

SC・磁気嵐中における内部磁気圏・プラズマ圏の電場応答とプラズマ密度変動

新堀淳樹・小野高幸(東北大学大学院理学研究科)

発表内容

- ・はじめに
- ・SC・磁気嵐に対する内部磁気圏・電離圏応答
 - (i) 太陽風の過渡的現象に伴う内部磁気圏電場の高速応答
 - (ii) 磁気嵐における電離圏 - 内部磁気圏結合
 - (iii) プラズマ圏の密度構造と電場の応答
- ・まとめ

内部磁気圏における電場の抜け道=赤道域・中緯度電離圏

1. はじめに

磁気嵐における内部磁気圏現象の問題点

1. 内部磁気圏・プラズマ圏(電離圏)の電場・プラズマ密度構造の激変

inner trough ($L < 3.5$)、plasma tail (plume)の形成、プラズマ圏のerosion

重イオン組成変化(酸素、窒素イオン)

グローバルな電場構造と伝播機構の理解

電場の起源と配位

擾乱の内部磁気圏・プラズマ圏(電離圏)への浸透

電磁場擾乱伝搬プロセスの直接観測が必要

観測・モデル等の見直しが必要

2. リングカレント粒子の進入とエネルギー散逸

プラズマ波動励起、背景プラズマの熱化

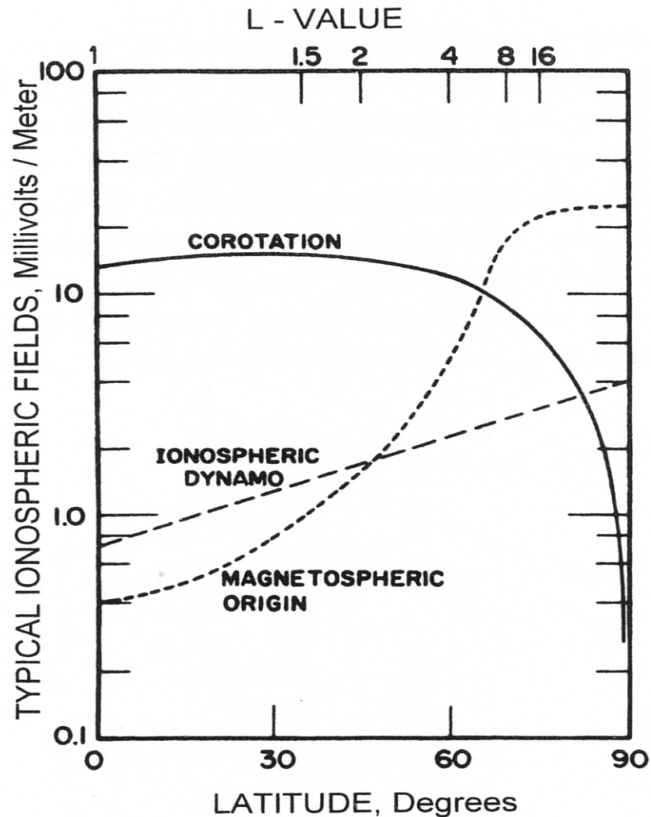
プラズマ・電場・磁場モデルの確立

3. 放射線帯粒子の消失と再構成

磁気嵐主相における消失メカニズムと消失先

プラズマ波動による加速過程 (MeV電子形成) の理解には**背景プラズマ密度分布モデル**の確立が必要

磁気圏電場の起源



Mozer, PSS, 1970

内部磁気圏・プラズマ圏・電離圏のプラズマのダイナミクスは電場で規定される

(i) 電離層ダイナモ電場

共回転電場[e.g., Axford and Hines, 1961]

電離層Sq電場

(ii) 対流電場 (Dawn-to-Dusk電場)

1. Reconnectionに伴う太陽風電場侵入

[e.g., Dungey, 1961; Nishida, 1966]

太陽風磁場方位と速度に依存

2. 磁気圧縮に伴うポテンシャル電場

[e.g., Araki, 1994; Shinbori et al., 2004]

SCのMI期の電場 太陽風動圧に依存

(iii) 分極電場

Alfvén Layer形成に関わる[e.g., Anderson et al., 2001; Keyser et al., 1998]

(iv) 誘導電場

SCのPI期のインパルス電場[Wygant et al., 1994; Shinbori et al., 2004]

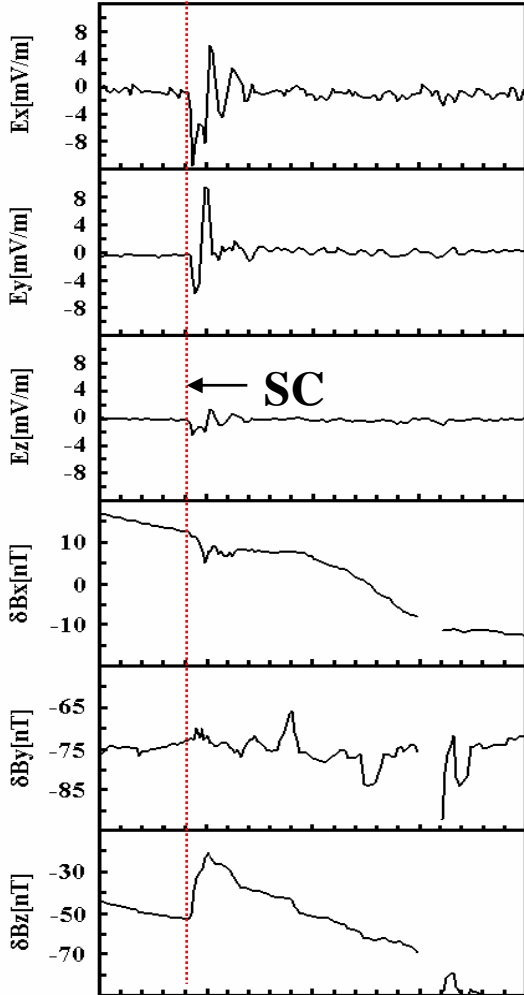
ベータトロン加速電場[Oya, 1991, 1997, 2004]

2. SC・磁気嵐に対する内部磁気圏・電離圏応答

(i) 太陽風の過渡的現象に伴う内部磁気圏電場的高速応答

Shinbori, et al., *Earth Planets Space*, 56, 269-282, 2004.

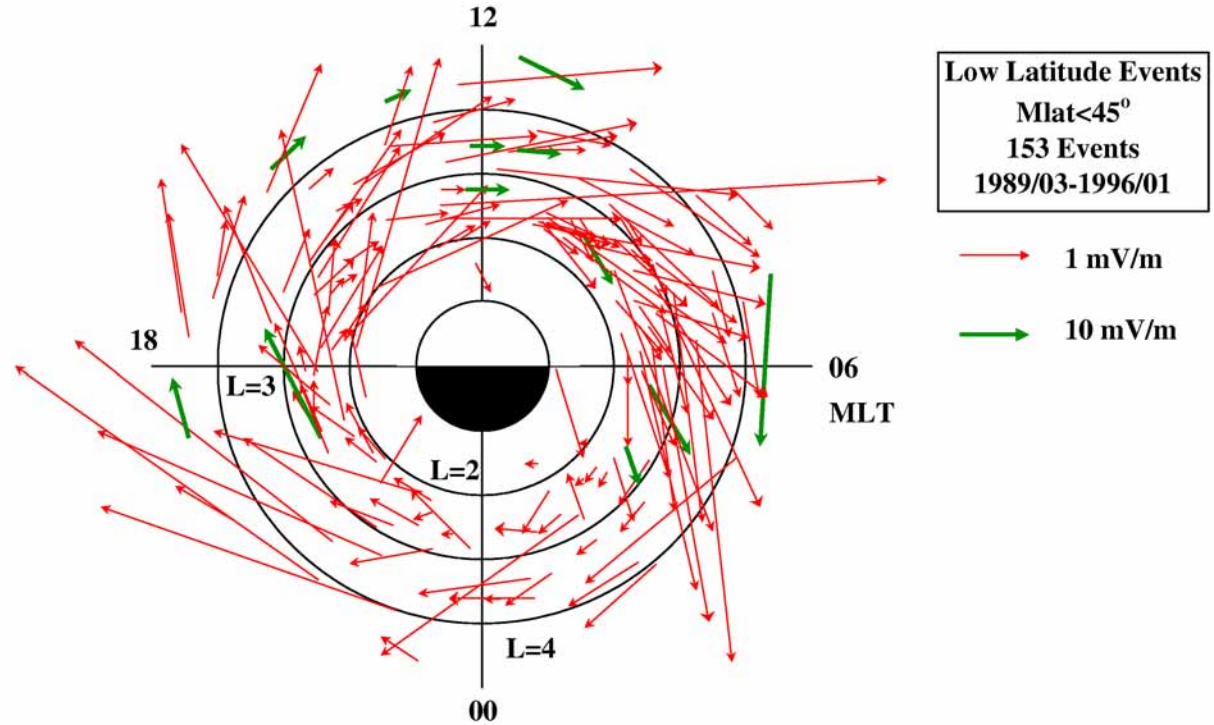
December 1, 1989



UT	17:45	17:50	17:55	18:00	18:05	[hh:mm]
MLT	05:28	05:34	05:40	05:47	05:54	[hh:mm]
MLAT	4.37	0:59	-3.25	-7.17	-11.21	[deg]
ILAT	51.48	51.31	-51.18	-51.27	-51.54	[deg]
ALT	10044.9	9950.9	9800.3	9592.8	9328.0	[km]

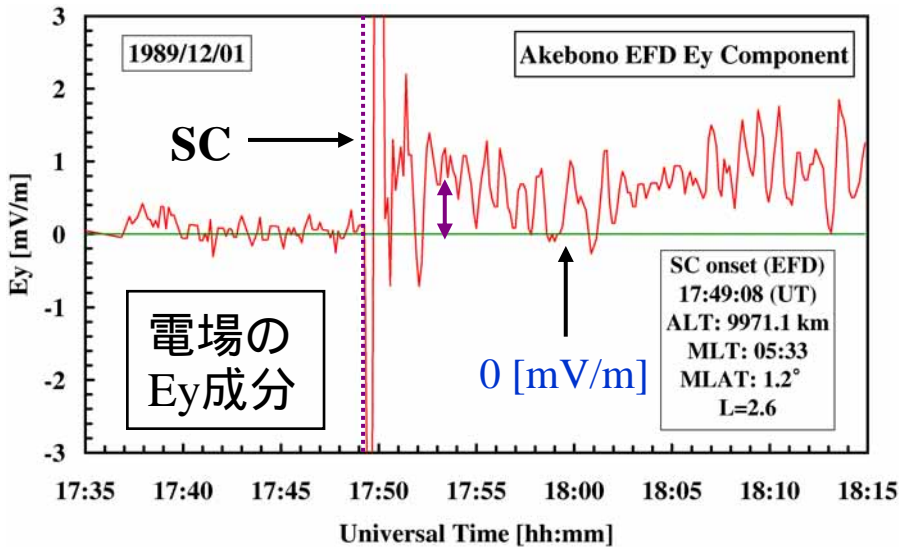
A. SCに伴う内部磁気圏電場的高速応答(PI期)

SCに対して、内部磁気圏内における電場、磁場が高速応答する

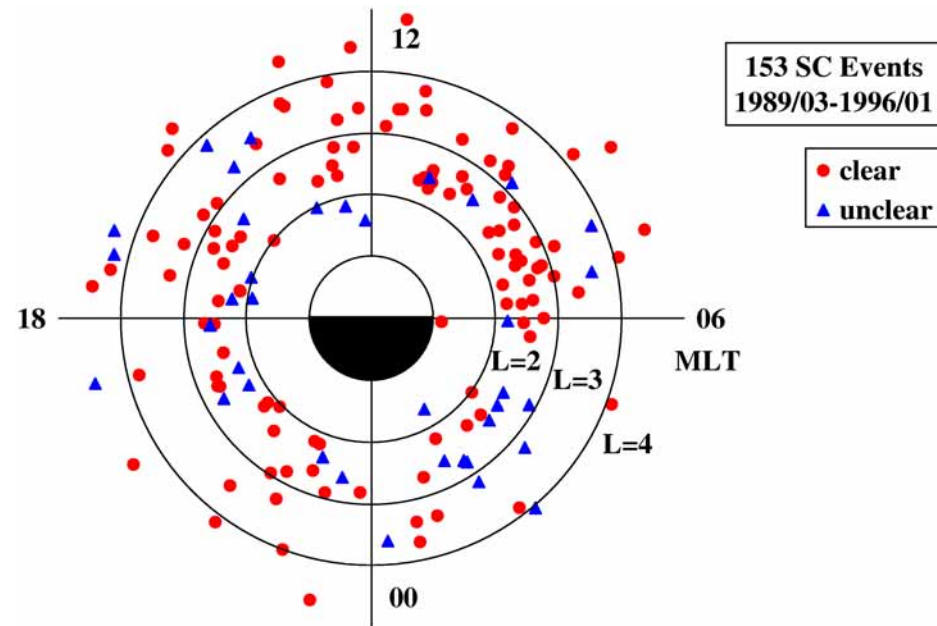


SCのPI期に強い西向き電場が内部磁気圏・プラズマ圏・電離圏内にて発生

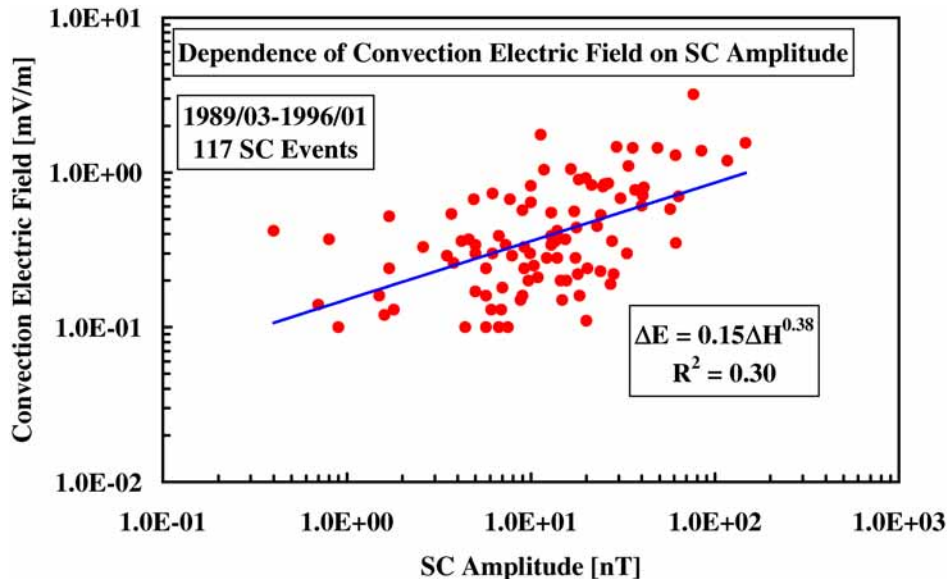
B. SCに伴う内部磁気圏電場の高速応答(MI期)



