

東北地方太平洋側を中心とした水準点の測量成果の改定 Revision of Leveling Survey Results on the Pacific Coast of Eastern Honshu

測地部 井上武久・大滝修・植田勲¹・山下達也

Geodetic Department Takehisa INOUE, Osamu OOTAKI, Isao UEDA,
and Tatsuya YAMASHITA

測地観測センター 白井宏樹²・鈴木啓¹・古屋智秋・檜山洋平³

Geodetic Observation Center Hiroki SHIRAI, Akira SUZUKI, Tomoaki FURUYA,
and Yohei HIYAMA

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)の発生後も継続している余効変動の累積により生じた水準点の測量成果の乖離を解消するため, 東北地方太平洋側を中心に水準測量を実施し, 平成29年2月28日に水準点及び電子基準点(標高)の測量成果の改定を行った。

本稿では, 平成28年8月から12月に実施した水準測量の概要及びこれらの測量結果から東北地方太平洋側を中心に実施した測量成果の改定について報告する。

1. はじめに

基本測量の水準点は, 平時から国や地方公共団体等が実施する公共測量の高さの基準として使用されている。また, 震災に伴う復旧・復興のための各種公共事業等の高さの基準としても不可欠である。

国土地理院では, 東北地方太平洋沖地震に伴い広い範囲で地殻変動が観測されたことから平成23年10月に測量成果の改定を行った。

しかし, 東北地方太平洋沖地震後の地殻変動の監視結果から, これら地域では測量成果の改定後も余効変動が継続していることが確認されている。

余効変動の影響は東北地方の太平洋側において顕著であり, 公表されている水準点の測量成果(標高)と実際の水準点の標高では最大で30cm程度の乖離が生じている。

このため, 東北地方の水準点の水準測量を再度実施して詳細な上下変動量を把握し, 水準点の新しい測量成果を平成29年2月28日に公表した。

本稿は, 2. で東北地方太平洋沖地震に伴う水準点の測量成果の改定について振り返り, 3. で改定後の余効変動の状況について説明する。4. では平成28年度末に実施された余効変動の影響に伴う測量成果の改定の概要を報告し, 5. では測量成果の改定の外部機関への周知について簡潔に述べる。

2. 東北地方太平洋沖地震に伴う水準点の測量成果改定

平成23年3月に発生した東北地方太平洋沖地震で

は, 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広い地域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, 国土地理院では平成23年3月14日に当該地方の測量成果(電子基準点, 三角点, 水準点)の公表を停止した。

その後, 国土地理院では測量成果の改定を行うため東北地方から関東地方において, 平成23年7月から9月に一等水準測量約3,600km(約1,900点)を実施し, その結果を平成23年10月31日に公表した(檜山ほか, 2011)。

東北地方太平洋沖地震に伴う水準点の測量成果改定の改定量を図-1に示す。地震を挟んで岩手県北部から茨城県の太平洋沿岸の広い範囲で大きく沈降し, 最大では宮城県牡鹿半島にある電子基準点(二等水準点)「牡鹿」において114cmの沈降を観測している。

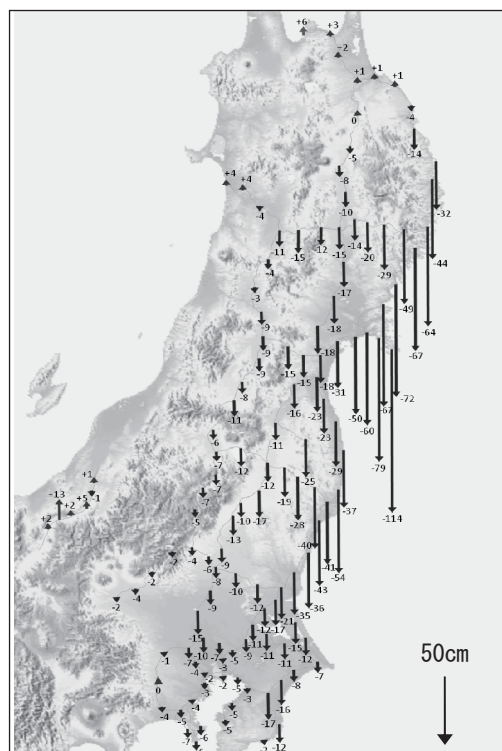


図-1 東北地方太平洋沖地震に伴う水準点の測量成果改定量

3. 東北地方太平洋沖地震後の余効変動の監視

国土地理院では、全国に設置された電子基準点と中央局から構成された GEONET (GNSS 連続観測システム) により、地殻変動等を監視している。

図-2 は、平成 23 年の水準点改測作業時から今回実施した水準点改測作業時までの GEONET が捉えた上下変動量である。東北地方太平洋沖地震後も東北地方の太平洋側地域を中心に余効変動が継続している。

