新規研究課題提案書

１．研究課題名：新規研究課題名を記入
精密単独測位型 RTK（PPP-RTK)を用いたリアルタイム地殻変動把握技術の開発

２．研究制度名
特別研究

３．研究期間：平成２７年　４月　　～　平成３０年　３月　（３年間）

４．課題分類
(3) 防災・減災のための研究開発

５．研究開発の背景・必要性

近年 GNSS 測位の分野では、精度の高い位置情報をほぼリアルタイムに近い時間で得ることができるリアルタイムキネマティック測位(RTK)技術が進展し、様々な分野で活用されている。地殻変動監視の分野では、RTK を導入することにより精度の高い地殻変動情報がリアルタイムに近い時間で得られれば、周波数特性の関係で地震計では検知することが難しいゆっくりとした地震・火山現象（津波地震やゆっくりとしたマグマの移動など）や、ダイナミックレンジの関係で地震計では正確な検知が難しい超巨大地震の規模を正確に検知できるようになる。そのような情報は、より即時性が求められる発災時の初動体制の設置などに活用することができることから、さまざまな大学・官庁において導入の検討が進められている。国土地理院においては、東北大学と共同で、電子基準点で観測された GNSS データをリアルタイムで常時解析し、地震時の概略の地殻変動量を即時に求め、気象庁の地震計を用いた津波予測の支援を行うシステム（津波予測支援のための GPS 情報提供システム）を開発している。

地殻変動監視で RTK を導入する場合、より高い精度を実現するため、基準局との相対的な位置を求める相対測位が行われるのが一般的である。しかしながら、相対測位では、基準局と観測局の間の距離が長いと精度が劣化するため、広域を対象とする場合、複数の基準局を設けて基準局と観測局との距離が長くならないようにする必要があるが、それでは絶対的な地殻変動量の把握が困難となること、また、観測局数の増大に伴う計算負荷の増大が著しくなるため、大規模化や複数衛星データの利用（マルチ GNSS 化）を要するシステム構築が困難であること、などの問題点があった。

そのような背景の下、精密単独測位型 RTK（Precise Point Positioning RTK; PPP-RTK)と呼ばれる手法が、近年、急速に発展し、世界的に研究が進められている。本手法は、国際 GNSS 事業(International GNSS Service; IGS)などの外部機関から提供される、GNSS 衛星の精密な軌道および時刻情報を用いて、各観測局で単独測位を行うものである。PPP-RTK では相対測位型 RTK に比べ精度が若干劣ることから、特に高い精度が必要とされる地殻変動監視では活用が困難であったが、近年、衛星毎に異なる位相端数バイアス(Fractional Cycle Bias; FCB)と呼ばれる補正情報を追加することで、単独測位において波数の整数不確定性を決定する(Ambiguity Resolution; AR)ことが可能となり、相対測位型 RTK に比べ、格段に少ない計算負荷で匹敵する精度を出せることが示されたことから、将来的には、電子基準点におけるリアルタイム地殻変動把握業務への応用が期待されている。

しかしながら、現時点では、PPP-RTK において安定的に AR を行う手法の開発やマルチ GNSS への

対応など技術的な課題が残され、安定した精度（座標再現性）を実現する手法まで到達しておらず、実用的な段階にはない。また、電子基準点におけるリアルタイム地殻変動把握業務への導入を想定すると、実際の地殻活動時における地殻変動把握能力、異常値の発生頻度などの評価、あるいは、外部機関からのGNSS衛星の精密な軌道および時刻情報が途絶した場合に、GEONETデータのみを用いてそのような情報を安定的に生成できるか、などの実運用を想定した評価を通じたシステムの開発が必要であるが、現状ではそのような評価は行われていない。

以上のことから、PPP-RTKを用いてより安定した測位精度を実現するために必要となる技術を開発するとともに、それを適用してPPP-RTKによるリアルタイム地殻変動把握のためのプロトタイプシステムを構築し、実運用を想定した評価を通じて改良を加え、完成させることが必要である。

６．研究開発の目的・目標

本研究では、電子基準点におけるリアルタイム地殻変動把握業務での、PPP-RTKの導入に向けたフィージビリティー評価を可能とすることを目的とする。

そのため、PPP-RTKにおいて安定した測位精度の達成に必要となる、リアルタイムで安定的にARを行う手法、マルチGNSS測位の安定化の対応などの技術開発を行うとともに、電子基準点データからPPP-RTKに必要となる補正情報を生成する手法開発を行い、最終的に全電子基準点にスケールアップ可能であり、目標精度として長期的な座標再現性で水平各成分2cm程度を有する、リアルタイム地殻変動把握のためのプロトタイプシステムを構築した上で、実運用を想定した評価を通じて改良を行い完成させることを目標とする。

７．研究開発の内容

本研究では、PPP-RTKにおいて安定した座標再現性を実現するために必要となる技術開発（安定的なリアルタイムAR手法、マルチGNSS測位安定化手法の開発）を行う。また、電子基準点データからPPP-RTKに必要となる補正情報(測位衛星の軌道・時刻情報・ARのための補正情報)を生成する手法を開発する。次に、それらの手法に基づいてPPP-RTKによるリアルタイム地殻変動把握のためのプロトタイプシステムを構築し、実運用を想定した評価を通じて改良を行い、完成させる。詳細な実施内容は以下のとおり：

