

セミ・ダイナミックな測地系の構築に向けた取り組みについて Development of Semi-dynamic Datum in Japan

測地部 田中愛幸・岩田和美・豊田友夫・平井英明・川口 保・松坂 茂
Geodetic Department Yoshiyuki TANAKA, Kazumi IWATA,
Tomoo TOYODA, Hideaki HIRAI, Tamotsu KAWAGUCHI and Shigeru MATSUZAKA
測地観測センター 畑中雄樹
Geodetic Observation Center Yuki HATANAKA
地理地殻活動研究センター 飛田幹男・黒石裕樹・今給黎哲郎
Geography and Crustal Dynamics Research Center
Mikio TOBITA, Yuki KUROISHI and Tetsuro IMAKIIRE

要 旨

基準点測量成果は、プレート運動に伴う地殻変動による歪を含んでいるものの、基準点測量が局所的に行われてきたために時間的に一定であると見なし、差し支えなかった(「スタティック」な測地系)。ところが、GPS の導入に伴い、新点設置時に遠方の基準点を用いることができるようになったため、地殻変動の歪みが測位誤差を生み、局所的な測量で求めた基準点成果との不整合を生じさせてしまう。しかも、成果を決定した時点から時間が経過するほど、歪による誤差は増大していく。

そこで、成果を常に現在の座標に改定すれば、観測値と成果との整合性を、いつでも保つことができる(「ダイナミック」な測地系)。しかし、成果そのものが時間変動するために、位置基準としての安定性は失われてしまう。

セミ・ダイナミックな測地系は、上に述べたスタティックな測地系とダイナミックな測地系の欠点を補うことで、測量成果の整合性と安定性を確保する手法である。すなわち、成果は一定のまま観測値に対してダイナミックな(=時間変化を考慮した)地殻変動の補正を行うことで、測量結果を求めるエポックである測地成果 2000 を定めた年(元期)に統一する。本稿では、この仕組みについて説明する。

続いて、基本測量での補正を目的とした地殻変動モデルの開発と精度検証を行う。地殻変動モデルは、電子基準点及び高度地域基準点のデータを利用して作成する。電子基準点を与点とする全国の四等三角点の測量結果にこのモデルを適用したところ、電子基準点間の閉合差が、補正前に比べ 1 割未満に減少することが確認された。

ネットワーク型 RTK-GPS においても、最近、独自の地殻変動補正手法が開発されている。実証試験観測によりそれらの手法を調査した結果、補正手法の違いはあるものの測位結果はどれも 10mm 前後で一致し、また、地殻変動が正しく補正されていることを確認した。補正した地殻変動量は、国土地理院の

モデルとも 10mm 程度で一致し、今後、基本測量での補正手法の確立や、ネットワーク型 RTK-GPS での補正手法の標準化を進めていく。

1. はじめに

国土地理院では、第 6 次基本測量長期計画において、今後 10 年間に基本測量が果たすべき役割と課題を掲げている。この究極の目的は、「いつでもどこでもだれでも現在の位置を正確に知ることのできる環境の実現」である。このような環境の基盤としての役割を担うのが測地成果 2000 であり、地殻変動の激しい日本列島において、地殻変動による成果の精度劣化を、いかに効率よく防いでいくかが、課題の一つとなっている。なぜなら、測地成果 2000 は、1997 年 1 月 1 日を元期として定められた、時間的に一定な座標値であるため、地殻変動の進行とともに、成果の指し示す位置と実際の位置とのずれが生じてしまうからである。

地震・火山活動に伴う地殻変動については、これまで、再測量や再計算を行い、局所的に成果を改定することで対処してきた。一方、プレート運動に伴う定常的な地殻変動については、対処方法はまだ確立されていない。定常的な地殻変動による誤差は、元期からの時間の経過とともに増大する。現時点で蓄積している成果の絶対誤差は、日本列島全体の電子基準点の変位を平均すると、世界測地系に対して約 20cm であり、歪みに直すと 2 ppm 程度となる。今後、この誤差は累積していき、いずれは隣接電子基準点間の閉合差の許容範囲を超えてしまうような大きな誤差を生み出すことになる。

定常的な地殻変動のもたらす誤差を回避する方法として、日本と同様に地殻変動の激しいニュージーランドにおいては、成果を改定せず、観測値に地殻変動の補正を施すセミ・ダイナミックな測地系を採用している(Grant and Blick, 1998)。国土地理院においても、今後の全面的な成果改定に伴う社会的コストを減らすため、第 6 次基本測量長期計画に基

づいて、セミ・ダイナミックな測地系の導入に向けた研究を、平成 16 年度から行っている(国土地理院, 2003)。本稿では、セミ・ダイナミックな測地系の仕組みを説明するとともに、これまでに得られた研究成果と今後の課題について報告する。

2. セミ・ダイナミックな測地系とは何か？

2. 1 セミ・ダイナミックな測地系の概念

セミ・ダイナミックな測地系とは、成果は一定のまま、現在の観測値を絶えず元期における観測値に引き戻すような計算過程を組み込んだ系のことをいう。一方、ITRF2000 が座標値とともに速度を持っているように、時間の経過とともに成果を逐次改定していくのが、ダイナミックな測地系である。以下、両者を比較しながらセミ・ダイナミックな測地系について説明する。

