



中緯度観測による極域電流系の研究

中野 慎也 家森 俊彦

(京都大学大学院理学研究科)

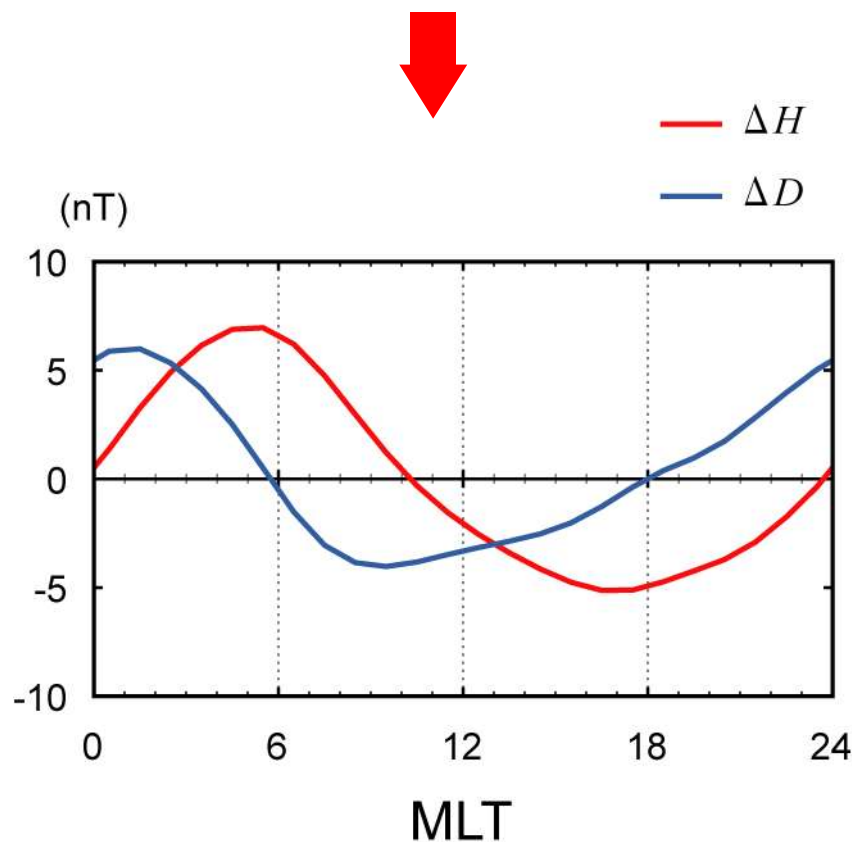
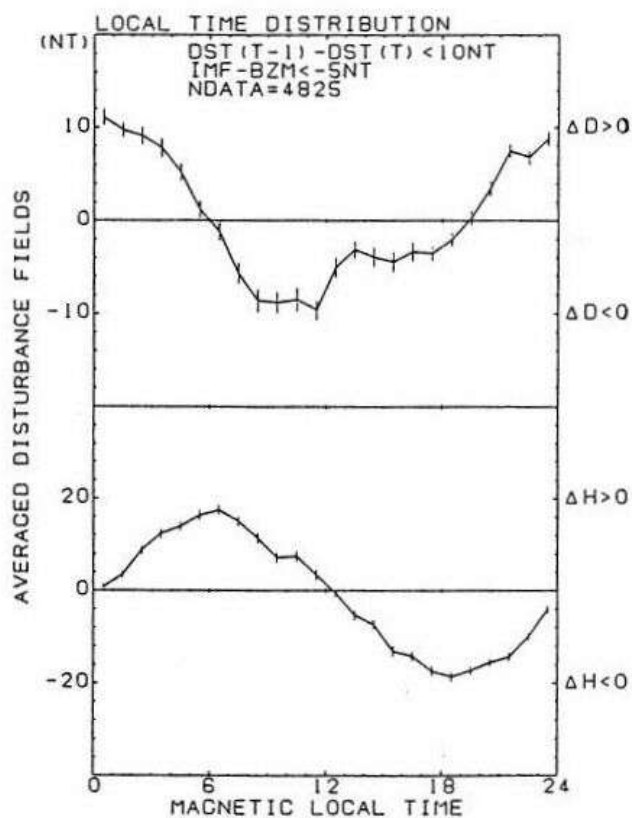
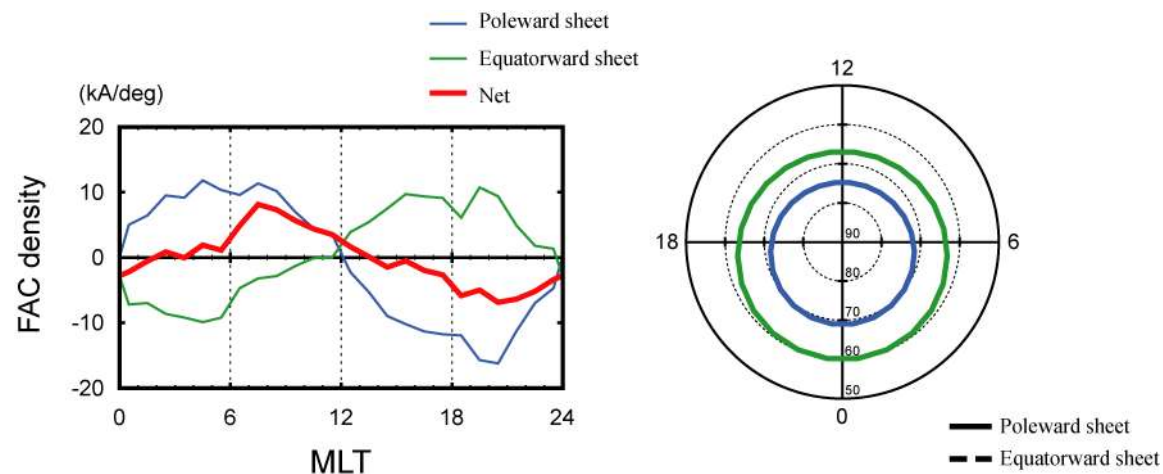
Introduction

極域沿磁力線電流の観測手段として

- 低高度極軌道衛星による磁場観測
 - 時間分解能をあげられない.
- オーロラ帯の磁場データ
 - オーロラ・エレクトロジェットの効果が支配的.

