

GEONET による熊本地震に伴う地殻変動 Crustal Deformation of the 2016 Kumamoto Earthquake Detected by GEONET

測地観測センター

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・嵯峨諭

Geodetic Observation Center

Yohei HIYAMA, Satoshi KAWAMOTO, Tomoaki FURUYA, Reiko KAI,
Kazunori YAMAGUCHI, Akira SUZUKI, Fumio SUGA and Satoshi SAGA

要 旨

平成 28 年 4 月 14 日 21 時 26 分以降に発生した熊本県を中心とする一連の地震活動(「平成 28 年(2016 年) 熊本地震」. 以下「熊本地震」という.)に伴い, 電子基準点の観測データにより, 九州地方の広い範囲で地殻変動が観測された. 特に, 4 月 16 日に発生したマグニチュード (M) 7.3 の地震では, 熊本県阿蘇郡南阿蘇村の電子基準点「長陽」が南西方向に約 98cm 移動するなど非常に大きな地殻変動が確認された. この地殻変動は, GEONET の定常解析だけでなく, 電子基準点リアルタイム解析システム (REGARD) によっても捉えられた. また, この地震の発生後, 一連の地震活動域を中心に余効変動が観測されており, 地震発生から 4 ヶ月を経過した時点において継続している.

本稿では, 熊本地震に伴い観測された地殻変動, 地震に伴い緊急に実施した電子基準点の傾斜の確認作業及びソーラーパネルの設置作業について報告する.

1. はじめに

熊本地震に伴い, 電子基準点の観測データにより, 九州地方の広い範囲で地殻変動が観測された. 4 月 14 日 21 時 26 分に熊本県熊本地方の深さ約 10km で M6.5 の地震が発生した後, 4 月 16 日 1 時 25 分に同地方の深さ約 10km で M7.3 の地震が発生した. これらの地震により熊本県で最大震度 7 を観測した.

地震調査研究推進本部地震調査委員会 (2016a) によれば, 4 月 14 日の M6.5 の地震の発震機構は北北西-南南東方向に張力軸を持つ横ずれ断層型で, 地殻内の浅い地震である. この地震の余震分布と発震機構から推定される震源断層は北北東-南南西方向に延びる右横ずれ断層であった. この地震の震源域付近には日奈久断層帯が存在しており, この地震は, その高野-白旗区間の活動によると考えられている. また, 4 月 16 日の M7.3 の地震の発震機構は南北方向に張力軸を持つ横ずれ断層型で, 地殻内の浅い地震である. この地震の余震分布と発震機構から推定される震源断層は, 北東-南西方向に延びる右横ずれ断層で正断層成分を含むものであった. この地震

の震源域付近には布田川断層帯が存在しており, この地震は, 主に布田川断層帯の布田川区間の活動によると考えられている.

国土地理院では, 顕著な地震活動が発生した場合, GEONET の解析結果に基づき地殻変動を調査し, その結果を公表することとしている. GEONET の定常解析には, 最終解 (F3), 速報解 (R3), 迅速解 (Q3) の 3 つの種類がある (中川ほか, 2009). このうち, 最終解及び速報解は 24 時間の観測データを単位とした解であるが, 迅速解は 6 時間の観測データを単位とし, 3 時間ごとに 1 回算出される解のため, 迅速性が重要となる地殻変動監視に適したものである. 熊本地震の発生後, これまでの地震の場合と同様に定常解析 (速報解 (R3) 及び迅速解 (Q3)) により求めた地殻変動を公表した.

国土地理院は, 平成 23 年度から東北大学との連携の下, 新たな電子基準点リアルタイム解析システム「REGARD (Real-time GEONET analysis system for Rapid Deformation monitoring)」の開発を進めてきた (川元ほか, 2016). REGARD は, GEONET でリアルタイムに収集されるデータを解析し, 各電子基準点の変位量から断層モデルを計算することで即時に地震規模の推定が可能なシステムである. 熊本地震においては, REGARD によって地震に伴う地殻変動の観測に成功し, REGARD の運用を開始してから初めてその結果を公表した.

