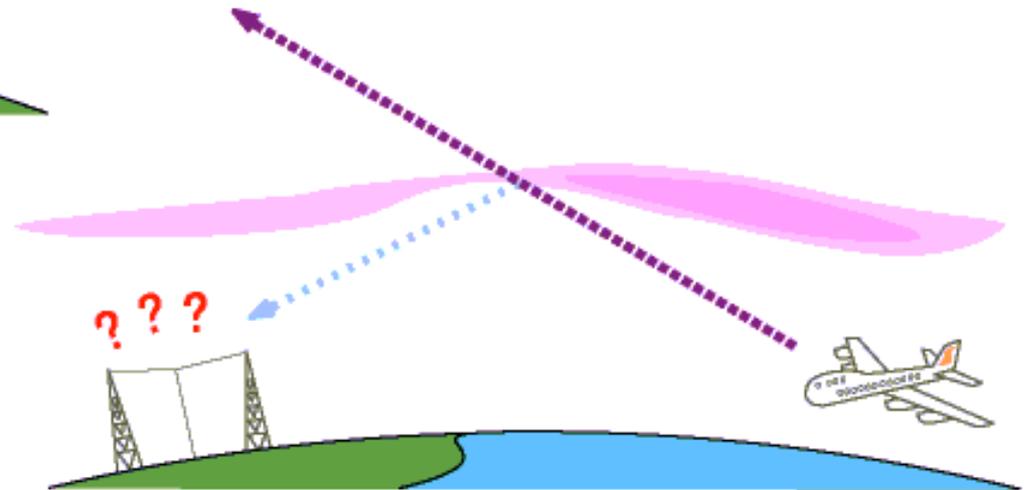
# 電離圏嵐と衛星電波障害

## GPS測位誤差と短波通信障害



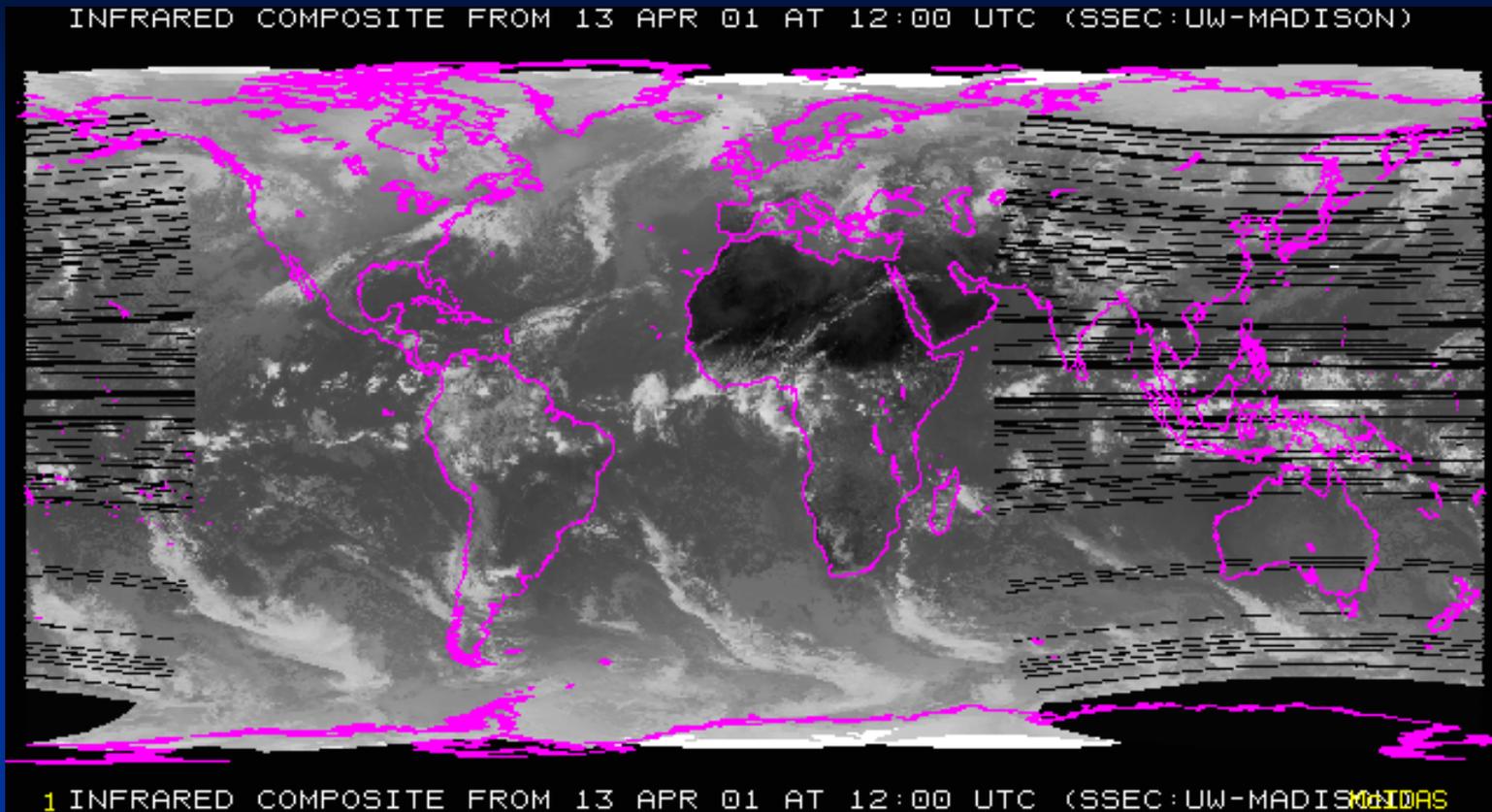
独自のGPS受信機ネットワークの整備と  
電離圏情報抽出アルゴリズムの開発

ふたつの周波数間の伝搬遅延差  
から伝搬路上の全電子数を求める

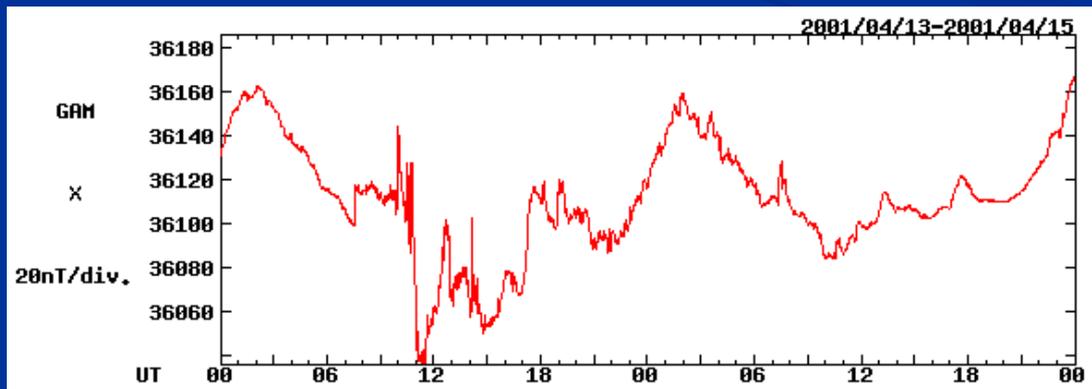


電離圏嵐による通信障害

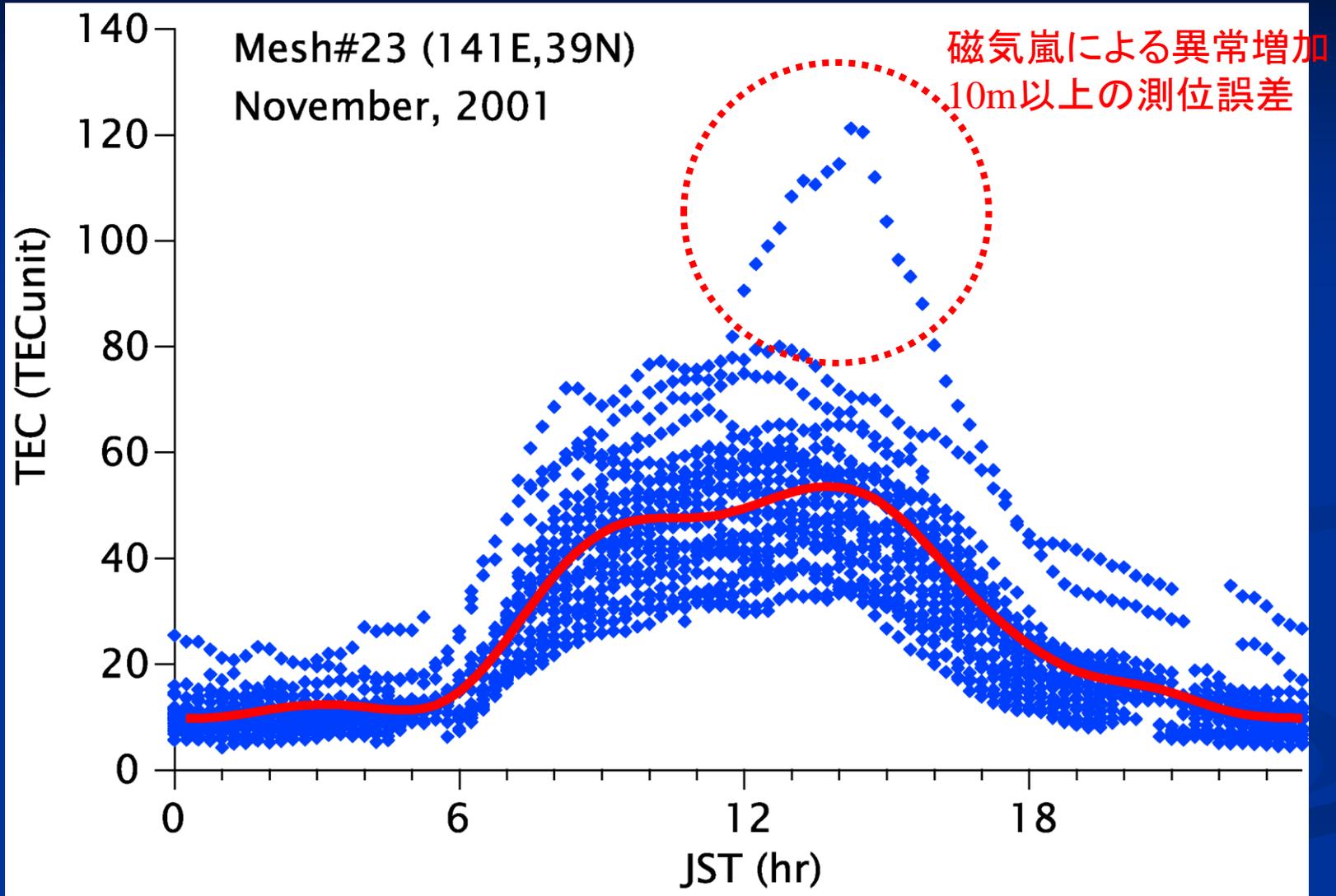
# 気象衛星GMS画像の乱れ (2001.4.13/12UT)



受信局Guamで観測された地磁気擾乱

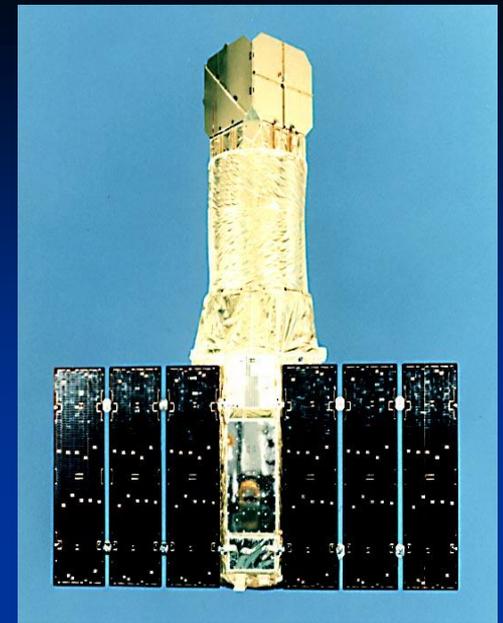
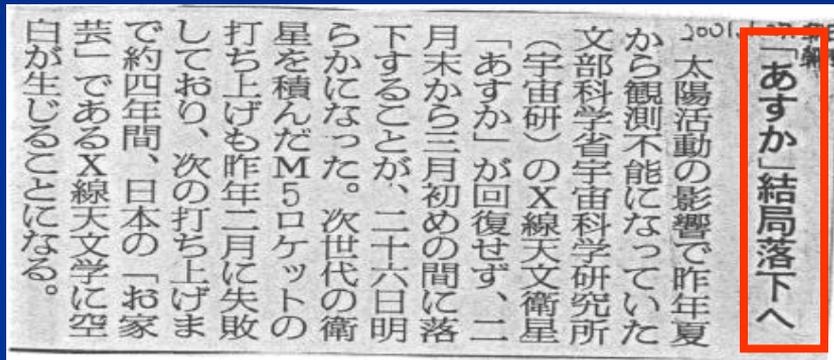


# 電離圏全電子数の異常増加(GPS誤差原因)



# 大気ドラッグによる X線天文衛星「あすか」姿勢・軌道障害

宇宙科学研究所のX線天文衛星「あすか」  
2000年7月に宇宙科学研究所のX線天文衛星「あすか」  
が、激しい地磁気嵐の影響による大気密度増加によ  
り姿勢が不安定になった。2001年3月に落下。朝日新聞 2001.1.27



宇宙航空研究開発機構(JAXA)より

# 太陽高エネルギー粒子による 火星探査機「のぞみ」通信・姿勢障害

2002年4月26日に、通信系及び姿勢制御系の一部の機能に異常発生。

原因:4月21日に発生した太陽フレア高エネルギー粒子群による電源系の異常。

2002年5月24日現在  
(文部科学省宇宙科学研究所HPより)



# 北海道赤色オーロラ

1989年10月21日宇宙天気予報にもとづき稚内で撮影



31年ぶりに北海道で観測された赤色のオーロラ



## 北海道オーロラ

2001年3月31日の晩に北海道で観測されたオーロラ（陸別町 銀河の森天文台 提供）

2003年10月29日深夜に北海道に現れたオーロラ  
(陸別町銀河の森天文台撮影)



# 宇宙利用障害

- 太陽フレアX線・・・通信障害(電離圏異常電離)
- 太陽高エネルギー粒子・・・通信障害(極域電離圏異常電離)、衛星障害
- CME(Coronal Mass Ejection)・・・磁気嵐、磁気圏嵐
- CIR(Corotating Interface Region)・・・磁気嵐、磁気圏嵐
  
- 磁気圏嵐(サブストーム)・・・オーロラ、衛星障害
- 磁気嵐・・・低緯度オーロラ、送電線・パイプライン誘導電流、磁気測量
- 放射線帯高エネルギー電子・・・衛星障害
- 電離圏嵐・・・通信障害、衛星電波シンチレーション、GPS誤差
- 熱圏嵐・・・衛星ドラッグ

# 宇宙天気予報

- 太陽フレア・CME・CIR予報
- ジオスペース嵐予報  
(SC・磁気嵐、オーロラ、放射線帯高エネルギー粒子、誘導電流、電離圏嵐、熱圏嵐)

# 電波伝搬研究から宇宙天気研究へ

## 大学院時代

MC: VLF電波伝搬・下部電離圏(内部重力波)

DC: 極域電離圏電場の赤道伝搬・磁気嵐急始SC

1976年 郵政省電波研究所(RRL)に入所

VLF電波観測・サブストーム電子降下

1981年 RRL電波部電波伝搬研究室

HF Doppler観測・SC電場

1988年 CRL平磯宇宙環境センター

宇宙天気予報プロジェクト・太陽フレア磁気嵐予報

2001年 CRL/NICT電磁波計測部門

宇宙天気予報センター、RT磁力計・レーダチェーン整備

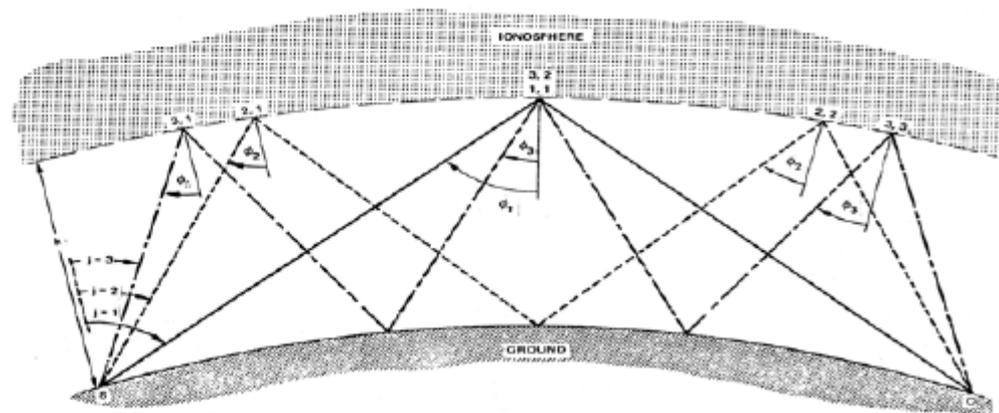
2005年 名古屋大学太陽地球環境研究所

磁気圏電離圏複合系研究・磁気嵐、サブストームの電流系

# VLF電波伝搬・高エネルギー電子 (VLF: 3-30 kHz)

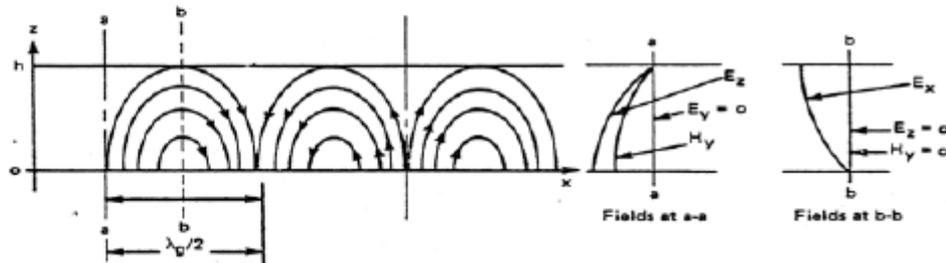
## Wave-Hop modes

70-90 km



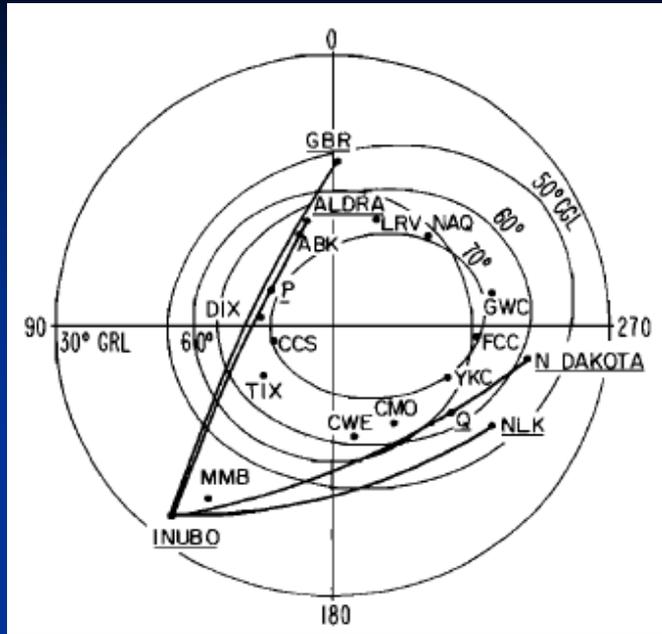
## Waveguide modes

Transverse magnetic TM1

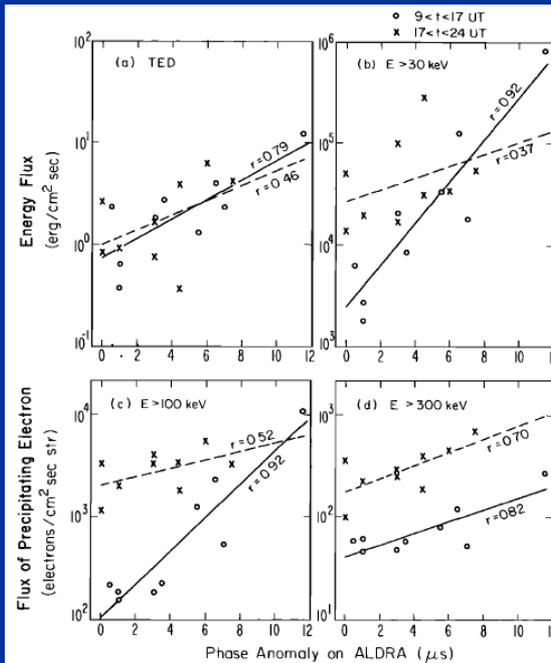
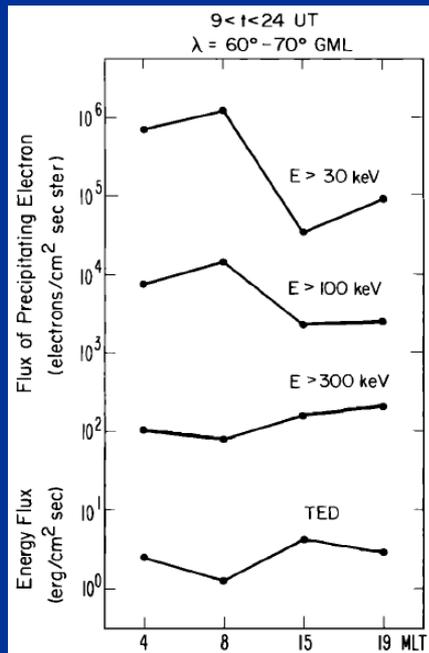
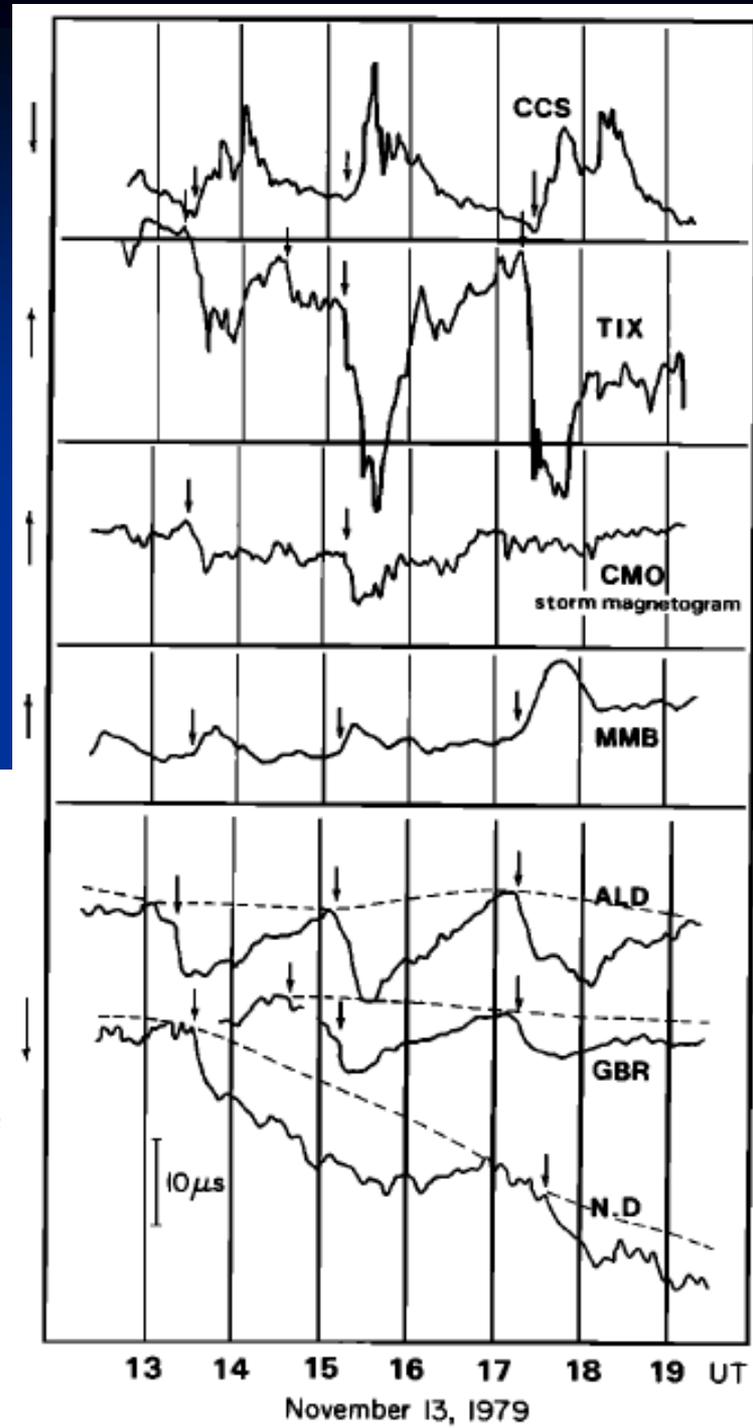


