

# GNSS リアルタイム解析による地殻変動の即時把握（第4年次）

実施期間

令和元年度～令和4年度

測地観測センター電子基準点課

竹井 義貴 村上 真亮

宮崎 隆幸 大野 圭太郎

阿部 聡 高松 直史

川元 智司

## 1. はじめに

国土地理院は2011年から東北大学との共同研究の下、電子基準点リアルタイム解析システム（以下「REGARD」という。）の開発を開始し、2016年から運用している。REGARDは電子基準点のリアルタイムデータを用いた相対測位により各電子基準点の座標値をリアルタイムに算出し、地震が発生した際には各電子基準点の地震前後の変位量から震源断層モデルを推定し、地震規模を推定するシステムである。

今回 REGARD に関して、リアルタイム測位への精密単独測位（以下「PPP」という。）の導入、マルコフ連鎖モンテカルロ（以下「MCMC」という。）法を用いた単一矩形震源断層推定結果の評価、REGARD 自己診断ツールの開発を行った。

## 2. 研究内容

### 2.1 リアルタイム PPP の導入

REGARD のリアルタイム測位には、相対測位（RTK 測位）が適用されており、REGARD は日本全国の電子基準点について、ある1点の固定点に対する相対位置を算出している。相対測位では、固定点の観測停止や通信断などによる解析停止の影響が全点に波及するほか、固定点近傍で発生した地震に対しては、固定点座標値が変化するため、あたかも日本全国で地殻変動が発生したかのような変位が観測されるという問題を抱えている。一方、PPP 測位は精密な衛星軌道情報を始めとした各種の補正情報を用いることで、準拠する測地基準系における絶対的な座標値の算出を単独で行うため、固定点の影響を受けずに全国の電子基準点の座標値を算出することが可能となる。今回、現行の REGARD の RTK 測位の現状を把握するために、各観測点の FIX 率を調べ、FIX 率と基線長の関係を調査した。また、導入した PPP の測位について、現行の RTK 測位との比較を行い、初期的な PPP の測位性能の評価を行った。

### 2.2 MCMC 法を用いた単一矩形震源断層推定の評価

REGARD が推定する震源断層モデルには、単一矩形震源断層モデルとすべり分布モデルの2種類があり、その両方について推定結果の信頼性を示す指標として Variance Reduction（以下「VR」という。）が計算される。現行の REGARD では、単一矩形震源断層モデルの推定に最尤法が用いられているが、令和3年度からは東北大学で開発された MCMC 法による推定手法（Ohno et al., 2021）を試験的に導入している。MCMC 法では各震源断層パラメータの事後確率分布が得られるため、その分布から震源断層推定結果の収束の様子の把握や、多様な震源断層モデルの存在可能性についての議論が可能である。令和3年度は、過去の地殻変動事例に対して、MCMC 法を適用したところ、現行の最尤法で高い VR（80%以上）が得られる事例では、MCMC 法でも同等の高い VR で推定が可能であるという結果を

報告した。その一方で電子基準点のデータがノイズレベル（最大水平変位 5 cm 以下）であるような事例においては、実際の地殻変動がないのにも関わらず、現行の最尤法ではノイズレベルの変位や推定計算の一時的な発散によるスパイク状の座標値時系列の跳びが地殻変動と誤認され、結果的に高い VR の震源断層推定結果が得られてしまうことがある。今回、地殻変動のない事例（以下「ノイズ事例」という。）について、最尤法及び MCMC 法それぞれの VR を集計し、ノイズ事例に対してどの程度適切な応答を行っているのか調査した。

## 2.3 REGARD 自己診断ツールの開発

REGARD はリアルタイムシステムであるため、障害が発生した際には迅速に状況を把握し、その障害に対応する必要がある。そこで、REGARD の測位の障害について定型的な調査を自動で行い、運用担当者が障害状況を即時に把握できるよう、REGARD の自己診断ツールを開発した。

