

## 衛星SARによる構造物の変位監視技術 ～フィルダムを事例として～

佐藤弘行・小堀俊秀・榎村康史・山口嘉一・岩崎智治・虫明成生・本田謙一

### 1. 研究の背景と目的

近年、東日本大震災など、国内外において大きな人的被害を伴う大規模災害が頻発している。今後の発生が懸念されている東海・東南海地震等の巨大地震では、津波による被害とともに構造物の大規模な被害も想定されている。

大規模災害時には構造物の変状を早期に把握することが迅速な被害把握および復旧計画のために必要となるが、場合によっては調査対象に簡単に近づけないことがある。このため、大規模地震時などにおいて構造物の変状を広域かつ迅速に検知できるモニタリング技術が、防災・減災において必要な技術となる。

また、日本国内ではインフラの老朽化が急速に進行しており、多数の構造物から、詳細な点検・調査を実施すべき対象を広域から絞ることが可能となる技術の開発が求められている。

そこで本報文では、人工衛星に搭載された合成開口レーダ (SAR、Synthetic Aperture Radar) により取得されるデータの領域が広域であること、かつ災害時にもデータが安定的に取得されることを利用し、大規模地震等の災害や老朽化に伴う構造物の変状を広域的・高精度・迅速に検知することが可能な新たなモニタリング手法を開発するための研究を紹介する。また、これまでに著者らが実施してきた衛星SARによるフィルダムの変位量についての研究成果を紹介する。

### 2. 衛星SARについて

図-1に衛星SARの原理の概念図を示す。衛星SARは、概念的には、軌道上に仮想的なアンテナをいくつも並べたものである。つまり、軌道を移動中に連続的にレーダの送信を行ない、地表面等から反射した電波を受信し、受信したデータを信号処理することによって、分解能を向上している。衛星

SARは、小さな開口面 (レーダアンテナの直径) により得られたデータを、信号処理により合成して、大きな開口面により得られる高解像度なデータと等価なデータを実現することが可能な方法である。通常、高解像度のデータを得るためには大きな開口面を有する巨大なパラボラアンテナのような観測機器が必要であるが、宇宙空間に巨大な観測機器を打ち上げることは不可能なため、このような衛星SARの技術が必要となる。

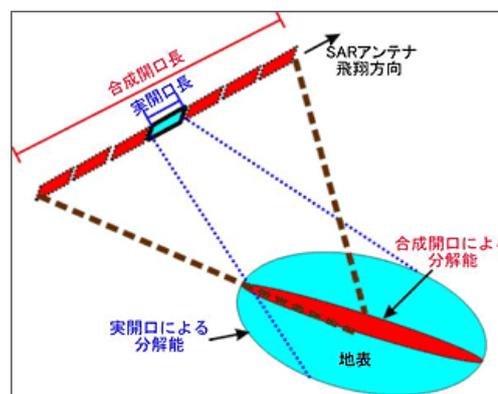


図-1 SARの概念図<sup>1)</sup>

衛星SARの主な特徴は以下の通りである。

- 衛星SARは発信した電波を自ら受信する装置であるため、夜間の観測が可能であり、また基本的に地上の観測設備が不要である。
- 図-2は、3章での検討に使用した衛星SARのデータの1シーンであるが、沖縄県北東部の領域をカバーしており、観測される領域が広いことが特徴である。
- 雨や雲を透過してデータが得られる。
- 人工衛星により得られるデータのため、定期的にデータが取得されるとともに、大規模地震等の災害時においても安定的にデータが取得される。
- 測量やGPSのように点のデータではなく、面的なデータが得られる。

衛星SARにより得られるデータは、①反射強度および②位相、の2つである。図-3に、衛星SARにより地表面等の変位を計測する手法の概念を示す。衛星SARで使用されるレーダの波長は決まってい

