

あらせーSuperDARN連携観測による超低周波波動に伴う高緯度電離圏変動の発生機構について

本日のキーポイント

磁気圏から電離圏へ持ち込まれた東西方向の電場振動が電離圏を上下方向に振動させ、夕方側サブオーロラ帯の全電子数(TEC)の5分振動を引き起こした。

新堀淳樹(名大ISEE)、細川敬祐(電通大)、堀智昭(名大ISEE)、大塚雄一(名大ISEE)、Pasha V. Ponomarenko (サスカチュアン大)、寺本万里子(九工大)、尾花由紀(九大i-SPES)、西谷望(名大ISEE)、西岡未知(NICT)、Septi Perwitasari (NICT)、熊本篤志(東北大)、土屋史紀(東北大PPARC)、松田昇也(金沢大)、笠原禎也(金沢大)、松岡彩子(京大WDC)、三好由純(名大ISEE)、篠原育(ISAS/JAXA)

1. はじめに

1.1 Pc 5地磁気脈動とその研究対象

| ULF pulsations | | Period (sec) | Frequency (mHz) |
|----------------|-----|--------------|-----------------|
| Continuous | Pc1 | 0.2-5 | 200-500 |
| | Pc2 | 5-10 | 100-200 |
| | Pc3 | 10-45 | 22-100 |
| | Pc4 | 45-150 | 6.7-22 |
| Irregular | | | |
| | Pi1 | 1-40 | 25-200 |
| | Pi2 | 40-150 | 6.7-25 |

地磁気脈動(Pc5)：

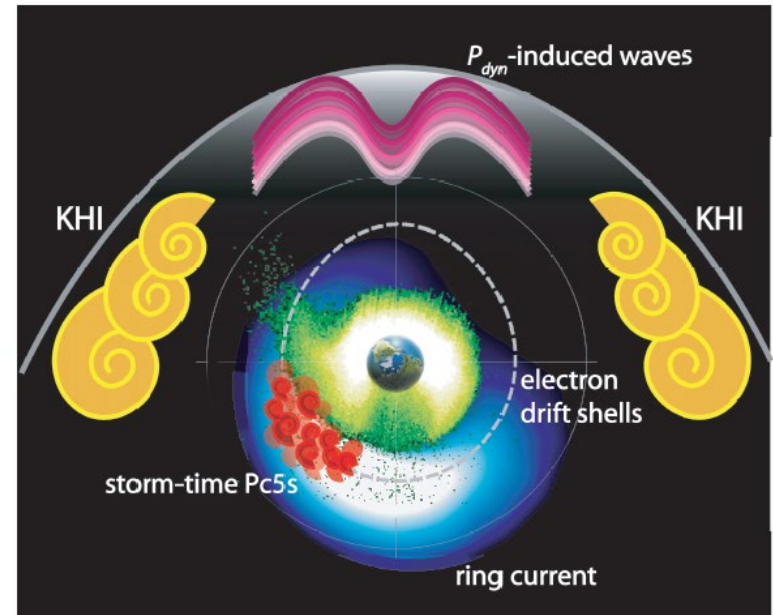
極超低周波(ULF)波動に分類され、周期が150-600秒、大振幅の波動現象

その研究対象：

太陽風—磁気圏相互作用(磁気圏への電磁エネルギー輸送)

磁気圏—電離圏結合(電流、電場生成、プラズマ密度変化)

内部磁気圏での粒子加速過程(ドリフト共鳴)

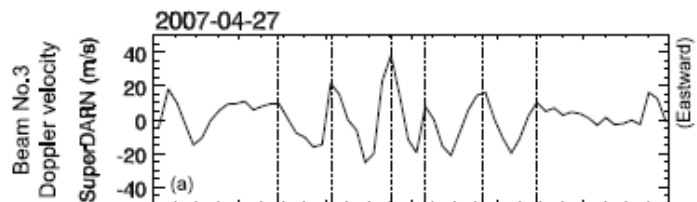


磁気圏におけるPc 5脈動のエネルギー源
[Ukhorskiy et al., 2009]

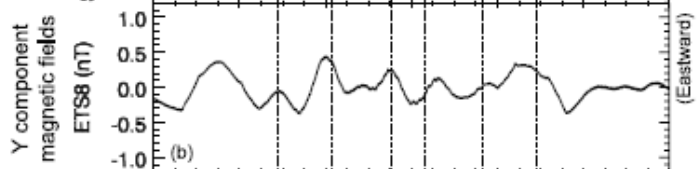
1.はじめに

1.2 SuperDARNレーダーによるPc 5脈動の観測

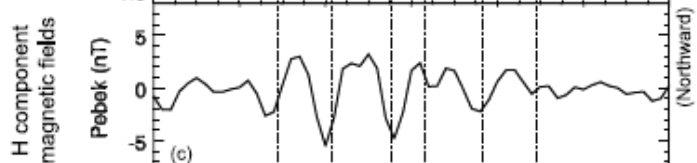
KSR
レーダー



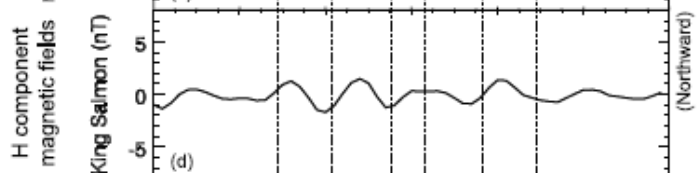
ETS8
衛星



磁力計
Pebek

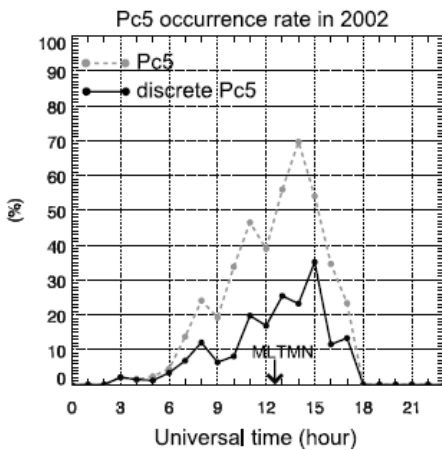


磁力計
King
Salmon



07:00 07:10 07:20 07:30 07:40 07:50 08:00
UT (hh:mm)

SuperDARNレーダーを使用する意義：
電離圏の条件に制約があるが、**2次元で電離圏電場を直接的に観測できる点**

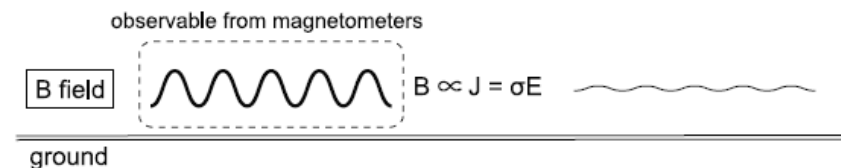
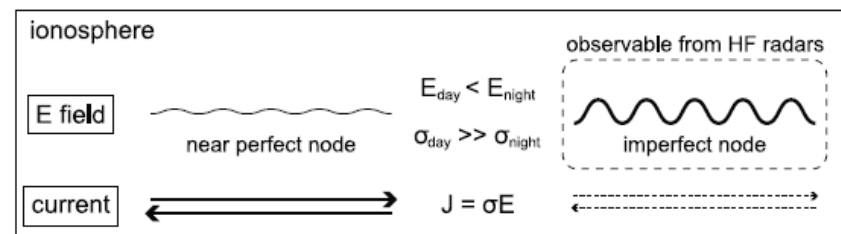


KSRレーダーで観測されたPc5脈動に伴うプラズマ速度変動の出現頻度

[Sakaguchi et al., 2012]

day: high conductivity (σ_{day})

