

GEONET 及び SAR 干渉解析による茨城県北部の地震に伴う地殻変動と地表変形 Crustal and Surface Deformation Associated with the 2016 Northern Ibaraki Earthquake Detected by GEONET and InSAR

測地部 仲井博之・三浦優司¹・山下達也・攪上泰亮・宮原伐折羅
Geodetic Department Hiroyuki NAKAI, Yuji MIURA, Tatsuya YAMASHITA,
Yasuaki KAKIAGE and Basara MIYAHARA
測地観測センター 島崎久実・菅富美男²
Geodetic Observation Center Kumi SHIMAZAKI and Fumio SUGA
地理地殻活動研究センター 小林知勝・中埜貴元・宇根寛
Geography and Crustal Dynamics Research Center
Tomokazu KOBAYASHI, Takayuki NAKANO and Hiroshi UNE
応用地理部 吉田一希・飯村元紀³
Geographic Department Kazuki YOSHIDA and Motoki IIMURA

要 旨

2016年12月28日21時38分に発生した茨城県北部の地震(M6.3)に伴い、茨城県常陸太田市の電子基準点「里美」が西南西方向に約3cm移動するなど、茨城県及び福島県内の複数の電子基準点で地殻変動が観測された。

だいち2号が12月29日に緊急観測した合成開口レーダー画像の解析結果によると、震源から北北東の範囲で最大約27cmの沈降又は西向きの地殻変動が見られた。今回の地震は電子基準点の空白域で発生し、地震に伴う地殻変動が生じた範囲が比較的小狭かったため、地殻変動の詳細は、だいち2号の解析結果によってはじめて明らかになった。また、この地震は、翌日に開催された地震調査委員会の臨時会に緊急観測の結果を提出した初めての事例となった。

これらの地殻変動をもとに、断層面2枚で仮定した震源断層モデルを構築した。検出した地殻変動と構築した震源断層モデルは、政府の行う地震活動の評価や国土地理院が行う測量成果改定の検討に用いられた。また、SAR干渉画像に現れた位相不連続箇所での現地調査を行い、地表変位を確認した。

1. はじめに

2016年12月28日21時38分に茨城県北部の深さ約11kmでM6.3の地震が発生し、茨城県高萩市で震度6弱、日立市で震度5強を観測したほか、関東地方を中心に東北地方から中部地方にかけて震度5弱から1を観測した。この地震は、東北東-西南西方向に張力軸を持つ正断層型であり、平成23年(2011年)東北地方太平洋沖地震の余震域で起きた。震央付近では、2011年3月19日に最大震度5強を観測したM6.1の地震が発生しているが、震央近傍に地震調査研究推進本部が長期評価を行っている主要な

活断層はない(地震調査研究推進本部地震調査委員会, 2016a)。

今回の地震では、国土地理院が運用するGNSS連続観測システム(以下「GEONET」という。)及び陸域観測技術衛星2号「だいち2号(ALOS-2)」が翌日に緊急観測したSARデータにより地殻変動を捉えた。国土地理院は、検出した地殻変動情報を翌日に開催された地震調査委員会の臨時会に速やかに報告した(地震調査研究推進本部地震調査委員会, 2016b)。

本稿では、茨城県北部の地震に伴いGEONET及びSAR干渉解析により観測された地殻変動とそれらをもとに構築した震源断層モデル及びSAR干渉画像の位相不連続箇所の現地調査の結果について報告する。

2. GEONETが捉えた地殻変動

2.1 GEONET解析結果による地殻変動

国土地理院では、顕著な地震活動が発生した場合、電子基準点を用いたGEONETの解析結果に基づき地殻変動を把握し、その結果を公表することとしている。全国約1,300箇所の電子基準点の座標値は、最新の衛星の軌道情報(暦)の公開に合わせて定期的に解析されている。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(F3)及び速報解(R3)は24時間の観測データを単位とした解であるが、迅速解(Q3)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は適したものである(矢来ほか, 2016)。茨城県北部の地震の発生後、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))により地殻変動を求めた。

2.2 定常解析結果

12月29日、茨城県北部の地震に伴う地殻変動を把握するため、地震前(12月21日から27日の7日間)の速報解(R3)と地震後(12月29日0時~6時までの1セッション)の迅速解(Q3)を用いて第1報として地震前後の地殻変動を求めた。

その後も逐次速報解(R3)を用いた地殻変動を求め、2017年3月22日には地殻変動を精査するため、最終解(F3)を用いて地震前(12月21日から27日の7日間)を基準とした、地震後(12月29日から1月4日の7日間)の地殻変動を同様に求めた。この結果を図-1に示す。GEONETで捉えた地殻変動は、地震調査委員会が公表している東北東-西南西方向に張力軸を持つ正断層型という発震機構と整合している。

