

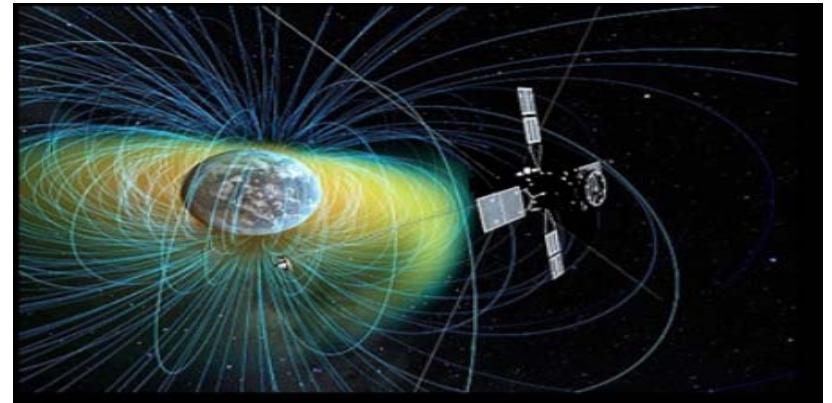
SuperDARNとあらせ衛星によるSAPS電場と粒子観測

高田知弥¹⁾、西谷望¹⁾、堀智昭¹⁾、Simon G. Shepherd²⁾、笠羽康正³⁾、熊本篤志³⁾、加藤雄人³⁾、笠原禎也⁴⁾、小路真史¹⁾、中村紗都子¹⁾、北原理弘¹⁾、土屋史紀³⁾、浅村和史⁵⁾、三好由純¹⁾、風間洋一⁶⁾、S.-Y. Wang⁶⁾、C.-W. Jun¹⁾、横田勝一郎⁷⁾、笠原慧⁸⁾、桂華邦裕⁸⁾、松岡彩子⁸⁾、今城峻¹⁾、新堀淳樹¹⁾、篠原育⁵⁾

1)名古屋大学宇宙地球環境研究所, 2) Thayer School of Engineering, Dartmouth College, 3)東北大学, 4)金沢大学, 5)宇宙航空研究開発機構 宇宙科学研究所, 6) Academia Sinica, Taiwan, 7)大阪大学, 8)東京大学



<http://www.stelab.nagoya-u.ac.jp/jpn/photo/2015/01/superdarn-2hf.html>
2021/03/05



SuperDARN研究集会

https://www.jaxa.jp/projects/sas/erg/index_j.html

1. SAPS (Sub-Auroral Polarization stream)

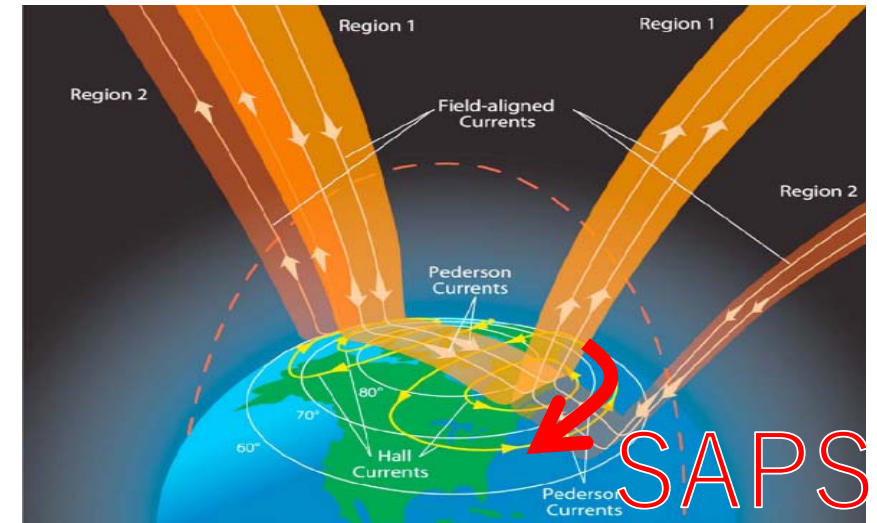
- 磁気嵐の時に発生するサブオーロラ帯におけるプラズマの西向き高速ドリフト[Foster and Burke, 2002]
- 中緯度トラフ(電子密度が低下している領域)の位置に発生する[Foster and Vo, 2002]。

➤ 電離圏

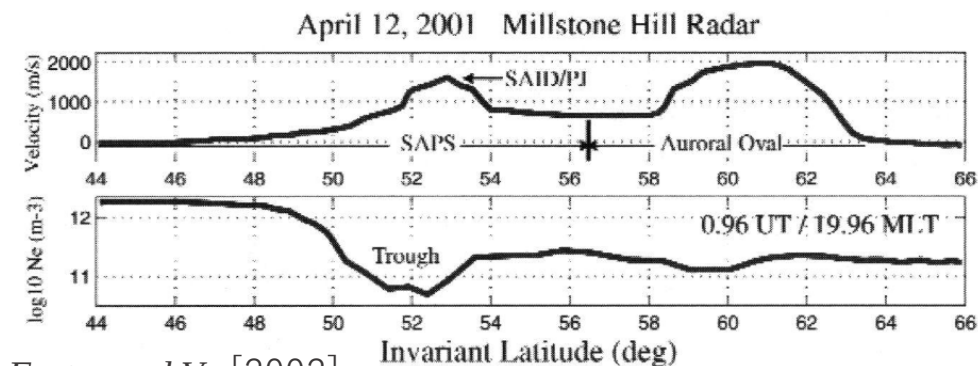
- 夕方側に電離圏に向かうR2FACが高緯度側のR1FACで閉じるため極向きの電場がかかる。
- トラフ領域で摩擦加熱に伴う電子密度の減少→導電率の低下→電流を保つために電場の増加→摩擦加熱・・・のような正のフィードバックで極向き電場が強くなっていく。

➤ 磁気圏

- 磁気圏側ではイオンと電子の分極に伴う分極電場がかかる。



Le, Slavin and Strangeway [2009]

