

セミ・ダイナミック補正の導入について Towards the Introduction of Semi-Dynamic Correction

測地部 檜山洋平・森下 遊・山尾裕美・湯通堂 亨・越智久巳一
Geodetic Department Yohei HIYAMA, Yu MORISHITA, Hiromi YAMAO,
Toru YUTSUDO and Kumikazu OCHI
中部地方測量部 岩田昭雄
Chubu Regional Survey Department Masao IWATA

要 旨

日本列島及びその周辺では、プレート運動に伴う地殻変動により、基準点の相対的な位置関係に歪みが生じ、やがて測量成果と観測結果の間に不整合を生むこととなる。このため、国土地理院では、基準点体系分科会（Ⅲ）報告書（国土地理院，2003）に基づき基準点測量に及ぼす地殻変動の影響を取り除く「セミ・ダイナミック補正」について検討を行ってきた。セミ・ダイナミック補正は、「地理空間情報活用推進基本計画」（平成 20 年 4 月閣議決定）及び「基本測量に関する長期計画」（平成 21 年 6 月国土交通省告示）に位置付けられ、平成 22 年 1 月から基本測量及び公共測量の一部に導入したところである。

本稿では、セミ・ダイナミック補正の導入に向けた検討内容及び平成 21 年度に国土調査に伴う基準点測量等において実施したセミ・ダイナミック補正の検証作業の結果を報告する。

1. はじめに

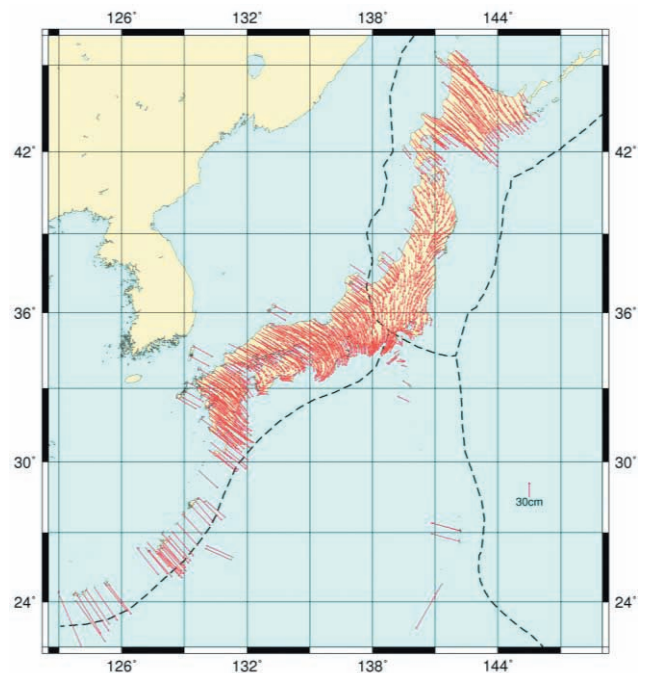
プレート境界に位置する我が国においては、プレート運動に伴う地殻変動により、各種測量の基準となる基準点の相対的な位置関係が徐々に変化し、歪みが蓄積していく（図－1）。基準点の測量成果は、測地成果 2000 の「元期」である 1997 年 1 月 1 日における位置情報としているが、地殻変動の進行とともに測量成果の示す座標値と実際の位置にずれが生じることとなる。しかし、日本列島の平均的な歪み速度は 0.2ppm/year 程度であり（国土地理院，2003）、近傍の三角点等を既知点とした局所的な測量が行われていれば、歪みの影響は小さいため、実用上の問題はなかった。

ところが、GPS 測量機を利用した測量方式の導入に伴い、遠方にある電子基準点を既知点とした測量が可能となった。歪みの影響は基準点間の距離及び「元期」からの経過時間に比例するため、累積する地殻変動の影響を考慮しないと、測量成果と観測結果との間に無視できない不整合を生むこととなる。

既設基準点の測量成果を地殻変動に連動して常に改定するダイナミックな測地系を構築すれば、測量成果と観測結果との整合性を保つことは技術的には

可能である。しかし、測量成果そのものが時間とともに変動するため、位置情報の基準としての安定性が失われ、社会的な混乱を招くおそれがあるばかりでなく、測量成果を頻繁に改定するために多大な費用と労力が必要と予測される。

