

干渉 SAR 時系列解析による全国変動分布図の公開とその活用

Publication and Utilization of Nationwide Ground Deformation using InSAR Time Series Analysis with ALOS-2 data

測地部 石本正芳・三木原香乃¹・市村美沙・古居晴菜・服部晃久²・雨貝知美¹・
佐藤雄大³・小門研亮¹

Geodetic Department ISHIMOTO Masayoshi, MIKIHARA Kano, ICHIMURA Misa,
FURUI Haruna, HATTORI Akihisa, AMAGAI Tomomi, SATO Yudai
and KOKADO Kensuke
地理地殻活動研究センター 小林知勝
Geography and Crustal Dynamics Research Center
KOBAYASHI Tomokazu

要 旨

国土地理院では、衛星合成開口レーダー地盤変動測量として、陸域観測技術衛星 2 号「だいち 2 号」(ALOS-2) の観測データを用いた SAR 干渉解析を実施し、日本全国の地殻・地盤変動を監視している。ALOS-2 の観測データが蓄積されたことによって、従来の SAR 干渉解析より変動検出精度の高い干渉 SAR 時系列解析が実施可能となった。そこで、全国の地殻・地盤変動の監視、さらには測量の基準の維持・管理、地盤沈下調査等の公共測量に活用することを目的として、日本全国を対象とした干渉 SAR 時系列解析を開始した。2023 年 3 月には、干渉 SAR 時系列解析による全国変動分布図を初めて一般に公開した。

本報告では、干渉 SAR 時系列解析の概要及び検出された変動の例を紹介するとともに、干渉 SAR 時系列解析による全国変動分布図の活用に向けた取組について報告する。

1. はじめに

国土地理院では、宇宙航空研究開発機構 (JAXA) が運用している陸域観測技術衛星 2 号「だいち 2 号」(ALOS-2) の観測データを用いた SAR 干渉解析を実施し、日本全国の地殻・地盤変動を監視している。ALOS-2 は、2014 年の打ち上げから設計寿命 5 年を超えた現在 (2024 年 7 月時点) も運用されている、合成開口レーダー (SAR) を搭載した人工衛星である。SAR はレーダーの一種で、天候や昼夜に関係なく、地表を広域的に高い空間分解能で観測できることが大きな特長である。SAR 干渉解析は、異なる 2 時期に観測された SAR データに含まれる電波の位相差により、衛星と地表の距離変化を計測する技術で、2 回の観測間に生じた地表の変動を観測できるものである。SAR 干渉解析により、電子基準点等の地上観測の配点密度では把握が困難な局所的な地表の変動を捉えることができることから、ALOS-2 が

年に 3~4 回、日本全国を観測しているデータ (基本観測データ) を用いて、全国定常解析として定期的に SAR 干渉解析を実施している。

全国定常解析は、火山活動や地盤沈下等の、平常時の地殻・地盤変動の把握や異常の検知を目的としている。得られた地殻・地盤変動情報は、火山監視、地盤沈下の調査等に活用するため、火山噴火予知連絡会や地方自治体等の関係機関に提供されている。特に、火山活動の監視においては、現地にアクセスできない状況でも観測できること、他の観測では把握困難な局所的な変動を把握できることなどから、重要な観測手段の一つとなっている。

しかしながら、地盤沈下の調査等にはあまり活用が進んでいないのが現状である。その要因として、SAR 干渉画像 (以下「干渉画像」という。) には様々な誤差が含まれることから、既存の水準測量等の観測手段に比べ計測精度が低いこと、実際の変動と誤差による見かけの変動との判別には経験や知識を必要とすることなどが挙げられる。

一方、2014 年の ALOS-2 打ち上げから観測データが蓄積されたことで、多数の干渉画像を統計的に処理することにより、変動の検出精度を向上させる干渉 SAR 時系列解析 (以下「時系列解析」という。) が実施可能な環境が整ってきた。さらに、ALOS-2 の後継機である先進レーダ衛星「だいち 4 号」(ALOS-4) では、観測頻度が ALOS-2 の約 5 倍となることから、時系列解析の有効性が高まると期待されている。

このような背景から、国土地理院では時系列解析システム「GSITSA」 (小林ほか, 2018) の開発を進め、2021 年度には火山監視に時系列解析を導入した。その結果、従来の干渉画像では捉えることが困難であった微小な変動を捉えることができ、時系列解析の有効性が確認された (三木原ほか, 2021, Ichimura et al., 2021)。さらに、地盤沈下が生じていることが知られており、水準測量が毎年実施されている千葉

県房総半島において、水準測量と時系列解析結果を比較した結果、水準測量と整合的な結果が得られることを確認した（古居ほか，2022）。2022年4月には、国土地理院のSAR干渉解析事業（衛星合成開口レーダー地盤変動測量）を基本測量に位置づけ、全国を対象とする全国時系列解析を開始した。2023年3月には、時系列解析による全国変動分布図を初めて一般に公開した。