（１）PPP-RTKによるリアルタイム地殻変動把握のためのプロトタイプシステムの開発

１）PPP-RTKプロトタイプの要素技術開発

①測位安定性の向上に関する研究

i)リアルタイムでARを安定的に行う手法に関する研究

ii)マルチGNSS環境下での安定的測位の実現手法に関する研究

②電子基準点データから補正情報を生成する技術の開発

電子基準点データからPPP-RTKに必要となる補正情報(測位衛星の位置・時刻情報・ARのための補正情報）を生成する技術を開発する

２）PPP-RTKプロトタイプの試作

１)の技術要素を組み込んだ、補正情報生成部および測位部からなる、PPP-RTKによるリアルタイム地殻変動把握のためのプロトタイプシステムを試作する。

（２）実運用を想定した評価を通じたプロトタイプシステムの改良

（１）で試作したプロトタイプシステムを用い、リアルタイム地殻変動把握での実運用を想定した評価および改良を行い、プロトタイプシステムを完成させる。そのため、プロトタイプを試験的に連続稼動し、地殻活動時の地殻変動把握能力、異常値の発生頻度、電子基準点データから推定する補正情報の安定性等を評価し、技術的課題を明らかにした上で改良を加える。

８．研究開発の方法、実施体制

上記７．（１）、（２）については、測地観測センターの協力を得ながら、宇宙測地研究室の主任研究官が中心となって実施する。７．（１）に関しては、実績のある既存のソフトウェアを導入し、改良を加えることで効率的に実施する。

９．研究開発の種類

(3)技術開発

10. 現在までの開発段階

(1)研究段階

11. 想定される成果と活用方針

想定される成果：

・PPP-RTK により安定に位置を推定するための基礎技術が開発される。

・全電子基準点にスケールアップ可能であり、目標精度として長期的な座標再現性で水平各成分 2cm 程度を有する PPP-RTK によるリアルタイム地殻変動把握のためのプロトタイプシステムが完成する。

想定される活用方針：

・電子基準点におけるリアルタイム地殻変動把握業務への導入に向けたプロトタイプとして活用

・津波予測支援のための GPS 情報提供システムの品質評価に活用

その他波及効果：

・補正情報の外部提供→防災分野での PPP-RTK の活用促進

・測量への導入

・GEONET のリアルタイムデータの品質情報提供

12. 研究に協力が見込まれる機関名

東京海洋大学等

13. 関係部局等との調整

技術開発は、GEONET を運用している測地観測センターの協力を得ながら実施する。

14. 備考

特になし。

15. 提案課・室名、問合せ先

国土地理院 地理地殻活動研究センター宇宙測地研究室
茨城県つくば市北郷１番
TEL：029-864-1111(内8341)　　FAX：029-864-2655　　e-mail：munekane@gsi.go.jp
担当者名：宇宙測地研究室　（氏名）宗包　浩志

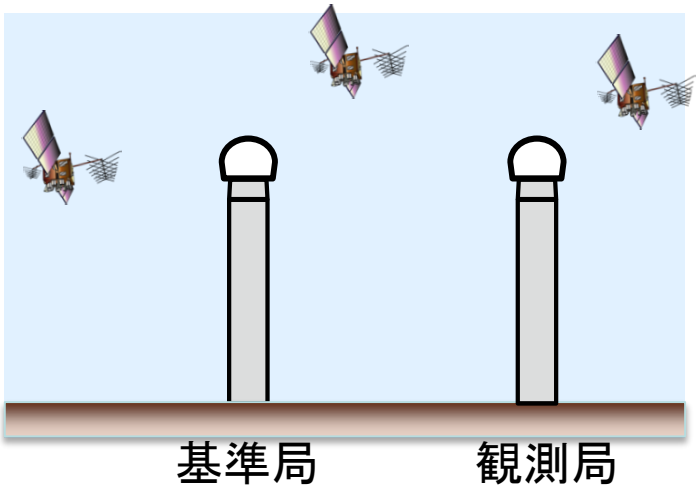
精密単独測位型RTK（PPP-RTK）を用いたリアルタイム地殻変動把握技術の開発

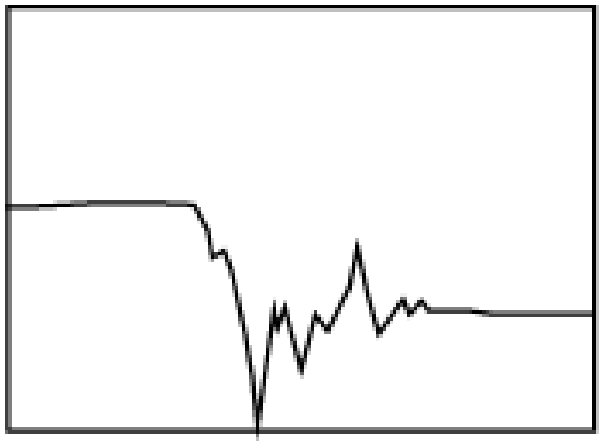
国土地理院 地理地殻活動研究センター
宇宙測地研究室
宗包　浩志

本研究の背景

国土地理院

リアルタイムキネマティック測位(RTK)を用いた リアルタイム地殻変動監視の防災への活用が進んでいる





GNSS観測点におけるリアルタイム
GNSSデータ取得(～毎秒)

