

中基線RTKにおける大気 の影響に関する研究

海運ロジスティクス

2024年2月13日

2255013 柳澤亘

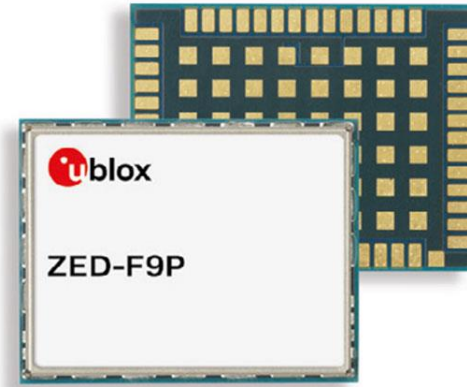
目次

1. 研究背景
2. PPP-ARを利用した電離層・対流圏推定の方法
3. 上述推定値を利用したPPP-RTKの確認
4. 近接電子基準点を利用した中基線RTK
5. 実験結果とまとめ
6. 課題

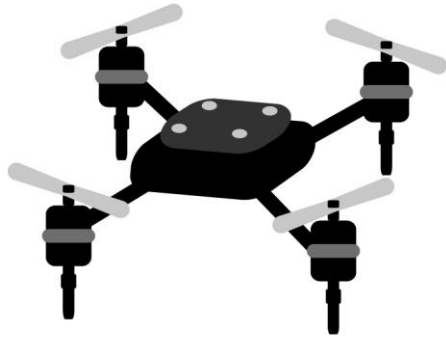
研究背景



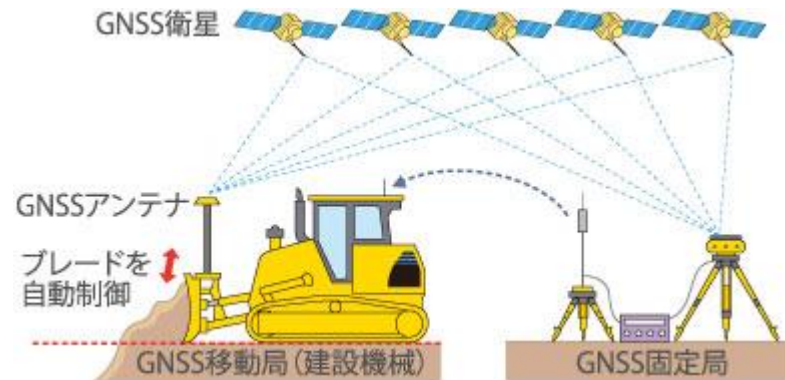
誤差数cmの高い精度
収束時間も瞬時



廉価なGNSS2周波受信機の出現



ドローン



ICT施工



スマート農業

RTKは精度の高さと収束時間の短さから、様々な分野に利活用されている

研究背景

基線長とは基準局受信機位置と移動局受信機位置を結ぶベクトルの長さのことを指す。

RTKは基線長が長くなると様々な原因で性能が大きく劣化するという弱点がある。
特に電離層・対流圏の影響が大きくなると言われている。

RTKの基線を伸ばすことで次に挙げるメリットが考えられる。

- ・性能の劣化が理由で利用が控えられていた分野や、海洋ブイなど基線による制限を緩和することができる。
- ・現在、国土地理院によるGNSS連続観測点は10~30km毎に設置されている。性能を落とさず基線長を延ばすことができると、基準局の数を減らすことができる。

研究背景

・ 太陽活動には周期があり、2024年から2025年にかけて太陽活動が最も活発になると言われている。今後は大気の影響は大きくなると予想されるため、電離層・対流圏誤差を正確に推定することはとても重要である。すでに2022年から2023年にかけて活動が活発になっている。この電離層の影響で**みちびきのcm級サービスであるCLASの性能が安定しないことを研究室でも確認済み**

RTKにおける電離層・対流圏の影響を調査して

**廉価な受信機による中基線のRTKでの
性能（精度やFIX率）の劣化を抑えることを目標とする。**

PPP-ARを利用した電離層・対流圏推定の方法

PPP-ARで電子基準点及び任意に決めたグリッド上の電離層・対流圏遅延量を推定する。PPP-ARでは精密暦、クロック、自身の精密位置を用いて、**高精度に各衛星の電離層と対流圏の遅延量を推定することができる。**

上記で推定した電離層・対流圏が正しいかを検証するためにPPP-RTK（CLAS相当）を実施した。PPP-RTKを行うために、客員研究員であったDr. Yizeが開発したプログラムを利用した。

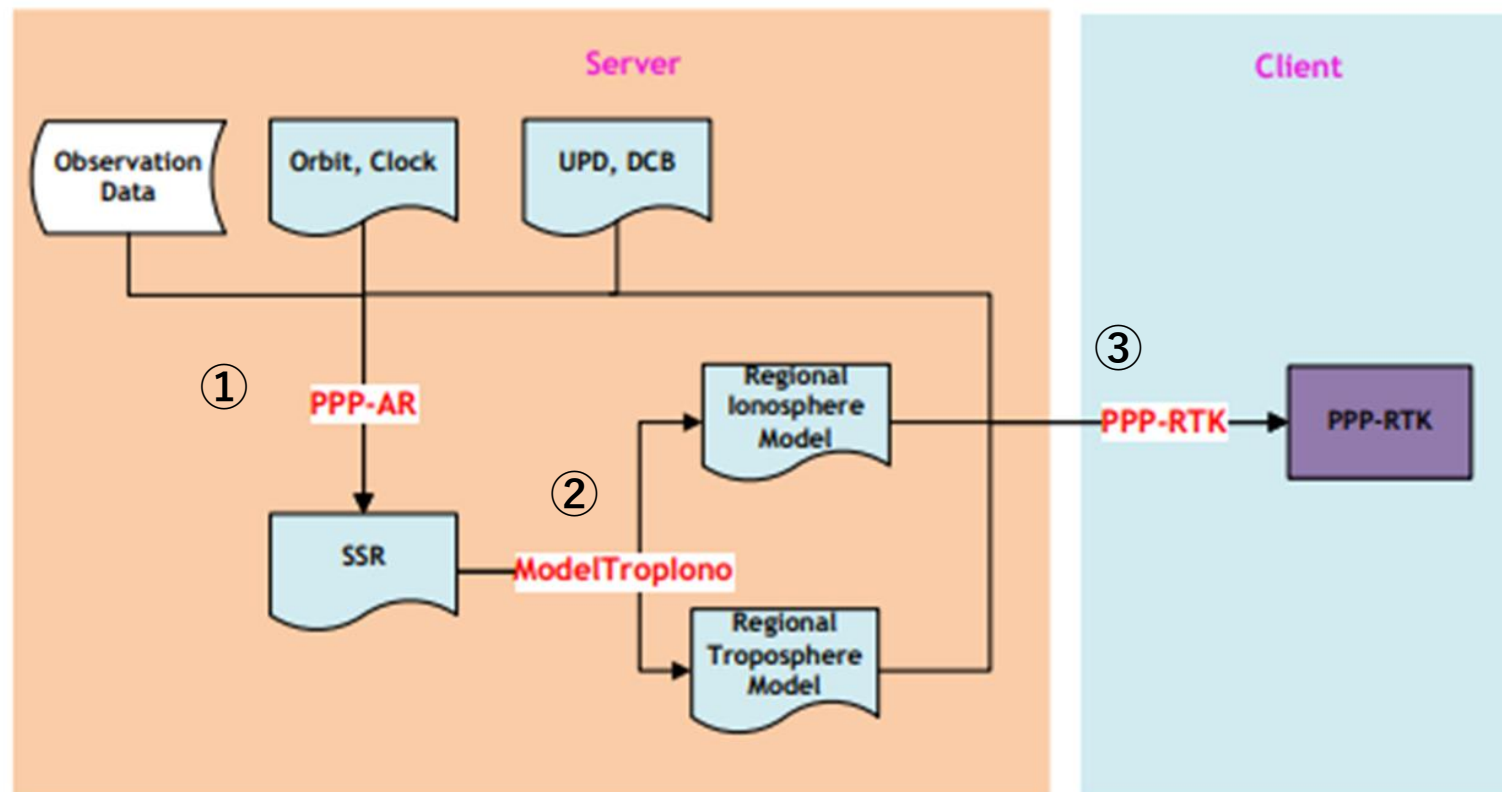
検証のためのPPP-RTK

フローチャートは図の通りである。

観測値として国土地理院の**GEONET**（30秒間隔）を利用した。

- ①精密位置有りのPPP-ARで観測点（電子基準点）の電離層・対流圏誤差を推定
- ②設定したグリッド上（緯度経度0.5度ずつ）での電離層・対流圏誤差を正確に推定
- ③ユーザ側で精密暦とクロック、そして②で求めた2つの大気圏誤差を利用してPPP-RTK（kinematic）を実施し、性能を検証。GPSとGALILEOのみ利用

