

DGPS測位への電離圏擾乱の影響

2025年2月20日

日本電気株式会社

鈴木和史

第20回宇宙天気ユーザーズフォーラム

情報通信研究機構イノベーションセンター

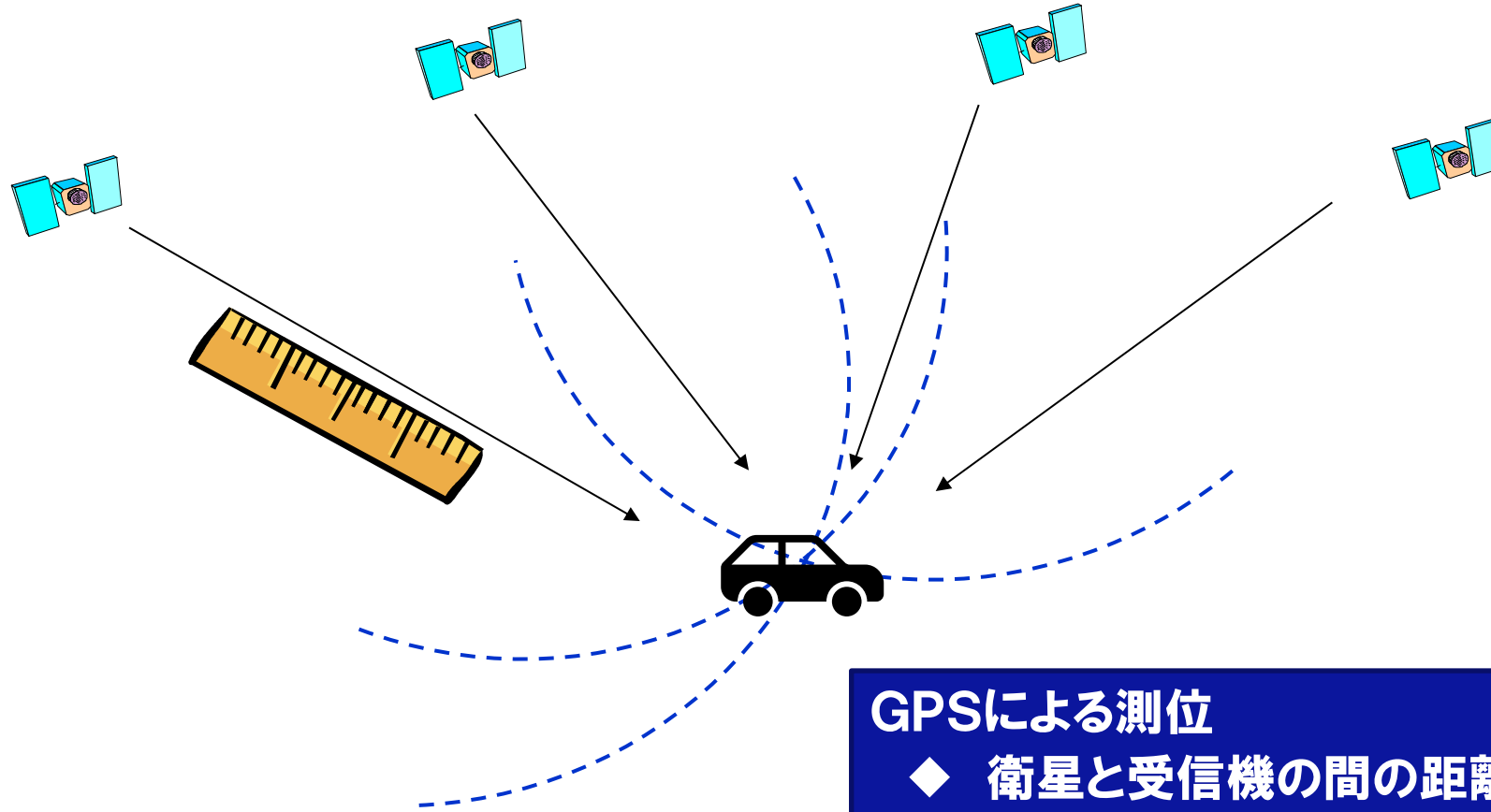
目次

1. はじめに
2. GPS測位
3. DGPSの原理
4. SLASの概要
5. SLASの活用事例
6. SLAS精度と太陽活動
7. 測位誤差の定点観測
8. 電離圏活動の影響事例 1
9. 電離圏活動の影響事例 2
- 10.まとめ

1. はじめに

- みちびき（準天頂衛星システム、QZSS）は、サブメータ級測位補強システム（SLAS）というDGPS（Differential GPS）サービスを提供している。
- SLASは、GPSおよびQZSSのL1信号に対する補強情報を送信し、1周波で約1メートル（サブメータ級レベル）の測位精度を実現するサービス。
- 2018年11月から本格的にサービスが開始され、今年で8年目となる。
サービス開始当初から、SLASのサービス対応受信機や関連商品も発売され、多くの方にご利用いただいている。
- サービス開始以来、安定して約1メートルの水平測位精度を維持してきたが、近年の太陽活動の活発化に伴う電離圏擾乱の影響により、測位精度の低下が見られる。

2. GPS測位

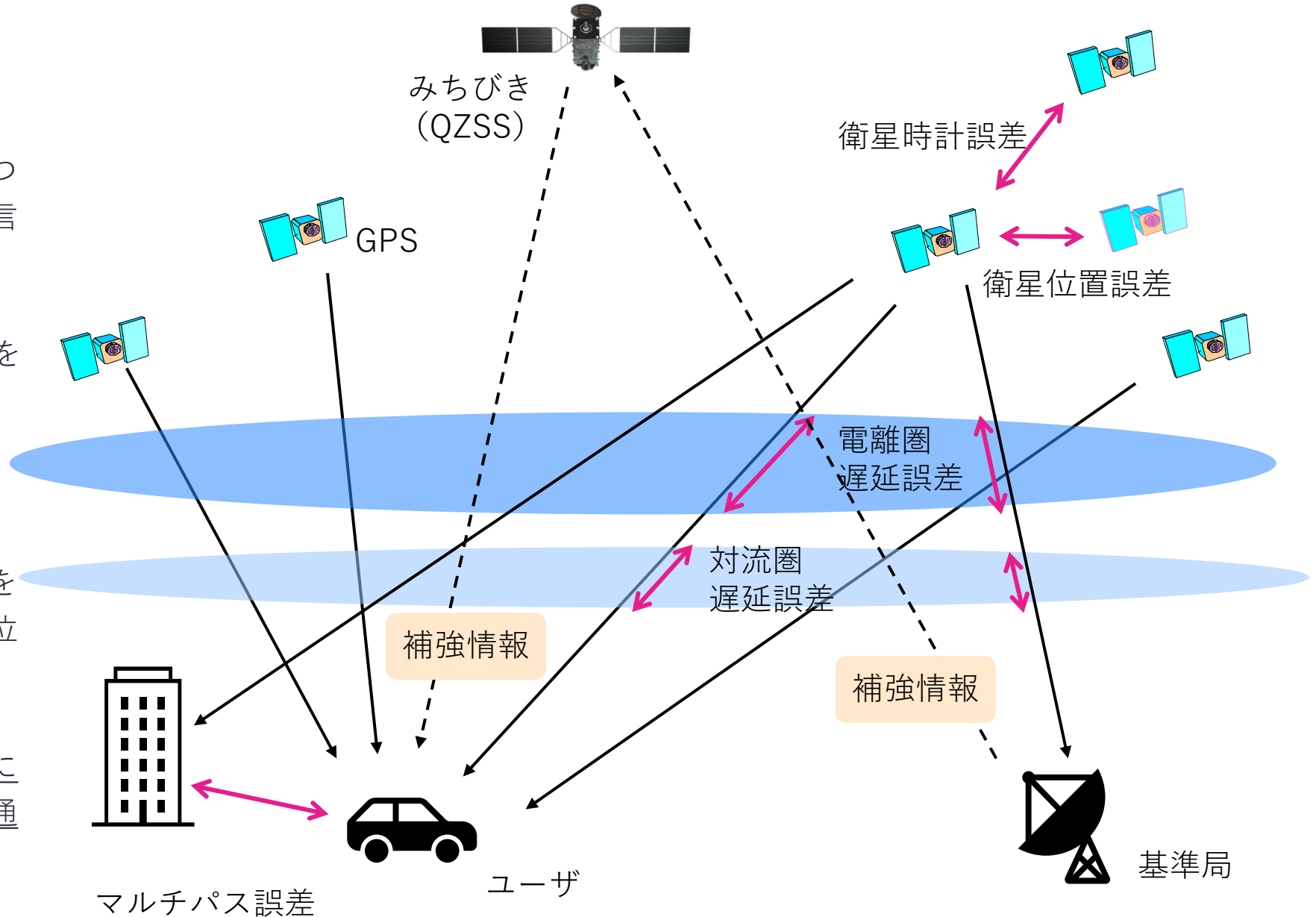


GPSによる測位

- ◆ 衛星と受信機との距離を計測
- ◆ 複数の衛星からの距離の交点として自位置を算出

3. DGPSの原理

- 基準局：
精度の高い自位置の情報を持つ基準局にて、測位衛星からの信号に含まれる誤差を計算し、ユーザに提供する。
SLASではQZSSから補強情報を放送する。
- ユーザ：
測位衛星から受信した信号を、基準局から提供された補強値を使用して補正して高精度に自位置を求める。
- 基準局とユーザで共通の誤差については補正が可能だが、共通でない誤差は補正できない。



4. SLASの概要

SLASは、サブメートル級の測位精度を提供するサービスである。

SLAS測位の方法：

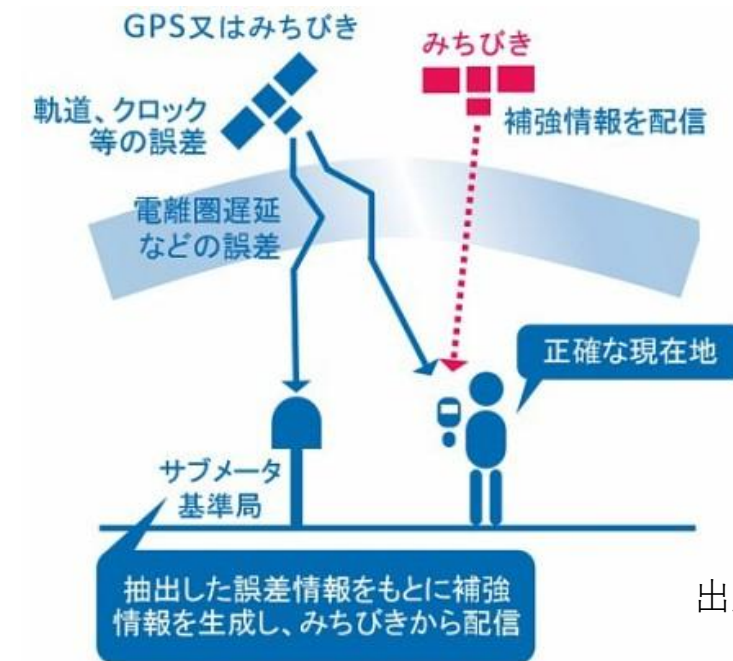
衛星測位に影響を与える誤差要因を補正する情報(補強情報)を作成し、QZSSから配信する。
ユーザは、配信された情報の内、一番近いサブメータ基準局の補強情報を使用して測位を行う。

配信信号： QZSS(L1S)

補強対象： GPS(L1-C/A)、QZSS(L1-C/A)

性能(精度)： 水平 1.0m (95%値)
垂直 2.0m (95%値)

原理： ディファレンシャル GPS(DGPS)



出展：<https://qzss.go.jp/>

4. SLASの概要（つづき）

■ 基準局

SLASの補強情報の源泉となるデータを収集する。
日本国内13か所に設置される。

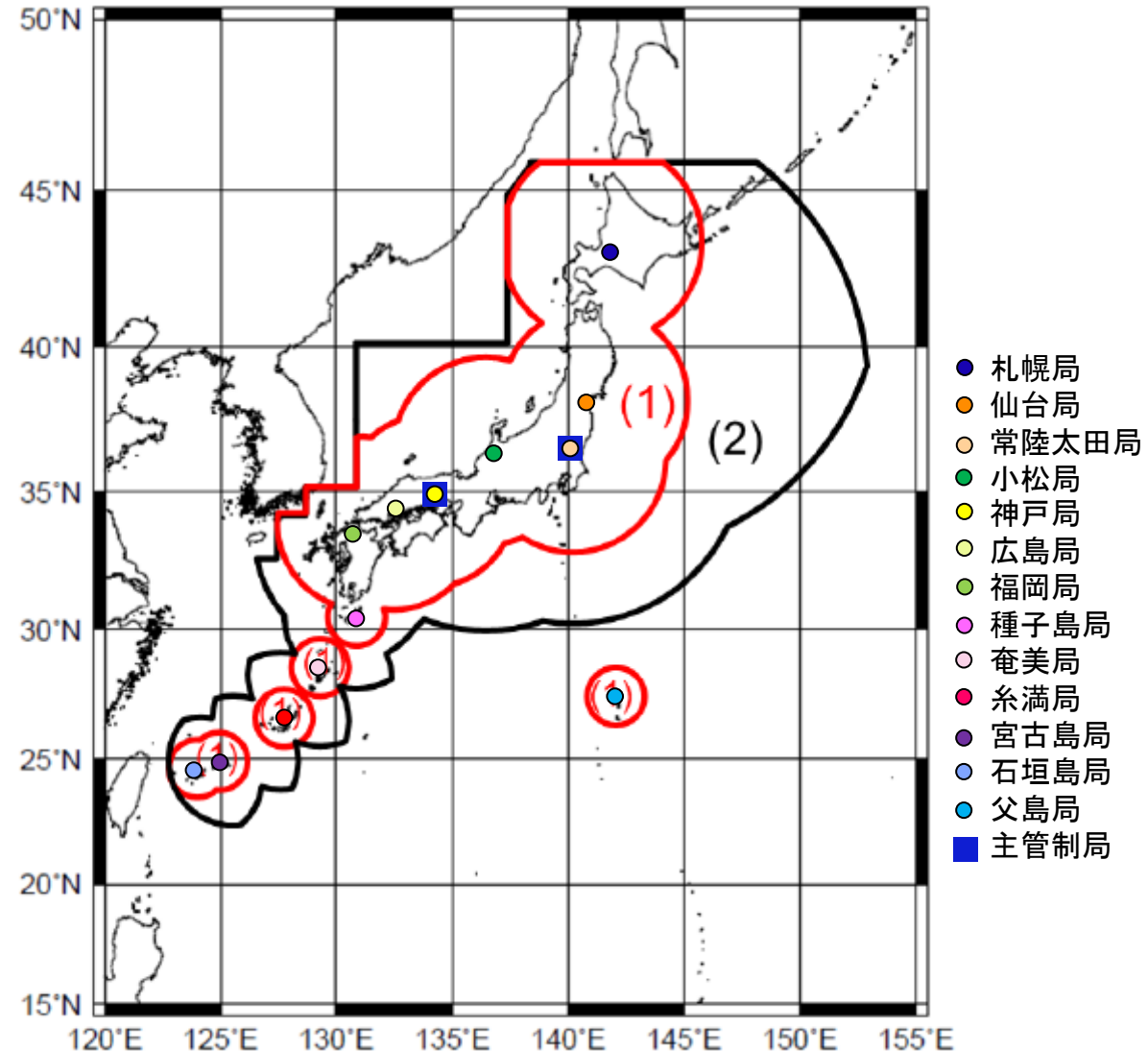
■ 主管制局

サブメータ基準局より収集したデータをもとに
補強情報を作成し、衛星アップロード機能を持つ
装置へ送信する。
冗長性の観点から、2地点に配置される。

■ サービス範囲

右図の赤枠の範囲で水平精度1mレベルの
サービスを提供。

SLASの基準局 配置とサービス範囲



5. SLASの活用事例

サービス開始から、SLASを活用した企画や製品を多くの方にご利用いただいている。

■企画

- ・バーチャルトライアスロン大会(琵琶湖)
出展：[報告] 琵琶湖のトライアスロン大会でSLASを活用した実証実験を実施(<https://qzss.go.jp/>)
- ・東京五輪セーリング大会支援
出展：みちびきを活用し、東京オリンピックのセーリング競技運営を支援(<https://qzss.go.jp/>)

