

特別寄稿

最新の宇宙測地技術 (干渉SAR)で捉える地盤変動

国土交通省 国土地理院
宇宙測地課
和田 弘人

1. はじめに

国土地理院は、これまでも国土全体の位置情報の基盤となる基準座標系（世界測地系）の維持・管理のために、VLBIやGPSといった、その時々最新の宇宙測地技術を取り入れてきました。例えば現在、全国に約1200点設置されている電子基準点から構成される、GPS連続観測システム（GEONET）は、各観測点が24時間連続的にGPS衛星からのシグナルを受信し、収集された観測データは無償で公開され、公共測量等で利用されています。また、これら電子基準点の時々刻々と変化する座標値は、文字どおり“国土の変化”を捉え続けています。ここでの“国土の変化”とは、専門的な言葉で言えば「地殻変動」と表現されますが、近年では、この言葉も国内外の地震災害に対する関心の高まりから、一般にもなじみのあるものとなってきました（“価格の地殻変動”など、言葉本来の分野を越えた使い方も見られます）。この地殻変動を捉えるための最新の宇宙測地技術として、人工衛星で観測したレーダー画像を用いた干渉SAR技術が近年注目を集めています。本稿では、最初に干渉SARの原理と、それを支える観測プラットフォームの概要を説明し、次に国土地理院が実施した解析事例を挙げて、この宇宙測地技術から得られる知見とその活用方法について紹介したいと思います。

2. 干渉合成開口レーダー（干渉SAR）

合成開口レーダー（SAR）は、空間的に離れた対象物から反射された電磁波の情報を基に、その対象物の位置や性質を知りリモートセンシング技術の一つです。SARは人工衛星や飛行機などに搭載され、地上へ向けて位相のそろった電波（マイクロ波）を照射し、地表面から反射される電波を受信してレーダー画像を得ます。干渉SARでは、レーダー画像を時間をおいて2回撮影し、これらレーダー画像間の位相の差分を取ります（図-1）。原理的には1回目と2回目の撮影時に地表の状態に変化が無ければ、同一地点から反射して戻ってくる電波の位相に変化はありません。この場合、位相差をとってもその変化量は0のままです。しかし、1回目の撮影後、例えば地震によって地面が盛り上がると、2回目の撮影時に、同じ場所から反射して戻ってくる電波の位相は1回目と比べて異なる

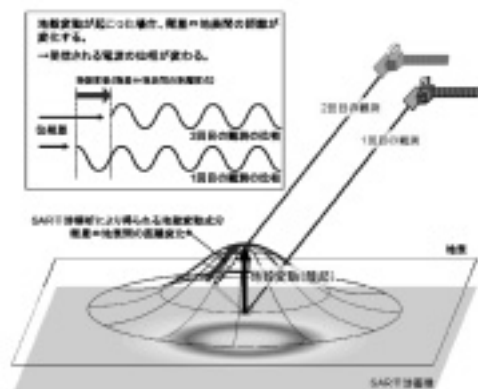


図-1 干渉SARの原理

る値となるはずです。電波の位相の変化は衛星と地表間の距離の変化を表していますので、地殻変動の前後で撮影したレーダー画像間で、同じ地点が写っている画素毎に位相差を取ることで、衛星と地表との距離の変化を表す画像（干渉画像）が得られます。距離の変化は、電波の1波長分の位相差 $0 \sim 2\pi$ で表現されるので、位相差の大きさに応じて配色することで、表紙裏絵のような縞模様の干渉画像が得られます。同じ色が連なっている領域は同じ位相差であり、衛星から見て同じ距離の分だけ地表面が動いたこととなります。干渉SARでは、一度に数十km四方を、10~20m画素の解像度で面的に、数cmの精度で地表面の変化を捉えることができます。これは、変動を計測する観測点の密度として考えると、例えばGEONETの密度は15~20kmに1点であることから、干渉SARによって得られる地殻変動の情報が如何に高密度であるかが分かります。これによって従来の観測では到底得られない、局所的な地殻変動の様子が分かるようになってきました。

3. 陸域観測技術衛星だいち (ALOS)

