

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 Crustal deformation of the 2016 Kumamoto Earthquake detected by ALOS-2 InSAR images

測地部 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
Geodetic Department Haruka UESHIBA, Yuji MIURA, Basara MIYAHARA,
Hiroyuki NAKAI, Masaki HONDA, Yasuaki KAKIAGE and Tatsuya YAMASHITA
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
Hiroshi YARAI, Tomokazu KOBAYASHI and Yu Morishita

要 旨

国土地理院は、平成28年4月に発生した「平成28年(2016年)熊本地震」(以下「熊本地震」という。)に際し、宇宙航空研究開発機構(JAXA)(以下「JAXA」という。)が運用する陸域観測技術衛星2号「だいち2号」(以下「だいち2号」という。)で取得した観測データを解析し、地表変動の把握を行った。

平成28年4月14日21時26分に熊本県熊本地方で発生したM6.5の地震以降、一連の地震に伴う地殻変動を把握するため、国土地理院が事務局を務める地震予知連絡会SAR解析ワーキンググループ(以下「地震SAR解析WG」という。)は、JAXAに対し、だいち2号による多数の緊急観測を要請した。これらの緊急観測のデータを用いて、5月中旬にかけて継続的にSAR干渉解析を実施し、一連の地震に伴う地殻変動及び平成28年4月16日のM7.3の地震以後に生じた余効変動を検出した。解析の成果は迅速に関係機関へ提供するとともに、国土地理院の「平成28年熊本地震に関する情報」サイト(以下「熊本地震サイト」という。)で公表した。SAR干渉解析で求めた地表の変動量は、国土地理院が現地で行った緊急GNSS観測の結果と整合的で、両者から、布田川断層の北側で最大約2mに及ぶ周辺と連続した緩やかな変位勾配を持つ沈降が生じたことが分かった。

熊本地震は、1995年の兵庫県南部地震(M7.3)以降に国内で発生した最大規模の内陸型の地震であり、地殻変動が広い範囲に及んだ。だいち2号のSAR干渉解析で求めた詳細な地殻変動の情報は、地震活動の評価や基準点の測量成果停止及び改定の範囲の精査に活用された。

1. はじめに

「SAR」とは合成開口レーダー(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ある。SARでは、航空機や人工衛星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

波を受信することで画像を撮影する。「干渉SAR」とは、地表のある場所を、ほぼ同じ地点からSARによって複数回観測し、反射波の位相差を用いて衛星と地表の間の距離の差を計算することによって、観測時期の間に生じた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の結果を求める解析のことを「SAR干渉解析」という。

国土地理院では、これまで地球資源衛星「ふよう1号(運用期間:平成4年~平成10年)」や陸域観測技術衛星「だいち(運用期間:平成18年~平成23年)」(以下「だいち」という。)のSARデータを用いてSAR干渉解析を行い、地震、火山活動、地盤沈下、地すべりなどに伴う地表変動を捉えてきた。

平成27年2月からは、平成26年5月に打ち上げられただいち2号のデータを用いて、全国の地盤変動・地殻変動の監視を目的に定常的な解析を実施している。また、地震や火山活動等の発生時には、SAR干渉解析を行うことでこれらに伴う地殻変動を即時的に把握し、その成果を防災関係機関に提供すると共に国土地理院の熊本地震サイトに掲載している(山田ほか,2015;森下ほか,2015;三浦ほか,2016a;山田ほか,2016)。

干渉SARは、詳細な地殻変動を高い空間分解能で捉えることが可能な技術である。地上の観測機器を

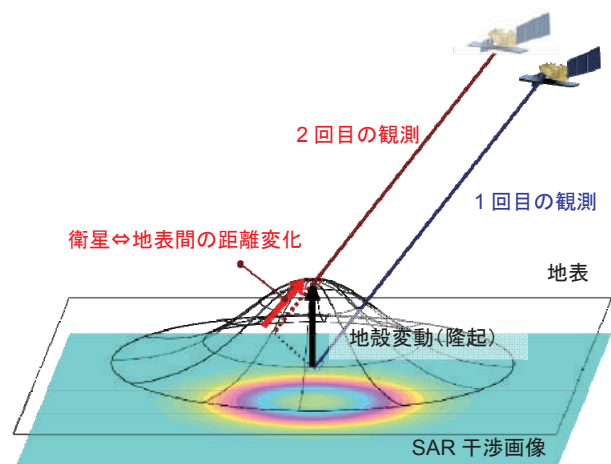


図-1 干渉SARの原理

必要とせず広い範囲を面的に観測できることから、GNSS 観測網では網羅できない局所的な地殻変動も捉えることができる。干渉 SAR は、これらの特長を活かして、特に複雑な地殻変動を引き起こすことの多い内陸型の地震の際に、地殻変動の把握と地震のメカニズムの解明に大きく貢献している(たとえば、Kobayashi et al., 2012)。

平成 28 年 4 月 14 日 21 時 26 分に熊本県熊本地方の深さ約 11km で M6.5 の地震が発生した。その後、同地方では 4 月 15 日 0 時 3 分に深さ約 7km で M6.4、4 月 16 日 1 時 25 分に同地方の深さ約 12km 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 (2016) によれば、これらの地震は布田川断層帯と日奈久断層帯の活動によるものと考えられており、これらの断層帯に沿って余震が続いた。