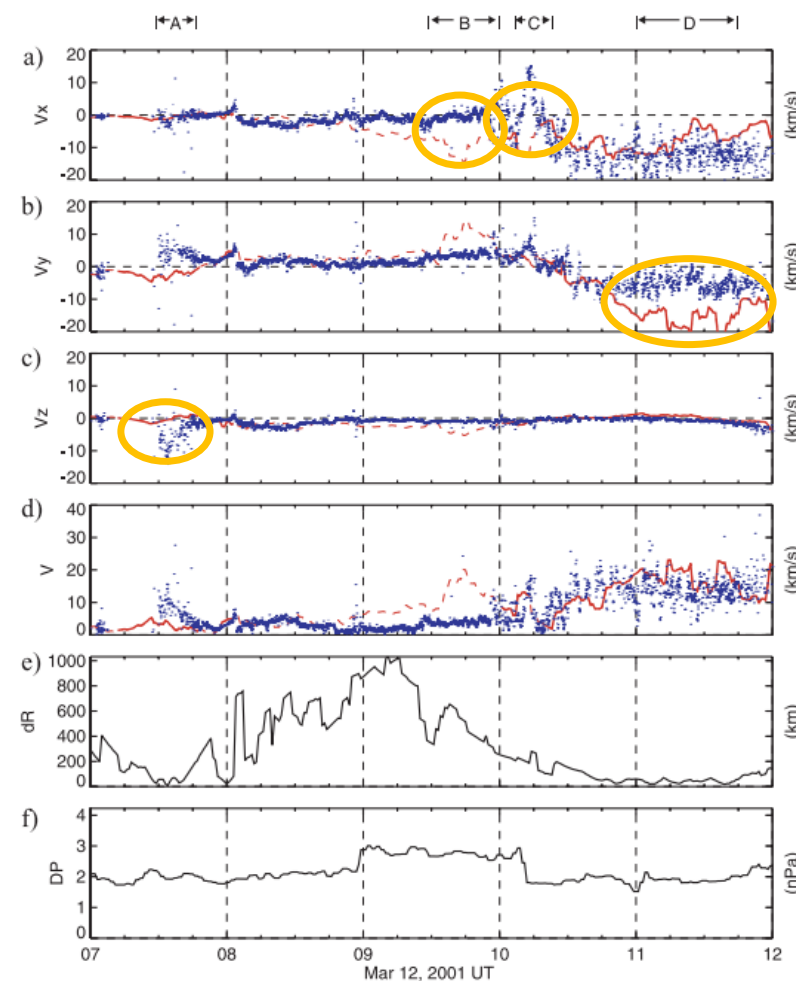


Foster and Vo [2002]

2. SuperDARNとCluster衛星による対流速度の比較 [Baker et al., 2004]

- SuperDARNとCluster衛星を用いて、電離圏(赤線)と磁気圏(青線)で対流速度を比較
- A~Dの期間で、衛星の電離圏フットプリントのずれ、磁力線に沿って等電位の仮定が成り立たない可能性があることを指摘

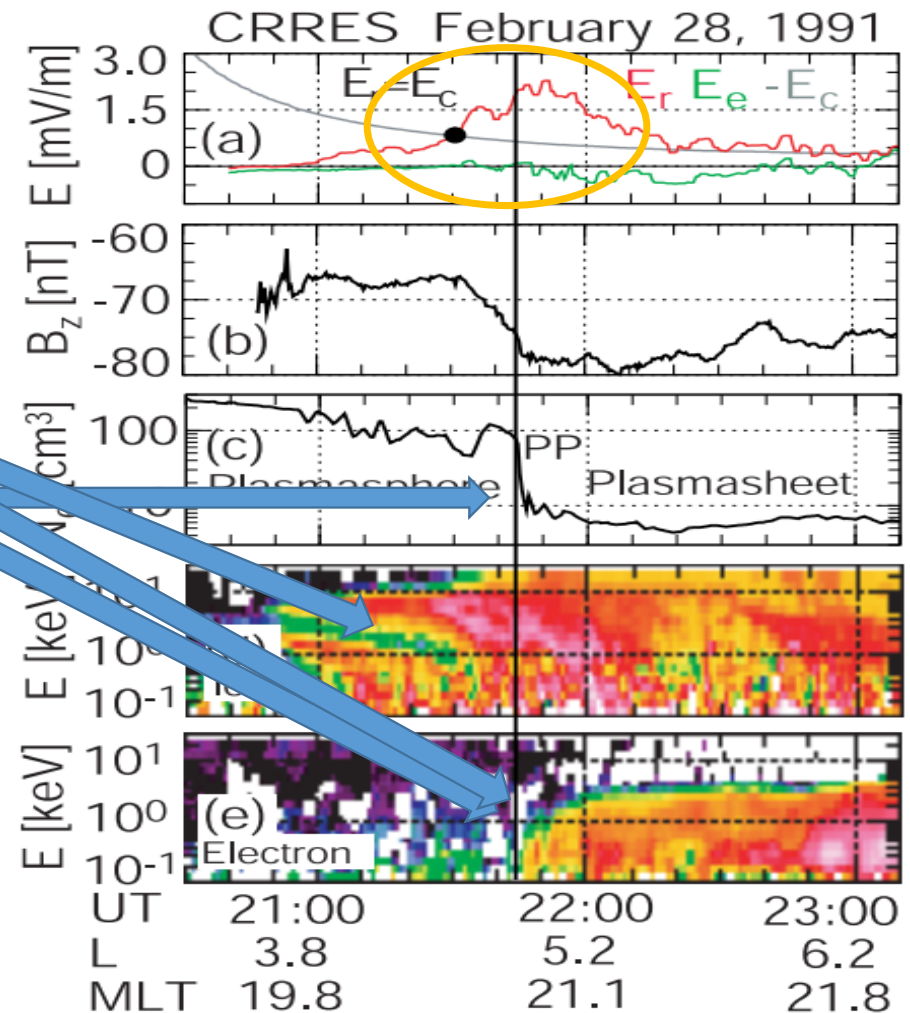
✓ 高緯度SuperDARNを使用しており、中緯度での、特にSAPS発生時の比較は行われていない。



3. CRESS衛星とDMSP衛星によるSAPSの電場観測 [Nishimura et al., 2008]

- CRRES衛星及びDMSP衛星を用いてSAPSの電場を捉えた。
- リングカレント粒子と電子プラズマシートの地球側境界の間で電場が増強
- プラズマ圏境界の位置と電子プラズマシートの位置が一致

✓電場のピークの電離圏側の対応などの電離圏での電場構造までは十分に理解されていない。



4. 研究の動機と目的

➤動機

- SAPSの生成メカニズムを考える上で重要な手掛かりとなる磁気圏の粒子・電場分布及びその変化が十分に分かっていない。
- SAPS電場の磁気圏側(分極電場)の影響と電離圏側(トラフによる正のフィードバック効果)の影響のどちらが強いのかについて決着が着いていない。

➤研究の目的

- SAPS電場を電離圏側(SuperDARN)と磁気圏側(あらせ衛星)で捉え、SAPSの位置を特定し、SAPSに伴う磁気圏の粒子分布の変化について調べる。
- SuperDARNとあらせ衛星の電場を比べることでSAPS発生時に磁力線に沿って等電位の仮定が成立しているかを検証する。