# サブストーム時のVLF位相異常

## オーロラジェット ト電流とVLF 位相変化に正 相関



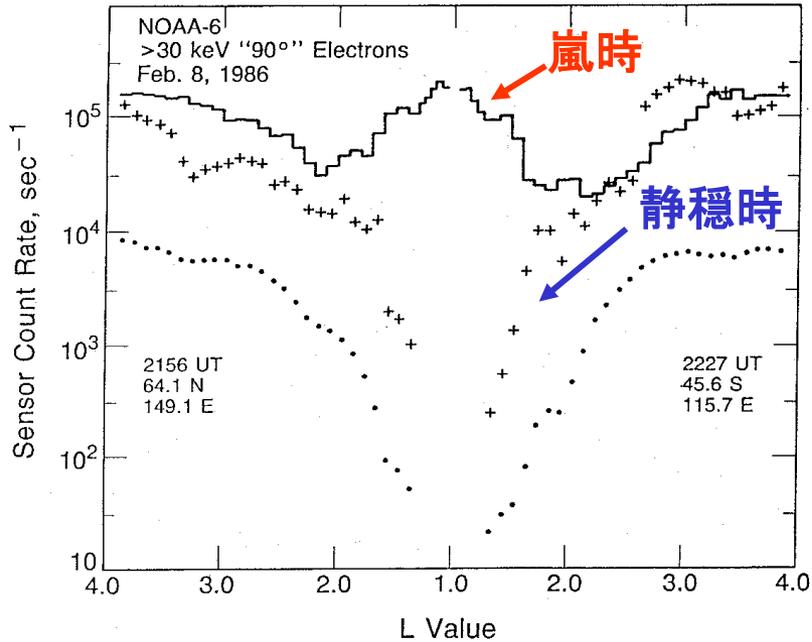
[Kikuchi and Evans, 1983]



# 1986年2月8日大規模磁気嵐中に観測された低緯度高エネルギー電子

Energetic electron events during the storm on February 8, 1986

(Kikuchi and Evans, Proc. Atmos. Res. Inst., 1989)



低緯度の高エネルギー電子は  
Dst(環電流)発達時に増加

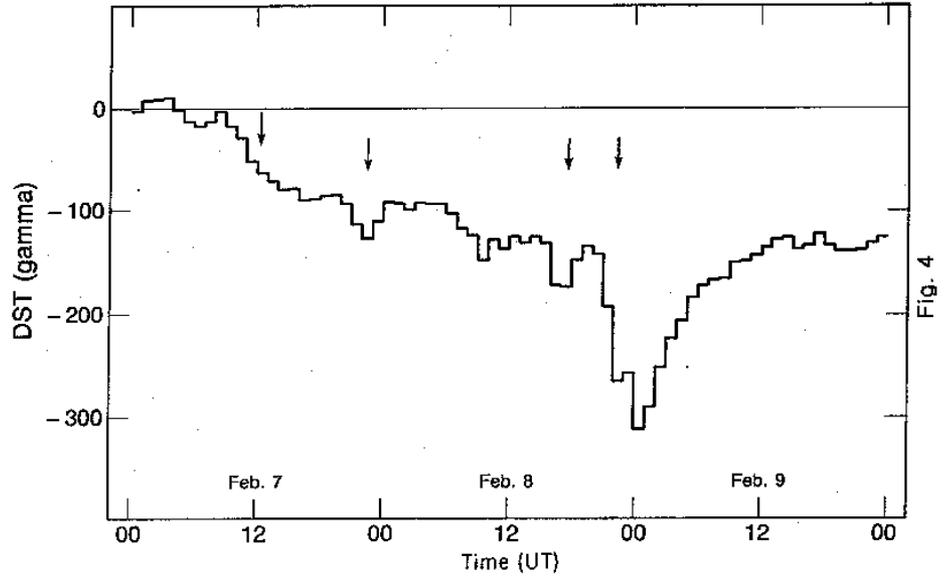


Fig. 2

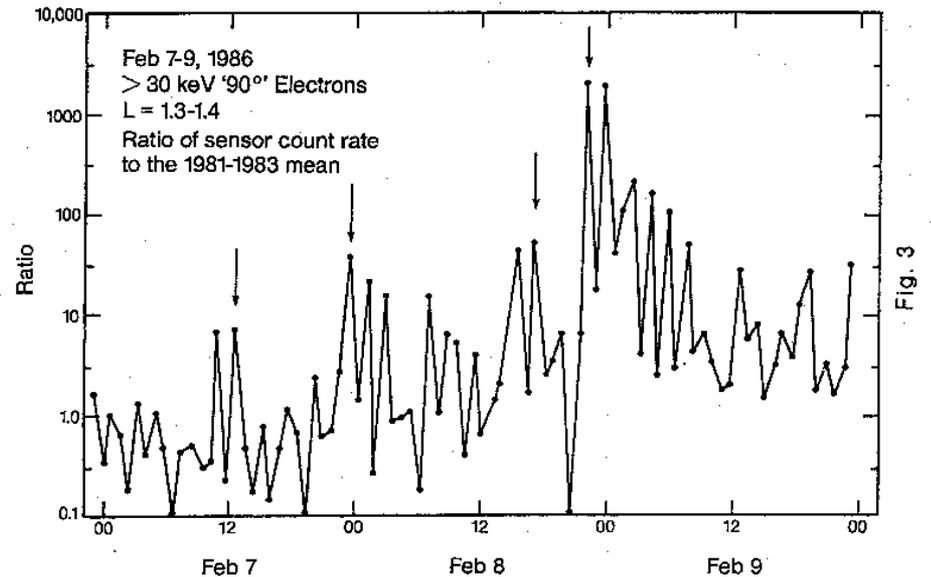


Fig. 3

# 電波伝搬研究から宇宙天気研究へ

## 大学院時代

MC: VLF電波伝搬・下部電離圏(内部重力波)

DC: 極域電離圏電場の赤道伝搬・磁気嵐急始SC

1976年 郵政省電波研究所(RRL)に入所

VLF電波観測・サブストーム電子降下

1981年 RRL電波部電波伝搬研究室

HF Doppler観測・SC電場

1988年 CRL平磯宇宙環境センター

宇宙天気予報プロジェクト・太陽フレア磁気嵐予報

2001年 CRL/NICT電磁波計測部門

宇宙天気予報センター、RT磁力計・レーダチェーン整備

2005年 名古屋大学太陽地球環境研究所

磁気圏電離圏複合系研究・磁気嵐、サブストームの電流系

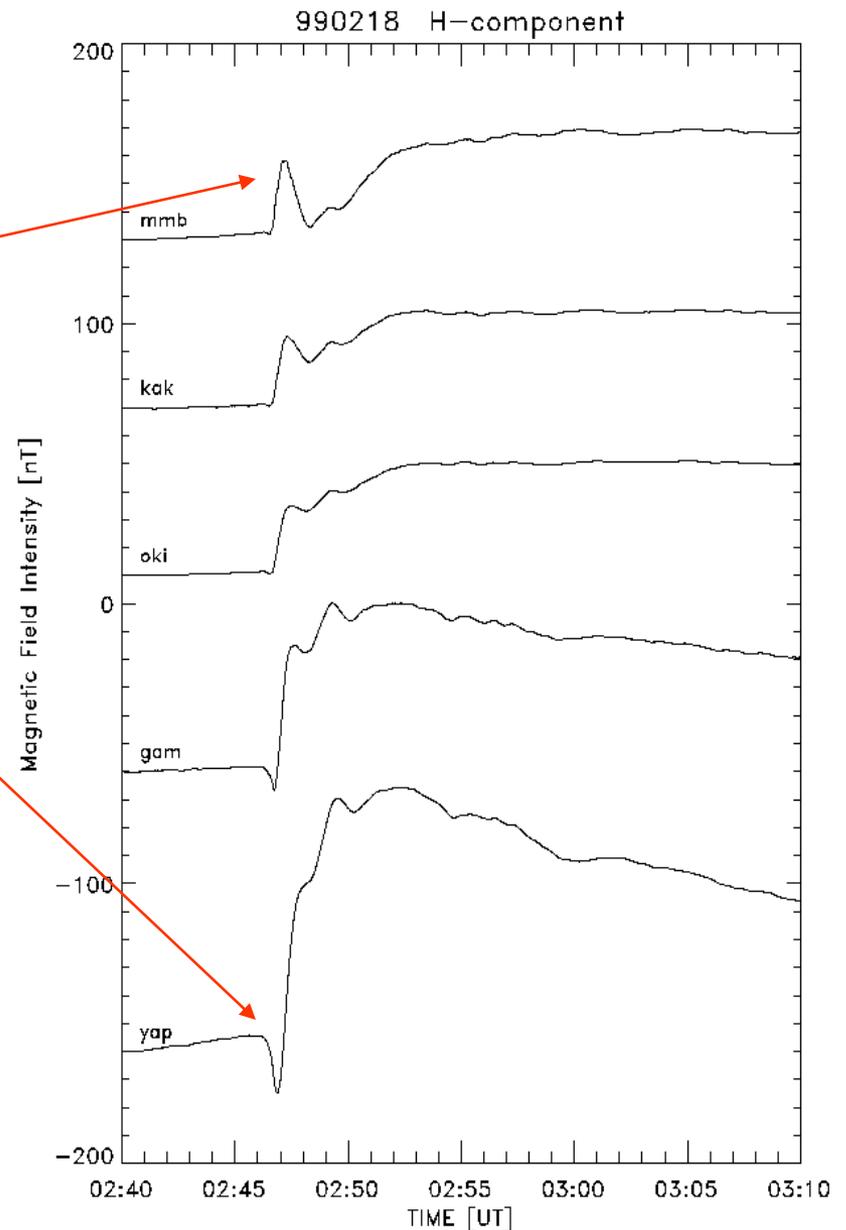
# SC研究の意義

- SCに伴う電流系は、電磁エネルギーの伝送路を示しており、この伝送路は、内部磁気圏への電場伝送や、substorm、stormの電流発達の理解に応用できる。

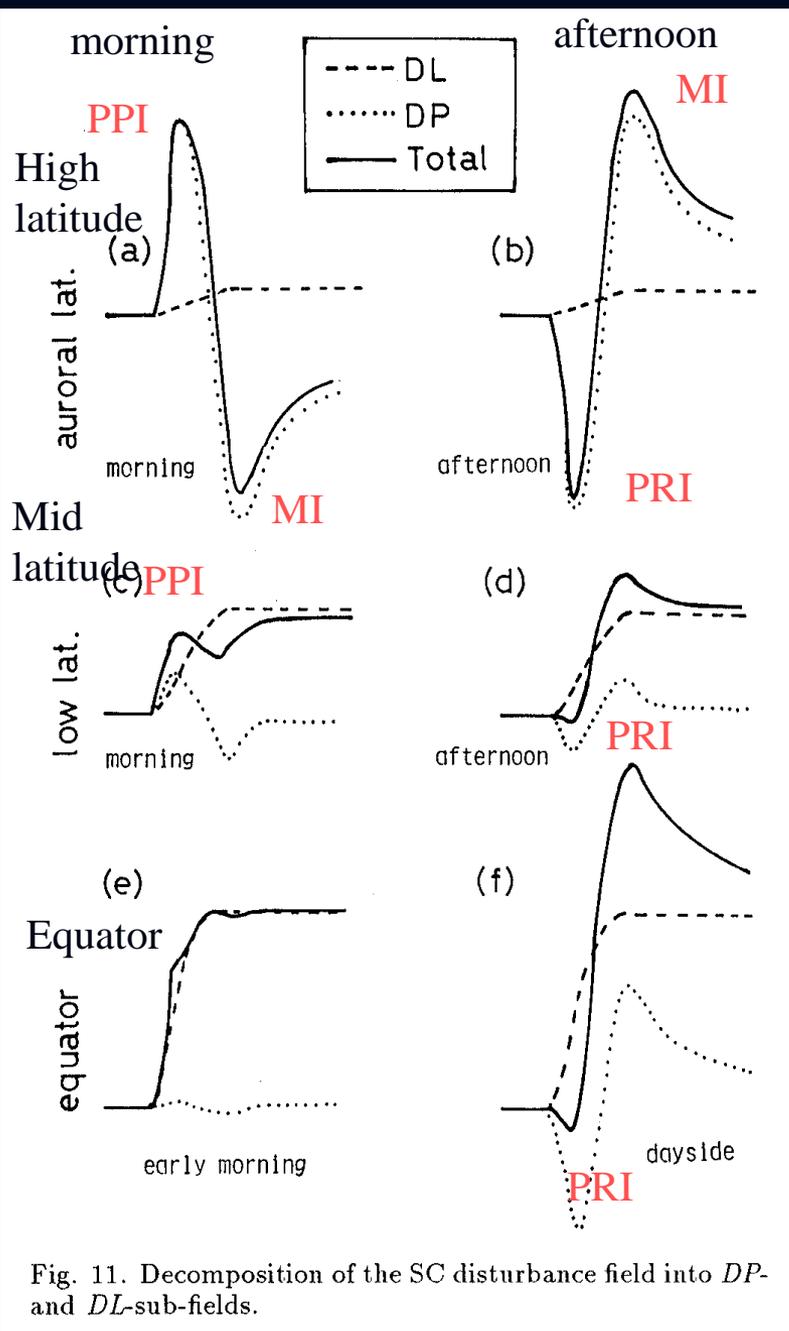
# SC時の中緯度PPI と赤道PRI

中緯度PPI (Preliminary positive impulse)と赤道PRI (preliminary reverse impulse)は同時に発生。

磁気圏電離圏三次元電流系で理解できる。



(Kikuchi et al., JGR 2001)



## 磁気嵐急始 (SC) の初期インパルス (PRI) と主インパルス (MI) の緯度地方時特性 (Araki, 1994)

Latitude and local time dependence of the PRI/PPI

PRIは午後の高緯度と昼間赤道で現れる

The preliminary impulse (PI) preceding the main impulse (MI) appears as the preliminary reverse impulse (PRI) and the preliminary positive impulse (PPI), depending on the local time and latitude.

The complicated latitude and local time dependence are explained by means of DP2-type ionospheric currents caused by dusk-to-dawn (PRI/PPI) and dawn-to-dusk (MI) electric fields.

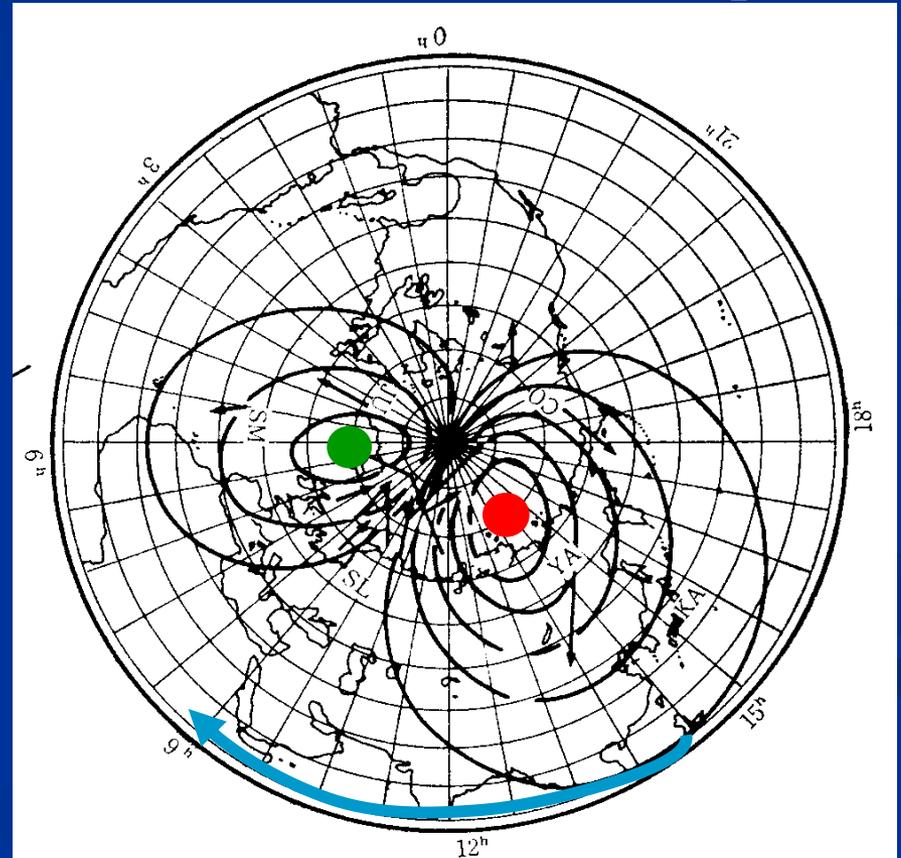
Fig. 11. Decomposition of the SC disturbance field into DP- and DL-sub-fields.

# PRIの等価電流系

Equivalent currents of the preliminary impulse (PRI/PPI) consist of twin current vortices at high-to-mid latitudes and zonal currents at the dayside equator

● downward  
● upward

The latitude and local time features were explained by means of the DP2-type ionospheric currents driven by the dusk-to-dawn electric field impressed from the magnetosphere.

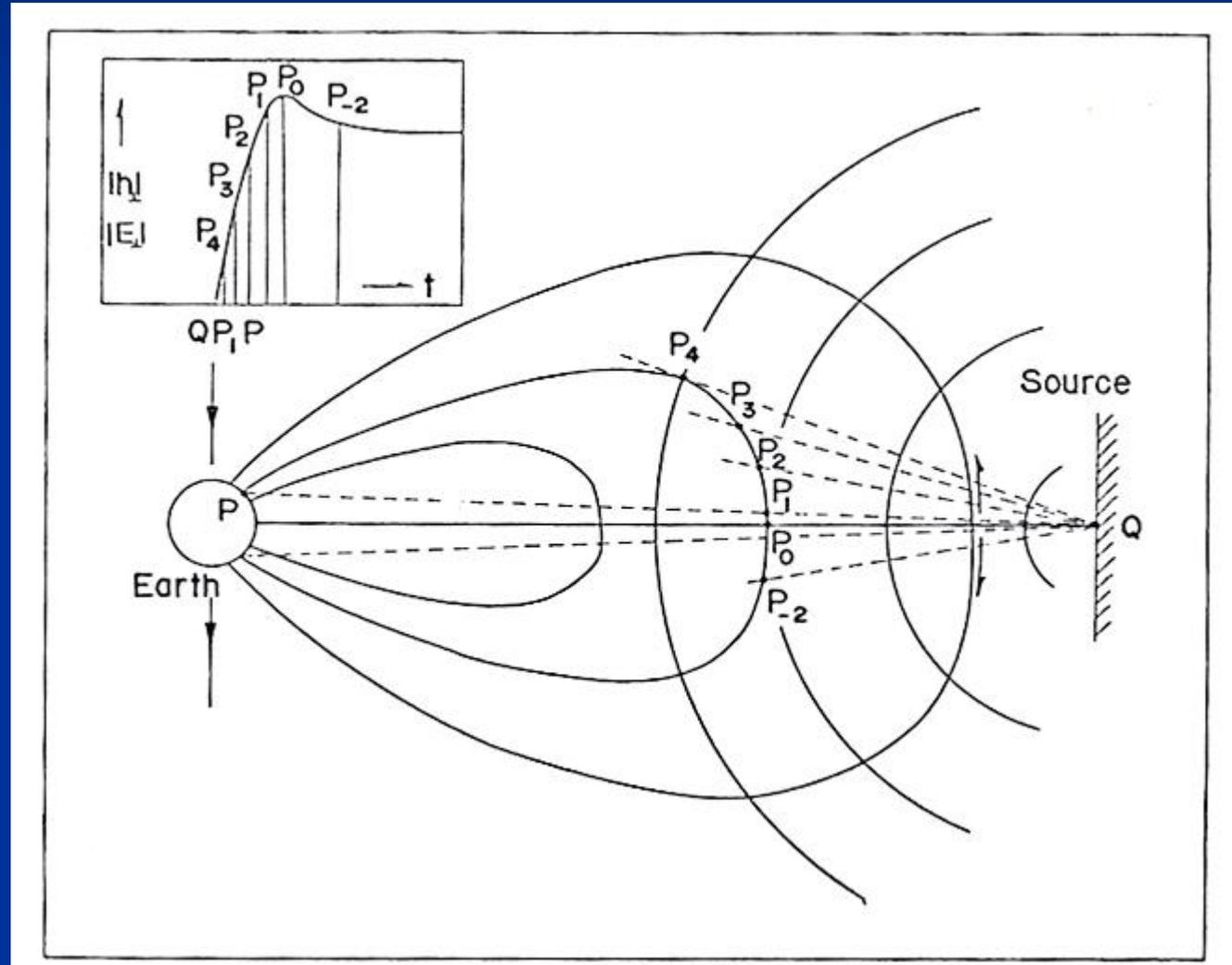


Nagata and Abe (1955)

12 MLT

Tamao [1964]は、PRIをcompressional MHD波からモード変換されたCTモード(Alfven波)で説明できるとした。

⇒伝搬と共に時間遅れが生じる。赤道には適用できない。



[Tamao, 1964]

# 極域と赤道で同時に(10秒精度)開始するPRI

The PRI started simultaneously at the dayside geomagnetic equator and afternoon high latitude within the temporal resolution of 10 sec (Araki, 1977).

