

# 衛星航法のための電離圏リアルタイム監視

<sup>1</sup>\*齋藤 享、<sup>2</sup>山本 衛、<sup>3</sup>齋藤 昭則

<sup>1</sup>電子航法研究所航法システム領域

<sup>2</sup>京都大学生存圏研究所

<sup>3</sup>京都大学理学研究科

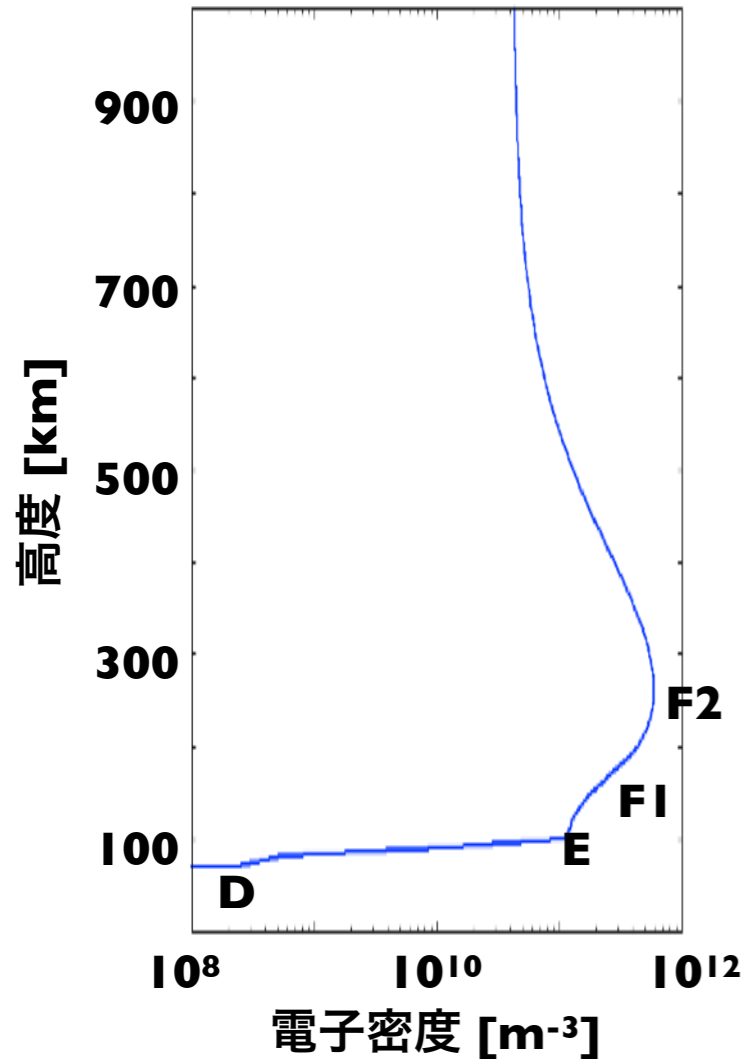
- ・ 科学研究費補助金基盤研究(B) “ロケット・地上連携観測による中緯度電離圏波動の生成機構の解明”  
期間：平成24～26年度 代表者：京都大学生存研究所・山本 衛
- ・ 科学研究費補助金挑戦的萌芽研究 “電離圏 リアルタイム3次元トモグラフィーへの挑戦”  
期間：平成26～29年度 代表者：京都大学生存研究所・山本 衛

- \* 電離圏と衛星航法
- \* 電離圏擾乱のリアルタイム監視
  - 変動成分のリアルタイム解析・表示
- \* 電離圏3次元密度分布のリアルタイム監視
  - 電離圏3次元リアルタイムトモグラフィ
  - 衛星航法等への応用

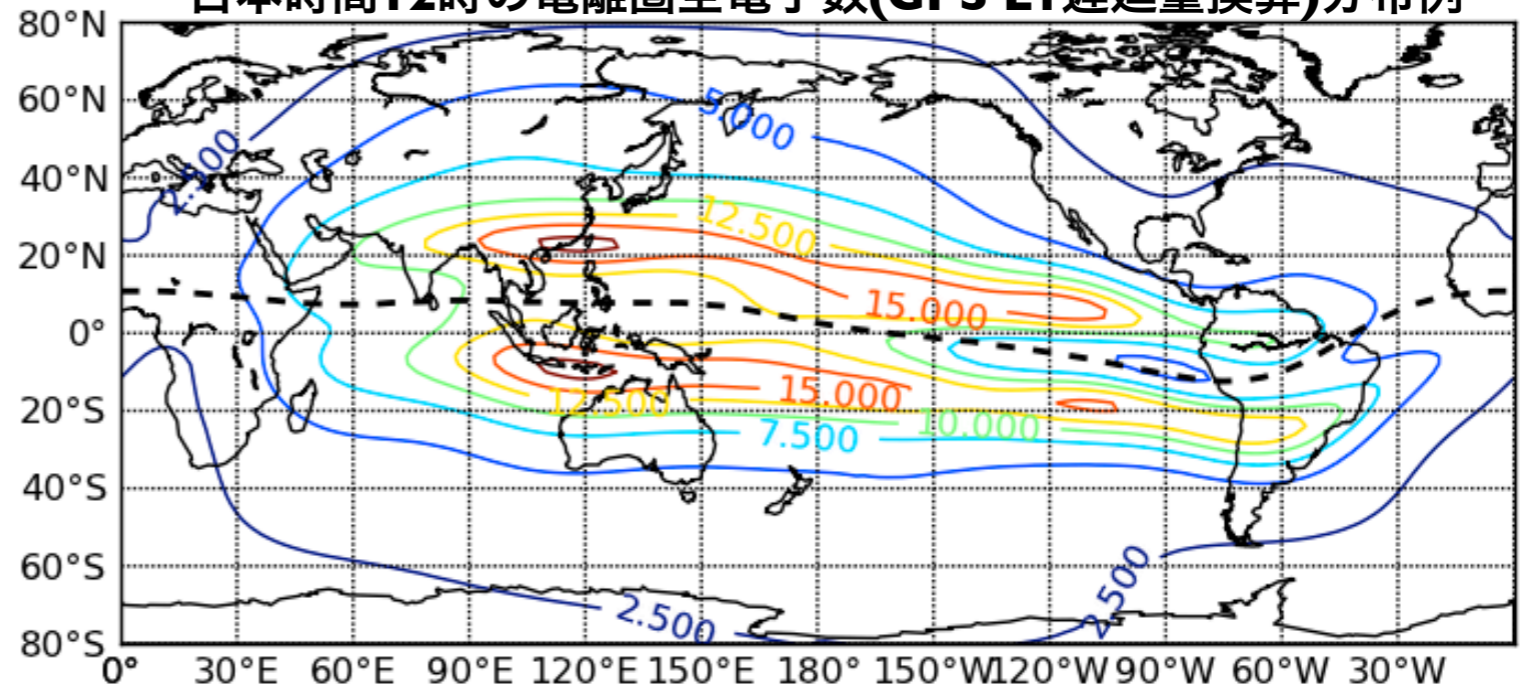
\* 電離圏：高度約60km～1000kmに存在する電離した地球大気（プラズマ）

