

合同シンポジウム

第一部 第43回 測量技術講演会

国土地理院 近畿地方測量部

公益社団法人 日本測量協会 関西支部

衛星SARの測量業務への 活用の可能性と課題

2024/10/08

京都大学大学院工学研究科
社会基盤工学専攻

須崎 純一

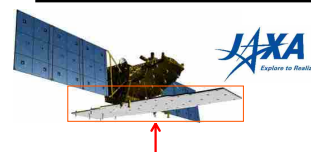
内容

1. 衛星SARと基本用語
2. 関連する法律・規程
3. 地盤沈下観測等における衛星活用
マニュアル(環境省:2017年3月)
4. JAXA ALOS-2事業化実証における議論
5. 国土地理院によるマニュアル等
6. 課題

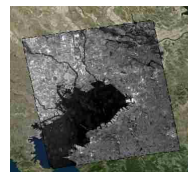
(1) 衛星SARと 基本用語

宇宙航空研究開発機構 (JAXA)
ALOS-2事業化実証(フェーズA)
2023年度 WG1(インフラ)会議資料からの抜粋
※JAXA様の許諾済み

ALOS-2(だいち)/PALSAR-2



Lバンド合成開口レーダ (PALSAR-2)



ALOS-2サンプル画像

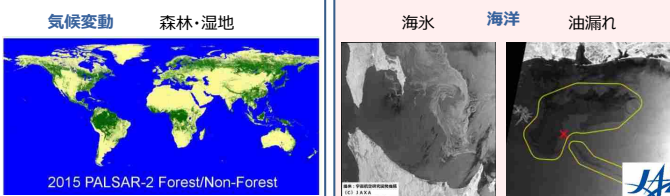
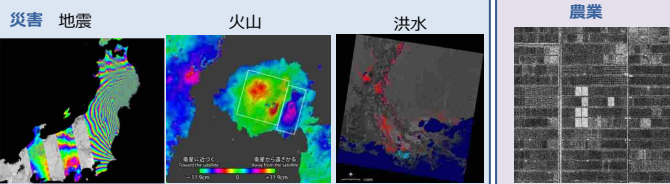
高分解能モード 観測幅: 50 km

種類	太陽同期準回帰軌道 (14日回帰)
運用軌道	高度 628km (赤道上)
通過時刻	12:00@赤道 (降交軌道)
打上げ	2014年5月24日
設計寿命	5年 (目標7年)
合成開口レーダ周波数	Lバンド (1.2GHz帯)
観測性能	スワッチング 分解能: 1x3m 観測幅: 25km
高分解能	分解能: 3/6/10m
観測幅	50/50/70km
広域観測	分解能: 100/60m
観測幅	350/490km

技術実証ミッションとして小型赤外カメラ (CIRC)、
船舶自動識別 (AIS) 信号受信機 (SPAISE2) を搭載

- 昼夜・天候の影響を受けず観測可能
- 防災、森林管理、農業、土地被覆、海水
監視、インフラ監視などの分野で利用

ALOS-2ミッション

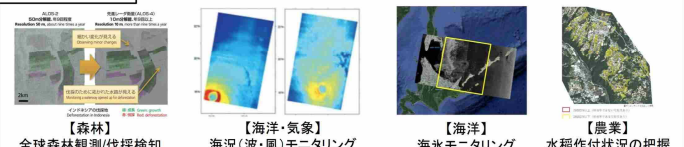


参考: ALOS-4

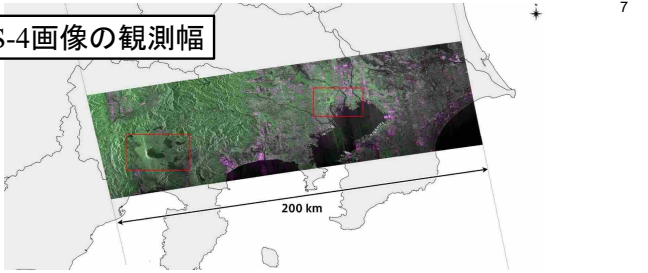
- 「だいち2号」の後継機にあたり、Lバンド合成開口レーダ (SAR) を搭載。空間分解能 (3m) を維持しつつ、観測幅を4
倍 (200km) に拡大し、観測頻度を向上。また、AIS (船舶自動識別装置) の受信機「SPAISE3」も搭載。



想定されるユースケース例



ALOS-4画像の観測幅



ALOS-2画像の観測幅

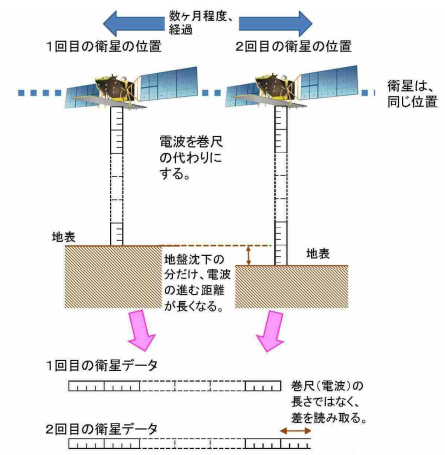
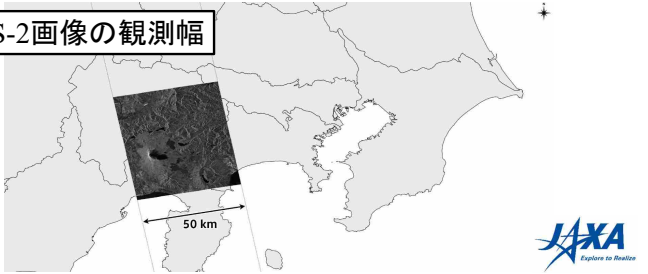
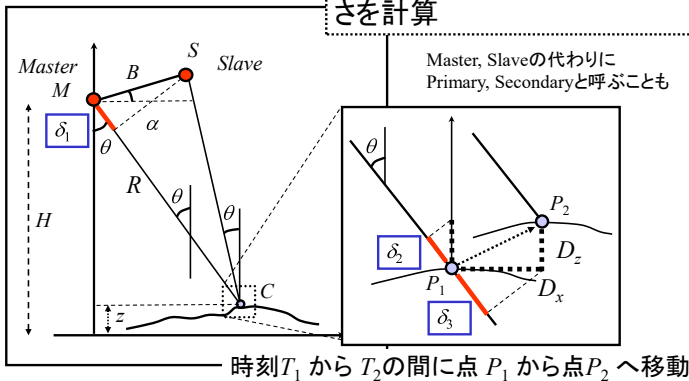


