

GEONET による平成 30 年北海道胆振東部地震に伴う地殻変動 Crustal Deformation of the 2018 Hokkaido Eastern Iburi Earthquake observed by GEONET

測地観測センター 田村孝・川元智司¹・三浦優司・阿部聡・真野宏邦
横川薫²・塩谷俊治³・浅谷将士・黒石裕樹

Geodetic Observation Center TAMURA Takashi,
KAWAMOTO Satoshi, MIURA Yuji, ABE Satoshi, SHINNO Hirokuni,
YOKOKAWA Kaoru, ENYA Toshiharu, ASATANI Masashi and KUROISHI Yuki

要 旨

平成 30 年 (2018 年) 9 月 6 日 3 時 7 分に、北海道胆振 (いぶり) 地方中東部の深さ約 35km を震源とするマグニチュード (M) 6.7 の地震「平成 30 年北海道胆振東部地震」が発生した。この地震に伴い、測地観測センターが維持管理する GNSS 連続観測点の観測データから地殻変動が観測された。

本稿では、平成 30 年北海道胆振東部地震に伴って観測された地殻変動とそれに対応して行った電子基準点の測量成果改定について報告する。

1. はじめに

測地観測センターでは、地震発生後から GNSS 連続観測システム (以下「GEONET」という.) で GNSS 連続観測点 (以下「電子基準点」という.) の解析を進めた。

電子基準点の観測データはリアルタイムで国土地理院宇宙測地館にある GEONET 中央局に収集されているが、この地震に伴って、発生直後には電子基準点 156 点で停電が確認されたほか、通信回線の途絶により電子基準点 15 点ではリアルタイムデータが収集できなくなった。電子基準点には商用電源が途絶した後でも 72 時間の観測が可能な容量を有するバッテリーを備えているため、観測に支障は生じなかった。また、災害時等を想定し、専用の IP-VPN 回線に加えて携帯電話網を利用した通信の二重化が施されているため、IP-VPN 回線によるリアルタイムデータが収集できなくなった点の観測データは、携帯電話網を利用して回収した。

GEONET の解析では、電子基準点リアルタイム解析システム (以下「REGARD」という。川元ほか、2016) による「リアルタイム解」と、定常解析による迅速解「Q3」、速報解「R3」、最終解「F3」が得られる (檜山ほか、2016)。国土地理院では、これら 4 種類の解析結果を用いて地殻変動の監視を行っており、「平成 30 年北海道胆振東部地震」 (以下「北海道胆振東部地震」という.) 時にも地殻変動の情報を地震調査委員会等各種会議へ提供するとともに、国土地理院ホームページ上で公開した。

2. GEONET による地殻変動の検出

2.1 REGARD による解析

測地観測センターでは、平成 28 年度から REGARD の運用を開始している。REGARD は、全国約 1,200 点の電子基準点から収集したリアルタイムデータを即時に基線解析し、地震発生時には電子基準点の変動量を計算した後に断層推定まで自動で行うシステムである。リアルタイム解析によるため、精度は水平成分 5cm、上下成分 10cm 程度であり、定常解析に比べて粗いが、人の目を介すればリアルタイムに地殻変動の様子を確認できるため、近年では地震の初動体制を決める情報の一つとして用いられている。

北海道胆振東部地震では、広域停電に伴い通信システムの基地局が停電した。データ収集が途絶えたため、震源に近い電子基準点「門別」、「厚真」及び「平取」では地震発生から 1 分以降の解析が出来ず、地震後の地殻変動情報が得られないなど REGARD に大きな影響があった。震央付近の電子基準点のリアルタイム解析結果を図-1 に示す。

通常システム出力では、時系列グラフは地震発生時刻を中心として前後の 5 分ずつがプロットされる (図-1「夕張」)。電子基準点「夕張」では地震時の揺れが 3 時 8 分過ぎに確認できるが、揺れの前後で座標値に変化は無いように見えるため、地震に伴う地殻変動はないものと推測される。一方、夕張以外の 3 点では、3 時 8 分 20 秒過ぎに通信が途絶したため、出力グラフのプロット幅が地震前の 5 分とデータが途絶するまでとなっている。そのため、「夕張」とは異なり、グラフの右端に地震時の揺れや地震に伴う地殻変動が描かれている。図-1 から、特に「厚真」と「門別」では揺れの後に若干の変動があるように見えるが、その後のデータが欠けているため、ステップ状の変動としては正確な判断ができない状態であった。図-2 に示すように、データ通信不可となった観測点のうち「厚真」と「門別」は震央近くに位置しており、地震に伴う地殻変動の把握におい

