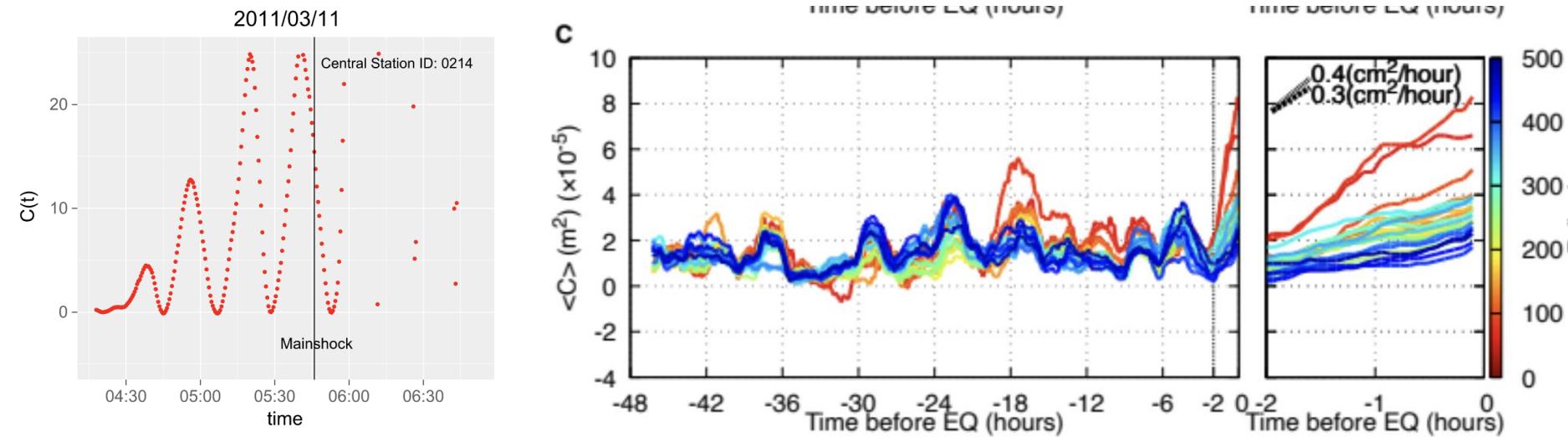


準リアルタイム相関解析 システム(β版)の開発

京大情報 小池元、梅野健

本開発の概要

- 地震準備過程の検出を（最終）目的としたリアルタイム監視システムの実装に向けた試み
- 相関解析 (Iwata-Umeno, 2016; Tanaka-Umeno, 2025)
 - 軽量かつ実績あり
 - 東北沖地震約 40 分前からの TEC 相関値の増加(Iwata-Umeno 2016)
 - 東北沖地震約 2 時間前からの座標 (POS) 相関値の増加 (Tanaka-Umeno, 2025)



観測センターの公開測位データ

相関解析によるプレスリップ検出 (Tanaka-Umeno, 2025) では外部機関 (Nevada Geodetic Laboratory) の測位データを使用

- NGL の解析プロダクト: 地殻変動研究で用いられるデータ 5分間隔
 - rapid: 2025/08/13 時点で、最新時点は 2025/07/31
 - final: 2025/08/13 時点で、最新時点は 2025/07/12
- 国土地理院日々の座標値 (F5 解、R5 解) 1 日間隔
 - F5 解、R5 解それぞれ、2 週間後、2 日後に公開される
公開が遅く、サンプリング間隔が長いので、リアルタイムシステム開発のためには自力測位する必要がある

地殻変動研究の参考: Bletry, Nocquet (2023)

