

MADDOCA-PPPを利用した 能登半島地震における地殻変動量推定

尾関友啓、久保信明

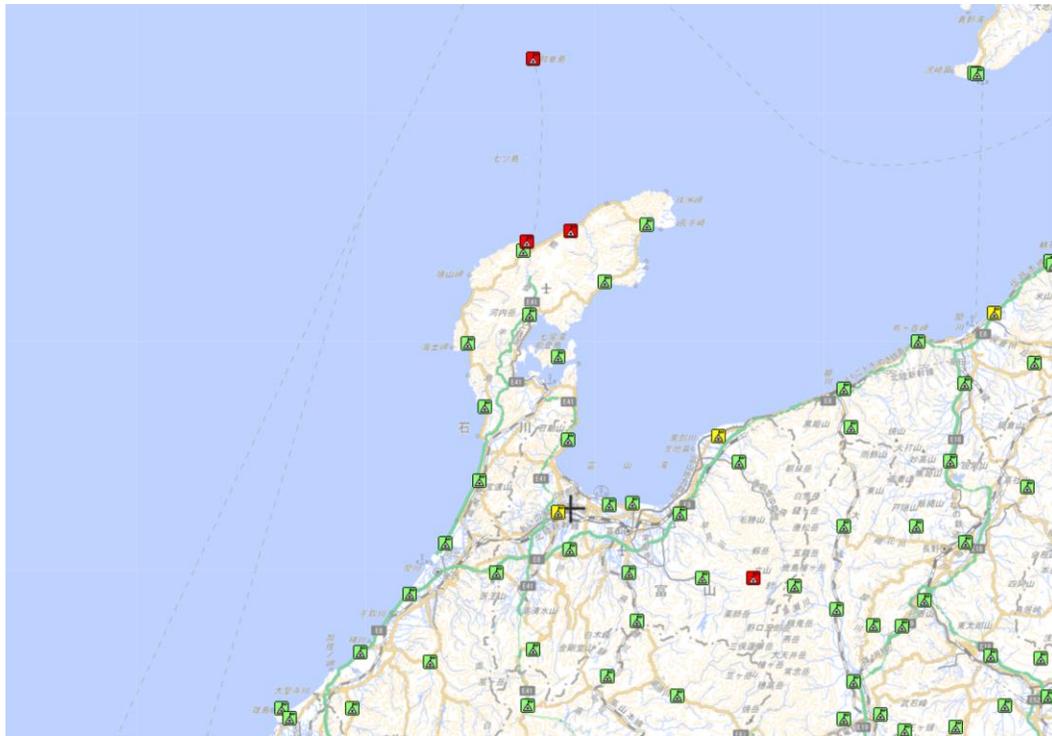
2024/03/06

2024年電子情報通信学会

概要

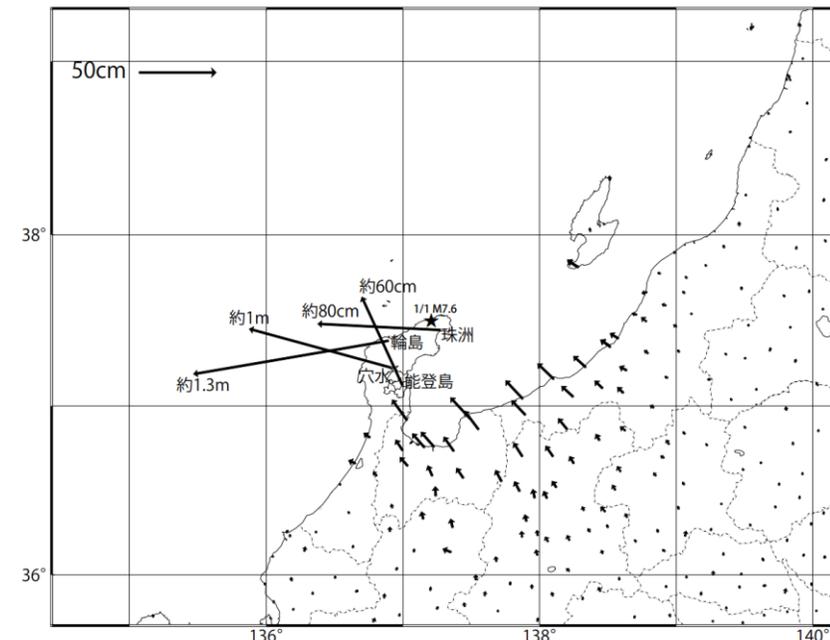
令和6年（2024年）1月1日16時10分頃に発生した能登半島地震について、震源域周辺の電子基準点及び可搬型GNSS連続観測装置（REGMOS）で観測された1月2日5時59分までのデータを解析した結果、電子基準点「輪島」で西南西方向に1.2m程度の変動、1.1m程度の隆起が見られるなど、能登半島を中心に広い範囲で地殻変動が観測されました。なお、この値は観測点の傾斜や局所的な変動の影響を受けている可能性があります。

