

SuperDARNを用いた磁気嵐に伴う中緯度 電離圏プラズマ対流の変動特性の研究

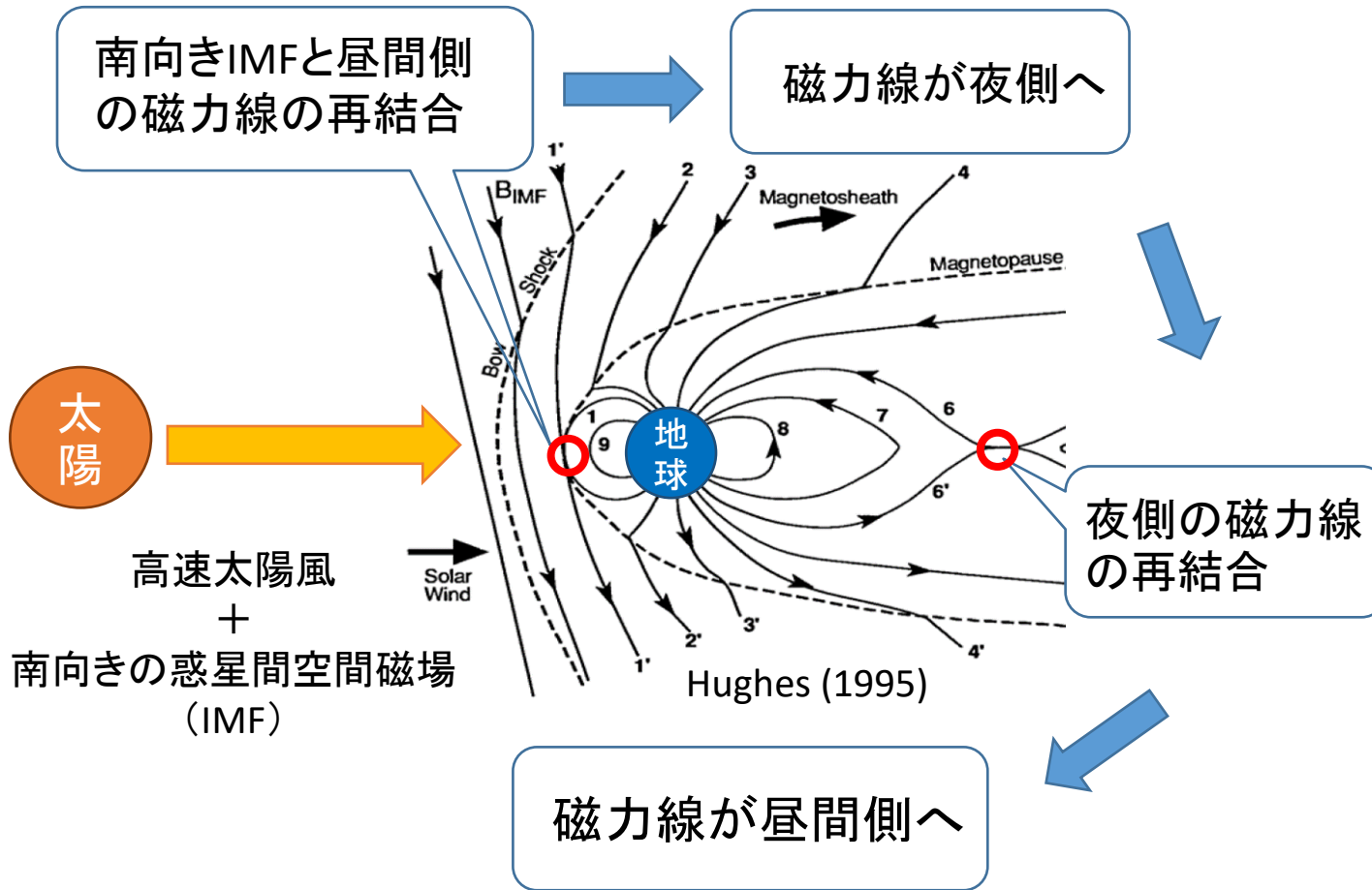
大森康平[1] 西谷望[1] 堀智昭[1] Simon Shepherd[2]

[1] 名古屋大学宇宙地球環境研究所

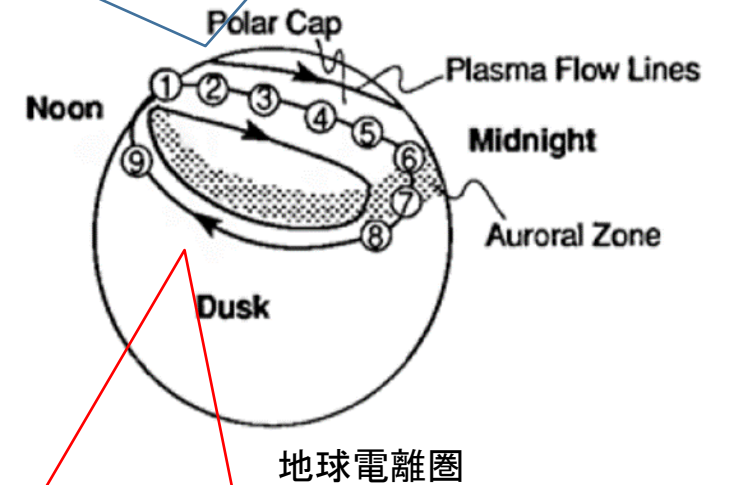
[2] Thayer School of Engineering, Dartmouth College, Hanover, NH, USA

研究背景 — 磁気嵐時の電離圏対流 —

磁気嵐時の地球近傍の磁場の流れ



高緯度電離圏(磁気緯度~60度以上)
磁気圏の対流に対応して2セルのプラズマ対流(高緯度対流)が形成される



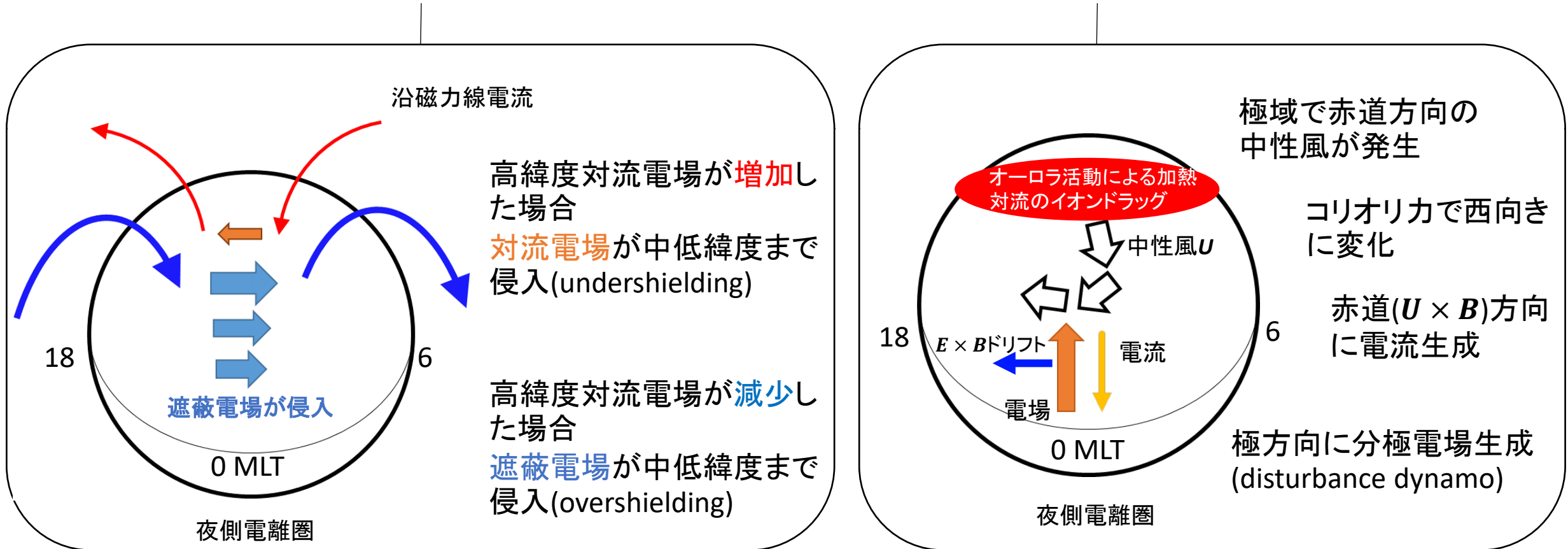
中緯度電離圏(磁気緯度~40-60度)
高緯度対流の増減に伴う高緯度からの電場侵入や中性大気の擾乱に伴う電場によってプラズマ対流が変動

今回の研究対象

研究背景 —磁気嵐時の電離圏対流—

中緯度電離圏対流の主な変動要因は、

高緯度対流の増減に伴う高緯度からの電場侵入 と **中性大気の擾乱に伴う電場** による $E \times B$ ドリフト



これらの現象がどのような期間・緯度・磁気地方時(MLT)で現れるかを解明することが重要

動機と目的

先行研究

- Kumar et al. (2010)
 - 磁気緯度49度での電離圏プラズマドリフト観測を用い、磁気嵐発生前後の平均的な電離圏対流変動を示した。
 - **単一の緯度**における解析であり、緯度方向の変動は見るできない
- Zou & Nishitani(2014)
 - 磁気緯度40-60度にわたる電離圏プラズマドリフト観測を用い、複数の緯度範囲にわたるプラズマドリフト変動の解析を試みた。
 - 磁気嵐数が少なく、十分なデータが得られなかった。



- ✓ 磁気嵐に伴う**中緯度電離圏対流**における**緯度方向の変動**に関しては、まだ十分な理解が得られていない

目的

磁気嵐による中緯度電離圏プラズマ対流の統計的な変動特性を複数の緯度にわたって示し、その変動メカニズムについて理解する

観測機器・データ

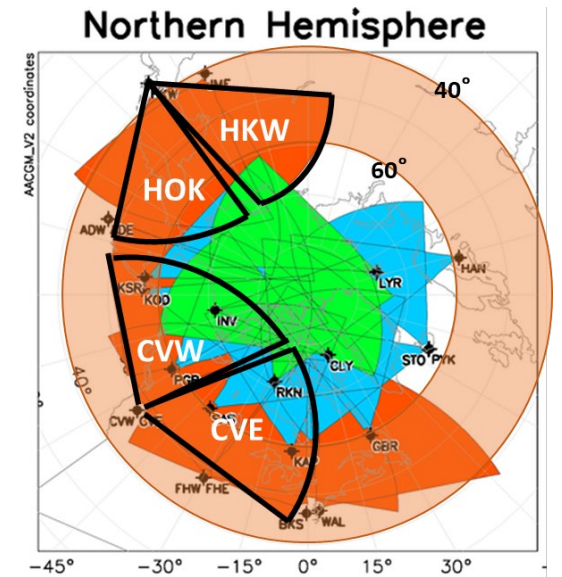
Super Dual Auroral Radar Network (SuperDARN)

- 国際的な大型短波レーダーネットワーク
- 電離圏プラズマドリフトの視線方向の速度を観測

Radar	磁気緯度 [°]	使用期間
Hokkaido East (HOK)	37.3	2006/12/1-2022/12/31
Hokkaido West (HKW)	37.3	2014/12/1-2022/12/31
Christmas Valley East (CVE)	49.5	2011/1/1-2022/12/31
Christmas Valley West (CVW)	49.5	2011/1/1-2022/12/31



SuperDARNレーダーのアンテナ



北半球SuperDARNレーダーの視野
http://vt.superdarn.org/tiki/assets/pages/fov/all/allfovs_20191027.png

各種指数

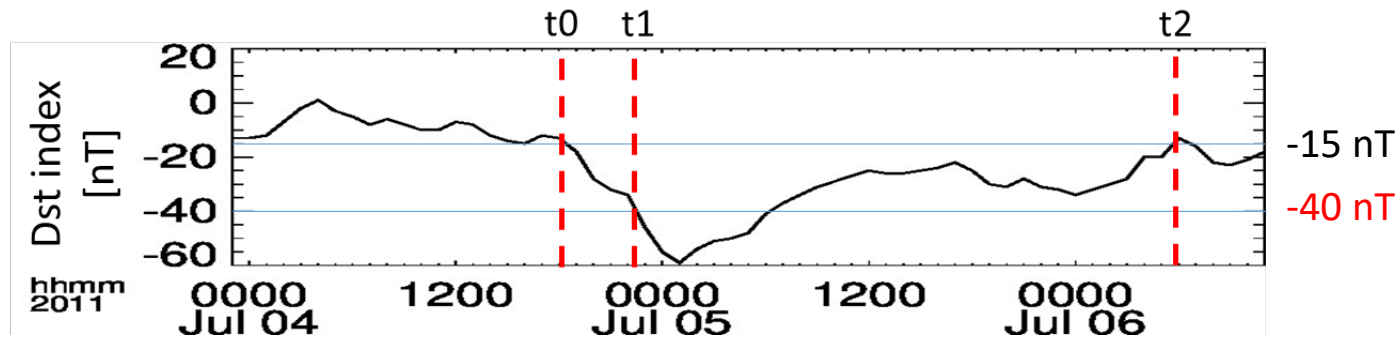
Data	Source
Dst指数	World Data Center for Geomagnetism, Kyoto https://wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp/index-j.html
IMF Bz	NASA's Space Physics Data Facility https://spdf.gsfc.nasa.gov/
極冠域電位差(CPCP)	SuperDARN potential map

解析手法

—磁気嵐時のドリフト速度に対するSuperposed epoch analysis—

磁気嵐の探索

- 使用データ: Dst指数
- 探索方法
 1. Dst指数が-40 nT以下となる時刻(t1)を探索。
 2. t1からさかのぼり、Dst指数が-15nTを上回る時刻を磁気嵐のオンセット時刻(t0)とする。
 3. t1以降Dst指数が再び-15 nTを上回る時刻から1. の探索を再開。



