

地盤沈下観測等における 衛星活用マニュアル

-概要補足版-

令和5年6月

環境省 水・大気環境局 水環境課
地下水・地盤環境室

- 本資料は、「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）」公表以降の情報を補足（追加・更新）し、マニュアルの内容をまとめた「概要補足版」です。
- マニュアルに掲載のない補足（追加・更新）資料は、本資料の右上に「※」で記載

■地盤沈下監視の必要性

- ・地盤沈下の多くは、地下水の過剰な採取により地下水位が低下し、粘土層が収縮するために生じています。
- ・一度沈下した地盤はもとはには戻らず、地下水の揚水を停止したとしても、地下水位は直ちに回復せず、沈下量は年々蓄積されていくこととなります。
- ・地盤沈下が長期的に続くと建造物の損壊や洪水時の浸水増大などの被害をもたらす危険性があり、その影響が深刻になる前に早期発見することが重要であり、現在も継続的な地盤沈下監視が行われています。

■衛星データを活用した地盤沈下監視

- ・一方で、地盤沈下は地下水採取規制により、年間2cmを超えるような地域は全国的にも少なくなってきており、水準測量には多くの費用や人員が必要であることから、より合理的かつ効率的な監視方法が求められてきています。
- ・本マニュアルは、現状の地盤沈下の監視体制を維持・向上させるため、観測衛星を用いた観測技術の導入までの手順などを取りまとめたもので、導入の検討に役立てていただけると幸いです。

地盤沈下観測等における衛星活用マニュアル

環境省では、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・向上に役立てることを目的とした「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）を作成

◆ マニュアルの目的

「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。

◆ 位置付け

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。

◆ 対象

地方公共団体の実務担当者を想定している。

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

(<https://www.env.go.jp/press/104084.html>)

衛星活用マニュアルの構成

第1章 総説編

衛星データによる監視
の仕組みや特徴

- 1-1 マニュアルの目的と位置付け
- 1-2 衛星データによる地盤沈下監視の仕組み
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

第2章 解説編

活用の方法やデータの
選び方・解析方法等

- 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

第3章 事例編

実際の解析事例や
その他の活用事例

- 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

参考資料

衛星情報や用語の解説

- (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

第1章 総説編

総説編では、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

■マニュアルの目的と位置付け

衛星監視マニュアルの目的・位置付けの解説

■衛星データによる地盤沈下監視の仕組みと特徴

人工衛星（合成開口レーダSAR）による地盤変位量の測定の仕組みや、衛星データを併用の特徴や利点・課題等を解説

■地盤沈下監視業務の流れ

「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段階に区分し、業務の全体の流れを解説

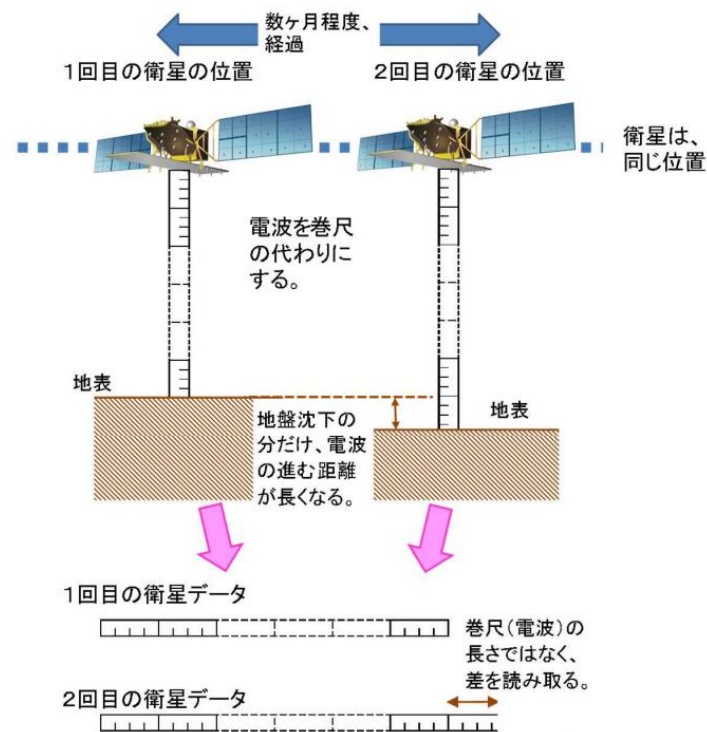


図-1 干渉SARによる地盤変動量の測定原理

第2章 解説編

解説編では、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解説

地盤観測業務の進め方

■ 目的の設定

「地盤沈下面的把握及び観測の効率化」といった衛星データ活用を目的を設定

■ 調査範囲・調査期間の設定

目的に応じて、調査範囲・調査期間を設定

■ 水準測量との組み合わせ

水準測量と衛星データ活用の組み合わせの考え方

■ 仕様確定・解析

衛星SAR解析の仕様書の例や解析方法の解説



図-1 衛星データの検索
JAXA(G-PORTAL)

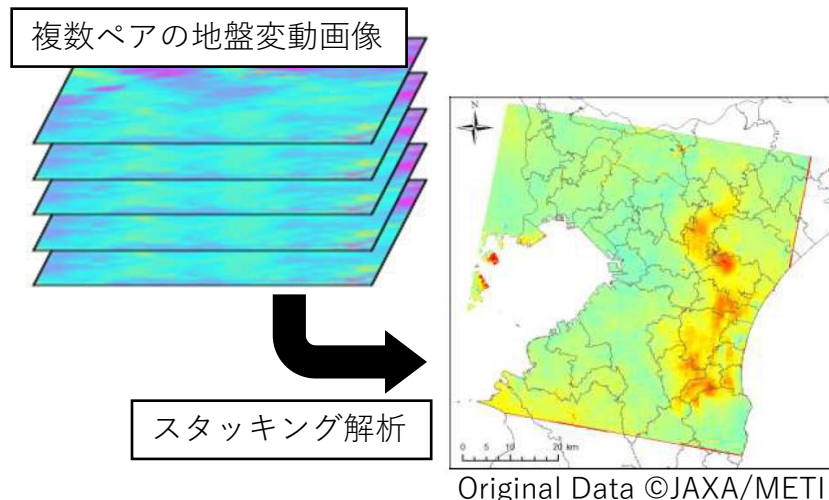


図-2 スタッキング解析

第3章 事例編

事例編では、実際の解析事例結果や精度検証等を紹介

千葉県九十九里浜

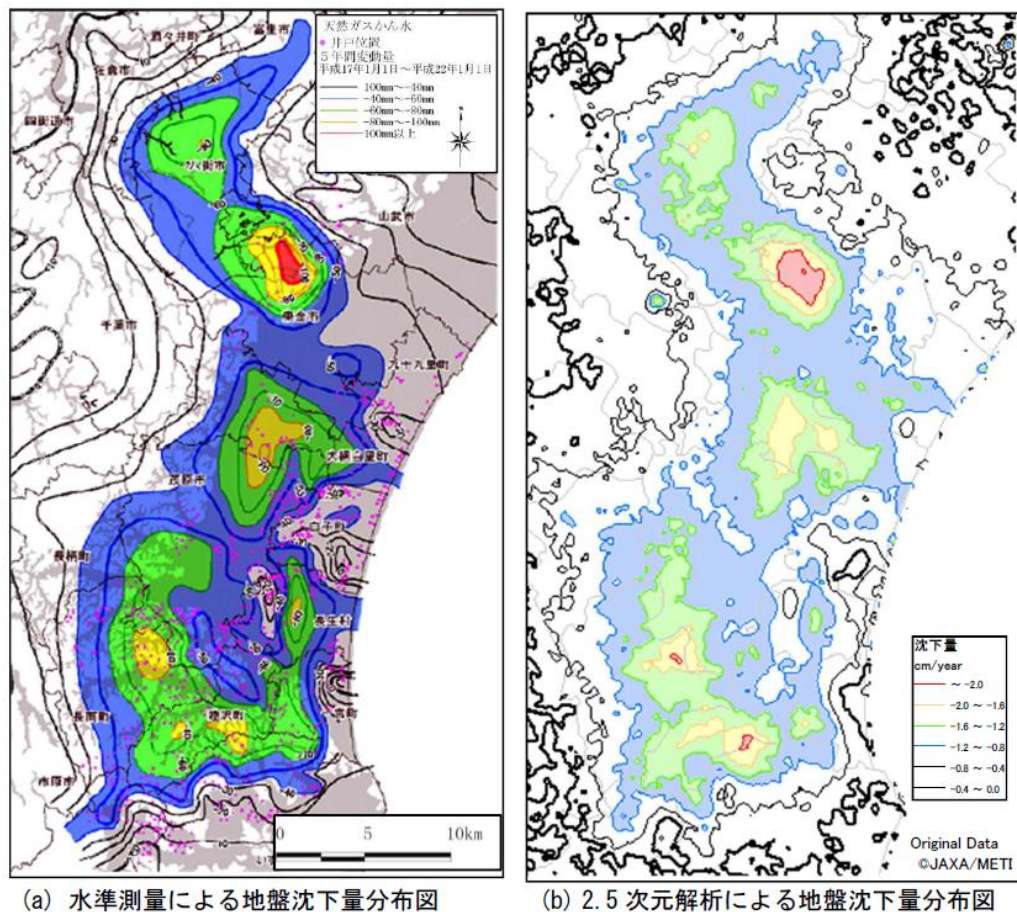


図-1 干渉SARの解析(2.5次元)と水準測量の比較例

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 (新時期)	2015/11/3

メッシュサイズ: 15m×15m

帰式: $Y = 0.7057 \cdot X + 0.3657$

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%)

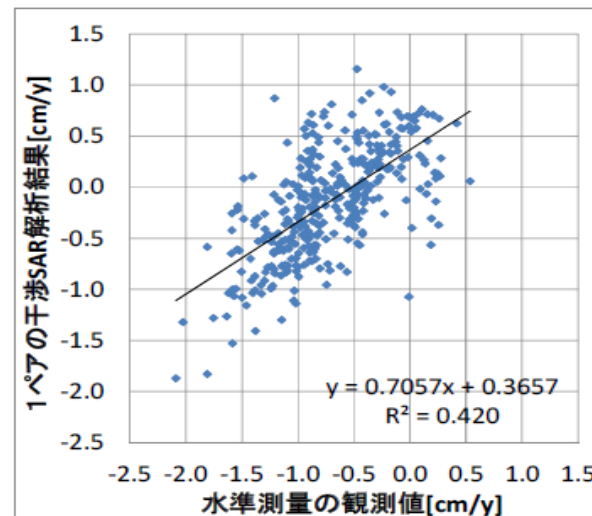


図-2 水準測量との比較による精度検証

概要版の構成

1. 活用編

- ・ 地盤沈下監視への活用・留意点

2. 事例編

- ・ 干渉SAR解析による地盤沈下量等の評価事例

3. 資料編

- ・ 干渉SAR解析等の技術的な内容

1.活用編

衛星データを活用した地盤沈下監視

陸域観測技術衛星2号「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)が平成26年5月24日に打ち上げたSAR衛星(合成開口レーダ)です。災害状況や森林分布の把握、地殻変動の計測など、様々な分野で利用されています。衛星から地上までの距離の変化を数cmの精度で検出できる性能を持ち、地盤沈下の観測への活用も期待されています。令和5年に先進レーダ衛星「だいち4号」(ALOS-4)の打ち上げも計画されています。

表-1 だいち2号(ALOS-2)の概要

	ALOS-2
運用軌道	赤道上高度：628km 軌道傾斜角：97.9° 降交点通過時刻：12:00±15分 回帰日数：14日 (元の位置に戻るまでの日数)
設計寿命	5(目標7年)
寸法	16.5m×3.7m×9.9m(軌道上)
質量	約2,100kg
データ伝送	直接伝送(最大800Mbps)および データ中継衛星経由(278Mbps)
搭載センサ	-Lバンド合成開口レーダ (PALSAR-2)