※精密暦、クロックはCNES(フランス)が公開している物（速報歴）を利用した。



検証のためのPPP-RTK

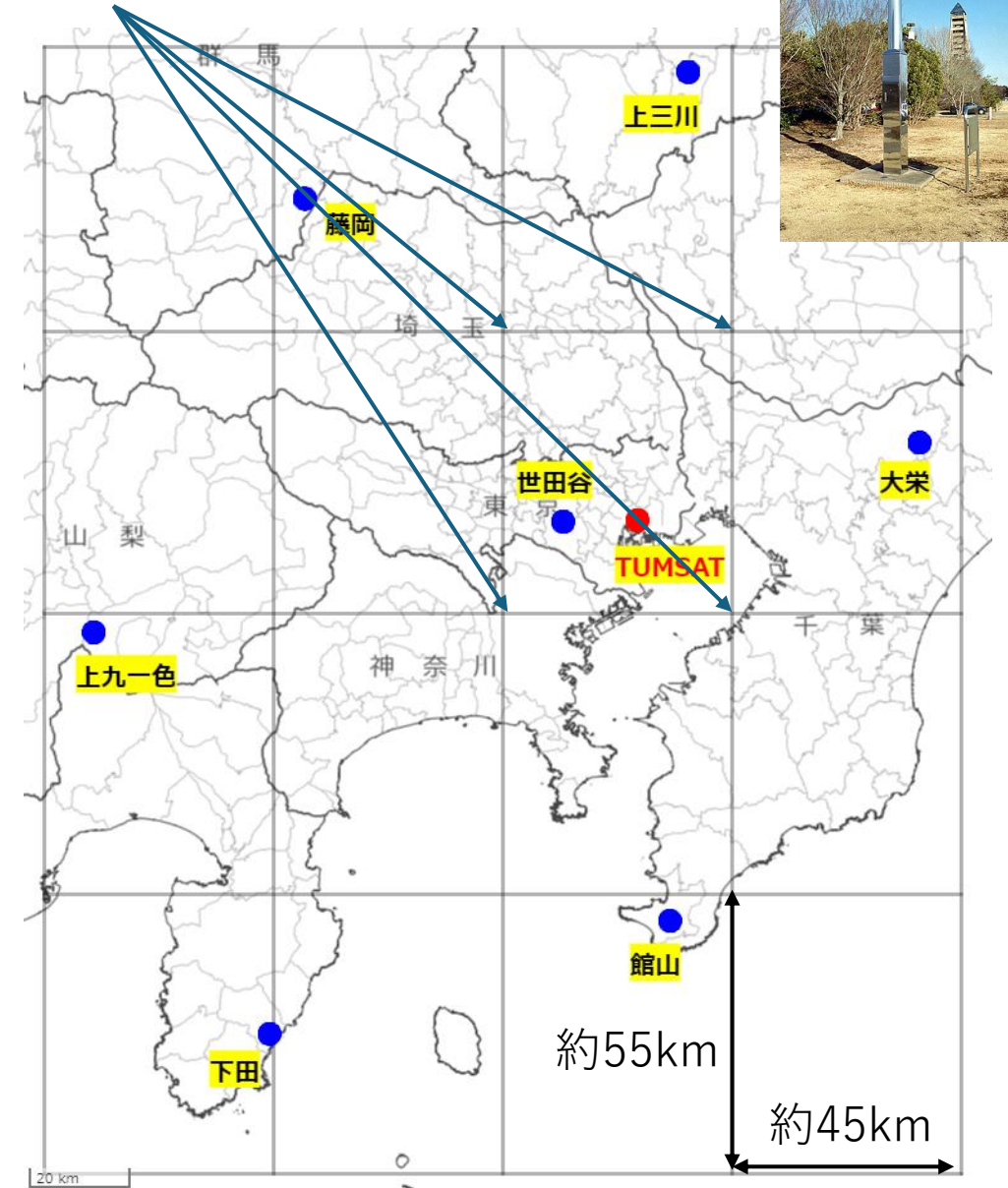
グリッド交点上での電離層、対流圏が推定されており、TUMSAT位置で内挿

ユーザ局(赤点)、観測局(青点)、グリッド(灰色線交点)は図の通り。海洋大屋上で観測しているCLAS（コア社製受信機）との比較も実施。

CLASとは日本の準天頂衛星より放送している補正データで、手法はPPP-RTKと同じである。

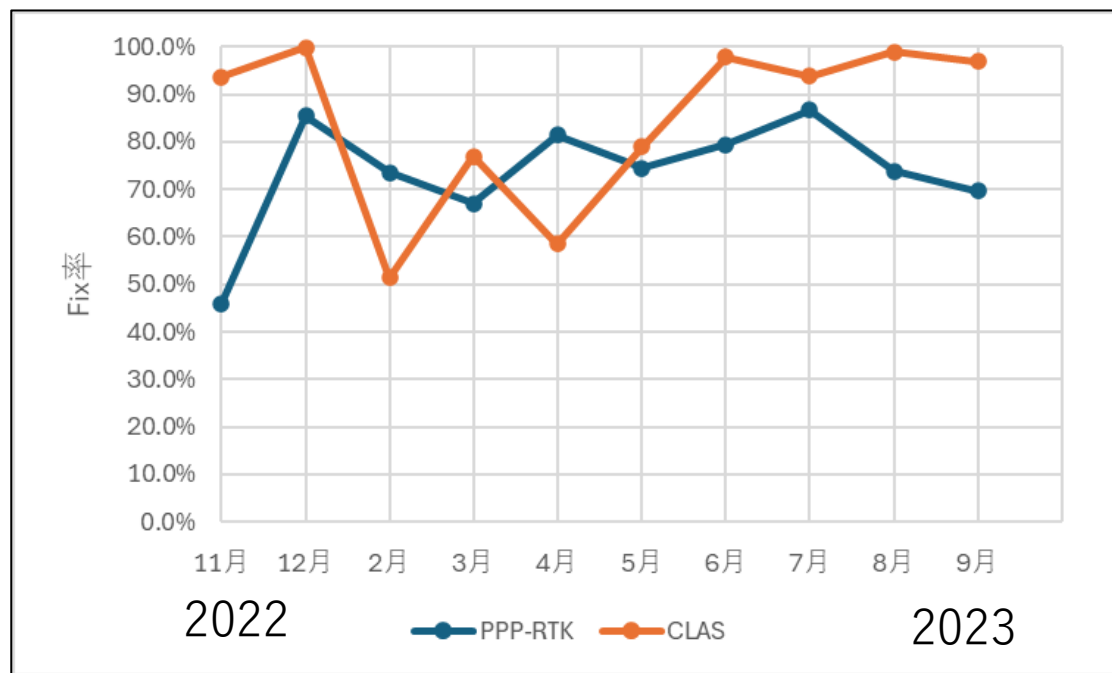
2022年11月～2023年9月の任意の1日のデータを利用してPPP-RTK（GPS + GALILEO）を実施。海洋大屋上のCLAS（GPS + GALILEO + QZSS）が24時間ある日なるべく選択した。

※2023年1月の海洋大屋上の観測データがなかったため、1月は省いています。

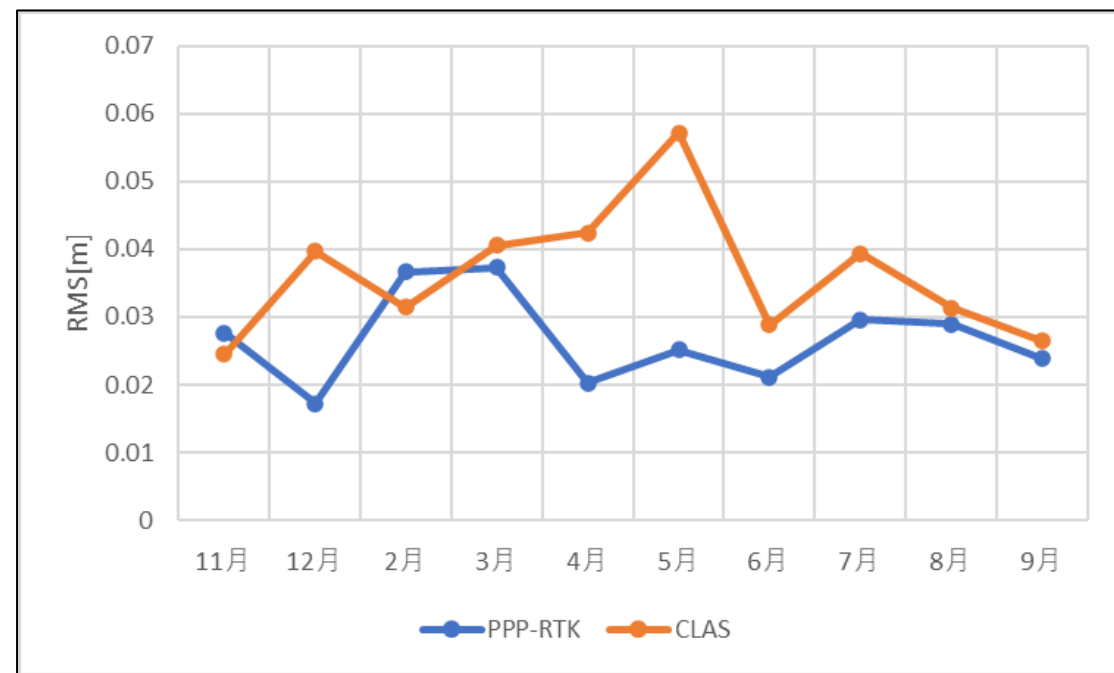


検証のためのPPP-RTK

FIX率



水平RMS



**FIX率、水平精度ともにCLASと遜色がなかった。FIXまでの収束時間もほぼ1-2分以内。
→PPP-AR（精密位置既知）で推定した電離層と対流圏遅延量が
正確であることがわかった。別途、TUMSATユーザ局に比較的近い
世田谷局を除いた観測データで検証し、性能が同様であることを確認した。**