■製品

- ①ドライブレコーダー
- ②船舶用ナビゲーション
- ③ゴルフナビ
- ④歩行者支援
- ⑤ドローン



①ドライブレコーダー (AR-35EC)
(<https://www.cellstar.co.jp>)



②船舶用ナビゲーション (GP-170)
(<https://www.furuno.com/jp>)



③ゴルフナビ (THE GOLF WATCH GS501) (<https://qzss.go.jp/>)



④歩行者支援(あしらせ2)
(<https://www.ashirase.com/>)

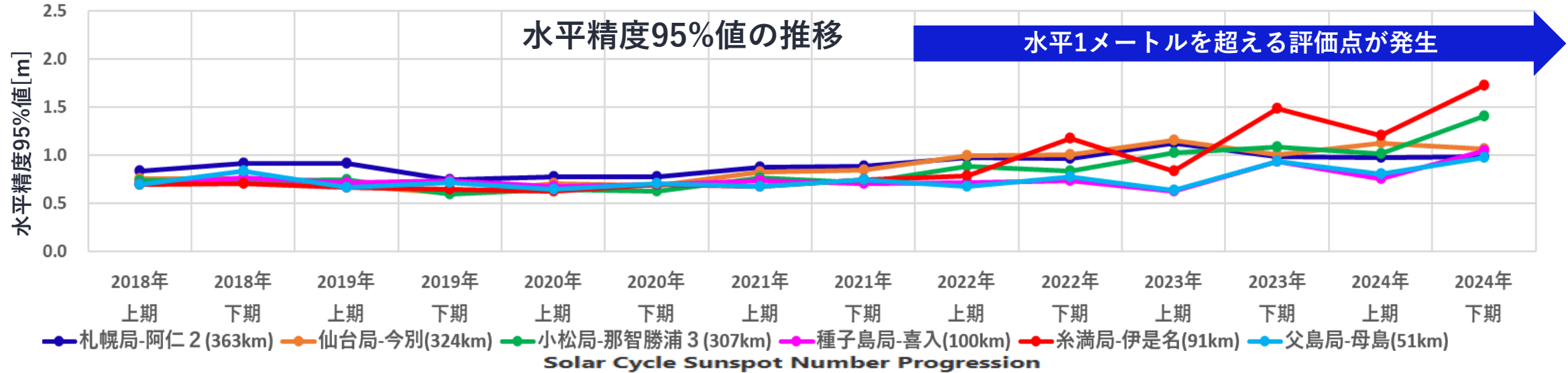


⑤ドローン (SOTEN(蒼天))
(<https://qzss.go.jp/>)

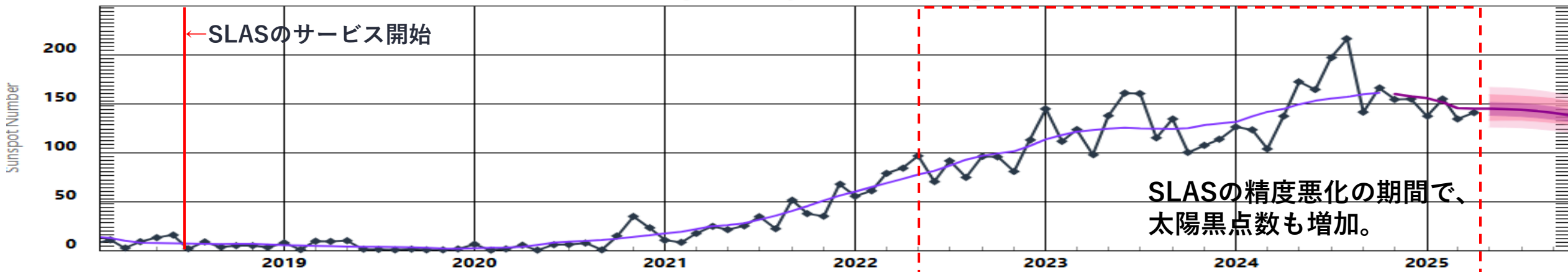
6. SLAS精度と太陽活動

SLAS精度と太陽活動(黒点数)との比較

精度と電離圏状態に影響を与える太陽活動(黒点数)を比較。太陽活動の活発に伴う精度悪化を確認。



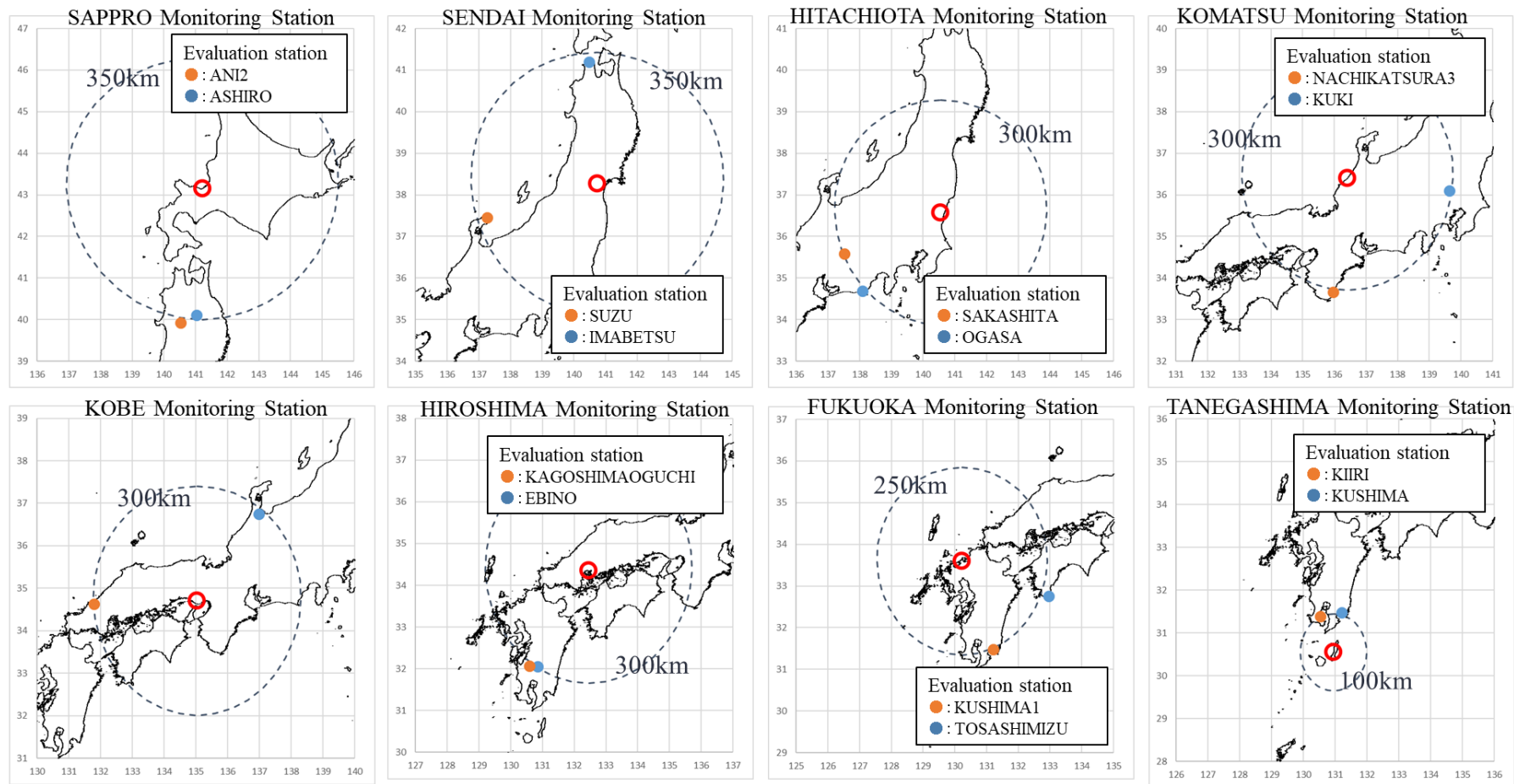
Solar Cycle Sunspot Number Progression



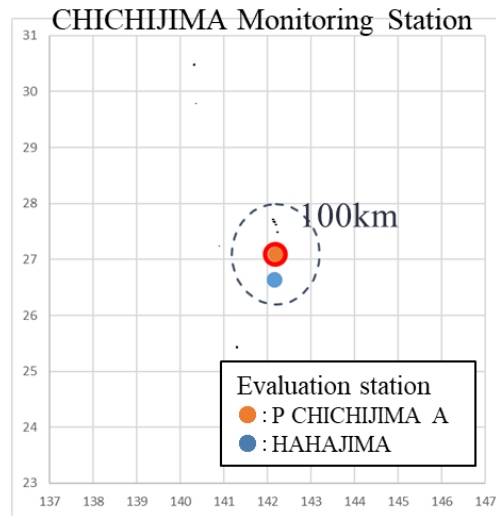
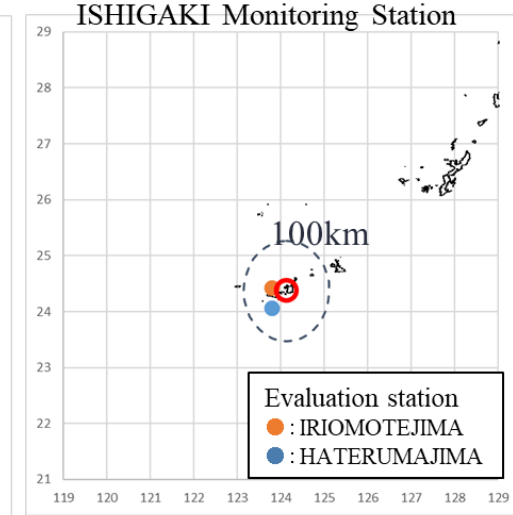
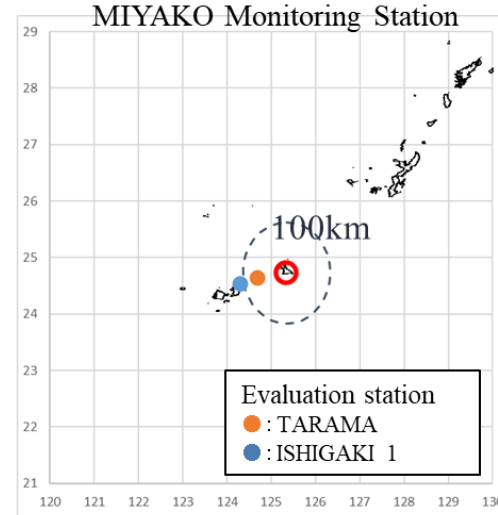
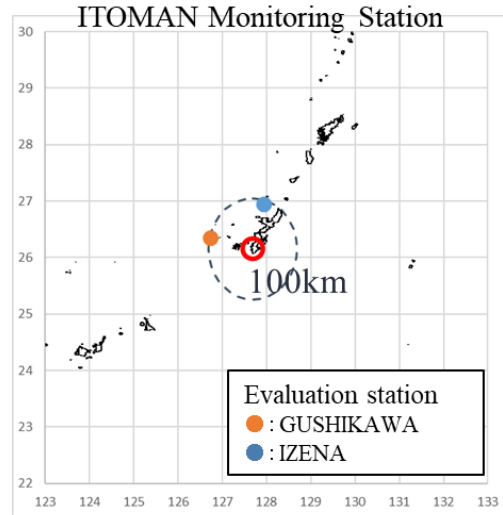
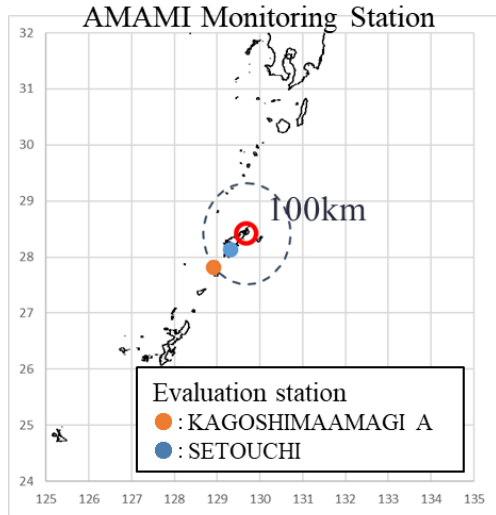
出展：NOAA / NWS Space Weather Prediction Center(<https://www.swpc.noaa.gov/>)