熊本地震は、だいち 2 号が運用を開始して以降発生した国内の内陸型地震では最大規模で、一連の地震活動の影響は広い範囲に及んだ。だいち 2 号は、平成 28 年 4 月 14 日の M6.5 の地震発生以降、繰り返し緊急観測を実施した。国土地理院では、これらのデータを用いて随時解析を実施し、地震活動に伴う詳細な地殻変動を検出した。得られた地殻変動情報は、関係機関へ迅速に提供するとともに、国土地理院の熊本地震サイト (国土地理院, 2016) で公表した。

本稿では、観測から解析、公開に至る一連の対応、把握した変動が災害対応に果たした成果について報告する。

2. だいち 2 号による緊急観測

2.1 だいち 2 号

だいち 2 号はだいちの後継機として JAXA が開発した SAR 専用衛星で、2014 年 5 月 24 日に打ち上げられた。だいちの経験を活かして様々な改善がなされている (JAXA, 2014)。

だいち 2 号では、だいちと比較して回帰日数が 46 日から 14 日へと短くなり、観測頻度が増加している。また、衛星の進行方向に対して観測方向を左右に切り替えることが可能になった。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を迅速に撮影することが可能となり、災害時における緊急観測の迅速性が向上した。さらに、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。

2.2 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、平成 26 年 4 月 7 日に協定を締結している。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 SAR 解析 WG について規定しており、国土地理院が事務局として、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ることを定めている。事務局である国土地理院は、地震発生時に実験協力者からの緊急観測要求を取りまとめ、JAXA へ緊急観測を要請することができる。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, 2016b)。

2.3 緊急観測

熊本地震では、4 月 14 日の M6.5 の地震発生以降、ほぼ毎日という高い頻度で観測が実施された (表-1)。実施された緊急観測のうち、10 件は地震 SAR 解析 WG が要請した観測である。4 月 14 日の地震発生後、直ちに緊急観測を要請したことにより、16 日の M7.3 の地震が発生する前の 15 日に最初の緊急観測が実施され、14 日の M6.5 及び 15 日未明の M6.4 による地殻変動を把握することができた。16 日の M7.3 の地震発生後は、地震の活動範囲が広がったため、詳細な地殻変動を把握するための高分解能モードによる観測と共に、変動の全容を把握するための広域観測モードによる観測の双方を要求した。緊急観測は、5 月中旬まで継続的に実施され、これらの観測データを用いて一連の地震に伴う地殻変動を時系列に沿って把握することができた。

3. 熊本地震での解析結果

3.1 ソフトウェアと補正処理

熊本地震では、国土地理院はこれまでの緊急観測と同様に、JAXA から観測データが提供され次第、速やかに SAR 干渉解析を実施した。解析は、国土地理院が開発したソフトウェア「新 GSISAR」を用いて実施した。地形起伏で生じる干渉縞を除去するための標高データには、「GSI10mDEHMJapan」(飛田, 2009) を用いた。また、大気中の水蒸気遅延に起因する誤差を低減するため、気象庁の数値気象モデルを用いた対流圏誤差低減処理 (小林ほか, 2014) を適用し、さらに衛星の軌道誤差等に起因する長波長の誤差を低減するため、主に国土地理院の GNSS 連続観測システム (GEONET) の GNSS 観測のデータを用いて補正を適用した (飛田ほか, 2005 ; 森下, 2016)。

表-1 実施された緊急観測と解析ペア一覧

記号	2回目観測日時(JST)	要求※1	1回目観測年月日	取得間隔	衛星進行方向	電波照射方向	観測モード	入射角(シーン中心)	垂直基線長	検出対象※2
a	4/15 12:53	有	2014/11/14	518日間	南行	左	高分解能(3m)	32.4°	-104m	F ^(P) ※3
b	4/18 0:25	有	2015/ 5/18	336日間	北行	右	高分解能(3m)	50.7°	+175m	F,M ^(P)
c	4/18 12:18	有	2016/ 3/ 7	42日間	南行	右	高分解能(3m)	36.3°	-124m	F,M ^(P)
d	4/19 0:46	有	2015/ 2/10	434日間	北行	右	広域観測(Wide)	65.9°	+54m	F,M ^(P)
e	4/19 23:30	有	2016/ 1/26	84日間	北行	左	広域観測(Normal)	43.6°	-186m	F,M
f	4/20 12:59	有	2015/ 1/14	462日間	南行	左	高分解能(3m)	43.0°	-3m	F,M ^(P)
g	4/22 0:11		2015/12/ 4	140日間	北行	右	高分解能(6m)	34.0°	-147m	F,M
h	4/27 0:18		2016/ 3/30	28日間	北行	右	高分解能(3m)	43.0°	-228m	F,M
i	4/27 12:11		2016/ 4/13	14日間	南行	右	高分解能(3m)	42.9°	+213m	F,M
j	4/28 0:39		2015/ 4/30	364日間	北行	右	高分解能(3m)	63.3°	-154m	F,M
k	4/29 12:52	有	2016/ 4/15	14日間	南行	左	高分解能(3m)	32.5°	-152m	M
l	4/29 23:44	有	2016/ 4/15	14日間	北行	左	高分解能(3m)	24.5°	+195m	M
m	5/1 0:04	有	2016/ 4/17	14日間	北行	右	高分解能(3m)	20.1°	-171m	A ^(P)
n	5/1 11:57		2016/ 4/17	14日間	南行	右	高分解能(3m)	60.1°	+89m	A
o	5/2 12:18	有	2016/ 4/18	14日間	南行	右	高分解能(3m)	36.3°	+87m	A ^(P)
p	5/6 0:11		2016/ 4/22	14日間	北行	右	高分解能(6m)	34.0°	+55m	A
q	5/11 0:18		2016/ 4/27	14日間	北行	右	高分解能(3m)	43.0°	+362m	A
r	5/16 12:18		2016/ 5/ 2	14日間	南行	右	高分解能(3m)	36.3°	+157m	A

