

地盤沈下観測等における 衛星活用マニュアル

平成 29 年3月

環境省 水・大気環境局
土壌環境課 地下水・地盤環境室

はじめに

地盤沈下は、一旦発生すると元には戻らない不可逆的な現象であるとともに、即座に止めることが困難な現象です。その影響は、構造物等の損壊にとどまらず、洪水・高潮時の浸水被害の増大を招くなど、様々な被害を生じさせています。

多くの機関の努力によって広域の地盤沈下は沈静化の傾向にあるものの、終息には到っていない状況にあります。また、近年の多様な地下水需要の高まりにより、新たな地盤沈下の発現も懸念されるところです。地盤沈下の早期発見には広域的な監視を継続することが不可欠であることから、国や地方公共団体は水準測量により地盤沈下監視を継続しています。しかしながら、測量には多くの費用や人員確保が必要となるため、水準測量による地盤沈下監視の継続が困難になっている状況もうかがえます。

今後、地盤沈下の監視が中断するような事態となった場合には、被害が明確になるまでその進行が放置される可能性があり、これまでの地盤沈下対策の努力が失われるとともに、更なる被害の増大に直結しかねません。

これらの背景を踏まえ、地盤沈下の監視体制を維持・向上させるためのより効率的、且つ効果的な技術の導入が必要となっており、地球観測衛星による観測データを活用した地盤高観測もその一つとして期待されています。本マニュアルは、地球観測衛星による観測データを活用した地盤高観測に関する技術情報や、この観測技術を導入するまでの手順などを取りまとめたものです。地盤沈下対策に取り組む地方公共団体の監視体制の維持・向上などに役立てて頂ければ幸いです。

本マニュアルの作成にあたって、地盤沈下観測等における衛星活用手法検討会（委員長：大東憲二 大同大学教授）の委員の方々にご指導頂くとともに、関東近郊の地方公共団体からもご意見、ご協力を頂きました。ご協力頂いた多くの関係者の皆様に改めてお礼申し上げます。

平成 29 年 3 月

環境省 水・大気環境局
土壌環境課 地下水・地盤環境室

目 次

第1章 総説編	1
1-1 マニュアルの目的と位置付け	2
1-2 衛星データによる地盤沈下監視の仕組みと特徴	4
1-3 衛星データを併用することで考えられる活用方法	8
1-4 地盤沈下監視業務の流れ	8
第2章 解説編	11
2-1 目的の設定	12
2-2 調査範囲の設定	14
2-3 調査対象期間の設定	15
2-4 水準測量との組み合わせ	18
2-5 衛星データの選び方	21
2-6 仕様の確定	30
2-7 解析	35
2-8 成果	42
2-9 データ蓄積・管理	47
第3章 事例編	49
3-1 「だいち」(ALOS)による九十九里平野の地盤沈下監視	50
3-2 「だいち2号」(ALOS-2)による 九十九里平野の地盤沈下監視	57
3-3 その他の衛星による九十九里平野の地盤沈下監視	65
3-4 その他の衛星データ活用のメリット	70
巻末資料	巻末- 1
(1) リモートセンシング技術と「だいち2号」(ALOS-2)	巻末- 3
(2) 用語解説	巻末-13
(3) 参考資料	巻末-23

本マニュアルの構成

本マニュアルは、地盤沈下監視に取り組む地方公共団体の実務担当者を対象としている。

第1章では、地盤沈下監視を行う上で、衛星データがどのように活用できるかなどの基本的な内容をはじめ、衛星データの活用方法、地盤沈下観測業務の手順を概説している。

第2章では、衛星データを活用した地盤沈下観測業務の手順に沿い、作業項目ごとの技術的な内容について説明している。

第3章では、環境省がこれまで地盤沈下監視への適用に関して検討を行ってきた陸域観測技術衛星「だいち」(ALOS)及び「だいち2号」(ALOS-2)での解析結果等を例示している。また、海外の衛星を利用した場合の解析事例や、地盤沈下に限らず衛星データが様々な分野で利用可能である事例などについても示した。

巻末には、衛星データに関する一般的知識や用語説明などをまとめた。

第1章 総説編

- 1-1 マニュアルの目的と位置付け
- 1-2 衛星データを活用した地盤沈下観測の仕組みと特徴
- 1-3 衛星データを併用することで考えられる活用方法
- 1-4 地盤沈下監視業務の流れ

どうやって、衛星データで地盤沈下を監視するのか？

第2章 解説編

- 2-1 目的の設定
- 2-2 調査範囲の設定
- 2-3 調査対象期間の設定
- 2-4 水準測量との組み合わせ
- 2-5 衛星データの選び方
- 2-6 仕様の確定
- 2-7 解析
- 2-8 成果
- 2-9 データ蓄積・管理

どのような作業をするのか？

第3章 事例編

- 3-1 「だいち」(ALOS)による九十九里平野の地盤沈下監視
- 3-2 「だいち2号」(ALOS-2)による九十九里平野の地盤沈下監視
- 3-3 その他の衛星による九十九里平野の地盤沈下監視
- 3-4 その他の衛星データ活用のメリット

実際の解析事例は？

巻末資料

- (1) 合成開口レーダおよび「だいち2号」(ALOS-2)
- (2) 用語解説
- (3) 参考資料

もう少し、細かいことを知りたい…

第 1 章

総説編

第1章 総説編

1-1 マニュアルの目的と位置付け

本マニュアルは、「地盤沈下監視ガイドライン」に規定されている新しい観測技術として、人工衛星により観測された衛星データを活用することで、より効率的な地盤沈下の監視に資することを目的とする。

衛星データの活用にあたっては、水準測量と対比し、精度確認を行うことが必要である。したがって、衛星データの活用による地盤高の観測は、水準測量の代替ではなく、水準測量と併用する位置付けとする。また、本マニュアルの主な対象は、地方公共団体の実務担当者を想定している。

【解説】

環境省では、地盤沈下監視における技術的な指針および監視方法等の適切な水準を示した「地盤沈下監視ガイドライン」（環水土発第 050629007 号。詳細は、環境省ホームページ参照。<http://www.env.go.jp/houdou/gazou/6132/6914/2356.pdf>）（以下「ガイドライン」と言う。）を公表している。この中で、新しい観測技術の導入について次のように記載している。

近年、衛星を用いた電子基準点等の新たな観測技術が開発されつつあり、精度の向上や費用の軽減が図られる可能性があるため、地盤高等の観測において、これまでと同様の精度や成果が得られるのであれば、新たな観測技術を導入あるいは併用することができるものとする。（ガイドライン、p5 より抜粋）

近年、人工衛星の様々な活用が試みられており、高精度地盤変動測量の精度も向上したことで、解析方法の組み合わせによっては、高精度に地表面形状の把握が可能となりつつある。そこで、環境省では、陸域観測技術衛星「だいち」（ALOS）（以下「ALOS」とする。）および「だいち2号」（ALOS-2）（以下「ALOS-2」とする。）による観測データを活用した地盤沈下観測手法について検討を行ってきた。この結果、水準測量と同程度の精度や成果が得られる見通しが得られたことから、ガイドラインで示す「新たな観測技術」の一つとしてその技術情報を取りまとめ、地盤沈下監視に取り組む地方公共団体を対象に、衛星データの地盤沈下監視への運用方法や技術情報を提供するものである。

一方、地盤高の観測は、測量法により具体的な方法や精度管理が定められた水準測量によることを基本としている。また、衛星データの利用による地盤高の観測は、利用する衛星データの特性、適用する解析方法などにより精度が大きく左右される。そのため、水準測量結果と衛星データの解析※結果とを比較し、衛星データの精度確認を行うことが必要

である。したがって、衛星データの活用による地盤高の観測は、水準測量の代替ではなく、水準測量と併用する位置付けとする。（※衛星データをそのまま読み取るのではなく、衛星データを解析することで地盤高の変動量が把握できる。その考え方は次の1-2節で、また解析の概要は「第2章 解説編」の「2-7 解析」、解析結果は「2-8 成果」を参照されたい。）

なお、本マニュアルは、2017年3月現在までに検討した技術的な事項を踏まえたものであり、ALOS-2による観測データを活用することを想定している。衛星データの活用技術の進歩は日進月歩であり、それに応じて将来的にマニュアルを改訂していく可能性があることについても考慮されたい。

1-2 衛星データによる地盤沈下監視の仕組みと特徴

衛星データによる地盤高の観測では、既存の水準点が無い範囲も含めて観測の面的連続性が確保されるメリットがある他、地盤沈下量分布図、任意地点での年間沈下量など、従来の水準測量と同様の成果品が得られる。

作業に当たっては、観測された衛星データを複数使用し、種々の解析方法を組み合わせることにより精度を向上させ、地盤高の変位量を算出する。この際、解析精度の評価は、水準測量結果との対比で求めた標準偏差や較差で示すことを基本とするため、必ず水準測量と組み合わせて利用することが必要である。

解析方法は、1ペアの干渉 SAR 解析（2 時期の地盤高の差を算出）→スタッキング解析（大気遅延等による誤差を平均化し低減）→2.5 次元解析（変位成分を分離し、鉛直沈下量を算出）の組み合わせを標準とする。

【解説】

(1) 使用する衛星データ

本マニュアルにおいては、ALOS-2 に搭載されている合成開口レーダ(PALSAR-2)によって観測されたデータの利用を想定する。ALOS-2 の諸元などの詳細は、巻末資料を参照されたい。

(2) 原理

人工衛星（合成開口レーダを搭載したものは SAR 衛星と呼ばれる）から地表に向かって発信した電波は、常に一定の波長で進む。時期を別にして、同じ位置から電波を発信した場合、地表面の変位に応じて差が生じる（図 1-1）。そこで、2 回の電波の差を読み取ることにより、地表の変位量を把握することができる。いわば、電波を巻尺代わりにし、2 時期の巻尺（電波）の差を求めることが衛星データによる地盤沈下監視の原理である。

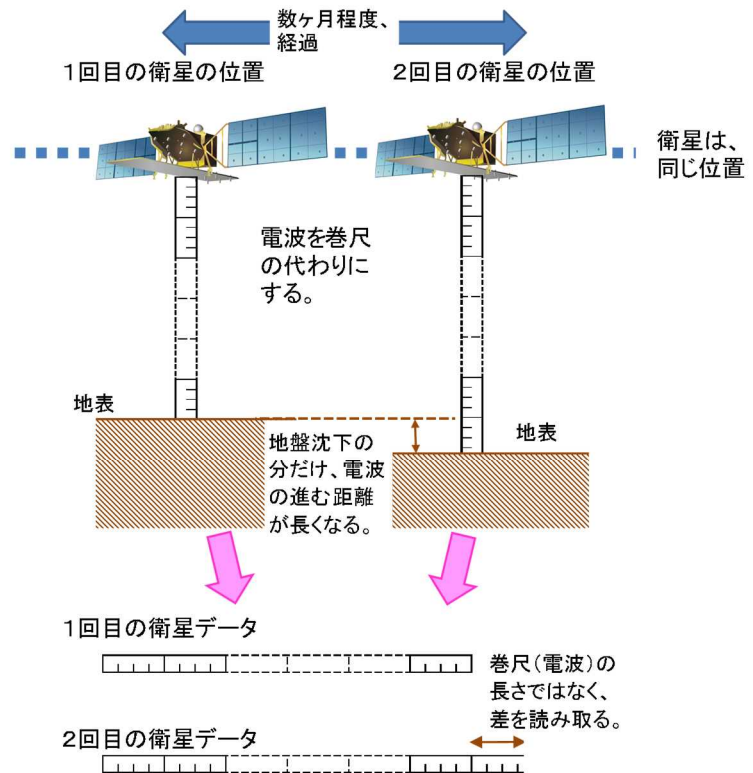


図 1-1 SAR 衛星による地盤沈下監視の原理

現在の技術において、衛星は高度な制御により軌道をコントロールされているものの、実際には高速で地球を周回するため、全く同一地点を通過するという事はほぼない。そのため、軌道上の衛星位置は、できるだけ近接していることが必要である。

解析では、異なる2時期の衛星データから初期干渉画像を作成した後に種々の処理を行い、地盤高の差を算出する(=1ペアの干渉SAR解析)。観測された衛星データには、大気中の水蒸気の影響などによるノイズを含む可能性があることから、算出した複数の地盤高の差を重ね合わせることで、ノイズ等の誤差の低減を図る(=スタッキング解析)。さらに、精度良く鉛直方向変位を抽出(=2.5次元解析)することで、利用したデータ期間における地盤高の変位量を求めることになる。

ここで、解析する衛星データの間隔は様々であるため、最終的には、求めた地盤高の変位量を年間沈下量「mm/y」に換算して評価する。詳細については、第2章を参照のこと。

(3) 具体的な作業工程

衛星データによる地盤沈下観測のための作業手順の概要は、主に次のようになる。

- ① 【入力】：衛星データを準備し、入力データとする。
- ② 【処理】：データを解析する(1ペアの干渉SAR解析→スタッキング解析→2.5次元解析)。各段階で水準測量結果と対比し、精度を検証する。
- ③ 【出力】：解析データから地盤沈下量分布図等を作成し、とりまとめる。

【入力】にあたるデータの選定作業は「第2章 解説編」の「2-5 衛星データの選び方」、【処理】にあたる解析の概要は「2-7 解析」、【出力】にあたる成果内容は「2-8 成果」を参照されたい。

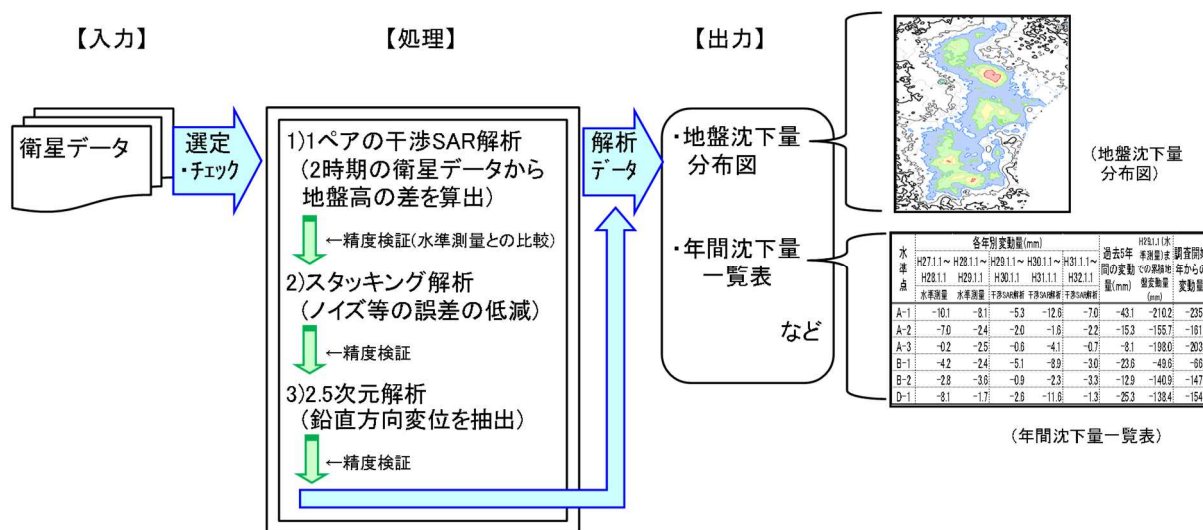


図 1-2 地盤沈下観測のための作業手順 (概略)

(4) 衛星データを併用した地盤沈下監視の特徴

人工衛星は一度に数 100km²に渡るエリアを観測可能であるとともに、高精度なセンサーを備えている。“従来通りの水準測量のみの監視を行った場合”と、“水準測量に衛星データを併用して監視を行った場合”において、それぞれの特徴やイメージについて、表 1-1 に一覧した。

表 1-1 水準測量のみの場合と水準測量に衛星データを併用した場合の特徴

	水準測量のみの場合	水準測量に衛星データを併用した場合
イメージ	<p>水準点でのみ、地盤高を観測。水準点のない場所では、測量データが無いため、地盤沈下の有無は明確に分からない。</p>	<p>水準点が無い範囲も含めて、面的に地盤高を把握。水準測量結果は、精度検証に用いるだけなので、幹線部等、一部の水準点のみを測量。</p>
利点	<p>基準日を定め、2回の水準測量結果の差より、地盤高の差から年間変動量を算出。</p> <ul style="list-style-type: none"> 法令に基づく作業規定が定められており、水準測量点での精度が担保される。 継続的に同一の水準点での標高を計測するため、過去からの測量の継続性が保たれる。 	<p>観測時期の異なる衛星データから、地盤高を算出し、年間変動量として評価する。</p> <ul style="list-style-type: none"> 直接、地表面の変位量を把握できるので、水準点の有無に係わらず地盤沈下を面的に把握することが可能。 現地作業を行うことなく、比較的安価に解析結果が得られる。 過去に観測された衛星データは全て蓄積されており、必要に応じて時期を遡っての解析が可能。
課題	<ul style="list-style-type: none"> 測量箇所が多いほど作業量が大きく、費用が増大する。 水準点の維持管理が必須である。 対象地域の変動量を精度良く把握するためには、多くの水準点で継続的に測量することが必須である。 	<ul style="list-style-type: none"> 衛星運用期間によっては、対象衛星の変更もあり得る（現状、衛星の設計運用期間は5年程度）。ただし、衛星の運用が停止した場合には、他の衛星データを用いることが可能で、蓄積された干渉 SAR 解析に係る知見や成果は、他の衛星データの解析でも適用できる。 使用するデータ選定に配慮すべき点がある（計測時期、計測頻度、植生の影響等）

1-3 衛星データを併用することで考えられる活用方法

前述の通り、衛星データを活用した地盤高の観測は、水準測量と併用することが基本である。両者の特徴を上手く組み合わせることで、例えば下記のような活用方法が考えられる。

- ①既存の監視範囲における地盤沈下の面的把握及び観測の効率化
- ②既存の監視範囲を超えた、より広域な地盤沈下の面的把握
- ③過去に遡っての地盤沈下の面的推移の把握

1-4 地盤沈下監視業務の流れ

調査対象範囲、調査対象期間、水準測量との組み合わせ方等によって、解析に必要な衛星データの選定方法が異なり、また、解析を含めた作業時間等にも影響する。したがって、衛星データを併用した地盤高の観測では、目的を明確にし、その内容に応じた衛星データ準備を行う必要がある。

全体的な地盤沈下監視業務の流れについては、次頁の「衛星データを活用した地盤沈下監視業務のフロー」を参照のこと。

【解説】

目的に関わらず、衛星データを併用した地盤沈下監視業務は、業務全体の調査計画の策定、調査・解析に係る作業、業務終了後のデータ蓄積・管理の、大きく3段階に区分される。このうち、本マニュアルでは、調査・解析について、業務委託等により専門業者等へ依頼することを念頭に置いている。

地盤沈下の監視は、継続的に実施することが不可欠である。そのために、中・長期的視野から調査計画を立案すると共に、実施後の結果等を踏まえ、場合によっては目的設定等の見直しを行う必要があると考える。

各作業項目に関する詳細は、第2章で詳述しているので、それぞれ対応する該当箇所を参照されたい。

～衛星データを活用した地盤沈下監視業務のフロー～

分類	項目	説明	本マニュアルでの記載項
調査計画の策定	目的の設定	調査目的を定める。 既存の水準測量による地盤沈下観測と併用することで、下記のような目的設定が考えられる。 ①既存の監視範囲における地盤沈下の面的把握及び観測の効率化 ②既存の監視範囲を超えた、より広域な地盤沈下の面的把握 ③過去に遡っての地盤沈下の面的推移の把握	2-1
	↓		
	調査範囲の設定	目的に応じて、適切な調査範囲を設定する。 目的①の場合には、既往の地盤沈下観測と同じ範囲とし、目的②や目的③の場合には、それらに応じた範囲を設定する。	2-2
	↓		
	調査対象期間の設定	地盤沈下量が主に進行する期間を挟み、且つ、基準日から基準日(関東平野では1月1日)までの1年間を基本とする。目的に応じ、利用する衛星データの組み合わせを設定する。	2-3
	↓		
調査計画の策定	水準測量との組み合わせ	目的①の場合、水準測量では幹線のみ継続し、支線は5年に1回程度の頻度とするなど、水準測量の作業量を削減する事が可能となる。目的②や目的③でも、衛星データの精度検証のため水準測量が不可欠である。	2-4
	↓		
	データの選定	調査範囲・対象期間に応じた衛星データ数を把握する。	2-5
	↓		
	仕様確定	調査仕様を決定する。	2-6
	↓		
調査・解析	データの確定	衛星の軌道諸元などを確認し、解析が可能なデータを確定する。	2-5
	↓ 解析		
	1ペアの干渉SAR解析	1ペア(2時期の衛星データ)から、地盤高の差を算出する。	2-7-1
	↓		
	スタッキング解析	ノイズ除去等のため、複数の干渉ペアの地盤高の変動量を重ね合わせ、精度向上を図る。	2-7-2
↓			
2.5次元解析	二つの軌道の地盤高の変動量の算出データより、鉛直方向変位(=地盤高の変動量)を求める。	2-7-3	
↓			
成果	解析結果等(地盤沈下量分布図、水準点別の地盤変動量一覧表、精度検証結果等)をとりまとめ報告書を作成する。	2-8	
↓			
管理	データ蓄積・管理	取得した衛星データや成果データを適切に管理する。	2-9
↓			
調査計画の策定へ	必要に応じて目的の設定等を見直し、継続的に地盤沈下を監視		

第 2 章

解説編

第2章 解説編

2-1 目的の設定

衛星による観測のメカニズムを十分に理解した上で、これまで水準測量のみで実施されてきた地盤高の観測を、中・長期的視野から俯瞰し、衛星データを活用する目的を明確に定める。そのためには、後述する調査対象範囲や調査対象期間の設定等も考慮して判断する必要がある。

【解説】

衛星データを活用した地盤高の観測の一番のメリットは、面的に地表変位を把握できることである。水準測量と併用し、両者の特徴を上手く組み合わせることで、地盤沈下を監視する例として、代表的と思われる、

- ①既存の監視範囲における地盤沈下の面的把握及び観測の効率化
- ②既存の監視範囲を超えた、より広域な地盤沈下の面的把握
- ③過去に遡っての地盤沈下の面的推移の把握

を目的とした場合について、以下に考え方を示す。

「①既存の監視範囲における地盤沈下の面的把握及び観測の効率化」では、測量箇所数を削減することで費用を縮減しつつ、既存の監視範囲内の水準点が無い場所でも地盤沈下量を把握できることとなる。この場合、主要な幹線については水準測量の継続を基本とし、支線については数年毎に水準測量を実施するなど、測量実施頻度の軽減が考えられる。組み合わせの方法は、地域の状況に応じることとし、特に、これまでの地盤沈下の状況や、継続して沈下傾向にある地点については、水準測量を継続して実施する方針と位置付けるなど、様々な角度から判断する必要がある。

「②既存の監視範囲を超えた、より広域な地盤沈下の面的把握」を目的とする場合には、衛星データ1シーン（データは面的であるので、1面のデータ一式を「シーン」単位で呼ぶ）が網羅できる範囲を念頭に置き、調査対象範囲をカバーできることを確認の上、データ選定を行う必要がある。衛星データは、取得時の軌道や撮影方向によっては、調査対象範囲を複数の衛星データで補う必要がある場合もある（衛星データの選定については、「2-2 調査範囲の設定」および「2-5 衛星データの選び方」を参照されたい）。

「③過去に遡っての地盤沈下の面的推移の把握」を目的とする場合には、着目した調査対象範囲に対し、過去にどの程度遡って調査するかなどを決めることが必要となる。衛星データは運用開始後から全て蓄積されているので、地盤沈下が特に進行する期間を挟むよう

に、衛星データの取得時期を選定する（「2-3 調査対象期間の設定」を参照されたい）などの配慮が必要となる。

以上のように、調査目的の設定は、衛星による観測のメカニズムを十分に理解することはもちろん、様々な角度から検討を重ねて設定することが肝要である。

2-2 調査範囲の設定

調査範囲の設定は、調査目的に応じて決定する。

例えば、水準測量との併用による効率化を目的とする場合には、既往調査の継続性を確保するために、原則、同じ範囲を調査対象に設定する。

一方、従来実施されてきた監視範囲を超える場所での新たな地盤沈下の確認を目的とした場合には、より広域な調査対象範囲を設定する必要がある。この場合、観測された衛星データ 1 シーンに含まれる範囲を超える場合もあるため、これまで蓄積された衛星データを実際に参照しながら決定する必要がある。

本マニュアルで使用する衛星データは、「だいち 2 号」(ALOS-2)の高分解能モード(分解能 3m×3m、観測幅 50km、1 シーンは、概ね 50km×50km 程度)で取得された衛星データを想定する。

【解説】

取得された衛星データは、衛星に搭載されるセンサー種別や解像度、観測モードによって、一回で取得できる範囲が決まっている。本マニュアルで対象としている ALOS-2 でも、観測モードによって 1 シーンの範囲は異なってくる。例えば、高分解能モード(分解能 3m×3m、観測幅 50km)で取得された衛星データは、軌道方向(ほぼ南北方向)に連続的に撮影・蓄積されているが、使用する画像を選択する際には、図 2-1 に示すように衛星の軌道上を重なりあうような範囲で設定することを基本としている。

図からも伺えるように、1 シーンで調査対象範囲をカバーしない場合もあるため、解析に利用する衛星データ選定に際しては蓄積された衛星データを確認し、必要に応じて複数シーンを用いることが必要となる。また、後述する 2.5 次元解析(「2-7 解析」)のためには、北行軌道と南行軌道のそれぞれで観測された衛星データが必要となるため、解析する範囲は両軌道から観測された衛星データの共通する範囲に限られる。これらを踏まえて、その範囲と調査対象地域の関係性を確認しておくことが必要である(詳細は、「2-5 衛星データの選び方」を参照されたい)。



図 2-1 ALOS-2 の観測範囲の例(北行軌道の例)

2-3 調査対象期間の設定

地盤沈下の観測は、1年単位が原則であることから、調査対象期間は、1年間とすることが基本である。また、複数年間の衛星データを用いることで、その間の地盤沈下を把握することが可能である。1年単位又は複数年間を調査対象期間は、水準測量の基準日から基準日までの1年間又は複数年間を調査対象とすることを基本とする。これは、水準測量成果と比較しながら解析精度を高めることができるためである。

なお、幅広い衛星データの活用方法の一つとして、季節変化等の1年未満の地盤沈下を把握することも可能である。その場合には、利用する人工衛星の観測計画によっては対象としたい期間を調査できない可能性がある。また、精度検証のための水準測量結果が、得られない可能性があることに留意する必要がある。

【解説】

(1) 1年間で調査対象期間とする場合

1つの干渉ペアで得られる地盤高の変動量は、用いた衛星データが取得された2時期の間の変動量である（例えば、4月1日と10月31日の衛星データによる干渉ペアは、その期間の地盤高の変動量を意味する）。1年間で調査対象とする場合は、水準測量の基準日（表2-1）と次の基準日のそれぞれの直近の観測データを用いる。これは、水準測量成果と比較しながら解析精度を高めることができるためである。その際、その間に観測されたデータなども使いながら複数の干渉ペアを作成することで（1ペア＝2シーンの衛星データ）、解析の精度を高めることができる。

なお、ALOS-2の基本観測計画によれば、現状で1年間に4回の観測を基本としているため、これらを用いて干渉ペアを作成することになる。

表 2-1 主な地域の水準測量の基準日

主な地域	基準日
関東平野	1月1日
長岡平野	9月1日
新潟平野	9月1日
濃尾平野	11月1日
筑後・佐賀平野	2月1日

出典：環境省全国地盤環境情報ディレクトリー（平成27年度版）、
<http://www.env.go.jp/water/jiban/directory/index.html>

(2) 複数年間で調査対象期間とする場合

例えば、3年間に渡る地盤高の変動量（累積）を求めたい場合、水準測量の基準日と3年後の基準日のそれぞれの直近の観測データを用いて干渉ペアを作成するとともに、その間に観測されたデータを使いながら複数の干渉ペアを作成する。なお、複数年に渡って地

盤高の変動量を評価する場合には、各年度に対して、それぞれ年間の変動量が求められるわけではないことに留意する必要がある（図 2-2）。

(3) 年間の変動量への換算

水準測量と併用して地盤沈下監視を行う場合には、これまでの地盤沈下監視との継続性を確保するため、調査対象期間の区切りは、基本的に水準測量の基準日～基準日までと設定する。例えば、関東地方における基準日は、1月1日であることから、1月1日～翌年1月1日までの年間の地盤高の変動量を、水準測量の差により算出している。また、複数年に渡る累積変動量は、これらを合算することで算定される（図 2-2 の①）。

一方、衛星データを併用する場合には、1月1日に調査対象エリア部で必ずデータ取得が行われているとは限らない。衛星の観測スケジュールによっては、数日程度前後する場合がありますため、1月1日に近い日に取得された衛星データにより解析を行う必要がある。このため、衛星データによる干渉 SAR 解析では、2時期の間（例えば 342 日など、必ずしも 365 日にはならない）における地盤の変動量が求まるため、これを年間の変動量に変換して、水準測量での値と同一に評価されることになる（図 2-2 の②）。

