3.5 InSAR データを用いた詳細ひずみ速度分布の解明（サブテーマ 3.2）

(1) 業務の内容

(a) 業務題目　InSAR データを用いた詳細ひずみ速度分布の解明

(b) 担当者

所属機関	役職	氏名
国立大学法人北海道大学理学研究院地球惑星科学部門	准教授	高田　陽一郎
国立大学法人東北大学災害科学国際研究所	教授	福島　洋

(c) 業務の目的

人工衛星搭載型 SAR（合成開口レーダー）衛星のデータを利用し、InSAR（干渉 SAR）時系列解析及び GNSS データの補助により、高空間解像度のひずみ速度場を推定する手法を高度化することを目的とする。また、同手法を国内の複数地域に適用することで詳細なひずみ速度分布を推定し、活断層等の内陸地震の長期評価手法の高度化に資する成果を得る。

(d) 3 か年の年次実施業務の要約

1）令和 7 年度：

陸域観測技術衛星 2 号「だいち 2 号」（ALOS-2）の SAR データを用い、先行研究が進む中部地方（糸魚川－静岡構造線北部及び新潟－神戸ひずみ集中帯東部）を対象に地震間ひずみ速度場を高解像度で検出した。このひずみ速度を求めるにあたってはサブテーマ 3.1 の成果物である GNSS 基準点網の日毎の座標値を用いて精度を高めた。さらにひずみ速度の局在化程度（幅と振幅）を定量的に求め、変形運動を担う地質構造を調べた。また、高度な大気ノイズ補正手法を適用し、精度向上への寄与を評価すると共に、実データへの適用に向けた解析環境の構築と手法の検証を行った。

2）令和 8 年度：

対象地域を中部地方南部、近畿、四国、北海道北部等へ拡大し、InSAR 時系列解析を実施する。衛星データの取得状況に応じ、山陰や東北脊梁ひずみ集中帯も検討対象とする。

3）令和 9 年度：

解析対象地域をさらに拡大し、中央構造線については九州まで含めたシームレスなひずみ速度分布を求める。3 年間の解析結果を比較することで、地域による精度の違いや特徴を定量的に明らかにする。

(2) 令和 7 年度の成果

(a) 業務の要約

「だいち 2 号」の SAR データを用い、活断層等内陸で発生する地震の評価手法の高度化

に資する高空間解像度のひずみ速度場推定手法の高度化を進めた。糸魚川－静岡構造線北部及び新潟－神戸ひずみ集中帯東部を対象として InSAR 時系列解析を実施し、水蒸気遅延、電離圏擾乱及び長波長ノイズの補正を行うと共に、サブテーマ 3.1 の成果である GNSS データも用いて、高精度のひずみ速度場を推定した。その結果、GNSS のみでは十分に把握できない局所的で振幅の大きなひずみ集中域を検出し、既知の活断層との対応や、浅部の固着・未知の伏在断層・非弾性変形の関与を示唆する知見を得た。また、四国地域を対象に広域 InSAR 解析を自動実行する環境を構築すると共に、だいち 2 号への時系列解析手法の適用及び稠密 GNSS データを用いた対流圏遅延補正手法の開発を進め、最大 36%のノイズ低減を確認した。これらの成果により、広域かつ高精度に微小な地殻変動を検出する基盤を整備した。

（b）業務の成果

1）北海道大学

糸魚川－静岡構造線北部及び新潟－神戸ひずみ集中帯東部を含む領域において、「だいち 2 号」が撮像した合成開口レーダー（SAR）画像を用いて InSAR 時系列解析を行い、高空間分解能の速度場を検出した（図 1）。期間は 2014 年から 2023 年までとして能登半島地震の影響の混入を避けた。各干渉画像を水蒸気補正遅延ツール GACOS を用いて補正し、Nagaoka et al. (2025)に従って改良を加えた帯域分割法を用いて電離層擾乱に伴うノイズを補正した。さらに干渉画像に含まれる長波長のノイズを GNSS データを用いて Takada et al. (2018)の手法に従って補正した。

次に GEONET、大学独自観測点、及びソフトバンク独自基準点網の観測点から南北速度場を求め、これを Kriging 法を用いて東西・上下速度場の全ての点に内挿した。このうちソフトバンク独自基準点網の速度は、サブテーマ 3.1 で得られた日座標値解析の成果に基づく。最後に研究領域全体から 1 km 間隔の格子状にひずみを計算する点を抽出する。次に、各点から半径 15 km 以内のグリッドの速度を空間の一次関数で最小二乗フィッティングすることで各点における速度勾配を計算し、さらにこの速度勾配を用いてひずみ速度テンソルを計算した。図 2 に従来どおり GNSS のみを用いて Shen et al. (1996)の手法で求めた面積ひずみ速度と、本研究で求めた面積ひずみ速度を示す。