※1 「有」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。

※2 各解析ペアでの検出対象を示す。F (Foreshock / 前震) : M6.5 (4月14日発生), M6.4 (4月15日発生), M (Main shock / 本震) : M7.3 (4月16日発生), A (Afterslip / 本震後の変動) を表す。

※3 「(P (Publish))」は国土地理院の熊本地震サイトで公表した解析結果を示す。

3.2 SAR 干渉解析

解析の結果は、地理院地図上で震央(気象庁, 2016)、及び活断層図(地震調査研究推進本部)と重ね合わせて表示した。2.3節で述べたとおり、4月15日に緊急観測が実施されたため、4月14日のM6.5の地震(以下「M6.5」という。), 15日のM6.4の地震(以下「M6.4」という。)による地殻変動(図-2)、16日のM7.3の地震(以下「M7.3」という。)を含む地殻変動(図-3)を各々把握することができた。さらに、16日のM7.3の発生以後にも複数の緊急観測が実施されたため、M7.3以後の余効変動(図-4)も把握が可能となった。

M6.5及びM6.4の地震前後の観測データを用いた解析では、布田川断層帯の北西部で最大約9cmの衛星に近づく向き(西向き又は隆起)の変動、南西部で最大約12cmの衛星から遠ざかる向き(東向き又は沈降)の変動が検出された(図-2)。SAR干渉解析で得られた地殻変動は、地震のメカニズム推定に活用され、布田川断層と日奈久断層の結合部分から日奈久断層に沿って南に延びる、西傾斜約70°のほぼ純粋な右横ずれの断層運動でよく説明できることが報告されている(Kobayashi, 2016)。

M7.3の前後のデータを用いた解析では、布田川断層帯及び日奈久断層帯に沿った地殻変動の様相が捉えられた(図-3)。布田川断層帯の既知の断層線の東側延長上においても、阿蘇カルデラ内で生じた地殻変動や、阿蘇カルデラ北西で見られる、北西-南東方向の複数の不連続線など、複雑な変動を捉えた。

M7.3以後の2時期のデータを用いた解析では、布田川断層沿い及び阿蘇カルデラ内で衛星から遠ざかる数cm程度の変動を検出した(図-4)。北行軌道と南行軌道の右観測の両方の解析で衛星から遠ざかる変動が見えていることから、地震後には沈降方向の変動が卓越しているといえる。

3.3 2.5次元解析

3.2節で得られたSAR干渉画像が含むのは、2時期の間に生じた、衛星-地表間の距離の変化に関する情報のみで、上下及び水平方向の変動量を分離することはできない。また、特にM7.3の地震の地殻変動を含むSAR干渉画像(図-3)では、位相変化が複雑なため、断層付近の地殻変動を直感的に想像することが難しい。そこで、同一の範囲を東西双方から観測した2枚のSAR干渉画像を用いて変動の準上

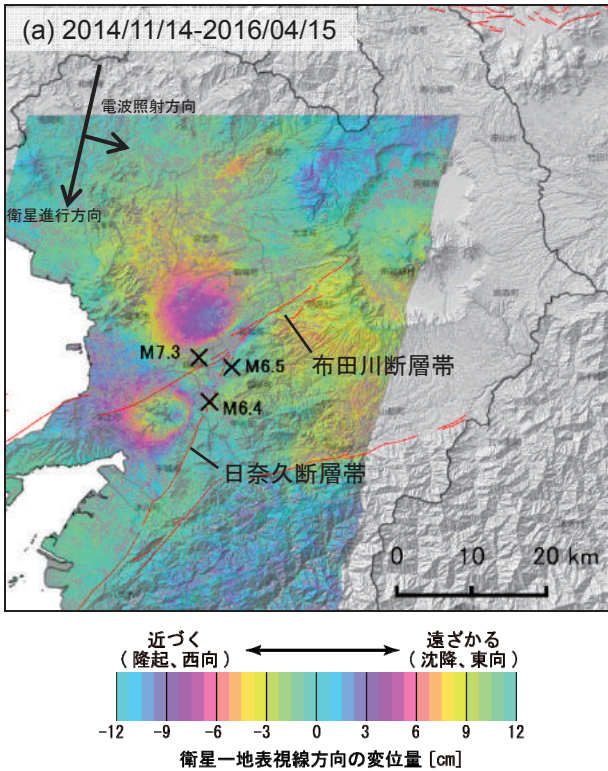
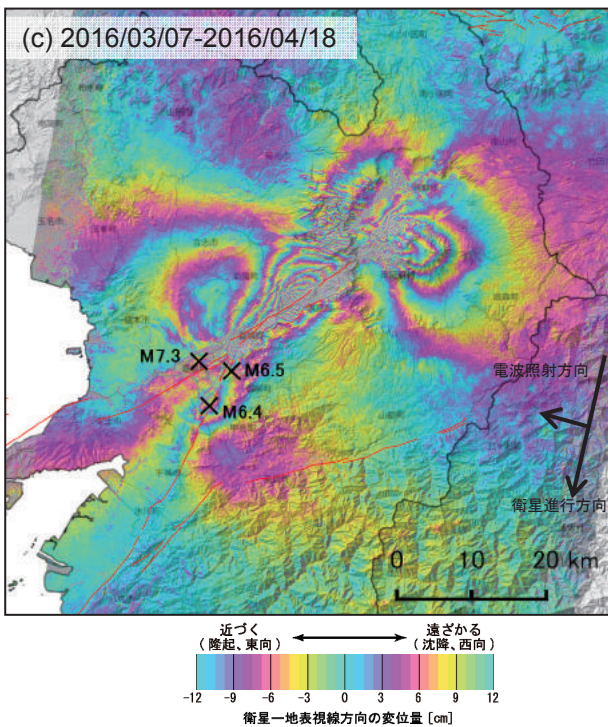