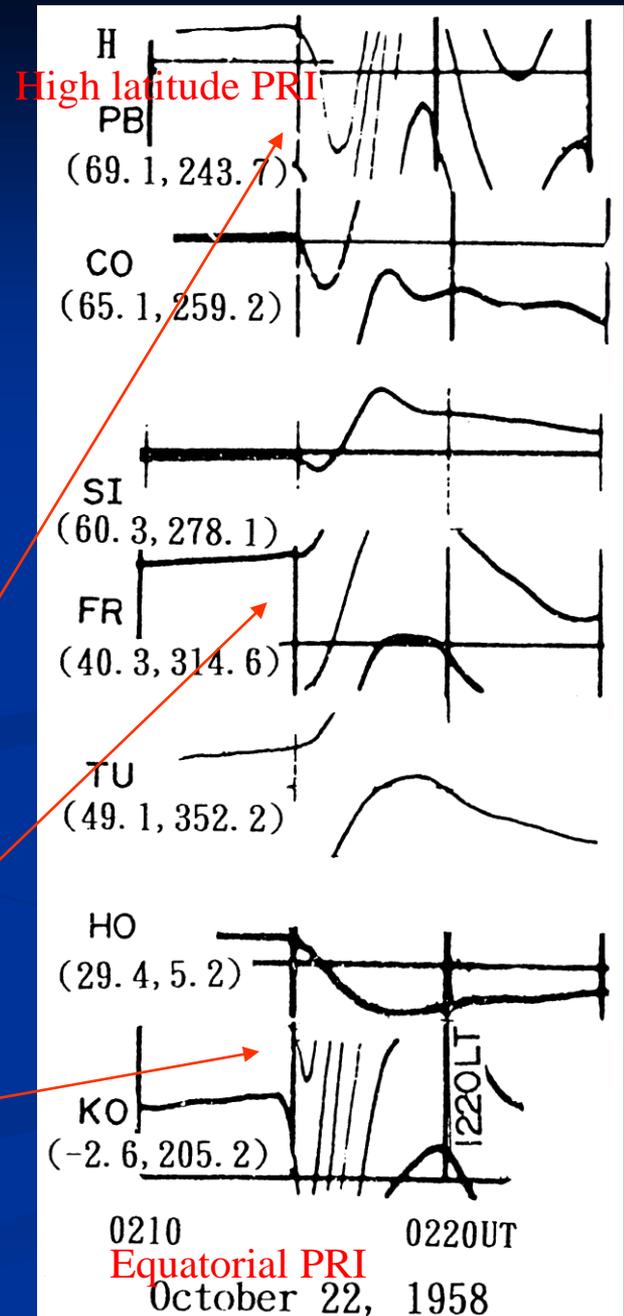
This result suggested instantaneous development of the PRI current from the polar ionosphere to the equator.

高緯度 PRI

低緯度では現れない

赤道PRI

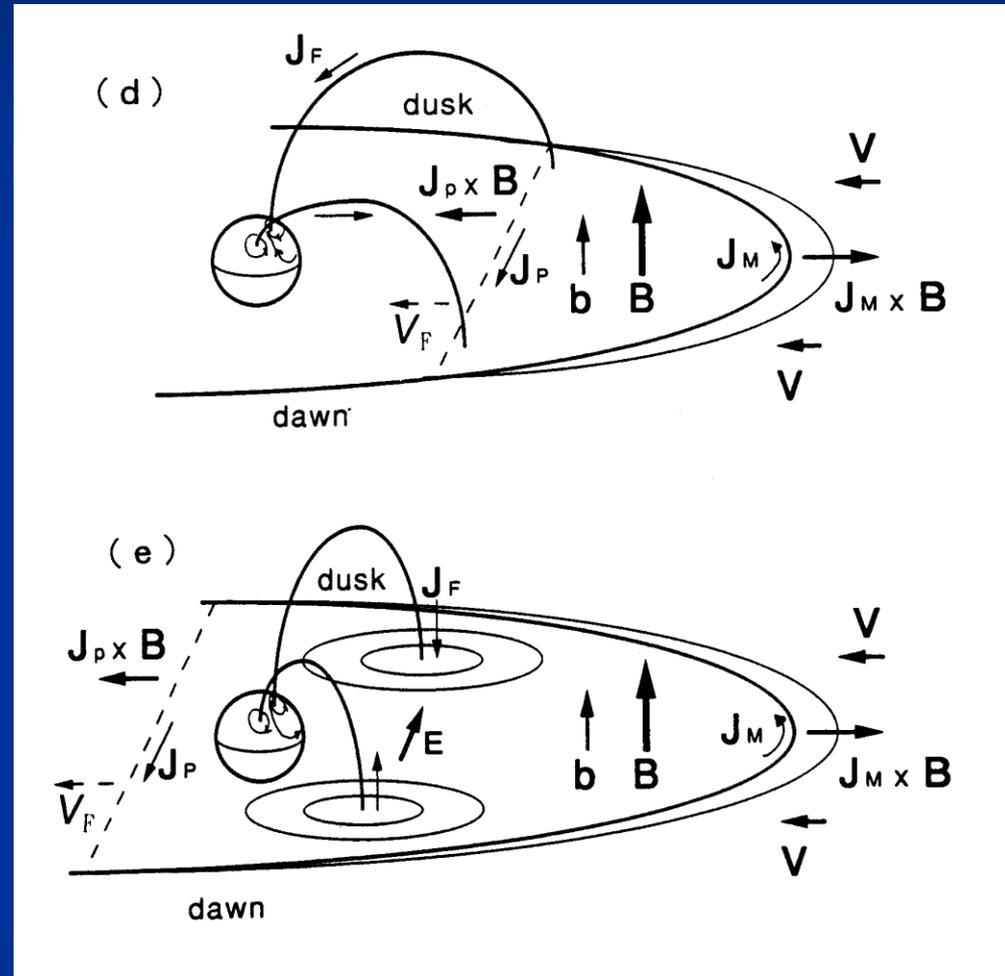
(Araki, PSS 1977)



# 磁気圏圧縮により発生する沿磁力線電流 Field-aligned currents during SC/SI

磁気圏境界電流の一部が磁力線電流として極域電離圏へ流入する(PRI電流系)

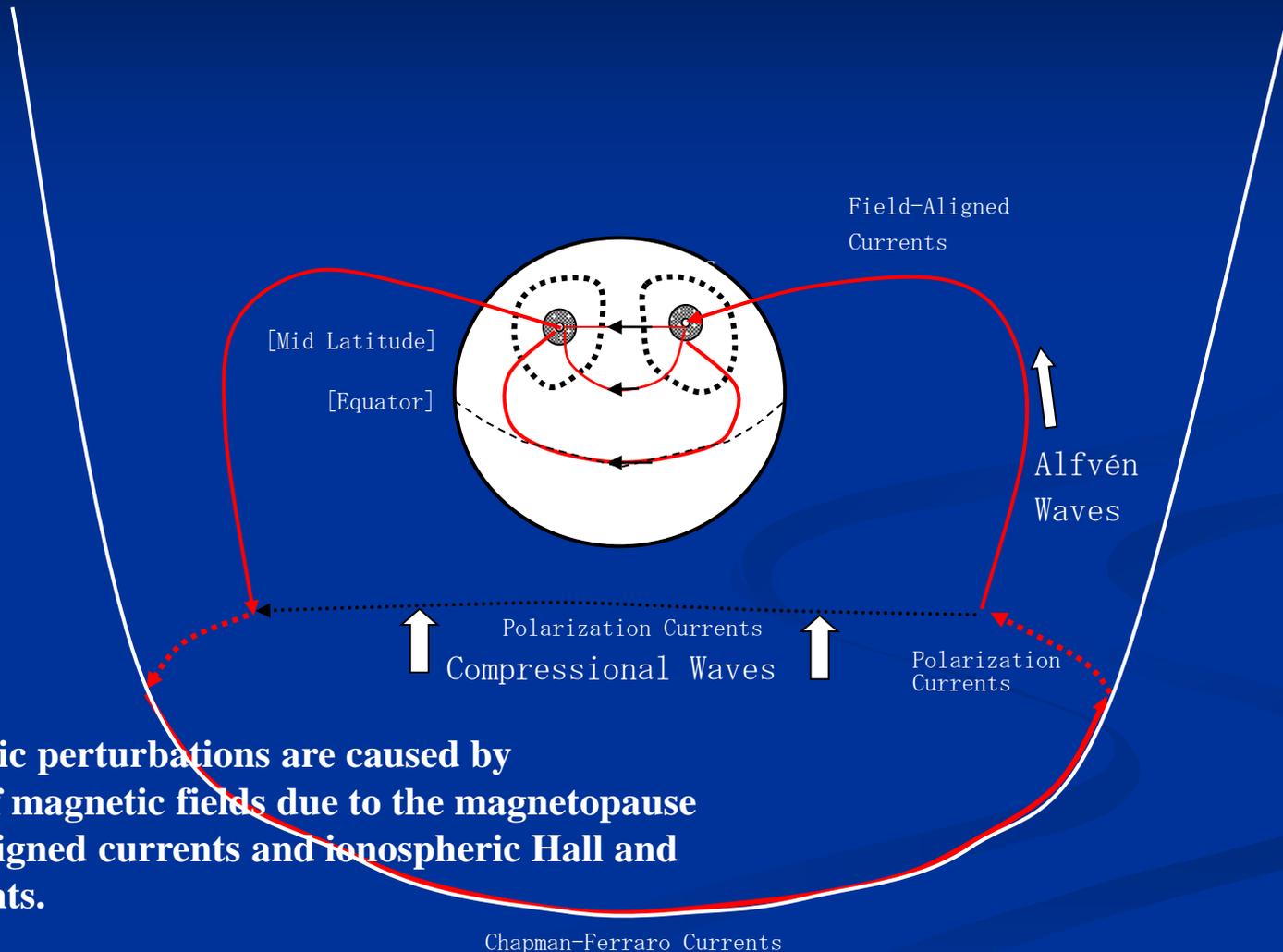
磁気圏圧縮によってプラズマ対流が強められ、沿磁力線電流が発生する(MI電流系)。PRI電流系と逆向きに流れる



(Araki, AGU Monograph 1994)

# 磁気圏圧縮により駆動される磁気圏電離圏電流系

## Magnetosphere-ionosphere current system of the PRI/PPI



Ground magnetic perturbations are caused by superposition of magnetic fields due to the magnetopause current, field-aligned currents and ionospheric Hall and Pedersen currents.

Chapman-Ferraro Currents

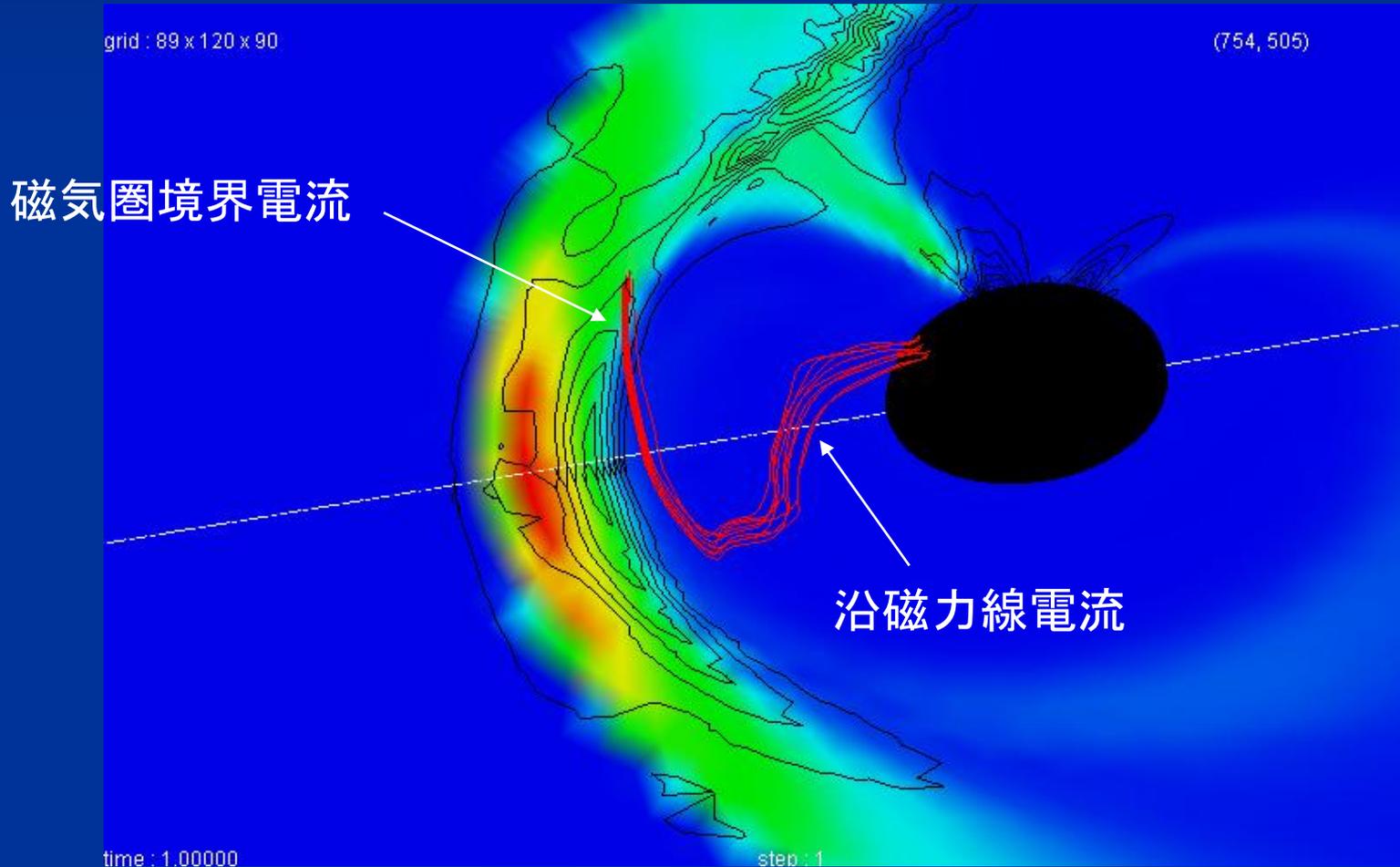
(Kikuchi et al., JGR 2001)

# MHDシミュレーションにより再現された沿磁力線電流

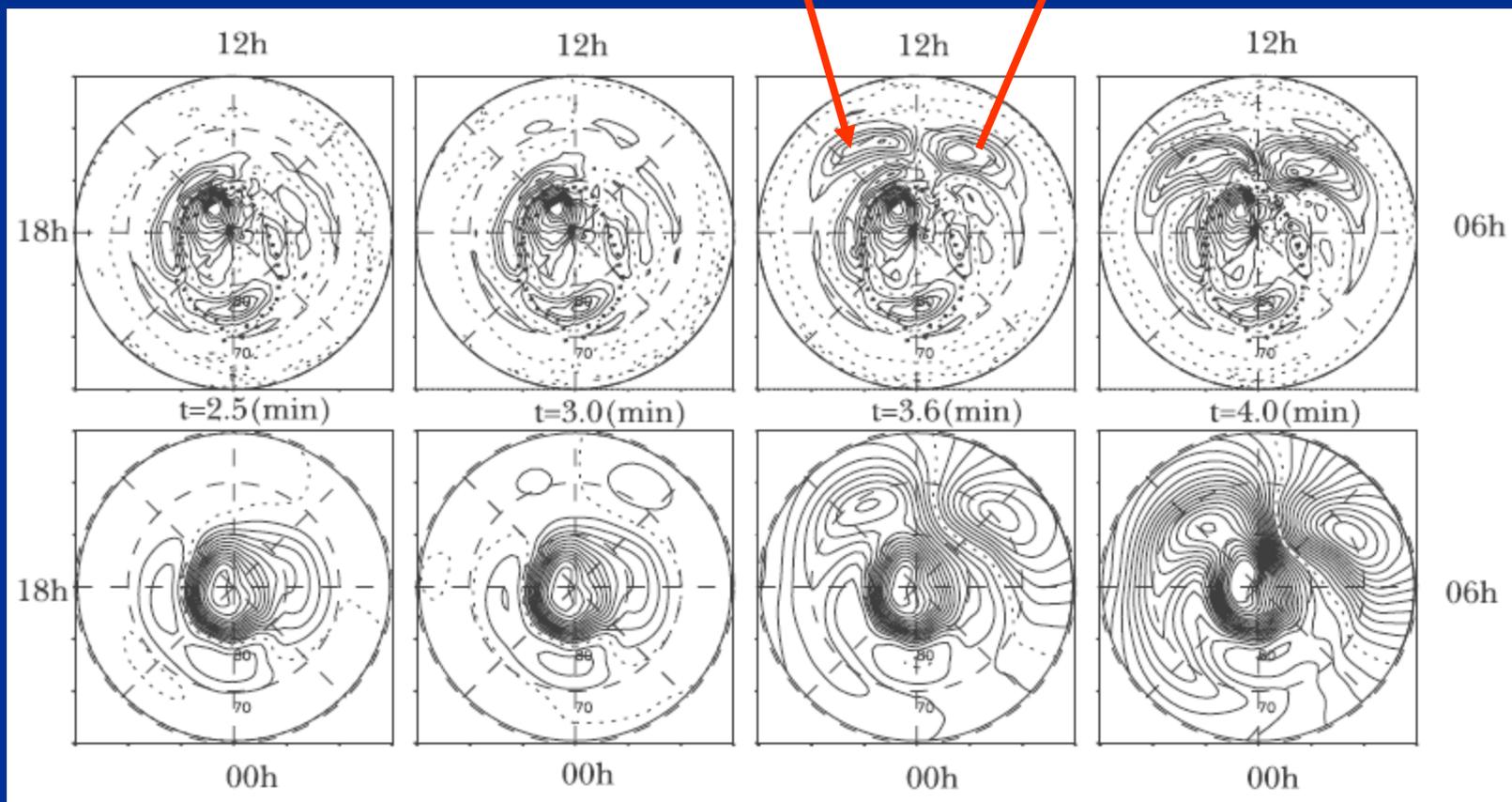
Current System during the Magnetospheric Compression

MHD Simulation by T. Tanaka

The 3-D current system consists of the magnetopause source current, polarization current and field-aligned current.



# MHD simulation で再現されたPRIの沿磁力線電流



(Fujita et al., 2003)



# E層内拡散モード波の一次元伝播

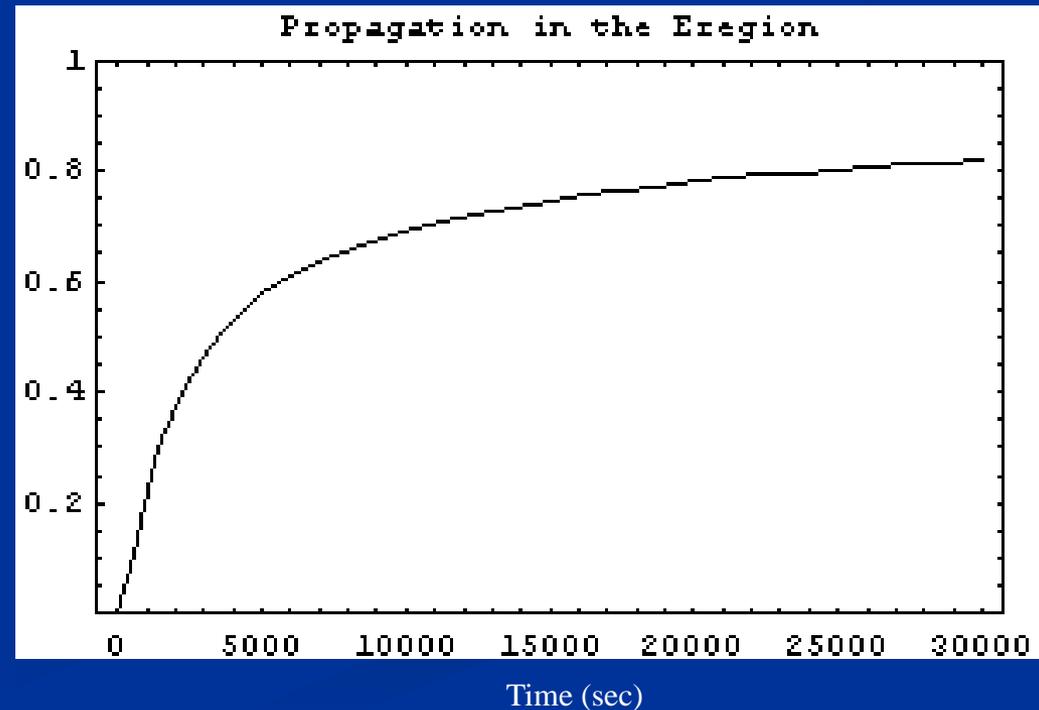
The propagation mode is a diffusion mode in the E-region and an evanescent mode in the F-region, both of which can not explain the instantaneous propagation.

E層で拡散モードであるために、PRIは瞬時伝播できない(Kikuchi and Araki, 1979a)

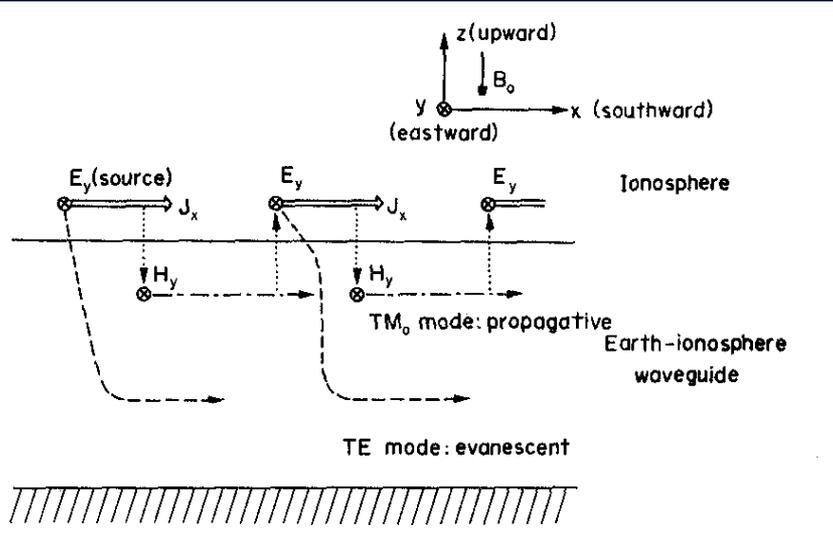
$$E_y = E_0 \operatorname{Erfc} \left( \frac{x \sqrt{\mu_0 \sigma}}{2\sqrt{t}} \right)$$

$$x = 5000 \text{ km}$$

$$\sigma = 10^{-4} \text{ mho/m}$$

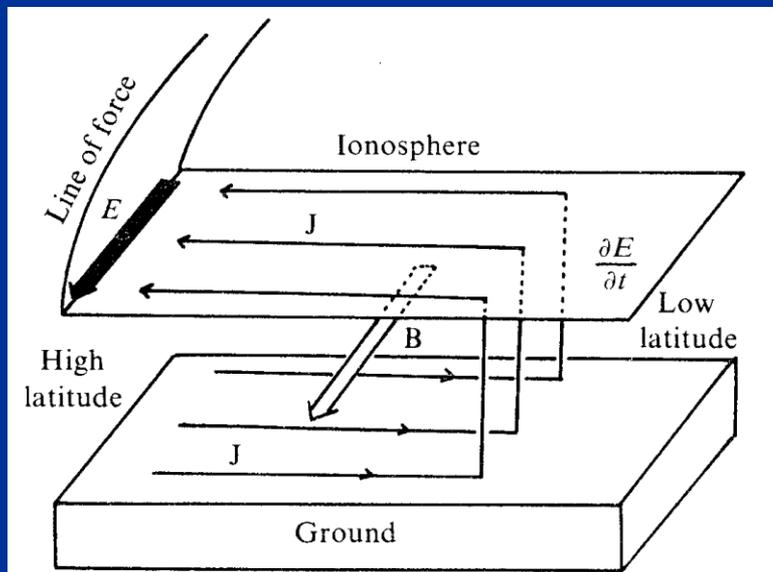


# 地面電離層導波管内のTM0モード伝搬



The polar electric field is transmitted to the equator at the speed of light by the TM0 mode in the earth-ionosphere waveguide. The TM0 mode has no lower cutoff frequency, which enables long-period disturbances to propagate to the equator.