リアルタイムでの観測エポック
(～毎秒)毎の(相対)地殻変動情報の取得

RTKで得られる地殻変動情報の特徴:
①ほぼリアルタイム
②振り切れない
③ゆっくりとした変動も捉えられる

・超巨大地震の規模の即時的把握
・ゆっくりした地震・火山現象の検知
(津波地震・火山でのマグマ移動など)
などに威力を発揮

より即時性が求められる、発災時の初動体制の整備などに活用が期待

本研究の背景

国土地理院

国土地理院の取り組み
-津波予測支援のためのGPS情報提供システムの開発-

＜津波予測のためのGPS情報提供システムに関する取り組み＞

地殻変動解析手法を高度化し、地震による地殻変動のより迅速な把握及び津波予測の高度化等に貢献。

東北大学と連携し、プロトタイプを構築。

解析手法の高度化

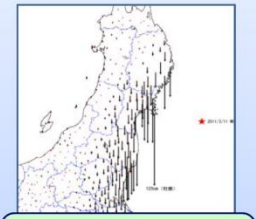
現状

正確な情報を時間をかけて提供（1cm精度の変動量　5時間後）

目標

概略の情報を即時に提供（10cm精度の変動量　1分以内※）

アウトプット



地震時の変動を即時把握

断層モデルの即時推定

効果

・津波予測の高度化支援
・地盤沈下地域の把握
・避難の初動支援

地震・津波発災時における生活者の安全・安心情報の提供

*電子基準点で地殻変動が生じてからの時間。震源域の大きな海溝型巨大地震の場合、地震発生時刻（震源断層で最初の破壊が始まった時刻）から1分経過しても、沿岸部の電子基準点では地殻変動が生じていないことがある。

地理院報道発表資料(2012.4.6)

2013年度モニタリング対象を全国(1240点）に拡大

本研究の背景

津波予測支援システムの高度化

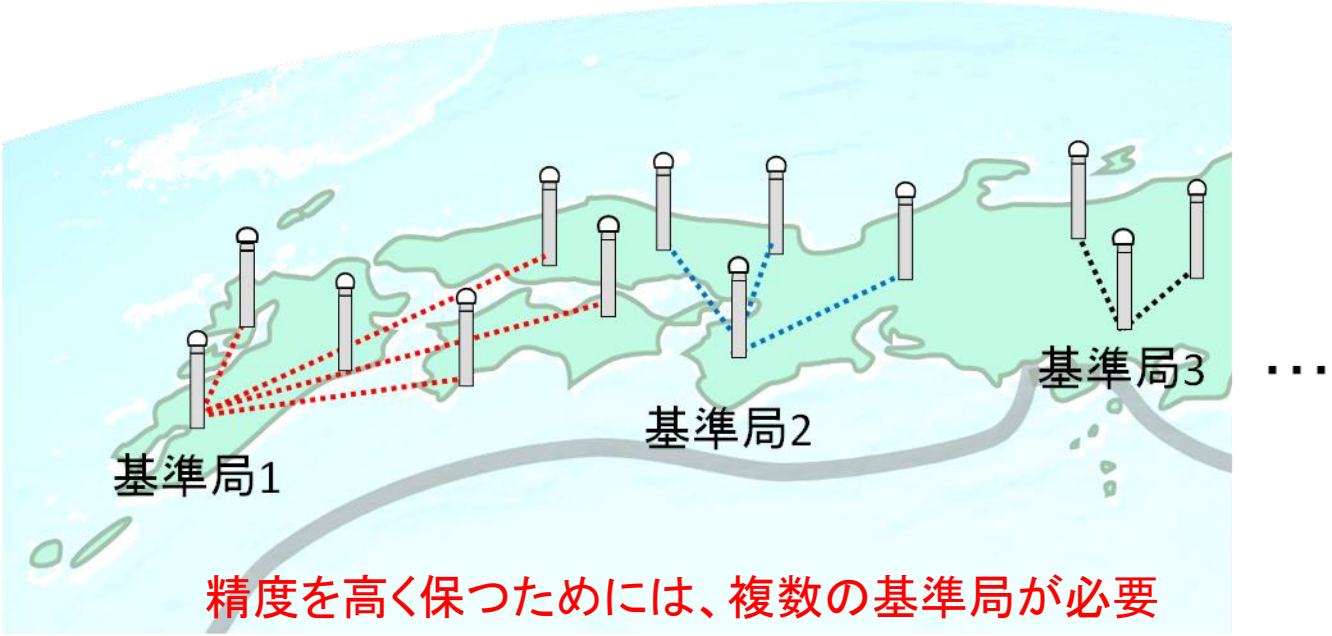
現行システムの地殻変動検知精度10cmをさらに向上することで、以下の効果が見込まれる

