

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 131,360 千円（5年間の総額）

国土地理院 地理地殻活動研究センター

宇宙測地研究室

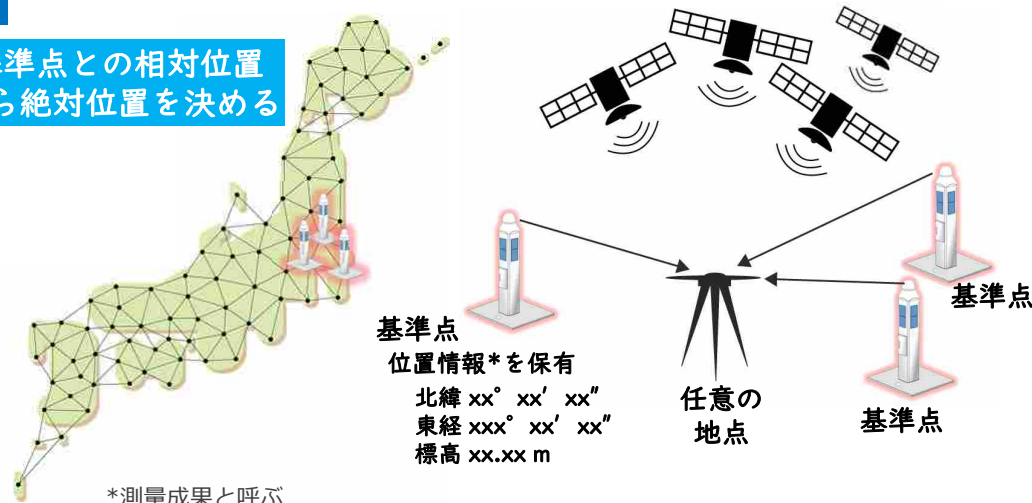
小林 知勝

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



*測量成果と呼ぶ

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】

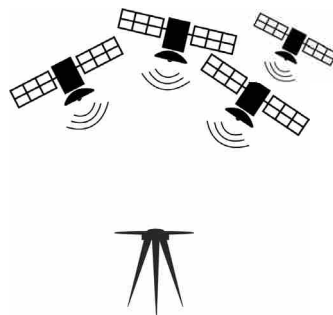
位置の基準に準拠・整合したものに統一されることで、誰もが安心して位置情報を**利活用可能**

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

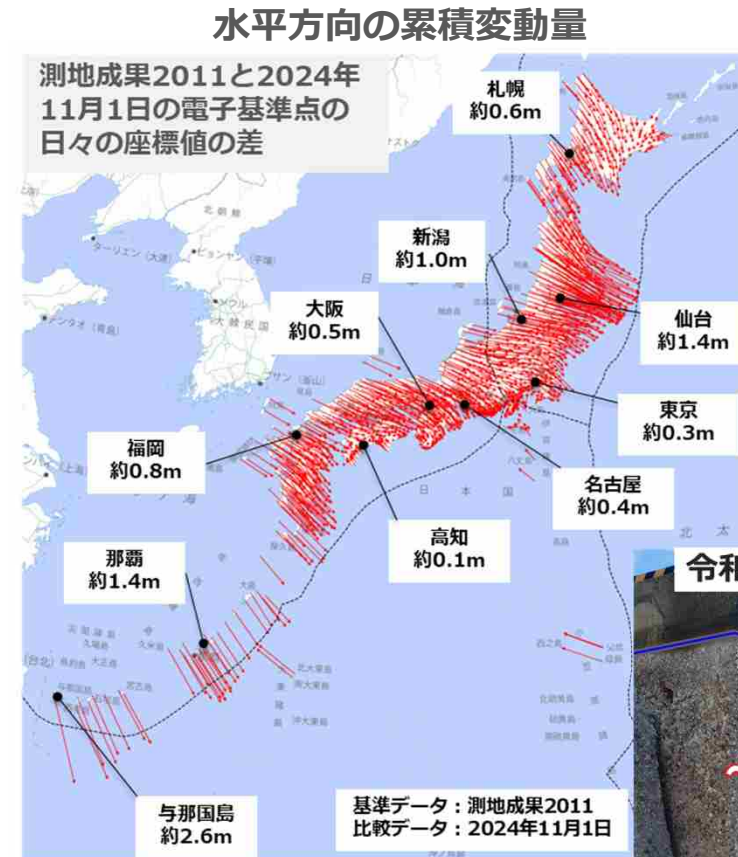
■ 年間数cmのズレ

- 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



点線：プレート境界
→：地表変動の向きと大きさ



研究背景：位置情報と位置の不整合

みんなが
共通に使う

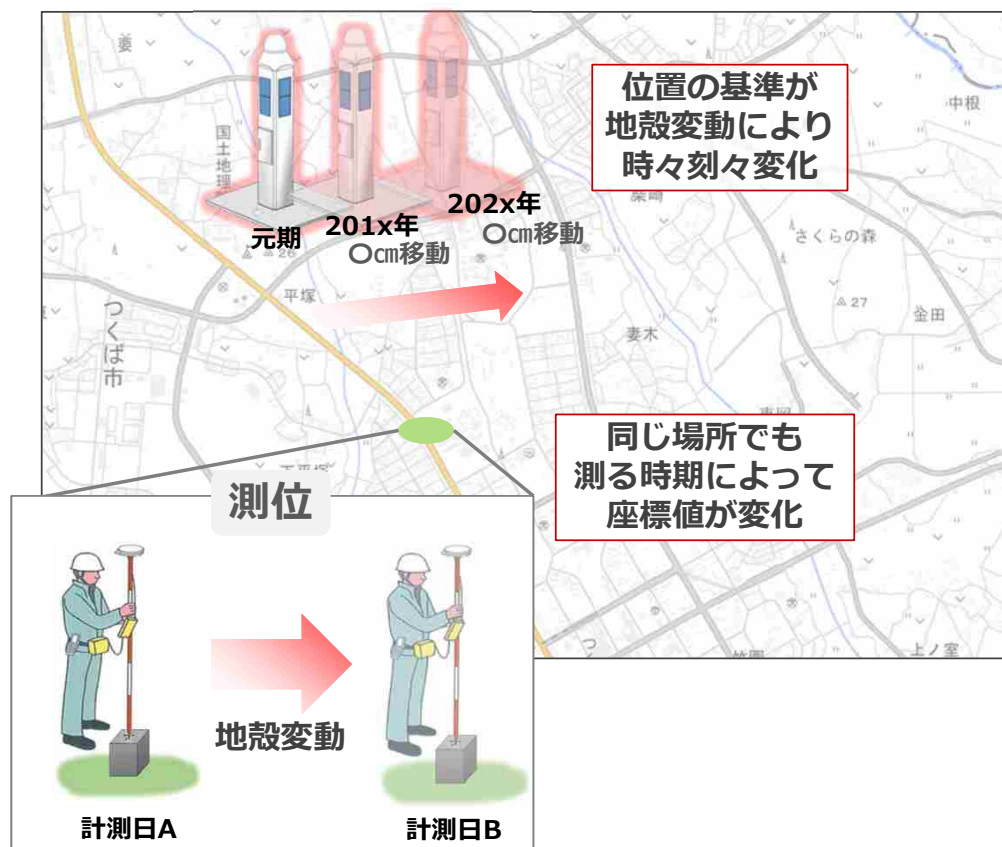
位置情報は基本的に不変

(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

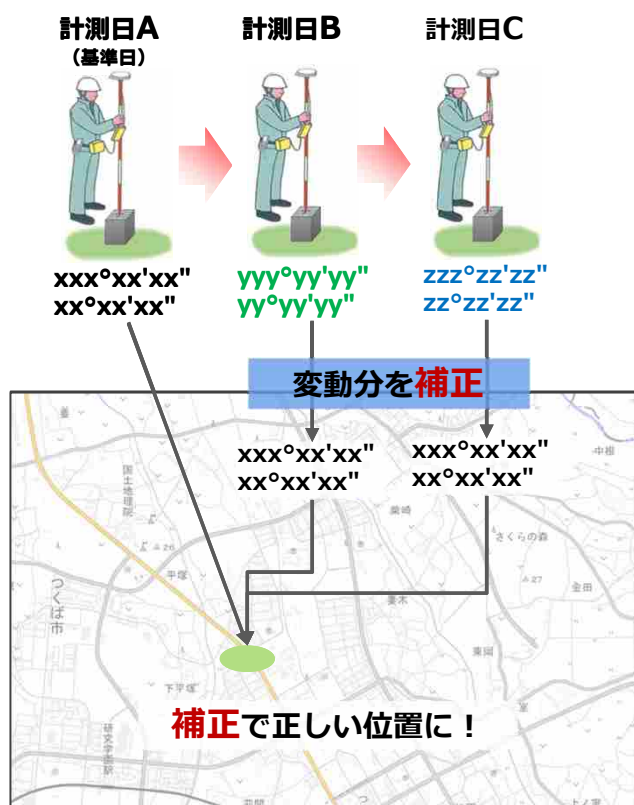
実際の位置は変化



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



補正量の時空間モデル



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）
両方に着目した**変化**の詳細な**計測**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16-21）

