平成 23 年（2011 年）東北地方太平洋沖地震に伴う基準点測量成果の改定
Revision of the Results of Control Points after the 2011 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake

測地部　檜山洋平・山際敦史・川原敏雄・岩田昭雄・福﨑順洋・東海林靖・佐藤雄大・湯通堂　亨・佐々木利行・重松宏実・山尾裕美・犬飼孝明・大滝三夫・小門研亮・栗原　忍・木村勲・堤　隆司
Geodetic Department
Yohei HIYAMA, Atsushi YAMAGIWA, Toshio KAWAHARA, Masao IWATA, Yoshihiro FUKUZAKI, Yasushi SHOUJI, Yudai SATO, Toru YUTSUDO, Toshiyuki SASAKI, Hiromi SHIGEMATSU, Hiromi YAMAO, Takaaki INUKAI, Mitsuo OHTAKI, Kensuke KOKADO, Shinobu KURIHARA, Isao KIMURA and Takashi TSUTSUMI
測地観測センター　矢萩智裕・古屋有希子・影山勇雄・川元智司・山口和典・辻　宏道・松村正一
Geodetic Observation Center
Toshihiro YAHAGI, Yukiko FURUYA, Isao KAGEYAMA, Satoshi KAWAMOTO, Kazunori YAMAGUCHI, Hiromichi TSUJI and Shoichi MATSUMURA

要　旨

平成 23 年３月 11 日 14 時 46 分に発生した平成 23 年（2011 年）東北地方太平洋沖地震（M9.0，最大震度７）（以下，「東北地方太平洋沖地震」という.）に伴い，電子基準点の観測データにより，東北地方から関東甲信越地方にかけての広い範囲で顕著な地殻変動が観測された．この地域の基準点の位置は大きく変動し，公共測量等で利用できないことが想定されたため，国土地理院では，３月 14 日に当該地域の電子基準点，三角点，水準点の基準点測量成果の公表を停止した．

東北地方太平洋沖地震は津波による甚大な被害をもたらし，東北地方から関東地方にかけての太平洋沿岸において多くの人命が失われ，また多くの家屋・施設等が被災した．基本測量の基準点は，国や地方公共団体の実施する公共測量の基準として使用されており，各種公共事業等東日本大震災に伴う復旧・復興に不可欠なものである．国土地理院では，これらの基準点の改定成果公表に向けた復旧測量に取り組み，５月 31 日には電子基準点の測量成果を，10 月 31 日には三角点，水準点等の測量成果を測地成果 2011 として，それぞれ公表した．

本稿では，国土地理院が実施した東北地方太平洋沖地震に伴う基準点測量成果改定の概要について報告する．

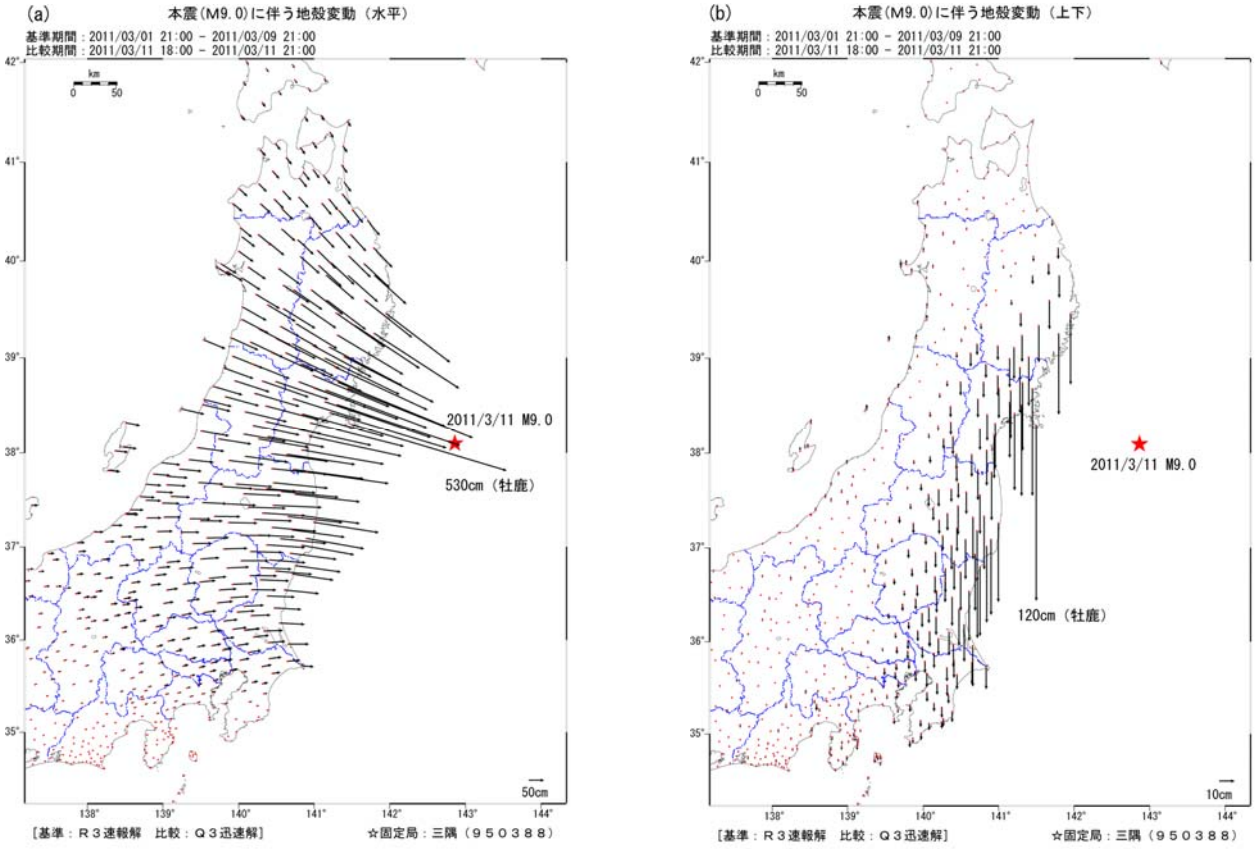
１．基準点測量成果の公表停止

我が国において土地等の位置を表す場合，水平位置は緯度・経度を用い，高さは標高（東京湾平均海面からの高さ）を用いる．この位置情報の基準となるものが基準点であり，国土地理院では約 13 万点の基準点（電子基準点・三角点・水準点等）を設置し，その測量成果を提供している．これらの基準点は，道路・河川・港湾等の各種公共事業や地籍調査事業における土地の測量の位置の基準として広く利用されている．

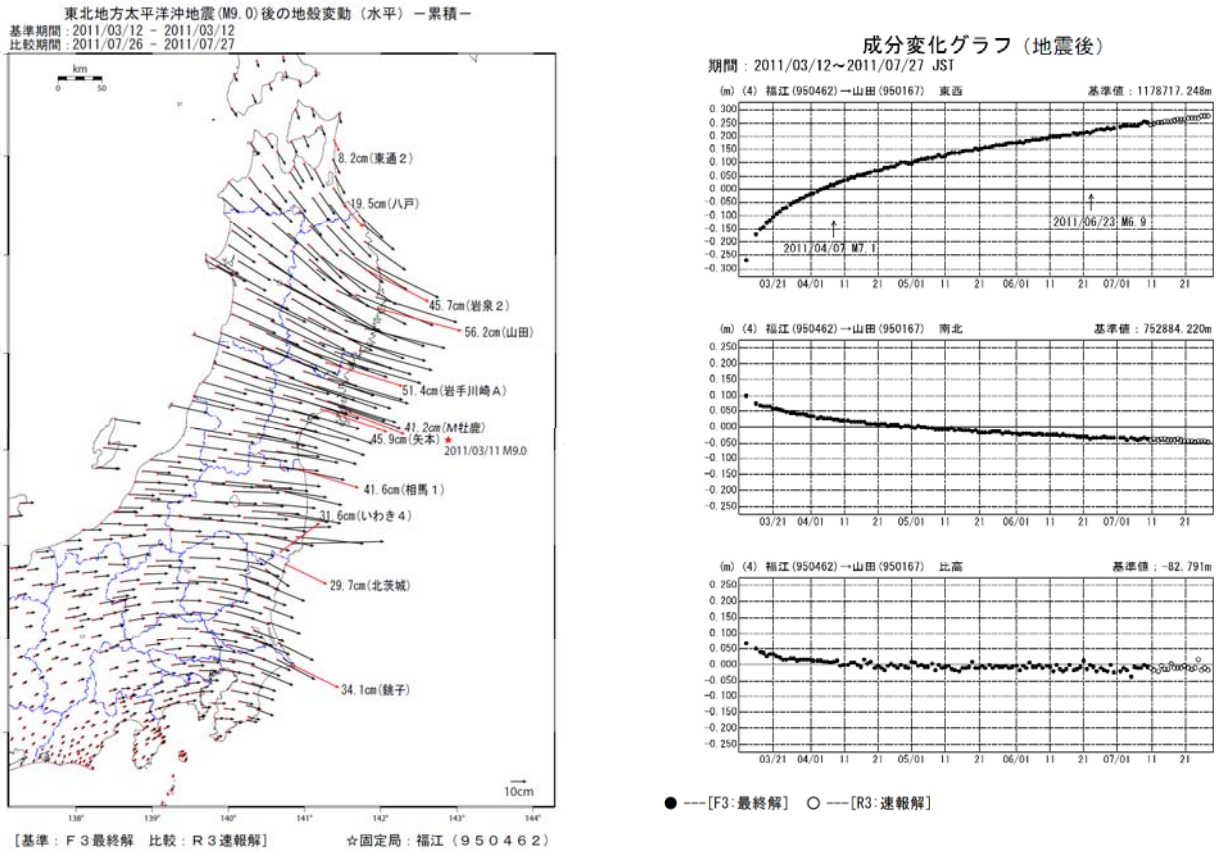
基準点の一つである電子基準点は，高精度な測量網の構築，測量作業の効率化及び地殻変動監視等を目的として全国に 1,240 点設置された GPS 連続観測施設である．国土地理院では，この電子基準点網と，観測データの収集・解析等を行う GPS 中央局から構成される GPS 連続観測システム（GEONET）を運用し，各電子基準点の座標値から国土の地殻変動の連続監視を行っている（例えば，中川ほか，2009）．

３月 11 日に発生した東北地方太平洋沖地震による地殻変動は，震源域に近い電子基準点「牡鹿」（宮城県石巻市）で東南東方向に約 5.3m，上下方向に約 1.2m沈降という極めて大きな変動など，東北地方から関東甲信越地方にかけての広い範囲で確認された（図－１）．また，本震後も東北地方の太平洋沿岸を中心に，東北・関東地方の広い範囲で余効変動が継続しているほか，各地で頻繁に発生した地震活動による局所的な地殻変動も観測されている（図－２）（水藤ほか，2011a，2011b）．

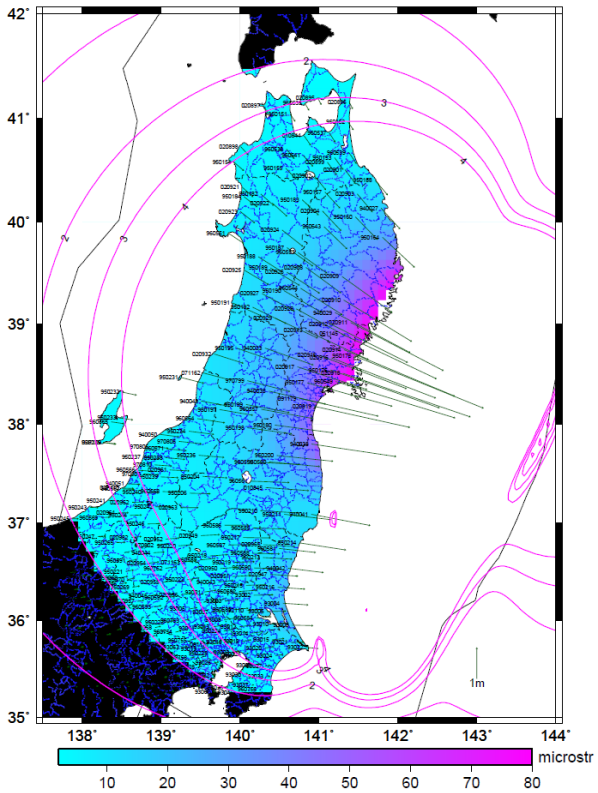
これらの地殻変動の結果，国土の位置の基準となる基準点の位置は大きく変化し，公共測量等の実施に支障を来たすおそれがあることから，国土地理院では，３月 14 日に基準点測量成果の公表を停止する措置を行った．



図－１　東北地方太平洋沖地震に伴う地殻変動量（a）：水平成分，（b）：上下成分）

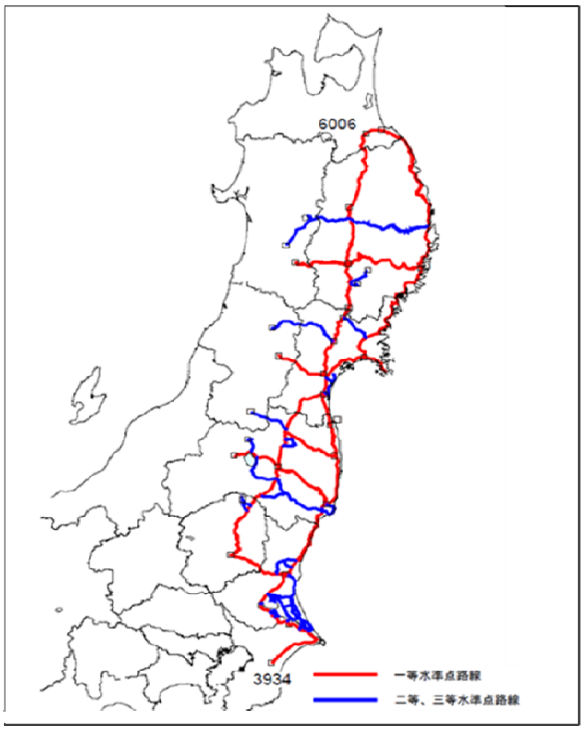


図－２　東北地方太平洋沖地震後（３～７月）の地殻変動量
（左）：水平成分，（右）：電子基準点「山田」時系列）



図－３　震源断層モデルから計算された最大剪断歪量

図－４　3/14 に電子基準点及び三角点の測量成果を公表停止した地域（赤枠），5/31 に電子基準点の測量成果を公表した地域（赤枠及び黄枠），5/31 に追加で三角点の測量成果を公表停止した地域（黄枠）及び電子基準点の測量成果の調整計算を行った地域（緑枠）



