

災害に強い位置情報の基盤（国家座標）構築のための 宇宙測地技術の高度化に関する研究

【研究期間】

令和2年4月～令和7年3月（5年間）

【予算】

特別研究経費 82,674 千円（令和2年～4年の総額）

国土地理院 地理地殻活動研究センター

宇宙測地研究室

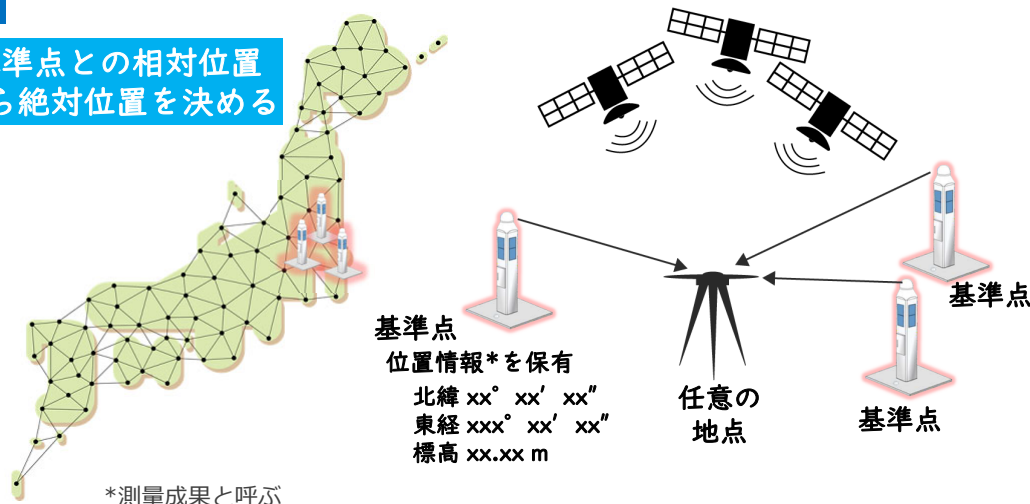
小林 知勝

研究背景：高精度測位社会の到来

誰もがいつでもどこでも高精度な位置座標を取得可能な時代に

従来

基準点との相対位置
から絶対位置を決める



基準日における**位置の基準**（国家座標）との
相対的な位置から国土の位置を知る 【測量】

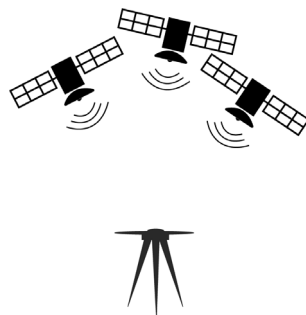
位置の基準に準拠・整合したものに統一され
ることで、誰もが安心して位置情報を**利活用可能**

近年

高精度測位社会

いつでもどこでも誰もが位置を得られる時代

カーナビやスマホも単独測位（誤差数m）だが、
補正情報（時刻・暦）を組み込む等して高精度
（誤差cmレベル）な測位が可能に



単独測位（PPP, CLAS等）の**精度が向上**

PPP : Precise Point Positioning
CLAS : Centimeter Level Augmentation Service

現在(今期)の絶対座標値の取得に基準点不要

※測位：地球重心を基準とした計測時点の絶対位置で表示

大地が不動なら位置情報の管理に概ね問題は無いが…

地殻変動の影響を受けるのは日本の宿命

【定常時】

■ 常に変動し続ける

- 複数のプレート境界に位置
- プレートの動きで地殻変動が進行

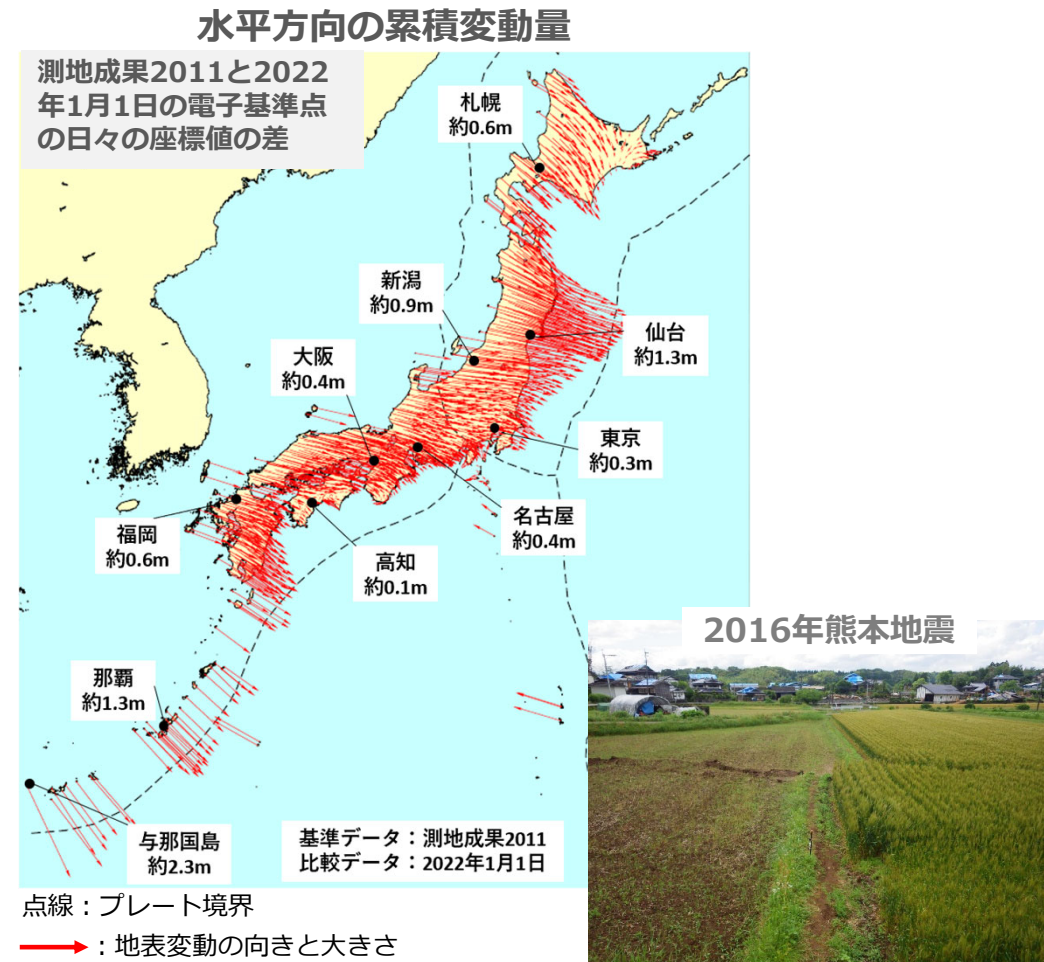
■ 年間数cmのズレ

- 10年経てば数10cmを超えるズレが蓄積
- 大地震後の余効変動

【災害時】

■ 地震時には数m動くことも

■ 空間的に複雑な変動場

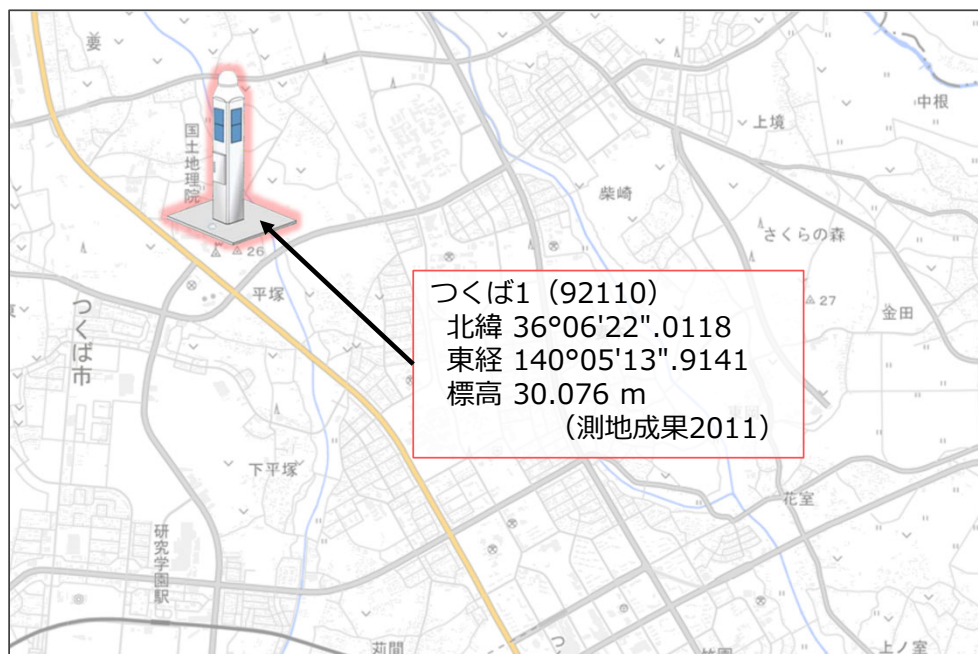


研究背景：位置情報と位置の不整合

みんなが
共通に使う

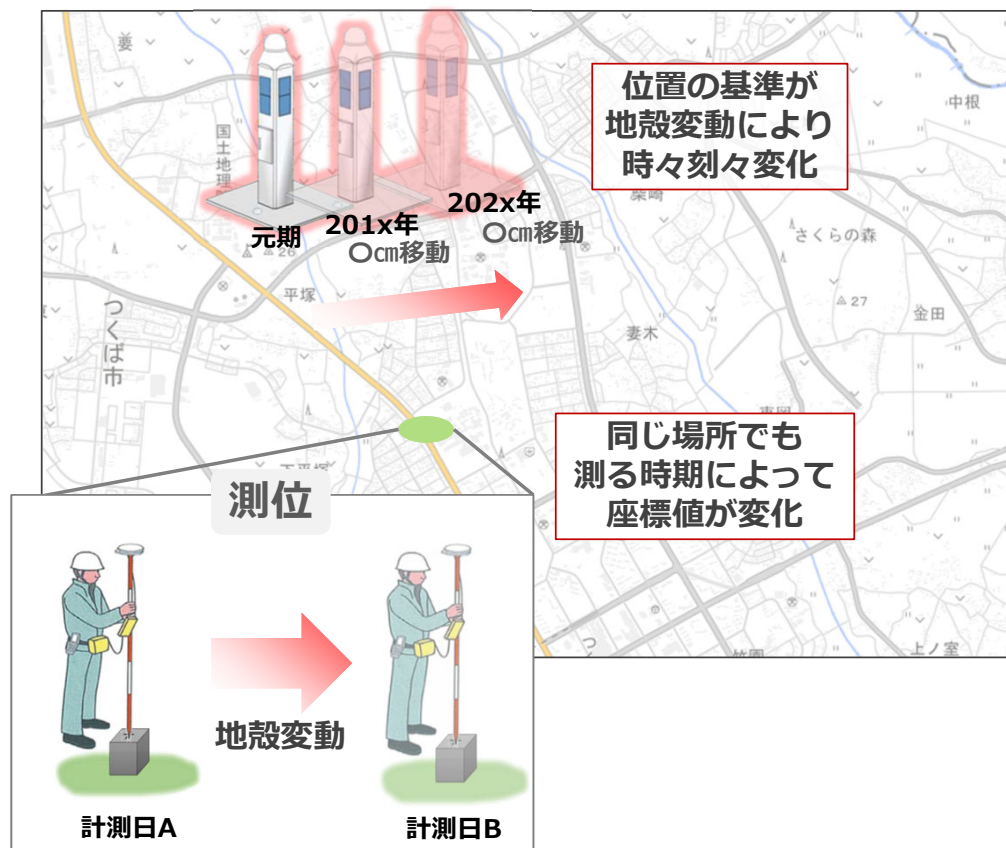
位置情報は基本的に不変

(地図、国家座標、測量成果...)



地理空間情報(地図等)は
決まった位置情報で管理される

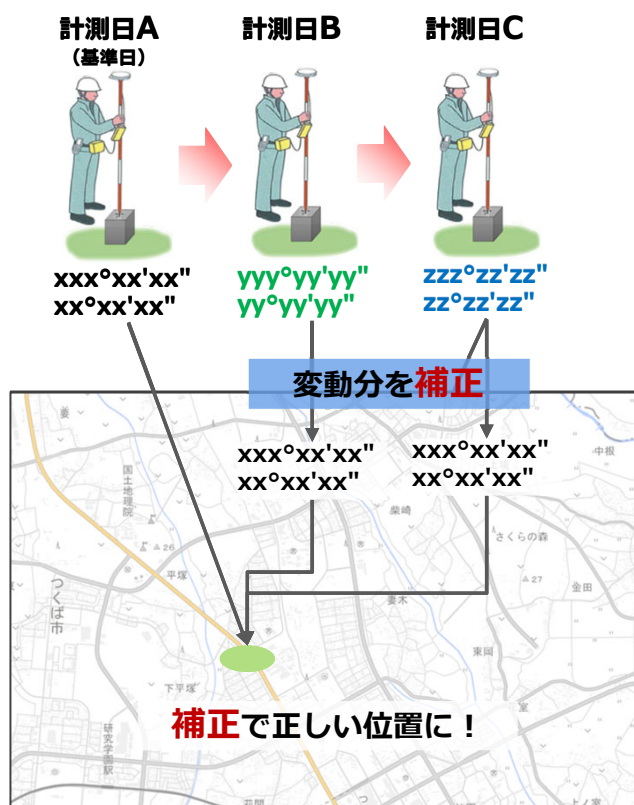
実際の位置は変化



研究背景：正確な位置情報の管理には

4次元（時間＋空間）の**位置情報**を適切に把握し管理できる仕組みと技術が必要

例）測位で得られた位置座標を地図にプロット



位置情報（国家座標）は
共通な位置を与える社会基盤

高精度測位社会



測位サービス
CLAS等

ドローン配送
スマート農業
ICT施工等

いつでもどこでも
正しい位置情報にアクセスできる
仕組みと技術

位置情報と位置の不整合を解消する
正確な補正

研究目的：位置の変化/位置の基準の変化の把握の高度化

高精度測位社会にも対応するための

位置情報の管理には **位置**やその**基準**の**空間**と**時間**（4次元）
両方の変化を詳細に**計測**することが**不可欠**

本研究の3つの柱

いつでもどこでも（4次元）正しい位置情報にアクセスできる仕組みと技術を

定常時の位置情報の管理 のための技術開発

複雑に進行する地表の時空間変化を計測し、任意の時点・任意の地点から正しい位置情報にアクセス可能とするための技術の開発・高度化

（スライド8-15）

災害時の位置情報の管理 のための技術開発

大規模かつ複雑な地表の時空間変化を計測し、位置情報の更新に適した技術の開発・高度化

（スライド16-22）

高さの位置情報の管理 のための技術開発

高さの基準（ジオイド）の定常時・災害時の時空間変化を把握するための技術の開発・高度化

（スライド23-26）

研究の目標・開発内容

【目標】4次元（空間＋時間）の位置情報の管理を支える宇宙測地技術の開発・高度化

■定常時の位置情報管理

定常時地表変動モデルの構築（①，②，④）

時間分解能の向上：時系列モデル

空間分解能の向上：SAR，小型GNSS，空間モデル

来るべき測位社会への適用：PPP

■災害時の位置情報管理

災害時地表変動モデルの構築（②，④）

時空間分解能の向上：SAR

■高さの位置情報管理

基準面の変化監視技術の開発（③）

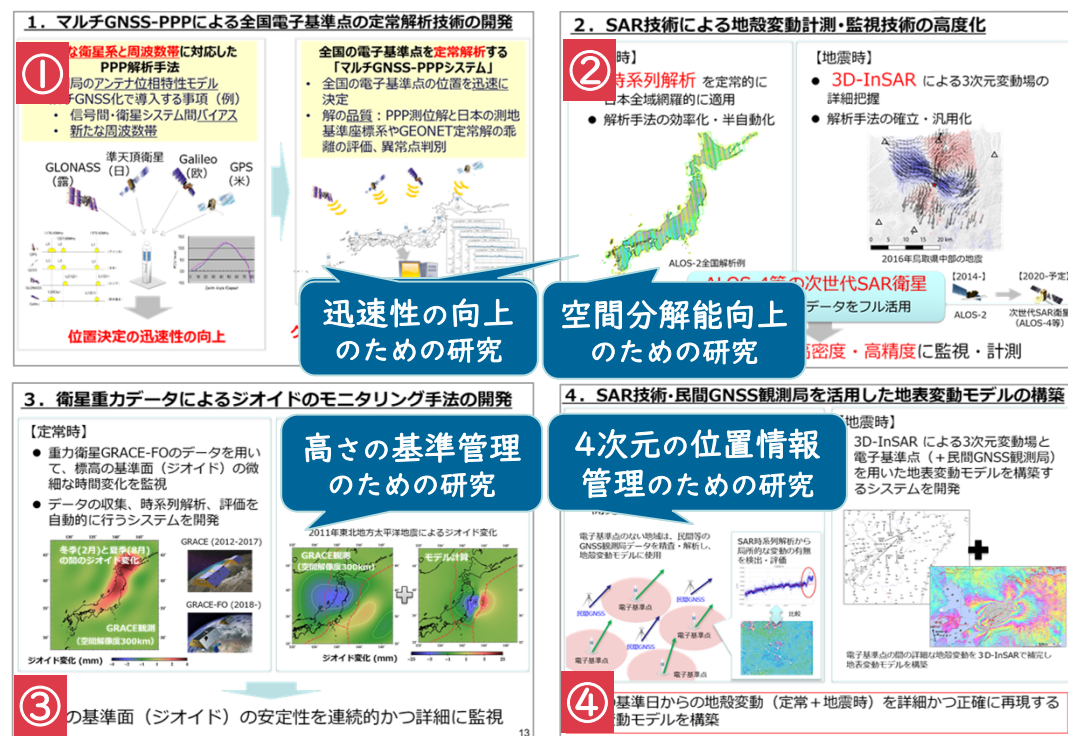
モデル計算による推定，重力衛星による計測

迅速性と分解能の目標

項目		従来	目標
迅速性	定常時	数週間（3カ月）	数日以内
	地震時	数ヶ月	数日～数週間
空間分解能	定常時	20km	数km
	地震時	数km～20km	数百m

新規課題提案時（2019年7月23日）：研究評価委員会 説明資料より

GNSS，SAR，重力・ジオイド， 地表変動モデルに関する技術開発



新規課題提案時（2019年7月23日）：研究評価委員会 説明資料より

定常時の位置情報の管理 に関する研究の進捗状況

定常時地殻変動補正機能 POS2JGD

地殻変動補正

地図上の位置

現在の位置

補正後の位置
(位置情報) を出力

測位した位置
日付を入力

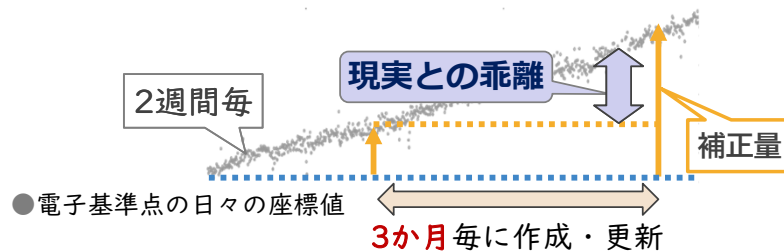


現在の位置情報管理の課題と本研究の取り組み ～定常時～

現状の課題

迅速性（時間分解能）の不足

- ①補正情報作成が**3か月毎**
- ②定常解析解（F3解）の取得に**2週間**必要
※研究提案時



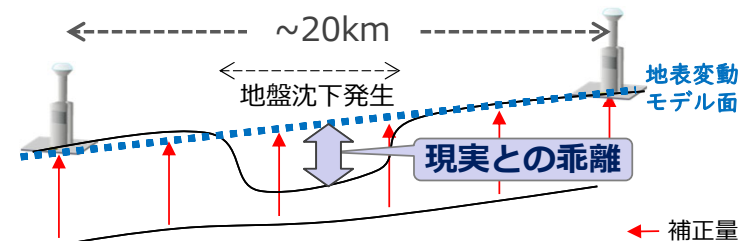
新目標設定：時間分解能を3か月毎→1日毎

※研究提案時にはなかったが重要性を考慮して改めて目標設定

空間分解能の不足

補正パラメータ：**5kmメッシュ**

電子基準点の配点密度(20km)では、局所的な変動の補正は困難



高精度化に向けた取り組み

目標

定常時地表変動モデル（次世代POS2JGD）

時間モデル

電子基準点の日々の座標値の連続的モデル化

迅速性（時間分解能）の向上

空間モデル

- ①観測の高空間分解能化（SAR, 小型GNSS観測）
- ②空間補間手法開発

空間分解能の向上

定常時地表変動モデル構築のための技術開発 ～時間方向のモデル化～

目標

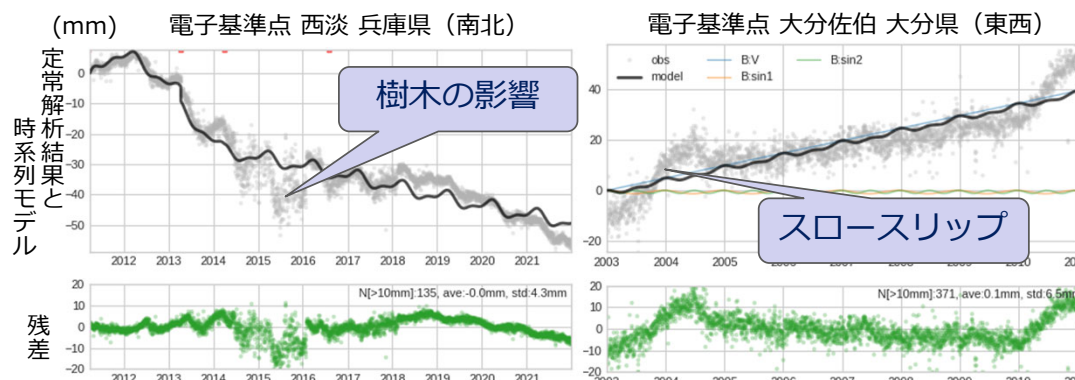
任意の時点の位置へ変換可能とする定常時地表変動モデルの構築に向け
電子基準点の座標時系列をモデル化