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22-25）

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：時間モデル

空間分解能の向上：SAR，小型GNSS，空間モデル

■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）

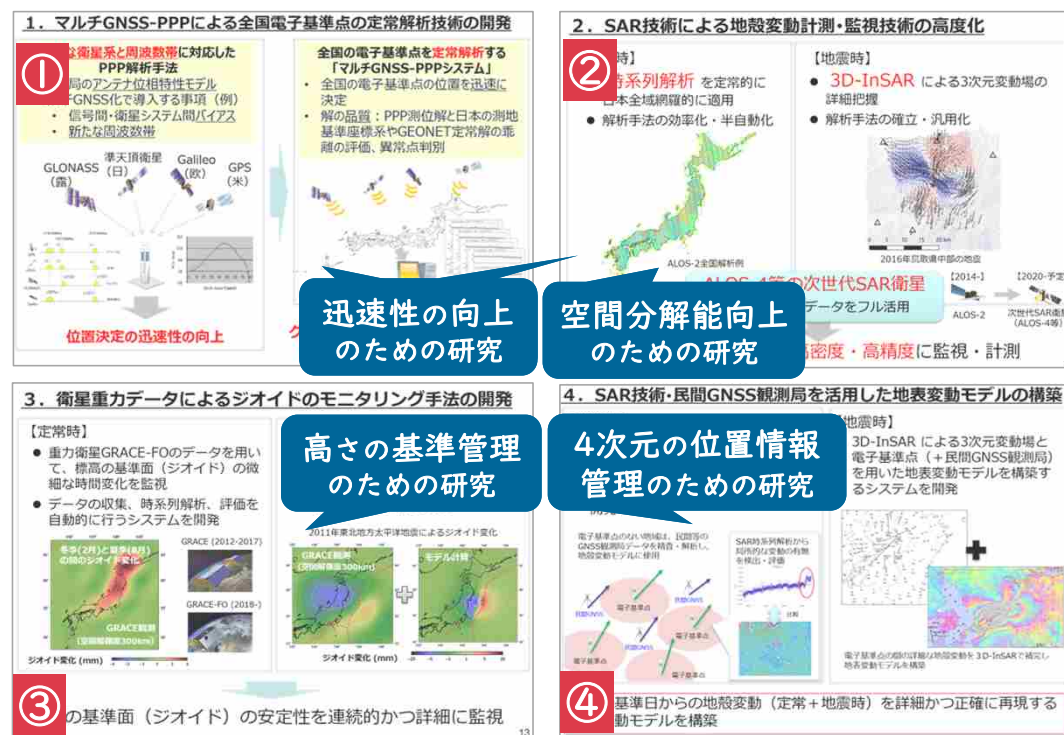
モデル計算による推定，重力衛星による計測

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

現在の位置情報管理の仕組み ～定常時～

定常時 動いた分を補正して正しい位置情報に

定常時地殻変動補正機能 POS2JGD

地殻変動補正計算(ITRF2014) Ver.2.0.0

操作方法 地殻変動補正API

計算条件

測位結果を国家基準に合わせる

測位実施日 2022-05-31

使用するパラメータファイル pos2jgd_202201_ITRF2014.par

補正する座標値の指定

■手動で1点毎に入力して補正 Q 度分秒 平面直角座標 地心直角座標

緯度 360613.58925 経度 1400516.27815 高さ 2.340

一括補正計算 入力ファイル作成方法

入力ファイルを選択してください。 Browse クリア 補正実行

計算結果

補正の内容 測位結果を国家基準に合わせる

測位実施日 2022-05-31

使用したパラメータファイル pos2jgd_202201_ITRF2014.par Ver.1.0.0

◆入力した測位結果

入力した緯度(度分秒): 360613.58925

入力した経度(度分秒): 1400516.27815

入力した高さ(m): 2.340

◆地図に照合する座標値(補正結果)

補正後の緯度(度分秒): 360613.59534

補正後の経度(度分秒): 1400516.26325

補正後の高さ(m): 2.2563

◆補正量

補正量dN(秒): 0.00609

補正量dE(秒): -0.01490

補正量dH(m): -0.0837

補正結果を平面直角座標に換算 補正結果を地心直角座標に換算 系番号 9系 360000.1395000 換算

地図と測量の科学館

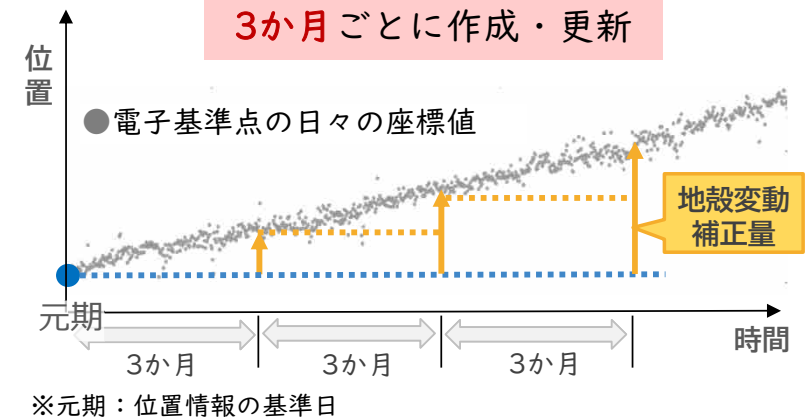
24.6

<https://positions.gsi.go.jp/cdcs/calc>



補正量

時間



空間



5km間隔

電子基準点の補正量を
内挿補間

↓
5km間隔の
格子点パラメータに

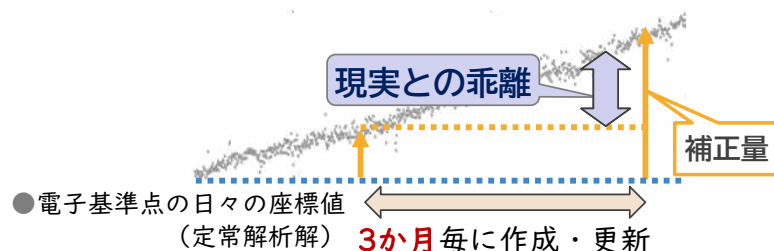
※任意の位置の補正量は、計測点
周囲の格子点における補正量を
バイリニア補間により推定

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



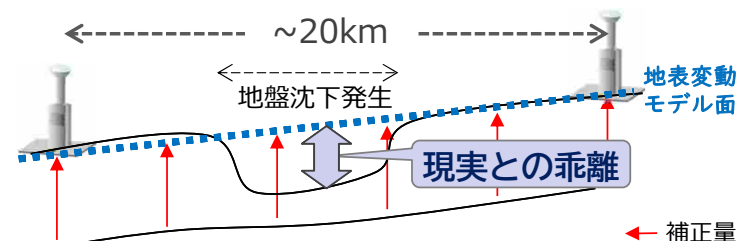
新目標設定：時間分解能を3か月毎→1日毎

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

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～

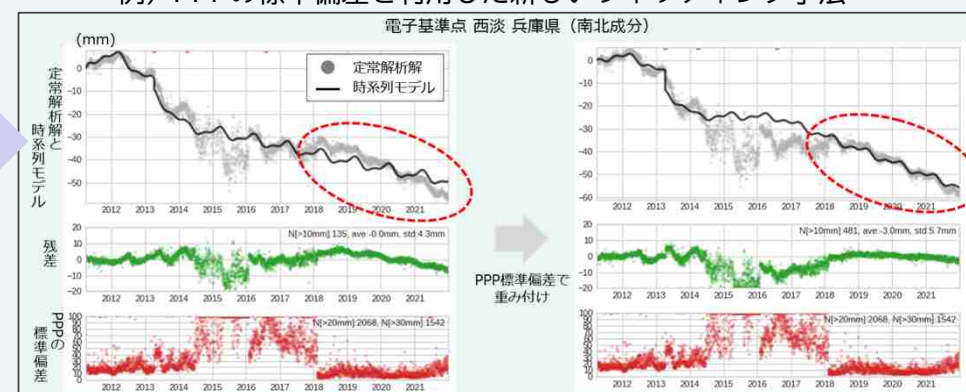
目標 任意の時点の位置へ変換可能とする定常時地表変動モデルの構築に向け電子基準点の座標時系列をモデル化

課題 日本全国の電子基準点で長期間の安定的なモデル化は困難
 $D(t) = a \cdot \log(1+t/b) + d \cdot \log(1+t/e) + f \cdot (1 - \exp(-t/g)) + V \cdot t + c$
 大規模地震の余効変動を対数・指数関数でフィッティング 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

- ・ 定常解析結果に含まれる固定局に起因する共通誤差を除去 (スライド36)
- ・ 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
- ・ 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
- ・ 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
- ・ 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

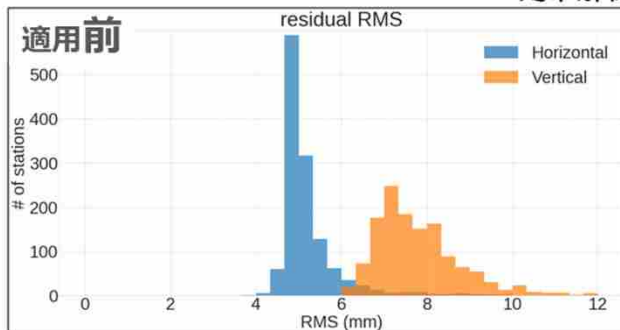
例) PPPの標準偏差を利用した新しいフィッティング手法



効果 樹木等による跳び値の影響の軽減に成功

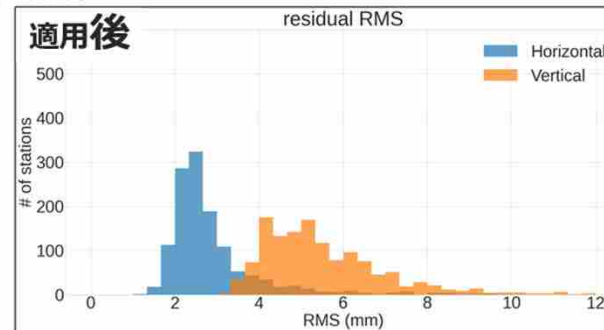
【成果】 各開発技術の適用により高精度なモデル化が実現

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



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

定常時地表変動モデル構築のための技術開発 ～空間のモデル化～

目標 任意の地点の位置座標の取得を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変動量を基に空間内挿

新しい空間内挿法の導入

クリギング (従来法) ※ここでは一般的な通常クリギングを指す

特性：データの空間的な相関を考慮に入れた未知点の推定

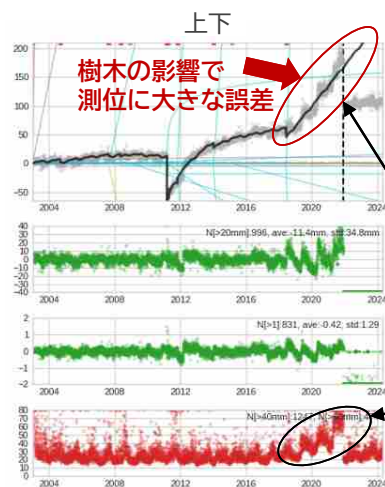
課題：観測値を真値として内挿
観測値の誤差を反映できない → 異常値, 誤差の大きな観測データに脆弱