図－５　水準点の測量成果公表停止路線図

電子基準点及び三角点の測量成果の公表停止地域については，電子基準点の観測データから推定した国土地理院による震源断層モデル（暫定値）に基づいて計算された最大剪断歪が概ね２ppm（10km あたり２cm の変化に相当）を超える範囲（図－３）を基本とした．公共測量に与える影響や行政区画等を考慮した結果，停止地域は青森県，岩手県，宮城県，秋田県，山形県，福島県，茨城県，栃木県，群馬県，埼玉県，千葉県，東京都（島しょを除く.），神奈川県，新潟県，山梨県，長野県の１都 15 県とした（図－４）．

水準点の測量成果の公表停止地域については，電子基準点の観測データから上下変動量が数 cm 以上となる地域の水準路線とした（図－５）．

東北地方太平洋沖地震により成果公表を停止した主な基準点数の一覧を（表－１）に示す．なお，３．２に示すように，電子基準点の改定成果公表時（５月 31 日），富山県，石川県，福井県，岐阜県の電子基準点の測量成果改定も合わせて実施する必要が生じた．これにより，当該４県の三角点の測量成果の改定も必要となったため，同日付けで三角点の測量成果の公表を停止した．このため，表－１には５月 31 日の４県追加後の点数も含まれている．

表－１　全国の基準点総数と１都 19 県の成果停止点数

種別		総数	成果停止点数
電子基準点		1,240	438
三角点	一等三角点	975	353
	二等三角点	5,060	2,140
	三等三角点	32,326	15,170
	四等三角点	70,713	26,194
水準点	一等水準点等	14,768	991
	二等水準点	3,471	388
	合計	128,553	45,674

２．電子基準点の測量成果の改定要件

２．１　要求精度

新しい測量成果を算出する場合，歪の全くない基準点体系を構築するのが理想だが，実際には地殻変動の影響や成果の公表を停止していない地域(以下，「成果非停止地域」という.）との接合等を考慮する必要がある．そのため国土地理院では，電子基準点の測量成果を算出する場合の要求精度として，点間の相対精度２ppm を目安としている．これは，電子基準点の平均点間距離約 20km に対し約 40mm に相当し，測量法第 34 条で定める作業規程の準則（以下，「準則」という.）で電子基準点のみを既知点とする測量の場合に規定されている許容範囲（水平 60mm+20mm√N，高さ 150mm+30mm√N）（ただし，N は辺数）を十分に満たす値となっている．

２．２　成果改定時期の検討

被災地における早期の災害復旧・復興等事業の実施のためには，位置の基準となる地震後の測量成果を早急に提供する必要があり，実際，測量計画機関等から改定成果の早期公表を求める要望が多数寄せられていた．特に，後に続く三角点の改測作業や被災地等の復旧・復興のための測量等にも利用される電子基準点の測量成果については早急に改定成果の公表が求められた．

一方，東北地方太平洋沖地震はM9.0 という国内観測史上最大の地震であり，その余効変動も長期間にわたり継続すると考えられた．そのような状況下で性急に成果を改定しても，余効変動等により基準点の位置が変動し，短期間で成果を再停止する事態となってはかえって社会的混乱やコストの増大を招くため，余効変動が十分小さくなり，将来的に成果への影響を及ぼさない時期を見定める必要があった．

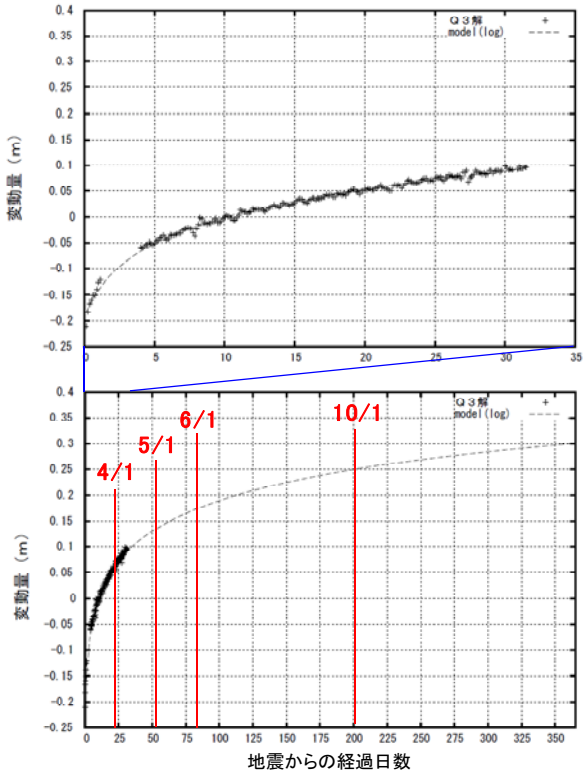
これら２つの相反する条件を踏まえ，被災地の災害復旧・復興に資するよう迅速に，かつ将来にわたって安定した測量成果を提供できるよう，電子基準点による余効変動の観測結果から将来蓄積される歪量を推定し，最適な成果改定時期について検討した．

国土地理院では，基準点測量におけるプレート運動等に伴う歪の影響を取り除くための「セミ・ダイナミック補正」を 2010 年１月から導入している．余効変動の影響については，年１回の頻度で構築している地殻変動補正パラメータを用いることにより，年間の歪が２ppm を大きく超えなければ測量への影響を最小限に軽減することが可能である．将来的な余効変動量については，地震後の各電子基準点の観測データから求められた地殻変動の推移から Marone et al.（1991）による以下の対数関数の近似式を用いて推定した．なお，余効変動の近似として指数関数を用いたモデルも用いられるが，今回は地震直後で余効すべりの寄与が卓越すると考え，ここでは対数関数のみで近似している．

$$y(t) = c + a\ln\left(1 + t/\tau_{\log}\right)$$

（c，a：定数，$\tau_{\log}$：時定数，t：経過時間）

推定した地殻変動量から将来蓄積される歪量を推定し，前述した地殻変動補正パラメータの更新時期も考慮し，最適な成果改定時期を検討した．余効変動量は地震発生からの経過時間と共に徐々に減衰しており（図－６），検討の結果，余効変動による影響を許容できる最大限に抑えられる時期として成果改定時期を５月末と設定し，４月 28 日に報道発表した．



図－６　電子基準点「山田」における地震後約 30 日後までの余効変動の推移（上）及び観測結果から推定した将来的な変動量（下）

３．電子基準点の測量成果の算出

３．１　GAMIT/GLOBK による試算

国土地理院では，これまで電子基準点の成果計算には主に学術用精密基線解析ソフトウェア GAMIT/GLOBK を用い，成果改定地域の外側にある電子基準点成果を固定して基線解析及び平均計算を行うことにより，既存の「測地成果 2000」に準拠した新成果を算出してきた（例えば，土井ほか，2005）．まず，今回もこの手法に従った成果計算の妥当性を検討するための試算を行った．その詳細を以下に記す．

３．１．１　基線解析及び平均計算の概要

はじめに，GAMIT による GPS 基線解析を以下の設定で実施した．

・計算の対象点は，成果改定地域の電子基準点に加え，固定点となる改定地域の外側（北海道及び中日本）の電子基準点 27 点とする．
・電子基準点を 40 点程度の地域クラスタに分割するとともに，固定点及び地域クラスタ間の重複点等で構成するバックボーン（BB）クラスタを設定．
・４月 18～20 日の３日間の観測データを解析．初期座標には同期間の速報解（R3 解）の平均値を採用し，衛星軌道情報には IGS の速報暦を使用．

次に，上記解析により得られた各クラスタの緩い拘束条件の解を用いて，GLOBK による平均計算を実施した．その設定条件等は以下のとおりである．

・固定点 27 点の座標を測地成果 2000 の成果値に固定し，先に BB クラスタについて GLOBK による平均計算を行って測地成果 2000 に基づく成果値を算出．
・次に，固定点及び BB クラスタ点の座標値を固定し，地域クラスタについて GLOBK による平均計算を行い，残りの電子基準点の成果値を算出．

３．１．２　試算結果の考察

３．１．１で得られた試算結果について，計算期間とした４月 18～20 日の R3 解平均値を真値とした差分から水平歪を算出し，相対精度の検証を行った．検証の結果，この手法では成果停止／非停止の境界領域で２ppm の相対精度が確保できず，公共測量の実施に支障が出る可能性があることが判明した．この理由として，地震に伴う地殻変動が広範囲に及んでいたこと，境界線の形状や各固定点の変動量が一様ではなかったこと等が考えられた．そのため，今回の成果算出にあたっては，次の３．２に示す新たな手法を採用することとした．

３．２　VLBI 及び GEONET 定常解析結果に基づく電子基準点の測量成果の算出

３．２．１　新成果の計算方針

今回の地震では広い範囲で地殻変動が発生したため，成果改定地域の周辺を従来の成果に固定して新しい成果を計算するという従来の手法ではなく，VLBI と GEONET の観測結果から最新の ITRF2008 座標系に基づく座標値を計算し，その値を成果改定地域の新成果として採用することとした．地震に伴う地殻変動が小さかった西日本や北海道では ITRF94 に基づく従来の成果のままとし，新成果との境界領域で生じる不整合については，両者が滑らかに整合するように調整計算を実施することで測量作業の実施に必要となる精度を確保した．

国土地理院の構内に設置されたつくば VLBI 観測局（以下，「TSUKUB32」という．）では，海外 VLBI 観測局との国際共同観測から，定期的に ITRF2008 座標系に基づく地球上の精緻な位置を算出している．また，GEONET では各電子基準点の観測データを定常的に解析し，高精度な座標値を算出している．さらに，TSUKUB32 と地理院構内の IGS 観測局（GEONET にも含まれる．以下，「TSKB」という．）間の正確な相対位置関係については，国土地理院が実施しているコロケーション観測作業により定期的に確認されている．これらの観測データを組み合わせ，前述した新たな方針に基づく成果計算を実施した．以下の項で，その詳細について報告する．

３．２．２　TSUKUB32 の座標値算出

東北地方太平洋沖地震の影響を受けていない海外の観測局との VLBI 観測を実施し，地震後の TSUKUB32 の正確な地心直交座標値（ITRF2008）を算出した．その詳細を以下に示す．

（１）成果算出に用いた国際 VLBI 観測データ

電子基準点の成果改定には最新の座標値を使用するため，成果計算時点で相関処理を完了していた観測のうち，最も新しい国際 VLBI 観測“IVS-R1482”のデータを TSUKUB32 の地心直交座標値の算出に用いた．観測データの詳細を表－２に示す．

表－２　国際 VLBI 観測（５/10 実施）の詳細

観測名	IVS-R1482
観測実施時間	2011 年５月 10 日 AM2:00～ ５月 11 日 AM2:00（日本時間）
参加観測局	TSUKUB32（日本，つくば） HOBART26（オーストラリア） KOKEE（米国） MATERA（イタリア） NYALES20（ノルウェー） WETTZELL（ドイツ）

（２）観測データの解析

IVS-R1482観測の相関処理はドイツのBONN相関局で実施され，データベースはIVSのデータセンターに提出される．TSUKUB32の地心直交座標値を算出するため，データベースをダウンロードし，VLBIデータ用の解析ソフトウェア“CALC/SOLVE”で最終解析を実施した．主な解析条件を表－３に示す．

本解析では，各観測局の地心直交座標値を求めるため，ITRF2008の座標値を各観測局のアプリオリ値として与えるとともに，TSUKUB32を除く観測局（HOBART26, KOKEE, MATERA, NYALES20, WETTZELL）の位置座標をITRF2008に拘束した．

これにより，地震の影響を受けていないと考えられる観測局の地心直交座標値を与件として，地震後のTSUKUB32の座標値を以下のとおり算出した．

基準座標系：ITRF2008
元期：2011/5/10-04:58:26(UT)
Ｘ：　-3957409225.65±6.51（mm）
Ｙ：　3310228896.56±5.12（mm）
Ｚ：　3737494719.44±6.95（mm）

３．２．３　成果算出手法

TSUKUB32及びGEONETの観測結果に基づく成果算出の詳細を以下に示す（図－７）．

（１）VLBIに基づく余効変動を加味した座標値の計算

①３．２．２に示したとおり，５月10日UT５時のTSUKUB32観測結果から地心直交座標値（ITRF2008）を算出

②国土地理院構内に設置されている電子基準点「つくば１」（92110）の，５月８～12日及び22～26日のR3解の平均値の差から余効変動量を算出．なお，「つくば１」の結果を利用したのは，TSKBが５月８～10日の間欠測していたためである．

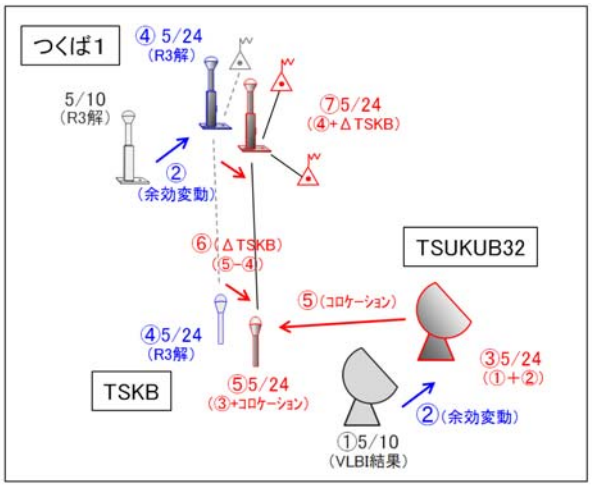
③①に②を加算し，５月24日UT12時のTSUKUB32の地心直交座標値（ITRF2008）を算出