図 1-1 SAR 衛星による地盤沈下監視の原理

<https://www.env.go.jp/content/000135342.pdf>

干渉SARの原理

コヒーレント性(位相が揃っている)を利用して、位相を計測し、それに基づきパスの長さを計算



時刻 T_1 から T_2 の間に点 P_1 から点 P_2 へ移動

参考: Small BAseline Subset method (SBAS)

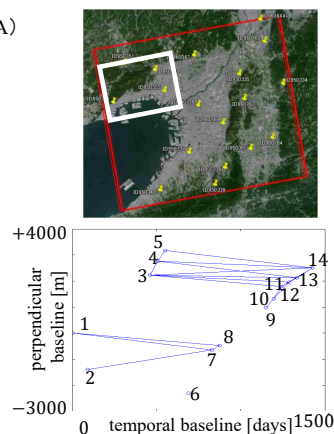
- **SBAS**: 基線長が短く、変動の計測に有効な干渉画像のみを、組み合わせる手法
 - 沈下量(沈下速度 v)だけでなく、DEMエラー Δz も未知数として推定可能 ($\Delta \varphi_{DEMerror} = c_j \Delta z$ と表されることを利用)
- 誤差が平均化されると同時に、局所的なDEMエラーも除去

$$\begin{bmatrix} t_1 - t_0 & \cdots & c_1 \\ t_1 - t_0 & t_2 - t_1 & c_2 \\ \vdots & \vdots & \vdots \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \partial v_1 \\ \partial v_2 \\ \vdots \\ \partial \Delta z \\ \partial v \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \partial \Delta \varphi_{ps1} \\ \partial \Delta \varphi_{ps2} \\ \vdots \\ \partial \Delta \varphi_{psN} \end{bmatrix} \rightarrow \text{相対的な沈下速度 } \partial v$$

SBASの例

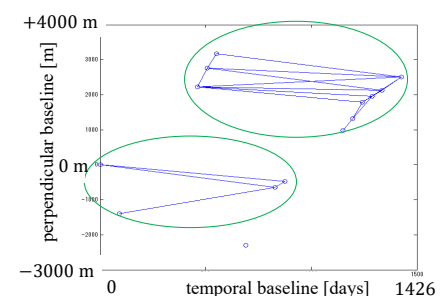
14 ALOS-PALSAR images (JAXA)

No.	year	month	day
1	2006	10	8
2	2007	1	8
3	2008	1	11
4	2008	2	26
5	2008	4	12
6	2008	8	28
7	2009	1	13
8	2009	2	28
9	2009	12	1
10	2010	1	16
11	2010	3	3
12	2010	4	18
13	2010	6	3
14	2010	9	3



91 DInSAR phases can be generated from 14 SAR images

→ 23 DInSAR phases were selected whose perpendicular baselines are less than 800 m and temporal baselines are less than 1000 days.



(2) 関連する法律・規程

■ 災害リスク管理

- ◆ 1958 地すべり等防止法
- ◆ 2008 地すべり防止技術指針及び同解説(国土交通省)
- ◆ 2011 地すべり監視体制構築の手引き(農林水産省)
- ◆ 2016 山地災害危険地区調査要領(林野庁)
- ◆ 2018 災害時の人工衛星活用ガイドブック水害版・衛星基礎編/水害版・浸水編/土砂災害版(JAXA・国土交通省)

■ インフラ管理

- ◆ 1961 盛土規制法
- ◆ 1964 河川法
- ◆ 2007 大規模盛土造成地の変動予測調査ガイドライン(国土交通省)
- ◆ 2016 河川砂防技術基準維持管理編(ダム編)(国土交通省)
- ◆ 2019 道路土工構造物点検要領(国土交通省)

関連法律等

■ 地盤沈下調査

- ◆ 1949 測量法
- ◆ 2006 地盤沈下ガイドライン(環境省)
- ◆ 2017 地盤沈下観測等における衛星活用マニュアル(環境省)
- ◆ 2022 衛星合成開口レーダー地盤変動測量作業規程(国土地理院)
- ◆ 2023 干渉SAR時系列解析結果(全国時系列解析)(国土地理院)
- ◆ 2023 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(環境省)
- ◆ 2024 衛星SARによる上下変動測量マニュアル(国土地理院)