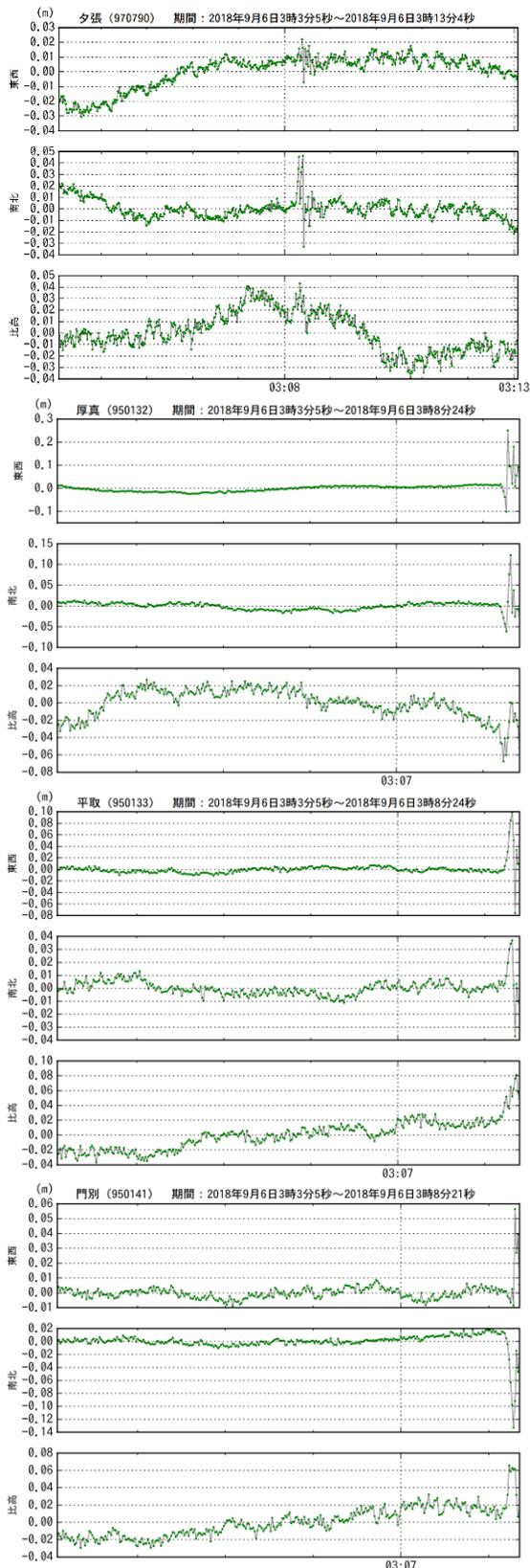


図-1 REGARD によるリアルタイム解の座標成分時系列（上から：電子基準点「夕張」, 「厚真」, 「平取」, 「門別」）。「夕張」以外は通信断により地震発生後にデータが途切れたため、時間軸が異なる。

ては重要な点である。そこで、リアルタイムでのデータ収集途絶のため自動処理が行われなかった観測点に対しては、手動の解析を実施した。



図-2 震央と観測点「門別」と「厚真」の位置関係

電子基準点の観測はバッテリーで継続されていたので、携帯電話網を用いて受信機内部に保存されている1秒間隔のデータを取得し、後処理による解析を実施した。得られた解析結果を図-3に示す。

