極域·中緯度SuperDARN研究集会(情報通信研究機構、2017.9.11)

# Storm/substorm時の対流/過遮蔽電場による中低緯度電離圏擾乱

#### 菊池崇、橋本久美子、海老原祐輔、西谷望、冨澤一郎、長妻努 T. Kikuchi<sup>1</sup>, K.K. Hashimoto<sup>2</sup>, Y. Ebihara<sup>3</sup>, N. Nishitani<sup>1</sup>, I. Tomizawa<sup>4</sup>, T, Nagatsuma<sup>5</sup>

<sup>1</sup> Institute For Space-earth Environmental Research, Nagoya University
 <sup>2</sup> Kibi International University
 <sup>3</sup> Research Institute For Sustainable Humanosphere
 <sup>4</sup> University Of Electro-Communications
 <sup>5</sup> National Institute of Information And Communications Technology

目的

- Storm, substorm時に磁気圏ダイナモで生成される電場と電流が中低緯度電離圏や内部磁気圏へ伝送され、地磁気・電離圏変動を引き起こす。
- 中低緯度への伝送が極域電離圏を経由するか、または磁気圏 から直接伝送されるかの二つの経路がある。
- 中低緯度電離圏への伝送経路を特定し、電場の性質を明らかにするために、中緯度SuperDARN、低緯度HF Doppler sounder、および極赤道磁力計データを解析する。
- 電離圏プラズマ変動に熱圏大気波動と磁気圏電場が寄与する。
   両者を区別するために、電離圏電流による地磁気変動との相関を重視する。

# 地磁気と相関する中低緯度電離圏電場

- SCの初期インパルス(PI)と主インパルス(MI) (T=1秒 - 10分) [Kikuchi他2016]
- Pi2 (T=1分)
- グローバルPc5 (T=5分)
- 準周期DP2 (T=10分 1時間) [Kikuchi他 2010]
- サブストーム(T=10分 1時間) [Hashimoto他 2017 under review]
- 磁気嵐主相と回復相(10分-数時間) [Hashimoto他2017 SGEPSS]

# 北海道レーダー、HF Dopplerサウンダー、磁 カ計による電離圏電場・電流の観測

$$\Delta f = -\frac{2f}{c} \frac{E}{B} \sin \theta \cos I$$
  

$$f = 5 \text{ [MHz]}, \theta = 78.2^{\circ}, I = 49^{\circ}, B = 46000 \text{ [nT]},$$
  
distance = 120 [km], reflection height=300 [km]  

$$E = 2.15 \text{ [mV/m]} (\Delta f = 1 \text{ Hz})$$





HF Doppler (HFD) sounder in Tokyo

At the dayside equator, YAP, the SC/SI, PC5 and DP2 are amplified due to the ionospheric currents intensified by the Cowling effect.

Cowling conductivity: 
$$\sigma_C = \sigma_P + \frac{\sigma_H^2}{\sigma_P}$$

#### 磁気急始(SC)は、圧縮性磁気流体波(compressional wave) により、地球方向へ伝搬する。



(Wilken et al., JGR 1977)

(Shinbori et al., EPS 2004)

## 磁気急始(SC)の緯度・地方時依存

階段状磁場増加(DL)に1分程度のPIと5-10分のMIが重畳する。 中高緯度PIは、午前で正(PPI)、午後で負(PRI)。 赤道PIは、昼間PRI,夜間PPI。 DLは磁気圏境界電流、PI,MIは電離圏電流による磁場。

(Kikuchi et al., JGR 2001)





電離圏のSC(PI,MI)電場は昼夜で逆転し、夕方で昼間と同じ性質を示す (Evening anomaly)。地上観測(左)と衛星観測(右)



ROCSAT 衛星観測



(Naoko Takahashi et al., JGR2015)

# SC電場のタ方増大

#### Evening enhancement of the SC electric fields

The electric field is 3 times stronger in the evening (11mV/m) than in the day (3.5 mV/m).



## グローバルシミュレーションによるSC電場の再現

(Kikuchi et al., JGR 2016)



#### SC時の非圧縮性電離圏の振る舞い

SC時に磁気圏は圧縮され、プラズマは地球方向へ移動するが、電離圏は圧縮 (下降運動)されず、逆に上昇する。上昇運動は電離圏電流に伴う電場による。



(Kikuchi et al., JGR 2016)



# 磁気嵐時Pc5 電場(HF Doppler)と赤道ジェット電流



低緯度Pc5電場(図最上段)は、 低緯度磁場(図2段目)との相関 は低いが、赤道ジェット電流(図 最下段)との相関がよい。

**Correlation Coefficient** 

- •Electric field Dayside EEJ  $\rightarrow$  –0.87
- •Electric field Nightside EEJ  $\rightarrow$  0.82

The dotted curves in each panel is the electric field (ORI) for reference.

## 準周期DP2磁場変動

#### 赤道DP2変動は対流電場 (R1FACs)によるEEJと過遮蔽電場 (R2FACs)によるCEJが交互に寄与 する。



Figure 11. Schematic diagram of the current system in the magnetosphere and ionosphere during the substom. The R1 and R2 FACs flow into the equatorial ionosphere through the polar ionosphere, resulting in the equatorial DP 2 when the R1 FACs are dominant, while the equatorial CEJ appears when the R1 FACs decay rapidly because of the northward turning of the IMF. The diagram is pertinent to the equatorial CEJ.