(3) 地盤沈下観測等における衛星活用マニュアル

2017年3月 環境省

<https://www.env.go.jp/content/000135342.pdf>

地盤沈下観測のための作業手順

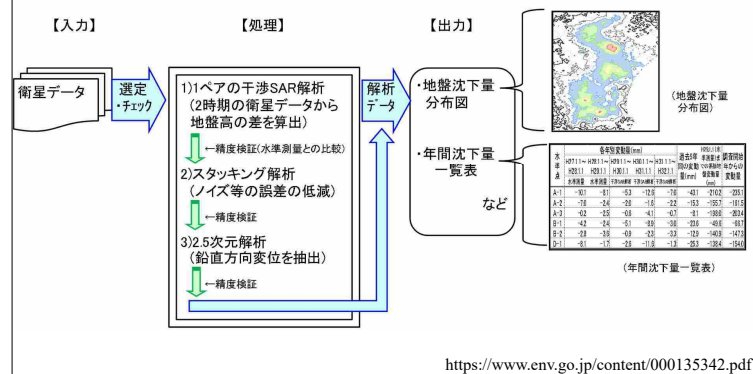


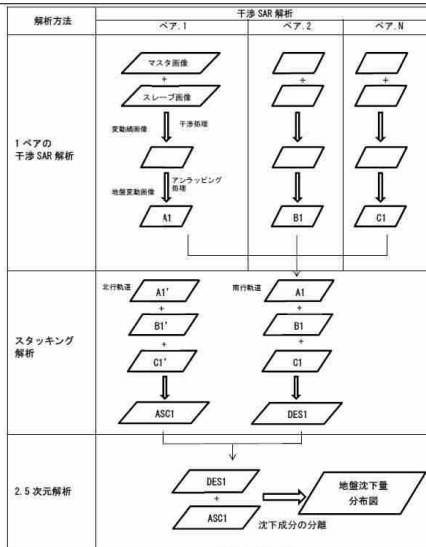
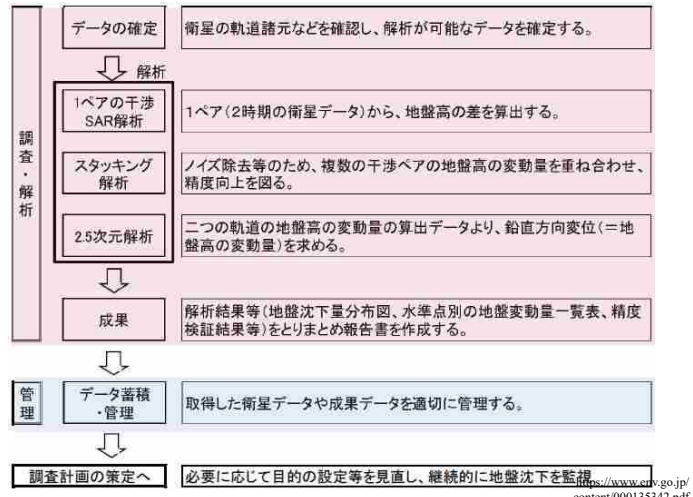
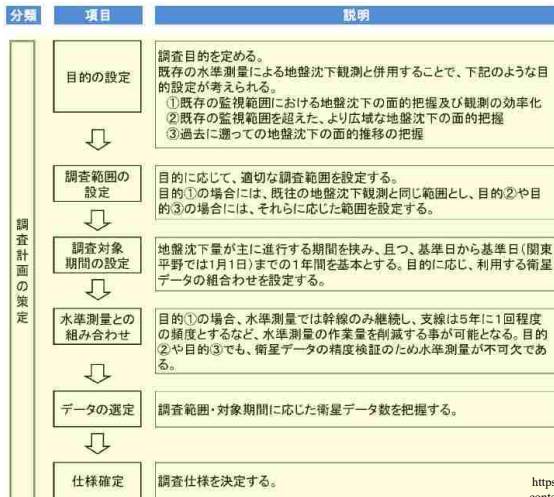
表 1-1 水準測量のみの場合と水準測量に衛星データを併用した場合の特徴

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
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。	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。
水準点のない場所では、地盤沈下の有無は分からない。	水準点の有無に関わらず、面的に地盤沈下を把握。
	水準点のない場所でも、新たに判明した地盤沈下。
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。	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。

<https://www.env.go.jp/content/000135342.pdf>

利点	・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。	・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、比較的安全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	・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。	・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)

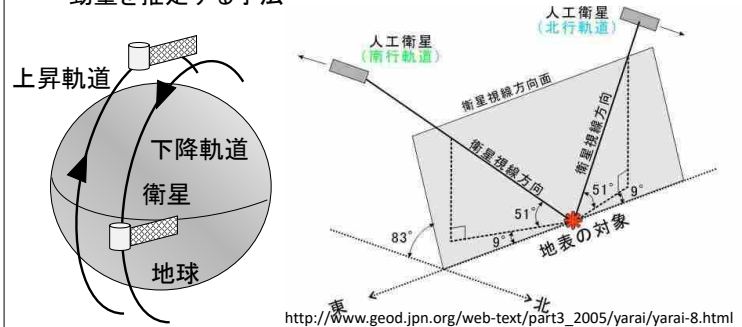
<https://www.env.go.jp/content/000135342.pdf>



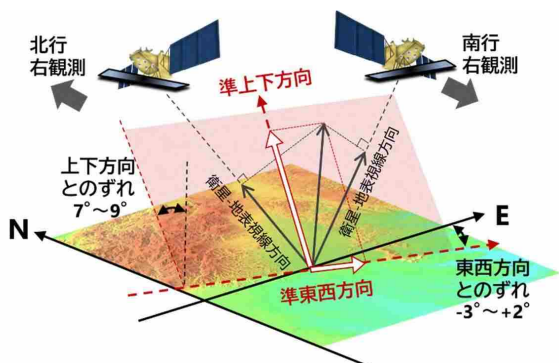
2.5次元解析

■2.5次元解析 (Fujiwara et al., 2000)

上昇軌道と下降軌道を組み合わせることによって、2次元の変動量を推定する手法



2.5次元解析の模式図



2.5次元解析用の観測方程式

SAR由来の観測値

$$\begin{bmatrix} V_{SAR}^{ASC} \\ V_{SAR}^{DES} \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \varphi_{ASC} \sin \theta_{ASC} & \sin \varphi_{ASC} \sin \theta_{ASC} & \cos \theta_{ASC} \\ \cos \varphi_{DES} \sin \theta_{DES} & \sin \varphi_{DES} \sin \theta_{DES} & \cos \theta_{DES} \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V^e \\ V^n \\ V^u \end{bmatrix}$$

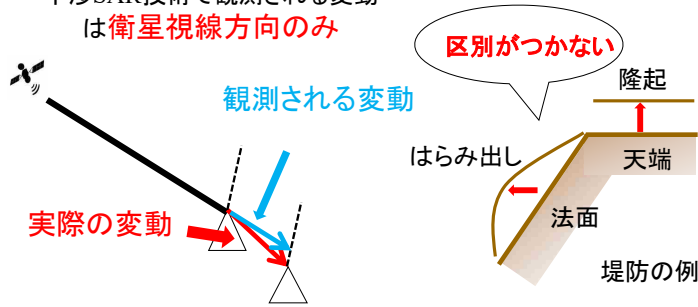
計画行列: 観測条件を反映

推定値

⇒ 最小二乗法にて、 $[v^e \ v^u]^T$ を推定
($v^n = 0$ と仮定することで解ける)