PPP-ARで推定した電離層・対流圏推定の利用

上述で推定した電離層・対流圏データを利用し、自身の中基線RTKのプログラム（基線70km）に適用を試みた。

具体的にはグリッド上（緯度経度0.5度ごと）の電離層・対流圏の垂直方向の遅延量を用いて、それらをスラント成分に変更し、二重位相差の計算の箇所で、電離層・対流圏の二重位相差分を考慮し、通常のRTK（ワイドレーンではない）を実施

残念ながら、自身のプログラムの問題がありFIX解が得られなかった。またPPP-ARで推定した電離層・対流圏についても精度の高い衛星だけ抜き出すと衛星数が極端に少なくなることがわかり自身で他の研究者のプログラムを改修するまで至らなかった。

→よって以降で別の手法を試みた。

提案する手法のイメージ図



近くの電子基準点データを利用して
残差を算出。

適用

二重位相差 + 補正分を考慮した
RTKを実施。

ターゲットは海洋大と富浦ステーション

電離層・対流圏誤差算出方法

電離層・対流圏の二重位相差の誤差（残差と呼ぶ）は精密位置が既知の2局同士の観測データを利用して求めることができる。電子基準点はオープンスカイ環境のため、マルチパス誤差と雑音はほぼないと仮定。

搬送波位相 φ 、幾何学的距離 ρ 、電離層遅延量 $iono$ 、対流圏遅延量 $tropo$ 、アンビギュイティ N 、基準衛星 $sv1$ と従衛星 $sv2$ の二重位相差は次の式で表される。

$$\varphi_{rov_ref}^{sv1_sv2} = \rho_{rovref}^{sv1sv2} - iono_{rovref}^{sv1sv2} + tropo_{rovref}^{sv1sv2} + N_{rovref}^{sv1sv2}$$

基準局及び移動局は電子基準点であるため、幾何学的距離の2重差 ρ_{rovref}^{sv1sv2} を導出できるため、次のように変形できる。

$$\varphi_{rov_ref}^{sv1_sv2} - \rho_{rovref}^{sv1sv2} = N_{rovref}^{sv1sv2} - iono_{rovref}^{sv1sv2} + tropo_{rovref}^{sv1sv2}$$

基線長が短く電離層・対流圏が安定しているとき、 $-iono_{rovref}^{sv1sv2} + tropo_{rovref}^{sv1sv2}$ は0に限りなく近い値になる。

N は整数アンビギュイティのため、全ての時刻の $N_{rovref}^{sv1sv2} - iono_{rovref}^{sv1sv2} + tropo_{rovref}^{sv1sv2}$ から平均を取り、ある程度推定できる。

$$\varphi_{rov_ref}^{sv1_sv2} - \rho_{rovref}^{sv1sv2} - N_{rovref}^{sv1sv2} = -iono_{rovref}^{sv1sv2} + tropo_{rovref}^{sv1sv2}$$

以上より、精密位置が既知の場合、 $-iono_{rovref}^{sv1sv2} + tropo_{rovref}^{sv1sv2}$ をcm級の精度で求めることができる。

RTKの基線長変化に応じた大気遅延の影響

前述の手法を用いて、RTKの基線解析に電離層・対流圏がどの程度影響しているのか調査した。
次の国土地理院のGEONETデータを利用し、それぞれ二重位相差を利用して残差を
求め、基線における影響の違いを確かめた。残差結果はGEONETデータと同じ30秒毎の結果である。
解析日時は2023年12月24日09:00:00~12:00:00(JST)

基準局：つくば1 移動局：つくば3 基線長：約0.3km

基準局：東京千代田 移動局：利根 基線長：約42km

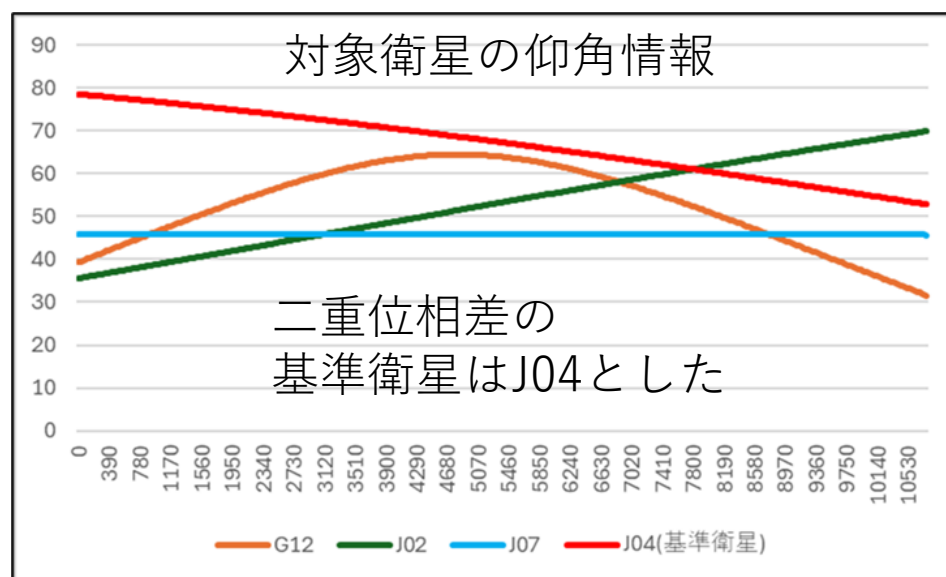
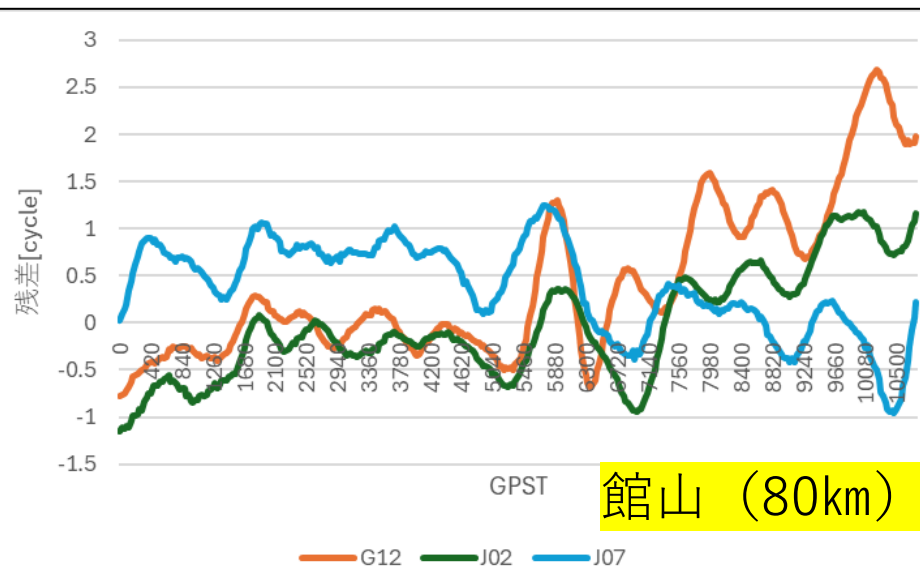
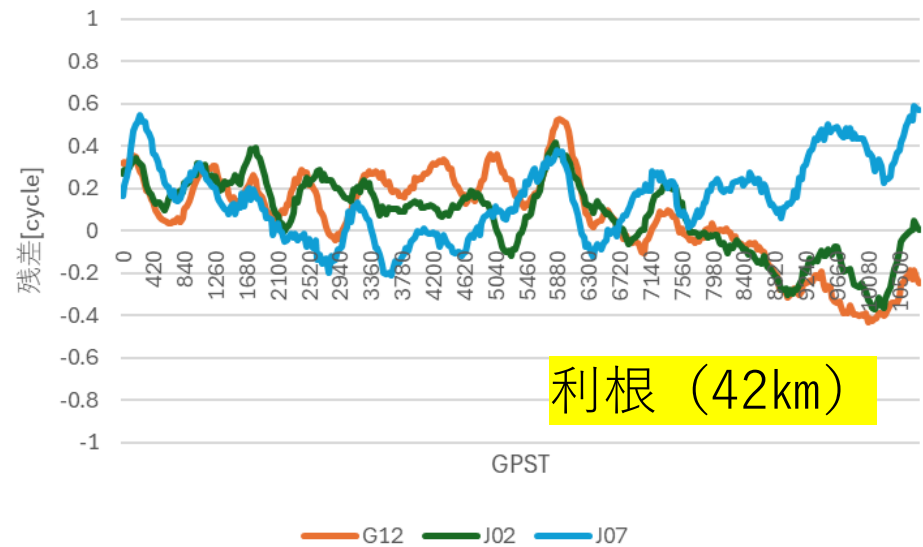
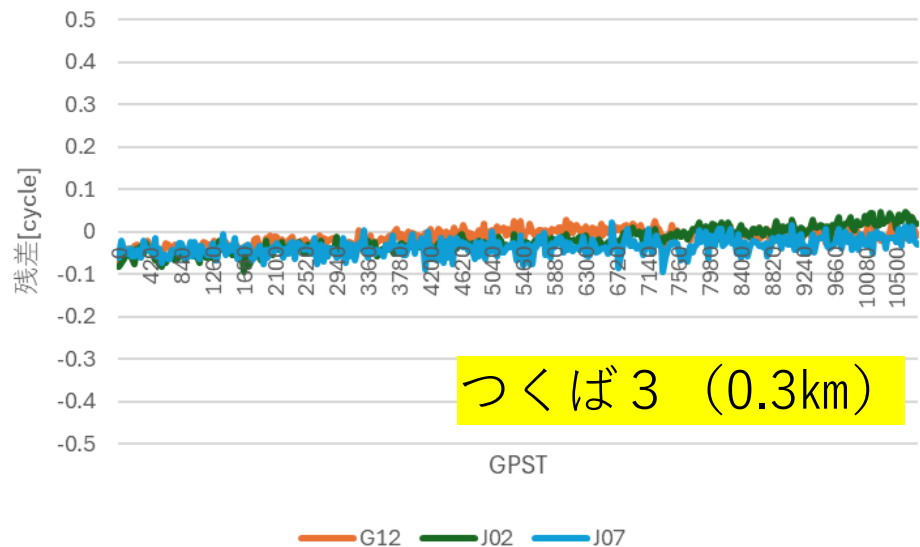
基準局：東京千代田 移動局：館山 基線長：約80km

