

南海トラフ沿いの巨大地震発生に対応 するための地殻活動把握手法の研究開発 (中間評価)

【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60,847千円（平成31年～3年の総額）

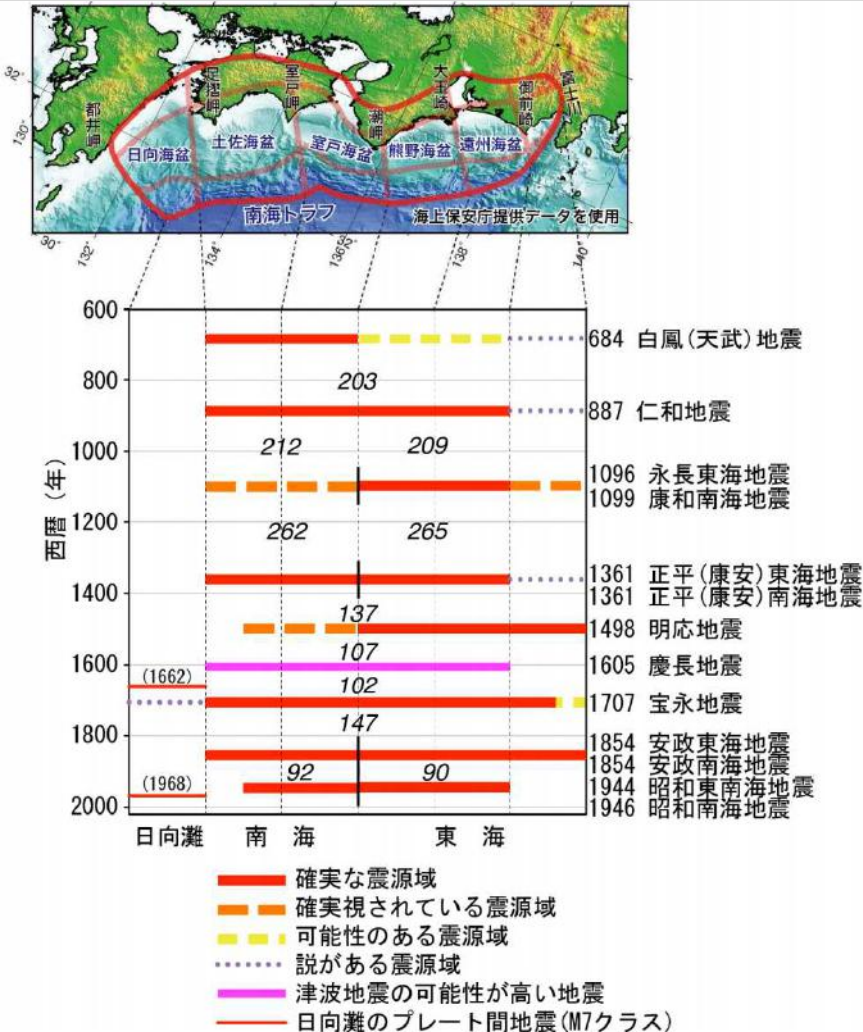
国土地理院 地理地殻活動研究センター
地殻変動研究室

宗包 浩志

① 研究開発の背景・必要性

南海トラフ

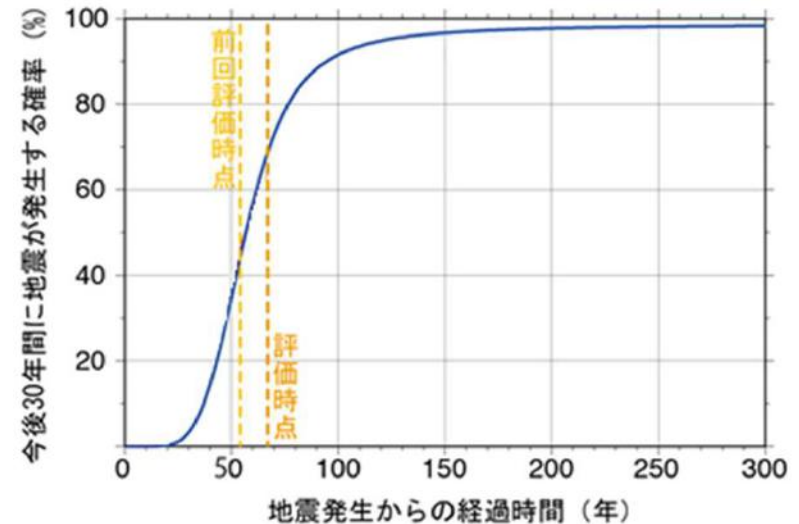
海溝型巨大地震が
100～150年程度の間隔で繰り返し発生



「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70年以上が経過

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

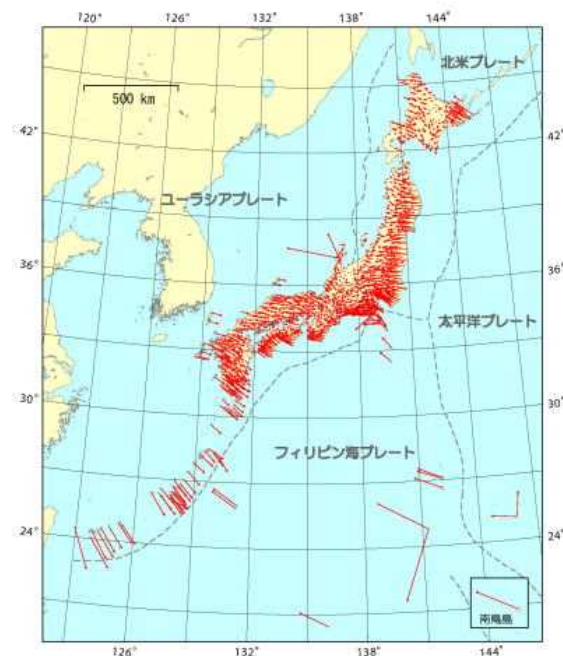


南海トラフでの海溝型巨大地震
の発生が切迫してきている。

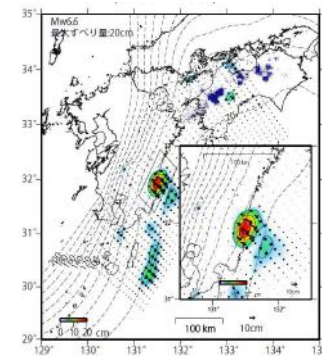
国土地理院の取り組み

- 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

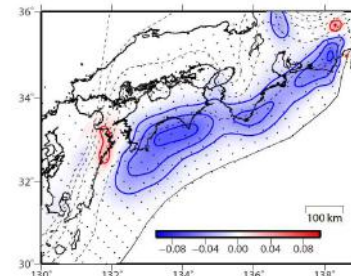
