

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 Crustal Deformation of the 2016 Central Tottori Earthquake Detected by GEONET and InSAR

測地観測センター 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
Geodetic Observation Center Yohei HIYAMA, Satoshi KAWAMOTO, Reiko KAI,
Kazunori YAMAGUCHI, Naofumi TAKAMATSU and Asuka SATO
測地部 宮原伐折羅・三浦優司・山下達也
Geodetic Department Basara MIYAHARA, Yuji MIURA and Tatsuya YAMASHITA
地理地殻活動研究センター 矢来博司・森下遊
Geography and Crustal Dynamics Research Center
Hiroshi YARAI and Yu MORISHITA

要 旨

平成 28 年 10 月 21 日 14 時 07 分に発生した鳥取県中部の地震（マグニチュード (M) 6.6) に伴い、電子基準点の観測データにより、鳥取県東伯郡湯梨浜町の電子基準点「羽合」が北北東方向に約 7cm 移動するなど、鳥取県周辺で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、だいち 2 号の観測データを用いた SAR 干渉解析の結果によれば、今回の地震の震央周辺に地殻変動の面的な広がりが見られ、水平方向では震央の北東で北東向き、北西で南東向き、南西で南西向き、南東で北西向き、上下方向では震央の北東及び南西で隆起、北西及び南東で沈降が検出された。

政府の地震調査研究推進本部地震調査委員会によると、今回の地震は北北西－南南東方向に延びる左横ずれ断層運動と評価されており、観測された地殻変動は、断層運動から予想される地殻変動と調和的である。

本稿では、鳥取県中部の地震に伴い GEONET 及び SAR 干渉解析により観測された地殻変動、この地震に伴う電子基準点の成果改定について報告する。

1. はじめに

10 月 21 日 14 時 07 分に鳥取県中部の深さ約 10km で発生した M6.6 の地震に伴い、鳥取県倉吉市、東伯郡湯梨浜町及び北栄町で最大震度 6 弱の揺れが観測され、電子基準点の観測データにより、鳥取県周辺で地殻変動が観測された。

地震調査研究推進本部地震調査委員会 (2016a) によれば、この地震の発震機構は西北西－東南東方向に圧力軸を持つ横ずれ断層型で、地殻内の浅い地震である。この地震の発震機構と今回の地震活動の分布から推定される震源断層は北北西－南南東方向に延びる左横ずれ断層であったとされている。

2. GEONET による地殻変動

2.1 定常解析とリアルタイム解析

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)。鳥取県中部の地震の発生後、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。

また、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)」(川元ほか, 2016, Kawamoto et al., 2016, Kawamoto et al., 2017) 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。平成 28 年 4 月 16 日に発生した熊本地震 (M7.3) では、REGARD の解析結果に基づき水平方向に最大約 1m などの大きな地殻変動をいち早く公表したところである (檜山ほか, 2016) が、次の 2.2 で述べるとおり、地震発生直後の公表には至らなかった。

2.2 リアルタイム解析結果

鳥取県中部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。この地震の震央の北に位置する電子基準点「羽合」(鳥取県東伯郡湯梨浜町) 及び「東伯 A」(鳥取県東伯郡琴浦町) の 1 秒単位の基線変化グラフ (固定局「小松 (石川県)」) を図-1 に示す。地震が発生した時刻 (10 月 21 日 14 時 07 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た(図-2). その結果, 「羽合」で北北東方向に約 5cm 移動するなどの地殻変動を観測した. しかし, この地殻変動ベクトル図では, 震央からある程度離れた電子基準点においても数 cm 程度の変位が見られており, ノイズである可能性が考えられることから, リアルタイム解析結果の公表は見送ることとした.

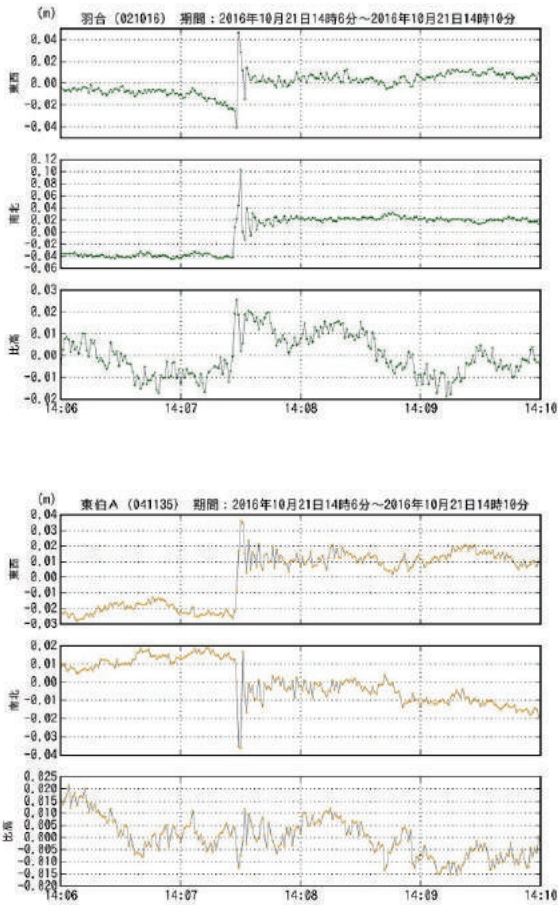


図-1 リアルタイム解析による鳥取県中部の地震に伴う「羽合」(上図)及び「東伯A」(下図)の基線変化グラフ(固定局「小松(石川県)」)

