

衛星観測による干渉SAR解析を用いた港湾施設 の変状の計測

穴原 琢摩¹・夏秋 嶺¹・琴浦 毅²・岩塚 雄大³・佐々木 義信¹・
富井 直弥⁴・前田 勇司²・西畑 剛²

¹ (国研) 宇宙航空研究開発機構 地球観測研究センター

(〒305-8508 茨城県つくば市千現2-1-1) E-mail: anahara.takuma@jaxa.jp

²正会員 五洋建設 (株) 技術研究所 (〒329-2746 栃木県那須塩原市四区町1534-1)

³正会員 五洋建設 (株) 名古屋支店 (〒460-8614 名古屋市中区錦3-2-1)

⁴ (国研) 宇宙航空研究開発機構 衛星利用運用センター (〒101-8008 東京都千代田区神田駿河台4-6)

本研究では日本全国の観測を続けてきた宇宙航空研究開発機構 (JAXA) のALOS (陸域観測技術衛星「だいち」) の計測データに時系列InSAR解析 (時系列Interferometric Synthetic Aperture Radar) を応用することで、空港埋立地盤や臨海部のコンクリート構造物に対してその変動を把握できるか検証した。ALOSは日本全国を年3~4回、分解能10m、50km~70km四方の広域を数十秒ほどで計測でき、本研究で用いる時系列InSAR解析によって、現地に新たに機材を設置することなく地表面全体の変動が可視化できる特徴がある。精度検証の対象として関西国際空港一期島での現場測量データを用いており、比較した計測誤差は11.5mmと算出され、実利用面でも有用性が認められる精度が確認された。また定性評価ではあるが、過去データに遡った解析利用の検証として、小名浜港での水路擁壁にて計測された変動も併せて検証している。

Key Words : Synthetic Aperture Radar, interferometry, time-series InSAR

1. 序論

合成開口レーダ (Synthetic Aperture Radar: SAR) を用いた解析手法の一つである SAR 干渉解析とは、SAR による同一地点の複数回の観測信号の変位量を計測することで、観測期間中における観測対象物の地盤高などの変動量を cm~mm 精度で計測する技術である。

SAR は可視光よりも波長の長いマイクロ波の照射により観測を行う仕組みであるため、可視光で行われる光学観測では阻害要因となる大気中の雲などの気象条件に左右されることなく、また太陽光の地表面からの反射を観測に用いるわけではないため、昼夜・天候を問わずに観測を行うことが可能となっている。特に宇宙航空研究開発機構 (JAXA) が運用を続けてきた ALOS (陸域観測技術衛星「だいち」) および ALOS-2 (陸域観測技術衛星 2号「だいち2号」) は Lバンド波長帯のマイクロ波 (波長 24cm 程度) を採用しており、この Lバンドは地表面上の観測対象物を覆う植生などを透過しやすい性質を持つ。そのため他の海外機関が運用する衛星の波長帯 (波長 3~6cm 程度) による観測に比べ、例えば植生に覆われた陸地の地盤沈下・隆起や河川堤防の変状など

の計測における誤差は小さくなり、比較的高精度に地表面の変動量を計測することができる。

SAR 干渉解析 (Interferometric SAR: InSAR) とは、地表面の変動が、その間に行われた 2 回以上の SAR 観測において受信マイクロ波の位相の変位量となって計測される性質を利用したものであり、特に本論文で用いる時系列 SAR 干渉解析 (以下、時系列 InSAR) はこれを時間方向に拡張し、経年的な微小変化量を測量できるように計測精度の向上を図ったものである。ALOS の運用期間は 2006 年から 2011 年、ALOS-2 は 2014 年から現在も運用が続いており、この間に ALOS および ALOS-2 を用いた InSAR および時系列 InSAR の利用法が検討されてきた。例えば InSAR 利用の事例では東日本大震災後の広域での地盤変動の分析が行われた¹⁾ほか、狭域の対象物として地すべり監視への適用²⁾が議論された。時系列 InSAR では地下水くみ上げによる地盤沈下の監視³⁾、ロックフィルダムの沈下監視への適用性の検討⁴⁾、さらに箱根山などの火山活動に伴う地表面の隆起や沈下を cm 精度で計測した事例が報告されている。それ等に代表されるように衛星搭載の合成開口レーダを用いた微小変化量計測の用途は多くの分野に広がっていると言える。