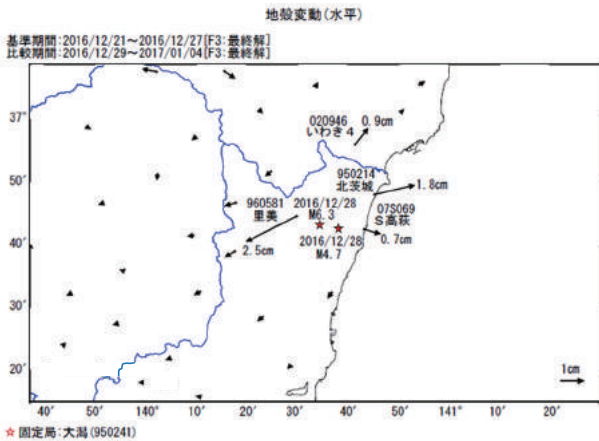


図-1 定常解析(最終解 F3)による茨城県北部の地震に伴う地殻変動(水平成分)。赤色の★は震央を示す。

3. SAR 干渉解析による地殻変動

3.1 だいち2号

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、だいち2号を2014年5月に打ち上げた(JAXA, 2014)。

だいち2号は、だいちの運用経験を活かして様々な改善がなされ、回帰日数が46日から14日へと短くなることで、観測頻度が増加している。また、衛

星の進行方向に対して電波照射方向を左右に切り替えることが可能になったことで、発災後の迅速な観測が可能となった。さらに、軌道がより精密に制御されるようになったことで、垂直基線長(2回の観測間での衛星の位置のずれ)が短くなり、同一の軌道から比較を行う SAR 干渉解析に適したデータが増加した。これらのことから災害発生範囲の撮影を可能とする緊急観測の迅速性が向上した。また、センサの改善によって空間分解能が向上したことで、詳細な地殻変動の把握が可能になった(上芝ほか, 2016)。

3.2 地震予知連絡会 SAR 解析ワーキンググループ

国土地理院と JAXA は、だいち2号のデータを用いた地理空間情報の整備と高度利用を連携して推進することを目的として、2014年4月7日に協定を締結した(森下ほか, 2015)。この協定では、JAXA が実施する防災利用実証実験の一つである地震予知連絡会 SAR 解析ワーキンググループ(以下「地震 SAR 解析 WG」という。)の設置について規定している。国土地理院は、地震 SAR 解析 WG の事務局として、国内の大学・研究機関等の実験協力者の課題・活動内容等を取りまとめ、地震発生時に実験協力者が提案する緊急観測を JAXA へ要請する役割を担っている。JAXA は、地震 SAR 解析 WG からの提案に対し、観測の可能性を検討し、可能と判断した場合は観測を実施して WG メンバーに観測データを提供する(三浦ほか, 2016)。

3.3 緊急観測要求とだいち2号による緊急観測

国土地理院は、地震発生1時間後に地殻変動シミュレーションを行い、だいち2号の観測によって地殻変動の検出が想定されることを確認した。

その15分後には、地震 SAR 解析 WG の事務局として、SAR 干渉解析が可能な観測の実施を WG メンバーに打診し、地震発生から2時間10分後には、翌日29日の緊急観測を JAXA に要請した。JAXA は、この緊急観測を認め、29日11時42分頃に観測が実施された(表-1)。

3.4 SAR 干渉解析

国土地理院は、緊急観測の40分後に SAR データ

表-1 だいち2号による緊急観測と解析ペア

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
12/29 11:42	2016/11/17	42日間	南行	右	高分解能(3m)	36.3°	+28m

