

# 地殻変動計測のための多様な衛星 SAR データの利用に関する研究（第3年次）

実施期間 平成 28 年度～平成 30 年度  
地理地殻活動研究センター  
宇宙測地研究室 森下 遊

## 1. はじめに

国土地理院では、SAR（合成開口レーダー）のデータを使用した SAR 干渉解析により、地震・火山活動・地盤沈下・斜面変動等に伴う地表変動を計測及び監視する事業、また、その事業に資するための研究開発を行ってきた。これまでの事業では、JAXA が開発した L バンド（波長約 24cm）SAR 衛星の ALOS（2006 年～2011 年）及び ALOS-2（2014 年～）のデータを主に利用している。一方で、世界では ESA（欧州宇宙機関）によって打ち上げられた C バンド（波長約 5.5cm）SAR 衛星 Sentinel-1 の利用が急速に進んでいる。Sentinel-1 は Sentinel-1A（2014 年～）と Sentinel-1B（2016 年～）の 2 機で構成され、最短 6 日間隔（日本域は概ね 12 日または 24 日間隔）という高頻度な観測を行っている。観測データは無償で公開され、誰もが容易に入手できる。これまでにないデータ量の膨大さと入手しやすさにより、世界の衛星 SAR データの利活用に革新をもたらしている。

本年度は、Sentinel-1 の大量の SAR 干渉画像を使用して数百 km 以上の広域を対象に適用可能な時系列解析手法を開発した。また、トルコを対象に事例解析を行い、断層沿いで約千 km にわたり生じているゆっくりとした変動及び各地で発生している局所的な地盤沈下を検出することに成功した。本解析手法は、ALOS-2 や今後打ち上げ予定の ALOS-4 のデータの利用も想定して開発しているため、今後の日本全国を網羅的に対象とする地表変動監視事業にも貢献できるであろう。

## 2. 解析対象地域

事例解析の対象地域はトルコである（図-1）。トルコの国土面積は約 78 万 km<sup>2</sup>で、日本のほぼ 2 倍である。国土の北部には約千 km にわたって北アナトリア断層が東西に横切っている（図-1 左）。同断層沿いでは巨大な被害地震が頻発しており、世界で最も活発な断層の一つである。GNSS により断層沿いで右横ずれの変動（最大約 3cm/年）が観測されている（図-1 右；Kreemer et al., 2014）。また、2002 年～2010 年に観測された Envisat（C バンド）の SAR データを用いた研究が行われており、時系列解析によって空間的に詳細な変動速度分布を明らかにし、各セグメントのすべり速度や固着域の深さを推定している（Hussain et al., 2018）。干渉 SAR は主に上下及び東西方向の変動にしか感度がないが、当該領域の主な変動方向は東西方向であるため、干渉 SAR の事例研究対象としても適している。

## 3. 使用データと LiCS プロジェクトによる Sentinel-1 データ自動干渉解析

LiCS（Looking inside the Continents from Space）は、英国の複数の大学・研究機関で構成される地震・火山関係の研究グループ COMET（Centre for Observation and Modelling of Earthquakes, Volcanoes and Tectonics）によって 2014 年から実施されている研究プロジェクトである。LiCS の目的は、Sentinel-1 データを利用した広域の時系列解析結果からひずみ分布を詳細に明らかにし、地震ハザードの詳細な評価を可能にすることである。また、火山の準リアルタイム監視も目的の一つである。2018 年まで継続して自動干渉解析機能の開発が行われてきており、Web（<https://comet.nerc.ac.uk/COMET-LiCS-portal/>）上で解析結果（位相アンラップ前後の干渉画像及びコヒーレンス）が公開されている。2018 年度末時