さらに, 測地観測センター電子基準点課では, 地震に伴う電子基準点のピラーの傾斜を確認するため現地調査を行うとともに, 阿蘇山周辺地域を対象に停電が発生した地域において地殻変動監視を継続させるため, ソーラーパネルの設置作業を行った.

2. 熊本地震に伴う地殻変動

2.1 4 月 14 日の M6.5 の地震及び 4 月 15 日の M6.4 の地震

4 月 14 日 21 時 26 分の M6.5 の地震発生直後から熊本県を中心に地震活動が活発化し, 4 月 15 日 0 時 3 分には M6.4 の地震 (最大震度 6 強) が発生した. これらの地震活動に伴う地殻変動を解析するため, 地震前の 4 月 7 日から 7 日間の速報解 (R3) を基準

として、地震後の迅速解 (Q3) (4月15日3時~9時までの1セッション) により、地震前後の地殻変動を求めた。その結果は第1報としてウェブページ (http://www.gsi.go.jp/chibankansi/chikakukansi_kumamoto20160414.html#02) に掲載するとともに4月15日16時から開催された政府の地震調査研究推進本部地震調査委員会臨時会に報告した (地震調査研究推進本部地震調査委員会, 2016b)。

最終解 (F3) が算出された後、地殻変動の精査を行い、4月7日から7日間の最終解 (F3) を基準として、地震後の迅速解 (Q3) (4月15日3時~9時から18時~24時のセッションまでの計6セッション) により、地震前後の地殻変動を求めた (図-1)。なお、このような「地殻変動を観測した地震」については国土地理院ウェブサイトにおいてアーカイブされており、次の URL から確認することができる。

「GEONETにより地殻変動を観測した地震一覧」
<http://mekira.gsi.go.jp/catalogue/index.html>

これらの地震の震央の西に位置する電子基準点「城南」(熊本県熊本市南区) では北北東方向に約20cmの移動と上下方向に約1cmの沈降、震央の北に位置する電子基準点「熊本」(熊本県熊本市北区) では北北西方向に約12cmの移動と上下方向に約4cmの隆起が観測された。その他、熊本県を中心に地震に伴う地殻変動が観測されており、これらの地殻変動の特徴は、今回の地震が右横ずれ断層運動であることと調和的である。

また、電子基準点「城南」及び「熊本」に関する基線変化グラフ (固定局「三隅 (島根県)») を図-2に示す。これらの地震に伴ってステップ状の変位が確認できるが、迅速解は6時間を単位として3時間ごとに算出されるため、どちらの地震でどれだけ変位したかについては、従来の定常解析では時間分解能が不足しており不明である。

一方、電子基準点リアルタイム解析システム (REGARD) による「熊本」及び「城南」の1秒単位の基線変化グラフ (固定局「北波多 (佐賀県)») を図-3及び図-4に示す。図-3は4月14日のM6.5の地震、図-4は4月15日のM6.4の地震前後の変位を示す。地震が発生した時刻 (4月14日21時26分及び4月15日0時3分) にステップ状の変位が認められることから、それぞれの地震に伴って地殻変動があったことが確認できる。

図-3では、最初のM6.5の地震に伴って「熊本」が約10cm北西に移動し、「城南」が約6cm北東に移動したことが分かる。さらに「城南」では、図-4に示すM6.4の地震に伴って、10cm以上北に移動したことが分かる。このように、REGARDの1秒単位のリアルタイム解析により時間分解能が向上したことから、複数の地震が時間的に近接して発生した場合

