⁽²³⁾ PSIと測量結果の統合による地盤沈下監視

伊藤 大生1・須崎 純一2

¹学生会員 京都大学大学院 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: itou.hiroki.64v@st.kyoto-u.ac.jp

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

人工衛星搭載型合成開口レーダ (synthetic aperture radar: SAR)により取得された時系列画像に対し, Persistent Scatterers Interferometry (PSI) 手法を適用することで広範囲の地盤沈下を高精度に測定できる.し かしながら,推定される変動は衛星から地上を見た視線方向に沿うもので,三次元変動を直接推定できな い.一方,離散的な観測に限られるが,水準測量は鉛直変位を,GPSは三次元変動を観測できる.よって 本研究では,PSI,GPSと水準測量を組み合わせることによって,地盤変動の三次元変動推定を試みた. 提案手法は,GPSと水準測量から空間的に内挿された変動と,上昇軌道と下降軌道の画像に対するPSIの 推定値を観測値として,三次元変動を推定する.関西国際空港の二期島に適用した結果,RMSEは18 mm/yearであり,PSIと測量結果の統合手法は,広範囲の地盤沈下の監視により効果的であると判明した.

Key Words : land subsidence, PSI, synthetic aperture radar (SAR), leveling, GPS

1. はじめに

現在、気候変動や地下水の汲み上げ等が原因で、世界 中で地盤沈下が深刻な問題になっており, 安価かつ高精 度に広範囲の地表面変動を推定する技術が求められてい る. 関西国際空港では地盤沈下が生じていることが報告 されている¹⁾. 関西国際空港は陸地から約5km離れた海 上に建設された世界で初めての海上空港である. 関西国 際空港は第一期島と二期島の二つの島からなり、それ ぞれ1991と2007に完成し、それらは海を埋め立てて建設 された. 関西国際空港では、水準測量と Global Positioning System (GPS)によって地盤沈下の計測が行われている. 図-1は水準測量とGPS測量の位置を示している. 水準測 量は鉛直変位, GPS は三次元変動を高精度に観測でき るが、それらは点の観測である. 面的な観測を行う手 段として, 合成開口レーダ (synthetic aperture radar: SAR)が ある. Differential interferometric SAR (DInSAR)は、広範囲の 地盤沈下を観測する手法としてよく知られている. 特 に、Persistent Scatterers Interferometry (PSI)²⁾は、複数のSAR 画像を用いることで、高精度に広範囲の地盤沈下を測定 することができる.しかし、その推定される変動は衛星 視線方向のみの一次元変動である. それゆえ, 本研究で は、PSI、GPSと水準測量を組み合わせることによって、 関西国際空港の広範囲の三次元変動の推定を試みた. 今

回の手法は、GPSと水準測量から内挿した結果と上昇軌 道と下降軌道のPSI結果に対して最小二乗法を適用し、 三次元変動を推定するものである.本論文では、関西国 際空港二期島を対象に手法を試み、水準測量のデータと 比較することで、検証を行った.



図-1 関西国際空港の Google Earth 画像. 黒い点が水準測量, 灰色の点が GPS の位置を示す. また, 白い枠が今回の対象地を示す. 地図データ:Google, ZENRIN.

2. 手法

PSIとは、複数のSAR画像から、統計的にノイズが小

さいと判定されたピクセルであるPersistent Scatterers (PS)に おいて、大気の影響や散乱体の高さの誤差を除去するこ とで、高精度に散乱体と衛星間の視線方向での変動量 や変動速度を求める技術である。今回、PSI処理につい ては、Maruo et al.³を参考した。この手法では、PS候補 選定について、一般な振幅分析に加え、それらのピクセ ルを用いて、Hooper et al.⁴により考案された位相分析を 行うことで、SAR画像枚数が少ない中でも信頼度の高い PS候補の選定を試みている。

PSIで推定される変動速度V_{ps}は衛星視線方向であり, 以下の式で衛星視線方向の単位ベクトルとの関係式が得られる.

$$V_{\rm ps} = V_{ps}^e \cdot u_{\rm e} + V_{ps}^n \cdot u_{\rm n} + V_{ps}^u \cdot u_{\rm u} \tag{1}$$

ここで V_{ps} は衛星視線方向のPSの変動速度、 V_{ps}^{e} 、 V_{ps}^{n} と V_{ps}^{u} は未知のPSの3方向の変動速度、 u_{e} 、 u_{n} と u_{u} はPSから衛星への単位視線ベクトルを表す.