図-3 に電子基準点「M 牡鹿」で観測された上下変動を時系列に示す。東北地方太平洋沖地震に伴い同点は大きく沈降したが、その後は隆起の傾向に反転し、宮城県牡鹿半島では 30cm 以上の隆起量を確認できる。

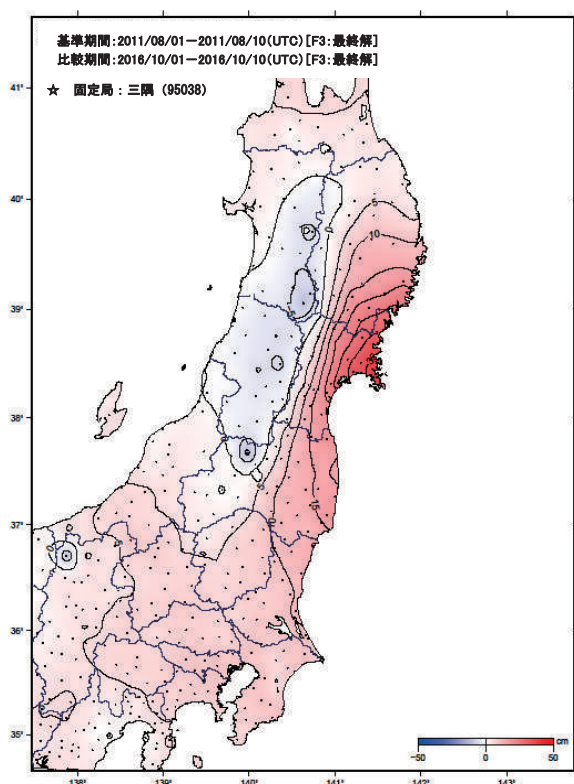


図-2 GEONET が捉えた余効変動量 (上下成分)

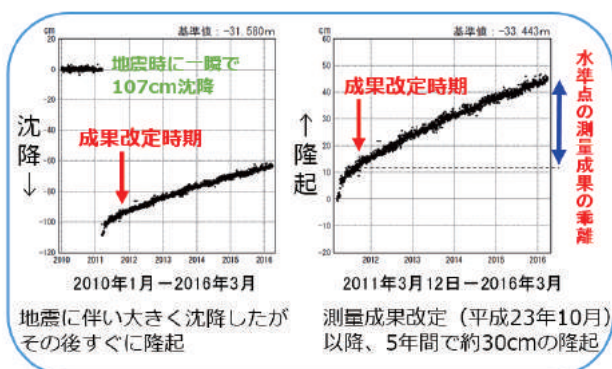


図-3 電子基準点「M 牡鹿」における上下変動

4. 余効変動に伴う水準点の測量成果の改定

4.1 水準点の測量成果への影響

平成 23 年 10 月に行った測量成果の改定後も余効変動による上下変動は継続し、図-3 に示すように年を追うごとに公表した測量成果と水準点の実際の高さに乖離が生じてきた。

このように水準点の測量成果が現況と整合しないまま道路や河川などの各種公共事業の高さの基準として測量を行うと、実際の高さと整合性を欠いてズレが生じることから、3. で述べた GEONET による地殻変動の監視結果から余効変動が大きいと推定される青森県、岩手県、宮城県及び福島県の太平洋沿岸地域において、水準点の測量成果の改定が必要となってきた。

4.2 水準点改測作業の概要

4.2.1 観測した水準路線の概要

水準点の測量成果の改定に必要な水準測量は、日本水準原点 (東京都千代田区) から国道 6 号線を北上し、宮城県仙台市 (一等水準点交 2179) で分岐し、国道 4 号線及び国道 45 号線をそれぞれ経由して青森県八戸市 (電子基準点 (二等水準点) 「八戸」) に至る水準路線を観測することとした (図-4)。