図-2 M6.5 及び M6.4 の地震前後の解析ペアの SAR 干渉画像. x は震央(M6.5:2016/04/14 21:26 深さ 11km, M6.4 : 2016/04/15 00:03 深さ 7km , M7.3 2016/04/16 01:25 深さ 12km) (気象庁, 2016). 赤線は活断層 (地震調査研究推進本部). 図-3 及び 図-4 においても同様.



下成分 (上下方向から数度ずれた方向の変動成分) と準東西成分 (東西方向から数度ずれた方向の変動成分) を導出する 2.5 次元解析 (Fujiwara et al., 2000) という手法を用いて準上下・準東西の変動成分の把握を行った (図-5).

解析には, 東から観測した SAR 干渉画像 (c) と西から観測した SAR 干渉画像 (d) を用いた ((c), (d) 等は表-1 の記号を示す (以下同じ)). この結果, M7.3 の地震を含む地震活動に伴って, 布田断層帯の北側で最大 1m 以上の沈降と東向きの変動, 南側で最大 30cm 以上の隆起と 50cm 以上の西向きの変動が生じたことが明らかになった (図-6). 最大の変動量を検出した付近には, 地殻変動を常時監視している電子基準点が設置されていないため, 2.5 次元解析を行うことで, 地表の観測点では行えなかった上下方向の変動量の詳細かつ迅速な把握が可能となった.

3.4 緊急 GNSS 観測結果との比較

布田川断層直近の地域では, SAR 干渉画像が非干渉もしくは位相変化が複雑であったため, 位相変化を変位量へ積算する位相連続化 (位相アンラッピング) が行えず, 2.5 次元解析で変動量を得られない場所があった. 国土地理院では, これらの地域の地殻変動の全体像を把握するため, 現地で緊急 GNSS 観測を実施した. 緊急 GNSS 観測は, 干渉 SAR で変動量が得られていない断層近傍の範囲に加え, 干渉 SAR で最大の変動量を確認した地点においても, 整合性を確認するための観測を実施した (図-7). その

