

干渉 SAR 時系列解析による微小な変位量で進行する地盤変動監視の実用化へ向けて Approach for Monitoring of Small Ground Surface Deformation by InSAR Time Series Analysis

測地部 森下遊・鈴木啓¹

Geodetic Department Yu MORISHITA and Akira SUZUKI

地理地殻活動研究センター 小林知勝

Geography and Crustal Dynamics Research Center Tomokazu KOBAYASHI

要 旨

国土地理院では、陸域観測技術衛星「だいち」(ALOS)のLバンド合成開口レーダー(PALSAR)のデータを使用して、全国の地盤沈下、地すべり及び火山地域を対象に、地盤変動の監視を目的として定期的にSAR干渉解析を実施してきた。今後は2013年度内に打ち上げ予定のALOS-2データを使用して、日本全国を対象にして定常解析を実施する予定である。

従来のSAR干渉解析技術では地盤変動の計測精度が数cmであったため、微小な規模で進行する変動を検出することは困難であった。このような計測精度の問題を改善するために、近年、国土地理院では、SAR干渉解析の発展的手法である「干渉SAR時系列解析」に関する調査・研究を実施しており、より高精度な結果が得られている。しかし、解析技術には発展の余地があり、実用化へ向けてはまだ多くの課題が残されている。

そこで、ALOS-2データを使用した干渉SAR時系列解析による日本全国の地盤変動監視の実用化を目指し、さまざまな誤差低減手法の干渉SAR時系列解析への適用や効率的な解析機能及び出力機能の開発を行った。また、実際にALOSデータを使用して、これらの手法を適用し、関東地方及び九州地方を対象に干渉SAR時系列解析を実施した。その結果、効率的かつ高精度に地盤沈下、地すべり及び火山地域の変動を検出することができ、干渉SAR時系列解析による全国の地盤変動監視の実現可能性を確認することができた。一方、長波長ノイズや山岳地域では良好な結果が得られないといった新たな問題点も明らかになった。今後も干渉SAR時系列解析による地盤変動監視の実用化へ向けて、調査・研究を続けていく。

1. はじめに

干渉SARとは、高空間分解能な合成開口レーダー(Synthetic Aperture Radar : SAR)による観測を地表の同一地点に対して2回以上実施し、反射波の位相差を計算することによって、地表の変動を面的に捉える技術である。国土地理院では、2006年1月～2011

年5月に運用されていた陸域観測技術衛星「だいち」(ALOS)のLバンド合成開口レーダー(PALSAR)のデータを使用して、全国の地盤沈下・地すべりによる地盤変動や火山活動による地殻変動の監視を目的として、定期的にSAR干渉解析を実施してきた。2013年度にはALOSの後継機であるALOS-2の打ち上げが予定されており、そのデータを使用してSAR干渉解析を引き続き実施する予定である。

これまでの定常解析では、解析時間の短縮のため、事前に監視対象地域として地盤沈下17地域、地すべり3地域、火山46地域を選定し、その範囲のみを切り出して解析を実施してきた。しかし、近年の解析機器性能の向上や国土地理院が開発した解析ソフトウェア(以下、「新GSISAR」という。)の改良により、解析効率が大幅に向上し、日本列島を縦断するような広域解析が実現可能になってきた(例えば、山中ほか、2011)。特定の地域に限定しない網羅的な解析は、未知の変動を検出する可能性を増加させ、国土の監視としてはより理想的である。ALOS-2では、広域観測モードの観測頻度がALOSよりも大幅に増加する見込みであることもあり、対象地域を限定しない広域解析を実施する予定である。

また、これまで2時期の観測データからその間に発生した変動を検出する従来型のSAR干渉解析手法を主に使用してきたが、大気ノイズなどの影響により、その計測精度は数cmにとどまり、微小な規模で進行する変動を検出することは困難であった。国土地理院では、最近、数多くの観測データを使用するスタッキングや干渉SAR時系列解析といった発展的解析手法に関する調査・研究を実施しており、従来よりも高精度な結果が得られている(山中ほか、2013)。ただ、これらの手法は多量のデータが必要で、解析に多大な時間を要するという問題点がある。また、結果の出力形式が確立されておらず、地盤変動監視への実用化へはまだ多くの課題が残っている。

本研究では、実用化へ向けて、さまざまな誤差低減手法の干渉SAR時系列解析への適用や効率的な解析機能及び出力機能の開発を行った。また、干渉SAR時系列解析による地盤変動監視の実現可能性及び課題を確認するため、5年超の運用期間で多く