- 中緯度の磁場データ
 - 南北成分（dipole 座標系）
 - ◇ Magnetopause current, ring current, etc.
 - 東西成分
 - ◇ 沿磁力線電流

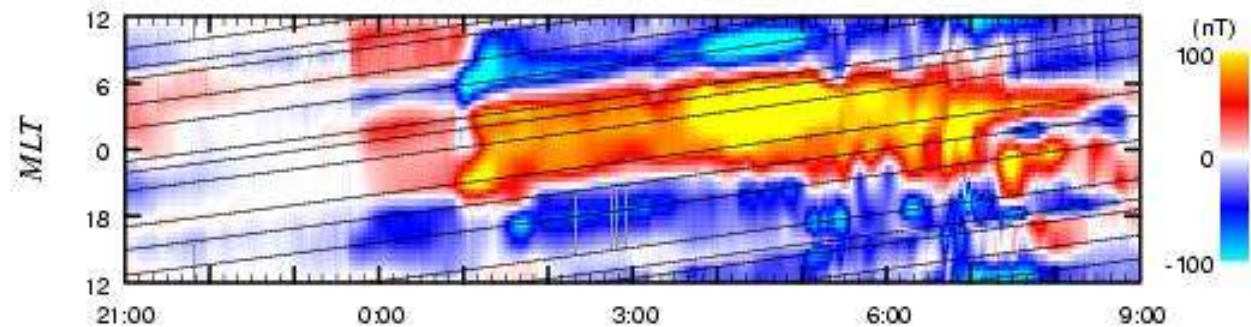
衛星観測で得られた
沿磁力線電流分布によって、
中緯度の地磁気擾乱の地方時
依存はうまく説明できる。



Result of a statistical analysis of mid-latitude
magnetic disturbances (Iyemori 1990)

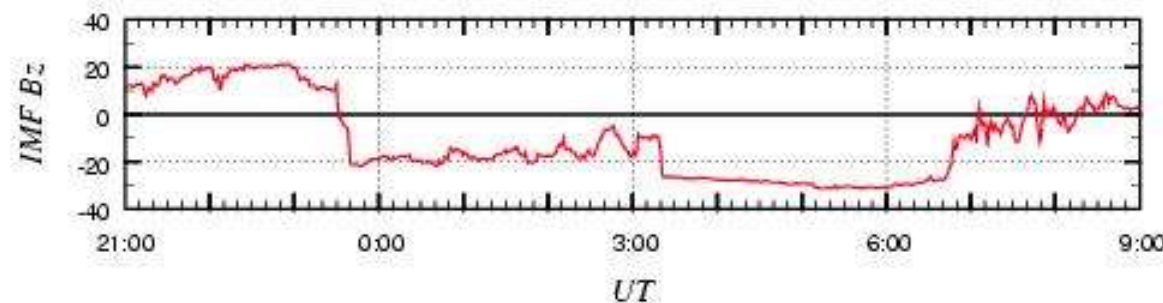
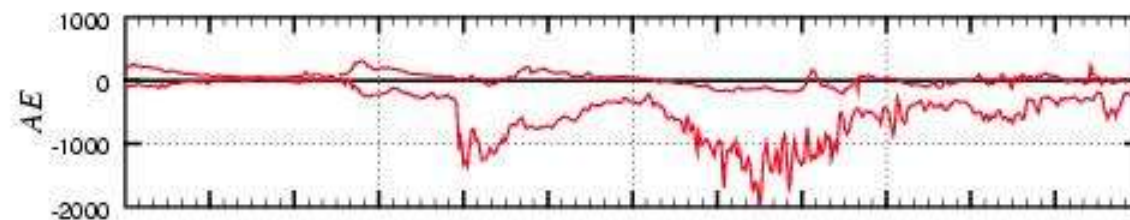
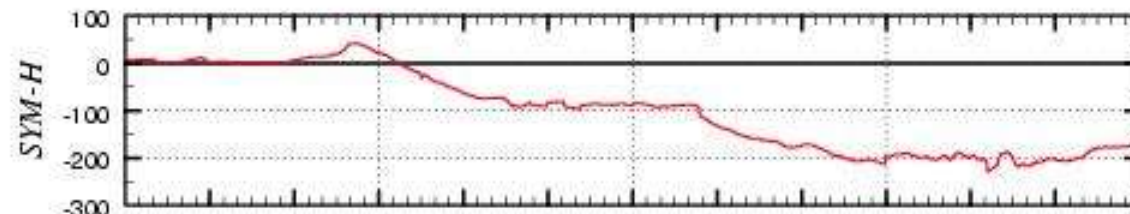
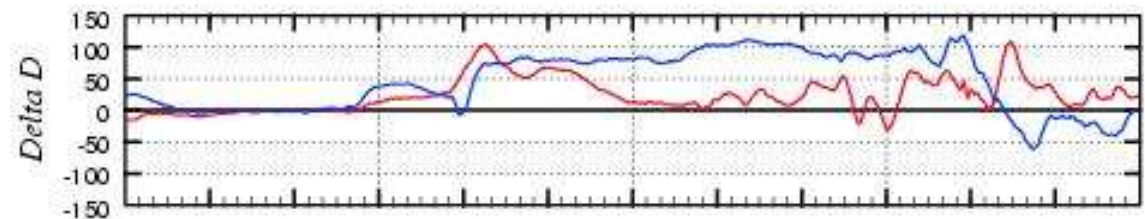
Result of a model calculation

