

# セミ・ダイナミック補正の高度化に関する研究

宮坂 正樹・中村 保彦 (株式会社パスコ)

## 1. はじめに

日本は複数のプレート境界に位置し、それぞれのプレートが異なる方向へ動くことから、複雑な地殻変動が起こっている。この一様でない地殻変動による歪みの影響を補正し、位置情報(緯度、経度、標高)の均一な精度を長期的に維持するためセミ・ダイナミック補正が運用されている。セミ・ダイナミック補正では、電子基準点における、GNSS連続観測によって得られた日々の座標(F3解)を基に、測地成果2011の基準日に準拠した元期座標から計算基準日である1月1日の座標(今期座標)までの地殻変動量を求め、全国の陸域をカバーする5kmメッシュの地殻変動補正パラメータが1年に1回提供されている。本稿では、国土地理院部外研究員として平成27年6月15日から平成27年8月7日の期間で実施した、セミ・ダイナミック補正の高度化に関する研究のうち、地殻変動補正パラメータ作成時の『今期座標推定方法の改良』、『観測点間距離と歪の関係』の2点について検証をした内容を報告する。

## 2. 今期座標推定方法の改良

### 2.1 現行の今期座標推定方法

現行の推定方法では、各電子基準点のデータが、積雪や樹木などによる電波障害、凍上現象による傾斜の影響を取り込んでしまう恐れがあるため、前年の1月1日から12月31日までの1年間のF3解に対して、プレートの沈み込み

などに伴う定常的な地殻変動である「トレンド」、温度・湿度・気圧など季節の変化に伴う「年周成分」、電離層や潮汐の影響など半年の周期を持つ「半年周成分」を考慮し(1)式のような関係関数を仮定し、最小二乗法により係数 $a_x \sim f_x$ を推定し、外挿することにより今期座標である1月1日の座標を推定している。

### 2.2 今期座標を推定するための期間についての検証

年周および半年周の成分は、気象状況などにより、毎年一様ではない。このことから、長期間のデータから今期座標を推定することによって年周・半年周成分の各年のばらつきが平準化されると考え、計算に使用するF3解のデータ期間を変更し今期座標推定した際の精度について検証した。また、キャンペーン観測や新設された観測点を用いた補正パラメータの作成を想定し、データ期間を短くすることによる今期座標の推定精度についても検証した。

#### 2.2.1 検証方法

検証に使用するデータの範囲について、2011年3月に発生した東北地方太平洋沖地震の影響で近年のF3解では、定常的な変動のほかにも地震後の余効変動などの影響があると考え、表1の解析条件について今期座標を推定し、現行の期間(1年)とその他のデータ期間で比較した。

データの評価は、現行の推定方法との差が、

$$x = a_x t + b_x + c_x \sin\left(\frac{2\pi}{365} t\right) + d_x \cos\left(\frac{2\pi}{365} t\right) + e_x \sin\left(\frac{2*2\pi}{365} t\right) + f_x \cos\left(\frac{2*2\pi}{365} t\right) \quad \dots (1) \text{式}$$

$x$ : F3解の $x$ 成分[m],  $t$ : 時間[日]

表1 検証データの解析条件

計算基準日	データ始日	データ終日	データ期間
2006年 1月1日	2005年12月1日	2005年 12月31日	1ヶ月
	2005年11月1日		2ヶ月
	2005年10月1日		3ヶ月
	2005年7月1日		半年
	2005年1月1日		1年
	2004年1月1日		2年
	2003年1月1日		3年
2006年 12月31日	2006年12月1日	2007年 12月31日	1ヶ月
	2006年11月1日		2ヶ月
	2006年10月1日		3ヶ月
	2006年7月1日		半年
	2006年1月1日		1年
	2005年1月1日		2年
	2004年1月1日		3年
2008年 1月1日	2007年12月1日	2007年 1月1日	1ヶ月
	2007年11月1日		2ヶ月
	2007年10月1日		3ヶ月
	2007年7月1日		半年
	2007年1月1日		1年
	2006年1月1日		2年
	2005年1月1日		3年

作業規定の準則第42条の重複基線ベクトルの較差 水平方向 20mm、高さ方向 30mmの半値である、水平方向 10mm、高さ方向 15mm以内であるかを良否の指標とした。