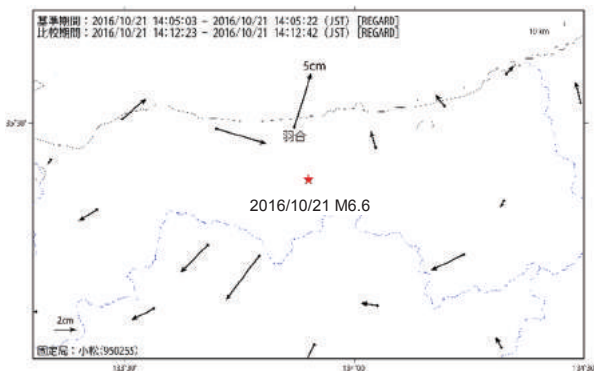


図-2 リアルタイム解析による鳥取県中部の地震に伴う地殻変動(水平). 赤色の★は震央を示す.

2.3 定常解析結果

鳥取県中部の地震に伴う地殻変動を把握するため, 地震前の10月13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)(10月21日15時~21時までの1セッション)により地震前後の観測データを解析し地殻変動を求め, その結果を第1報として国土地理院ウェブサイトに掲載した.

(http://www.gsi.go.jp/chibankansi/chikakukansi_tottori_20161021.html)

また, 10月22日15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は, 地震前の10月14日から7日間の速報解(R3)を基準として, 地震後の10月21日18時~24時から22日0時~6時までの3セッションのデータを追加して報告した(地震調査研究推進本部地震調査委員会, 2016a).

さらに地殻変動の精査を行うため, 地震前の10月14日から7日間を基準として, 地震後の10月22日から7日間のデータにより地震前後の地殻変動を求めた. この結果を図-3に示す.

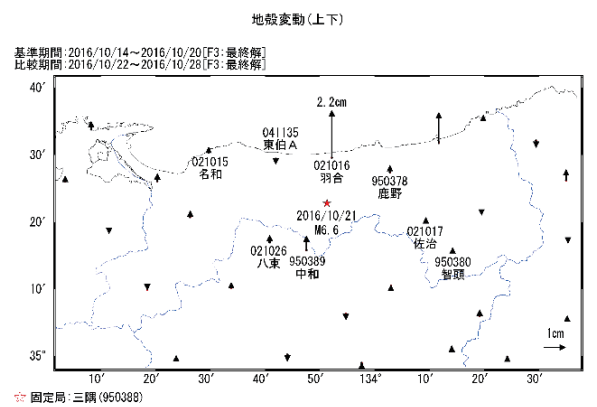
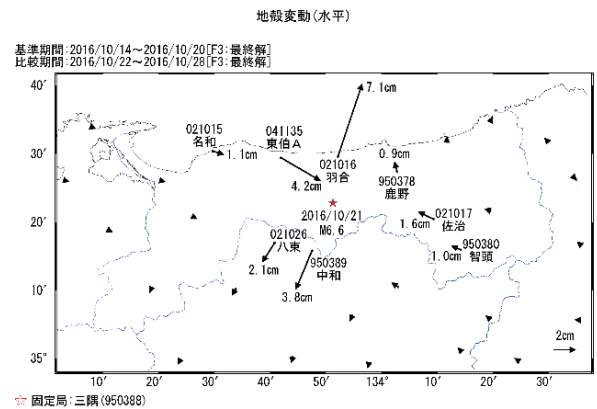


図-3 定常解析(F3)による鳥取県中部の地震に伴う地殻変動(水平成分(上図)及び上下成分(下図)). 赤色の★は震央を示す.

鳥取県中部の地震に伴い、「羽合」で北北東方向に約 7cm の移動, 上下方向に約 2cm の隆起, 「東伯 A」で東南東方向に約 4cm の移動など, 鳥取県から岡山県北部の電子基準点で地殻変動が確認された。これらの地殻変動の特徴は, 今回の地震が左横ずれ断層運動であることと調和的である。

2.4 現地調査結果

変動量が最も大きい「羽合」において, 10 月 31 日～11 月 1 日に中国地方測量部が現地調査を行い, ピラー傾斜測定及び「羽合」周辺の三角点における GNSS 観測を実施した。

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 箇所に固定鉋を設置し, 定期的に比高観測を実施している。前回 (平成 27 年 10 月) の観測値と比較し, ピラーが傾斜していないことを確認した。また, 過去に電子基準点を既知点として設置された「羽合」周辺の三角点において GNSS 観測を実施し, 変動の小さい「鳥取」を固定点とする基線解析を行った。「羽合」及びその周辺の三角点の変動量を比較した結果を図-4 に示す。四等三角点「漆原」においてはやや小さいものの, 「野方」及び「高辻」においては約 11cm の北向きの変動が確認され, 「羽合」の傾向と比較し, 大きな差がないことを確認した。

