(28) SAR 画像シミュレータの開発とその応用

寺西　由夏[1]・須﨑　純一[2]・大庭　哲治[3]
石井　順恵[2]・久田　裕史[4]

[1] 学生会員　京都大学大学院工学研究科（〒615-8540 京都市西京区京都大学桂）
E-mail: teranishi.yuka.34z@st.kyoto-u.ac.jp
[2] 正会員　京都大学大学院工学研究科（〒615-8540 京都市西京区京都大学桂）
E-mail: susaki.junichi.3r@kyoto-u.ac.jp, ishii.yoshie.4k@kyoto-u.ac.jp
[3] 正会員　京都大学経営管理大学院（〒606-8501 京都府京都市左京区吉田本町）
E-mail: oba.tetsuharu.5n@kyoto-u.ac.jp
[4] 正会員　西日本高速道路株式会社（〒530-0003 大阪府大阪市北区堂島 1-6-20 堂島アバンザ 18 階）
E-mail: h.hisada.aa@w-nexco.co.jp

集中豪雨等による土砂災害被害を低減するには，恒常的な地盤変動のモニタリングにより適切な事前対策を行う必要がある．様々な変動観測手法の中でも SAR を用いた方法は広範囲を高精度で観測できる点で優れている．一方で，地形の向きや変動によっては SAR 画像の利用が適切ではないこともある．本研究では，SAR 画像に含まれる位相成分を任意の地形，変動で生成するシミュレータの開発及びその利用可能性を示す．地物の反射で生じる位相変化の基本式に則り作成される擬似 SAR 画像は，実画像と同様に既存の変動推定手法が適用できることを確認した．また，複数の地形の角度や変動で速度推定を行うことで，SAR 画像解析によって有意な結果が得られる場合と得られない場合のシミュレーションを実施した．

Key Words: *synthetic aperture radar(SAR), ground deformation, simulator, road management*

1. 背景と目的

近年，頻発する集中豪雨や土砂災害による土木インフラ構造物への被害が深刻な問題となっている．2019 年 8 月の九州北部豪雨の際には，長崎自動車道武雄 JCT（佐賀県）において，地滑りに伴う大規模な路面隆起が発生し，完全復旧までに 1 年もの時間を要した．武雄 JCT における土砂災害を引き起こしたのは連日の集中豪雨であったが，須﨑らは，周辺の地盤変動には 1 年以上前から地滑りの兆候が表れていた可能性を指摘している [1]．このことから，土砂災害による人的，経済的被害を最小限にとどめるためには，土木インフラ構造物及びその周辺地盤の恒常的なモニタリングが非常に重要であることがわかる．

地盤変動の様子をモニタリングする手法として，高速道路会社を始め，多くの土木インフラ事業者が用いるメジャーな手法の一つに，GNSS 測量がある．昨今の観測技術の向上により高い精度の変動観測が可能になった一方で，広範囲の変動観測ができないことや，周辺地域が私有地である場合には装置の設置ができないという課題もある．これらの問題点を解決する手法として，合成開口レーダ（Synthetic Aperture Radar: SAR）を用いた地盤変動モニタリング [1]が注目されている．SAR は人工衛星に搭載された，マイクロ波を使用する能動型のレーダで，時間や天候に左右されることなく地表面の観測が可能である．しかし一般的に SAR 画像の解析によって得られる変動はレーダの照射方向に限られるため，衛星の航行軌道と変動の方向，観測地域の環境次第では SAR 画像の有用性があまり高くない状況も存在する．また，地盤の変動を観測する際に用いる比較的に波長の長い L バンド画像は購入費用も高くなる傾向がある．そのため，SAR 画像による土木インフラモニタリング技術の普及には，事前に SAR 画像解析の適用可能性を検討する手段が必要である．

そこで本研究では土木インフラ構造物とその周辺地域のモニタリングにおける SAR 画像の有用性の検討に資する L バンド SAR 画像シミュレータおよびその応用について述べる． 一般的に，SAR データは反射波の振幅と位相の情報を併せ持つ Single Look Complex（SLC）フォーマットで配布されるが，本研究では変動解析手法として使用される干渉 SAR（Interferometric SAR: InSAR）を適用することを念頭に置き，任意に設定した地物の乱反射で生じる観測位相成分のみを生成した．シミュレーション画像の応用では，任意の変動を与えた地形を，固定した衛星軌道に対して回転させることで，SAR が対象の変動に対して持つ感度が地形と変動の向きによってどのように変化するかを調べた．