本報告では、時系列解析の処理の概要について述べ、時系列解析結果である全国変動分布図で捉えられた局所的な変動を紹介する。さらに、全国変動分布図を地盤沈下調査等の公共測量に活用するために整備した測量マニュアルの概要について報告する。

2.時系列解析と全国変動分布図

本章では、国土地理院で開発した時系列解析システム「GSITSA」の概要と使用した観測データ、さらに全国変動分布図の作成にあたり実施した処理について述べる。

2.1 GSITSA の概要

GSITSA による時系列解析の流れを図-1 に示す。本システムは、入力データとして、国土地理院で開発した干渉 SAR 高次処理ソフトウェア「GSISAR」で生成した干渉画像を用いる。各干渉画像には、対流圏遅延誤差低減処理（小林ほか，2014）、Range Split-Spectrum 法による電離層遅延誤差低減処理（Gomba et al., 2016）及び GNSS による長波長誤差補正等の補正を必要に応じて適用する。なお、GNSS 観測点が存在しない離島等においては、位相連続化処理後に、多項式近似曲面による長波長誤差補正を実施する。各補正後、コヒーレンス（干渉性の高低）又は正規化位相分散（隣接する領域内の位相のばらつきを示す指標）に基づくマスク及び基盤地図情報による河川や湖沼等の水域情報に基づくマスクを適用し、干渉画像内の品質の悪いデータを除外する。これらの処理で得られた干渉画像について、MCF 法（Costantini, 1998）により位相連続化処理を行う。位相連続化処理を行った画像を入力データとして、SBAS 法（Berardino et al., 2002）により位相最適化を行うことで、各観測日の変位量が得られる。この時、時間方向のスムージング処理を行い、干渉画像の各誤差低減処理では十分に補正できない誤差をさらに低減している。この処理により得られた各観測日の変動量から、最小二乗法により衛星視線方向の変位速度が推定される。

この一連の処理により得られるのは、パス（衛星の軌道）及び観測モード（ALOS-2 の観測では、同一パスにおいて、電波の照射方向により複数の観測モードが存在する）毎の変位速度である。また、位

相最適化処理を実施する際には、変動がないと仮定した参照点が必要となる。通常、参照点は解析に用いる画像の一点にとるが、全国時系列解析では、電子基準点「大潟」（950241）付近を参照点としている。したがって、得られる変位速度は、大潟付近は変動がないと仮定した変位速度となる。

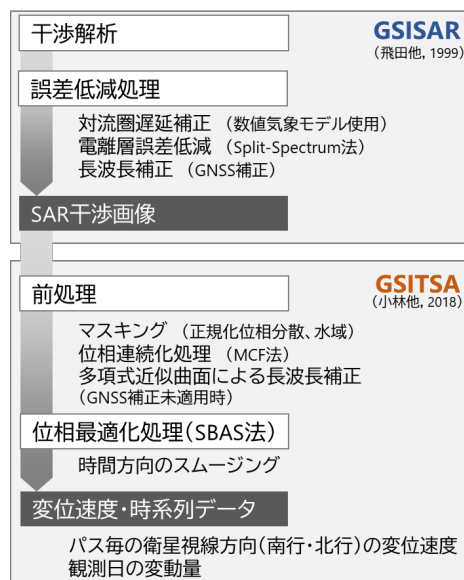


図-1 時系列解析処理の流れ。

表-1 全国変動分布図の作成に用いた観測データ

衛星進行方向	北行	南行
観測期間	2014年8月8日 2022年12月19日	2014年8月6日 2023年3月27日
電波照射方向	右	
観測モード	高分解能 (3 m) モード	
観測数	1121	1371
干渉ペア数	4257	4690
ピクセルスペーシング	90 m	
垂直基線長の上限	200 m	
観測間隔の上限	1095日	730日
冬季データ	(北海道・東北) 含まない (関東以南) 含む	

2.2 観測データ

2023年3月に公開した全国変動分布図の作成に用いた観測データを表-1 に示す。ALOS-2 によって2014年から実施されている高分解能3 mモードの基本観測データをほぼ全て使用した。観測データは、パス及びフレーム毎の約50 km×70 kmの範囲(1シーン)に分割して配布されるが、解析は同一パス及

び観測モード毎にいくつかのシーン(最大9シーン)を結合して行っている。結合した画像を1観測としてカウントしたものが、表-1に示す観測数である。干渉解析を行う組み合わせ(干渉ペア)は、垂直基線長200m以内、観測間隔を北行観測では1095日、南行観測では730日以内とした。なお、北行観測は観測頻度が低いため、十分な干渉ペア数を確保するために、南行観測より観測間隔を長く設定した。この条件を満たす干渉ペア数(干渉画像数)は、北行及び南行観測を合わせ約9000枚となり、この全ての干渉ペアについて処理を行った。