- 時刻、緯度、経度、季節、太陽活動度などによって大きく変動する
  - 電離圏の振る舞いは一定ではなく、様々な時間・空間スケールで変動する
- ➔ 電離圏擾乱

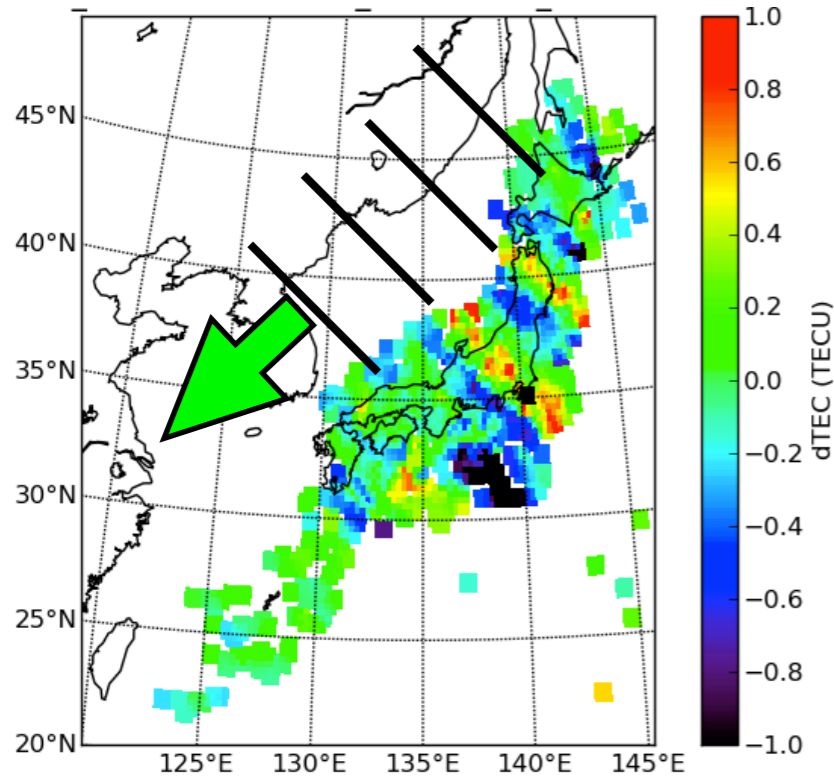
昼間の電離圏密度の高度分布例



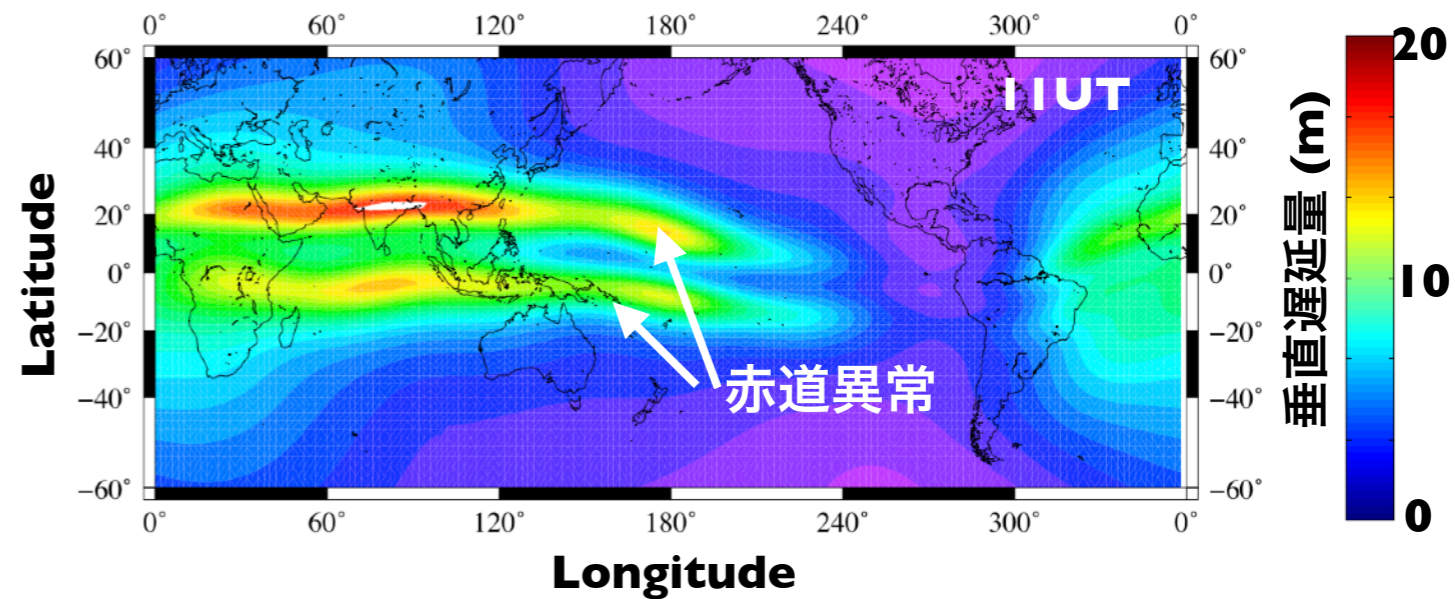
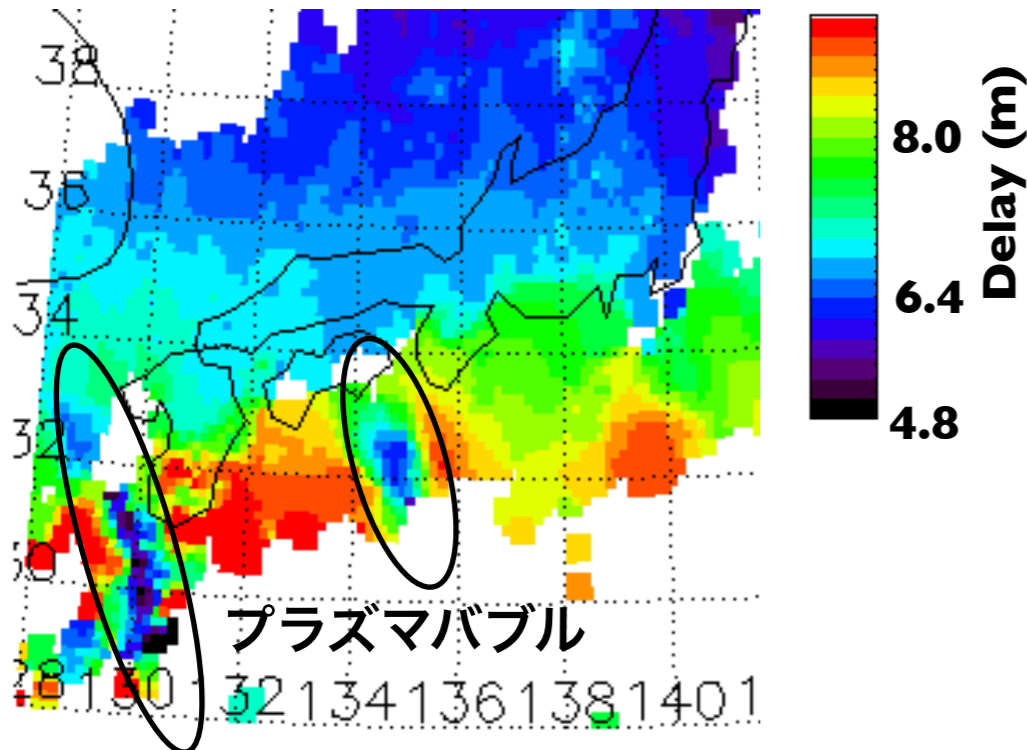
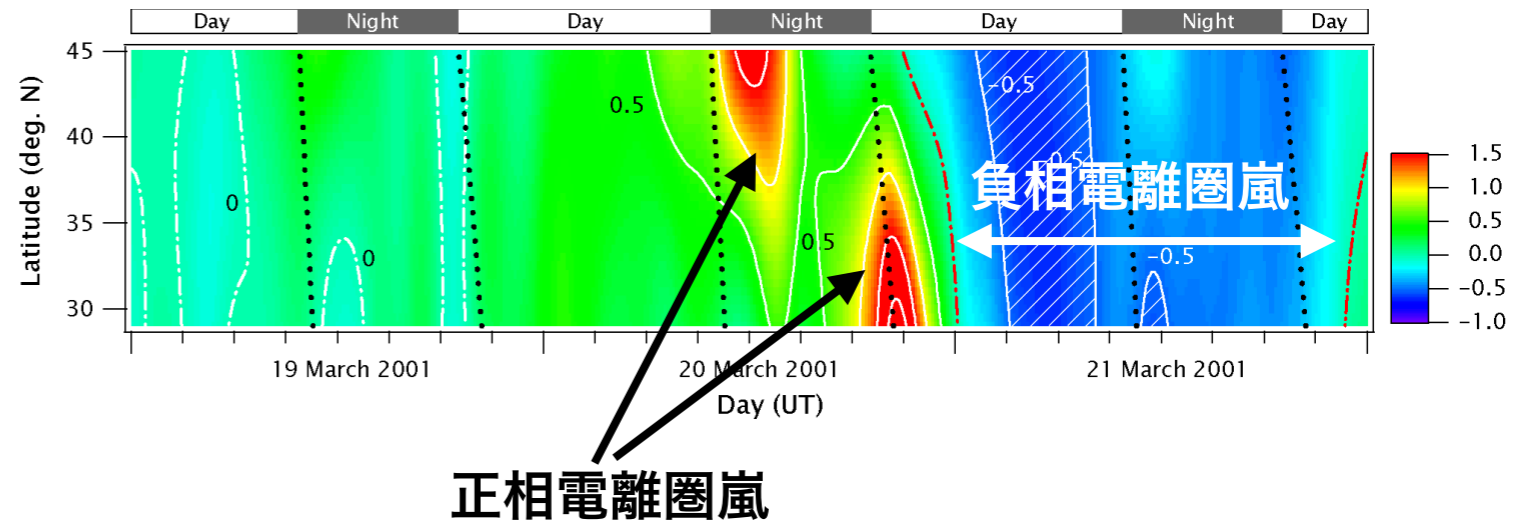
日本時間12時の電離圏全電子数(GPS LI遅延量換算)分布例



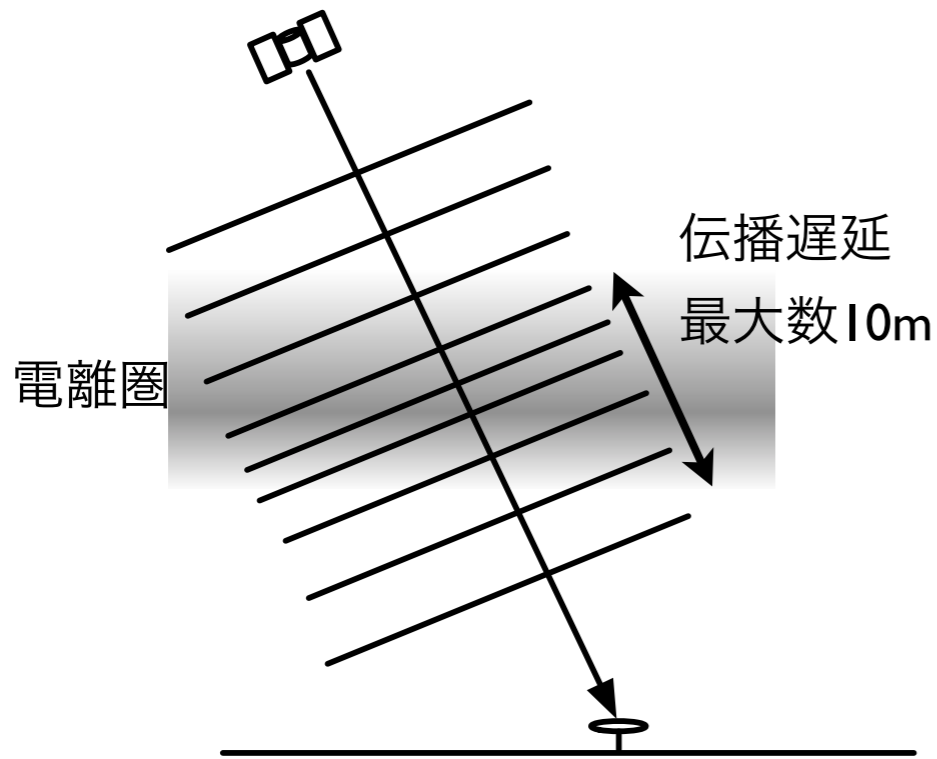
### 中規模伝搬性電離圏擾乱



### 磁気嵐起源電離圏嵐







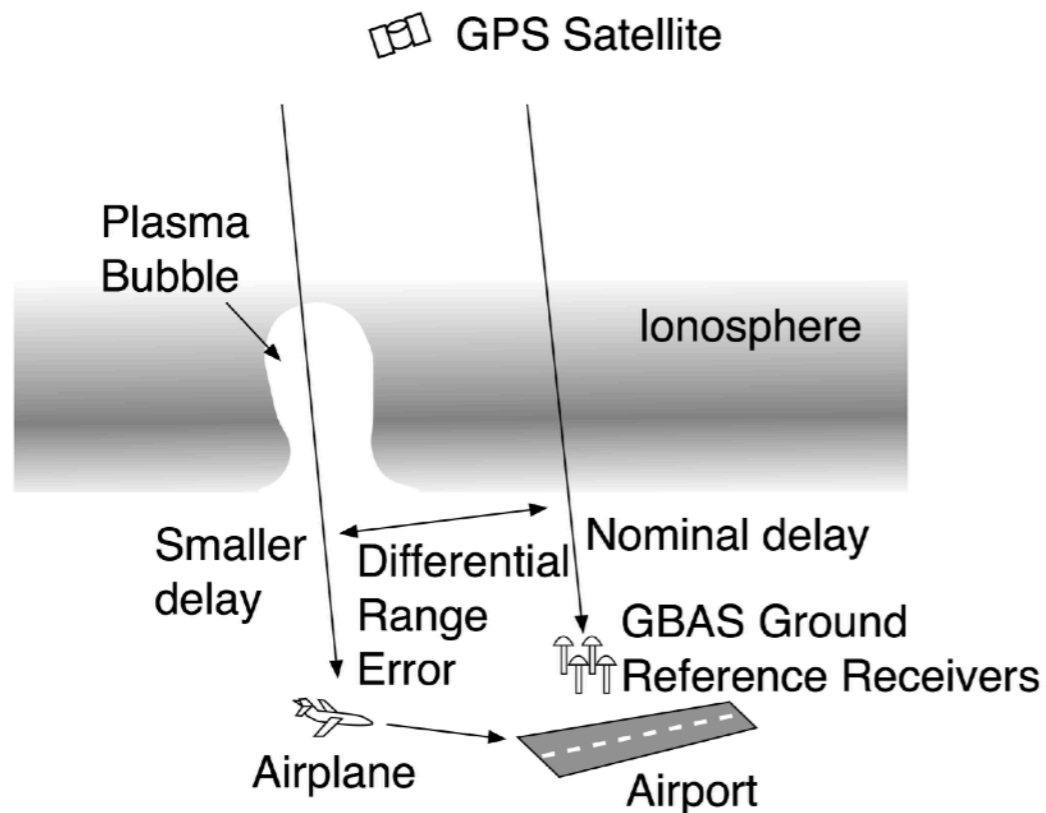
- \* 電離圏プラズマ中では電波の速度がわずかに遅くなり、衛星-受信機の距離が長く見える
- ➔ 電離圏遅延

- \* 垂直方向の電離圏遅延量は20-30 mにもなりうる

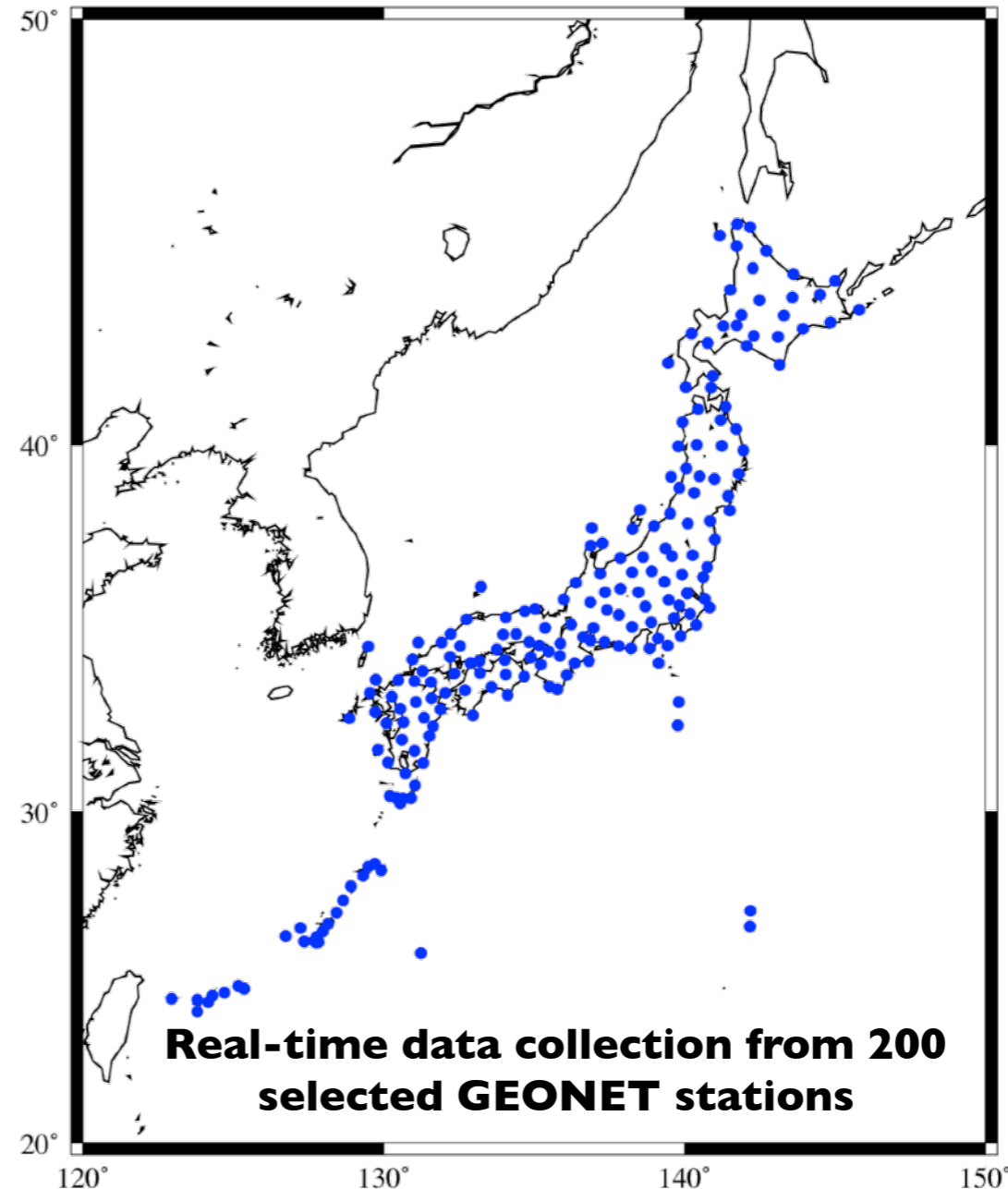
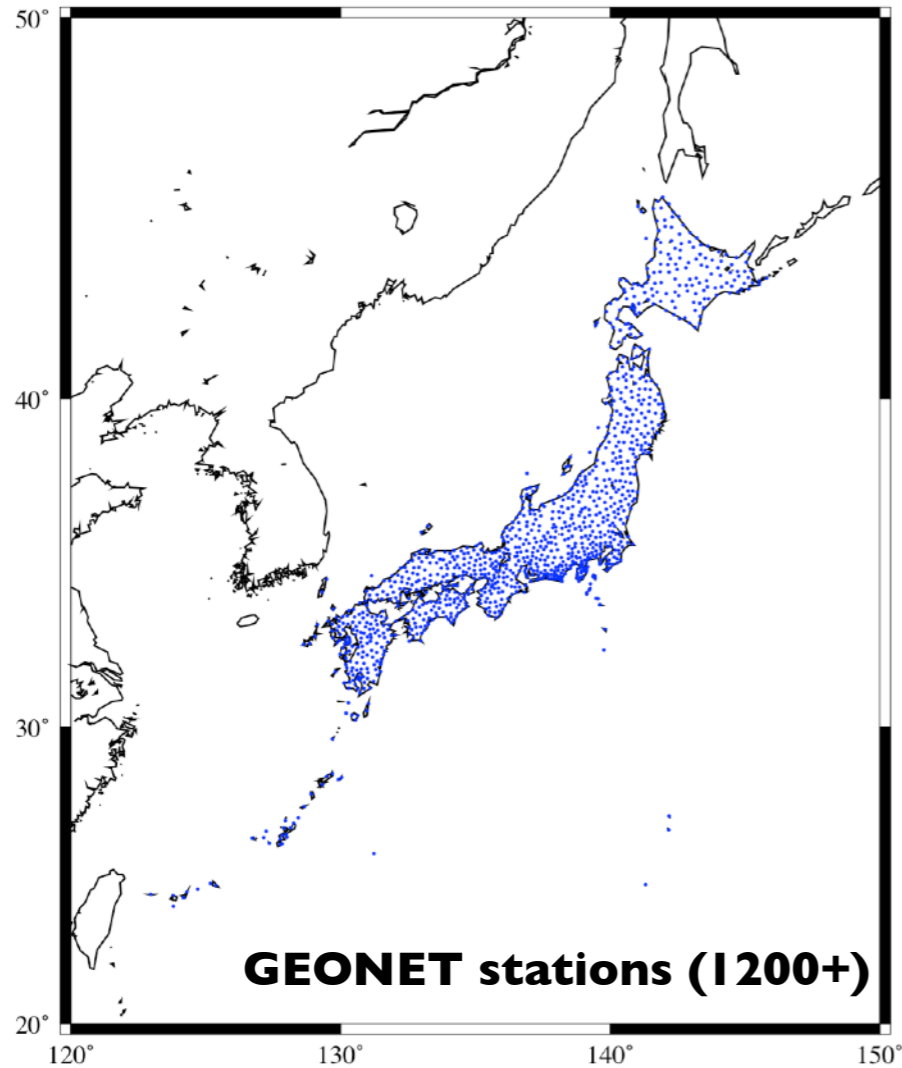
- 斜め方向には2~3倍にもなる

