

衛星合成開口レーダーを用いた平成19年(2007年)能登半島地震に伴う
地殻・地盤変動の検出**Detection of Crustal and Ground Deformation Triggered
by the Noto Hanto Earthquake in 2007 with InSAR**

測地部 雨貝知美・和田弘人・藤原みどり・鈴木 啓
**Geodetic Department Tomomi AMAGAI, Kozin WADA,
Midori FUJIWARA and Akira SUZUKI**
地理地殻活動研究センター 飛田幹男・矢来博司
**Geography and Crustal Dynamics Research Center
Mikio TOBITA and Hiroshi YARAI**

要 旨

国土地理院は、陸域観測技術衛星「だいち」(ALOS)に搭載されているLバンド合成開口レーダー(PALSAR)の観測データを用いて、干渉SAR解析を定常的に実施している。この定常解析に加え、災害発生時には、災害状況の把握等を目的として、緊急解析も実施している。

2007年3月25日に発生した平成19年(2007年)能登半島地震では、北行軌道と南行軌道の異なる軌道からの観測がそれぞれ2回実施され、これらの観測データを用いた緊急解析を行った。

これらの解析結果は、地震による広範囲の変動を面的に捉えることに成功した。さらに、いずれも震源断層モデルによるシミュレーション結果とほぼ一致しており、干渉SARによって、地殻変動を正確に捉えたことを示した。また、SAR干渉画像単独では変位の向きを特定することはできないが、2方向以上からのSAR干渉画像を組み合わせることにより、変動を擬似的な上下方向の成分と東西方向の成分とに分離することが可能となる。これによって得られた上下・東西方向の変動量は、能登半島地震のメカニズムから想定される変動量と調和的であった。これらの成果は、基準点の改測などの復旧作業を行う上で重要な情報となる。

さらに、地震に伴う地殻変動に加えて、地すべりなどの局所的な地表面の変化を捉えることに成功した。この中には、現地調査や空中写真判読では捉えることが難しい微少な地すべりも含まれており、大規模災害に発展する可能性のある地域の把握等、防災面でも有効な情報となることが示された。

1. はじめに

干渉合成開口レーダー(以下、「干渉SAR」という。)は、人工衛星に搭載した合成開口レーダーを用いて、地表のある地域を2回以上観測し、その期間に起こった地表の動きを受信波の位相差として捉えるというリモートセンシング技術である。これにより、数10km四方という広範囲の地殻変動を、数cmの変動

精度で面的に捉えることができる。

国土地理院は、1994年以降、干渉SARを用いた定量的な地殻・地盤変動計測の実用に向けて、解析手法ならびにそれらに必要なソフトウェアの研究開発を行ってきた(飛田, 2003)。その結果、今日まで地震・火山による地殻変動や地盤沈下など、地表の変動現象を様々なスケールで捉えることに成功してきた(小澤ほか, 2003; 藤原ほか, 2005)。

これらの研究開発の成果を基に、平成16年度からの第6次基本測量長期計画では、2006年10月から定常運用が開始された、陸域観測技術衛星「だいち」(ALOS: Advanced Land Observing Satellite)のLバンド合成開口レーダー(PALSAR: Phased Array type L-band Synthetic Aperture Radar)を用いた、高精度地盤変動測量の実施を提示している。この高精度地盤変動測量では、地震・地盤沈下・火山・地すべり等による防災・災害状況把握のための地殻・地盤変動の監視を目的としている。特に、長期的な活動をすることが多い火山・地盤沈下地域は、定常的な解析・監視に努めている。一方、災害発生時には、災害状況の把握等を目的として、緊急解析を実施している。

2007年3月25日に発生した平成19年(2007年)能登半島地震(以下、「能登半島地震」という。)についても、緊急解析を実施し、成果を公表した。この成果は、広範囲の変動を捉えると共に、地すべりなどの局所的な地表面の変化を捉えることに成功し、基準点の改測などの復旧作業を行う上で、重要な情報となることが示された。

本稿では、緊急時における観測要求から成果公表までの作業工程を示した上で(2章)、能登半島地震に際して実施した緊急解析の概要と、その解析結果について述べる(3章)。さらに、その成果がどのように利用されたかを示す(4章)。最後に、まとめと今後の課題について述べる(5章)。

2. 緊急時における作業工程

干渉SARを実施するためには、最低2回の観測が

必要である。人工衛星を利用する場合は、ほぼ同一の軌道を飛行した異なる時期の観測が利用される。こうして、2つの観測の位相差をとることによって、地殻変動量の検出に利用する。この組となる2つの観測データを「干渉ペア」と呼び、先に観測されたものを「マスター」、後に観測されたものを「スレーブ」という。干渉処理を行うためには、まずは干渉ペアがあることを確認しなければならない。

地震等の災害が発生した場合、災害前後に行われた観測による干渉ペアが必要となる。そのため、初めに、災害地域における「だいち」の観測スケジュールを確認する。「だいち」の観測スケジュールは、「だいち」を運用している宇宙航空研究開発機構(以下、「JAXA」という。)による、ALOS(だいち)情報システム WWW サービス (AUIG: ALOS User Interface Gateway) から確認できる。この AUIG から、災害地域において、すでに観測されたマスターに対し、干渉ペアとなりうるスレーブの観測が確認できた場合は、その観測が実施されるよう、JAXA へ緊急観測要求を行う。この際、干渉ペアが複数ある場合には、①災害発生後からの経過日数が少ない、②観測領域が、震源断層モデルによるシミュレーション結果から想定される変動領域をより広範囲にカバーしている、等の条件によって、優先順位を付加して観測要求を行う。