陸域観測技術衛星“だいち”(ALOS: Advanced Land Observation Satellite)は2006年1月に宇宙航空研究開発機構(JAXA)により打ち上げられた地球観測衛星であり、46日の周期で同じ地域を同じ条件で観測することができます。ALOSは2種類の光学系センサとSARを搭載しています。ALOSに搭載されているSARは、PALSAR (Phased Array L-band Synthetic Aperture Radar)と呼ばれています。光学系のセンサは太陽の反射光を利用するので、衛星が地球の昼側の軌道を通過する際に観測を行います。PALSARは衛星自らマイクロ波を照射するので、昼

夜を問わず撮影が可能です。また、マイクロ波は雲や噴煙を透過するので、光学系のように、観測地域が雲に覆われて地上の様子が捉えられない場合でも、地表の様子を捉えることができます。この昼夜・天候に左右されないレーダーの特性は災害監視にとって重要となります。

PALSARは、センサの名前が示すとおり、Lバンド(波長約24cm)のマイクロ波を採用しています。SARセンサには、目的によって様々なバンドが採用され、海外の衛星では主にX・Cバンド(波長2.4~7.5cm)が用いられています。バンドの違いは、地表の何処で反射されるかという性質に関係します。例えばCバンドは、波長と同程度の大きさの葉などの表面で反射されてしまいます。このため森林では、電波は樹冠で反射され、地表まで到達できません。また葉などは、風によって、波長と同程度のスケールで容易に揺らいでしまいます。このためCバンドでは、地表が森林等によって覆われていると、地殻変動に係わる情報を得ることはできません。これに対してLバンドは、葉の大きさと比べて波長が長いので樹冠を透過し、地表面まで到達します。地表面は樹冠と比較しても堅固で安定しており、ここでの位相差を捉えることで、地殻変動の情報を得ることができます。このため、国土の7割が森林で占められている日本では、干渉SARによる地殻変動の監視には、PALSARの利用が必須となります。

4. 災害発生時における干渉SARの利用

4-1 岩手・宮城内陸地震

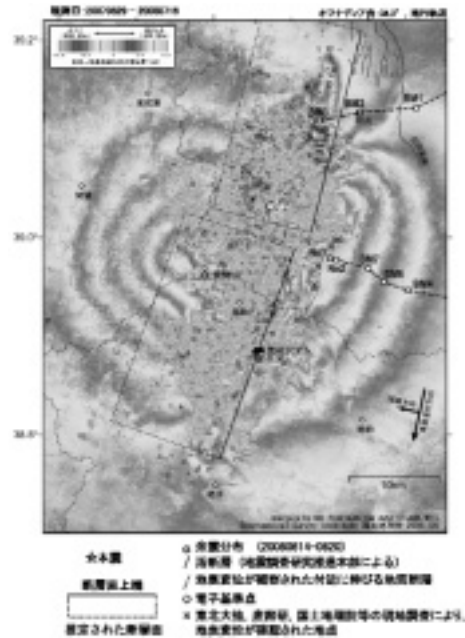
2008年6月14日8時43分頃に岩手県内陸南部の深さ約10kmでマグニチュード7.2の地震が発生しました。この地震で岩手県奥州市と宮城県栗原市で最大震度6強

を観測し、死者13名、行方不明者10名、負傷者451名を出す大きな被害が生じました。JAXAはこれを受けてPALSARによる緊急観測を、6月23、24日に行いました。観測後、国土地理院はJAXAからデータ提供を受けて解析を実施し、翌6月25日にその成果を発表しました（表紙裏絵）。

この地震で得た干渉画像を概観すると、星印の震央の周辺には、砂目模様の領域が北東－南西方向の範囲に広がっています。また、その周縁にはこれを囲んで縞模様が広がりますが、外側に向かってその密度は次第に小さくなります。縞の密度が大きい範囲は、周辺と比べて変動量が大きいことを示しています。例えば、縞模様が密な栗駒山の西部では、縞の本数から周辺と比べて1 m程度の変動量があったことが読み取れます。また、中心部の砂目模様の領域は、一部で密な縞が見られることから、ここでは変動量が非常に大きいため、干渉SARで連続した位相の変化として捉えられる範囲を越えていると考えられます。これらの特徴から、地殻変動は大局的に、震央を含む北西－南東方向を軸にその中軸部に向かって変動量が大きくなる傾向を示しています。この範囲は、テレビ等で報道された荒砥沢ダム上流の大規模な地すべりや、駒の湯温泉に被害を与える原因となった土砂崩壊等が多発生した領域と重なります。これらの状況は、国土地理院が電子国土上で公開している「岩手・宮城内陸地震情報集約マップ」(<http://zgate.gsi.go.jp/iwate2008/index.htm>)で干渉画像を他の地理情報と重ね合わせることで見ることができます。