（国土地理院第1報）



能登半島だけで11点

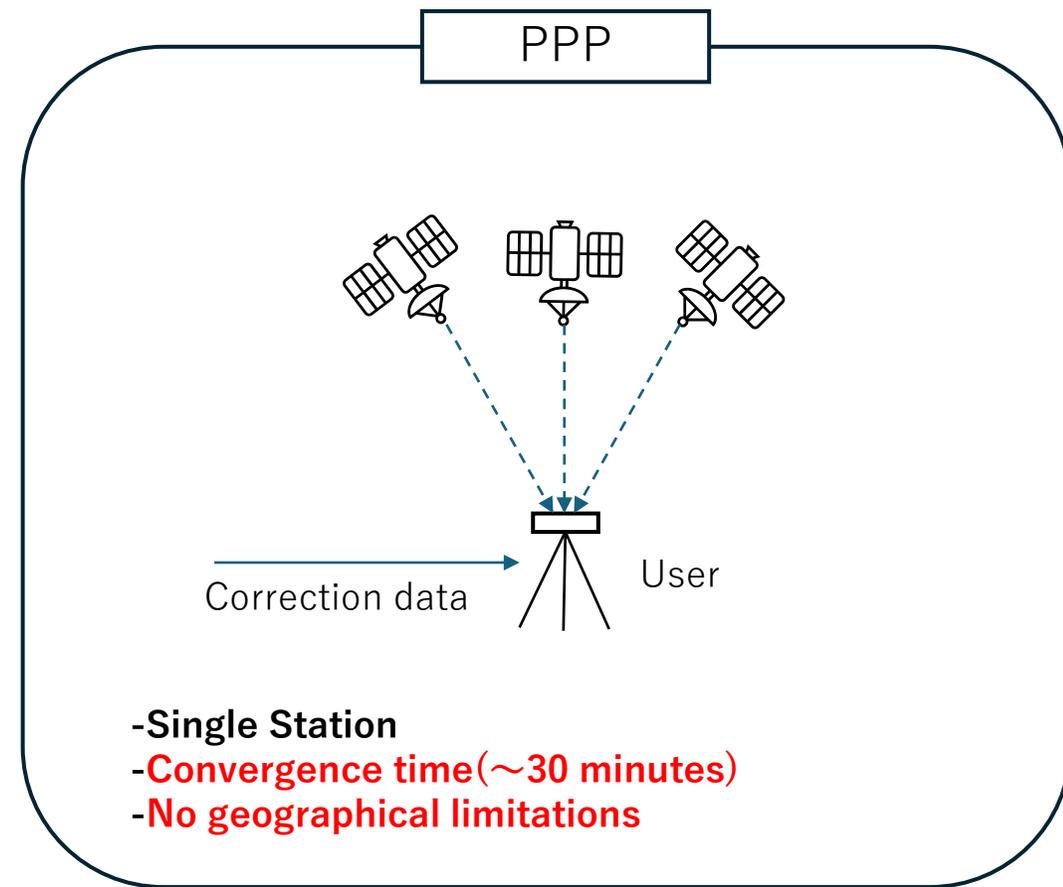
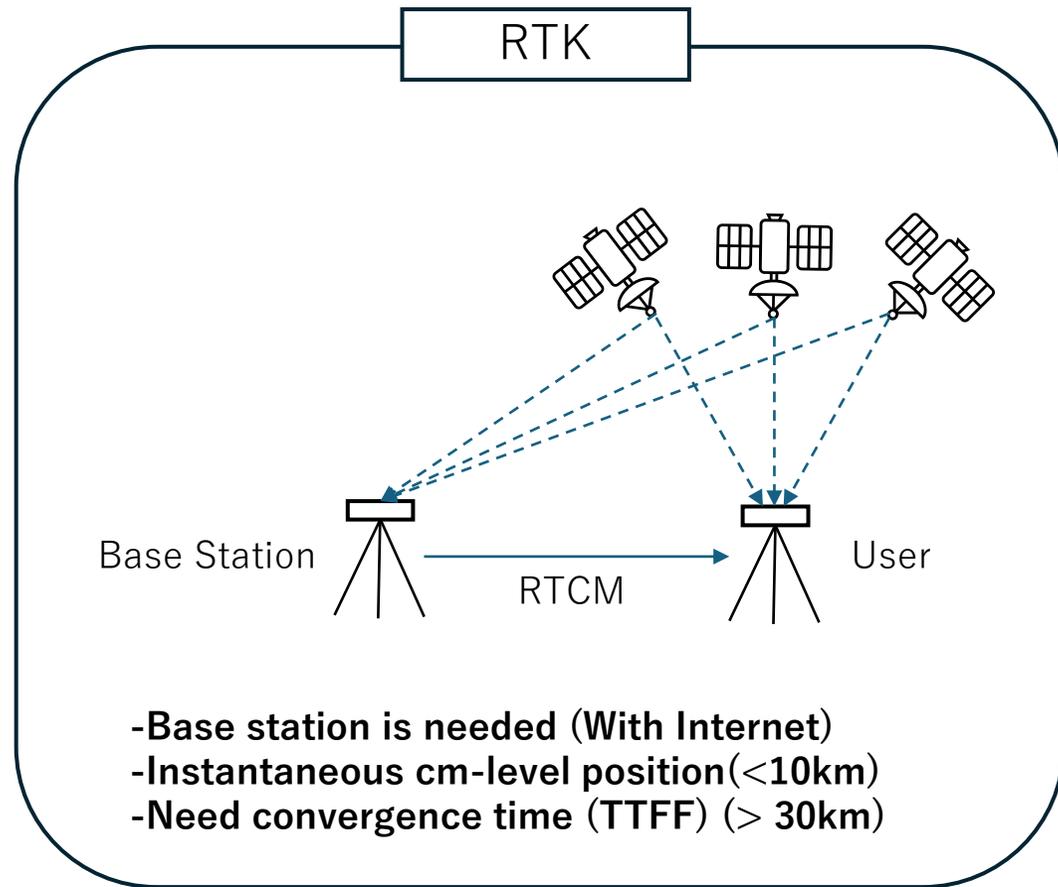
令和6年能登半島地震(1月1日 M7.6(速報値) 前後の観測データ(リアルタイム解析結果) 地殻変動(水平) 暫定
この地震に伴い大きな地殻変動が観測された。