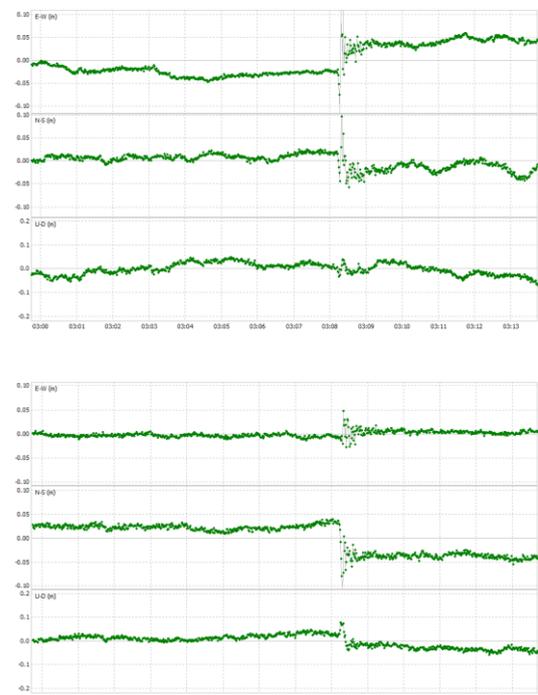


図-3 後処理1秒解析による座標成分の時系列（上：電子基準点「厚真」, 下：「門別」）

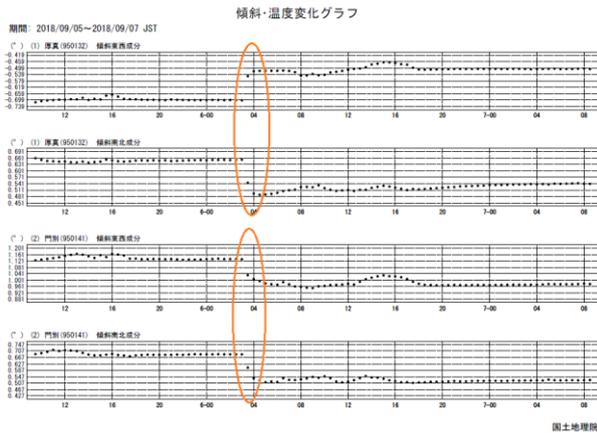


図-4 地震前後の傾斜・温度変化時系列（傾斜の東西、南北成分. 上から「厚真」「門別」.)

図-3では、「門別」と「厚真」において、それぞれ水平成分 5cm 以上の変動が認められる。電子基準点に設置されている傾斜計のデータを確認すると、「門別」と「厚真」の両点において、電子基準点自体が傾斜している可能性が疑われた（図-4）。

そのため、地殻変動の情報としては、観測値に電子基準点が傾斜した影響を含んでいる可能性を考慮し、

震央周辺の電子基準点データの速報的な解析の結果、電子基準点「門別」において南に約 5cm、電子基準点「厚真」において南東に約 5cm の変動が見られています。本結果は、速報的な解析により得られた暫定値です。このため、今回得られた数値は、今後の精査により変わることがあります。

とのコメントを付し、9月6日11時50分に「平成30年9月6日03時08分頃の胆振（いぶり）地方中東部の地震に伴う地殻変動（暫定）」（国土地理院 2018a）として国土地理院ウェブサイト上で公開した。

今回の経験は、REGARD は自動処理システムとして即時的な地殻変動把握に有効であることを示唆している。一方で、地震に伴う停電等のためにデータがリアルタイムに収集されないことがあり、その場合変動量が自動で計算されず、電子基準点の変動の有無やそこから類推される地殻変動の範囲等を即時に判断することが出来なくなるなど、即時解析の強みを十分に活かさないことを改めて認識させるものとなった。

2.2 定常解析：迅速解（Q3）解析

REGARD に基づく結果を公表した後、迅速解（Q3）による地殻変動情報の把握と公表に向け、準備を開

始した。地震発生は3時7分であったが、できるだけ早く有意な地殻変動の有無を確認するため、まず、地震前の観測をごく一部含む3時から9時までの1セッションのデータによる迅速解（Q3）を用いて地殻変動の検出を試みた。その後、純粋に地震発生以降の観測である6時から12時までの1セッションの迅速解（Q3）を求めた。

また、当日17時から開催されることとなった第321回地震調査委員会臨時会へ提供する資料とすべく、8月28日から7日間の速報解（R3）の平均を基準とし、地震後の二つの迅速解（Q3）（9月6日6時～15時までの計2セッション）の平均から地殻変動量（暫定値）を求めた。

その結果、「門別」で南方向に 6.9cm、「厚真」で東南東方向に 5.1cm の変動を検出した。この時点でも、電子基準点に局所的な傾斜の可能性が払拭できないため、