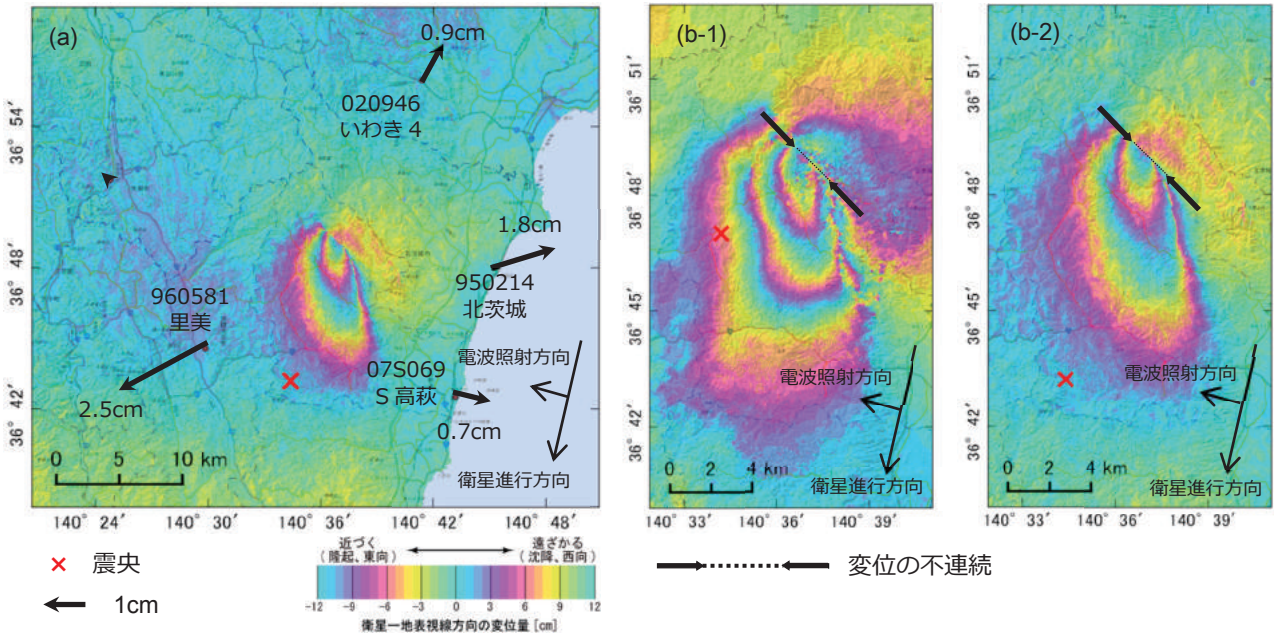


図-2 干渉 SAR 解析から得られた地殻変動
 (a)2016 年 12 月 28 日に発生した地震(M6.3)に伴う地殻変動全域を示す SAR 干渉画像 (2016/11/17 ~ 2016/12/29)
 (b) 2011 年 3 月 19 日の地震(M6.1)と 2016 年 12 月 28 日の地震(M6.3)に伴う顕著な地殻変動域の比較
 (b-1) 2011 年 3 月 19 日の地震の SAR 干渉画像 (2010/11/20 ~ 2011/4/7)
 (b-2) 2016 年 12 月 28 日の地震の SAR 干渉画像 (2016/11/17 ~ 2016/12/29)

を取得して速やかに SAR 干渉解析を開始し、観測の約 2 時間後に SAR 干渉画像から地殻変動を確認した。SAR 干渉解析において、地形縞を除去するための標高データ (DEM) は「GSI10mDEHMJapan」(飛田, 2009) を使用した。SAR 干渉画像に電子基準点の変動ベクトルを重ねた地殻変動の空間分布図を図-2 (a) に示す。さらに、今回の解析結果と 2011 年 3 月 19 日に発生した地震 (M6.1) 時の SAR 干渉画像の比較を図-2 (b-1) (b-2) に示す。これらの画像から次の知見が得られた。

- ・北茨城市市街地から西約 10km の位置に、最大約 27cm の衛星から遠ざかる向き (沈降又は西向き) の変動が見られる。その北東側では、最大約 6cm の衛星に近づく向き (隆起又は東向き) の変動が見られる。
 - ・最大の変動が見られる領域では、変位の不連続が約 2km の長さにとわって見られる。
 - ・変動は、電子基準点による地殻変動観測の結果とおおむね整合している。
 - ・変動領域は、2011 年 3 月 19 日に発生した地震 (M6.1) で観測された地殻変動とほぼ同じである。特に、変位の不連続の位置は同じ場所に見られる。
- 今回の地震の震源は、配点間隔 20~25km の電子基準点の間に位置し、地殻変動が比較的狭い範囲で生じたため、電子基準点の観測のみからは詳細な地

殻変動を観測することはできなかった。一方、だいち 2 号の SAR 干渉画像は、電子基準点の空白域においても地殻変動を確実に捉えられることから、地震のメカニズムを解明する上で貴重な情報となった。

4. 震源断層モデル構築

SAR 干渉画像及び GEONET データをもとに、震源断層モデルを構築した。ここでは、12 月 29 日に観測された南行軌道の SAR 干渉画像を用いた。SAR 干渉画像から、深部の断層滑りに加えて、震源領域の北東部においてごく浅部の滑りが示唆されることから、本モデル計算では断層面を 2 枚仮定した。断層滑りは、半無限弾性体中の矩形断層面上の一様滑りを仮定し (Okada, 1985), Simulated Annealing 法により各断層パラメータを推定した (Kobayashi et al., 2012)。

浅部断層面の走向角は、SAR 観測による変位不連続の方向 (130°) に固定し、断層長は変位不連続線の長さ (約 2km) に強く拘束した。他のパラメータに関しては、拘束をほとんどかけずに探索した。図-3 に推定された断層面の地上投影位置 (白枠) を、表-2 に推定された断層パラメータを示す。矩形断層一様滑りを仮定した比較的単純なモデルだが、SAR 及び GNSS の観測値をよく説明している (図-3, 図-4)。図-5 に、モデルの概念図を示す。得られた震源