PI電場の直後から、MI期の数10分間
Dawn-to-Dusk電場が内部磁気圏・プラズマ圏・電離圏の広範な領域に渡って瞬時に配位する



Dawn-to-dusk電場の出現分布

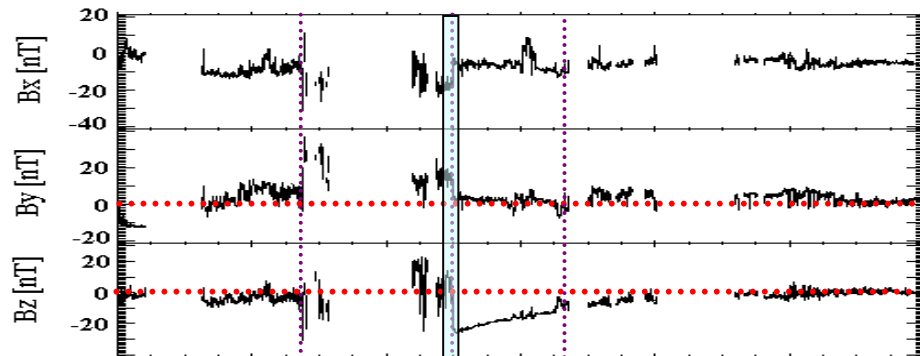


SCのMI期の電場の大きさはSCの振幅
(太陽風の動圧)に比例

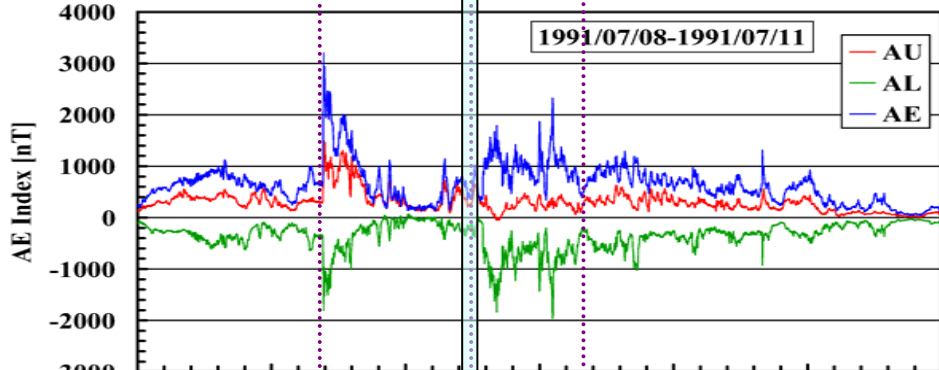
Shinbori, et al., ASR, 2004 (to be submitted).

C. IMFの急な変化に対する内部磁気圏電場の高速応答

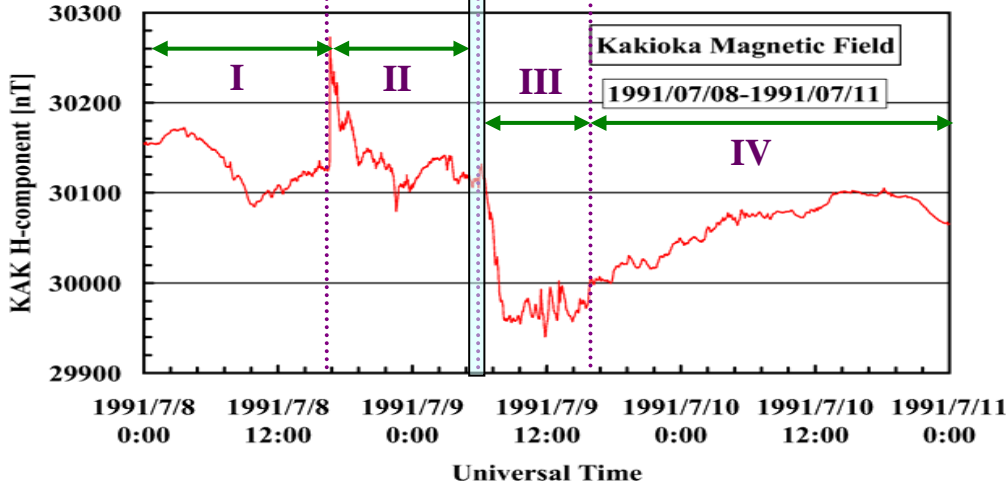
惑星空間磁場



AE指数



柿岡磁場水平成分



1991年7月8-10日にかけて
発生した磁気嵐の概要

惑星空間磁場(IMP8:X=20Re)

7月8日16:33(UT)頃、

惑星空間衝撃波が通過

SCの起源(16:35(UT))

7月9日05:51(UT)頃、

Bz成分の値が南向きを示す

磁気嵐の起源

地上磁場変動

16:35(UT)にSCが発生

(振幅:146nT)

瞬時にAE指数が増大

(3000nT)

翌日の06:00頃、主相に移行

Dst=-194nT

磁気嵐Main Phase開始と電場の高速応答 (Akebono観測)

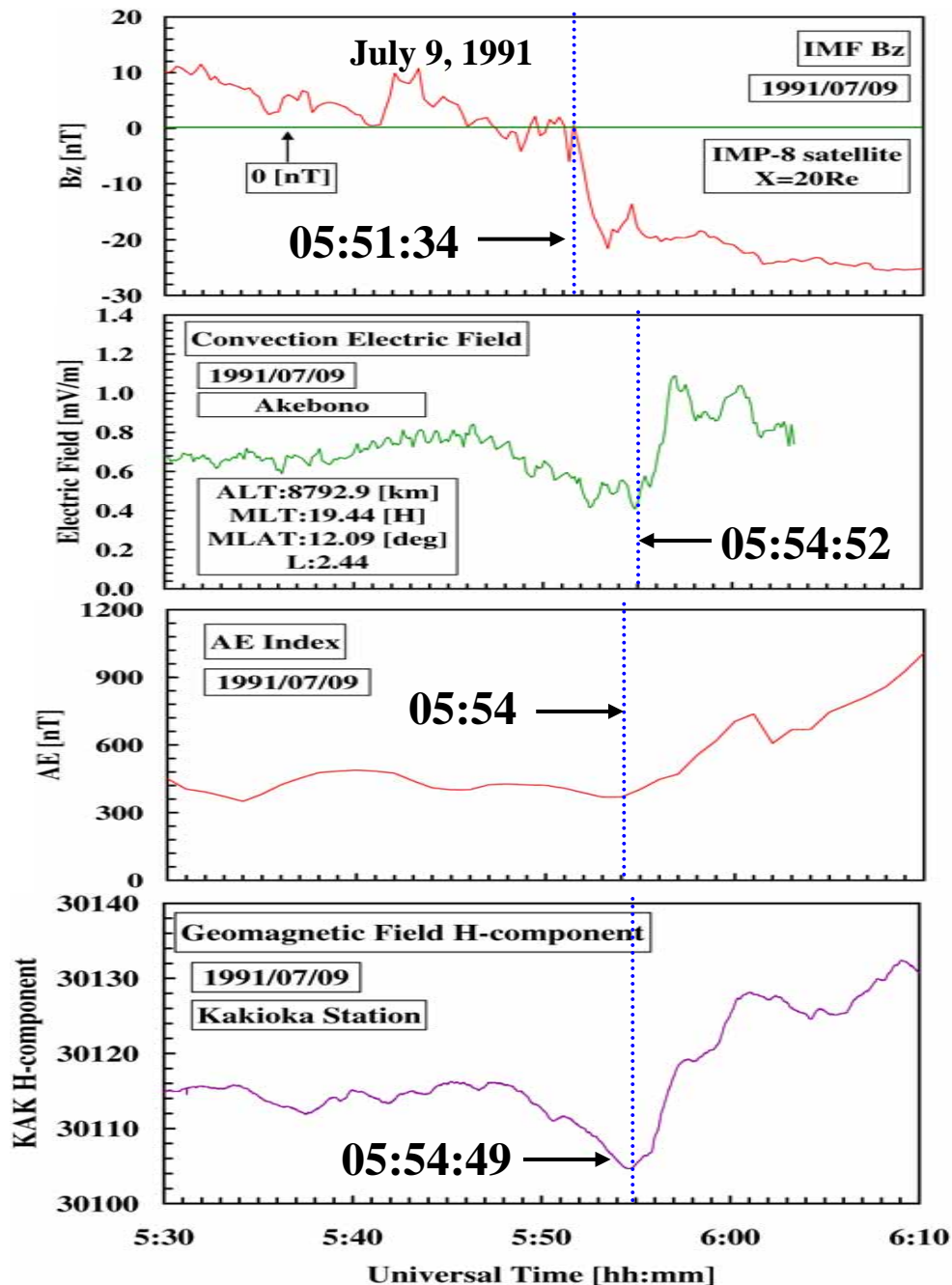
IMP-8衛星(X=20Re)

昼間側地球磁気圏の前面

Akebono衛星

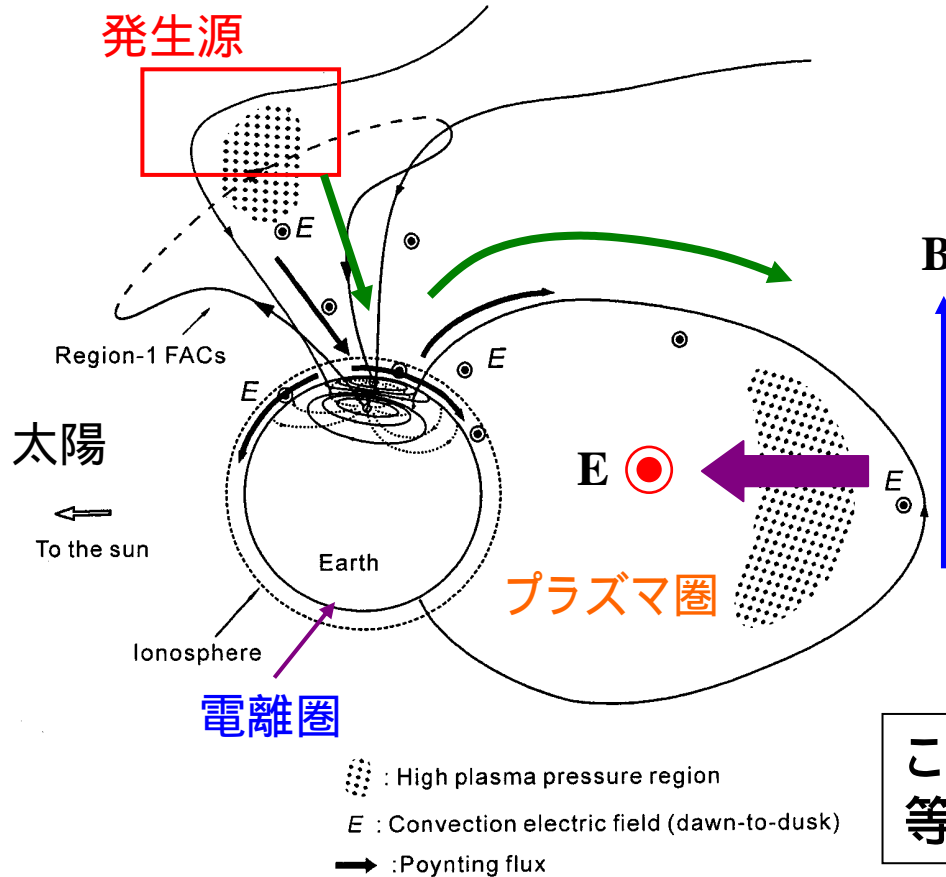
L=2.44, MLT:19:26 ALT:8792.9

IMP-8によるIMF南向き変動より3-4分後にKakioka磁場、AE、プラズマ圏電場の応答が見られる (SCの場合と同様KakiokaのOnset から1分以内に極域電離圏・プラズマ圏・中低緯度電離圏にかけてDawn-to-Dusk電場が瞬時に配位する)



内部磁気圏における電場の急速な配位のモデル

[Hashimoto et al., 2002]



- 磁気圏対流電場の電離圏、プラズマ圏、および内部磁気圏へ伝播、配位する様子
- 対流電場の起源: 太陽風の運動エネルギー
- 発生場所: 高緯度側カस्प域
- 矢印: ポインティングベクトル

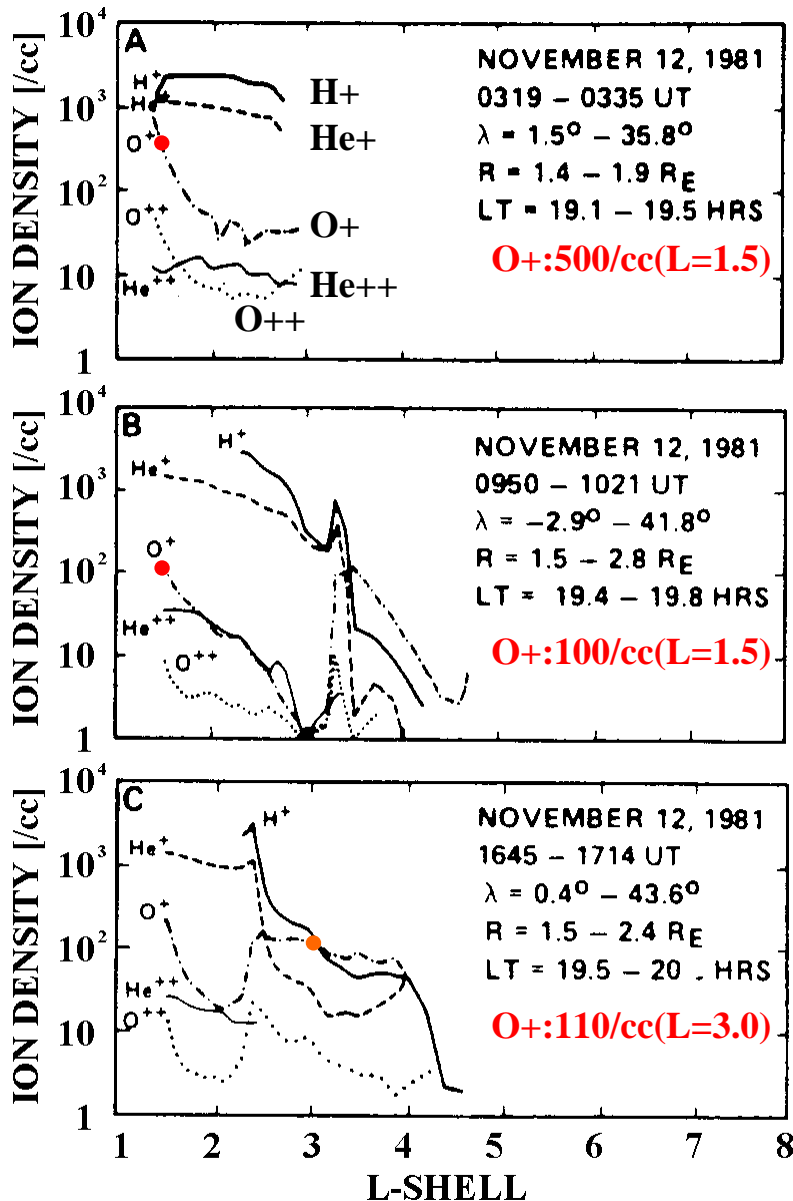
このモデルに関連しFujita et al. (2003) 等によるsimulationでPI, MIの再現