探索期間	2006年12月1日-2022年12月31日
磁気嵐数	263

解析手法 — 磁気嵐時のドリフト速度に対するSuperposed epoch analysis —

SuperDARNデータの処理

- SuperDARNの視線方向速度から東西方向のプラズマドリフト速度(dV_{zonal})を算出
- 以下より、磁気嵐による東西方向の速度の変動量(dV_{zonal})を算出

$$\underline{dV_{zonal}} = \underline{V_{zonal}} - \underline{V_{q\ zonal}}$$

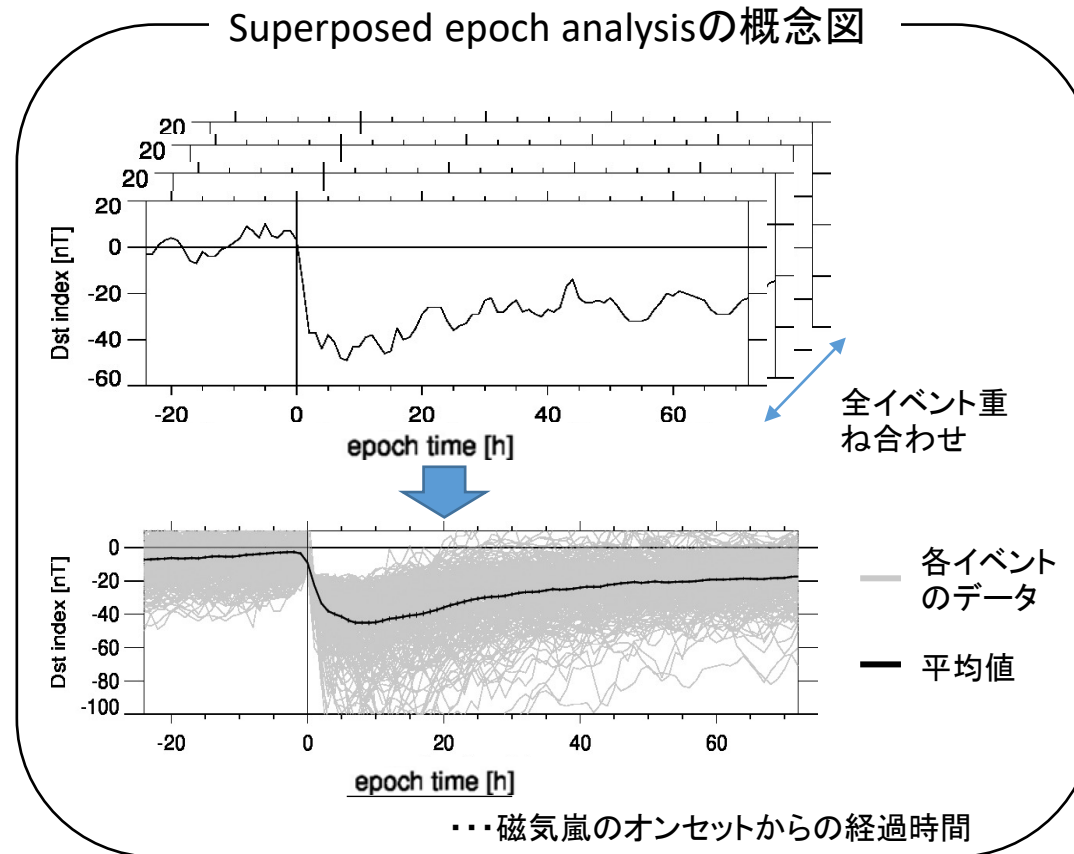
東西速度の変動量 磁気嵐時の東西速度 静穏時の東西速度

Time interval	Latitude interval	Longitude interval
1 h	1° MLAT	1h MLT

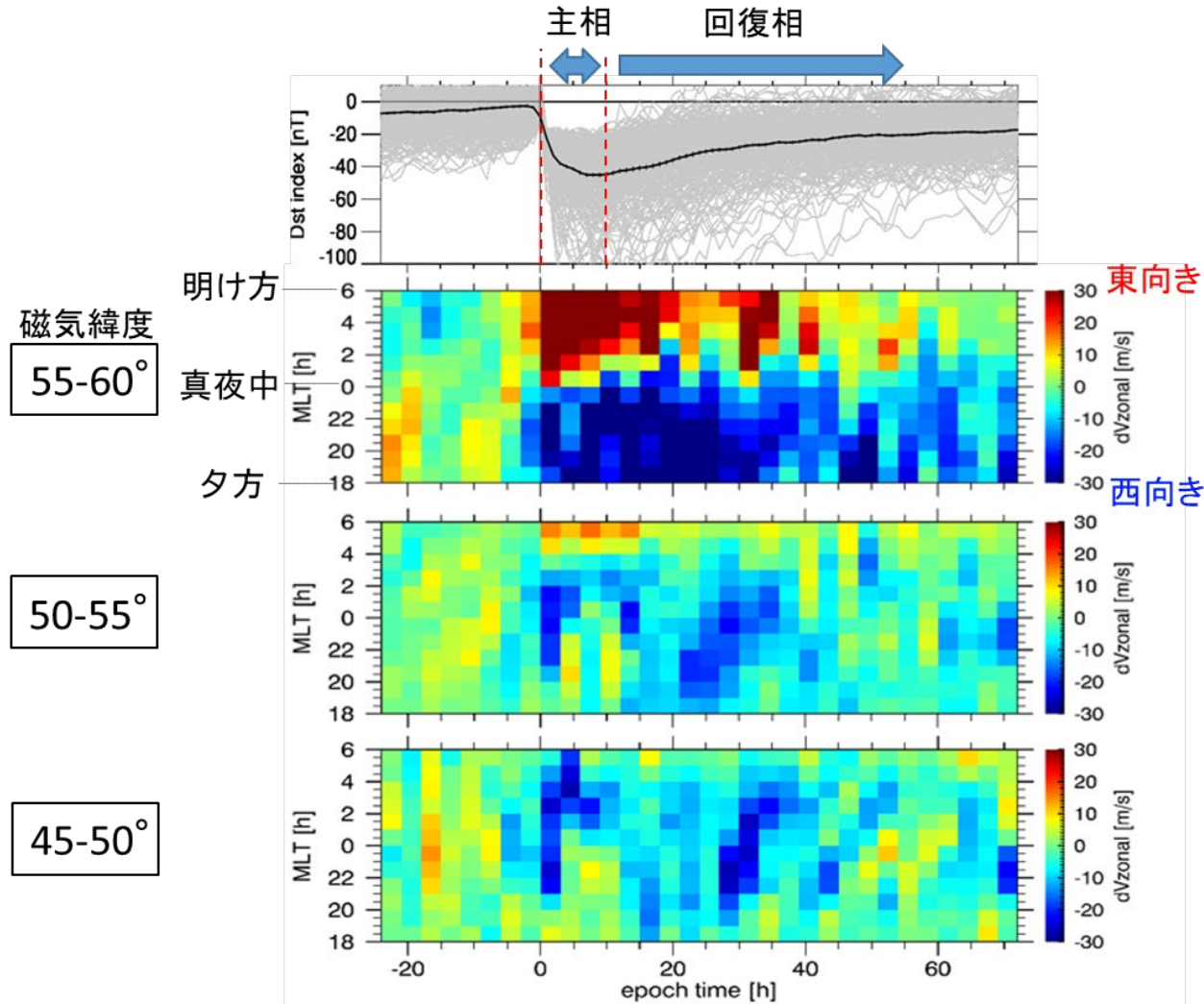
Superposed epoch analysisにより、 dV_{zonal} 及び各種指数の平均的な変動を算出

- 磁気嵐のオンセット時刻を基準として、1時間ごとの平均の dV_{zonal} 及び各種指数を算出

Superposed epoch analysisの概念図



解析結果



Dst指数及び東西方向ドリフト速度の時間・MLT変化

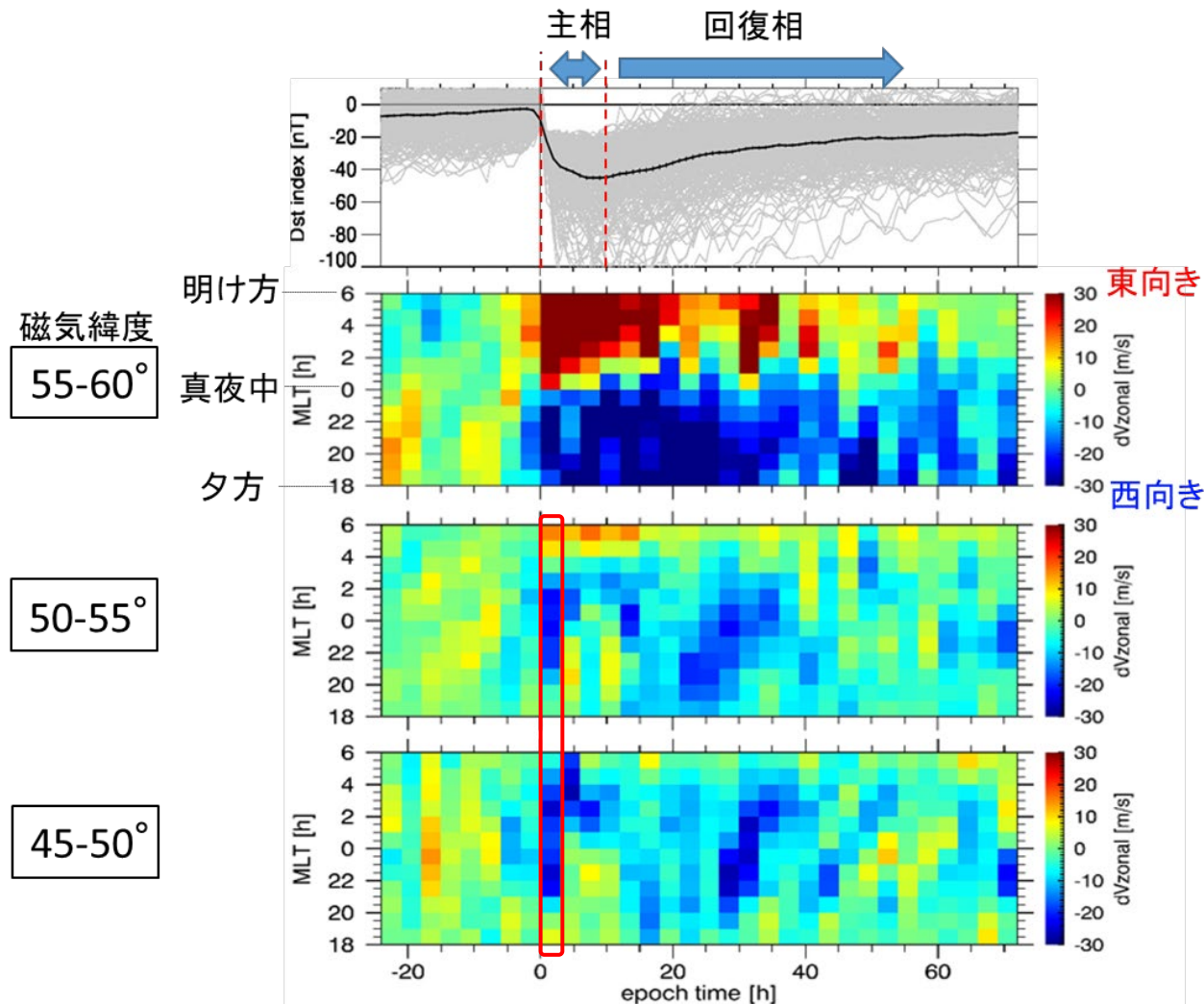
磁気緯度55-60度

- 夕方側で西向き、明け方側で東向きの高緯度対流パターンが数十時間継続

磁気緯度45-50度、50-55度

- 時間によって異なるドリフトパターンが見られる

解析結果



Dst指数及び東西方向ドリフト速度の時間・MLT変化

磁気緯度55-60度

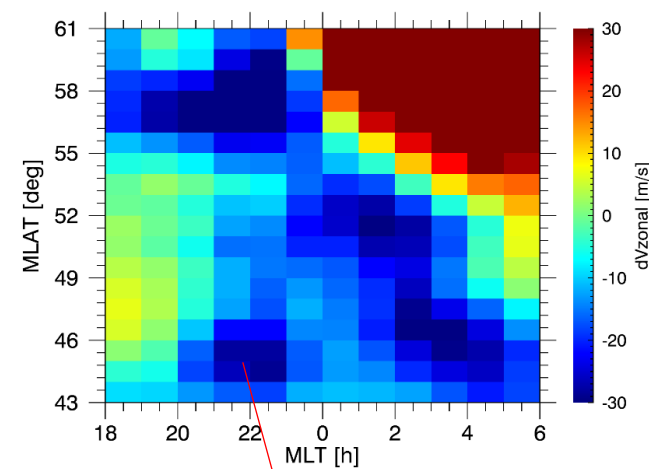
- 夕方側で西向き、明け方側で東向きの高緯度対流パターンが数十時間継続

磁気緯度45-50度、50-55度

- 時間によって異なるドリフトパターンが見られる

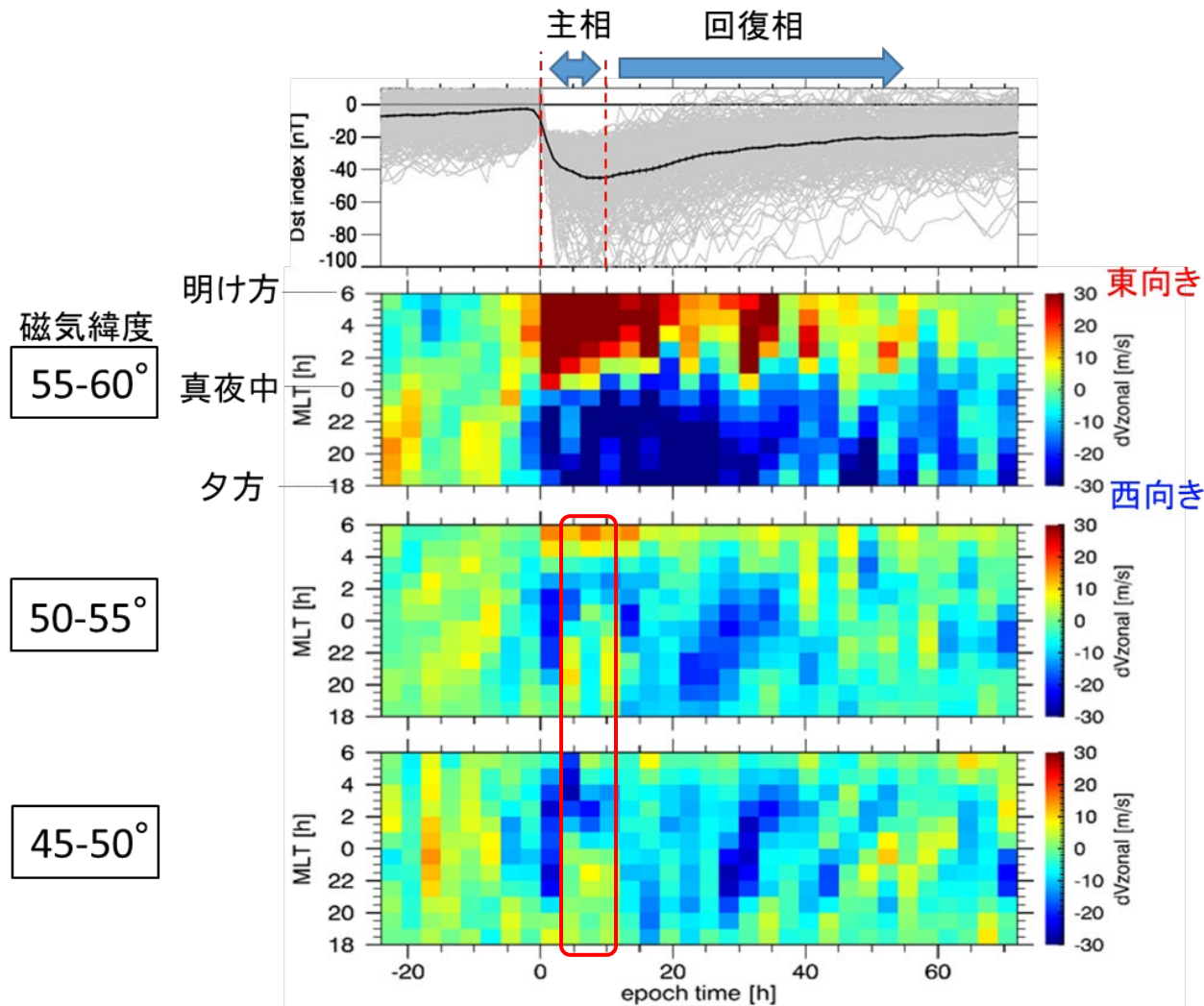
1. オンセット時刻付近(epoch time~ 0-3 h)

