

迅速・高精度なGNSS定常解析システムの 構築に関する研究

【研究期間】

平成29年4月～令和2年3月（3年間）

【予算】

特別研究経費 26,443千円（3年間の総額）

国土地理院 地理地殻活動研究センター
宇宙測地研究室
中川 弘之

- 本研究の背景・必要性
- 本研究の目的・目標
- 本研究の実施内容
 - －（１）プロトタイプシステムの開発
 - －（２）衛星軌道の評価
 - －（３）座標時系列の再現性の評価
 - －（４）本システムの有効性の検証　－2016年熊本地震－
- 当初目標の達成度
- 今後の課題と成果活用の見込み

電子基準点

全国に約1,300点設置している、
高い位置精度の国家基準点



電子基準点
(高さ 5m)



- ① 測定の基準
- ② 地殻変動の監視
- ③ 位置情報サービスの支援

位置が測れる環境を提供



定常的に
解析

2 種類の解析システム
を運用

GEONET定常解析：電子基準点の位置を高い精度と安定性で 定常的に計算。我が国の基本的な地殻変動データとして認識

地震調査委員会、地震防災対策強化地域判定会：地震活動の評価
火山噴火予知連絡会：活火山の山体の変化の監視等に使用

電子基準点リアルタイム解析システム (REGARD)：
電子基準点の1秒毎の変位を常時計算、大きな地震が発生した際に断層モデルを推定し地震の規模を推定

定常解析の課題

- 政府の防災関係の会議に地殻変動情報を提供するタイミングが遅くなる場合がある（**迅速性**）
- 短時間に続発する地震や火山噴火前後の地殻変動の推移を詳細に捉えられない（**時間分解能**）

それに対しREGARDは

- **リアルタイム**で電子基準点の位置を把握
- **迅速性は高いが、精度は定常解析よりも低い**

（参考）定常解析とREGARDの比較

定常解析	解析の種類	解の間隔	地震発生後に変動が捉えられるまでのタイミング	水平精度 （座標再現性の代表的な値）
	F3（最終解）	1日	2～3週間後	2～3mm
	R3（速報解）	1日	約2～3日後	2～3mm
	Q3（迅速解）	3時間	約8～11時間後	1cm
	REGARD	1秒	リアルタイム	約10cmより良

目的：

- 全国のGEONETデータを、精度を保ちつつ従来の定常解析よりも**迅速・高時間分解能に解析できる手法の開発**
- 将来の定常解析を想定した**プロトタイプシステム**の開発

高い時間分解能の地殻変動情報を迅速に提供

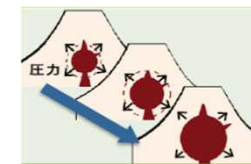
詳細な地殻変動メカニズムの解明と迅速な防災への活用

プロトタイプシステムの性能目標：

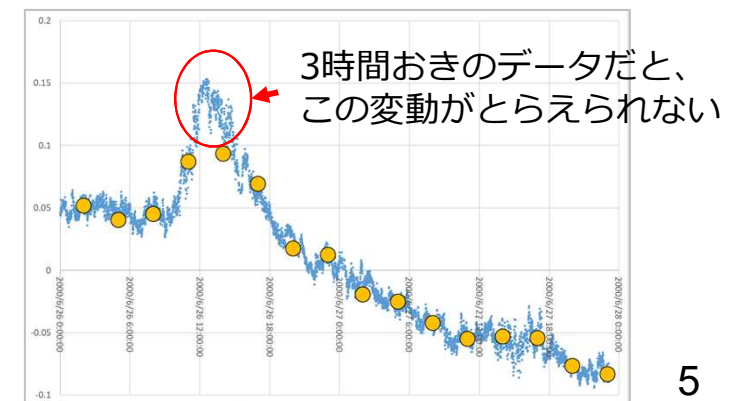
要求	目標	理由
精度 (再現性)	水平成分の 標準偏差 約1cm	現在の定常解析解 (迅速解 (Q3)) と同等
迅速性	約2時間	地震時、政府の臨時 の会議に断層モデル を適時に提出
時間分解能	1秒	火山噴火や地震後の 余効滑り域の監視

火山活動時の山体変動の例

三宅島の噴火貫入イベント (2000/6/26~27)



電子基準点「三宅2」 東西方向の変位



青: 30秒データ

茶: 3時間おきにデータを選んだもの

本研究の実施内容

(1) プロトタイプシステムの開発

地殻変動監視の課題を克服するには従来の手法よりも**精密単独測位のAR法（PPP-AR法）**が適している

- AR*を行えば、精度は従来の手法に匹敵
- 精密単独測位法は計算負荷が軽く多量の観測点を迅速に解析可能

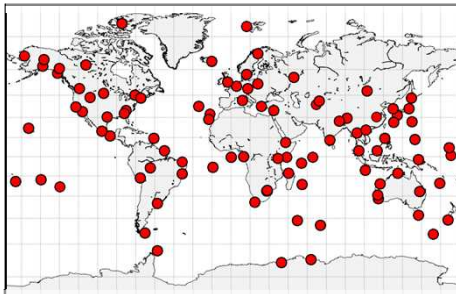
*AR（Ambiguity Resolution）：測位衛星までの距離を正しく求める手法

	GEONET定常解析		キネマティックPPP-AR法		REGARD	
再現性	◎	2mm～約1cm	○	1cm（水平）	△	約10cm
迅速性	△	8時間～3週間	○	電子基準点全点を2時間で解析（目標）	◎	リアルタイム
時間分解能	△	3時間～1日	◎	1秒	◎	1秒

既存の解析の隙間を埋める

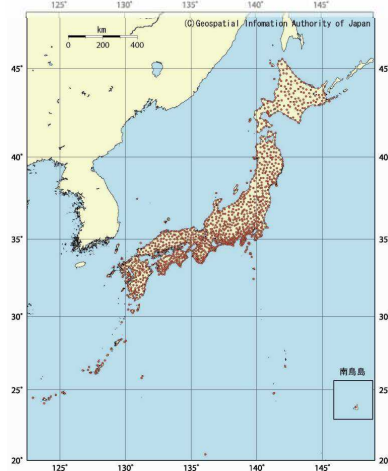
二つのステップで構成

グローバル観測局
約100局



IGS、UNAVCO、JAXAのMGM-net、
GEONETから選点

GEONET 全国約1300点



グローバル
観測データ



補正情報等の生成
(MADOCA)

1 : グローバルな観測データから補正情報等の推定

補正情報等

- 衛星軌道
- 衛星クロック
- その他補正情報

直近の24時間分を定期的に解析

補正情報等

2 : 全国の電子基準点の位置を計算

GEONET
観測データ



PPP-AR解析
(RTKLIB)

座標の時系列

- 精度 : 水平1cm
- 時間分解能 : 1秒
- 24時間スパン
- 2時間以内 (目標)

※使用するGNSS : GPS、GLONASS

MADOCA : JAXAが開発した衛星軌道・クロック等推定ソフトウェア。PPP-ARのための補正情報も推定可能
RTKLIB : PPP解析が可能な無償ソフトウェア。(http://www.rtklib.com/)

高品質な座標値の生成には

安定した補正情報（衛星軌道や衛星クロック）が必要

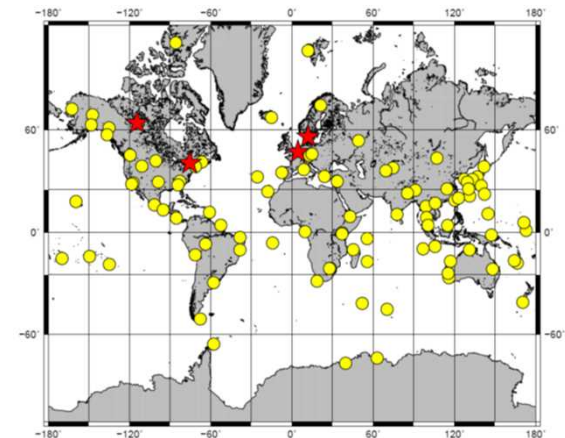
そのためには

1. 観測データの欠測の影響を小さくすること
2. 安定した時計情報を基準として用いることが必要
(次のスライドを参照)

開発のポイント：補正情報等を推定するごとに以下の2点を実施

1. グローバル観測局の観測データの欠測による影響軽減
→ 1時間以上の欠測がある観測局を除外
2. 安定した基準時計情報を選定するアルゴリズム
→ 複数のグローバル候補局から
最も安定した観測局を選定

