

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活動把握手法の研究開発

【研究期間】

平成31年4月～令和6年3月（5年間）

【予算】

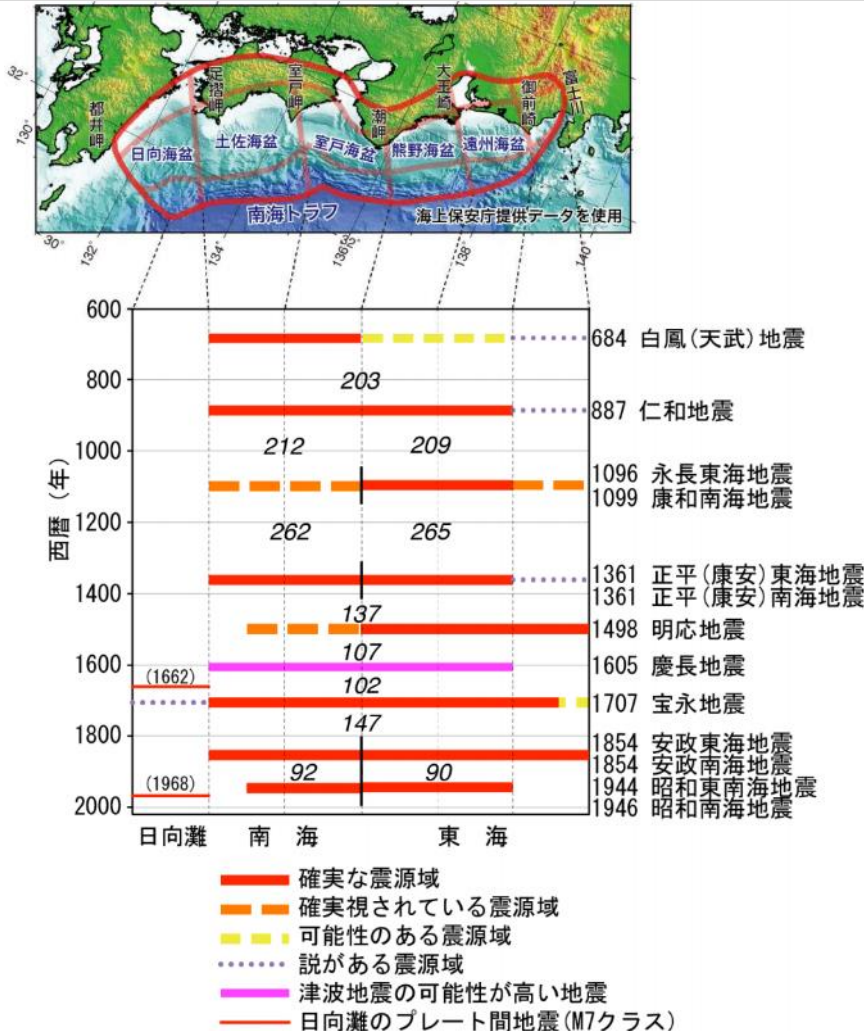
特別研究経費 96,013 千円（平成31年～令和5年の総額）

国土地理院 地理地殻活動研究センター
地殻変動研究室

宗包 浩志

南海トラフ

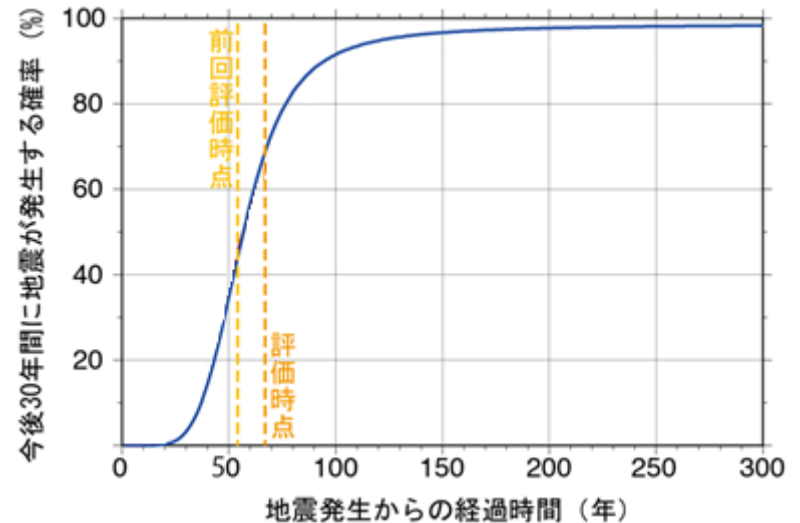
海溝型巨大地震が
100～150年程度の間隔で繰り返し発生



「南海トラフの地震活動の長期評価(第2版)」より

昭和東南海地震、昭和南海地震から
既に80年近く経過

今後30年以内に南海トラフで大地震
が発生する確率の時間推移



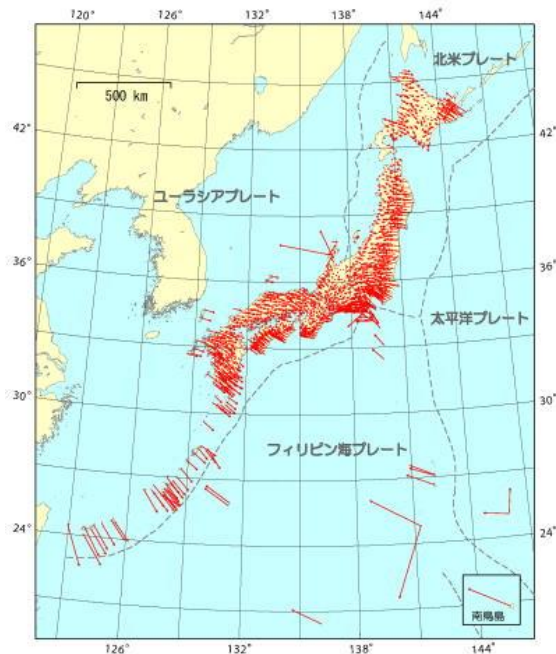
平成30年2月に、今後30年以内の発生
確率が70%程度から70～80%程度へ引
き上げ



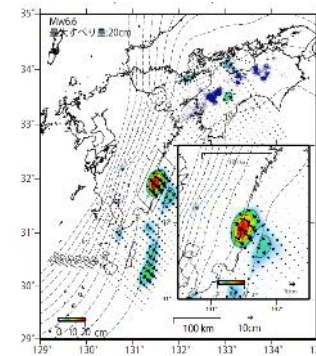
南海トラフでの海溝型巨大地震
の発生が切迫してきている。

国土地理院の取り組み

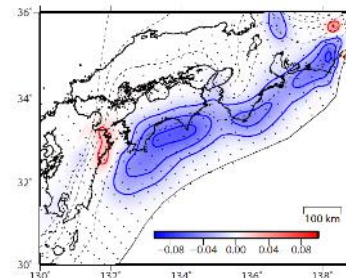
- 電子基準点を用いたGNSS連続観測、水準測量、干渉SARなどの測地観測を通じ、日本列島の地殻変動を監視
 - 地殻変動の現状や、そこから明らかになるプレート境界面の状況を、国の委員会等（地震調査委員会や南海トラフ沿いの地震に関する評価検討会など）に資料提供
- **地震発生可能性（地震発生可能性が通常より高いかどうか）の評価に貢献**



電子基準点の監視から明らかになった日本列島の地殻変動



日向灘のプレート境界で発生した長期のゆっくりすべり



プレート間の固着*状況（青がより固着していることを示す）

*プレート間の固着：プレートどうしの密着度合いのこと。

① 研究開発の背景・必要性

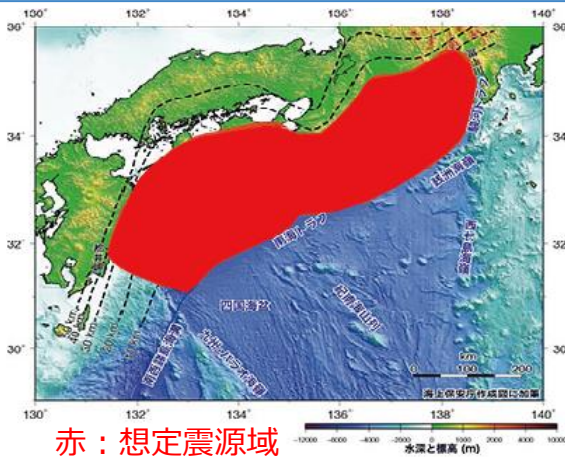
南海トラフ沿いで発生する典型的な異常現象（内閣府, 2017）

ケース1
想定震源域の半分
で地震が発生

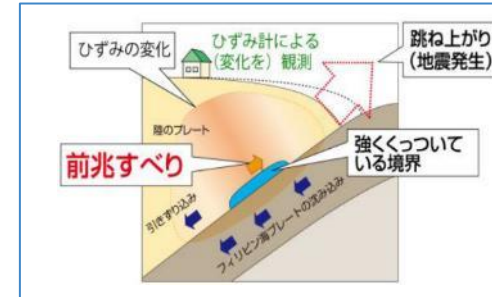
ケース2
想定震源域の中で
小規模（M7級）
の地震が発生

ケース3
プレート境界面での
変化を示唆する現象
の観測

ケース4
プレート間の固着の
はがれが発生



- ・ 地震活動
- ・ 地殻変動
- ・ 地球電磁気
- ・ 地下水
- ・ . . .