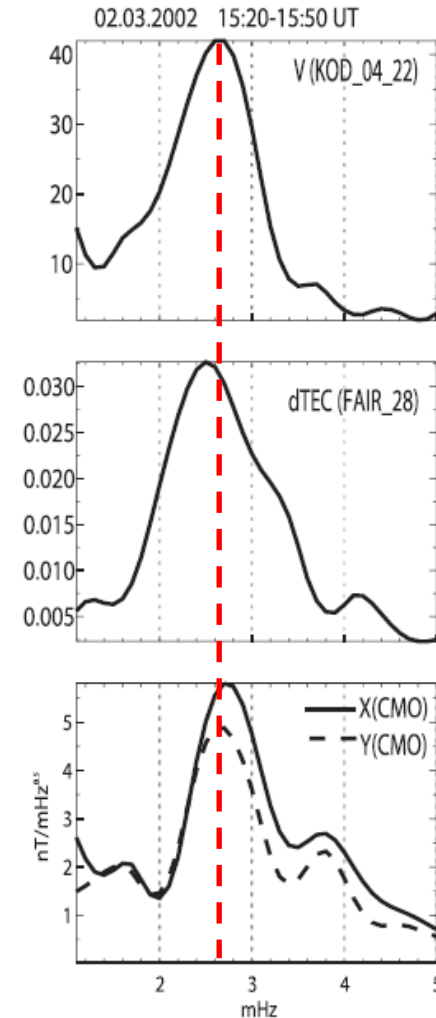
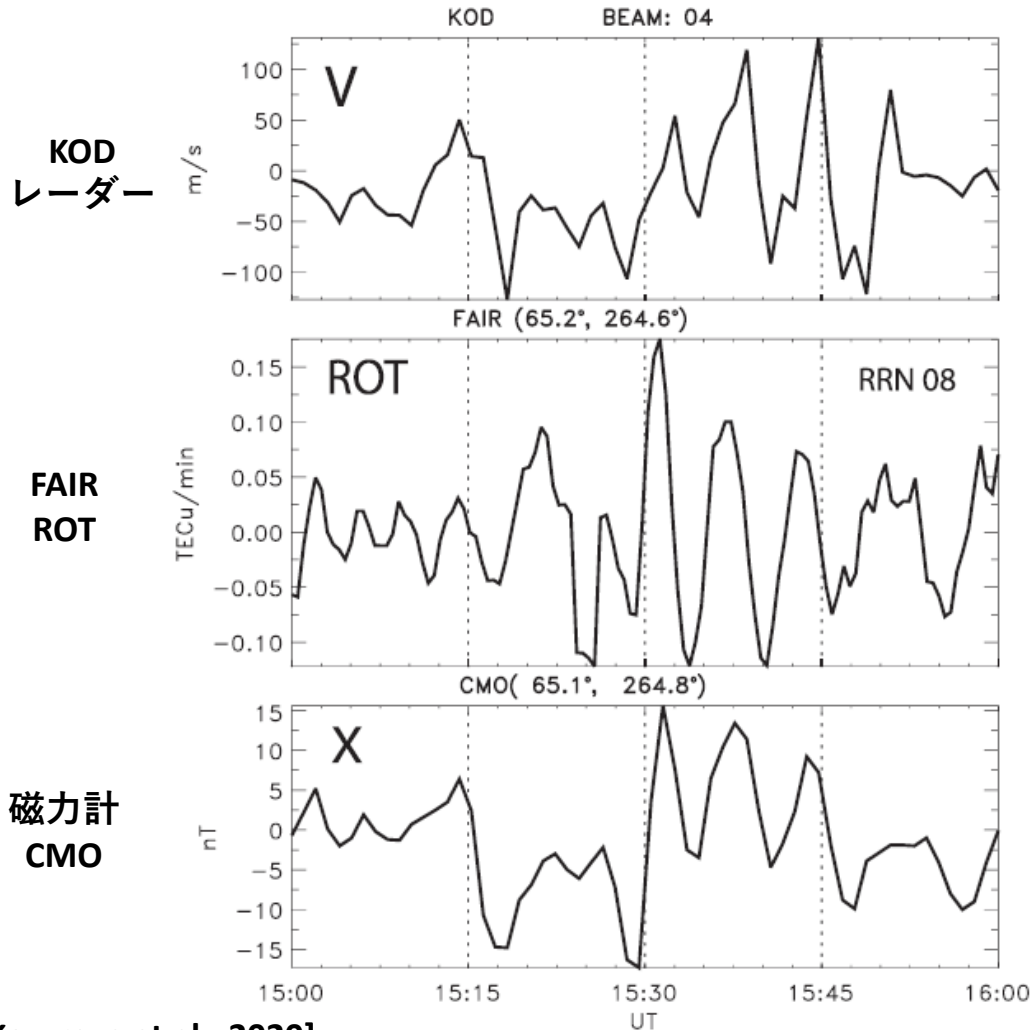
night: low conductivity (σ_{night})



夜側で電場変動が観測されやすい理由を示した図

1.はじめに

1.3 GNSS-TEC観測を用いたPc5脈動による電離圏電子密度変化



右図：
各データの
周波数スペ
クトル

[Kozyreva et al., 2020]

1. はじめに

1.4 これまでの研究の問題点と本研究の目的

GNSS-TEC観測法を用いた研究の問題点(特に、Kozyreva et al. [2020]の場合)

1. TEC値の導出にはCarrier phaseデータのみを使用
→TECのバイアス推定が不十分($2n\pi$ の任意性を不除去)
2. TEC値の代わりにその時間微分であるROT値を利用
→位相情報が $\pi/2$ ずれるため、正確な位相差の議論がしにくくなる
3. 電離圏プラズマフローとTEC変動の位相差に着目していない



Pc 5脈動がどのようなメカニズムで電離圏電子密度変動を起こしているのかが未解明の事項として残されている

本研究の目的

あらせ衛星とSuperDARN共同観測キャンペーン時に得られたデータとGNSS-TEC観測データを用いて、**2022年11月23日に観測されたPc 5脈動による電離圏電子密度変動の要因を解明する**

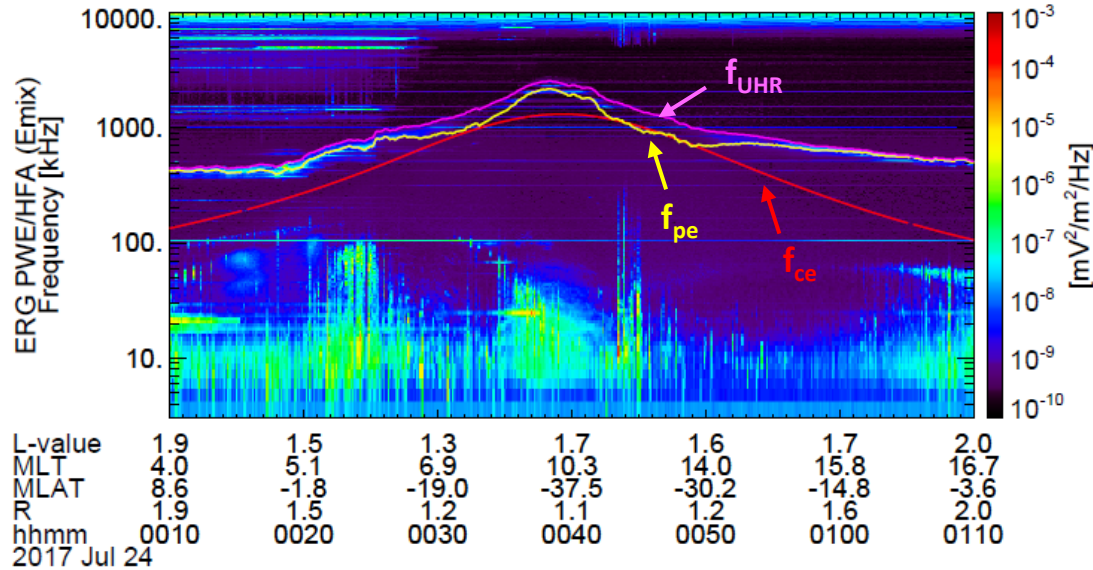
2. 観測データと解析手法

2.1 観測データおよび使用モデル

| データ/モデル | 目的 | 提供元 |
|--------------------------------------|------------------------------|---|
| GNSS-TEC | 電離圏電子密度変化 | ISEE/NICT |
| SuperDARNレーダー (PGR, SAS) | 電離圏プラズマフロー変化 | ISEE |
| あらせ衛星 (PWE-HFA/OFA, MGF) | 内部磁気圏の電子密度変化 Pc 5脈動の発生域 | ISEE |
| OMNI | 太陽風と地磁気の概況把握 | CDAWeb/NASA |
| F10.7 | IRIモデルのインプットデータ | ISEE |
| IGRF-13モデル | 高度300 kmの磁気緯度の計算 | IAGA |
| IRIモデル 2023/10/29にIRI-20が リリース | 電離圏電子密度の高度プロファイル モデル計算に利用 | https://irimodel.org/ |

