

GEONET全点を用いた 日本列島上空の 電離圏3次元トモグラフィー解析

2025年度 地震予知学会 学術講演会

山本真悟¹⁾, 梅野健²⁾

¹⁾京都大学工学部情報学科数理工学コース

²⁾京都大学大学院情報学研究科

研究の背景と概要

背景

- 地震先行現象の解明において TEC (電離圏全電子数) の異常変動が注目されている
- GNSS-TEC 法による2次元的な解析が主流
- 高さ方向の情報が少ない
- 異常変動の3次元的構造の把握が不可欠

概要

- 3次元電離圏トモグラフィーにより地震発生前の空間構造を解析
- Yoneyama and Umeno (2025) で提案された FCIT アルゴリズムを用いる
- Iwata and Umeno (2016) で提案された CRA をボクセルに応用し解析・異常の分析

FCIT アルゴリズム

- Yoneyama and Umeno (2025) で提案
- 各時刻（エポック）で次のような大規模な連立方程式を解く必要がある

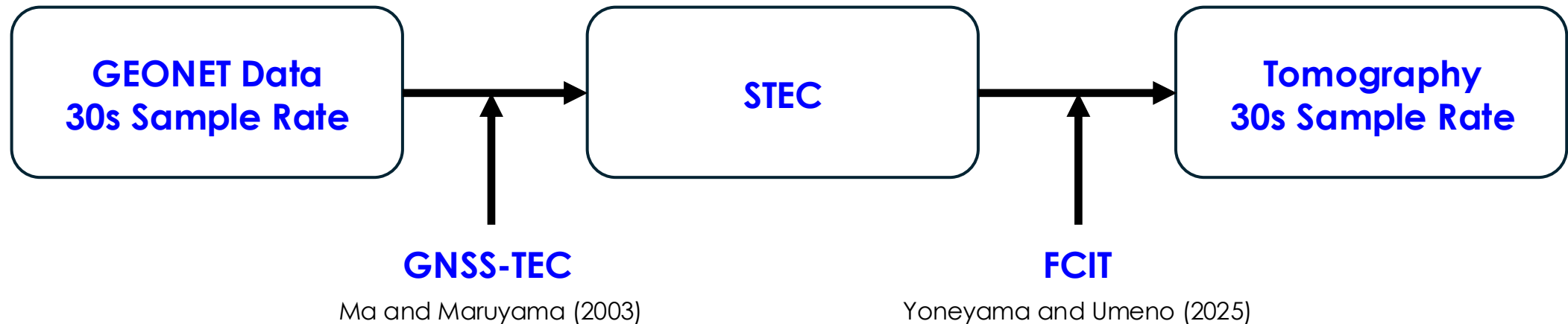
$$(A^T A + \lambda^2 H^T H)X = A^T (b - p) + \lambda^2 H^T y$$

- 大きく次の3つの工夫をもって高速に解を得る

- 直接法ではなく**反復法で解く**
- 係数行列の対角行列を用いる**前処理付き共役勾配法**を活用
- 各エポックでの**初期解に前エポックでの解を採用**する