ケース3
プレート境界面で
異常なすべりはない
か？

→ プレート間すべり
の正確な把握が必要

ケース4
固着のはがれが加速
するの？

→ プレート間の
固着状態の正確
な把握が必要

ケース1, 2
さらなる大規模地震につながるのか？
→ 地震直後の余効すべり*の正確な
把握が必要

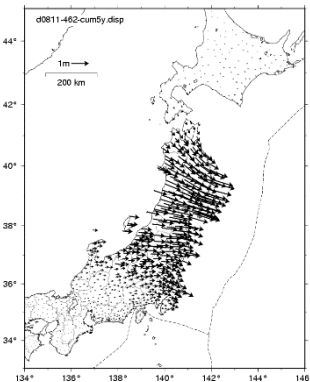
*余効すべり：地震断層の周辺領域のゆっくりとしたすべり

余効すべりの推定において東北地方太平洋沖地震を経験して見えてきた課題

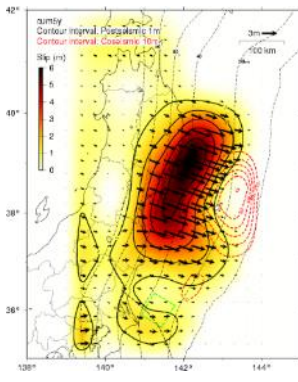
1) 正確な余効すべりの推定には、**粘性緩和**の影響を除去することが必要

2) **粘性緩和**の見積もりにおいて**地下構造**の影響が大きい

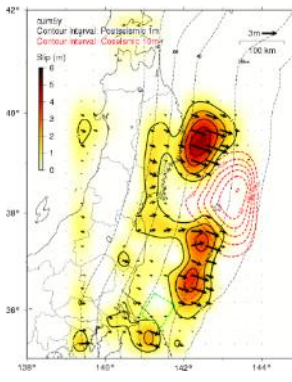
地震後の地殻変動
(余効変動)



粘性緩和の影響を
無視した場合



粘性緩和除去後の
余効すべり

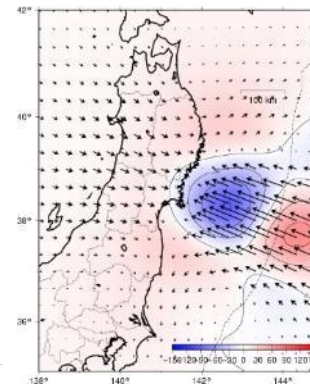


地下構造が異なると、計算される変動は大きく異なる

モデルから計算される地震後5年間の変動

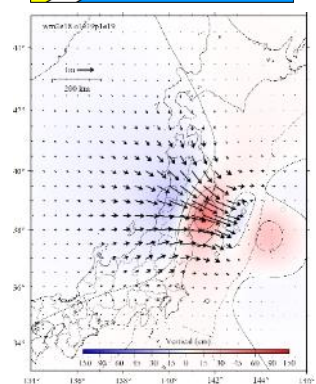
水平二層モデル

粘性率: $1 \times 10^{18} \text{Pa} \cdot \text{s}$



プレート+異なる粘性率

$2 \times 10^{18} \text{Pa} \cdot \text{s}$
 $1 \times 10^{19} \text{Pa} \cdot \text{s}$



$$\text{余効変動} = \text{余効すべり} + \text{粘性緩和}^*$$

*粘性緩和: 地震による力に応じた地下深部の岩石のゆっくりとした流動



余効すべりを正確に推定するため、**正確な地下構造モデルに基づいた粘性緩和の補正**が必要

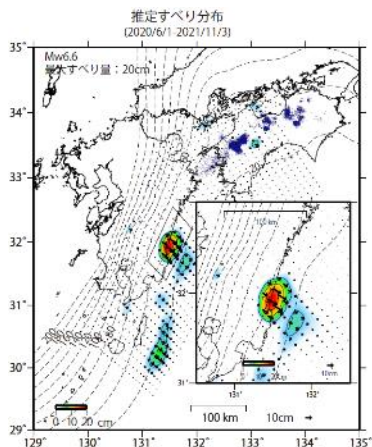
近年の観測網の充実、測位解の精度向上により見えてきた可能性

プレート間すべりのうち、長期間のすべりに加えて、短期間のすべりについてもGNSSでも検知できる可能性がでてきた。

● 代表的なプレート間すべり

■ 長期間のすべり

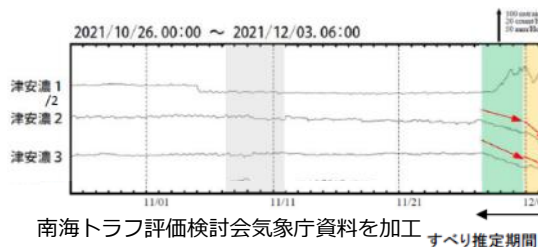
長期的ゆっくりすべり (数ヶ月～数年)



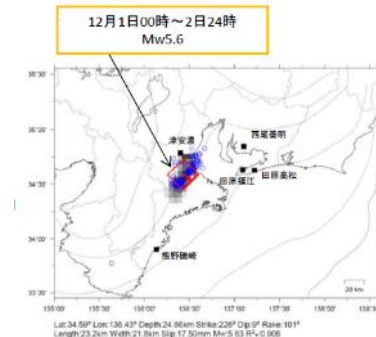
現状でもGNSSで捉えられている。

■ 短期間のすべり

短期的ゆっくりすべり (数日～数週間)



南海トラフ評価検討会気象庁資料を加工



GNSSより感度の高いひずみ計や傾斜計で検知されているが、降雨などの影響を受けやすい。



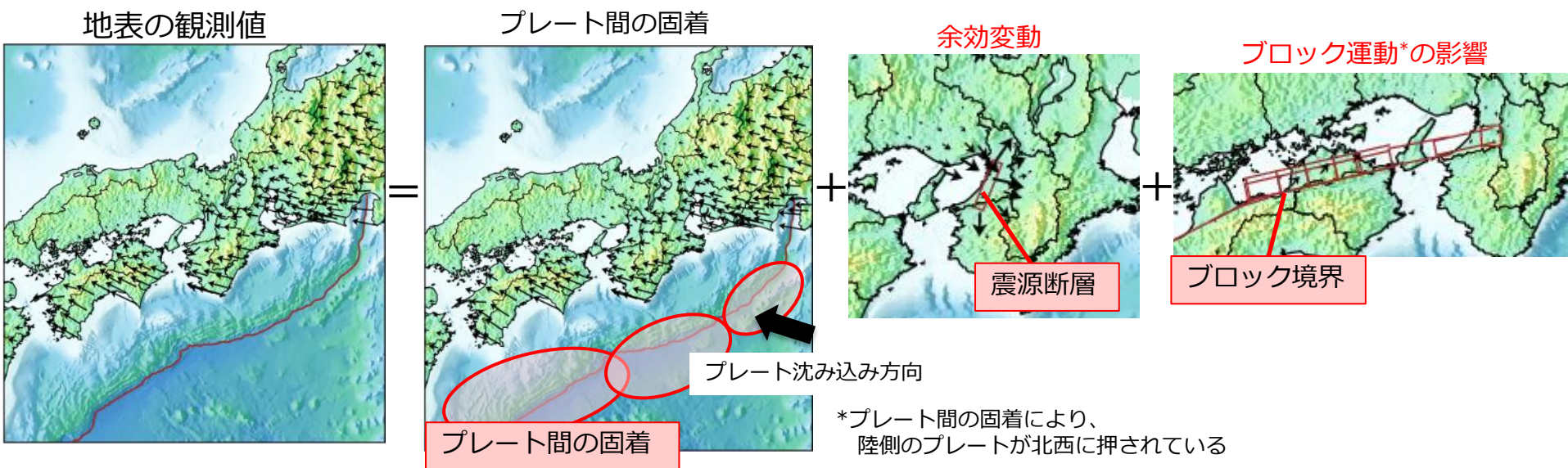
近年の測位解の精度向上→GNSSでも捉えられる可能性がでてきた。

プレート間すべりのより正確な把握のため、**短期間のすべりについてGNSSを活用した推定手法の開発が必要**

近年の観測網の充実、測位解の精度向上により見えてきた課題

正確なプレート間の固着の推定には、観測された地殻変動の観測値（地表の観測値）からプレート内部変形（余効変動+ブロック運動の影響）の影響を除去することが必要

$$\text{地表の観測値} = \text{プレート間の固着による変動} + \text{余効変動} + \text{ブロック運動の影響}$$



プレート間の固着を適切に推定するため、**プレート内部変形（余効変動やブロック運動の影響）の把握**が必要

*ブロック運動：プレート内部の断層を境界としたかたまりの運動

②研究開発の目的・目標

目的

南海トラフ周辺の地殻活動をより正確に把握し、**プレート間の状態の変化に関する正確な情報**を提供することによって、南海トラフの巨大地震等の発生に備える。

目標

以下の3つの小課題を通して、南海トラフにおける地震発生可能性の評価に資する。

課題A：南海トラフでの巨大地震発生後の粘性緩和による変形を予測できる**地下構造モデル**を構築し、**地震直後の粘性緩和を考慮した余効すべり推定**を可能とする ケース1、2