複数年に渡っての解析を実施する場合には、使用したデータ期間に渡る平均変動量が求められることになり、この値を単年度に分割することはできない（図 2-2 の③）。

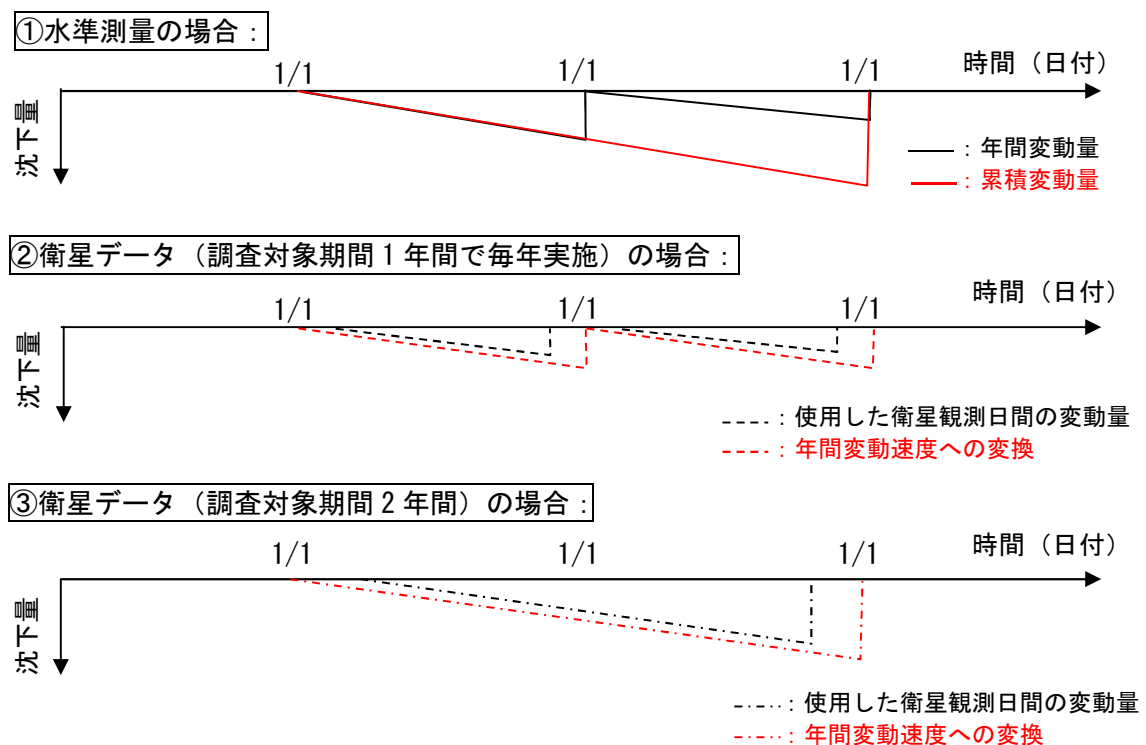


図 2-2 衛星データを用いた地盤高さ観測における調査期間と変動量把握のイメージ

(4) 数か月を調査対象期間とする場合

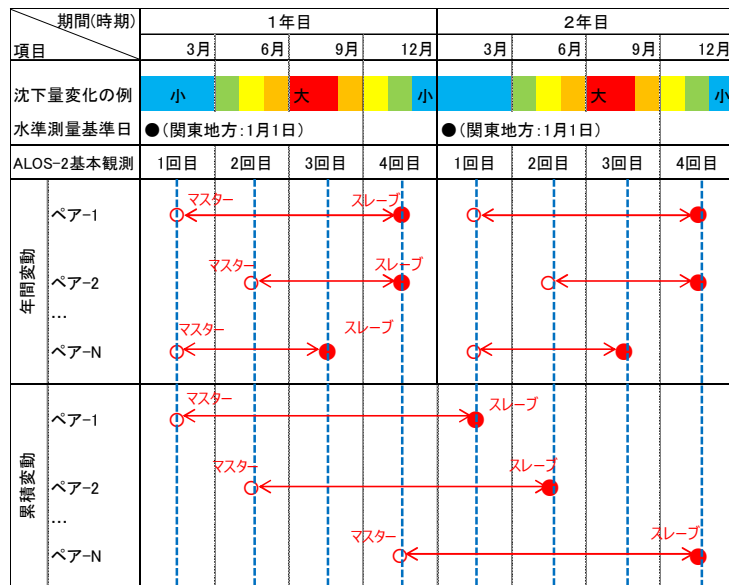
幅広い衛星データの活用方法の一つとして、地盤沈下の季節変動を把握することも可能である。その場合は、調査したい期間の始まりと終わりのそれぞれに直近の観測データを用いて干渉ペアを作成し、その2時期間に生じた地盤高の変動量を求める。その際、利用する人工衛星の観測計画によっては対象としたい期間を調査できない可能性があること、また、その2時期を対象とした水準測量成果が無い場合は水準測量成果を用いた精度検証ができないこと等に留意する必要がある。なお、調査対象期間が短い場合は地盤の変動量も小さくなるため、干渉 SAR 解析結果に変位以外の影響が含まれやすいことにも留意する必要がある。また、地盤の変動が継続している途中の時期の観測データを用いると、正確な地盤の変動を把握することが出来ない。したがって、観測井のデータ等より地盤の変動が落ち着く時期を把握し、当該時期の衛星のデータを用いることが必要である。なお、水準測量の基準日は、地盤の変動が落ち着いている時期に設定されている。

衛星データによる地盤高さ観測の評価は、解析に使用した時期の異なる期間の地盤高さ変位を評価することになる。これは、衛星が観測スケジュール（4回/年間のデータ取得）に基づいた地表観測を行っているため、必ずしも基準日と合致するものではないことによる。逆に考えれば、水準測量のように計測の基準日が設定されているわけではないため、衛星データの観測期間内であれば、任意の期間の地盤高さ変位を把握する際には、衛星データの方が有利となる。

また、対象とする調査対象エリアを必ず網羅しているとは限らないため、データ購入に際しては、実際に蓄積された衛星データがどのようなものかを確認して購入する必要がある。

調査期間の設定による干渉ペア作成の概念図を図2-3に示す。干渉ペア作成には、初回観測データ（マスター画像）と2回目観測データ（スレーブ画像）の2つのデータが必要となる（詳細は、「2-7 解析」を参照のこと）。

なお、干渉ペア選定にあたって、より具体的な選定方法や留意点は、「2-5 衛星データの選び方」に記載する。



【干渉ペア選定の主な視点】

- 年間の変動量観測の場合
 - 出来るだけ観測間隔の広い観測データを組合せ
 - 地盤沈下量が大きいと考えられる期間を含むように選定
 - 植生(森林・農地など)の被覆変化の少ない時期を組合せ(同じ季節に観測されたデータを利用)
 - 水準測量基準日に近い観測データを優先的に利用
- 累積の変動量観測の場合
 - 植生の変化の少ない時期を組合せ(同じ季節に観測されたデータを利用)
 - 水準測量基準日に近い観測データを優先的に利用

図 2-3 調査期間の設定による干渉ペア作成の概念図

2-4 水準測量との組み合わせ

水準測量との併用による効率化を目的とした場合には、測量対象箇所を絞り込み調査対象範囲を面的にとらえることや、中・長期的な地盤沈下監視の調査計画に基づき、支線での水準測量の実施頻度を粗くする一方で、干渉 SAR 解析については継続的に行うなどの組み合わせを検討する。なお、新たな地盤沈下エリアの把握を目的とした場合においても、衛星データの精度検証に水準測量のデータが必要である。

【解説】

(1) 水準測量との併用による効率化を目的とした場合における費用削減の例

水準測量と衛星データ活用の組み合わせの考え方を、以下に示す。

表 2-2 水準測量と衛星データ活用の組み合わせの考え方

	水準測量	衛星データ（干渉 SAR 解析）
対象	<ul style="list-style-type: none"> 隣接県を含めた水準測量全体の精度管理上、主要水準点である交点の標高は必須のため、交点を含む水準網（幹線）を水準測量の対象とし、支線の測量については、その管理等を勘案の上、実施頻度を減ずることを考える。 幹線以外でも、地盤沈下が問題になっている地区については、水準測量の対象とすることが望ましい。 	<ul style="list-style-type: none"> 既存の監視対象範囲を網羅するような範囲設定が基本的な考え方である。
頻度	<ul style="list-style-type: none"> 干渉 SAR 解析の精度を確保するために、対象を絞っても、毎年、水準測量を行うことが必要である。幹線及び地盤沈下が問題になっている場所は毎年、その他では数年間隔とすることが考えられる。 	<ul style="list-style-type: none"> 水準測量との併用であるため、基本的には、基準日に近い日時に取得されたデータを利用する。

以下に、地盤沈下監視の調査計画について、具体的に2つのメニュー案を挙げ、効率化の効果による比較例を紹介する（表 2-3）。

・メニュー案1

水準測量で、幹線は毎年、支線は5年に1回の頻度とする。干渉 SAR 解析は毎年の実施とする。地盤高の変動量が比較的大きく、とくに水準点が少ない範囲で地盤沈下の懸念がある地域での適用が考えられる。

・メニュー案2

幹線の水準測量は毎年の実施とする。また、支線の水準測量と干渉 SAR 解析については、交互に実施する。年間の地盤高の変動量が小さい地域では、干渉 SAR 解析によ

る精度は低い。そこで、年次間隔をあけて干渉 SAR 解析することで、精度を確保することを目的としたメニュー案の例である。

表 2-3 衛星データ併用のメニュー案

【メニュー案 1】

方法		1年目	2年目	3年目	4年目	5年目	備考
水準測量	幹線	○	○	○	○	○	毎年
	支線	—	—	○	—	—	5年に1回
干渉 SAR 解析		○	○	○	○	○	毎年

【メニュー案 2】

方法		1年目	2年目	3年目	4年目	5年目	備考
水準測量	幹線	○	○	○	○	○	毎年
	支線	—	○	—	○	—	交互に
干渉 SAR 解析		○	—	○	—	○	隔年

これらのメニュー案のもと、現在行われている水準測量による地盤沈下観測に要する費用と、水準測量に併用して衛星データを利用した地盤沈下観測の場合について、コスト試算比較を行った（表 2-4）。

これまで、実際的水準測量に要した費用に対し、いずれのメニュー案においても最大3割または4割程度のコスト削減に寄与できる見込みが伺える。ただし、地域によっては、その削減効果に違いが見られることから、実際の調査面積やこれまでの費用等を踏まえ、最適な地盤沈下監視の調査計画の検討が必要と言えよう。

表 2-4 メニュー案に係る費用試算（5年間の合計）【単位：百万円】

		A県	B県	C県	D県	E県	F県	G県
現況	水準測量のみの費用	28	77	86	293	365	282	324
	参考 水準測量面積(km ²) 県の面積(km ²)	$\frac{305}{6,096}$	$\frac{598}{6,408}$	$\frac{315}{6,363}$	$\frac{2,844}{3,797}$	$\frac{3,208}{5,156}$	$\frac{1,020}{2,188}$	$\frac{308}{2,416}$
メニュー案 1	概算費用 (水準測量のみに対する比率)	27 (96.4%)	62 (80.5%)	62 (72.1%)	243 (82.9%)	293 (80.3%)	194 (68.8%)	205 (63.3%)
	削減額（5年間の合計）	-1	-15	-24	-50	-72	-88	-119
	〃（1年当たり）	-0.2	-3	-5	-10	-14	-18	-24
メニュー案 2	概算費用 (水準測量のみに対する比率)	26 (92.9%)	64 (83.1%)	67 (77.9%)	248 (84.6%)	303 (83.0%)	214 (75.9%)	234 (72.2%)
	削減額（5年間の合計）	-2	-13	-19	-45	-62	-68	-90
	〃（1年当たり）	-0.4	-3	-4	-9	-12	-14	-18

試算に当たったの条件は以下のとおり。

- ・ 現況の水準測量のみの費用は、各県の HP で公表された事業費（平成 22 年度～平成 26 年度）。
- ・ 水準測量面積は、環境省全国地盤環境情報ディレクトリー（平成 26 年版）による。
- ・ 幹線と支線の水準測量に係る費用は同額とし、メニュー 1 及び 2 では幹線のみの測量を想定。
- ・ 衛星データは、1 年目は 12 シーン、2 年目以降は各年 8 シーンを購入。
- ・ 人件費を含めて、平成 28 年度の単価。

(2) 新規の地盤沈下観測のための組み合わせ

新たな地盤沈下エリアの把握や、過去からの変化状況の把握に当たっても、水準測量のデータが必要である。これは、衛星データの精度検証を目的とするため、水準点の数は、多い方が望ましい。なお、衛星データの対象範囲に含まれるのであれば、調査範囲外の水準点でも適用可能である。(図 2-4)。

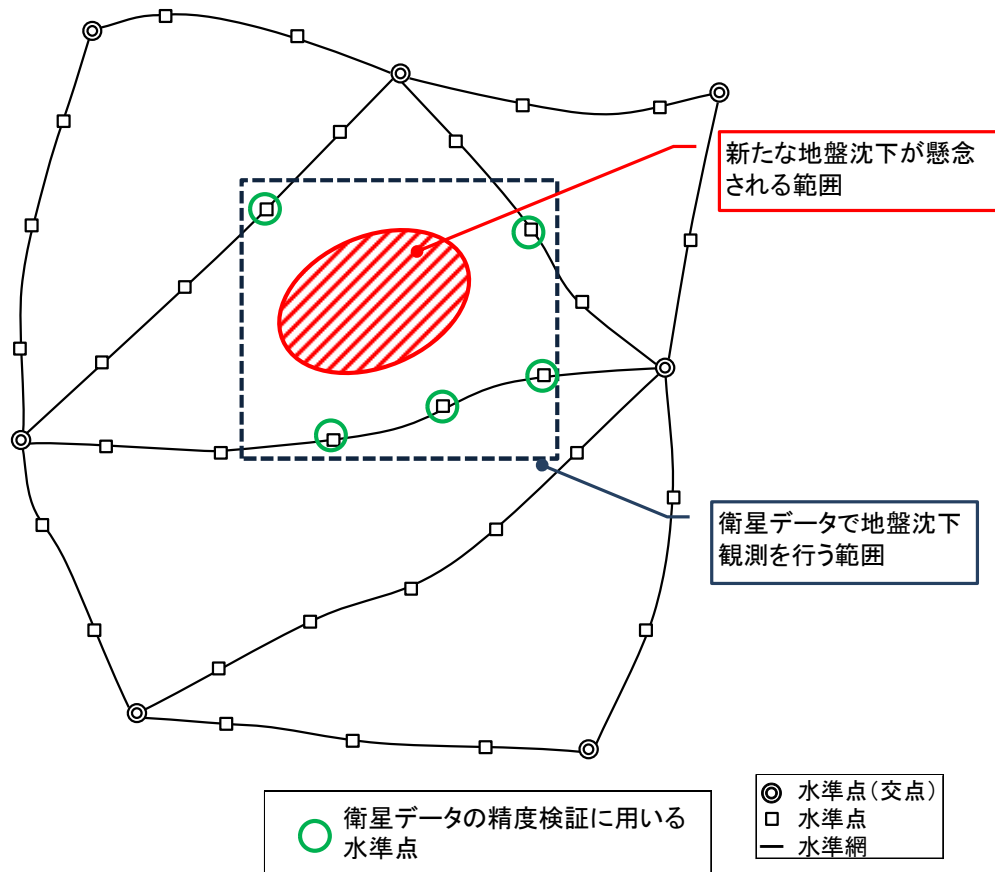


図 2-4 衛星データの精度検証に用いる水準点の位置

2-5 衛星データの選び方

「だいち2号」(ALOS-2)により取得された衛星データは、AUIG^{*}、もしくは、衛星データ利用促進プラットフォームから検索・注文することができる。これらのサイトより、衛星データに関する基本的な情報(範囲、時期など)を入手し、衛星データを選定する。地盤沈下監視業務を想定した場合、調査計画の策定の段階でデータ数を把握し、調査・解析の段階では、干渉解析が可能かなどの留意点があり、それぞれの段階で確認を要する。衛星データは、各軌道4シーン(合計8シーン)を用いることを基本とする。

※AUIG : ALOS-2/ALOS User Interface Gateway (JAXAによる衛星データ検索・注文のためのホームページ。検索のみの利用も無料で可能)

【解説】

(1) データ選定の手順

a. 解析に用いる衛星

対象地域をカバーし、且つ、観測対象期間内に複数回の衛星データが取得されている衛星を選定する。衛星データの諸元等は、当該衛星の運用機関のサイトで検索することができる。本マニュアルでは、2014年5月24日に打ち上げられた、我が国のALOS-2により取得された衛星データ利用を想定しているが、衛星データを利用しての地盤高の観測に関する手順、検討事項は、他の衛星データでも概ね同様である。

調査計画の策定に際しては、対象地域で観測された衛星データが存在することを確認し、解析に用いる衛星を選択する。

b. データ数を把握

蓄積データの中から、干渉SAR解析に用いる衛星データを確定する。この選定に当たっては、地盤沈下が進行する季節を考慮すると共に、観測偏波や衛星の基線長など、干渉SAR解析上、考慮すべき技術的事項がある。そのため、実務担当者は、

- ・解析に用いる衛星
- ・データ数(干渉ペア数を考慮して)

について設定し、干渉SAR解析可能な衛星データの組合せ等については、実際に解析作業を実施する専門業者から提案する形とすることが容易であろう。

(2) 「だいち2号」(ALOS-2)のデータの検索および入手

a. データの検索および入手先

ALOS-2の観測データは、現在(2017年3月)、

- ・株式会社パスコ
- ・一般財団法人リモート・センシング技術センター(RESTEC)

により販売されている。過去の衛星データの検索や注文は表 2-5 に示す検索・注文システムを通して行う。

表 2-5 ALOS-2 のデータ検索・注文システム

検索・注文システム	URL	機能
AUIG2 ALOS-2 / ALOS User Interface Gateway	https://auig2.jaxa.jp/ips/home	検索・注文が可能。 注文に当たっては JAXA と 協定を結び、ID・パスワード が必要。
衛星データ利用促進プ ラットフォーム	https://satpf.jp/spf_atl/	検索・注文が可能

b. 衛星データの検索方法

衛星データは検索システム(表 2-5)より検索・注文する。一例として図 2-5 に AUIG2 ALOS-2 / ALOS User Interface Gateway での検索結果を示す。

「検索条件の設定」では、検索範囲、観測日、観測モードなどを設定する。具体的な設定方法は、検索・注文システムのヘルプを参照されたい。なお、観測モードは「PALSAR-2」の内、「観測幅 50km/分解能 3m」を基本とする。

検索結果は、観測された衛星データの観測範囲の枠が地図上に、シーン ID や観測年月日などがリスト表示される。さらに各衛星データの概要「画像」と詳細な観測諸元が記載された「シーン詳細」が表示される。

干渉 SAR 解析を行うためには同じ軌道から対象地域を観測している必要があることから、「衛星進行方向」、「観測方向」、「観測パス番号」、「中心フレーム番号」、「観測モード」、「オフナディア角」および「偏波」が同じデータを選定することが必要である(表 2-7)。

検索結果から、観測対象地域を観測する、干渉 SAR 解析が行える衛星データの多い観測パス番号、中心フレーム番号の観測日を調べ、解析に必要なデータ数が十分に確保できることを事前に確認することが必要である。

検索条件の設定

- ALOS-2
 - PALSAR-2
 - 観測幅 25km/分解能 3m
 - 観測幅 50km/分解能 3m
 - 観測幅 50km/分解能 6m
 - 観測幅 70km/分解能 10m
 - 観測幅 350km/分解能100m
 - 観測幅 490km/分解能 60m
 - AVNIR-2
 - 観測幅 70km/分解能 10m-20m

検索結果の表示で選択されたデータ (ALOS2016040700-140909) 範囲

シーンID	センサ	衛星種別	観測開始日時	観測終了日時	運用モード	観測パス番号	中心スレーム番号
ALOS2012340740-140815	PALSAR-2	ALOS-2	2014/08/15 13:56	2014/08/15 13:57	SM1	119	740
ALOS2014042820-140827	PALSAR-2	ALOS-2	2014/08/27 02:22	2014/08/27 02:23	SM1	15	2820
ALOS2014410740-140829	PALSAR-2	ALOS-2	2014/08/29 13:56	2014/08/29 13:56	SM1	119	740
ALOS2014710700-140831	PALSAR-2	ALOS-2	2014/08/31 14:37	2014/08/31 14:38	SM1	125	700
ALOS2015822860-140908	PALSAR-2	ALOS-2	2014/09/08 03:17	2014/09/08 03:17	SM1	23	2860
ALOS2016040700-140909	PALSAR-2	ALOS-2	2014/09/09 14:30	2014/09/09 14:32	SM1	124	700
ALOS2016040710-140909	PALSAR-2	ALOS-2	2014/09/09 14:30	2014/09/09 14:32	SM1	124	710

検索結果の表示

検索結果で選択したデータのシーン詳細

- シーンID
- センサ
- 運用モード
- 観測パス番号
- 中心スレーム番号
- 軌道データ種別(シーン情報作成時)
- 観測開始日時
- 観測終了日時
- 衛星種別
- 衛星進行方向
- 観測方向

図 2-5 AUIG2 の検索結果例

c. 衛星データの解析可能範囲

ある対象地域の地盤高の変動量を解析する場合、1 シーンの衛星データが、対象地域全域をカバーしているとは限らないため、1 時期について複数シーンが必要になる場合がある。

また、2.5 次元解析を行う場合は、二つの軌道のいずれでも観測している範囲が解析可能範囲となる。2.5 次元解析の解析可能範囲の例を図 2-6 に示す。

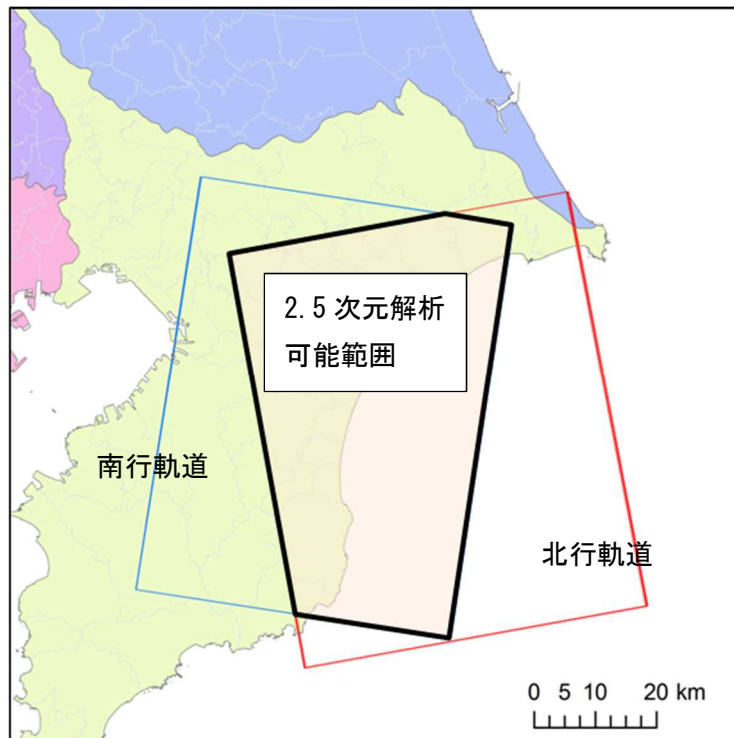


図 2-6 九十九里平野の 2.5 次元解析の解析可能範囲例

さらに、2.5 次元解析の際には対象地域を西から観測する軌道と東から観測する軌道を組み合わせる必要があるため、観測軌道と共に、観測方向・観測方位にも留意が必要である。表 2-6 には、衛星軌道・観測方向と観測方位の関係を示す。

表 2-6 衛星軌道・観測方向と観測方位

衛星軌道	観測方向	観測方位
北行軌道	右側観測	西から観測
北行軌道	左側観測	東から観測
南行軌道	右側観測	東から観測
南行軌道	左側観測	西から観測

(3) 精度指標とシーン数の決定

a. 精度指標

地盤沈下について環境基準は設定されていないが、一般に地盤沈下分布図は、1cm もしくは 2cm 以上の地盤沈下の範囲について示されることが多い。

一方、環境省がこれまで実施した干渉 SAR 解析について検討したところ、干渉 SAR 解析の結果と水準測量の結果の差（較差と言う。）が 1cm 以上となる水準点数の割合は、正規分布における理論値の変化傾向にほぼ等しく、特に、較差の標準偏差が小さなほど理論値と近似していることが確認されている（図 2-7）。例えば、較差の標準偏差が 1cm のとき、較差 1cm 以上の水準点の割合は約 30%、すなわち、較差 1cm 未満の水準点の割合が残り 70%を占めていることになる。解析精度向上のためには、較差は小さいことが望まれる。

一般的に、正規分布では標準偏差（ σ ）の 2 倍（ ± 2 ）の範囲に、全体の約 95% が含まれることが、統計的に知られている。

上記の結果を踏まえれば、較差の標準偏差が小さくなるほど、較差 1cm 以上の水準点の割合が少なくなる、すなわち、較差 1cm 未満の水準点の割合が増えることになり、解析精度の向上が見込める。以上から、較差 1cm 以上の水準点の割合が 5%以下（=全データの 95%超が、較差 1cm 未満に収まる）の場合における、較差の標準偏差（ $\sigma = 0.5\text{cm}$ ）を当面の目安とする。

以上から、衛星データ活用による解析においても、年間 1cm 程度の地盤沈下を把握できることを当面の目安とし、較差の標準偏差 $1\sigma = 0.5\text{cm}$ を精度指標とする。

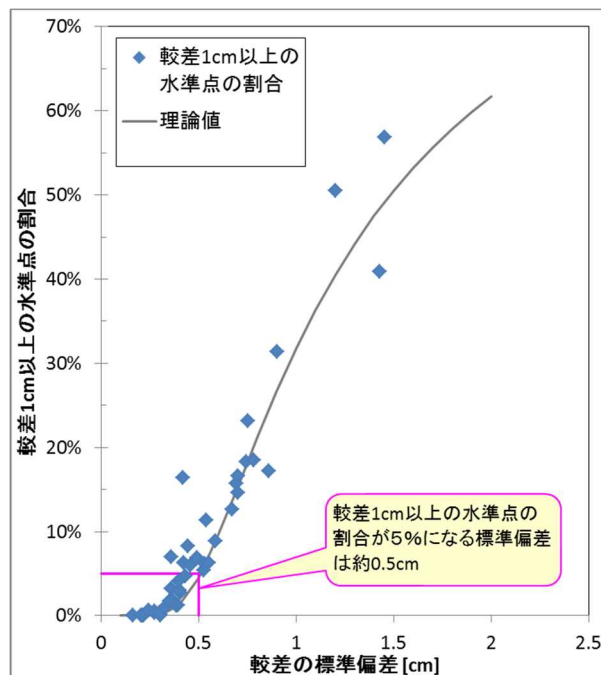


図 2-7 較差の標準偏差と較差 1cm 以上の点の割合の関係

b. シーン数

干渉 SAR 解析による地盤変位の解析の精度は、解析に使用するシーン数（1つの干渉ペアで2シーンを用いる）が多いほど向上する。環境省がこれまで実施した検討結果として、ALOS-2 による“シーン数と較差の標準偏差の関係”、及び、“シーン数と較差 1cm 以上の点の割合の関係”について、図 2-8 に示す。

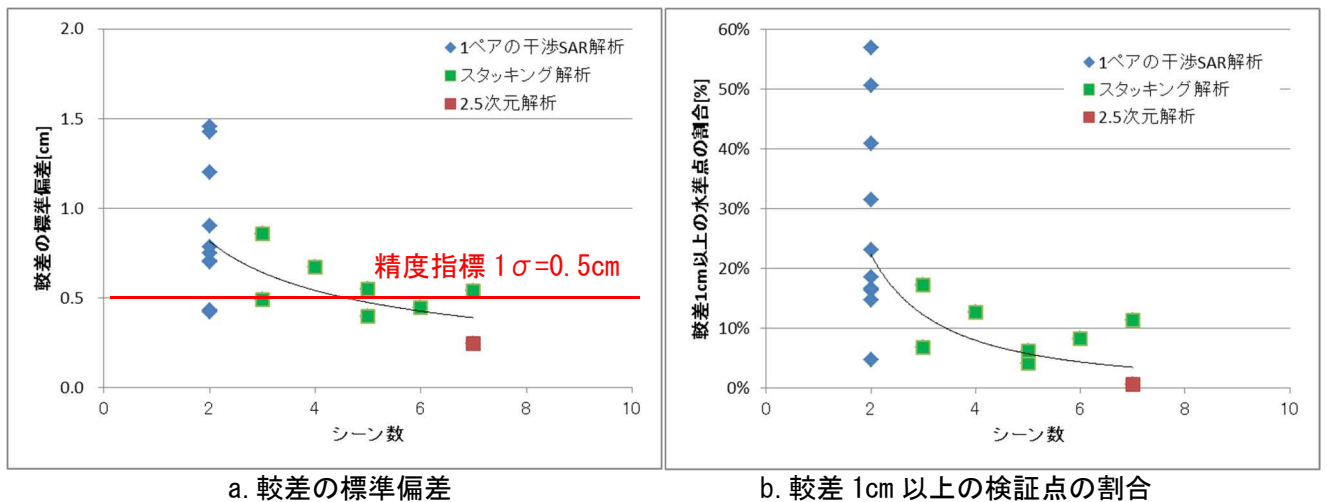


図 2-8 干渉 SAR 解析のシーン数と精度の関係（対象地：九十九里平野）

図 2-8 から、各軌道で4～5シーン（両軌道で8シーン程度）を用いて解析すれば、較差の標準偏差が 0.5cm 以下にほぼ安定して収束させることができると考えられる。また、ALOS-2 の基本観測が各軌道年間4シーンであり、国内のどの地域でも年間4シーンの衛星データは蓄積される。