こうした問題に対応するため、国土地理院は、測地成果 2000 の「元期」から生じた地殻変動による歪みの影響を測量の計算過程で補正する「セミ・ダイナミック補正」について検討を行い、平成 22 年 1 月から基本測量及び公共測量の一部に導入した。



図－1 電子基準点等で検出された 1997 年から 2009 年までの地殻変動

2. セミ・ダイナミック補正とは？

2. 1 セミ・ダイナミック補正の導入の背景

電子基準点が測量に利用される以前は、図－2（左）のように測量地域の近傍にある三角点を既知点とした測量が実施されてきた。例えば、元期から 10 年を経過して実施した 1 級基準点測量で、三角点を既知点とする場合、標準的な既知点間距離を 4 km、

平均的な歪み速度を 0.2ppm/year とすれば、歪みの影響 (mm) は、(歪み速度 (ppm/year)) $\times$ (元期からの経過時間 (year)) $\times$ (既知点間距離 (km)) より 8 mm 程度であり、測量の誤差と見なしたとしても大きな問題にはならなかった。

しかし、図-2 (右) のように電子基準点が既知点として利用されるようになると、既知点間の距離の制限が適用されないため既知点間の距離が長くなり、地殻変動による歪みの影響が既知点の間で大きくなる。電子基準点のみを既知点とした 1 級基準点測量の場合、電子基準点間の距離を 25km とすると、50mm 程度の歪みの影響が見込まれることになる。

新点 C を三角点 A, B の間に設置する場合 (図-2 (左)) と電子基準点 A, B の間に設置する場合 (図-2 (右)) では、電子基準点を既知点とした場合の方が、測量した結果に歪みの影響が大きく加わり、平均計算で誤差楕円が大きくなるという問題が生じる。

また、基準点測量の点検計算で行われる電子基準点間の閉合差にあてはめると、辺数 (N) が 2 辺の場合における許容範囲は $60\text{mm} + 20\text{mm} \times \sqrt{N} = 88\text{mm}$ となる。図-2 (右) の場合、歪みの影響は 50mm であり、元期から 10 年程度経過した現在では許容範囲に収まっているものの、歪みの影響は年々増すため、やがて、良好な観測を行っても制限を満たすことができなくなってしまう。

こうした問題に対応するため、測地成果 2000 の元期から観測を行った時点 (以下、「今期」という。) までの間に生じた地殻変動の量 (以下、「地殻変動量」という。) を、座標値等に補正することによって、元期において得られたであろう測量成果を求めるセミ・ダイナミック補正を導入することとした。

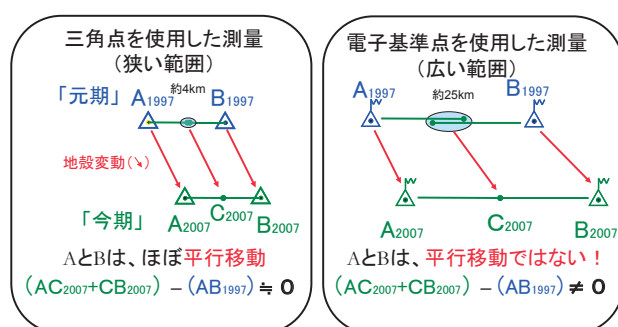


図-2 地殻変動による歪みの影響

2. 2 セミ・ダイナミック補正の方法

具体的な例として、電子基準点のみを既知点として新点を設置する場合は、次のようにセミ・ダイナミック補正を適用し、この方法を標準的な補正方法とする (図-3)。

1) 既知点の測量成果 (元期における位置情報) を

用意する。

- 2) 既知点の測量成果の座標値を参照して地殻変動補正パラメータより元期から今期までに生じた地殻変動量を求め、既知点の測量成果にその量を加えて今期の座標値へ補正する。
- 3) 既知点の座標値を今期の座標値に固定して網平均計算を行う。
- 4) 網平均計算の結果から、元期から今期までに生じた地殻変動量を差し引き、元期における座標値を新点の測量成果とする。