- ●地殻変動検知時間の短縮
  - ➢（例）1分→30秒
- ●対象となる現象の拡大
  - ➢現状では主に巨大海溝型地震に伴う地殻変動
  - →（例）プレート境界でのゆっくりすべり、余効変動、火山活動に伴う地殻変動の時間発展も検知可能に

本研究の背景

国土地理院

津波予測支援システムの高度化の高度化に向けた課題



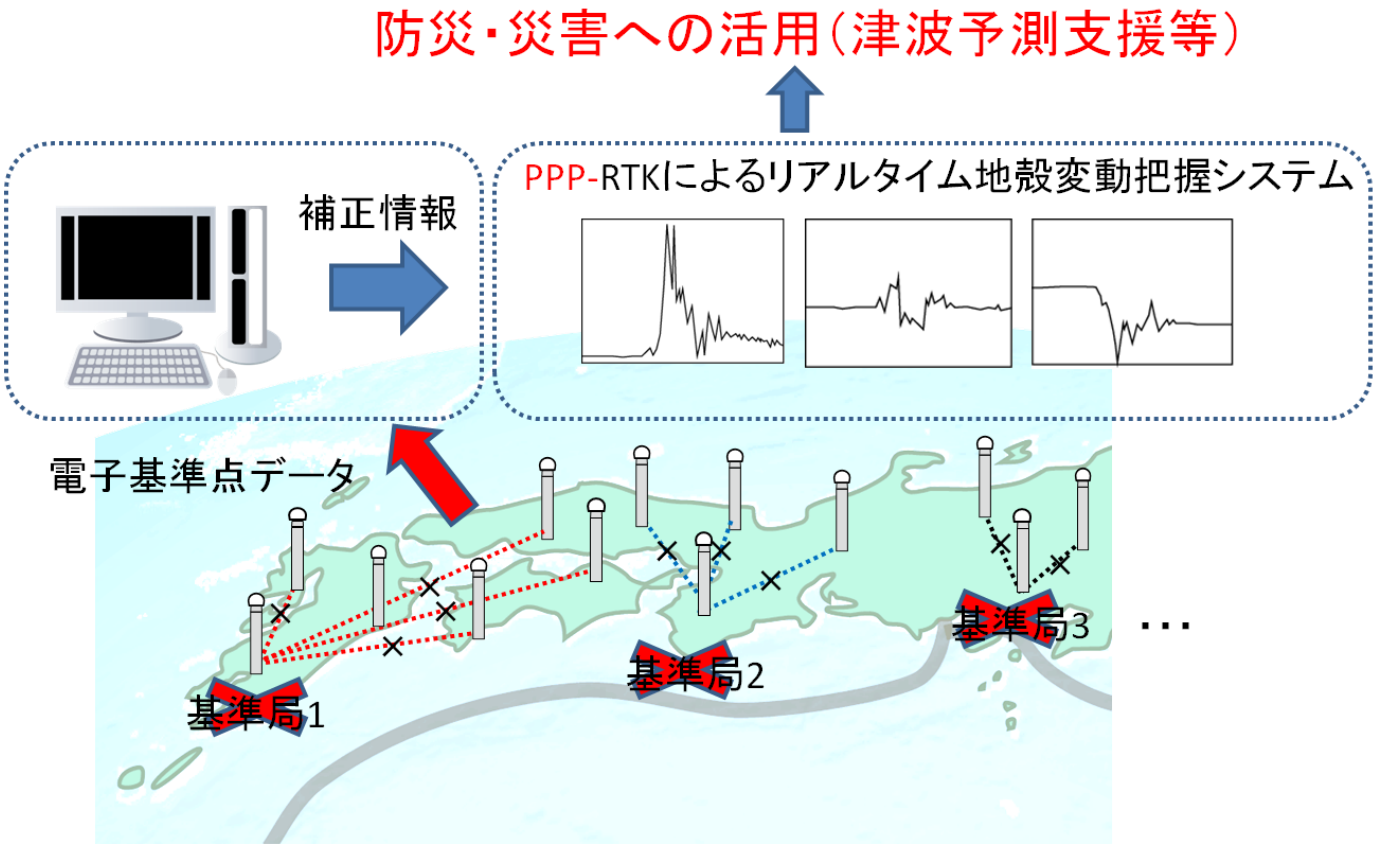
〇計算負荷が大きい→規模の拡大や、マルチGNSS化による精度改善が困難
〇基準局が変動した場合、地殻変動量の絶対値の推定が困難

本研究の背景

国土地理院

精密単独測位型（PPP*-）RTKシステムとは

*PPP=Precise Point Positioning (精密単独測位)