以上のことから、シーン数は「各軌道4シーン（合計8シーン）」を用いることを基本とする。

各軌道4シーン（合計8シーン）から2シーンを組みあわせて得られる干渉 SAR 解析のためのペア数は6ペア（合計で最大12ペア）であるが、シーンの取得時期の日数が短いなど、地盤高の変動を十分に把握できない場合がある。したがって、購入した衛星データを全て用いて干渉 SAR 解析を行った上で、高い精度で地盤高の変動を把握できるペアを選定することが必要である。

なお、他の衛星を用いる場合や、観測間隔が短く変動量が小さい地域を解析する場合においては同様の検討を行い、精度確保に必要なシーン数を把握することが望ましい。

(4) 解析に用いる衛星データの確定と確定の際の留意点

選定した観測パス・観測フレームの衛星データから、干渉 SAR 解析に用いる干渉ペアを確定する。

干渉 SAR 解析は、使用する衛星データによっては、精度の低下などが発生することがある。衛星データ選定時に考慮すべき点は以下の通りである。

都道府県の地盤沈下の担当者は、国土地理院の干渉 SAR 解析結果が閲覧可能であるので、干渉度や気象ノイズの有無など SAR 干渉画像の品質をデータの購入前に確認することができる。衛星データの選定の際には、その情報も参照されたい。

a. 干渉 SAR 解析を行う衛星データの観測モード

干渉 SAR 解析およびスタッキング解析を行うためには、観測時の条件は、同じ仕様とする必要がある。この条件を表 2-7 に一覧する。

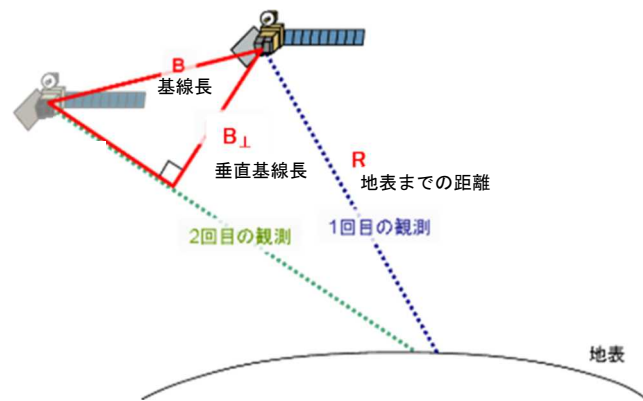
表 2-7 干渉 SAR 解析を行うために統一する必要があるデータ仕様

確認する仕様	説明
衛星進行方向	北行軌道と南行軌道がある。
観測方向	センサで観測する方向のこと。進行方向に対して右側観測と左側観測がある。右側観測が基本とされる。
観測パス番号	観測範囲のパス（東西）の番号
中心フレーム番号	観測範囲のフレーム（南北）の番号
観測モード	観測データのモードのこと。分解能や観測範囲が変化すると干渉しない。
オフナディア角	衛星が地表面を観測する時の傾き角度。
偏波	観測する偏波のこと。 HH、HV、VH、VV が存在する。同じ設定でなければ干渉しない。

b. 基線長

地球観測衛星は全く同一の地点を通過することはなく、異なる時期における衛星データの取得位置は、若干、差が生じる。衛星位置の差を基線長と言う（図 2-9）。干渉 SAR 解析を行う際には、2 時期の軌道の差である垂直基線長が短いことが望ましい（図 2-9 中の B_⊥）。垂直基線長が長いと、DEM（数値標高データ）の誤差の影響を強く受けるほか、干渉性の低下により解析の精度が下がる。そのため、衛星データの購入時には干渉 SAR 解析を行うペアの垂直基線長が短いものを選定することが望ましい。

ALOS-2 は、非常に高い精度で軌道の調整を行っているため基線長は 500m 以下に抑えられており十分に短く、どの組合せでも高い干渉性が得やすいため、ほとんど全ての観測された衛星データで干渉 SAR 解析を行うことができる。



出典：国土地理院 干渉 SAR Q&A に加筆

<http://vldb.gsi.go.jp/sokuchi/SAR/qanda/qanda.html>

図 2-9 衛星の 2 時期の軌道の差（基線長）の成分

c. 衛星データの時期

水準測量結果と比較するため、衛星データは水準測量の基準日に近いことが望ましい。さらに、干渉 SAR 解析に用いる 2 つのデータは、地盤沈下が進行している季節を挟むように選定する必要がある。

1 ペアの干渉 SAR 解析は、SAR の特性に基づき、適切な観測間隔で選択する必要がある。特に、複数年にわたる長期間の解析を行う場合、複数の期間に分けて干渉ペアを選定することが必要である。ALOS-2 の場合、1 ペアの干渉 SAR 解析の 2 つの衛星データの間隔は、3 年未満とすることが望ましい。

d. 衛星観測時の気象条件

大気中の水蒸気が多い時の観測データを用いると、干渉 SAR 解析結果における S/N 比（本来の地盤変動量と解析誤差を生じるノイズ成分の比）が悪化しやすい。このため、解析に用いる衛星データの選定にあたっては、データ観測時間帯の気象条件、特に降雨データ（X バンド降雨データ）などを確認し、降雨が確認されれば解析対象データから除外することが望ましい。また、用いる場合は解析精度が悪化しやすいことに注意する必要がある。

(5) 九十九里平野における衛星データの選定例

九十九里平野を対象とした解析に際し、衛星データの選定例を示す。観測対象範囲を九十九里平野、対象観測期間を 2015 年 1 月 1 日と 2016 年 1 月 1 日の一年間、干渉ペアを各軌道 4 シーンと決定した時、2015 年前後の ALOS-2 の観測データを検索すると表 2-8 の情報を得ることができる。

表 2-8 九十九里平野を観測している ALOS-2 の衛星データ

軌道方向	観測パス番号	観測フレーム番号	オフナディア角	観測方向	観測回数	観測日		
南行	18	2900	32.4	右側観測	5	2015/1/15	2015/9/24	2016/3/10
						2016/6/16	2016/8/11	
北行	124	700	29.1	右側観測	7	2014/9/9	2014/11/4	2015/2/24
						2015/6/2	2015/10/20	2015/11/3
						2016/5/31		

観測期間干渉ペアは表 2-9、表 2-10 のように選定することができる。

また、観測対象期間が短く変位が小さい場合や、観測データが少ない場合には、データの観測時期を広げて干渉ペアを追加することも検討する。

表 2-9 南行軌道の九十九里平野の干渉ペア候補

No	Master	Slave	観測期間	基線長(m)	2014年			2015年			2016年		
					平成26年			平成27年			平成28年		
1	2015/1/15	2015/9/24	252	-184				←		→			
2	2015/1/15	2016/3/10	420	-21				←			→		
3	2015/1/15	2016/6/16	518	163				←				→	

表 2-10 北行軌道の九十九里平野の干渉ペア候補

No	Master	Slave	観測期間	基線長(m)	2014年			2015年			2016年		
					平成26年			平成27年			平成28年		
1	2014/11/4	2015/11/3	364	-226				←		→			
2	2015/2/24	2015/10/20	238	-118				←		→			
3	2015/2/24	2015/11/3	252	226				←		→			

(6) ALOS-2 により観測された衛星データの費用

解析に使用する衛星データを決定した後、上述のシステムより注文することができる。データ購入価格を表 2-11 に示す。詳細については当該機関に確認されたい。

干渉 SAR 解析に用いるデータフォーマットは特殊な形式であることから、データ入手に係る作業は調査・解析の中で専門業者にて行うことが望ましい。

表 2-11 ALOS-2 のデータ購入価格 (2017 年 3 月現在)

価格	備考
税抜¥80,000 / 1 シーンあたり	観測モード、及び、観測時期に依らず定額

2-6 仕様の確定

本節では、衛星データを活用した調査・解析を、専門業者へ発注する際の参考情報として、特記仕様書、積算、作業工程のイメージを示す。

なお、ここで言うイメージとは、特記仕様書等で盛り込むことが考えられる項目・内容の参考例であり、そのままの利用を想定するものではなく、各々の状況に応じて適宜、対応願いたい。

2-6-1 特記仕様書のイメージ

干渉 SAR 解析に係る特記仕様書について、次の方針にもとづくイメージを示す。

- ・水準測量は別途業務とする。
- ・特記仕様書では要求水準を示すことに主眼を置き、解析方法や精度管理の詳細については、受注者の検討事項とする。
- ・発注者が対応すべき事項としては、計画書、成果物及び精度管理の結果の確認に重点を置く。

項目	仕様書のイメージ	説明
(趣旨)	第〇条 この特記仕様書は、〇〇県地盤沈下把握に係る業務委託に関し必要な事項を定めるものとする。	
(業務委託の内容)	第〇条 本委託業務は、〇〇県平野部の地盤沈下の実態を把握するため、合成開口レーダーによる観測データ（以下「衛星データ」という。）による干渉 SAR 解析を実施し、地盤沈下分布図等の成果品を提出する。	
(工期)	第〇条 委託業務の工期は平成〇〇年〇〇月〇〇日とする。	
(作業計画)	第〇条 受注者は、本委託業務の目的を十分に理解し、仕様書で挙げた成果物について、必要な品質を確保するための方法を立案し、作業計画書を作成し、監督員に提出するものとする。	仕様書では、成果物の要求水準を示すこととし、具体的な作業方法は受注者が検討。
(実施体制)	第〇条 (1)受注者は、管理技術者 1 名、照査技術者 1 名、担当技術者複数名よりなる業務実施体制を編成し、業務を行うものとする。技術者には、干渉 SAR 解析の業務経験を有する者、1 名以上を含めること。	品質を確保するために、解析に係わる業務経験が必要。確認のための書類として、TECRIS や AGRIS の登録内容確認書等が挙げられる。
	(2)業務の管理技術者は、技術士（情報工学部門）、技術士（応用理学部門）、技術士（建設部門）、空間情報総括管理技術者のいずれかを有する者とする。	管理技術者は、情報全般、地盤沈下、空間情報の、いずれかの技術資格を有する者とする。
	(3)業務の照査技術者は、技術士（情報工学部門）、技術士（応用理学部門）、技術士（建設部門）、空間情報総括管理技術者のいずれかを有する者とする。	資格を有する照査技術者を置くことが望ましい。
(干渉 SAR 解析に係る業務内容)	第〇条 (1)解析対象データ : 解析の対象とするデータは、「だいち 2 号」(ALOS-2)の衛星データで、計〇〇シーン（北行軌道〇シーン、南行軌道〇シーン）とする。なお、干渉解析ができ	

項目	仕様書のイメージ	説明
	ない等によりデータ数が変わる場合は、契約変更する。	
	(2)データの確認 : 受注者は、衛星データの内容及び取得時期を確認し、解析方法及び解析期間を検討する。なお、解析期間は、平成27年1月～平成28年1月、平成28年1月～平成29年1月、平成29年1月～平成30年1月を想定しているが、衛星データの撮影時期及び衛星データの品質を勘案して、受注者から提案すること。	データ内容について、発注者・受注者の双方で確認するための項目。解析期間はイメージであり、目的及びデータ諸元を踏まえることが必要。
	(3)水準測量データによる検証 : 水準測量データを用いて干渉SAR解析の値の精度を検証する。水準測量データは、県が貸与する。	
	(4)衛星データを用いた地盤高の変動量の解析 : 衛星データを使用し地盤高の変動量の解析を行う。解析手法は1ペア干渉SAR解析、スタッキング処理、2.5次元解析等によるものとする。解析に用いる衛星データの組み合わせは受注者にて提案する。また、水準測量データとの検証より、組み合わせ結果が妥当であることを示すこと。	解析するペア数は、受注者側の責任マターとする。
(地盤沈下量解析に係る業務内容)	第〇条 (1)地盤沈下分布の背景図 : 貸与する県全域の白図	
	(2)1年間の地盤沈下分布図の作成 : 前第〇条(2)項で定めた期間について、地盤沈下分布図(10万分の1、20万分の1)を作成する。なお、地盤沈下分布図作成に当たり、コンターは10mm間隔を予定するが、詳細な描画方法は、監督員と協議し、承認を得るものとする。	図の縮尺、コンターの間隔はイメージであり、既往調査等を踏まえ、設定。
	(3)複数年の累積地盤沈下分布図の作成 : 前第〇条(2)項で定めた期間を踏まえ、累積地盤沈下分布図(10万分の1、20万分の1)を作成する。なお、累積地盤沈下分布図作成に当たり、コンターは10mm間隔を予定するが、詳細な描画方法は、監督員と協議し、承認を得るものとする。また、累積地盤沈下分布図は、計3期間を予定するが、詳細は、監督員と協議し、承認を得るものとする。	図の縮尺、コンターの間隔はイメージであり、既往調査等を踏まえ、設定。
	(4)沈下量面積 : (2)項及び(3)項で挙げた期間について、地域別、及び、市町村別に、地盤沈下量別の面積を算出する。	
	(5)水準点別地盤沈下量の抽出 : (2)項及び(3)項で挙げた期間について、水準点位置の相当する地点の地盤沈下量を抽出する。	
(成果物)	第〇条 以下の成果物を提出すること。なお、成果物等の様式については、監督員の指示を受けること。	
	(1)地盤沈下量分布図(年間)、1/10万、紙出力:3面	成果のイメージを、第3章に示す。
	(2)地盤沈下面積一覧表(年間、地域別・市町村別)	
	(3)水準点別地盤沈下量一覧表(年間、ワースト地点)	
	(4)実測水準測量結果と、各干渉SAR解析結果との相関図(精度検証として)	
	(5)干渉SAR解析方法に関する説明	
	(6)(2)～(5)をとりまとめた報告書	
	(7)上記電子データ(分布図についてはShapefile形式及びGeotiff形式、一覧表については表計算ソフトで利用可能な形式とする。)	分布図はGISソフト上で利活用することを想定。
	(8)干渉SAR解析に用いた元データ	データは発注者に帰属し、受注者が代理で購入

項目	仕様書のイメージ	説明
	(9)その他監督員が指定した書類	する。詳細はALOS-2製品使用許諾条件書を確認すること。
(成果品の照査)	第〇条 作業方法及び成果の妥当性について、照査技術者は照査報告書を提出すること。	干渉 SAR 解析に関する規定はないので、照査技術者が精度管理を行う。
(記録等の帰属)	第〇条 この業務の実施に伴い作成された記録等の権利は、〇〇県に帰属する。	
(関係法令の遵守)	第〇条 受注者は、業務の実施に当たっては、関係法令を遵守しなければならない。	
(その他)	第〇条 上記事項に定めのない事項又は疑義が生じた場合は、その都度、発注者と受注者が協議の上、決定する。	

2-6-2 積算のイメージ

干渉 SAR 解析に係る積算について、次の方針にもとづくイメージを下記に示す。

- ・作業はデータ解析が主体であることから、コンサルティング業務を想定。
- ・衛星データは、受注者が入手。

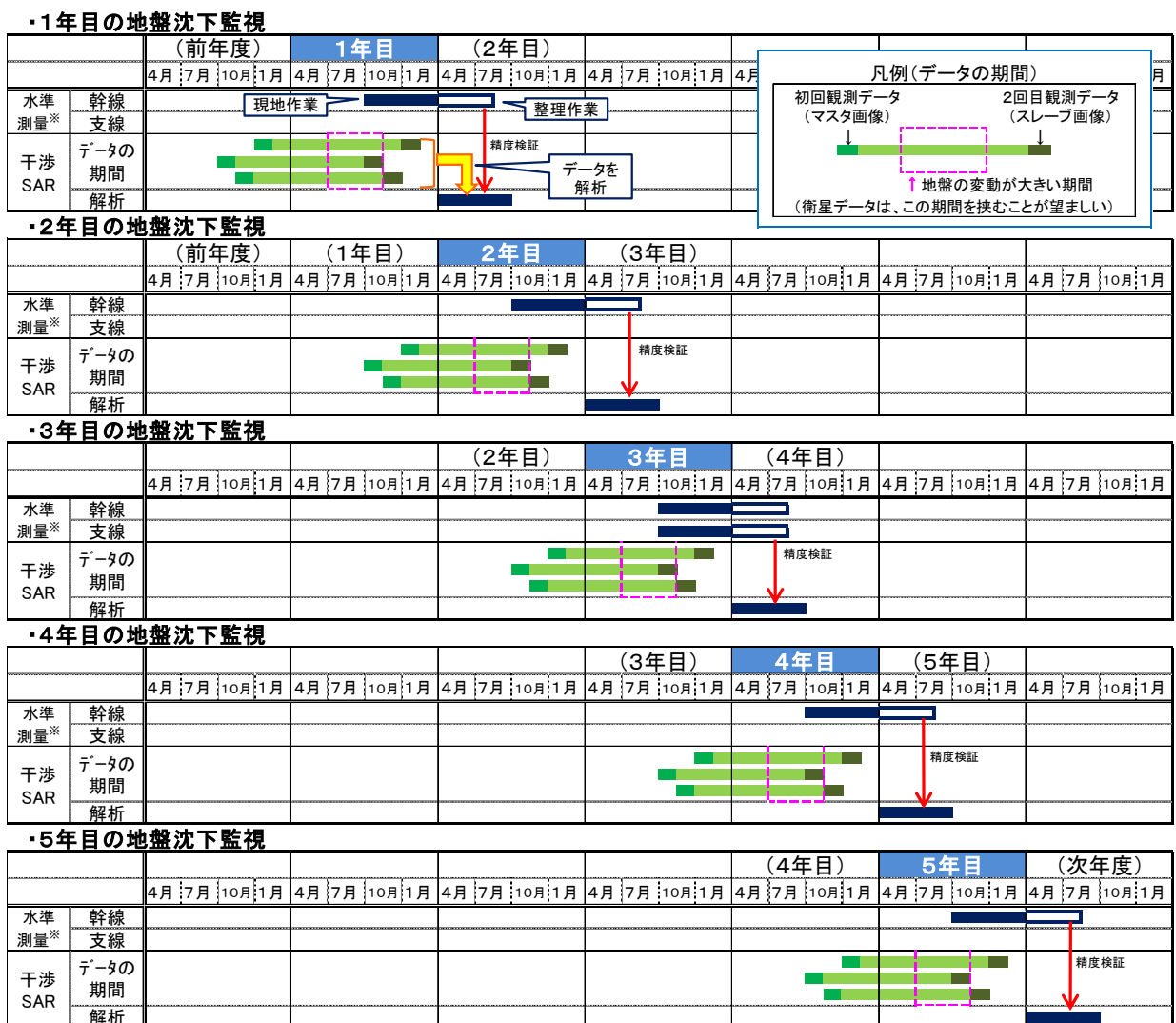
種別	細別	名称	単位	数量	単価	金額	摘要
解析等調査							
	直接人件費						
		計画・準備	式	1			
		水準点データの整理	式	1			
		1ペア干渉解析	式	1			精度検証を含む
		スタッキング	式	1			精度検証を含む
		2.5次元解析	式	1			精度検証を含む
		成果物作成	式	1			
		打合せ協議（5回）	式	1			
		照査	式	1			
直接経費							
	直接経費						
		衛星データ	式	1			
		打合せ交通費	式	1			
		成果物作成費	式	1			電子成果物を含む
直接原価（その他原価を除く）							
その他原価							
一般管理費							
調査費合計							
消費税							
総計							

図 2-10 積算項目のイメージ

2-6-3 作業工程のイメージ

「2-4 水準測量との組み合わせ」で挙げた2つのメニュー案として、水準測量の作業量を縮減する工程のイメージを図 2-11、図 2-12 に示す。工程の考え方は、以下のとおり。

- ・水準測量の基準日を1月1日と想定。水準測量は年度後半からの作業となる。
- ・水準測量結果と比較し、衛星データによる地盤高の変動量解析結果の精度を検証することが前提。
- ・地盤沈下は地下水利用が集中する季節に進行し、その後、地下水利用が少なくなると、若干ではあるが回復することが多い。地盤変動が大きな期間中に取得された衛星データを用いても、精度の良く地盤沈下を把握することはできない。したがって、地下水利用の実態や、地下水位・地盤沈下観測井の観測記録等をもとに、地盤の変動が大きいと思われる期間中を外し、その前後の衛星データを選ぶことが必要。

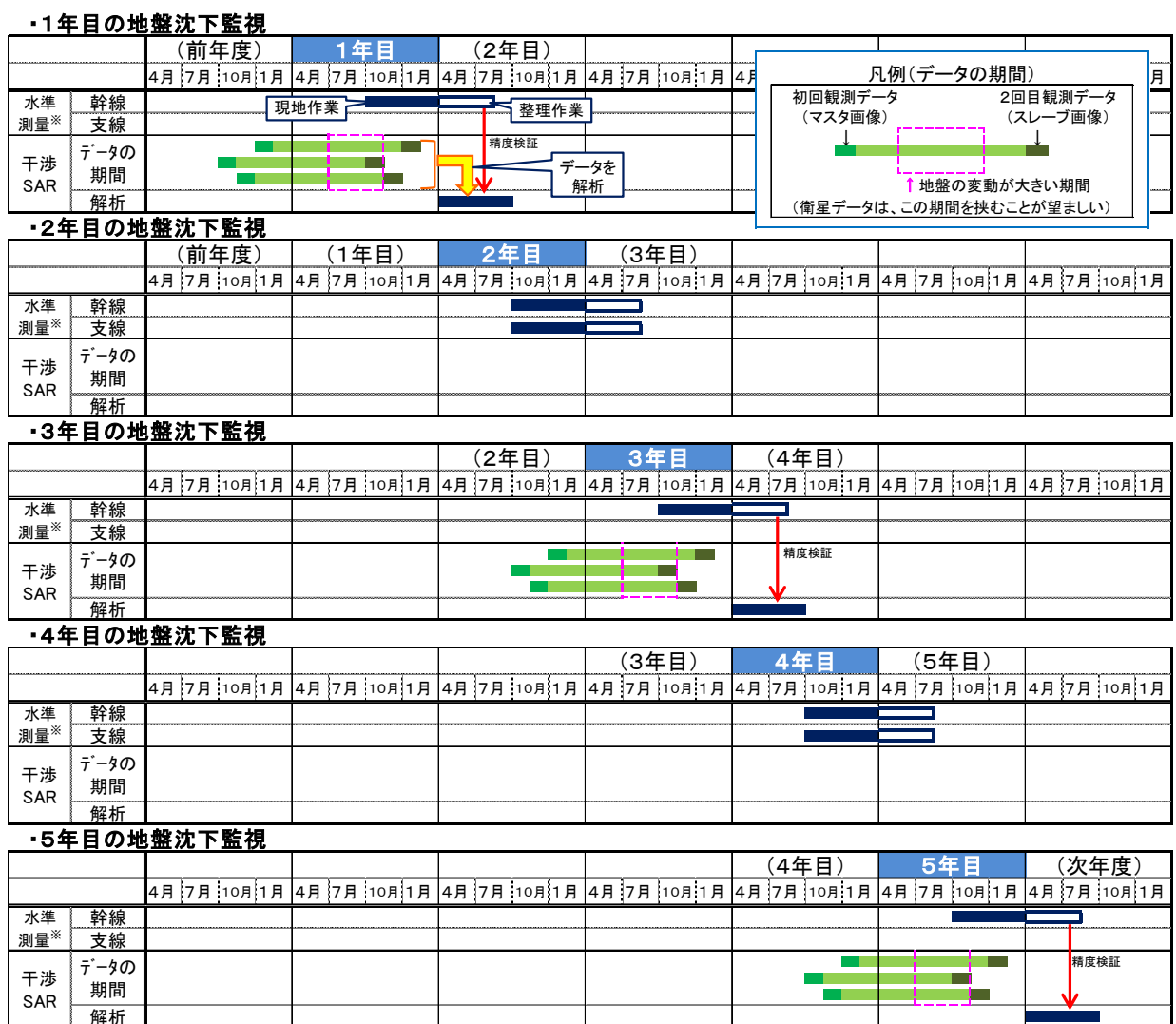


※水準測量（現地作業及び整理作業）と干渉SAR解析は、別業務を想定。

図 2-11 作業工程のイメージ（メニュー案1）

衛星データの検証で、水準測量結果が必要である点が、工程上の課題となる可能性がある。その対応策として、以下の方法が有効である。

- ・水準測量結果の公表前であっても、結果の整理できた段階で、検証作業に用いる。
この際には、水準測量結果は公表前の速報値である旨を記載する必要がある。
- ・水準点位置の緯度・経度を、予め、データ化しておく。既にデータ化している自治体は、この作業は不要。
- ・対象年は異なるが、前年度以前の水準測量結果を用いて概略的に検証し、当該年の水準測量結果が整理された段階でデータを入れ替えて、検証を確定する。



※水準測量（現地作業及び整理作業）と干渉 SAR 解析は、別業務を想定。

図 2-12 作業工程のイメージ（メニュー案 2）

2-7 解析

選択された衛星データを利用して干渉 SAR 解析により地盤高の変動量解析を行う。干渉 SAR 解析として、①2 回の観測データを用いた 1 ペアの干渉 SAR 解析、②スタッキング解析、③2.5 次元解析の順で行うことで、精度の向上が可能である。

なお、本マニュアルで示す解析方法のみならず、より高度な解析を行うことで精度を向上させることも可能であるが、そのためには多くの衛星データや解析処理費用が必要となる。本マニュアルでは、解析の中で、比較的、簡便な方法を適用している。

【解説】

干渉 SAR 解析の種類を表 2-12 に、解析の流れを図 2-13 に示す。

干渉 SAR 解析方法として、①1 ペアの干渉 SAR 解析、②スタッキング解析、③2.5 次元解析があり、この順番で解析を行うことで、精度を向上させることができる。

各々の解析に関する概要や特徴を表 2-12 に一覧する。また、本マニュアルで挙げた以外の解析方法については、巻末資料や文献等を参照されたい。

表 2-12 干渉 SAR 解析の種類

	1 ペアの干渉 SAR 解析	スタッキング解析	2.5 次元解析
概要	2 時期の衛星データ (1 ペア) による干渉 SAR 解析。衛星データから初期干渉画像を作成し地形による成分や軌道による成分を除いて地盤高の変動画像を作成する。この地盤高の変動画像は大気遅延による誤差等を含んでいる。	複数ペアの干渉 SAR 解析結果を合成することで、大気遅延の誤差等を低減し、精度を上げることができる。時系列解析とも呼ばれる。	撮影方向の異なるスタッキング解析結果を組み合わせ、変動成分を鉛直方向と東西方向に分離することで、鉛直方向の変位の精度を向上させる。
特徴	<利点> ・2 時期の衛星データだけで解析できる。 <欠点> ・大気遅延などの誤差が多く含まれる。	<利点> ・大気遅延などの誤差を低減することができる。 ・合成する衛星データ数 (ペア数) が多いほど精度が向上する。 <欠点> ・同一の衛星軌道で複数回の観測が必要となり、1 ペアの干渉 SAR 解析よりも多くのデータが必要となる。	<利点> ・大気遅延などの誤差をより低減することができる。 ・水平移動成分を除き、鉛直方向の変動成分を抽出できる。 <欠点> ・異なる軌道の衛星データが必要となり、解析可能範囲が狭くなる。