Mid latitudes E-W 21/10/1999



MLT-UT distributoin of
East-west disturbances at
mid-latitudes

赤 : pre-midnight
青 : post-midnight

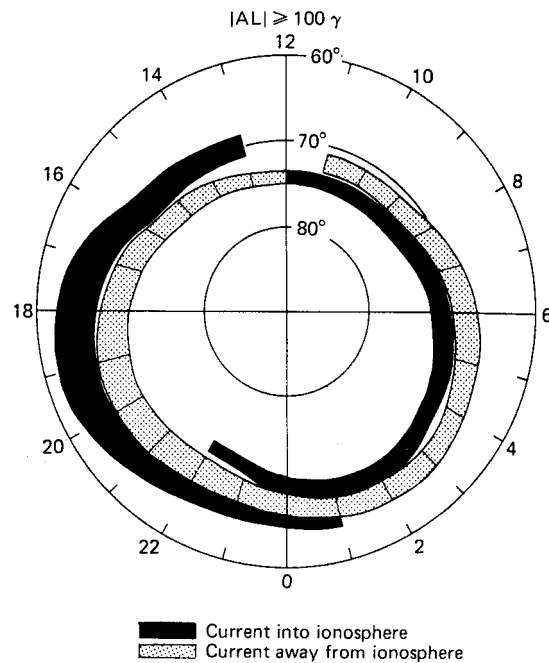


Substorm 時の電流は
10 分程度の時間ス
ケールで変化する.



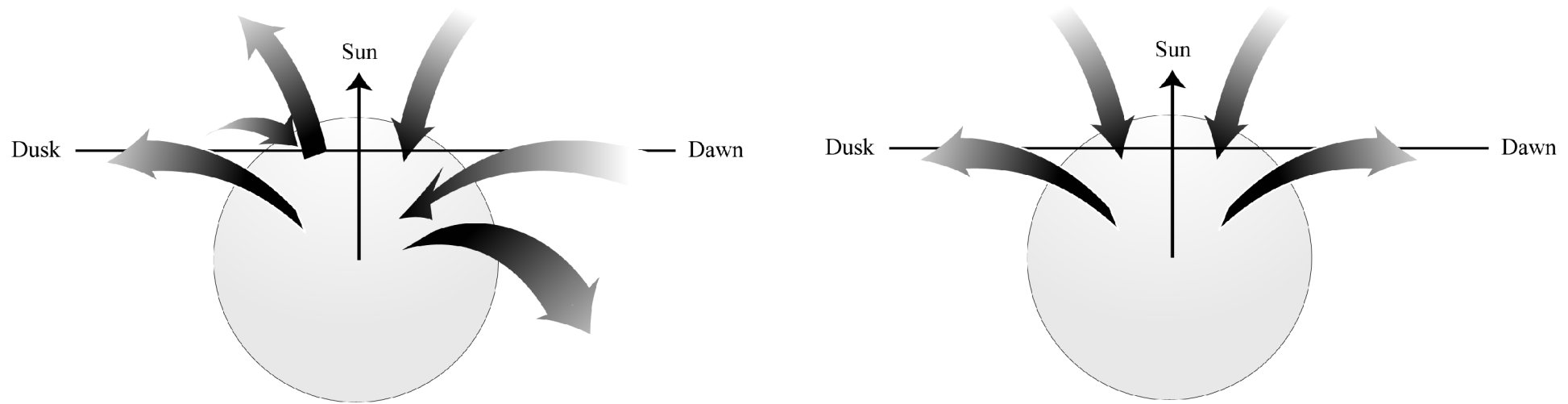
低軌道衛星の観測では
難しい.