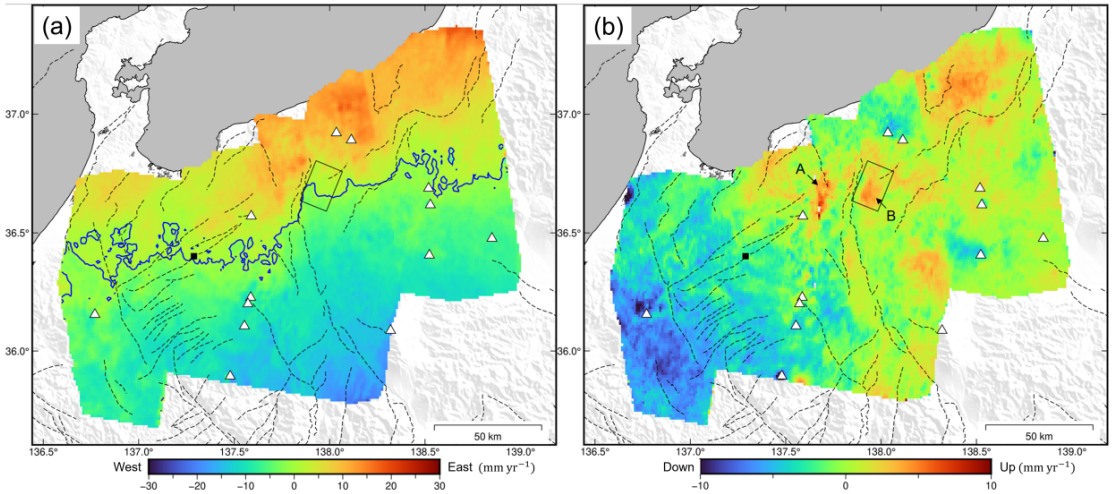


図 1 糸魚川－静岡構造線北部及び新潟ー神戸ひずみ集中帯東部の速度場
（左）東西速度場、（右）上下速度場。点線は活断層。三角は活火山。東西速度場に描かれた青線は 0 mm/yr のコンター。上下速度場の A は飛騨山脈北部の急速な隆起を示す。B と黒枠は 2014 年長野県北部地震の余効変動に伴う隆起と地震断層を示す。

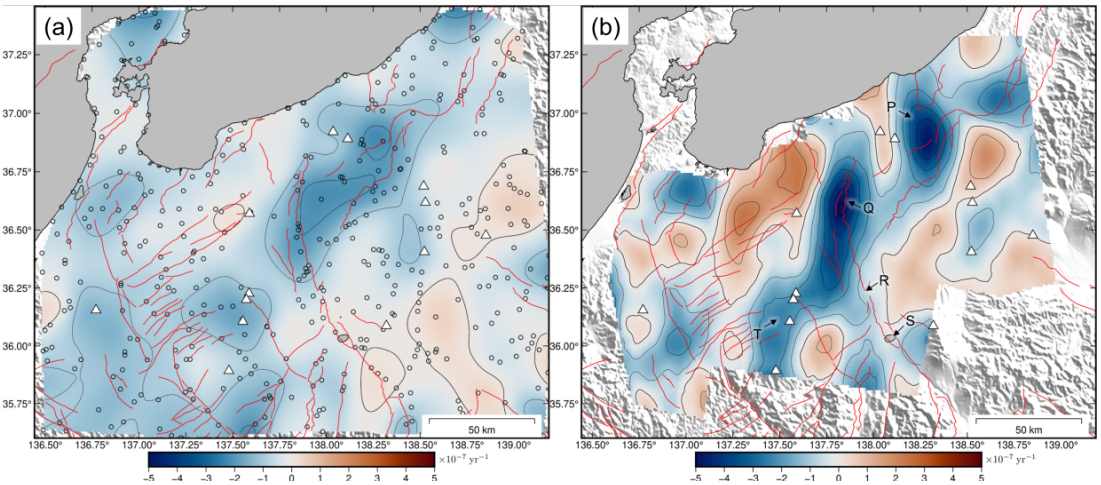


図 2 面積ひずみ速度場
（左）GNSS のみ、（右）本研究（InSAR と GNSS）。赤線は活断層。三角は活火山。コンター間隔は 1×10^{-7}/yr。左図の丸は GNSS 観測点。青（負）は短縮、赤（正）は膨張を示す。

