

平成 30 年北海道胆振東部地震における SAR 干渉解析及び基準点復旧測量
InSAR-derived Coseismic Deformation and Following Restoration Survey of Control Points
to the 2018 Hokkaido Eastern Iburu Earthquake

測地部 本田昌樹・岩田昭雄・山下達也・林京之介・桑原將旗・酒井和紀・宗包浩志
住谷勝樹・堤隆司・加古考範¹・齋田宏明²

Geodetic Department HONDA Masaki, IWATA Masao, YAMASHITA Tatsuya,
HAYASHI Kyonosuke, KUWAHARA Masaki, SAKAI Kazuki, MUNEKANE Hiroshi,
SUMIYA Katsuki, TSUTSUMI Takashi, KAKO Takanori and SAITA Hiroaki

地理地殻活動研究センター 矢来博司・小林知勝・森下遊

Geography and Crustal Dynamics Research Center
YARAI Hiroshi, KOBAYASHI Tomokazu and MORISHITA Yu

要 旨

測地部は、平成 30 年北海道胆振東部地震に伴い、陸域観測技術衛星 2 号「だいち 2 号 (ALOS-2)」の緊急観測のデータを用いて SAR 干渉解析を行った。解析の結果、震央周辺の隆起及び隆起域の東側の東向きの地殻変動を明らかにした。

また、この地震に伴う地殻変動により、震源域周辺の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、基本基準点の測量成果停止の検討及び水準点の復旧測量（再測量）を実施した。水準点の復旧測量は、震災復旧・復興事業に必要な正確な位置情報（高さ）を迅速に提供することを目的に、(一社)全国測量設計業協会連合会との災害協定に基づく緊急測量として実施した。緊急測量の結果に基づき、標高成果の改定が必要と判断した水準点 126 点と電子基準点 6 点の測量成果を改定した。

1. はじめに

測地部は、陸域観測技術衛星 2 号「だいち 2 号 (ALOS-2)」(以下「だいち 2 号」という。)の緊急観測データを用いた SAR 干渉解析及び 2.5 次元解析 (Fujiwara et al., 2000) (以下「SAR 干渉解析等」という。)によりこの地震に伴う地殻変動を明らかにした。この地殻変動情報は、政府の地震調査委員会に報告され、地震の評価に用いられた (地震調査研究推進本部地震調査委員会, 2018)。

さらに、この地殻変動情報や電子基準点の変動量に基づき推定された震源断層モデルから試算した震央周辺の変動量等を参考に、基本基準点の公表成果の停止について検討するとともに、大きな変動の見込まれる地域において水準点の復旧測量（再測量）を実施した。この測量結果に基づく改定標高成果は、融雪後に本格的に取り組みされる震災復旧・復興事業をはじめとする各種測量に正確な高さの基準として

利用可能となるよう、平成 31 年 2 月 20 日に公表した。

本稿では、測地部による SAR 干渉解析及び水準点の復旧測量の対応、把握した地殻変動情報が災害対応に果たした成果、基本基準点の測量成果の改定等について報告する。

2. SAR 干渉解析による地殻変動把握

2.1 SAR 干渉解析の概要

「SAR」は Synthetic Aperture Radar の略で、合成開口という技術を用いて空間分解能を高めたマイクロ波レーダーで、「合成開口レーダー」ともいう。SAR では、人工衛星や航空機に搭載したセンサから地上に向かってマイクロ波を斜め下に照射し、地表からの反射波の強度と位相を取得する。「干渉 SAR」とは、地表のある場所を、ほぼ同じ位置から SAR によって複数回観測し、取得した反射波の位相差を用いて衛星等と地表の間の距離の差を計算することによって、2 回の観測の間に生じた数 cm から数 m の地表の変動を面的に計測する技術である (図-1)。本稿では、干渉 SAR で地表の変動を求める解析を「SAR 干渉解析」という。

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。内陸の活断層で発生する地震では、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のメカニズムでは空間分解能が粗いため、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。一方、干渉 SAR は、地殻変動の詳細な空間分布を把握できるため、内陸地震での地殻変動検出において大きな貢献ができる。

干渉 SAR で把握できるのは衛星－地表視線方向の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が、Fujiwara et al. (2000) による 2.5 次元解析では、東西 2 方向からの観測で得られた SAR 干渉画像を用いて準東西/準上下の変位量を推定することができる (図-2)。