2.3 全国変動分布図の作成

全国変動分布図は、平常時の地殻・地盤変動を把握すること、さらに電子基準点では把握が困難な局所的な変動を把握することを目的としている。そのため、地震時変動の推定除去及び電子基準点データによる広域変動の除去を行った。また、これらの補正を加えた北行・南行軌道の変位速度から2.5次元解析(Fujiwara et al., 2000)により準上下方向及び準東西方向の変位速度を得た。さらに、2.5次元解析を行うため、パス及び観測モード毎の変位速度を結合する処理を行った。これらの処理の詳細について、以下で述べる。

2.3.1 地震時変動の推定・除去

地震による顕著な地殻変動が見られた地域については、位相最適化後の各観測日の変動量を用いて変位速度を推定する際に、地震時変動も同時に推定した。この処理により、地震に伴う地殻変動だけでなく、地震と同時に生じた地盤変動も除去されることに注意が必要である。

地震時変動を推定・除去した地震及び対象となる画像(パス、観測モード、フレーム)の一覧を表-2に、2016年10月21日に発生した鳥取県中部の地震に伴う地殻変動を推定・除去した例を図-2に示す。補正前の変位速度の画像(図-2(a)の上)では、図中の十字の北西には衛星から遠ざかる変動、南西には

衛星に近づく変動が見られている。また、補正前の時系列グラフ(図-2(a)の下)では、地震前後で約7cm程度のギャップが生じていることがわかる。これに対して地震時変動を同時に推定した補正後の変位速度及び時系列を示したグラフ(図-2(b))では、図-2(a)で見られた変動が見られず、この処理により地震時の変動が適切に推定・除去されていることがわかる。なお、平成28年(2016年)熊本地震については、変動が大きく複雑であることから、熊本地震の影響が見られる九州地方については地震後の観測データのみを用いて時系列解析を行っている。

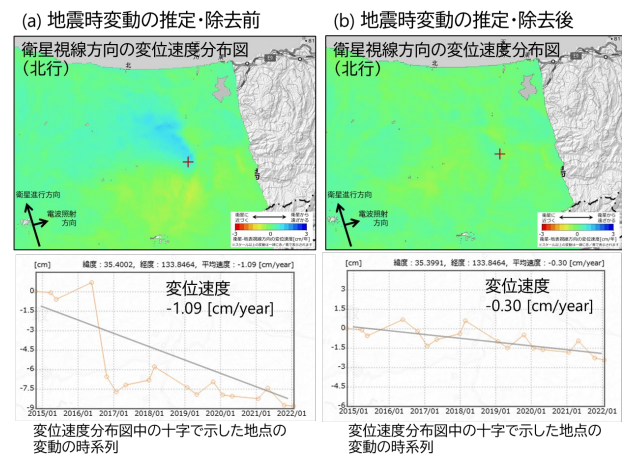


図-2 地震時変動の推定・除去の例(2016年10月21日鳥取県中部の地震)

2.3.2 電子基準点の観測データを用いた広域変動の除去

2.1で述べたとおり、時系列解析で得られる変位速度は、電子基準点「大潟」付近を参照点とした変位速度である。したがって、時系列解析により得られる変位速度は、プレート運動等による広域的な地殻変動が支配的な変動分布となっている。全国変動分布図は、電子基準点では把握が困難な局所的な変動を把握することを目的としていることから、このような広域的な地殻変動を次の手順で除去した。

表-2 地震時変動を推定除去した地震及び補正を実施した画像

対象地震	衛星進行方向	観測モード	パス	フレーム
2018年9月6日北海道胆振東部地震	南行	U7	18	2710 - 2750
	南行	U9	17	2720 - 2760
	北行	U6	122	840 - 900
	北行	U8	123	840 - 880
2016年12月28日茨城県北部の地震	南行	U7	18	2850 - 2910
	北行	U6	124	700 - 770
	北行	U7	124	720 - 800
2016年10月21日鳥取県中部の地震	南行	U6	22	2900 - 2950
	北行	U6	128	660 - 700

まず、電子基準点の F5 解（村松ほか，2021，Takamatsu et al., 2023）から、時系列解析に用いたデータ期間における、電子基準点「大潟」を参照点とした東西，南北，上下成分の変位速度を求める。次に、各成分それぞれについて、クリギング法により平滑化したグリッドデータを作成し、これらのデータを衛星視線方向の変位速度に変換する。この平滑化した衛星視線方向の変位速度を広域の地殻変動として、時系列解析結果から差し引くことで、広域の地殻変動除去後の変位速度を得る。

