

太陽地球系物理学分野のデータ解析手法

多地点の衛星=地上ビーコン観測における TEC オフセット値の
自動推定手法

坂本悠記, 山本衛 (京都大学RISH)

目次

- 1 研究背景
- 2 ビーコン衛星観測を用いた東南アジアでの電離圏観測
- 3 TEC推定手法の開発
- 4 赤道異常の統計解析
- 5 赤道異常の南北非対称性の解明
- 6 結論

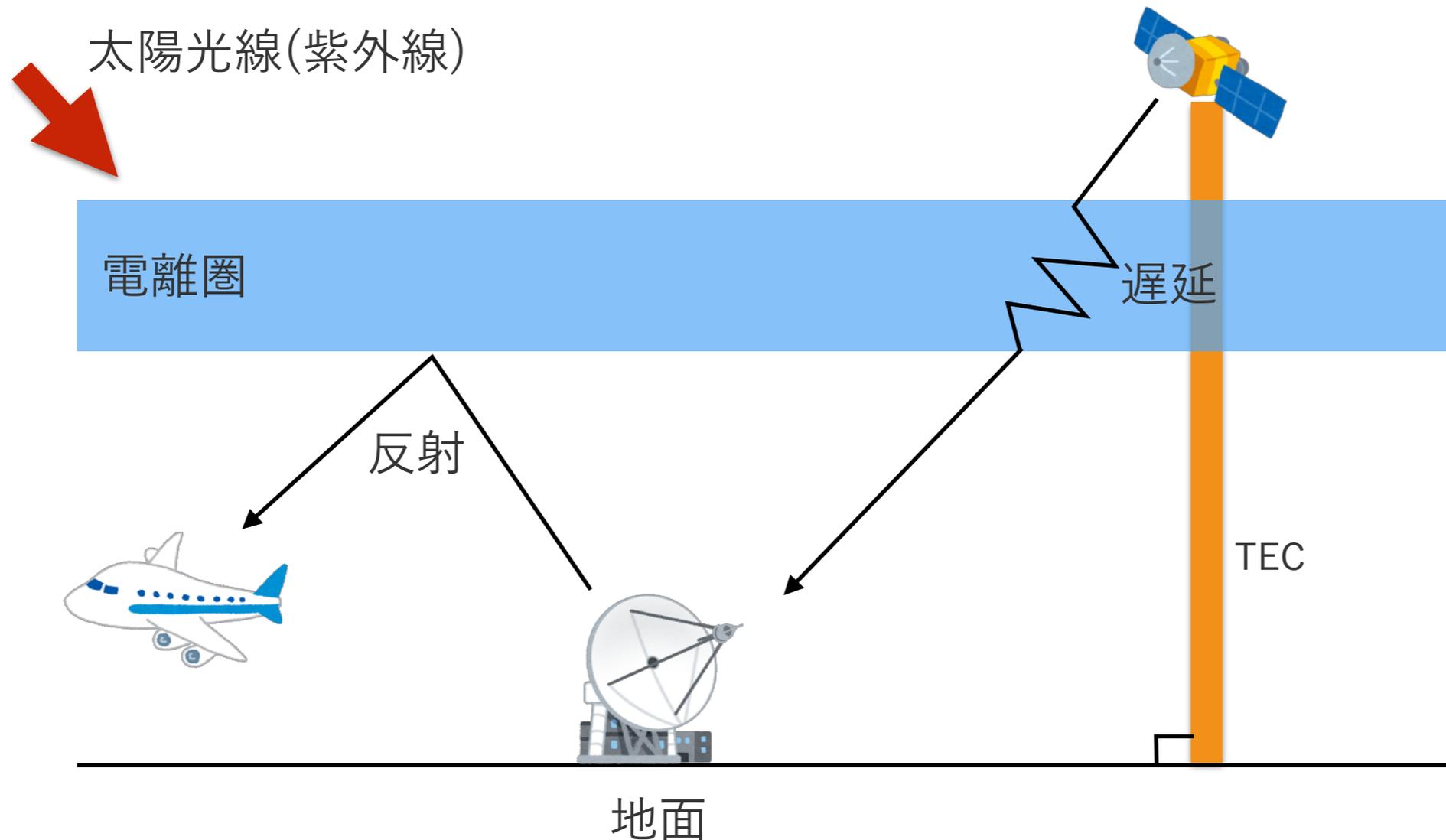
電離圏について

— 電離圏 —

- ・ 高度が約60~1000 km の間に位置する原子や分子が電離している領域。

— 電離圏全電子数(TEC) —

- ・ 視線方向の電子数を積分した値で単位はTECu。
- ・ 1TECuは視線に沿った底面積 1m^2 の円柱に 10^{16} 個の電子が含まれることを意味する。



研究背景 / 目的

— 研究背景 —

- ・電離圏の構造解明のために東南アジア地域でビーコン衛星による電離圏観測を実施している。

従来, ビーコン衛星を用いたTEC算出は大きく分けて次の2つがあった。

1. ビーコン衛星のみを用いた1観測点法 (Smitha. V. Thampi et al. 2014)
→ 計算量が小さい, ビーコン衛星情報のみでよい, TEC精度に欠ける
2. GPS-TECを初期値として利用した多観測点法 (Watthanasangmechai et al. 2014)
→ TEC精度がよい, 計算量が大きい, ビーコン衛星情報の他にGPS-TECも必要

— 目的 —

1. 衛星ビーコンのみによる電離圏観測データからTEC算出の手法を開発する。
2. この手法によって得られたTEC分布をデータベース化する。
3. このデータを用いて低緯度地域における電離圏変動現象(赤道異常)を解明する。

— 環境 —

Python (numpy, pandas, joblib)

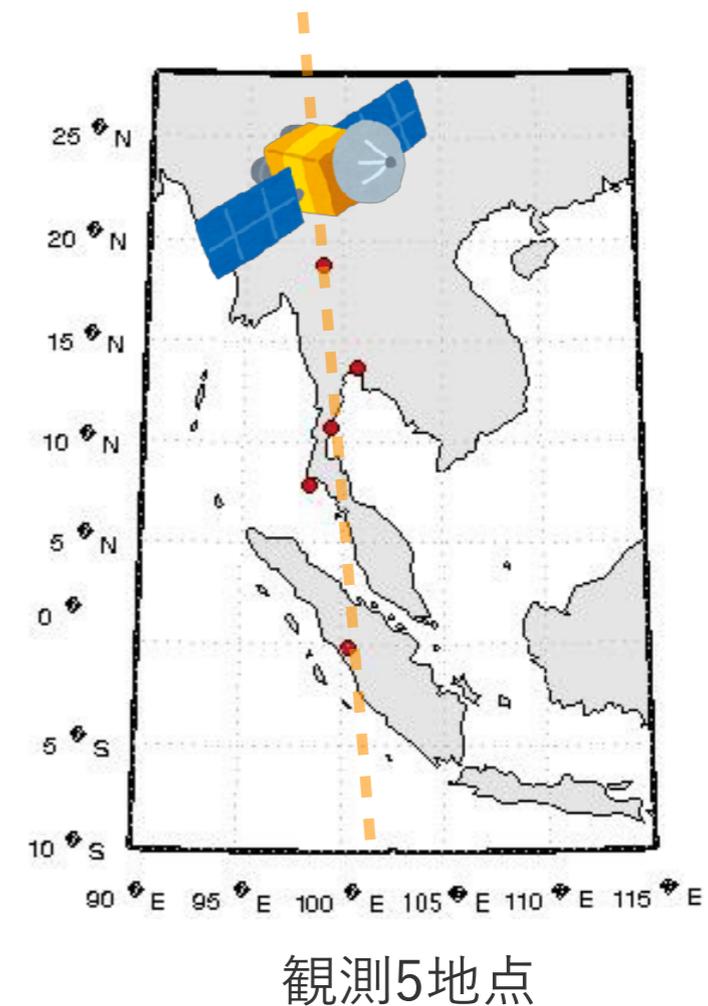
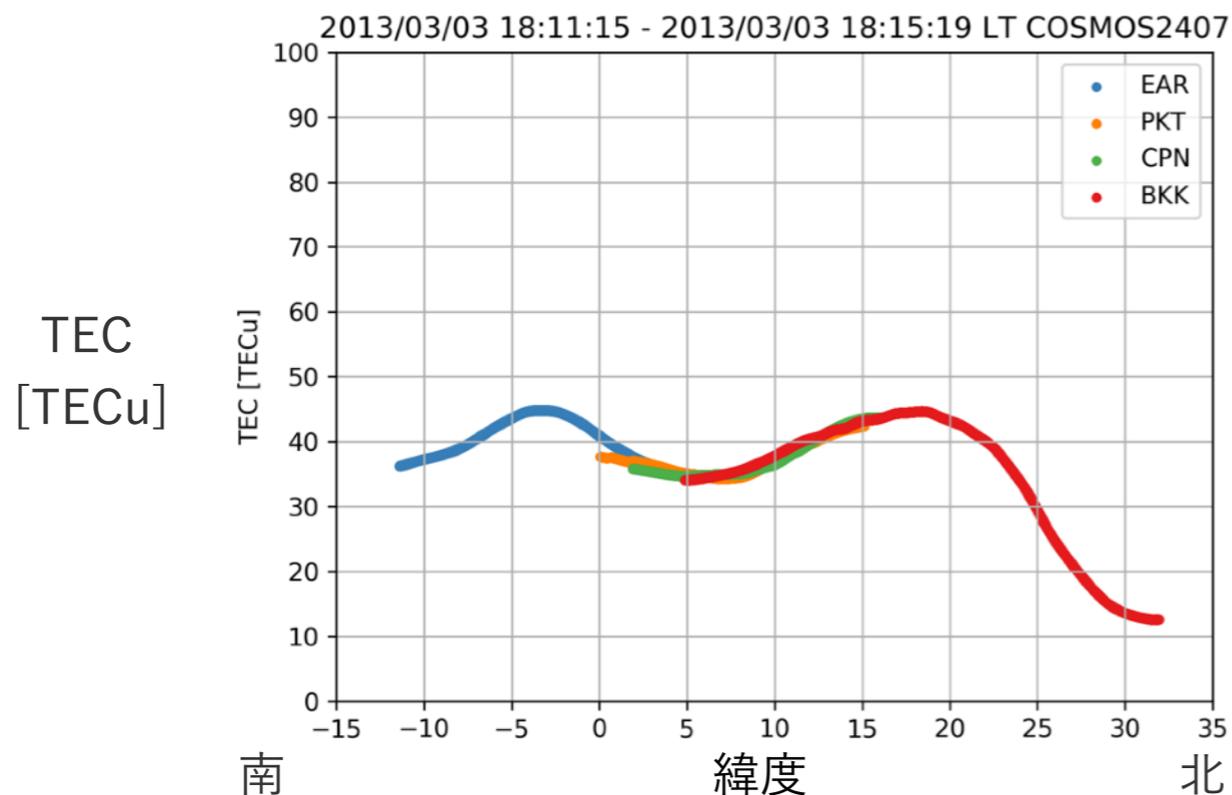
衛星ビーコン観測ネットワークについて

