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
A Correction Method to Artificial Displacements on GEONET Coordinate Time Series

測地観測センター　岩下知真子・梅沢　武[1]・川元智司・野神　憩
Geodetic Observation Center
Chimako IWASHITA, Takeshi UMESAWA, Satoshi KAWAMOTO and Kei NOGAMI
地理地殻活動研究センター　畑中雄樹
Geography and Crustal Dynamics Research Center　Yuki HATANAKA
測地部　石倉信広
Geodetic Department　Nobuhiro ISHIKURA

要　旨

GPS 連続観測システム（GEONET）の定常解析結果を用いた地殻変動の監視にとって，実際の地殻変動ではない，GPS 観測局のメンテナンス等人為的要因によって生じる座標値のとび（オフセット）は，障害となるノイズである．地殻変動を的確に把握するためにはこれらのオフセットを適切に推定し，補正することが必要である．

そこで，補正すべきオフセットと本当の地殻変動のように補正してはならないオフセットの区別を整理するとともに，補正すべきオフセットの補正量を解析結果の時系列データまたは水準測量による傾斜量測定から補正する手法について説明する．

１．はじめに

GPS 連続観測システム（GEONET）の定常解析結果座標値の時系列変化には，地震等に伴って生じる実際の地殻変動の他に，アンテナ交換，アンテナ取り付け高の変更，その他の機器の保守等により生じる人為的な「値の瞬間的な飛び」（本稿では「オフセット」と呼ぶ）が含まれており，定常解析結果を用いた地殻変動監視にとって障害となる．地殻変動を的確に把握するためには，これらのオフセットを補正することが望ましい．そのためには，オフセット量の推定が必要である．

本研究では，最初に，オフセットの補正を行うべき対象と，これまでに確立してきた解析結果の時系列データからオフセット量を推定する手法について整理する．次に，GEONET の解析戦略第４版への更新に伴う，解析戦略変更に伴うオフセット量の再計算の実際とその補正効果を紹介し，あわせて，地震時の振動によるピラーのローカルな傾斜によって生じるオフセット量を水準測量による傾斜測定から補正する手法を報告する．

なお，本稿では「オフセット量」という言葉を，座標各成分の未補正のデータ時系列上に飛びが見られる場合に，「飛びの前の値に対する後の値の差」（飛びの後の値から前の値を引いたもの）と定義する．また，「オフセットの補正量」とは，オフセットを補正するために，飛びの後のデータに加算する補正量と定義する．すなわち，オフセット補正量とオフセット量とは符号が逆であり，「(オフセット補正量)＝－(オフセット量)」である．

２．オフセット量を推定するイベントの選別

解析結果の座標時系列のオフセットには，アンテナ位置の実際の変化によるものや観測条件や解析条件の変化による見かけ上の座標変化があり，その原因も広域的な地殻変動から，局所的なアンテナ架台の傾斜，人為的操作によるものまで様々である．そのうちのどれを補正すべきかは，目的よって異なる．

地殻変動監視のためには，人為的な要因によるオフセットは補正すべきだが，本当の地殻変動まで補正することがあってはならない．しかし，人為的な要因でも地殻変動でもないオフセットも存在し，また，人為的な要因についても解釈上の技術的な問題や解釈の不確定さによって全てを補正するのが妥当とは限らない．一貫した方針のもとにオフセット補正を運用するためには，オフセットを補正すべき現象を選別するためのガイドラインが必要である．

本報告では，オフセットを補正すべき現象と補正してはならない現象を，以下の方針に沿って選別する．

まず，地殻変動は補正してはならない．加えて，地震以外でも，自然現象に伴うオフセットは基本的には補正しないこととする．一方，補正を行うオフセットは，それが人為的な要因によることが明白であり，その日付が確認でき，かつ，座標時系列に明らかなオフセットが生じていることが確認できるものに限定することとする．オフセットの発生は，座標時系列変化グラフを目視により確認する．