電子基準点「門別」において南方向に約 5 cm、電子基準点「厚真」において南東方向に約 5 cm の変動が見られたほか、その周辺の電子基準点で小さな変動が確認されました。ただし、本結果は、地震に伴い電子基準点が傾斜した影響を含んでいる可能性があります。

とコメントを付し、地震調査委員会臨時会に報告する（地震調査研究推進本部地震調査委員会 2018a）とともに、当日21時0分に国土地理院ウェブサイト上で「平成30年北海道胆振東部地震に伴う地殻変動（暫定）（第2報）」（国土地理院、2018b）第2報として公開した。

2.3 定常解析：速報解（R3）解析

9月10日には、速報解（R3）（9月6日9時～9月9日9時までのデータ）及び迅速解（Q3）（9月8日21時～9月10日6時までの計10セッション）に基づいて地殻変動を求めた。

その結果、「門別」で南方向に 6.4cm、「厚真」で東南方向に 4.4cm の変動を検出した。得られた結果については、迅速解の場合と同様に、「門別」及び「厚真」で約 5cm の変動が観測された旨を、9月10日に開催された気象庁との合同記者会見で発表するとともに、国土地理院ウェブサイト上「平成30年8月の地殻変動」（国土地理院、2018c）で公開した。併せて、9月11日の第322回地震調査研究推進本部地震調査委員会に報告した（地震調査研究推進本部地震調査委員会 2018b）。

2.4 定常解析：最終解（F3）解析

地殻変動が検出された2点の電子基準点について局所的な傾斜の有無を明らかにするため、北海道地

方測量部によって水準測量を用いた傾斜測定が緊急的に行われた(北海道地方測量部, 2019). その測定から、「門別」が南南西方向に1.4cm, 「厚真」が東南東方向に1.9cmほど傾斜したことが観測され, その傾斜の向きと大きさは傾斜計データとほぼ整合する結果であった(表-1).

電子基準点自体の傾斜量が明らかとなったことから, 地殻変動の精査を行い, 水準測量を用いた傾斜測定から得られた傾斜量の補正を加え, 8月29日から7日間の最終解(F3)の平均を基準とし, 最終解(F3)(9月6日9時から7日間の平均)から地殻変動量を求めた.

表-1 水準測量による傾斜測定から求められた電子基準点の傾斜の方位と傾斜による座標変動量(門別・厚真).

門別(950141)

現地傾斜測定結果(水準測量)

	固定点1(cm)	固定点2(cm)	固定点3(cm)	固定点4(cm)
地震前観測値	-19.6	-17.6	-17.2	-19.5
地震後観測値	-25.3	-23.2	-23.2	-25.6
比高変化量	5.7	5.6	6.0	6.1

傾斜測定による水平変動量(水準測量)

変動量(cm)	変動方向(°)	東西成分(cm)	南北成分(cm)
1.4	202	-0.5	-1.3

傾斜計による水平変動量

東西成分	南北成分
-1.4cm (-0.164°)	-1.4cm (-0.163°)

厚真(950132)

現地傾斜測定結果(水準測量)

	固定点1(cm)	固定点2(cm)	固定点3(cm)	固定点4(cm)
地震前観測値	2.3	1.4	2.3	2.6
地震後観測値	6.0	5.0	5.3	5.8
比高変化量	-3.7	-3.6	-3.0	-3.2

傾斜測定による水平変動量(水準測量)

変動量(cm)	変動方向(°)	東西成分(cm)	南北成分(cm)
1.9	108	1.8	-0.6

傾斜計による水平変動量

東西成分	南北成分
1.6cm (0.189°)	-1.0cm (-0.111°)

この結果, 「平成30年北海道胆振東部地震に伴い,

電子基準点「門別」が南方向に約5cm, 電子基準点「苦小牧」が東方向に約4cm移動したほか, 複数の電子基準点が地震に伴い移動したことが分かりました. なお, 地震後の現地調査により, 電子基準点「門別」及び「厚真」で観測点の傾斜が確認されたため, 傾斜量を測定し補正を行っています. また, これらの観測点については, 電子基準点周辺の局所的な変動が含まれている可能性があります.