— 観測ネットワーク —

- ・ 東経100度 南緯0.2度-北緯18.2度にかけて5地点に受信機を配備。
(Kototabang, Phuket, Chunphon, Bangkok, Chiangmai)

— 観測衛星 —

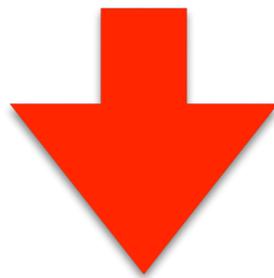
- ・ 極軌道衛星：COSMOS 2454, 2429, 2414, 2463, 2407, RADCAL, DMSP-F15
- ・ 期間：2012年3月～2015年9月
- ・ 有効データ数：約7800 衛星パス



計算の流れ

方針：ビーコン衛星のみを用いてTEC-緯度分布を求める。

0. 3次スプライン補間によって衛星軌道データと受信データの時刻を同期する。
IPPを求める。
観測データのノイズを除去する。
1. バイアス値(TECのオフセット値)の存在範囲を求める。
2. その範囲から各地点のバイアス値の組合せの準最適解を求める。
3. 準最適解を利用して最適解を求める。



広範囲・高精度なTEC-緯度分布が求まる

観測原理

— 観測原理 —

- 2周波数(pf_r MHz, qf_r MHz)の位相差でTECを推定する.
- TECを求めるためにオフセット成分であるバイアス値の推定が必要である.
ここでは衛星, 受信機バイアスをまとめて考える.

$$\Phi = \frac{\pi A}{cf_r} \left(\frac{1}{q^2} - \frac{1}{p^2} \right) \int N(x) dx + \eta$$

位相差

定数

視線方向のTEC 位相不確定性

$$\int N(x) dx + \eta' = \Phi \left(\frac{\pi A}{cf_r} \left[\frac{1}{q^2} - \frac{1}{p^2} \right] \right)^{-1}$$

観測値 S_r

$$S_a = S_r - \eta'$$

視線方向のTEC

これを求めたい

視線方向から鉛直方向への変換

— IPP —

電離層を薄膜と近似した場合に, 信号が電離層を通過する位置.

IPPは高度350kmに設定した.

受信機と衛星の位置座標からIPP, IPPでの天頂角を求めた.

ECEF, BLH, ENU座標系の変換を利用した. (たぶん今はライブラリがある)