〇基準局を用いないので地殻変動量の絶対値の推定が容易
〇各観測局データの単独測位→計算負荷が小さいため、
よりコンパクトなシステムで実現
可能

従来型RTKの問題点を
解消する新技術

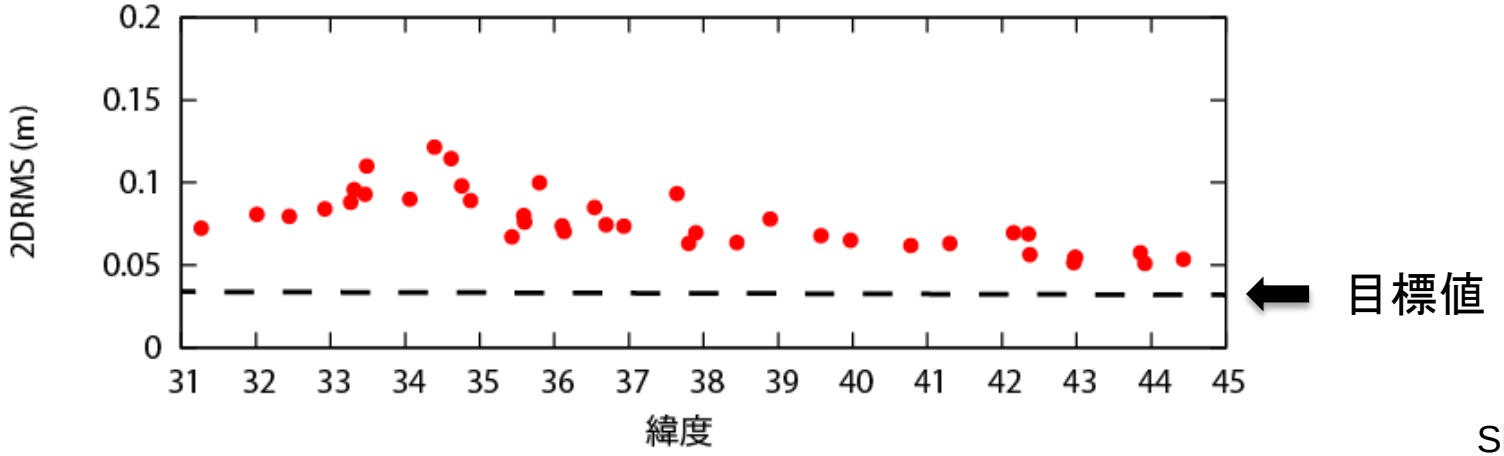
リアルタイム地殻変動把握のための精密単独測位型（PPP-）RTKシステムの課題(1/2)

- 座標値安定性の向上
  - 現状では水平各成分で5cm超→2cmが必要

そのために必要となる要素技術

〇整数不確定性の決定(Ambiguity Resolution; AR)

〇マルチGNSS化　等



電子基準点におけるPPP-RTK解析の座標再現性（例）

リアルタイム地殻変動把握のための精密単独測位型（PPP-）RTKシステムの課題(2/2)

- 外部機関に依存しない補正情報の生成
  - 衛星位置・時刻情報は国際GNSS事業 (International GNSS Service; IGS)などから入手可能ではあるが、通信が途絶えた場合にもシステムが稼動する必要があり、独自の推定も必要
  - 精度向上に必要となるAmbiguity Resolutionのための位相端数バイアスについては独自の推定が必要
- リアルタイム地殻変動把握での実運用を想定した評価
  - PPP-RTKはまだ実験的段階であり、リアルタイム地殻変動把握においては、実運用上の問題（異常事象の発生頻度、座標値のとび、ゆらぎなど）の評価を行い、改良が必要

本研究の目標

国土地理院

PPP-RTKによるリアルタイム地殻変動把握のためのプロトタイプシステムの完成

目標

電子基準点におけるリアルタイム地殻変動把握業務での、PPP-RTKの導入のためのフィージビリティー評価を可能とする

（1）リアルタイム地殻変動把握のためのPPP-RTKプロトタイプシステムの開発

1）PPP-RTKプロトタイプの要素技術の開発

①測位安定性の向上に関する研究

②電子基準点データから補正情報を生成する技術の開発

2）PPP-RTKプロトタイプシステムの試作

（2）リアルタイム地殻変動把握への導入を想定した試験運用による評価・システム改良

全電子基準点にスケールアップ可能で目標精度が長期的な座標再現性で水平各成分2cm程度のPPP-RTKによるリアルタイム地殻変動把握のためのプロトタイプシステムの完成

本研究内容の工程表

国土地理院

研究内容

H27年度	H28年度	H29年度
PPP-RTKプロトタイプの開発		**リアルタイム地殻変動把握への導入を想定した試験運用による評価・改良**
PPP-RTKプロトタイプの要素技術の開発 PPP-RTK測位部の開発 電子基準点データから補正情報を生成する技術の開発（オフライン）	**PPP-RTKプロトタイプの試作** PPP-RTK測位部の改良 電子基準点データから補正情報を生成する技術の開発（オンライン）	**技術開発項目** ○波数不確定性決定(AR)の安定性向上 ○マルチGNSS環境下の測位安定性向上 ○電子基準点データから補正情報を生成する手法

期待される成果と活用方針

国土地理院

【想定される成果】

■ **全電子基準点にスケールアップ可能で、目標精度が長期的な座標再現性で水平各成分2cm程度のPPP-RTKによるリアルタイム地殻変動把握のためのプロトタイプシステム**