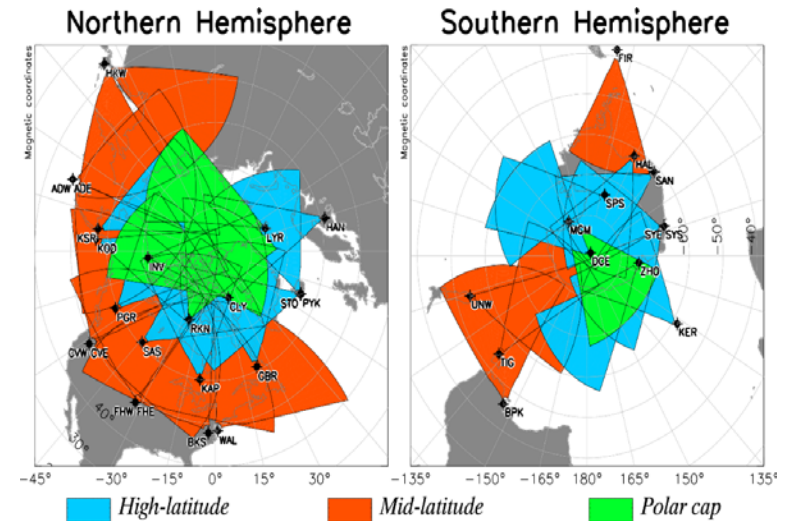
5. 観測機器

➤ SuperDARN

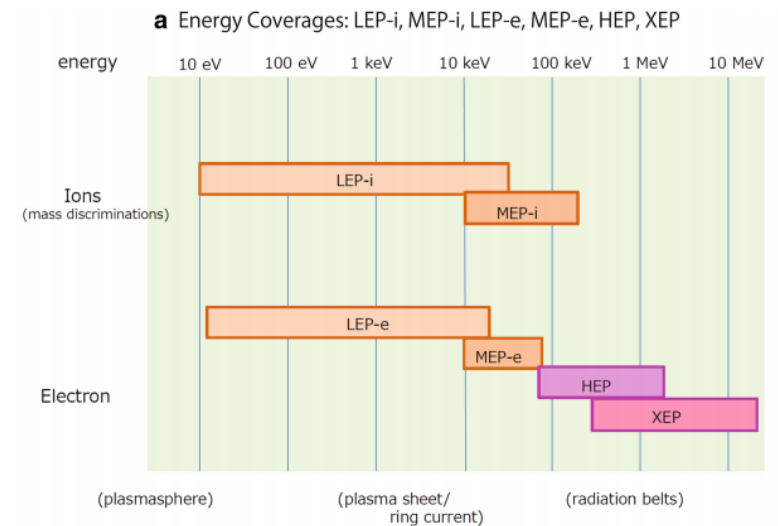
- The Super Dual Auroral Radar Networkの略で国際的なHFレーダーの観測網
- 本研究ではHOK,HKW,CVE,CVW,FHEの5つの中緯度レーダーを使用

➤ あらせ衛星

- 近地点 ~440 km,遠地点 ~32000, 軌道傾斜角 ~31度の楕円軌道衛星
- 粒子観測(LEP-i, LEP-e, MEP-i, MEP-e)と電場観測データ(PWE/EFD)を使用

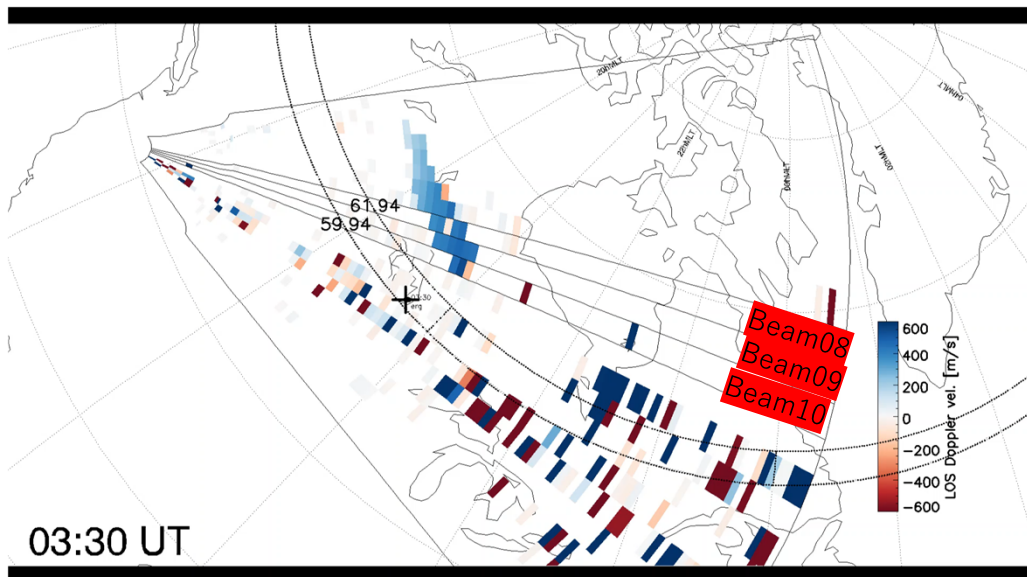


<http://vt.superdarn.org/tiki-index.php?page=Radar+Overview>

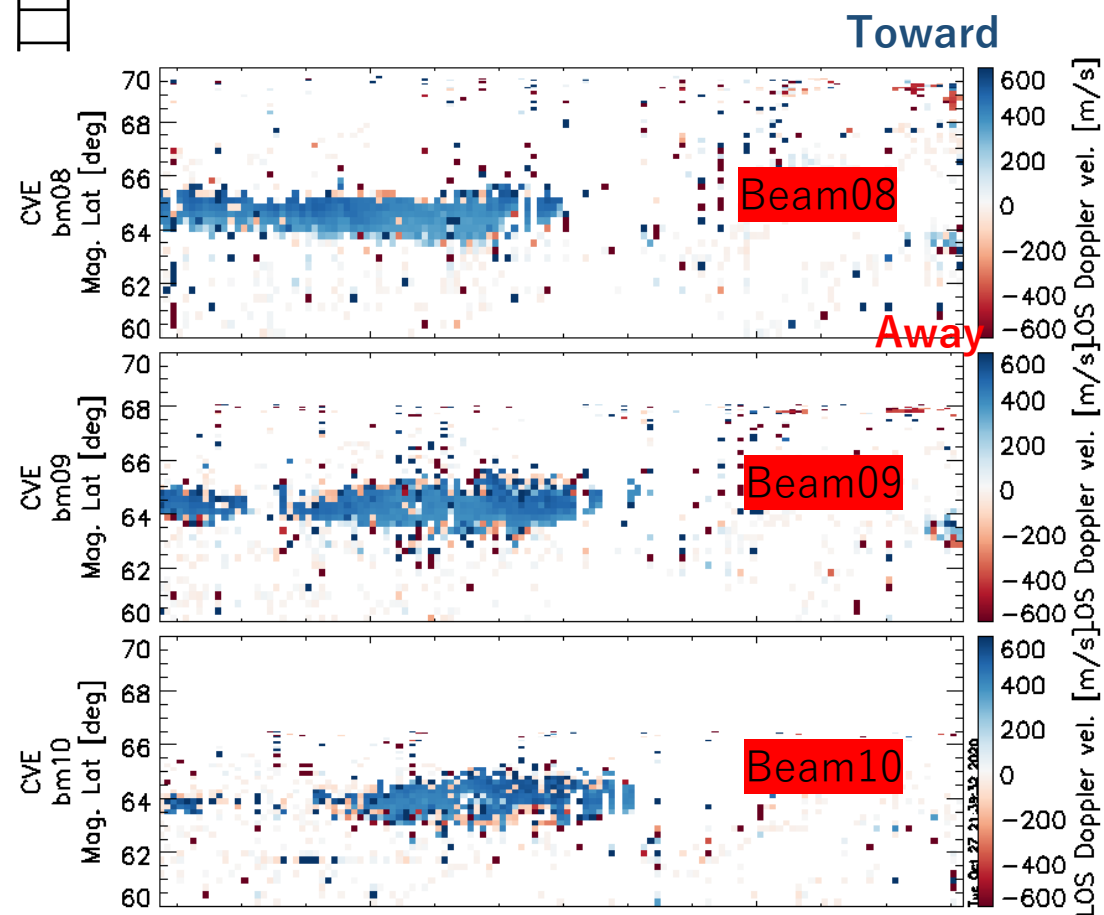


Miyoshi et al., 2018

観測例 2017年6月22日



- Mlat=63~66° あたりにレーダーに向かう方向の視線方向速度(青色)が観測された。
- これは東向きのSuperDARNにおいて西向きのフロー(SAPS)に相当する。



Lm	5.0	6.5
MLT	21.3	22.0
MLAT	17.0	23.2
hhmm	0400	0500
2017 Jun 22		

6. 観測手法

➤ イベント選択

1. Tsyganenko 2005モデルを用いてあらせのフットプリントを計算
2. 視線方向速度が $v_{losv} \geq 200 \text{ m/s}$
3. フットプリントの $\text{MLT} \pm 1, \text{MLAT} \pm 1^\circ$ 以内に5点以上データが存在(フィッティングの条件)