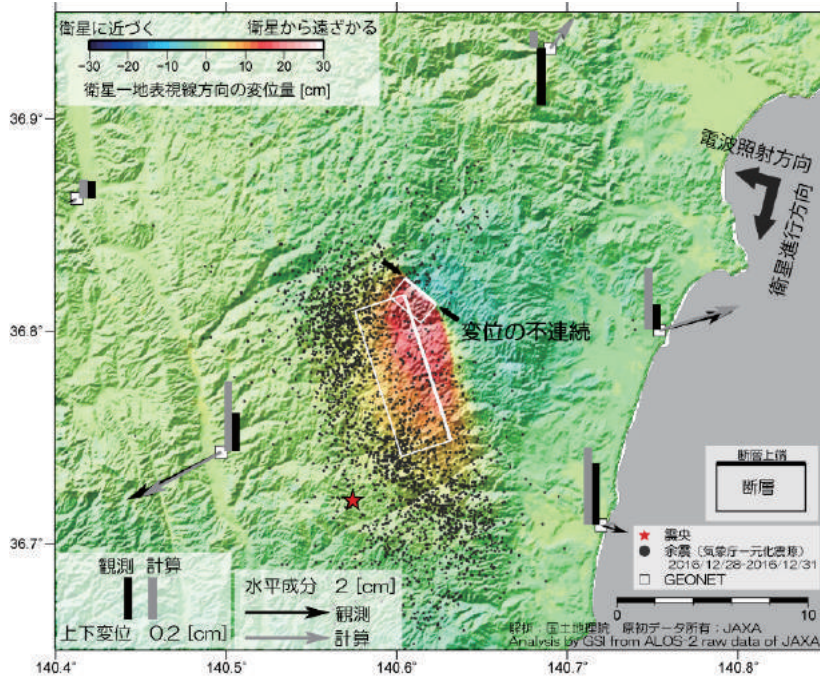


図-3 SAR 干渉解析から得られた地殻変動

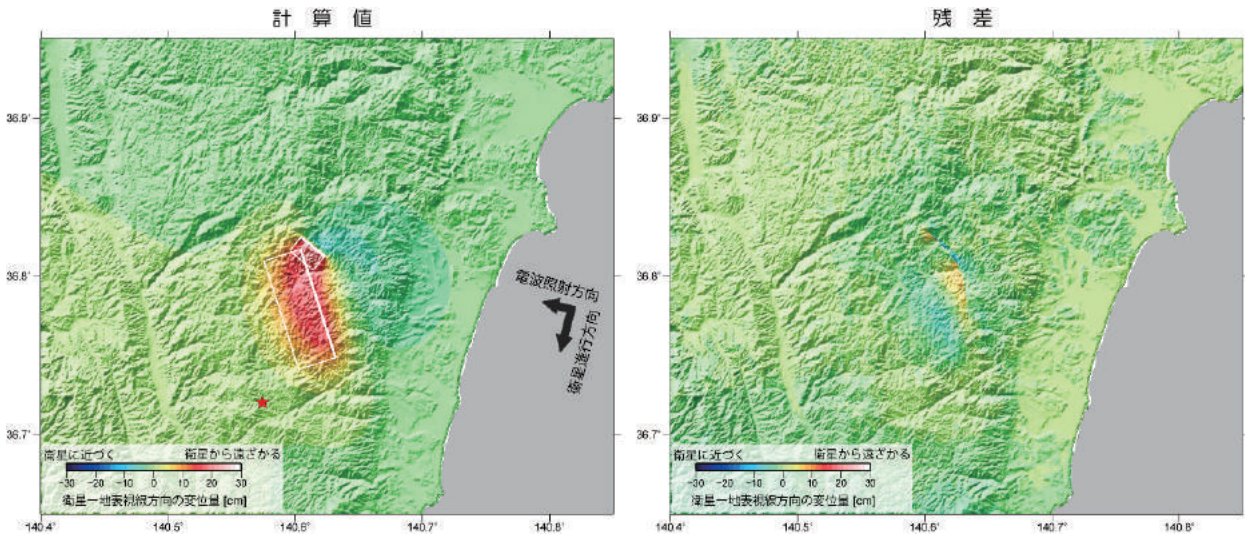


図-4 (左) 震源断層モデルから計算された地殻変動 (右) 残差

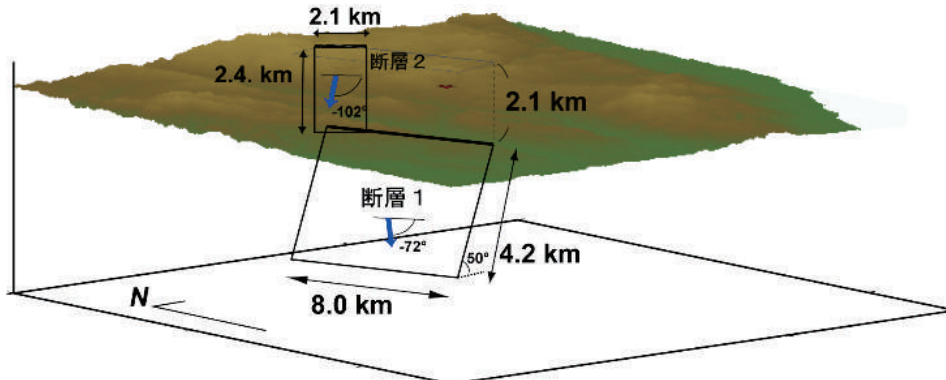


図-5 震源断層モデルの概念図

表-2 推定された断層パラメータ

断層	緯度 [°]	経度 [°]	深さ [km]	長さ [km]	幅 [km]	走向 [°]	傾斜 [°]	滑り角 [°]	滑り量 [m]	M _w
1	140.604 (0.003)	36.817 (0.005)	2.1 (0.4)	8.0 (0.9)	4.2 (0.9)	162 (5)	50 (6)	-72 (12)	0.7 (0.3)	5.83
2	140.605 (0.002)	36.825 (0.002)	0.1 (0.0)	2.1 (0.1)	2.4 (0.4)	130	59 (11)	-102 (32)	0.4 (0.1)	5.15
計										5.85

緯度・経度は断層の左上端を示す。()内の数値は標準偏差

断層モデルの主な特徴として、①南西傾斜の断層面（傾斜角 50~60°）、②北北西（北西）-南南東（南東）方向の走向、③正断層型の断層運動、④最大変位域の直下のごく浅部に局所的な滑り、等が挙げられる。2011年3月19日に発生した地震（M6.1）で推定された震源断層モデルの特徴と類似点が多い（Kobayashi et al., 2011; Kobayashi et al., 2012）。

