

# 合成開口レーダー干渉解析を利用した 災害時の港湾被害の検出

夏秋 嶺<sup>1</sup>・穴原 琢摩<sup>1</sup>・琴浦 毅<sup>2</sup>・岩塚 雄大<sup>3</sup>・  
富井 直弥<sup>4</sup>・片山 裕之<sup>3</sup>・西畑 剛<sup>2</sup>

<sup>1</sup> (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: natsuaki.ryo@jaxa.jp

<sup>2</sup> 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)

<sup>3</sup> 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)

<sup>4</sup> (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)

衛星搭載型合成開口レーダー(SAR)は、天候に左右されずに数十キロ四方の広範囲に位置する観測対象を一度に観測できる強みを持つ。SAR 画像の干渉解析は、二回の観測の間に生じた地盤高の変動を数センチ単位で計測できる性能を持ち、これまで地殻変動や被災域の検知を目的として研究されてきた。著者らは、陸域観測技術衛星「だいち2号」(ALOS-2) を利用し、SAR 干渉解析による災害時の港湾の被害状況を迅速に把握するべく研究を進めている。本稿では、港湾施設を模した消波ブロック列を用い、干渉解析の適用可能性を検討し、標準偏差で約 2 cm の精度を得たほか、平成 26 年台風第 11 号により被災した兵庫県神戸市の長田港および須磨港の防波堤の被災領域の検出を試みた結果についても報告する。

**Key Words :** *synthetic aperture radar, interferometry, disaster monitoring*

## 1. はじめに

合成開口レーダー (Synthetic Aperture Radar: SAR) を利用した干渉解析 (干渉合成開口レーダー Interferometric Synthetic Aperture Radar: InSAR) による地殻変動の計測は、21 世紀に入り飛躍的に進歩した。これは、電子機器の性能向上にともなう軌道制御やレーダーの信号雑音比の改善、分解能の向上により、より狭い範囲の微小な信号を捉えることが可能となったためである。レーダーによる観測は、光学観測に対して、天候に左右されない点や干渉解析を行うことで地盤高の変位を数 cm から、詳細な時系列解析を行えば数 mm の精度で捉えられる点で優位である。また、衛星による観測は通常、東西数十 km の幅で観測可能であり、広範囲の変動を一度に観測できる点で航空機や地上の計測に対し優位性を持つ。また、一般的な測量に対しては観測後数時間で変動量を算出できる速報性で、また GPS による連続観測に対しては数メートルという空間分解能で優位に立つ。

陸域観測技術衛星「だいち2号」(ALOS-2) は、2014 年 5 月に打ち上げられた日本の衛星であり、空間分解能約 3 m を持つ<sup>1)</sup>。だいち2号は打ち上げ以来、干渉解析を利用してネパール地震や口永良部島、箱根山といった地震や火山に起因する地殻変動や被災域の把握で成果を挙げ

てきた。この技術を港湾における台風等の自然災害による変状の把握に応用することが本研究の目的である。

本稿では、まず干渉合成開口レーダーの原理について概略を説明し、精度検証を目的とした消波ブロック列による模擬港湾構造物の上下動の計測実験に加え、平成 26 年台風第 11 号により被災した兵庫県神戸市の長田港および須磨港の防波堤を事例として、被災領域の抽出の実験結果について報告する。

## 2. 干渉合成開口レーダー

本章では、合成開口レーダー (SAR) を利用した干渉解析について概略を述べる。

### (1) 合成開口レーダー

合成開口レーダーは、航空機や人工衛星といった、十分なアンテナ径を確保できない機材にレーダーを搭載するために開発された観測方式である。アンテナ自身を機材とともに移動させ、受信データを計算により合成することで、より大きなアンテナと同等の空間分解能を確保することができる。

このような SAR は、衛星搭載型の場合は高度約 800

km の上空から数メートル程度の地上分解能を持つ。陸域観測技術衛星「だいち2号」(ALOS-2) の場合は、日本国内では約3 m, 国外では10 m の分解能のモードを基本として観測している。本稿では衛星搭載型SARの干渉解析を例としているが、原理は航空機搭載型でも同じとみなせる。