7. 測位誤差の定点観測

基準局ごとに2評価点、計26評価点（13基準局×2評価点）でSLAS測位精度の定点観測を行っている
評価点としては、各基準局のサービス範囲端付近の電子基準点を活用。



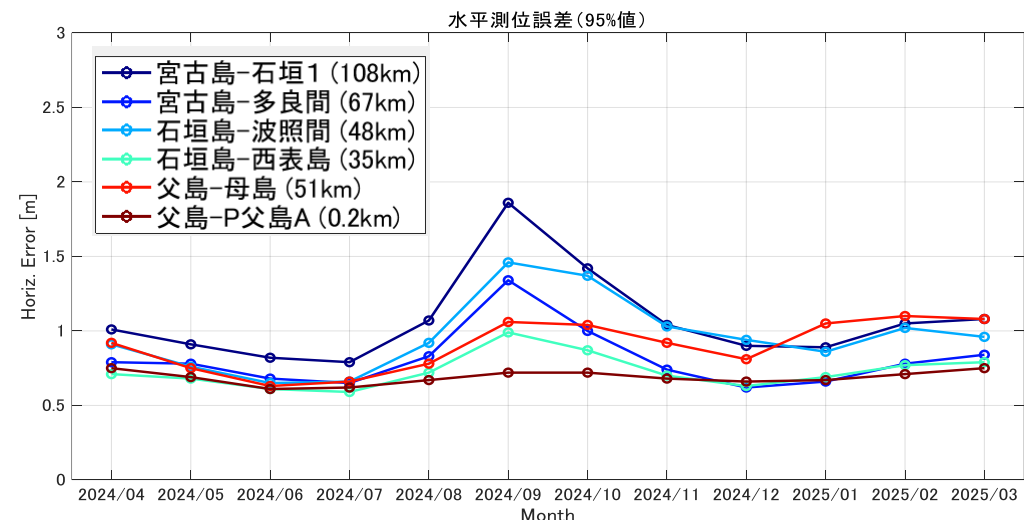
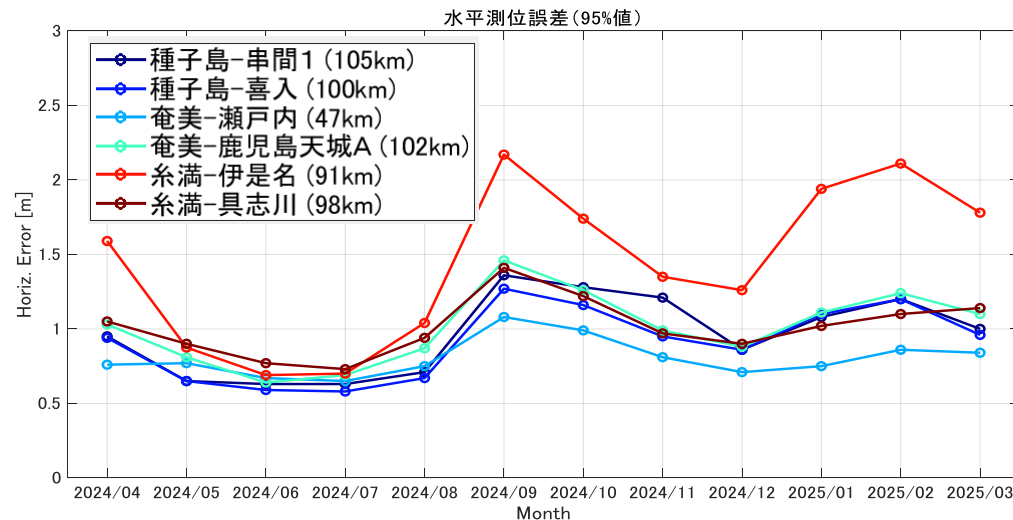
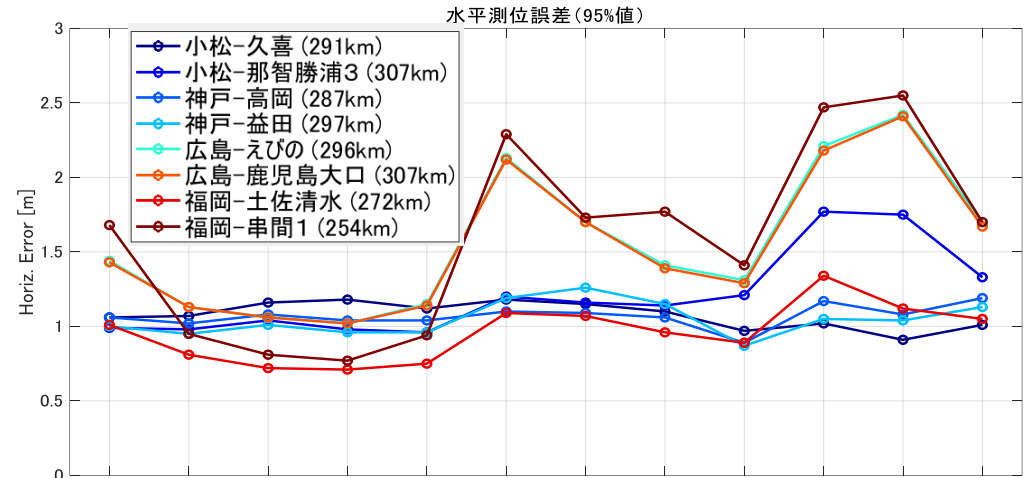
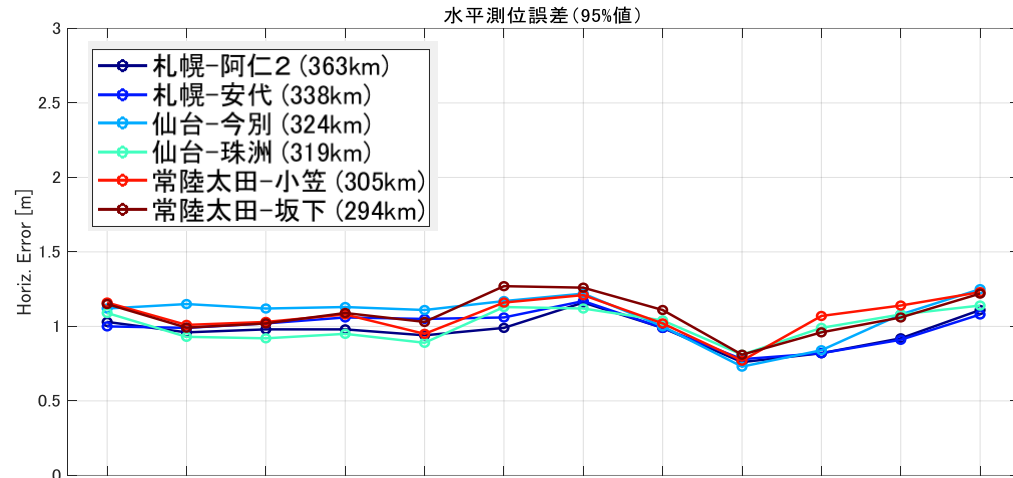
7. 測位誤差の定点観測 (つづき)



7. 測位誤差の定点観測

2024年度 月次水平測位精度 (95パーセンタイル)

- 1メートルを超える測位誤差が多数。秋（9~10月）、春（1~3月）に誤差の増加が大きい傾向
- 特に、南北に基線長の評価点（広島-えびの、広島-鹿児島大口、福岡-串間1、小松-那智勝浦3）で誤差の増加が顕著
- 南西諸島では基線長が100km程度であっても、1.5~2.0m程度の誤差が生じることがある。

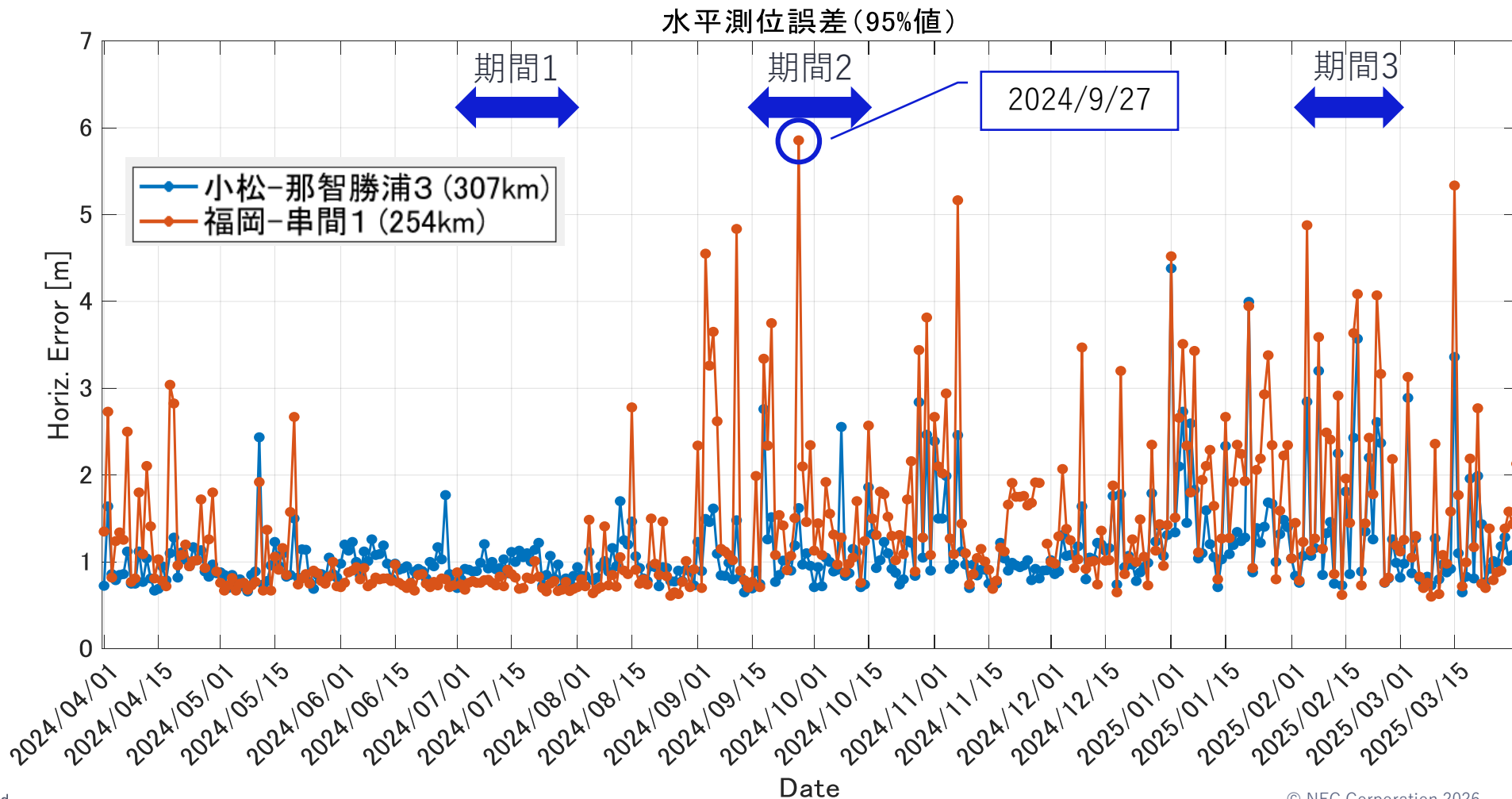
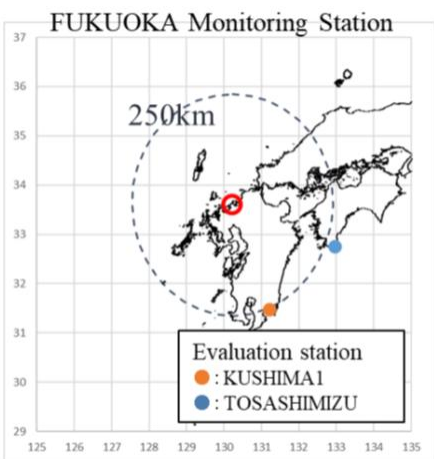
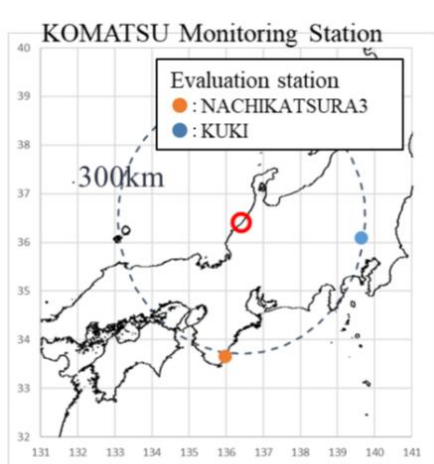


注) 本評価は、各基準局のカバレッジ境界 (端部) で実施しています。実運用では、ユーザは通常、最寄りの基準局から配信される補強情報を利用します。そのため、本評価結果は実際のユーザが経験する誤差よりも、原則として大きめに算出されます。

8. 事例1：南北の長基線

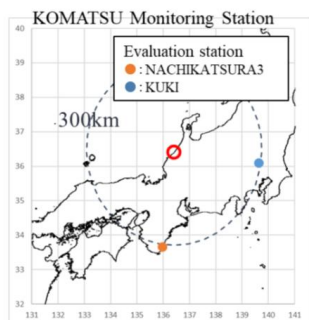
(1) 日々の95%値（水平）

- 南北の基線長が長く、精度の低下が顕著であった評価点 那智勝浦3と串間1に着目
- 1m程度の精度を達成している時期と、精度が著しく低下している時期が存在
期間1、期間2、期間3の基準局-評価点間の電離圏遅延量差を後述