課題B：**短期間のすべり**を含めて**プレート間すべり**を把握できるような手法の高度化を行うとともに、プレート間すべりの推定を実施する ケース3

課題C：内陸の活断層帯周辺等の**プレート内部変形**を高精度に把握し、**広域・長期的なプレート間の固着状態**を高精度に推定できるようにする ケース4

課題 A (ケース 1, 2 の対応) :

巨大地震発生後の粘性緩和による変形を予測できる地下構造モデルを構築し、地震直後の粘性緩和を考慮した余効すべり推定を可能とする

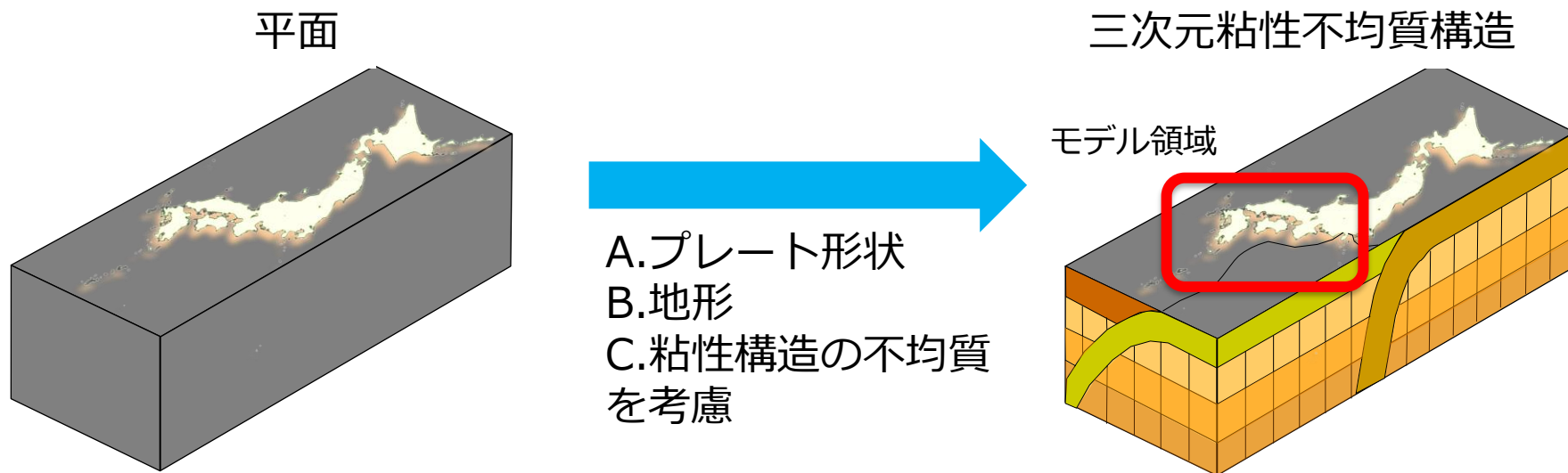
工程 :

1. 粘性緩和の計算 (有限要素法) で用いる、地下を細分化した要素 (メッシュ) の作成
2. 南海トラフの大地震後の粘性緩和による変動の見積もり
 - ✓ 過去の測地データなどを踏まえた地下構造のチューニング
 - ✓ 過去の大地震及び想定巨大地震に対する粘性緩和の見積もり
3. 半割れ、一部割れを想定した、地震直後の粘性緩和を考慮した余効すべり推定を行う仕組みの構築

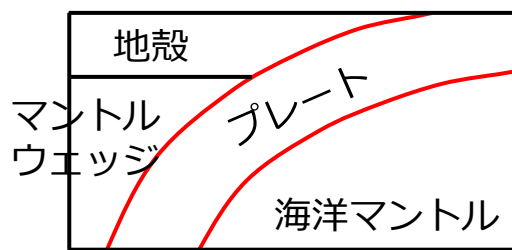


半割れ、一部割れが発生した後、粘性緩和の影響の有無を考慮した余効すべりを国の検討会等へ資料提供し、地震発生可能性の評価へ貢献する

1. 西南日本の地下構造を想定した有限要素メッシュの作成

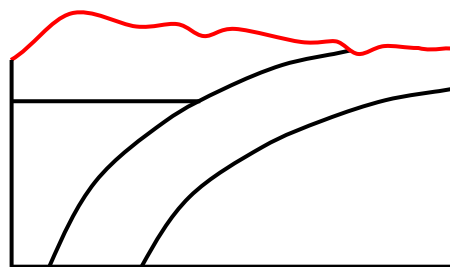


A.プレート形状



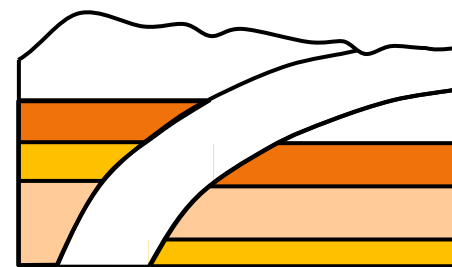
三次元のプレート形状

B.地形



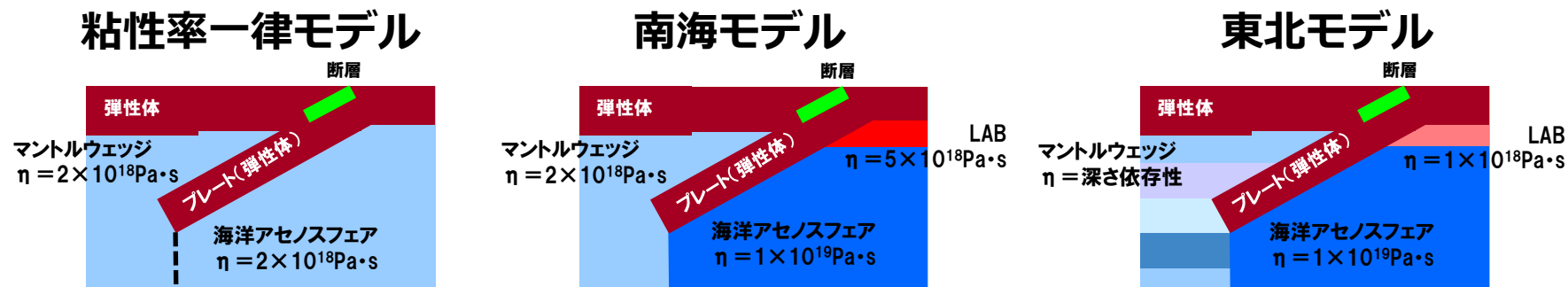
地形の考慮

C.粘性構造の不均質



マンントルウェッジ、海洋マンントルの粘性率の深さ依存性

2. 南海トラフの大地震後の粘性緩和による変動の見積もり



■ 粘性率一律モデル

- ・ 比較参照用

■ 南海モデル：

- ・ 水藤（2017）による2004年紀伊半島南東沖の地震の余効変動から推定した地下構造モデル
- ・ マントルウェッジの粘性率は制約されていない
- ・ LABの粘性率が制約できている

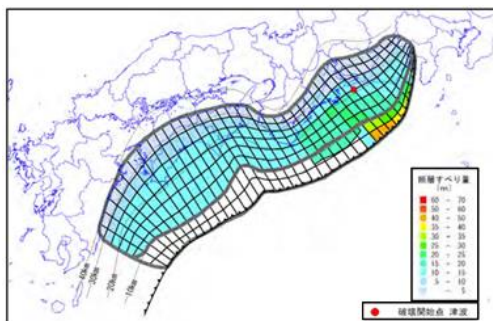
■ 東北モデル：

- ・ 東北地方太平洋沖地震の余効変動から推定した地下構造モデル
- ・ Suito(2017)を参考に構築
- ・ 地震5年後以降のデータを制約に使用
- ・ 西南日本の変動からマンテルウェッジの構造が制約されている（深さ依存性）
- ・ 東北沖の海底地殻変動のデータからLABの粘性率が制約されている

*LAB: 地殻-アセノスフェア境界(Lithosphere-Asthenosphere Boundary)

2. 南海トラフの大地震後の粘性緩和による変動の見積もり

想定南海トラフ巨大地震による地震後1年間の粘性緩和による変動量
—南海トラフ沿いの巨大地震の想定ケース（内閣府, 2012）に対する試算の例—



基本的な検討ケース① (case01)