でも、それぞれの地殻変動を分離して解析することが可能となった。

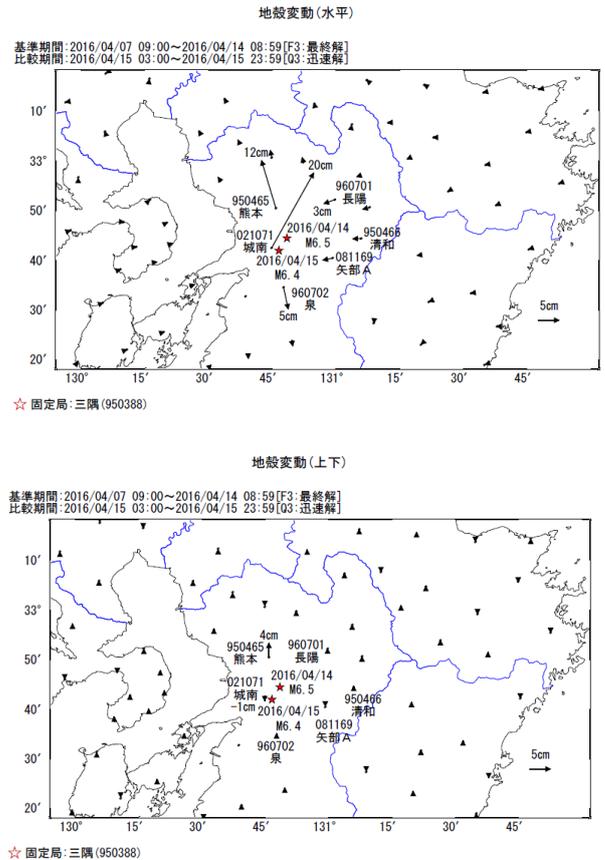


図-1 定常解析による4月14日のM6.5の地震及び4月15日のM6.4の地震に伴う地殻変動 (水平成分 (上図) 及び上下成分 (下図)). 赤色の★は、それぞれの地震の震央を示す。

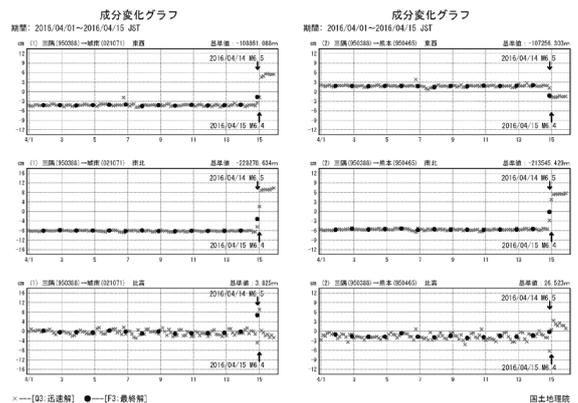


図-2 4月14日のM6.5の地震及び4月15日のM6.4の地震に伴う「城南」及び「熊本」の基線変化グラフ (固定局「三隅 (島根県)»)。

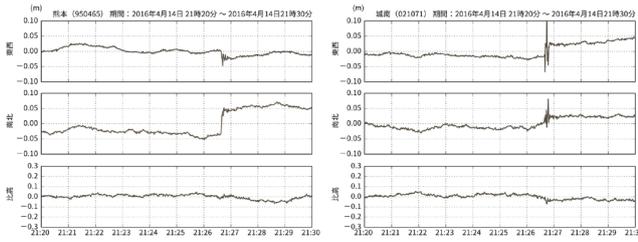


図-3 リアルタイム解析による4月14日のM6.5の地震に伴う「熊本」(左図)及び「城南」(右図)の基線変化グラフ(固定局「北波多(佐賀県)」)

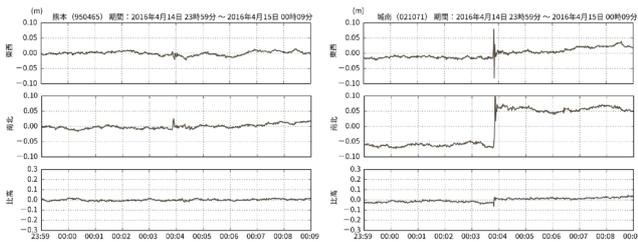


図-4 リアルタイム解析による4月15日のM6.4の地震に伴う「熊本」(左図)及び「城南」(右図)の基線変化グラフ(固定局「北波多(佐賀県)」)