点では主にアルプス・ヒマラヤ造山帯及び複数の火山地帯の解析結果が公開されており、最終的には全球の地震・火山地帯を対象とすることを目標としている。

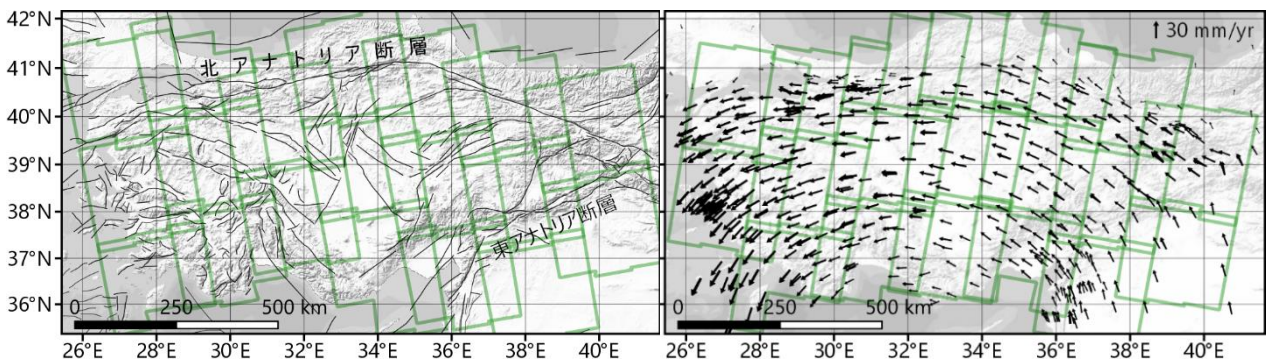


図-1 研究対象地域 (左) 北行のフレームと断層の分布 (右) 南行のフレームと GNSS 変動速度

LiCS はトルコを最優先の解析対象地域としており、2018 年 8 月頃までに利用可能なほぼ全ての Sentinel-1 のデータを用いた干渉解析が実施された。2016 年中旬までは Sentinel-1A のみが運用されていたため、概ね 12 日毎の観測間隔であったが、2016 年中旬以降は Sentinel-1B との 2 機体制になり、6 日毎という高頻度でデータが得られるようになった。Sentinel-1 の 1 フレームの広さは約 250km 四方であり、対象地域をカバーするために北行・南行それぞれで 19 個のフレームのデータが処理された(図-1)。LiCS では、あるデータに対し基本的に 3 つ後までのデータとの干渉画像を作成する。なお、垂直基線長は常に約 300m 以下であり、基線長が大きいくことで生じる干渉性の低下を考慮する必要はない。干渉画像は  $20 \times 4$  でマルチルック (空間平均化) され、レーダー座標系での空間分解能は約 80m、画像サイズは約  $3400 \times 4600$  画素 (約 60MB/枚) である。2014 年 10 月頃から 2018 年 8 月頃までで、各フレーム約 150 個の観測データ及び約 450 枚の干渉画像、対象地域全体では約 5600 個の観測データ及び約 17000 枚の干渉画像が利用可能であった。この干渉画像は約 2700 億画素、約 1TB に相当する。時系列解析ではこの大量の干渉画像を利用した。

## 4. 広域を対象とする時系列解析手法

### 4.1 マルチルック

大量のデータを計算処理する上で問題となるのが計算時間である。計算時間は解析機器の性能に依存するが、利用可能な解析機器が限られていた (2.90GHz,  $2 \times 8$ core, 4 台を研究グループ内で共有) ため、現実的な時間で解析が完了するように、アンラップ画像に対しさらにマルチルックを適用した。マルチルック後の空間分解能は LiCS の主目的であるひずみ分布の推定を想定し、約 1km とした。

### 4.2 異常データ・アンラップエラーを多く含む干渉画像の除去

Sentinel-1 データの中には、人工的な位相不連続があるもの (特に 2015 年 7 月以前) や欠損があるものがしばしば含まれる。コヒーレンスやアンラップ画像の統計値から、それら異常データを抽出し、自動的に時系列解析対象のデータから除去した。