例) 20XX年に既設の電子基準点を使用して新点を設置する場合

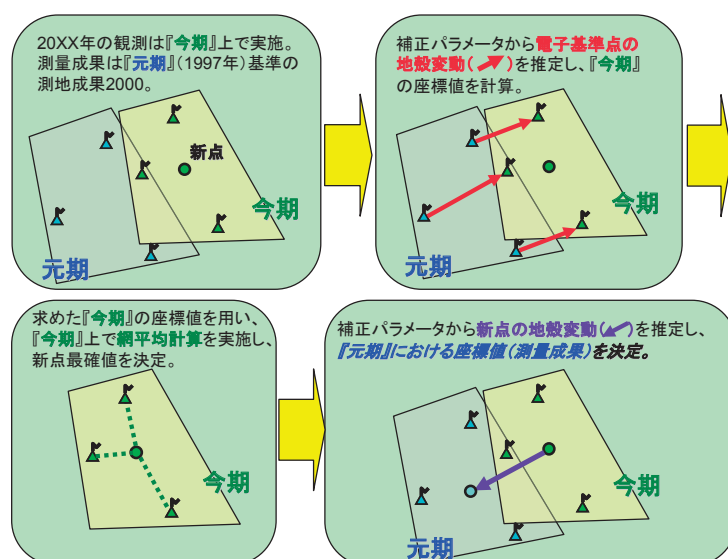


図-3 セミ・ダイナミック補正の方法
(座標値に補正する場合)

なお、標準的な補正方法以外にも基線ベクトルに補正する方法があり、次のように適用する。

- 1) 既知点の測量成果 (元期における位置情報) を固定し、基線解析を行う。
- 2) 得られた各基線ベクトルに、その始点における地殻変動量を加え、終点における地殻変動量を差し引いて得られるベクトルを求める。
- 3) 既知点の測量成果 (元期における位置情報) を固定し、2) で得られたベクトルを用いて網平均計算を行う。
- 4) 網平均計算の結果を新点の測量成果とする。

これら 2 つの補正方法のうち、座標値に補正する方法を標準的な補正方法としたのは、次の理由による。

- 1) 公共測量を含めた基準点測量にセミ・ダイナミック補正を無理なく導入することを考慮し、複雑な方法は避け、より単純な方法を採用する。
- 2) 世界測地系移行のための座標変換 (TKY2JGD) (飛田, 2002)、地震時地殻変動に伴う座標値

の補正 (PatchJGD) (飛田, 2009) 等により実績のある座標補正パラメータ方式のため、補正の考え方がすでに一般に浸透している。

- 3) 点検及び検査する項目が少ないため、補正導入に伴うコストアップが避けられる。
- 4) 座標値に補正する場合、観測点の座標値を今期もしくは元期に補正する「セミ・ダイナミック補正支援ソフトウェア」を提供することで、既存の三次元網平均ソフトウェア等がそのまま利用できる。

2. 3 セミ・ダイナミック補正の対象とする測量

2. 1 節にまとめたように、観測値に含まれる地殻変動の影響は、既知点間の距離及び元期からの経過時間に比例して大きくなる。このため、元期からの経過時間が同じであれば、既知点間距離の長い場合はセミ・ダイナミック補正の効果が期待される一方、距離が短い場合は補正を適用してもその効果が期待できない。この現状では、費用対効果を考慮すれば、すべての測量に一律にセミ・ダイナミック補正を適用することは適切でないと判断される。

したがって、セミ・ダイナミック補正の対象とする測量は、基本的に「電子基準点 (付属標を除く.) のみを既知点とした基準点測量」とする。基本測量では、高度地域基準点測量、国土調査に伴う基準点測量等、公共測量では、電子基準点のみを既知点とした 1 級基準点測量が対象となる。

3. 地殻変動補正パラメータ

3. 1 地殻変動補正パラメータの対象とする地殻変動

地殻変動補正パラメータ (以下、「補正パラメータ」という.) の対象とする地殻変動は、電子基準点及び高度地域基準点測量等により検出可能な地殻変動のうち、定常的なものとする。これは、主にプレート運動に伴う地殻変動を想定している。

地震や火山活動に伴う地殻変動は、プレート運動に伴う地殻変動と厳密に区別することは困難であるが、これらの活動に伴う特徴的な変動は、改測や改算による測量成果の改定によって対応することとする (例えば、(土井ほか, 2005))。