$$\underline{V_a} = (\underline{S_r} + B)\cos \chi$$

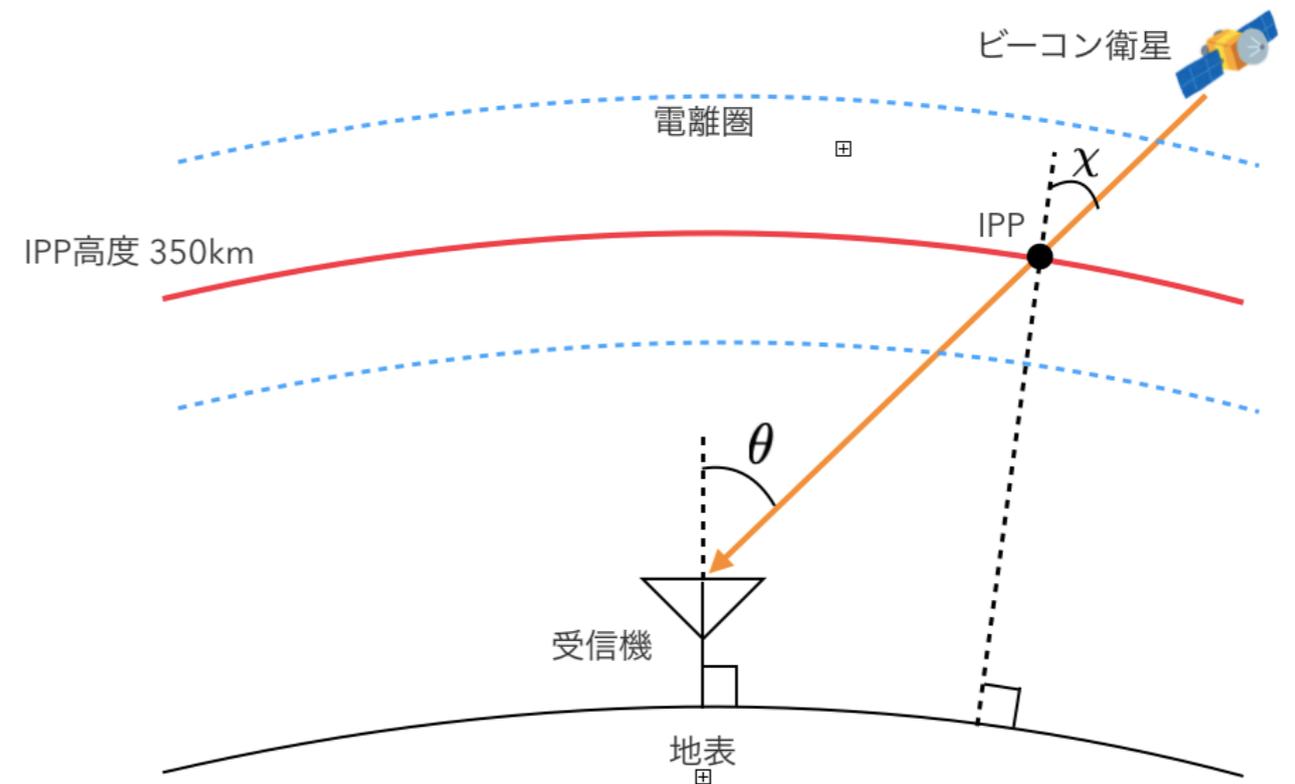
鉛直TEC

IPPでの天頂角

$$S_r \cos \chi = -B \cos \chi + V_a$$

$$\text{ここで } x = \cos \chi \quad y = S_r \cos \chi$$

$$y = -Bx + V_a \text{ と表せる.}$$



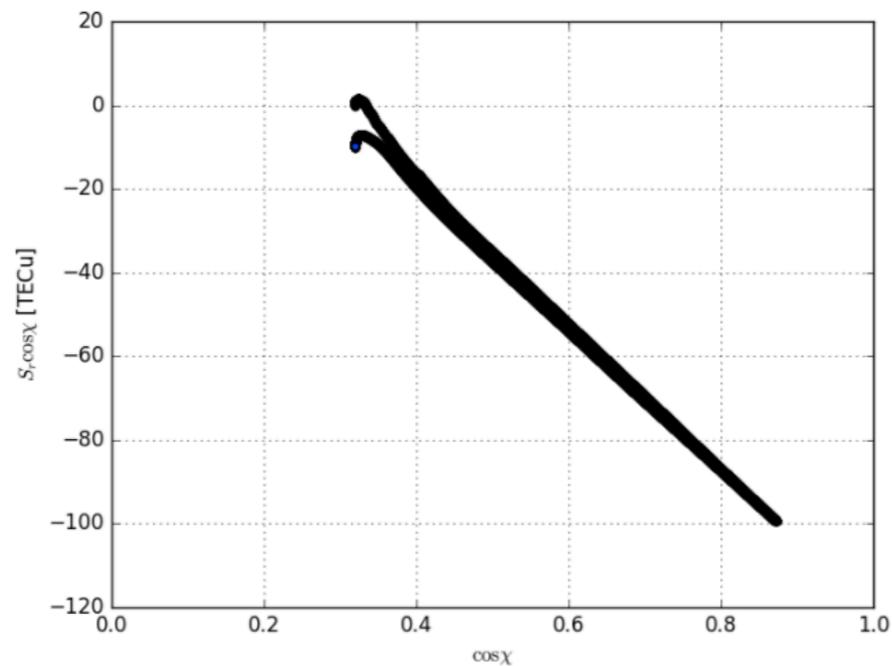
バイアス値の存在範囲の導出

$$y = -Bx + V_a \text{ より,}$$

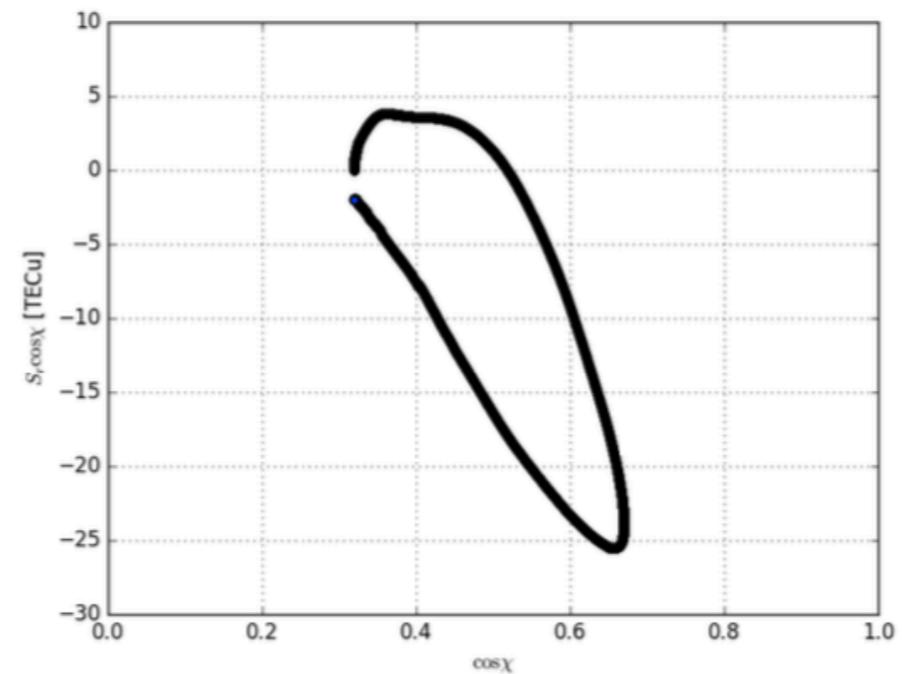
バイアス値B：グラフの傾き

TEC値 V_a ：グラフの切片 に対応する。

最小二乗法によってプロットの1次関数近似式を導出した。

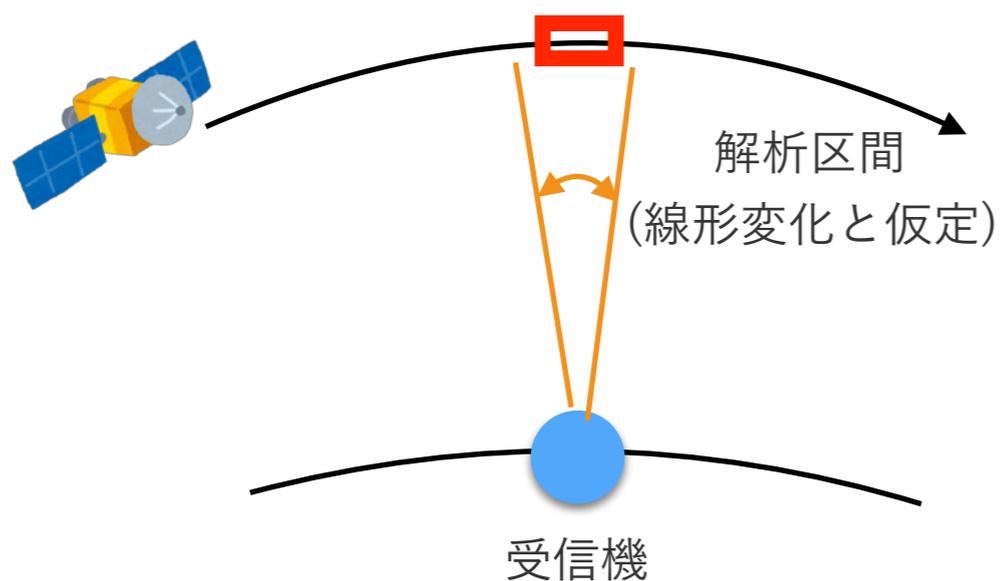


(b) 2012/3/24 03:31 LT PKT
xyプロットの例

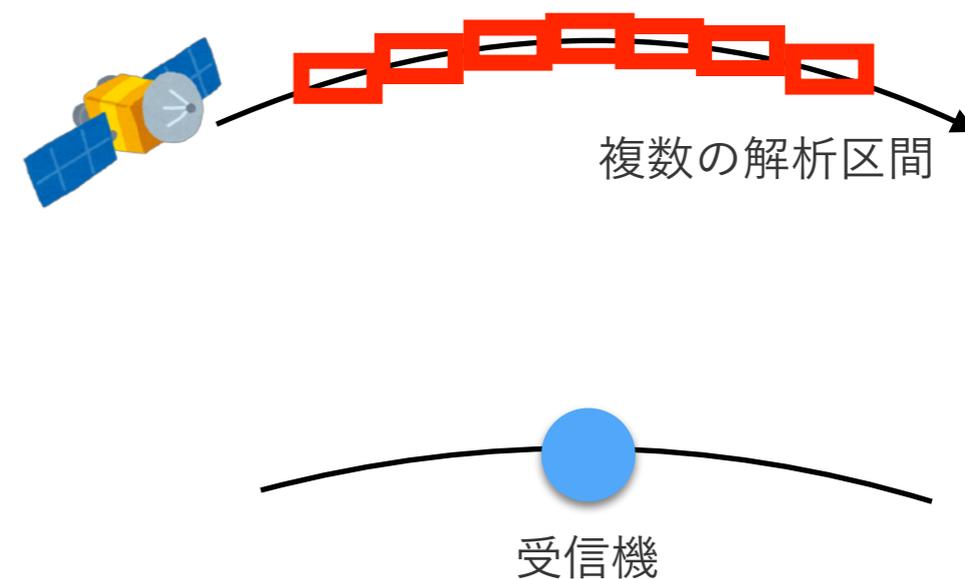
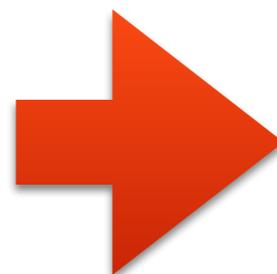


(e) Mar. 5, 2012 21:15 LT CMU
xyプロットの例

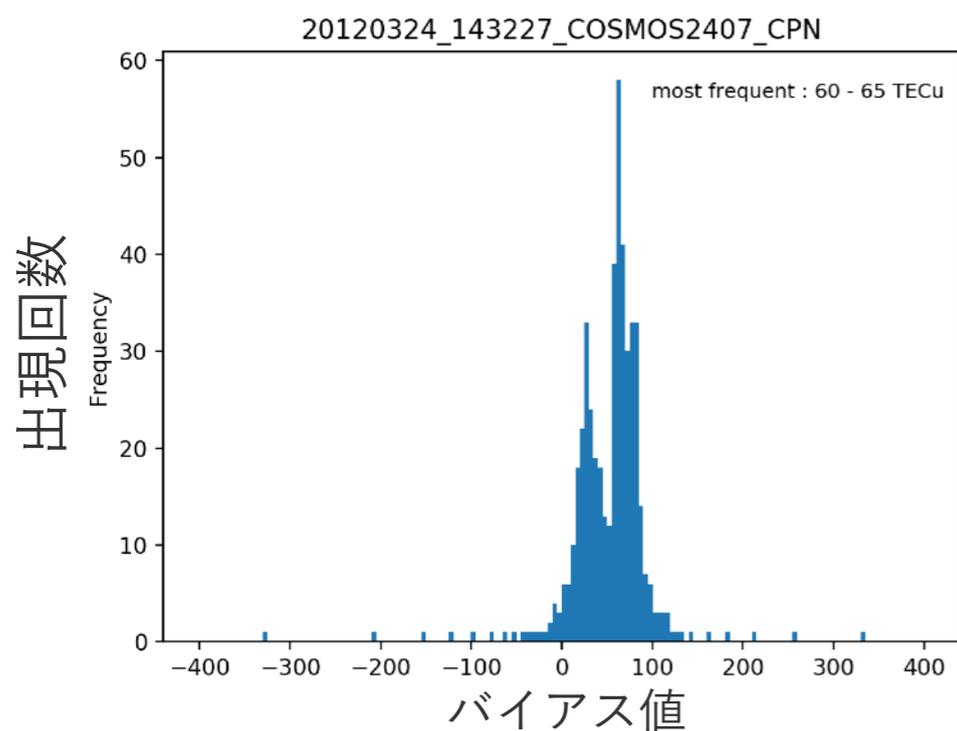
バイアス値の存在範囲の導出



先行研究 (Smitha. V. Thampi et al. 2014)