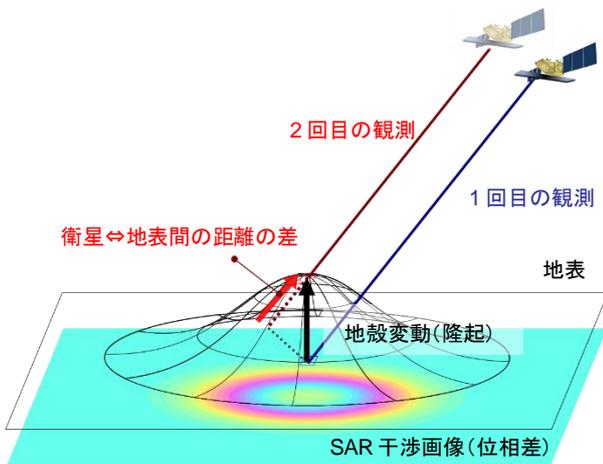


図-1 干渉 SAR の原理

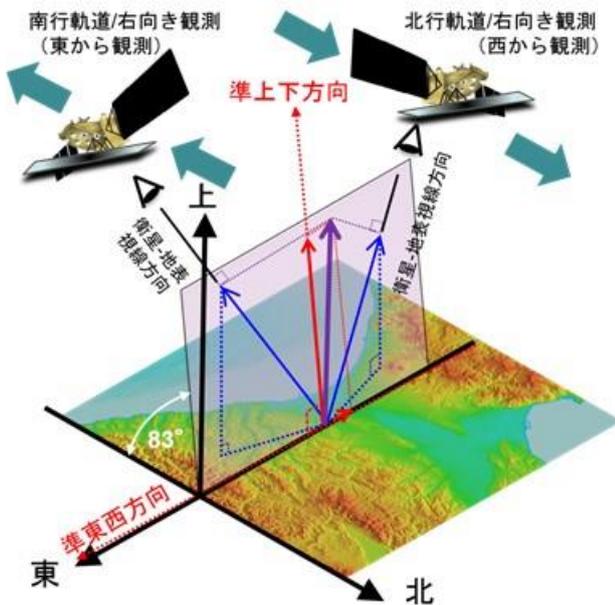


図-2 2.5次元解析の概念図

東及び西側からの観測結果 (青矢印) から 2 次元 (ピンクの平面) の変動量 (紫矢印) を推定し、準上下成分、準東西成分 (赤矢印) に分離する。

2.2 地震予知連絡会 SAR 解析ワーキンググループ

国立研究開発法人宇宙航空研究開発機構 (以下「JAXA」という.) は、地球観測衛星を用いた防災利用実証実験に属するワーキンググループを主体となって実施しており、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.) は、その一つである。地震 SAR 解析 WG の事務局は国土地理院が担当し、実験協力者とともに地殻・地盤変動等の異常検出や災害時の被害状況把握への適用といった課題に取り組んでいる。

顕著な地殻変動が想定される地震が発生した際に、地震 SAR 解析 WG 事務局は実験協力者が提案する観測をとりまとめて JAXA へ要請する。JAXA は要請された観測の可能性を検討し、可能な場合は観測及び地震 SAR 解析 WG メンバーへの観測データ提供を実施している。

2.3 だいち 2 号による緊急観測と SAR 干渉解析結果

平成 30 年北海道胆振東部地震の発生後、国土地理院は、地震 SAR 解析 WG 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。JAXA は、この要求を踏まえだいち 2 号による緊急観測を地震発生当日である 9 月 6 日に 2 回実施し、9 月 20 日までに計 5 回実施した。その後も地震 SAR 解析 WG の緊急観測要求外の観測を同地域で実施した。国土地理院が SAR 干渉解析を行ったペアを表-1 に示す。

図-3 は、地震前後の SAR 干渉解析結果で、変動震央の南を中心として最大で 5cm を超える衛星に近く変動が見られる。

図-4 は、図-3 の拡大図で、厚真町からむかわ町にかけての平野部で局所的な変動が多数見られる。局所的な変動が見られた図-4 の A 地点では、現地で道路が盛り上がるように変形したことを確認した (写真-1)。

図-5 は、図-3 の SAR 干渉解析結果を基に 2.5 次元解析を行い、変動の準上下成分と準東西成分を示したもので、震央周辺で最大 7cm 程度の隆起と、隆起域の東側で最大 4cm 程度の東向きの変動が見られることが明らかになった。

図-6 は、地震後約 2 か月間の SAR 干渉解析結果で、ノイズレベルを超える地震の余効変動は見られなかった。



写真-1 図-4 中 A 地点の道路の変形

2.4 結果の公表とアクセス数

地震発生当日である 9 月 6 日に SAR 干渉解析結果 1 枚を、9 月 10 日に SAR 干渉解析結果 2 枚及び 2.5 次元解析結果（準上下／準東西）を国土地理院の web サイトに掲載した。（国土地理院, 2018a, 2018b）。

これら 5 枚の地理院地図への合計アクセス数は 9 月のみで 29 万件に、平成 31 年 1 月までに 38 万件に達した。中でも 9 月 6 日に掲載した SAR 干渉解析結果（図 3(a)）のアクセス数は、9 月の 1 か月間のみで 14 万件であった。

SAR 干渉解析等で捉えた地殻変動情報は、新聞、テレビ等の各媒体で報道された。

2.5 地震活動評価、災害対応への活用

小林ほか（2019）は、SAR 干渉解析等と GEONET から把握した地殻変動情報を用いて、ほぼ南北方向の高角な断層面上における逆断層が動いたとする震源断層モデルを推定した。

SAR 干渉解析等で捉えた地殻変動情報を、地震調査委員会（9 月 6 日臨時会及び 9 月 11 日定例会）をはじめ関係機関に提供した。地震調査委員会は、提供された情報をもとに「陸域観測技術衛星 2 号「だいち 2 号」の合成開口レーダー干渉解析の画像によると、震央周辺で最大約 7cm（暫定値）の隆起及び、隆起域の東側で最大約 4cm（暫定値）の東向きの地殻変動が観測された。」と評価した。（地震調査研究推進本部地震調査委員会, 2018）。