るので、2時期の地表面等の変位に伴うわずかな位相差を衛星SARにより検出することができれば、地表面等の変位量を算出することができる。図-3のように、2時期の位相差により地表面等の変位量を求める手法をInSAR（Interferometric SAR、干渉SAR<sup>\*</sup>）と呼ぶ。InSARによる変位計測の理論的な精度はミリメートルと言われている<sup>1)</sup>。しかし、気象条件や衛星軌道のずれ等の影響により、InSARの精度は一般的には数センチメートルと考えられている<sup>1)</sup>。

衛星SARは、これまで、地震による地表面の変位を計測することにより断層の動きを推定<sup>2)</sup>、火山の変位から地下のマグマの動きを推定<sup>3)</sup>、地盤沈下や地すべりを計測<sup>4)</sup>するなど、主に比較的広域な災害の変位計測に大きな貢献をしてきた。本研究は、これまでほとんど検討が行われていないダムのような人工構造物を対象として、衛星SARによる構造物の変位のモニタリング技術の開発を行うものである。

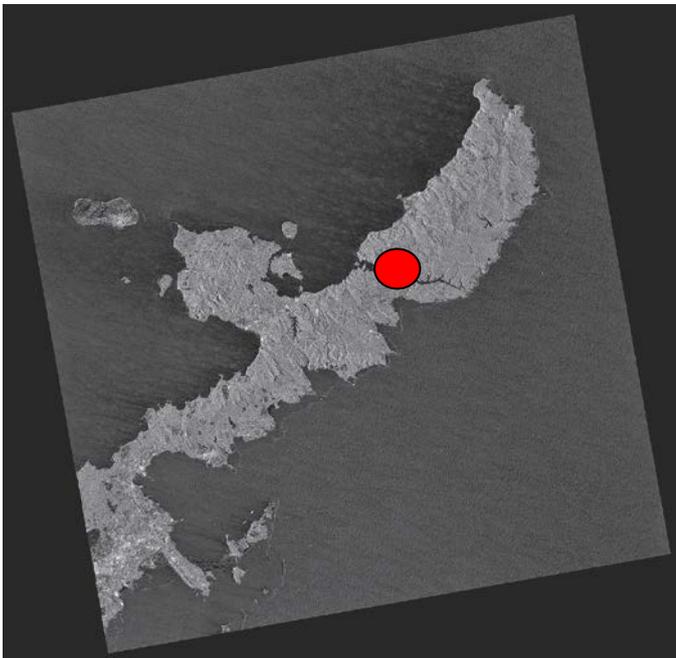


図-2 衛星 SAR データ 1 シーン の例

### 3. フィルダムを事例とした衛星SARによる変位モニタリング

本研究では、2006（平成 18）年 1 月から 2011（平成 23）年 5 月まで運用されていた「だいち（ALOS）」により観測されたデータを使用した。「だいち（ALOS）」の解像度は 10m である。

検討対象ダムは、図-2 の赤丸で示した位置にあり、2006（平成 18）年 10 月に盛立工事が終了した大保脇ダム（堤高 66m、堤頂長 445m）とした。大保脇ダムは中央コア型ロックフィルダムで、図-4 に標準断面図を示す。また、大保脇ダムの空中写真を図-5 に示す。