- \* 電離圏変動(擾乱)はディファレンシャルGNSSの誤差要因

- ➔ 電離圏擾乱のリアルタイム監視はGNSSの有効活用に重要



ディファレンシャルGNSS (GBAS)誤差

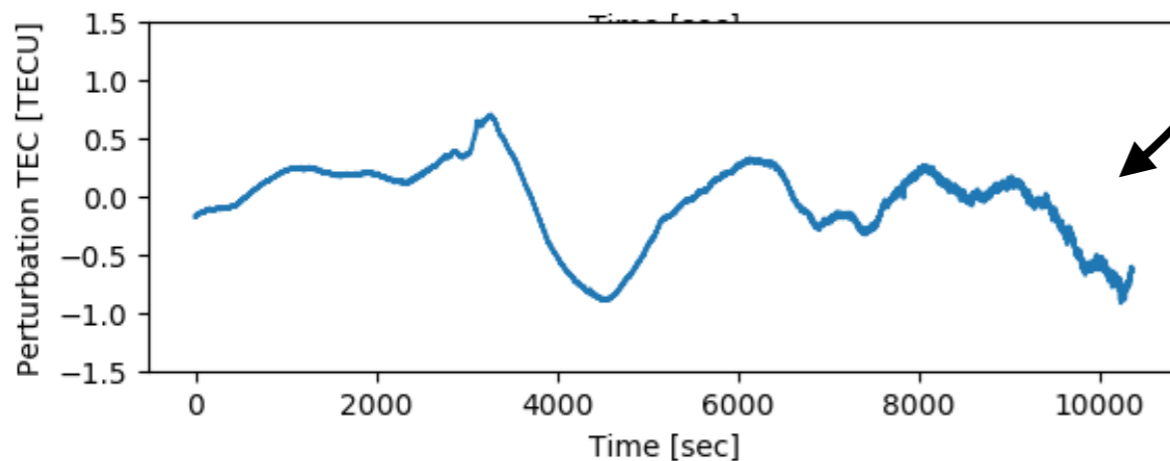
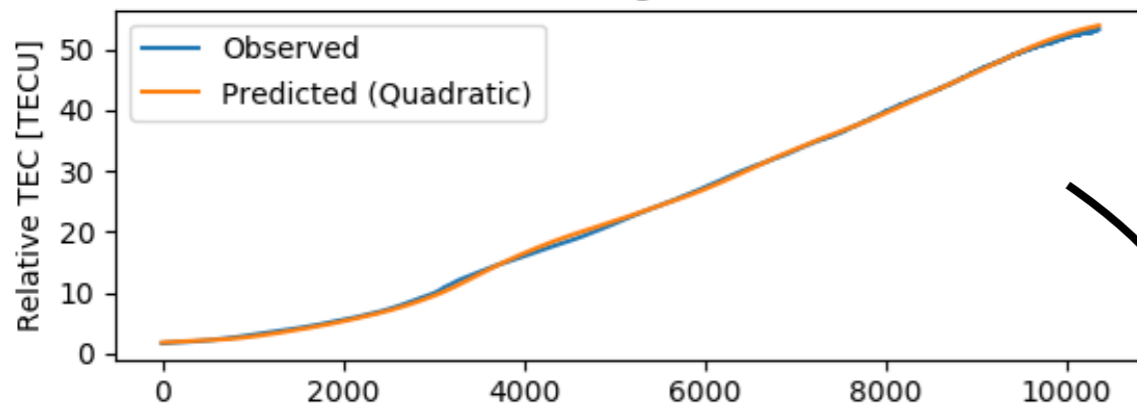
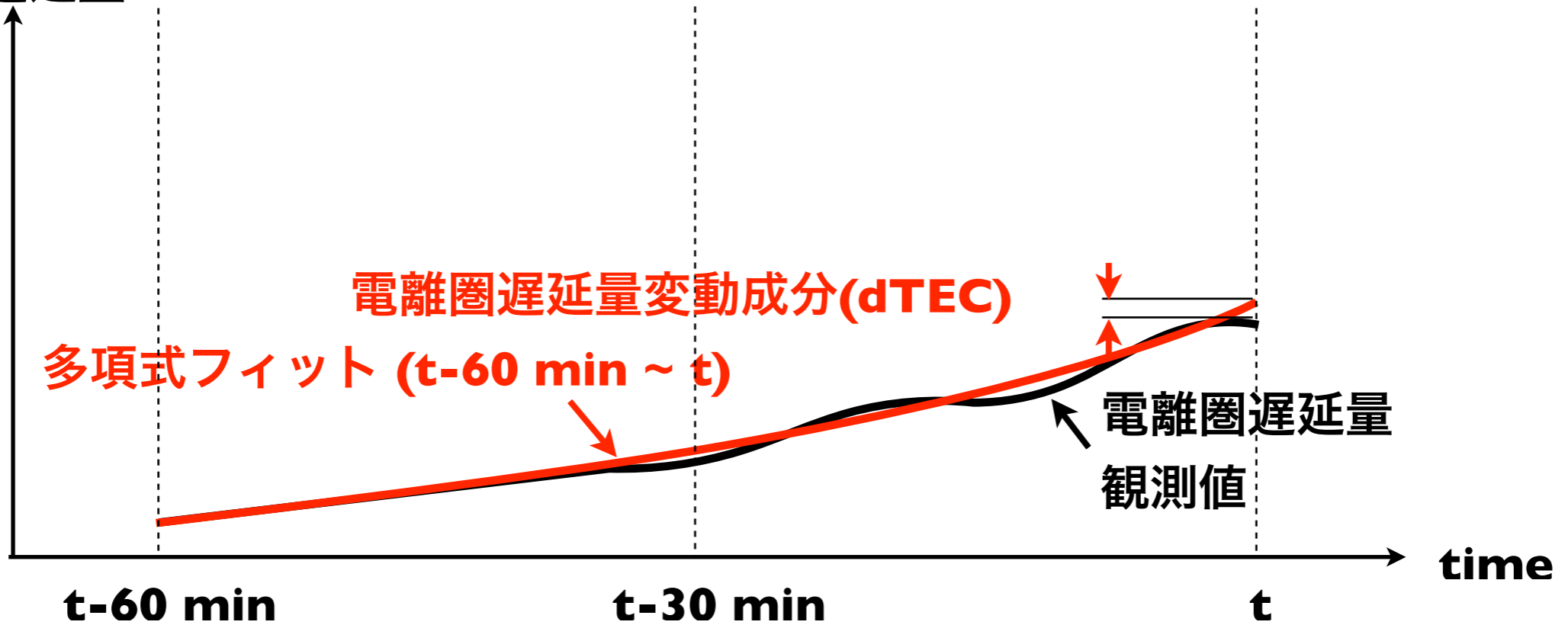


- \* 約1200点の国土地理院電子基準点網(GEONET)のうち、200点のデータ(1秒値)をリアルタイムで受信
- ➡ 稠密リアルタイムデータにより電離圏を可視化