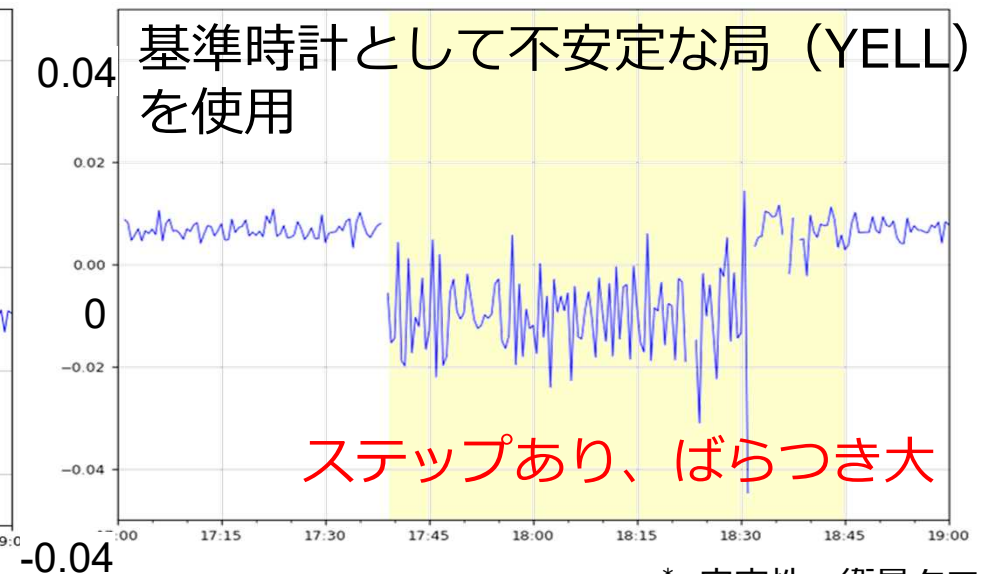
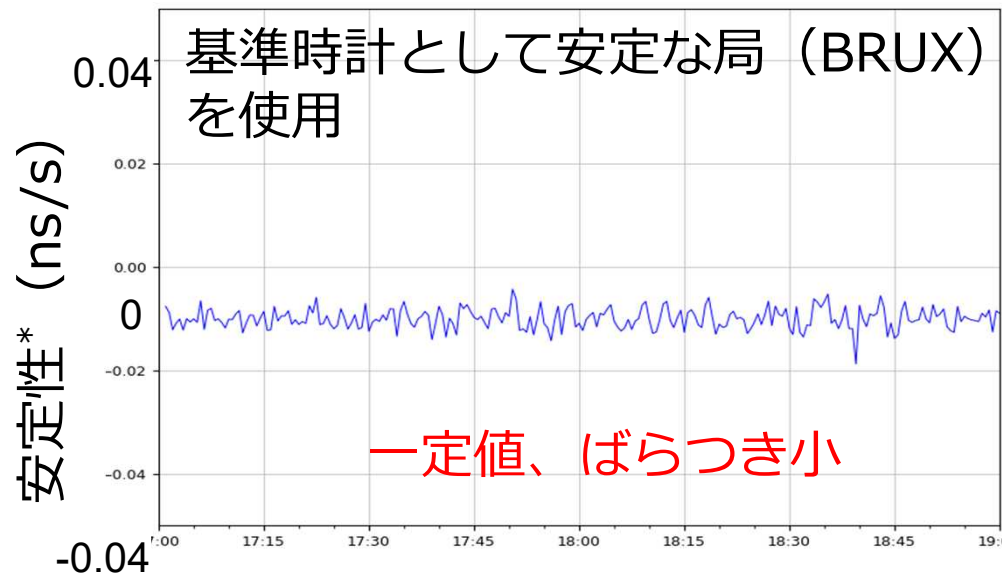
(候補局それぞれを基準時計として衛星クロックを推定。それぞれを用いて一点のGEONETデータを実際に解析して、座標時系列のばらつきが最も少なかった候補局を基準時計に選定)



黄色：グローバル観測局
赤色：候補局

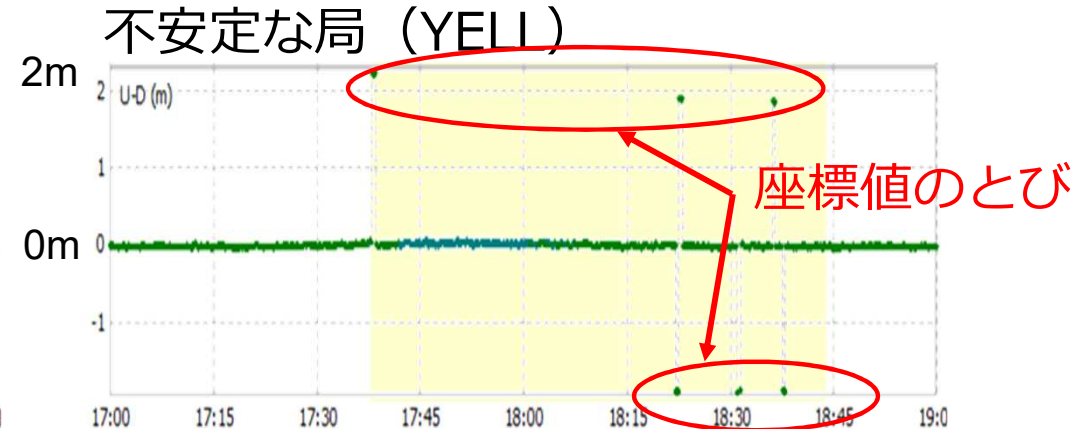
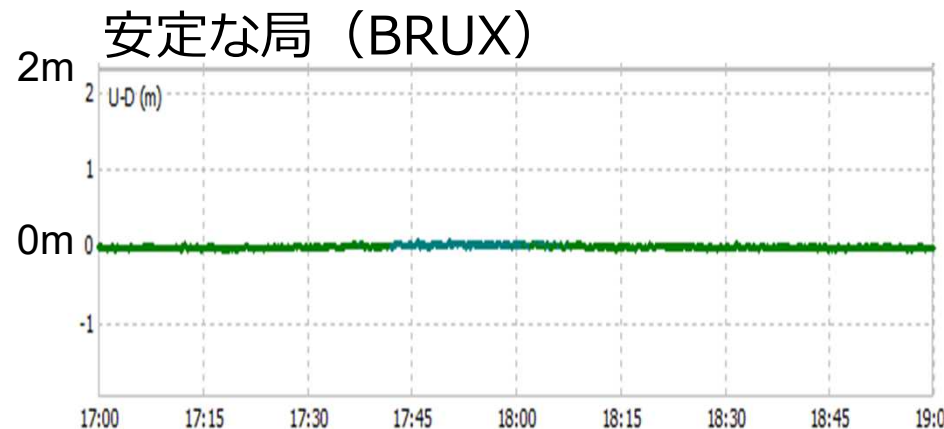
(1) プロトタイプシステムの開発