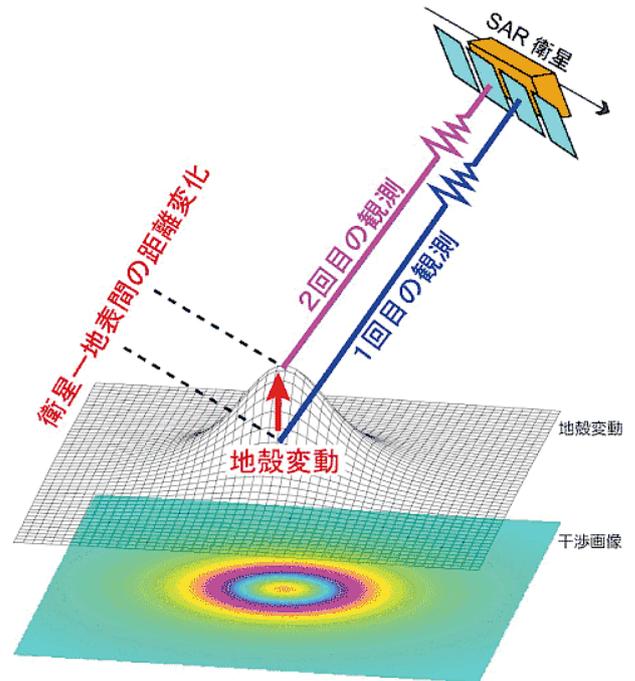


図-3 InSAR の概念図<sup>1)</sup>

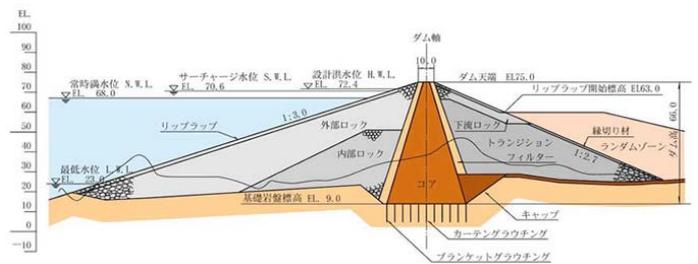


図-4 大保脇ダム標準断面図

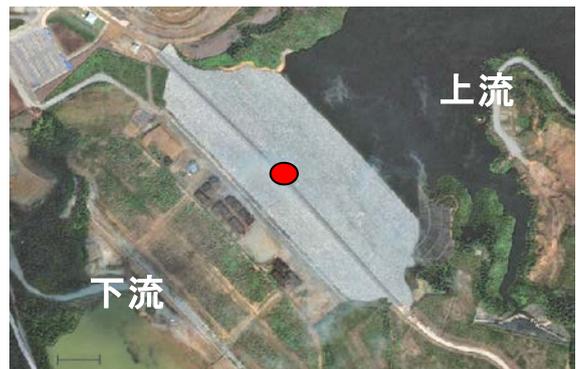


図-5 大保脇ダムの空中写真（Googleより）

<sup>\*</sup>土木用語解説：干渉SAR

ダムは、河川管理施設等構造令<sup>5)</sup>により定期的に変位量を計測することが義務付けられているが、大保脇ダムにおいては堤体の24箇所にGPSを設置し、詳細に変位量を計測している。

大保脇ダムの盛立工事が終了した約3か月後の2007年1月12日に得られた衛星SARデータを比較対象として、それ以降の13時期の衛星SARデータを用いて、InSARにより13時期のダムの変位量を求めた。図-6にその結果を示す。

図-6を見ると、2007年1月12日から時間が経過するにつれて、赤い領域が大きくなっている。この赤い領域は、衛星から遠ざかる方向に堤体の変位して

いる、つまり堤体が沈下していることを表している。フィルダムは土や岩石を締固めて築造されるため、盛立完成直後からしばらくの間は沈下する傾向があるが、衛星SARによる変位モニタリングにより、大保脇ダムの沈下傾向を定性的かつ面的に評価することができた。

図-5の大保脇ダムの空中写真に示した赤丸の位置における、GPSとInSARによる変位量の計測結果の比較を図-7に示す。2011年1月23日のGPSとInSARの変位量には2cm程度の差があるが、GPSとInSARによる変位計測結果はともに堤体の沈下を定性的にとらえている。InSARによる変位計測