このうち、一等水準点交 2179 から国道 4 号線及び国道 45 号線を経由する水準路線では環閉合によって観測精度の確認ができるよう観測を計画した。

観測期間は、余効変動の影響を最小化するため平成 28 年 8 月末から 12 月上旬までの短期に集中して実施することとし、水準路線の始終点は電子基準点 (二等水準点) とすることで余効変動の影響を評価できる計画とした。

作業の大半は外注 (9 物件) によるが、青森県八戸地方において約 80km を直営で観測した (写真-1)。



写真-1 水準測量の観測風景 (青森県八戸市付近)



図-4 測量成果の改定ために観測を行った水準路線

なお、福島県双葉町から広野町までの福島第一原発の事故による帰還困難区域は、通行止めが解除されたことから、地震後初の観測となった。

観測の総延長は、平成27年度に観測を行った茨城県水戸市から福島県いわき市の区間（103km）、平成26年度に観測を行った茨城県土浦市から石岡市の区間（41km）と合わせて約1,300kmである。

また、この水準路線に組み込んだ電子基準点（二等水準点）の数は36点である。

4.2.2 観測精度の検証

水準測量で観測された比高データは、環閉合計算により精度評価を行った。その結果を図-5に示す。

環閉合させた観測距離817.9kmにおいて、閉合差は-15.8mm（許容範囲±57.2mm）であり、良好な精度が確保されていた。この理由としては、ほぼ同時期かつ短期間に観測を実施したことにより、余効変動に伴う地殻変動の影響を最小限に抑えられたことが挙げられる。

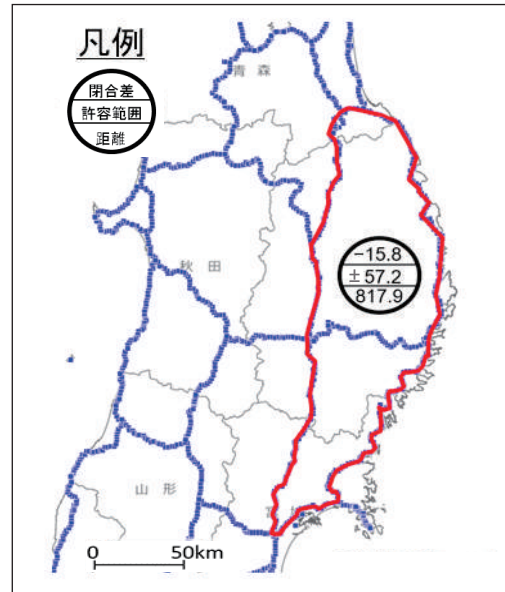


図-5 環閉合計算の結果

4.3 水準点の測量成果改定の計算手順

4.3.1 水準網平均計算の固定点と測量成果改定範囲の決定

測量成果の改定の基本方針は、熊本地震に伴う測量成果の改定（大滝ほか、2016）と同様に「復旧測量実施要領」に基づき実施した。以下に、復旧測量実施要領を抜粋する。

「水準測量において、既設水準点の成果不整合が確認された場合の測量成果の修正基準は以下を標準とする。

- ① 測量成果に対する隣接水準点との変動量の差が15mm 以上の場合。
 - ② 変動図を作成し、地域的な成果不整合の状況を把握した場合には、①に示す基準に関わらず路線毎又は地域毎に成果の修正を行うことができる。ただし、計算の既知点として使用する水準点は原則として以下の条件を満たすものとする。
 - ・過去の変動を考慮し、可能な限り変動が少ない水準点を選定する。
 - ・一等水準点においては、既知点間の結合差が $6\sqrt{S}$ mm以内（S:点間距離、km単位）。
- 具体的な計算手順は以下のとおりである。

- (1) 事前準備として、GEONETによる地殻変動の監視結果を用いて、全域の変動図作成のための固定点を日本水準原点及び東北地方太平洋沖地震による測量成果の改定後に上下変動がほぼ生じていない電子基準点「二戸」の近傍で、地震後の測量成果の改定でも水準網平均計算の固定点とした一等水準点 5527-2（岩手県二戸市）の2点に決定した。
- (2) 日本水準原点及び一等水準点 5527-2 を固定点