新規開発

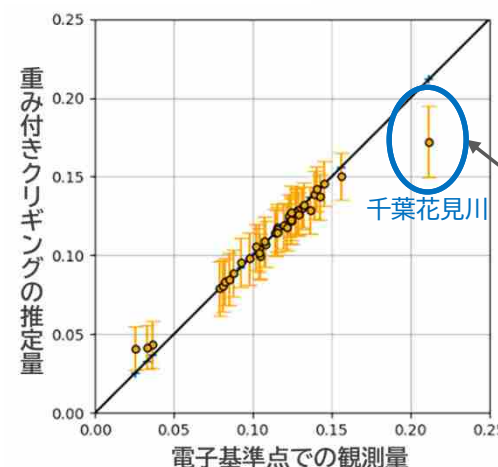
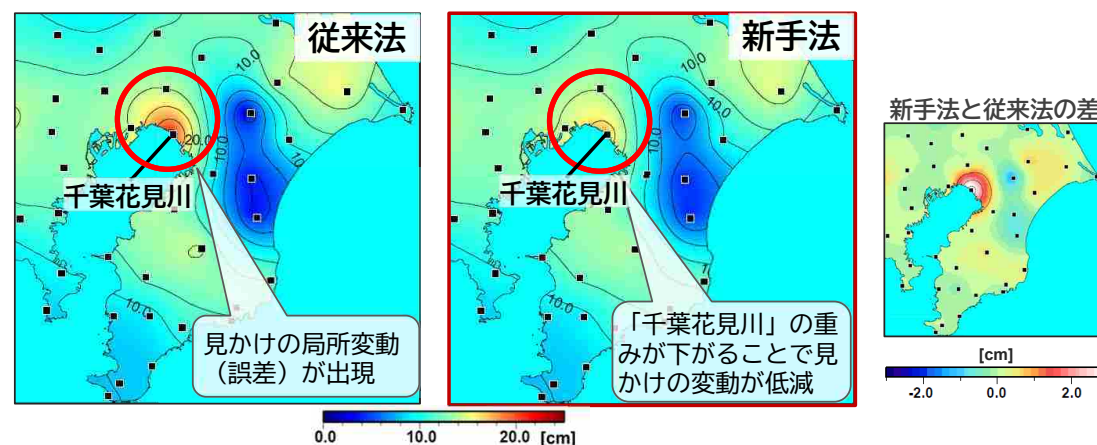
重み付きクリギング (新手法)

特性：観測値の誤差情報を重みとして利用
より信頼性の高い空間内挿

(スライド37)



成果 観測値の誤差情報を推定に組み込むことで、異常値に対する堅牢性が向上



【検証】 観測量と推定量の比較

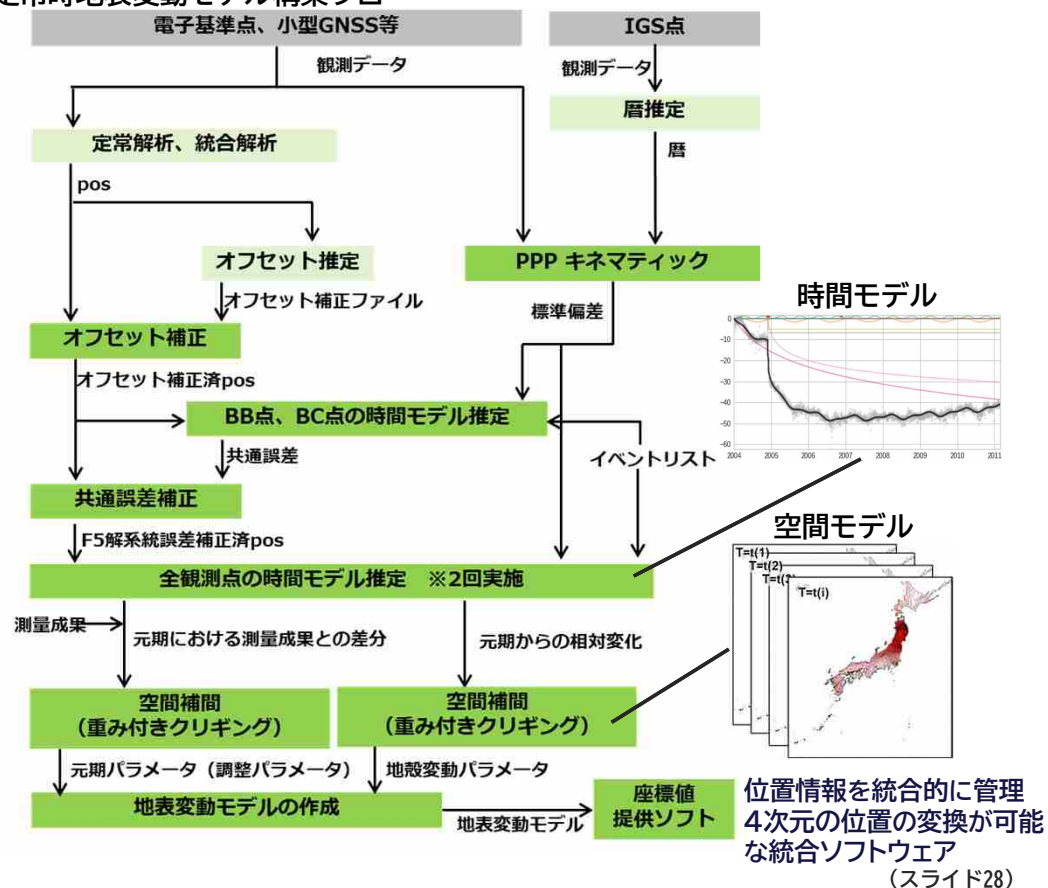
異常点(千葉花見川)： データの誤差が大きく、観測された局所変動の信頼性は低いと判断されて、周囲の広域変動に近い値が推定される。

推定誤差(エラーバー)が大きい。推定値の信頼情報も適切に出力できるように

成果のまとめと期待される効果 ～定常時地表変動モデル～

【成果】開発した技術を適用して日本全国の定常時地表変動モデルのプロトタイプを構築
任意の時点・地点の位置座標を高精度にモデル化

定常時地表変動モデル構築フロー



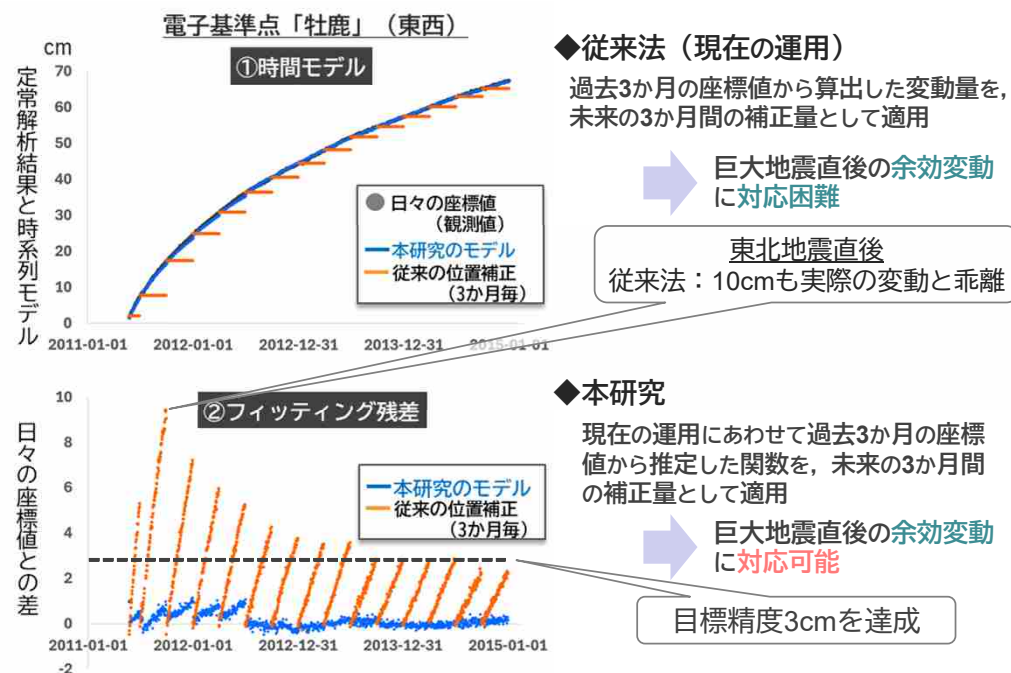
【効果】

■ **4次元**で位置情報を管理するための技術に
 任意の地点の任意の日付への位置（情報）の変換が可能に

■ **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従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）と正確性の向上】

地殻変動補正パラメータ ～従来法との比較～



小型GNSS観測装置の開発と地殻変動観測への適用の成果 【空間分解能の向上】

小型GNSS観測装置の開発

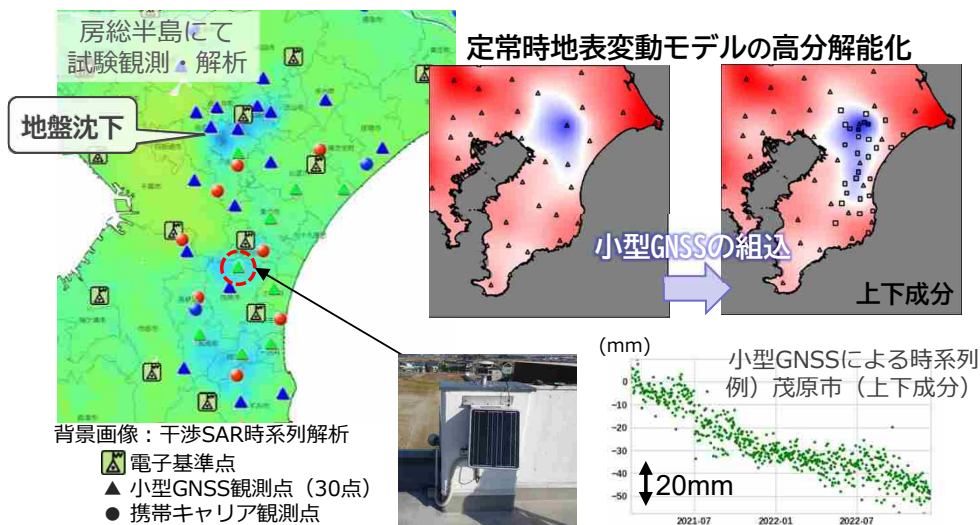


- ✓ 縦40cm、横40cm、30kg以下
- ✓ 商用電源利用、ソーラーパネルによる給電可
- ✓ 全体制御、通信、データ記録としてRaspberry PIを使用
- ✓ 4G/LTEを介しての遠隔制御、リアルタイムデータの通信可能