緊急観測要求によって観測されたデータは、観測後、速やかにオンライン (AUIG) で提供される。オンラインで提供されるデータは、定常時に提供される L0 形式フォーマットデータ (以下、「L0 データ」という。)ではなく、L1.0 形式フォーマットデータ (以下、「L1.0 データ」という。)である。そのため、データ受領後、即座に解析を開始することができる。

干渉処理を行う解析は、1 シーン (およそ 70×70 km) のマスターとスレーブを用いた場合、およそ 5～6 時間程度かかる。SAR 干渉画像ができるまでの工程を、図-1 に示す。解析によって得られた干渉画像は、必要に応じて市町村境界等と重ね合わされ、国土地理院のホームページ (<http://www.gsi.go.jp/>) 上で公開される。緊急時の場合、干渉画像の公開は、データを受領した翌日あるいは翌々日を目標に行われる。また、その成果の重要度によっては、記者発表等も併せて行う。

2. 1 緊急観測要求とデータ受領

「だいち」は、災害発生・校正検証等の理由から行う観測を除き、あらかじめ長期的に決定された基本観測計画に基づき観測が行われる。国土地理院は、JAXA と締結した共同研究協定に基づき、「だいち」の観測に対する観測要求を行っている。また、これらの観測要求に基づいて実施された観測のデータは、

JAXA から順次提供される。

国土地理院の観測要求は、「だいち」の基本観測計画に対する要求である基本観測要求と、災害等の緊急時に対する緊急観測要求に大別される。基本観測要求は、希望する観測地域や観測頻度等の観測要求を予め提出するのに対し、緊急観測要求は、災害発生時等に、必要な地域の観測を指定して観測要求を提出する。また、データの提供方法も異なり、定常時には、DTF-2 というテープ媒体にて、1 週間に 1～2 度の割合で、L0 データが送付される。L0 データは、一般ユーザーが入手するシーン単位の形式ではなく、ALOS から地上局に送られてくる受信信号に近い、低次レベルのデータである。このため、PC 上で扱え、シーン単位に切り出されたデータである L1.0 データへの変換処理が必要となる。これに対し、緊急時には、迅速化のため、L1.0 データがオンライン (AUIG) で提供される。そのため、緊急観測後数時間でデータが提供されるだけでなく、L0 データから L1.0 データへの変換等の処理が不要となる (和田ほか, 2007)。

「だいち」の観測は、昼間観測の南行 (Descending) 軌道と夜間観測の北行 (Ascending) 軌道がある。また、周回軌道の性質として、観測を行う領域上空を、現地時間の午前あるいは午後 10 時 30 分前後に通過する。つまり、日本国内における観測は、南行 (Descending) 軌道の場合は、日本時間午前 10 時 30 分頃に、北行 (Ascending) 軌道の場合は、日本時間午後 10 時 30 分頃に実施される。したがって、昼間観測の緊急観測データは、観測当日の昼過ぎに、夜間観測の緊急観測データは、観測翌日の午前中には提供される。

2. 2 解析工程

緊急観測データ (L1.0 データ) が提供されると、速やかに、予め準備されたマスターデータ (L1.0 データ) との干渉処理を行う。しかし、L1.0 データは、PC 上で扱え、シーン単位に切り出されたデータであるが、依然としてセンサの受信信号のままであり、このままでは干渉処理は行えない。そこで、これに信号圧縮処理を行い画像化する (再生処理) ことで、干渉処理のための強度・位相画像を得る。このデータを用いて干渉処理を行い、最終的に経緯度情報を付与 (ジオコード) した干渉画像を作成する (藤原ほか, 1999)。

国土地理院が独自に開発した解析ソフトウェア「新 GISAR」は、以上の処理をほぼ自動的に行う。

自動的に作成された初期の干渉画像には、大気中に含まれる水蒸気による誤差などが含まれていることが多い (藤原ほか, 1998)。そこで、「新 GISAR」では、大気遅延の湿潤項が標高の一次関数で十分近

似できることを利用して、標高と相関のある残差位相を標高の一次関数として求めて取り除くことで補正を行う (藤原ほか, 1999). この際、適切な補正係数を指定すれば、かなりの効果が得られる。しかし、