2.2 4月16日のM7.3の地震

4月16日1時25分に熊本県熊本地方の深さ約10kmでM7.3の地震が発生した。この地震に伴う地殻変動を緊急的に解析するため、REGARDのリアルタイム解析結果により震央付近の電子基準点の地殻変動を調査した。この地震の震央の東に位置する電子基準点「長陽」(熊本県阿蘇郡南阿蘇村)の1秒単位の基線変化グラフ(固定局「北波多(佐賀県)」)を図-5に示す。地震が発生した時刻(4月16日1時25分)にステップ状の変位が認められることから、この地震に伴って地殻変動があったことが確認できる。また、各電子基準点で観測された地震時のステップ状の変位量から地殻変動ベクトル図を作成し、第1報としてウェブページ(http://www.gsi.go.jp/chibankansi/chikakukansi_kumamoto20160414.html#03)に掲載した(図-6)。基線変化グラフのばらつきの傾向から、1cm単位の地殻変動を表現することは困難と判断されたため、地殻変動量は10cmを単位に丸めて表示することとした。その結果、電子基準点「長陽」で南西方向に約1m、「熊本」で東北東に約80cmの移動など、非常に大きな地殻変動を観測した。このような地震に伴う顕著な地殻変動をREGARDによってリアルタイムで解析した例は今回が初めてである。さらに、今回初めてREGARDによってリアルタイムで震源断層モデル(Mw 7.0)が推定されたが、本稿ではその結果については割愛する。詳細については、Kawamoto et al. (2016)を参照されたい。

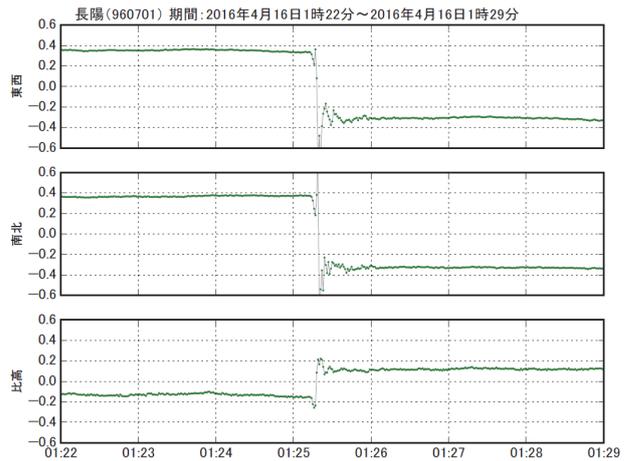


図-5 リアルタイム解析による4月16日のM7.3の地震に伴う「長陽」の基線変化グラフ(固定局「北波多(佐賀県)」)

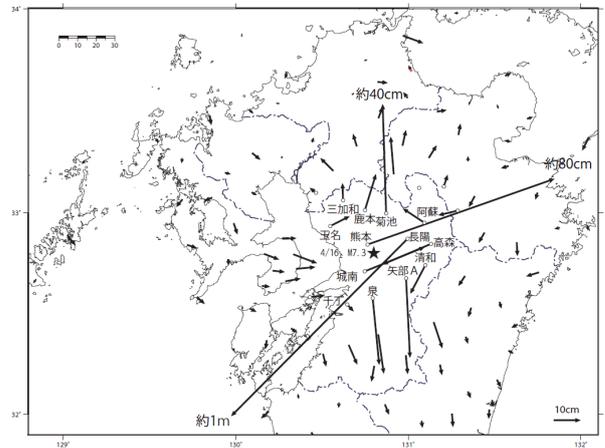


図-6 リアルタイム解析による4月16日のM7.3の地震に伴う地殻変動(水平)。★は震央を示す。

REGARDのリアルタイム解析結果について、これまでに実際の地震時に評価した例がなかったため、その結果の妥当性については、定常解析によって評価することが必要である。しかし、地震後の定常解析の結果を待っていると地震発生から約9時間の時間を要するため、緊急解析(S3)を行うことによって地殻変動を確認した。