図-1 は、両者の概念の比較を行ったものである。ダイナミックな測地系では、時間とともに座標系が変化していくのに対して、セミ・ダイナミックな測地系では、座標系は時間が経っても元期のままである。今、座標系を構成する点 i に、正しい速度 V が与えられているとする。理解しやすくするため、 V は一定とする。ダイナミックな測地系では、速度は点 i の現在の座標(以下、「今期の座標」という。)を逐次計算するのに用いられるが、セミ・ダイナミックな測地系では、速度は点 i において元期から今期の間に生じた地殻変動量を求めるのに用いられる。求めた地殻変動量を今期の座標から差し引いた結果をセミ・ダイナミックな測地系における測量結果と見なすことで、地殻変動の影響が除去される。この引き戻し計算は、新点の座標を決定するときにも用いられる。その結果、セミ・ダイナミックな測地系においては、実際の観測時期はばらばらであっても、測量結果を得るエポックは、常に測地成果 2000 の元期である 1997 年 1 月 1 日に統一されることになる。

これは、地盤沈下の水準測量において、観測結果を基準日に統一するのと同じと考えてよい。ただし、水準測量では上下変動のみ補正するのに対して、セミ・ダイナミックな測地系では、三次元的に補正を行う点異なる。

図-1 の計算式のように、地殻変動の補正を行うためには、測量に用いる点での速度が分かっている必要はない。電子基準点の設置場所においては、連続観測データを用いることで、速度を容易に計算することができる。しかし、観測が行われる多くの点の速度は未知であり、これらの速度を推定するための地殻変動モデルを構築する必要がある。なお、上記の説明では、速度によって地殻変動を表してきたが、速度の代わりに座標差を用いても、地殻

変動を表すことは可能である。地殻変動モデルについては、第 3 章で詳しく述べる。

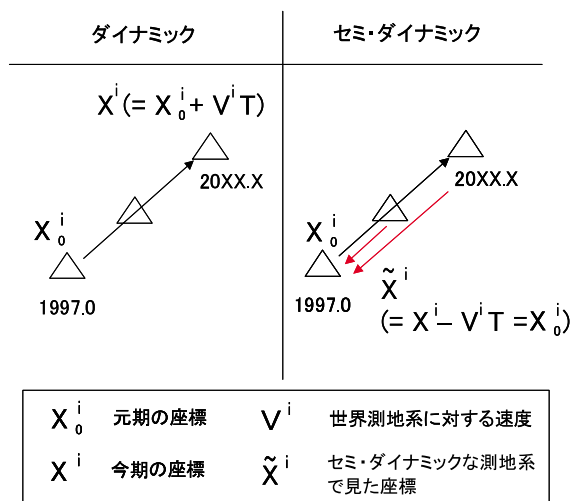


図-1 セミ・ダイナミックな測地系の概念

2. 2 なぜセミ・ダイナミックな測地系か？

前節で、セミ・ダイナミックな測地系の仕組みをダイナミックな測地系と比較しながら説明した。それでは、成果を逐次改定するダイナミックな測地系を採用しないのはなぜか？ これに対する答えは、国土地理院(2003)に以下のように述べられている。現在の成果は、これまで行われた莫大な数の地籍調査や土地登記等の基準として用いられてきた。したがって、成果を全面的に改定することによる社会的費用は非常に大きいため、常に基準点が正しい位置にあるというダイナミックな測地系の合理性を考慮してもなお、成果改定は避けるべきである。ただし、定常的な地殻変動による絶対的な変位が、GPS の単独測位の精度に対して無視できない誤差となった場合は、測地成果の全面改定も視野にいれる必要がある。

なお、地震による局所的な変動が生じた場合や、個々の基準点の成果が悪い場合は、セミ・ダイナミックな測地系においても、局所的な成果改定を行う。

2. 3 簡単な計算例

セミ・ダイナミックな測地系の効果を計算例を用いて説明する。図-2 に、一次元のみ考慮した観測図を示す。既知点 A, C から新点 B の位置を決定する。A, C 間の距離の成果を 25km とし、A, B 間の 1997.0 年時の真の距離は 10km とする。今、A, C 間に 0.2ppm/yr 程度の地殻変動が生じているとして、2017.0 年に観測を行ったところ、表-1 (上) のような結果を得たとする。元期から 20 年の時間が経過したため、4 ppm の歪みが A, C 間に生じている。

この歪みのため、成果と A, C 間の閉合差は 10cm となり、現行の計算方法では、許容範囲($60\text{mm}+20\sqrt{N}$, $N=2$) を超えてしまう。また、10cm の誤差が網平均により等しく分配されたとすると、A, B 間の距離は、1997.0 年の真の距離に対し、5cm 伸びることになる。

次に、セミ・ダイナミックな測地系での場合を考える。今、A, B, C 点の速度が、地殻変動モデルによって、図-2 のように与えられているとする。すると、20 年間に生じた各基線の変動量は、4cm, 6cm となる。これらの地殻変動量を 2017.0 年における観測値から差し引くことで、元期に引き戻された距離が得られる(表-1(下))。この例では、地殻変動を補正した A, B 間の距離と B, C 間の距離の和は、成果と完全に一致している(閉合差=ゼロ)。したがって、網平均後の A, B 間の距離は、A, B 間の観測値と等しくなる。現行の方法が真の位置に対して 5cm ずれていたのに比べ、差は 7mm まで低減されている。

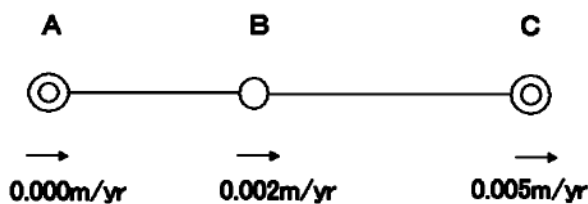


図-2 観測図

表-1 計算方法の比較

現行の計算方法

基線	成果(1997.0)	観測値(2017.0)	成果との差	許容範囲
A→B	10000.000	10000.033		
B→C	15000.000	15000.067		
A→C	25000.000	25000.100	0.100	0.088 ×
網平均後の A→B	10000.050		0.050	