として、水準測量で観測した比高データにより全域を網羅する「変動図」を作成した。

次に、作成した変動図と公表している測量成果を比較し、変動傾向が顕著となる範囲を選定した。図-6 に岩手県太平洋沿岸部における変動図を示す。

測量成果改定のための水準網平均計算は、この範囲でのみ行うこととし、この範囲の端に当たる水準点を改めて水準網平均計算の固定点とした。

- (3) 選定した固定点は以下の三点である。
- ・一等水準点 6914-1 (岩手県下閉伊郡普代村)
 - ・一等水準点 交 5496 (岩手県滝沢市)
 - ・一等水準点 4055 (茨城県水戸市)

新しい水準点の測量成果は、この三点を固定点とした水準網平均計算により算出した。

(4) 固定した水準点の外側 (図-7 の青色の水準路線) は改定の対象外とした。

(5) 余効変動の影響を受けている地域にあるが観測を実施しなかった水準路線 (補間路線) は、新たに算出された水準点の測量成果を固定し過去の観測データを用いて計算し、精度確認を行ったうえで改算した。

具体的には、岩手県釜石市から岩手県北上市を結ぶ一等水準路線 (路線番号 124) は平成 23 年 (地震後) の観測値を、宮城県石巻市から牡鹿半島先端の鮎川検潮所を結ぶ一等水準路線 (路線番号 120) は平成 26 年の観測値を用いて改算した。

