

(41) 上昇・下降軌道のSAR画像を用いた PSIによる地盤沈下解析

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

近年、複数時期のSynthetic Aperture Radar (SAR)画像を組み合わせる手法であるPSI (Permanent Scatterer Interferometry)¹⁾は、面的かつ高精度に線形変動を計測できるため、国や自治体への社会実装が期待されている。一方で、PSInSARより得られる地盤変動量は、実際の3次元変動の衛星視線方向への投影となるため、3次元変動を捉えたいという需要が存在している。そこで、本稿では、PSIを用いて、関西国際空港を対象に上下方向と東西方向の変動量の推定を試みた。今回の手法は、上昇軌道と下降軌道のそれぞれのSARデータに対してPSIによる地盤変動速度の推定を行い、上昇軌道と下降軌道の地盤変動推定結果を結合し、上下方向の変動量と東西方向の変動量を推定するものである。その結果、上下方向の地表面変動推定に関して、水準測量点8か所とのRMSE 0.016 m/yearという推定精度を示した。

Key Words : PSI, InSAR, surface deformation, SAR, ascending-descending combination

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。複数時期のSynthetic Aperture Radar (SAR)画像を組み合わせる手法であるPermanent Scatterer Interferometry (PSI)¹⁾は、面的かつ高精度に線形変動を計測できるため、国や自治体への社会実装が期待されている。一方で、PSIより得られる地盤変動量は、実際の3次元変動を衛星視線方向に投影した1次元成分のため、3次元変動を捉えたいという需要が存在しており、上昇軌道と下降軌道を組み合わせることで、上下方向の変動量と東西方向の変動量を求める2.5次元解析²⁾と呼ばれる手法等の3次元変動を推定する様々な手法が開発されてきた。そこで、本稿では、PSIを用いて、関西国際空港を対象に上下方向と東西方向の変動量の推定を試みた。今回の手法は、上昇軌道と下降軌道のそれぞれのSARデータに対してPSIによる地盤変動速度の推定を行い、上昇軌道と下降軌道の地盤変動推定結果を結合し、上下方向の変動量と東西方向の変動量を推定するものである。本論文では、関西国際空港一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。

2. 使用データ

本研究では、関西国際空港第一期島を対象地域とし、上昇軌道のデータとして、2006年から2010年に取得されたALOS/PALSAR画像24シーン、下降軌道のデータとして、2006年から2010年に取得されたALOS/PALSAR画像14シーンをそれぞれ用いた。解像度はレンジ方向に約3.1 m、アジマス方向に約7.5 mである。地形による干渉位相の影響を取り除くために、スペースシャトル立体地理データ(SRTM: Shuttle Radar Topography Mission) 3秒メッシュ(約90 m) 解像度の数値標高モデルを用いた。なお、関西国際空港は第一期島と二期島の二つの島からなり、一期島よりも二期島の方が沈下は顕著であるが、SRTMから得られるDEMは一期島の地表高モデルのみであるため、今回は一期島のみを対象地域とした。

また、地表面変動推定結果の検証用データとして関西エアポート株式会社により2006年から2010年までの期間に1年に1度、計4回計測された水準測量点17か所を用いた(図-1)。



図-1 検証用データ。現地計測の位置と沈下速度を表す。

3. 地盤沈下解析手法

(1) 概要

今回関西国際空港の地盤沈下を把握するために行った上下方向と東西方向の変動速度推定手順を図-2に示す。まず、上昇軌道のSAR画像24枚と下降軌道のSAR画像14枚からPSIによるPS変動推定をそれぞれ行う。そして、上昇軌道と下降軌道よりそれぞれ得られたPS時系列変動を組み合わせることによって、衛星視線方向面上の上向きの変位量と東向きの変位量を計算した。

(2) PSI

PSIとは、複数のSAR画像から、PSと呼ばれるノイズの小さいピクセルを統計的に選定し、このPSにおいて、差分干渉SARで取り除くことが出来なかった大気の影響や散乱体の高さの影響を推定し、除去する手法である。PSI処理に関しては、上昇軌道について2009年1月のSAR画像を基準として23枚の差分干渉画像を生成し、下降軌道について2009年11月のSAR画像を基準として13枚の差分干渉画像を生成した。今回、PSI処理については、Maruoら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⁴⁾に加え、それらのピクセルを用いて、Hooperら⁵⁾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。

(3) 上下方向と東西方向の変動量算出

今回、2.5次元解析により、上下方向と東西方向の変動量を算出した。2.5次元解析とは、上昇軌道と下降軌道の2方向の解析結果を合成し、変動量を衛星視線方向面上での準東西方向と準上下方向の成分へ分離する手法である。ただし、2.5次元解析により求められる準上下方向の変動量は、実際には地表面から約85度傾いた方向