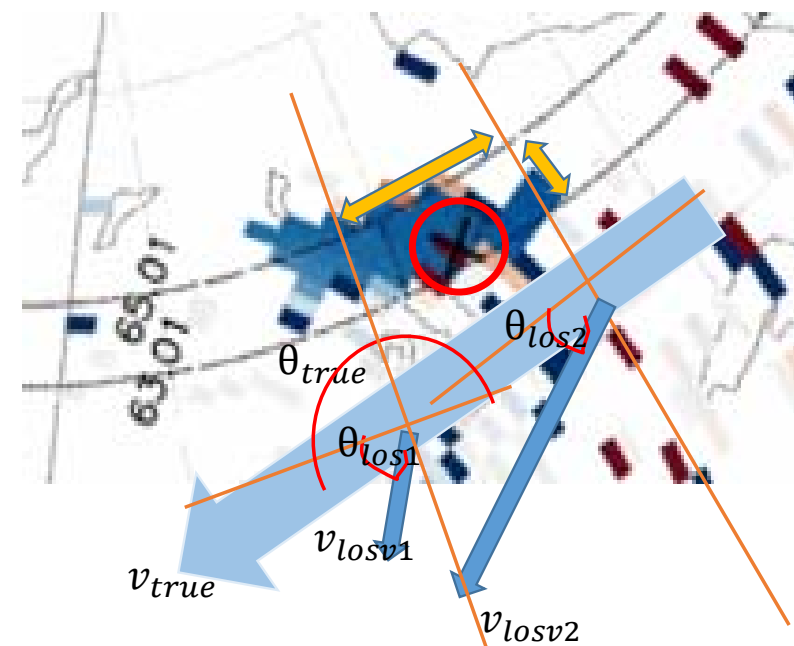
➤ 電場の計算方法

1. (1)、(2)を仮定しフットプリントの $\text{MLT} \pm 1, \text{MLAT} \pm 1^\circ$ 以内にフィッティングを行い、真のフロー速度 v_{true} を計算
 - (1)磁気緯度線上でフロー速度がー様
 - (2)同じスキャンは同時刻中に行っている。