人為的に生じるオフセットの原因としては，主として電子基準点の機器交換等の保守作業によるものがある．これらに関しては，作業記録により作業日

現所属：[1] 測地部

を明確に確定できる．以下に対象となる作業をあげる．

・移設
・アンテナ交換
・受信機交換
・レドーム関連作業
・架台調整・改造等
・アンテナ高調整
・その他（アンテナ避雷器や電波吸収材設置等）

上記の方針にはいくつかの例外がある．その一つは，電子基準点周囲の樹木の伐採に伴うオフセットである．これは，樹木の成長に伴って徐々に衛星への視通に障害が生じてノイズが増大することにより，徐々に座標値にずれが生じてきたものが，伐採によって本来の正常な値に戻るものである．したがって，これを他の人為的な要因によるオフセットと同様に補正してしまうと，正常な値を伐採直前のノイズの影響を受けた値に合わせて補正することになる．本来ならば，長期にわたって徐々にずれが蓄積された期間全体を補正すべきであるが，このような長期にわたり徐々に蓄積した誤差量を時間変化に含めて適切に推定・補正することは困難であり，ここで想定する単純なオフセット補正手法の適用は適当ではない．従って，樹木の伐採によるオフセットは補正対象から外すこととする．

別の例外は，人為的な要因ではない場合についても，要因が生じたタイミングが明確に特定できる，変動量を推定する手法が確立されている，といった条件を満たすものについては補正を行うことである．たとえば，６．に記述する，地震時の振動で生じたアンテナ架台の傾斜にともなうオフセットの補正がそれである．

３．オフセットの補正手法

３．１　オフセット量推定方法の選択

オフセット量の推定方法には大きく分けて，座標解とは独立に電子基準点の保守作業時に現地でオフセット量の推定に必要な諸元を測定する直接的手法と，座標解の時系列データに基づいてオフセット前後のデータの差をとることにより推定する間接的手法の２つが考えられる．

直接的手法には，現地で保守前後においてアンテナの位置の変化を直接測定する．しかし，アンテナ交換などほとんどの保守作業はアンテナ位相特性や観測のノイズレベル等の観測条件に影響を与えるため，座標解にはアンテナの実際の位置変化だけではなく，観測条件の変化が解析に影響を与えることによって生じる見かけ上のオフセットが累重している．したがって，観測条件の変化の影響を無視できる場合以外は，直接的手法は不十分である（Hatanaka et al.，2001；豊福ほか，2007；豊福ほか，2009）．そのため，オフセット推定は，ほとんどの場合間接的手法で行われる．（６．に述べるピラーの傾斜の補正手法は直接的手法を採用する数少ないケースであるが，これは観測条件の変化の影響を生じていないと仮定して行われる．）間接的手法の詳細について，以下に記述する．

３．２　オフセット量推定計算の基本方針

間接的オフセット量推定の基本的な考え方は，オフセットが生じる前の時系列データの平均値と生じた後の時系列データの平均値の差をオフセット量とすることである．あまりに短期間の平均値ではノイズが除去できない可能性があるが，長期間の平均値では定常的な地殻変動の影響が無視できなくなる．このため，オフセットが生じた日に近い 10 日分の平均をとることとした．

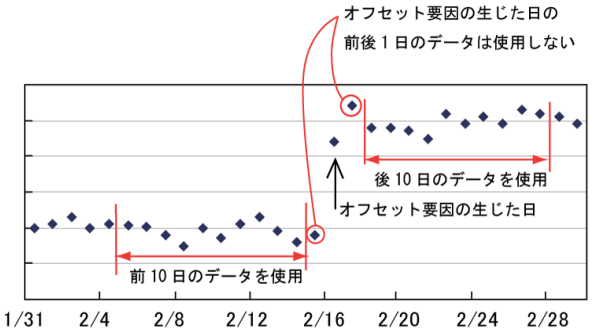
オフセット推定に用いる時系列データには，観測点の座標値と，ターゲットとする観測点を端点とする基線の各成分の２種類が考えられる．しかし，観測点座標値は，解析の固定点（「つくば１」）から離れるに従ってノイズが大きくなる傾向があるため，その座標時系列データから直接オフセットを推定すると，固定点からの距離によって推定されるオフセット量の品質に差が生じることになる．そこで，ターゲットとする観測点を端点とするなるべく短い基線について，基線ベクトル各成分の時系列データを用いてオフセット量を推定することとする．