2. 観測データと解析手法

2.2 電子密度の導出方法



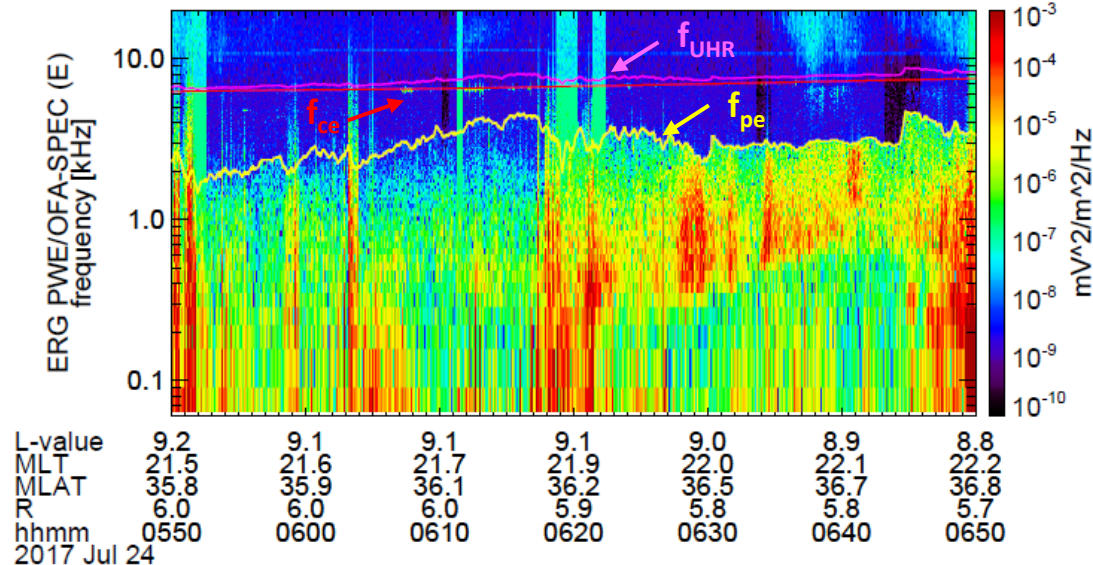
$f_{UHR} > 20 \text{ kHz (PWE/HFA)}$

高域混成共鳴(UHR)波動の上限周波数から導出

$$f_{UHR} = \sqrt{f_{pe}^2 + f_{ce}^2}$$

f_{pe} : 電子プラズマ周波数

f_{ce} : 電子サイクロトロン周波数



$f_{UHR} < 20 \text{ kHz (PWE/OFA)}$

$f_{pe} > f_{ce}$

UHR波動の上限周波数から導出

$f_{pe} < f_{ce}$

ホイッスラー波のカットオフ周波数 (f_{pe})から直接導出

2. 観測データと解析手法

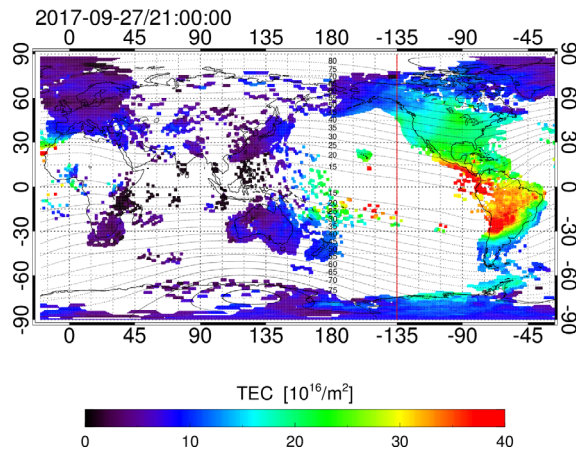
2.3 rTEC (ratio of the TEC difference)値の導出方法

○次式に従って擾乱時と10日静穏日平均TEC値の差を求め、その値をTEC平均値で規格化

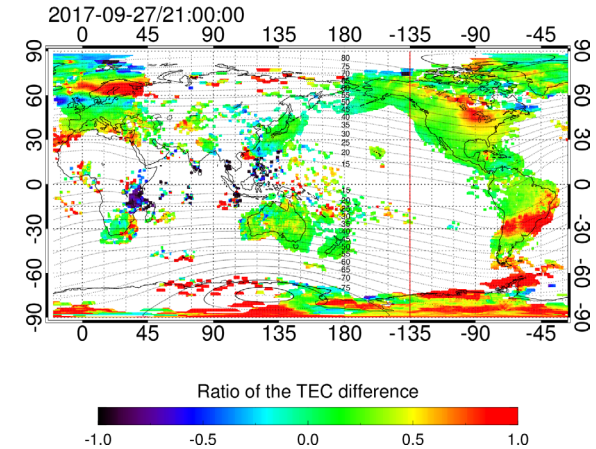
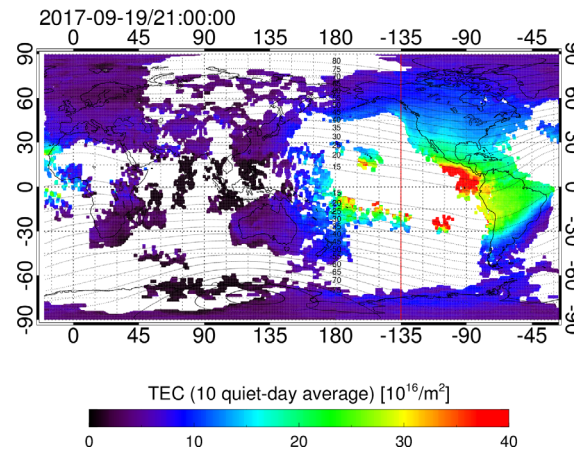
$$rTEC = (TEC_{st} - TEC_{sq}) / |TEC_{sq}|$$

[Immel and Mannucci, 2013;
Sori et al., 2019, shinbori et al.,
2020, 2021, 2022]

(ex. 2017/09/27 21:00)



(ex. 9月の10静穏日)



