

## 干渉 SAR 解析による津軽平野の地盤沈下\*

弘前大学 小岩圭吾・道家涼介

### 1. はじめに

津軽平野は青森県西部に位置し、東を津軽山地、西を岩木山に囲まれている。平野の中央部には岩木川が流れ、北流して十三湖へと注ぐ。津軽平野中部では、新第三系から第四系にかけての未固結な堆積物の厚さが数百 m に及んでいる<sup>1)</sup>。また、同平野における国土地理院による昭和 43 年以降の一等水準測量において、弘前市から五所川原市に至るまで様々な場所で地盤沈下が認められている<sup>2)</sup>。地盤沈下は、建物の損壊を引き起こすとともに、洪水リスクを増大させる災害要因であり、十分にモニタリングされる必要がある。近年の人工衛星による観測では、国土地理院が全国を対象に実施している ALOS-

2/PALSAR-2 データの南行軌道における干渉 SAR 時系列解析の結果において、鶴田町と藤崎町で、衛星から遠ざかる顕著な変位 (約 3cm/yr) が観測されている<sup>3)</sup>。しかし、上記の観測結果より前の期間においては、ALOS/PALSAR データの南行軌道での 2006 年 4 月 27 日と 2007 年 4 月 30 日の干渉ペアでは、鶴田町での変位は殆ど見られず<sup>4)</sup>、観測時期による沈下傾向に差異が見られる。これらの観測結果から、津軽平野の地盤沈下は、時間的および空間的に変動的であることが示唆される。したがって、地盤沈下の実態を把握するためには、近年取得された衛星データを用いたより詳細な解析が不可欠である。本研究では、直近の衛星データを解析することで近年の地盤沈下の挙動を詳細に把握し、沈下傾向の差異をもたらす要因を検討することで、沈下のメカニズムを解明することを目指す。

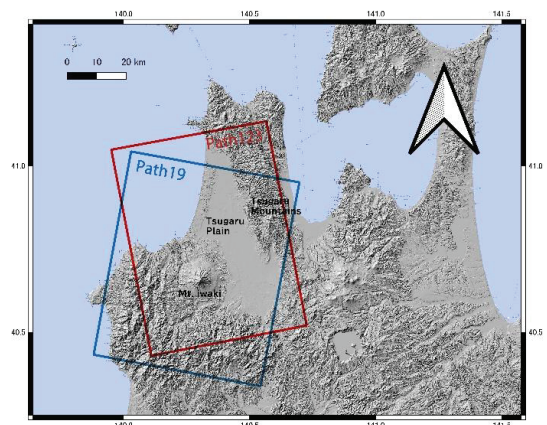


図 1 津軽平野の位置および解析に使用したデータ。図中の赤枠 (Path123) および青枠 (Path19) は解析に使用した ALOS-2/PALSAR-2 データの範囲を示す。地理院地図のタイルデータ (陰影起伏図) を基図に使用。

### 2. 使用データと解析方法

#### 2.1. 干渉 SAR 解析

本研究では、宇宙航空研究開発機構 (JAXA) が開発した L-band マイクロ波の合成開口レーダである PALSAR-2 によって撮像された津軽平野周辺のデータである Descending 右観測の Path19 (SM1) と Ascending 右観測の Path123 (フルポラリメトリ) のデータを使用した (図 1)。この 2

\* Insar analysis of subsidence in the Tsugaru Plain by Keigo Koiwa and Ryosuke Doke

条件の観測データについて、2015年-2018年、2018年-2021年、2021年-2023年の各期間で干渉ペアを作成し、RINC<sup>5)</sup>を用いて干渉処理を行い、その結果に対して2.5次元解析を適用した。また、地殻変動の時系列変化を捉えるために、Descendingのデータを用いてSBAS法による時系列解析を行った。解析にはLiCSBAS<sup>6)</sup>を使用し、PALSAR-2の観測が開始された2014年から2025年前半までの期間において、観測期間が2年以内となるペアを選定した。なお、広域的かつ長期的なトレンドを抽出するために、空間フィルター(2km)と時間フィルター(365日)を適用している。

## 2.2. 圧力源パラメータの逆解析

時系列解析の結果に基づき、MCMCを用いたベイズ推定に基づくモデリングを実施するプログラムであるVMOD<sup>7)</sup>を使用し、圧力源推定を行った。干渉SAR画像は膨大なデータ点を持つため、全画素を用いた逆解析は計算コストの観点から困難である。そのため、quadtreeアルゴリズムを用いてデータ数を削減した<sup>8)</sup>後、解析を行った。モデルには回転楕円体圧力源を仮定するYangモデル<sup>9)</sup>を採用した。本解析におけるYangモデルの逆解析では、圧力源の中心座標(x,y)、深さ、回転楕円体の長軸半径、短軸半径、走向(北から時計回り)、傾斜(水平面から時計回り)、圧力変化、およびオフセットの計9項目を推定パラメータとした。