$$v_{losv} = -v_{true} \cos(\theta_{true} - \theta_{los})$$

2. v_{true} から電場を計算

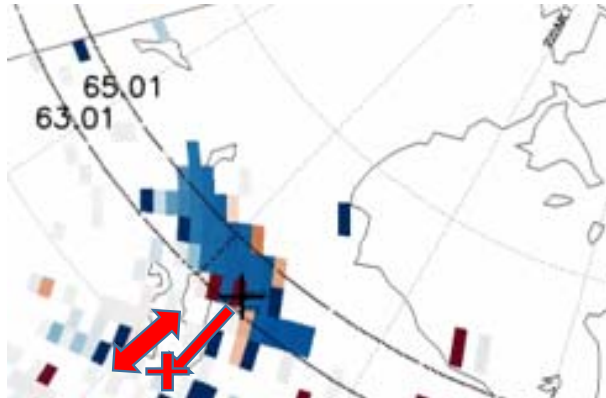
$$v_{true} = E \times B / B^2$$



v_{losv} :視線方向速度

θ_{los} :視線方向と西方向との間の角度

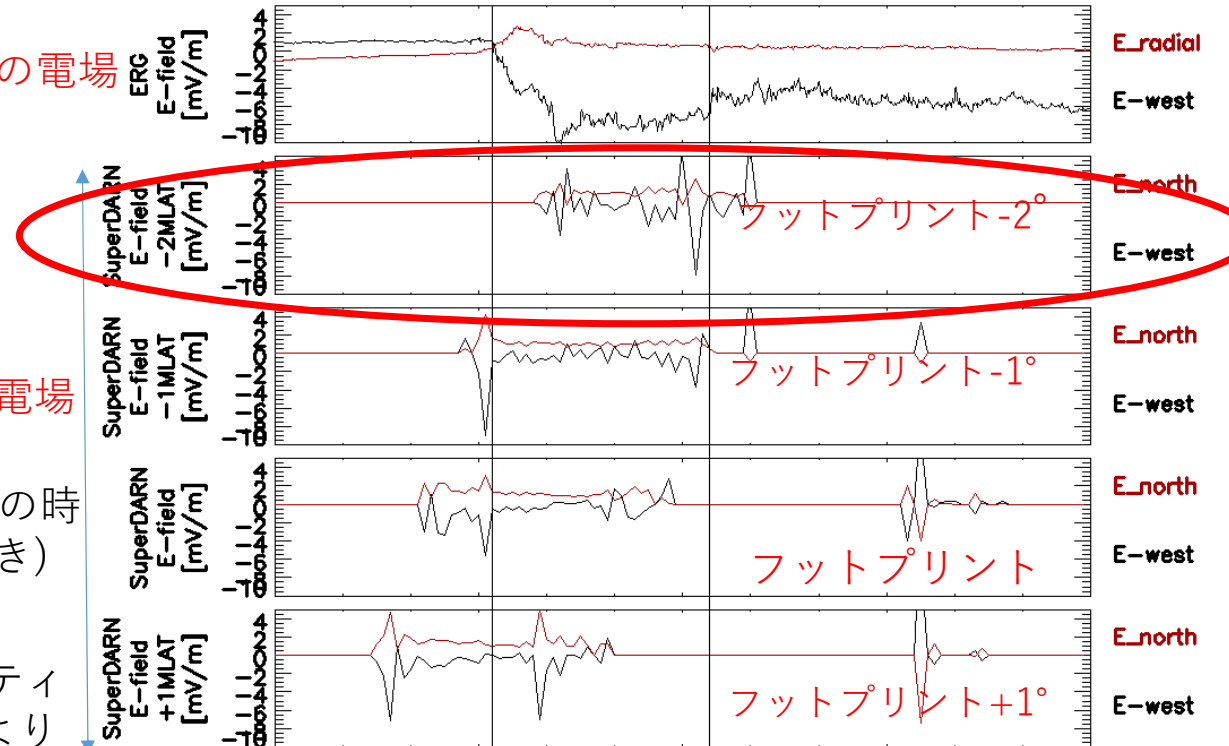
7. 結果 あらせとSuperDARN による電場観測



SuperDARNの電場

あらせの電場

南北成分(+:北向き) 東西成分(+:西向き)
あらせにおける電場の増加時間帯



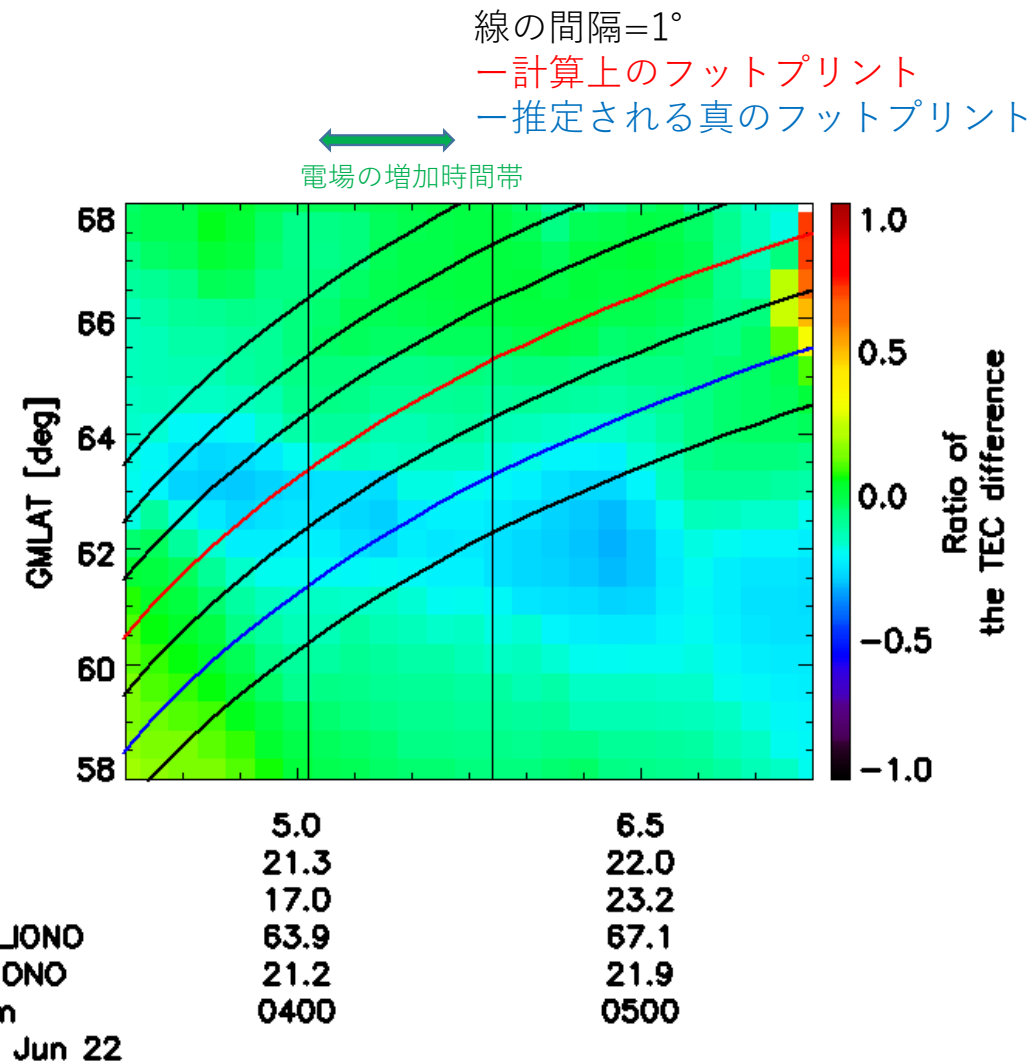
Lm	4.1	5.0	5.9	6.5	7.1
MLT	20.8	21.3	21.7	22.0	22.3
MLAT	12.2	17.0	20.5	23.2	25.3
MLAT_JONO	60.9	63.9	65.8	67.1	68.1
MLT_JONO	20.7	21.2	21.6	21.9	22.2
hhmm	0330	0400	0430	0500	0530
2017 Jun 22					

- あらせとSuperDARNの電場の大きさは、ほとんどの時間で一致していないが電場の方向性(東向き、極向き)は一致している。
- SuperDARNの電場観測では $\pm 1^\circ$ Mlat幅でフィッティングをしているため、あらせの電場の立ち上がりよりも前に、また、立ち下がりのあとも電場増加が見えるはずである。

→立ち上がりと立ち下がり時間からフットプリントから -1° Mlat ずらした場所が真のフットプリントと推定

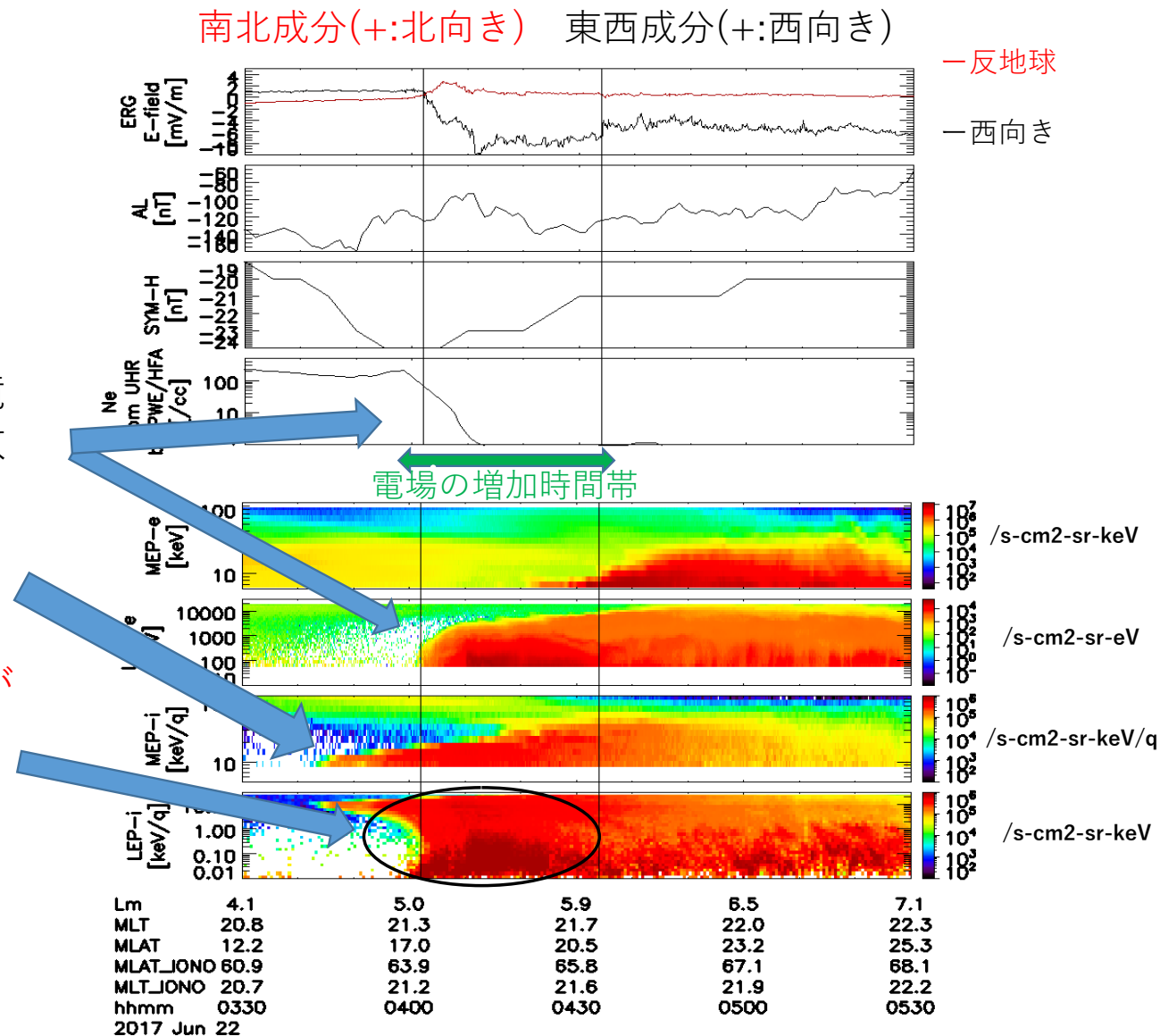
トラフ位置

- $RTEC = \frac{TEC - TEC(\text{静穏平均})}{|TEC(\text{静穏平均})|}$
- RTECがマイナスとなる場所が静穏日に比べ電子密度が低下している＝トラフの位置
- Tsyganenko 2005モデルを用いて計算したあらせのフットプリント(赤線)から-2° MLATした位置(青線)で、RTECの減少位置(トラフ)と電場の増加が一致する。