## 2.2.2 検証結果

各解析条件における現行の推定方法との差を表2に示す。

南北方向と東西方向については、使用するデータ期間が1ヶ月～半年と短い場合、平均値は± 3.0mm程度、標準偏差は最大で 5.6mmであり、データ期間が短い場合でも水平座標は推定可能と考える。

使用するデータ期間が2年、3年の場合、平均値は± 4.0mm程度、標準偏差は± 6.0mm以内であり期間が短い場合と大差はないが、期間が長くなるにつれ、バラつきが大きくなる傾向が見られる。これは、使用するデータ期間を長くしたことにより、現行の期間(1年)よりも非定常的な地殻変動や、それに伴うトレンドの変化を含んで今期座標を推定したためと考えられる。

表2 現行の推定方法との差

base	interval	dN [mm]		dE [mm]		dU [mm]	
		average	stdev	average	stdev	average	stdev
2006/01/01	1month	-2.0	3.8	-0.6	2.6	20.1	7.8
	2month	-0.9	4.2	-1.0	5.6	12.9	11.7
	3month	-0.3	1.7	-1.6	1.9	7.8	5.2
	1/2year	-1.2	1.4	-2.1	1.1	5.8	3.7
	2year	-2.1	4.4	-1.4	4.4	1.3	4.0
	3year	-2.2	4.6	-0.1	5.4	0.8	4.5
2007/01/01	1month	1.3	2.3	-1.5	2.5	0.9	6.6
	2month	1.1	1.5	-2.5	1.5	-5.9	5.2
	3month	1.9	1.4	-3.0	1.4	-7.8	5.5
	1/2year	0.2	1.2	-4.0	1.1	-3.5	3.5
	2year	-1.1	1.8	-1.4	2.3	-2.2	3.0
	3year	-3.7	3.9	-2.3	3.5	-0.9	3.6
2008/01/01	1month	-2.2	2.6	0.4	3.1	-1.3	9.0
	2month	-1.3	1.8	0.7	1.8	2.0	5.4
	3month	-1.2	1.5	0.9	1.5	1.6	4.1
	1/2year	0.0	1.1	-0.1	0.9	-0.3	2.7
	2year	0.0	1.1	2.2	1.4	0.5	2.1
	3year	-1.1	1.8	2.6	2.4	0.5	2.4

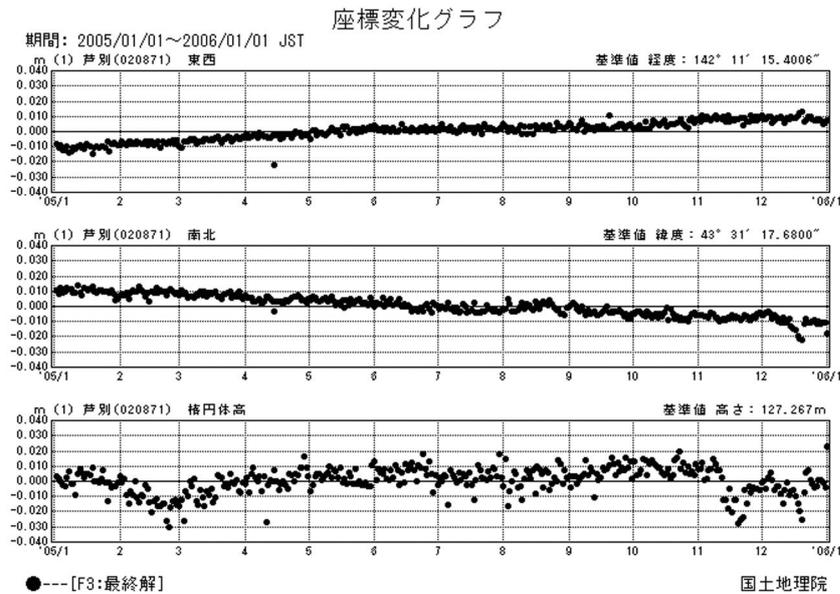


図1 F3解の座標変化グラフ

高さ方向については、使用するデータ期間1ヶ月～3ヶ月と短い場合の、平均値は±20.0mm程度、標準偏差は最大で11.7mmと大きな値を示しており、利用するデータ期間として十分でないと考えられる。使用するデータ期間が2年、3年の場合、平均値が±2.0mm程度、標準偏差は最大で4.5mmと小さい。これは、F3解の時系列をみると、水平方向と比較し高さ方向は1年間で周期的な変動傾向が強くばらつきも大きいいため、年周、半年周の変動が顕著な基準点においては、短期間のデータ期間では正しく推定できないためと考えられる。このことから、高さ方向の今期座標推定には3ヶ月より長い期間で推定すべきである。図1に周期的な変動が大きいF3解の時系列の例を示す。