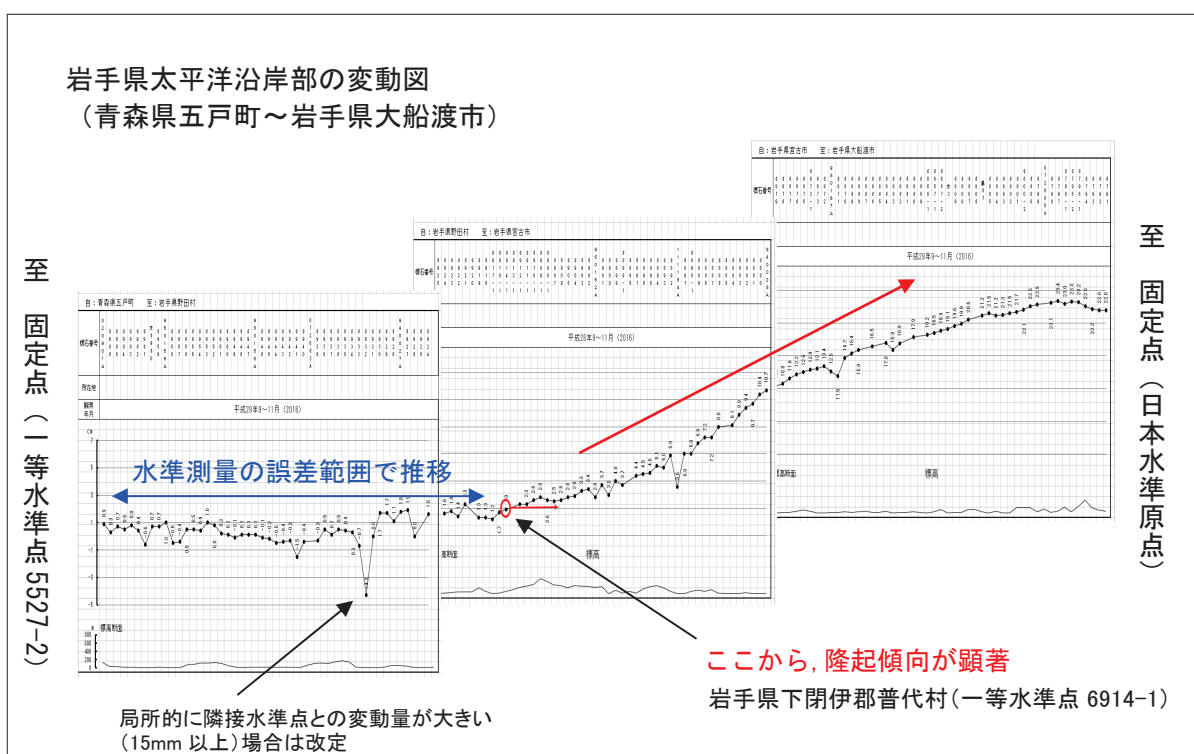


図-6 岩手県太平洋沿岸部の変動図

4.3.2 水準網平均計算と精度評価

図-7 に、水準網平均計算で固定点とした水準点の位置を示す。

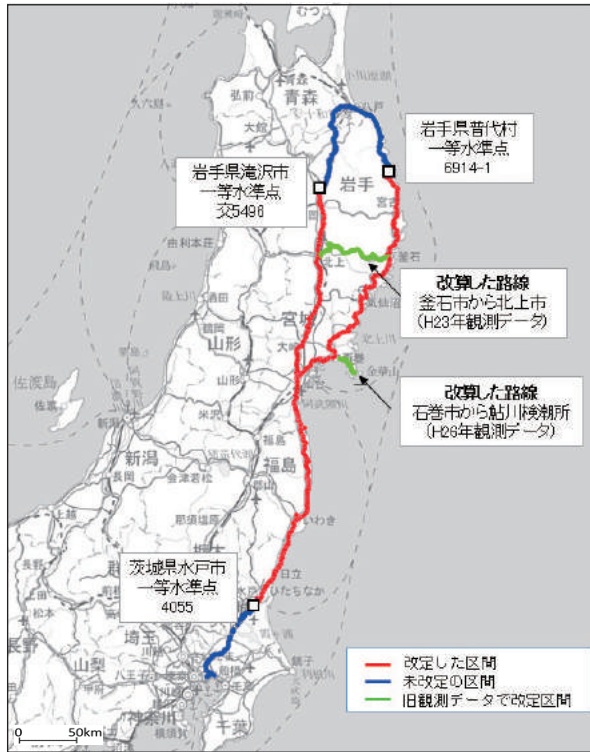


図-7 水準網平均計算の固定点位置と成果改定の範囲

観測した全ての水準路線を対象とする水準網平均計算（固定点一点 5527-2）による単位重量当たりの観測の標準偏差は、0.578 mm/km であった。平成 23 年に実施した東北地方太平洋沖地震に伴う水準測量の 0.524mm/km（檜山ほか、2011）と同等の精度であった。

また、最終的な三点固定による水準網平均計算（網の標準偏差）の結果も、4.492mm で良好であった。

4.3.3 接続する未改測の水準路線について

今回測量成果の改定を行った水準路線とそれに接続する未改測の水準路線（今回は水準測量を実施していない水準路線）の測量成果には不整合が生じるため、図-8 に示す水準点は事前に測量成果の公表を停止した。

これらの水準点（維持管理対象点以外は除く）については、平成 29 年度に新たに水準測量を実施して測量成果を改定し、公表する予定である。



図-8 接続する未改測の水準路線

4.4 主な地点での測量成果（標高）の改定量

主な地点での標高の改定量を、図-9 に示す。

各県において、改正量が大きかった地点は、岩手県では陸前高田市（一等水準点 6778-1）で+22.0cm、宮城県では石巻市（一等水準点 5639 及び 5642）で+30.6cm、福島県では新地町（一等水準点 5572）で+13.9cm、茨城県では北茨城市（道路水準点 006-173）で+8.0cm である。



図-9 主な地点での測量成果（標高）改定量

また、各県毎の改測及び改算の内訳は、岩手県で改測 176 点、改算 51 点、宮城県で改測 174 点、改算 23 点、福島県で改測 99 点、茨城県で改測 50 点、全体で改測 499 点、改算 74 点（合計 573 点）であった。

4.4.1 GEONET で検知された上下変動との比較

改定した水準点の測量成果を検証するため、水準路線に組み込んで観測した電子基準点（二等水準点）の測量成果の改定量（旧標高値と新標高値の差）と GEONET で検知された楕円体高の変動量を比較した。結果を表-1 及び図-10 に示す。

全ての電子基準点において較差 2cm 以内と良く一致しており、改定した電子基準点（二等水準点）の測量成果の改定量が、GEONET における変動量と整合的であることが確認できた。

