

GEONETリアルタイムデータに基づく 電離圏トモグラフィ・システムの開発

山本衛、鈴木翔太(京大生存圏研)
齋藤享(電子航法研究所)
齋藤昭則(京大理)
Chia-Hung Chen (National Cheng Kung University)

研究背景

1. 電離層のリアルタイム情報の必要性
 - ・電離層観測に基づく地震や津波等の緊急警報システム
⇒3次元構造の変化による地震や津波の検知
 - ・飛行機のGPS衛星航法における精密な位置測位
⇒電離層遅延の補正が必要

2. 先行研究

- ・電子航法研究所による2次元変動TECの準リアルタイム化
[Saito et al. (2013)]
- ・モデル低依存の電離層3次元トモグラフィ
[Gopi et al. (2014)]



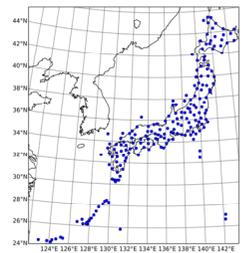
リアルタイムの電離層3次元解析へ

研究目的

変動TEC解析, 絶対値TEC解析, 3次元トモグラフィ解析の3つのプロセスを取り入れた統合的な電離層リアルタイム3次元解析システムを構築する。

課題

1. TEC絶対値の導出
3次元トモグラフィ解析には**計器遅延(バイアス)**を補正した**TEC絶対値**が必要となる。
2. 解析の高速化
大規模行列の生成および演算の必要があり, 現在は解析のみで約30分を要する。
3. 基地局数の制限(1200箇所 ⇒ 200箇所)
従来のトモグラフィ手法ではGEONETの1200基地局を利用していた。しかし, リアルタイムの1秒値が得られる基地局は右上図の**200箇所**に**限定**され, データ数が限定される環境下での**安定解の取得**が必要となる。



1秒値が得られる200の基地局

電離圏3次元トモグラフィの原理

GPS-TEC観測方程式

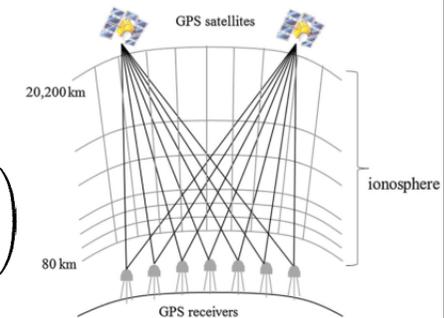
$$Ax = b$$

$$A = \begin{pmatrix} l_{11} & \dots & l_{1n} \\ \dots & \dots & \dots \\ l_{m1} & \dots & l_{mn} \end{pmatrix}$$

l_{mn} : パスmがセルnを通過するパス長

x : 電子密度ベクトル

b : 絶対値TECベクトル



解析の高速化

マルチプロセスによるBINEXのデコード

従来システム: BINEX → RINEX → TECの導出 (5分)

本システム: BINEX → TECの導出 (1分以下)

疎行列演算アルゴリズムの適応による計器バイアス推定の高速化

大規模疎行列(要素率0.1%)の最小二乗計算

→ 疎行列の最小二乗計算アルゴリズムを適応

→ 24時間分のデータによる計器バイアス推定が**1.0秒以下に高速化**

スプライン補間および疎行列生成による3次元トモグラフィの高速化

3次元トモグラフィにおけるA行列の生成および最小二乗計算

→ セル単位のパス長の導出にはスプライン補間を利用

→ Aを疎行列として生成し演算することで解析時間を**10分以下に高速化**

電離圏3次元トモグラフィに関する検討

観測システムシミュレーション実験

電離層の経験モデルからと実データの衛星-受信機パスから TEC値を算出し、そのトモグラフィ解析結果とモデル値との RMSEを比較する

拘束係数C及びハイパーパラメータλの決定

$$J(x) = \|b - Ax\|^2 + \lambda \|Wx\|^2$$

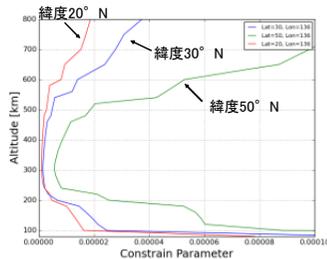
↑ 最小二乗項 ↑ ハイパーパラメータ
↑ $Wx = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^6 C_{i,j} (x_i - x_{i,j})$ ↑ 空間勾配への拘束項
↑ 拘束係数

拘束係数Cの決定

手法a NeQuickからセル座標で決定される方向非依存な値として設定 (従来法)