# 電離圏擾乱リアルタイム監視

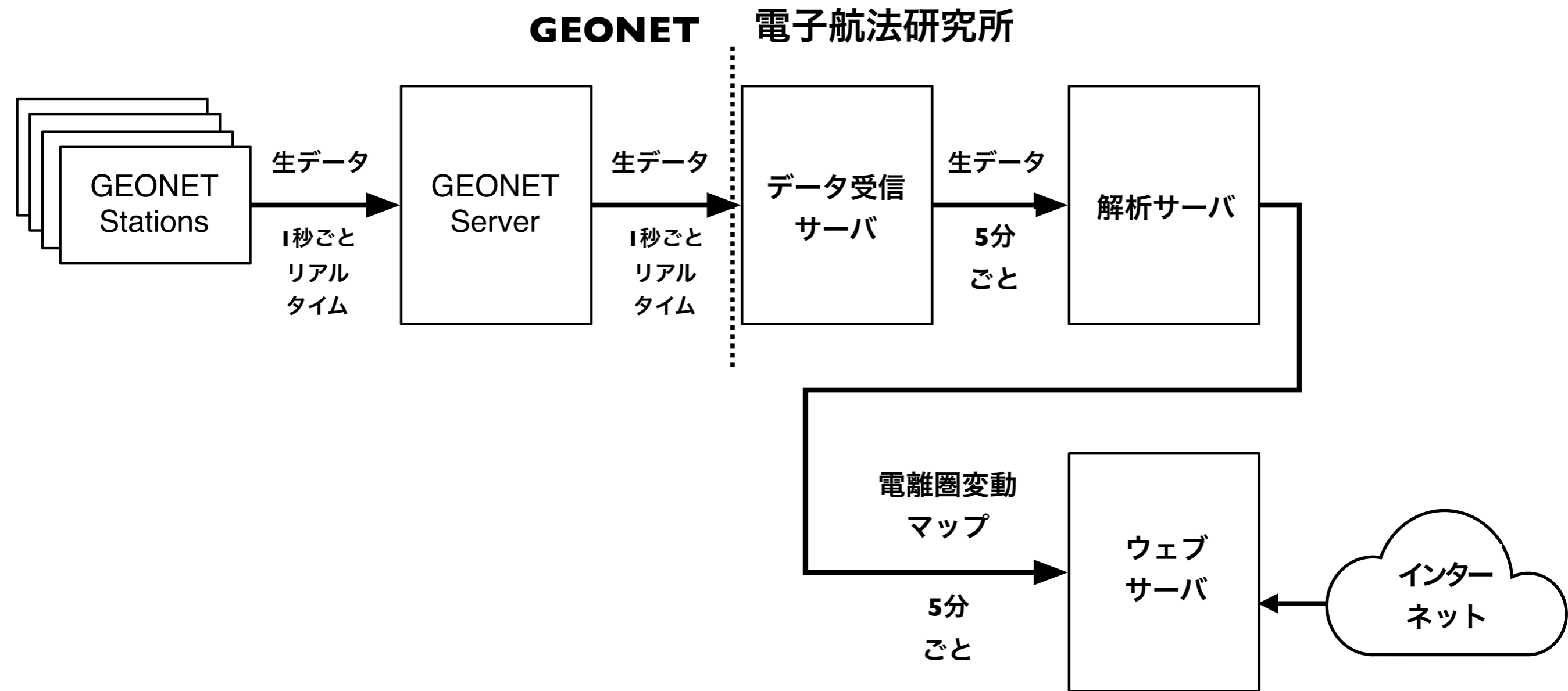
電離圏変動成分のリアルタイム解析・表示

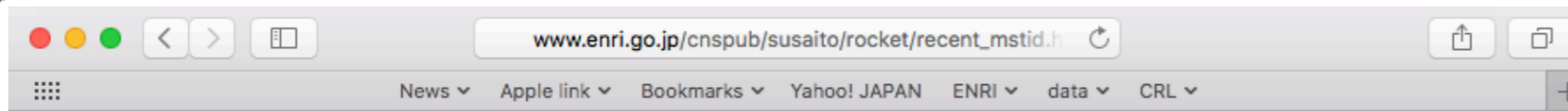
電離圏遅延量



\* 多項式近似でトレンドを除去、変動成分のみ取り出す





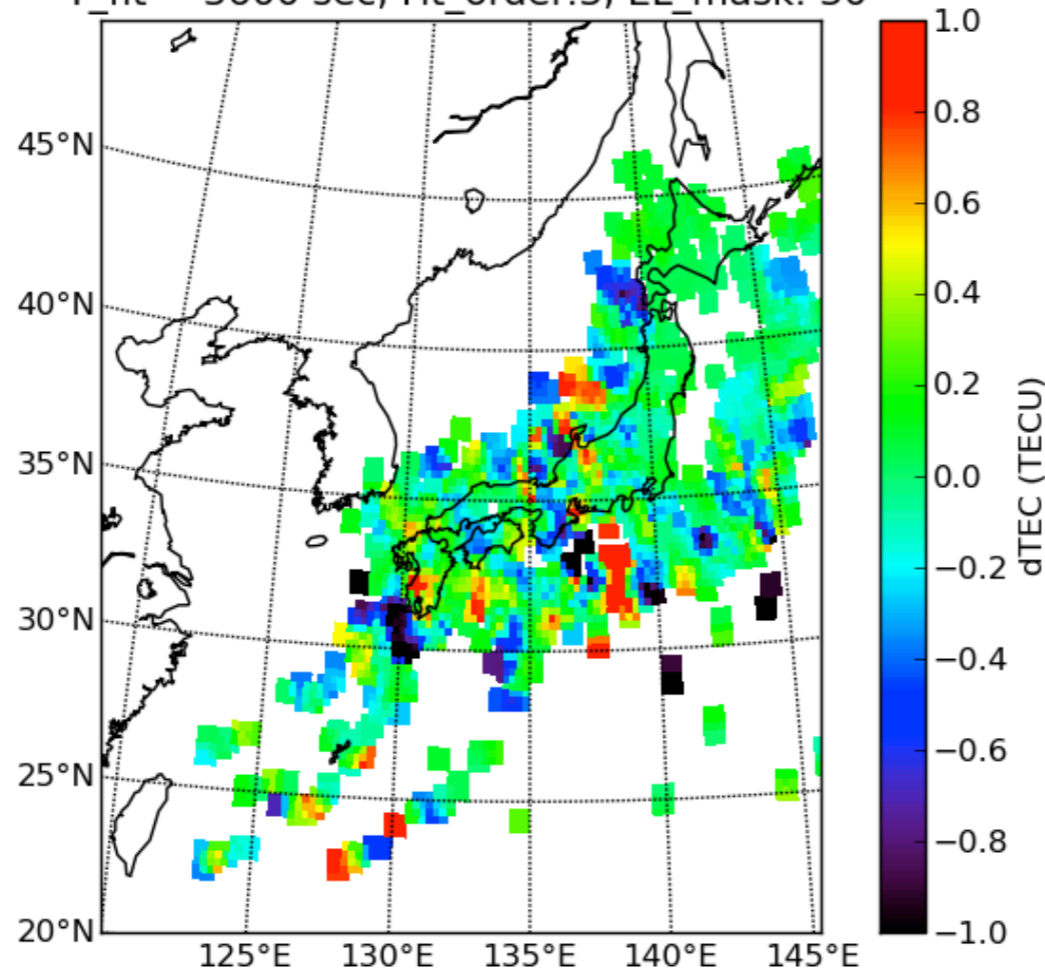


## Latest TEC perturbation map

[Last 3 hours TEC perturbation maps](#)  
[Select TEC perturbation map by time](#)

14:00:00 2018/05/29

T\_fit = 3600 sec, Fit\_order:3, EL\_mask: 30



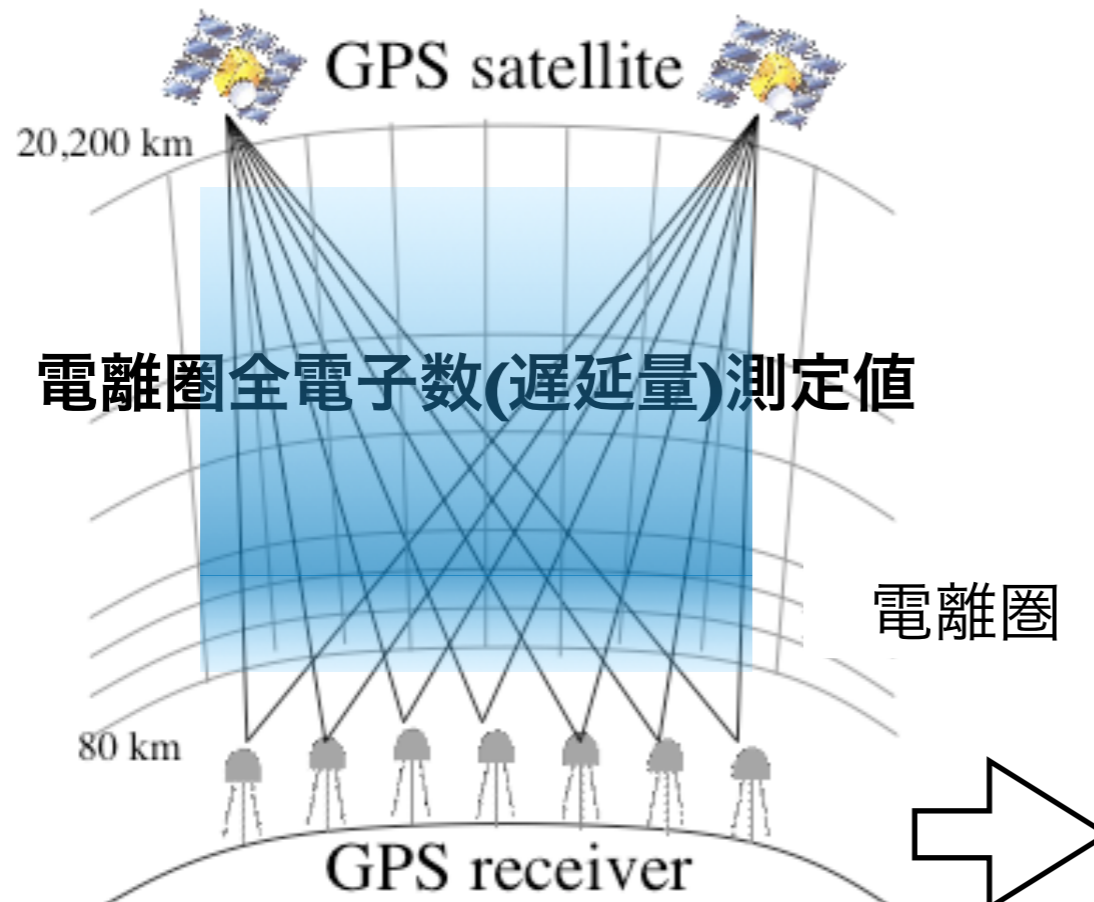
- \* 最新電離圏変動マップ
- \* 過去3時間電離圏変動  
マップ一覧
- \* 電離圏変動マップ検索
- \* 電離圏遅延量変動指数  
(ROTI)分布(試行中)

Generated by Electronic Navigation Research Institute (ENRI).

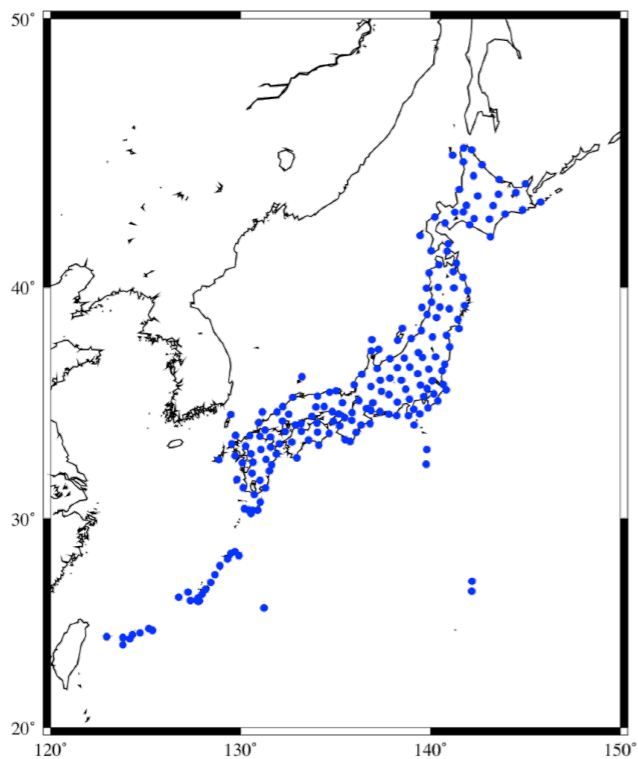
[http://www.enri.go.jp/cnspub/susaito/rocket/recent\\_mstid.html](http://www.enri.go.jp/cnspub/susaito/rocket/recent_mstid.html)

# 電離圏3次元密度分布のリアルタイム監視

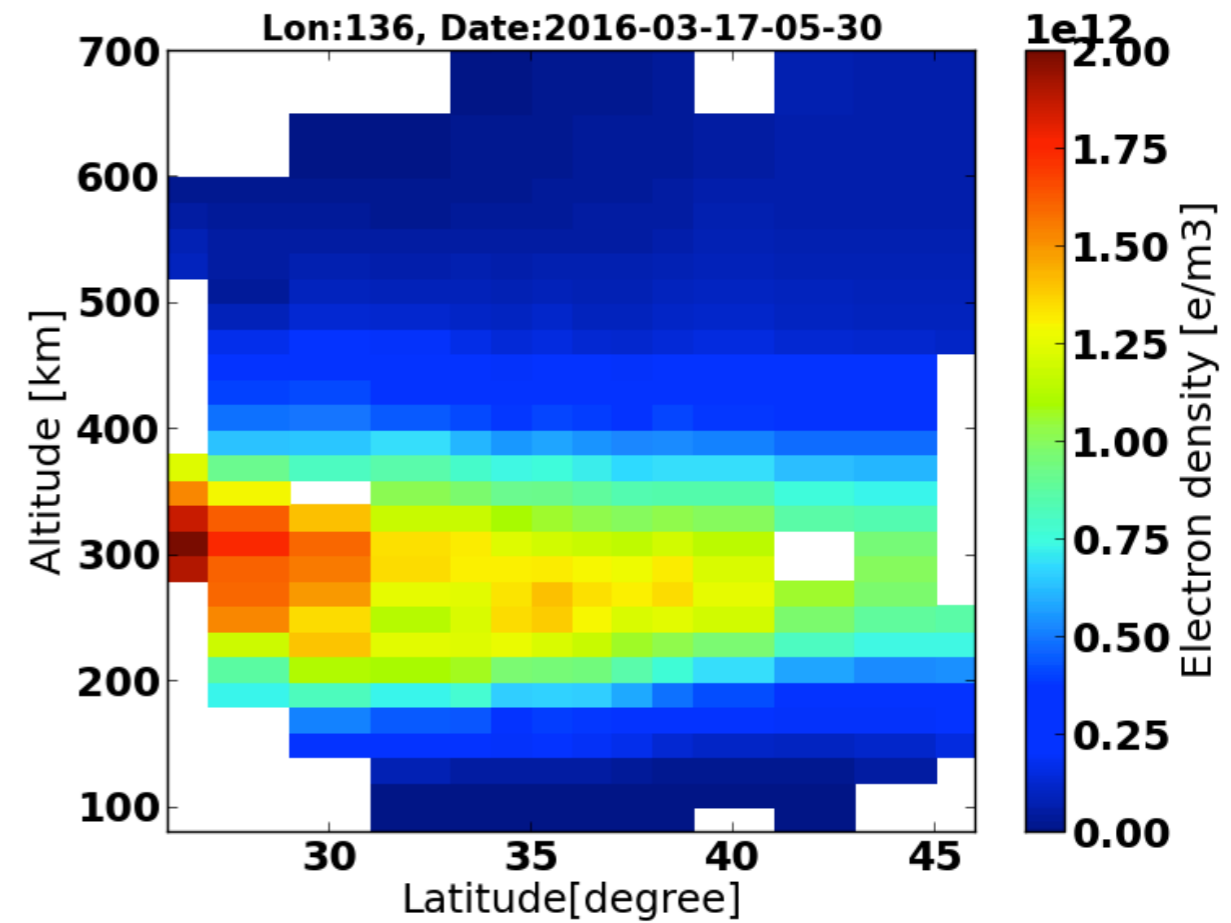
電離圏3次元リアルタイムトモグラフィ解析・表示



再構成



### 3次元電離圏密度分布

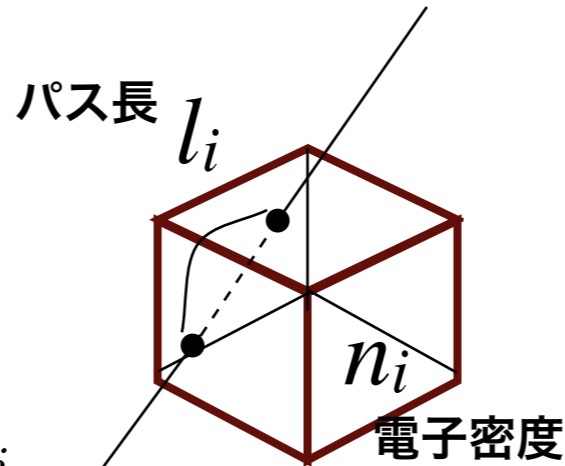


\* 拘束付き最小2乗法

電離圏遅延量  
測定値  $TEC_i$

$$= \sum_{s=1}^{N_i} l_i n_i$$

$$= \sum_{j=1}^N l_{i,j} n_{i,j}$$



電離圏遅延量  
観測値ベクトル  $\vec{T}$

電子密度ベクトル(未知)  $\vec{n}$

ジオメトリ  
行列  $A$

$$\vec{T} = A\vec{n}$$

拘束条件  $\vec{W}\vec{n} = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^6 C_{i,j} (n_i - n_{i,j})$