対流電場の伝播経路

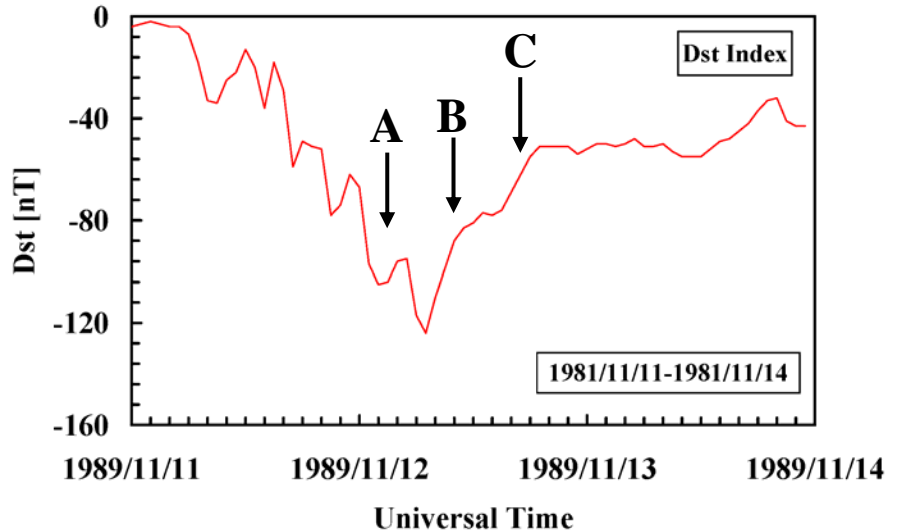
1. 昼間側のカस्प領域で発生した電場が磁力線を介して極域電離圏へ伝播
2. 地上-電離圏間を電磁波でもって極域から低緯度電離圏へ光速で伝播
3. 電離圏全体にかかった電場が内部磁気圏・プラズマ圏内へ沸きあがって配位

(ii) 磁気嵐における電離圏 - 内部磁気圏結合

磁気嵐中のプラズマ圏のイオン組成変動



Horwitz, J. L., R. H. Comfort, and C. R. Chappell,
Thermal ion composition measurements of the formation
of the new outer plasmasphere and double plasmopause
during storm recovery phase, GRL, 11, 701-704, 1984.



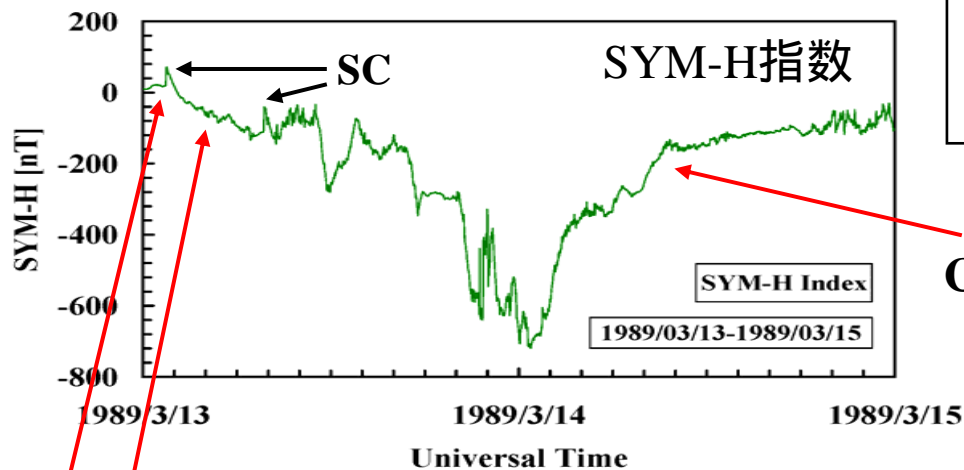
主相の期間において酸素イオン密度が
L=2.0以下の内部プラズマ圏で増加

対流電場の侵入によるドリフト効果?

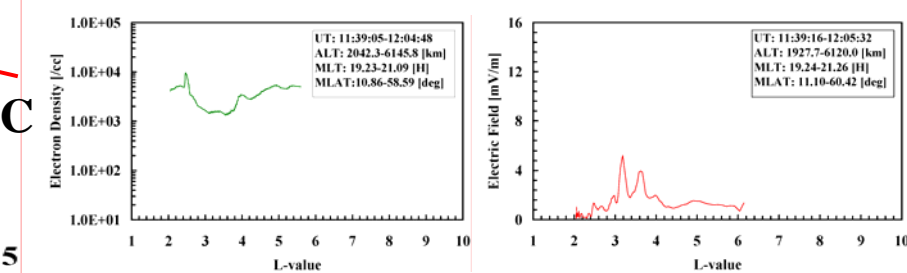
回復相になると、L=2-4の外部プラズマ
圏内で酸素イオン密度の異常増大

プラズマ圏のrefilling効果

磁気嵐中のプラズマ圏密度の異常増加と電場構造(dusk側)



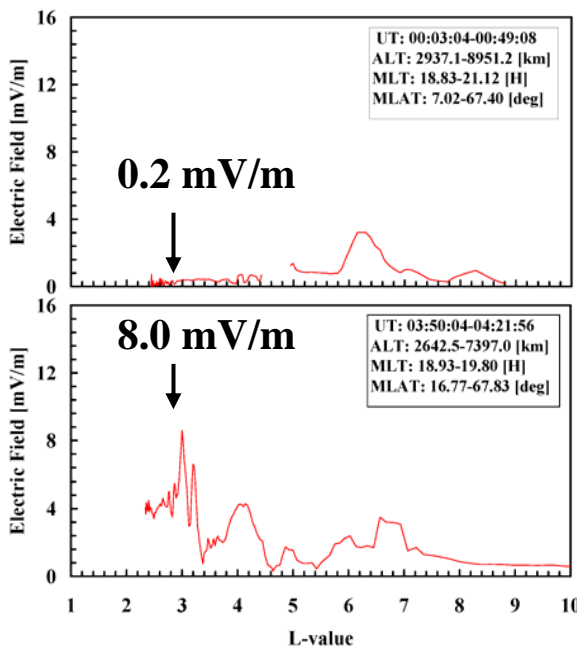
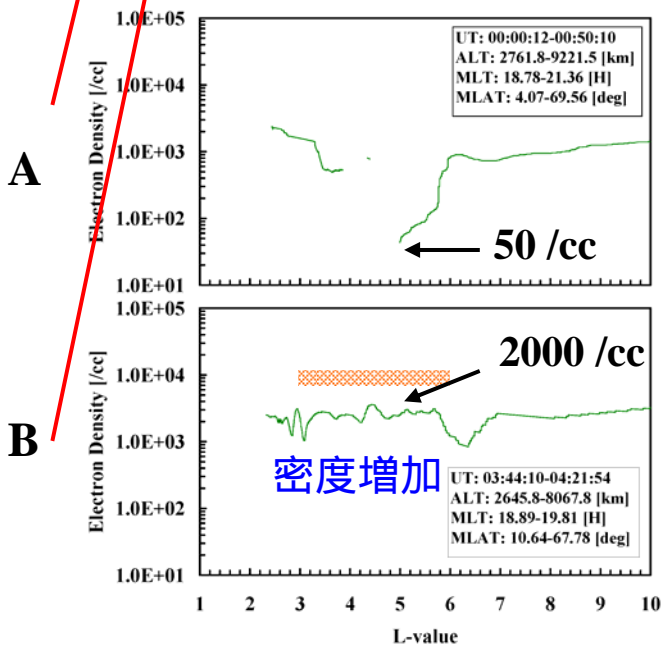
1989年3月13-14日に発生した巨大磁気嵐



電子密度

Dawn-to-dusk電場

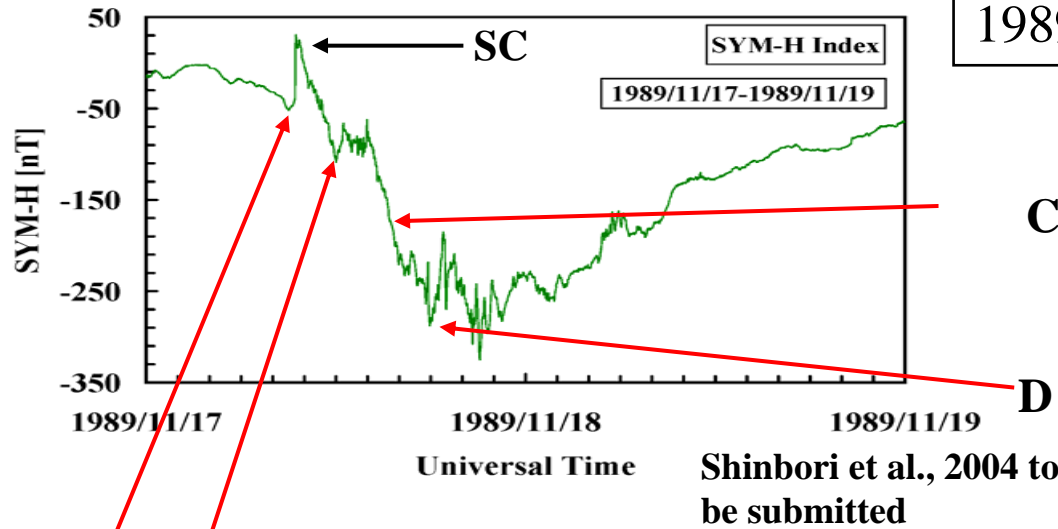
Shinbori et al., 2004
to be submitted



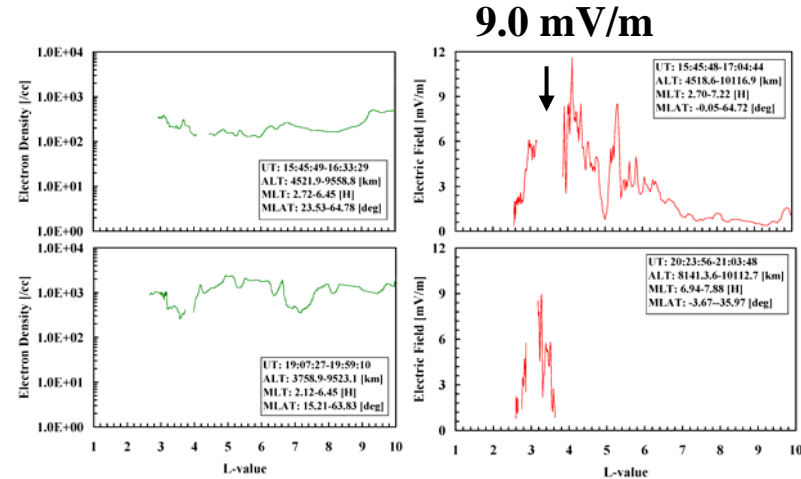
L=2-4付近で強いDawn-to-Dusk電場が配位する
強度:4.0-8.0 mV/m
同時に、Trough域の高度5000-9000kmでのプラズマ密度が通常の10-100倍に急増している

磁気嵐中のプラズマ圏密度の異常増加と電場構造(dawn側)

1989年11月17-18日に発生した磁気嵐



C
D



電子密度

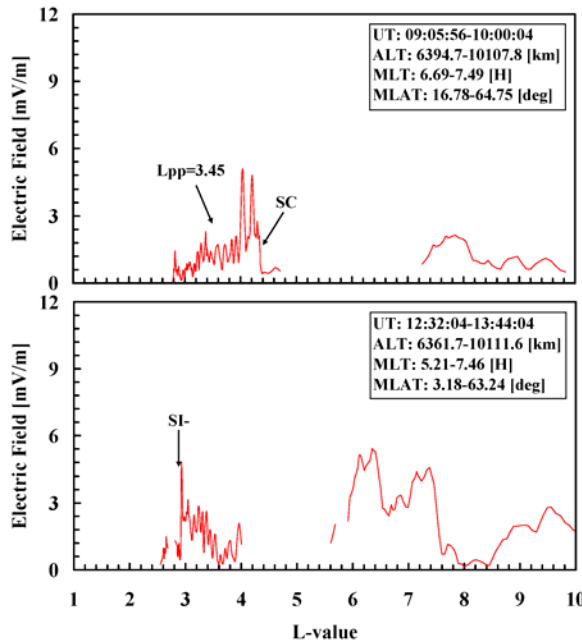
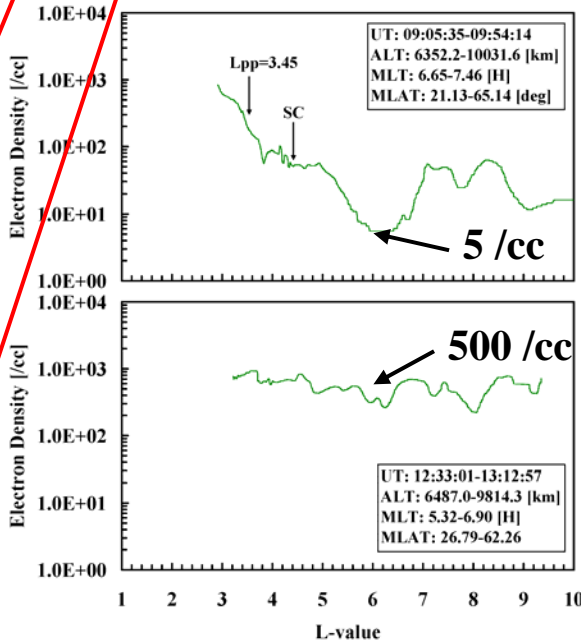
Dawn-to-dusk電場

主相の開始から約3時間以上継続する

L=2-4付近で強いDawn-to-Dusk電場が配位する
同時に、Trough域の高度5000-9000kmでの**プラズマ密度が通常の10-100倍に急増している**

Fostr et al., 2004による
TEC急増と対応するか？

A
B

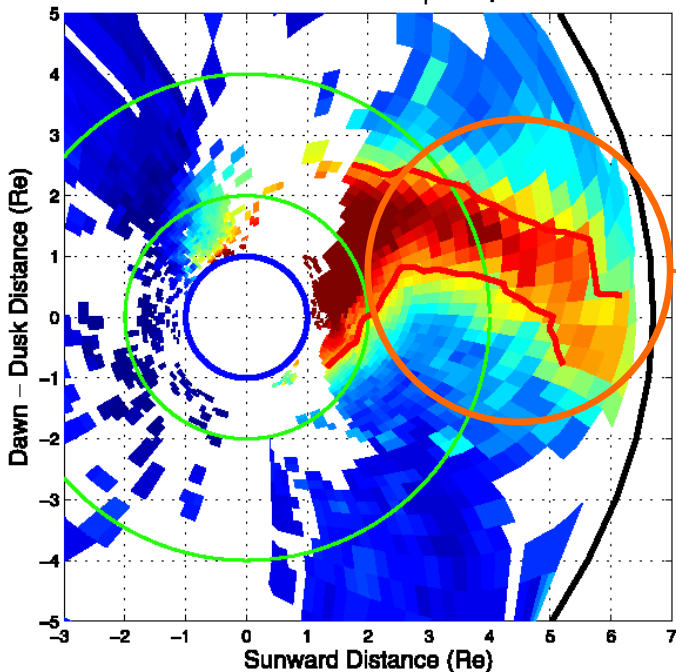


磁気嵐に伴うプラズマ流出

Foster et al., Stormtime observations of the flux of plasmaspheric ions to the dayside cusp/magnetopause, Geophys. Res. Letts., 31, 2004.