この一連の処理は、時系列解析を実施した画像（パス及び観測モード）毎に実施した。また、広域の地殻変動をクリギング法で得る際には、画像の端で歪みが生じないように、画像外の電子基準点のデータも使用している。また、広域の地殻変動を得ることが目的であるため、周囲の観測点と異なる傾向の変動をしていると考えられるデータは除外した。以下に除外手順を示す：①チェック対象の観測点データを中心とした経度・緯度 0.25 度以内の範囲に含まれる観測点（対象点は除く）の変位速度をスタッキングし、平均変位速度を求める。このとき、異常値の影響をなるべく少なくするためロバスト平均を用いる。②求めた平均変位速度と対象点の変位速度の差を求め、この差が水平 1.0 cm/year，上下 1.5 cm/year を超える点を異常点として除外する。

図-3 に、南行軌道の観測データによって得られた東北地方太平洋側の変位速度に対して、広域変動を補正した例を示す。図-3(a)，(b)，(c)は、それぞれ補正前の変位速度，電子基準点データによって推定した変位速度及び(a)から(b)を差し引いた補正後の変位速度である。画像の南側の赤色の領域は、衛星に

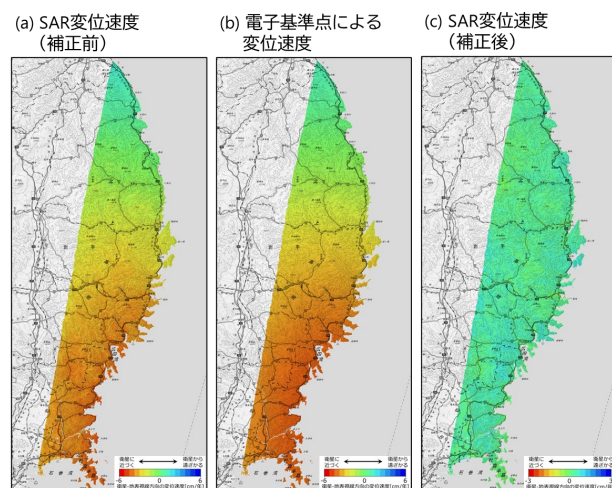


図-3 南行軌道の観測データによって得られた東北地方太平洋側の変位速度に対して広域変動を補正した例。(a)は補正前の変位速度，(b)は電子基準点データを用いて推定した変位速度，(c)は(a)から(b)を差し引いた補正後の変位速度。

近づく変動を示しており、2011 年東北地方太平洋沖地震による余効変動を捉えていると考えられる。補正後の画像では、このような広域の変動が見られず、また、他の地域で広い範囲に渡る変動も見られないことから、適切に補正がされていることがわかる。

2.3.3 画像の結合と 2.5 次元解析

ある地点において、北行軌道及び南行軌道の観測による変位速度が得られると、西側上空方向と東側上空方向の向きの異なる 2 つの変位速度が得られる。この向きの異なる 2 つの変位速度を準東西及び準上下方向に変換する手法が 2.5 次元解析である（図-4）。ここで、“準”とは、得られる変動の方向が、正確な東西，上下方向とは完全に一致していないことを示している。

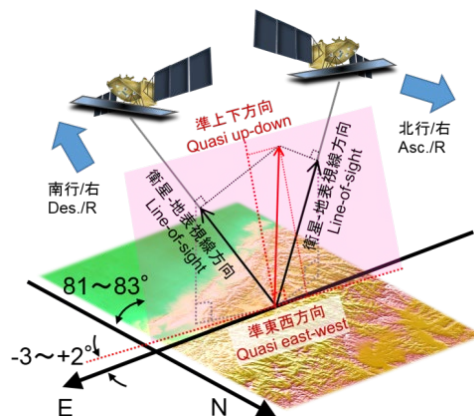


図-4 2.5 次元解析の概念図

時系列解析により、パス及び観測モード毎に北行軌道と南行軌道で変位速度が得られるが、北行軌道と南行軌道の変位速度が得られる画像同士は、衛星の進行方向が南北からずれているため、一部しか重ならない。そのため、様々な画像同士の組合せで 2.5 次元解析を行う必要があり、結果としていびつな形状の分布図が多数得られ、活用するのが困難である（図-5）。そこで、北行軌道と南行軌道のそれぞれの画像を全て結合し、日本全国を一つの画像に結合した後に、2.5 次元解析を実施することとした。ただし、画像を結合する際、単純に重ねると、画像の境界で不連続が生じる（図-6(b)）。このような不連続を軽減するため、重なり合う部分において、各画像の端ほど重みを低くして平均した（図-6(a)）。この重み平均を用いた結合により、不連続が軽減された画像となる（図-6(c)）。

地震時変動の推定・除去後に結合した北行・南行軌道の衛星視線方向，準上下方向，準東西方向の 4 種類の変位速度と、広域変動を除去後に結合したものを図 7 に示す。図 7 の左が広域変動の除去前，右