（２）GEONETに基づく座標値の計算

④全国の電子基準点について，５月23～25日のR3解を平均し，５月24日UT12時の地心直交座標値（ITRF2005）を算出．さらに，座標変換パラメータを用いてITRF2005からITRF2008に座標変換．この解析結果にはTSKBの座標値も含まれる．なお，R3解の固定点としていた電子基準点「つくば１」が東北地方太平洋沖地震に伴い変動するとともに余効変動が大きいことから，３月11日以降のR3解析は電子基準点「与論」（鹿児島県）を固定点とし，ITRF2005の座標及び速度を与えて計算している（大島ほか，2011）．

表－３　VLBI観測データ解析条件

解析ソフトウェア	CALC/SOLVE release of 2010.05.21
推定パラメータ	
観測局位置座標 (ITRF2008)	X,Y,Z
電波源位置 （一部のみ）	赤経，赤緯
地球姿勢パラメータ	極運動(X,Y,Xdot,Ydot) 地球自転速度(dUT1,dUT1dot) 章動オフセット(dPsi,deps)
天頂湿潤大気遅延量	20分毎に推定
時系の相対変化量	60分毎に推定
大気勾配	8時間毎に推定
アプリオリ	
観測局位置，速度	ITRF2008 (Altamimi et al., 2011)
電波源位置	ICRF2 (Fey et al., 2009)
地球姿勢パラメータ	USNO Finals from NASA/GSFC on 2011.05.25 (Godard Geodetic VLBI Group's web pages)
海洋潮汐加重モデル	Ocean loading model “2007b_oclo.hps”from NASA/GSFC (Petrov et al., 2003)
マッピング関数	NMF dry mapping Function (Niell et al., 1996)



図－７　TSUKUB32及びGEONETの解析結果を利用した成果計算のイメージ（図中の番号は本文に対応）

（３）TSUKUB32 及び GEONET の計算結果の結合

⑤平成 19 年度に実施したつくば地区コロケーション結果（三浦ほか，2009）を元に，③の結果から TSKB の５月 24 日 UT12 時の地心直交座標値（ITRF2008）を算出

⑥⑤の VLBI に基づく TSKB 座標値と，④の GEOENT に基づく TSKB 座標値との座標差を算出

⑦⑥で得られた TSKB での座標差を④で計算した R3 解全体に加算し，VLBI に基づく R3 解を算出．成果停止地域の電子基準点については，この結果を仮成果とする．なお，標高については，「日本のジオイド 2000」（安藤ほか，2002）から各点のジオイド高を求め，各電子基準点の楕円体高から減ずることにより算出した．

以上の計算により，新たに算出された電子基準点の仮成果については，VLBI 及び GEONET の観測結果に基づいた体系が構築されたことになる．

なお，測量法第 11 条において，「測量の原点は，日本経緯度原点及び日本水準原点とする.」と規定され，各原点の原点数値は，測量法施行令第２条に規定されている．しかし，東北地方太平洋沖地震に伴い，原点の位置と原点数値に乖離が生じたため，原点数値の改正前に電子基準点の測量成果を改定する根拠として,同法第 11 条第１項第３号ただし書きに基づき，国土地理院長の承認を得て，上記手法で成果を算出した．電子基準点成果の原点はつくば超長基線電波干渉計観測点（以下,「VLBI 観測点」という.)とし,原点方位角の方向を VLBI 観測点から TSKB の方向とした．

３．２．４　境界領域における調整計算

３．２．３で新たに仮成果を算出した地域と，成果非停止地域との境界領域では,測地成果 2000 の元期である 1997 年１月１日からの累積地殻変動(東北地方太平洋沖地震による変動を含む）等による歪が蓄積されていることから，そのままでは境界をまたいで測量する際に準則で定められた所定の許容範囲を超過してしまう可能性があった．そこで，電子基準点のみを既知点とした公共測量等を実施しても問題が生じないよう，成果非停止地域との境界付近における歪量が概ね２ppm 以下になるよう調整計算を実施した．なお，調整領域以外の地域については，仮成果の値をそのまま最終成果とする．成果非停止地域との境界のうち，津軽海峡で隔てられた本州と北海道間では測量の実態がないため，調整計算を実施する領域（以下,「調整領域」という.）は西日本側の境界のみとしている．また，高さについても，成果停止／非停止地域をまたぐ隣接電子基準点間の差が準則の許容範囲に対し問題にならない程度であることが確認されたため，調整計算は実施していない．以下に調整計算の詳細を記す．

（１）緯度・経度調整量の近似平面の推定

調整領域の外側に固定点を設定し，領域内の任意の場所での緯度・経度の調整量を近似する平面を最小二乗法で推定する．

①調整領域の外側の電子基準点を固定点に設定し，各固定点 i での緯度・経度の座標差（dB_i，dL_i）を算出する．具体的には，東側（成果改定側）の固定点ではゼロ，西側（成果非停止側）の固定点では，測地成果 2000 と３．２．３で計算された VLBI に基づく R3 解との差とする．なお，基準値には各点の座標差の平均値を適用する．

②各固定点における緯度・経度の座標差が平面上にあると仮定し,最小二乗法により係数を推定する．固定点での緯度・経度を（Br_i，Lr_i）とすると，観測方程式は,

$$aBr_i + bLr_i = dB_i + \phi_i\,,\quad mBr_i + nLr_i = dL_i + \varphi_i$$

緯度について，$\sum_i \phi_i^{\,2} \equiv \min$ から，

$$\frac{\partial}{\partial a}\left(\sum_i \phi_i^{\,2}\right) = 0\,,\quad \frac{\partial}{\partial b}\left(\sum_i \phi_i^{\,2}\right) = 0$$

これを解いて,

$$\begin{bmatrix} a \\ b \end{bmatrix} = A \begin{bmatrix} \sum_i Lr_i^{\,2} & -\sum_i Br_i Lr_i \\ -\sum_i Br_i Lr_i & \sum_i Br_i^{\,2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \sum_i Br_i dB_i \\ \sum_i Lr_i dB_i \end{bmatrix}$$

$$A = \frac{1}{\sum_i Br_i^{\,2} \sum_i Lr_i^{\,2} - \left(\sum_i Br_i Lr_i\right)^2}$$

経度についても，同様に最小二乗法から平面近似式の係数（m，n）を算出する．

（２）球面距離での重み付けによる配分計算

各固定点において，推定された近似平面からさらに残る座標差について，各固定点と調整領域内の各電子基準点間の球面距離による重み付けで配分する．

③固定点（Br_i，Lr_i）の方向余弦は,

$$(x_i, y_i, z_i) = (\cos Br_i \cos Lr_i, \cos Br_i \sin Lr_i, \sin Br_i)$$

電子基準点（Br_j，Lr_j）の方向余弦は,

$$(x_j, y_j, z_j) = (\cos Br_j \cos Lr_j, \cos Br_j \sin Lr_j, \sin Br_j)$$

内積の公式 $\vec{A}\cdot\vec{B}=\left|\vec{A}\right|\left|\vec{B}\right|\cos\theta$ より，単位球面上の距離 D_{ij} は，

$$D_{ij}=\theta=\arccos\left(x_i x_j+y_i y_j+z_i z_j\right)$$

④各固定点における近似平面からの座標差について，各電子基準点における寄与を③で求めた距離 D_{ij} の二乗の逆数で重み付けして計算．それを，近似平面から算出される各電子基準点での調整量に加えることにより，調整領域内の各電子基準点における最終的な調整量（ΔB_j，ΔL_j）を算出する．

$$\Delta B_j=\frac{\sum_i dB_i/D_{ij}^2}{\sum_i 1/D_{ij}^2}+aBr_j+bLr_j+\overline{dB_i}$$

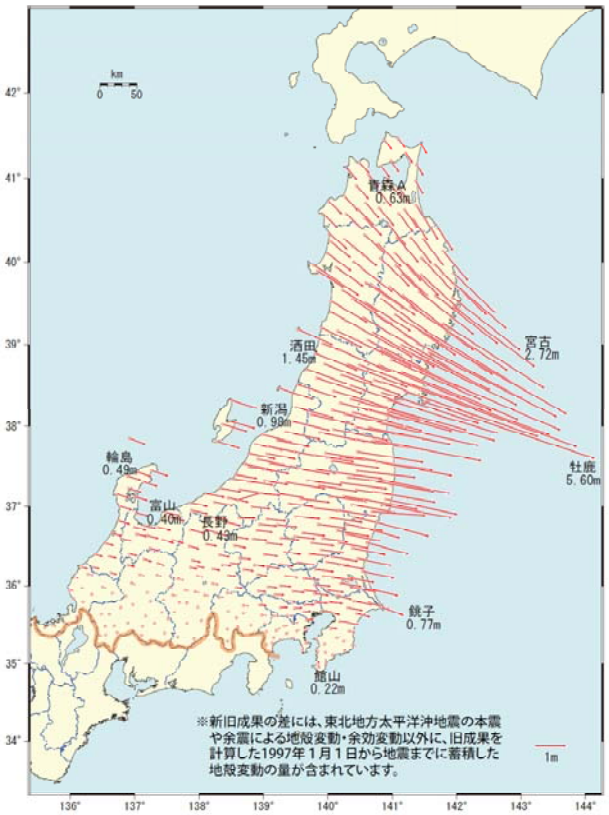
$$\Delta L_j=\frac{\sum_i dL_i/D_{ij}^2}{\sum_i 1/D_{ij}^2}+mBr_j+nLr_j+\overline{dL_i}$$

⑤３．２．３で算出した仮成果に④の最終的な調整量を加算し，調整領域内の最終成果とする．

成果停止/非停止地域の境界において，累積地殻変動量の影響により，VLBI に基づく R3 解と測地成果 2000 との座標差が大きく，高精度な測量成果を提供するためには成果改定地域をさらに西側に拡大する必要があると判断された．そのため，成果改定対象地域を，３月 14 日に成果公表を停止した地域に富山県・石川県・福井県・岐阜県を加えた地域とし，そのうち調整領域を福井県，石川県，富山県，岐阜県，長野県（北部の一部を除く），山梨県，神奈川県（西部）に設定した（図－４）．なお，改定地域に追加した４県については，事前に地方測量部から計画機関及び作業実施機関に説明を行い，成果改定及び実施中の公共測量への対応について理解を得た．

３．２．５　新成果と旧成果の比較

算出された各電子基準点の新成果について，旧成果（「測地成果 2000」）と比較したベクトル図を図－８に示す．東北地方太平洋沖地震による地殻変動等の影響により，成果値に東北地方を中心に最大で５ｍを超える差が生じていることが分かる．一方，調整計算の結果，西日本側の境界に向かうほど新旧成果の差は小さくなり，成果停止/非停止地域の境界部で成果値が整合していることを示唆している．また，電子基準点間の歪についても，調整領域で概ね２ppm より小さくなるよう緩やかに配分され，公共測量作業等の実施に大きな影響がないことを確認している．



図－８　電子基準点の新旧成果の差（水平成分）

３．３　電子基準点の測量成果の公表

３．２で算出された成果停止地域の電子基準点 438 点（東京電力福島第一原子力発電所から 20km 圏内の電子基準点「小高」（950203）を除く）の新成果を５月 31 日に公表し，被災地等における電子基準点を利用した公共測量等の実施が可能となった．一方，３月 14 日に測量成果の公表を停止していなかったものの，新たに成果改定地域となった富山県・石川県・福井県・岐阜県の三角点等については，同日付けで測量成果の公表を停止した．なお，成果改定後の余震や余効変動等により地殻変動補正パラメータで補正できないほどの歪が生じ，公共測量等の実施に支障を来たすと判断される場合には，当該地域の測量成果の再停止及び再改定が必要となる．10 月末時点ではそのような大きな歪の蓄積は確認されていないが，引き続き余効変動等による影響を注意深く監視していく．

３．４　電子基準点付属標の測量成果の算出

３．４．１　概要

各電子基準点にはトータルステーションを使用した測量でも利用できるよう付属金属標が取り付けられ（以下，「付属標」という．），測量成果が与えられている．また，一部の付属標については二等水準点としての標高成果を持つ点もある．東北地方太平洋沖地震でこれら付属標の測量成果の公表も停止とな

ったため，新たに成果を算出し，10 月 31 日に三角点及び水準点の測量成果とともに公表した．

３．４．２　付属標の測量成果の算出及び公表

付属標成果算出の基本的な考え方は，電子基準点本点（以下，「本点」という．）と付属標の相対位置関係が地震前後で変化していないとし，付属標の旧成果に本点の新旧成果の座標差を加算するというものである．なお，地震前後に各電子基準点における顕著な傾斜は認められていなかったため，今回の計算では，その影響については考慮していない．

（付属標新成果）＝（付属標旧成果）＋Δ

但し，Δ＝（本点新成果）－（本点旧成果）

具体的な算出手順を以下に示す（図－９）．

①付属標旧成果から，座標変換により地心直交座標値（ITRF2008）を算出．

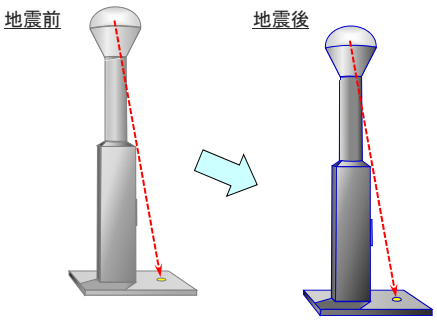
②本点旧成果から，座標変換により地心直交座標値（ITRF2008）を算出し，本点新成果の地心直交座標値（ITRF2008）との座標差を計算．