のデータが蓄積された ALOS データを使用して、関東地方及び九州地方を対象に干渉 SAR 時系列解析を実施した。

2. 干渉 SAR 時系列解析

2.1 干渉 SAR 時系列解析の概要

干渉 SAR 時系列解析とは、多量のデータを使用することにより、干渉性の低下、DEM 誤差及び対流圏・電離圏遅延などに起因するノイズの影響を低減することで、計測精度を向上させる解析手法である。一概に干渉 SAR 時系列解析といっても、様々なアルゴリズムが開発されている。本稿では、非商用に限り無償で利用可能なソフトウェアである StaMPS/MTI version3.2.1 (Hooper et al., 2007) を使用した。本ソフトウェアでは、PSI (Persistent Scatterer Interferometry) という解析手法を実行可能である。PSI は、解析期間において散乱特性が変化しない点 (PS 点) にのみ着目し、PS 点における時系列的な変動を推定することができる。PS 点となり得る地表の物体は主に人工建造物や岩であり、それらが密に分布する都市部や植生及び積雪のない山肌などで良好な結果が得られやすい。計測精度はデータ量、波長、対象地域などによって大きく異なるが、条件が良ければ 1mm/year 程度を達成可能であるという報告がある (Crosetto et al., 2008)。

2.2 PSI の解析手順

StaMPS/MTI の解析手順の概要は以下の通りである (Hooper et al., 2007 ; 福島, 2011)。

- 1) L1.0 データから SLC の作成 (画像再生)
- 2) 解析範囲の切り出し
- 3) 1 つのマスター画像と他の全スレーブ画像との間で画像マッチング
- 4) 3)の結果に基づいて全スレーブ画像をリサンプル
- 5) マスター画像と他の全スレーブ画像との間で差分干渉処理
- 6) ジオコード
- 7) 強度分散指標に基づいて PS 候補点を抽出
- 8) PS 候補点に対して位相安定性評価を行い、PS 点を抽出
- 9) (必要に応じて) 加重平均による PS 点の間引き
- 10) 3次元位相アンラッピング
- 11) マスター画像誤差、DEM 誤差、各スレーブの軌道誤差を推定
- 12) (必要に応じて) 時空間フィルタによりスレーブ画像に含まれる空間相関ノイズを推定

このうち、7)以降が PSI と呼ばれる解析手順であり、6)まではそのために必要な前処理である。一般的に 1)~4)及び 8)に膨大な時間を要する。

3. さまざまな誤差低減手法の StaMPS/MTI への適用

国土地理院では、干渉 SAR の計測精度を向上させるため、数値気象モデルによる対流圏誤差低減処理 (小林ほか, 2011) 及び GNSS 補正 (飛田ほか, 2005) といった手法を開発してきた。しかし、これらは従来型の SAR 干渉解析手法及び新 GSISAR に対応したものであり、StaMPS/MTI では実行できなかった。そこで、これら 2 つの手法を StaMPS/MTI で実行できるように調製し、干渉 SAR 時系列解析のさらなる精度向上を試みた。

3.1 数値気象モデルによる対流圏誤差低減処理

干渉 SAR で観測される位相には大気中の水蒸気による遅延量が含まれ、それが地盤変動計測においては誤差となる (以下、「対流圏誤差」という)。対流圏誤差は、水蒸気分布の不均質性に起因して水平方向に不規則に現れるものに加え、標高に相関して現れるものがある (藤原ほか, 1999)。前者は時間的に不規則であるため、複数の SAR 干渉解析結果を平均化するスタッキングという手法で統計的に低減することが可能である (山中ほか, 2013)。しかし、偶然にも時間相関を持ってしまった場合は低減されない。後者については、標高と位相差の関係を近似した一次関数を使用する補正手法がよく用いられてきた (藤原ほか, 1999)。しかし、実際の変動が標高に相関する場合 (火山活動による地殻変動など)、対流圏誤差を正確に変動量から分離して推定することは困難である。

ここでは、対流圏誤差低減の有効な手法として近年開発された数値気象モデルを使用した手法 (小林ほか, 2011) を StaMPS/MTI で実行できるようにした。この手法では、全データ点において、マイクロ波の屈折の効果を考慮したレイトレーシング法を適用して位相遅延量を推定する。そのため、データ点数に比例して、ある程度の計算時間を要する。そこで、計算するデータ点数を大幅に減らすために PS 点抽出・間引き後 (2.2.手順 9 の後) に低減処理を実行できるようにし、計算時間の大幅な短縮に成功した。