本研究では日本全国の観測を続けてきたJAXAのALOSの計測データにより、時系列InSARを応用することで、空港埋立地盤や臨海部のコンクリート構造物に対してその変動を把握できるか検証する。解析に用いるALOSとその時系列InSAR解析には以下のような特徴がある。

- ALOSには数種類の観測モードを備えており、本研究で用いる観測モードは日本全国を年3~4回、分解能10m、50km~70km四方の広域を数十秒ほどで計測するものを用いている。
- 時系列InSARはGPSとは異なり、現地に新たに機材を設置することなく定期的に観測でき、機器の置かれた点だけではなく面的に地表面の変動が全体的に把握できることも特徴となっている。
- 時系列InSARは既に観測の行われた衛星データを利用すれば、管理上過去の記録がないところで変状が起こった箇所でも、過去のデータに遡って経年変化を追跡・把握することも可能となっている。

港湾施設等が高精度に計測可能であれば、港湾構造物の点検・モニタリング利用の観点では上記のような利点を利用できるものと考えられる。検証は関西国際空港の現場での沈下測量データを用いており、また小名浜港での計測事例も定性的観点から検証している。

2. 時系列InSAR

時系列InSARとは、複数時期に観測されたInSAR解析を時系列方向に拡張し、計測誤差要因となる大気中の水蒸気によるマイクロ波の伝搬遅延や参照標高データの誤差を低減することで、経年的な微小変化量を測量できるように計測精度の向上を図ったものである。干渉解析と位相の変位量との関連は図-1に示す。複数回観測を実施する中で、観測対象の地表面または構造物などが変動した場合、観測対象と衛星間の距離が変化する。この時距離が変化することで、衛星から照射したマイクロ波が地表面から反射されて再び衛星に到達するまでの時間が変化する。マイクロ波の波長が λ のとき、観測時間 t_1 と t_2 でそれぞれ観測されたマイクロ波の位相 $\phi(t_1)$ と $\phi(t_2)$ の差は変動量 d_{21} との関係式

$$d_{21} = \frac{\phi(t_2) - \phi(t_1)}{4\pi} \lambda \quad (1)$$

を満足すると考えられる。ただし、これには下記のような誤差要因が含まれる。

- 観測毎における大気中の水蒸気量の変化に応じて、図-2のようにマイクロ波の伝搬経路が変化することによる経路差が生じる（大気遅延）。
- SARは複数回観測する際の観測位置の差異に応じて地形の標高に比例する位相が含まれる。そのため初

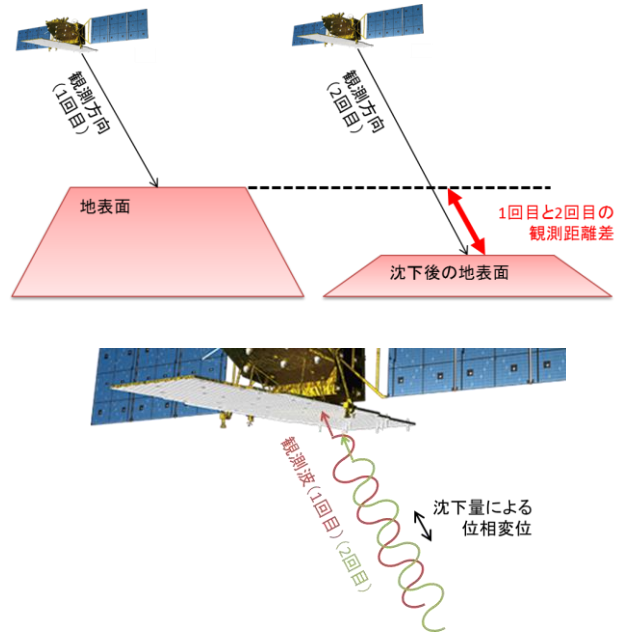


図-1 地表面の沈下前後における1回目の観測(左上図)と2回目の観測(右上図)の期間中の変動量の計測のイメージ図。また、その際の位相の変位量を示したもの(下図)