【活用方針】

■ 国土地理院が行うリアルタイム地殻変動把握業務においてPPP-RTKを導入する際のプロトタイプシステムとして活用

電子基準点によるリアルタイム地殻変動把握において、検知能力の向上へ

■ 津波予測支援のためのGPS情報提供システムの品質評価に活用

【波及効果】

■ 補正情報を外部に提供することでPPP-RTKの利用を促進

■ 将来的に測量利用への発展

■ GEONETのリアルタイムデータの品質情報提供

参考資料

用語集

- 整数不確定性
  - GNSS観測では、衛星と受信機との間に電波の山が何個あるかを連続的に追跡している。ただし、その絶対値はわからず、基準となる個数からのずれしか分からない。その基準となる個数のことを言う。整数バイアスとも言う。測位解析の過程でこのバイアスを推定できる(＝整数化できる)と座標精度が向上する。
- 位相端数バイアス
  - 上の整数バイアスは、厳密にいうと衛星および受信機の電子回路に起因する誤差のせいで完全な整数ではない。その誤差を言う。通常の測位では、処理の過程でこの誤差が消去され、バイアスを整数として取り扱えるが、PPPの場合はそうでないため、バイアスを推定する(＝整数化する)ためには位相端数バイアスの情報が必要となる。

用語集

- キネマティック測位
  - GPS等の衛星測位において、観測間隔かそれに近い時間間隔で、受信機の位置を推定する測位方法。主に移動体の位置決定や、地震・火山活動等に伴う地殻変動の研究など、受信機が短時間で大きく動く場合に用いられる。
- 干渉測位
  - 測位衛星からの信号を2点以上で同時に受信し、観測された信号の差を用いて、観測局間の相対的な位置を求める方式。この際、基準とする観測局のことを基準局と言う→基準局
- 単独測位
  - 一点の観測局で受信された測位衛星からの信号を用いて、観測局の絶対的な位置を求める方式。

用語集

- 基準局
  - 干渉測位において位置の基準とする観測点。基準局に位置の変動がない場合、干渉測位で得られた、基準局に対する観測局の相対的な位置変化は、観測局の変動そのものを表していると解釈することができる。
- 座標再現性
  - 測位により推定された観測局の座標値の平均値からのばらつき(標準偏差)のこと。座標値の精度の指標の一つである。一方、平均値からのばらつきではなく、真値からのばらつきのことを、RMSE(Root Mean Square Error; 自乗平均平方根誤差)といい、座標値の正確度の指標の一つとなる。

GEONETによるリアルタイム地殻変動監視におけるPPP-RTKのメリット・デメリット

国土地理院

測位方式	精度	計算負荷	検出可能な地殻変動
干渉測位型RTK	短基線◎（～100km） 長基線△（～1000km）	大	相対値
PPP-RTK	×	小	絶対値
PPP-RTK改良（本研究）	○	小	絶対値