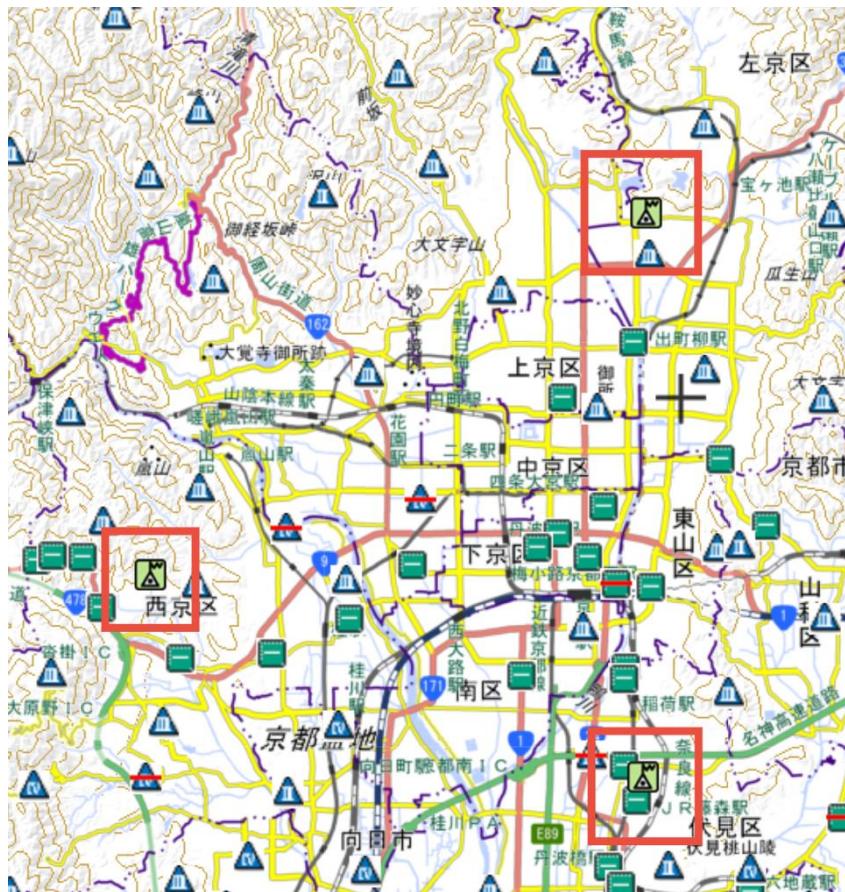
<https://www.science.org/doi/abs/10.1126/science.adg2565>

データ元: 電子基準点の30秒毎衛星観測データ

電子基準点: 国土地理院が設置した GNSS 連続観測点 (一覧)