## 3. 得られた成果

### 3.1 リアルタイム PPP の導入

電子基準点「稚内」を固定点とした RTK 測位について、2023 年 1 月 31 日の 24 時間分の測位結果を集計し、各電子基準点について、FIX 率を計算した。FIX 率の空間分布（図-1 左）より、固定点である電子基準点「稚内」に近い北海道・東北地方の電子基準点においては、FIX 率は高い傾向にあるが、稚内からの距離が長い西日本の電子基準点では、徐々に FIX 率が低くなる傾向が明らかになった。各電子基準点の FIX 率と電子基準点「稚内」からの基線長の関係（図-1 右）をみると、基線長が約 1500 km を超えると、FIX 率の上限は 80 %を下回ることがわかる。また、基線長がおよそ 1800 km 以上になると急速に FIX 率の上限が下がっている。以上から、RTK 測位では、長基線特に 1500 km 以上では FIX 率が大幅に低下し、測位の信頼性が低下する懸念があることが明らかになった。

次に固定点を電子基準点「稚内」とした RTK 測位と今年度導入した PPP 測位の結果についての比較を行った。図-2 に固定点との基線長が 1785 km の電子基準点「阿久根」の時系列図を示す。図-2 から PPP の時系列は、RTK に比べて長周期のばらつきが小さくなっていることがわかる。標準偏差では、RTK の 3 成分が  $(X, Y, Z) = (0.044, 0.063, 0.045)$  m であるのに対し、PPP は  $(X, Y, Z) = (0.024, 0.038, 0.018)$  m と、長基線では、各成分で PPP の標準偏差が RTK より小さくなっている。一方で、固定点との基線長が 159 km である電子基準点「興部」では、RTK の 3 成分の標準偏差は  $(X, Y, Z) = (0.011, 0.010, 0.013)$  m であるのに対し、PPP の 3 成分の標準偏差は  $(X, Y, Z) = (0.026, 0.027, 0.027)$  m であった。短基線で比較すると、標準偏差の値は PPP のほうが大きいものの、その値は各成分とも 3 cm 未満であり、PPP 測位は巨大地震の地殻変動を検出するのに現行の RTK 測位と比較しても遜色ない精度を持っていると考えられる。