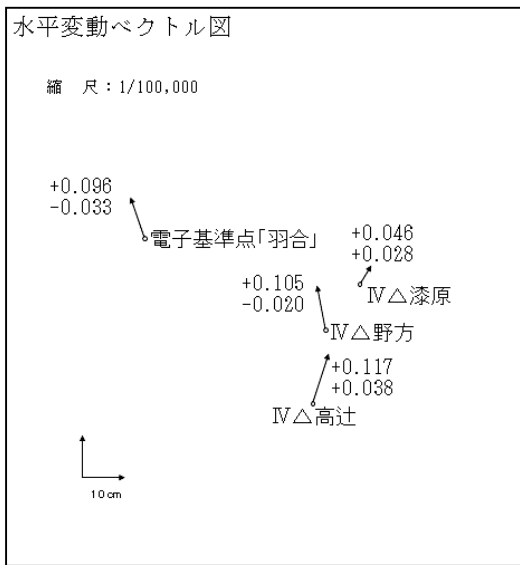


図-4 電子基準点「鳥取」を固定点とした「羽合」及びその周辺の三角点の変動量

2.5 リアルタイム解析と定常解析結果の比較

REGARD のリアルタイム解析結果について, 熊本地震の例 (檜山ほか, 2016) では, GEONET の定常解析の結果と比較して水平成分は概ね±5cm 程度の範囲で一致していたが, 今回の地震のように数 cm

程度の地殻変動を評価した例はなかった。今回の地震では, 図-2 及び図-3 に示す「羽合」, 「東伯 A」, 「中和」及び「八束」において, REGARD の結果と GEONET の定常解析の結果は概ね一致していることが分かった。一方, これらの電子基準点の周辺で, REGARD の結果に見られる 2~3cm 程度の変位は, 定常解析結果には明瞭には認められず, 2~3cm 程度の変位はノイズレベルの可能性のあるものと考えられる。

「羽合」及び「東伯 A」に関する基線変化グラフ (固定局「三隅 (島根県)») を図-5 に示す。この地震に伴うステップ状の変位が確認できる。

なお, 今回の鳥取県中部の地震のような「地殻変動を観測した地震」については, 観測された地殻変動が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>

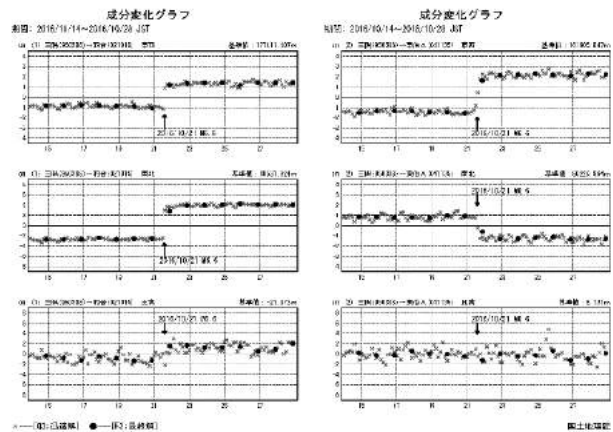


図-5 鳥取県中部の地震に伴う「羽合」及び「東伯 A」の基線変化グラフ (固定局「三隅 (島根県)»)

3. SAR 干渉解析による地殻変動

3.1 SAR 干渉解析と 3 次元変動場の推定

人工衛星に搭載された合成開口レーダー (SAR : Synthetic Aperture Radar) による干渉解析 (以下「干渉 SAR」という。) は, 地震に伴う地殻変動の空間分布を効率よく捉えることができるリモートセンシング技術である。干渉 SAR には, 地上に観測機器の設置が不要であることや高い空間分解能で広域を一度に観測できるといった特徴がある。特に, 内陸の活断層で発生する地震では, 震源断層の近傍で非常に複雑な地表面の変動が生じるため, 地震波形を用いた解析や GNSS 観測網のみで捉えた地殻変動から推定した地震発生メカニズムでは, 地震を引き起こした地下の断層の複雑な動きを正しく把握すること

は困難な場合が多い。上空から地殻変動の詳細な空間分布を把握できる干渉 SAR は、内陸地震での変動検出において、他の技術では難しい複雑な地表面の変動の詳細な把握に大きな力を発揮する。

干渉 SAR では、同一地点での 2 時期の電波の波の差分（位相差）を測定することで、この 2 時期に衛星と地表面の間で生じた距離の変化を数 cm 精度で検出が可能である。ただし、把握できるのは衛星と地表の間で生じた一次元の変動のみであるため、一つの解析結果からでは、南北・東西・上下いずれの方向で生じた変動が把握することはできない（図-6）。