残差を出す際の設定値は次の通り

- ・マスク角：30°
- ・利用衛星：GPS, QZSS, Galileo
- ・利用周波数：L1 + L2, E1 + E5a
- ・信号強度の閾値：35

RTKにおける大気遅延誤差（残差）

1サイクル：約19cm



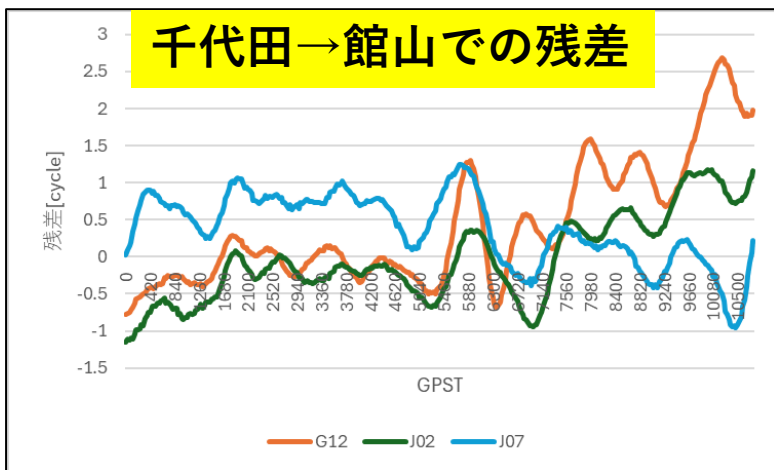
基線長に応じて、
二重位相差の残
差の誤差が大き
くなっているこ
とが明らか。
(残差はほぼ
電離層＋対流圏
によるもの)

中基線RTK（海洋大―富浦ステーション） へ前述の二重位相差の電離層・対流圏の残差を適用

将来的に瞬時ARを用いて移動体に適用することをターゲットとする。

提案手法

- ①受信機は廉価版受信機（今回はu-blox社のF9Pを利用）とする
- ②ワイドレーンでの性能を確認する
- ③ターゲットとなる海洋大と富浦の近くにある2つの電子基準点のデータを利用して電離層・対流圏遅延分が支配的な残差を推定。推定した電離層・対流圏の残差を上記のワイドレーンへ適用し性能が改善するか調べた



海洋大と富浦ステーションで取得した廉価版受信機の観測値に、左の残差を適用することで、性能が改善するか検証。改善できれば、どの程度（距離や数）の基準局による残差情報を準備すればよいかの検証へ進める。