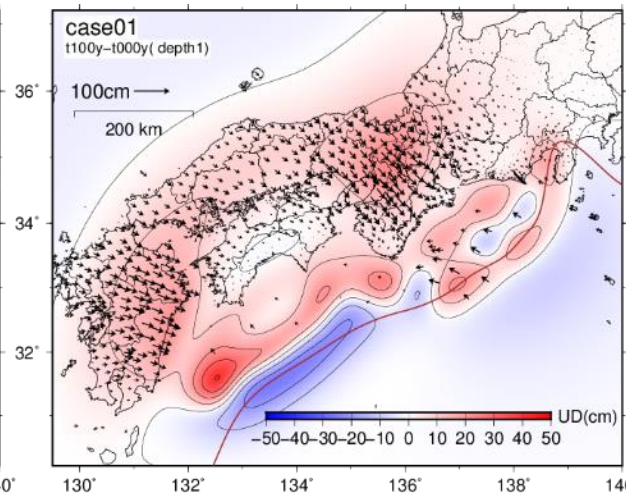
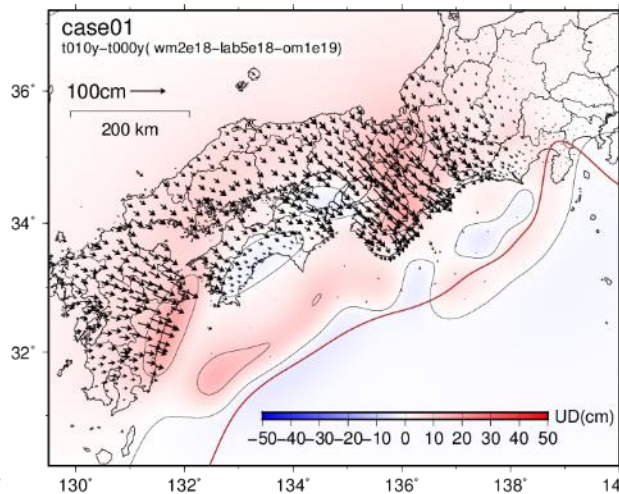
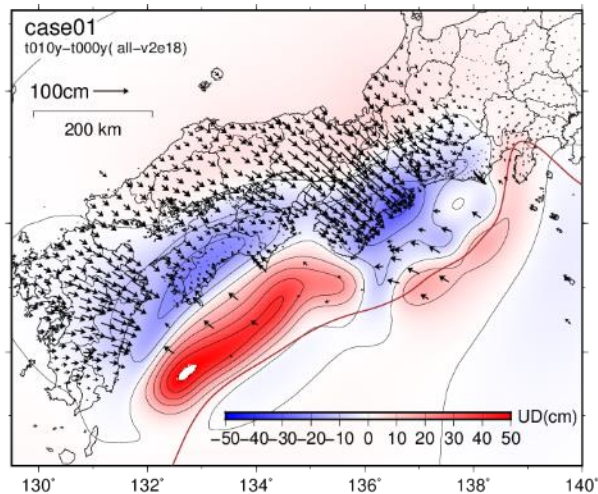
「駿河湾～紀伊半島沖に大すべり域+超大すべり域を設定」に対する試算

(マグニチュード9.1、平均すべり10.7m)

粘性率一律モデル

南海モデル

東北モデル

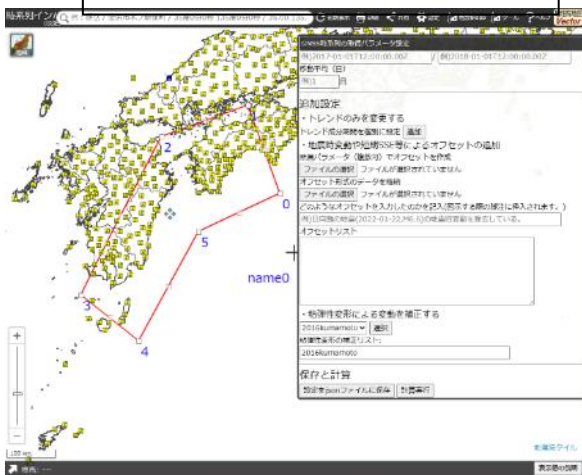


地下構造モデル：

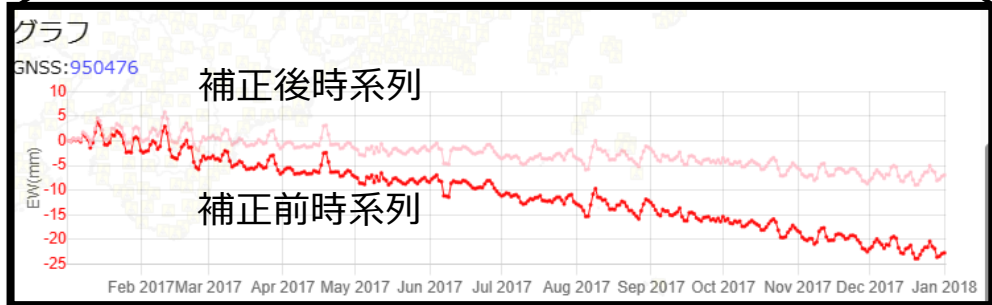
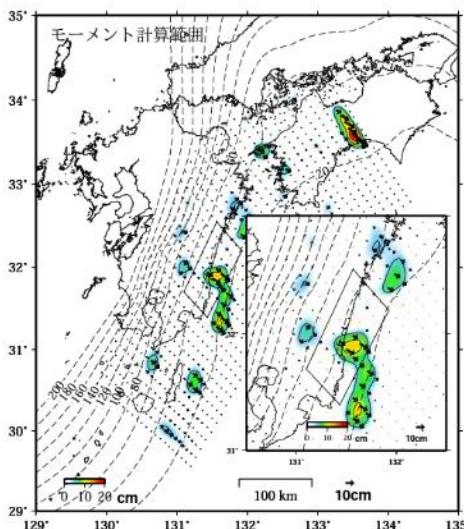
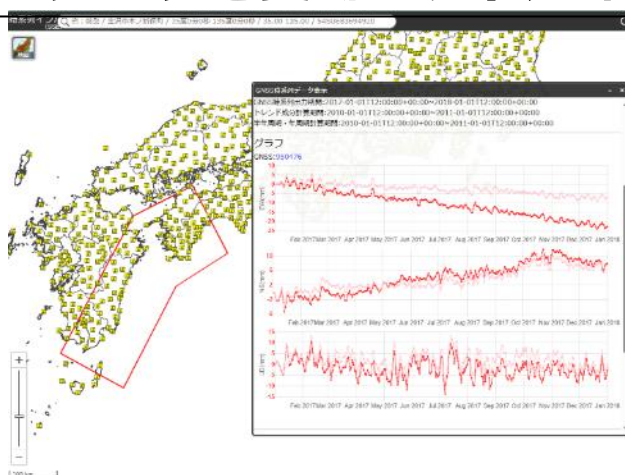
現状では最適であっても、モデルによって結果は大きく異なるため、
今後も随時最適モデルを更新していく必要がある

3. 半割れ、一部割れを想定した、地震直後の粘性緩和を考慮した余効すべりの推定を行う仕組みの構築

パラメータの選択



時系列データと変動ベクトル確認



赤線：粘性緩和を含めたトレンド成分

桃色：粘性緩和を含めないトレンド成分

すべり推定システムの入力データに対し、粘性緩和の計算結果を補正できるようにした

青：実施済

赤：残された課題

成果のまとめと残された課題

1. 粘性緩和の計算（有限要素法）で用いる、地下を細分化した要素（メッシュ）の作成
2. 南海トラフの大地震後の粘性緩和による変動の見積もり
 - ✓ 過去の測地データなどを踏まえた粘性構造のチューニング
 - ✓ 過去の大地震及び想定巨大地震に対する粘性緩和の見積もり
 - ・ 粘性構造モデルの改良
3. 半割れ、一部割れを想定した、地震直後の粘性緩和を考慮した余効すべり推定を行う仕組みの構築



半割れ、一部割れが発生した後、粘性緩和の影響の有無を考慮した余効すべりを国の検討会等へ資料提供し、地震発生可能性の評価へ貢献する

課題B (ケース3の対応) :

短期間のプレート間すべりを含めて、プレート間すべりを把握できるように手法の改良を行うとともにプレート間すべりの推定を実施する

工程 :

1. GNSSによる短期間のプレート間すべりの推定
 - 1 - ①GEONETによる短期的ゆっくりすべり把握手法の改良
 - 1 - ②GNSSと感度の高い(気象庁)ひずみ計を同時に用いたプレート間すべり推定手法の開発
2. 南海トラフ沿いにおけるプレート間ゆっくりすべりの推定の実施