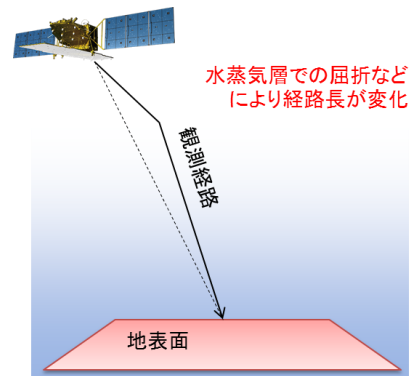


図-2 大気中の水蒸気遅延によりマイクロ波の伝搬経路が屈折するなどの現象が起こるため、経路長が変化する

期の処理として地表の大よその標高を除算しなければならないが、参照した標高データに誤差が多く含まれる場合は前後の位相差に誤差として反映される(標高誤差)。

- 衛星軌道情報の誤差により、衛星位置が計算上の値と異なるため、位相に誤差として含まれる(軌道誤差)。
- その他、センサのノイズや地表面の状態変化などによるランダムなノイズも生じる。

これらの誤差は時系列上にデータを拡張することで、後述するように誤差の大部分を低減することができる。代表的な時系列解析手法にPSInSAR⁵⁾ (Permanent Scatter Interferometry) やSBAS⁶⁾ (Small Baseline Subset), SqueeSAR⁷⁾ などがあり、本研究ではPSInSARに基づいてJAXAで改良

したアルゴリズムを解析に用いている。

以下、本研究で用いる手法の概略を示す。時系列解析では、たとえば大気遅延や軌道誤差が、狭い領域では一様、かつ変動量や標高誤差とは異なり観測時間や衛星間距離（後述のもの）に相関がない、とみなせる性質を利用する。具体的な手順として、まず同一の観測点を複数回観測した位相データを重ね合わせ、空間的に一致するよう幾何変換を行う。SARの観測データはグリッド（またはピクセル、ALOSでは10m）ごとに観測値が記録されており、空間的に近接したある二つのグリッドの位相（各々時間方向に複数の位相データであるベクトルデータを持つ）は、近似的に同一の大気経路や同一の軌道位置の条件下で観測されるものとみなされ、一方で一つのグリッドの中で時間方向には相関がない。そのため、二つのグリッドにおける位相ベクトルデータの差分ベクトルは、大気遅延や軌道誤差は十分小さく時間方向にランダムと見なし、それを踏まえて支配的である残りの2成分（変動量の時間係数である変動速度 v 、標高誤差 H_{error} の差分）と余剰項 n が線形和で表されるモデルから変動量を推定する。すなわち、観測値であるグリッド p と q における、一連の観測時間 $t = \{t_0, t_1, \dots, t_N\}$ の時系列における位相データ $\phi_p(t)$ 、 $\phi_q(t)$ について、

$$\begin{aligned} \phi_q(t) - \phi_p(t) &= \Delta v_{(qp)} F_1(t) + \Delta H_{error(qp)} F_2(B(t)) + n \quad (2) \end{aligned}$$

となるとき、 n が最小となる $\Delta v_{(qp)}$ と $\Delta H_{error(qp)}$ を推定する。ただし $F_1(t)$ と $F_2(B(t))$ は観測時に決まるパラメータであり（図-3）、観測時 t の衛星間距離の垂直成分 $B(t)$ 、衛星と観測対象の距離 R 、観測方向の入射角 θ を用いて、下記の通りとなる。

$$F_1(t_j) = \frac{4\pi}{\lambda} t_j \quad (3)$$

$$F_2(B(t_j)) = \frac{4\pi}{\lambda} \frac{B(t_j)}{R_j \sin(\theta_j)} \quad (4)$$

これらの手順を複数のグリッドの組み合わせで行い、基準となる箇所の変動量を0と仮決めすることで、周囲の相対的な変動量が算出できる。さらに線形でない変動であっても、 v の推定後に余剰項を時間方向に低周波な成分を抽出することで、非線形項が推定可能となっている。線形項・非線形項のいずれでも、これらの項は時系列データの少ない組み合わせでは、余剰の大気遅延・軌道誤差などに相関があると判断された推定誤差を含むが、時系列データ数を複数入力することで精度の高い推定が可能となる。