水準測量とGPSで観測される変動速度は内挿によって PSIの空間的解像度と合わせる必要がある.本研究では, 内挿方法の一つである普通クリギングを用いた⁵⁰⁰.そ の内挿された速度Vは以下の式で速度ベクトルとの関係 式が得られる.

$$V = \begin{bmatrix} V_{GPS}^{e}, & V_{GPS}^{n}, & V_{GPS+leveling}^{u} \end{bmatrix}^{T}$$
(2)

ここで V_{GPS}^{e} , V_{GPS}^{n} , $V_{GPS+leveling}^{u}$ は,東西,南北と鉛 直方向の内挿された速度ベクトルの成分を表す.この 時,最小二乗法を用いて,PSIと内挿結果から最終結果 を得る.最小二乗法における観測方程式は以下のよう に示される.

 V_{ps}^a u_n^a Γu_e^a V_{ps}^d u_n^d u_e^d rV^{e-} u_u^d V_{GPS}^{e} V^n (3)1 0 0 V^{u} 0 V_{GPS}^n 0 1 0 0 1 $V^u_{GPS+leveling}$

ここで $[V^e, V^n, V^u]^T$ は推定される変動速度, V_{ps}^a , V_{ps}^d は上昇軌道と下降軌道それぞれのPSI変動速度 $[u_e^a, u_n^a, u_u^a]^T$ と $[u_e^d, u_n^d, u_u^d]^T$ は上昇軌道と下降軌道それ ぞれの単位視線ベクトルを表す.この観測方程式を最小 二乗法によって解き,三次元変動を推定した.

3. 対象地域と使用データ

本研究では、上昇軌道のデータとして、2014年9月から2017年7月に取得されたALOS2/PALSAR2画像9シーン、下降軌道のデータとして、2014年3月から2016年11月に取得されたALOS2/PALSAR2画像8シーンをそれぞれ用いた.また、地形による干渉位相の影響を取り除くために、国土地理院が公開している10mメッシュ数値標高モデルを用いた.一期島はGPS測量データがなかったため、今回は二期島のみを対象地域とした. 今回、関西エアポート株式会社により計測された水準測量点54か所とGPS測量点38か所を用いた(図-1).内挿用データとして、水準測量点32か所とGPS測量点38

4. 結果

まず,図-2 (a)に上昇軌道のPSIによる地表面変動量推 定結果を,図-2 (b)に下降軌道のPSIによる地表面変動量 推定結果をそれぞれ示す.



図-2 PSI 解析結果 (a) 上昇軌道 PS 地盤変動マップ, (b) 下降軌道 PS 地盤変動マップ. 地図データ:Google, ZENRIN







図-4 上昇軌道と下降軌道のPSI結果とGPSと水準測量の統合結果(a) 東西方向地盤変動マップ,(b) 南北方向地盤 変動マップ,(c)上下方向地盤変動マップ.単位はmm/year.(d) 現地計測と推定した上下変動速度の関係の プロット図.地図データ:Google, ZENRIN

また、SAR 干渉解析結果において、水準点の座標 から100 m以内で最も近いPS点を水準点と同じ位置 であると見なし、水準測量との結果の比較を行った. なお、SAR干渉解析による変動推定量は衛星視線方 向の変動量であるため、検証用データと比較する際、 水平方向の変動はないものと仮定し、推定変動量を 衛星視線方向角の余弦で除したものを推定鉛直方向 変動量として用いた.上昇軌道に関して、PSによ る変動推定結果と水準測量点との比較によるRMSE は43 mm/year となり、下降軌道に関して、PSによ る変動推定結果と水準測量点との比較によるの RMSEは34 mm/year となった.

