

(26) 衛星SAR画像を用いた構造物の抜け上がり検出

辻野 雅博¹・須崎 純一²・丸尾 尚之³・Tirawat Boonyatee⁴

¹非会員 西日本旅客鉄道株式会社 (〒530-8341 大阪市北区芝田二丁目4番24号)

E-mail: tsujino.masahiro@gmail.com

²正会員 京都大学大学院准教授 工学研究科社会基盤工学専攻 (〒615-8540 京都市西京区京都大学桂)

E-mail: susaki.junichi.3r@kyoto-u.ac.jp

³非会員 スカパーJSAT株式会社 (〒107-0052 東京都港区赤坂1-8-1 赤坂インターシティAIR)

E-mail: o000maru310420@gmail.com

⁴非会員 チュラロンコン大学准教授 工学部土木工学科 (Phayathai, Bangkok, 10330, Thailand)

E-mail: dr.tirawat@gmail.com

本論文では、差分干渉SAR解析手法の一種であるPermanent Scatterer Interferometry (PSI) を改良した、構造物の抜け上がり量を推定する手法を提案する。PSIで抽出される恒久散乱体 (permanent scatterer: PS) の高さを推定し、地盤面変動を表す地盤面PSと構造物変動を表す構造物PSを分類し、両者の変動速度差を抜け上がり速度として推定する。実験の結果、RMSE=5.6 mm/yearと十分な精度で推定可能と判明した。提案手法は抜け上がり速度推定だけでなく、構造物変動、地盤面変動推定の高精度化にも寄与するものであり、都市における土木構造物や地盤沈下の変動監視へ活用できる可能性を十分有すると結論付けられる。

Key Words : synthetic aperture radar (SAR), differential settlement, differential interferometric synthetic aperture radar (DInSAR), persistent scatterer interferometry (PSI)

1. はじめに

近年、高度経済成長期に建設された多数の土木構造物が老朽化しており、効率的な維持管理手法の開発が求められている。その中で短時間に広範囲を定期的に観測できる合成開口レーダ (synthetic aperture radar: SAR) を用いて、対象物の変動速度を計測できる差分干渉SAR (differential interferometric SAR: DInSAR) 技術に注目が集まっている。DInSAR技術は既に広域の地盤沈下監視技術として定着しているが、構造物変動への応用においては更なる困難が生じる。まず、SARは倒れこみや複雑な散乱過程のために、高さを持つ散乱体の位置とSAR画像上の信号が対応しない場合が起こり得る。また、都市部においては地下の支持層まで達する杭基礎によって支えられる構造物が多く存在しており、構造物の変動は地盤沈下とは異なる。構造物によって散乱されたSAR信号は構造物変動を表し、差分干渉SAR技術によって計測した結果には構造物と地盤面の変動が混在してしまう。

一方、地盤沈下が発生している地域では相対的に構造

物が地盤面から浮き出てくる、抜け上がりと呼ばれる現象が発生する。抜け上がりが発生すると、地下で構造物と接続する埋設パイプの破断や構造物の支持杭の破損を引き起こす。抜け上がりが発生している地域を特定し、抜け上がり量を定量的に把握することは土木構造物の維持管理の観点からも重要であるが、多大な時間と労力を消費するため効率的な監視手法が必要とされている。そこで本研究では、差分干渉SAR解析手法の一種であるPermanent Scatterer Interferometry (PSI) ^{1,2)}を改良して、構造物の抜け上がり量を推定する手法の開発を目的とする。

2. 先行研究

抜け上がり解析に関する先行研究として丸尾らによる研究^{3,4)}が挙げられる。これらはPSIまたはSqueeSARにおけるpermanent scatterer (PS) による変動解析結果を建物変動であると仮定し、また、SBASやSqueeSARにおけるdistributed scatterer (DS) による変動解析結果を地盤変動であると仮定し、両者の差をとることで抜け上がり速度の算出を試みた。バンコクに適用した結果では抜け上がり発



