

衛星SARによる19基のロックフィルダムの変形計測

佐藤弘行・金銅将史・小堀俊秀・小野寺葵

1. 研究の背景と目的

衛星SAR (Synthetic Aperture Radar、合成開口レーダー) は夜間や雨天時にも地表面の状態に関するデータを取得することが可能な技術であり、また広域での地表面の変位の計測も可能なため、地震や火山活動による地殻変動や地すべりの把握等に活用されている。

国総研では、SIP (戦略的イノベーション創造プログラム) のインフラモニタリングの分野において、個別課題「衛星SARによる地盤および構造物の変状を広域かつ早期に検知する変位モニタリング手法の開発」(2014~2018年度予定) を実施している。本個別課題では、構造物の維持管理の高度化・効率化に資することを目的として、衛星SARをコア技術として、平常時および災害時にダムを中心とした構造物の変状を広域かつ早期に検知する変位計測技術の開発を実施している。

本報文では、これまでの成果の一部として、衛星SARにより19基のロックフィルダムの外部変形計測を試行した結果の概要を紹介する。

2. 衛星SARによるダムの外部変形計測の概要

衛星SARは地上500から800km程度の上空を南北方向に周回しながら、衛星に搭載されているセンサから地表にレーダーを照射するとともに地表からの反射波を受信することにより地表の状態を観測している。また、衛星SARは10日から2か月程度の回帰日数で同一軌道を周回するが、同一軌道上で撮影した2時期のデータを比較する干渉SARと呼ばれる手法¹⁾により、図-1のようにダム等の構造物の変形を計測することが可能である。なお、紙数の都合により、詳細については参考文献^{1)~3)}を参照されたい。

3. 19基のロックフィルダムの外部変形計測

使用した衛星SARデータは、2014年5月に打

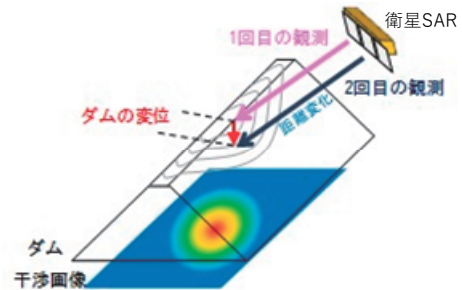


図-1 干渉SARによるダムの外部変形計測の概念図

表-1 19ダムの堤高と使用した衛星データの概要

ダム名	堤高 (m)	使用した衛星の軌道	使用した衛星データ数	衛星データの観測日	
				初回	最終
A	78.5(※1)	北行(※2)	6	2015/7/30	2016/7/28
B	161	南行	6	2014/8/24	2016/8/21
C	41.2	北行	5	2015/5/23	2016/6/4
D	89.9	北行	6	2015/4/7	2016/6/28
E	52.5(※1)	北行	6	2014/9/4	2016/5/26
F	127	北行	6	2015/4/7	2016/6/28
G	112	北行	5	2014/9/9	2016/5/31
H	90	北行	8	2014/10/21	2016/6/14
I	66	北行	5	2014/9/9	2016/5/31
J	119.5	南行	6	2014/10/28	2016/6/7
K	158	南行	10	2014/10/9	2015/7/14
L	127.5	南行	7	2014/9/30	2016/9/13
M	83	北行	8	2014/10/24	2016/6/3
N	35	南行	15	2015/2/9	2016/9/5
O	35(※1)	北行	8	2014/10/11	2016/7/16
P	91.7	北行	8	2014/10/11	2016/7/16
Q	66	北行	7	2014/9/27	2016/7/2
R	66.5	北行	7	2014/9/27	2016/7/2
S	37	南行	6	2015/2/28	2016/6/18

※1: 複合ダムのフィル部の堤高、※2: 左側観測 (他は右側観測)

ち上げられ現在運用中の「だいち 2 号 (ALOS-2)」により観測されたデータとした。「だいち 2 号 (ALOS-2)」に搭載されているセンサの空間解像度は 3m、観測波長は L バンド (23.6cm) である。対象ダムは国内の 19 基のロックフィルダムとした。19 ダムの堤高と使用した衛星データの概要を表-1 に示す。表-1 の北行は衛星が南から北に進行していることを示し、南行は衛星が北から南に進行していることを示している。なお、衛星 SAR は衛星の斜め下を観測するが、表-1 の A ダムでは衛星の進行方向の左側斜め下を観測しており、その他のダムは衛星の進行方向の右側斜め下を観測している。

