

広帯域バンド幅合成について (その4:電離層TEC推定の改良)

情報通信研究機構鹿島宇宙技術センター

近藤哲朗、岳藤一宏

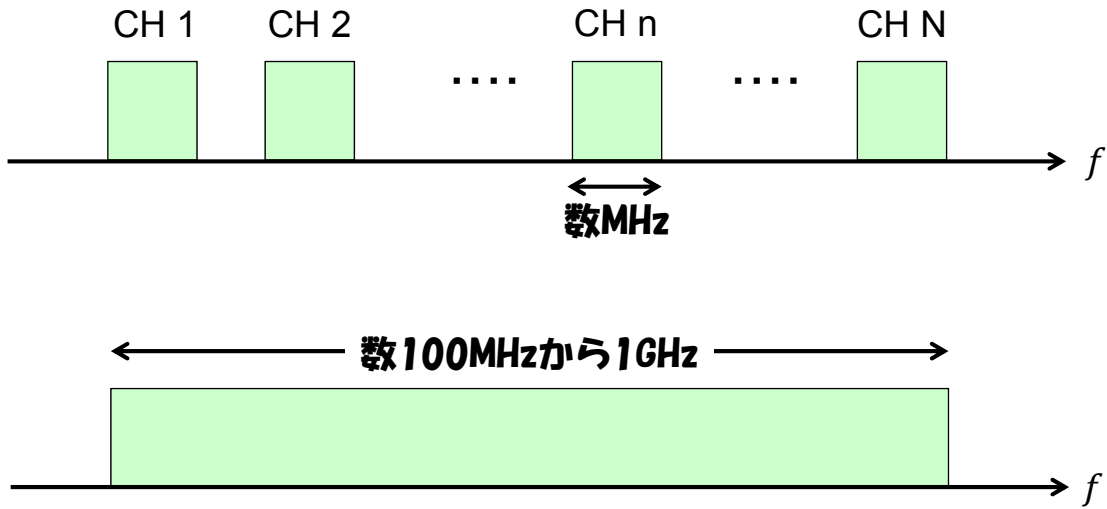


今回の中身

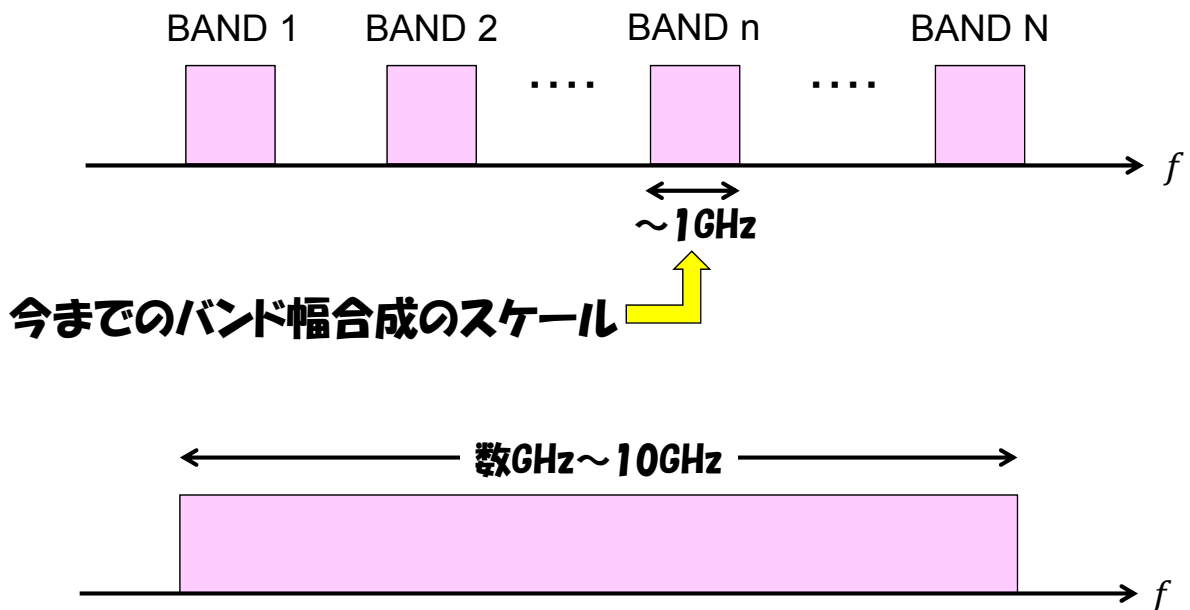
- 「その1」で方針
- 「その2」では具体的な処理方法と短基線の実データを使った結果(ただし電離層補正は無し)
- 「その3」で電離層TEC推定の具体的方法 < = 完結編の筈だった
- 今回、電離層TEC推定方法を改良し、低SNR時のTEC推定結果の評価を行なったので報告する



従来のバンド幅合成



広帯域バンド幅合成



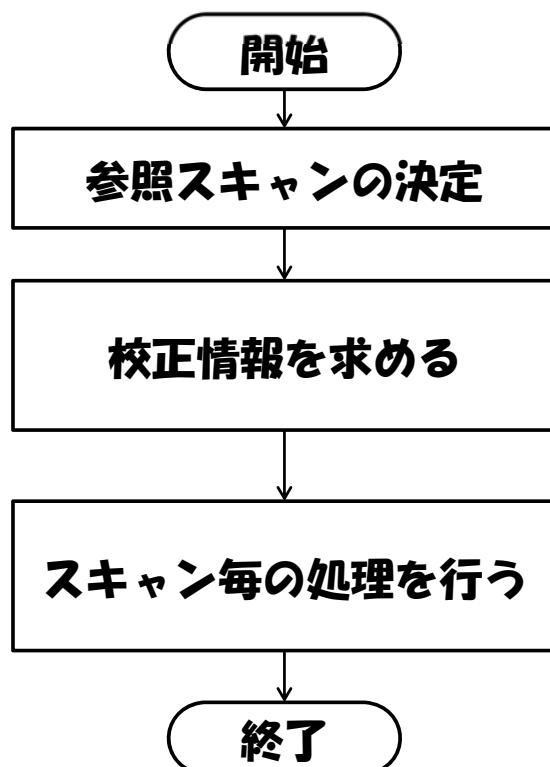
広帯域バンド幅合成手法

1. まず基準とする観測（スキャン）を1つ決める
2. バンド毎に処理をして
 1. バンド間遅延差を求める
 2. バンド内位相特性差を求める
3. こうして得られた補正データで他の観測（スキャン）も処理する
4. 広帯域バンド幅合成後の位相スペクトルを用いて観測（スキャン）毎の電離層補正を行う