表-1 GEONET により検知された変動量との比較

電子基準点 点名	①GEONET に よる隆起量 (cm)	②水準測量による 隆起量 (cm)	差 (①-②)
宮古	10	9	+1cm
山田	10	11	-1cm
釜石	18	16	+2cm
大船渡	22	今回未測量	—
気仙沼	23	22	+1cm
志津川	28	27	+1cm
矢本	28	27	+1cm
牡鹿	31	31	0cm
利府	19	18	+1cm
亘理	16	14	+2cm

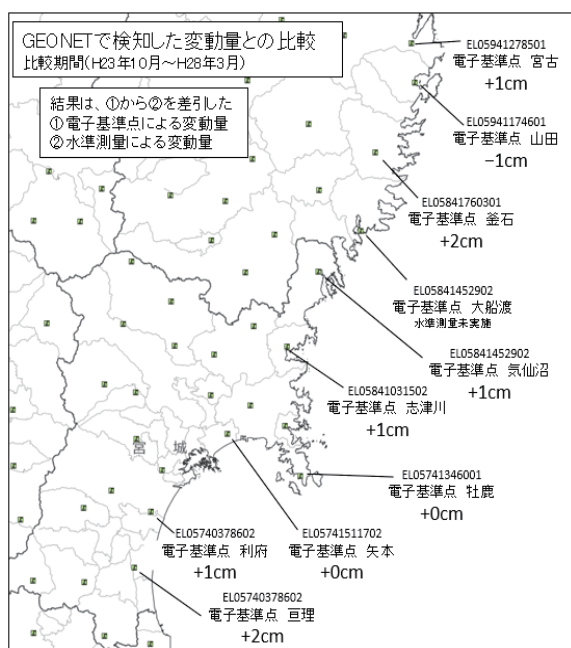


図-10 GEONET により検知された変動量との比較

4.5 電子基準点の測量成果（標高）の改定

電子基準点の測量成果（標高）の改定範囲は、事前に水準点の測量成果を公表停止した範囲（図-8）を基準とし、77 点の電子基準点の測量成果（標高）を改定した（図-11）。また、電子基準点の標高は、水準取り付け実施の有無により測量成果算出方法が異なるため、それぞれについて、4.5.1 及び 4.5.2 で述べる。

なお、電子基準点の標高以外の測量成果（楕円体高、緯度、経度）は、測量成果を使用する際に、地殻変動によるひずみの影響を補正する「セミ・ダイナミック補正」が適用されるため改定しない。

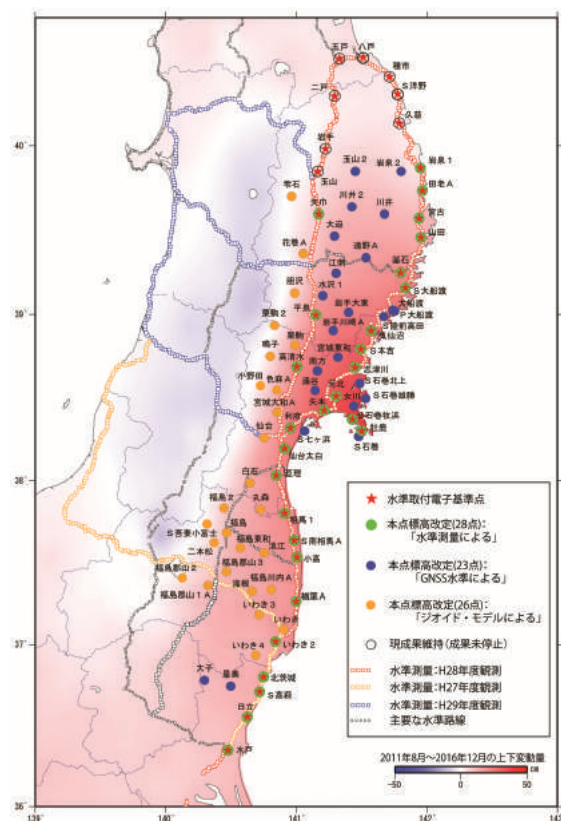


図-11 電子基準点の標高改定地域と改定区分

4.5.1 水準取り付けを実施した電子基準点の標高

図-7 で示した「改定した区間」及び「旧観測データで改定区間」に位置する電子基準点（28 点：図-11 緑●）は、隣接する水準点と同様に測量成果（標高）の改定を実施した。改定した電子基準点の標高は、標高区分「水準測量による」となり、GNSS 水準測量の既知点に使用できる点となる。