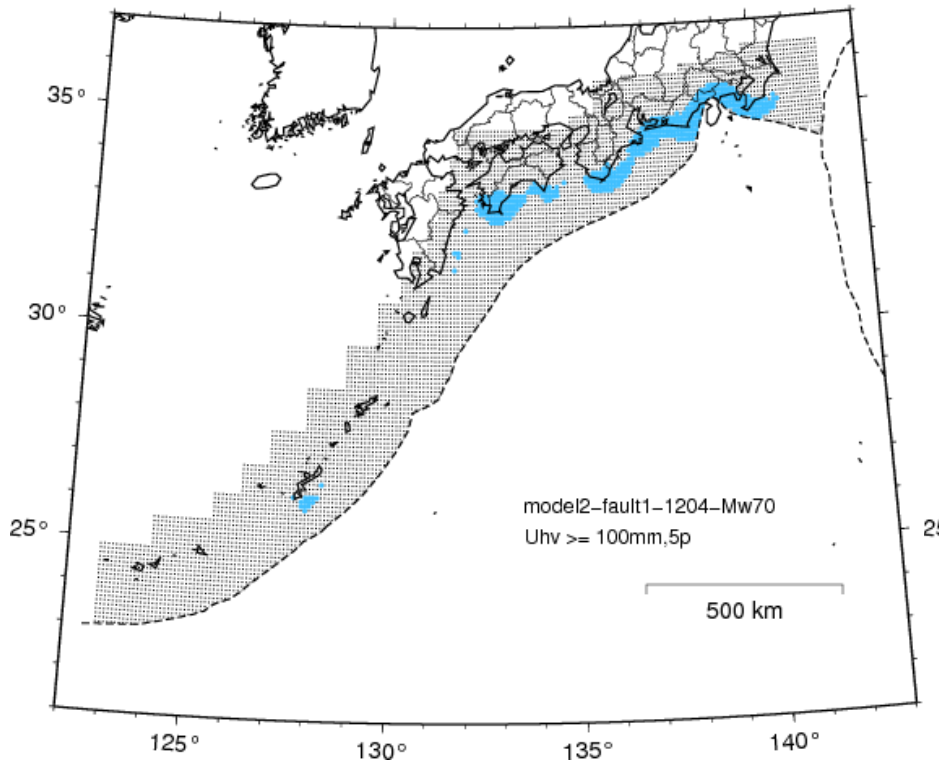
◎1cm程度
○2cm
△5cm程度
×10cm程度

プレート境界面上の断層すべりの検知能力

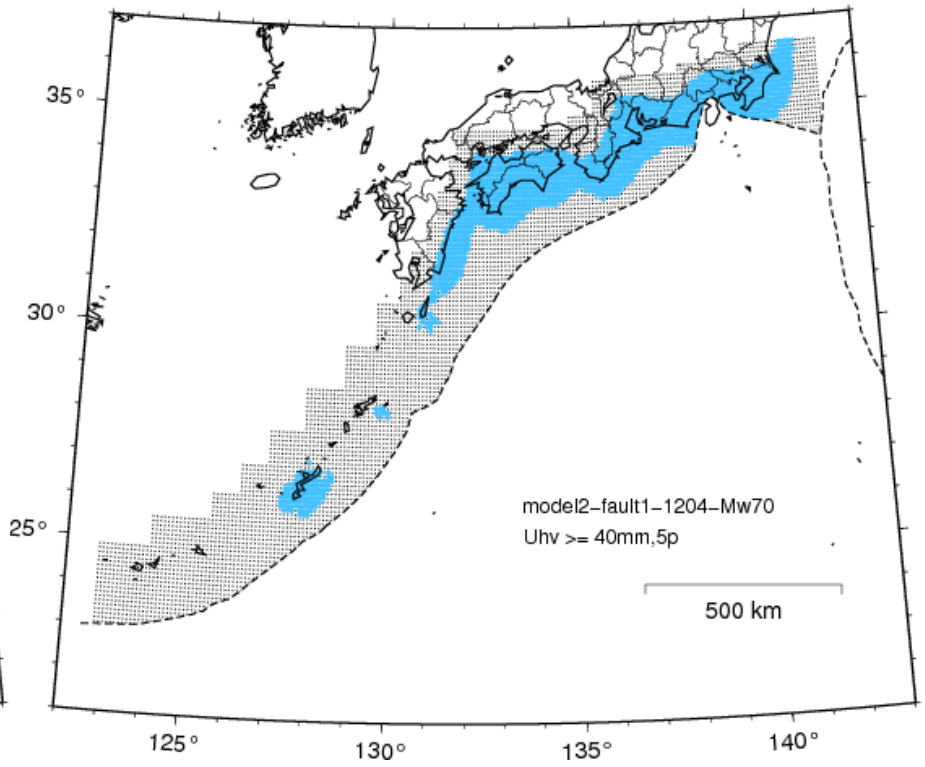
国土地理院

Mw7.0以上の断層すべりが検知できる範囲

閾値10cm



閾値4cm



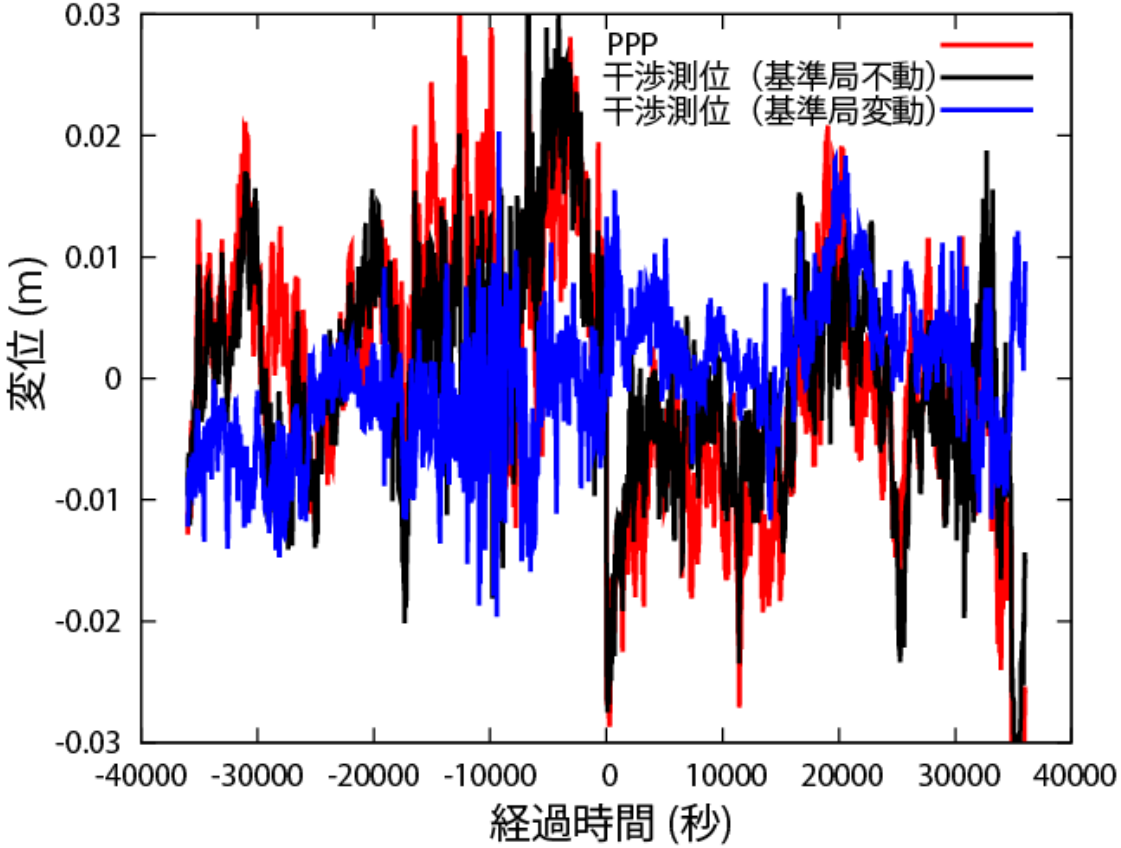
※観測点数はいずれも5点以上

基準局の変動の影響

国土地理院