## 3. 解析結果

### 3.1. 干渉SAR解析結果

図2に2.5次元解析における準上下成分を、図3に準東西成分を示す。解析期間は2015年-2018年(図2a)、2018年-2021年(図2b)、2021年-2023年(図2c)である。なお、AscendingとDescending軌道の双方が揃う期間の制約から、図2cのみ解析期間が約2年になっていることを留意されたい。準上下成分(図2)では、2地点における顕著な沈下に加え、さらに南部でも1箇所、小規模な沈下が確認された。顕著な沈下がみられた2地点では、2015年-2018年および2018年-2021年の両期間において、約9cmの変位が認められた。一方で、北部の沈下域についてのみ、2021年-2023年の変位量は約4cmとなり、年あたりの沈下速度が減少していることが確認された。図3の準東西成分を確認すると、これら3地点において変位の向きが沈下の中心域を境に反転しており、いずれも沈下の中心域に向かって収束する傾向が確認された。これらの2.5次元解析による結果は、地下の圧力源の収縮によって生じる地殻変動パターンを示し、本地域における沈下も圧力源の収縮で説明できることが示唆される。

干渉SAR時系列解析の結果(図3)、2.5次元解析と同様に、B地点およびC地点における顕著な変位に加え、C地点南部のD地点でも有意な変位が検出された。D地点では、期間を通じて衛星から遠ざかる線形な変位が見られ、C地点においても同様の傾向が確認された。一方で、B地点では2021年頃から変位速度の鈍化傾向が認められる。対照的に、A地点では2020年頃から変位速度が増大傾向であることが明らかになった。このようなB地点の鈍化とA地点の加速という対照的な変化は、沈下の中心域あるいは変動源が、時間の経過とともに局所的に移動している可

能性を示唆している。前述の通り、これら A・B 地点は近年変動が顕著になった地域である。今後、周辺地域への変位域の拡大やトレンドの変化が生じる可能性があるため、継続的なモニタリングが必要である。

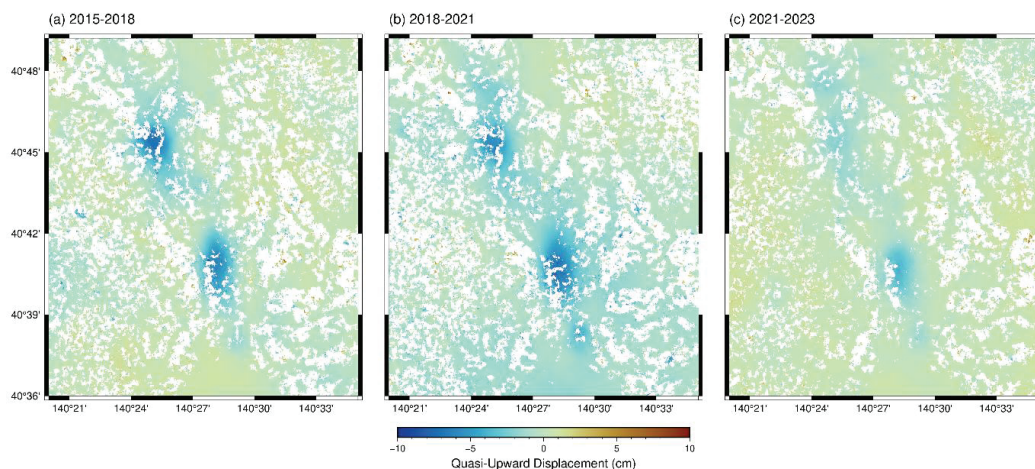


図2 2.5次元解析における準上下成分。(a) 2015年-2018年の干渉ペア (b) 2018年-2021年の干渉ペア (c) 2021年-2023年の干渉ペアの解析結果。各図において、正の値は下向きおよび負の値は上向き変位を示す。