- ~20-6 MLTで西向きドリフト速度が増加



- 真夜中前の低緯度側で西向きドリフトが大きい

解析結果



Dst指数及び東西方向ドリフト速度の時間・MLT変化

磁気緯度55-60度

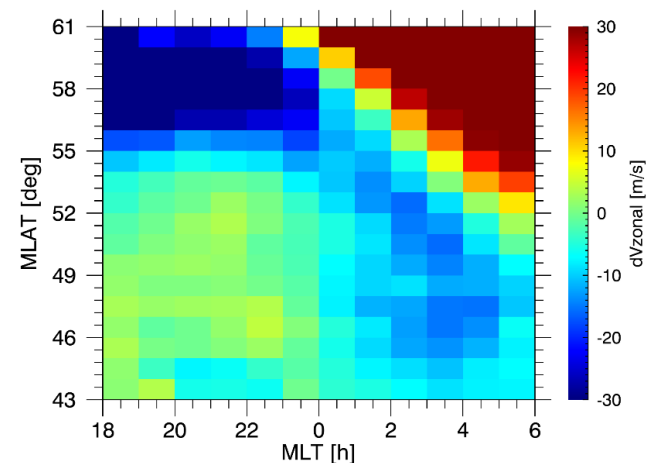
- 夕方側で西向き、明け方側で東向きの高緯度対流パターンが数十時間継続

磁気緯度45-50度、50-55度

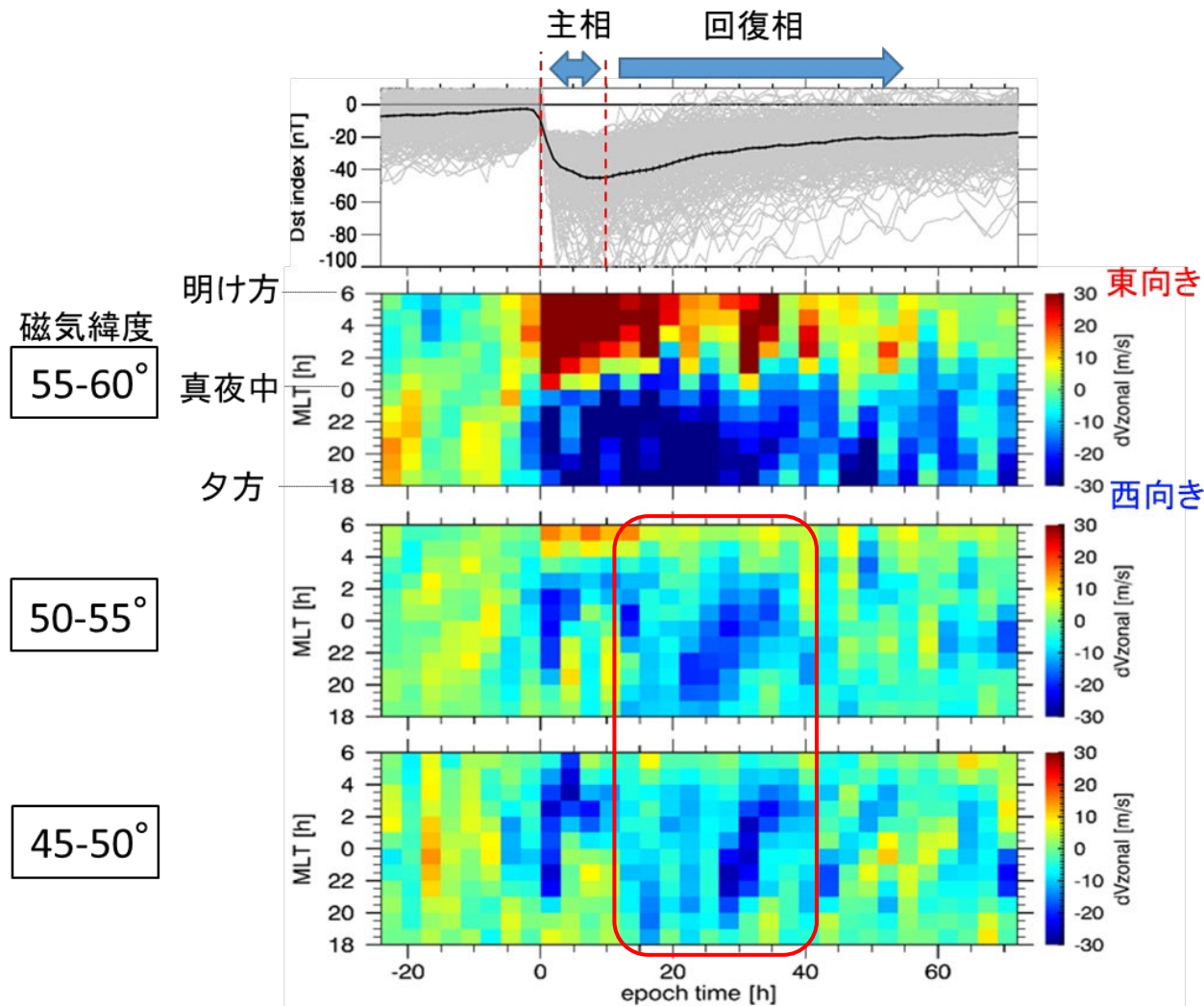
- 時間によって異なるドリフトパターンが見られる

2. 主相-回復相初期(epoch time~3-12 h)

- 夕方側で東向き、明け方側で西向きのプラズマドリフトが見られる



解析結果



Dst指数及び東西方向ドリフト速度の時間・MLT変化

磁気緯度55-60度

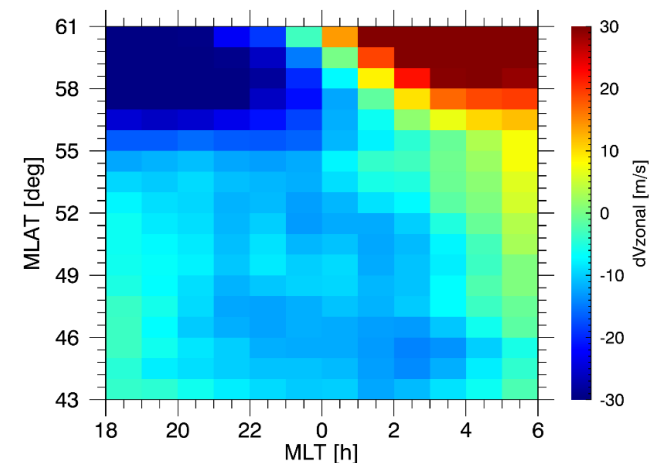
- 夕方側で西向き、明け方側で東向きの高緯度対流パターンが数十時間継続

磁気緯度45-50度、50-55度

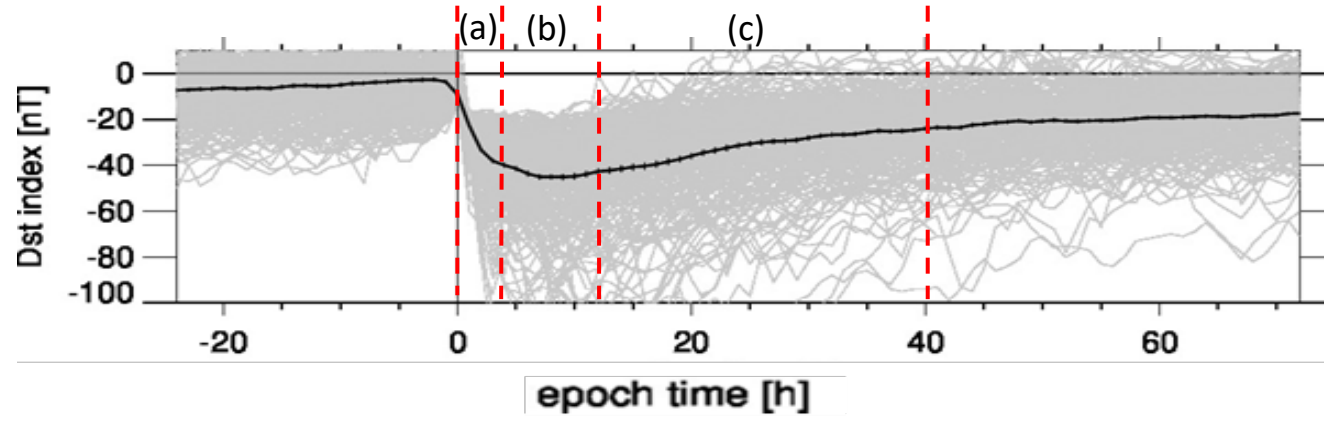
- 時間によって異なるドリフトパターンが見られる

3. 回復相後期(epoch time~12-40 h)

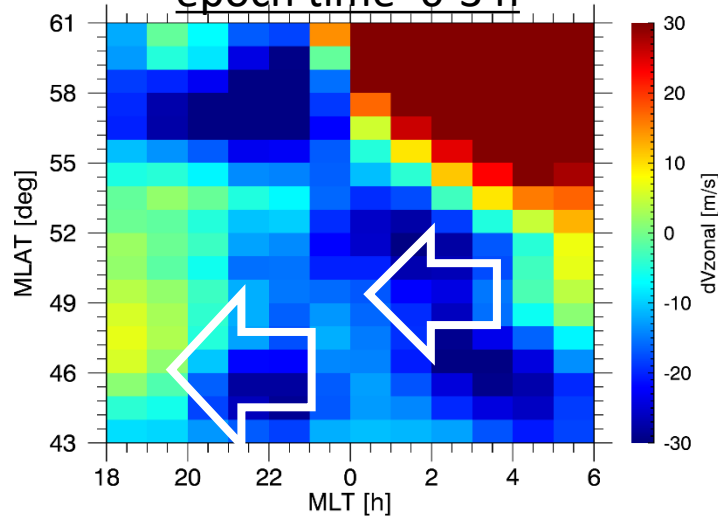
- 夜側全体で西向きのプラズマドリフトが見られる



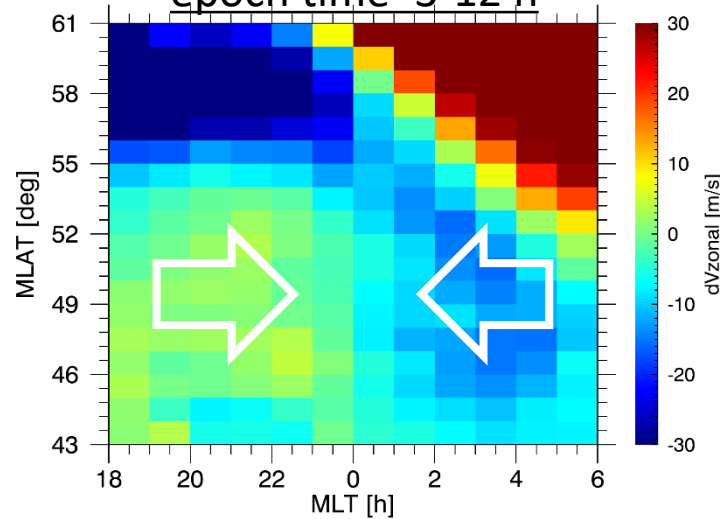
解析結果



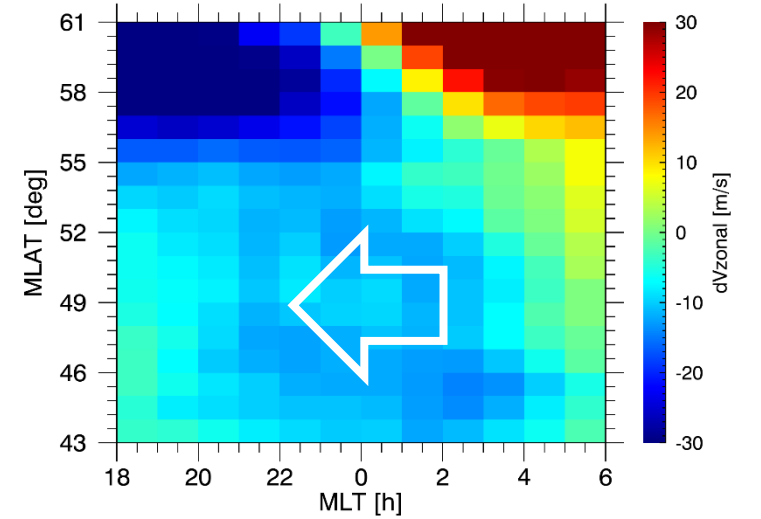
(a) オンセット時刻付近
epoch time=0-3 h



(b) 主相-回復相初期
epoch time=3-12 h



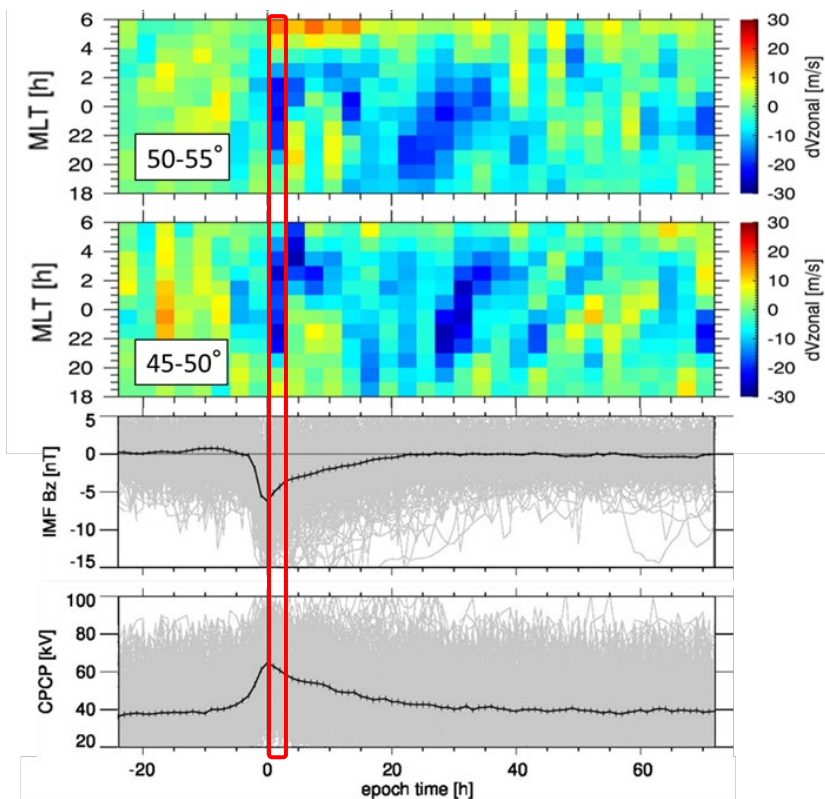
(c) 回復相後期
epoch time=12-40 h



考察

1. オンセット時刻付近における西向きドリフトについて

- 南向きIMFとCPCPがオンセット付近で極大
 - ⇒ 高緯度対流電場の侵入 (**undershielding**) が西向きドリフトを増強している可能性がある



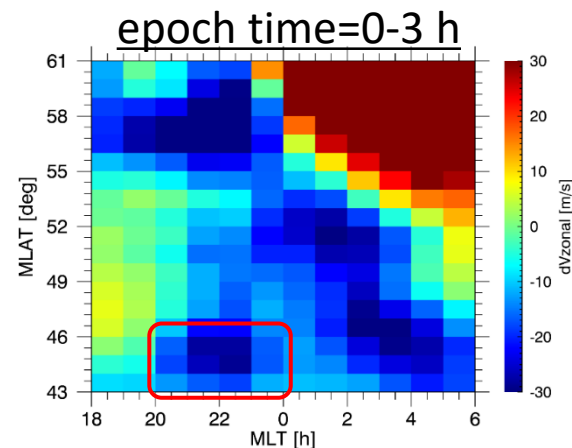
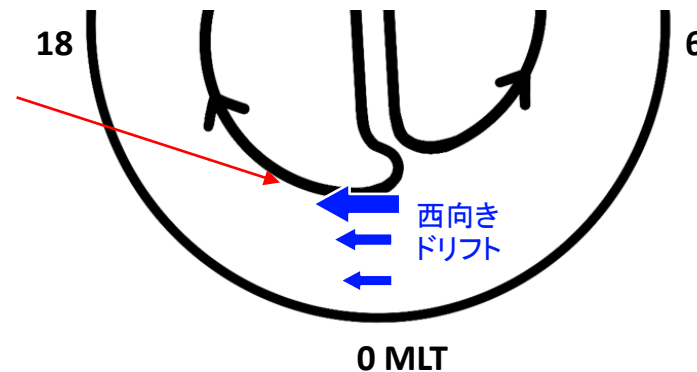
東西方向ドリフト速度の時間・MLT変化
及びIMF Bz, CPCPの時間変化

- 先行研究より
 - 地磁気擾乱時、夕方側の高緯度対流セルが真夜中後まで拡大 (Thomas & Shepherd, 2018)
 - ⇒ 真夜中後まで西向きドリフト拡大

- Undershieldingによる西向きドリフトは**高緯度側の方が大きい** (Fejer & Scherliess, 1998)
 - ⇒ 本研究の結果と一致しない

- 磁気嵐の主相には通常の2つの沿磁力線電流系よりも多くの電流構造が現れる場合がある (Ebihara et al., 2005)
 - ⇒ 緯度方向に複雑な電場を形成する可能性がある