- 大規模地震の余効変動を対数関数や指数関数でフィッティング
- 地震時変動をオフセットとして推定

$$D(t) = a \cdot \log(1+t/b) + d \cdot \log(1+t/e) + f \cdot (1 - \exp(-t/g)) + V \cdot t + c$$

日本全国の電子基準点で長期間（20年以上）の
安定的なモデル化は困難

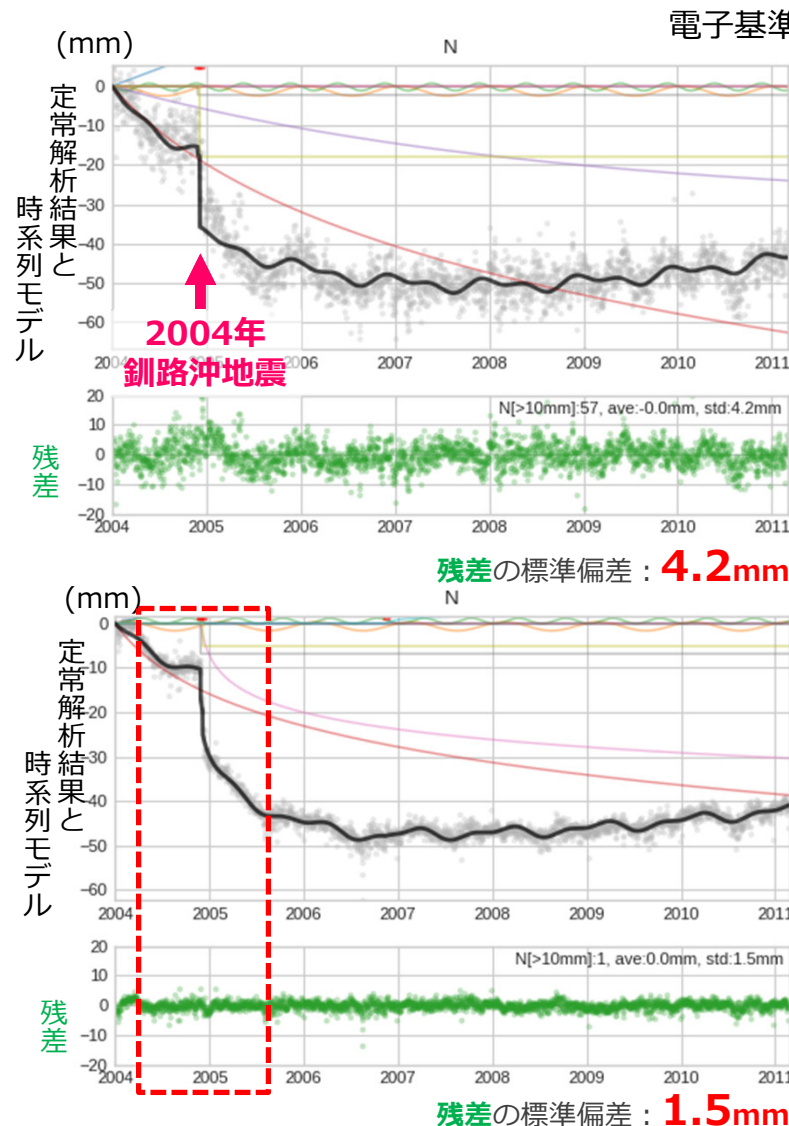
非線形問題を解く必要



【主な開発内容】安定的なモデル化のため、以下の要素技術を開発

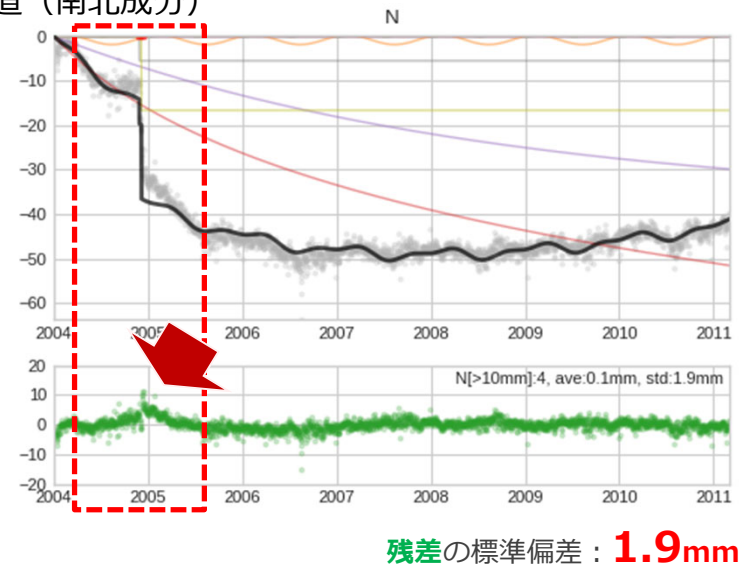
- 大規模地震ごとにフィッティング関数の時定数をグリッドサーチし、AICで評価
(対数関数と指数関数の組合せや余効変動の範囲をイベントごとに精査) (スライド37-39)
- 定常解析結果に含まれる固定局（電子基準点 つくば1）に起因する共通誤差を除去
- 樹木による影響の軽減のため、フィッティング時に、PPP（精密単独測位）による標準偏差の逆数を重みとして利用
- スロースリップによる変動を、一次関数でフィッティング (スライド36)
- 異常データによる影響の軽減のため、1回目のフィッティングによる残差を重みに加えて2回目のフィッティング

研究開発① 定常解析結果に含まれる共通誤差の除去



共通誤差の
除去

対数関数の
追加



開発 定常解析結果に含まれる固定局（電子基準点 つくば1）に起因する**共通誤差**を**除去**する機能

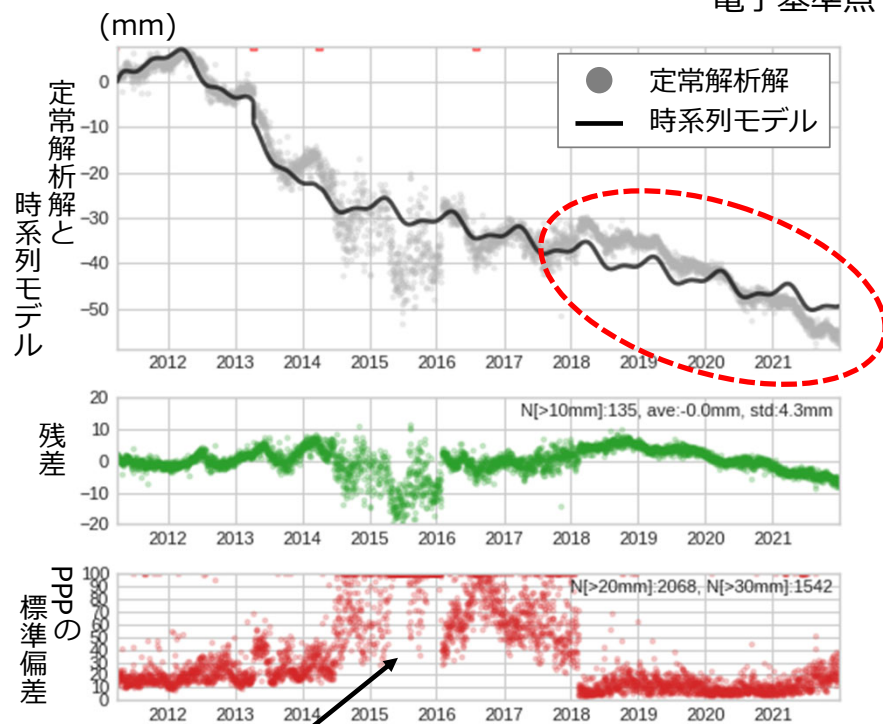
（スライド35）

成果 残差のばらつきが大きく**減少**

効果 2004年釧路沖地震（Mw7.0）の余効変動が明瞭に
→ さらに釧路沖地震の余効変動を対数関数で推定
することで、より高精度なフィッティングに

研究開発② 樹木の影響を低減したモデル化 ～PPPの標準偏差の活用～

電子基準点 西淡 兵庫県（南北成分）

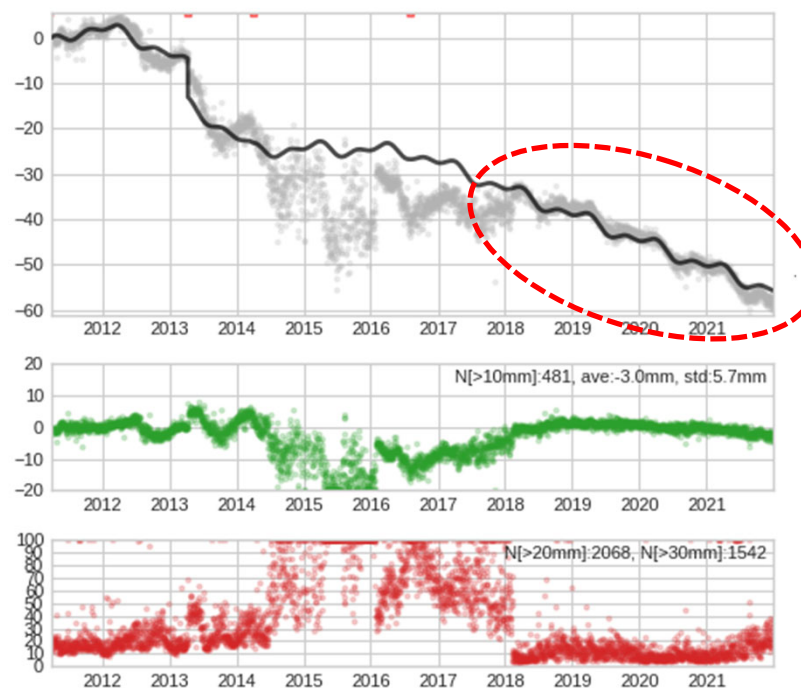


樹木の影響により
PPPの標準偏差が悪化

樹木の影響がない



PPP標準偏差で
重み付け



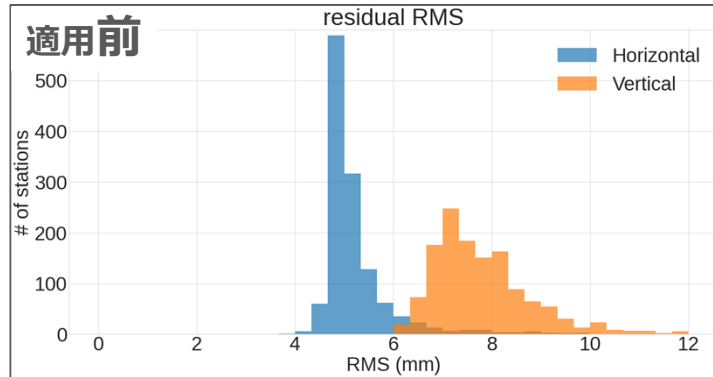
開発 PPP（精密単独測位）の標準偏差の
逆数をフィッティング関数の推定時に
重みとして与えるモデリング機能

効果 樹木等による跳び値の影響の軽減に成功

成果のまとめと期待される効果

【成果】各開発技術の適用により高精度なモデル化が実現

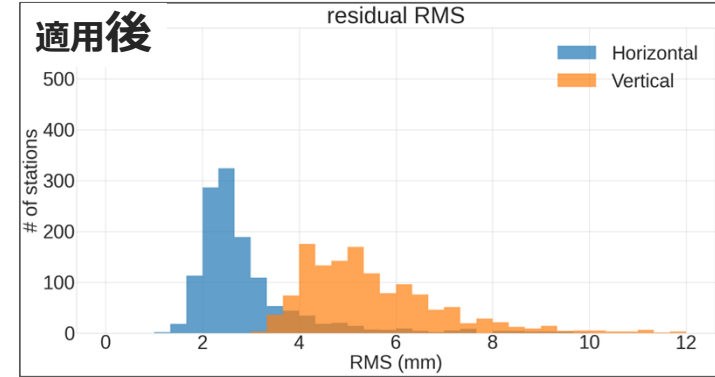
定常解析結果と時系列モデルの残差のRMS



中央値(RMS)
 水平:5.0mm → 2.6mm
 上下:7.6mm → 5.2mm



開発技術
 の適用



【効果】

■ 大規模地震に強い位置情報管理技術に

大地震直後の余効変動に追随した位置情報管理が可能に
 補正情報更新：3ヵ月毎 → 1日毎

【迅速性（時間分解能）の向上】

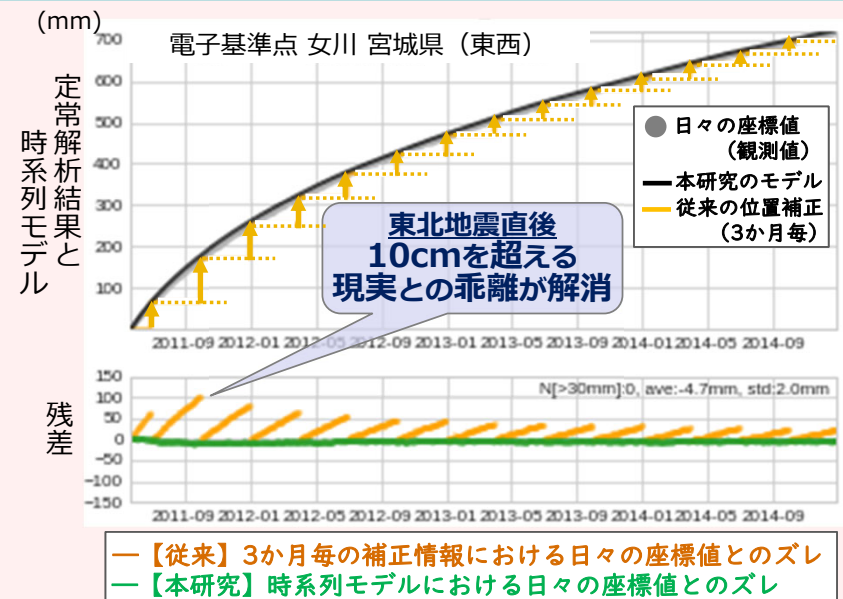
■ 4次元で位置情報を管理するための技術に

任意の日付への位置（情報）の変換が可能に

【今後の取り組み】

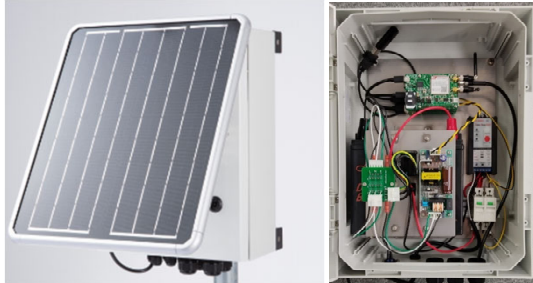
任意の地点の位置情報管理に向けた空間方向のモデル化

(スライド15, 32)



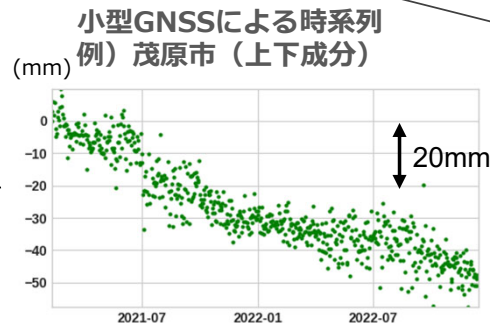
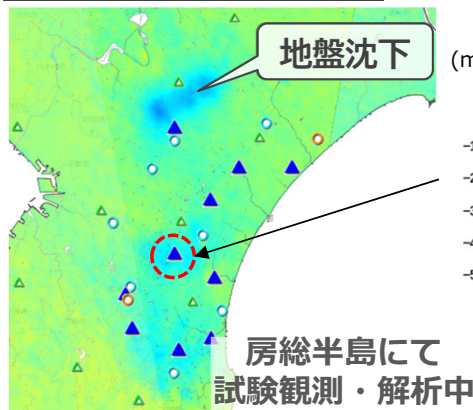
今後の開発研究（空間分解能向上）に向けた技術開発 ～中間成果～

小型GNSS観測装置の開発



- ✓ 縦40cm、横40cm、30kg以下
- ✓ 商用電源利用．ソーラーパネルによる給電可
- ✓ 全体制御、通信、データ記録としてRaspberry PIを使用
- ✓ 4G/LTEを介しての遠隔制御、リアルタイムデータの通信可能

干渉SAR時系列解析



- △電子基準点
- ▲小型GNSS観測点（10点）
- 携帯キャリア観測点
- ※背景画像はSAR時系列解析結果

高い空間分解の地表変動データを定常時地表変動モデルの構築に組み込む手法開発が今後の課題

全国の面的な地殻変動の時間推移を把握可能に

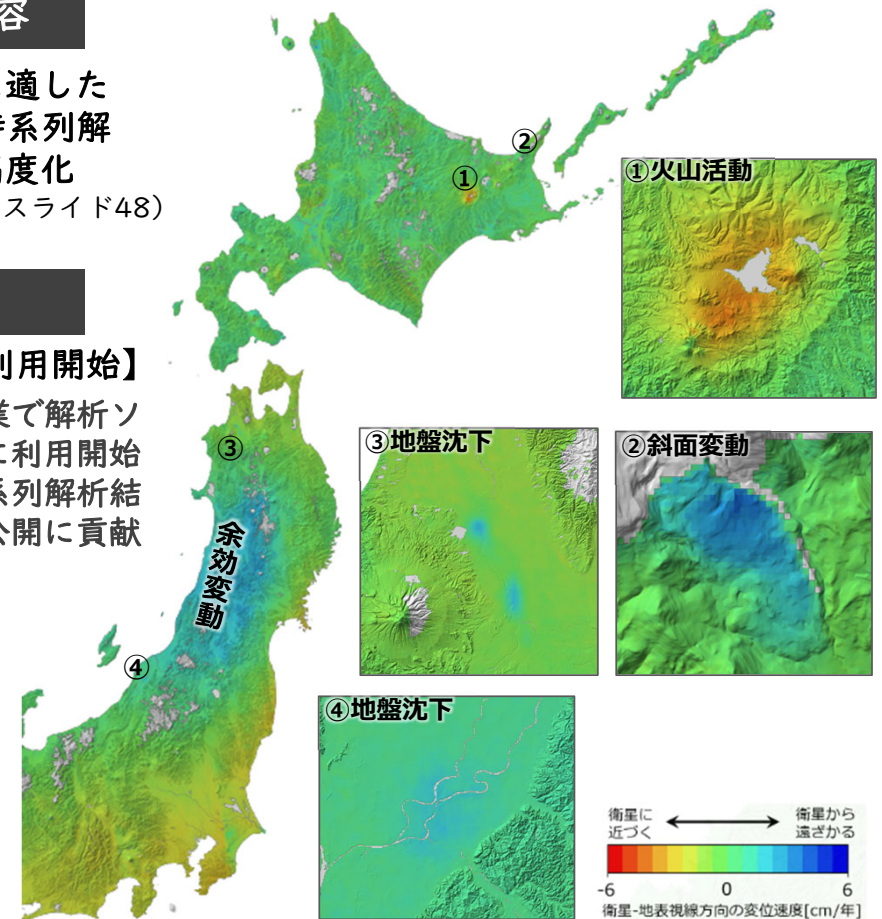
開発内容

全国解析に適した干渉SAR時系列解析手法の高度化
(スライド48)