水蒸気分布が場所毎に不均一であった場合などは、適切な係数を機械的に推定することは難しく、依然として、解析者の経験に基づいた判断を要する。

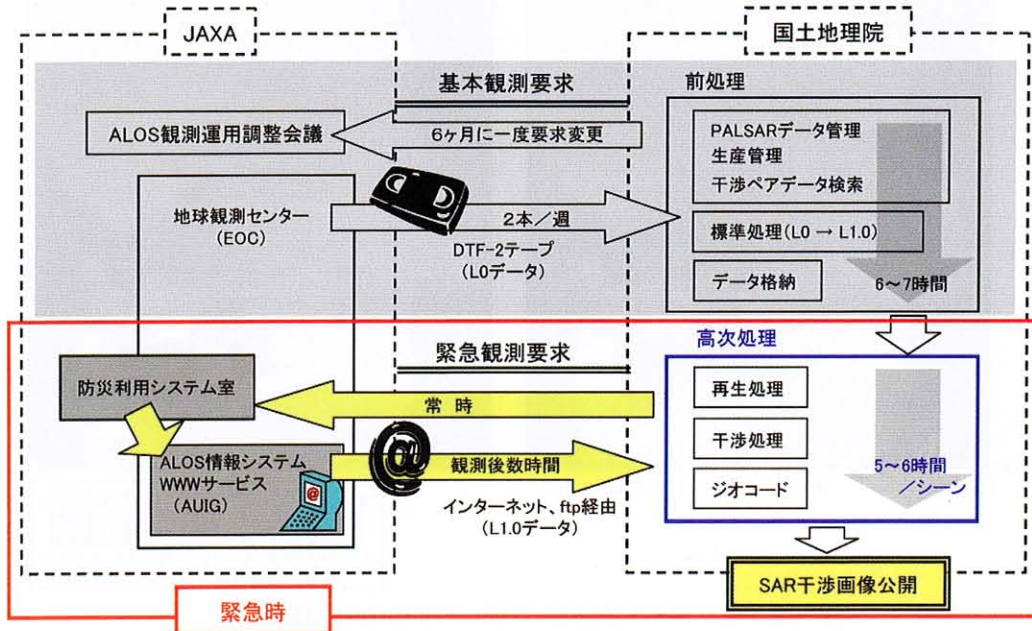


図-1 国土地理院におけるデータ処理・解析工程

3. 能登半島地震における緊急解析

3.1 解析の概要

「だいち」に搭載された PALSAR には、複数の観測モードがある (宇宙航空研究開発機構, 2006). 国土地理院の干渉 SAR では、それらの観測モードの中で、最も高精度な高分解能モード (1 偏波) (以下、「FBS」という.) のオフナディア角 34.3° の観測モードを基本モードとして、定常解析を行っている。これに対して、緊急解析の際には、観測モードに限らず解析を行う。

2007 年 3 月 25 日に発生した能登半島地震では、国土地理院やその他の関係機関からの緊急観測要求を受け、4 月 10 日 (地震発生 16 日後) に FBS・北行 (Ascending) 軌道・オフナディア角 41.5° の観測モード、5 月 10 日 (地震発生 46 日後) に FBS・南行 (Descending) 軌道・オフナディア角 34.3° の観測モードによる緊急観測が JAXA により実施された。これらの観測を受け、国土地理院では、表-1 に示す 2 つの干渉ペアの解析を実施した。

表-1 能登半島地震における緊急解析ペア

観測日 (マスク) 観測日 (スレーブ)	モード	軌道方向	オフナディア角	基線長 垂直成分
2007/02/23 2007/04/10	FBS FBS	北行軌道	41.5°	+432 m
2006/12/23 2007/05/10	FBS FBS	南行軌道	34.3°	+220 m

これらの成果のうち、地震後初の干渉ペアとなった北行軌道の解析結果については、緊急観測が行われた 4 月 10 日 (夜間観測) の 2 日後である 4 月 12 日に、記者発表 (国土地理院, 2007) にて公表された。

3.2 得られた成果

3.2.1 干渉画像

表-1 に示した北行軌道の SAR 干渉画像、及び、GPS と干渉 SAR の解析結果から推定された震源断層モデル (小沢ほか, 2007) によるシミュレーション画像を図-2 に示す。同様に、表-1 に示した南行軌道の SAR 干渉画像とシミュレーション画像を図-3 に示す。

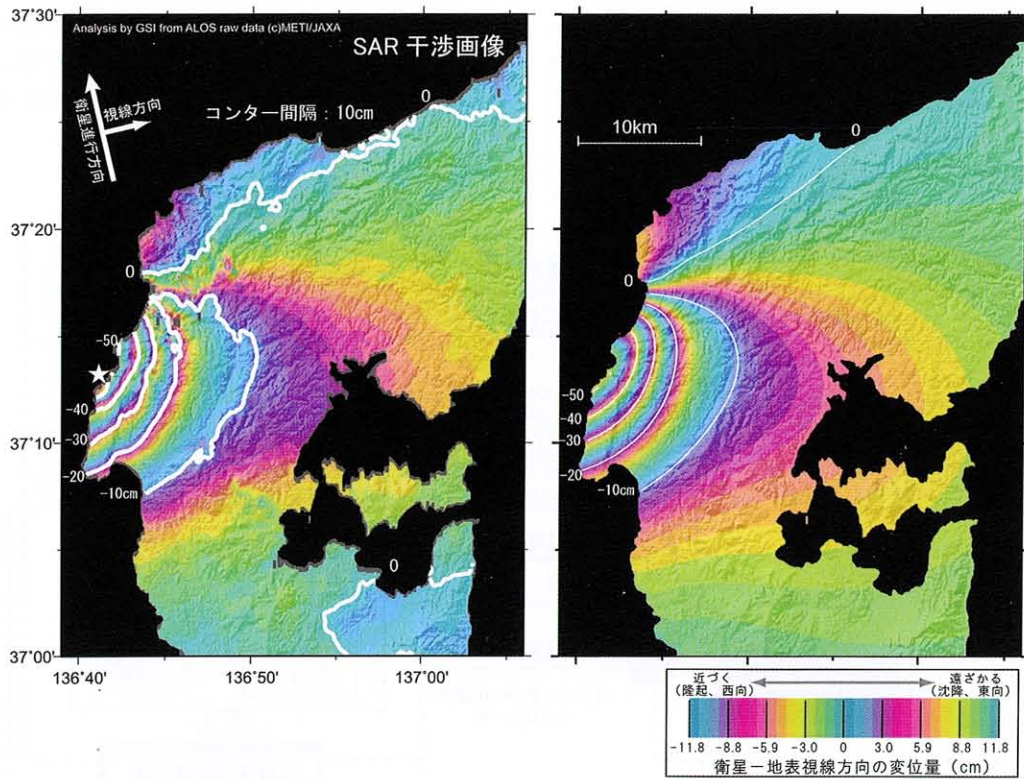


図-2 右: SAR 干渉画像 (FBS, Ascending, 41.5°)
 左: 断層モデルによるシミュレーション画像
 (観測日: 2007/02/23-2007/04/10)