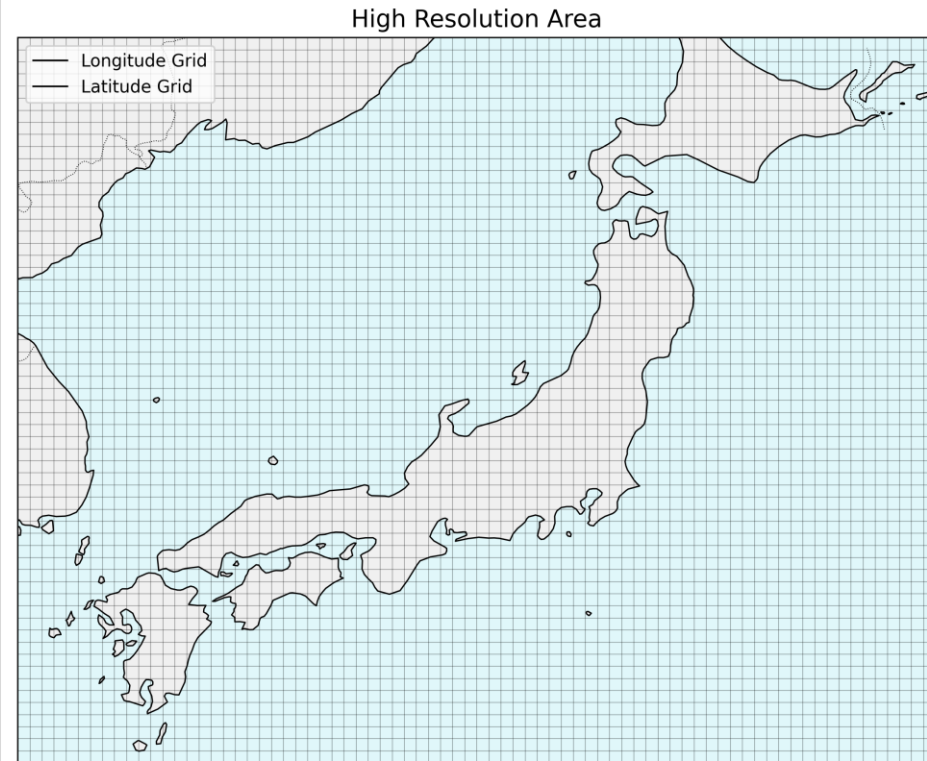
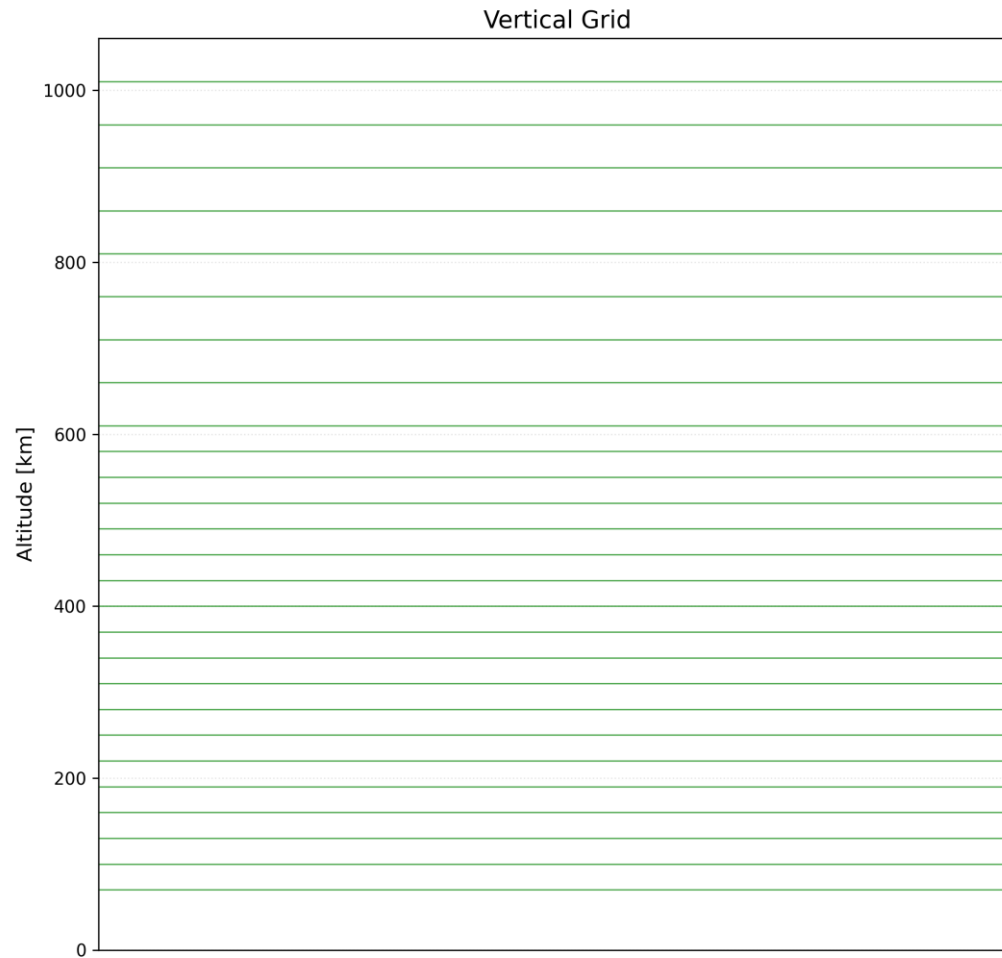
解析データ