成果

【事業での利用開始】

- ・測地部事業で解析ソフトを既に利用開始
- ・全国の時系列解析結果の一般公開に貢献



災害時の位置情報の管理 に関する研究の進捗状況

研究背景：現在の位置情報管理の仕組み ～災害時～

災害時 成果改定：位置情報（測量成果）自体を変更

改測

基準点で測量し地震等で移動したズレの量を**実測**



改算

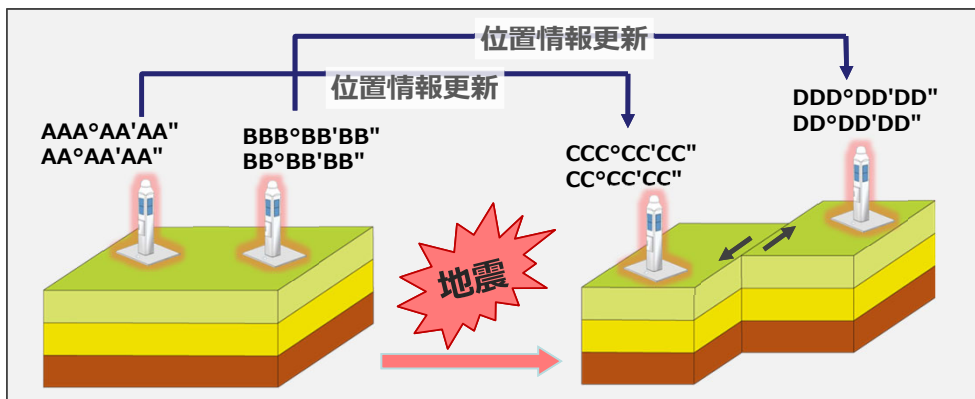
座標改定（改算）用パラメータによる補正

パラメータ

改測で得られた基準点における新しい位置情報（成果）を基に**内挿処理**により格子点状に座標補正用パラメータを作成

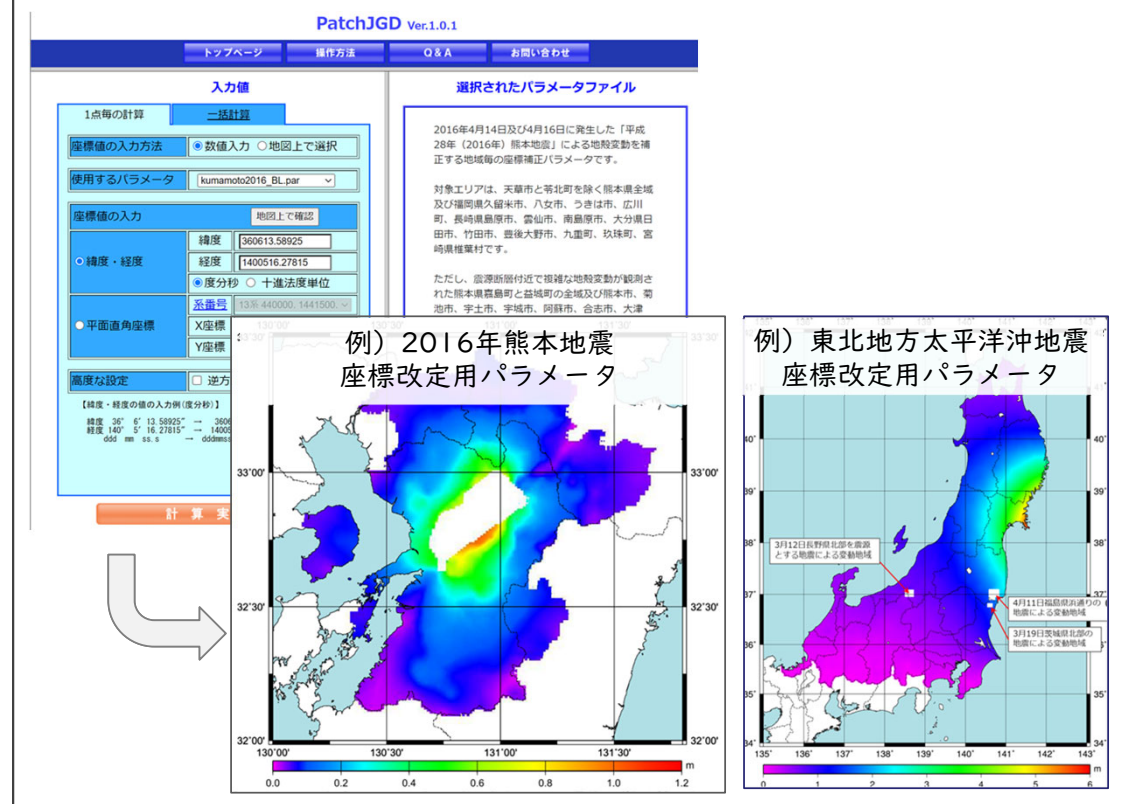
成果改定

位置情報（測量成果）を新しい数値に更新



座標改定（改算）用パラメータ

災害時地殻変動補正機能 PatchJGD



現在の位置情報管理の課題と本研究の取り組み ～災害時～

現状の課題

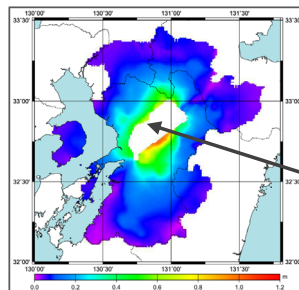
迅速性の不足

位置情報の更新（成果改定）に**数か月**かかる

例）熊本地震：成果改定に**約5か月**

（原因）標石基準点での改測（実測）に時間がかかる

例）2016年熊本地震
座標改定用パラメータ



空間分解能の不足

観測の空間分解能不足のため、複雑な変動域で信頼度の高い補正パラメータの作成困難

改測（実測）は基準点の間隔

－ 電子基準点：～20km / 標石基準点：数km

複雑な変動場では内挿処理に限界

- － 短波長変動を表現不可
- － 相対位置の変化（歪み）を正確に表現不可

補正パラメータに空白域が生じる

高精度化に向けた取り組み

目標

災害時地表変動モデル（次世代PatchJGD）

迅速な位置変化計測

衛星によるリモート観測により
迅速に変位の3成分計測

迅速性の向上

高空間分解能な計測

高い計測精度で
面的に変位の3成分計測

空間分解能の向上

災害時地表変動モデル構築のための技術開発

【開発内容】

SAR3次元解析ツール

(スライド45)

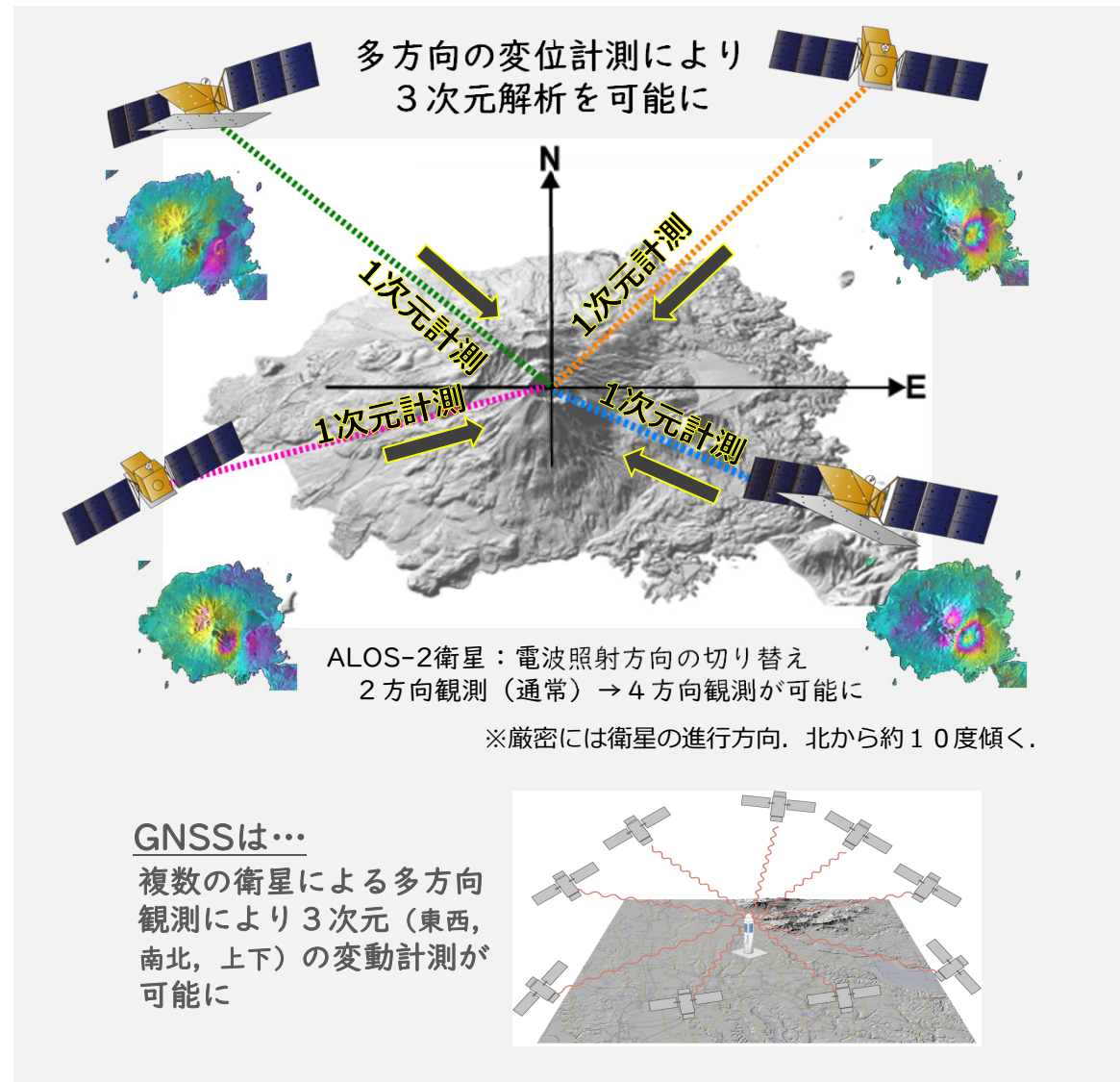
SARの短所
(1方向観測)の克服

1. 4方向の干渉SARデータ
近年, 観測能力・環境の向上により
4方向観測が可能に (通常: 2方向観測)
2. 南北方向※の水平変位を計測する
特殊な解析技術
SBI法, ピクセルオフセット法
3. 計測誤差の評価方法

【成果】

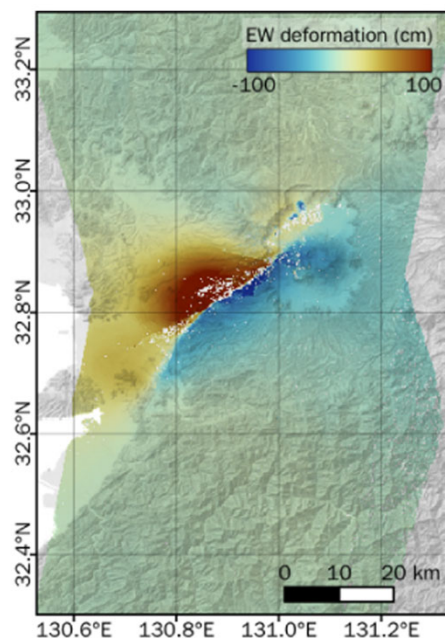
- ①位置情報管理に必要な3成分
「東西・南北・上下変位」の取得が可能に
- ②精度評価の定式化
適切な位置情報管理の指標に

※干渉SAR技術の原理と長短所についてはスライド44参照

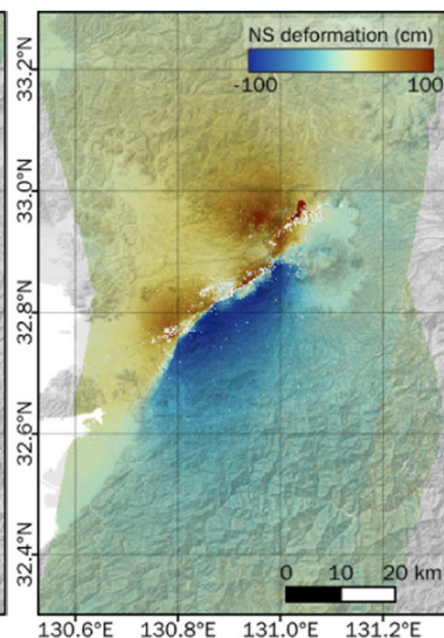


成果事例：平成28年（2016年）熊本地震への適用

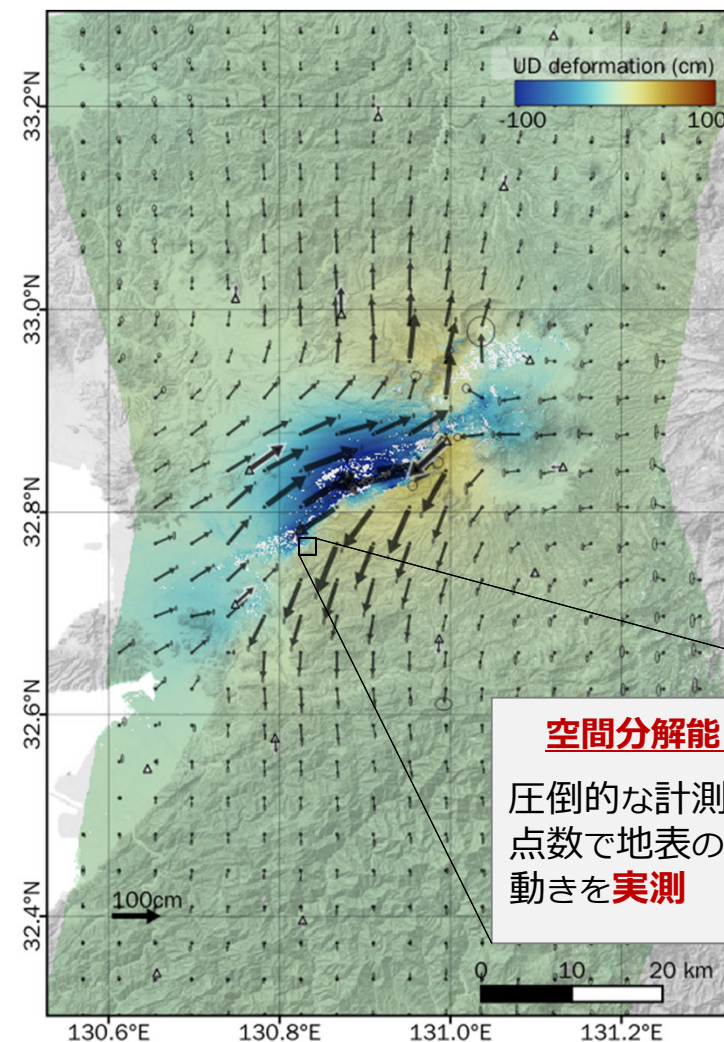
東西成分



南北成分



3次元：上下成分+水平成分（矢印）



- ✓ 熊本地震に伴う地表変動の**3成分**を計測
- ✓ 変動を**面的**（空間分解能～50m）に計測
- ✓ **断層近傍の複雑な変動**も計測

計測精度 上下成分：～1cm
※本解析の場合 東西成分：～1cm
南北成分：～5cm

（スライド46）

空間分解能：～50m

圧倒的な計測
点数で地表の
動きを**実測**

位置情報管理への適用可能性 ～熊本地震での検証～

【効果】

1. 成果改訂量と整合的な計測が実現

実際の成果改訂量との残差の標準偏差

東西：1.2cm, 南北：3.0cm, 上下：2.1cm

2. 補正量の提供範囲の拡大

従来：複雑な変動域では、推定値である
↓ 補正パラメータの適用に限界

本研究：観測量のため、計測した値を
そのまま補正量に利活用可能

空白域の約**70%**を実測可能に

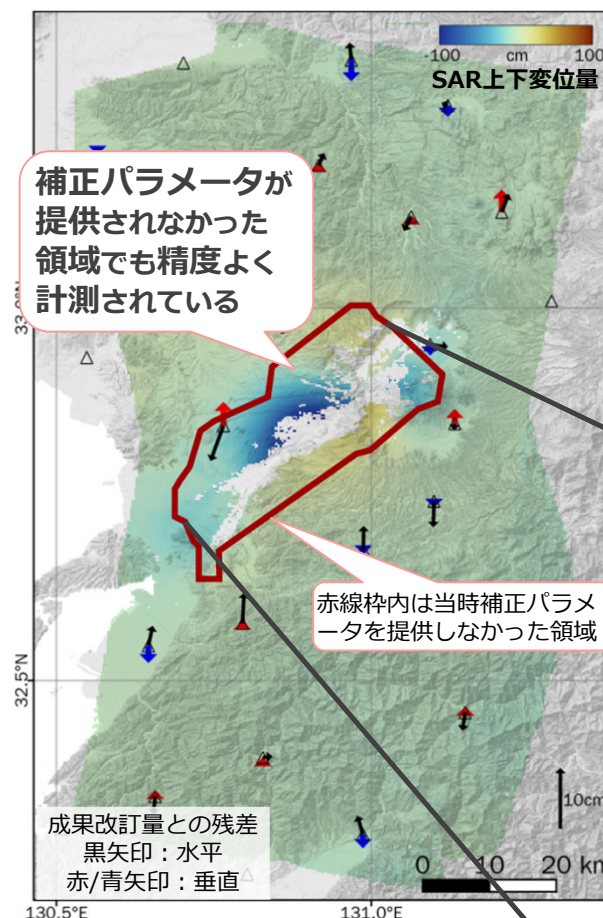
3. 補正量の提供までの時間短縮

従来（熊本地震）：補正パラメータの提供に
↓ 約5か月

本研究：3次元解析に約**2週間**

(スライド47)

SAR上下変位の計測可能範囲と 補正量提供範囲



※勾配二乗和根が100ppmを超過する領域（補正量の誤差が大きい領域）には色を付けていない。

補正パラメータの公開まで 地震発生



地震発生 4/15,16 測量成果停止

5/19
電子基準点 成果改定

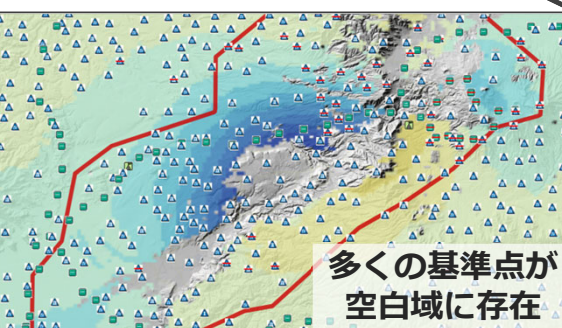
三角点改測
水準点改測

補正パラメータ作成（計算、調整、精度評価）

補正パラメータ適用

8/31 水準点+三角点
成果改定（改測）

9/12 三角点成果改定
（パラメータ）



成果のまとめと期待される効果

大規模地震時変動の複雑な変動場を 3次元で精度良く計測可能に

成果と効果のまとめ

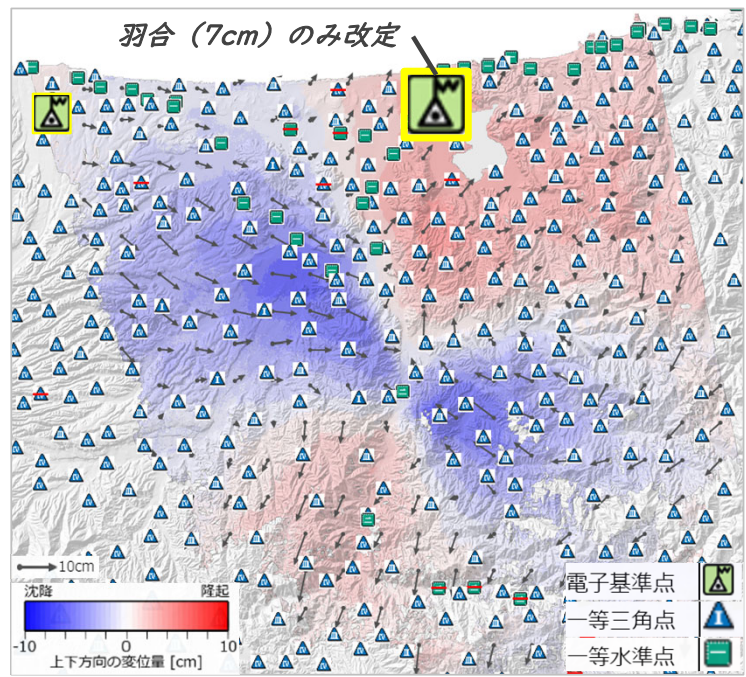
	従来 三角点改測	本特研成果 SAR3次元解析
迅速性	数か月	数日-2週間 (<1か月) 電子基準点成果改定と同時に パラメータ公開可能
現地測量	必要 発災直後は困難なことも 三角点の管理、定期的な再 測量が必要	基本的に不要
計測精度 (1σ)	定量的評価は困難 (観測時期・方法に依存)	東西上下：約1cm 南北：約4cm 大変動域：≥10cm
空間分解能	2-10km	数十m-数百m
複雑な変動 (内陸地震断層周辺)	全点再測量が必要 パラメータ空白域	計測可能 パラメータ作成可能
局所変動 GEONET間 (<20km)	改測実施せず パラメータ作成せず	パラメータ作成可能

期待される効果

従来は困難だった中規模内陸地震による位置変化の計測能力も向上

成果停止の検討や補正パラメータ作成が可能に

2016年鳥取県中部の地震 (Mw6.2)



高さの位置情報管理 に関する研究の進捗状況

研究背景：現在の位置情報管理のための仕組みと課題 ～高さ～

3つの高さ：標高 = 楕円体高 - ジオイド高

将来の標高体系

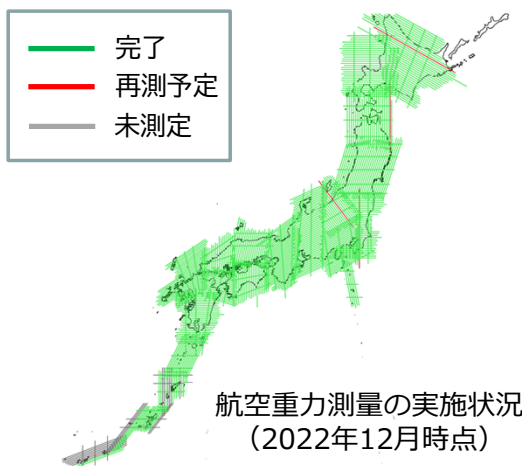
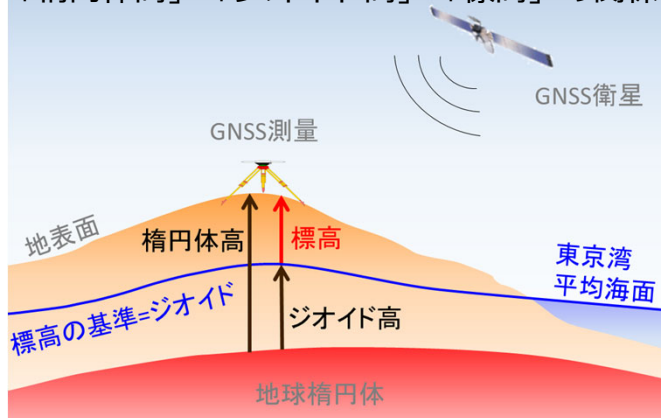
標高の基準