周囲との結合の  
強さの指数  $C_{i,j}$

評価関数  $J(\vec{n})$

境界条件  $A^{bc} \vec{n}^{bc}$

拘束条件  $\lambda$

境界条件  $W^{bc} \vec{n}^{bc}$

$$J(\vec{n}) = \underbrace{\|\vec{T} + A^{bc} \vec{n}^{bc} - A\vec{n}\|^2}_{\text{最小2乗項}} + \lambda \underbrace{\|\vec{W}\vec{n} + W^{bc} \vec{n}^{bc}\|^2}_{\text{拘束項}}$$

電子密度推定値  
ベクトル  $\vec{n}$

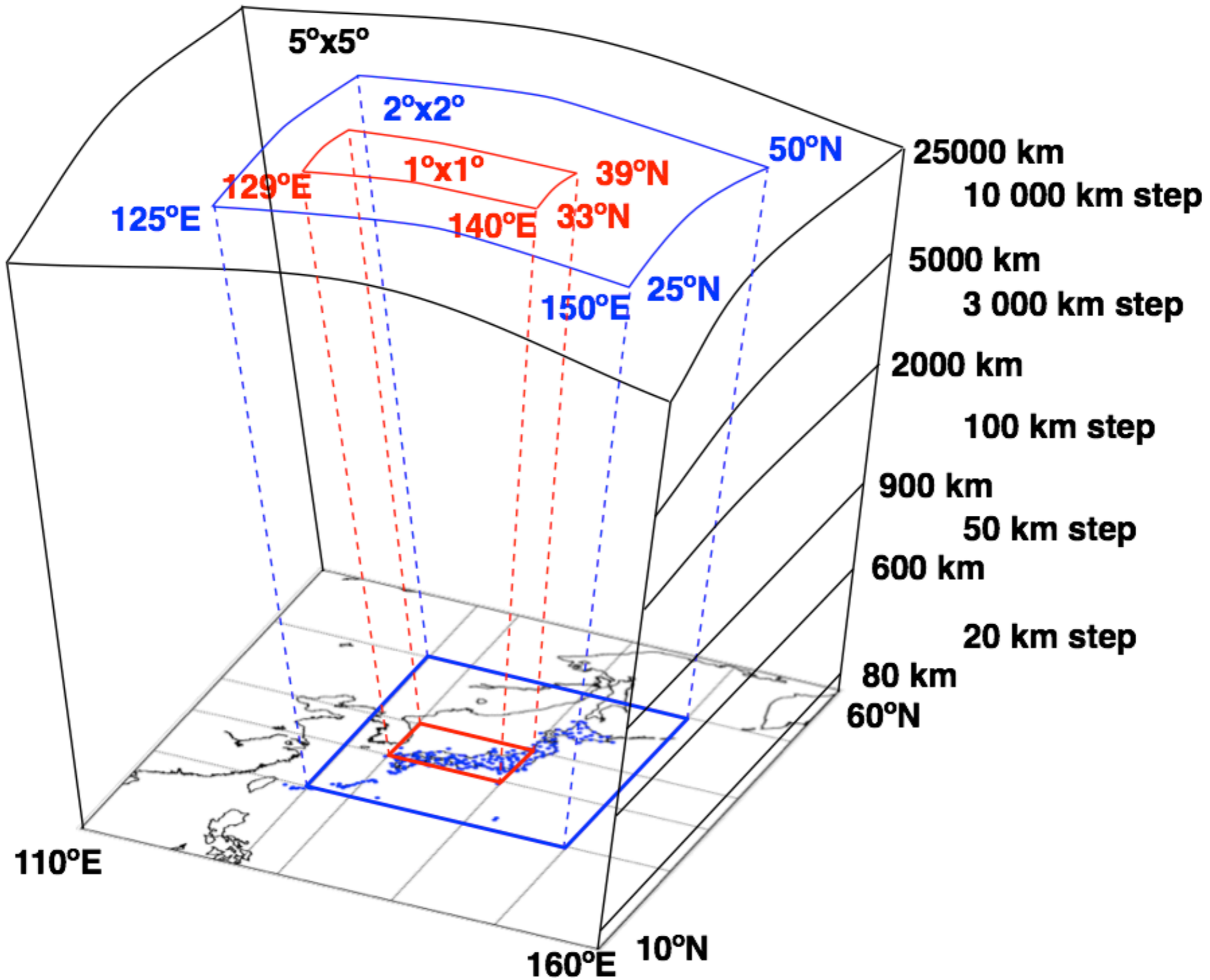
$$\vec{n} = (A^T A + \lambda W^T W)^{-1} \left( A^T (\vec{T} + A^{bc} \vec{n}^{bc}) + \lambda W^T W \vec{n}^{bc} \right)$$

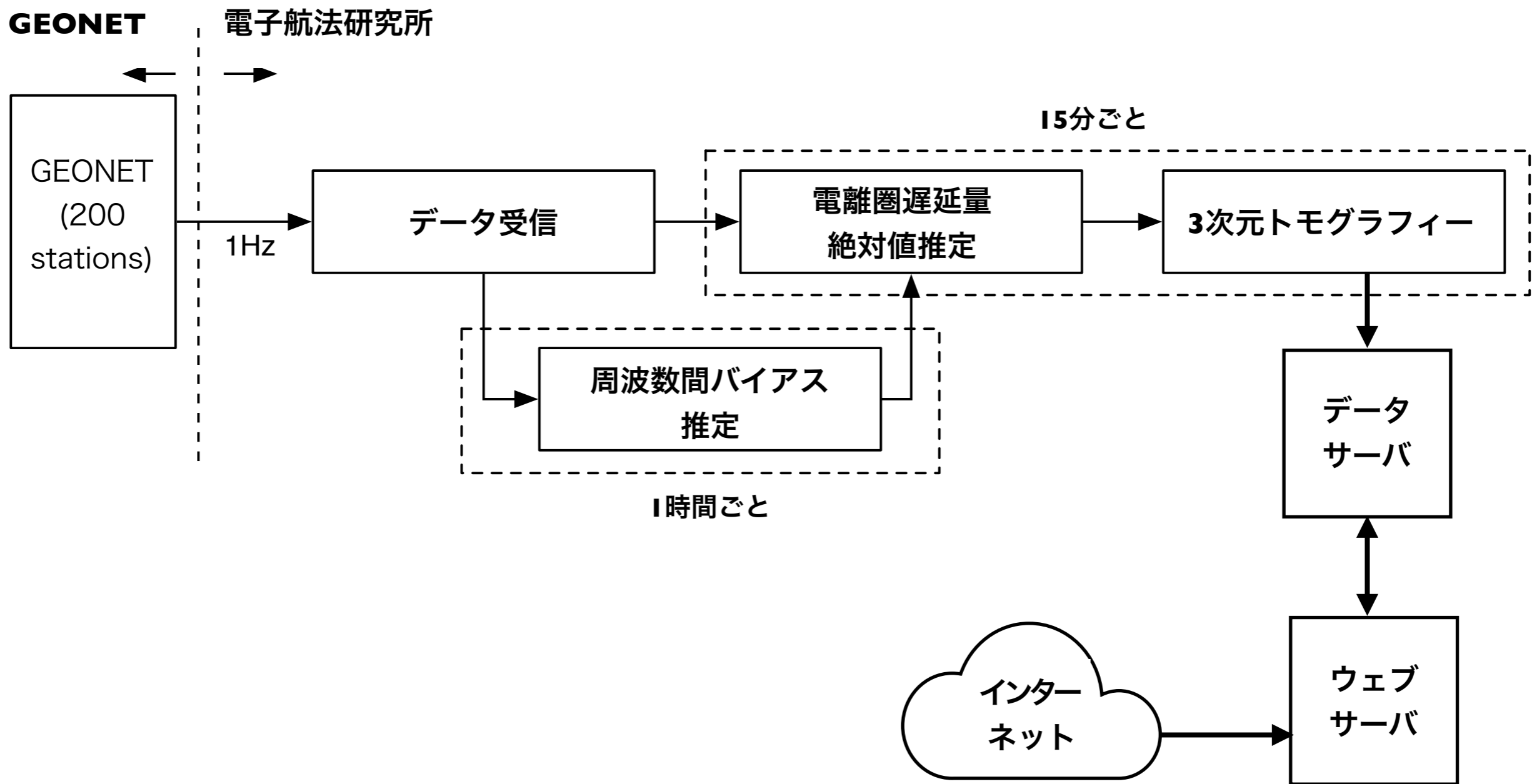
[Seemala et al., 2014; Chen et al., 2016; Saito et al., 2017]

平成30年度電子航法研究所研究発表会 (平成30年5月31~6月1日)