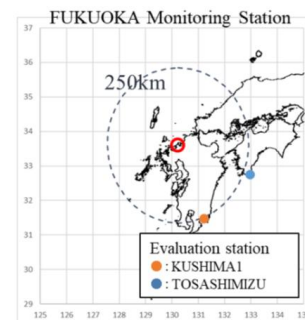
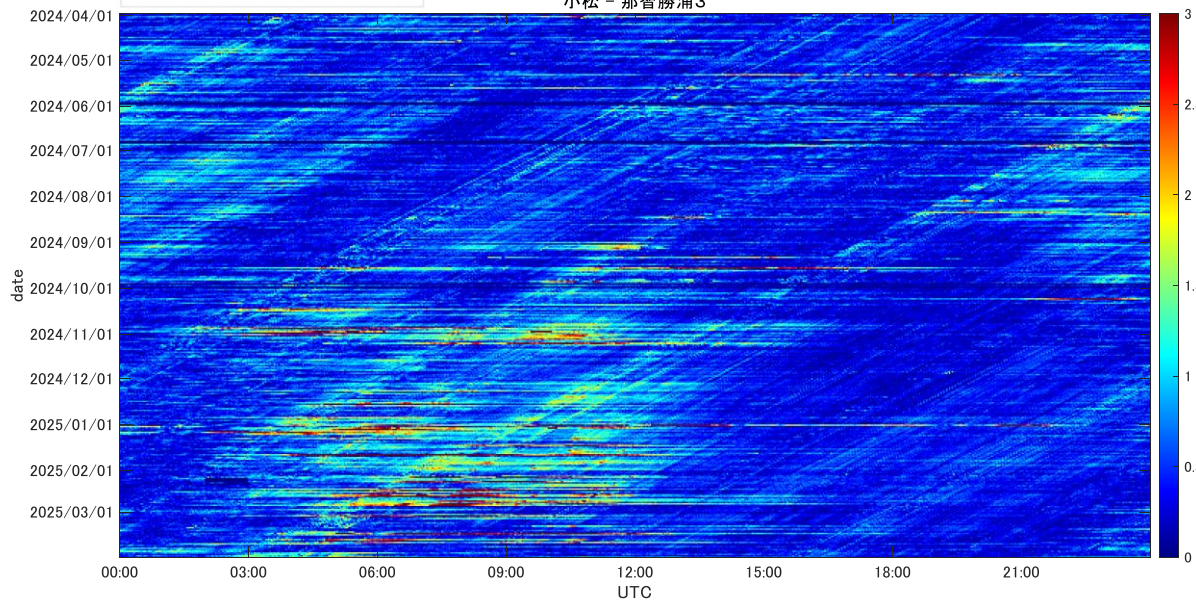
8. 事例 1：南の長基線 (2)1年間の測位誤差の推移

- 季節変化：5~8月は精度が安定し、9~10月・1~3月は悪化する傾向。
- 日内変化：UTC 3:00~12:00 (JST 12:00~21:00) で誤差が増大し、UTC 17:00 (JST 02:00) 付近以降は安定する傾向。
- 評価点位置：より南に位置している串間1では、那智勝浦3よりも精度低下が顕著。



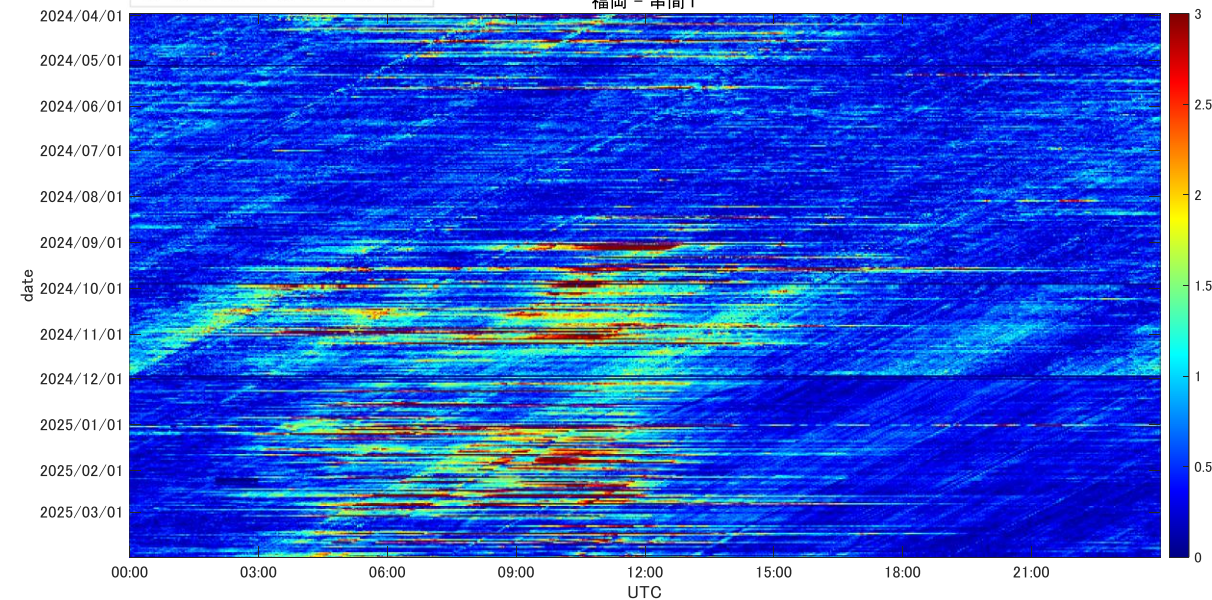
小松-那智勝浦3

水平測位誤差 [m]
小松 - 那智勝浦3



福岡-串間1

水平測位誤差 [m]
福岡 - 串間1



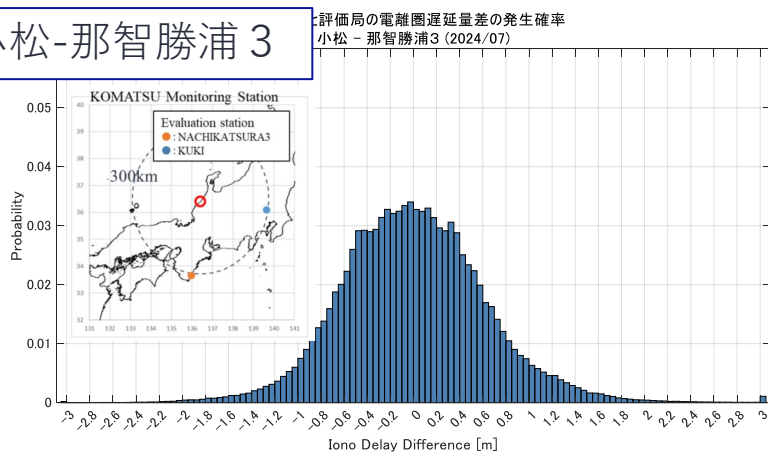
8. 事例1：南北の長基線

(3) 基準局-評価点間の電離圏遅延量差の確率分布

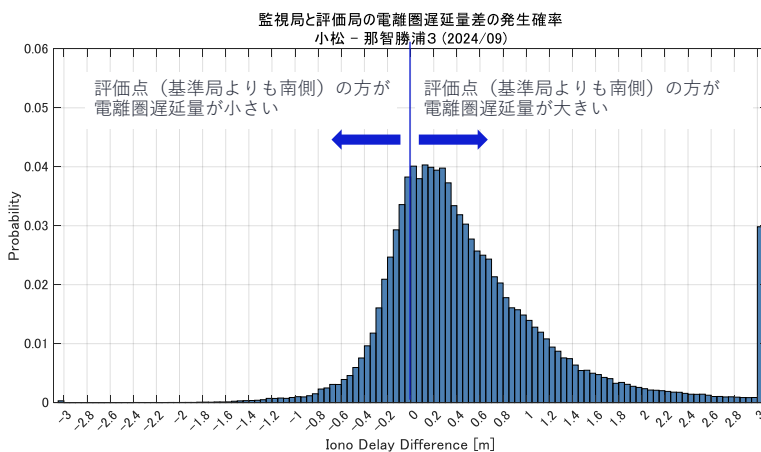
- 精度が安定していた期間1では概ね平均0で、極端に大きな遅延量差も観測されていない。→ DGPS方式が有効
- 精度が低下していた期間2および期間3では、遅延量差がプラス側に偏って分布（基準局<評価点）し、3m以上の遅延量差が発生するケースも見受けられる。→ 南の方が遅延量が大きいことを示唆。また、DGPS方式では十分な補正が困難。

期間1：2024年7月

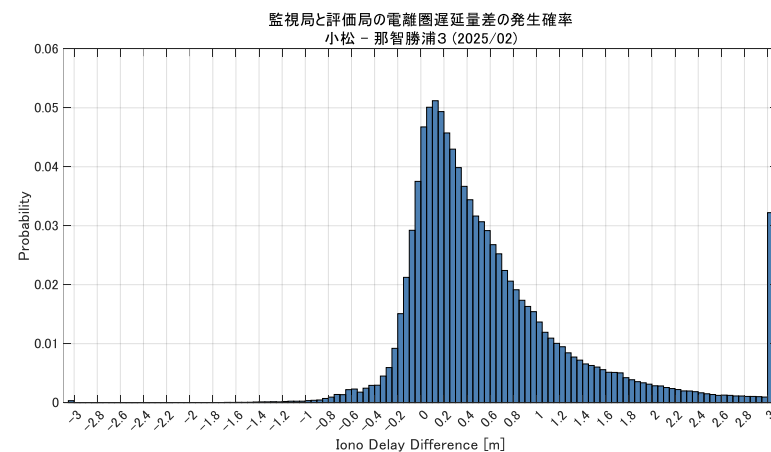
小松-那智勝浦3



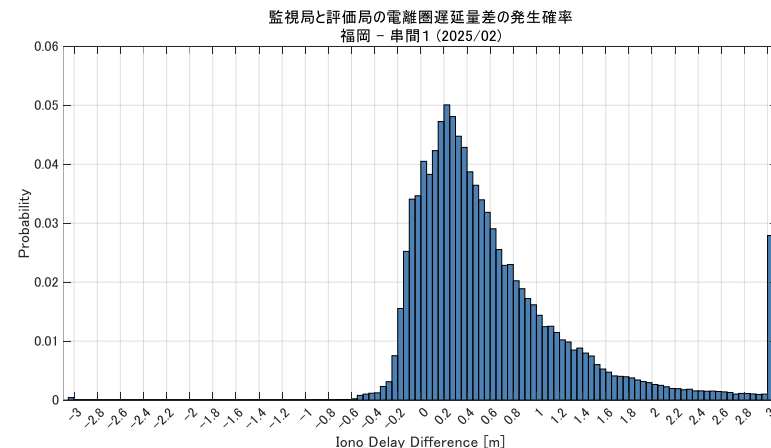
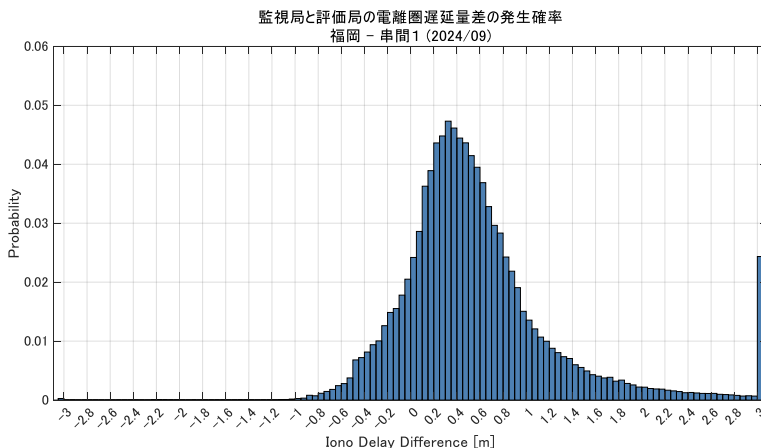
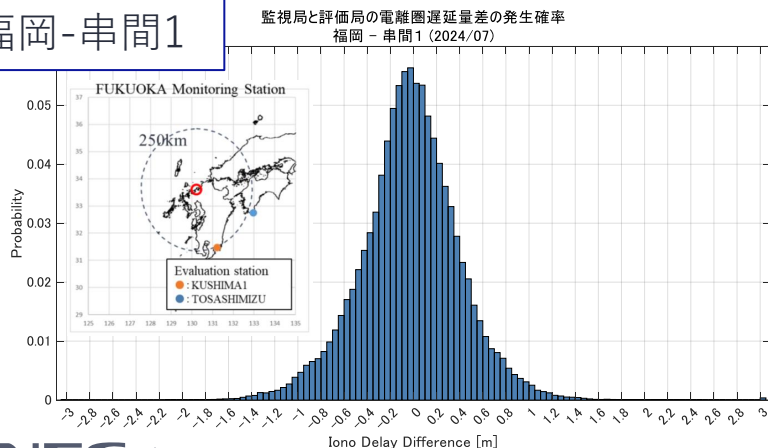
期間2：2024年9月



期間3：2025年2月



福岡-串間1



8. 事例1：南北の長基線

(4) 基準局-評価点間の電離圏遅延量差の累積確率分布

- 期間1では累積確率の立ち上がりが速く、95%値はおよそ0.9mから1.3m程度。
 - 期間2および期間3では、累積確率が95%に達するのはおよそ2.4mから2.5m程度。
- ※水平測位精度1mを達成の前提としている電離圏遅延量差の95%値は、約65cm