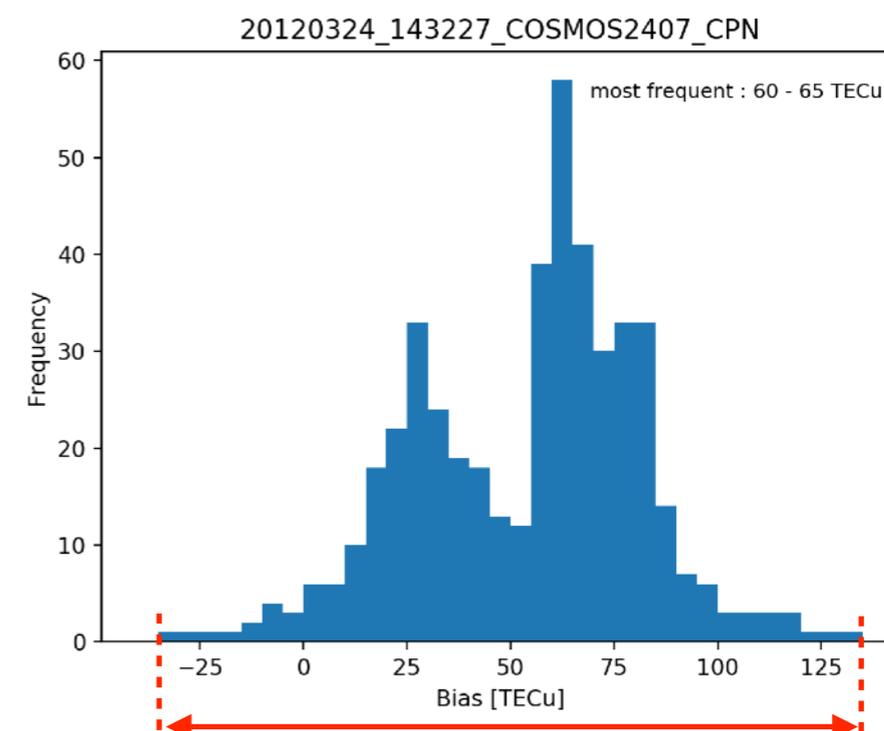
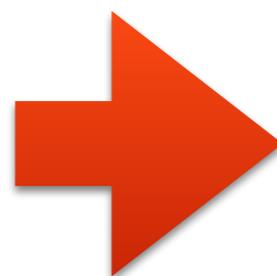


実施した手法



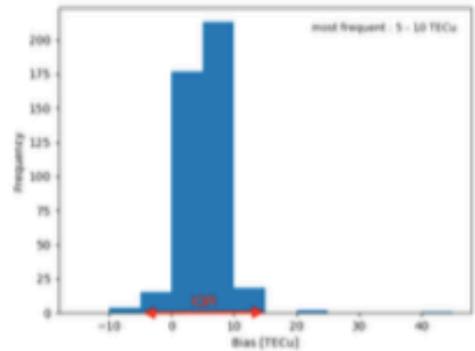
本研究の手法で得られたバイアス値の分布

四分位範囲

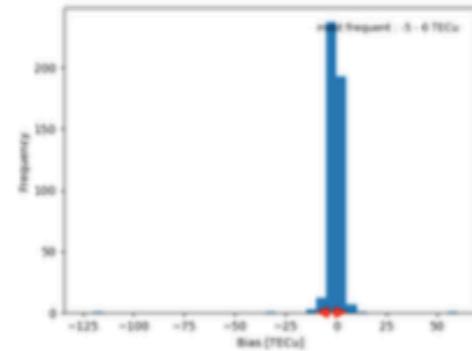


バイアス値の存在範囲

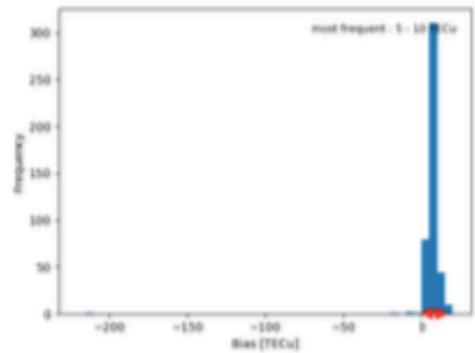
最頻出値=バイアス値として決定してしまうと・・・



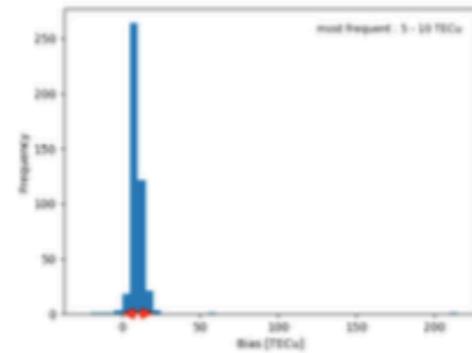
(a) EAR



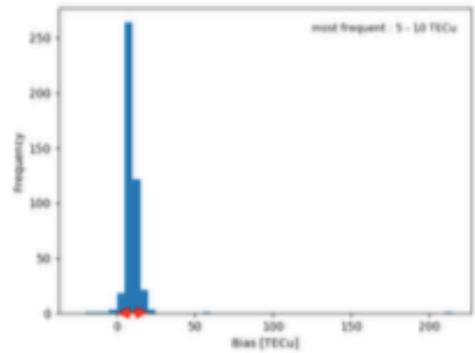
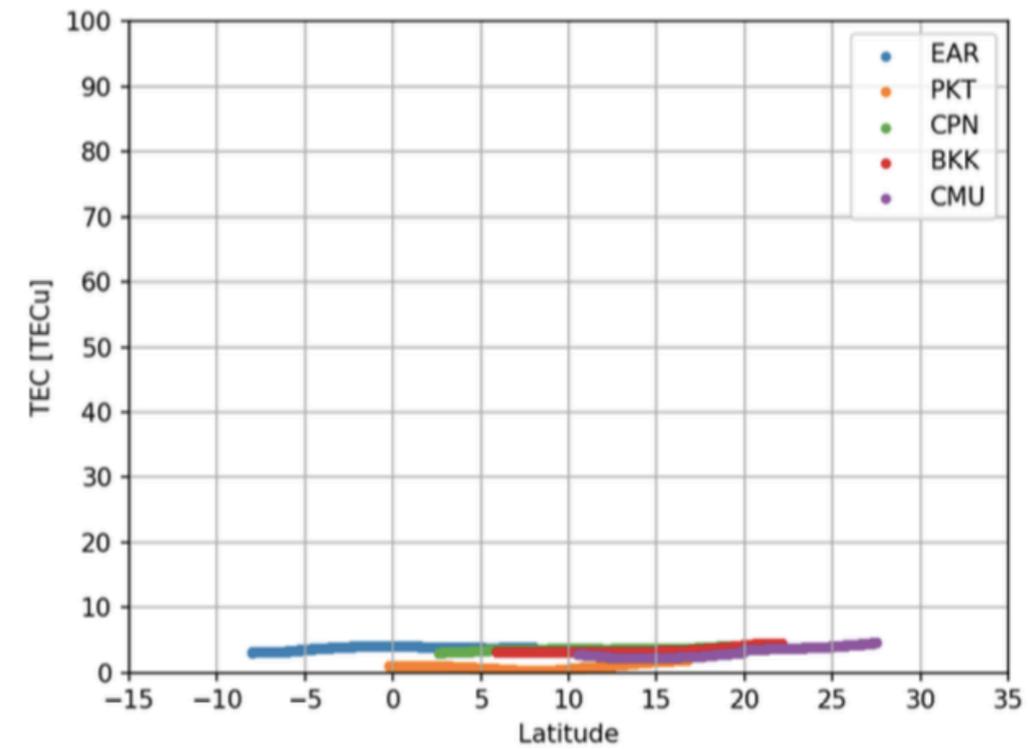
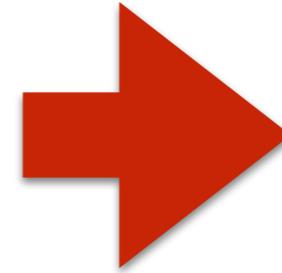
(b) PKT