手法b セル高度で決定される方向非依存な値として設定 (提案法)

手法c NeQuickからセル勾配に対して決定される方向依存値として設定 (提案法)



手法aにおける拘束係数Cの緯度-高度依存性 [Gopi et al. (2014)]

手法bにおける高度と拘束係数の関係

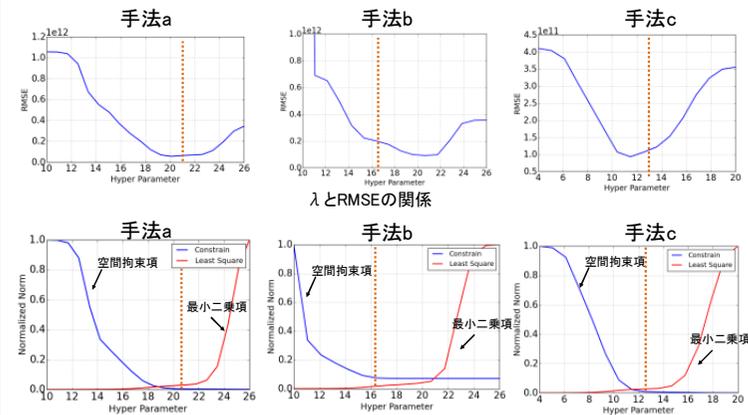
高度	拘束係数C
80 km	1E-01
180 km	1E-04
650 km	1E-04
1000 km	1E-02
1500 km	1E-01
2000 km	1
25000 km	1