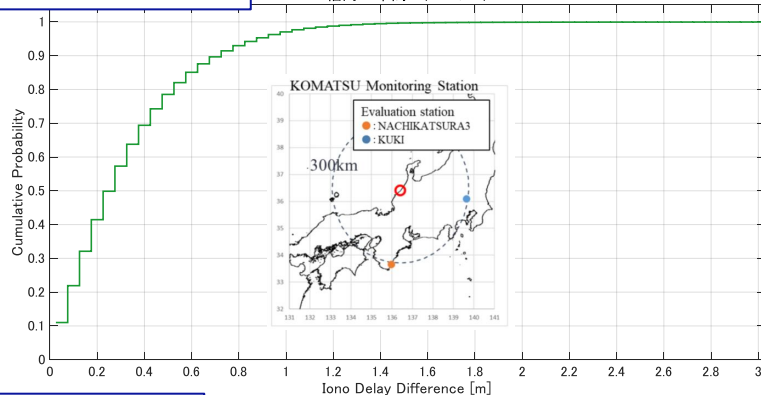
期間1：2024年7月

期間2：2024年9月

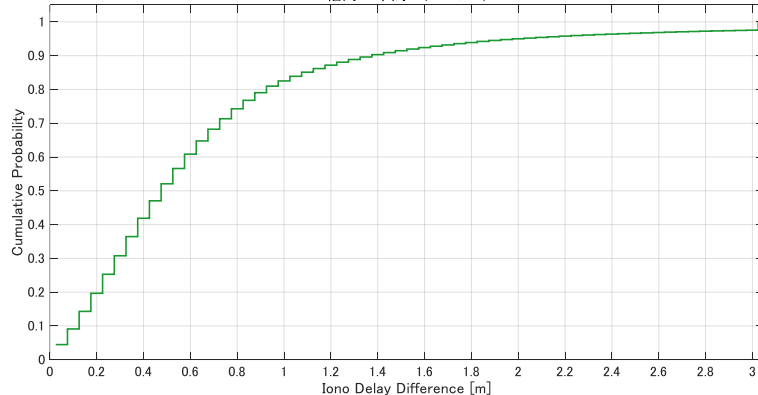
期間3：2025年2月

小松-那智勝浦3

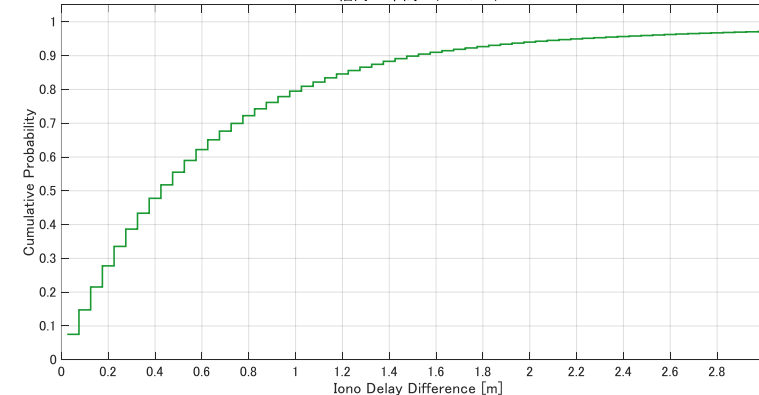
監視局と評価局の電離圏遅延量差の累積確率
福岡 - 串間1 (2024/07)



監視局と評価局の電離圏遅延量差の累積確率
福岡 - 串間1 (2024/09)

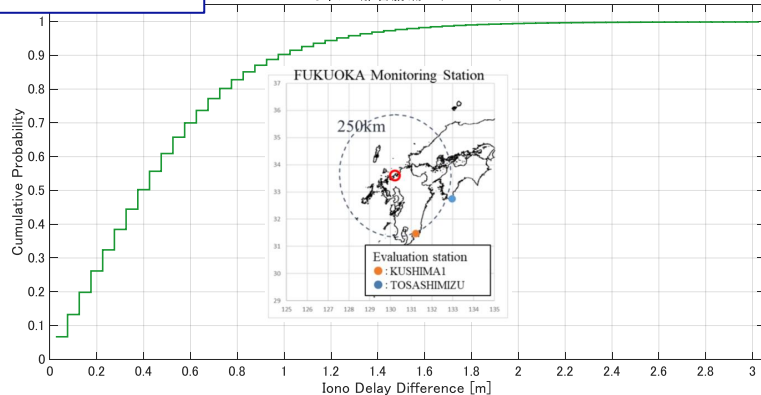


監視局と評価局の電離圏遅延量差の累積確率
福岡 - 串間1 (2025/02)

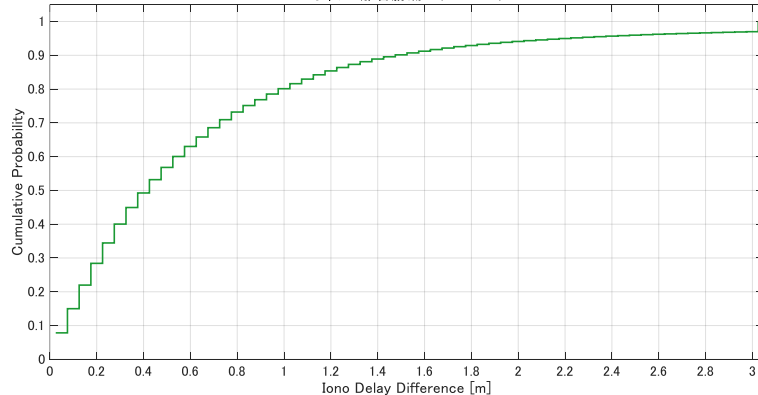


福岡-串間1

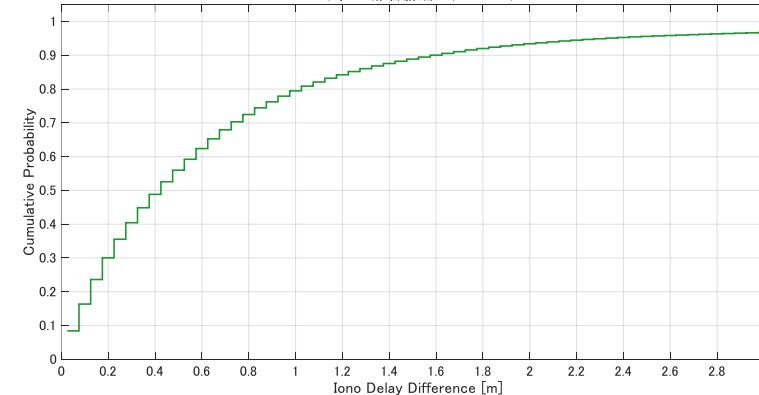
監視局と評価局の電離圏遅延量差の累積確率
小松 - 那智勝浦3 (2024/07)



監視局と評価局の電離圏遅延量差の累積確率
小松 - 那智勝浦3 (2024/09)



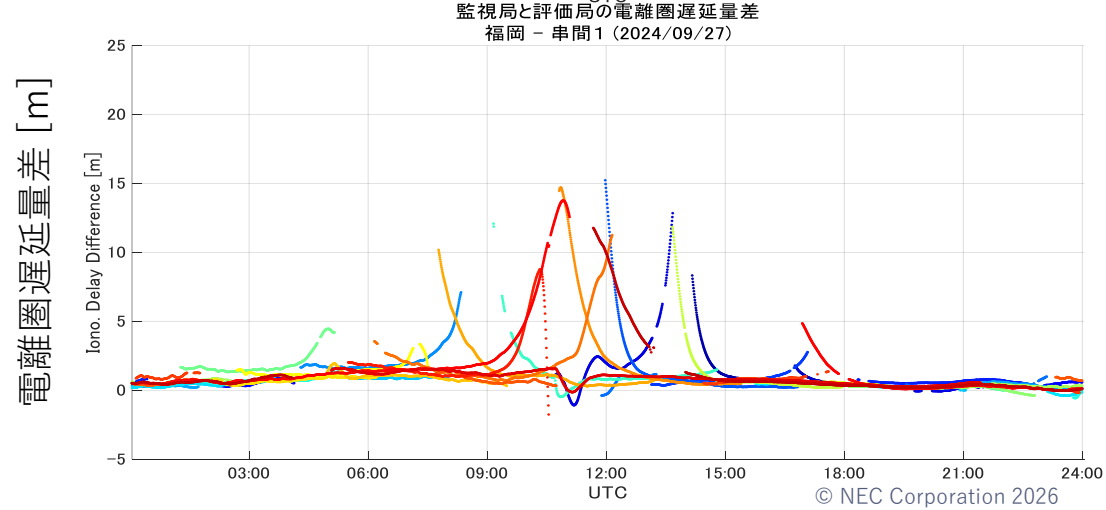
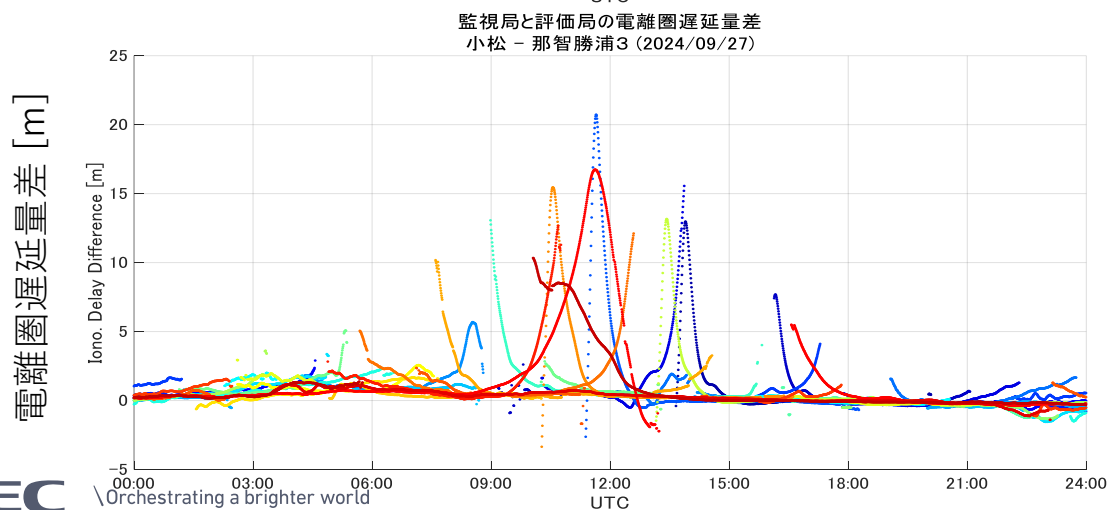
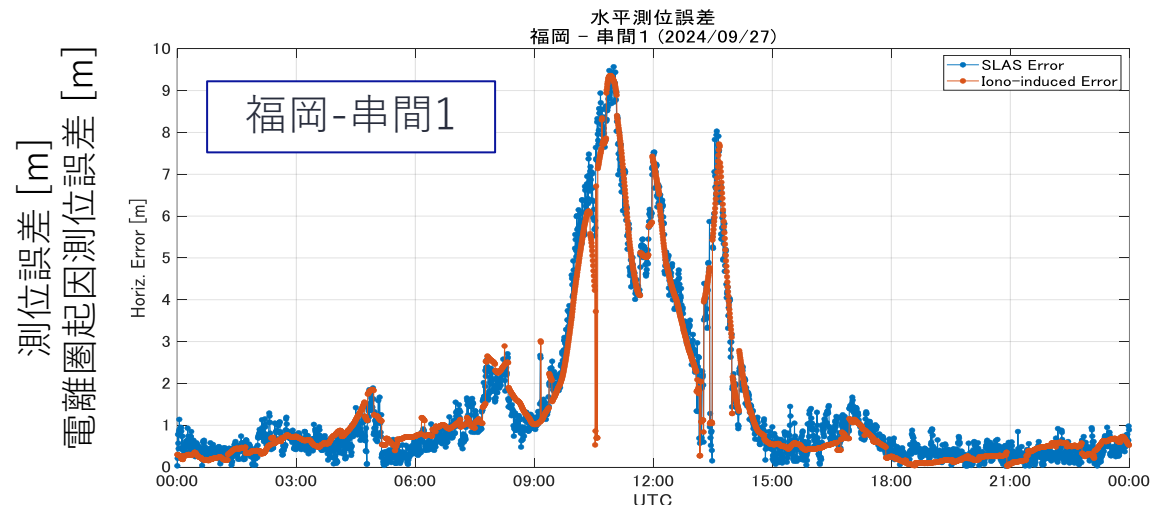
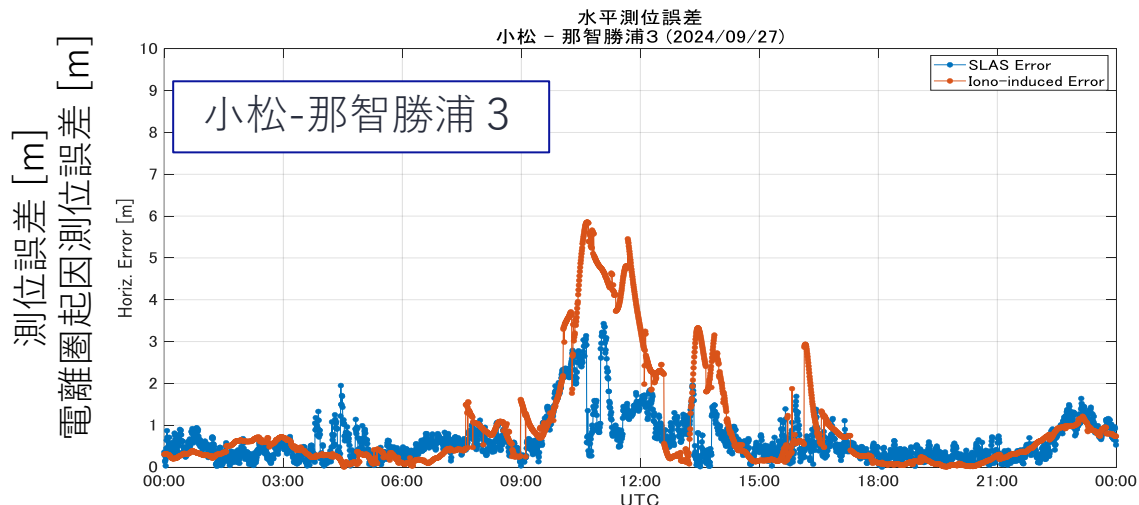
監視局と評価局の電離圏遅延量差の累積確率
小松 - 那智勝浦3 (2025/02)



8. 事例 1：南北の長基線

(5) 測位誤差、電離圏起因測位誤差、電離圏遅延量差

- 基準局-評価点間の電離圏遅延量差から、電離圏起因の測位誤差を算出。測位誤差の大部分が電離圏に起因していることが確認できる。
- 測位誤差が増大している時間帯において、電離圏遅延量差が増加。