の変動量であるが、本論文では上下方向の変動量と見なす。また、一般的に変動量を分離する際、上昇軌道と下降軌道の双方に値が存在するピクセルのみを用いるが、今回ジオコーディングの際に用いる射影パラメータの影響や解像度の違いから完全に一致するピクセルは存在しなかった。そのため、100 m以内で最も近い点を同じPS点であると見なし、その点のみに対して、上下方向と東西方向の変動量分離の処理を行った。

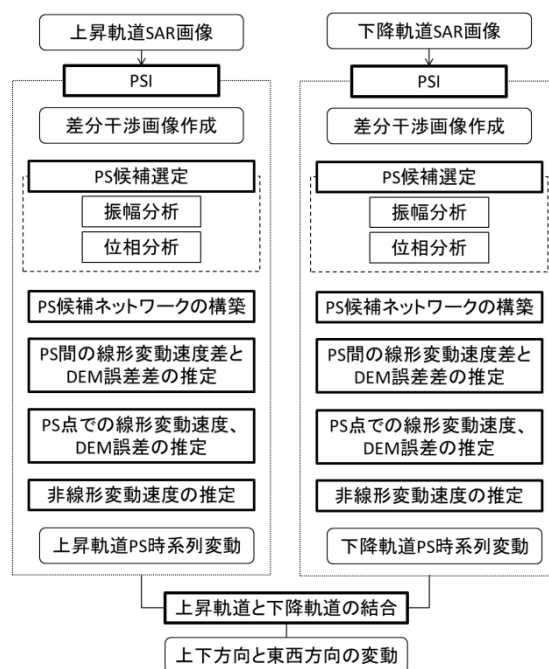


図-2 地盤沈下解析手法のフローチャート

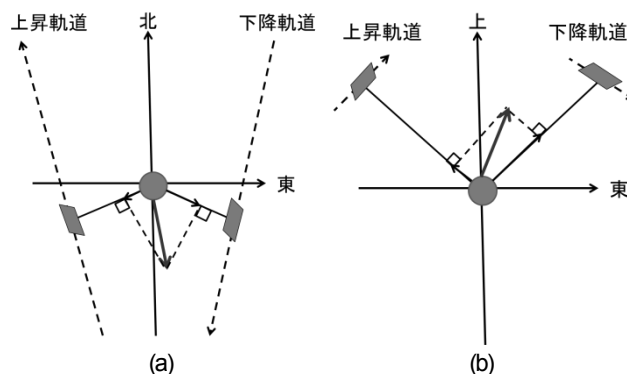


図-3 上昇軌道と下降軌道の2方向から行われる観測の概念図。灰色の矢印は実際の変動，黒色の矢印は観測値を表す。(a) 平面図，(b) 立面図

4. 結果

まず、図-4 (a)に上昇軌道のPSIによる地表面変動量推定結果を、図-5 (a)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。上昇軌道の推定結果は、-0.25 m/year(沈下)から0.04 m/year(隆起)の範囲で、下降軌道の