補足：衛星SARからの三次元変動推定

干渉SAR技術で観測される変動
は衛星視線方向のみ



干渉SAR技術を用いた三次元変動推定手法への期待

(参考)環境省ガイドラインでは「1 km²に1か所の密度での年1回の地盤高の観測」が推奨

2. 地盤高の観測

地盤高の観測は、地盤沈下の発生状況を直接把握する上で基本となる情報であり、同一点を経時的に観測することにより地盤沈下の状況を把握することができ、今後の予測や対策を図る上で重要な資料となる。観測範囲は、地盤沈下の状況を把握できるような範囲で観測することが望ましく、特に現在地盤沈下が進行している地域については、沈下現象が面的に把握できるよう詳細に観測する必要がある。

(1) 水準点の配置

水準点の配置は、調査対象区域を網羅できるよう1 km²に1か所の密度に設けることを標準とするが、沈下の状況や土質・地質、土地利用状況等の地域特性により配置の増減を図るものとする。また、十分に調査検討し、今後地盤沈下が発生する恐れがないと判断される地域については、地盤沈下現象が把握できる程度に効率化を図ることができるものとする。なお、観測に当たっては、他機関の観測資料を活用するなど、効率的かつ経済的な配置となるよう留意する必要がある。

(2) 観測の頻度

観測の頻度は、年1回(毎年同時期に観測)を標準とする。ただし、沈下の著しい地域や地下水利用の季節変動が大きく、地盤沈下に季節性が想定される地域などにおいては、必要に応じて年に数回実施するものとする。

(3) 観測の精度

観測の精度は、測量法第33条の規定に基づき、国土交通省公共測量作業規定で定める一級水準測量の精度を原則とする。

<https://www.env.go.jp/content/000135342.pdf>

(4) JAXA ALOS-2事業化 実証における議論(2023年度)

宇宙航空研究開発機構(JAXA)
ALOS-2事業化実証(フェーズA)
2023年度WG1(インフラ)会議資料からの抜粋
※JAXA様の許諾済み

衛星SAR画像解析結果を水準測量へ応用する際の課題

背景	- ALOS-2データの蓄積とともに衛星データによる地盤沈下観測例の増加 - 地盤沈下監視マニュアル(環境省)にて干渉SAR時系列解析結果の活用方法を検討中	地盤沈下監視マニュアル等の整備状況 「地盤沈下監視等における衛星活用マニュアル(環境省)」(策定中(N23)) 「衛星合成開口レーダー地盤変動量作業規程(国土地理院)」(策定(N4)) 「干渉SAR時系列解析結果活用マニュアル(国土地理院)」(策定(N5)) 「地盤沈下監視等における衛星活用マニュアル(環境省)」(策定(N5)) 「公共測量作業規程の改訂(衛星SARを用いた上下変動測量マニュアル(国土地理院))」(策定中)
現状	「地盤沈下監視ガイドライン(環境省)」にて、地盤沈下監視における観測・調査項目、頻度、精度(一級水準測量)が規定。ただし、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できると定められている。 - 水準測量と対比し精度を確認する必要があることから、「地盤沈下監視等における衛星活用マニュアル(環境省)」では、水準測量と併用する形で地盤沈下監視における衛星データの活用が認められている。	
課題	- 地盤沈下監視において衛星データを活用したInSAR解析を導入すれば、観測の効率化が図られる(より広い範囲を面的に把握することができる)が、「地盤沈下監視等における衛星活用マニュアル(環境省)」に示された方法(個別に自ら実施するInSAR解析と水準測量を併用)では、年間の調査面積が増大すると調査費用の総額が増加してしまう。予算確保が困難な状況では導入が困難。 - 自治体によっては、現行の地盤沈下監視ガイドラインに示された水準点の密度よりも高い分解能で調査を実施し、局所的な地盤沈下を監視したい要望あり。	
要望案	- 地盤沈下監視における衛星データの継続的な活用には、単年度の調査費用を従来手法より低減させる必要。 「地盤沈下監視等における衛星活用マニュアル(環境省)」の手法だけでなく、国土地理院の干渉SAR時系列解析結果を用いることにより、地盤沈下監視の精度を確保しつつ、調査費用の総額を低減する方法を探るのが重要。 - 地盤沈下調査で必要とする空間分解能は地域特性により異なることから、それぞれの自治体の状況・ニーズに応じた水準測量とInSAR解析の併用方法を検討することが必要。 - この際、当該マニュアルの発元である環境省への相談が必須。	
提案先	- 環境省 水・大気環境局 水環境課 地下水・地盤環境室 - 国土交通省 国土地理院	

水準測量とInSAR解析の組み合わせによる経済効果

	水準測量のみ	①案	②案	③案
水準測量(幹線)	毎年	毎年	毎年	毎年:変動量小さい箇所では緩和
水準測量(支線)	毎年	1回/5年	隔年:InSARと交互	隔年:InSARと交互
InSAR解析	—	毎年	隔年:水準測量と交互	隔年:水準測量と交互
費用(10年)	0.84億円	1.23億円	1.08億円	0.80億円
費用の詳細	- 観測対象地域3区画の内、1区画にて地盤沈下調査を実施 - 水準測量面積:3区画合計で約200 km²(幹線:67km² 支線:133km²) 1区画当たり66.6km²(幹線:22.2km² 支線:44.4km²)と想定 - 水準測量費:幹線:280万円/区画 支線:560万円(12.6万円/km²) - 民間InSAR解析費:700万円/区画 3区画合計で約1380 km² ※観測対象範囲面積 - 衛星画像購入費:8万円/枚(初年度:3シーン(A/D)×25枚=600万円、2年目以降:3シーン(A/D)×5枚=120万円) - 地理院干渉SAR時系列解析の確認、比較、地盤沈下図作成:300万円			

【仮定】「InSAR解析結果において年間変動量が10mm以下」の基準を満足する場合に、地盤変動量が小さい箇所としての水準測量の実施間隔の見直しを行う

地盤沈下観測等における衛星活用マニュアル

(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)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く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($\sigma=0.5cm$)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 $1\sigma=0.5cm$ を精度指標とする。