③①に②を加算し，付属標新成果の地心直交座標値（ITRF2008）を算出．

④③の値を換算して GRS80 楕円体上の緯度・経度を算出し，さらに「日本のジオイド 2000」からジオイド高を求めて標高を計算．

⑤東北地方太平洋沿岸を中心に，後述する水準測量の改測路線の近傍にある付属標については，水準取り付け観測を実施し，④の標高成果を二等水準点としての標高成果に修正．

⑥⑤の改測路線以外で地震前に水準取り付け観測を実施していた付属標については，周囲の水準点成果との整合性を保持するため，④の標高成果を地震前の水準測量の標高成果のままとした．



図－９　地震前後における本点と付属標のイメージ．本点のアンテナ底面と付属標との相対位置関係は変化していないものとする．

これら付属標成果の計算日については，⑤で標高成果を修正した付属標で水準取り付け観測を実施した日となるほかは，本点成果の計算日（エポック）と同じ５月 24 日となる．

今回成果を算出した付属標は，５月 31 日に新成果が公表された電子基準点 438 点のうち，「鹿角２」（970798）（2010 年 12 月の事故によりピラーが変形）及び「楢葉Ａ」（101181）（2010 年７月に移設し，本点と付属標間の取り付け観測が未実施）の２点を除く 436 点である．これら付属標の新しい測量成果については，10 月 31 日に三角点及び水準点の測量成果とともに公表され，測量作業等での利用が可能となっている．

４．日本経緯度原点及び日本水準原点の原点数値改正

測量法第 11 条では，基本測量及び公共測量の基準について，位置は地理学的経緯度及び平均海面からの高さで表示すると規定されている．このうち地理学的経緯度は「日本経緯度原点」（東京都港区麻布台）を，平均海面からの高さは「日本水準原点」（東京都千代田区永田町）を測量の原点とし，その地点及び原点数値は，測量法施行令第２条第１項及び第２項にそれぞれ規定されている．

東北地方太平洋沖地震に伴い，日本経緯度原点及び日本水準原点の移動が確認された．東京都周辺における電子基準点の地殻変動（図－１）によれば，日本経緯度原点は約 20cm 東へ移動し，日本水準原点は約５cm 沈降したと推定される．原点の位置が移動したことにより，原点の位置と原点数値に乖離が生じたことから，測量の正確さを確保するため，原点数値の改正を行った．

４．１　日本経緯度原点の原点数値改正

４．１．１　GNSS 観測及び計算

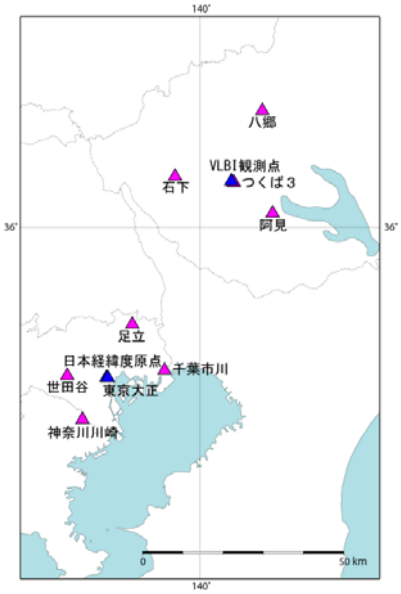
国土地理院では日本経緯度原点の新しい原点数値を算出するため，６月 21 日から 25 日にかけて GNSS 観測作業（以下，「本観測」という．）を実施した（佐藤ほか，2011）．

本観測を実施したのは，日本経緯度原点，一等三角点「東京（大正）」（以下，「東京大正」という．），国土地理院構内に設置されている VLBI 観測点の３点であり（図－10），精密測地網高度地域基準点測量作業規程（案）に準じて作業を実施した．東京大正は日本経緯度原点から東に約 80ｍの地点に設置されている．いずれの観測点も建造物・樹木に取り囲まれているため，日本経緯度原点及び東京大正では高さ 15ｍアンテナタワー（写真－１），VLBI 観測点では高さ６ｍのアンテナタワーを設置した．５月 31 日に公表した電子基準点の改定成果の計算には３日間分の観測データを用いていることから，本観測も３日間行うこととした．なお，本観測は，夜間も職員を安全監視員として観測点に配置し，３～６時間間隔でアンテナ高・致心・受信機動作等を確認する

ことにより，24 時間体制で実施した．

基線解析・調整計算は，GAMIT/GLOBK を使用して東京とつくばの２地区に分けてそれぞれ行った．１日の観測を１セッションとし，各セッションにおける基線解析で既知点とした電子基準点の座標値は，各観測日の日々の座標値[F3 解]を用いた．GLOBK による調整計算は３セッション全ての基線解析結果を用いて行い，既知点の座標値は，５月 31 日に公表された電子基準点の測量成果（元期：2011 年５月 24 日）を地心直交座標に換算したものを用いた．また，算出した座標値から，日本経緯度原点と VLBI 観測点間の方位角を求めた．本観測により算出した日本経緯度原点の原点数値を表－４，日本経緯度原点から VLBI 観測点への方位角を表－５，測地成果 2000（元期：1997 年１月１日）からの水平変動量を表－６にそれぞれ示す．

測地成果 2000 に対応する地心直交座標系は ITRF94 系であるので，水平変動量は ITRF2008 系に統一するよう座標変換を行った上で計算している．



図－10　各観測点及び解析の既知点とした電子基準点の位置図

写真－１　日本経緯度原点に設置した 15mアンテナタワー

表－４　日本経緯度原点の新旧座標値

	経度 緯度	x(m)
		y(m)
		z(m)
新 (ITRF2008)	139° 44′ 28″ .8869 35° 39′ 29″ .1572	−3959340.203
		3352854.274
		3697471.413
旧 (ITRF94)	139° 44′ 28″ .8759 35° 39′ 29″ .1572	−3959340.090
		3352854.541
		3697471.475

表－５　日本経緯度原点から VLBI 観測点への方位角

方位角	新	32° 20′ 46″ .209
	旧	32° 20′ 44″ .756

表－６　本観測により算出した各観測点における座標値（元期：2011 年５月 24 日）と測地成果 2000（元期：1997 年１月１日）との差（ITRF2008 系に統一して計算）

点名	変動量	変動の方向
日本経緯度原点	26.5 cm	91° 56′ 42″ .53
東京大正	29.6 cm	91° 56′ 05″ .76
VLBI 観測点	69.4 cm	99° 32′ 37″ .70

４．１．２　日本経緯度原点における検証作業

2011 年６月に実施した本観測の検証のため，日本経緯度原点及び東京大正において，９月 14 日に GNSS 観測を実施した．この観測は９月 14 日の１日間（24 時間）のみ行い，その他の条件は本観測と同様である．

この検証及び本観測により算出した日本経緯度原点及び東京大正の座標値の差はそれぞれ 0.6cm，0.8cm であり，検証結果はほぼ整合している．したがって，この間，既知点とした電子基準点と各観測点間の位置関係に有意な変化は認められず，歪みの原因の一つである余効変動の影響もほとんど無いと考えられる．

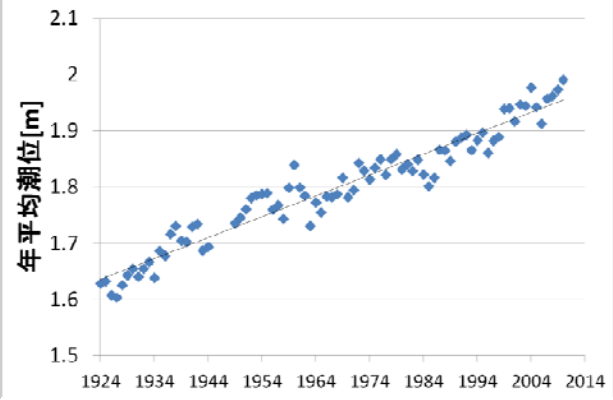
４．２　日本水準原点の原点数値改正

測量法施行令第２条第２項において，日本水準原点の原点数値は東京湾平均海面を基準として与えられている．国土地理院では，油壺験潮場（神奈川県三浦市）において，連続的な潮位観測及び GPS による観測を行うとともに，油壺験潮場と日本水準原点

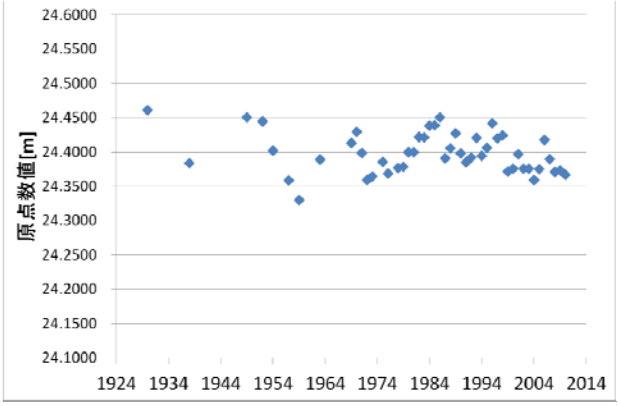
との間で，毎年水準測量を繰り返し実施することにより，日本水準原点の原点数値の点検を行っている．

４．２．１　東北地方太平洋沖地震前までの潮位観測及び原点数値の点検結果

油壺験潮場における潮位観測結果を図－11 に示し，潮位観測と水準測量から求めた日本水準原点の取り付け観測結果を図－12 に示す．図－11 によれば 1924 年以降潮位が上昇しているようにも見えるが，油壺験潮場は沈降していることが知られており（国土地理院，2010），潮位観測と水準測量から求めた日本水準原点の高さは，図－12 のように大きな変動は見られない．また，気象庁（2011）でも，日本沿岸の海面水位を長期的に見た場合，世界平均の海面水位にみられるような明瞭な上昇傾向はみられないとされている．これらのことから，東北地方太平洋沖地震前までの東京湾平均海面及び日本水準原点の高さは，変化がなかったものとする．



図－11　油壺験潮場における年平均潮位の変化（1924 年～2010 年）

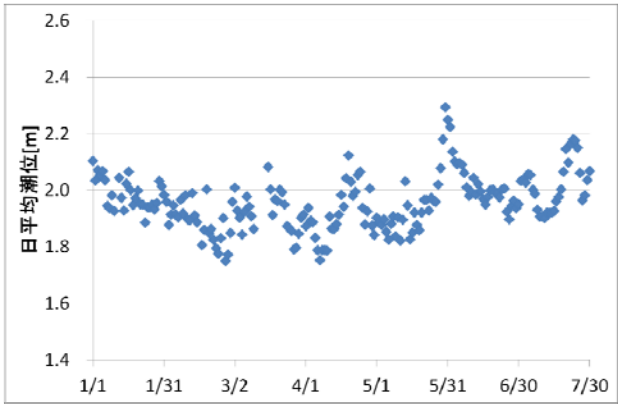


図－12　油壺験潮場の潮位に基づく日本水準原点の原点数値点検結果（1924 年～2010 年）

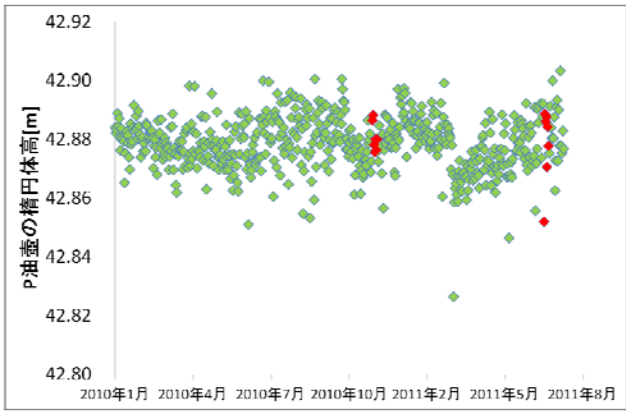
４．２．２　東北地方太平洋沖地震前後の潮位観測及び GPS による観測結果

油壺験潮場における東北地方太平洋沖地震前後の潮位観測（図－13）によれば，地震に伴う明瞭な潮位変化は観測されていない．また，油壺験潮場に設置されている P 油壺（験潮場に設置されている GPS 観測点）及び近傍の電子基準点「三浦２」における楕円体高の GPS による観測結果をそれぞれ図－14 及び図－15 に示す．いずれもばらつきが大きいが，３月 11 日の地震に伴って楕円体高が数 cm 変化したものの，地震後の余効変動により，地震に伴う変化は徐々に小さくなっていく傾向がある．

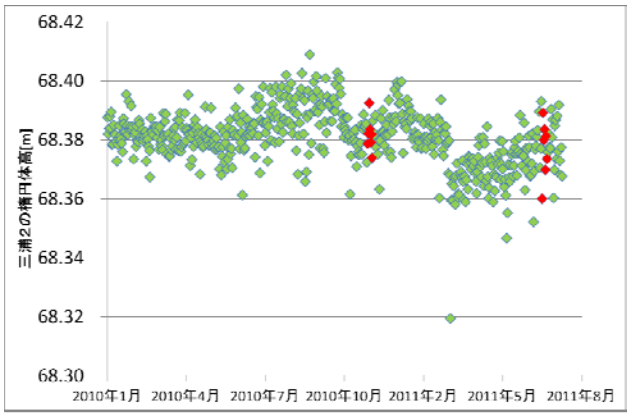
図－14 及び図－15 において赤色で示したデータは，地震前（2011 年１月）及び地震後（2011 年７月）の油壺から日本水準原点までの水準測量を実施した期間のうち，油壺験潮場固定点または電子基準点「三浦２」の付属標に取り付け観測を行った日を基準として，それぞれ１週間分のデータを示す．２回の水準測量の間の油壺験潮場及び電子基準点「三浦２」の楕円体高変化（表－７）を求めると，どちらも GPS 観測の精度を考慮すれば，有意な変化は見られない．