4月16日のM7.3の地震が発生する約25時間前(4月15日0時3分)にはM6.4の地震が発生し、地殻変動を伴った。このため、地震前の迅速解(Q3)(4月15日3時~9時から18時~24時のセッションまでの計6セッション)を基準として、地震後の緊急解析(S3)(4月16日2時~6時まで)により、地震前後の地殻変動を求めた。その結果は第2報としてホームページ(http://www.gsi.go.jp/chibankansi/chikakukansi_kumamoto20160414.html#04)に掲載するとともに4月17日10時から開催された地震調査委員

会臨時会に報告した（地震調査研究推進本部地震調査委員会，2016c）。

その後、再度地殻変動の精査を行うため、地震後のデータを地震後4時間のS3解析から、約1日分の迅速解(Q3)(4月16日6時~12時から4月17日0時~6時のセッションまでの計7セッション)に更新した。地震前のデータは第2報と同じである。これによって求めた地震前後の地殻変動を図-7に示す。

GEONETの定常解析(Q3)の結果によると、M7.3の地震に伴い、電子基準点「長陽」で南西方向に約98cmの移動、上下方向に約24cmの隆起、「熊本」で東北東方向に約76cmの移動、上下方向に約19cmの沈降など、熊本県を中心に大分県、長崎県などを含む広い範囲で地殻変動が確認された(図-7)。これらの地殻変動の特徴は、今回の地震が右横ずれ断層運動であることと調和的である。

REGARDの結果は、GEONETの定常解析の結果と比較すると、得られた地殻変動の水平成分は概ね±5cm程度の範囲で一致していることが分かった(図-6, 7)。これは、今後 REGARDによって緊急的に地殻変動の解析を行う際の精度の1つの目安になると考えられる。

また、電子基準点「長陽」及び「熊本」に関する基線変化グラフ(固定局「三隅(島根県)」)を図-8に示す。この地震に伴ってステップ状の変位が確認できる。

3. 熊本地震の余効変動

図-9は、4月16日のM7.3の地震後の地殻変動を示した図である。地震発生後の4月17日から8月下旬までの約4ヶ月間に電子基準点「長陽」で南西方向に約5cm、「泉」(熊本県八代市)で南方向に約4cmの水平変動が確認された。また、上下方向では、「長陽」で約5cmの隆起、「阿蘇」(熊本県阿蘇市)で約3cmの沈降が見られている。これらの余効変動では、4月16日のM7.3の地震に伴う地殻変動と概ね同じ向きの変位が見られている。

また、図-10は、電子基準点「長陽」及び「泉」の基線変化グラフである。いずれの電子基準点も、地震発生から4ヶ月を経過した時点において熊本地震の余効変動が継続していることを示している。

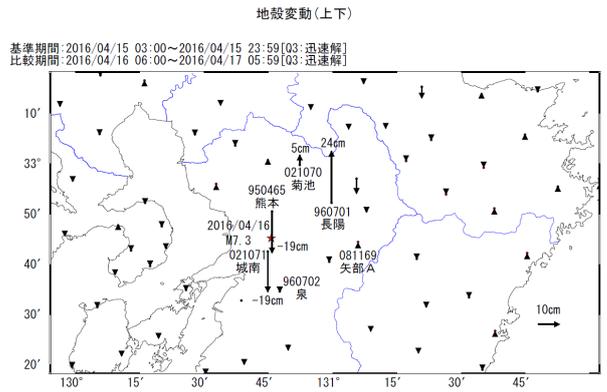
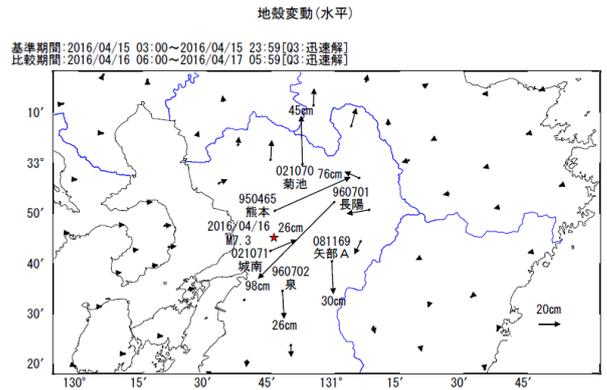


