

# 将来の測地基準系の保持手法に関する研究（第7年次）

実施期間 平成24年度～平成30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（国家座標）として公開している。これらの国家座標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楽しむことができる。近年の衛星測位技術の進展に伴い、精密単独測位を用いた位置情報サービスの展開が予想されるが、この精密単独測位で得られる計測時点の位置座標を測地基準座標系に基づき作成された地図等と重ね合わせるためには、測地基準座標系の基準日（東日本：2011.5.24、西日本：1997.1.1）から計測時点までに累積した地殻変動によるズレを適切に補正しなければならない。

上記の地殻変動によるズレを適切に補正するために、測量分野においてはセミ・ダイナミック補正が採用されているが、セミ・ダイナミック補正のパラメータ更新頻度や精度は、測量における相対測位手法での利用を前提としたものであり、精密単独測位に最適化されたものではない。精密単独測位により求められた計測時点の位置情報を地図等の位置情報に正確に補正するためには、時間の経過とともに時々刻々と変化する地殻の動きを高い時空間分解能で高精度に再現できる地殻変動モデルが必要である。

このため、本研究では、定常的なプレート運動や2011年3月11日に発生した東北地方太平洋沖地震後の余効変動、その他の内陸地震等を考慮した地殻変動モデルの検討を進めている。第7年次となる平成30年度は、昨年度までに開発及び有効性の確認を行ったマルコフ連鎖モンテカルロ法（以下「MCMC法」という。）による余効変動モデル推定手法（宮崎・松尾，2018）を用いて、東北地方太平洋沖地震の余効変動の影響が大きい東北地方における地殻変動モデルを計算した。

## 2. 研究内容

本研究における地殻変動モデルの計算は、東北地方太平洋沖地震後の余効変動が顕著な東北地方のGEONETの定常解析（F3解）（中川ほか，2009）を用いて行った。地殻変動モデルの計算及びその検証の手順は以下のとおりである。

- ① 東北地方6県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した。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関数をグリッドサーチで推定する手法を採用した。フィッティング計算に係る諸条件を表-1に示す。
- ② ①で求めたフィッティング関数の将来的な予測値精度を明らかにするため、フィッティング関数の推定に用いたデータ使用期間後2018/7/11～12/10の期間について、各関数による推定値とF3解を比較し、フィッティング関数による予測値の精度を評価した。
- ③ ①で求めたフィッティング関数に基づき電子基準点毎の地殻変動量の算出及びクリギング法によ

る空間補間を実施し、2011/3/11～2018/7/10 までの期間について面的な地殻変動モデルを計算した。地殻変動の算出は、東北地方太平洋沖地震後の成果改定日である 2011/5/24 を基準日とし、フィッティング関数上の任意の日付の座標値から基準日の座標値を引くことで算出した。また、クリギング法による補間計算の設定は、セミ・ダイナミック補正を参考とし、等方的な球型のバリオグラムモデルを用いて点間距離 100km のバリオグラムを作成し、任意の地点における地殻変動量を推定した。空間補間の妥当性を評価するため、フィッティング計算を実施した電子基準点について、フィッティング関数による計算値と周囲の電子基準点を基に空間補間で推定した値を比較し、残差を評価した（1点抜き交差検証（LOOCV））。

表-1 フィッティング計算に係る諸条件

条件項目	内容
対象点	東北地方6県（青森、岩手、宮城、秋田、山形、福島）の電子基準点（計161点）
使用データ	GEONETの定常解析（F3解）
データ使用期間	2011/3/11 から 2018/7/10 まで
フィッティング手法	MCMC法及びグリッドサーチ
フィッティング関数	対数（Log）及び指数（Exp）の項を3項までとした以下の計算式を採用 $D(t) = a \cdot \log(1+t/b) + c + d \cdot \log(1+t/e) - f \cdot \exp(-t/g) + V \cdot t$ LogとExpの組み合わせについては、以下の5パターンで最適な式を選択 1:Log, 2:Log+Log, 3:Log+Exp, 4:Log+Exp, 5:Log+Log+Exp
備考	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ BICをもとに最適な関数パターンを選択し、ENU成分を独立に推定</li> <li>・ Trend項（<math>V \cdot t</math>）は、1997年～2001年までのF3解より推定</li> <li>・ 年周・半年周の変動量、内陸地震等のオフセットも併せて推定</li> </ul>