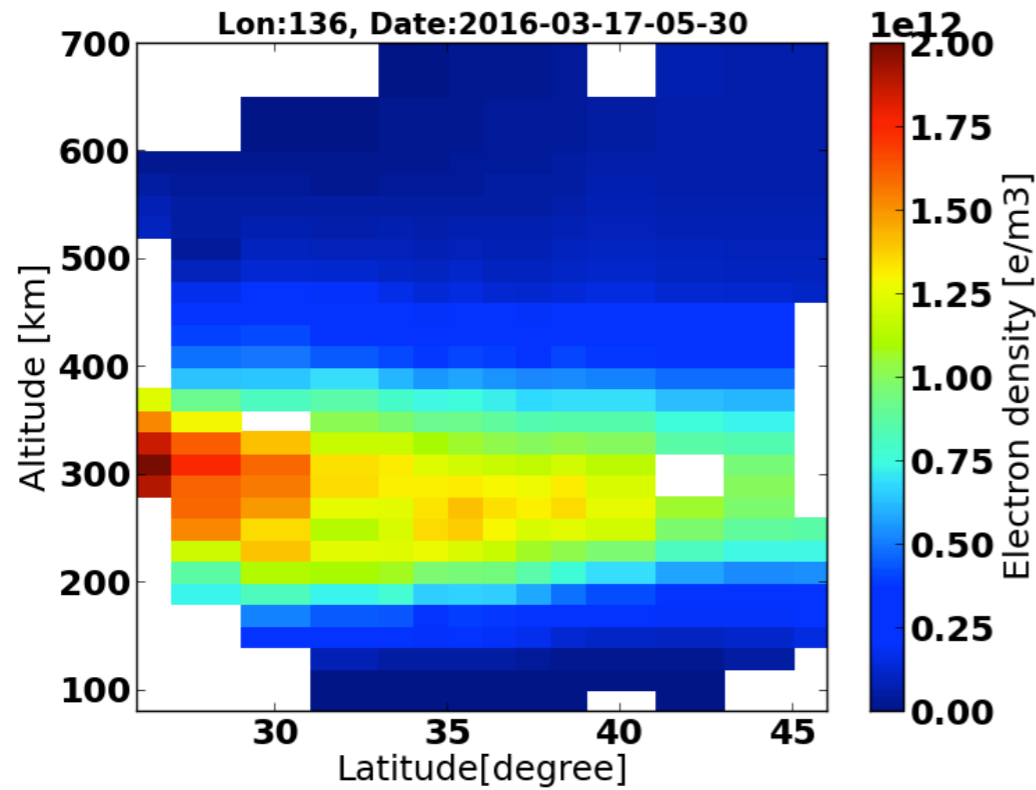
# 電離圏トモグラフィ解析エリア



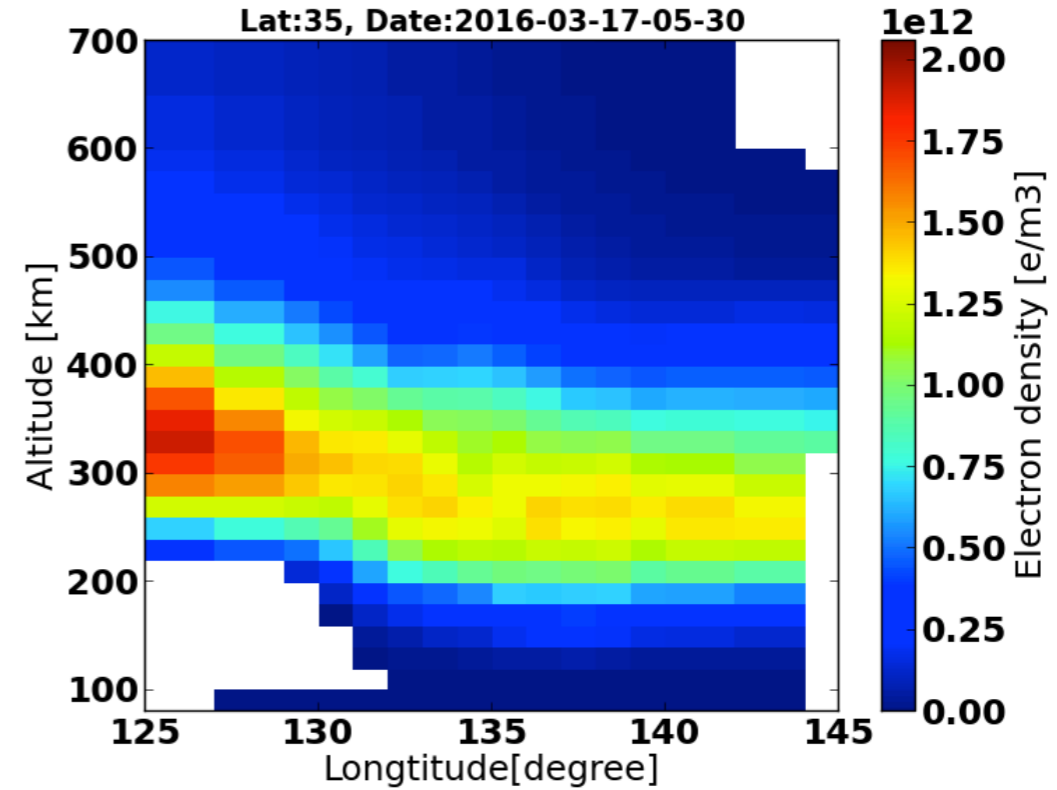


# トモグラフィー解析結果例

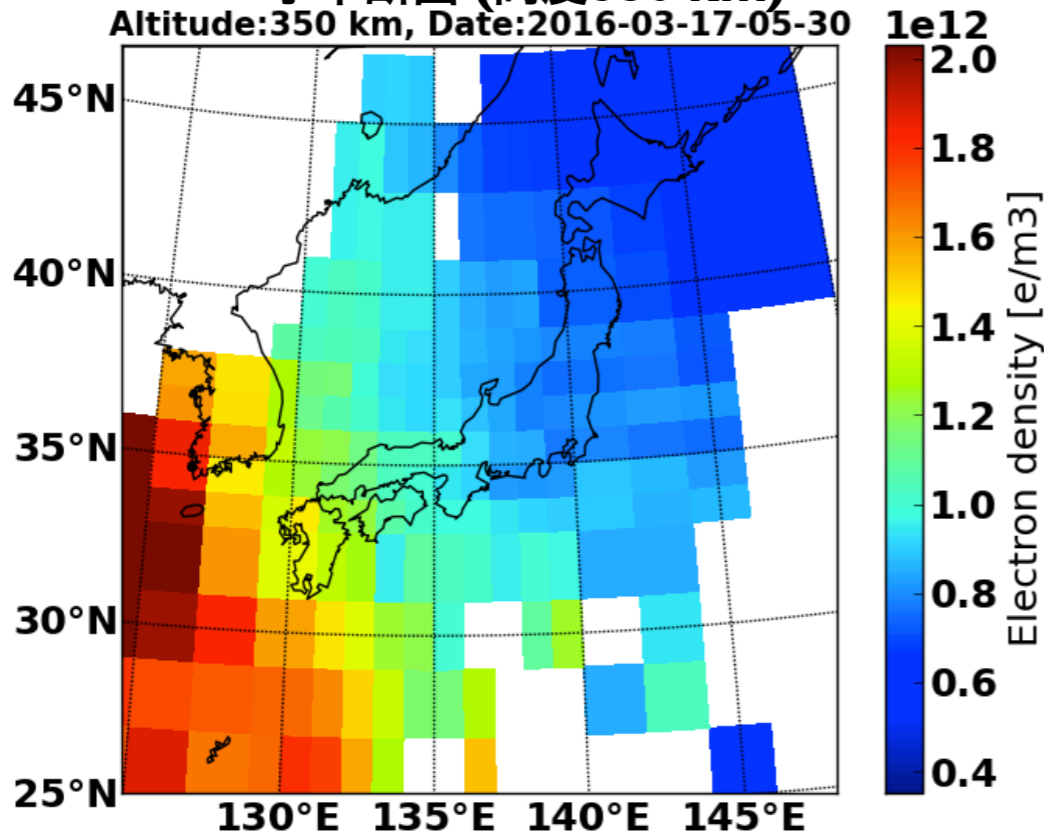
緯度断面 (136°E)



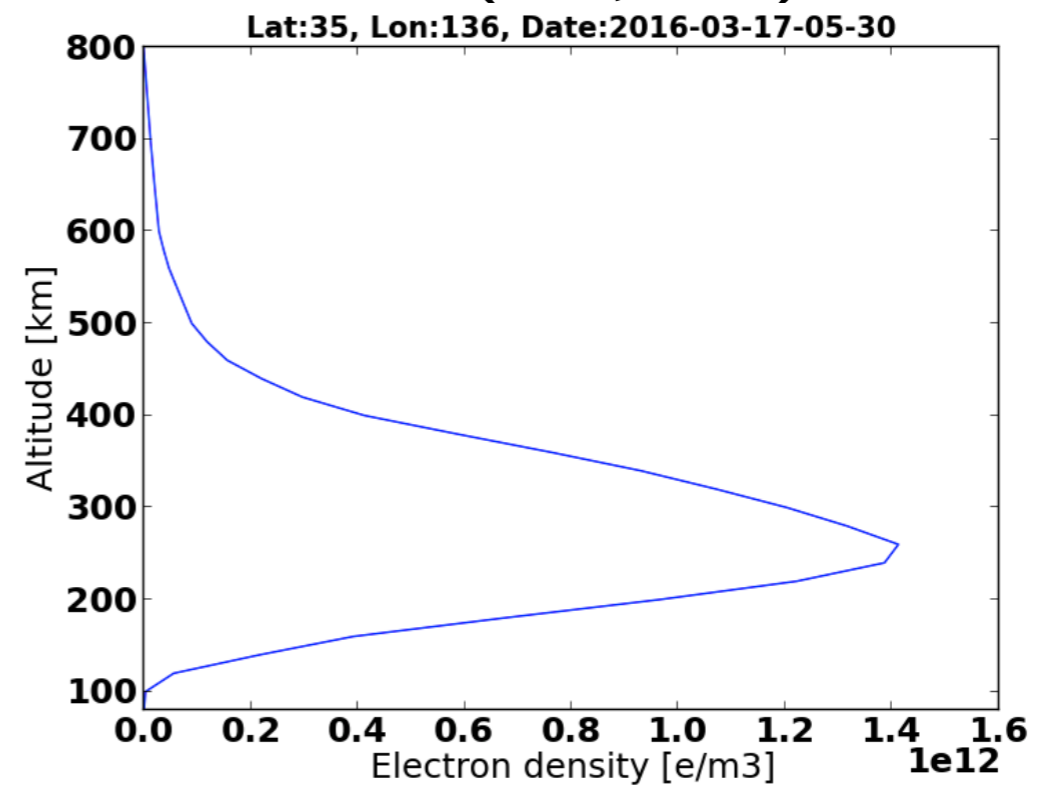
経度断面 (35°N)



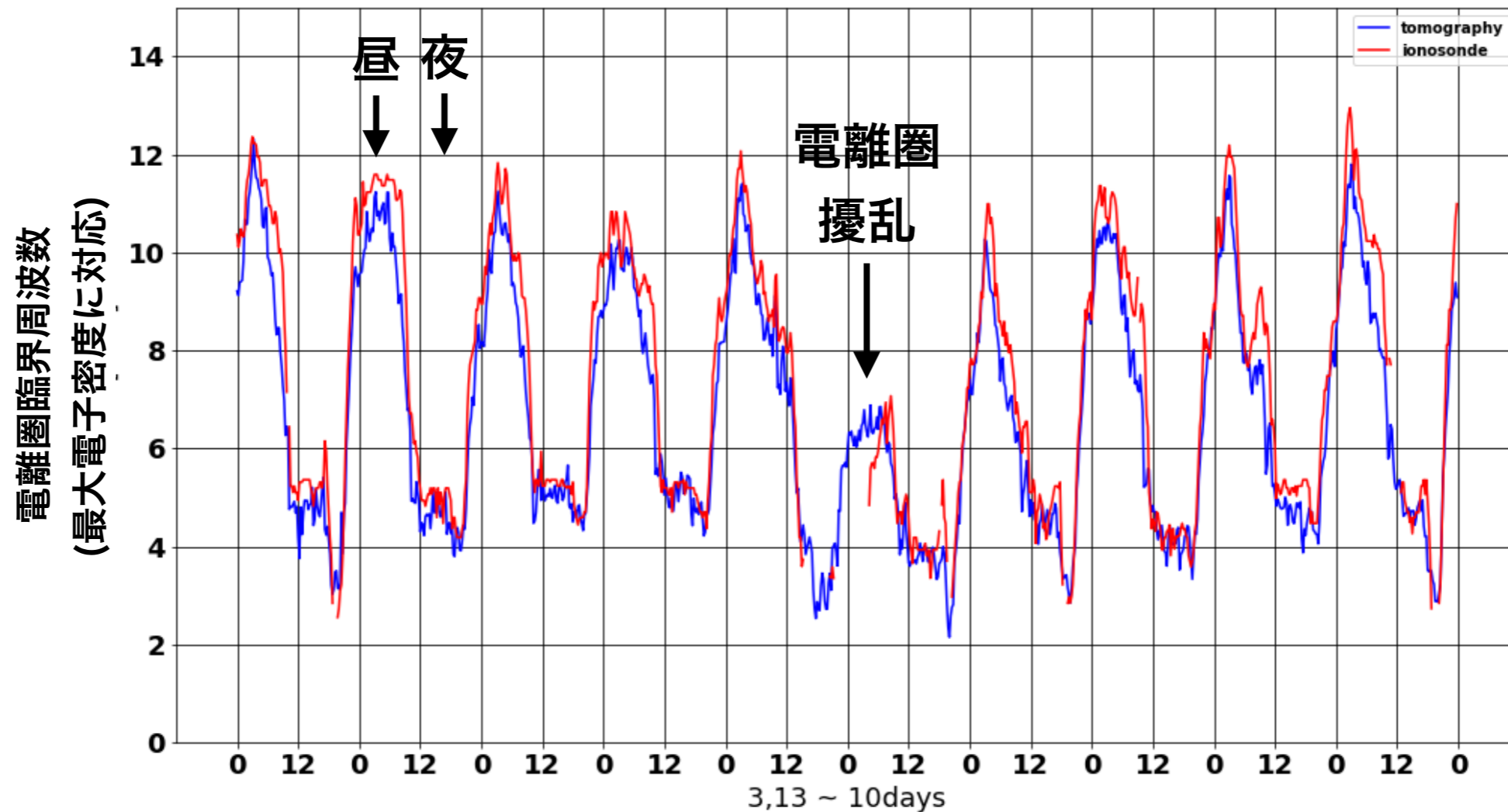
水平断面 (高度350 km)