4-2 地震像の把握

この干渉画像の活用として第一に挙げられることは、地震活動の全体像の把握です。地震の場合、地殻変動の観測結果は、これ



図一 2 岩手・宮城内陸地震における震源域周辺のSAR干渉画像

を発生させた地下の断層の位置や形状、運動等の推定に用いられます。この地震では、干渉SARとその他の観測データから、砂目模様の直下に西北西に傾き下がる2枚の矩形の断層モデルが推定されました（図一2）。この断層モデルを考慮しつつ、干渉画像を見ることで、現地踏査で確認された局所的な地表の撓みや断層端の出現位置と、広域的な地殻変動の関係を直接的に結びつけて議論することができます。また、断層端付近での局所的な地殻変動の様子は、周辺に存在する活断層への影響や関連性といった将来の防災のための情報としても非常に有用であるといえます。

4-3 災害対応のための情報

第二の活用は、発災直後～復興までの災害対応のための基礎情報としての活用です。

山間部で発生した地震で問題となるのは、地すべりや土砂災害による直接的な被害の他に、それらによる外部との交通手段

の遮断や、河道閉塞の発生等があります。干渉SARによる局所的な地表面の動きの検出は、砂目模様として表される既に崩壊した箇所以外にも、明瞭な崩壊が未だ発生していない斜面全体のわずかな移動をも捉えることができます。この情報は、例えば発災直後に干渉画像が得られれば、初動対応における外部からの進入ルートを検討や、二次災害の発生危険箇所の評価等への活用が考えられます。

また、国土地理院が関わる測量分野では、地震の影響を受けた基準点の復旧測量を行う際の資料としての利用が挙げられます。復旧測量を行う範囲の策定は、震源域周辺の基準点成果の停止期間や再測量に必要なコストに直接的な影響を与えます。この際に干渉画像から、基準点毎に広域（地殻変動）あるいは局所的（地すべり）な変動の影響を検討することで、「現地で測って影響の度合を把握する」のではなく、「予め影響の度合を把握してから測る」ことが可能となります。実際、昨年発生した能登半島地震や本地震でも、干渉画像は復旧測量の計画立案に役立てられました。

5. これまでの成果と今後の課題

地殻変動の監視を行う上で、ALOSの運用前後で大きく変化したことは、世界中のどこで災害が発生しても、地上の観測設備に関係なく干渉画像から、地殻変動がどの範囲にまで及ぶかを直接イメージすることが当たり前のようにできるようになったことです。この例として四川省地震があり、現地の情報を待たずに地殻変動の全容を詳細に捉えることができました。

国土地理院は、この宇宙測地技術を利用して、国土の変化を監視しています。平常時には火山や地盤沈下域（図-3）を対象に、また大地震などの突発的な災害発生時



図-3 干渉SARによる火山・地盤沈下監視対象地域には、海外をも含めて緊急の解析を実施し、それらの成果を公開しています (<http://vldb.gsi.go.jp/sokuchi/sar/>)。

これまでの地殻変動の情報は、どちらかと言えば、学術面での地震像の把握と、復旧測量という、地理院の業務に密接に関連した、言い換えればその他の分野での利用が限定される情報でした。しかし、面的で高密度な干渉SARによる地殻変動情報の出現は、災害対応のあらゆる段階で他の分野との連携・活用の可能性を示しています。そのためには干渉画像が、専門の人以外にも理解されるような、情報の普及と一般化が求められます。これには、電子国土による災害情報集約マップの例が示すように、地殻変動情報を他の、“なじみのある”地理情報と関連づけた形で提供することが、これらの更なる理解と利用の促進につながると考えています。

参考資料

総務省消防庁災害情報詳報「平成20年（2008年）岩手・宮城内陸地震（第75報）」
地震調査研究推進本部公表：「平成20年（2008年）岩手・宮城内陸地震に関する情報」

国土地理院2008年6月16日報道発表資料