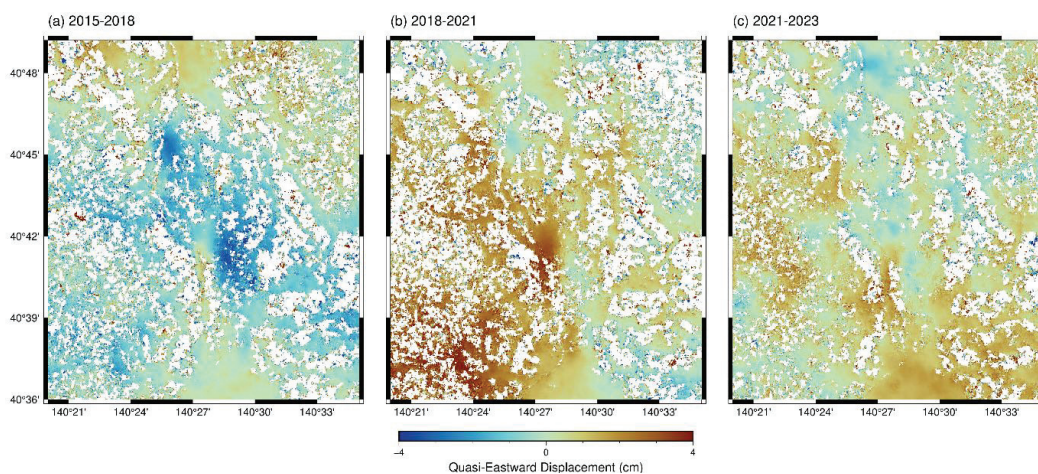


図3 2.5次元解析における準東西成分。各図の期間は図2の説明を参照。正の値は東向きおよび負の値は西向き変位を示す。

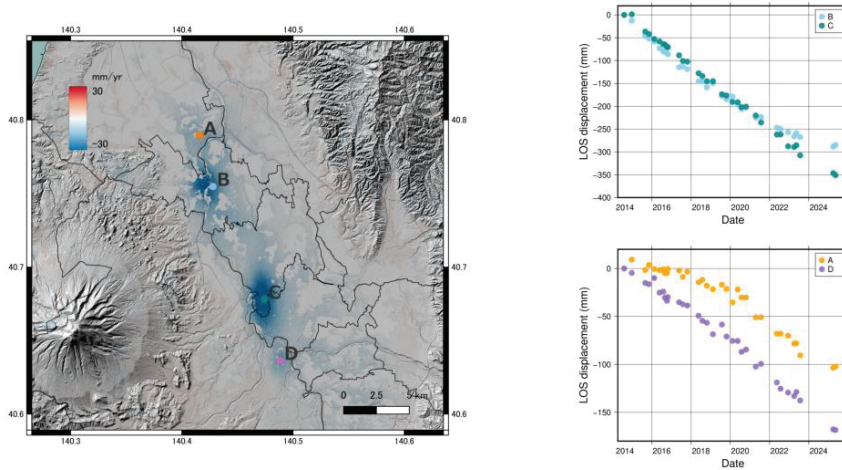


図4 2014年から2025年2年以内の干渉ペアを使用した時系列解析による平均変位速度図(左図)。右図は各地点の累積変位量を示す。

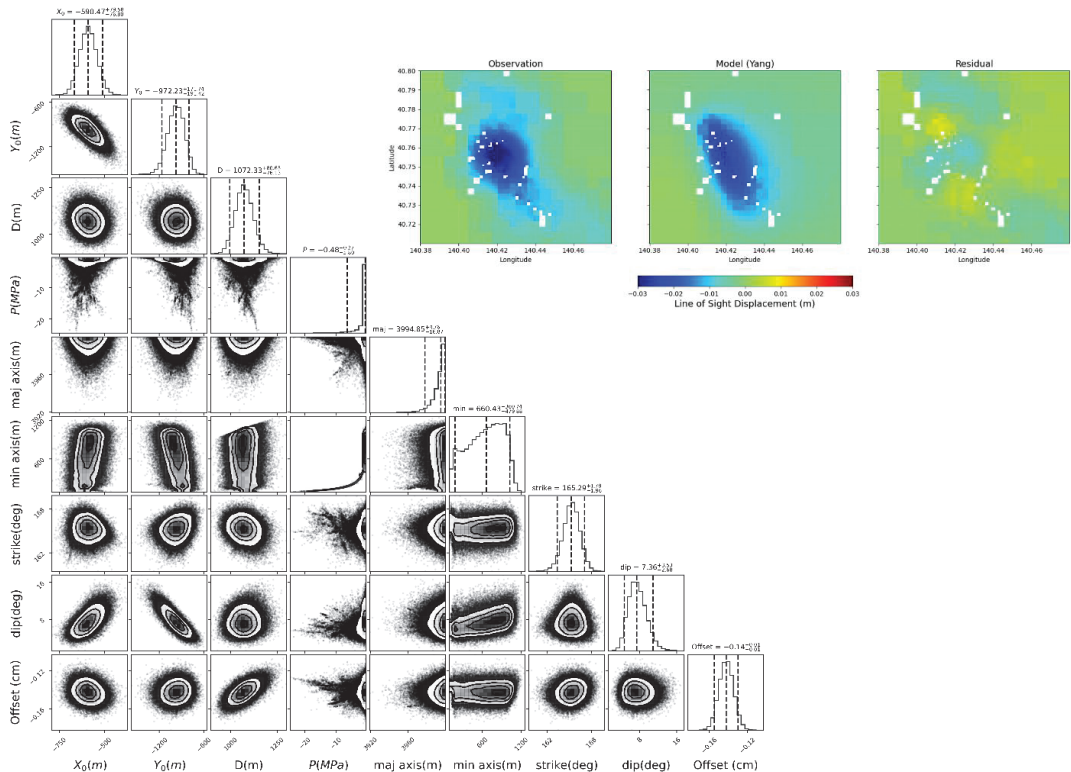


図5 左図はMCMC法によって推定されたモデルパラメータの事後確率分布。