→ **地震発生可能性（地震発生可能性が通常より高いかどうか）の評価に貢献**



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的ゆっくりすべり



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。

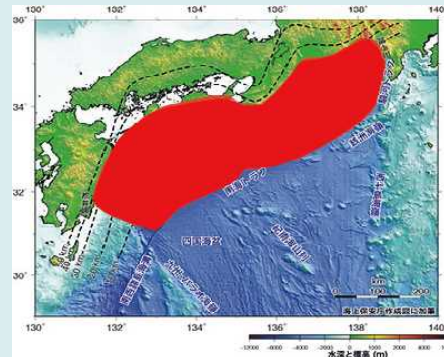
南海トラフ沿いで発生する典型的な異常現象（内閣府, 2017）

【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



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

【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

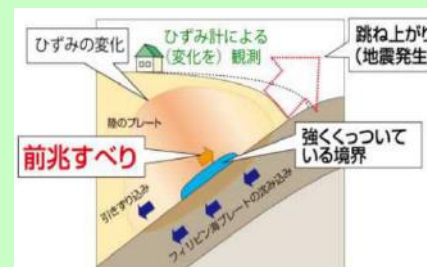
- ・地震活動
- ・地殻変動
- ・地球電磁気
- ・地下水・・・

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】

プレート間の固着のはがれが発生



固着のはがれが加速するのか？

→ プレート間の固着状態の正確な把握が必要

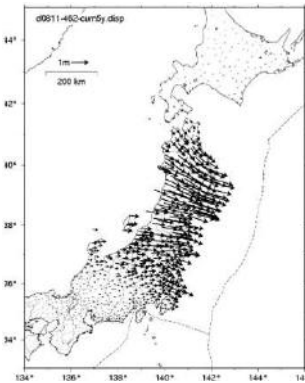
① 研究開発の背景・必要性 (ケース1, 2)