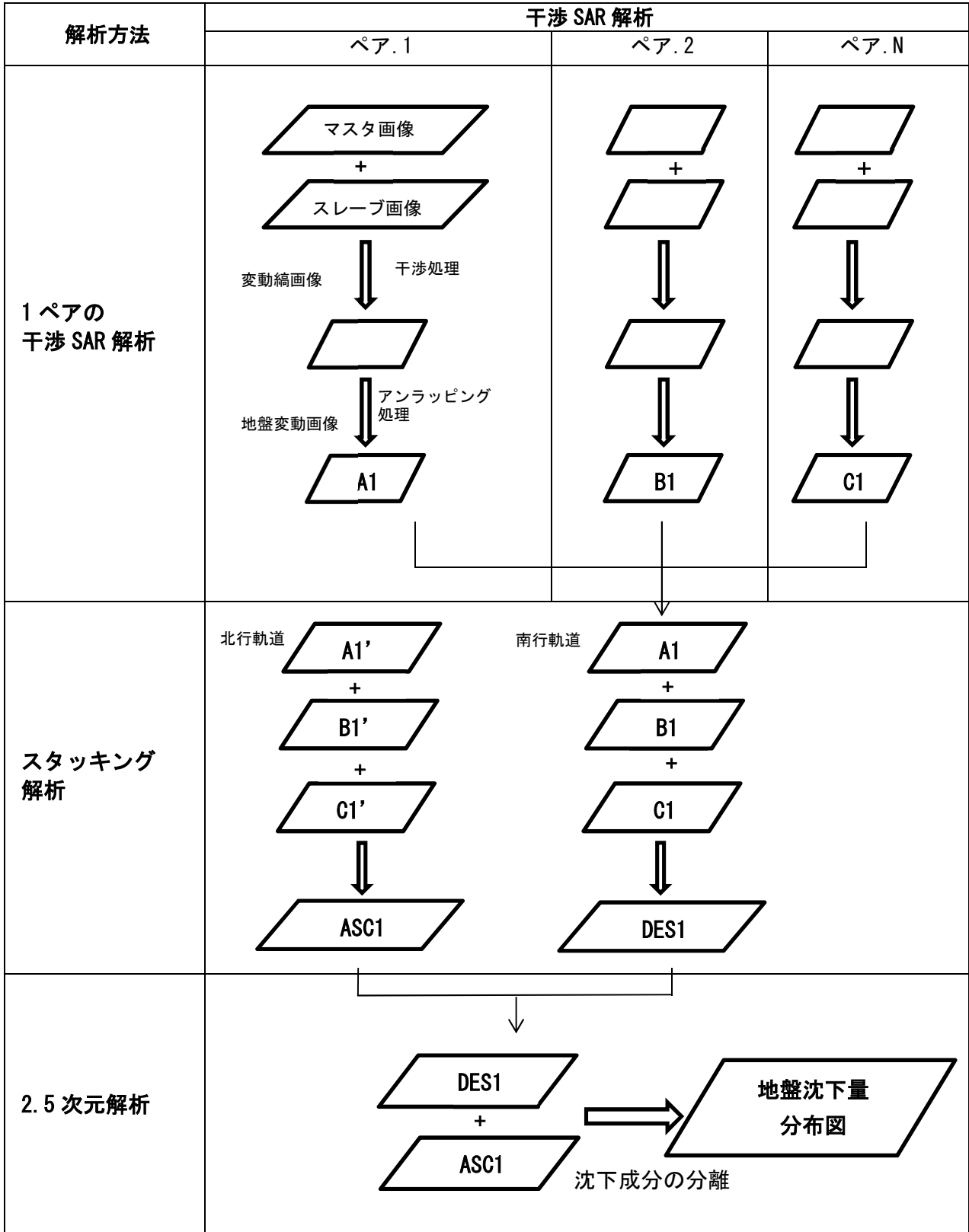


図 2-13 干渉 SAR 解析の全体の流れ

(1) 1 ペアの干渉 SAR 解析

最も基本的な干渉 SAR 解析である、2 回の衛星データ (1 ペア) を用いた 1 ペア干渉 SAR 解析の流れを図 2-14 に示す。

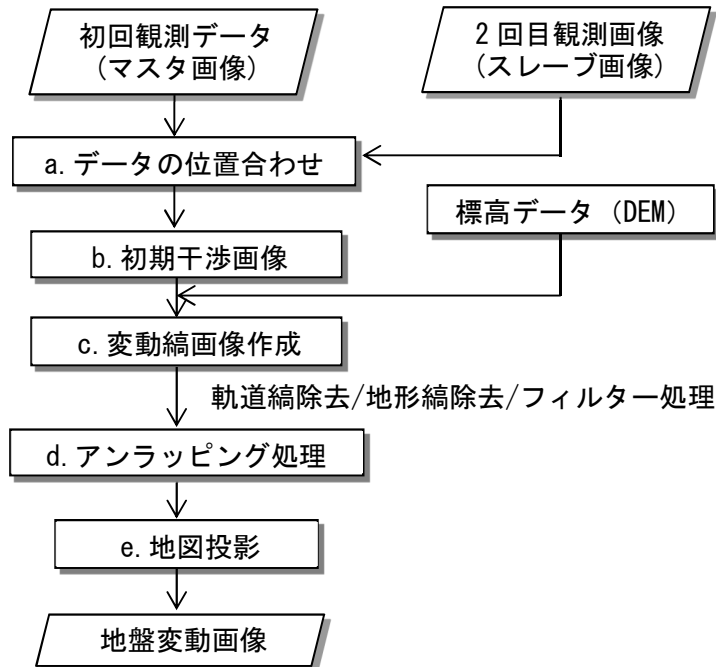


図 2-14 1 ペアの干渉 SAR 解析の流れ

a. データの位置合わせ

初回観測データをマスタ画像、二回目観測データをスレーブ画像という。

ALOS-2 では、処理レベル 1.1 データ (SLC: Single Look Complex、図 2-15) を入手し、2 枚の観測データから、両画像で明瞭に認識できる対応点について画像上での位置ずれを算出し、マスタ画像にスレーブ画像の位置を合わせる。



図 2-15 SLC データの例 (ALOS データ利用)

b. 初期干渉画像作成

位置合わせを行った 2 枚の画像の画素ごとに位相の差分を計算し、初期干渉画像を作成する (図 2-16)。

この段階での干渉画像は軌道縞・地形縞などの誤差成分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。規則正しい平行線の縞模様は、高速で移動する衛星

が1回目と2回目の観測で全く同一の地点から観測される事はほぼ出来ないため、この軌道のずれに起因する軌道縞であり、地形の凹凸のある場所では地形縞と重なり平行線が崩れる。また、水面など2時期の表面形状が大きく異なる場所では位相のばらつきが大きいため、砂をばらまいたような画像となる。このような場所は干渉性が低くなるため、変動量の把握は困難となる。

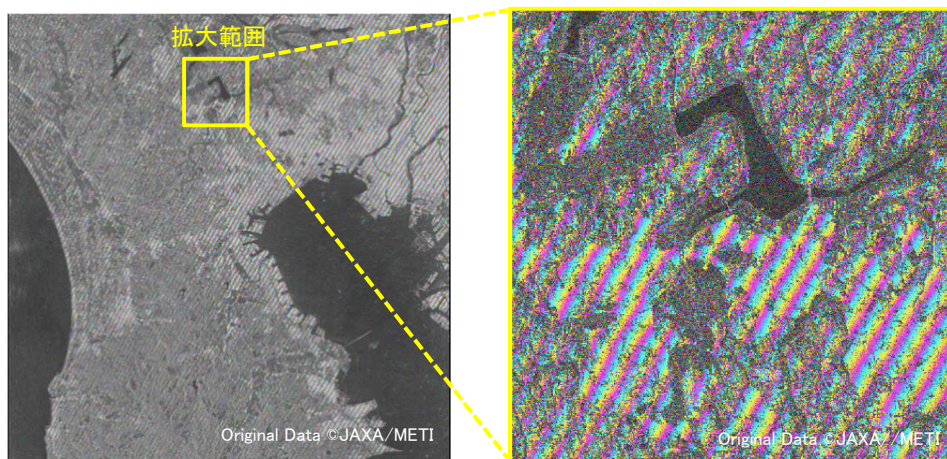


図 2-16 初期干渉画像の例
(ALOS データ利用)

c. 変動画像作成

初期干渉画像から前述した軌道のずれの影響を除去するため、衛星データの持つ基線長情報から算出した軌道縞の除去、数値標高データ (DEM) と基線長から算出した地形に起因する地形縞を除去し、初期干渉画像から地表面の変動情報のみを抽出する。

また、SAR による位相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フィルター処理を適用しノイズを除去する。

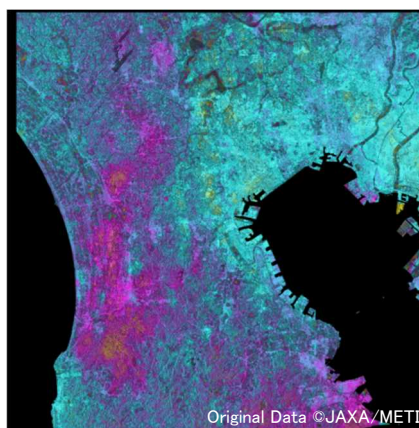
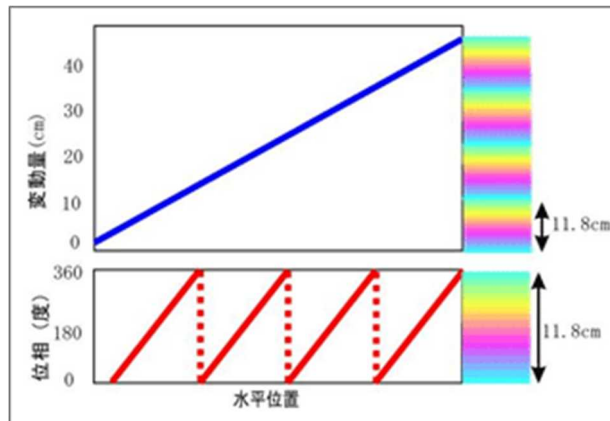


図 2-17 軌道縞・地形縞を除去した変動画像
(ALOS データ利用)

d. アンラッピング処理（位相差から変動量への変換処理）

前項までの初期干渉画像や変動画像では、位相差を色表現した画像であるが、位相は $0^\circ \sim 360^\circ$ までの値しか持たない。そのため、変位が大きくなっていくと、 360° から 0° に戻ってしまう。これを、周辺の位相差を考慮して変位の絶対値に変換することが必要となる。この処理をアンラッピング処理という。アンラッピング処理の模式図を図 2-18 に示す。



出典：国土地理院 干渉 SAR のしくみ

<http://vldb.gsi.go.jp/sokuchi/sar/mechanism/mechanism04.html>

図 2-18 アンラッピング処理の模式図

アンラッピング処理を行った結果の変動量は、衛星視線方向の変位となる。これを水準測量と比較するために、衛星の観測角度の情報を利用して、地面と垂直な方向の年間変位速度に換算する。

e. 地図投影

変動画像の作成までは、SAR によって得られた画像の座標系で処理を行っているため、緯度経度や平面直角座標などの位置情報（座標系）を持っていない。これを必要な座標系に変換し、地形図や市町村界など、他の空間情報と重ねられる地盤変動画像を作成する。このようにして作成された地盤変動画像を図 2-19 に示す。

図 2-15～図 2-17 の画像では、衛星データそのものが持つ情報を処理しているため、図 2-19 と比較して左右反転しており、また、他の空間情報との位置的な整合が取れていないこともそれらの理由による。

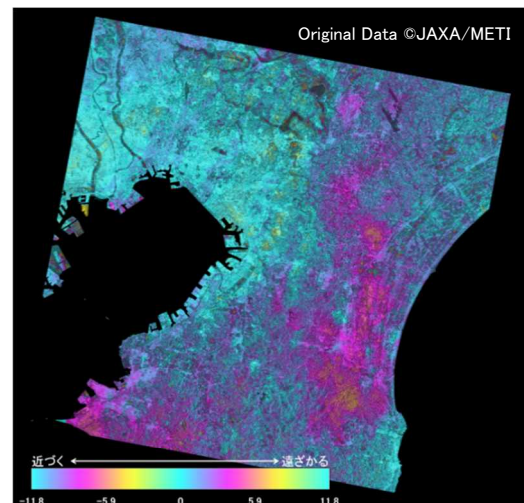


図 2-19 干渉 SAR 解析による地盤変動画像（ALOS データ利用）

(2) スタッキング解析

干渉 SAR では GPS と同様にマイクロ波を用いているため、電離層の電子密度が衛星観測時によって変化することによるマイクロ波の伝搬遅延（電離層の影響）と大気中の水蒸気の分布が空間的に異なるために発生するマイクロ波の遅延（大気遅延）が主な誤差として挙げられる。これらを補正する方法として 1 ペアの干渉 SAR 解析による地盤変動画像を複数枚重ね合わせることによって空間的な誤差を平均化し、誤差を軽減する方法がある。これをスタッキング解析または時系列解析という。

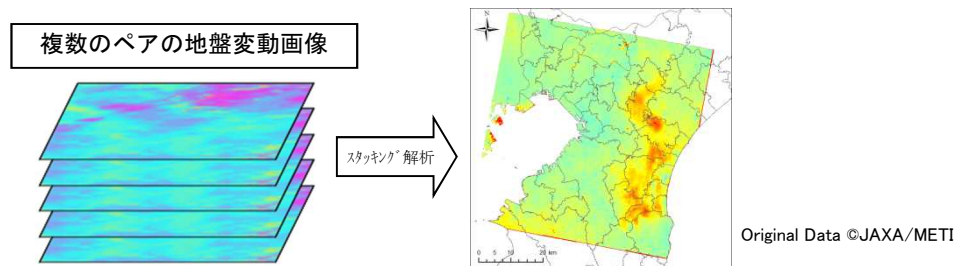


図 2-20 スタッキング解析の概念図
(ALOS データ利用)

解析には、多くの衛星データが必要となり、使用するシーン数が多いほど、精度が高くなることが期待できる。スタッキング解析にあたり、1 ペア干渉 SAR 解析結果を目視で確認したり、水準測量結果と比較し、ノイズの多い干渉ペアを除いたりすることで、スタッキング解析結果の精度を向上させることができる。

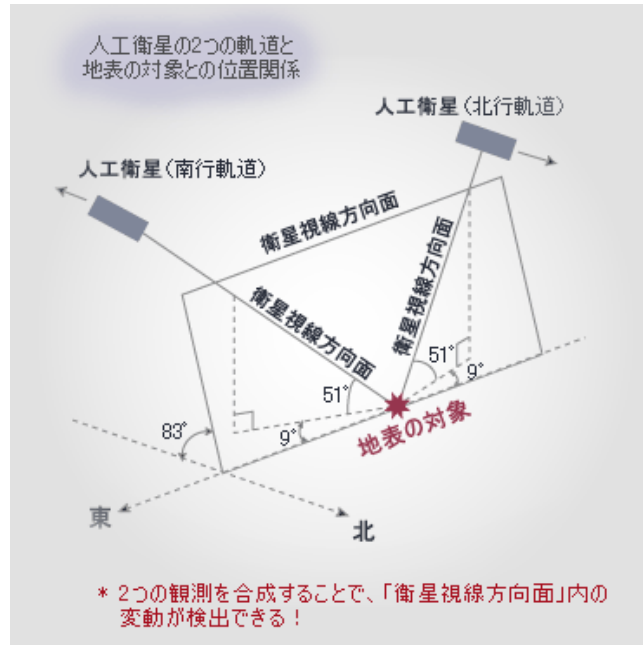
なお、解析手法には変位速度の平均化の他に、SBAS、PS-InSAR（詳細は用語解説参照）などの手法があり、いずれでも地盤高の観測把握に利用可能である。本マニュアルでは、比較的簡便で、簡単な解析ソフトでも実装されている方法として、平均化による解析手法を用いている。

(3) 2.5 次元解析

1 ペア干渉 SAR 解析結果を踏まえたスタッキング解析結果から得られる変位は、その軌道からみた衛星の視線方向の変動量である。SAR は観測原理の制約により、地表を斜めの方向から観測しているため、SAR で観測している変位は斜め方向の成分であり、鉛直方向なのか水平方向なのかを区別することはできない。そこで、一つの軌道のみ衛星データを用いる干渉 SAR 解析では、衛星の観測角度の情報を加味することで、鉛直方向の変位を求める。

観測する位置を増やすことができれば、変位を求めることが可能となる。人工衛星による観測は南行軌道と北行軌道という異なる二つの方向から地表を観測しているため、この二方向の解析結果を合成することで、変動量を鉛直方向と東西方向の成分へ分離することができる。このように、異なる方向からの結果を組み合わせることで変動量を推定する手法を 2.5 次元解析という。図 2-21 に 2.5 次元解析の模式図を示す。

各軌道によるスタッキング解析結果を用いて 2.5 次元解析を行うことで、平行移動成分を除去し、鉛直方向の地盤変動をより精度よく得ることができる。



出典：国土地理院 干涉 SAR の応用

<http://vldb.gsi.go.jp/sokuchi/SAR/mechanism/stereo01.html>

図 2-21 2.5 次元解析の模式図

2-8 成果

衛星データを併用した地盤高の観測により、従来の地盤沈下調査と同様の成果として、地盤沈下量分布図、地盤沈下面積一覧表、水準点別地盤沈下量一覧表等を得ることができる。また、水準測量結果と比較して精度を検証することとし、解析のプロセスやその結果(成果)については、作業を実施する機関が照査することで、品質を確保する。

【解説】

(1) 成果のイメージ

前述の解析では、衛星データ干渉ペア(最大 50km 四方)をメッシュ単位で解析することで、メッシュ毎の平均的な地盤変動量が算出される(図 2-22)。メッシュサイズは、フィルター処理等を実施することで ALOS-2 の分解能 3m×3m よりも粗くなる。解析に使用している DEM のメッシュサイズである 10m を超えるサイズとする。メッシュサイズが小さいとノイズが多くなるため、ノイズが多い場合にはメッシュサイズを大きくする。その値を用いて、主要成果として、地盤沈下量分布図、地盤沈下面積一覧、及び、水準点別地盤沈下量一覧を作成する。

このように、衛星データを併用した地盤高の観測では、水準測量の作業に係わる計算手簿等を除き、従来の水準測量による地盤沈下調査と同様の成果が得られる。

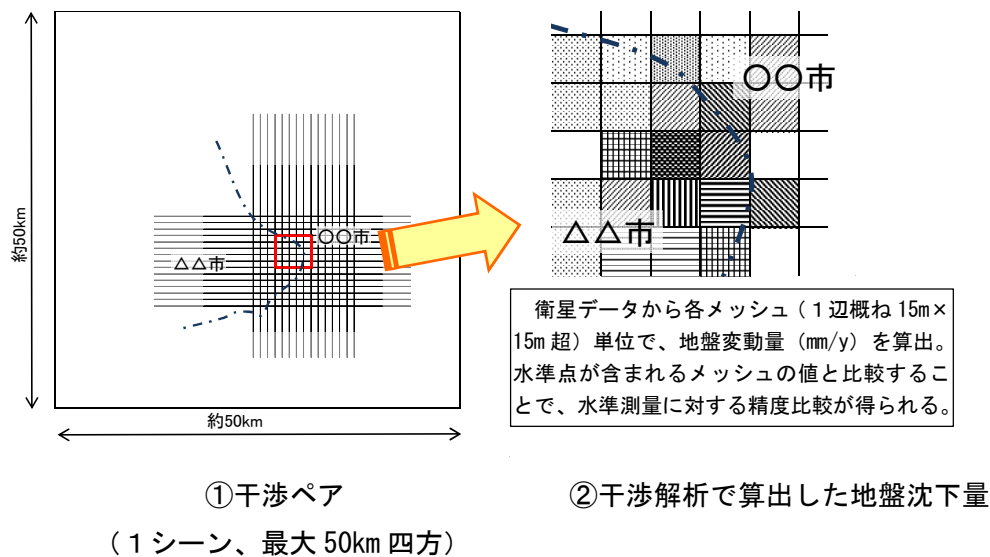


図 2-22 干渉 SAR 解析で算出される地盤変動量

a. 地盤沈下量分布図

電子データでの解析処理になるため、任意の縮尺・背景図で平面図の作成が可能である（図 2-23）。

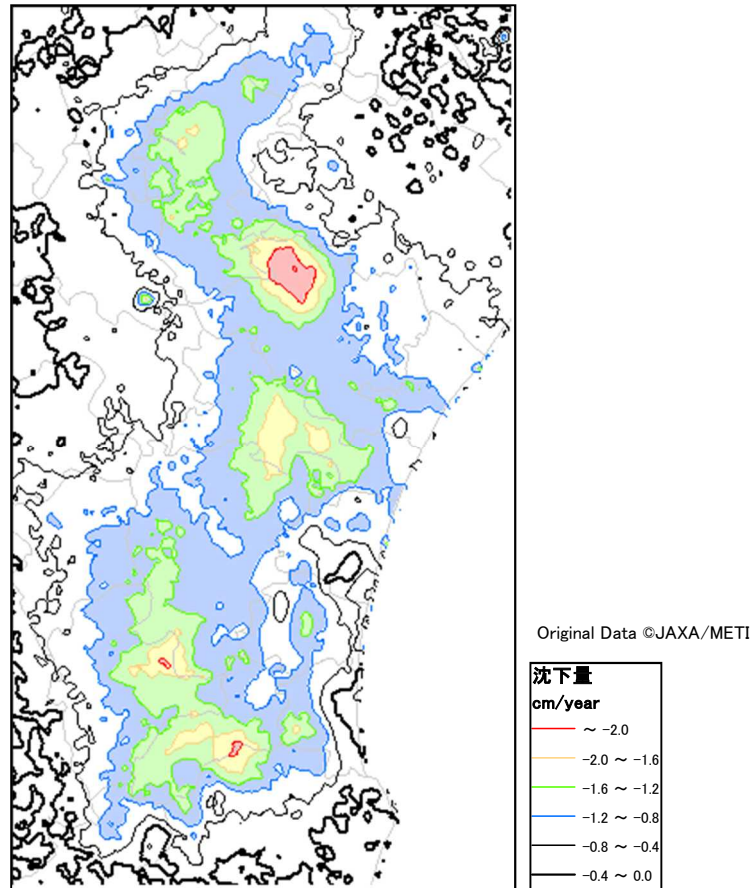


図 2-23 干渉 SAR 解析による地盤沈下量分布図の解析例
(千葉県九十九里平野)

b. 地盤沈下面積一覧

地盤沈下量分布図は電子データ情報を有するため、任意の範囲・任意の地盤沈下量について、面積を算出することができる。例えば、全県、市町村単位のほか、大規模開発等で地盤沈下が懸念されている地区を監視するという利用方法も考えられる。

表 2-13 地盤沈下面積一覧表のイメージ

	1cm 以上 2cm 未満	2cm 以上 3cm 未満	...
全県	10.5km ²	1.3km ²	
A 市	2.1km ²	0.6km ²	
B 市	0.5km ²	0.0km ²	
C 町	1.0km ²	0.0km ²	
D 村	0.1km ²	0.0km ²	
〇〇地区	3.0km ²	0.5km ²	

c. 水準点別地盤沈下量一覧

衛星データから得た地盤沈下量分布図上で、メッシュ単位で任意の位置の地盤沈下量を抽出することができる。例えば、これまで水準測量で行われてきた地盤沈下量の評価は、その水準点を含むメッシュでの地盤沈下量として算定されるため、これまでのデータに引き続き、継続的に地盤沈下量の評価が可能である。このイメージを表 2-14 に示す。

表 2-14 水準点別地盤沈下量一覧表のイメージ

水準点	各年別変動量(mm)					過去5年間の変動量(mm)	H29.1.1(水準測量)までの累積地盤変動量(mm)	調査開始年からの変動量
	H27.1.1～ H28.1.1	H28.1.1～ H29.1.1	H29.1.1～ H30.1.1	H30.1.1～ H31.1.1	H31.1.1～ H32.1.1			
	水準測量	水準測量	干渉SAR解析	干渉SAR解析	干渉SAR解析			
A-1	-10.1	-8.1	-5.3	-12.6	-7.0	-43.1	-210.2	-235.1
A-2	-7.0	-2.4	-2.0	-1.6	-2.2	-15.3	-155.7	-161.5
A-3	-0.2	-2.5	-0.6	-4.1	-0.7	-8.1	-198.0	-203.4
B-1	-4.2	-2.4	-5.1	-8.9	-3.0	-23.6	-49.6	-66.7
B-2	-2.8	-3.6	-0.9	-2.3	-3.3	-12.9	-140.9	-147.3
D-1	-8.1	-1.7	-2.6	-11.6	-1.3	-25.3	-138.4	-154.0

(2) 精度検証

水準測量と併用する場合で、測量データによる地盤沈下量が把握できている場合には、衛星データによる地盤高変動量は、水準測量結果と比較する事で、解析の精度を検証する。その評価方法を表 2-15 に示す。干渉 SAR 解析、スタッキング、及び、2.5次元解析を経て、精度が向上する過程も重要な知見であることから、最終的な解析結果だけでなく、各解析の中間過程の精度検証も重要な知見となる。

なお、例えば、1月1日基準日の関東平野では水準測量結果として地盤沈下の値が公表されるのは翌年度であり、衛星データの検証作業は、その後となる。したがって、衛星データ解析との検証は、異なる年度の作業となる場合がある。

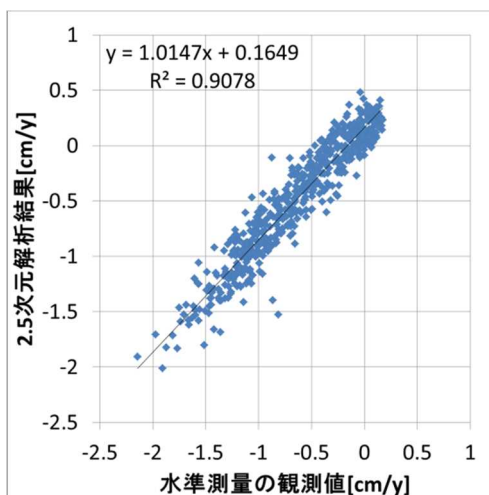
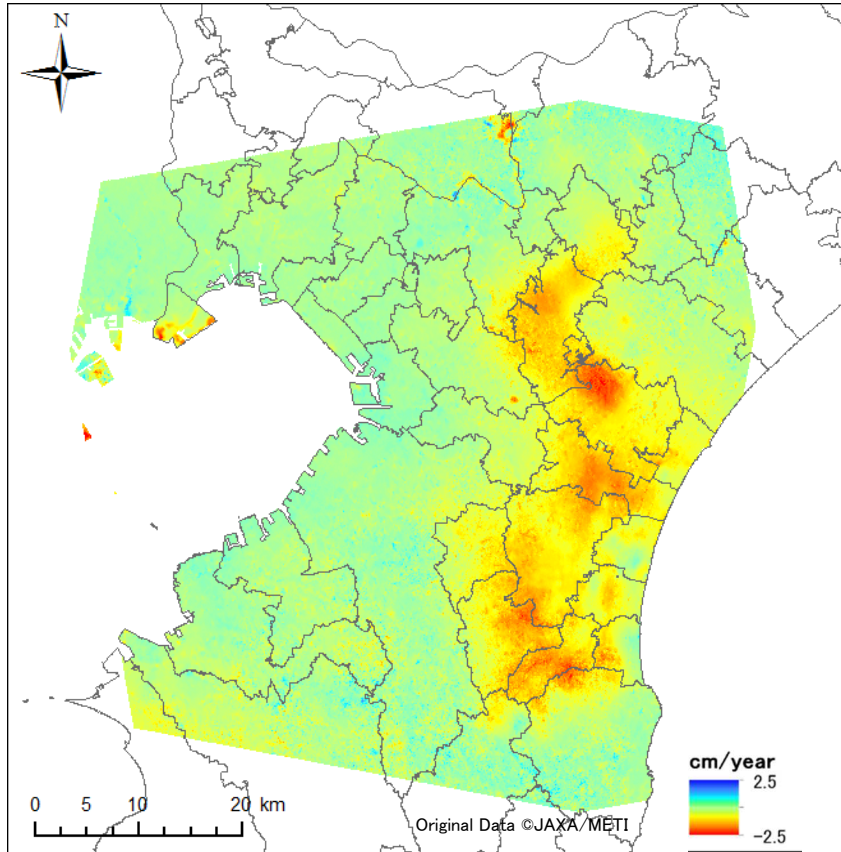
表 2-15 干渉 SAR 解析における地盤高変動量の解析精度の評価方法

項目	評価内容
回帰式の作成	干渉 SAR 解析による地盤高の変動量解析結果と水準測量結果の関係を示す。一次式 $y=ax+b$ で表され、傾き a が 1.00 に近い、かつ切片 b が 0 (ゼロ) に近づくほど精度が高いと評価される。
標準偏差の算出	水準測量結果に対する干渉 SAR 解析結果の総合的な誤差を示す。標準偏差の数値が小さいほど精度が高いと評価される。
最大較差の算出	水準測量観測点と干渉 SAR 解析結果において、最大の誤差を生じた観測点における変動量の差。最大較差が小さいほど精度が高いと評価される。
較差 1cm を超える観測点数	水準測量観測点と干渉 SAR 解析結果において、両者の差が 1cm を超えた観測点の数。較差 1cm を超える観測点数が少ないほど精度が高いと評価される。

a. 水準測量との比較

精度検証による成果の例を、図 2-24 に示す。

全ての干渉 SAR 解析について、水準測量による地盤高の変動量と相関を求め、決定係数、回帰式、標準偏差等を算出する。2.5次元解析まで実施した際の標準偏差は、0.5cm 以下となる結果が得られることを目安とする。



干渉 SAR 解析結果と水準測量の比較散布図

使用データ

4年間の北行軌道の6ペアスタッキング結果と南行軌道の6ペアスタッキング結果（計23シーン）

メッシュサイズ：30m×30m

回帰式： $Y=1.0147 \cdot X+0.1649$

X：水準測量結果 Y：干渉 SAR 解析結果

決定係数 $R^2=0.9078$

標準偏差=0.165[cm]

最大較差=0.76[cm]

較差が1cmを超える点数=0点（0%）

図 2-24 干渉 SAR 解析の評価結果のまとめ例

b. 作業実施機関による照査

特記仕様書のイメージにも示したように、解析手法の採用や精度検証の方法は、作業を実施する機関の責務とし、照査技術者による照査報告書も、精度管理の役割に位置づけられる。

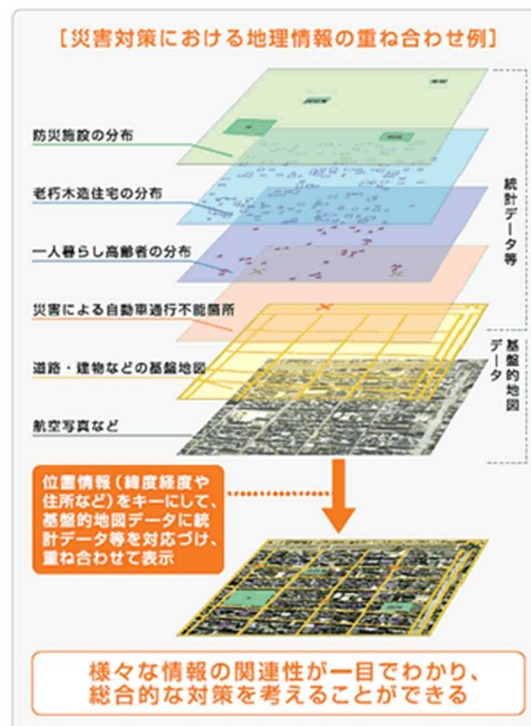
(3) 成果品の保管及びデータ形式

成果品は、通常の業務成果物と同様の方法で保管しておく。成果品のうち、図表類については、表 2-16 に示す形式を標準とすることが望ましい。地盤沈下量分布図については、データフォーマットを GIS ソフト上で利用できる形式とすることで、例えば、地形や地質等と重ね合わせ、地盤沈下の要因を考察する等の活用方法が考えられる。