図-2 に、衛星 SAR による 19 基のロックフィルダムの衛星視線方向の外部変形量を示す。図-2 の

外部変形量は、表-1 の初回観測日のダムの変形量をゼロとして、表-1 の最終観測日までの堤体の外部変形量を示している。なお、図-2 の赤い矢印は衛星の視線方向を示している。図-2 のように、ダムの表面全体の変形量を計測できることが衛星

SAR による変形計測の大きな特長である。なお、N ダムの変形量が最大で約 3cm と比較的大きいが、これは 2016 年 4 月の熊本地震による沈下であるが、地震後の調査によりダムの安全性には影響がないことが確認されている。

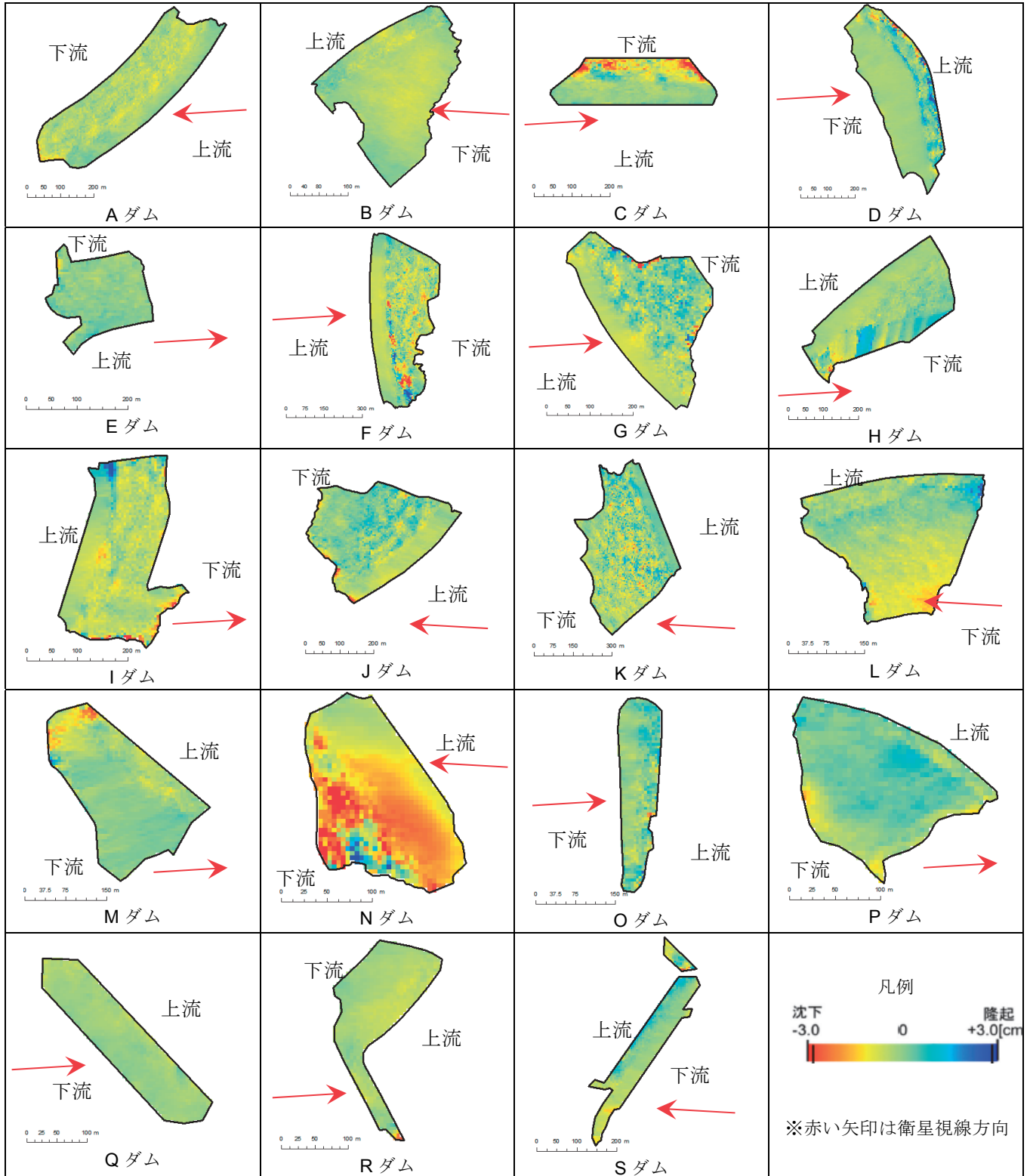


図-2 衛星SARによる19基のロックフィルダムの衛星視線方向の外部変形量

図-3 に、測量や GPS により外部変形が計測されている計測点における RMSE を示す。図-3 を見ると、測量・GPS の計測点における RMSE は概ね

5mm 以下となっているが、RMSE が 5mm 以上と比較的誤差が大きい箇所も散見される。次章でその誤差要因を分析する。

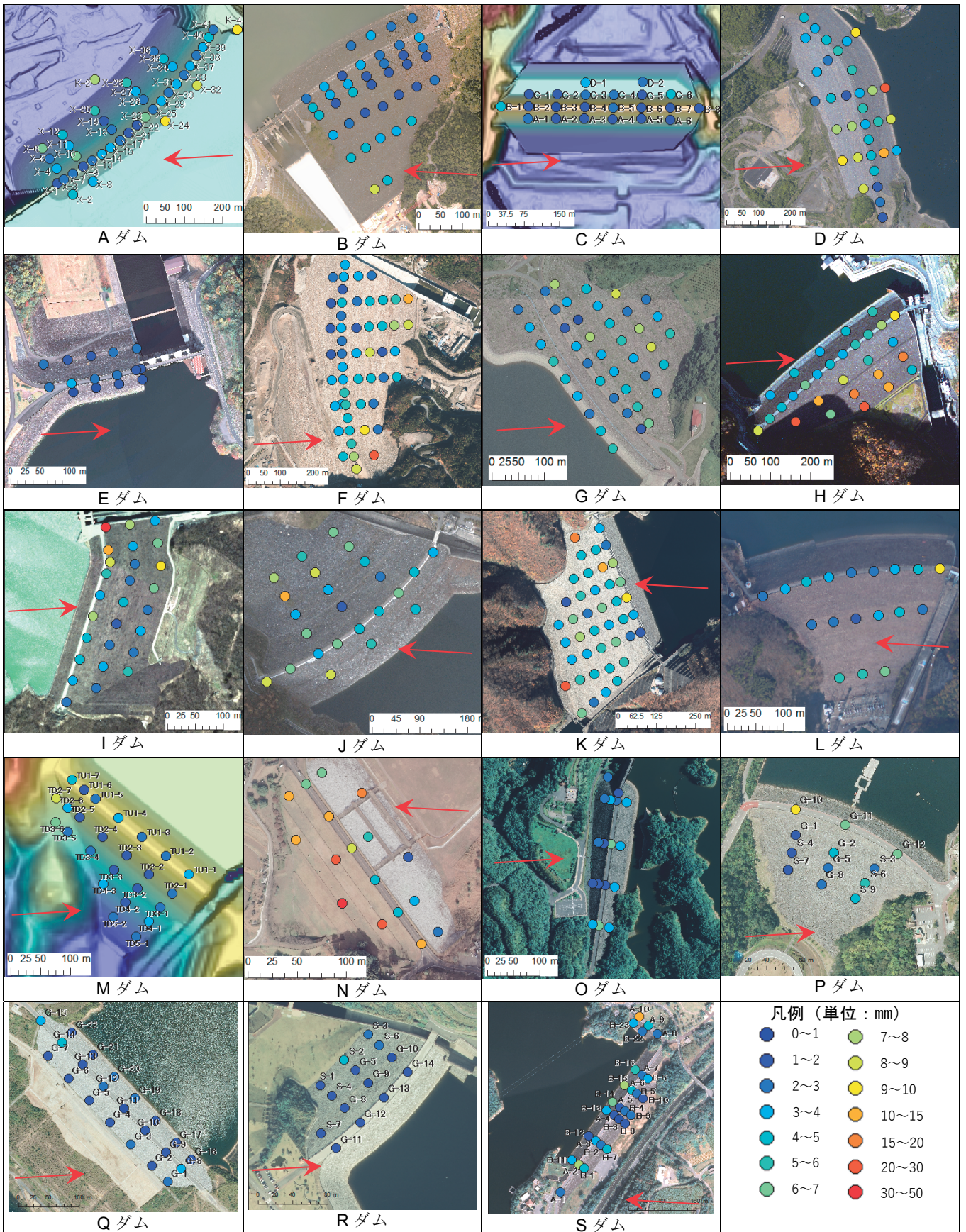


図-3 測量・GPSの計測点におけるRMSE

4. 誤差要因の分析