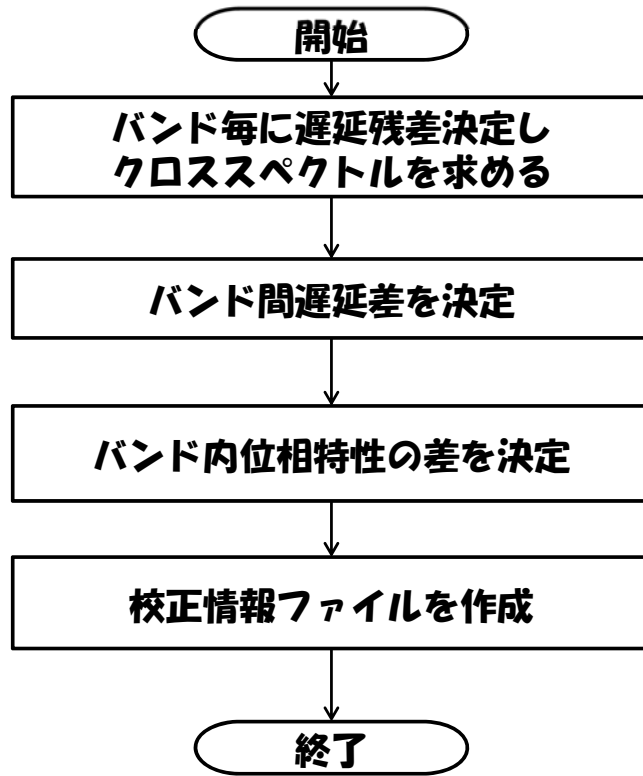
システムがある程度安定であることを仮定している



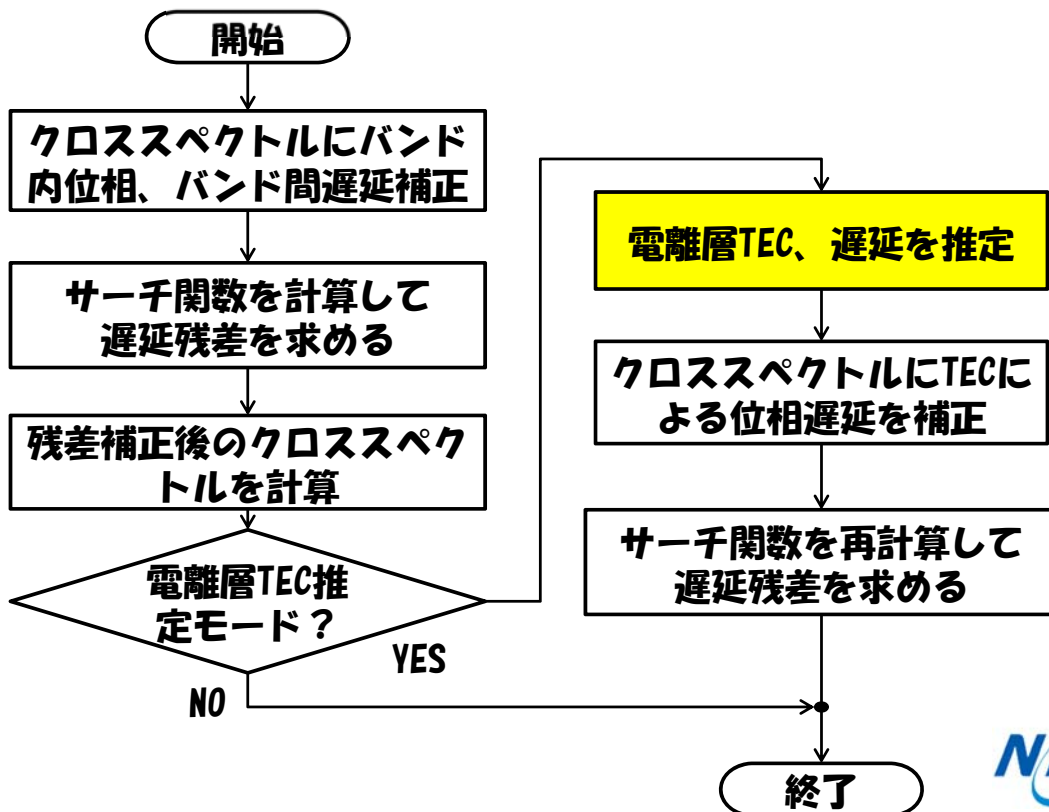
処理方法の簡単なまとめ



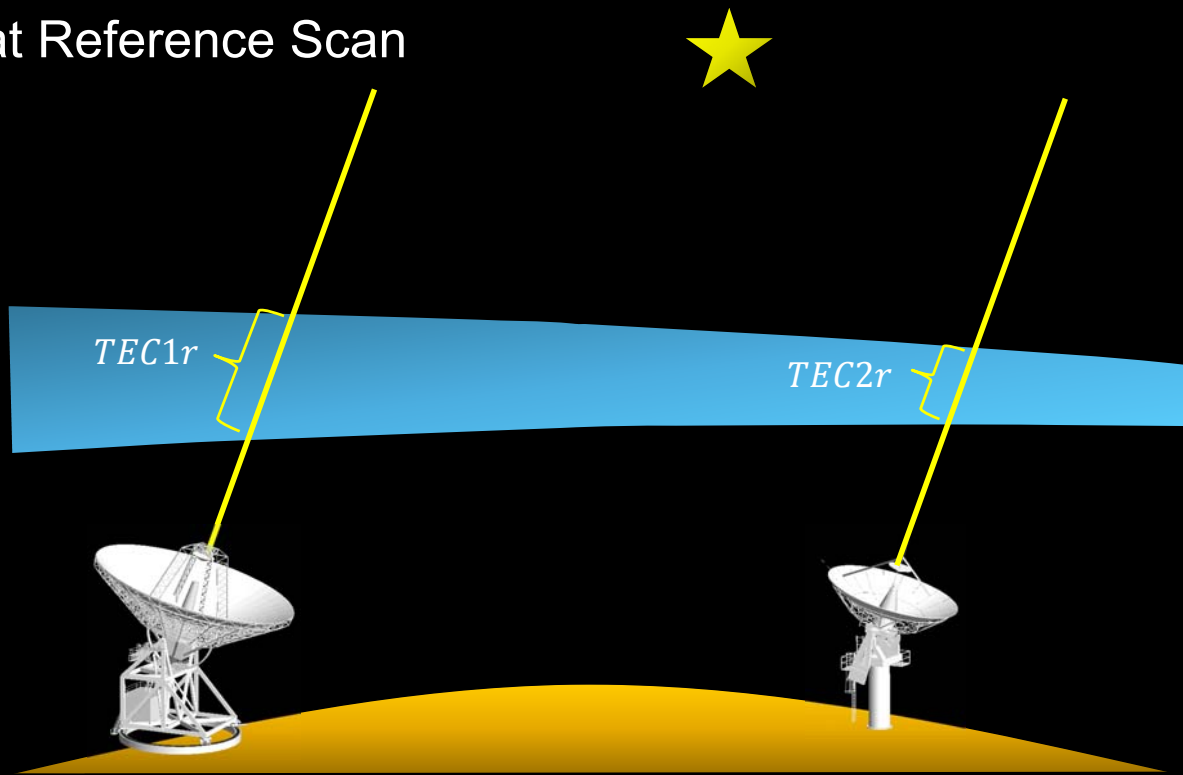
校正情報の求め方



スキャンごとの処理



at Reference Scan

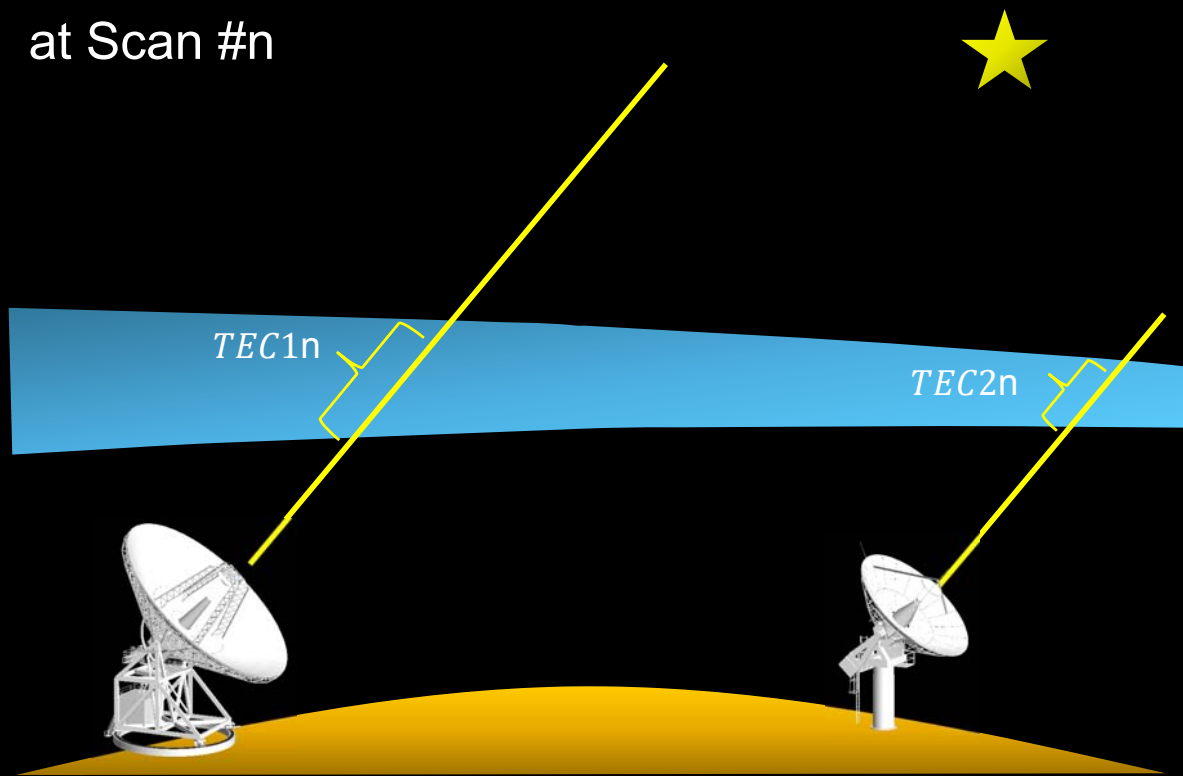


$$\Delta TEC_r = TEC_{2r} - TEC_{1r}$$

これは位相校正情報に含まれてしまう

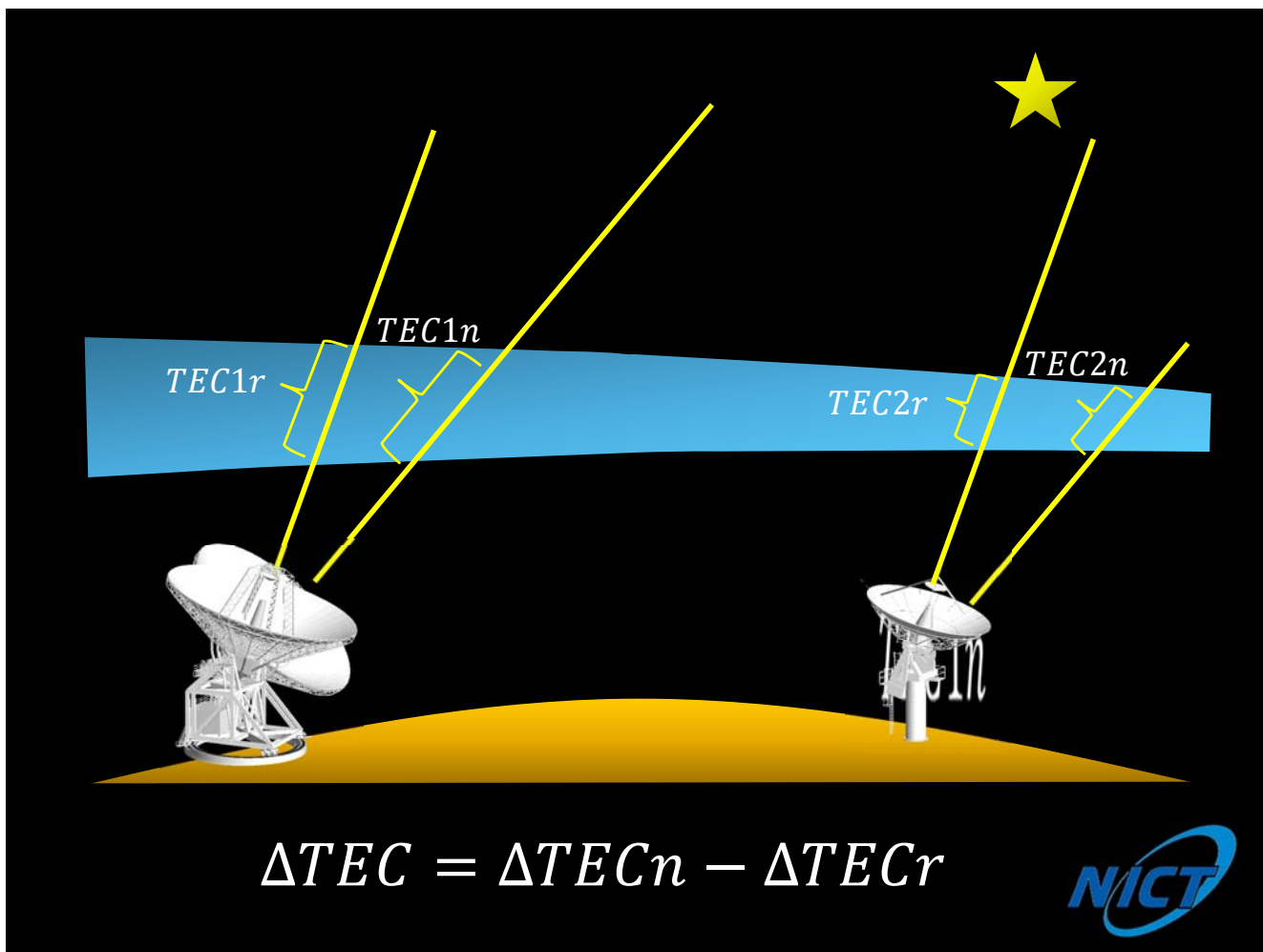


at Scan #n



$$\Delta TEC_n = TEC_{2n} - TEC_{1n}$$



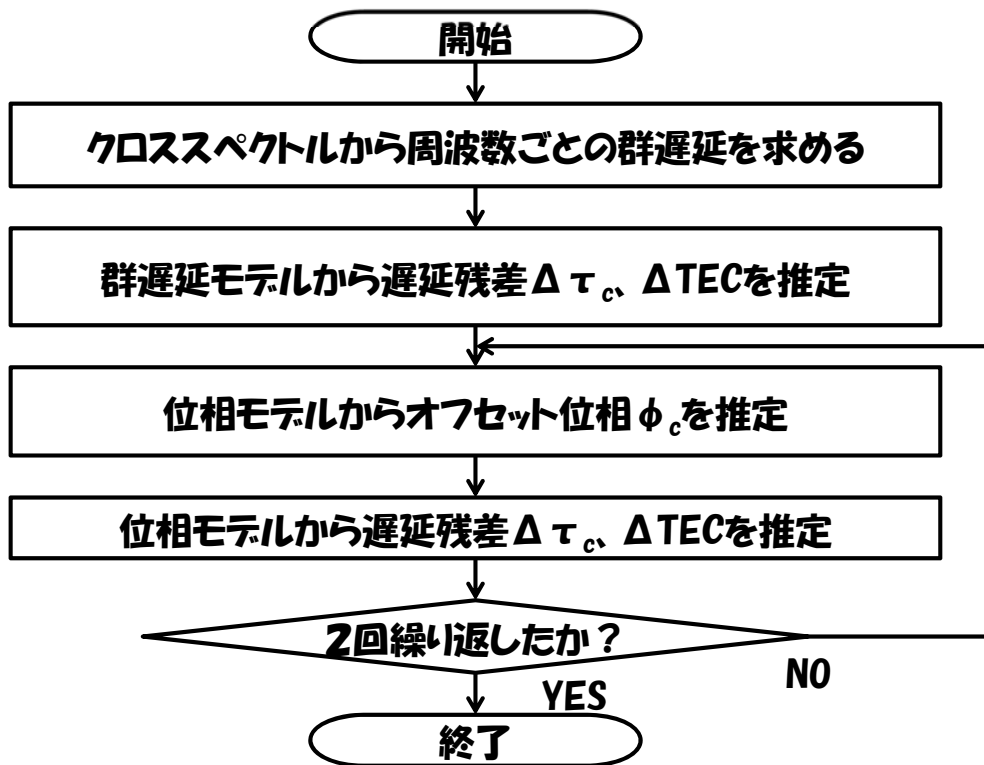


電離層補正手法

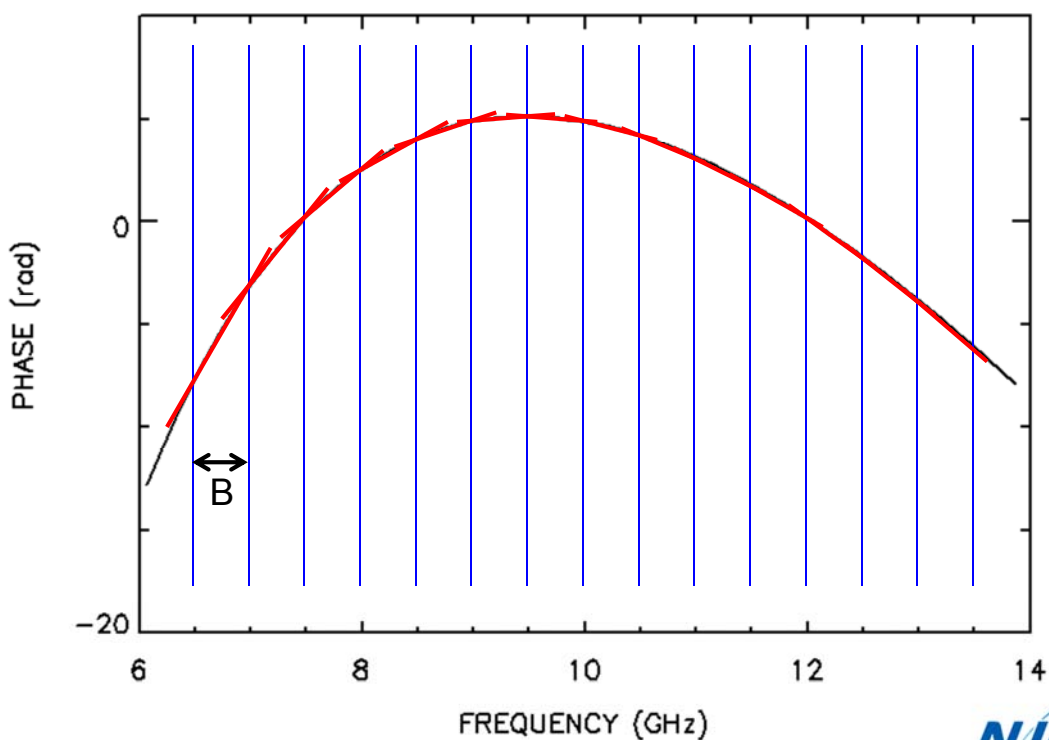
1. クロススペクトルから群遅延（の周波数特性）を計算
2. 群遅延モデルから遅延残差 $\Delta\tau_c$ 、 ΔTEC を推定
3. 位相モデルからオフセット位相 ϕ_c を推定
4. 位相モデルで ϕ_c を固定して、 $\Delta\tau_c$ 、 ΔTEC を推定