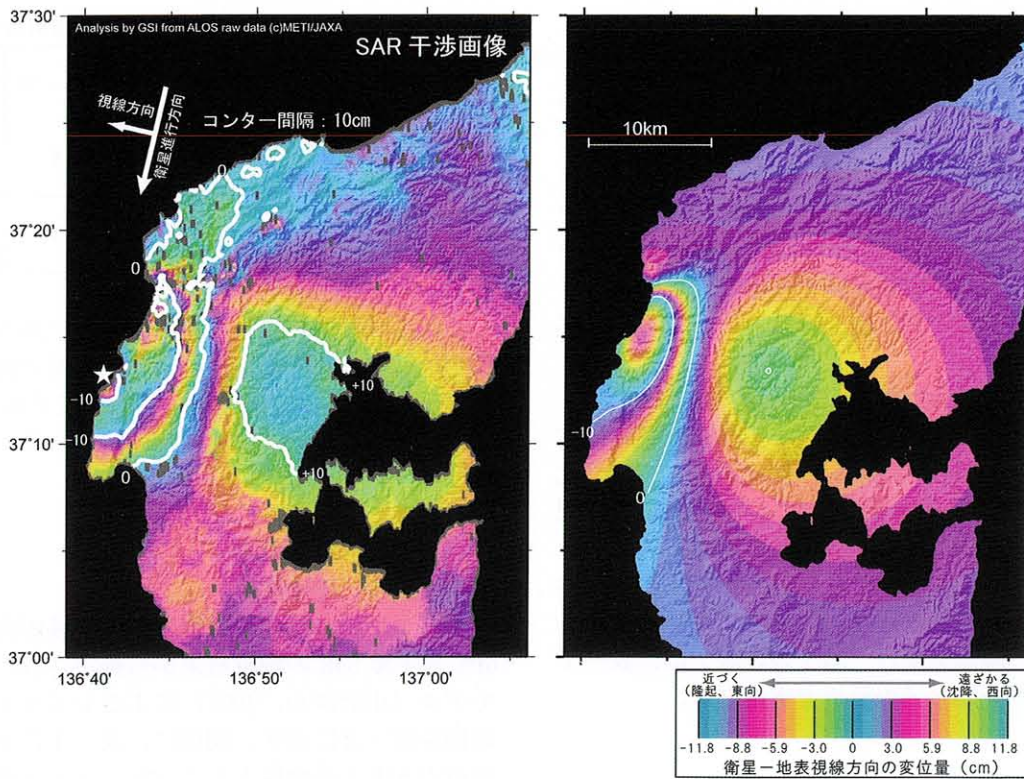


図-3 右: SAR 干渉画像 (FBS, Descending, 34.3°)
 左: 断層モデルによるシミュレーション画像
 (観測日: 2006/12/23-2007/05/10)

これらの図からも分かる通り、SAR 干渉画像とシミュレーション画像は、ほぼ一致しており、地殻変動を正確に捉えたことを示している。

これらの解析結果と、GPS データとを統合すると、最も変位の多い場所は、震源地に近い輪島市門前町付近で、隆起量がおよそ 35cm、水平変動量がおよそ 40cm と推定される。

3. 2. 2 干渉SARとGPSによる視線方向変動量の比較

干渉SAR解析による変動量とGPSによる変動量は、観測時期、場所、測定成分、固定方式等の違いによって、通常、整合しない。しかし、震源断層モデル推定や次項に示す2.5次元解析のためには、干渉SARとGPSの変動量に整合性が求められる。

そのため、図-2、3で示したSAR干渉画像を、飛田ほか(2005)の方法で、干渉SARデータとGPSデータを整合させる処理を行った。図-4は、整合化処理後の地上と衛星を結ぶ視線方向(LOS: Line-Of-Sight)の変動量を電子基準点において比較した結果である。

GPSデータから計算したLOS変動量(黒い棒)と干渉SARから得られたLOS変動量(赤い棒)を比較すると、差の標準偏差が、南行軌道では約 2cmで、北行軌道では約 1cmである。つまり、干渉SARの観測値とGPSの観測値は、1~2cm程度の整合性を持っているということがいえる。

干渉SARとGPSの整合化処理を行う過程で、両者の不一致が大きいGPS点は、整合化処理から棄却される。南行軌道については、電子基準点「富来」(960575)、「能登島」(020972)等4点を棄却しなければならなかったが、北行軌道については、干渉画像の内すべての電子基準点が採用された。このような違いが生じる原因として、大気遅延の影響の違い、干渉性の違い、観測時期の違いなどが候補として挙げられる。なお、干渉画像内のすべての電子基準点(今回は25点)で、干渉SARとGPS観測値が良く一致し、棄却されなかったのは今回が初めてである。