本手法の効果として、阿蘇山の例を示す。当該地域は山岳部内に広大なカルデラがあり、その中心にさらに中岳などの標高の高い地帯があるという特殊な地形である (図-1)。本手法適用前の観測量 (図-2 上段) には標高に相関する位相変化量が見られる。この結果のみからでは火山性の変動によるものか、対流圏誤差によるものかを判断することは不可能である。しかし、本手法によって数値的に推定した位相遅延量 (図-2 中段) を差引くことで、標高に相関

する位相変化量が大きく減少している(図-2 下段). 時系列的にも不自然な位相変化がなくなったことから, 対流圏誤差が大きく低減されたと考えられる. 今後は, 数値気象モデルを利用した低減効果の更なる検証や将来公開予定の数値気象モデルである局地モデル(LFM)への技術的対応が課題となる.

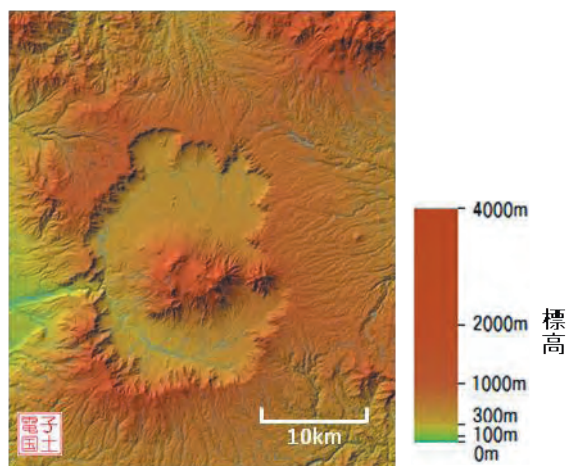


図-1 阿蘇山及びその周辺の色別標高図

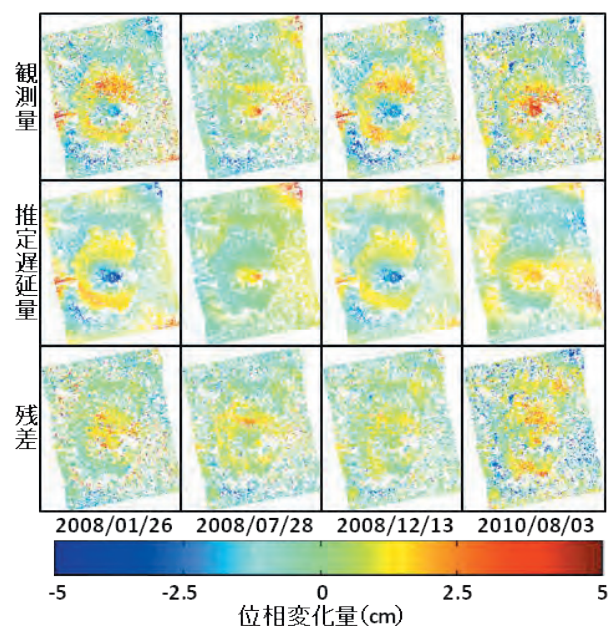


図-2 阿蘇山における対流圏誤差低減処理の効果. 範囲は図-1と同様. マスター観測日は2007年7月26日で共通, 各スレーブ観測日は図下部に示してある. (上段) PSIによる観測量. (中段) 数値気象モデルによる位相遅延量推定量. (下段) 両者の残差.

3.2 GNSS 補正

SAR 干渉解析結果には, 衛星軌道推定値の誤差に起因する規則的な長波長の誤差が含まれる(藤原ほか, 1999). GNSS 補正は, 地上における GNSS 観測によって得られた変位量と SAR 干渉解析結果とを

比較することによって, この誤差量を推定・除去する手法である(飛田ほか, 2005). 福島・Hooper (2011)では, 同様の手法を StaMPS/MTI に適用しており, 補正関数としてバイリニア曲面に加え, 標高相関成分も推定している. ここでは補正関数として, 傾斜平面とバイリニア曲面, 標高相関成分推定の有無を選択可能にした. 解析範囲内の GNSS 観測データ点数や地形によって, 最適な関数形を選択することができる.

本手法は位相アンラッピング後に(2.2 手順 11の一部として)適用する. しかし, 日本列島を縦断するような広域の解析では, 電離層擾乱に起因すると考えられる不規則な長波長のノイズが卓越し, うまく補正関数にフィットしないことがある. 不規則な長波長ノイズは時空間フィルタ(2.2 手順 12)によって統計的にある程度除去することができる(Hooper et al., 2007)ため, ここでは, この手順以降に再度本手法を適用可能にした. これにより, 激しい長波長ノイズをある程度除去した後で GNSS 補正を実施し, より GNSS 観測データに適合した結果を得ることができる. ただ, 変動の性質によっては, 検出すべき本物の変動もノイズとして除去されてしまう危険性があるため, 適用する際には注意が必要である.