- 国土地理院が運営する GNSS 連続観測網 GEONET の公開データを用いた
- 観測点は日本国内の全観測点 (1308点)
- 観測のサンプリングレートは30秒で, トモグラフィーについても30秒間隔で構成
- 衛星は GPS,GLONASS,Galileo,QZSS を使用



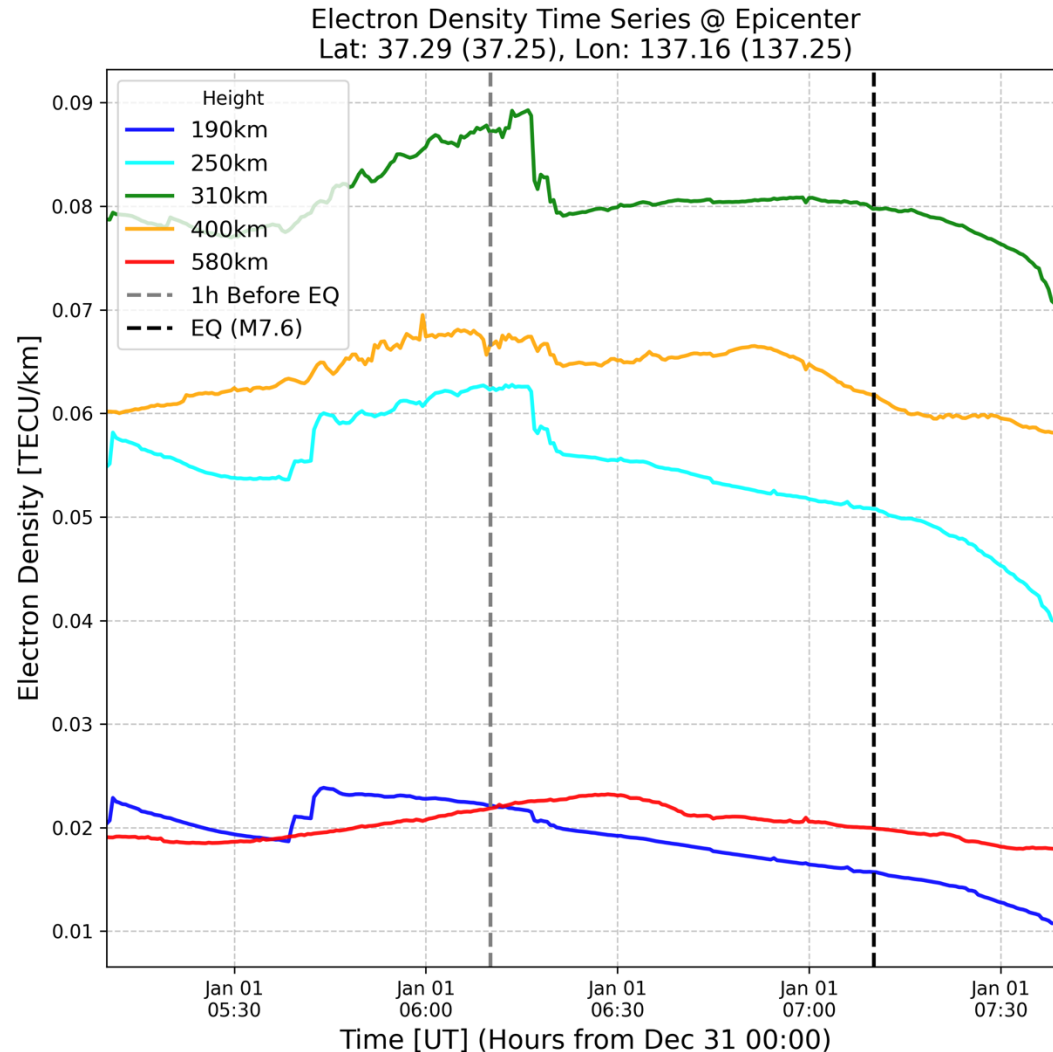
- 解析対象期間 : **2023/12/31 19:00 ~ 2024/01/01 09:00 (UTC)**
 - 2023/12/31 21:55 (UTC) 太陽フレア (X5.0クラス) 発生
 - 2024/01/01 07:10 (UTC) 能登半島地震発生