衛星クロックの安定性 例：GPSの2番衛星（2019/2/5 17:00~19:00）



* 安定性 = 衛星クロックの変化率

このときの座標時系列の安定性（「つくば1」上下成分）

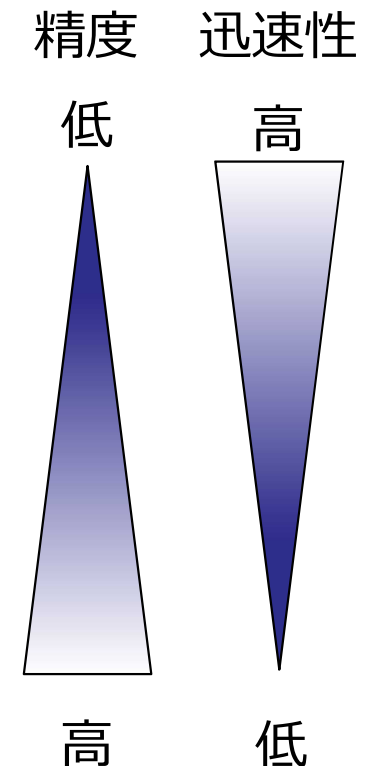


基準時計として安定したグローバル観測局を採用
不安定な

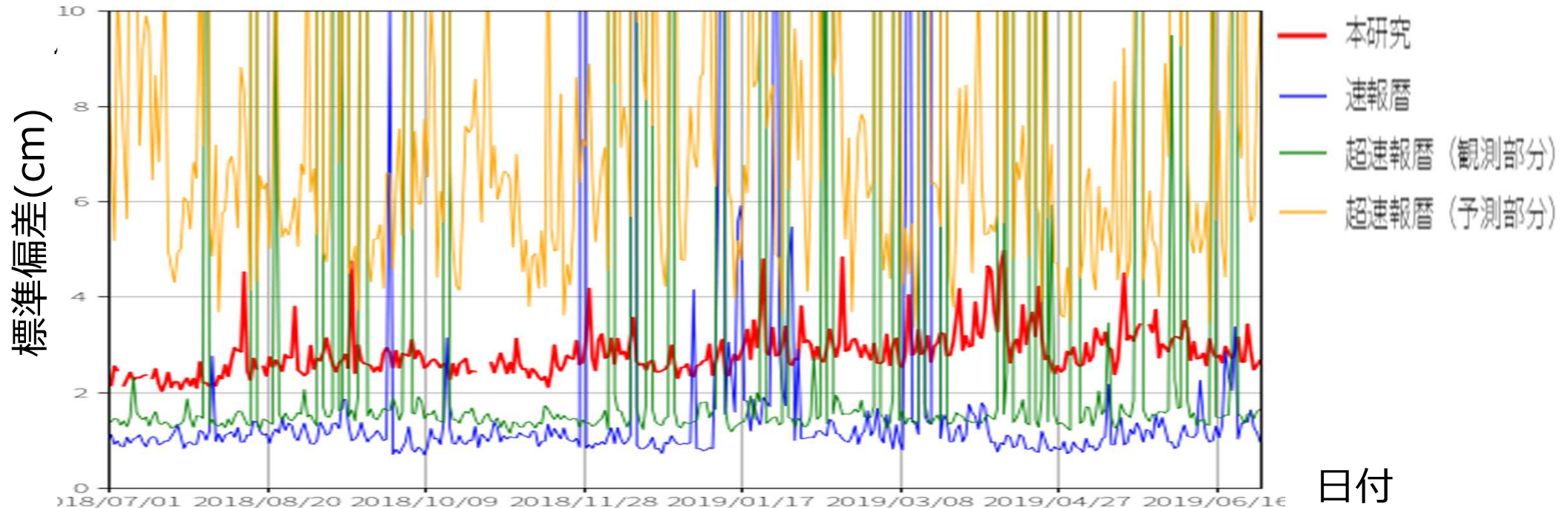
→ 座標値も安定
→ 座標値も不安定

- GPSについて、国際機関（国際GNSS事業：IGS）が提供している最も精度の高い衛星軌道（最終暦）を基準として、それからの差分の標準偏差を評価
- IGSが提供している3種類の衛星軌道と比較

名称	時間遅れ	更新頻度
IGS超速報暦 (予測部分)	リアルタイム (24時間後までの 予測値)	6時間毎
本研究	15～20分程度	1時間毎
IGS超速報暦 (観測部分)	3～9時間後	6時間毎
IGS速報暦	17～41時間後	毎日



本研究とIGS速報暦、超速報暦（観測部分、予測部分）の比較：
IGS最終暦との差分の標準偏差



本研究の結果は

- IGS速報暦、超速報暦（観測部分）（約1～2cm弱）より、生成は早いが精度は劣る
- IGS超速報暦（予測部分）（数～十cm程度）より高精度
 - 本研究の結果は予測部分を含まないため
- 他の軌道情報で見られる様な標準偏差のとびは見られない
→ 安定性が高い

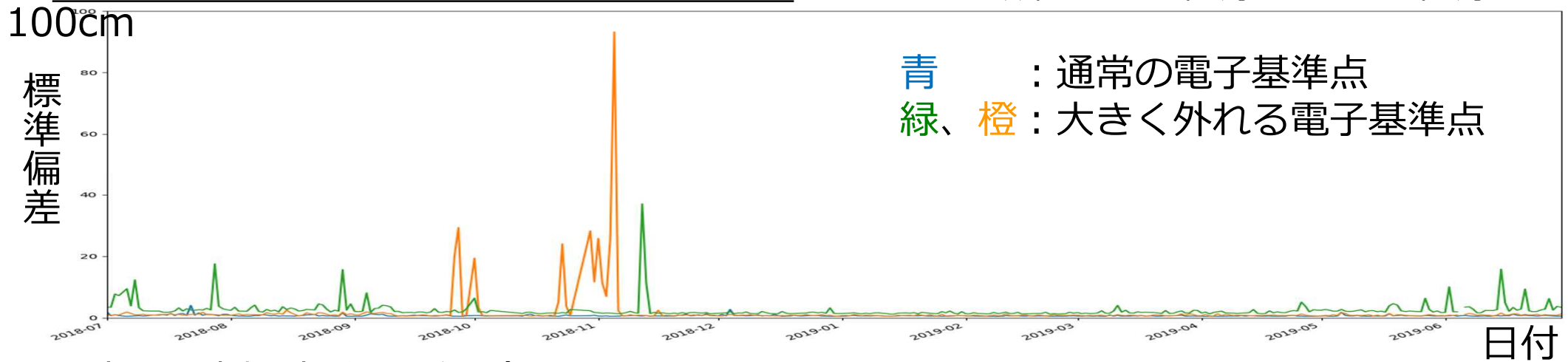
(3) 座標時系列の再現性の評価

毎日の座標時系列の水平成分の標準偏差（試験期間：1年間）

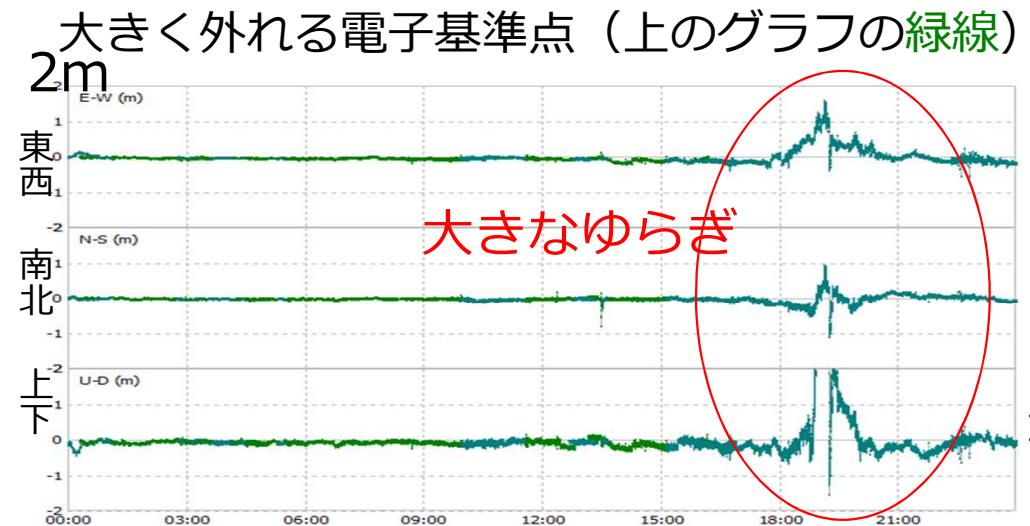
- 多くの電子基準点では大きい日でも3~4cm
- 一方、**十cm~数mまで外れる日がある観測局が存在した**

年間の標準偏差の時系列の例（東西成分）

期間：2018年7月1日~2019年6月30日



24時間の座標時系列の例（2018/7/28）



異常点の除去

解の品質を低下させる、主要な「**外的な**」要因

- **機器**（受信機、アンテナ）の不調
- **不良な観測環境**（樹木による遮蔽等）
- **近隣の電波干渉源**（携帯電話の基地局等）

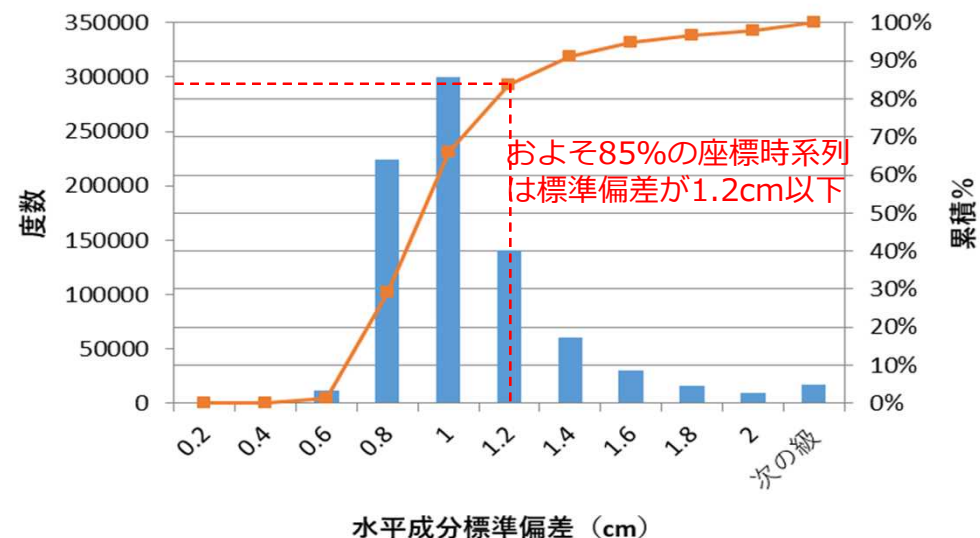
プロトタイプシステムそのものの**安定性**を見るためには、試験解析期間中において、上記に該当した電子基準点を**除外する必要**