干渉SARとGPSの整合化処理において、画素平均を行う際のルック数やフィルターの強さが、結果に大きな影響を及ぼすのが実情である。

能登半島地震でのGPSとSARの比較 ALOS+GEONET

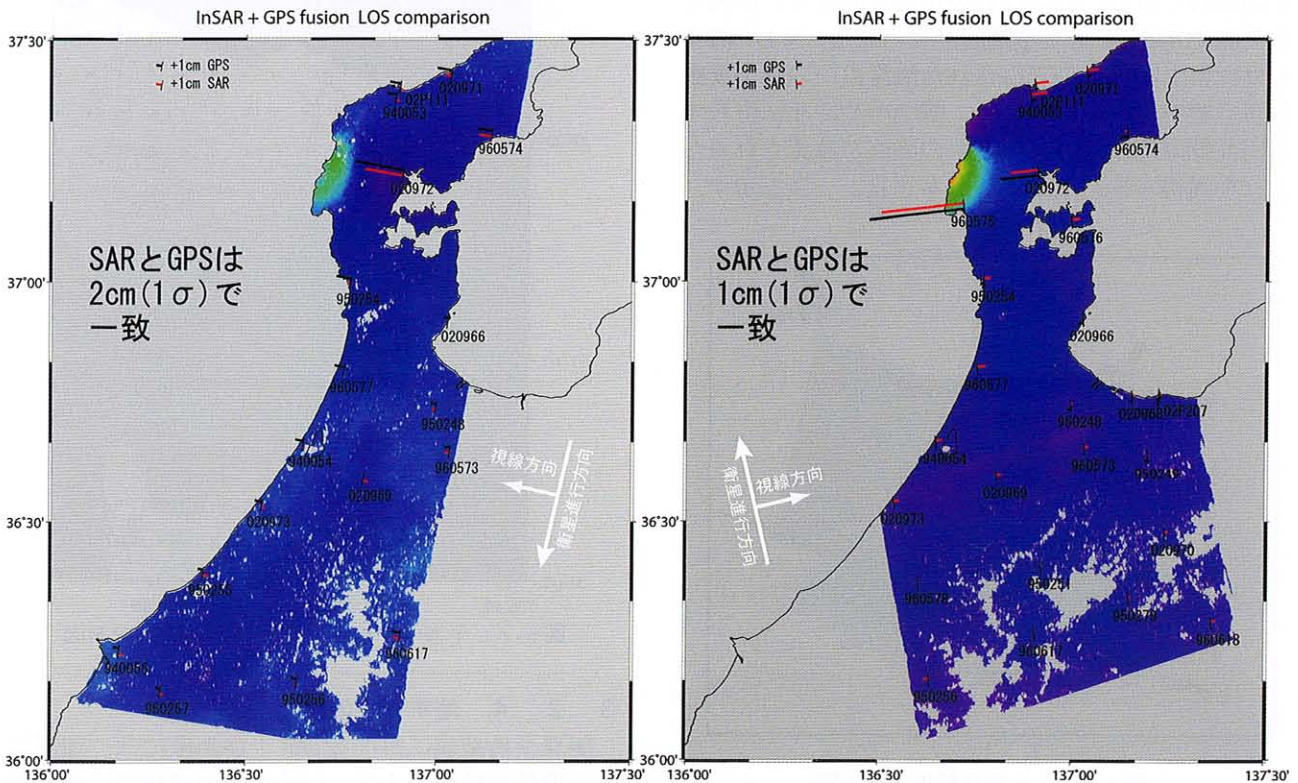


図-4 干渉SARとGPSによるLOS変動量の比較

(左) 南行軌道からのLOS変動量 (右) 北行軌道からのLOS変動量

背景の色は、干渉画像から計算したLOS変動量に対応しており、衛星に近づくようなLOSが減少する変動量を緑や黄色で示している。“020971”等の英数字で示された電子基準点におけるLOS変動量の内、GPSによるものを黒い棒、干渉SARによるものを赤い棒で示した。

3. 2. 3 2.5次元解析

干渉 SAR では、衛星から地表への視線方向での変位量を計測するため、単独では変動の方向を特定することができない。しかし、2方向以上からの SAR 干渉画像を組み合わせることにより、変動を2次元的、3次元的に把握することが可能となる (Massonnet et al., 1995, 1996; Fialko et al., 2001)。

能登半島地震に関しては、北行軌道と南行軌道からの2方向の干渉画像(図-2, 3)が得られている。これらの干渉画像を解析することにより、地表の各地点において衛星の視線方向が張る平面(衛星視線方向面)上の変位成分を求めることができる(図-5)。地表の各地点(2次元的に分布)について視線方向面上の変位(2次元成分)を得られることから、この手法は2.5次元解析と呼ばれる(Fujiwara et al., 2000)。今回の場合、得られる変位成分は、図-5に示されているようにほぼ上下方向とほぼ東西方向となる。得られた準上下方向と準東西方向の変動量分布図をそれぞれ図-6、図-7に示す。

得られた変動量分布は、一部に大気中水蒸気の影響と思われる擾乱が見られるものの、能登半島地震のメカニズム(やや右横ずれ成分を含む逆断層運動)と調和的である。変位は震央付近で大きく、震央やや北側で40cmを超える隆起が見られる。なお、海岸のカキの上限分布から得られた海岸沿いの上下変動分布(栗田ほか, 2007)は、震央のやや北に位置する門前町剣地漁港で約40cmの隆起が確認されるなど、今回得られた上下変動分布と良い一致を示す。