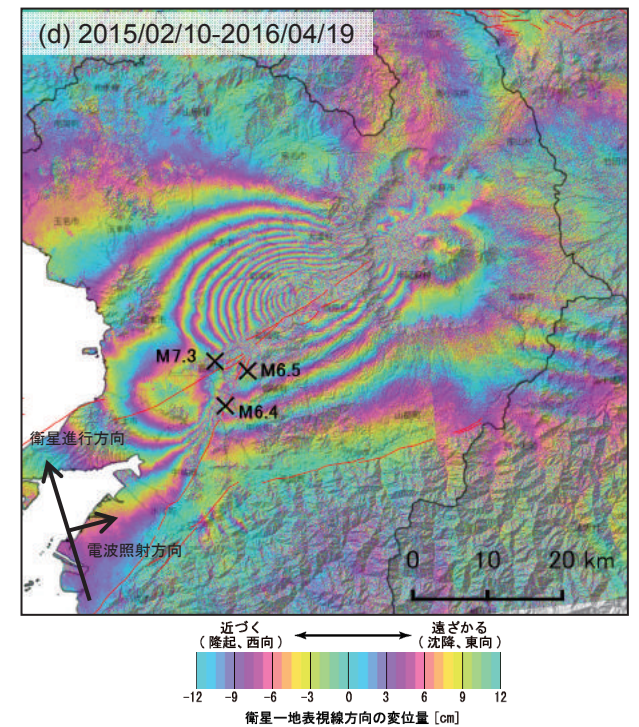


図-3 M7.3 の地震前後の解析ペアの SAR 干渉画像

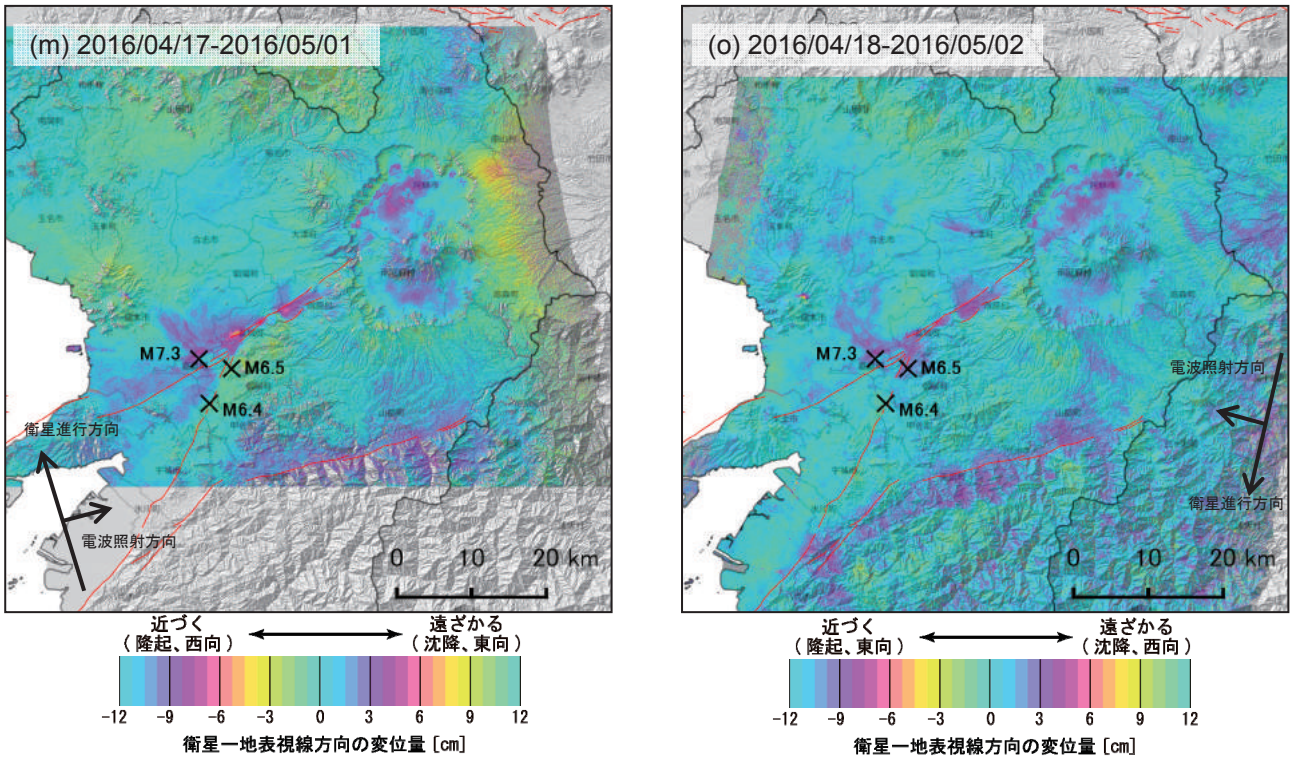


図-4 M7.3の地震発生以後の解析ペアのSAR干渉画像

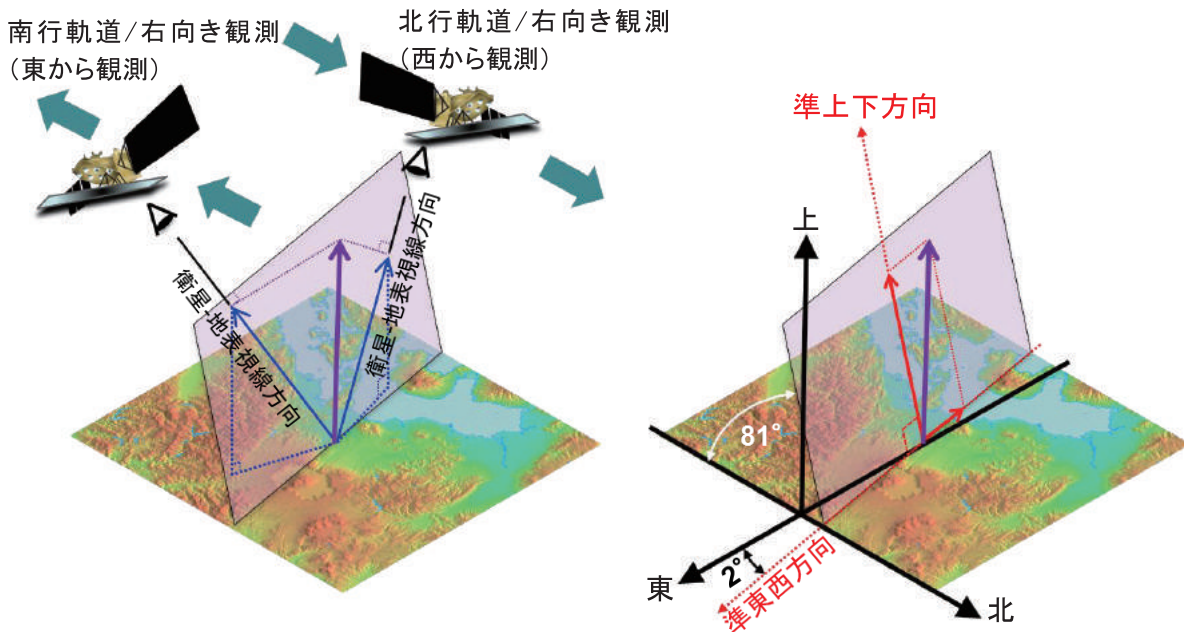


図-5 2.5次元解析の概念図. 東, 西からの観測結果 (青矢印) から2次元 (ピンクの平面) の変動量 (紫矢印) を推定し, 準上下成分, 準東西成分 (赤矢印) に分離する.