そこで、中緯度の地磁気データから沿磁力線電流分布の変動の情報を得ることを考える。



... しかし、沿磁力線電流分布は大雑把に見ても2層構造になっている。

中緯度の磁場変動は、それぞれの層の効果の（低緯度側の電流層の効果に重みをつけた形の）重ね合わせになってしまう。



この2つの電流分布パターンは，中緯度の磁場擾乱の
地方時分布パターンからは区別できない．

... ただし， polar cap には異なる磁場変動をつくる．

Polar cap の磁場水平成分の変動

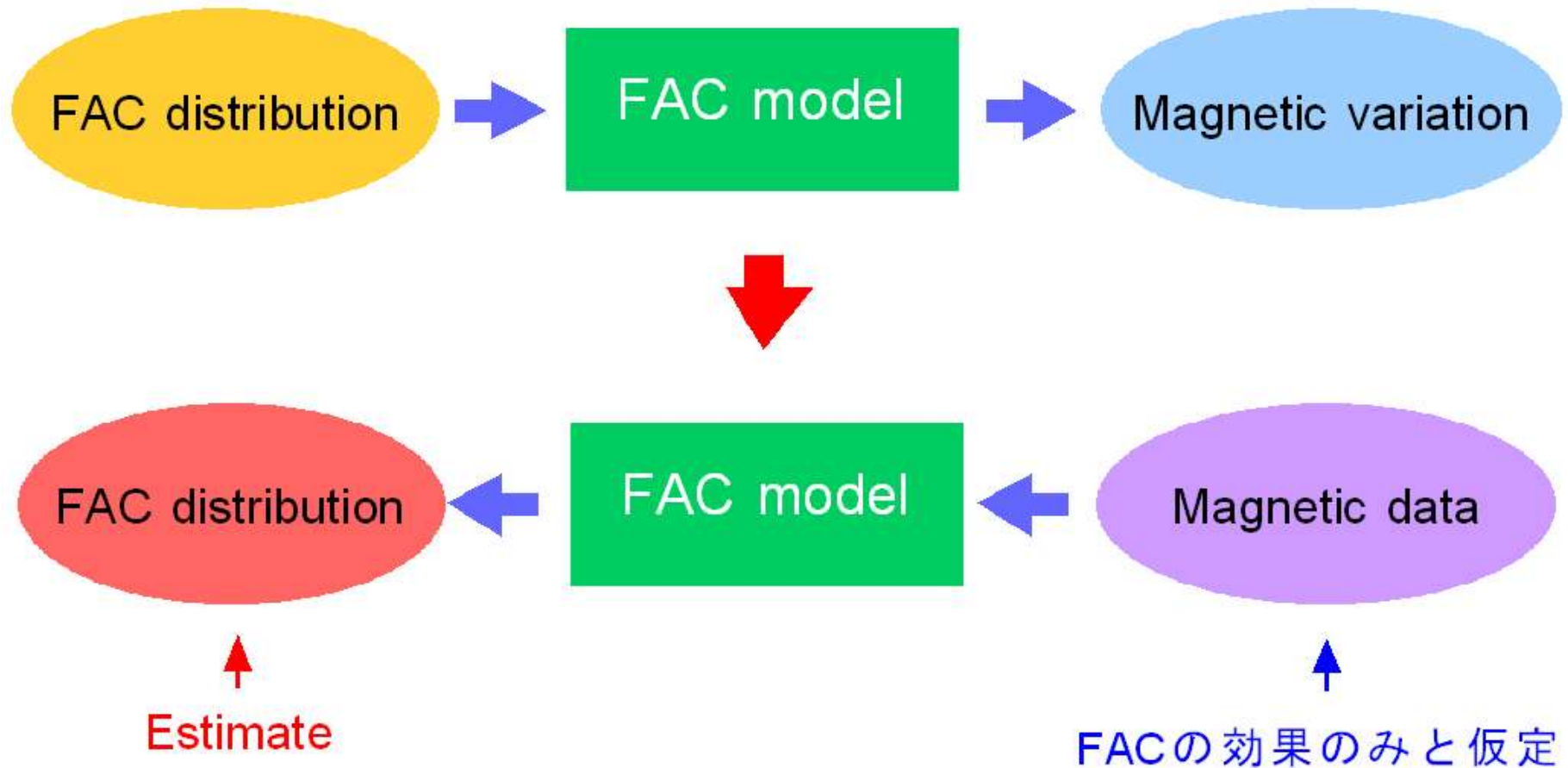
➡ 日陰ではほぼ沿磁力線電流の効果と考えられる.

(電場が 10 mV/m の場合でも, 直上の電離層電流の効果は 2 nT 程度.)



中緯度の地磁気東西成分に加えて, 日陰の polar cap での地磁気水平成分のデータも参照することで, 2層構造をした沿磁力線電流の変動を把握することを考える.

Design of this study



Inversion を使って沿磁力線電流分布の復元を試みる

Data

- 中緯度 15 点の地磁気東西成分のデータ，及び，polar cap 3 点の地磁気水平 2 成分のデータ．
- 同じ月の quiet day の平均を S_q として引いた．