4. 広域を対象とした干渉 SAR 時系列解析の試行

ALOS 打上げ当初は1日に10シーン程度を処理するのが限界であったため, 特定の地域を定常解析地域に指定し, その範囲を切り取って解析を実施していた(和田ほか, 2007). しかし, 解析機器の高性能化や解析ソフトウェアの改良により, より多くのデータを高速に処理することが可能になってきた. 国土の監視という観点からは地域を限定しない網羅的な広域解析が望ましい. そこで, 広域解析の実現可能性を確認し, その課題を明確にするため, 関東地方全域及び九州地方全域において, StaMPS/MTI による解析を実施した. 使用したデータはALOSの北行軌道のものである.

4.1 関東地方全域の PSI 広域解析結果

解析に使用したデータは合計で934シーンにも及んだ(表-1). ここでは定常的な変動に着目し, 観測期間における衛星-地表間距離(LOS)平均変動速度を算出した. 2007年7月16日の新潟県中越沖地震や2011年3月11日の東北地方太平洋沖地震に伴う変動を含むデータは, LOS 平均変動速度算出からは除いた. また, 電離層擾乱の影響と思われる長波長の激しいノイズを含むデータも除去した. これらのデータ除去後においても, 全パスで観測数15回以上のデータを使用することができた.

このような広範囲を本来の分解能（1 ルック）を保持したまま解析すると、PS 点数が計算不可能なほど膨大になってしまう。本解析では、広域的な変動のみに着目することとし、PS 候補点を抽出する閾値を下げ、さらに抽出した PS 点を 500m 間隔に間引いた。また、前章の対流圏誤差低減処理及び GNSS 補正を適用し、GNSS 観測データの固定点は、解析地域のほぼ中心に位置する電子基準点「境」(020956)とした。さらに、時空間フィルタによりスレーブ画像に含まれる空間相関ノイズを推定・除去した。なお、空間スケールの小さな変動を検出するのに特化した解析手法については次章で述べる。

表-1 関東地方の解析データ情報

| | | | |
|----------------|-------------------------|-------------------------|------------------------|
| パス番号 | 404 | 405 | 406 |
| フレーム数 | 8 | 8 | 7 |
| 解析観測数 ※ | 23 (15) | 24 (16) | 22 (17) |
| 平均変動速度 計算期間 | 2007/7/25 2010/12/18 | 2006/12/24 2011/2/19 | 2007/1/10 2011/3/8 |
| パス番号 | 407 | 408 | 409 |
| フレーム数 | 6 | 6 | 5 |
| 解析観測数 ※ | 22 (17) | 27 (23) | 22 (20) |
| 平均変動速度 計算期間 | 2007/9/14 2010/12/23 | 2006/12/29 2011/2/24 | 2007/1/15 2011/1/26 |

※括弧内は地震関連データ及び激しい長波長ノイズを含むデータ除去後の観測数

関東地方における PSI 広域解析の結果を図-3 に示す。山岳地域の大部分では結果が得られていないが、これは PS 点が抽出できなかつたためであり、PSI では当該地域の結果を得るのが困難であることを示している。長波長ノイズの影響により、パスの境界では変動速度の値は必ずしも一致しない。また、LOS 方向の平均変動速度のため、上下成分のみではなく、東西成分の変動も寄与していることに注意しなくてはならない。日本海側が LOS 伸長、太平洋側が LOS 短縮の傾向が見られるが、GNSS 観測の結果も考慮すると、これは主に東西方向の変動を反映していると考えられる。その中でも、九十九里平野や新潟平野などでは、周囲と比較して相対的に LOS 伸長の変動を示す局所的な地域が見られ、これらは地盤沈下を捉えていると考えられる（図-3 黒破線内）。ただし、空間分解能を低下させ、かつ時空間フィルタを適用しているため、この変動速度は水準測量などで検出されているものより小さく、過小評価されていると考えられる。