図-3 (a)から(c)に普通クリギングの地表面変動量 推定結果を示す.東西方向の内挿結果は,-36 mm/year (西方向)から64 mm/year (東方向)の範囲で 値をとった.南北方向の内挿結果は二期島が南方向 に移動していることを示した.鉛直方向の内挿結果 は,-390 mm/year (沈下)から-16 mm/year (沈下)の範 囲で値をとった.また,上昇軌道による解析と下降 軌道による解析と同様の方法によって,水準測量と の結果の比較を行ったところ,普通クリギングによ る上下方向の変動推定結果と水準測量点との比較に よるRMSEは94 mm/year となった.

続いて、図-4 (a)から(c)に3方向の統合結果を示す. 南北方向の結果は内挿結果とほとんど変わらなかった.その理由としては、衛星の軌道によってSAR の観測は南北方向の感度が悪いということが考えられる.鉛直方向の統合結果は、-431 mm/year (沈下) から-190 mm/year の範囲で値をとった.また、上昇 軌道による解析と下降軌道による解析と同様の方法 によって、水準測量との結果の比較を行った.図-4 (d)に上下方向の変動推定結果と水準測量による計 測結果の比較結果を示す.PSI、GPS と水準測量を 組み合わせによる上下方向の変動推定結果と水準測 量点との比較によるRMSEは18 mm/year となった.

5. 考察と結論

本研究では、PSI、GPS と水準測量を組み合わせることによって、関西国際空港の広範囲の三次元変動を推定した.その結果、水準測量22か所とのRMSEは18 mm/yearであり、良い推定精度を示しており、地盤沈下を把握できているといえる.全ての結果の精度を表-1にまとめた.これより、PSI、GPSと水準測量を統合する手法は、PSIのみや内挿のみの推定結果と比べて、広範囲の地盤沈下の監視により効果的であるといえる.

内挿結果について、内挿結果のRMSEがPSI結果のRMSEより大きい理由として、GPSと水準測量の 表す地盤変動の特徴が異なることが挙げられる. ほとんどのGPS計測点は堤防上であるため、内挿に おいてGPSが支配的である場所は、内挿結果と地表 面を観測した水準測量の変動速度とは異なると考え られる. また、本研究では、観測方程式を解くために最小 二乗法を適用した.しかし、この手法では、GPS、 水準測量とPSIの分散の違いは考慮されていない. 近年、重み付き最小二乗法を用いてDInSARとGPS の統合を行う手法がいくつか提案されている⁷⁾⁸⁾. それゆえ、今後は、重み付き最小二乗法を適用し、 三次元変動速度を推定することを予定している.

表-1 推定結果と水準測量の比較結果

手法	RMSE
上昇軌道 SAR 画像を用いた PSI	43 mm/year
下降軌道 SAR 画像を用いた PSI	34 mm/year
GPSと水準測量の内挿(衛星画像なし)	94 mm/year
GPS, 水準測量 と PSI の統合	18 mm/year

参考文献

- 1) [関西空港]沈下の状況|関西エアポート, < http://www.kansai-airports.co.jp/efforts/ourtech/kix/sink/sink3.html>, (入手 2018.6.13).
- Ferretti, A., Prati, C., and Rocca, F.: Nonlinear subsidence rate estimation using permanent scatterers in differential SAR interferometry, *IEEE Trans, Geosci. Remote Sen.* 38.5, pp. 2202–2212, 2000.
- 3) 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 37h Asian Conference on Remote Sensing*, 2016.
- Hooper, A., and Zebker, H.: Persistent scatterer interferometric synthetic aperture radar for crustal deformation analysis, with application to Volcán Alcedo, Galápagos, J. *Geophys. Res.: Solid Earth*, 112.B7, 2007.
- 5) Brooker, P. I.: *A geostatistical primer*, World Scientific, 1991.
- Deutsch, C. V., and Journel, A. G.: Geostatistical software library and user's guide, *Oxford University Press*, New York, 1998.
- Hu, J., et al.: Three-dimensional surface displacements from InSAR and GPS measurements with variance component estimation, *IEEE Geosci. Remote Sensing Letters*, 9.4, pp.754-758, 2012.
- Samsonov, S., et al.: Application of DInSAR-GPS optimization for derivation of fine-scale surface motion maps of Southern California, *IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing*, 45.2, pp.512, 2007.