2. 衛星リモートセンシングによるフィルダム の外部変形計測

Exterior deformation monitoring of filldams by satellite remote sensing

本田 謙一*・浅田 典親*・虫明 成生*

Kenichi HONDA, Norichika ASADA and Naruo MUSHIAKE

Abstract : To promote rapid and efficient safety management of filldams, this study examined the applicability of interferometry SAR (InSAR), which is used to measure exterior deformation of filldams using ALOS PALSAR data. The result showed the accuracy, Root Mean Square Error, of displacement of filldams monitored by InSAR compared to GPS measurement was about 11~13mm. In addition, the trend of time-series variation was well captured by InSAR. Therefore, this study indicated that it is possible to monitor exterior deformation of filldams by InSAR techniques using ALOS PALSAR data. Moreover, there is a possibility of applying this technique to other large-scale infrastructures.

1. はじめに

ダムは日本全国に約2,800箇所存在する。多くのダムは、戦後の高度経済成長期に建設されているため、2020年には、完成から50年以上経過するダムが全体の約58%に達するなど、ダムの老朽化が急速に進んでいる。

完成から長期間経過したダムでは、安全管理のための外部変形計測が重要となる。従来は、光波測量で計測が行われてきた。しかし、すべてのダムで定期的計測を行うには多くのコストと時間がかかる。

また、地震などの災害時には、ダムの臨時点検を行うことが定められているが、大きな災害では調査対象地域に近づけないこともあるなど、急な作業者の手配や作業の安全性を確保することが困難となることがある。

そのため現在、多数のダムを安全かつ迅速に、安価で計測できる外部変形計測技術が期待されている。

衛星 SAR を用いた干渉 SAR 解析による変位計測は、天候に影響されないこと、災害時に迅速に計測できること、なにより現地にセンサや人を置く必要がないことから、ダムの効率的な外部変形計測に有望である。

そこで本研究では、フィルダムを対象に、ALOS PALSAR (L バンド) を用いた干渉 SAR による局所的な変位計測を試み、大規模構造物の安全点検に対す

る衛星リモートセンシングの可能性について検討した。

2. 対象ダムと使用データ

本研究では、国内のロックフィルダムである X ダムを対象として検討を行った。

X ダムでは、2006年12月の盛り立て完了以来、GPS によって外部変形計測を行っており、2006年12月から2010年12月までの4年間で100mm 以上の変位が計測されている (図1) (岩崎ほか, 2012)。本研究では、この GPS 計測結果と比較することで、干渉 SAR によ

図1 Xダムの2006/12/29から2010/12/17までのGPS計測変位

*国際航業株式会社 地理空間基盤技術部
「写真測量とリモートセンシング」VOL. 54, NO. 6, 2015

る外部変形計測精度を評価した。

SAR 衛星データは、ALOS PALSAR で2006年12月から2011年1月までの4年間に観測された、北行軌道と南行軌道の各14シーンをを用いた。使用したデータの観測日を表1に示す。

また、DEM データは、国土地理院が提供している10 m メッシュDEM に、X ダムの設計図から作成したダムの堤体モデルを追加して使用した。

表1 ALOS PALSAR データの観測日

(a) 北行軌道

No	Ascending 北行軌道
1	2006/12/6
2	2007/10/24
3	2007/12/9
4	2008/1/24
5	2008/4/25
6	2008/7/26
7	2008/12/11
8	2009/1/26
9	2009/10/29
10	2009/12/14
11	2010/1/29
12	2010/8/1
13	2010/11/1
14	2010/12/17

(b) 南行軌道

No	Descending 南行軌道
1	2007/1/12
2	2007/4/14
3	2007/8/30
4	2007/10/15
5	2007/11/30
6	2008/1/15
7	2008/4/16
8	2008/6/1
9	2008/9/1
10	2009/1/17
11	2009/4/19
12	2009/9/4
13	2010/1/20
14	2011/1/23

3. 解析方法

干渉 SAR による変位計測には、複数の干渉ペアを用いた時系列解析を行った。時系列解析手法は SBAS 法 (Berardino *et al.*, 2002) を用いた。

初めに、ALOS PALSAR の14シーン、全91ペアの中から基線長が1,000m 以下のペアで干渉処理を行った。基線長1,000m 以下の干渉ペアは北行軌道では39ペア、南行軌道では37ペアであった。次に、解析した干渉ペアの位相差を用いて、軌道毎に時系列変位を算出した。

時系列変位の算出方法は以下の通りである。

まず、初回観測日から各観測日までの変位ベクトル $\mathbf{d}$ を次式で与える。

$$\mathbf{d}^T = [d_1, d_2 \cdots d_i] \quad (i=1, 2, \dots, 13) \quad (1)$$

各干渉ペアにおける変位 Φ は式(2)と定義する。

$$\Phi^T = [\Phi_1, \Phi_2 \cdots \Phi_n] \quad (n=1, 2, \dots, 39) \quad (2)$$

各干渉ペアによって観測された変位 Φ_n は、各時期の変位 d_i の線形結合により定義できる。例えば、北行軌道においてマスターデータが2007年10月24日、スレーブデータが2007年12月9日を用いた干渉ペアの変位 Φ_n は $d_2 - d_1$ と表せる。したがって、式(3)式(4)が成り立つ。

$$\mathbf{A} \mathbf{d} = \Phi \quad (3)$$

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} 0 & -1 & 0 & 1 & \cdots \\ 0 & 0 & 1 & 0 & \cdots \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \end{bmatrix} \quad (4)$$