- ①GNSS（楕円体高）
- ②ジオイド・モデル（ジオイド高） で実現・維持管理

高精度ジオイド・モデル構築に向けた航空重力測量を実施中

2024年度までに精度3cmを持つ日本のジオイド・モデルが整備される予定

「楕円体高」「ジオイド高」「標高」の関係



現状の課題

一般的には
ジオイドは時空間的に安定
といわれるが、cmスケールでは

大地震、気候変動等で変化

することが知られている

しかし

ジオイドの変化を定量的に
把握・監視する環境が未整備

【災害時】災害時（大地震）のジオイド変化を把握不可
【定常時】中・長期のジオイド変化の監視不可

目標

ジオイド変化監視機能開発

【定常時】経年変化算出

【災害時】地震時変化算出

ジオイド変化の監視機能の開発① ～定常時～

【開発内容】

重力衛星 (GRACE/GRACE-FO) による
重力ジオイド変動計算機能を新規に開発
(詳細：スライド49)

【成果】

- ・ 地理院初のジオイドの経年的時空間変動の算出ツール
- ・ 中長期的な時空間変化の長波長成分をmm精度で監視可能に
- ・ 日本周辺のジオイドが最大約0.5mm/年の速度で変化

【期待される効果】

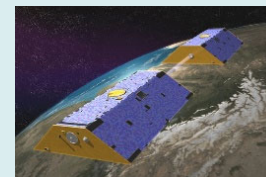
ジオイド・モデルの改定時期の判断に活用

【今後の取り組み】

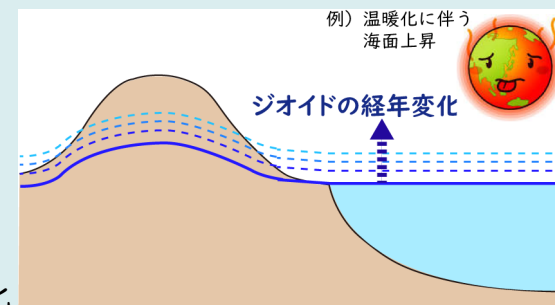
空間分解能 (現在：～300km) の向上

(詳細：スライド32)

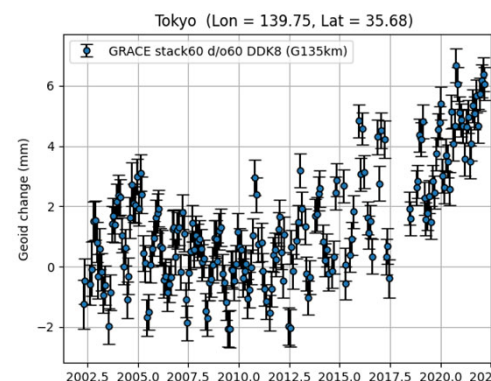
入力 重力衛星データ



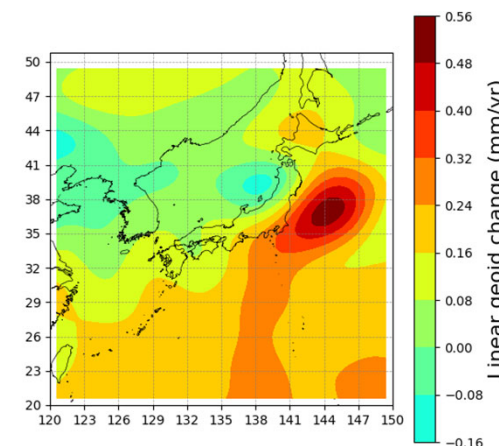
出力 ジオイド時空間変化



ジオイドの時間変化



ジオイド変化の空間分布



海水準変動・陸水変動・地震後変動 (粘弾性緩和) によるジオイド変化

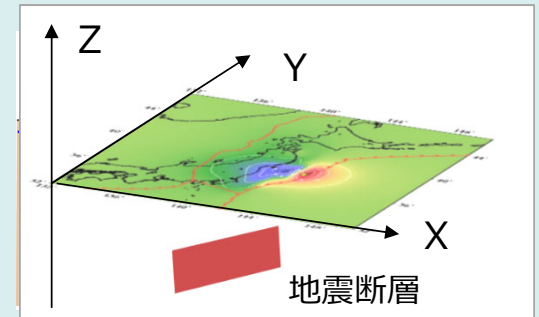
ジオイド変化の監視機能の開発② ～災害時（地震時）～

【開発内容】

大規模地震時におけるジオイド変化の
理論計算機能を新規に開発
(詳細：スライド50)

入力 断層パラメータ
(位置, 傾斜角, 走向,
すべり角, すべり量)

出力 ジオイド変化



【成果】

- 地理院初のジオイド変動推定ツール
- 開口断層にも対応 (※火山への適用も)

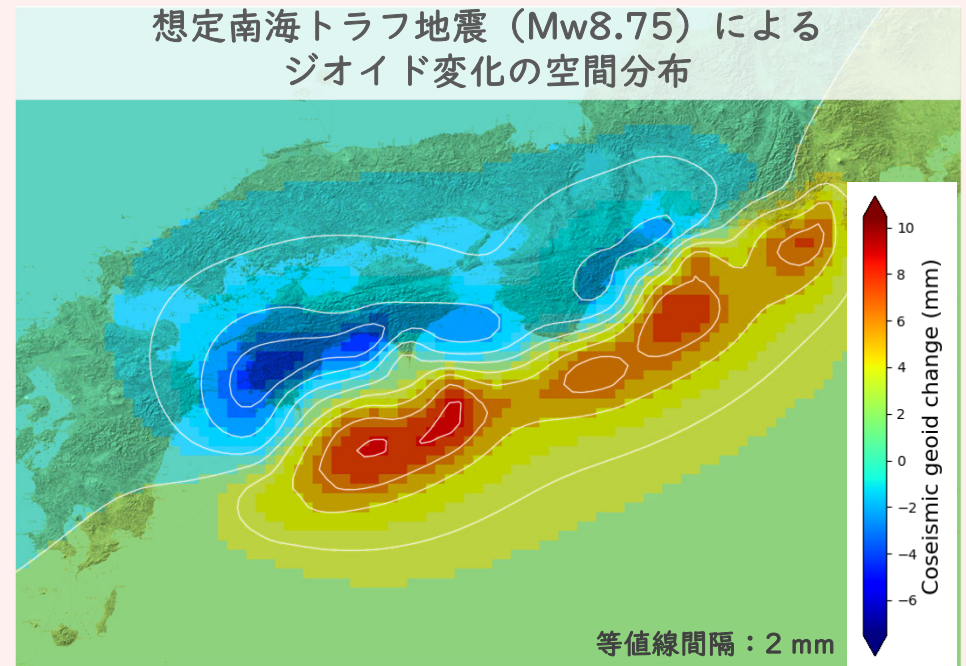
【期待される効果】

- 地震直後の推定が可能に **<迅速性の向上>**
東北地方太平洋沖地震の際には対応できなかった
迅速なジオイド変動推定が可能に
- 将来の**南海トラフ地震**等、日本周辺の大規模
地震時のジオイド・モデル改定の検討、**事前シ
ミュレーション**に活用可能

【今後の取り組み】

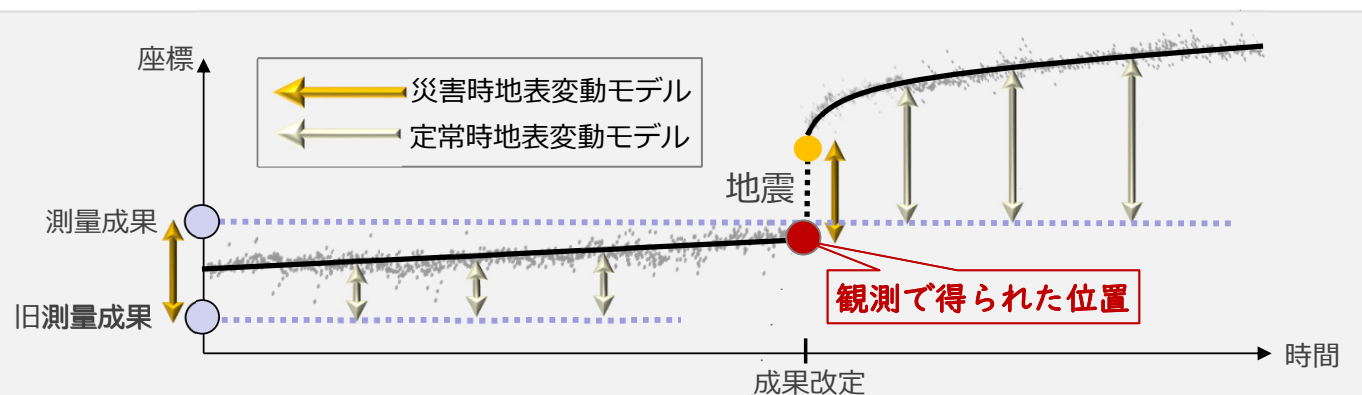
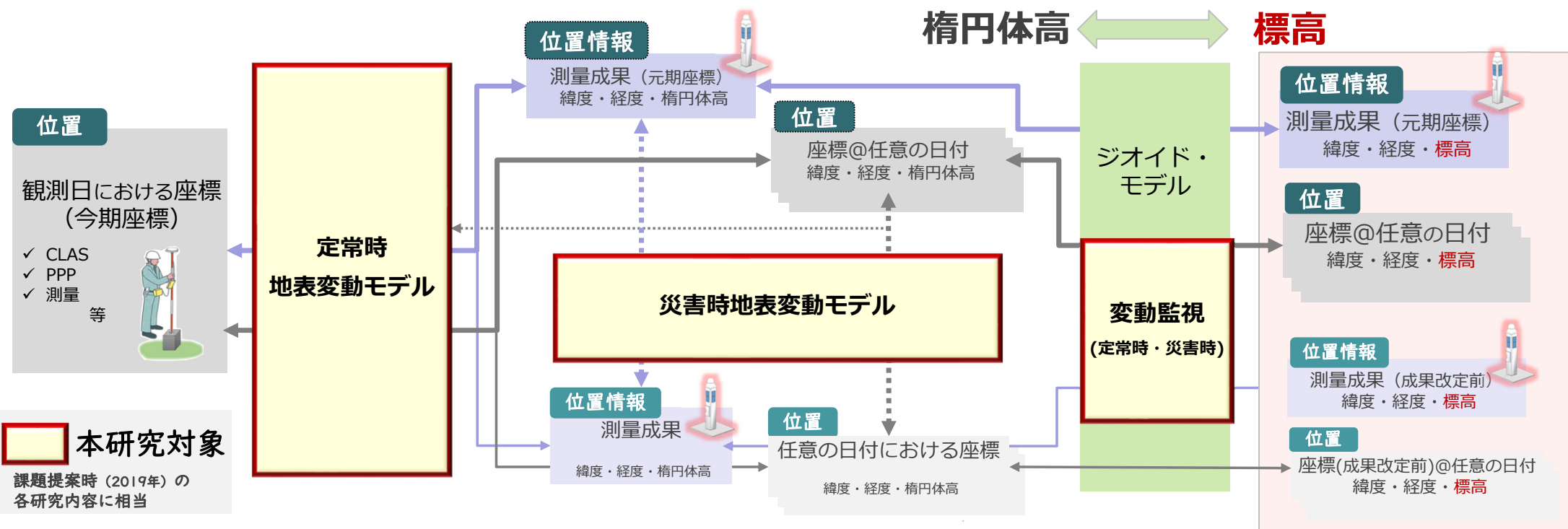
観測量を組み込んだ正確性の向上

(詳細：スライド32)



Ohno et al. (2022)で使用された断層モデルを使用

本研究を通して実現される4次元の位置（情報）の管理の仕組み



標高体系も含む
4次元の位置情報（国家座標）
の管理が可能な仕組みに

まとめ① 各技術開発の進捗状況

各技術開発は順調な進捗状況

◎：済 / ○：着手中 / ★：後半に着手

1. マルチGNSS-PPPによる全国電子基準点の定常解析技術の開発

新たな衛星系と周波数帯に対応した PPP解析手法

- 観測局のアンテナ位相特性モデル
- マルチGNSS化で導入する事項 (例)
 - 信号間・衛星システム間バイアス
 - 新たな周波数帯

GLONASS (露) 準天頂衛星 (白) Galileo (欧) GPS (米)

全国の電子基準点を定常解析する「マルチGNSS-PPPシステム」

- 全国の電子基準点の位置を迅速に決定
- 解の品質：PPP測位解と日本の測地基準座標系やGEONET定常解の乖離の評価、異常点判別

スライド40～43

L5信号によるPPP解析機能を開発中

※本研究提案後、**R5解**（最終解F5解の精度に匹敵し観測の数日後に配信）が定常解析解として公開されたことにより、**当初の迅速性に関する課題は解決**。ただし、PPP解は耐災害性の高い技術のため引き続き技術開発・検証を進めている。

2. SAR技術による地殻変動計測・監視技術の高度化

【定常時】

- 時系列解析を定常的に日本全域網羅的に適用
- 解析手法の効率化・半自動化

【地震時】

- 3D-InSARによる3次元変動場の詳細把握
- 解析手法の確立・汎用化

ALOS-2全国解析例

2016年鳥取県中部の地震

ALOS-4等の次世代SAR衛星による膨大なデータをフル活用

電子基準点間の変動を高密度・高精度に監視・計測

3. 衛星重力データによるジオイドのモニタリング手法の開発

【定常時】

- 重力衛星GRACE-FOのデータを用いて、標高の基準面（ジオイド）の微小な時間変化を監視
- データの収集、時系列解析、評価を自動的に行うシステムを開発

冬季(2月)と夏季(8月)の間のジオイド変化

GRACE観測 (空間解像度300km)

GRACE-FO (2018-)

ジオイド変化 (mm)

【地震時】

- 地球物理モデルに基づく地震時ジオイド変化モデルの構築
- GRACE-FOデータとジオイド変化モデルの同化手法の導入

2011年東北地方太平洋地震によるジオイド変化

GRACE観測 (空間解像度300km)

モデル計算

ジオイド変化 (mm)

標高の基準面（ジオイド）の安定性を連続的かつ詳細に監視

4. SAR技術・民間GNSS観測局を活用した地表変動モデルの構築

【定常時】

- 民間GNSS観測局データの精度評価
- GNSS解析結果の高さ成分の変動をSAR技術で検証・評価する仕組みを開発

【地震時】

- 3D-InSARによる3次元変動場と電子基準点（+民間GNSS観測局）を用いた地表変動モデルを構築するシステムを開発

電子基準点のない地域は、民間等のGNSS観測局データを精査・解析し、地殻変動モデルに使用

SAR時系列解析から局所的な変動の有無を検出・評価

電子基準点 民間GNSS 電子基準点 民間GNSS 電子基準点

電子基準点の間の詳細な地殻変動を3D-InSARで補完し地表変動モデルを構築

一定の基準日からの地殻変動（定常+地震時）を詳細かつ正確に再現する地殻変動モデルを構築

まとめ② 進捗状況

1. 定常時の位置情報管理

定常時地表変動モデル

時間モデル

電子基準点の日々の座標値の
連続的モデル化

迅速性（時間分解能）の向上

空間モデル

①観測の高空間分解能化
(SAR, 小型GNSS観測) ②空間補間
手法開発

空間分解能の向上

済

2. 災害時の位置情報管理

災害時地表変動モデル

迅速な位置変化計測

衛星によるリモート観測により
迅速に変位の3成分計測

迅速性の向上

高空間分解能な計測

高計測精度で
面的に変位の3成分計測

空間分解能の向上

概ね
済

3. 高さの位置情報管理

ジオイド変化監視機能

【定常時】経年変化算出

【災害時】地震時変化算出

まとめ③ 主な成果と達成度

災害に強い4次元国家座標の構築・維持管理に向けて技術的基盤が整備されつつある

1. 定常時地表変動モデル

座標時系列データのモデル化技術を開発
位置情報の時間方向の変換能力が向上

効果 大地震直後の余効変動に強い位置情報管理
効果 任意の日付への位置情報の変換が可能に

2. 災害時地表変動モデル

SAR 3次元解析機能を開発
地震時の位置情報の更新能力が向上

効果 補正量提供範囲の拡大，提供時間の短縮

3. ジオイド・モデル（標高の基準）

ジオイドの時空間変化の監視機能を開発

効果 大規模地震や海面上昇等による変化を監視可能に
効果 標高の管理（ジオイド・モデル改訂の検討等）の高度化

定常時	従来	目標	本研究 (検証事例)	
空間分解能	20km	数km	研究中 数百m～数km	
迅速性	数週間	数日	数日	目標達成※
迅速性 (時間分解能)	3か月	数日	1日	目標達成

災害時	従来	目標	本研究 (検証事例)	
空間分解能	数km～20km	数百m	数十m～数百m	目標達成
迅速性	数か月	数日～ 数週間	約2週間	目標達成

※研究提案後、国土地理院から定常解析解（R5解）が公開されたことにより当初の迅速性の課題は解決。

まとめ④ 成果公表

3年間（令和2年度～4年度）の研究成果の公表

- | | | |
|----------|---------|----------------------------|
| 1. 発表論文 | 6 編 | |
| 査読有： | 5 編 | ・ Earth, Planets and Space |
| | (国際誌5編) | ・ Journal of Geodesy |
| 査読無： | 1 編 | ・ Remote Sensing |
| | | ・ 国土地理院時報 |
| 2. 研究報告書 | 14 編 | |
| | | ・ 国土地理院調査研究年報 |
| | | 特別研究 |
| | | 関連する一般研究 |
| 3. 学会等発表 | 38 編 | |
| 国内： | 27 編 | ・ 日本測地学会 |
| 海外： | 11 編 | ・ 日本地球惑星科学連合 |
| | | ・ 日本火山学会 |
| | | ・ 測位航法学会 |
| | | ・ 国土地理院報告会 |
| | | ・ AGU（米国地球物理学学会） |
| | | ・ IAG（国際測地学協会） |

今後の主な取り組み

任意の地点の位置情報を管理するための定常時地表変動モデルの構築

- 推定された時系列モデルを用いて、任意の日付における電子基準点ごとのモデル値を計算し、定常時地表変動モデルの**空間補間**の手法（Kriging法，最小二乗コロケーション等）開発・高度化
- 高い空間分解能の変動データ（小型GNSS，干渉SAR時系列解析）を定常時地表変動モデルの構築に組み込むための手法開発

ジオイド変化の算出の高度化

- 空間分解能を向上させる取り組み（定常時）
物理モデル（陸水・海洋・粘弾性緩和モデル等）を用いた推定手法及び同化手法の開発
地殻変動研究室の特別研究「南海トラフ沿いの巨大地震発生に対応するための高精度な地殻変動把握手法の研究開発（平成31年度～令和5年度）」の粘弾性緩和モデルを活用予定
- 断層モデルを使った理論値に観測量を組み込み正確性を向上させる取り組み（災害時）
重力衛星（GRACE/GRACE-FO）データを組み込む同化手法の開発

統合解析可能なソフトウェアの開発・改造

- 本研究の**成果の実用化**に向けて、各開発技術を統合して位置情報の管理が可能な統合ソフトウェアの開発・高度化を実施する。

補足資料

「地理空間情報活用推進基本法」
信頼性の高い衛星測位サービスを安定的に享受できる環境を確保する
「基本測量に関する長期計画」
正確さの確保等により、重ね合わせができる良質な地理空間情報を整備することで、地理空間情報高度活用社会を実現する

国家座標とは

国家座標とは、その国の**位置の基準**です。具体的には、その国において**緯度、経度、高さ**やこれに準ずる座標（数値）で位置を表す場合の基準をいいます。我が国においては、**測量法第11条で定められた基準**に準拠した緯度、経度、標高、平面直角座標、地心直交座標が、**測量に限らず**、様々な法令や民間の地図や図面などで位置を表現する場合の基準として用いられ、国家座標となっています。

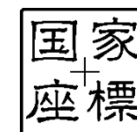
同じ位置の数値が複数存在すると**社会的な混乱**が生じてしまいますが、国家座標に準拠・整合したものに統一されていることで、誰もが安心して位置情報を利活用することが可能となっています。

日本の国家座標の定義や分かりやすく説明する場合の例は以下のとおりです。

【定義】

国家座標とは、その国の位置の基準である。

日本の国家座標とは、測量法第11条で定められた基準に準拠した緯度、経度、標高、平面直角座標、地心直交座標である。



【日本の国家座標やその一部を分かりやすく伝える場合の例】

- 1) 国家座標とは、**日本経緯度原点**の座標と整合する座標です。
- 2) 国家座標とは、日本水準原点の標高と整合する座標です。
- 3) 国家座標とは、**基盤地図情報**の位置と整合する座標です。
- 4) 国家座標とは、国土地理院の地図やこれを使用して作成される道路地図など**一般の地図**の座標と整合する座標です。
- 5) 国家座標とは、日本経緯度原点等の測量の基準（測量法第11条）及び**国家基準点**の成果と整合する座標です。
- 6) 国家座標とは、**三角点**や**電子基準点**と整合する座標です。
- 7) 国家座標とは、国家基準点の成果と整合した緯度、経度、標高、平面直角座標、地心直交座標などの座標値を指す普通名詞です。現在の日本の国家基準点成果は、**世界測地系（地球基準座標系）**のひとつである測地基準座標系「**日本測地系2011**」（JGD2011）に準拠しており、いわゆる国家座標です。