あらせによる電場、 粒子観測

- 電場の増加開始位置が、プラズマ圏境界、プラズマシートの内側境界と一致
- リングカレントイオン(10 keV程度)はプラズマ圏に侵入
- 電場増加時に低エネルギープロトン (0.01~1 keV) のフラックスの増加が見られる。

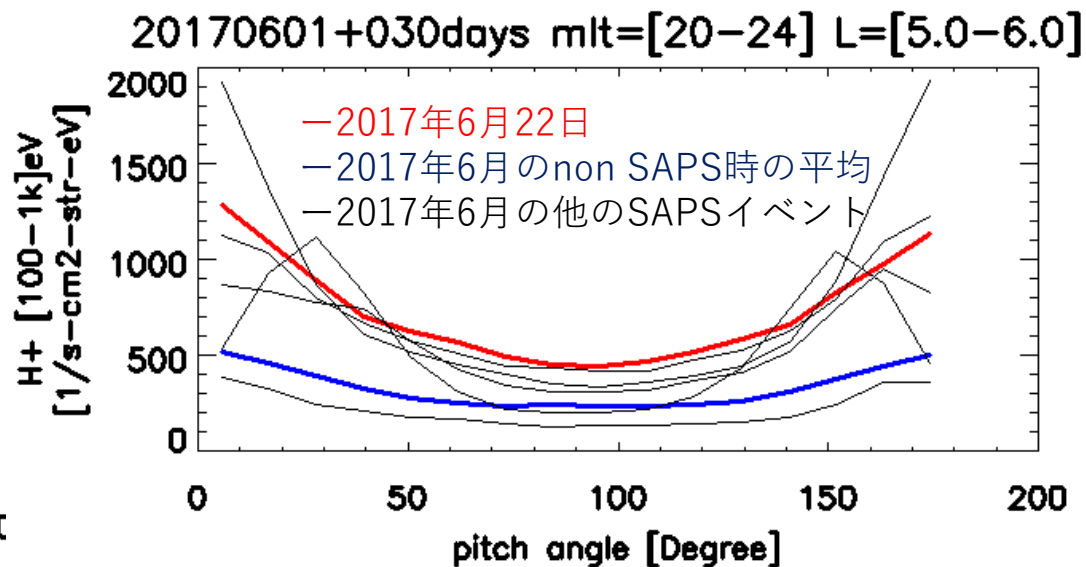
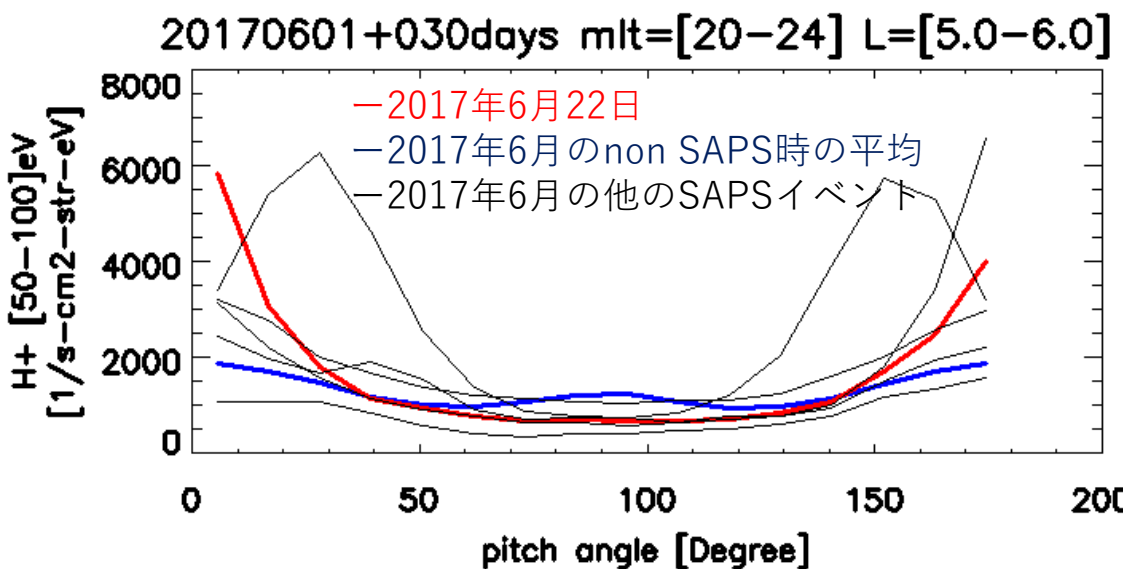


低エネルギープロトンのピッチ角分布

- 2017年6月22日のイベントでは、6月の月平均に比べて、**ピッチ角0° 付近の50~100eVのフラックスが約3倍に増加している。**
- ピッチ角180° 付近のフラックスも約2倍増加している。
- ピッチ角90° 付近のフラックスは月平均に比べて、増加していない。