巨大地震 (東北地方太平洋沖地震) を経験して見えてきた課題

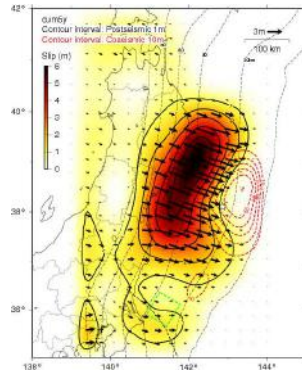
(ケース1, 2の場合)

正確な余効すべりの推定には、
粘弾性緩和の影響を除去が必要

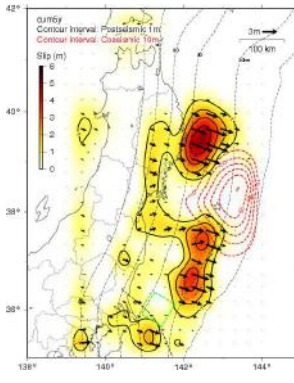
地震後の地殻変動
(余効変動)



粘弾性緩和の影響
を無視した場合



粘弾性緩和除去後
の余効すべり



粘弾性緩和の見積もりには、

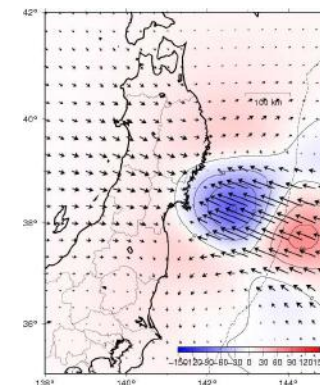
- ・ **地下構造、粘性率**が大きく影響

構造や粘性率が異なると、
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

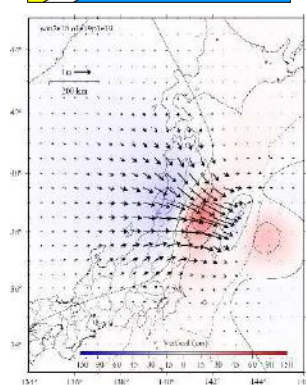
水平二層モデル

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



異なる粘性率

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



余効変動 = 余効すべり + **粘弾性緩和***

*粘弾性緩和: 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には**粘弾性緩和**の補正が必要。

→**正確な地下構造モデルの構築**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

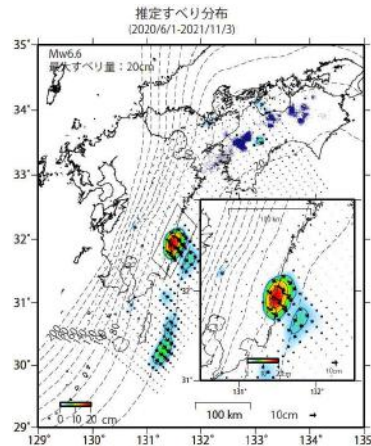
(ケース3の場合)

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

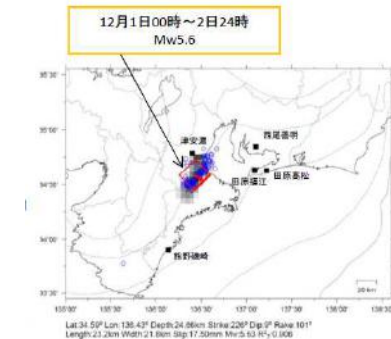
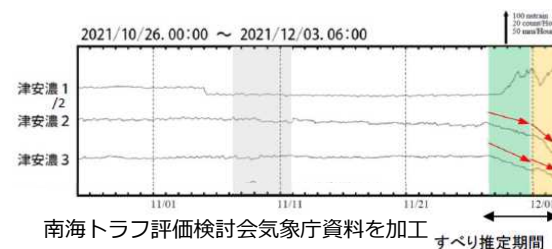
長期的ゆっくりすべり（数ヶ月～数年）



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）



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、降雨ノイズ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正確な把握には、**短期間のすべりについて、GNSS単独や、ひずみ計などとの組み合わせで推定する手法の開発が必要**