## (2) 合成開口レーダーの干渉解析による変動計測

SARによる観測データには、光学写真の輝度値にあたる振幅だけでなく、位相の情報も含まれている。そこで、二回の観測で受信したレーダー画像の位相差を計算することで、干渉画像を作成することができる<sup>2)</sup>。この干渉画像には標高や地盤高の変動に対応する成分が重畳されている。地盤高の変動を抽出する場合は、同一箇所から時間をおいて二回観測したデータの干渉計測が理想である。しかし、実際には移動する衛星から時間を経て観測しているため、二回の観測時に同一カ所から観測できず、位置のずれが無視できなくなる。すなわち、観測位置のずれから地形に応じて電波伝搬距離が変わるほか、電離層や水蒸気量の時間的な変化に伴う電波伝搬経路への影響が干渉画像に含まれてしまう。そこで、これら変動以外の成分を除くことで地盤高の変化を計測できるようにする。一般には、地形の影響は事前の測量データから推定することで除去し、電離層や水蒸気量に関しては観測対象が数キロ程度の範囲であれば無視するほか、広範囲の観測や山岳地の観測では気象や地形のデータを利用して事前推定することとなる。本稿では、地形の影響は国土地理院の10 m メッシュ数値標高データを利用して除去し、電離層及び水蒸気量は計測範囲が狭いことから無視した。以下では、地盤高の変動以外の成分については除去されているものとして論じるほか、垂直方向の変位のみが存在すると仮定する。

図-1 に地盤高の変位計測の模式図を示す。地盤の変動前後の SAR データに干渉処理を施すと、衛星と地表面間の距離の変化に応じた位相値が得られる。その位相値は、標高の視線方向の変化 $\Delta R$  と電波の波長 $\lambda$ にのみ依存し、式(1)のようになる。

$$\theta_{defo} = \frac{4\pi}{\lambda} \Delta R \quad (1)$$

すなわち、電波が $\Delta R$  の距離を往復する時間差が位相 $\theta_{defo}$ として干渉画像中に現れる。この位相値 $\theta_{defo}$ は、 $-\pi$ から $\pi$ の値しか持たない。すなわち、2分の1波長以上の変動が起きる場合は $2n\pi$ の不確定性を持つ。ALOS-2が使用している電波の波長は約24 cmであるため、 $\Delta R=0, \pm 12, \pm 24\dots$ の時はいずれも $\theta_{defo}=0$ となる。地震などの地殻変動では、地盤の変動域から十分遠い領域に変動量0を仮定し、干渉画像の隣接するピクセル同士

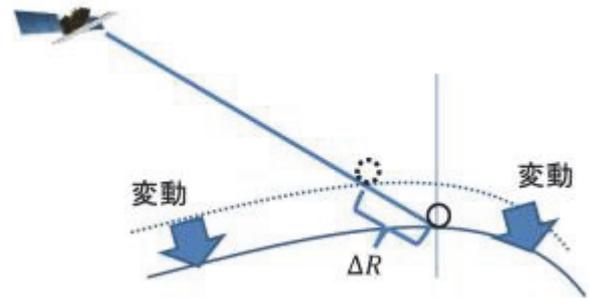


図-1 SAR 干渉解析の模式図。散乱源の移動(破線)を電波伝搬距離の差 $\Delta R$ として計測する

の位相差を積分することによってある地点の変動量の値を算出する。したがって、仮に隣り合うピクセル間で視線方向の変化が4分の1波長以上生じてしまうと、サンプリング定理を満たさなくなるため、位相に $2\pi$ の不定値が入ってしまい、変動を定量できなくなる。例えば、地震の地殻変動を捉える際には、断層付近で大きな変位が生じてしまい、定量が困難となる場合がある。

ALOS-2 の場合、使用している電波の波長は約24 cmであるのに対し、空間分解能が最大3 mであるため、3 m 格子の隣同士のピクセル間で6 cm 以上の変位があると、隣接ピクセル間での位相差を定量できなくなる。

なお SAR はその特性により直下の観測ができないため、斜めの視線方向の変化しか得ることができない。仮に地表面が三次元的に変動している場合は、複数方向から観測することで推定するか、本稿のように鉛直一方向のみの変位であることを仮定する。