3. 2 補正パラメータの提供範囲及びグリッド間隔

補正パラメータは、電子基準点及び高度地域基準点測量等によって検出された地殻変動量から各グリッドの地殻変動量を推定したものである。補正パラメータは、近傍に電子基準点がない等の理由でグリッドの地殻変動量が計算されなかった一部の離島を除き、日本国内の陸域を提供範囲とする (図-4)。

補正パラメータのグリッド間隔は、田中 (2008) が検討した結果に基づき約 5 km (緯度方向 2 分 30 秒間隔、経度方向 3 分 45 秒間隔) とした。この数値は、補正パラメータを作成する際に行った内部評価 (補正パラメータにバイリニア補間を施し、補間から求めた各電子基準点等における地殻変動量と、それぞれの点で検出された地殻変動量と差をとって RMS を求めること) の結果等から検討されたものである。グリッド間隔を狭くすればするほど、ファイル容量や計算時間が増大すること、補正パラメータの管理が困難となることを考慮して約 5 km のグリッド間隔が設定された。また、ファイルの大きさもインターネットを介した提供を想定したものとなっており、2009 年度版補正パラメータファイルのサイズは圧縮しない場合で約 760kB である。

なお、地殻変動量は年々累積して大きくなるので、この補正パラメータは年度ごと (通常、毎年 4 月 1 日) に更新する。原則として同じ年度の測量作業では、同じ補正パラメータファイルを使用する。これは、平均的な歪み速度は 0.2ppm/year 程度であり、1 年間同じ補正パラメータを使用した場合でも測量には十分な精度を得られると考えられるためである。

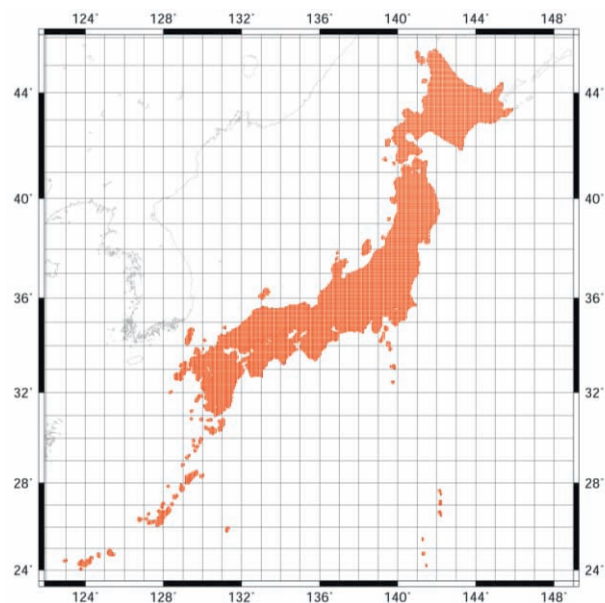


図-4 補正パラメータの提供範囲

3. 3 2009 年度版補正パラメータの作成方法

3. 3. 1 電子基準点の今期の座標値とパラメータの内部評価

田中ほか (2006) では、電子基準点における地殻変動量は、毎年 1 月 1 日から 2 週間の日々の座標値を平均した値から測量成果とアンテナ交換等に伴う人工的なオフセットを差し引いて求めることとしていた。しかし、日々の座標値は、電子基準点のメンテナンス等人為的要因に起因する地殻変動ではない

座標値の跳び（オフセット）を含んでいる（岩下ほか，2009）．さらに日々の座標値は，積雪や樹木等による電波障害，凍上現象やその他季節変動等の周期的な変動も含んでいるため，そのまま地殻変動量の算出に使うことは必ずしも適切ではない．

そこで，正味の地殻変動量を得るため，2009 年度版補正パラメータでは 2008 年 1 月 1 日から 2008 年 12 月 31 日までの F3 解を用い，この期間の人為的オフセット量を補正した上で，それぞれの電子基準点の F3 解の時系列を再現する周期的変動を考慮した近似式を求め，求めた式を 2009 年 1 月 1 日に外挿することにより各電子基準点の今期の座標値を推定した（檜山ほか，2009）．なお，平成 20 年（2008 年）岩手・宮城内陸地震に伴い測量成果が改定された電子基準点及び新設された電子基準点については測量成果計算日以降の F3 解を用いた．

