

平成 30 年 5 月 18 日現在

機関番号：10101

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2014～2017

課題番号：26400454

研究課題名(和文) 宇宙測地技術による飛騨山脈周辺の地殻変動様式の解明

研究課題名(英文) Crustal deformation in and around the Hida mountain range revealed by space geodetic technologies

研究代表者

高田 陽一郎 (Takada, Youichiro)

北海道大学・理学研究院・准教授

研究者番号：80466458

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,400,000円

研究成果の概要(和文)：GNSSデータとInSAR時系列解析を組み合わせることで、飛騨山脈近傍の跡津川断層系において空間分解能の高い地震間地殻変動速度場を得た。これまでInSARによる地震間地殻変動の検出例は乾燥地域や変位速度の大きな断層クリープに限られていたが、我々は飛騨山脈のように地形が険しく植生も濃く、さらに積雪も多い劣悪な環境に適した手法を確立した。跡津川断層系を構成する活断層の中で最も変位勾配が大きいのは牛首断層近傍であることが分かった。本研究を通して、歪集中帯内部の空間的な不均質構造を検出することが可能となった。

研究成果の概要(英文)：Combining GNSS surveys and InSAR time-series analyses, we obtained high spatial resolution images of inter-seismic velocity field in and around the Hida mountain range, especially for the Atotsugawa fault system. So far, InSAR has been applied to detect inter-seismic crustal deformation for arid regions and/or fault creeps along large scale active faults. In this study, we successfully applied InSAR analysis to humid areas covered with dense vegetation in summer and large amount of snow in winter. We revealed that, among three fault strands consisting of the Atotsugawa fault system, displacement gradient takes maximum in proximity of the Ushikubi fault. Through our work, it becomes possible to detect heterogeneous velocity field inside strain concentration zones.

研究分野：地形形成論

キーワード：InSAR GNSS 飛騨山脈 跡津川断層

## 1. 研究開始当初の背景

日本の人工衛星「ふよう」と「だいち」は1992-1998年および2006-2011年の期間に大量の合成開口レーダー(SAR)画像を撮像した。異なる日時に撮像されたSAR画像同士の差を用いて衛星から地表までの距離変化を検出する干渉SAR(InSAR)は、地表観測を必要とせず、面的(高空間分解能)に変位場を求める強力な手法である。一方、これまでにInSARによって検出された成果の多くは地震時変動であるが、世界的な課題は地震間変動を面的に求めることにある。地震間変位は勾配が小さいため、InSAR解析では軌道推定誤差や水蒸気擾乱などに起因する長波長ノイズとシグナルの分離が課題となる。GNSS解析は高い時間分解能を活かして地震間変位の検出に成功した。しかし山岳地域にはGNSS観測点が極端に少ない。そこで、山岳地域におけるInSAR画像に含まれる長波長ノイズを周辺地域に展開されたGNSSのデータで補正するという着想に至った。これを実行する最適な地域の1つが、山岳地域でありながらGNSS観測点が密に存在する飛騨山脈周辺である。

## 2. 研究の目的

(1) 本研究の目的は飛騨山脈周辺地域の速度場をInSAR解析を用いて検出し、その長波長誤差をGNSSデータで補正して地震間地殻変動の詳細を解明することである。

(2) 飛騨山脈周辺地域は地形的に険しく、植生に覆われており、さらに冬季には多量の積雪を見る。これらはいずれもInSAR解析に適さない条件であるが、我が国の日本海側ではごく普通の環境と言える。本研究の第二の目的は、こうした悪条件に耐えて空間的に密な地殻変動場を得るための基礎的な手法を確立することにある。

## 3. 研究の方法

まずSAR画像は波長が長く干渉性が高い「だいち」が撮像したものをを用いる。次に地震間地殻変動は速度が遅いためS/N比を向上させるために時間基線長が長い干渉ペアを選択する。また、地形による誤差の影響を軽減するために、空間基線長の短い干渉ペアを選ぶ。以上の条件を満たすInSAR画像を複数作る。

次に、数値標高モデルを用いて、これらの画像から標高依存成分を除去する。すなわち、標高の違いに応じて大気を透過する経路の長さが異なることの影響を軽減していることになる。

さらに、GNSS速度場を用いて各InSAR画像に含まれる長波長ノイズを除去する。長波長ノイズの起源は主に軌道推定誤差・水蒸気お

よび電離層の擾乱である。具体的な手法はFukushima and Hooper (2011)に従い、以下のように行う。

- (1) GNSS観測点で推定された速度場から衛星視線方向の速度を合成する。
- (2) InSAR画像中のGNSS観測点近傍のピクセルの値とGNSS速度場から得た(1)の値の差をとり、これをInSAR画像の誤差とする。
- (3) GNSS観測点で得られたInSAR画像の誤差を全てのピクセルに内挿する。