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。

表-1 だいち 2 号による緊急観測と解析ペア一覧

| 図記号 | 2 回目 観測年月日*1 [mm/dd hh:mm] | 1 回目 観測年月日*1 [yyyy/mm/dd] | 取得 間隔 [日間] | パス 番号 | 観測 モード *2 | 入射角 [°] | 衛星 進行 方向 | 電波 照射 方向 | 垂直 基線長 [m] | 緊急 観測 要求*3 | web 公開 *4 |
|-----|----------------------------------|---------------------------------|------------------|----------|-----------------|------------|----------------|----------------|------------------|------------------|-----------------|
| a | 09/06 11:41 | 2018/08/23 | 14 | 18 | U2-7 | 36 | 南行 | 右(西) | +71 | ○ | 9/06 |
| | 09/06 22:37 | 2018/08/23 | 14 | 116 | U2-9 | 43 | 北行 | 左(西) | +41 | ○ | 9/10 |
| b | 09/08 23:18 | 2018/08/25 | 14 | 122 | FP4 | 31 | 北行 | 右(東) | -70 | ○ | 9/10 |
| | 09/13 22:25 | 2018/03/29 | 168 | 123 | U2-8 | 40 | 北行 | 右(東) | -283 | ○ | |
| | 09/15 11:34 | 2018/07/07 | 70 | 17 | U2-9 | 43 | 南行 | 右(西) | -93 | | |
| | 09/20 11:41 | 2018/09/06 | 14 | 18 | U2-7 | 36 | 南行 | 右(西) | -77 | ○ | |
| c | 10/04 11:41 | 2018/09/06 | 28 | 18 | U2-7 | 36 | 南行 | 右(西) | +28 | | |
| | 10/11 22:25 | 2018/09/13 | 28 | 123 | U2-8 | 40 | 北行 | 右(東) | +203 | | |
| | 11/01 11:41 | 2018/09/06 | 56 | 18 | U2-7 | 36 | 南行 | 右(西) | -34 | | |
| d | 11/08 22:25 | 2018/09/13 | 56 | 123 | U2-8 | 40 | 北行 | 右(東) | +164 | | |
| | 11/29 22:37 | 2018/09/06 | 84 | 116 | U2-9 | 43 | 北行 | 左(西) | -142 | | |

*1 観測年月日は日本標準時。2 回目観測は全て 2018 年。1 回目の観測時刻は 2 回目と同じ。

*2 「U」は高分解能（3m）モードを、「FP」は高分解能（6m）モードを示す。

*3 「○」は地震 SAR 解析 WG から JAXA に緊急観測要求をして実施された観測を示す。

*4 月日は国土地理院の web サイトに掲載された時期を示す。

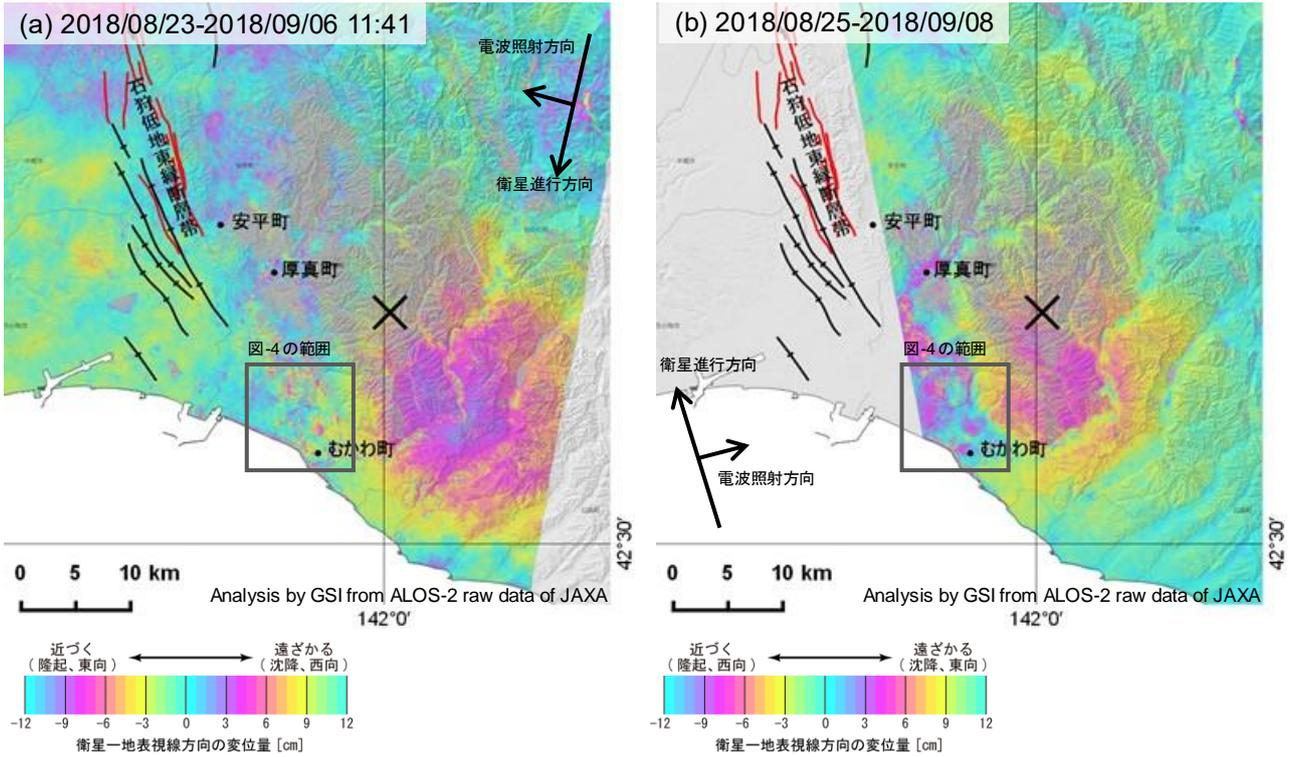


図-3 平成 30 年北海道胆振東部地震前後の SAR 干渉解析結果

× : 震央 2018/09/06 03:07 深さ 37km M6.7 (気象庁一元化震源) (図-5,6 も同様)