2. シミュレーションの概要

(1) 原理

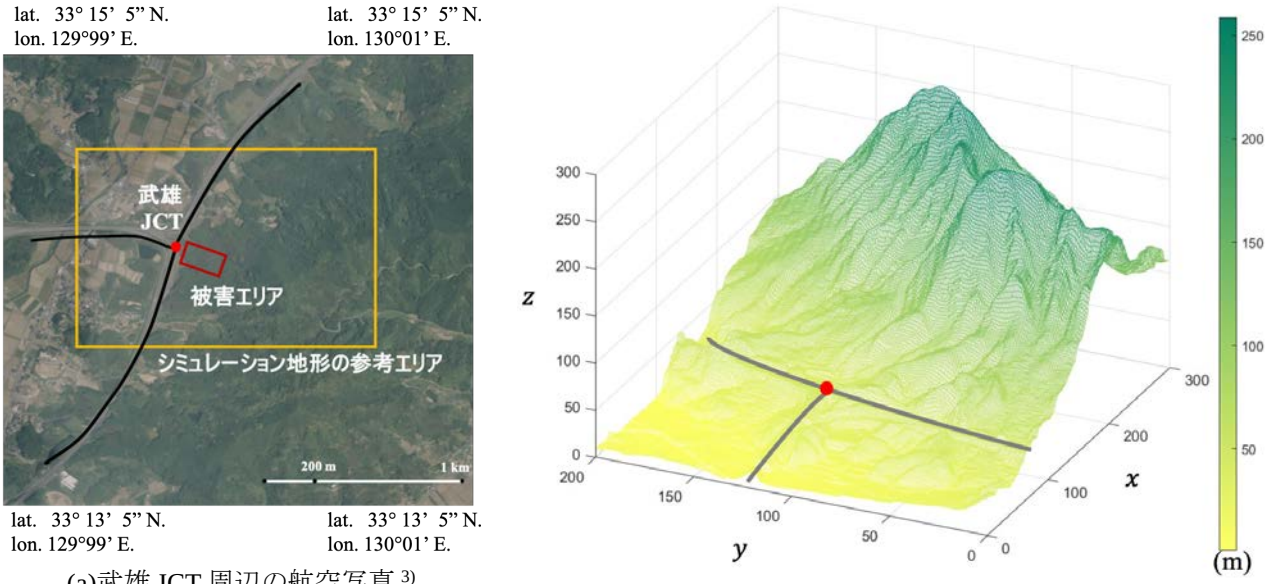
今回は位相成分のみを含む SAR 画像を作成した．スラントレンジ（衛星から地物までの距離）と地物で反射して返ってきた波の位相変化の関係は式(1)で表される．

$$\phi = \frac{2\pi}{\lambda} \cdot 2 \cdot R \qquad (1)$$

ここで，ϕ: 観測される位相，λ: マイクロ波の波長（L バンドでは 150～300 mm），R: スラントレンジである．また，ϕは$-\pi \sim \pi$にラップする必要がある．