図－13　油壺験潮場における日平均潮位の変化（2011 年１月～７月）



図－14　Ｐ油壺の楕円体高変化（2010 年１月～2011 年７月）



図－15　電子基準点「三浦２」の楕円体高変化（2010 年１月～2011 年７月）

表－７　Ｐ油壺及び電子基準点「三浦２」における楕円体高変化と誤差

	楕円体高変化[m]（2010/11 から 2011/7 まで）	誤差[m]
Ｐ油壺	－0.0026	0.0053
電子基準点「三浦2」	－0.0049	0.0043

４．２．３　日本水準原点の新しい原点数値の計算

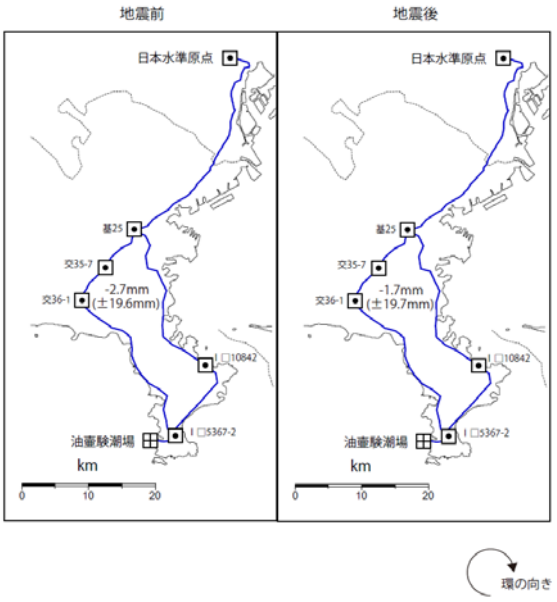
油壺験潮場における東北地方太平洋沖地震前後の潮位観測，GPS による観測及び水準測量の結果に基づき，日本水準原点の新しい原点数値を以下の①及び②の手順により計算し，③により検証することとした．計算に使用した水準測量の結果は，図－16 に示す水準路線のものである．

①地震前の 2011 年１月に実施した油壺験潮場から日本水準原点までの水準測量の結果に基づき，日本水準原点の原点数値を固定して油壺験潮場固定点の高さを求めると，2.4173m である．三浦半島における網平均の標準偏差から，±0.0022m程度の誤差が見積もられる．

②2011 年１月及び７月における GPS による観測の結果から油壺験潮場では東北地方太平洋沖地震に伴う有意な上下変動はないものと考えられる．このことから，①で求めた油壺験潮場固定点の高さを固定して，平成 23 年７月に実施した水準測量の結果により，日本水準原点の新しい原点数値を求めると，24.3904m である．

地震前後の水準測量データから環閉合を計算した結果は，いずれも許容範囲に収まっており，計算に使用したデータの品質は良好と判断される（図－17）．

図－16　日本水準原点の原点数値計算に使用する水準路線図



図－17　日本水準原点の原点数値計算環閉合図

③VLBI 観測点から日本水準原点までの水準測量の観測結果から，②で求めた原点数値を次の方法により検証する（福崎，2011）．

a　使用する水準測量データ

国土地理院構内に設置されている水準点（11231）では，過去に水準測量が繰り返し行われており，日

本水準原点との間の比高が求められている．2000年度平均成果以降の観測は 2002 年８月に行われている．また，地震後 2011 年７月～８月にかけて水準測量が行われており，同様に日本水準原点との間の比高が求められている．

b　VLBI 観測による楕円体高変化の推定

VLBI 観測結果を用いて，2002 年８月時点における VLBI 参照点の座標を求める．次に，2011 年８月時点における VLBI 参照点の座標を求める．この２つの楕円体高の差が，この期間における国土地理院構内の高さ方向の変位量と仮定すると，水準点（11231）は 0.05639m沈降したと考えられる．

c　水準点（11231）の標高の算出

まず，2002 年８月時点での水準点（11231）の標高を求める．2002 年８月の水準測量結果から，日本水準原点－水準点（11231）間の比高は 1.0270mである．水準原点の原点数値は 24.4140mであることから，水準点（11231）の標高は 25.4410mとなる．

次に，VLBI 観測より求められた 2002 年８月から 2011 年８月までの水準点（11231）の変位量が -0.05639mであることから，2011 年８月における水準点（11231）の標高は 25.3846mとなる．

ただし，水準点（11231）は 2004 年４月以降に国土地理院構内において定期的に行われている水準測量の結果では，2011 年１月以降沈下の傾向が認められる．その量は-0.00436mと見積もられるので，最終的に 2011 年８月時点における水準点（11231）の標高は 25.3803mと求められる．

d　日本水準原点の標高値の算出

2011 年７月から８月に行われた水準測量の結果から，日本水準原点の標高値を求める．水準点（11231）－日本水準原点間の比高は-0.9796mであることから，最終的に 2011 年８月時点における日本水準原点の標高値は，24.4007mとなる．

②で求めた結果は 24.3904mであり，VLBI 観測による楕円体高の精度として１cm 程度を考慮しても，誤差の範囲内で一致していると考えられる．

水準測量の網平均計算結果の標準偏差から①及び②の結果には±0.0026m程度の誤差が見積もられるため，日本水準原点の新しい原点数値は，小数第４位を四捨五入し，24.3900mとする．

４．３　測量法施行令の改正

前述のとおり，日本経緯度原点及び日本水準原点の原点数値は測量法施行令第２条第１項及び第２項にそれぞれ規定されているため，原点数値の改正には測量法施行令の改正が必要である．また，測量法第 11 条により，基準点測量成果はこれらの原点を基準に表示することが求められるため，本改正は 10 月を目標に実施することとした基準点測量成果の改定に先行して行う必要がある．このため，６月から着手した所要の手続きを経て，平成 23 年 10 月 18 日に測量法施行令の改正が閣議決定され，同 21 日に公布・施行された．

５．三角点の測量成果改定

三角点の測量成果改定において，精度を確保する上で最も望ましいことは，三角点で実際に観測を行うことである．しかし，測量成果の公表を停止した三角点は約４万点に上るため，すべての三角点の改測を実施することは，時間と費用の関係から現実的ではない．今回の地震において観測された地殻変動は比較的一様であるため，平成 15 年（2003 年）十勝沖地震に伴う三角点の成果改定（土井ほか，2005）のように，一部の三角点で改測作業を実施し，改測によらない三角点の成果改定は，補正パラメータによる改算として実施することとした．

三角点成果改定の方針は，次のとおりとする．三角点の緯度・経度については，１．に示す１都 19 県の成果公表停止地域全域で改定する．一方，三角点の標高については，地震直後に顕著な上下変動が観測され，その後の余効変動も含め，10cm 程度を超える上下変動量が確認されたのは，東北地方及び茨城県の太平洋沿岸の地域であるため，東北６県と茨城県で実施するものとする．ただし，長野県・新潟県県境付近の地震に伴う三角点改測作業及び同地域で実施された高度地域基準点測量作業については，標高も改測することとする．三角点の改定成果は，補正パラメータとともに 10 月 31 日に公表する．

５．１　高度地域基準点測量

補正パラメータは，電子基準点や一部の三角点で観測を実施することにより地震に伴う地殻変動量を求め，これをクリギング法と呼ばれる補間法によりグリッド化して構築する．地殻変動量を求めるには，約 20km 間隔で設置されている電子基準点に加え，より多くの三角点で観測を実施することが必要である．このため，東北地方から関東甲信越地方の骨格的な三角点において，高度地域基準点測量（GNSS による６時間観測）を外注により総地区数 22 地区，総点数 591 点で実施することとした（図－18）．

今回は，早期の補正パラメータ構築が必要であることから，通常は請負業者において実施する GAMIT/GLOBK による基線解析・調整計算を測地基準課(監督員)において実施するなどの対応を行った．

なお，高度地域基準点測量を実施した三角点のう

ち，金属標識（10 点）及び急遽振替点とした６点を除く 575 点については IC タグを設置した．

５．２　三角点改測

東北地方太平洋沖地震では，震源に近い東北地方の太平洋沿岸ほど大きな地殻変動が観測されている．また，この地域では津波により甚大な被害が発生しており，さらに場所によっては地盤の液状化等により，三角点が傾斜，埋没，亡失するなど現況に異常を来していると考えられたため，三角点改測作業を外注により総地区数 45 地区，総点数 1,278 点（四等三角点新設６点，平成 22 年度新設四等三角点の改測７点を含む）で実施することとした（図－18）．

全地区において設計業務量を完了するよう作業は進められたが，支障木伐採等で地権者の了承が得られない（所在不明）などにより，最終改測点数は 1,257 点（四等三角点新設６点，平成 22 年度新設四等三角点の改測７点を含む）となった．

５．３　直営作業の状況

５．３．１　高度地域基準点測量

５月 31 日に成果公表停止地域に追加された富山県，石川県，福井県，岐阜県の補正パラメータ構築を目的に，直営作業として６月 28 日から７月８日の日程で福井県２点，岐阜県２点の高度地域基準点測量を実施した．

当該作業は東北地方太平洋沖地震に伴う歪が２ppm 未満の地域であり，過去に実施された高度地域基準点測量を電子基準点の改定成果に基づいて改算処理した結果の精度検証を目的に実施するものである．この検証の結果，平成 19 年度から平成 22 年度までに実施した能登，中部日本，甲信，近畿東部地区の高度地域基準点測量データを利用した改算結果を補正パラメータ構築に使用して差し支えないことを確認した．

この直営地区を含めて，高度地域基準点測量は 23 地区，595 点を実施したこととなる（図－18）．また，過去に実施された高度地域基準点測量を電子基準点の改定成果に基づいて改算処理した点数は，73 点となった．

５．３．２　三角点改測

直営作業として，再発注においても契約不調となり，隣接地区への追加協議も調わなかった宮城県南三陸北部地区の 10 点と合わせて，三角点改測空白地域となっていた岩手県宮古市及び下閉伊郡山田町の太平洋沿岸突端部周辺（岬の地域）の５点の２地区 15 点の三角点改測を実施した．

８月８日から 13 日の期間に選点を実施後，８月 22 日から９月２日の期間に GNSS 観測を実施した．南三陸地区については，今後の利用状況を勘案し３点において移転を行い，５セッションの観測を実施し，宮古・山田地区については３セッションの観測を実施した．

この直営地区を含めて，三角点改測は 47 地区，1,272 点を実施したこととなる（図－18）．

図－18　東北地方太平洋沖地震に伴う高度地域基準点測量及び三角点改測実施地域図

５．４　補正パラメータによる改算

電子基準点，高度地域基準点及び過去の高度地域基準点の観測値による改算の新旧成果を用いて，水平座標の補正パラメータ（以下，「座標補正パラメータ」という．）及び標高の補正パラメータ（以下，「標高補正パラメータ」という．）を構築し，改測及び過去の観測値による改算を実施しない点について，補正パラメータによる改算を実施した．

補正パラメータによる成果改定の流れは次のとおりである．

①電子基準点の成果と，高度地域基準点測量及び一部の三角点改測作業で求められた地震後の成果と旧成果より変動量を算出．

②補正パラメータの構築．ただし茨城県においては明治時代以来の三角点の標高不整合が残っている地域があるため，標高補正パラメータとして，不整合を含むパラメータと，不整合を含まないパラメータの２種類を構築した．なお，東北地方の

三角点の標高不整合は2010年10月に解消済みである（湯通堂ほか，2011）.

③基準点GISにより地震前の成果公表停止地域の基準点成果を取得し，そこから改測と過去の観測値を用いた改算並びにパラメータ提供エリア外の三角点を除外．残った三角点をパラメータによる改算で成果を求める点とする.

④座標については，全点で座標補正ソフトウェアPatchJGD（飛田，2009）を用いて改算．標高については，三角点成果の改定方針に従い東北６県と茨城県の三角点について，標高補正ソフトウェアPatchJGD（標高版）を用いて改算.

⑤求めた座標に対応するジオイド高を全点で算出．算出には日本のジオイド2000 Ver.5.0を使用.

５．４．１　補正パラメータの構築に使用した電子基準点・三角点

（１）共通事項

①電子基準点及び高度地域基準点による地殻変動量は，補正パラメータ構築に原則使用する.

②地殻変動量のベクトルを図示し，明らかに特異な変動を示している三角点については，補正パラメータの構築には採用しないこととする.

③震源に近い宮城県の太平洋沿岸においては，地殻変動量をより正確に与えるために一部の三角点改測作業による地殻変動量を採用する.

④４月11日に発生した福島県浜通りの地震など,東北地方太平洋沖地震後に発生した規模の大きな地震等により地域的に周囲と傾向が異なり，太平洋沿岸地域の三角点改測作業により影響のある範囲が確認される地域は，三角点改測作業による地殻変動量を採用し，地域的な不整合を解消することとする.

⑤補正パラメータ構築過程の内部評価・外部評価・勾配二乗和根（飛田，2002）で，特異な傾向が確認された点については，補正パラメータの構築から除外することとする.

（２）座標補正パラメータ

①電子基準点による暫定的な座標補正パラメータを構築し，高度地域基準点測量による地殻変動量の外部評価を実施し,水平で10cm以上の較差がある高度地域基準点については，過去の作業履歴を確認し，旧成果を公表成果ではなく地震の前に行われた最新の観測による座標を採用して地殻変動量を算出する.

②成果改定地域と非成果改定地域との整合性を保つために，隣接県の電子基準点も含める（変動量は０とする）．ただし，津軽海峡で隔てられた本州と北海道間では電子基準点の成果は調整されていないため，北海道の電子基準点は含めない.

（３）標高補正パラメータ

①電子基準点「いわき４」は，４月11日に発生した福島県浜通りの地震で高さ方向に大きく変動したことが確認されているので，標高補正パラメータ構築には使用しないこととする.