日本全体で約 1300 箇所

30 秒毎衛星観測データ: ‘ftp’ で取得可能

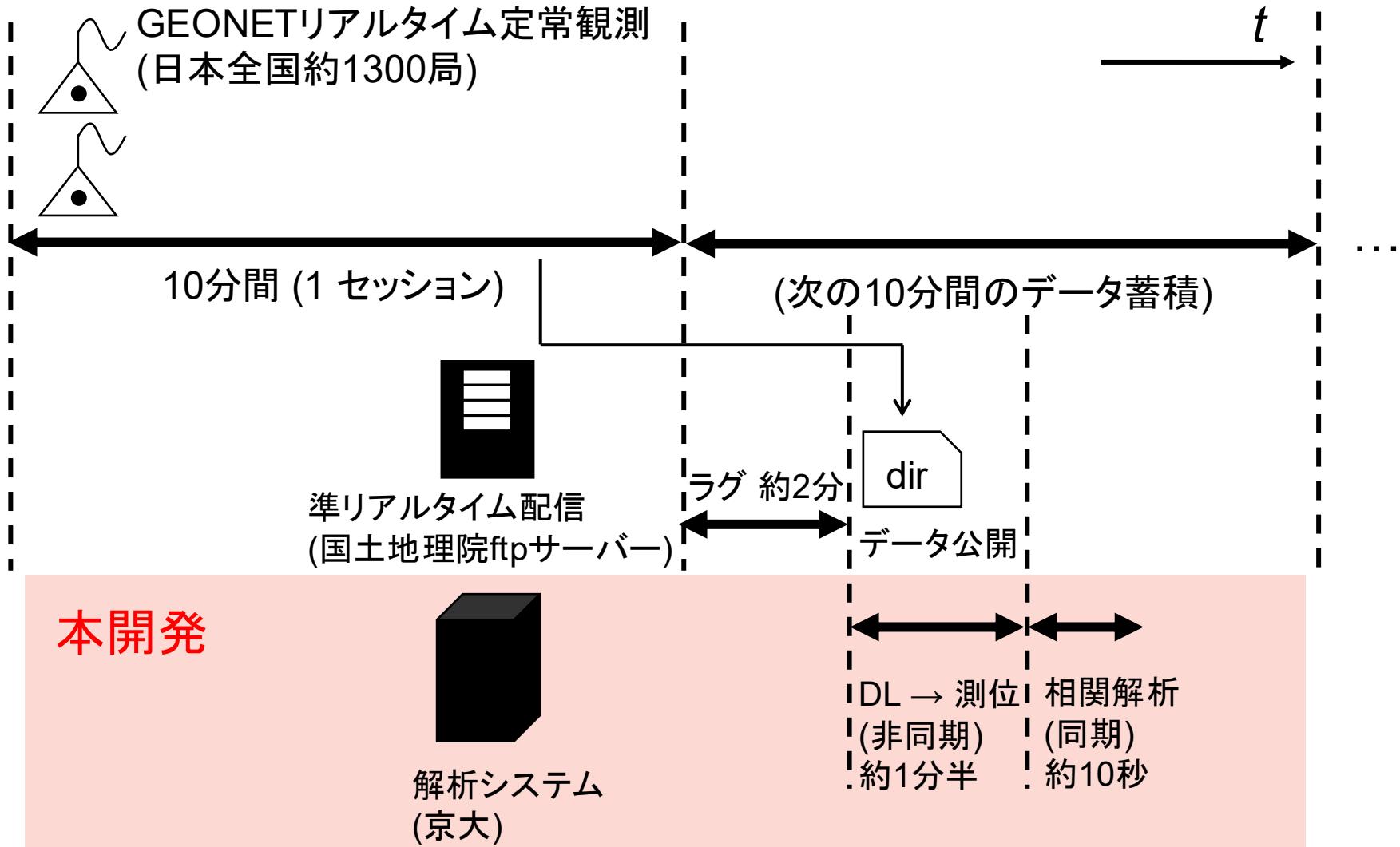


(左) 京都市中心部の電子基準点
(右) 京都左京2 (左図右上の□)