図-7 定常解析(Q3)による4月16日のM7.3の地震に伴う地殻変動(水平成分(上図)及び上下成分(下図))。赤色の★は、地震の震央を示す。

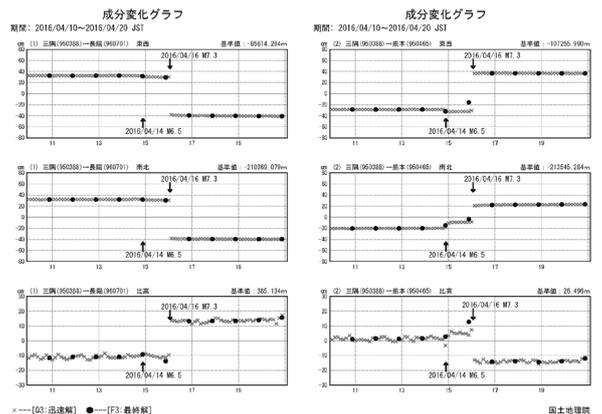


図-8 4月16日のM7.3の地震に伴う「長陽」及び「熊本」の基線変化グラフ(固定局「三隅(島根県)」)

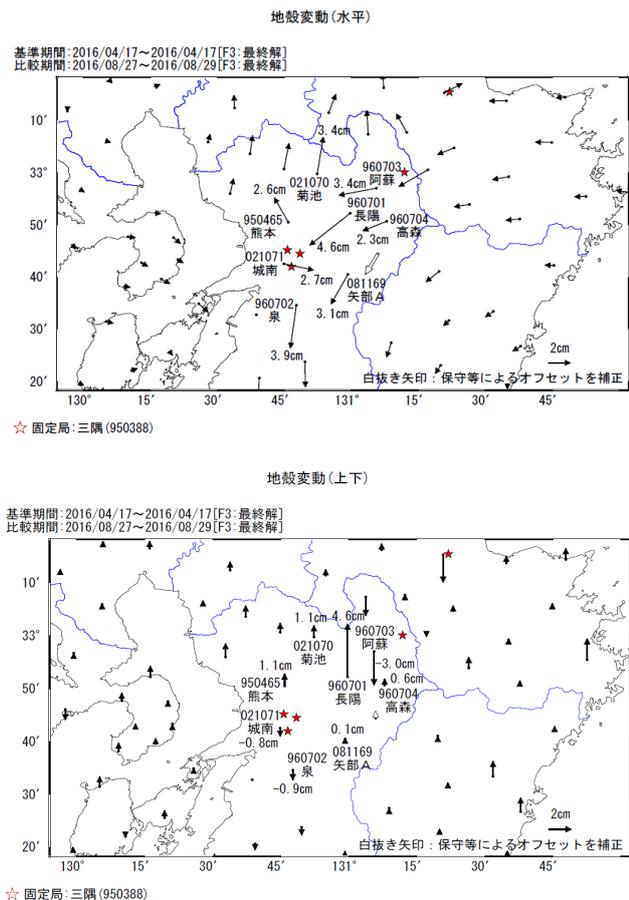


図-9 定常解析による4月16日のM7.3の地震以降の余効変動(水平成分(上図)及び上下成分(下図)). 赤色の★は、地震の震央を示す。

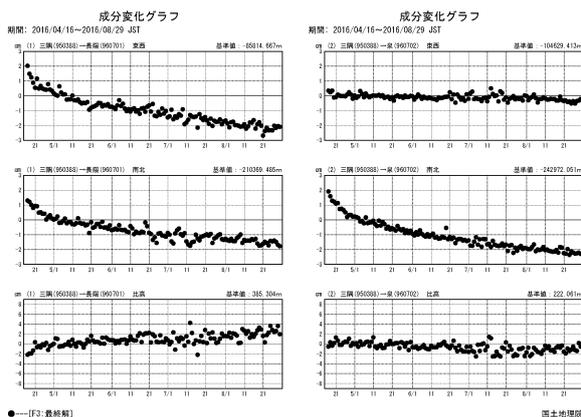


図-10 4月16日のM7.3の地震以降の「長陽」及び「泉」の基線変化グラフ(固定局「三隅(島根県)」)