<https://www.gsi.go.jp/common/000253916.pdf>

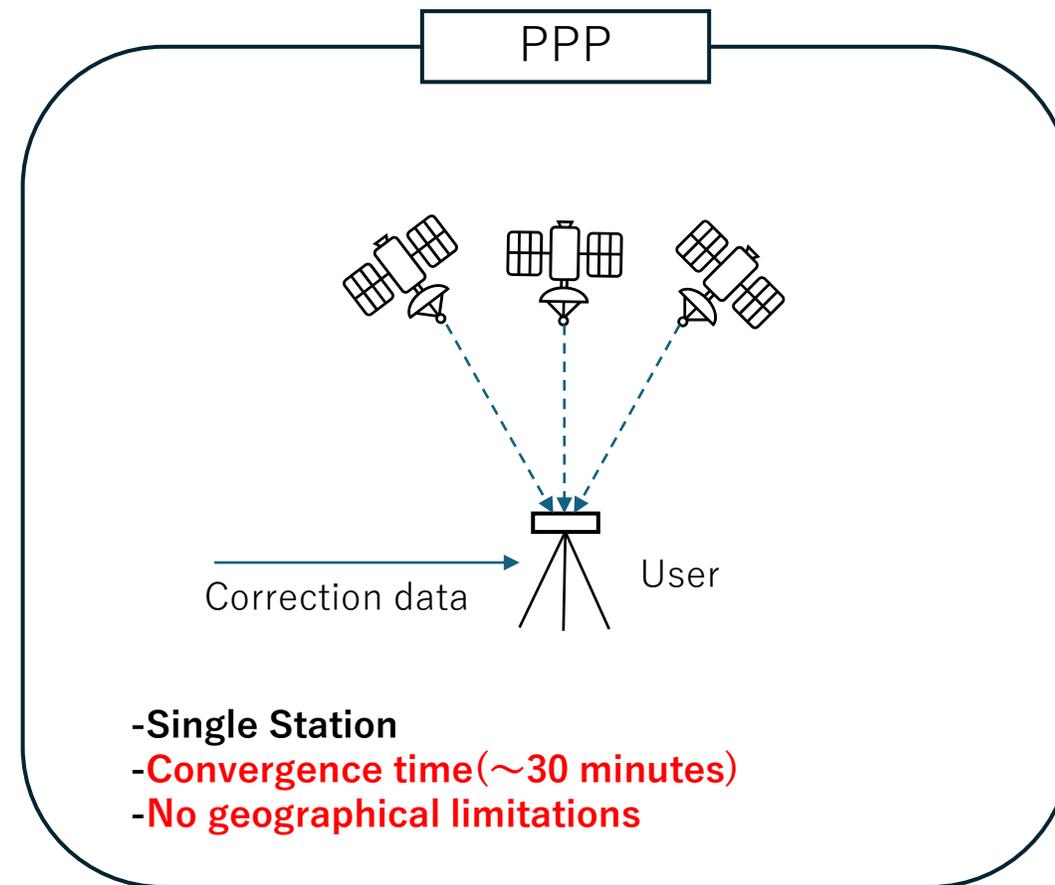
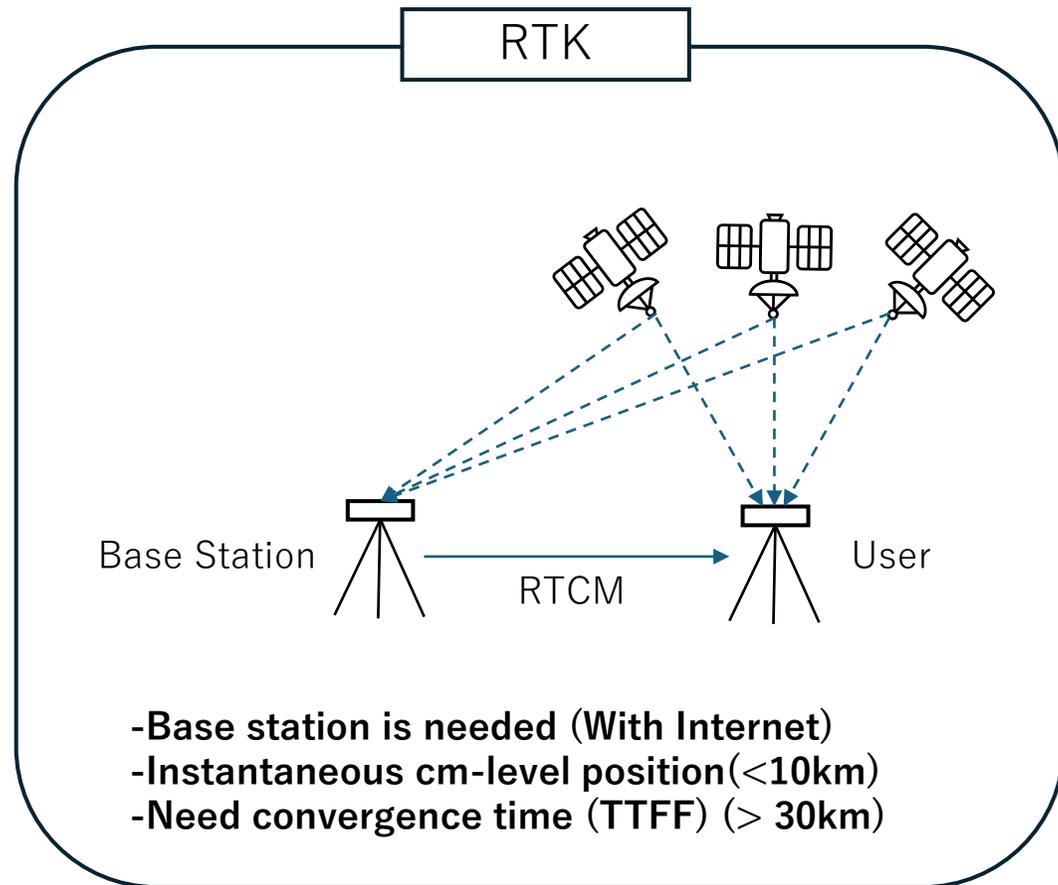
被害の大きい輪島付近は一時データ断絶、
またSARによって一番地殻変動が確認された門前周辺には電子基準点はなし

地殻変動監視手法(GNSS)



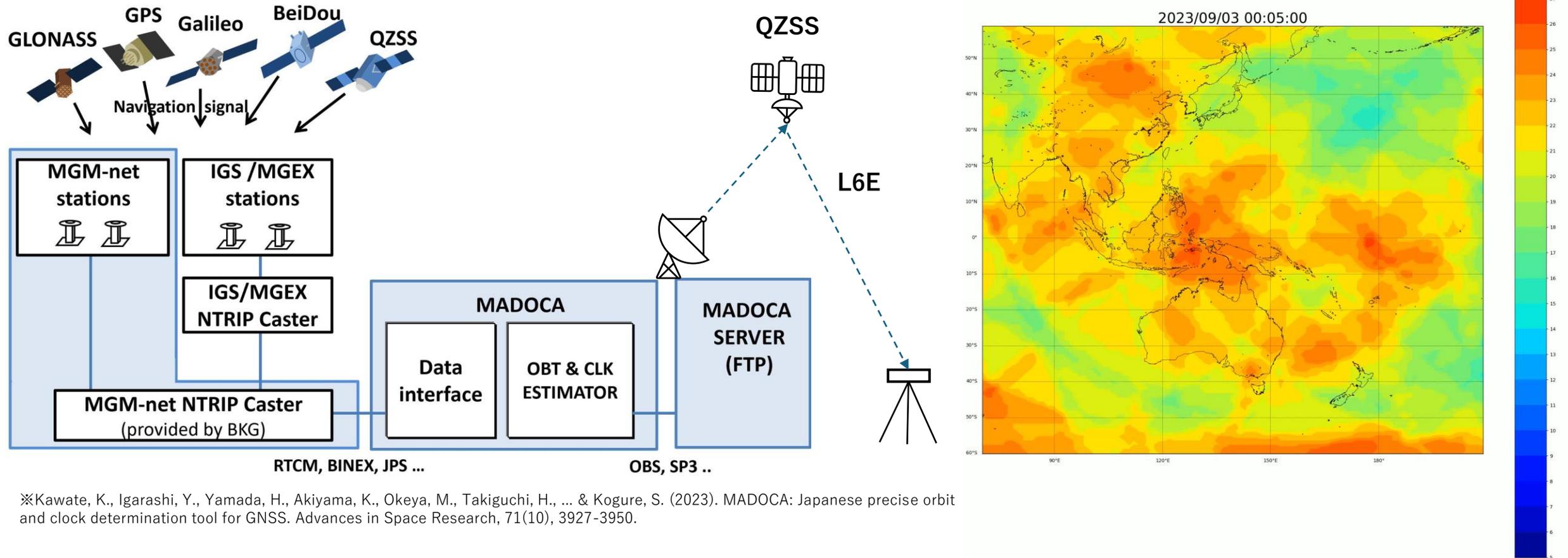
- 国土地理院(REGARD)ではRTK(基準局との相対測位)で電子基準点の地殻変動量を求めている
RTKの問題はあくまで基準局との相対ベクトルなので、基準局が固定されていることが前提
能登半島地震(M7.6)、東日本大震災(M9.0)のような巨大地震では広範囲で地殻変動が確認される
実際に今回は関東でも水平1cm程度の変動が確認されている
- 国土地理院は三隅(島根県)との長基線RTKで変動量を確定させている(約500km)
→瞬時に地殻変動していない基準点を探す必要がある(しかもなるべく近くで)