また，ある１つの基線のみを用いてオフセット量を推定すると，推定に使用した期間に，相手局固有のノイズが生じている場合，正確なオフセット量を求めることができない．そこで，ターゲットとする観測点へ，複数の隣接点から基線を組み，各基線で推定されたオフセット値の平均を，ターゲット点のオフセット量として採用するという戦略をとることにした．

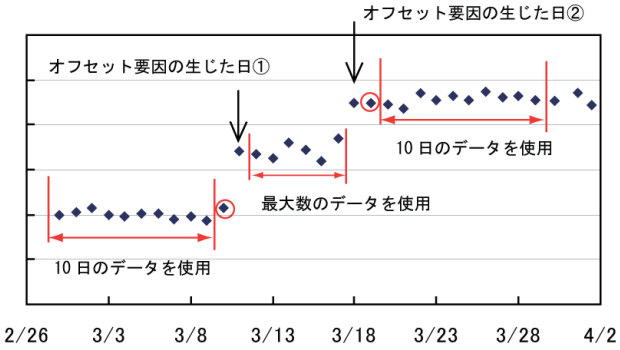
オフセット量推定の具体的な手順は以下に示すとおりである．

（１）推定に用いるデータ期間の決定

ａ）オフセット量の推定には，オフセットの要因の生じた日の前および後の各 50 日以内に得られる座標データから，なるべく要因の生じた日に近い前後 10 日分のデータを用いる．ただし，安全策をとりオフセットの生じた日の前後１日分のデータは使用しない．また，はずれ値は適宜取り除く（図－１）．



図－１　オフセット量推定用データ選択概念図
（１）－ａ）に対応



図－２　オフセット量推定用データ選択概念図
（１）－ｂ）に対応

ｂ）複数の人為的なオフセットが近接していて，その間の期間で 10 日間分のデータを得ることができない場合には，その期間で得られる最大数のデータを用いる（図－２）．

ｃ）オフセットの要因が生じた日の前後の各 50 日以内に 10 日分のデータが得られない場合には，特例として別途取り扱う．

（２）ターゲット点からの距離の短いものから順に，基線を組む相手局を 25 点選択する．ただし，次の条件を満たすものを選ぶ．

ａ）（１）で決定された前後各 10 日分の期間中にオフセットを生じるような作業を行っていないこと

ｂ）（１）で決定された前後各 10 日中に欠測がないこと

（３）（２）で選択した 25 点との間の各基線それぞれについて，オフセットの前後それぞれで成分ごとに上記に定めたデータ期間の平均をとり，その差を求め，オフセット推定量とする．

（４）（３）で得られた 25 基線の各成分について，中央値からのずれが大きな２点を除いた 23 点のオフセット推定量の平均をとり，それをターゲットとする観測点のオフセット量とする．

なお，（１）－ｃ）は，オフセットの要因が生じた日の前または後に長期の欠測があることを意味する．そこで，この場合には，長期間にわたって各基線は一定速度で変化すると仮定し，オフセット量と直線トレンドを同時推定することとする．具体的には，下記のような手順で計算を行う．

（１’）推定に用いるデータ期間は，オフセットの要因の生じた日の前後 720 日をとる．

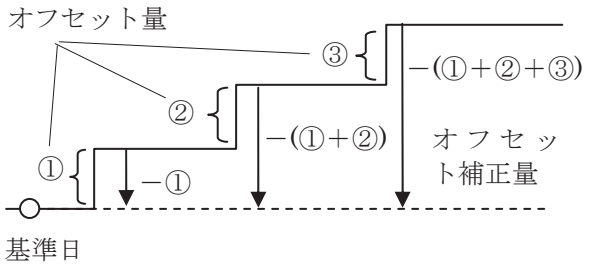
（２’）25 点の選択に際し（２）－ｂ）の条件を適用せず，代わりに前後各 50 日以上かつ合計 365 日以上という条件を課す．

