

# 将来の測地基準系の保持手法に関する研究（第 8 年次）

実施期間

平成 24 年度～令和元年度

地理地殻活動研究センター

宇宙測地研究室 小門 研亮

## 1. はじめに

国土地理院では、日本における位置の基準として測地基準座標系を定め、この測地基準座標系に基づいて電子基準点をはじめとした基準点の位置を測量成果として公開している。これらの測量成果が世の中の様々な測量や地図等の基準として用いられることで、全国で互いに整合した位置情報サービスを享受することができる。近年の衛星測位技術の進展に伴い、準天頂衛星システムのセンチメートル級測位補強サービスや民間事業者による高精度測位サービス等が開始され、周囲の基準点を使用することなく、誰もがリアルタイムに高精度な測位結果を得られる社会が到来しつつある。これらの高精度測位サービスの中には、民間事業者等が精密単独測位手法に基づく独自の解析手法を採用しているものもあり、そのため、測地基準座標系が測量成果とは一致せず、 $\text{cm}\sim\text{m}$  レベルで測量成果と位置がずれる可能性がある。今後、同様の測位サービスが増加すると各サービスの測位結果にこのようなズレ（不整合）が生じる可能性があることから、精密単独測位で得られる計測時点の座標と測量成果との間に不整合が生じないように適切な管理の仕組みを検討する必要がある。

現在の日本における測地基準座標系は、測量の基準日における基準点の座標値（測量成果）を定め、これを位置の基準として提供してきたが、日本のように日々地殻変動にさらされる国土において、前述の精密単独測位手法で算出される任意の計測時点の座標値を管理するためには、国土の形状とその変化を常に把握し、位置情報の基盤となる日々の国家座標を正確に定める必要がある。このため令和元年度の本研究では、国土の変化を表現するモデルの構築を目的とし、電子基準点で得られる日々の座標値（F3 解）を用いて地殻変動の時空間モデルを作成する手法を検討するとともに、令和元年度に試作した地殻変動モデルの再現性を評価した。

## 2. 研究内容

平成 30 年度は、東北地方 6 県に位置する電子基準点データを用いて地殻変動モデルの試作及び検証を行ったが、地殻変動の空間パターンの考慮が不十分であり、電子基準点の空間密度が低い地域や空間補間の外挿地域において、地殻変動モデルの再現性が低くなる傾向が見られた。このため、今年度は、全電子基準点で得られる地殻変動量について点間の類似性を計算し、地殻変動の空間パターンの把握した上で、地殻変動モデルを試作した。モデル作成は、関東地方と東北地方を主な対象とし、以下の手順で地殻変動量の算出及びモデル化を実施した。

- ① 関東地方（新潟県を含む）と東北地方に位置する電子基準点（データ品質の悪い点は除く）について、地震後の変動を表現するフィッティング関数を対数関数と指数関数の組み合わせで推定。フィッティング計算では、座標時系列のばらつき（RMS）が小さい電子基準点を約 100km 間隔で選定し、MCMC 法で時定数を推定した後、その時定数を初期値として周囲の電子基準点のフィッティング計算をグリッドサーチと最小二乗法で実施。
- ② ①で求めたフィッティング関数を用いて、各電子基準点の 2011/3/11 から 2019/1/1 までの累積地殻変動量を算出。算出した累積変動量データから次式で定義される点間の非類似性計算。観測点

間の距離を横軸、非類似性を縦軸として、点間ベクトルの方位毎にプロットを作成し地殻変動の空間パターン（距離と類似度の関係）の異方性を確認。

$$\gamma = \frac{1}{2n} \sum_{i,j} (X_i - X_j)$$

[ $\gamma$ :非類似性,  $n$ : データ数,  $X_i, X_j$ : 電子基準点  $i$  又は  $j$  における変動量]

- ③ ②で確認した空間パターンの異方性を基に、クリギング法における球型バリオグラム等のパラメータを設定（長軸の角度と長軸と短軸の距離を指定）。全電子基準点の累積地殻変動量を①のフィッティング関数から算出し、クリギング法を用いた空間補間を実施。空間補間は1日毎に行い、2011/3/11 から 2019/1/1 までの期間について1日毎に地殻変動モデルを作成。

上記の手法で作成した地殻変動モデルの再現性を検証するため、全電子基準点で1点抜き公差検定（ある電子基準点1点の変動量データを除いてモデルを作成し、当該点の実測変動量とモデル計算値の較差を計算することでモデルの再現性を評価する方法。以下「LOOCV」という。）を実施し、対象地域全体のモデル再現性を評価した。