TECネットワーク観測結果
の磁気赤道面への投影

GPS TEC 23:00 UT April 11, 2001

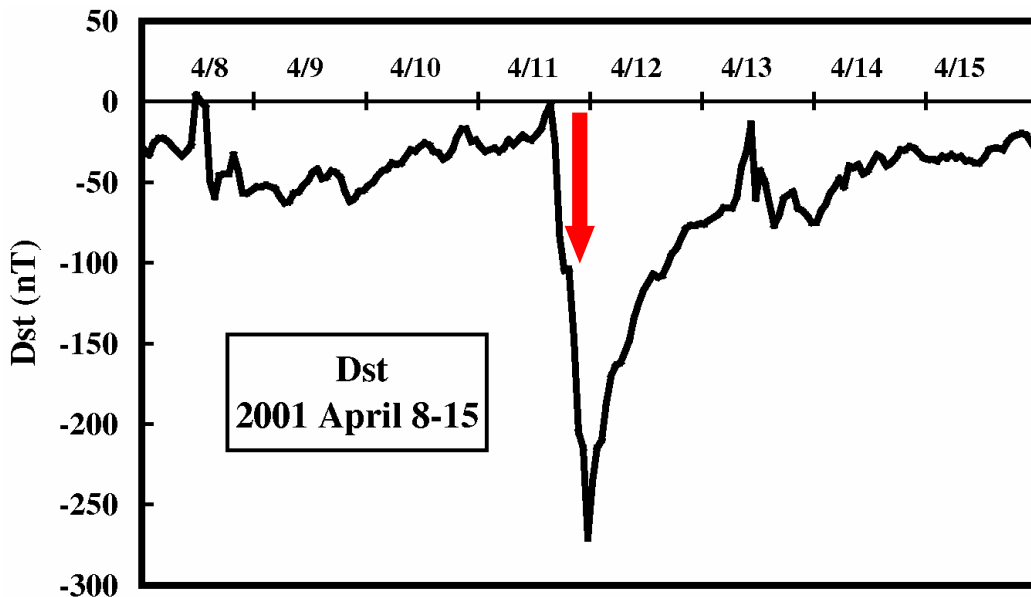
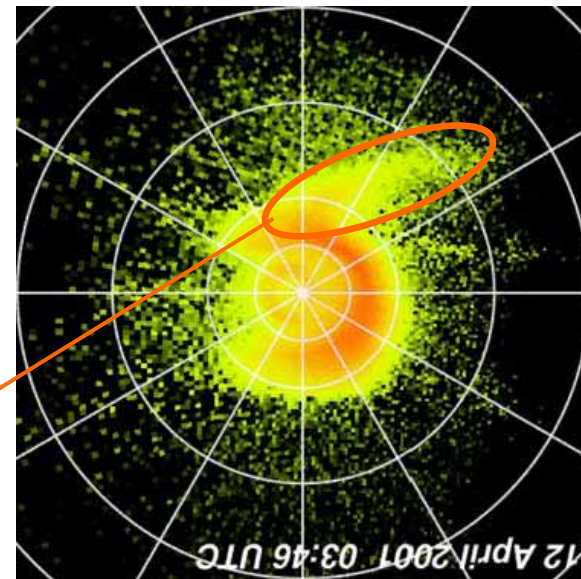


Tsyganenko magnetic field aligned mapping is used to **project the GPS TEC observations** from their 350-km altitude ionospheric penetration points into the magnetospheric equatorial plane.

IMAGE EUV observation 5. The white circles are at L = 1, 2, 4, and 6. A prominent **drainage plume** extends from the plasmasphere at roughly 17 MLT to at least L = 5 near 15 MLT.

対応している!?

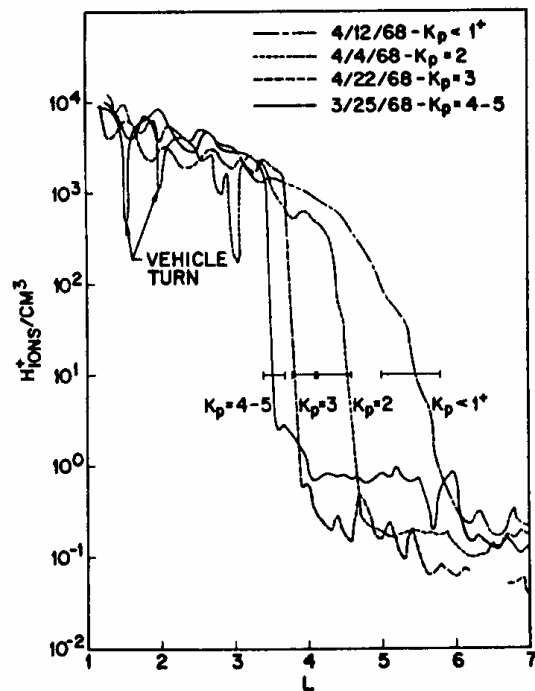
IMAGE衛星観測によるPlasma Plume (約4時間後観測)



(iii) プラズマ圏の密度構造と電場の応答

(プラズマ圏・プラズマポーズの形成と変動)

Chappell et al., A study of the influence of magnetic activity on the location of the plasmapause, J. Geophys. Res., 1970.

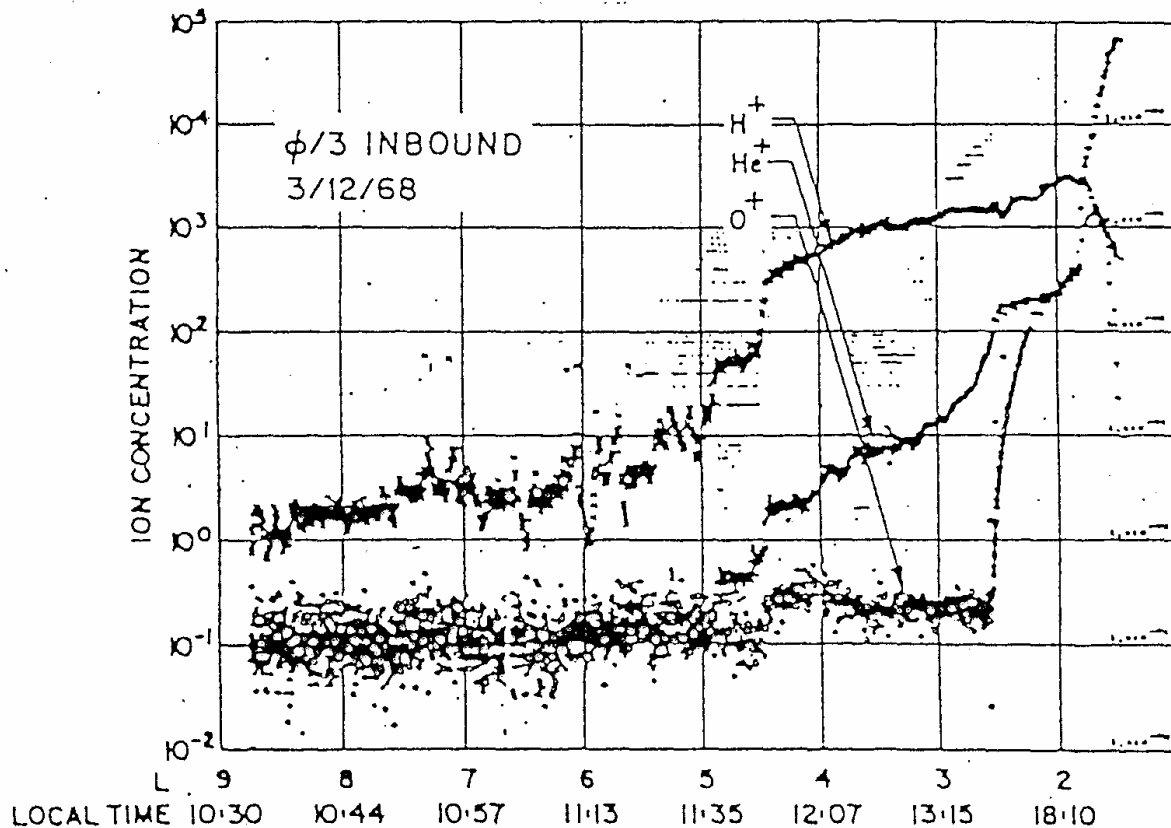


OGO-V Satellite

Apogee: 23Re

Perigee: 300km

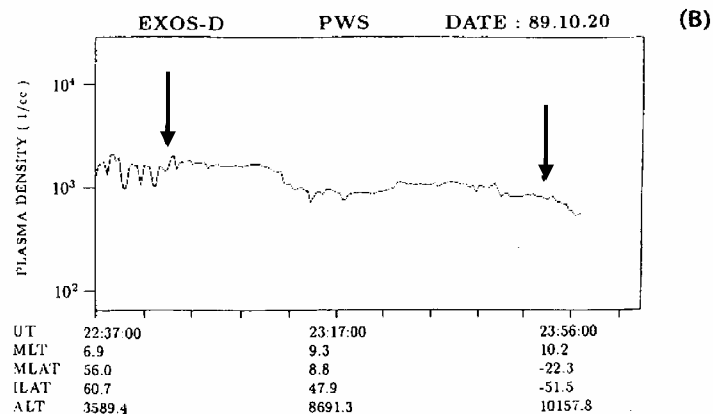
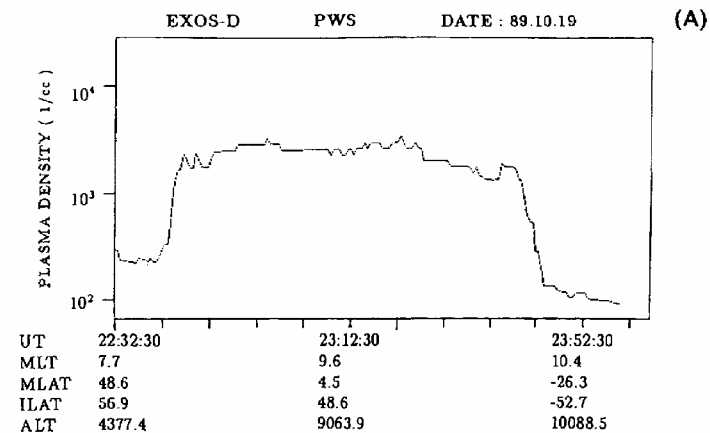
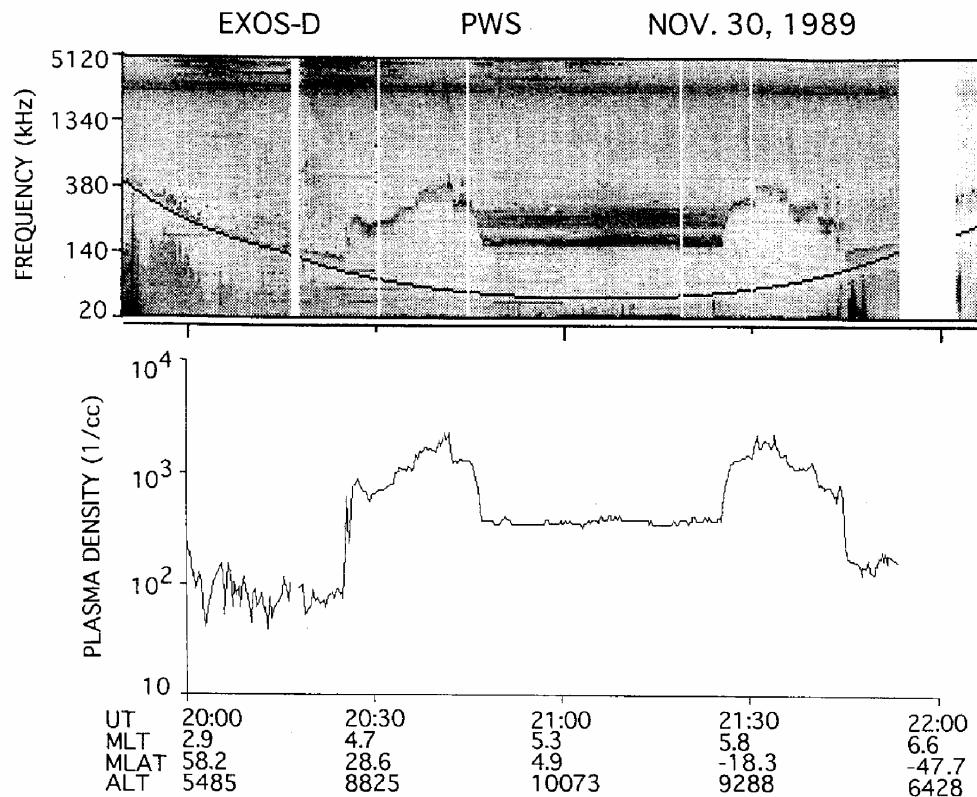
Orbital Period: 2.5day



Akebono衛星で見た、磁気嵐に呼応して出現するプラズマ圏の異常構造(ロバの耳構造)

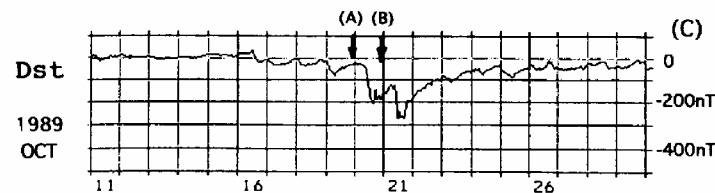
Oya et al., J. Geomag. Geoelectr., 1990.

Oya, J. Geomag. Geoelectr., 1997.