また、震源断層の周囲で余震活動が活発な点も、この地震の特徴として挙げられる（図-3）。以上の結果は、第300回地震調査委員会（平成29年1月13日）及び第214回地震予知連絡会（平成29年2月20日）に報告された。

5. 解析結果の活用と公表

5.1 地震調査委員会での活用

GEONET 定常解析と SAR 干渉解析の結果は、地震発生翌日の12月29日15時に開催された政府の地震調査研究推進本部第299回地震調査委員会臨時会に提出され、その一部は地殻変動の大きさと方向の評価において地震活動の評価文に引用された。これは、だいち2号の運用開始以降、緊急観測による SAR 干渉解析の結果が、地震発生翌日の地震調査委員会でも活用された初めての事例である。だいち2号は、だいちより分解能、観測可能域、データ提供時間などが改善しており、特に災害対応に直結する緊急観測の機動性とデータ伝送速度の向上は、観測要求・緊急観測・解析結果公表までの時間短縮に寄与した。2017年1月13日に開かれた定例の第300回地震調査委員会でも、震源断層モデルが地震の評価文に引用された（地震調査研究推進本部地震調査委員会, 2017）。このことから、だいち2号の SAR 干渉画像は、GEONET による地殻変動と同様に地震活動の評価に不可欠なものとなっている。

5.2 基準点測量成果改定の検討

国土地理院では、地震に伴う顕著な地殻変動によって、基準点測量成果を公共測量等に使用できなくなることが想定される場合、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。

基準点測量成果の公表停止にあたっては、GEONET, SAR 干渉解析及び震源断層モデルから推定される地殻変動の規模と範囲に基づいて、公共測量への影響を考慮した上で、停止範囲を検討してきた（檜山ほか, 2017）。今回、SAR 干渉解析に基づく震源断層モデルが三角点の成果公表停止域の検討において大きな役割を果たしたので、以下ではその概要について述べる。

図-2 (a) に示したとおり、茨城県北部の地震は電子基準点の空白域で発生し、その変動域の空間スケールは電子基準点の点間距離よりも小さかった。そのため、地震発生域近傍にある三角点の変動を電子基準点によって把握することは困難であった。また、今回の地震発生後、SAR の緊急観測は一度しか行われなかったため、SAR の観測だけで地震に伴う上下変動と水平変動を同時に得ることはできなかった。そこで水平変動と上下変動の推定値を同時に得るため、4.で述べた SAR 干渉画像と GEONET データに基づく震源断層モデルを適用することで、測量成果公表を停止する基準点の検討を行うこととした。

震源断層モデルの結果から、いずれの三角点も水平変動が5cmを上回ることはないことが推定された。一方、上下変動については三角点2点で20cm程度の変動が見込まれた。基準点測量成果改定の目安は、測量成果との較差が水平成分10cm、高さ成分20cm以上とされており、それに加えて公共測量への影響を考慮することとされている。水平変動が最大で5cm未満であるという震源断層モデルの結果に加え、三角点2点が山間部に位置しており、公共測量への影響が小さいことを鑑み、三角点の測量成果については、公表停止及び改定の必要はないと判断した。

5.3 国土地理院ウェブサイトでの公表

SAR 干渉解析結果、GEONET の速報解 (R3) 及び迅速解 (Q3) から求めた地殻変動は、12月29日に国土地理院ウェブサイトに掲載した。

(<http://www.gsi.go.jp/BOUSAI/H28-ibaraki-earthquake-index.html>)

さらに、最終解 (F3) から求めた地殻変動の結果 (図-1) についても、3月22日に掲載した。

(http://mekira.gsi.go.jp/catalogue/pdf/20161228_2138.pdf)

6. 現地調査

SAR 干渉画像に現れた変位の不連続箇所及び変位の急変帯において、地表地震断層等の地表変位が生じているか否かを確認するため、2017年1月10日に現地調査を実施した。現地調査は図-6に示したA~Hの8地点で実施した。