### 3. 得られた成果

#### 3.1 フィッティング関数の推定結果

各電子基準点におけるフィッティング関数値と F3 解の残差（RMSE）のヒストグラムを図-1 に示す。一部の電子基準点を除き、RMSE は水平で 7mm 未満、上下で 14mm 未満に収まっており、上空視界や電波受信環境による測位解のばらつきがある電子基準点でなければ、地殻変動を高精度に再現するフィッティング関数を推定できることを確認した。

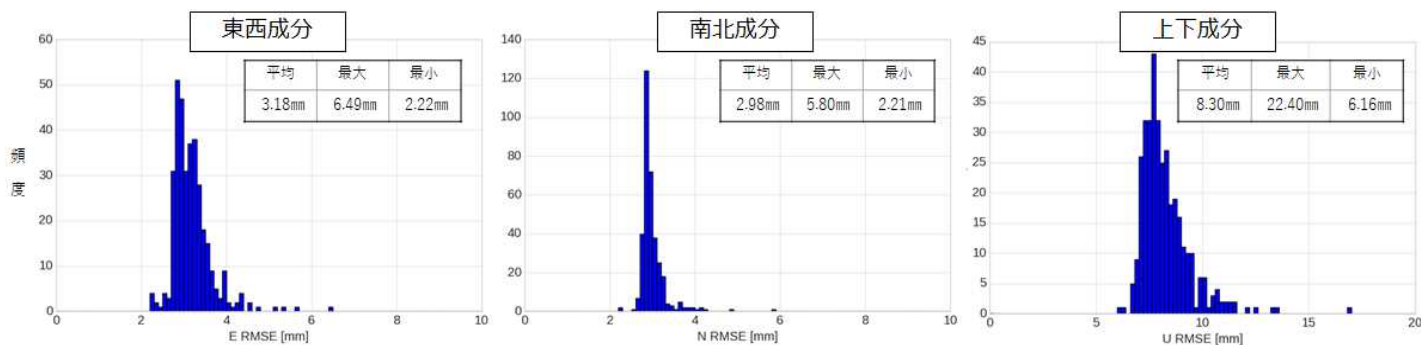


図-1 フィッティング関数と F3 解の差（RMSE のヒストグラム）

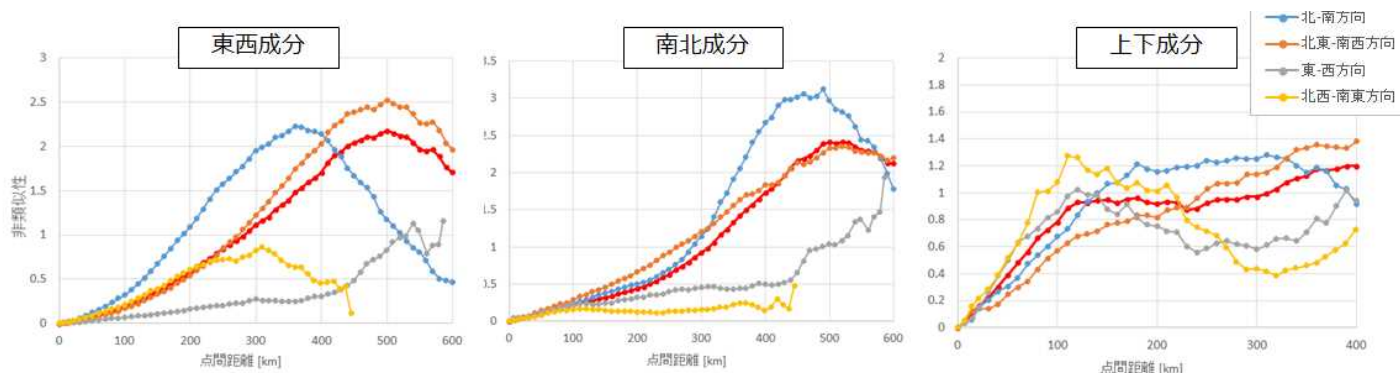


図-2 バリオグラム（空間従属性の指標）の計算結果

### 3.2 地殻変動の空間パターンの確認

累積地殻変動量は東西、南北、上下の3成分について計算しており、空間補間も成分毎に独立に実施しているため、地殻変動量の非類似性の計算も3成分についてそれぞれ実施した(図-2)。東西、南北の水平成分については、北-南方向で点間距離に伴う急激な変化が見られ、東-西方向に比べ非類似度が高いことが分かった。一方、上下方向については、方角による違いは小さく、空間パターンの異方性は小さいと判断できる。このため、クリギング法による空間補間においては、当該結果を参考に水平方向については東-南方向に長い球型バリオグラムとし、上下方向については異方性のない球型バリオグラムを適用した。