地殻変動監視手法(GNSS)



- PPPは電子基準点単独で高精度測位(cm級)ができるため、リアルタイムでの監視に向いている
精度は短基線RTK(<10km)のほうが良いが、中基線以上の場合はRTKも精度劣化を免れることはできない
- PPPは基準局の代わりに補正情報(軌道誤差、衛星時計誤差)を必要とする
→準天頂衛星(QZSS)のL6E信号より送信されているMADOCAメッセージでPPPができるため、
MADOCA-PPP(Kinematic-PPP)を用いて、電子基準点の変動量を推定する

MADOCA : Multi-GNSS Advanced Orbit and Clock Augmentation



※Kawate, K., Igarashi, Y., Yamada, H., Akiyama, K., Okeya, M., Takiguchi, H., ... & Kogure, S. (2023). MADOCA: Japanese precise orbit and clock determination tool for GNSS. *Advances in Space Research*, 71(10), 3927-3950.

- Provide precise orbit&clock error and code/phase bias using via QZSS (L6E signal).
- GPS/QZSS/Galileo/GLONASS are supported in **real-time processing**.
- Now, ALL QZSS transmit same message.

変動量の計算方法について

2-2. 「日々の座標値」からどのように変動量を求めているのですか？

いくつか方法がありますが、変動量が楕円体（地球）のスケールに対して十分に小さければ、XYZ（地心座標値）方向の変動を、観測点の緯度・経度で座標変換（回転）し、NEU（東西南北および上下）方向の成分を求める方法が最も単純です。

例えば、緯度B、経度Lの点で、変動量（dX,dY,dZ）が得られたとすれば、

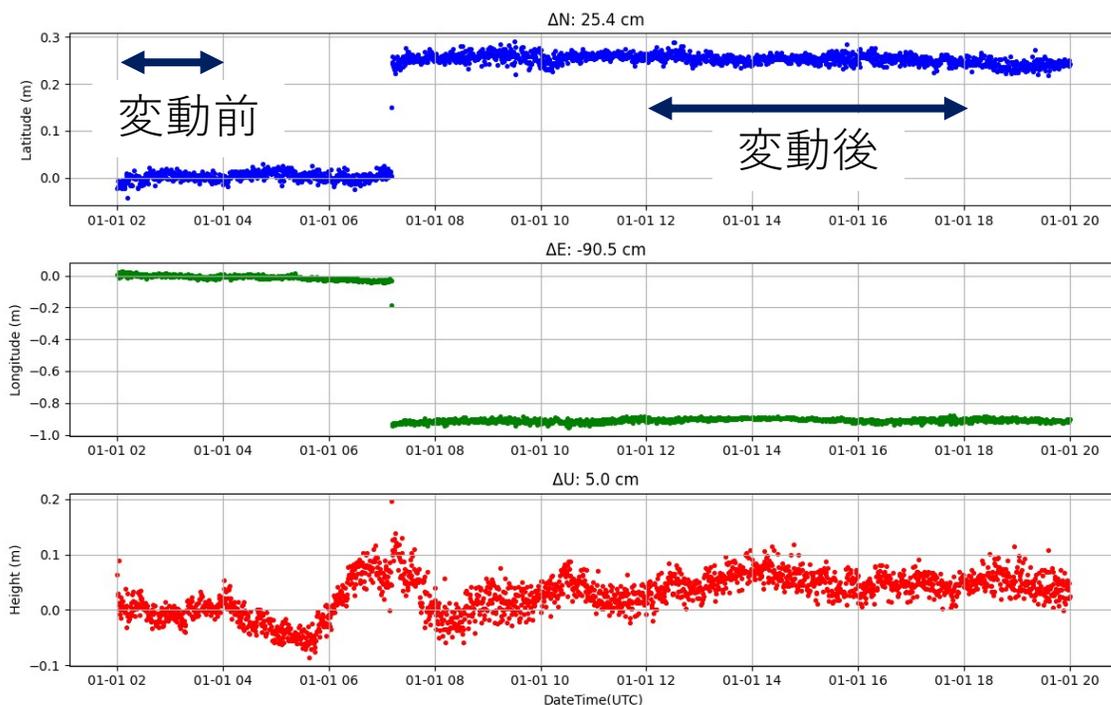
$$dN = -\sin B \cdot \cos L \cdot dX - \sin B \cdot \sin L \cdot dY + \cos B \cdot dZ$$

$$dE = -\sin L \cdot dX + \cos L \cdot dY$$

$$dU = \cos B \cdot \cos L \cdot dX + \cos B \cdot \sin L \cdot dY + \sin B \cdot dZ$$