(c) CPN



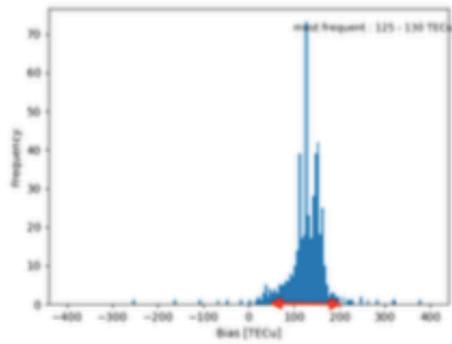
(d) BKK



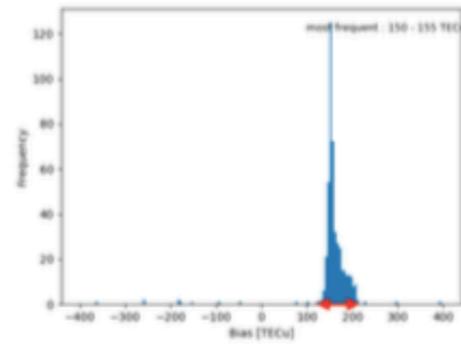
(e) CMU

TEC分布の変化が小さい場合はうまくいく。

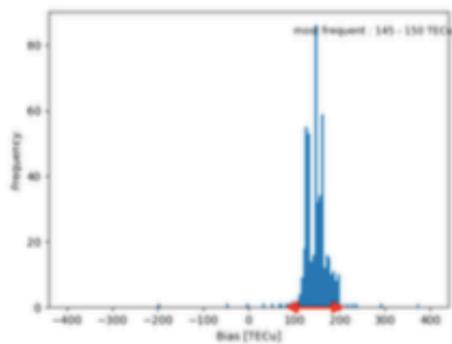
最頻出値=バイアス値として決定してしまうと・・・



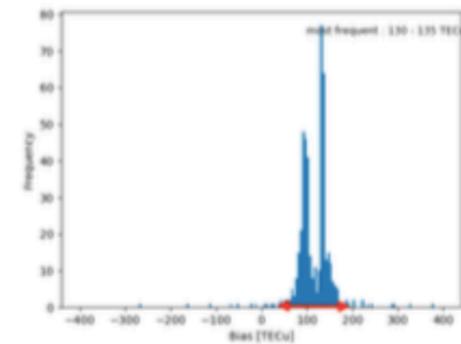
(a) EAR



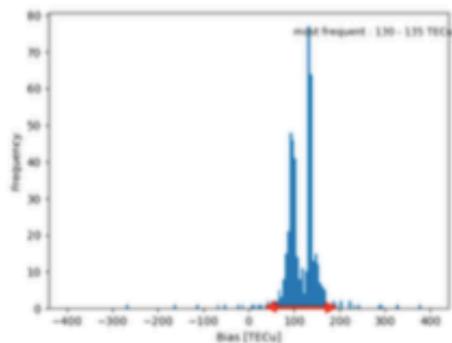
(b) PKT



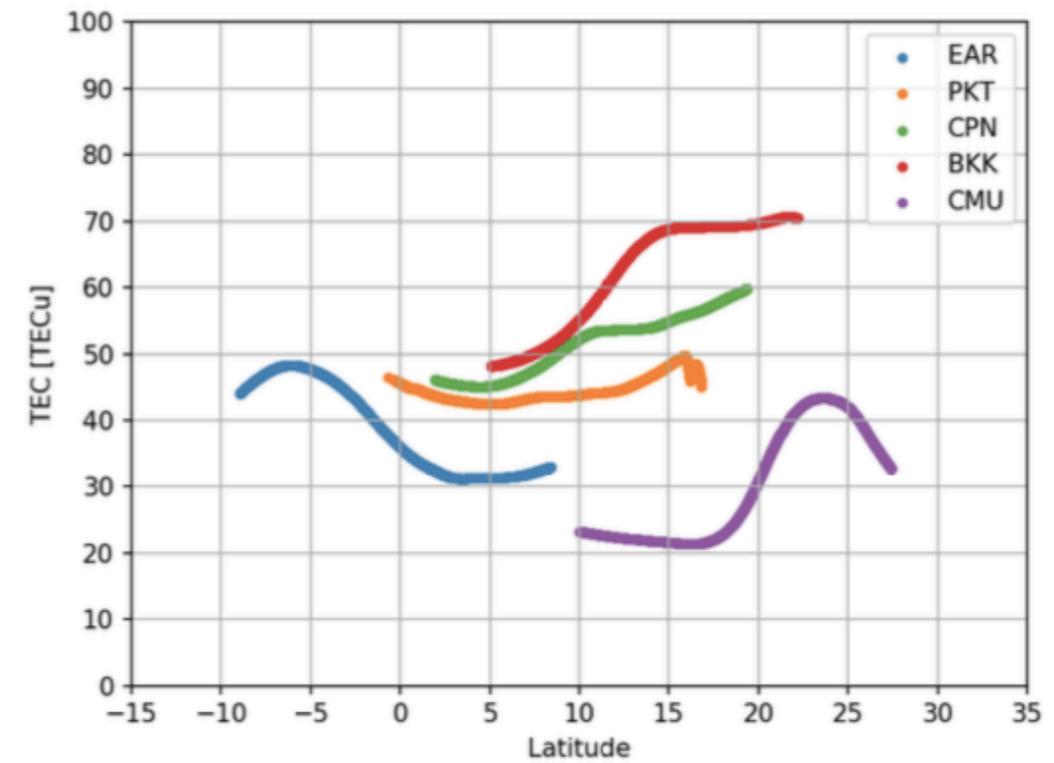
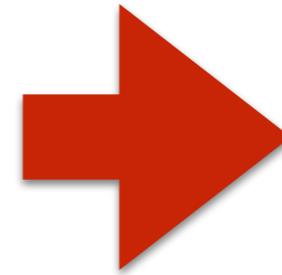
(c) CPN



