

## (41) 干渉 SAR の 2.5 次元解析による 東北地方太平洋沖地震の余効変動の調査

染谷 亮太<sup>1</sup>・羽柴 秀樹<sup>2</sup>・園部 雅史<sup>3</sup>

<sup>1</sup>学生会員 日本大学大学院 理工学研究科土木工学専攻 (〒101-8308 東京都千代田区神田駿河台 1-8-14)

E-mail: csry21016@g.nihon-u.ac.jp

<sup>2</sup>正会員 日本大学 教授 理工学部土木工学科 (〒101-8308 東京都千代田区神田駿河台 1-8-14)

E-mail: hashiba.hideki@nihon-u.ac.jp

<sup>3</sup>正会員 日本大学 助教 理工学部土木工学科 (〒101-8308 東京都千代田区神田駿河台 1-8-14)

E-mail: sonobe.masashi@nihon-u.ac.jp

近年、合成開口レーダ (Synthetic Aperture Radar : SAR) の観測データを用いた干渉 SAR 解析は、地震活動や豪雨災害などに伴う地殻変動を把握する有効な手法として、定着しつつある。本研究では、東北地方太平洋沖地震の余効変動を調査するために、対象地域で干渉 SAR 時系列解析を行った。その解析結果に 2.5 次元解析を適応し準東西方向と準上下方向に変換し、対象地域の変動状況を調査した。その結果、今回の調査期間において、準東西方向では対象地域で複雑な変位傾向が得られた。また、準上下方向では奥羽山脈を境に隆起方向と沈降方向の変位が得られた。

**Key Words:** Synthetic Aperture Radar, Sentinel-1, post-seismic deformation, InSAR time series analysis, 2.5-dimensional analysis

### 1. はじめに

近年、地震や火山噴火、豪雨を起因とした地すべりなどによる自然現象に伴う地殻変動が多く発生している。これらの地殻変動は、国民の生活に大きな影響を与えるため、地殻変動の継続的なモニタリングは極めて重要である。これまで、衛星リモートセンシング技術を用いた干渉 SAR 解析が地殻変動を把握する手段として定着しつつあるが、干渉 SAR 解析結果には、大気遅延や電離層遅延などによるノイズが含まれており、これらのノイズを低減・除去する方法が提案されている<sup>1)</sup>。また、複数の SAR データを用いる干渉 SAR 時系列解析と呼ばれる手法や、2 方向の衛星視線方向から取得された干渉 SAR 時系列解析の結果を用いて、準東西方向と準上下方向の変位を得ることが可能な 2.5 次元解析と呼ばれる手法が近年定着しつつある。

本研究の対象地域では 2011 年 3 月 11 日に発生した東北地方太平洋沖地震 (本震) によって、東日本を中心に広い範囲で地殻変動が観測され、牡鹿半島では水平方向に 5m を超える地殻変動、鉛直方向に 1m を超える沈降が観測された。その後、余効変動

により、同地域では本震後 10 年間で水平方向に最大 1.5m の変動と鉛直方向に最大 50cm を超える隆起が観測された<sup>2)</sup>。なお、本震前から 10 年間の累計では同地域で 6m を超える水平方向の変動と、最大約 50cm の沈降となっている。これらに対し、国土地理院では GNSS を用いた観測や L バンド合成開口レーダ (PALSAR-2) のデータを使用して地殻変動の監視を行っている<sup>3)</sup>。一方でフリーで準リアルタイムに観測情報が入手可能な Sentinel-1 衛星データは C バンドの波長特性を有するため、L バンドの観測データに比べ微小な地表面の変化の把握に優位性があると考えられる。C バンドの干渉 SAR 時系列解析を用いた調査<sup>4)</sup>や 2.5 次元解析による地盤変動の調査<sup>5)</sup>は行われているが、本震の余効変動に対して C バンドで観測された観測データの特性を生かした余効変動の把握のための検討はまだ十分に調査されていない。ここでは、本震の余効変動を調査するために、2017 年から 2020 年の 3 年間に Sentinel-1 衛星により観測された C バンド衛星 SAR データを用いて、地殻変動を干渉 SAR 時系列解析の結果を用いた 2.5 次元解析から調査し、地盤変動のモニタリングへの有用性を考察した。