5. 3. 4のプロセスを計2回繰り返す
6. クロススペクトルに ΔTEC の補正を行う
7. 再度、遅延残差、遅延変化率残差を求める



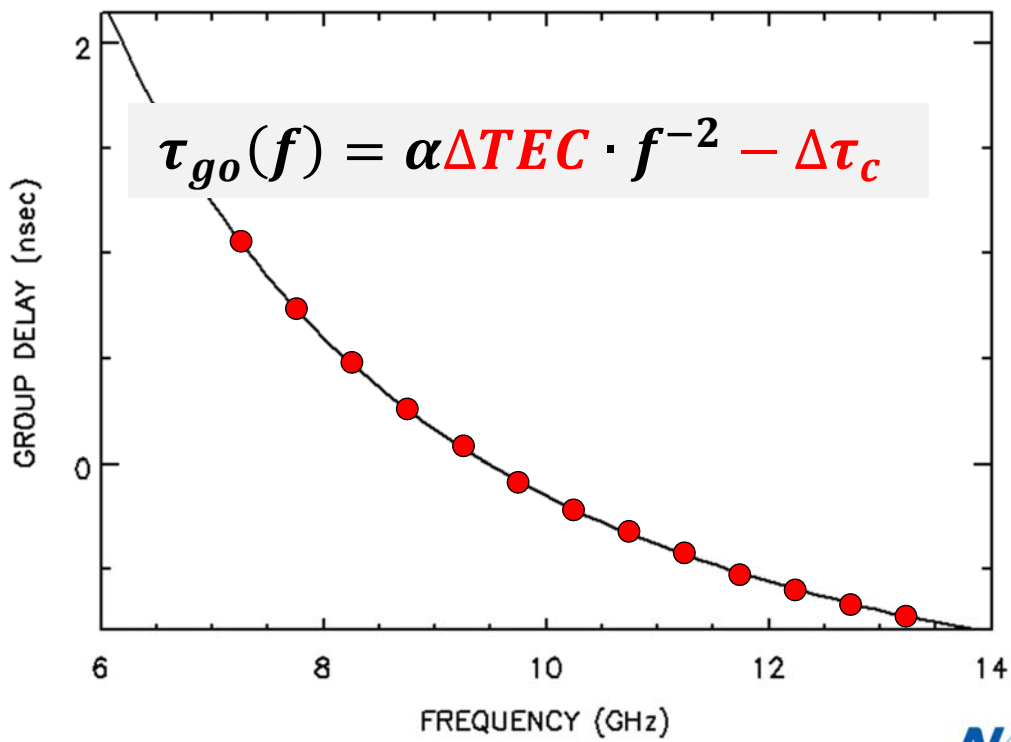
電離層(TEC)推定処理



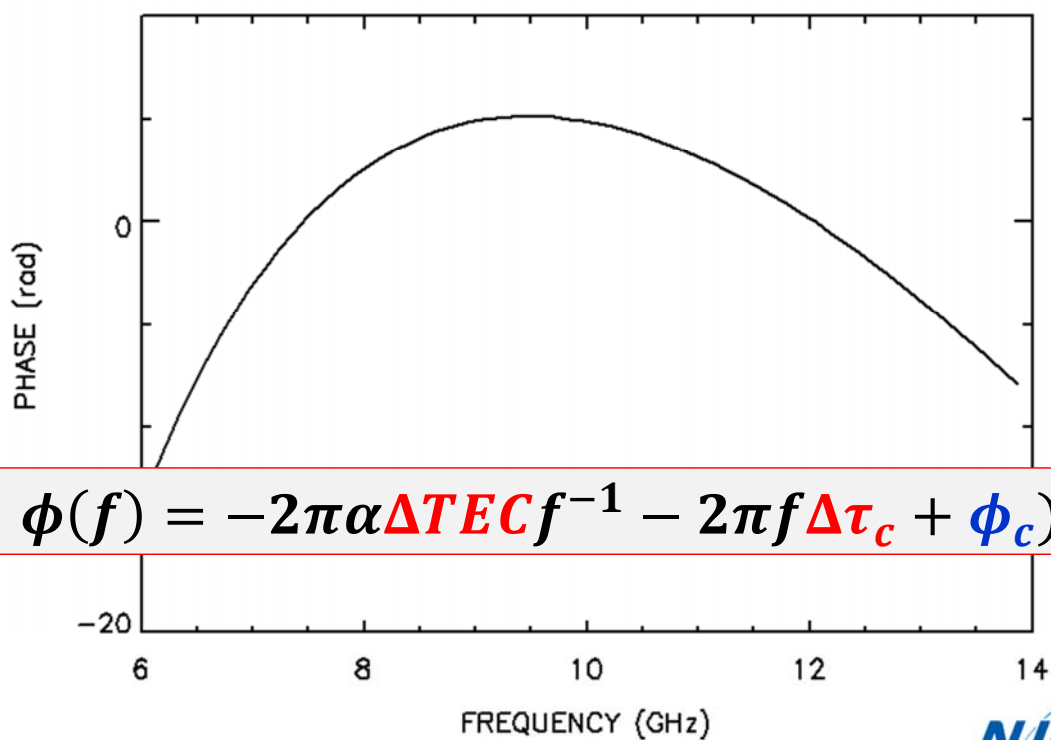
周波数毎の群遅延の決定



得られる群遅延



位相スペクトル



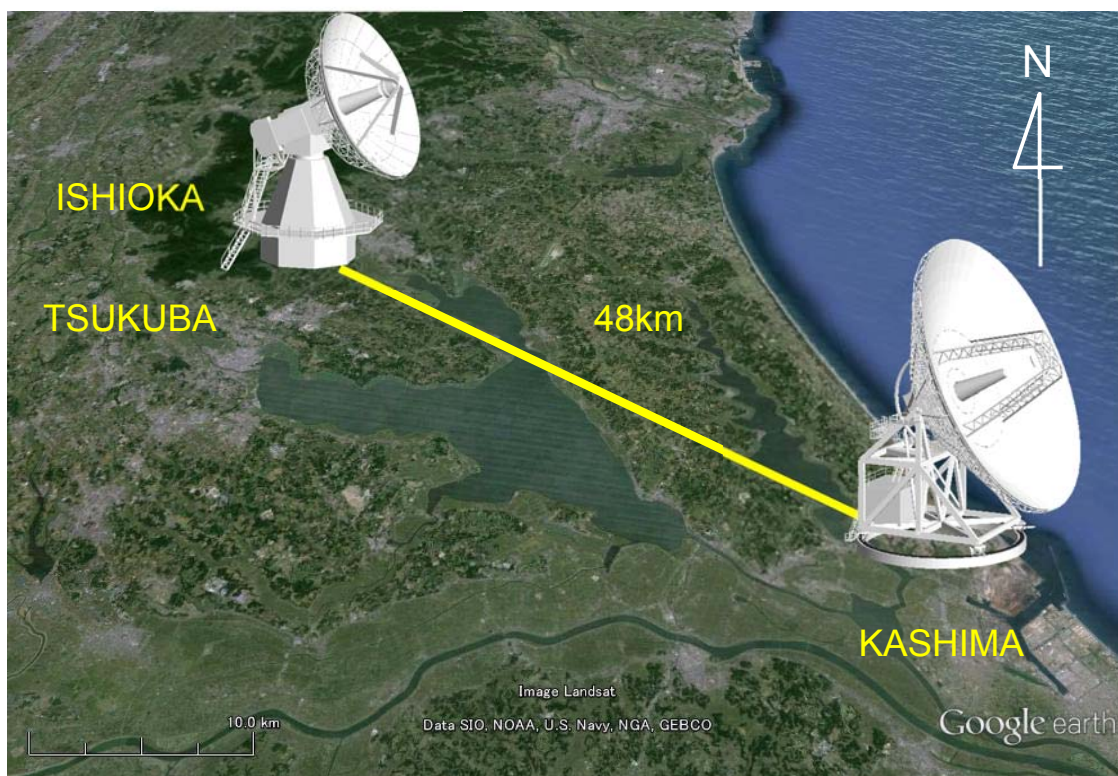
シミュレーションデータの作成

1. 生相関データ $R(\tau, k) \Rightarrow$ クロススペクトル $S(f, k)$
ここで τ : ラグ、 k : 時間、 f : 周波数
2. 電離層 (ΔTEC) による位相遅延を受けたクロススペクトル $S_i(f, k)$ を次式で計算
付加ノイズ
$$S_i(f, k) = S(f, k) \exp[i\{\phi_{ion}(f) + \sigma_\phi(f)\}]$$

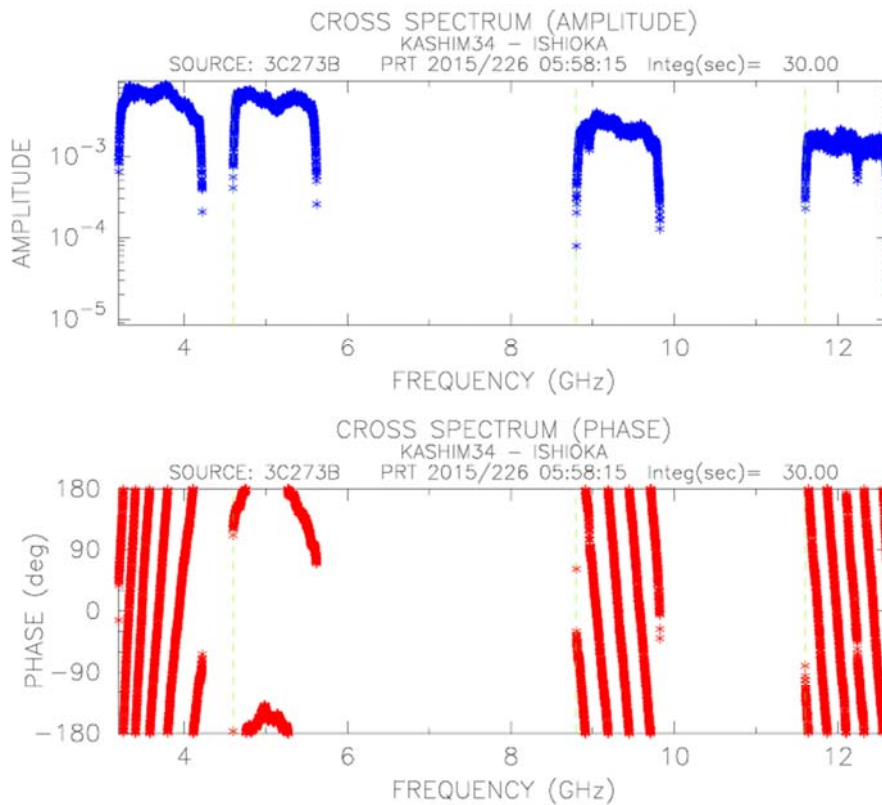
ここで $\phi_{ion}(f) = -2\pi\alpha\Delta TEC \cdot f^{-1}$
3. クロススペクトル $S_i(f, k) \Rightarrow$ 相関データ $R_i(\tau, k)$