グリッド分割



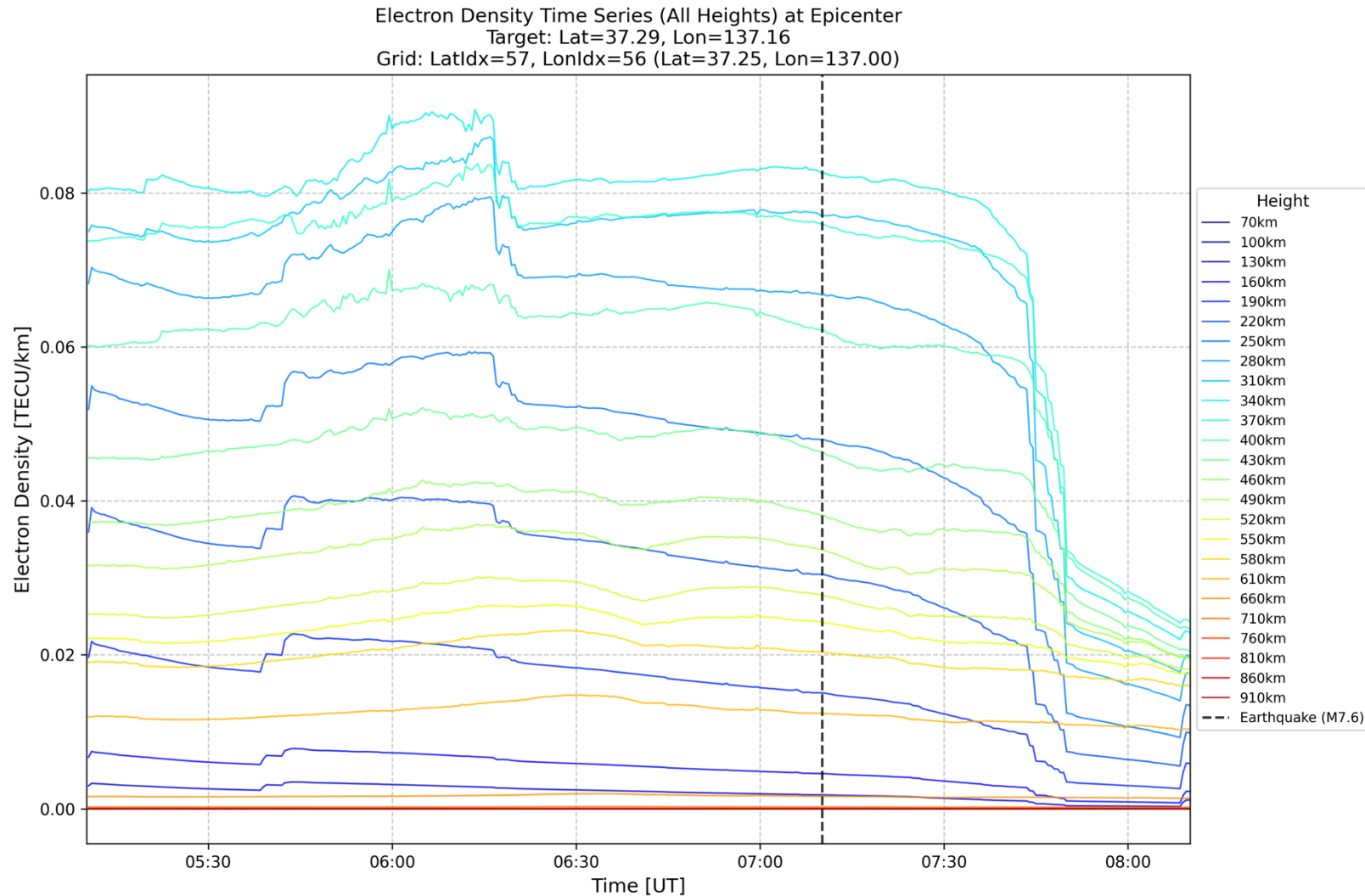
- 高度方向・水平方向それぞれ一番細かい部分は**30km**・**0.25°**間隔
- 全部で約350000ボクセル