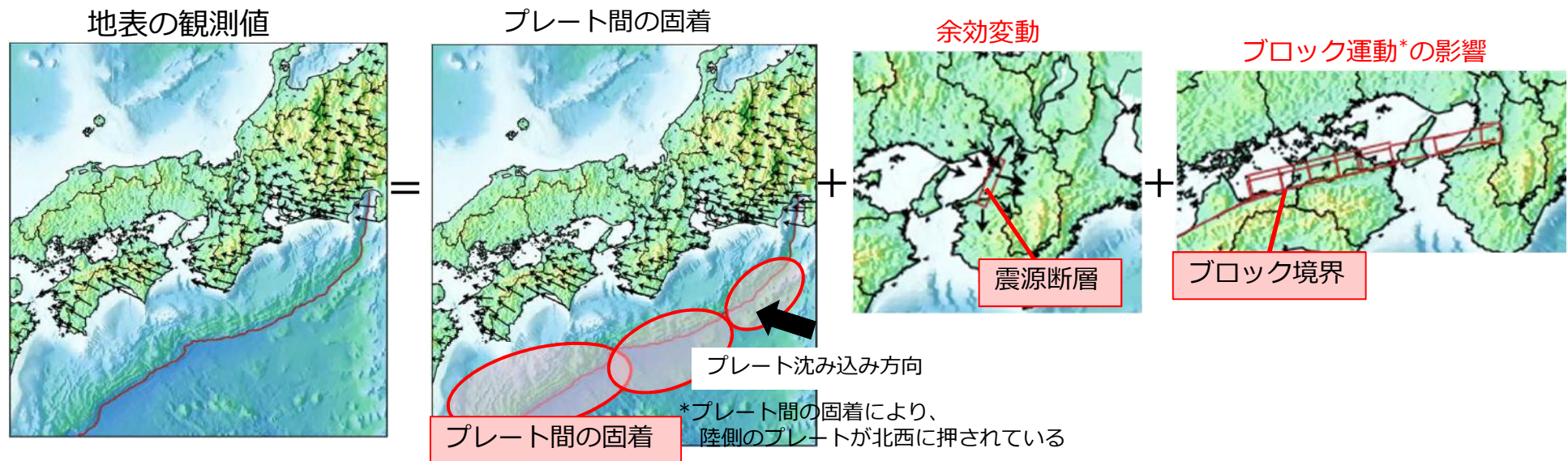
① 研究開発の背景・必要性（ケース4）

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

(ケース4の場合)

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には、

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・除去が必要

*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、地震発生可能性の評価に資する。

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の可能性の高まりの評価に資する。

- A. 南海トラフでの巨大地震発生後の粘弾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、**地震直後の粘弾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
- 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
- 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弾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、地震直後の粘弾性緩和を考慮した余効すべり推定を可能とする