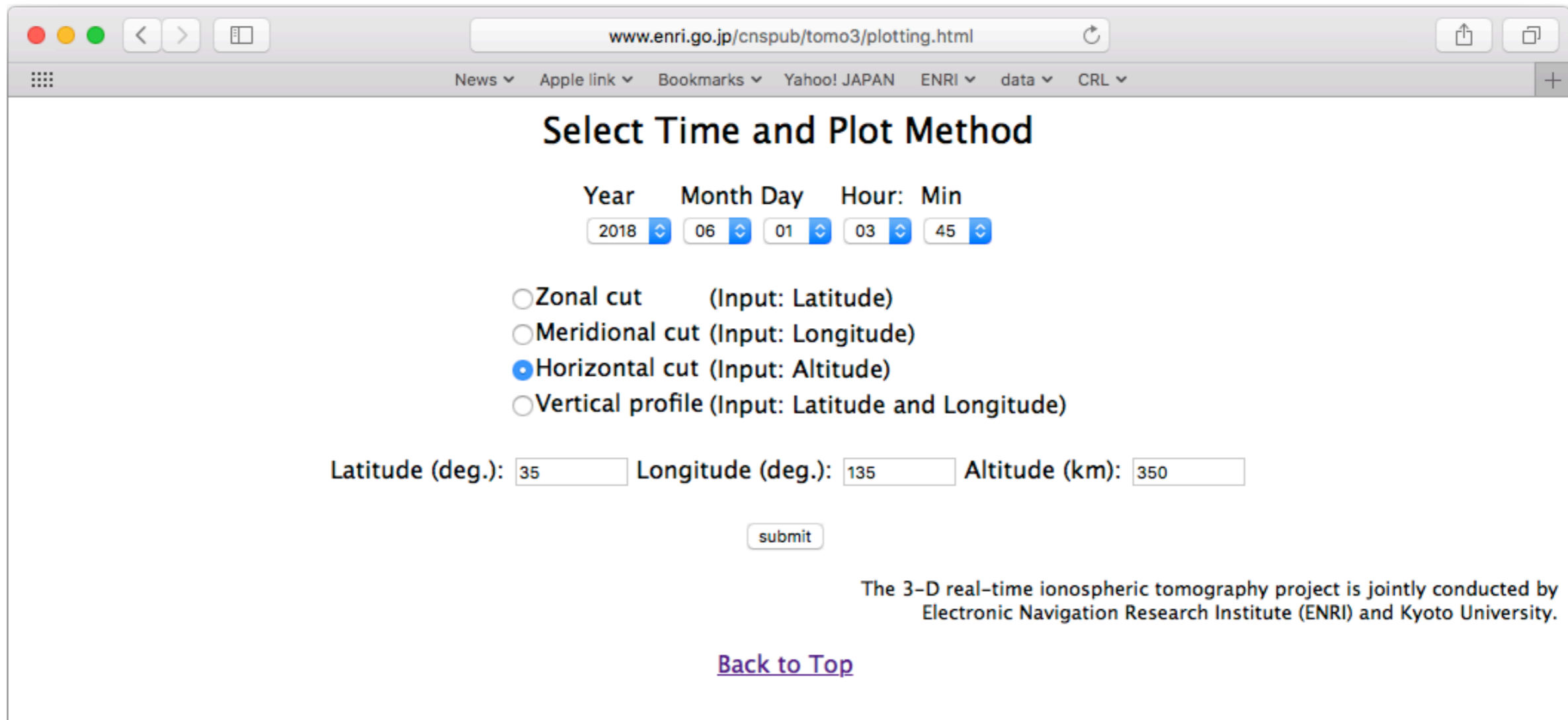
垂直分布 (35°N, 136°E)



- \* 電離圏観測装置（イオノゾンデ, 情報通信研究機構）との比較



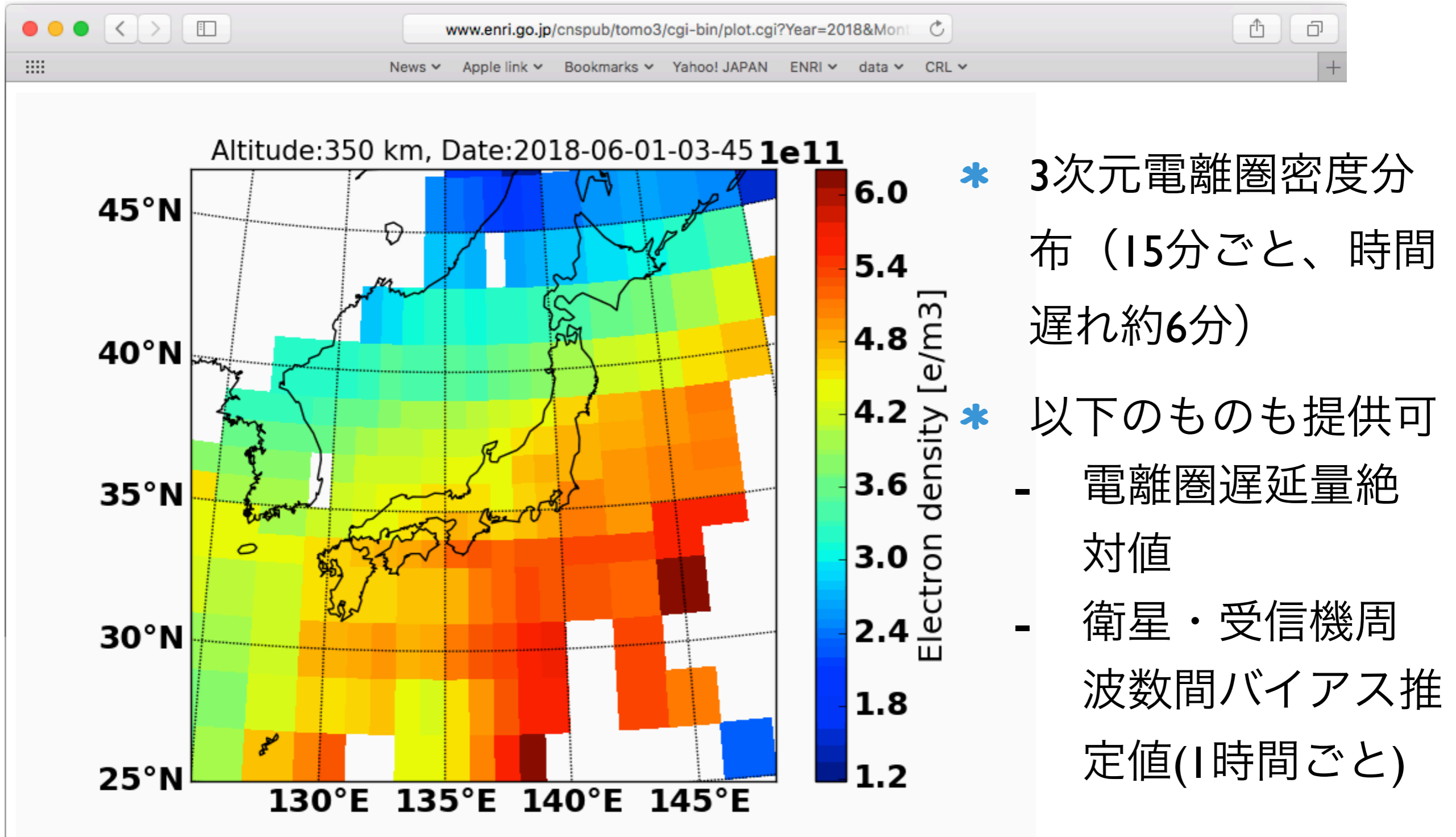
- \* 昼夜の変動、電離圏擾乱による変動をよく表す



The screenshot shows a web browser window with the URL [www.enri.go.jp/cnspub/tomo3/plotting.html](http://www.enri.go.jp/cnspub/tomo3/plotting.html). The page title is "Select Time and Plot Method". It features a form for selecting a date and time, with dropdown menus for Year (2018), Month (06), Day (01), Hour (03), and Minute (45). Below the date/time selection, there are four radio button options for plot methods: "Zonal cut (Input: Latitude)", "Meridional cut (Input: Longitude)", "Horizontal cut (Input: Altitude)" (which is selected), and "Vertical profile (Input: Latitude and Longitude)". At the bottom of the form, there are input fields for Latitude (deg.): 35, Longitude (deg.): 135, and Altitude (km): 350. A "submit" button is located below these fields. At the bottom of the page, there is a note: "The 3-D real-time ionospheric tomography project is jointly conducted by Electronic Navigation Research Institute (ENRI) and Kyoto University." and a link "Back to Top".

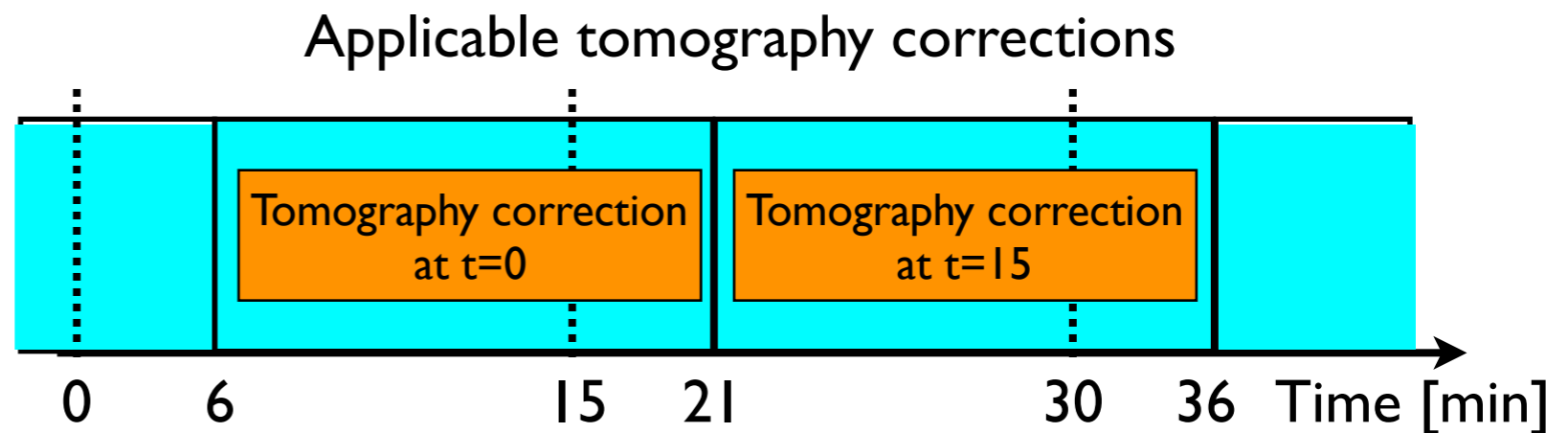
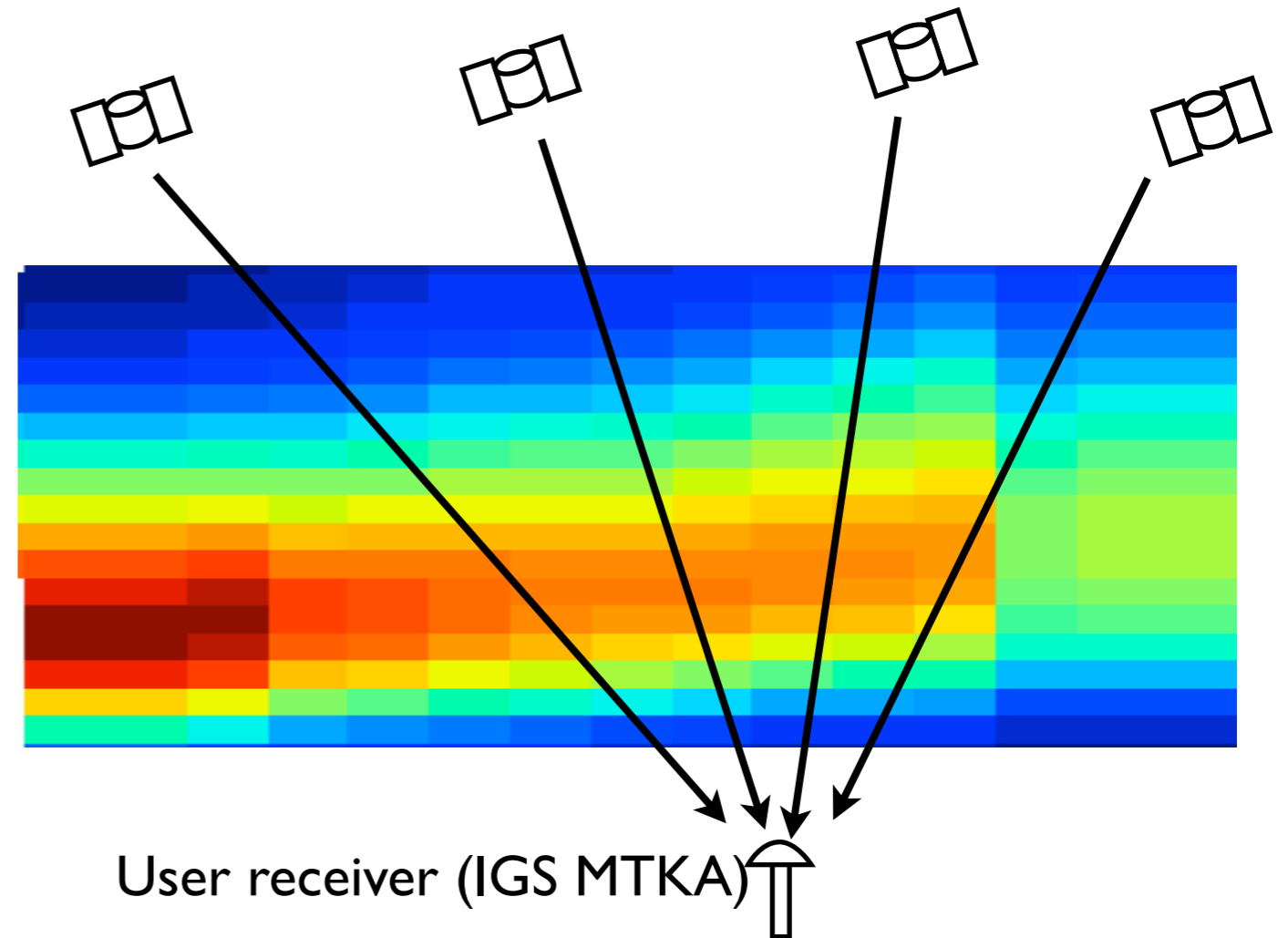
<http://www.enri.go.jp/cnspub/tomo3/plotting.html>