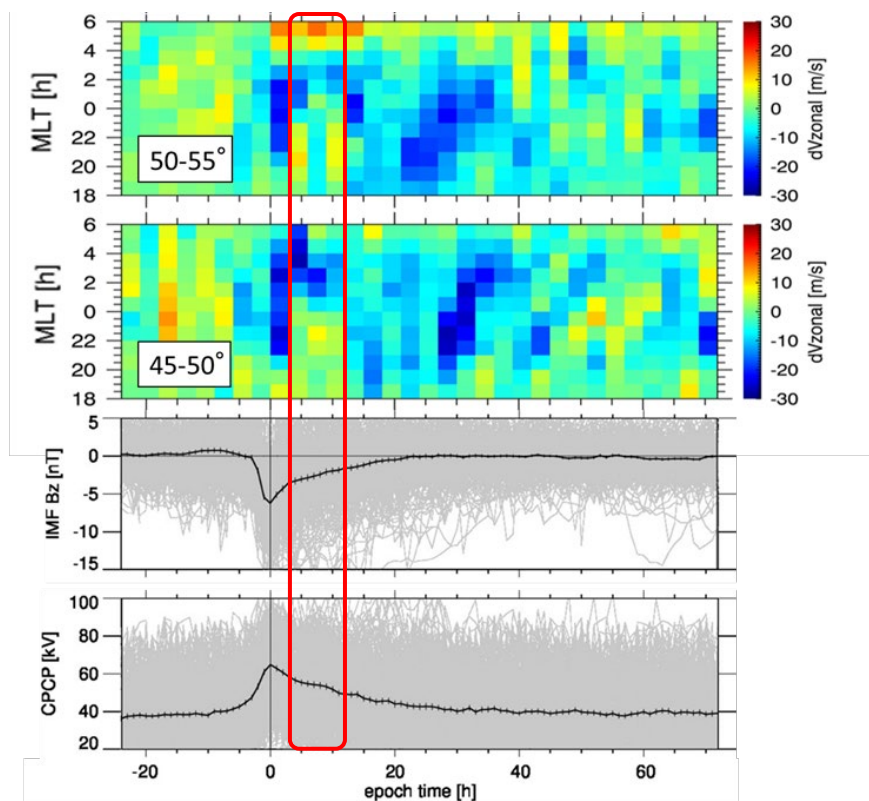
地磁気擾乱時の高緯度対流



考察

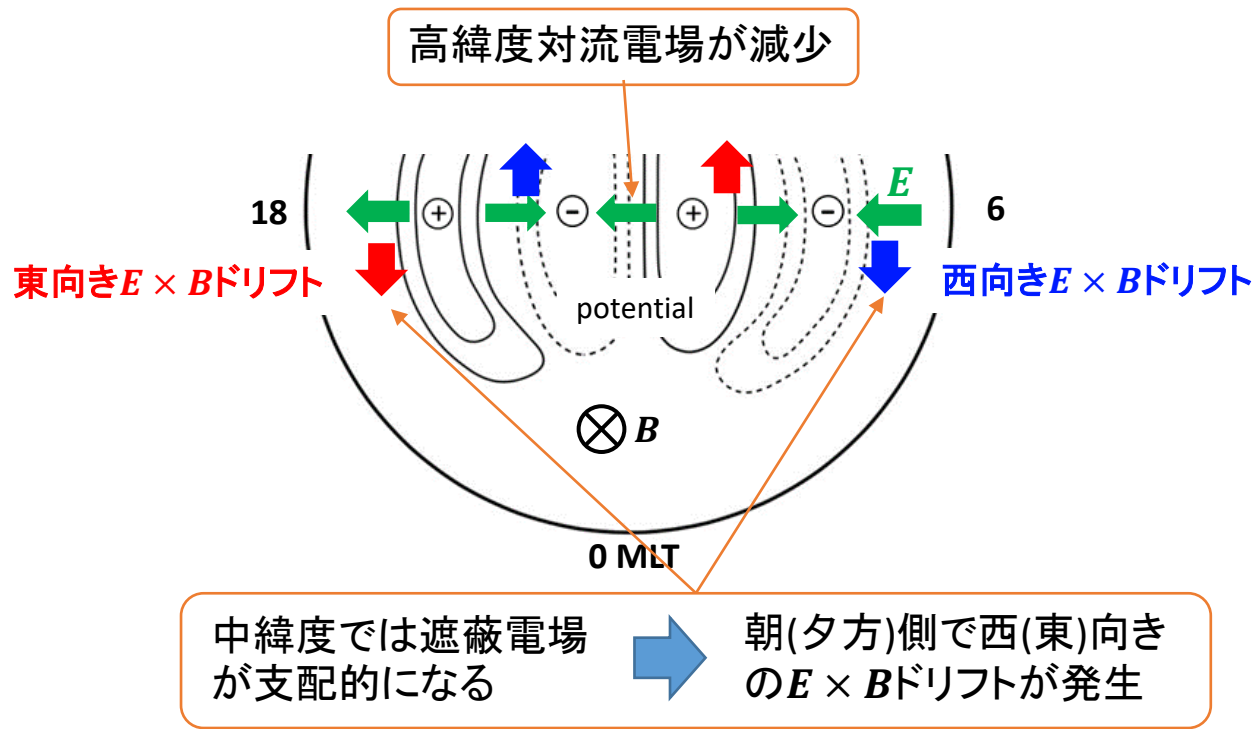
2. 磁気嵐主相-回復相初期における夕方側で西向き、明け方側で東向きのドリフトについて

- 南向きIMFとCPCPが減少
⇒ 遮蔽電場の侵入(overshielding)が影響している可能性がある



東西方向ドリフト速度の時間・MLT変化
及びIMF Bz, CPCPの時間変化

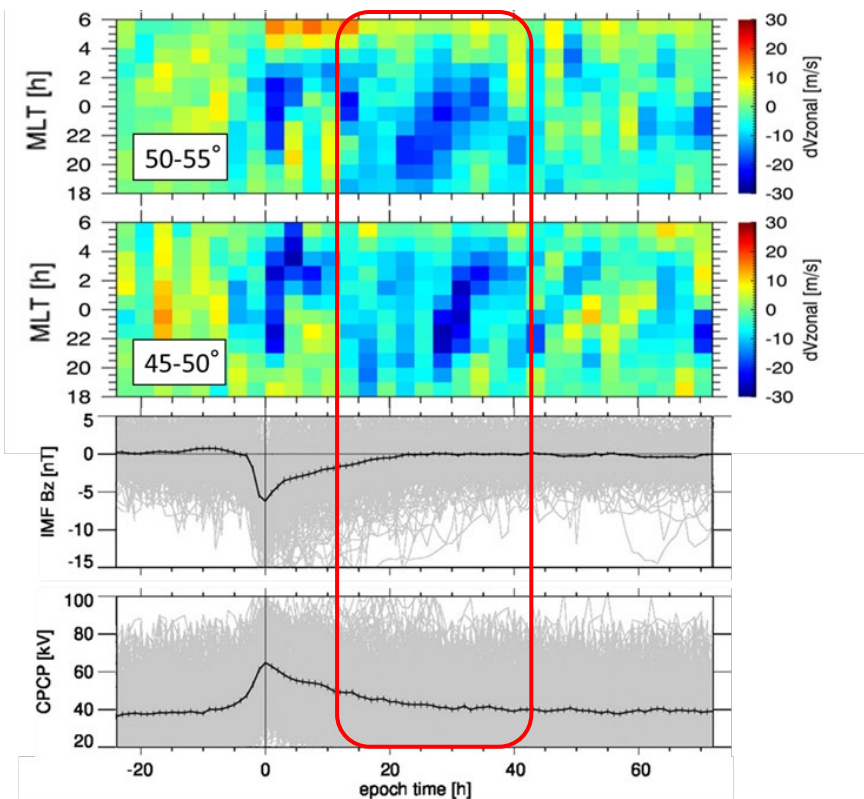
- 先行研究より
 - 南向きIMF減少時、高緯度対流電場の低緯度側で逆向きの遮蔽電場が卓越
 - 夕方側では高緯度対流の低緯度側に東向きドリフトが発生(Ebihara et al., 2008)



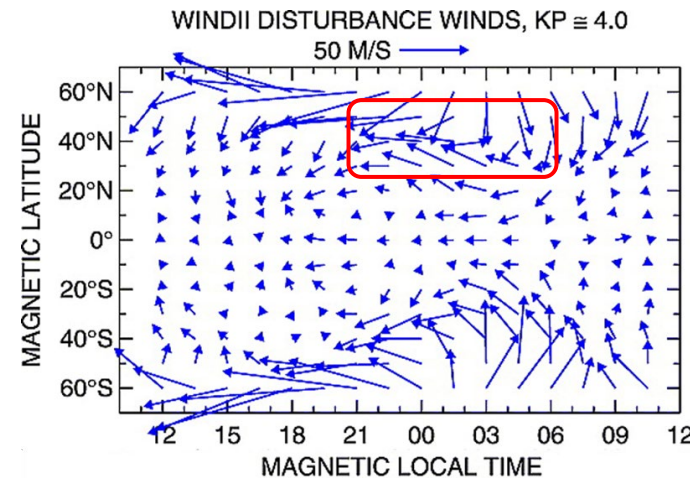
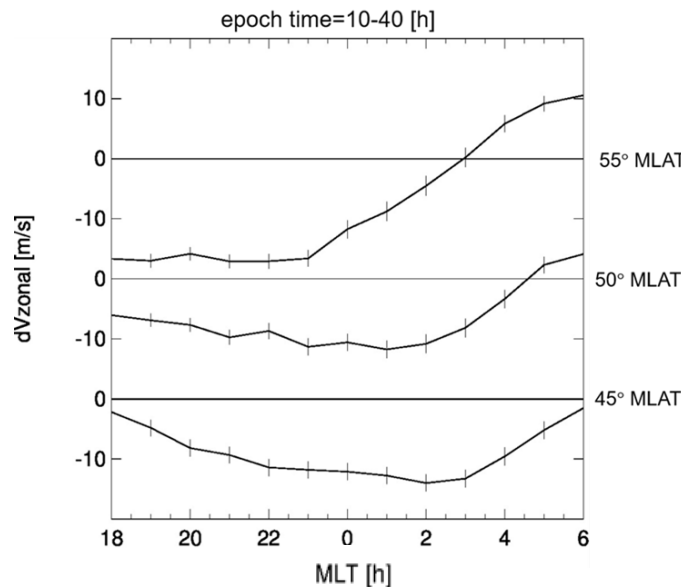
考察

3. 回復相において夜側全体で見られる西向きドリフトについて

- 南向きIMFとCPCPの変動は少ない。
⇒ 高緯度対流電場の侵入の影響は少ない。

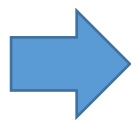


東西方向ドリフト速度の時間・MLT変化
及びIMF Bz, CPCPの時間変化



地磁気擾乱時の平均的な中性風
変動(Emmert et al., 2004)

- 低緯度側の真夜中-真夜中後で特に西向きドリフト速度が大きい。
- 西向きの擾乱中性風は真夜中-真夜中後の磁気緯度40度付近で大きい。
⇒ **disturbance dynamo**(Blanc & Richmond, 1980)が西向きドリフトを発生させている可能性がある。



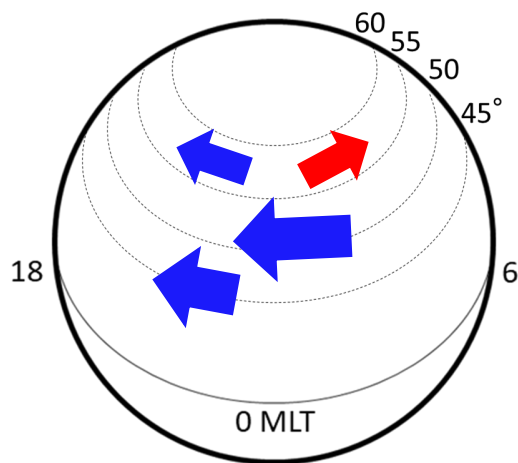
disturbance dynamoによる西向きドリフトは磁気緯度45度まで及び、磁気嵐発生後40時間程度継続

まとめ

- 大型短波レーダーによる電離圏プラズマドリフトの観測を用いて、磁気嵐発生に伴う中緯度電離圏対流の変動を調査した。

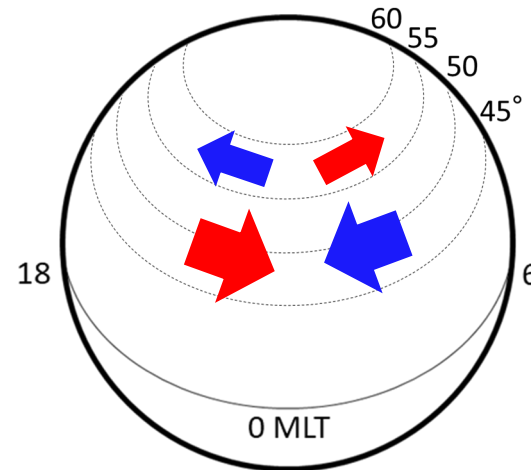
- オンセット時刻付近

磁気緯度~55-60度
➤ 高緯度対流が継続



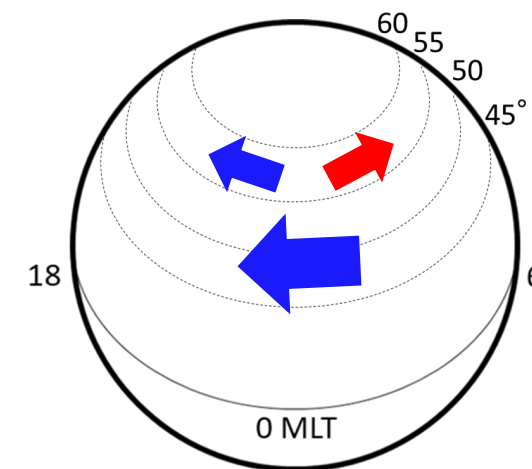
- 対流電場の侵入による西向きドリフト
- 真夜中前低緯度側で速度の大きな西向きドリフト

- 主相-回復相初期



- 遮蔽電場の侵入による高緯度対流と逆向きの対流

- 回復相後期



- Disturbance dynamoによる西向きドリフト

- ✓ 磁気嵐発生後数十時間にわたる中緯度電離圏対流の変動特性を複数の緯度範囲にわたって示した

今後の課題

- 沿磁力線電流等と比較し、オンセット直後における低緯度側の西向きドリフト速度の増加の原因を検討する

予備スライド

プラズマドリフト速度の算出

- SuperDARNが観測するのは視線方向のドリフト速度
⇒ **beam swinging technique**により実際のドリフト速度を推定

Time interval	Latitude interval	Longitude interval
1 h	1° MLAT	1h MLT

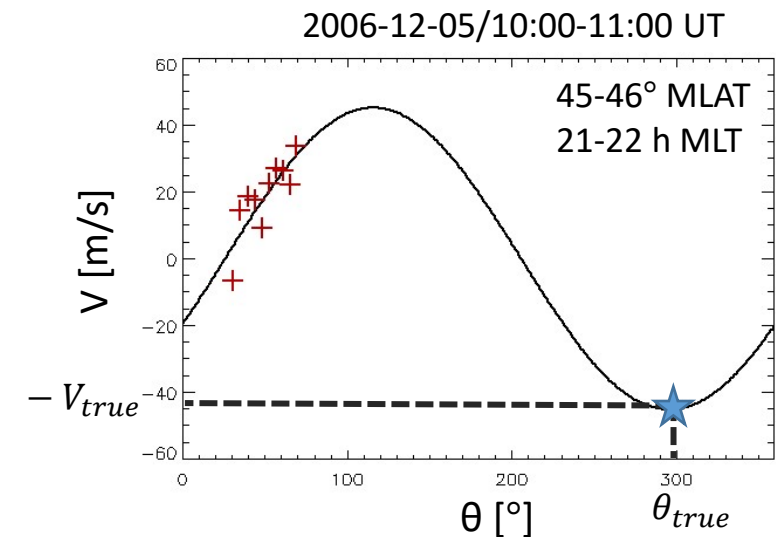
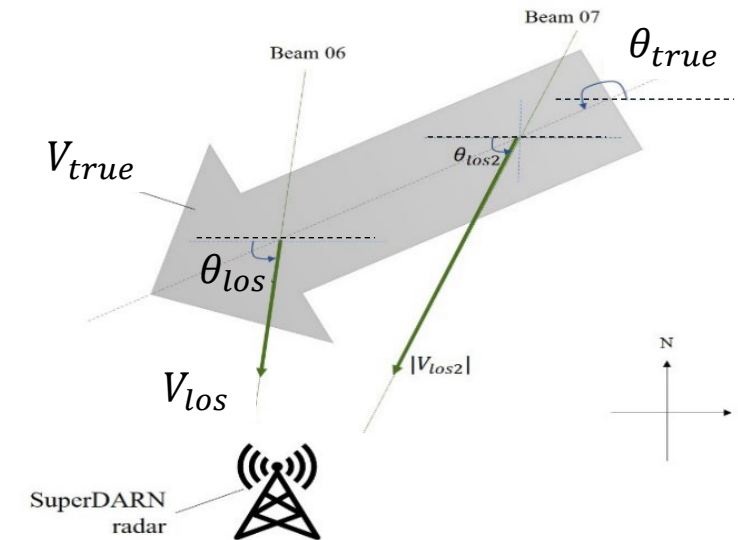
Beam swinging technique