なお、これまでは、基準日（元期）に固定した国家座標が用いられてきましたが、これからは、3次元の座標値（緯度・経度・高さ）に時点情報を加えた**4次元の国家座標（JGD4D）**も必要となってきています。

時間を含めた4次元の国家座標（JGD4D）は、任意の時刻間の変換（地殻変動補正）によって実現されます。

※整合とは、同一地点の座標が測定の誤差の範囲内で一致していることをいう。

※国家基準点とは、三角点、水準点、電子基準点等をいう。

定常解析結果にみられる共通誤差の除去

解析固定点に起因する共通誤差を、電子基準点50点のフィッティング関数の残差から計算し、各電子基準点の定常解析結果から除去



抽出した電子基準点の配点図

共通誤差を除去するまでのフロー

50点の定常解析結果

時系列フィッティング

$$D(t) = a \cdot \log(1+t/b) + d \cdot \log(1+t/e) + f \cdot (1 - \exp(-t/g)) + V \cdot t + c$$

定常解析結果と時系列モデルの残差

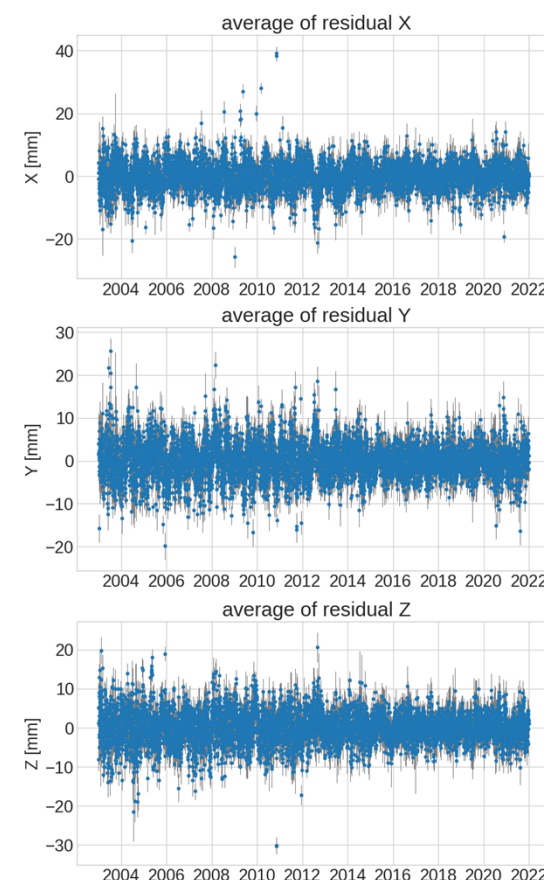
電子基準点50点を平均

$$\mu = \Sigma \text{residual}(X_i, Y_i, Z_i) / n$$

※ 残差の標準偏差が大きい（10mm以上）日付は、観測点固有の変動が含まれているとし、共通誤差は計算しない

共通誤差

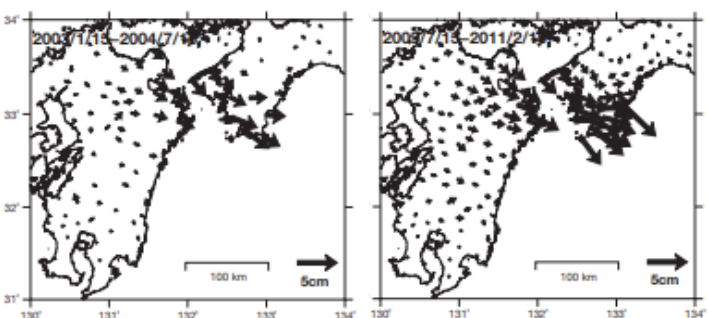
すべての電子基準点の解析結果から除去



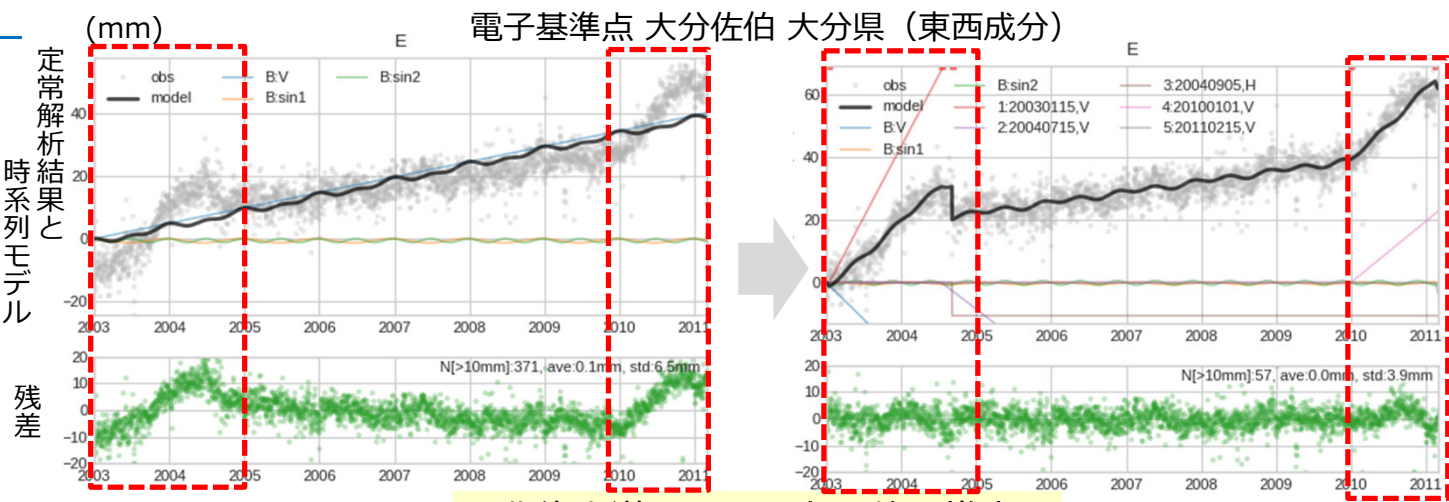
共通誤差

スロースリップのフィッティング

例) 豊後水道SSE (2003年、2010年)

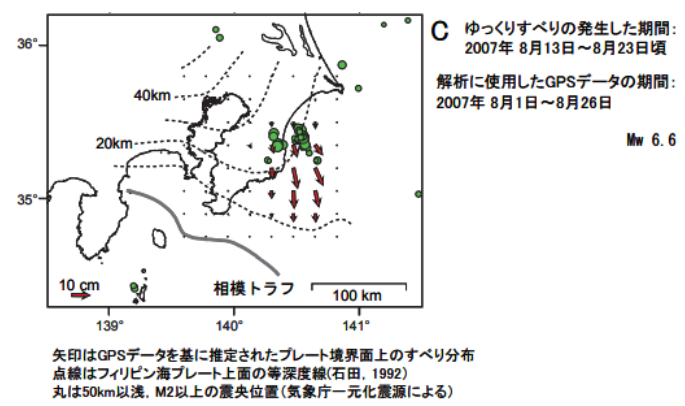


[https://cais.gsi.go.jp/YOCHIREN/history/CCEP50th/CCEP50th_2_3_3_\(1\).pdf](https://cais.gsi.go.jp/YOCHIREN/history/CCEP50th/CCEP50th_2_3_3_(1).pdf)

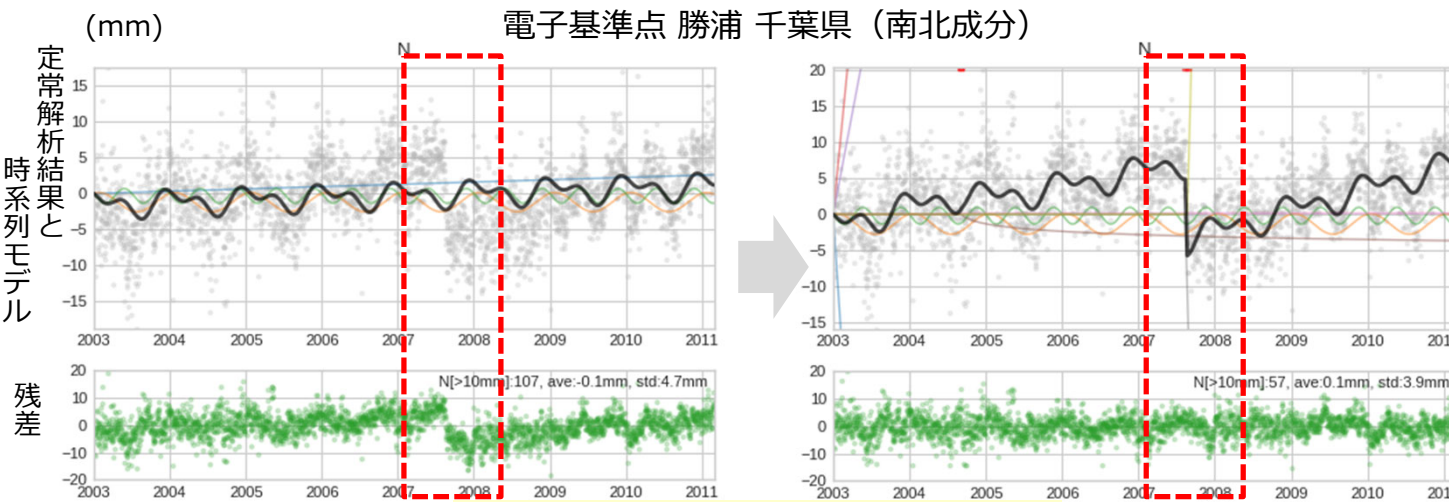


豊後水道SSEを一次関数で推定

例) 房総半島SSE (2007年)

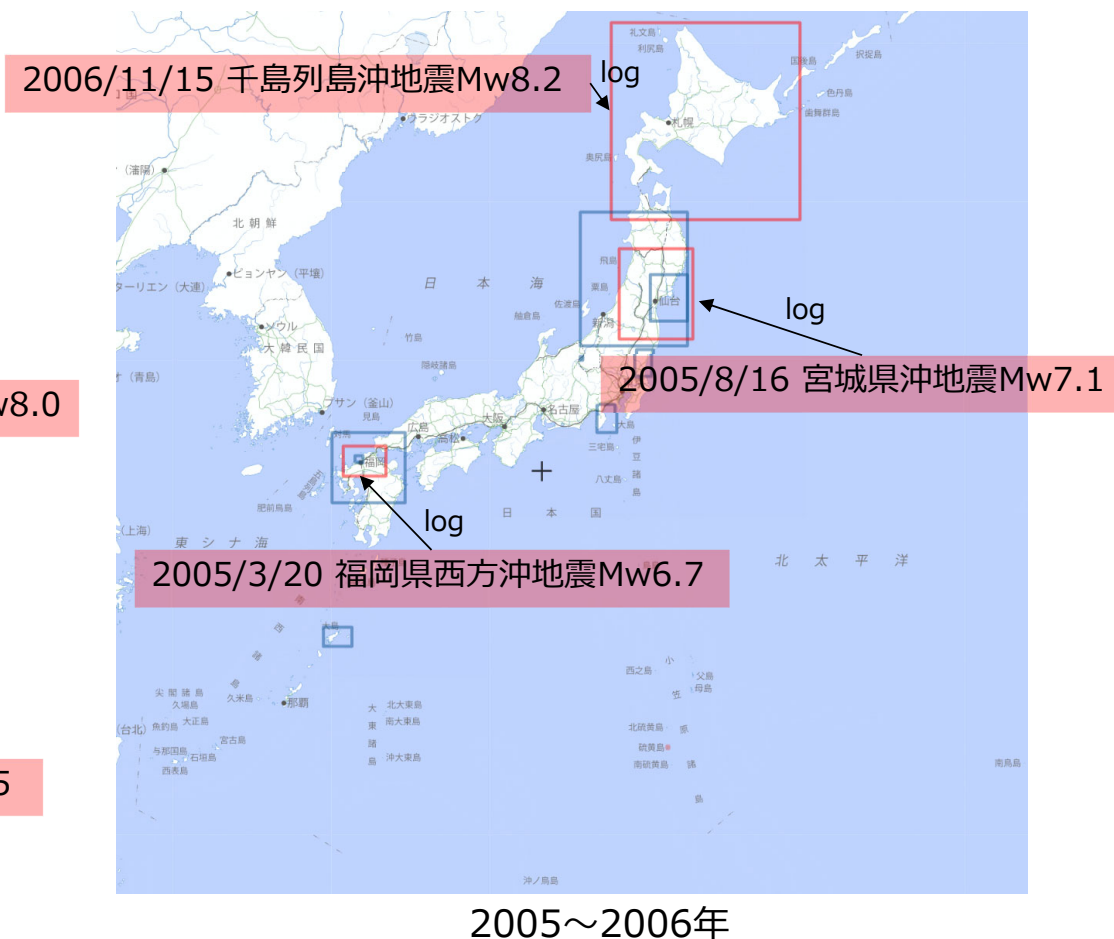
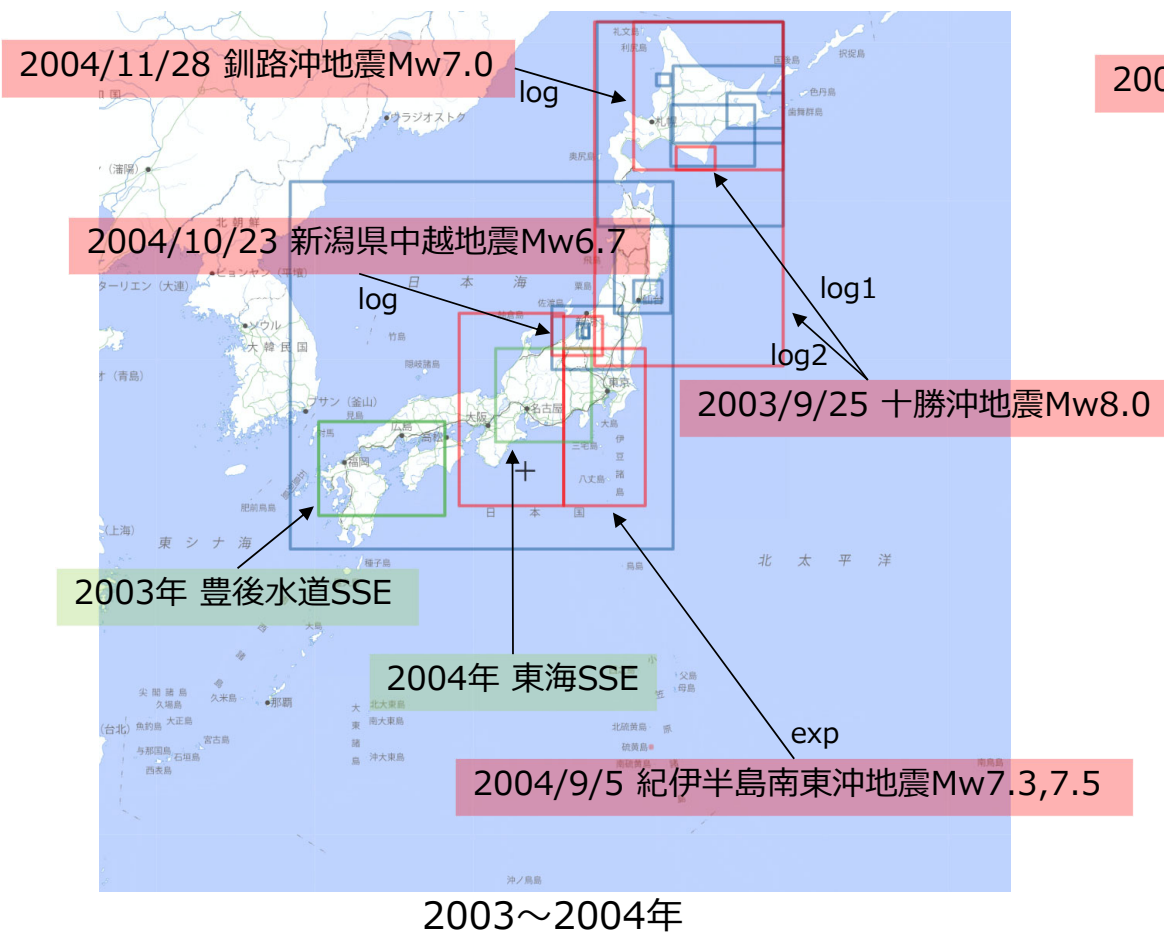