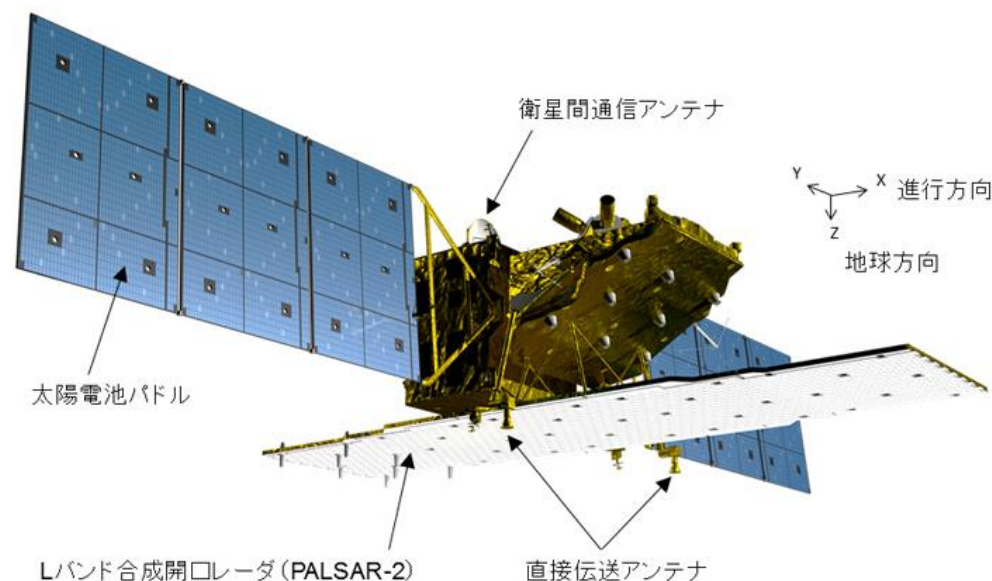


図-1 陸域観測技術衛星2号「だいち2号」(ALOS-2)

出典：ALOS-2 プロジェクト/プロジェクトの概要(JAXA)
(<http://www.eorc.jaxa.jp/ALOS-2/about/joverview.htm>)

水準測量と衛星データによる地盤沈下監視の比較

水準測量では測量規定で精度が担保されていること、衛星データは地盤沈下を面的に把握することができるなど、それぞれ利点・欠点が存在します。
地盤沈下監視における衛星データの活用では、それぞれのメリットを生かした活用を行うことが重要になります。

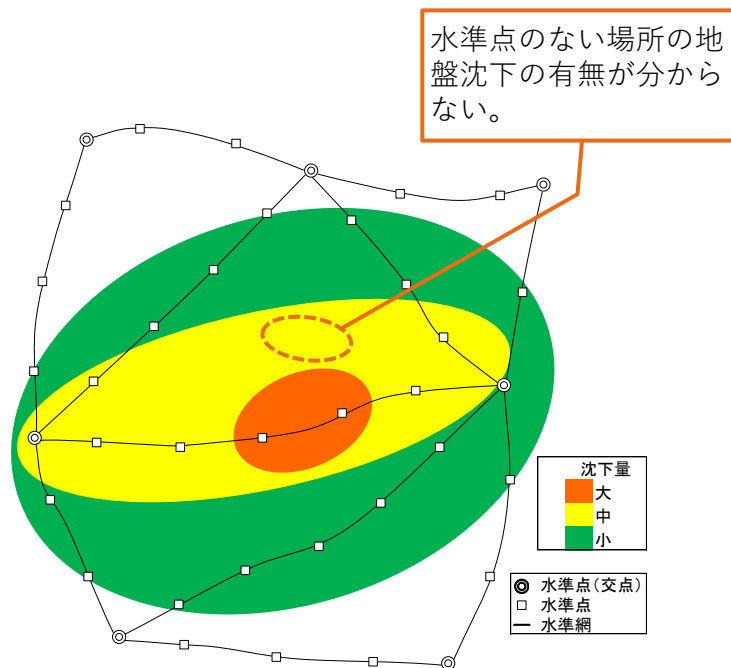
	水準測量	衛星データ
利点	<ul style="list-style-type: none">法令での作業規定により水準点での<u>精度が担保</u>されている。継続的に同一の水準点での標高を計測するため、地盤沈下の<u>時系列変化が把握</u>しやすい。<u>過去からの継続性</u>が保たれる。	<ul style="list-style-type: none">地盤沈下を<u>面的に把握</u>できる。水準測量箇所が少なくなり<u>比較的安価</u>。過去のデータを使って必要に応じて時期を<u>遡って解析が可能</u>。<u>年間を通じたデータを取得</u>可能。<u>地盤沈下監視以外の目的にも活用</u>することができる。
欠点	<ul style="list-style-type: none">測量箇所が多いと作業量が大きくなり、<u>費用が増大</u>する。水準点の<u>維持管理</u>が必要。対象地域の変動量を精度良く把握するには、<u>多くの水準点での継続的な測量</u>が必要。水準点が無い場所での<u>地盤沈下を見落とす可能性</u>がある。	<ul style="list-style-type: none">衛星運用期間によっては<u>対象衛星の変更</u>もあり得る（現状の設計運用期間は5年程度）使用する<u>データ選定に配慮</u>すべき点がある（計測時期、計測頻度、植生の影響等）衛星レーダを活用するため、電離層での<u>ノイズの影響</u>が避けられない。

衛星データ併用による地盤沈下監視の利点

水準測量と衛星データにはそれぞれ利点・欠点がありますが、メリットを生かすために、相互補完的に活用する併用を推奨しています。

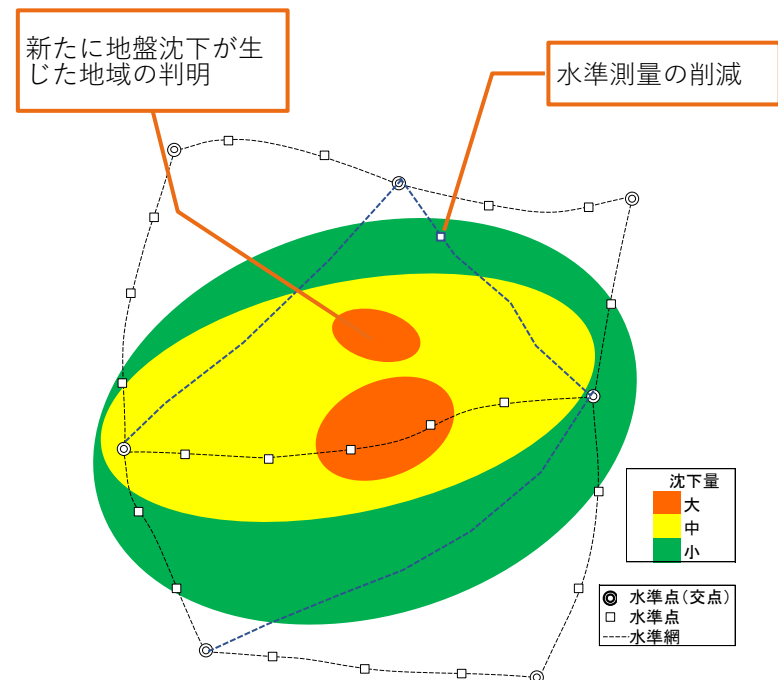
水準測量のみの場合

水準点でのみ地盤高を観測。水準点のない場所は、地盤沈下の有無が明確に分からない。



衛星データを併用した場合

水準点が無い範囲も含め面的に地盤高が把握できる。水準測量結果は精度検証に用いるだけなので、幹線部等の一部の水準点を除いて、**水準測量の削減**ができる。



衛星データの併用の活用方法

衛星データを活用することで、従来の水準測量による地盤沈下監視にはない、活用方法が考えられます。ここでは、衛星データ併用の3つの活用方法を紹介します。

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

衛星データを併用する大きな利点のひとつとして、主要な幹線以外の水準測量の観測点を削減することによって費用を縮減できることがあります。

また、地盤沈下が収束してきている地域では、水準測量の頻度を減らし、測量の間の期間を衛星データを活用して補完することで費用を縮減する方法もあります。

※次ページで試算例を紹介。

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

衛星データは、衛星軌道から撮影された画像データ（SLCと呼ばれる特別な画像フォーマット）として提供されており、面的な情報を持っています。これを解析処理することで、面的な地盤変動量を把握することができます。衛星軌道や撮影方向に注意する必要がありますが、適切な画像データを選択することで、従来の観測範囲を超えた広域の地盤沈下の状況の把握に活用することができます。