図 2 から、InSAR を用いた結果の方が全般にひずみ速度の値が大きいことが分かる。また特に糸魚川－静岡構造線北部（図 2b の Q から R）にかけて強い短縮が発生していることが分かる。このシグナルは神城断層の運動と関係している可能性が高いものの、神城断層の長期的なすべり速度（4.4～5.4 mm/yr）（Matsuta et al., 2004）ではこのひずみ速度を説明することはできないため、未知の伏在断層や非弾性ひずみが大きく関与している可能性がある。また直江津から長野市にかけて（図 2b の P）にも強い圧縮が検出されて

おり、国土地理院による 80 年間に及ぶ三辺測量（鷺谷・多田，1998）の結果と調和的である。糸魚川－静岡構造線の南部は諏訪湖（図 2b S）から南よりも飛騨山脈の南方延長（図 2b T）へひずみが集中しているように見える。図 3 にこのひずみ速度場の断面図と既知の活断層を比較した結果を示す。CC'を見ると活断層とひずみ速度の局在点は良く一致している。しかしそれ以外の場所では若干ずれている。この原因は現時点では分からないが、一般的に活断層の浅部が固着して深部がすべっていることから、このようなズレが発生するのは自然である。逆にこのズレから活断層がどの程度の深さまで固着しているかを推定する試みが重要であろう。

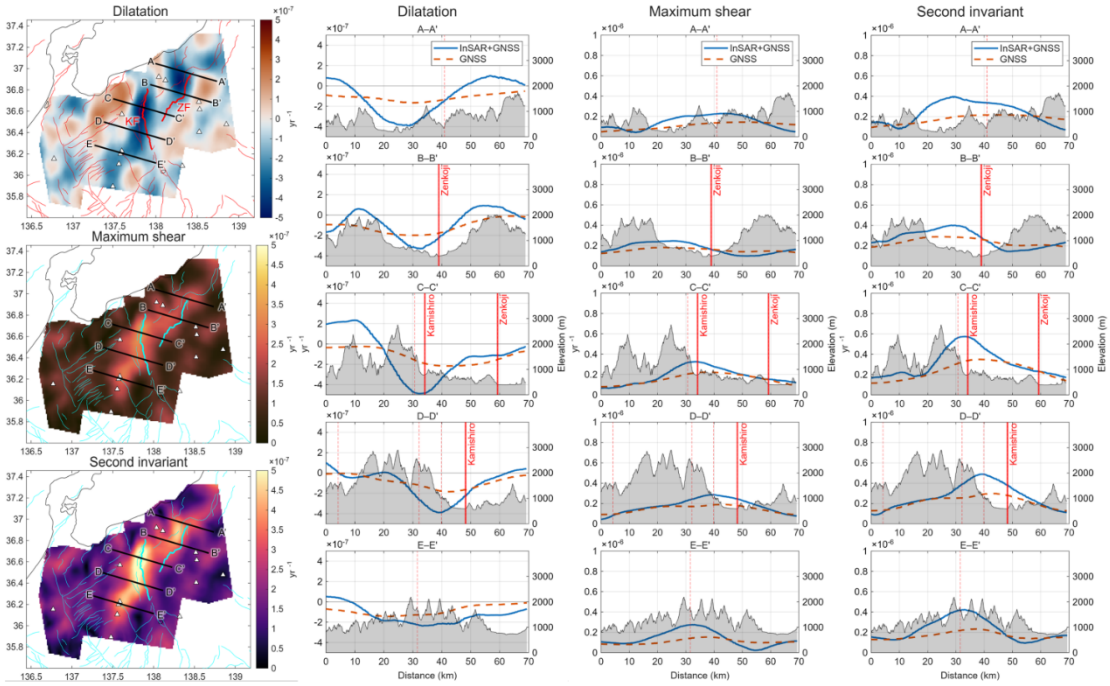


図 3 ひずみ速度場と活断層の比較
（左列）上から面積ひずみ速度、最大せん断ひずみ速度、第二不変量。（右）左列に示した測線（AA'から EE'）上でのひずみ速度と地形。青線が本研究（InSAR+GNSS）、点線は GNSS のみ。赤線は活断層。