一方で推定された変動量に関して、図-4に示すように変動量は衛星の視線方向に観測されるため、厳密には視

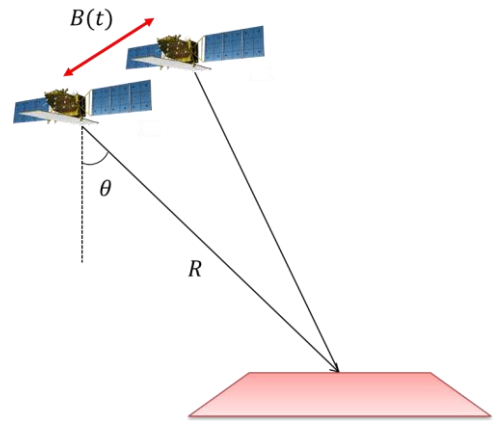


図-3 式(3)(4)におけるパラメータのイメージ図。二つの衛星位置はそれぞれ別の観測時期における位置を示す

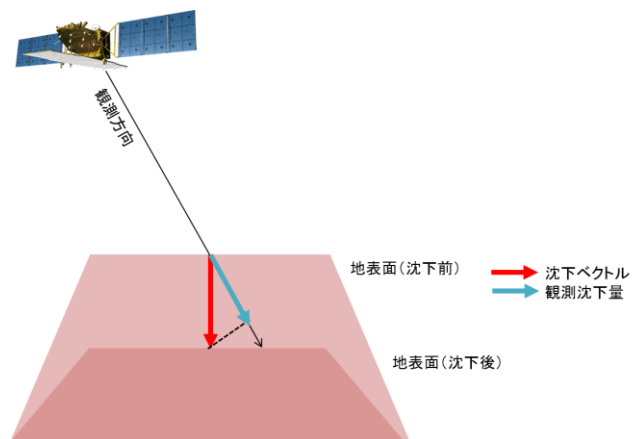


図-4 沈下量を衛星の観測方向から測った場合の値の違いのイメージ図

線方向の変動量には沈下ベクトルだけでなく水平方向の変動ベクトルが合成されるが、本研究では各々の観測値については鉛直方向以外の変動がないものと仮定して鉛直の変動量を算出している。

3. 検証

解析研究の対象として、本研究では定量的観点から関西国際空港の第一期島と、定性的観点から小名浜港臨海部におけるコンクリート水路擁壁の変動に着目して検証した。

(1) 関西国際空港一期島

関西空港の埋め立て地について一期島を対象にした解析を精度検証として行った。地上計測点の位置は図-5の通りとなっている。前処理として幾何変換を用いた画像の重ね合わせを行う必要があるが、これは建物などの観測信号が強い箇所でも精度よく行うことができるため、検証対象として一期島中央のターミナルビルを中心とした緯度経度±0.02度の赤枠の箇所を対象とした。これらは

web上で関西空港土地保有株式会社から公開されているものを用いている。対象の箇所は過去のALOS観測データにおいて、2006年10月～2010年10月の間に23回の観測を行っているが、そのうち解析が容易な同観測モードの13シーンをを用いて解析を行った。解析結果はSARの解析の特性上、相対的な変動量として表されるため、画像全体の変動量を0としたときの相対値を出している。結果は図-6に示す通りとなっている。現地で測量の行われた箇所について、変動量の空間分布の比較を目的として、観測期間の変動速度をALOS解析結果と同様のスケールで表している。この結果では、点で計測された現地の測量データによる変動速度の空間分布と、面的にALOSによって把握できる空間分布の傾向がよく一致していると考えられる。特に他の測量値に比べて著しく変動量が大きかったNo. 3の箇所も、ALOSの解析結果では値が大きくなっており、沈下の傾向が捉えられていると言える。また、この時の各地上計測点におけるALOS解析結果の時系列プロットを図-7に示した。