⇒ 1170点を評価（136点を除外）

結果

水平成分の標準偏差
の平均値は1.00cm
= 目標を達成

水平成分座標時系列標準偏差のヒストグラム



PPP-ARを用いて、電子基準点全点のデータを従来よりも迅速・高時間分解能に解析できる手法を開発し、それを実装したプロトタイプシステムを構築

- 1年間の座標時系列の水平成分の標準偏差は、電子基準点全点の平均値で1.00cmとなり、目標を達成した
- 電子基準点全点の24時間の座標時系列（1秒間隔）が、約2時間半で算出できた
- これにより、従来のGEONETと同程度の精度の地殻変動情報が、より早く提供できる見通しがたった
- 2016年熊本地震では、3時間弱で発生した2つの地震の地殻変動を精度良く分離できた

今後の課題

- 解析の迅速化、システムの安定性の向上
 - 座標時系列の安定性の向上
 - 補正情報等や座標時系列の品質チェックの方法の検討
- 定常的運用へ（研究部門→現業部門）

さらなる挑戦：

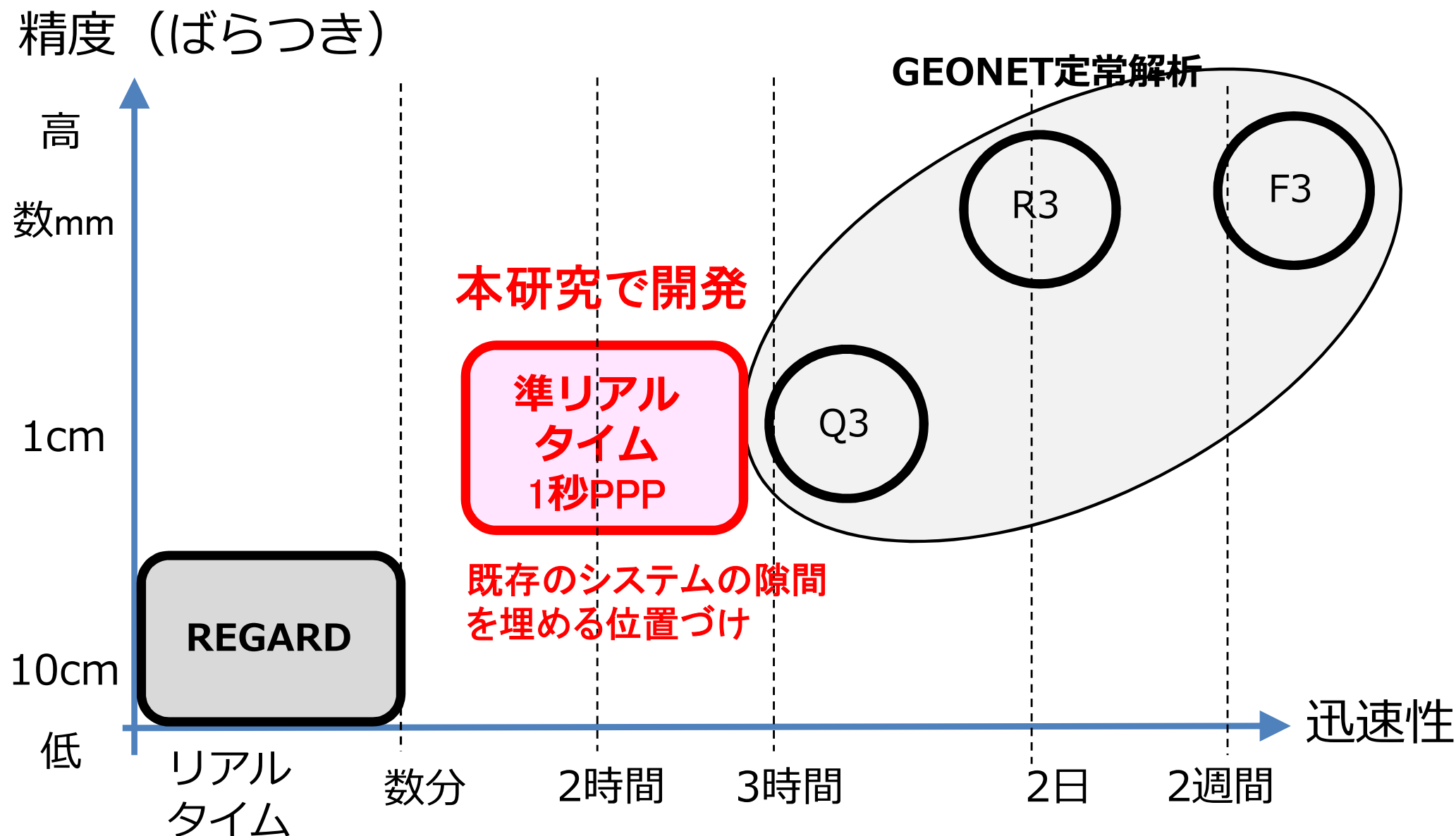
- 推定する衛星軌道・クロックの他の衛星系（準天頂衛星システム、Galileo）への拡張による座標時系列の安定性の向上
→ 次期特研で開発を検討

成果活用の見込み

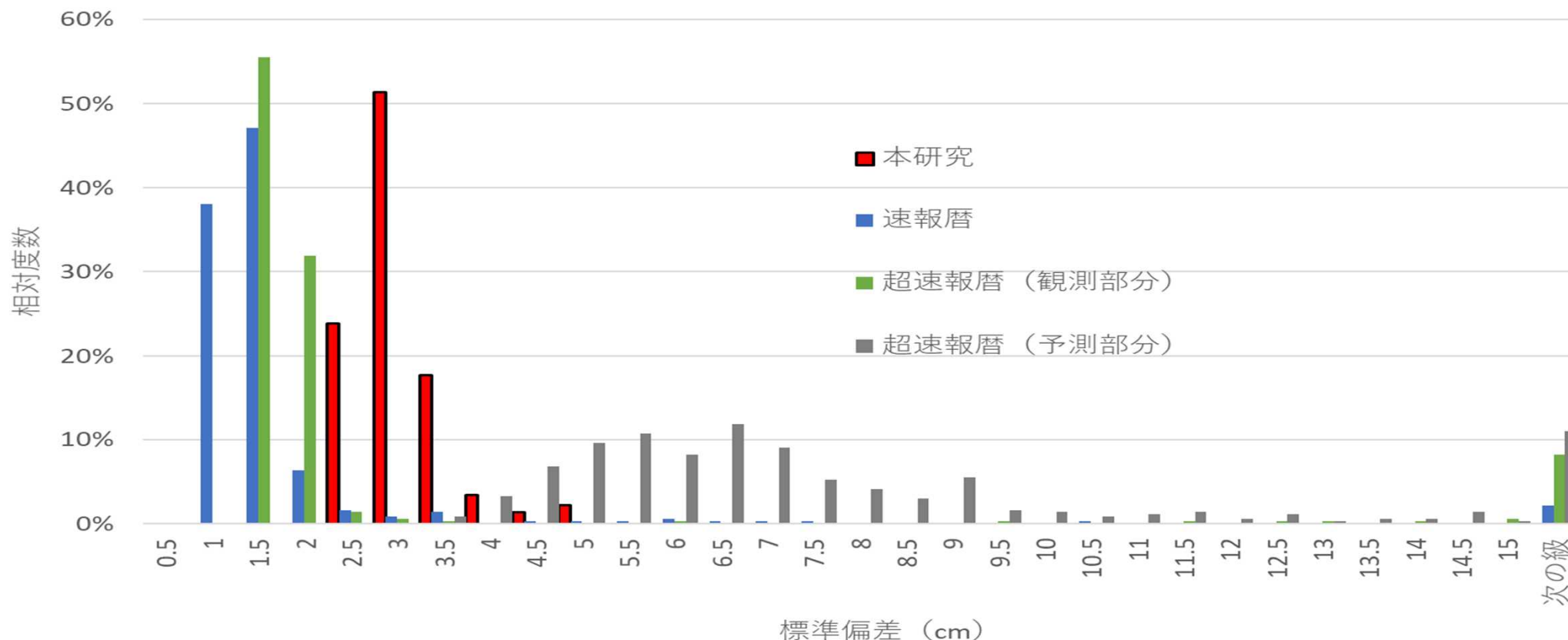
- 国土地理院による、地殻変動情報のより迅速な把握や詳細な震源過程のモデル化等
→ 地震・火山に伴う地殻変動監視や評価への貢献
- （将来的に）作成した衛星軌道情報等の提供