(Kikuchi et al., JGR 2010)

## DP2電場 (Hokkaido radar and HF Doppler sounder)





## 高緯度DP2電場(SuperDARN観測) Two-cell/multi-cell convection vortices during southward/northward IMF periods

The convection is in two-cell pattern for southward IMF (Figures (1), (4), (6)). The electric field associated with the two-cell pattern penetrated to the equatorial ionosphere, and caused the e-EJ.

Reversed flow vortices appeared equatorward of the two-cell convection vortices for norhward IMF (Figures (2), (3), (5)). The reverse vortices must be associated with the R2 FACs that would cause a westward electric field responsible for the w-EJ at the equator.

(Kikuchi et al., JGR 2010)

The reverse vortices should be caused by the R2 FACs



Map Potential Velocities

(m s



サブストーム時の磁気圏電離圏電流系

PRC-R2 FACsが発達し、中低緯度で過遮蔽 電場・電流が発達する(赤道CEJ)。





Current wedgeが西向きauroral electrojetと接続 し、その内側にpartial ring currentが発達し、 東向きauroral electrojetと接続する。 Sun (Kamide<sup>l</sup>et al. 1976) ring current Field-aligned Tail currer current Ionosopheric current (ь) (a) R2 FACs Substorm Current Wedge gion-2 FACs 00 MLT Westward AEJ Partial Ring Current 18 MLT 06 MLT PRC Equatorial CE.

12 MLT

Region-1 FACs

Cusp Dynamo

**R1 FACs** 

Substorm時にR1, R2 FACs共に 発達する。

Geomagnetic Equator

(Hashimoto et al., JGR 2011)

## Substorm対流·過遮蔽電場(EISCAT観測)

Substorm onset時にR2FAC電 場(点線)が発達し、オーロラ 帯(図上段)で対流電場を増加 させ、中緯度(下段)で減少さ せる。対流電場が減少すると、 中緯度-赤道で過遮蔽が発生 する。

Overshielding occurs when the R2 FAC electric field overcomes the R1 FAC electric field when the R1 FACs decrease rapidly.



(Kikuchi et al., JGR 2000)

# Substorm時の過遮蔽電場(低緯度HF Doppler観測)



(b)  $\underbrace{\text{EEJ (YAP-0.88*OKI)}}_{\text{20030212}}$   $\underbrace{\text{CD}}_{\text{2}}$   $\underbrace{\text{CD}}_{\text{2}}$  $\underbrace{\text$  Positive bayの開始と同時に昼側赤 道でCEJが発達し、夜側で東向きの 過遮蔽電場が観測された。過遮蔽電 場により夜側赤道電離圏にEEJが流 れる。

(a) Positive bay(b) CEJ on the dayside(c) Electric field on the nightside

EEJ on the nightside

(Hashimoto et al., 2017 under review)

CRL Magnetometer Network



#### 磁気嵐時の赤道ジェット電流(EEJ/CEJ)

環電流による低緯度磁気嵐に電離圏電流が重畳し、振幅が 増大した。

(Kikuchi, Hashimoto, Nozaki, JGR 2008)



(NICT SWM) Okinawa 14.47 degs GML -0.3 degs GML Yap

## 磁気嵐時の昼側と夜側の赤道ジェット電流

## 昼間、主相で東向き、回復相で西向き 夜間、主相で西向き、回復相で東向き



(Tsuji et al., JGR 2012)

# 磁気嵐主相の対流電場と回復相の過遮蔽電場 (HF Doppler観測)

(橋本他、SGEPSS2017予定)

1950 UTに強い過遮蔽電場が観測された。



## 圧縮性磁気流体波の電離圏への入射



磁気圏の磁化プラズマ(誘電 体)に接する電離圏E層(導 体)に平行な電場は弱くなるた めに、電離圏を圧縮できない。

 $\varepsilon = \frac{1}{\mu_0 V_A^2} = \frac{\rho}{B^2}$ 

The electric field tends to be perpendicular to the surface of the conductor. Therefore, the vertical motion is suppressed in the F-region ionosphere.

## 中低緯度電離圏への電場伝送

磁気圏ダイナモー磁力線ー電離圏E層で構成される電流回路を伝搬して、中低緯度電離圏に達する。Poynting fluxはAlfven波とTMO電磁波で伝送される。



まとめ

- Hokkaido中緯度レーダー、低緯度HF Dopplerサウンダー、極赤道磁力計網 観測により次の結果を得た。
- 磁気圏波動と考えられるSC, Pi2, Pc5やR1, R2沿磁力線電流を伴うstorm, substormの中低緯度電離圏電場は、赤道電離圏電流と高い相関関係にあり、 電場が電流に伴うポテンシャル場であることを示す。
- SC時における電離圏プラズマ運動が上昇運動であることは、圧縮性波動に
   伴う電場が電離圏で存在できないことを示す。
- 磁気圏ダイナモで生成された電場は、沿磁力線電流を伴ってAlfven波により 極域電離圏へ伝送され、電離圏電流を伴ってTMO電磁波により中低緯度電 離圏へ伝送される。
- Substorm, storm時に、対流電場と過遮蔽電場が発達する。特に、substormや 磁気嵐回復相で顕著な過遮蔽が発生し、中低緯度電離圏変動の原因となる。