図 2-25 には、GIS による重ね合わせのイメージを示す。

表 2-16 成果品のフォーマット

成果品	データ形式
地盤沈下面積一覧	エクセル形式
水準点別地盤沈下量一覧表	エクセル形式
地盤沈下量分布図	Shapefile 形式、 Geotiff 形式



出典：国土交通省 国土政策局 「GIS とは」

http://www.mlit.go.jp/kokudoseisaku/gis/guidance/guidance_1.html

図 2-25 GIS を用いた地理情報の重ね合わせ例

2-9 データ蓄積・管理

継続的な地盤沈下監視のために、入手した衛星データは、その諸元の記録と合わせて、散逸しないように、一元的に管理する必要がある。

【解説】

地盤沈下監視は、継続して行なわれる必要がある。また、遡って地盤沈下を把握する、あるいは、地盤沈下以外の用途に衛星データを活用することも考えられる。衛星データ容量は、ALOS-2 では1シーンで約6GBと非常に大きく、大容量の記憶媒体が必要となる。将来に渡って衛星データは蓄積されていくと想定されることから、必要に応じて各部署で再利用*できるように、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。

(※衛星データを購入する際に、エンドユーザーを定める場合がある。詳細は、ALOS-2 製品使用許諾条件書など、購入時の契約条項を確認されたい。)

次年度以降も、同じ衛星データを使って干渉 SAR 解析を行うためには、同一の軌道を同一の観測モードで観測したデータを用いることが必要である。そのため、衛星データの管理に当たっては、表 2-17 に示す諸元情報を台帳形式等で整理しておくことが望ましい。これらの情報は、衛星の検索や注文時に入手できるので、例えば、業務の受託者が諸元情報を整理し、衛星データと一緒に納品することが考えられる。

表 2-17 管理に必要な衛星データの諸元

種類	諸元の例	説明
衛星種別	ALOS-2	観測した衛星
センサ	PALSAR-2	観測したセンサ
運用モード	SM1	観測の運用モード
シーン ID	ALOS2016040700-140909	シーンの ID
観測パス番号	124	観測したパス番号
中心フレーム番号	700	観測したフレーム番号
シーンシフト	+0	観測範囲を南北方向にシフトする。 10%毎に+4~-5 で設定する。
処理レベル	L1.1	衛星データの処理レベル。干渉 SAR 解析を行うためには L1.1 以下である必要がある。
軌道データ種別	確定軌道暦	軌道情報
観測開始日時	2014/9/9 14:30	観測開始の時間 (世界標準時)
観測終了日時	2014/9/9 14:32	観測終了の時間 (世界標準時)
衛星進行方向	アセンディング	アセンディング (北行軌道) とディセンディング (南行軌道) で設定
観測方向	右側観測	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
オフナディア角	29.1	観測角度
偏波	HH	観測の偏波モード。HH、HV、VH、VV、 HH+HV、VH+VV、HH+HV+VH+VV がある)
ビーム No	U2-6	観測ビームの種類

第 3 章

事例編

第3章 事例編

本章では、「だいち2号」(ALOS-2) (以下 ALOS-2 とする。) (2014 年～) や、「だいち」(ALOS) (以下 ALOS とする。) (2006 年～2011 年) および Sentinel-1(2014 年～)によって取得された衛星データを利用して解析を行った、地盤沈下監視の事例を紹介する。

3-1 「だいち」(ALOS)による九十九里平野の地盤沈下監視

ALOS によって取得された衛星データを利用し、九十九里平野を対象とし 2006 年から 2011 年までの 5 年間のデータで干渉 SAR 解析を行い、水準測量結果と比較した事例を示す。解析方法は、1 ペアの干渉 SAR 解析、スタッキング解析、2.5 次元解析である。

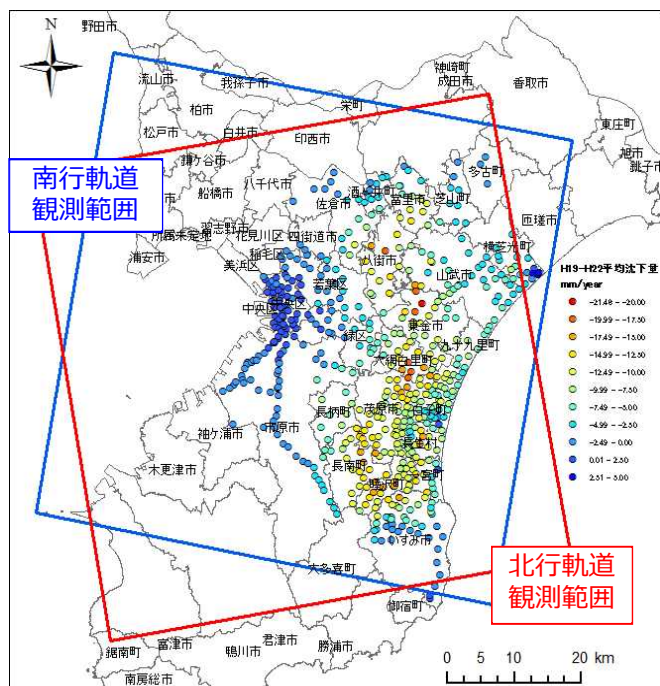


図 3-1 九十九里平野を対象とした ALOS での観測範囲と精度検証に用いた水準点の分布

3-1-1 1 ペアの干渉 SAR 解析

1 ペアの干渉 SAR 解析では、各軌道 12 枚の画像から 6 ペアずつの干渉ペアを用いた。干渉ペア毎の期間を表 3-1 に示す。

表 3-1 ALOS の 1 ペアの干渉 SAR 解析に用いた干渉ペア

①南行軌道

No	Master	Slave	観測期間	基線長 (m)
1	2006/10/11	2009/1/16	828	157
2	2006/11/26	2008/12/1	736	26
3	2007/1/11	2010/6/6	1242	378
4	2007/2/26	2009/10/19	966	224
5	2007/11/29	2010/6/6	920	4
6	2008/5/31	2010/12/7	920	104

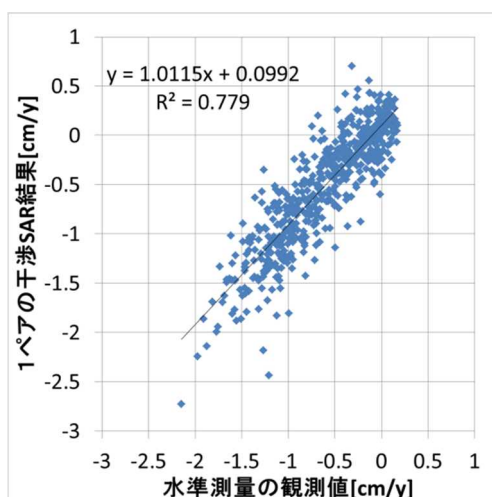
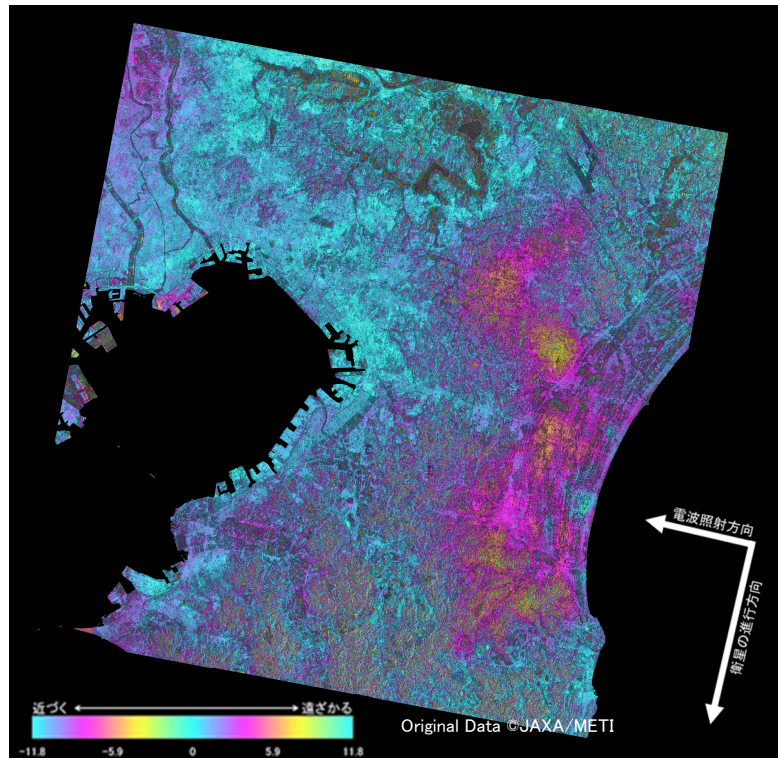
②北行軌道

No	Master	Slave	観測期間	基線長 (m)
1	2006/8/8	2009/7/1	1058	623
2	2006/11/8	2009/11/16	1105	84
3	2006/12/24	2009/2/13	782	324
4	2007/5/11	2010/7/4	1150	889
5	2008/2/11	2011/2/19	1104	1175
6	2008/3/28	2011/1/4	1012	408

ALOS の観測データの選定にあたって以下の点に留意した。

- ・観測年月日：関東平野の水準測量基準日である 1 月 1 日に近いもの
- ・基線長：1,000m 以下、もしくはそれに近い基線長（ALOS の場合、基線長は 1,000m 以下の場合に干渉性が高くなる場合が多い）

水準測量結果を用いて、1 ペアの干渉 SAR 解析結果の精度検証を行った（図 3-2）。また、各組み合わせペアにおける解析結果の精度検証結果を表 3-2、表 3-3 に示す。



1 ペアの干渉 SAR 解析結果と水準測量の比較散布図

使用データ
1 ペア (2 シーン)

Master (旧時期)	2007/01/11
Slave (新时期)	2010/06/06

メッシュサイズ：30m × 30m

回帰式： $Y = 1.0115 * X + 0.0992$

X: 水準測量結果

Y: 1 ペアの干渉 SAR 解析結果

決定係数 $R^2 = 0.779$

標準偏差 = 0.275 [cm]

最大較差 = -1.23 [cm]

較差が 1cm を超える点数 = 2 点 (0.36%)

図 3-2 ALOS による 2007/1/11 と 2010/6/6 の干渉 SAR 解析の精度検証結果

表 3-2 ALOS による南行軌道のペア毎の精度検証結果

	マスター画像	スレーブ画像	観測間隔 (days)	基線長 (m)	決定係数 (R ²)	標準偏差 (cm/yr)	最大較差 (cm/yr)	較差1cm以上 の点数	較差1cm以上 の点の割合	回帰式
1	2006/10/11	2009/1/16	828	157	0.665	0.530	-2.37	34	6.15%	Y=1.3685X+0.2758
2	2006/11/26	2008/12/1	736	26	0.625	0.424	3.74	35	6.33%	Y=1.0694X+0.4816
3	2007/1/11	2010/6/6	1242	378	0.779	0.275	-1.23	2	0.36%	Y=1.0115X+0.0992
4	2007/2/26	2009/10/19	966	224	0.756	0.393	-1.93	7	1.27%	Y=1.2708X+0.2439
5	2007/11/29	2010/6/6	920	4	0.550	0.359	1.29	18	3.25%	Y=0.7092X+0.1694
6	2008/5/31	2010/12/7	920	104	0.511	0.407	2.42	15	2.71%	Y=0.7858X+0.0436

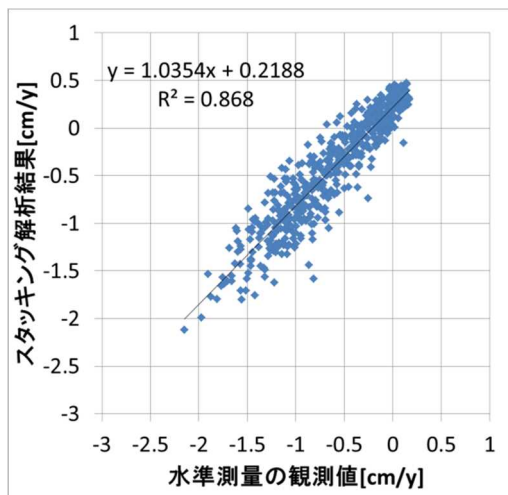
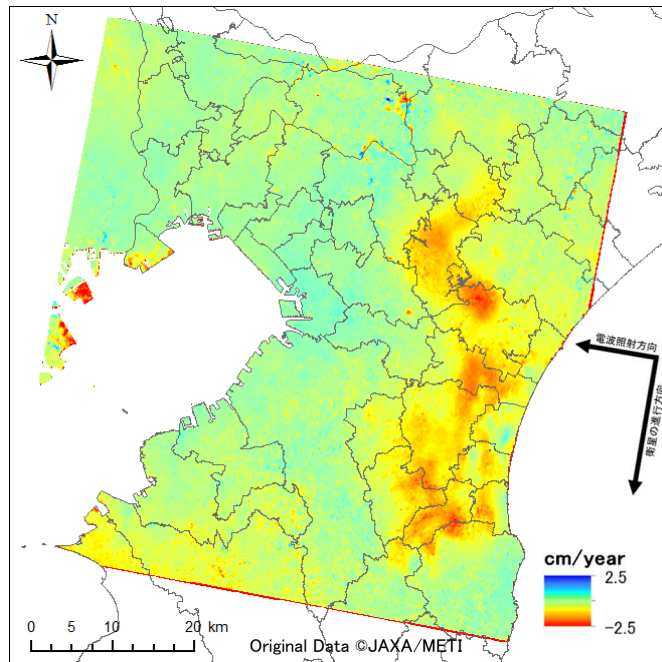
表 3-3 ALOS による北行軌道のペア毎の精度検証結果

	マスター画像	スレーブ画像	観測間隔 (days)	基線長 (m)	決定係数 (R ²)	標準偏差 (cm/yr)	最大較差 (cm/yr)	較差1cm以上 の点数	較差1cm以上 の点の割合	回帰式
1	2006/8/8	2009/7/1	1058	623	0.449	0.744	-3.15	101	18.30%	Y=1.2906X-0.0519
2	2006/11/8	2009/11/16	1104	84	0.426	0.457	1.73	33	5.98%	Y=0.7381X+0.1035
3	2006/12/24	2009/2/13	782	324	0.431	0.587	1.85	49	8.88%	Y=1.0018X+0.0548
4	2007/5/11	2010/7/4	1150	889	0.543	0.526	2.32	30	5.43%	Y=1.1166X+0.2623
5	2008/2/11	2011/2/19	1104	1175	0.658	0.367	-1.56	10	1.81%	Y=0.9981X+0.2816
6	2008/3/28	2011/1/4	1012	408	0.564	0.384	2.03	7	1.27%	Y=0.8362X+0.0317

精度検証結果より、1 ペアの干渉 SAR 解析の標準偏差は 0.275~0.744[cm/year]、最大較差は 1.23~3.74[cm/year]であった。

3-1-2 スタッキング解析

スタッキング解析の結果として、1ペアの干渉 SAR 解析と同様の精度評価を行った事例を図 3-3、表 3-4 に示す。1ペアの干渉 SAR 解析結果と比較して、標準偏差、最大較差、較差が 1cm を超える点数のいずれも良好な結果となっている。スタッキング解析を行うことで、1ペアの干渉 SAR 解析結果よりも、誤差の低減が可能であると言える。



スタッキング解析結果と水準測量の比較散布図

使用データ
南行軌道の全 6 ペア平均値 (11 シーン)

メッシュサイズ : 30m × 30m

回帰式 : $Y = 1.0354 * X + 0.2188$

X : 水準測量結果

Y : スタッキング解析結果

決定係数 $R^2 = 0.8680$

標準偏差 = 0.207 [cm]

最大較差 = -0.77 [cm]

較差が 1cm を超える点数 = 0 点 (0%)

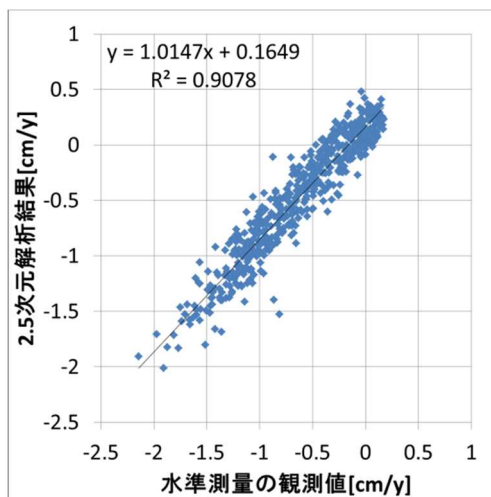
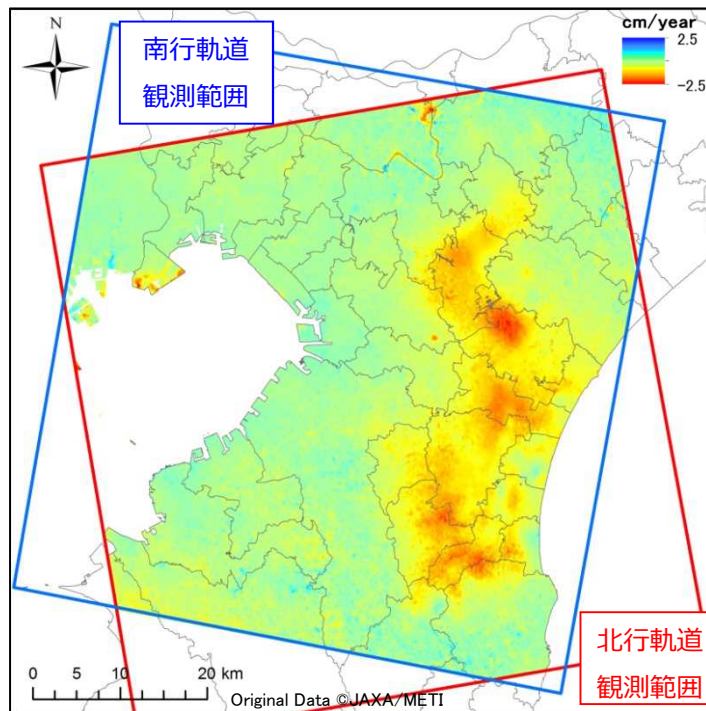
図 3-3 ALOS による南行軌道のスタッキング解析の精度検証結果

表 3-4 軌道毎のスタッキング解析の精度検証結果

軌道	決定係数 (R ²)	標準偏差 (cm/yr)	最大較差 (cm/yr)	較差1cm以上の点数	較差1cm以上の点の割合	回帰式
南行軌道	0.868	0.207	-0.77	0	0.00%	$Y = 1.0354X + 0.2188$
北行軌道	0.741	0.300	1.20	2	0.36%	$Y = 0.9960X + 0.1125$

3-1-3 2.5次元解析

2.5次元解析を実施した結果として、これまでと同様の計測精度評価を行った事例を図3-4に示す。1ペアの干渉SAR解析、スタッキング解析結果と比較して、標準偏差、最大較差のいずれも良好な結果となっている。2.5次元解析を行うことで、1ペアの干渉SAR解析結果、スタッキング解析よりも、さらに計測誤差の低減が可能であることが確認された。



2.5次元解析結果と水準測量の比較散布図

使用データ

北行軌道の6ペア(11シーン)
スタッキング結果と
南行軌道の6ペア(12シーン)
スタッキング結果

メッシュサイズ：30m×30m

回帰式： $Y=1.0147 * X + 0.1649$

X：水準測量結果

Y：2.5次元解析結果

決定係数 $R^2=0.9078$

標準偏差=0.165[cm]

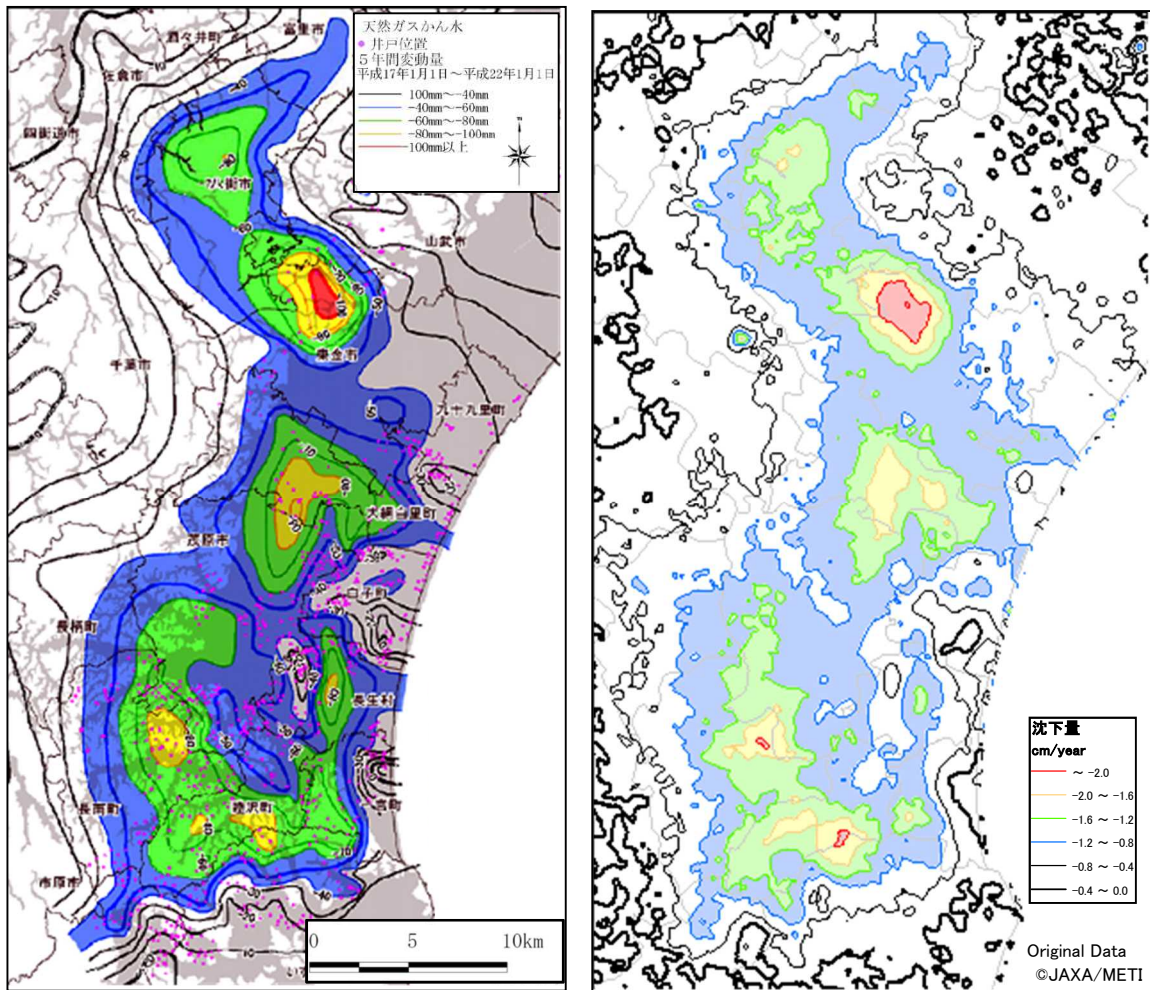
最大較差=0.76[cm]

較差が1cmを超える点数=0点(0%)

図 3-4 ALOSによる2.5次元解析の精度検証結果

3-1-4 地盤沈下量分布図

これまでの解析結果から地盤沈下量分布図を作成し、水準測量による既存の地盤沈下量分布図と比較する（図 3-5）。ここでは、両者の分布の特徴が整合していることが確認できる。



(a) 水準測量による地盤沈下量分布図

(b) 2.5次元解析による地盤沈下量分布図

(a)の出典：地盤沈下の防止に関する協定の概要等について（千葉県環境審議会水環境部会資料より）
https://www.pref.chiba.lg.jp/suiho/shingikai/mizukankyuu/documents/101115_2kyouteigaiyou.pdf

(b)：南行軌道6ペア（11シーン）・北行軌道6ペア（12シーン）を用いた解析結果

図 3-5 九十九里平野における水準測量による地盤沈下量分布図と
 ALOSによる地盤沈下量分布図の比較

また、解析結果をもとに作成した水準点別地盤沈下量一覧表を表 3-5 に示す。

表 3-5 ALOS による水準点別地盤沈下量一覧表

水準点	住所	水準測量 [mm/year]	干渉 SAR 解析 [mm/year]
T0-19	東金市油井	-19.1	-20.1
T0-20	東金市松之郷	-21.5	-19.1
0-2	東金市押堀 136-1	-17.7	-18.3
0-7	四街道市吉岡 477	-18.7	-18.2
MT-10	長生郡睦沢町大上 3552-1	-15.1	-18.0

3-2 「だいち2号」(ALOS-2)による九十九里平野の地盤沈下監視

ALOS-2 によって取得された衛星データを利用し、九十九里平野を対象とし 2014 年から 2016 年までの 2 年間*について干渉 SAR 解析を行い、水準測量結果と比較した事例を示す。解析方法は、1 ペアの干渉 SAR 解析、スタッキング解析、2.5 次元解析である。

(※ALOS-2 を運用開始した時期であり、観測データ数の蓄積が少なかったため、本事例では 2 年間分の衛星データを解析している。)

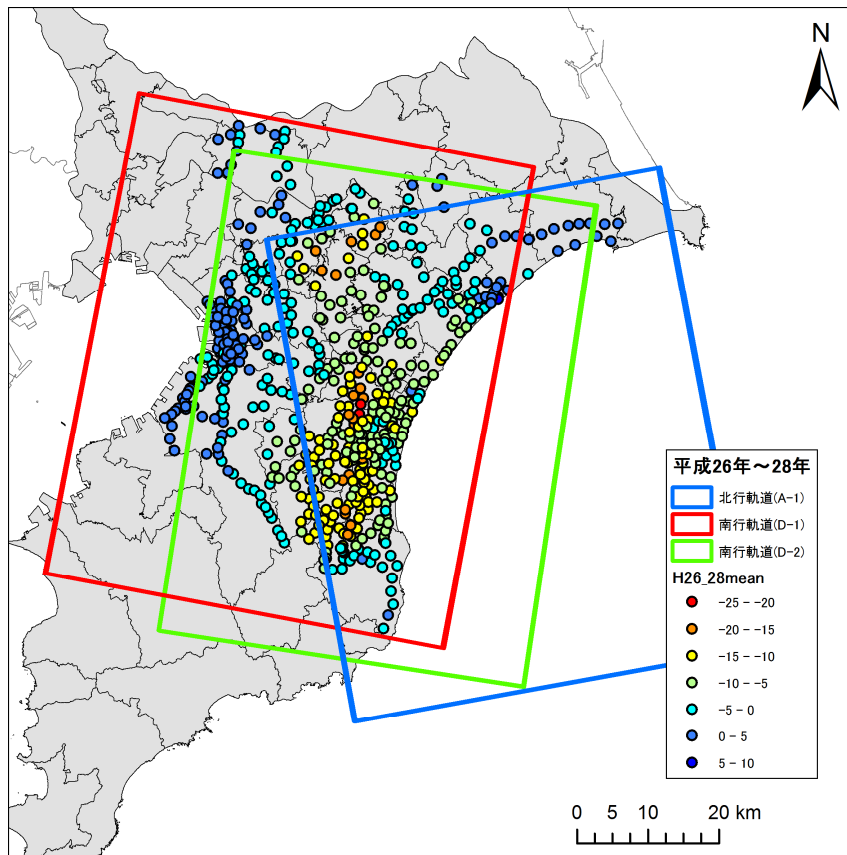


図 3-6 九十九里平野を対象とした ALOS-2 での観測範囲と精度検証に用いた水準点の分布

3-2-1 1ペアの干渉 SAR 解析

1ペアの干渉 SAR 解析では、軌道毎に6ペア程度の干渉ペアを作成して干渉 SAR 解析を行った。干渉ペアはできるだけ長い観測間隔が得られるものを選定した。干渉ペア毎の期間を表 3-6 に示す。

表 3-6 ALOS-2 の 1 ペアの干渉 SAR 解析に用いた干渉ペア

①南行軌道

No	Master	Slave	観測期間	基線長 (m)
1	2015/1/15	2015/9/24	252	-184
2	2015/1/15	2016/3/10	420	-21
3	2015/1/15	2016/6/16	518	-206
4	2015/1/15	2016/8/11	574	-132

②北行軌道

No	Master	Slave	観測期間	基線長 (m)
1	2014/9/9	2015/11/3	420	-207
2	2014/9/9	2016/5/31	630	392
3	2014/11/4	2015/6/2	210	-166
4	2014/11/4	2016/5/31	574	335
5	2015/2/24	2015/10/20	238	-107
6	2015/2/24	2016/5/31	462	380

水準測量結果を用いて、1ペアの干渉 SAR 解析結果の精度検証を行った。精度検証の例を図 3-7 に示す。また、各組み合わせペアにおける解析結果の精度検証結果を表 3-7、表 3-8 に示す。

