

国土技術政策総合研究所資料

TECHNICAL NOTE of
National Institute for Land and Infrastructure Management

No.1233

December 2022

衛星 SAR データを用いたロックフィルダムおよび貯水池周辺斜面の 変位計測マニュアル(案)

佐藤弘行、金銅将史、小堀俊秀、櫻井寿之

Manual for Displacement Measurement of Rockfill Dams and
Slopes Around Dam Reservoirs Using Satellite SAR Data (draft)

SATO Hiroyuki, KONDO Masafumi, KOBORI Toshihide, SAKURAI Toshiyuki

国土交通省 国土技術政策総合研究所

National Institute for Land and Infrastructure Management
Ministry of Land, Infrastructure, Transport and Tourism, Japan

衛星 SAR データを用いたロックフィルダムおよび貯水池周辺斜面の変位計測マニュアル(案)

佐藤弘行*、金銅将史**、小堀俊秀***、櫻井寿之****

Manual for Displacement Measurement of Rockfill Dams and Slopes Around Dam Reservoirs
Using Satellite SAR Data (draft)

SATO Hiroyuki*, KONDO Masafumi**, KOBORI Toshihide***, SAKURAI Toshiyuki****

概要

本資料は、衛星 SAR データを用いたロックフィルダムの堤体およびダム貯水池周辺斜面の変位計測方法を解説するものである。また、衛星 SAR データを利用する上で理解すべき基本的な事項や、実際の導入にあたり必要になる技術的事項について、実務的な対応方法の例、留意点等を説明する。

キーワード：ロックフィルダム、衛星 SAR、貯水池周辺斜面、変位計測

Synopsis

This technical note explains the method of measuring the displacement of the Rockfill dam body and the slopes around the dam reservoirs using satellite SAR data. In addition, basic matters to be understood in using satellite SAR data, technical matters necessary for actual introduction, examples of practical measures, points to note, etc. are explained.

Key Words: Rockfill Dam, Satellite SAR Data, Slopes of Around Dam Reservoir, Displacement Measurement

* 国土交通省 近畿地方整備局 足羽川ダム工事事務所 所長 (前 大規模河川構造物研究室主任研究官)	Director, Asuwagawa Dam Construction Office, Kinki Regional Development Bureau, Ministry of Land, Infrastructure, Transport and Tourism (Former Senior Researcher, Large-scale Hydraulic Structure Division)
** 河川構造物管理研究官 (前 大規模河川構造物研究室 室長)	Research Coordinator for River Structures (Former Head, Large-scale Hydraulic Structure Division)
*** 大規模河川構造物研究室 主任研究官	Senior Researcher, Large-scale Hydraulic Structure Division
**** 大規模河川構造物研究室 室長	Head, Large-scale Hydraulic Structure Division

目次

はじめに.....	1
1. 総説編.....	3
1.1 本資料の目的と構成.....	5
1.1.1 本資料の目的.....	5
1.1.2 本資料の適用範囲.....	5
1.1.3 本資料の構成.....	5
1.2 衛星 SAR データを用いた変位計測の特徴.....	6
1.2.1 衛星 SAR データの利用で可能になること.....	6
1.2.2 衛星 SAR データの活用場面.....	8
1.2.3 衛星 SAR データを利用するメリット.....	9
1.2.4 他の変位計測手法との比較.....	11
1.3 衛星 SAR の特徴.....	12
1.3.1 SAR 衛星の概要.....	12
1.3.2 衛星 SAR の特徴.....	12
1.4 衛星 SAR データを用いた変位解析の概要.....	18
1.4.1 必要なデータ.....	18
1.4.2 干渉 SAR 解析の概要.....	19
1.4.3 干渉 SAR 解析を行う際の注意点.....	25
1.4.4 干渉 SAR 解析による変位計測の精度低下要因.....	28
1.4.5 時系列干渉 SAR 解析の概要.....	31
1.4.6 スタッキング解析の概要.....	32
1.5 ダムの安全管理における衛星 SAR データの活用.....	33
1.5.1 平常時・災害時における活用方法.....	33
1.5.2 外部委託の活用.....	34
2. 解説編.....	39
2.1 はじめに.....	41
2.2 解析対象ダムの諸元・各種条件の確認.....	41
2.3 変位計測期間の設定.....	43
2.4 利用する衛星データの選び方.....	44
2.4.1 データ選定における留意点.....	44
2.4.2 データの検索手順（ALOS-2 の場合）.....	48
2.5 解析の実施.....	50
2.5.1 解析手順.....	50
2.5.2 干渉 SAR 解析.....	58
2.5.3 時系列干渉 SAR.....	63

2.5.4 三次元変位の抽出.....	65
2.5.5 スタッキング解析.....	66
2.5.6 精度向上のための留意点.....	69
2.5.7 誤差要因.....	71
2.6 解析結果とその出力.....	73
2.6.1 干渉画像・コヒーレンス画像.....	73
2.6.2 変位量マップ.....	74
2.6.3 時系列変位グラフ.....	75
2.7 解析結果の精度検証.....	76
2.7.1 解析結果の精度検証方法.....	76
2.8 データの蓄積・管理.....	78
2.8.1 衛星 SAR データの蓄積・管理.....	78
2.8.2 干渉 SAR 解析結果等の蓄積・管理.....	79
2.8.3 その他データの蓄積・管理.....	80
(参考) 干渉 SAR 解析に必要な機材等.....	81
巻末参考 試行適用事例.....	85
事例 1：ロックフィルダム堤体の変位計測事例.....	87
事例 2：貯水池周辺斜面の変位計測事例.....	89
参考文献.....	91

はじめに

主にロックフィルダム等のフィルダムの安全管理の一環として定期的あるいは地震発生後などに臨時に行われる堤体の外部変形計測は、基本的に堤体上に設けた測線上の標点を使った測量（近年では一部 GPS 等の GNSS）により行われている。また、ダムの堤体とともに安全管理の対象となる貯水池周辺斜面については、目視による巡視のほか、特に重点的な監視が必要な箇所では傾斜計、伸縮計等の計器を用いた計測による動態監視が行われている。これら測量によるダム堤体の外部変形計測や計器を用いた貯水池周辺斜面の計測は、いずれも基本的には計測箇所での「点」での計測であり、面的な変位分布を直接的に知ることは困難である。しかし、地震や火山活動に伴う広域的な地盤変動のモニタリング等、防災分野で近年活用が進んでいる衛星 SAR（Synthetic Aperture Radar、合成開口レーダ）データを利用すれば、地表面の変位を広域かつ面的に計測することが可能である。また、計測のためのセンサを地上に設置する必要がないなどの利点もある。

このため、これまで国土技術政策総合研究所（以下、国総研）では、ダムの安全管理における新たな手法として、ロックフィルダムの堤体外部変形の計測のほか、貯水池周辺斜面の変動領域の把握における衛星 SAR データの活用に向け、国土交通省が所管するロックフィルダムや貯水池周辺斜面を対象とした試行適用を通じ、衛星 SAR データを用いた変位計測技術の開発を行ってきた。本資料は、これにより得られた知見をもとに、衛星 SAR データのロックフィルダムの堤体やダム貯水池周辺斜面の変位計測への利用を検討する上で理解すべき基本的な事項や、実際の導入にあたり必要になる技術的事項について、実務的な対応方法の例、留意点等を解説するものである。

なお、衛星 SAR は前述の通り防災分野で活用が進んでいるが、ダム等インフラの維持管理の分野での活用例は少ない。このため、本資料は次のような構成とした。

「1. 総説編」では、ダムの管理者を含め、ダムの安全管理に関わる技術者全般を対象として、衛星 SAR の技術に関する基礎的な説明を含め、衛星 SAR データを用いたロックフィルダムや貯水池周辺斜面の変位解析を行うために必要な基本事項を分かりやすく説明している。

「2. 解説編」では、ダムの管理者等からの依頼や要請を受けて、実際にロックフィルダムや貯水池周辺斜面の変位解析を担当することが想定される専門技術者を主な対象として、ロックフィルダムや貯水池の周辺斜面の変位解析を精度よくかつ効率的に実施する上で必要となる各種の技術的事項について解説している。

また、本資料に示す手法を適用してこれまでに国総研において衛星 SAR データを用いたロックフィルダムや貯水池周辺斜面の変位解析を試行的に実施した例を「巻末参考」に収録している。

近年、洪水や地震が頻発するとともに、今後ダムの維持管理に関わる人員の減少や高齢化などが課題となることも想定される。このような中、ダムの維持管理を平常時・災害時を通じて確実かつ効率的に行っていくために、衛星 SAR データの活用は1つの有効な手段になる可能性を有している。その導入検討にあたり、本資料が参考になれば幸いである。

令和4年12月 河川研究部 大規模河川構造物研究室

（注）本資料は、内閣府による SIP（戦略的イノベーション創造プログラム）の「インフラの点検・モニタリング・診断技術の研究開発」での「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、国総研）で得られた成果の一部をとりまとめたものである。

1. 総説編

1.1 本資料の目的と構成

1.1.1 本資料の目的

本資料は、ダム安全管理の一環として行われるダムの堤体や貯水池周辺斜面の変位モニタリングに際して、衛星 SAR (Synthetic Aperture Radar、合成開口レーダ) データの利用を検討する際、同データを用いた変位解析を高精度かつ効率的に行えるようにするため、理解しておくべき基本事項や適用にあたっての主な技術的留意点等を取りまとめたものである。

なお、SAR 衛星である ALOS-2 (だいち 2 号) のデータを利用したこれまでの試行適用の結果、ダム堤体については、堤体表面の傾斜が比較的緩いことや、堤体表面に保護材料としてリップラップ材が配置され適度な凹凸があることにより、衛星から地上に照射する電波の反射強度や干渉性を確保しやすいといった理由から、特にロックフィルダムに対しての適用が有効なことが分かっている。このため、本資料では、ダム堤体の変位モニタリングについては、ロックフィルダムへの適用に必要な事項を記述している。

また、ダム安全管理において、堤体などのダム本体とともに管理対象となる貯水池周辺斜面のモニタリングにおいても、衛星 SAR データの利用が有効なことが分かっている。ただし、貯水池周辺斜面は衛星 SAR で用いるレーダのノイズの要因となる植生に覆われていることが多い。このため、本資料では、貯水池周辺斜面のモニタリングについては、変位量の定量的な解析精度よりも変動領域を精度良く抽出することに重点を置いている。

なお、必要に応じ、本資料中に記載の参考文献等を参照することにより、より詳細な情報を入手することが可能である。

1.1.2 本資料の適用範囲

本資料は、国内のダム安全管理において、ロックフィルダムや貯水池周辺斜面を対象に衛星 SAR データを用いた変位解析を行う際に活用されることを想定している。

なお、本資料では衛星 SAR データとして、JAXA (Japan Aerospace Exploration Agency、国立研究開発法人宇宙航空研究開発機構) により運用が行われている SAR 衛星である ALOS-2 (Advanced Land Observing Satellite 2、だいち 2 号) により取得されたデータの利用を主に想定して記述している。

1.1.3 本資料の構成

本資料は「1. 総説編」、「2. 解説編」および「巻末参考」としての事例紹介からなり、必要に応じて該当する箇所を参照することが可能な構成としている。

このうち「1. 総説編」では、衛星 SAR データの利用経験がないダムの管理職員を含め、ダムの管理に関わる技術者全般を念頭に、本手法の利用に際して理解しておくべき基本事項として、衛星 SAR の概要、衛星 SAR データを用いた変位解析手法 (干渉 SAR 解析) の概要や変位解析結果 (干渉縞) の見方などを示している。なお、衛星 SAR データを用いた変位解析を実際に行う際には、高度な専門知識も必要とすることから、実務において変位解析を外部に委託する場合を想定し、その際に必要になる基本事項も合わせて示している。

「2. 解説編」では、ロックフィルダムやダム貯水池周辺斜面を対象として衛星 SAR データを用いた変位解析を実際に行う専門技術者等を念頭に、変位解析を高精度かつ効率的に行えるよう、必要な技術的留意点等をこれまで国総研において行ってきた試行適用で得られた知見を踏まえて示している。

「巻末参考」では、国総研において行ってきた試行適用の事例として、ALOS-2 データを用いたロックフィルダムおよび貯水池周辺斜面の変位計測の例を紹介している。

1.2 衛星 SAR データを用いた変位計測の特徴

1.2.1 衛星 SAR データの利用で可能になること

衛星 SAR は地上数百 km の上空から地表に向かって電波を照射し、広範囲な地表から反射される電波を受信している。このような衛星 SAR により取得された観測データを用いることにより、ロックフィルダムあるいは貯水池周辺斜面の変位計測に関して主に以下のようなメリットがある。

✚ ロックフィルダム堤体の外部変形を面的に計測することが可能

衛星 SAR のデータを用いることにより、ロックフィルダム堤体の変位（外部変形）を面的に計測することが可能となる（図 1.2.1）。

これまでの国総研の試行においては、既存の測量あるいは GNSS（GPS）による計測結果と比較して、条件が良い場合には 2mm 程度、平均的には 5mm 程度の精度でロックフィルダム堤体の変位を計測することが可能である。

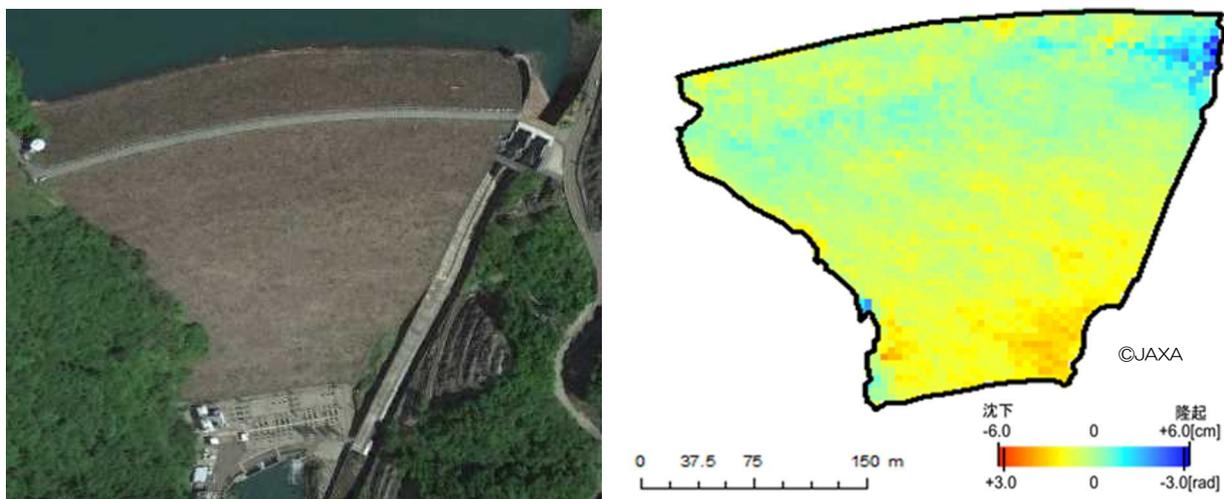


図 1.2.1 衛星 SAR データから得られたロックフィルダムの面的な変位計測の例
(左：航空写真、右：変位計測結果)

✚ 貯水池周辺斜面の変位を面的に計測することが可能

貯水池周辺斜面についても、衛星 SAR のデータを用いることにより面的な変位を計測することが可能であり、斜面の変動の有無や変動がある場合には変動領域や変動方向を把握することが可能になる。

図 1.2.2 は国総研において試行した貯水池周辺斜面の変位計測の事例である。本事例では測量等の比較できる他の変位計測結果がなく定量的な精度を直接評価することは困難であるが、図 1.2.2 の着色部の変

動領域の周辺部を対象とした現地踏査により段差等の変状が確認されており、衛星 SAR データを用いることで変動領域の抽出はほぼ正しく行えている。

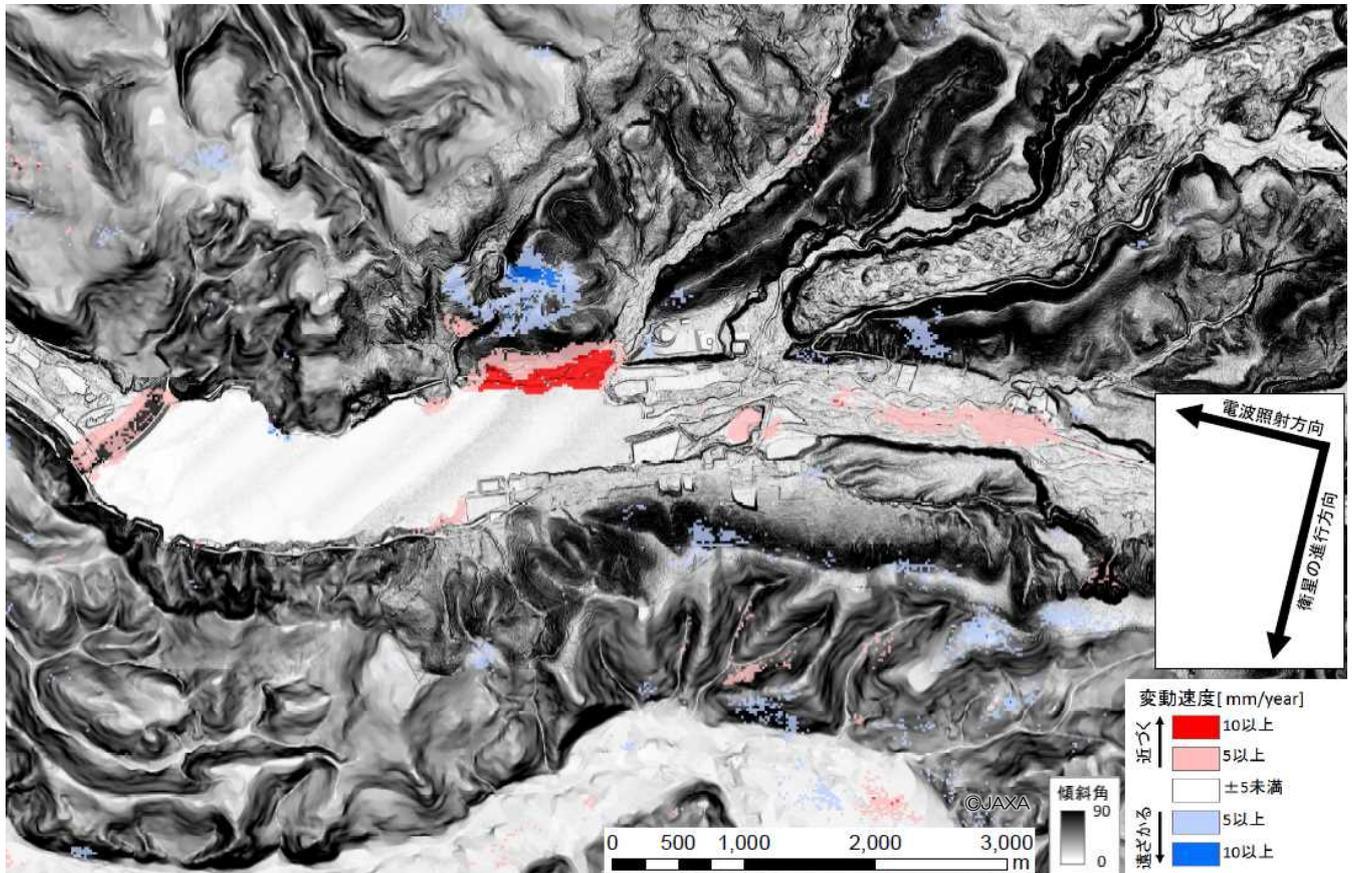


図 1.2.2 衛星 SAR データから得られた貯水池周辺斜面の面的な変位計測の例
(図の中央の、貯水池右岸側の斜面の赤・青色の箇所が変動領域)

※なお、高標高部の青色部は沈下傾向、貯水池近傍の赤色部は隆起傾向を示している。

測量等のデータがない場合でも、過去の変位を面的に計測することが可能な場合がある

衛星 SAR により過去に観測データが取得され、現在まで JAXA 等においてデータが保存されている場合には、そのデータ（アーカイブデータ）を入手することにより、過去の変位を面的に計測することが可能となる場合がある。

図 1.2.1 や図 1.2.2、あるいは本資料「巻末参考」の収録事例では、2014（平成 26）年に JAXA により打ち上げられ現在運用中の ALOS-2（だいち 2 号）により取得されたデータを使用している。ALOS-2 は、2014 年後半から現在まで、国内および国外各地を対象としてデータを取得しており、そのデータは JAXA によりアーカイブ化されている。過去に取得されたそのアーカイブデータを購入して入手することにより、過去の変位を計測することも可能な場合がある。

1.2.2 衛星 SAR データの活用場面

衛星 SAR は定期的にデータを取得しており、その観測データを用いることにより、ロックフィルダムあるいは貯水池周辺斜面の平常時の変位を定期的・面的に計測することができる。

また、衛星 SAR は地上数百 km の上空から観測を行ってデータを取得するため、大規模地震等の災害時においても地上の状態によらずにデータを取得することが可能であり、災害によるロックフィルダムあるいは貯水池周辺斜面の変位を計測することができる。

✚ 平常時の継続的な変位モニタリングへの活用

衛星 SAR により定期的に取得される観測データを用いて、図 1.2.1 や図 1.2.2 のように、ロックフィルダムあるいは貯水池周辺斜面の変位を定期的・面的に計測することができる。

✚ 災害時の緊急的な変位モニタリングへの活用

大規模地震等の災害が発生した場合には、災害前後に得られた衛星 SAR データを用いて変位を計測することで、現地に行くことが困難な場合においても、ロックフィルダムあるいは貯水池周辺斜面の変位を計測することが可能である（図 1.2.3）。

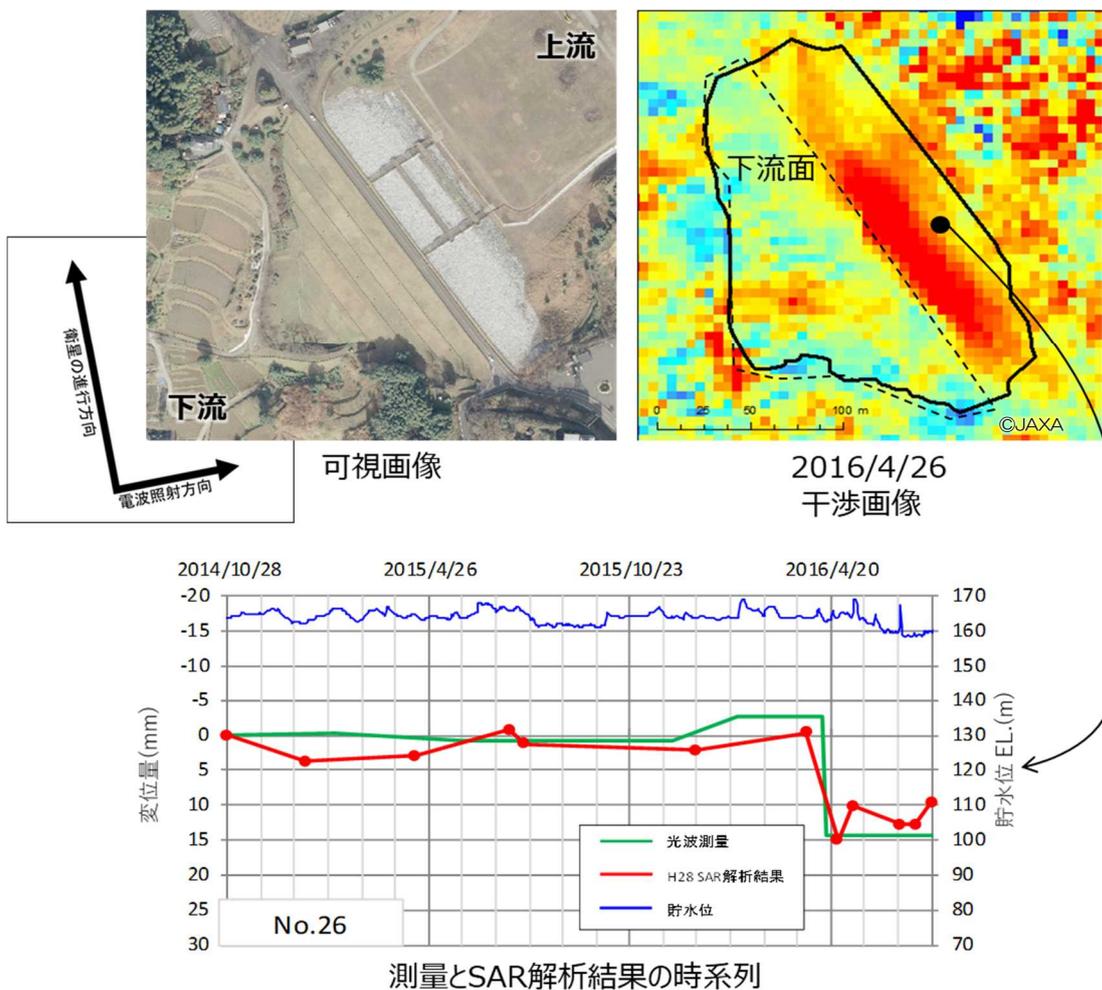


図 1.2.3 大規模地震直後のロックフィルダム堤体変位の検出例

1.2.3 衛星 SAR データを利用するメリット

衛星 SAR は、地上数百 km の上空から地表に向かって電波を照射し、広範囲な地表から反射される電波を受信している。このような衛星 SAR の観測データをロックフィルダムや貯水池周辺斜面の変位計測に利用することには以下のようなメリットがある。

✚ 面的な変位計測が可能

ロックフィルダムの変位計測に用いられている測量等による変位計測、あるいは貯水池周辺斜面の動態観測に用いられている伸縮計等による変位計測は、堤体あるいは斜面上の計器等を設置した「点」における変位を計測するものである。一方、衛星 SAR データを用いた変位計測においては、数 m の空間解像度で堤体あるいは斜面全体の面的な変位量を計測することが可能である（図 1.2.4）。そのため、観測点以外の場所で通常とは異なる傾向の変位が発生した場合、観測点のデータからそれを把握することは困難であるが、2 時期の衛星 SAR データを利用することで視線方向（衛星から地表の各地点の方向）の位相差分布を面的に得ることができる干渉 SAR 解析（1.4.2 参照）では可能となる。

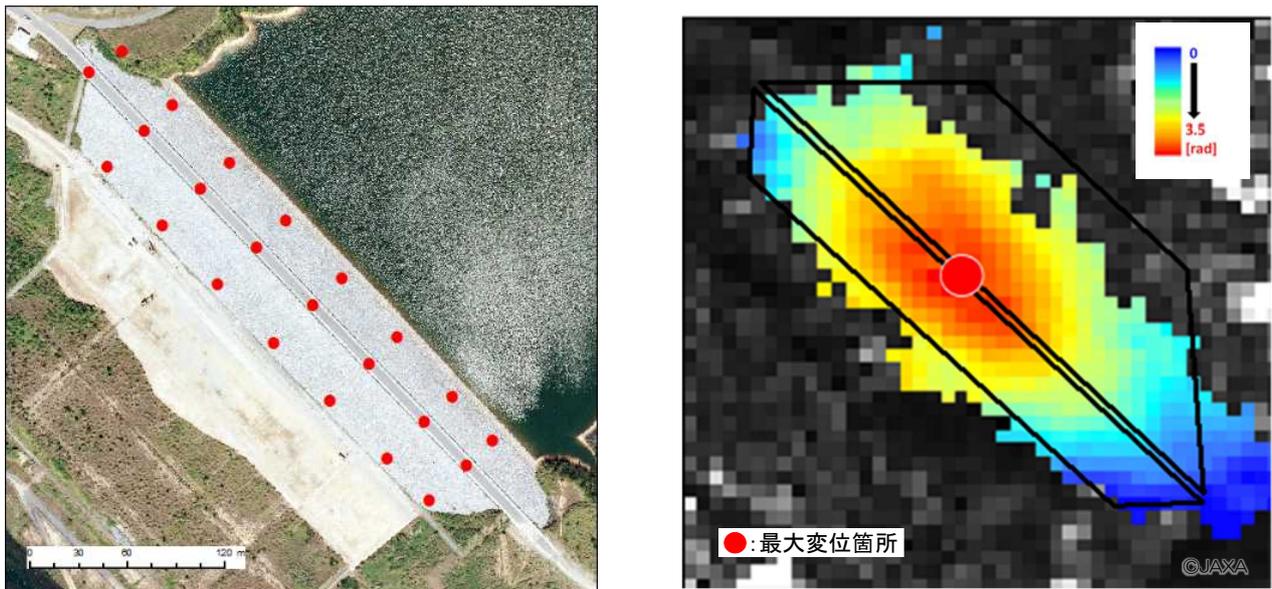


図 1.2.4 ロックフィルダム堤体上の変位（外部変形）測量点（左）と干渉 SAR 解析結果（右）

✚ 1つの衛星 SAR データに含まれる複数のダムあるいは貯水池周辺斜面の変位計測が可能

SAR 衛星は地表の数十 km × 数十 km 程度の広域を観測しているため、1 つの観測で得られる衛星 SAR データの観測領域に複数のダムが含まれている場合が多い（図 1.2.5）。その場合には、1 つの衛星 SAR データに含まれる複数のロックフィルダムあるいは貯水池周辺斜面の変位を計測することが可能となる。

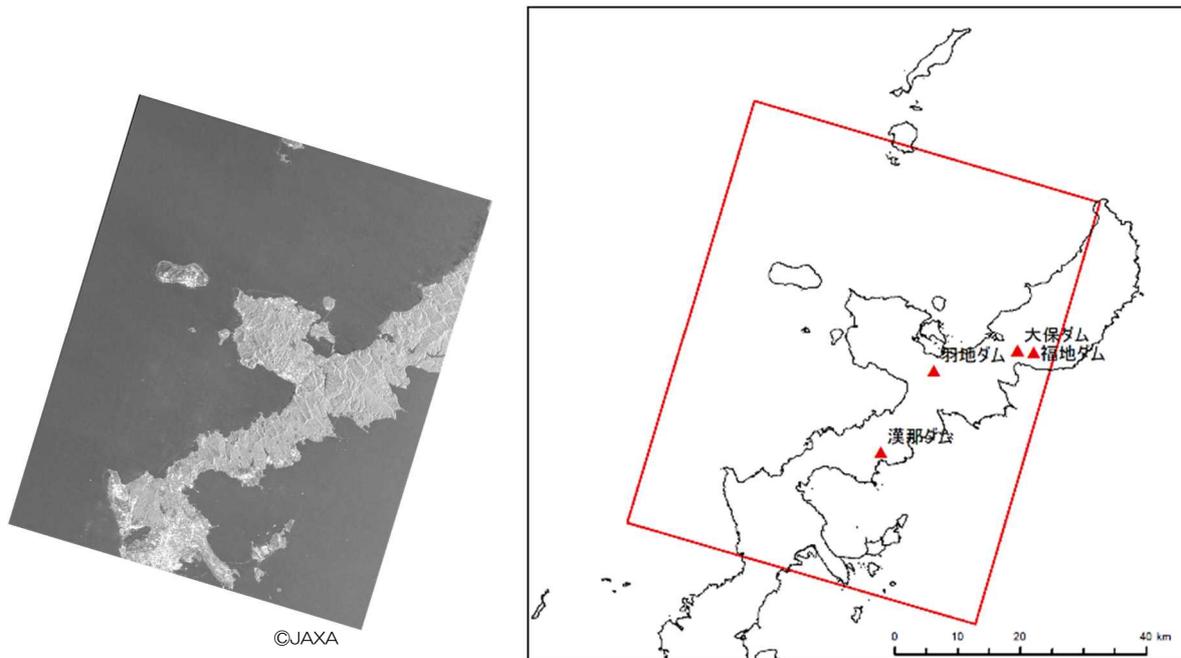


図 1.2.5 衛星 SAR の 1 データに複数ダムが含まれる例
(左：ALOS-2 データの例、右：ロックフィルダムの位置)