このように推定した電子基準点の今期の座標値から元期の座標値（測量成果）を差し引いて求めた地殻変動量からパラメータを構築し，内部評価を行った．この内部評価の較差が大きい電子基準点は，補正パラメータの作成から除外した．

3. 3. 2 高度地域基準点測量のデータの利用

補正パラメータ作成手法の高度化を図るため，檜山・森下（2009）は，高度地域基準点測量のデータの利用方法について検討した．高度地域基準点における地殻変動量は，繰り返し測量から世界測地系（ITRF94 系）における変動速度を求め，元期から電子基準点の今期の座標値を求めた時点までの時間を乗算して求めることとされている（国土地理院，2009）．しかし，当時の測量データの中には，繰り返し測量が行われた高度地域基準点はなかった．このため，電子基準点の日々の座標値を既知点にして平均計算された今期の高度地域基準点の座標値から元期の座標値（測量成果）を差し引いたものを，元期から観測日までの時間で割ることでそれぞれの基準点の変動速度を求め，元期から今期までの時間をその変動速度に乗算するという方法でそれぞれの基準点の地殻変動量を計算した．

高度地域基準点は，測地成果 2000 構築以降に測量成果が改定されておらず，かつ測地成果 2000 構築時に電子基準点に取り付けられた点のみを抽出した．これらの点は，観測時期が元期に近いとため，精度良く測量成果が求められていると考えられる．しかし，それ以前に実施された一次基準点測量や二次基準点測量の成果には，元期と観測時期との時間差による歪みの影響が含まれている可能性があるため，補正パラメータの作成から除外することとした．

また，測地成果 2000 構築時に三角点の標高成果は改定されず，標高成果は三等三角測量以降の約 100

年間の地殻変動が蓄積した状態となっているため，上下成分の地殻変動量は除外した．

そして，抽出した高度地域基準点の地殻変動量と 3. 3. 1 で作成したパラメータから求めた地殻変動量とを比較して，許容範囲である 30mm 以内に収まったものを補正パラメータの作成に利用することとした．

上記の手法により，電子基準点 1218 点及び高度地域基準点 28 点の座標値を用いて，2009 年度版補正パラメータを作成した．その内部評価結果（RMS）は南北方向 3.3mm，東西方向 2.7mm，上下方向 3.9mm であった．

4. セミ・ダイナミック補正支援ソフトウェアの作成

セミ・ダイナミック補正を行うには，補正パラメータを用いて既知点の測量成果を今期の座標値へ，新点の今期の座標値を元期の座標値へ補正する必要がある．この元期と今期との間の補正を簡便に行い，セミ・ダイナミック補正の円滑な導入を図るため，補正支援ソフトウェアとして「SemiDynaEXE（読み：せみだいなえぐぜ）」を開発した．SemiDynaEXE のメイン画面を図 5 に示す．

SemiDynaEXE は，測量が行われた年度における補正パラメータファイルを選択し，補正したい点の座標値を入力することで，自動的に補正パラメータを読み込んでバイリニア補間を行い，補正後の座標値を出力するものであり，基本的な機能は，TKY2JGD（飛田，2002）や PatchJGD（飛田，2009）と同様である．網平均計算の前後に SemiDynaEXE を利用して座標補正を行うことで，既存の網平均ソフトウェアをそのまま利用して，セミ・ダイナミック補正を行うことが可能である．SemiDynaEXE は，国土地理院ウェブサイトから無償でダウンロードすることができる．