赤線 : 活断層線 (1/2.5 万活断層図) (図-5,6 も同様)

黒線 : 活褶曲線 (1/2.5 万活断層図) (図-5,6 も同様)

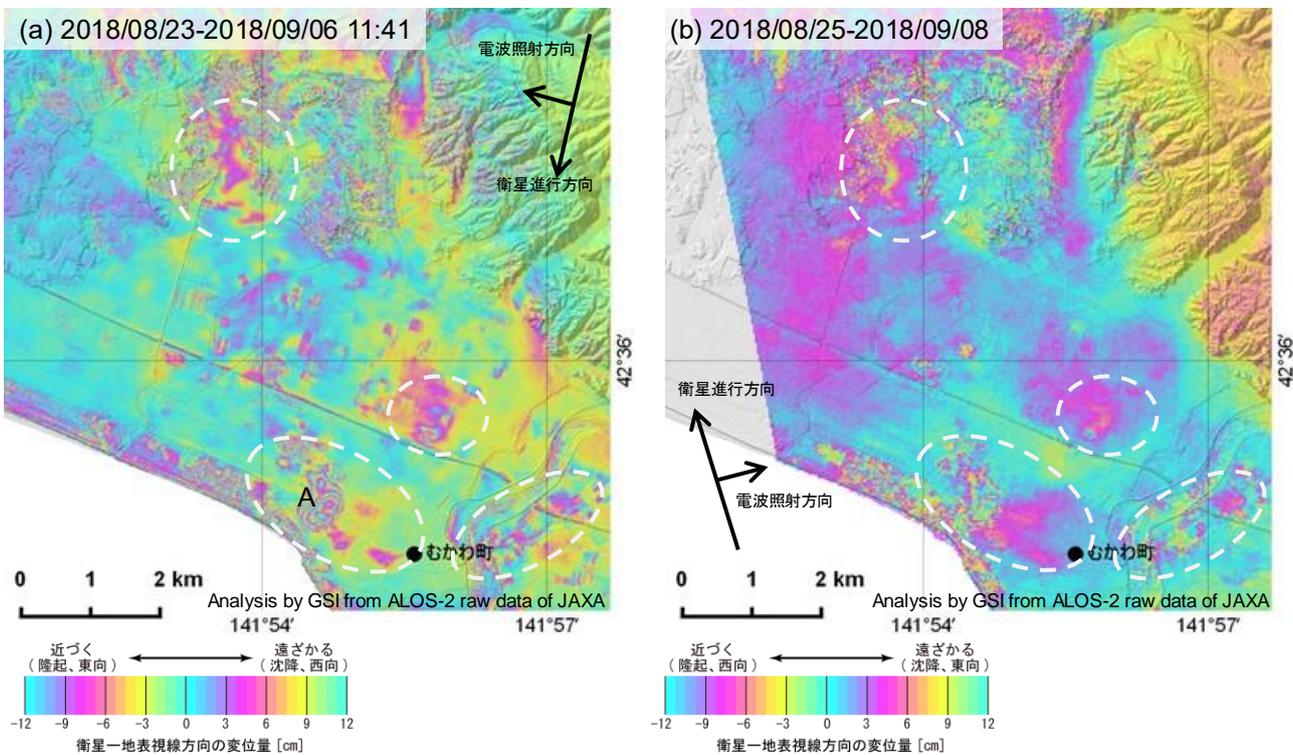


図-4 平成 30 年北海道胆振東部地震前後の SAR 干渉解析結果の拡大図。白破線内で局所的な変動が見られる。

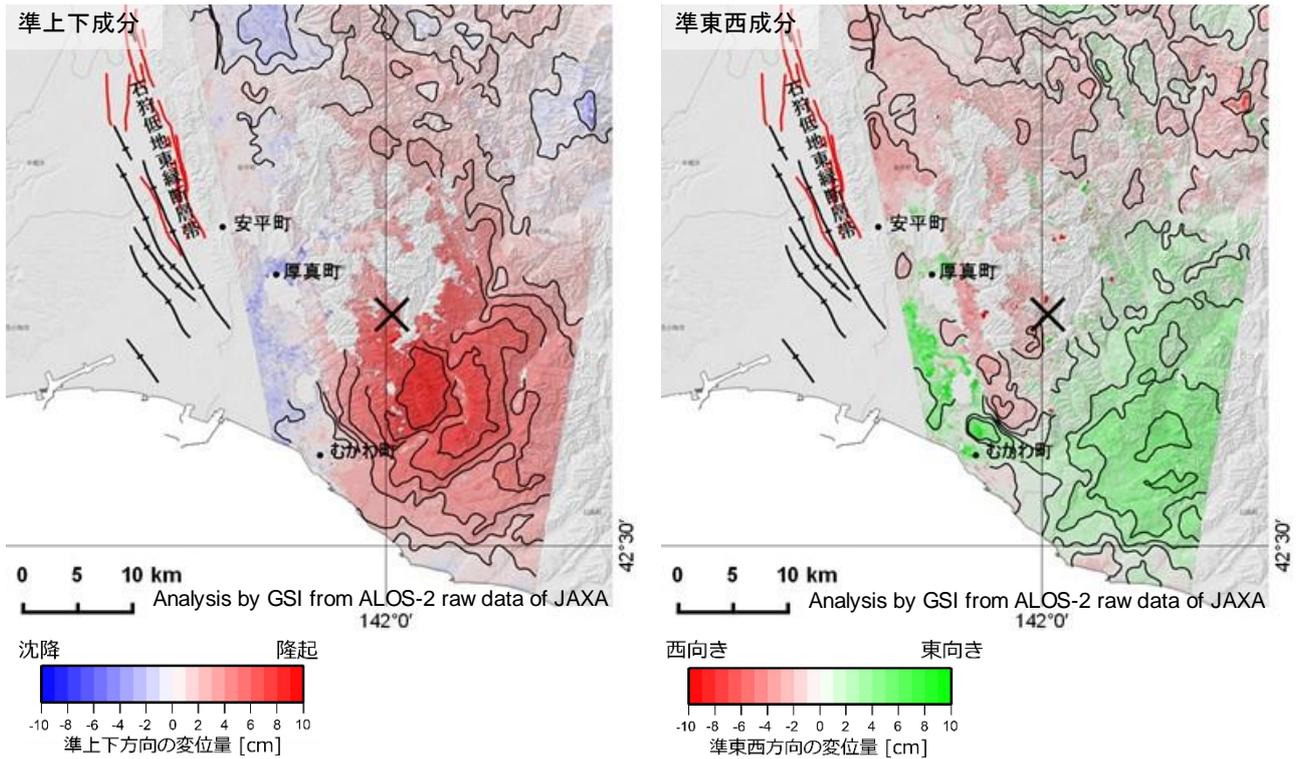


図-5 (a) 2018/08/23-2018/09/06 11:41 と (b) 2018/08/25-2018/09/08 の 2.5 次元解析結果