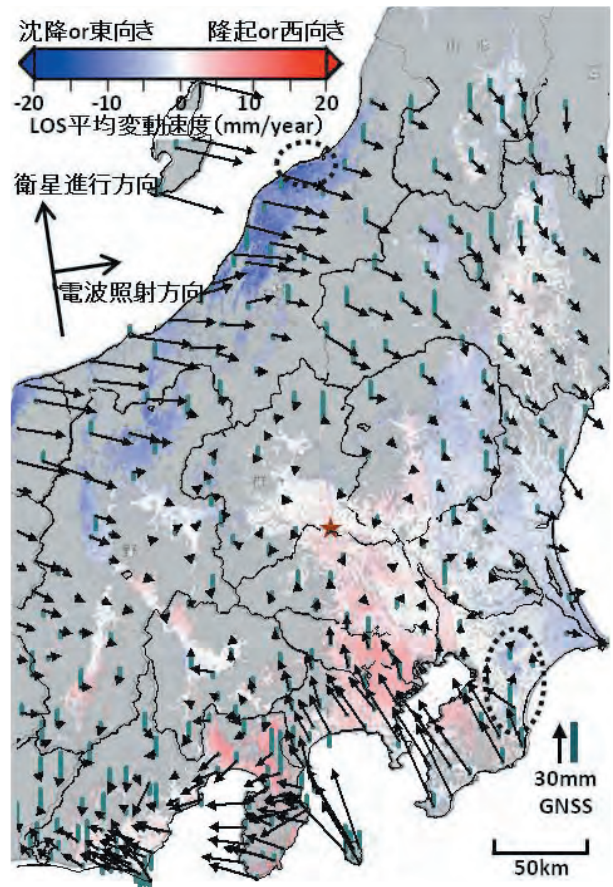


図-3 関東地方における PSI 広域解析の結果。背景の灰色が表示されている地域は結果が得られなかった地域である。黒矢印及び緑棒はそれぞれ水平方向及び上下方向の 2007 年 9 月～2010 年 9 月における GNSS 観測による変動量。星印は GNSS 観測データの固定点を表す。黒破線内は地盤沈下が捉えられていると考えられる地域を表す。

4.2 九州地方全域の PSI 広域解析結果

解析に使用したデータは合計で 558 シーンであった（表-2）。関東地方と同様に、長波長の激しいノイズを含むデータを除去し、対流圏誤差低減処理、GNSS 補正及び時空間フィルタを適用した。GNSS 補正の固定点は、解析地域のほぼ中心に位置する電子基準点「五木」(021073)とした。

表-2 九州地方の解析データ情報

| | | | | |
|----------------|-----------------------|-------------------------|-----------------------|-----------------------|
| パス番号 | 422 | 423 | 424 | 425 |
| フレーム数 | 5 | 6 | 6 | 5 |
| 解析観測数 ※ | 24 (20) | 21 (15) | 27 (23) | 30 (25) |
| 平均変動速度 計算期間 | 2007/7/9 2011/1/17 | 2008/1/26 2010/12/19 | 2007/8/12 2011/4/7 | 2006/8/26 2011/3/9 |

※括弧内は激しい長波長ノイズを含むデータ除去後の観測数

全体として西側が LOS 伸長、東側が LOS 短縮の傾向を示しているが、GNSS 観測の結果も考慮する

と、これは主に東西方向の変動を反映していると考えられる(図-4)。九州地方では雲仙岳、霧島山、桜島など活動が活発な火山が複数存在するが、本解析ではPS候補点を抽出する閾値を下げ、かつ空間分解能を低下させているため、目立った変動は検出されなかった。