## (3) 干渉度を利用した解析

大規模な災害が発生すると、地表面の状態が大きく変化し、電波の散乱特性自体が変化してしまう場合がある。このような場合は、干渉画像の位相値が空間的に大きくばらつき、変動を定量化することができなくなる。このような位相値のばらつきの大きさを干渉度として評価する。干渉度が高いとは、二回の観測の間で地表面の状態変化が小さく電波の散乱源が安定して存在していることを意味するため、干渉度の高低はそれ自体が意味を持つ。仮に隣接ピクセル間の位相差が大きく、位相差を利用して定量的な変動量を求められなかったとしても、この干渉度を指標として被害域の推定が可能となる。

二回の観測データのうち一方を master, もう片方を slave と呼び、それぞれの標本を  $M, S$  と表すと、干渉度の値 $\gamma$ は式(2)のように求まる。

$$\gamma = \frac{\langle M * S \rangle}{\sqrt{\langle M * M \rangle} \sqrt{\langle S * S \rangle}} \quad (2)$$

式(2)において、 $M * \bar{M}$  はM同士の複素共役積を意味し、 $\langle \rangle$  は平均を表す。すなわち、 $M$ と $S$ の複素共役積の平均を、 $M$ 、 $S$ 同士の複素共役積で除して規格化した値といえる。この $\gamma$ を干渉度、あるいはコヒーレンス値と呼び、0から1の値を持つ。 $\gamma=1$ は通常、 $M=S$ のときのみ生じる。

InSARの場合、建物のように永続的に変動の小さい散乱源は0.7~0.8程度の高い干渉度を長期的に示す。これに対して、特に裸地やコンクリートのケーソンのように表面が平滑な領域は、0.3以下の低い値を示す。災害発生前の二回の観測と災害発生前後の観測で干渉度の値に差が生じることを利用した三時期コヒーレンス解析などが、災害情報抽出に活用されている<sup>3)</sup>。今回は $\gamma < 0.4$ となる領域を干渉度が低いとみなし解析から除いた。

### 3. 模擬港湾構造物による精度検証

#### (1) 消波ブロックを利用した模擬港湾構造物

港湾施設の中でも消波ブロックのような構造物は、大きさや形状がレーダーにとって十分明るい散乱源とは限らない。そこで、消波ブロック列を模擬港湾構造物として設置し、ジャッキアップによる人工的な地盤高の変位を対象に干渉解析を行い、垂直変位量の計測精度を検証した。

図-2に垂直変動させる消波ブロック列を示す。2トン型の消波ブロックを2×2mのコンクリート平板上に設置し、これをジャッキベース上に5×5列に並べ、模擬港湾構造物とした。地盤高を変位させる場合は、一度コンクリート平板ごと消波ブロックを撤去し、ジャッキベースを調整したうえで消波ブロックを再設置する。だいち2号の観測スケジュールに合わせ、地盤高を変動させることで、干渉解析の計測精度を検証する。模擬港湾構造物は全体として10×10mの規模となるため、約3mのだいち2号の空間分解能では3×3格子程度となるが、実際には格子点の切り出しの位置によって数ピクセル程度変化する。この模擬港湾構造物を、だいち2号の観測ス



図-2 垂直変動させる消波ブロック列 (模擬港湾構造物)

ケジュールに合わせ、2015年10月9日から24日、2016年1月15日から25日の2回、それぞれ2cmずつジャッキアップし、ジャッキアップ前後の観測データから干渉画像を作成し、変動量を正しく計測できているかを検証した。

#### (2) 計測結果

だいち2号は、約90分で地球を一周する間に世界を観測しているが、観測できる範囲は地球が自転しているために周回ごとに異なる。そのため地球上の同じ地点を宇宙空間の同じ地点(軌道)から観測できる機会は14日に一度の回帰でしか訪れない。干渉解析は同一軌道からの観測データ同士で行えない。ただし、実際にはだいち2号は同じ軌道に到達しても観測範囲の制約により地球上の別の地点を観測するよう設定されているため、実際の同一地点に対する同一軌道からの観測頻度は概ね3か月に一度程度となる。なお、発災時などの緊急観測時は24時間以内の観測が可能である。