1. 各ビーム方向における視線方向速度の1時間毎の中央値 (V_{los}) を算出。
2. 式(1)を用いたカーブフィッティングにより、真の速度の大きさ (V_{true}) とその方角 (θ_{true}) を求める。

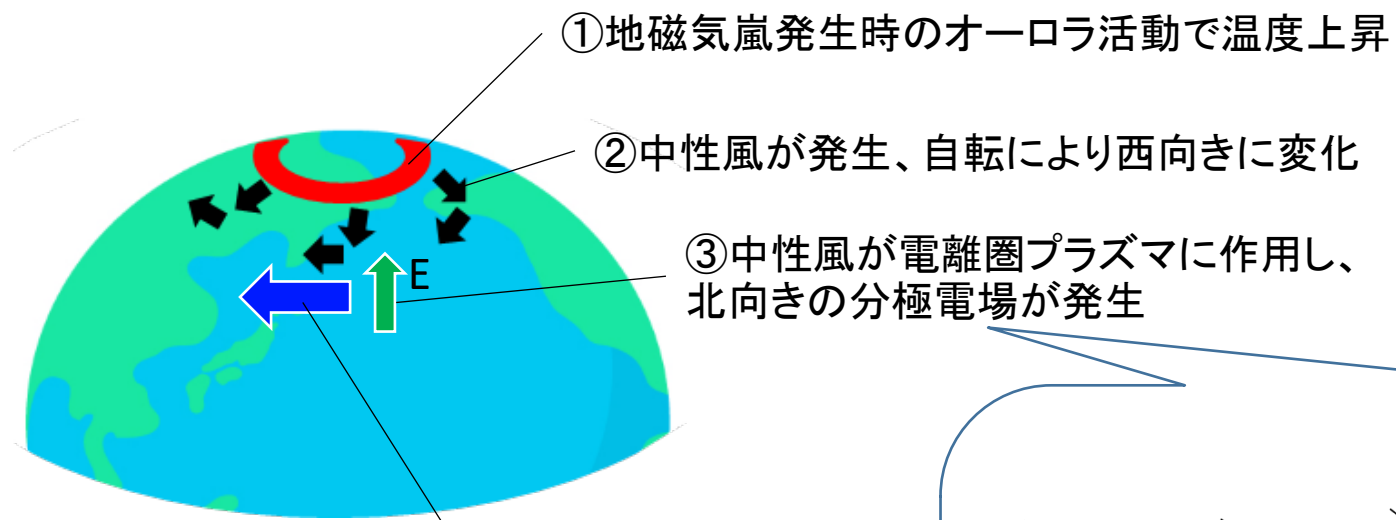
$$V_{los} = -V_{true} \cos(\theta_{true} - \theta_{los}) \dots (1)$$

3. 式(2)を用いて東西方向の速度 (V_{zonal}) を求める。

$$V_{zonal} = |V_{true}| \cos(\theta_{true}) \dots (2)$$



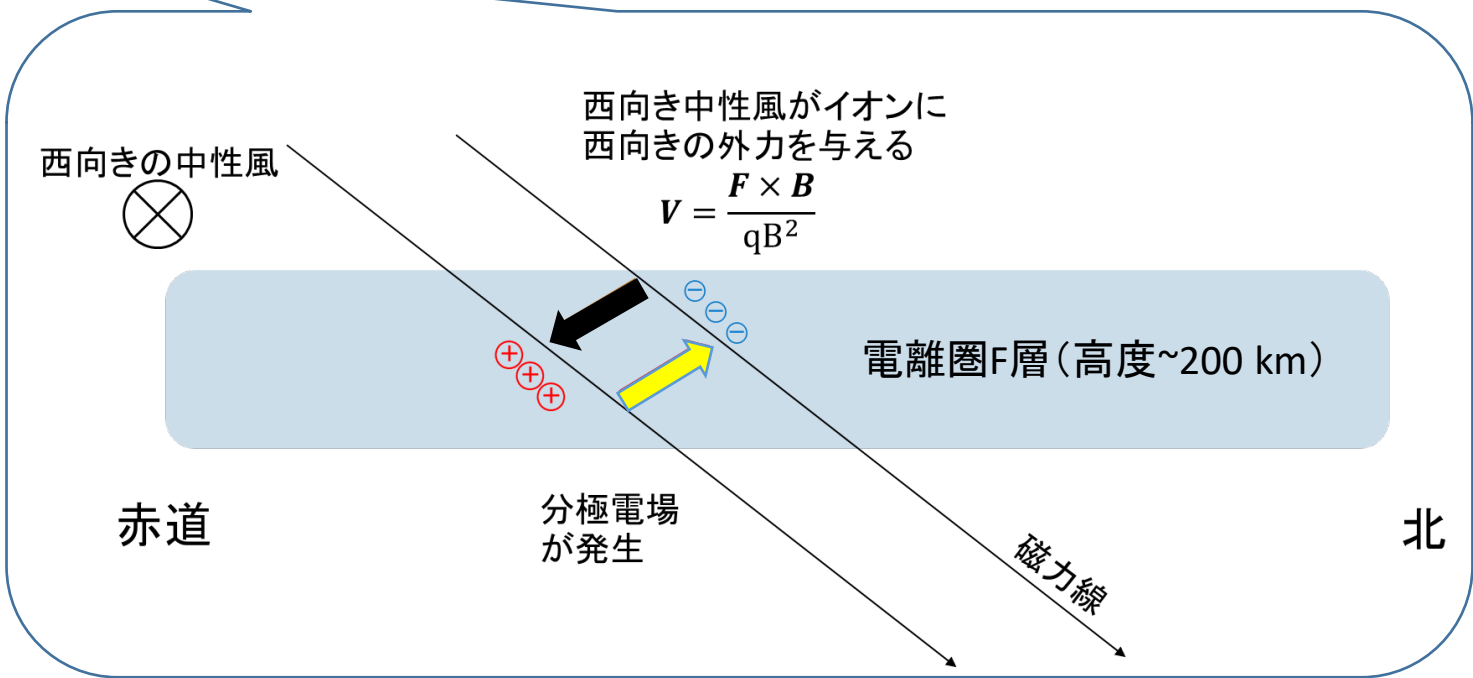
disturbance dynamoの発生機構



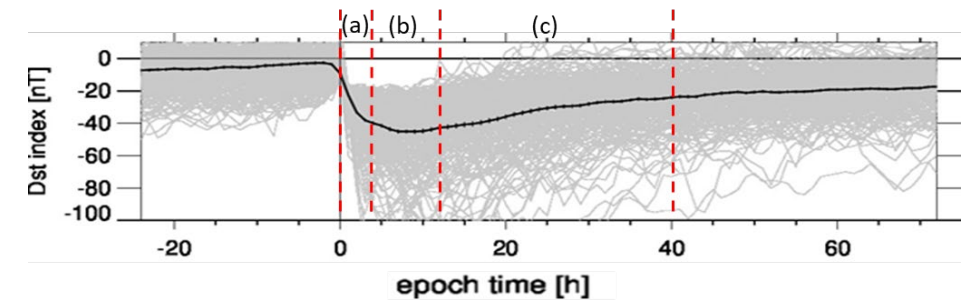
- ①地磁気嵐発生時のオーロラ活動で温度上昇
- ②中性風が発生、自転により西向きに変化
- ③中性風が電離圏プラズマに作用し、北向きの分極電場が発生

④電離圏プラズマが西向きにドリフト

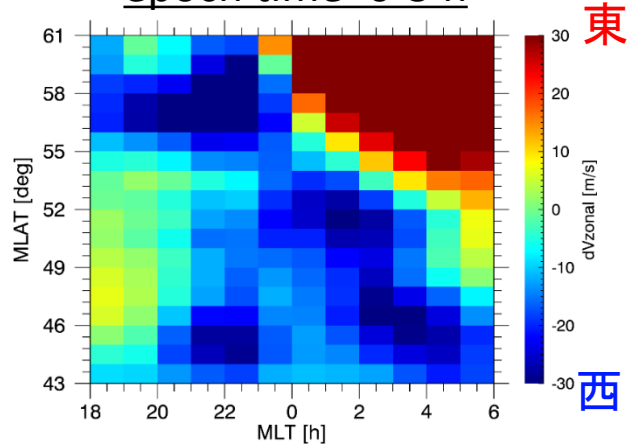
$$V = \frac{E \times B}{B^2}$$



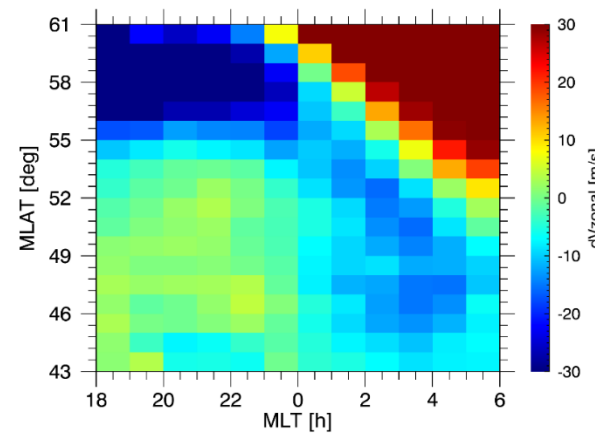
東西方向および南北方向の速度



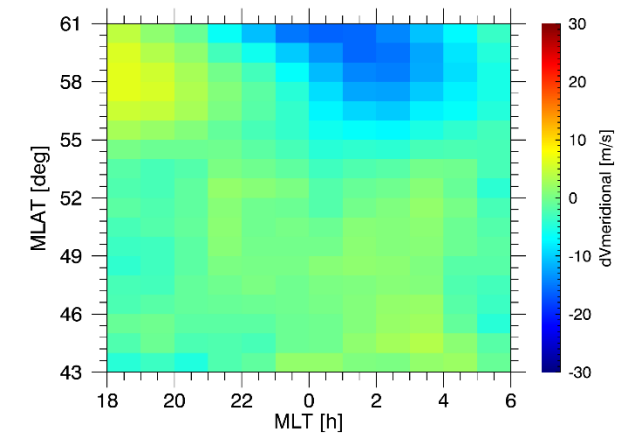
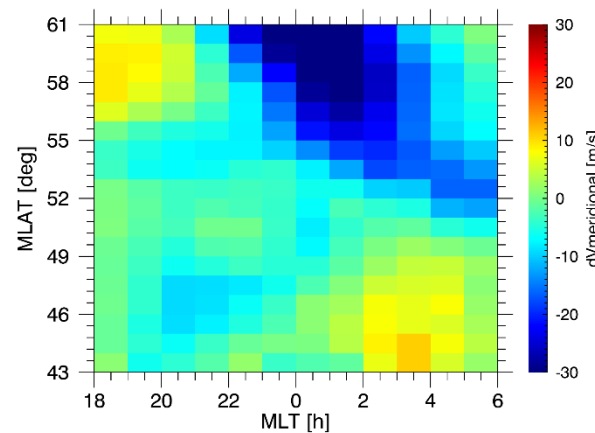
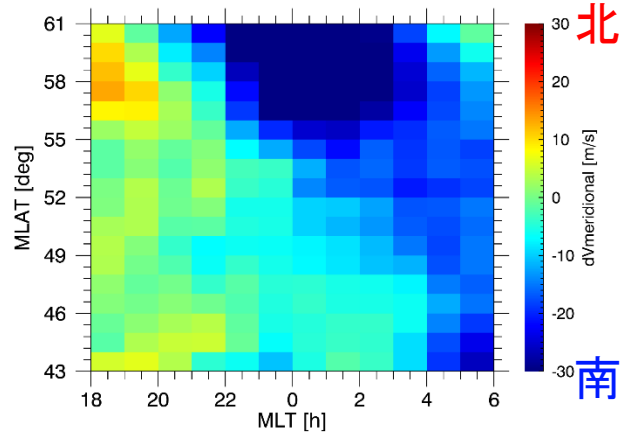
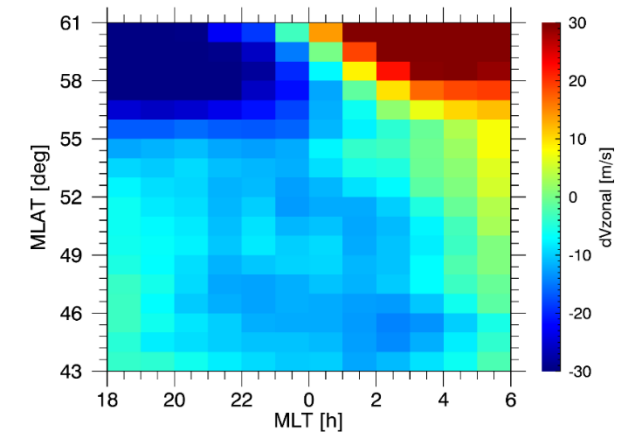
(a) オンセット時刻付近
epoch time=0-3 h



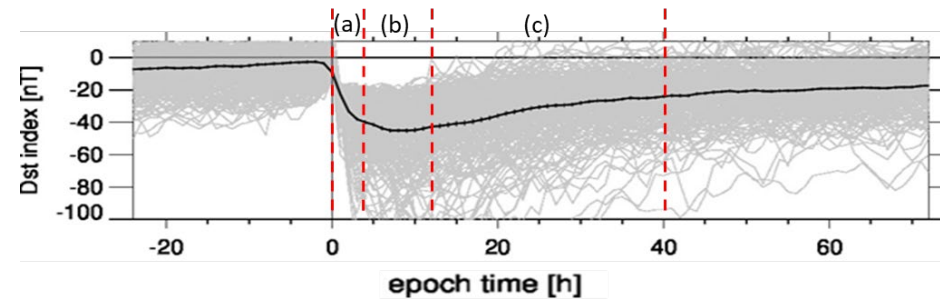
(b) 主相-回復相初期
epoch time=3-12 h



(c) 回復相後期
epoch time=12-40 h



磁気嵐の規模による変動

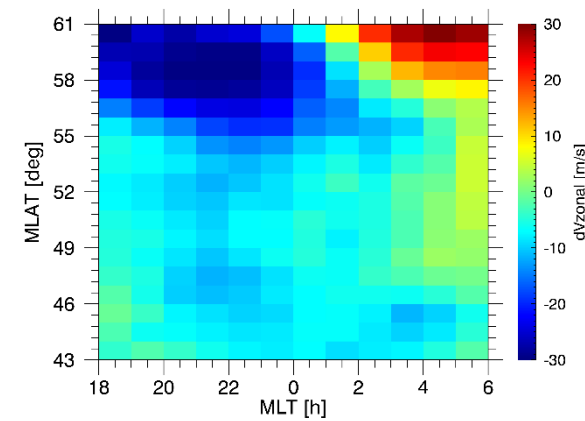
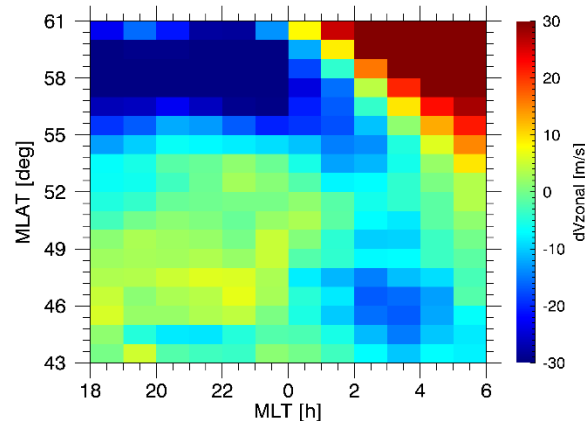
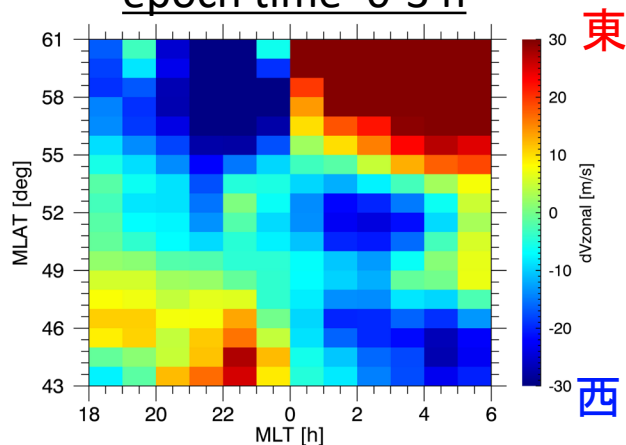