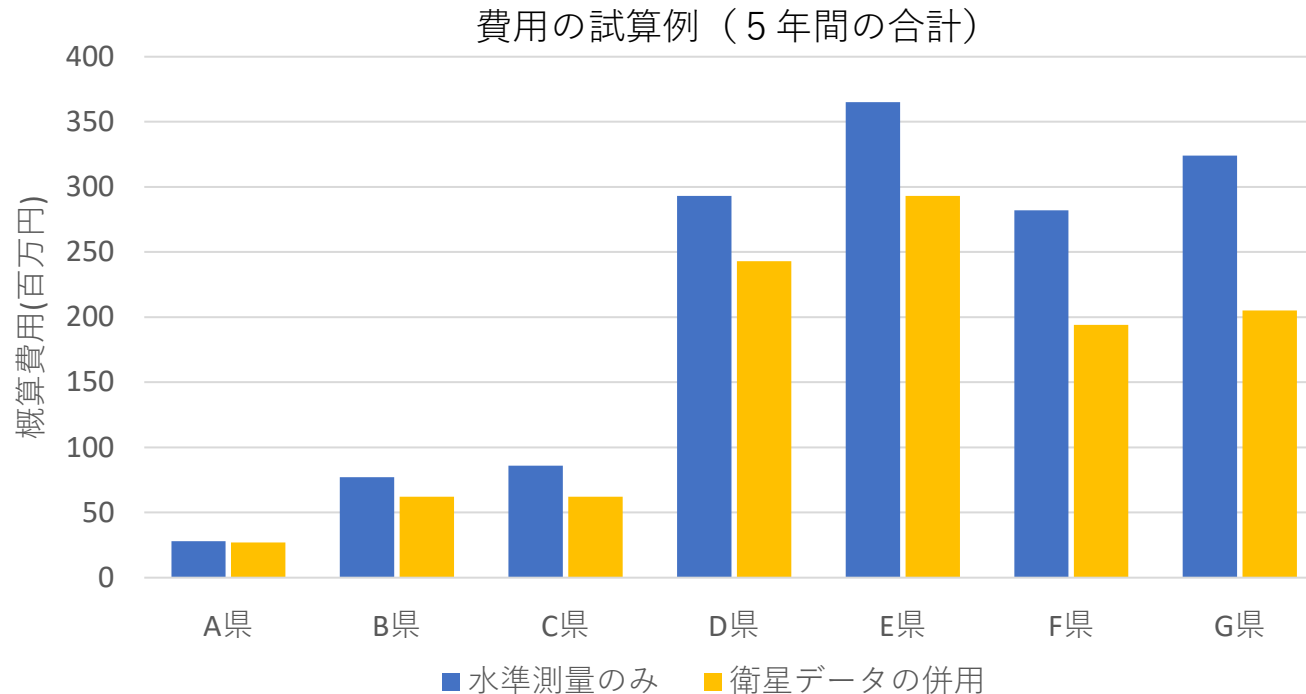
③ 過去に遡っての地盤沈下の面的推移の把握

衛星データは、運用開始からのデータがすべて蓄積されています。このため、データが蓄積されている期間であれば過去に遡って地盤沈下量の調査を行うことができます。

観測の効率化による費用削減

衛星データ併用による費用削減は、測量地点数や観測頻度によって異なりますが、一例として、環境省でのコスト削減の試算例をご紹介します。

水準測量は、幹線では毎年、支線では5年に1回の頻度で実施とし、干渉SAR解析は毎年実施したと仮定。

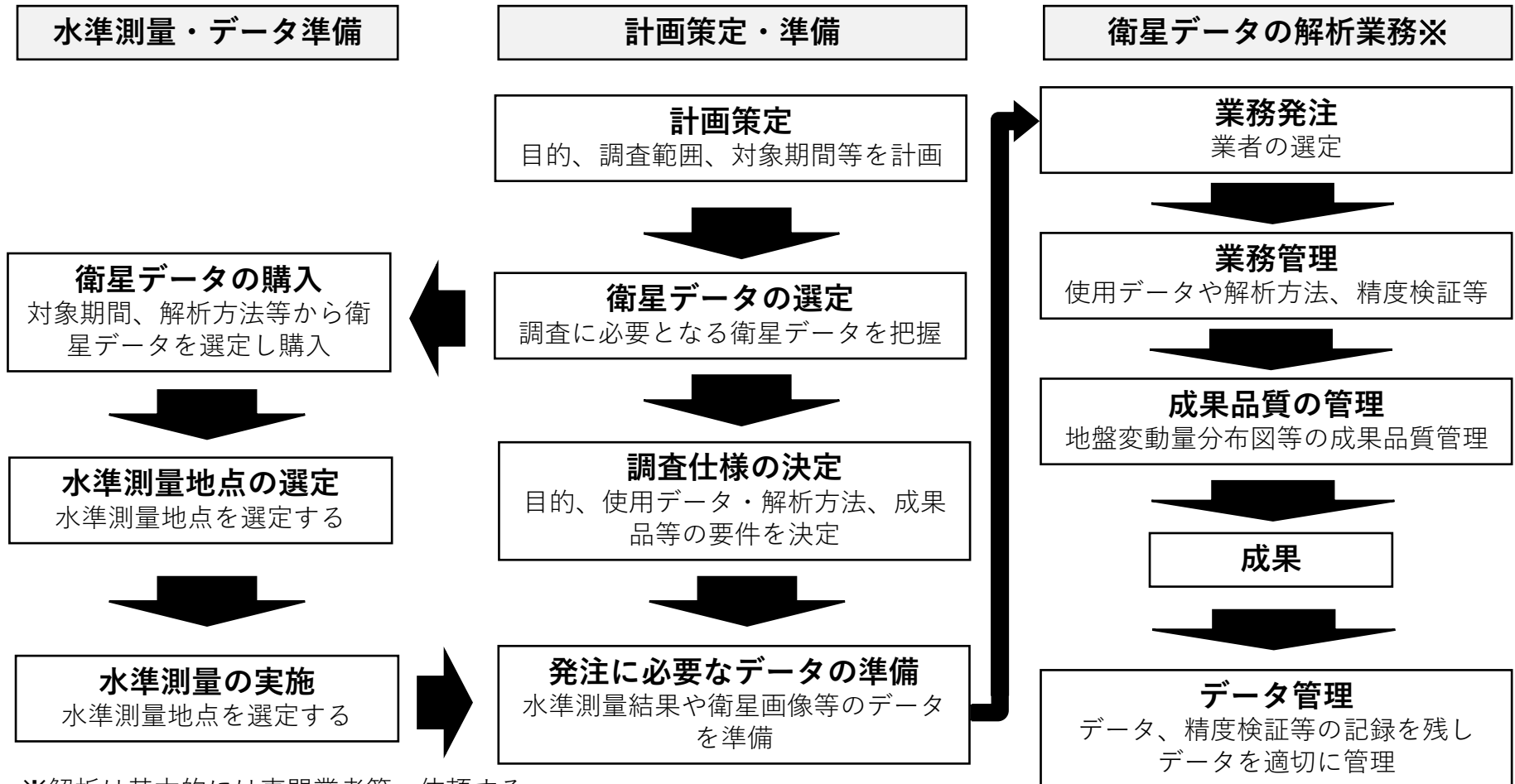


試算に当たっての条件は以下のとおり。

- ・ 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

衛星データを活用した地盤監視業務の基本的な流れ

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、解析を含めた作業時間等にも影響します。衛星データを併用した地盤沈下監視業務では、目的に応じて、水準測量や衛星データの準備をします。



衛星データを活用した地盤監視業務

	項目	説明
計画策定	目的設定	衛星データを活用した調査目的を設定する。 ①監視地域の地盤沈下監視の効率化 ②既存監視地域外も含めた広域的地盤沈下の面的把握 ③過去に遡っての地盤沈下の面的把握 等
	調査範囲	目的に応じて衛星データによる地盤沈下の調査範囲を設定する。
	対象期間	目的に応じて対象期間を設定する。
	水準測量との組合せ	目的に応じて水準測量を実施する地点を設定する。
	使用データの選定	調査範囲・対象期間に応じて干渉SAR解析に用いる衛星データを選定する。
	調査仕様の決定	調査仕様の内容（目的、範囲、対象期間等）を決定する。

	項目	説明
調査・解析	データの確定	衛星軌道と撮影方向、範囲等から解析可能なデータを確定する。
	解析	1ペアの干渉解析 1ペア（2時期の衛星データ）から地盤変動量を算出する。
		スタッキング解析 複数のペアを重ね合わせノイズの影響を低減させる。
		2.5次元解析 ノイズの影響をさらに低減させるとともに、鉛直変位量を算出する。
	成果	解析結果を取りまとめ地盤変動量図を作成する。水準測量成果と比較し精度検証を行う。

	項目	説明
管理	データの蓄積・管理	元となったデータや解析データを蓄積し、今後の検討に活用できるように適切に管理する。

発注仕様書の内容(例)

調査仕様を決定した後、発注仕様書を作成します。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等の詳細については、受注者の検討事項とします。発注者は、計画書、成果物及び精度管理の結果の確認に重点を置きます。発注仕様書には、次のような項目を定めます。

項目	説明
1.趣旨	地盤沈下の把握を目的としたものであることを定めます。
2.業務委託の内容	業務委託内容として、目的（地盤沈下の実態把握）、対象地域を定め、干渉SAR解析の実施、地盤沈下分布図の作成等の委託内容を定めます。
3.業務範囲	対象地域の範囲を定めます。
4.実施体制	管理技術者、照査技術者等の実施体制と資格要件を定めます。
5.干渉SAR解析に係る業務内容	使用する衛星データ（数量、仕様）、解析方法、水準測量による精度検証等について定めます。
6.地盤沈下量解析に係る業務内容	地盤沈下分布図の作成仕様（背景地図、縮尺、コンター等の仕様）、地盤沈下面積の集計方法等を定めます。
7.打合せ	打合せ協議を実施する時期・回数を定めます。
8.成果品	成果品とする項目と仕様（地盤沈下量分布図等）を定めます。
9.照査	照査技術者を置き精度管理を行うこととします。
10.衛星画像データ及び記録等の帰属	取得・作成したデータの帰属先を定めます。
11.関係法令	関係法令とその遵守を定めます。

衛星データの入手方法

衛星データは、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、JAXA 地球観測衛星データ提供システムのHPより入手可能です。手続きや価格については、各担当窓口よりご確認ください。

○衛星SAR画像データの入手先

1. 株式会社パスコ ALOS利用推進グループ

URL:<http://jp.alos-pasco.com/>

2. 一般財団法人 リモート・センシング技術センター ソリューション事業第一部

URL:<http://www.restec.or.jp/>

3. JAXA 地球観測衛星データ提供システム G-Portal

URL:<https://gportal.jaxa.jp/>

※概要補足版作成に伴い情報追加したもの



図-1 株式会社パスコ

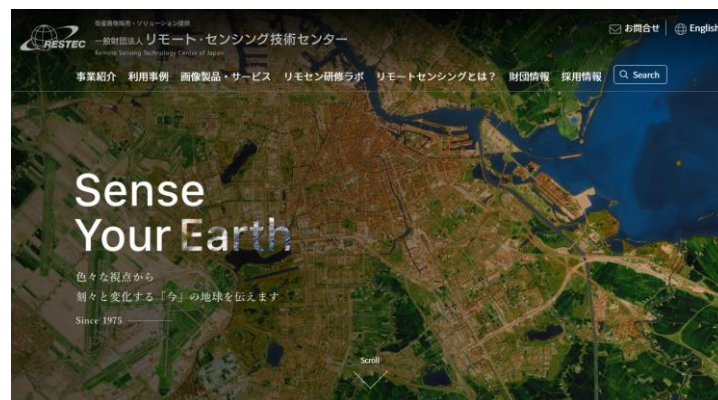


図-2 リモート・センシング技術センター

データの蓄積・管理

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になります。過去データを参照するためにも、衛星データは蓄積・管理する必要があります。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、一元的に管理することが重要です。

また、解析には衛星軌道等の情報が必要になります。諸元情報も一緒に適切に管理しておく必要があります。

表-1 管理に必要な衛星データの諸元の例

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

地盤沈下監視への導入例

※概要補足版作成に伴い情報追加

静岡県では、全国に先駆け、令和2年度に人工衛星データを活用した地盤沈下調査を試験的に実施し、令和3年度から本格的な導入が進められています。解析精度の検証の結果、水準測量と比較して十分な精度の範囲内であることが確認されています。

2.5次元解析結果図（解析期間：2013年12月～2020年12月）



図-1 静岡県西部地域における衛星データの解析結果

2.5次元解析結果図（解析期間：2014年12月～2021年12月）

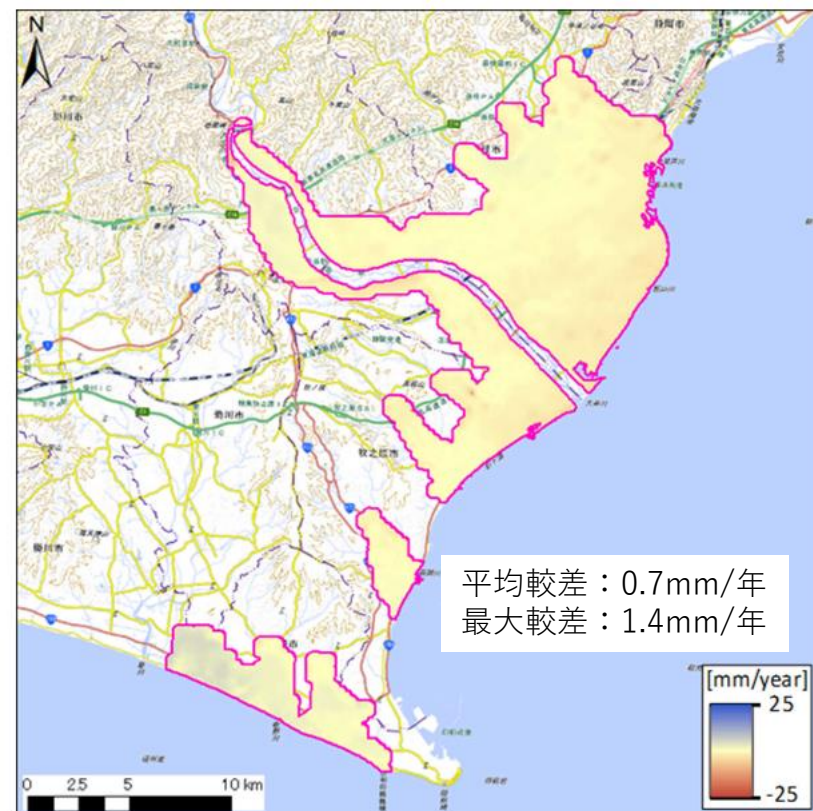


図-2 静岡県中部地域における衛星データの解析結果

発注仕様書の記載例(1)

※概要補足版作成に伴い情報追加

参考として、静岡県が発注仕様書の業務内容の記載例を紹介します。

干渉SAR解析に係る業務内容

使用するシーン数等を指定

1 解析対象データ

使用する衛星については、監督員と協議することとし、シーン数については、原則16シーン（北行軌道8シーン、南行軌道8シーン）とする。ただし、精度の管理等に必要性が認められる場合は、監督員と協議のうえ、必要数を追加できるものとする。また、使用する衛星やシーン数等に変更が生じた場合、データ使用料及び追加で生じた業務等について契約変更の対象とする。

解析に使用する上で、衛星データの内容・期間の確認

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26年12月～令和3年12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。また、衛星データの取得については、発注者の指示により行うこと。

解析対象期間の指定

(つづく)

発注仕様書の記載例(2)

※概要補足版作成に伴い情報追加

(つづき)