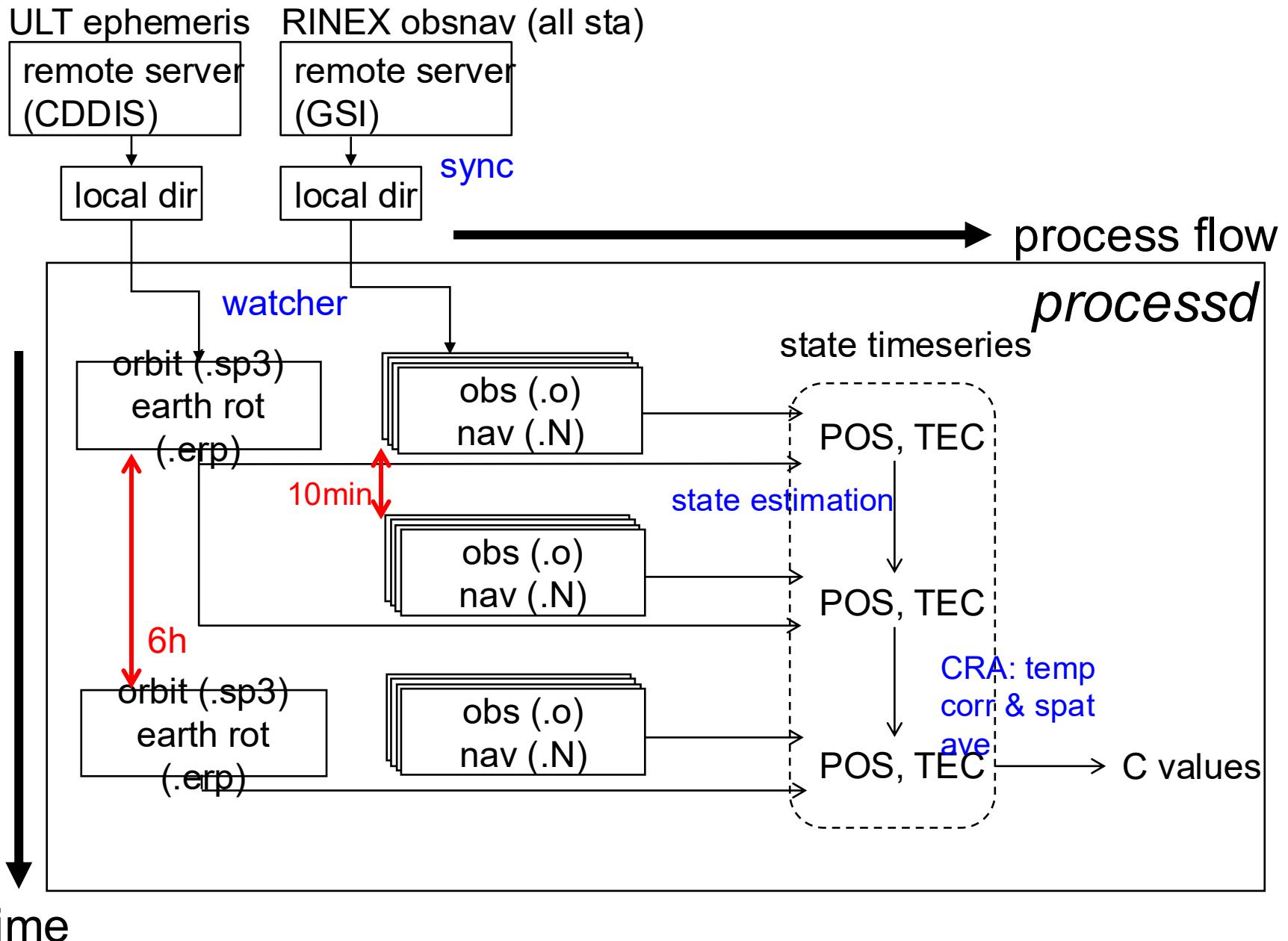
準リアルタイム定常観測データの活用

- `ftp://terras.go.jp` 上で公開 (詳細ページ:
https://terras.gsi.go.jp/ftp_about.html)
- サンプリング間隔 30 秒、10 分間データ
(00:00:00-00:09:30) が 00:10:00-00:12:00 頃公開
- 実時間から約 12 分後までにはその観測データにアクセス可能

準リアルタイムシステム: コンセプト



準リアルタイムシステム実装



相関解析 (CoRelation Analysis; CRA)

- シンプル: 自局と近接局との時間相関を近傍で平均²

$$C_i(T) = \frac{1}{MN} \sum_{j=1}^M \sum_{t=T}^{T-N+1} x_{i,t} x_{j,t} \quad (1)$$

- $x_{i,t}$: 自局 i 、時刻 t における時系列 (長さ N)
- $x_{j,t}$: 近接局 j 、時刻 t における時系列 (局数 M 、長さ N)
- VLBI における相関処理の GNSS 衛星観測への対応物
- もし共通信号 s_t 、独立ノイズ $n_{i,t}, n_{j,t}$ を用いて
 $x_{i,t} = s_t + n_{i,t}$ 、 $x_{j,t} = s_t + n_{j,t}$
→ $C_i(T)$ の SNR は $O(N)$ (x の積の平均をとりノイズ小さく)
- このモデルの状況に近づけるため前処理

²近接局空間平均と自局との内積の移動平均とも (Tanaka-Umeno, 2025)

³Iwata Umeno, 2016 ほか

前処理

相関にかける前に

- POS 時系列: ECEF 座標解 (地球重心を原点とした直交座標系) RTKLIB 2.4.2 改変版で算出
 - 目標イベント (地震) があるとき
 - 地震前期間 (2 日前-1 日前) の中央値を原点として ENU 変換
 - 地震前期間 (2 日前-1 日前) の中央値を原点としなおす⁴
 - 目標イベントがない時
 - 解析期間の 2 日前-1 日前の中央値を原点として ENU 変換
 - 準リアルタイムシステム: 起動時から 2 時間 15 分前の測位値を原点とし ENU 変換⁵
- TEC 時系列: Carrier L_4 TEC
 - 時点 T に対し、TEC を時刻 t の関数でフィッティング (T の 2 時間 15 分前から 15 分前)
 - フィッティング関数を (T の 15 分前から T まで) 外挿した残差時系列
- (オフライン解析) 異常値除去
 - POS 時系列標準偏差が閾値超過局を除去 (POS: 0.5[m])

⁴Tanaka-Umeno, 2025 ではこれだけ; NGL データは ENU 変換済で提供

⁵システム起動時、過去 2 時間 15 分前のデータから測位

システム構成

構成部	処理内容	処理方法	処理ストラテジ	
データ取得部	観測データ取得	GSI に lftp	lftp 起動間隔	10[min]
	精密暦取得	CDDIS に lftp	lftp リトライ間隔	10[sec]
			lftp 起動間隔	6[hour]
			lftp リトライ間隔	6[hour]
測位部	座標解 (POS) 算出	RTKLIB 2.4.2 (PPP-AR)	使用衛星システム 時間分解能	GPS, GRONASS, QZSS 30[sec]
	TEC 算出	Carrier TEC	使用衛星 時間分解能	GPS, GRONASS, QZSS 30[sec]
			Carrier-to-code leveling	なし
			周波数間バイアス補正	なし
相関処理部	POS-CRA (TU2025 参照)		原点設定方法	システム起動時 PPP 収束値
			相関積分長	110[min]
			時間分解能	5[min]
			隣接局数	8
	TEC-CRA (IU2016 参照)		フィッティング長	120[min]
			相関積分長	15[min]
			時間分解能	30[sec]
			隣接局数	30