さらに、このように補正された複数枚の干渉画像を用いてSBAS法(Berardino et al., 2002)に基づくInSAR時系列解析を行い、短周期成分(主に電離層や水蒸気の擾乱に起因)を除去して、面的な地震間速度場を得る。

## 4. 研究成果

### (1) 解析技術的な側面

既存の方法ではGNSS観測点の標高を用いて標高に相関する位相成分を除去している。しかし飛騨山脈近傍では非常に山が高いため、GNSS観測点はどうしても低地に集まりがちである。そこで、まず数値標高モデル(DEM)を用いて標高依存性を除去した。この際、長波長の位相トレンドを双線関数で近似して一時的に除去し、DEMを用いた補正の終了後に再度戻すという作業を行った。この手法の効果を図1(a,b)に示す。赤点線で示す谷や、特に跡津川断層南側の山地に相関したシグナルが除去されている様子が分かる。

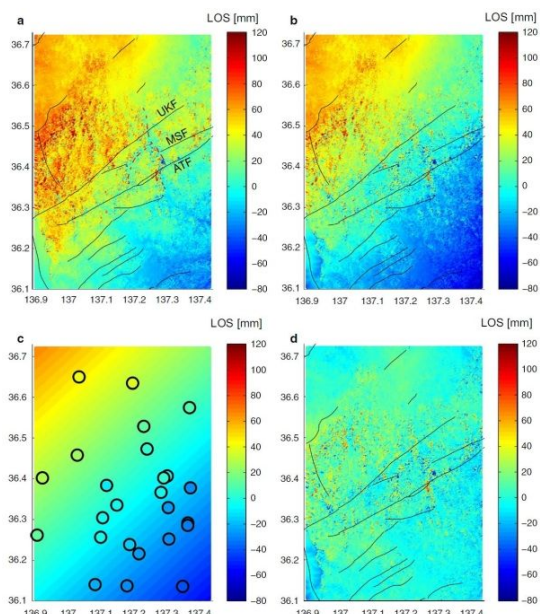


図1. 干渉画像(20071104-20100512)の補正例。(a) 補正前の干渉画像。(b) DEMで標高依存性を除去した結果。(c) GNSS速度場から求めた長波長トレンド。色付きの丸はGNSS観測点の衛星視線方向速度場。(d) GNSS補正後の干渉画像。

また、解析する領域を絞って InSAR 画像から小さい領域を切り出すことも重要であった。これは、場所が異なると大気の成層構造が異なるためである。

各干渉画像を GNSS データで補正する際には、GNSS 観測点で得られた InSAR 画像の誤差を任意のピクセルに内挿する必要がある。この際、スプライン関数を用いて内挿すると、GNSS データの誤差（特に上下成分）が直接補正結果に混入してしまうため、この方法は避けた。かわりに、InSAR の誤差が空間の双線形関数に従うと仮定して任意のピクセルでの誤差を評価した。この手法は地殻変動の波長が長い場合に有効であると考えられる。GNSS データを用いて InSAR 画像を補正した例を図 1(c, d)に示す。長波長ノイズが大幅に軽減されていることが分かる。

GNSS 観測点としては国土地理院が整備した GEONET に加えて北海道大学・名古屋大学・京都大学で共同管理している観測点のデータも用いた（図 2）。これらの観測点の保守・維持に本研究課題の経費を当てた。

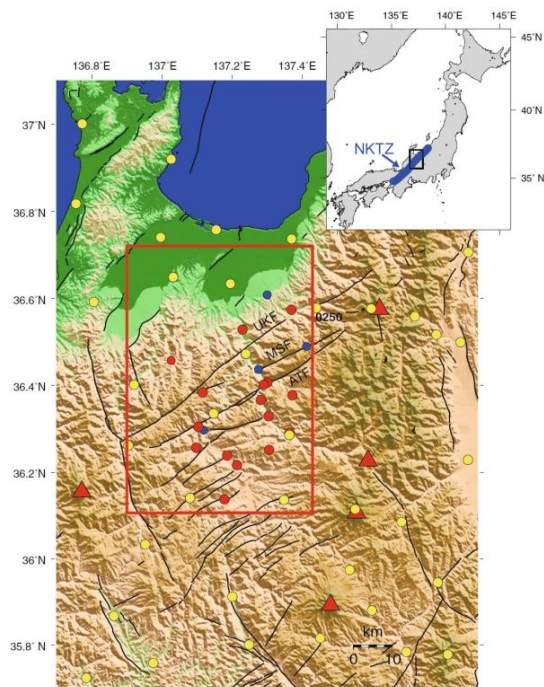


図 2 . 跡津川断層系周辺の GNSS 観測点。丸印が GNSS 観測点。黄丸は GEONET、赤丸は大学の観測点を示す。青丸はノイズが大きいため補正に用いなかった観測点。赤枠が InSAR 解析領域。UKF: 牛首断層, MSF: 茂住-祐延断層, ATF: 跡津川断層。NKTZ: 新潟神戸歪集中帯。