地盤沈下分布図に示される地盤沈下は1cm以上のもの
→1cm以下の地盤沈下は「地盤変動量が小さい箇所」とみなすことが可能

衛星データ活用において求められる較差(水準測量とInSAR解析のとの差)が0.5cm
→水準測量に対するInSAR解析の精度は満足しているものとして想定

以下の基準を満足する場合に、地盤変動量が小さい箇所としての水準測量の実施間隔の見直しを行い、結果として50%程度の緩和と想定
例えば、InSAR解析結果において年間変動量が10mm以下[変動量の観点]

地盤沈下に関する現状と課題

求めるアウトカムの定義	必要なアウトプットの定義	必要なアウトプットの創出	十分な費用対効果の提供	他ユーザーへの横展開
「県の地盤沈下調査コストの削減」として定義	・環境省基準の精度や年に1度の頻度での提供など、定義されている	・十分な精度、頻度でInSAR解析が実施できている	・現状のマニュアル・ガイドラインに則ってInSAR解析を行うと、コスト増となり実行困難	・地盤測量業者も対応できる形での横展開を検討する必要

地盤沈下調査に関するガイドライン・マニュアルの改訂

- 「地盤沈下監視ガイドライン(環境省)」及び「地盤沈下観測等における衛星活用マニュアル(環境省)」の改訂に向けたアクション案
- ガイドライン改訂案・横展開の方針案
- (参考)ユーザーからの地盤沈下監視における調査費用低減に向けたアイデア

事業化に向けた意見・課題：地盤沈下

- 衛星データの活用を推進していくためには、単年度の費用低減が可能な水準測量との併用方法が課題
- 国土地理院干涉SAR時系列解析結果では解析事業者等が詳細な時系列解析結果を参照できないため、時系列解析結果や数値データの取得が可能となる閲覧システムを別途構築予定
- 他自治体への横展開に向けて、国土地理院地方測量部や日本測量協会地方支部が自治体に対して実施している公共測量説明会にて、地盤沈下調査における衛星データ活用に関する説明が必要ではないか

課題解決後のありたい姿

	課題	対策
アクセシビリティ	■ 紙データやバラバラの形式 - 紙データしか収集できず衛星データとの組合せられない - 地上データの形式が統一されておらず、解析事業者側にて衛星データとの組み合わせに向けた調整等手間が発生 ■ 異なるプラットフォーム・自治体内での情報連携不足 - 自治体では公開プラットフォームが統一されていない - 自治体内でもデータの保有部署が異なり、データ収集には各部署への問い合わせが必要	■ デジタル庁にて推進中のオープンデータへの取組みにて対応
網羅性	■ 南北方向の変動量把握が困難 - 南北方向の変位量測定が十分な精度で捉えられない ■ 高分解能な地上データの不足 - 各府省庁のオープンデータは広域・低分解能データが中心であり詳細データは公開が限定 - 自治体保有の詳細な地上データは公開されていないものが多い	■ 2.5次元解析等による精度検討 2.5次元解析や3次元解析を用いて高精度な南北方向の変位量測定が可能か検討 ■ 網羅的な地上データセット - 広域で低分解能な地上データから詳細な地上データまで網羅的に取り揃えて公開することで、ユーザーニーズに応じた適切な地上データの選択と適切な解析が可能

【解析の高度化】
・高分解能衛星データと高分解能な地上データとを組み合わせ、実際に即した解析やユーザーが求める示唆を導出

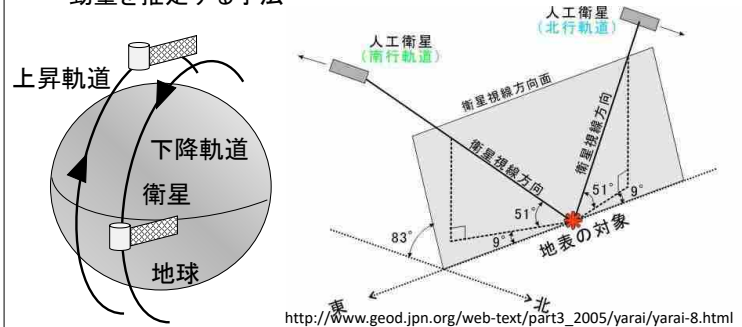
【官民連携・横展開の推進】
・民間企業が行政に対して、オープンデータを活用した新たなサービス提供・協働・共創の可能性
・オープンデータを活用し他自治体へのサービスの横展開が容易

【地域課題の解決】
・産官学有志によるオープンデータを活用した被災状況等把握

2.5次元解析

■ 2.5次元解析 (Fujiwara et al., 2000)

上昇軌道と下降軌道を組み合わせることによって、2次元の変動量を推定する手法



2.5次元解析用の観測方程式

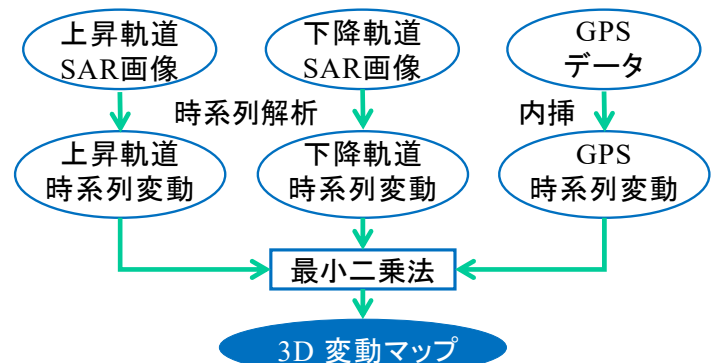
SAR由来の観測値

$$\begin{bmatrix} V_{SAR}^{ASC} \\ V_{SAR}^{DES} \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \varphi_{ASC} \sin \theta_{ASC} & \sin \varphi_{ASC} \sin \theta_{ASC} & \cos \theta_{ASC} \\ \cos \varphi_{DES} \sin \theta_{DES} & \sin \varphi_{DES} \sin \theta_{DES} & \cos \theta_{DES} \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V^e \\ V^n \\ V^u \end{bmatrix}$$

計画行列: 観測条件を反映

⇒ 最小二乗法にて、 $[V^e \ V^u]^T$ を推定
($V^n = 0$ と仮定することで解ける)