✚ 地上の観測設備が不要

SAR 衛星は、衛星に搭載されたセンサから電波（レーダ）を地表面に向けて照射し、そのセンサで地表面から反射された反射波を受信することにより観測を行っている。そのため、地上に観測設備が不要である。

✚ 災害時に現地に行くことなくデータを得ることが可能

衛星 SAR を利用した変位計測では地上の観測設備が不要なため、変位計測の対象（現地）に行くことなく観測データを得ることが可能である。そのため、災害時に道路等が不通になり現地へのアクセスが困難になった場合でも、対象領域の観測データを入手することで、その領域内のダムや貯水池周辺斜面の変位を計測することが可能である。

✚ 過去の衛星 SAR データを得ることが可能な場合がある

衛星 SAR データが過去に取得され、現在まで JAXA 等においてデータが保存されている場合、そのデータを用いて過去の変位を計測することが可能となる場合がある。例えば、ALOS-2 については、2014 年後半から現在までに取得された観測データが JAXA により保存（アーカイブ化）されており、そのアーカイブデータを購入することによりデータを使用することができる。

1.2.4 他の変位計測手法との比較

ロックフィルダムの変位計測で用いられることの多い光波測量と GNSS 測量との主な比較を表 1.2.1 に示す。

他の変位計測手法と比べると、地上に計測設備を設置する必要がないこと、面的に変位を計測することが可能なことが主な特長である。

表 1.2.1 衛星 SAR と既存の変位計測手法との比較

観測手法	観測対象	観測対象とする 最小変動量	データ取得頻度	特徴
光波測量	観測点	数 mm	年数回（任意で実施）	現地作業必要
GNSS 測量	観測点	数 mm	24 時間連続観測	要インフラ（受信アンテナ等）整備
衛星 SAR (ALOS-2)	ロックフィルダム	5mm 程度以下	年 3~4 回程度×2 (北行軌道、南行軌道)	地上に計測設備不要
	貯水池周辺斜面	—※	年 3~4 回程度×2 北行軌道、南行軌道)	地上に計測設備不要

※貯水池周辺斜面を対象としたこれまでの試事例では、比較対象となる観測領域での光波測量あるいは GNSS の測量結果が得られておらず、それに対する衛星 SAR による変位計測結果らとの誤差（精度）は確認できていないため、対象とする最小変動量は不明である。ただし、現地踏査結果との比較では、変動領域をほぼ正確に評価することは可能なことがわかっている。また、変動量や変動方向についても概略的な評価は可能なことがわかっている（「巻末参考」事例 2 参照）。

1.3 衛星 SAR の特徴

1.3.1 SAR 衛星の概要

SAR 衛星の概要

SAR 衛星は、搭載されているレーダ（合成開口レーダ：SAR）から電波（マイクロ波）を地表に向けて照射し、その反射波を衛星のアンテナで受信することにより SAR データを取得する能動型の地球観測衛星である。

衛星のレーダから電波を自ら照射するため、夜間も観測可能である。また、使用するレーダは雲を透過するため、雨天時でも観測が可能である。

1.3.2 衛星 SAR の特徴

観測波長

現在、利用可能な衛星 SAR に用いられる電波の波長帯は主に L バンド、C バンド、X バンドの 3 種類である（図 1.3.1）。各バンドの波長は、L バンドが約 24cm、C バンドが約 6cm、X バンドが約 3cm である。

X バンド（約 3cm）のように波長が短いほど、小さな変位を検出しやすくなるが、地表面にある植生や大気中の雨・水蒸気などの影響を受けやすい。その影響は観測データにノイズとして現れ、変位計測の精度が低下する場合もある。

また、干渉 SAR 解析（1.4.2 参照）により計測可能な変位量は、基本的に衛星 SAR での観測波長の 1/2 以下となる。このことを考慮し、干渉 SAR 解析による変位計測の対象の変位量と衛星 SAR の観測波長・観測頻度などから、変位計測に用いる衛星 SAR の観測波長を適切に選定する必要がある。

なお、本資料で使用している ALOS-2 で使用しているレーダの波長は L バンド（23.8cm）である。



L バンド：波長約 24cm

C バンド：波長約 6cm

X バンド：波長約 3cm

図 1.3.1 電波の周波数による違い
(参考文献¹⁾の図に加筆)

SAR 衛星の軌道

ALOS-2 は、地上 628km の上空をほぼ南北方向に周回する軌道を飛行している。ここで、地球は自転しているため、図 1.3.2 において日本上空での衛星の飛行方向を考えると、図 1.3.2(a) では衛星は南から北に向かって飛行しており、図 1.3.2(b) では衛星は北から南に向かって飛行している。図 1.3.2(a) のように衛星が南から北に向かって飛行する衛星の軌道を「北行軌道」と呼ぶ。逆に、図 1.3.2(b) のように衛星が北から南に向かって飛行する衛星の軌道を「南行軌道」と呼ぶ。なお、北行軌道は昇行軌道 (ascending orbit)、南行軌道は降行軌道 (descending orbit) と呼ばれることもある。

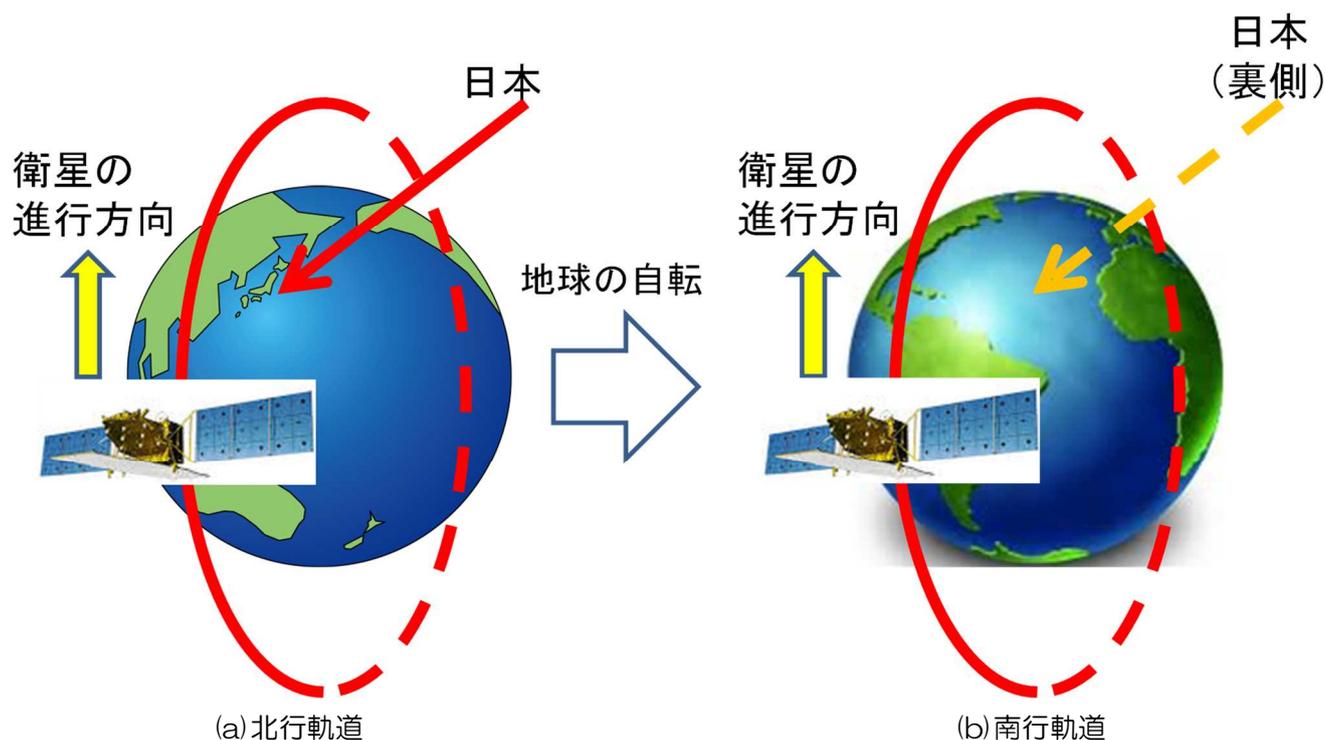


図 1.3.2 北行軌道と南行軌道

回帰日数と変位解析が可能な観測間隔

SAR 衛星は図 1.3.2 のような軌道で地球の上空を周回し、ALOS-2 の場合には、地表から見て 14 日後には同じ場所に戻る。この 14 日を ALOS-2 の回帰日数と呼ぶ。なお、他の衛星 SAR については回帰日数が ALOS-2 と異なる場合がある。

衛星 SAR データを使った変位解析 (干渉 SAR 解析、1.4.2 参照) では、衛星 SAR により同じ場所から撮影された 2 時期のデータを使用するが、上述のとおり ALOS-2 の場合には 14 日毎に同じ場所から地表面を撮影したデータを取得することが可能なため、ALOS-2 により取得されたデータを用いる場合には、変位解析が可能なデータの観測間隔は 14 日の倍数になる。

ただし、ALOS-2 は、14 日毎に必ずデータを取得するとは限らないため、ALOS-2 データを用いて変位解析を行う場合には、過去に取得されたデータ (アーカイブデータ) の有無を確認する必要がある。アーカイブデータは JAXA の HP のリンク先等から確認することが可能である。

観測方向（電波照射方向）

図 1.3.2 のように、SAR 衛星は地球を周回しながら、地表面に向けてレーダから電波を照射し、その反射波を受信することにより、地表面についての観測データ（視線方向の距離）を取得している。

この時、仮に衛星から真下の方向に電波の照射及び反射波の受信を行うとすると、図 1.3.3(a)のように電波の照射から反射波の受信までの時間が同一になってしまう信号については、原理的に左右のどちらから反射されたか区別することができない。そのため、図 1.3.3(b)に示すように、衛星の進行方向の右下（あるいは左下）となる斜め下にてレーダを向けて電波を照射し、観測を行っている。

なお、ALOS-2 の場合には、多くのアーカイブデータは進行方向に対して右下観測となっているが、左下観測のアーカイブデータも存在するため、観測方向に注意が必要である。

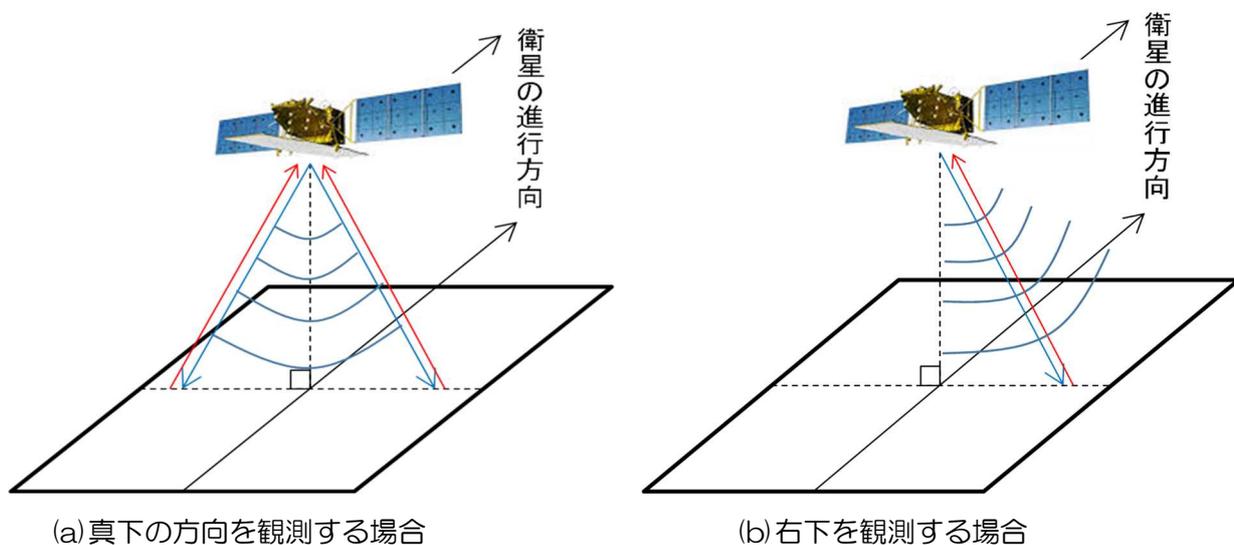


図 1.3.3 衛星 SAR での観測方向

オフナディア角

図 1.3.3 に示したように、衛星 SAR で地表面を観測する際には衛星の真下ではなくやや斜め下の方向の観測を行う。この時、衛星の鉛直下方から観測方向のなす角をオフナディア角と呼ぶ（図 1.3.4）。

ALOS-2 のオフナディア角は 30 度前後の場合が多いが、観測日によって異なる。衛星 SAR データを複数用いてその間の変位量を算出する干渉 SAR 解析を行うためには、オフナディア角が同じ複数の衛星 SAR データを使用する必要がある。

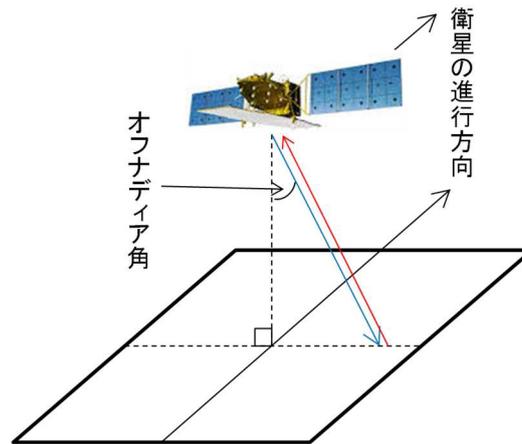


図 1.3.4 オフナディア角

空間解像度

衛星 SAR データを取得する際、空間解像度が数 m の比較的高解像度で数十 km 四方のエリアを撮影するモードと、空間解像度が数十 m の比較的低解像度で数百 km 四方のエリアを撮影するモードのデータがある場合がある。衛星 SAR データを使用して変位解析（干渉 SAR 解析）を行う場合には、出来るだけ空間解像度が高く、その空間解像度で撮影されたデータ数が多い空間解像度のデータを用いることが望ましい。

ALOS-2 の場合には、空間解像度が約 3m の高解像度のデータが多く、それらのデータを干渉 SAR 解析に用いる場合が多い。

基線長

図 1.3.2 に示したように、SAR 衛星は 1 回目の観測の後、回帰日数後には同じ位置を飛翔することになっている。しかし、図 1.3.5 のように 1 回目の観測と 2 回目の観測で位置がずれてしまうことがある。図 1.3.5 に示した 1 回目の観測の衛星の位置と、2 回目の観測の衛星の位置のずれの距離を基線長と呼ぶ。一般に基線長（正確には図 1.3.5 の垂直基線長）が長いほど、変位計測の誤差が大きくなることが理論的に明らかとなっている。変位計測の誤差を小さくするためには、小さな基線長のデータを用いる必要がある。なお、ALOS-2 については、図 1.3.6 に示すように半径 500m のチューブ内を飛翔するように運用が行われている。このため、変位解析に及ぼす基線長の影響は小さいものと考えられる。

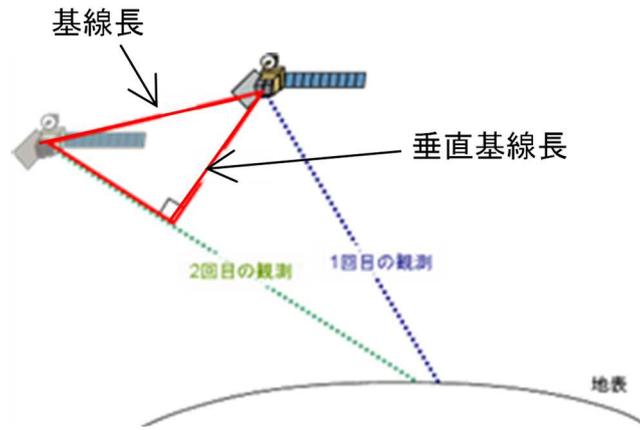


図 1.3.5 基線長
(参考文献²⁾の図に加筆)

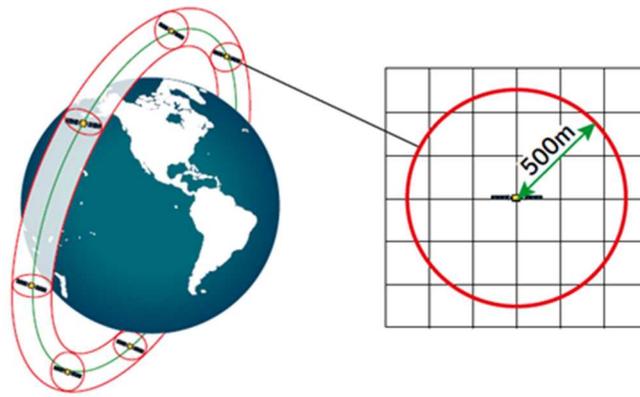


図 1.3.6 ALOS-2 の観測軌道¹⁾

運用中の SAR 衛星のうち、干渉 SAR 解析にそのデータが利用可能な主な衛星を表 1.3.1 に示す。

表 1.3.1 干渉 SAR 解析が可能な SAR 衛星の代表例

衛星名	運用期間	使用波長帯 (バンド)	代表的モードの空間分解能	運用国 (組織)
ALOS-2 	2014~	L	3m	日本 (JAXA)
COSMO-SkyMed 	2007~	X	1~3m	イタリア (ASI)
RADARSAT-2 	2007~	C	3~10m	カナダ (MDA)
Sentinel-1 	2014~	C	20m	欧州 (ESA)
TerraSAR-X 	2007~	X	1~3m	ドイツ (DLR)

1.4 衛星 SAR データを用いた変位解析の概要

1.4.1 必要なデータ

衛星 SAR データを用いてダムあるいは貯水池周辺斜面の変位解析を行うためには、以下のデータが必要となる。

(1) 衛星 SAR データ

衛星 SAR データを用いて変位解析を行うためには、以下の条件が同じで異なる時期に取得された 2 時期（あるいはそれ以上）の衛星 SAR データを用意する必要がある。

- 撮影領域
- 観測軌道（北行または南行軌道）
- 観測方向（右側または左側観測）
- オフナディア角
- 空間解像度

その上で、変位解析による精度が良くなるようにデータを選定することが望ましい。変位解析の精度が良くなるためのデータ選定の留意点については 2.4.1 に後述する。

(2) DEM データ

衛星 SAR データを用いて変位解析（干渉 SAR 解析）を行う際には、地表面の標高を精度良く入力する必要がある。そのため、対象領域の標高を数値としてデータ化した DEM（Digital Elevation Model）データ（数値標高データ）が必要となる。DEM データの精度がよいほど、干渉 SAR 解析の精度もよくなる。

ロックフィルダムの堤体あるいは貯水池周辺斜面の DEM データは、航空レーザ測量により得られた 3 次元地形データ（LP データ）から作成することが可能である。堤体あるいは貯水池周辺斜面の表面は、工事等の何らかの影響により改変されている場合があるので、DEM データのもとになる LP データは、できるだけ最近のものを使用することが望ましい。

(3) その他

上記のデータ以外に、干渉 SAR 解析の精度を高めることが可能となるデータや、干渉 SAR 解析の精度を確認するために必要なデータがある。これらのデータについては、2.4.1 に後述する。

1.4.2 干渉 SAR 解析の概要

干渉 SAR 解析の基本

干渉 SAR 解析は、衛星 SAR により観測された異なる 2 時期のデータを用いて、地表面の変位を算出するための基本的な手法である。

SAR 衛星は決められた軌道上を飛行しており、定期的に衛星軌道上の同じ位置から、同じ地表面の観測を行うことが可能である。1 回目の観測の後、ある期間をおいた 2 回目の観測の際に、地表面に変位がない場合には、観測される電波の位相には変化がない（図 1.4.1(a)）。一方、1 回目の観測後に、地盤の隆起や地盤沈下等により観測対象の地表面に変位がある場合、地表面の変位に伴い、1 回目の観測と 2 回目の観測では衛星から地表面までの距離が変化する（図 1.4.1(b)）。地表面の変位に伴う衛星から地表面までの距離の変化は、衛星 SAR では 1 回目と 2 回目の観測データの位相のずれ（位相差）として計測される（図 1.4.1）。干渉 SAR 解析は、この位相のずれ（位相差）を 2 時期の衛星 SAR データから求めるための基本的な手法である。

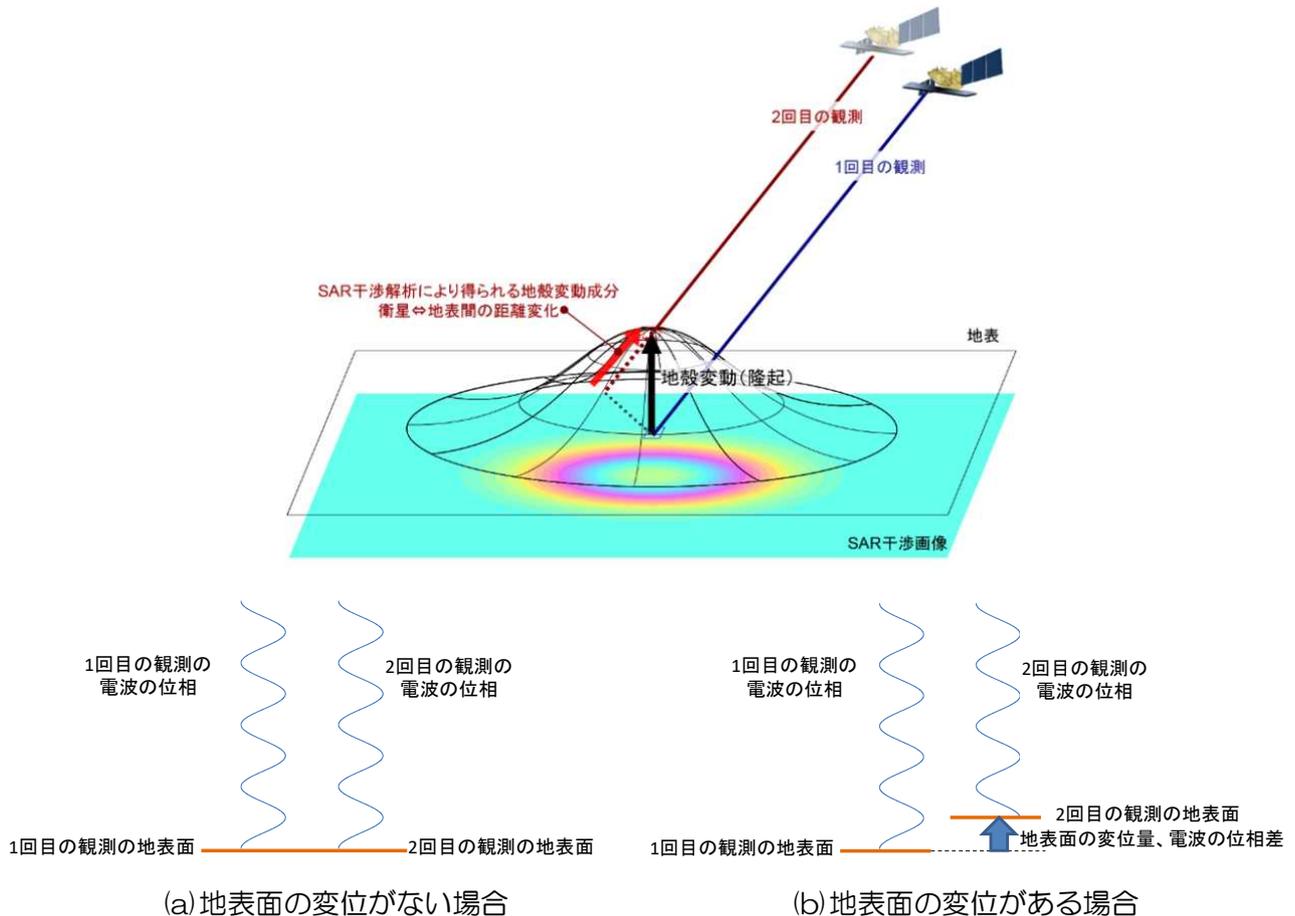


図 1.4.1 地表面の変位と干渉 SAR 解析により得られる位相差の概念図

(参考文献³⁾の図に加筆)

干渉 SAR 解析の結果（干渉縞）の見方

地表面の変位がない場合には干渉 SAR 解析により得られる位相も変化はない（図 1.4.2 左）。一方、地表面に変位がある場合には、その変位量に応じ、位相が変化したことを表す干渉縞が色調の変化として現れる（同図中・右）。

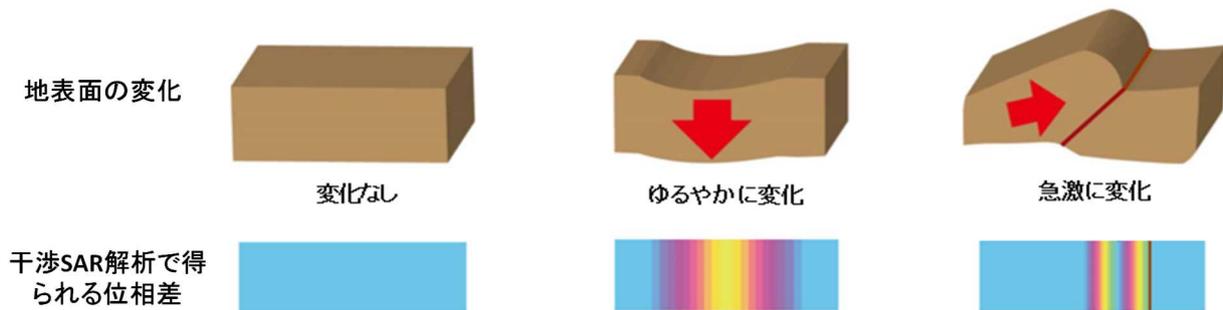


図 1.4.2 地表面の変化と干渉 SAR 解析により得られる位相差の関係
（参考文献⁴⁾の図に加筆）

このように、干渉 SAR 解析では、地表の変位に伴う衛星との距離の変化に対応する電波の位相の変化が干渉縞として表される画像（干渉画像）が得られ、この干渉画像から観測対象の変位（直接には衛星からの視線方向の変位）を知ることができる。

衛星から地表までの距離の変位を表す数値の符号は、1 回目の観測に比べて 2 回目の観測で衛星から地表が遠ざかる場合をプラス、逆に近づく場合をマイナスで表す場合が多い。ALOS-2 の場合、観測波長は約 23.8cm であることから、例えば 2π (360°) の位相差は、マイクロ波が衛星と地表を往復するため半波長である約 11.9cm の変位量に相当する（図 1.4.3）。なお、地表面が沈下すると衛星に対して地表面は遠ざかることになるので、図 1.4.3 ではプラスの値となる。逆に、地表面が隆起すると衛星に対して地表面は近づくことになるので、図 1.4.3 ではマイナスの値となる。

ただし、変位量そのものと異なり、位相差は $-\pi$ から π までの値しか決定することができない。そのため、実際の変位量が半波長よりも大きくなっている場合には、図 1.4.4 のように、 $-\pi$ から π までの位相差を繰り返して変位量を表示する必要がある。この時、変位量を計測するためには、変位ゼロに対応する位相差ゼロとなる点を変位量の基準点（不動点）として、干渉 SAR 解析結果の評価に用いる必要がある。

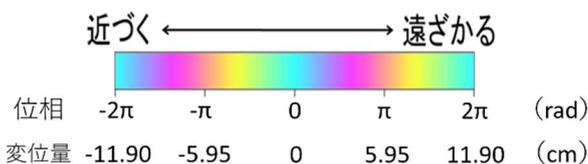


図 1.4.3 色調変化で表される位相差と変位量の関係（ALOS-2 の場合）

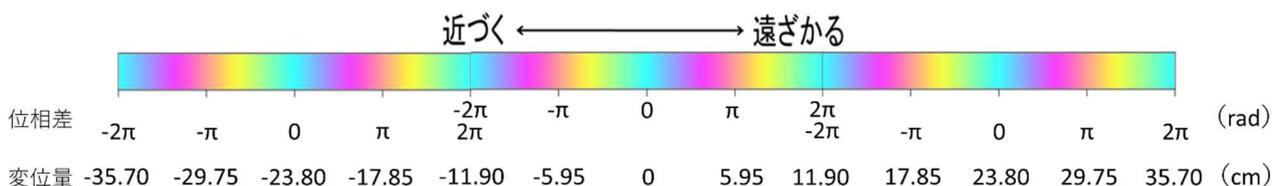


図 1.4.4 位相差が大きい場合の位相差と変位量の関係（ALOS-2 の場合）

干渉 SAR 解析により得られる干渉縞から変位量を読み取るには、変位が発生していないと考えられる場所を基準点として、その基準点から変位量が大きくなる（＝干渉縞の色調変化が大きい）方向に色が変化するパターンを確認する必要がある。

一例として、大規模地震時の広域的な地殻変動が解析されている図 1.4.5 では、基準点(a)は水色で、周囲の色調変化も少ないことから、変位量がゼロと考えられる。この基準点(a)から同図中の赤点線の矢印に沿う色調の変化を見ると、水色→緑色→黄色→橙色→紫色→水色、を繰り返していることが確認できる。この色調変化は、凡例にあるカラーパレットと比較すると、衛星に近づく変位を示していることが分かる。凡例を見ると、衛星の電波照射方向は西向きになっていることから、隆起あるいは東側への変位によるものと考えられる。

一方、同図の基準点(b)から同図中の青点線の矢印に沿う色調の変化を見ると、水色→紫色→橙色→黄色→緑色→水色、を繰り返していることが確認できる。これは、前述の基準点(a)からとは逆の色調変化のパターンになっており、凡例にあるカラーパレットと比較すると、衛星から遠ざかる変位を示していることが分かる。凡例を見ると、衛星の電波照射方向は西向きになっていることから、沈降あるいは西側への変位によるものと考えられる。

このように、干渉縞の色調変化から、地表面が衛星から「近づいている」「遠ざかっている」のいずれの変位方向なのかを判断できる。また、図の凡例にあるカラーパレットの色調変化と観測波長から、位相差に応じた変位量を算出することも可能である。