気象情報等を元に精度の低くなる可能性がある衛星データは除外

衛星SARデータの解析手法を指定

3 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次元解析によるものとする。1ペア干渉SAR解析に用いる衛星データの組み合わせは、気象情報等から精度低下の要因となりやすい衛星データを除外して選択する。また、水準測量の基準日やSARの特性を考慮して適切な観測期間を選択する。スタッキング処理と2.5次元解析には、高い精度で地盤高の変動量を把握できていると考えられる干渉ペアを選定して用いる。また、過年度の水準測量データと干渉SAR解析結果を組み合わせ、干渉SAR解析の変位計測精度を向上させる処理を行う。水準測量との組み合わせにより、組み合わせ結果が妥当であることを示すこと。

解析精度が高くなるように使用する解析ペアを選定

4 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。水準測量データについては、県が過年度に発注した測量業務委託の成果品を使用すること。

水準測量データと比較して、干渉SARの解析精度を検証

導入して良かった点

- 地盤沈下調査の成果としては十分な成果が得られた。
- 水準測量よりも広域を面的に把握でき、面積当たりの調査費用が大幅に削減となった。
- 調査精度も水準測量と大きな差異がなくマニュアルに定められた較差に収まっていた。
- 以上のことから本手法による調査を始めて良かったと感じる。

課題と感じている点

- 面積当たりの調査費用は大幅削減できたが、調査面積が広がったため、単年度の調査費用としては増加した。調査費用の削減等については、検討の余地がある。
- 専門的な部分については、指導が難しく、実質、業者任せにならざるを得ないところがある。
- 水準測量を併用することについて、財政部局の理解を得るのが難しい。

2.事例編

水準測量と衛星データの地盤沈下量分布図の比較(ALOS)

環境省では、九十九里平野を対象とした水準測量と衛星データとの比較を行い精度検証を実施しています。ALOSによる地盤沈下量分布図の比較では、概ね分布図の特徴が整合した結果が得られています。事例編では、ALOS、ALOS-2及び海外で運用されているSentinel-1を使用した解析結果をご紹介します。

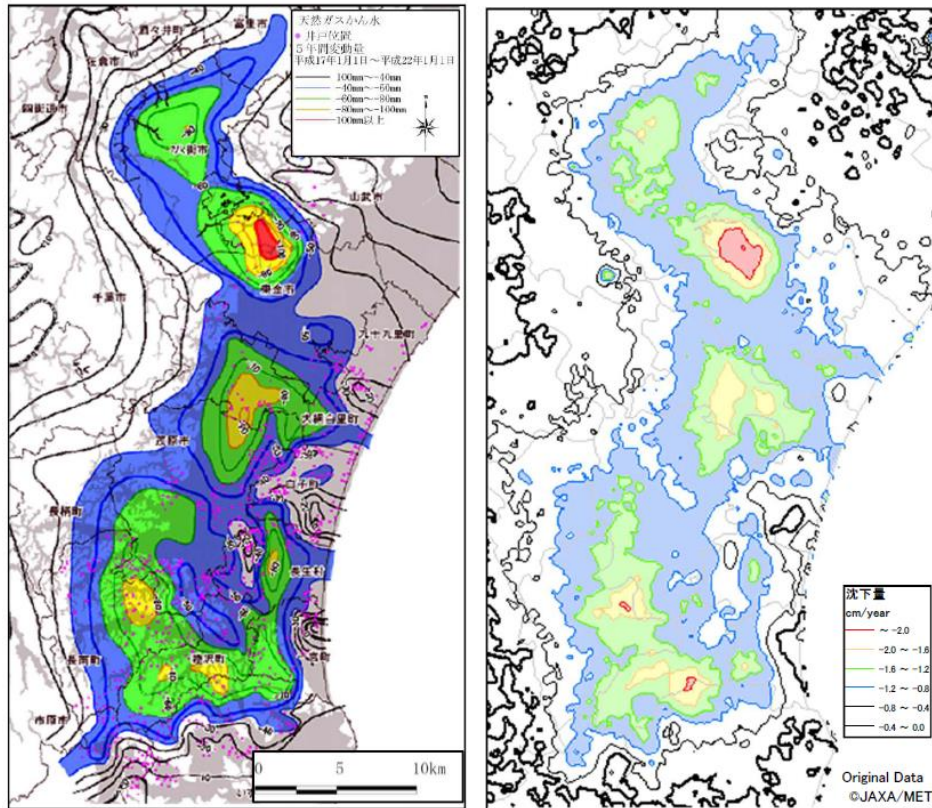


図-1 九十九里平野における水準測量による地盤沈下量分布図とALOSによる地盤沈下量分布図の比較

解析手法の誤差比較

○1 ペアの干渉SAR 解析 (1ペア(2シーン))

決定係数=0.779
標準偏差=0.275(cm)
最大較差=-1.23(cm)

○スタッキング解析 (南行軌道の全6 ペア(11シーン))

決定係数=0.8680
標準偏差=0.207(cm)
最大較差=-0.77(cm)

○2.5 次元解析 (北行軌道の6ペア(11シーン) 南行軌道の6ペア(12シーン))

決定係数=0.9078
標準偏差=0.165(cm)
最大較差=0.76(cm)

千葉県九十九里浜での衛星SARの解析と精度検証(ALOS-2)

ALOS-2によって取得されたデータを利用した解析事例をご紹介します。
解析方法としては、1ペアの干渉SAR解析、スタッキング解析、2.5次元解析があります。
各解析手法による精度検証の比較結果をご紹介します。

対象地域：千葉県九十九里浜 解析期間：2006年から2011年までの5年間

表1-干渉SAR 解析に用いた衛星データ

①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

②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

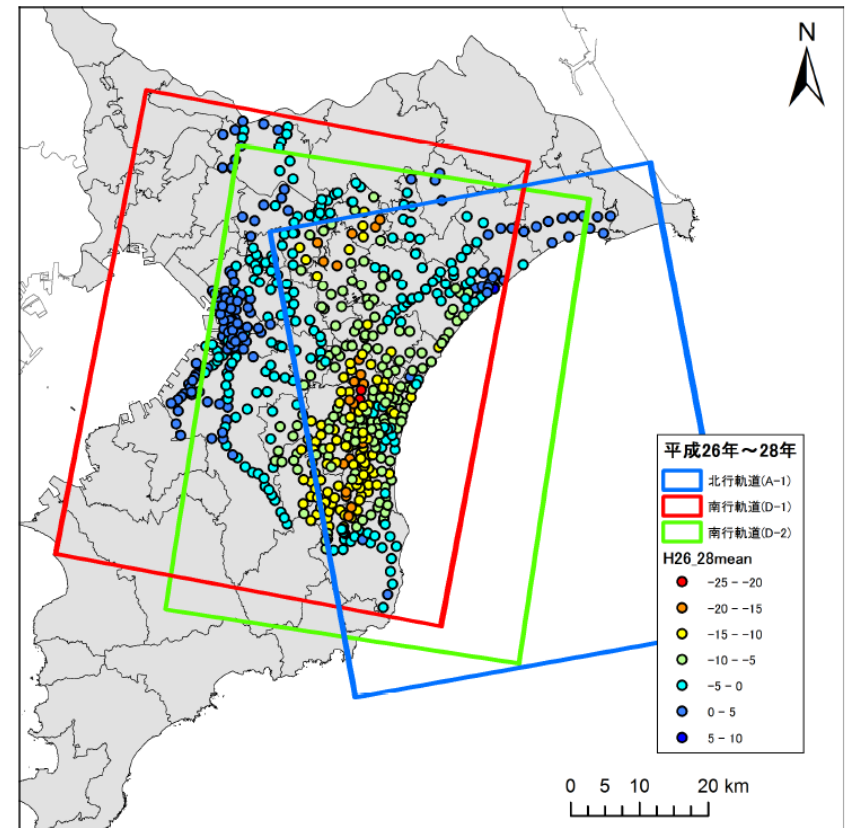


図-1 使用した軌道・観測範囲と水準測量点の分布

1 ペアの干渉SAR 解析(ALOS-2)

1ペアの干渉SAR解析(北行軌道のNo.1, 1ペア(2 シーン)を使用)

回帰式 : $Y = 0.7057 X + 0.3657$ (X:水準測量、Y:1ペアの干渉解析結果)

標準偏差=0.422(cm)

最大較差=2.08(cm)

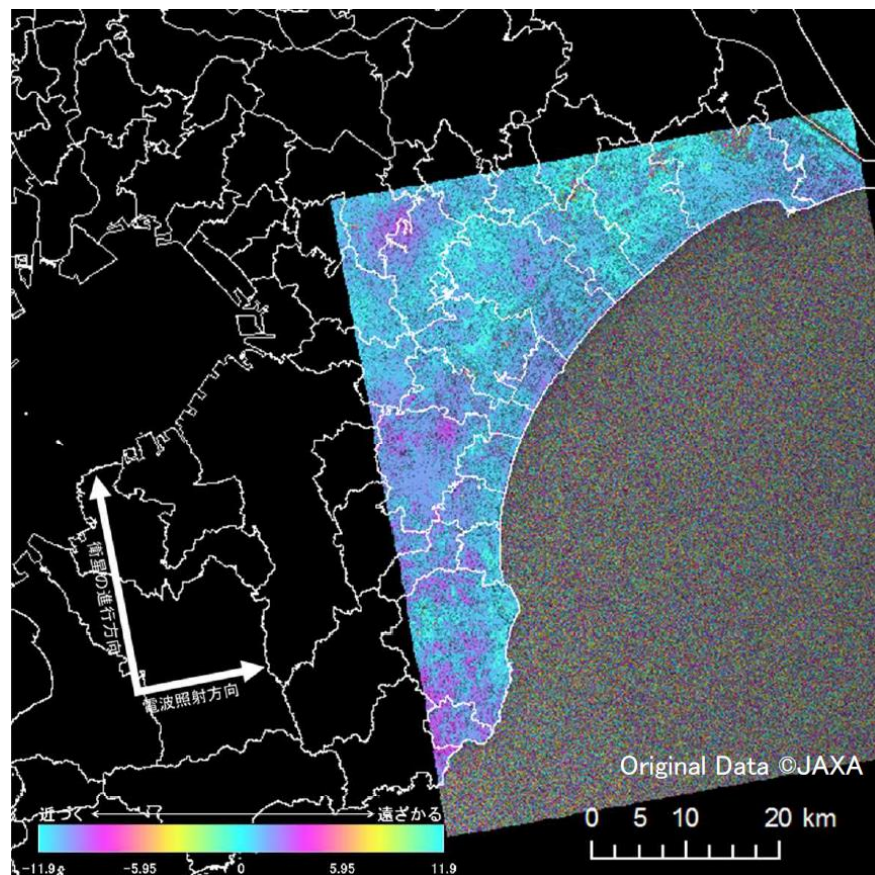


図-1 1ペアの干渉SAR解析結果画像

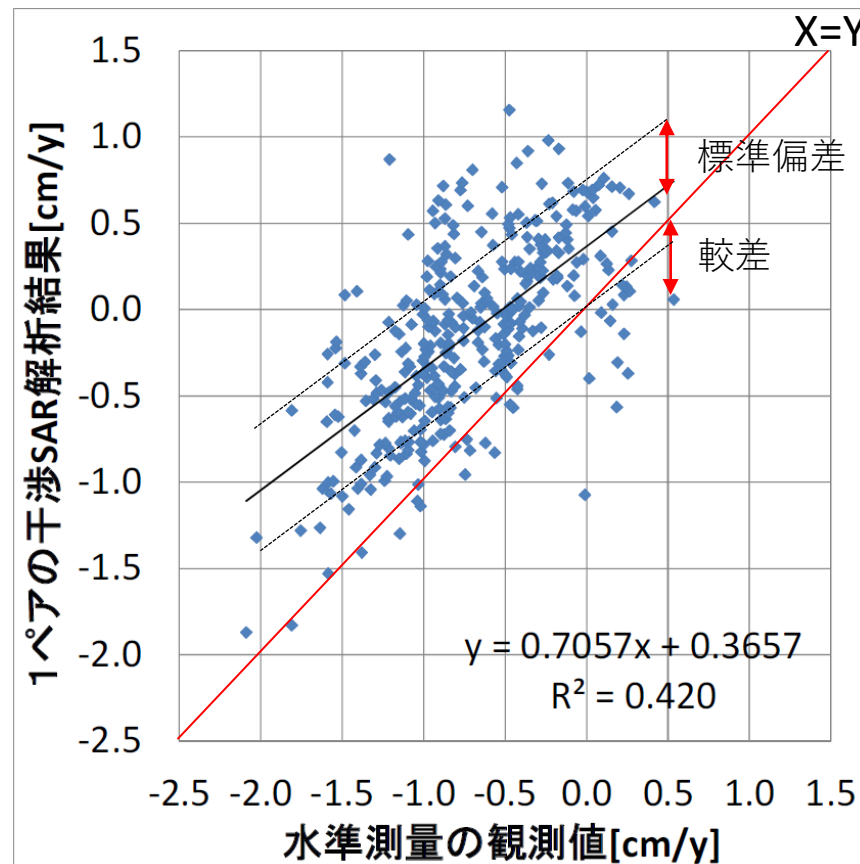


図-2 水準測量との比較図

スタッキング解析 (ALOS-2)