地磁気擾乱時の全球
TECの2次元マップ

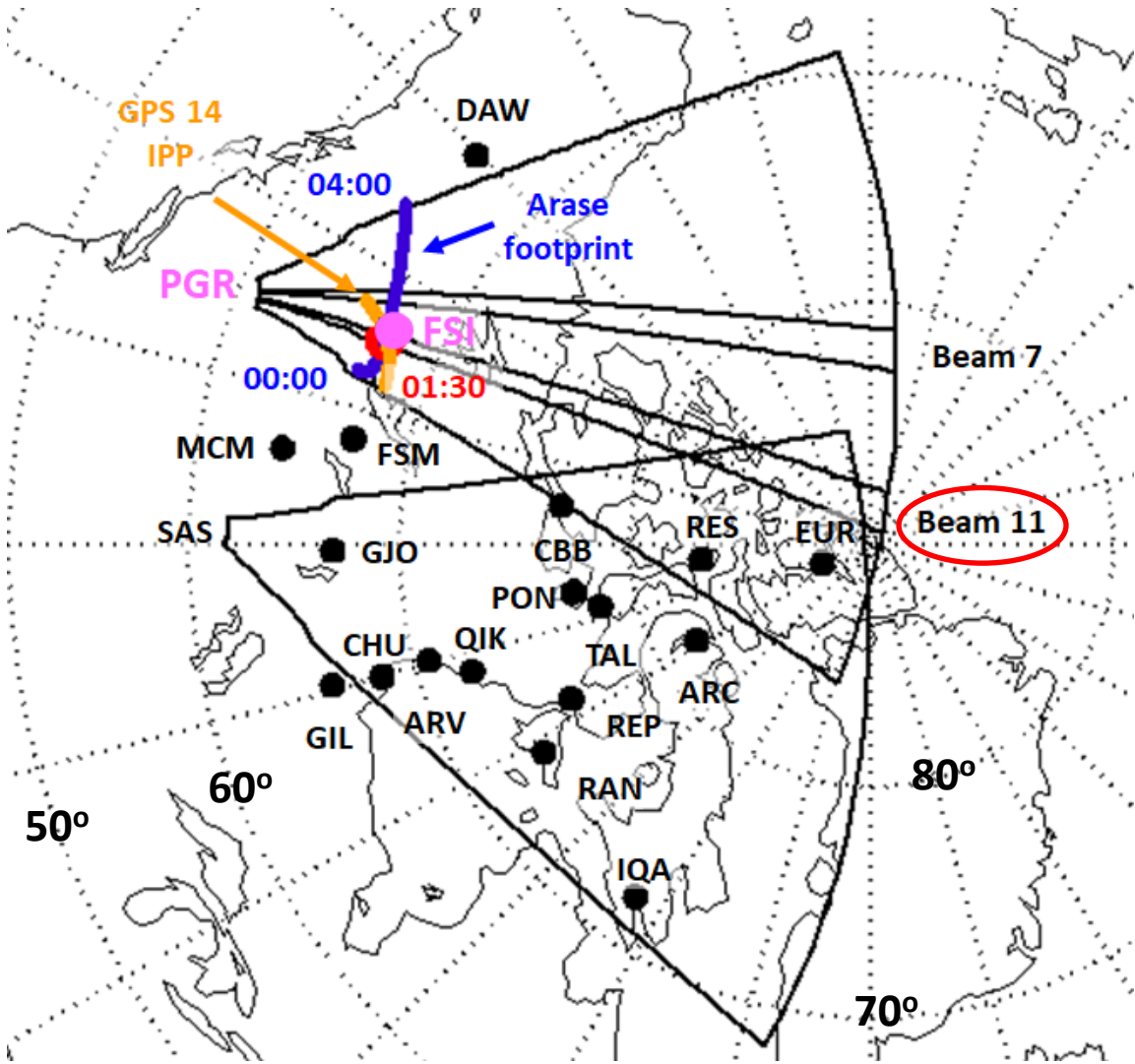
10日地磁気静穏日TEC
の平均値

地磁気擾乱時の規格化
差分TECの2次元マップ

○オーロラオーバル、中緯度トラフなどの電離圏構造が同定しやすくなる

3. 解析結果

3.1 北米における2機のSuperDARNレーダーの視野とGNSS観測点



●解析上ポイント

各ビームの視線方向成分の電離圏プラズマフローしか観測できない



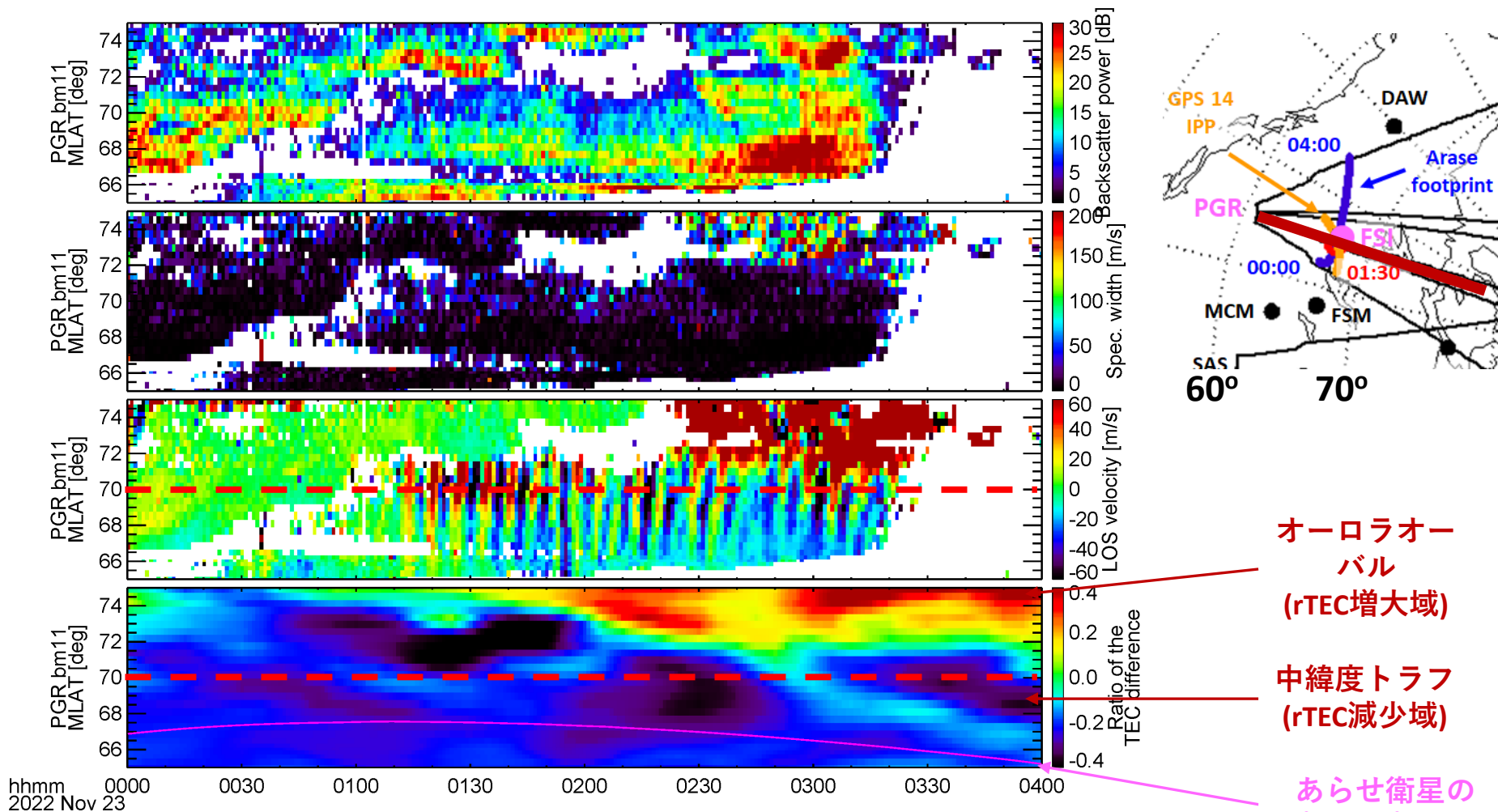
磁気経線にほぼ沿ったbeam 11の視線速度データを選定



電離圏の鉛直振動に関わる東西方向の電場の情報が得られる

3. 解析結果

3.2 Pc 5脈動の出現領域(TECデータとの比較)



オーロラオーバル
(rTEC増大域)