https://cais.gsi.go.jp/YOCHIREN/report/kaihou79/04_11.pdf



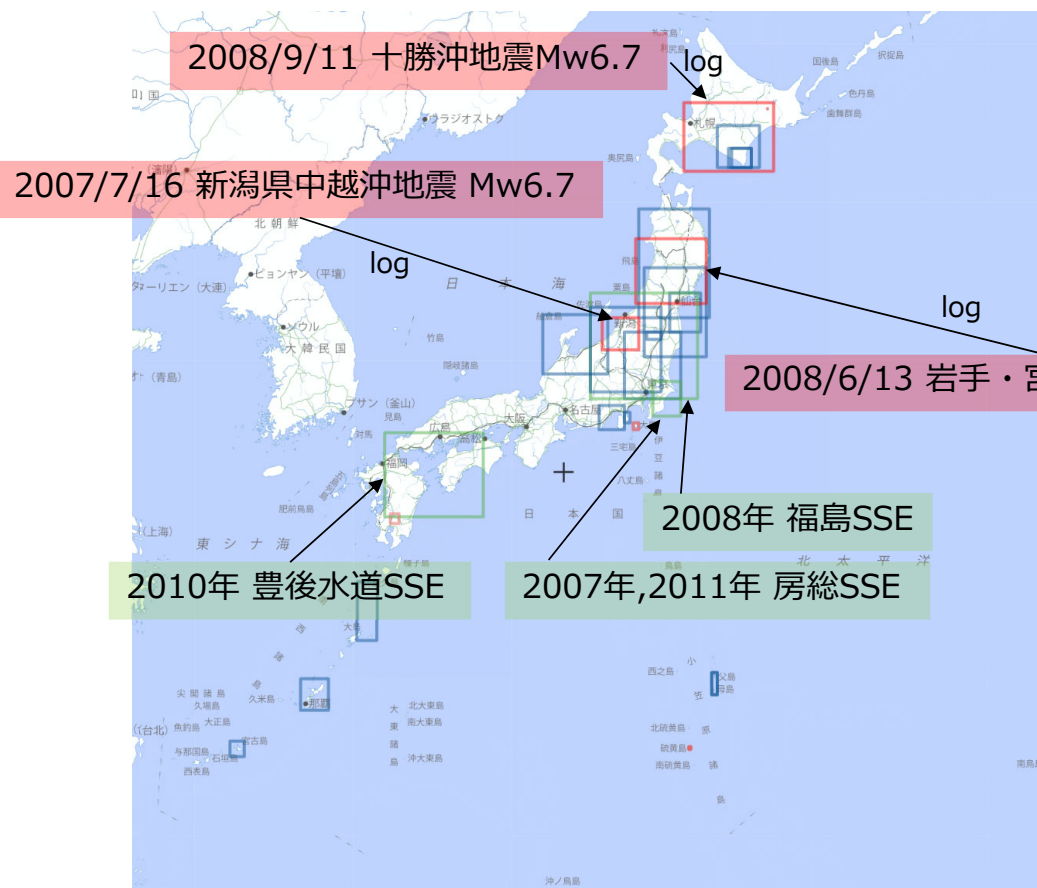
房総半島SSEを一次関数で推定

フィッティング時に考慮した地殻変動イベント①

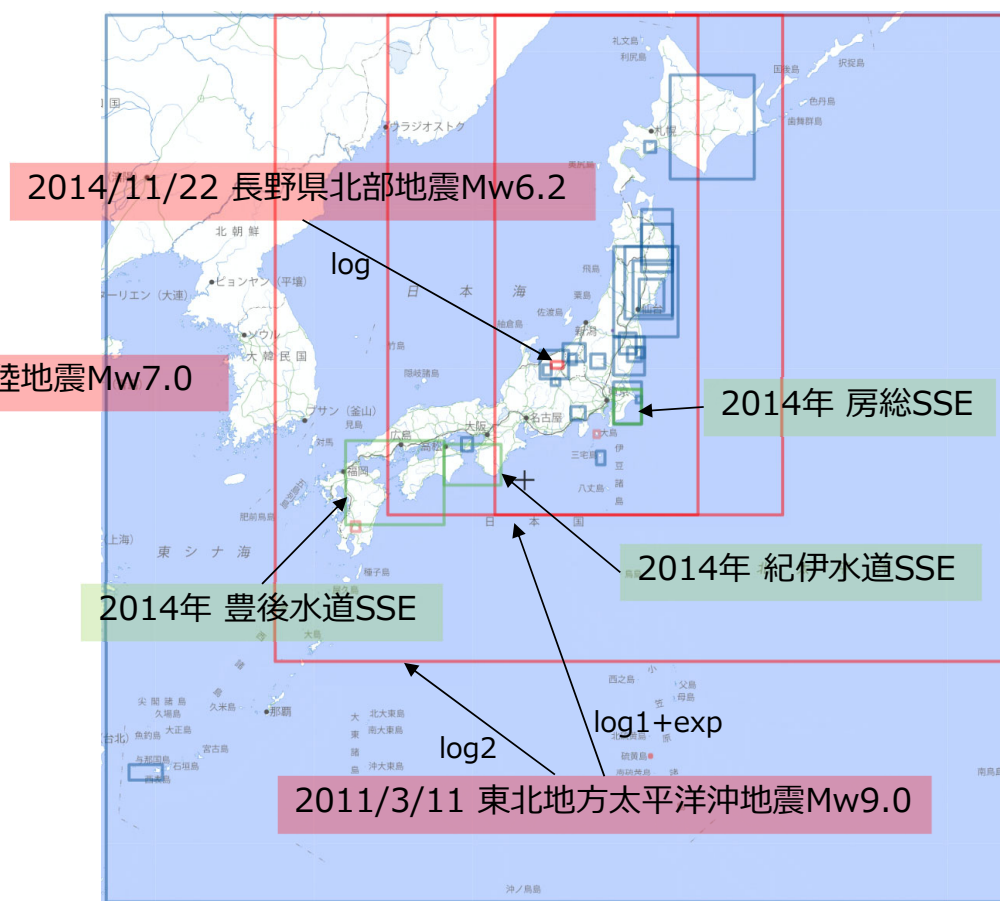


青：地震・群発地震、赤：余効変動（日付はUTC）、緑：スロースリップ、橙：速度変化、火山

フィッティング時に考慮した地殻変動イベント②



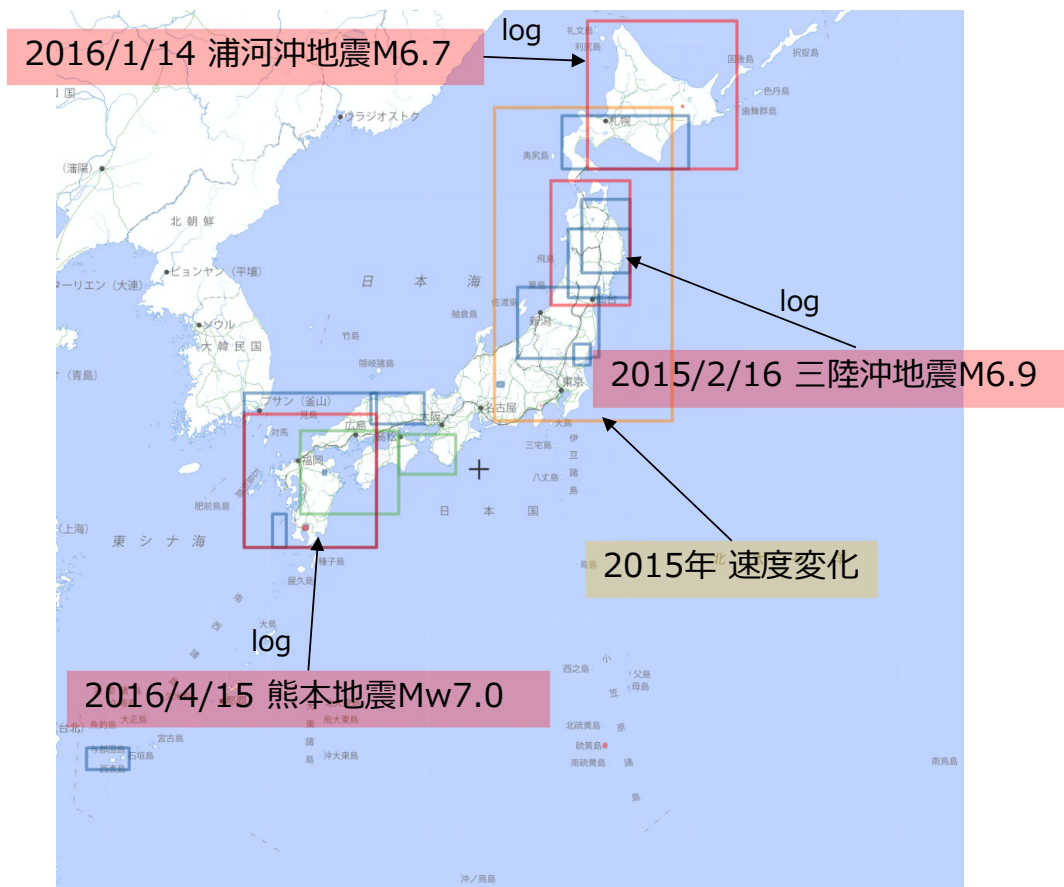
2007~2010年



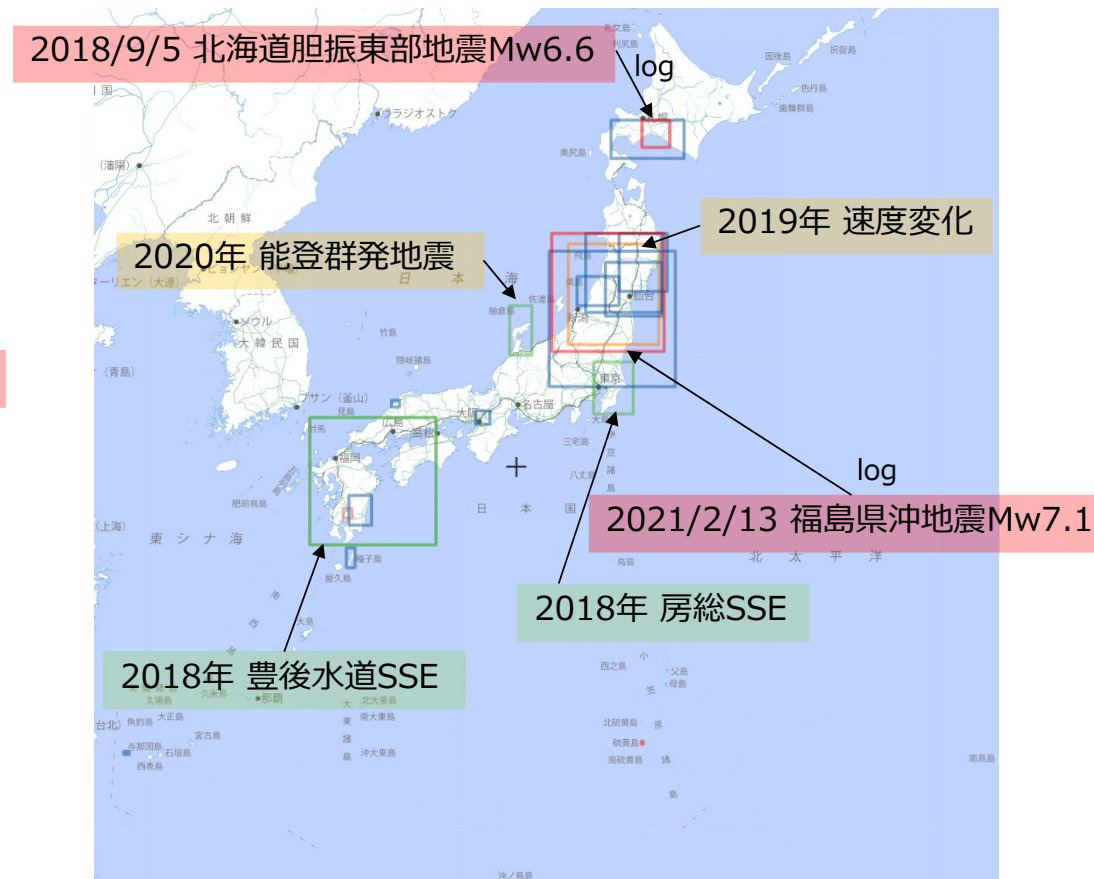
2011~2014年

青：地震・群発地震、赤：余効変動（日付はUTC）、緑：スロースリップ、橙：速度変化、火山

フィッティング時に考慮した地殻変動イベント③



2015～2017年



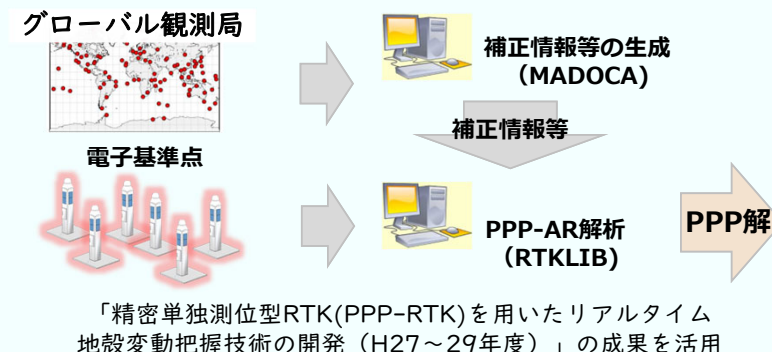
2018～2021年

青：地震・群発地震、赤：余効変動（日付はUTC）、緑：スロースリップ、橙：速度変化、火山

精密単独測位 (PPP) に関する中間成果 ～地表変動モデルへの適用可能性～

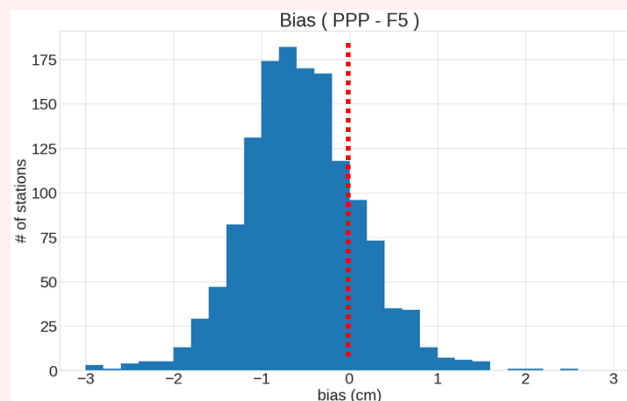
【研究内容】

- ・マルチGNSS-PPP解析へのQZSSへの組み込みとその効果の調査 (スライド41)
- ・定常解析解との整合性 (バイアス量とその時間変化) を検証

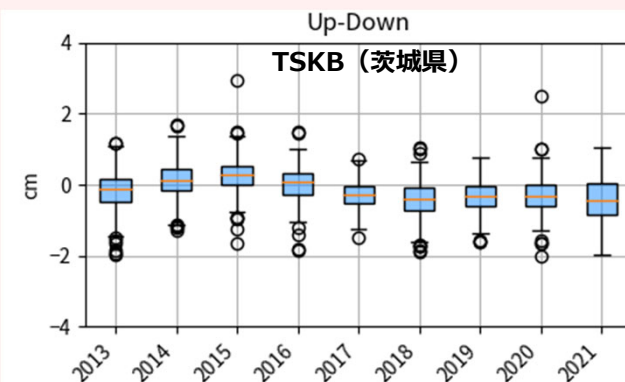


【中間成果】

- ・後処理PPP (スタティック解) の適用
 ➡ 解の取得：数日 【迅速性の向上】 ※
- ・定常解析解とのバイアスを確認
 東西：-0.9mm, 南北：0.2mm,
 上下：-5.4 mm
- ・バイアスに顕著な時間変化はなし
 【IGS局での予備的調査】 (スライド42)



全電子基準点の2003～2021年の定常解析結果とPPP解のバイアス平均値 (上下成分) のヒストグラム



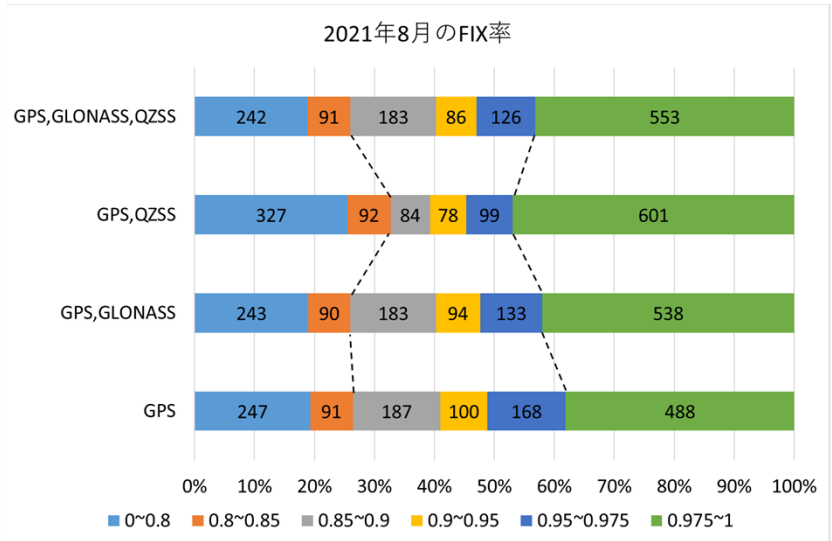
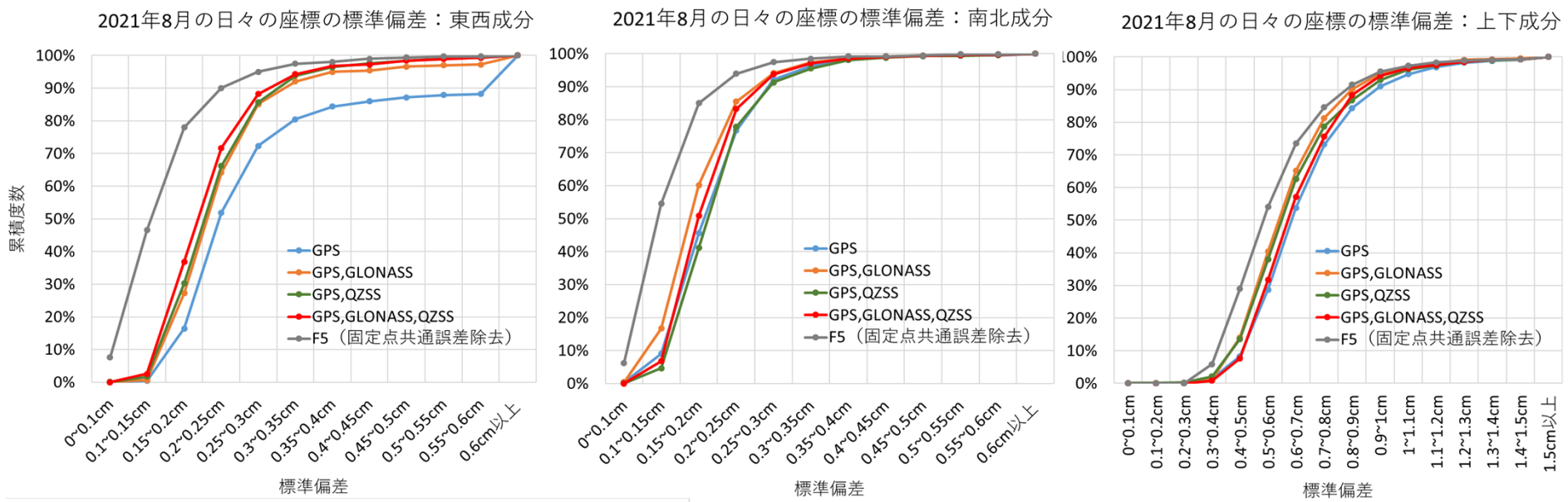
電子基準点 TSKBにおける年ごとの定常解析結果とPPP解のバイアスの分布 (バイアスの時間変化)

【今後の取り組み】

地表変動モデルへの適用に向けたバイアス低減に向けた取り組み

※研究提案後、R5解のサービスが開始 (F5解の精度に匹敵しITRFに整合。観測の3日後に配信)。これにより当初の迅速性の課題は解決済みだが、PPP解は耐災害性の高い技術のため、引き続き技術開発を進めている。

マルチGNSS-PPP解のばらつきとFIX率



GPSのみのPPP解に比べ、GPS、GLONASS及びQZSSを用いたマルチGNSS-PPPにより、

- **いずれの成分でも解の標準偏差が小さな観測点の割合が増加。**
ただし、いずれの場合も**F5解には及ばない。**
- 特に、東西成分のGPSのみのPPP解に顕著な、**標準偏差の大きな（0.6cm以上）観測点の割合が、マルチGNSS-PPPでは減少**
- **FIX率は向上。**