### 3.3 試作した地殻変動モデルの再現性 (LOOCVの結果)

2012/1/1 及び 2019/1/1 時点の地殻変動モデルを使用して実施した LOOCV の結果 (累積度数分布) を図-3 に示す。両時期ともに全体の 95% で較差が 3.5cm 以内 (90% 以上の電子基準点で 3cm 以内) に収まっており、概ね良好な結果が得られたが、2012/1/1 時点のモデルに比べると 2019/1/1 時点のモデルの再現性が低下していることが分かった。2019/1/1 時点の LOOCV の結果を空間的にプロットしたところ (図-4)、平成 30 年度のモデル試作時に見られた電子基準点の空間密度が低い地域や空間補間の外挿地域 (半島や離島部等) での再現性の低下が解消されていることを確認した。これは、空間従属性を考慮して空間補間を実施したことによる効果と考えられる。

一方、福島県浜通り付近や房総半島等で再現性が悪いことが確認できる。これらの地域では平成 23 年 (2011 年) 東北太平洋沖地震の余震やスロースリップによって局所的な変位が発生しており、現状の電子基準点の点間間隔では詳細な地殻変動を検出できず、最適なモデルを作成できなかったためと考えられる。また、東北地方の内陸部 (奥羽山脈付近) においても、再現性が悪いことを確認した。当該地域は火山活動等により周囲と異なる変動が生じている可能性があり、地殻変動の様相の変化が再現性の低下につながっている可能性がある。

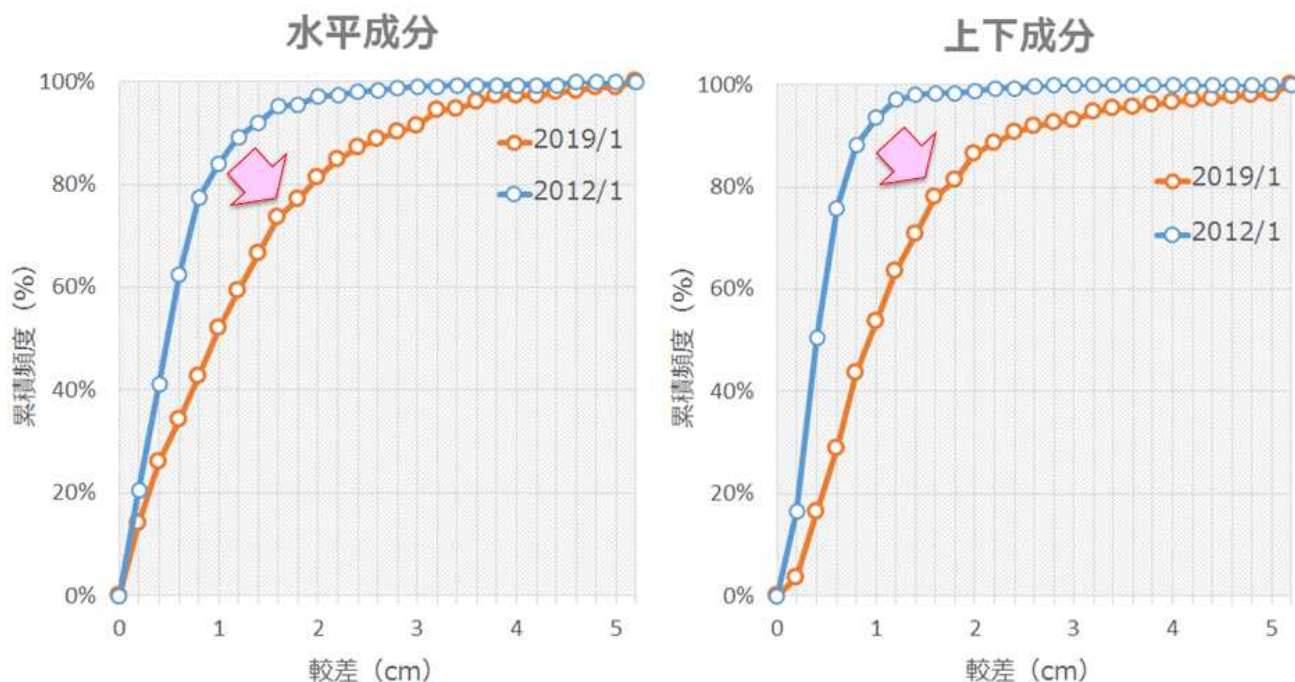


図-3 LOOCV の結果 (累積度数分布)