三次元解析手法



三次元推定用の観測方程式

SAR由来の観測値

$$\begin{bmatrix} V_{ASC} \\ V_{DES} \\ V_{GPS}^e \\ V_{GPS}^n \\ V_{GPS}^u \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\theta_{H,ASC}\sin\theta_{I,ASC} & \sin\theta_{H,ASC}\sin\theta_{I,ASC} & \cos\theta_{I,ASC} \\ \cos\theta_{H,DES}\sin\theta_{I,DES} & \sin\theta_{H,DES}\sin\theta_{I,DES} & \cos\theta_{I,DES} \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v^e \\ v^n \\ v^u \end{bmatrix}$$

GNSS由来の観測値

計画行列: 観測条件を反映
(θ_H : 方向角, θ_I : 入射角)

推定値

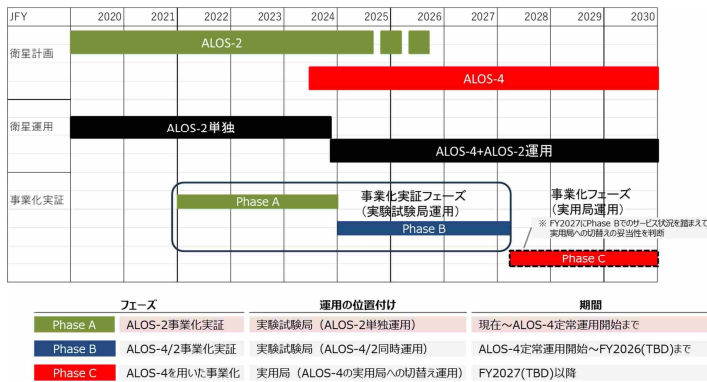
⇒ 最小二乗法にて, $[v^e \ v^n \ v^u]^T$ を推定

(4) JAXA ALOS-2事業化実証における議論(2024年度)

宇宙航空研究開発機構 (JAXA)
ALOS-2事業化実証(フェーズA)
2024年度 会議資料からの抜粋

※JAXA様の許諾済み

現在のPhase



ALOS-2,4の観測幅、観測頻度

観測幅の比較

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

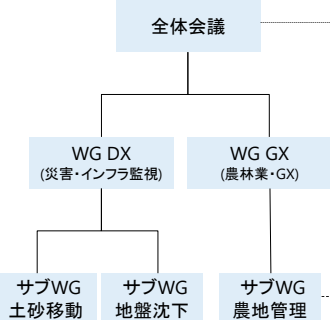
国内の基本観測で予定されている観測頻度の比較

分解能	ALOS-2	ALOS-4
高分解能モード (分解能3 m)	年4回	年20回程度(2週に1回)

※広域観測モードを除き、ALOS-2, 4のデータの干渉解析は可能。また、3 mモードはALOS-2は基本は単偏波、ALOS-4は2偏波

2024年度の会議体

会議体の階層構造



各会議体の目的

- 官民それぞれのテーマでALOS-2,4の定常利用によって目指す姿、それに向けたアクションプラン (What)を主に議論

- DX/GX各実証事業の課題解決やALOS-2,4の定常利用に向けたアクションプランの実行方法 (How)を主に議論
- 各事業者の実証事業のとりまとめ

- 各テーマで主務官庁にもオブザーバー参加などの依頼を行い、定常利用に向け確かな進捗創出
- 実証事業者にも参加を依頼し、ユーザーニーズの具体化、市場形成に向けて議論

(5) 国土地理院によるマニュアル等

衛星合成開口レーダー
地盤変動測量作業規程
(国土地理院: 2022年4月)

<https://www.gsi.go.jp/common/000241120.pdf>

■（目的）

第1条 この規程は、測量法（昭和24年法律第188号）第4条に規定する基本測量のうち、衛星合成開口レーダー地盤変動測量の作業方法及び精度管理の基準を定め、測量成果の精度を確保することを目的とする。

■（定義）

第2条 この規程において、次の各号に掲げる用語の意義は、それぞれ当該各号に定めるところによる。

- 一 衛星合成開口レーダー地盤変動測量とは、人工衛星に搭載された合成開口レーダー（以下「SAR」という。）により繰り返し観測されたデータを用いて、地表の変位量を求める測量をいう。
- 二 SAR干渉解析とは、概ね同じ位置から異なる2時期に観測されたSARデータの差分を用いて、地表の変位量を求めるための解析をいう。
- 三 SAR干渉画像とは、SAR干渉解析結果によって得られた画像をいう。
- 四 干渉SAR時系列解析とは、多数のSAR干渉画像を統計的に処理することにより、地表の変位の時間変化を求める解析をいう。
- 五 2.5次元解析とは、対象の領域に対し異なる位置から衛星が観測したデータを用いて、準東西方向及び準上下方向の地表の変位量を求める解析をいう。この場合において、準東西方向、準上下方向とは、解析により得られた地表の変位の方向が東西方向、上下方向からわずかにずれていることを示す。

<https://www.gsi.go.jp/common/000241120.pdf>

■（SAR干渉解析）第9条運用基準に定める条件に適合するデータを用いて、SAR干渉解析を実施する。

■ 2 SAR干渉解析に用いる観測データは、Lバンドの電波を用いて観測されたデータを標準とする。

■ 3 SAR干渉解析は、運用基準に定める方法で実施する。

■（干渉SAR時系列解析）第10条前条に定めるSAR干渉解析で得られたSAR干渉画像を用いて、干渉SAR時系列解析を実施する。

■ 2 干渉SAR時系列解析は、運用基準に定める方法で実施する。

■（2.5次元解析）第11条前条に定める干渉SAR時系列解析の結果を用いて、2.5次元解析を実施する。

■ 2 2.5次元解析は、運用基準に定める方法で実施する。

■（測量成果等の整理）第12条第10条に定める干渉SAR時系列解析結果及び前条に定める2.5次元解析結果のうち、運用基準に定める条件及び方法により算出した結果を衛星合成開口レーダー地盤変動測量の測量成果とする。