### 3. 得られた成果

#### 3.1 電子基準点毎のフィッティング関数の推定

東北地方の電子基準点161点（データ量が不足している点は除く）についてフィッティング計算を実施したところ、全161点のRMS平均が、東西成分2.3mm（最大：5.1mm）、南北成分2.0mm（最大：3.1mm）、上下成分7.3mm（最大：12.5mm）となり、概ね10mm以内のRMSで時系列変化を表現することができた。水平成分及び上下成分の閾値を水平5mm、高さ10mmとし、閾値を超過した4点の座標時系列を確認したところ、一部の期間に異常値が存在するのみで、フィッティング自体に問題は見られなかった。図-1に全161点のRMSの度数分布、図-2にフィッティングの例（電子基準点「宮古（940028）」の時系列座標及びフィッティング関数のプロット）を示す。

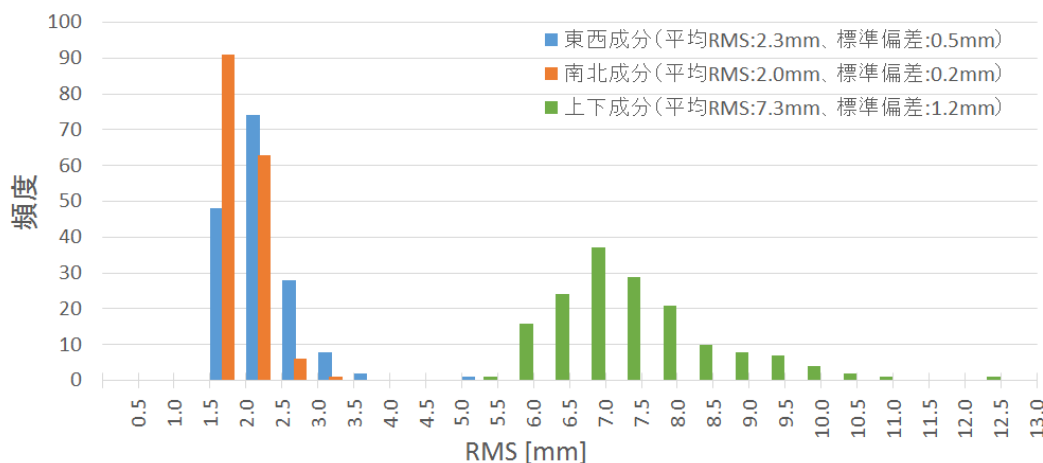


図-1 フィッティング計算におけるRMSの度数分布

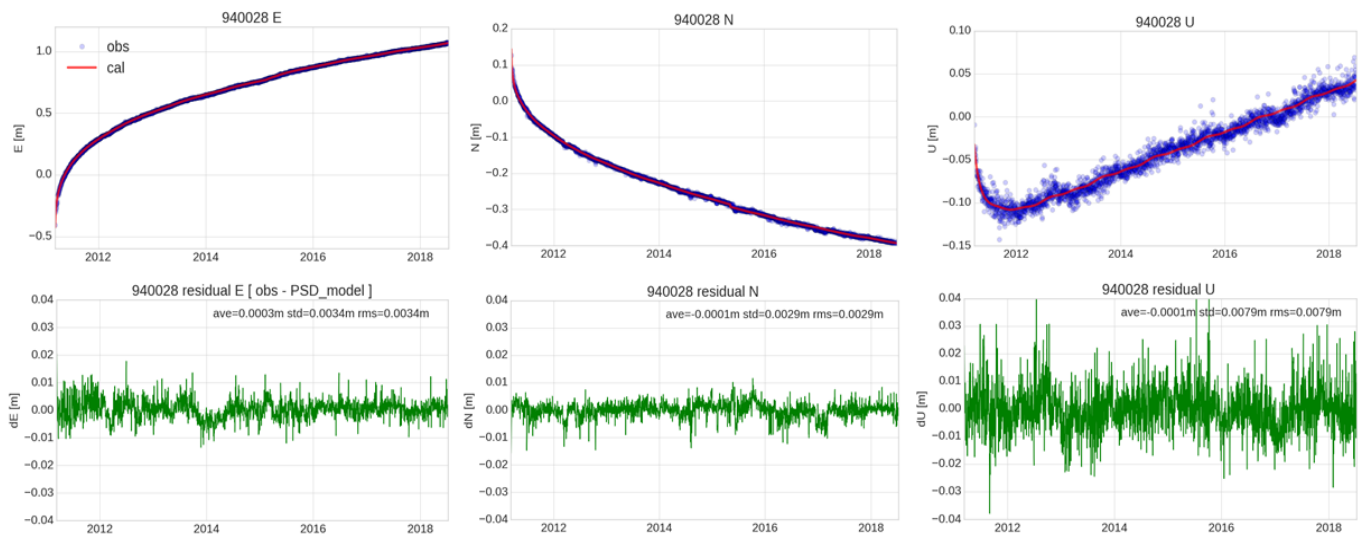


図-2 電子基準点「宮古 (940028)」のフィッティング計算結果

(上段：F3 解時系列プロット (青) とフィッティング関数 (赤)，下段：フィッティング残差)