図-1 タイ王国バンコクにおける抜け上がりの例。

生・非発生地域で結果に差は発生していたものの、推定精度は十分ではなく、また比較的沈下速度が小さいPSと大きいPSという二種類の変動速度のパターンが存在することが確認された。PSは人工構造物からの反射信号であることが多いが、構造物のみにあたって反射する場合と構造物の側面と地盤面で二回反射する場合が存在すると考えられる。は構造物の変動を表すと考えられるのに対し、は構造物で反射しているものの、経路長を考えると地盤面変動を表すと考えられる。

そこで構造物の抜け上がりを検知するためにはPSを、構造物変動を表すPS（以降、構造物PSと呼ぶ）と地盤面変動を表すPS（以降、地盤面PSと呼ぶ）に分類する必要がある。また、構造物PSと地盤面PSを正しく分離できれば、PSIの処理だけで抜け上がり速度を算出できると考えられる。

3. 手法

提案する手法の概要を図2に示す。PSI処理については丸尾³⁾の手法を基にした。まず、PSI処理を行いPSの変動速度とDSM誤差を計算する。次に構造物の検出を行う。DSMデータを用いてPSの標高を計算するとともに、DSMから作成したDEMを使用してPSの地盤面からの高さ（PS高さ）を計算する。さらに、PS高さの分布形状からDSMのバイアスを補正し、構造物PSと地盤面PSを区別するための閾値を決定する。決定した閾値をPS高さに適用しPSを構造物PSと地盤面PSに区別する。最後に区別された構造物PSと地盤面PSの速度差を計算することにより抜け上がり速度を算出する。

PSI処理においてPSのネットワーク間の変動速度差を求める際、式(1)で表される目的関数を最大化するような、時間基線長に比例するPSのネットワーク間の変動速度差と、空間基線長に比例するPSネットワーク間のDSM誤差の差という2つのパラメータを計算する。

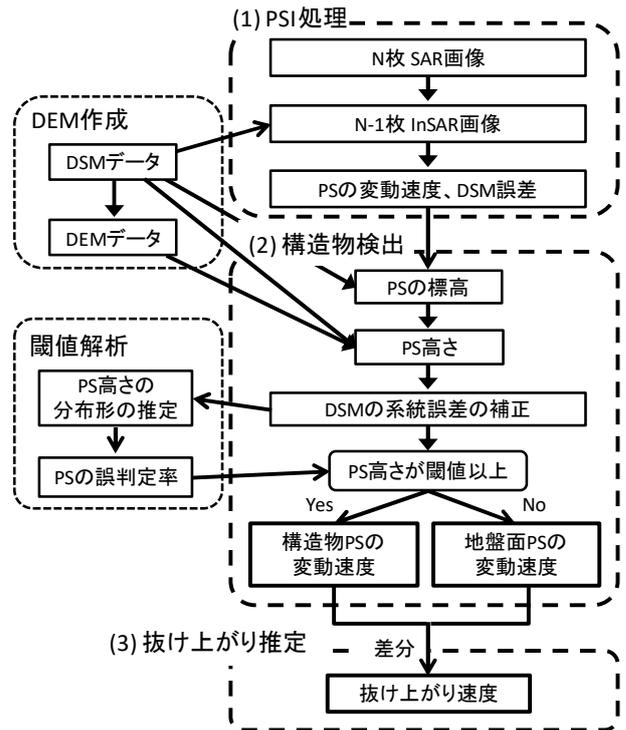


図-2 提案手法のフローチャート。

$$\gamma_k(v_k, h_k) = \max \left\{ \frac{1}{N-1} \left| \sum_{l=1}^{N-1} \left\{ \exp \left(-i \left(\varphi_{l,k} - \frac{4\pi}{\lambda} v_k \cdot t_l - \frac{4\pi}{\lambda} \frac{B_{\perp l}}{R_k \sin \theta_k} h_k \right) \right) \right\} \right| \right\} \quad (1)$$