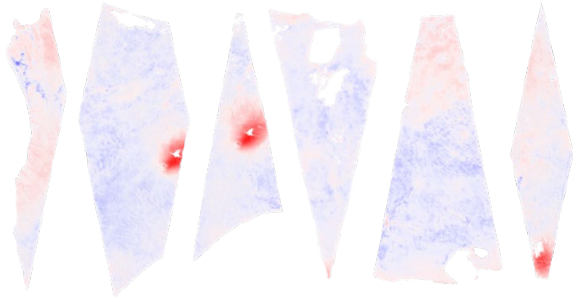


図-5 パス毎に2.5次元解析を行った場合に得られる画像の例（準上下方成分，縮尺は不統一）．多数のいびつな領域の画像が得られる．

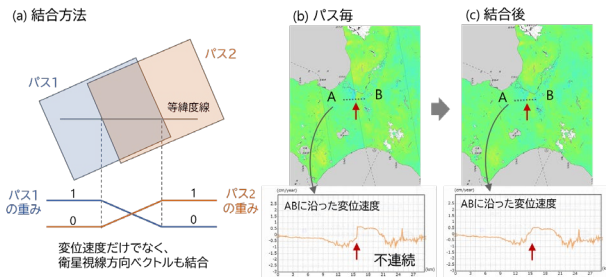


図-6 画像結合処理方法及び結合例

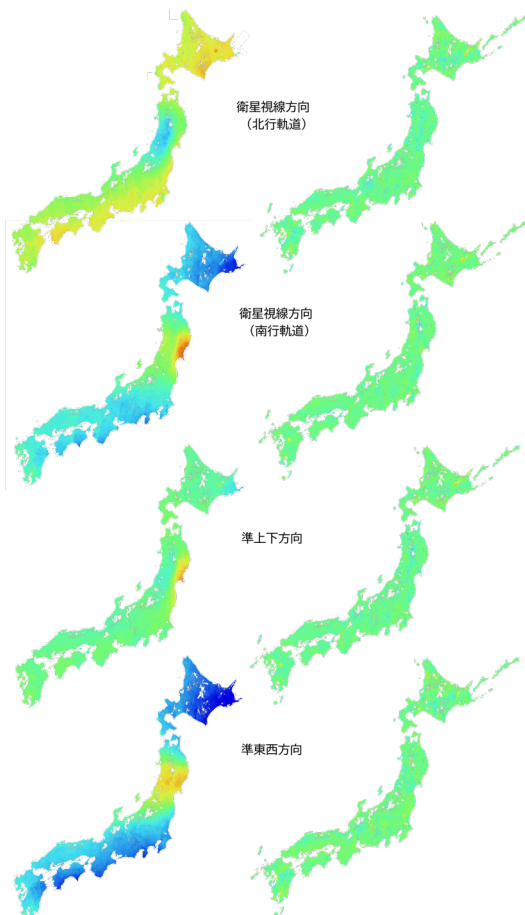


図-7 日本全国の北行・南行軌道の衛星視線方向，準上下方向，準東西方向の変位速度（左：広域変動除去前，右：広域変動除去後）．

が広域変動の除去後であり，後者が2023年3月に公開した全国変動分布図である．

3. 全国変動分布図により得られた変動

公開している全国変動分布図は，2章で述べたとおり，地震時変動や広域変動を推定除去している．また，空間分解能は約90mである．そのため，全国変動分布図により把握できる変動は，おおむね数百m～数十kmの空間的な広がりのもと考えられる．

本章では，全国変動分布図により検出された火山，地盤沈下，斜面変動などの局所的な変動のうち，地盤沈下及び斜面変動の事例について紹介する．火山については，火山を対象として別途解析を実施している時系列解析によって，より詳細に変動が把握されているので，ここでは省略する．

3.1 地盤沈下

全国変動分布図により検出された地盤沈下の主な例を図-8に示す．これらの例で示すとおり，年間1cmを超えるような地盤沈下が全国変動分布図で捉えられるものと考えている．これらの結果の中で，年間約4cmと最も沈降速度が大きかった津軽平野の例を，東西成分の変位速度及び干渉画像とともに図-9に示す．従来の全国定常解析による干渉画像でも地盤沈下は把握されるものの，時系列解析結果の方がより空間的な広がりがあることがわかる．また，この例では，東西に圧縮する方向の変動が見られている．一般に，地盤沈下は，水準測量等により監視されることから，東西方向の変動が検出されたのは非常にまれな例と考えられる．