Kikuchi et al. [1978], Kikuchi and Araki [1979b]



- 光速で伝播する
- 遮断周波数がゼロであるために、PRI, DP2などの長周期変動も伝播

# 電離圏電位の光速伝搬

## Transmission of the potential electric field in the three-layered Earth-ionosphere waveguide

The Poynting flux is transmitted horizontally at the speed of light by the TM<sub>0</sub> (TEM) mode wave in the Earth-ionosphere waveguide (Kikuchi et al., 1978; Kikuchi and Araki, 1979). The electric field in the ionosphere is transmitted along the field lines into the inner magnetosphere.

$$S_{z,M}(x, z) = \frac{\Sigma_A}{(\Sigma_A + \Sigma_I)^2} H_{yV}^2(x) \cdot U\left(t - \frac{z}{V_a}\right)$$

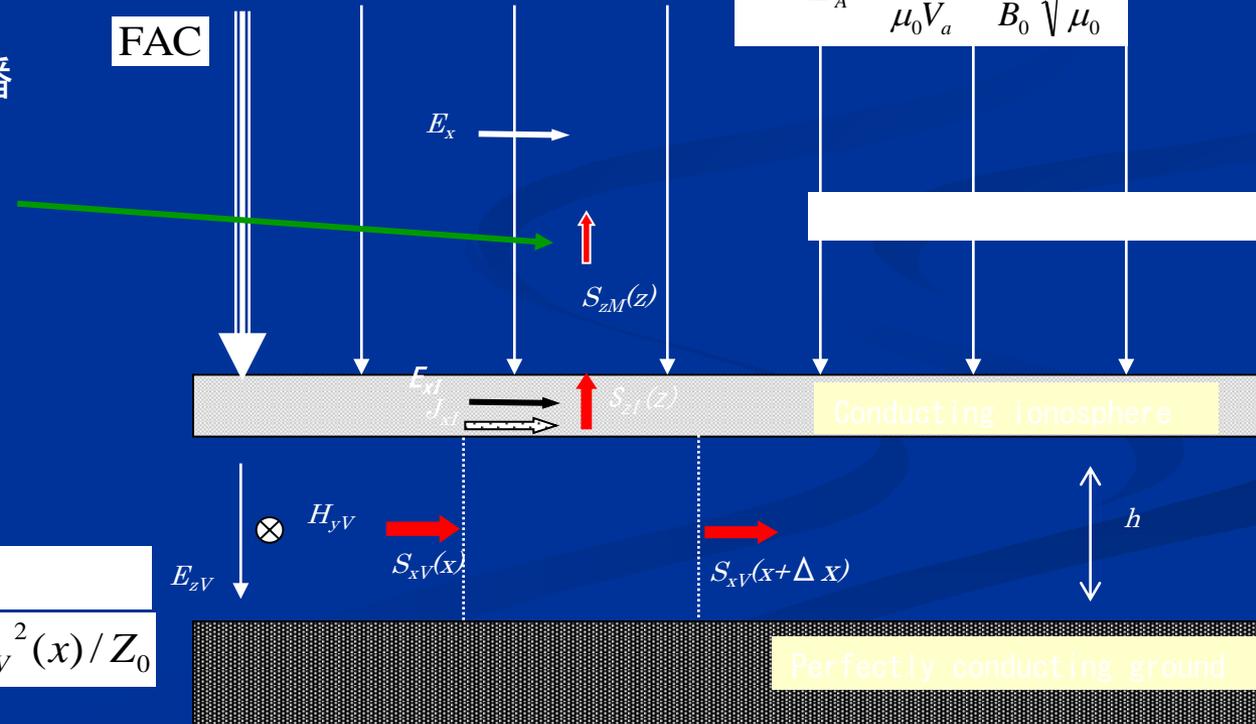
$$E_{xM}(x) = E_{xI}(x) \cdot U\left(t - \frac{z}{V_a}\right)$$

$$E_{xI}(x) = \frac{1}{\Sigma_A + \Sigma_I} H_{yV}(x)$$

$$\Sigma_A = \frac{1}{\mu_0 V_a} = \frac{1}{B_0} \sqrt{\frac{\rho}{\mu_0}}$$

Poynting fluxは導波管を伝播し、一部は電離圏から磁気圏へ伝播する。

電離圏伝導度が大きい時、電離圏電場は減衰することなく、上方へ伝播する。



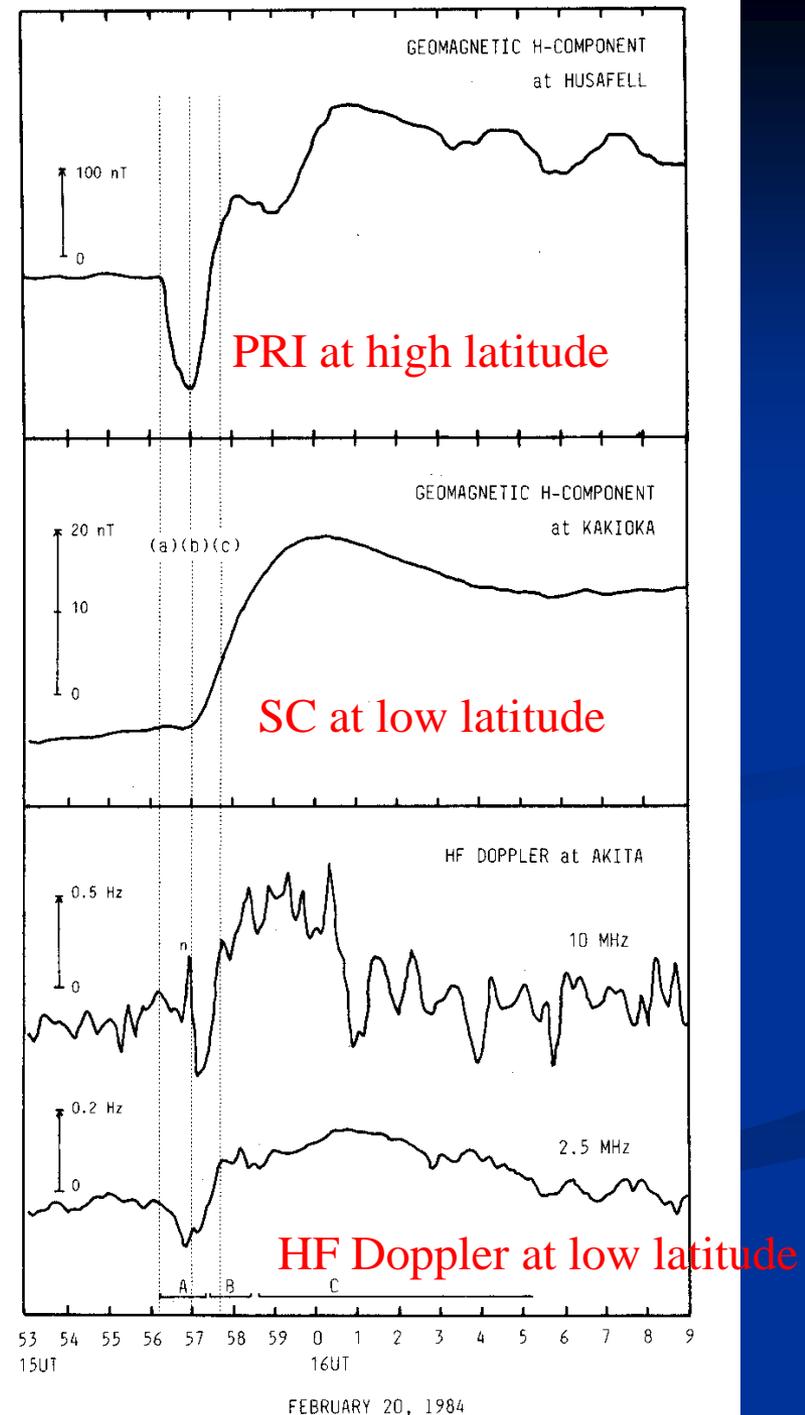
$$S_{xV}(x) = Z_0 H_{yV}^2(x) = E_{zV}^2(x) / Z_0$$

# 高緯度PRIと同時にPRI 電場が夜側の低緯度電離圏で観測された (HF Doppler observation)

SCF (SC-associated Frequency deviation) is preceded by a negative PFD (Preliminary Frequency Deviation) in the midnight.

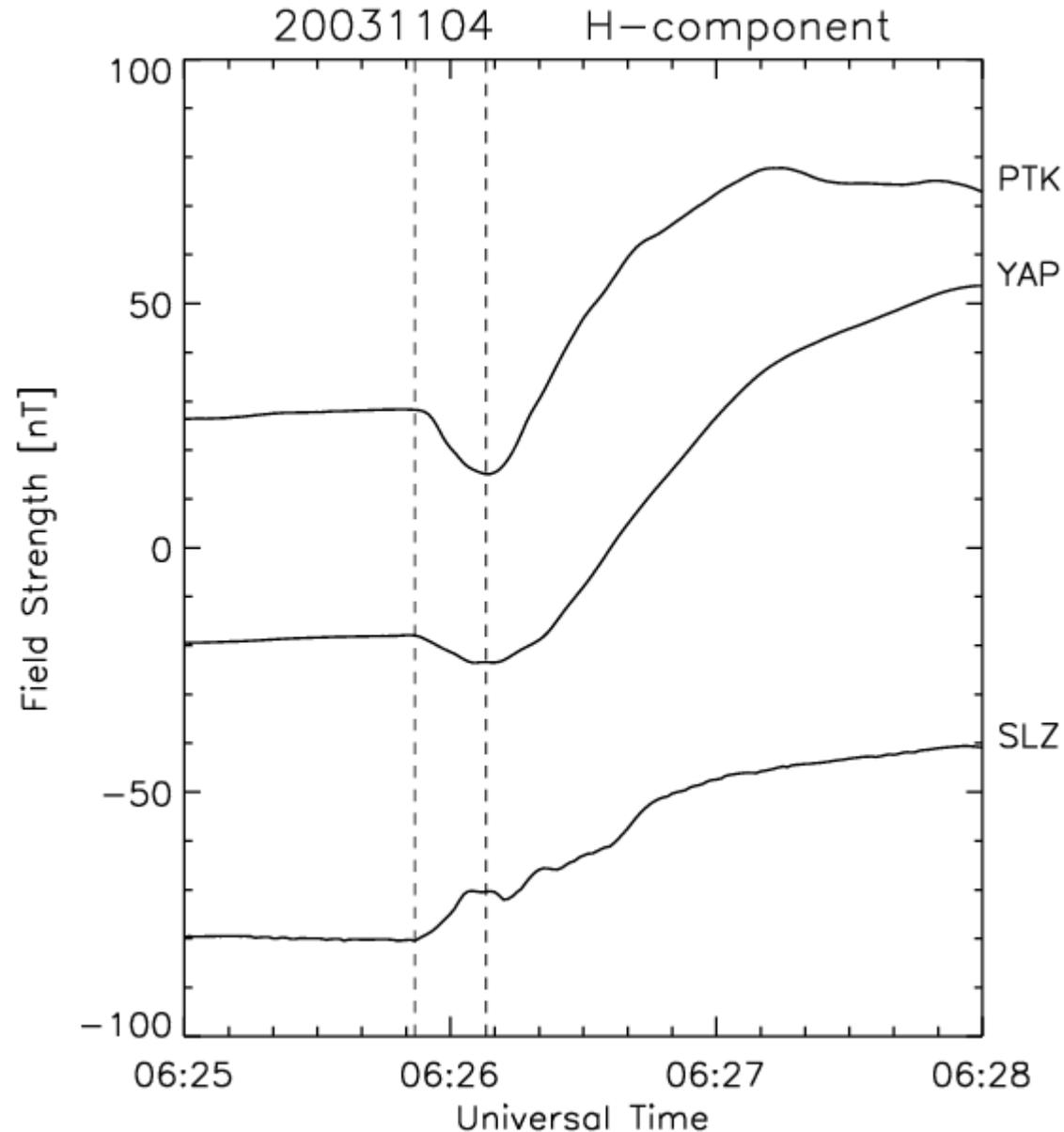
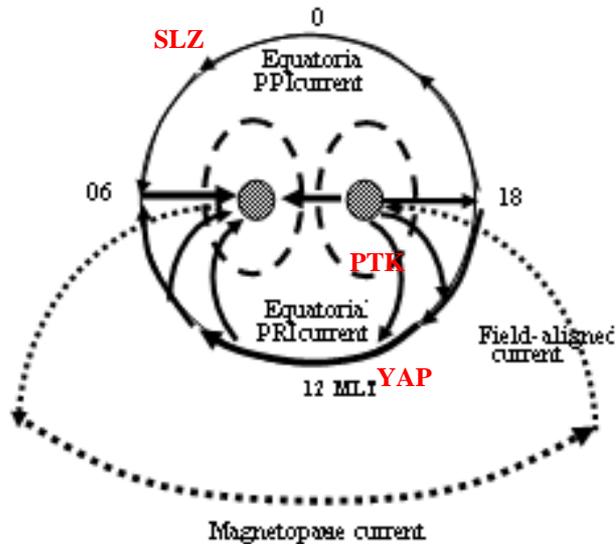
The PFD occurs simultaneously with the high latitude PRI within a time resolution of 10 sec.

(Kikuchi, JGR 1986)



# 昼間赤道PRIと夜間赤道PPIが1秒の精度で同時

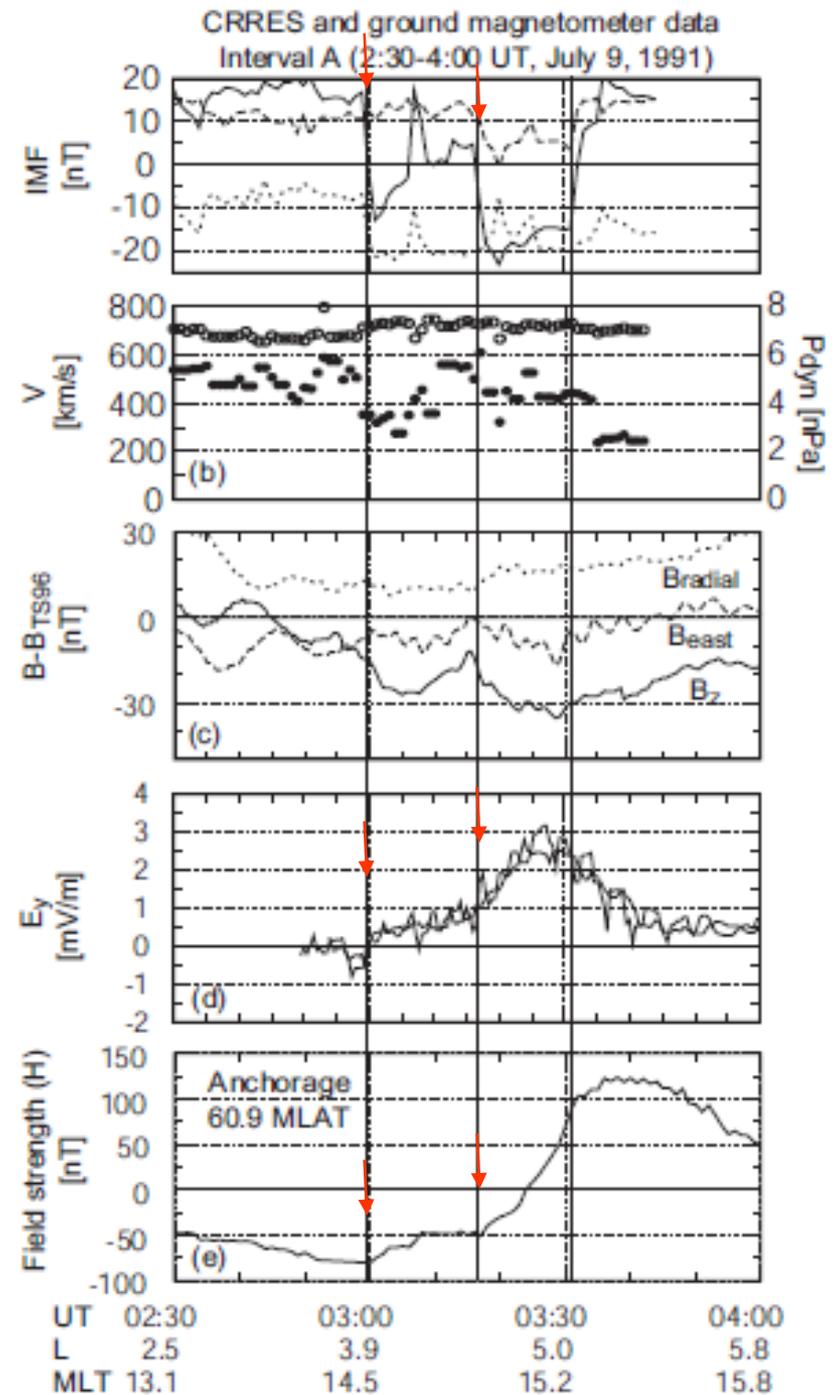
Simultaneous occurrence within a few sec of the preliminary impulses of a geomagnetic sudden commencements at the mid latitude and day- and night-side equator



# 対流電場の増加減少が内部磁気圏(L=4-5)へ1分以内に伝播

(Nishimura et al., JGR 2009)

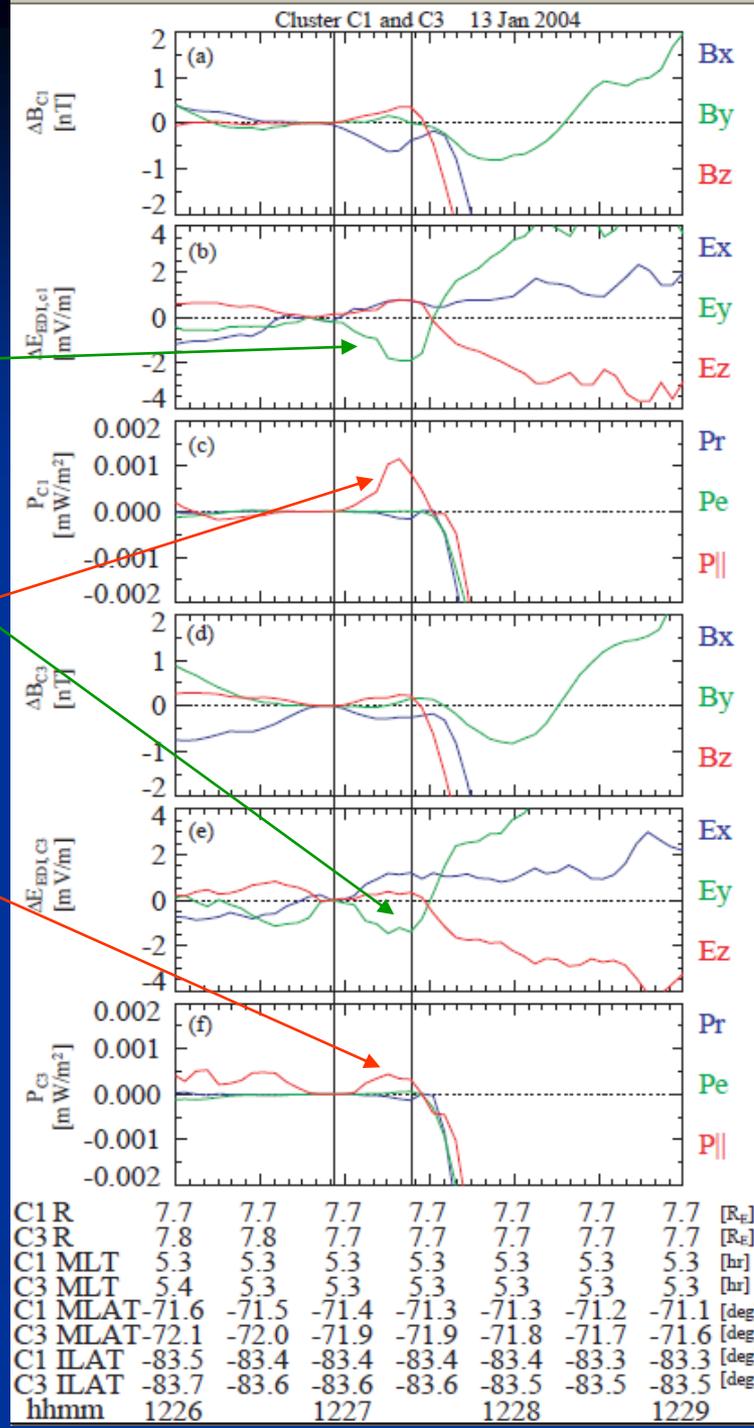
Sudden southward turnings of the IMF (top panel) caused increases in the polar cap potential (bottom panel) and the electric field in the inner magnetosphere (4<sup>th</sup> panel).