式(3)を $\mathbf{d}$ について解くことにより各時期の変位を求めた (式(5))。

$$\mathbf{d} = (\mathbf{A}^T \mathbf{A})^{-1} \mathbf{A}^T \Phi \quad (5)$$

精度検証は堤体に取り付けられた22箇所の GPS で計測された変位と比較した。

干渉 SAR 解析では衛星視線方向の距離変化が計測されるため、衛星視線方向と実際の変位の方向の補正を行う必要がある。本研究では、GPS で計測した変位ベクトルより、衛星視線方向の GPS の変位を求め、その結果と干渉 SAR の視線方向変位を比較した。

4. 結果・考察

図4に、南行軌道における干渉 SAR 解析の各観測日の衛星視線方向変位を示す。変形の傾向は、左右岸取付部の変位が小さく、天端中央部の変位が時間と共に衛星から遠ざかる方向に変位している。この傾向は GPS 計測結果と符合している。同様の傾向が北行軌道の解析結果でも見られた。

堤体周辺の白い領域は、いずれかの干渉ペアで干渉性が低く、解が求まらない領域である。貯水池やダム周辺の緑地は観測間隔が長いと干渉性が下がるが、X ダムの堤体は後方散乱強度も高く、干渉性は安定して高かった。これは、X ダムはロックフィルダムであり堤体表面に岩を敷き詰めていることから植生の繁茂も

なく、地表の状態が安定しているためと考えられる。

図2、表2に、干渉 SAR 解析変位と GPS 計測変位の比較を示す。干渉 SAR 解析変位は GPS 計測変位と良い相関を示している。最小二乗平均誤差 (RMSE) は北行軌道が13.19mm、南行軌道が11.47mm と若干南行軌道の精度が高かった。北行軌道の衛星視線方向は、ダムの天端に対して直交しており、南行軌道は平行する方向から観測している。これらの観測軌道の違いが計測精度の差に影響している可能性がある。

図2 干渉 SAR 解析変位と GPS 計測変位の比較

表2 干渉 SAR 解析の計測精度

	RMSE [mm]	相関係数 R
北行軌道	13.19	0.83
南行軌道	11.47	0.78

図3に、堤体の最大断面のGPS計測点G-12における時系列変位の比較を示す。Xダムは、2006年12月に盛り立てが完了している。フィルダムは土や岩石を締め固めて築造されるため、盛り立て完成直後からしばらくは沈下による変位が大きく、その後、変位が収束していく。干渉 SAR 解析でもその傾向がよく捉えられていることがわかる。

干渉 SAR 解析結果はGPS計測結果よりもやや小さい傾向にあった。散布図より、GPS計測変位が大きいほど、干渉 SAR 解析変位は小さくなる傾向にある。これは、フィルダムの変形がALOS PALSARの分解

能に対して局所的であるため、ノイズフィルタにより変位が平滑化され、見かけ上の変位が小さくなったものと考えられる。

現在運用されているALOS-2 PALSAR-2はALOS PALSARよりも分解能が向上しているため、より高精度に変位を計測できる可能性がある。

(a) 北行軌道

(b) 南行軌道

図3 堤体最大断面上のGPS計測点G-12における時系列変位の比較

5. まとめ

本研究では、ALOS PALSARを用いた干渉 SAR 解析によるフィルダムの外部変位計測の検証を行った。

結果、GPS計測変位と比較して11~13mm程度の精度が得られた。また、時系列的な変位の傾向がよく捉えられており、干渉 SAR 解析による変位計測のフィルダムへの適用可能性が示された結果と考える。

干渉 SAR 解析を用いた変位計測はフィルダムに限らず、様々な大規模構造物に適用できる可能性がある。構造物の種類や建造時期により、変位計測の要求精度が異なるが、Lバンド SARに限らず、より高分解能かつ波長の短いXバンド SARも適切に使用することで、衛星リモートセンシングによる大規模構造物の変位モニタリングが期待できる。

参考文献

岩崎智治, 小堀俊秀, 山口嘉一, 増成友宏, 清水則一,
2012, フィルダム外部変形計測への GPS 自動変位
計測システムの適用に関する研究, ダム工学, 22(1),
pp. 4-15.

Berardio, P., Fornaro, G., Lanari, R. and Sansosti,
E., 2002. A new algorithm for surface deformation
monitoring based on small baseline differential
SAR interferograms, IEEE transaction on geos-
cience and remote sensing, 40(11), pp.2375-2383.

図4 南行軌道の干渉 SAR による X ダムの衛星視線方向変位