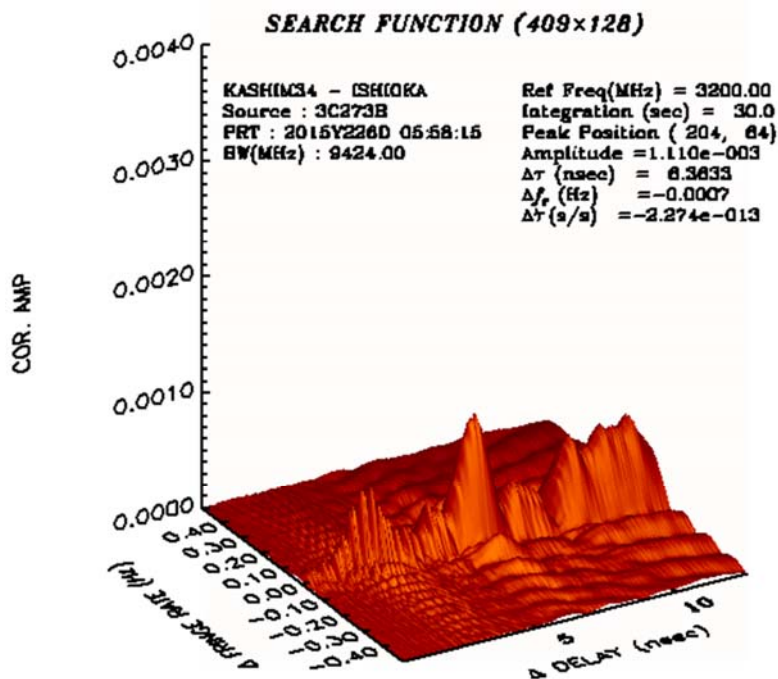
鹿嶋 - 石岡 基線



TEC simulation data 100 TECU 付加/イヌなし

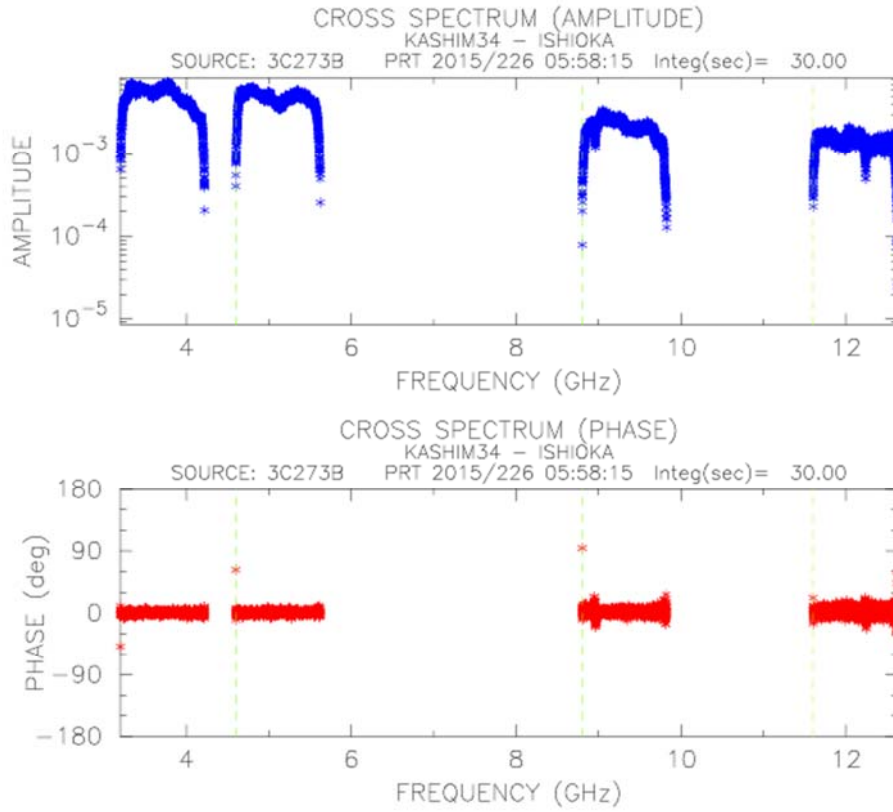


TEC simulation data 100 TECU 付加/イヌなし



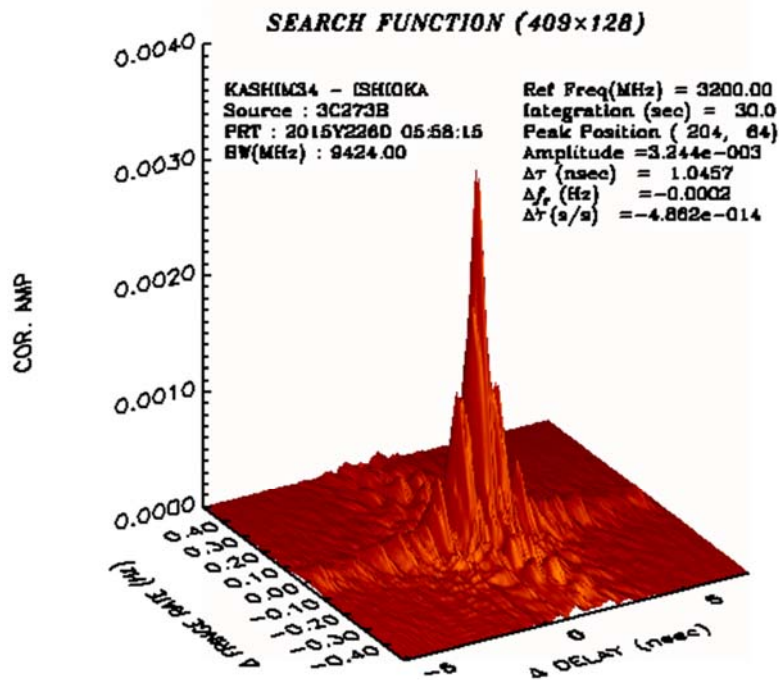
After TEC estimation

Estimated TEC = 100.0028 ± 0.0007

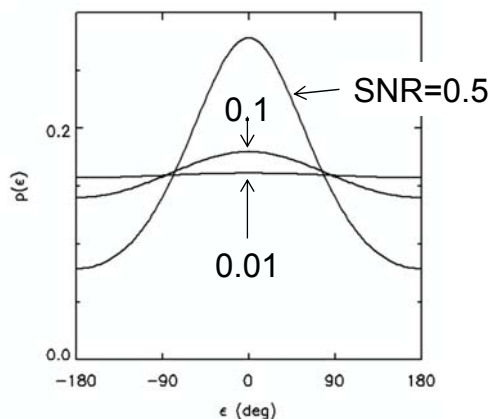
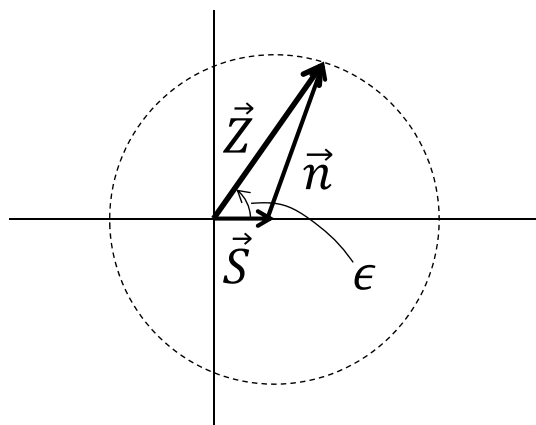


After TEC estimation

Estimated TEC = 100.0028 ± 0.0007



付加ノイズはどのように与えるか

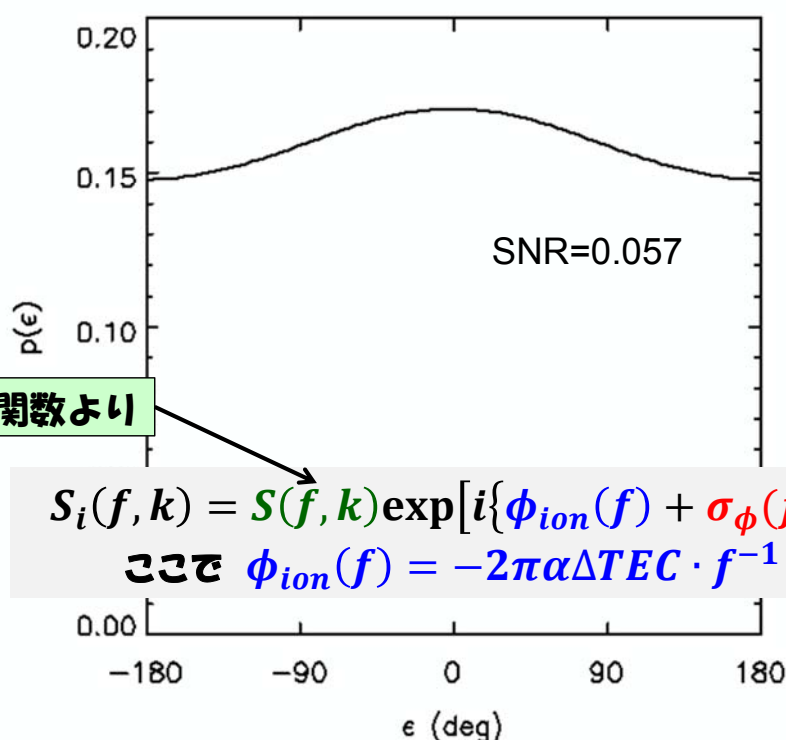


$$p(\epsilon) = \frac{1}{2\pi} \exp\left(-\frac{1}{2}SNR^2\right) \times \left\{ 1 + \sqrt{\frac{\pi}{2}}SNR \cdot \cos\epsilon \cdot \exp\left(\frac{1}{2}SNR^2 \cos^2\epsilon\right) \left[1 + \operatorname{Erf}\left(\frac{1}{\sqrt{2}}SNR \cdot \cos\epsilon\right) \right] \right\}$$

このSNRは単位積分時間(1sec)周波数要素あたりのSNR



バンドあたりSNR=10の場合
(周波数要素あたりSNR=0.057に相当)