参考資料

地殻変動監視の高精度化のためには、精度を保ちつつ、迅速性と時間分解能を向上させた新たな解析手法が必要



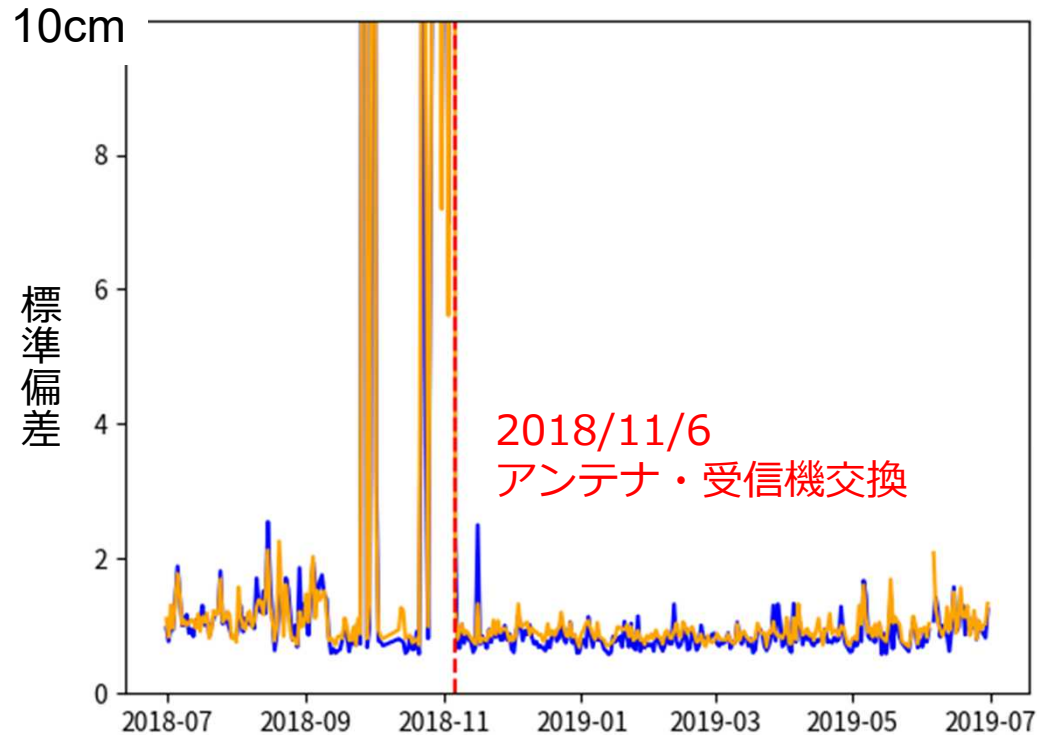
IGS最終暦との差分の標準偏差 (期間：2018/7/1～2019/6/30)



本研究の結果は

- IGS速報暦、超速報暦（観測部分）（約1～2cm弱）より、生成は早いが精度は劣る
- IGS超速報暦（予測部分）（数～十cm程度）より高精度
- 他の全ての暦で見られる標準偏差のとびは見られない
= 安定性が高い