■ 2 測量成果及び測量記録は、運用基準に定める方法により整理する。

<https://www.gsi.go.jp/common/000241120.pdf>

(5) 国土地理院による マニュアル等

衛星SARによる上下変動測量 マニュアル (国土地理院:2024年6月)

<https://www.gsi.go.jp/common/000259158.pdf>

本マニュアルの使用方法

■ ①公共測量を実施する場合

測量計画機関において作業規程の準則を準用している場合、準則第17条（機器等及び作業方法に関する特例）第3項の規程に基づく国土地理院が整備した新たな測量技術に関するマニュアルとして使用することができる。測量計画機関は、公共測量を実施する際にはあらかじめ測量法第36条（計画書についての助言）に基づく国土地理院の技術的助言を受けなければならない。その際、提出する計画書に本マニュアルを使用する旨を記載する。

■ ②基本測量及び公共測量以外の測量を実施する場合

基本測量及び公共測量以外の測量を実施する場合にも、本マニュアルを利用することができる。利用に当たっては、利用目的に応じて本マニュアルに示す各種基準や精度管理表等が当該測量に適しているかを確認する必要がある。

本マニュアルの構成

第1章 総則

第2章 衛星 SAR 地盤変動測量成果等を用いた上下変動測量

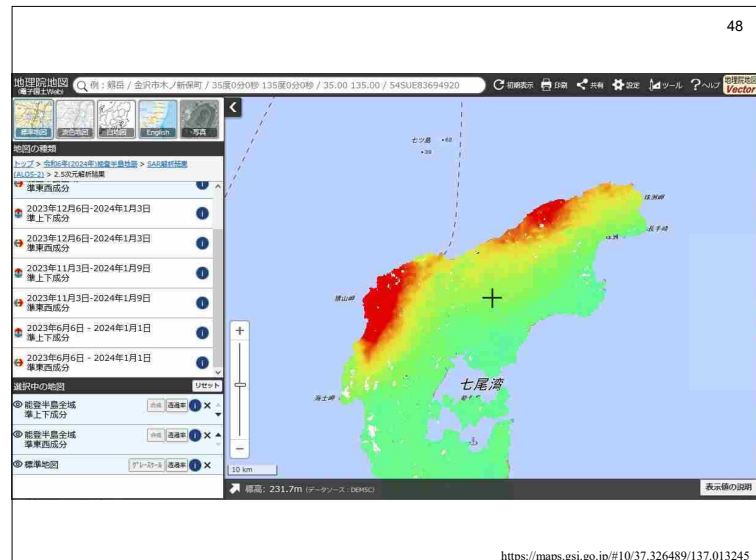
衛星SAR地盤変動測量成果等を用いた上下変動量計算を実施するにあたっての工程別作業区分及び作業手法について規定

第3章 干渉 SAR 時系列解析

国土地理院の公開・提供する衛星 SAR地盤変動測量成果を用いず、SAR干渉解析によるSAR干渉画像の作成、作成したSAR干渉画像を用いた干渉SAR時系列解析の作業手法について規定。

第4章 資料

衛星SAR地盤変動測量成果等を用いた上下変動測量を実施するにあたっての精度管理のための標準様式を規定。参考資料を添付。



<https://maps.gsi.go.jp/#10/37.326489/137.013245>

◆ 第9条「衛星 SAR 地盤変動測量成果等を用いた上下変動測量」とは、衛星 SAR 地盤変動測量成果等及び基準点の標高を測定する測量（以下「地上測量」という。）によって得られる上下変動量を用いて、調査対象地域及び対象期間の上下変動分布を得るための測量をいう。

◆第10条 地上測量は、2級水準測量相当以上の精度で上下変動量を測定可能な方法とする。

「だいち 2号」の観測データを用いる場合には、必要に応じて過去の観測データを用いることで8観測以上を確保すること。「だいち 4号」等の高頻度観測衛星のデータを用いる場合には、入手可能な調査対象期間の前後1ヶ月の間に観測されたデータを全て用いることを標準とする。

(SAR 干渉解析)

- ◆ 第25条 前条で取得した衛星 SAR 観測データを用いて SAR 干渉解析を実施し、SAR 干渉画像を作成する。

<第25条 運用基準>

SAR 干渉解析は、北行軌道及び南行軌道それぞれについて、以下の条件及び手順で実施することを標準とする。

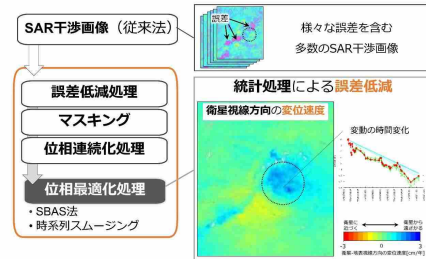
1. SAR 干渉解析に用いる解析データの観測ペアの選択基準は、垂直基線長及び観測間隔に基づいて選択することとし、垂直基線長 200m 以内、南行軌道は観測間隔 730 日以内、北行軌道は観測間隔 1095 日以内を標準とする。このほかの観測ペアの選択基準に基づく場合には、計画機関に承認を得ること。また、実際に適用した観測ペアの選択基準は、解析結果とともに作業記録として明示すること。

2. SAR 干渉解析は、以下の項目の作業を行うことを標準とする。

- (1) 2 時期の観測データの位置合わせ
- (2) 初期干渉画像の作成
- (3) 軌道縞・地形縞の除去
- (4) 各種補正手法の適用
- (5) フィルター処理

対流圏遅延補正、電離層遅延補正、電子基準点データ(GNSS補正)や多項式曲面近似式等による長波長補正

- 対流圏による誤差と電離層による誤差の低減処理を施した、複数の干渉画像を用意します。
- 次に、これら入力データに対してGNSSを使用した長波長補正を行い、さらに正規化位相分散(隣接する領域内の位相のばらつきを示す指標)に基づくマスクによって干渉画像内の品質の悪いデータを、水部マスクによって水域のデータを除外します。
- これらの処理を行い得られた複数の干渉画像の位相データを位相連続化処理によって変位量に変換し、最後に位相最適化処理を行うことで、各観測日の変位量と観測期間における変位速度を推定することができるようになります。



https://www.gsi.go.jp/uchu/sokuchi/sar_tsa.html

(干渉 SAR 時系列解析)