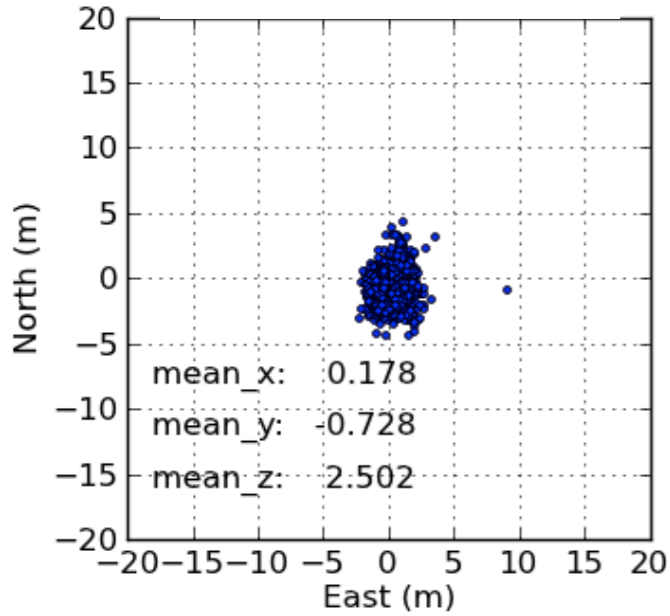
<http://www.enri.go.jp/cnspub/tomo3/plotting.html>

- \* 1周波衛星測位ユーザのための電離圏補正
- \* 3次元電離圏密度分布から任意の視線の電離圏遅延量を推定可能

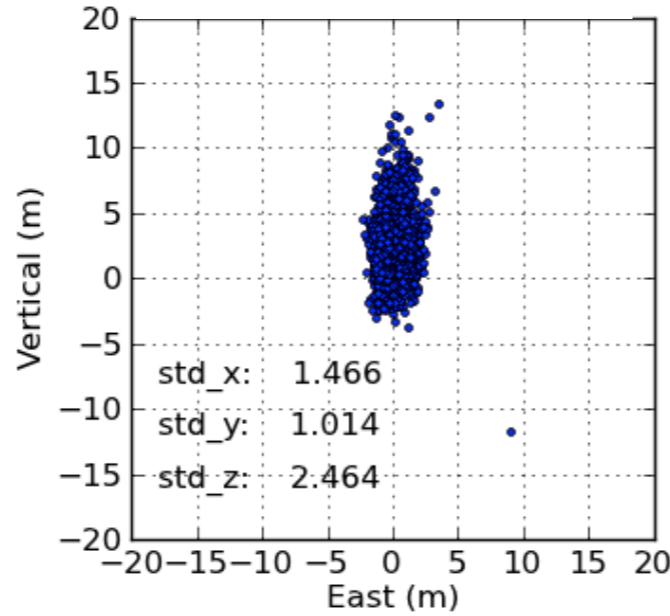


I周波・補正なし

水平誤差

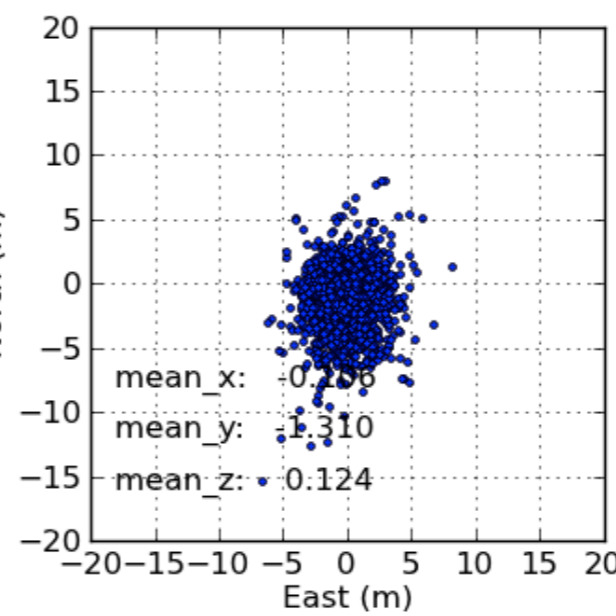


垂直誤差

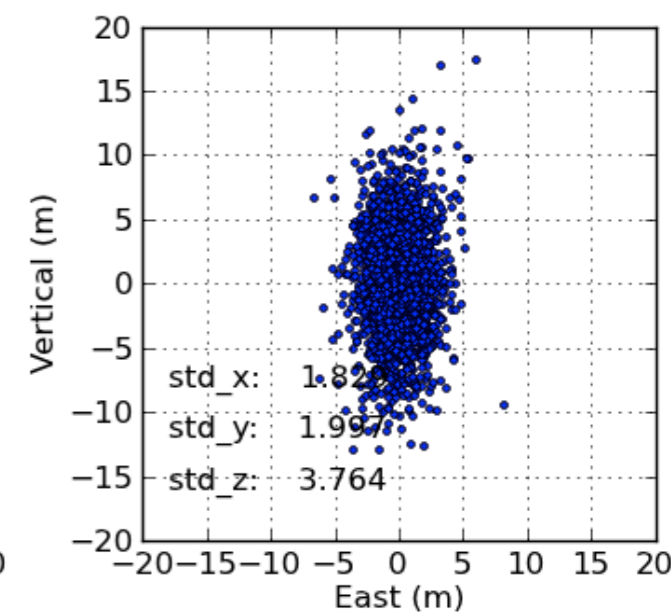


2周波測位

水平誤差

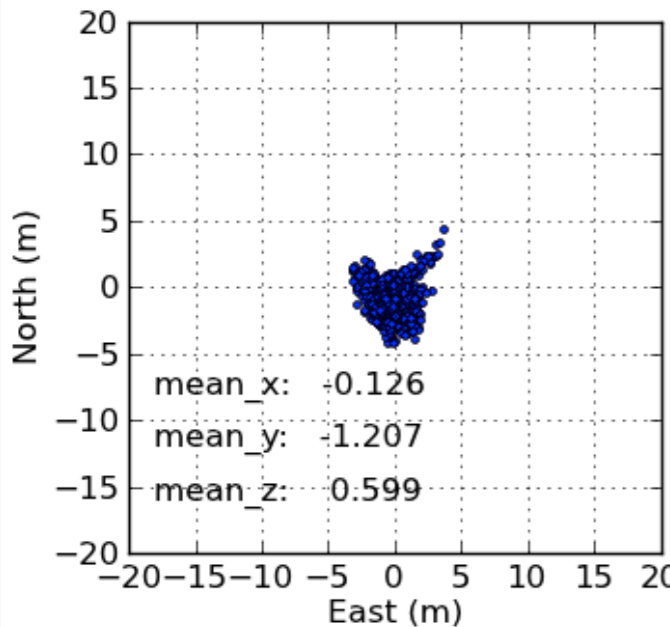


垂直誤差

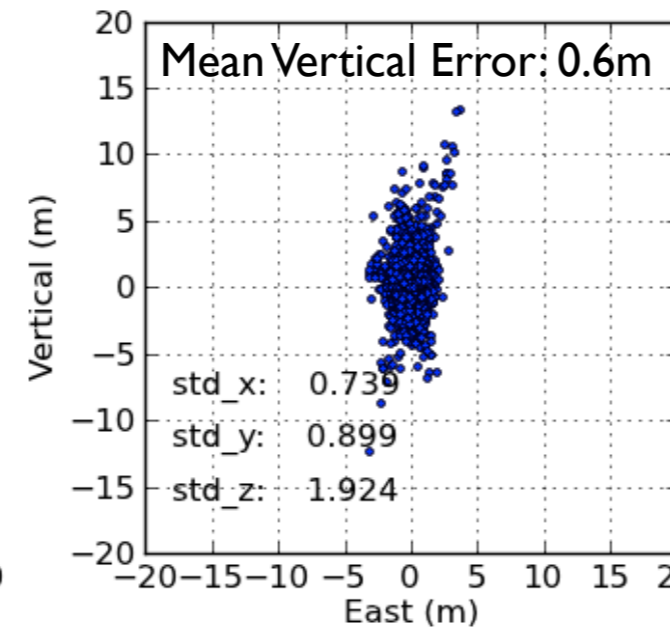


I周波・トモグラフィー補正

水平誤差

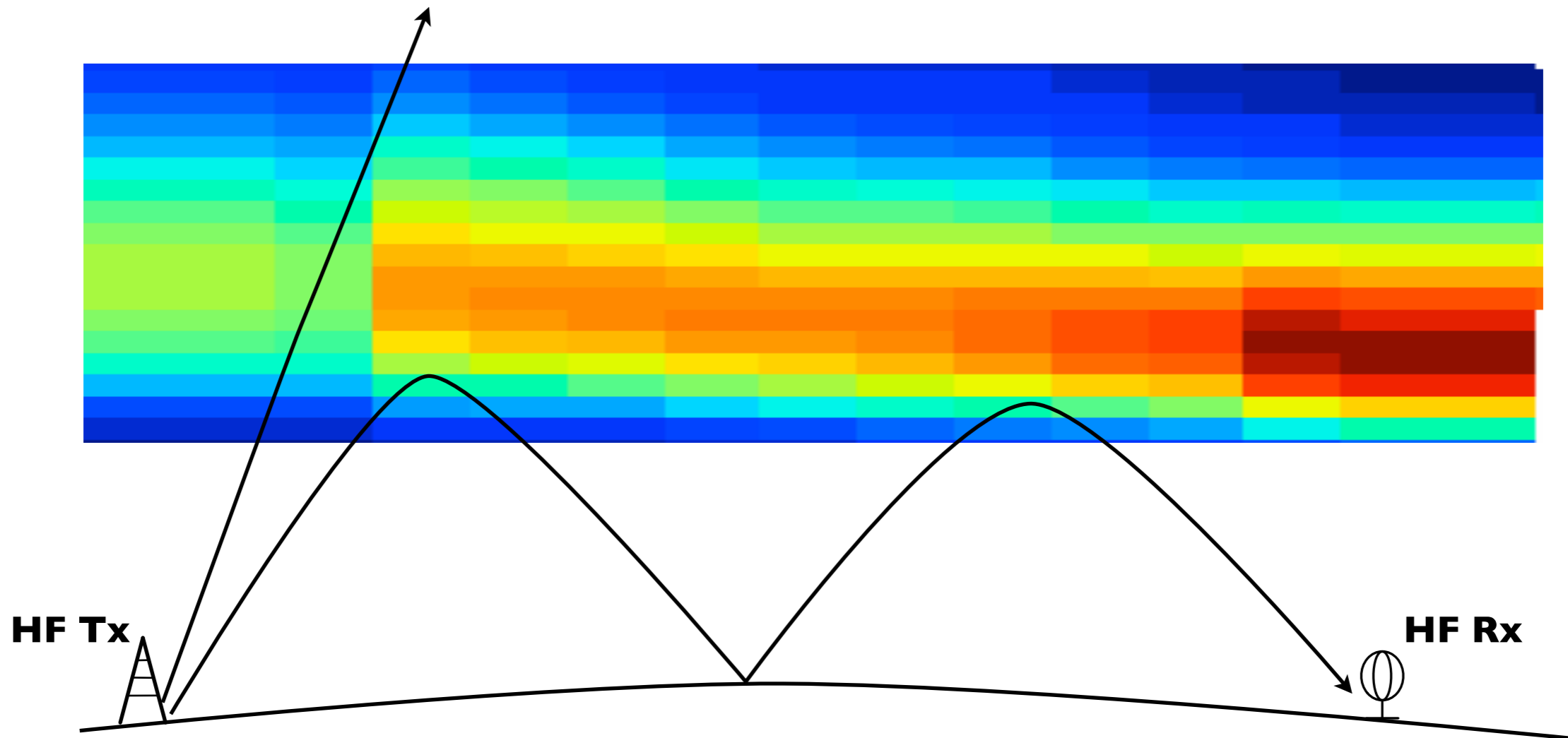


垂直誤差



垂直位置誤差

	平均	分散
I周波	2.5	2.5
2周波	0.12	3.8
I周波・トモグラフィー補正	0.6	1.9



- \* 短波電波伝播シミュレータと結合することにより、国内の短波電波伝播状況をリアルタイム予測
- \* NICTを中心に開発中

- \* GEONETリアルタイムデータを用いた電離圏リアルタイム監視システムを開発
  - 衛星航法のための監視・補強システムとして活用できる
  - 電離圏データベースとして電離圏物理の理解に寄与
  - ❖ 他の応用も広く追求（短波伝播リアルタイム予測など）
- \* 電離圏変動リアルタイムデータ
  - [http://www.enri.go.jp/cnspub/susaito/rocket/recent\\_mstid.html](http://www.enri.go.jp/cnspub/susaito/rocket/recent_mstid.html)
- \* 3次元電離圏密度リアルタイムデータ
  - <http://www.enri.go.jp/cnspub/tomo3/plotting.html>