実際の相関関数より

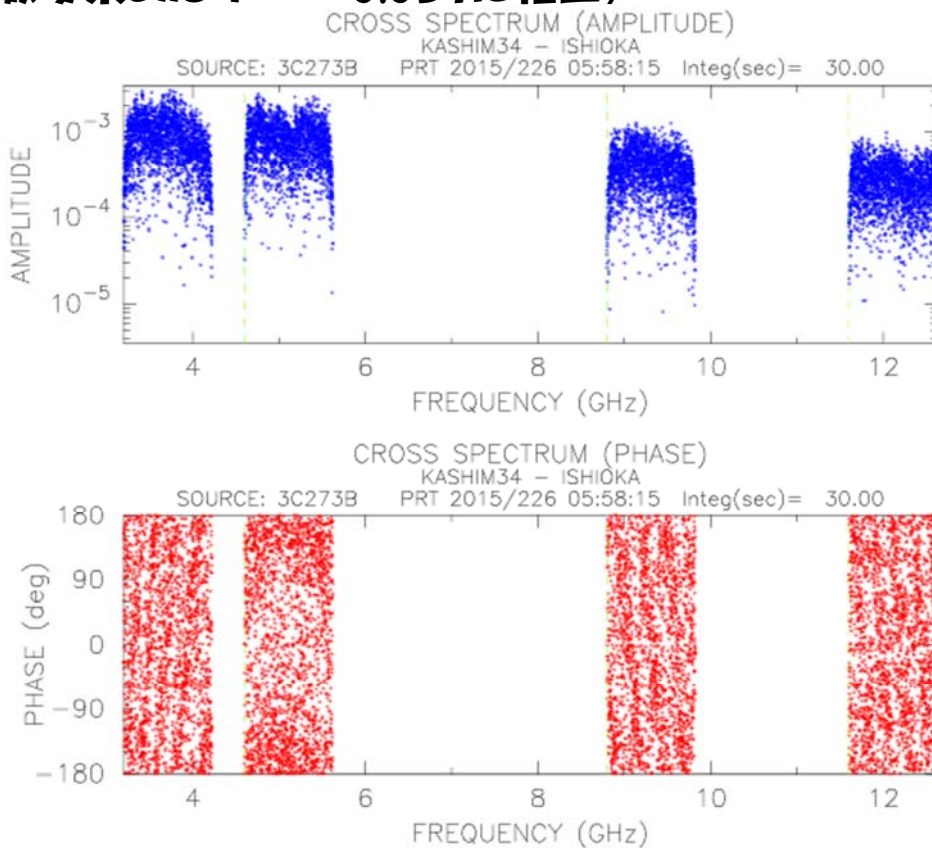
付加ノイズ

$$S_i(f, k) = S(f, k) \exp[i\{\phi_{ion}(f) + \sigma_\phi(f)\}]$$

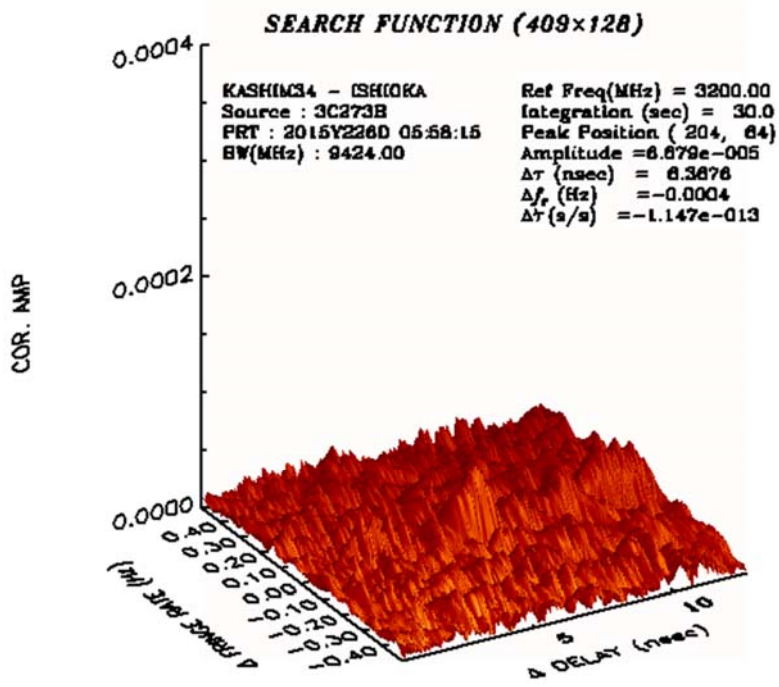
ここで $\phi_{ion}(f) = -2\pi\alpha\Delta TEC \cdot f^{-1}$



バンドあたりSNR=10の場合 **TEC推定無し**
(周波数要素あたりSNR=0.057に相当)

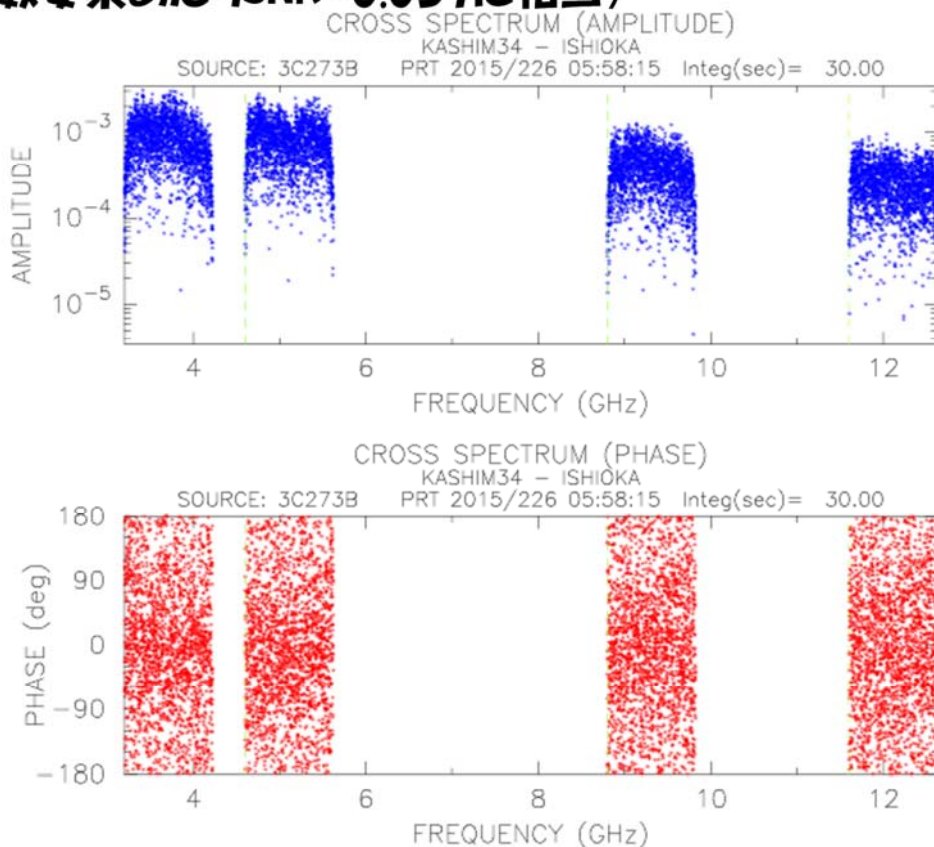


バンドあたりSNR=10の場合
(周波数要素あたりSNR=0.057に相当)



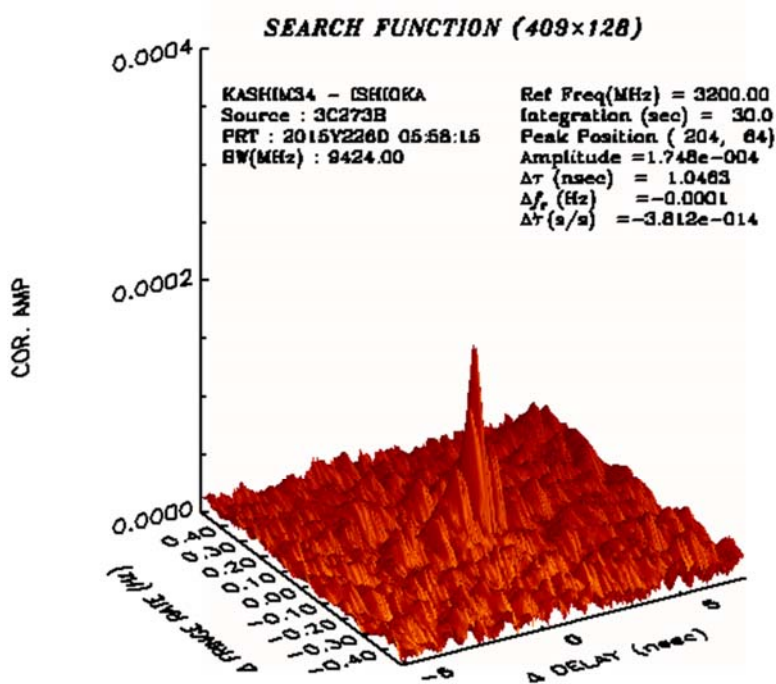
バンドあたりSNR=10の場合 **TEC推定後**
(周波数要素あたりSNR=0.057に相当)

Estimated TEC
 = 99.9938 +/- 0.0086



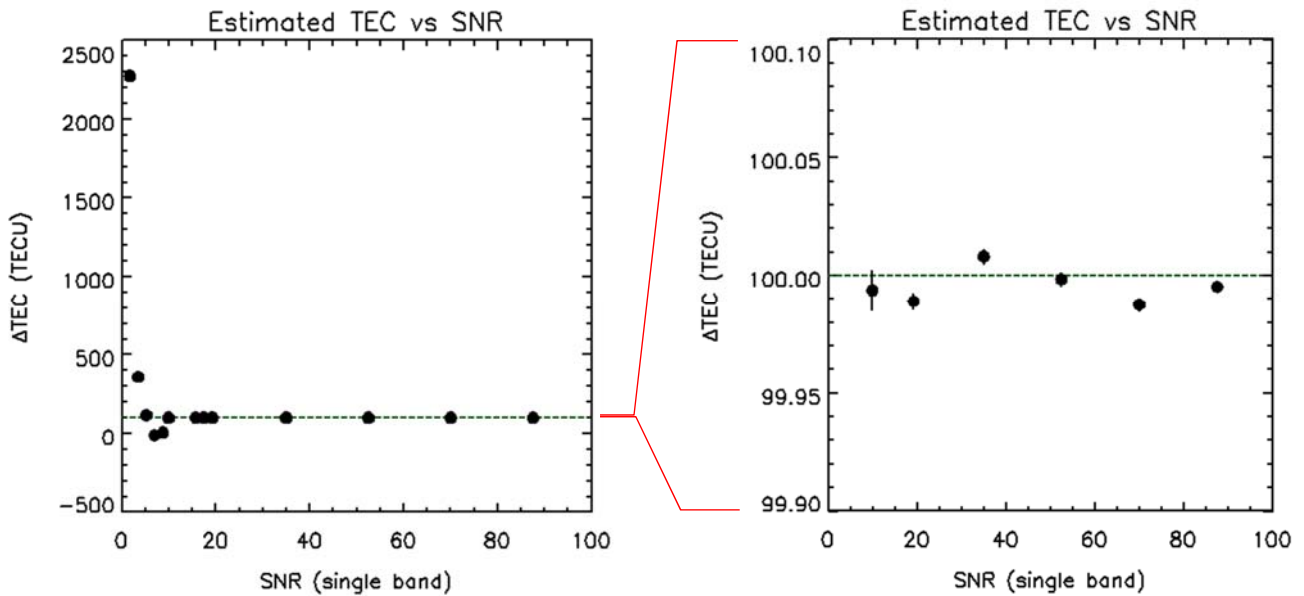
バンドあたりSNR=10の場合
(周波数要素あたりSNR=0.057に相当)