②電子基準点による暫定的な標高補正パラメータを構築し，高度地域基準点測量を実施した三角点で外部評価を実施し,標高で20cm以上の較差がある高度地域基準点については，過去の作業履歴を確認し，旧成果を公表成果ではなく地震の前に行われた最新の観測による座標を採用して地殻変動量を算出する.

③茨城県においては，明治時代以来の三角点の標高不整合が残っている地域があるため，不整合を含んだ標高補正パラメータとして構築し，標高補正計算を行う．なお，ユーザの混乱を避けるため，標高不整合を含まない東北地方太平洋沖地震による地殻変動量で構築した標高補正パラメータを公開する.

④低下高上改埋処理を行っている三角点については,その値を補正して変動量を算出する.

⑤標高の成果改定地域と非成果改定地域との整合性を確保するために隣接県の電子基準点，高度地域基準点測量による変動量を含めるものとする．ただし，隣接県の三角点は，明治時代以来の標高成果の不整合を含む点があるので，変動量が周囲と合わない三角点は，不整合が確認された場合には使用しないこととする．また，津軽海峡で隔てられた本州と北海道間では電子基準点成果は調整されていないため北海道の電子基準点は含めない.

以上の整理の結果，補正パラメータ構築に使用した電子基準点・三角点は1,254点あり，図－19のとおりである.

５．４．２　補正パラメータの構築及び評価

補正パラメータは，各電子基準点・三角点の変動量から３次メッシュ南西角の変動量をクリギング法により推定して構築し，陸域をカバーするように抽出したものである.

構築にあたっては，補正パラメータについて内部評価，勾配二乗和根，外部評価の精度検証作業を行い，特異な変動を持つ三角点の除外を行っている．以下にそれぞれの評価結果を示す.

図－19　補正パラメータ構築に使用した電子基準点・三角点配点図

①座標補正パラメータ

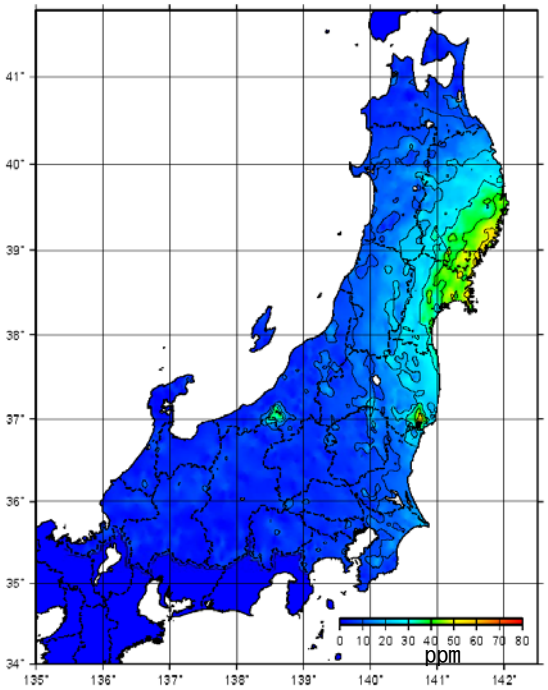
a　電子基準点による暫定的なパラメータでの外部評価

電子基準点による暫定的な座標補正パラメータを構築し，高度地域基準点測量の新旧成果による地殻変動量に特異な変動が含まれないか外部評価を実施した．

10cm 以上の較差がある高度地域基準点は 39 点あり，それぞれの作業履歴を確認したところ，29 点については，地震の前に高度地域基準点測量が実施されており，その値を旧成果として地殻変動量を算出した．残り 10 点のうち，１点は「平成 20 年（2008 年）岩手・宮城内陸地震」に伴う改測作業を平成 22 年度に実施していたため，その改測結果を旧成果とした．残り９点のうち，４点は平成 19 年（2007 年）新潟県中越沖地震等過去の地震に伴う高度地域基準点測量により改測された成果であったためそのまま旧成果を採用した．残り５点のうち，周囲のベクトルの傾向と整合している１点は採用し，残り４点は，地震の前に公表成果とは別の観測履歴がなかったため，固有の変動を持つものと判断し計算から除外することとした．

b　勾配二乗和根

東北地方太平洋沖地震の後，比較的規模の大きな地震による局所的な地殻変動が発生した場所では実際の地殻変動が座標補正パラメータによる補正計算で正確に計算できない可能性があるほか，座標補正パラメータ構築時に使用したデータに異常データとして含まれてしまう可能性もある．そのような地域や三角点を検出するために勾配二乗和根の計算を行った結果を図－20 に示す．震源に近い三陸沿岸で勾配二乗和根が大きく，パラメータの変化が急であることに対応している．また，いわき市周辺及び長野県・新潟県県境付近では地震による局所的な地殻変動があったことが判読できる．このような地域において補正パラメータを適用する際には，点検測量等で確認を行うことが必要である．



図－20　座標補正パラメータによる勾配二乗和根

c　内部評価

座標補正パラメータ構築に使用した電子基準点・三角点の変動量が，構築した補正パラメータとどの程度整合しているか確認するために，成果改定地域内にある 1,092 点により内部評価を行った．地震前の成果に対し，構築した座標補正パラメータによる補正計算を実施し，改定成果との比較を行った．その較差の標準偏差は南北方向３mm，東西方向４mm と，許容範囲２cm 以内に収まる結果となった（表－８）．

表－８　座標補正パラメータの内部評価結果（平面直角座標での較差）

	dx	dy
最大値(m)	0.011	0.019
最小値(m)	−0.023	−0.024
標準偏差(m)	0.003	0.004

d　外部評価

構築された座標補正パラメータがどの程度現況に整合しているか，地震後に実施された三角点改測作業，補正パラメータ確認作業（ネットワーク型 RTK 法）及び地方測量部で実施された作業で得られた観測値により，座標補正パラメータの外部評価を行った（図－21）.

内部評価と同様に観測値と補正値の比較をしたところ，９割以上の三角点で許容範囲として設定した 10cm 以内に収まる結果となった．しかし，50cm 以上の大きな較差が生じている三角点もある．このような例は非常に少ないので旧成果算出時以降に異常が生じていた可能性が高いと考えられる．外部評価結果のヒストグラムを図－22 に示す.

図－21　外部評価に使用した三角点配点図

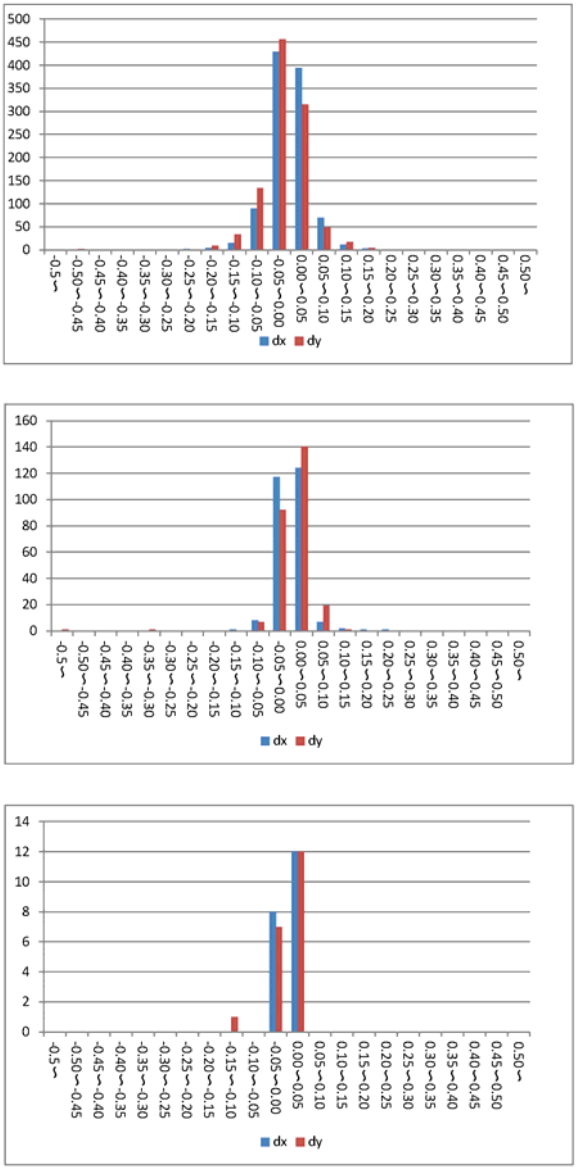
②標高補正パラメータ

a　電子基準点による暫定的なパラメータでの外部評価

電子基準点による暫定的な標高補正パラメータを構築し，高度地域基準点測量の新旧成果による上下変動量に特異な変動が含まれないか外部評価を実施した．20cm 以上の較差がある高度地域基準点は 13 点あり，それぞれの作業履歴を確認したところ，９点については地震の前に高度地域基準点測量が実施されており，その値を旧成果として地殻変動量を算出した．残り４点のうち，１点は平成 20 年（2008 年）岩手・宮城内陸地震に伴う改測作業を平成 22 年度に実施していたため，その改測結果を旧成果とした．残り３点については，地震の前に公表成果とは別の観測履歴がなかったため，固有の変動を持つものと判断し計算から除外することとした.

b　内部評価

成果改定地域内にある 562 点により，茨城県における明治時代以来の三角点の標高不整合を含む補正パラメータと含まない補正パラメータそれぞれについて内部評価を行った．地震前の成果に対し，構築した標高補正パラメータによる補正計算を実施し，改定成果との比較を行った（表－９）．その較差は両パラメータとも標準偏差４mm と，許容範囲２cm 以内に収まる結果となった.



図－22　座標補正パラメータの外部評価結果を 0.05m 区間で作成したヒストグラム．上から三角点改測地域，補正パラメータ確認作業の東北・関東地区，岐阜地区の結果

表－９　標高補正パラメータの内部評価結果

	茨城県の明治以来の標高不整合を含まないパラメータ	茨城県の明治以来の標高不整合を含むパラメータ
	dH	dH
最大値(m)	0.017	0.017
最小値(m)	−0.013	−0.017
標準偏差(m)	0.004	0.004

c　外部評価

座標補正パラメータの外部評価に使用した三角点のうち，標高改定地域の三角点を抽出し，標高補正パラメータの外部評価を行った．

内部評価と同様に旧成果補正値と観測値の比較をしたところ，９割以上の三角点で許容範囲として設定した 20cm 以内に収まる結果となった．しかし，50cm 以上の大きな較差が生じている三角点もある．このような例は少ないので旧成果算出時以降に異常が生じていた可能性が高いと考えられる．外部評価結果のヒストグラムを図－23 に示す．

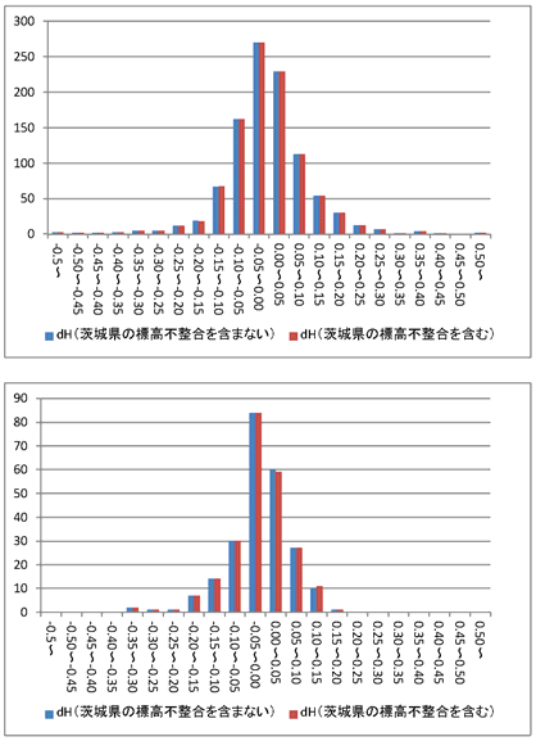
５．４．３　補正パラメータの適用エリア

補正パラメータの適用エリアは，三角点の測量成果の改定方針に従い，座標補正パラメータは成果公表停止地域全域，標高補正パラメータは，標高改定地域である東北６県及び茨城県のみとした．

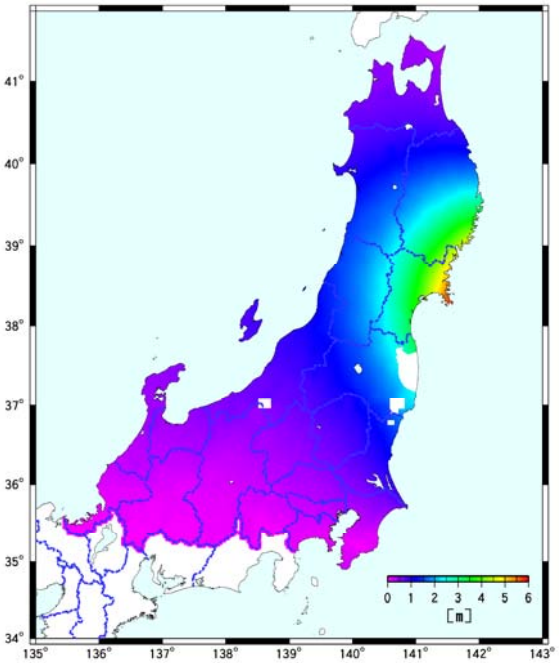
また，東北地方太平洋沖地震後に比較的規模の大きな地震が発生し，電子基準点や干渉 SAR（国土地理院，2011）で地殻変動が確認された地域では，補正パラメータによる計算結果が不適切であることが確認されたため，適用エリアから除外することとした．除外した地域では，改測された三角点を除き改定成果は公表されない．なお，５．４．２の外部評価では，補正パラメータの除外地域として計算されていないので評価に含まれていない．

また,福島第一原子力発電所周辺半径 30km 以内の地域及び計画的避難区域では，測量作業を行うことができず，補正パラメータの精度が確認できないため，当面提供エリアから除外することとした．