成果① 定常時地表変動モデルの高空間分解能化

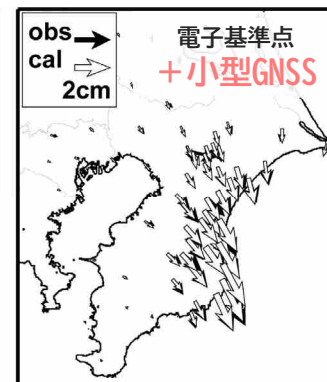
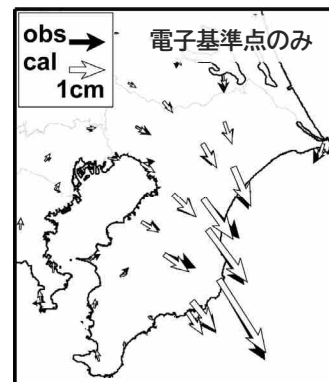
多点観測による局所変動検出能力の向上

(詳細：スライド38)

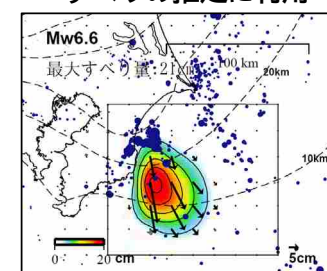


成果② 房総半島沖のゆっくりすべりの検出

微小な規模(数mm~1cm)の変動も検出可能な精度



プレート境界面上でのすべりの推定に利用

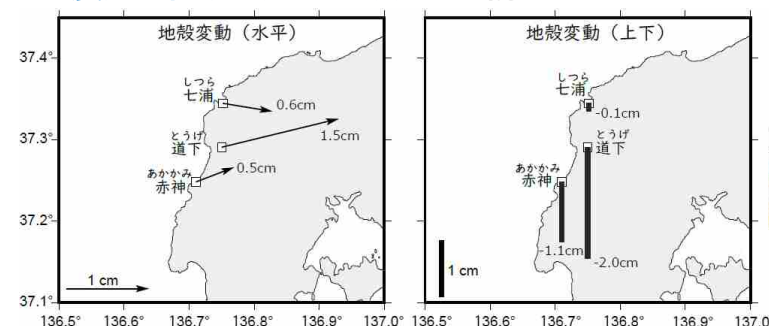


2024年2月4日~2024年3月17日

第399回地震調査委員会資料 (一部改変)

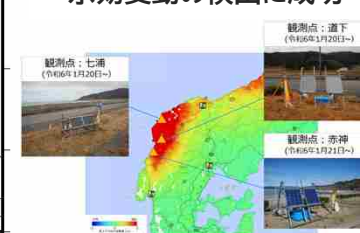
成果③ 令和6年能登半島地震の余効変動の検出

地震発生直後の迅速な観測を可能に



第399回地震調査委員会資料

最大隆起域で初期の余効変動の検出に成功



本機器開発で得られた成果は特別研究「GNSSと異種センサを統合した新しい測地観測技術の開発 (R6-10年度)」にて活用

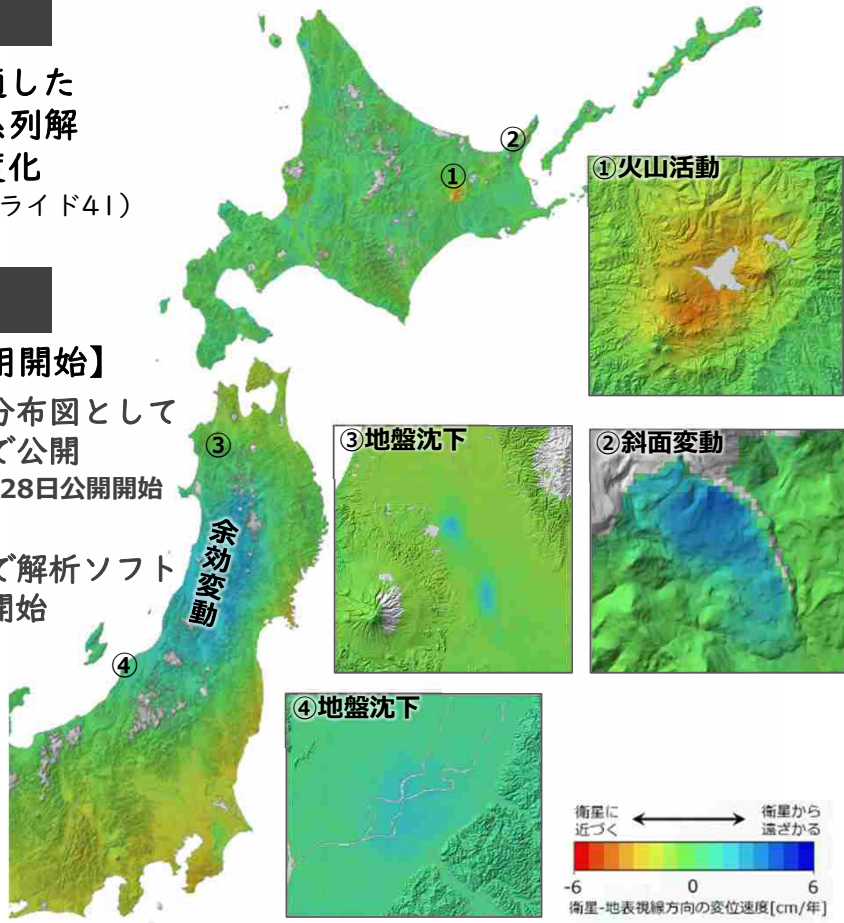
全国の面的な地殻変動の時間推移を把握可能に

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41)

成果

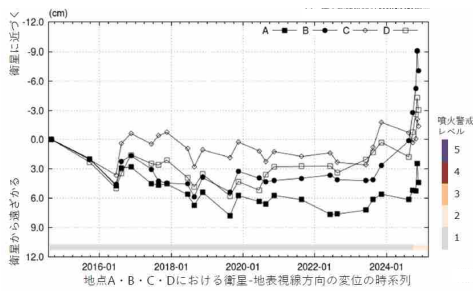
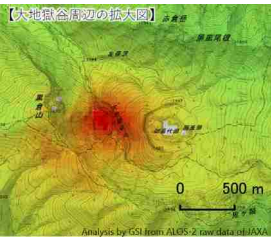
- 【事業での利用開始】
- ・ 全国の変動分布図として
地理院地図で公開
2023年3月28日公開開始
 - ・ 測地部事業で解析ソフト
を既に利用開始



波及効果

■ 火山本部等での火山活動評価への活用

火山監視の標準的ツールに

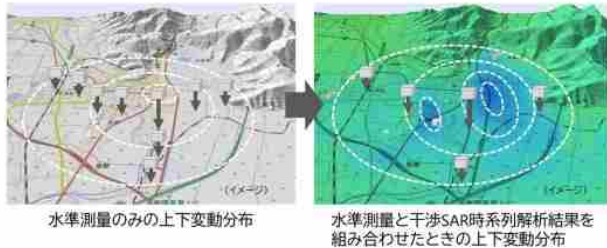


第154回火山噴火予知連絡資料

■ 衛星SARによる上下変動測量マニュアル 2023年6月6日公開

都道府県等が行う
地盤沈下調査等
における水準測量の
効率化に期待

※測地部宇宙測地課



位置情報管理への適用の試み

※測地部測地基準課と共同開発

電子基準点と干渉SAR時系列解析のデータ同化による地殻変動
補正パラメータ（上下）構築手法の開発

局所変動を反映したパラメータ化により、高さの補正
精度の向上に期待

(スライド39)