 左：準上下成分 右：準東西成分の変位量 等量線の間隔は 1cm
 図中の彩色がない部分の変動量は不明である。

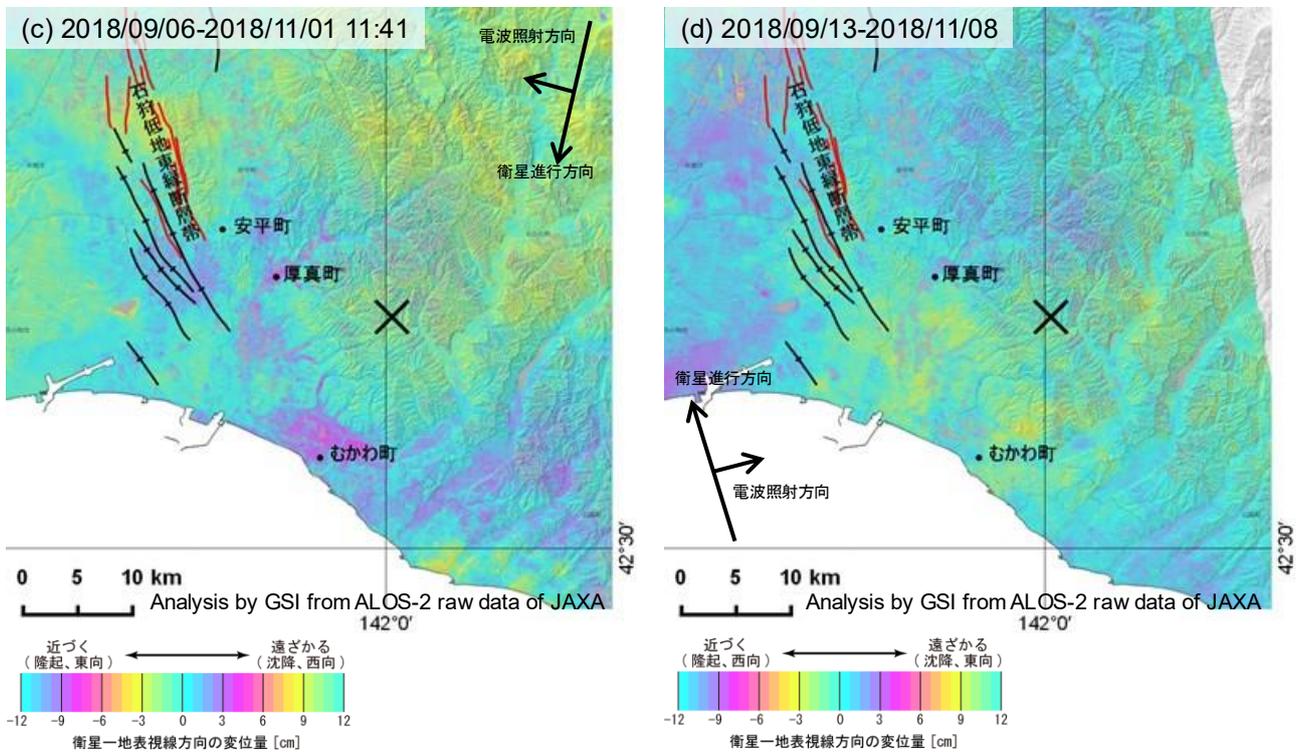


図-6 平成 30 年北海道胆振東部地震後の SAR 干渉解析結果

3. 基本基準点成果の取り扱い

3.1 三角点の測量成果停止の検討

広範囲な基準点成果改定に伴い、院内関係部・センター間の今後の対応の調整を図るため、基準点成果改定連絡会を9月12日に開催した。そこで、電子基準点「厚真」、「門別」については、地震に伴う変動に加え局所的な変動も生じていることから、9月13日付けで成果公表を停止し、1か月を目途に改定成果を算出することとなった。