ここで、 γ はensemble coherence、 k はPSネットワークのリンク番号、 v は地盤変動速度、 h はDSM誤差、 N は画像枚数、 l はInSARの画像番号、 φ は差分干渉位相、 λ は波長、 t は時間基線長、 B は垂直基線長、 R はスラントレンジ距離、 θ は入射角を表す。DSM誤差とは、PSIの前処理であるInSAR処理において計算された位相差のうち、標高に依存する位相成分をDSMを用いて除去した際の残差に相当するものである。これを用いて、PSIと同様の方法でDSM誤差を計算することができる。つまり、PSネットワークの接続関係から以下の式が成立し、これを解くとPSごとのDSM誤差の値が求まる。

$$XA = B \quad (2)$$

$$X = \begin{bmatrix} 1 & -1 & 0 & \dots & 0 \\ 1 & 0 & -1 & \dots & 0 \\ 1 & 0 & 0 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & \dots & 1 \end{bmatrix} \quad (3)$$

$$A = \begin{bmatrix} \Delta h_1 \\ \Delta h_2 \\ \Delta h_3 \\ \vdots \\ \Delta h_k \end{bmatrix}, \quad B = \begin{bmatrix} \Delta h_{1,2} \\ \Delta h_{1,3} \\ \Delta h_{1,4} \\ \Delta h_{2,1} \\ \Delta h_{2,5} \\ \vdots \\ \Delta h_{k,(k-3)} \end{bmatrix} \quad (4)$$

$$A = BX^{-1} \quad (6)$$

ここで、 X は計画行列、 A はPSにおけるDSM誤差、 B はPSネットワーク間のDSM誤差の差を表す。このようにしてDSM誤差を計算する。ここで計算されたDSM誤差は絶対的な値を持つ基準点が存在しないため相対的な値でしかなく、値にはバイアスが含まれる。

PSの地表面からの高さ(PS高さ)は、DSM、DSM誤差、DEMを用いて式(7)で表される。

$$\begin{aligned} (\text{PS高さ}) &= (\text{DSM標高}) + (\text{DSM誤差}) \\ &\quad - (\text{DEM標高}) \end{aligned} \quad (7)$$

PS高さの観測値の分布は、高さが0付近を中心に存在する地盤面PSによる分布と、高さが数m~数十mにかけて存在する構造物PSによる分布を合わせた形になると仮定できる。観測値から構造物PSと地盤面PSそれぞれの高さ分布を推定することでPS高さのバイアスを除去できればよいが、一般に混合分布を推定する問題は分布形を仮定できない場合は解が定まらない。DSM誤差のバイアス補正を行うためには、地盤面PSによる分布の中心を推定できればよい。そこで、地盤面PSと構造物PSのそれぞれの分布が正規分布に従うと仮定し分布形を決定する。複数の正規分布の和によって表される混合ガウス分布から個々のガウス分布を推定する際に、EMアルゴリズム⁵⁾を使用する。

4. 対象地域と使用データ、結果

対象地域は地盤沈下とそれに伴う抜け上がりが深刻な問題となっているバンコクとした。バンコクは沖積低地で、上位から埋土層、軟弱粘性土層(層厚13~15m)、硬質粘性土層(深度22~24m)、密な砂質土層、固結粘性土層で構成される。軟弱粘性土層の地下水は塩性を地下水位はGL-1~-2mであるが、バンコク郊外では多数の工場が地下水を揚水し利用するため砂質土層以深の地下水位は約GL-23mとなっており、地下水位低下による地盤沈下が進行している⁶⁾。

実験では、2009年9月から2011年2月にかけて撮影されたTerraSAR-X/TanDEM-Xによる画像20枚を使用した。

撮影モードは全てStrip Map (SM)で解像度は約3mである⁷⁾。今回は処理時間短縮のため抜け上がり発生地域で切り出して処理を行った。InSAR解析とDEMの作成、PS高さの算出にあたって必要となるDSMデータとしてNASAが公開している解像度30mのDSMであるSRTM⁸⁾を使用した。

PSIの変動速度結果における基準用のデータとして、タイ王立測量局(RTSD: The Royal Thai Survey Department)により2008年から2011年までの期間に一年に一度、計四回計測された1m深度の水準測量点⁹⁾を用いた。また、抜け上がりの精度検証用データとして現地計測データを使用した。現地の建築物などの抜け上がり量を計測し、建設されてからの年数で割って抜け上がり速度を計算したが、建設後の年数が不明な建築物については一律20年と仮定して抜け上がり速度を推定した。