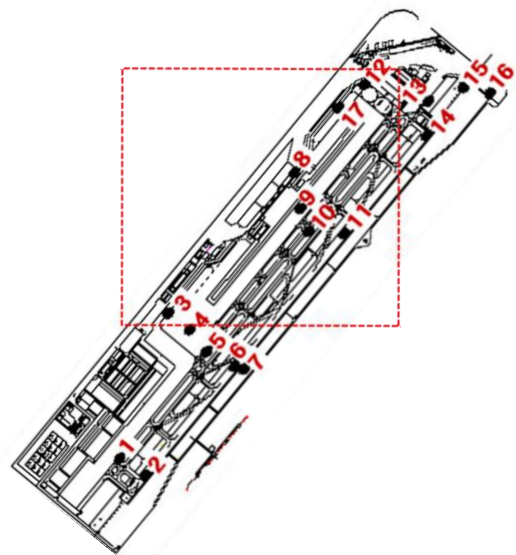


図-5 一期島における観測番号ごとの位置と、ALOS解析対象枠。No.9を中心に周囲の計測点を含めている

図-7の結果では、検証データとの比較を行うために一つの点を基準として他の変動量の結果を比較している(図は一例としてNo. 9を0とした場合)。また、ALOSでの個々の時系列プロットに関しては、現地の検証データが得られた箇所の周囲のグリッドのデータを4ピクセルを平均化処理している。これらの結果では、No. 11を除いて相対的な変動量の傾向が捉えられていることが判る。No. 11については正の方向(沈下が大き)に過大評価されているが、現地計測ではNo. 8～10と大きな変動差は確認できないため、ALOSの解析では誤差が十分に取除けなかった可能性がある。また一方で、今回の解析では水平方向の変動量はないものと仮定しているため、水平方向の移動成分が含まれている可能性も考えられる。使用した7つの計測点から基準となる点を入れ替えて交差検定的にRMSE (Root Mean Square Error) を算出したところ、11.5mmの値を得た。実利用面から検討すると十分な精度であると考えられる。

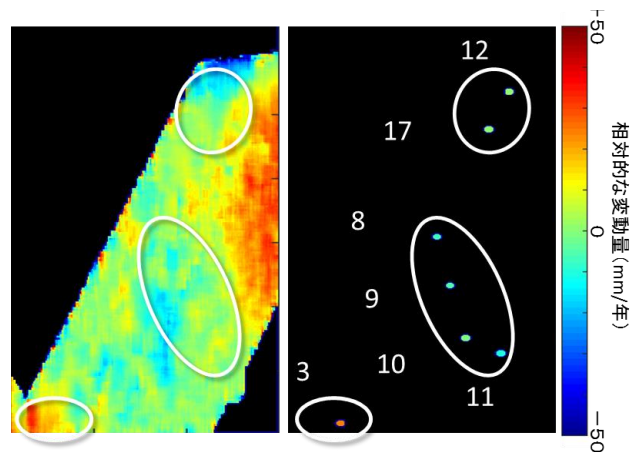


図-6 ALOSの計測結果(左図)と同位置における地上計測値(右図)を同じスケールで表示したもの。値が正であるところが沈下が大きく、負で小さくなる

(2) 小名浜港水路擁壁

小名浜港については2006年9月～2011年4月の21回観測が行われている。これらを活用して小名浜港湾一帯を解析(図-8)したうえで、相対的な変動量の解析結果で特に変状が大きかった水路の現地調査を行った。解析結果は図-8右図の通りであり、こちらは空間的な変動の分布を図示している。変動量の空間分布上で特に変動量の大きかった水路について調査を行ったところ、図-8左図のように、定性的ではあるが水路の壁面の傾斜と歩道の沈下が確認された。図-8の観測は東から西方向に行われるため、擁壁壁面の傾斜と地面の沈下はマイクロ波の伝搬経路の伸展に寄与する。そのため沈下が大きく出るとい

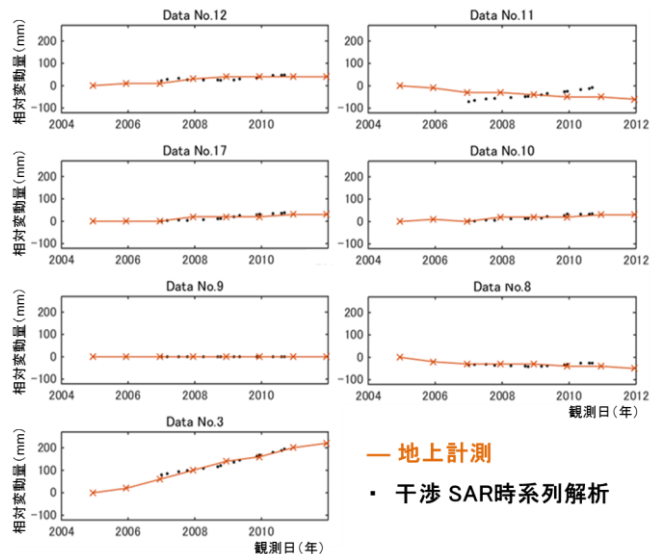


図-7 時系列プロットの比較。地上計測と解析結果ともに、No.9を基準に他の点の相対的な変動量をプロットしている

う結果になっているものと考えられる。また、この箇所については管理事務所から経年的に水路の変状が疑われていたとの報告を頂いており、変状をモニタリングした過去のデータや記録はない対象でありながら、ALOSで観測していた過去のデータに遡って解析が可能であった利用事例の一つと言える。