三角点については、震源断層モデル(国土地理院, 2018c)から算出された最大せん断歪み 2ppm 以上の範囲内に約 300 点が高密度に設置されている(図-7)。同じく震源断層モデルから算出された水平変位量分布によると、最大水平変動量は 10cm 程度であると

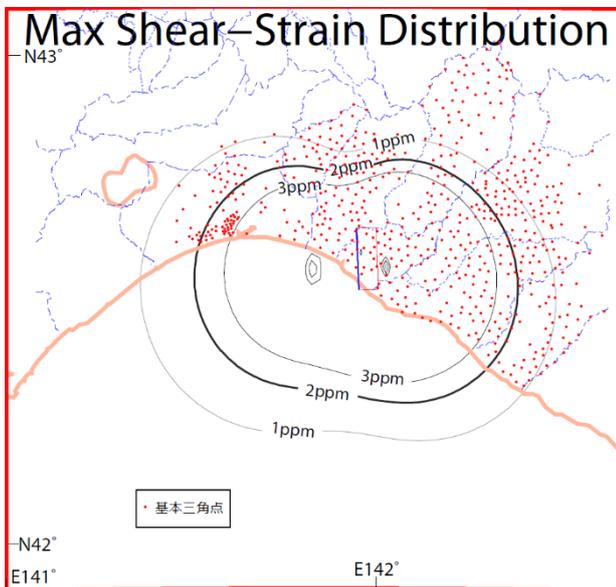


図-7 震源断層モデルから算出された最大せん断歪み図と基本三角点の設置状況

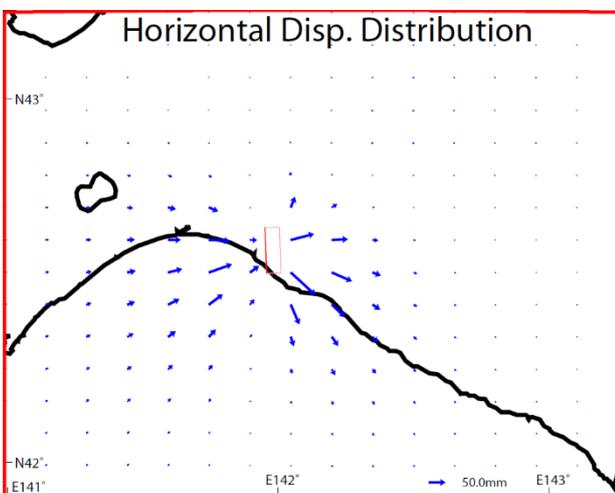


図-8 震源断層モデルから算出された水平変位量分布

推定された(図-8)。これらを考慮し、隣接する三角点を使用することで、公共測量での1級基準点測量の水平位置の閉合差の許容範囲($10\text{cm} + 2\text{cm}\sqrt{N \cdot \Sigma S(\text{km})}$)を超える不整合は生じないと判断して、基本的には成果公表停止は行わないこととした。

ただし、斜面崩壊により土中に埋まっている三角点については、実質的に使用できないため、国土地理院作成の斜面崩壊・堆積分布図をもとに埋没を確認できた26点について9月19日までに成果公表を停止した(図-9)。

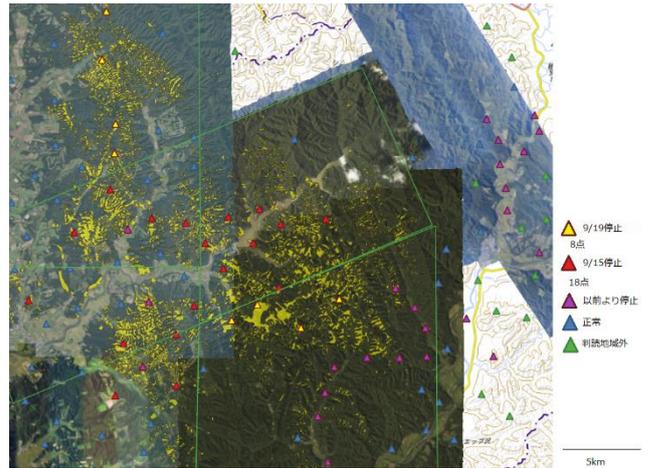


図-9 成果公表停止三角点の配置図
(斜面崩壊・堆積分布図を背景に判読)

なお、震源周辺に位置する安平町、厚真町、むかわ町、平取町、日高町においては、地籍調査は休止中、苫小牧市においては未着手であり、いずれも早急な三角点使用の予定がないことを合わせて確認した。

3.2 水準点の測量成果停止の検討

水準点についても、震源断層モデルから算出された上下変位量分布図等を参考に、震源断層直上を跨ぐような水準路線の配置ではなかったため、公共測量の1~3級水準測量の閉合差の許容範囲($15\text{mm}\sqrt{S(\text{km})}$)を超える不整合はないと判断して、成果の公表停止は行わず、被災地の応急復旧事業等には利用可能と整理した(図-10)。ただし、利用に際して、可能な限り現場に隣接した最寄りの水準点を既知点として使用すること、復旧測量に基づく改定成果公表後は新たな成果により再計算することをwebサイトで広く周知するとともに北海道内の関係地方公共団体ならびに測量作業機関等に事務連絡を発出した。