Estimated TEC= 99.9938 +/- 0.0086



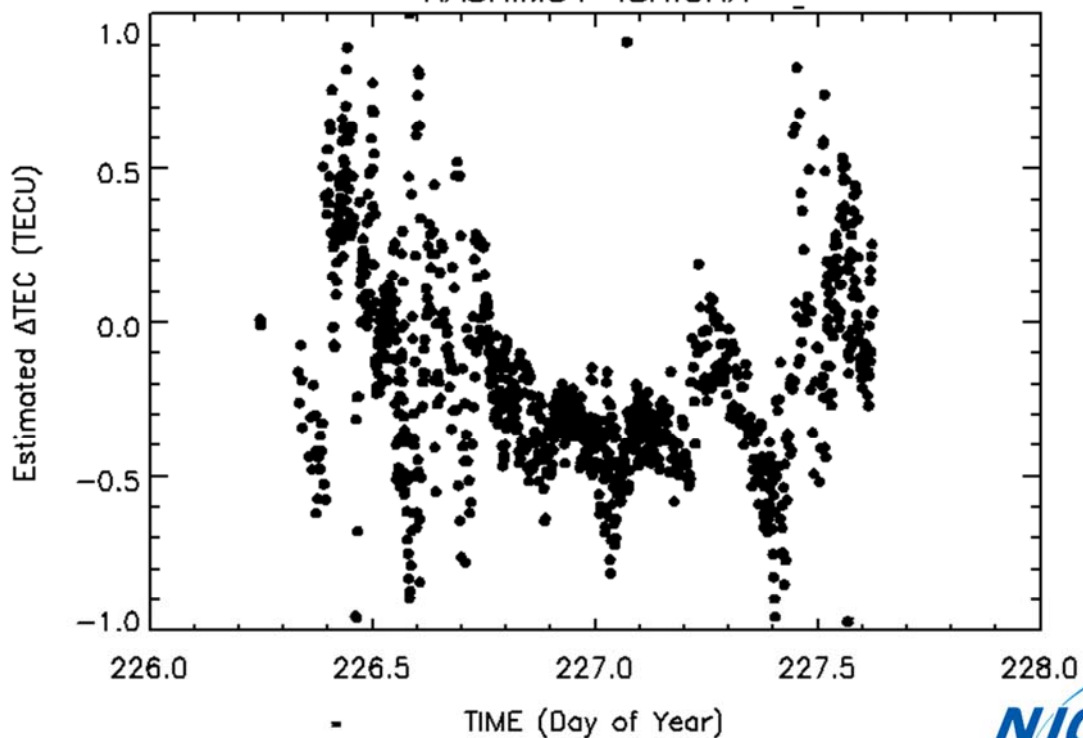
バンドあたりのSNRとTEC推定結果

$\Delta\text{TEC}=100$



TEC推定結果

KASHIM34-ISHIOKA



推定した Δ TECが正しいかの検証

1. 従来の2バンド法との比較

$$\Delta TEC = 7.46 \times 10^6 \frac{f_1^2 f_2^2}{f_1^2 - f_2^2} (\tau_2 - \tau_1)$$

ここで f_1, f_2 : RF周波数 τ_1, τ_2 : 遅延

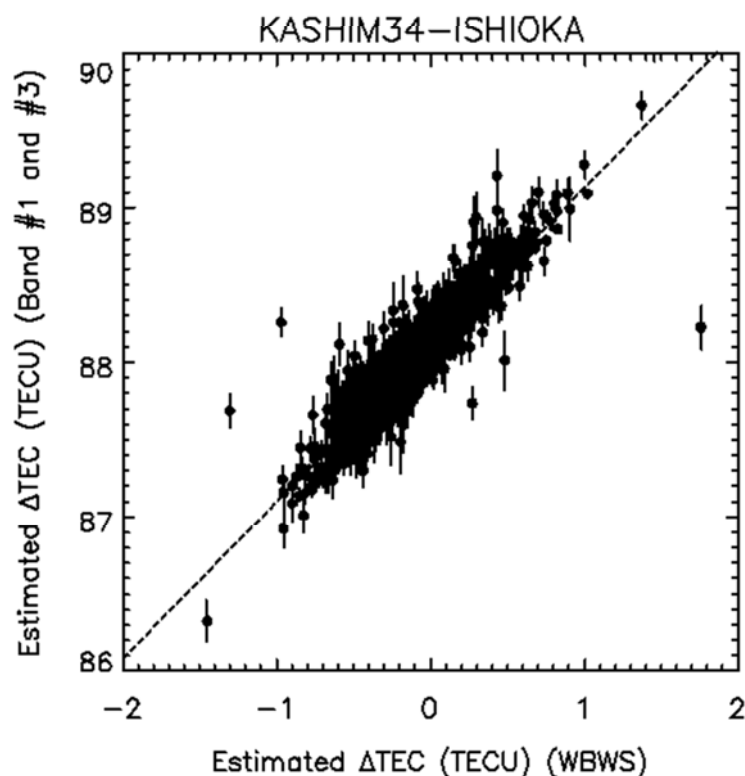
2. GNSS観測との比較

1. GNSS観測で得られたTECの汎地球データ(IONEXデータ)を使用して、スキャンごとの天頂方向TEC (ZTEC)を内挿によって求める
2. 各局ごとの視線方向のTEC (STEC)を求める
3. STECの差を求める

IONEXデータ <ftp://cddis.gsfc.nasa.gov/gnss/products/ionex/2015/226/jplg2260.15i.Z> and <227/jplg2270.15i.Z>



1. 従来の2バンド法との比較



$y=ax+b$

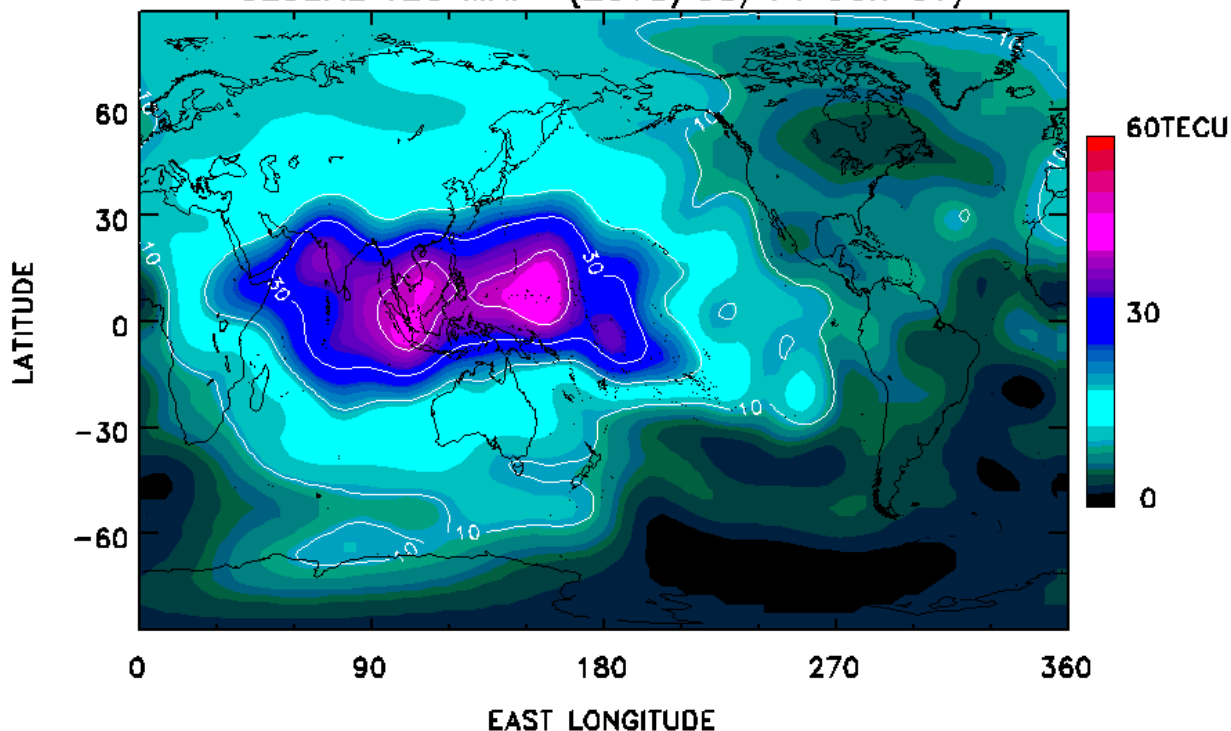
$a=1.016\pm 0.0132$ $b=88.1149\pm 0.0050$



2. GNSS観測との比較

TECマップ(2015/08/14 06UT)

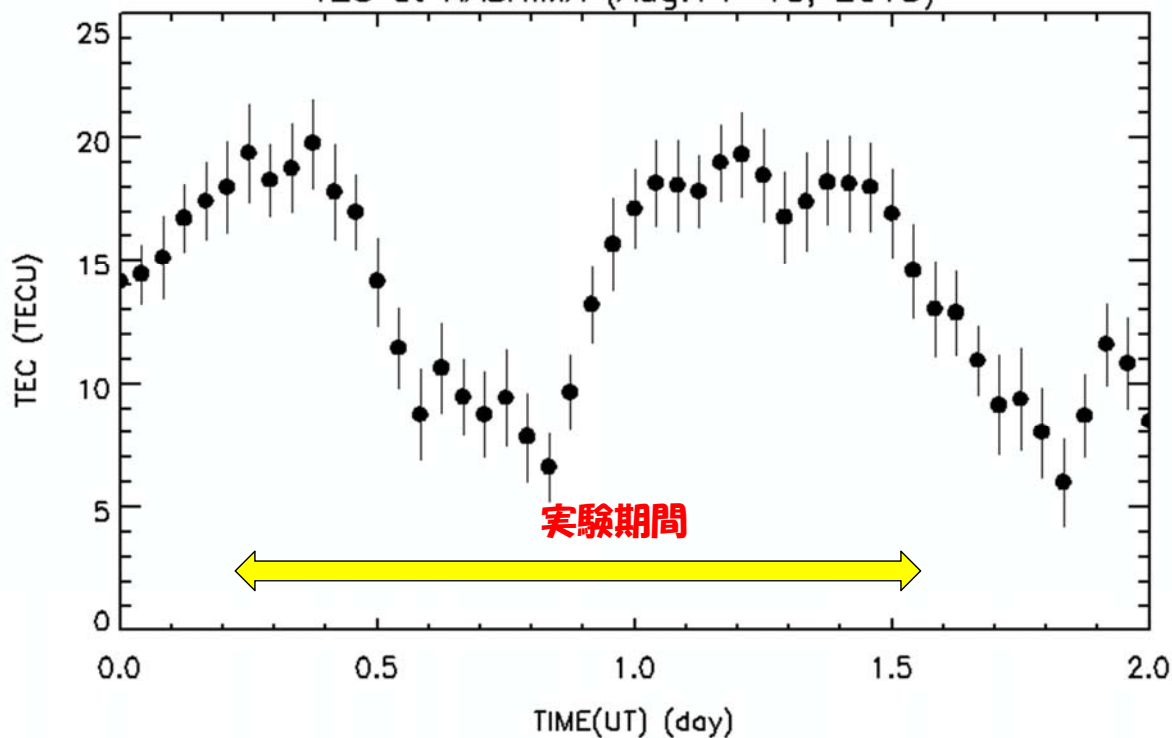
GLOBAL TEC MAP (2015/08/14 06h UT)



鹿嶋のZTEC

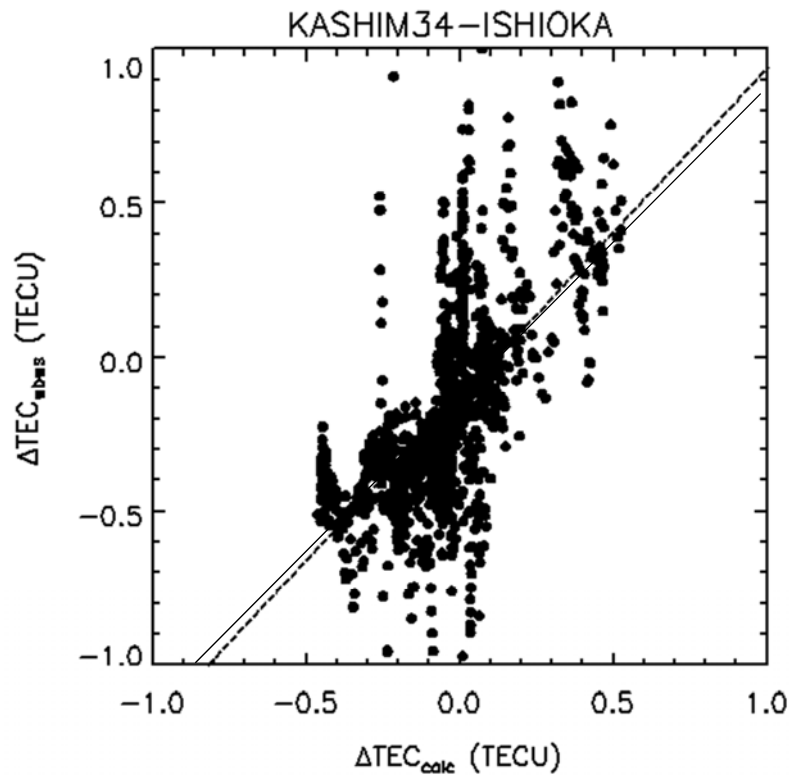
(2015/08/14 0h UT-08/15 24h UT)

TEC at KASHIMA (Aug.14-15, 2015)