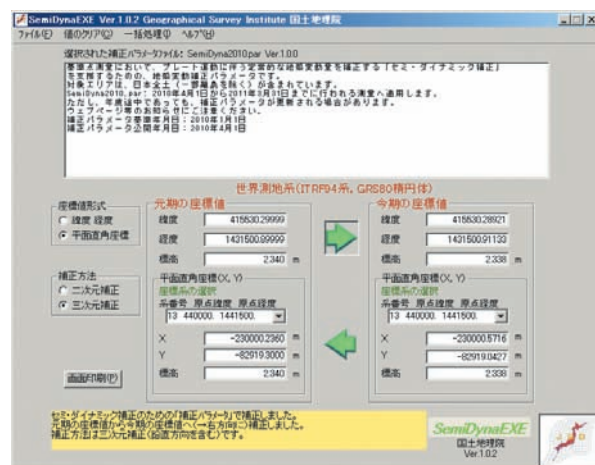


図 5 SemiDynaEXE のメイン画面

5. 平成21年度セミ・ダイナミック補正確認作業

セミ・ダイナミック補正の本格的な導入を前に、補正の効果の確認と補正支援ソフトウェア及び補正パラメータの不具合の有無を確認するため、平成21年度に実施した全国の国土調査に伴う基準点測量等を対象にセミ・ダイナミック補正確認作業を行った（湯通堂・山尾，2010）。基準点測量の点検項目である電子基準点間の閉合差が補正を適用しない場合（以下、「従来法」という。）と適用した場合（以下、「SDC」という。）で、どの程度改善するかを確認した。次に、基準点測量の精度管理に用いられている新点位置の標準偏差を確認した。さらに、補正の有無により座標最確値がどの程度変化するかを確認した。

5. 1 電子基準点間の閉合差

セミ・ダイナミック補正の有無による電子基準点間の閉合差を比較した結果を図-6及び図-7に示す。なお、水平方向の閉合差は水平距離に換算した。

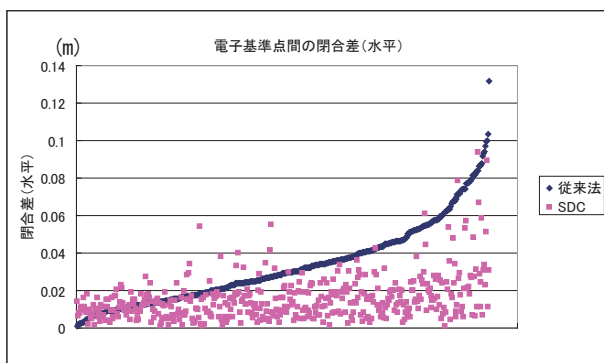


図-6 SDCによる閉合差と従来法による閉合差（水平方向）

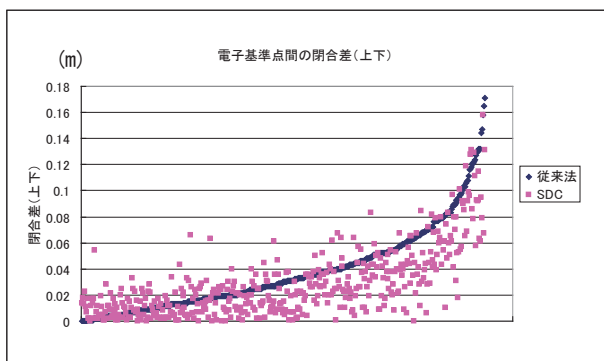


図-7 SDCによる閉合差と従来法による閉合差（上下方向）

図-6及び図-7は、従来法による閉合差を◆、SDCによる閉合差を■として、従来法による閉合差が小さい順に左から並べてプロットしたものである。水平方向（図-6）、上下方向（図-7）ともに、従

来法による閉合差と比較するとSDCによる閉合差の方が小さい傾向であることが分かる。SDCによる閉合差が許容範囲を超えるような異常な結果は得られていない。

電子基準点間の閉合差と地殻変動量の差の関係を図-8に示す。

図-8は、縦軸に電子基準点間の閉合差の水平成分、横軸に閉合差を点検する路線の両端にある電子基準点の地殻変動量の差の水平成分をプロットしたものである。

また、青色の直線は、従来法による電子基準点間の閉合差◆を回帰分析した結果である。電子基準点の地殻変動量の差が大きいほど、閉合差が大きいことが分かる。一方、赤色の直線は、SDCによる電子基準点間の閉合差■を回帰分析した結果である。SDCによる電子基準点間の閉合差は全体的に小さく、ほとんど地殻変動量の差によらないことが分かる。