（３’）25 点との基線の時系列データからオフセット量と直線トレンドを同時推定する．

（４’）25 基線の各成分について，中央値からのずれが大きな２点を除いた上で，23 点の平均をとり，ターゲットとする観測点のオフセット量とする．

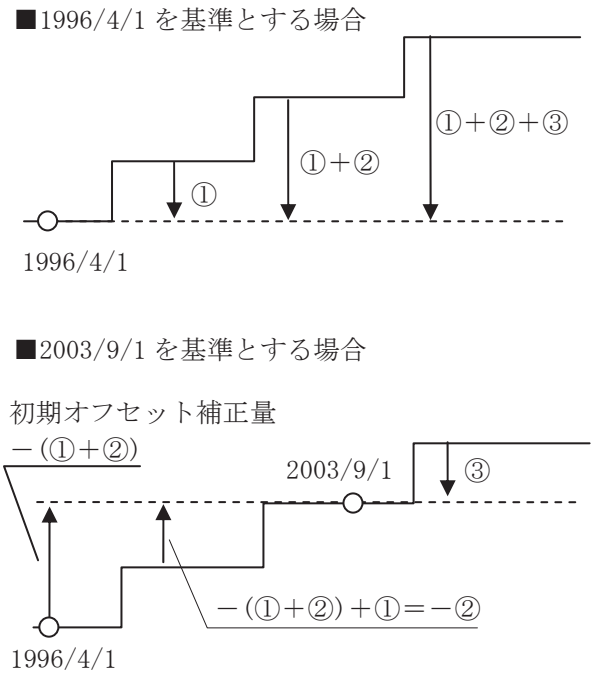
３．３　オフセット補正と初期オフセット補正量の推定

オフセットの補正は，オフセットが生じた日以後の解析結果に対し，推定されたオフセット量の符合を反転したオフセット補正量を加えることにより行う．オフセットが生じるごとに，それ以後の解析結果に累積したオフセット補正量を加えていくことで，基準日座標にもどせることになる（図－３）．



図－３　オフセット補正概念図

これを単純に適用した場合，時系列の最初のデータが常に基準（補正なし）となり，以後アンテナ交換等が行われるたびに補正量が積算されてゆくことになる．しかし，電子基準点は 2002 年から 2003 年にかけて行われたアンテナ交換でアンテナ種類が統一され，観測点ごとの個体差が小さくなりより安定した結果が得られるようになったため，基準とすべき座標値は，この後の座標値とすることが望ましい．



図－４　初期オフセット補正概念図

このためには，指定された期間のデータを基準とすることができるようなメカニズムが必要となる．さらに，オフセット補正量による補正と同じアルゴリズムでこれが実現されるのが望ましい．そのために，最初のデータに初期オフセット補正量を追加して，全データに下駄を加えて調整するという考え方をとることにする．

基準日における補正量をゼロにするために，基準日以前のオフセット量をすべて合計したものを初期オフセット補正量として与えることとする（図－４）．また，基準日以前にオフセットが存在しない観測局については，初期オフセットは不要である．基準日は，アンテナ交換他の作業が一段落した 2003 年９月１日とした．この日付以後の作業（2002 年に新設された観測点のアンテナ架台改修を含む）に伴うオフセットは，基準からのずれとして積算されることになる．

４．解析戦略変更への対応

解析戦略が変わってもアンテナの位置が変わるわけではないが，解析時の補正モデルの違いによって座標値のバイアスが観測局毎に異なる場合がある．また，精度の向上に伴い，古い解析戦略では検出されなかったオフセットが新しい解析戦略では検出されることも考えられる．このため，解析戦略を変更すると，オフセット量も再度推定する必要がある．

2009 年４月１日から，GEONET の定常解析戦略が第４版（F3）に移行される．F3 は，以前の第３版の解析戦略（F2）と，表－１のような相違がある．

表－１　解析戦略変更点の概要

	現行解析(F2)	新解析(F3)
解析ソフトウェア	Bernese4.2	Bernese5.0
座標系	ITRF2000	ITRF2005
アンテナ位相特性	相対モデル	絶対モデル
固定点の座標値	固定値	各日解析
大気遅延勾配	推定しない	推定する