今回設置した模擬港湾構造物を観測できるのは、軌道番号18, 124, 125と呼ばれる3軌道であった。図-3に模擬港湾構造物を観測した実際の干渉画像の例を示す。

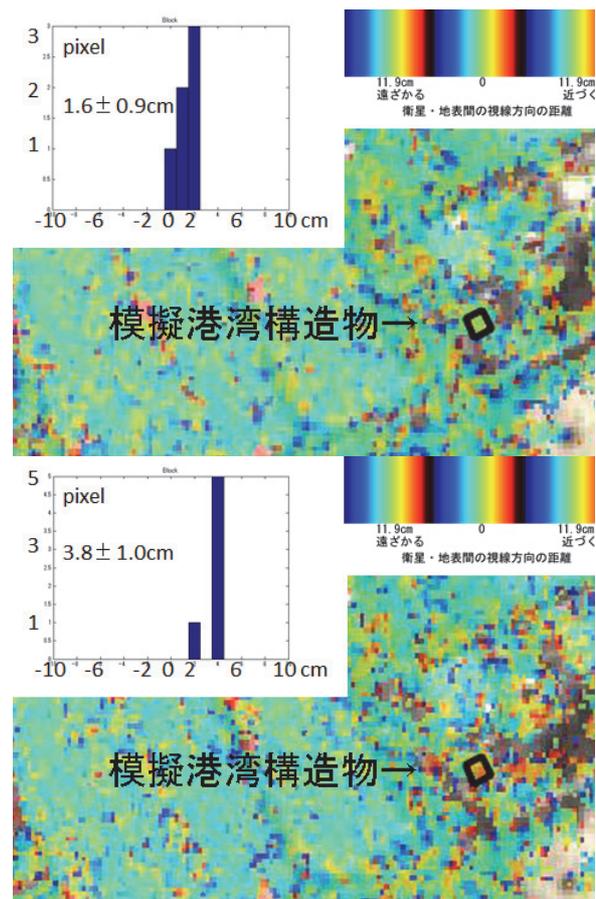


図-3 軌道番号18より模擬港湾構造物を観測した干渉画像。上:2015年10月8日から12月31日にかけての変位。下:2015年10月8日から2016年2月11日にかけての変位

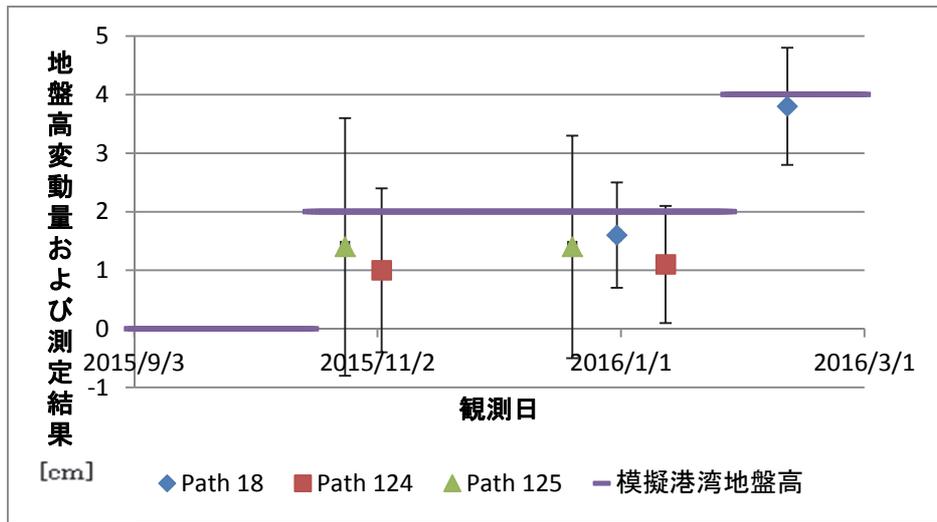


図-4 模擬港湾構造物の地盤高の変動量と各軌道ごとの計測結果

図-3 では軌道番号 18 の観測データを用い、10 月 8 日から 12 月 31 日にかけて、および 10 月 8 日から 2 月 11 日にかけての地盤高の変位量を示している。図中の黒四角が模擬港湾構造物に対応する。本稿では垂直変動のみを仮定し、水平方向の変動はゼロとみなしている。図-3 の干渉画像では、緑色を変位 0 とし、赤に近づくほど地盤が隆起した、青に近づくほど地盤が沈降した結果を示す。ただし、図中では干渉度が低い領域は背景の地面を透過するようにしている。