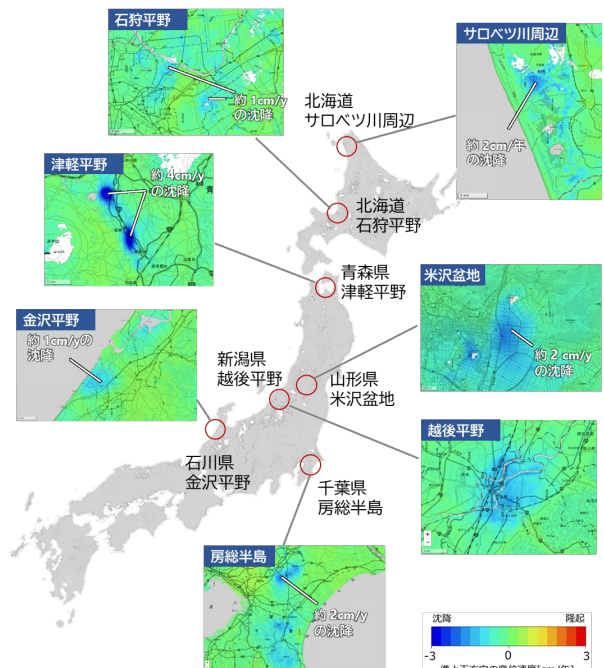


図-8 全国変動分布図により捉えられた地盤沈下の例．

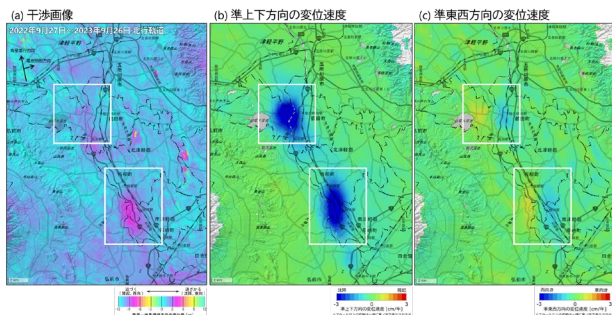


図-9 青森県津軽平野の地盤沈下の例. (a) 2022 年 9 月 27 日と 2023 年 9 月 26 日の北行軌道による干渉画像, (b) 時系列解析結果による準上下方向の変位速度, (c) 時系列解析結果による準東西方向の変位速度.

3.2 斜面変動

全国変動分布図により検出された斜面変動の主な例を図-10 に示す. 全国の山岳域で非常に多くの斜面変動と考えられる変動が捉えられた. このうち, 愛媛県久万高原の例を図-11 に示す. 従来の干渉画像では, 周囲の誤差等により明確に変動が捉えられていない (図-11(a)). また, 変動が検出された範囲に, 電子基準点「久万高原 (041132)」がある. この観測点は, 周囲の電子基準点と異なる変動をしていることが指摘されている点である. 図-11(b)に示す時系列解析により, 電子基準点周辺一帯が変動していることがわかる.

このように, 時系列解析では定常的に生じる斜面変動を把握できることから, 今後は斜面変動を調査する関係機関にとっても有効な情報として活用が期待される.

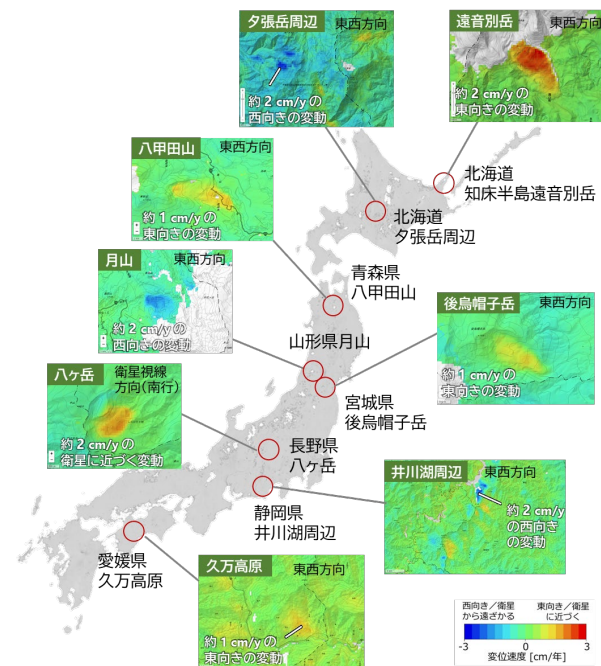


図-10 全国変動分布図により捉えられた斜面変動の例.

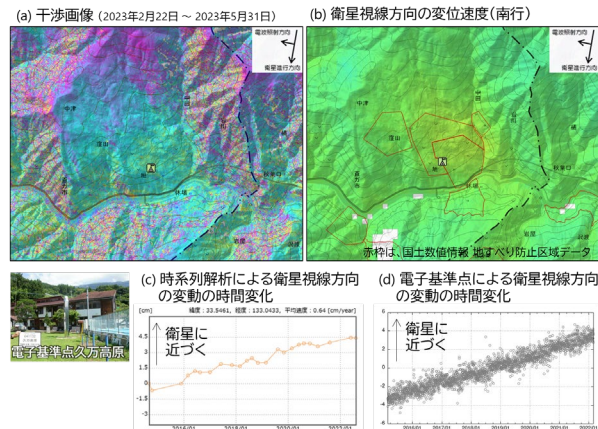


図-11 愛媛県久万高原の斜面変動の例. (a) 2023 年 2 月 22 日と 2023 年 5 月 31 日の南行軌道による干渉画像, (b) 時系列解析結果による衛星視線方向 (南行軌道) の変位速度, (c) 電子基準点位置における時系列解析結果による衛星視線方向の変動の時間変化, (d) 電子基準点データから計算した衛星視線方向の変動の時間変化.