## 2. 対象地域と使用データ

### (1) 対象地域

本研究の対象地域は、本震による余効変動が比較的大きい東北地方の秋田県南部、宮城県、山形県とした。対象地域を図-1に示す。2.5次元解析の解析結果を検証するため、太平洋側、山間部、日本海側に13地点の検証点を設けた。



図-1 対象地域と検証点

### (2) 使用データ

本研究では、欧州宇宙機関（ESA）により2022年6月時点で2機体制のコンステレーションで運用される Sentinel-1 衛星で異なる軌道方向で観測された衛星 SAR データを使用した（図-2）。軌道方向は西側上空から撮影された北行軌道、東側上空から撮影されたそれぞれ12ペアの観測データセットを構築した（表-1）。これらの観測データは Copernicus Open Access Hub から入手した。南行軌道のそれぞれを使用した観測モードは Interferometric Wide Swath (IWS) モードであり、分解能は衛星進行方向に5m、電波照射方向に20m、観測幅は250kmである。



図-2 Sentinel-1 衛星データの観測範囲

表-1 使用データ

ペア	北行軌道		南行軌道	
	Master	Slave	Master	Slave
a	2017/3/15	2017/6/7	2017/3/4	2017/6/6
b	2017/6/7	2017/9/23	2017/6/6	2017/9/10
c	2017/9/23	2017/12/16	2017/9/10	2017/12/15
d	2017/12/16	2018/3/22	2017/12/15	2018/3/21
e	2018/3/22	2018/6/14	2018/3/21	2018/6/13
f	2018/6/14	2018/9/6	2018/6/13	2018/9/29
g	2018/9/6	2018/12/11	2018/9/29	2018/12/10
h	2018/12/11	2019/3/5	2018/12/10	2019/3/4
i	2019/3/5	2019/6/21	2019/3/4	2019/6/20
j	2019/6/21	2019/9/25	2019/6/20	2019/9/12
k	2019/9/25	2019/12/6	2019/9/12	2019/12/29
l	2019/12/6	2020/3/23	2019/12/29	2020/3/10

## 3. 解析方法

Sentinel-1 衛星により撮影された、図-2に示す範囲内の観測データの内、表-1に示す3か月間隔のデータセットから連続してそれぞれ差分干渉解析（DInSAR 解析）を行い、全期間を合算し評価期間の時系列的な変動状況を把握した。また、干渉画像を作成する際に、干渉性を示すコヒーレンスが0.3以下の領域を除外した。電波照射方向に27ルック、衛星進行方向に7ルックのマルチルック処理を施すことでノイズを低減させた。標高データは国土地理院の基盤地図情報数値標高モデルの10mメッシュを用いた。解析には ENVI+SARscape ソフトウェアを用いた。本手法である DInSAR 解析は、ほぼ同一の軌道上から観測された2時期の SAR データの位相差から地表面の変位を抽出する解析手法である。干渉 SAR では衛星視線方向に沿った地表面の変動量が計測されるが、水平方向や垂直方向の地表面の変動量を把握することはできない。そのため、北行軌道と南行軌道のおおよそ反対となる方向からの DInSAR 解析を用いることで、準上下方向と準東西方向に変換した結果を得ることが可能である<sup>9)</sup>。また、大気遅延などの誤差をより低減できる利点を有する。2.5次元解析の模式図を図-3に示す。