IGS点におけるF5解とPPP解の比較

PPP解-F5解 定常解析解（F5解）とのバイアスに顕著な時間変化はIGS点においては認められない

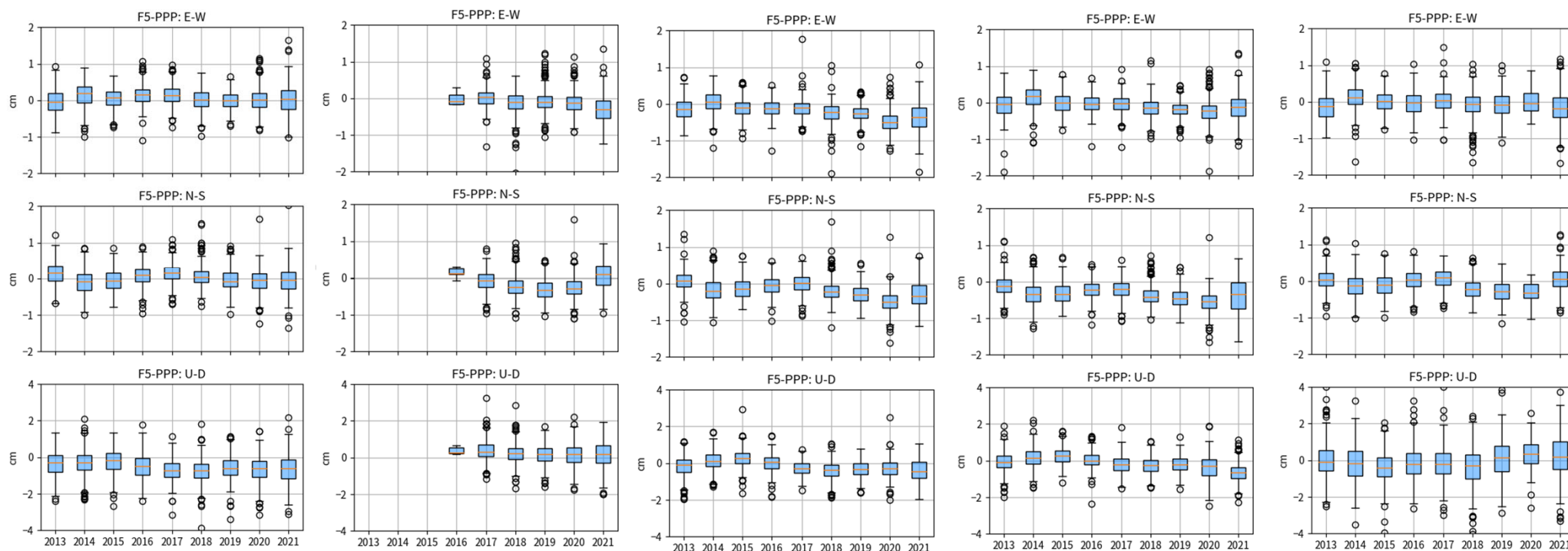
新十津川A

石岡

TSKB

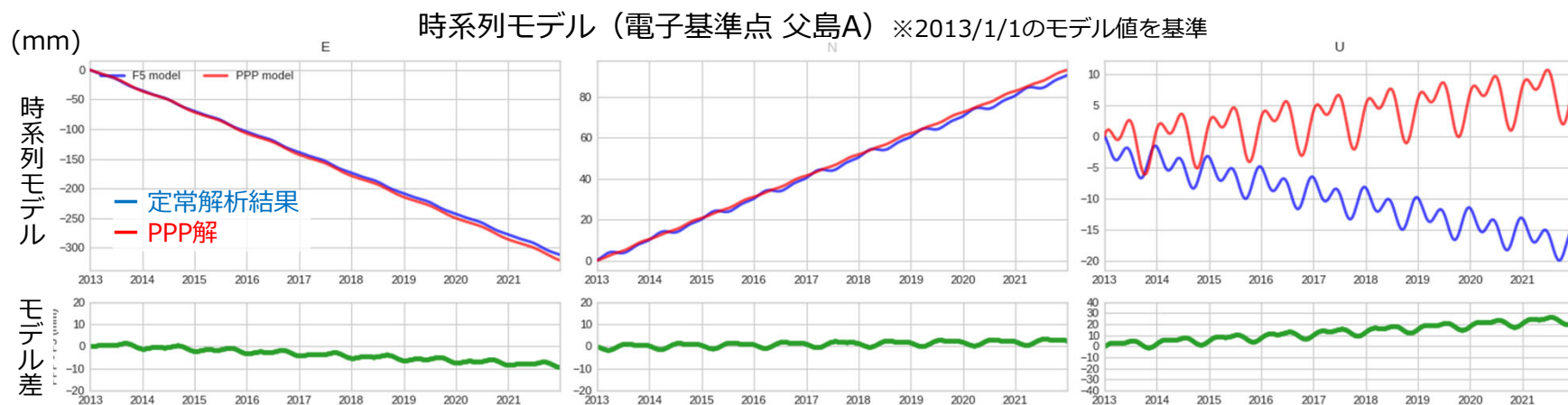
つくば2A

始良

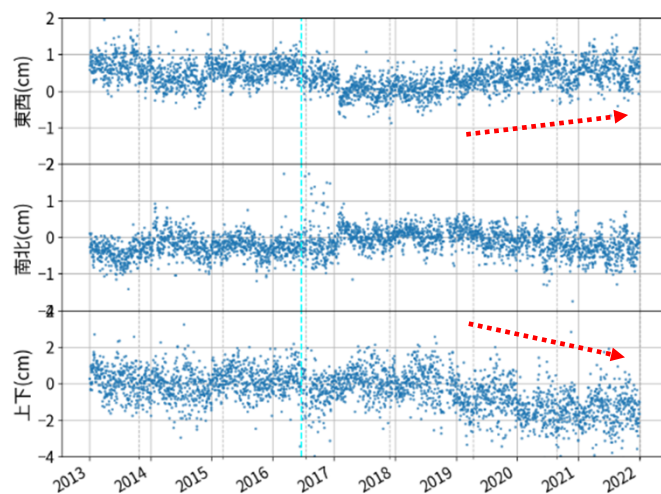


上段: 東西成分 スケール: -2cm~2cm
 中段: 南北成分 -2cm~2cm
 下段: 上下成分 -4cm~4cm

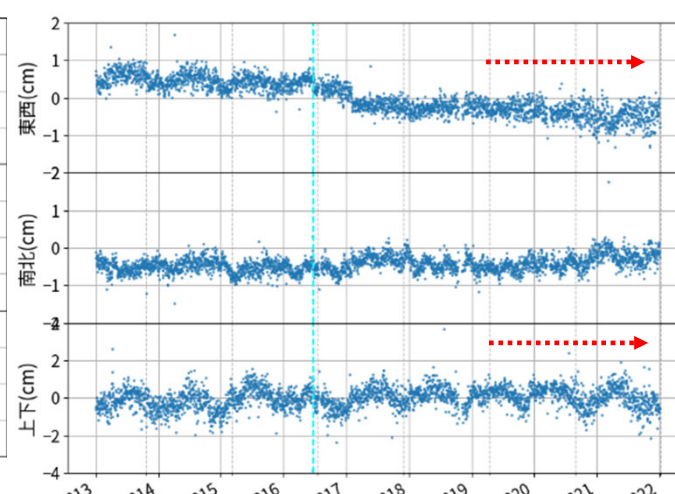
離島における時系列モデル推定へのPPPの活用効果：父島Aの例



離島における時系列モデルは、元にする座標（定常解析結果/PPP解）によって大きく異なる



IGS解に対する定常解析結果の座標差



IGS解に対するPPP解の座標差

離島の定常解析結果は、IGS解との座標差が時間変化

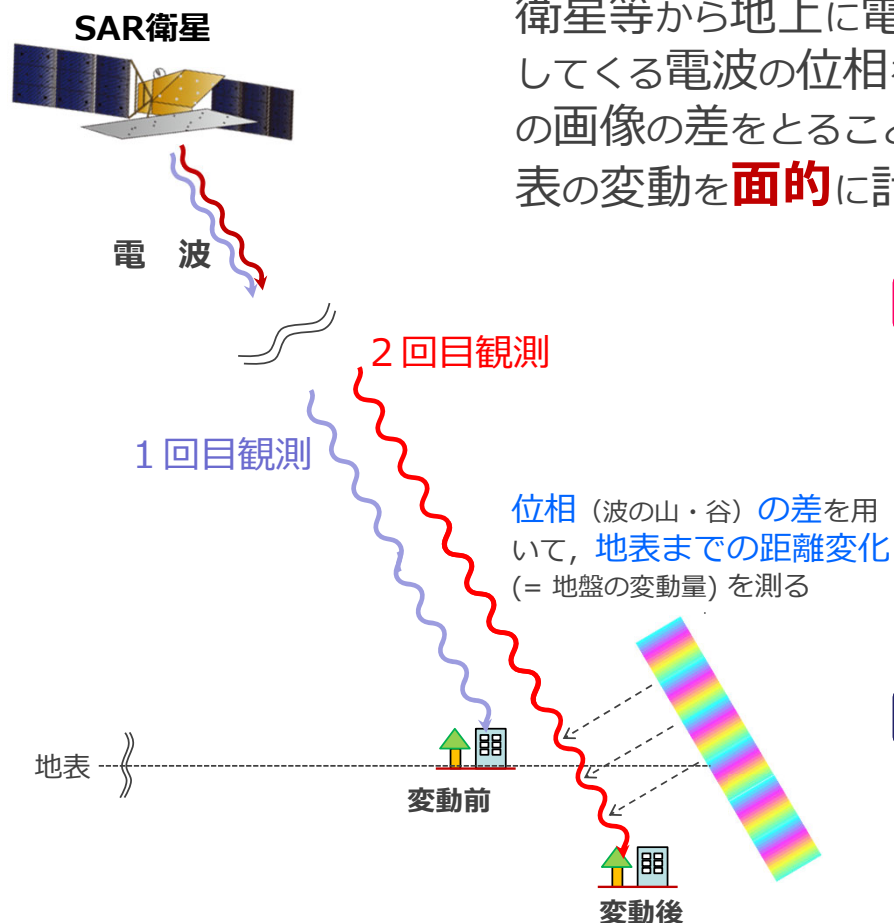
→ 離島の地表変動モデルでは定常解析解よりもPPP解を用いた方が有効な可能性（検討中）

PPP解とIGS解の相互比較により解の品質を監視できる

SAR：レーダー画像で測る地面の動き

干渉SARとは

衛星等から地上に電波を面的に照射し、反射してくる電波の位相を画像として表し、2時期の画像の差をとることにより、その間に生じた地表の変動を面的に計測する技術。

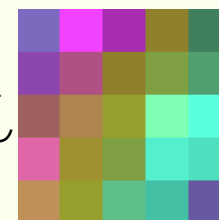


国産SAR衛星「だいち2号 (ALOS-2)」が活躍中

長所

空間分解能：数十m

他の観測方法と比べ、圧倒的な計測点数で、地表の動きを画像として把握可能

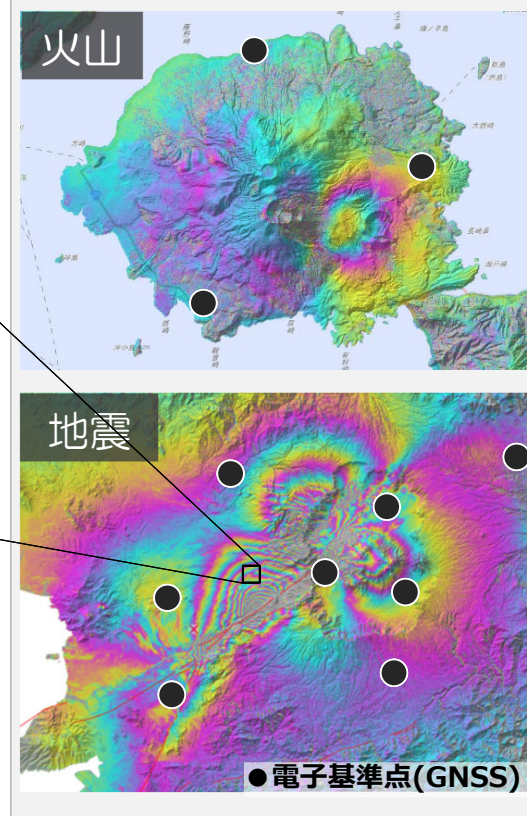


短所

計測方向：1成分
衛星視線方向成分

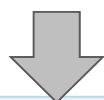
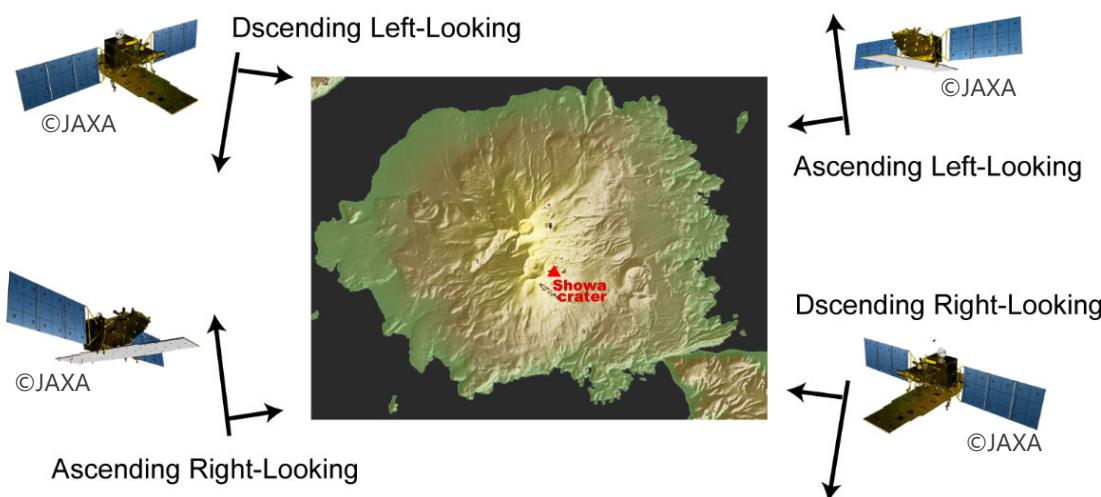
↓
位置情報管理に適さない

国土地理院では干渉SARによる国土の地盤変動の監視を実施している。



SAR 3次元解析：東西・南北・上下成分の推定

4方向の干渉SARデータを利用した3次元解析



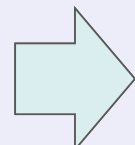
観測方程式: $d = Gu$ (4方向の場合)

各LOS方向の単位ベクトル

$$\begin{bmatrix} d1 \\ d2 \\ d3 \\ d4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} e_1^{ew} & e_1^{ns} & e_1^{ud} \\ e_2^{ew} & e_2^{ns} & e_2^{ud} \\ e_3^{ew} & e_3^{ns} & e_3^{ud} \\ e_4^{ew} & e_4^{ns} & e_4^{ud} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_{ew} \\ u_{ns} \\ u_{ud} \end{bmatrix}$$

【観測値】 【推定値】 3次元変動量 (東西、南北、上下)

最小二乗法



$$\hat{u} = -(G^T \Sigma_R^{-1} G)^{-1} G^T \Sigma_R^{-1} d$$

$$\Sigma_{\hat{u}} = (G^T \Sigma_R^{-1} G)^{-1}$$

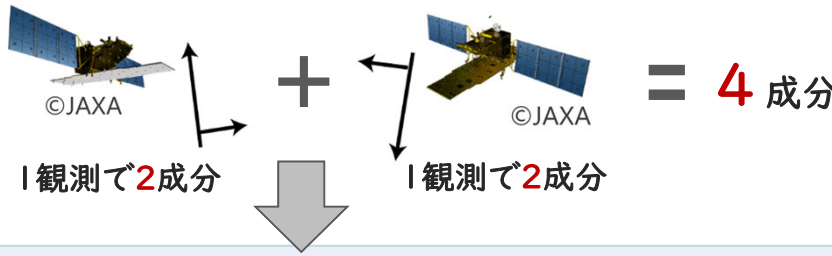
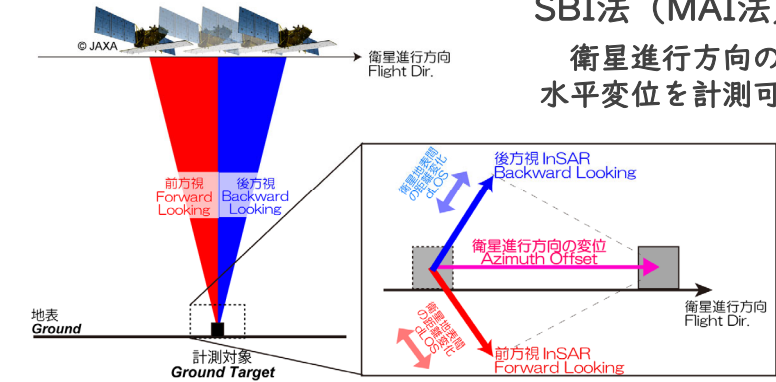
分散共分散行列

衛星進行方向の変位を利用した3次元解析

【衛星進行方向の変位計測技術】

SBI法 (MAI法)

衛星進行方向の
水平変位を計測可能



解析事例：平成28年（2016年）熊本地震（最大 M_j 7.3） ～計測精度～ 国土地理院

計測精度

（※本解析の場合）

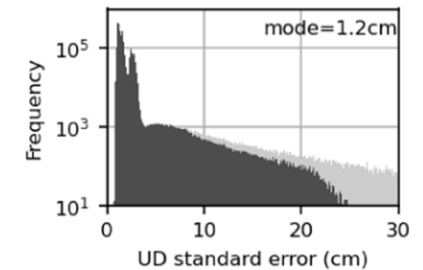
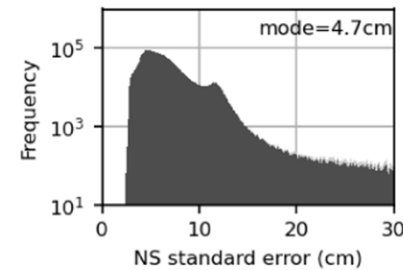
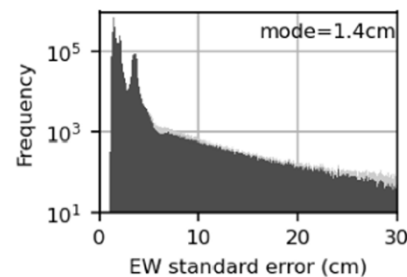
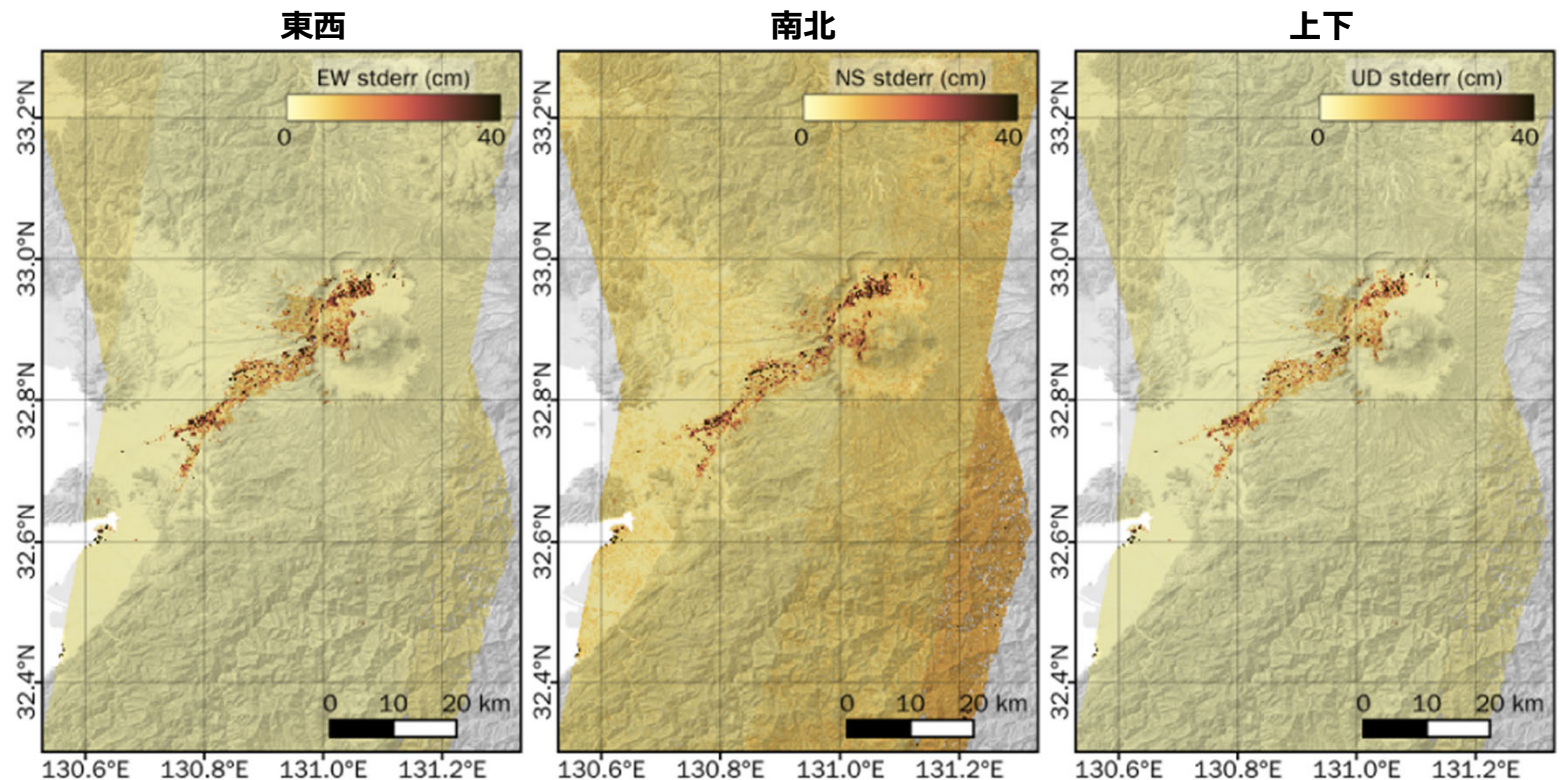
上下成分：～1 cm

東西成分：～1 cm

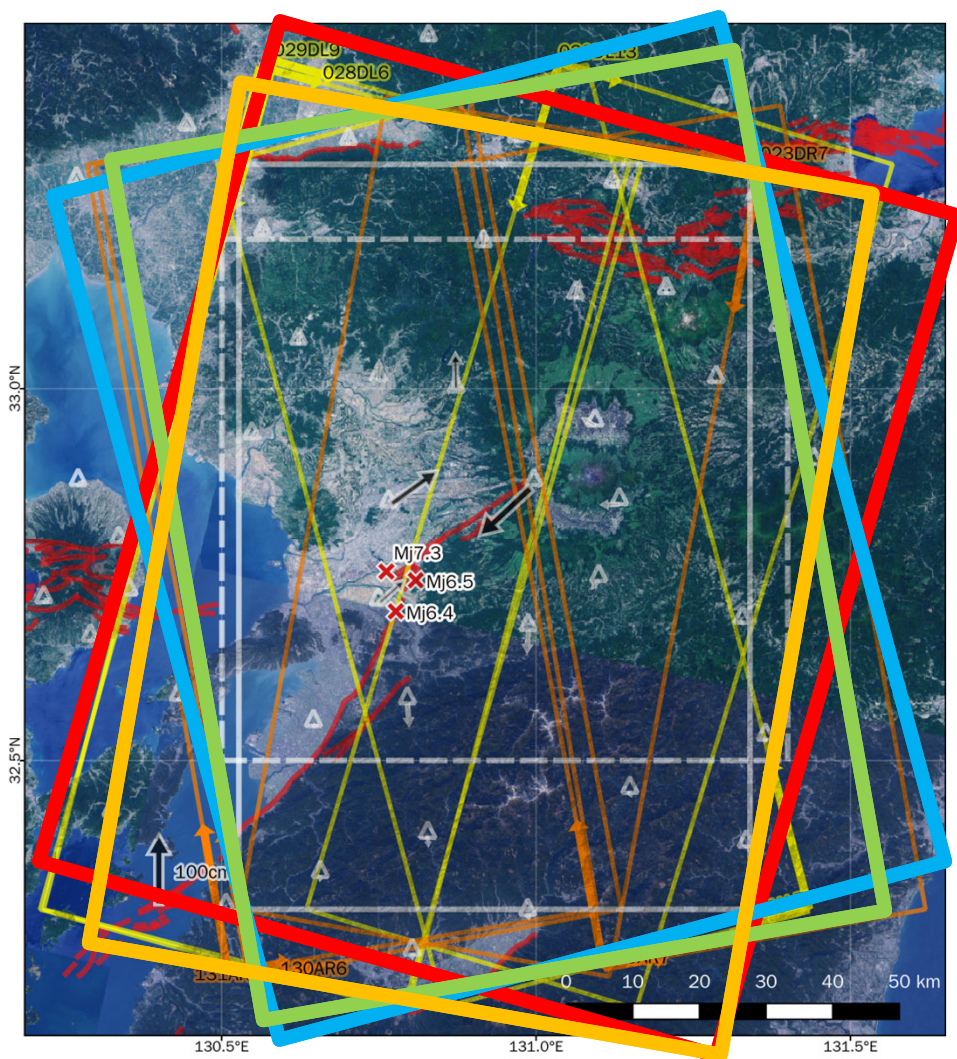
南北成分：～5 cm

※1 断層近傍では地表状態が大きく変わるために計測精度が劣る（～10cmを超える場所も）ことに注意.

※2 観測条件により精度は大きく変わるため、全ての計測でこの精度が保証されるわけではない.