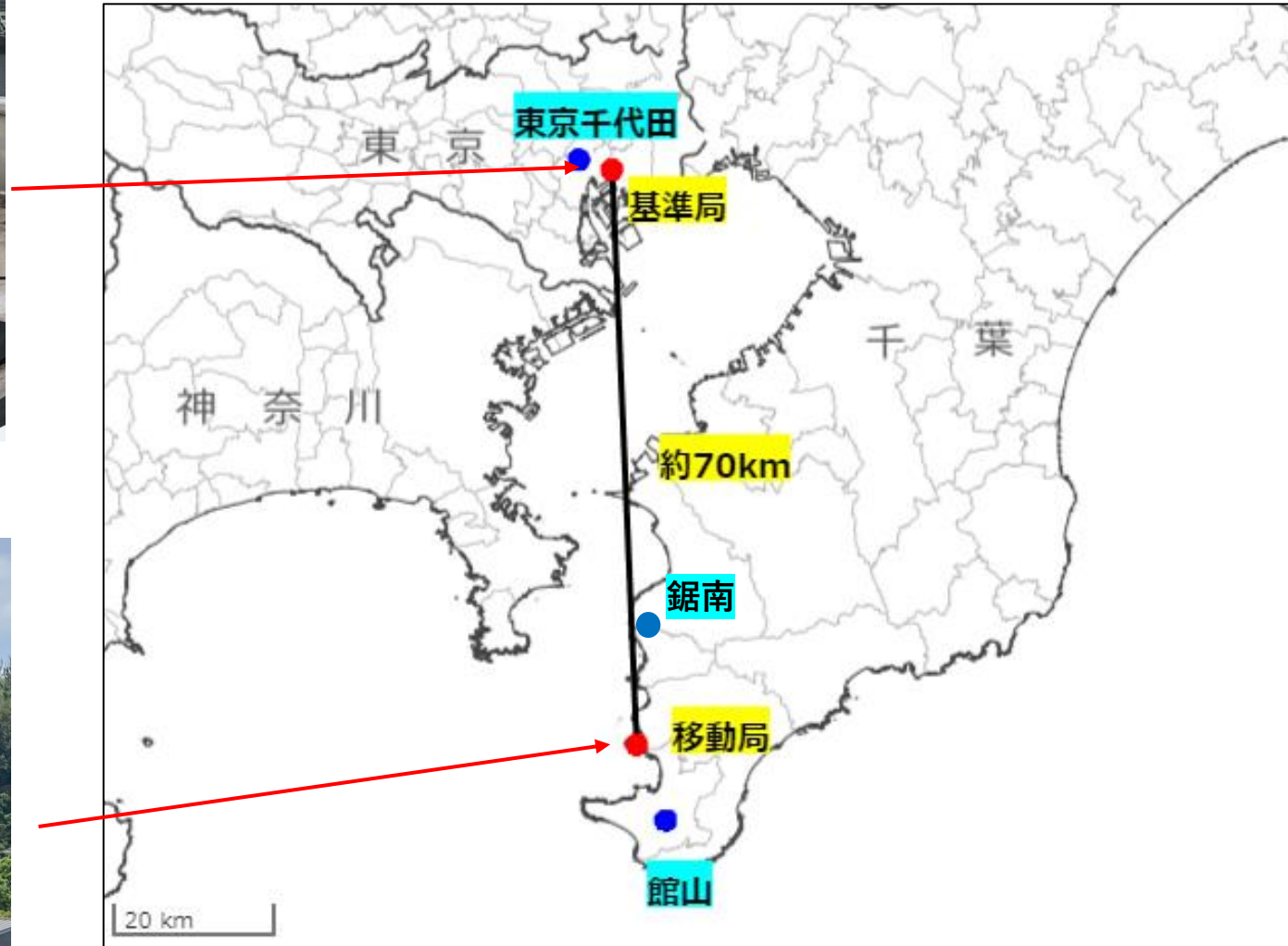
受信機とアンテナ（海洋大と富浦ステーション）



海洋大アンテナ



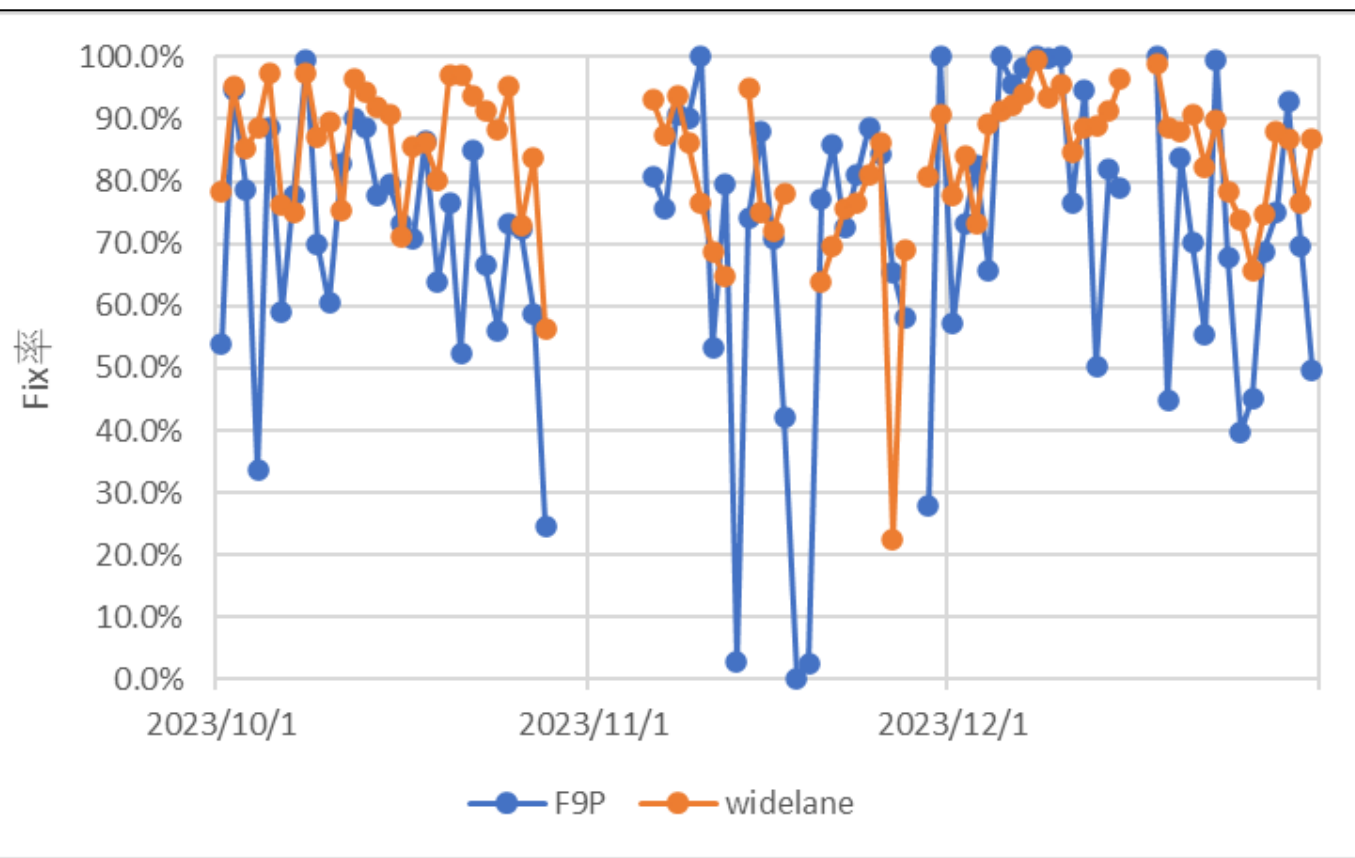
富浦アンテナ



受信機
(u-blox F9P)

2023年10月1日から
2023年12月31日まで
データを取得

ワイドレーンでの結果



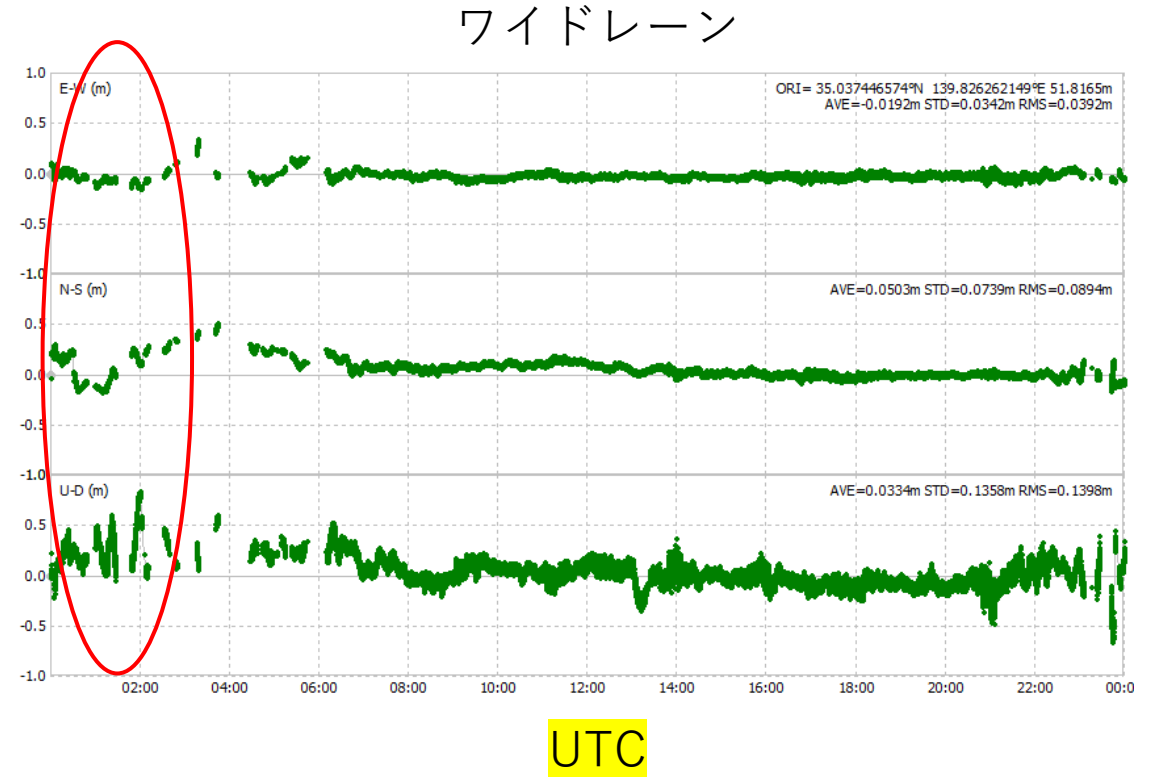
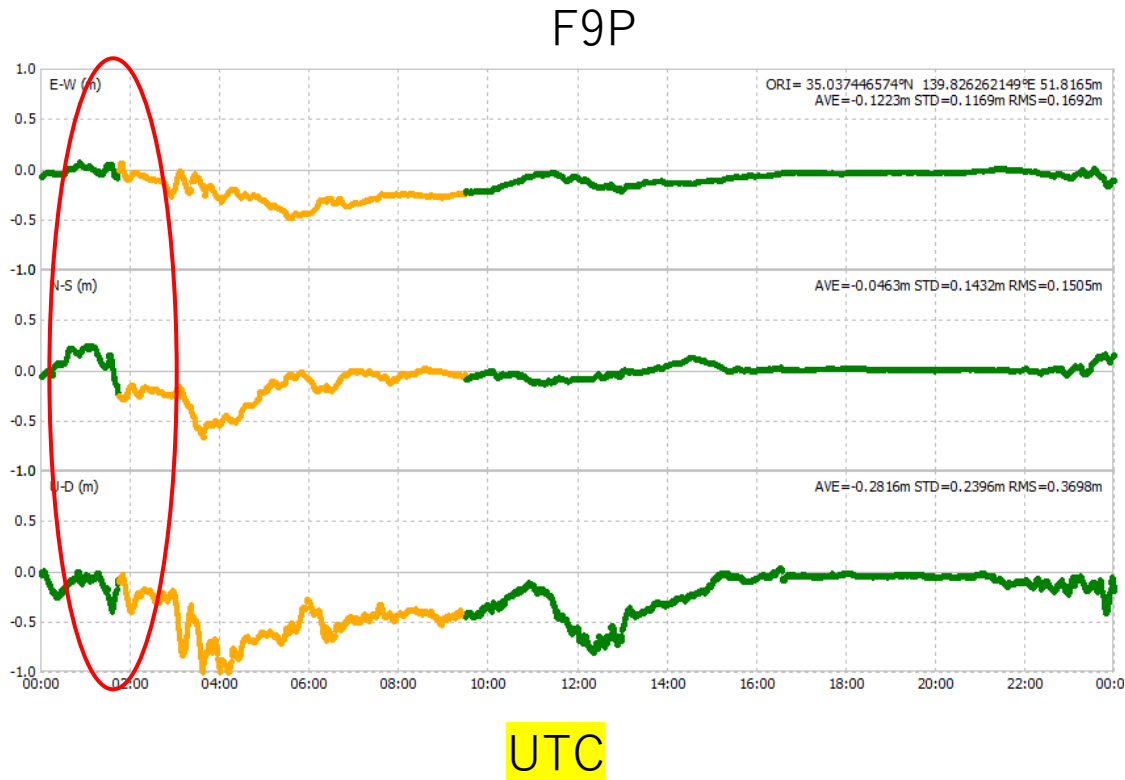
2023年10月1日から12月31日（約70日分）
取得できていない時間帯は海洋大または富浦側でデータ停止時

- ・ マスク角：30°
 - ・ 利用衛星：GPS, QZSS, Galileo, BDS
 - ・ 利用周波数：L1 + L2, E1 + E5b, B1 + B2
 - ・ アンビギュイティ：Instantaneous
 - ・ Ratio値：2.5
 - ・ 信号強度の閾値：35dBHz
- ※F9PはGPS, Galileo, BDS, GLONASSを利用

	F9P	ワイドレーン
Fix率	72.5%	78.8%
水平RMS	0.106m	0.122m
垂直RMS	0.216m	0.164m

ワイドレーン利用で、市販受信機の内蔵RTKエンジンより良いことがわかった

12月24日 24時間結果 (電離層の影響が少ない日時)