セミ・ダイナミックな測地系での計算方法

基線	成果(1997.0)	観測値(1997.0)	成果との差	許容範囲
A→B	10000.000	10000.033-0.040 = 9999.993		
B→C	15000.000	15000.067-0.060 = 15000.007		
A→C	25000.000	25000.000	0.000	0.088 ○
網平均後の A→B	9999.993		0.007	

単位はm

2. 4 セミ・ダイナミックな測地系の利用

セミ・ダイナミックな測地系の実体は、地殻変動の補正に他ならない。したがって、エポックを元期に統一するという概念としてはともかく、実際の補正計算をどのように適用するかは、各種測量の目的や精度と補正量の大きさを考慮して、判断すべき

であろう。現時点では、基本測量も含め、地殻変動補正をどの測量に適用するのかは検討段階であるが、本節で、地殻変動の誤差と測量の種類について簡単に比較してみよう。

測量においては、通常、相対精度の維持が重要であるため、相対誤差の原因となる地殻変動の歪みに注目する。地殻変動の歪みによる誤差は、基線長が長いほど、また元期から観測を行った時期までの時間が長いほど、増大する。図-3 は、元期から 10 年毎の歪みによる誤差と基線長の関係を示したもので、電子基準点から直接新点を求める場合や、ネットワーク型 RTK-GPS 等、観測網の大きい測量で地殻変動誤差が大きく、補正の必要性がより高いことが分かる。反対に、トータルステーションを用いた局所的な測量では、誤差は 30 年後で数ミリである。

一方、成果と世界測地系における現在位置との差(絶対的な誤差)は現時点で約 20cm であり、基準点を用いないような測位(現在位置を求める測位)と用いる測位(測地成果 2000 に基づいた 1997 年における位置を求める測位)との間に差を生じさせる。この誤差を 1/500 の図上で換算すると 0.4mm の誤差であり、今のところ大きな問題とはならないが、歪みと同様、絶対誤差も時間に比例して増大し、今後の単独測位の精度、利用者の要求精度の向上によっては、より早い段階でセミ・ダイナミックな測地系の適用を行わなければならない領域が出てくる可能性もあるので、測位技術の動向に注意が必要である。

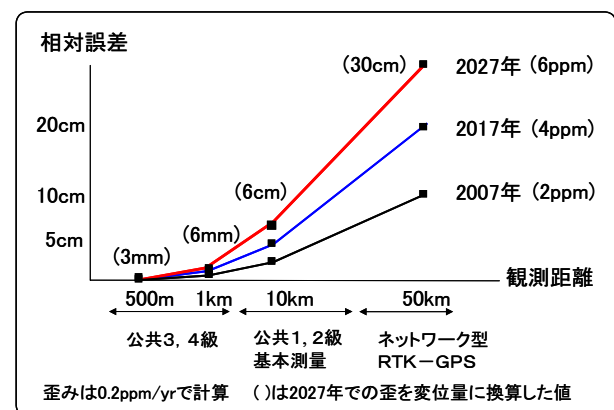


図-3 地殻変動による相対誤差の累積

3. 地殻変動モデル

地殻変動モデルとは、測量に用いる既知点および新点における、元期から今期までに生じた地殻変動量を推定するためのモデルである。セミ・ダイナミックな測地系を採用しているニュージーランドでは、繰り返し GPS 観測から求めた速度場からプレート運動の力学的なモデルを構築し、地殻変動モデルとしている(Beavan and Haines, 2001)。一方、日本

においては、電子基準点が高密度に展開されているので、連続観測の利点を活かしたモデルを構築できる可能性がある。この章では、主に基本測量への適用を念頭において、このような観点に基づいて作成した地殻変動モデルを紹介し(3.1)、さらにモデルの精度や有効性について述べる(3.2)。

3. 1 モデルの概要

国土地理院では、電子基準点、高度地域基準点等を利用して定常的な地殻監視を行っている。電子基準点は、約 25km 間隔で設置されており、日々の座標を用いて元期から今期までの地殻変動量をいつでも得ることができる。これを空間的に補間することで、任意の観測点における地殻変動量を求めることができる。一方、GPS による高精度な繰り返し観測が行われている高度地域基準点は、約 10km 間隔で設置されており、地殻変動の検出に、より長い時間を要するものの、電子基準点のみでは捉えられない、詳細な変動を得ることができる。高度地域基準点測量は、平成 16 年度から開始されており、全国を一巡するのは 5～10 年後であるが、このデータもモデルの高精度化に利用していく。

空間補間のアルゴリズムは、地球統計学において幅広く用いられている Kriging 法を採用する(Wackernagel ほか, 2003)。Kriging 法は、日本測地系と世界測地系との変換を行うソフトウェア TKY2JGD(飛田, 2002)や、地震に伴う変動を補正するソフトウェア PatchJGD(土井ほか, 2005)でも採用している。定常的な地殻変動についても、同様のパラメータを作成することで、それら既存のソフトウェアのアルゴリズムを利用することが可能である。

補間は、地殻変動の速度に対してではなく、元期と今期との座標差に対して行う。さらに、座標差は、次の更新を行うまで一定の値をとるものとする。電子基準点の座標差は、毎年 1 月 1 日から 2 週間の日々の座標を平均した値から成果とアンテナ交換等に伴う人工的なオフセットを引いて求め、これを補間して得られたパラメータの更新は、毎年 4 月に行う他、地震等に伴い成果が改定された地域において、随時行う予定である。ここで、速度を用いずに座標差を用いるのには、次のような理由がある。