4. 結論

本研究では日本全国の観測を続けてきた JAXA の ALOS の計測データにより、空港埋立地盤や臨海部のコンクリート構造物に対してその変動を把握できるか検証した。解析手法として InSAR 解析を時間方向に拡張した時系列 InSAR 手法を用いて経年的な微小変化の変動量の高精度な観測を目的としている。現地での測量データとの比較として関西国際空港の一期島における計測データを用いて比較・検証を行った。定量的な評価として現地測量での沈下量データと衛星観測のデータを、一つの基準点からの相対的な変動量を計算した上で RMSE を計算することをを行った。正確な計算のため、交差検定的に基準点を全ての点で入れ替えつつ計算したところ、11.5mm との結果を得た。これはインフラの管理・メンテナンスの観点では十分な精度であると言える。また、変動量の空間分布での比較では、ALOS の結果では相対的な変動量の様子が面的に把握できることが判る。ただし No. 11 の測量点での傾向が乖離している点については、統計処理上の誤差除去が不完全であった可能性も含め、議論が残った。一方で小名浜港湾に対して解析を行った上で、とくに変動量が大きいとなった水路擁壁について

現地調査を行った。観測対象の擁壁は傾き、また土台の歩道も沈下していたため、マイクロ波の伝搬経路が長くなり、沈下と認識されたと考えられる。また、この箇所は管理事務所から経年的に水路の変状が疑われていたとの報告を頂いており、変状をモニタリングした過去のデータや記録はないものの、ALOS で観測していた過去のデータに遡って解析が可能であった利用事例の一つと言える。以上のように、本研究では精度面での解析値の検証と空間的な変動量分布の把握、また過去のデータに遡った場合の解析事例などが確認されたと考えられる。

謝辞：本研究は戦略的イノベーション創造プログラム (SIP) インフラ維持管理・更新・マネジメント技術/モニタリングシステムの現場実証/衛星及びソナーを利用した港湾施設のモニタリングシステムの構築の研究開発(管理法人NEDO)の助成を受けて実施された。また、関西空港の測量データは関西空港土地保有株式会社がweb上で公開している情報に基づいており、原初データは同社に帰属する。

参考文献

- 1) Kobayashi, T : The 2011 Tohoku Earthquake and the Related Disasters Observed by InSAR Using ALOS / PALSAR: Mainshock , Induced Inland Earthquakes , and Liquefaction, *Synth. Aperture Radar (APSAR), 2013 Asia-Pacific Conf.* pp.540-543, 2013.
- 2) 鈴木啓, 雨貝知美, 森下遊, 佐藤浩小荒井衛 : 山形県月山周辺における SAR 干渉画像を用いた地すべりの検出 Landslides Movement Detection Using SAR Interferometry Image in Mt . Gassan Area , Yamagata Prefecture, *国土地理院時報* 120, pp.1-7, 2010.
- 3) Shimada, M., Watanabe, M. and Motooka, T.: Subsidence Estimation of