4. 全国変動分布図の活用に向けた取組

本章では, 全国変動分布図の地盤沈下や斜面変動等の把握への活用に向けて, 関係機関向けに国土地理院で運用している地理院 SAR マップの活用について述べる. さらに, 全国変動分布図を公共測量にも活用可能とするための測量マニュアルについて述べる.

4.1 地理院 SAR マップにおける時系列解析結果の公開

地理院 SAR マップとは, 干渉画像や国土に関する地理空間情報を, 地理院地図で閲覧できる Web サイトである. この Web サイトは, 国や地方自治体等に, 国土地理院の全国定常解析結果を地震, 火山活動, 地盤沈下等に係る業務に活用してもらうことを目的に運用している. 本サイトは利用登録が必要であり, 登録数は 159 となっている (2024 年 3 月時点).

この地理院 SAR マップにおいて, 一般に公開している全国変動分布図のほか, 指定した経路に沿ってどのような変化をしているのか確認できる断面図及びある地点の変動の時間推移を確認できる時系列グラフを表示できるツールを公開した (図-12). 断面図の表示により, 例えば, 水準路線に沿った変化の様子の確認や, 時系列グラフにより, 定常的な変動と一時的な変化の判別などの確認ができる. これらのツールを活用することで, 時系列解析結果の有効性が高まるものと考えている. 本機能は, 次節で述べる測量マニュアルとともに一般に公開した.

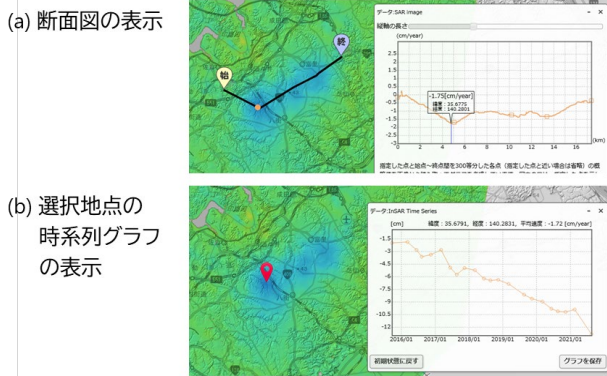


図-12 地理院 SAR マップ（関係機関向けサイト）における断面図及び時系列グラフの表示機能

4.2 測量マニュアルの概要

3.1 節において、全国変動分布図により全国の地盤沈下が捉えられることを示した。現在、地盤沈下の調査における観測項目のうち、地盤高の観測は水準測量により実施されている。水準測量は、測量した水準点の変動を非常に高い精度で把握できるものの、変動が生じている範囲を詳細に把握するためには、作業量が膨大となる。これに対し、全国変動分布図で捉えられる上下変動は、はるかに空間分解能が高いため、地盤沈下調査等に全国変動分布図を活用することで、従来よりも少ない作業量で稠密な上下変動分布が得られることが期待される。

そこで、全国変動分布図のうち準上下方向の数値データを活用し、従来測量と整合的な変動を得るための測量マニュアル案を作成した。全国変動分布図は、厳密な上下方向の変動が得られないことや広域の変動を除去していることなどから、そのままでは水準測量の結果と整合しない。そこで、測量マニュアルでは、まず対象地域において、2 時期の水準測量を実施して水準点における上下変動を得る。この水準点における上下変動と全国変動分布図における上下変動の差を小さくするように補正を加え、この補正を加えた上下変動量を成果とする（図-13）。この測量マニュアルの手法を適用することにより、水準測量を実施する路線を削減できるため、水準測量のみで測量するより低いコストで、稠密な上下変動分布が得られるものと期待される。本マニュアルは、測量成果（数値データ）とともに、2024 年 6 月に公開した

（https://www.gsi.go.jp/KOUKYOU/koukyo0042_sar.html）。

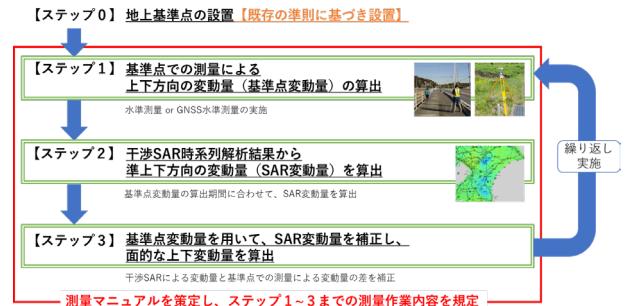


図-13 時系列解析結果を上下変動把握に活用するための測量マニュアル

5. 今後の予定と課題

2023 年 3 月に公開した全国変動分布図は、ALOS-2 の蓄積された観測データを用いて作成した。今後は、ALOS-2 が新たに観測したデータを追加して解析を行い、1 年に 1 回更新する予定である。さらに、2024 年 7 月に打ち上げられた ALOS-4 の定常運用開始後には、ALOS-4 の観測データを用いた全国時系列解析を継続して実施する予定である。