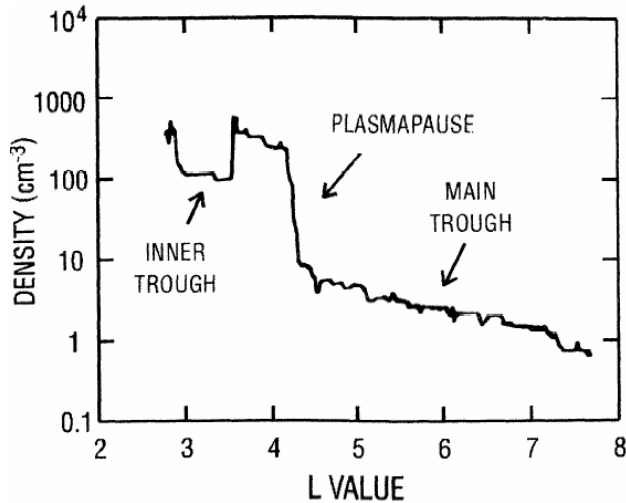
磁気嵐の主相にてプラズマ圏の崩壊現象が出現(プラズマ圏界面の消失)

トラフ領域の電子密度上昇による



低-Lプラズマポーズ / Inner Trough の観測

Carpenter et al., **CRRES observations** of density cavities inside the plasmasphere, J. Geophys.Res., 2000.



ISEE1 inner trough
(Carpenter and Anderson, 1992)

Inner Troughの性質

幅: $\Delta L \sim 0.5-2.0$

横方向の広がり:磁気経度20度以上

1. 出現領域

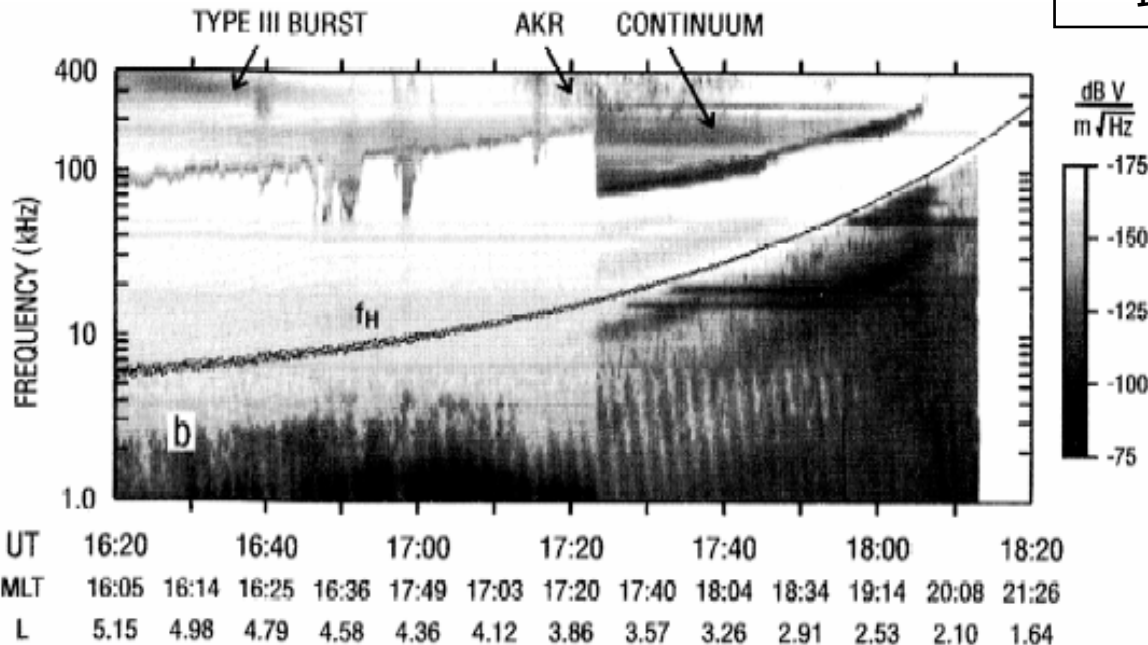
$L < 2.5$:約30%程度

$2.5 < L < 3.5$:約70%程度

2. 出現頻度

最大:18:00-24:00(MLT)

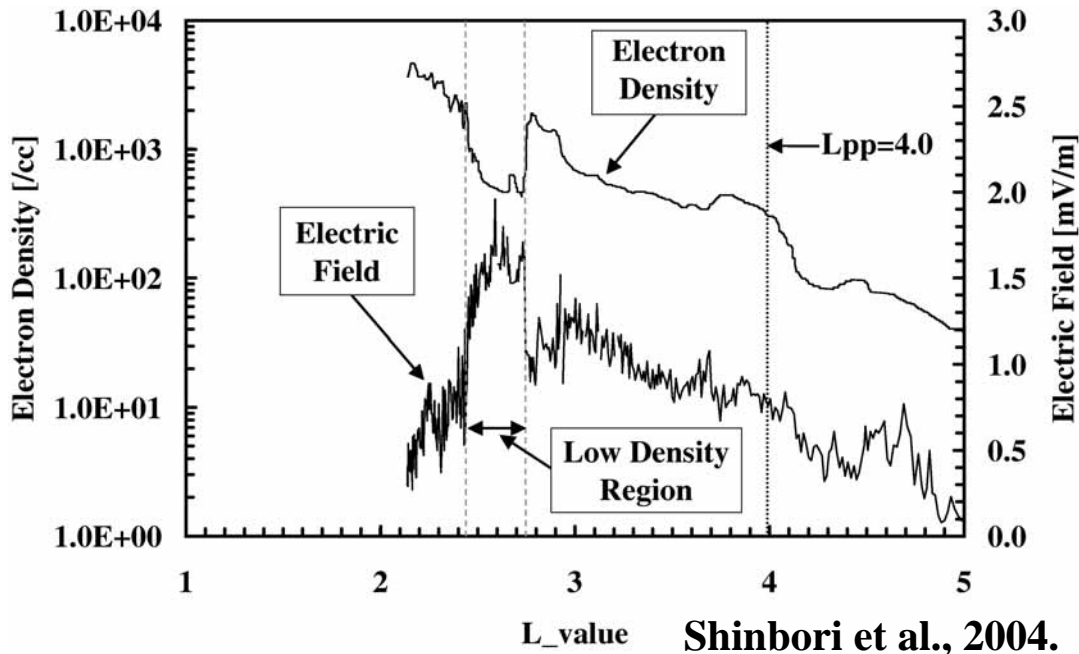
最小:06:00-12:00(MLT)



Inner Troughの形成には
SAID現象が深く関係?

MLT分布

OGO-V、Jikikenで見た
Detached Plasmaは、
Akebonoが見たロバの耳
構造と対応する現象と思
われる



Inner Troughと電場：
Substormとの関係で夕方側に現れるとされる、SAID /SAPS (Galperin et al., 1973) との関係の可能性も検討が必要

SAID: Sub-auroral Ion Drift との関係が最近議論され始めている

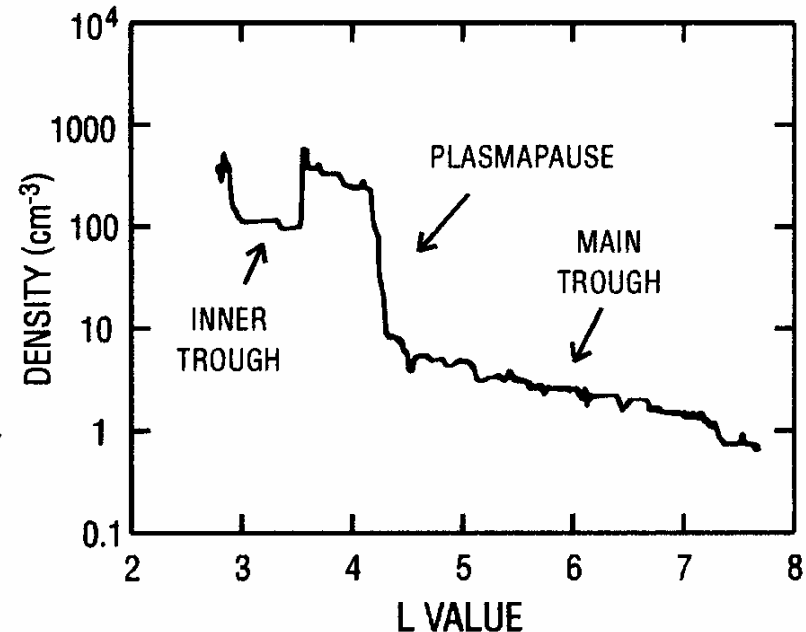
Sub-aurora帯における1km/sを越えるイオンドリフト

緯度幅が狭く (<1-2°)、夕方側、Substormの **Recovery Phase** に発生する (Galperin et al., 1973)

近年、衛星観測により**内部磁気圏への波及効果**も示される (Anderson et al., 2001)

但しAkebonoの電場観測では緯度範囲や、MLT分布などの点でSAIDとの対応については**未解決**

ISEE1 Inner Trough



3. まとめ

SC・磁気嵐に対する内部磁気圏-プラズマ圏-電離圏結合の理解

考慮すべき点

最近の観測データ解析結果

カスプ域より進入する擾乱(電場)は、**高速**で低緯度電離圏、および内部磁気圏へ**1-2分の間**で伝播しえることを示唆

プラズマ圏のプラズマ密度構造並びに電場の空間分布の激変、電離圏からの輸送によるTrough領域の消滅

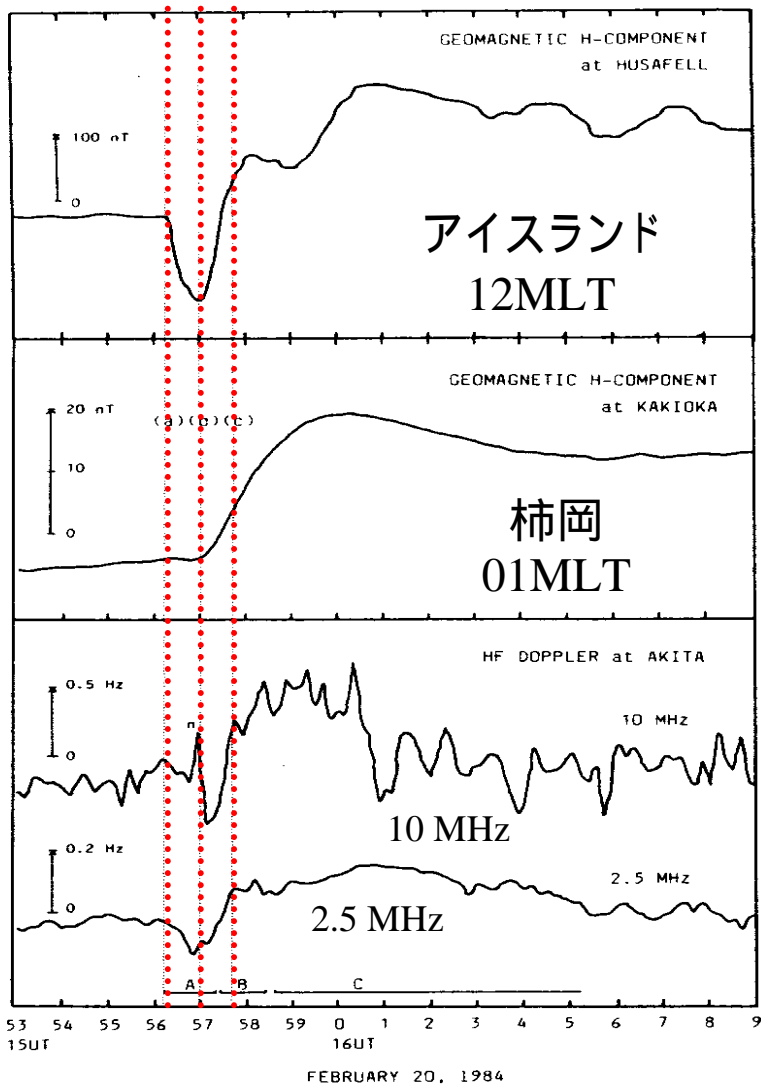
プラズマ波動励起・伝播、プラズマ加速に影響

古典的な磁気圏-電離圏ダイナミクスの理解を一步進め、その真の姿を得るには、**地上観測と衛星観測の多点観測を連携**させて、この**特性時間**を十分に分解する観測を実施し、磁気嵐に伴う**擾乱の発生メカニズム**、**伝播の方向・速度並びに空間構造**などを厳密に知る必要がある

中緯度短波レーダの設立の意義

今まで観測のあまり行われていない中緯度電離圏の観測から得られる**新たな観測事実の理解**を通じての**新しい磁気嵐の描像を構築**する事が可能

HFドップラー観測によるSC時の磁気圏電場の侵入



上段: 高緯度におけるSC時の磁場変動
中段: 低緯度におけるSC時の磁場変動
下段: HF Doppler観測結果(2.5MHz、10MHz)

2.5MHz: 電離圏E層(高度:100-110 km)
10.0MHz: 電離圏F2層(高度200-250km)