とコメントを付し, 10月9日に開催された気象庁との合同記者会見で発表するとともに, 国土地理院ウェブサイト上「平成30年北海道胆振東部地震に伴う地殻変動(第3報)」(国土地理院, 2018d)で第3報として公開した. 併せて, 10月12日に開催された第323回地震調査研究推進本部地震調査委員会において報告した(図-6, 図-8)(地震調査研究推進本部地震調査委員会 2018c).

なお, この地震に伴う上下変動については, 電子基準点周辺が局所的に変動した可能性があり, 正しい地殻変動量を求められないとして, 数値等の公表はしていなかったが, 2019年3月に国土地理院ウェブサイト「地殻変動を観測した地震(地殻変動カタログ)」(国土地理院, 2018e)上で, 電子基準点周辺の局所的な変動が含まれている可能性がある旨コメントを付し公開した(図-7).

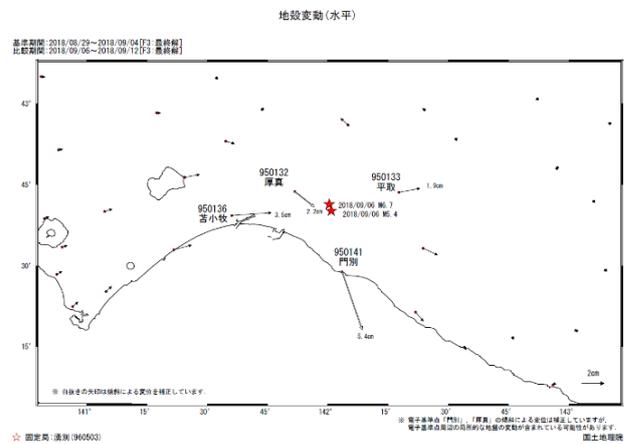


図-6 (水平成分) 定常解析(F3)による9月6日M6.7及びM5.4の胆振東部地震に伴う地殻変動(水平成分及び上下成分). 赤色の★は震央を示す.(固定局「湧別(北海道紋別郡湧別町)」)

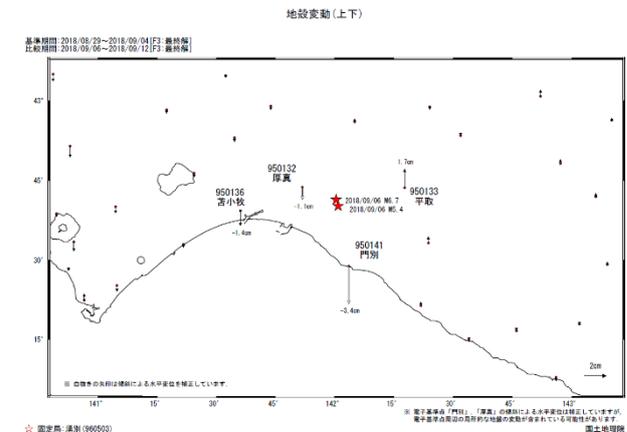


図-7 (上下成分) 定常解析(F3)による9月6日M6.7及びM5.4の胆振東部地震に伴う地殻変動(水平成分及び上下成分). 赤色の★は震央を示す.(固定局「湧別(北海道紋別郡湧別町)」)

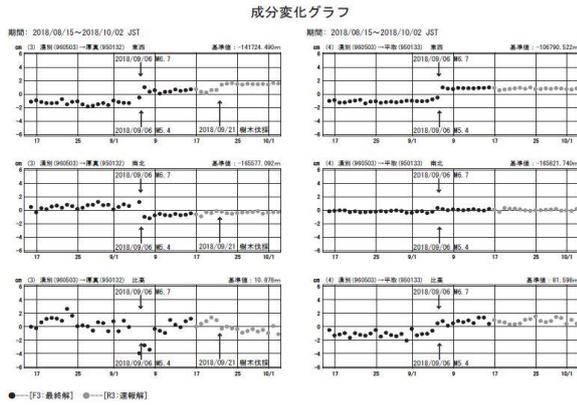


図-8 定常解析(F3)による9月6日のM6.7及びM5.4の胆振東部地震に伴う「門別」(上左上図),「苦小牧」(上右上図),「厚真」(上左下図)及び「平取」(上右下図),の基線変化グラフ。
(固定局「湧別(北海道紋別郡湧別町)」)