が局所座標（B,L）におけるNEU方向の「変動量」となります。（国土地理院）

020972 (ANAMIZU) ΔHorizontal diff: 94.0 cm ΔVertical diff: 5.0 cm

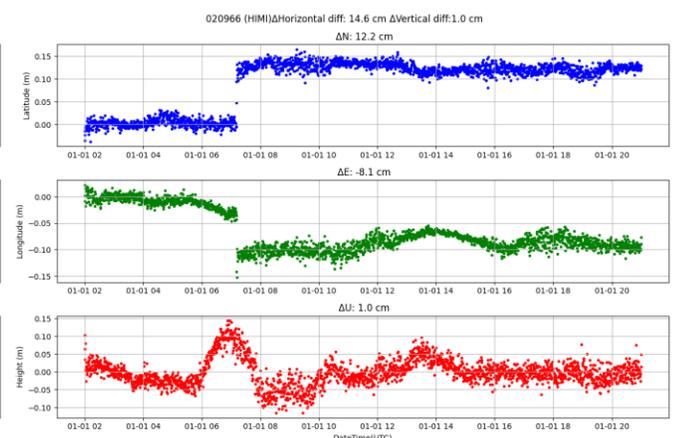
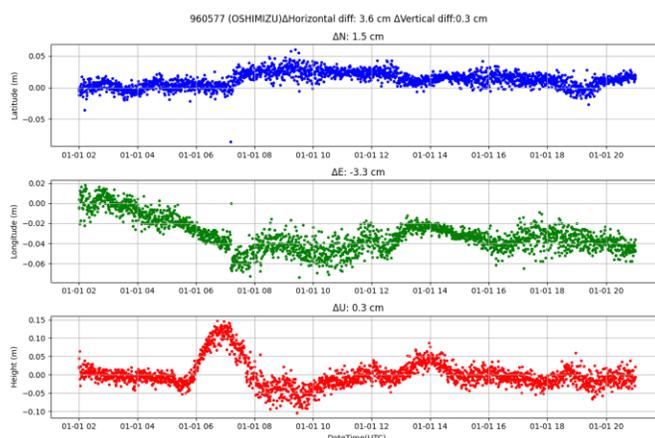
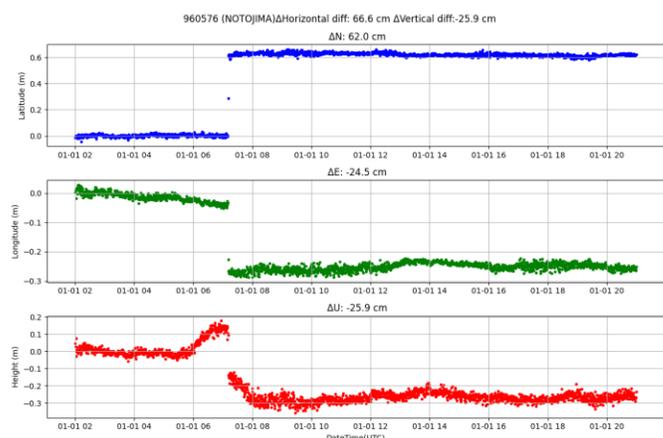
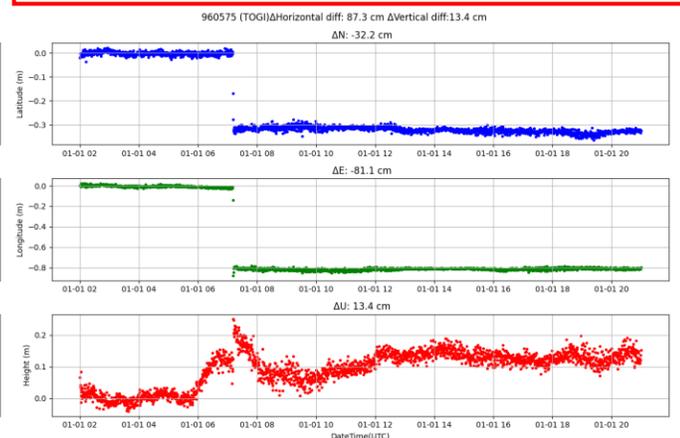
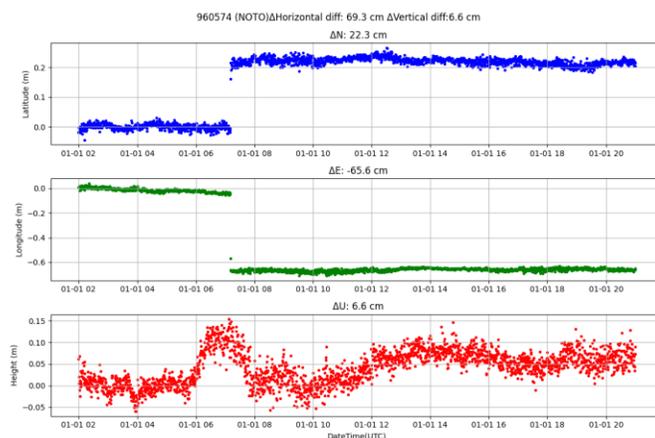
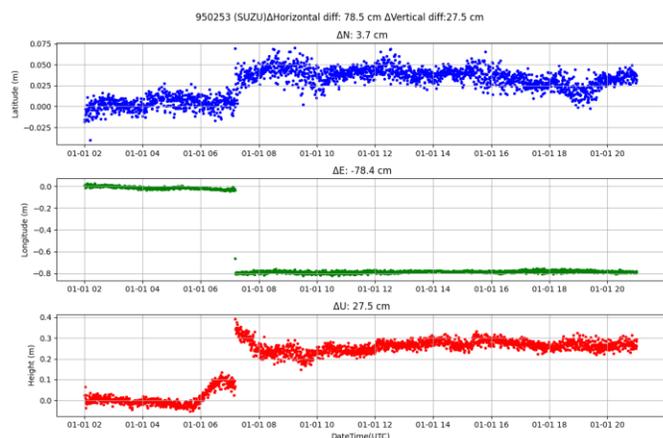
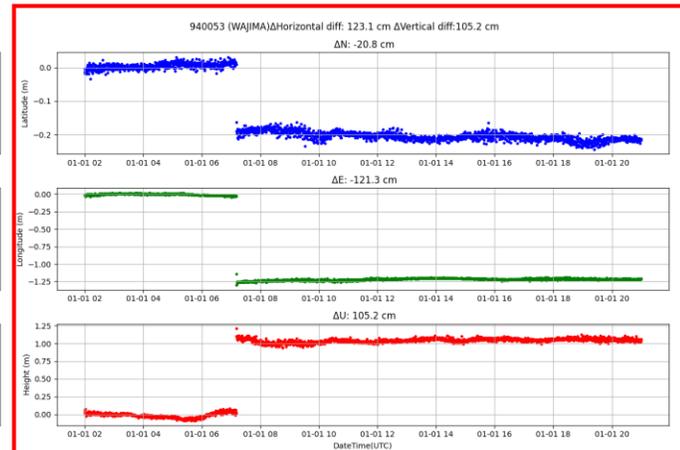
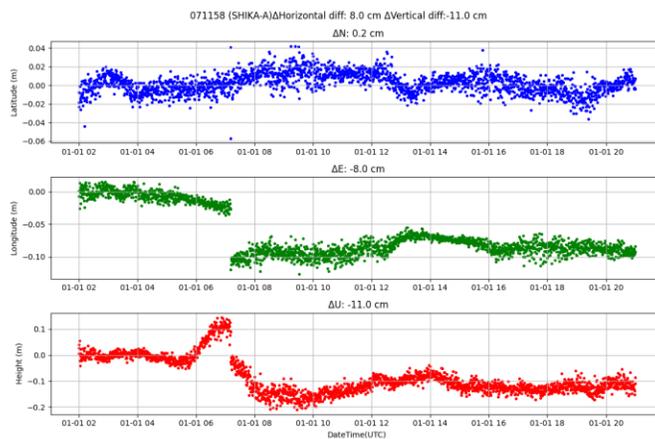
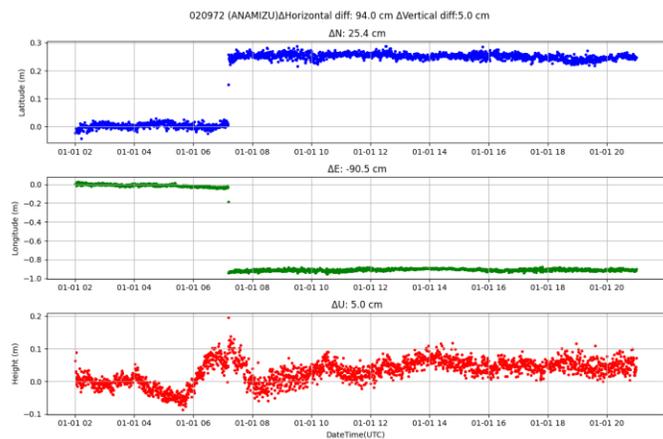