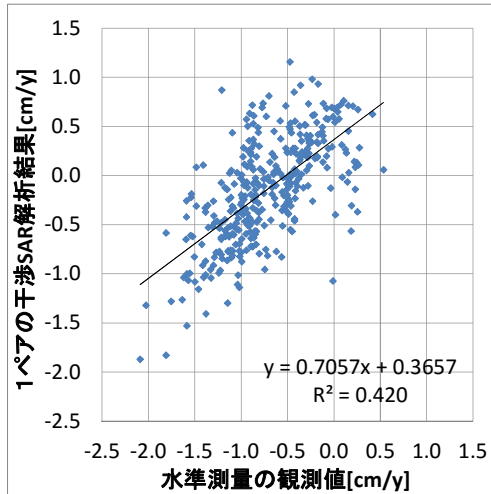
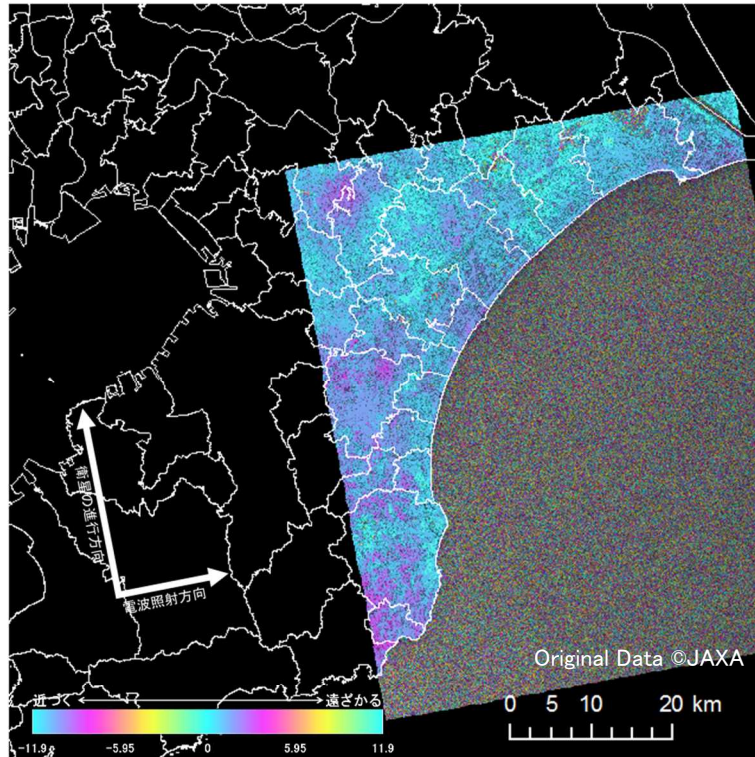
精度検証結果より、1ペアの干渉 SAR 解析の標準偏差は 0.422~1.453 [cm/year]、最大較差は 1.51~4.39[cm/year]であった。

表 3-7 ALOS-2 による南行軌道のペア毎の精度検証結果

	マスター画像	スレーブ画像	観測間隔 (days)	基線長 (m)	決定係数 (R ²)	標準偏差 (cm)	最大較差 (cm)	較差1cm以上の点数	較差1cm以上の点の割合	回帰式
1	2015/1/15	2015/9/24	252	-184	0.144	1.427	2.93	232	40.85%	Y=1.1385X-0.0749
2	2015/1/15	2016/3/10	420	-21	0.636	0.433	1.51	27	4.73%	Y=1.1048X+0.3865
3	2015/1/15	2016/6/16	518	-206	0.019	1.201	2.30	282	50.54%	Y=0.3111X-0.6564
4	2015/1/15	2016/8/11	574	-132	0.100	0.904	2.53	173	31.40%	Y=0.5116X+0.0108

表 3-8 ALOS-2 による北行軌道のペア毎の精度検証結果

	マスター画像	スレーブ画像	観測間隔 (days)	基線長 (m)	決定係数 (R ²)	標準偏差 (cm)	最大較差 (cm)	較差1cm以上の点数	較差1cm以上の点の割合	回帰式
1	2014/9/9	2015/11/3	420	-207	0.420	0.422	2.08	59	16.39%	Y=0.7057X+0.3657
2	2014/9/9	2016/5/31	630	392	0.197	0.701	2.40	59	16.62%	Y=0.7149X+0.0959
3	2014/11/4	2015/6/2	210	-166	0.016	1.453	4.39	207	56.87%	Y=-0.3498X-0.1516
4	2014/11/4	2016/5/31	574	335	0.164	0.704	2.41	51	14.66%	Y=0.6183X-0.0427
5	2015/2/24	2015/10/20	238	-107	0.227	0.751	2.01	82	23.10%	Y=0.8460X+0.2462
6	2015/2/24	2016/5/31	462	380	0.233	0.782	2.25	65	18.52%	Y=0.8884X-0.0758



1 ペア干渉 SAR 解析結果と水準測量の比較散布図

使用データ

北行軌道の No.1 1 ペア (2 シーン)

Master (旧時期)	2014/9/9
Slave (新时期)	2015/11/3

メッシュサイズ : 15m × 15m

回帰式 : $Y = 0.7057 * X + 0.3657$

X : 水準測量結果

Y : 1 ペア干渉 SAR 解析結果

決定係数 $R^2 = 0.420$

標準偏差 = 0.422 [cm]

最大較差 = 2.08 [cm]

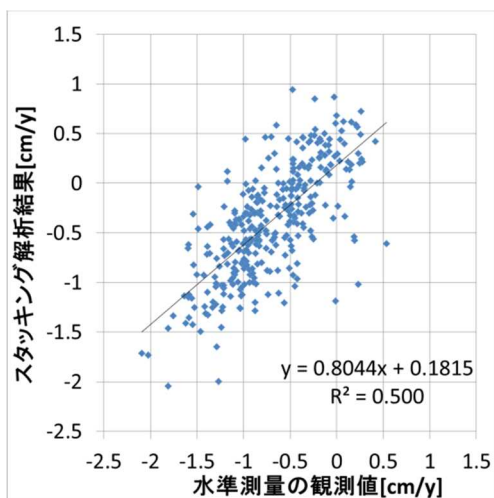
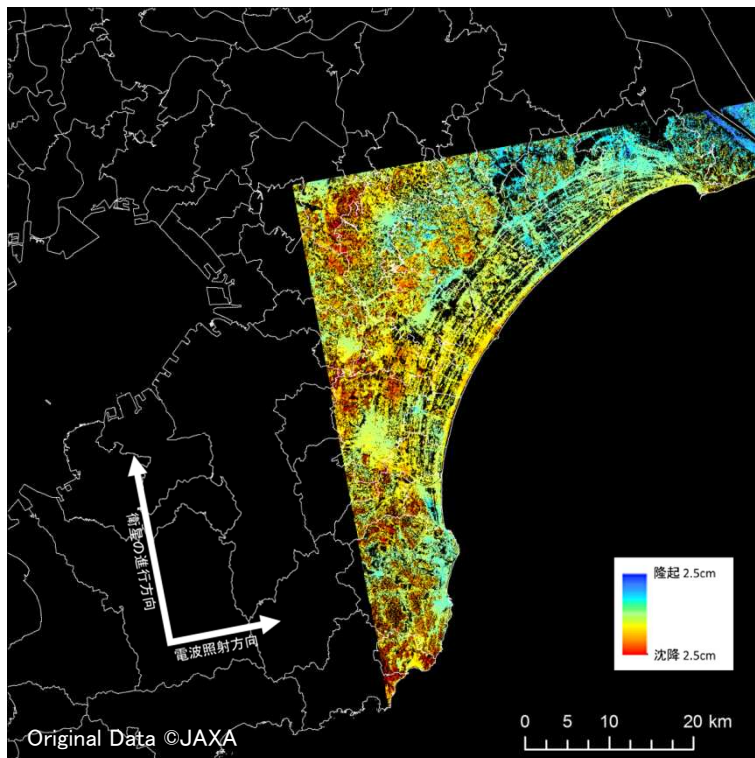
較差が 1cm を超える点数 = 59 点 (16.39%)

図 3-7 ALOS-2 による 2014/9/9 と 2015/11/3 の 1 ペア干渉 SAR 解析の精度検証結果

3-2-2 スタッキング解析

スタッキング解析を実施した結果として、1ペアの干渉 SAR 解析と同様の計測精度評価を行った事例を図 3-8、表 3-9 に示す。良好な干渉ペアを組み合わせることで、1ペアの干渉 SAR 解析結果と比較して、標準偏差、最大較差、較差が 1cm を超える点数のいずれも良好な結果となっている。

スタッキング処理を行うことで、1ペアの干渉 SAR 解析結果よりも、計測誤差の低減が可能であることがわかる。



スタッキング解析結果と水準測量の比較散布図

使用データ
北行軌道の No. 1, No. 5, No. 6
3 ペア (5 シーン)

メッシュサイズ : 15m×15m

回帰式 : $Y = 0.8044 * X + 0.1815$
X: 水準測量結果
Y: スタッキング解析結果

決定係数 $R^2 = 0.500$

標準偏差 = 0.399 [cm]

最大較差 = 1.45 [cm]

較差が 1cm を超える点数 = 14 点 (4.11%)

図 3-8 ALOS-2 の北行軌道のスタッキング解析の精度検証結果

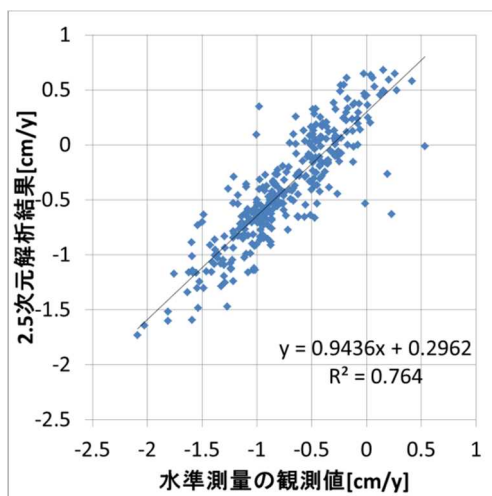
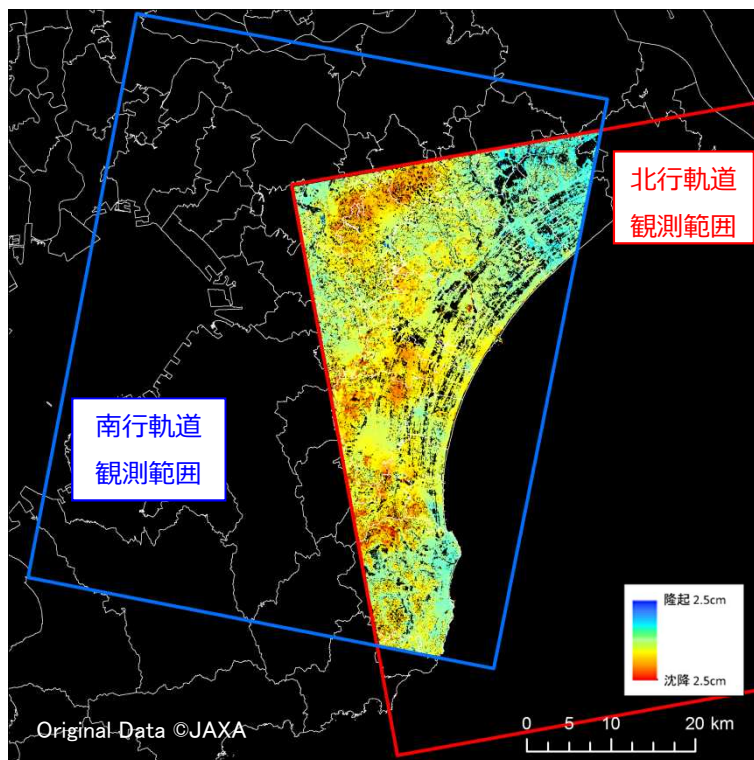
表 3-9 ALOS-2 の組み合わせ毎のスタッキング解析の精度検証結果

軌道	ペアNo	決定係数 (R ²)	標準偏差 (cm)	最大較差 (cm)	較差1cm以上の点数	較差1cm以上の点の割合	回帰式
北行軌道	1, 2, 3, 4, 5, 6	0.236	0.539	2.03	37	11.31%	Y=0.5775X+0.0901
北行軌道	1, 5, 6	0.500	0.399	1.45	14	4.11%	Y=0.8044X+0.1815
北行軌道	1, 2, 4, 5, 6	0.417	0.447	1.69	27	8.26%	Y=0.7617X+0.1334
南行軌道	1, 2	0.303	0.858	1.99	96	17.17%	Y=1.1047X+0.1499
南行軌道	2, 4	0.441	0.491	1.67	37	6.84%	Y=0.8388X+0.1970
南行軌道	1, 3, 4	0.207	0.671	1.38	67	12.59%	Y=0.6486X-0.2453
南行軌道	1, 2, 3, 4	0.337	0.551	1.31	33	6.26%	Y=0.7517X-0.0886

※ペア No は、表 3-7 及び表 3-8 の番号と同じ

3-2-3 2.5次元解析

2.5次元解析を実施した結果として、これまでと同様の計測精度評価を行った事例を図3-9に示す。1ペアの干渉SAR解析、スタッキング解析結果と比較して、標準偏差、最大較差のいずれも良好な結果となっている。2.5次元解析を行うことで、1ペアの干渉SAR解析結果、スタッキング解析よりも、さらに計測誤差の低減が可能であることが確認された。



2.5次元解析結果と水準測量の比較散布図

使用データ

南行軌道：No. 2 1ペア(2シーン)

北行軌道：No. 1, No. 5, No. 6

3ペア(5シーン)の平均

メッシュサイズ：15m×15m

回帰式： $Y = 0.9436 * X + 0.2962$

X：水準測量結果

Y：2.5次元解析結果

決定係数 $R^2 = 0.764$

標準偏差=0.287[cm]

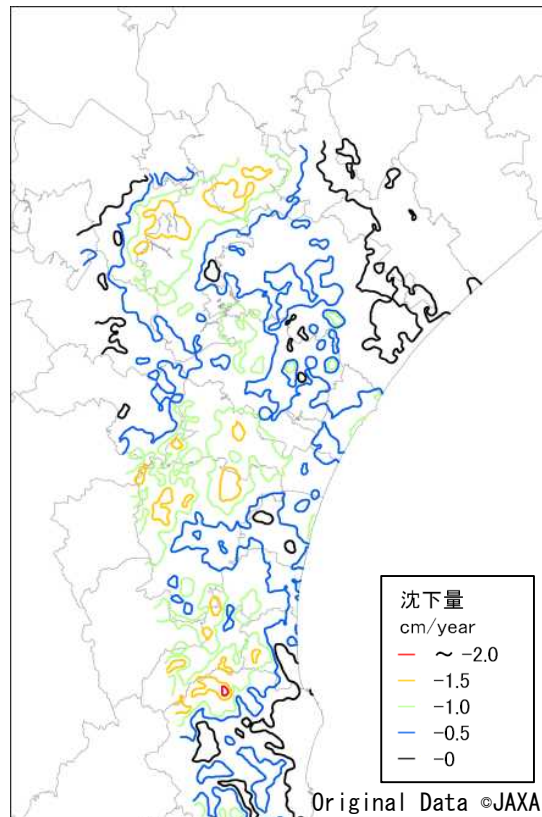
最大較差=1.38[cm]

較差が1cmを超える点数=3点(1.02%)

図3-9 ALOS-2による2.5次元解析の精度検証結果

3-2-4 地盤沈下量分布図

干渉 SAR 解析結果（2.5 次元解析結果）から作成した、2014 年 1 月～2016 年 1 月の 2 年間の累積の地盤沈下量分布図に図 3-10、水準点別地盤沈下量一覧表に表 3-10 示す。



南行軌道 1 ペア（2 シーン）・北行軌道 3 ペア（5 シーン）を用いた解析結果

図 3-10 九十九里平野における ALOS-2 による地盤沈下量分布図

表 3-10 ALOS-2 による水準点別地盤沈下量一覧表

水準点	住所	水準測量 [mm/year]	干渉 SAR 解析 [mm/year]
48	茂原市萱場 435-1	-20.9	-17.3
0-7	大網白里市 南横川 3252	-20.3	-16.4
TM-18	富里市高松 101	-18.1	-16.0
TM-7	富里市御料 4-1	-15.9	-16.0
44	茂原市西野 213	-18.1	-15.2

3-2-5 1 ペアの干渉 SAR 解析による変動画像と水準点の重ね合わせ

地図投影された干渉 SAR 解析による変動画像と水準点の重ね合わせにより、水準点と現在の変動領域の空間的な関係性を把握することが可能である。

図 3-11 では、変動量が大きい水準点が少ない地域や、変動量は小さいが水準点が多い地域が把握出来る。さらには、干渉 SAR 解析は面的に地盤変動を把握出来ることから、既存の水準点が配置されていないような、狭小な領域の変動を抽出することが可能である。

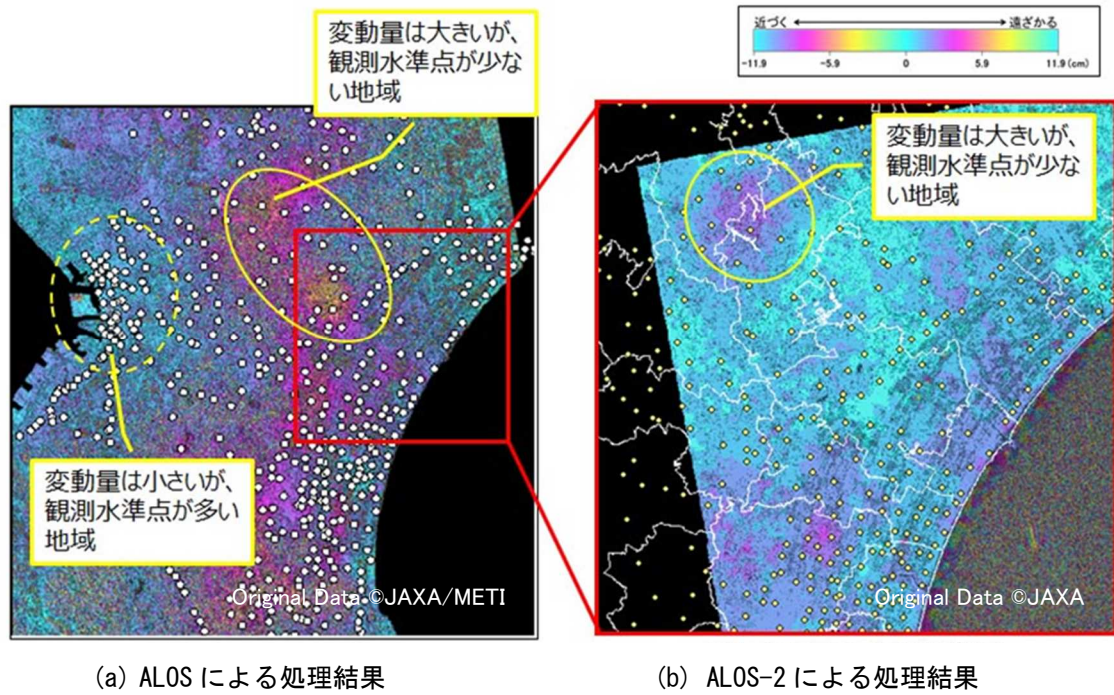


図 3-11 干渉 SAR 解析による変動画像と水準測量観測点の重ね合わせ結果の例

3-3 その他の衛星による九十九里平野の地盤沈下監視

3-3-1 「だいち2号」(ALOS-2)と Sentinel-1 の特徴

本マニュアルでは、日本の衛星であり、地盤沈下解析に適した L バンド SAR である ALOS-2 を用いることを想定している。

しかし、ALOS-2 は 1 機のみでの運用であるため、衛星やセンサにトラブルが発生した場合、データ観測の継続性の面では不安がある。このようなとき、代替手法として、ALOS-2 以外の SAR 衛星の利用ができれば地盤沈下監視の継続が可能である。そこで、ALOS-2 以外の衛星による地盤沈下監視の可能性を検討した。

ここでは、欧州宇宙機関 (ESA) が運用している Sentinel-1 による地盤高の観測への適用性を評価した。ALOS-2 と Sentinel-1 を地盤高の観測に用いた場合の長所・短所を表 3-11 に整理する。

表 3-11 ALOS-2 と Sentinel-1 を地盤高の観測に用いた場合の長所・短所

衛星	長所	短所
ALOS-2	<ul style="list-style-type: none"> 空間分解能が高い (3m×3m)。 植生域の影響が少なく精度が下がりにくい L バンドを用いて観測している。 日本の衛星であり、注目領域の観測を要請することができる。 	<ul style="list-style-type: none"> 干渉 SAR 解析を行えるデータセットの観測頻度が少ない。 データは有料配布。 1 機のみでの運用のためトラブルが発生するとデータの取得が行えない。
Sentinel-1	<ul style="list-style-type: none"> データが無料配布されている。 干渉 SAR 解析が行えるデータセットの観測頻度が高い。 同型機を 2 機運用しているため継続性が高い。 	<ul style="list-style-type: none"> 空間分解能が低い (5m×20m)。 大気中の水蒸気の影響が強く表れる。 Sentinel-1 が観測に用いている C バンドは L バンドより植生域や水田の精度が低い。 観測要求が行えない。

これらの特性を踏まえて、以下に Sentinel-1 での解析を試みた。解析方法は 1 ペアの干渉 SAR 解析とスタッキング解析である。

解析には南行軌道で観測した全 31 シーンを用いた。観測日のリストを表 3-12 に示す。また、Sentinel-1 の 1 シーンでの観測範囲と、検討での解析範囲を図 3-12 に示す。

表 3-12 Sentinel-1 の観測日 (南行軌道)

観測回数	観測日				
31	2014/11/25	2014/12/7	2014/12/19	2014/12/31	2015/1/12
	2015/1/24	2015/2/5	2015/2/17	2015/3/1	2015/3/13
	2015/3/25	2015/4/18	2015/5/12	2015/6/5	2015/6/29
	2015/7/23	2015/8/16	2015/9/9	2015/10/3	2015/10/27
	2015/11/20	2015/12/14	2016/1/31	2016/3/19	2016/4/12
	2016/5/6	2016/5/30	2016/7/17	2016/8/10	2016/9/3
	2016/9/27	-	-	-	-

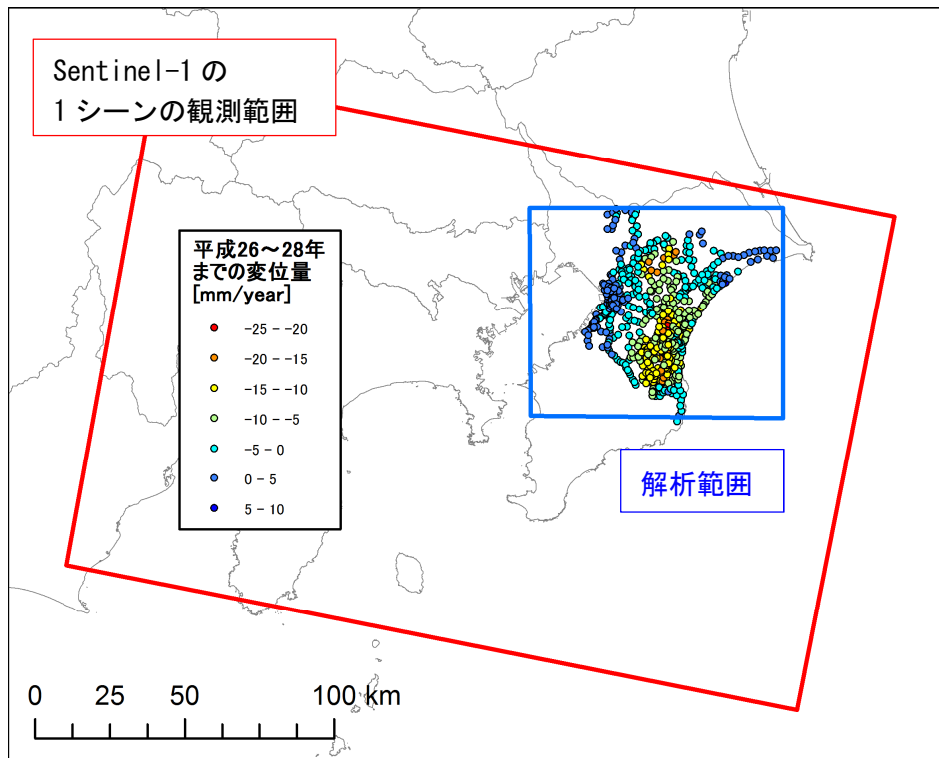


図 3-12 九十九里平野の Sentinel-1 での観測範囲、解析範囲
および精度検証に用いた水準点の分布

3-3-2 1 ペアの干渉 SAR 解析

1 ペアの干渉 SAR 解析では、31 時期の画像から、7 ペアの干渉ペアを解析し、精度を比較した。干渉ペア毎の期間を表 3-13 に示す。

表 3-13 Sentinel-1 の 1 ペアの干渉 SAR 解析に用いた干渉ペア

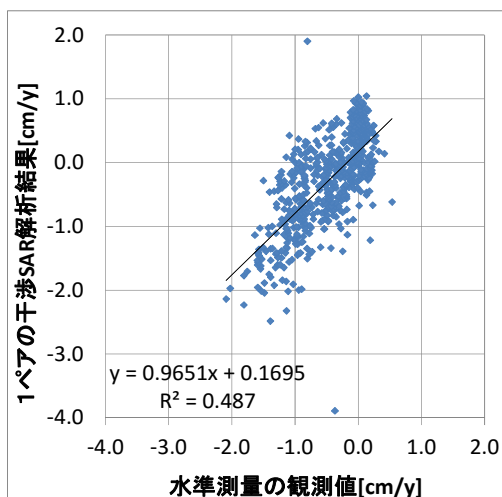
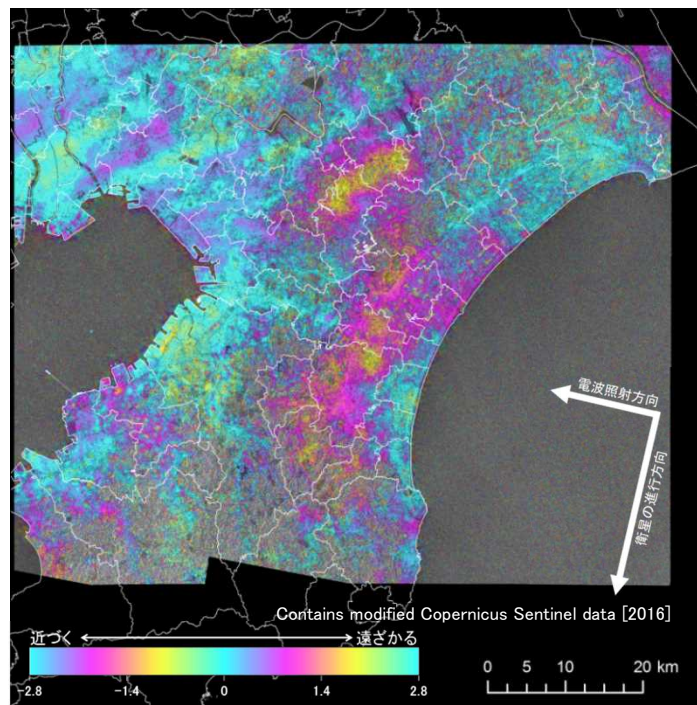
No	Master	Slave	観測期間	基線長 (m)
1	2014/12/31	2015/12/14	348	60.4
2	2014/12/31	2016/1/31	396	-48.6
3	2015/1/12	2015/12/14	336	97.1
4	2015/1/12	2016/1/31	384	-12.1
5	2014/11/25	2016/5/30	552	-26.5
6	2015/5/12	2016/9/27	504	120.2
7	2015/7/23	2016/8/10	384	-103.7

水準測量結果を用いて、1 ペアの干渉 SAR 解析結果の精度検証の例を図 3-13 に示す。また、全解析結果の精度検証結果を表 3-14 に示す。

Sentinel-1 の用いているマイクロ波の波長は、だいち 2 号の L バンド (23.8cm) より短い C バンド (5.6cm) である。そのため、大気中の水蒸気の影響や地表面の変化に弱く、1 ペアの干渉 SAR 解析で観測期間が長期間になると精度が低下することが多い。

表 3-14 Sentinel-1 によるペア毎の精度検証結果

	マスター画像	スレーブ画像	観測間隔 (days)	基線長 (m)	決定係数 (R ²)	標準偏差 (cm)	最大較差 (cm)	較差1cm以上 の点数	較差1cm以上 の点の割合	回帰式
1	2014/12/31	2015/12/14	348	80.4	0.487	0.513	3.521	33	5.69%	Y=0.9651X+0.1695
2	2014/12/31	2016/1/31	396	-48.8	0.464	0.537	2.225	92	15.67%	Y=0.9613X+0.4199
3	2015/1/12	2015/12/14	336	87.1	0.080	0.755	6.446	93	15.84%	Y=0.3972X-0.0035
4	2015/1/12	2016/1/31	384	-12.1	0.277	0.539	3.880	46	8.03%	Y=0.5934X+0.1707
5	2014/11/25	2016/5/30	552	-26.5	0.483	0.459	4.020	15	2.94%	Y=0.8458X+0.1923
6	2015/5/12	2016/9/27	504	120.2	0.224	1.004	4.490	241	48.98%	Y=1.0652X-0.8975
7	2015/7/23	2016/8/10	384	-103.7	0.342	0.596	3.230	38	7.27%	Y=0.8297X-0.2088



1 ペアの干渉 SAR 解析結果と水準測量の比較散布図

使用データ

南行軌道の No.1 1 ペア (2 シーン)

Master (旧時期)	2014/12/31
Slave (新时期)	2015/12/14

メッシュサイズ : 30m × 30m

回帰式 : $Y = 0.9651 \cdot X + 0.1695$

X: 水準測量結果

Y: 1 ペアの干渉 SAR 解析結果

決定係数 $R^2=0.487$

標準偏差=0.513 [cm]