この軌道からは模擬港湾構造物に対応するピクセルが 2 × 3 の 6 ピクセルから得られ、それぞれの地盤高の変位量は  $1.6 \pm 0.9$  cm,  $3.8 \pm 1.0$  cm であった。ただし、±以下の値は標準偏差 (1σ) を表す。図-3 左上に、横軸に変位量、縦軸に対応するピクセル数となるようヒストグラムを示す。この間、模擬港湾構造はそれぞれ 10 月 8 日に比べ +2 cm, +4 cm の地盤高であった。

軌道番号 124 および 125 の結果も含め、地盤高および干渉解析による計測結果を図-4 に示す。軌道番号 124 および 125 は 18 に比べやや標準偏差の値が大きいものの、いずれも 2 cm の地盤高の変位に対応した値を示している。もっとも標準偏差が大きかったのは軌道 125 の 2.2 cm であった。これは電離層や妨害波といった外乱成分の寄与により干渉度が低下していることが原因と考えられるが、今後はさらに観測回数を増やすことで軌道あるいは観測時期固有の問題か否かを検討する予定である。

#### 4. 平成 26 年台風第 11 号による長田港・須磨港の被害検知

SAR 干渉解析による実港湾被害の検証として、平成 26 年台風第 11 号による長田港および須磨港の被災を対

象に解析結果を行った。両港とも同台風により大阪湾に面する防波堤の消波ブロックが被災し、台風通過後の現地測量によれば、被災前後の断面の変動量は 1m を上回り、計画高さを下回っていた。図-5 に神戸港の全体と長田港、須磨港の位置を示す。

SAR 干渉解析は 7 月 25 日、10 月 5 日および 11 月 30 日の観測データを用いて位相値と干渉度による計測をおこなった。前述した干渉度の解析では、発災前の二時期の干渉画像と、発災前後のデータを使った干渉画像の干渉度の比較を行う必要があるが、だいち 2 号の発災前の観測データが一つしか存在しなかったため、変則的に発災後の二時期と発災前一時期のデータを利用した。干渉度による被災判定では、発災前後の干渉度が発災後に比べ 0.2 より下回った部分を被災域として判定し赤色で着色した。また、継続的に干渉度が高い領域を健全と判定し緑色で着色した。なお、SAR 観測時間の潮位を考慮すると消波ブロックは防波堤前面から 10m 程度干出していたと想定され、空間解像度 3m を考慮すると 3 格子程度に相当する。