### 2.3 トレンドを考慮した今期座標の検証

現行のセミ・ダイナミック補正で用いる地殻変動補正パラメータは、1月1日に計算した値を翌年の3月末まで使用している。これによりGNSSと整合した位置の基準が提供されているが、地域によっては1年間の地殻変動量が実際の変動量と一致しないことが起こりうる。また、近年GNSSによるPPPなどリアルタイムに絶

対位置を求める技術開発も進められており、今後このような技術が普及すれば1年間の地殻変動量が測位精度に影響を与える可能性がある。地殻変動補正量と実際の変動量との差を縮めるためには、地殻変動補正パラメータの配信頻度を上げることが有効だが、提供するパラメータが多くなることにより、ユーザーの混乱を招くなど新たな問題が懸念される。そこで、トレンドを考慮した地殻変動速度のパラメータを現行手法と同様に年1回作成し、そのパラメータを用いて、毎月の今期座標を推定した場合の有効性について検証した。

#### 3.1.1 検証方法

各電子基準点における、トレンドを考慮した今期座標を推定し、実際のF3解と比較した。トレンドを考慮した今期座標の推定方法は、(2)式のような関係関数を仮定し、計算基準日までの1年間のF3解に対し、最小二乗法により係数 $a_x$ 、 $b_x$ を推定し、外挿することにより各月の今期座標を算出した。

$$x = a_x t + b_x \dots (2) \text{ 式}$$

$x$ : F3解の $x$ 成分 [m],  $t$ : 時間 [日]

### 3.1.2 検証結果

計算基準日 2006 年 1 月 1 日における、現行のパラメータの有効期間 15 ヶ月後（1 月 1 日に計算した値を翌年の 3 月末まで使用）の各電子基準点における現行の推定方法およびトレンドを考慮した今期座標と F3 解との差を図 2 に示す。

高さ方向については、現行の推定方法と比較し、トレンドを考慮した今期座標について優位な差は確認できなかった。

水平方向については、現行の推定方法では、全体的に実際の F3 解との差が大きい傾向なのに対し、トレンドを考慮した方法では、東北、四国および九州の一部を除き F3 解との差は小さい。差が大きい地域については、トレンドを推定する際の 1 年間のデータ期間に地震などによる非定常的な地殻変動が含まれており、その影響で実際の F3 解との差が現れたものと考えられる。このことから、非定常的な地殻変動が少ない地域においては水平方向に対してトレンドを考慮した今期座標の推定は有効であることが確認された。

## 3. 観測点間距離と歪の関係

### 3.1 電子基準点データによる検証

地殻変動補正パラメータ作成に用いられる電子基準点は、国内に 1300 点以上整備されており、その観測網はプレートの沈み込みに起因する定常変動のような長波長変動を捉えるには十分稠密である。そのため、欠測などによりデータ量が不十分で、その点のデータを間引いたとしても、運用上支障のない精度でパラメータを作成できる。運用上求められる精度で補正パラメータを作成するためには、その地域の地殻内の変形の程度やようすを表す歪の集合である歪場に対して、観測点間距離がなんらかの制約を受けると予想される。電子基準点の F3 解から、平均点間距離が異なる地殻変動補正パラメータを作成し、その結果を比較することで観測点間距離拡大によるパラメータの変化と歪場の関係を議論した。