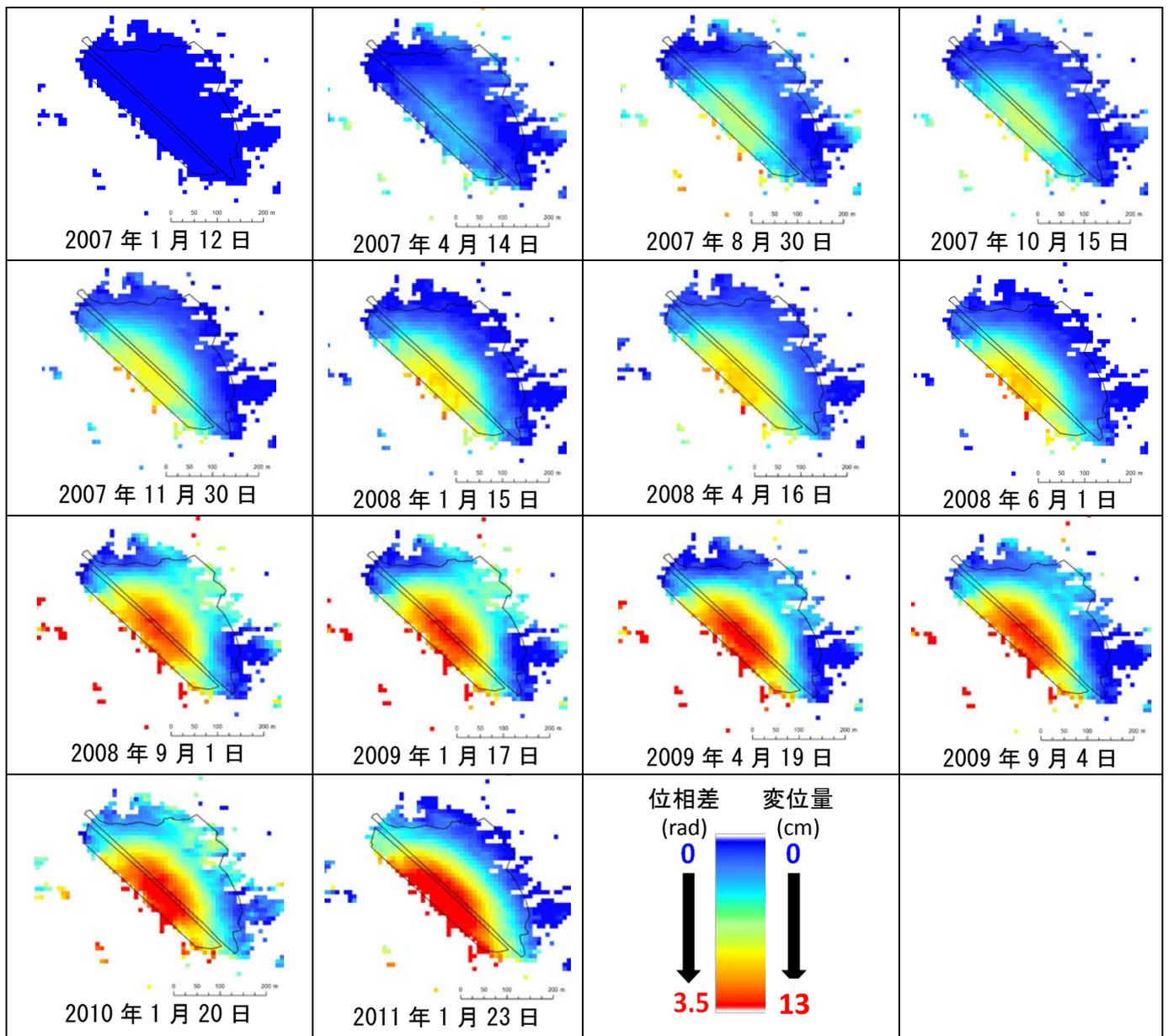


図-6 衛星SARにより観測された2007年1月12日から2011年1月23日までの大保脇ダムの変位量

においては、空気中の水蒸気や衛星軌道のずれなどが変位量の精度に大きな影響を与えることが知られており、今後はこのような誤差を低減させるための研究を進める予定である。