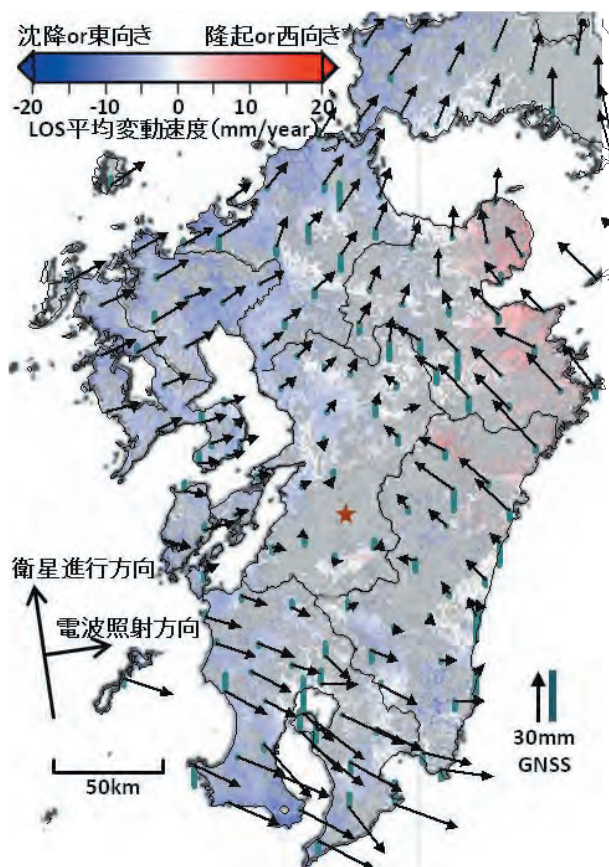


図-4 九州地方におけるPSI広域解析の結果。背景の灰色が表示されている地域は結果が得られなかった地域である。黒矢印及び緑棒はそれぞれ水平方向及び上下方向の2007年9月～2010年9月におけるGNSS観測による変動量。星印はGNSS観測データの固定点を表す。

4.3 広域解析の実現可能性と課題

これらの解析を実施した結果、約13TBのファイルが生成された。不要な中間ファイルを削除することである程度ディスク容量は節約できるが、いずれにせよ日本全国を解析するには大容量のハードディスクが必須となる。

解析に要する時間は、データ数やPS点数に大きく依存するが、1つのパスでおおよそ4日～1週間程度であった。しかし、現在入手可能な解析機器性能であれば複数のパスを並行して解析でき、効率的に解析を実施できる。また、可能な限りの処理の自動化を行ったため、手動での処理を要する部分は各処

理手順の結果の確認や最適な結果を得るための解析パラメータ調整などに限定され、少人数でも広域解析は実現可能であると考えられる。ただ、解析パラメータ調整においては解析に関する高度な知識や経験が必要とされる。

激しい長波長ノイズが含まれるデータが多く見られ、これが広域解析において使用可能データの減少及び精度低下を招く大きな要因の一つとなっている。このノイズは電離層擾乱に起因するものと考えられているが、現時点では効果的な誤差低減手法はなく、当該データを除去するしかない。しかし、データ数の減少は干渉SAR時系列解析において精度低下につながる。Lバンドは電離層の影響を受けやすく、ALOS-2でも同様の問題に直面することが想定されるため、誤差低減手法の確立が求められる。

PSIでは解析の性質上、植生のある山岳地域で結果を得るのが困難である。Lバンドは時間的・空間的短基線の干渉ペアであれば植生地域でも干渉性の高い結果が得られるため、そのような結果を利用する干渉SAR時系列解析のもう一つの主な手法であるSBAS (Small Baseline Subset) であれば、山岳地域でも良好な結果が得られる可能性がある (Berardino et al., 2002)。

5. 効率的な局所解析と実用的な出力

広域解析ではデータ量の調整のため空間分解能を大きく低下させたが、PSIは本来、高分解能を利点とする解析手法である。地盤沈下、地すべり、火山活動などの局所的な地盤変動の監視においては高分解能な情報が望ましい。そこで、広域解析の結果を利用して効率的に高分解能な結果を得る機能を開発し、StaMPS/MTIに追加した。そしてこの機能を実際に地盤沈下、地すべり及び火山地域に適用した。

また、実用化にあたっては、解析結果の利用・理解のしやすさも重要な要素の一つである。そこで、解析結果をKML形式で出力する機能を開発した。

5.1 効率的な局所解析

StaMPS/MTIの標準的な処理では、異なる範囲の解析を実施する場合、解析範囲の切り出し(2.2手順2)から実施するため、局所的な解析でも長時間を要していた。しかし、広域解析を実施済であれば時系列処理に必要な前処理(2.2手順6まで)の結果が存在する。そこで、この結果に対して解析範囲の切り出しを行い、PSI処理(2.2手順7)から開始できるような機能を追加した。これにより、局所的で高分解能な解析の計算時間を大幅に短縮することに成功した。

局所解析の場合は、対流圏や電離層による長波長ノイズの影響が小さいため、多くの場合、時空間フ

イルタを使用したスレーブ空間相関ノイズを推定する必要がない。よって、本物の地盤変動を過小評価してしまう危険性が低下する。

5.2 KML 形式での解析結果の出力

解析結果をより効果的に利用するには、他の地理空間情報と重ね合わせて表示できることが望ましい。そこで、KML 形式で PSI 結果を出力する機能を開発した。本機能により、PS 点の位置及び変動量、等量線、格子化画像、凡例などを地図上に表示することが可能となった。

KML 形式を表示できるソフトウェアは無償で公開されており、インターネット環境があれば誰でも簡単に利用することができる。地図の拡大/縮小及び情報の表示/非表示の切り替えが容易で、視覚的に理解しやすい。重ね合わせ情報として、電子国土 Web システムの標準地図や色別標高図 (<http://geolib.gsi.go.jp/download.html>) 及び基本基準点や公共基準点の位置情報 (<http://sokuseikagis1.gsi.go.jp/>) などが KML 形式で入手可能である。その他にもさまざまな地理空間情報を重ね合わせて表示することが可能である。