### 3.2.1 検証手法

検証データは、東北地方の全ての電子基準点を用いて作成した地殻変動補正パラメータ（平均

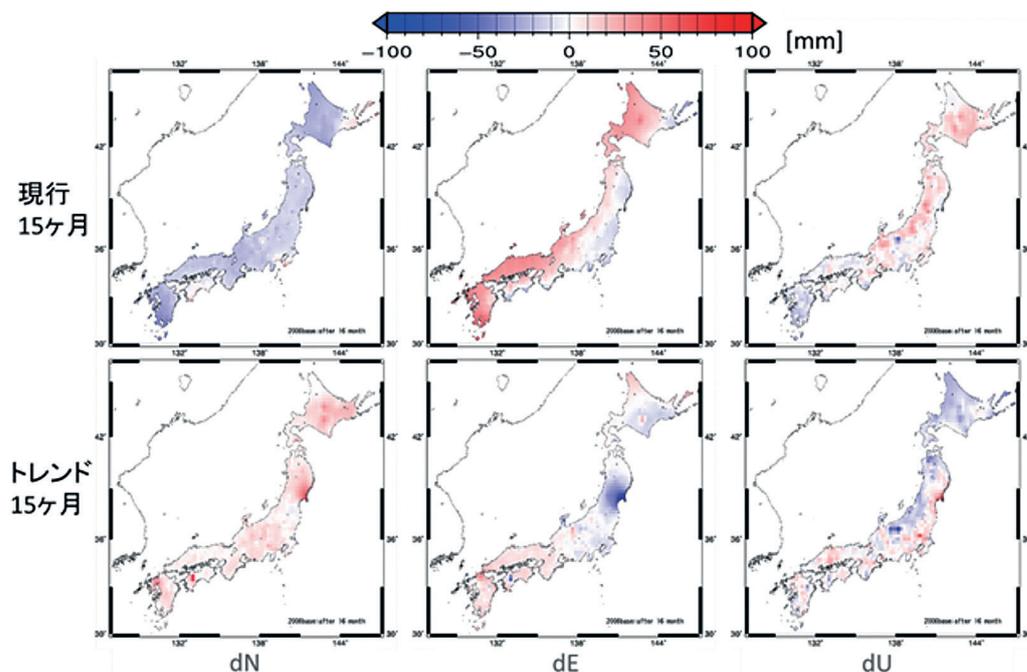


図 2 各電子基準点における今期座標と F3 解との差

点間距離 20km) に加え、平均点間距離を 25km、45kmとなるように電子基準点を間引いてパラメータを作成した。また、異なる歪場の比較を行うため、パラメータの計算基準日は東北地方太平洋沖地震の発生日を跨ぐ、2011年1月1日、2015年1月1日の2時期を採用し、平均点間距離3種(20km、25km、45km)、計算基準日2時期の組合せで、計6種のパラメータを作成した。計算基準日2時期の平均点間距離 20kmを基

準とし、25km、45kmのパラメータとの水平成分残差(以下、25km残差・45km残差とする)および、その標準偏差を求めた。25km残差と45km残差の結果を比較することで、点間距離増加に伴う補正パラメータの変化を確認した。