Fix率がややましな12月24日でも **日中はFIXしない時間が多い**
→電離層の影響によるものと考えられる

電離層・対流圏の残差適用の概要

- 期間 3時間分

昨今、太陽活動の影響で日中に電離層の影響が大きくなっているように見受けられる。残差適用の関係（基準衛星を3時間継続する）で、**日中の一部となる9時から12時の3時間を解析対象**とした。

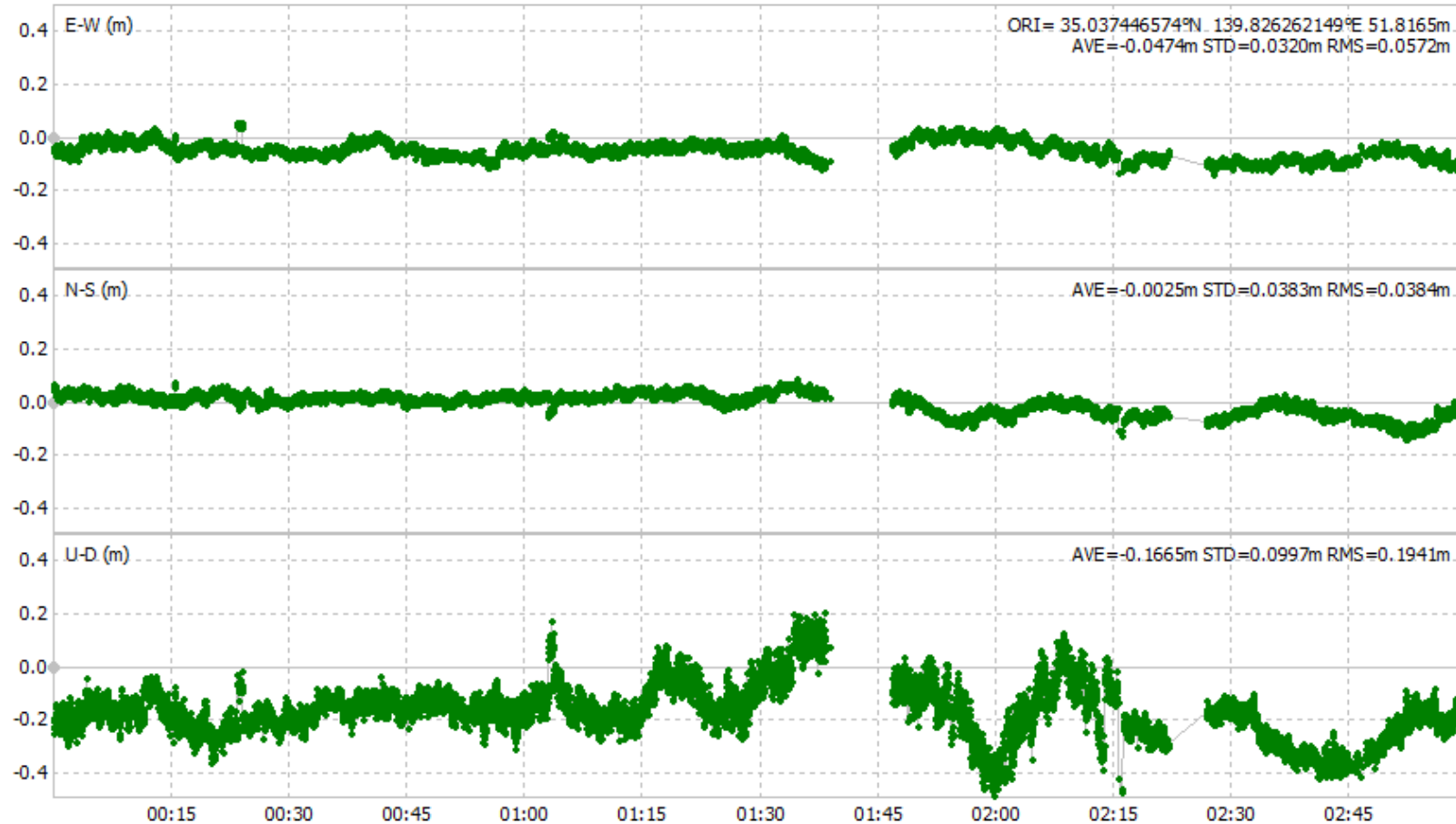
- GPS + QZSS + GALILEO

残差計算には電子基準点のデータを利用する。電子基準点はBDSの観測データを取得していない。そのため、残差適用の測位には前述のワイドレーンの利用衛星からBDSを除いた3つの衛星システムを利用する。利用衛星が減少するため、性能は落ちる