抜け上がり速度解析の実験結果を図-2に示す。このうち、図-2(a)にPS高さ分布図、図-2(b)に地盤面PSの変動速度分布図、図-2(c)に構造物PSの変動速度分布図、図-2(d)に抜け上がり速度の推定結果を示す。現地計測結果とのRMSEは5.7mm/yearであった。

5. 考察と結論

図-2(d)の抜け上がり速度の推定結果から、対象地域では殆どの推定地点で正の値をとり抜け上がりがエリア全体にわたって発生しているのに対していることが判明した。また紙面の都合で割愛したが、抜け上がりが全く発生していない他の地域では、ほぼ全ての推定地点で抜け上がり速度が0に近い値であった。現地計測の結果との比較においても正の相関を持っていることが確認された。さらに、本手法をSAR画像のシーン全体に対しても適用した結果、バンコク中心部から郊外部へと抜け上がり速度が大きくなっている様子が確認され、郊外部において抜け上がりの影響が深刻である様子が示唆された。また、推定結果の傾向は正しく示されていると考えられるものの、全体的に過小推定傾向であった。この点については今後の課題としたい。

本研究では、PSIでPSの変動速度を推定する際に同時に推定されるDSM誤差とDSMから導出されるDEMを利用して、PS高さを導いた。PSには構造物と地盤面各々から由来するものが混在すると仮定し、PS高さの確率密度関数にEMアルゴリズムを適用して、両者の確率密度関数を推定する。地盤面の確率密度関数の期待値をDSM誤差に含まれるバイアスとして除去した後に閾値処理を加え、地盤面変動を表す地盤面PSと構造物