### 3.2 フィッティング関数による予測値精度の評価結果

データ使用期間から約 5 か月後の 2018/12/1～12/10 の残差を確認したところ、RMS 平均が、東西成分 2.6mm (最大：6.3mm)，南北成分 2.3mm (最大：7.5mm)，上下成分 7.5mm (最大：22.5mm) となり、概ね 2cm 以内の良好な整合性が得られたが、残差は時間の経過とともに徐々に大きくなる傾向が見られた (図-3)。電子基準点によっては半年以内に予測値と実測値の差が 3cm 以上になることも想定され、予測値に求められる期間や精度に応じてフィッティング手法の改善が必要である。

今回の検証ではデータ使用期間が 7 年 4 ヶ月、予測期間は約 5 ヶ月半であり、余効変動の速度は地震直後に比べ小さくなっているため、フィッティング関数による予測がある程度容易であったと言える。しかしながら、地震後のデータ使用期間を 2.5 年より短くした場合、10 年以上のスケールを持つ粘弾性緩和による変動を正確に推定することができず、予測値精度が大きく低下する。データ使用期間が短い場合は、粘弾性緩和による影響を考慮した上で、フィッティング関数を推定する必要がある。

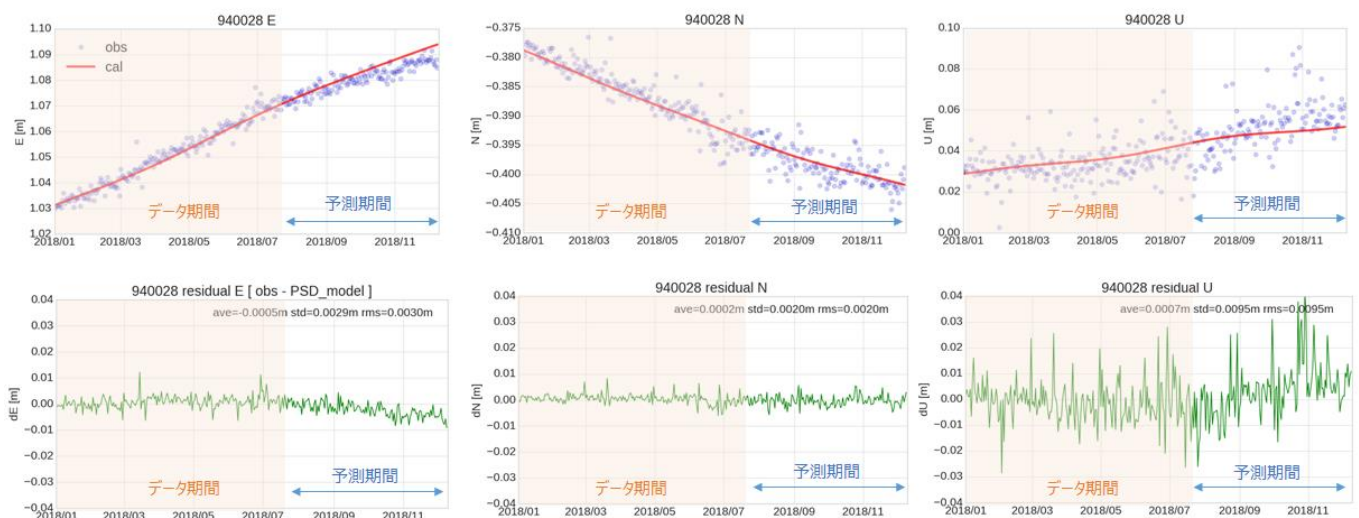


図-3 電子基準点「宮古 (940028)」の予測値精度の評価

(上段：F3 解時系列プロット (青) とフィッティング関数 (赤)，下段：フィッティング残差)