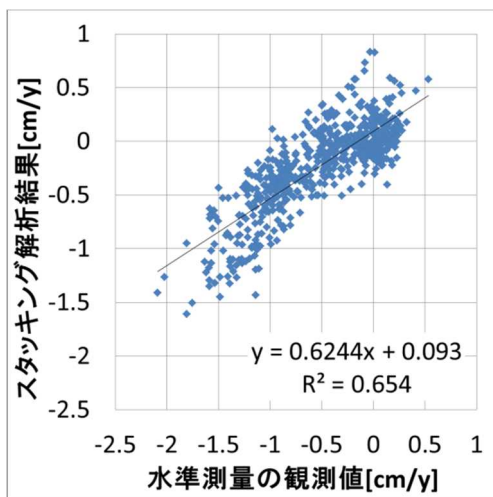
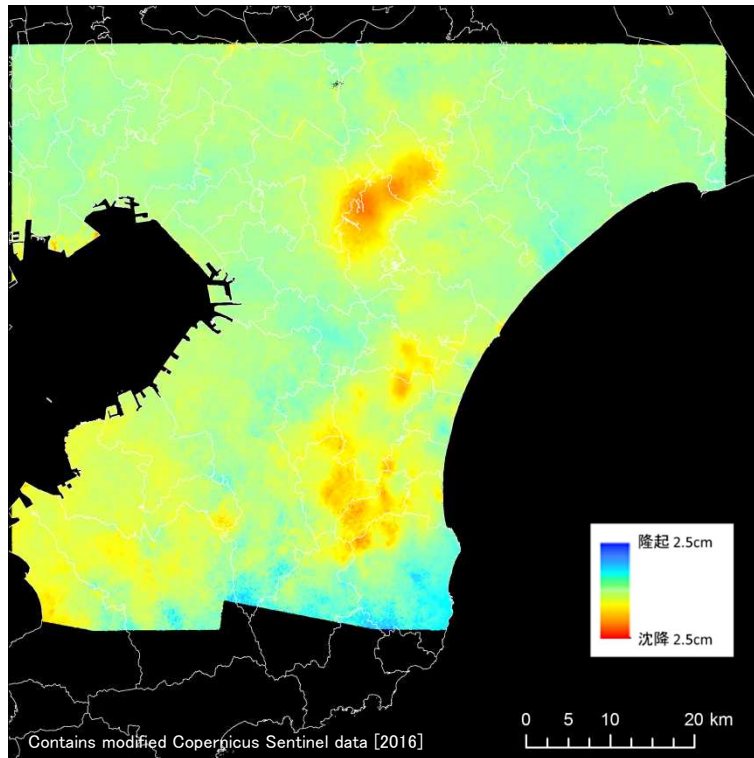
最大較差=3.521 [cm]

較差が 1cm を超える点数=33 点 (5.69%)

図 3-13 Sentinel-1 による 2014/12/31 と 2015/12/14 の 1 ペアの干渉 SAR 解析の精度検証結果

3-3-3 スタッキング解析

Sentinel-1 による観測データ 31 シーンを用いてスタッキング解析を行った結果を図 3-14 に示す。



スタッキング解析結果と水準測量の比較散布図

使用データ
南行軌道の 31 シーンによる SBAS 法

メッシュサイズ : 30m × 30m

回帰式 : $Y = 0.6244 * X + 0.093$

X: 水準測量結果

Y: スタッキング解析結果

決定係数 $R^2 = 0.654$

標準偏差 = 0.307 [cm]

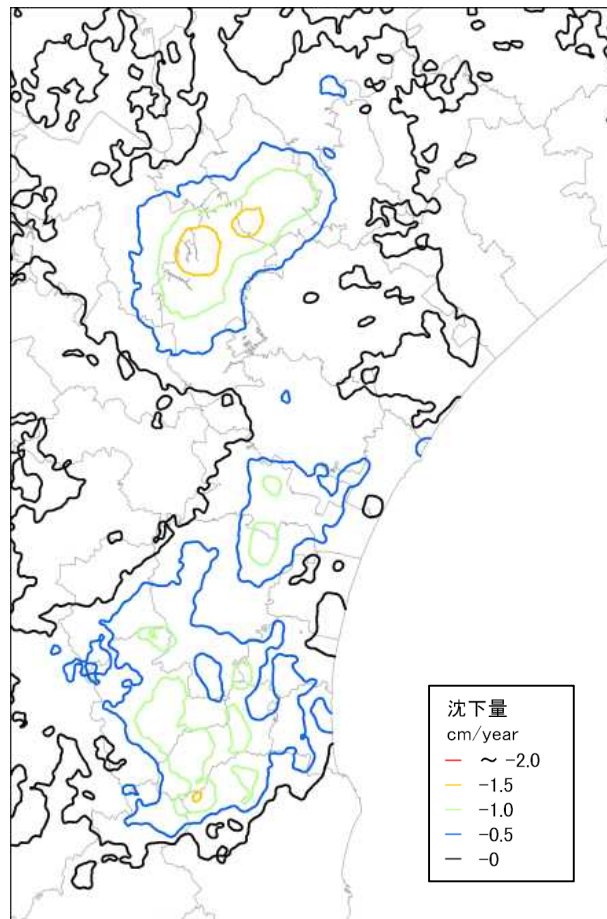
最大較差 = 1.09 [cm]

較差が 1cm を超える点数 = 2 点 (0.33%)

図 3-14 Sentinel-1 の南行軌道のスタッキング解析の精度検証結果

3-3-4 地盤沈下量分布図

干渉 SAR 解析結果（スタッキング解析結果）から作成した、2014 年 1 月～2016 年 1 月の 2 年間の累積の地盤沈下量分布図を図 3-15 に、水準点別地盤沈下量一覧表を表 3-15 に示す。



Contains modified Copernicus Sentinel data [2016]
南行軌道 31 シーンを用いた解析結果

図 3-15 九十九里平野における Sentinel-1 による地盤沈下量分布図

表 3-15 Sentinel-1 による水準点別地盤沈下量一覧表

水準点	住所	水準測量 [mm/year]	干渉 SAR 解析 [mm/year]
TM-18	富里市高松 101	-18.1	-16.1
YM-4	八街市八街ろ 59-10	-17.6	-15.1
TM-9	富里市十倉 1087	-14.9	-14.5
CN-19	長生郡長南町 須田 22-1	-11.4	-14.3
48	茂原市萱場 435-1	-20.9	-14.1

3-4 その他の衛星データ活用のメリット

衛星データの活用による地盤高の観測によって、対象地域を面的、且つ、容易に管理することが可能であり、地盤沈下対策に取り組む地方公共団体の経費及び作業の削減に寄与することが、もっとも大きなメリットの一つである。さらに、衛星データを用いて、局所的な地盤変動を、過去に遡って把握することも、メリットの一つである。例えば、防災や土木インフラ管理においては、これらの情報で、異変の見逃し防止や点検の効率化などにも寄与することが可能である。このように、衛星データを活用することで、地盤高の観測以外にも、新たな活用策が期待できる。

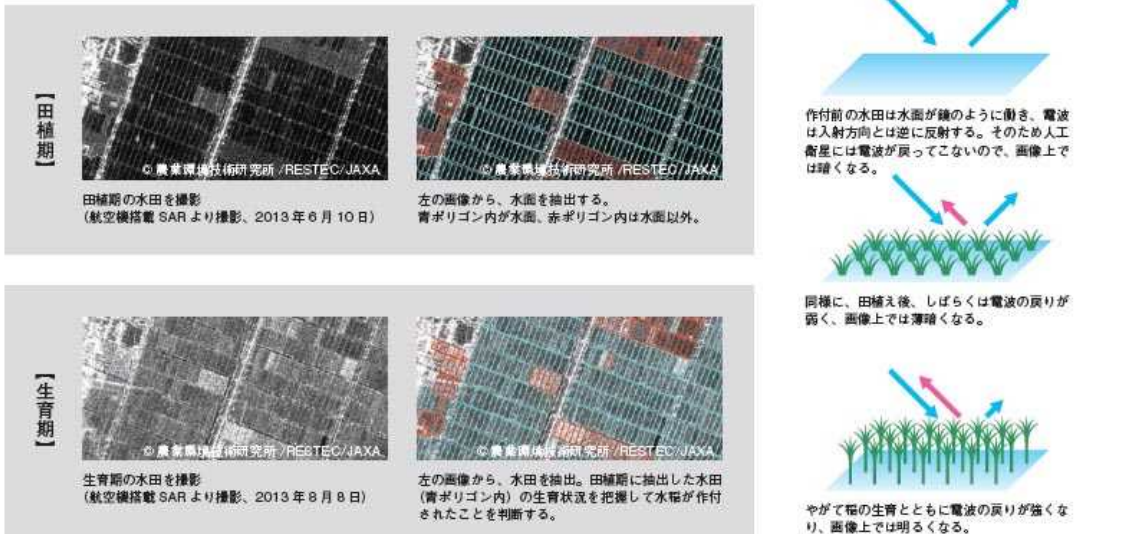
表 3-16 には、分野別の衛星データの利用例を示す。また、図 3-16 には農業分野での利用事例、図 3-17 及び図 3-18 には防災分野での事例を示す。

表 3-16 分野別の衛星データの利用例

分野	利用例
資源探査分野	岩石・鉱物の分類による鉱物資源探査、海表面の油徴（オイルスリック）による海底油田の探査、堆積盆における石油資源探査等
農業分野	農地の作付分類、作物の収量や品質の推定、収穫適期の決定等
森林分野	樹種分類、森林成長モニタリング、森林の枯損検知、森林管理、森林伐採モニタリング（早期警戒システム）等
環境分野	大気汚染・水質汚染・土壌汚染等の環境汚染分布等
土地利用分野	水域・森林・草地・裸地・市街地・工場等の土地利用（被覆）分類等
海洋分野	海水面温度、海色、船舶モニタリング（自動船舶識別）等
防災分野	地震防災、火山防災、地殻変動・変位計測、標高モデルデータ作成、各種災害対応等

出典：衛星データをビジネスに利用したグッドプラクティス事例集（内閣府）に加筆

» 水稻作付面積を高精度に把握する



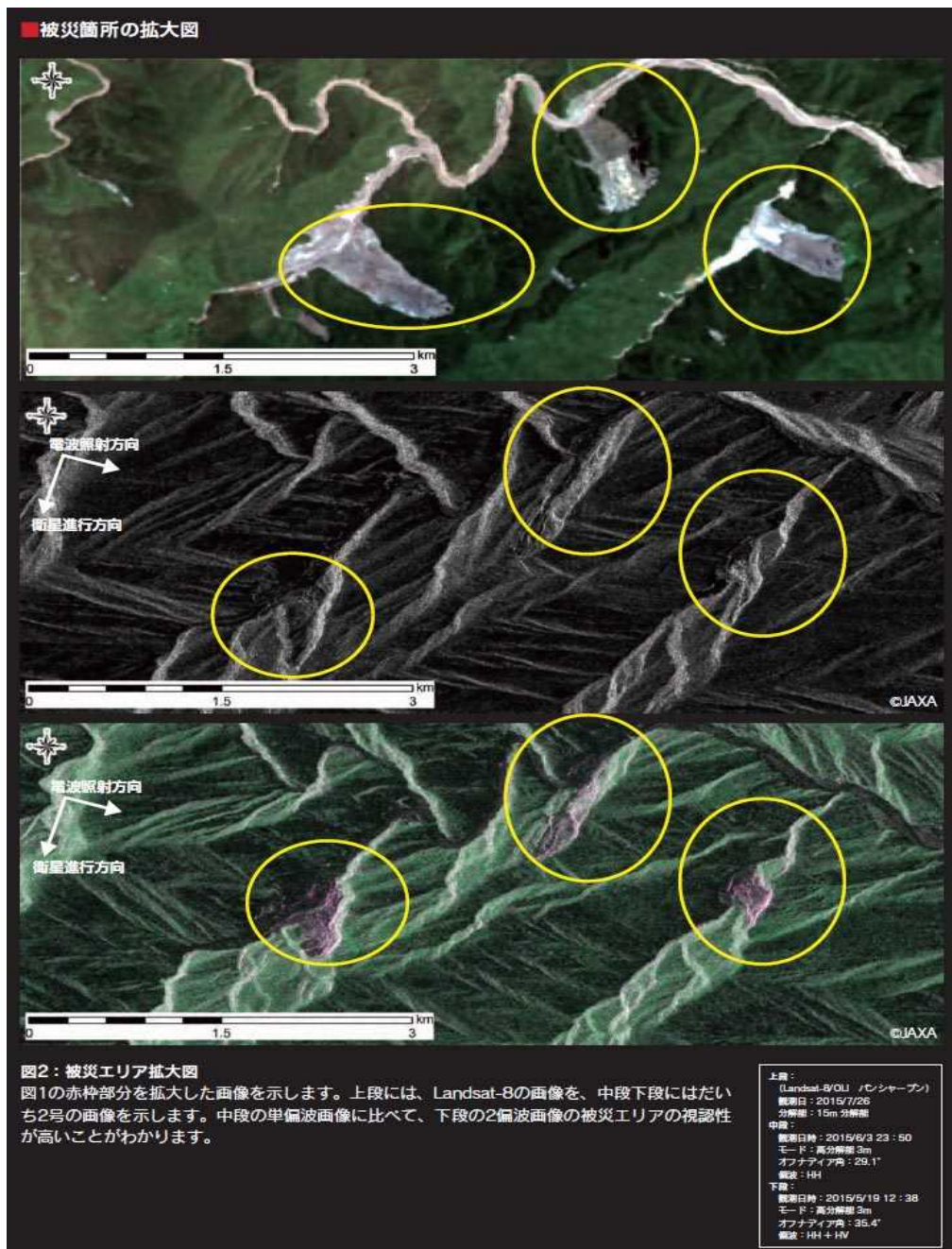
水稻は作付する際に水を張るため最初は暗く映ります。稲が育ち水面が隠れるにつれて徐々に明るく見えるようになっていきます。つまり、観測時期の異なる画像を比較する事で、明るさが変化した土地が水稻の作付域だと判断できます。

また、水稻以外にもトウモロコシやサトウキビといった比較的大きな作物もLバンドSARによって見分けられる可能性があり、応用利用が検討されています。

通常、水田や畑では休耕や転作がしばしば行われるため、作付状況の把握が必要となります。SAR で広範囲にわたる作付状況を一度に把握できれば、より効率的な管理ができるようになります。(出典資料を引用)

出典：ALOS-2 SOLUTION BOOK (JAXA)

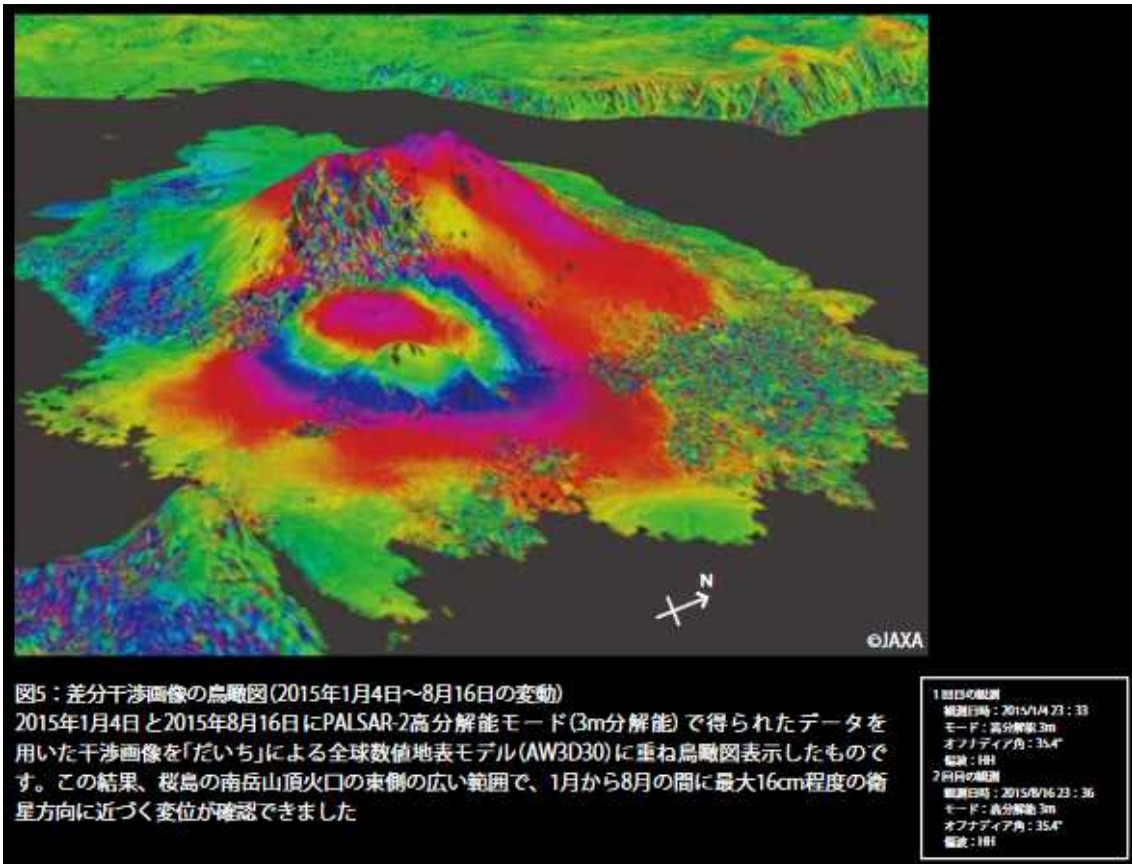
図 3-16 農業分野での利用事例 (SAR を用いた水稻作付地の把握)



河道閉塞箇所の緊急調査、対策を実施する上では、迅速に発見する手法が必要であり、ヘリ調査のできない夜間・荒天時においても地表状況を観測可能な合成開口レーダー画像を利用できる可能性があります。また、だいち2号の機能向上により高分解能2偏波画像を用いることで、湛水池や河道閉塞箇所の大規模崩落箇所を抽出でき、判読時の視認性が向上することが期待できます。（出典資料を引用）

出典：宇宙からの災害監視 陸域観測技術衛星2号「だいち2号」災害事例集 2014～2015 (JAXA)

図 3-17 防災分野での利用事例①（平成 23 年台風第 12 号の痕跡：紀伊半島大水害）



桜島では、2015年8月15日に島内を震源とする地震が多発し、また、設置している傾斜計および伸縮計では山体膨張を示す急激な地殻変動が観測されました。JAXAは、火山噴火予知連絡会に設置された「衛星解析グループ(火山WG)」(事務局: 気象庁)からの要請に基づき、だいち2号による緊急観測を実施し、観測データを提供しました。火山WGメンバーの気象庁気象研究所および国土地理院による解析結果は「火山噴火予知連絡会拡大幹事会」において報告され、地殻変動の変動源の推定に活用されました。(出典資料を引用)

出典：宇宙からの災害監視 陸域観測技術衛星2号「だいち2号」災害事例集 2014～2015 (JAXA)

図 3-18 防災分野での利用事例②(平成 27 年 8 月の桜島の火山活動に伴う地殻変動)

本マニュアルの図に使用している行政界データは、国土政策局が、国土地理院長の承認を得て、同院発行の数値地図（国土基本情報）電子国土基本図（地図情報）を複製したもの（承認番号 平 27 情複、第 757 号）を使用した。

巻末資料

- (1) リモートセンシング技術と「だいち2号」(ALOS-2)
- (2) 用語解説
- (3) 参考資料

(1) リモートセンシング技術と「だいち2号」(ALOS-2)

1. リモートセンシングとは

リモートセンシングとは、ある対象に直接、触れずに、電磁波や音などを介して調査する技術である。人工衛星によって、宇宙から地球上を調査する技術を、衛星リモートセンシングという。

【解説】

リモートセンシングとは、調査したい対象物に触れずに、材質や形状を調べる技術のことである。調べる方法には、人間の目で見える可視光のほかにも、赤外線やマイクロ波などの光・電磁波が計測できるセンサが使われる。また、そのセンサを搭載する移動体（プラットフォーム）には、航空機やヘリコプター、人工衛星などが用いられる。

このうち、宇宙から人工衛星に搭載したセンサを用いて地球上を観測し、地表面の地物の形状や変化を解析することを衛星リモートセンシングという。人工衛星を用いることで、広域を同時に観測することができるといった特長がある。

2. リモートセンシングに係わる装置

リモートセンシングには、電磁波などを受ける検知器（センサ）と、センサを搭載する移動体（プラットフォーム）よりなる機器を用いる。衛星リモートセンシングでは、電磁波を送受信できるセンサを搭載した人工衛星（プラットフォーム）を衛星軌道で周回させ、データを取得する。

【解説】

(1) センサ

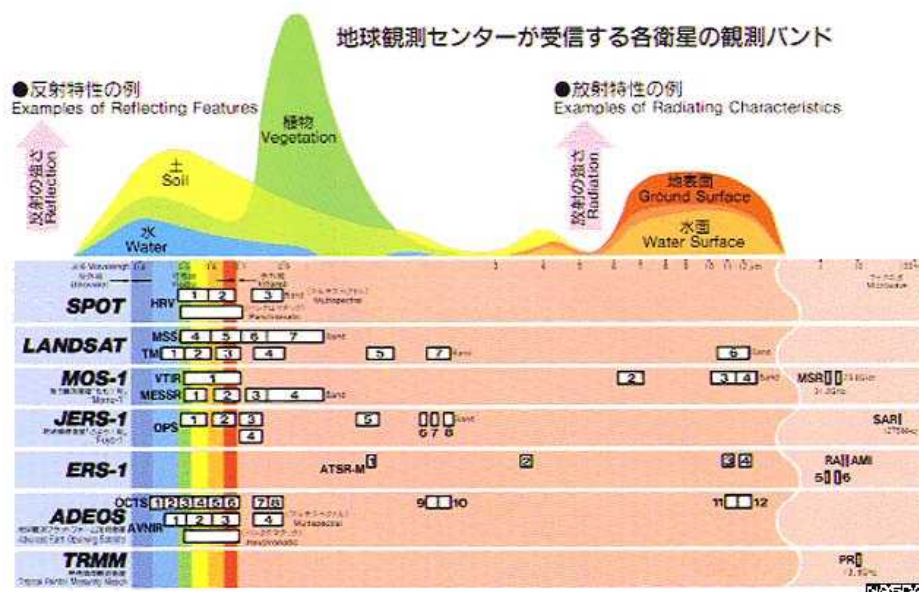
植物や土などの物体はその組成や形状によって、様々な反射特性を持っている。例えば、植物は人の目で見ることのできる可視光よりも少し長い波長の近赤外で強い反射を示す。また、マイクロ波は物体の凹凸に反射して強度が変化する。

リモートセンシングでは、このような物体によって異なる特性を取得するため、様々な光・電磁波を検知できる検知器（センサ）が用いられる。主な物体の反射特性や放射特性と、センサが受信する電磁波の波長域を下図に示す。

センサは、受動型センサと能動型センサに大別できる。

受動型センサは、物体に太陽の光が当たり、反射してきた光・電磁波や、物体自身が放射する電磁波を受信するセンサである。

また、能動型センサは、センサから対象に向けて電磁波を発射し、その反射波を計測するセンサである。合成開口レーダは、波長の長い電磁波であるマイクロ波を用いた能動型センサに区分される。



出典：(国研)宇宙航空研究開発機構（JAXA）ホームページ

http://www.eorc.jaxa.jp/hatoyama/satellite/observation/image/remote_g.jpg

図 1 物質の主な反射特性と各衛星センサが受信する波長帯

(2) プラットフォーム

センサを搭載する移動体をプラットフォームという。リモートセンシングに用いられる主なプラットフォームを下表に示す。

飛行高度が低いほど、地表を観測する分解能が高くなるが、一度に観測する範囲が狭くなる。それに対して、飛行高度が高いと広域を観測することができ、データを取得する頻度を多くすることができる。

表 1 リモートセンシングに用いられるプラットフォームの例

プラットフォーム		飛行高度		利用例
人工衛星	円軌道衛星	外気圏	500km～1000km	LANDSAT(米)
				Terra Aqua(米)
スペースシャトル		熱圏 成層圏	240km～350km	SIR(米)
気球・飛行船				100m～100km
航空機	高高度ジェット機	対流圏	10,000～12,000m	
	低中高度飛行機			300～8,000m
ヘリコプタ		対流圏	100～2,000m	
ラジコン機				500m以下
UAV			150m以下	固定翼(グライダー) マルチコプター等

出典：衛星データ処理マニュアル 国土技術政策総合研究所
<http://www.nilim.go.jp/lab/ddg/naiyo/manual.pdf>

3. 合成開口レーダ (SAR) とは

合成開口レーダ (Synthetic Aperture Radar: SAR) はマイクロ波で地表を観測するセンサである。昼夜、雲の有無に係わらず、観測することができる。

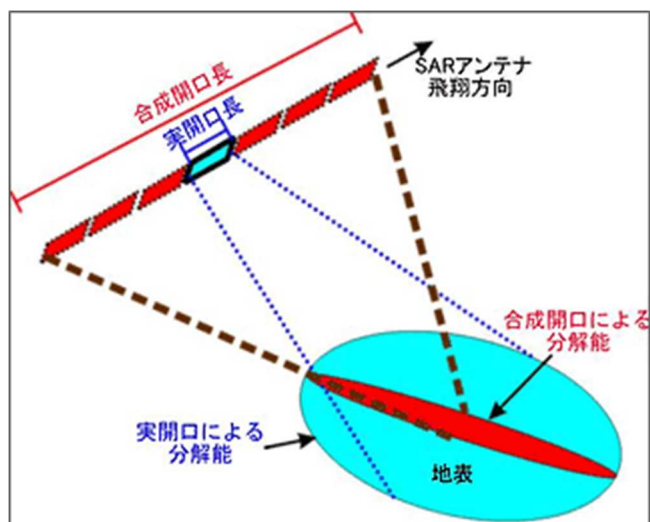
【解説】

SAR は、センサからマイクロ波を地表に放射し、その反射 (後方散乱) から地表を観測するセンサである。

観測のイメージを下図に示す。一般に、レーダで地表を観測するとき、画像の分解能はアンテナが大きいほど向上する。しかし、宇宙空間に巨大なアンテナを打ち上げることは困難である。そこで、衛星が軌道を移動しながらマイクロ波を地表に照射し、同じ地点を複数回観測することにより、見かけ上、大きなアンテナを持っていることと等しい画像を得ることができる。この技術を合成開口処理といい、合成開口処理を行っているレーダを合成開口レーダという。

マイクロ波は雲や雨を透過するため、曇っていても地表を観測することができる。また、センサからマイクロ波を発射し、その後方散乱を観測しているため、太陽の出ていない夜間でも観測ができる。

また、SAR は後方散乱と共に、衛星から地表までの距離を示す「位相」を取得できる。この位相の情報を用い、干渉 SAR 解析を行うことで、地表面の変位を計測することができる。



出典：国土地理院干渉 SAR 成果ホームページ

<http://vldb.gsi.go.jp/sokuchi/sar/mechanism/mechanism01.html>

図 2 合成開口レーダの観測原理イメージ図

4. だいち 2号 (ALOS-2)

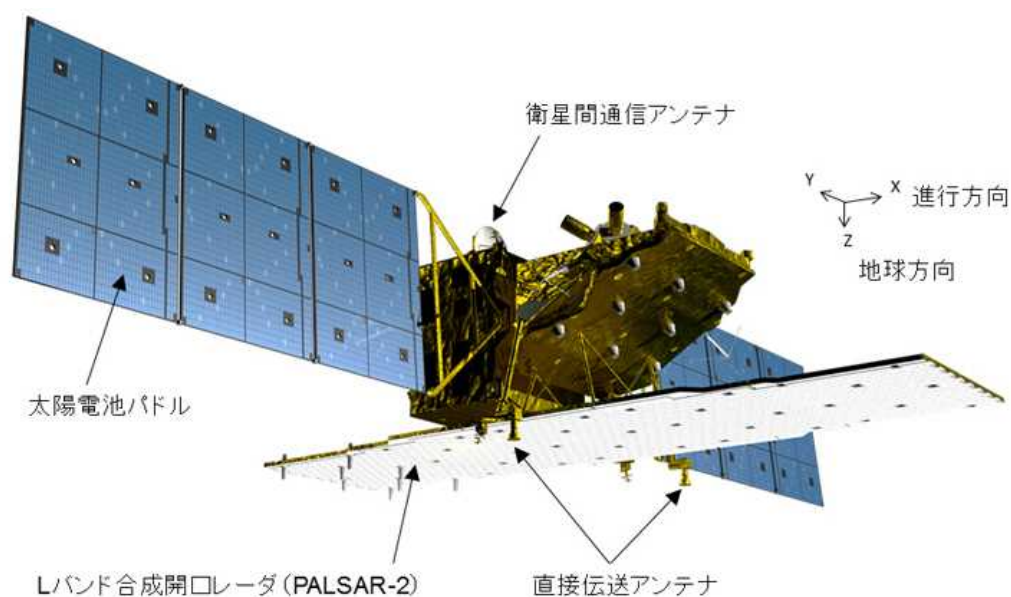
だいち 2号 (ALOS-2) は国立研究開発法人宇宙航空研究開発機構 (JAXA) が 2014 年に打ち上げた衛星で、合成開口レーダを搭載している。日本国内については、基本的な観測として年間 4 回程度、干渉 SAR 解析に使えるデータを取得している。

【解説】

(1) だいち 2号 (ALOS-2) の概要

だいち 2号 (The Advanced Land Observing Satellite-2 : ALOS-2) は日本の国立研究開発法人宇宙航空研究開発機構 (JAXA) が平成 26 年 5 月 24 日に打ち上げた SAR 衛星である。平成 18 年から平成 23 年まで運用された「だいち」(ALOS) の後継機に当たる。だいち 2号の主要諸元を以下に示す。