熊本地震のタイムラインシミュレーション（ALOS-4の場合）



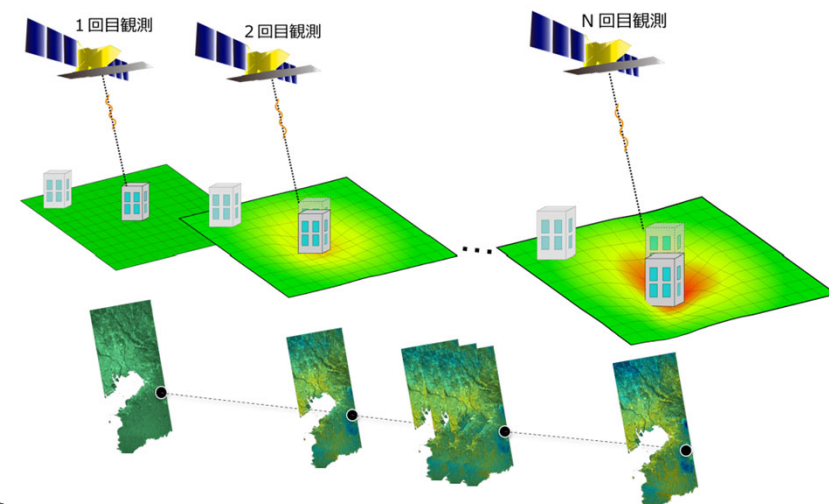
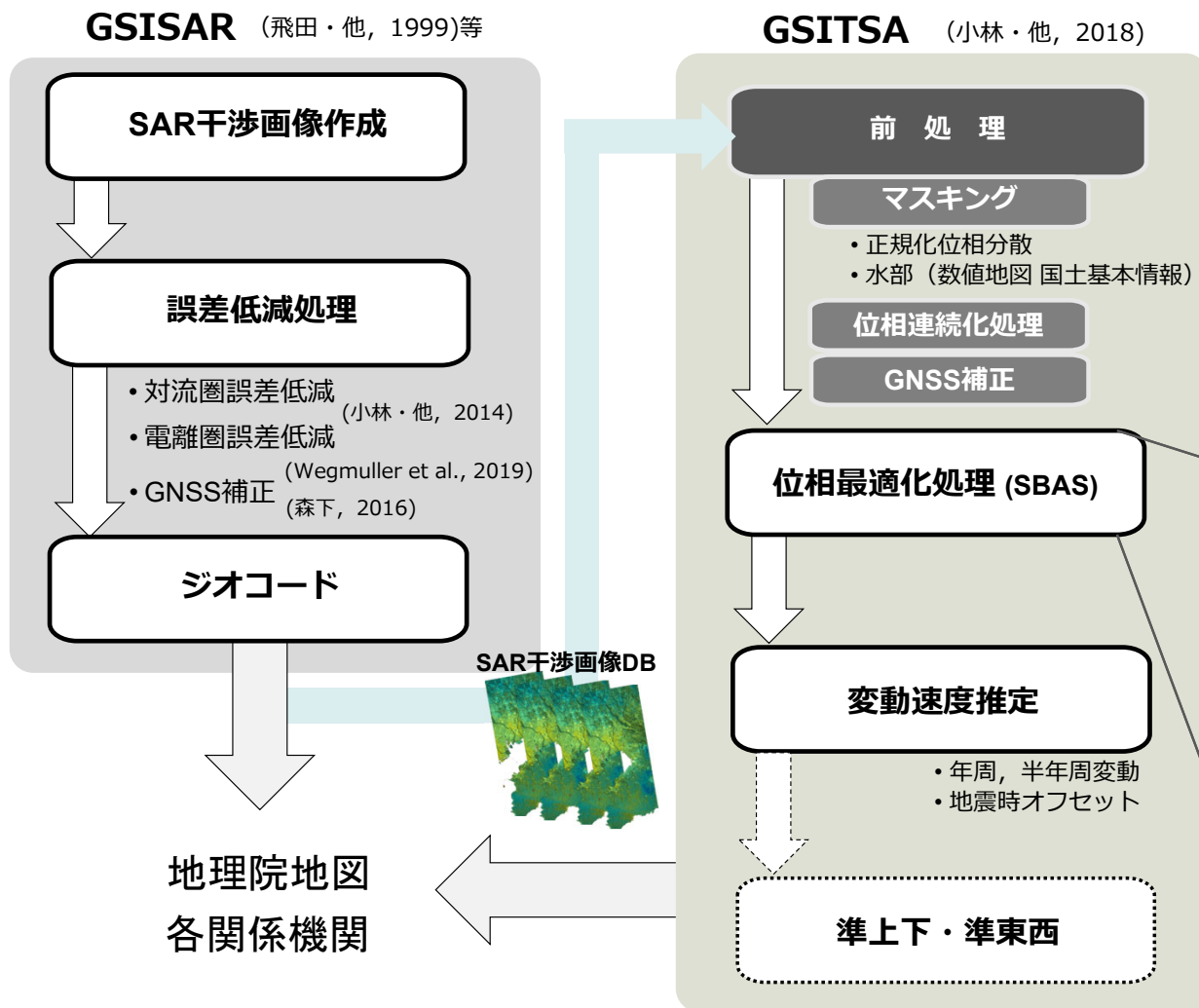
約
2
週
間

月日	時間	
04/16	01:25	Mj 7.3の地震発生
04/18	00:25	p132AR3観測、初観測
	12:19	p023DR1観測 InSAR2.5次元解析結果（速報）公表
04/19	23:30	p124AL2観測
04/20	13:00	p029DL2観測 SAR3次元解析結果（速報）公表
04/22	00:12	p130AR1観測、定常モードなので好条件
04/24	23:37	p125AL1観測
04/29	12:53	p028DL1観測
05/02	00:25	p132AR3観測
	12:19	p023DR1観測
05/19		● 電子基準点成果改定（2016年熊本地震の場合）

- ・ ALOS-4では1観測で変動域全体をカバー
→精度向上が期待される
- ・ 電子基準点成果改定とほぼ同時に補正パラメータを公表可能

干渉SAR時系列解析 ～時系列解析の流れ～

多数枚のSAR画像を統計的に処理する干渉SARの応用技術



$$\begin{bmatrix} \mathbf{G} \\ \kappa^2 \nabla^2 \end{bmatrix} \mathbf{m} = \begin{bmatrix} \mathbf{d} \\ \mathbf{0} \end{bmatrix} \quad \begin{array}{l} \nabla : \text{Laplacian operator} \\ \kappa : \text{超パラメータ} \end{array}$$

$$\mathbf{d} = [\dots \phi_{ji} \dots]^T \quad \mathbf{m} = [\phi_{10} \ \phi_{21} \ \dots \ \phi_{ji} \ \dots]^T$$

$$\mathbf{G} = \begin{bmatrix} & & & & & & & \\ & & & & & & & \\ & & & & & & & \\ 0 & 0 & \dots & 1 & 1 & 1 & \dots & 0 & 0 \\ & & & & & & & & \\ & & & & & & & & \end{bmatrix}$$

Laplacian smoothing (時間方向)
(Schmidt and Burgman, 2003)

- ABIC/CVSSによる超パラメータ決定
- 重み付き最小二乗
- 位相の標準偏差 (コヒーレンスから算出)

衛星重力データ（球面調和関数モデル）から推定するジオイド高 ～定常時～

ジオイド高 N

$$N_{\text{GGM}} = \frac{GM_1 - GM_2}{R\gamma_Q} - \frac{W_0 - U_0}{\gamma_Q} + \frac{GM_1}{r\gamma_Q} \sum_{n=2}^{n_{\text{max}}} \left(\frac{a_1}{r}\right)^n$$

$$\sum_{m=0}^n \left[\left(\bar{C}_{nm} - \left(\frac{GM_2}{GM_1} \right) \left(\frac{a_2}{a_1} \right)^n \bar{C}_{2n}^* \right) \cos(m\lambda) + \bar{S}_{nm} \sin(m\lambda) \right]$$

$$\bar{P}_{nm}(\cos \theta),$$

Matsuo & Kuroishi (2020)の式(6)より

短波長ノイズ低減処理

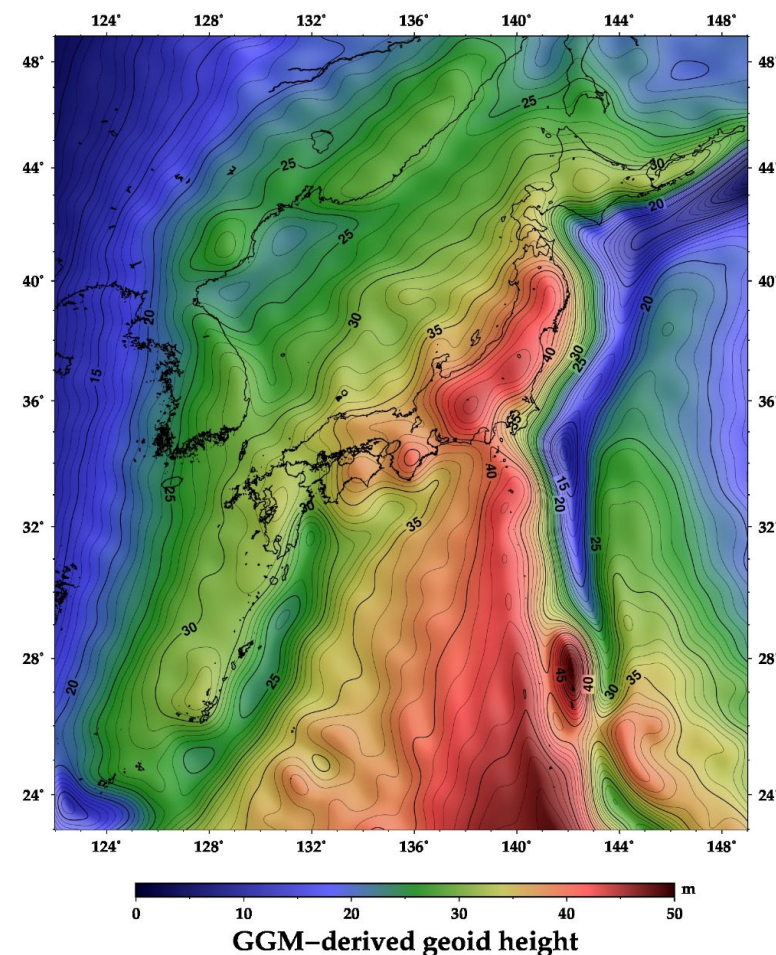
衛星重力データに適用する空間フィルター
(Wahr et al. (1998)の式(32)～(34))

$$W(\alpha) = \frac{b}{2\pi} \left(\frac{\exp[-b(1 - \cos \alpha)]}{1 - e^{-2b}} \right) \quad b = \left(\frac{\ln 2}{1 - \cos(r/a)} \right)$$

$$W_0 = \frac{1}{2\pi} \quad W_1 = \frac{1}{2\pi} \left[\frac{1 + e^{-2b}}{1 - e^{-2b}} - \frac{1}{b} \right]$$

$$W_{n+1} = -\frac{2n+1}{b} W_n + W_{n-1} \quad W_{m+1} = -\frac{2m+1}{b} W_m + W_{m-1}$$

衛星重力データから導出されたジオイド高



震源断層パラメータから推定するジオイド変化 ～地震時～

ジオイド高さ変化 ΔN

$$\Delta N = \Delta\psi/g$$

重力ポテンシャル

$$\Delta\psi(x_1, x_2, x_3) = \{\rho G[U_1 S(\xi, \eta) + U_2 D(\xi, \eta) + U_3 T(\xi, \eta)] + \Delta\rho U_3 C(\xi, \eta)\}||$$

断層すべりに関する情報

$$\Delta\rho = \rho' - \rho$$

$$S(\xi, \eta) = -q_0 I_0 \sec^2 \delta + R \tan \delta + 2I_1 \tan^2 \delta$$

$$D(\xi, \eta) = -\xi I_0 \tan \delta - 2x_3 I_2 \sin \delta - q_0 [\log(R + \xi) + 2I_1 \tan \delta]$$

$$C(\xi, \eta) = -\xi \log(R + \eta) - \eta \log(R + \xi) - 2qI_2$$

$$T(\xi, \eta) = \xi I_0 \tan^2 \delta - x_3 \sin \delta \cdot \log(R + \xi) + 2q_0 (I_1 \tan^2 \delta + I_2) + C(\xi, \eta)$$

$$I_0(\xi, \eta) = \log(R + \eta) - \sin \delta \cdot \log(R + \bar{d})$$

$$I_1(\xi, \eta) = \tan^{-1} \left(\frac{-q \cos \delta + (1 + \sin \delta)(R + \eta)}{\xi \cos \delta} \right)$$

$$I_2(\xi, \eta) = \tan^{-1} \left(\frac{R + \xi + \eta}{q} \right)$$

$$R = \sqrt{\xi^2 + \eta^2 + q^2}$$

$$q = x_2 \sin \delta - (d - x_3) \cos \delta$$

$$q_0 = q - x_3 \cos \delta$$

$$\bar{d} = \eta \sin \delta - q \cos \delta$$

Okubo (1992)の式(24)～(36)より

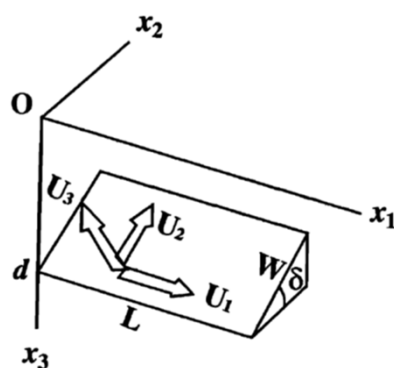
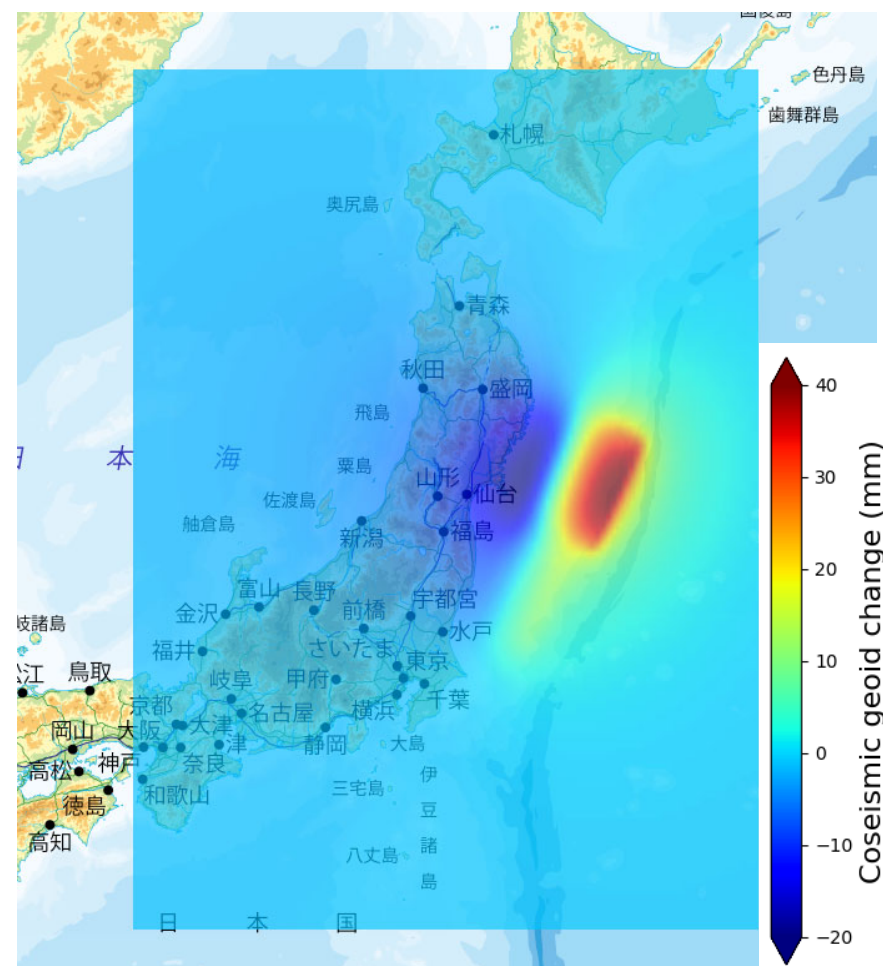


Fig. 2. Geometry of the source model. Positive U_1 , U_2 , and U_3 with $0 < \delta < \pi/2$ mean left-lateral slip, thrusting slip, and tensile opening, respectively.

Okubo (1992)の図2より

2011年東北地方太平洋沖地震に伴うジオイド変化



解析/分析ソフトウェアの開発

GUI操作による計算条件入力, 結果の画像表示・操作により解析・分析作業の効率性を向上

重力・ジオイド

重力ジオイド変動解析ソフトウェア

定常時監視用

重力ジオイド変動解析ソフトウェア

入力画面例

① GRACE解: ☒ 大気質量変動を含む

② 計算モード: ☐ ポイント計算, ☐ リスト計算, ☒ 経年変化図

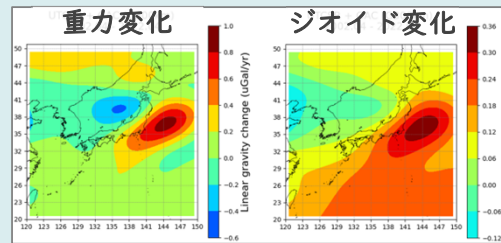
③ 計算点: 経度 度 - 度, 緯度 度 - 度

④ 計算期間: 年 月 - 年 月

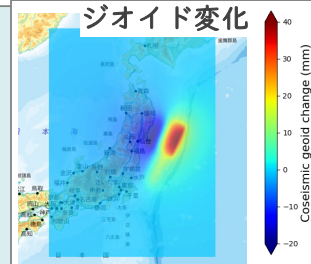
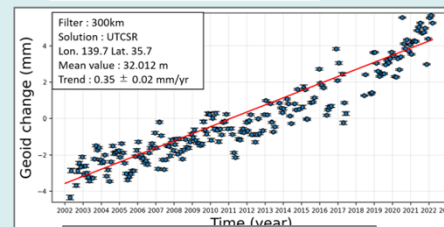
⑤ フィルター長: km

⑥

⑦



時間変化(ジオイド)



2011年東北沖地震時のジオイド変化

災害時監視用

重力ジオイド変化算出

☐ 解析範囲・計算間隔

北端 度
西端 度 東端 度
南端 度

計算間隔 度

☐ 断層パラメータ

断層左端の位置 経度 度
緯度 度
断層上端深さ km

断層の長さ m
断層の走向角 度
断層の滑り量 m
断層の開口量 m

☐ 密度

媒体の密度 kg/m³
貫入体の密度 kg/m³

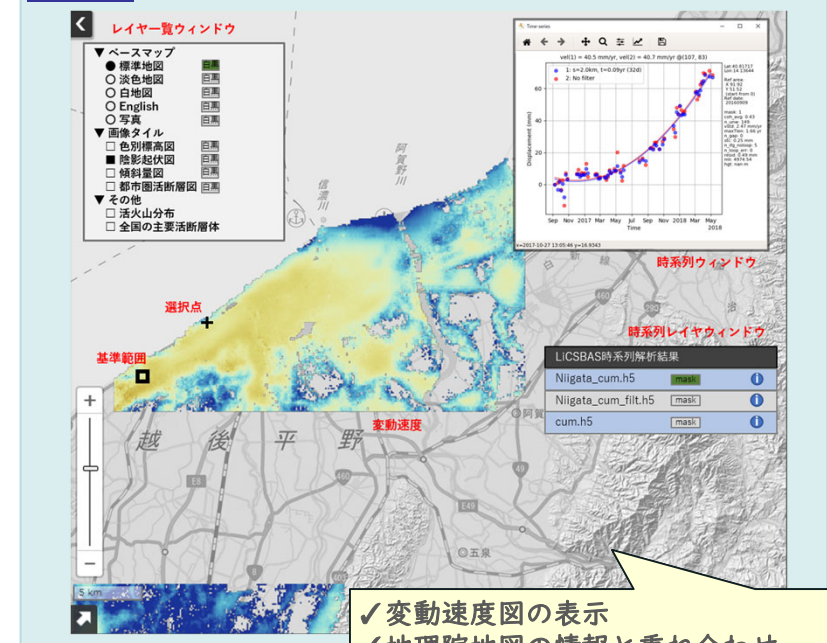
☐ カラーマップ ☒

※GUIは現在開発中

- ✓ 重力データによる重力/ジオイドの経年的時間変化を計算
- ✓ 断層モデル等による重力/ジオイドの時間変化を計算

SAR

干渉SAR時系列解析結果ウェブ地図表示機能



- ✓ 変動速度図の表示
- ✓ 地理院地図の情報と重ね合わせ
- ✓ HDF5形式による表示速度の高速化

※PPP解算出用ソフトウェア, 災害時地表変動モデル構築用ソフトウェアも開発中

現業での利用を想定したツール開発

用語説明

■ 精密単独測位（PPP）

単独観測局のみで精密な測位を行う手法。相対測位と異なり基準観測点を必要としない。GNSS衛星の精密な軌道情報及び時刻情報を用いることで精密な測位解を実現する。

■ ジオイド

地球の重力による位置エネルギーの等しい面（重力の等ポテンシャル面）の1つであり、地球全体の平均海面に最もよく整合するものとして定義される。日本においては、東京湾平均海面に一致する等ポテンシャル面をジオイドと定め、標高の基準としている。

■ 干渉SAR（干渉合成開口レーダー）

空間分解能の高いマイクロ波レーダーであるSAR（Synthetic Aperture Radar：合成開口レーダー）による観測を、地表の同一範囲に対して二回以上実施し、それらのデータに含まれる位相の差を計算することで、観測の間に発生した地盤変動を面的に計測できる技術。地上に観測点を設置することなく、数十mの高い空間分解能で、地盤変動を数cmの精度で計測が可能。衛星を用いた宇宙からの観測が一般的。

■ 干渉SAR時系列解析

観測時期の異なる多数枚のSAR干渉画像を用いて、定常的な（場合によっては非定常な）地盤の変動を計測する干渉SARの応用技術。多くのデータを用いることで、大気起因等のランダムなノイズを低減して信号対雑音比(S/N比)を高め、年速度1cm以下でゆっくり進行する微小な地盤変動も計測が可能。