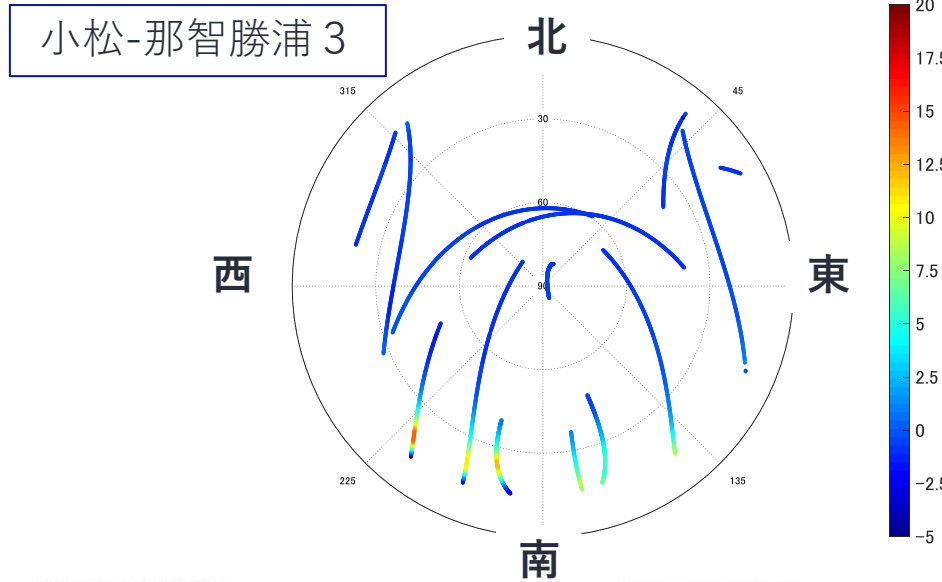


8. 事例1：南北の長基線

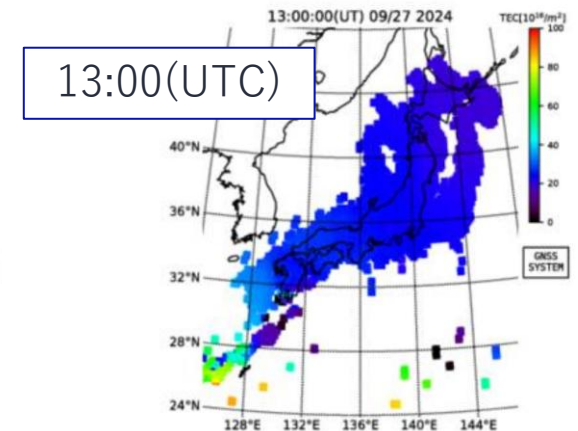
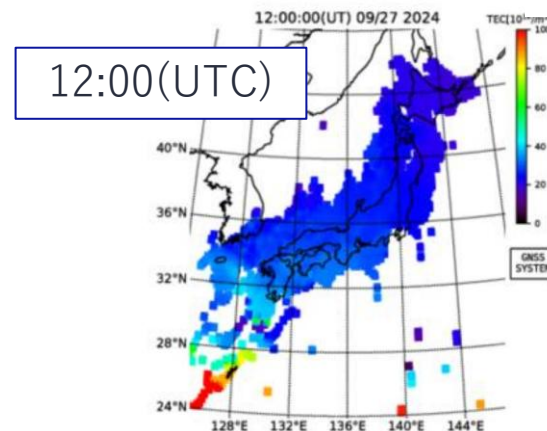
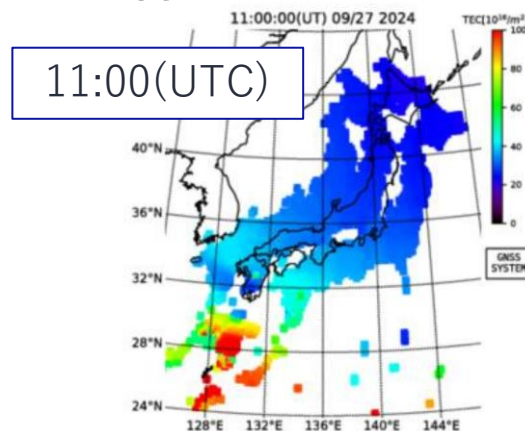
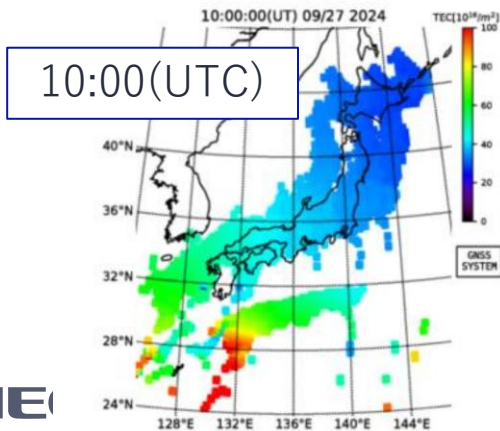
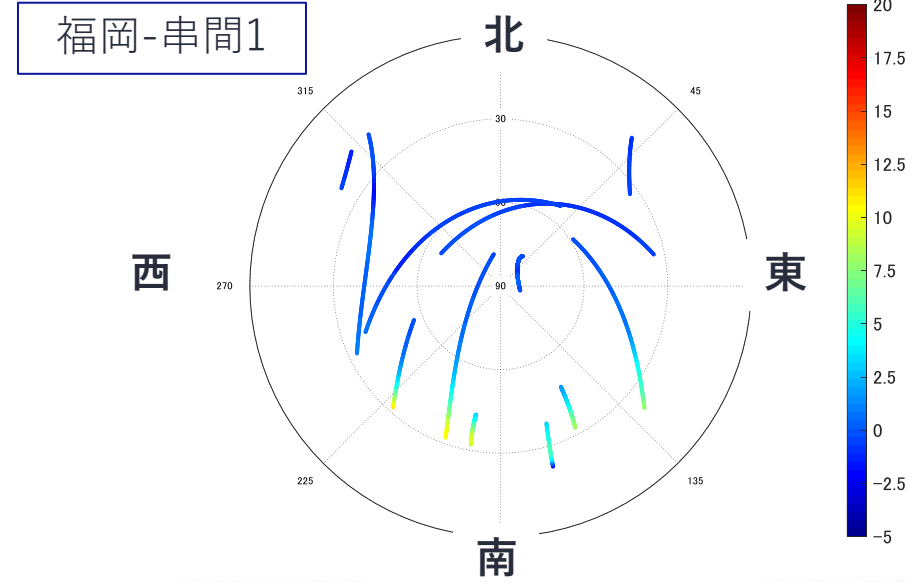
(6) 遅延量差のスカイプロット、TECマップ (2024/9/27 10:00-13:00)

- 南方の低仰角の衛星で電離圏遅延量差が増大している。
- TECマップでも南方でTECが増大していることが確認できる。

監視局と評価局の電離圏遅延量差
小松 - 那智勝浦3, [10:00-13:00]

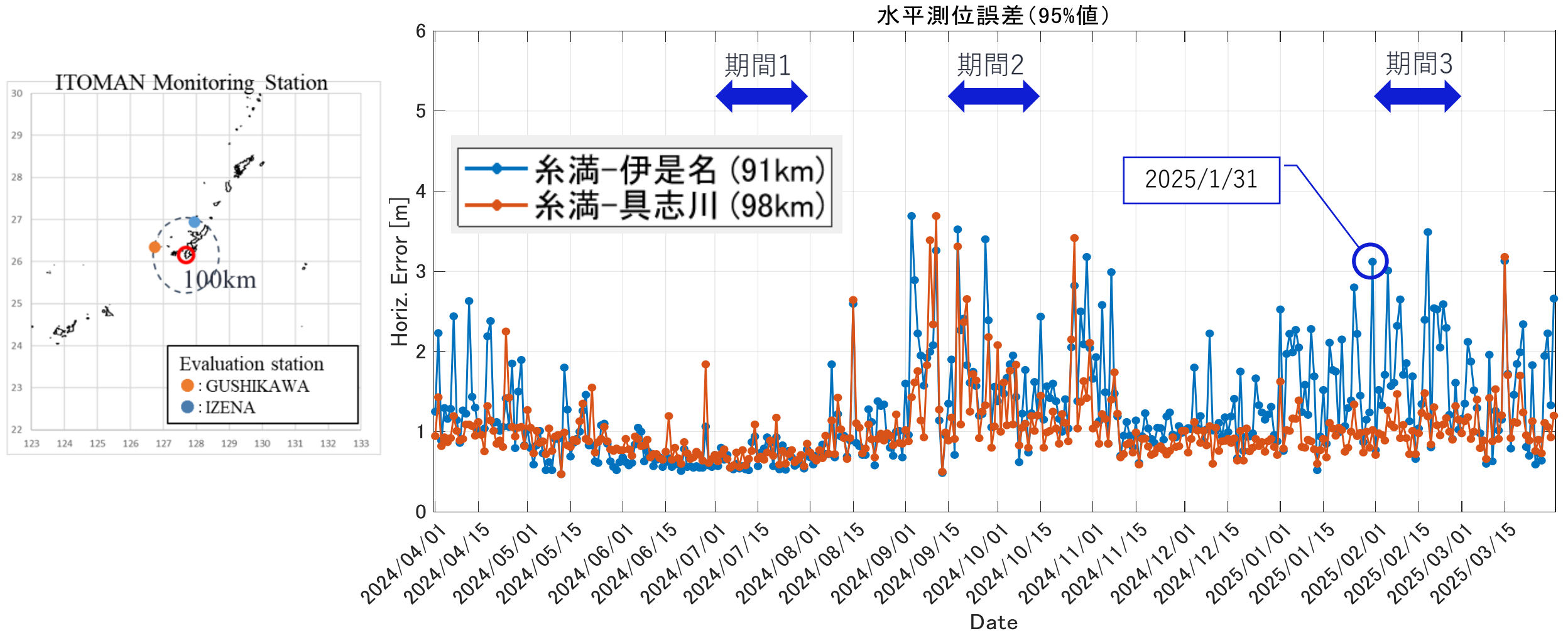


監視局と評価局の電離圏遅延量差
福岡 - 串間1, [10:00-13:00]



9. 事例2：南北基線と東西基線 (1)日々の95%値（水平）

- 測位精度の季節変化は、事例1と同様
- 精度低下時、南北基線（糸満-伊是名）の方が、東西基線（糸満-具志川）よりも誤差の増加が顕著

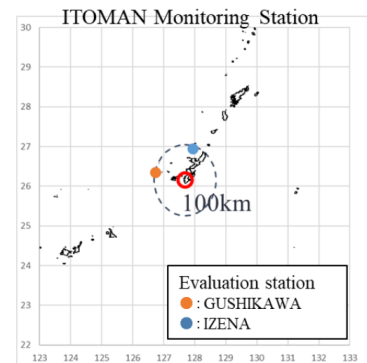


9. 事例2：南北基線と東西基線

(2) 半年間の測位誤差の推移

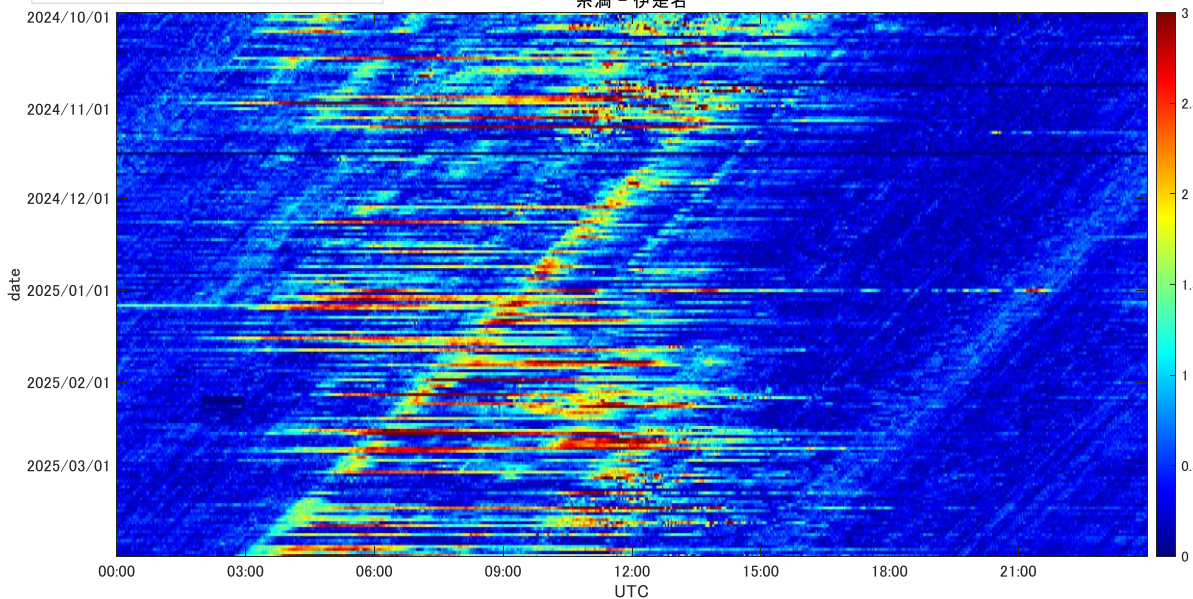
注：糸満-具志川の2024年度上期分のデータが未取得のため、下期分のみをプロットしている。

- 期間を通じてを通じて、東西基線の糸満-具志川は安定した精度。
- 南北基線の糸満-伊是名ではUTC 3:00~12:00 (JST 12:00~21:00) の時間帯に精度が低下する傾向。
(事例1と同様)