但し，今回解析するのは， polar cap の 3 点がすべて日陰にいる場合のみ．

Field-aligned current model

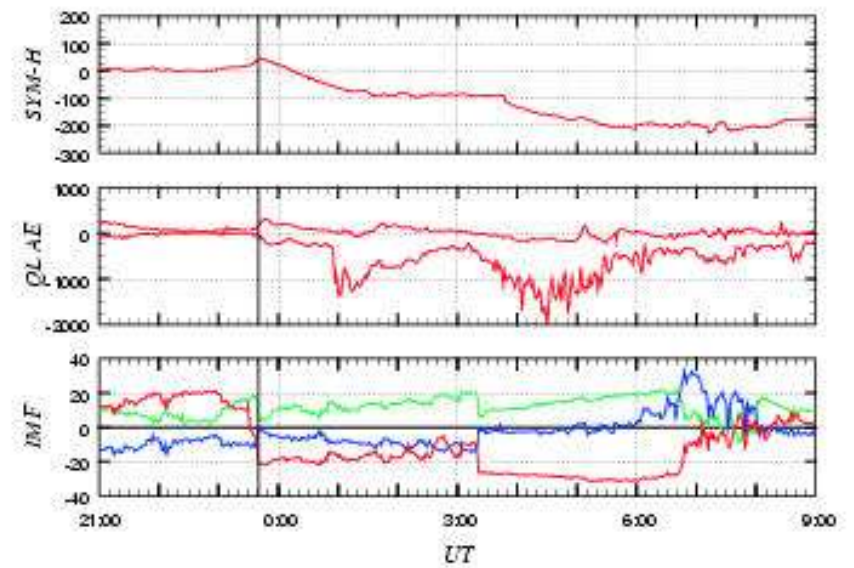
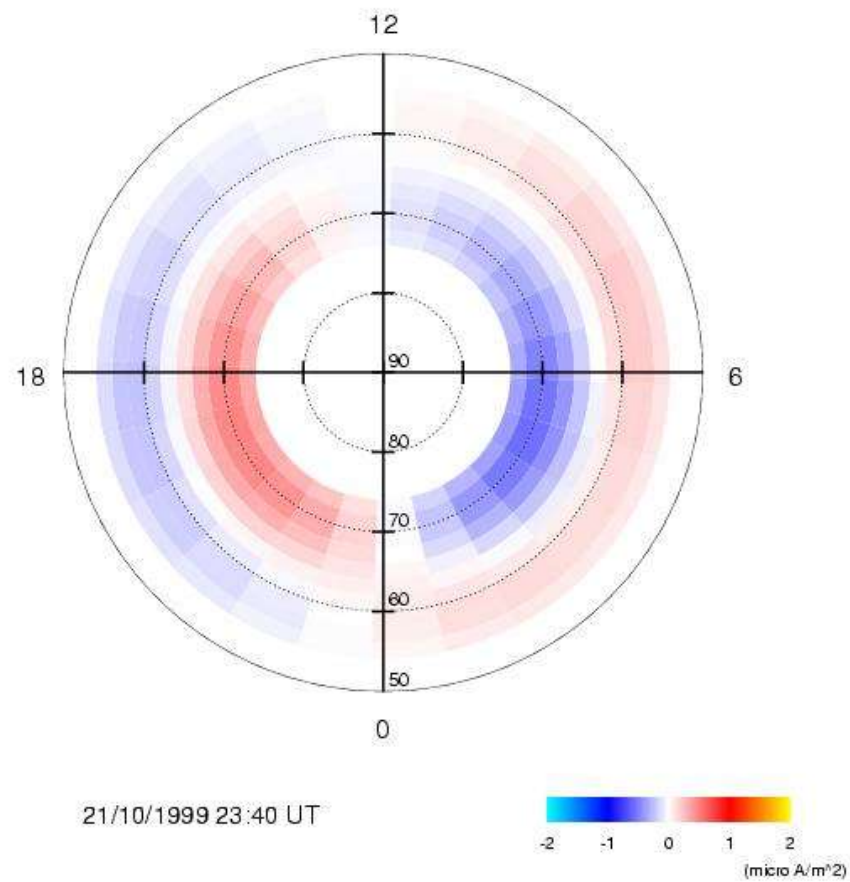
- 沿磁力線電流は， apex latitude で 54 度から 74 度の間に流れると仮定し，この領域を緯度幅 2 度，経度は 15 度の cell に切って電流を分布させる．
- 地球主磁場は， IGRF 2000 modelを与え，沿磁力線電流は地表高度 100km磁力線の頂点との間を，完全に主磁場に沿って流れると仮定．