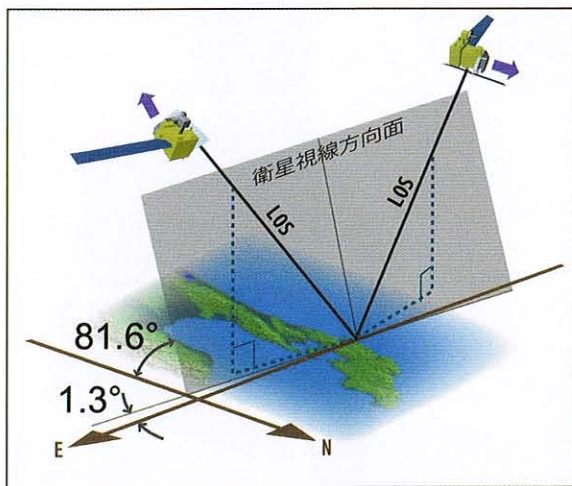


図-5 2.5次元解析モデル図

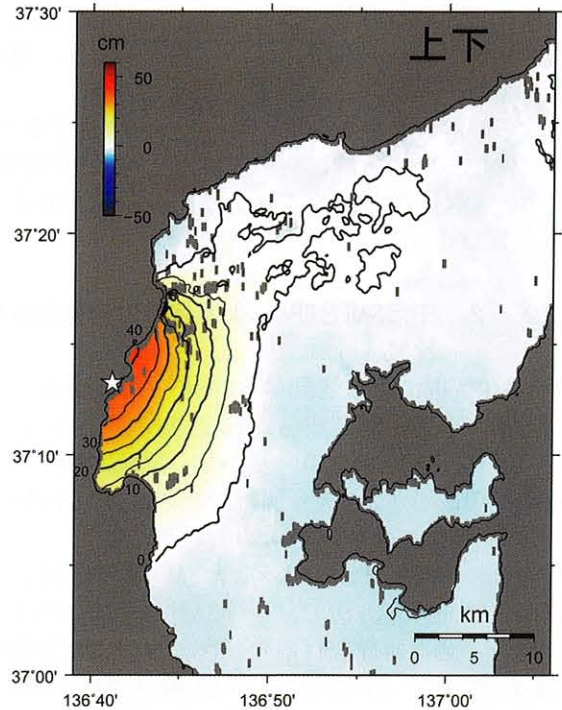


図-6 干渉 SAR による上下成分の変動分布図

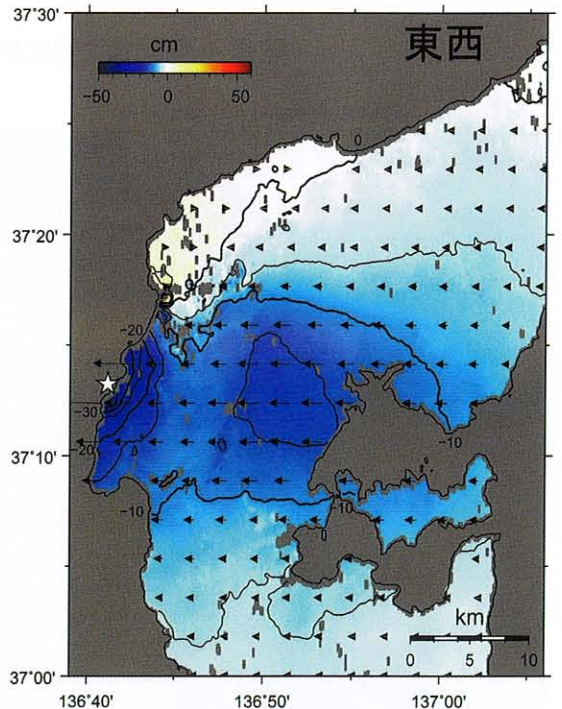


図-7 干渉 SAR による東西成分の変動分布図

3. 2. 4 地すべりの検出

能登半島地震における SAR 干渉画像には、地震による地殻変動に加えて、いくつかの地域で、地震動で発生した地すべりと思われる地表の動きを捉えた(図-8)(宇根ほか, 2007)。これらは最大で10数cm程度の変動量であり、現地調査や空中写真判読では捉えることが難しい微少なものである。干渉 SAR では、このように、目では見えない微少な地す

べりを網羅的に捉えることができる。

一方で、斜面崩壊のように、地表面が大きく変化する場合は干渉せず、干渉画像には、その変動を捉えることができない。したがって、干渉SARによる地すべり調査は、現地でも認識できるような、大規模な地すべりの検出ではなく、大規模災害に発展する可能性のある地域を把握し、監視を続けるといった防災面での利用が有効である。