地点A~Cは、北西-南東走向の明瞭な変位の不連続箇所、地点D~Hは北北西-南南東走向の変位の不連続または急変帯に位置する。各地点での調査結果を以下に記す。

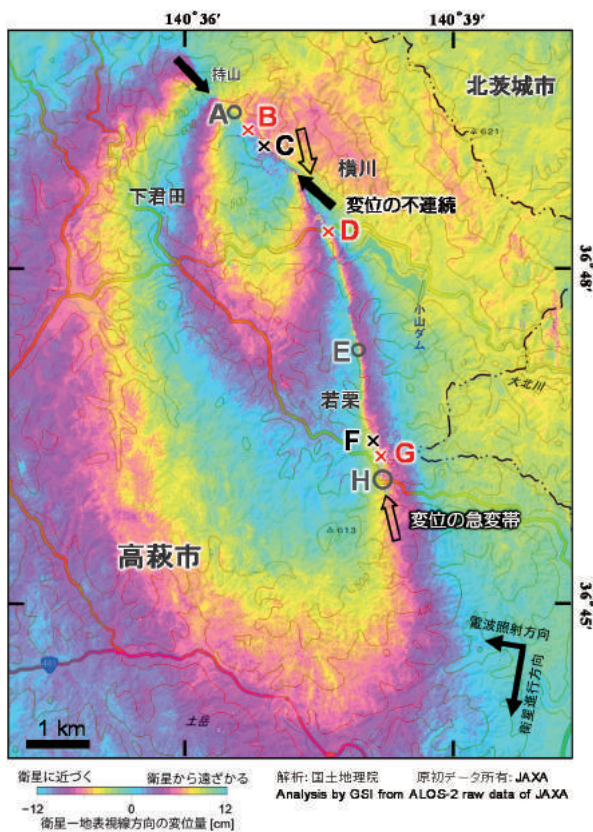


図-6 地表変位の現地調査地点。地点A~Hのうち、赤字はSAR干渉画像における変位と調和的な地表変位が確認できた地点、黒字はその他の地表変位が確認できた地点、灰色字は地表変位が確認できなかった地点を示す。黒矢印間が変位の不連続区間、白抜き矢印間が変位の

地点Aは、北西-南東走向の変位の不連続の北端付近に位置するが、植林地であり人工構造物が無いため、地表変位は確認できなかった。最近倒れたと思われる樹木を確認し、付近の住民に聞き取り調

査を実施したが、いつ倒れたのかは不明であった。

地点Bは、高萩市持山集落へつづく道路と変位の不連続が交差する地点で、アスファルト道路上に2本の新鮮な開口亀裂を確認した(写真-1(a))。亀裂の走向はN35°W、開口幅3~8cm、上下変位量(南西落ち)が最大3cm(写真-1(b))で、亀裂の延長線上の林地内(写真-1(a)に写っている人物の足許)にも同走向の開口亀裂を確認した。これらの変位の向きは、SAR干渉画像で検出された変位の特徴と調和的である。なお、この地点の地表変位は、佐藤・八反地(2017)や小俣・杉田(2017)、栗田・吾妻(2017)でも報告されている。

地点Cでは、アスファルト道路路肩部において新鮮な開口亀裂を確認した(写真-1(c))。亀裂の走向はN40°~50°WでSAR干渉画像の変位の不連続の走向と調和的だが、北東側が沈下しており、路肩の重力性変形によると推察された。

地点Dは、北北西-南南東走向の変位の不連続と県道が交差する地点であり、新小山橋の西詰付近で交差している。現地調査の結果、新小山橋西詰において、橋のつなぎ目の上下変位(3~5cmの西落ち)と上下変位に伴う欄干接合部の伸び(最大10cm)を確認した(写真-1(d),(e))。その西側のアスファルト道路及び歩道縁石においては、開口亀裂群(走向N20°~25°W、開口幅0.5~2cm、上下変位無し、一部は3cmの右横ずれ)を確認した(写真-1(f))。これらの変位の向きは、SAR干渉画像で検出された変位の特徴と調和的である。なお、この地点の地表変位は、佐藤・八反地(2017)や小俣・杉田(2017)、栗田・吾妻(2017)でも報告されている。

地点Eは、未舗装林道と変位の急変帯が交差する箇所であったが、明瞭な地表変位は確認できなかった。ただ、栗田・吾妻(2017)は同地点において、走向北-南ないし北北西-南南東、開口幅数mmの開口断裂を報告している。

地点Fは、やや広がりを持った変位の急変帯と砂利舗装の林道が交差する地点であり、新鮮で大規模な開口亀裂が複数地点で確認された(写真-1(g))。ただ、これらの開口亀裂は林道とほぼ並行する亀裂が大半であり、斜面下方側が沈下していること、また、それらの走向がバラバラであることから、いずれも重力性変形によると推察された。

地点Gは、やや広がりを持った変位の急変帯と若栗トンネルが交差する地点であるが、若栗トンネル内(南西口から約26m地点)において、トンネルのつなぎ目及び歩道に、トンネルと直交方向(北西-南東走向)の新鮮な開口亀裂を確認した(写真-1(h))。開口幅は1cm弱、上下変位量(南西落ち)が約1cm(写真-1(i))であった。なお、トンネル内にはいくつかの古い亀裂も見られたが、今回確認した亀裂は