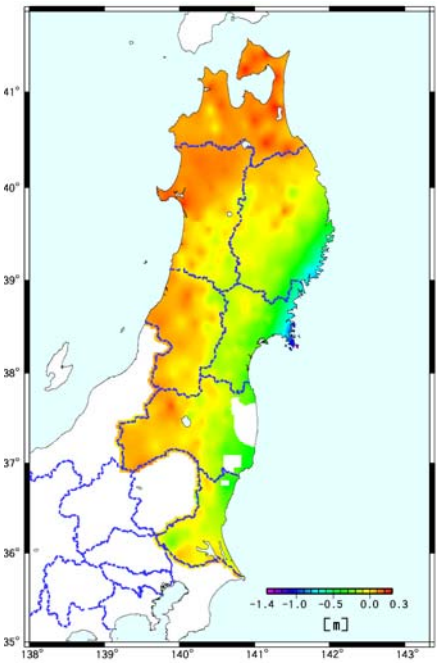
これらの結果を踏まえ，補正パラメータを決定し（図－24，図－25），この補正パラメータに基づき，改測によらない 41,392 点の三角点の成果改定を実施した．



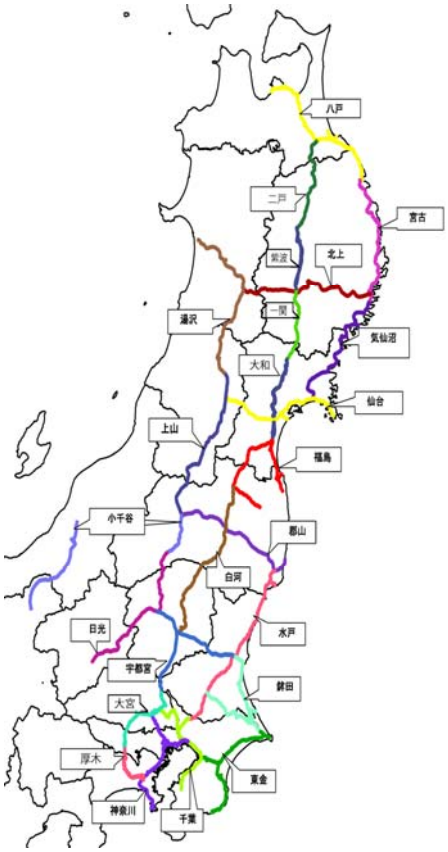
図－23　標高補正パラメータの外部評価結果を 0.05m 区間で作成したヒストグラム．上から三角点改測地域，補正パラメータ確認作業の東北・関東地区の結果．



図－24　構築した座標補正パラメータ．
パラメータ提供エリア内で空白となっているのは，３月 12 日長野県・新潟県県境付近の地震・３月 19 日茨城県北部の地震・4 月 11 日福島県浜通りの地震による変動地域及び福島第一原子力発電所周辺半径 30km 以内の区域及び計画的避難区域である．



図－25　構築した標高補正パラメータ．
パラメータ提供エリア内で空白となっているのは，３月 19 日茨城県北部の地震・４月 11 日福島県浜通りの地震による変動地域及び福島第一原子力発電所周辺半径 30km 以内の区域及び計画的避難区域である．



図－26　高精度三次元測量　24 地区実施地域図

６．水準点の測量成果改定

三角点の測量成果改定に使用する標高補正パラメータは目標とする精度が 10cm～20cm であり，0.1mm や１mm の標高が与えられる水準点の成果改定にパラメータを適用することはできない．したがって，水準点の成果改定は，基本的には改測によることとし，東北・関東地方で実施する高精度三次元測量（水準測量）及び日本水準原点の新しい原点数値に基づく多点固定の網平均計算によることとした．

６．１　高精度三次元測量（水準測量）

水準点の測量成果の公表停止地域については，図－５に示す水準路線としたが，観測する水準路線の精度検証及び日本水準原点の原点数値の観測を行うため，図－26 に示す 24 地区の高精度三次元測量（3,660km）を実施した．高精度三次元測量とは，骨格となる水準路線を繰り返し観測し，電子基準点付属標や験潮場を含む水準点の標高を 0.1mm 単位で決定する水準測量である．

また，水準測量速報について入念な点検及び速やかな提出を受注者に求め，水準測量速報を基に網平均計算のデータベースを構築し，一次納品または最終納品の測量成果で点検することとした．

６．２　成果改定方針

成果改定方針は以下のとおりである．観測を実施した水準点については，10 月 31 日に改定成果を公表し，観測を実施しない水準点については，過去の観測データを用いた計算により，順次改定成果を公表する．

（１）観測を実施した水準点

東北地方太平洋沖地震に伴う高精度三次元測量を実施した水準点については，観測値を用いた網平均計算を実施し，成果を改定する．

（２）接続路線

地震による影響を受けていない地域にあるが，改測路線に接続している路線（以下，「接続路線」という．）については，過去の観測データを用い，接続路線上の水準点と接続先の改測点との間に生じた不整合が小さくなるように調整計算を行って成果を改定する．

（３）地震の影響を受けた地域にあるが観測を実施しなかった路線（補間路線）

地震による影響を受けた地域にあるが観測を実施しなかった路線（以下，「補間路線」という．）については，過去の観測データを用い，改測成果を固定した平均計算を行い，成果を改定する．

（４）改測路線上の観測されなかった水準点

今回の改測路線上にあるが観測されなかった水準点については，過去の観測データを用い，改測成果を固定した平均計算を行い，成果を改定する．

（５）改算の実施が不可能な水準点

当面は，上記の（３）及び（４）に該当する水準点のうち，平成元年以降の観測データがあるものについて，計算により成果を計算する．平成元年以降の観測データが無い水準点や計算の許容範囲を超えた水準点については，改算の実施が不可能であるため成果の公表停止措置を継続する．

６．３　観測を実施した水準点の測量成果計算

観測後の網平均計算を実施するにあたって，一定の精度を確保しつつ，成果改定水準路線以外への影響を最小限に抑えることが求められた．改測による影響を抑えるためには，地震前も含めて上下変動が小さかった複数の水準点を固定して，多点固定による網平均計算を行うこととなる．しかし，固定点の数を増やすと水準点の測量成果の精度の低下につながるおそれがある．

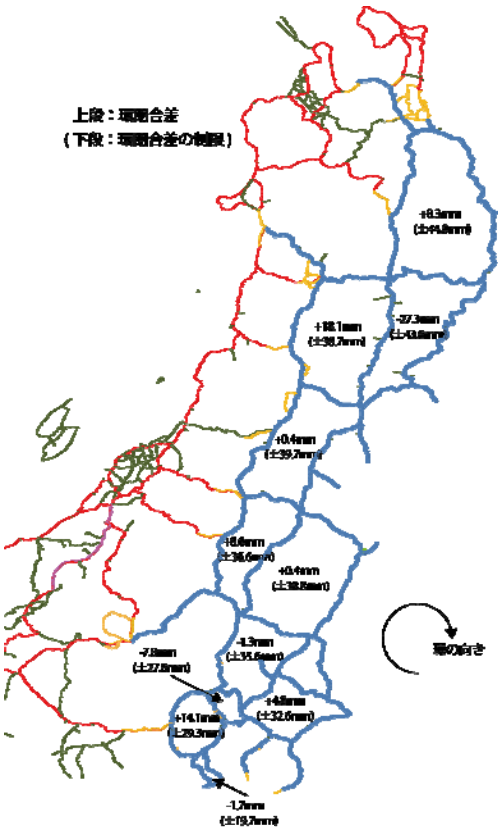
そこで，日本水準原点１点を固定した場合と，日本水準原点及び地震前も含めて上下変動が小さかったと考えられる水準点１点の計２点を固定した場合の試算を行い，計算方法を決定することとした．試算は，水準測量速報データを用いて行った．観測路線により構成した環の閉合差は，図－27 のように全ての環が許容範囲に収まっており，大変良好な結果が得られた．

６．３．１　固定点の選定

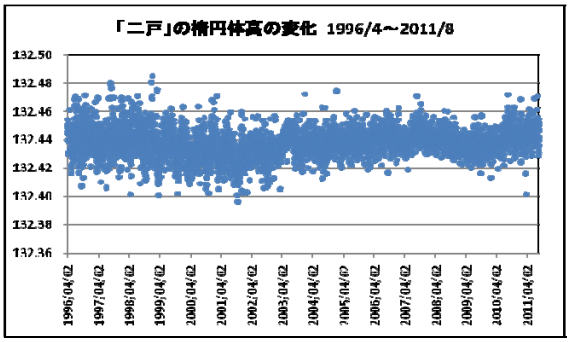
日本水準原点とともに固定する水準点は，次の①から③のような手順で選定した．

①電子基準点の新旧標高成果の差が小さい地域を特定する．
②当該地域内で，水準点に近接する電子基準点数点を選定し，各点における楕円体高変化を比較する．
③楕円体高変化が小さい電子基準点に近接する水準点を，２点目の固定点として採用する．

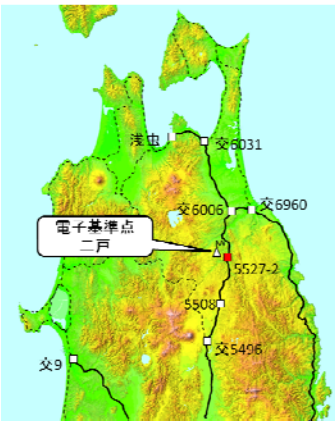
上記①から③について検討した結果，電子基準点「二戸」の 1996 年４月以降の楕円体高の変化は１cm 未満であることから，岩手県二戸市の一等水準点 5527-2 を２点目の固定点として採用することとした（図－28，図－29）．



図－27　環閉合図



図－28　電子基準点「二戸」の楕円体高変化



図－29　電子基準点「二戸」及び一等水準点 5527-2 の位置図

６．３．２　水準測量速報データによる試算

（１）１点固定

日本水準原点の新しい原点数値（１点のみ）を固定し，東北地方太平洋沖地震に伴う高精度三次元測量を実施した一等水準路線の網平均計算を行った．単位重量あたりの観測の標準偏差は 0.524mm となった．路線交点の平均標高の標準偏差は図－30 のようになり，最大値は 10.910mm であった．また，2000 年度平均成果からの変動量は図－31 のようになった．

（２）２点固定

日本水準原点の新しい原点数値及び一等水準点 5527-2 の 2000 年度平均成果を固定し，東北地方太平洋沖地震に伴う高精度三次元測量を実施した一等水準路線の網平均計算を行った．単位重量あたりの観測の標準偏差は 1.442mm となった．路線交点の平均標高の標準偏差は図－32 のようになり，最大で 19.914mm であった．また，2000 年度平均成果からの変動量は図－33 のようになった．

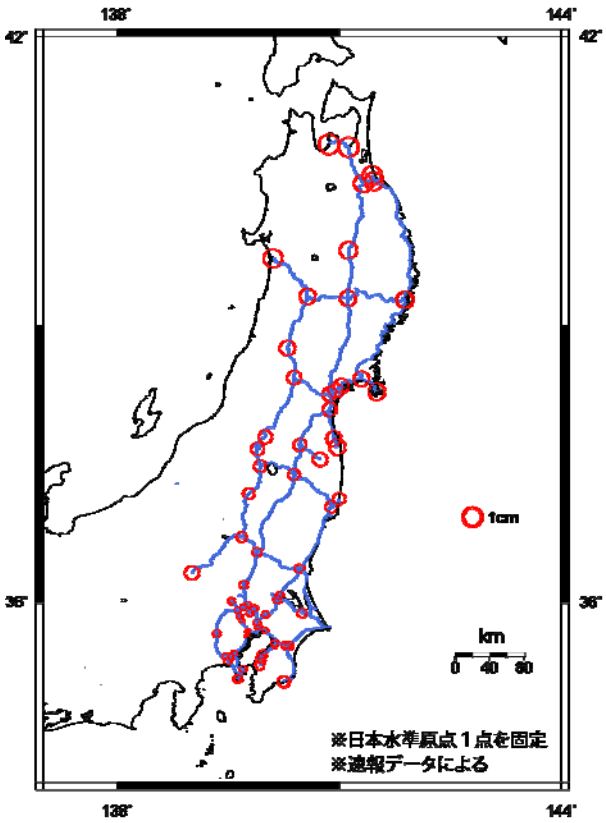
６．３．３　本計算

水準測量速報データによる２通りの試算を行った結果，１点固定では，単位重量あたりの観測の標準偏差及び路線交点の平均標高の標準偏差ともに小さいが，２点固定に比べて成果の改定量が大きくなることが分かった．今回の水準点成果改定は，次の２つの理由から２点固定による網平均計算を実施して本計算を行うこととした．第一の理由は，１点固定の場合，新旧両成果の差が地震に伴う上下変動量に一致せず，特に，太平洋沿岸部において，電子基準点の上下変動と水準点の上下変動が整合するためには，試算結果から２点固定でなければならないことが確認できたためである．第二の理由は，今回の成果改定はすべての水準点の成果改定を行うものではなく，成果を改定しない水準路線との水準点成果の整合性を確保することが必要となるためである．

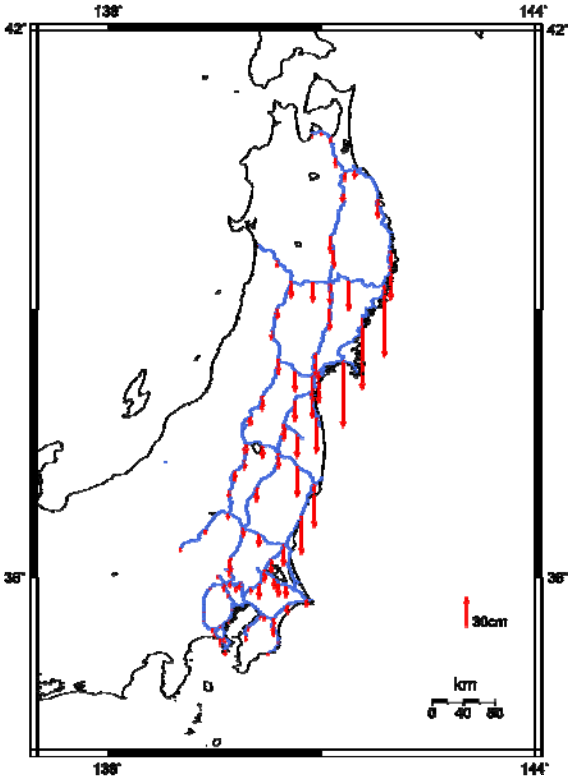
本計算では，納品された観測データを用いて計算を実施した．正標高補正の位置には，地震後に水平位置決定作業を実施して求めた経緯度を使用した．