スタッキング解析(北行軌道のNo.1, No.5, No.6, 3ペア (5 シーン)を使用)

回帰式 : $Y = 0.8044 X + 0.181$ (X:水準測量、Y:スタッキング解析結果)

標準偏差=0.399(cm)

最大較差=1.45(cm)

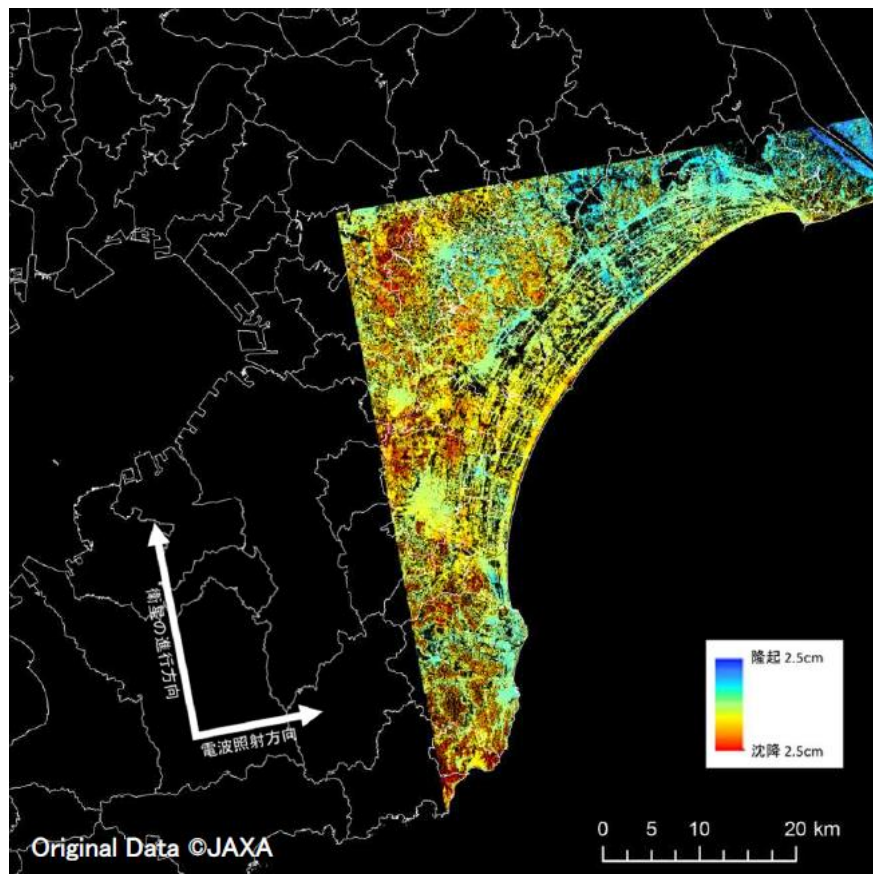


図-1 スタッキング解析結果画像

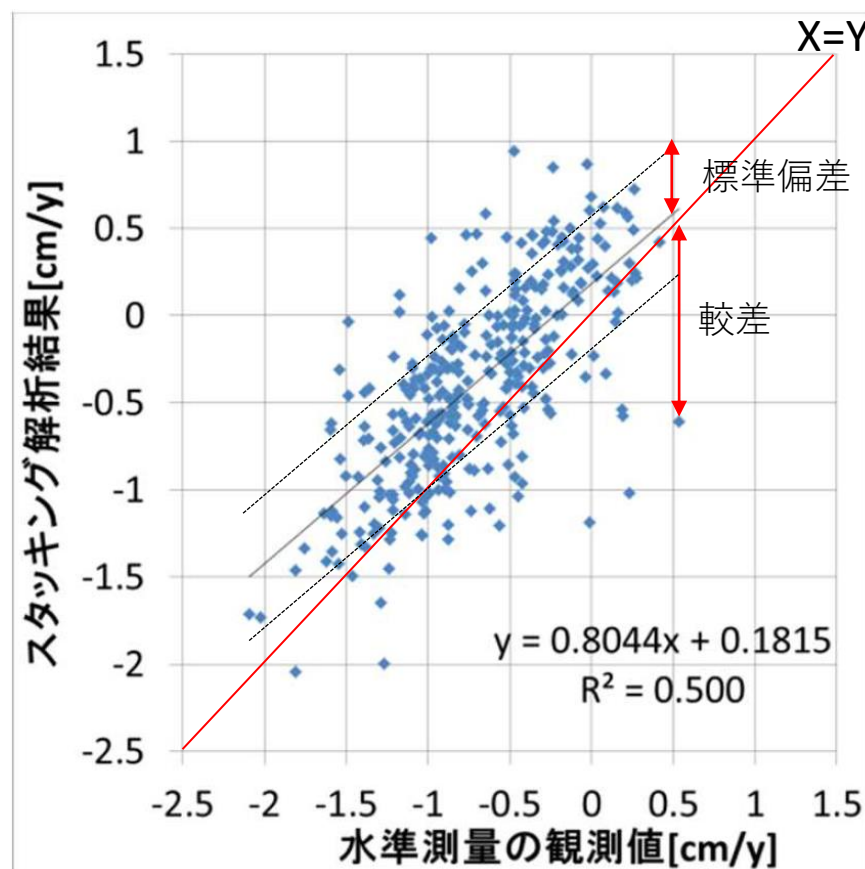


図-2 水準測量との比較図

2.5次元解析 (ALOS-2)

2.5次元解析(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))

回帰式 : $Y = 0.9436 X + 0.2962$ (X:水準測量、Y:2.5次元解析結果)

標準偏差=0.287(cm)

最大較差=1.38(cm)

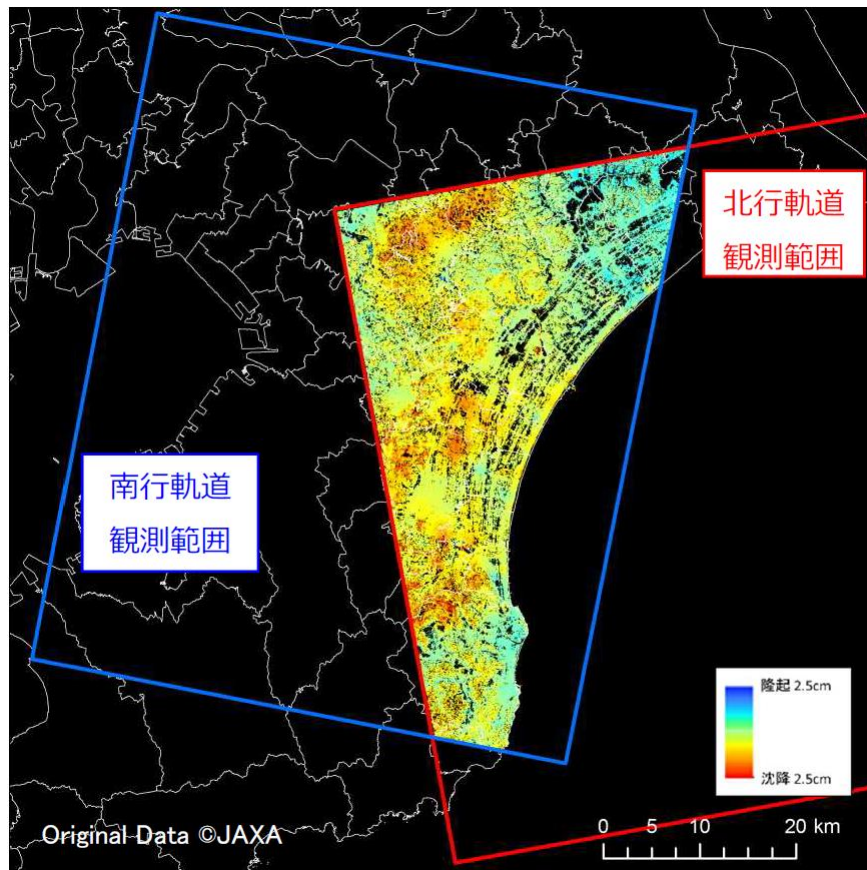


図-1 2.5次元解析結果画像

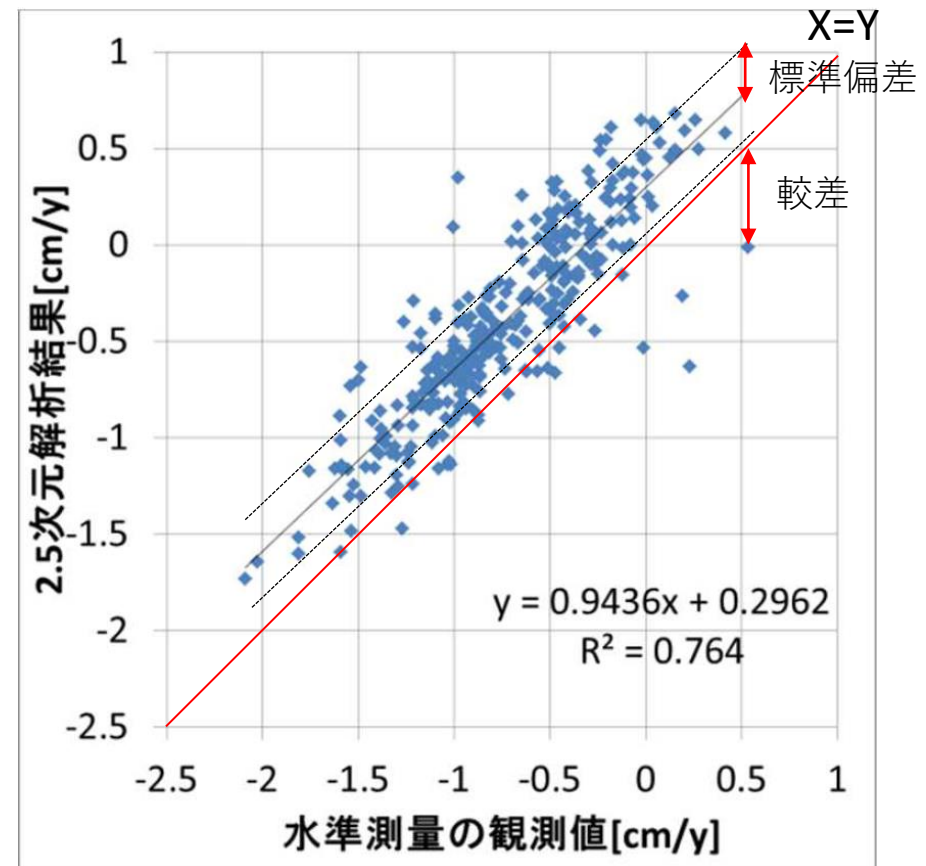


図-2 水準測量との比較図

Sentinel-1（欧州宇宙機関：ESA）

衛星マニュアルでは、日本の衛星であり、地盤沈下解析に適したLバンドレーダを使用しているALOS、ALOS-2及びその後継機（ALOS-4）を用いることを想定していますが、衛星やセンサにトラブルが発生した場合には代替として、海外の衛星データを使用することも可能です。