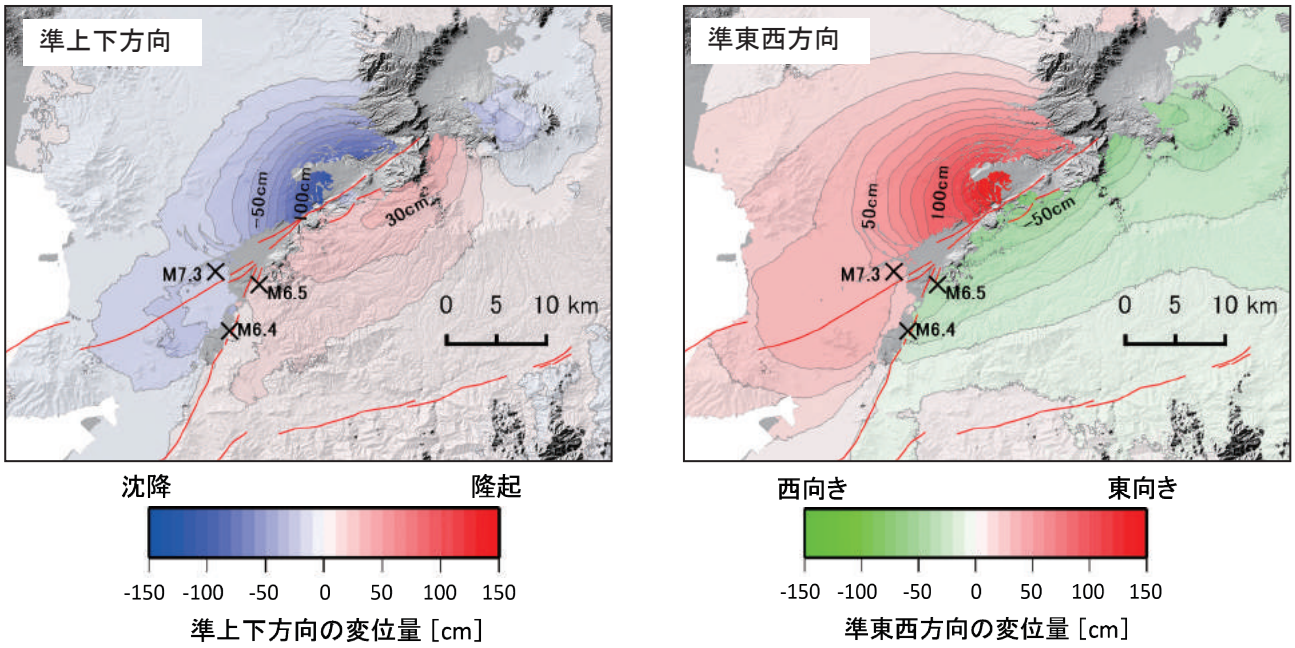


図-6 2.5次元解析によって得られた準上下方向と準東西方向の変位量。等量線の間隔は10cm。

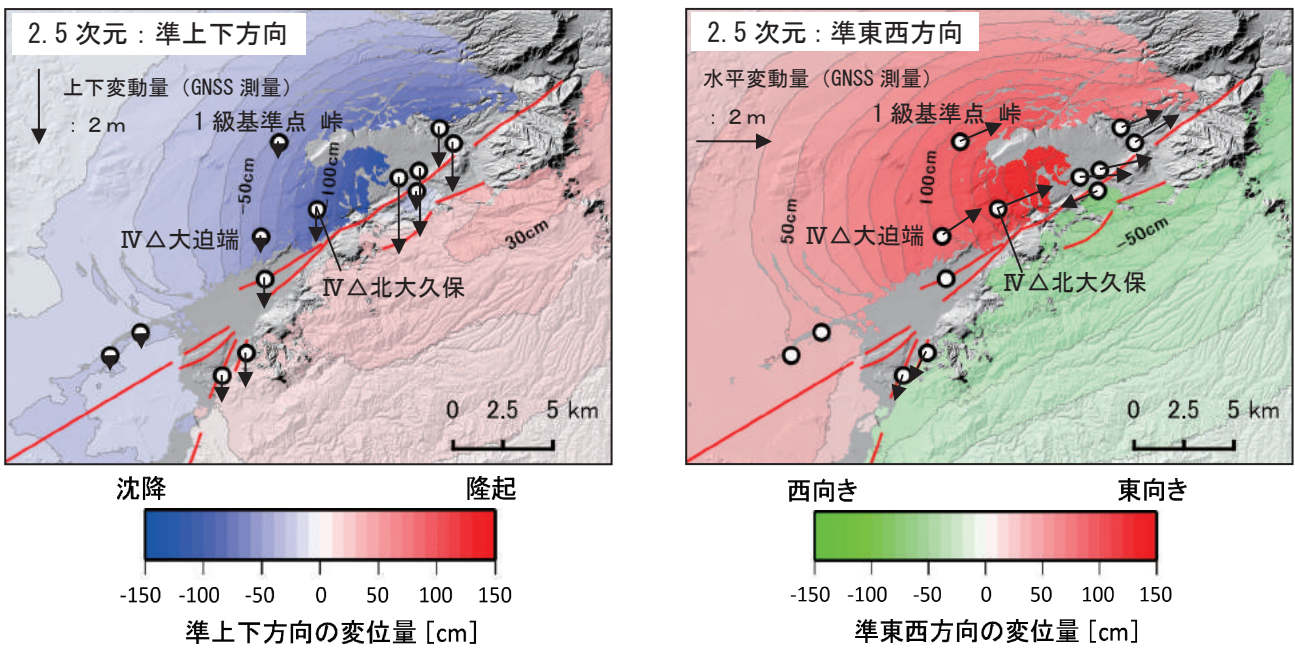


図-7 緊急GNSS測量（上下，水平）と2.5次元解析の結果（準上下，準東西）の比較。
 (GNSS測量の水平方向のベクトルは水準点でのデータを除いている.)

表-2 2.5次元解析とGNSS測量の比較

観測点	準上下方向の変動量 [cm]			準東西方向の変動量 [cm]		
	2.5次元	GNSS測量	差	2.5次元	GNSS測量	差
IV△北大久保	-95.0	-103.0	8.0	129.9	148.1	-18.2
IV△大迫端	-62.3	-59.6	-2.7	100.3	104.3	-4.0
1級基準点 峠	-55.7	-55.0	-0.7	106.4	111.7	-5.3

※GNSS測量での上下・水平方向の変動量と、2.5次元解析での変動量がともに得られている基準点で比較。

結果、2.5次元解析で得た変動量とGNSS観測で得た変動は、特に変動量の大きい四等三角点「北大久保」ではその差が準上下方向で約8cm、準東西方向で約18cmと比較的大きいものの、他の2点では概ね5cm程度以内で一致し、GNSS観測とSAR干渉解析で得た結果は概ね整合しているといえる(表-2)。両者の結果を統合することで、布田川断層の北側で最大2mほど周辺から緩やかな勾配で沈下していたことが明確になった。

4. 情報の提供と活用

熊本地震では、断層運動に伴う広範囲かつ複雑な地殻変動の様相を、SAR干渉解析によって地震後速やかに、時系列に沿って捉えることができた。また、SAR干渉解析では、GEONETによるGNSS観測やUAV・航空写真の判読のみでは困難であった、変動の及んだ範囲の特定や局所的な地表変動の詳細な把握も行うことができたため、その成果は災害対応の様々な場面で活用された。

解析した結果のうち、解析終了時点で新たな変動情報が含まれていた解析ペア(a)、(b)、(c)、(d)、(f)、(m)、(o)を地理院地図に掲載し、直ちに熊本地震サイト(国土地理院、2016)で公表した。平成28年4月30日までに、地理院地図の上で(a)には57万件、(c)には83万件のアクセスがあった。ウェブ公表しなかった解析ペアは、地震に伴う地殻活動の監視に使用している。地震予知連絡会に提供した解析結果は、地震活動の検討に活用された(地震予知連絡会、2016)。SAR干渉解析とGNSS連続観測の結果から推定した震源断層モデル(矢来ほか、2016)は、地震調査委員会で地震活動の評価に活用され、ここから推定される震源断層の長さは約35kmと評価された(地震調査研究推進本部地震調査委員会、2016)。