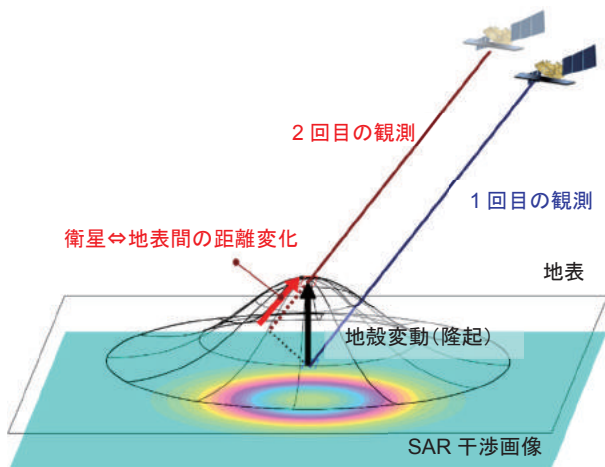


図-6 干渉 SAR の原理

干渉 SAR で二次元・三次元での変動量を得るためには、地表面を様々な方向から観測して複数の方向から変動を把握し、それらを用いて求める方向の変動を分離する必要がある。国土地理院でもこれまで、東西 2 方向から観測した SAR 干渉画像を用いて準東西／準上下の変位量を求める 2.5 次元解析（たとえば、Fujiwara et al., 2000）、画像の画素のずれから電波照射方向及び衛星進行方向の 2 方向の変動を検出するピクセルオフセット解析（たとえば、Tobita et al., 2001）、衛星進行方向の周波数帯域分割により衛星進行方向の変動を検出する MAI 法（たとえば、Kobayashi et al., 2017）といった手法を用いて解析を実施している。

宇宙航空研究開発機構（JAXA）は、2011 年まで

運用された陸域観測技術衛星「だいち（ALOS）」の後継となる SAR 専用衛星、陸域観測技術衛星「だいち 2 号（ALOS-2）」を 2014 年 5 月に打ち上げた。だいち 2 号では、だいちと比べて空間分解能や回帰日数が向上するとともに、衛星の進行方向に対して右左両方の向きに観測が可能となった。これによって、北行・南行軌道で各々左右の観測が可能となり、「北行軌道・右観測」「北行軌道・左観測」「南行軌道・右観測」「南行軌道・左観測」の 4 方向から SAR 干渉解析を行うことが可能となった。従来の 2.5 次元解析では、推定できる成分が準東西・準上下の 2 成分に限られる、ピクセルオフセット解析や MAI 法を利用した 3 次元解析では推定変動量に数 10cm に及ぶ誤差が含まれるといった課題があったが、だいち 2 号では、4 方向の観測を組み合わせることで、誤差の少ない 3 次元の変動量の推定が可能となった。

2015 年 8 月に桜島で発生したマグマ貫入イベントでは、国土地理院はだいち 2 号が観測した 4 方向の SAR 干渉画像を統合し、3 次元変位量を推定する干渉 SAR 3 次元解析を実施した。解析では、干渉 SAR の変動検出精度に近い精度でマグマ貫入時に生じた 3 次元の地殻変動の詳細を明らかにすることに成功した（Morishita et al., 2016）。国土地理院は、鳥取県中部の地震でも同様に、だいち 2 号が撮像した緊急観測データを迅速に SAR 干渉解析するとともに、4 方向から撮影した SAR 干渉画像を用いて地震に伴う 3 次元の地殻変動を推定した。

3.2 だいち 2 号による緊急観測

鳥取県中部の地震の発生後、国土地理院は、地震予知連絡会 SAR 解析ワーキンググループの事務局として、だいち 2 号による緊急観測を JAXA に速やかに要求した。

だいち 2 号による緊急観測は、地震発生の翌日である 2016 年 10 月 22 日から 10 月 26 日にかけて計 4 回実施された（表-1）。なお、4 回の観測は、それぞれ「北行軌道・左観測」「南行軌道・左観測」「北行軌道・右観測」「南行軌道・右観測」と異なる 4 方向からの観測で、地震後わずか 5 日間で撮像された。

表-1 だいち 2 号による緊急観測と解析ペア一覧

記号	観測日時 (JST)	アーカイブ 画像	取得間隔	衛星進 行方向	電波照 射方向	観測モード	入射角 (画像中心)	垂直基線長
a	10/22 23:17	2015/ 1/17	644 日間	北行	左	高分解能(3m)	43.4°	+172m
b	10/23 12:45	2014/12/7	686 日間	南行	左	高分解能(3m)	36.2°	+10m
c	10/24 23:58	2016/ 5/23	154 日間	北行	右	高分解能(3m)	32.8°	+54m
d	10/26 12:10	2016/ 8/ 3	84 日間	南行	右	高分解能(3m)	32.5°	+1m

3.3 SAR 干渉解析

国土地理院は、だいち 2 号の観測データを取得次第、速やかに SAR 干渉解析を実施し、国土地理院ウェブサイトで公表するとともに地震調査研究推進本部地震調査委員会及び地震予知連絡会に提出した。4 回の緊急観測による SAR 干渉画像を図-7 に示す。SAR 干渉画像から把握される地殻変動は、北北西-南南東に延びる左横ずれ断層運動による地殻変動と調和的であった。

3.4 干渉 SAR 3 次元解析

Morishita et al., (2016) の手法に従い、緊急観測による 4 方向の SAR 干渉画像を用いて、鳥取県中部の地震に伴う 3 次元の地殻変動を推定した。推定では、最大変位量は 10cm 程度と小さいながら震源断層のメカニズムとよく整合する 4 象限型の空間分布を持つ地殻変動が検出された(図-8)。変動の上下成分は、震央の北東及び南西で隆起、北西及び南東で沈降を示し、水平成分は、震央の北東で北東向き、北西で南東向き、南西で南西向き、南東で北西向きを示すことから、北北西-南南東に延びる左横ずれ断層運動を強く示唆している。