実際のシステムの出力

(コマンドライン画面へ)

- 処理時間
 - データ公開ラグ: 平均 2 分
 - データ取得部 + 測位部 (各局独立、非同期処理): 平均 38 秒
 - 相関処理部 (局が揃うのを待つ、同期処理): 平均 12 秒
- データ公開ラグ + データ取得部がボトルネック

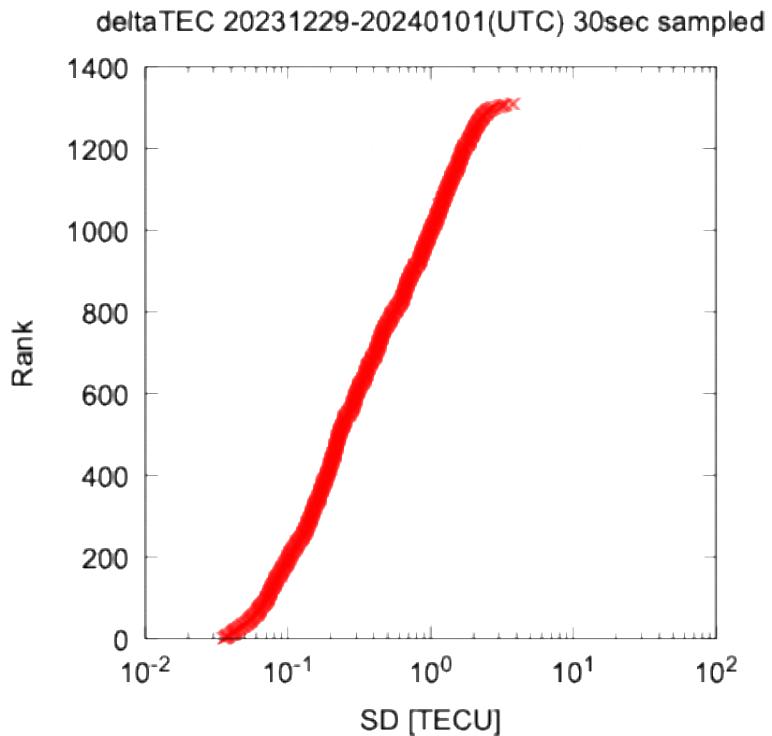
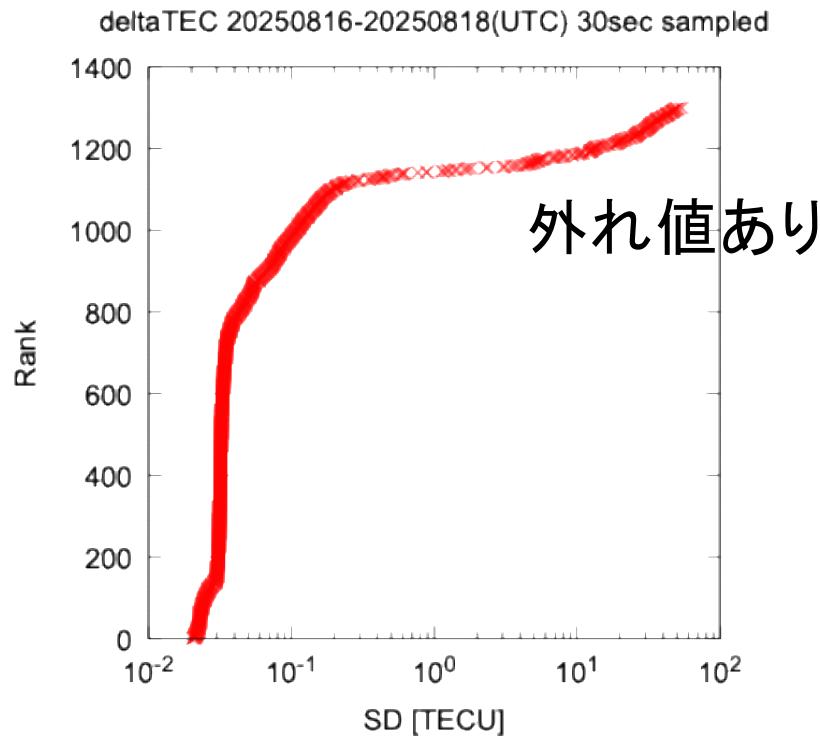
TEC 精度評価: Δ TEC 標準偏差 (単位: [TECU])

fitting して detrend する時、TEC 時系列が連續でないと悪影響が出る: fitting 残差 (相関解析の入力時系列) が平均 0 の Gaussian で近似できない