手法cにおける拘束係数Cの決定式

$$C_{jk} = 10^{-4} \times \log(n_{max}) / \log(n_{jk})$$

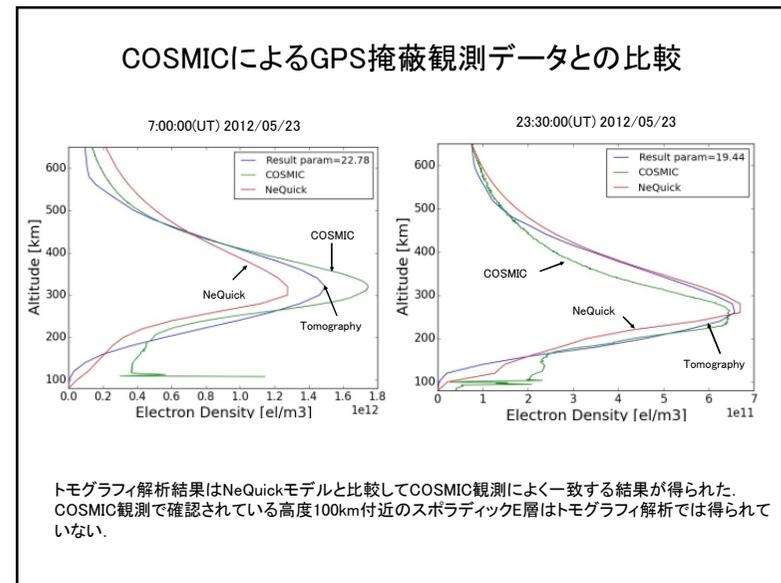
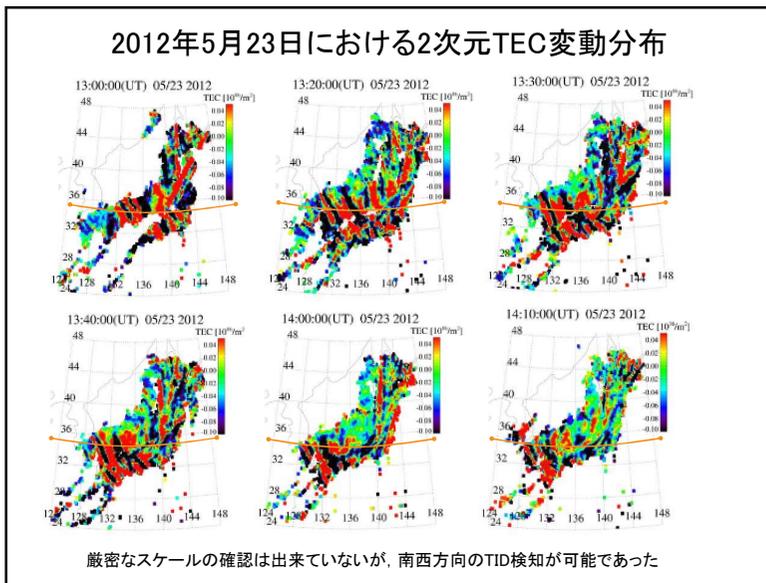
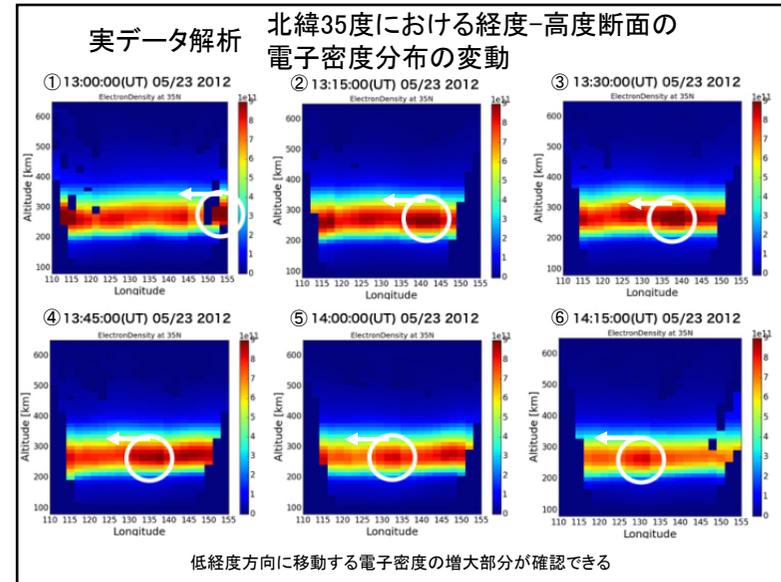
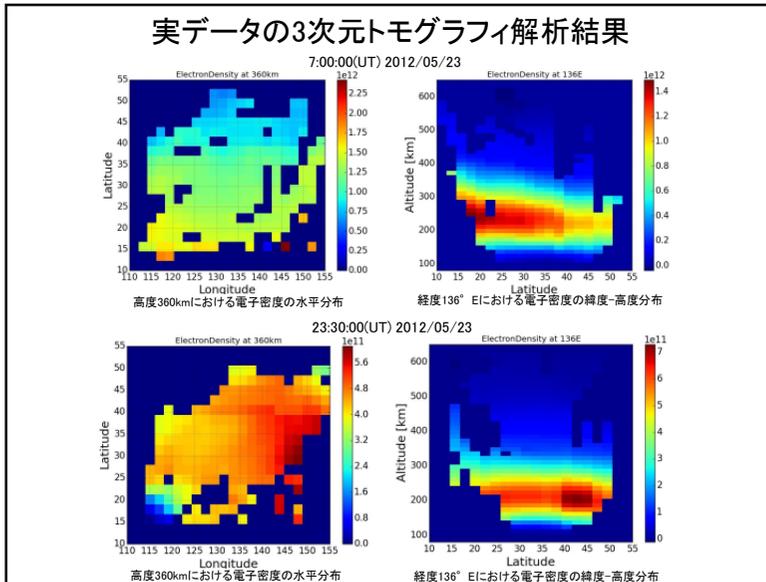
n_{max} はモデルの最大電子密度勾配
 n_{jk} はセルjとセルkの電子密度勾配

拘束係数決定手法の比較結果



λと最小二乗項及び拘束項ノルムの関係

L-curve法 … 最小二乗項と空間拘束項のノルムの和が等しくなるλを採用
 選択されたλにおけるRMSE値は手法aが最小値をとる⇒ 手法aを採用.



結論

- 本研究で開発した電離圏3次元解析システムでは、TEC分布導出プロセス、計器バイアス推定プロセス、3次元トモグラフィ解析プロセスを並列に実装し、リアルタイム環境下においてTEC変動分布及び絶対値分布は30秒遅延の出力、3次元トモグラフィ解析は10分遅延の出力を実現した。
- 計器バイアス推定では行列計算を1秒以下に高速化させ、1時間ごとに過去24時間分のデータから推定を行うことで低誤差の計器バイアス推定が可能となった。
- 電離圏3次元トモグラフィ解析では、拘束係数C及び λ の推定手法を決定した。リアルタイムの環境下における実データの解析では、GPS掩蔽観測データとよく一致し、さらに稚内を除いた国分寺、山川、沖縄のイオノゾンデ観測データとよく一致する結果が得られた。
- 本研究で開発したシステムは、電子航法研究所に設置した専用サーバーにて稼働準備中であり、2016年3月のローンチを予定している。

今後の課題

- 大量解析結果とGPS掩蔽観測及びイオノゾンデ観測結果との比較による統計的な精度分析