ヒストグラム上の破線は90%信用区間と中央値を示す。右上図は衛星視線方向の変位を示しており、左からB地点の観測値、モデルによる推定値、残差を表している。

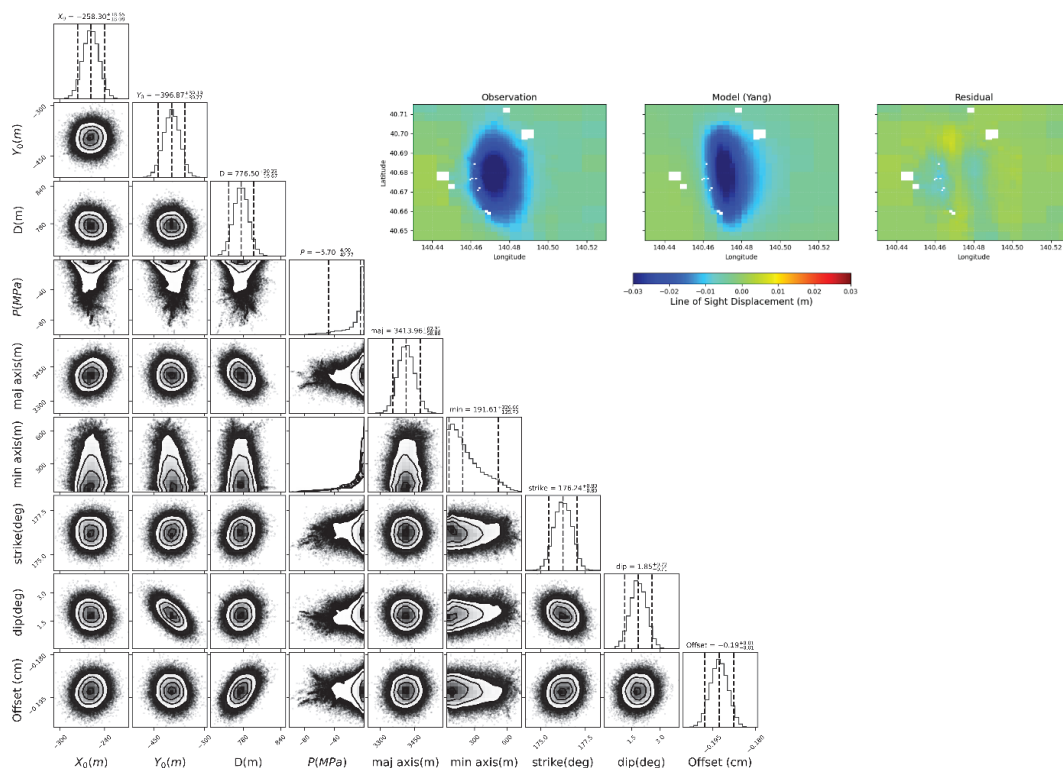


図6 図5の説明を参照。観測値はC地点の変位を示している。

#### 4. 議論

図4に示す変位速度分布において、特にA・B地点北部では変位挙動の空間的な不均質性が顕著であった。この傾向は、先述した未固結堆積物の層厚変化や地質学的な不均一性に起因することが示唆される。また、観測された沈下は限定的な範囲に留まっており、周辺の広域的な変位傾向からは独立した現象であると言える。