(d) BKK

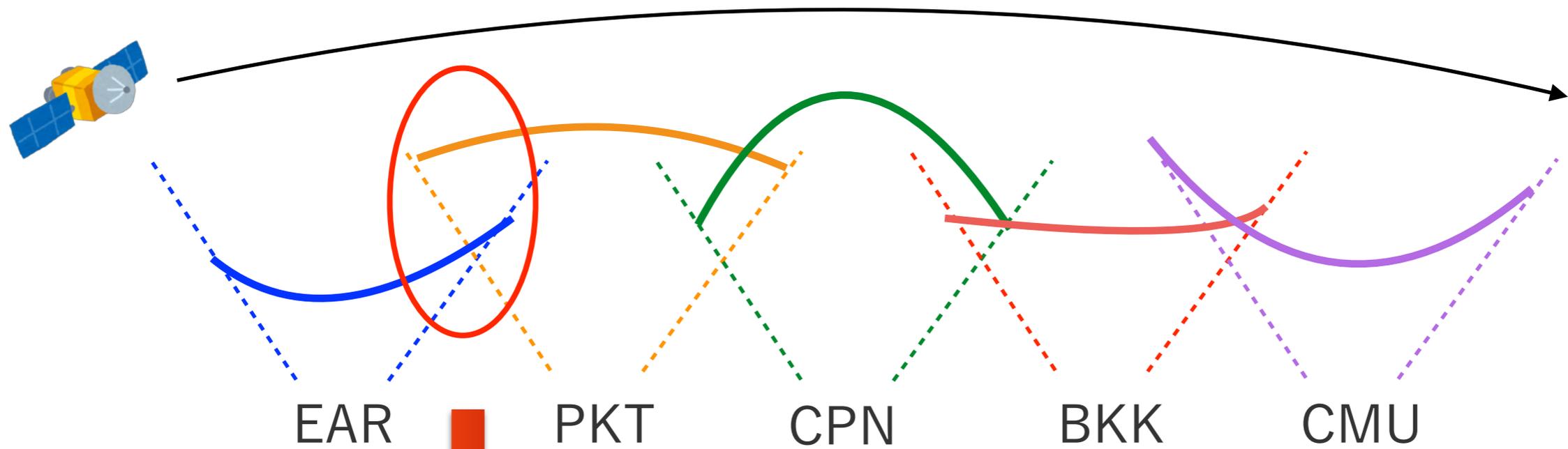


(e) CMU



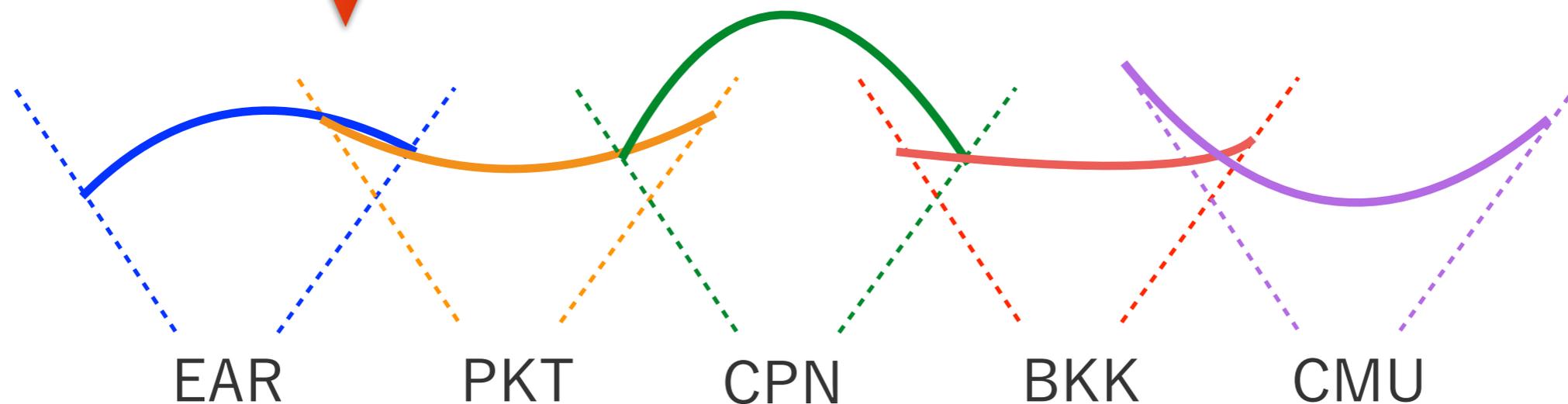
TEC分布の変化が大きい場合うまくいかない。

準最適解の導出

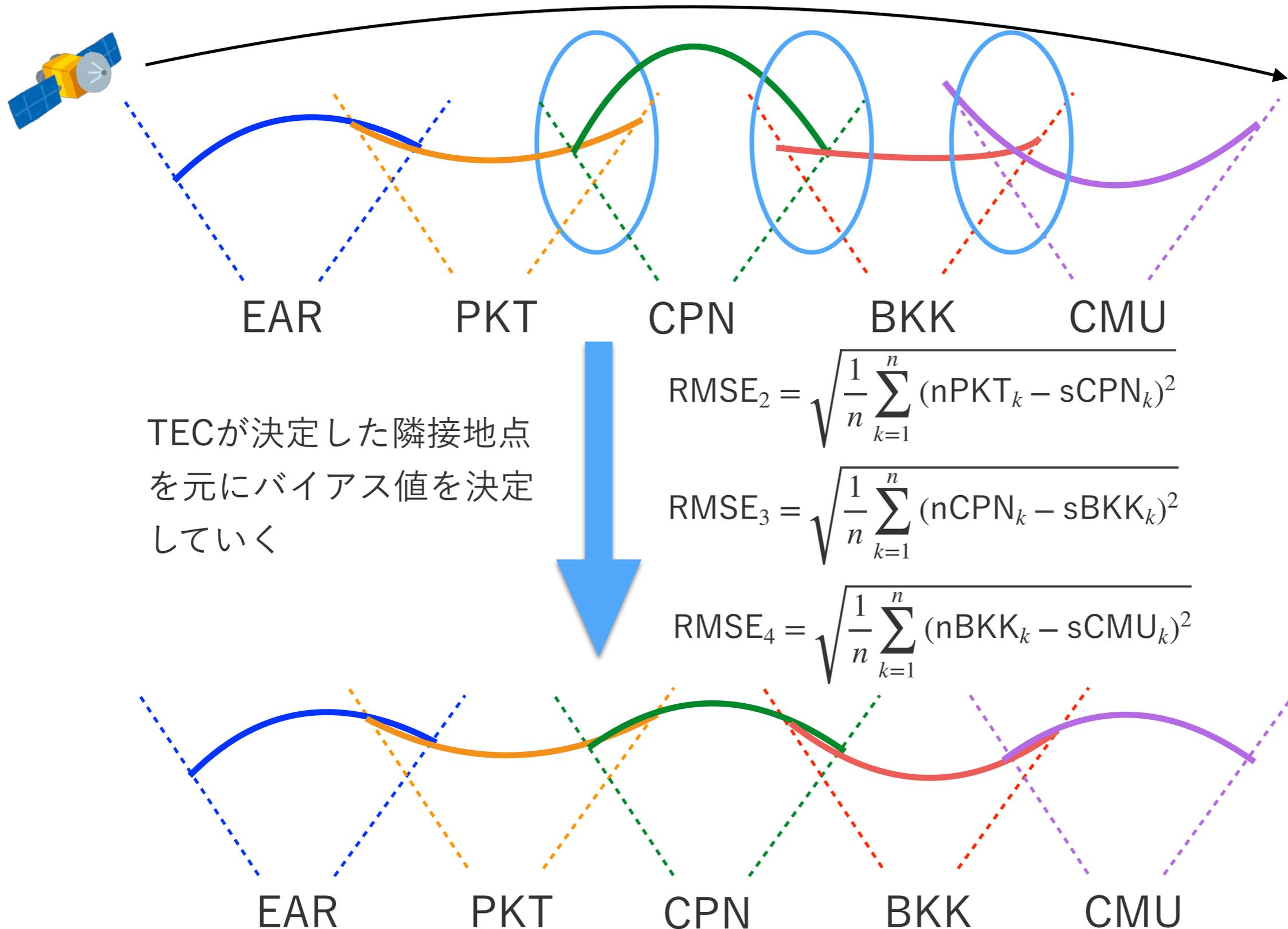


適当な隣接2地点間で
バイアス値の存在範囲
内で総当り

$$\text{RMSE}_1 = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{k=1}^n (n\text{EAR}_k - s\text{PKT}_k)^2}$$



準最適解の導出

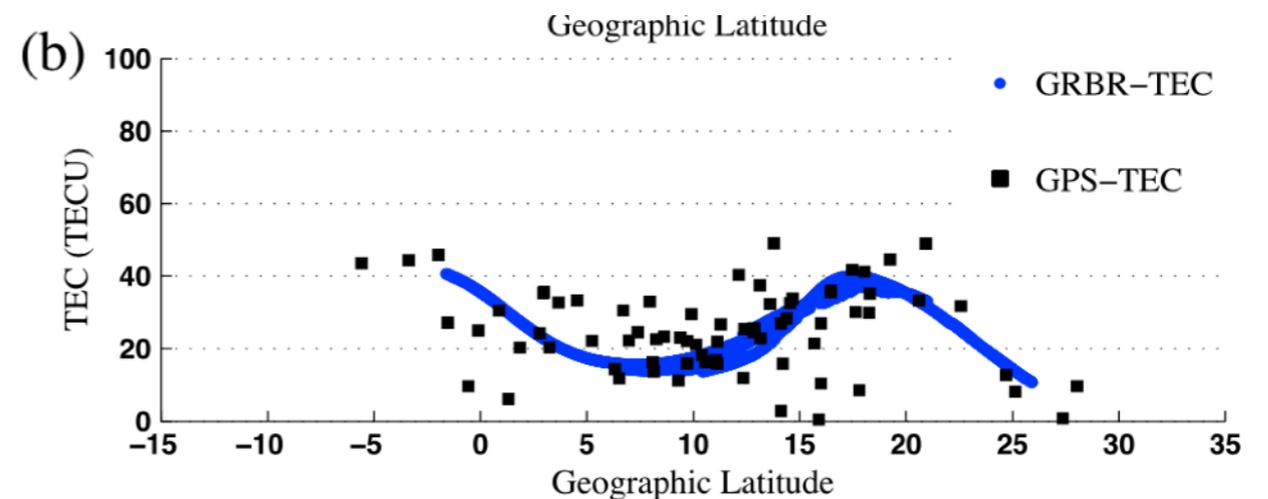
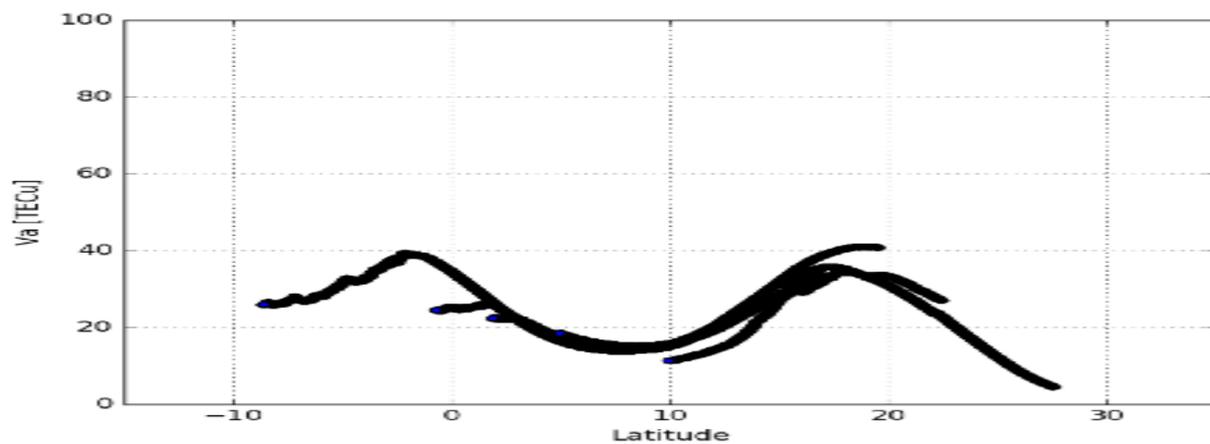
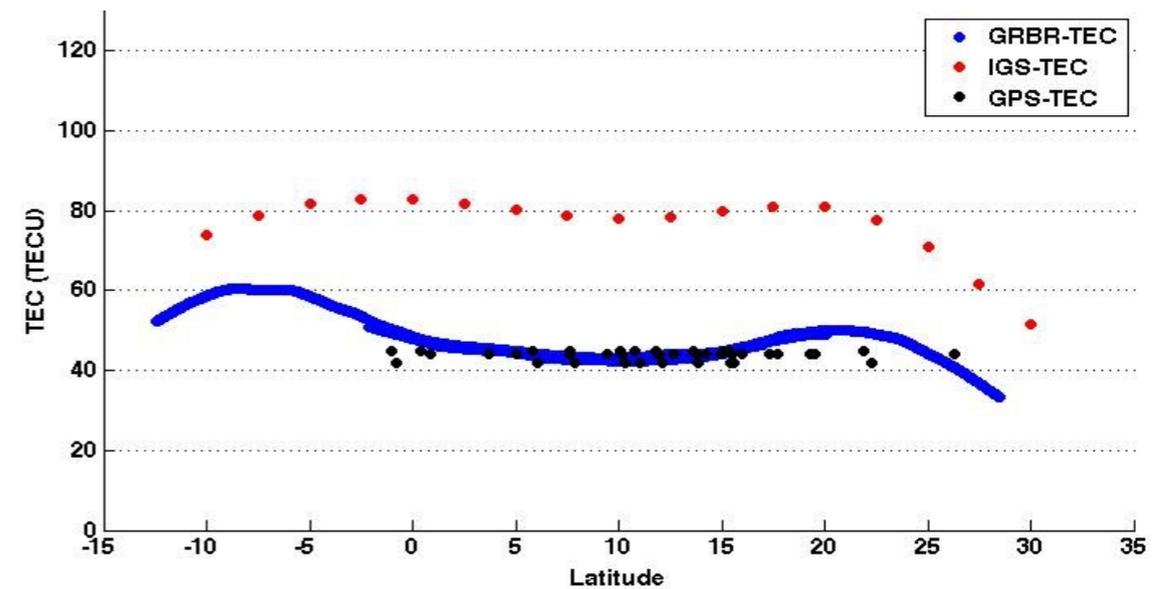
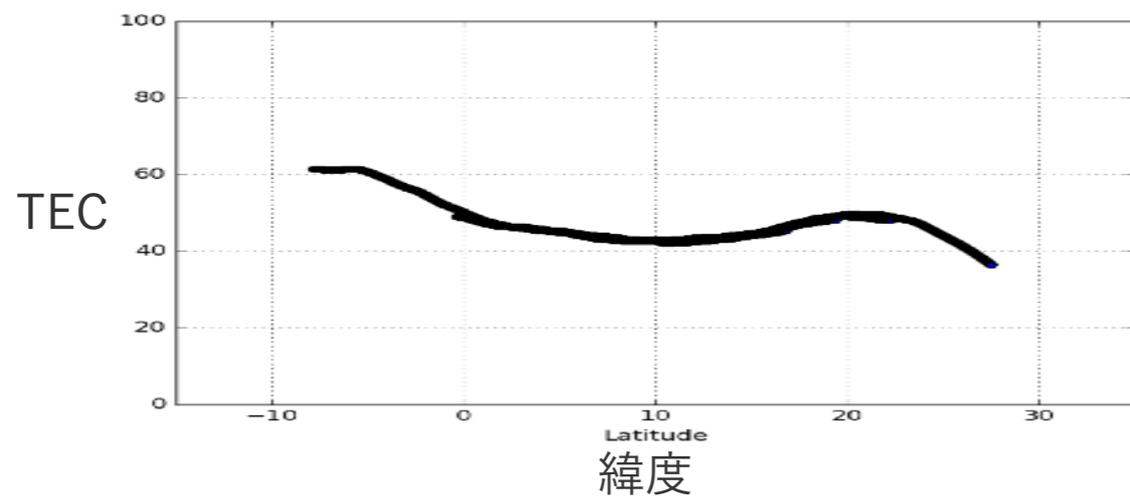