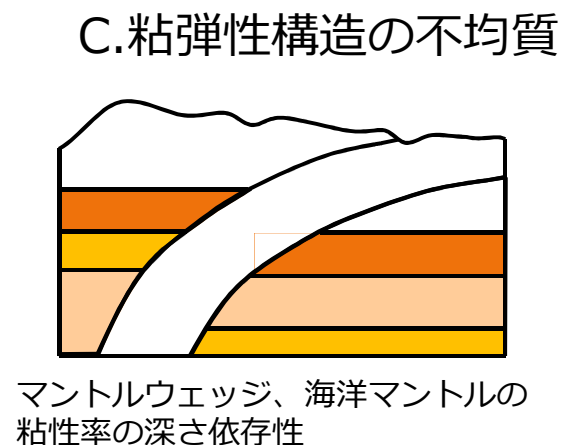
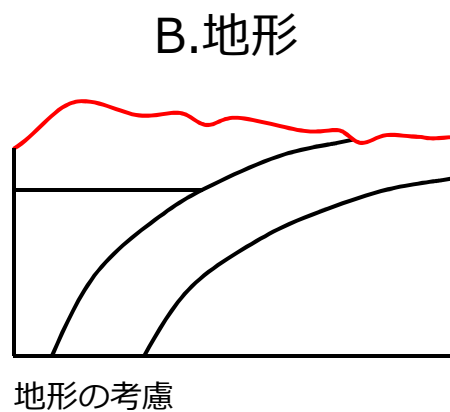
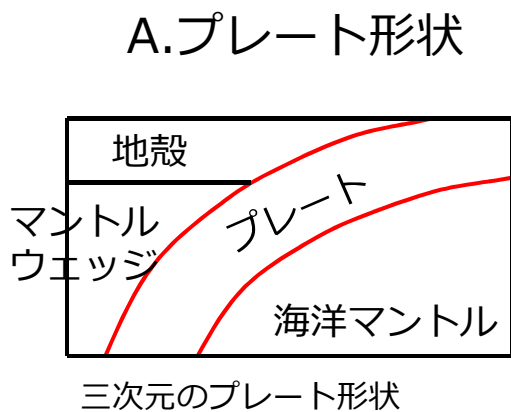
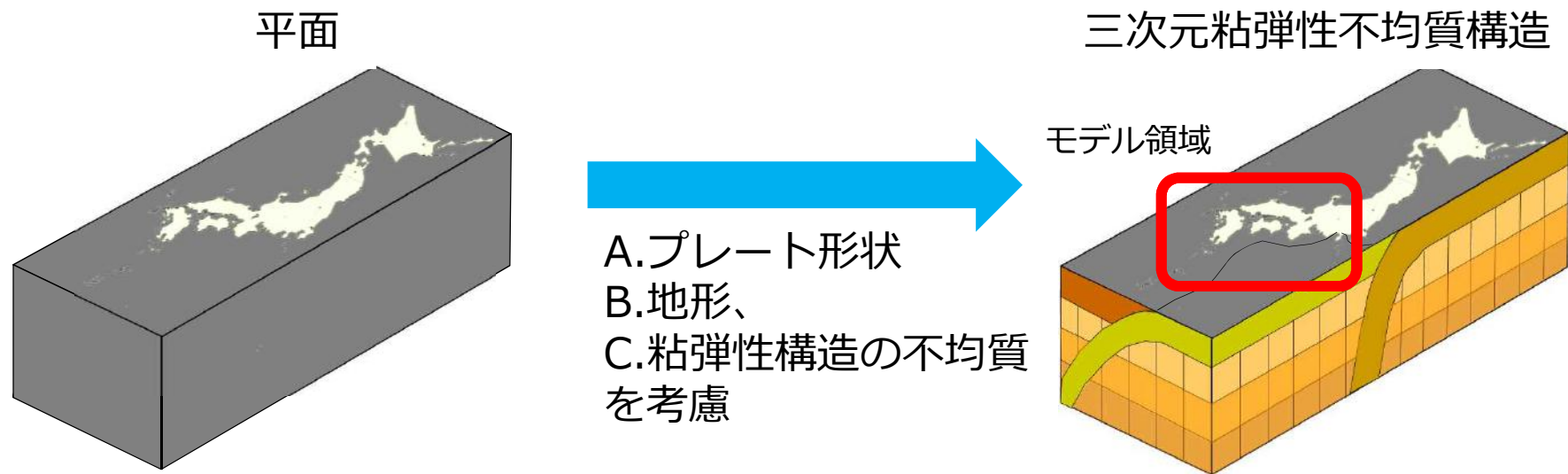
工程 :

1. 粘弾性緩和の計算 (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弾性緩和による変動の見積もり
 - ✓ 粘弾性構造の違いが地震後の粘弾性緩和に与える影響の調査
 - ✓ 過去の測地データなどを踏まえた粘弾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弾性緩和の見積もり
3. 半割れ、一部割れを想定した、地震直後の粘弾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、粘弾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モデルを想定した有限要素メッシュの作成



これまでの成果と今後の予定（ケース1，2）

1. 粘弾性緩和の計算（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

- ・メッシュ作成の実行

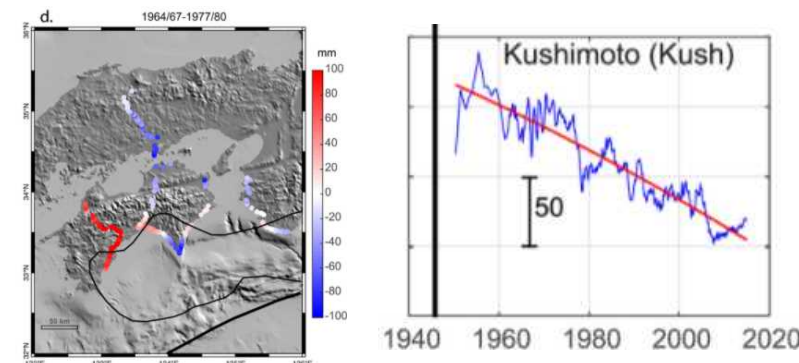
青：実施済
赤：実施予定

2. 南海トラフの大地震後の粘弾性緩和による変動の見積もり

- ・粘弾性構造の違いが地震後の粘弾性緩和に与える影響の調査
- ・過去の測地データなどを踏まえた粘弾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弾性緩和の見積もり

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

- ・余効すべりを推定する仕組みへの粘弾性緩和の反映



粘弾性構造のチューニングに
用いる測地データの例

（左）水準測量

（右）潮位観測

Johnson and Tebo (2018)