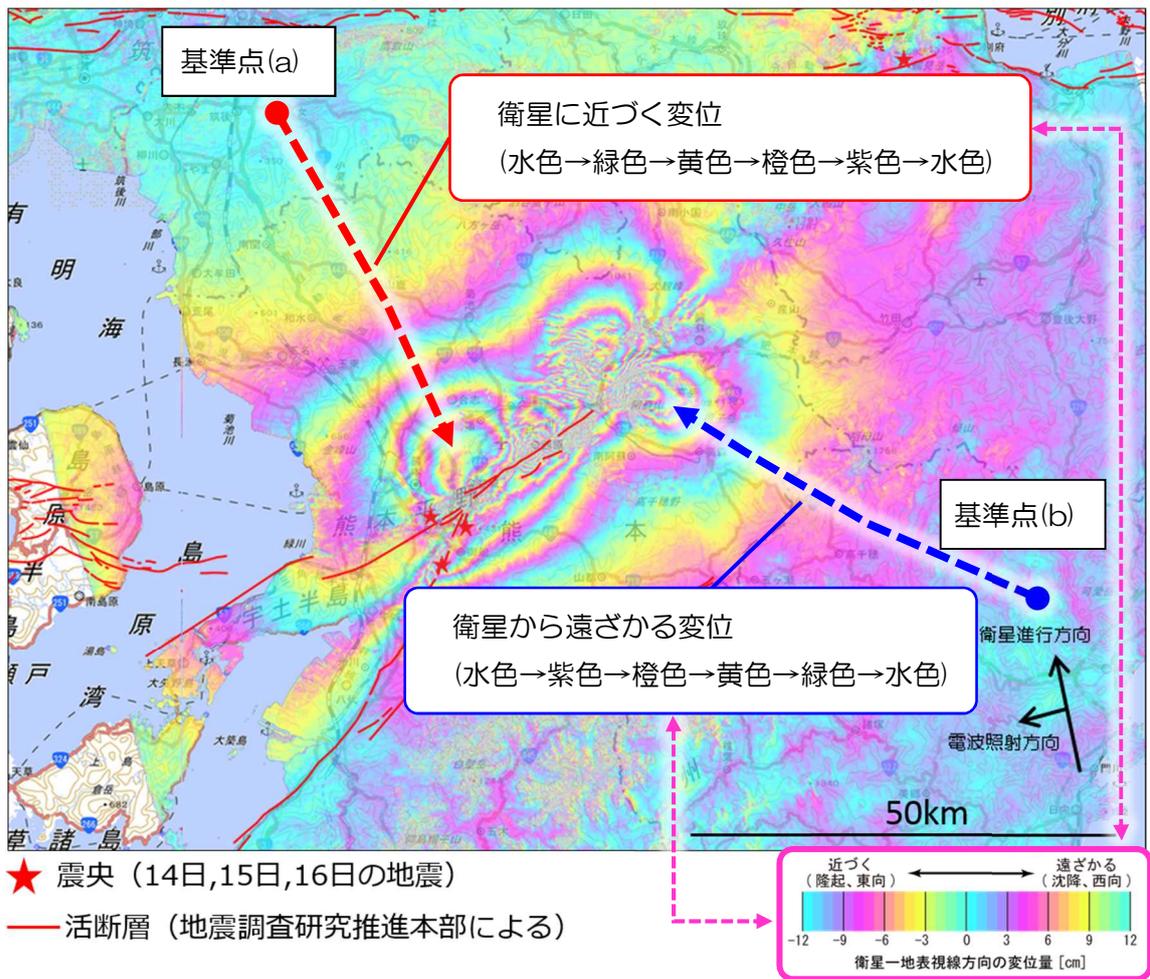


図 1.4.5 干渉縞による変位の方向の見方
(参考文献⁵⁾にある干渉 SAR 解析結果に加筆)

干渉縞から実変位量への変換

干渉縞は 2 時期に生じた地表面の変位量を位相差という形で示しているため、 $-\pi$ から π (-180 から 180°) の情報となる。この位相差から実際の変位量を取得するためには、得られた干渉縞の位相情報から実際の変位量に変換する必要がある。変位量に変換された画像データをアンラップ画像という(図 1.4.6)。

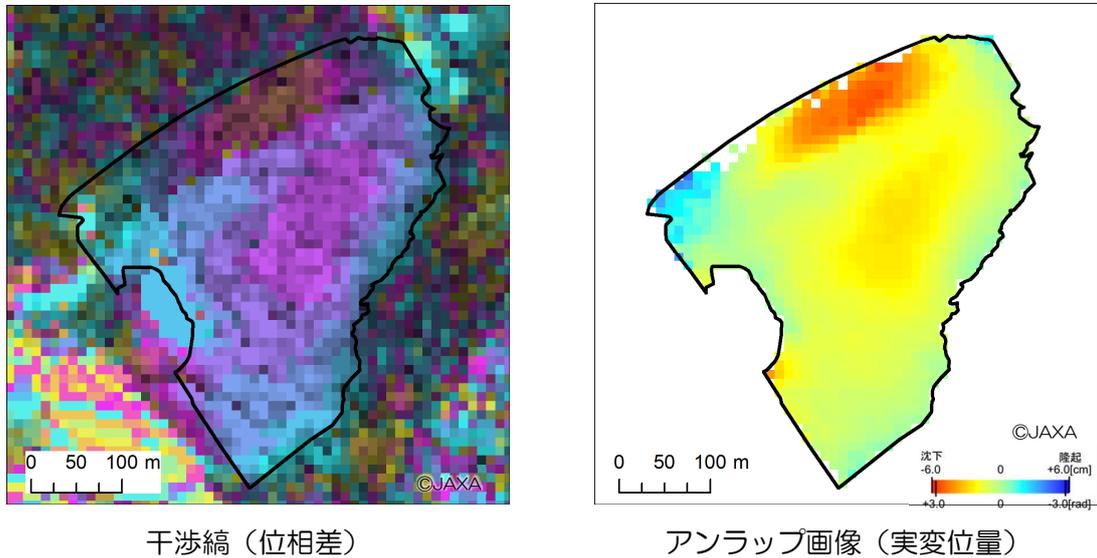


図 1.4.6 干渉画像とアンラップ画像 (左：干渉縞；右：アンラップ画像)

使用する SAR の電波の波長によって位相差が示す変位量は異なる^{※1} が、ALOS-2 の場合には位相差 360 度が約 11.9cm を示す^{※2}。なお、干渉 SAR 解析に用いる 2 時期の観測の間で 11.9cm 以上の変位が発生した場合には、干渉 SAR 解析により変位量が正しく算出されない場合がある。

※1：位相差 360 度は X バンド SAR の場合 1.5cm、C バンド SAR の場合 3cm を示す。

※2：干渉 SAR 解析の位相差は地表と衛星の往復距離の変化としてあらわれるため、地表面の変位量の 2 倍の長さが 1 波長で表現できる最大の距離となる。ALOS-2 の場合には、波長 (約 23.8cm) の半分の距離となる約 11.9cm が位相差の 1 サイクルに相当する。

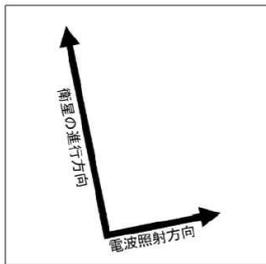
視線方向の計測変位と実際の変位の関係

干渉 SAR 解析により得られる変位量は、衛星のレーダからの電波の照射方向 (視線方向) の一次元の変位量である。そのため、干渉 SAR 解析により得られた結果から実際の変動方向を解釈する際に注意が必要な場合がある。

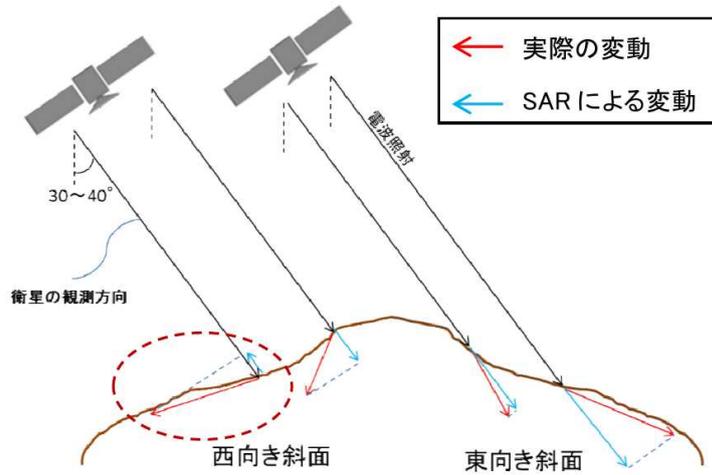
ALOS-2 の観測データで多い右側観測の場合について、干渉 SAR 解析により得られる変動方向と実際の変動方向の概略関係を図 1.4.7 に示すが、同図中に赤い破線で示した北行軌道・右側観測の場合の西向き斜面と南行軌道・右側観測の場合の東向き斜面については、斜面が斜め下方に変動しているときに、干渉 SAR 解析により得られる変動方向が衛星に近づく方向となる場合がある。このような場合には、斜面が隆起していると誤って評価する可能性があり、注意が必要である。

なお、北行軌道・右側観測および南行軌道・右側観測の 2 種類のデータそれぞれの干渉 SAR 解析を行うことにより、より実際の変動方向に近い変動方向を推定することが可能となる。

北行軌道(右側観測)

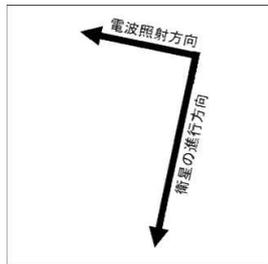


北行軌道(右側観測)の場合、西向き斜面の斜面変動は、衛星 SAR では適切に評価されない場合がある(図中丸破線)。

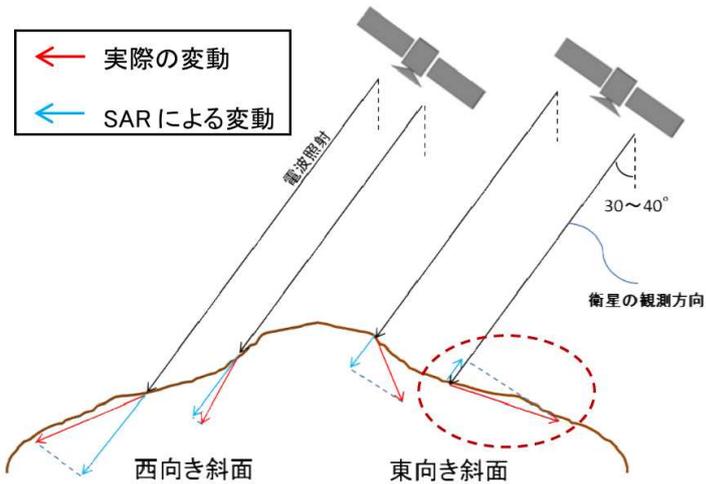


(a) 北行軌道、右側観測の場合

南行軌道(右側観測)



南行軌道(右側観測)の場合、東向き斜面の斜面変動は、衛星 SAR では適切に評価されない場合がある(図中丸破線)。



(b) 南行軌道、右側観測の場合

図 1.4.7 実際の変動方向と干渉 SAR 解析により得られる変動方向の関係

1.4.3 干渉 SAR 解析を行う際の注意点

ロックフィルダムと貯水池周辺斜面の表面状態の差異が干渉 SAR 解析結果に及ぼす影響

地表面の状態が衛星 SAR データに及ぼす影響は、衛星 SAR データに含まれる反射強度と、それから算出されるコヒーレンスにより評価することができる。

衛星 SAR では、衛星のレーダから地表面に向けて照射され、地表面で反射されて戻ってきた電波を受信することで反射強度が観測される。また、干渉 SAR 解析に用いる 2 時期の衛星 SAR データの反射強度等から、干渉しやすさの指標となるコヒーレンスという指標が算出される。

水平な地表面がコンクリート等の滑面で覆われている場合には、地表面での電波の反射（後方散乱）が少なくなるため反射強度が小さくなるとともに、コヒーレンスも低下する。本マニュアルで対象とするロックフィルダムの堤体表面は、通常、リップラップと呼ばれる最大粒径 1m 程度の岩石で覆われており、リップラップの表面は適度な凹凸があるため、ロックフィルダム表面の反射強度とコヒーレンスは十分に大きく、干渉 SAR 解析に適していることが分かっている。ただし、ロックフィルダムの表面に植生がある場合には、植生により反射強度・コヒーレンスが低下したり、またノイズの要因となることにより、干渉 SAR 解析による変位の計測精度が低下する場合がある。そのため、ロックフィルダムの表面の植生は定期的に伐採することが望ましい。

貯水池周辺斜面の表面は、通常、植生に覆われており、それにより反射強度・コヒーレンスは低下することにより、干渉 SAR 解析により得られる変位量の計測精度が低下する場合がある。そのような場合には、（１）植生の影響が同程度と考えられる同じ季節の衛星 SAR データを用いる方法や、（２）ノイズを低減させることが可能な変位解析方法を適用することにより、変位計測の精度を向上させることが可能な場合がある。

（１）については、干渉 SAR 解析は 2 時期の衛星 SAR データの位相差を求めることにより変位を計測するが、2 時期のデータとして①2020 年 10 月の観測データ、②2021 年 10 月の観測データ、というように、植生が同程度と考えられる同じ季節の観測データを用いる方法である。2 時期の植生が同程度であれば、2 時期の衛星 SAR データにおいて植生が及ぼすノイズが同程度となると想定され、2 時期のデータの位相差を算出する干渉 SAR 解析によりノイズが相殺されることが期待される。

（２）については、第 2 章に詳述するスタッキング解析による方法などがある。

ロックフィルダム、

一般的に、反射強度・コヒーレンスが高く、ノイズの影響が低い

⇒ 干渉 SAR 解析の精度高

⇒ 時系列干渉 SAR 解析の適用性が高い

貯水池周辺斜面

一般的に、反射強度・コヒーレンスが低く、ノイズの影響が大きい

⇒ 干渉 SAR 解析の精度が高くない場合がある

⇒ スタッキング解析によりノイズを低下させる検討が望ましい

斜面の向きと変位の方向により干渉 SAR 解析で変位が計測されない場合

干渉 SAR では、電波の照射方向に沿った変位が検出可能である。一方、ロックフィルダムや貯水池周辺斜面では、重力方向の沈下に加えて水平方向の変位も発生する場合があることから、一つの軌道による電波照射では変位が正しく把握できない可能性がある。（図 1.4.7）

また、ロックフィルダムや貯水池周辺斜面は、その傾斜方向（ダム堤体では上流面と下流面の傾斜方向、貯水池周辺斜面では個々の斜面の傾斜方向）が異なるため、一つの軌道からの電波照射で得られたデータだけでは計測対象全体の変位分布を捉えられないことが少なくない。

そのため、計測対象とするダム堤体や斜面に対して 2 つの軌道（東西の両方向）からの電波照射による衛星 SAR データを利用して干渉 SAR 解析を行い、異なる視線方向からの変位量を評価することが望ましい（図 1.4.8）。

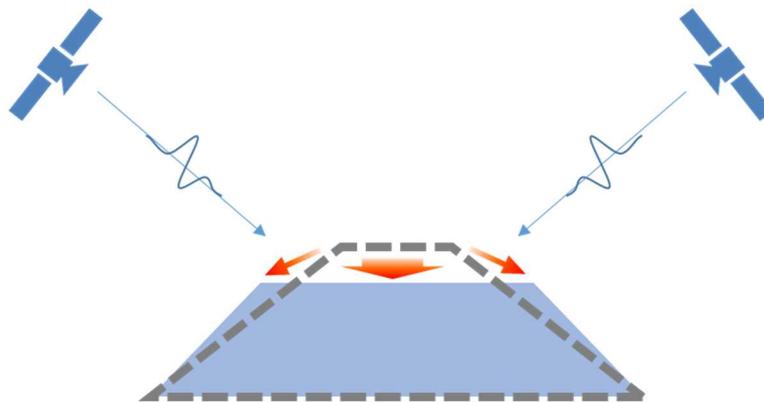


図 1.4.8 衛星 SAR の両方向からの観測による斜面の変位の評価

斜面勾配が急で干渉 SAR 解析により変位が評価できない場合

（レイオーバー・レーダーシャドウ、周辺構造物による強反射域）

衛星 SAR では、衛星から斜め下方向に電波を照射し、地表面からの反射波を受信することにより観測を行っている。平地や緩やかな勾配の斜面であれば衛星に近い場所から順に電波が反射されるが、高い建物や急峻な地形では水平位置で衛星から見て手前に位置する低い標高の場所よりも、奥に位置する建物・稜線の方が衛星との直線距離が近くなり、その結果として「衛星からの水平距離と直線距離の逆転」が生まれ、正しく画像が取得できなくなる現象「レイオーバー（Layover）」が発生する（図 1.4.9 左）。

また、衛星から見て急な地形や高い建物の裏側となる範囲などには電波が届かなくなり、その箇所が影となる現象「レーダーシャドウ（Radar Shadow）」が発生する（図 1.4.9 右）。

衛星 SAR 画像には、衛星から見て斜め下の方向を観測するという観測手法の特性上、このような現象による影響を受けた解析結果が部分的に含まれている場合があるので注意が必要である。

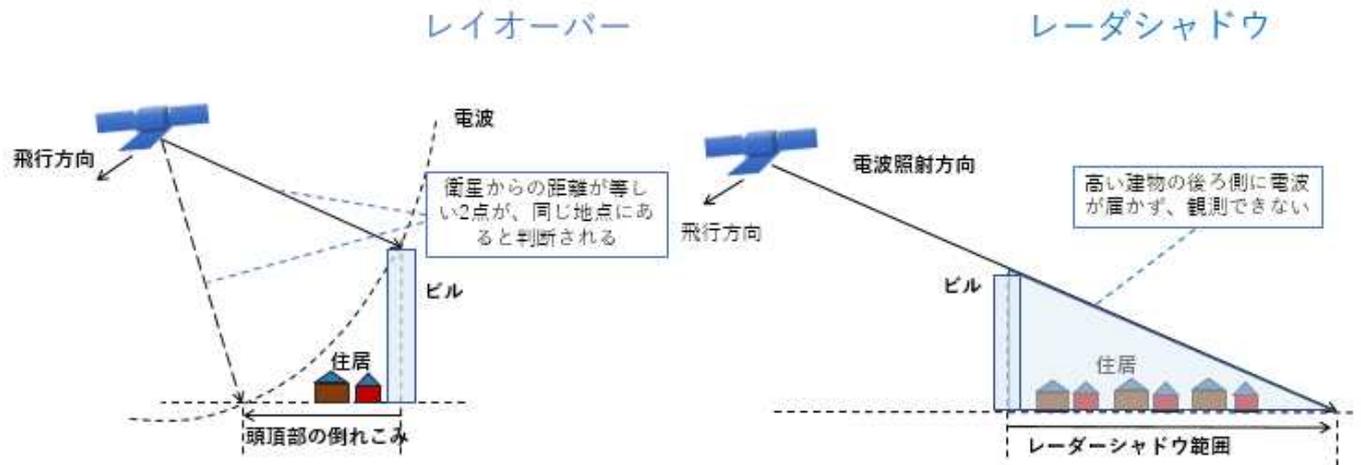


図 1.4.9 レイオーバーとレーダーシャドウの概念図

例えば、ロックフィルダムの変位解析においては、左右岸アバットメント部の法面や洪水吐によってレイオーバー・レーダーシャドウが発生する場合があります(図 1.4.10)。また、貯水池周辺斜面においても、斜面の勾配が急な場合にはレイオーバー・レーダーシャドウが発生する場合があります。

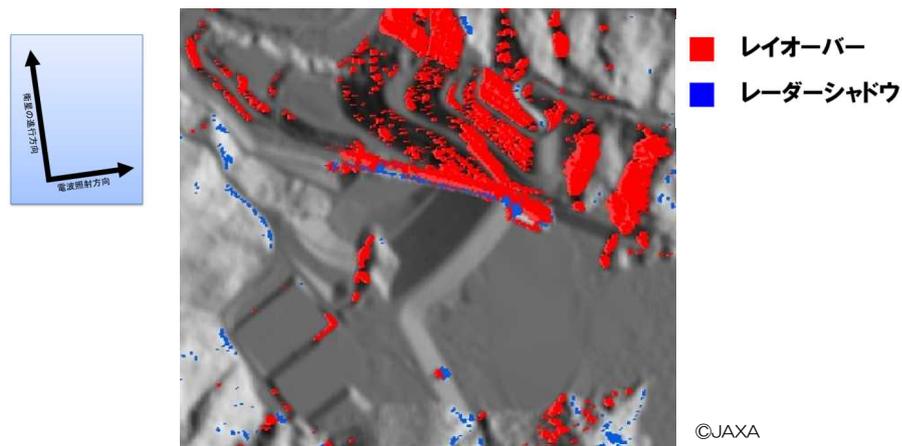


図 1.4.10 ロックフィルダム堤体周辺のレイオーバー(赤)・レーダーシャドウ(青)発生状況の例

周辺構造物等により電波の強反射が発生している場合

衛星 SAR で観測された画像の中に、衛星からの電波の照射方向に正対するような向き of 構造物が存在した場合、強い反射波が衛星に戻り、写真のハレーションのように強い散乱領域が発生する場合があります。図 1.4.11 は、ロックフィルダムの洪水吐きの導流壁に電波が強反射して干渉縞に影響を及ぼし、堤体の変位量の評価が困難となったケースを示している。

この現象は特定の角度からの観測で発生するものであり、異なる時期であっても同じ軌道・同じ角度での観測では同じ様に発生する。このため、解析対象としたダムの堤体上に強反射の影響が認められた場合には、反対方向からの観測データを利用する必要がある。

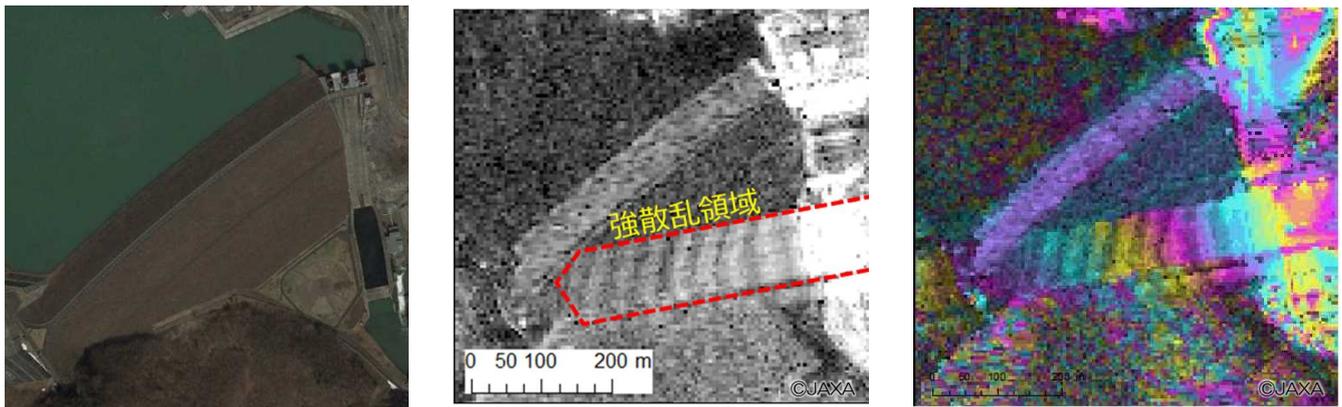


図 1.4.11 周辺構造物による強反射の影響（左：航空写真、中：反射強度、右：干涉縞）

1.4.4 干渉 SAR 解析による変位計測の精度低下要因

ロックフィルダムや貯水池周辺斜面を対象に干渉 SAR 解析を実施する場合、様々な要因が変位計測の精度低下要因となりうる。以下には、干渉 SAR 解析における主な変位計測精度の低下要因とその対策を記載する。

干渉 SAR 解析に用いるデータの時期が離れている場合

一般に干渉 SAR 解析に用いる 2 つのデータの観測期間が離れていれば離れているほど、その 2 つのデータからは有意な変位が計測しにくくなる（干渉性が悪くなるという）とともに、得られた変位の精度が低下する。

そのため、離れた期間における変位を計測したい場合には、できるだけ対象期間を分割するような衛星 SAR データを複数選定したうえで干渉 SAR 解析を行い、後で対象領域における変位を足し合わせることで、対象期間の変位を求めることが望ましい。

基線長が長い場合

図 1.4.12 に示すように、干渉 SAR 解析を行う際に用いる 2 時期のデータを観測した時には、多少なりとも衛星の位置がずれてしまう。この 2 時期の衛星の位置のずれ（基線長）が大きいと、干涉縞の中に基線長に起因する縞模様（軌道縞という）が現れるなど干渉 SAR 解析により得られる変位の精度が悪くなり、極端な場合には干渉しなくなる。

そのため、基線長が極端に大きなデータは除外し、可能な限り基線長の小さいデータを用いることが望ましい。

なお、ALOS-2 については、図 1.3.6 に示したように半径 500m のチューブ内を飛翔するように運用が行われており、変位解析に及ぼす基線長の影響は小さいものと考えられる。

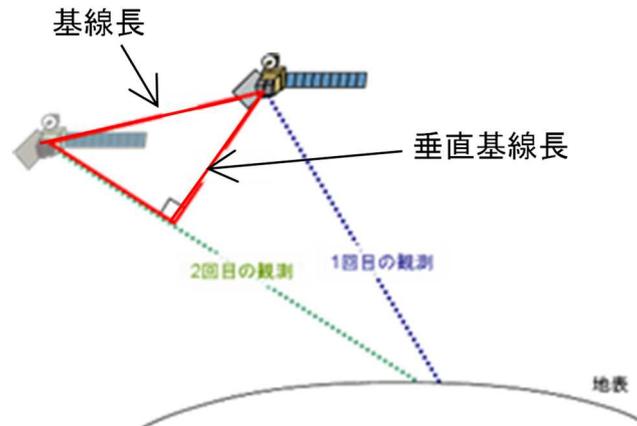


図 1.4.12 基線長 (図 1.3.5 の再掲)
(参考文献²⁾ の図に加筆)

DEM データの精度が悪い場合

DEM データの精度が悪い場合には、干渉 SAR 解析により得られた干渉縞に DEM データに起因する縞模様が見られることがある。これは地形縞と呼ばれている。

地形縞が確認される場合には、最新の LP データから DEM データを作成し直すなどして、DEM の精度を向上させる必要がある。

DEM データの位置ずれ

干渉 SAR 解析を行う際には、衛星 SAR データと DEM データの位置を合わせる必要があるが、この位置合わせにずれがある場合には、法面の方向に依存した干渉縞が発生することがある。このような場合には DEM データの位置ずれを補正し、DEM データの位置ずれによる誤差を抑えるような処理を行う必要がある。

図 1.4.13 中央の図において干渉縞は貯水池側の斜面では紫色になっているが、反対側の斜面では黄色になっている。DEM データの位置ずれを補正したところ、図 1.4.13 右側の図のように斜面の方向に依存しない干渉縞が得られた。

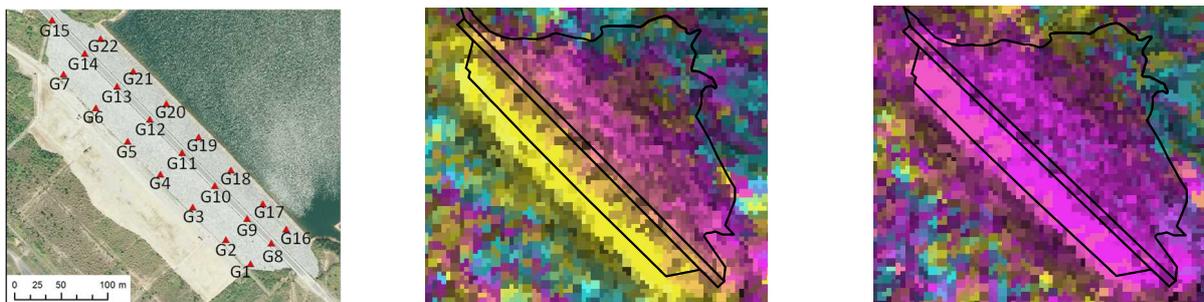


図 1.4.13 DEM データの位置ずれが干渉縞に及ぼす影響
(左：航空写真、中央：位置ずれあり、右：位置ずれ補正後)

大気中の水蒸気

大気中に水蒸気のまとまった場所が存在すると、その部分を電波が通過する際に遅延が発生する。これにより、あたかも地表面変位が発生したような干渉縞が現れる場合がある。このような場合には、該当する領域を除外したり、水蒸気による遅延量を推定して位相差（あるいは変位量）を算出したりするなどの処理が必要となる。

植生

図 1.3.1 に示したように、地表面が植生に覆われている場合、ALOS-2 の観測波長のような波長の長い L バンドの電波は植生を透過し、地表面で反射する。しかし、他の SAR 衛星（表 1.3.1）で使われている X バンドや C バンドの電波は植生で反射し、地表面からの反射波が観測されない。また、植生を透過する L バンドの電波であっても、植生の表面で反射する割合が高くなり、地表面で反射する電波の中にノイズとして混入することになる。

なお、ロックフィルダムの堤体を対象として干渉 SAR 解析を行う場合には、X・C・L バンドいずれの波長帯の衛星 SAR データを利用することが可能であるが、盛立直後の比較的沈下量大きい場合には、2 時期の変位量が半波長を超えないよう、観測波長の長い L バンドの衛星 SAR データを用いるのがよいと考えられる。また、貯水池周辺斜面を対象として干渉 SAR 解析を行う場合には、貯水池周辺斜面は植生に覆われていることが多いことから、L バンドの衛星 SAR データを用いるのがよいと考えられる。

積雪

地表面が雪に覆われている場合、雪の表面で電波が反射されるため、地表面の位置を把握することが困難となる。そのため、積雪の影響のある時期のデータは干渉 SAR 解析から除外する必要がある。

地表面の改変

例えば、干渉 SAR 解析の対象期間において、ロックフィルダムの天端の舗装の工事が行われている場合など、対象領域において何らかの地表面の改変があった場合には、その箇所の干渉 SAR 解析結果において変位が発生したような結果が得られる場合がある。このため、変位計測の対象とする領域での地表面の改変を伴う工事の有無や範囲について把握しておく必要がある。

1.4.5 時系列干渉 SAR 解析の概要

複数ペアの2時期の衛星 SAR データを用いて干渉 SAR 解析を行った場合、図 1.4.14 のように、各ペアごと（個々の2時期間）における変位量が得られる。この各ペアごとに得られた変位量を全ペアについて最初から足し合わせれば、任意の期間における変位量を算出することができる。

ここで、図 1.4.14 の赤丸のピクセルにおいて計測された変位量を足し合わせた変位量を、図 1.4.15 に赤丸で示す。図 1.4.15 に赤丸で示された変位量について、最小二乗法により得られる各時刻の変位量を赤い三角で示す。このように、複数ペアの干渉 SAR 解析結果をもとに、時間方向に最小二乗法を適用して確からしい変位量を得る方法を時系列干渉 SAR 解析⁶⁾という。

各ペアのデータを用いた干渉 SAR 解析から得られる個々の2時期間の変位量にはノイズの影響が含まれている場合があるが、このような時系列干渉 SAR 解析によりノイズの影響を低減できる場合がある。この点で、時系列干渉 SAR 解析は、ロックフィルダムの変位量を算出する場合に有効な手法といえる。