Δ TEC (30秒前後のTECの変化量) の標準偏差の累積分布

(左) 通常時 (2025/08/16-2025/08/18)

(中) 能登半島地震前後 (2023/12/29-2024/01/01)



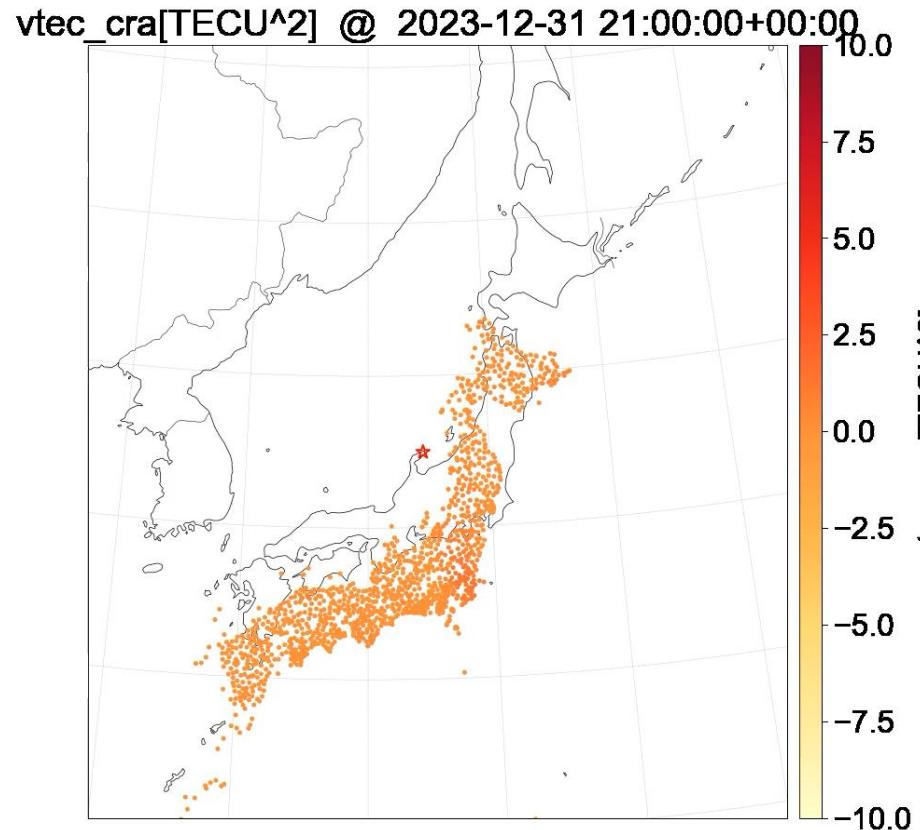
TEC-CRA: 能登半島地震前後

能登半島地震 2023/12/31 21:00-2024/1/1 9:00 (UT)

地震発生時刻: 2024/01/01 07:10:09 (UT)

太陽フレアXクラス: 2023/12/31 21:55頃 (UT)

(データ切れ目 (12/31 23:59 → 1/1 00:00) のジャンプによる相関値の乱れ
(2024/01/01 00:00~02:15頃)