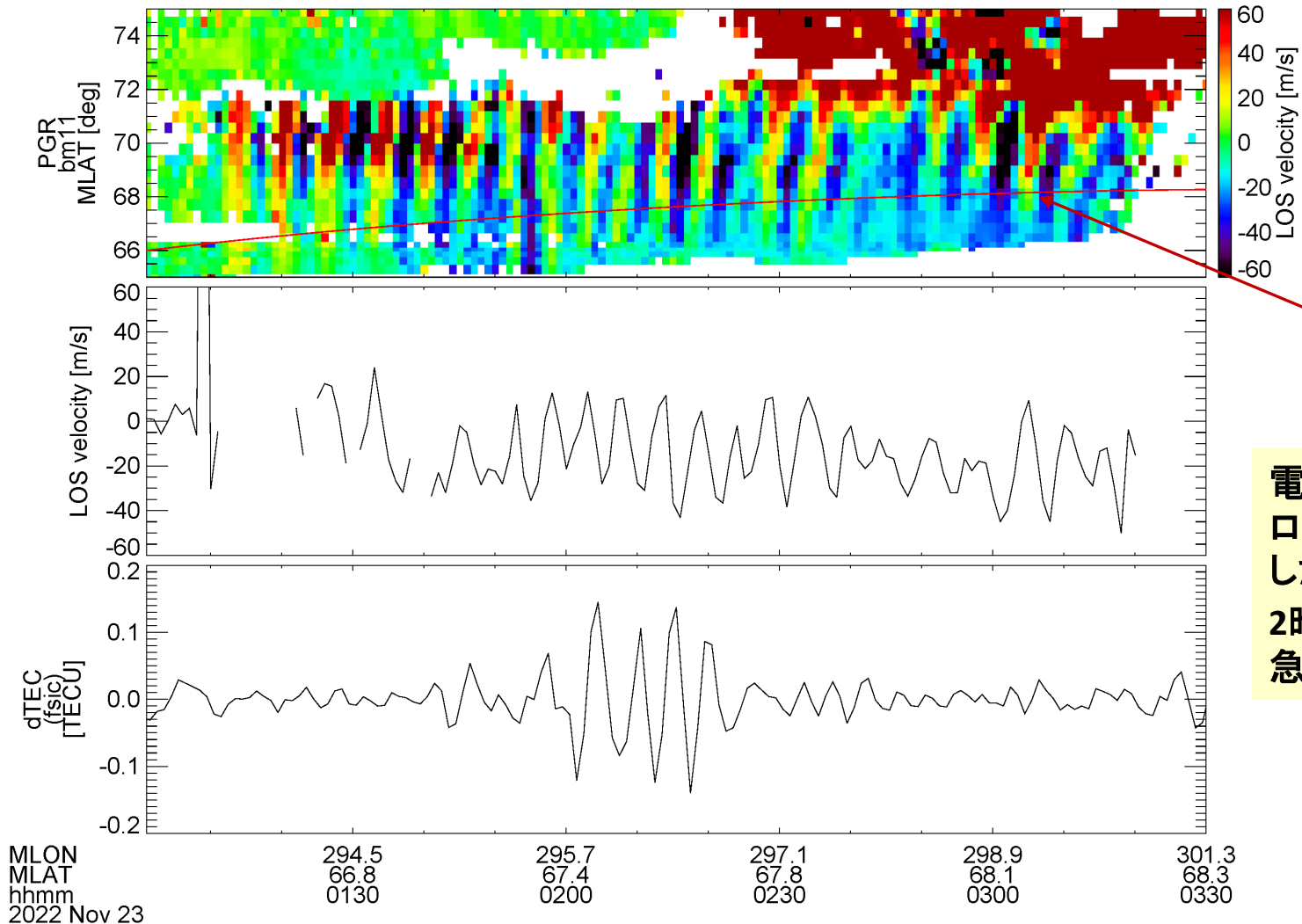
中緯度トラフ
(rTEC減少域)

あらせ衛星の
フットプリント

TECの減少域(深いトラフ)の出現によって視線方向速度の振幅が大きくなる傾向にある

3. 解析結果

3.3 GNSS-TECとSuperDARNレーダーの比較

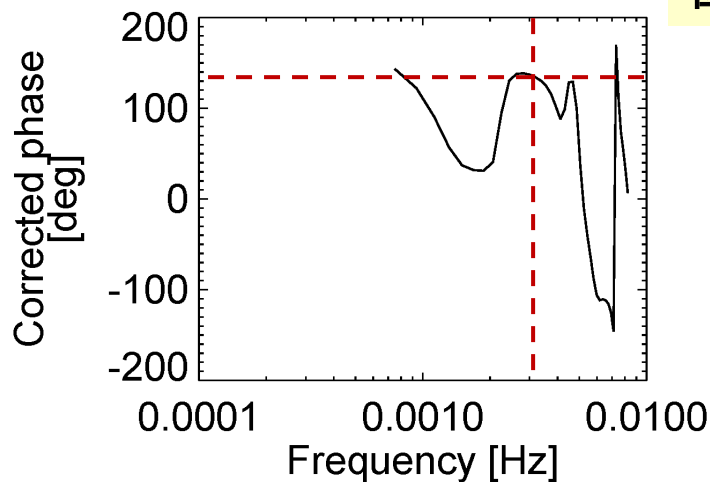
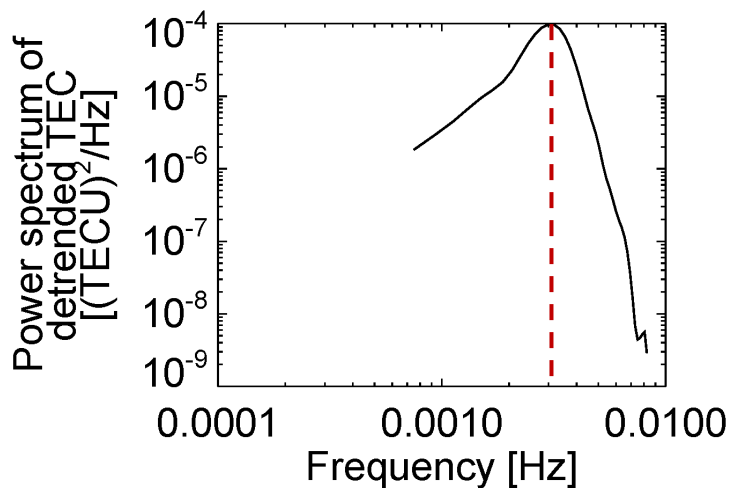
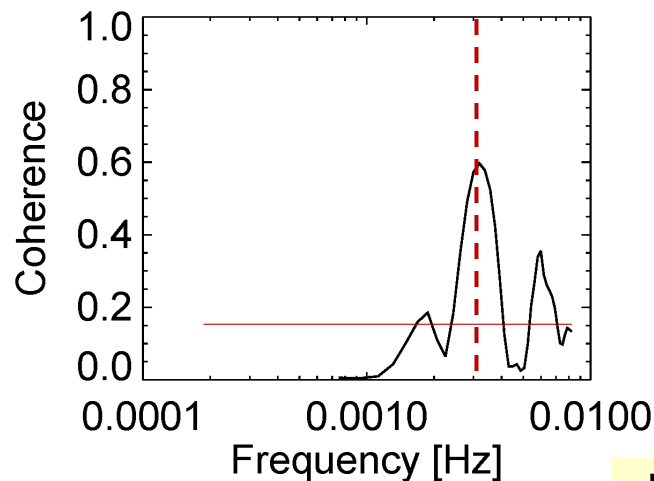
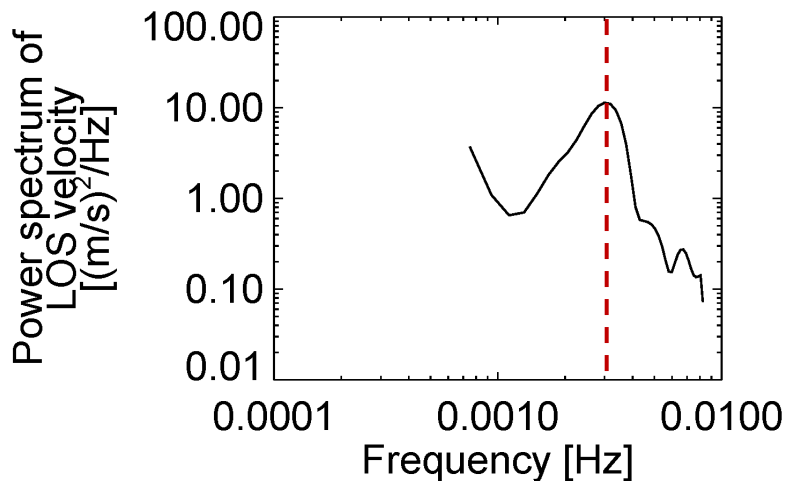