50eV~100eV

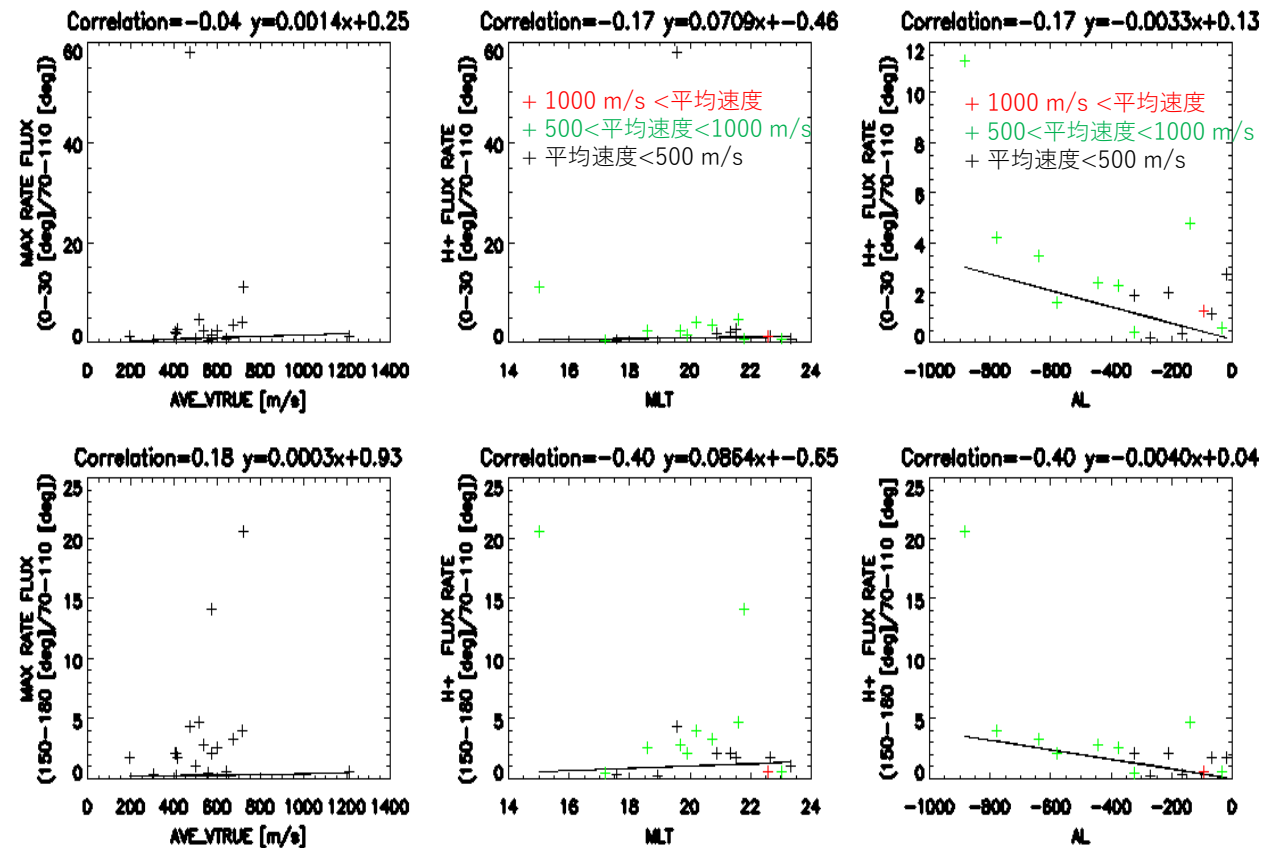
100eV~1keV



磁力線に平行、反平行のフラックス増加の統計解析

- 縦軸: 磁力線に平行方向(反平行)のフラックスが最大時の磁力線に垂直方向のフラックスとの比

$$= \frac{\text{磁力線に平行(ピッチ角 } 0-30) \text{ なフラックス}}{\text{磁力線に垂直(ピッチ角 } 70-110) \text{ なフラックス}}$$
- 横軸:
 AVE_VTRUE: SuperDARN観測されたSAPSの平均速度
 MLT: 磁力線に平行(反平行)方向のフラックスが最大時のMLT
 AL: SuperDARNでSAPSが観測された時間内の最低値
- SAPS速度、MLTと比べてAL指数に最もよい相関



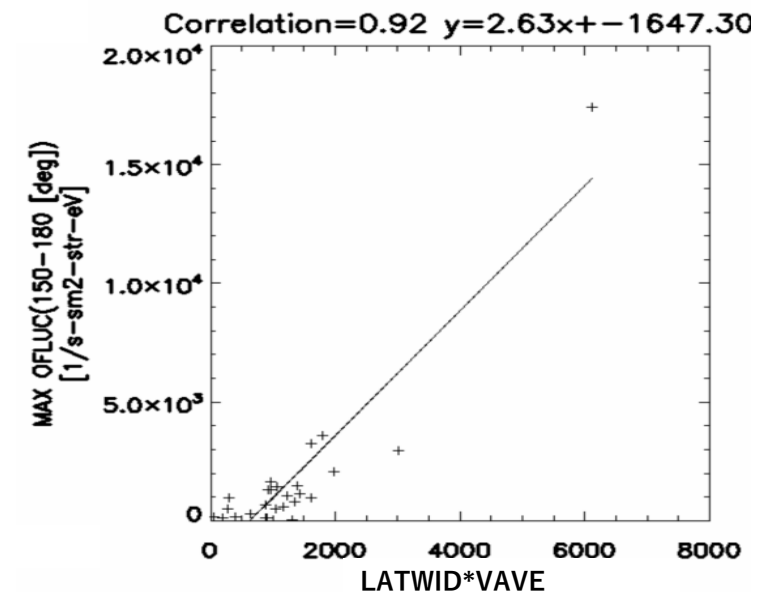
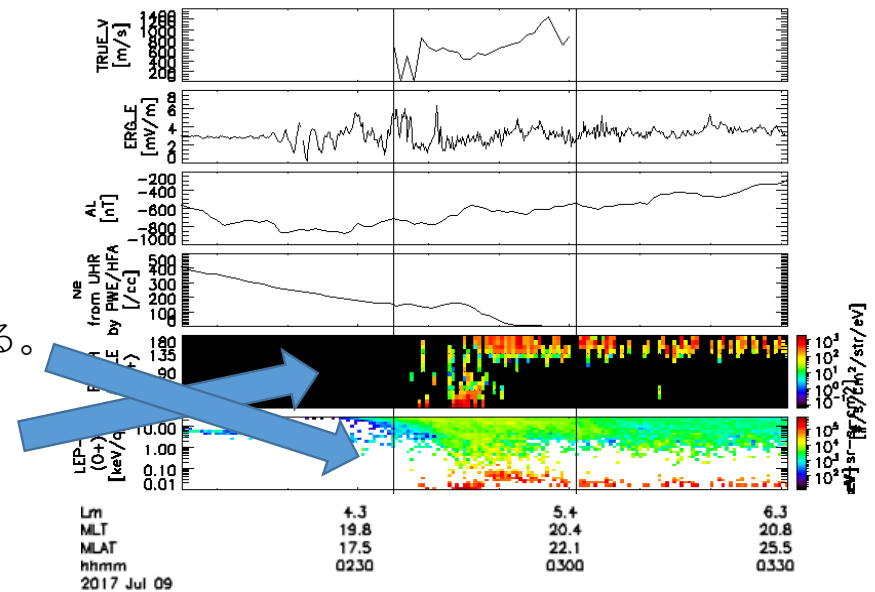
O+フラックスの増加

➤ 2017年7月9日 02-03UT付近の例

- SAPS発生時にO+イオン(0-100 eV)のフラックスが増加している。
- 磁力線に対して反平行(ピッチ角180° 付近)で増加が見られた。

➤ 統計解析の結果

- 縦軸: SAPS発生時の磁力線に反平行なO+イオンフラックスの最大値
- 横軸:
LATWID: SuperDARNで観測されたSAPSの緯度幅
VAVE: SAPSの平均速度
- O+イオンフラックスの増加は、SAPSの緯度幅×平均速度に最もよい相関を見せた。



8.考察 1/2

➤ フットプリントのずれ

- SuperDARNで得られた電場の立ち上がり、立ち下がり位置から真のフットプリントは -1° MLATと推定
- 電場増加時にトラフと通過したのはフットプリントから -2° した位置