図 4 に最大せん断ひずみ速度とひずみ速度テンソルの第二不変量、及びひずみ速度の主軸を示す。最大せん断ひずみ速度を見ると新潟－神戸ひずみ集中帯は全体として高いひずみ速度を保った一連の領域であるが、屈曲していることが分かる。さらに圧縮の主軸が北西－南東方向に伸びており、この地域で発生する地震のメカニズム解から推定した絶対応力場（Terakawa and Matsu'ura, 2010）の最大圧縮方向と整合的である。

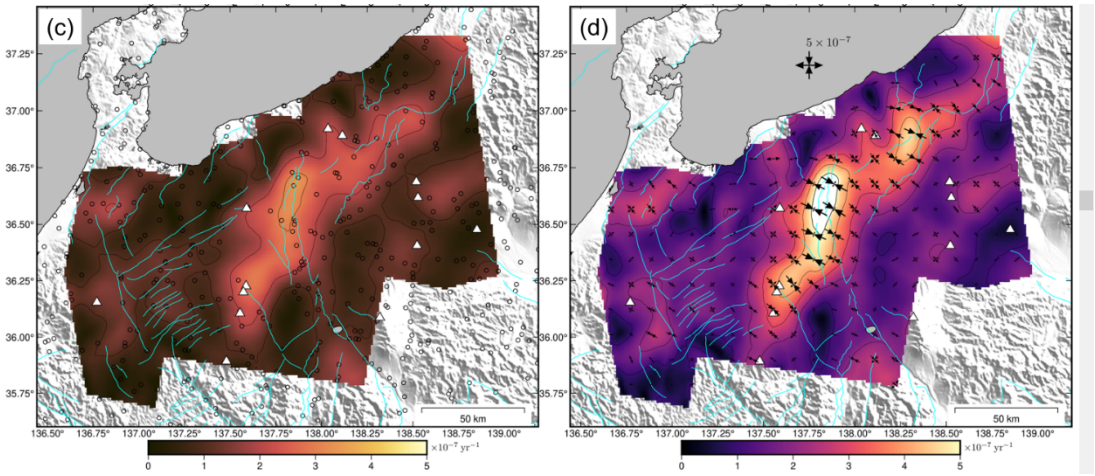


図 4 最大せん断ひずみ速度（左）と第二不変量（右）
青線は活断層、三角は活火山、矢印はひずみ速度の主軸を示す。

2）東北大学災害科学国際研究所

最初に、四国地域において大量の InSAR 解析を高精度に自動実行するための環境構築を行った。四国地域をカバーする「だいち 2 号」の観測データを、関連研究機関のサーバーより取得した。単一の観測画像では網羅できる範囲が限定されるため、複数の画像を南北方向に結合し、広域な干渉画像を一括して生成するプログラムを開発した。これにより、広範囲にわたる地殻変動をシームレスに把握することが可能となった。さらに、日本の衛星が使用する L バンド電波において課題となる電離圏の乱れ（ノイズ）に対し、帯域分割法を用いた補正処理を実施した。補正パラメーターの最適化を図ることで、広域的な解析の妨げとなる長波長ノイズの低減を確認した。解析システムの自動実行を妨げていた設定ファイルの読み込みエラー要因に対し、データ形式を調整する処理を導入することで、大量のデータを連続して処理するための安定性を確保した。また、地形の影響による誤差を補正する過程で生じていたデータ互換性の問題を修正し、解析精度の向上を図った。

次に、衛星データを用いて地表の微小な変形を捉える「InSAR 時系列解析手法」の高度化と実データへの適用検証を目的に、四国東部地域において解析を実施した。具体的には、もともと「Sentinel-1」衛星用に開発された解析ツール「LiCSBAS」を、日本の L バンド衛星「だいち 2 号」へ適用するための解析パイプラインを構築した。特に、広域解析を可能にするため、断片的な画像データ（複数フレーム SLC）を自動で繋ぎ合わせる連結処理スクリプトを開発した。

最後に、高度な大気ノイズ補正手法の適用により、地殻変動検出のさらなる高精度化を図った。具体的には、国土地理院の GEONET に加え、ソフトバンク独自基準点網による超稠密な GNSS データから推定した対流圏遅延量を用いて補正を行う手法を構築した。四国東部をテストフィールドとして検証した結果、最大 36%のノイズ削減を達成し（図 5）、当手法の有効性を実証した。この成果により、微小な地殻変動シグナルを抽出する際の最大のハードルである複雑な大気遅延ノイズを大幅に低減し、精度向上に大きく寄与する手法であることを確認した。