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

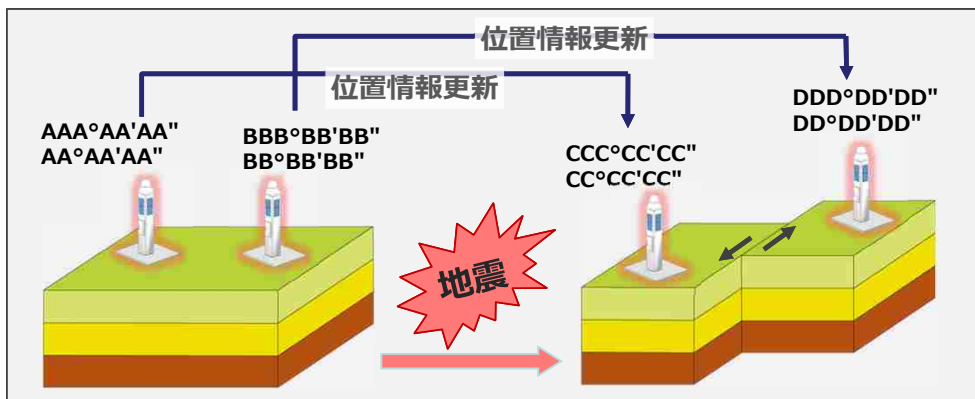
座標改定（改算）用パラメータによる補正

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

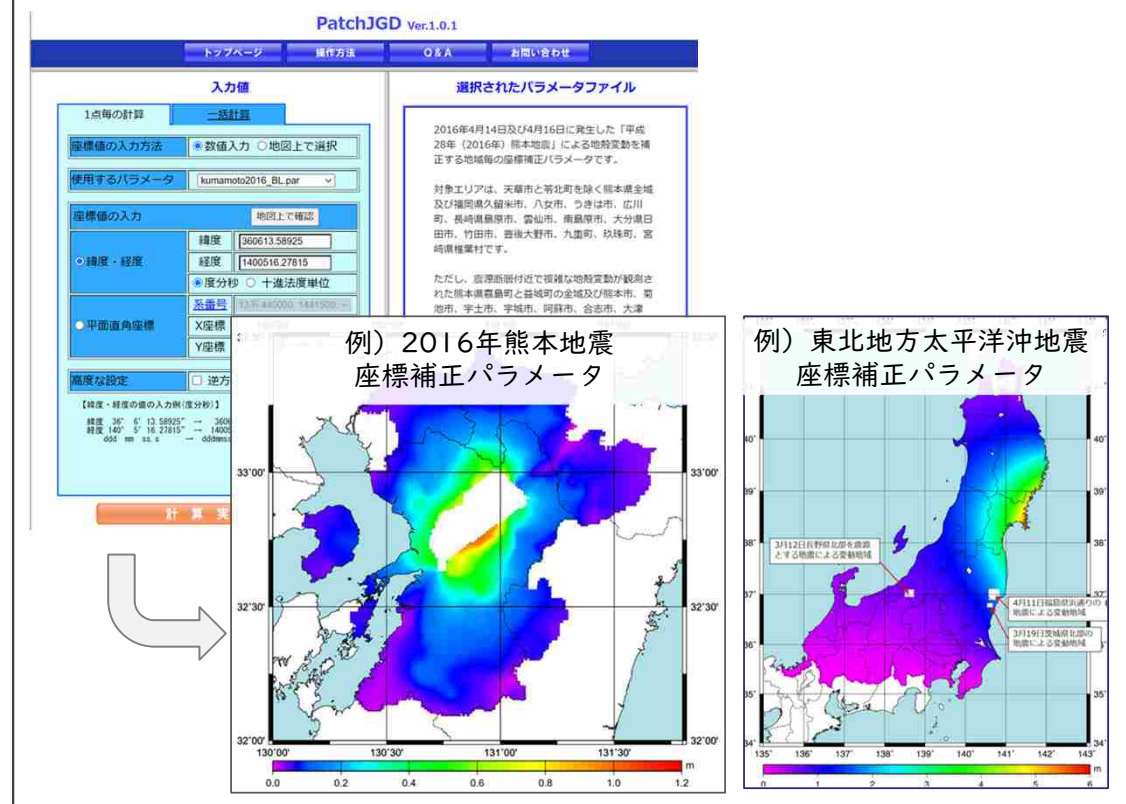
成果改定

位置情報（測量成果）を**新しい数値に更新**



座標改定（改算）用のパラメータ

災害時地殻変動補正機能 PatchJGD



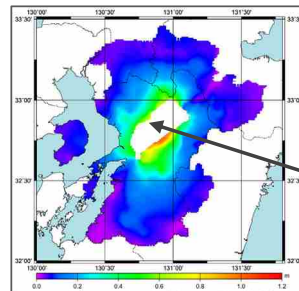
現在の位置情報管理の課題と本研究の取り組み ～災害時～

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
座標補正パラメータ



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42)

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】

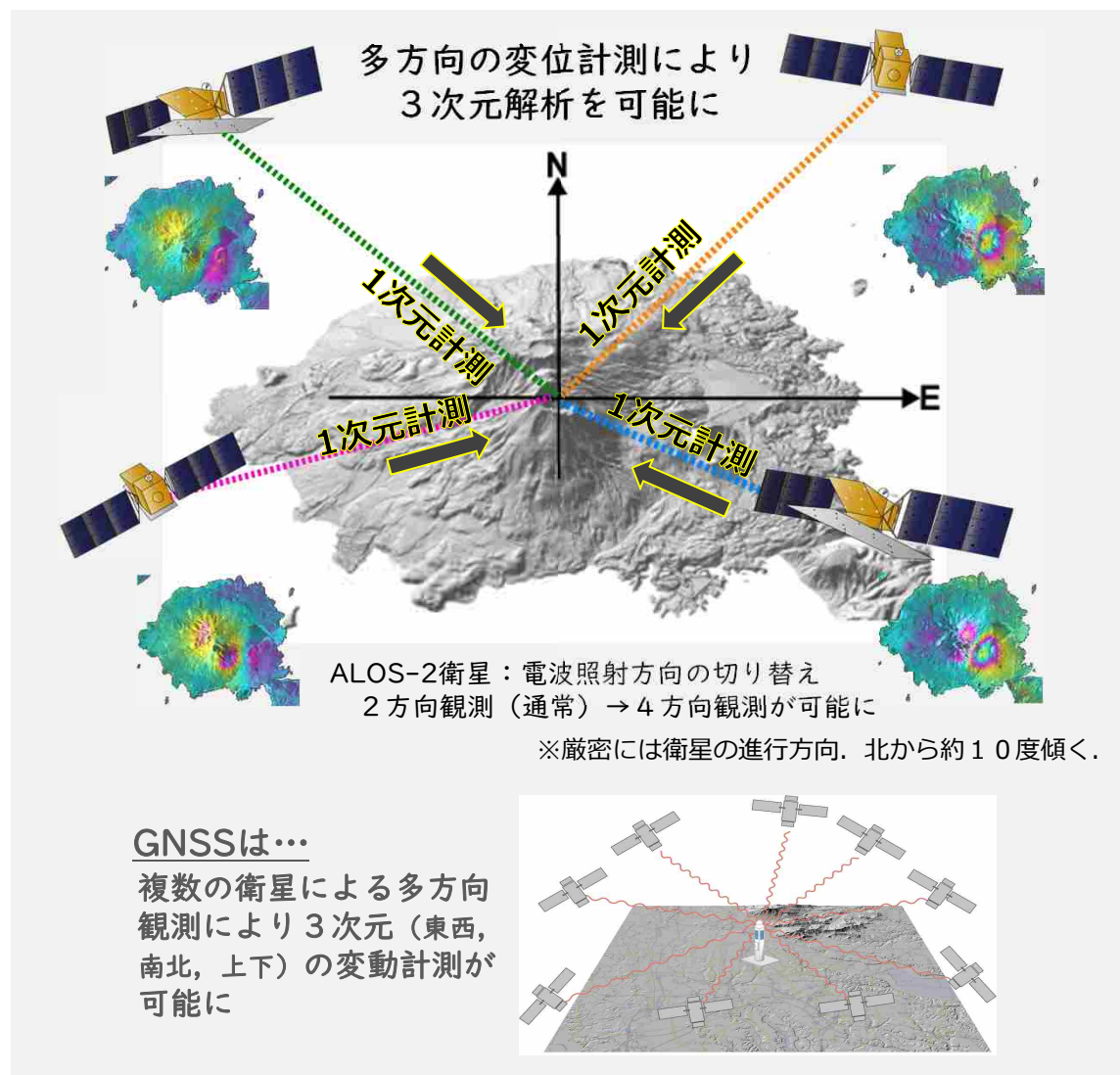
①位置情報管理に必要な3成分

「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40参照



位置情報管理への適用可能性 ～熊本地震での検証～

【効果】

熊本地震の解析結果より(スライド43-44)

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

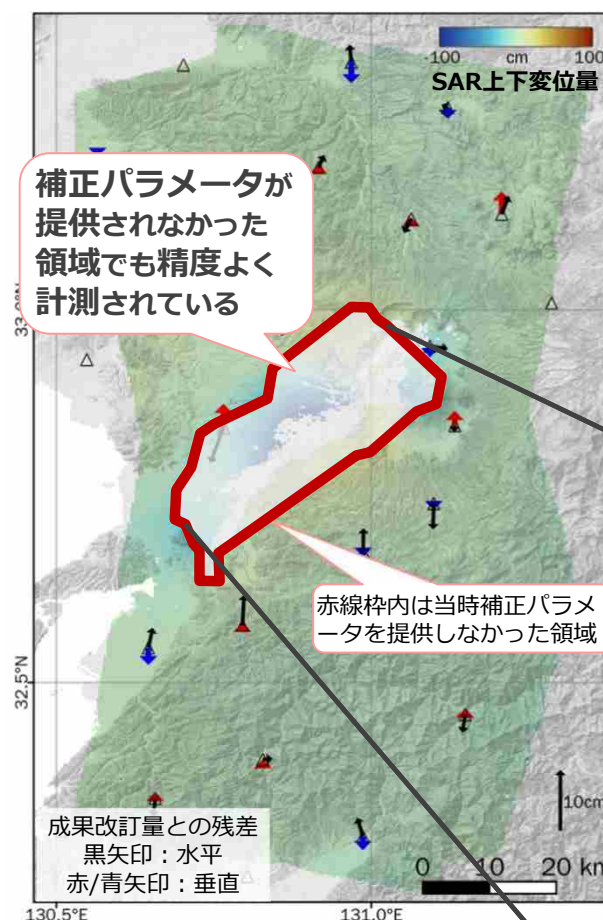
3. 補正量の提供までの時間短縮

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45)

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



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 ～災害時地表変動モデル～

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

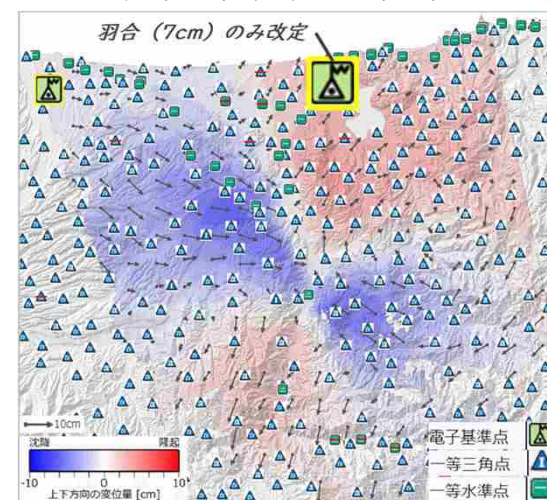
	従来 三角点改測	本特研成果 SAR3次元解析
迅速性	数か月	数日-2週間 (<1か月) 電子基準点成果改定と同時に パラメータ公開可能
現地測量	必要 発災直後は困難なことも 三角点の管理、定期的な再 測量が必要	基本的に不要
計測精度 (1 σ)	定量的評価は困難 (観測時期・方法に依存)	東西上下: 約1cm 南北: 約4cm 大変動域: ≥ 10 cm
空間分解能	2-10km	数十m-数百m
複雑な変動 (内陸地震断層周辺)	全点再測量が必要 パラメータ空白域	計測可能 パラメータ作成可能
局所変動 GEONET間 (<20km)	改測実施せず パラメータ作成せず	パラメータ作成可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