## (2) 地球科学的な側面

このように補正した InSAR 画像を用いて時系列解析を行い、空間解像度の高い地震間地殻変動速度場を得た。用いた InSAR 画像のペアを図 3 に、得られた速度場を図 4 に示す。

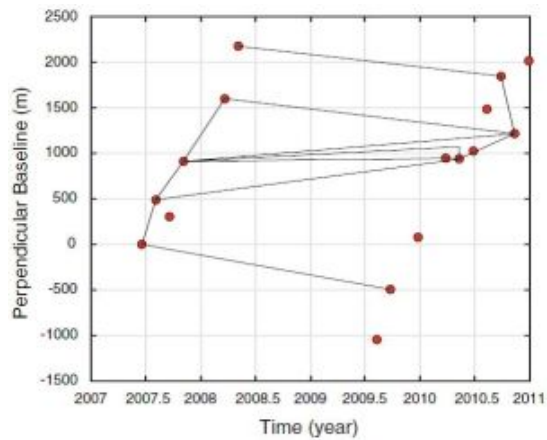


図 3. 時系列解析に用いた InSAR 画像。赤丸が撮像日、黒線が InSAR 画像を示す。

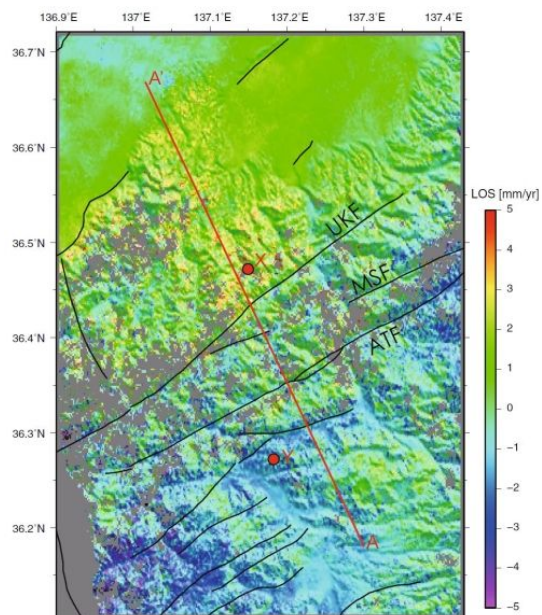


図 4. InSAR 時系列解析により得られた衛星視線方向 (LOS) の速度場。

使用したデータは「だいち」(ALOS)の上昇軌道から撮像している。図 4 では跡津川断層系の北側は衛星から遠ざかり、南側は遠征に近づくセンスとなっている。これは跡津川断層系が全体として右横ずれ運動をしているという既知の観測事実(例えば Hirahara et al., 2003, Ohzono et al., 2011)と整合的である。さらに詳細を調べるために、図 4 中の AA' 側線に沿ったプロファイルを作成した(図 5)。図 5 から、跡津川断層系の中でも牛首断層近傍で変位勾配が最も大きくなっている様子が分かる。また、図 5(a)と(b)を比較すると、標高と変位速度の間に相関は見られず、標高に依存する大気遅延の系統的なパターンを見ているわけではないことも分かる。

最後に、時系列解析によって短周期の擾乱を除去できているかをチェックするために、図 4 の X と Y の 2 点における累積変位をプロ

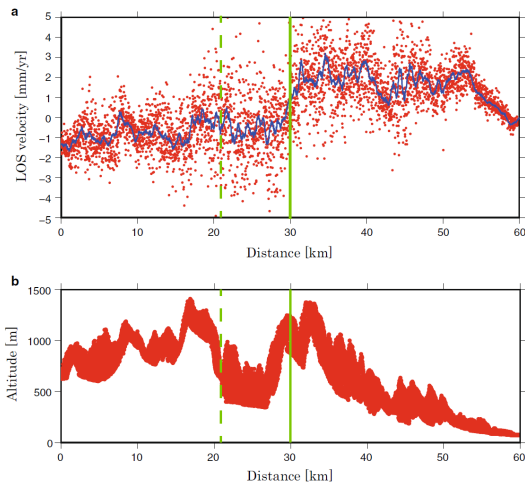


図 5. AA' (図 4) に沿ったプロファイル。(a) 衛星視線方向の速度。青線は 30 点移動平均。(b) 標高。緑点線は跡津川断層、緑線は牛首断層の位置を表す。