推定した 3 次元の変動量の標準偏差は、東西成分で約 1cm、南北成分で約 4cm、上下成分で約 1cm となった。この高精度な 3 次元分布の情報は、左右両方向の観測が可能ないだいち 2 号を用いた SAR 干渉解析によって達成されるもので、従来の解析手法や他の SAR 衛星で実現することは難しい。また、GEONET を構成する電子基準点の配点密度は、概ね 20km 間隔で、GEONET では震源付近の詳細な地殻変動を得ることは出来ないことから、地震のメカニズムを把握する上で不可欠な震源付近の詳細な 3 次元の地殻変動はだいち 2 号によってはじめてもたらされた貴重な情報である。

3.5 干渉 SAR による地殻変動の活用

国土地理院は、SAR 干渉解析(干渉 SAR 3 次元解析を含む)と GEONET から把握した地震に伴う地殻変動を用いて、北北西-南南東方向に延びる高角の断層が左横ずれる的に動いたとする震源断層モデルを推定した(国土地理院地理地殻活動研究センター地殻変動研究室, 2016)。また、地震調査委員会は、地震活動の分布、GEONET 解析に加え、SAR 干渉解析による地殻変動の空間分布についても、震源断層を北北西-南南東方向に延びる長さ約 10km の左横ずれ断層と推定する際の判断材料としており(地震調

査研究推進本部地震調査委員会, 2016b)、だいち 2 号を用いた SAR 干渉解析は、GEONET による地殻変動監視と同様に地震活動の評価に不可欠なものとなっている。

4. 電子基準点の測量成果改定

4.1 成果改定範囲の検討

電子基準点や三角点等の基準点は、道路・河川等の各種公共事業や地籍調査事業における測量の位置の基準として広く利用されている。地震に伴う顕著な地殻変動が観測され、公共測量等に使用できないことが想定される場合は、国土地理院は当該地域の基準点測量成果の公表を停止し、測量成果の改定を行ってきた。

鳥取県中部の地震の場合、電子基準点における最大の地殻変動は「羽合」の北北東方向に約 7cm である。一方、断層を挟んで南側に位置する「中和」は南南西方向に約 4cm 移動している。これらの電子基準点 2 点のみを既知点とする測量では、公共測量作業規程の準則第 42 条第 1 項第 2 号ロ (3) (i) に定める電子基準点間の閉合差の許容範囲(水平)

$$60 \text{ mm} + 20 \text{ mm}\sqrt{N} \quad (N: \text{辺数})$$

において、例えば、辺数 N を 2 辺とした場合の許容範囲 88mm を超過し、測量作業の実施に影響が生じることが想定される。このため、少なくとも電子基準点「羽合」の成果改定を行うことが必要と判断した。

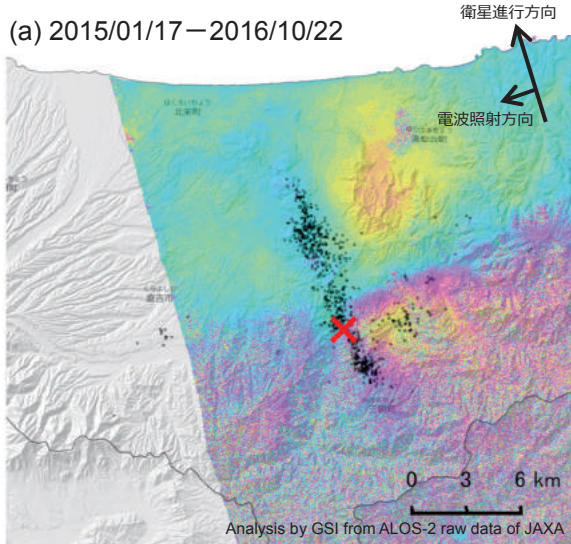
また、電子基準点の成果改定を行うことで生じる改定未実施の三角点や公共基準点との間の不整合について検討を行った。これまで大規模な地震時には、GEONET、SAR 干渉解析及び震源断層モデルの結果と、公共測量への影響を総合的に考慮した上で、三角点の再測量や地震に伴う変動補正パラメータの構築を検討・実施してきた。鳥取県中部の地震の場合、干渉 SAR3 次元解析(図-8)の結果より、最大変動量は 10cm 程度と推定される。「羽合」の成果を改定した場合において近傍の三角点との間に生じる不整合は、公共測量作業規程の準則第 42 条第 1 項第 1 号ロに定める水平位置の閉合差

(1 級基準点測量の場合)

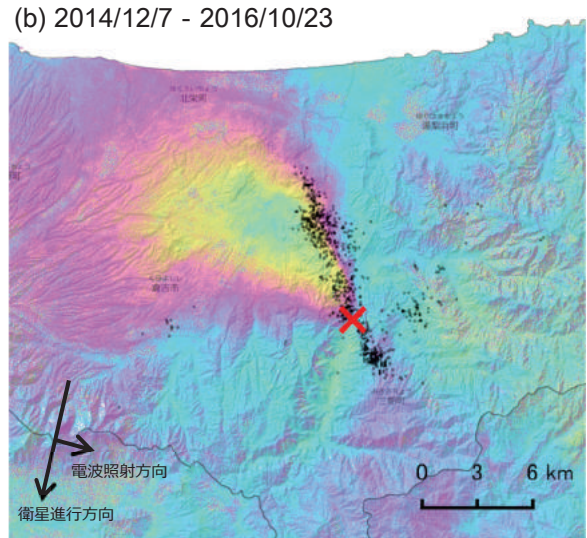
$$100 \text{ mm} + 20 \text{ mm}\sqrt{N} \Sigma S$$