新しい解析戦略（F3）における変更点の中で，固定点の扱いかたの変更が，オフセット推定に対して最も大きな影響を与えている．

GEONET の定常解析戦略が第３版による座標解（以下 F2 解）では固定点の座標値は固定座標値と速度で表される区分直線によって計算される固定的な値である．このため，F2 解では固定点のアンテナ取り付け高の調整を実施した時には，固定点の初期座標にこの作業が反映されず，解析の初期座標と実際の位置の変化との間に齟齬が生じ，これによるオフセットが解析網全体に生じる．これによる影響は固定点からの距離などによって観測点ごとに異なるため，単純な網の平行移動では完全には吸収できない．そのため，固定点に対する補正だけではなく，全観測点に対し，「固定点のアンテナ交換によるオフセット」を補正していた．

これに対し，GEONET の定常解析戦略が第４版による座標解（F3 解）は固定点の座標値を ITRF2005 に準拠したグローバルな解析により日々算出しているため，固定点の座標の変化は解析の初期座標値に反映され，網全体に影響を及ぼすことはない．したがって，F2 解に対して行った，全点を対象とした「固定点のアンテナ交換によるオフセット」の補正は不要である．

さらに，F3 解では，F2 解で検出されなかったオフセットも検出される可能性があるため， F2 解でオフセット補正を行った日付のみに F3 解のオフセット補正をするだけでは不十分な可能性がある．このため，過去のメンテナンス記録から，オフセットを生じる可能性がある日の前後の基線変化時系列グラフをすべて目視により確認した．また，F2 解用のオフセット補正ファイル corrf2.dat に補正日が記述されているものの，メンテナンス記録が残されていないものについても，時系列グラフの目視確認を行い，時系列データにおける飛びの大きなものについては，F2 解と同様に補正することとした．

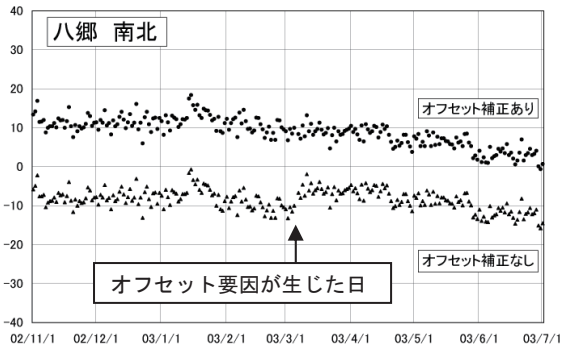
５．補正の効果について

推定したオフセット量によるオフセット補正で，座標時系列データに見られるオフセットを解消することができるか，補正の効果をすべてのオフセット

について目視により確認した．その効果が示した事例を以下にあげる．

事例１．八郷（茨城県石岡市）

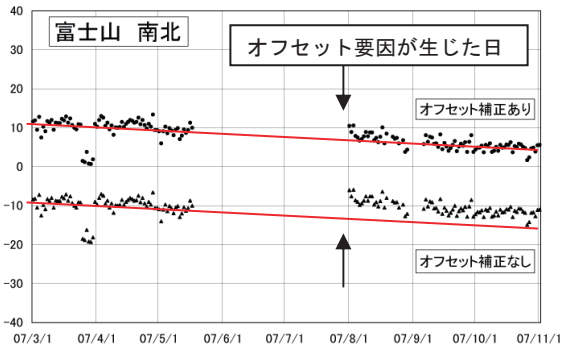
オフセット前後に長期の欠測が無く，標準的な推定計算から補正を行った例．オフセットが解消されている（図－５）．



図－５　八郷（93002）　座標変化グラフ南北成分
オフセット要因：アンテナ異機種交換
縦軸：単位 mm　　横軸：年/月/日

事例２．富士山（静岡県富士宮市）

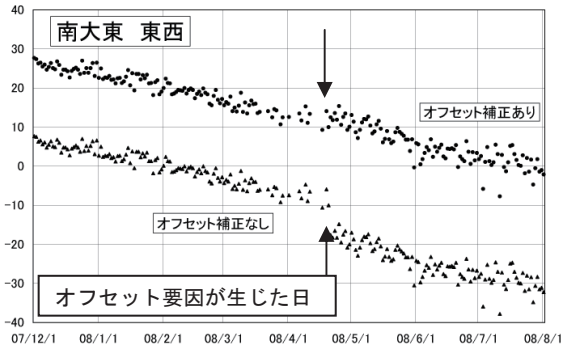
オフセット直前に長期の欠測があり，直線トレンドを同時に推定計算してオフセット補正を行った例．オフセットが解消されている（図－６）．