2024年能登半島地震発生前後の高度別電子数密度時系列

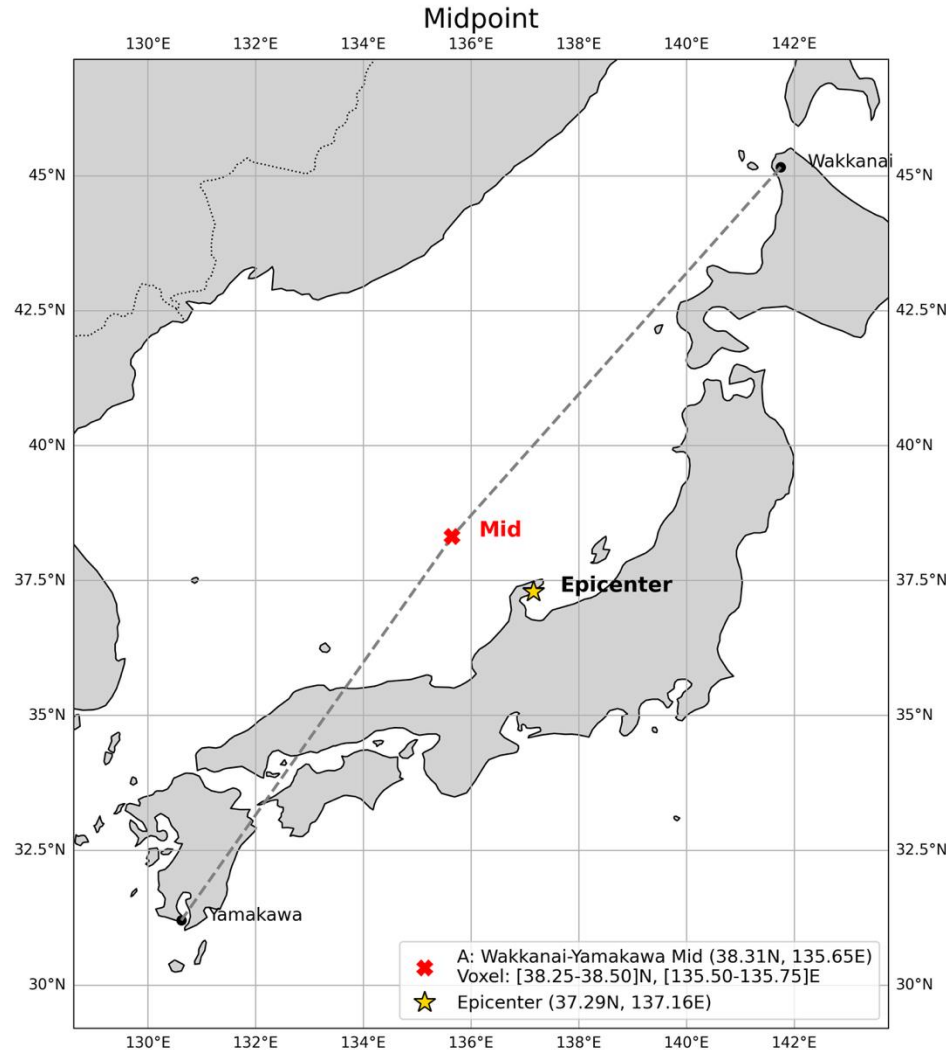


- 各高度によってTEC絶対値の大きさ, 増減の仕方に違いがあることがわかる
- 高度による時系列の違いから, 地震先行異常の空間的な広がり方についての解析が期待される