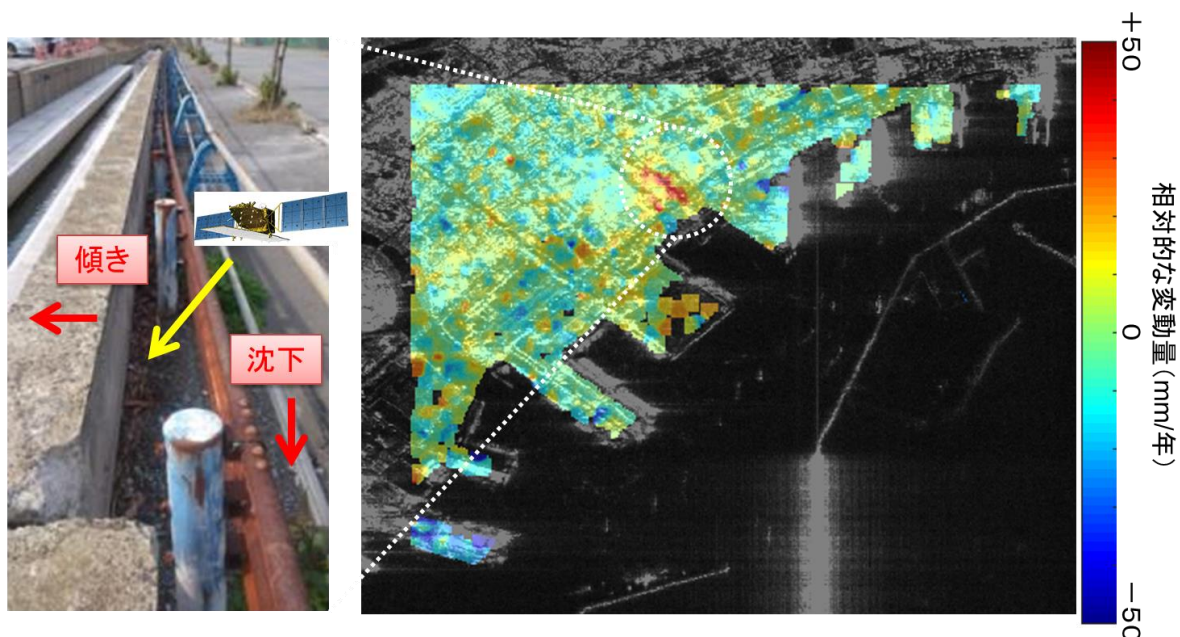


図-8 小名浜港湾における変動量解析結果(右図)と特に変動量が大きかった箇所の現地写真(左図、衛星観測方向を矢印で示している)。用水路の壁の傾きと歩道面の沈下が確認された

- the Peatland Forest in the Central Kalimantan Using the Palsar Time Series, *Geosci. Remote Sens. Symp. (IGARSS), 2013 IEEE Int.* pp.1846–1849, 2013.
- 4) Honda, K. Nakanishi, T. Haraguchi, M. Mushiake, N. Iwasaki, T. Satoh, H. Kobori, T. and Yamaguchi, Y.: Application of exterior deformation monitoring of dams by DInSAR analysis using ALOS PALSAR, *Geosci. Remote Sens. Symp. (IGARSS), 2012 IEEE Int.* pp.6649–6652 2012.
 - 5) Ferretti, A., Prati, C. and Rocca, F.: Permanent scatterers in SAR interferometry, *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.* 39, pp.8–20, 2001.
 - 6) Berardino, P., Fornaro, G., Lanari, R. and Sansosti, E.: A new algorithm for surface deformation monitoring based on small baseline differential SAR interferograms, *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.* Vol.40, pp.2375–2383, 2002.
 - 7) Ferretti, A., Fumagalli, A., Novati, F., Prati, C., Rocca, F. and Rucci, A.: A New Algorithm for Processing Interferometric Data-Stacks: SqueeSAR, *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.* Vol.49, pp.3460–3470, 2011.
- (2016. 3. 16 受付)

DEFORMATION MEASUREMENT OF HARBOR FACILITIES WITH SATELLITE-BORNE INSAR ANALYSIS

Takuma ANAHARA, Ryo NATSUAKI, Tuyoshi KOTOURA, Yuudai IWATSUKA,
Yoshinobu SASAKI, Naoya TOMII, Yuuji MAEDA and Takeshi NISHIHATA

We evaluated the application of time-series InSAR analysis for the deformation on a reclaimed land of airport and a concrete structures in a harbor area by use of ALOS data. ALOS has capability of 3 to 4 times observation in a year throughout Japan, 10m resolution, measurement in 50 to 70 km square area for less than a minute. The time-series InSAR analysis of ALOS repeatedly measures targets on the ground as ‘surface’ not as ‘point’ like GPS without setting receivers. Furthermore, it enables to acquire information about past deformation even when we have not recorded it, with the analysis of the observed ALOS data. These advantages are useful for the monitoring use if its accuracy has been demonstrated. In this paper, measurement data in Kansai international airport are used for accuracy assessment and a case on an irrigation channel in Onahama harbor is analyzed.