### 3.2.2 検証結果

計算基準日 2011年1月1日における、25km残差・45km残差のヒストグラムを図3に示す。

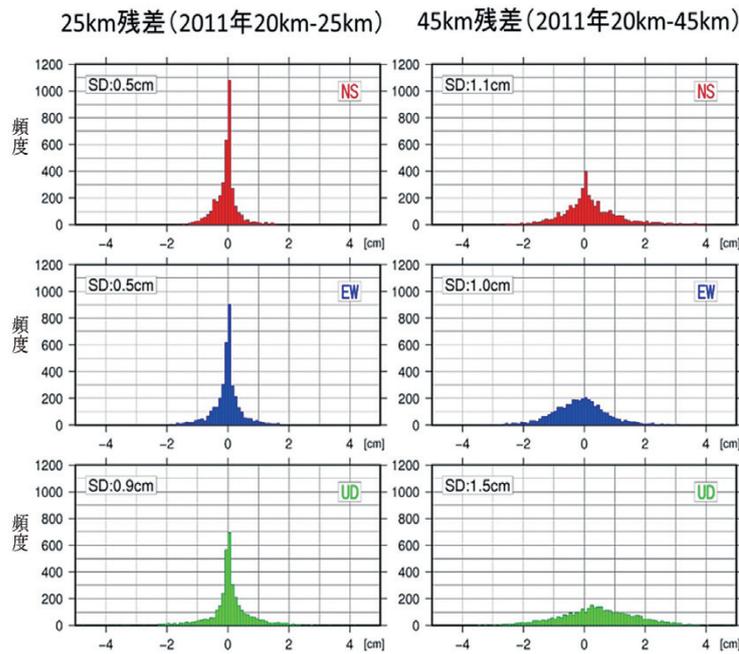


図3 計算基準日 2011年1月1日におけるヒストグラム

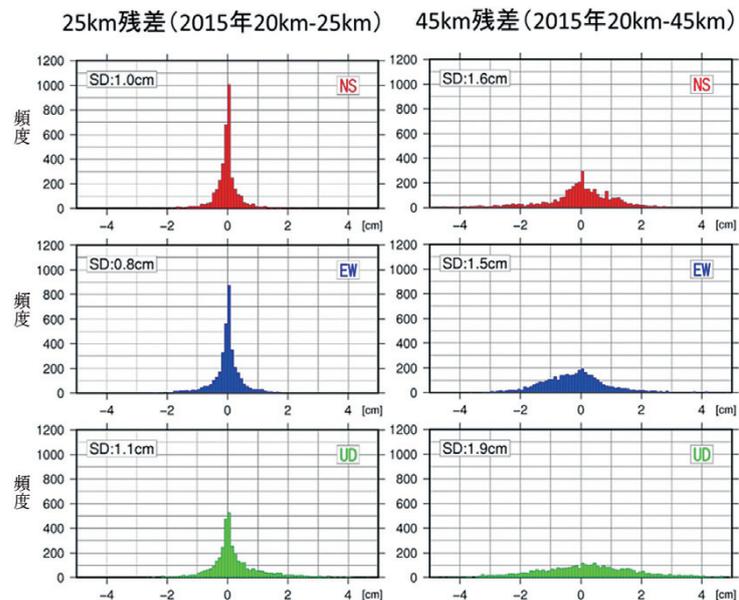


図4 計算基準日 2015年1月1日におけるヒストグラム

表3 25km残差、45km残差の標準偏差 [cm]

年	20km-25km		20km-45km	
	2011年	2015年	2011年	2015年
南北	0.5	1.0	1.1	1.6
東西	0.5	0.8	1.0	1.5
上下	0.9	1.1	1.5	1.9

25km残差と45km残差のヒストグラムを比較すると、ピークがより顕著に表れているのは25km残差のヒストグラムである。45km残差のヒストグラムでは、地殻プレートの沈み込みによる定常変動のような長波長変動は再現されているものの、観測点間距離の拡大に伴い、局所的に影響する短波長変動に対する再現度は、低下することが読み取れる。

計算基準日2015年1月1日における、25km残差・45km残差のヒストグラムを図4に示す。2011年の結果と同様に、25km残差がより顕著なピークを持つ。この結果からも、観測点間距離の拡大に伴い、短波長変動に対する再現度が、低下することを確認した。

各年の25km残差、45km残差の標準偏差を表3に示す。東北地方太平洋沖地震後の2015年の結果が0.5cm程度大きい傾向を示す。この結果から、歪の大きさ、あるいは歪の不連続のいずれに依存するのか判断するまでは至らなかったが、観測点間距離を拡大させた場合の変化はその地域の歪場に依存することが示された。

#### 4. まとめ

今期座標推定方法の改良については、データ期間を変えて今期座標の推定およびトレンドを考慮した今期座標を推定した。

現行の推定方法におけるデータ期間については、最低でも1年の1/4である3ヶ月のF3解を用いて今期座標の推定が必要と考えられる。

トレンドを考慮した推定については、1年間のF3解を用いて推定することにより、非定常的な地殻変動のない地域においては、有用なパ

ラメータが作成可能と考える。

観測点間距離と歪の関係については、観測点間距離の拡大によって、地殻プレートの沈み込みによる定常変動のような長波長変動は再現されるが、観測点間距離の拡大に伴い短波長変動に対する感度が低下すること及び、観測点間距離の拡大に伴う補正パラメータの変化がその地域の歪場に依存することを確認した。

#### 謝辞

本研究は、平成27年6月15日～8月7日まで「国土地理院部外研究員受入れ規程」(平成26年3月26日国官技第311号第2条第2項)に基づいて行った。

本研究にあたり、国土地理院測地部測地基準課 田中課長、根本課長補佐、豊福基準管理係長、湯通堂調査係長、山下基準管理係をはじめとする測地基準課の皆様には業務多忙中にもかかわらず、貴重な指導・助言及び資料の提供をしていただいた。また公益財団法人日本測量調査技術協会の関係各位に様々なご尽力を頂いた。ここに記して感謝する。

#### ■執筆者

宮坂 正樹 (みやさか まさき)  
株式会社パスコ

#### (共著者)

中村 保彦 (なかむら やすひこ)  
株式会社パスコ