圧力源パラメータの逆解析の結果(図5)、B地点における圧力源の深度は約1000m、短軸半径(厚さ)は約660mと推定された。青森県による温泉地質断面図<sup>10)</sup>によると、この地域は軟質層と硬質層が互層を成す多様な地層構成であり、複数の帯水層が存在することで地下水の流動経路が複雑化していると考えられる。また、本地点は、他地点と比較して長いストレーナー区間を有している特徴がある。この長尺のストレーナーを通じて、帯水層の上位やストレーナー区間に挟在する軟弱層からも脱水が生じ、沈下が発生した可能性が示唆される。この解釈は、解析で得られた圧力源の厚みが約660mと大きく推定された結果と整合的である。一方で、当該地域の北部、深度約1000m付近には正断層の上端が存在することが知られている<sup>11)</sup>。しかし、これは活断層ではなく、現在活動しているものではない。圧力源深度との一致から何らかの構造的な関与も否定できないが、現時点ではその関連性は明らかではない。

C地点の逆解析(図6)では、深度約770m、短軸長約190mと推定された。温泉地質断面図に

よれば、本地域の深度 550m 以浅は軟弱な未固結層であり、深部地下水は涵養の乏しい油田かん水の性状を示すとされる。これは、揚水による水位回復が見込めない非可逆的な環境であることを意味する。したがって、推定深度での揚水が上位軟弱層からの脱水を誘発し、沈下を招いていると考えられる。

また、両地点ともに揚水井戸の水温が高い傾向にあり<sup>1)</sup>、温泉利用に限らず一般の生活用水等においても深部起源の地下水が汲み上げられている可能性が高い。したがって、これら深層地下水の長期的な揚水が、近年の顕著な沈下を引き起こした主要因であると推察される。

## 参考文献

- 1) 尾崎次男, 菅野敏夫: 津軽平野の被圧地下水—東北地方総括調査研究— (1965), 地質調査所月報, 第 16 巻, pp.25-35.
- 2) 環境省: 青森県津軽平野 令和 5 年度,  
<https://www.env.go.jp/water/jiban/directory/tsugaru.html>, (2025 年 11 月 04 日閲覧)
- 3) 森下 遊, 鈴木 啓, 雨貝知美, 唐沢正夫, 藤原みどり (2010): 干渉 SAR を活用した効率的な水準測量の実施へ向けた取り組み, 国土地理院時報, 第 120 集, pp.17-22.
- 4) Ozawa T. Fujita T. and Ueda H. (2016): Crustal deformation associated with the 2016 Kumamoto Earthquake and its effects on the magma system of Aso volcano, *Earth, Planets and Space*, 68(186). doi: 10.1186/s40623-016-0563-5
- 5) Morishita, Y.; Lazecky, M.; Wright, T.J.; Weiss, J.R.; Elliott, J.R.; Hooper, A. (2020): LiCSBAS: An Open-Source InSAR Time Series Analysis Package Integrated with the LiCSAR Automated Sentinel-1 InSAR Processor. *Remote Sens.* 12, 424, <https://doi.org/10.3390/RS12030424>.
- 6) Angarita, M., Grapenthin, R., Henderson, S., Christoffersen, M., Anderson, K. R. (2024): Versatile Modeling Of Deformation (VMOD) Inversion Framework: Application to 20 Years of Observations at Westdahl Volcano and Fisher Caldera, Alaska, US. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 25(4). doi: e2023GC011341.
- 7) Jónsson, S., Zebker, H., Segall, P., & Amelung, F. (2002). Fault slip distribution of the 1999 Mw 7.1 Hector Mine, California, earthquake, estimated from satellite radar and GPS measurements. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 92(4), 1377–1389. <https://doi.org/10.1785/0120000922>
- 9) Yang, X. M., Davis, P. M., & Dieterich, J. H. (1988). Deformation from inflation of a dipping finite prolate spheroid in an elastic half-space as a model for volcanic stressing. *Journal of Geophysical Research*, 93(B5), 4249–4257. <https://doi.org/10.1029/jb093ib05p04249>
- 10) 青森県 (1997): 青森県温泉地質誌, 16p, 337p, 348p.
- 11) 佐藤比呂志, 石山達也, 蔵下英司, 加藤直子, 岩崎貴哉, 越谷 信, 戸田 茂, 豊島剛志, 小林健太: 沿岸海域および海陸統合構造調査, 令和 2 年度「日本海地震・津波調査プロジェクト」成果報告書, 2021.