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

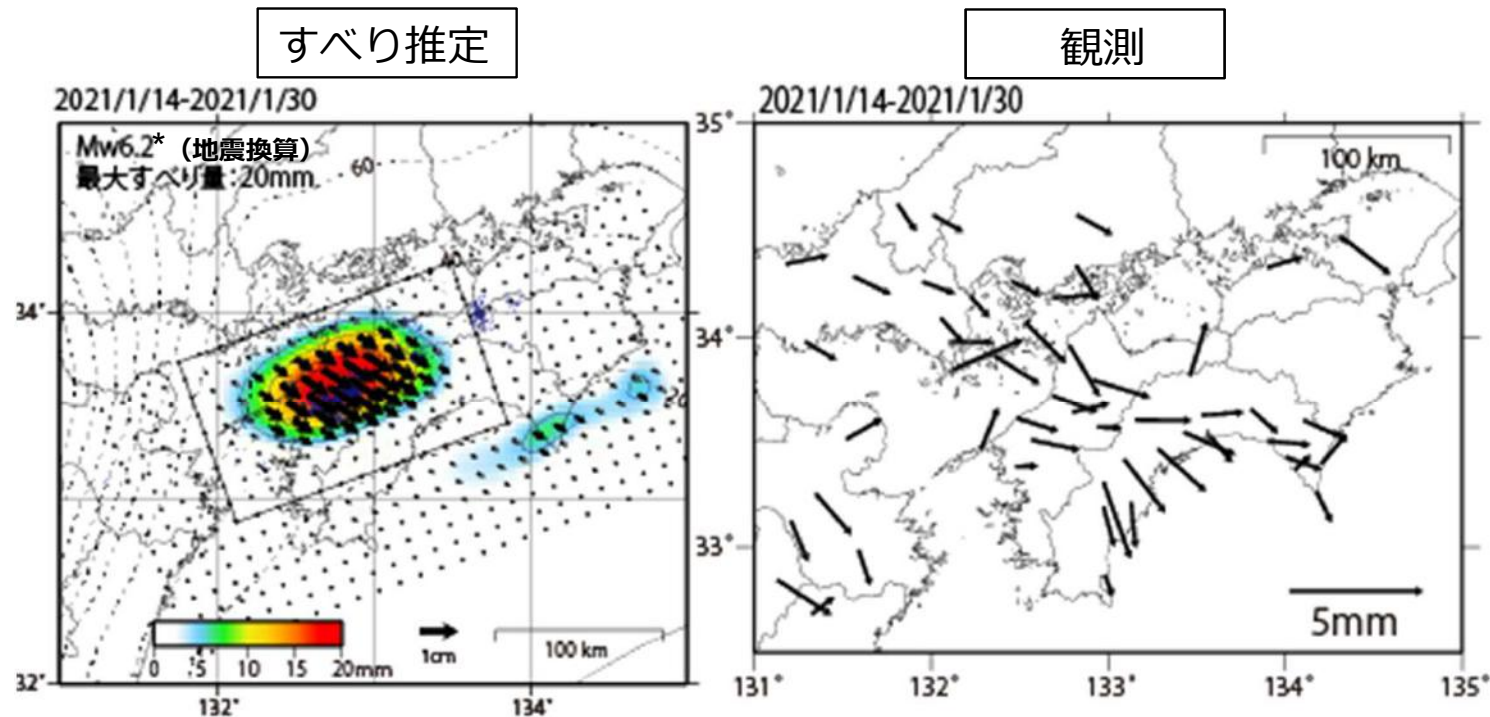
工程：

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