全高度範囲での電子数密度の時系列@能登半島地震震央直上



イオノゾンドの観測結果との比較



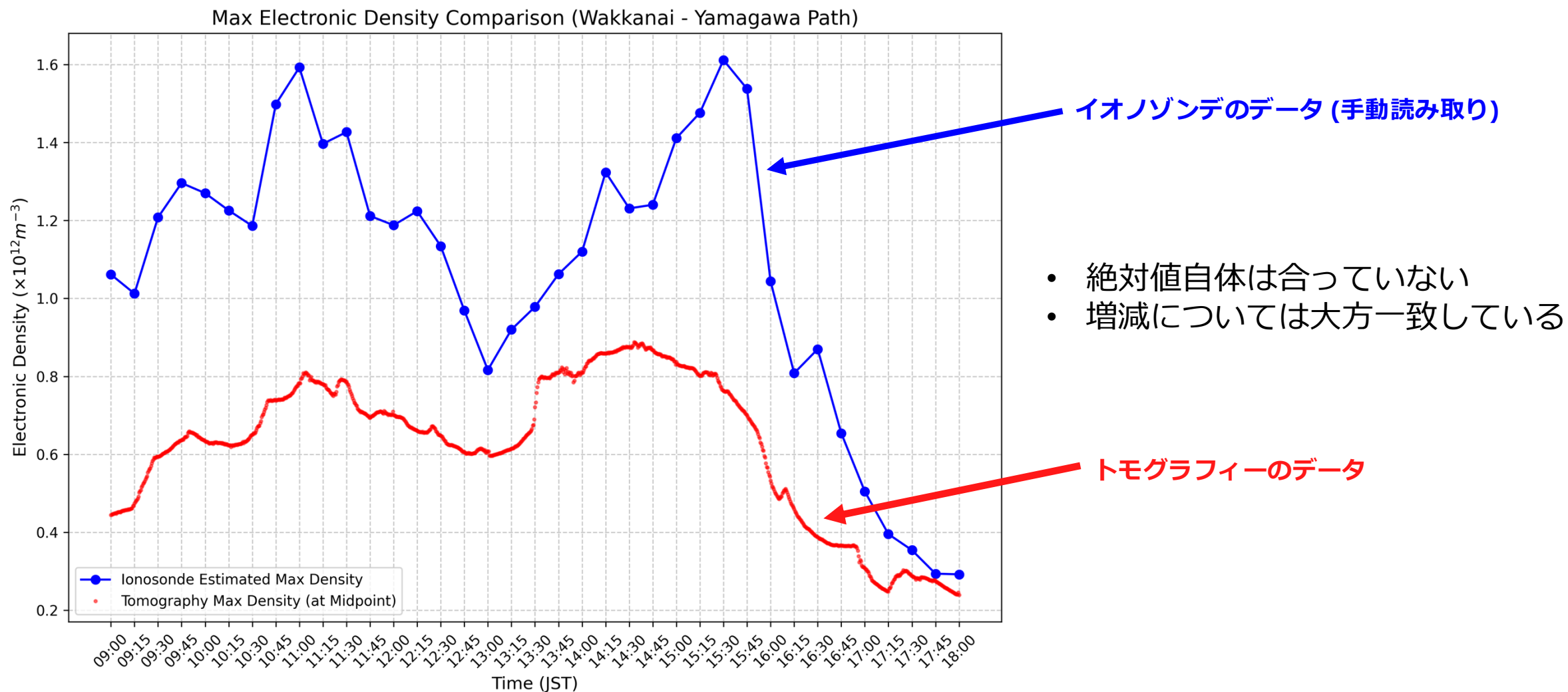
- NICT の観測施設である，稚内・山川間の斜入射観測のデータをベンチマークとする
- 中間地点が今回の解析の対象とした能登半島地震の震源地に近い
- 以下の式で**最大電子密度を計算できる**