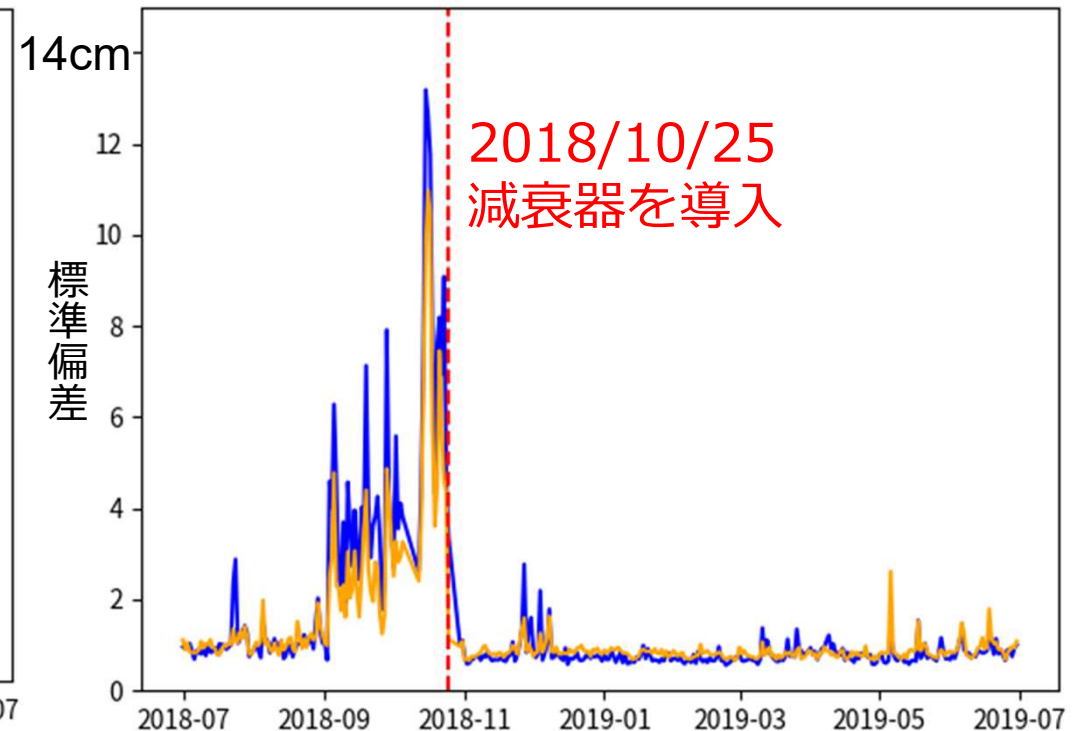
機器の不調の影響



オレンジ：東西成分 青：南北成分

アンテナと受信機の交換により、
座標時系列の水平成分のばらつき
が改善

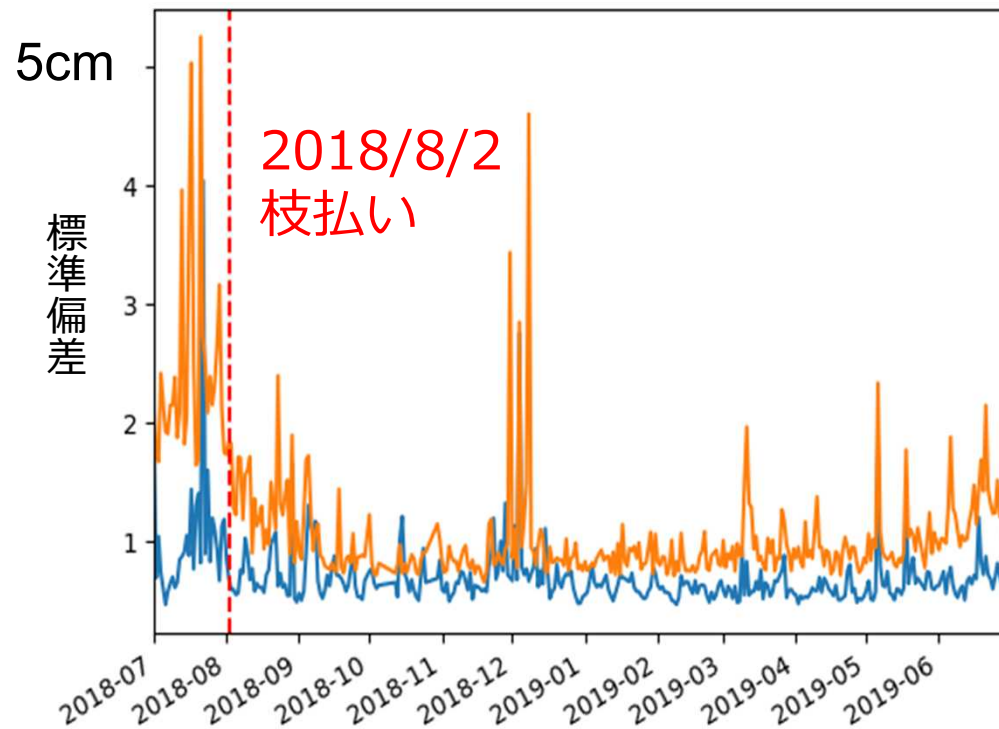
電波干渉の影響



オレンジ：東西成分 青：南北成分

減衰器の導入（電波干渉の影響の
軽減）により、座標時系列の水平
成分のばらつきが改善

樹木の影響



枝払い前の上空視界



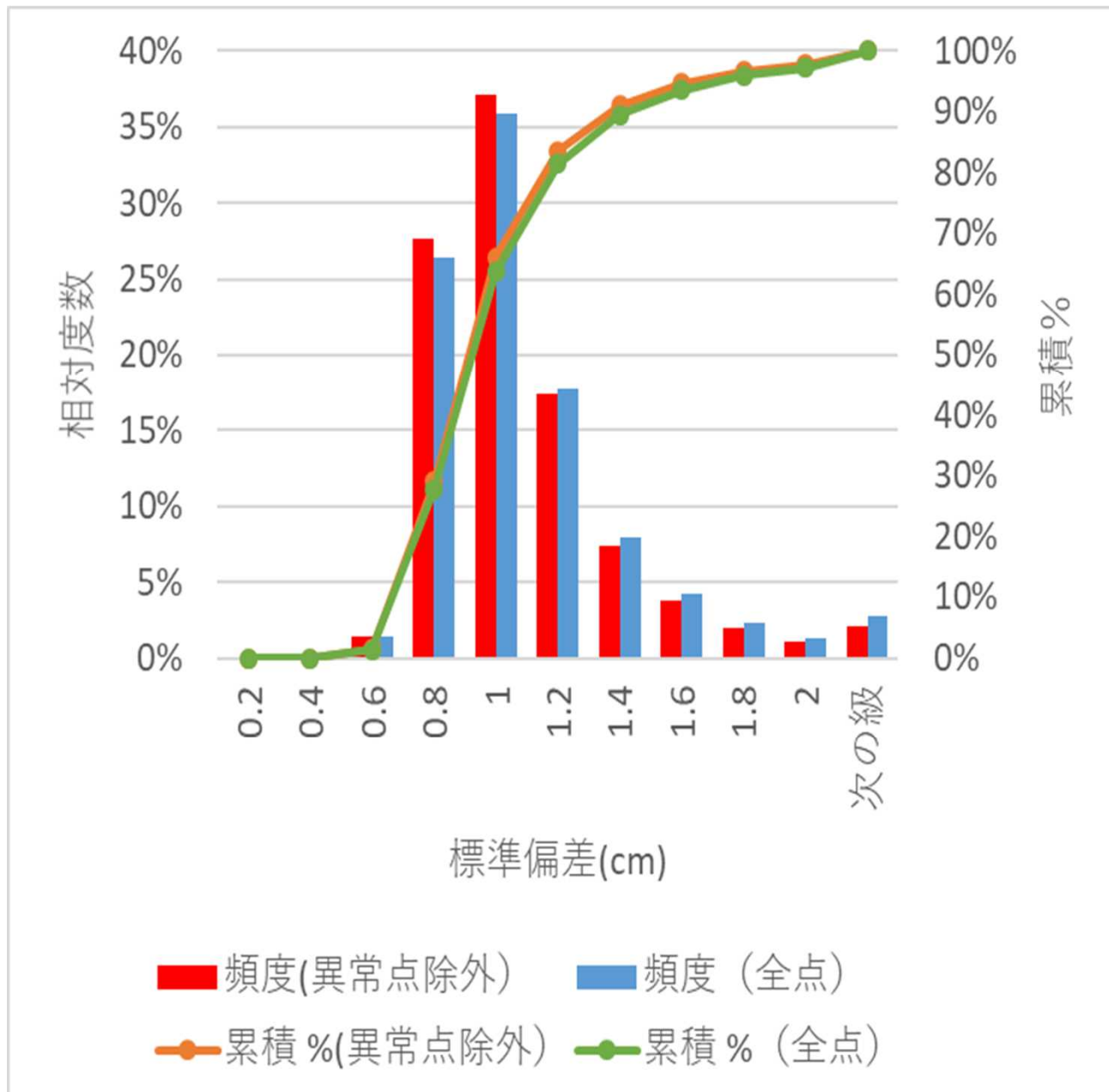
樹木による遮蔽

オレンジ：マルチパスの影響大の観測点。東西成分。
(南西側に桜の木)