図-4に、対象とした19基のダムについて、光波測量やGPSによる外部変形量を基準とした時の衛星SARによる外部変形量の二乗平均平方根誤差(RMSE、Root Mean Square Error)を示す。なお、RMSEは(1)により算出される。

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (u_{SAR} - u_{\text{測量等}})^2} \quad \text{式(1)}$$

ここで、 n は衛星SARのシーン数、 u_{SAR} は衛星SARにより計測された外部変形量の衛星視線方向成分、 $u_{\text{測量等}}$ は衛星SARの観測日において測量あるいはGPSにより計測された外部変形量の衛星視線方向成分、である。

図-4を見ると、対象19ダムの半数以上の12ダムにおいてRMSEは5mm以下となっており、ロックフィルダムの定期的な外部変形量の計測に必要な精度と考えている5mmの精度は得られている。なお、衛星SARの視線方向に近い鉛直方向の計測精度については、光波測量は±2.5mm程度、GPSは±1.5mm程度と考えられている⁴⁾が、実際の光波測量やGPSの計測値は気象条件等の影響を受けたり偶然誤差を含むために上記の精度よりも悪化することが考えられる。そこで、衛星SARによる目標精度は、光波測量やGPSの実際の計測精度に近いと考えられる5mmとしている。

図-4においてRMSEが目標としていた5mmよりも大きくなる誤差要因を考察した。誤差要因としては以下の要因が推測された。

(1) 植生

図-5にNダムの航空写真と測量点におけるRMSEを示す(図-3から再掲)。Nダムの下流面には植生が繁茂していることが確認でき、衛星SARによるダムの外部変形計測の大きな誤差要因となっているものと推測される。

(2) サイドローブ

図-6にHダムの衛星SARの強度画像、衛星SARによる外部変形量(図-2から再掲)、測量点におけるRMSE(図-3から再掲)および洪水吐と導流壁の写真を示す。図-6左上の衛星SARの強度画像を見ると、左から右への衛星SARからのレーダーが洪水吐の

導流壁で強反射して堤体下流面の観測データに大きな影響を与えており、その結果、当該箇所の衛星SARによる外部変形量(図-6右上)が縞模様になっているとともにRMSEの値が大きくなっている(図-6左下)。このような現象をサイドローブと呼ぶ。

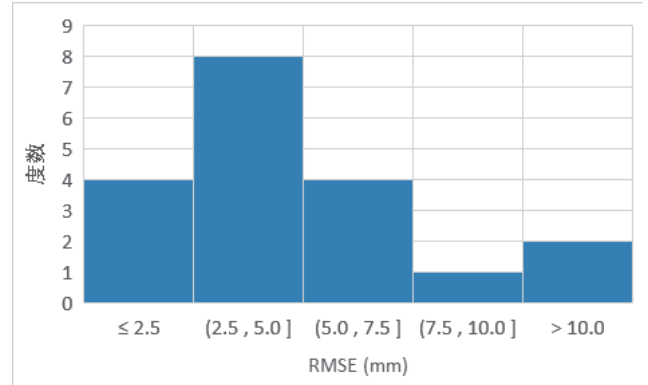


図-4 SARと測量・GPSによる外部変形量のRMSEの度数分布

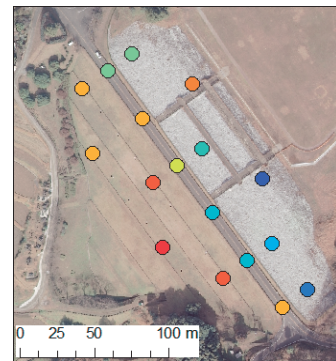


図-5 Nダムの航空写真とRMSE(再掲)