2. GNSS観測との比較(鹿嶋でのZTECを使用)

Hion=300km

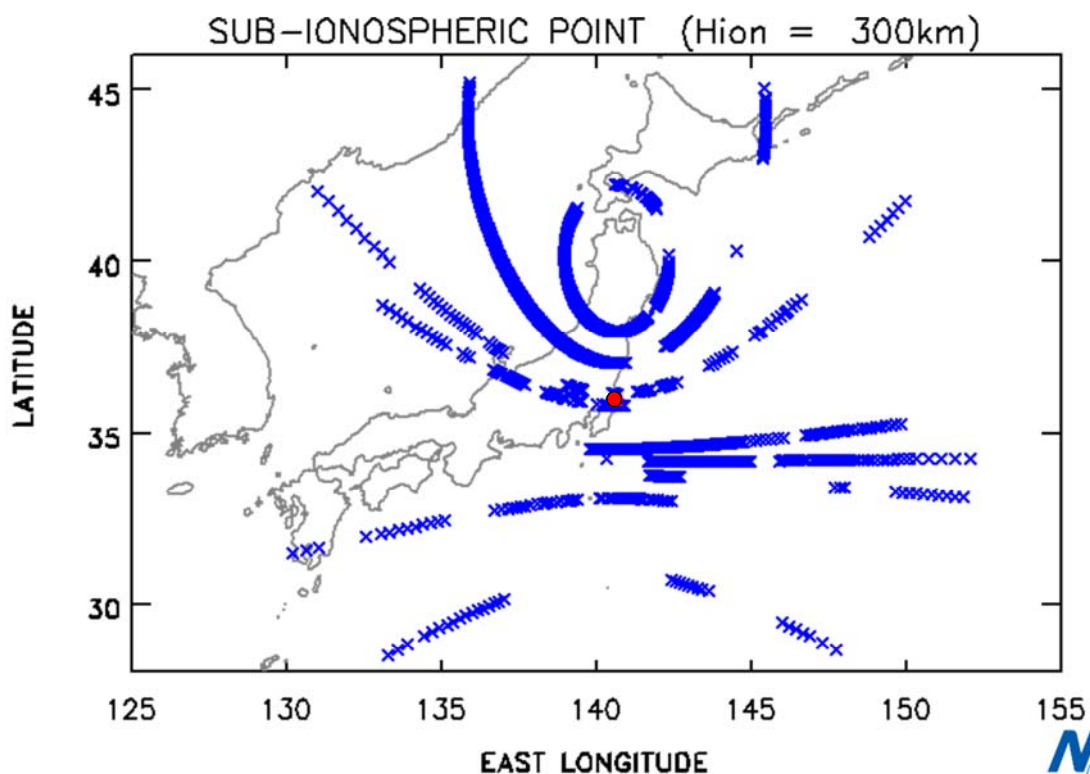


$y=ax+b$

$a=1.06\pm 0.04$ $b=-0.1285\pm 0.007$

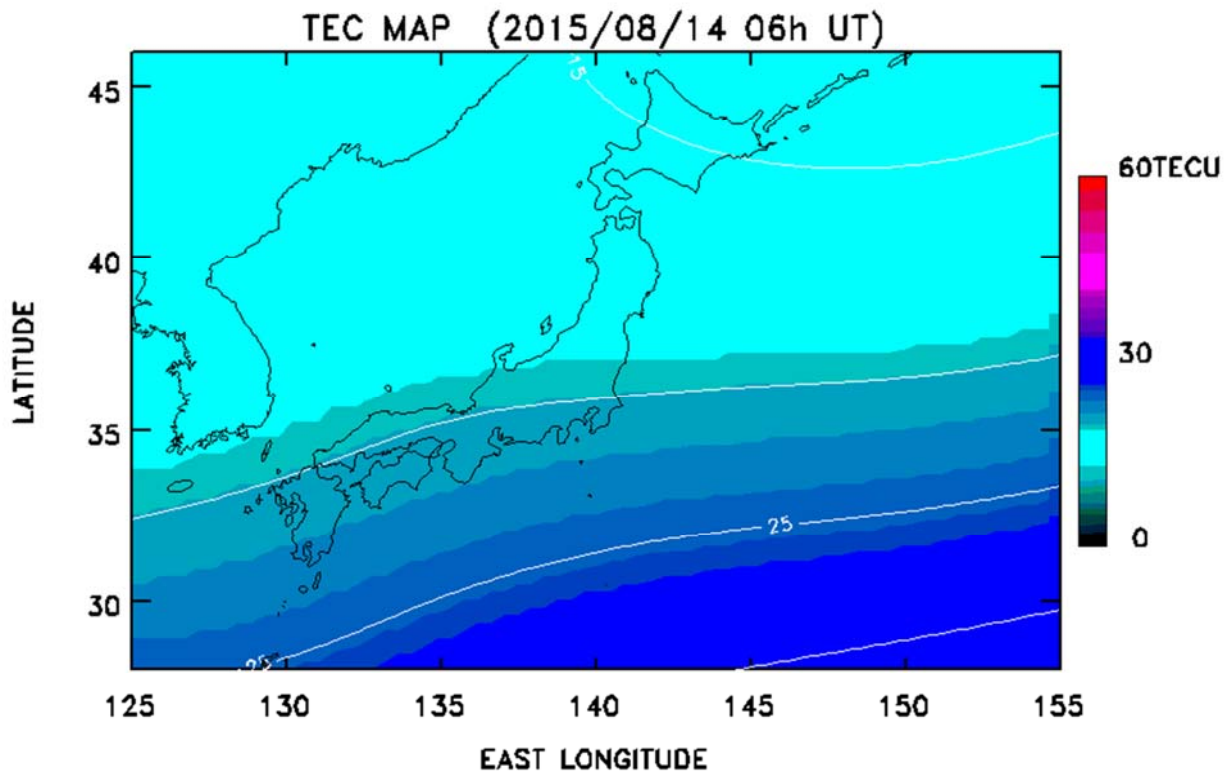


スキャンごとの電離層通過点(Kashima)



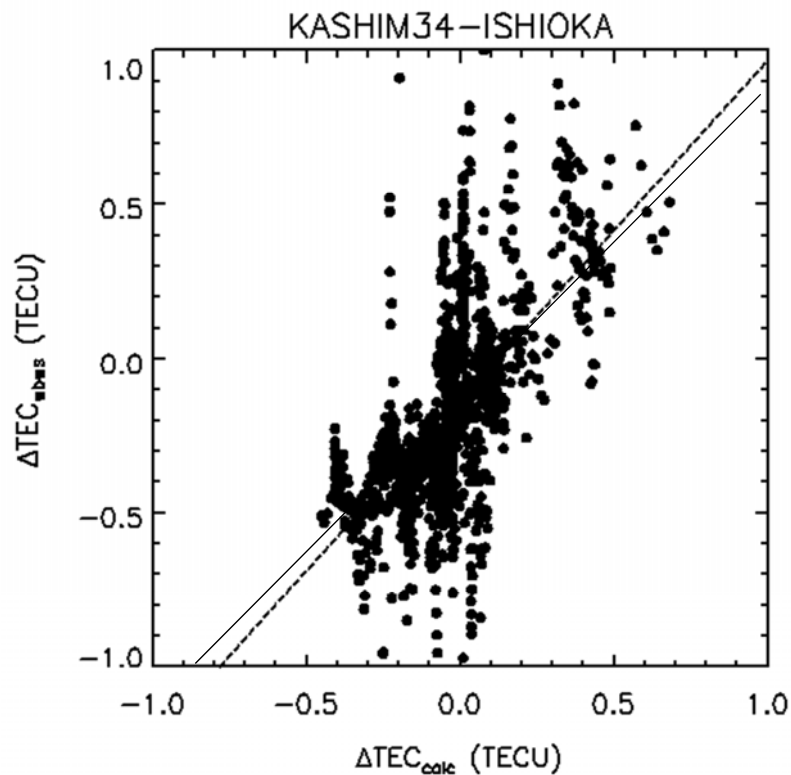
実験期間中の日本周辺TECマップ

(2015/08/14 06h UT-08/15 15h UT)



2. GNSS観測との比較 (電離層通過点のZTECを使用)

Hion=300km

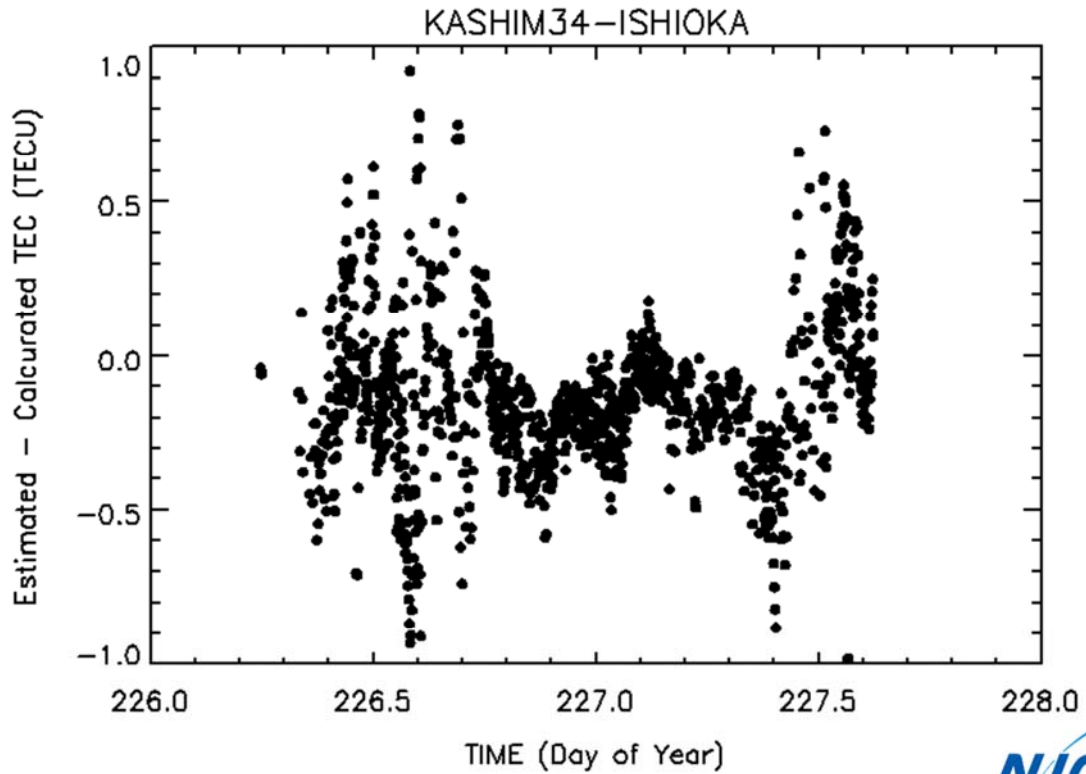


$$y=ax+b$$

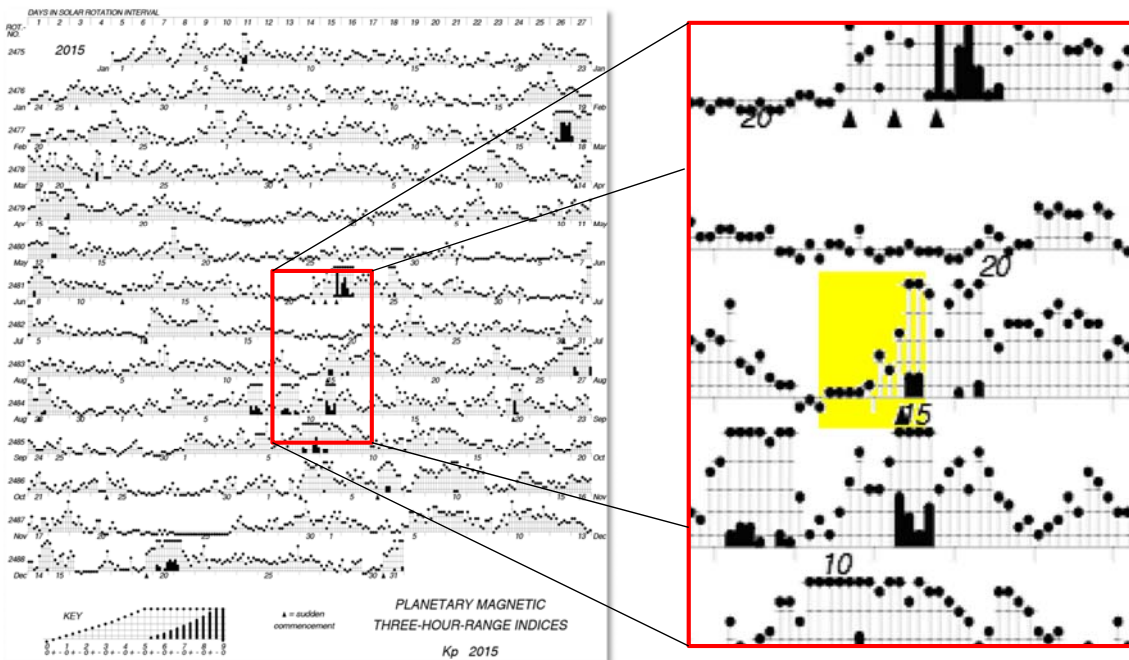
$$a=1.11\pm 0.04 \quad b=-0.136\pm 0.007$$