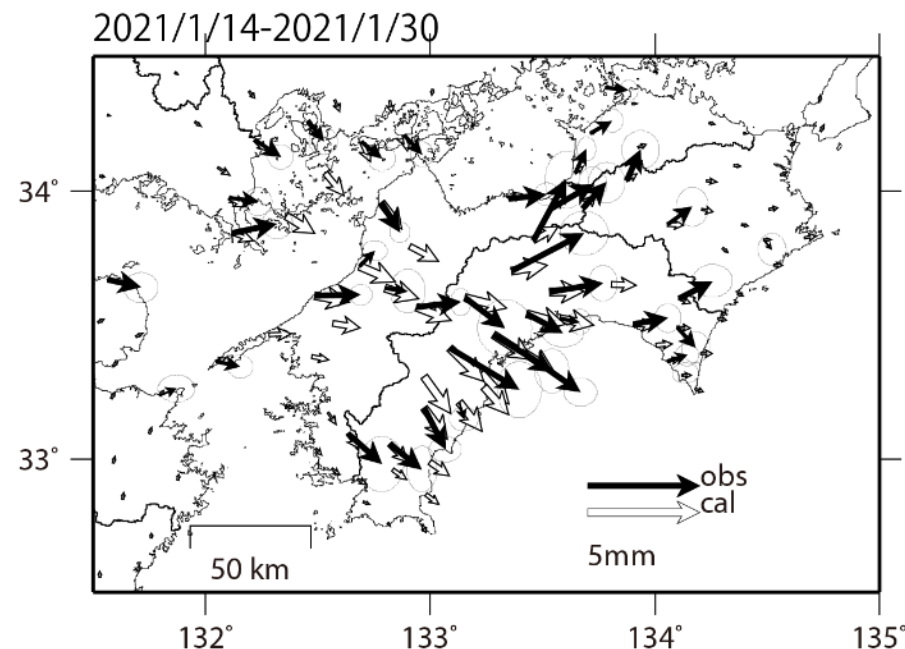
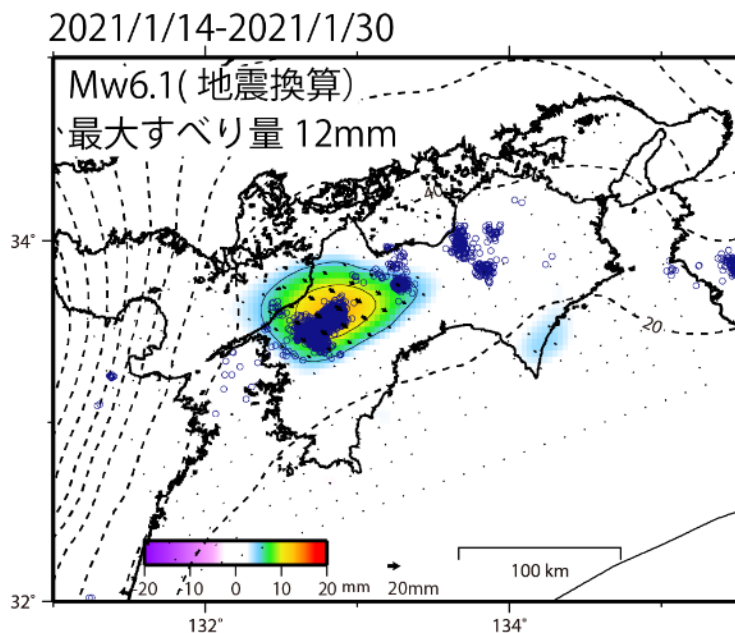


プレート間すべりが発生した際に国の検討会等へ資料提供し、地震発生可能性の評価へ貢献する。特に短期間のプレート間すべりは降雨等の影響を受けやすいひずみ・傾斜計による検知を補完する。

1-① GEONETによる短期的ゆっくりすべり把握手法の改良

すべり推定

観測



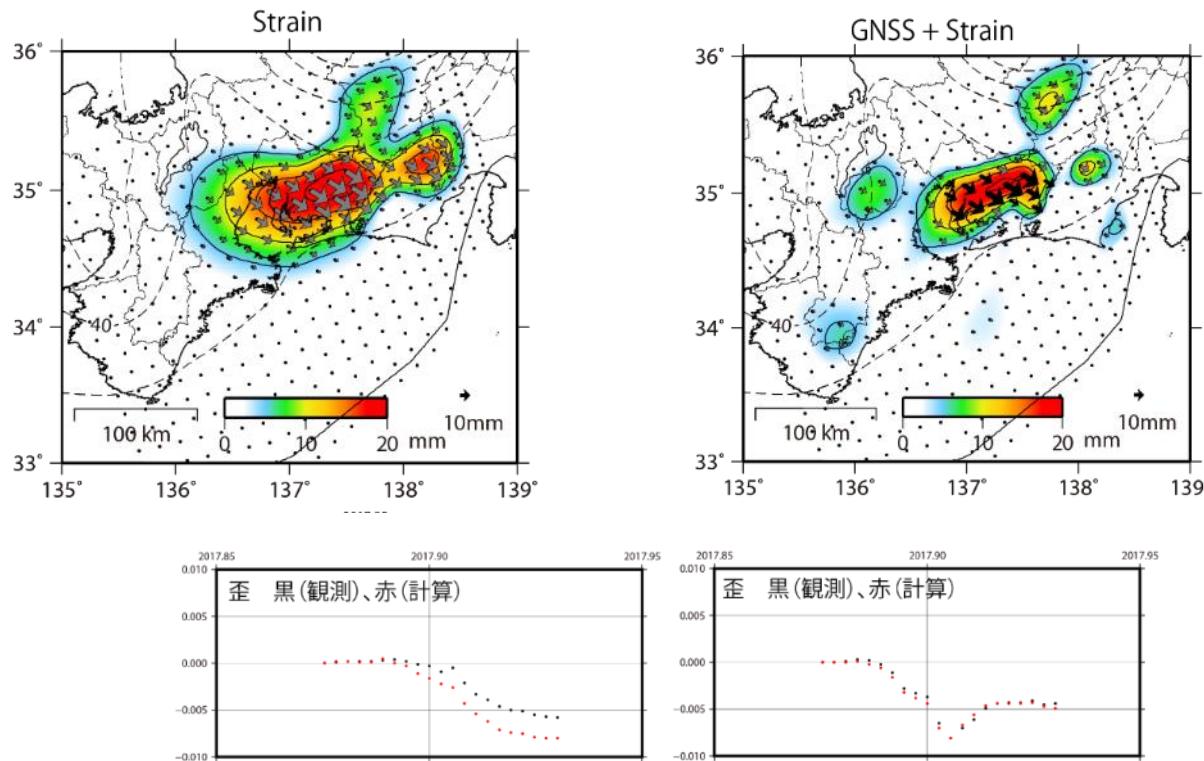
長期的ゆっくりすべり推定に用いているプログラムについて、
短期的ゆっくりすべりの特性に合わせた調整を実施



- ・ 規模が大きい短期的ゆっくりすべりの推定が可能な場合があることを解明
- ・ 解析を自動化

1-② GEONETによる短期的ゆっくりすべり把握手法の改良

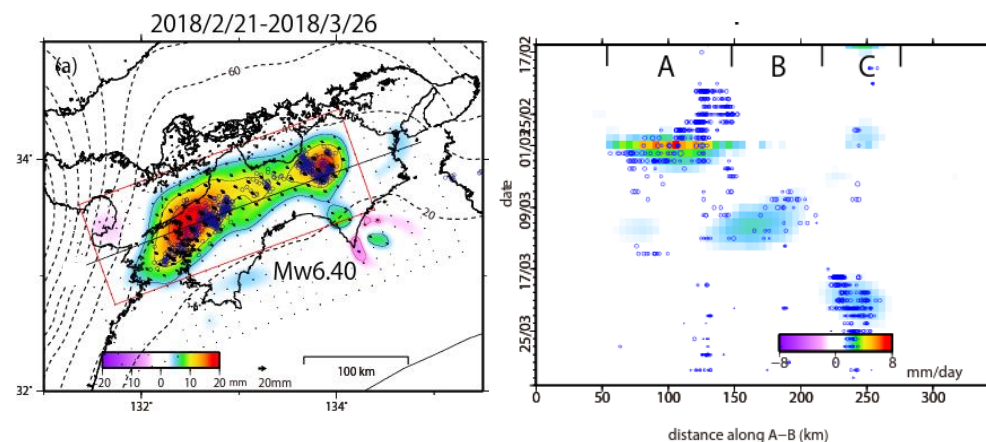
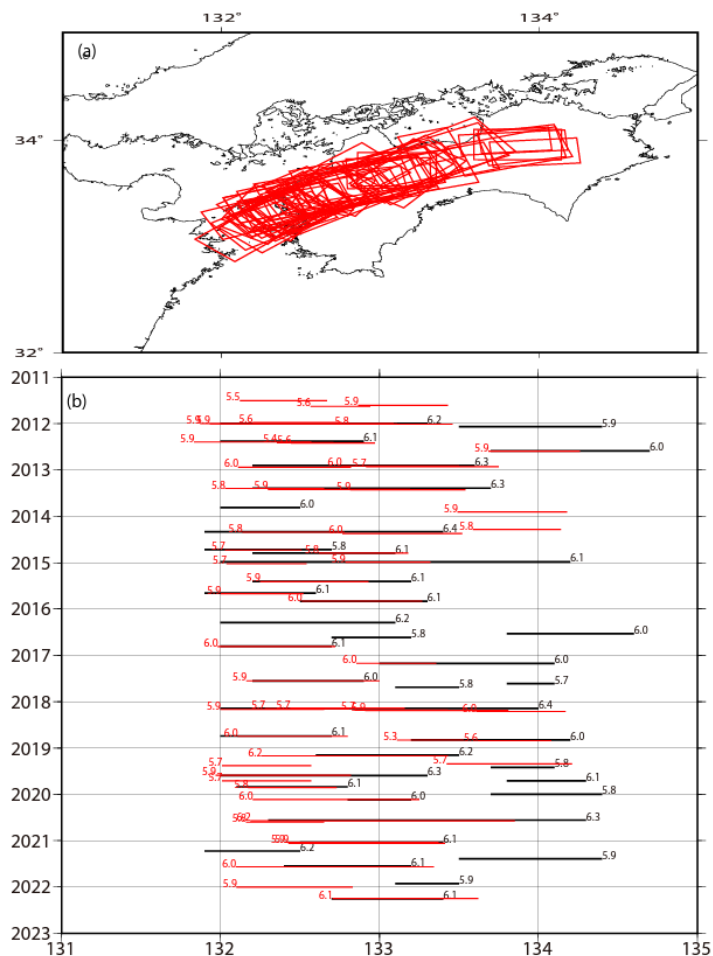
- GNSSと感度の高い（気象庁）ひずみ計を同時に用いたプレート間すべり推定手法の開発-