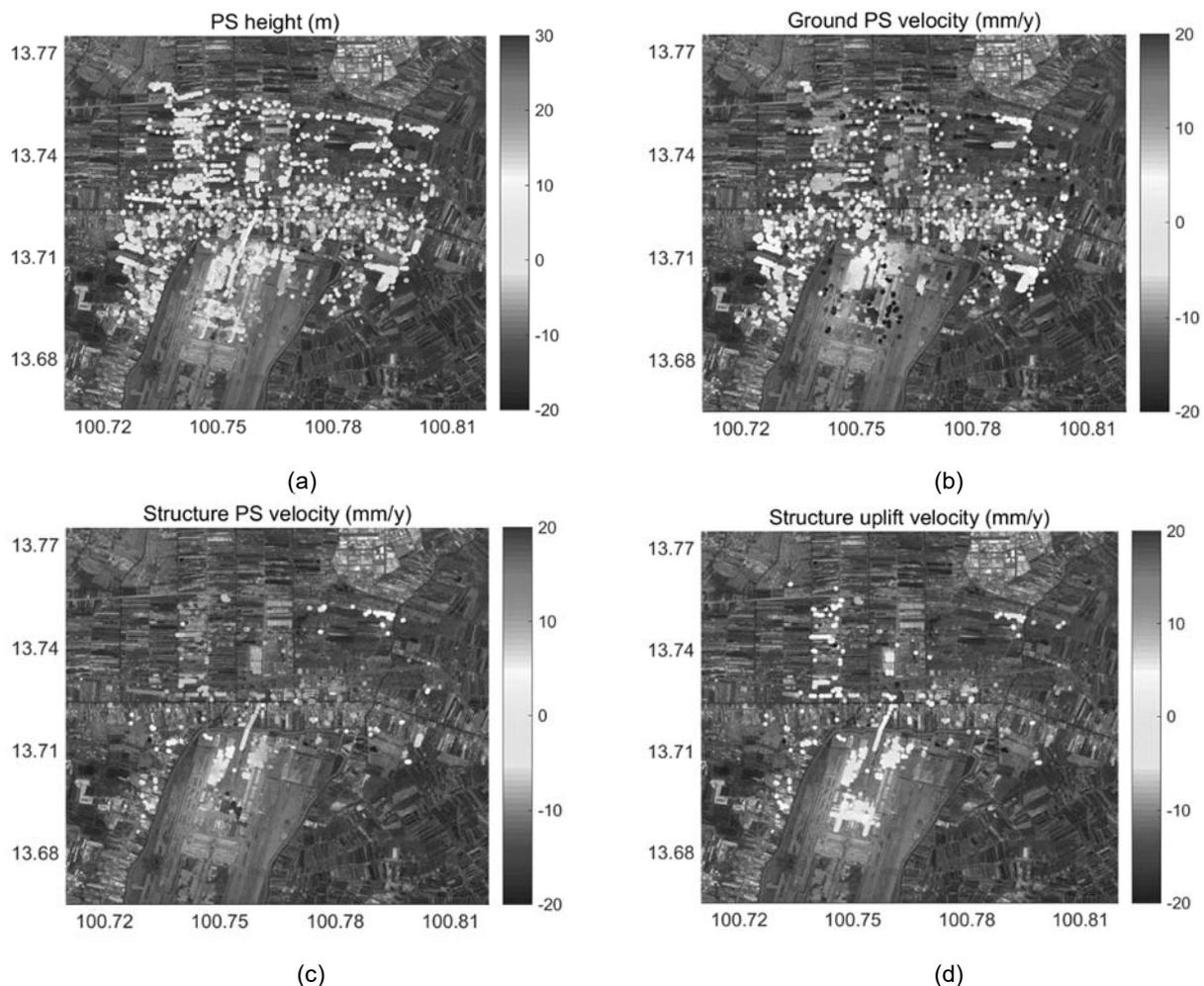


図-4 抜け上がり速度推定結果．(a) PS高さ，(b) 地盤面PSの変動速度，(c) 構造物PSの変動速度，(d) 抜け上がり速度．単位はmm/year．地図データ:Google，ZENRIN

変動を表す構造物 PS を分類する．最終的に，地盤面 PS と構造物 PS の変動速度の差を利用して抜け上がり速度を推定する．この PS 高さの推定が本研究の新規性と言える．

本提案手法はPSを分類することで，抜け上がり速度推定だけでなく，構造物変動，地盤面変動推定の高精度化にも寄与するものであり，都市における土木構造物や地盤沈下の変動監視へ活用できる可能性を十分有すると結論付けられる．

参考文献

- 1) Ferretti, A.; Prati, C.; Rocca, F. Permanent scatterers in SAR interferometry. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 39, pp.8-20, 2001.
- 2) Hooper, A. and Zebker, H. : Persistent scatterer interferometric synthetic aperture radar for crustal deformation analysis, with application to Volcán Alcedo, Galápagos. *J. Geophys. Res.*, 112(B07407), 2007.
- 3) 丸尾直之：差分干渉SAR解析を用いた構造物の抜け上がり検知手法の開発，京都大学大学院工学研究科社会基盤工学専攻修士論文，2017．
- 4) Maruo, N., Susaki, J., Boonyatee, T., and Kishida, K.: Detection of the deformation rate gaps between buildings and land surface by differential synthetic aperture radar interferometry techniques, *Proceedings of the 37th Asian Conference on Remote Sensing*, 2016.
- 5) Redner, R. and Walker, H. : Mixture densities, maximum likelihood and the em algorithm. *SIAM Review*, 26, 1984.
- 6) Phien-wej, N., Giao, H. P. and Nutalaya, P. : Land subsidence in Bangkok, Thailand, *Engineering Geology*, 82, pp.187-201, 2006.
- 7) German Aerospace Center (DLR) : TerraSAR-X - Germany's radar eye in space, http://www.dlr.de/dlr/en/desktopdefault.aspx/tabid-10377/565_read-436/#/gallery/350 (accessed 2018.2.2).
- 8) U. S. Geological Survey (USGS) : Shuttle Radar Topography Mission (SRTM) 1 Arc-Second Global, <https://lta.cr.usgs.gov/SRTM1Arc> (accessed 2018.2.2).
- 9) The Royal Thai Survey Department : International union of geodesy and geophysics -Thailand reported on the geodetic work period 1999-2002, presented at the XXIII general assembly of the international union of geodesy and geophysics, 2003.