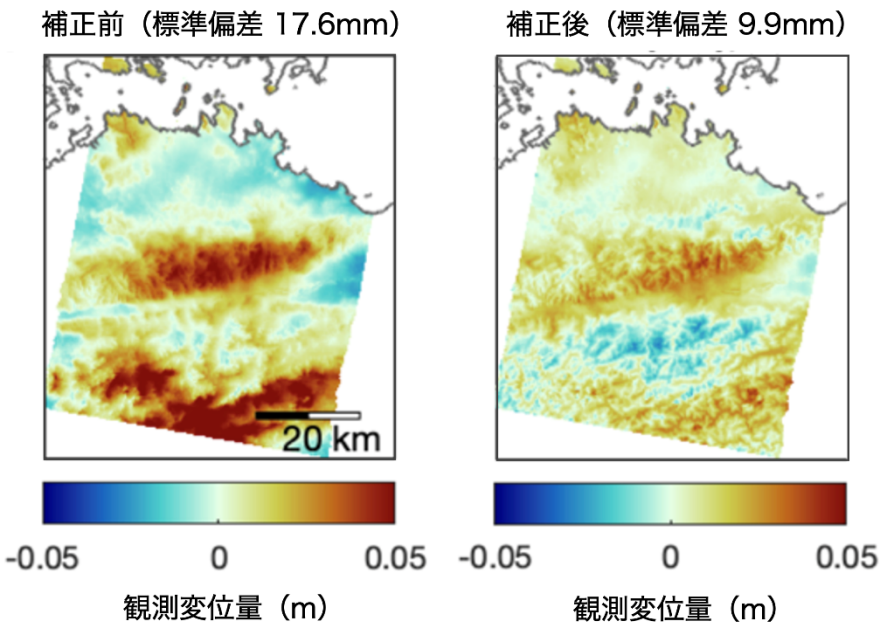


図 5 四国東部における稠密 GNSS データを用いた対流圏遅延ノイズ補正の実施例。
「だいち 2 号」による干渉解析結果（2023 年 3 月 17 日～5 月 12 日）に対し、GEONET 及びソフトバンク独自基準点網のデータを用いて補正を行った。補正前（左）に卓越していた対流圏遅延由来のノイズが、補正後（右）には大幅に低減されている。

(c) 結論並びに今後の課題

「だいち 2 号」の SAR データを用いた InSAR 解析手法の高度化により、活断層等内陸で発生する地震の評価手法の高度化に資する高空間解像度のひずみ速度場推定の基盤を整備した。特に、糸魚川－静岡構造線北部及び新潟－神戸ひずみ集中帯東部においては、GNSS のみでは十分に把握できない局所的で振幅の大きなひずみ集中域を検出し、既知の活断層との対応や、伏在断層あるいは非弾性変形の関与を示唆する知見を得た。また、ひずみ集中域と活断層トレースのずれは、活断層浅部の固着と深部すべりを反映している可能性があり、断層の固着深度を推定する上でも重要な知見が得られた。四国地域においては、広域 InSAR 解析の自動実行環境及び高精度な大気遅延補正手法を構築し、地殻変動を高精度に検出するための技術的基盤を整備した。今後は、解析対象地域を順次拡大すると共に、活断層分布、地質構造及び応力場との比較検討を進めることで、ひずみ集中の成因、活断層浅部の固着深度、及び地震発生場との関係をより定量的に明らかにする必要がある。

(d) 引用文献

Matsuta, N., Ikeda, Y. and H. Sato, The slip-rate along the northern Itoigawa-Shizuoka tectonic line active fault system, central Japan. Earth, Planets and Space, 56, 1323–1330, 2004.

Nagaoka, S., Takada, Y. and Y. Morishita, Improved application of the split-spectrum method to L-band interferograms for ionospheric phase mitigation: a practical recipe. Earth, Planets and Space, 77, 82, 2025.

鷺谷威・多田堯，日本海東縁部の地殻変動とテクトニクス，月刊地球, 20, 515-521, 1998.
Shen, Z.-K., Jackson, D. D. and B.X. Ge, Crustal deformation across and beyond the Los Angeles basin from geodetic measurements. Journal of Geophysical Research, 101, 957–984, 1996.
Takada, Y., Sagiya, T. and T. Nishimura, Interseismic crustal deformation in and around the Atotsugawa fault system, central Japan, detected by InSAR and GNSS. Earth, Planets and Space, 70, 32, 2018.
Terakawa, T. and M. Matsu'ura, The 3-D tectonic stress fields in and around Japan inverted from centroid moment tensor data of seismic events. Tectonics, 29, 2010.