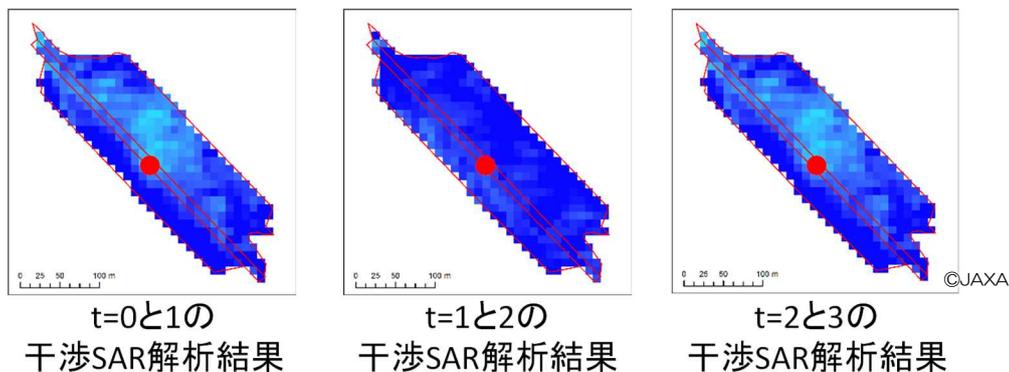


図 1.4.14 各ペア（個々の2時期間）の干渉 SAR 解析から得られる変位量の例

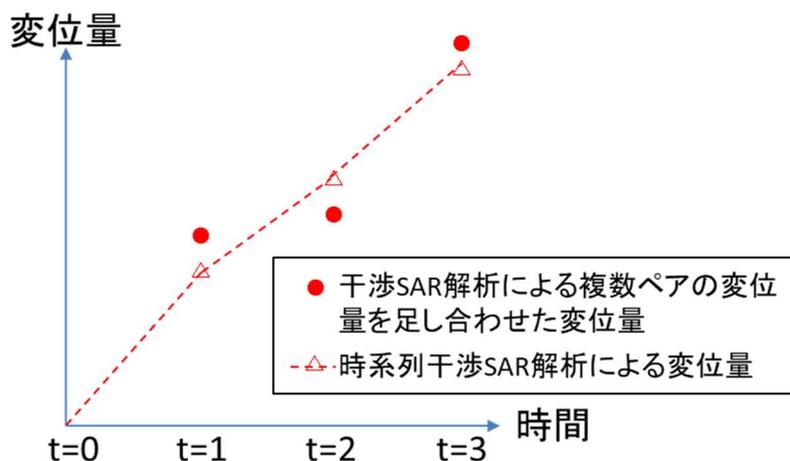


図 1.4.15 時系列干渉 SAR 解析による変位量の算出（概念図）

1.4.6 スタッキング解析の概要

図 1.4.14 に示した複数の干渉 SAR 解析に含まれるノイズによる位相差（あるいは変位量）は、一般にランダムなものになると考えられる。一方、貯水池周辺斜面に実際に変位が生じる場合、通常問題となるのは特定の変動方向に集中して累積的に生じる変位である。そこで、複数ペアの干渉 SAR 解析結果に含まれるランダムなノイズを低減するとともに、実際に問題となるような変位が生じていた場合にそれによる有意な位相差を増幅して検出しやすくするため、複数の干渉 SAR 解析結果を足し合わせるスタッキング解析と呼ばれる解析方法がある（図 1.4.16）。

例えば、貯水池周辺斜面は植生に覆われていることが多く、その衛星 SAR データの反射強度やコヒーレンスは低いことが多い。このため、貯水池周辺斜面を対象とした干渉 SAR 解析結果にはノイズの影響が大きい場合が多い。このような場合、複数ペアの衛星 SAR データから得られた干渉 SAR 解析結果を適切に選定した上でスタッキング解析を行うことで、貯水池周辺斜面の変動領域を適切に抽出しやすくなることがある。

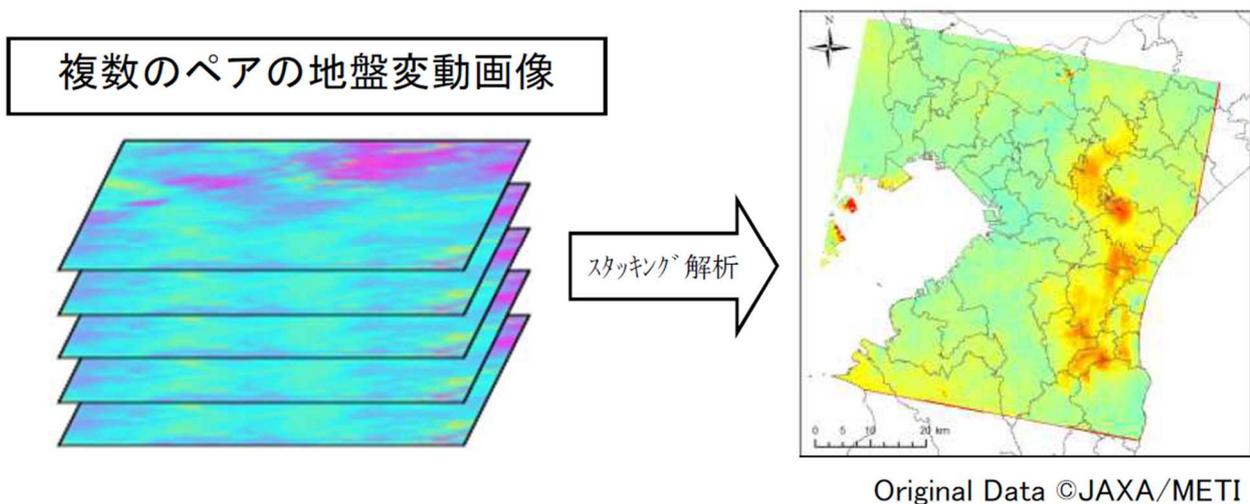


図 1.4.16 スタッキング解析の概要⁷⁾

1.5 ダムの安全管理における衛星 SAR データの活用

1.5.1 平常時・災害時における活用方法

ダムの安全管理において、衛星 SAR データを用いた変位計測の導入・活用が想定される場面として、平常時のモニタリングと災害時のモニタリングがある（図 1.5.1）。

平常時のモニタリングでは、定期的を取得される衛星 SAR データを用いて、ロックフィルダム堤体の変位および貯水池周辺斜面の変動の定期的なモニタリングに活用することが考えられる。

災害時のモニタリングでは、大規模地震時などの災害前後に取得される衛星 SAR データを用いて、ロックフィルダムの堤体の変位や貯水池周辺斜面の変動の迅速な確認に活用することが考えられる。

<平常時のモニタリングへの活用>

目的： ロックフィルダムや貯水池周辺斜面の面的な変位を把握する。

実施内容： 定期的（あるいは計画的）に衛星 SAR データを取得して干渉 SAR 解析を行う。

導入成果： ロックフィルダムの圧密沈下の収束傾向（不同沈下の有無等）を面的に把握できる。
貯水池周辺斜面の変動領域と変動方向を把握できる。

<災害時のモニタリングへの活用>

目的： 大規模地震時等の災害時に迅速にロックフィルダムの変位や貯水池周辺斜面の変動を把握する。

実施内容： 災害前と災害直後に観測された衛星 SAR データを用いて干渉 SAR 解析を行う。

想定成果： ロックフィルダム堤体の変位ほか、貯水池周辺斜面の変動について、現地に行くことなく迅速に（現地アクセスが困難な状況でも）面的かつ広域に把握できる。

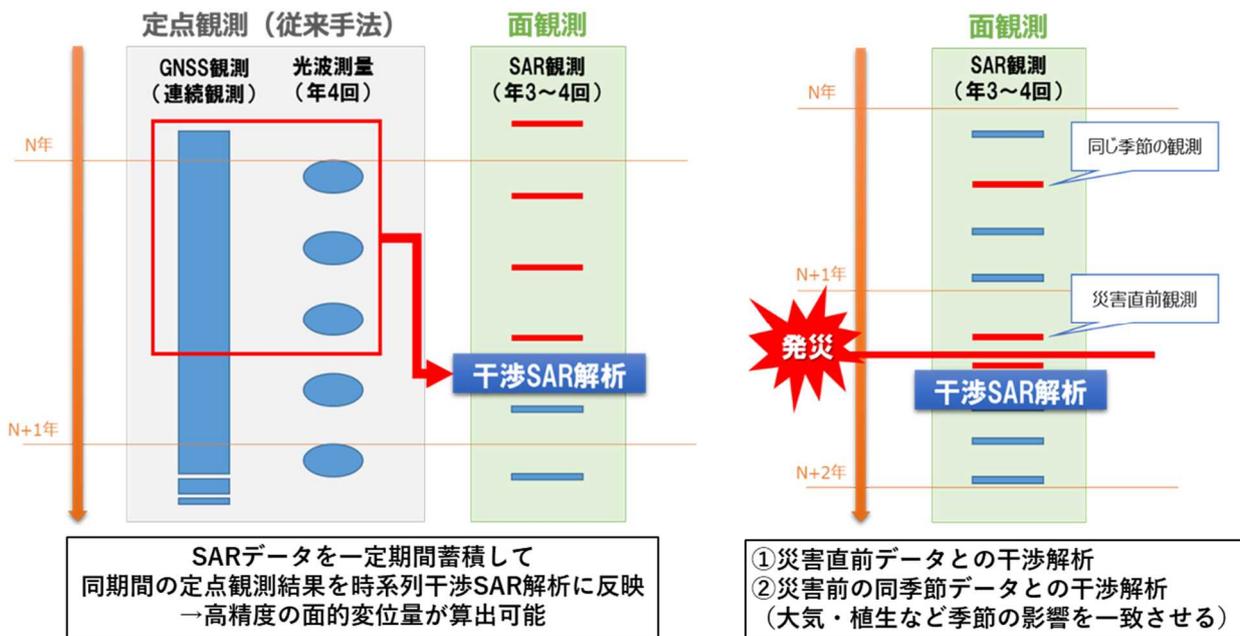


図 1.5.1 干渉 SAR 解析の導入によるモニタリングの流れ（左：平常時、右：災害時）

1.5.2 外部委託の活用

外部委託の活用と必要な準備

ダム安全管理への活用を目的として、衛星 SAR データを用いてロックフィルダムや貯水池周辺斜面を対象とした変位解析（干渉 SAR 解析等）を実際に行うには、解析に使用する SAR データの取得や DEM データの準備等を行った上で、解析用ツールとその適切な利用及び解析結果の評価等のために本資料「2. 解説編」に示す内容を含む干渉 SAR 解析等に関する専門知識が必要となる。そのため、ダム管理に携わる職員が直接実施することが難しい場合には、専門技術者を有するコンサルタント等への外部委託を活用することが考えられる（図 1.5.2）。

なお、外部委託を活用する場合にも、干渉 SAR 解析の実施に必要な以下の基本的な条件設定や関連資料の有無・所在の確認は、ダム管理者において行う必要がある。

① 条件設定

- ・対象とするダムや貯水池周辺斜面
- ・解析（モニタリング）の対象時期・期間
 - 平常時のモニタリングの場合： 定期観測（計測）の対象とする期間
 - 災害時のモニタリングの場合： 臨時計測の対象とする災害（イベント）または対象期間

② 干渉 SAR 解析に必要な関連資料・データ等の確認

- ・DEM データの作成に必要な最新の LP データ（有無・所在の確認）
- ・その他ダム管理者として保有している関係図面、ダム管理データ等

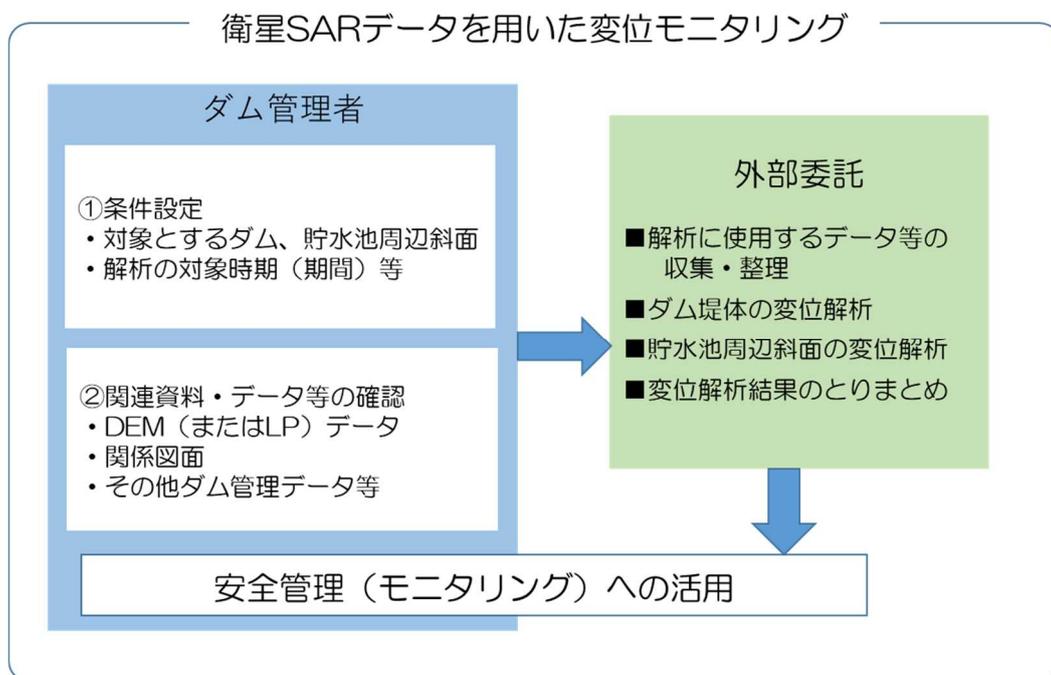


図 1.5.2 衛星 SAR を用いた変位モニタリングにおける外部委託の活用例

なお、衛星 SAR データを用いた干渉 SAR 解析やその結果の取りまとめに必要な関連資料・データ等としては、表 1.5.1 に示すものがある。

表 1.5.1 衛星 SAR データを用いた変位解析（干渉 SAR 解析）に必要な資料・データの一覧

資料・データ	必要性	必要な理由等
衛星 SAR データ	◎	干渉 SAR 解析が可能なプロダクトレベルの衛星 SAR データが必要。（プロダクトレベルについては 2.4.1 を参照）
DEM データ	◎	干渉 SAR 解析の地表面の標高データとして使用。 干渉 SAR 解析は地形の影響を大きく受けるため、DEM の精度が高いほど、変位の精度も高くなる。
工事履歴	○	SAR データの解析は土地被覆の影響を大きく受けるため、工事などによってダム表面等の改変が行われていないか確認する。
積雪データ	○	積雪は干渉 SAR 解析においてはノイズとなるため、積雪が確認される SAR データは解析から除外する。
光波測量等による 実測変位データ及 び測量箇所座標	○	干渉 SAR 解析によって得られた変位を実測の値と合わせることで、面的に高い精度の変位解析が可能。
オルソフォト	△	地物の確認。解析データの検証。
貯水位データ	△	貯水位と変位量の関係性を検討する。

◎：変位解析のために必ず必要となるデータ

○：変位解析の精度を高めるために必要となるデータ

△：変位解析の結果を評価する際にある方が望ましいデータ

これらのうち、衛星 SAR データは JAXA が指定するサイト等より直接取得（購入）することもできるが（ALOS-2 の場合）、以下に示す点に留意する必要がある。衛星 SAR データの取得は、ダム管理者において変位解析の対象、時期等を指定した上で、解析に適したデータの選定を含めて外部委託の中で行うことも可能である。

③ その他の留意点

- 干渉 SAR 解析の結果には斜面変位以外のノイズの影響も含まれる場合がある。このため、解析対象期間内におけるできるだけ多くの衛星 SAR データを取得することが望ましい。
- 電波照射方向により変位の方向の解釈が変わってくる。このため、東側、西側の両方の電波照射方向の衛星 SAR データを取得することが望ましい。
- 積雪期に撮影されているなど、事前に得られる情報から除外するのが望ましい衛星 SAR データが含まれていないか確認した上で、変位解析に有効なデータを優先して取得するのが望ましい。
- 災害時のモニタリングの場合

災害による変位を算出するためには、災害発生前と災害発生後のデータを取得する必要がある。災害発生前のデータについては、災害直前、あるいは災害発生後のデータと同じ季節に撮影されたデータを取得することが望ましい。

DEM データについては、航空レーザ測量による LP データから作成することが可能であり、ダム管理所で所有しているか事前に確認しておくことが必要である。ダム管理所で DEM データあるいは LP データを所有していない場合には、近隣の事務所等あるいは国土地理院等の他機関で所有している可能性もあり、問い合わせた上で入手しておくことが望ましい。他機関でも所有していない場合は、堤体あるいは貯水池周辺斜面の CAD データから DEM データを構築する必要があるが、構築した DEM データが実際の標高と大きく異なる場合には変位量の精度が低下する場合があるので注意が必要である。

その他の資料・データについては、ダム管理業務の中での保有の有無・所在を確認しておくことで、外部委託での変位解析をスムーズに実施することが可能となる。

（参考）外部委託における業務内容の設定例

衛星 SAR データを用いた干渉 SAR 解析によるロックフィルダム及び貯水池周辺斜面の変位モニタリングを外部委託により行う場合に想定される業務内容等の設定例を以下に示す。

外部委託における業務内容等の設定例

1. 業務目的

本業務は、〇〇ダムにおける安全管理のためのモニタリングの一環として、堤体（ロックフィルダム）の外部変形および同ダム貯水池周辺斜面の変動領域を把握するために、衛星 SAR データを用いて干渉 SAR 解析を実施し、変位量を計測するものである。

2. 業務内容

(1) 計画準備

受注者は、本業務の目的・内容を十分に把握して、業務計画書を作成するものとする。

(2) 解析に使用するデータ等の収集・整理

干渉 SAR 解析に使用する衛星 SAR データとして、ALOS-2（だいち 2 号）によるデータを JAXA が指定するサイト等から取得することにより収集・整理する。取得する衛星 SAR データは、X 年 X 月 X 日～X 年 X 月 X 日までに XX ダム堤体および貯水池周辺斜面を観測した衛星画像（プロダクトレベル 1.1（注：本資料 2.41 参照）のもの）とし、衛星の軌道及び電波の照射方向等を考慮して当該業務の実施に適したデータを計〇シーン（時期）分程度（又は「発注者と協議により」）取得するものとする。

このほか、干渉 SAR 解析やその結果の精度確認等に必要なデータ・資料等として、DEM データ（注：ない場合は航空レーザ測量による LP データ）、光波測量等によるダム堤体の外部変形計測結果等の実

測データ、その他のダム管理データ（貯水位・工事履歴・積雪深等）は、調査職員から受注者に貸与するものとする。

(3) ダム堤体の変位解析

上記(2)により取得したダム堤体を含む衛星 SAR 画像を用いて、全ペアに対する干渉 SAR 解析を行う。干渉 SAR 解析では、オリジナル衛星画像データからマスタ画像とスレーブ画像を選択、位置合わせを行い、干渉画像を作成するものとする。また、作成した干渉画像から軌道縞・地形縞を除去、アンラップ処理を行って変位（変動）画像を作成し、衛星 SAR 画像の座標系を実際の座標系に変換するものとする。なお、アンラップ処理においては、地上での光波測量等による外部変形の計測点で計測された変位量を基準として、干渉 SAR 解析結果より求めた変位量を絶対変位に変換するものとする。

次に、上記の干渉 SAR 解析結果をもとにダム堤体の時系列干渉 SAR 解析を行う。時系列干渉 SAR 解析の方法は SBAS 法によるものとする。なお、時系列干渉 SAR 解析においては、積雪や工事などにより明らかにノイズとなるデータを除去した上で解析を行うものとする。

(4) 貯水池周辺斜面の変位解析

上記(2)により取得した貯水池周辺斜面を含む衛星 SAR 画像を用いて、全ペアに対する干渉 SAR 解析を行う。干渉 SAR 解析の主な流れは、上記(3)ダム堤体の干渉 SAR 解析と同様とする。

次に、上記の干渉 SAR 解析の結果をもとに、貯水池周辺斜面のスタッキング解析を行う。スタッキング解析においては、積雪や工事などにより明らかにノイズとなるデータを除去するとともに、着目する斜面が変動したと想定される時期を含む干渉 SAR 解析結果を用いるものとする。

(5) 変位解析結果の取りまとめ

上記(3)及び(4)により実施したダム堤体及び貯水池周辺斜面の変位解析結果を以下の画像等を整理することによりとりまとめるとともに、光波測量等による地上での変位計測結果との比較により、解析結果の精度評価を行う。

- 干渉画像及びコヒーレンス画像：
干渉 SAR 解析によるペア毎の干渉画像およびコヒーレンス画像
- 変位量マップ：
時系列干渉 SAR 解析によるダム堤体および貯水池周辺斜面の変位マップ（平面図）
- 時系列変位グラフ：
時系列干渉 SAR 解析によるダム堤体外部標的地点の時系列変位グラフ、
スタッキング解析による貯水池周辺斜面の代表地点の変位
- 想定変動領域図：貯水池周辺斜面のスタッキング解析から想定される変動領域の図

(6) 地震発生時の変位解析（注：災害時のモニタリングとして地震時の変位解析を含める場合）

〇〇ダム近傍の気象庁地震観測点（XX 市〇〇、XX 市▲▲）において震度■以上の地震が観測された場合又は〇〇ダム基礎部地震計により■gal 以上の地震動を観測した場合等で、調査職員が必要と認めた場合、地震後の衛星 SAR 画像をすみやかに取得し、地震によるダム堤体（及び貯水池周辺斜面）

の変位量を評価するために干渉 SAR 解析を実施する。なお、地上での光波測量等による計測点を干渉 SAR 解析での変位計測に使用する変位の基準点として使用することが地震の影響により困難と考えられる場合は、ダム近傍の不動点と見なせる地点を変位の基準点として設定し、解析を行うものとする。

この地震発生時の変位解析は、設計変更の対象とする。

(7) 報告書作成

上記各業務内容の実施結果について、報告書にとりまとめる。

3. 成果品

- 2で実施した各業務内容の実施結果をとりまとめた報告書 一式
- 2(2)で取得した衛星 SAR データその他調査職員が指定する本業務で使用したデータ等 一式

第2章 解説編

2.1 はじめに

この解説編では、「1. 総説編」で概説した衛星 SAR データを用いたロックフィルダムと貯水池周辺斜面を対象とした変位解析を実際に行う際に、精度のよい結果を得るために推奨される解析の具体的方法、解析上の留意点などについて解説する。

なお、解析の処理方法等を分かりやすく説明するために干渉画像等を示しているが、これらは ALOS-2 により取得された衛星 SAR データをもとに、以下のソフトウェアを用いて出力したものである。

- ENVI 5.5 + SAR Scape 5.4 (Harris Geospatial Solutions)

2.2 解析対象ダムの諸元・各種条件の確認

ロックフィルダムの堤体についてはその規模や上・下流面の傾斜方向、貯水池周辺斜面については、対象斜面の勾配等によって、干渉 SAR 解析による変位計測の向き・不向きがある。

以下にこれらの条件が干渉 SAR 解析に与える影響について述べる。

● 観測対象の大きさ（ダム堤体等の規模）

ALOS-2 の観測データを用いる場合、そのデータの 1 ピクセルは約 2.5m であるため、これより堤体規模が十分に大きいロックフィルダム堤体の上・下流面等については、面的に変位を計測することが可能である。しかし、衛星 SAR データの 1 ピクセル以下の地物を対象とする場合には、1 ピクセルの中に対象とする地物以外の変位も含むことになるため、対象の変位のみを計測することができない。

● 電波の入射角（図 2.2.1）

対象とするダム堤体の表面（上・下流面）や貯水池周辺斜面に対して垂直な方向と衛星からの電波照射方向のなす角度（＝入射角）が小さいと変位計測の精度が高い。一方、入射角が大きくなるほど精度が低下する。衛星観測時のオフナディア角とあわせて検討する必要がある。

● 電波の照射方位角（図 2.2.2）

堤体に対し、衛星からの電波が側面から照射されている場合には変位計測の精度が高い傾向がある。一方で衛星からの電波が図 2.2.2 の正面もしくは背面側から照射される場合、精度が低くなる可能性があるため注意が必要である。特に、ダム堤体では電波が堤体の正面方向から照射される場合には変位の計測精度が低下する傾向にある。

● 表面の状況と反射強度、コヒーレンス

水平な地表面がコンクリート等の滑面で覆われている場合には、後方散乱が少なくなるため反射強度が小さくなるとともに、コヒーレンス（干渉性）も低下する。

ロックフィルダムの堤体表面はリップラップと呼ばれる最大粒径 1m 程度の岩石で覆われているが、リップラップは適度に凹凸があるため、ダム表面の反射強度とコヒーレンスは十分に大きい。このため、ロックフィルダムは干渉 SAR 解析に適した構造物であるといえる。

貯水池周辺斜面の表面は、植生に覆われていることが多い。この植生により反射強度は低下し、コヒーレ

ンスは小さくなる。そのため、干渉 SAR 解析により得られた変位量の精度がよくない場合がある。このような場合にはノイズ低減により、計測精度の向上を図る必要がある。

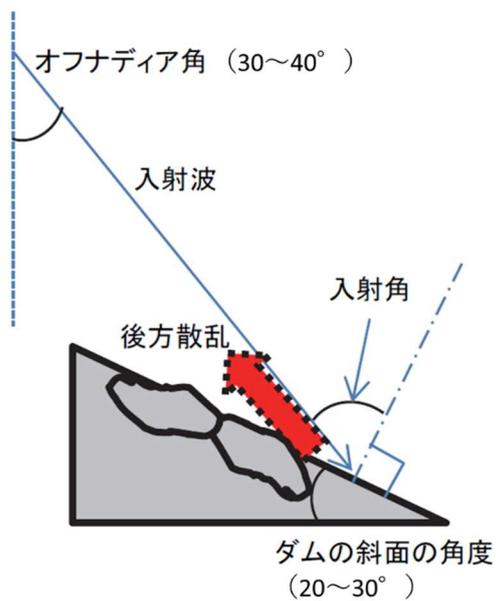


図 2.2.1 ダム堤体に対する入射角の概念

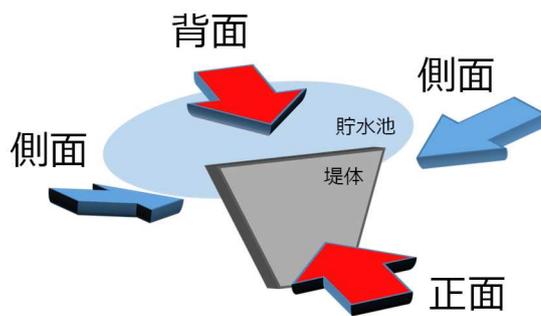


図 2.2.2 ダム堤体に対する照射方位角の概念

2.3 変位計測期間の設定

● 平常時のモニタリングの場合

干渉 SAR 解析による変位モニタリングを初めて導入する場合は、利用する衛星（ALOS-2 又はその前身の ALOS（だいち 1 号））のそれぞれの運用期間をベースに解析に利用するデータの取得期間を考えることになる。

なお、ダム堤体の天端補修工事や貯水池周辺斜面の人工改変など、変位解析に影響を与える事象があった場合は、基本的に当該事象以降のデータを取得し、解析に使用することになる。

● 災害時のモニタリングの場合

災害直後の観測条件と一致するデータのうち、①災害前（直前）及び ②前年同一時期の 2 種類のデータを取得して変位解析に用いることが望ましい。災害直前の画像と直後の画像で解析することで、災害に起因する変位が捉えられる可能性が高い。

一方、災害直前のデータ取得時期（季節）が災害後データ取得時期と異なる場合、積雪や植生の変化による影響が解析結果に現れる可能性がある。前年の同程度の季節のデータを用いた解析を行うことで、季節変化による変位の可能性を低減することができる（図 2.3.1）。

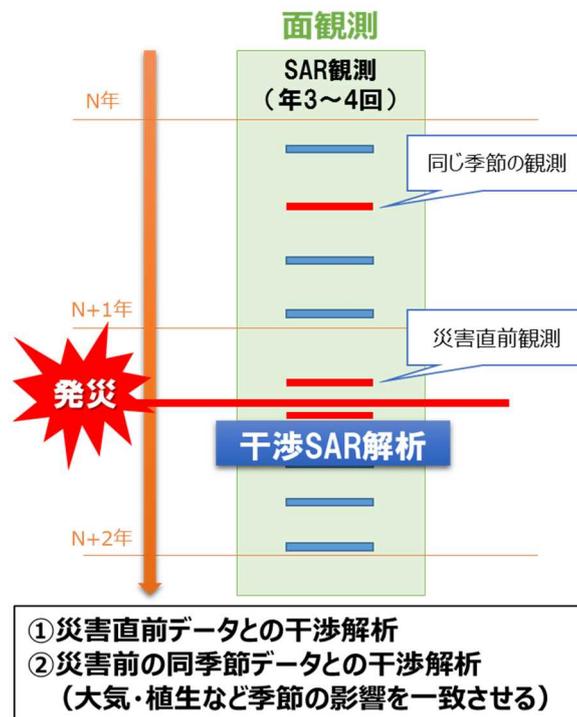


図 2.3.1 災害時の干渉 SAR による変位モニタリング（1. 総説編から再掲）

2.4 利用する衛星データの選び方

2.4.1 データ選定における留意点

衛星 SAR データを用いて干渉 SAR 解析を行う場合、以下が同じ複数のデータを用いる必要がある。

- 観測波長
- 衛星の軌道と電波照射方向
- オフナディア角

これらの条件が同じで干渉 SAR 解析が可能な複数のデータから、精度良く干渉 SAR 解析を行うことが可能となるよう、以下に示すような留意点を考慮した上で、実際に使用するデータを選定する必要がある。

利用可能な衛星 SAR データと入手方法

現在運用中の衛星 SAR には、その観測波長として表 2.4.1 に示す 3 種類の波長が使用されている。

表 2.4.1 各バンドの波長

波長帯	波長
Xバンド	約 3cm
Cバンド	約 6cm
Lバンド	約 24cm

波長が短い衛星 SAR データを干渉 SAR 解析に用いれば、原理的にはより微小な変位を検出することが可能である。しかし、実際には観測波長が短いほど、大気中の水蒸気などの気象の影響を受けやすくなる。また、地表面の植生による影響も大きくなる。これらの影響により、干渉 SAR 解析の精度低下要因となる場合がある。このような影響に対しては、使用する衛星 SAR データの観測日における気象条件を確認したり、衛星あるいは航空写真の可視画像から地表面の植生状況を確認するなど、精度を低下させる要因の有無を確認することが必要となる。

また、干渉 SAR 解析では、衛星 SAR の観測波長の $1/2$ が変位の検出限界となる。解析ペア間の変位量が衛星 SAR の半波長を超える場合には、基本的に変位を一意的に決定することができない。このような場合には、半波長を超えた変位が生じていることを認識したうえで干渉縞から変位量に変換するなどの対応が必要となる。そのため、まず初めに波長の長い L バンドで観測された衛星 SAR データを使用して干渉 SAR 解析を行った後に、より微小な変位量を計測するために、C バンドあるいは X バンドで観測した衛星 SAR データを使用して干渉 SAR 解析を行うことも考えられる。