図-5 長田港、須磨港の位置図

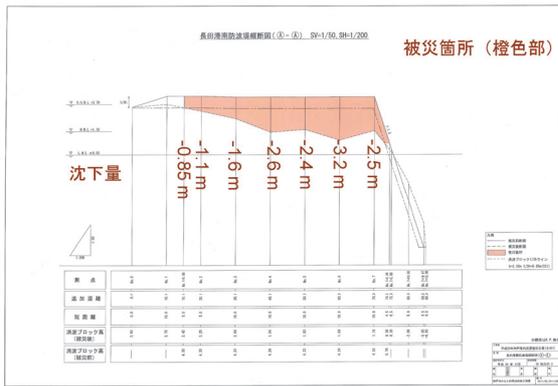


図-6 長田港南防波堤縦断図および平面図. 橙色で塗られた部分が被災部分を示す

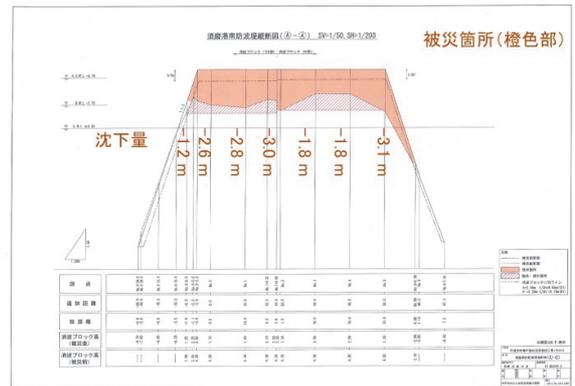


図-8 須磨港南防波堤縦断図および平面図. 橙色で塗られた部分が被災部分を示す

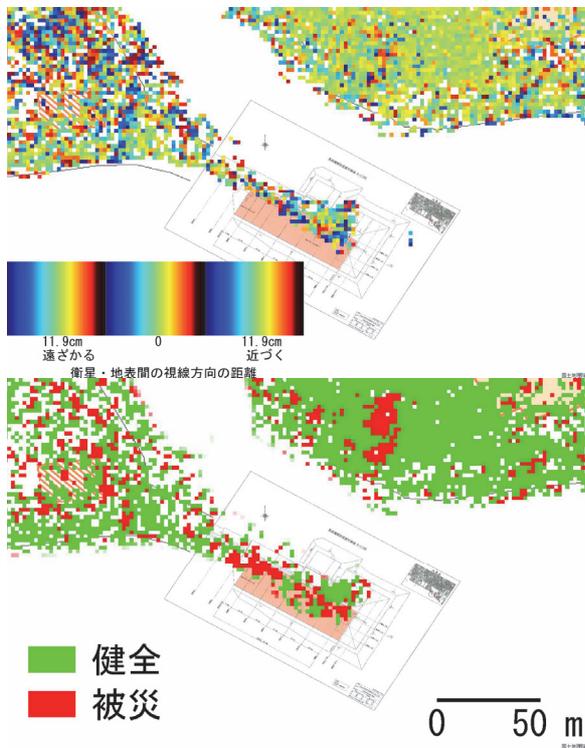


図-7 長田港南防波堤干渉画像（上）および被災判定画像（下）. 干渉画像の位相値からは変動量を定量できないが、干渉度の変化量から防波堤先端部の被害が大きい

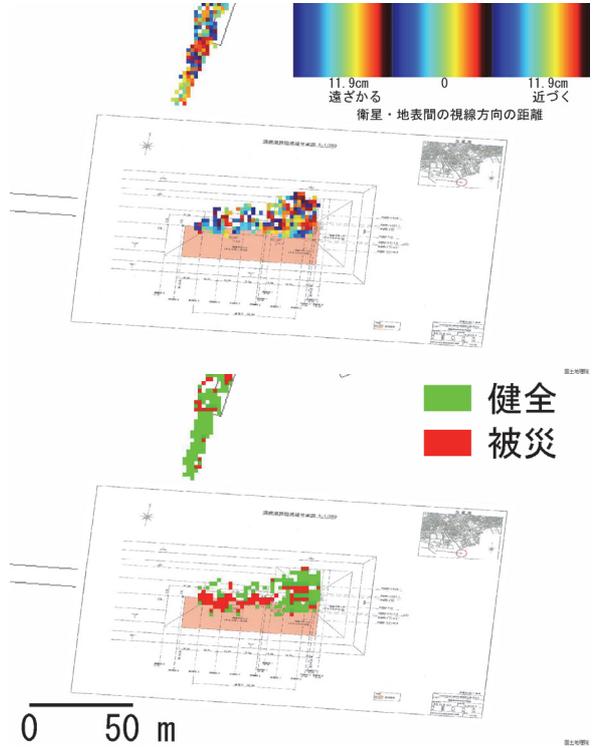


図-9 須磨港南防波堤干渉画像（上）および被災判定画像（下）. 干渉画像の位相値からは変動量を定量できないが、干渉度の変化から防波堤南側が被災したとわかる

## (1) 長田港

長田港では、南防波堤の消波ブロックが被災した。図-6に平面図および側面図を示す。橙色で塗られている部分が被災前後の断面の差である。被災時には根元付近の最小で-0.85 m, 最大で-3.2 m 程度の高さ変化が、延長約 60 m にわたって生じていた。ここでいう高さ変化とは消波ブロックの垂直方向の変動だけではなく、転動して水没したために断面形状が変化した分も含めている。