FSI受信機と
GPS-14のIPPの
位置

電離圏プラズマ
ローの振動に呼応
したTEC変動が出現
2時過ぎに振幅が
急激に増大する

3. 解析結果

3.4 クロススペクトル解析結果



卓越周期: 5分
位相差: 135度

4. 考察(TEC変動のメカニズム)

4.1 ULF波動による電離圏電子密度(TEC)変動の物理機構

1. 電離圏を伝搬する磁気音波が駆動するプラズマ密度変調[Sciffer and Waters, 2002; Pilipenko and Fedorov, 1995]
2. 周期的な磁気圏からの粒子降下[Pilipenko et al., 2014]
3. 水平方向の電離圏プラズマ密度不均一性[Waters and Cox, 2009]
4. 電離圏E領域におけるイオン加熱(摩擦加熱)[Pilipenko et al., 2014]
5. 磁力線方向のプラズマ輸送[Cran-McGreehin et al., 2007]
6. **電離圏の周期的な上下運動**[Pilipenko et al., 2014]

Pc 5脈動が作る東西電場による電離圏プラズマの電場ドリフト

※高緯度であっても伏角は90度でないので、鉛直方向のドリフト運動が生じる

どのメカニズムが電離圏プラズマ密度変化に対して寄与しているかが不明であった

4. 考察(TEC変動のメカニズム)

4.2 GNSS-TECと電離圏プラズマフロー変化の位相差の物理的意味

電離圏電子密度変化を記述する連続の式

$$\frac{\partial n}{\partial t} + \nabla \cdot (n\mathbf{v}_E) = P - L$$

n : 電子密度、 \mathbf{v}_E : 電場ドリフト速度、 P : 生成、 L : 損失

n_e と v_1 の平面波近似、東向き伝搬

生成と損失はなし

$$n_{e1}, v_1 \propto \exp\{i(\omega t - kx)\} \quad k_x = 0$$

$$P = 0, L = 0$$

n_e と v_1 の関係は次式のようになる

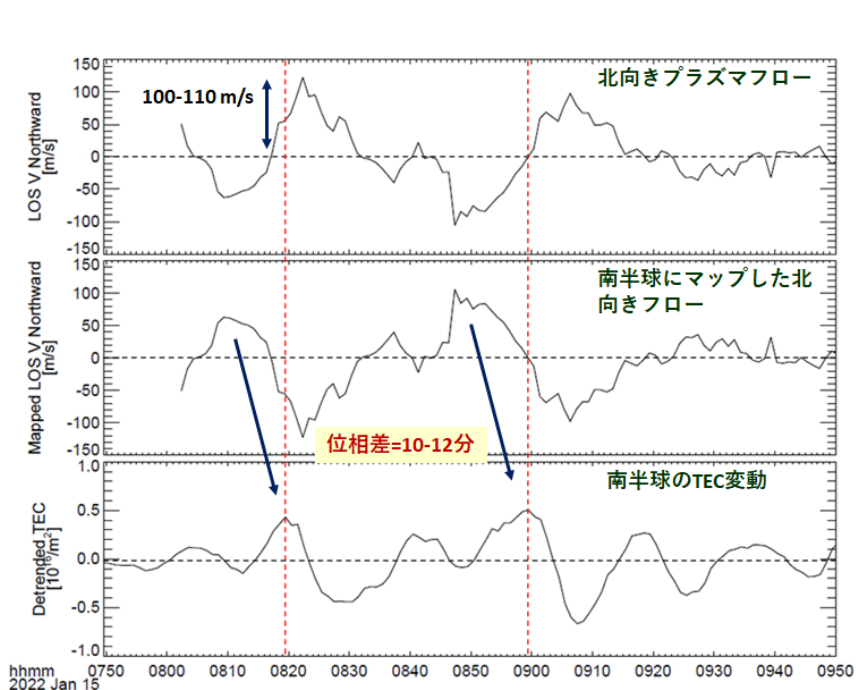
$$n_{e1} = \frac{i}{\omega} v_1 \frac{\partial n_e}{\partial z} \cos I \quad (z' = iz)$$

I : 電離圏高度での地球磁場の伏角

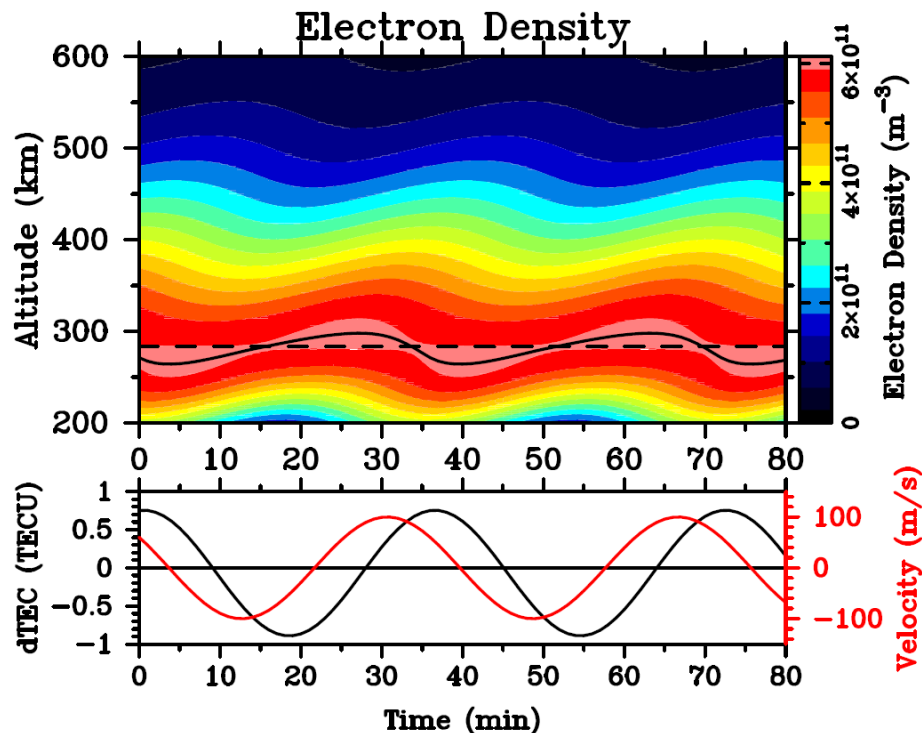
電場が外部起源(E領域ダイナモ電場、磁気圏起源電場)であれば、電子密度とプラズマ速度変化の間には90度の位相差が生じる

4. 考察(TEC変動のメカニズム)

4.3 GNSS-TECと電離圏プラズマフロー変化の位相差に着目した経緯



[Shinbori et al., 2022]