表-1 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（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機のため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バンドより水蒸気の影響や地表面変化を受けやすく、植生域や水田の精度が低い。・観測要求が行えない。

スタッキング解析結果(Sentinel-1)

スタッキング解析（南行軌道：7ペア(31シーン)）

回帰式： $Y = 0.6244X + 0.093$ （X:水準測量、Y:スタッキング解析結果）

標準偏差=0.307(cm)

最大較差=1.09(cm)

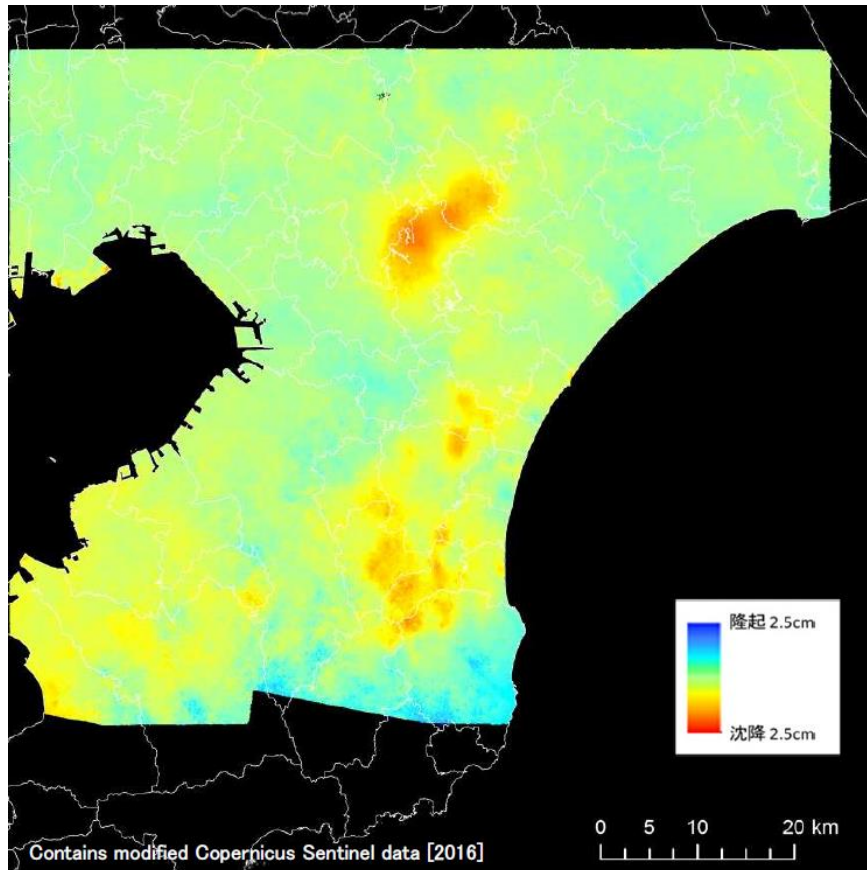


図-1 スタッキング解析結果画像

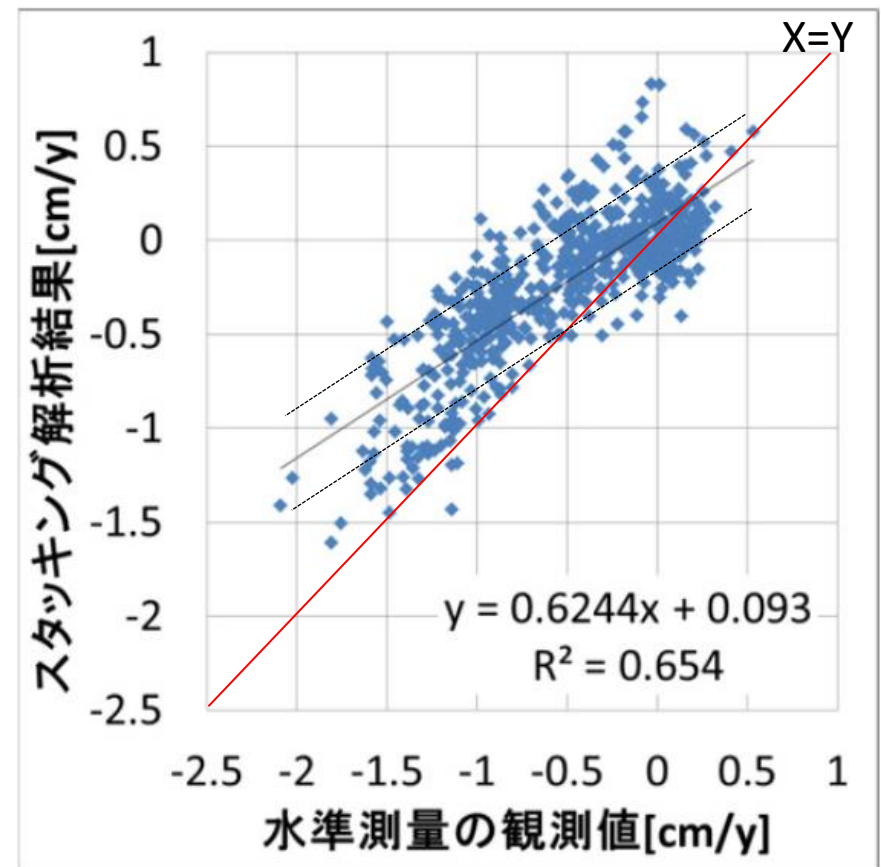


図-2 水準測量と比較図

2.5次元解析（北行軌道：7ペア、南行軌道：7ペア）

最大較差=7.5mm/年、平均較差=1.4mm/年

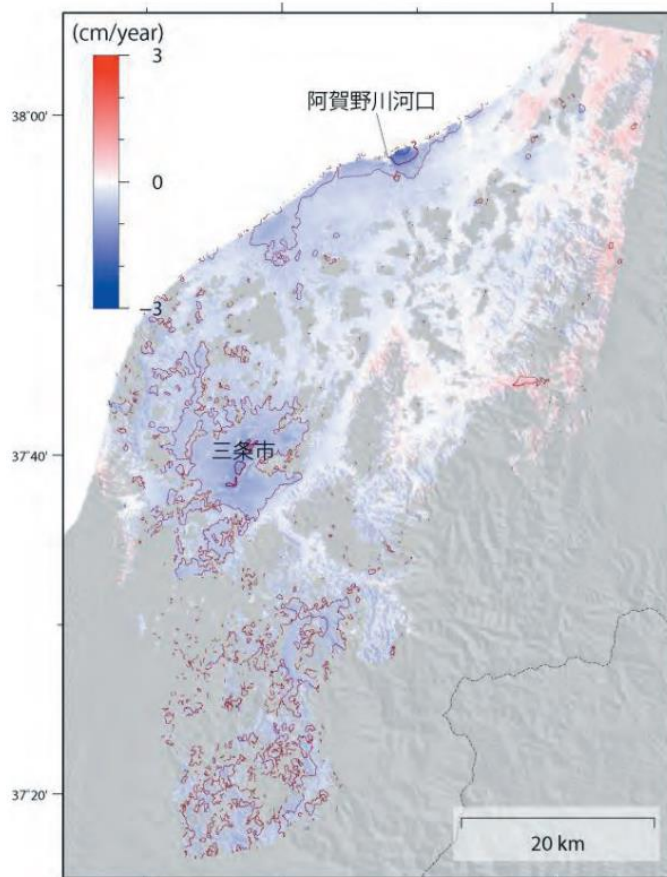


図-1 新潟平野の上下方向の平均変動速度の解析結果

出典：山中雅之・森下 遊・大坂優子

干渉 SAR 時系列解析による地盤沈下の検出, 国土地理院時報 2013 No.124

表-1 スタッキングに用いた解析データ

(a) 北行軌道			(b) 南行軌道		
	観測日(マスター) 観測日(スレーブ)	基線長(m)		観測日(マスター) 観測日(スレーブ)	基線長(m)
1	2007/08/27 2009/09/02	-894	1	2007/07/19 2009/12/09	-27
2	2007/10/13 2009/12/03	-915	2	2007/07/19 2009/03/11	559
3	2007/11/28 2010/03/05	2	3	2007/10/19 2010/06/11	469
4	2007/11/28 2010/04/20	188	4	2007/10/19 2010/07/27	410
5	2008/04/14 2010/10/21	-511	5	2007/12/04 2010/09/11	691
6	2008/04/14 2010/12/06	-416	6	2008/06/05 2010/10/27	-235
7	2008/05/30 2010/09/05	-567	7	2008/07/21 2009/09/08	62

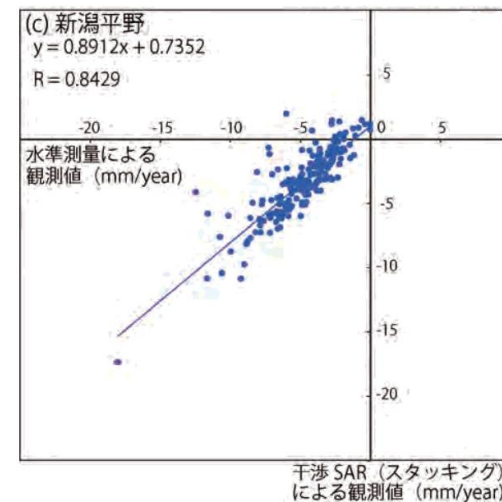


図-2 水準測量との比較図

2.5次元解析（北行軌道：4ペア、南行軌道：4ペア）

平均較差=0.3mm/年

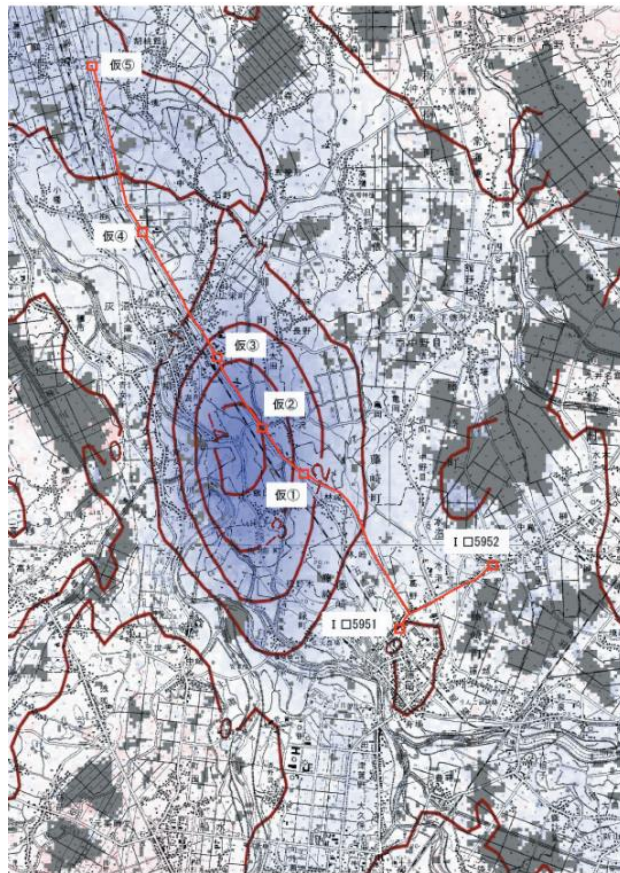


図-1 津軽平野における干渉SARのスタッキングの結果と水準路線

出典：森下 遊・鈴木 啓・雨貝知美・唐沢正夫・藤原みどり

干渉 SAR を活用した効率的な水準測量の実施へ向けた取り組み, 国土地理院時報 2010 No.120

表-1 スタッキングに用いた解析データ

	マスター観測日	スレーブ観測日
北行	2007/06/21	2008/06/23
	2007/09/21	2009/09/26
	2007/12/22	2008/06/23
	2008/06/23	2009/06/26
南行	2006/04/24	2007/04/30
	2006/07/28	2007/09/15
	2006/09/12	2008/09/17
	2007/09/15	2009/09/20