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)



【研究期間中の波及効果】

令和6年能登半島地震のSARによる補正パラメータ (試作版) が林野庁の災害の把握・分析や復旧事業の検討に活用された ※測地部測地基準課との共同 (スライド46)

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

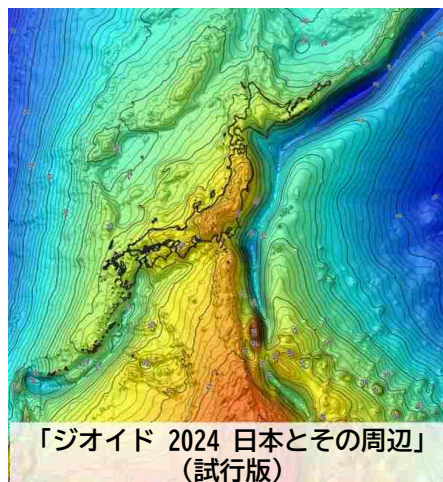
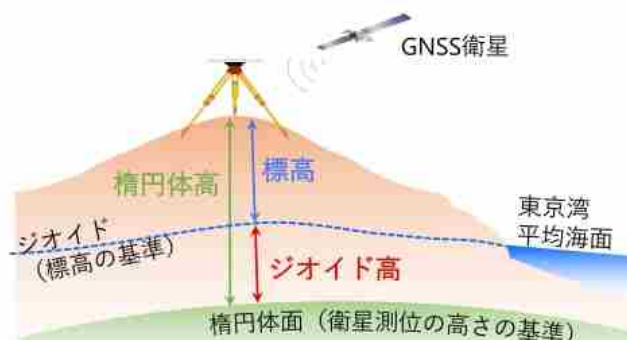
標高の基準

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

- ・ 2024年度 「ジオイド2024 日本とその周辺」（試行版）公開【精度3cm】
- ・ 2025年度 全国の標高成果の改定「測地成果2024」

「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

【災害時】地震時変化算出

【定常時】経年変化算出

ジオイド変化の監視機能の開発① ～災害時（地震時）～

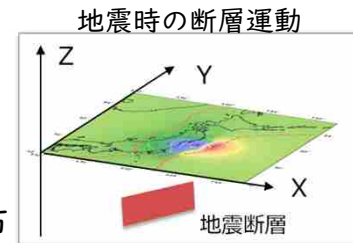
【開発内容】

大規模地震時及び地震後における
ジオイド変化の理論計算機能を
新規に開発

入力 断層パラメータ
(位置, 傾斜角, 走向,
すべり角, すべり量)

地下構造 (粘性率)

出力 ジオイド変化の空間分布
(粘弾性緩和は時空間分布)



地下構造

海水
弾性層
粘弾性層
$\eta_m = 1 \times 10^{19} \text{ Pa} \cdot \text{s}$
$\eta_m = 1 \times 10^{20} \text{ Pa} \cdot \text{s}$
$\eta_m = 1 \times 10^{21} \text{ Pa} \cdot \text{s}$

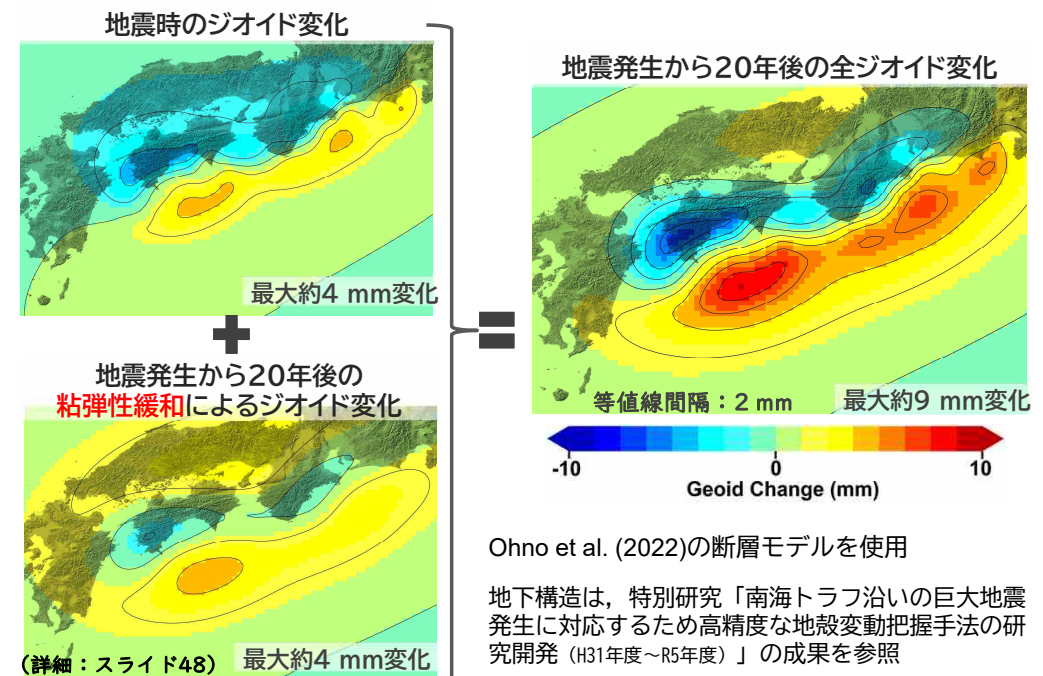
【成果】

- 断層面上のすべり & 粘弾性緩和の効果を評価可能に
- 開口断層にも対応 (※火山への適用も)
- 地理院初のジオイド変動推定ツール

【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
- ジオイド・モデル更新に向けた重力測量の範囲の
検討に活用
- 将来の南海トラフ地震等、日本周辺の大規模地
震時及び地震後のジオイド・モデル改定の検討、
事前シミュレーションに活用可能

想定南海トラフ地震 (Mw8.75) によるジオイド変化

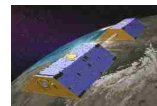


ジオイド変化の監視機能の開発② ～定常時～

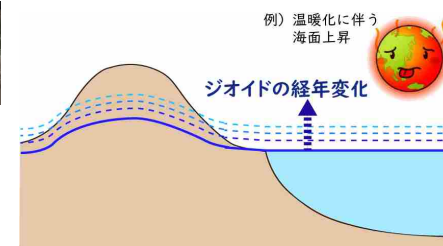
【開発内容】

- ・ 重力衛星データによる重力ジオイド変動計算機能を開発
- ・ 後氷期回復・陸水質量変化・氷床質量変化・海洋質量変化による重力ジオイド変動計算機能を開発

入力 重力衛星データ
衛星高度データ
GIAモデル(ICE6G)
陸水モデル(GLDAS) 等々



出力 ジオイド時空間変化



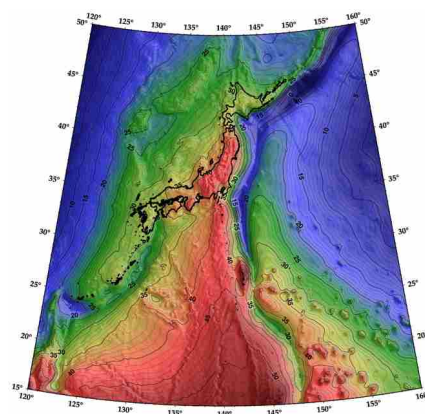
【成果】

- ・ 地理院初のジオイドの経年的時空間変動の算出ツール
- ・ ジオイド変化の要因を定量的に評価
【地震活動(数cm) >> 後氷期回復(0.1mm/yr) > 氷床質量変化(0.08mm/yr) > 陸水質量変化≒海洋質量変化(0.03mm/yr)】
(詳細：スライド49-53)
- ・ 中長期的な時空間変化(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検討に活用
- ・ 4次元の位置情報(高さ)管理の基盤に活用

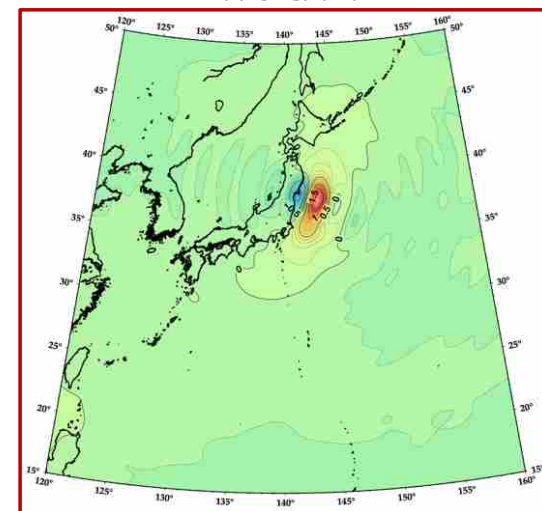
スタティック・ジオイド・モデル
【従来】



ジオイド2024 日本とその周辺(試作版)