トンガ火山噴火によって引き起こされた電離圏F領域のプラズマ速度とTEC変動の間には明瞭な位相差が存在

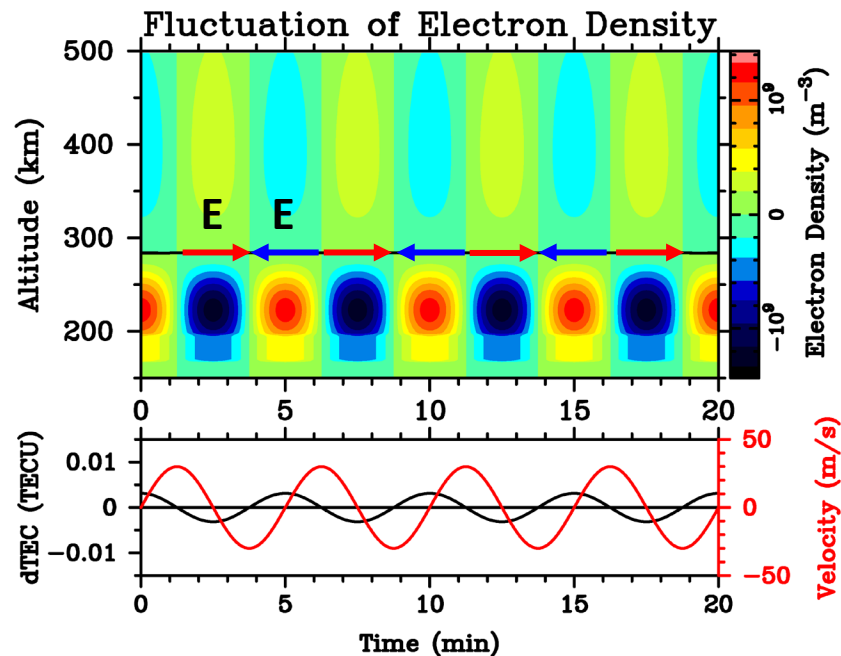
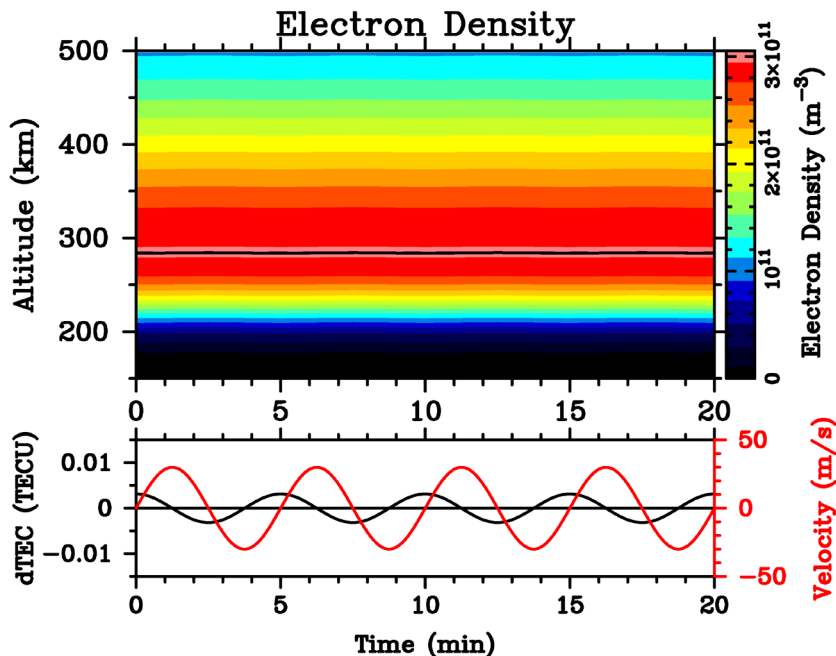


外部電場を入れた電離圏モデル計算でも観測データで見られた変動の位相差を確認

外部電場起源による電離圏変動を見極める一つの発見

4. 考察(TEC変動のメカニズム)

4.4 Pc 5脈動イベントに適応した電離圏モデル計算結果



伏角: 78.501
地理緯度・経度: 61.2、239.1
日付: 2022/11/23 02:02 UT
F10.7: 115.7
電場変動の周期: 5分
電場ドリフト速度: 30 m/s

TECとプラズマフロー変化の間の位相差: **90度**

→ 観測結果とほぼ一致(**135度**)

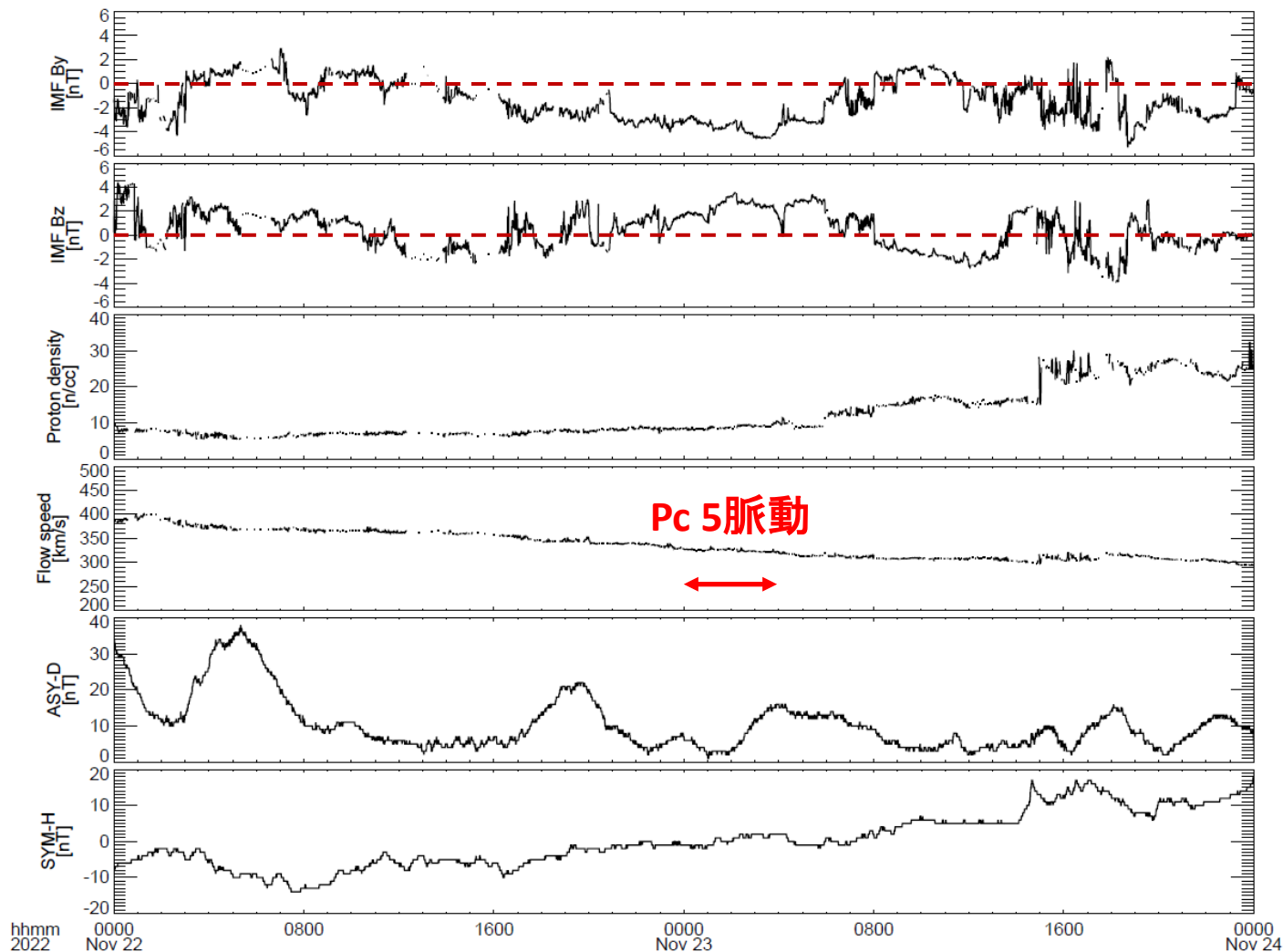
(観測の時間分解能以内: **45度=0.6分 < 1分**)

トンガ火山のケースと類似

-> Pc 5脈動が電離圏に持ち込んだ東西電場振動による電離圏高度変化がTEC変動をもたらした

4. 考察(ULF波動のエネルギー源は?)

4.5 太陽風と地磁気の概況はどうであったか?