- 1) 1 年間一定の座標差を用いても測量に十分な精度を得られる(平均 0.2ppm)。
- 2) 速度を用いた場合、当初予測した速度からずれが生じた際、新たな速度を決めるのに十分なデータを得るための期間が、座標差の場合より長くなる。結果として、更新頻度を上げないといけなくなりモデルの更新時期も不定期になる。
- 3) 同一年度内の作業での補正量が同じである。

4) 座標差であるため、観測値への補正量が直接に分かる。

5) 速度を公開すると、将来の地殻変動量の予測等、本来の目的以外に利用され、混乱が生じる恐れがある。

なお、速度モデルが実際の変動とずれることにより生じる問題に関しては、ニュージーランドにおいても指摘されている(Blick, 2003)。

図-4 は、房総地区におけるパラメータの例である。1997 年 1 月から 2006 年 1 月の変位を示す。ここでは電子基準点の変動(黒矢印)のみを補間している。グリッド化された変動は赤矢印で示してある。ただし、図が煩雑になるのを避けるため、グリッド間隔を粗くしている。実際には、1～2 km 間隔でグリッド化したパラメータを作成する予定である。

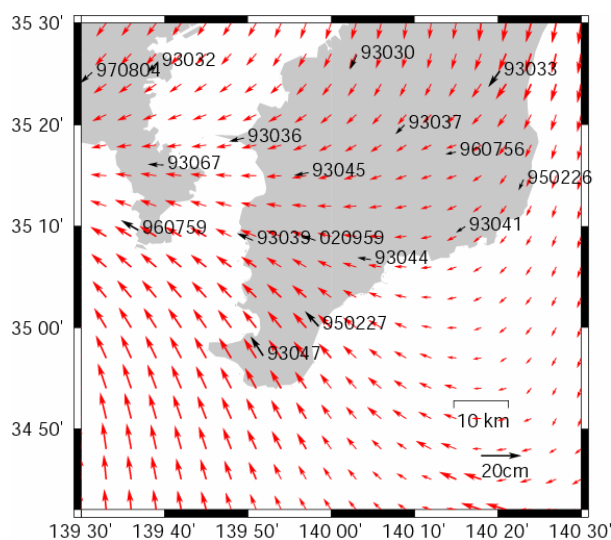
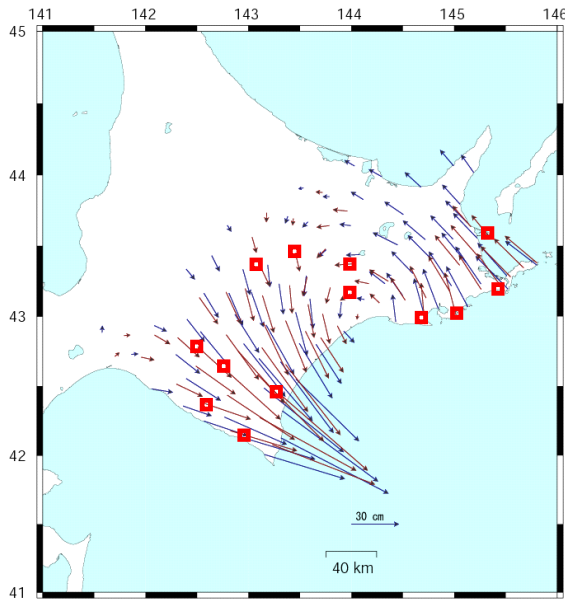


図-4 地殻変動モデルの例(房総南部)

3. 2 モデルの検証

3. 2. 1 補間アルゴリズムの検証

補間精度の検証を行うため、電子基準点の変位を高度地域基準点位置に補間し、高度地域基準点測量の実測値との比較を行った(田中・齋田, 2005)。ただし、この検証では、定常的な地殻変動の代わりに、2003 年十勝沖地震前後の地殻変動データを用いた(図-5)。青が電子基準点、赤が高度地域基準点での変位を示す。このデータを用いた理由は、高度地域基準点測量は、当時、この地震に際して北海道地区で初めて行われたばかりで他にデータがなかったことと、生じた変動が、定常的な地殻変動と同程度に空間的に滑らかだったこと、大規模な地震により変動量が大きいこと、元期からの時間が十分経過した場合の検証に適していたことが挙げられる(図-5 のベクトルが描かれている領域の北端から帯広にかけて 2 ppm～10ppm)。



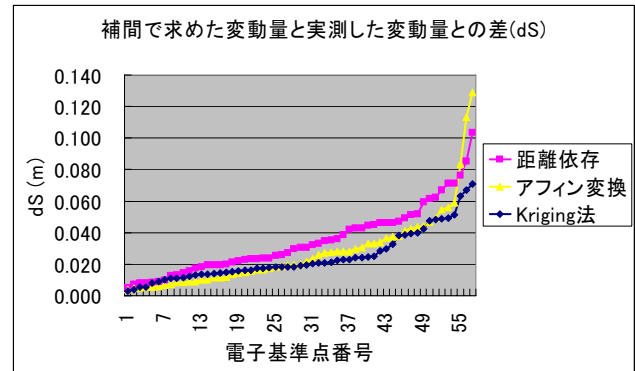
図－5 十勝沖地震による電子基準点及び高度地域基準点の変動

図－6 に検証結果を示す。縦軸が、観測された高度地域基準点の変動量と補間した変動量の水平成分の差を距離で表したものであり、その差が小さい順に左から並べ変えてある。補間アルゴリズムの比較のため、Kriging 法以外に、直近の電子基準点3点から距離に依存した重みつき最小自乗法によって求めた結果と、アフィン変換で求めた結果も示した。この図から、アフィン変換では差が小さい（2 cm 以下）ものが多いが、2 cm 以上のところでは Kriging 法がより一致しており、他の手法で見られる大きなとび（8 cm 以上）も見られないことが分かる。3つのアルゴリズムそれぞれで求めた差の平均値は Kriging 法が 0.024m、重みつき最小自乗法が 0.035 m、アフィン変換が 0.028m であった。これらのことから、全体の平均として、また大きな誤差を防ぐ意味で、Kriging 法が最も精度がよいと考えられる。