図-7に長田港の干渉画像と被災判定画像を示す。合成開口レーダーでは海面部は検出されないため背景の地図が透過され白色となっている。また、干渉画像の位相値はばらつきが大きく変動量を定量できなかった。しかし、被災判定画像によれば、南防波堤の陸側の被災していない消波ブロックに比べ被災と判定された領域が広く、この領域で大規模な変動が生じたと考えられる。これは、測量により実際に被災した消波ブロックの範囲と概略一致する。なお、消波ブロック以外の内陸部にも被災と判定された箇所があるが、一般に内陸部では人間の活動(車両や資器材といったレーダー散乱源の移動)や季節変化による植生の変化に伴い干渉度の低下が生じるため、これらを被災と判定したものと考えられる。こういった災害によらない干渉度の低下の除外を実用上は除外する必要があり、今後の課題といえる。

## (2) 須磨港

須磨港でも同様の解析を行った。図-8に須磨港南防波堤の東端の縦断面図および平面図を示す。消波ブロックは南防波堤を構成するケーソンの東西両端を保護するために構築されたものであり、西端の消波ブロックに変位はなかったものの、東端については -1.2 m から -3.1 m の断面変化が生じていた。図-9に同港の干渉画像と被災判定画像を示す。長田港の事例と同様、こちらも干渉画像は位相値のばらつきが大きく変動量を定量できなかった。しかし、被災判定画像によれば、より陸側の被災してい

ない消波ブロックに比べ被災と判定された領域が広く、この領域で大規模な変動が生じたと考えられる。こちらも、測量により実際に被災した消波ブロックの範囲と概略一致する。

## 5. おわりに

本稿では、SAR 干渉解析の港湾への適用可能性について検討をした。消波ブロック列を用いた模擬港湾構造物では、だいち2号のデータを用いて 2cm 程度の精度で変動を計測できることを検証した。また、兵庫県の長田港、須磨港の台風被害の解析を行った結果、課題はあるものの合成開口レーダー干渉解析を用いた港湾施設被害推定への適用性が確認された。

**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ました。長田港、須磨港の測量データは神戸市みなと総局より提供を受けたものであり、原初データは同局に帰属します。

## 参考文献

- 1) Kankaku Y. et al., 2014, "PALSAR-2 Launch and Early Orbit Status" Proc. of IEEE Geoscience and Remote Sensing Symposium 2014, pp. 3410 - 3412, 2014.
- 2) 大内和夫：合成開口レーダの基礎, pp. 227-232, 東京電機大学出版局, 2004.
- 3) Plank, S. : Rapid damage assessment by means of multi-temporal SAR - a comprehensive review and outlook to Sentinel-1, Remote Sensing, Vol. 6, pp. 4870-4906, 2014.

(2016.2.4 受付)

## PRELIMINARY EXPERIMENT FOR DISASTER MONITORING IN HARBOR USING SYNTHETIC APERTURE RADAR INTERFEROMETRY

Ryo NATSUAKI, Takuma ANAHARA, Tsuyoshi KOTOURA, Yuudai IWATSUKA, Naoya TOMII, Hiroyuki KATAYAMA, Takeshi NISHIHATA

The Advanced Land Observing Satellite-2 (ALOS-2, "DAICHI-2") operated by Japan Aerospace Exploration Agency (JAXA). The ALOS-2 carries the Phased Array type L-band Synthetic Aperture Radar-2 (PALSAR-2). The PALSAR-2 can observe the disaster affected area day and night in any weather with its high power and high resolution Synthetic Aperture Radar (SAR). In this paper, we report some preliminary experiments of the disaster monitoring in harbor based on Synthetic Aperture Radar Interferometry (InSAR). In order to evaluate the usefulness of the InSAR, we measured the uplift of a working model made of concrete armor units and confirmed its accuracy can be better than 2 cm in standard deviation. We also analyzed the damages in Nagata and Suma ports Kobe prefecture hit by the 11th Typhoon in 2014, and detected the damaged area with interferometric coherence analysis.