なお、ロックフィルダムの堤体を対象として干渉 SAR 解析を行う場合には、X・C・L バンドいずれの波長帯の衛星 SAR データを利用することが可能であるが、盛立直後の比較的沈下量が大きい場合には、2 時期の変位量が半波長を超えないよう、観測波長の長い L バンドの衛星 SAR データを用いるのがよいと考えられる。また、貯水池周辺斜面を対象として干渉 SAR 解析を行う場合には、貯水池周辺斜面は植生に覆われていることが多いことから、L バンドの衛星 SAR データを用いるのがよいと考えられる。

現在運用されている衛星 SAR データの使用波長帯（バンド）とその入手方法等を表 2.4.2 に示す。

表 2.4.2 干渉 SAR 解析に利用可能な衛星 SAR データとその入手方法

衛星名	運用期間	使用波長帯	代表的モードの空間分解能	干渉 SAR 解析が可能なプロダクトレベル
ALOS-2	2014～	L	3m 高分解能	Level 1.1
TerraSAR-X / TanDEM-X	2007～	X	1～3m STRIPMAP (SM)	SSC
COSMO-SkyMed	2007～	X	1～3m STRIPMAP HIMAGE	Level 1A (SCS)
RADARSAT-2	2007～	C	5m Fine Mode	SLC
Sentinel-1A / 1B	2014～	C	5m×20m IWS	Level - 0 / Level -1

衛星の軌道と電波照射方向

干渉 SAR に用いられる軌道は「北行軌道」「南行軌道」の 2 パターンがあり、電波照射方向はそれぞれの進行方向に対して「左」「右」の 2 パターンがある。したがって、それぞれの組み合わせにより合計 4 パターンの観測方法がある（図 2.4.1）。この 4 パターンの観測方法のうちシーン数の多い観測方法を選択することにより、干渉 SAR 解析の可能なデータが選定しやすくなる。干渉 SAR 解析の対象とするダム の 堤体や貯水池周辺斜面の向きや観測期間・基線長等を考慮した上で、干渉 SAR 解析に使用可能なデータが十分にあり、変位の計測精度が確保されると考えられる衛星の軌道と電波照射方向を選択するとよい。

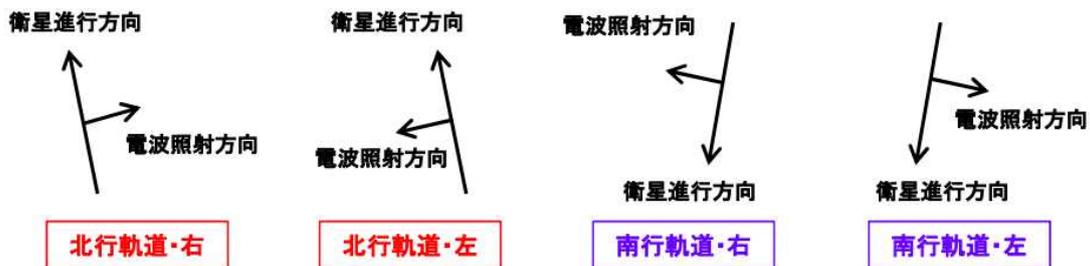


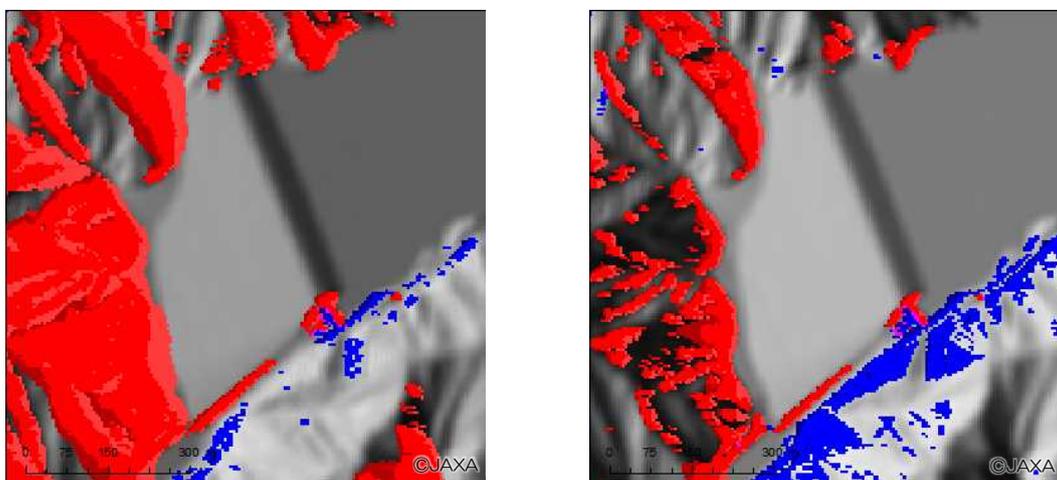
図 2.4.1 軌道と照射方向⁴⁾

観測モード

衛星 SAR による変位解析を実施するための前提条件として、同じ軌道・同じ観測モード・同じ入射角で観測されたデータである必要がある。なお、同じ観測波長帯であっても異なる衛星 SAR により取得されたデータは、通常は干渉 SAR 解析に使用することはできない。ただし、TerraSAR-X と TanDEM-X、COSMO-SkyMed の 1 号機から 4 号機、Sentinel-1A と 1C のように、同じ衛星群の異なる機種間で取得されたデータから干渉 SAR 解析が可能なケースもある。

オフナディア角

衛星 SAR の観測手法の原理上、同じ軌道であっても観測入射角度が違えばデータの見え方が異なる。角度が違えば、レイオーバーやレーダーシャドウも違ってくるので注意が必要である（図 2.4.2）。レイオーバーやレーダーシャドウに該当する範囲では、変位を計測することができない。



南行軌道・右側観測・オフナディア角 32.4°

南行軌道・右側観測・オフナディア角 38.2°

図 2.4.2 同じ軌道で違うオフナディア角によるレイオーバーやレーダーシャドウの例

空間分解能

表 2.4.2 に示した ALOS-2 の干渉 SAR 解析に用いるデータの空間分解能は約 3m となっている。これは、ロックフィルダム堤体の変位量を計測したり、あるいは貯水池周辺斜面の変動領域を把握することに適した空間分解能である。

干渉 SAR 解析を行う際には、通常、ノイズを低減するために、着目するピクセルとその周辺のいくつかのピクセルの位相を平均化する処理（マルチルック）を行う。

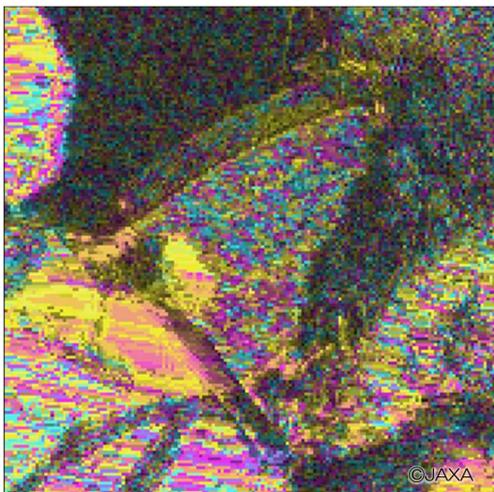
データ数の確保

ダム変位量解析において、計測の精度および信頼性を確保するためには、解析に用いる衛星 SAR データをできるだけ多く用意することが望ましい。対象ダム周辺を観測している SAR 衛星によるデータの取得状況を整理し、より多く、より高頻度の観測が行われている衛星およびデータセットを選定することで、計測の精度や信頼性を高めることができる。

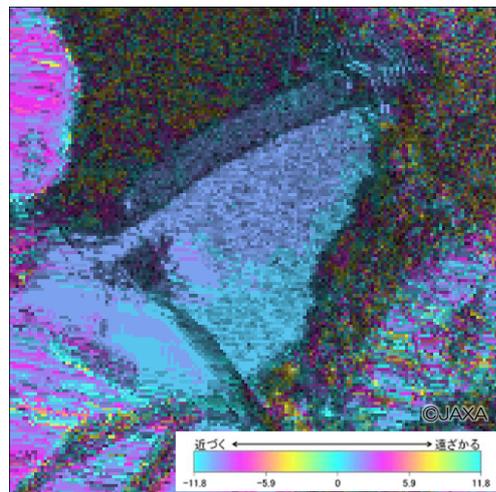
観測時期（積雪期の除外）

積雪期のデータを含んだ場合には干渉性が低下し、変位計測の精度に影響を与える。このため、冬季から春季のデータを取得する際には、対象地域周辺の積雪情報等から積雪（残雪）の影響の有無について考慮する必要がある。

例として、図 2.4.3 に示す積雪期を含むペアのデータを用いた干渉画像（左）は、夏期どうしのペアを用いた干渉画像（右）に比べ、ノイズが多く発生していることがわかる。



積雪期を含むペアの場合（2014/8/24
と 2015/2/8 の干渉画像）



夏期どうしのペアの場合（2014/8/24
と 2015/9/20 の干渉画像）

図 2.4.3 積雪期のデータを用いた場合の干渉画像の干渉性の低下例

プロダクトレベル

干渉 SAR 解析を実施するためには、衛星 SAR データの位相と反射強度（振幅）の両方の情報が必要となる。そのため、衛星 SAR データの各種プロダクトレベルのうち、位相情報が含まれるプロダクトレベルのデータを取得する必要がある。

プロダクトレベルはセンサごとに表現は異なるものの、基本的には SLC（Single Look Complex）データと呼ばれるものに相当する。

国内で使用することが多いと考えられる ALOS-2 のデータについては、表 2.4.3 に示すように複数のプロダクトレベルがある。干渉 SAR 解析を実施するためには、このうち位相と反射強度（振幅）の両方の情報が含まれるプロダクトレベル 1.1 のデータを入手する必要がある。

表 2.4.3 ALOS-2 のプロダクトレベル⁸⁾

レベル	定義	フォーマット
レベル 1.1	レンジ圧縮及びアジマス圧縮を行った後の、スラントレンジ上の複素数データ。1 ルックのデータであり、位相情報を含んでいるため、この後の処理のベースとなる。広域観測モードでは、スキャン単位でイメージファイルが作成される。	CEOS/GeoTIFF
レベル 1.5	レンジ圧縮及びアジマス圧縮を行い、さらに地図投影した振幅データでマルチルックされたグラントレンジ上のデータ。	CEOS/GeoTIFF
レベル 2.1	レベル 1.1 データに数値標高データを用いて幾何補正(オルソ補正)を行ったデータ。	CEOS/GeoTIFF
レベル 3.1	レベル 1.5 データに画質補正(雑音除去処理、ダイナミックレンジ圧縮処理)を行ったデータ。	CEOS/GeoTIFF

2.4.2 データの検索手順 (ALOS-2 の場合)

ALOS-2 データの検索は、「衛星データ利用促進プラットフォーム (運営：株式会社パスコ)」や「G-Portal (運営：宇宙航空研究開発機構) (図 2.4.4～ 図 2.4.5)」で行うことができる (2022 年 12 月時点)。



図 2.4.4 G-Portal トップページ

2.5 解析の実施

2.5.1 解析手順

解析対象範囲の設定

ロックフィルダムの堤体を対象として変位量解析を行う際には、衛星 SAR データの全域を解析する必要はない。対象ダムを中心にある程度余裕をもった解析範囲を設定する。ダム堤体だけを対象とした場合、SAR 画像同士の位置合わせが正確に行われず、解析できないことがあるため、より広めの範囲で解析を行う必要がある（図 2.5.1）。なお、精度の向上に関しては、「2.5.6 精度向上のための留意点」を参照のこと。

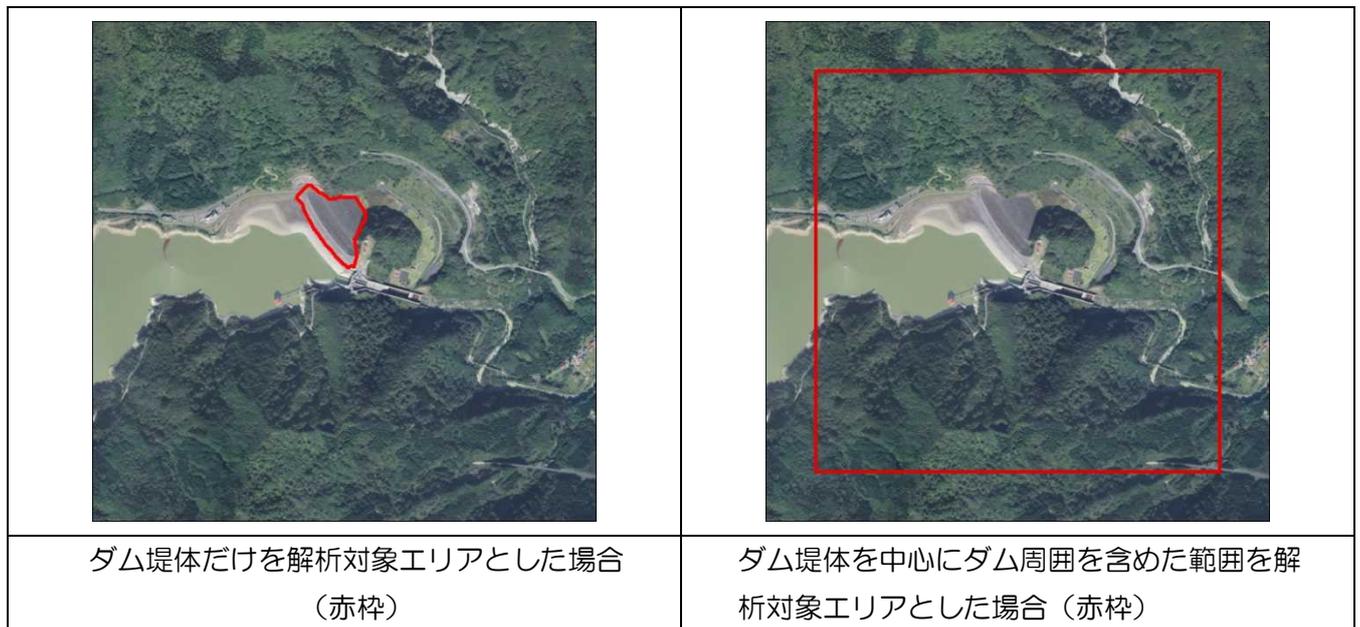


図 2.5.1 解析対象範囲の設定

DEM の準備と利用上の留意点

① DEM の種類と空間分解能

衛星 SAR データを用いた変位量解析に利用する DEM データは、高精度かつ高空間分解能を持つ必要がある。基本的には航空レーザ測量により作成された DEM、あるいは堤体の構造を示した CAD データをもとに構築した DEM を利用する。

以下、DEM の種類および留意点について述べる。

航空レーザ測量による DEM (LP DEM)

衛星 SAR データを用いた変位量解析では、高精度かつ高空間分解能の DEM として、航空レーザ測量によって取得された DEM データ（空間分解能 1m 程度）があることが望ましい。ダム管理者等により航空レーザ測量が行われている場合は、その測量成果を利用して DEM を作成する。なお、航空レーザ測量の実施の有無・実施主体・計測時期などは、一部を除き（公財）日本測量調査技術協会が運営する「航空レーザ測量データポータルサイト」（図 2.5.2）で確認可能である。

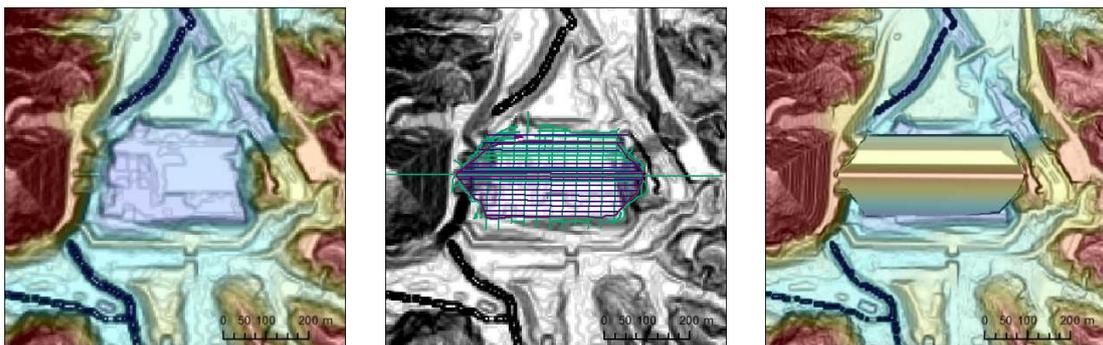


図 2.5.2 航空レーザー測量データポータルサイト



CAD による DEM 構築

対象箇所で航空レーザー測量が実施されていない、あるいは航空レーザー測量が実施されたあとにダムが建設された・大規模な工事が実施されたなど、標高の変化があった場合には図面データ (CAD 等) を利用して最新のダムを表現した DEM を作成する必要がある (図 2.5.3)。



(a) 基盤地図情報
数値標高モデル 5m

(b) 堤体図面データの
位置合わせ

(c) 作成した解析用
DEM データ

図 2.5.3 CAD データからの DEM の作成の例



国土地理院による 5mDEM

国土地理院がインターネット上で公開している「基盤地図情報数値標高モデル」では、場所により空間分解能が 5m の DEM（5mDEM）が利用できる。データが整備されている範囲は限られているが、航空レーザ測量成果がベースとなっている（※注）ため、精度の高い DEM として利用が可能である。ただし以下の 2 点が注意点として挙げられる。

- 空間分解能が 5m であるため、元データより空間分解能・精度が低下している
- 貯水域は標高データが空白のため、変位量解析に影響を与える可能性がある

なお、基本的に 5mDEM が整備されている範囲は、航空レーザ測量が実施されている。ダム管理者等により航空レーザ測量が行われている場合は、その元データ（航空レーザ測量成果）を取り寄せて利用することが望ましい。

※注）一部地域では、空中写真測量ベースでの 5mDEM も並行して整備されているため、データをダウンロードする際に諸元を確認する必要がある。



国土地理院による 10mDEM

日本国内であれば、国土地理院がインターネット上で公開している「基盤地図情報数値標高モデル」から空間分解能 10m の DEM（10mDEM）を取得することが可能である。ただし、この DEM データは、2 万 5 千分の 1 地形図で取得された空中写真測量ベースの等高線から自動発生させた DEM であり、位置・標高・空間分解能いずれにおいてもダム堤体等の変位量解析に利用する DEM としての精度を満たしていない。そのため 10mDEM の利用は避け、航空レーザ測量あるいは CAD による DEM 構築を実施する必要がある（図 2.5.4）。

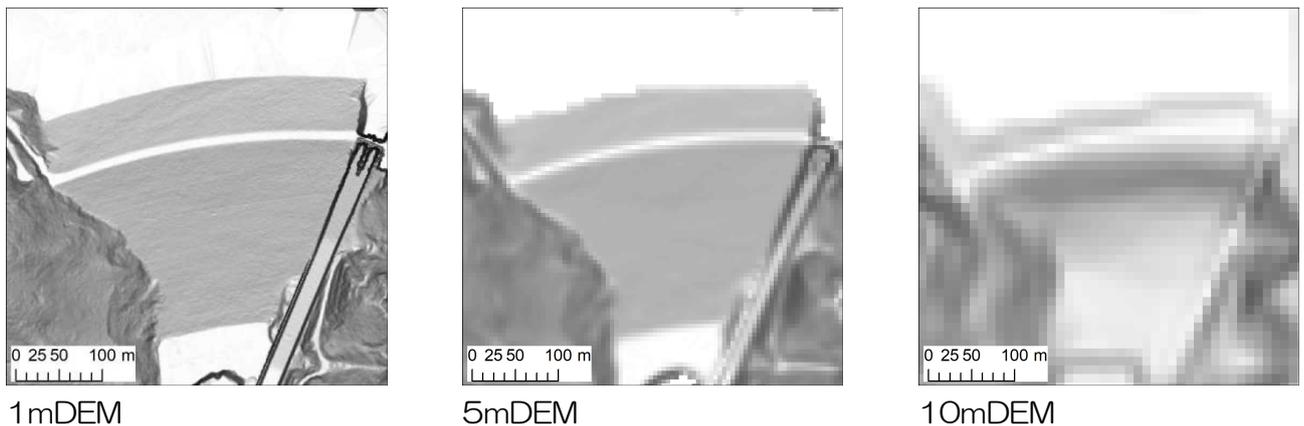


図 2.5.4 空間分解能が異なる DEM の比較（DEM に基づく傾斜量図）

② DEM の取得時期の確認

航空レーザ測量により対象ダム周辺の DEM が取得されている場合であっても、航空レーザ測量が実施されたあとにダムが建設されたり、大規模な補修工事等により堤体形状に変化が生じたりしていることもある。そのため、DEM 取得時期と工事記録を調査し、衛星 SAR データ取得時期と DEM 取得時期の間に変化が無いかどうか確認する必要がある。

③ 位置の調整

高精度の DEM を利用した場合においても、わずかな位置ずれが存在することで変位とは異なる干渉縞が発生する場合がある。このような干渉縞が初期干渉画像において確認された場合、そのまま解析を実施すると変位量に誤差が組み込まれることになる。このため、DEM と衛星 SAR 画像がずれないように位置調整を行って、位置誤差に伴う干渉縞を取り除く作業が必要になる。

現地情報の準備と利用上の留意点

変位量解析にあたり、地上での光波測量等によるダム堤体の変位（外部変形）計測データや植生の状況等の現地情報は、解析結果の変位量補正や精度検証などに利用される。変位量の補正や精度検証に必要な現地情報を以下に示す。

① 変位計測結果

ダム堤体の変位計測結果は、干渉 SAR 解析でのアンラップ処理における基準点情報、および解析結果の精度検証に利用される。GNSS 測量、光波測量、プラムラインなどが利用可能である。

✚ 変位量の視線方向への変換

衛星 SAR データを用いた変位量解析で得られる解析変位量は、原理上、衛星の視線方向（LOS: Line Of Sight）で取得される。そのため、現地で取得される計測変位量との対応を取るためには、計測変位量 D を LOS 方向の変位量 S に変換する必要がある（図 2.5.5）。

$$S = |D| \cos \theta$$

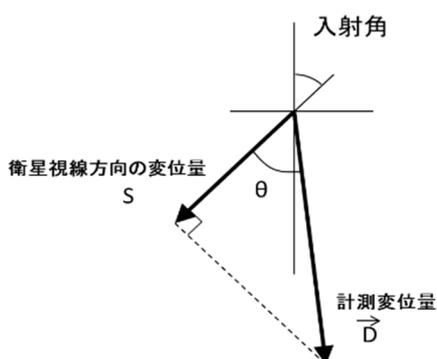


図 2.5.1 計測変位量と解析変位量(LOS) の関係

✚ 変位量取得時期の整合

GNSS による変位計測は連続データである。このため、衛星 SAR による観測時の変位量が取得でき、変位解析結果を補正するための情報（基準点）として利用でき、衛星 SAR による変位解析結果の精度検証を確実にを行うためにも有効である。一方、光波測量の場合は、連続データでないため衛星 SAR データの観測時期との不一致が発生する。このため、実測変位量を時間軸で線形補間（内挿）して SAR 観測時の変位量を推定するなどの処理が必要となる。

なお、強い地震など突発的な変位が想定されるイベントが現地変位計測の間に発生したことが確認されている場合には、前後2時期における線形補完（内挿）ではなく、イベント直前の変位量を固定する（イベント発生時までの変位量を0とする）などの処理が別途必要になる（図 2.5.6）。

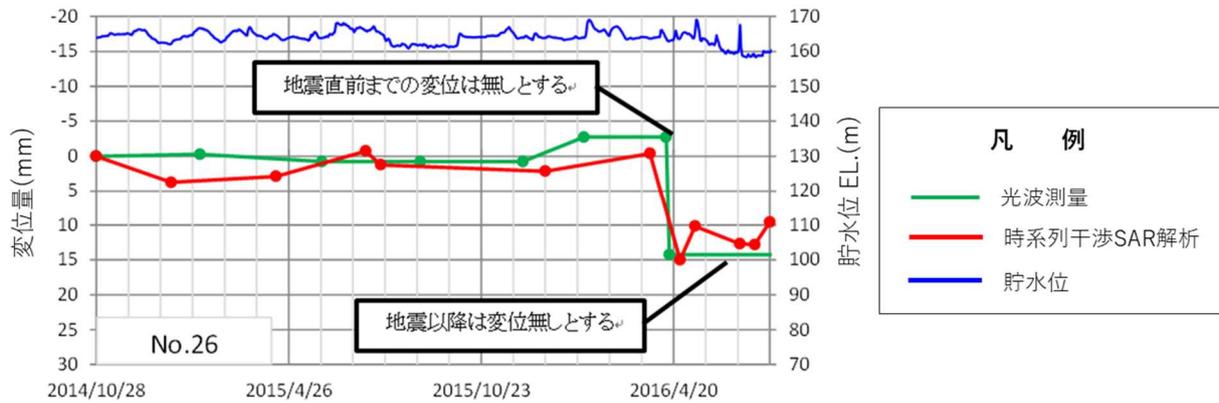


図 2.5.6 地震を挟んだ変位量の処理例

② 変位基準点情報

ダム堤体の外部変形計測のための光波測量の計測点など地上での変位計測点における測量結果を変位基準点として利用する際には、信頼できる点を採用することが必要となる。

✚ 基準点の利用点数

変位基準点は、基本的に地上での変位計測点の全てを利用することが望ましい。ただし、後述の「変位基準点周辺の影響の確認」に示すような解析結果に影響を及ぼす要因が考えられるケースでは、影響を及ぼす計測点を変位基準点に含めると精度に悪影響を与える可能性が高い。このため、該当する変位計測点については、変位基準点から適切に除外する必要がある。

なお、最低3点の変位基準点を確保することで精度が安定するが、そのうち2つについては、上・下流面のリップラップ部にそれぞれ設定するのが望ましい。

✚ コヒーレンスの安定性

衛星 SAR による変位量解析の精度を確保する上で、基準点として利用する変位計測点は、コヒーレンス（干渉性）が安定して高いことが非常に重要である。そのため、解析に利用する全シーンの変位基準点についてコヒーレンスを確認し、極端に低下する時期がないことを確認することが望ましい。なお、基本的にはこの確認を行うことでノイズの影響の大半は除去可能であるが、後述の「サイドローブ効果」のように「安定して高いコヒーレンスを示すノイズ」もあることから、多角的な確認作業が必要である。

✚ 変位基準点周辺の影響の確認

変位基準点の設定に際しては、上記のほか以下のような影響等についても確認しておく必要がある。

（ア）地形効果

ダム堤体周辺を含んだ DEM によるレイオーバーやレーダーシャドウの影響範囲のシミュレーションを実施し、変位基準点にこれらの影響がないことを確認する（図 2.5.7）。

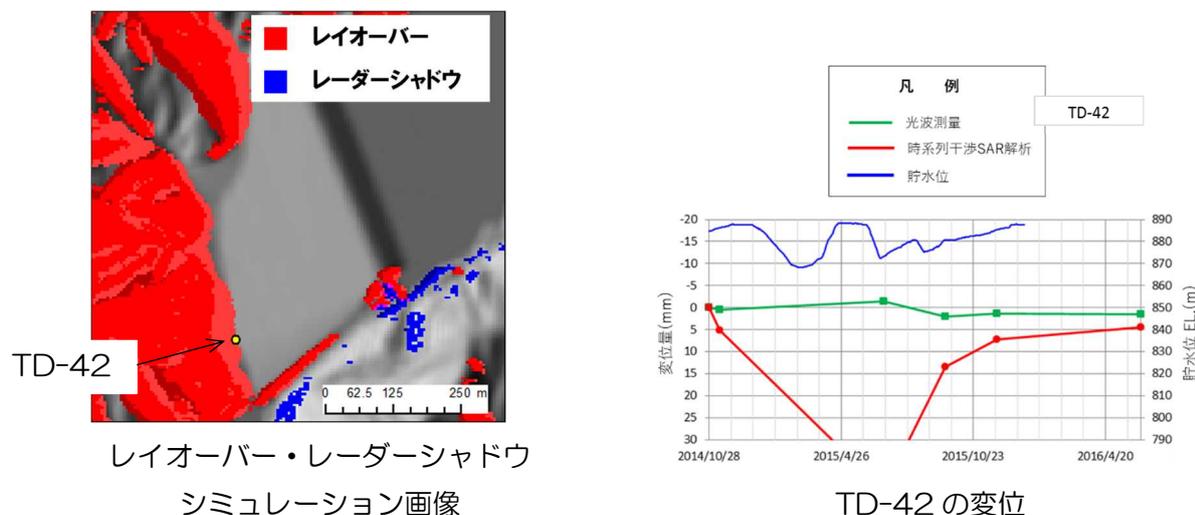
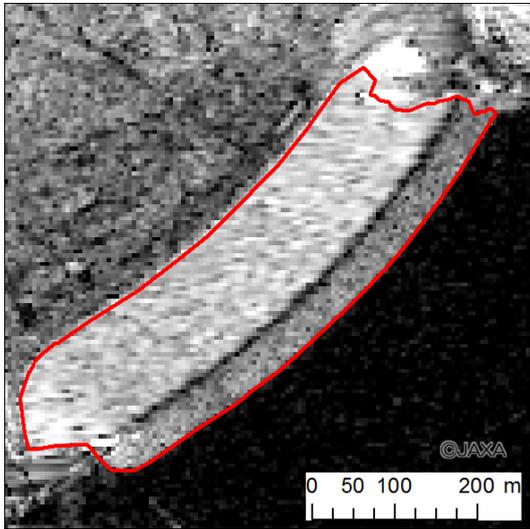


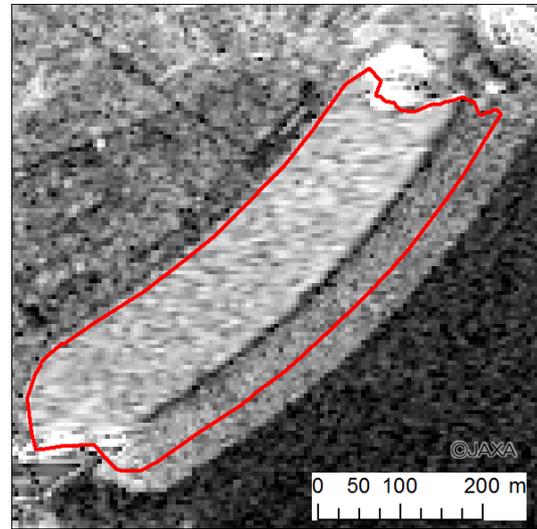
図 2.5.7 レイオーバー・レーダーシャドウの影響範囲（南行軌道）
（レイオーバーに含まれてしまっている TD-42 では急激な変位を示している）

(イ) 貯水面の影響

貯水面に近い変位計測点では、水位の上昇に応じて冠水、あるいは水面が近づくことで、基準点上の位相・強度に強い影響を及ぼすことがある(図 2.5.8)。このような点を基準点として採用した場合には精度の低下を招くため、水位情報および強度画像を確認し、湛水の影響が無いことを確認する。