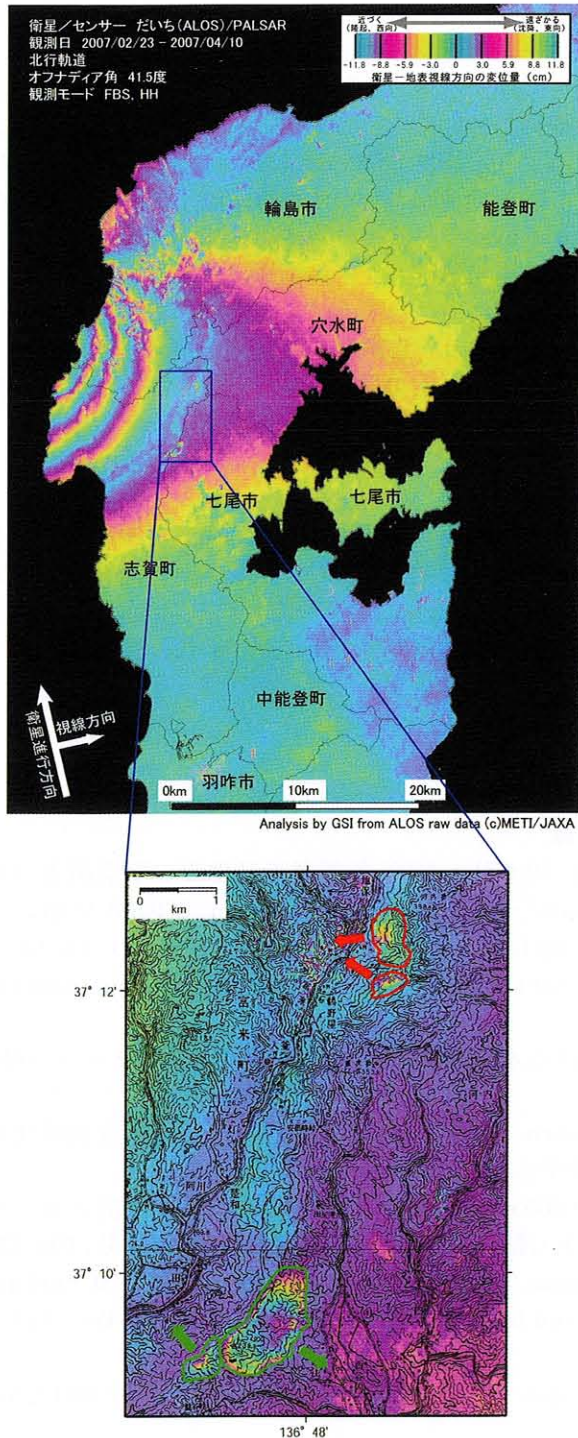


図-8 干渉SARによって検出された地すべり
(下図中の矢印はすべり方向を示す)

4. 成果の利用

干渉SARの最大の利点は、広域な地殻変動を面的に把握することが可能な点である。今回の緊急解析でも、震源域周辺の陸域における地殻変動分布を詳細に把握することができた。これによって得られた変動量は、GPSデータとあわせて、断層モデルの計算に用いられる(小沢ほか, 2007)。干渉SARの解析結果は、断層モデルの計算において、これまでネックとなっていたGPSの配点密度の問題を解決することができる。

また、緊急解析におけるSAR干渉画像は、現地での復旧作業における参考資料としても活用される。そのため、SAR干渉画像が作成され次第、それらに基準点位置情報や地形図等の重ね合わせを行う。その資料は、速やかに現地の作業班へと転送され、現地での作業・調査にて利用される。また、国土院が管理する測地基準点の復旧測量の実施地域を決定する際にも、重要な資料の1つとなる(図-9)。

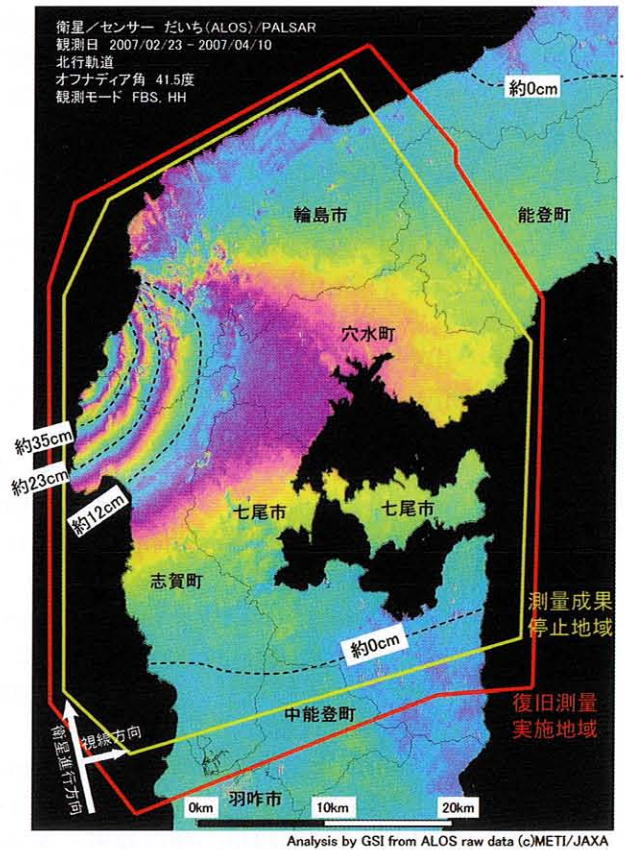


図-9 能登半島地震に伴う測地基準点の
復旧測量実施地域

図中の波線は、衛星-地表間の距離の変化(地表の動き)を示す。単位はcmである。

さらに、今回の解析では、いくつかの微小な地すべりを捉え、地すべりの監視においても、干渉SARの有効性を示した。今回捉えた地すべりについては、

今後も引き続き監視を行う予定である。

5. まとめと今後の課題

能登半島地震における緊急解析で得られた SAR 干渉画像は、震源断層モデルによるシミュレーション画像や GPS データと整合しており、干渉 SAR によって、地殻変動を正確に捉えたことを示した。さらに、地震動で発生した地すべりと思われる地表の動きも捉え、地すべりの監視においても有効であることを示した。

これらの成果からも明らかなように、干渉 SAR は、防災・災害状況の把握のための強力なツールとして、認識されつつある。平成 18 年 1 月に打ち上げられた「だいち」では、干渉度や空間分解能が飛躍的に向上し、今後、さらなる利活用が期待される。

そのような中で、今後の課題として、下記の点に取り組む必要がある。

1) 解析結果の精度向上

「だいち」の運用により、干渉 SAR の変動検出精度は飛躍的に向上した。さらに、SAR 干渉画像単独では特定できない変位方向についても、2.5 次元解析や、GPS データとの融合技術の開発により、特定が可能となっている。一方で、大気補正については、定量的な補正は未だ困難であり、依然として課題が残されている。この大気補正については、特に日本のような高温多湿の地域では影響が大きく、無視できない。そのため、今後も研究を続ける必要がある。