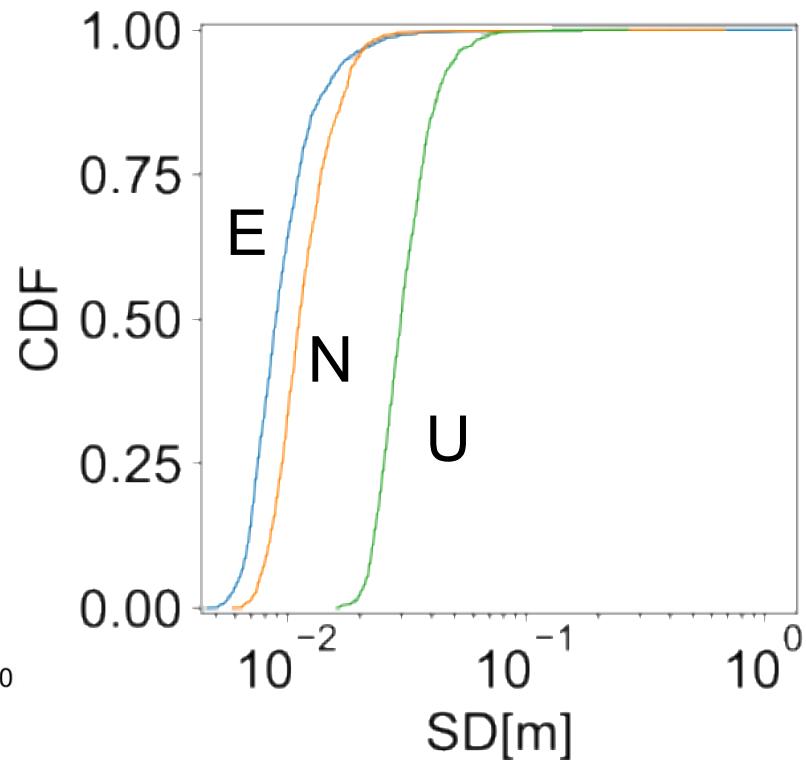
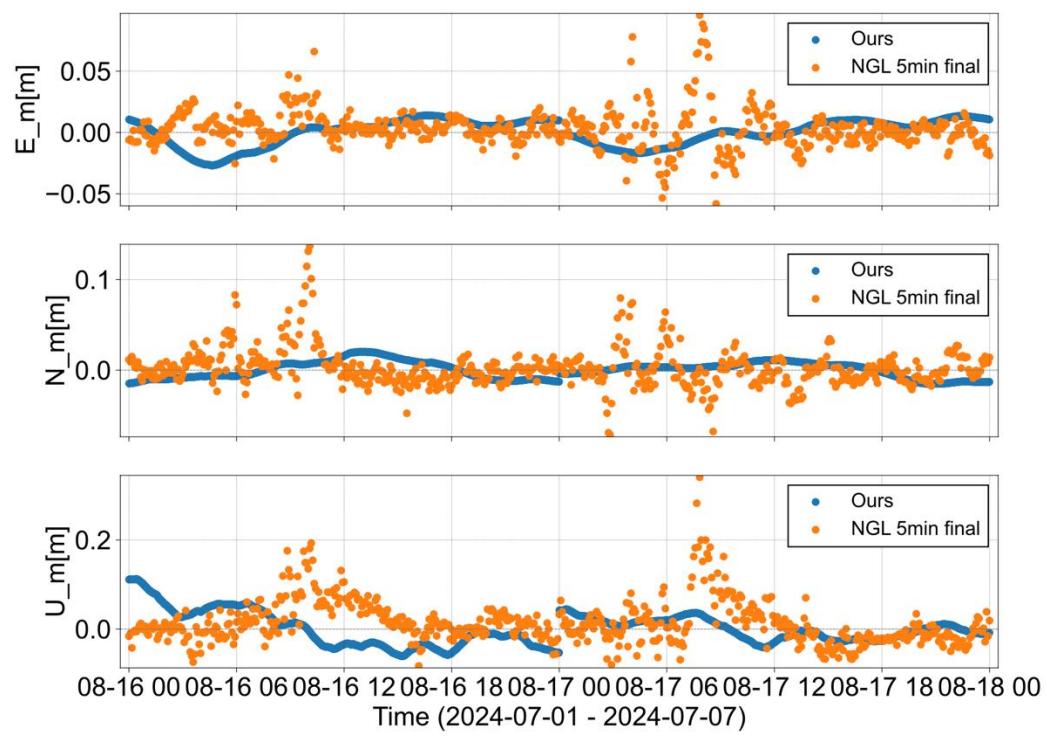


POS 算出値: 平常時 NGL 5min final との比較

解析期間: 2025/08/16-2025/08/18 (平常時)