ALOS-4 では、観測頻度が ALOS-2 の 5 倍となり、解析量は数十倍になる見込みである。これまでに、このような大量のデータを処理するための解析環境やソフトウェアの改良を行ってきた。一方で、高い品質で解析結果を出すため、解析結果は目視で確認し、問題があれば手動で修正する方針としていた。しかしながら、ALOS-2 の観測データを用いた全国時系列解析を通じて、ALOS-4 の大量のデータを処理するためには、解析結果の品質管理の自動化・効率化が必要であることが明らかとなった。特に、最終的な結果の精度に大きく影響する位相連続化処理の効率化は、喫緊の課題である。

今後は、位相連続化処理の効率化のための技術開発を行うとともに、解析手法の高度化も進める。

6. まとめ

全国の地殻・地盤変動の監視、さらには測量の基準の維持・管理及び地盤沈下調査等の公共測量に活用することを目的として、ALOS-2 の基本観測データを用いた全国時系列解析を新たな定常解析として開始した。時系列解析により、火山、地盤沈下、斜面変動などが多く検出され、電子基準点等では検出困難な局所的な変動の検出に時系列解析が有効であることが示された。このような局所的な変動のうち、地盤沈下の把握に時系列解析結果を活用するための測量マニュアルを整備し、2024 年 6 月に公開した。

今後も、ALOS-2 の観測データを用いた時系列解析を継続するとともに、ALOS-4 の観測データを用いた全国時系列解析を実施する予定である。

謝 辞

解析に使用した SAR 衛星「ALOS-2」のデータは、ALOS-2に関する国土地理院と JAXA の間の協定「陸域観測技術衛星 2 号観測データ等の高度利用に関する協定」に基づき提供されました。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。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。一部の計算及び図の作成において、The Generic Mapping Tool (GMT) ソフトウェア (Wessel and Smith, 1998) を使用しました。

(公開日：令和 6 年 9 月 12 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.
- Costantini, M. (1998): A novel phase unwrapping method based on network programming, *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, 36, 813- 821.
- Fujiwara, S., Nishimura, T., Murakami, M., Nakagawa, H., Tobita, M., and Rosen, A. P. (2000): 2.5-D surface deformation of M6.1 earthquake near Mt Iwate detected by SAR interferometry, *Geophysical Research Letters* 27, 2049-2052.
- 古居晴菜, 三木原香乃, 市村美沙, 雨貝知美, 石本正芳, 佐藤雄大, 小林知勝 (2022) : 衛星画像を用いた地盤沈下の精密監視~国家座標管理への衛星画像活用に向けて~, 令和 4 年度国土技術研究会.
- Gomba, G., A. Parizzi, F.D. Zan, M. Eineder and R. Bamler (2016): Toward operational compensation of ionospheric effects in SAR interferograms: The split-spectrum method, *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, 54, 1446-1461.
- Ichimura, M., K. Mikiyara, N. Ishikura, K. Shimazaki, M. Ishimoto, Y. Sato, T. Kobayashi and H. Munekane (2021): Monitoring Active Volcanoes in Japan Using InSAR Time Analysis System with ALOS-2 Data, *AGU Fall Meeting 2021*.
- 小林知勝, 森下遊, 山田晋也 (2018) : 干渉 SAR 時系列解析プロトタイプシステムの開発, *国土地理院時報*, 130, 123-133.
- 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.
- 松村弘規, 高松直史, 阿部聡, 古屋智秋, 加藤知瑛, 大野圭太郎 (2021) : 新しい GEONET 解析ストラテジによる電子基準点日々の座標値 (F5 解・R5 解) の公開, *国土地理院時報*, 134, 19-32.
- 三木原香乃, 犬飼孝明, 石倉信広, 島崎久実, 石本正芳, 小林知勝 (2021) : 干渉 SAR 時系列解析による国内火山の長期的な地殻変動について, 日本地球惑星科学連合 2021 年大会.
- Schmidt and Bürgmann (2003): Time-dependent land uplift and subsidence in the Santa Clara valley, California, from a large interferometric synthetic aperture radar data set, *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 108, G9, 2416.
- Takamatsu, N., Muramatsu, H., Abe, S., Hatanaka, Y., Furuya, T., Kakiage, Y., Ohashi, K., Kato, C., Ohno, K., and Kawamoto, S. (2023): New GEONET analysis strategy at GSI: daily coordinates of over 1300 GNSS CORS in Japan throughout the last quarter century. *Earth Planets Space* 75, 49. doi:10.1186/s40623-023-01787-7
- Wessel, P. and W.H.F. Smith (1998): New, improved version of Generic Mapping Tools released, *EOS Trans. Am. Geophys. Union*, 79, 579.