#### 4. おわりに

本研究では、衛星SARの特徴を有効に活用し、平常時と災害時の区別なく構造物の変位をモニタリングし、構造物の老朽化や災害時の変状を広域かつ迅速に検知するための手法の検討を行ってきた。土木構造物は、様々な材料により建設され、また人工衛星に対する向きも様々であり、今後はこのような多種多様な土木構造物を、衛星SARにより一度に変位モニタリングできる技術の開発を進めていきたい。土木構造物は、構造物によって重要監視対象となる変位量が異なるため、今後は多種多様な土木構造物の変位量の注意・警戒基準を考慮した変位モニタリングの検討も実施し、国土強靱化に資するように研究を進めていきたいと考えている。

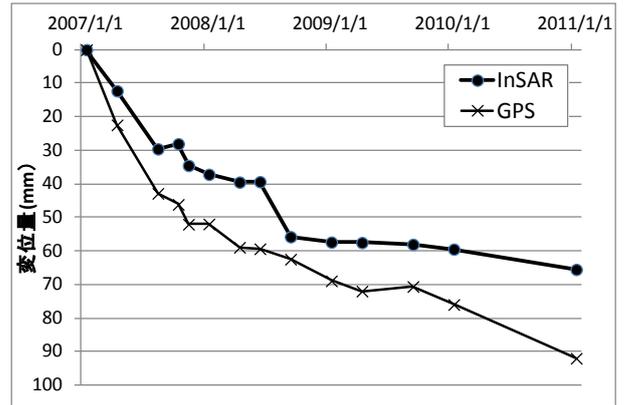


図-7 図-5の赤丸部における衛星SARとGPSにより計測された変位量の比較

#### 参考文献

- 1) 国土地理院：干渉 SAR、<http://vldb.gsi.go.jp/sokuchi/sar/>
- 2) 京都大学防災研究所地震予知研究センター：平成20(2008)年岩手・宮城内陸地震、<http://www.rcep.dpri.kyoto-u.ac.jp/IWATE/insar.png>
- 3) 飛田ら：地震・火山監視（地殻変動観測）に有効な SAR観測、第3回ALOS-2ワークショップ、[http://www.eorc.jaxa.jp/ALOS/conf/workshop/alos2\\_ws3/ALOS2\\_2\\_3\\_Tobita\\_Mikio.pdf](http://www.eorc.jaxa.jp/ALOS/conf/workshop/alos2_ws3/ALOS2_2_3_Tobita_Mikio.pdf), 2011.
- 4) 佐藤ら：SAR干渉画像を用いた地すべり地表変動の検出について：山形県月山周辺を事例にして、日本地すべり学会誌、49(2)、pp.61～67、2012.
- 5) 河川管理施設等構造令研究会編集：解説・河川管理施設等構造令、(社)日本河川協会、1978.

佐藤弘行



(独)土木研究所つくば中央  
研究所水工研究グループ  
水工構造物チーム 主任  
研究員  
Hiroyuki SATO

小堀俊秀



(独)土木研究所つくば中央  
研究所水工研究グループ水  
工構造物チーム 研究員  
Toshihide KOBORI

榎村康史



(独)土木研究所つくば中央  
研究所水工研究グループ  
水工構造物チーム 上席  
研究員  
Yasufumi ENOMURA

山口嘉一



(一財)ダム技術センター  
首席研究員 (前 (独)土木  
研究所つくば中央研究所水  
工研究グループ水工構造物  
チーム上席研究員)  
Yoshikazu YAMAGUCHI

岩崎智治



国際航業(株)海外事業部  
防災水資源部 主任技師  
Tomoharu IWASAKI

虫明成生



国際航業(株)空間情報基  
盤技術部リモートセンシ  
ンググループ 主任技師  
Naruo MUSHIAKE

本田謙一



国際航業(株) 技師  
Kenichi HONDA