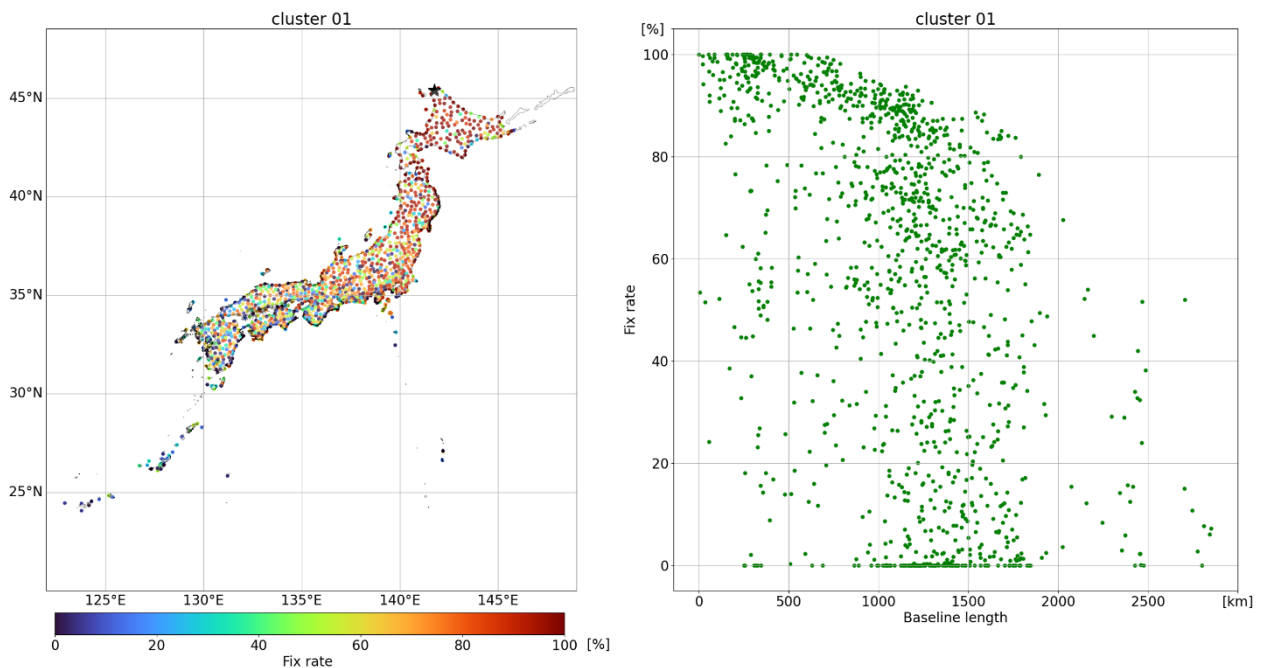


図-1 電子基準点「稚内」を固定点としたときの FIX 率：2023 年 1 月 31 日 24 時間分の測位を集計

(左：FIX 率の空間分布，星印は固定点の位置を示す。

右：点毎の FIX 率と稚内からの基線長の散布図．横軸が基線長，縦軸が各点の FIX 率を示している.)

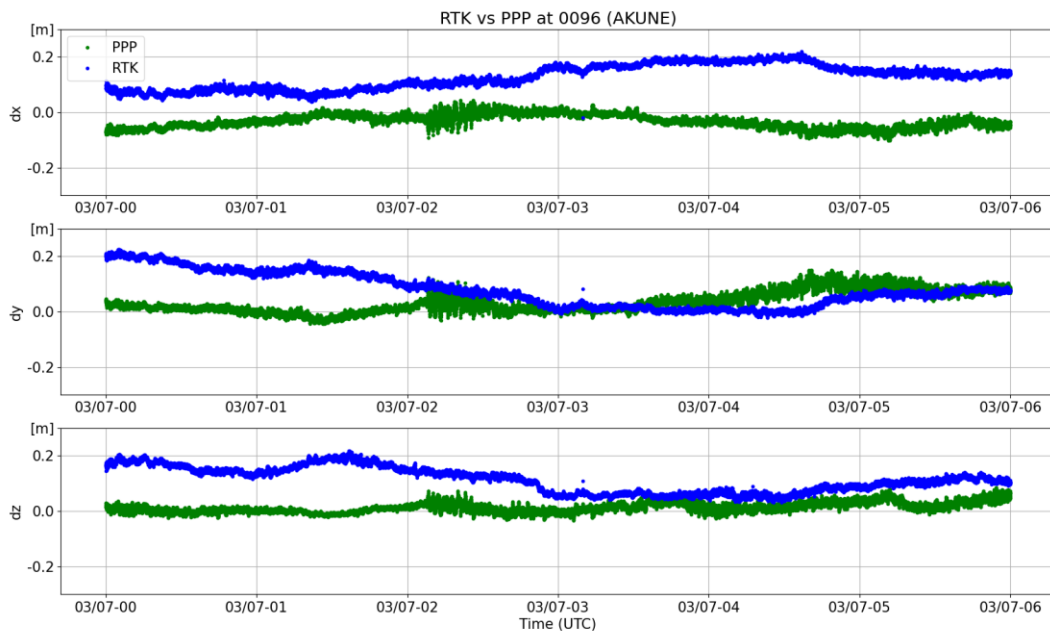


図-2 電子基準点「阿久根」の RTK 測位結果と PPP 測位結果の比較．期間は 2023 年 3 月 7 日 0 時から 2023

年 3 月 7 日 6 時まで．RTK 測位の固定点は電子基準点「稚内」で，基線長は 1785 km．青が RTK による測位結果，緑が PPP による測位結果，基準値は該当期間の日々の座標値である．