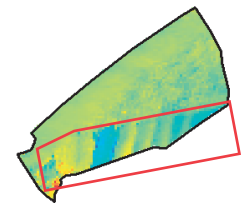
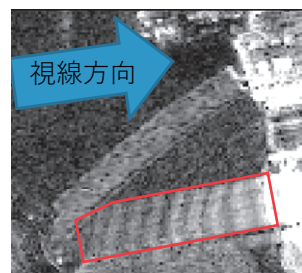


図-6 Hダムの衛星SAR強度画像(左上)、衛星SARによる外部変形量(右上、再掲)、RMSE(左下、再掲)洪水吐と導流壁(右下)

※図の赤線内がサイドローブ発生箇所

H ダム以外にも、洪水吐の導流壁によりサイドローブが発生し図-3のRMSEが5mm以上になっている箇所がいくつか確認されており、衛星SARによるダムの外部変形計測の誤差要因となっているものと推測される。

なお、衛星SARからのレーダーと導流壁がほぼ垂直になるためにサイドローブが発生し堤体の変形量の誤差となると考えられることから、サイドローブによる堤体の変形量の誤差を回避するためには、衛星SARからの視線方向が反対となる観測データを用いてダムの変形量を計測することが対応策として考えられる。

(3)貯水あるいは周辺岩盤と堤体の境界付近

堤体と貯水あるいは堤体と周辺岩盤の境界付近において、衛星SARと測量・GPSの外部変形量が大きく異なる場合があることが確認された。図-7にDダムのRMSE（図-3から再掲）および衛星SARと測量による外部変形量を示す。図-7上図の赤丸で示した測量点は、貯水面に非常に近いために貯水面からのノイズが大きくなっていることが誤差要因になっているものと推測された。

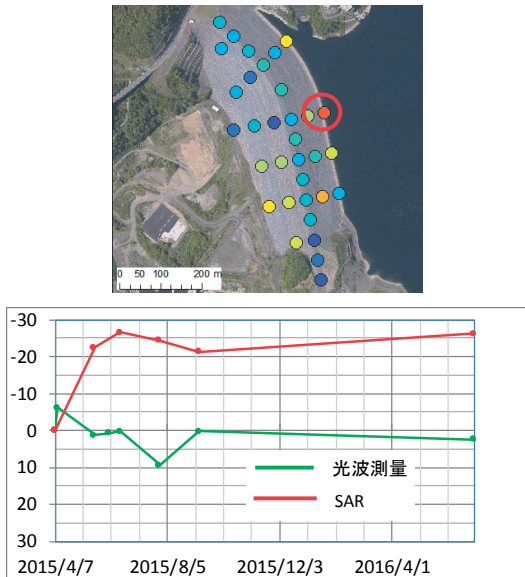


図-7 DダムのRMSE（上図、再掲）と上流面の貯水に近い測量点（上図の赤丸箇所）の衛星SARと測量による外部変形量（下図、プラスが沈下）

(4)堤体の斜面と衛星SAR観測方向の関係

堤体の斜面と衛星SAR観測方向の関係を図-8に示す。図-8の(a)の場合には入射角が小さく反射強

度が十分大きいと考えられるが、図-8の(b)の場合には入射角が大きく反射強度が小さくなるために反射波に含まれるノイズの影響が大きくなり、ダムの外部変形計測の誤差要因となるものと考えられる。

図-3のRMSEの図においては、Fダム下流面、Gダム下流面、Jダム下流面においてRMSEが5mm以上となっている箇所がいくつかあり、図-8(b)の関係が誤差要因となっているものと推測された。

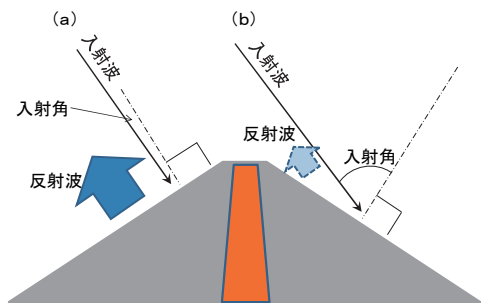


図-8 堤体の斜面と衛星SAR観測方向の関係

(5)残雪

図-9のFダム右岸側下流面に、赤と青の線状の斑模様となっている特異な外部変形量を示す箇所が確認された。Fダムの観測データとして2015年4月7日のデータを使用しているが、特異な外部変形量を示す箇所に残雪が確認され（図-9）、残雪による誤差と推測された。