Pc 5脈動の出現時の太陽風、地磁気は非常に静穏

IMF Bz > 0

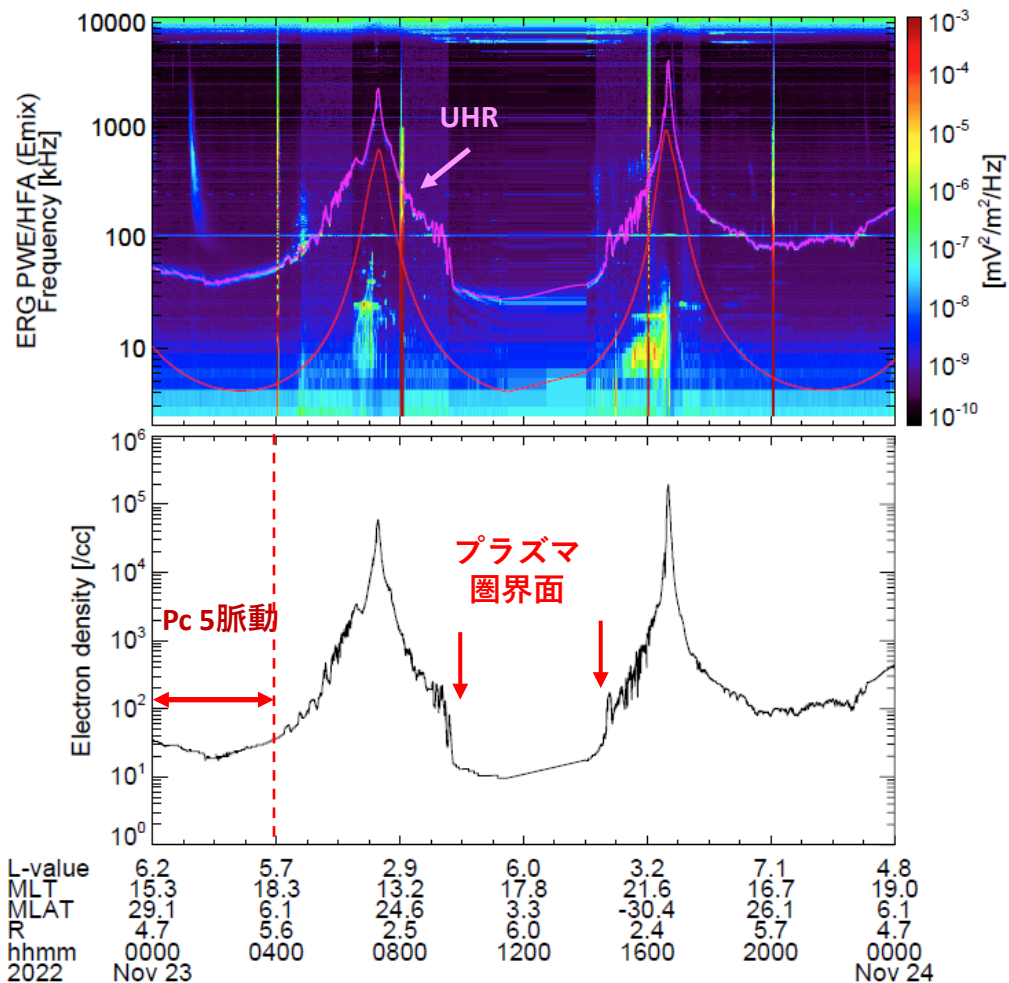
Nsw ~ 10 /cc

Vsw ~ 350 km/s

SYM-H ~ 0 nT

4. 考察(ULF波動のエネルギー源は?)

4.6 Pc 5脈動出現時の地上—衛星の観測状況



- プラズマ圏界面を示す電子密度構造が見られない
- オーロラ電波放射(AKR)があらせ衛星の波動観測から全く見られない
→ 極域におけるオーロラ活動がかなり低調である



磁気圏対流が弱く、磁気圏尾部からのエネルギー注入がほとんどないと考えられる

5. 結論

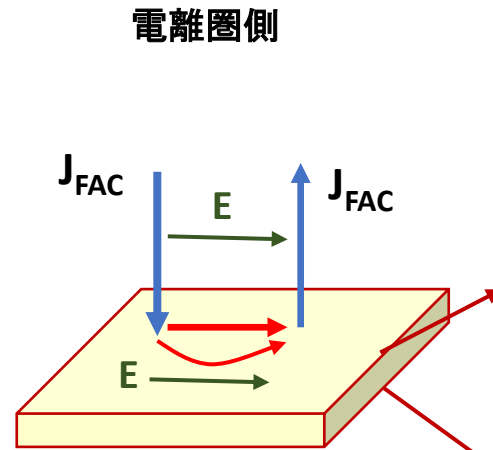
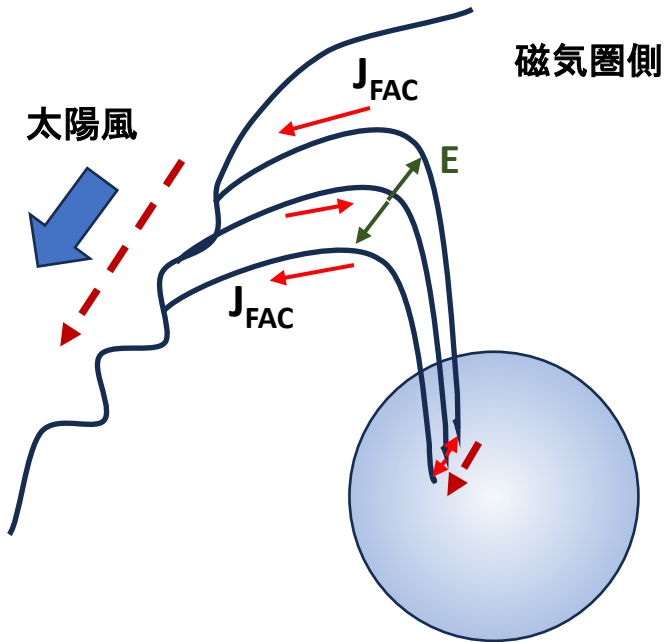
あらせ衛星とSuperDARN共同観測キャンペーン時に得られたデータとGNSS-TEC観測データを解析することで、2022年11月23日に観測されたPc 5脈動に伴う電離圏電子密度変動の特徴とその物理機構について以下のようなことが分かった。

1. 全電子数(TEC)と電離圏プラズマの視線方向速度にPc 5脈動の周期の振動が見られ、**両者の変動の間には明瞭な位相差がある**ことがわかった。
2. Pc 5脈動と同じ周期をもつ電場振動を入力とした電離圏モデル計算を実施した結果、**観測と同様にTEC変動が遅れて出現する**ことが分かった。
→ TEC変動は外部電場の振動によって生成されたと説明できる。
3. Pc 5脈動が出現した時間帯は、**太陽風と地磁気指数ともに非常に静穏**であり、プラズマ圏は磁気圏の遠方(少なくともあらせ衛星の遠地点以上)の領域まで拡大した。
→ **磁気圏対流が弱く、磁気圏尾部からのエネルギーインプットがほとんどない**。
4. Pc 5脈動の振幅が**TECの減少域(トラフ域)の出現に対応して増加する**傾向が見られた。
→ 定電流源の性質を帯びた磁気圏と電離圏を結ぶ電流系の振動の可能性の一つとして考えられる。

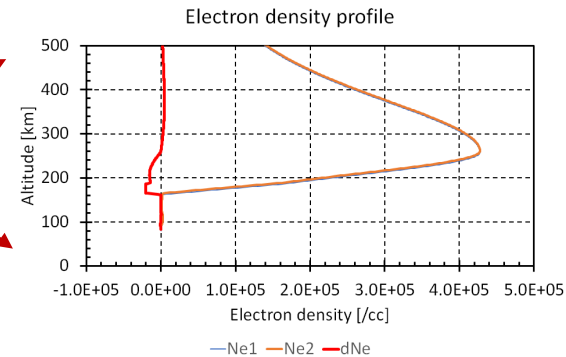
5. 結論

結論として。。。

- 磁気圏から電離圏へ持ち込まれた**東西方向の電場振動が電離圏を上下方向に振動させる**ことにより、夕方側のサブオーロラ帯における全電子数(TEC)の5分振動が発生した。
⇒夕方側の磁気圏界面付近で発生するFACの振動に関係？(今後の研究で要精査)



電場振動による電離圏の上下・水平方向の移動によって密度(TEC)変化が現れる



- トンガ火山噴火関連の研究で得た知識がULF波動現象を活用した磁気圏—電離圏結合研究といった別の研究対象に生かすことができた。
⇒**他分野の研究にも興味を持つべき!** (自分の研究の役に立つことがある)

3. 解析結果

3.2 Pc 5脈動の出現領域(TECデータとの比較)