# 磁気圏で観測されたSCの Preliminary impulse (PI)に伴う電 場と電離圏からのPoynting flux

PIに伴うdusk-to-dawn 電場が圧縮性MHD波より早く到達する

電離圏から磁気圏へ向かう  
Poynting flux



Nishimura et al. (JGR 2010)

# 電波伝搬研究から宇宙天気研究へ

## 大学院時代

MC: VLF電波伝搬・下部電離圏(内部重力波)

DC: 極域電離圏電場の赤道伝搬・磁気嵐急始SC

1976年 郵政省電波研究所(RRL)に入所

VLF電波観測・サブストーム電子降下

1981年 RRL電波部電波伝搬研究室

HF Doppler観測・SC電場

1988年 CRL平磯宇宙環境センター

宇宙天気予報プロジェクト・太陽フレア磁気嵐予報

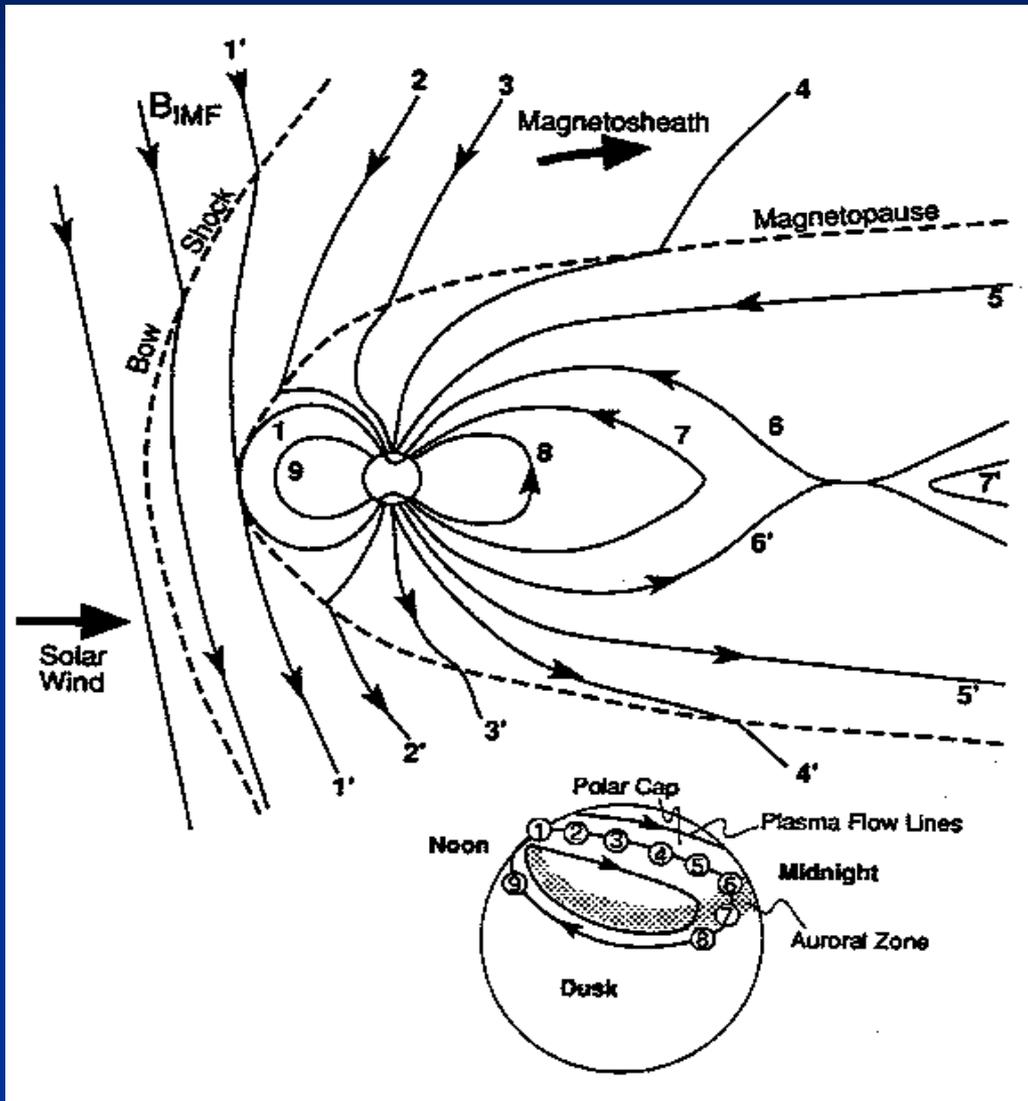
2001年 CRL/NICT電磁波計測部門

宇宙天気予報センター、RT磁力計・レーダチェーン整備

2005年 名古屋大学太陽地球環境研究所

磁気圏電離圏複合系研究・磁気嵐、サブストームの電流系

# 太陽風磁気圏相互作用 (電磁エネルギー・物質の流入)

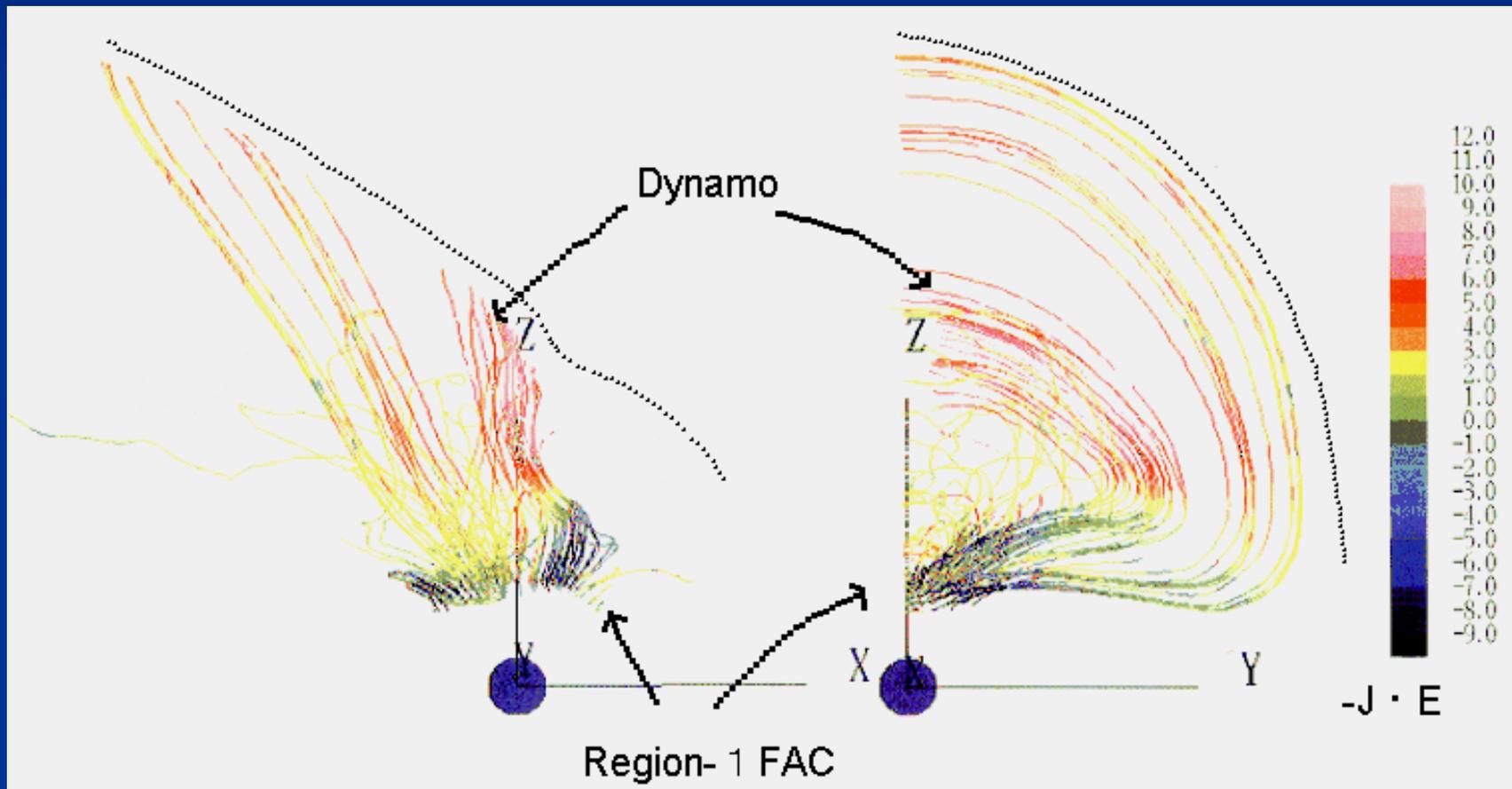


太陽風磁場 (IMF) と地球磁場の再結合 (reconnection) により、磁気フラックスが反太陽方向へ移動する。これが磁気圏と電離圏のプラズマの大規模な運動を起こす。

Dungey (1961)



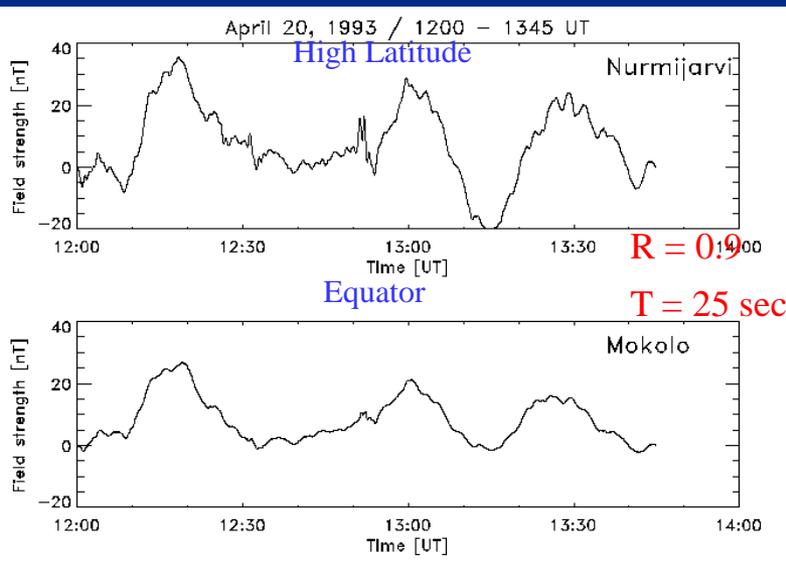
# Region-1沿磁力線電流・対流電場のダイナモ (MHD シミュレーションによる)



[Tanaka, JGR 1995]

# 対流電場の極赤道間高速伝播

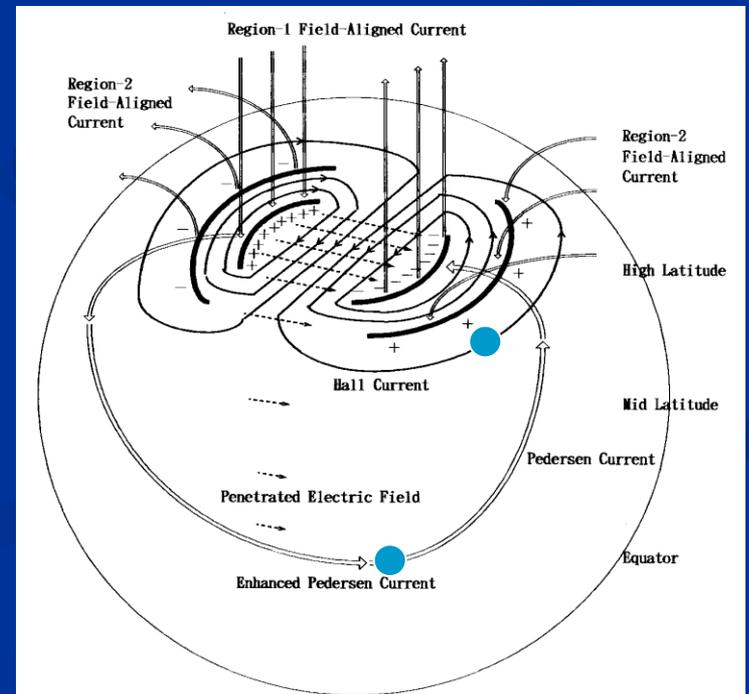
## Instantaneous transmission of the DP2 current to the equatorial ionosphere (R1 FAC - DP2 Current circuit)



Excellent correlation between the high latitude and equatorial DP2 suggests instantaneous transmission of the electric field and current to the equator.

A current circuit is completed between the R1 FAC and the equatorial DP2 current.

(Kikuchi et al., JGR 1996)

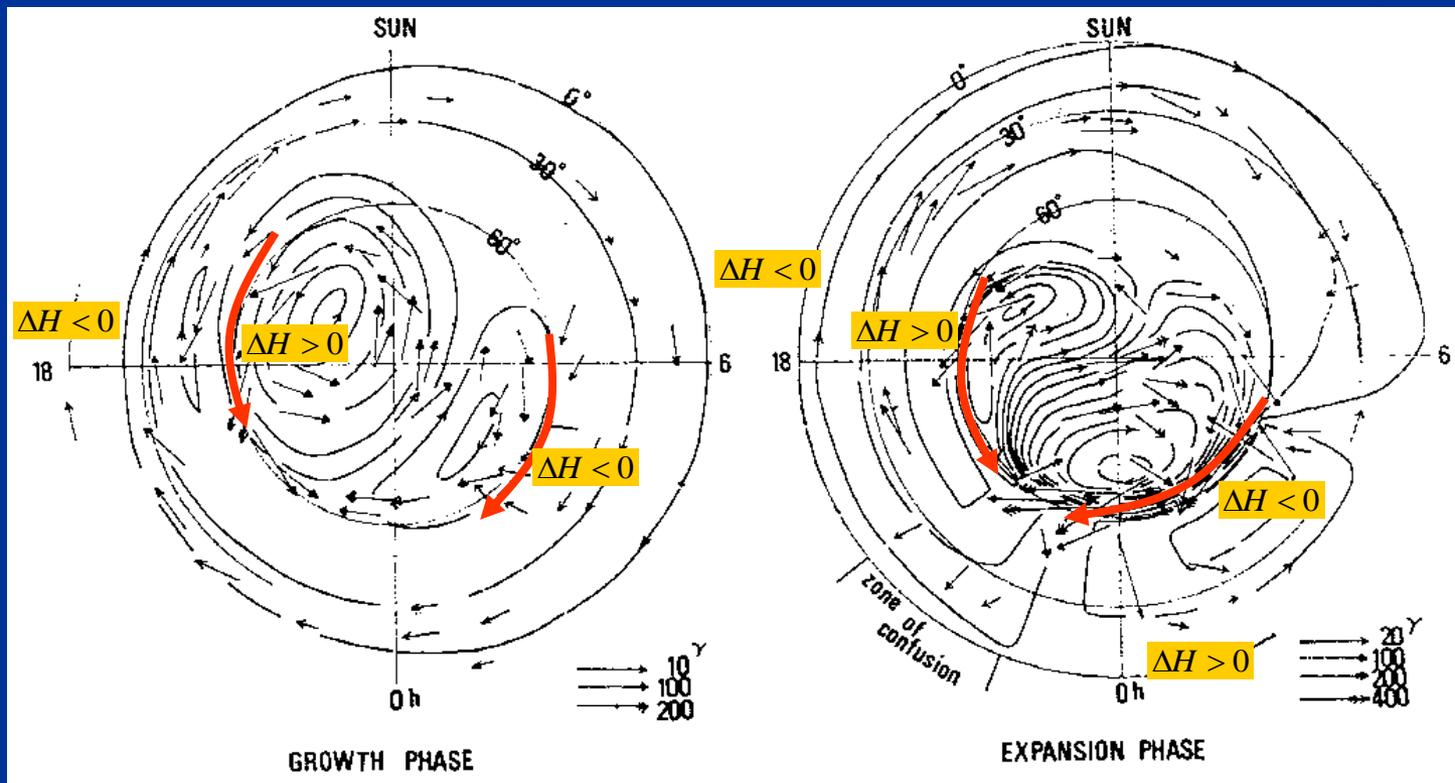


# サブストーム電流系

[Iijima and Nagata, 1972]

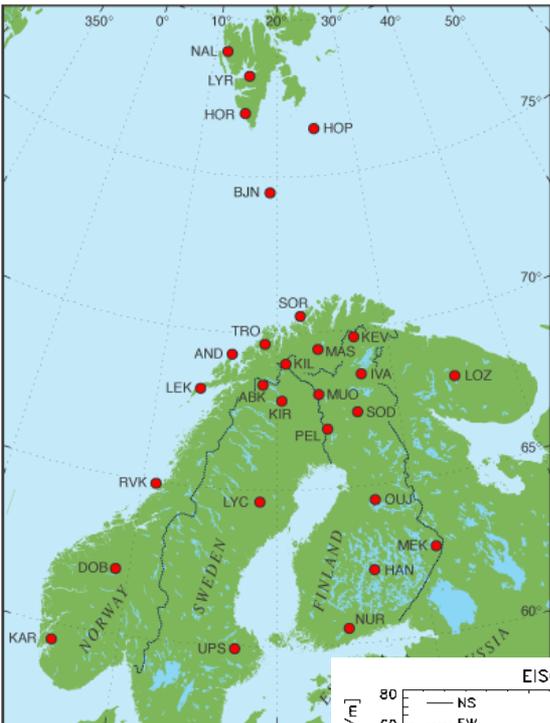
Growth phase (DP2)

Expansion phase (DP1)

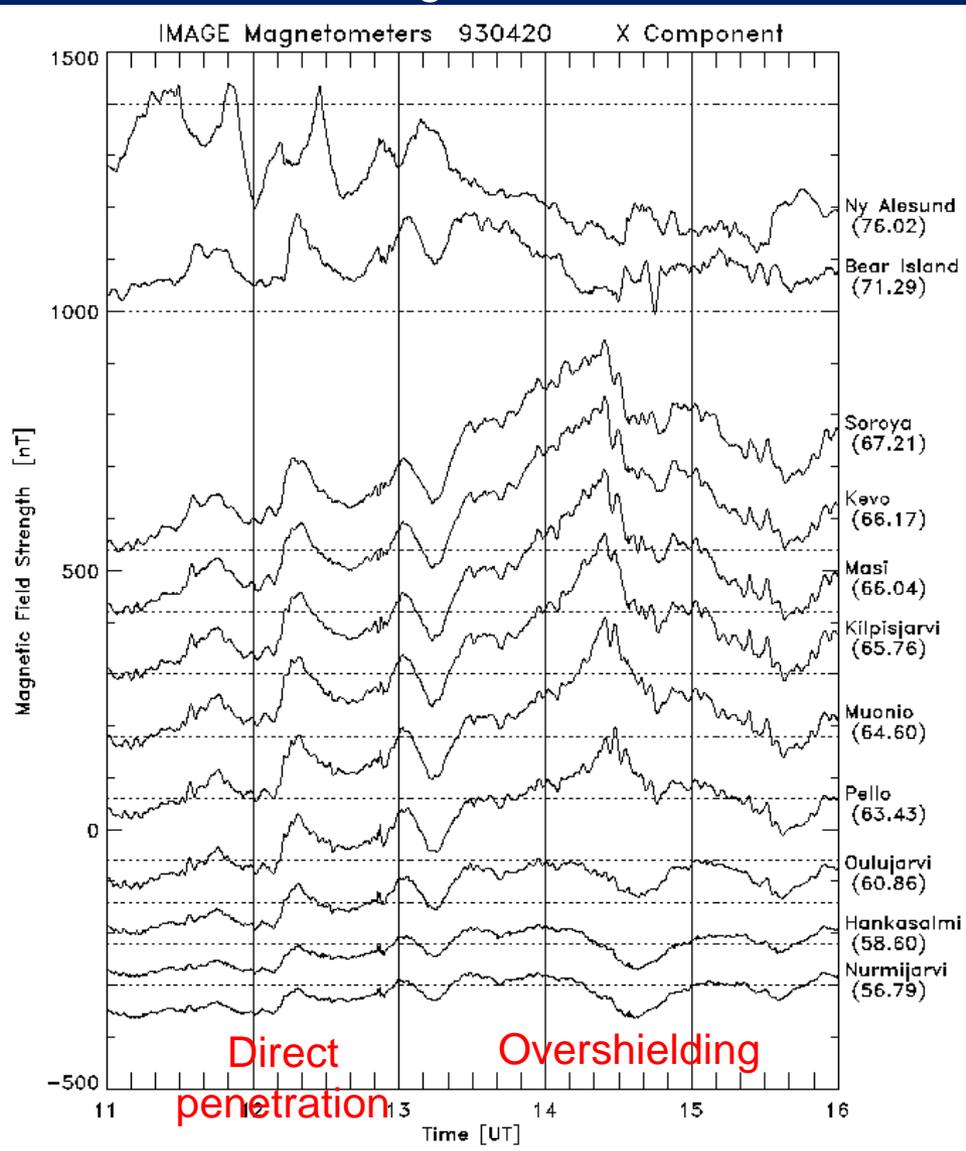
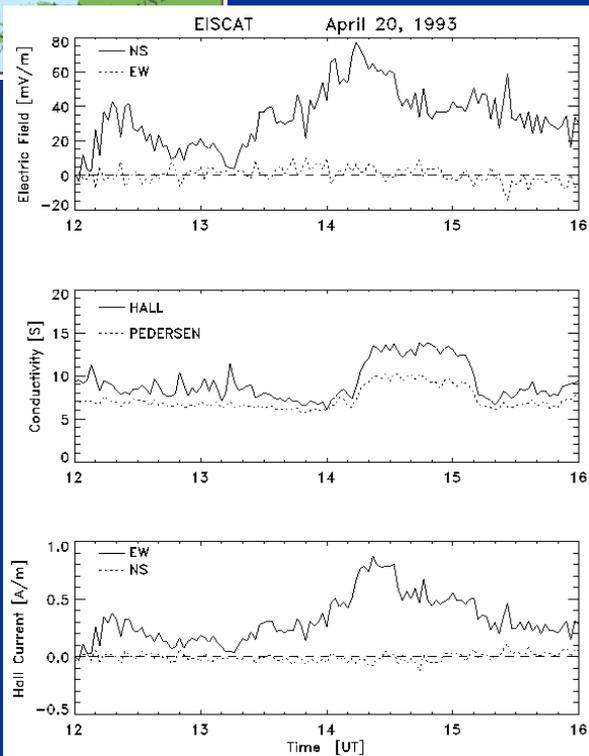