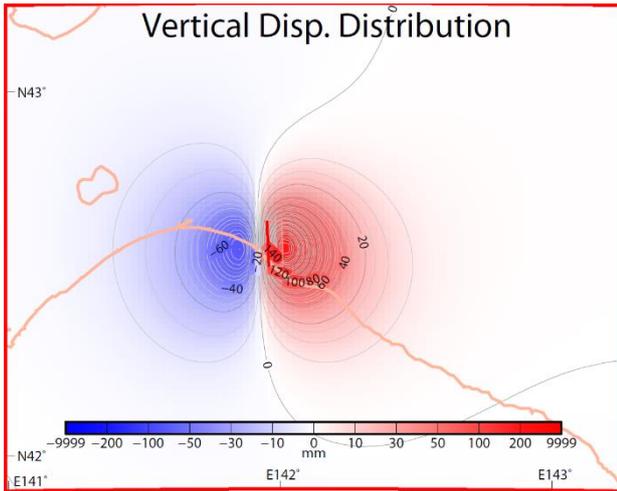


図-10 震源断層モデルから算出された上下変位量分布図

4. 水準点の測量成果の改定

4.1 水準点の復旧測量

水準点の復旧測量については、融雪後に本格的に開始される震災復旧・復興事業の円滑な実施に資する目的により、積雪前の観測終了を前提に計画した。胆振地方の過去の積雪状況データによると、12月上旬までが測量実施可能期限である。よって通常の業務発注手続きにより競争に付すことができないため、(一社)全国測量設計業協会連合会(以下「全測連」という。)との間で締結している「災害時における緊急測量作業実施に関する協定書」(以下「協定書」という。)に基づく緊急測量として実施することとした。これにより、平成31年2月中の改定成果公表を目指した。なお、測地部における協定書に基づく緊急測量作業の実施は、平成20年(2008年)岩手・宮城内陸地震に伴う水準測量(2社、計86km)以来であり、今回で2度目の実施となる(木暮ほか,2008)。緊急水準測量の実施範囲は、震源断層モデルから算出された上下

変位量分布図等を参考に、図-11に示す電子基準点付属標6点を始終端点とする総延長236kmの路線とした。測量実施可能期限と必要な外業日数を考慮すると、1地区当たりの業務量は60km程度であるため、10月12日に全測連へ4班程度の「緊急測量作業調査要請書」を发出、これを受け全測連より10月15日に「緊急測量作業対応可能会社調査結果」の回答報告があった。対応可能会社は、4社であったため、10月22日、入札・契約手続運営委員会において4社と契約協議を開始することを決定し、翌10月23日、各社に緊急測量作業を依頼した。

監督員の体制については、業務地区が本院から遠方であること及び迅速な対応が求められることから、国土地理院北海道地方測量部の協力を得て、各地区とも測地基準課(5名)と国土地理院北海道地方測量部(測量課2名)の混成対応とした。11月1日に国土地理院北海道地方測量部(札幌市)において、受注会社担当技術者との業務着手時打ち合わせを実施し、その後、各社とも速やかに業務に着手、積雪の影響を多少受けたものの12月14日までに全地区の実地最終確認を終了した(写真-2)。



写真-2 緊急水準測量作業の観測風景



図-11 緊急水準測量路線図

なお、今回の水準点の復旧測量業務内において、水準点の維持管理や保全を考慮のうえ、1点の移転と3点の再設、1点の補修を実施している。

4.2 水準点の測量成果改定

水準点の標高成果改定計算に必要な数値データ(比高データファイル等)は、特記仕様書により平成31年1月21日の第一期成果品納期までに成果検定機関の検定済みデータを提出することとした。各

地区の比高データを取りまとめ、平均計算（標高網平均計算）を実施し、各水準点の新たな標高成果を決定した。

手順は以下の通りである。

- ①水準測量を実施した電子基準点のうち、地震に伴う変動量が最も小さかった電子基準点「長沼」の付属標「940014A」を不動点とする標高変動量計算を実施。
- ②変動量計算の結果、電子基準点「長沼」、「白老」、「平取」、「静内」の各付属標取り付け点である近傍の4点の一等水準点の変動量較差が最大9mmで整合していることを確認（表-2）。

表-2 「長沼」付属標（940014A）を不動点とした
終端一等水準点の変動量

| 水準点番号 | 変動量 | 取付電子基準点 |
|-------|-------|---------|
| 7325 | +33mm | 「長沼」 |
| 7231 | +37mm | 「白老」 |
| 7925 | +39mm | 「平取」 |
| 準基255 | +30mm | 「静内」 |