- 沿磁力線電流分布は南北で対称と仮定．

Assumptions

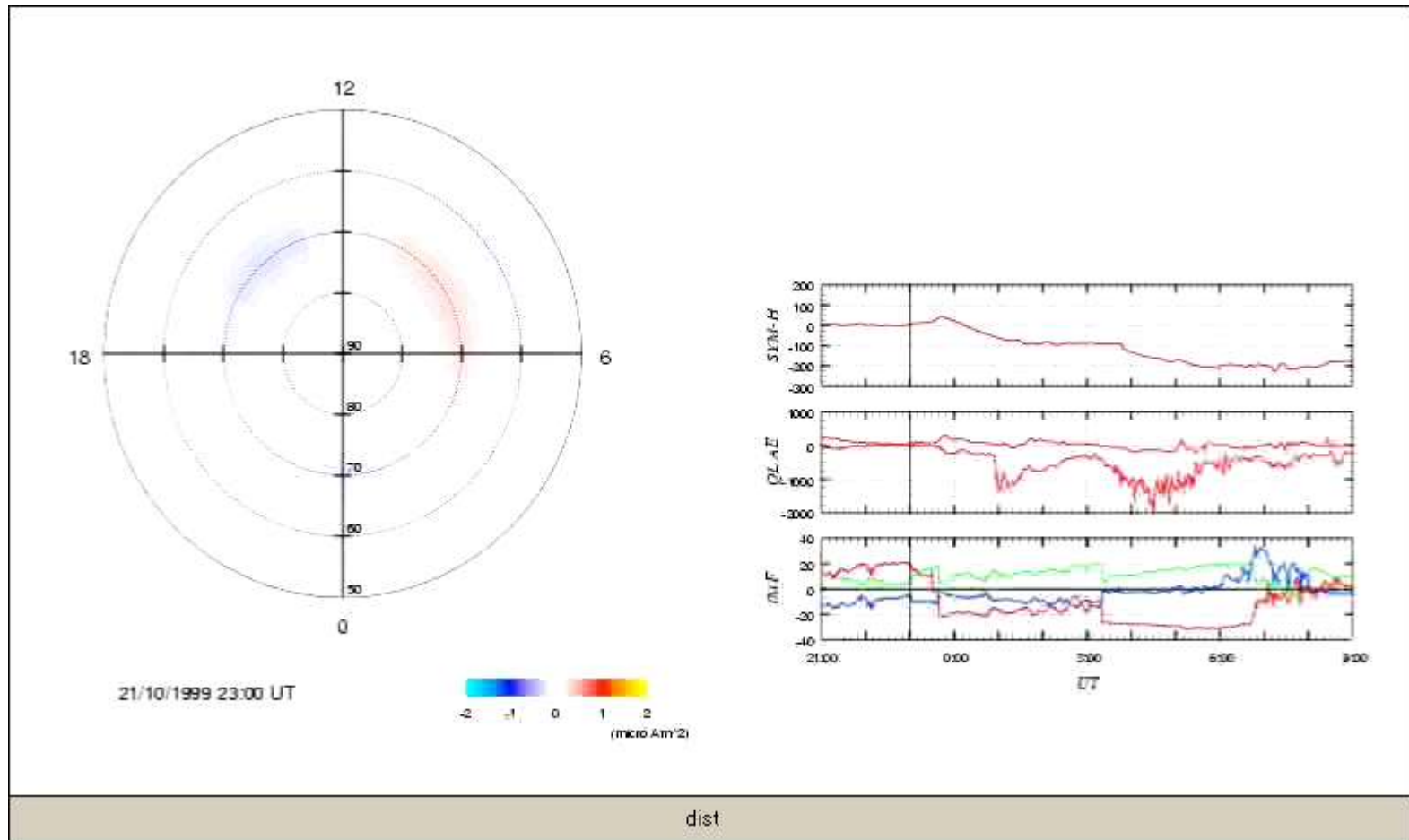
- 沿磁力線電流は，オーロラ帯の中で閉じており，**closure current**の中緯度および極冠域の磁場擾乱への影響は無視できることを仮定し，
- 中緯度，極冠域の磁場擾乱は，ほとんど沿磁力線電流の効果であると仮定する．
- 但し，地球内部の**induction currents**の効果は，外部の効果による磁場の0.5倍と仮定する．