だいち 2号は PALSAR-2 という合成開口レーダを搭載している。PALSAR-2 はだいちに搭載されていた合成開口レーダである PALSAR の後継センサであり、分解能などの性能が向上している。



出典 : ALOS-2 プロジェクト/プロジェクトの概要

<http://www.eorc.jaxa.jp/ALOS-2/about/joverview.htm>

図 3 だいち 2号 (ALOS-2) の概要

表 2 ALOS-2 の主な諸元

項目		諸元
運用軌道 (衛星の 地球周回 に係わる 諸元)	種類	太陽同期準回帰軌道
	高度	約 628km (赤道上)
	軌道傾斜角 (軌道と赤道の角度)	97.9°
	降交点通過地方時 (赤道を北から南に通 過する時刻)	12:00±15 分
	回帰日数 元の位置に戻るまでの 日数	14 日
寸法		3.5m×3.2m×4.5m (打上時) 16.5m×3.7m×9.9m (軌道上)
質量		約 2100kg (打上時)
設計寿命		5 年 (目標 7 年)
搭載センサ		L バンド合成開口レーダ PALSAR-2
打上げ	日時	平成 26 年 (2014 年) 5 月 24 日
	ロケット	H-IIA ロケット 24 号機

出典 : JAXA ALOS-2 プロジェクト/ALOS-2 の概要

<http://www.eorc.jaxa.jp/ALOS-2/about/joverview.htm> を加工

(2) だいち2号(ALOS-2)の基本観測計画

基本観測計画とは、衛星による観測条件や観測頻度などを定めたものであり、衛星を運用する上での基本となるものである。ALOS-2の基本観測計画はWebで公開されている。
(http://www.eorc.jaxa.jp/ALOS-2/obs/jpal2_obs_guide.htm)

干渉SAR解析では、同じ観測条件及び観測軌道のデータを2つ(これを1ペアと言う。)を使うため、データ取得にあたっては観測条件及び観測軌道に留意することが必要である(2-5 衛星データの選び方 参照)。だいち2号の基本観測計画では、干渉SAR解析用の観測は「定期的差分干渉用」ベースマップとして、年間4回行われる計画である(表3、表4参照 地方公共団体で実施する地盤沈下観測には「高分解能[3m]モード」を利用する)。

通常は、基本観測計画に基づき観測されているが、計画にない観測が行われる場合もある。また、地震や火山などの災害等が発生した場合は、基本観測計画より優先して災害発生地域の緊急観測が実施され、基本観測が行われないこともある。

表3 「定期的差分干渉用」ベースマップの観測条件

観測条件項目	高分解能[3m]モード	広域観測[350km]モード
衛星飛行方向	降交(南行)および昇交(北行)	
ビーム方向	右	
ビーム範囲(入射角)	U2(30.2° ~ 44.4°)	W2(25.7° ~ 49°)
偏波	単偏波(HH)	2偏波(HH+HV)
周波数帯域	84MHz	28MHz

干渉の頻度を優先。観測は毎年同じ時期に実施。

出典：ALOS-2基本観測シナリオ(第2版)・初版・2016年11月18日JAXA/ALOS-2プロジェクト

表4 定期的な干渉SAR解析用データの観測頻度

軌道方向	高分解能3m		広域観測350km	
	最大観測回数(年)**	干渉SARの間隔	最大観測回数(年)**	干渉SARの間隔
降交・右	4	3ヶ月~3.5ヶ月	6	1.5ヶ月~4.5ヶ月
昇交・右	4	2.5ヶ月~3.5ヶ月	6	1.5ヶ月~4.5ヶ月

** 地殻変動以外のユーザとの競合が無い場合

出典：ALOS-2基本観測シナリオ(第2版)・初版・2016年11月18日JAXA/ALOS-2プロジェクト

5. その他の SAR 衛星

だいち 2号(ALOS-2)以外にも、世界各国で SAR 衛星が運用されている。したがって、ALOS-2 の観測された衛星データの無い期間について地盤沈下を把握する場合は、他の SAR 衛星のデータを活用することができる。

【解説】

SAR 衛星は世界各国で運用されている。日本で入手できる SAR 衛星を表 5 に示す。また、今後打ち上げ予定の SAR 衛星を表 6 に示す。

だいちやだいち 2号の観測していない時期の地盤沈下を把握する場合は、他の SAR データを活用することができる。その際、衛星によって分解能や観測バンド、データの観測頻度が異なることに注意が必要である。

表 5 主な SAR 衛星の一覧

名称	国	運用機関	運用期間	分解能 (m)	観測幅 (km)	観測バンド	回帰日数
TerraSAR-X TanDEM-X	ドイツ	DLR	2007 -	3×3	30	X	11 日 2 機体制
COSMO-SkyMed	イタリア	ASI (e-GEOS)	2007 -	3×3	40	X	16 日 4 機体制
ERS-2	欧州	ESA	1995 -2011	30×30	80.4	C	35 日
RADARSAT 1	カナダ	MDA	1995-2013	9×9	45	C	24 日
ENVISAT1/ASAR	欧州	ESA	2002-2012	28×28	100	C	35 日
RADARSAT 2	カナダ	MDA	2007 -	3×3	20	C	24 日
Sentinel-1	欧州	ESA	2014 -	5×20	80 -250	C	12 日 2 機体制
JERS-1/SAR	日本	JAXA/METI	1992-1998	18×18	75	L	44 日
ALOS/PALSAR	日本	JAXA/METI	2006-2011	10×10	70	L	46 日
ALOS-2/PALSAR-2	日本	JAXA	2014 -	3×3	50	L	14 日

表 6 主な今後打ち上げ予定の SAR 衛星

名称	国	運用機関	打ち上げ予定	分解能 (m)	観測幅 (km)	観測バンド	回帰日数
CSG (COSMO-SkyMed Second Generation)	イタリア	ASI/MiD	2018 予定	1×1 以下 ~35×35	10~320	X	16 日 2 機体制
TerraSAR-NG	ドイツ	DLR/Airbus Defence and Space	2025 予定	0.25×0.25 ~3×3	5~40	X	—
RCM (RADARSAT Constellation Mission)	カナダ	CSA	2018 予定	1×1~	20~500	C	12 日 3 機体制
Sentinel-1C,1D	欧州	ESA	2021 予定	5.0×20	80~250	C	12 日 2 機体制
先進レーダ衛星	日本	JAXA	2020 予定	3×3	200	L	14 日
Tandem-L	ドイツ	DLR	2022 予定	1×1 ~3×3	350	L	16 日 2 機体制

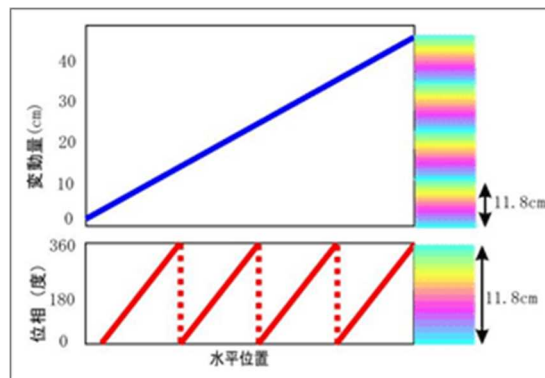
(2) 用語解説

【アンラッピング処理】

干渉 SAR 解析では 2 時期の変位量が位相差として $0 \sim 2\pi$ のサイクルで得られる。このサイクルが連続的に見られることから縞模様を呈し「干渉縞」と呼ばれる画像となるが、このままでは変化傾向の分析はできても変位量の評価ができない。

干渉縞を物理量に変換するためには、不動地点あるいは移動量が既知となる基準点を設定し、そこから干渉縞のサイクルをつなぎ合わせて累加し、周回数×波長によって物理量に換算する必要がある。

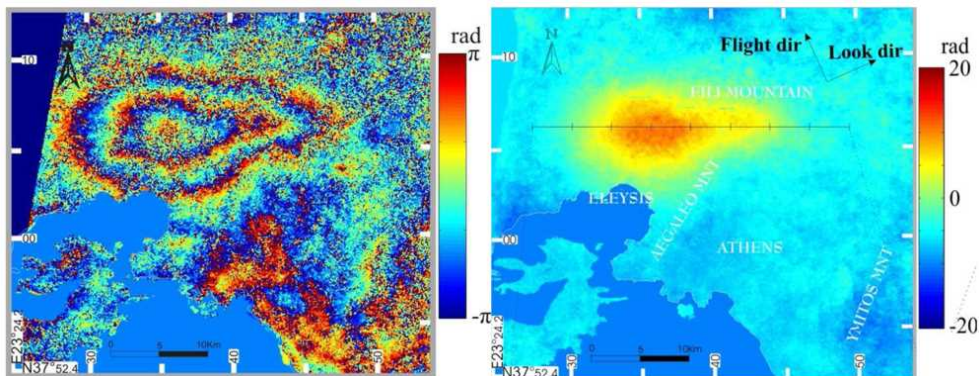
この干渉縞サイクルをつなぎ合わせ、累加する処理を「アンラッピング処理」という。(位相情報として包まれた (= wrapped) 情報を展開する (= un-wrapping) 処理)



出典：国土地理院 干渉 SAR のしくみ 中級編 1

<http://vldb.gsi.go.jp/sokuchi/sar/mechanism/mechanism04.html>

図 4 L バンド干渉 SAR で得られる位相変化(下: アンラッピング前, 上: アンラッピング処理後)



A Methodology to Validate the InSAR Derived Displacement Field of the September 7th, 1999 Athens Earthquake Using Terrestrial Surveying. Improvement of the Assessed Deformation Field by Interferometric Stacking (<http://www.mdpi.com/1424-8220/8/7/4119>)

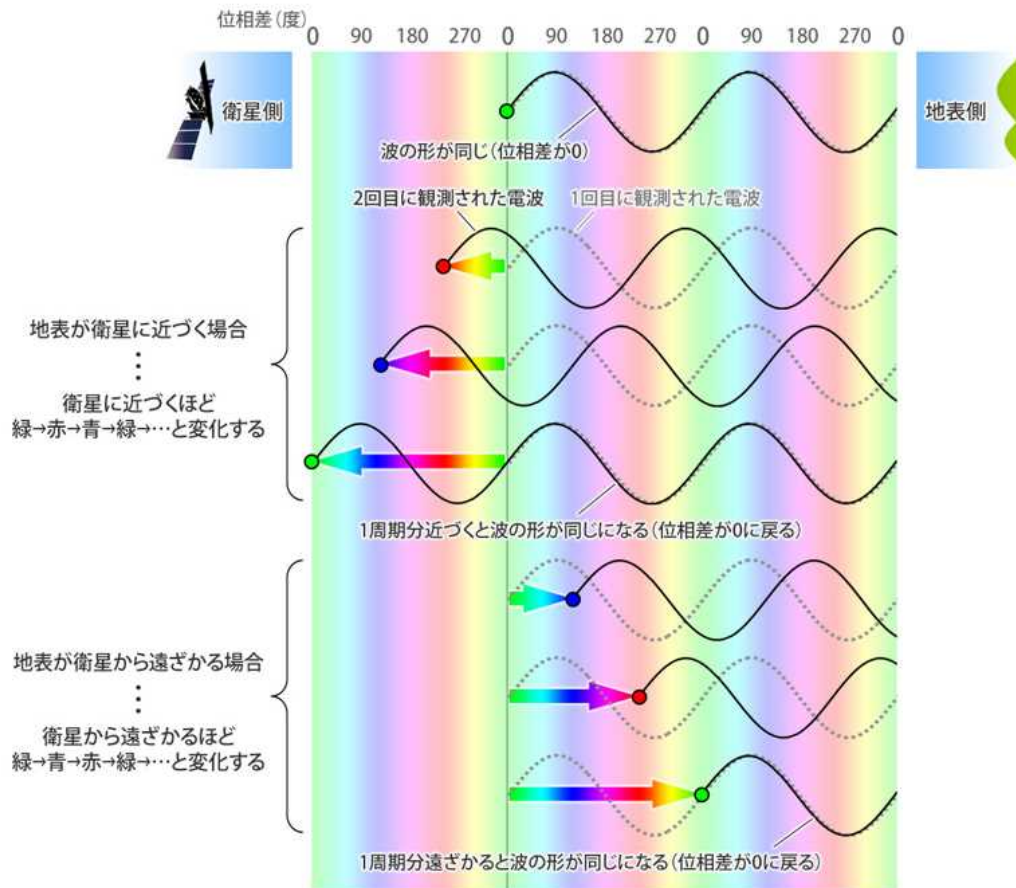
図 5 干渉縞画像 (左) とアンラップ処理後画像 (右)

【位相および位相差】

SARは、電波を地表に放射しその反射波からデータを得る観測センサである。電波は下図に示すように、山→谷→山を一定の周期で繰り返す波の性質を持ち、山→谷→山で示される1周期内での位置を位相と言い、 $0\sim 360^\circ$ の角度で表現する。

また、2回の観測で地表面の変位が生じている場合、全く同じ位置のセンサから発射された電磁波が地表面で反射して返ってきた波を観測した場合、観測される波の位置の差が生じることを位相差と言う。この位相差を計測することで地盤変動量を把握する。

干渉SAR解析による解析結果は、一般的に、変動を虹色の縞で示した干渉画像で表される。この差を干渉画像では、地表が衛星に近づく場合には緑→赤→青→緑、衛星から遠ざかる場合には、緑→青→赤→緑の色で表す。地表の変位が大きく、電波の往復経路が波長(山と山の間隔)と同じだけ変化してしまった場合、波形が再び一致する(位相差が $360^\circ=0^\circ$ に戻る)ため、干渉画像では再び緑色に戻る(下図)。このため、干渉画像では変位が大きくなるにつれて同じ色の順番が繰り返し現れることとなる。



出典：JAXA ALOS-2 プロジェクト/PALSAR-2

http://www.eorc.jaxa.jp/ALOS-2/img_up/jpal2_howto_insar.htm

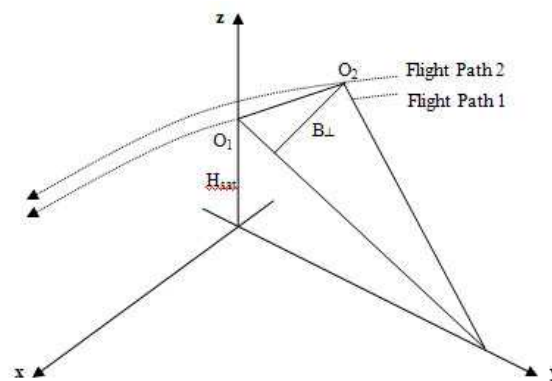
図6 干渉画像で見られる色と地表の変位の関係を示した模式図

【干渉性(コヒーレンス)】

同一地点の一定領域内における2期間の後方散乱強度・電波位相の類似性を示し、一般に0~1の実数で示される。数値が高いほど強度・位相の相関が高く、2期間で電波反射特性に関する変動が少ないことを示す。

【垂直基線長】

垂直基線長は干渉 SAR 解析に用いる干渉ペアを観測した2期間の衛星軌道の距離を示す指標である。下図において O_1 と O_2 が衛星位置であるが、同一地点への視線方向(LOS; Line-Of-Sight)を引いたとき地球に近い衛星側から他方の LOS に垂線を下ろした距離が垂直基線長(Perpendicular Baseline ; 下図 B_{\perp})である。差分干渉 SAR など、視線方向の変位量を求める上で、垂直基線長は短いほど干渉性(コヒーレンス)は増大し、解析の安定性が増す。



©Alaska Satellite Facility <https://www.asf.alaska.edu/sar-data/insar/download-data/>

図 7 基線長の概念

ALOS または ALOS-2 で干渉解析を行う上で、一般的に基線長 1000m (1500m) 以下が良いとされている。対象物のコヒーレンスが高いなど他の解析条件が良ければ、より大きな基線長でも干渉解析は可能である。

反対に、植生に覆われている、急峻な地形であるなど悪条件が重なると基線長が短くても十分なコヒーレンスが得られずに干渉解析ができない場合もある。

【スレーブ画像(slave)】

干渉処理の過程において用いる2枚の画像のうち、基準でない方の画像データのこと。

【大気遅延】

マイクロ波をはじめとする電磁波は真空では光速で進行するが、空気や水蒸気などの

物質中では伝播速度が変化する。高高度の人工衛星から発射された電波は、大気中を通過する際に光速より遅い速度で伝わるため、電波は真空の場合より遅れて地表に伝わる。この遅れを大気伝播誤差と呼ぶ。大気中の水蒸気が多いほどマイクロ波は遅れるため、天候が悪い日のデータでは、精度が低下する可能性がある。

正確な変位の決定には、この誤差を補正することが必要である。

【電離層】

電離層とは太陽光線によって高温加熱された大気が、電子と陽子に乖離した状態（プラズマ状態）になった層のこと。日中は地表から高さ 200km～300km を中心に発生する。

電離層は、太陽や下層大気の活動等の影響を受けて常に変動しており、しばしば短波通信や、衛星測位の高度利用、衛星通信等に障害を与える。電離層を突き抜ける電波は、伝播経路上の電子の総数と電波の周波数に依存して、速度が遅くなる。これを電離層遅延という。

【標準偏差】

データや確率変数の散らばり具合（ばらつき）を表す数値のひとつであり、日本工業規格では、分散の正の平方根と定義している。

【フィルタ処理】

干渉 SAR 解析では、位相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処理を行う。これをフィルタ処理という。干渉 SAR 解析では、変動画像に対して 2次元の窓領域（例えば 5 画素×5 画素）を設定して画像の値を平滑化するなどの処理を行うが、強いフィルタ処理を適用すると狭い範囲の変位が見えにくくなることもある。

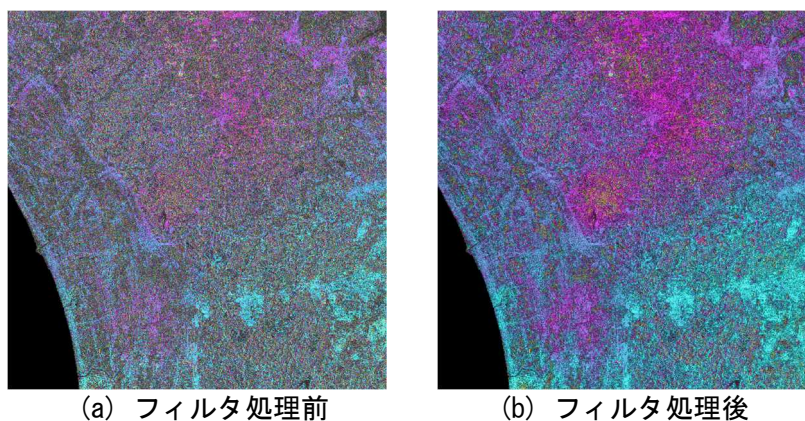
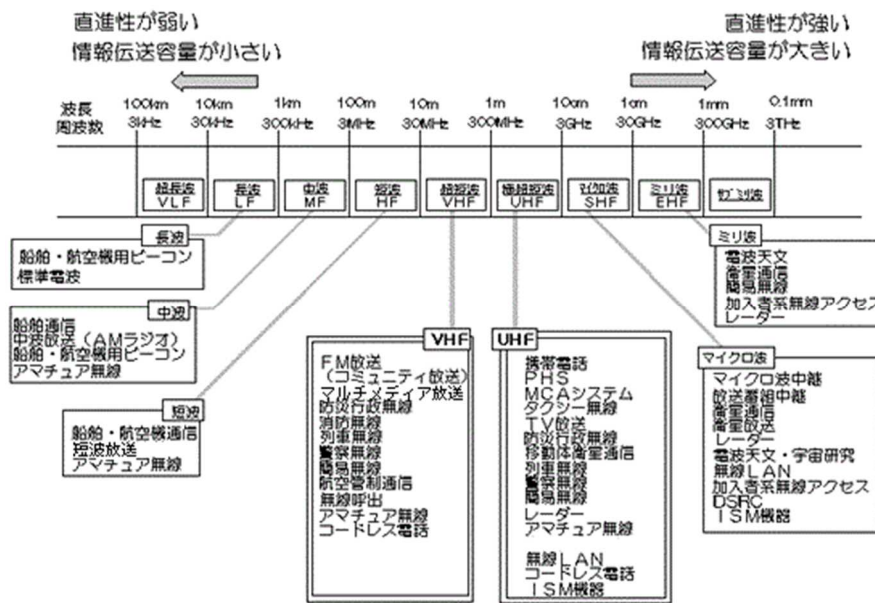


図 8 フィルタ処理による効果

【マイクロ波】

マイクロ波は電磁波の1種で、波長は1~10cm (図 9)。直進性が強い性質を持つため、特定の方向に向けて発射するのに適している。

マイクロ波は波長によって、バンド名が付与されている。SAR では一般に Xバンド、Cバンド、Lバンドを用いて観測が行われる (表 7)。



出典：総務省電波利用ホームページ

<http://www.tele.soumu.go.jp/j/adm/freq/search/myuse/summary/>

図 9 電磁波の分類 (総務省電波利用ホームページより)

表 7 マイクロ波の呼称と波長、周波数

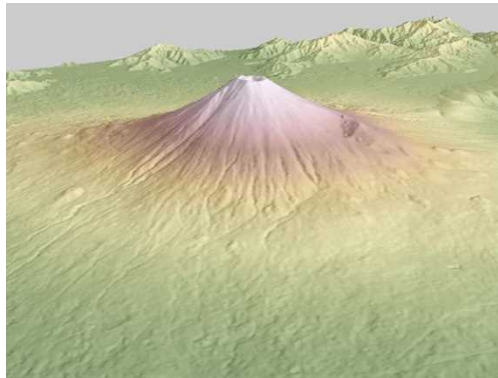
バンド名	波長 (mm)	周波数 (GHz)
Ka	7.5~11.0	40.0~26.5
K	11.0~16.7	26.5~18.0
Ku	16.7~24.0	18.0~12.5
X	24.0~37.5	12.5~8.0
C	37.5~75.0	8.0~4.0
S	75.0~150	4.0~2.0
L	150~300	2.0~1.0
P	300~1000	1.0~0.3

【マスター画像 (master)】

干渉処理の過程において使用する 2 枚の画像のうち、基準となる画像データのこと。

【DEM (Digital Elevation Model)】

地盤面を等間隔のメッシュで区切り、メッシュ中心の標高値を持たせたデータのこと。数値標高モデルと言われる。



出典：JAXA プレスリリース 世界最高水準の全世界標高データ (30m 版) の無償公開について
http://www.jaxa.jp/press/2015/05/20150518_daichi_j.html

図 10 DEM を利用した富士山の例

【PS-InSAR (Permanent Scatters Interferometry Synthetic Aperture Radar)】

PS-InSAR の PS とは恒久散乱体のこと。砂地などではなく、ビルのような反射の位相が非常に安定なターゲットである恒久散乱体を含むピクセル候補の値のみを用いて SAR 干渉処理を行う。

PS-InSAR の特徴は、データ量を減らすことができること、20 枚以上の画像を一気に使って一種の重ね合わせを行い、それらを位相モデルに当てはめ、DEM の補正量や変形量などを同時に推定すること、時系列情報の推定が可能であることである。

PS-InSAR では、標準的な InSAR と同じように空間パターンで画像が出るだけでなく、ピクセルごとの時系列の変化が得られる。(古屋正人 (2007) : “JERS SAR による伊豆大島火山の地殻変動と数値地図の同時推定および ALOS SAR による検証” より)

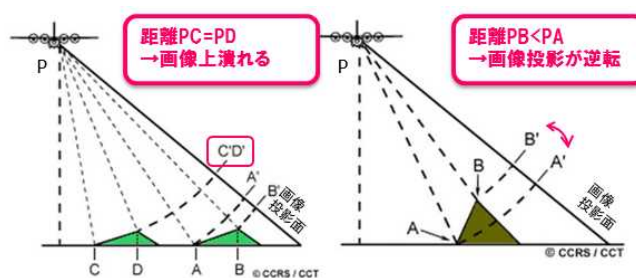
【SAR の幾何学特性(レーダーシャドウ, レイオーバー, フォアショートニング)】

SAR は航空機や衛星等の観測プラットフォームの進行方向 (=アジマス方向) に対して真横斜め下方向 (=レンジ方向) に向けてセンサから電波を照射し、地表からの反射波がセンサ受信部に到達した順に記録する観測システムである。

観測対象となる地表の勾配が水平に近い、あるいはなだらかな地形の場合にはセンサ手前から奥に向かって順に地表に電波が照射され、反射波も水平距離に準じて近いところから受信できるため地物の位置関係が正しく記録できるが、山と谷の標高差が激しい急峻な

山岳地形においてはセンサから見て手前に位置する山麓（＝低標高）部よりも奥に位置する稜線（＝高標高）部の方がセンサー-地物間の直線距離が近くなり、その結果として反射波の受信順序が逆転する現象が起きる。

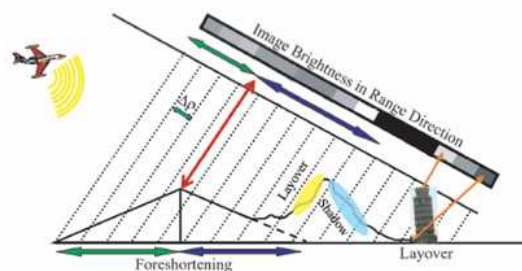
この場合、受信電波を画像化すると稜線と山麓で位置関係が逆転あるいは過剰圧縮された結果潰れた画像となり、画像判読等の解釈が非常に困難となる。一般にこの標高差に伴い生じる電波受信の逆転現象を「レイオーバー (Lay-over)」と呼ぶ（これに対してレイオーバーまでには至らない程度ではあるが標高差に伴い電波の受信速度に変化が生じ、地物が圧縮されて記録される状態は「フォアショートニング (Fore-shortening)」と呼ばれる）。



© 2012 The Pennsylvania State University(<https://www.e-education.psu.edu/geog883/node/470>)に加筆

図 11 SAR の幾何学的特性の模式図

レイオーバーを回避するためには観測角を浅くし、センサと地物の中で水平距離の位置関係と直線距離の位置関係に逆転が起きないように電波を照射する必要があるが、一方で観測角を浅くしすぎると電波が稜線に遮蔽され稜線裏側の斜面および谷部に電波が照射されなくなる（レーダーシャドウの発生）。このため山間部で SAR 観測を実施するにあたっては入射角の設定が平野部に較べて非常に限定されることに加えて、観測されたデータの一部には不可視領域が発生することになる。



© 2012 The Pennsylvania State University

(<https://courseware.e-education.psu.edu/courses/bootcamp/lo04/cg.html>)

図 12 SAR の観測原理と幾何学的特性の模式図

【SBAS (Small BAseLine Subset)】

多数の SAR 画像から垂直基線長および時間間隔の短い干渉ペアを構成し、干渉処理を行い、干渉性の高いピクセルを抽出して、時間変化を検出する方法。(Berardino et al. (2002), IEEE Trans. Geosci. Remote Sens. 40, 2375-2383. より)

【SLC 画像 (Single Look Complex)】

合成開口レーダ(SAR)の画像フォーマットのひとつで、画像として認識できる振幅(強度)の情報に加え、位相の情報もあわせもつデータ(複素データ)のこと。通常、SARの干渉処理(InSAR)には、このSLCフォーマットのデータが使用される。(リモートセンシング用語集 HP より)

(3) 参考資料

「第1章総説編」の「1-1 マニュアルの目的と位置付け」でも述べたように、衛星データの活用技術は日進月歩である。それに伴い、国内でも衛星データを解析できる研究機関や民間会社等が増えてきている。それぞれで解析技術を持ち合わせているので、詳細については各々の機関のHP等を確認願いたい。また、本マニュアル策定に際して参照した資料を以下に示すので、解析技術等の参考にされたい。

- [1]国土地理院, 国土地理院干渉 SAR ホームページ,
[online]<http://vldb.gsi.go.jp/sokuchi/sar/>, (参照 2017-2-9).
- [2]宇宙航空研究開発機構, JAXA ALOS-2 プロジェクト 干渉 SAR 画像の見かたについて,
[online]http://www.eorc.jaxa.jp/ALOS-2/img_up/jpal2_howto_insar.htm
(参照 2017-2-9).
- [3]一般社団法人日本リモートセンシング学会 国土防災リモートセンシング研究会(2013),
建設・国土防災分野における InSAR の実利用化に関する調査研究,
[online] <http://rssj-kokudo.civil.ibaraki.ac.jp/right/material/InSAR-final%20report.pdf>(参照 2017-2-9).
- [4]地震調査研究推進本部 地震調査委員会(2011), 「合成開口レーダーによる地震活動に関連する地殻変動観測手法」報告書,[online]<http://www.jishin.go.jp/main/eisei/>(参照 2017-2-9).
- [5]一般社団法人 日本リモートセンシング学会 編(2011), 基礎からわかるリモートセンシング, 理工図書株式会社.
- [6]日本リモートセンシング研究会 編(2004), 改訂版 図解リモートセンシング, 日本測量協会.
- [7]大内和夫(2009), リモートセンシングのための合成開口レーダの基礎, 東京電機大学出版局.

平成 28 年度 地盤沈下観測等における衛星データの活用手法検討会
委員名簿

委員	所属・役職
(委員長) 大東 憲二	大同大学 情報学部 総合情報学科 教授
富井 直弥	国立研究開発法人 宇宙航空研究開発機構 第一宇宙技術部門 衛星利用運用センター
宮原 伐折羅	国土地理院 測地部宇宙測地課長
守田 優	芝浦工業大学 工学部 土木工学科 教授
六川 修一	東京大学 工学系研究科 教授

(敬称略、50 音順)