図－６　富士山（021100）座標変化グラフ南北成分
縦軸：単位 mm　　横軸：年/月/日

事例３．南大東（沖縄県南大東村）

プレートの異なるターゲット点から推定計算し，補正を行った例．プレートが異なると，直線トレンドの傾斜量が大きくなるが，ある程度はオフセットが解消されている（図－７）．



図－７　南大東（950497）座標変化グラフ東西成分
縦軸：単位 mm　　横軸：年/月/日

以上は問題なく推定された事例であるが，長期の欠測が度々あるなどデータが不足している場合には，良好な推定計算結果が得られない．このような場合には，妥当な補正が行えないため，オフセット補正は行わないこととする．

６．地震時のピラー傾斜に対するオフセット量推定

電子基準点の基礎部分の傾斜のために生じるピラーの傾斜が，座標値に影響をおよぼすことは認識されている．現在，ピラーの傾斜を監視する方法には，傾斜計と水準測量による傾斜測定手法の２つがある．

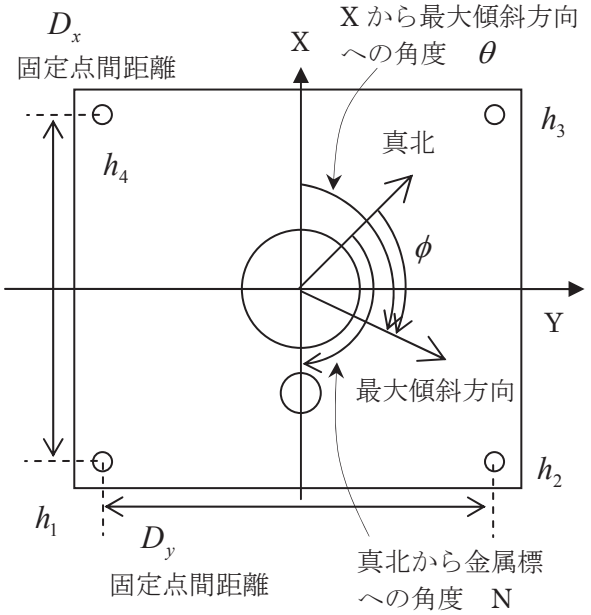
これらの結果を用いてピラーの傾斜量を補正する手法についても検討が行われた．しかし，傾斜計の測定値は温度への依存性が高く日周変動を示すため，正確な傾斜量を算出することは難しく，傾斜計データによる補正は行っていない．また，水準測量による傾斜測定では，数年毎の繰り返し観測で前回測定値との差から傾斜量を推定するので，その間の累積した傾斜量は算出されるものの，その傾斜が生じたタイミングを確認することができない．このため，定常的に水準測量による結果に基づいて補正を行うには至っていない．

例外的に，地震の発生に伴って生じた傾斜に関しては，傾斜の生じたタイミングと地震の生じた時刻が一致すると考えることで，タイミングを特定することが可能である．従来は，地震に伴う傾斜についても，人為的な要因ではないこと，地殻変動の解釈に関わるような大きな傾斜量が観測されなかったことから，傾斜に関するオフセット補正は実施してこなかった．しかし，2007 年３月 25 日に発生した平成 19 年能登半島地震の際，電子基準点「富来」および「能登島」が傾斜計および現地調査により傾斜したことが確認された．この時，水準測量により確認されたピラーの傾斜量が地殻変動の把握に影響するほど大きく，またこれらの電子基準点の変位から真の地殻変動量とピラーの傾きによる変動量を分離することが地殻変動監視のために必要であったため，