1-① GNSSによる短期間のプレート間すべりの推定 -GEONETによる短期的ゆっくりすべりの把握-



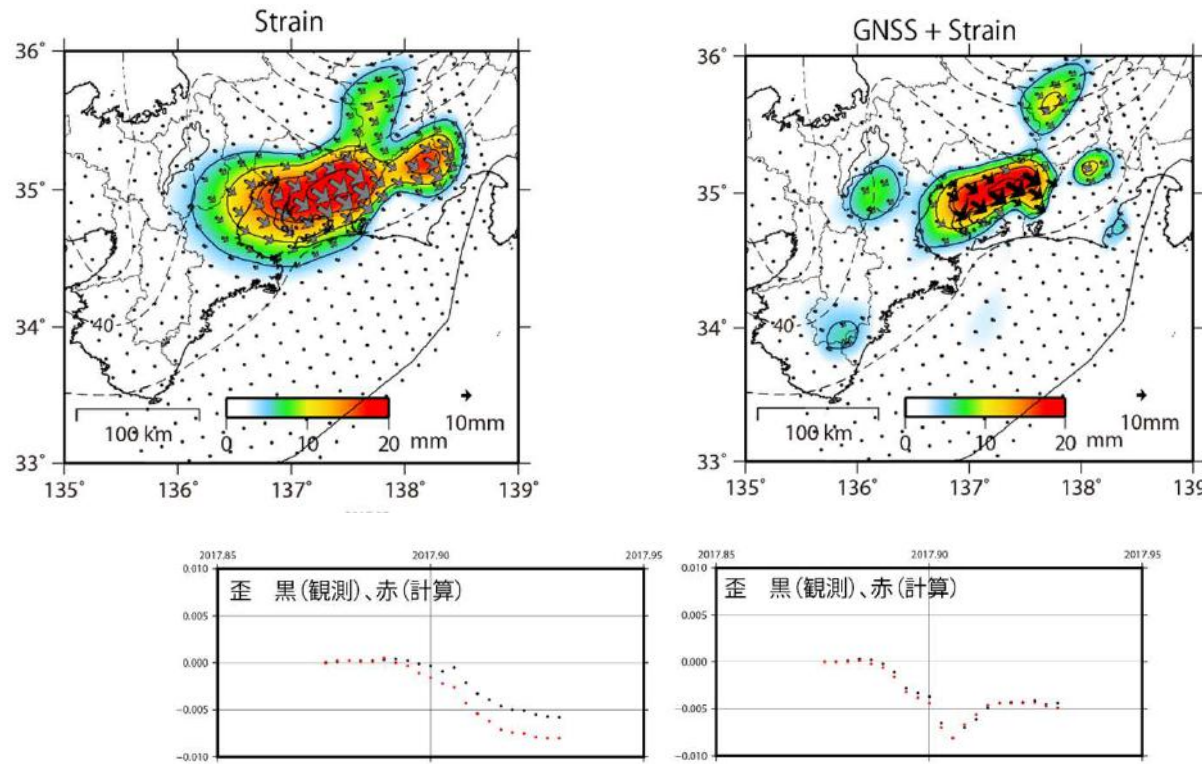
長期的ゆっくりすべり推定に用いているプログラムについて、
短期的ゆっくりすべりの特性に合わせた調整を実施