次に、アルゴリズムによる差が生じた原因を調べる。今、高度地域基準点の変動量の誤差を 30mm とすると、図－6 より、検証に用いた高度地域基準点のうち約 1/4 の点の変動量は、Kriging 法の結果と誤差の範囲で一致していない。そこで、Kriging 法と実測値との差が 30mm 以上だった点を図－5 にプロットした（赤い四角で囲った点）。これらの点では、アルゴリズム同士の差も 1～数 cm 生じている。差が大きかったこれらの点には、次のような特徴がある。変動量そのものが大きい（帯広）、海岸に近い位置にあるため電子基準点網からはみ出している（えりも、釧路）、補間元となる点の配置密度が低い（中央部）。このことから、より多くの点の変動量を平均して補間を行う Kriging 法が、補間元の点の配置が好ましくない場合に、他のアルゴリズムよ

りも良い精度を発揮していることが分かる。

誤差の範囲で一致しなかった点については、高度地域基準点の実測値を補間を含めることにより、モデルの高精度化が可能である。また、今回の検証は、地震に伴う変動を用いて行ったが、今後、高度地域基準点測量データを蓄積し、同様の検証を定常的な地殻変動に対して行っていく予定である。

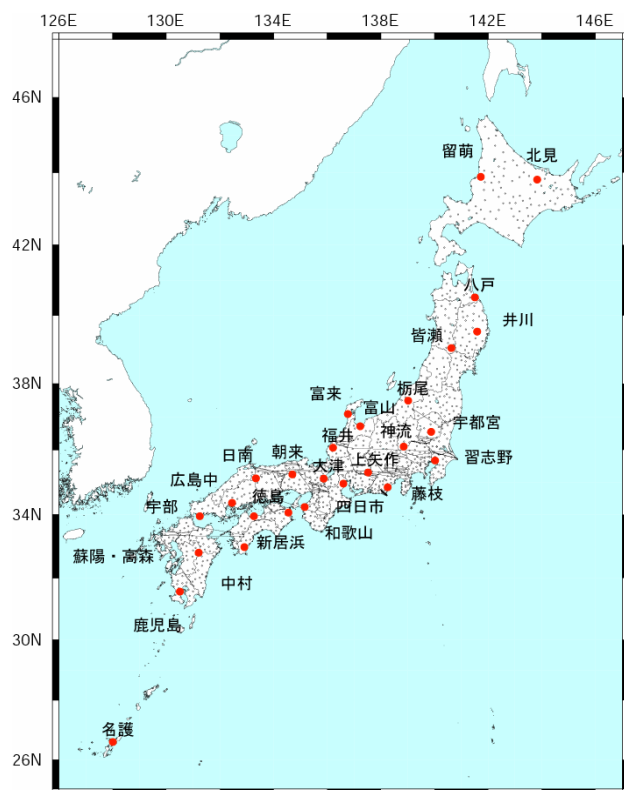


図－6 補間アルゴリズムの比較

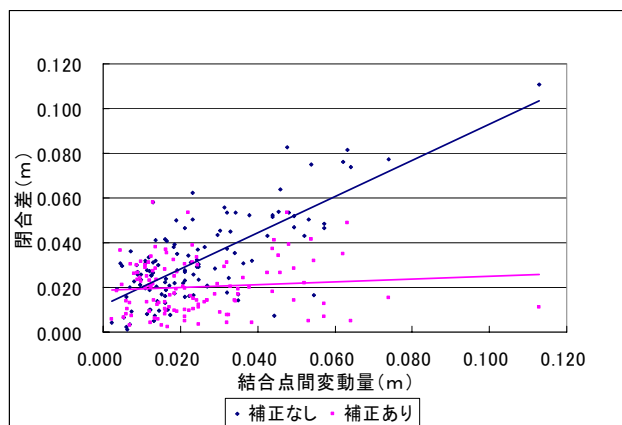
3. 2. 2 地殻変動補正による測量精度の改善

前節では、地殻変動モデルの精度検証を行った。本節では、地殻変動モデルを実際の測量データに適用し、補正の有効性を確認する（詳細は、国土地理院（2005a）を参照）。このため、電子基準点と与点とした四等三角点の測量データを用いて、電子基準点間の閉合差が補正によりどれくらい改善するか調査した。扱ったデータは、平成 16 年度に行われた全国 28 地区（図－7）のデータである。

図－8 に結果を示す。この図で、縦軸は各路線の閉合差、横軸は隣接既知点間の地殻変動量の差である。青の直線は、現行の測量の結果を用いて、両者の相関をとったものである（地殻変動補正なし）。紫の直線は、地殻変動モデルにより補正を行った後、相関をとったものである。まず、補正なしの場合に、既知点間の変動量の差に比例して閉合差が大きくなっていることが分かる。単回帰分析結果は、Y 切片 0.0119、傾斜 0.8121 で、今回の検証地区では、既知点間の変動量が最大 0.113m であった。変動量が 0.113 m の場合、 $Y=0.8121 \times 0.113 \text{ m} + 0.0119 \text{ m} = 0.1037 \text{ m}$ となり、許容範囲 0.0946m ($60\text{mm} + 20\text{mm}\sqrt{N}$; $N=3$ 今回の平均辺数) を超過している。これに対し、補正を行った場合は、既知点間の変動量が大きくなっても閉合差は大きくない。観測値に対する補正が上手くいったことを示すものである。単回帰分析結果は、Y 切片 0.0187、傾斜 0.0623 で、上記と同様に変動量が 0.113 m あった場合、 $Y=0.0623 \times 0.113 \text{ m} + 0.0187 \text{ m} = 0.0257 \text{ m}$ となる。変動量の大きな地域でも、閉合差が大きくなり、十分許容範囲に収まる。