貯水位が高い時の後方散乱強度画像



貯水位が低い時の後方散乱強度画像

図 2.5.8 貯水位の変化による強度画像の例

(ウ) 強反射(サイドローブ効果)の影響

電波の照射角と構造物の関係によっては強い反射によるサイドローブ効果が発生し、堤体面上にノイズが乗る場合がある(図 2.5.9)。このような影響を受ける範囲の基準点を利用すると精度が大きく低下するため、衛星の軌道と電波照射方向をもとに、強反射の影響の少ないパターンをあらかじめ確認する。

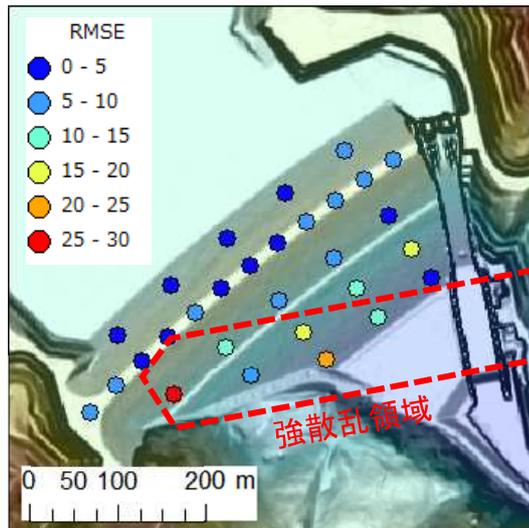
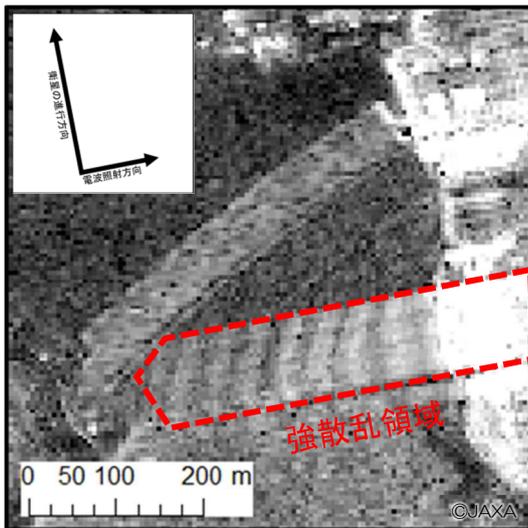


図 2.5.9 サイドローブ効果の例

右図の強散乱領域内の変位計測点はサイドローブに重なっていることから、精度が下がっている。

(エ) その他土地被覆の影響

空中写真・高分解能光学衛星・現地調査などにより土地被覆の状況を確認し、変位基準点として利用可能な場所であることを確認する。ロックフィルダム堤体の場合、リップラップ材で被覆されている場合に比べ、芝などで被覆されている場合には、変位解析の精度が低くなる傾向にある（図 2.5.10）。

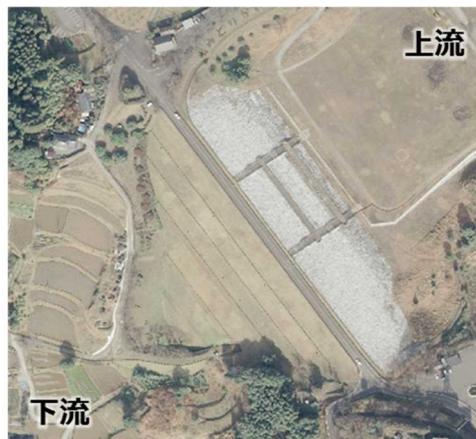


図 2.5.10 土地被覆の状況の例
下流面が芝で被覆されているため、精度が下がる傾向にある。

③ 工事記録

航空レーザ測量などのDEMデータの取得時期と解析に利用するSARデータの取得時期の間、あるいは使用する衛星SARデータの取得期間中などに堤体周辺で工事が実施され、堤体形状に変化が発生した場合には変位量として取得される可能性が大きい。そのため、DEMデータの取得時期から解析に用いる衛星SARデータの取得時期にかけての工事記録をもとに、堤体の表面形状に影響を及ぼす事項（舗装・設備設置など）について整理し、解析結果の検証・分析に利用する。

④ 貯水位

ロックフィルダムの堤体は、貯水位の変動によって変形することがある。このため、変位量に周期性が見られた場合などの検証に貯水位の履歴データを利用するほか、現地の変位計測点への冠水等の影響評価のためにも利用する。

2.5.2 干渉 SAR 解析

干渉 SAR 解析の流れ

衛星 SAR データによる変位計測では、解析に用いる SAR 画像データの入手から干渉 SAR 解析により変位解析結果を得るまでの処理手順は、概ね図 2.5.11 のような流れとなる。

また、各ステップで行う作業は、以下に述べるようなものとなる。

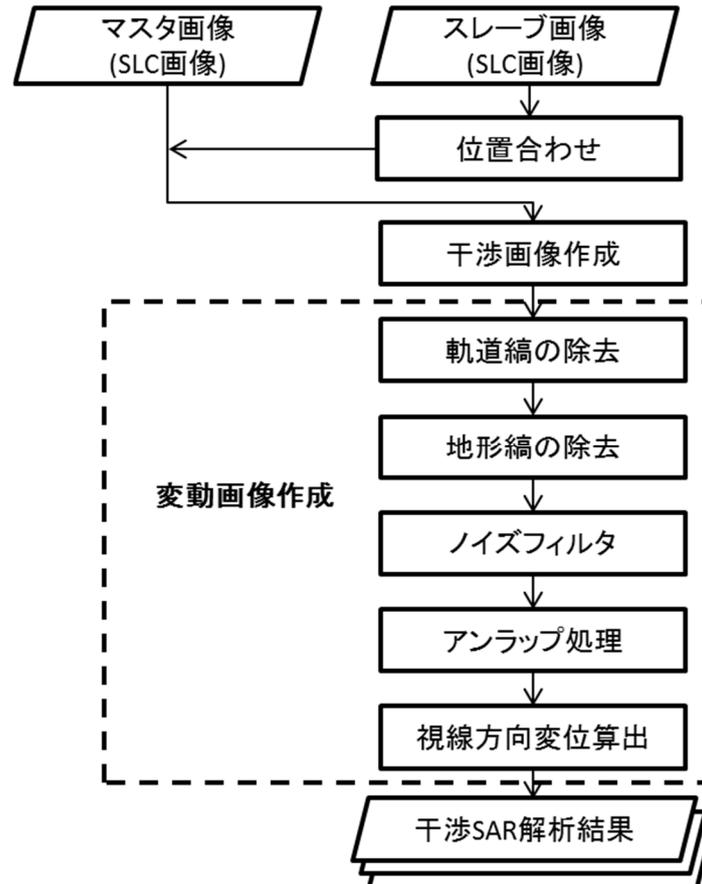


図 2.5.11 干渉 SAR 解析による変位計測の流れ

① マスタ画像とスレーブ画像の準備

干渉 SAR 解析を行うためには、SAR 衛星で観測した生データから SLC (Single Look Complex、シングルルック複素画像) 画像を再生するか、あるいは SLC データを入手する (図 2.5.12)。

SLC データは振幅と位相の情報を有している。複数の SLC データから、任意でマスタ (主) 画像とスレーブ (従) 画像を選択して干渉処理を行う。通常は、マスタ画像は変位の起点となる過去のデータ、スレーブ画像はマスタ画像からの変位量を知りたい時期のデータを選定する。通常の SAR 画像は 1 シーン全体の一辺は数十 km となり、1 シーン全体を干渉処理すると時間がかかる場合があるが、ロックフィルダム の堤体あるいは貯水池周辺斜面を解析対象とする場合には 1 シーン全域を処理する必要はない。そのため、ダム周辺の必要な範囲のみを切り取って処理することで、データの処理時間を短くすることができる (図 2.5.13)。

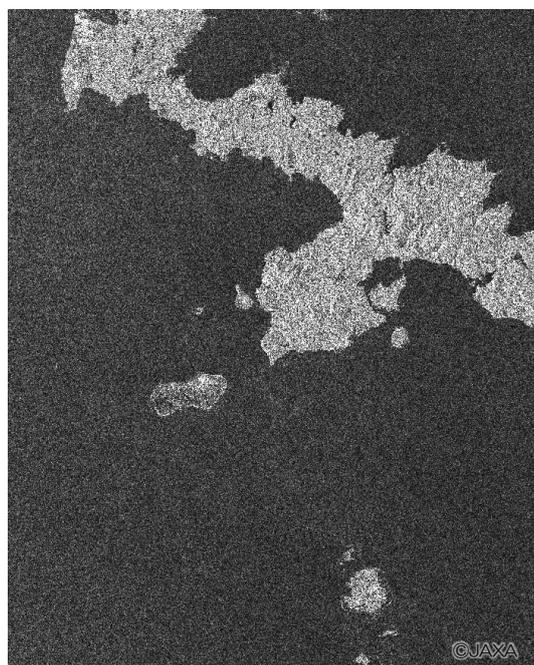


図 2.5.12 SLC 画像の例

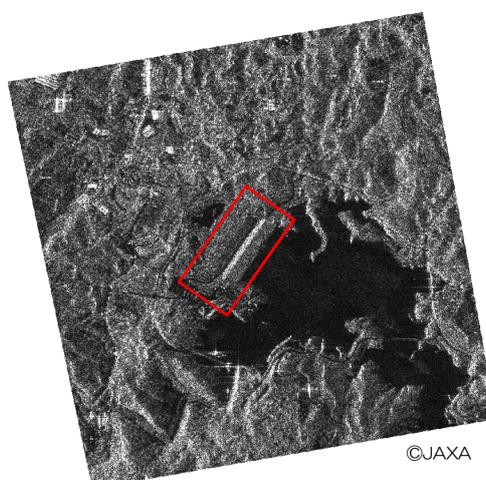


図 2.5.13 ダム周辺の必要な範囲のみを切り取った SLC 画像の例
(赤枠内：対象ダムの堤体)

② データの位置合わせ

マスタ画像とスレーブ画像は取得時点では若干の位置ずれが生じている。このためマスタ画像に対するスレーブ画像の位置ずれ量をピクセル (=画素) レベルで測定し、マスタ画像にスレーブ画像の位置を対応させる変換係数を求める。

③ 干渉画像作成

上記②で求められた変換係数を用いて、サブピクセルレベルで演算を行うことにより、干渉画像を作成する。この段階での干渉画像は軌道縞・地形縞などの除去処理を行っていないため、初期干渉画像と呼ばれる。初期干渉画像では、図 2.5.14 の縦方向に生じているような規則正しい平行線の干渉縞が確認されることがあるが、これは軌道縞であり、地形のある場所では地形縞と重なる。水面など干渉しない場所では位相差に空間的な規則性が見られず、結果として砂をばらまいたような画像となる (同図)。

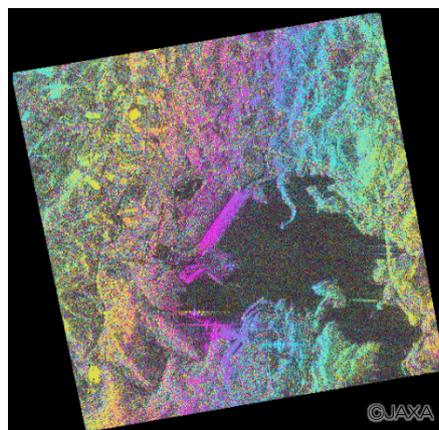
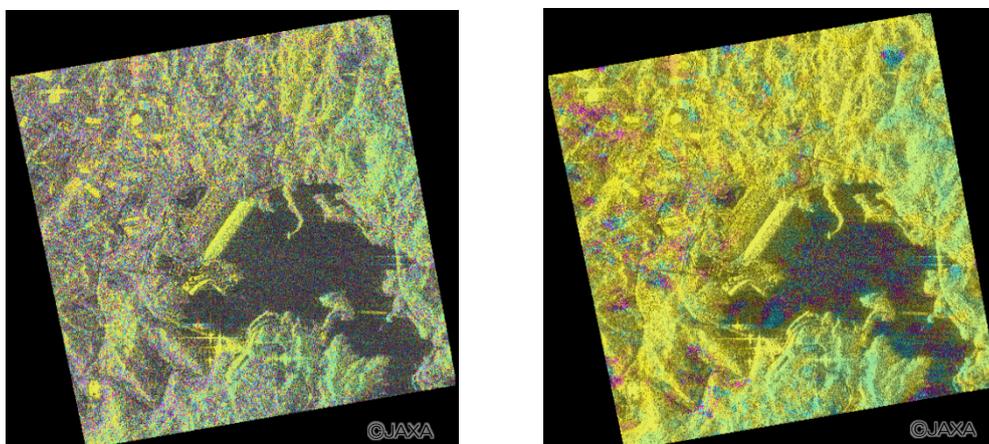


図 2.5.14 初期干渉画像の例

④ ノイズの処理

初期干渉画像から基線長情報を用いて軌道縞の除去を行うとともに、DEM と基線長を用いた数値計算から地形に起因する地形縞を除去することで、初期干渉画像から地表面の変動情報を抽出する。また、コヒーレンス (干渉性: 2 時期間における電波の反射強度や位相の類似性) の低下などによって、位相差の分布には多くのノイズが含まれるため、その影響を軽減するための 2 次元の画像フィルタ処理を行う。図 2.5.15 にこの処理の過程を示す。



軌道縞・地形縞除去画像

フィルタ処理画像

図 2.5.15 変動画像作成の過程

⑤ アンラップ画像の作成

干渉 SAR 解析結果で得られる情報は位相差であり、 $-\pi$ から π (-180 から 180°) までの繰り返しとなるため、位相差の周期を積み上げて変位の絶対値に変換するための処理（アンラップ処理）を行う（図 2.5.16）。なお、干渉 SAR 解析の結果（干渉縞）の見方については、1.4.2 干渉 SAR 解析の概要を参照のこと。

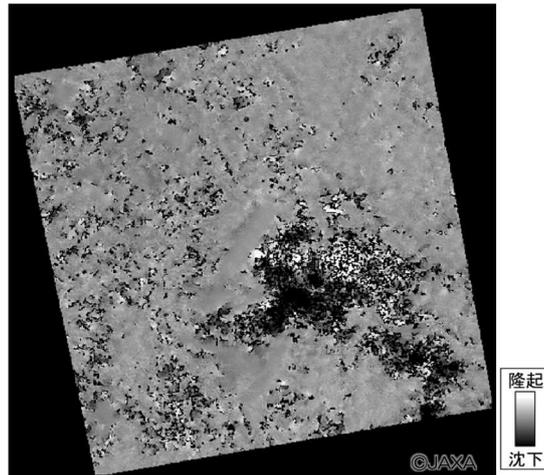


図 2.5.16 アンラップ画像の例

⑥ 干渉 SAR 解析結果の作成

アンラップ画像の作成までは、SAR 観測によって得られたレーダ画像内の座標系（画像座標系）で処理を行っているが、これを地図座標系（投影座標系/地理座標系など）に変換する（図 2.5.17）。

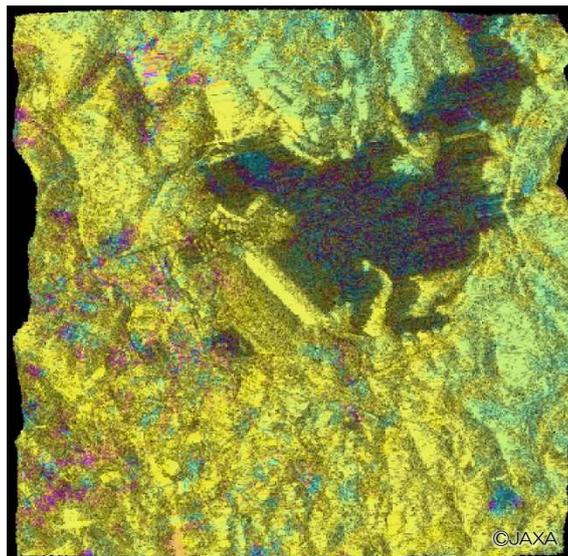


図 2.5.17 変動画像の座標変換結果

① ロックフィルダム堤体を対象に解析する場合の留意点

(A) 堤体の被覆

堤体が芝生・積雪などに覆われている場合には、解析精度の低下・エラー値の発生などを引き起こす可能性がある。そのため、定常的および季節的な土地被覆の影響について考慮する必要がある。

(B) 衛星からの電波照射方向

衛星 SAR による変位量解析は衛星視線方向（LOS）での評価に限定されるため、堤体に対して電波の入射方向がどのようになるかが計測精度に大きく影響する。

(C) 地形や構造物の幾何学的特性

SAR はダム堤体周囲の急峻な地形や構造の影響を受けることから、周辺環境および構造物そのものの幾何学的特性（フォアショートニング（実際よりも手前に倒れこむ）、レイオーバー（上下が反転する）、レーダーシャドウ（影ができる））を評価し、解析困難な領域を取り除く必要がある。

(D) ノイズ領域のマスク処理

貯水位の上昇に伴う堤体の水没範囲、周辺構造物の強反射に伴うサイドローブ効果の影響範囲など、変位以外のノイズが明らかな範囲についてはマスク処理を施し、解析結果から除外する必要がある。

② 様々な SAR データを用いる場合の技術的な留意点

(A) 使用する波長帯と変位量

衛星 SAR データの利用では、まず初めに波長の長い L バンドで観測された衛星 SAR データを使用して干渉 SAR 解析を行った後に、より微少な変位量を計測するために、C バンドあるいは X バンドで観測した衛星 SAR データを使用して干渉 SAR 解析を行うことも考えられる。

(B) 使用する衛星ごとの適切なノイズ処理パラメータ設定

使用する SAR 衛星ごとにロックフィルダム堤体の変位計測に最も適したルック数・位相フィルタ強度（窓領域サイズ）が異なる。これら以外の衛星の SAR データを利用して解析を実施する場合には、利用する衛星ごとに精度検証を行い、最適なパラメータを決定する必要がある。

2.5.3 時系列干渉 SAR

時系列干渉 SAR 解析の方法

時系列干渉 SAR 解析は、多数の観測データを使用することで対流圏遅延や軌道誤差に起因するノイズを統計的に除去し、時系列の変位を算出するとともに、変位計測の精度を向上させる手法である。時系列干渉 SAR 解析の手法としては、SBAS (Small BAseline Subset method) 法⁶⁾がある。その基本的な計算方法は以下の通りである。

初回観測日から各観測日までの変位ベクトル d を仮定する。

$$d = [d_0, d_1 \dots d_n]$$

ここに、 $i=0,1,2 \dots n$ は観測番号である。 d_0 は初期値であり変位 0mm にあたる。

また、各干渉ペアの変位（位相差から算出） ϕ を以下と定義する

$$\phi = [\phi_{1,1}, \phi_{1,2} \dots \phi_{j,k}]$$

ここに、 j : マスタ画像の観測番号、 k : スレーブ画像の観測番号である。

この時、 $\phi_{j,k}$ は d の要素の線形式として表せる。

$$\phi_{j,k} = d_k - d_j$$

そのため、

$$Ad = \phi \quad \dots \dots \dots (*)$$

となる以下の行列 A が規定される。

$$A = \begin{bmatrix} 0 & -1 & 0 & 1 & \dots \\ 0 & 0 & 1 & 0 & \dots \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \end{bmatrix}$$

式 (*) を変位ベクトル d について解くことで、各時期の変位を算出することができる。

$$d = (A^T A)^{-1} A^T \phi$$

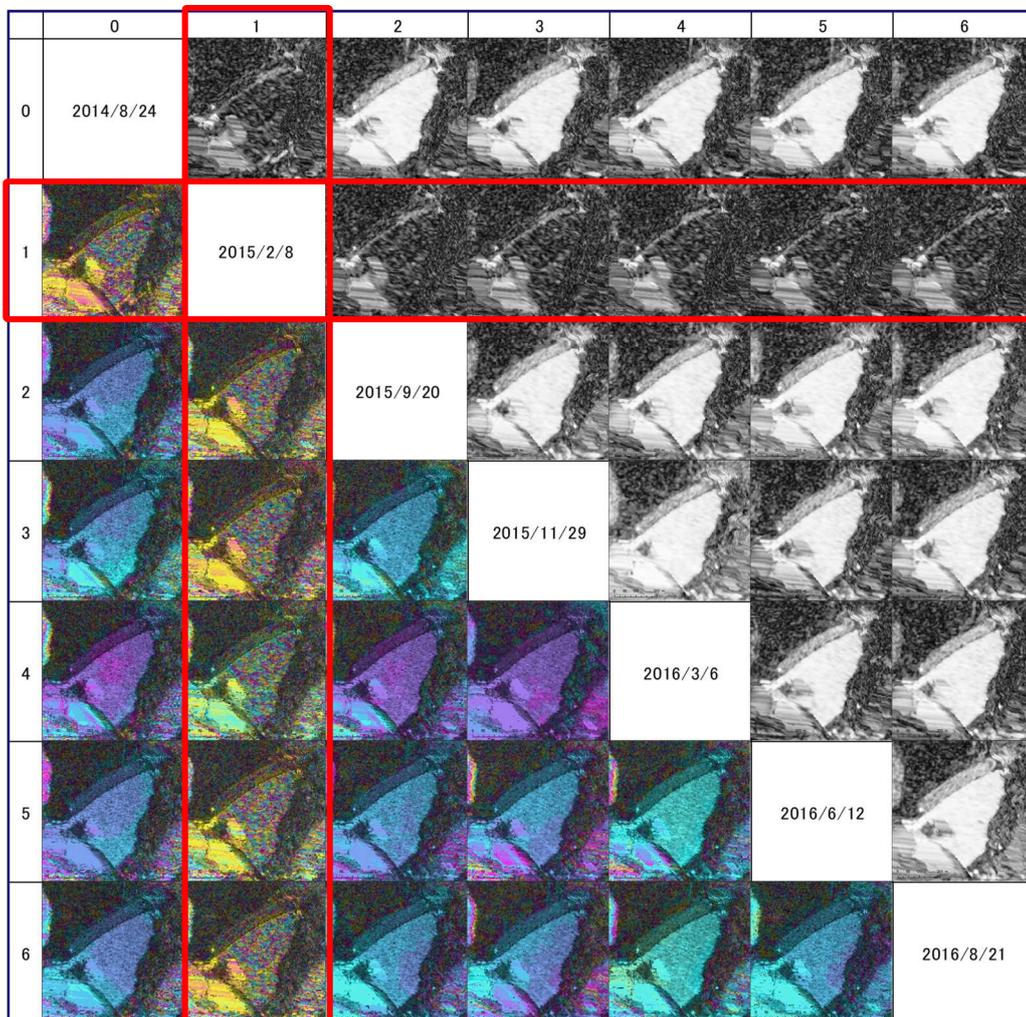
時系列干渉 SAR 解析における留意点

時系列干渉 SAR 解析では、干渉 SAR 解析の留意点に加え、以下の点にも留意することが必要となる。

- 解析に用いる干渉ペアの選定 (図 2.5.18)

一般に SBAS 法では観測間隔および基線長が短い2時期の衛星 SAR データのみを干渉ペアとして選別して用いることとしている。しかし、ロックフィルダムの場合は、長い基線長の干渉ペアも含めた全観測データを用いることで精度が安定する傾向があることがわかっている。

ただし、積雪期の SAR 観測データを用いると、干渉性が低くなる可能性が高い。(図 2.5.18 に示す例では、積雪が確認された 2015/2/8 のシーンを使うと、いずれの画像とのペアでも干渉性が低いことが分かる。) このため、解析精度を低下させる可能性が非常に高い積雪期のデータは、解析に用いない方がよい。



©JAXA

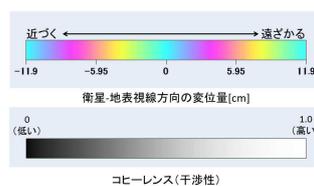


図 2.5.18 積雪期の観測データの影響の例 (赤枠部)
(図右上：各ペアのコヒーレンス画像、図左下：各ペアの干渉画像)

2.5.4 三次元変位の抽出

SAR 衛星の一つの軌道での観測データから得られる変位量は、その軌道からダム堤体等までの距離であり、1次元の値である。そのため、水平移動の成分・方向と鉛直変位（沈下等）のそれぞれを直接知ることはできない。しかし、複数の観測軌道の干渉 SAR 解析結果を組み合わせることで、3次元変位を求める手法がある。

このような3次元変位を知る手法として、2.5次元解析と呼ばれる手法がある（図 2.5.19）。これは、北行軌道と南行軌道の二つの軌道を用いることで、ベクトル演算により対象の準東西方向の変位と鉛直方向の変位を求める手法である。

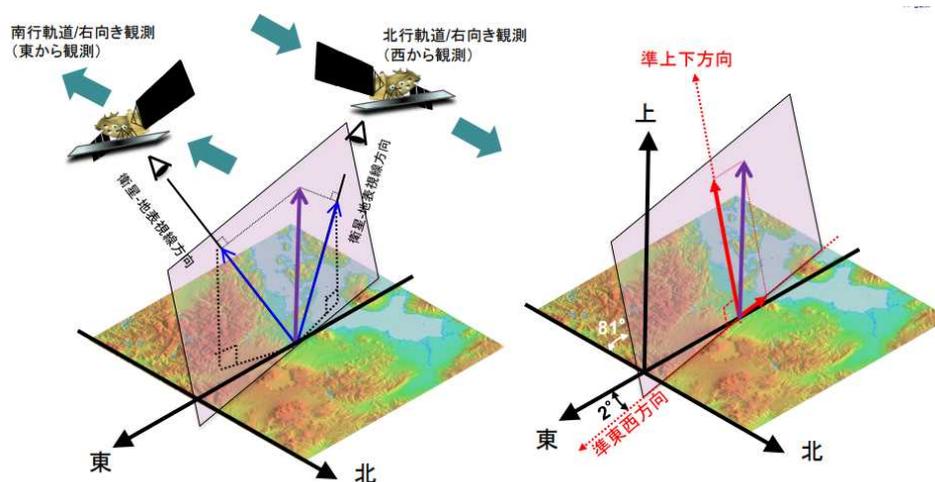
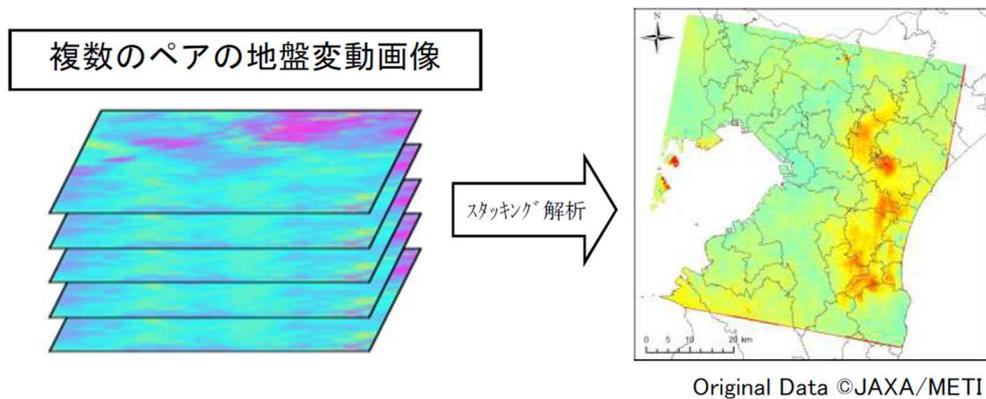


図 2.5.19 2.5次元解析の概念図⁹⁾

2.5.5 スタッキング解析

スタッキング解析の方法

スタッキング解析とは、各ペアの干渉 SAR 解析で得られる変位速度を複数用いて平均化する手法である（図 2.5.20）。複数の干渉 SAR 解析結果を足し合わせることにより、実際に生じている特定方向の有意な（累積）変位による位相差は平均化され、ノイズ成分は位相差がランダムなものとなり相殺される。このため、植生に覆われるなどして 1 ペアでの干渉 SAR 解析のみでは精度良く変動を捉えることが難しい貯水池周辺斜面の解析では、スタッキング解析を行うことで、実際の変動領域を明瞭に捉えることが可能になる。



スタッキング解析における留意点

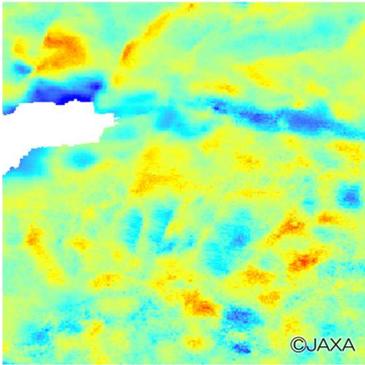
スタッキング解析を行うには、できるだけ多くの干渉 SAR データ（干渉画像ペア）があることが望ましいが、干渉 SAR 解析の留意点に加え、以下の点にも留意する必要がある。

- 解析に用いる衛星 SAR データの適切な観測間隔の選定

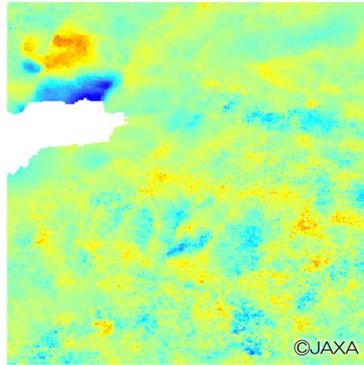
スタッキング解析に用いる干渉 SAR 画像は、適切な観測間隔の画像のペアで解析されたものを選択することで、より変動領域が抽出しやすい解析結果が得られやすくなる。適切な観測間隔は、貯水池周辺斜面を対象とする場合、斜面の規模（変動領域の大きさ）や変動速度によって異なるが、一般に変動速度が大きい斜面に対しては、短い観測間隔のペアを用いる必要がある。また、逆に斜面の変位速度が遅い斜面に対しては、長期観測間隔のペアでないと位相差による変動が捉えられない可能性がある。

図 2.5.21 に示す事例では、1 年以上の観測間隔のペアを用いることで変動領域を比較的明瞭に抽出することができている（同図中央）。しかし、同じ斜面に対して、観測間隔が短いペアを用いた干渉 SAR 画像を用いると、気象のノイズが増幅され有意な変動以外のノイズが強調されることがわかる（同図左）。また、逆に観測間隔が長すぎるペアの干渉 SAR 画像だけを用いると、変動速度の大きな地すべりではアンラップエラーを起こし、適切に変位を評価することが難しくなることもわかる（同図右）。

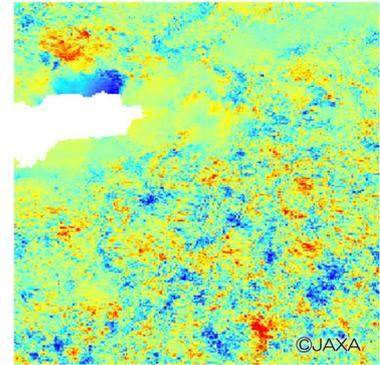
このため、貯水池周辺斜面の解析では、短い観測間隔を含めたスタッキング解析や長期間観測ペアだけを利用したスタッキング解析を行い、それぞれの結果を確認するなどして、変動領域の見落としが生じないようにする必要がある。