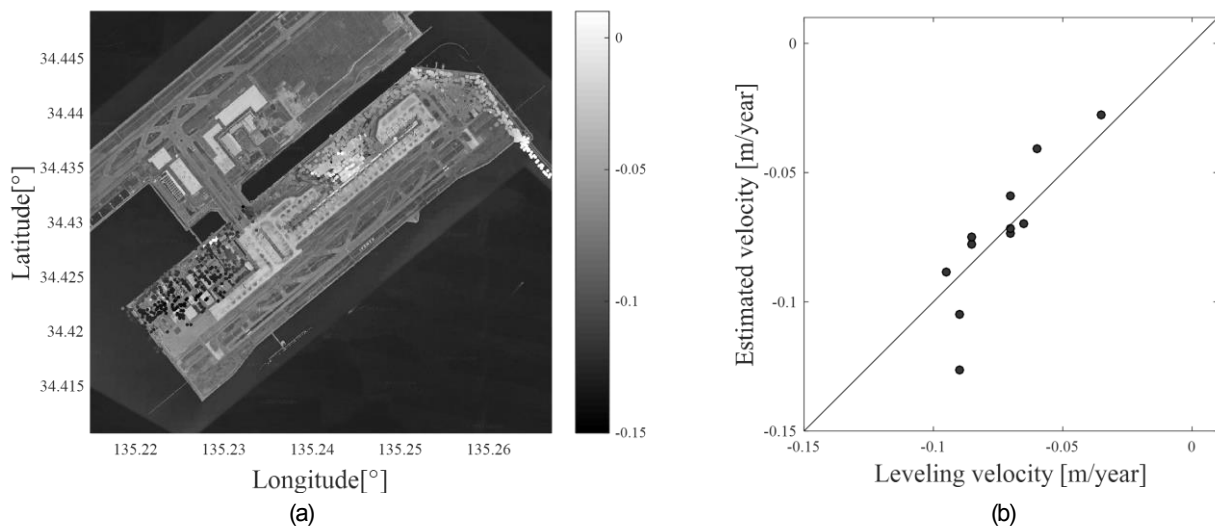


図4 北方軌道解析結果 (a)PS地盤変動マップ, (b)現地計測と推定した上下変動速度の関係のプロット図

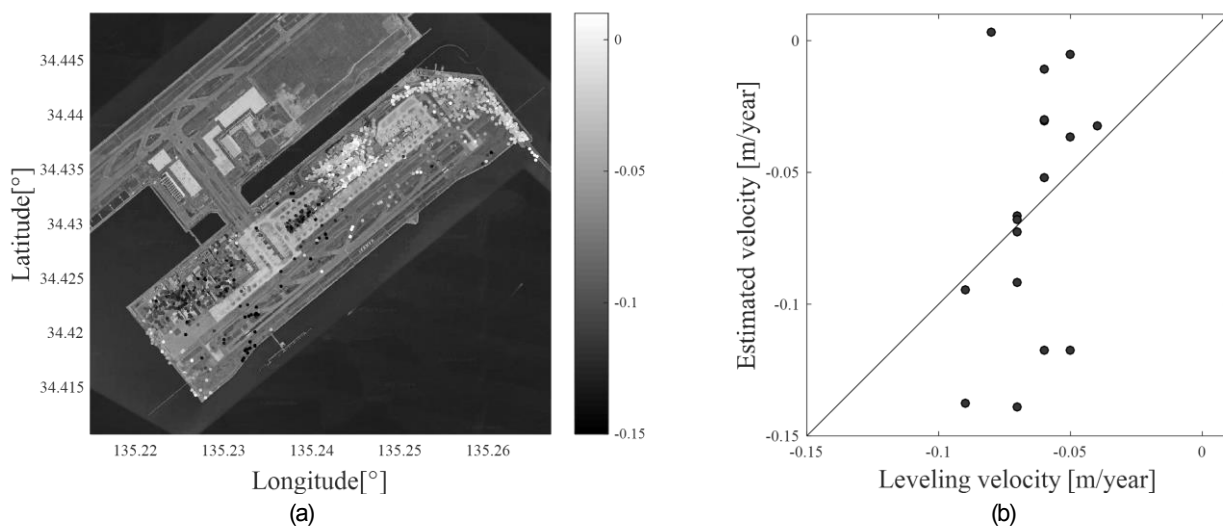


図5 南方軌道解析結果 (a)PS地盤変動マップ, (b)現地計測と推定した上下変動速度の関係のプロット図

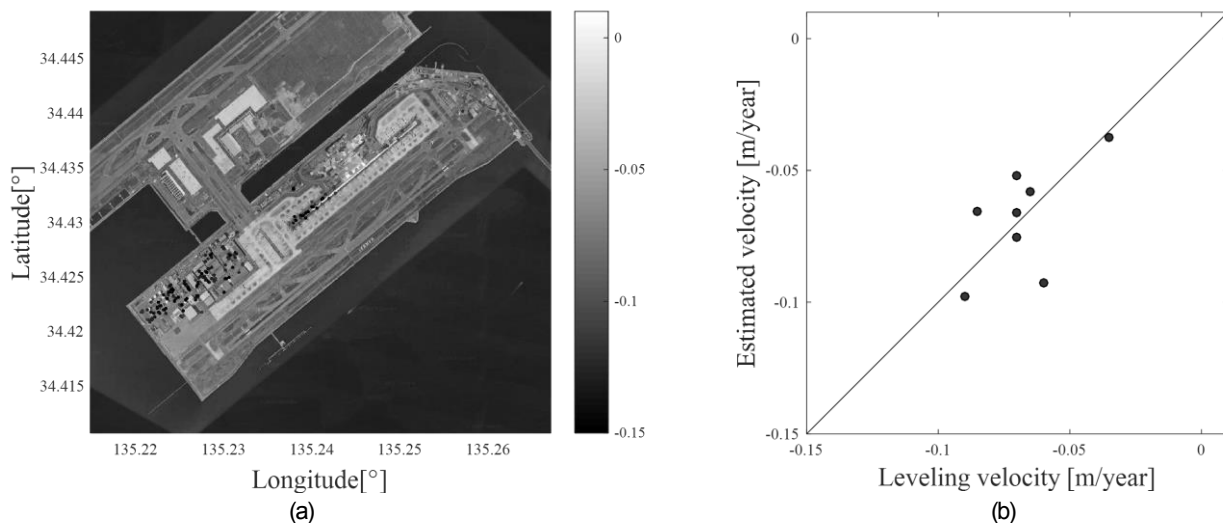


図6 2.5次元解析結果 (a)上下方向地盤変動マップ, (b)現地計測と推定した上下変動速度の関係のプロット図

推定結果は、 -0.22 m/year (沈下)から 0.19 m/year (隆起)の範囲でそれぞれ値をとった。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。図-4 (b)に上昇軌道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、図-5 (b)に下降軌道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それぞれ示す。上昇軌道に関して、PSによる変動推定結果と測量点11点とのRMSEは 0.015 m/year となり、下降軌道に関して、PSによる変動推定結果と測量点17点とのRMSEは 0.041 m/year となった。

続いて、図-6 (a)に上下方向の地表面変動量推定結果を示す。推定結果は、 -0.2 m/year (沈下)から 0 m/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-6 (b)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。2.5次元解析による上下方向の変動推定結果と測量点8点とのRMSEは 0.016 m/year となった。

5. 考察

まず、上昇軌道の変動推定結果と水準測量による計測結果を比較したRMSEは 0.015 m/year、下降軌道の変動推定結果と水準測量による計測結果を比較したRMSEは 0.041 m/yearであり、下降軌道より上昇軌道の変動推定結果の方が推定精度が良いことが分かった。また、2.5次元解析による上下方向の変動推定結果と測量点8点で計測された変動量計測結果は、ほとんどの計測点で同様の変動速度を示しており、そのRMSEは 0.016 m/yearであり、推定結果の妥当性が示された。

一方で、2.5次元解析による上下方向の変動推定結果と測量点とのRMSEが、水平方向の変動はないと仮定をした上昇軌道の変動推定結果と測量点とのRMSEと比べて、 0.001 m/year大きい値となった。考えられる主な要因は2つある。1つ目は、上昇軌道と下降軌道の地盤変動推定結果を結合することで上下方向の変動を求めるため、下降軌道に関する変動解析の精度の悪さであると考えられる。一般的に、PSInSARにおいて、画像枚数が多いと精度が良くなることが知られており、そのため、下降軌道の解析結果の精度が悪かったことの主な原因は、画像