(2) シミュレーション画像の作成

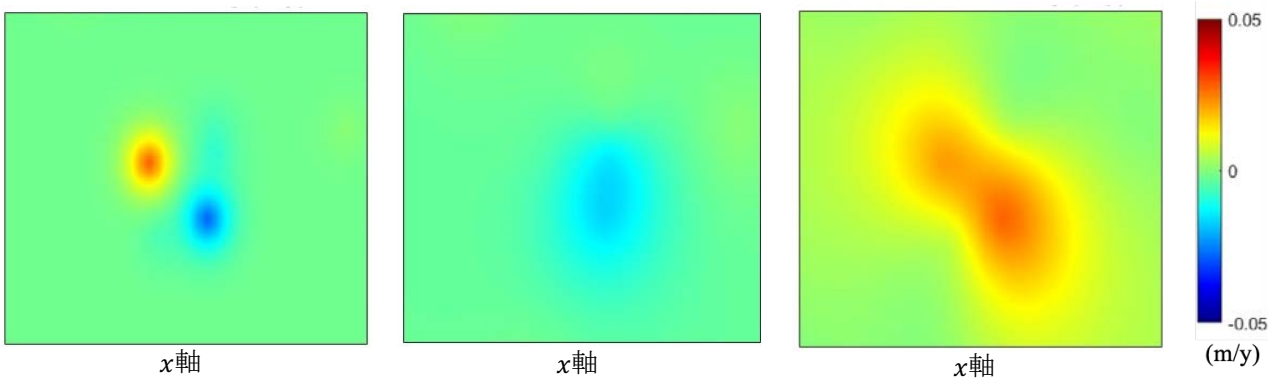
シミュレーション画像の作成に使用した諸条件は次のとおりである．地形は 2019 年に大規模な路面隆起が生じた佐賀県武雄 JCT 周辺（東西 1.5 km×南北 1 km）を模しており（図-1），変動も当時の状況に合わせ，恒常的に山の斜面が地滑り方向に移動を続けるように設定した（図-2）．解像度は 5 m である．観測波長は L バンドであり，周波数はおよそ 1.2 GHz，衛星軌道は南から北に航行する Ascending 軌道（本章ではy軸に沿う）右側観測を想定し，基準となる軌道からおよそ半径 500 m のチューブ内 [2] で軌道保持を行う．各 SAR 画像の取得間隔は 50 日，計 10 枚の画像を生成した．一例として，作成した画像の 1～5 枚目を図-3 に示す．



(a)武雄 JCT 周辺の航空写真 [3]
（赤枠: 2019 年 8 月豪雨の被害エリア，黄枠: シミュレーションの参考エリア）

(b) シミュレーションで使用した地形

図-1 シミュレーションにおける地形



(a) z方向（鉛直）の変動　(b) x方向の変動　(c) y方向の変動

図-2 シミュレーションにおける地盤の変動速度の分布（上空から見たとき）

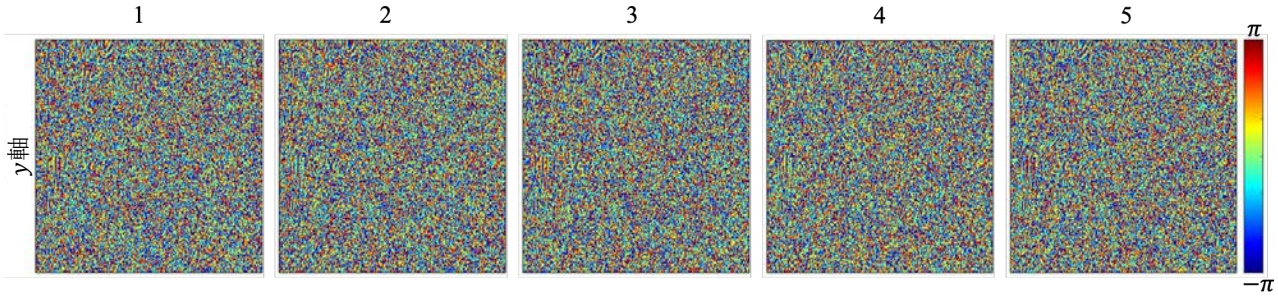


図-3　シミュレータで作成した擬似 SAR 画像

3.　擬似 SAR 画像の応用

シミュレーション画像を使った，対象地域，変動への SAR 画像の有用性の検討を行う．第 2 章でも使用した武雄 JCT 周辺を模した地形と変動を Ascending 軌道に対して回転させることで，SAR 画像解析による変動観測の感度がどう変化するのかを調べた．変動推定には Permanent Scatterers InSAR（PSInSAR）[4]を用いた．

(1)　PSInSAR

対象地域に生じている平均地盤変動速度を推定する．本研究で用いたフローは図-4 の通りである．ここで本シミュレータでは振幅情報を生成しないため，PS 候補はランダムに 4000 点を指定した．また標準正規分布に従う DEM 誤差と，軌道情報には半径 1 m の不確実性を与えた．

マスター画像の選定には式(2)[5]を用いた．

$$\min\left(\frac{1}{N-1}\sum_{k=0}^{N-1} g\left(B_{\perp}^{k,m}, a_1\right)\cdot g\left(T^{k,m}, a_2\right)\right) \qquad (2)$$

式(2)において

$$g(x,c)=\begin{cases}1-\dfrac{|x|}{c} & \text{if } |x|<c\\ 0 & \text{otherwise}\end{cases} \qquad (3)$$