基準局が変動しない場合、PPPによる測位と干渉測位のいずれによっても正しい地殻変動が得られるが、基準局が変動した場合には、干渉測位では、正しい地殻変動が得られない。

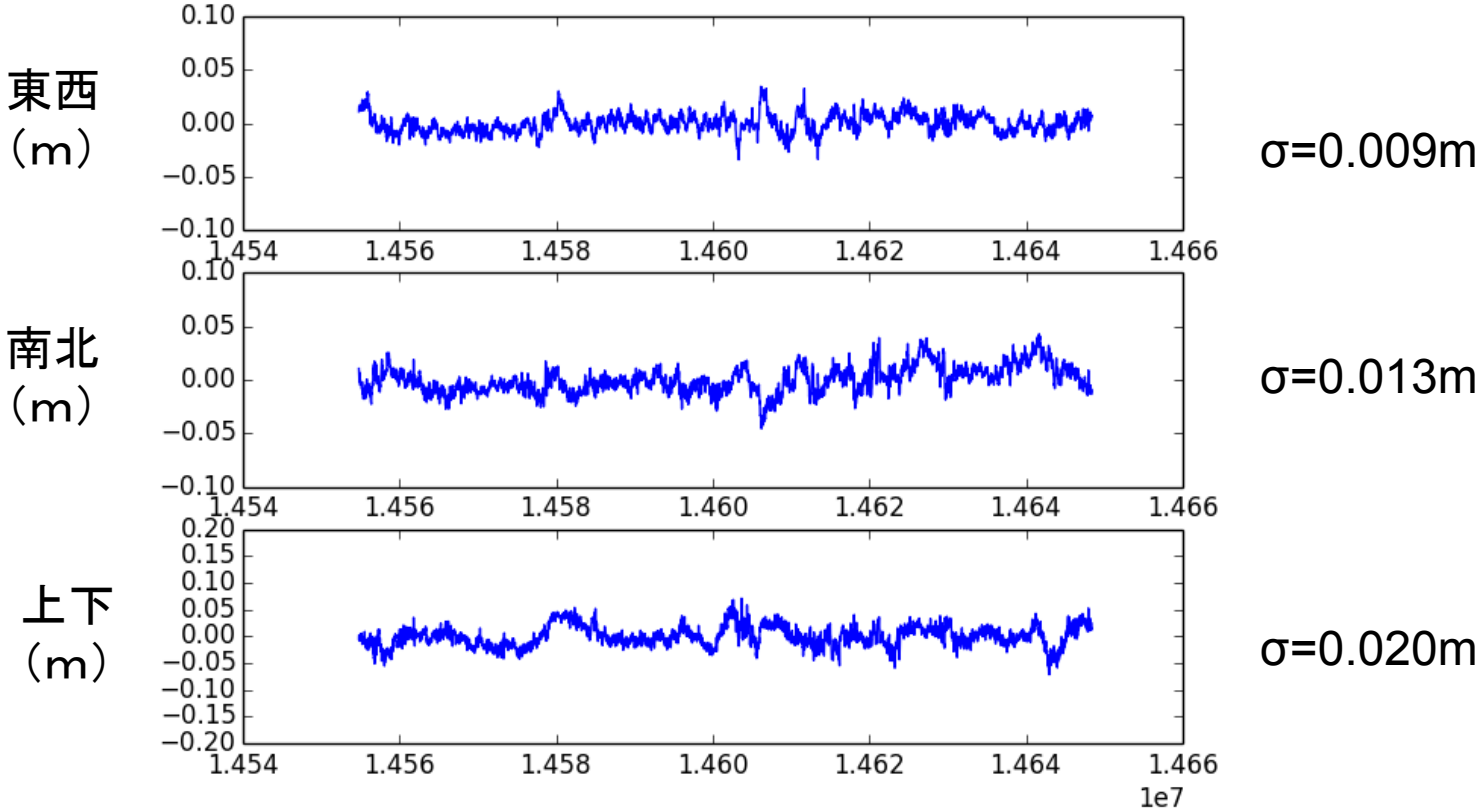
PPPと干渉測位による同一局の座標変化の比較例
経過時間0秒以降に地殻変動が発生している



参考：高さの精度について

国土地理院

高さ成分の精度は、原理的に水平成分の精度のおおよそ2～3倍になることが知られている。本研究での高さ成分の精度のおおよその目標は、水平各成分2cmに対し、5cmを想定している。

→GPSブイによる津波の検知には十分利用可能

PPPによるキネマティック測位の例（後処理; AR後）