# サブストーム成長相の対流電場と爆発相の過遮蔽電場

IMAGE Magnetometer chain



EISCAT



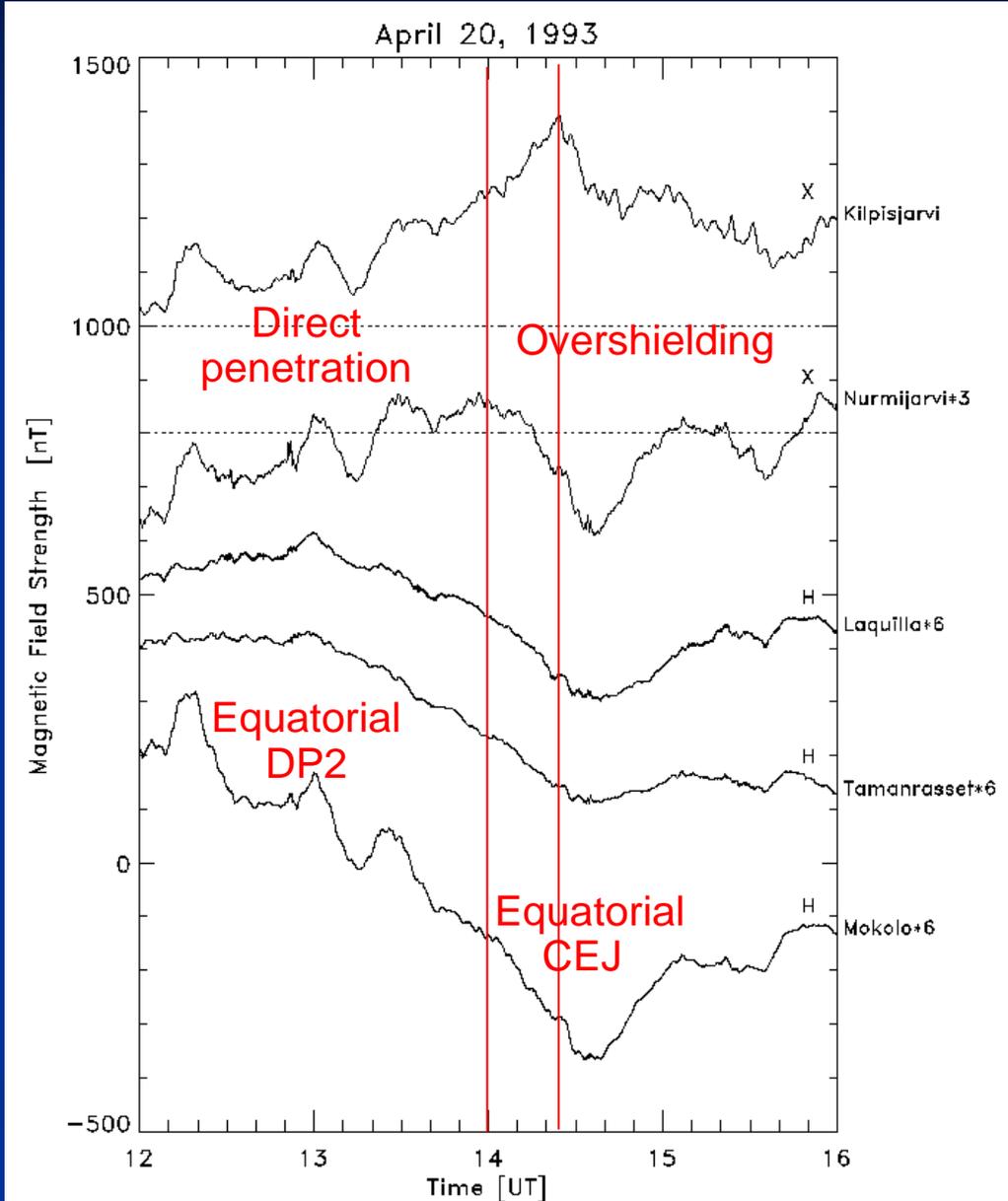
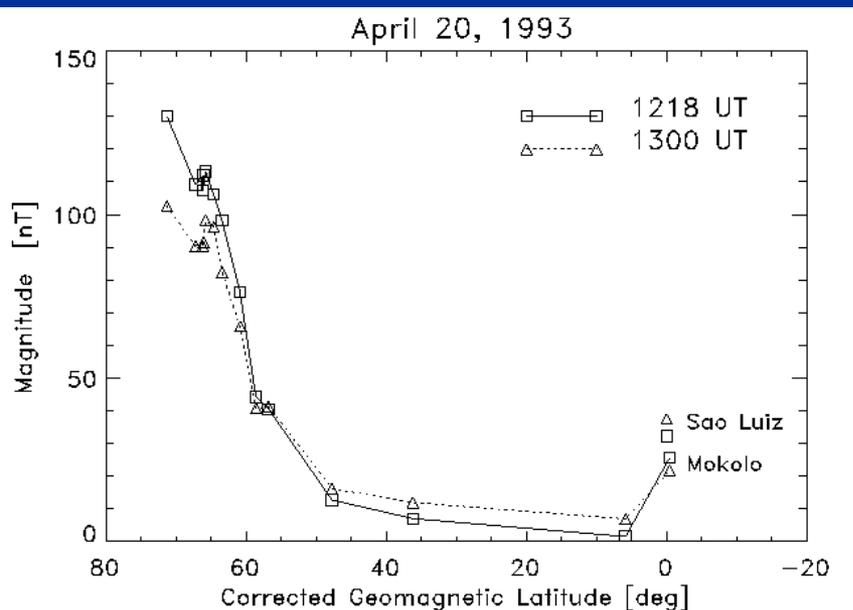
(Kikuchi et al., JGR 1996)

# 対流電場と過遮蔽電場は赤道電離層へ伝搬し、 EEJ、CEJを流す

Magnetometer chain in  
the afternoon sector

Kikuchi et al. ( JGR 1996)

Latitudinal profile of the DP2 current

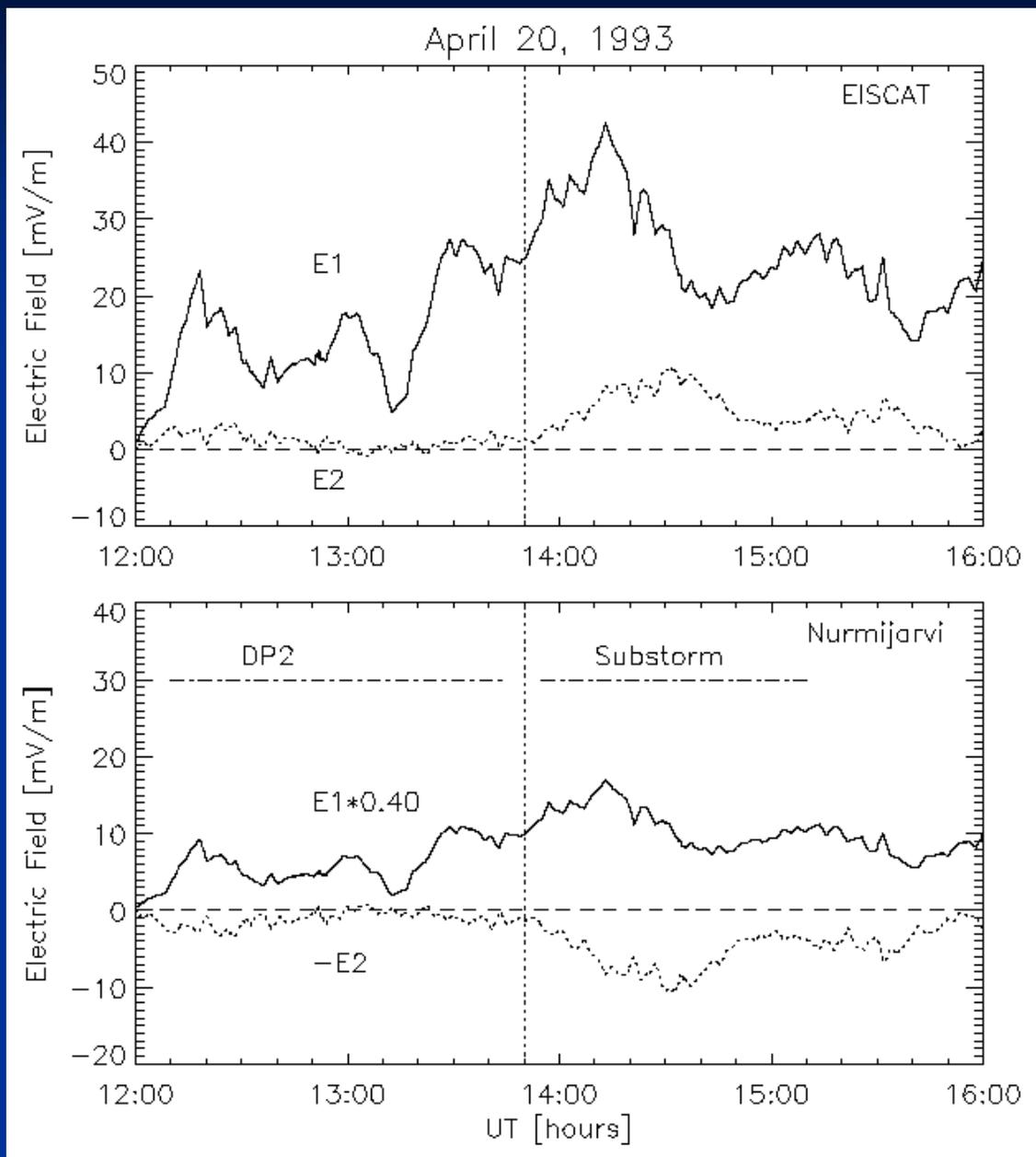


# サブストーム成長相の対流電場と爆発相の過遮蔽電場

**Convection electric field (R1 FAC) and shielding electric field (R2 FAC) at auroral (EISCAT) and mid latitudes (Nurmijarvi)**

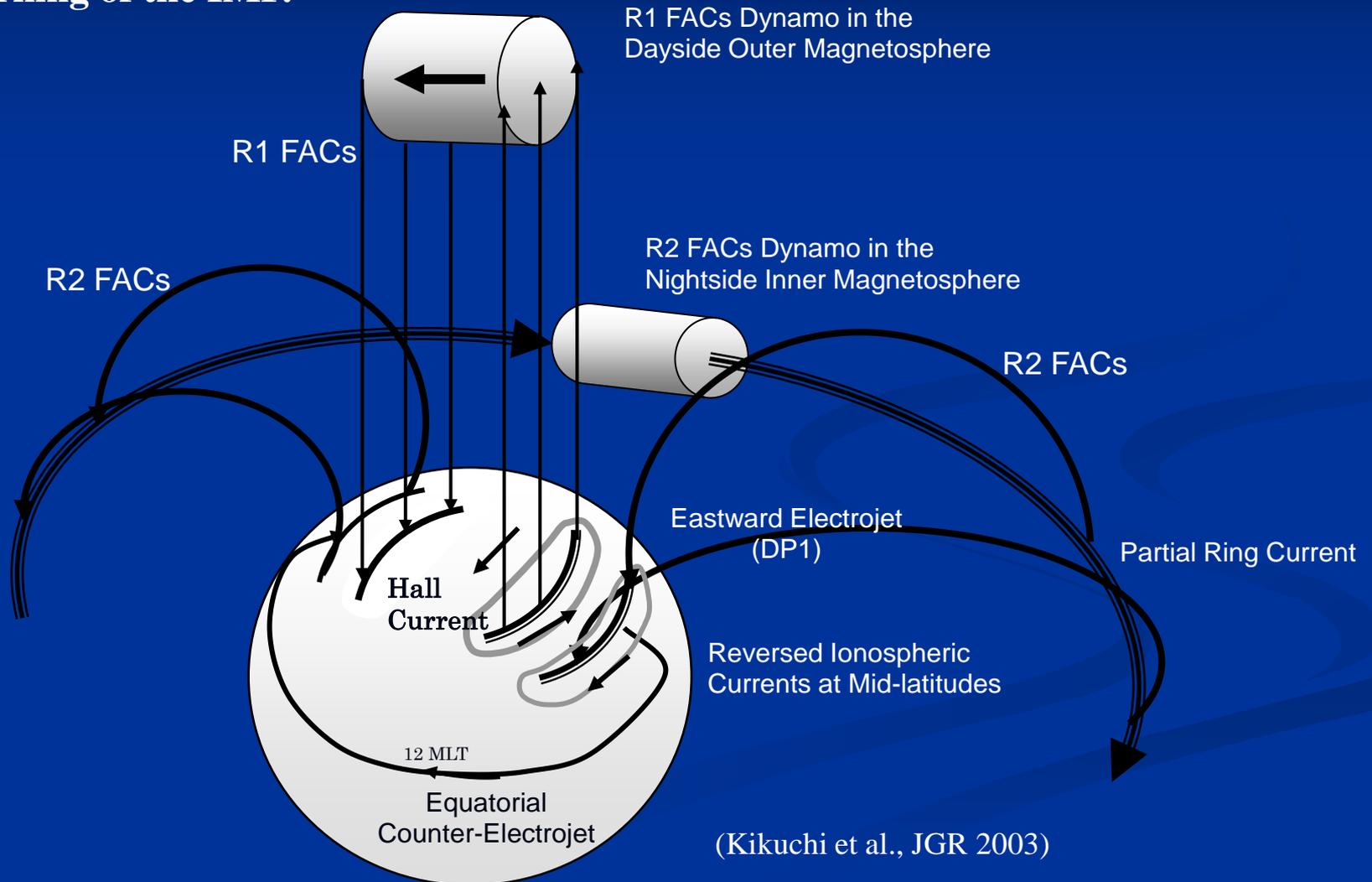
**The R2 FAC electric field can overcome the R1 FAC electric field, when the R1 FACs decay rapidly.**

(Kikuchi et al., JGR 2000)

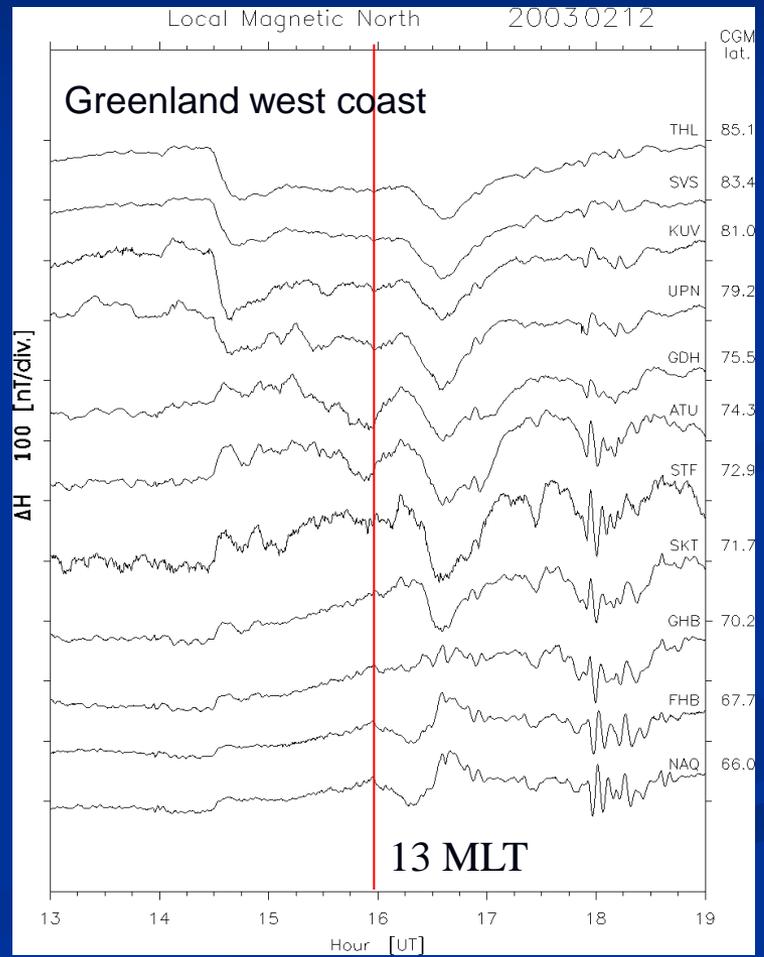
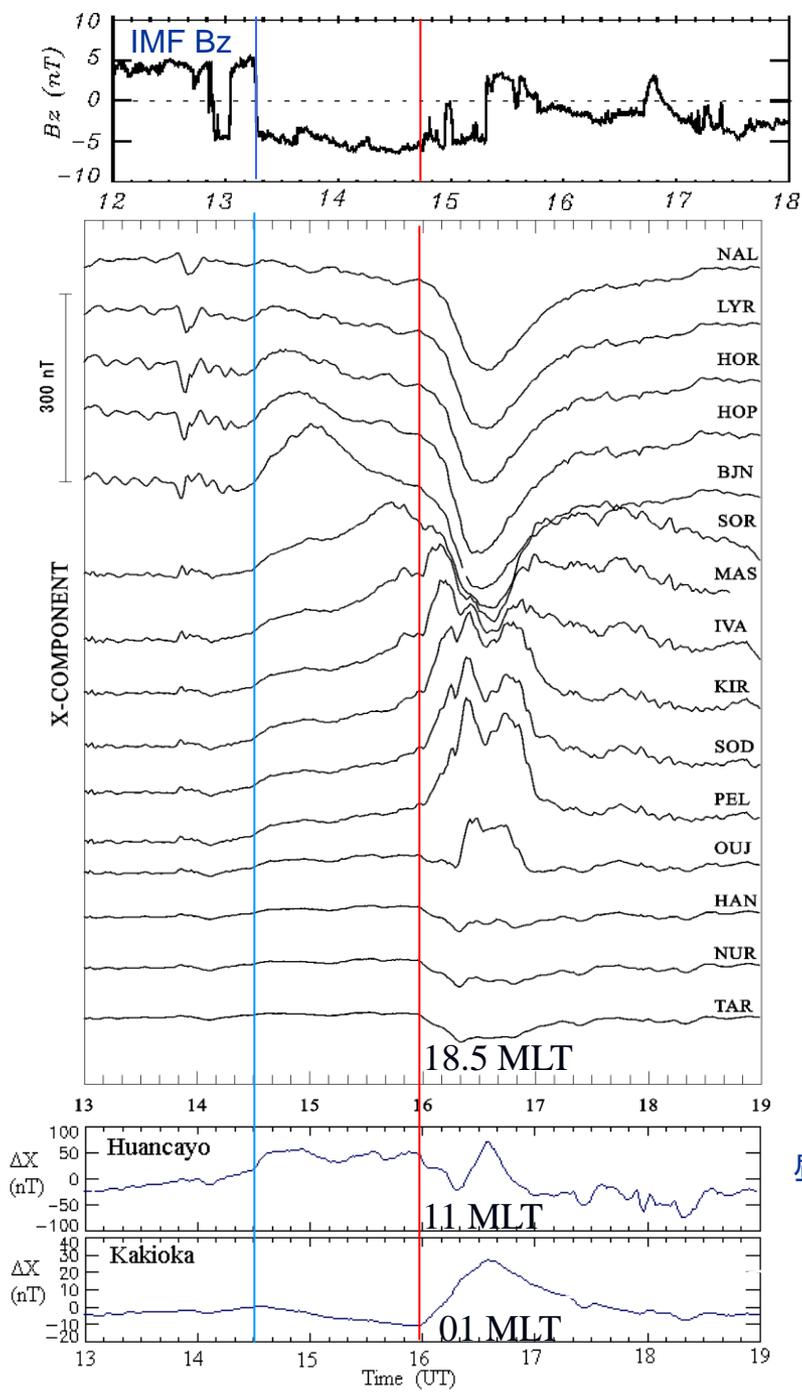


# サブストーム時に発達するR2FAC-CEJ 電流系

Magnetosphere-ionosphere current system is composed of the R1 and R2 FACs and ionospheric currents. The equatorial CEJ connects with the R2 FACs, which become dominant when the R1 FACs decay rapidly because of the northward turning of the IMF.



# サブストーム開始時にオーロラジェット ト電流と赤道CEJが発達 R1FACsとR2FACsが同時に発達し たことを示す



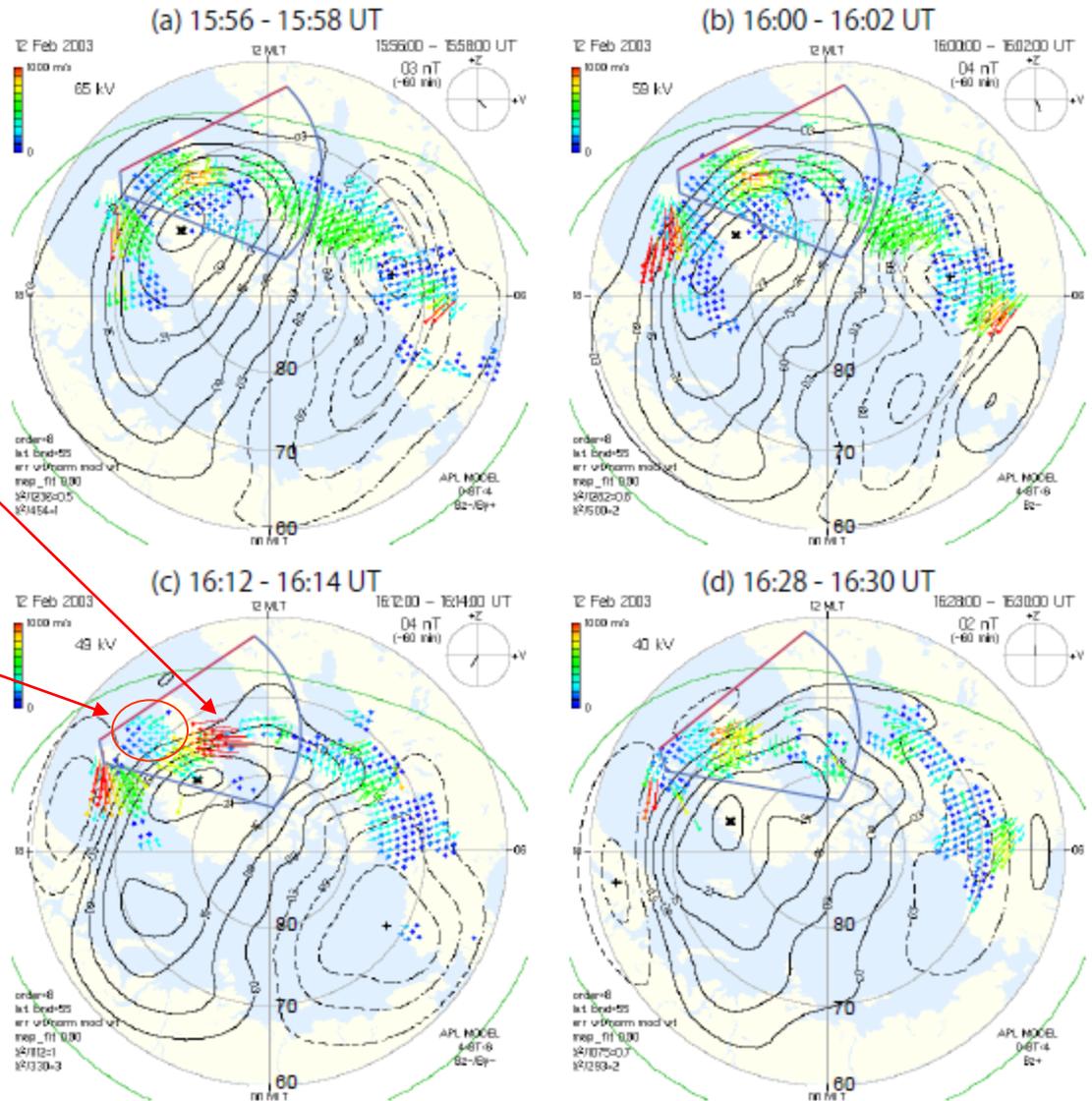
(Hashimoto et al., JGR 2011)

# SuperDARN により観測されたサブストーム開始時の 逆向き対流渦 (過遮蔽電場)

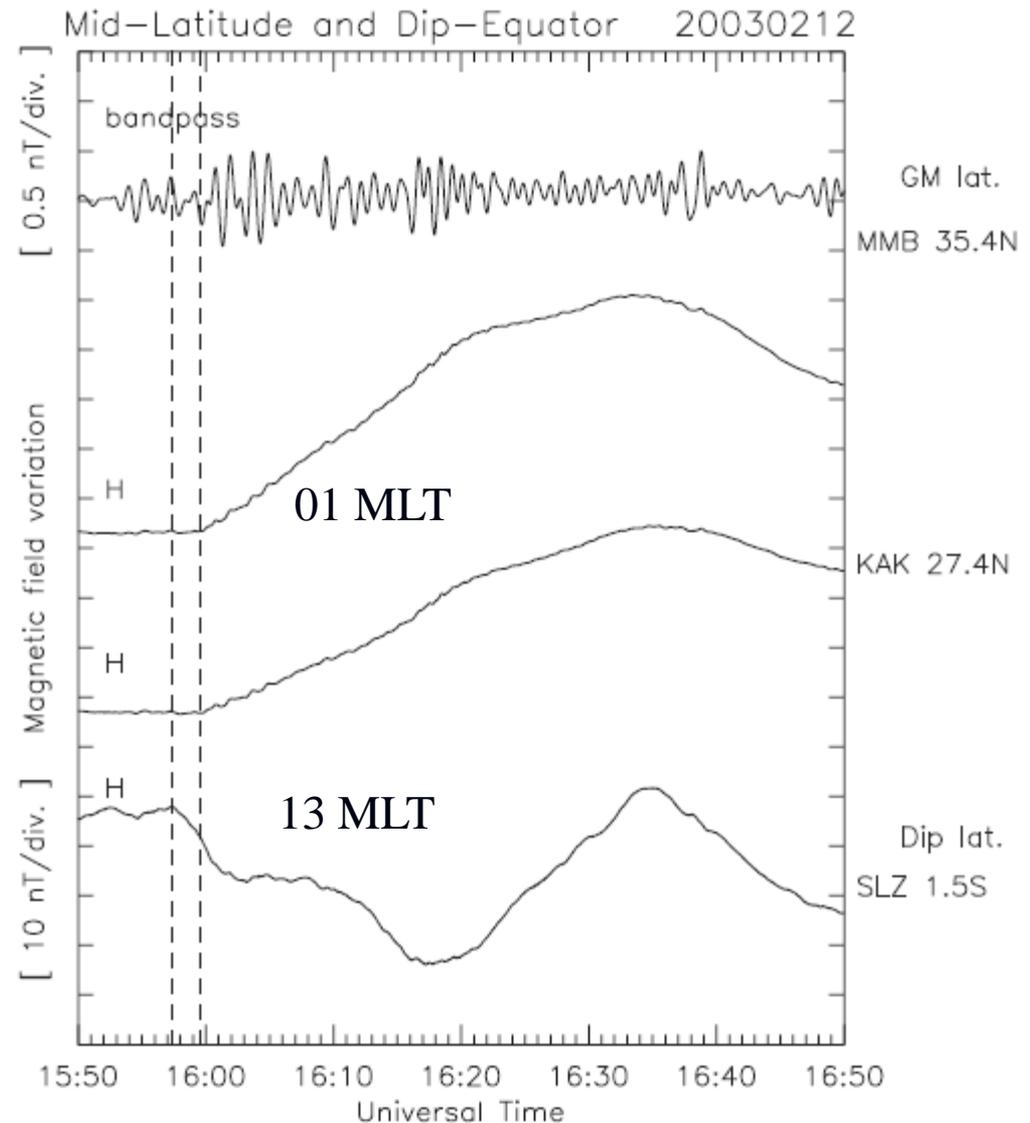
The sunward convection in the afternoon sector is intensified at the onset of substorm.