- ③このことより、上記4点の電子基準点付属標に取り付けている水準点4点を固定した平均計算によって、一等水準路線内の水準点の改定標高成果を算出。
- ④電子基準点「千歳」、「厚真」に通じる二等水準路線については、各交点の改定標高成果に観測比高を加え、各二等水準点の改定標高成果を算出。
- ⑤上記の手順で再測量を実施した水準点の改測成果を算出したが、電子基準点「平取」の取付水準点周辺で改定量が十分に収束していない恐れがあったため、前回測量データ（平成16年度観測）を用いて、富良野市の「交8162」まで路線を75km延伸して再度平均計算を実施した。結果は、「平取」の取付水準点周辺で改定標高成果の較差は1mm程度であり、改善はほとんど見られず、改定量は収束していると判断して当初の平均計算結果を採用することとした。
- ⑥電子基準点「白老」、「静内」の各付属標の改測結果に基づく成果改定量は、各々-3.8mm、+4.5mmと微小であったため、電子基準点標高成果を含め改定しないこととした。
- ⑦その他6点の電子基準点付属標については、復旧測量作業実施要領に定める水準点の成果修正基準である、隣接水準点との変動量の差15mmを超えていたため、電子基準点標高成果を含め改定する

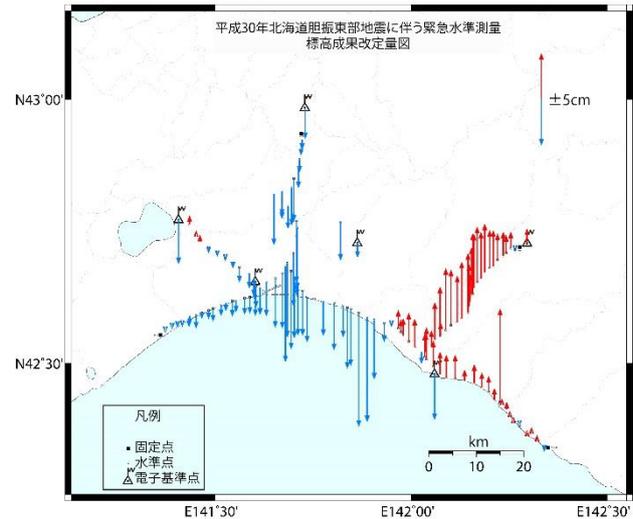


図-12 測量成果を改定した水準点と改定量

こととした。これにより、一等水準点及び二等水準点計120点に加え、電子基準点6点と各電子基準点付属標（二等水準点）の新たな標高成果を決定し、当初目標としていた2月20日に改定標高成果を公表した。

成果改定量は、震源断層の東側に位置する日高町、平取町ではプラスが、西側に位置するむかわ町、厚真町、苫小牧市などではマイナスが支配的となっており、震源断層モデルから算出された上下変位量分布と調和的な結果となっている。また、苫小牧市のウトナイ湖周辺では、低湿地帯に起因する液状化と考えられる10cm近い局地的に大きく沈降した点も存在している（図-12）。

5. まとめ

平成30年9月6日03時07分に発生した平成30年北海道胆振東部地震に伴い、だいち2号の緊急観測のデータを用いてSAR干渉解析及び2.5次元解析を行った。これらの解析によって把握した地殻変動情報は、震源断層モデルの推定や政府の地震調査研究推進本部地震調査委員会による地震活動の評価に貢献した。

この地震に伴う地殻変動は、震源域周辺の震災復旧・復興事業をはじめとする各種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、平成30年度第1次補正予算により、水準点の復旧測量（再測量）を実施した。再測量の結果に基づき、水準点の新たな標高成果を平成31年2月20日に公表した。融雪後に本格的に実施される被災地での地すべり対策工などに、公表した高精度な高さ情報が有効に活用されることが期待される。

謝 辞

ここで使用させていただいた 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 の間の協定及び火山噴火予知連絡会衛星解析グループの活動に基づき提供されました。数値気象モデルは、「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ました。この場を借りて、御礼申し上げます。

最後に、地震により被災された方々が一日も早く元の生活に戻れるとともに、測地部の取組が被災地の早期復興に繋がることを願っている。

(公開日：令和元年 12 月 27 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.
- 地震調査研究推進本部地震調査委員会 (2018)：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 22 Feb. 2019).
- 気象庁 (2018a)：平成 30 年 9 月 6 日 03 時 08 分頃の胆振地方中東部の地震について (第 4 報), https://www.jma.go.jp/jma/press/1809/06h/kaisetsu201809061730_4.pdf (accessed 22 Feb. 2019).
- 小林知勝, 矢来博司, 山田晋也 (2019)：平成 30 年北海道胆振東部地震の震源断層モデル, *国土地理院時報*, 132, 69-73.
- 国土地理院 (2018a)：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), https://www.gsi.go.jp/chibankansi/chikakukansi_20180906iburi_00002.html (accessed 22 Feb. 2019).
- 国土地理院 (2018b)：平成 30 年 (2018 年) 北海道胆振東部地震に関する情報, <https://www.gsi.go.jp/BOUSAI/H30-hokkaidoiburi-east-earthquake-index.html#6> (accessed 22 Feb. 2019).
- 国土地理院 (2018c)：平成 30 年 (2018 年) 北海道胆振東部地震に関する情報, <https://www.gsi.go.jp/BOUSAI/H30-hokkaidoiburi-east-earthquake-index.html#8> (accessed 28 Feb. 2019).
- 木暮弘幸, 菅原準, 横川正憲, 住谷勝樹, 平岡喜文, 瀬川秀樹, 根本盛行 (2008)：平成 20 年 (2008 年) 岩手・宮城内陸地震に伴う機動観測 (緊急路線調査・機動観測高精度三次元測量・GPS による間接水準測量・REGMOS による電子基準点データの転送), *国土地理院時報*, 117, 21-32. <https://www.gsi.go.jp/common/000048773.pdf> (accessed 28 Feb. 2019).