(N: 辺数, S: 路線長 (km))

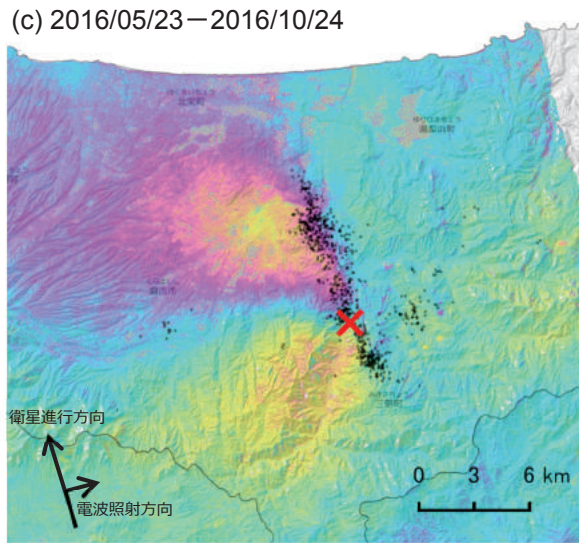
の許容範囲内と想定される。このことから、改定する電子基準点の周辺に位置する三角点の成果の公表停止及び改定は行う必要がないと判断した。



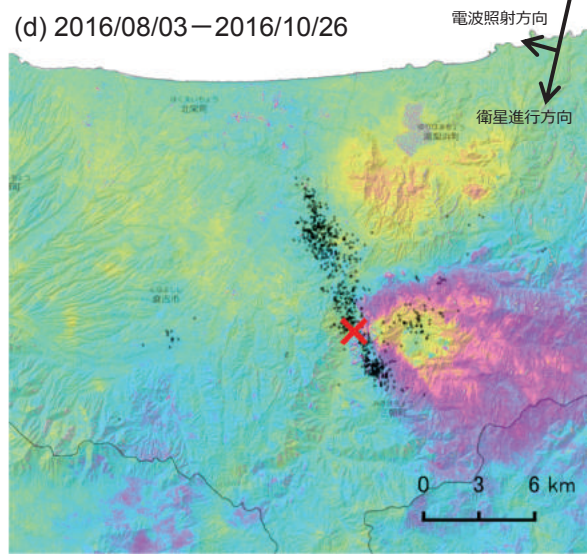
震央の北東側で最大約 6cm の衛星に近づく向きの変動が見られる。また、震央の南東側で衛星から遠ざかる向きの変動が見られる。



震央の北西側で最大約 12cm の衛星から遠ざかる向きの変動が見られる。



震央の北西側で最大約 9cm の衛星から遠ざかる向きの変動が見られる。また、震央の南西側で、最大約 6cm の衛星に近づく向きの変動が見られる。



震央の北東側で最大約 6cm の衛星に近づく向きの変動が見られる。また、震央の南東側で、最大約 12cm の衛星から遠ざかる向きの変動が見られる。

✕: 震央 2016/10/21 14:07 深さ 11km M6.6 ●: 余震 (2016/10/21-2016/10/27, M2 以上) 気象庁一元化震源