The anti-sunward convection appears equatorward of the sunward convection.

The latitudinal features of the convection flow implies development of the R2 FACs.



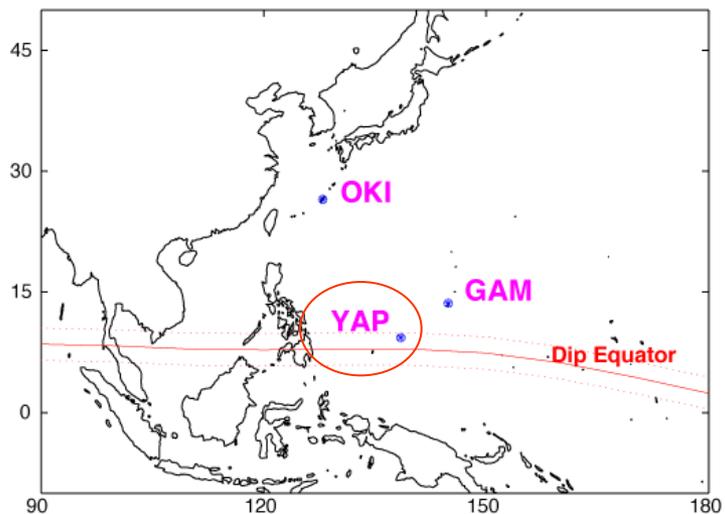
サブストームの過遮蔽(CEJ)は真夜中のcurrent wedgeより2分早く開始 CEJ begins 2 min earlier than the midnight positive bay



# 低緯度 (OKI) と磁気赤道 (GAM, YAP) で観測された磁気嵐

Kikuchi et al. (JGR 2008)

赤道で磁気嵐の振幅が異常に大きくなっている。

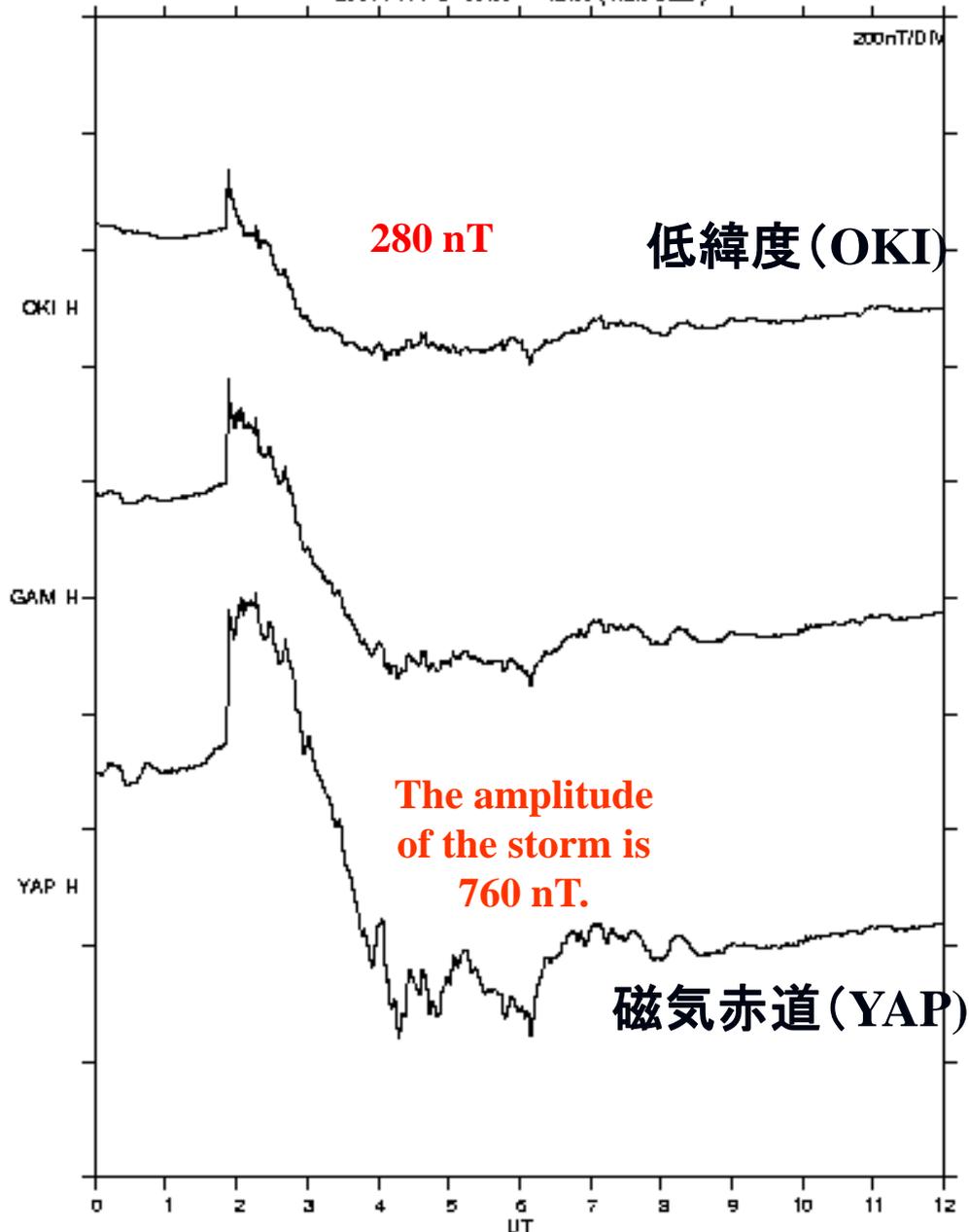


(NICT SWM)

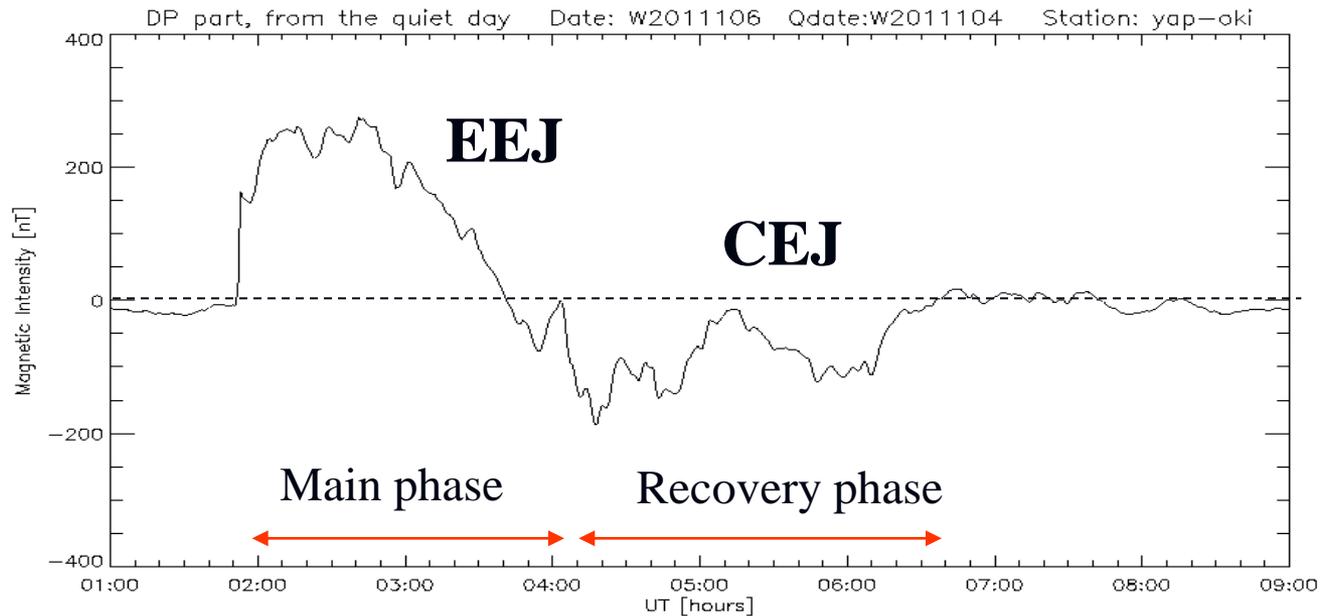
Okinawa 14.47 degs GML

Yap -0.3 degs GML

2001 / 11 / 6 00:00 - 12:00 (Raw Data)



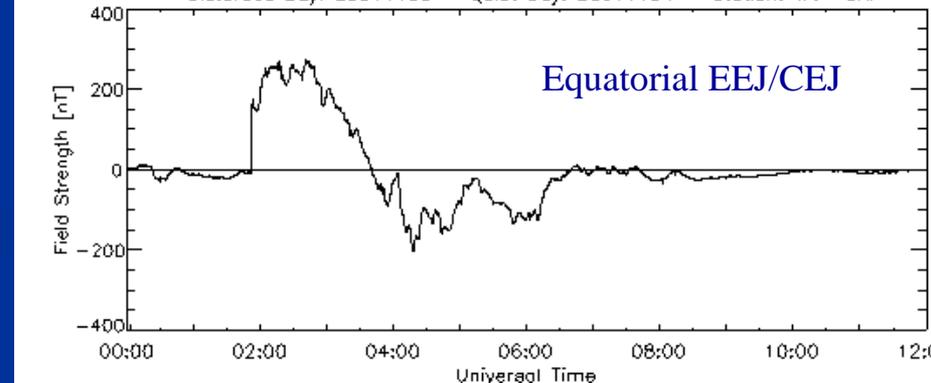
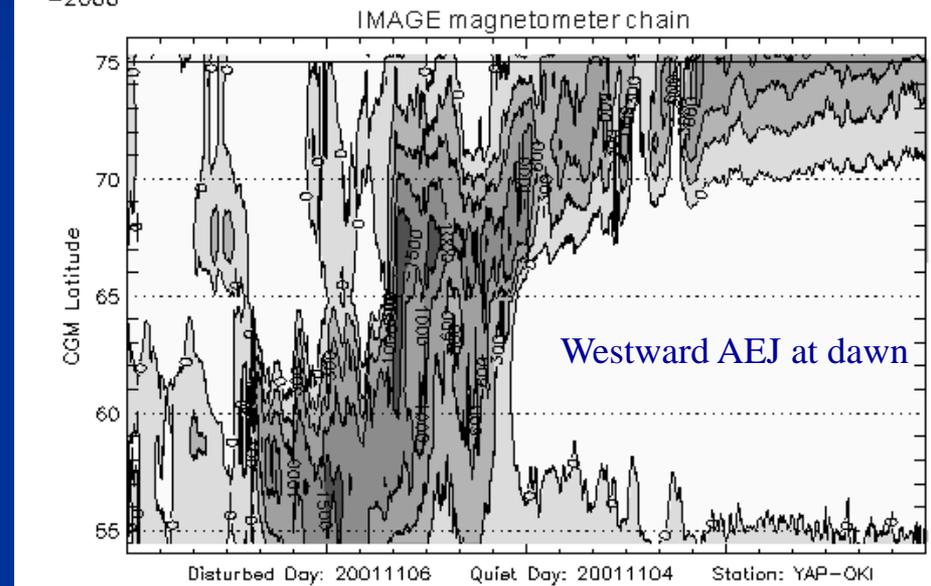
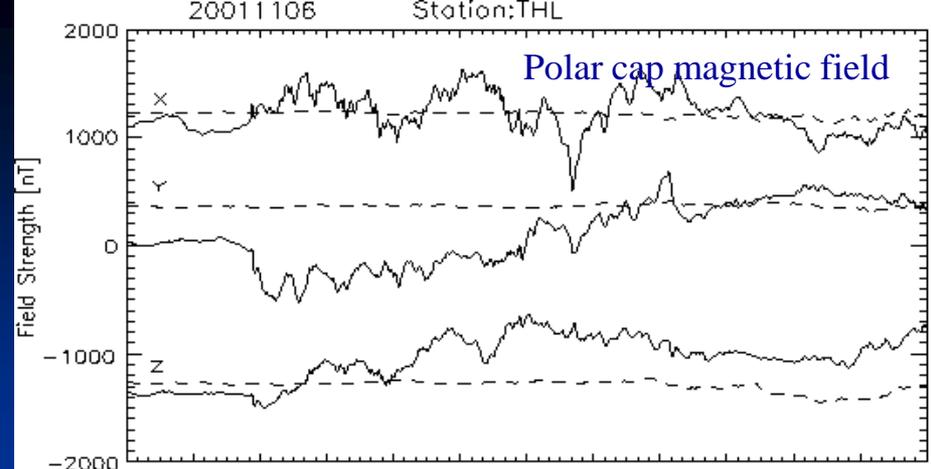
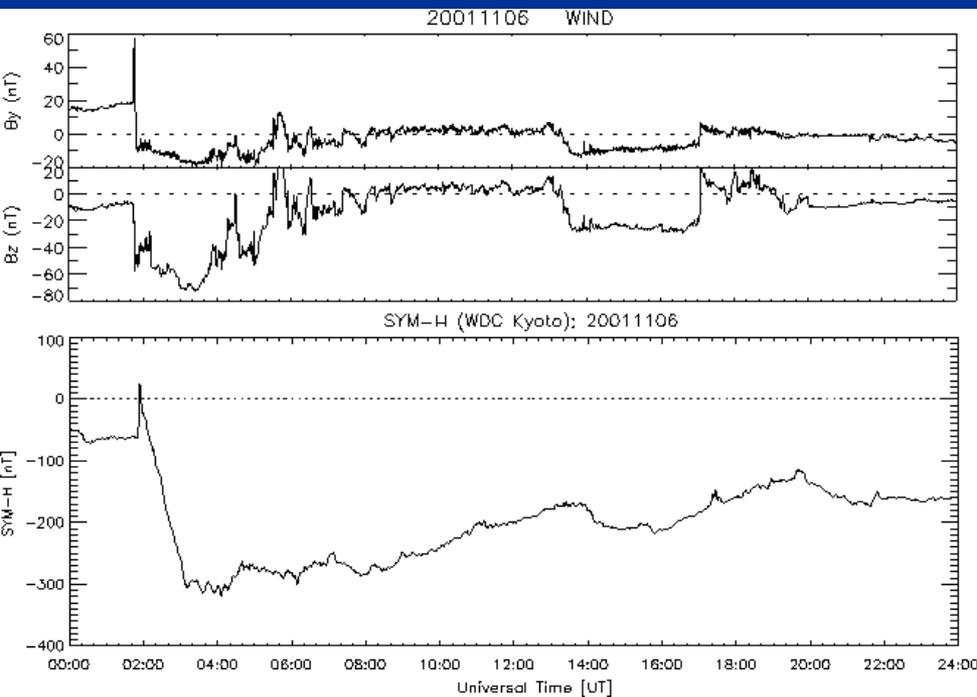
# 磁気嵐主相の赤道ジェット電流EEJと 回復相のカウンターエレクトロジェットCEJ



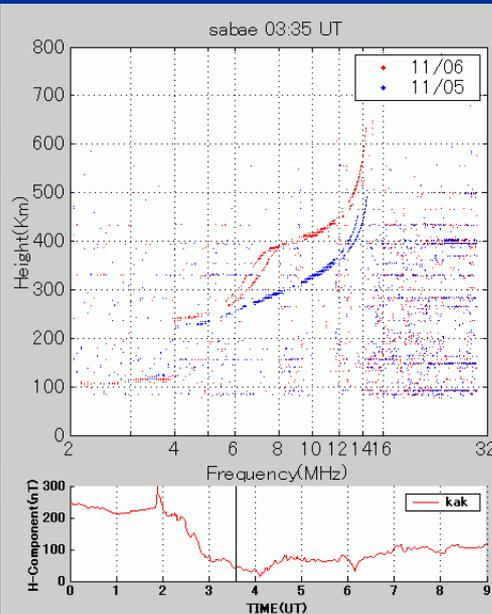
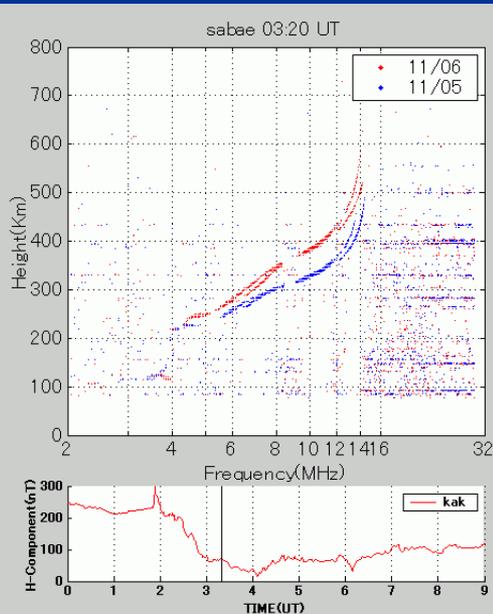
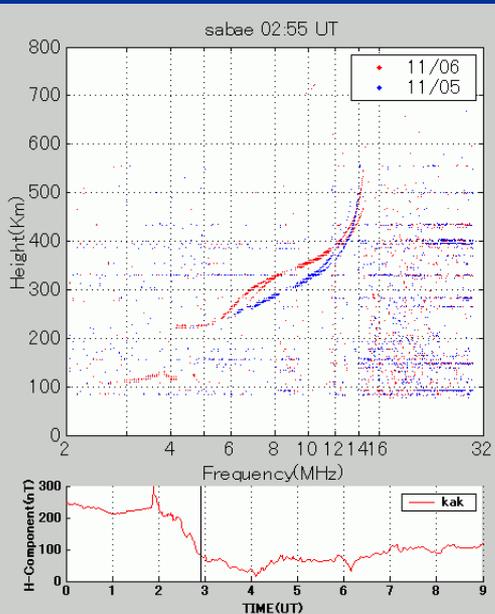
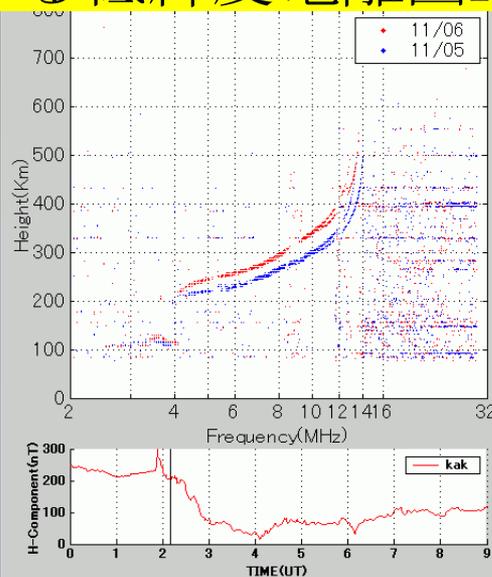
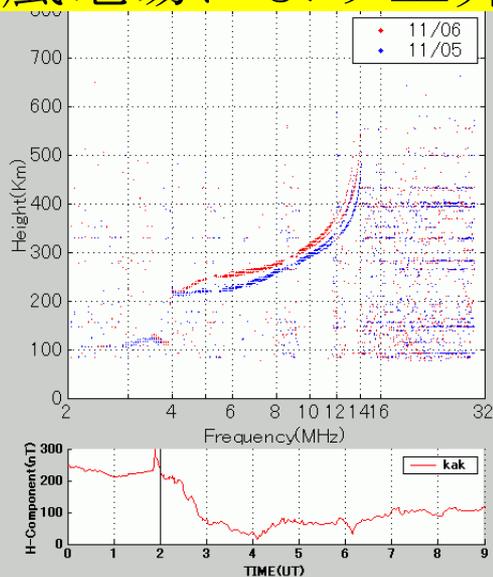
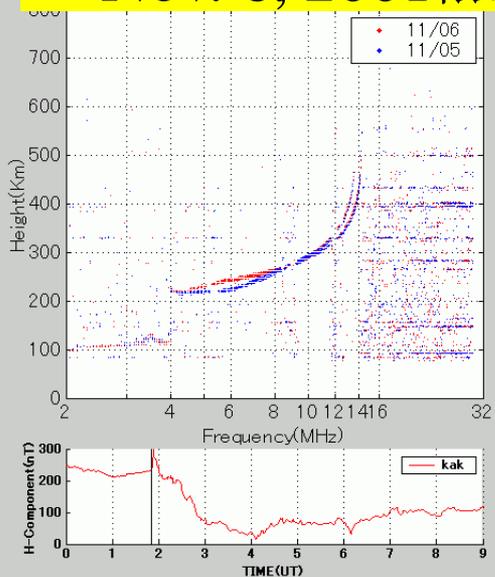
**Convection electric field dominant**   **Shielding getting effective**   **Shielding dominant (over-shielding)**

磁気嵐主相でオーロラジェット電流 (AEJ)が中緯度で発達し、同時に赤道ジェット電流EEJが発達。  
 磁気嵐回復相でAEJが高緯度へ移動し、赤道カウンターエレクトロジェットCEJが発達(過遮蔽電場)