図ー7 補正効果の検証を行った地区



図ー8 補正の有無による閉合差の違い

3. 2. 3 精度保証の問題

前2節では、アルゴリズムの妥当性と補正の有効性について確認したが、実際の測量へ地殻変動補正を適用するには、当然、補正精度を保証しなければならない。しかし、これは容易なことではない。なぜなら、新たに位置を求める点の地殻変動の補正には、実際に測定した地殻変動量ではなく、補間した変動量を用いなければならないからである。補間した変動量と、実際の変動量との差がどれだけであるかは、少なくとも2回、異なる時期に観測されたデータがなければならないが、現実的に、新設点を置く数年前に観測をしておくという考えは考えられない。そうかといって、点固有の局所的な変動

をも予測してモデル化することは困難である。現在、どのような基準によって精度評価を行うかについては検討中であるが、セミ・ダイナミックな測地系において、何を補正すべきかを明確に定義し、モデル化できるものとそうでないものとを分け、モデルの限界を定めることが重要である。例えば、広域的な地殻変動はセミ・ダイナミック補正するが、局所的な地盤変動は補正しない（改測等、他の方法で対処する）という定義が考えられる。もちろん、この場合の広域的・局所的が何を指すのかを定めなければならない。モデルの精度に関して言えば、最近の地震に伴う成果改定において、生じた歪みの大きさが概ね2 ppm以上の地域を改測・改算しているので、地震以外の地殻変動による誤差を、最大で2 ppmに抑えることは一つの目安になる。それを超えるような変動が見つかった場合には、局所的に成果改定を行うということである。

4. ネットワーク型 RTK-GPS における地殻変動補正

ここまで、基本測量を念頭においた地殻変動モデルの概要、構築手法、有効性等について述べてきたが、2.4節で述べたように、ネットワーク型RTK-GPSにおいては、地殻変動による相対誤差の影響はより顕著になる。このため、ネットワーク型RTK-GPSにおいては、測位精度を向上させるために、独自の地殻変動補正が開発されている。この章では、そのような補正手法の調査、試験観測による有効性の確認等を行ったので報告する（詳細は、国土地理院（2005b）を参照）。

4. 1 地殻変動補正の現状

ネットワーク型RTK-GPSでは、ネットワークを構成する電子基準点間の距離は、概ね30kmから70kmである。したがって、現時点の地殻変動の歪みによる誤差が、電子基準点間で10cmを超えることもまれではない。多くのデータを平均して解を求めるスタティック測量と異なり、短時間で解を得なければならないリアルタイム測位では、電子基準点間の距離の観測値と成果とに1 cm以上の差が生じると、測位結果のばらつきが大きくなる。さらに差が大きくなれば、成果の誤差ではなく、観測値が異常であると判定されてしまい、解析ができなくなってしまう。このため、仮想点の位置を測地成果2000に適合させるような網平均を行う（以下、「A方式」という。）、あるいは現実の空間において新点の位置を求めた後、元期に引き戻す（同B方式）といった地殻変動の補正手法が開発されている。その他、post-VRS用が開発された補正手法（同C方式）もある。

4. 2 地殻変動補正の効果

4. 2. 1 実証試験の概要

前節で述べたそれぞれの方式による補正効果を検証するため、平成 18 年 2 月 21 日及び 22 日に、千葉県印旛沼市において、試験観測を行った(写真-1)。図-9 は、試験観測で用いた電子基準点と試験観測点の位置を示す。試験観測点は、数m間隔で数点設置され、複数の受信機・アンテナを用いて、同一の場所・時刻で異なる補正手法による解析結果を得ることができる。



写真-1 実証試験観測

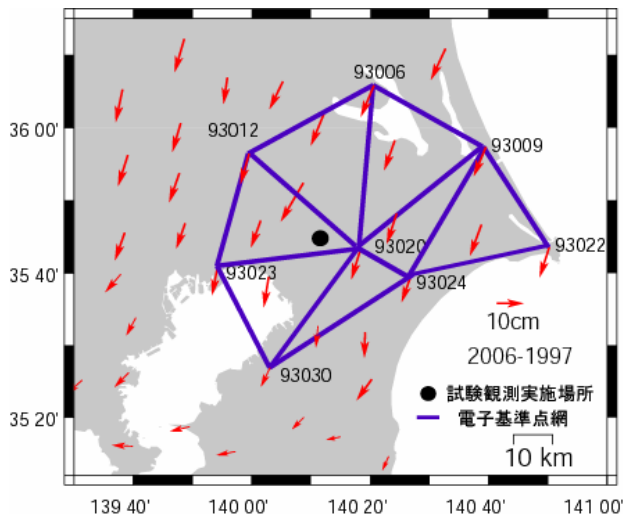


図-9 実証試験配点図

補正効果の検証は、試験観測点の位置を求める際に、補正を施した場合としない場合とで、基準値に対してどれくらい差が生じるかを評価することで行った。基準値は、24 時間のスタティック測量で試験観測点 1 点の座標を求めた後、他の点をトータルステーションで決定した。これらの位置決定精度は数 mm で、地殻変動補正の効果を検証するのに十分な精度である。この基準値は、地殻変動補正を行わない標準的な GPS の解析方法で求めているが、この計