解析に使用した日時は2024/01/01 00:00:00～23:59:30(UTC)
PPP-KinematicをForward解析(GPS+QZSS+GLO+GAL)
(最初の1時間は収束時間として削除)

地震発生時刻が07:10なので、
02:00～04:00までの平均値を地殻変動前
12:00～18:00までの平均値を地殻変動後と定義

その両解の差分を上記の手法で計算し、変動量を算出

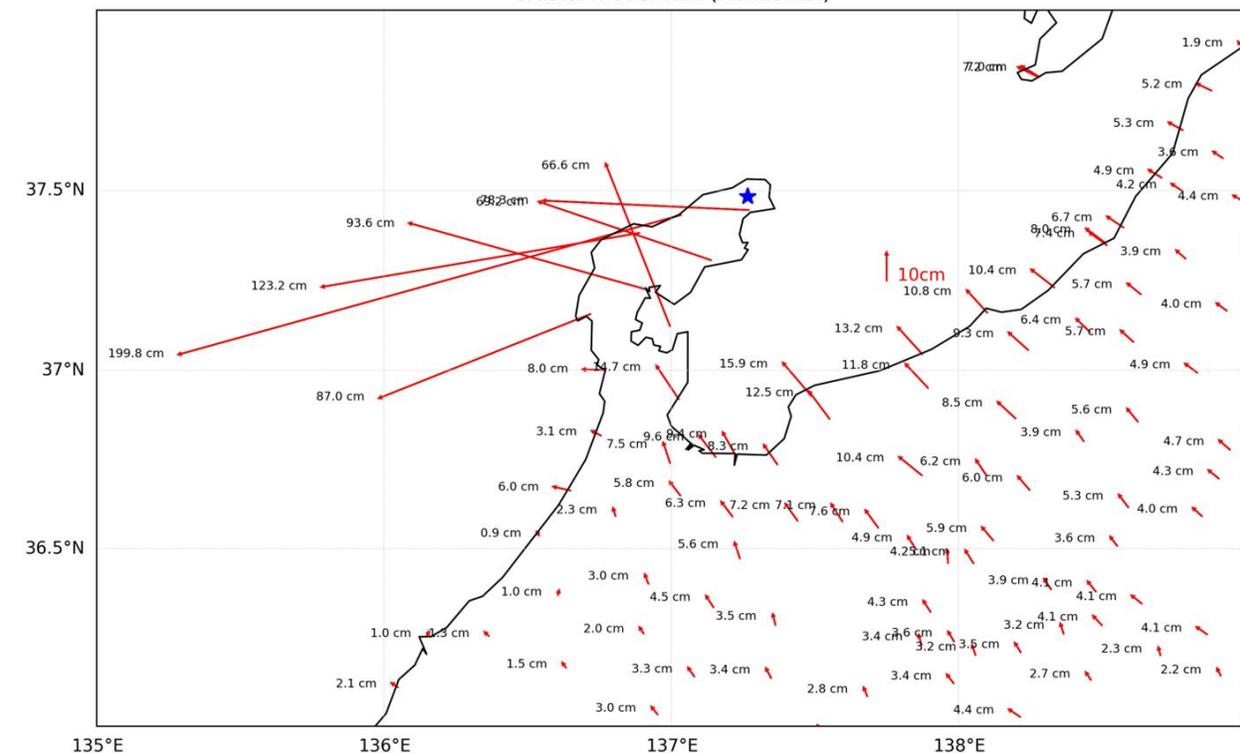
時系列解析結果



変動量マップ

MADOCA

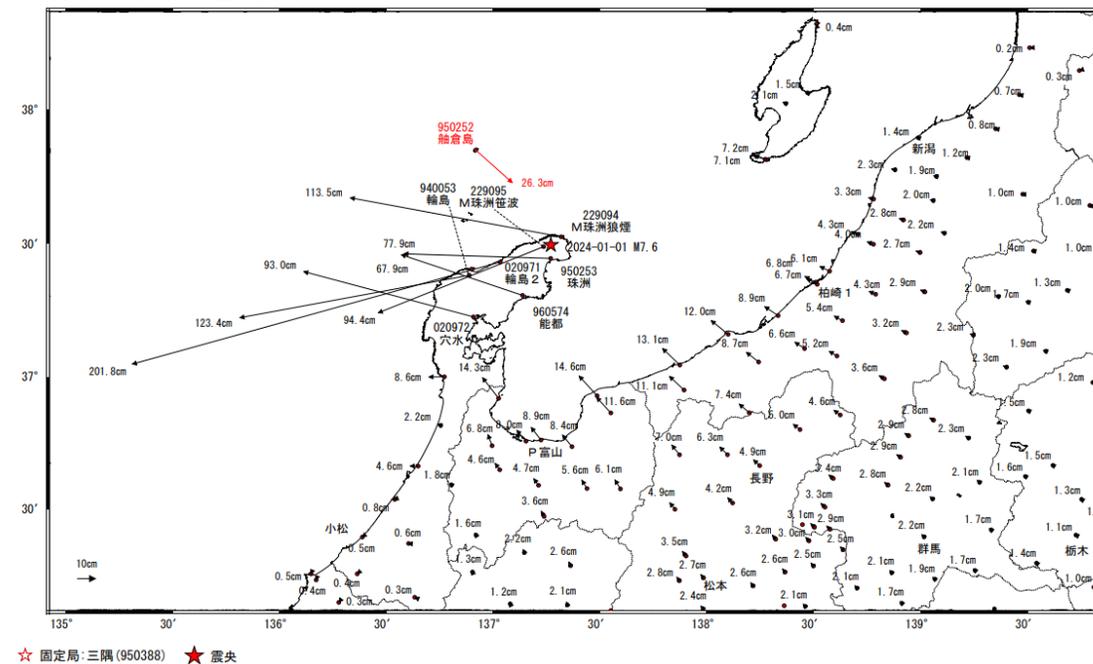
Crustal movement (Horizontal)



国土地理院(F5解)

地殻変動(水平)