現地調査の際に行った水準測量の結果に基づく傾斜の補正を初めて実施した．また，同年７月 16 日に発生した平成 19 年新潟県中越沖地震の際に傾斜が確認された電子基準点「出雲崎」「柏崎２」，2008 年６月 14 日に発生した平成 20 年（2008 年）岩手・宮城内陸地震の際に傾斜が確認された電子基準点「栗駒」「栗駒２」「鳴子」についても同様の手法で傾斜補正を行った．現在では，地震時にピラーの傾斜が確認された場合には，水準測量の結果を用いて補正を実施する方針としている．

水準測量による傾斜量推定では，基礎の比高変化からピラー部分の傾斜量を推定し，アンテナ部分の移動量を求めることとなる．ただし，傾斜測定の結果からは，上下成分の変動は求めることができないことに注意する必要がある．

水準測量による固定点比高の測定では，固定点①～④の比高 h_1～h_4，それ以外の計算要素を図－８のように置く．



図－８　水準測量による傾斜計算概念図

アンテナの変位量は以下の手順により求める．

（１）基礎の四隅に設置した固定点の比高を水準測量により測定し，以下により傾斜量を求める．

傾斜測定より求めた各固定点の比高を①～④とおく．金属標とピラーを結ぶ方向にＸ軸，それと直交する方向にＹ軸をとる．アンテナが，Ｘ，Ｙ方向へ移動する傾斜を正と考える．Ｘ，Ｙへの傾斜量 T_x，T_y は以下のように表せる．

$$T_x = ((h_1 - h_4)) + (h_2 - h_3))/2$$

$$T_y = ((h_4 - h_3)) + (h_1 - h_2))/2$$

（２）今回の測定で求めた傾斜量から前回求めた傾斜量を差し引いて，傾斜の変化量を求める．

前回のＸ，Ｙ方向への傾斜量を T_{xp}，T_{yp} とすると，傾斜の変化量 dT_x，dT_y は以下のように表せる．

$$dT_x = T_x - T_{xp}$$

$$dT_y = T_y - T_{yp}$$

（３）基礎の傾斜角（単位：radian）を求める．

Ｘ方向の固定点間の距離を D_x，Ｙ方向の固定点間の距離を D_y とすると，Ｘ，Ｙ方向への基礎の傾斜角 A_x，A_y は以下のように表せる．

$$A_x = \tan^{-1}(dT_x / D_x)$$

$$A_y = \tan^{-1}(dT_y / D_y)$$

（４）電子基準点の方位の測定結果から，東西，南北の傾斜角に変換する．

まず，各方向への傾斜量を，Ｘから最大傾斜方向までの角度 θ と，最大傾斜角 A に変換する．

Ｘ軸からの角度 θ は以下のように表せる．

$$\theta = \tan^{-1}(A_y / A_x)$$

どの象限に位置するかで θ の値が変わることに注意する．最大傾斜角 A は

$$A = \sqrt{A_x^2 + A_y^2}$$

と表せる．

この角度 θ を真北からの角度 ϕ に変換する．真北から金属標への角度 N（これまでの作業の中で測定済み）を用いて，ϕ は以下のように計算できる．

$$\phi = \theta - (180 - N) \quad (0 \le \phi < 360)$$

つまり，真北からの角度 ϕ の方角に，最大傾斜角 A だけ傾斜していることになる．これを南北成分 A_n，

東西成分 A_e に分割すると，

$$A_n = A\cos\phi, \qquad A_e = A\sin\phi$$

となる．

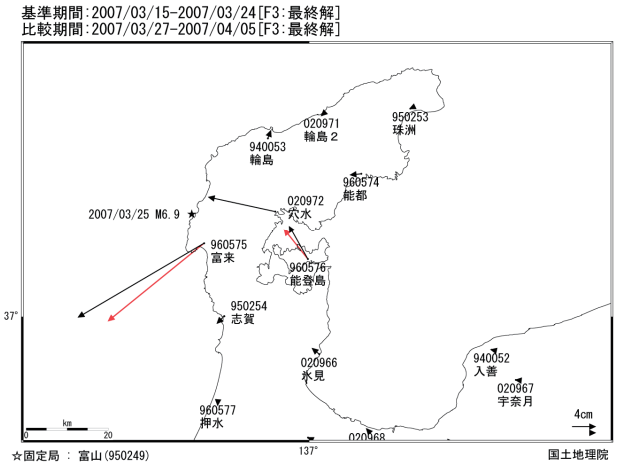
（５）東西，南北の傾斜角に電子基準点の高さをかけて，アンテナ部分の移動量を求める．