地震による地殻変動が広範囲に及んだため、三角点・水準点の測量成果の公表停止にあたっては、SAR干渉解析の成果を活用して地殻変動の範囲を特定し、公表を停止する基準点と改測の範囲を決定した(大滝ほか、2016)。

そのほか、だいち2号になって向上した高い空間解像度を活かして、地震に伴って生じた変位の小さい地表断層の抽出(藤原ほか、2016; Fujiwara et al., 2016)など、地上での観測・調査だけでは全てを把握することが困難な地表変動の把握を行い、現地調査を行う際の資料として活用した。

5. まとめ

国土地理院は、熊本地震に際し、だいち2号によって観測されたデータを用いて、SAR干渉解析を実施した。だいち2号では観測頻度及び緊急観測の迅速性がだいちより向上したため、一連の地震活動に伴う詳細な地殻変動を時系列に沿って迅速に捉えることが可能となった。また、高分解能モード・広域観測モードを組み合わせることで、地震活動に伴う地殻変動の全容と詳細の双方を効率的・効果的に捉えることができた。

だいち2号によって、地震に伴う地殻変動の干渉SARによる把握は、迅速性が向上するとともに、変動の全容・詳細の双方を把握する性能が向上した。得られた地殻変動の情報は、地震活動の評価や基準点の測量成果停止及び改定の範囲の精査に活用された。一方で、解析終了後、解析の成果に対する評価に要する時間と外部へのデータ提供の迅速化には課題が残った。SAR干渉解析の迅速性・性能を災害対応に活かすために、得られた成果を専門家・一般のニーズに合わせて分かりやすく速やかに提供できるよう、双方のユーザの要望を把握し、要望に沿ったデータ発信を行うよう検討を進めていきたい。

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SAR解析WG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。判読に使用した活断層図のデータは地震調査研究推進本部事務局(文部科学省研究開発局地震・防災研究課)から提供されました。この場を借りて、御礼申し上げます。

(公開日:平成28年11月10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.