昼側中緯度においては，電離層電流の磁場擾乱への寄与が無視できないと思われるが，今のところ **Sq** 以外の効果は考慮せず，**weight** を小さくすることで対処している．

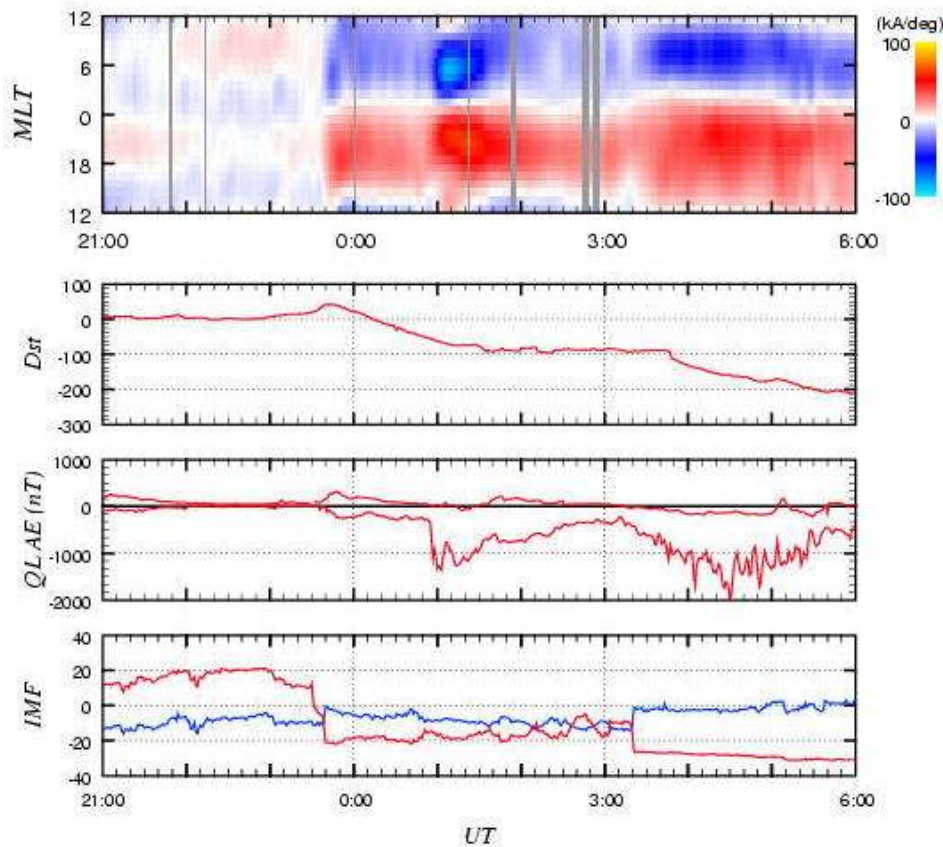
Results



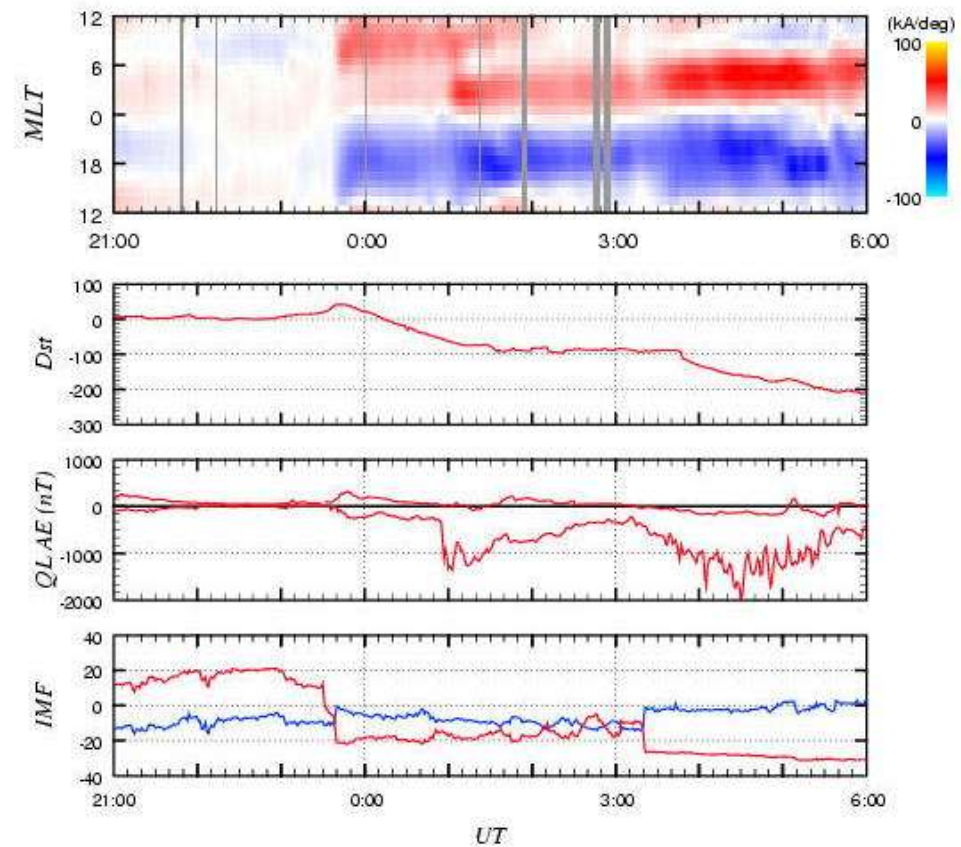
Result



各層の MLT 分布の変化 21-22 Oct. 1999



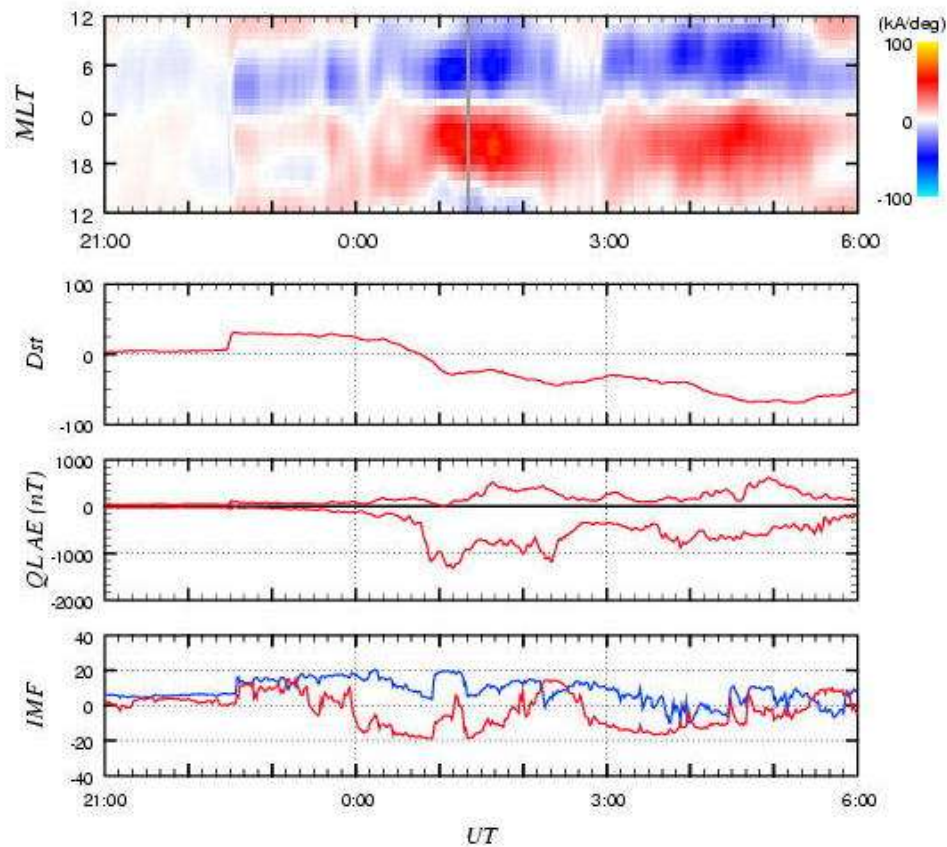
Estimated current intensity
 $\text{Lat} > 66^\circ$