2.5 電子基準点の測量成果の改定
2.5.1 電子基準点成果の公表停止

国土地理院では、電子基準点の測量成果を新たに算出する場合、電子基準点間の相対精度 2ppm を要求精度の目安としている(たとえば、檜山ほか(2011))。この値は、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において、基準点測量で電子基準点のみを既知点とする場合に規定されている点検計算(電子基準点間の閉合差)の水平成分の許容範囲(60mm+20mm√N; Nは辺数)を十分に満たすことから、妥当な数値といえる。

北海道胆振東部地震に伴い、北海道内の複数の電子基準点で地殻変動が観測されたため、地震に伴う地殻変動量から電子基準点間の最大剪断歪を計算したところ、震源に近い電子基準点「厚真」と「門別」を含む基線では 2ppm を超過することが明らかとなった。このことから、電子基準点「厚真」、「門別」の測量成果を改定することとし、2018年9月13日に測量成果の公表を停止した(国土地理院, 2018)。

2.5.2 測量成果の改定

通常の測量成果の算出(たとえば、檜山ほか(2017))と同様に、学術用精密基線解析ソフトウェア GAMIT/GLOBK (Herring et al.,2010) を用い、電子基準点「厚真」、「門別」の測量成果を算出した。具体的には、成果を算出しようとする電子基準点2点の周囲にある電子基準点5点(「長沼」、「夕張」、「平取」、「苦小牧」、「静内」)の座標を固定して、基線解析及び網平均計算を行うものである。その際、地震直後には余効変動が生じている可能性を考慮し、地震発生から約2週間以後の9月23日から25日の3

日間の観測データを使用することとし、IGS 精密層を用いて基線解析を実施した。

電子基準点の基台には、現地で直接測量ができるように付属金属標が設置してあるため、電子基準点と共に付属金属標の測量成果を併せて改定する必要があった。付属金属標の水平成分(緯度・経度)の算出には、電子基準点「厚真」、「門別」の地震前後の測量成果の差分を加え、今回の地震に伴い局所的に傾斜した影響(水準測量による傾斜測定結果:表-1)を補正して求めた。また、付属金属標の標高は、基線解析で求めた電子基準点の標高からオフセット量(付属金属標から電子基準点のアンテナ底面までの高さ)を差し引いて算出した。なお、電子基準点の傾斜がもたらす高さ方向の変化は、オフセット量の計測における許容誤差(±5mm)に比べて十分小さいため、その影響は無視した。

改定した測量成果(付属金属標を含む)は、北海道胆振東部地震の発生から約1か月経った10月12日に公表を再開した。

3. まとめ

平成30年9月6日に発生した北海道胆振東部地震では、広域な停電が発生したため北海道内の多くの電子基準点でも商用電源による給電の途絶が発生した。しかし、電子基準点にはバッテリーが備えてあり、停電時には電源をバッテリーに切り替えて観測を継続したため、観測に支障は生じなかった。

一方、地震に伴って発生した通信中断により、リアルタイムでのデータ収集が行えない電子基準点が震源周辺等で生じたことから、REGARDによるリアルタイム処理での地殻変動の解析が十分に行えなかった。

この地震に伴う地殻変動を迅速に把握するため、特に、震源に近い電子基準点「厚真」と「門別」について、通信の二重化として装備してある携帯通信網を用いて観測データを個別に回収し、手動によるキネマティック解析を実施した。併せて、定常解析を用いた地殻変動の検出も迅速に行った。

得られた地殻変動情報は地震調査委員会等に提供するとともに、国土地理院ホームページから公開した。その際、震源近傍にある2点の電子基準点では、局所的な傾斜が含まれている可能性が懸念されたため、現地における傾斜測定を実施するまで、細かな精度を持つ地殻変動量として公表できなかった。

この地震に伴う地殻変動の発生に対し、2点の電子基準点において測量成果の改定が必要になった。これらの電子基準点の成果は復旧・復興の測量にとって重要であるため、それに支障がないようにするため、最短の期間で改定成果を公表した。