図-7 だいち 2号による SAR 干渉解析結果

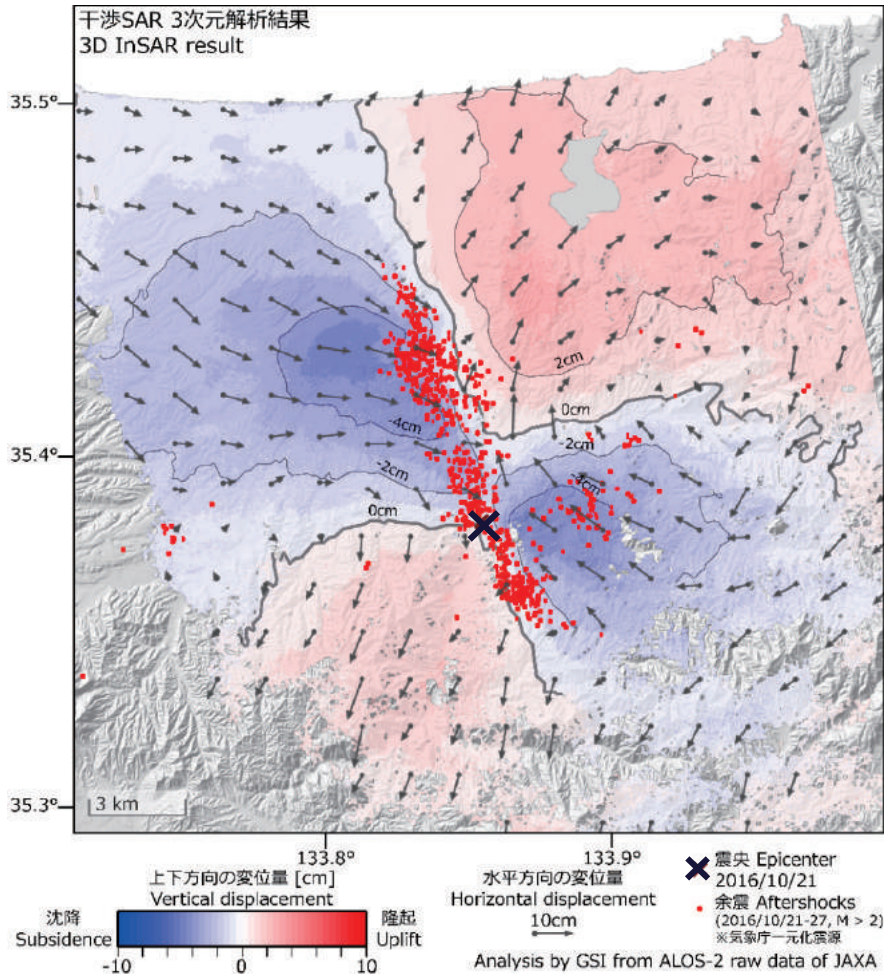


図-8 干渉 SAR 3次元解析によって計測された地殻変動分布. 赤は隆起, 青は沈降を示す. 矢印は地殻変動の水平成分の向きと大きさを示す. 水平・上下変動ともに, 北北西-南南東に延びる左横ずれ断層運動による地殻変動と調和的な空間分布を示している. (水平成分: 震央の北東で北東向き, 北西で南東向き, 南西で南西向き, 南東で北西向き 上下成分: 震央の北東及び南西で隆起, 北西及び南東で沈降)

4.2 電子基準点「羽合」の測量成果改定

測量成果改定の対象となる点が「羽合」1点のみであるため, 通常の測量成果の算出と同様に, 学術用精密基線解析ソフトウェア GAMIT/GLOBK を用い, 測量成果改定点周囲の電子基準点3点(「東伯A」, 「鹿野」及び「中和」)を固定して基線解析及び平均計算を行うことにより, 地震後の新しい測量成果を算出した. 地震直後の数日間に, わずかな余効変動が確認されたため(図-9), 1週間後の10月28日~30日の3日間の観測データとIGS精密暦に基づき測量成果を算出し, 11月24日に公表した.

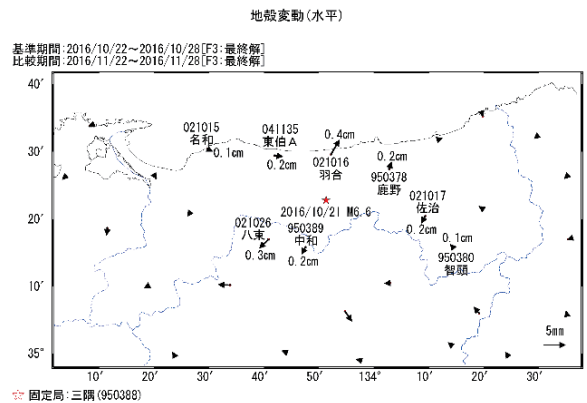


図-9 鳥取県中部の地震に伴う余効変動(固定局「三隅(島根県)」)

4.3 成果改定のセミ・ダイナミック補正に対する影響

「羽合」のみ測量成果を改定する場合、2017年度版のセミ・ダイナミック補正パラメータの品質に影響を及ぼすことが懸念されたため、その影響について評価を行った。

セミ・ダイナミック補正パラメータは、電子基準点の1月1日における座標値と成果値の差を入力値として構築される。従って、2017年度版のセミ・ダイナミック補正パラメータを構築する際には、「羽合」の新しい成果を使用することになる。「羽合」のみ成果を改定した場合に懸念されることとして、「羽合」付近に補正量の「谷」が出来、補正パラメータの品質要件を満たさなくなることが挙げられる。セミ・ダイナミック補正の運用基準では、内部評価の許容較差が南北、東西方向ともに20mmと定められている。ここで内部評価とは、パラメータから既知点である電子基準点での補正量を算出し、1月1日における座標値と成果値の差と比較することで、その整合性を確認する評価のことを言う。一般に補正量の勾配が大きい場合に内部評価の結果が悪くなる傾向がある。「羽合」付近に補正量の「谷」があるということは、そこに補正量の勾配が存在するということがあり、許容範囲内に収まるかどうか品質要件上の焦点となる。

そこで2017年度版の補正パラメータで想定される「羽合」での内部評価を次のように見積もることとした。

- (1) 2016年度版の補正パラメータの「羽合」以外の電子基準点での入力値に対して、鳥取県中部の地震の変動量を加え、擬似的な2017年度版補正パラメータの入力値を作成する。「羽合」については成果改定によって地震の変動量が全て解消されたものと仮定し、2016年度版のパラメータの入力値そのものを用いることとする。
- (2) 作成した入力値をもとに「羽合」周辺における擬似的な2017年度版補正パラメータを構築する。
- (3) 構築した擬似的な2017年度版補正パラメータをもとに「羽合」での補正量を算出し、「羽合」での擬似的な入力値と比較を行う。