(a) オンセット時刻付近
epoch time=0-3 h

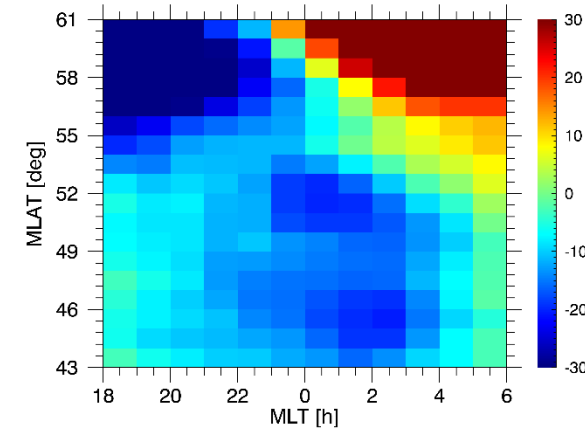
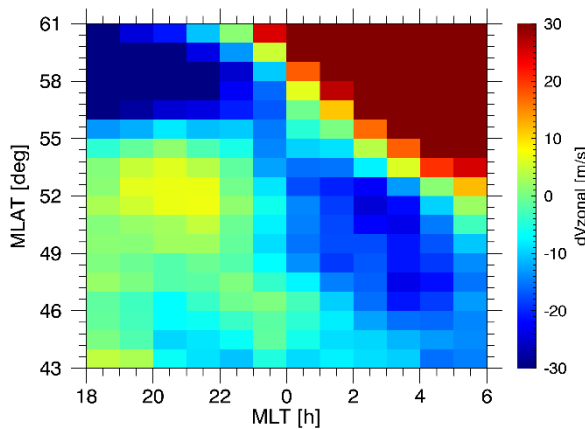
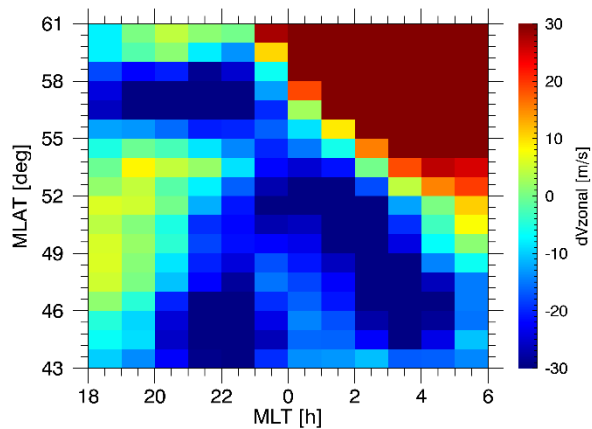
(b) 主相-回復相初期
epoch time=3-12 h