観測間隔を考慮せず
全ペアを利用した例
(変位以外も強調されている)



観測間隔が 1 年以上の例
(左上の変位が際立っている)



観測間隔が 3 年以上の例
(干渉性の低下によるノイズが発生し
ている)

図 2.5.21 貯水池周辺斜面のスタッキング解析の例
(使用する干渉 SAR 画像の観測間隔の違いによる比較)

- 解析に用いる干渉ペアの選定

干渉 SAR 解析での留意点と同じく、スタッキング解析に用いる干渉ペアに積雪期の観測データが含まれると干渉性が低くなり、解析精度を低下させる可能性が非常に高い。このため、積雪期の観測データは、解析対象データから除外する必要がある。

図 2.5.22 の例では、積雪が確認された 2016/1/9 のシーンを使うと、いずれの画像とのペアでも干渉性が低いことが分かる。

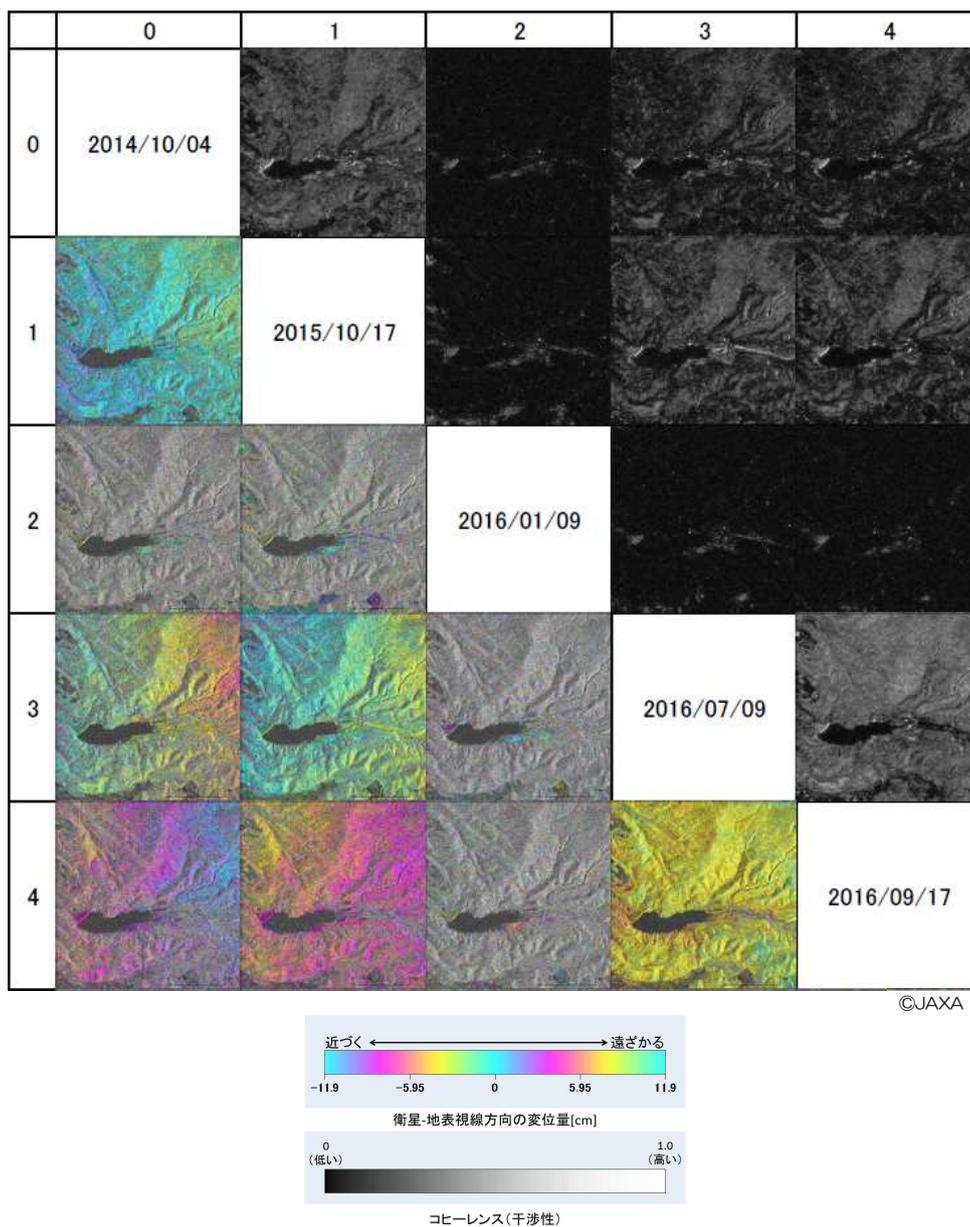


図 2.5.22 積雪期の観測データの影響の例
(図右上：各ペアのコヒーレンス画像、図左下：各ペアの干渉画像)

2.5.6 精度向上のための留意点

時系列干渉 SAR 解析の精度は、利用する干渉ペアの精度に大きく影響される。このため、解析に使用する衛星 SAR データの選定は、解析精度への影響について十分に考慮して行う必要がある。

衛星 SAR データを用いてロックフィルダムや貯水池周辺斜面の変位モニタリングを精度よく行うために必要な作業上の留意点について、一部既に述べた事項も含め以下にまとめる。

使用する衛星データの選別

干渉 SAR 解析による変位モニタリングでは、モニタリングの対象期間に取得された衛星 SAR データであっても、様々な条件から解析に適さないデータが含まれる場合がある。解析に適さないデータを含んだまま解析を行うと、精度に悪影響を与える。そのため、以下の条件で解析に用いる観測データを選別する必要がある。

① 積雪期のデータの除外

積雪期のデータが含まれると、干渉性が低下し解析の精度に影響を与える。このため、冬季から春季のデータを取得する際には、対象地域周辺の積雪情報等から積雪（残雪）の影響の有無について確認する必要がある。

② 工事等の影響が想定されるデータの除外

積雪期のデータと同様に、工事等で解析対象とするダム堤体の表面形状が変化したり、貯水池周辺斜面の地形が改変されたりすると、干渉性が低下し精度に影響を与える。工事履歴情報を参考にし、工事等の影響が想定される時期のデータを除外して解析を行うなどの対応が必要である。

SAR 画像と DEM の位置合わせ

高精度に地形縞を除くためには、LP DEM（空間分解能 2m 以下）を用いることが有効であるが、同時に SAR 画像と DEM との位置合わせを行うことで、より高精度に地形縞を除き、計測精度の向上が見込める。位置合わせの方法としては、SAR の投影変換前の反射強度画像と DEM の傾斜量図を比較し、同一地点と思われる地点を位置合わせのための基準点として取得する方法がある。位置合わせのための基準点の設定例を図 2.5.23 に示す。

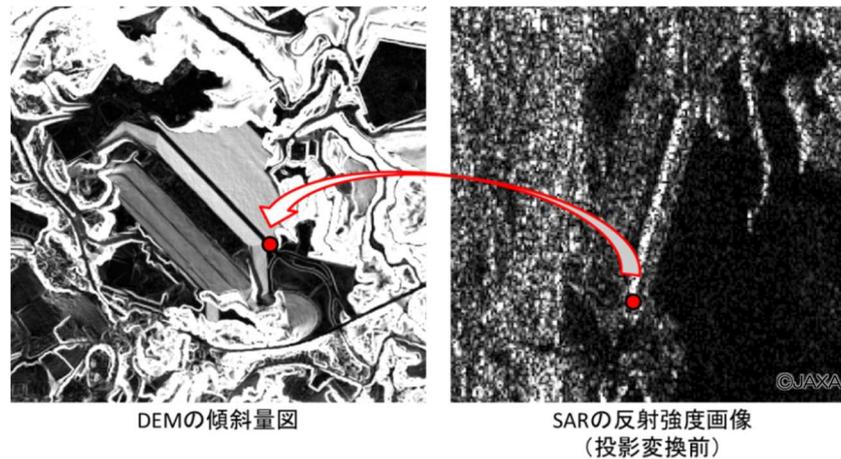


図 2.5.23 SAR 画像と DEM の位置合わせ

使用する SAR 衛星に適した処理パラメータ

使用する SAR 衛星によりダム堤体等の変位量解析に適したルック数・位相フィルタ強度（窓領域サイズ）が異なる。パラメータは SAR の観測波長、分解能、ノイズの量などに依存する。異なる SAR データでの解析を実施する場合には、利用する衛星ごとに精度検証を行い、最適なパラメータを確認する必要がある。

長周期の位相差の除去

干渉 SAR 解析では、SAR 衛星の軌道決定精度や大気遅延や電離層の影響で本来の変位とは異なる長周期の位相差が現れることがある。ALOS-2 では軌道の精度が高く制御されているためこの影響は小さいが、COSMO-SkyMed 等基線長の長い衛星では影響が大きくなる可能性がある。また、地震時には、地殻変動によってダム堤体に生じる変動よりも長周期（距離スケールの大きな）変動が現れる可能性が高い。このような長周期変動に対しては、ハイパスフィルタや衛星軌道の再推定によって長周期成分を除くことでその影響を軽減し、解析精度を向上させることができる可能性がある。

変位基準点・不動点の選定

干渉 SAR 解析は相対変位を計測する技術であるため、絶対変位を求めるためには変位の基準（変位基準点）が必要である。変位基準点としては、ロックフィルダム堤体での安全管理を目的とした地上での光波測量等による外部変形計測に使用している信頼できる計測点の全てを使用することが望ましい。なお、地上での光波測量等の計測点であっても、変位計測の精度（信頼性）に劣る計測点を変位基準点として使用すると、干渉 SAR 解析での変位計測に悪影響を与える可能性があるため、このような計測点は適切に除外する必要がある。また、地震等により地上の計測点が影響を受けるなどして信頼できる計測点として利用しがたい場合は、別に不動点とみなせる近傍の適切な地点を基準点として設定する必要がある。

なお、地上での光波測量での実測変位量には、測量距離の長さその他周囲の環境の影響に応じた計測誤差が含まれる。このような誤差が懸念される場合も、干渉 SAR 解析に用いる不動点を適切に設定して基準点として用いることにより、信頼できる計測結果が期待できる。

2.5.7 誤差要因

干渉 SAR 解析及び時系列干渉 SAR 解析において変位の解析結果の精度に影響を及ぼす各種の誤差要因について、ALOS-2 及び ALOS のデータを用いた場合の要因別の影響度を表 2.5.1 に示す。

表 2.5.1 誤差要因とその影響度

衛星	解析方法	土地被覆	コヒーレンス	基線長	観測間隔	水蒸気量	観測角度
ALOS-2	干渉 SAR	◎	○	△	△	△	○
	時系列干渉 SAR	◎	△	△	△	△	○
ALOS	干渉 SAR	◎	◎	○	○	△	○
	時系列干渉 SAR	◎	△	○	△	△	○

◎：明らかな影響が認められる

○：影響が認められる

△：原理的には影響がありうる

以下に各種誤差要因に関わる指標と解析上の留意点を示す。

コヒーレンス・土地被覆

これまでの試行から、いずれの衛星・解析手法を用いた場合であっても、植生や積雪の有無などの土地被覆の条件の違いが変位解析の結果に大きな影響を与えることがわかっている。これは、土地被覆の条件の相違によって生じるコヒーレンス（干渉性）の相違によるものと考えられる。そのため、土地被覆の条件は、干渉 SAR 解析や時系列干渉 SAR 解析における最も重要な誤差要因になるものと考えられる。

高い精度の解析結果が期待できるのは、土地被覆が安定して高いコヒーレンスが得られる条件の場合である。またコヒーレンスは電波の強度（反射強度）と位相の複素相関であることから、観測対象が強度・位相ともに安定している条件の下では、精度の良い解析結果が期待できる。逆に、例えば無積雪期と積雪期など土地被覆の条件が大きく変化しているデータを用いて解析するとコヒーレンスが低下し、計測精度が悪化する。ただし、コヒーレンスが高い場合であっても、周囲の構造物の強反射がもたらすサイドローブ効果によって対象物による本来の強度・位相が得られない場合もあるため、注意が必要である。

基線長

ALOS-2 では軌道制御性能の向上によって基線長が短くなっており、解析上十分な精度が得られる基線長を保った軌道を巡回している。このため、基線長による解析精度への影響は少ない。一方、ALOS では軌道制御性能が ALOS-2 よりも低い傾向にあり、基線長によっては解析の精度に影響することもある。このように、利用する SAR 衛星の軌道制御性能の違いによる影響についても留意する必要がある。

観測間隔

解析に使用する衛星 SAR データの観測間隔が長いと解析結果の精度が低下する場合がある。また、季節変動のように周期的な変動を捉えることもモニタリングの目的とする場合には、想定される周期的な変化に比べて十分短い間隔の観測データを用いる必要がある。

水蒸気量

ALOS や ALOS-2 は波長が長い L バンドの観測データを用いるため、一般に水蒸気量の影響を受けにくい。ただし、水蒸気量による影響は理論的に存在することから、利用しようとする SAR データの観測時期の間に大きな水蒸気量の変化が生じている場合には注意が必要である。一方、波長が短い X バンドで観測する衛星（COSMO-SkyMed、TerraSAR-X 等）は水蒸気量による影響を比較的受けやすいため、利用しようとする SAR データの観測時の気象条件を確認する必要がある。

観測角度

これまでの試行から、ロックフィルダム of 堤体に対して正面および背面から衛星からの電波が照射される方向の観測データを用いると、フォアショートニングや後方散乱強度の低下の影響により解析精度が低下する可能性があることがわかっている。一方、側面（ダム軸方向）から衛星からの電波が照射される場合には、最も良い精度が得られる傾向がある。このため、ダム堤体の方向と観測角度（衛星からの電波の照射方向）の関係に留意する必要がある。

2.6 解析結果とその出力

2.6.1 干渉画像・コヒーレンス画像

適切な2時期（ペア）の衛星 SAR データを用いた干渉 SAR 解析により、干渉画像とコヒーレンス（干渉性）画像が得られる。ロックフィルダム堤体を対象とした干渉 SAR 解析で得られた両画像の例を図 2.6.1 に示す。

なお、同一の観測対象について得られた多時期間（複数ペア以上）の干渉画像のデータを用いる時系列干渉 SAR 解析では、各ペアの干渉 SAR 解析で得られた干渉画像とコヒーレンス画像を用いるが、解析の精度を確保するため、干渉画像のノイズが多いペアやコヒーレンスが極端に低いペアを除外して用いる必要がある。図 2.6.1 の例では、2015/2/8 の観測データと対応する各ペアの干渉性が低い。これは積雪の影響と考えられ、同日のデータは時系列干渉 SAR 解析に用いるデータから除外する必要がある。

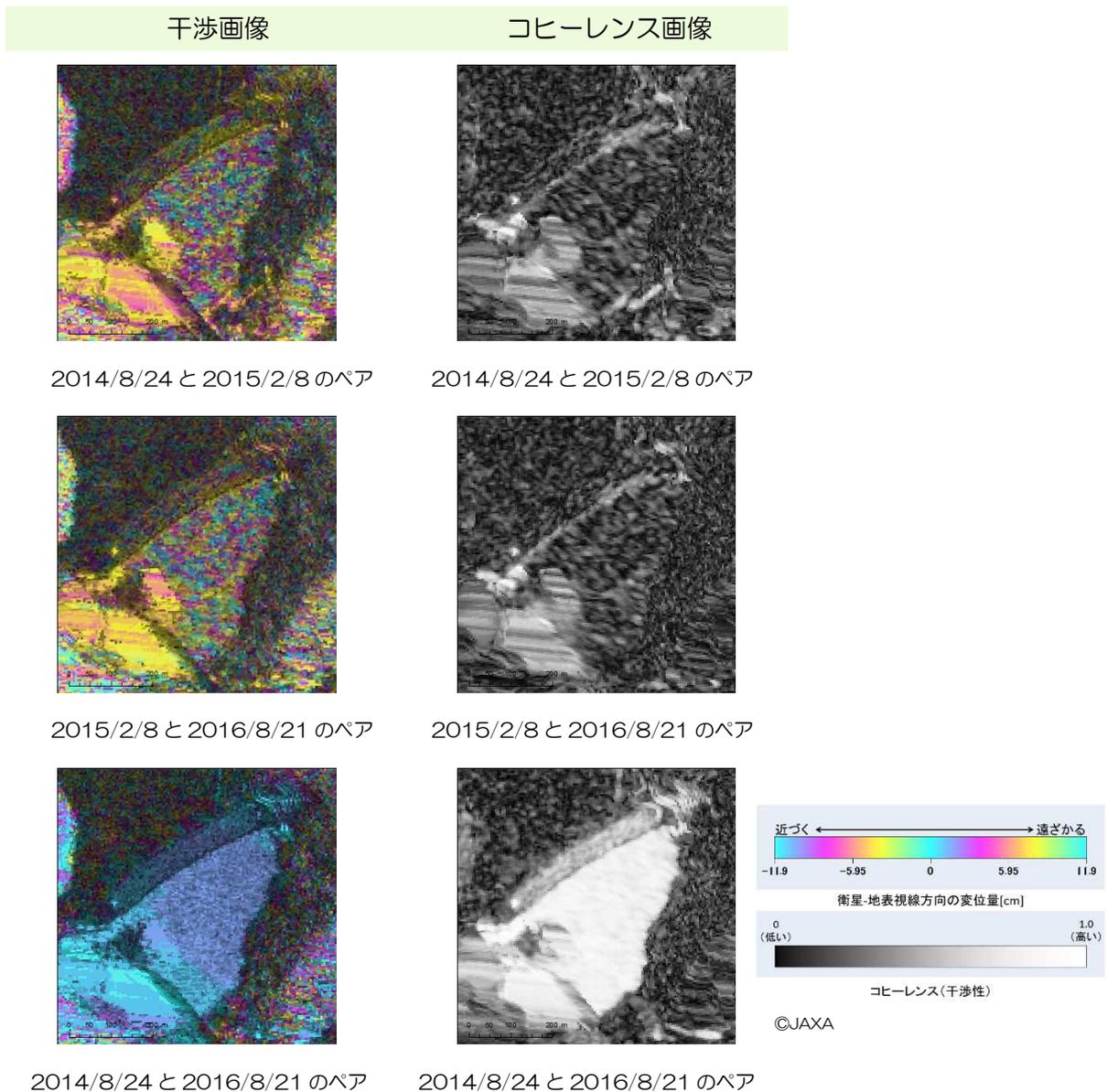


図 2.6.1 干渉 SAR 解析で得られた干渉画像とコヒーレンス画像の例

2.6.2 変位量マップ

多期間（複数ペア）の衛星 SAR データを用いた干渉 SAR 解析で得られる各観測時期間（ペアごと）の変位量には、実際の各観測時期間の変位量以外にも各ペアでの条件に依存した大気遅延等のノイズが含まれる。この影響を取り除いて精度よく変位量を求めるため、ロックフィルダムの堤体を対象として時系列干渉 SAR 解析を行って得られた変位量マップの例を図 2.6.2 に示す。

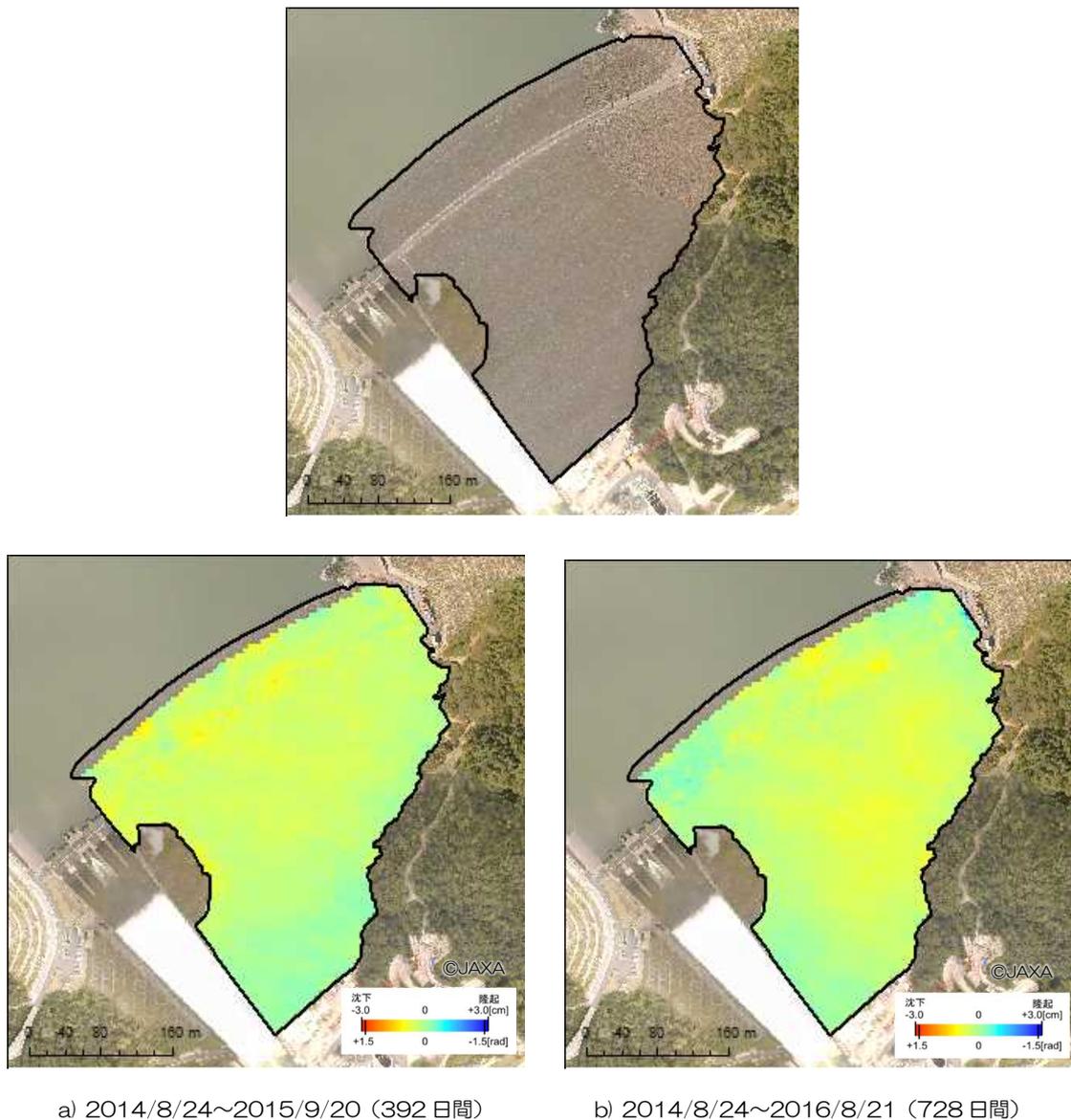


図 2.6.2 時系列変位量マップの例

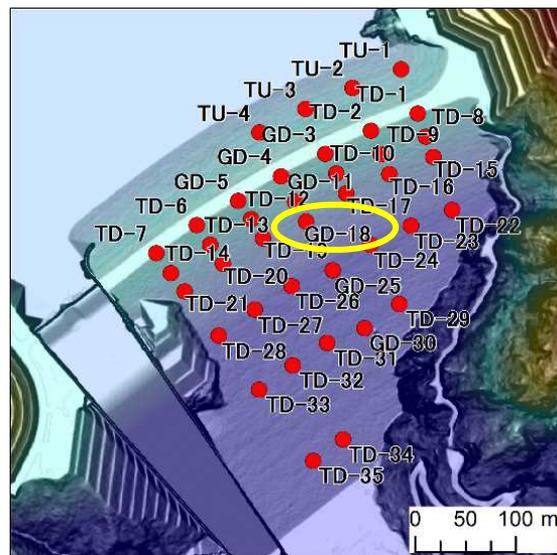
図中の黄色に着色された箇所が衛星から遠ざかる変位（沈下傾向）を示した場所である。2枚の画像を比較すると、解析に使用したデータの期間が短い左図よりも右図の結果の方が沈下傾向を示す黄色の範囲が広がっており、変位の範囲が拡大していると考えられる。

2.6.3 時系列変位グラフ

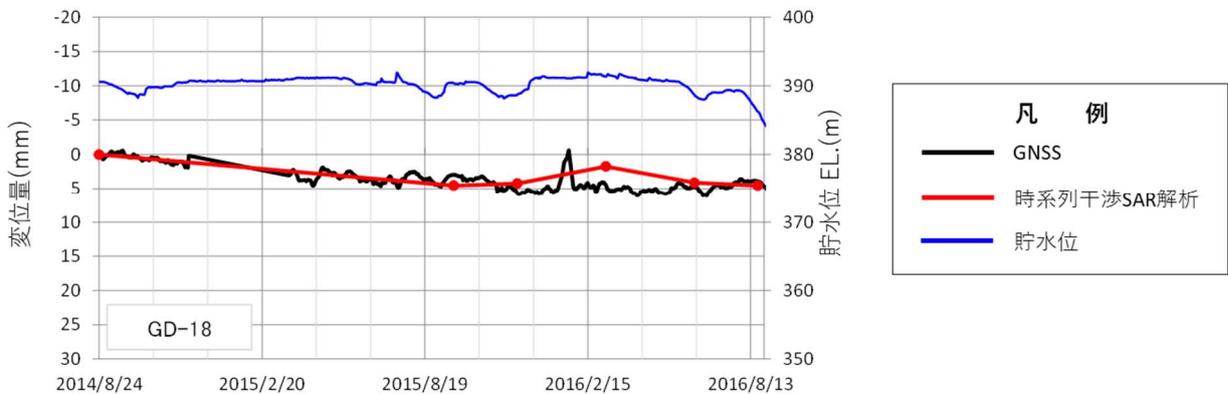
時系列干渉 SAR 解析で得られた変位量分布をもとに、ダム堤体上等の着目する地点（画像上の指定するピクセル）の変位量データの時系列を抽出し、グラフ化する。前掲の図 2.6.2 に示した変位量マップから抽出した着目地点の変位量を時系列グラフ化した例を図 2.6.3 に示す。

このとき、光波測量等の地上での信頼できる実測データが得られている場合には、同図のように時系列 SAR 解析で得られた変位量の時系列とあわせて表示することで、両者の整合性を確認することができる。干渉 SAR の解析結果の精度検証（2.7 参照）の結果を踏まえた上で、前項で示した変位量マップによって変位量の空間的な分布状況を確認することで、光波測量等の計測点以外の場所も含めた面的（あるいは観測対象とするダム堤体等の周辺も含めた広域的な）変位状況のモニタリングが可能となる。

なお、時系列干渉 SAR 解析で得られた面的な変位マップから抽出した地上での計測点位置での変位量が地上での光波測量等のデータと整合していても、変位マップ内の他の場所で異なる傾向の変位が認められる場合には、未知の変位（変動）を捉えている可能性がある。このような場合には、反対方向からの衛星 SAR データを用いて時系列干渉 SAR を行うなどして、確度を高めることが望ましい。



(a) 計測点の位置図



(b) 時系列変位グラフ

図 2.6.3 ロックフィルダム堤体を対象とした時系列変位のグラフ化の例
(時系列干渉 SAR 解析と光波測量との比較)

2.7 解析結果の精度検証

2.7.1 解析結果の精度検証方法

衛星視線方向への変換

干渉 SAR 解析及び時系列干渉 SAR 解析による変位計測結果の精度検証は、地上での光波測量等（光波測量や GNSS 測量）で得られた変位データを真値と仮定した比較により行うことができる。ただし、光波測量等の結果は、上下流方向、左右岸方向、鉛直（沈下）方向の3次元座標で表されるが、衛星 SAR データを用いた変位解析の結果と比較するため、3次元座標を衛星視線方向の変位方向に変換して比較する必要がある。変換方法を以下に示す。

地上での3次元計測で得られた変位量 D を衛星視線方向の変位量 S に変換するには、衛星視線方向と地上での変位計測で得られた変位方向との角度（図 2.7.1 参照）を θ とすると、以下の式で表すことができる。

$$S = |D| \cos \theta$$

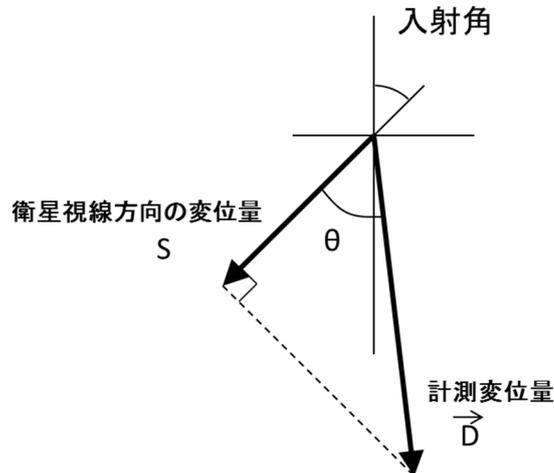


図 2.7.1 地上での光波測量等で得られる変位量と衛星視線方向の変位量の関係

時系列干渉 SAR 解析での変位補正のための基準点の設定

時系列干渉 SAR 解析では、変位計測のための各基準点（1, 2・・・n）において地上での光波測量等で得られている変位データと衛星 SAR により得られた変位量（衛星視線方向への変換値）の差を D_n とすると、 $D_1+D_2+\dots+D_n=0$ となる値になるように各ペアの時系列干渉 SAR 解析結果に対する補正值を定める。そのため、必ずしも差がゼロになる点がないことがある（図 2.7.2）。

なお、地上での変位の計測点が複数ある場合、一般には全てを基準点として用いることで衛星 SAR での変位計測の精度を高めることができるが、精度に悪影響を与えるおそれがある計測点がある場合には、適切に除外する必要がある（2.4.1 参照）。

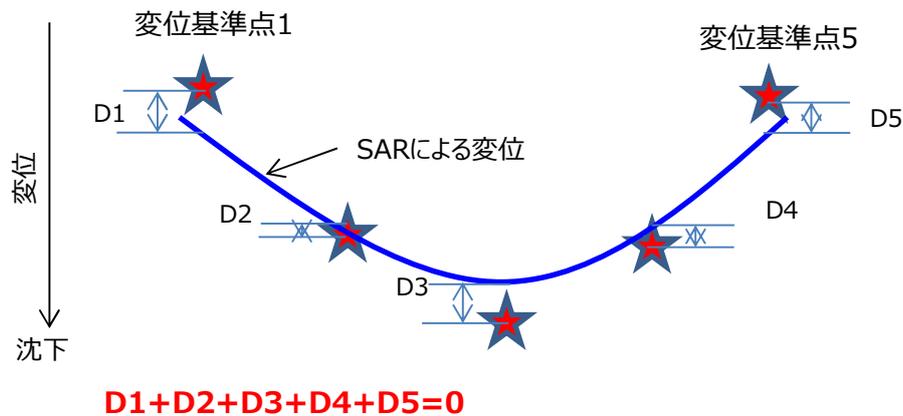


図 2.7.2 基準点での変位計測データを用いた時系列干渉 SAR 解析結果の補正（概念図）

時系列干渉 SAR 解析の精度指標

時系列干渉 SAR 解析の精度を評価するための指標としては、一般に RMSE（Root Mean Square Error：2乗平均平方根誤差）を用いる。RMSE は、補正值を用いて補正した衛星 SAR データからの変位解析結果と地上での変位計測データとの計測点毎の差から、次式により算出できる。

$$RMSE = \sqrt{\sum_{i=1}^n (D_i - d_i)^2 / n}$$

D_i : 地上での計測変位（計測点 i ）
 d_i : 衛星 SAR データからの解析変位（同）
 n : 変位計測点数

RMSE の値が小さいほど時系列干渉 SAR 解析の結果と地上での実測データの変位の誤差が小さく、衛星 SAR データからの解析値の精度が高いと評価することができる。