算では試験観測点近傍の電子基準点を固定しており、歪みが小さいため、この基準値に対する地殻変動の影響は無視してかまわない。つまり、この基準値は試験観測点の 1997 年での値(測地成果 2000)になる。

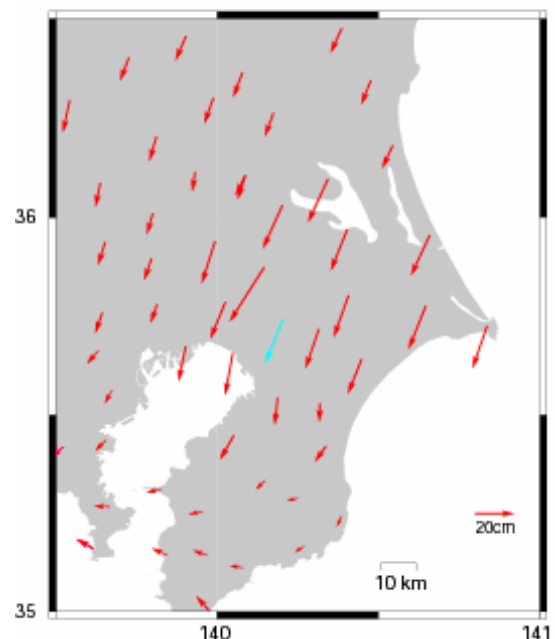
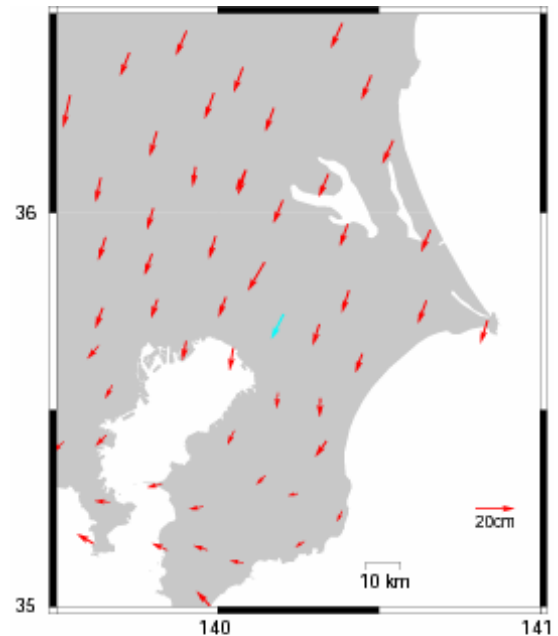


図-10 地殻変動シミュレーション

A 方式では、地殻変動がさらに進行した場合のシミュレーションを行うことができる。これは、地殻変動を起こす代わりに、図-9 の電子基準点の成果をずらすことで行われる。この場合の試験観測点の基準値は、成果をずらした電子基準点のうち、試験観測点の近傍で、歪みの少ないものを固定点として

選び、スタティック解析を行った結果である。したがって、この場合も基準値を 1997 年での値と見なして差し支えない。一方、ネットワークを構成する周囲の点は、仮想的な成果のずれにより、観測値とのずれが増大するため、測位結果の誤差も増大することになる。成果のずれは、1997 年から 2006 年までの変動（図-10 上図）を、2006 年に対するずれの平均値が+50mm、+100mm（図-10 下）となるように定数倍して求めている。

4. 2. 2 A方式での検証結果

表-2（上）は、A方式で地殻変動補正をした場合、しない場合のそれぞれについて、1エポック毎の測位結果のずれを、1時間にわたって平均した値を示す。平均値からの各エポックの観測値のばらつきは、XY平面内で±10mm程度であった。この表から、補正なしの場合、基準値との差は、地殻変動量が増加するにつれ大きくなっている。一方、補正ありの場合、基準値との差は最大でも14mmであり、上記のばらつきを考慮しても、補正が有効であることが分かる。なお、A方式では、各基線ベクトルの相対成分を補正するため、試験観測点での補正量は、地殻変動量そのものではない。

4. 2. 3 B方式での検証結果

表-2（下）にB方式での補正効果を示す。B方式では、試験観測点の地殻変動量そのものが補正量となる。実際、補正をしない場合、1997年に対し、試験観測点は南南西にずれており、プレート運動による地殻変動と調和的である。なお、補正をしない場合の測位結果は、物理的な意味で、ITRFにおける正しい位置を示していると言える（GEONETと同じ）。しかし、測地成果を基準としていないため、測量成果としては使用できない。

表-2 ネットワーク型 RTK-GPS における補正効果

A方式

	補正なし		補正あり	
地殻変動追加量	x	y	x	y
なし(2006値)	0.012	0.016	-0.005	0.005
50mm	0.026	0.024	-0.001	0.014
100mm	0.029	0.029	0.006	0.006

単位:m

B方式

	補正なし		補正あり	
地殻変動追加量	x	y	x	y
なし(2006値)	-0.102	-0.048	0.011	-0.013

単位:m

4. 2. 4 地殻変動補正量の比較

前2節では測位結果における補正効果を見てきたが、この節では、補正量そのものの比較を行う。表

-3は、4.2.1節で述べた方式と、3章で述べた方法で作成した地殻変動モデル（以下、「国土地理院のモデル」という。）による補正量（図-10（上）の水色の矢印を反対向きにしたもの）を示す。ただし、A方式は相対成分の補正のため、ここでは示していない。C方式は、試験観測点を囲む最近接の電子基準点3点について、電子基準点間を結ぶ基線ベクトルの成果と、同じ基線に対して観測当日のRINEXデータを用いて解析した基線ベクトルとの差を、試験観測点位置に線型補間する方式であるが、絶対的な変位に直すために、3点のうち1点については国土地理院のモデルから求めた絶対変位を与えてある。この表から、各モデルの差は、XY成分についてほぼ10mm以内であることが分かる。