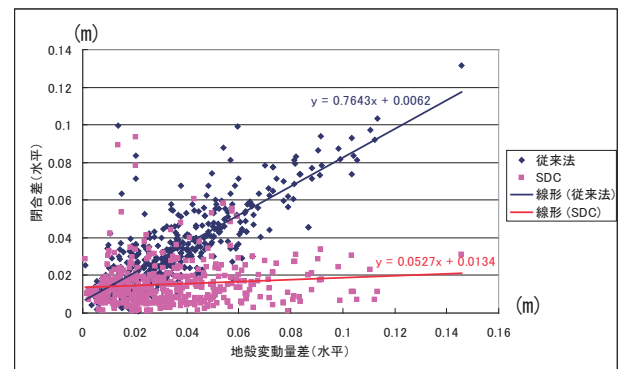


図-8 電子基準点間の閉合差と地殻変動量差

以上の結果から、セミ・ダイナミック補正を行うことにより、電子基準点の測量成果に対して地殻変動の影響を適切に補正できていることが分かる。

5. 2 新点位置の標準偏差

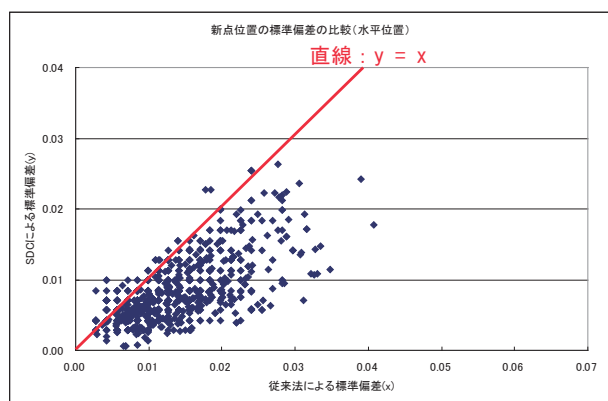
SDCによる新点位置の標準偏差と従来法による新点位置の標準偏差を比較した結果を図-9及び図-10に示す。

図-9及び図-10は、縦軸にSDCによる標準偏差を、横軸に従来法による標準偏差をプロットしたものである。

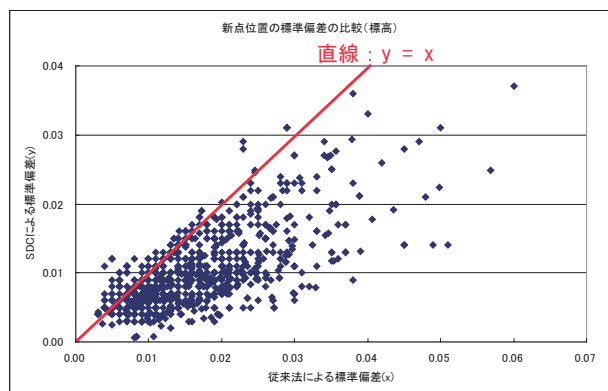
赤色の直線は、（縦軸：SDCによる標準偏差）＝（横軸：従来法による標準偏差）という条件を満たす点の集合である。赤色の直線の下側にプロットされる場合は、補正により標準偏差が小さくなったことを意味する。従来法による標準偏差が大きい場合は、SDCによる標準偏差が小さく、補正により概ね改善されるという傾向が見られる。従来法による標準偏差がもともと小さい場合には、補正後の標準偏差の