- ◆ 第26条 前条で得られたSAR干渉画像を用いて、干渉SAR時系列解析を実施する。

<第26条 運用基準>

1. 干渉SAR時系列解析は、スタッキング法又はSBAS法を用いることを標準とする。
2. 干渉SAR時系列解析は、北行軌道及び南行軌道それぞれについて、以下の項目の作業を行うことを標準とする。

- (1) 位相連続化処理
- (2) 位相連続化処理画像の確認
- (3) 長波長誤差の補正
- (4) ジオコード
- (5) 位相最適化処理(SBAS法のみ)
- (6) 変位速度の推定

(1)から(4)までの処理は、前条で得られた全てのSAR干渉画像に対し、個別に処理を行い、その結果得られたデータを用いて変位速度を求める。

参考: Small BAseline Subset method (SBAS)

- SBAS: 基線長が短く、変動の計測に有効な干渉画像のみを、組み合わせる手法
- 沈下量(沈下速度 v)だけでなく、DEMエラー Δz も未知数として推定可能($\Delta\varphi_{DEMError} = c_f \Delta z$ と表されることを利用)

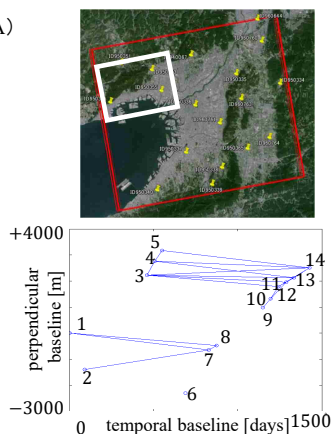
→ 誤差が平均化されると同時に、局所的なDEMエラーも除去

$$\begin{bmatrix} t_1 - t_0 & \cdots & c_1 \\ t_1 - t_0 & t_2 - t_1 & c_2 \\ \vdots & \vdots & \vdots \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \partial v_1 \\ \partial v_2 \\ \vdots \\ \partial \Delta z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \partial \Delta \varphi_{ps_1} \\ \partial \Delta \varphi_{ps_2} \\ \vdots \\ \partial \Delta \varphi_{ps_N} \end{bmatrix} \rightarrow \text{相対的な沈下速度 } \partial v$$

SBASの例

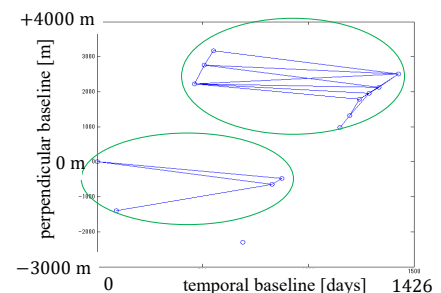
14 ALOS-PALSAR images (JAXA)

No.	year	month	day
1	2006	10	8
2	2007	1	8
3	2008	1	11
4	2008	2	26
5	2008	4	12
6	2008	8	28
7	2009	1	13
8	2009	2	28
9	2009	12	1
10	2010	1	16
11	2010	3	3
12	2010	4	18
13	2010	6	3
14	2010	9	3



91 DInSAR phases can be generated from 14 SAR images

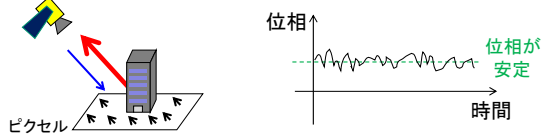
→ 23 DInSAR phases were selected whose perpendicular baselines are less than 800 m and temporal baselines are less than 1000 days.



参考：Permanent Scatterers InSAR (PSInSAR)

61

- **PS**: 長期にわたってコヒーレンスが低下せず、安定した信号を反射する散乱体



$$\Delta\varphi_{ps} \approx \frac{4\pi}{\lambda}(d_2 - d_1) + \Delta\varphi_{DEMError} + \Delta\varphi_{orbit} + \Delta\varphi_{atm} + \Delta\varphi_{noise}$$

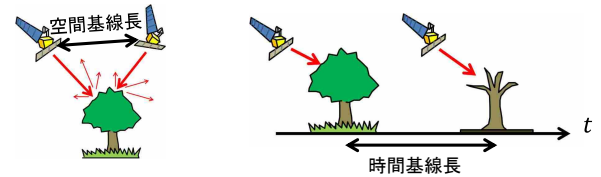
- 隣接するPS間での位相差の差(二重位相差)を用い、軌道誤差及び大気遅延の影響を小さくすると同時に、位相アンラップを回避

$$\partial\Delta\varphi_{ps} \approx \partial\frac{4\pi}{\lambda}(d_2 - d_1) + \partial\Delta\varphi_{DEMError} + \partial\Delta\varphi_{orbit} + \partial\Delta\varphi_{atm}$$

(1) SBAS [Berardino et al., 2002]

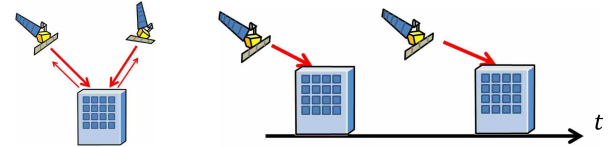
62

空間基線長(spatial baseline)や時間基線長(temporal baseline)の短いSAR画像のペア同士でコヒーレンスの高い干渉画像を生成する。



(2) PSInSAR [Ferretti et al., 2000 & 2001]

建物などの、常に安定した信号が返ってくる散乱体(PS)のみを選定し、変動解析を行う。



(6) 課題

63

■ 使用画像、ソフトウェア

- ◆ Sentinel-1 (ESA: Cバンド): 無料、高時間解像度
- ◆ PALSAR-2 (JAXA: Lバンド): 有料、年に数枚程度
→ ALOS-4/PALSAR-3: 年に20枚程度利用可能

■ 処理技術の普及

- 成果品の検証、認証: 従来の厳密な水準測量と併用し、精度を実証していく必要性

- 2.5次元解析: 南北方向の変動量が出ない
→ 本当の三次元変動量の推定手法の確立