GNSSと気象庁ひずみ計を同時に用いたプレート間すべりの推定を可能とするためプログラムの改良を実施

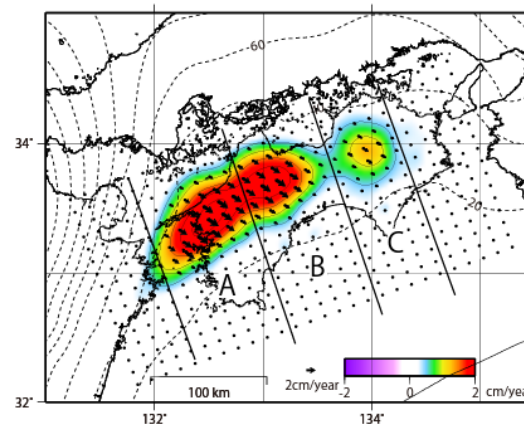
(B) プレート間すべり現象の把握

2. プレート間すべりの推定 (短期的ゆっくりすべり)



(左) 短期的ゆっくりすべりの例 (右) すべり速度の時空間変化

Ozawa et al. (2023)



GNSSにより検知された短期的ゆっくりすべりの平均すべりレート。

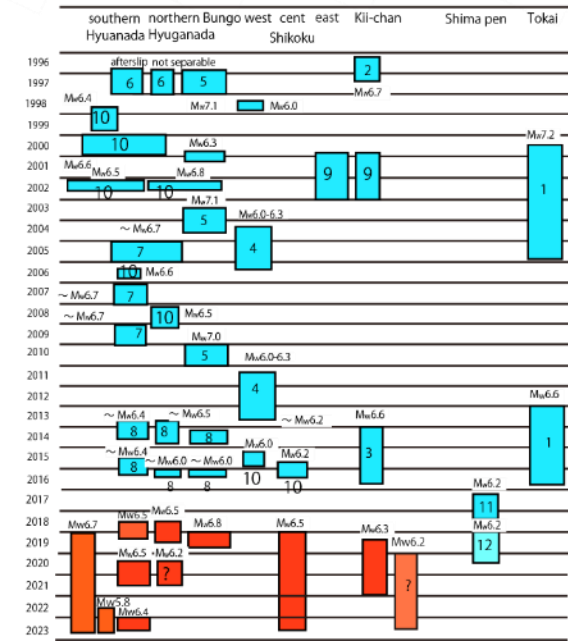
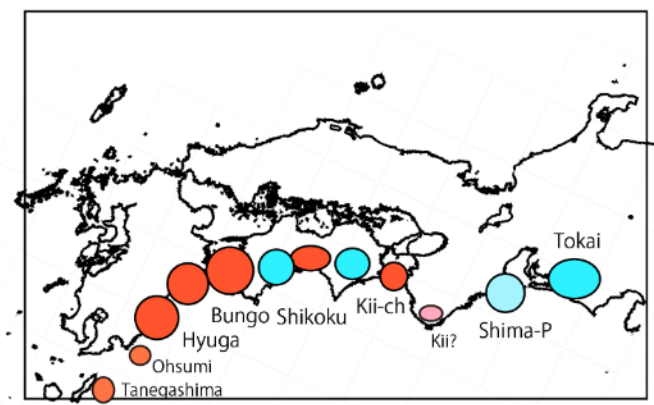
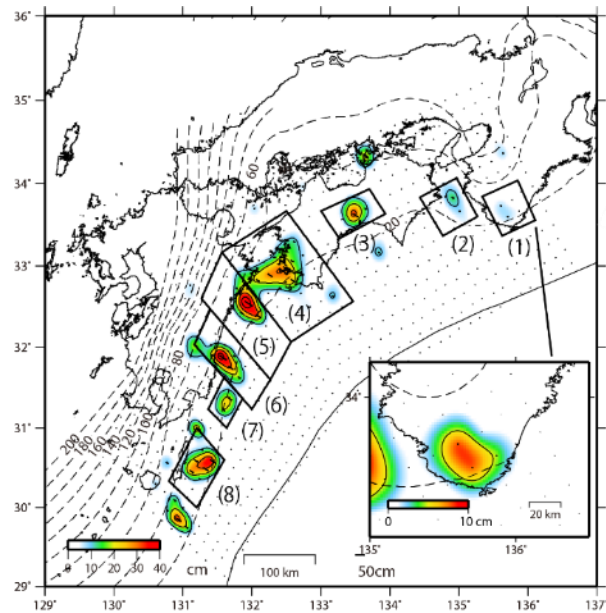
セクション名はHirose and Kimura (2020)による

GNSSにより検知された短期的ゆっくりすべり (黒線)。
赤線が防災科研により傾斜計記録から報告されているもの
(NIED:地震予知連会報)

2012年以降発生した四国の短期的ゆっくりすべりについて網羅的にGNSS解析を行いカタログを作成した。また、すべりの時空間的な特徴を明らかにした。

(B) プレート間すべり現象の把握

2. プレート間すべりの推定 (長期的ゆっくりすべり)



1. Ozawa et al., 2016
2. Kobayashi 2014
3. GSI 2016
4. Takagi et al., 2016
5. Ozawa et al., 2013
6. Ozawa et al., 2001
7. Yari & Ozawa 2013
8. Ozawa 2017
9. Kobayashi 2017
10. Takagi et al., 2019
11. Kobayashi & Tsuyuki 2019
12. GSI 2019

Ozawa et al., submitted

(左) 2018-2023の間に発生した長期的ゆっくりすべり
 (右上) 長期的ゆっくりすべりが発生した場所
 赤が2018-2023の間に発生した場所、
 水色はそれ以前に発生した場所
 (右下) 長期的ゆっくりすべりの時空間分布

短期的ゆっくりすべりによる変位、地震による粘性変形を補正して、2018年以降に発生した南海トラフ沿い長期的ゆっくりすべりを調べ、カタログを作成した。

成果のまとめと残された課題

青：実施済
赤：残された課題

1. GNSSによる短期間のプレート間すべりの推定
 - 1-① GEONETによる短期間のすべり現象把握手法の開発
 - 1-② GNSSと気象庁ひずみ計を同時に用いたプレート間すべり推定
 - ・ 解析手法の開発
 - ・ 解析事例の蓄積、手法の改良
 - ・ 高時間分解能のGNSSデータの活用
2. 南海トラフ沿いにおけるプレート間ゆっくりすべりの推定の実施
 - ・ 短期的・長期的ゆっくりすべりの網羅的な推定の実施

プレート間すべりが発生した際に国の検討会等へ資料提供し、地震発生可能性の評価へ貢献する。特に短期間のプレート間すべりは降雨等の影響を受けやすいひずみ・傾斜計による情報を補完する。

課題C（ケース4の対応）：

内陸の活断層帯周辺等のプレート内部変形を高精度に把握し、
広域・長期的なプレート間の固着状態を高精度に推定できるようにする

工程：

1. プレート内部変形の把握

1－①内陸活断層周辺の変動の把握

- ・平成28年(2016年) 熊本地震の余効変動
- ・それ以外の変動

1－②ブロック運動

2. プレート間の固着状態の推定



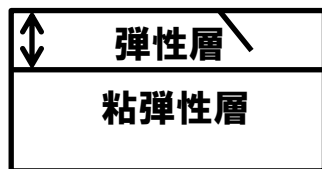
プレート間の固着状態の変化が見られた際に国の検討会へ資料提供し、
地震発生可能性の評価へ貢献する