最適解の決定

- 準最適解を初期値としてそれぞれ ± 7 TECu で総当り

$$\text{RMSE}_{\text{total}} = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N \text{RMSE}_k$$

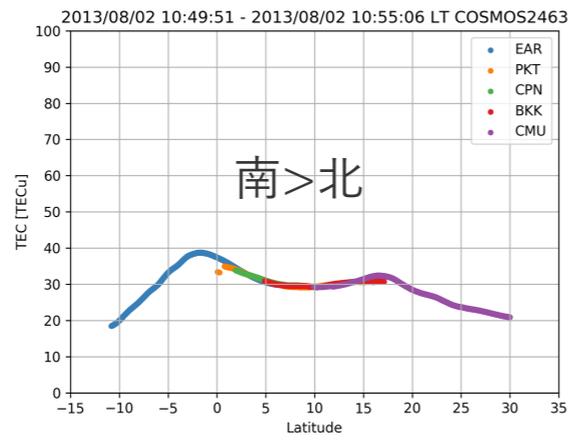
- その後 ± 0.9 TECu (0.1 刻み) で準最適解導出, ± 0.5 TECu で総当たり
- 先行研究結果と一致し、正しく TEC-緯度分布が求められていることを確認



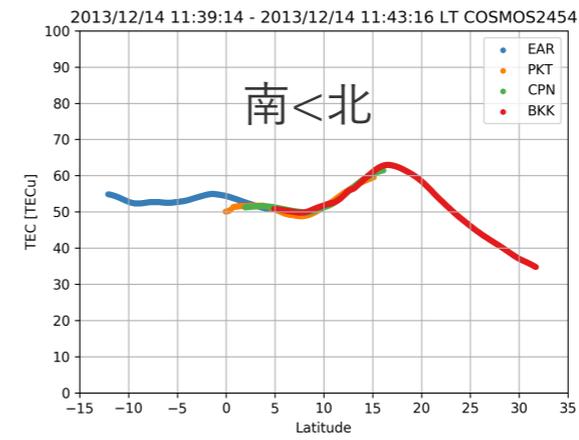
本手順で作成

Kornyanat Watthanasangmechai et al. 2014

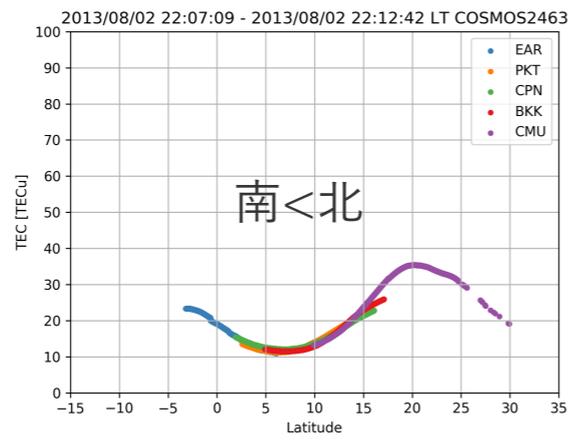
作ったTEC-Lat分布図



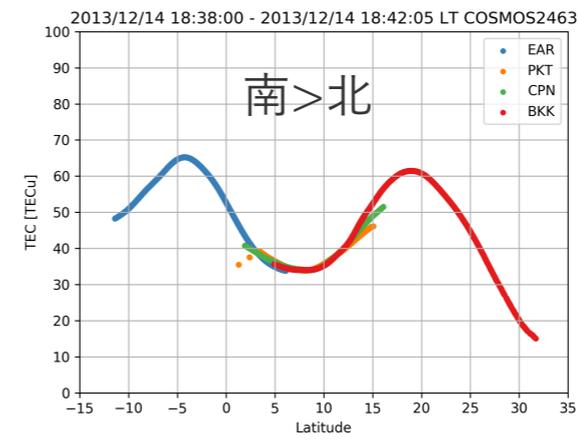
(a) Summer morning



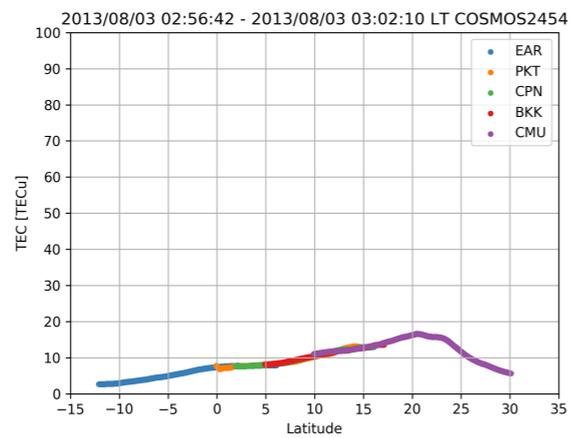
(b) Winter morning



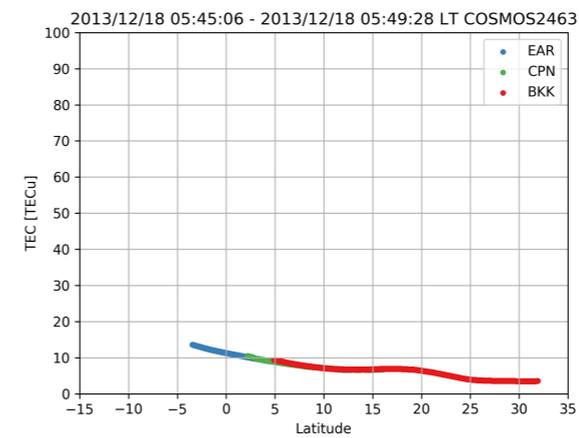
(c) Summer afternoon



(d) Winter afternoon



(e) Summer middle of the night

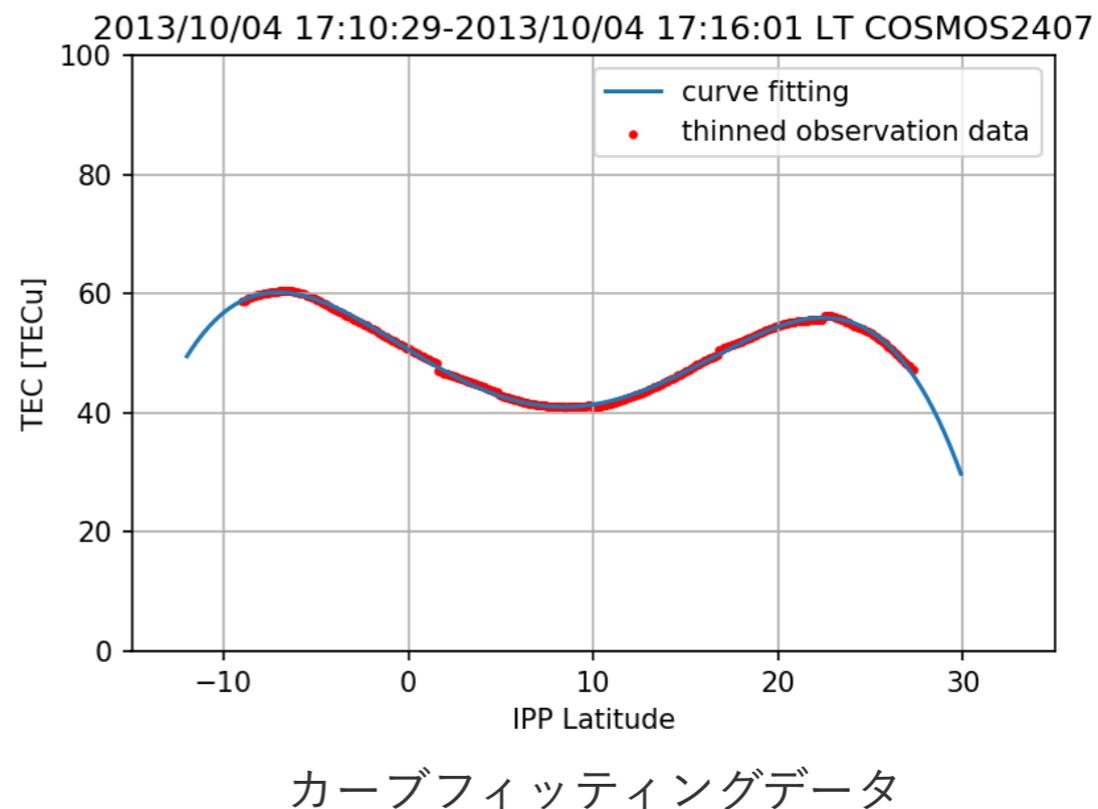
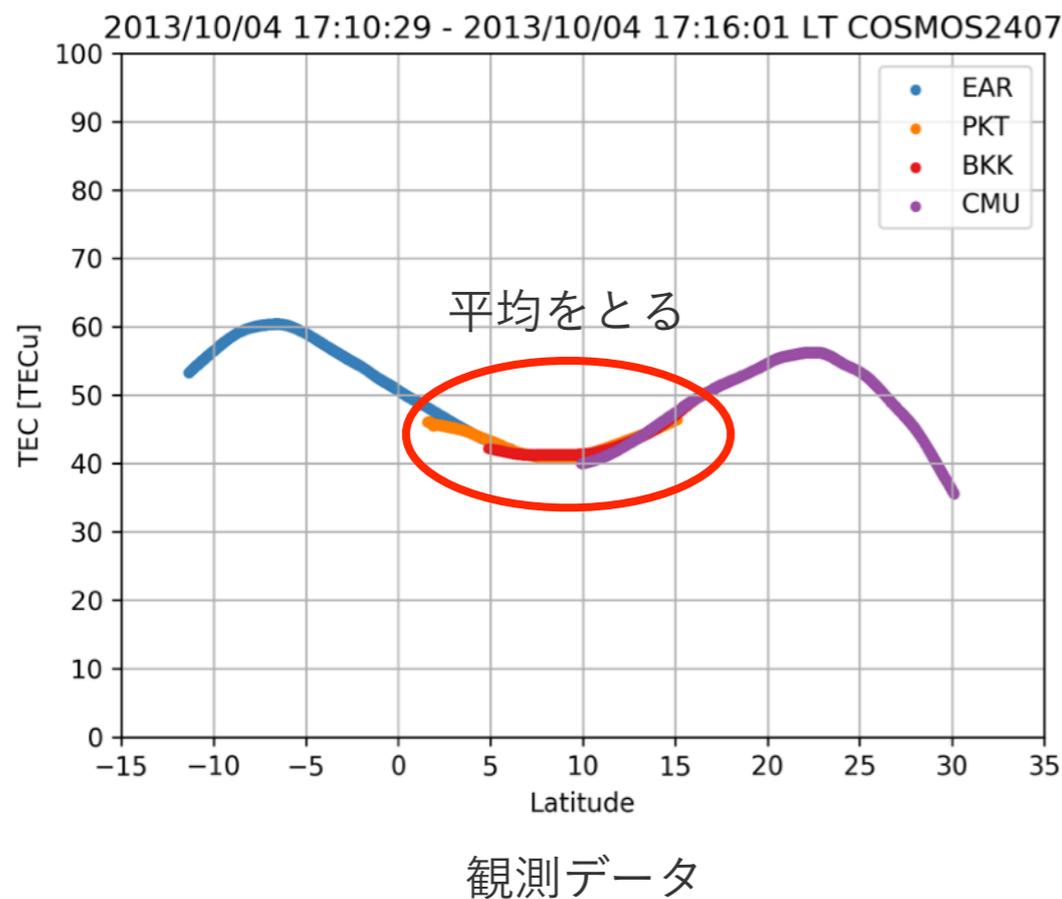


(f) Winter middle of the night

TEC分布の関数化

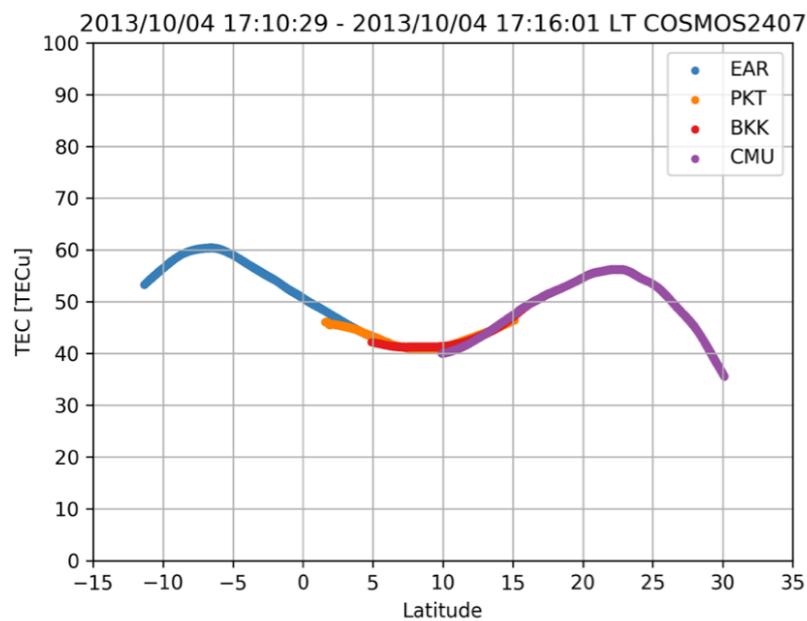
データを扱いやすくするためにTEC分布を関数化した

1. 観測データを緯度0.1度単位に間引く
- 2.重なっている観測範囲は平均値をとる
3. TEC分布グラフに対して4次元関数カーブフィッティングを実施



まとめ / 成果物

- ビーコン衛星のみを用いたTEC推定手法を考案し, 広範囲(タイ-インドネシア), 長期間(2012-2015), 高精度のTEC-緯度分布データを得た.
- 得られたTEC分布などをNetCDF形式でデータベース化した.
- TEC-緯度分布を関数化することで大量の解析を容易にした.



TEC-緯度分布図 (png)

```
{
  "Satellite": "COSMOS2407",
  "Local_time": "2012/03/03 00:10:01",
  "IPP_lat1": "-524.5570650266154",
  "IPP_lat2": "-6.961901738414597",
  "IPP_lat3": "9.778900391278576",
  "TEC1": "54429.8605009956",
  "TEC2": "16.8170358319698",
  "TEC3": "20.3313160186370",
  "a": "-2.1361981868258385e-06",
  "b": "-0.0014860535783759986",
  "c": "0.006604083564373908",
  "d": "0.3051491649453231",
  "e": "18.12494633917503"
},
{
  "Curve_fitting": "y = ax^4 + bx^3 + cx^2 + dx + e"
}
```

カーブフィッティングデータ (json)

Name	Long Name
20120401_012932_COSMOS2...	20120401_012932_COSMOS2407_EAR...
azimuth_angle	azimuth angle
cos(x)	x is the angle formed by vector1(receive...
distance	distance to satellite
elevation_angle	satellite elevation angle
frequency_shift_150MHz	frequency shift of 400 MHz
frequency_shift_400MHz	frequency shift of 400 MHz
IPP_Latitude	Latitude of IPP
IPP_Longitude	Longitude of IPP
power_150MHz	power of 400MHz
power_400MHz	power of 400MHz
S4_150MHz	S4 of 150MHz
S4_400MHz	S4 of 400MHz
slant_TEC	slant TEC (bias is not removed)
SNR_150MHz	SN ratio of 150MHz
SNR_400MHz	SN ratio of 400MHz
STD_TEC	standard deviation of slant TEC
TEC	vertical TEC (bias is removed)
time	time
velocity	relative speed of satellite

観測+計算したもの (NetCDF)