内部評価の結果を表-2に示す。「羽合」での内部評価の結果は南北1.9mm、東西0.9mmとなり、運用基準の許容範囲を十分満たすことが分かった。内部評価結果が良好であった要因として、「羽合」周辺の2016年度版の入力値の勾配が小さかったことに加え、「羽合」以外の電子基準点における地震の変動量が小さいことが挙げられる(表-3、図3)。以上の考察から、「羽合」のみを改定することは2017年度の補正パラメータの品質に悪影響を及ぼさないと結論付けられる。

表-2 「羽合」における補正パラメータの内部評価

	南北	東西
入力値(m)	-0.1730	0.5247
補正值(m)	-0.1749	0.5238
内部評価(mm)	1.9	0.9

表-3 「羽合」周辺における2016年度版補正パラメータの入力値

	南北(m)	東西(m)
羽合	-0.1730	0.5247
東伯A	-0.1696	0.5211
鹿野	-0.1918	0.4995
中和	-0.1929	0.4473
鳥取	-0.2007	0.5328

5. まとめ

平成28年10月21日14時07分に鳥取県中部で発生したM6.6の地震に伴い、電子基準点「羽合」で北北東方向に約7cmの移動など、鳥取県から岡山県北部にかけての地域で地殻変動が観測された。

この地震に伴いGEONETやSAR干渉解析によって観測された地殻変動は、政府の地震調査研究推進本部地震調査委員会に報告され、地震活動の評価に役立てていただいたところである。また、電子基準点リアルタイム解析システム(REGARD)によっても地殻変動が捉えられた。今回は観測された地殻変動が数cm程度と小さく、精査を行う必要があったため、REGARDの結果の公表は見送ったが、REGARDの結果とGEONETの定常解析の結果は概ね一致していることが分かった。

今回の地震に伴う地殻変動は、震央付近の一部の電子基準点間において閉合差の許容範囲を超過し、公共測量等の実施に影響が生じることが想定されたため、電子基準点「羽合」のみ測量成果の改定を行った。一方、三角点については、「羽合」の成果を改定した場合において近傍の三角点との間に生じる不整合は、公共測量作業規程の準則に定める水平位置の閉合差の許容範囲内と想定されることから、成果改定の対象としなかった。この対応は、今後、同程度の規模の地震が発生した場合における基準点成果改定を検討する際の参考になるものと考えられる。

謝辞

ここで使用しただいち2号の原初データの所有権はJAXAにあります。これらのデータは、だいち2号に関する国土地理院とJAXAの間の協定及び地震予知連絡会SAR解析ワーキンググループの活動に基づき提供されました。解析には、「電子基準点等観測データ及び数値予報格子点データの交換に関する

細部取り決め協議書」に基づき、気象庁から提供された数値気象モデルを使用しました。この場を借りて、御礼申し上げます。

(公開日：平成 29 年 3 月 15 日)

参 考 文 献

- Fujiwara, S., T. Nishimura, M. Murakami, H. Nakagawa and M. Tobita (2000): 2.5-D surface deformation of M6.1 earthquake near Mt Iwate detected by SAR interferometry, *Geophysical Research Letters*, 27, 2049-2052.
- 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 (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.
- 地震調査研究推進本部地震調査委員会 (2016a) : 2016 年 10 月 21 日鳥取県中部の地震の評価 (平成 28 年 10 月 22 日公表), http://www.static.jishin.go.jp/resource/monthly/2016/20161021_tottori.pdf (accessed 06 Jan. 2017).
- 地震調査研究推進本部地震調査委員会 (2016b) : 2016 年 10 月 21 日鳥取県中部の地震の評価 (平成 28 年 11 月 10 日公表), http://www.static.jishin.go.jp/resource/monthly/2016/20161110_tottori.pdf (accessed 06 Jan. 2017).
- 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, *Earth Planets Space*, 68:190, doi:10.1186/s40623-016-0564-4.
- Kawamoto, S., Hiyama, Y., Ohta, Y., Nishimura, T., Todoriki, M., Furuya, T., Sato, Y., Yahagi, T., Miyagawa, K.(2017) : REGARD: A new GNSS-based real-time finite fault modeling system for GEONET, *Journal of Geophysical Research*, doi:10.1002/2016jb013485.
- Kobayashi, T. (2017): Earthquake rupture properties of the 2016 Kumamoto earthquake foreshocks (Mj 6.5 and Mj 6.4) revealed by conventional and multiple-aperture InSAR, *Earth Planets Space*, 69: 7, doi:10.1186/s40623-016-0594-y.
- 国土地理院地理地殻活動研究センター地殻変動研究室 (2016) : 合成開口レーダー (SAR) によって明らかとなった 3 次元地殻変動と震源断層モデル, <http://www.gsi.go.jp/cais/topic161027-index.html> (accessed 06 Jan. 2017).
- Morishita, Y., T. Kobayashi, and H. Yarai (2016): Three-dimensional deformation mapping of a dike intrusion event in Sakurajima in 2015 by exploiting the right- and left-looking ALOS-2 InSAR, *Geophysical Research Letters*, 43, doi:10.1002/2016GL068293.
- 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.
- Tobita, M., M. Murakami, H. Nakagawa, H. Yarai, S. Fujiwara, and P. A. Rosen (2001) : 3-D surface deformation of the 2000 Usu eruption measured by matching of SAR images, *Geophysical Research Letters*, 28, 4291-4294.