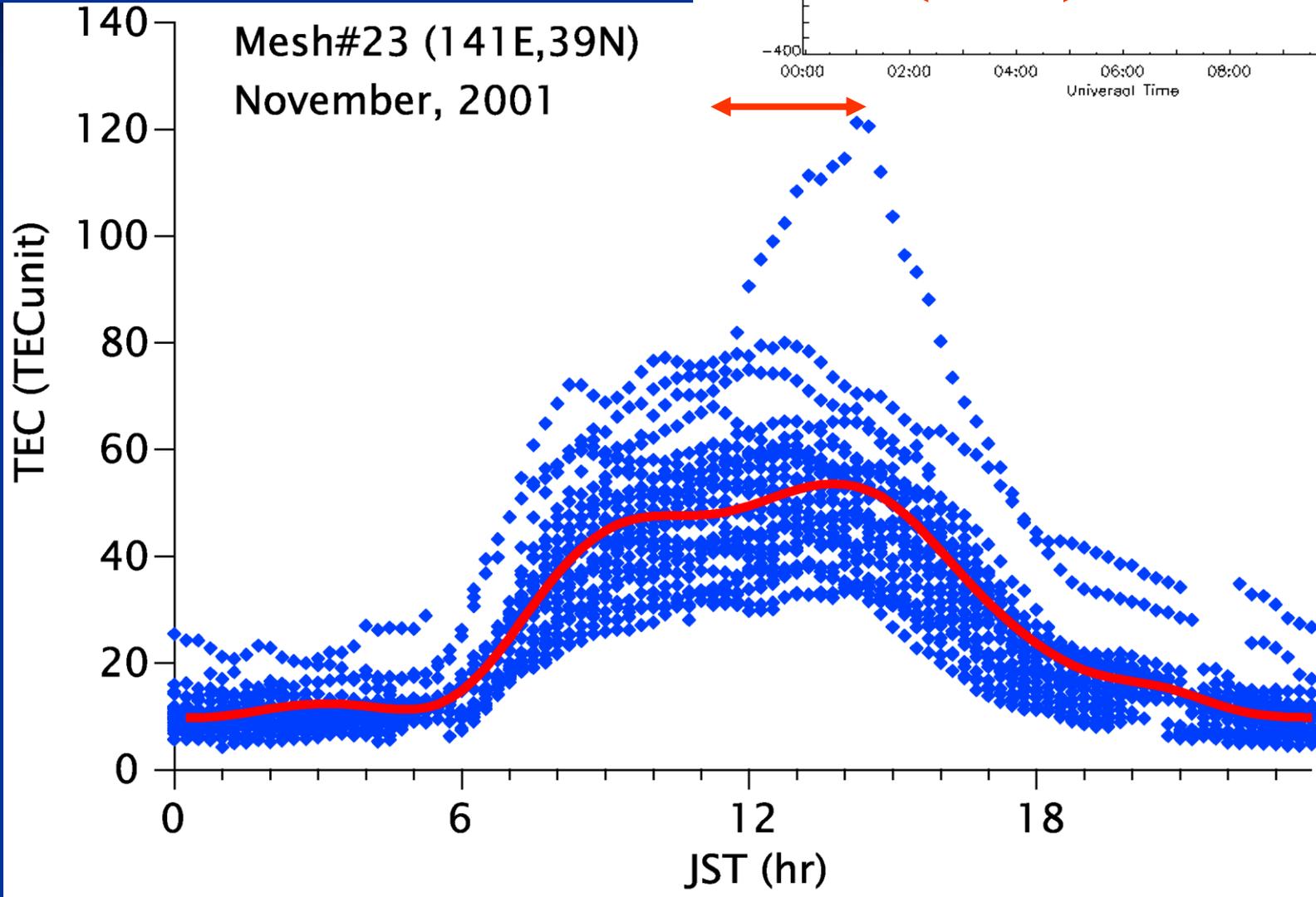
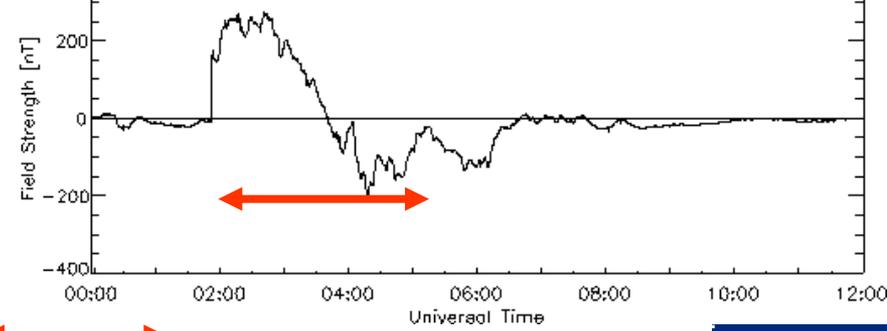
Geomagnetic storm on November 6, 2001



# Nov. 6, 2001 磁気嵐電場により上昇する低緯度電離圏F層



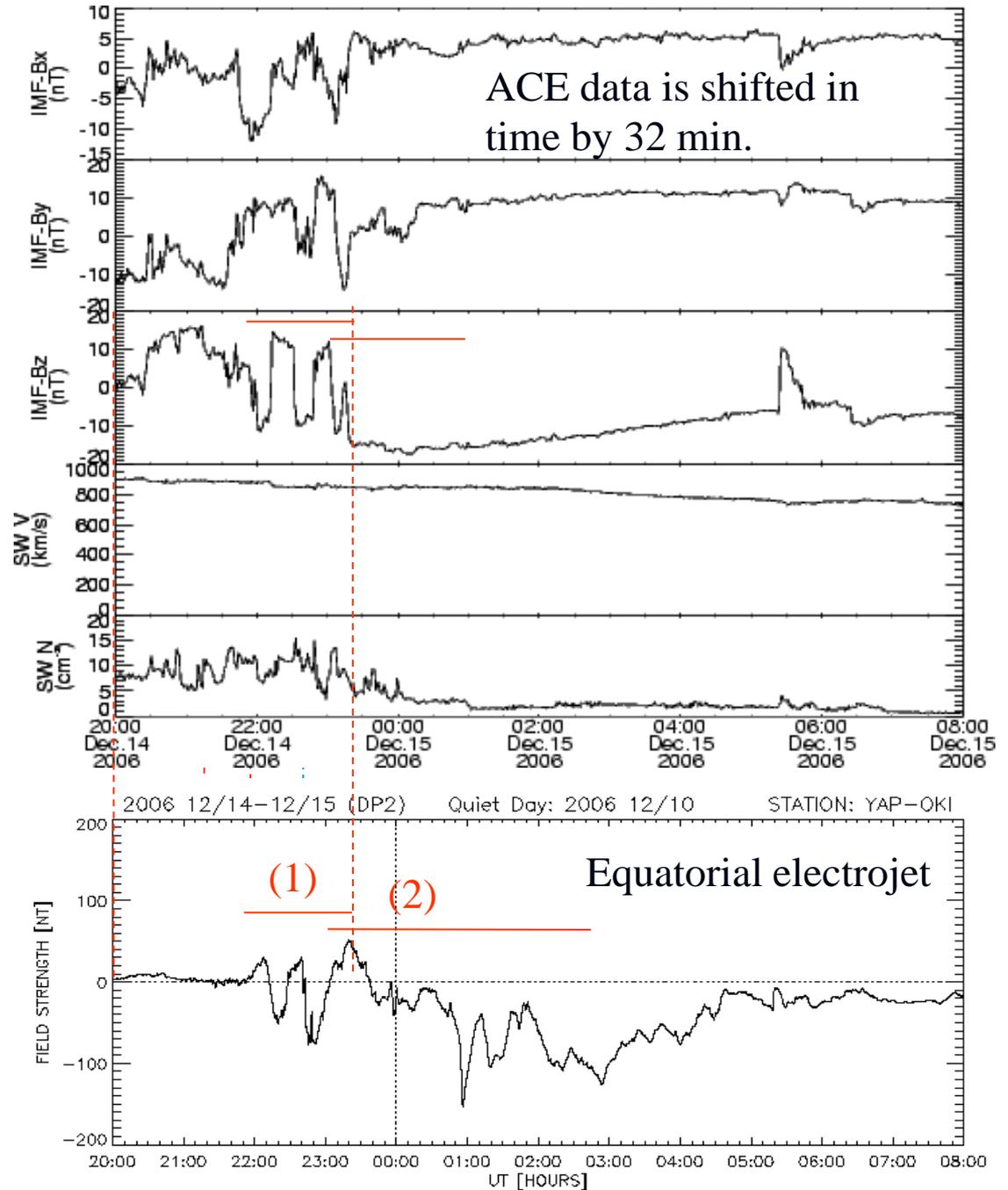
# Nov. 6, 2001磁気嵐時に増加する 低緯度電離圏全電子数



# 磁気嵐主相中に発達するカ ウンターエレクトロジェット (CEJ)

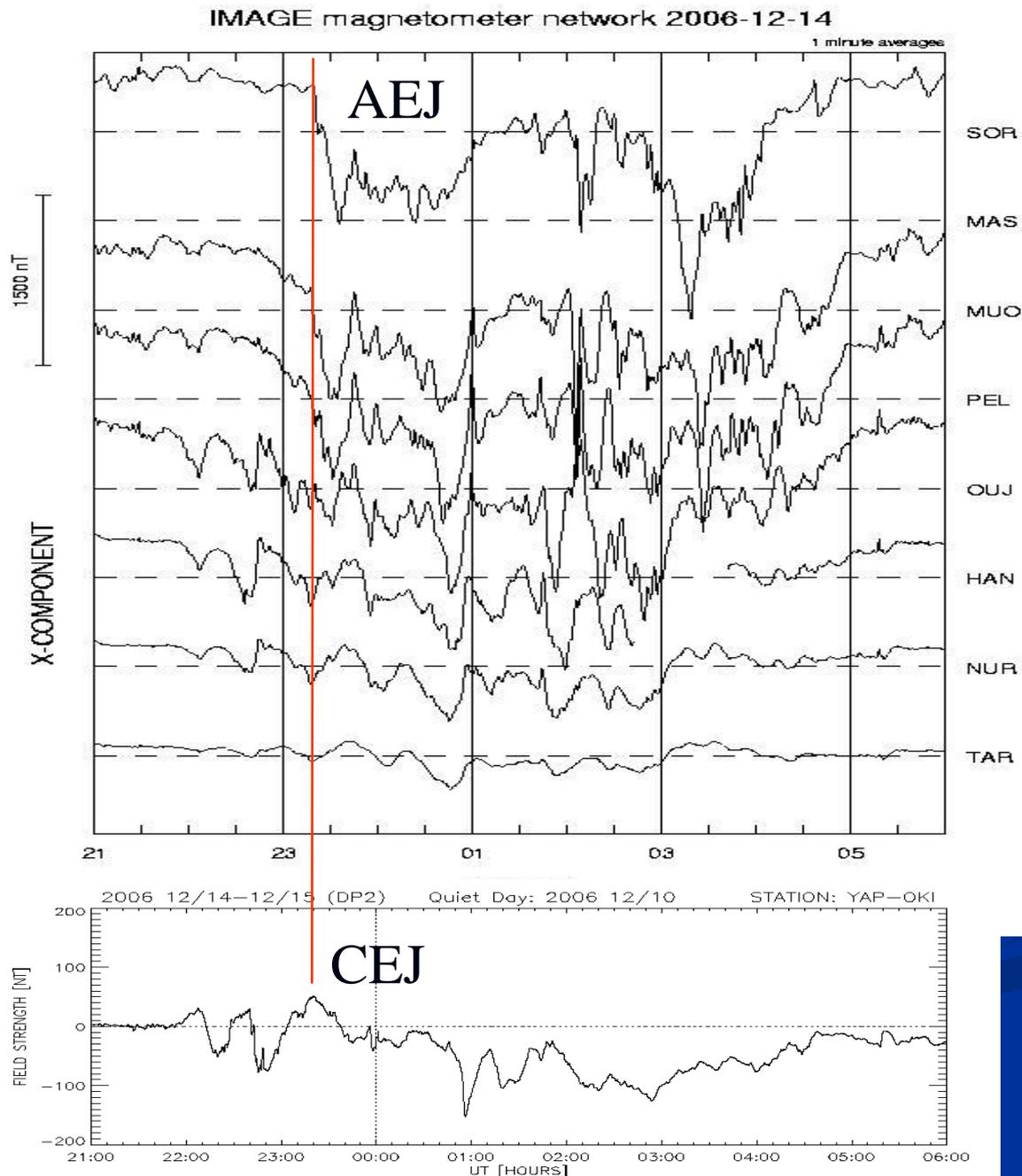
December 14-15, 2006

- (1) Quasi-periodic DP2 fluctuations are composed of EEJ and CEJ caused by the southward and northward IMF, respectively. (Kikuchi et al., JGR 2010)
- (2) The CEJ appears during the main phase of the storm.

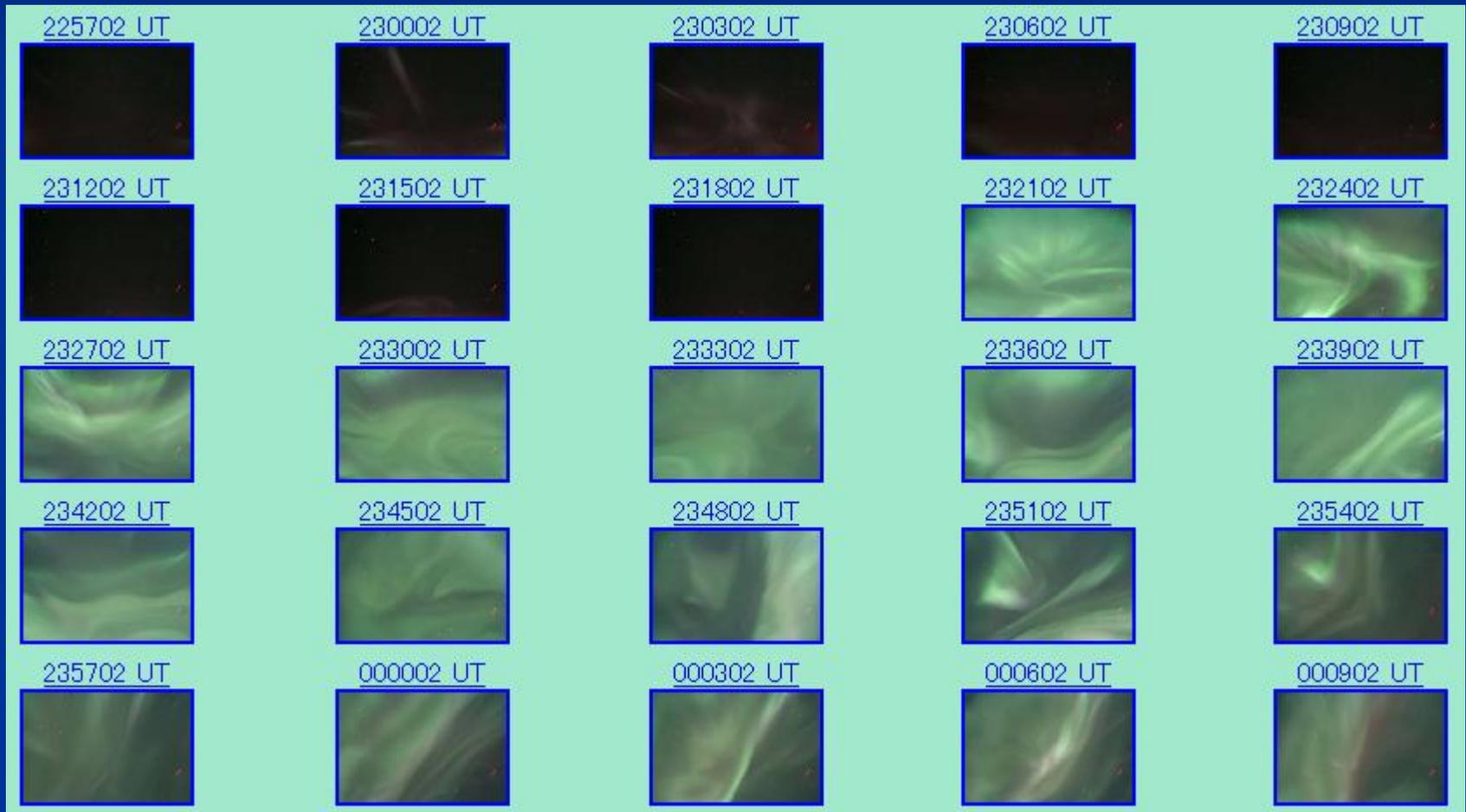


赤道CEJと同時に  
AEJが発達した。  
Substorm breakup  
occurred simultaneously  
with the equatorial CEJ.

The overshielding started  
at 2320 UT, when the  
westward electrojet was  
intensified suddenly at  
SOR. This indicates that  
the overshielding was  
caused by the substorm.  
The following reversed  
currents could be due to  
the disturbance dynamo,  
but the reversed currents  
could be due to the  
overshielding, since they  
continued until 05 UT, in  
concert with the westward  
auroral electrojet at SOR.



# 過遮蔽の開始時2321 UTにAuroral breakupが発生 (Tromso/Ramjordmoen) [Courtesy of Dr. S. Nozawa at STEL]



# 残された課題

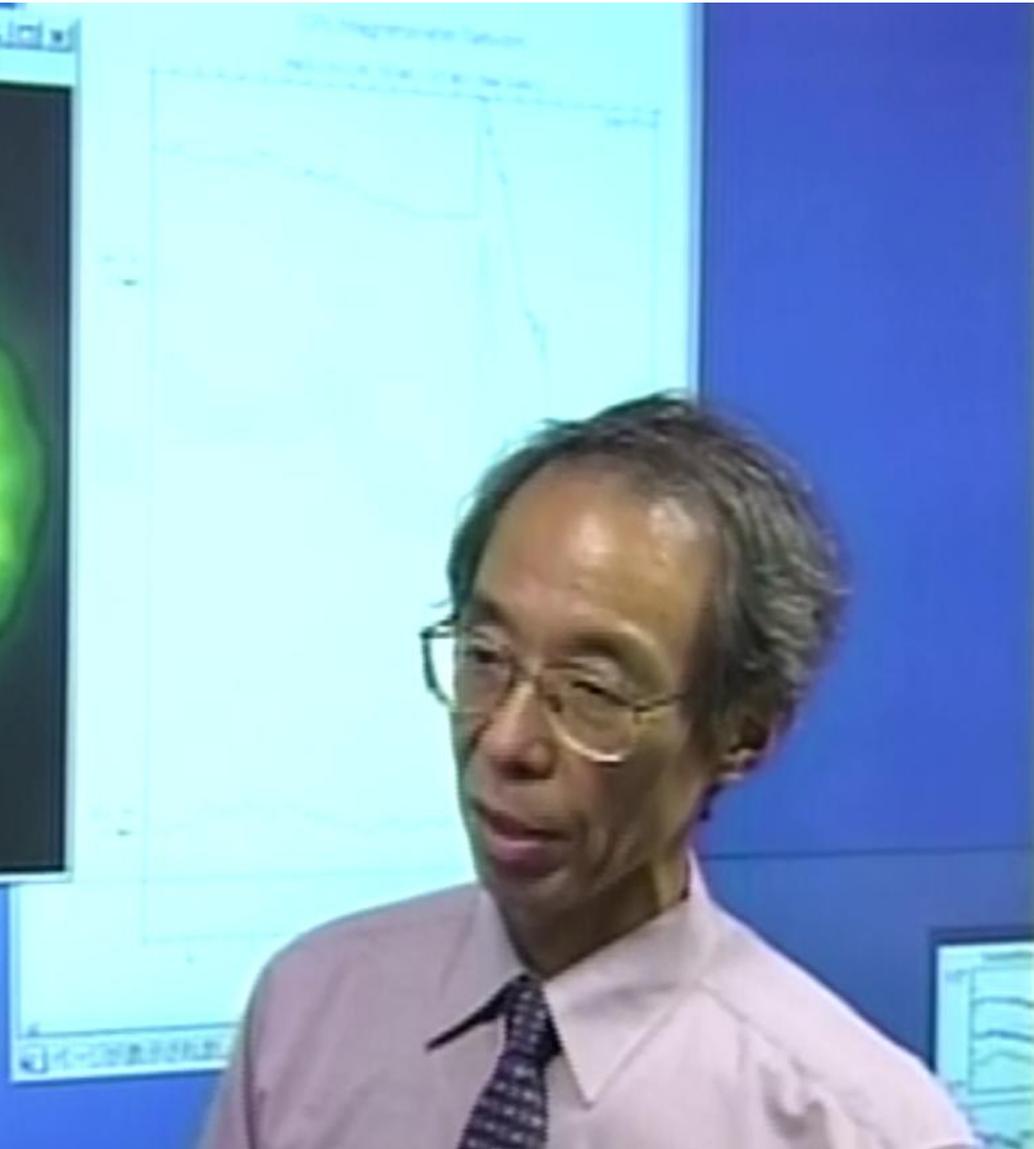
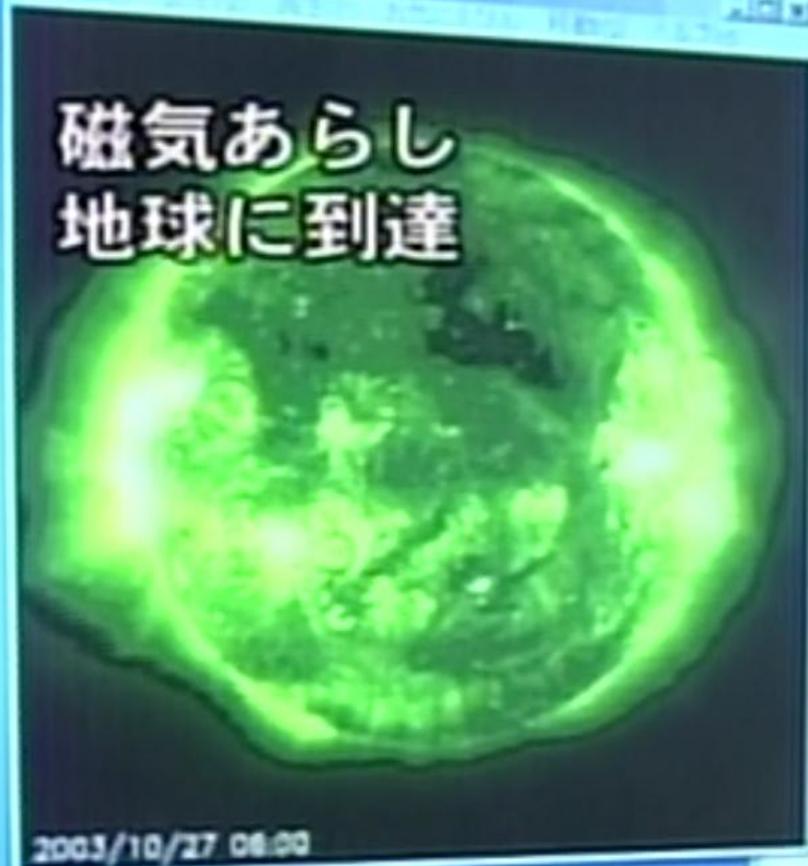
1. ULF (PC5, Pi2)電流のダイナモは？
2. サブストームcurrent wedgeのダイナモは？
3. 中低緯度の磁気嵐電場は過遮蔽電場？
4. 磁気嵐とオーロラは予報可能か？



(塩川HPより)

2003年10月 NHKニュース





# 宇宙の渚

2011.9.18 BSプレミアム, NHK特集

(宇宙ステーションからオーロラを撮る)