2) 成果公表までの迅速化

干渉 SAR の有効性が認識されつつある中で、次に求められるのは、いかに早く成果を公表できるか

ある。国土地理院では、「新 GSISAR」を用いて、ほぼ自動的に干渉処理を行うが、前述した大気補正のように、依然として解析者の判断を要する工程が存在する。そのため、1) の課題も踏まえて、「新 GSISAR」の更なる自動化・高速化を進める必要がある。また、SAR 干渉画像作成後に行う、市町村境界等との重ね合わせの作業は自動化されておらず、今後、これらの自動化も検討していく。

3) 成果の提供内容の検討

緊急時における干渉 SAR の解析結果は、国土地理院ホームページ等で公表するだけでなく、今後は、国や関係する地方自治体等の防災担当者へも速やかに提供していく。そのためには、様々なニーズに応えるような提供方法を考案しなければならない。現在、国土地理院が管理する電子国土において、既存の地盤情報データベースや微地形の判読結果、現地調査の結果等を SAR 干渉画像に重ねあわせて提供するという方法を試みている。この方法が普及すれば、提供された各機関が、各自で持つ任意の情報を追加することも可能となり、干渉 SAR の利活用の幅が広がることを期待できる。

謝 辞

ここで使用した「だいち」の PALSAR データの所有権は、経済産業省および宇宙航空研究開発機構にあります。また、これらのデータは、宇宙航空研究開発機構との共同研究協定に基づいて、提供を受けています。この場を借りて、御礼申し上げます。

参 考 文 献

- 栗田泰夫, 遠田晋次, 吾妻 崇, 金田平太郎, 堀川晴央 (2007): 2007 年能登半島地震の緊急調査 (地形・地質), <http://unit.aist.go.jp/actfault/katsudo/jishin/notohanto/report/070403.html>.
- Fialko, Y., M. Simons, and D. Agnew (2001): The complete (3-D) surface displacement field in the epicentral area of the 1999 Mw7.1 Hector Mine earthquake, California, from space geodetic observations, *Geophys. Res. Lett.*, 28, 3063-3066.
- 藤原 智, 飛田幹男, 村上 亮 (1998): 干渉 SAR における水蒸気情報の重要性, 気象研究ノート「GPS 気象学」, 192 号, 199-212.
- 藤原 智, 飛田幹男, 村上 亮, 中川弘之, Paul A. Rosen (1999): 干渉 SAR における地表変動検出精度向上のための基線値推定法と大気一標高補正, *測地学会誌*, 第 45 巻, 第 4 号, 315-325.
- 藤原 智, 仲井博之, 板橋昭房, 飛田幹男, 矢来博司 (2005): JERS-1 干渉 SAR による小空間スケール地表変位の検出 - 有明海周辺干拓地における田の沈下・隆起 -, *測地学会誌*, 第 51 巻, 第 4 号, 199-213.
- 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, *Geophys. Res. Lett.*, 27, 2049-2052.
- 国土地理院 (2007): 記者発表資料, <http://www.gsi.go.jp/WNEW/PRESS-RELEASE/2007/0412.htm> (accessed 20 Jul. 2007)
- Massonnet, D., P. Briole, and A. Arnaud (1995): Deflation of Mount Etna monitored by spaceborne radar interferometry, *Nature*, 375, 567-570.

- Massonnet, D., K. Feigl, H. Vadon, and M. Rossi (1996): Coseismic deformation field of the $M = 6.7$ Northridge, California earthquake of January 17, 1994 recorded by two radar satellites using interferometry, *Geophys. Res. Lett.*, 23, 969-972, 1996.
- 小沢慎三郎, 矢来博司, 飛田幹男, 宇根 寛, 西村卓也 (2007): 平成19年(2007年)能登半島地震の震源断層モデル, *国土地理院時報*, 第113集, 小特集: 平成19年(2007年)能登半島地震, 49-53.
- 小澤 拓, 宗包浩志, 矢来博司, 村上 亮 (2003): JERS-1 の干渉 SAR により検出された霧島火山群・硫黄島周辺の局所的な地殻変動, *火山*, 第48巻, 第6号, 507-512
- 飛田幹男 (2003): 合成開口レーダー干渉法の高度化と地殻変動解析への応用, *測地学会誌*, 49, 1-23.
- 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ーの解析技術に関する研究, *国土地理院時報*, 第106集, 37-49.
- 宇宙航空研究開発機構 (2006): ALOS データ利用ガイドブック, 付録3 PALSAR データの関連情報.
- 宇宙航空研究開発機構: AUIG (ALOS User Interface Gateway),
<https://auig2.eoc.jaxa.jp/auig2s/jp/top/index.html> (accessed 20 Jul. 2007)
- 宇根 寛, 佐藤 浩, 矢来博司 (2007): 衛星合成開口レーダー画像で抽出された平成19年(2007年)能登半島地震に伴う地形変化, *国土地理院時報*, 第113集, 小特集: 平成19年(2007年)能登半島地震, 41-47.
- 和田弘人, 松坂 茂, 藤原 智, 仲井博之, 藤原みどり, 雨貝知美, 飛田幹男, 福崎順洋, 矢来博司 (2007): ALOS/PALSAR データの干渉 SAR 測量への利用とデータ処理・解析システムの構築概要, *国土地理院時報*, 第111集, 小特集II: 国土地理院における陸域観測技術衛星「だいち」(ALOS) の利用, 107-117.