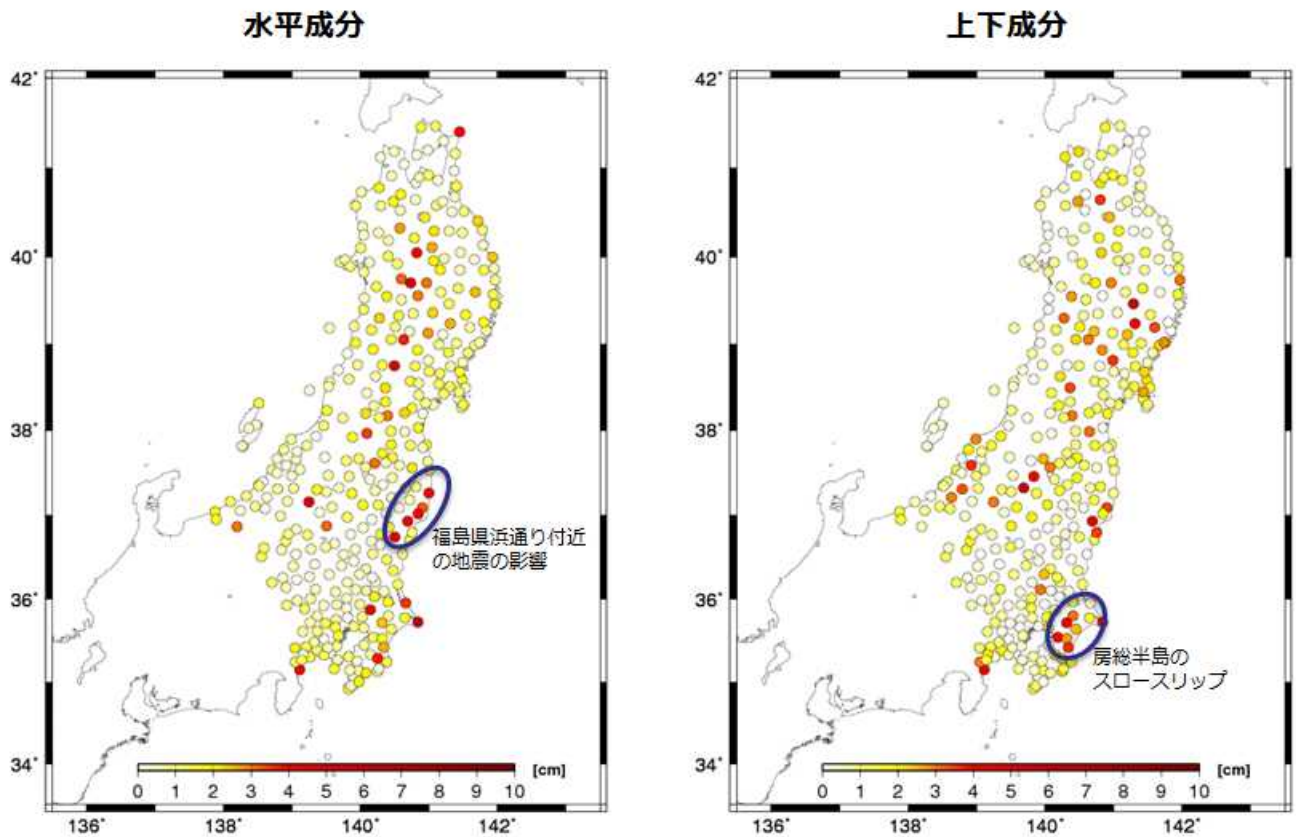


図-4 LOOCVの結果（地図上プロット）

#### 4. 結論

令和元年度は、関東～東北地方を対象に地殻変動モデルの作成を実施した。地殻変動量の空間補間計算時に空間パターンを考慮することで、空間補間の外挿地域を中心に地殻変動モデルの再現性が向上することを確認した。一方、電子基準点のみでは捉えられない局所的な地殻変動が生じた地域については、電子基準点のみで短波長の地殻変動を再現することが難しく、モデルの再現性が悪い結果となった。これらの地域では、別途研究している低価格 GNSS による連続観測点を設置するなど、観測データの空間分解能を向上させる必要がある。

また、地殻変動モデルの再現性は、2012/1/1 時点よりも 2019/1/1 時点の方が低下していることが分かった。電子基準点毎の F3 解のフィッティングにおいては、フィッティング精度の低下は見られていないことから、空間補間の方法に課題が残っていると思われる。時間の経過とともに空間波長の異なる地殻変動が累積するが、現状の空間補間は全ての地殻変動を累積した変動量を基に計算をしているため、それぞれの地殻変動に最適化した空間補間ができていない。局所変動のような短波長の地殻変動と地震の余効変動のような長波長の地殻変動を分離して空間補間を実施するなど、地殻変動の空間波長を考慮した空間補間手法の検討が必要である。