まず，日本水準原点の新しい原点数値及び一等水準点 5527-2 の 2000 年度平均成果を固定し，東北地方太平洋沖地震に伴う高精度三次元測量を実施した路線（鹿嶋地域の二等水準路線を除く）の網平均計算を行った．単位重量あたりの観測の標準偏差は 1.442mm となり，水準測量速報データによる試算結果と変わらなかった．

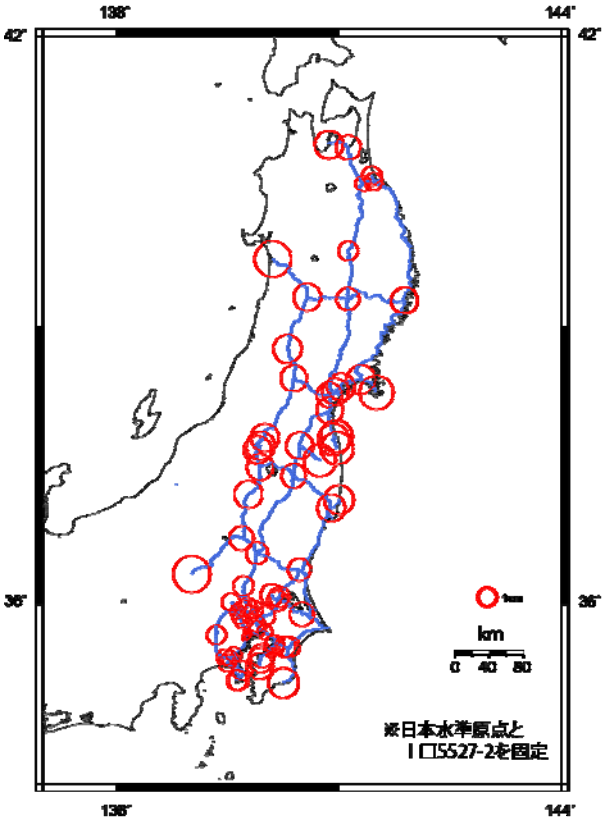
次に，鹿嶋地域の二等水準路線の補間計算を実施した．さらにここまでの結果を固定して，開放路線により取り付けられた電子基準点付属標（二等水準点）や各機関の検潮所球分体の成果計算を行った．



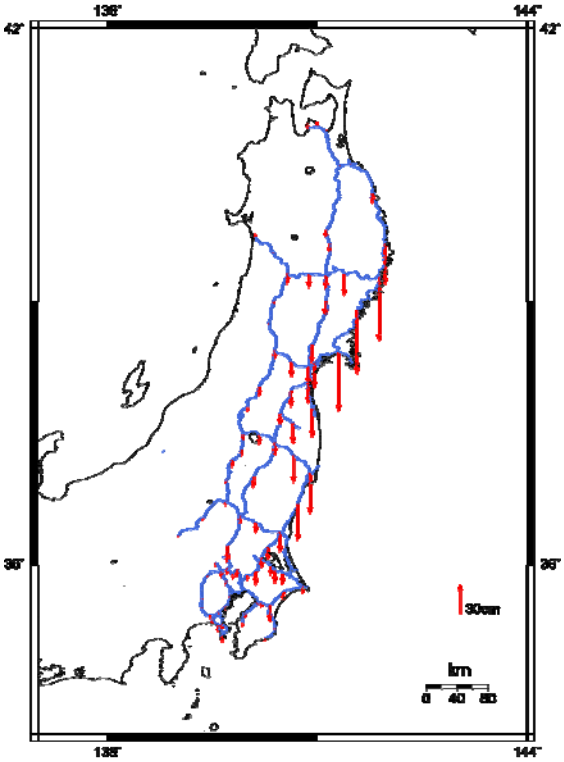
図－30　１点固定の場合の路線交点の平均標高の標準偏差



図－31　2000 年度平均成果からの変動量（１点固定による試算）



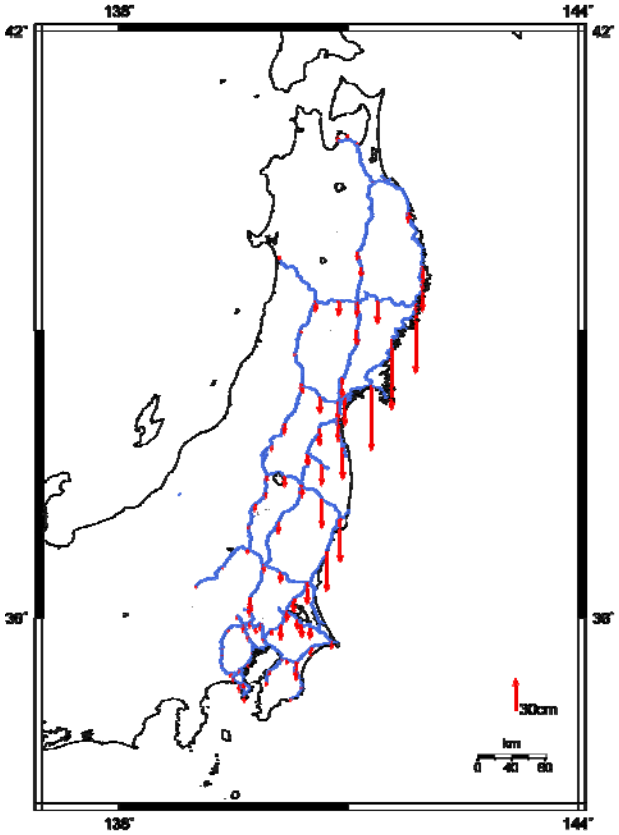
図－32　２点固定の場合の路線交点の平均標高の標準偏差



図－33　2000 年度平均成果からの変動量
（２点固定による試算）

上記の手法により改定した成果を 10 月 31 日に公表した.改定した成果と 2000 年度平均成果の差を図－34 に示す.

ここで得られた各水準点の新成果と旧成果（2000 年度平均成果）の差は，電子国土サイト「東北地方太平洋沖地震に伴う地殻変動量（上下方向）」にとりまとめられ，以下の URL から各観測点の位置と変動量が分かりやすく把握できる．http://vldb.gsi.go.jp/sokuchi/www_kido/index.htm



図－34　改定成果と 2000 年度平均成果の変動量

７．ジオイドへの影響

過去の巨大地震においてジオイドに影響があったことが知られている．そこで，東北地方太平洋沖地震によるジオイドへの影響量の計算を，東京大学地震研究所の大久保修平教授・田中愛幸助教に依頼した（川原，2011）．計算結果は，最も地殻変動が大きかった牡鹿半島で-15mm～-18mm の変化となり，その地域を取り囲む三陸沿岸から福島県沿岸にかけての陸域の広範囲で－５mm 以上の変化があった．また，余効変動によるジオイドへの影響量は，本震後から６月下旬の期間において三陸沿岸部で最大+１mm 強，その他の地域では－１mm 未満の変化であり，余効変動による変化量は本震より１桁小さい値となった．

これらのことから，東北地方太平洋沖地震に伴うジオイドの変化は，各種測量作業の実施に影響を与

えるほど大きなものではないと考えられる.

８．まとめ

東北地方太平洋沖地震に伴い，東日本の広い範囲で顕著な地殻変動が観測されたため，１都 15 県の電子基準点及び三角点の測量成果と東北・関東地方の水準点の測量成果の公表を３月 14 日に停止した（５月 31 日に一部地域追加).

被災地の災害復旧・復興に資するよう迅速に，かつ将来にわたって安定的な成果を提供できるよう，電子基準点による余効変動の観測結果から将来蓄積される歪量を推定し，最適な成果改定時期について検討した結果，５月 31 日に電子基準点の改定成果を公表した.

さらに，日本経緯度原点及び日本水準原点の移動が確認された．原点数値は測量法施行令に規定されているため，測量法施行令の改正が必要である．このため，所要の手続きを経て，原点数値を改正するための測量法施行令の一部を改正する政令が 10 月 21 日に公布・施行された.

測量成果の公表を停止した三角点は約４万点に上るため，一部の三角点で高度地域基準点測量等改測作業を実施し,改測によらない三角点の成果改定は,補正パラメータによる改算として実施した.

水準点の成果改定は，基本的には改測によることとし,東北･関東地方で高精度三次元測量を実施し,日本水準原点の新しい原点数値に基づく網平均計算を行った.

三角点及び水準点改定成果は，10 月 31 日に公表した．原点数値が改正されたこと，東日本の広い範囲で測量成果が改定されたことから，利用者に周知を図るため，電子基準点，三角点及び水準点の測量成果の名称を全国で「測地成果 2011」に改め，基準点成果表の書式も変更となった.

なお，現在，補正パラメータ未提供地域となっている福島県いわき市など一部の三角点においては，今後，三角点改測を実施する計画である．また，福島第一原子力発電所の緊急時避難準備区域の解除に合わせ，解除された地区の測量を逐次実施する計画である．これにより，東日本大震災に伴い被災した地域の災害復旧・復興に必要な基準点成果を整備することとしている.

謝　辞

東北地方太平洋沖地震に伴うジオイド変化の検討にあたり，東京大学地震研究所の大久保修平教授・田中愛幸助教にはジオイドへの影響量の計算を行っていただきました.ここに記して感謝申し上げます.

参 考 文 献

Altamimi, Z., X. Collilieux and L. Metivier (2011): ITRF2008 an improved solution of the international terrestrial reference frame, Journal of Geodesy, 85, 457-473.

安藤久，畑中雄樹，黒石裕樹，福田洋一，佐々木正博，田中和之，重松宏美（2002）:「日本のジオイド 2000」の構築，国土地理院時報，97，25-30.

土井弘充，矢萩智裕，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，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.

Fey, A., D. Gordon and C.S. Jacobs (2009): The Second Realization of the International Celestial Reference Frame by Very Long Baseline Interferometry, IERS Technical Note No.35, “ http://www.iers.org/IERS/EN/Publications/TechnicalNotes/tn35.html (accessed 14 Sep.2010).

福﨑順洋（2011）：VLBI 参照点（AZEL 交点）の楕円体高の変位量を用いた平成 23 年（2011 年）東北地方太平洋沖地震後の水準原点数値の推定，国土地理院測地部平成 23 年度技術報告書.

Godard Geodetic VLBI Group’s Gemini auxiliary web pages, http://gemini.gsfc.nasa.gov/solve_save/usno_finals .erp (accessed 27 Feb.2009).

水藤尚，西村卓也，小沢慎三郎，小林知勝，飛田幹男，今給黎哲郎，原慎一郎，矢来博司，矢萩智裕，木村久夫，川元智司（2011a）：GEONET による平成 23 年（2011 年）東北地方太平洋沖地震に伴う地震時の地殻変動と震源断層モデル，国土地理院時報，122，29-37.

水藤尚，西村卓也，小沢慎三郎，飛田幹男，原慎一郎，矢来博司，矢萩智裕，木村久夫，川元智司（2011b）：GEONET による平成 23 年（2011 年）東北地方太平洋沖地震に引き続いて発生している余効変動と余効すべりモデル，国土地理院時報，122，39-46.

川原敏雄（2011）：東北地方太平洋沖地震に伴う地殻変動地域のジオイドへの影響計算について，国土地理院測地部平成 23 年度技術報告書.

気象庁（2011）：気候変動監視レポート 2010.

国土地理院（2010）：日本全国の地殻変動，地震予知連絡会会報，84，8-31.
国土地理院（2011）：東北地方太平洋沖地震に伴う地殻変動を面的に把握～最終版を作成～，http://www.gsi.go.jp/uchusokuchi/uchuusokuchi40010.html（accessed 30 Nov. 2011).
Marone, C. J., C. H. Scholtz and R. Bilham(1991): On the Mechanics of Earthquake Afterslip, Journal of Geophysical Research,96, B5, 8441-8452.
三浦優司，吉田賢司，小谷京湖，栗原忍，川元智司（2009）：VLBI-GPS コロケーション測量について，国土地理院時報，119，71-85.
中川弘之，畑中雄樹，湯通堂亨，石倉信広，豊福隆史，小谷京湖，宮原伐折羅，岩下知真子，川元智司，宗包浩志，石本正芳，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.
Niell, A.E (1996): Global mapping functions for the atmosphere delay at radio wavelengths, Journal of Geophysical Research, 101, B2, 3227-3246.
大島健一，三浦優司，影山勇雄，古屋有希子，矢萩智裕，丸山一司（2011）：平成 23 年（2011 年）東北地方太平洋沖地震による GPS 観測施設・験潮場の被災状況及び復旧対応，国土地理院時報，122，113-125.
Petrov, L., C. Ma (2003): Study of harmonic site positions determined by very long baseline interferometry, Journal of Geophysical Research, 108, B4, 2190, doi:10.1029/2002JB001801.
佐藤雄大，佐々木利行，上野智史（2011）：平成 23 年（2011 年）東北地方太平洋沖地震に伴う日本経緯度原点の新しい原点数値の算出，国土地理院測地部平成 23 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，東海林靖，嵯峨諭，檜山洋平（2011）：東北地方の三角点標高成果改定，国土地理院時報，121，69-76.