電離層・対流圏残差適用の結果（館山利用）

12/24 09:00:00~12:00:00

富浦との直線距離は約10km



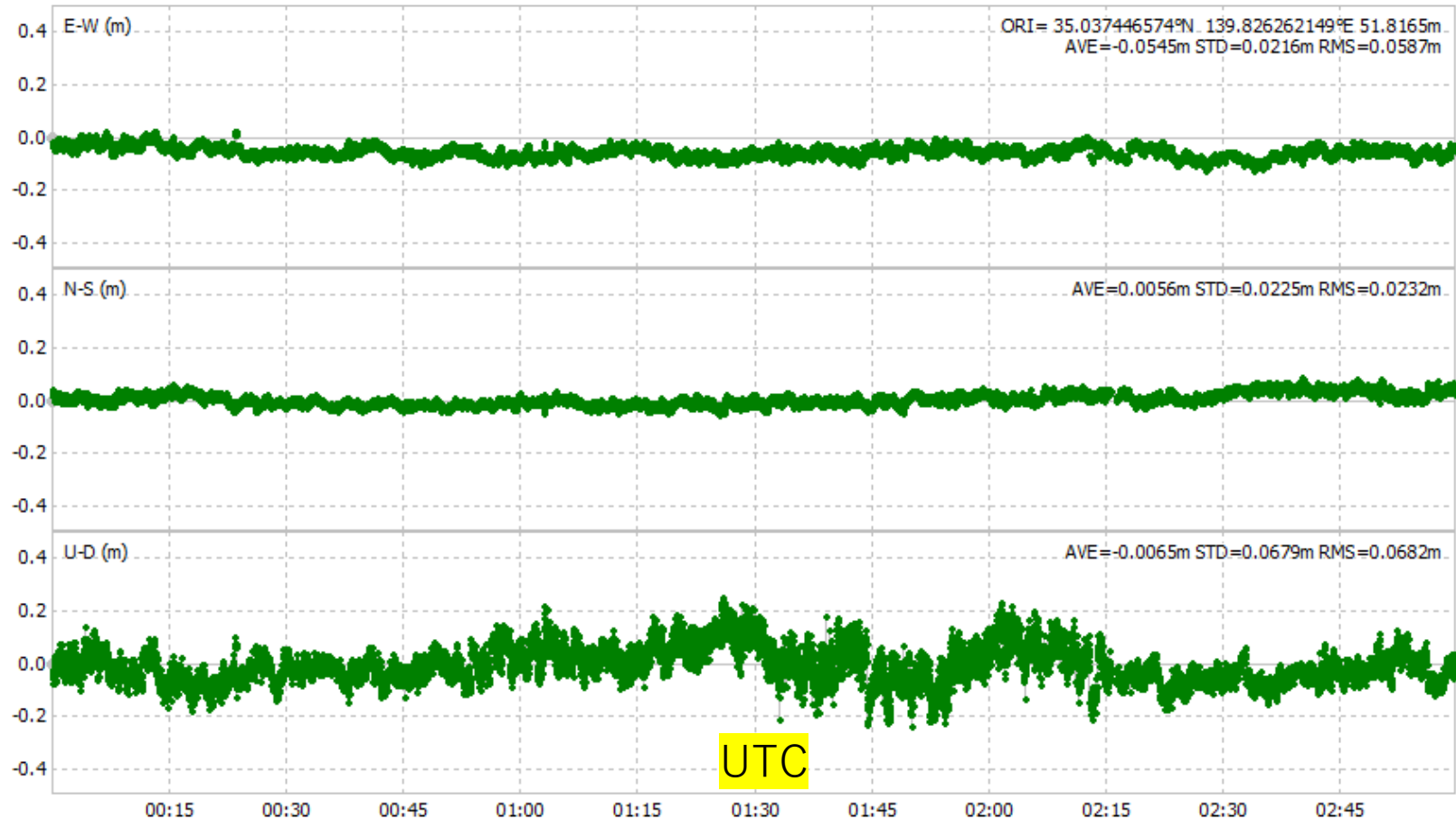
UTC

この9-12時（JST）のFix率は88.1%、大きく改善した

電離層・対流圏残差適用の結果（鋸南利用）

12/24 09:00:00~12:00:00

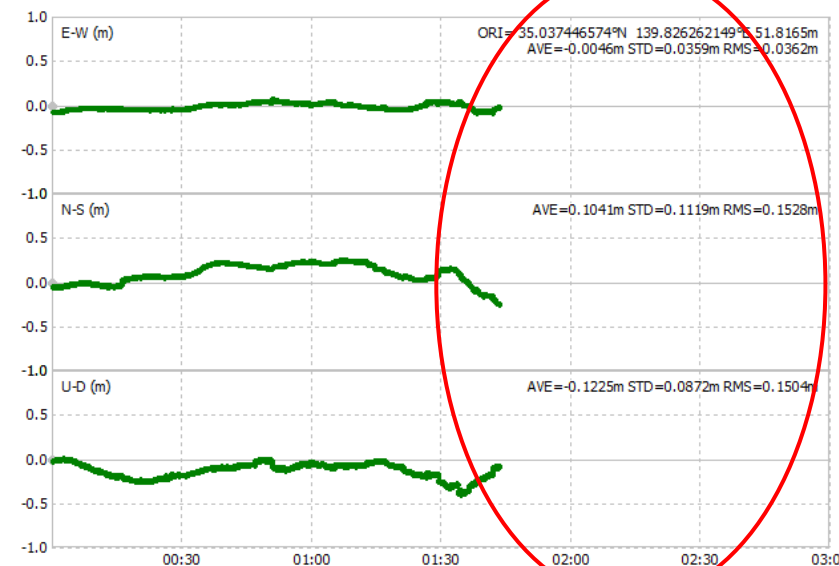
富浦との距直線離は約12km



Fix率は99.4%→大きく改善

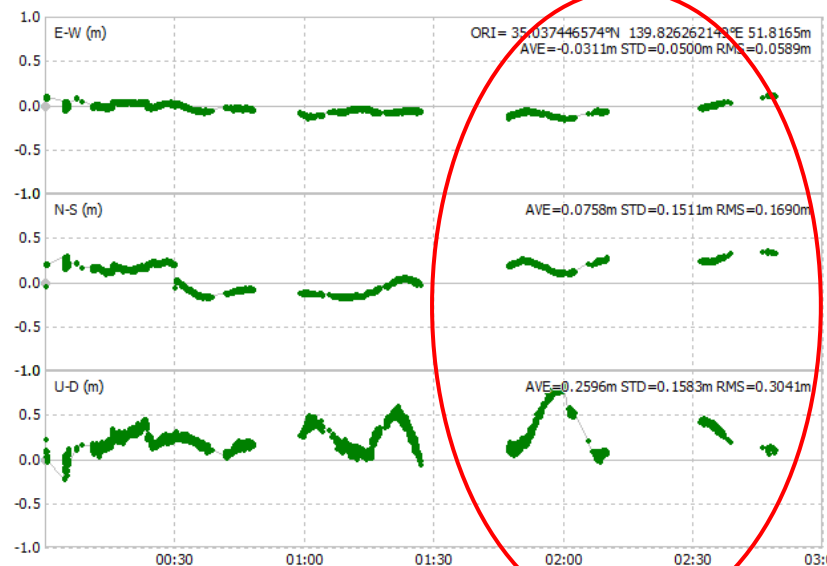
12/24結果比較 09:00:00~12:00:00

57.5%



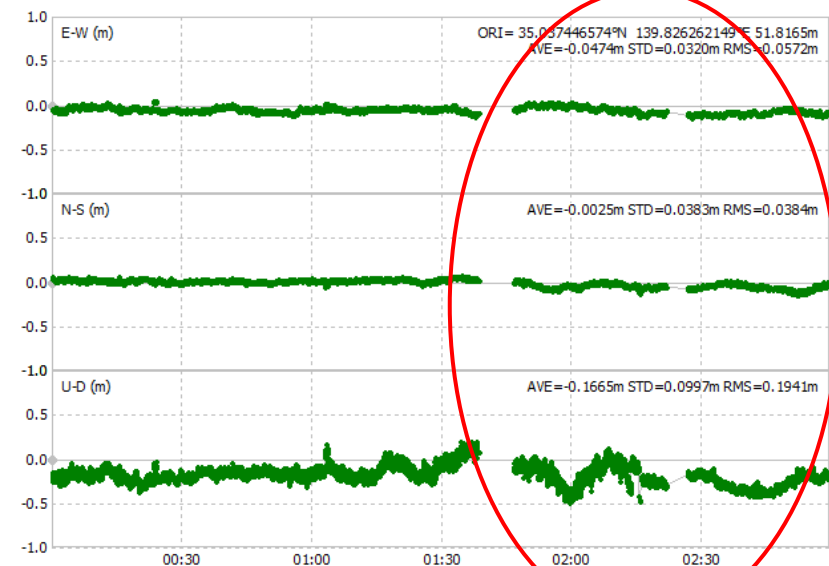
F9P UTC

35.8%



ワイドレーン UTC

88.1%

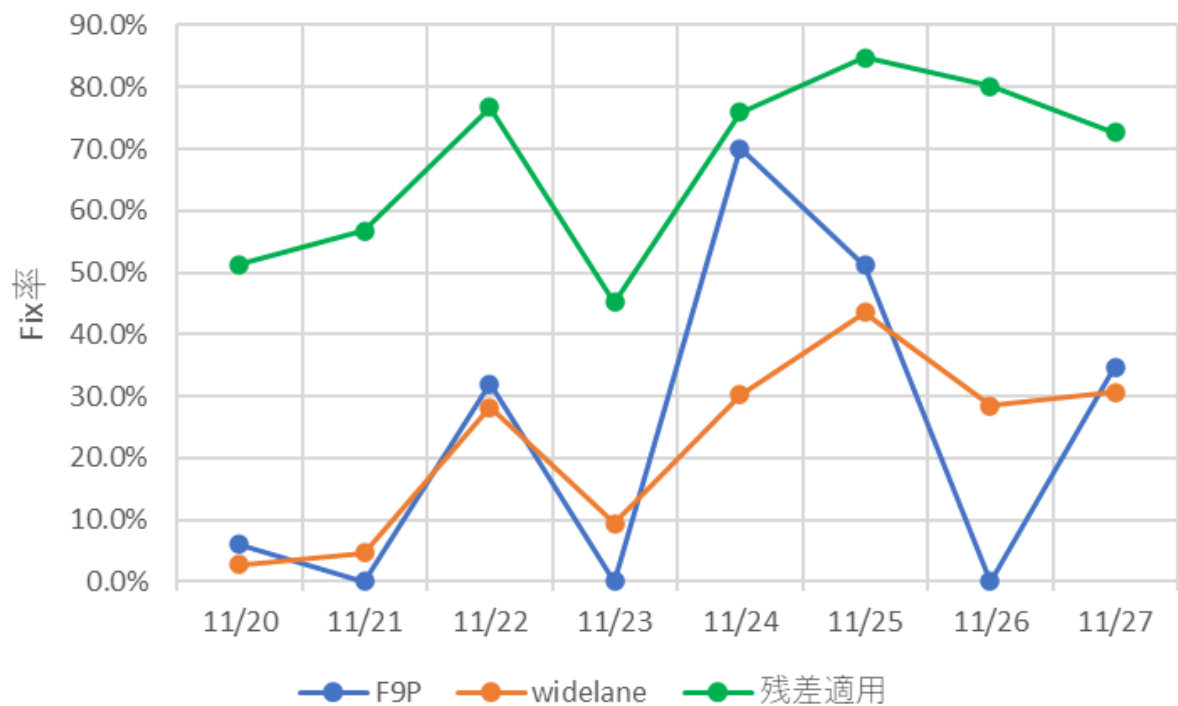


残差適用(館山) UTC

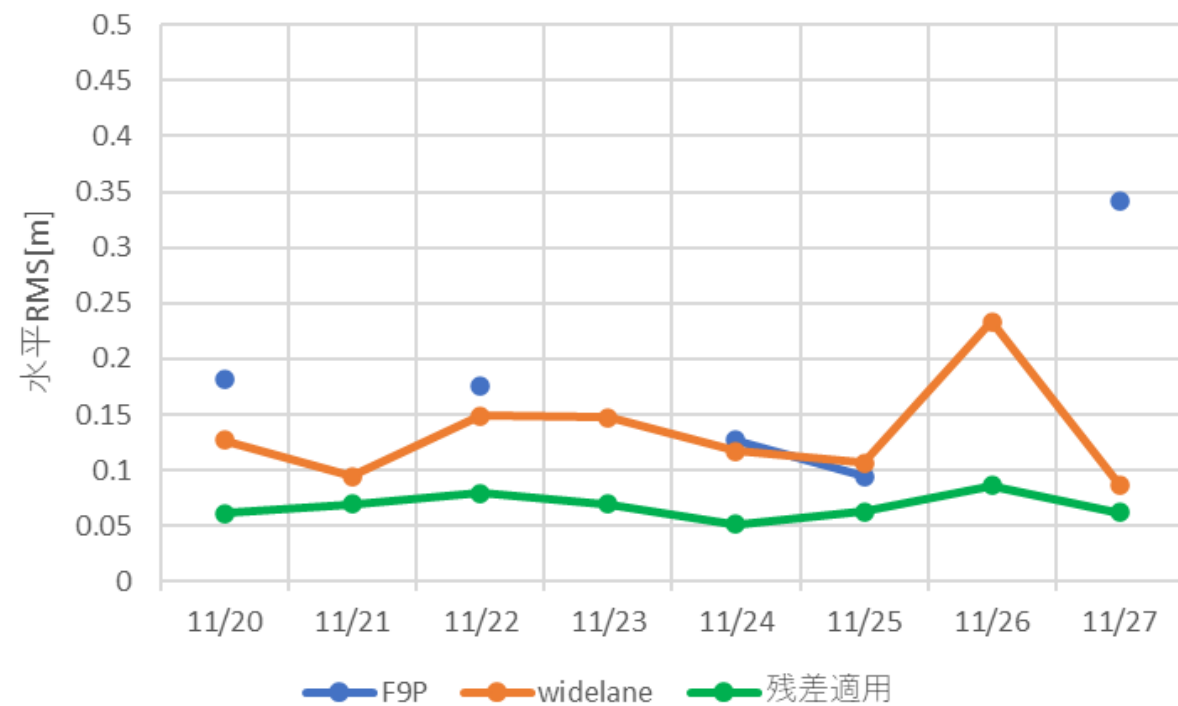
F9P、ワイドレーンでFix解を得られなかった時間帯でも、
電離層・対流圏の残差を適用することでFIX率が大きく改善
→提案した近接の電子基準点の残差適用による効果がでた