### 3.3 空間補間による面的な地殻変動モデルの交差検証結果

全電子基準点を対象に1点抜き交差検証を実施した結果、全点のRMS平均が東西成分7.9mm、南北成分6.7mm、上下成分9.1mmとなり、空間補間による誤差が概ね20mm以内に収まることを確認した。しかしながら、電子基準点の密度が低い地域では、地殻変動算出の基準日(2011/5/24)から時間が経過し、地殻変動量が大きくなるほど空間補間の誤差も相対的に大きくなる傾向(3cm以上)が見られた(図-4)。クリギング法により適切に空間補間するには、空間従属性を正確に把握する必要があるが、東北地方太平洋沖地震後の余効変動場の空間従属性は異方性を持つ地殻変動場であり、今回用いた等方的な球型のバリオグラムモデルは最適なものではない可能性がある。空間補間の誤差を小さくするには、クリギング法における設定条件を精査し、余効変動場に適したバリオグラムモデルを設定する必要がある。

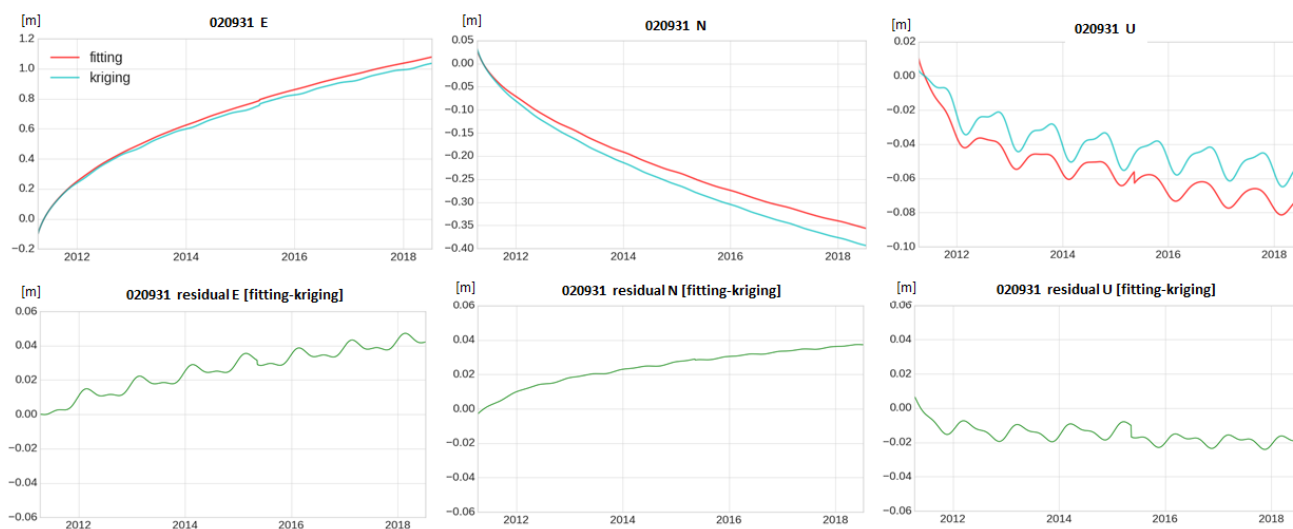


図-4 電子基準点「最上(020931)」での交差検証結果

(上段：フィッティング関数(赤)と空間補間推定値(緑)、下段：空間補間残差)

## 4. まとめ

東北地方における地殻変動モデルをF3解のフィッティング及びクリギング法による空間補間により計算した。計算の結果、電子基準点毎のフィッティングについては、水平・上下成分ともに1cm以内の誤差で時系列変化を表現できた。空間補間については、概ね2cm以内の誤差で地殻変動を推定できるが、時間の経過とともに誤差が大きくなる傾向にあり、空間補間手法の精査が必要である。

## 参考文献

宮崎隆幸, 松尾功二 (2018) : 将来の測地基準系の保持手法に関する研究 (第6年次), 平成29年度調査研究年報, 152-155.

中川弘之, 豊福隆史, 小谷京湖, 宮原伐折羅, 岩下知真子, 川元智司, 畑中雄樹, 宗包浩志, 石本正芳, 湯通堂亨, 石倉信広, 菅原安宏 (2009) : GPS連続観測システム(GEONET)の新しい解析戦略(第4版)によるルーチン解析システムの構築について, 国土地理院時報, 118, 1-8.