4. ピラーの傾斜の確認及びソーラーパネルの設置作業

4月14日のM6.5の地震後の4月15日に九州地方測量部において、変動量の大きかった電子基準点「城

南」のピラー傾斜測定を実施した。電子基準点では、ピラーの傾斜量を測定するため、基礎上面の4隅4箇所に固定鈎を設置し、定期的無比高観測を実施している。前回(平成24年)観測時から現況に変化があったため、全ての固定鈎では比高観測を実施できなかったが、観測可能な固定鈎での前回観測値との比較により、ピラーが傾斜していないことを確認した。

4月16日のM7.3の地震被害の影響から停電の長期化が懸念された阿蘇山周辺地域の電子基準点「阿蘇」,「長陽」及び「高森」において、地震直後の4月18日から19日にソーラーパネルの設置を行うとともに、ピラーの傾斜測定を実施した。

ピラーの傾斜測定の結果については、電子基準点「阿蘇」及び「高森」において、前回値(平成27年)と比較し、ピラーの傾斜がないことを確認した。しかし、地震時の変動量が大きかった電子基準点「長陽」においては、電子基準点周囲のアスファルト舗装上面や電子基準点基礎の上面モルタルに亀裂が見られ(写真-1)、その影響により固定鈎もぐらつく状態であったため、厳密な傾斜量が確認できなかった。



写真-1 電子基準点「長陽」における傾斜測定

ソーラーパネルは、停電が長期化してもリアルタイムデータ取得を継続させるよう考慮し設置した(写真-2)。



写真-2 ソーラーパネル設置前後の電子基準点「長陽」

5. まとめ

平成28年4月16日1時25分に熊本県熊本地方で発生したM7.3の地震に伴い、電子基準点「長陽」で南西方向に約98cmなど、熊本県を中心とした地域で顕著な地殻変動が観測された。熊本地震の一連の地震活動においてGEONETが記録した地殻変動

は、政府の地震調査研究推進本部地震調査委員会に報告し、地震活動の評価に役立てていただいているところである。また、今回の地震では、電子基準点リアルタイム解析システム(REGARD)によって地震に伴う非常に大きな地殻変動の観測に成功し、REGARDの運用を開始してから初めてその結果を公表した。

さらに、阿蘇山周辺の停電が発生した地域において地殻変動監視を継続させるため、地震直後の4月18日から19日にソーラーパネルの設置作業を行った。これにより、熊本地震に伴う停電による観測の停止は発生しなかった。

震央付近の電子基準点では、熊本地震の発生から4ヶ月を経過した現在でも余効変動が観測されており、国土地理院では今後ともGEONETによる地殻変動の監視に努めていきたい。

(公開日：平成28年11月10日)

参考文献

- 地震調査研究推進本部地震調査委員会(2016a)：平成28年(2016年)熊本地震の評価，http://www.static.jishin.go.jp/resource/monthly/2016/2016_kumamoto_3.pdf (accessed 20 Sep. 2016).
- 地震調査研究推進本部地震調査委員会(2016b)：平成28年(2016年)熊本地震の評価，http://www.static.jishin.go.jp/resource/monthly/2016/2016_kumamoto.pdf (accessed 20 Sep. 2016).
- 地震調査研究推進本部地震調査委員会(2016c)：平成28年4月16日熊本県熊本地方の地震の評価，http://www.static.jishin.go.jp/resource/monthly/2016/2016_kumamoto_2.pdf (accessed 20 Sep. 2016).
- 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.
- Kawamoto, S., Hiyama, Y., Ohta, Y., Nishimura, T. (2016) : First Result from the GEONET Real-time Analysis System (REGARD): the Case of the 2016 Kumamoto Earthquakes. Submitted to the special issue in Earth, Planets and Space.
- 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.