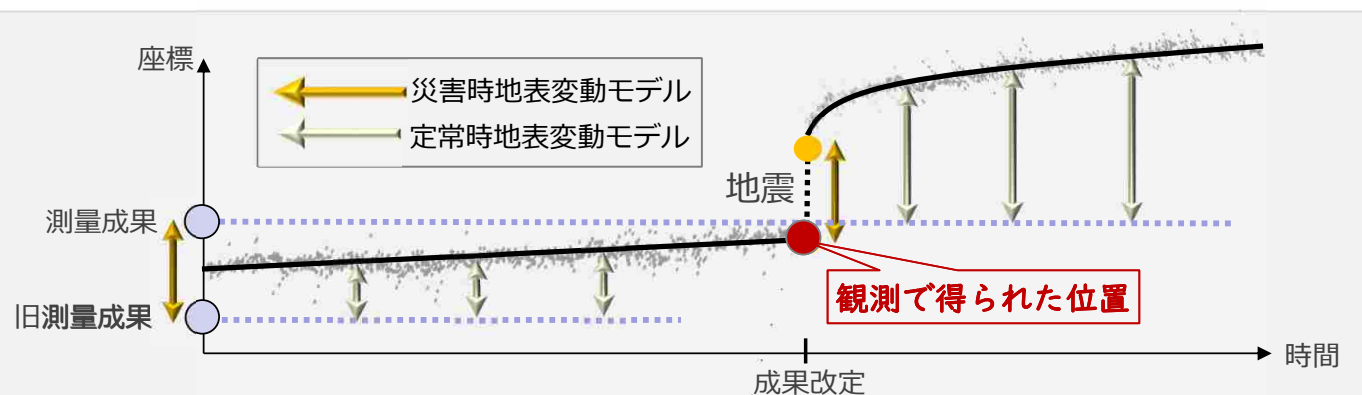
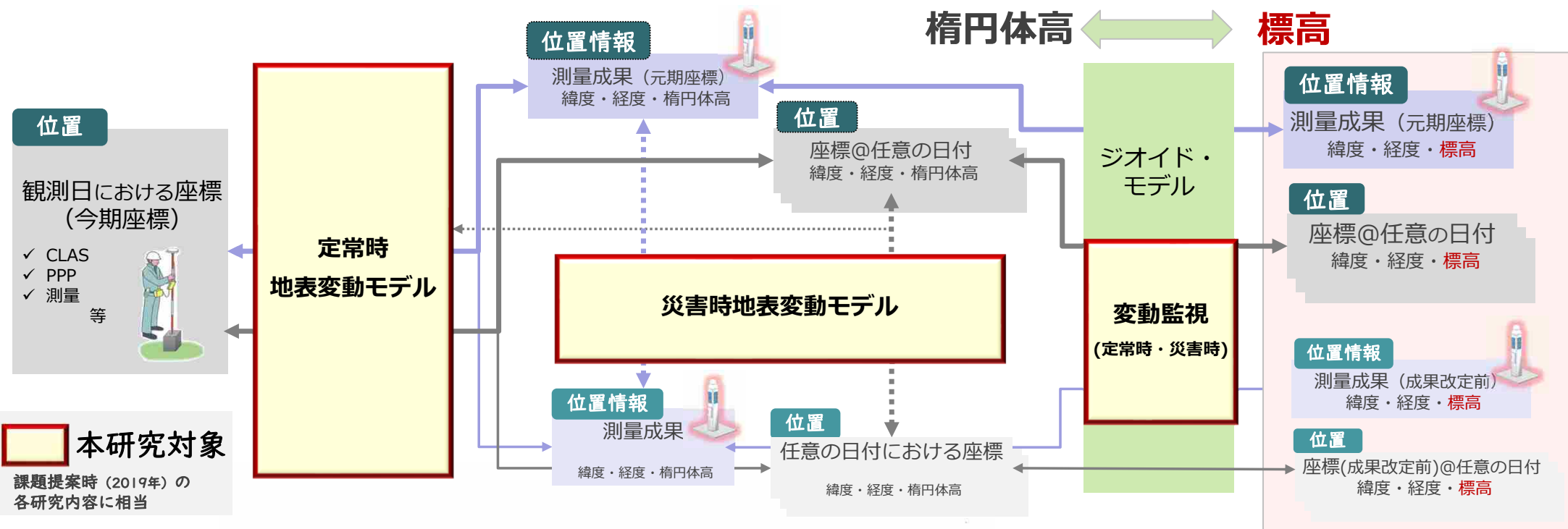
日本の標高決定に活用

ダイナミック・ジオイド・モデル
(東京湾固定)



地震活動(地震時断層運動+粘弾性緩和)・後氷期回復・陸水質量変化・氷床質量変化・海洋質量変化の全要因を考慮したモデル

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

4次元の位置情報管理に必要な 位置座標の変換の仕組みを構築

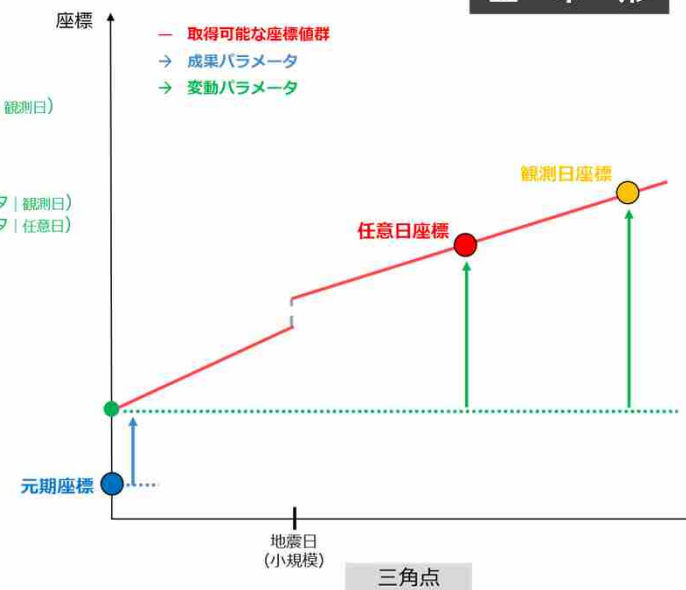
変換処理の定式化 → 統合的な処理を可能に

測地成果の変換（東日本）



A) 測量/測位 (観測日座標 ⇔ 元期座標)
 (元期座標) = (観測日座標)
 - (変動パラメータ | 観測日)
 - (成果パラメータ)

B) 測位 (観測日座標 ⇔ 任意日座標)
 (任意日座標) = (観測日座標)
 - (変動パラメータ | 観測日)
 + (変動パラメータ | 任意日)



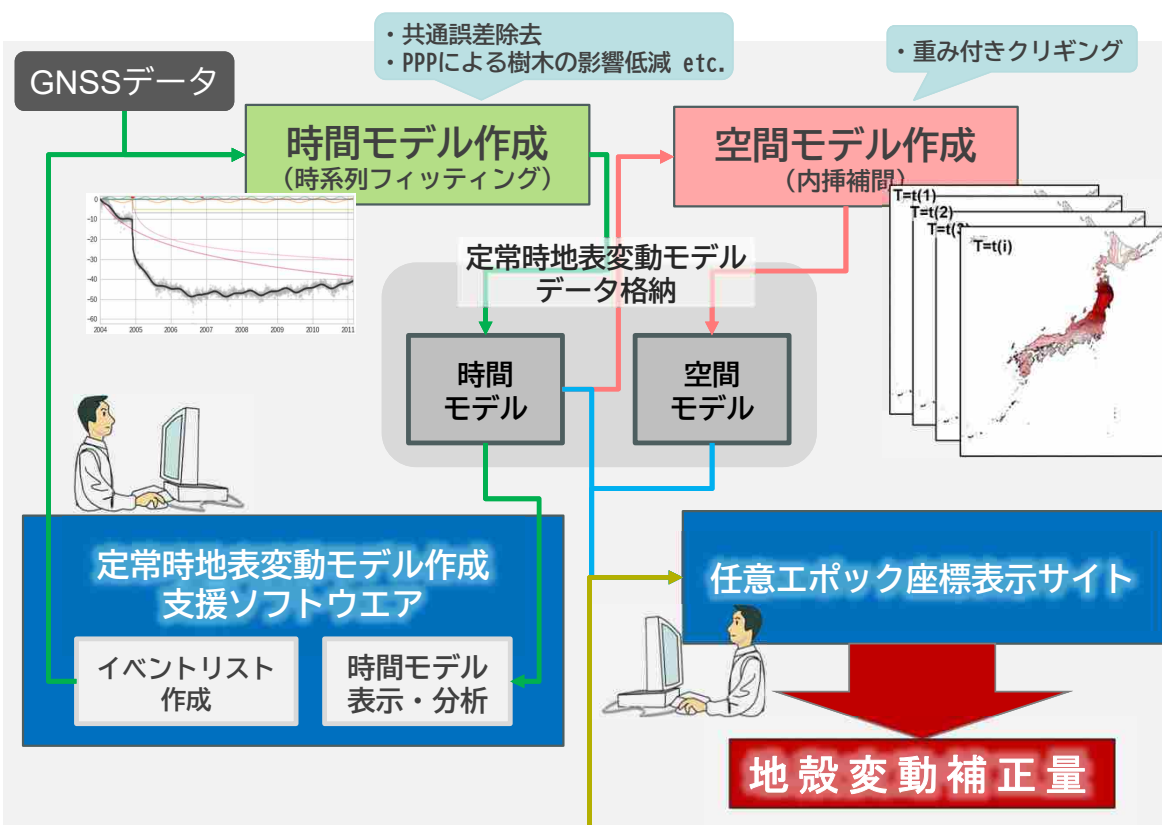
任意エポック座標表示サイトの開発



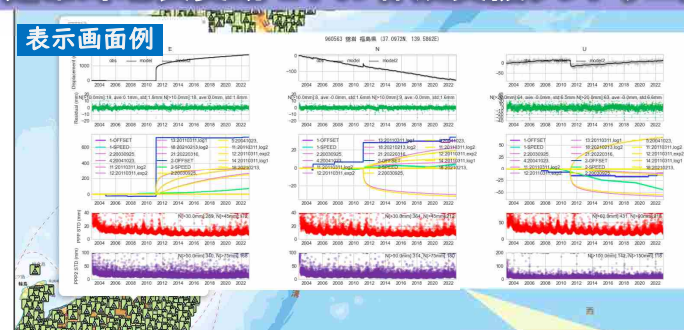
入力条件に従い必要な処理を自動的に選択。ユーザーは複雑な変換処理を考慮することなく補正量等を取得可能

4次元の位置情報管理のためのソフトウェア開発

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



定常時地表変動モデル作成支援ソフトウェア



任意エポック座標表示サイト

The screenshot shows the **任意エポック座標表示サイト** (Arbitrary Epoch Coordinate Display Site) interface. It includes a search bar for coordinates, a table of results showing coordinates for different epochs (e.g., 2004, 2008, 2012, 2016, 2020, 2022), and a map view showing the location of the input and output points.