青：マルチパスの影響のない観測点。東西成分。

枝払いにより、水平成分のばらつきが改善

「異常点」を除去した効果

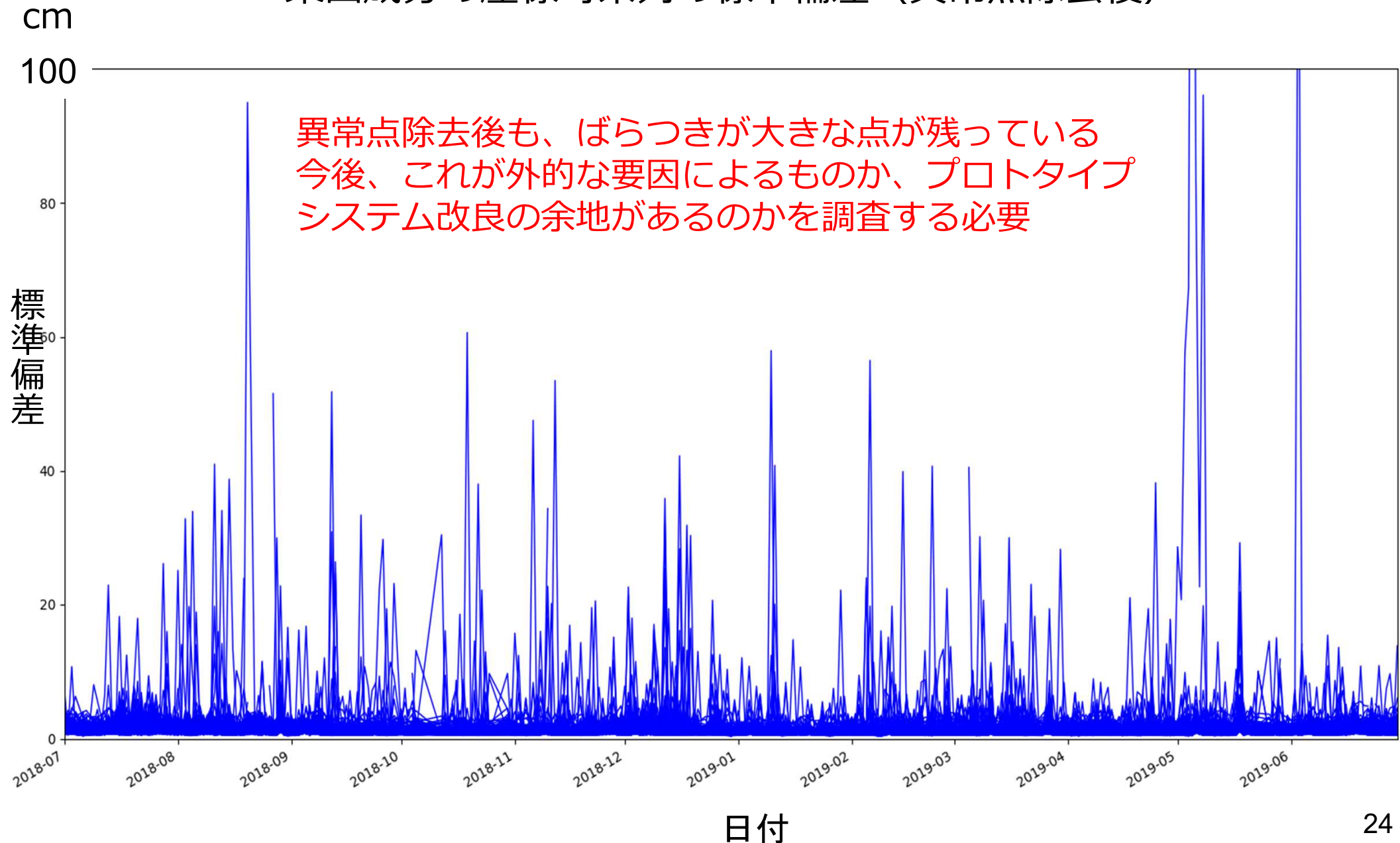


理由	除外点数
機器不調による交換	63点
観測環境が不良	74点
電波干渉	4点

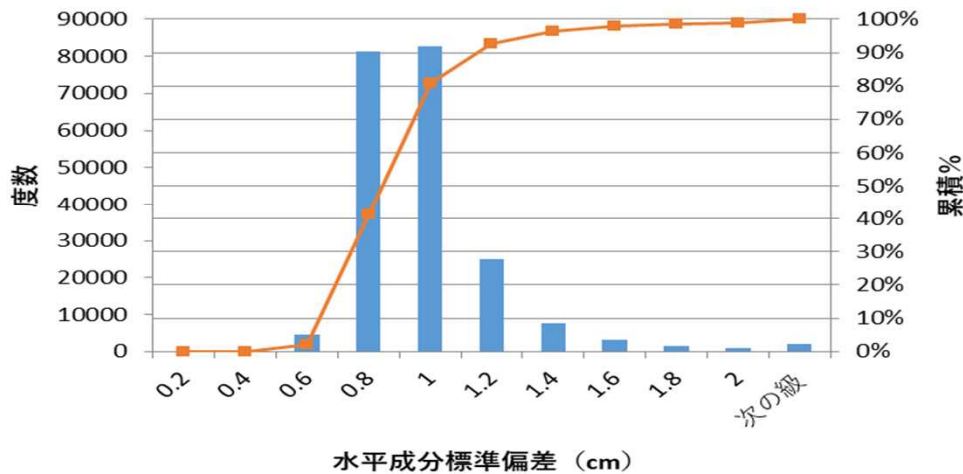
重複があるため、実際に除外した点数は136点

異常点の除去により、
座標時系列の再現性が
若干の改善

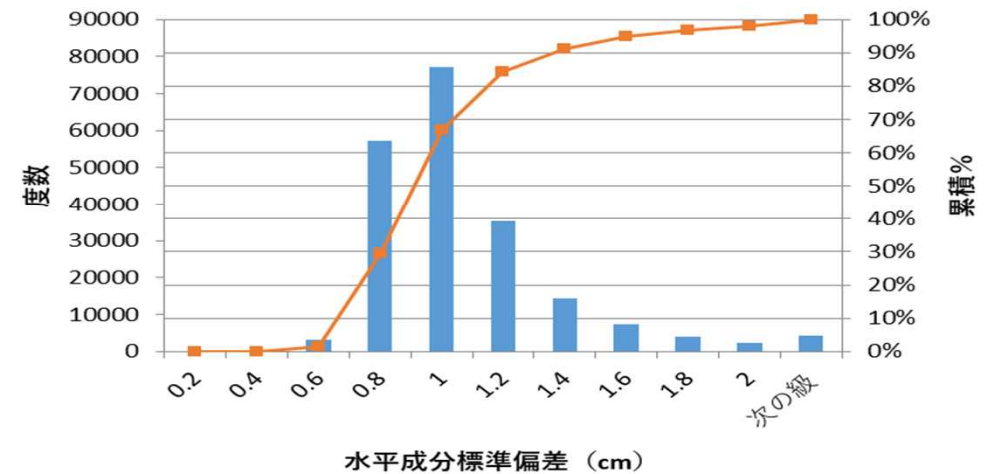
東西成分の座標時系列の標準偏差（異常点除去後）



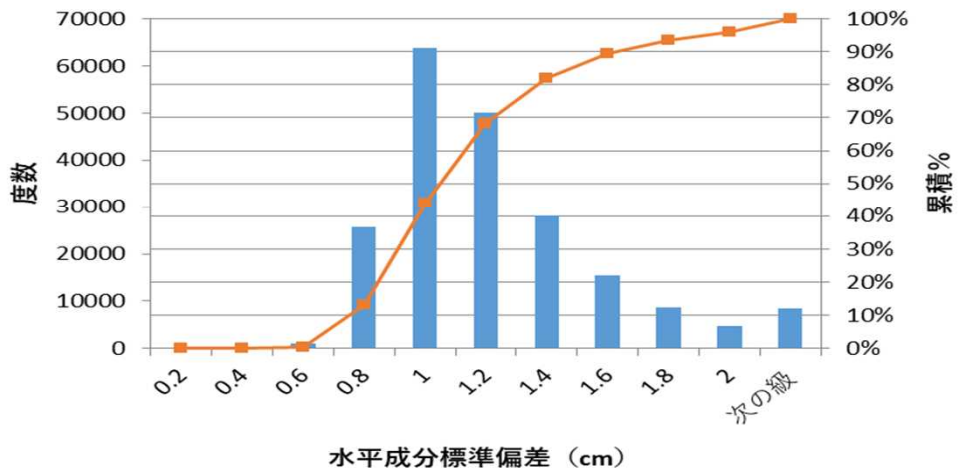
冬期 (2019/1/1～3/31)



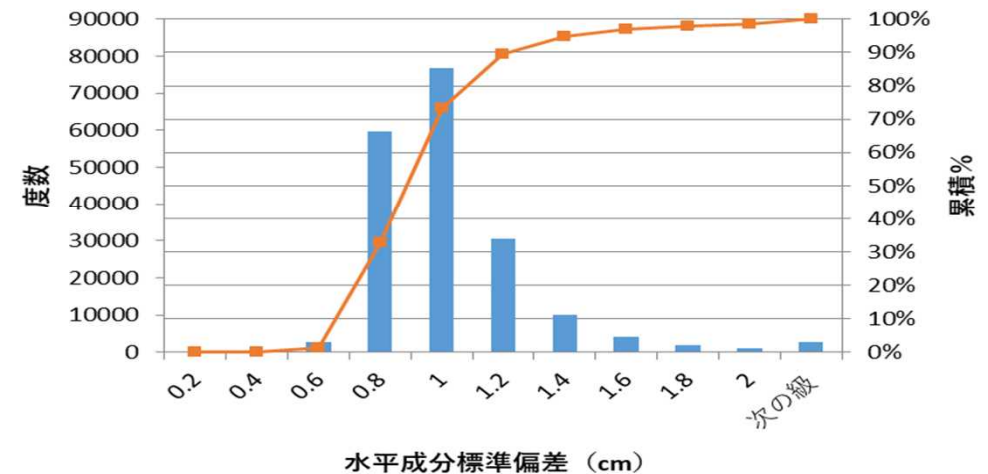
春期 (2019/4/1～6/30)



夏期 (2018/7/1～9/30)



秋期 (2018/10/1～12/31)

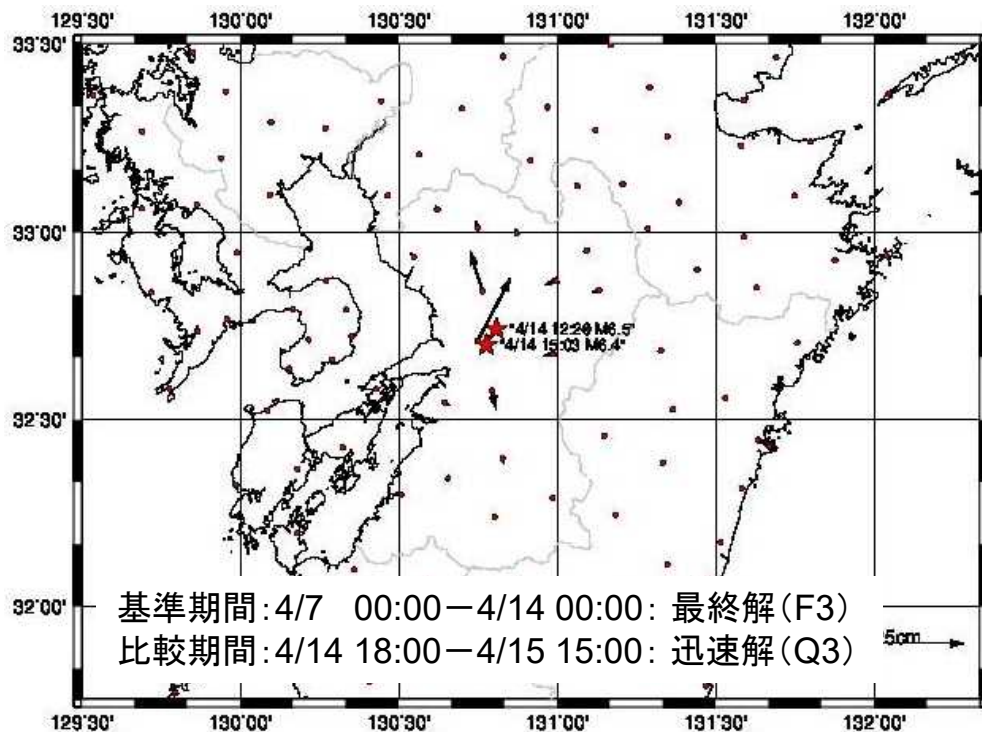


- 全期間の標準偏差の平均値は1.00cm
- 夏期1.15cm、冬期0.90cm：夏期にばらつき大、冬期に小
 - － 夏期は大気中の水蒸気量が多いためと考えられる