1 ー①内陸活断層周辺の変動の把握

- ・平成28年(2016年) 熊本地震の余効変動

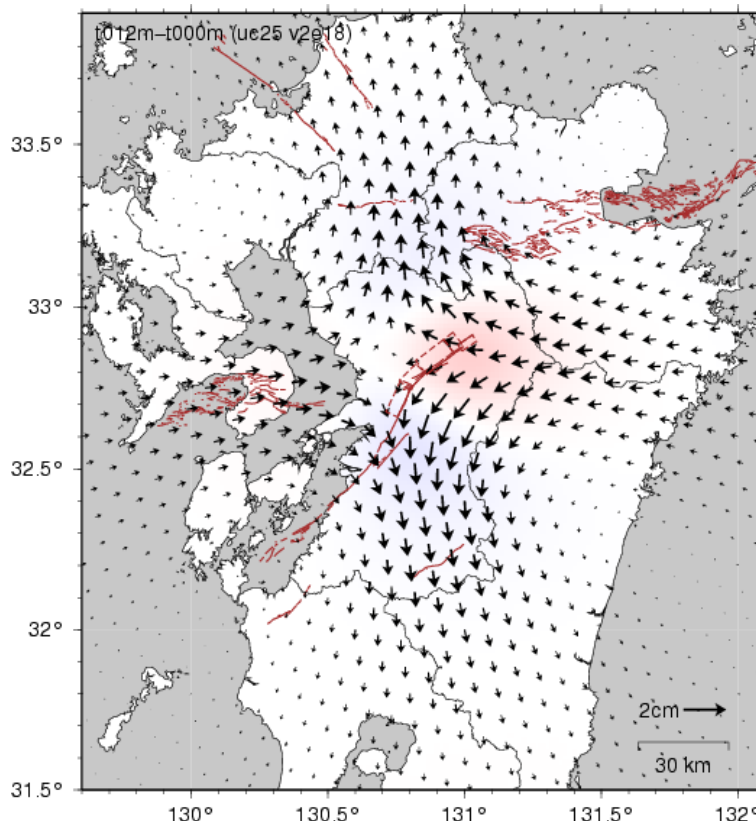
水平二層モデル

弾性層 2.5 km

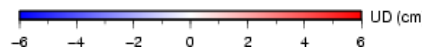


粘性率 $2 \times 10^{18} \text{Pa}\cdot\text{s}$

地震後1年間の粘性緩和



水藤・他(2017)



2. プレート間の固着状態の推定

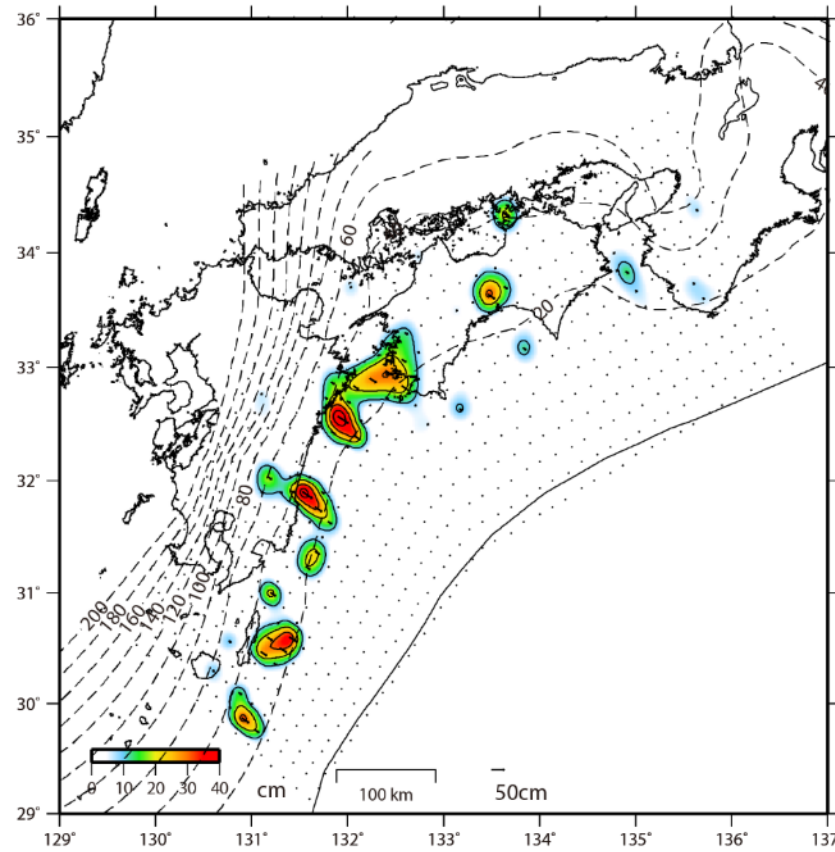
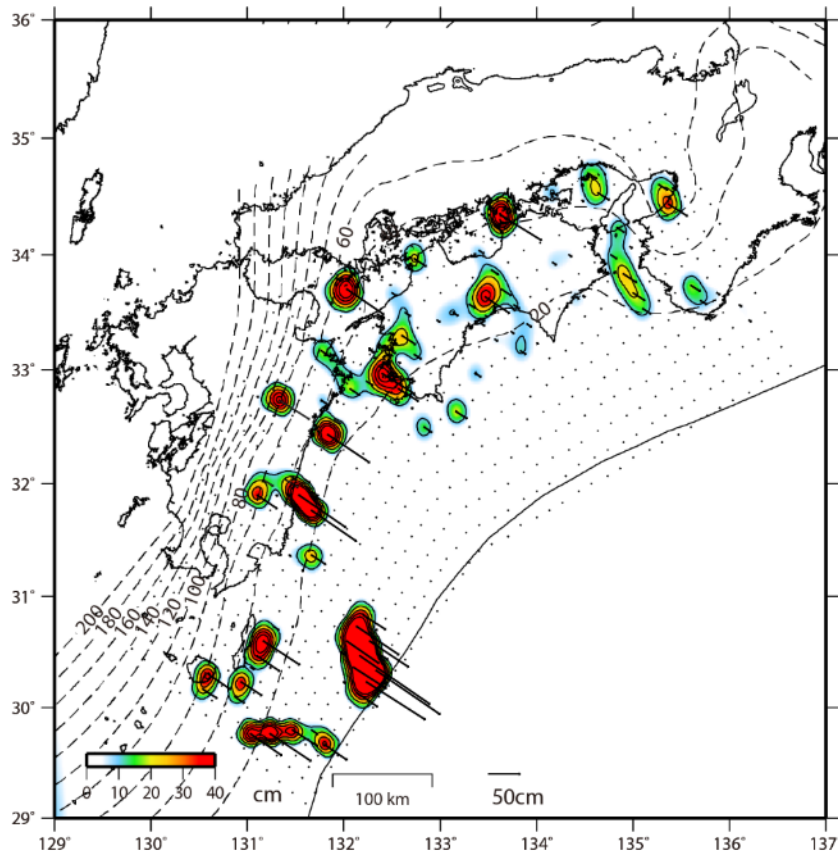
平成28年(2016年)熊本地震の粘性緩和の影響評価