4.5.2 水準取り付けを実施しない電子基準点の標高

電子基準点の標高改定地域（図-11）において、水準取り付けが実施されなかった電子基準点（49 点）の標高については、標高区分を「GNSS 水準による」と「ジオイド・モデルによる」に分けて改定を実施

した。

標高区分が「GNSS 水準による」の電子基準点の標高を算出する場合、標高区分が「水準測量による」である電子基準点を既知点とする必要がある。そこで、周囲の電子基準点の標高と整合性を考慮するため、4.5.1 において標高を改定した電子基準点で囲まれた地域に位置する電子基準点（21 点：図-11 青●）を対象に測量成果（標高）を改定した。

なお、一部例外として、電子基準点「里美」及び「太子」は、平成 25 年 1 月に一等水準点 4177（茨城県高萩市）から水準取り付けを実施していたため、本水準点の改定成果に整合させるため標高区分を「GNSS 水準による」で測量成果（標高）を改定した。

また、水準取り付けが実施されなかった電子基準点のうち、標高区分を「GNSS 水準による」で測量成果を改定しなかった電子基準点（26 点：図-11 オレンジ●）は、ジオイド・モデルにより標高を算出し、標高区分を「ジオイド・モデルによる」で測量成果（標高）を改定した。

各県別において、電子基準点の測量成果（標高）を改定した対象点数は、表-2 のとおりである。このうち、標高区分を「ジオイド・モデルによる」で改定した電子基準点については、平成 29 年度以降の水準測量の結果により、標高の改定を検討する。

表-2 電子基準点の測量成果（標高）の改定点数

標高区分	岩手県	宮城県	福島県	茨城県	計
水準測量による	8	11	5	4	28
GNSS 水準による	13	8	0	2	23
ジオイド・モデルによる	3	9	14	0	26
合計	24	28	19	6	77

5. 測量成果改定の外部機関への周知

測量成果の改定にあたっては、海岸堤防建設等の海岸事業への影響が大きいことから、年度当初から関係機関との調整をはかるとともに平成 28 年 5 月 31 日に水準測量の再度の実施について報道発表を行った。

また、測量成果公表時には、従来の国土地理院ホームページによる周知に加え、今後の公共測量等をより円滑に進めることを目的に平成 29 年 3 月 2 日に、岩手、宮城、福島各県の測量計画機関及び測量作業機関を対象として仙台市で説明会（東北地方測量部が主催）を実施した。

説明会では、1) 地殻変動の現状と電子基準点の成果改定（測地観測センター電子基準点課）、2) 水準測量の実施と成果改定（測地部測地基準課）、3) 公共測量の実施の際の留意点（企画部測量指導課）について説明した。（参加者：測量計画機関 226 名、測量作業機関 156 名、その他 3 名、合計 385 名、報道機関 3 社）。

6. まとめ

東北地方太平洋沖地震後の余効変動による地殻変動の影響を受けた水準点及び電子基準点（標高）の測量成果を改定し、平成 29 年 2 月 28 日に同測量成果を公表した。

これまで経験したことのない規模の余効変動が継続している中で測量成果の改定を行うことの難しさ、影響の大きさを実感したが、平成 28 年度は一連の取組を通じて、変動の顕著な東北地方太平洋側を中心に測量成果を改定し、正確な高さの基準を提供できた。

引き続き、沈降傾向の見られる東北地方日本海側の地域においても水準測量を実施し、測量成果の改定を予定している。

本年度に実施した測量成果の改定に関する一連の手順が参考になれば幸いである。

（公開日：平成 29 年 9 月 22 日）

参 考 文 献

- 檜山洋平，山際敦史，川原敏雄，岩田昭雄，福崎順洋，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，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（2011）：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，国土地理院時報，122，55-78. <http://www.gsi.go.jp/common/000064457.pdf> (accessed 15 Sep. 2016).
- 大滝修，井上武久，植田勲，山下達也，山口和典，白井宏樹，鈴木啓，三木原香乃（2016）：熊本地震に伴う基準点成果の改定，熊本地震に伴う基準点成果の改定，国土地理院時報，2016，128，177-187，<http://www.gsi.go.jp/common/000147112.pdf> (accessed 15 Aug. 2017).