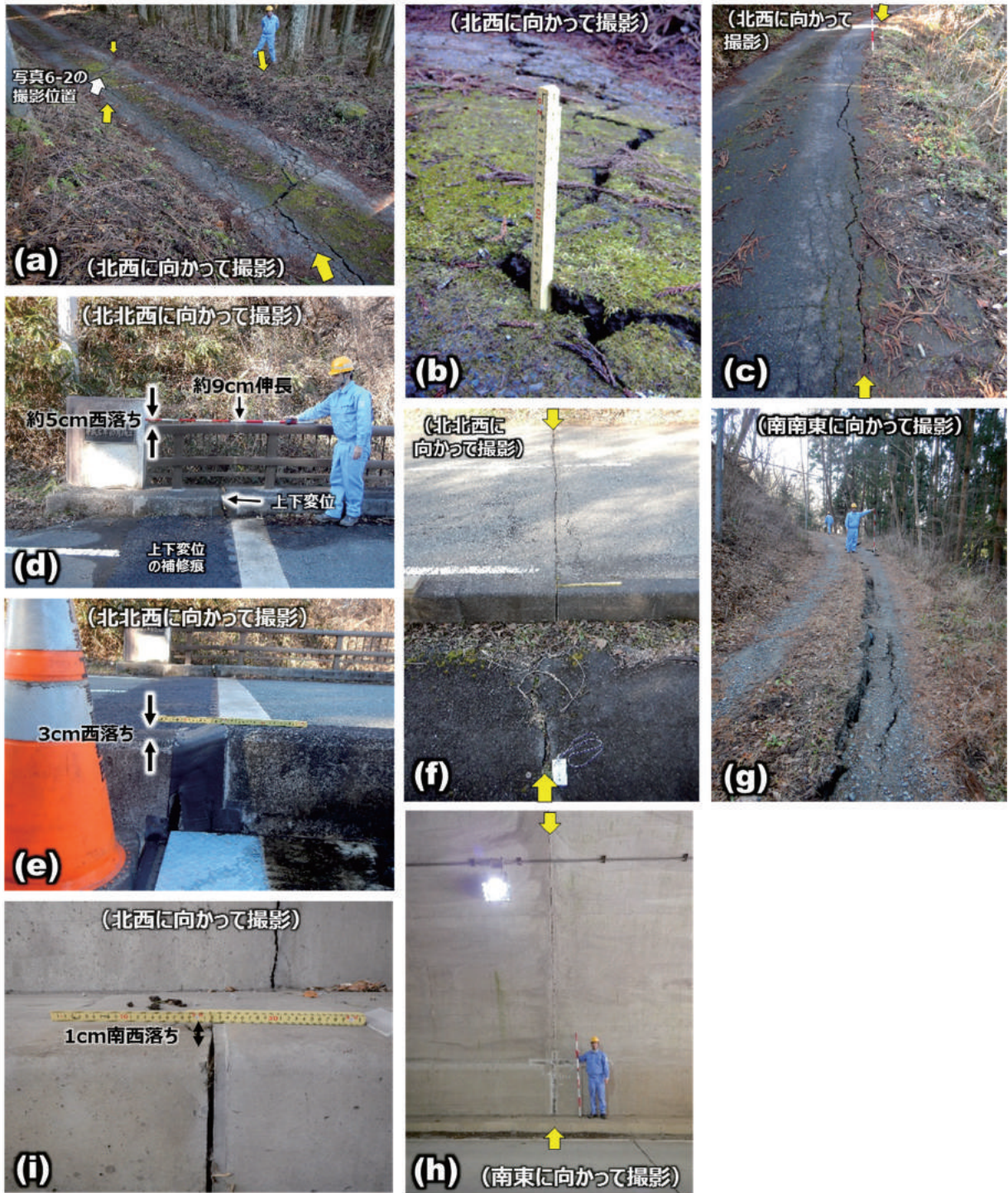


写真-1 現地調査結果

- (a) 地点 B で確認したアスファルト道路の開口亀裂（黄色矢印間）
- (b) 地点 B で確認したアスファルト道路の開口亀裂の上下変位
- (c) 地点 C で確認したアスファルト道路路肩部の重力性変形に伴う開口亀裂（黄色矢印間）
- (d) 地点 D で確認した橋梁つなぎ目の上下変位とそれに伴う欄干接合部の伸び
- (e) 地点 D で確認した橋梁つなぎ目縁石の上下変位
- (f) 地点 D で確認したアスファルト道路及び歩道縁石の開口亀裂群の一部（黄色矢印間）
- (g) 地点 F で確認した林道の重力性変形に伴う開口亀裂の一部
- (h) 地点 G で確認したトンネルつなぎ目の開口亀裂（黄色矢印間）
- (i) 地点 G で確認したトンネル内歩道の上下変位（南西落ち）を伴う開口亀裂

かなり新しいものであり、今回の地震で生じたものと推察した。

地点 H 付近では、変位の急変帯の幅がだいぶ広がっており、それと交差する県道では特に明瞭な変位は確認できなかった。

以上の現地調査結果から、地点 B, D, G の変位は、走向、変位の向きなどはいずれも SAR 干渉画像から推定される地表変位と調和的であり、SAR 干渉画像で捉えられた変位の不連続及び急変帯では、数 cm レベルの上下変位が生じたと考えられる。ただし、変位量が小さく、調査地点以外への連続性も十分に確認できていないことから、地下の断層の変位がそのまま地表に現れた地表地震断層であるかどうかは定かではない。

7. まとめ

2016年12月28日21時38分に茨城県北部で発生したM6.3の地震に伴い、震源に近い電子基準点「里美」や「北茨城」で2~3cmの地殻変動が観測された。震源が電子基準点の空白域に位置したことや変動域の空間スケールが電子基準点の点間距離より小さかったことから GEONET では震央近傍の地殻変動を把握することは難しかったが、だいち2号の SAR 干渉画像から、変動範囲と最大変位の箇所、地表変形箇所の把握が可能となった。

GEONET と SAR 干渉画像から得た地殻変動とそれに基づいて推定した震源断層モデルは、政府の地

震調査委員会において地震活動の評価に活用され、国土地理院でも地殻変動の著しい三角点の測量成果公表停止及び改定の判断に用いられた。SAR 干渉画像に現れた変位の不連続箇所及び急変帯を8地点で現地調査したところ、3地点で SAR 干渉画像から推定される地表変位と調和的な変位が確認でき、全体として数 cm レベルの上下変位が推測されたことから、地震に伴う地表変位の把握において干渉 SAR が一定程度の有用性を示すことが再確認された。