$$N_{max} = \left(\frac{f_{ob} \cos \phi}{k} \right)^2$$

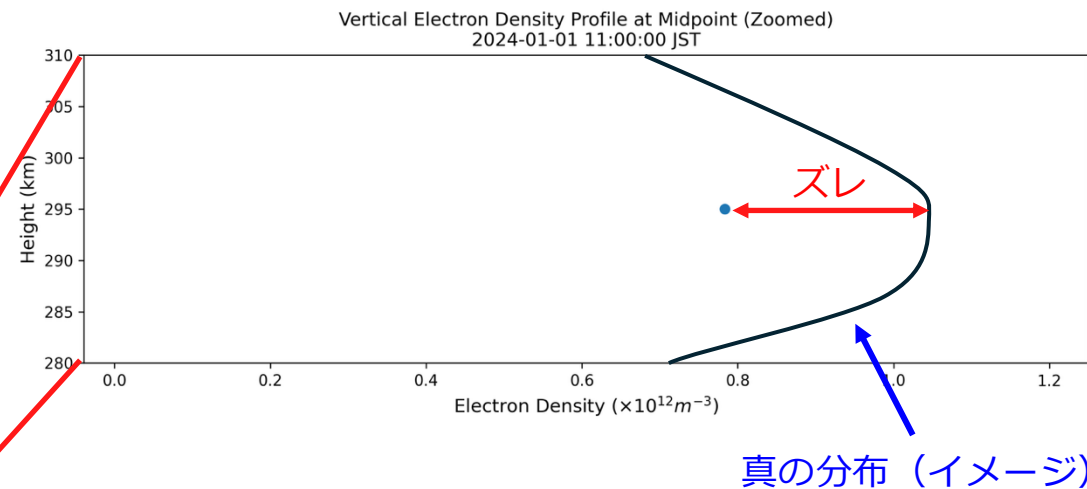
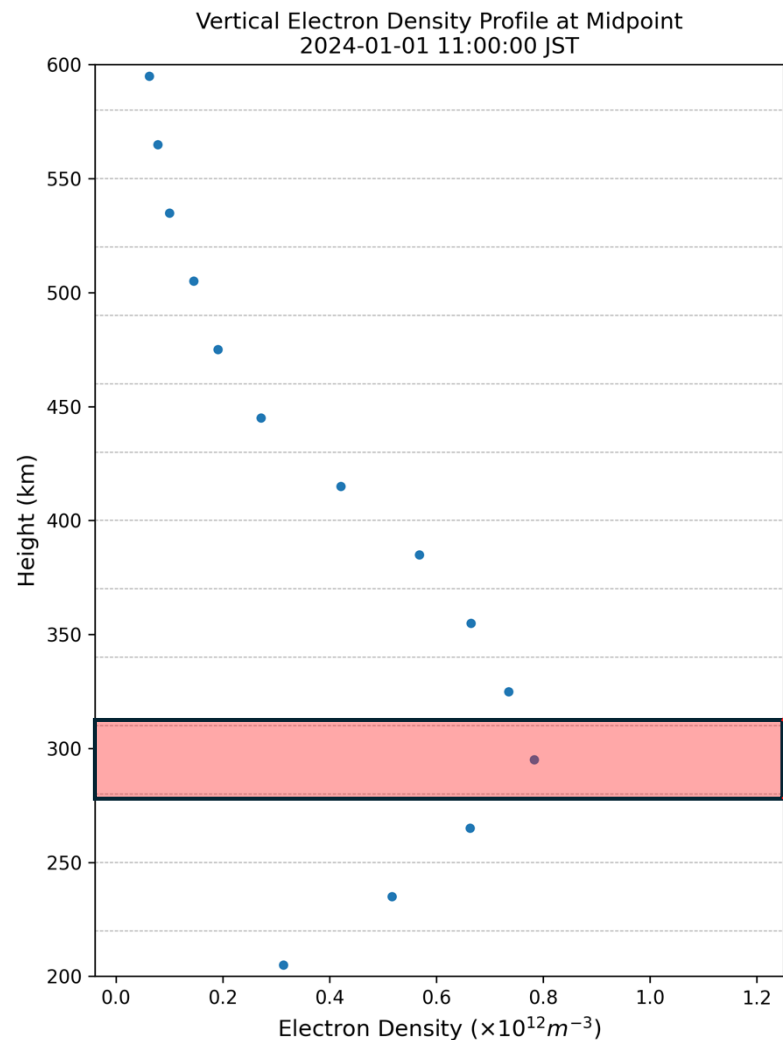
N_{max} : 最大電子密度
 f_{ob} : 斜入射観測での周波数(MUF)
 ϕ : 電離圏への入射角
 k : 物理定数から決まる定数

- トモグラフィー側は，**中間地点のボクセルについて鉛直方向に探索し，最大値を求める**

比較の結果



絶対値がなぜ一致しないのか



- トモグラフィは平均化された密度がボクセルに割り当てられる
- ピーク値と平均値との差が現れていると考えられる