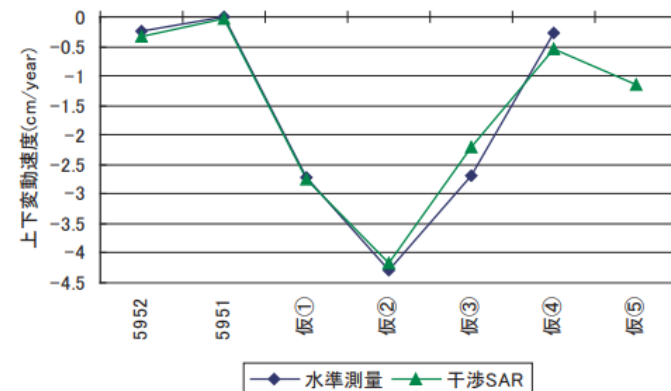


図-2 水準測量と干渉SARスタッキング解析の上下変動速度の比較

その他の活用方法

※概要補足版作成に伴い掲載情報を更新

衛星データの活用した地盤高観測は、対象地域を面的かつ容易に管理することが可能になります。経費、作業削減に寄与するだけでなく、過去に遡って解析を行うこともできます。さらに、地盤高の観測だけでなく、衛星データを活用した新たな活用策も期待できます。

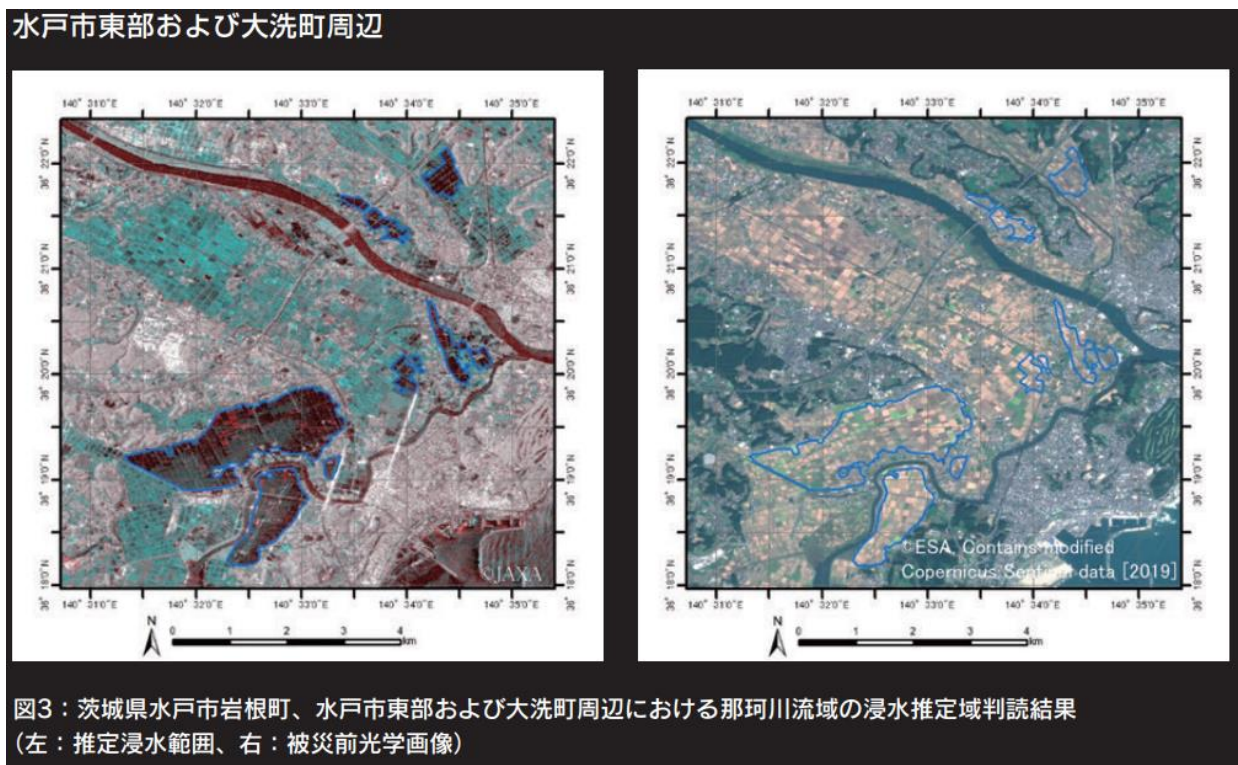


図-1 防災分野での利用事例（令和元年東日本台風）

出典：JAXA 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2014～2021
(https://earth.jaxa.jp/files/application/disaster/space_application_for_disaster_monitoring.pdf)

3.資料編

合成開口レーダー(Synthetic Aperture Radar)

SAR衛星では、観測衛星から地表に向かって電波を発信し、地表で反射して返ってきた電波（後方散乱）の強さ（振幅）や、返ってくるまでの時間（位相）を測定することで、地表が持つ性質や地表までの距離を計測しています。

観測衛星のアンテナが大きいほど、より分解能が高く、より詳細に対象物を判別できますが、衛星に搭載されるアンテナの大きさには限界があります。これを移動しながら電波を送受信することで、見かけ上大きな開口を持ったアンテナと同等な画像が得られるように合成しており「合成開口レーダー」と呼ばれます。

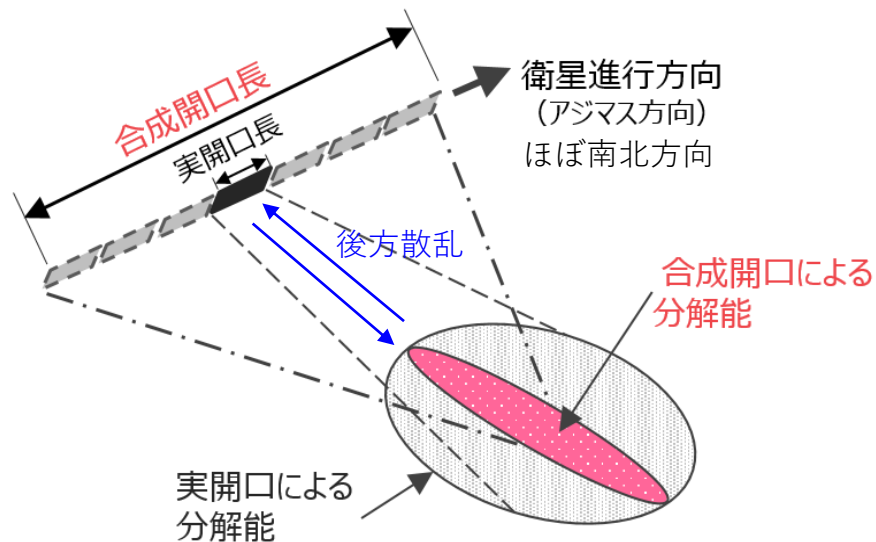


図-1 合成開口レーダー(SAR)

出典：干渉SARの原理（国土地理院）を一部改変
(https://www.gsi.go.jp/uchusokuchi/sar_mechanism.html)

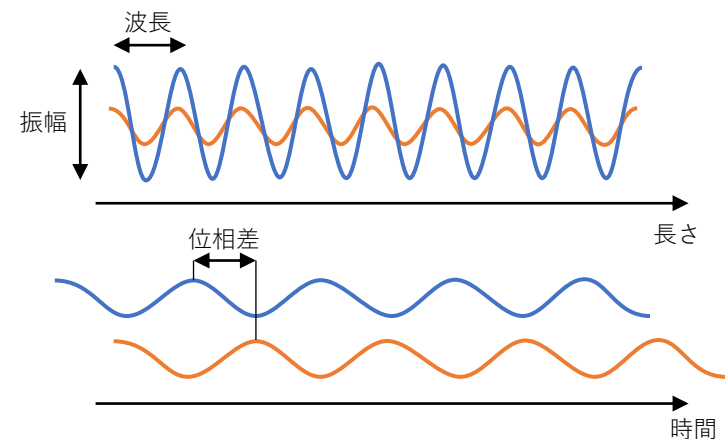


図-2 位相と振幅

干渉SARによる地盤変動量観測のしくみ

※概要補足版作成に伴い情報追加

SAR干渉画像の縞模様の色は、その地点の2回の観測データの距離の差を表現したものです。つまり、2回の観測で変化した変動量を表しています。
SARの波長(Lバンドレーダー)は約24cmなので、これを2で割った(往復距離なので2で割る)12cmが1周期の変動量であり、たとえば水色から次の水色までは変動量の差が12cmあることを意味しています。

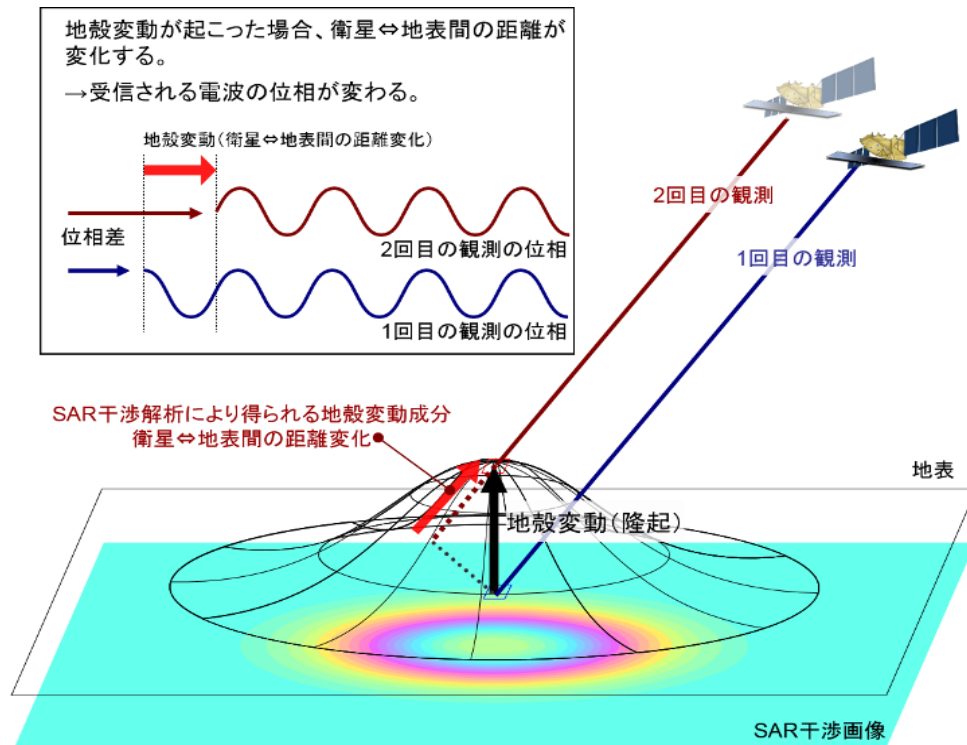


図-1 干渉SAR画像

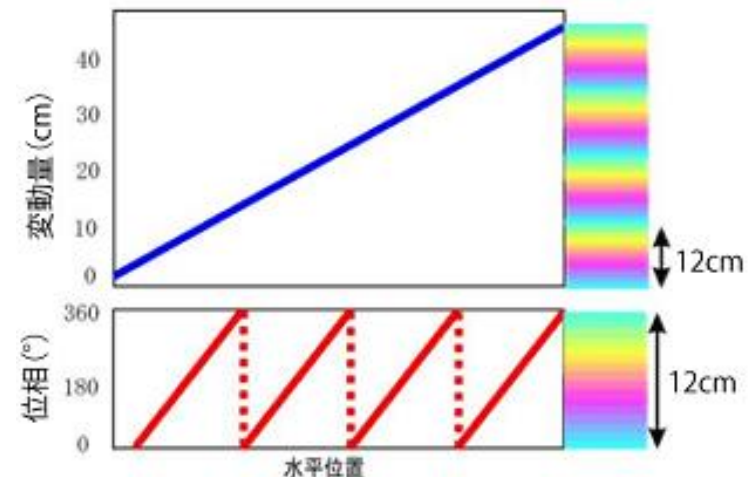


図-2 干渉縞

出典：干渉SARの原理(国土地理院)

(https://www.gsi.go.jp/uchusokuchi/sar_mechanism.html)