謝 辞

だいちの PALSAR データの所有権は、(独)宇宙航空研究開発機構 (JAXA) 及び経済産業省にあります。ここで用いた PALSAR データは、ALOS 防災利用実証実験/衛星データを用いた地震・地盤変動データ流通及び解析グループの協定に基づき、JAXA から提供を受けています。

だいち2号の原初データ (PALSAR-2 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9月22日)

参 考 文 献

- 栗田泰夫, 吾妻崇 (2017): 「2016年12月28日茨城県北部の地震 (Mj 6.3)」の現地調査報告, <https://www.gsj.jp/hazards/earthquake/ibaraki2016/report20170105.html> (accessed 19 Jun. 2017).
- 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.
- JAXA (2014): 陸域観測衛星2号「だいち2号」, <http://fanfun.jaxa.jp/countdown/daichi2/files/daichi2.pdf> (accessed 09 Jun. 2017).
- 地震調査研究推進本部地震調査委員会 (2016a): 2016年12月28日茨城県北部の地震活動 (平成28年12月29日公表), http://www.static.jishin.go.jp/resource/seismicity_annual/major_act/2016/20161228_ibaraki_01-03_summary.pdf (accessed 5 July. 2017).
- 地震調査研究推進本部地震調査委員会 (2016b): 2016年12月28日茨城県北部の地震の評価 (平成28年12月29日公表), http://www.static.jishin.go.jp/resource/monthly/2016/20161228_ibaraki.pdf (accessed 14 Jun. 2017).
- 地震調査研究推進本部地震調査委員会 (2017): 2016年12月28日茨城県北部の地震の評価 (平成29年1月13日公表), http://www.static.jishin.go.jp/resource/monthly/2016/20161228_ibaraki_2.pdf(accessed 09 Jun. 2017).
- 地震予知連絡会 (2017a): 第214回地震予知連絡会 (2017年2月20日) 議事概要 国土地理院資料11-14頁 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://cais.gsi.go.jp/YOCHIREN/activity/214/image214/011-014.pdf>(accessed 09 Jun. 2017).
- Kobayashi T., M. Tobita, T. Nishimura, A. Suzuki, Y. Noguchi, and M. Yamanaka(2011):Crustal deformation map for the 2011 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake, detected by InSAR analysis combined with GEONET

data, Earth Planets Space, 63,621-625.

Kobayashi T, Tobita M, Koarai M, Okatani T, Suzuki A, Noguchi Y, Yamanaka M, Miyahara B (2012): InSAR-derived crustal deformation and fault models of normal faulting earthquake (Mj 7.0) in Fukushima-Hamadori area., Earth, Planets Space, 64, 1209-1221, doi:10.5047/eps.2012.08.015.

三浦優司, 和田弘人, 仲井博之, 山中雅之, 山田晋也, 攪上泰亮, 上芝晴香, 矢来博司, 小林知勝, 森下遊 (2016): だいち2号を活用した口永良部島新岳噴火に伴う地表変化の検出, 国土地理院時報, 128, 5-12.

森下遊, 山田晋也, 山中雅之, 吉川忠男, 和田弘人, 矢来博司, 中埜貴元, 飛田幹男, 小林知勝, 中島秀敏, 神谷泉 (2015): だいち2号 SAR 干渉解析により捉えられた平成26年(2014年)長野県北部の地震に伴う地殻変動と地表変形, 国土地理院時報, 127, 47-56.

中川弘之, 豊福隆史, 小谷京湖, 宮原伐折羅, 岩下知真子, 川元智司, 畑中雄樹, 宗包浩志, 石本正芳, 湯津堂亨, 石倉信広 (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.

Okada Y (1985): Surface deformation due to shear and tensile faults in a halfspace., Bull Seismol Soc Am 75, 1135-1154.

小俣雅志, 杉田律子 (2017): 2016年茨城県北部の地震に伴う地表変状 (速報),

<http://jsaf.info/jishin/items/docs/20170105144457.pdf> (accessed 19 Jun. 2017).

佐藤浩, 八反地剛 (2017): 平成28年12月の茨城県北部を震源とする地震に伴う表層崩壊と亀裂の現地調査, http://www.ajg.or.jp/disaster/files/201612_ibaraki001.pdf (accessed 19 Jun. 2017).

飛田幹男 (2009): 地殻変動計測のための SAR 画像分析の高度化に関する研究 (第3年次), 平成21年度国土地理院調査研究年報, <http://www.gsi.go.jp/common/000057644.pdf> (accessed 09 Jun 2017).

上芝晴香, 三浦優司, 宮原伐折羅, 仲井博之, 本田昌樹, 攪上泰亮, 山下達也, 矢来博司, 小林知勝, 森下遊 (2016): だいち2号 SAR 干渉解析による熊本地震に伴う地殻変動の検出, 国土地理院時報, 128, 139-146.

矢来博司, 小林知勝, 森下遊, 藤原智, 檜山洋平, 川元智司, 上芝晴香, 三浦優司, 宮原伐折羅 (2016): 熊本地震に伴う地殻変動から推定された震源断層モデル, 国土地理院時報, 128, 169-176.