ピラーの高さを H とすると，アンテナ部分の変動量 T_n，T_e は次のようになる．

$$T_n = A_n \times H, \qquad T_e = A_e \times H$$

以上の計算により算出された補正量を，他のオフセット補正値と同様に解析結果に加え，地殻変動以外の影響を除去する．

水準測量によりピラーの傾斜量を補正した例として，平成 19 年（2007 年）能登半島地震（2007 年３月 25 日）についての地殻変動ベクトル図（図－９）を示す．



図－９　平成 19 年（2007 年）能登半島地震による地殻変動水平成分．黒矢印：GEONET 解析結果から求めた変動，赤矢印：水準測量による傾斜補正後の変動

図－９で，赤色の矢印で表示した電子基準点「富来」（960575）および「能登島」（960576）の水平変動ベクトルは，水準測量による傾斜補正を行っている．補正前後のベクトルでは，変動の絶対値にはあまり差がないがベクトルの向きが異なり，補正により地震による地殻変動がより正確に把握できたことがわかる．

なお，地震時のピラー傾斜に関し，水準測量による傾斜量推定を用いたオフセット量推定には以下の問題点があることに留意されたい．

１）ピラーの下部中心を支点として傾斜したと仮定しているが，実際にはどこが支点になっているか不明である．

２）ピラーの高さは一律に５ｍとして計算しているが，実際の高さは測っていないため不明である．

３）地震の直前に傾斜が測定されているとは限らないため，前回の測定から長期間が経過している場合は，地震時の傾斜以外にも局所的な変動による傾斜を含んでいる可能性がある．

これ以外にも問題点はあると思われるが，現在のところ水準測量による傾斜量推定以外の手法は確立されておらず，今後の検討課題である．

６．まとめ

正確な地殻変動を把握し，監視を行うためには，真の地殻変動と電子基準点の保守等に伴う人為的なオフセットを区別し，後者を適切に補正する事が不可欠となる．人為的なオフセットの補正量の計算手法については，既に確立されており，新しい解析戦略第４版においてもこの手法によりオフセット量を推定し，補正を行った．その結果，地殻変動の監視において良好な結果が得られている．

また，地震調査研究の観点から，地震に伴うピラーの傾斜によるオフセット量については，水準測量によりこれを推定し，補正を行っている．

今後の課題としては，補正を行う閾値の客観性の問題があげられる．現在は補正を行う閾値に画一的な数値がなく，個別に目視により確認している．過去に幾度となく閾値に関する議論がなされたが，結論を出すには至っていない．当面は，従前どおりにメンテナンス等の原因のはっきりした人為的な事象について，前後の時系列グラフを目視で確認し，より地殻変動監視に影響がある場合のみの補正を行ってゆく方針である．

今後もメンテナンス等によるオフセット要因が生じた場合は，適宜これらの方針に基づいたオフセット補正計算を行い，地殻変動をより的確に把握することを目指す．

なお，オフセットの補正は，GEONET ルーチン解による地殻変動データの表示に適用されるものであり，「電子基準点日々の座標値」（国土地理院技術資料 G･3）として提供されている座標値は，オフセットの補正を適用しないものであることを注意する．

参 考 文 献

Hatanaka, Y., M. Sawada, A. Horita and M. Kusaka (2001): Calibration of antenna-radome and monument-multipath effect of GEONET-Part 1: Measurement of phase characteristics, Earth Planets Space, 53, 13-21.

豊福隆史，岩下知真子，畑中雄樹，湯通堂亨（2009）：電子基準点のアンテナ絶対位相特性モデルの構築と評価，国土地理院時報，118，9-15.

豊福隆史，湯通堂亨，岩下知真子，畑中雄樹（2007）：GEONET におけるアンテナ絶対位相特性モデルの適用について，日本測地学会第108回講演会要旨集，19-20.