である．ここで，N:総枚数，m: マスター画像，k: スレイブ画像，$B_{\perp}^{k,m}$，$T^{k,m}$: m枚目とk枚目の SAR 画像間の垂直基線長，時間基線長，a_1，a_2: 限界垂直基線長，限界時間基線長である．

時間コヒーレンスγの絶対値を最大化する平均変動速度，DEM 誤差の算出には式(4)を使用した．

$$\operatorname{argmax}\left(|\gamma|=\left|\frac{1}{N}\sum_{k=1}^{N}\exp\{i(\Delta\varphi_{Flat}-\varphi_{Defo}-\varphi_{TopoErr})\}\right|\right) \qquad (4)$$

式(4)において

$$\varphi_{Defo}=\frac{4\pi}{\lambda}T_k\cdot v \qquad (5)$$

$$\varphi_{TopoErr}=\frac{4\pi}{\lambda}\frac{B\cos(\theta'-\alpha)}{R'}\Delta h \qquad (6)$$

である．ここで，$\Delta\varphi_{Flat}$: 干渉画像の位相差から，基線長と DEM による影響を取り除いた成分，φ_{Defo}，$\varphi_{TopoErr}$: 地盤の変動，DEM の誤差によって生じる位相変化，T_k: マスター画像との時間差分，v: 平均地盤変動速度，B: 基線長，θ'，R': DEM 誤差を考慮して計算したオフナディア角とスラントレンジ，α: 基線長が水平線となす角，Δh: DEM 誤差である．

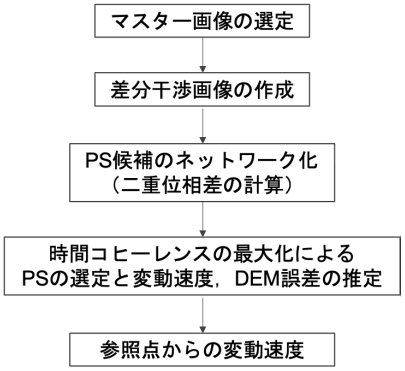


図-4　PSInSAR の処理フロー

(2)　結果

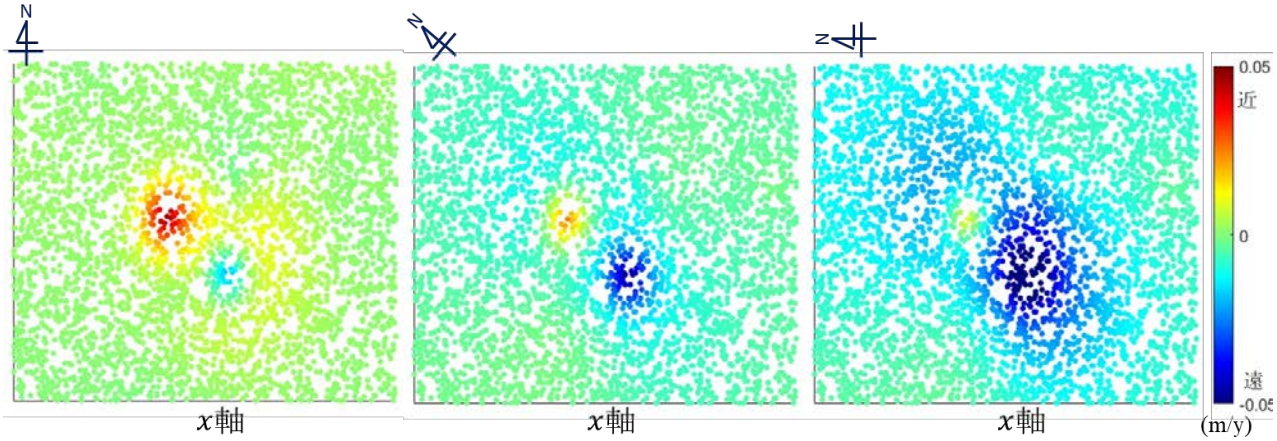
シミュレーションの基本設定は前章と同様である．地形の回転は時計回りに 0°，45°，90° の 3 つを設定した．また，速度推定の精度についてはいずれのケースでも RMSE は 3.5 mm/y 以上を達成しており，大局的な地盤変動を評価するにあたっては十分であると考える．図-5 に各地形条件で作成された SAR 画像から抽出したレーダ視線方向の推定変動を示す．本シミュレーションでは山の斜面上部の土塊が崩れ，斜面の下で隆起が発生する様子（図-2）を SAR の視線方向の変動観測でどの程度捉えられるのかを議論する．そのため観測変動速度の鉛直，水平方向への分解は行わない．