北海道胆振東部地震では、広域の停電が発生した

ため、電源を電子基準点に備え付けたバッテリーに切り替えることで長時間の観測を継続した。そのため、観測が停止した観測点は生じなかった。バッテリーの導入からは既に長い時間が経っているため、近い将来、商用電源の停電に対して、設計どおりの時間長について観測を継続できない可能性もある。

今回の経験を教訓として、バッテリーを更新するなど、引き続き強靱な電子基準点網の構築に努めて参りたい。

(公開日：令和元年12月27日)

参考文献

- Herring, T.A., R.W. King and S.C. McClusky (2010) : Documentation for the GAMIT/GLOBK GPS analysis software, Department of Earth, Atmospheric and Planetary Sciences, Massachusetts Institute of Technology, Cambridge.
- 川元智司, 檜山洋平, 古屋智秋, 佐藤雄大, 太田雄策, 西村卓也, 等々力賢 (2016) : 電子基準点リアルタイム解析システム (REGARD) プロトタイプの開発, 国土地理院時報, 128, 55-66.
- 気象庁, 災害時地震報告 平成30年北海道胆振東部地震, 災害時自然現象報告書 2019年第1号, 1.
- 国土地理院 (2018) : 平成30年北海道胆振東部地震に伴う基準点成果の公表停止及び再開について, <http://www.gsi.go.jp/sokuchikijun/H30-iburitoubu-earthquake-seika.html>, (accessed 22 Mar. 2019)
- 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.
- 檜山洋平, 川元智司, 古屋智秋, 甲斐玲子, 山口和典, 鈴木啓, 菅富美男, 嗟峨諭 (2016) : GEONETによる熊本地震に伴う地殻変動, 国土地理院時報, 128, 163-168.
- 檜山洋平, 川元智司, 甲斐玲子, 山口和典, 高松直史, 佐藤明日花, 宮原伐折羅, 三浦優司, 山下達也, 矢来博司, 森下遊 (2017) : GEONET及びSAR干渉解析による鳥取県中部の地震に伴う地殻変動, 国土地理院時報, 129, 33-41.
- 北海道地方測量部 (2019), 平成30年北海道胆振東部地震における北海道地方測量部の対応, 国土地理院時報, 132, 75-77.
- 地震調査研究推進本部地震調査委員会 (2018a) : 平成30年北海道胆振東部地震の評価 (平成30年9月6日公表), https://www.static.jishin.go.jp/resource/monthly/2018/20180906_iburi.pdf (accessed 29 Mar. 2019)
- 地震調査研究推進本部地震調査委員会 (2018b) : 平成30年北海道胆振東部地震の評価 (平成30年9月11日公表), https://www.static.jishin.go.jp/resource/monthly/2018/20180906_iburi_2.pdf (accessed 29 Mar. 2019)
- 地震調査研究推進本部地震調査委員会 (2018c) : 平成30年北海道胆振東部地震の評価 (平成30年10月12日公表), https://www.static.jishin.go.jp/resource/monthly/2018/20180906_iburi_3.pdf (accessed 29 Mar. 2019).
- 国土地理院 (2018a) : 平成30年9月6日03時08分頃の胆振(いぶり)地方中東部の地震に伴う地殻変動(暫定) http://www.gsi.go.jp/chibankansi/chikakukansi_20180906iburi_00001.html (accessed 29 Mar. 2019)
- 国土地理院 (2018b) : 平成30年北海道胆振東部地震に伴う地殻変動(暫定)(第2報) http://www.gsi.go.jp/chibankansi/chikakukansi_20180906iburi_00002.html (accessed 29 Mar. 2019)
- 国土地理院 (2018c) : 平成30年8月の地殻変動, <http://www.gsi.go.jp/WNEW/PRESS-RELEASE/2018-goudou0910.html> (accessed 29 Mar. 2019)
- 国土地理院 (2018d) : 平成30年北海道胆振東部地震に伴う地殻変動(第3報) http://www.gsi.go.jp/chibankansi/chikakukansi_20180906iburi_00005.html (accessed 29 Mar. 2019)
- 国土地理院 (2018e) : 地殻変動を観測した地震(地殻変動カタログ) <http://mekira.gsi.go.jp/catalogue/index.html> (accessed 29 Mar. 2019)