(左) 本解析、NGL 5min finalデータの変位時系列

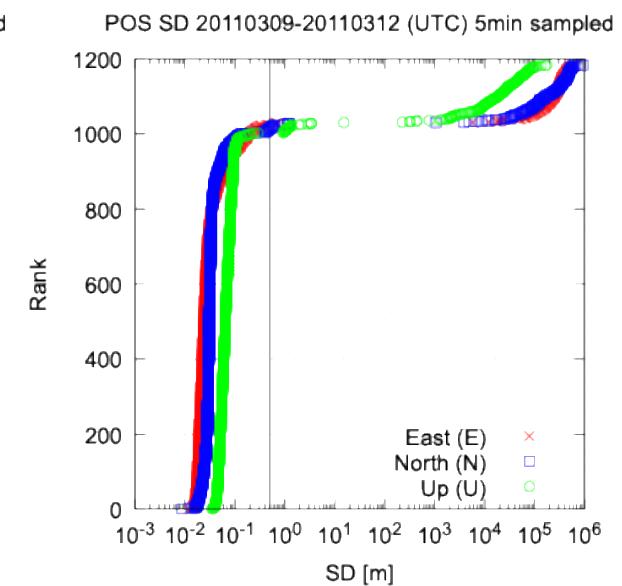
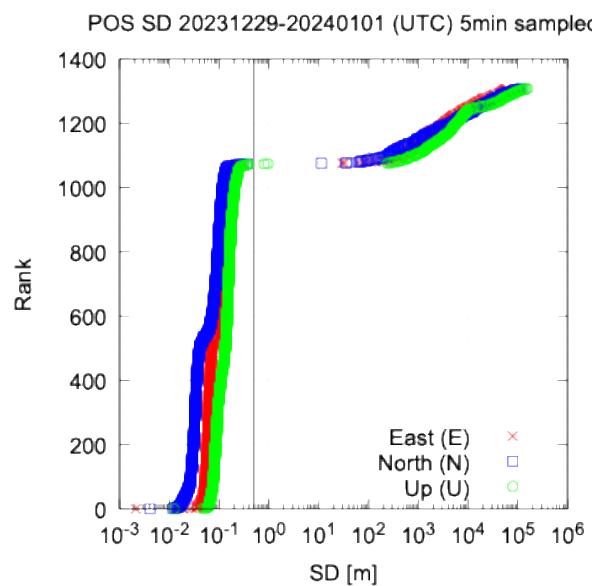
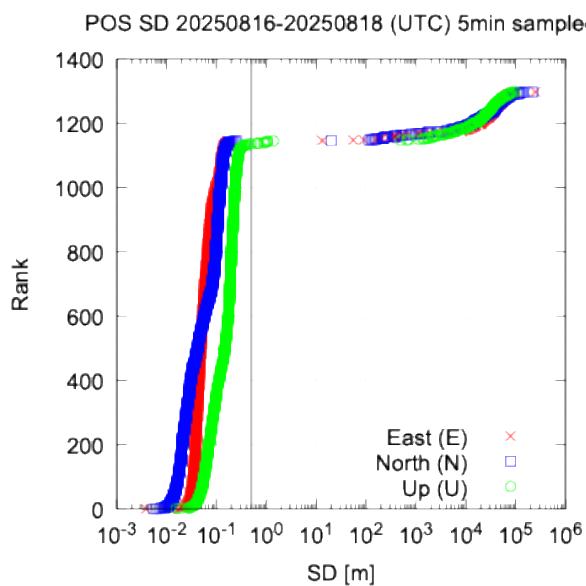
(右) 本解析のデータの日本全局にわたるE, N, U方向標準偏差累積分布



POS 精度評価: 標準偏差 (単位: [m]) 累積分布

座標時系列 30[sec] から 5[min] にダウンサンプリングし標準偏差を計算
(左) 通常時 (2025/08/16-2025/08/18) (準リアルタイム取得データ)
(中) 能登半島地震前後 (2023/12/29-2024/01/01) (1 日データ)
(右) 東北地方太平洋沖地震前後 (2011/03/09-2011/03/12) (1 日データ)

異常を除去してから CRA するため閾値設定 (図の縦線 全方向 0.5[m] で設定)



現段階でのまとめ(最終スライド)

- 準リアルタイム GNSS データを用いた相関解析システム (β 版) を開発
 - データ取得部、測位部、相関処理部で構成
 - 処理時間: リアルタイム + 平均 3 分 30 秒ほど
 - データ公開ラグ + データ取得部が最大のボトルネック
- POS, TEC を同一データから算出: POS 算出は (標準偏差は) NGL と同じほぼオーダー、TEC 算出は Δ TEC の不連続性が課題
- 今後の課題
 - 開発と運用に関するプロトコルの確立
 - TEC, POS 時系列の詳細評価 (特に設計した測位ストラテジが正常に実現されているか)
 - TEC 算出の改善 (レベリング、バイアス補正)、POS 算出の改善 (安定した PPP の実現)、安定運用
 - プレスリップ検出に必要な測位精度の実現と処理時間

謝辞 国土地理院 (準リアルタイムデータ試験公開)、高須知二様 (RTKLIB 2.4.2)