アンラップエラーは時系列解析での誤差要因となる。ここでは冗長な干渉画像ペアによって構成されるループ位相を計算・確認することにより、アンラップエラーを多く含む画像を抽出し、時系列解析対象のデータから自動的に除去した。ループ位相を用いることでアンラップエラーを修正することも原理的には可能であるが、試行したところ誤修正による新たなアンラップエラーが生じることが多く、現時点での導入は断念した。アンラップエラーの修正は今後の課題である。

#### 4.3 変動時系列及び速度の算出（時系列インバージョン）

干渉画像の組み合わせ（ネットワーク）から変動時系列及び変動速度を最小二乗的に算出（インバージョン）する。よく用いられている時系列解析手法である SBAS（Small BAseline Subset）では、全ての干渉画像において有効なデータが存在する画素のみが解析対象となる。つまり、一時期でも干渉性が低下してデータが欠損した点においては、ネットワークが不連続となり（インバージョンが階数不足となり）、有効な変動時系列を算出することができなくなるという問題が生じる。都市部などコヒーレンスが高い領域ではこの問題は生じにくいですが、今回の対象地域は特に冬季に干渉性が低下しやすく、通常の SBAS ではほとんどの領域で有効な解を得られなかった。

そこで、不連続を含むネットワークから変動時系列を算出するため、NSBAS という手法を用いた（Lopez-Quiroz et al., 2009; Doin et al., 2011）。NSBAS では、インバージョンに時間方向の拘束条件を加えることで階数不足の問題を解消し、不連続なネットワークを仮定した時間関数にフィットするように結合して解く。NSBAS はオープンソースの時系列解析ソフトウェアである GIANt でも採用されている。

なお、現時点では対流圏誤差低減、電離層誤差低減、基線値再推定、時空間フィルタ等の処理は行っていないが、今後機能を追加していく予定である。

#### 4.4 変動速度のマスク

ある程度のデータ量が利用可能であれば変動速度を算出することはできるが、条件が悪い（例えば、コヒーレンスが低い、利用可能なデータ量が少ない、ネットワークの不連続が多い等）画素では誤差量が大きくなり有意な値とならないため、それらの画素は最終結果からは除かれるべきである。そこで、様々な誤差要因の指標を計算した上で、各指標に基づいてマスクを作成し、誤差量が大きい画素を除去した。

#### 4.5 GNSS との結合及び変動成分の分離

各フレームの変動速度はそれぞれの範囲内にある参照点に対する相対的な値であるため、フレーム間では整合しない。広域の変動を議論するためには全フレームの変動速度を共通の参照点に対する値に合わせる必要がある。そこで、GNSS によって得られている変動速度に各フレームの変動速度を整合させる処理を実施した。

また、北行・南行の 2 成分の衛星-地表方向の変動速度と GNSS から推定した南北方向の変動速度を用いて、東西・上下方向の変動成分を分離した（Hussain et al., 2018）。

### 5. 解析結果

東西成分では、約千 km にわたる北アナトリア断層沿いの右横ずれ変動及びトルコ南東部を北東-南西方向に走る東アナトリア断層沿いの左横ずれ変動が明瞭に検出された（図-2 左）。上下成分では複数の地盤沈下が検出された（図-2 右）。そのうち Konya 平野や Bursa 平野では他の研究により同様の地盤沈下が検出されている（例えば、Aslan et al., 2019）。

この結果で特筆すべきは、網羅性と空間スケールの大きさである。ひずみ分布を詳細に明らかにするには対象地域を網羅するデータが必要不可欠であるが、従来の C バンド SAR を利用した時系列解析では、干渉性が低下しやすい非都市部の領域では有効な解析結果を得ることが困難であった。Sentinel-1 の最短 6 日間隔という非常に短い観測時間間隔のおかげで非都市部でも干渉性が保たれ、さらに大量の短時間間隔干渉画像を用いることで、網羅的かつ高精度な結果を得ることが可能となった。また、全 38 フレームという広域の膨大なデータを処理し、GNSS を補助的に利用することで、約千 km にわたる断層沿いの変動の全体像とその詳細な空間分布を明らかにすることができた。