5.3 地盤沈下（新潟県柏崎市）への適用事例

新潟県では消雪用として地下水が利用されており、県内の複数の地域で地盤沈下が発生してきた（環境省，2012）。地盤沈下を監視するため、複数の市で毎年、高密度な水準測量が実施されてきた。ここでは、顕著な地盤沈下が水準測量でも検出されている柏崎市への適用事例を示す。

PSI 局所解析の結果、最大 2cm/year を超えるような地盤沈下が検出された（図-5）。この結果は水準測量の結果とも整合的である。水準点の分布と比較すると、PS 点の方が非常に多く分布していることがわかる。水準点の存在しない地点の変動量も計測可能で、変動の極大点の位置を高精度に推定したり、未知の変動域を発見したりすることも可能である。観測頻度も、水準測量は年 1 回（柏崎市は 2 年に 1 回）が標準であるのに対し、ALOS は最大年 8 回であり、時間分解能も高い。干渉 SAR 時系列解析の結果は、水準測量を効率的に実施するための参考情報や、水準測量を実施していない地域の新たな情報として利用できると考えられる。

5.4 地すべり（佐賀県唐津市）への適用事例

佐賀県唐津市の地すべり地帯に本機能を適用したところ、最大 3cm/year を超える LOS 短縮の変動が検出された（図-6）。地形の形状から、西向き地すべり性の変動が発生していると考えられる。この結果は、干渉 SAR 時系列解析により地すべり性の微小

な変動を検出できることを示している。

本機能では、この事例のような数 km 四方の解析範囲であれば、わずか数十分で解析結果を得ることができる。一般的に地すべりは空間スケールが小さいため、高密度な観測網が展開されていない限り検出は困難であるが、干渉 SAR 時系列解析を地すべりが疑われる範囲に対してくまなく適用することで、未知の地すべりを発見することが可能になると期待される。

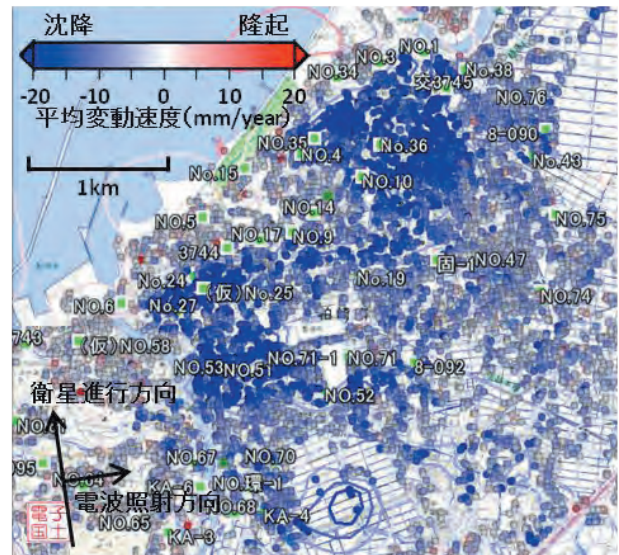


図-5 新潟県柏崎市における PSI 局所解析の結果。丸印及びその色が PS 点の位置及び平均変動速度、緑四角印及び文字列がそれぞれ水準点の位置及び水準点名を表す。色付きの実線は PS 点の平均変動速度からスプライン補間により推定した等量線である。平均変動速度は、水平方向の変動はないと仮定して、LOS から上下方向に投影したものである。