### 3.2 MCMC 法を用いた単一矩形断層推定の評価

2022年1月1日から2022年12月31日の期間の地殻変動のない事例について、VRごとに頻度を集計した。図-3から、現行の最尤法、MCMC法ともに、VRの小さい頻度が高くなっており、地殻変動のない事例について、期待通りVRが低く推定できていることがわかる。VRが大きい（40%以上）領域に着目してみると、現行の最尤法では、高VR事例の頻度は1.55%であるのに対し、MCMC法では、高VR事例の頻度は0.45%である。現行の最尤法に比べ、MCMC法ではノイズ事例に対して高いVRの推定頻度が低くなることからわかる。MCMC法による震源断層推定では、観測データのノイズに対して過推定するケースが減少していると考えられ、MCMC法による断層推定は現行の最尤法に比べて、ノイズ事例に対してより妥当な推定を行えることが期待される。

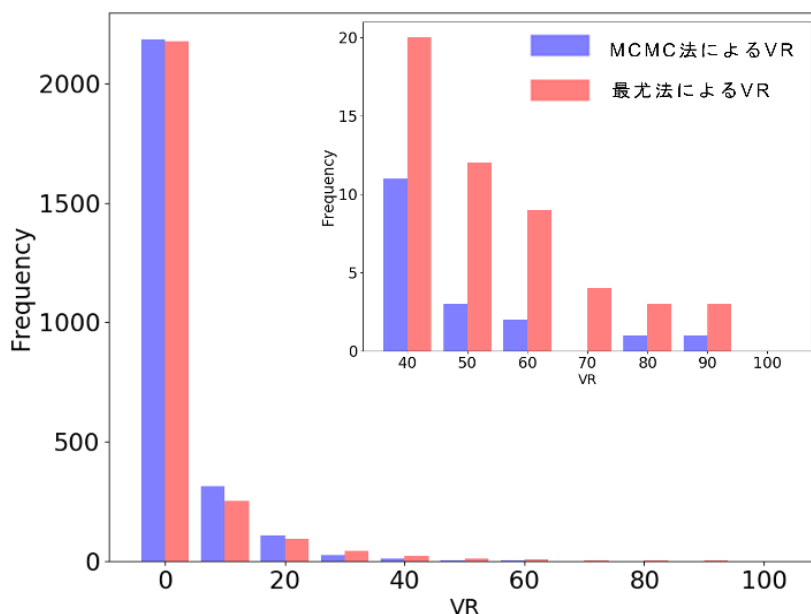


図-3 ノイズ以下のイベントに対するVRの頻度分布。2022年1月1日から2022年12月31日までのVRの頻度分布。赤が現行の最尤法による推定結果、青がMCMC法による推定結果。挿入図はVRが40%以上の領域を拡大表示したもの。

### 3.3 REGARD 自己診断ツールの開発

これまでの REGARD の運用実績から障害原因について調査したところ、超速報暦及び固定点データの欠損、特定の不正な衛星の信号取得が多くを占めることがわかった。加えて、特定の衛星の影響による測位障害については、障害範囲に地域性及び時間変化があることが明らかになった。これらの障害について、障害の原因を特定し影響を把握するために、超速報暦格納状況及び固定点データ取得状況を調査し、衛星の地上トラック図、解の種類（Fix 解／Float 解）の時系列図及び分布図を作成するツールを作成した。

## 4. 結論

REGARD のリアルタイム測位に PPP 測位を導入するにあたり、現行の RTK 測位の FIX 率を調査した。1500 km を超える長基線では FIX 率が急激に低下することが明らかになった。RTK 測位と今回導入した PPP の解を比較したところ、RTK で長基線となる観測点では、PPP のほうが標準偏差は小さくなり、PPP は巨大地震の地殻変動を検出するための十分な測位性能持つことがわかった。また、

REGARD の震源断層推定について、ノイズ事例に対する応答を調査したところ、MCMC 法による震源断層推定手法は、現行の最尤法よりも観測点ノイズに起因する誤推定を低減できる可能性があることが明らかになった。加えて、REGARD の障害について、迅速に状況を把握しその障害に対応するため、REGARD の自己診断ツールの開発を行った。

#### 参考文献

Ohno, K., Ohta, Y., Kawamoto, S., Abe, S., Hino, R., Koshimura, S., Musa, A., and Kobayashi, H. (2021) : Real-time automatic uncertainty estimation of coseismic single rectangular fault model using GNSS data, *Earth Planets and Space*, 73 (127), 1-18.