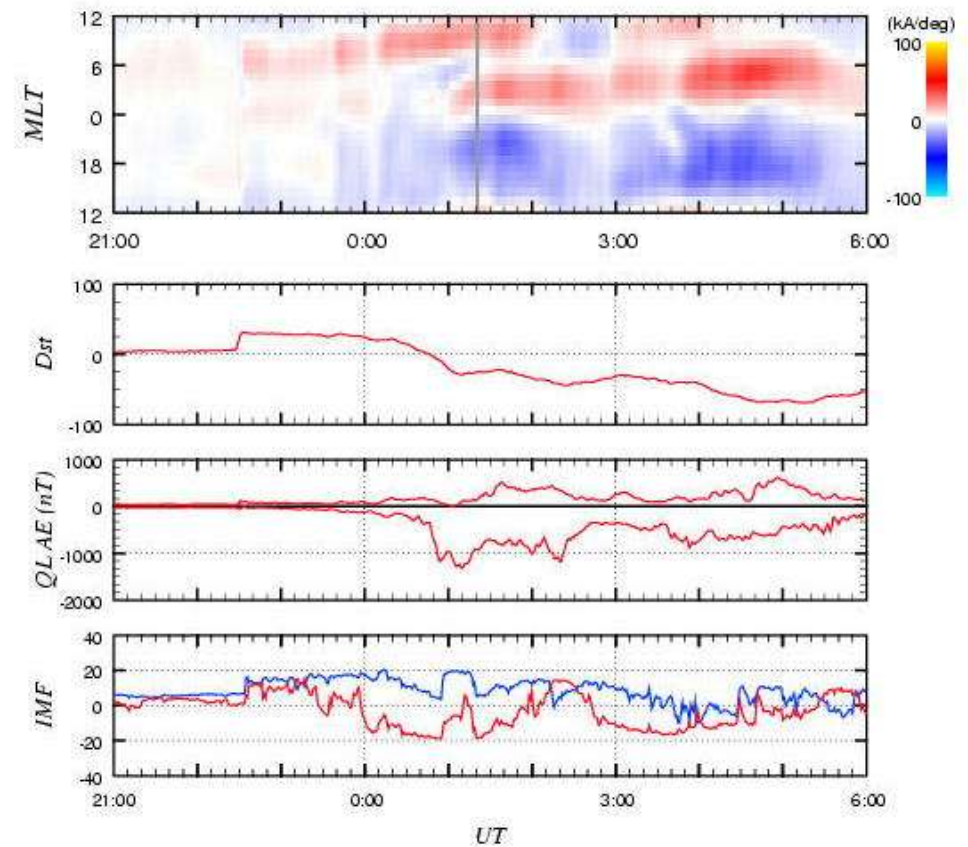
Estimated current intensity
 $\text{Lat} < 64^\circ$

サブストーム時の中緯度の地磁気変動は、夜側 region 1 電流と post-midnight の上向き region 2 電流の両方の発達によるものとして解釈できる。

各層の MLT 分布の変化 12-13 Oct. 2000



Estimated current intensity
 $\text{Lat} > 66^\circ$



Estimated current intensity
 $\text{Lat} < 64^\circ$

問題点

- 昼側（特に午前側）の中緯度電離層電流の扱い.
 - 中緯度電離圏対流，電気伝導度の理解が必要.
→ まだ.
 - 現在は， weight を電離層電気伝導度のモデル値（coutesy of Dr. Takeda）で変化させることで対処.

Summary

- 中緯度の地磁気データは， Large-scale の沿磁力線電流分布の変動を見る上で有用である．
- さらに， Polar cap の磁場データを用いることで， 太陽風磁場が南向きの場合には， region 1, 2 電流のパターンが概ね復元できる．
- 電流の出入り， 磁気圏からのエネルギー流入が常時モニタリングできるかもしれない．
- ただし， 昼側（特に午前側）の中緯度電離層電流の扱いに関しては， 今後検討を要する．

この沿磁力線電流 model を用いて，沿磁力線電流分布と地上磁場変動とを

$$\Delta B_j = \chi \int C(\lambda, \phi) J(\lambda, \phi) d\lambda d\phi \simeq \sum_i C_{ij} J_i \quad (1)$$

のように対応づけ，この沿磁力線電流 model を用いて，任意の分布の沿磁力線電流に対して，各観測点でつくられる磁場変動が計算できるようにする．ここで， ΔB_j が磁場変動， J は各 cell の電流密度で，係数 C は Biot-Savart's law によって計算する．Eq. (1) を行列表示すると，

$$\mathbf{b} = \mathbf{CJ}. \quad (2)$$

$\mathbf{b}$ は， ΔB_j を vector の形にしたもの．実際に用いたデータは，中緯度の東向き成分 15 個と polar cap 3 点の 2 成分とで計 21 個なので， $\mathbf{b}$ の次元も 21 になる．

沿磁力線電流分布の推定は、以下のようにする.

1. $\|\mathbf{b} - C\tilde{\mathbf{J}}\|$ を最小化 ($\tilde{\mathbf{J}}$ は電流分布の推定値).
2. 電流分布が滑らかになるようにするための条件も加える. ここでは, 凹凸具合を

$$\text{roughness} = \sum_i \left(\tilde{J}_i - \frac{\tilde{J}_{i,E} + \tilde{J}_{i,W} + \tilde{J}_{i,N} + \tilde{J}_{i,S}}{4} \right)^2 \quad (3)$$

のように定義し, これを最小化することにする. $\tilde{J}_{i,E}, \tilde{J}_{i,W}, \tilde{J}_{i,N}, \tilde{J}_{i,S}$ は, cell i に隣り合う4つのcellである.

結局,

$$(\mathbf{b} - C\tilde{\mathbf{J}})^T(\mathbf{b} - C\tilde{\mathbf{J}}) + \xi^2 \tilde{\mathbf{J}}^T R \tilde{\mathbf{J}} \rightarrow \min. \quad (4)$$

という条件を満たすような $\tilde{\mathbf{J}}$ を求めるという形で, 電流分布を推定する ($\tilde{\mathbf{J}}^T R \tilde{\mathbf{J}}$ は, Eq. (3) を2次形式表記にただけのもの). Eq. (4) の解は,

$$\tilde{\mathbf{J}} = \underline{(C^T C + \xi^2 R)^{-1} C^T \mathbf{b}}. \quad (5)$$



この行列を計算しておけば, 磁場データから瞬時に
電流分布の推定値が得られる.