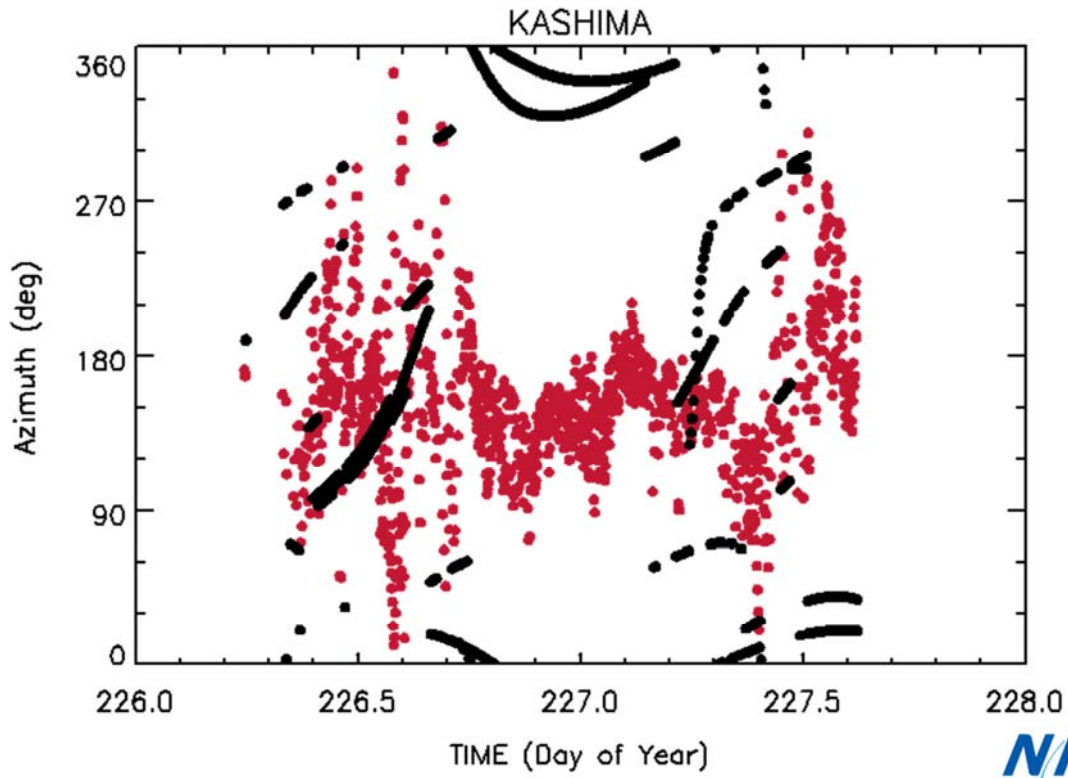
GNSS観測との比較（時系列表示）



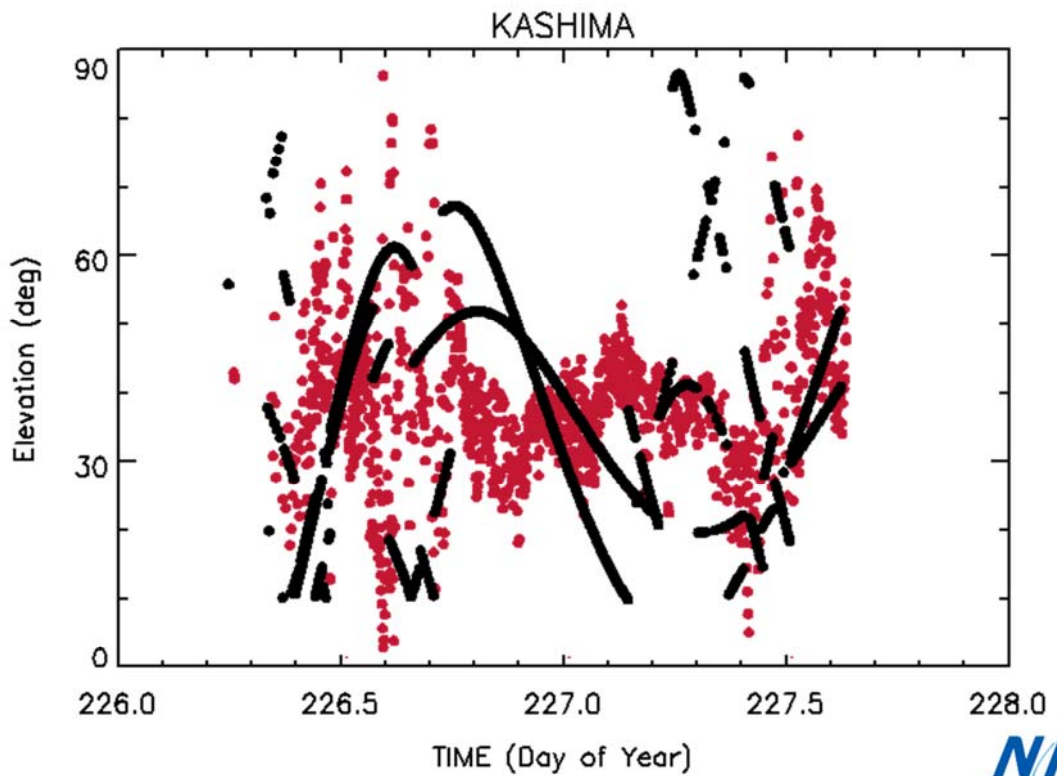
Kp INDICES



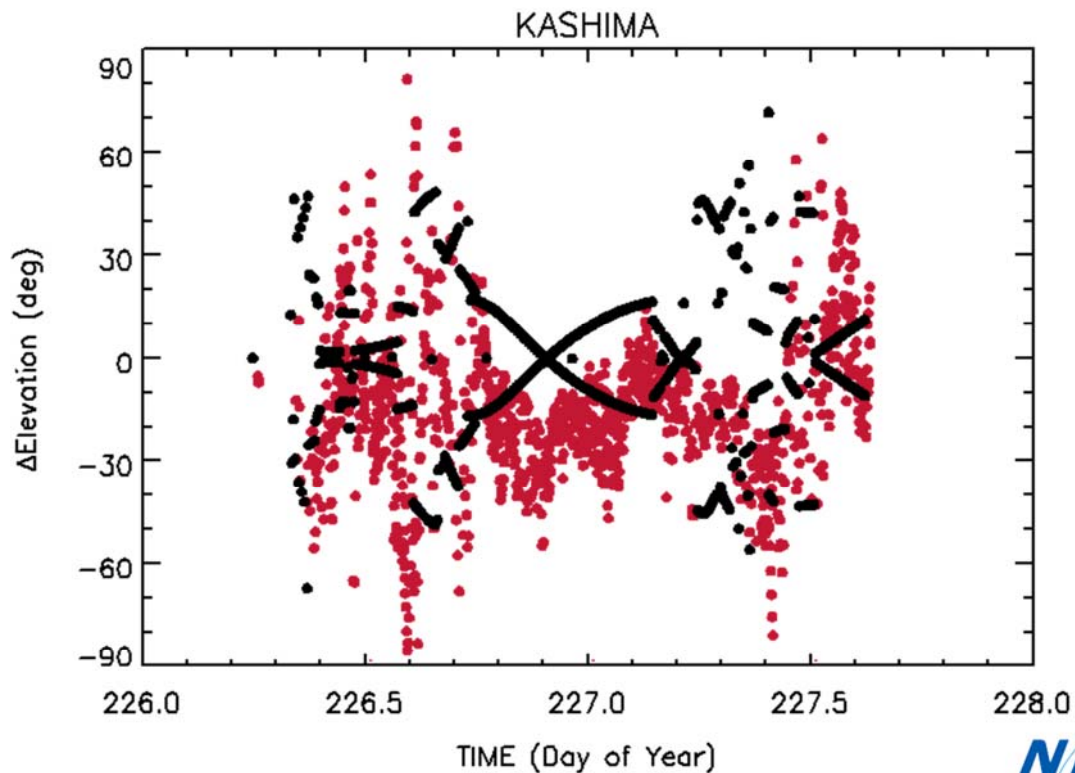
観測方位角の時間変化



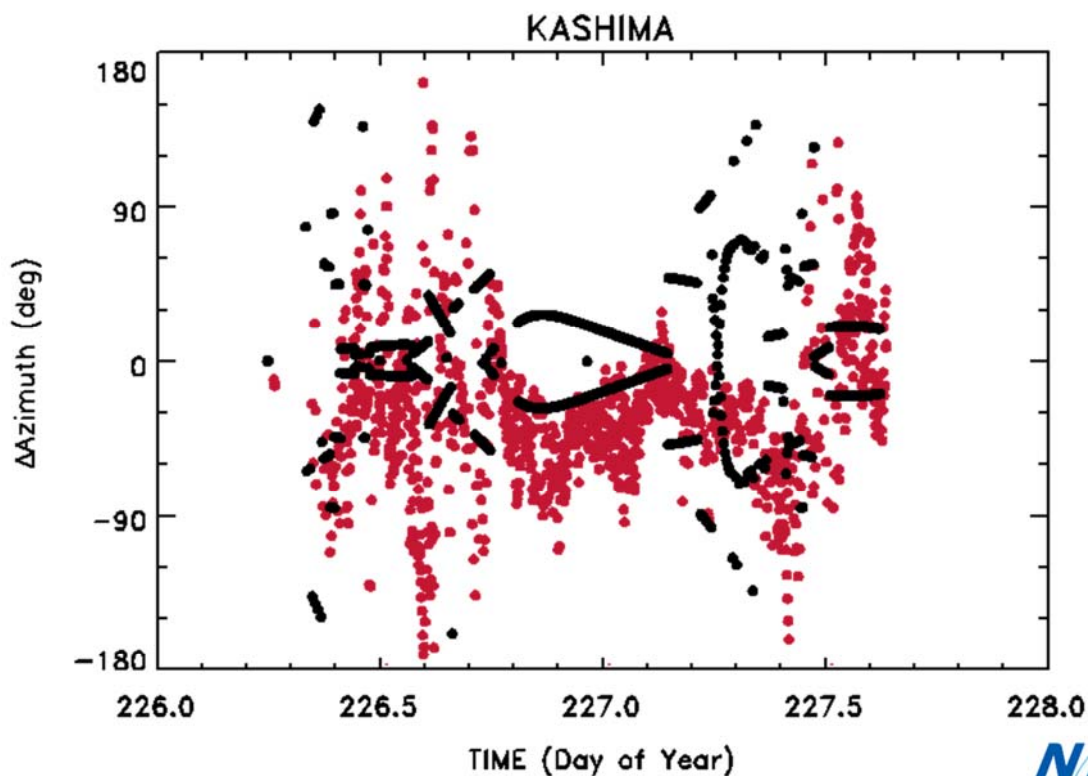
観測仰角の時間変化



仰角移動距離の時間変化



方位角移動距離の時間変化



まとめ

- 広帯域バンド幅合成手法を確立
- 電離層の推定法も確立
 - 2段階に分けることによりロバストかつ高精度な推定が可能になった
- 今後、長基線データによる検証