最初の点線: 高緯度におけるSCの開始点
真中の点線: 低緯度におけるSCの開始点
最後の点線: 正の周波数パルス点

高緯度でのSCの開始時刻とほぼ同時に秋田におけるHF Dopplerの周波数が負の方向へ変化

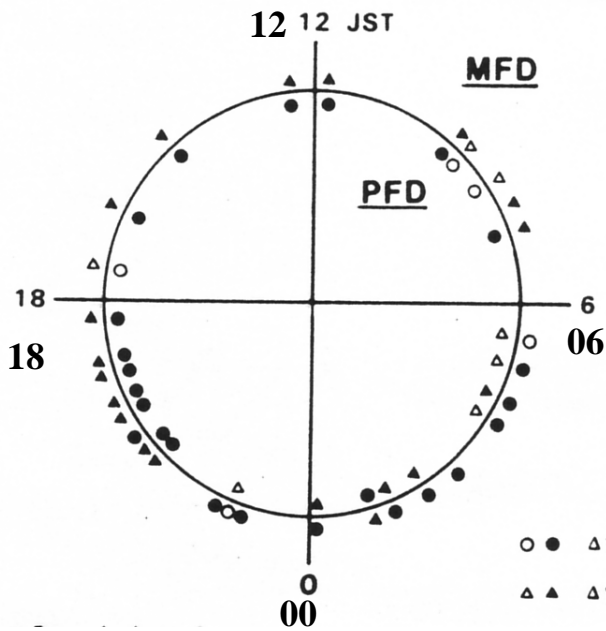
PIの電場が高緯度から低緯度へ瞬時に伝播していることを示している

その後、正の方向へ変化している

MIの電場の侵入

秋田のHF Doppler観測から得られた電離層の移動

SCに伴うHFドップラーの統計解析と電離圏に配位する電場

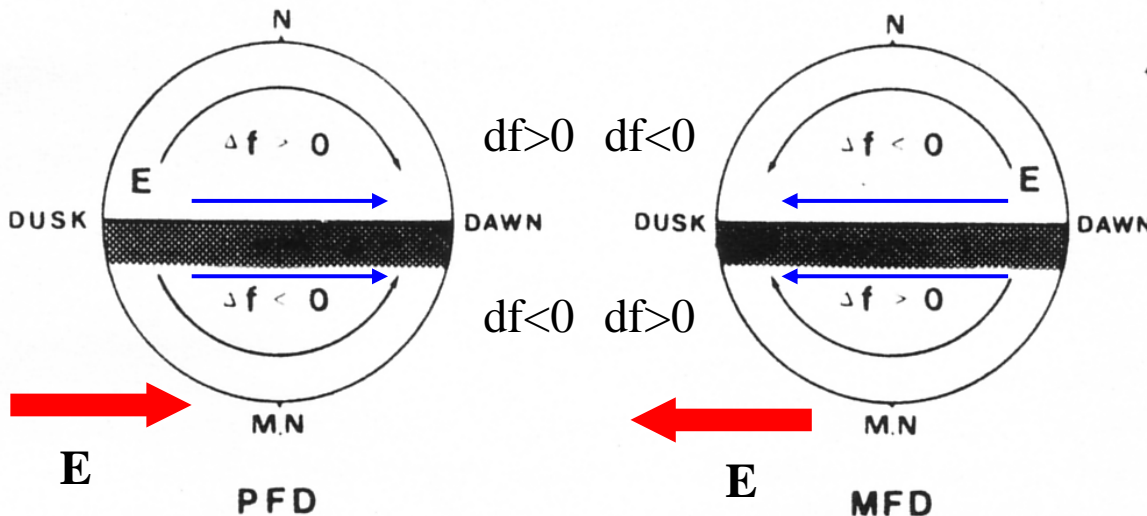
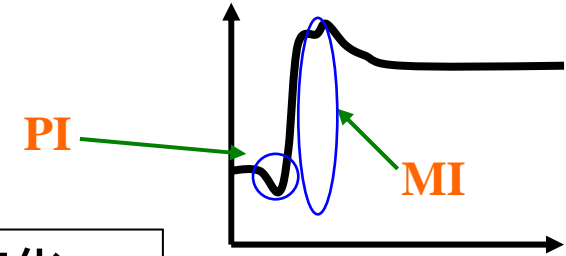


丸印: $df > 0$
 三角印: $df < 0$

PFD: PI期における周波数変化
 MFD: MI期における周波数変化

Afternoon-evening側: $df > 0$ $df < 0$
 Midnight-dawn側: $df < 0$ $df > 0$

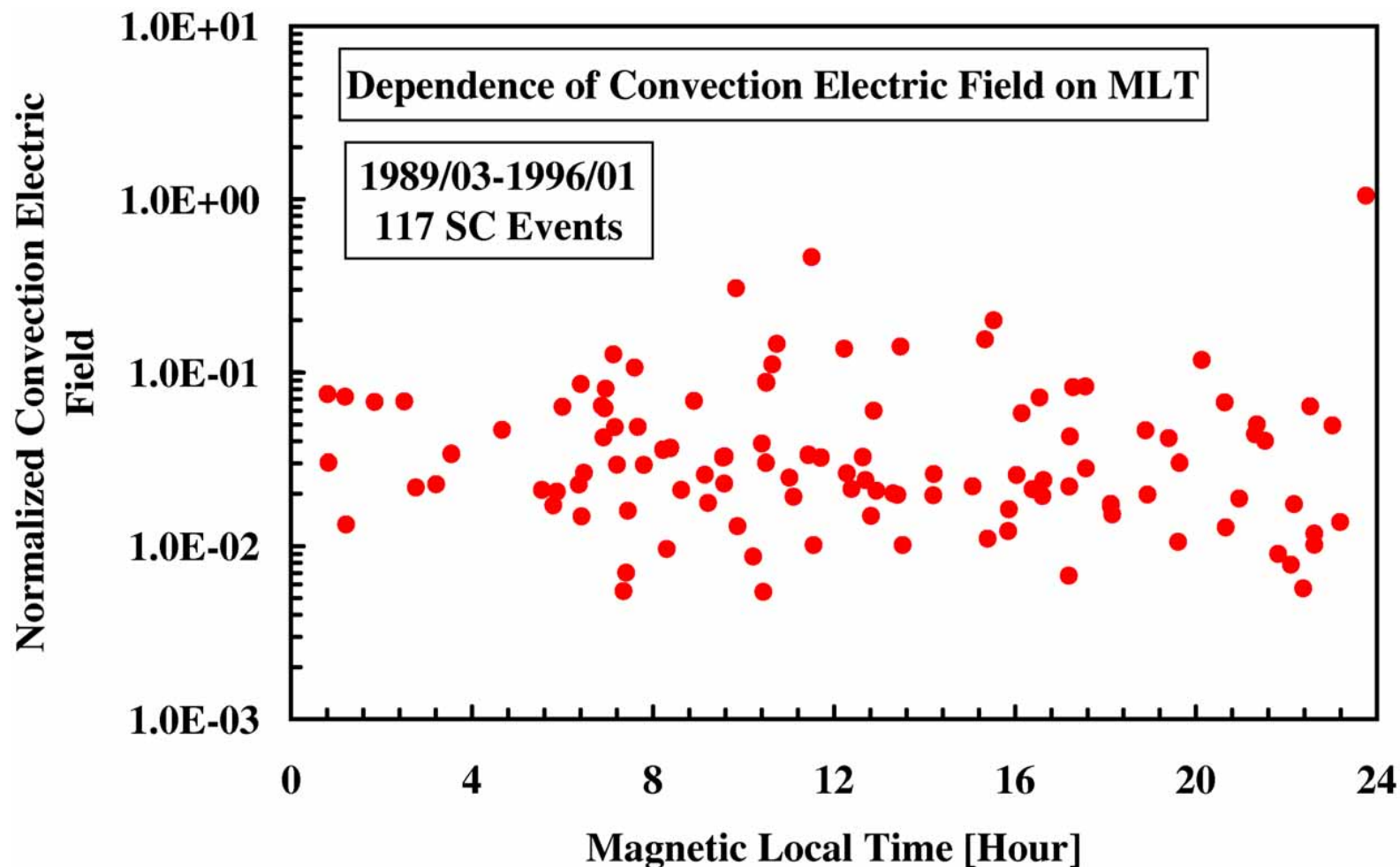
●● $\Delta f > 0$
 ▲▲ $\Delta f < 0$



電場の方向

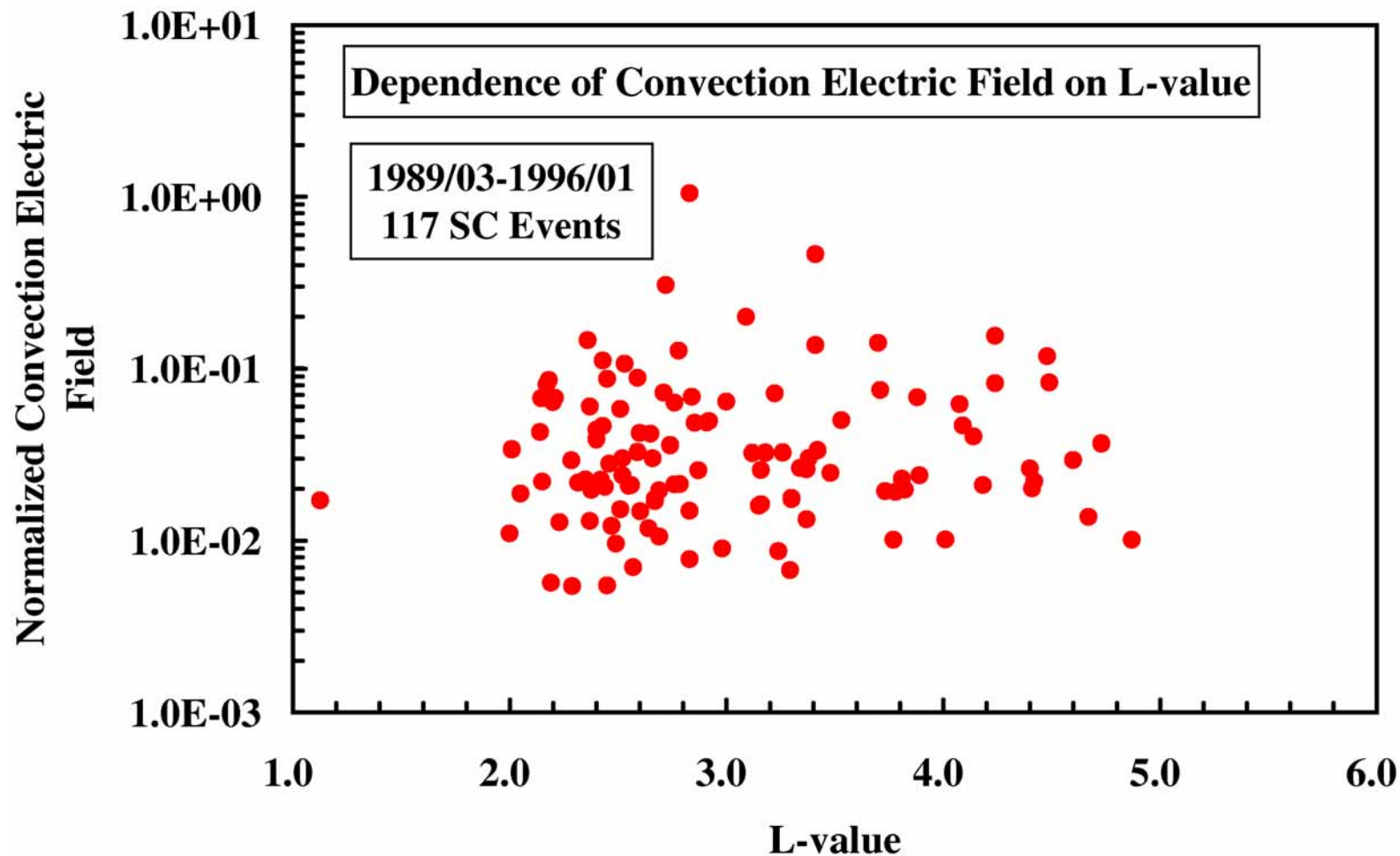
Afternoon-evening側:
 Dusk-to-dawn方向
 Midnight-dawn側:
 Dawn-to-dusk方向

SCに伴う磁気圏対流電場のMLT依存性(MI-phase)



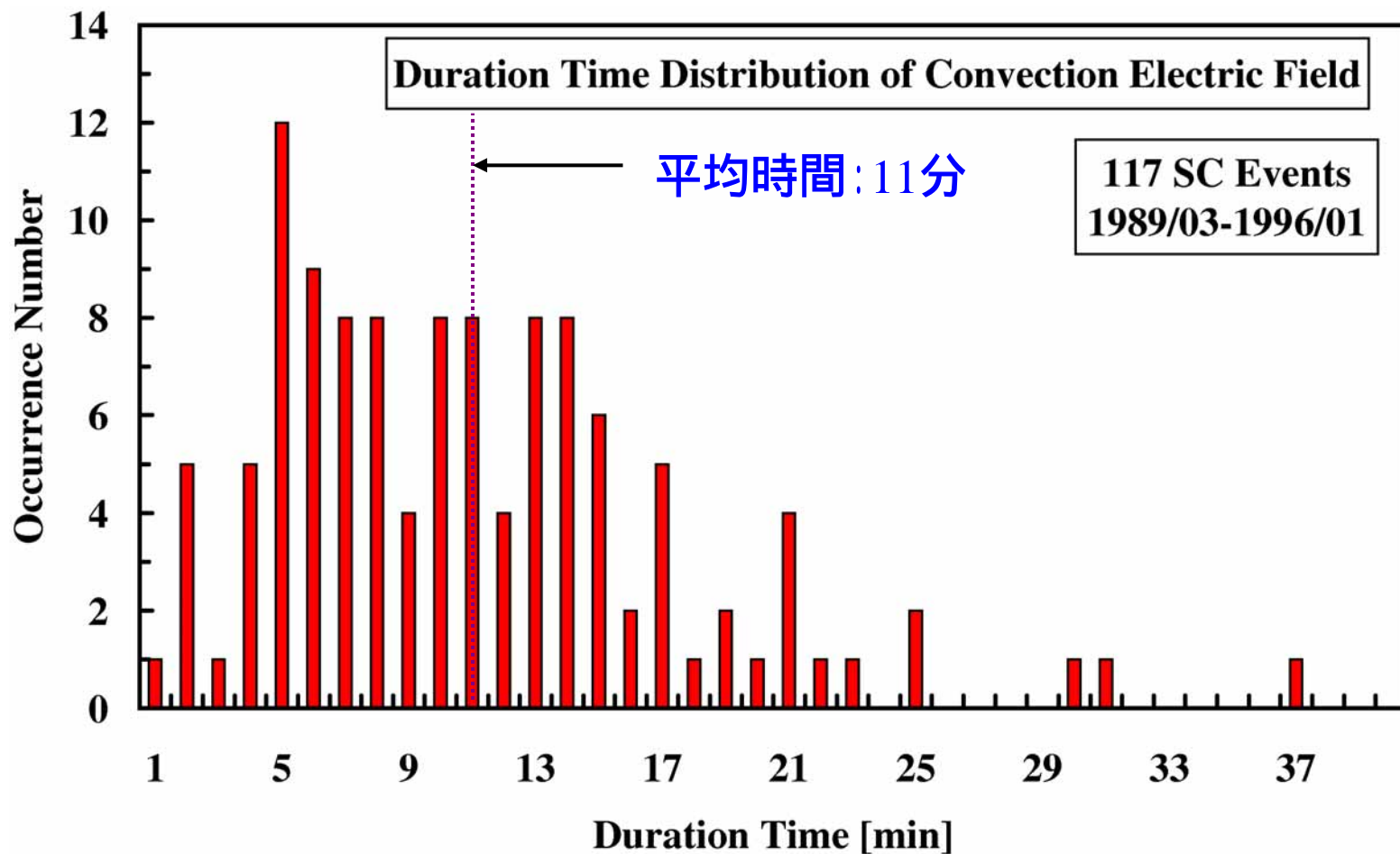
- 磁気圏対流電場の増加分を柿岡でのSCの振幅で規格化
- 分布の傾向: 磁気地方時によらず、 10^{-2} - 10^{-1} の範囲に大部分が分布