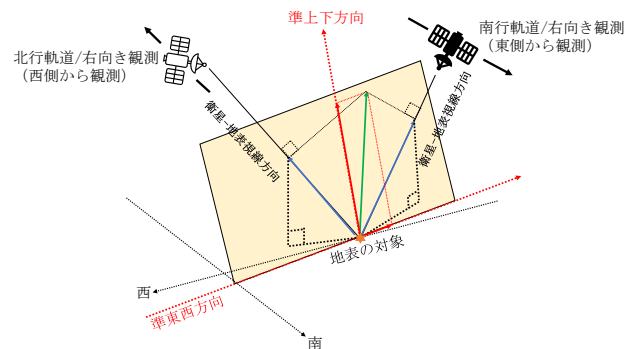


図-3 2.5次元解析の模式図

#### 4. 解析結果

対象地域での準東西方向の解析結果を図-4に、準上下方向の解析結果を図-5に示す。グラフ中の縦棒は各期間、各地点での変位の量を示しており、折れ線は各地点の累積変位を示している。隆起方向、準東向きの変位を正とする。2.5次元解析の結果において、図-4に示す準東西方向の変位を見てみると、各期間、各地点では複雑な変動となっていることが分かる。3年間の累積を見てみると、太平洋側の気仙沼、S本吉、女川、牡鹿、矢本、利府、S七ヶ浜、亘理の8地点では西向きの変位傾向となっている。日本海側と山間部の本庄、象潟、酒田、湯沢、天童の5地点では2018年3月ごろまでは西向きの変位傾向となっており、その後は東向きの変位傾向となっていることが分かる。これらの変位は国土地理院の報告<sup>2)</sup>とは異なる変位となっているが、国土地理院の報告は長崎県の固定局を基準とした相対的な変動を元としているため、人工衛星を基準とした変動と直接的な比較をすることは難しく、さらなる検討が必要である。また、図-5に示す準上下方向においても、各期間、各地点で複雑な変動となっていることが分かる。3年間の累積を見てみると、太平洋側の8地点では、0に近い値となっているが、2017年12月～2018年3月、2019年3月～2019年6月、2019年9月～2019年12月の期間で過剰な沈降方向の変位が見られており、これにより隆起方向の変位が打

ち消されている可能性が考えられる。日本海側と山間部の5地点では、沈降方向の変位傾向となっており、国土地理院の測量成果の報告<sup>7)</sup>と比較すると、日本海側と山間部での変位傾向は一致していることが分かる。一方、得られた変位量は過大に算出されているため、さらなる検討が必要である。

#### 5. おわりに

本研究では2017年～2020年にSentinel-1衛星により観測されたCバンドによる観測データを用いて、地殻変動を干渉SAR時系列解析の結果を用いた2.5次元解析から調査し、地盤変動のモニタリングへの有用性を考察した。調査した結果、準東西方向では西向きの変位傾向が得られたが、余効変動の諸特性<sup>2)</sup>から一様に西向きに変位しているとは言い難く、さらなる検討を進めていく必要がある。準上下方向では奥羽山脈を境に変位傾向が異なる結果が得られた。しかし、太平洋側で過剰な沈降方向の変位や日本海側、山間部で過大に変位の量が得られたため、精度を高めるためにさらなる検討が必要である。今後は、長崎県の固定局を含めた範囲で同様の2.5次元解析を行い、国土地理院の電子基準点のデータとの比較が可能であるかを検討する予定である。また、解析結果の検証点を増やし、より面的な変動状況を捉えられるようにする必要があると考えている。