の枚数の差であるといえる。2つ目の理由として、今回 100 m以内で最も近い点を同じPS点であると見なし、上下方向と東西方向の変動量を推定したが、違うPS点同士を用いたという可能性があると考えられる。また、PS点と比較をした水準測量点に関しても、同様に全く別の散乱体と比較している可能性がある。

6. 結論

本研究では、関西国際空港第一期島を対象地域とし、PSIにより上昇軌道と下降軌道のデータを用いて対象地域の地表面変動を面的・時系列的に推定し、それらを用いて上下方向と東西方向の変動を推定した。その結果、上下方向の地表面変動推定に関して、水準測量点8か所とのRMSEは 0.016 m/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。

今後の課題としては、下降軌道の変動解析の精度向上や、上昇軌道と下降軌道の解析結果結合の際のPS点の対応付け方法の検討、水準測量点との結果比較方法の検討などが挙げられる。

謝辞：本研究で用いたALOSのデータを提供して下さった国立研究開発法人宇宙航空研究開発機構JAXAの穴原琢磨氏に感謝申し上げます。

参考文献

- 1) Ferretti, A., Prati, C., and Rocca, F.: Nonlinear subsidence rate estimation using permanent scatterers in differential SAR interferometry, IEEE Trans. Geosci. Remote Sens. 38.5, pp. 2202–2212, 2000.
- 2) Fujiwara, S., Nishimura, T., Murakami, M., Nakagawa, H., Tobita, M., and Rosen, P. A.: 2.5 - D surface deformation of M6. 1 earthquake near Mt Iwate detected by SAR interferometry, Geophysical research letters 27.14, 2049-2052, 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.
- 4) Ferretti, A., Prati, C., and Rocca, F.: Permanent scatterers in SAR interferometry, IEEE Trans. Geosci. Remote Sens. 39.1, pp. 8–30, 2001.
- 5) 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.