✓地理院地図上で操作
✓時間モデルの計算結果の詳細表示
(各成分の時系列モデル, 観測値とのフィッティング, PPP時系列の標準誤差)

✓3種の変換が可能 (測位座標→測位座標, 測位座標→測地成果, 測地成果→測位座標)

✓変換の条件分岐を実装。ユーザは複雑な変換処理を考慮することなく補正量を取得可能 (スライド55-57)

災害時地表変動モデル作成ソフトウェア

既存のpatchJGD

The screenshot shows the **災害時地表変動モデル作成ソフトウェア** (Disaster-time Surface Deformation Model Creation Software) interface. It includes a search bar for coordinates, a table of results showing coordinates for different epochs (e.g., 2004, 2008, 2012, 2016, 2020, 2022), and a map view showing the location of the input and output points.

補正前 (入力), 補正後 (出力) の位置を地理院地図上に表示

中間評価時の評価とその後の対応

研究課題中間評価表 総合評価

当初の目標にある国家座標の四次元化に向けた研究開発が着実に進んでおり、論文等の成果も多く、科学的に見ても十分良い研究が進んでいると考える。ジオイドのモニタリングも含めて、残りの研究での進捗を期待したい。

本研究の成果は広く社会で活用される見込みなので、研究後半は、実際のユーザーを考えた上で、どういうふうに成果をアウトプットしていくか、業務として使えるような形、社会の様々な位置情報、それらに溶け込ませていけるような形、どういう形があり得るのかを含めて検討していただきたい。

個別研究開発課題評価書 外部評価の結果

当初の目標にある国家座標の四次元化に向けた研究開発が着実に進んでおり、素晴らしい成果を今までの3年間で挙げていると評価する。

宇測測地技術等に関するさまざまな技術的な進展を取り入れながら、残りの2年間の研究を邁進させていただきたい。

本研究の成果は地籍に関することにも応用できる見込みで、その影響の大きさを考えて、どういうふうに成果をアウトプットしていくか、どのような問題点があるかを含めて検討していただきたい。

また、論文等の公表を通して、本研究の成果を広く世界にアピールすることを期待する。

主な対応・波及効果

ジオイドに関する研究

- ・ 重力データや粘弾性緩和を考慮した数値シミュレーションによる経時的なジオイド変化の推定機能の開発
- ・ 「ジオイド2024 日本とその周辺」
→ 全国の標高成果の改定（令和7年度予定）で利用
- ・ 第31回日本測地学会坪井賞

業務への貢献

- ・ 4次元の位置情報管理のためのツール作成
 - 座標エポック表示サイトの開発
 - 定常時地表変動モデル作成支援ツールの開発

社会での利活用

- ・ 干渉SAR時系列解析 → 衛星SARによる上下変動測量マニュアルの策定
- ・ SAR3次元 → 令和6年能登半島地震のSAR3次元解析による変動補正パラメータ（試行版）が、林野庁の災害の把握・分析や復旧事業の検討で活用
- ・ 位相特性モデル → 全国の標高成果の改定（令和7年度予定）（スライド54）

海外への成果発信

- ・ 国際誌（査読あり）： 8（7）編 ※中間評価後（R5,6年度）：2編
- ・ 国際学会： 19件【招待講演1件】 ※中間評価後（R5,6年度）：8件

まとめ① 各技術開発の取組

提案時に目標とした各技術開発はほぼ予定通り着手・終了

標高成果改定用のGPS位相特性モデル構築 (スライド54)

L5信号によるPPP解析機能を開発

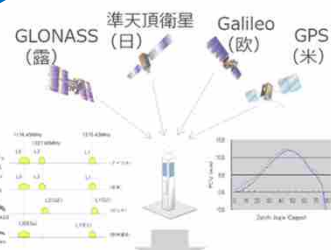
重力衛星データによる重力ジオイド変動計算機能を新規開発(スライド47)

地理院初の経年的時空間変化の計算機能を開発(スライド25)

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



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



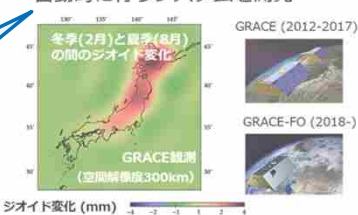
PPPとF5解の整合性等の品質評価 (中間評価説明資料)

※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・検証を進めた。

3. 衛星重力データによるジオイドのモニタリング

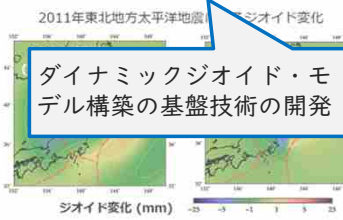
【定常時】

- 重力衛星GRACE-FOのデータを用いて、標高の基準面 (ジオイド) の微細な時間変化を監視
- 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



【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



地震時断層すべり、粘弾性緩和によるジオイド変化推定機能の開発(スライド24,48)

ダイナミックジオイド・モデル構築の基盤技術の開発

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

2. SAR技術による地殻変動計測・監視技術の高度化

【定常時】

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

全国変動分布図の公開 (スライド15)

誤差の定量的評価方法の確立 (スライド44)

【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

国内外の大規模地震への適用 (熊本地震, トルコ・シリア地震, 能登半島地震) (スライド20,21,42,46)

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

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異常点の判別等に係る仕組みを開発
- 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

干渉SAR時系列解析との同化(スライド39)

小型GNSS観測装置による多点観測の検証(スライド14,38)

【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

SARによる変動補正パラメータ (熊本地震, 能登半島地震) (スライド20,46)

4次元の位置情報管理のためのソフトウェア開発 (スライド28)

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 主な成果と達成度

災害に強い4次元国家座標の構築・維持管理に向けた基盤技術を高度化

1. 定常時地表変動モデル

位置変化の時空間モデル化技術を開発・高度化

効果 任意の地点における任意の時点への位置情報の変換能力が向上

効果 大地震直後の余効変動に強い位置情報管理

2. 災害時地表変動モデル

SAR 3次元解析機能を開発・高度化

効果 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・高度化

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・モデル更新の必要性の検討等）の高度化

4. 4次元の位置情報管理の仕組みを構築

位置座標の変換の仕組みを定式化

統合処理ソフトウェアの開発

効果 複雑な変換処理を考慮することなく位置（情報）の変換が可能

迅速性と分解能の当初目標

定常時	従来	目標	本研究 (検証事例)	
空間分解能	20km	数km	数百m～数km	目標達成
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③ 成果公表

研究成果の公表

- | | |
|--|---|
| <p>1. 発表論文 17編</p> <p style="padding-left: 40px;">査読有： 8編</p> <p style="padding-left: 80px;">(国際誌7編)</p> <p style="padding-left: 40px;">査読無： 9編</p> | <ul style="list-style-type: none"> ・ Earth, Planets and Space ・ Journal of Geodesy ・ Remote Sensing ・ Geophysical Journal International ・ Encyclopedia of Earth Science Series ・ 測地学会誌 ・ 国土地理院時報 |
| <p>2. 研究報告書 26編</p> | <ul style="list-style-type: none"> ・ 国土地理院調査研究年報 <li style="padding-left: 20px;">特別研究 <li style="padding-left: 20px;">関連する一般研究 |
| <p>3. 学会等発表 58編</p> <p style="padding-left: 40px;">国内： 39編</p> <p style="padding-left: 40px;">海外： 19編</p> | <ul style="list-style-type: none"> ・ 日本測地学会 ・ 日本地球惑星科学連合 ・ 日本地震学会 ・ 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) ・ SSA (米国地震学会) |

本研究成果と国土地理院の今後の施策

基本測量に関する長期計画

令和6年4月1日

国土交通省 国土地理院

地理院の長期計画を遂行 する上での技術基盤の確立

基本測量に関する長期計画

今後10年間（令和6年度から15年度）で
国土地理院が目指すべき施策

4. 国家座標に基づく測位と測量

(1) 共通の位置の基準である国家座標の整備及び保全の推進
(中略)

- ・国家座標の時間管理を導入することにより、任意の時点で地殻変動補正を行った正確な位置情報を国土のどこでも利用可能とする基盤である4次元国家座標が構築され、位置情報を扱う幅広い分野での国家座標の活用促進、社会全体の生産性・安全性が担保される環境を実現する
- ・4次元空間情報の表現方法を検討し、4次元国家座標へのアクセス性を向上させる。

(後略)

9. 研究開発及び人材育成

(1) 4次元国家座標の構築及び維持管理に資する技術開発
(中略)

- ・任意の時点、任意の地点における位置情報の取得を可能とする地表変動モデルの構築等に関する研究開発を実施し、高精度測位社会にも対応する4次元国家座標を維持管理するための技術を開発・整備する

(後略)

長期計画を背景に
「研究開発計画」
を策定



地理空間情報高度活用社会

高精度測位社会

(G空間社会)

測位サービス
CLAS等

ドローン配送
スマート農業
ICT施工等



誰もがいつでもどこでも
必要な地理空間情報を活用

地理空間情報活用推進基本計画

4次元国家座標に基づく施策

4次元での位置情報管理技術

本特別研究後

国土地理院 研究開発計画(令和6年4月) 地理地殻活動研究センター
5 今後の重点行動(プライオリティ・アクション)

- (1) 国家座標の高度化
- 高精度測位社会に貢献するため、任意の時点、任意の地点の位置情報を取得可能とする地表変動モデルの構築等に関する研究開発を実施し、水平方向、高さ方向に時間方向を加えた4次元国家座標を維持管理するための技術を開発・整備する。

(後略)