(c) 回復相後期
epoch time=12-40 h

Dst peak ≥ -55 nT

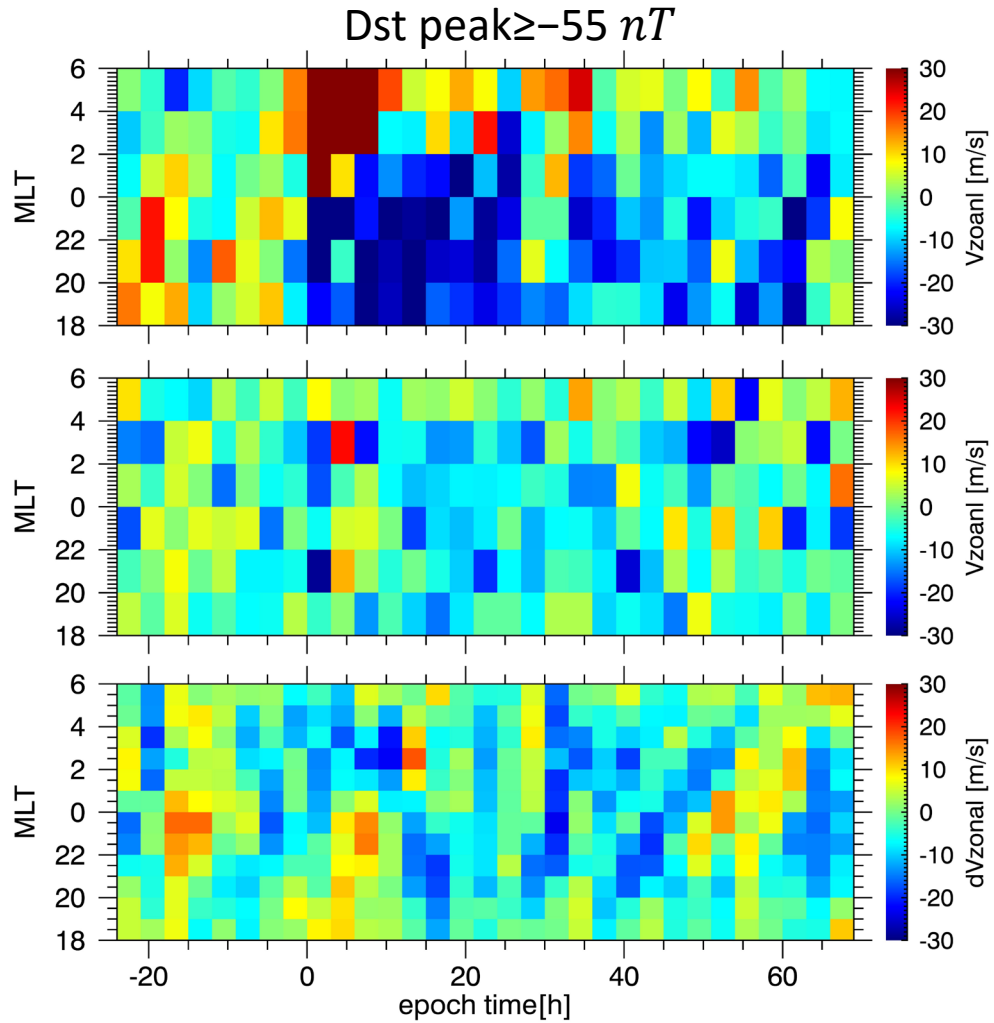


Dst peak < -55 nT



磁気嵐の規模による変動

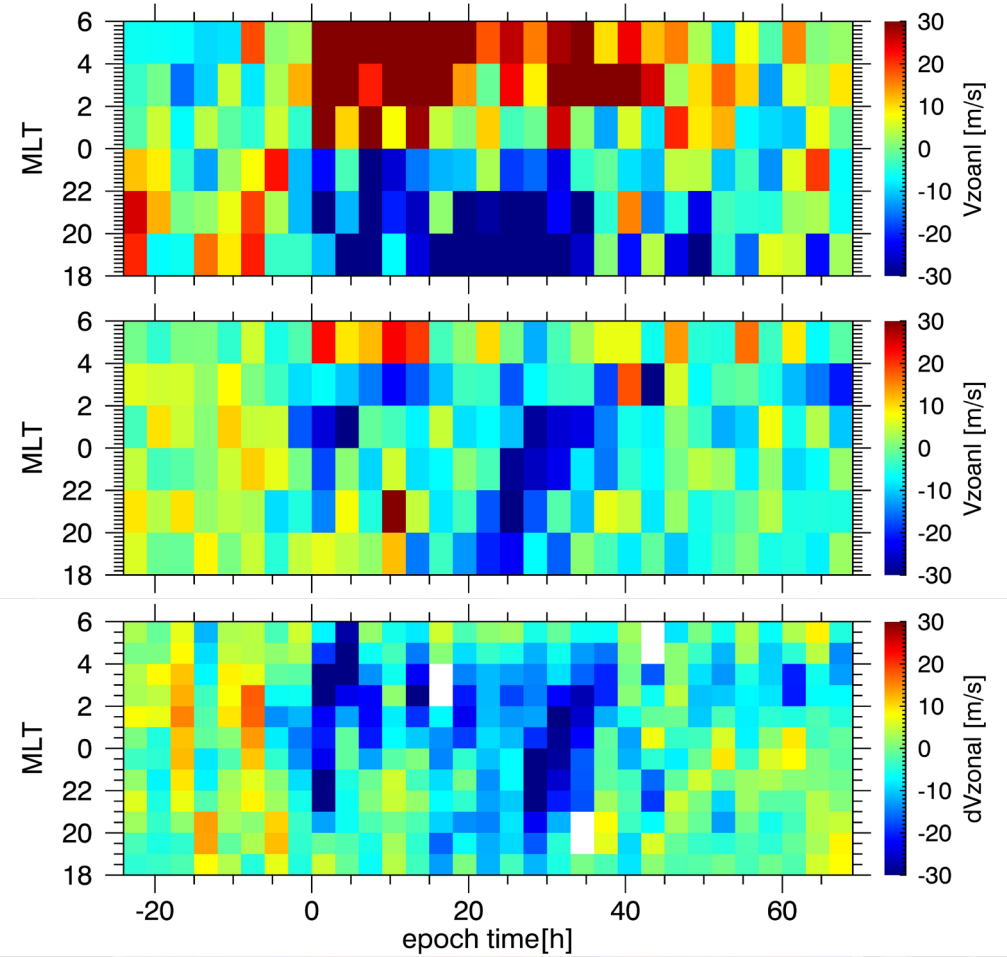
磁気緯度
55-60°



50-55°

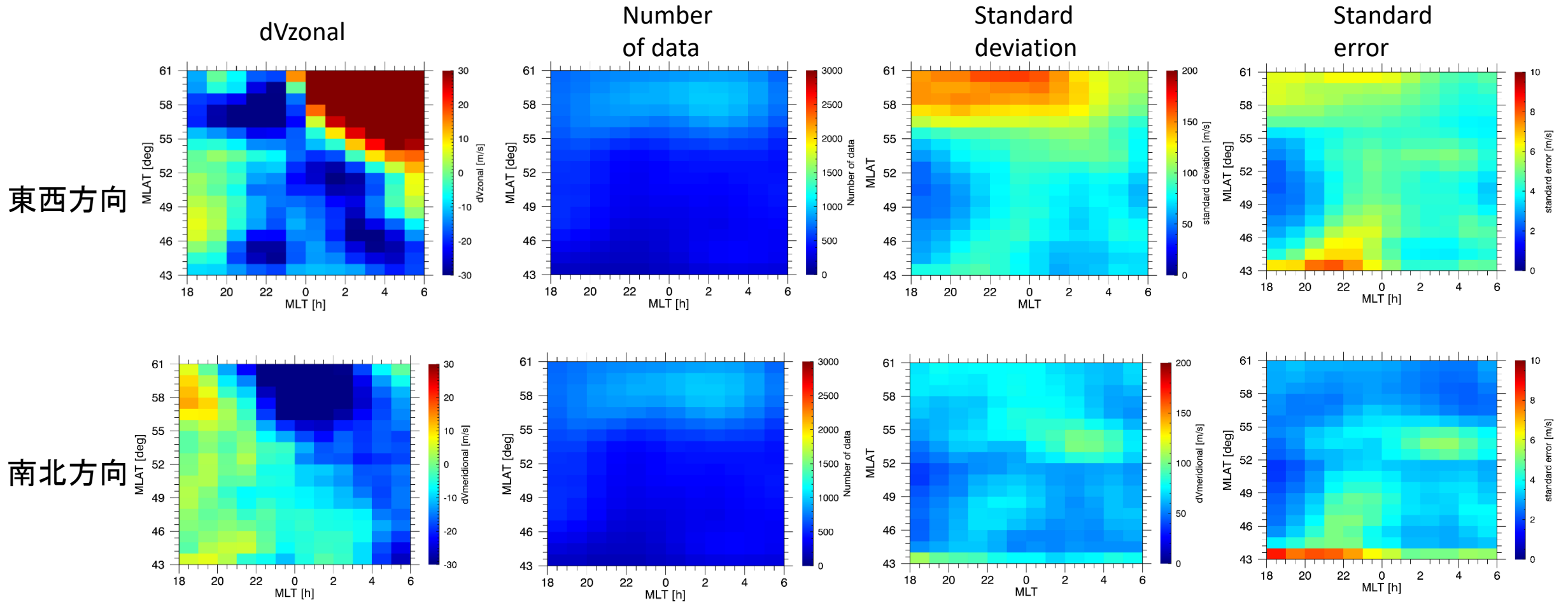
45-50°

Dst peak < -55 nT



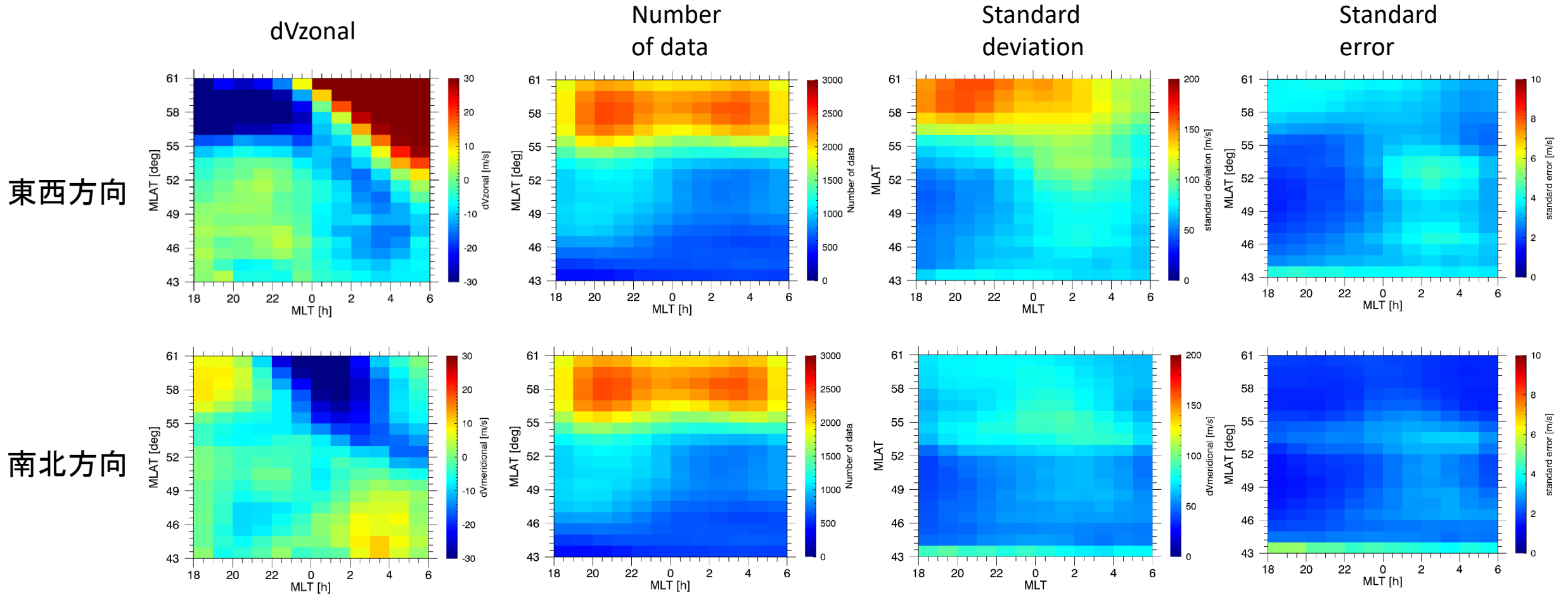
データ数・標準偏差・標準誤差

epoch time=0-3 h



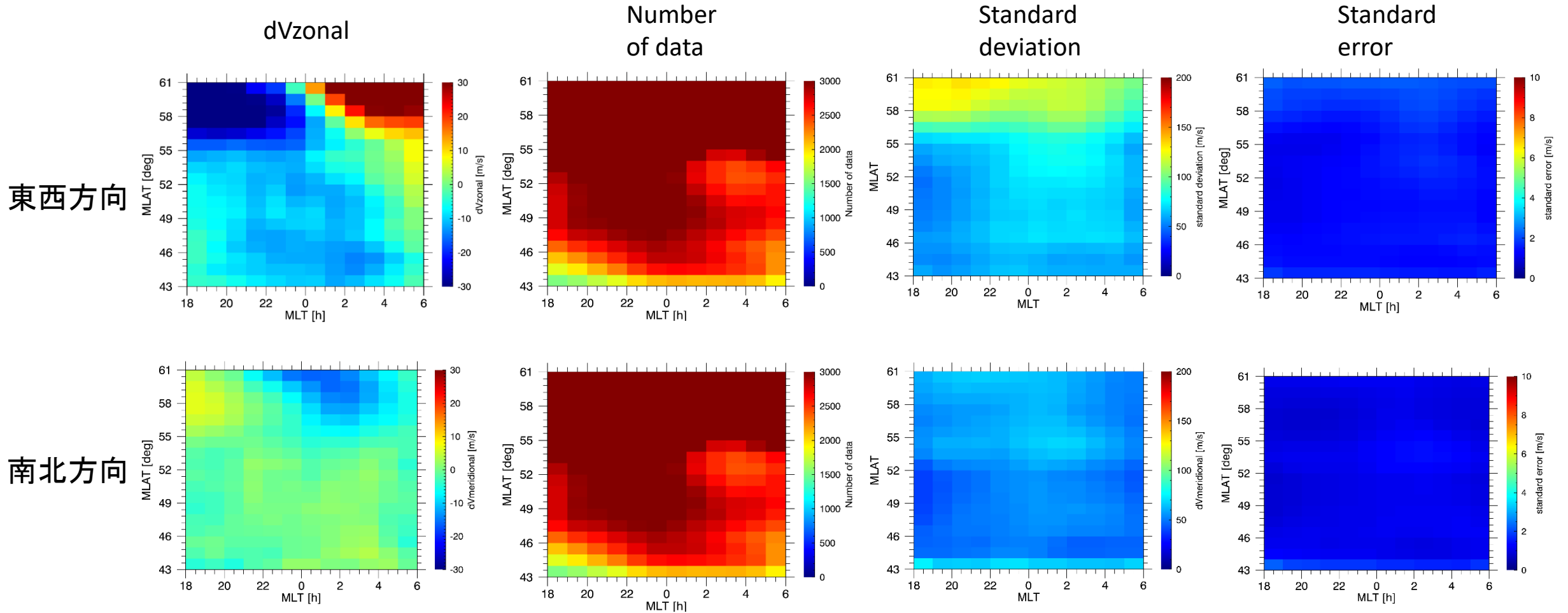
データ数・標準偏差・標準誤差

epoch time=3-12 h



データ数・標準偏差・標準誤差

epoch time=12-40 h



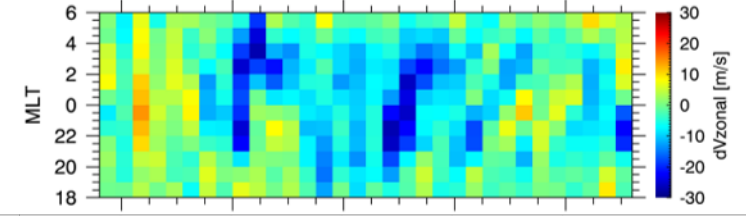
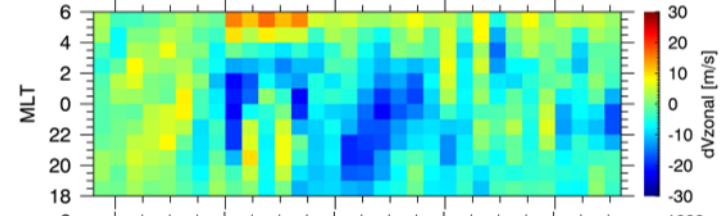
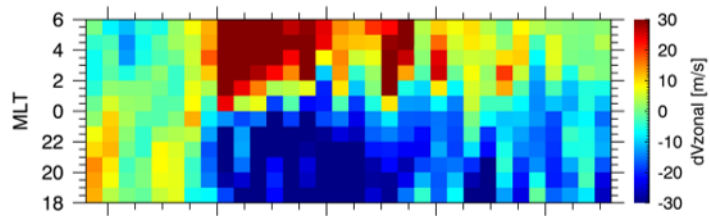
データ数・標準偏差・標準誤差

55-60°

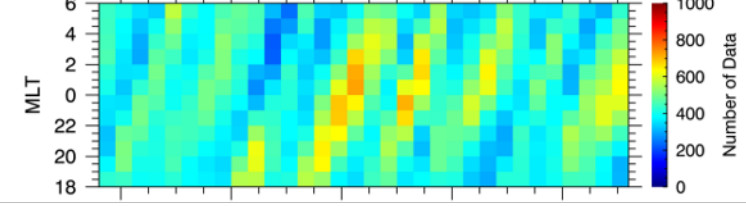
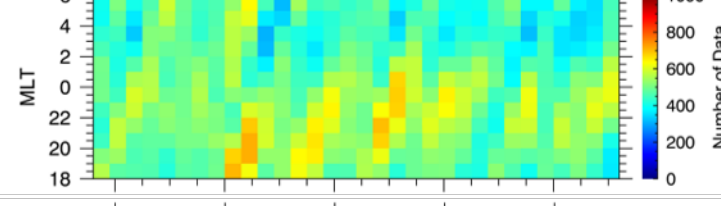
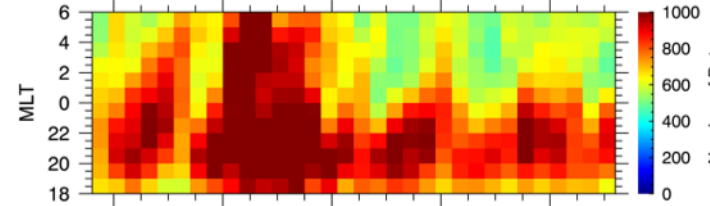
50-55°

45-50°

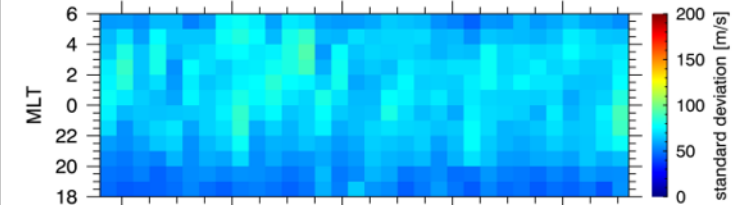
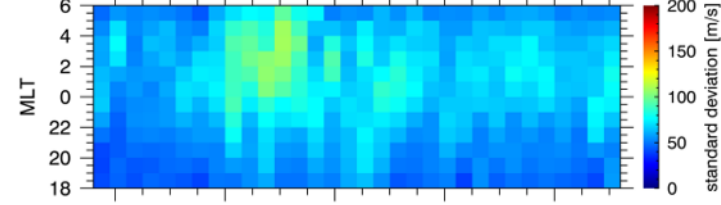
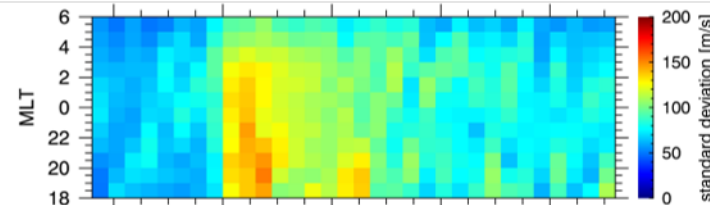
dVzonal



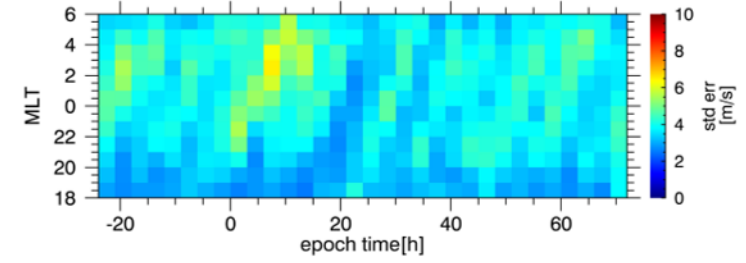
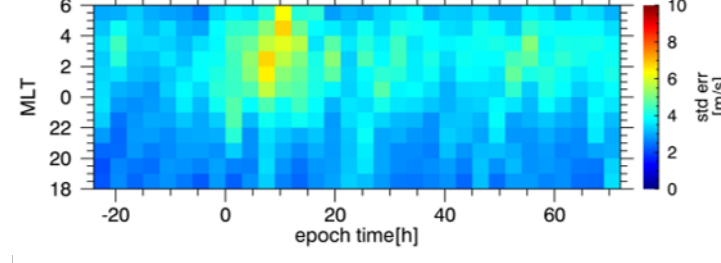
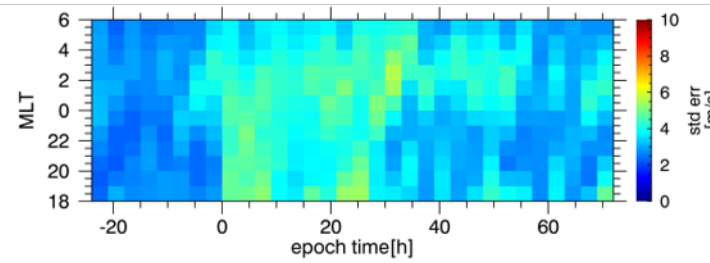
Number of data



Standard deviation

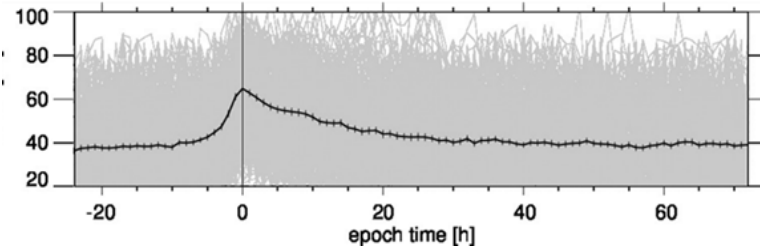


Standard error



高緯度側と低緯度側の速度変動

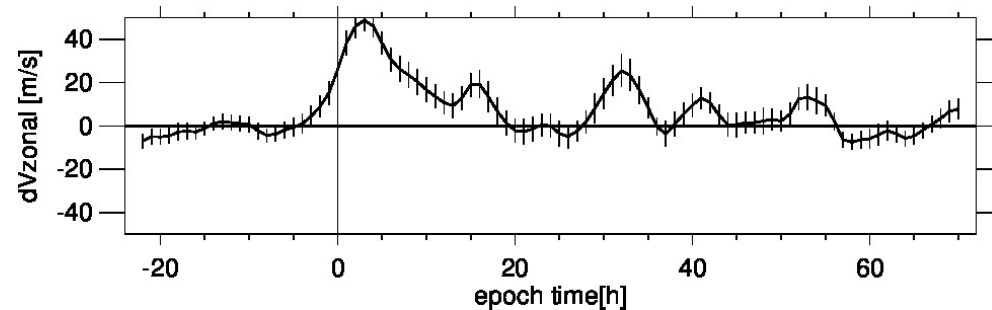
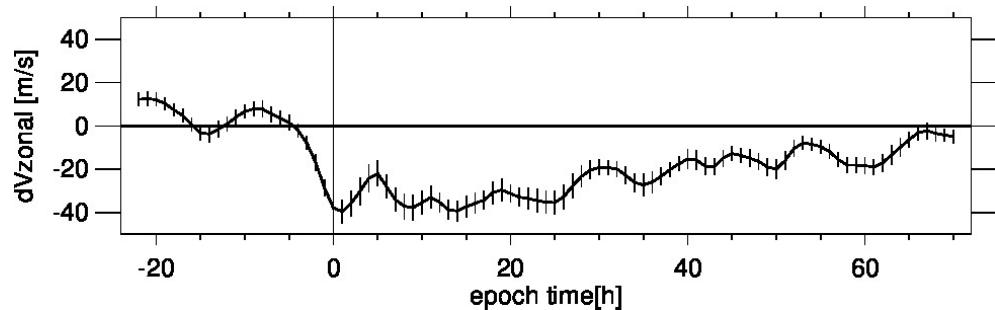
極冠域電位差
[kV]



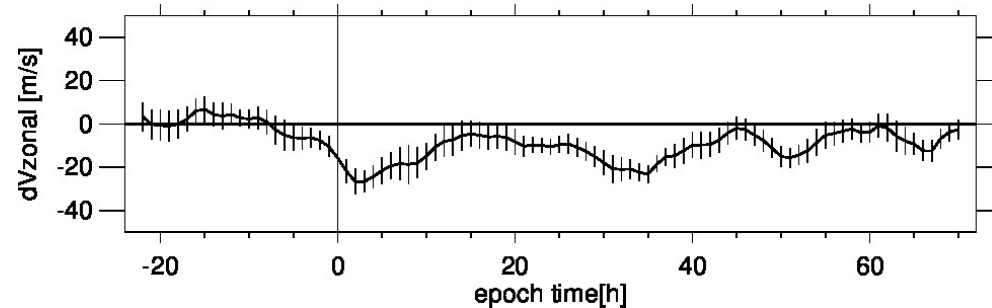
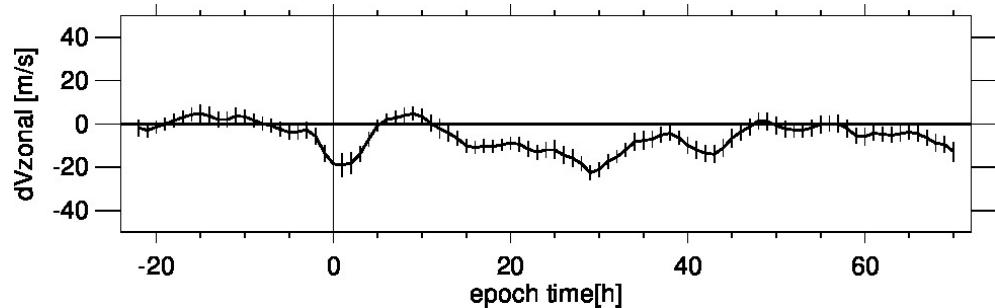
21-23 h MLT(夕方側)

1-3 h MLT(明け方側)