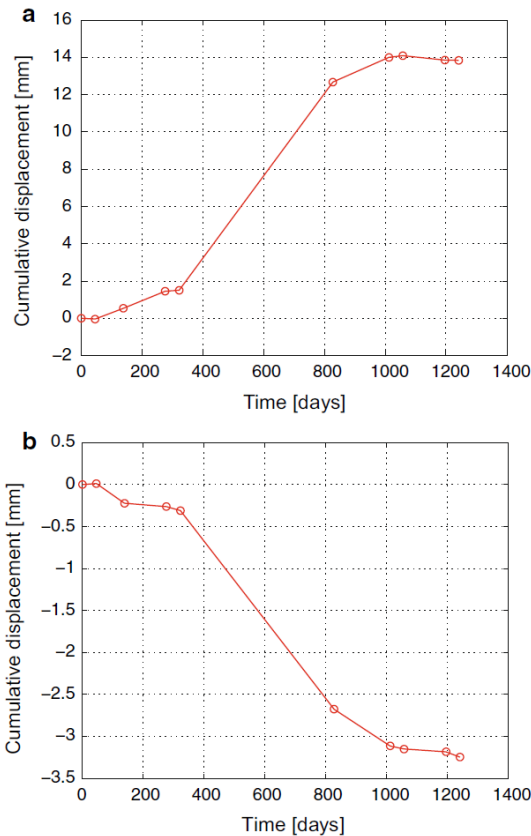


図 6. InSAR 時系列解析から得た累積変位量。(a) 図 4 の点 X。(b) 図 4 の点 Y。

ットした(図 6)。図 6 に示されている通り、変位は時間とともに単調に累積している。このことは、時系列解析によって短周期ノイズ(多くは水蒸気や電離層の擾乱に起因)がそれなりに除去されていることを示す。一方、時間的に完全に単調(直線的)に累積しているとは言えず、こうした擾乱の影響が完全に除去されていないことも分かる。「だいち 2 号」(ALOS2) がより多くのデータを撮像することができれば、この問題は大きく改善され

るであろう。

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 3 件)

Youichiro Takada, Takeshi Sagiya, Takuya Nishimura, Interseismic crustal deformation in and around the Atotsugawa fault system, central Japan, detected by InSAR and GNSS, *Earth Planets and Space*, 査読有、vol. 70:32, 2018, pp. 1-12, DOI: 10.1186/s40623-018-0801-0

Kotaro Tsukahara, Youichiro Takada, Aseismic fold growth in southwestern Taiwan detected by InSAR and GNSS, *Earth Planets and Space*, 査読有、vol. 70:52, 2018, pp. 1-7, DOI: 10.1186/s40623-018-0816-6

Youichiro Takada, Kei Katsumata, Hiroshi Katao, Masahiro Kosuga, Yoshihisa Iio, Takeshi Sagiya, Stress accumulation process in and around the Atotsugawa fault, central Japan, estimated from focal mechanism analysis. *Tectonophysics*, 査読有、vol. 682, 2016, pp. 134-146, DOI: 10.1016/j.tecto.2016.05.013

〔学会発表〕(計 6 件)

高田陽一郎、地震時と地震間の応力変化に対する地殻の応答からわかること、日本測地学会第 128 回講演会、2017 年 10 月、岐阜県瑞浪市

高田陽一郎、有限要素法による InSAR 画像の解釈：地形・弾塑性・粘弾性の効果、日本測地学会第 126 回講演会、2016 年 10 月 21 日、岩手県奥州市

Youichiro Takada, Takeshi Sagiya, Takuya Nishimura, Interseismic crustal deformation in and around the Atotsugawa fault system, Central Japan, detected by InSAR and GNSS, *American Geophysical Union Fall Meeting*, 2015 年 12 月 15 日、San Francisco, USA

高田陽一郎、鷺谷威、西村卓也、跡津川断層周辺における地震間地殻変動の特徴、日本測地学会第 124 回講演会、2015 年 10 月 14 日、福岡県福岡市

高田陽一郎、跡津川断層近傍における変形運動と応力蓄積過程、日本地球惑星科学連合 2015 年大会、2015 年 5 月 24 日～28 日、

千葉県千葉市

高田陽一郎、鷺谷威、西村卓也、InSAR と GPS を用いた歪集中帯における地震間地殻変動検出の試み、日本測地学会第 122 回講演会、2014 年 11 月 5 日～7 日、茨城県つくば市

〔その他〕

ホームページ等

<https://www.sci.hokudai.ac.jp/~takaday/paper.html>

## 6 . 研究組織

### (1)研究代表者

高田 陽一郎 (TAKADA, Youichiro)  
北海道大学・大学院理学研究院・准教授  
研究者番号：80466458

### (2)研究分担者

鷺谷 威 (SAGIYA, Takeshi)  
名古屋大学・減災連携研究センター・教授  
研究者番号：50362299