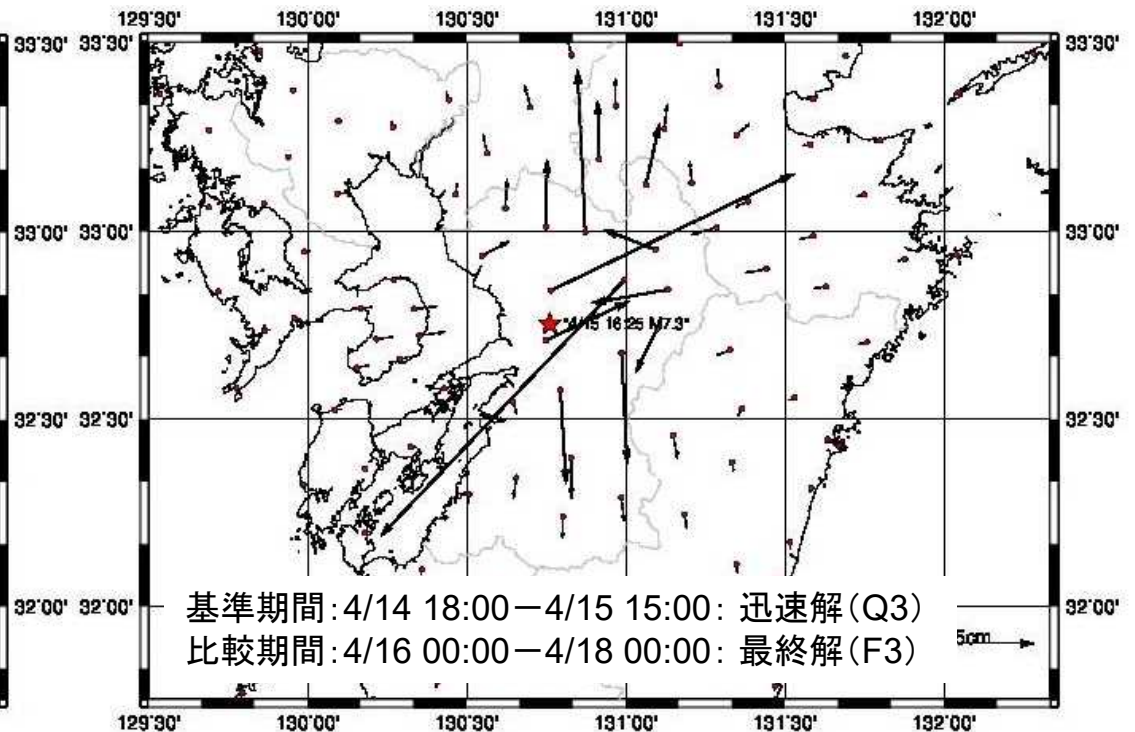
2016年熊本地震

- 前震 : 4月14日12時26分 (UT) M6.5
前震の余震 : 4月14日15時03分 (UT) M6.4
- 本震 : 4月15日16時25分 (UT) M7.3

前震及び前震の余震のベクトル図



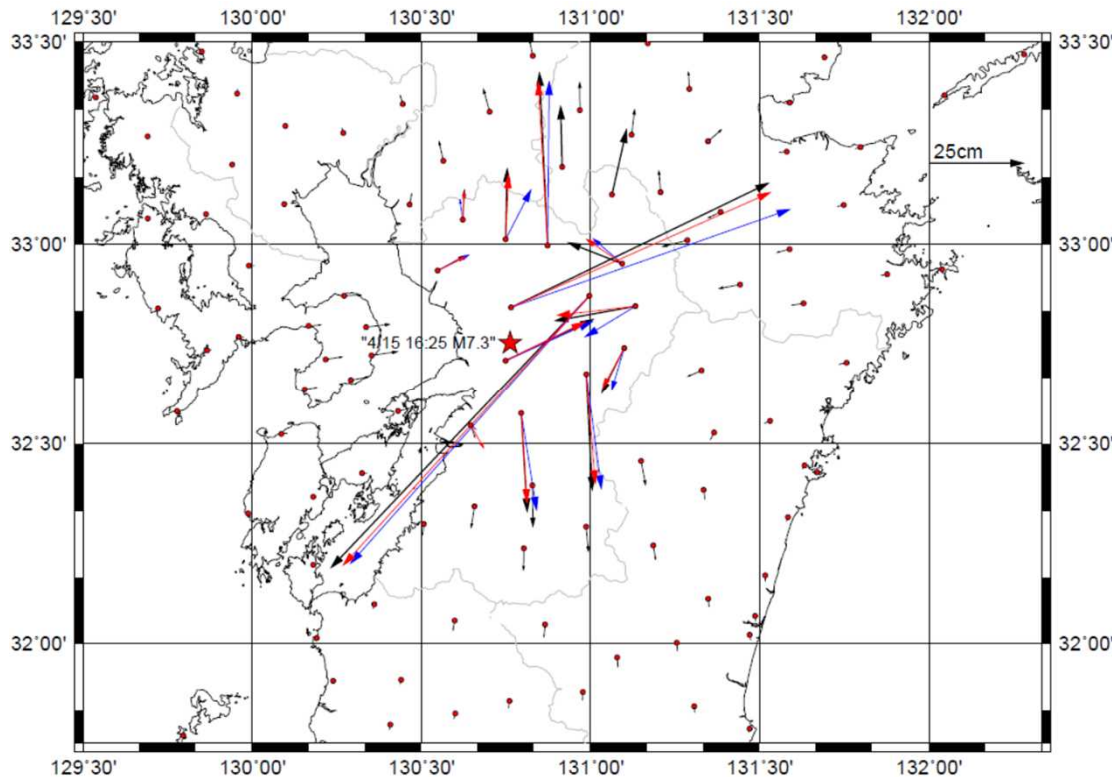
本震のベクトル図



最終解1日毎、迅速解3時間毎のGEONET定常解析では、約3時間の間に発生した前震と前震の余震の地殻変動は分離できなかった

	REGARD	本研究	GEONET定常解析
解析手法	RTK (相対測位)	PPP-AR	相対測位
	キネマティック		スタティック
ソフトウェア	RTKLIB		BERNESE
衛星軌道・ クロック	IGS超速報暦	独自推定	IGS超速報暦 (Q3) IGS最終暦 (F3)
基準系	ITRF08	ITRF14	ITRF08
解のスパン	—	24時間	6時間 (Q3) 24時間 (F3)
解の間隔	1秒		3時間 (Q3) 24時間 (F3)
迅速性 (解が得られるまでの時間)	即時 (リアルタイム)	2時間程度	数時間後 (Q3) 2～3週間後 (F3)

REGARDと本研究はGEONET定常解析と整合的
地震時の地殻変動量には両者に差がみられない



黒: GEONET定常解析

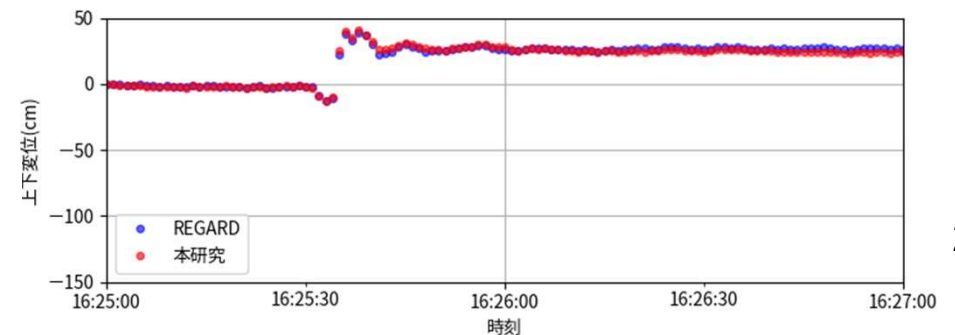
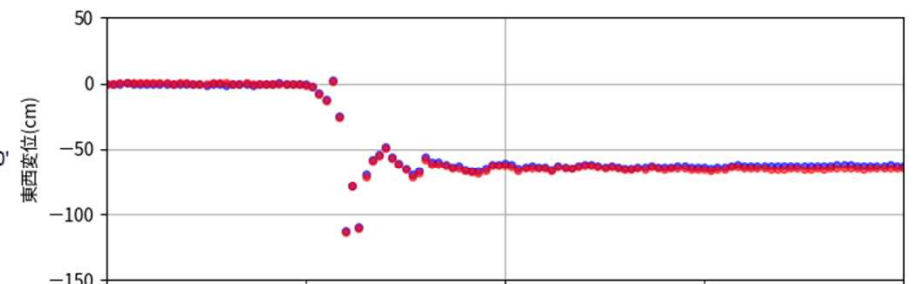
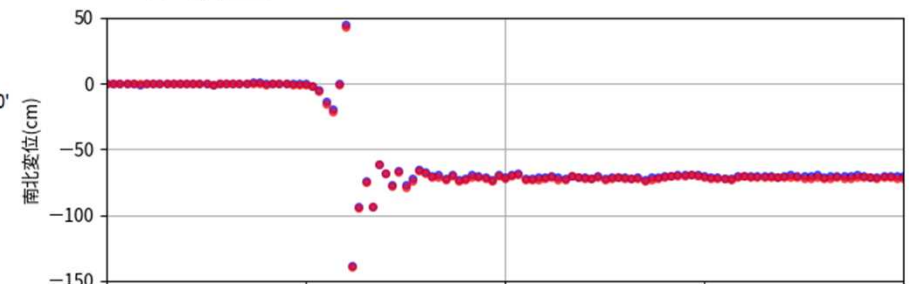
赤: 本研究

青: REGARD

赤: 本研究

青: REGARD

最大変位を観測した電子基準点
の変位



目標：GEONETデータ取得後、2時間以内に全国の電子基準点の座標を算出

現状：現在のプロトタイプシステムでは、通常は2時間半程度で解析可能

課題：

他の処理が重なった場合に処理速度が低下（3時間～10時間）

－ 他の処理：GEONETデータファイルのフォーマット変換、データの再解析等

原因：ディスク読み書きの集中

解決策 －今後の課題－：

- 機器の増強
- 分散ファイルシステムの導入