SCに伴う磁気圏対流電場のL値依存性



- 磁気圏対流電場の増加分を柿岡でのSCの振幅で規格化
- 分布の傾向:L値によらず、 10^{-2} - 10^{-1} の範囲に大部分が分布

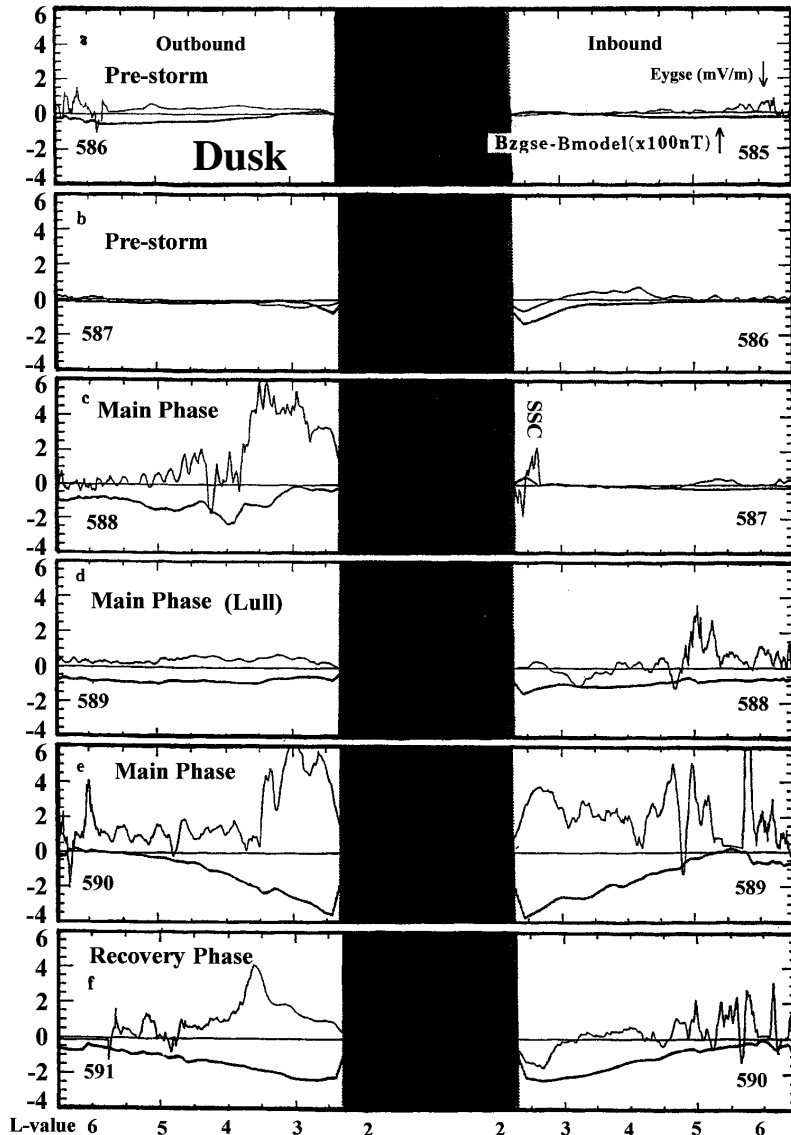
SCに伴う磁気圏対流電場の継続時間の分布(MI-phase)



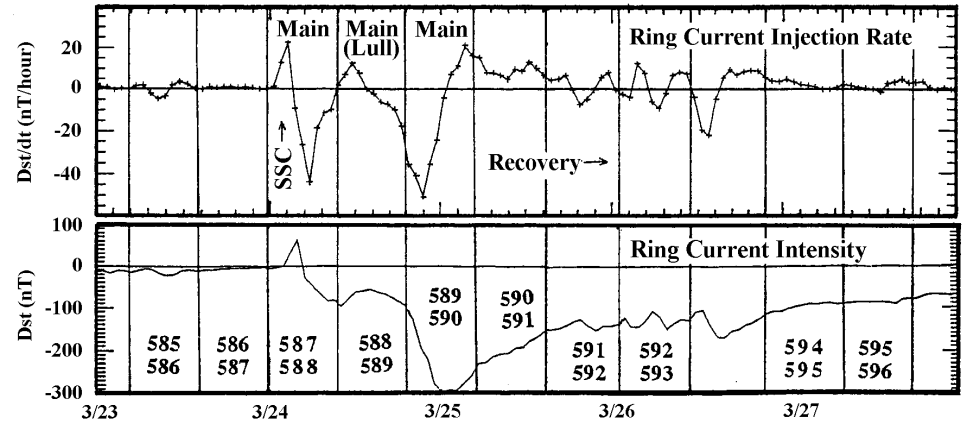
分布の特徴: 継続時間が4分から15分間にイベントが集中
長いイベントで20-40分程度
平均的な継続時間: 約11分程度

赤道軌道衛星(CRRES)による磁気嵐時の内部磁気圏電場(E_y 成分)の時間変化と空間構造

Electric and Magnetic Fields During 3/24/91 Geomagnetic Storm



Geomagnetic Activity and CRRES Orbital Coverage for March 23-28, 1991

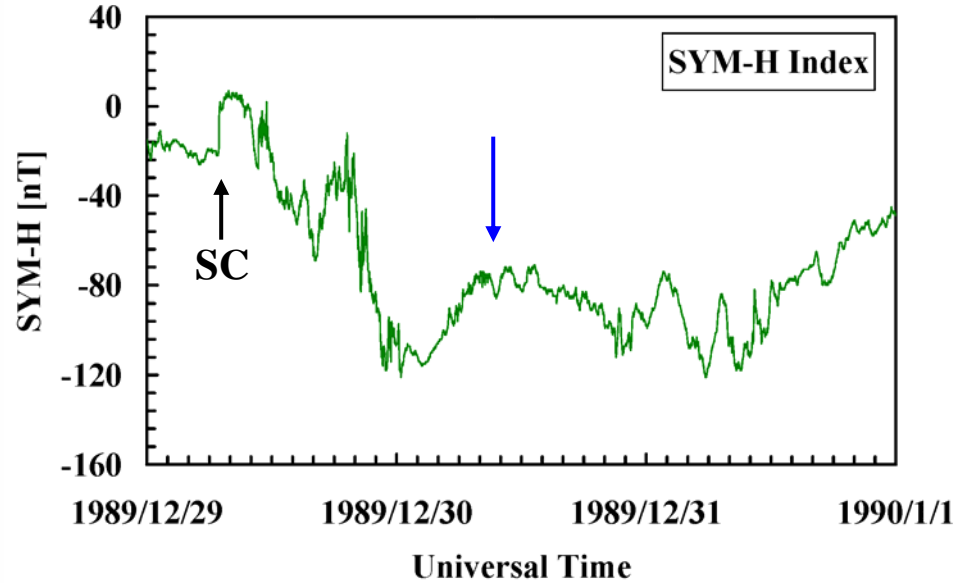
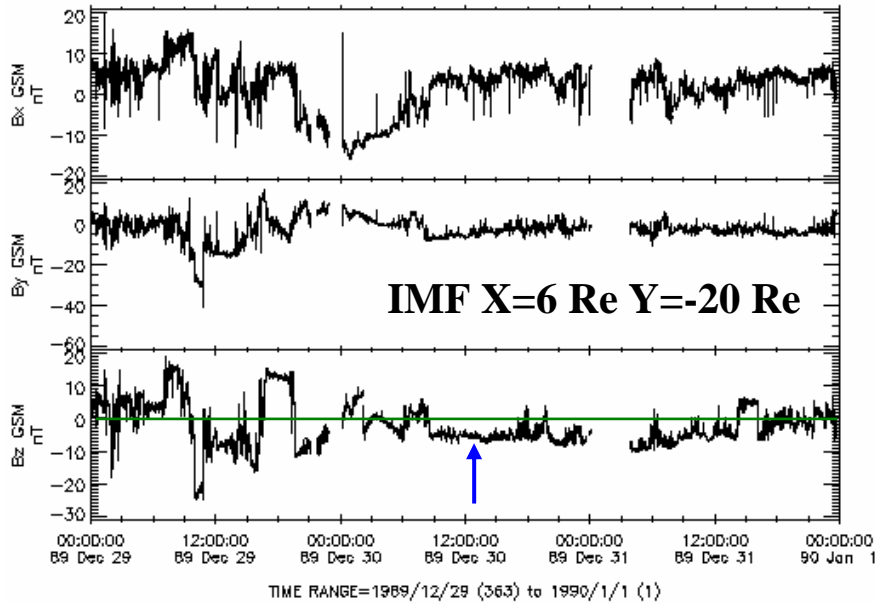


Wygant et al., JGR, 1998

- 主相で最大強度: 6.0 mV/m ($L=2-4$)
potential dropにして50-70 kV
通常の60倍
post-midnight側に比べてdusk側の方が電場の強度が強い
- 継続時間: $\sim 1 \text{ hour}$
- 回復相にて逆向きの対流電場が出現
環電流粒子によるshielding電場?
- SAID (narrow latitude band)とは異なる?

磁気嵐中に観測された逆向きの対流電場

IMP-8 MAG>Fluxgate Magnetometer HO>High Time Resolution



CRRES衛星と同様に磁気嵐の回復相?で**逆向きの対流電場が出現**

大きさ: -0.5-1.1 mV/m

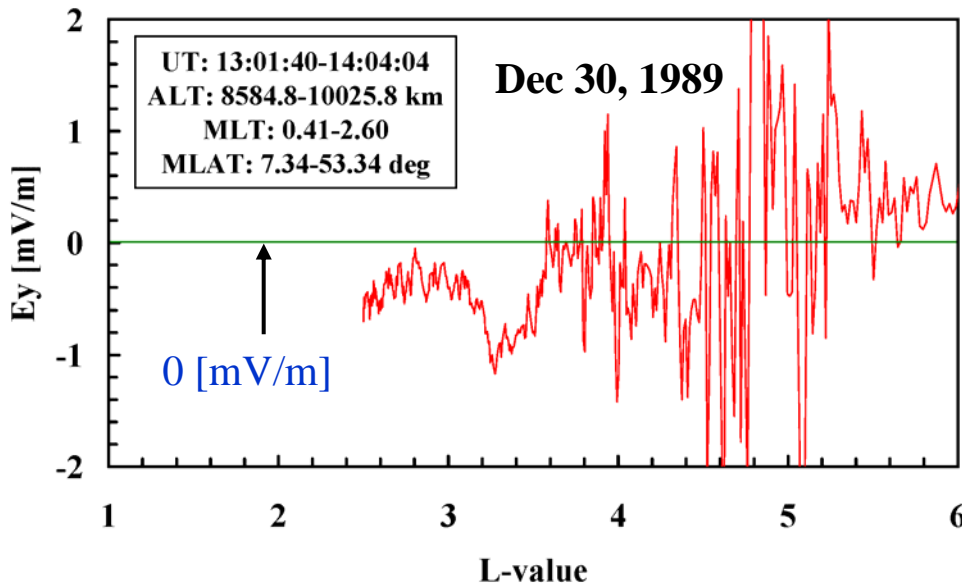
(L=3.3付近で最小)

磁気地方時: 0.41-2.60 hour

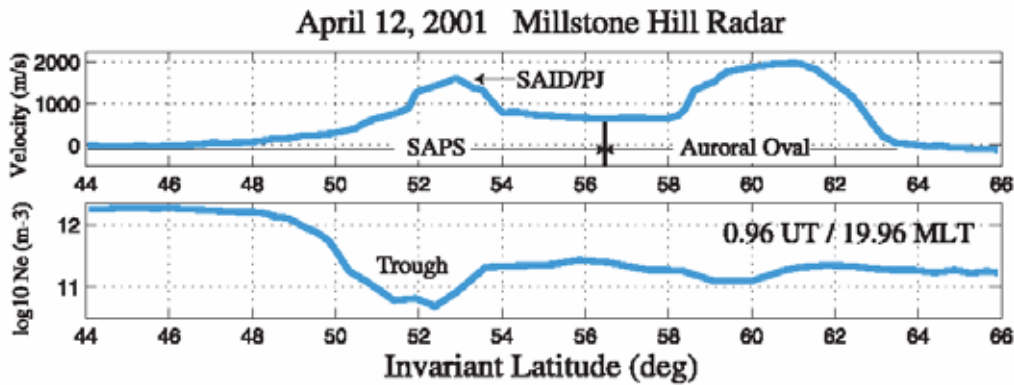
IMF Bz成分: -4.0-5.0 nT程度

shielding効果、

磁気地方時に固有の現象?



SAPS (subauroral polarization stream)とtroughの関係



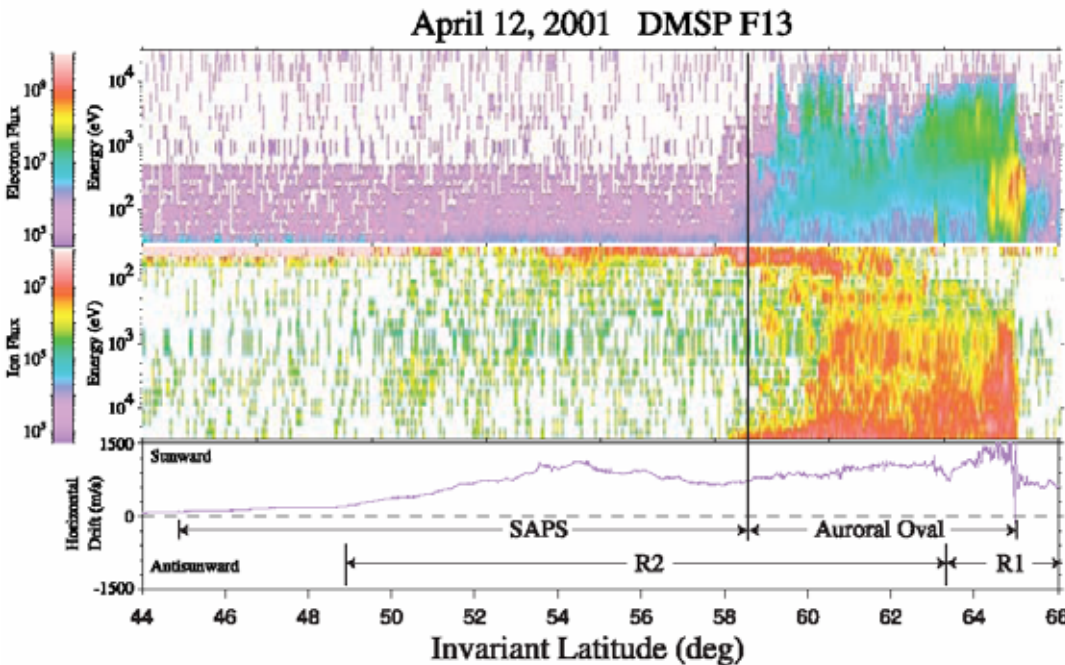
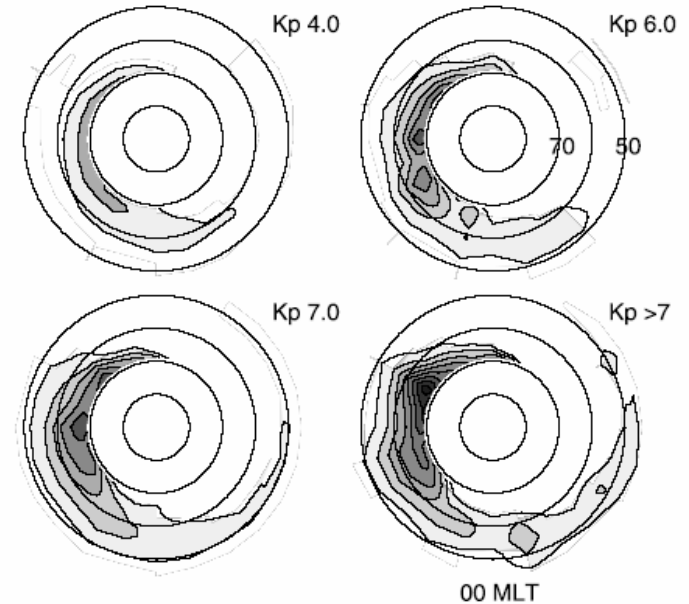
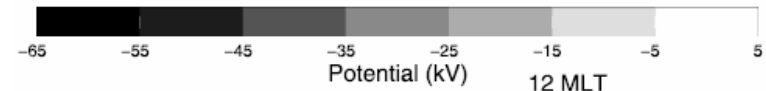
Two cell convectionの低緯度側