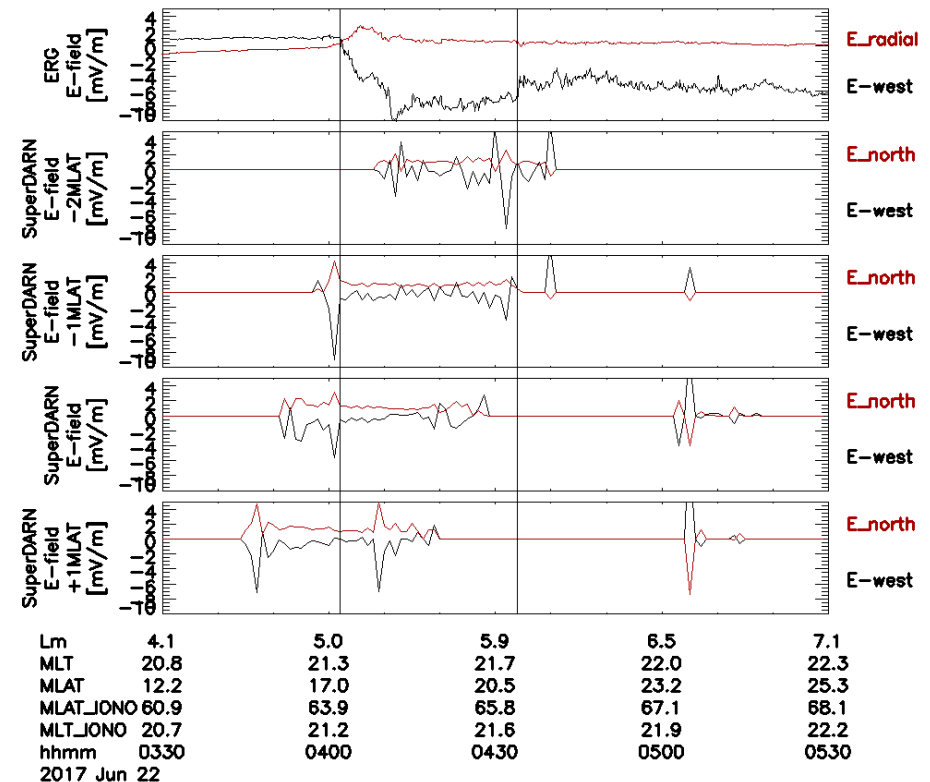
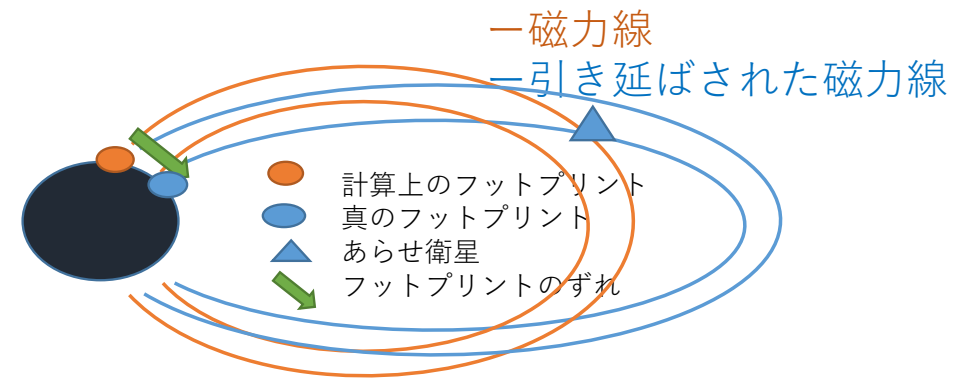
→真のフットプリントは、計算されたフットプリントより磁気緯度 $1\sim 2^{\circ}$ 赤道側にずれている。

→磁場モデルが磁気擾乱時における夜側の磁力線の引き伸ばしを表現できていない可能性がある。

➤ 電場の比較

- 電場の方向性については、東向き、極向きで一致している。
- ほとんど全ての時間であらせとSuperDARNで得られた電場が一致していない。
- フットプリントをずらしても改善しない。

→本研究では電場の立ち上がり、立ち下がりの位置の比較にのみ使用する。



8.考察 2/2

➤ 低エネルギープロトンフラックスの増加について

- 観測されたプロトンのエネルギーが0.01-0.1 keVと低いこと
- ピッチ角が 0° 、 180° 付近のフラックスが増加している。

→磁力線に沿って電離圏から流れてきたイオンである可能性がある。

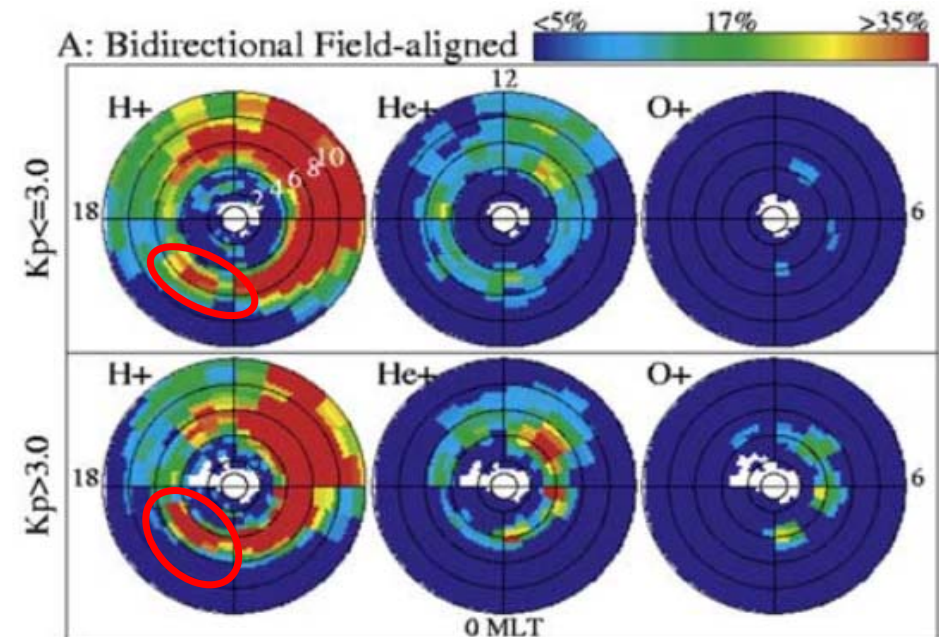
- Warm plasma cloakでは、高緯度の電離圏から磁気圏尾部に輸送されたプラズマが地球方向に輸送されている。[Giles et al., 1993]
- KP指数の増加に伴い、夕方側にシフトすることが観測されているが、この夕方側のフラックスの増加がサブストーム、またはSAPSに関連して電離圏から直接流出してきた粒子による可能性がある。

➤ 低エネルギーO+フラックスの増加について

- 観測されたO+イオンのエネルギーが0.01-0.1 keVと低いこと
- ピッチ角が 180° 付近のフラックスが増加している。

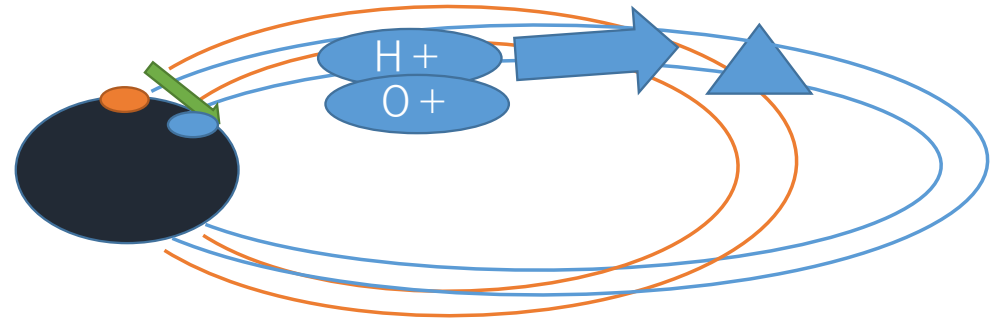
→磁力線に沿って電離圏から流れてきたイオンである可能性がある。

- O+イオンフラックスの増加は、SAPSの緯度幅×平均速度に最もよい相関を見せており、SAPSのポテンシャルに関係がある可能性がある。



Warm plasma cloak (10-100 eV)の分布 [Giles et al., 1993]

9. 結論



- SAPS発生時などの磁気擾乱時の磁場モデルによるあらせのフットプリントは真のフットプリントから $1\sim 2^\circ$ 高緯度側に(2017年6月22日のイベントでは)ずれており、**磁場モデルが夜側の磁力線の引き伸ばしをうまく表現できていない可能性がある。**
- あらせとSuperDARNの電場の大きさは、フットプリントを変化させても対応関係が改善しないため、SAPSの細かな電場構造を議論することはできなかった。
- SAPS発生時に低エネルギーイオンフラックスの増加が観測された。
→ **電離圏から磁気圏に流れ込んだイオンがあらせ衛星で観測された可能性がある。**