さらに1週間分で比較

- 11月20日から27日（電離層が活発な時期） 09:00:00~12:00:00



Fix率



Fix解の水平RMS

電離層・対流圏残差適用した場合、電離層が活発な1週間でも
Fix率と水平精度ともに大きく改善

まとめと課題

- PPP-ARを利用した電離層・対流圏遅延量の推定を行い、PPP-RTKへ適用できた。性能はCLASと遜色がなかった
- 中基線RTKにPPP-ARで推定した電離層・対流圏遅延量の適用を考えたが、プログラムに問題がありうまくできなかった。
- 二重位相差の残差推定を行い、廉価な受信機に対して、近接の電子基準点データを利用した残差の適用を試みた。
- 上述の残差推定値を利用し、Fix率、精度ともに大きく改善することを確認した。
- より広範囲（基準点間が50km以上）での中基線RTKの性能改善が課題であり、現在も取り組んでいる。
- 本提案手法は移動体がターゲットで1エポックでアンビギュイティを解いている。実際に富浦付近で移動体実験を行い検証する

課題

- ・右図の富浦を囲む電子基準点を複数利用し、富浦の電離層・対流圏補正データを自分で生成してRTKを行うという、PPP-AR、PPP-RTKと同じようなことを自分の中基線RTKのプログラムでも行えるか検討。
- ・東京千代田と富浦周辺の電子基準点を利用し、特にRTKの結果が悪かった日の電離層勾配等を調査する。

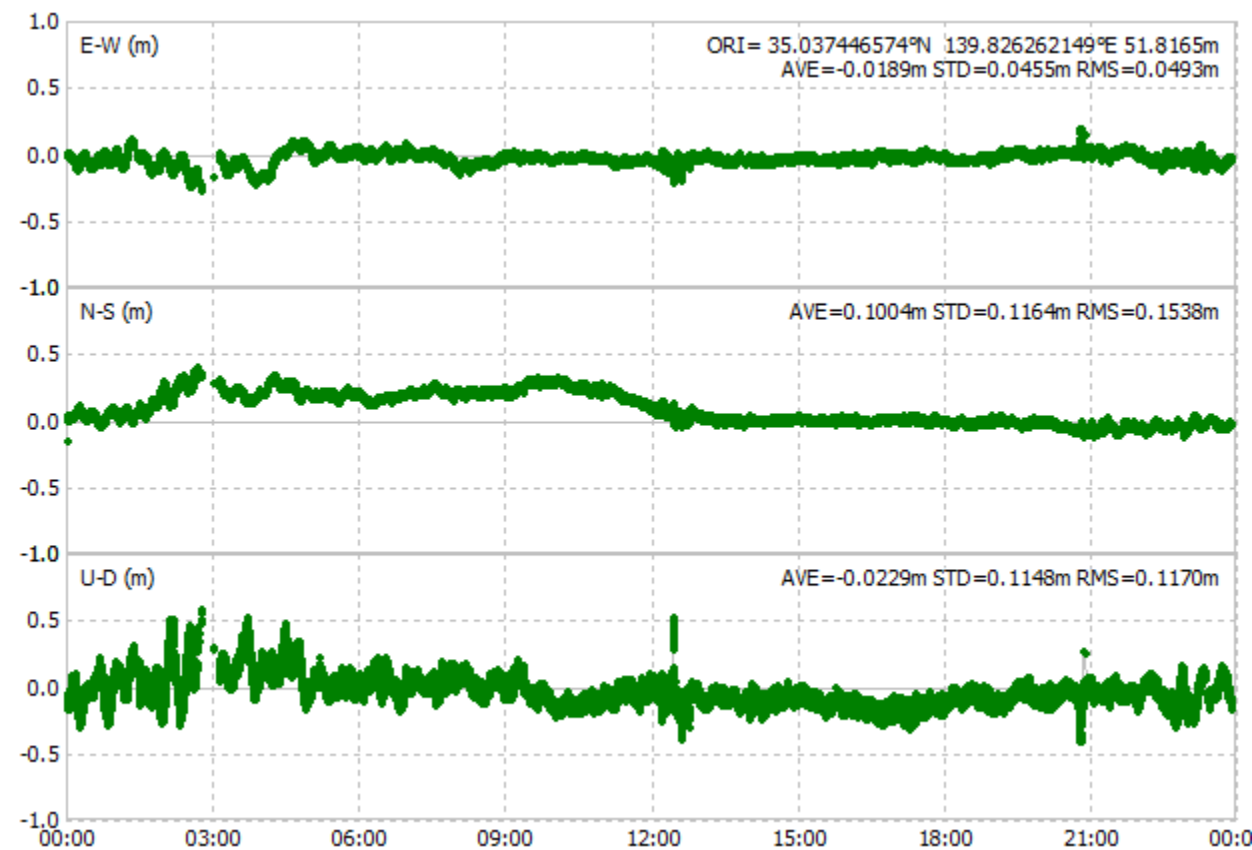
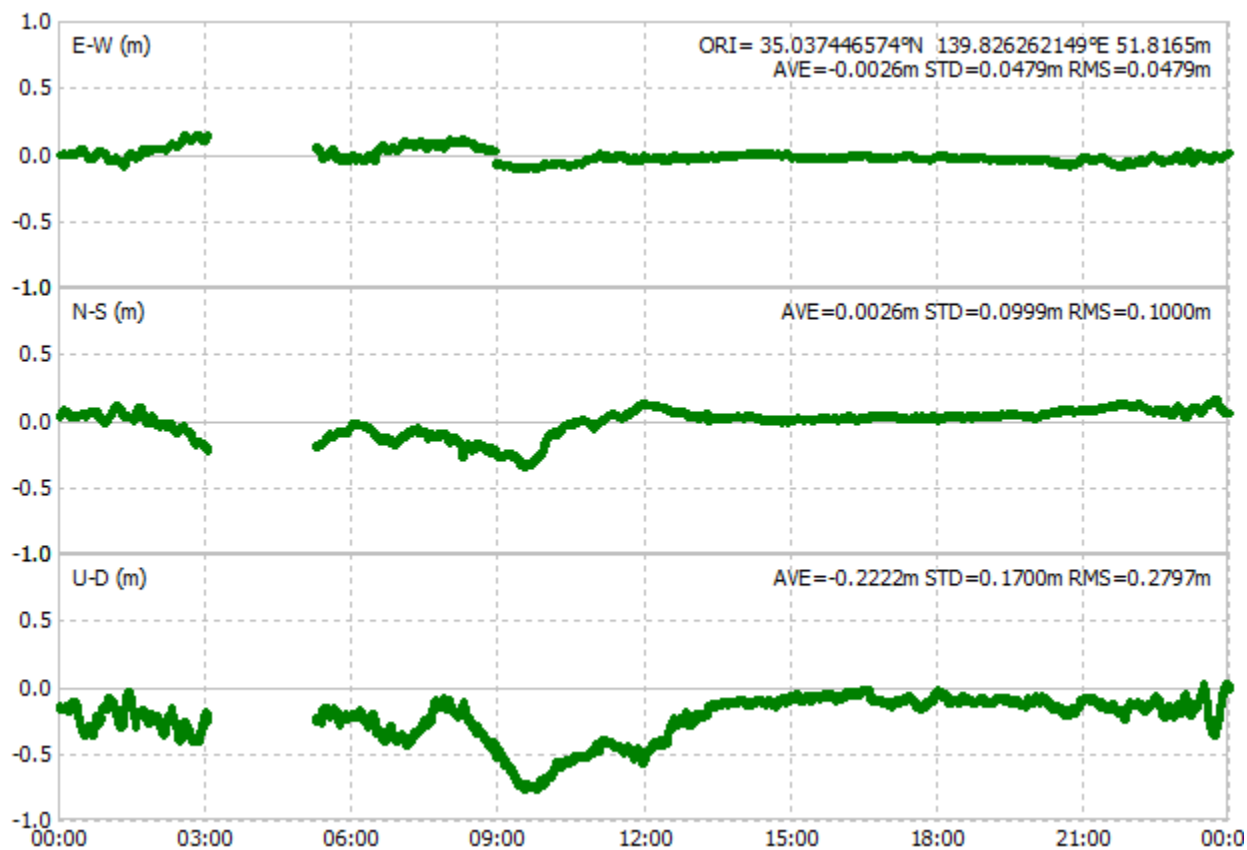
以上を3月までの課題とする。



水平プロット、時系列の比較（1日分）

F9P

ワイドレーン



11月8日 24時間