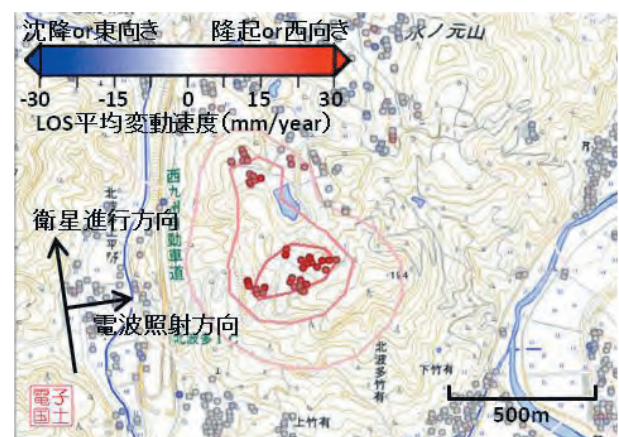


図-6 佐賀県唐津市における PSI 局所解析の結果

5.5 火山（大分県九重山）への適用事例

九重山は「火山防災のために監視・観測体制の充実等が必要な火山」として火山噴火予知連絡会によ

って選定された47火山のうちの一つで、気象庁により地震計やGNSSを使用した常時観測が実施されている。本機能を適用したところ、星生山頂付近における約1km四方の狭い範囲で、最大6cm/yearを超えるLOS伸長の変動が検出された(図-7)。気象庁のGNSS観測点は今回検出した変動域の外側に位置しているため、このような変動は検出されていなかった。地上の観測点を設置するのが容易ではない火山地域において、PSIによる高分解能な監視は効果的であるといえる。しかし、植生や積雪があるとPS点を抽出するのは困難になるため、適用可能な火山は限定される可能性がある。



図-7 大分県九重山におけるPSI局所解析の結果. 黄緑色印は気象庁が設置したGNSS観測点を表す.

6. まとめ

今回の結果から、干渉SAR時系列解析による地盤変動監視の実現可能性を確認することができた。PSI広域解析では、長波長ノイズや山岳地域では良好な結果が得られないといった問題点が明らかになったが、PSI局所解析により、地盤沈下、地すべり及び火山地域において効率的に高精度な結果を得ることができた。今後は、より良好な結果を得るため、電離層ノイズ低減手法やPSIとは異なる干渉SAR時系列解析手法に関する調査・研究を実施し、ALOS-2などの次世代のSAR衛星データを使用した地盤変動監視の実用化を目指す。

謝辞

本研究で使用した「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。これらのデータは、「陸域観測技術衛星を用いた地理空間情報の整備及び高度利用に関する協定」に基づき、JAXAから提供されました。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。KML出力機能の一部としてGMT(Wessel and Smith, 1998)を利用しました。干渉SAR時系列解析の計算処理の一部は、平成25年度職場体験実習生の京都大学大学院・金子泰洸ポール君に実施してもらいました。ここに記して謝意を表します。

(公開日：平成25年11月6日)

参考文献

- Berardino, P., G. Fornaro, R. Lanari, and E. Sansosti (2002): A new algorithm for surface deformation monitoring based on small baseline differential SAR interferograms, *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, 40, 2375-2383.
- Crosetto, M., O. Monserrat, N. Adam, A. Parizzi, C. Bremmer, S. Dortland, R.F. Hanssen and F.J. van Leijen (2008): Validation of existing processing chains in TerraFirma stage 2, http://www.terrafirma.eu.com/validation/ValProj/Final%20Reports/ValProj_Final_report.pdf (accessed 30 Aug. 2013).
- 藤原智, 飛田幹男, 村上亮, 中川弘之, P. 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-標高補正, *測地学会誌*, 45, 315-325.
- 福島洋 (2011): StaMPSパッケージを用いたPS干渉SAR解析, *測地学会誌*, 57, 41-48.
- 福島洋, A. Hooper (2011): PS干渉解析による2004年新潟県中越地震後の地殻変動, *測地学会誌*, 57, 195-214.
- Hooper, A., P. Segall, and H. Zebker (2007): Persistent scatterer InSAR for crustal deformation analysis, with application to Volcán Alcedo, Galápagos, *J. Geophys. Res.*, 112, B07407
- 環境省 (2012): 全国地盤環境情報ディレクトリ (平成23年度版), http://www.env.go.jp/water/jiban/dir_h23/index.html (accessed 30 Aug. 2013).
- 小林知勝, 飛田幹男, 今給黎哲郎, 鈴木啓, 野口優子, 石原操 (2011): 「だいち」SAR干渉解析により捉えられた霧島山(新燃岳)の火山活動に伴う地殻変動とその圧力変動源の推定, *国土地理院時報*, 121, 195-201.
- 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.
- 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, 111, 107-117.

Wessel, P. and W. H. F. Smith, New, improved version of the Generic Mapping Tools released, EOS Trans. AGU, 79, 579.

山中雅之, 野口優子, 鈴木啓, 宮原伐折羅, 石原操, 小林知勝, 飛田幹男 (2011) : 衛星合成開口レーダーを用いた平成 23 年 (2011 年) 東北地方太平洋沖地震に伴う地殻変動の検出, 国土地理院時報, 122, 47-54.

山中雅之, 森下遊, 大坂優子 (2013) : 干渉 SAR 時系列解析による地盤沈下の検出, 国土地理院時報, 124, 1-14.