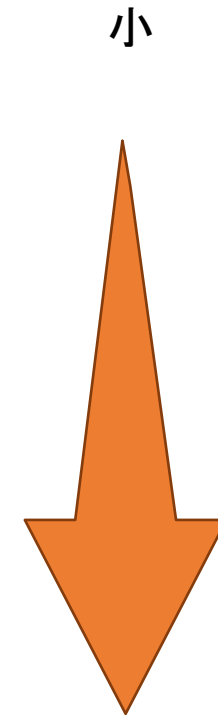
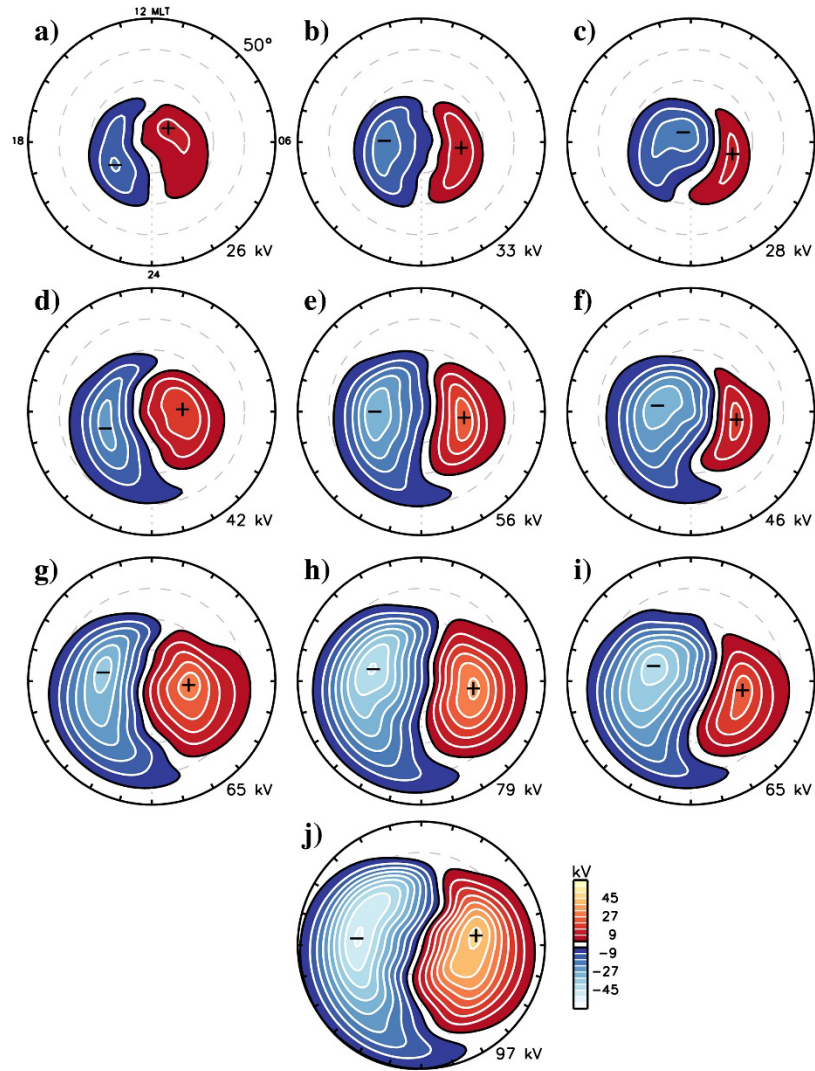
55-60 度



45-50 度



地磁気擾乱時の高緯度対流



小

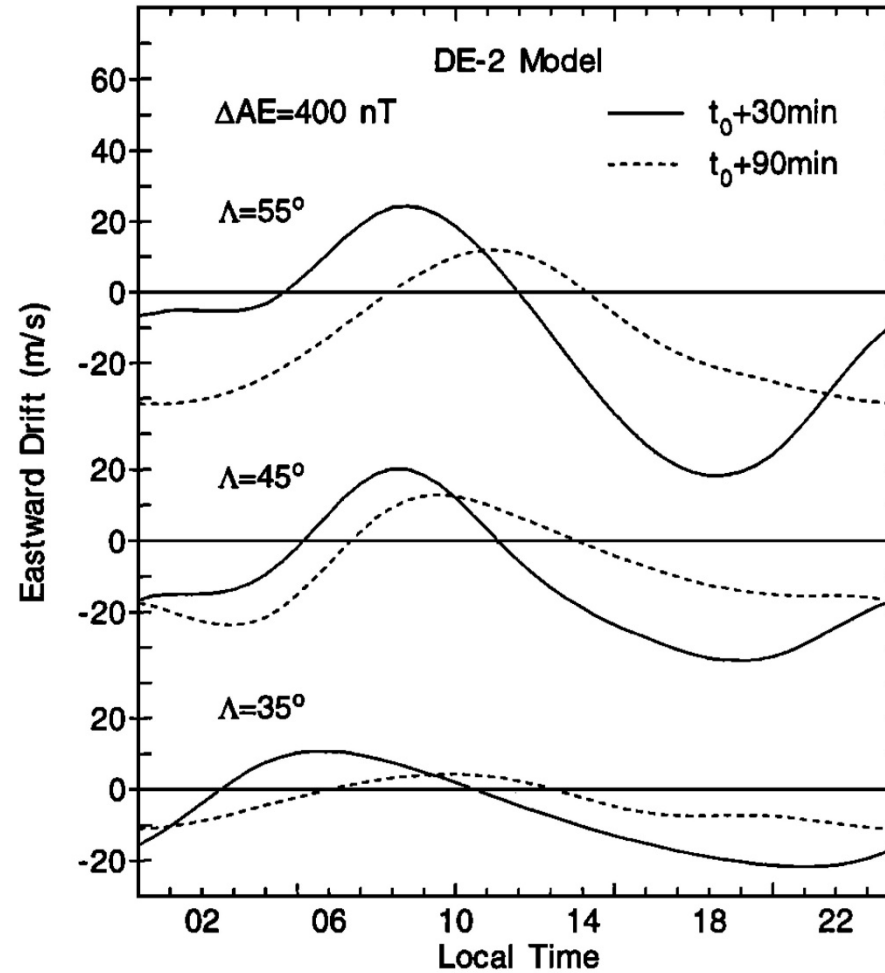
地磁気擾乱度

大

Thomas & Shepherd (2018)

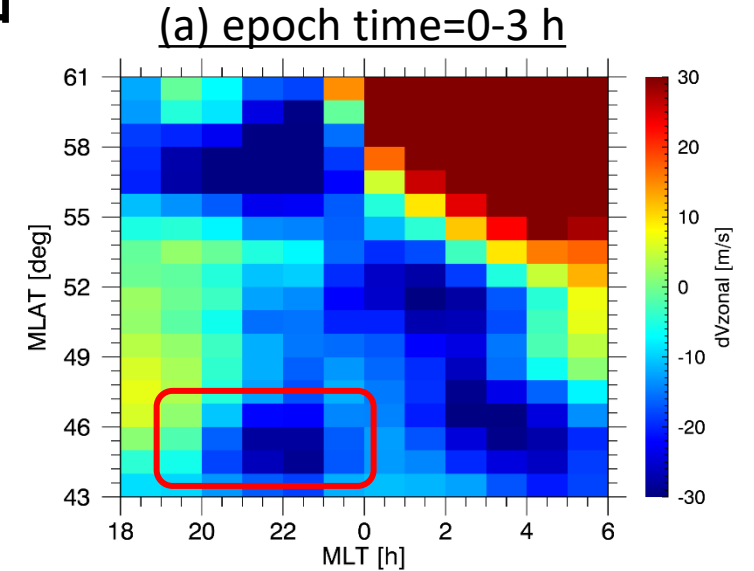
中緯度における対流電場の侵入

- AE指数が400 nTの増加を示した後の東西方向ドリフト速度の経験モデル (Fejer & Scherliess, 1998)



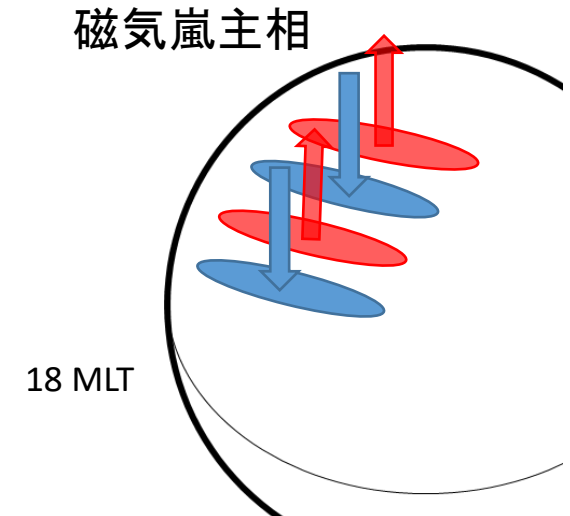
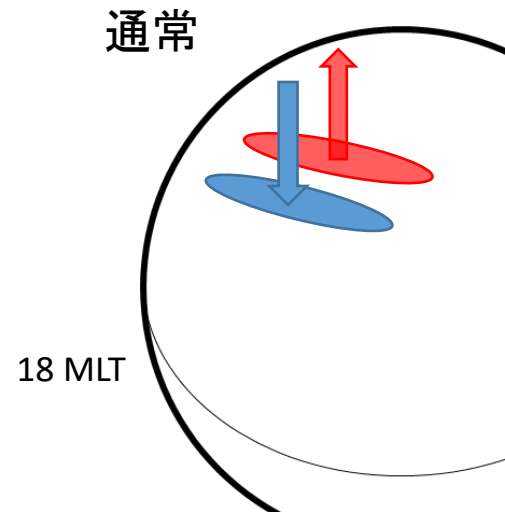
低緯度側で大きな西向きドリフトが現れる要因

- 可能性1: disturbance dynamo
 - Disturbance dynamoは赤道方向の擾乱風が中低緯度で西向きに変化することで発生(Blanc & Richmond, 1980)
 - ⇒ 低緯度側の方が西向きドリフト速度が大きくなることもある

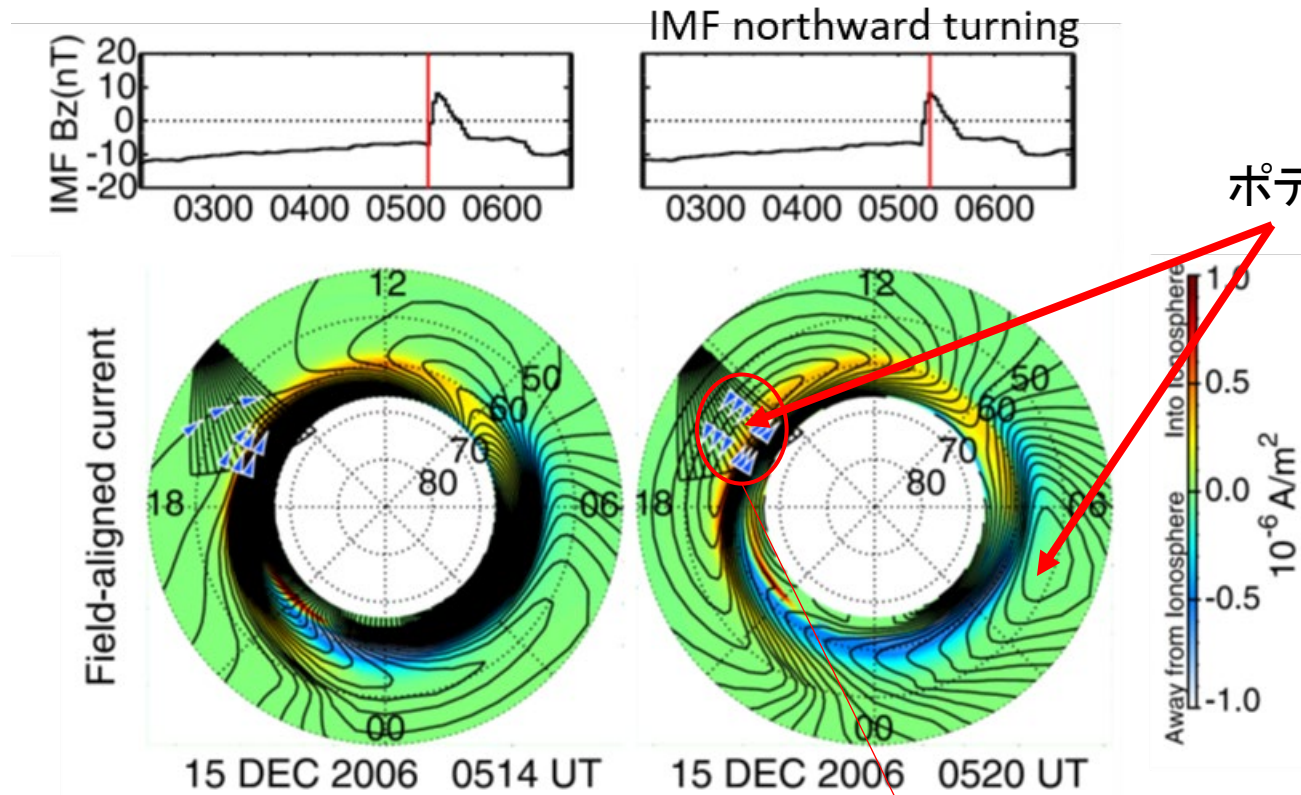


- 可能性2: 複数の沿磁力線電流系による電場分布

- 磁気嵐の主相には通常の2つの沿磁力線電流系よりも多くの電流構造が現れる場合がある(Ebihara et al., 2005)
 - ⇒ 緯度方向に複雑な電場を形成する可能性がある



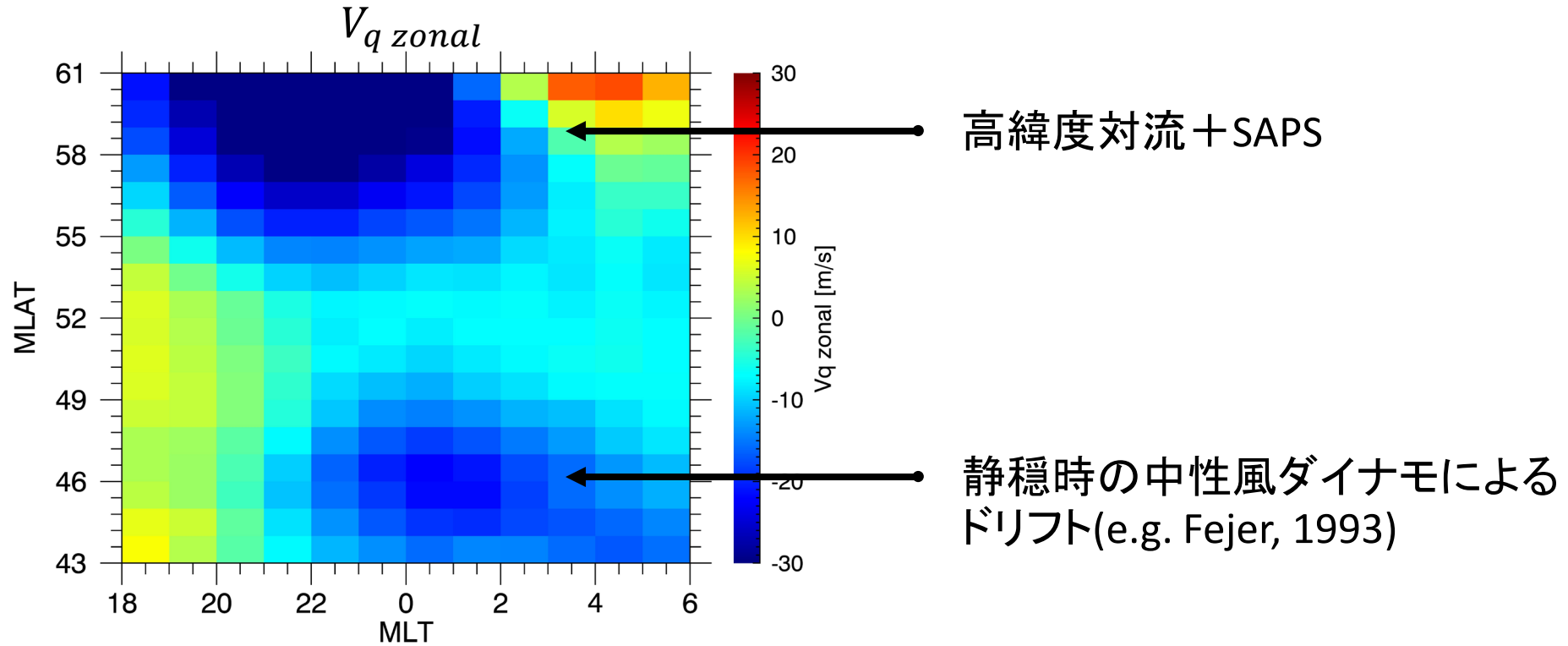
遮蔽電場侵入時の電離圏ポテンシャル



ポテンシャルピークの高緯度側では西向き、低緯度側では東雨季のドリフト

IMF北向き変化時における高緯度電離圏ポテンシャルのMHDシミュレーション
Ebihara et al. (2008)

静穏時の電離圏プラズマドリフト



全磁気嵐のオンセット時刻から24時間前まで
で平均した東西方向ドリフト速度

各種指数の変動