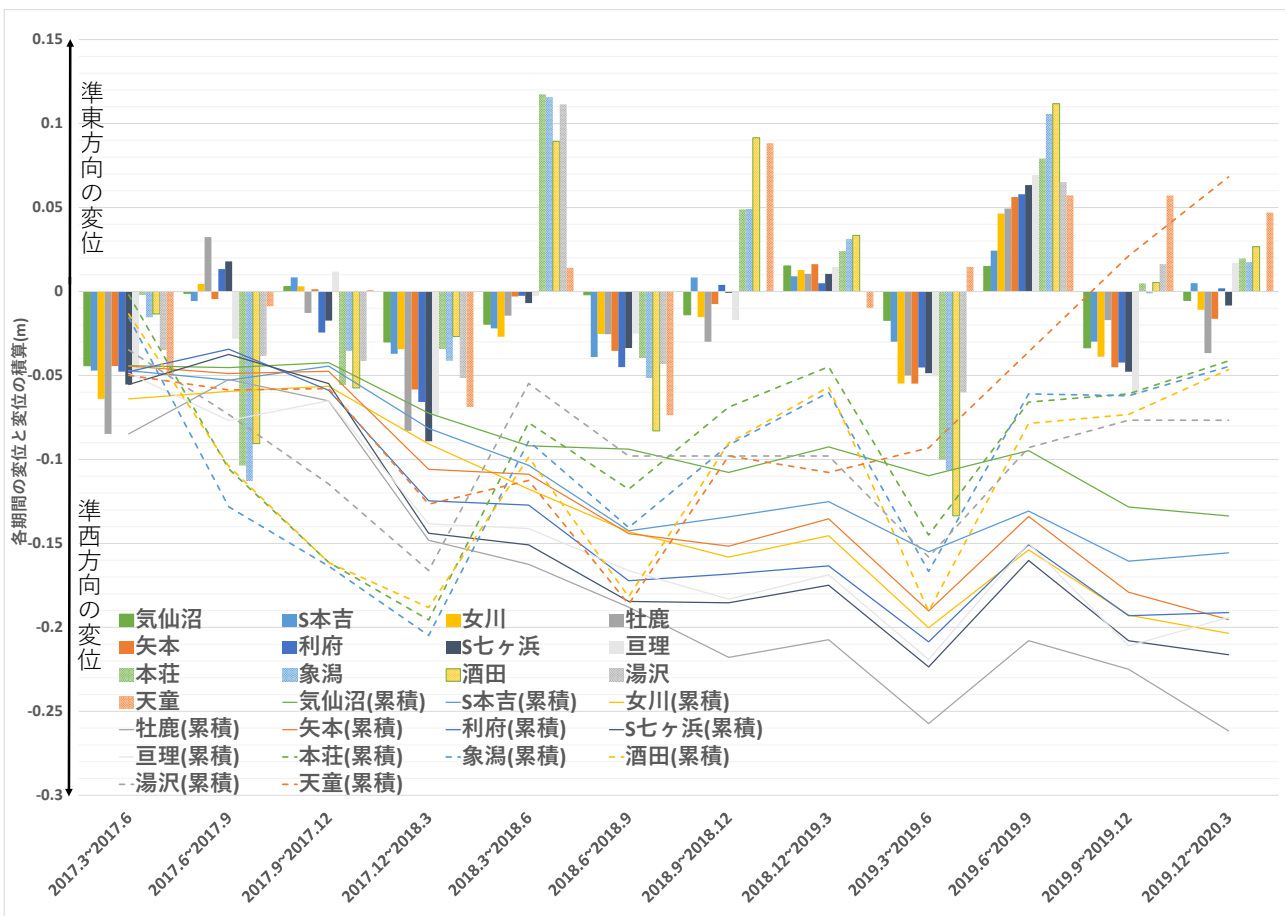


図-4 準東西方向の2.5次元解析の結果

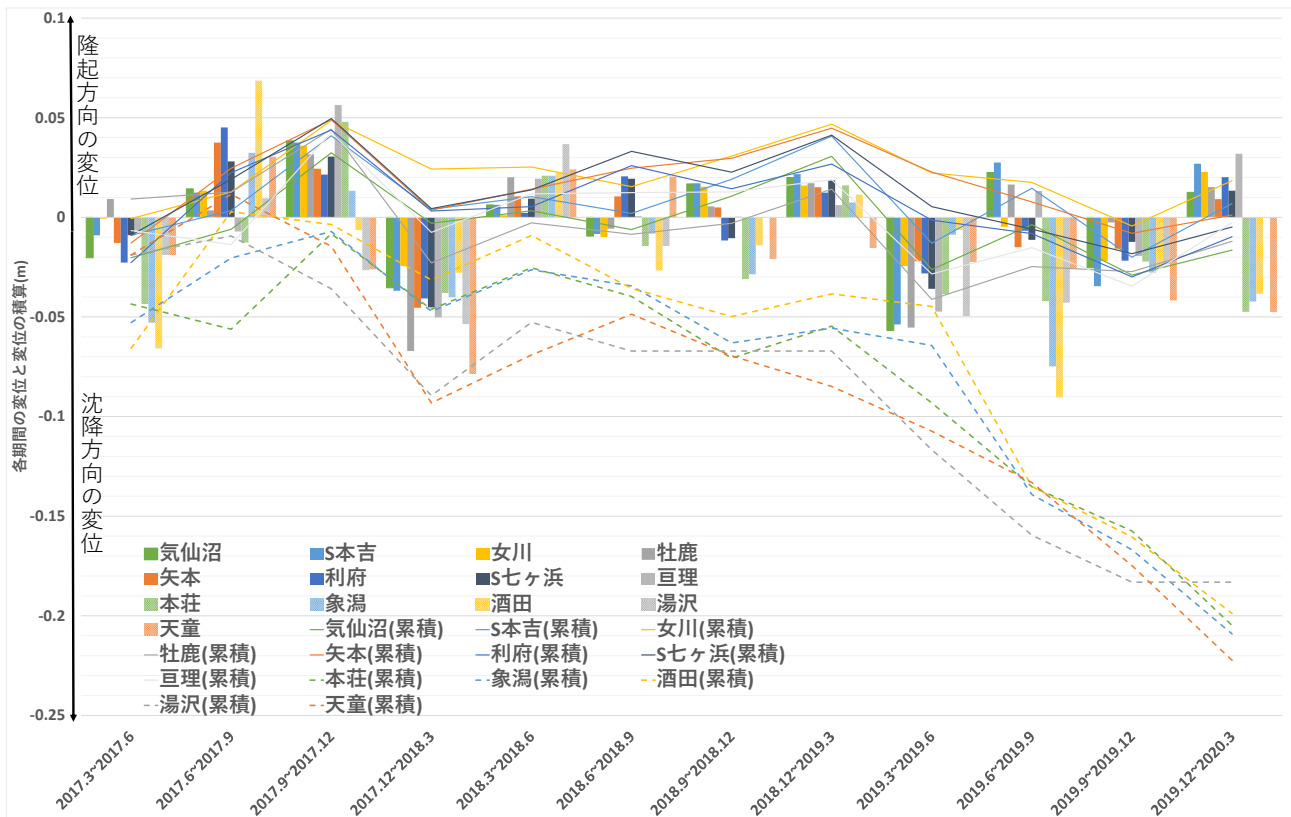


図-5 準上下方向の2.5次元解析の結果

## 参考文献

- 1) 藤原智, 飛田幹男, 村上亮, 中川弘之, Paul A Roser : 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, 測量学会誌, Vol.45, No.4, pp.315-325, 1999.
- 2) 国土地理院 : 平成23年(2011年)東北地方太平洋沖地震後の地殻変動に関する解説, <[https://www.gsi.go.jp/kanshi/h23touhoku\\_afterslip.html](https://www.gsi.go.jp/kanshi/h23touhoku_afterslip.html)>, (2022年3月15日閲覧)
- 3) 国土地理院 : だいち2号SAR干渉解析による熊本地震に伴う地殻変動の検出, <<https://www.gsi.go.jp/common/000147110.pdf>>, (2022年2月22日閲覧)
- 4) Yu Morishita : Nationwide urban ground deformation monitoring in Japan using Sentinel-1 LiCSAR products and LiCSBAS, *Progress in Earth and Planetary Science*, <<https://doi.org/10.1186/s40645-020-00402-7>>, (2022年5月24日閲覧)
- 5) 福田晴香, 三井雄太 : Sentinel-1衛星データのInSAR解析に基づく富士山・伊豆大島周辺の地表変位場, 静岡大学地球科学研究報告, Vol.48, pp.1-9, 2021.
- 6) Fujiwara, S., T. Nishimura, M. Murakami, H. Nakagawa and M. Tobita : 2.5-D surface deformation of M6.1 earthquake near Mt Iwate detected by SAR interferometry, *Geophysical Research Letters*, Vol.27, Issue14, pp.2049-2052, 2000.
- 7) 国土地理院 : 東北地方日本海側を中心とした水準点の測量成果の改定, <<https://www.gsi.go.jp/common/00205205.pdf>>, (2020年6月2日閲覧)