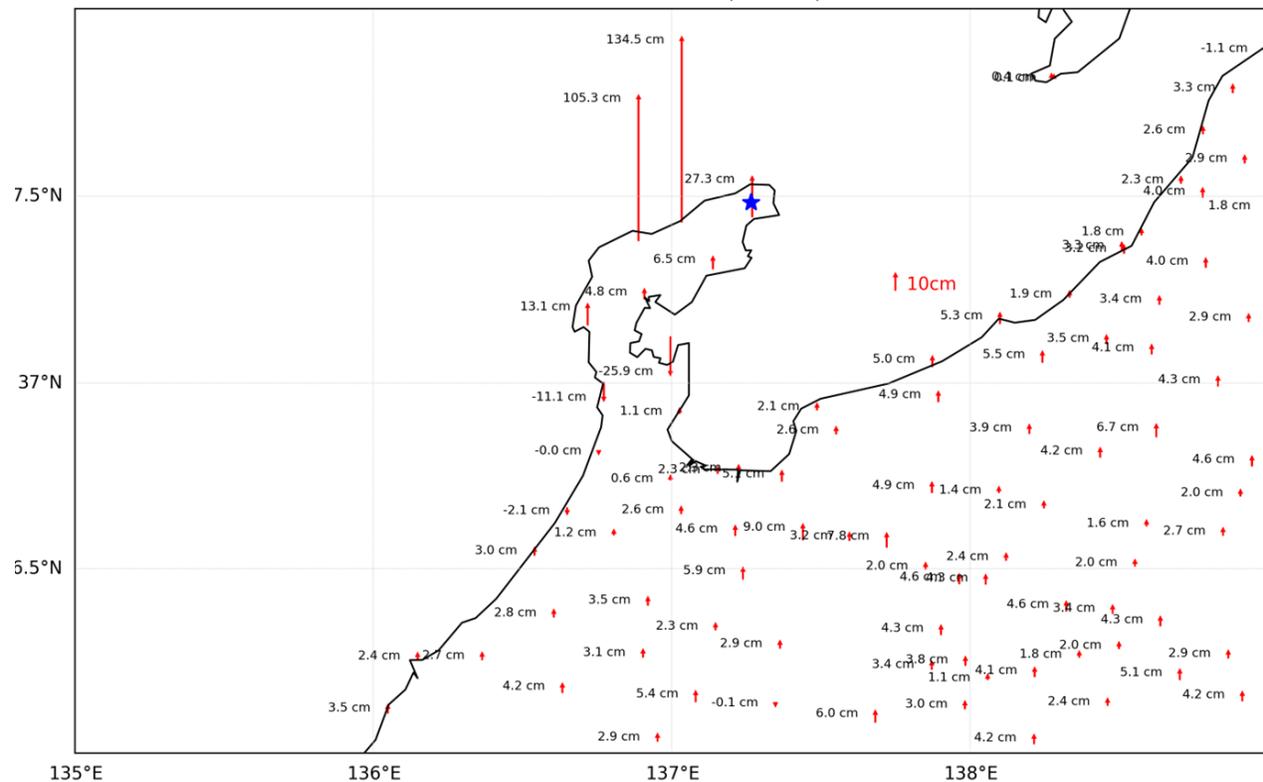
基準期間: 2023-12-25~2023-12-31 [F5: 最終解]
比較期間: 2024-01-02~2024-01-02 [F5: 最終解]



電子基準点	MADOCA	国土地理院	差分
輪島2	199.8cm	201.8cm	-2.0cm
輪島	123.2cm	123.4cm	-0.2cm
穴水	93.6cm	93.0cm	0.6cm
富来	87.0cm	87.6cm	-0.6cm
珠洲	78.3cm	77.9cm	0.4cm
能登	69.2cm	67.9cm	1.3cm

変動量マップ(垂直)

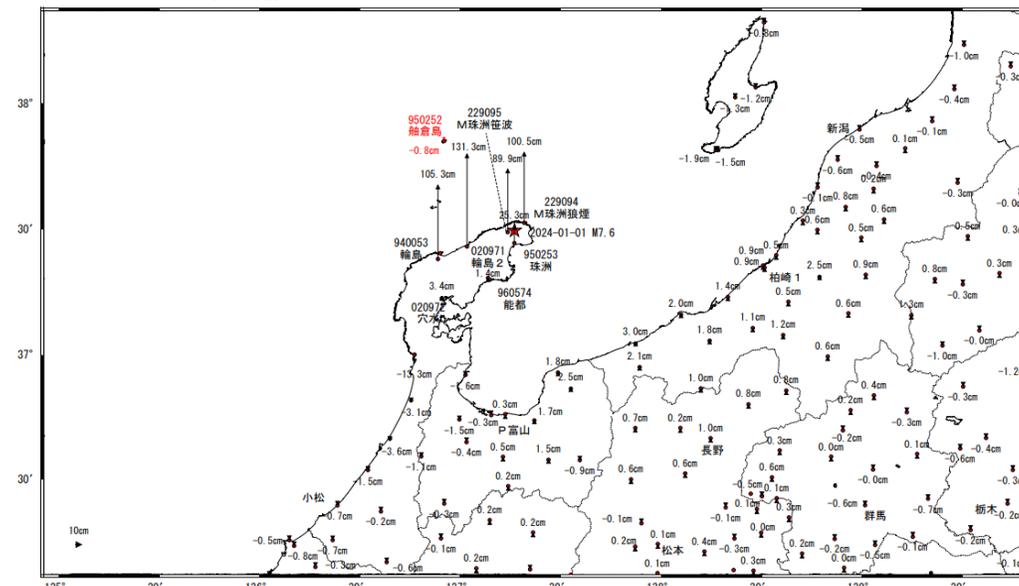
MADOCA Crustal movement (Vertical)



国土地理院(F5解)

地殻変動(上下)

基準期間: 2023-12-25~2023-12-31 [F5:最終解]
比較期間: 2024-01-02~2024-01-02 [F5:最終解]



☆ 固定局:三隅(950388) ★ 震央

※一部の観測点は、傾斜等の影響を受けている可能性がある。

国土地理院

電子基準点	MADOCA	国土地理院	差分
輪島2	134.5cm	131.3cm	3.1cm
輪島	105.3cm	105.3cm	0.0cm
穴水	4.8cm	3.4cm	1.4cm
富来	-11.1cm	-13.3cm	2.0cm
珠洲	27.3cm	25.3cm	2.0cm
能登	6.5cm	1.4cm	5.1cm

Kinematic解析なので、
高度方向の一致度は低い

変動量一覧

水平

電子基準点	MADOCA	国土地理院	差分
輪島2	199.8cm	201.8cm	-2.0cm
輪島	123.2cm	123.4cm	-0.2cm
穴水	93.6cm	93.0cm	0.6cm
富来	87.0cm	87.6cm	-0.6cm
珠洲	78.3cm	77.9cm	0.4cm
能登	69.2cm	67.9cm	1.3cm
能登島	66.6cm	65.2cm	1.4cm
入善	15.9cm	14.6cm	1.3cm
宇奈月	12.5cm	11.6cm	0.9cm
内灘	6.0cm	4.6cm	1.4cm
押水	8.0cm	8.6cm	-0.6cm
糸魚川1	13.2cm	13.1cm	0.1cm
糸魚川2	11.8cm	11.1cm	0.7cm