緯度幅: 3-5度

MLT分布: 16-24 h

Westward drift速度 > 300 m/sec

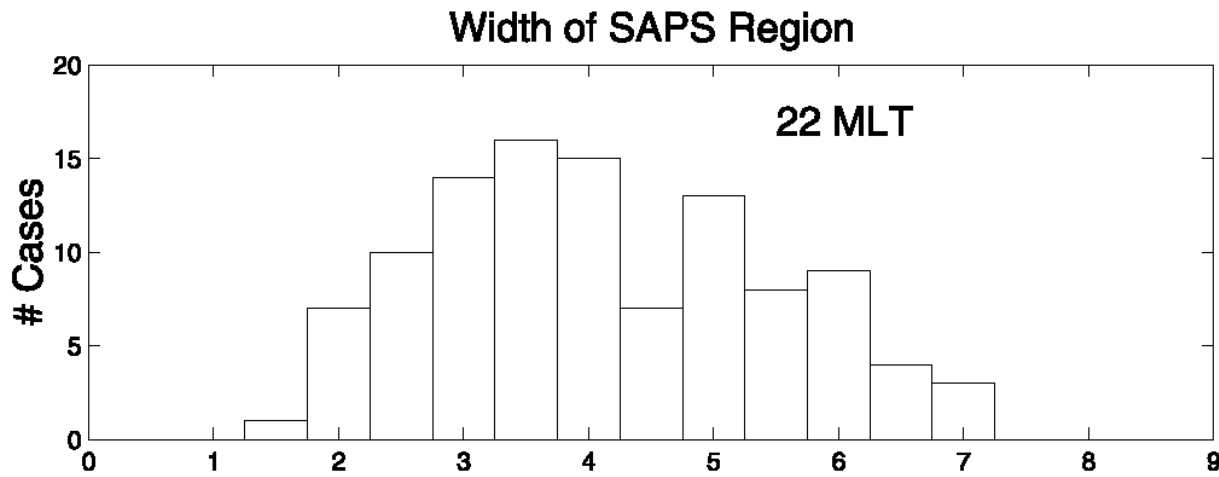
Kp > 4でdawn側(4-6)にも出現



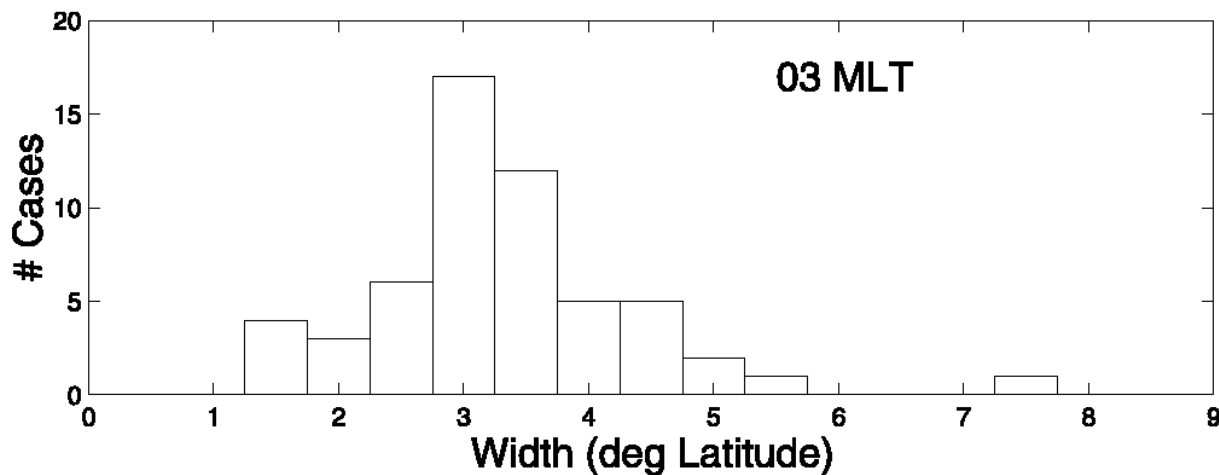
Foster and Vo, JGR, 2002

Akebonoで観測されたinner troughと電場は、このSAPSに対応するか？

SAPSの緯度幅の分布



Pre-midnight
sector: 3-5度



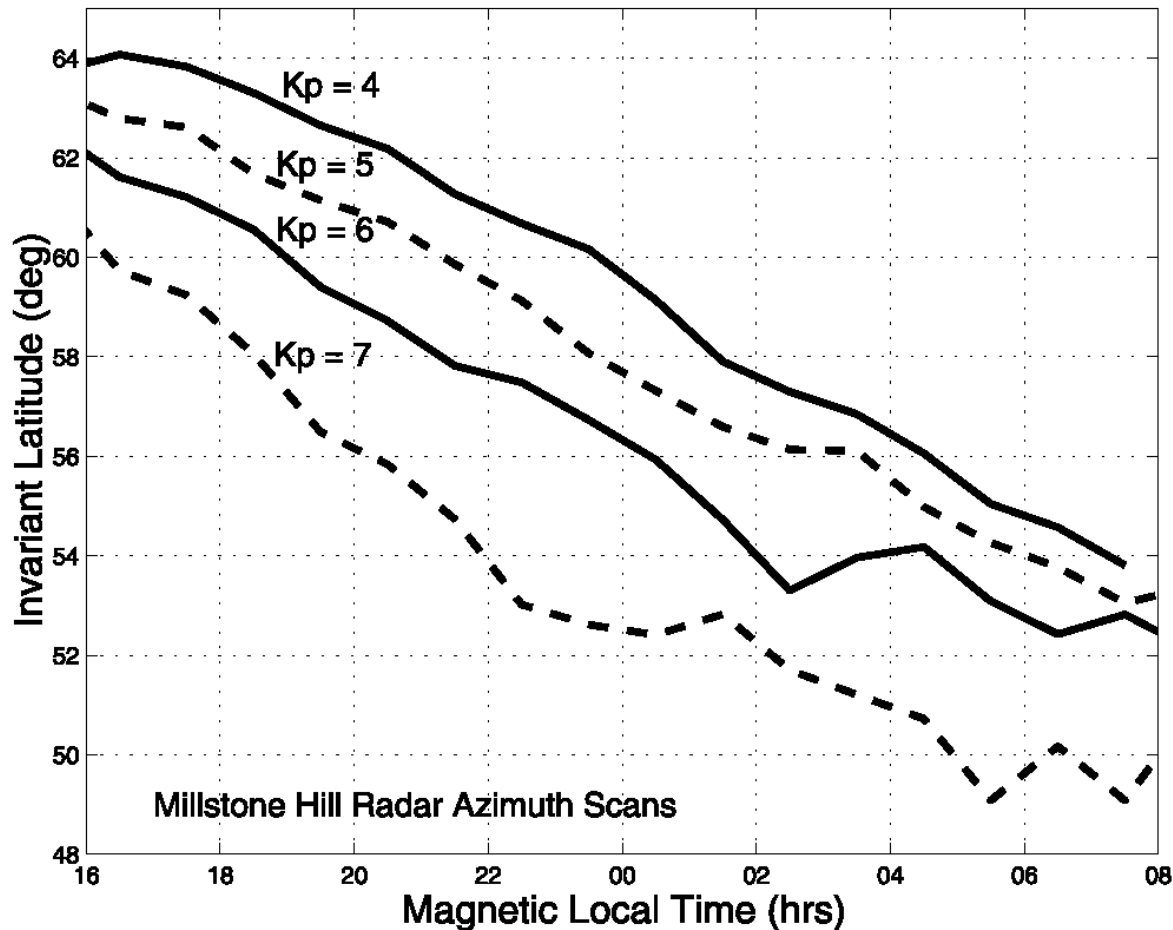
Post-midnight
sector: ~3度

Foster and Vo, JGR, 2002

Pre-midnight sectorに比べてSAPSの緯度幅は、post-midnight sectorの方が**比較的狭い**傾向にある

SAPSがピークとなる部分の緯度とMLTとの関係

Average Latitude of SAPS



Kpの増加とともにSAPSがピークとなる部分の緯度が高緯度側から低緯度側へ移動

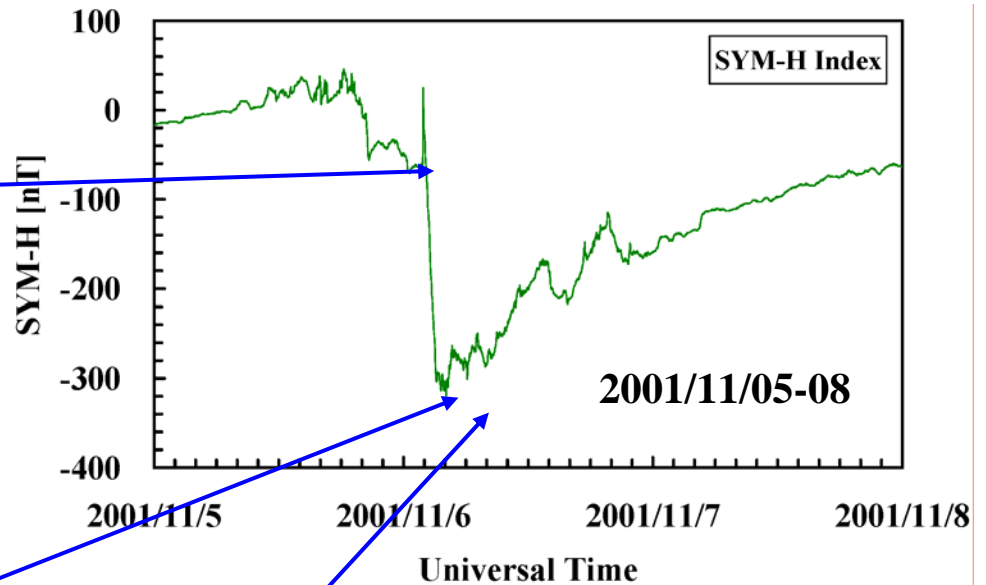
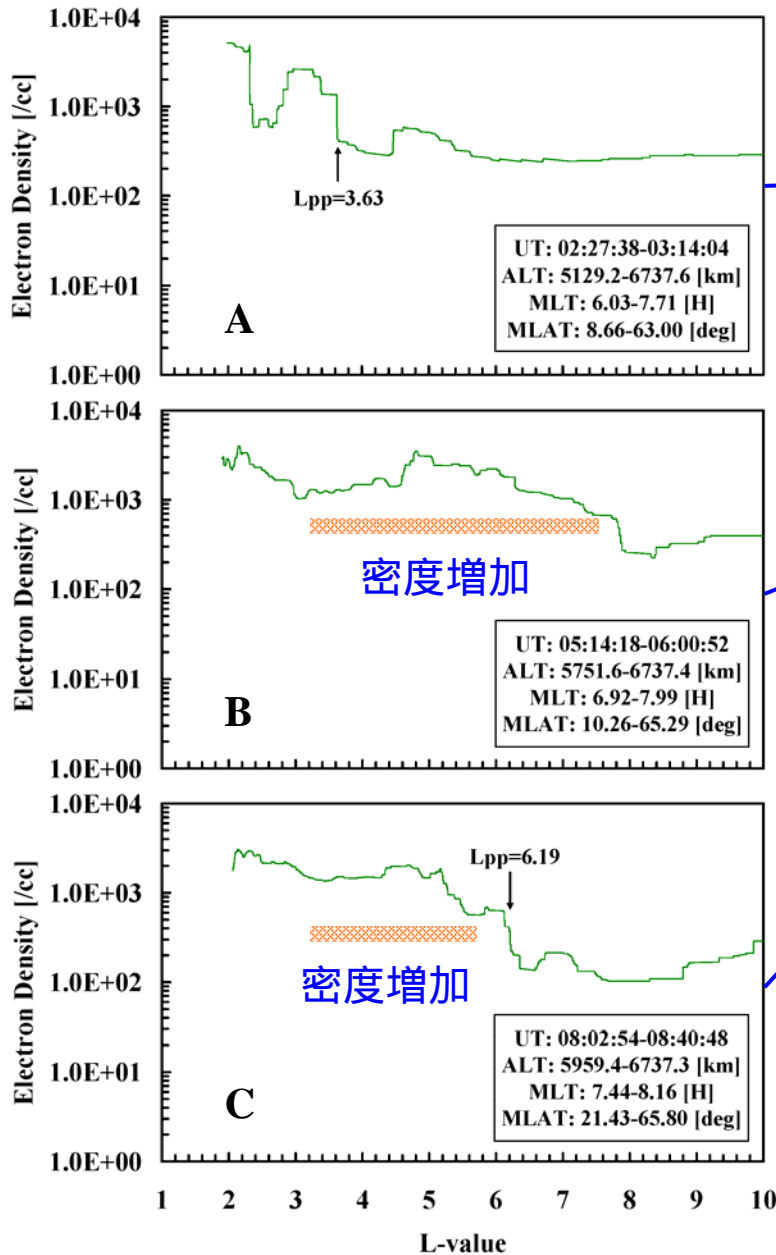
Dusk側：高緯度(60-64度)

Dawn側：低緯度(50-54度)

プラズマ圏界面のMLT依存性と地磁気活動度との関係を反映

SAPSはプラズマ圏界面付近、あるいはtrough領域付近でよく発生

磁気嵐中のプラズマ圏密度の異常増加 (dawn側)



2001年11月6-7日の磁気嵐

主相にてL=3-7のプラズマ圏から
 トラフ領域の電子密度が約1桁程
 度異常増大

Ne=500 /cc Ne=3000 /cc (L=4.8)

SCの直後においてL=2.4-2.8の内
 部プラズマ圏内にinner troughが
 出現

磁気嵐中のプラズマ圏密度の異常増加 (dawn側)