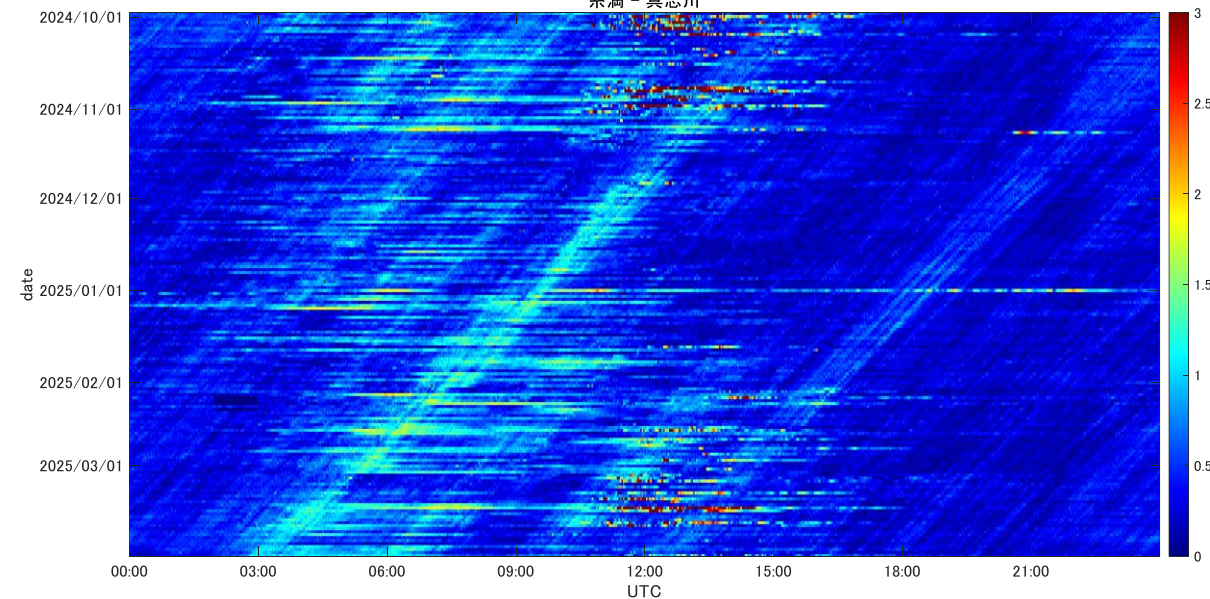
糸満-伊是名

水平測位誤差 [m]
糸満 - 伊是名



糸満-具志川

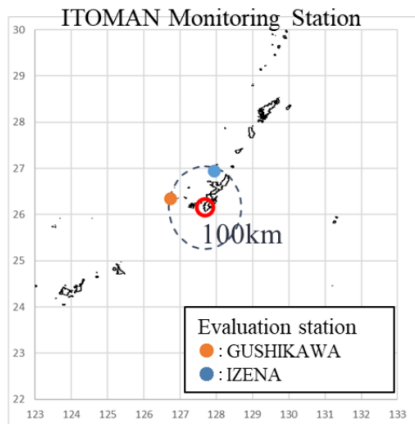
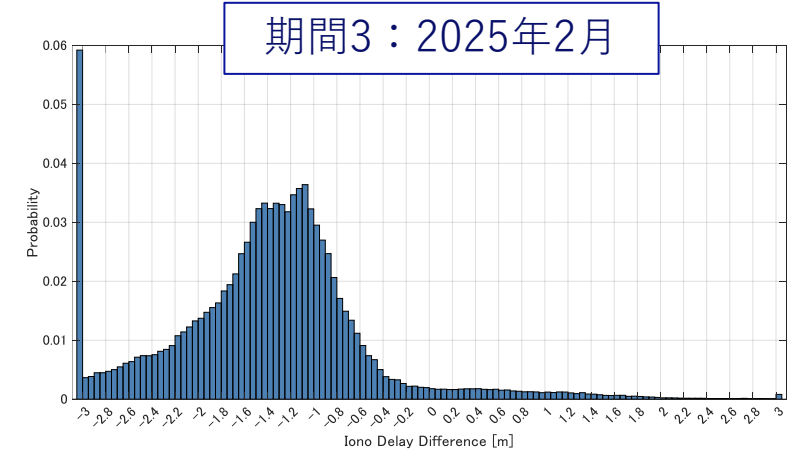
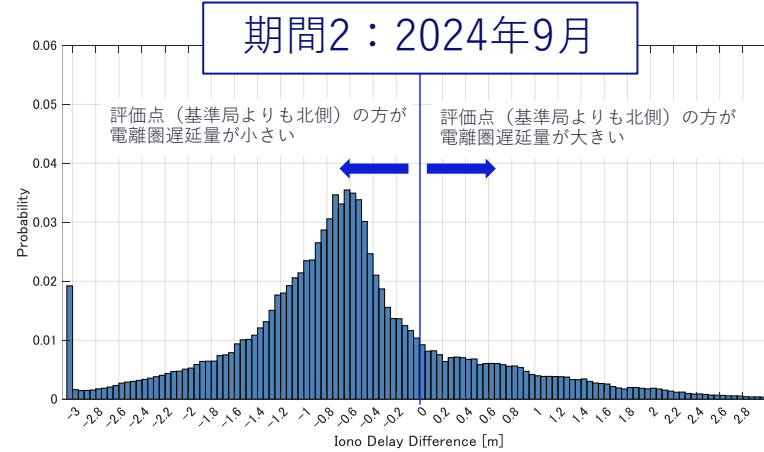
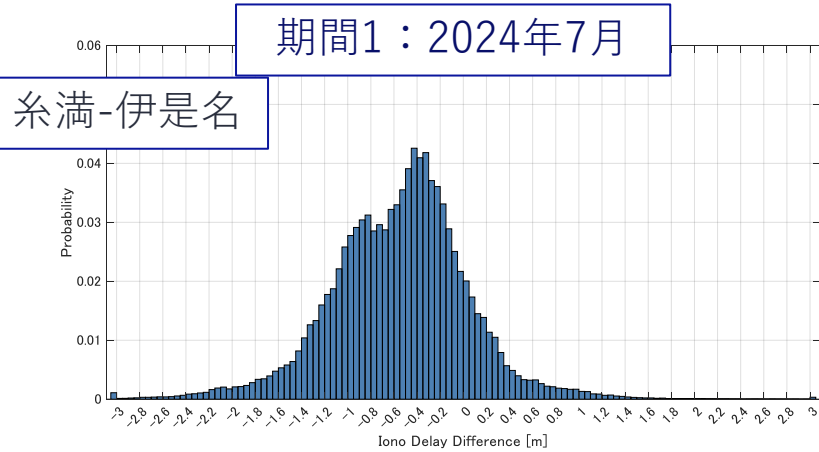
水平測位誤差 [m]
糸満 - 具志川



9. 事例2：南北基線と東西基線

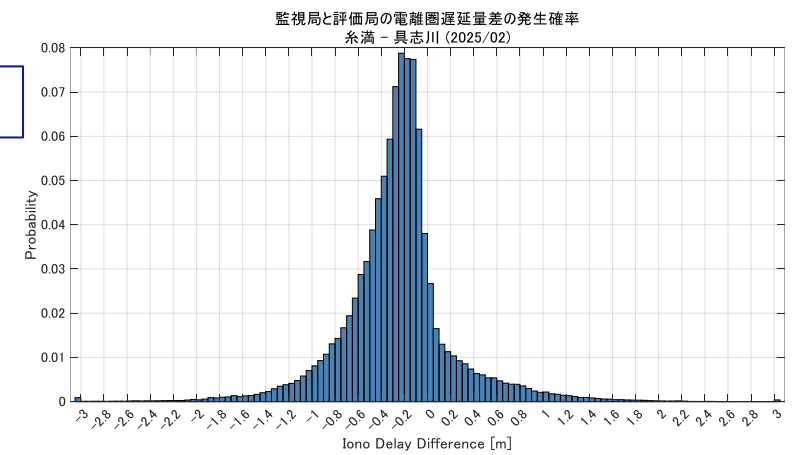
(3) 基準局-評価点間の電離圏遅延量差の確率分布

- 南北基線の糸満-伊是名では、遅延量差がマイナス側に偏って分布（基準局 > 評価点）。南側の方が電離圏遅延量が大きいことが読み取れる。
- 東西基線の糸満具志川では、最頻値が西側に偏る傾向はあるものの、糸満-伊是名基線と比べてゼロ付近に集中。
- これらの結果から、東西方向の勾配よりも南北方向の勾配の方が大きいことが読み取れる。



糸満-具志川

糸満-具志川の期間1、期間2のデータは未取得



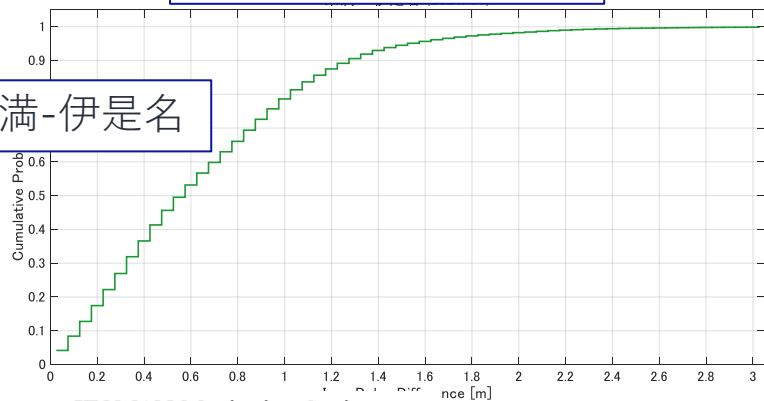
9. 事例2：南北基線と東西基線

(4) 基準局-評価点間の電離圏遅延量差の累積確率分布

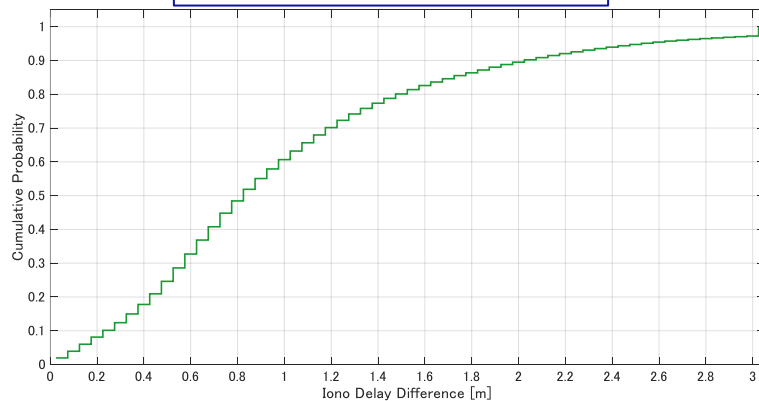
- 南北基線の糸満-伊是名では期間1でも、事例1と比較して累積確率の立ち上がりが遅く、95%値は約1.6m程度。期間2および期間3では、さらに立ち上がりが遅く、期間2で95%値は約2.6m程度、期間3では3mでも95%に達しない。
- 東西基線の糸満-具志川では期間3で95%に達するのはおよそ1.4m程度。
※水平測位精度1mを達成の前提としている電離圏遅延量差の95%値は、約65cm。

期間1：2024年7月

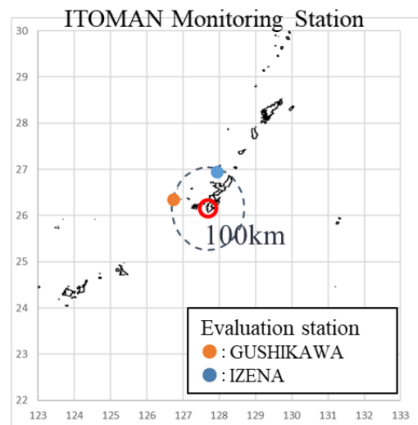
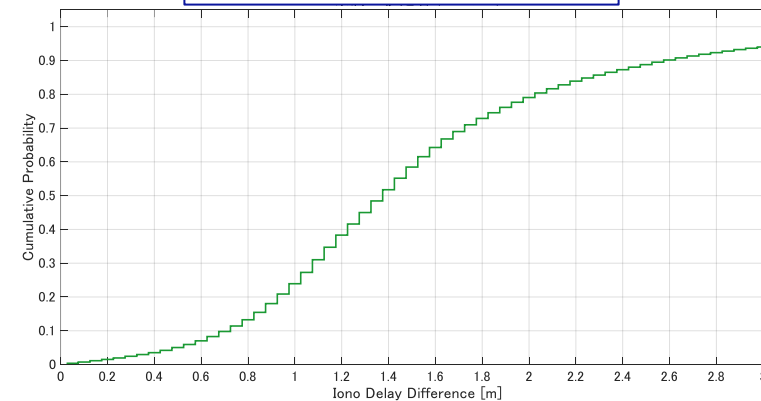
糸満-伊是名