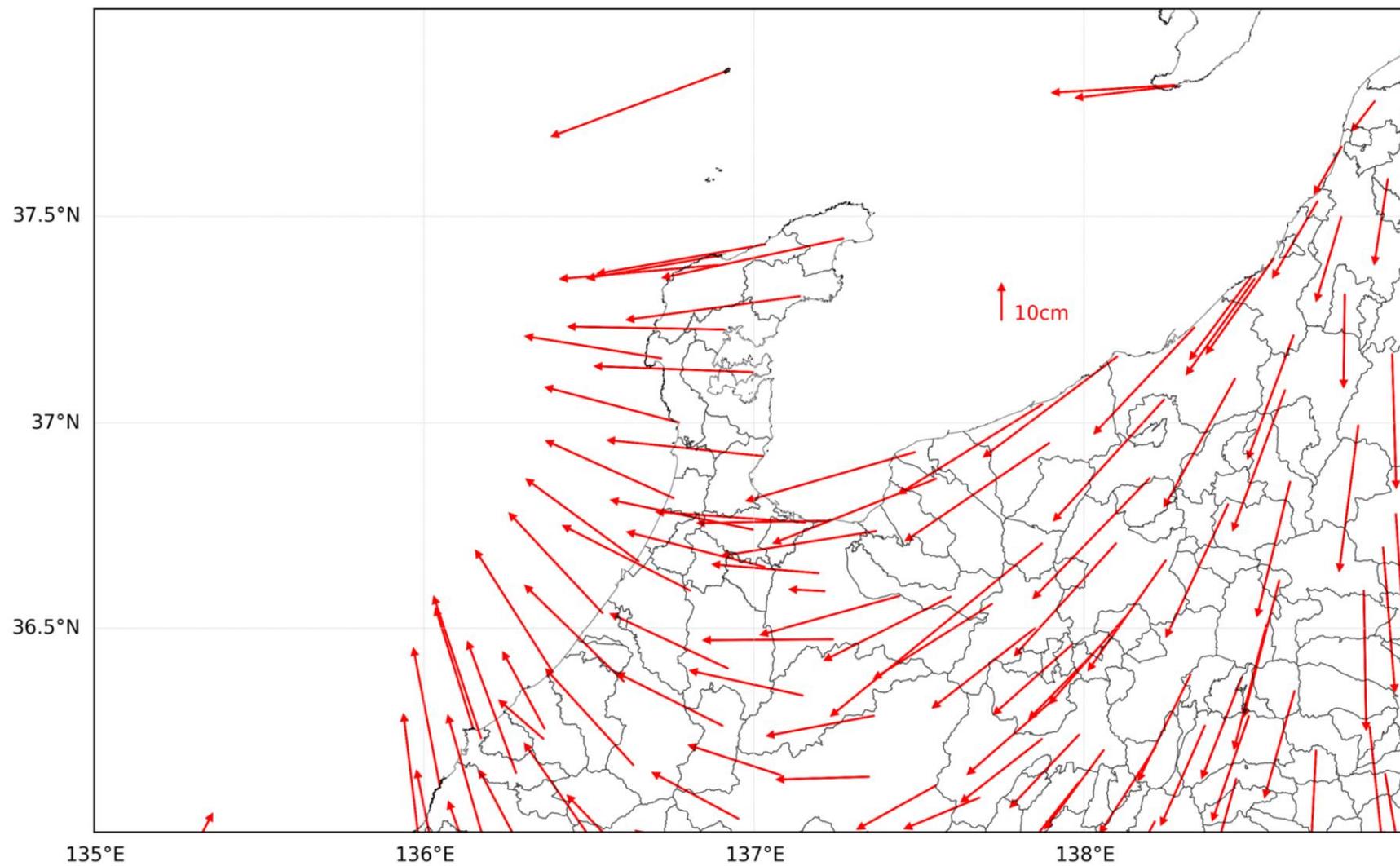
垂直

電子基準点	MADOCA	国土地理院	差分
輪島2	134.5cm	131.3cm	3.1cm
輪島	105.3cm	105.3cm	0.0cm
穴水	4.8cm	3.4cm	1.4cm
富来	-11.1cm	-13.3cm	2.0cm
珠洲	27.3cm	25.3cm	2.0cm
能登	6.5cm	1.4cm	5.1cm
能登島	-25.9cm	-31.3cm	5.4cm
入善	2.6cm	1.8cm	0.8cm
宇奈月	2.1cm	2.5cm	-0.4cm
内灘	-2.1cm	-3.1cm	1.0cm
押水	-11.1cm	-13.3cm	2.2cm
糸魚川1	5.0cm	3.0cm	2.0cm
糸魚川2	4.9cm	2.1cm	2.8cm

まとめ

- MADOCA-PPPのKinematic解析でも水平1～2cm程度、垂直方向数cm程度の精度で地殻変動を捉えることができる
Static解析を利用すれば、特に高度方向での精度を上げれるはずである
(比較対象のF5解は最終暦&1秒データを利用しているので、かなり不利な比較ではある)
- 現状、国土地理院はRTKによって全国1300点の電子基準点を監視しているので、MADOCA-PPPは新たに使用するメリットは薄い
- 私設電子基準点(大学、工事現場)をリアルタイムでモニタリングするには向いている
例えば1日1回PPPを実施し、その値を基準局の精密位置とする
電子基準点とのRTKをする方法もあるが、補正情報を購入の必要あり
- 今後1秒データが公開された場合、再解析
PPP-ARをした場合どうなるか

電子基準点(2013~2023)_参考

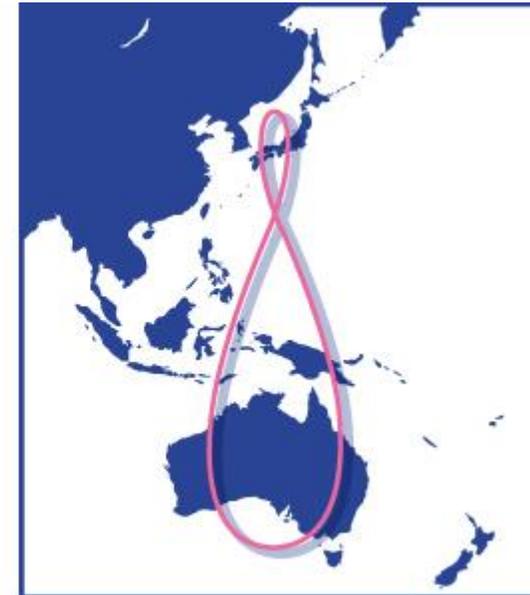


みちびき(QZSS)について

- みちびきとは、準天頂軌道の衛星が主体となって構成されている日本の衛星測位システム(QZSS)
測位衛星としては米国のGPSが有名だが、みちびきはGPSとの互換性を持つことで日本付近における測位精度を高める(**補強機能**)、測位可能エリアを広げる(**補完機能**)を有している
- みちびきの軌道は特徴的で、地上からは8の字の軌道を描いているように見える(日本付近で観測しやすい)
- みちびきの補強機能は、カーナビ等で使用される単独測位の精度(m級)を最大cm級までに高める機能
そのためにはみちびきより送信される補強信号(L1S/L6D/L6E)を受信する必要がある



みちびきの軌道



出典：みちびき 公式ページより