2018/1/1-2023/7/1

粘性変形非補正、短期的ゆっくりすべり補正

2018/1/1-2023/7/1

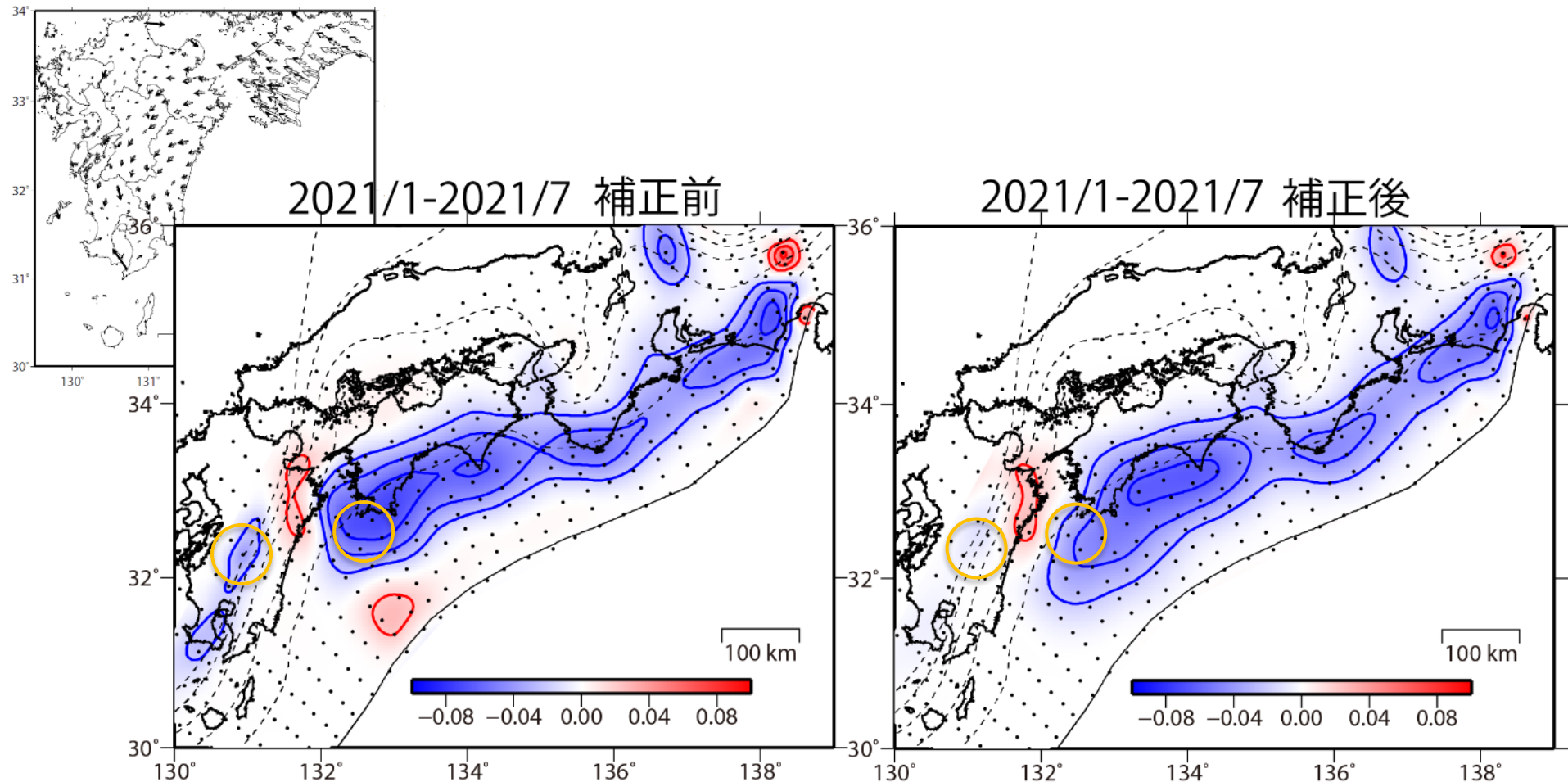
粘性緩和補正、短期的ゆっくりすべり補正



粘性緩和を補正することにより、明瞭にゆっくりすべりを検出することができた。

2. プレート間の固着状態の推定

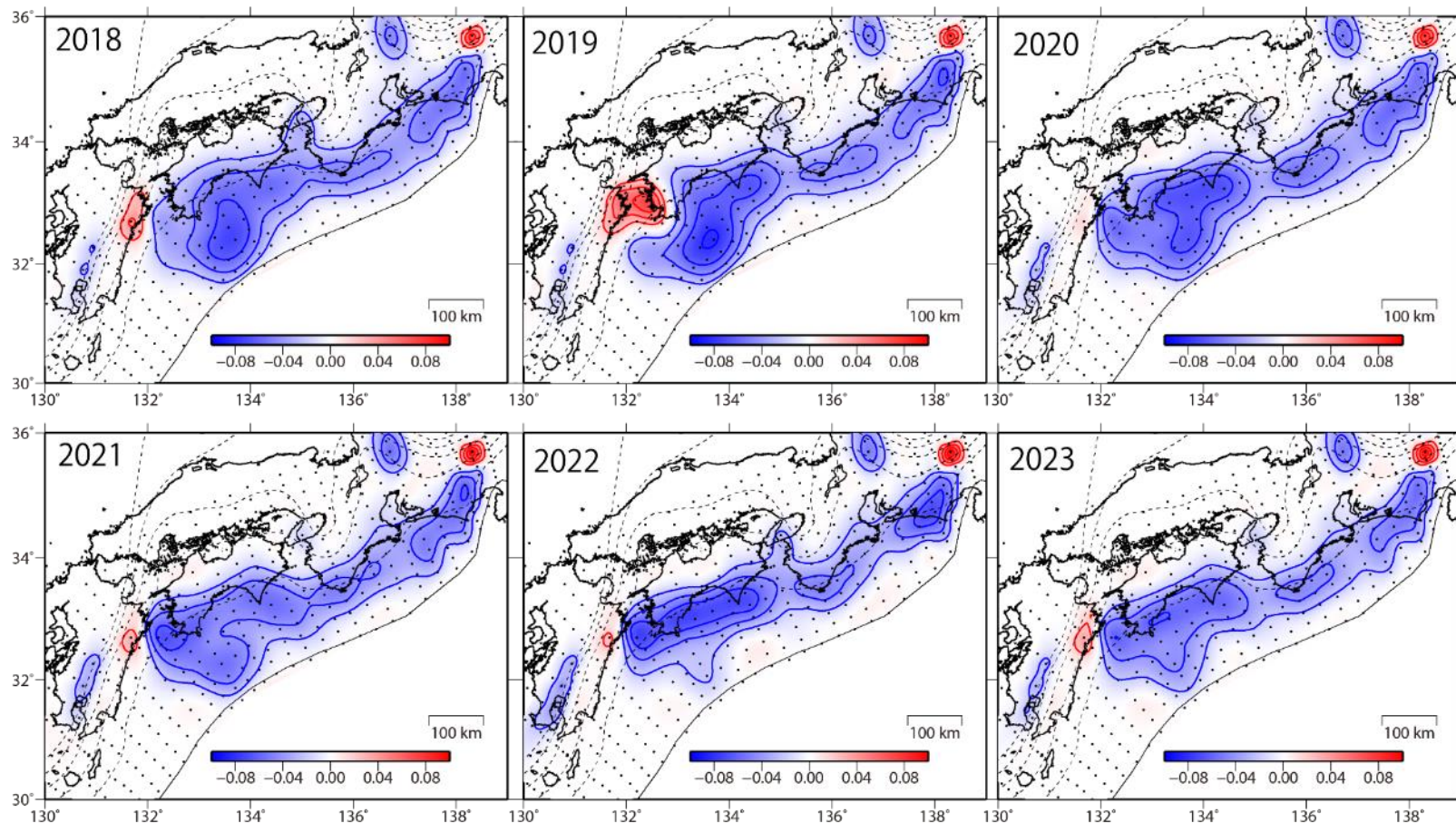
平成28年(2016年)熊本地震の粘性緩和の影響評価



余効変動を補正することで、プレート間固着状態の推定を高精度化

2. プレート間の固着状態の推定

海底地殻変動データも加えて年毎の固着の時間変化を推定した



成果のまとめと今後の課題

青：実施済
赤：今後の課題

1. プレート内部変形の把握

1 – ①内陸活断層周辺の変動

- ・平成28年(2016年) 熊本地震の余効変動
 - ・干渉SAR時系列による余効変動の時空間分布の把握
 - ・余効変動モデルの構築・高度化
- ・それ以外の変動
 - ・干渉SAR時系列解析を活用した変動把握の検討

1 – ②ブロック運動

- ・干渉SAR時系列解析を活用した変動把握の検討

2. プレート間の固着状態の推定

- ・熊本地震の余効変動モデルを反映したプレート間の固着状態の推定の試行
- ・1. の進捗を反映させたプレート間の固着状態の推定の実施

中間評価時の指摘への対応

課題A)

- ・ 地下構造モデルの検討において、一意的な決定に至っているかの検討が必要
 - 2004年紀伊半島沖後のGNSSデータに基づくモデルおよび東北地方太平洋沖地震後のGNSSデータに基づくモデルを構築した。
 - 現時点でモデルは一意ではなく、引き続き地下構造モデルの改良が必要。

課題B)

- ・ 短期的ゆっくりすべりの推定における、とりこぼし、誤検知の評価が必要
 - GNSSによる短期的ゆっくりすべりのカタログを整備した。
傾斜計によるカタログと比較した結果、M6.1以上であれば両者は概ね一致することを確認した。誤検知の評価は今後の課題。
- ・ すべり推定の時間分解能向上のため高時間分解能GNSSの活用が必要
 - 高時間分解能GNSSのばらつきのため断念。GSI/JAXA暦による高時間分解GNSS座標解の利用などが今後の課題。

課題C)

- ・ 干渉SAR時系列解析の成果をプレート内部変形の検討に活用できるよう、精度向上のための検討が必要
 - 研究期間内に実現できず。データ環境や解析技術の進展を踏まえつつ今後引き続き検討が必要。
- ・ 海底地殻変動データの取り込みが必要
 - 海上保安庁の海底地殻変動データを取り込んでプレート間の固着の推定を行った。

5年間(令和元年度～五年度) の研究成果の公表

1. 発表論文 7編
 - 査読あり：6編 (うち査読中2件)
 - 査読なし：1編
2. 研究報告書 5編
3. 学会発表等 15件
 - 国内：13件
 - 海外：2件