方が大きくなることもあるが、全体的には改善される傾向が見られるため、大きな問題はないと考えられる。

この結果から、セミ・ダイナミック補正を適用することにより、平均計算の精度が改善するということが分かる。



図－9 SDC による水平位置の標準偏差と従来法による水平位置の標準偏差の比較

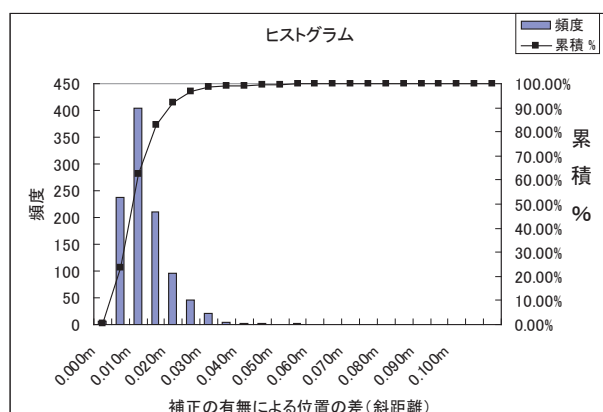


図－10 SDC による標高の標準偏差と従来法による標高の標準偏差の比較

5. 3 座標値の比較

従来法による座標最確値と、SDC による座標最確値にどの程度差があるかを確認した。結果を図－11に示す。

図－11 は、SDC による座標最確値と従来法による座標最確値の差を斜距離に換算し、ヒストグラムで表したものである。全体の約 8 割が、位置の差（斜距離）にして 1.5cm 以内に収まっていることが分かる。現時点では元期からの経過時間が 12 年と比較的短く地殻変動による歪みの影響が小さいため、座標最確値にはほとんど差がないと推察される。



図－11 補正の有無による新点位置の差(斜距離)の度数分布と累積度数

6. まとめ

国土地理院では、基準点体系分科会（Ⅲ）報告書（国土地理院，2003）に基づき、基準点測量の結果から地殻変動の影響を取り除く「セミ・ダイナミック補正」の導入に向けた検討を行ってきた。主な内容は次のようにまとめられる。

- ・標準的な補正方法は、座標値に補正を行う方法とする。
- ・補正の対象とする測量は、電子基準点（付属標を除く。）のみを既知点とした基準点測量とする。
- ・補正の対象とする地殻変動は、電子基準点及び高度地域基準点測量等により検出可能な地殻変動とする。ただし、地震や火山活動に伴うものは、改測や改算によって対応する。
- ・補正パラメータは、電子基準点の日々の座標値（F3 解）及び高度地域基準点測量のデータを使用して求める。
- ・補正パラメータは、原則として毎年 4 月 1 日に更新し、同じ年度の測量作業では、同じ補正パラメータファイルを適用する。

また、平成 21 年度国土調査に伴う基準点測量等において実施したセミ・ダイナミック補正確認作業の結果から、補正を行うことにより、地殻変動に起因する歪みの影響が適切に補正されていることが確認できた。

以上を踏まえ、国土地理院では、平成 22 年 1 月から基本測量及び公共測量の一部にセミ・ダイナミック補正を導入した。これにより地殻変動の歪みの影響が補正され、高精度な位置情報基盤の構築が期待される。

謝辞

補正パラメータ作成手法の高度化にあたり、測地観測センターの皆様から多くの助言をいただきました。また、セミ・ダイナミック補正確認作業の実施

にあたり、各地方測量部及び支所の皆様に多大なご協力をいただきました。ここに記して感謝の意を表します。

参 考 文 献

- 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，108，1-10.
- 檜山洋平，森下 遊（2009）：地殻変動パラメータの作成における高度地域基準点測量のデータの利用，国土地理院測地部平成 20 年度技術報告書.
- 檜山洋平，山尾裕美，森下 遊（2009）：2009 年度版地殻変動パラメータの作成について，国土地理院測地部平成 21 年度技術報告書.
- 岩下知真子，梅沢 武，川元智司，野神 憩，畑中雄樹，石倉信広（2009）：GPS 連続観測システム（GEONET）解析結果に生じる人為的要因によるオフセットの補正手法について，国土地理院時報，118，23-30.
- 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ー変動する国土と人々を結ぶ位置情報の基盤ー，国土地理院技術協議会基準点体系分科会（Ⅲ）報告書.
- 国土地理院（2009）：セミ・ダイナミック補正要領及び同運用基準，国土地理院測地部.
- 田中愛幸，岩田和美，豊田友夫，平井英明，川口 保，松坂 茂，畑中雄樹，飛田幹男，黒石裕樹，今給黎哲郎（2006）：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，国土地理院時報，110，1-9.
- 田中愛幸（2008）：セミ・ダイナミック補正パラメータ作成におけるグリッド間隔について，国土地理院測地部平成 19 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，97，31-51.
- 飛田幹男（2009）：地震時地殻変動に伴う座標値の変化を補正するソフトウェア”PatchJGD”，測地学会誌，55，355-367.
- 湯通堂 亨，山尾裕美（2010）：セミ・ダイナミック補正確認作業について（2），国土地理院測地部平成 22 年度技術報告書.