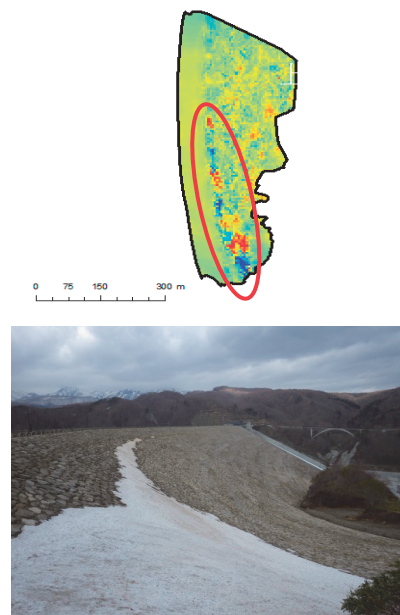


図-9 FダムのRMSE（上図、再掲）と右岸側下流面残雪状況（下図、2015年4月16日）

※図の赤線内が残雪の影響と推測される箇所

本報文では、積雪地帯にあるダムについては、12月から3月の衛星SARの観測データは除外して検討を行っているが、堤体表面の残雪を確認したうえでデータを選定する必要がある。

本報文の検討対象ダムおよび計測条件においては、衛星SARによる外部変形量の誤差要因として上記のような要因が推測された。このような誤差要因を適切に除去できれば、5mm以下の誤差で衛星SARによりロックフィルダムの外部変形計測が可能であると考えている。

5. おわりに

本報文では、現在SIPのインフラモニタリング分野において実施している成果の一部を紹介した。これまでの検討により、衛星SARによりロックフィルダムの外部変形量を5mm以下の精度で計測することが可能であり、ロックフィルダムの定期的な外部変形計測に適用することが可能であると考えている。

今後、サイドロープ等により比較的RMSEの大きかった箇所があったダムを対象に、衛星SARの観測方向が逆のデータを用いた検討を行うなど、引き続き誤差低減の検討を行う予定である。

衛星SARは面的な変形量を計測することが可能であるため、測量・GPSの計測点ではない箇所における局所的な変形を検知することも可能である。図-2に示した事例の中には、測量・GPSの計測点ではない箇所において局所的な変形が観測された事例があり、衛星SARによる観測された局所的な変形が誤差か実際に発生した変形なのかについて検討を

行う予定である。

今後は、衛星SARをコア技術として測量やGPS等を融合した広域的・効率的で信頼性の高い変位モニタリング手法の開発に取り組み、ダム等の維持管理の高度化・効率化に寄与したいと考えている。

謝 辞

本研究は、内閣府のSIP（戦略的イノベーション創造プログラム）のインフラモニタリング分野の個別課題「衛星SARによる地盤および構造物の変状を広域かつ早期に検知する変位モニタリング手法の開発」（H26～H30年度予定）により実施しているものです。本研究の実施にあたって、各種データ提供等のご協力をいただいた関係各位にこの場をお借りして厚くお礼申し上げます。

参考文献

- 1) 国土地理院：干渉 SAR、
<http://vldb.gsi.go.jp/sokuchi/sar/>
- 2) 佐藤弘行、佐々木隆、金銅将史、小堀俊秀、小野寺葵、山口嘉一、佐藤渉、虫明成生、本田謙一：ALOS/PALSAR データを用いた時系列干渉 SAR 解析による 5 基のロックフィルダムの外部変形計測、土木学会論文集、F3 部門、Vol.73、No.1、pp.1～14、2017
- 3) 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：土木技術資料、Vol.56、No.1、pp.20～23、2014
- 4) (一社)ダム工学会計測管理研究部会：フィルダムの変位計測に関するGPS利用マニュアル、130p、2014

佐藤弘行



国土交通省国土技術政策
総合研究所河川研究部
大規模河川構造物研究室
主任研究官
Hiroyuki SATO

金銅将史



国土交通省国土技術政策
総合研究所河川研究部
大規模河川構造物研究室
長
Masafumi KONDO

小堀俊秀



国土交通省国土技術政策
総合研究所河川研究部
大規模河川構造物研究室
研究官
Toshihide KOBORI

小野寺葵



研究当時 国土交通省国土
技術政策総合研究所河
川研究部大規模河川構造
物研究室 研究官、現
東北地方整備局鳴瀬川総
合開発工事事務所調査設
計課調査係長
Aoi ONODERA