2.8 データの蓄積・管理

2.8.1 衛星 SAR データの蓄積・管理

衛星 SAR データを用いた変位解析では、できるだけ多くの時期のデータを用いて時系列干渉 SAR 解析を行う方が精度の良い解析結果が得られることが確認されている。そのため、一定期間（例：1 年間）のデータをまとめて取得・解析した上で、解析を行うことが精度面・効率面のいずれにおいても望ましいが、このように精度・効率を高く維持して継続して変位解析を行うためには、取得した SAR データをその諸元情報と合わせて、散逸しないように一元的に管理する必要がある。

衛星 SAR データの容量（サイズ）は、ALOS-2 では 1 シーンで約 6GB と非常に大きい。このため、大容量の記憶媒体が必要となる。ダムของ安全管理のような継続的なモニタリングにおいては、将来にわたりこのような衛星 SAR データの蓄積を行っていくことが想定されるため、記憶媒体の所在を定めるなど、一元的に管理する必要がある。

継続的に同じ SAR 衛星のデータを使って干渉 SAR 解析を行うためには、同一軌道上から同一の観測モードで観測されたデータを用いる必要がある。そのため、衛星データの管理に当たっては、表 2.8.1 に示すようなデータの諸元情報を整理して記録・管理することが望ましい。なお、これらの諸元情報は、解析に使用する衛星 SAR データの検索や取得（購入）時に入手できる。このため、外部委託を活用する場合（15.2 参照）には、解析結果だけでなく、諸元情報を整理した衛星データもあわせて納品されるようにしておくのが良い。

表 2.8.1 衛星 SAR データの管理に必要な諸元情報の例

項目	項目の説明	例
衛星種別	観測した衛星	ALOS-2
センサ	観測に使用したセンサ	PALSAR-2
運用モード	観測の運用モード	SM1
シーンID	シーンのID	ALOS2016040700-140909
観測パス番号	観測したパス番号	124
中心フレーム番号	観測したフレーム番号	700
シーンシフト	観測範囲を南北方向にシフトする。ALOS-2 の場合、10%毎に+4~-5 で設定する。	+0
処理レベル	衛星データの処理レベル。ALOS-2 の場合、干渉 SAR 解析を行うためには L1.1 以下である必要がある。	L1.1
軌道データ種別	軌道情報	確定軌道暦
観測開始日時	観測開始の時間（世界標準時）	2021/9/1 14:30
観測終了日時	観測終了の時間（世界標準時）	2021/9/1 14:32
衛星進行方向	アセンディング（北行軌道）かディセンディング（南行軌道）か	アセンディング（北行軌道）
観測方向	観測方向が進行方向に対して右側を観測したか、左側を観測したか	右側観測
オフナディア角	観測角度	29.1°
偏波	観測の偏波モード。（HH、HV、VH、VV、HH+HV、VH+VV、HH+HV+VH+VV がある）	HH
ビームNo	観測ビームの種類	U2-6

2.8.2 干渉 SAR 解析結果等の蓄積・管理

干渉 SAR 解析や時系列干渉 SAR 解析は、その特性上、同じ性能の SAR センサで同一軌道を同一観測モード、同一入射角で観測したデータどうしでないと解析できない。そのため、それまで用いてきた SAR 衛星のデータが衛星の運用終了その他の理由で利用できない場合など、それまでに取得した観測データを使った解析を行うことができなくなる場合は、利用可能な別の衛星のデータを新たに用いて解析を行っていく必要が生じる。

このように、ダム of 長期的な安全管理の中で変位モニタリングを継続していくには、新たな衛星のデータの解析で得られた変位を過去の解析で得られた変位と比較して、傾向変化の有無等を評価する必要がある。災害時などに緊急的な解析を行う必要があり、解析時間を短縮するためにデータ数を少なくして解析した結果を過去の解析結果と比較して評価する必要があるような場合も同様である。

このように、あらゆる状況において得られた解析結果を適切に評価できるよう、過去の解析で得られた変位量や変位分布のデータは、取得した SAR データ自体とあわせて適切に管理していく必要がある。

2.8.3 その他データの蓄積・管理

衛星 SAR データを用いた変位モニタリングでは、取得した SAR データや解析で得られた変位量や変位分布のデータ以外にも、干渉 SAR 解析に使用する DEM データ、解析精度の検証に用いる地上での変位計測データなども不可欠なデータ・資料となる。これらのデータや資料は必ずしも同一の管理者により一元的に管理されていない場合もある。衛星 SAR データを用いた変位モニタリングの導入に際しては、災害時等緊急時の利用も含め、これらのデータ・資料がいつでも利用できるように管理しておくことが重要である。中でも解析に不可欠な DEM データの管理は特に重要であり、SAR データ等とともに一元管理することが望ましい。

1) ハードウェア

衛星 SAR データを用いた変位モニタリングのための干渉 SAR 解析では、比較的大きなデータを扱うことになる。特に時系列干渉 SAR 解析では、大量のデータを扱うため可能な限り高性能な計算機を用いることが望ましい。優先的に要求される性能は、①メモリ、②HDD/SSD、③CPU である。OS については、解析に用いるソフトウェアが対応していれば問題ない。

参考として、本資料で紹介している試行において解析用に用いたハードウェア仕様の例を表 2.参.1 に示す。

表 2.参.1 解析用ハードウェア仕様の例

項目	諸元	備考
CPU	3.50 GHz	並列計算に対応したソフトも多くコア数は複数が望ましい
メモリ	32.0GB	画像解析には大きなメモリを必要とする
HDD/SSD	240GB SSD 1TB 内蔵 SSD 数 TB 外付け HDD	解析結果の出力先を 1TB 程度以上の内蔵 SSD にすると解析時間が短縮できる。SAR データは非常に大きいため、大容量 HDD (内蔵・外付け) が必要
その他	ビデオカード/メモリ 4GB	GPU 対応のソフトでは性能が高いことが望ましい

2) ソフトウェア

干渉 SAR 解析が可能なソフトウェアの一覧を表 2.参.2 に示す。提供形態としては製品版とフリーソフトウェアがあるが、フリーソフトウェアは商用利用が禁じられている場合があるので注意を要する。また、時系列干渉 SAR 解析 (SBAS 法) に未対応のソフトウェアもあり、このようなソフトウェアを利用する場合には、別途プログラム開発等の対応が必要となる。

なお、使用するソフトウェアによって、操作形態 (GUI: グラフィカルユーザーインターフェース/CUI: キャラクターユーザーインターフェース) が異なり、作業時間も異なってくる。

表 2.参.2 干渉 SAR 解析が可能なソフトウェア

ソフト名	干渉 SAR 解析	時系列 干渉 SAR 解析	提供 形態	開発元	参照 URL	備考
ENVI SARscape	○	○	製品	Sarmap 社	https://www.harrisgeospatial.co.jp/Software-Technology	ENVI のオプションモジュール (ENVI が必要)
Gamma SAR	○	○	製品	Gamma 社	http://www.opengis.co.jp/html/gamma/gamma.htm	
ERDAS IMAGINE SAR Interferometry	○	×	製品	Intergraph 社	https://www.pasco.co.jp/products/imagine_addon/	ERDAS IMAGINE のオプションモジュール (ERDAS IMAGINE Advantage 以上が必要)
GMT SAR	○	○	フリー	David Sandwell	http://topex.ucsd.edu/gmtsar/	Generic Mapping Tool 上で稼働
SNAP	○	×	フリー	European Space Agency	http://step.esa.int/main/	
DORIS	○	×	フリー	Delft 工科大学	http://doris.tudelft.nl/	
StaMPS/MTI	○ DORIS 使用	○	フリー	Stanford 大学	https://homepages.see.leeds.ac.uk/~earahoo/stamps/	MatLab (有料) が必要

※2022 年 1 2 月時点

3) 時間と費用

実施期間

干渉 SAR 解析や時系列干渉 SAR 解析に必要な作業時間は、対象とする地域や観測データ数に大きく依存する。特に、観測データに含まれる全域を解析する場合は、多くの時間を必要とする。

以下では、一連の解析にかかる一般的な作業時間を ①前処理にかかる作業時間、②干渉 SAR 解析・時系列干渉 SAR 解析にかかる作業時間、および ③災害時等の緊急的な解析に必要な作業時間 に分けて参考に示す。これらは、ALOS-2 データを用いて解析対象であるダム周辺のみの切り取りで解析した場合に想定される処理時間を本資料で紹介する試行適用での実績を踏まえたものである。なお、以下の想定は各作業での解析等の処理時間であり、解析に使用するパラメータの検討時間等は含まれていない。

① 前処理にかかる作業時間

干渉 SAR 解析に使用する DEM の作成や時系列干渉 SAR 解析での補正に用いる地上で計測された過去の変位データの整理等の前処理にかかる作業時間の想定を表 2.参.3 に示す。ただし、これらの時間は、実際には入手したデータの状況や作業の習熟度に大きく依存し、さらに時間を要する場合もある。なお、DEM と SAR 画像の位置合わせは、SAR の分解能が低いと正確な位置を判読することが難しくなるため、作業時間がかかりやすい。

表 2.参.3 前処理の作業時間の例

項目	処理時間の概算	備考
DEM 作成	1 日/1 地域	LP データを想定
過去の変位データの整理	数日	視線方向変位への変換も含むデータの整理状況に依存
SLC データの前処理 (インポート、切り取り)	1 時間/1 シーン	堤体周辺のみとすることでその後の処理時間を大きく短縮できる
DEM と SAR 画像の位置合わせ	5 時間/1 軌道	基準画像により DEM と SAR 画像の位置合わせを行う

② 干渉 SAR 解析・時系列干渉 SAR 解析にかかる作業時間

干渉 SAR 解析及び時系列干渉 SAR 解析にかかる作業時間を表 2 参.4 に示す。処理時間はロックフィルダムの堤体の変位量解析に必要な範囲を切り出して解析を行う場合を想定している。時系列干渉 SAR 解析の時間は用いる観測シーン数に依存する。

表 2.参.4 干渉 SAR 解析・時系列干渉 SAR 解析の作業時間の例

項目	処理時間の概算	備考
干渉 SAR 画像の作成	10 分/1 ペア	各種処理パラメータの設定は確定しているものとする
視線方向の変位算出	10 分/1 ペア	
SBAS 法を用いた処理	30 分/1 地域	7 シーン程度を想定 シーン数によってはさらに多くなる
視線方向の変位算出	30 分/1 地域	7 シーン程度を想定 シーン数によってはさらに多くなる

③ 災害時等の緊急的な解析に必要な作業時間

地震等の災害時にダム堤体等の変位を緊急に確認する必要がある場合、衛星 SAR データを利用して広域かつ面的な変位を迅速に把握するには、発災後の対応だけでなく事前の準備も重要となる。そのため、災害前に準備すべき項目と発災後の処理内容に分けて、処理内容とそれに要する時間の目安を表 2.参.5 及び表 2.参.6 にそれぞれ示す。

表 2.参.5 地震等の災害前に行う処理内容と要する時間

項目	内容	処理時間の目安
DEM の準備	解析に使用する DEM を準備	1 日
DEM と SAR 画像の位置合わせ	基準画像により DEM と SAR 画像の位置合わせを行う	5 時間

表 2.参.6 地震等の災害直後に行う処理内容と要する時間

項目	内容	処理時間の目安
データの前処理	データのインポートおよび切り取り	3 時間/1 シーン
干渉 SAR 解析	既に準備しておいたデータを用いた干渉 SAR 解析	30 分
ハイパスフィルタの適用 および後処理	ダム大きさに応じてフィルタの大きさを決定する。ダム大きさの 2~3 倍程度を基本とする	30 分

費用等

解析に必要な費用は、SAR データ利用（購入）する衛星、解析に用いる SAR データのシーン数、処理ソフト等に大きく依存する。

DEM データについては、ダム管理事務所あるいは地域を管轄する国土交通省の事務所等で航空レーザ測量成果として所有している場合には、それを活用することができる。

卷末参考 試行適用事例

事例 1：ロックフィルダム堤体の変位計測事例

国内で供用中のロックフィルダムを対象に、ALOS-2 によって取得された衛星データ（表 例.1.1 に示す 2015 年から 2016 年までの 2 年間のデータ）を用いて時系列干渉 SAR 解析を行い、得られた堤体変位の計測結果を GNSS 測量結果と比較した事例を示す（図 例.1.1～図 例.1.4）。

表 例.1.1 使用したデータの諸元

センサ名	PALSAR-2
運用モード	SM1
衛星進行方向	ディセンディング
観測方向	右側
オフナディア角	32.4
偏波	HH
観測日	2015/02/28 2015/03/28 2015/09/26 2015/12/15 2016/03/12 2016/06/18
シーン数	6
ペア数	15

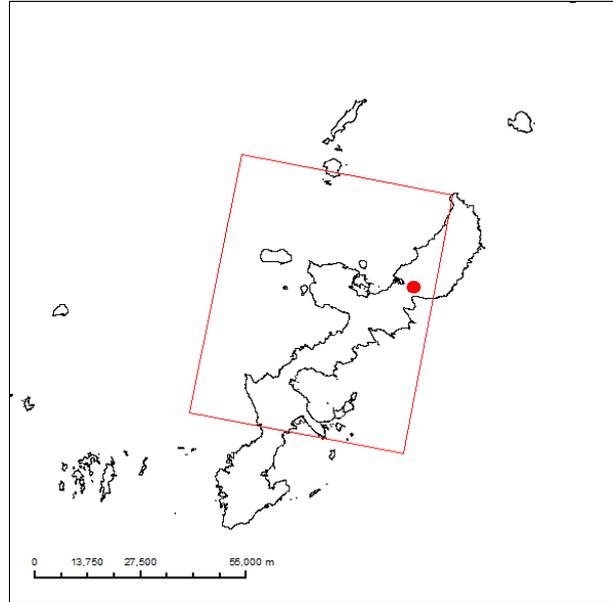


図 例.1.1 使用したデータの観測範囲
※赤丸が対象ダムの位置

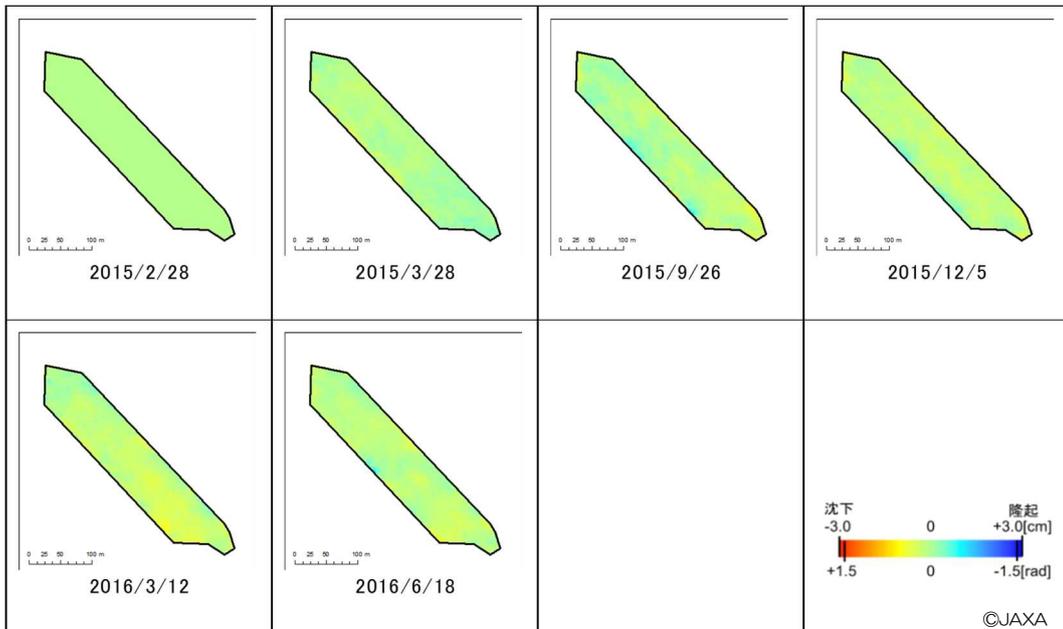


図 例.1.2 時系列干渉 SAR 解析結果：沈下量分布図

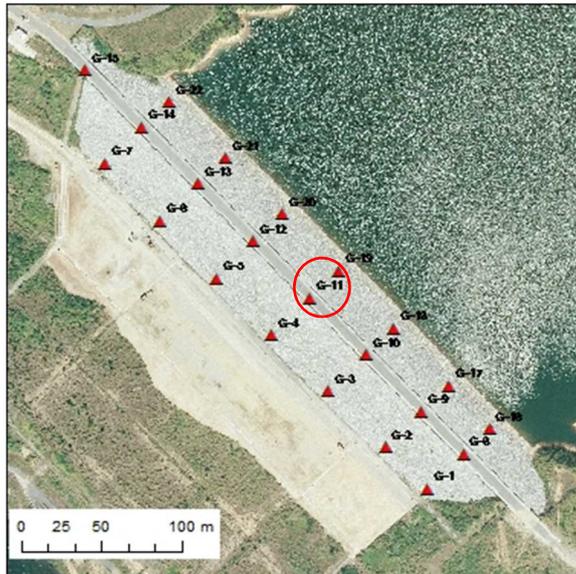


図 例.1.3 変位計測点の位置
(検証対象基準点数：21 点)

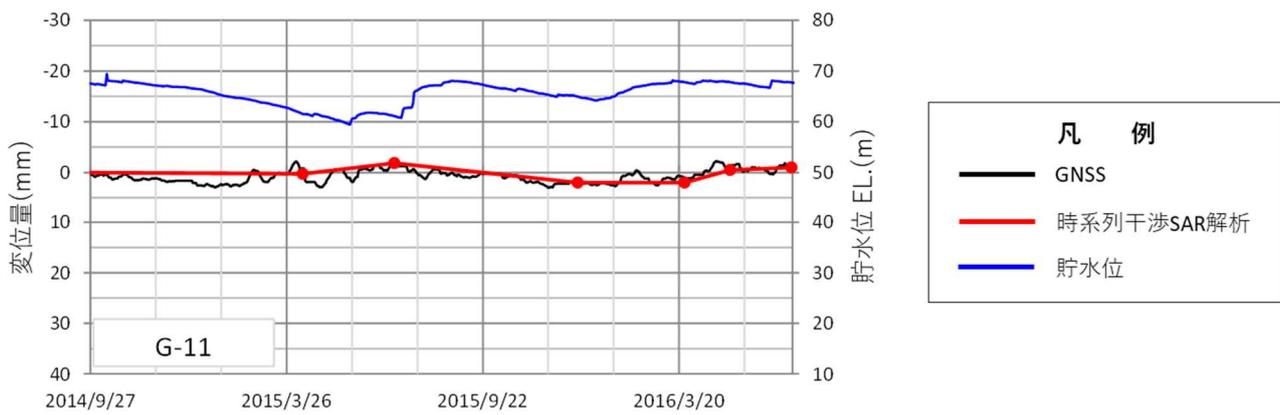


図 例.1.4 時系列干渉 SAR 解析による変位の時系列 (GNSS との比較)

時系列干渉 SAR 解析結果と地上での GNSS 測定の結果を比較したところ、良く整合する安定した結果が得られた (図 例.1.4)。

この理由としては、地域的な条件として周辺に標高の高い山や急な斜面が無く、衛星 SAR データによる時系列干渉 SAR 解析を行う際に阻害要因となる要素が少ないことや、年間を通して気候が安定しており、積雪などの季節変化の影響が少ないことのほか、変位の真値として用いた実測値についても、GNSS 測量によって連続した高精度の時系列データとして取得されていることが考えられる。

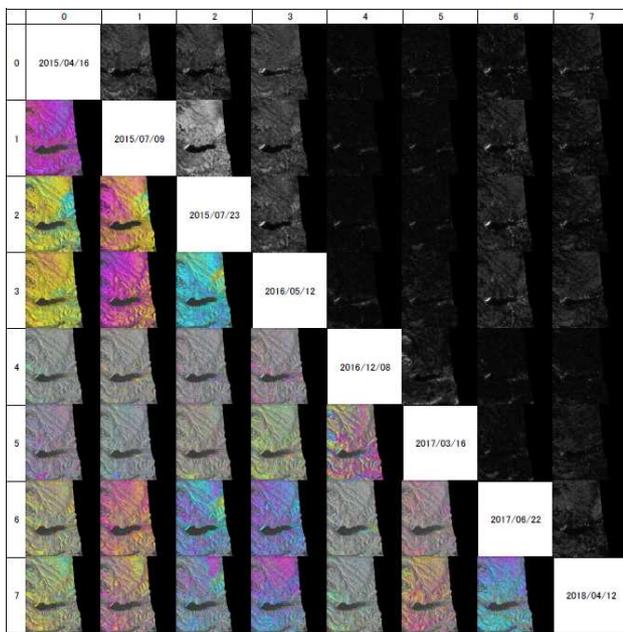
事例 2：貯水池周辺斜面の変位計測事例

国内のダム貯水池周辺斜面を対象として、ALOS-2 によって取得された SAR データ（表 例.2.1 に示す北行軌道及び南行軌道の両軌道のデータ）を用い、発生箇所がシーンごとに異なるノイズを除くためにスタッキング解析を行い、斜面変位の抽出を行った事例を示す。

スタッキング解析は、各軌道の全シーンのデータを使って干渉 SAR 解析の結果から、積雪などの影響によりスタッキング解析においてノイズとなるシーンを特定し（図 例.2.1）、当該シーンを除いた上で行った。（解析に用いたシーン数は表 例.2.1 中に示している。）

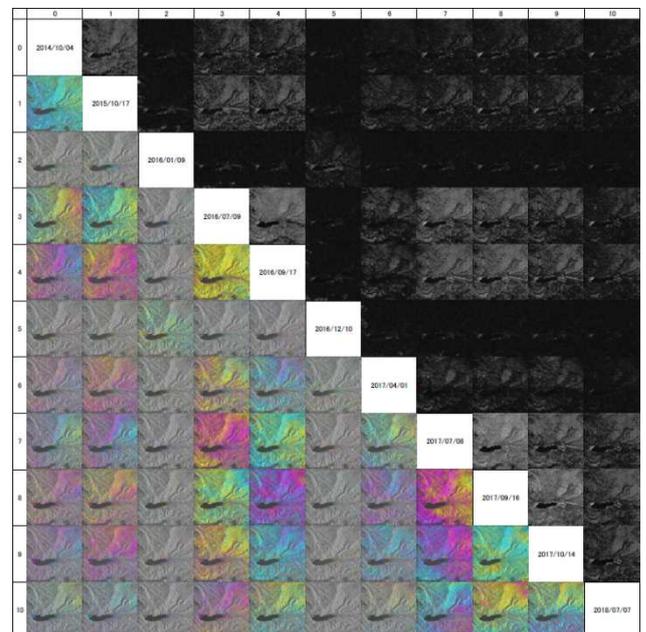
表 例.2.1 使用したデータの諸元

センサ名	PALSAR-2	センサ名	PALSAR-2
運用モード	SM1	運用モード	SM1
衛星進行方向	北行軌道	衛星進行方向	南行軌道
観測方向	右側	観測方向	右側
オフナディア角	38.2	オフナディア角	38.2
偏波	HH	偏波	HH
全シーン数	8	全シーン数	11
解析利用シーン数	6	解析利用シーン数	8



(a) 北行軌道

©JAXA



(b) 南行軌道

©JAXA

図 例.2.1 全シーンを用いた干渉 SAR 解析結果

スタッキング解析の結果を図 例.2.2 に示す。なお、対象とした斜面周辺の解析では、両軌道で観測間隔が 1 年以上のデータを用いることで変位箇所が抽出しやすい結果となった。このため、観測間隔が 1 年以上の干渉画像を用いたスタッキング解析の結果から、変動領域を抽出するための変位マップを作成した（図例.2.3）。

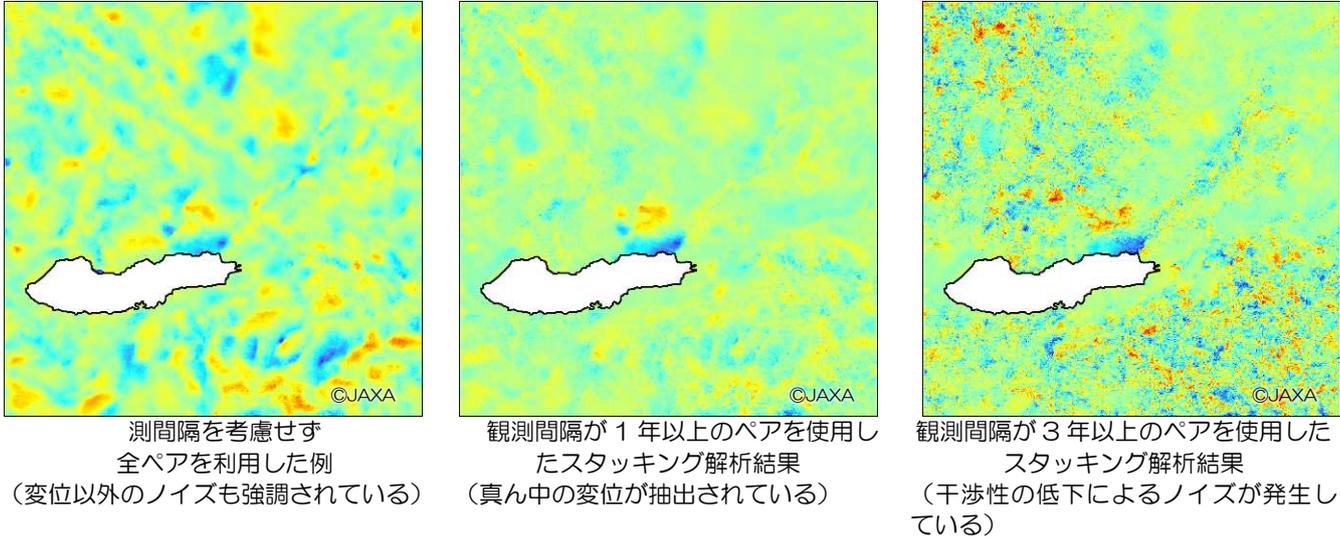


図 例.2.2 スタッキング解析結果の比較（使用した干渉画像による違い、南行軌道）

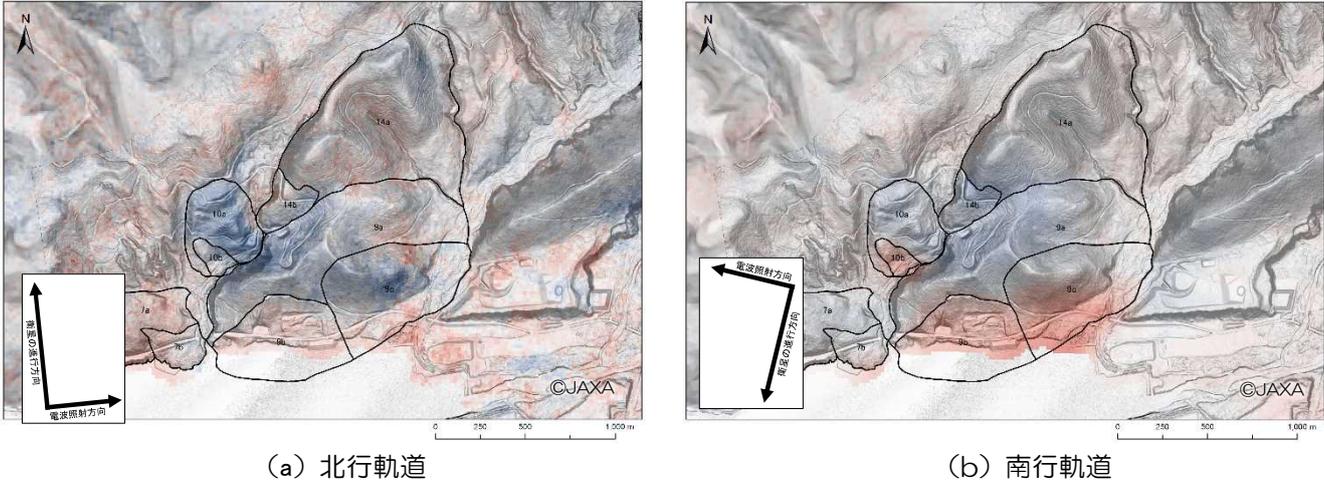


図 例.2.3 変位抽出マップ

北行軌道と南行軌道のデータからそれぞれ作成した変位マップを合わせて判読することで、変位の方向についても考察することができる。青色の箇所は衛星視線方向で遠ざかる向きに移動していることを示している。そのため、北行軌道で青色の箇所は「東向き/沈降」、南行軌道で青色の箇所は「西向き/沈降」と判読できる。このようにして両軌道の変位マップを比較した結果、両方で青色の箇所では「沈降」傾向の変位、両軌道で赤色の場合には「隆起」傾向の変位がそれぞれ卓越していると考えられる。

このように両軌道のデータから得られた変位マップを用いることで、変動領域の抽出に加え、変位方向の把握も可能となる。

参考文献

- 1) JAXA：陸域観測技術衛星 2 号「だいち 2 号」、
<https://fanfun.jaxa.jp/countdown/daichi2/files/daichi2.pdf>
- 2) 国土地理院：国土地理院の干渉 SAR、https://www.gsi.go.jp/uchusokuchi/gsi_sar_faq1.html
- 3) 国土地理院：干渉 SAR の原理、https://www.gsi.go.jp/uchusokuchi/sar_mechanism.html
- 4) 国土地理院：干渉 SAR の特徴、https://www.gsi.go.jp/uchusokuchi/sar_character.html
- 5) 国土地理院：平成 28 年熊本地震に関する情報、だいち 2 号干渉 SAR による変動の検出について、
<http://www.gsi.go.jp/BOUSAI/H27-kumamoto-earthquake-index.html>
- 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 Transactions on Geoscience and Remote Sensing Vol. 40, No. 11, November 2002
- 7) 環境省：地盤沈下観測等における衛星活用マニュアル、
<https://www.env.go.jp/press/104084.html>
- 8) JAXA：ALOS-2 / プロダクトフォーマット説明書、
<https://www.eorc.jaxa.jp/ALOS-2/doc/jformat.htm>
- 9) 国土地理院：干渉 SAR の 2.5 次元解析、<https://www.gsi.go.jp/common/000139926.pdf>

国土技術政策総合研究所資料

TECHNICAL NOTE of N I L I M

No. 1233 December 2022

編集・発行 ©国土技術政策総合研究所

本資料の転載・複写の問い合わせは

〒305-0804 茨城県つくば市旭1番地

企画部研究評価・推進課 TEL 029-864-2675