- 藤原智, 矢来博司, 小林知勝, 森下遊, 中埜貴元, 宇根寛, 宮原伐折羅, 仲井博之, 三浦優司, 上芝晴香, 攪上泰亮 (2016): だいち 2 号干渉 SAR による熊本地震で生じた小変位の地表断層群の抽出, 国土地理院時報, 128, 147-162.
- Fujiwara, S., H. Yarai, T. Kobayashi, Y. Morishita, T. Nakano, B. Miyahara, H. Nakai, Y. Miura, H. Ueshiba, Y. Kakiage (2016): Small displacement linear surface ruptures of the 2016 Kumamoto earthquake sequence detected by ALOS-2 SAR interferometry, *Earth, Planets and Space*, 68:160, doi:10.1186/s40623-016-0534x.
- 地震調査研究推進本部地震調査委員会 (2016): 平成 28 年 (平成 28 年) 熊本地震の評価, http://www.static.jishin.go.jp/resource/monthly/2016/2016_kumamoto_3.pdf (accessed 8 Sep. 2016).
- 地震予知連絡会 (2016): 第 211 回地震予知連絡会 (平成 28 年 5 月 11 日) 議事概要, <http://cais.gsi.go.jp/YOCHIREN/activity/211/211.html> (accessed 29 Sep. 2016).
- 気象庁 (2016): 震源リスト, http://www.data.jma.go.jp/svd/eqev/data/daily_map/index.html (accessed 6, Sep. 2016).
- Kobayashi, T., M. Tobita, M. Koarai, T. Okatani, A. Suzuki, Y. Noguchi, M. Yamanaka, and B. Miyahara (2012), InSAR-derived crustal deformation and fault models of normal faulting earthquake (M7.0) in Fukushima-Hamadori area. *Earth Planet Space*, 64, 1209-1221.
- 小林知勝, 石本正芳, 飛田幹男, 矢来博司 (2014): SAR 干渉解析のための数値気象モデルを用いた大気遅延誤差の低減処理ツールの開発, 国土地理院時報, 125, 31-38.
- Kobayashi, T. (2016): Earthquake rupture properties for foreshocks (M6.5 and M6.4) of the 2016 Kumamoto Earthquake, revealed by conventional and multiple-aperture InSAR, submitted to *Earth, Planets and Space*.
- 国土地理院 (2016): 平成 28 年熊本地震に関する情報, <http://www.gsi.go.jp/BOUSAI/H27-kumamoto-earthquake-index.html> (accessed 10 Aug. 2016).
- 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 (2016a): 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.
- 三浦優司, 宮原伐折羅, 藤原智, 矢来博司, 小林知勝, 森下遊, 仲井博之, 本田昌樹, 上芝晴香, 攪上泰亮 (2016b): だいち 2 号を活用した地震に伴う地殻変動の把握—地震予知連絡会 SAR 解析ワーキンググループの取組—, 写真測量とリモートセンシング, VOL.55, NO.3, 178-182.
- 森下遊, 山田晋也, 山中雅之, 吉川忠男, 和田弘人, 矢来博司, 中野貴元, 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.
- 森下遊 (2016): GNSS データを用いた干渉 SAR に含まれる空間的長波長誤差の低減, 測地学会誌, 印刷中.
- 大滝修, 井上武久, 植田勲, 山下達也, 山口和典, 白井宏樹, 鈴木啓, 三木原香乃 (2016): 熊本地震に伴う基準点成果の改定, 国土地理院時報, 128, 177-187.
- 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 10 Aug. 2016).
- 飛田幹男, 宗包浩志, 松坂茂, 加藤敏, 矢来博司, 村上亮, 藤原智, 中川弘之, 小澤拓 (2005): 干渉合成開口レーダの解析技術に関する研究, 国土地理院時報, 106, 37-49.
- 宇宙航空研究開発機構 (2014): 陸域観測衛星 2 号「だいち 2 号」<http://fanfun.jaxa.jp/countdown/daichi2/files/daichi2.pdf> (accessed 13 Sep. 2016).
- 山田晋也, 森下遊, 和田弘人, 吉川忠男, 山中雅之, 藤原智, 飛田幹男, 矢来博司, 小林知勝 (2015): だいち 2 号 SAR 干渉解析による御嶽山噴火に伴う地表変位の検出, 国土地理院時報, 127, 11-15.
- 山田晋也, 三浦優司, 山中雅之, 仲井博之, 和田弘人, 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 SAR 干渉解析によって検出された箱根山・大涌谷内の地表変動, 国土地理院時報, 128, 67-75.
- 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.