観測モードとは、観測の分解能や観測幅等観測の仕様を分類したものです。干渉解析を行うには、同じ観測モードのものを使用する必要があります。2023年には、新たにALOS-4の打ち上げが計画されており、観測幅が従来より広がり、分解能を維持しつつ、1回で観測できる範囲が飛躍的に向上する予定です。

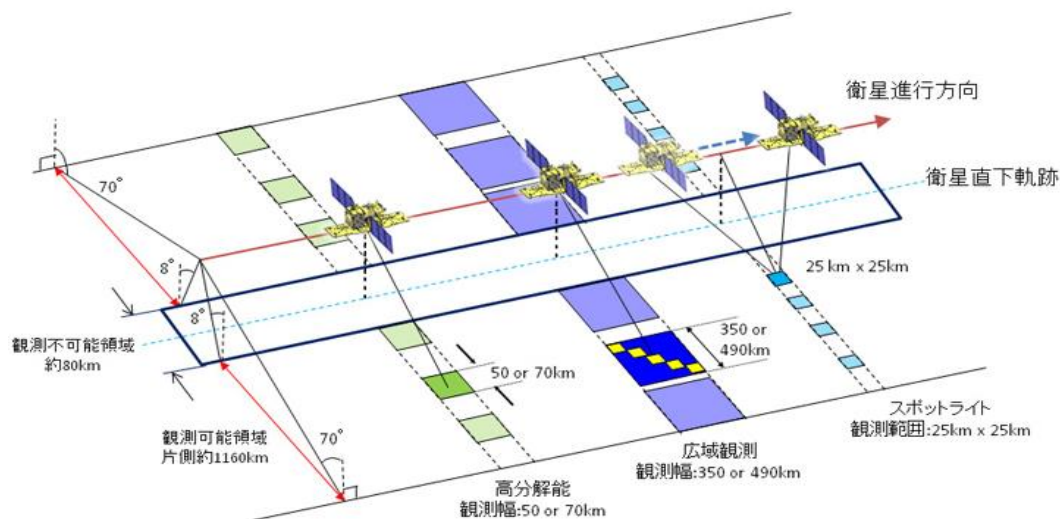


図-1 ALOS-2(PALSAR-2) 観測モード

出典：ALOS-2プロジェクト / PALSAR-2(JAXA)

(<https://www.eorc.jaxa.jp/ALOS-2/about/jpalsar2.htm>)

観測モード (分解能)	観測幅(ALOS-2)	観測幅(ALOS-4)
高分解能モード(分解能 3m、6m、10m)	50km, 70km	100km - 200km
広域観測モード(分解能 25m)	350km, 490km	700km
スポットライトモード(分解能 1m x 3m)	25km x 25km	35km x 35km

干渉SAR画像に含まれる誤差

※概要補足版作成に伴い情報追加

衛星データはSLC（Single Look Complex、シングルルック複素画像）と呼ばれる画像フォーマットで配布されています。このフォーマットには振幅だけでなく位相の情報が含まれていますが、地形や軌道による成分（地形縞、軌道縞）や、大気遅延などによる誤差が含まれています。

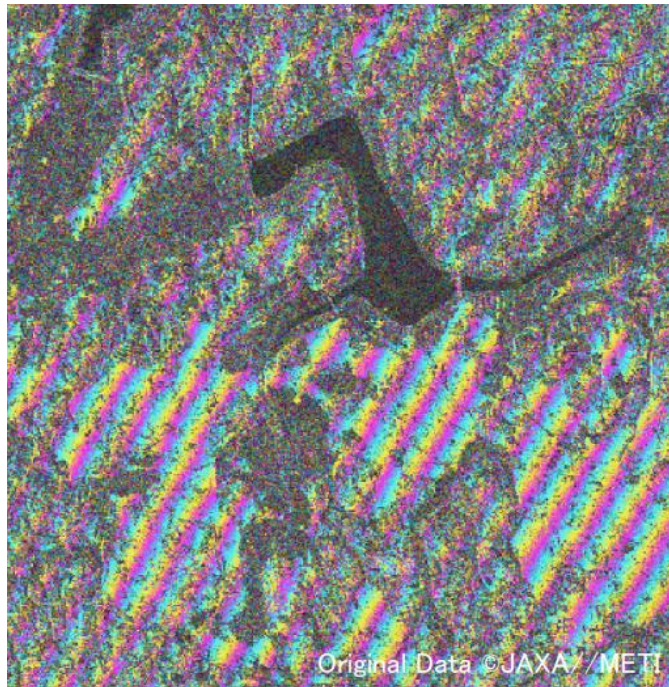


図-1 衛星データに含まれる地形縞

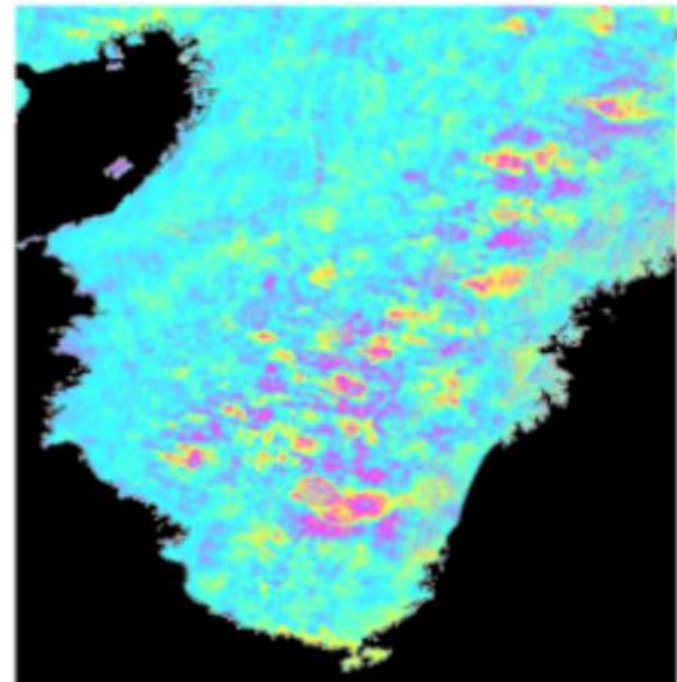


図-2 大気遅延による誤差

干渉SAR画像の解析方法

2時期の変動量を求めるため、1ペアの干渉SAR解析を行い、衛星データに含まれる大気遅延などの誤差を低減するために、スタッキング解析を行います。さらに精度を高め、水平成分と鉛直成分に分離するために2.5次元解析を行います。

解析手法	概要	特徴
1ペアの干渉SAR解析	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取り除き地盤高の変動画像を作成する。	<利点> 2時期の衛星データだけで解析できる。 地形縞、軌道縞が取り除ける。 <欠点> 大気遅延などの誤差が多く含まれる。
スタッキング解析 （時系列解析）	電離層、大気、植生等の影響を低減するため、複数枚の干渉ペアをスタックすることで、大気遅延の誤差等を低減し、精度向上を図る。	<利点> 大気遅延などの誤差が低減できる。 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、より多くのデータが必要になる。
2.5次元解析	北行軌道と南行軌道の異なる軌道の観測データを使うことで、変動成分を東西方向の水平変位と鉛直方向の変位に分離し精度を向上させる。	<利点> 大気遅延などの誤差をさらに低減できる。 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、解析可能な範囲が狭くなる。

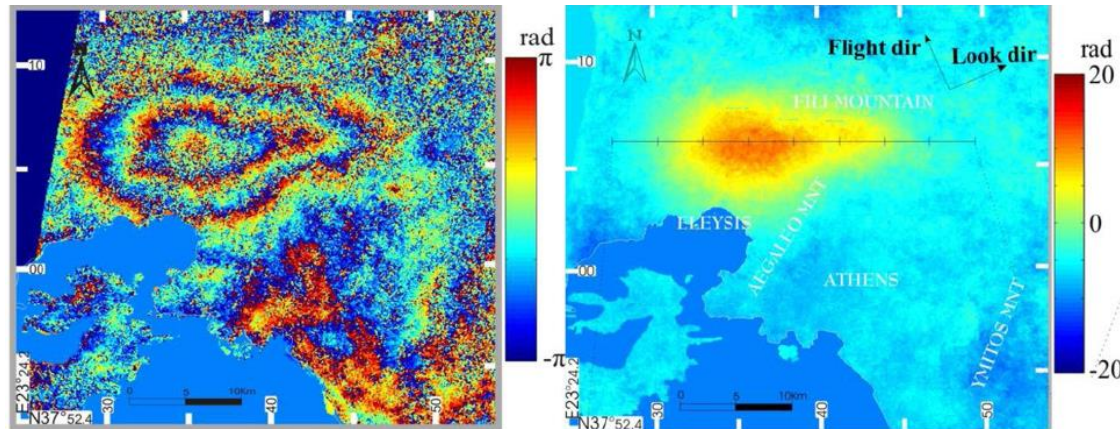
だいち 2 号(ALOS-2)以外にも、世界各国の機関でSAR衛星が運用されています。ALOS-2の観測された衛星データの無い期間についても、地盤沈下を把握する場合に、他のSAR衛星のデータを活用することが可能です。2023年には、だいち 4 号(ALOS-4)の打ち上げも予定されています。

表-1 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
RADARSAT2	カナダ [*]	MDA	2007-	3×3	20	C	24日
Sentinel-1A	欧州	ESA/EC	2014-	5×5	80 -250	C	12日 2基体制
ALOS-2/PALSAR-2	日本	JAXA	2014	3×3	50	L	14日
COSMO-SkyMed Second Generation	イタリア	ASI/MiD	2019-	3×3	40	X	16日 2基体制
RCM(RADARSAT Constellation Mission)	カナダ [*]	CSA	2019-	1×3	20-500	C	12日 3機体制
ALOS-4/PALSAR-3	日本	JAXA	2023(予定)-	3×3	100-200	L	14日

■ 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($0 \sim 2\pi$)として得られる。このため、周期的に色が変化する縞模様を呈し「干渉縞」と呼ばれる画像になる。この干渉縞画像を連続的な変化量となるように、つなぎ合わせる処理をアンラッピング処理と呼ぶ。



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-1 干渉縞画像（左）とアンラップ処理後画像（右）

■ 回帰式

二つのデータの組(x,y)を、座標平面上にプロットした時の分布を直線で近似的に表現したもの。1次式 ($y = ax + b$) で表される。衛星活用マニュアルでは、水準測量と衛星データの解析結果との比較に用いている。比較結果としては、傾きaは1に近いほど、切片bは0に近いほど良い。

■ 較差

二つの数値の差のこと。衛星活用マニュアルでは、水準測量の値と衛星データによる解析結果の値の差のことを較差としている。誤差の評価指標のひとつ。

■ 干渉性（コヒーレンス）

コヒーレンスは、同一地点の一定領域内における 2 時期間の後方散乱強度・電波位相の類似性を示す。一般に0～1 の実数で表される。数値が大きいほど強度・位相の相関性が高く、電波反射特性に関する変動が少ないことを表す。

■ スレーブ画像(slave)

干渉処理において使用する 2 枚の画像のうち、変化後の基準でない画像データのこと。

■ 大気遅延

大気中の空気や水蒸気などによってマイクロ波の伝搬速度に遅れが生じる現象。この影響で、天候が悪い日のデータでは、解析精度が低下する可能性がある。

用語集(3)

■ 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いる。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速度が遅くなる。

■ 標準偏差

統計的なデータの指標のひとつ。平均値からのデータのばらつきの程度を表す。水準測量との比較では、標準偏差の数値が小さいほど、誤差のばらつきが小さいと評価できる。

■ マスター画像(master)

干渉処理において使用する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。数値標高モデルと呼ばれる。

■ SAR

Synthetic Aperture Radarの略。合成開口レーダーのこと。ALOS、ALOS-2等の搭載されているセンサ。

■ SLC (Single Look Complex)

合成開口レーダ(SAR)の画像フォーマットのひとつ。画像として認識できる振幅の情報に加え、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の干渉処理には、このSLCフォーマットのデータが使用される。

■ InSAR

Interferometric SARの略。干渉SARのこと。同地域の2時期の合成開口レーダ画像を用いて、地表面の形や変動を算出する手法。地震による地殻変動や地盤沈下の把握に用いられる。