期間2：2024年9月

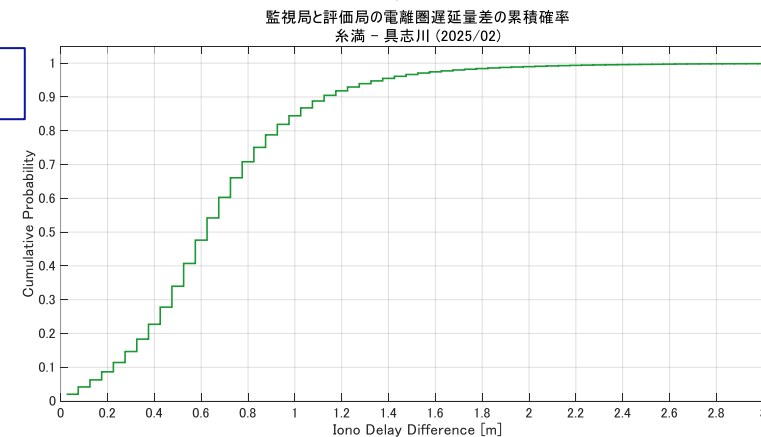


期間3：2025年2月



糸満-具志川

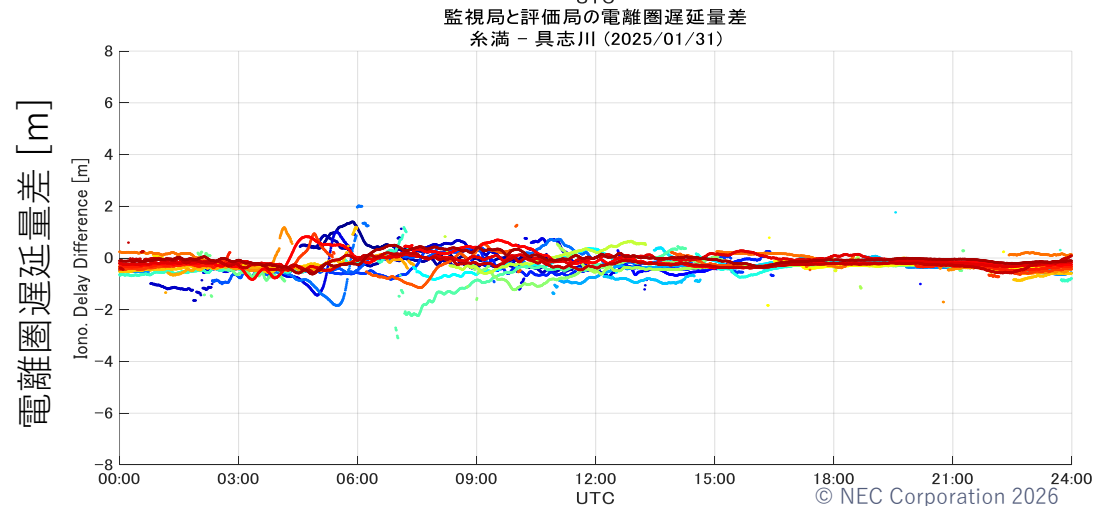
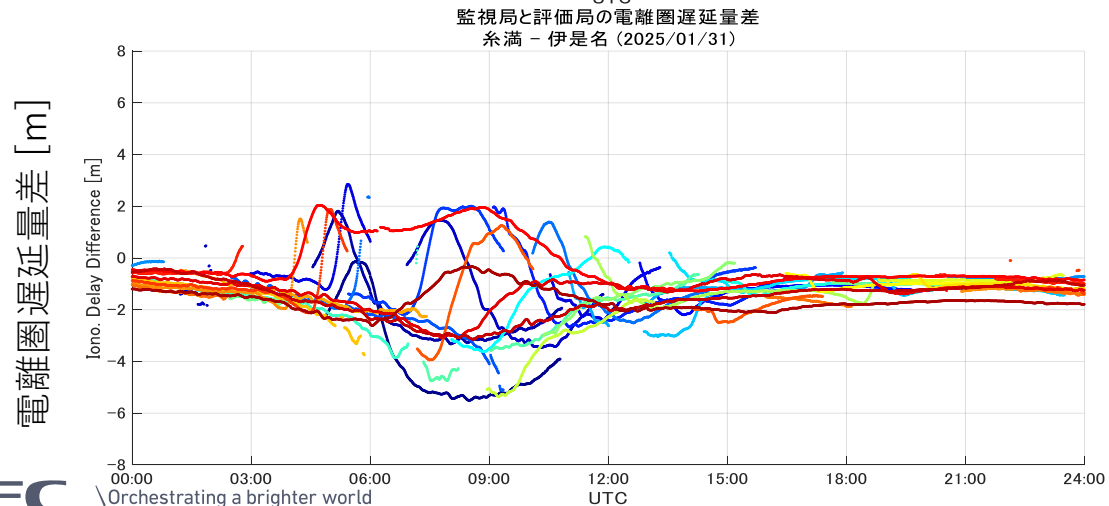
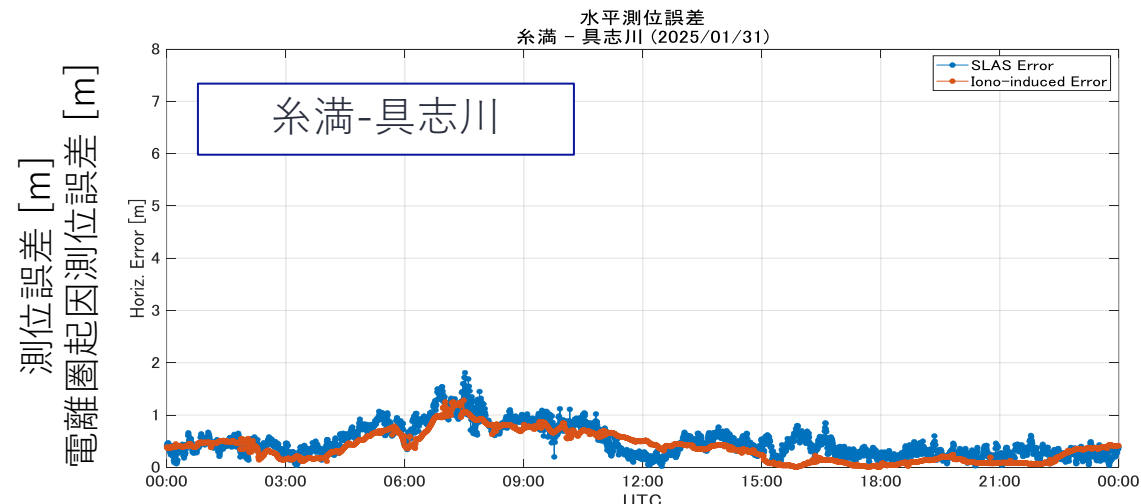
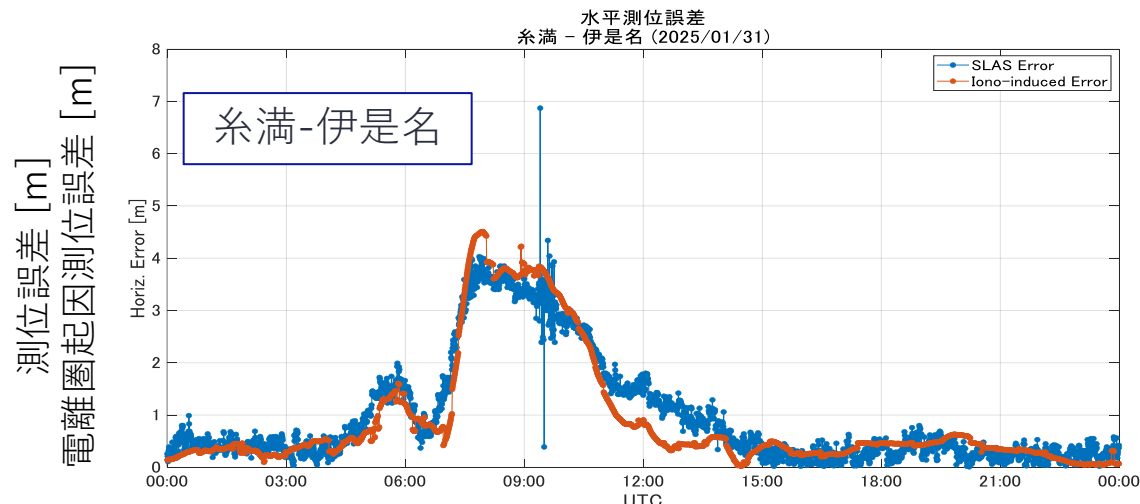
糸満-具志川の期間1、期間2のデータは未取得



9. 事例2：南北基線と東西基線

(5) 測位誤差、電離圏起因測位誤差、電離圏遅延量差

- 測位誤差増大時に電離圏遅延量差も増大。
- 特に糸満-伊是名では電離圏遅延量差の増大が顕著。
- 電離圏遅延量差がプラス側に現れていた事例1とは異なり、本事例では正負両側に存在。



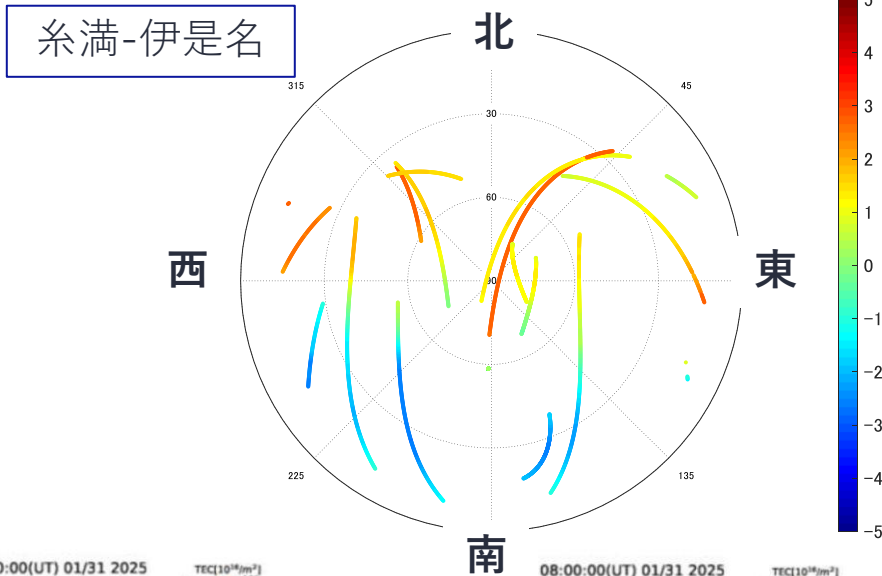
9. 事例2：南北基線と東西基線

(6) スカイプロット、TECマップ

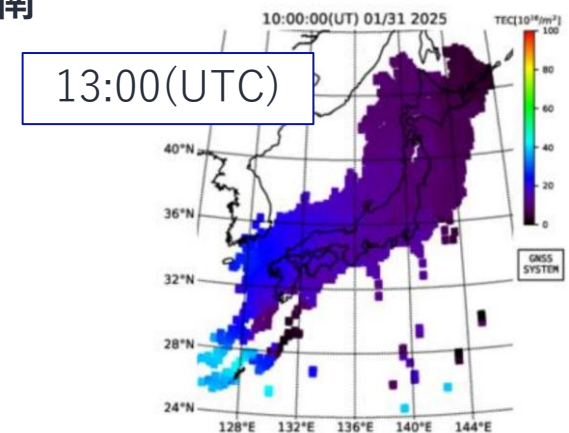
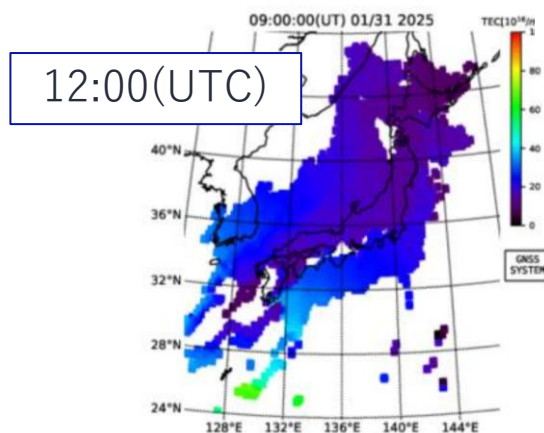
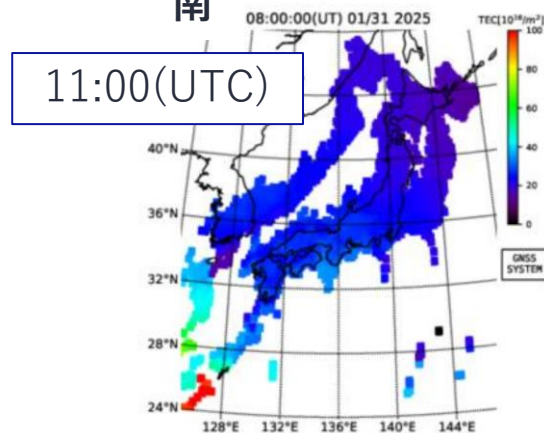
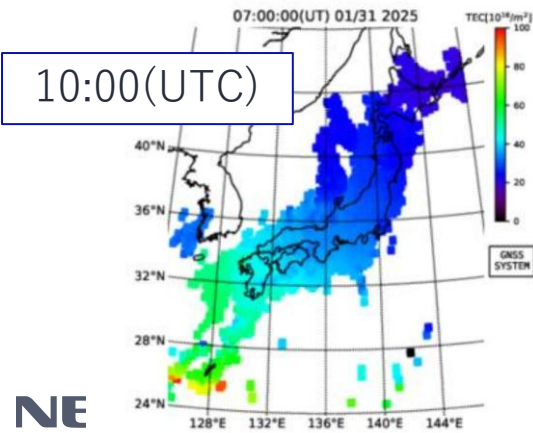
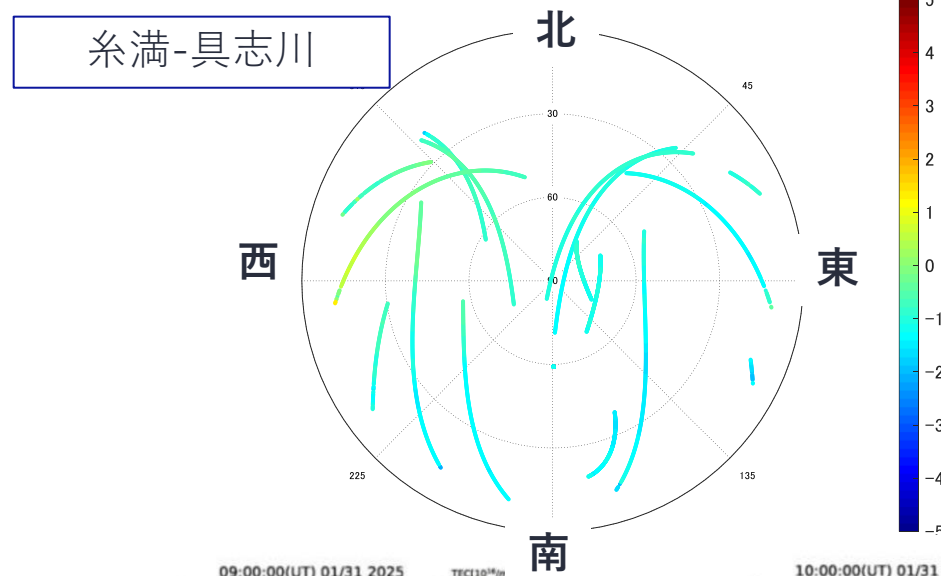
※TECマップはNICT様の宇宙天気ホームページから取得
[GEONET GPS全電子数マップ \(最新24時間、1時間間隔\)](#)

- 糸満-伊是名では高仰角から北側にかけて正の遅延量差が、南側では負の遅延量差が見られ、電離圏勾配が南北方向に谷状になっていることがうかがえる。また、複数の衛星で大きな電離圏遅延量差が発生しており、これが測位誤差増大の要因となっていることが確認できる。

監視局と評価局の電離圏遅延量差
 糸満 - 伊是名, [07:00-10:00]



監視局と評価局の電離圏遅延量差
 糸満 - 具志川, [07:00-10:00]



10. まとめ

- みちびきは、SLASという1周波でサブメータ級の測位を実現するDGPSサービスを提供している。
- 2018年11月のサービス開始以降、安定した測位精度を維持してきたが、太陽活動が活発化してきた2022年以降、測位精度の低下が見られる。
- SLAS精度の定点観測に使用しているデータを活用し、電離圏活動の影響でSLAS測位精度に影響が生じた事例を紹介した。
 - 測位精度の低下と同期して、基準局-評価点間で電離圏遅延量差が増大しており、これが測位精度低下の原因であることを確認した。（事例1、事例2）
 - 南北に基線が長い配置では、南側の低仰角の衛星が電離圏活動の影響を受ける。（事例1）
 - 東西基線と比較して、南北基線の方が電離圏活動の精度への影響が大きい。（事例2）
 - 測位精度には電離圏活動と同様に日内変化、季節変化がみられる。（事例1、事例2）
（測位精度の低下が電離圏活動の影響のため当然ではあるが・・・）

NEC

\Orchestrating a brighter world