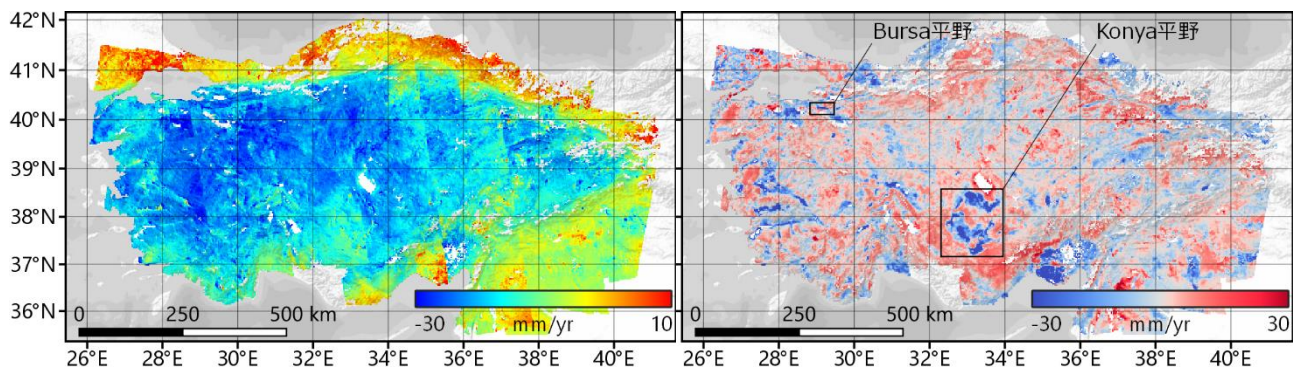


図-2 得られた変動速度 (左) 東西成分 (右) 上下成分

## 6. まとめと課題

大量の Sentinel-1 データを利用した時系列解析により、広域にわたる断層沿いの地震間変動及び複数の地盤沈下を検出することに成功した。ここで開発した解析手法は L バンドデータへも適用可能である。今後はここで開発した手法をベースに L バンド及び日本域に向けて改良・最適化を試みる。

広域を対象とする時系列解析を地表変動監視事業で用いるには、まだまだ課題が残されている。本年度は計算時間を短縮するため空間分解能を約 1km まで落としたが、事業で利用するにはより高い分解能が必要となる。高分解能でも現実的な時間で解析処理が可能となるよう、計算処理高速化や効率化、解析機器の整備を進める必要がある。また、大量のデータを処理するため、可能な限りの自動化が望まれる。誤差の評価や新たな観測データによる解析結果の更新も課題である。

## 参考文献

- Aslan, G. et al. (2019): Investigating Subsidence in the Bursa Plain, Turkey, Using Ascending and Descending Sentinel-1 Satellite Data, *Remote Sens.*, 11, 85.
- Doin, M.-P. et al. (2011): Presentation of the small baseline NSBAS processing chain on a case example: the Etna deformation monitoring from 2003 to 2010 using Envisat data, *Proc. ESA Fringe 2011 Workshop*.
- Hussain, E., T. J. Wright, R. J. Walters, D. P. S. Bekaert, R. Lloyd, and A. Hooper (2018): Constant strain accumulation rate between major earthquakes on the North Anatolian Fault, *Nat. Commun.*, 9, 1392.
- Kreemer, C., G. Blewitt, and E. C. Klein (2014): A geodetic plate motion and global strain rate model, *Geochem. Geophys. Geosystems* 15, 3849–3889.
- López-Quiroz, P., M. P. Doin, F. Tupin, P. Briole, and J. M. Nicolas (2009): Time series analysis of Mexico City subsidence constrained by radar interferometry, *J. Appl. Geophys.*, 69(1), 1-15.

## 謝辞

本研究は筆者が日本学術振興会海外特別研究員制度の助成を受けリーズ大学に滞在中に実施されました。Sentinel-1 データの干渉解析、GNSS との結合及び変動成分の分離はリーズ大学の J. Weiss 博士によって実施されました。ここに記して謝意を表します。