4.　考察

SAR 画像のシミュレーションについては概ね良好な結果が得られた．第 3 章で既存の変動推定手法を適用することで，シミュレータで作成する擬似 SAR 画像を実画像と同様の取り扱いができることを示した．一方で本研究のシミュレータでは土地被

覆に影響される振幅や，より複雑な地形で懸念される幾何的影響を考慮できていないという課題も残る．

次にシミュレーション画像を用いた地盤変動推定結果について考察する．まず図-5(a)～(c)を見比べると，全く同じ地形，変動であっても SAR の視線方向との関係性により，推定される変動の規模や傾向が大きく異なることがわかる．SAR では理論上，視線と直行する水平方向の変動を検知することができない．そのため回転角 0° （図-5(a)）では今回のように山を右手に見て下から上に （y方向）大きくずれ込むような変動に対して，実際よりも変動の規模を過小評価してしまう可能性がある．また回転角 45° （図-5(b)），回転角 90° （図-5(c)）を実際に鉛直方向（z方向)に与えた速度（図-2(a)）と比べると，武雄 JCT と見立てた点での隆起傾向の規模や隆起量を捉えきれていないことがわかる．各方向の変動成分が衛星の視線方向に集約される際に，z方向の隆起成分とy方向の成分が相殺してしまうためである．このことから，地形や変動の方向と，衛星軌道の関係によっては SAR による地盤変動推定が有意な結果を示さない場合も存在することがわかる．



(a) 回転角 0° (b) 回転角 45° (c) 回転角 90°

図-5 擬似 SAR 画像から推定した視線方向速度

5. 結論

本研究では，土木インフラ構造物のモニタリングにおける SAR 画像解析の利用促進という背景のもと，擬似 SAR 画像を生成するシミュレータの開発を行った．本シミュレータでは地形，変動，軌道，観測頻度などを任意に変更することができ，シミュレータを使用して作成した擬似 SAR 画像は実画像と同様に変動解析などにも適用できる．

シミュレータの応用の観点では， SAR の利用を検討している対象地域や予測される変動が，SAR 画像解析によって有意な結果を得られる条件であるかを事前に検討することができるということも示した．また，本シミュレータは他の研究活動にも資するものとなる可能性も併せ持つと考える．SAR 画像，特に L バンドのデータは費用面での問題により，多くのデータを使用した実験が困難である．加えて変動解析という点では，実際の変動が正確に得られないことも少なくなく，解析結果の評価が難しい．そのため，シミュレーション画像を使った機械学習や提案手法の妥当性検証など，その応用可能性は多岐にわたると期待される．

シミュレータに関わる今後の課題としては振幅情報やその減衰の追加，幾何的影響の導入などがある．土地被覆による影響を表現することは，より実画像に近づけるために欠かすことはできない．また，幾何的影響も実画像には必ず付帯する現象である．特に日本の土木インフラ構造物は山間部に位置していることも多く，シャドウ，フォアショートニングの影響を避けることはできない．より実際の観測条件に近いシミュレーションができるような改良を加えていく予定である．

参考文献

1) 須﨑純一，楠瀬智也，木村優介，宇野伸宏，藤原優，久田裕史: 時系列衛星 SAR 画像を活用した高速道路周辺山地の地盤変動モニタリング. 土木学会論文集, 79 巻, 1 号, 2023.
2) 宇宙航空研究開発機構第一衛星利用ミッション本部 ALOS-2 プロジェクトチーム：だいち 2 号, https://fanfun.jaxa.jp/countdown/daichi2/files/daichi2.pdf（入手 2023.4.1）
3) 国土地理院: 地図・空中写真閲覧サービス, https://maps.gsi.go.jp/maplibSearch.do#1.（入手 2022.1.13）
4) Ferretti, A., Prati, C. Rocca, F.: Permanent scatterers in SAR interferometry. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 39, no. 1, pp. 8-20, 2001.
5) B.M.Kampes, Radar Interferometry Persistent Scatter Technique, pp. 7, Springer, 2006.