表-3 地殻変動補正量の比較

A方式		B方式		C方式		地理院モデル	
x	y	x	y	x	y	x	y
相対成分を補正		0.113	0.035	0.107	0.034	0.118	0.042

単位:m

4. 3 試験結果の評価と今後の課題

本実証試験により、ネットワーク型 RTK-GPS の測位結果が地殻変動の影響を受けており、補正によってその影響が取り除かれ、測地成果 2000 との整合性が維持されていることが明らかになった。補正方式には、相対誤差を補正する方法と絶対誤差を補正する方法に大別されるが、どちらの手法で補正を行っても、両者の測位結果の差は 10mm 未満であり、現行のスタティック観測の結果とも、10mm 強で一致した。ネットワーク型 RTK-GPS の公称精度 20mm-30mm を考えれば、地殻変動補正によって、スタティック測量と変わらない精度が得られていることが分かる。

また、A方式でシミュレーションを行った結果、地殻変動がさらに進行した場合でも補正が有効であることが確かめられた。

3種類の補正方式で補正量の比較を行ったところ、10mm 程度で一致した。この差が生じた原因として、補間元とする電子基準点の変動量にどのような値を用いるか、補間に使用する電子基準点をどのように選択するか、補間アルゴリズム（線型・Kriging 法等）をどう選択するか、等が考えられる。

一例として、補間に使用する電子基準点の違いがどのような問題を生じさせるか考えてみる。ある網の中に、1点だけ周囲と異なる傾向の変動が生じていたとする。この点を補間に含むか含まないかで、その点の周囲の補正量は異なる。これは、地震により局所的な成果改定が行われた地域で測量する際に、改定地域外の電子基準点だけを用いて地殻変動補正量を求めると、震源域の変動を反映できないのと同

じことである。

以上のように、測位結果や補正量のよい一致は見られたものの、各手法の精度を評価する統一的な基準は今のところない。また、シミュレーションのパターンも限られた場合にしか行われていない。このため、より多様な地殻変動のパターンに対して、補正結果や補正量の差を評価するとともに、上記の原因を考慮した、標準的な補正方法を確立する必要がある。

5. おわりに

地殻変動の補正を組み込んだセミ・ダイナミックな測地系の概念や計算方法について説明してきた。また、基本測量での利用を考慮した地殻変動モデルの概要を示し、補正の有効性を確認した。続いて、ネットワーク型 RTK-GPS における地殻変動補正手法について、基礎的な実証試験を行い、各手法の違い

を示すとともに、補正によって測地成果 2000 との整合性が改善されていることを確認した。それらの測位結果には、大きな差は見られず、用いられている補正量についても、本稿で述べた地殻変動モデルと 10mm 程度で一致した。

今後、セミ・ダイナミックな測地系を基本測量へ適用するために、地殻変動モデルの精度評価方法を確立する必要がある。このため、基本測量用の地殻変動補正マニュアルの作成を進めている。また、ネットワーク型 RTK-GPS において、本研究の実証試験から測位結果により一致は見られたものの、それらを評価する基準が確立されていない。そこで、さらに検証事例を増やすとともに、各補正手法の差を評価し、標準的な補正方法を確立するための研究を引き続き行う予定である。これらを踏まえ、来年度以降、セミ・ダイナミックな測地系を適用する測量についても、検討を進めていく予定である。

参考文献

- Beavan, J., and J. Haines (2001): Contemporary horizontal velocity and strain rate fields of the Pacific-Australian plate boundary zone through New Zealand, *J. Geophys. Res.*, 106, 741-770.
- Blick, G. (2003): Practical limitations with the implementation of a semi-dynamic datum for new Zealand, presented at IUGG 2003, Sapporo, Japan, July 3, 2003.
- 土井弘充, 白井康友, 大滝三夫, 斉藤正, 湊敏弘, 千葉浩三, 井上武久, 住谷勝樹, 菅原準, 田中愛幸, 齋田宏明, 矢萩智裕, 小島秀基, 湯通堂亨, 雨貝知美, 岩田昭雄 (2005): 平成 15 年 (2003 年) 十勝沖地震に伴う基準点成果の改定, *国土地理院時報*, 第 108 集, 1-10.
- Grant, D. and G. Blick (1998): A new geocentric datum for New Zealand, *New Zealand Surveyor*, No. 288.
- Hans Wackernagel (著), 青木謙治 (監訳), 地球統計学研究委員会 (訳編) (2003): 地球統計学, 森北出版, 280.
- 国土地理院 (2003): ダイナミックな測地基準点体系の実現に向けて -変動する国土と人々を結ぶ位置情報の基盤-, 国土地理院技術協議会基準点体系分科会 (Ⅲ) 基準点分科会 (Ⅲ) 報告書.
- 国土地理院 (2005a): 地殻変動補正の有効性の確認及び補正データ作成方法の検討, 国土地理院測地部平成 17 年度部外研究員報告書.
- 国土地理院 (2005b): ネットワーク型 RTK-GPS における地殻変動補正に関する調査研究, 国土地理院測地部平成 17 年度調査研究報告書.
- 田中愛幸, 齋田宏明 (2005): 地殻変動モデルの精度評価方法について, 国土地理院測地部平成 17 年度技術報告書.
- 飛田幹男 (2002): 世界測地系移行のための座標変換ソフトウェア "TKY2JGD", *国土地理院時報*, 第 97 集, 31-51.