- 規模が大きい短期的ゆっくりすべりの推定が可能に
- 一部の地域で解析を自動化

1-② GEONETによる短期間のすべり現象把握の試行

-GNSSと感度の高い（気象庁）ひずみ計記録を用いたプレート間すべり推定-



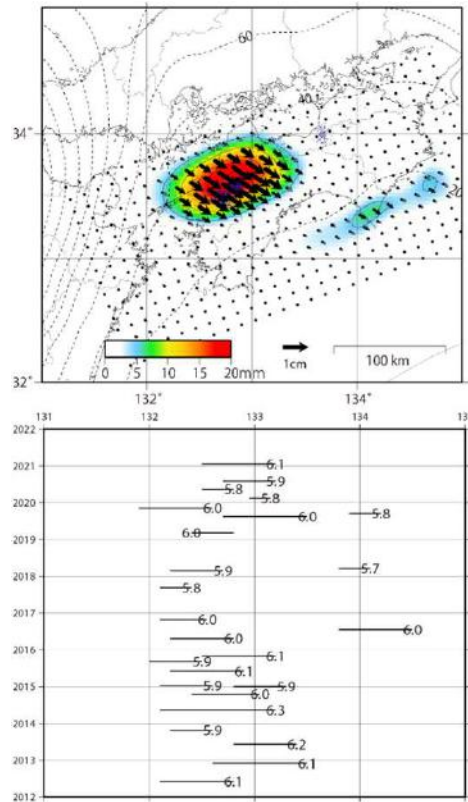
プログラムの改良を実施



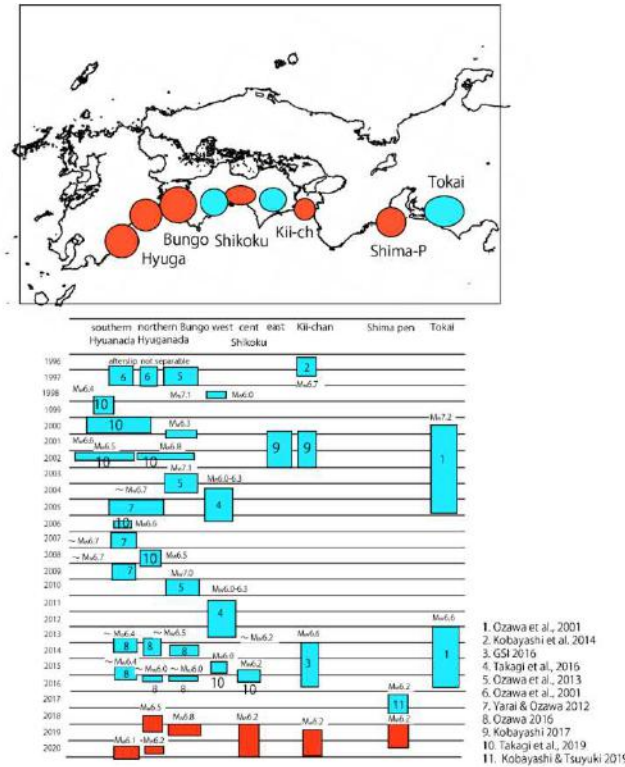
GNSSと気象庁ひずみ計記録を同時に用いたプレート間すべりの推定が可能に

2. プレート間すべりの推定

短期的ゆっくりすべり



長期的ゆっくりすべり



南海トラフにおいて短期的・長期的ゆっくりすべりの推定を実施



明らかになったゆっくりすべりについて、国の検討会等で報告

これまでの成果と今後の予定（ケース3）

1. GNSSによる短期間のプレート間すべりの推定

青：実施済
赤：実施予定

1－①GEONETによる短期間のすべり現象把握手法の開発

- ・ 解析の試行
- ・ 一部地域での自動解析の実行
- ・ 手法の改良、自動解析地域の拡充

1－②GNSS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

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推定の実施
- ・ 国の検討会等への資料提供

(C) プレート内部変形の把握

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



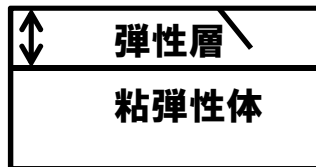
プレート間の固着状態の変化が見られた際に国の検討会へ資料提供し、
 地震発生可能性の評価へ貢献する

1. 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

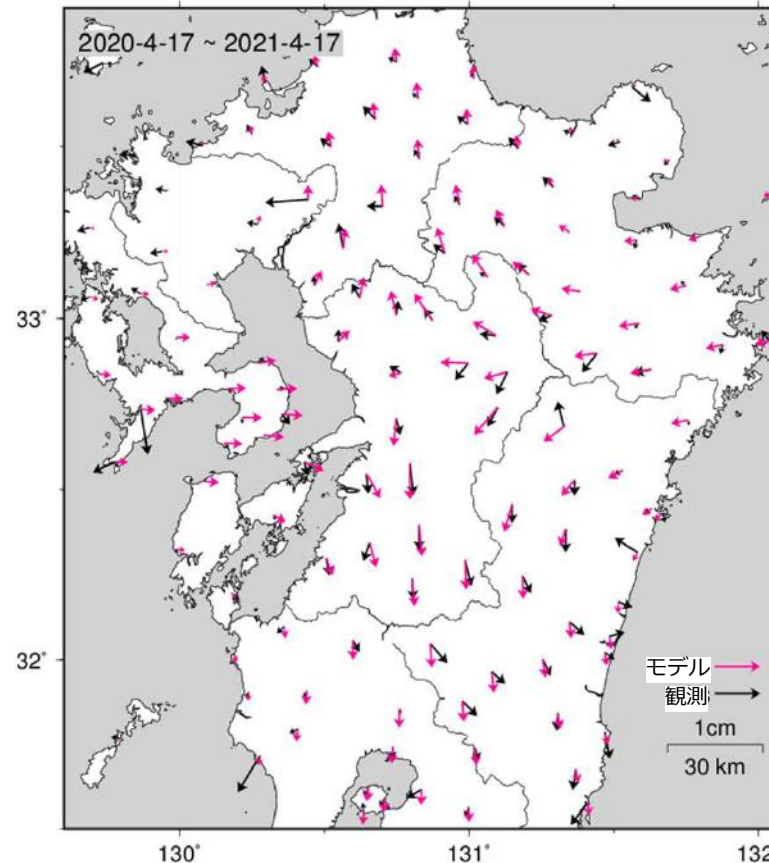
- ・平成28年(2016年) 熊本地震の余効変動

弾性層25km



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

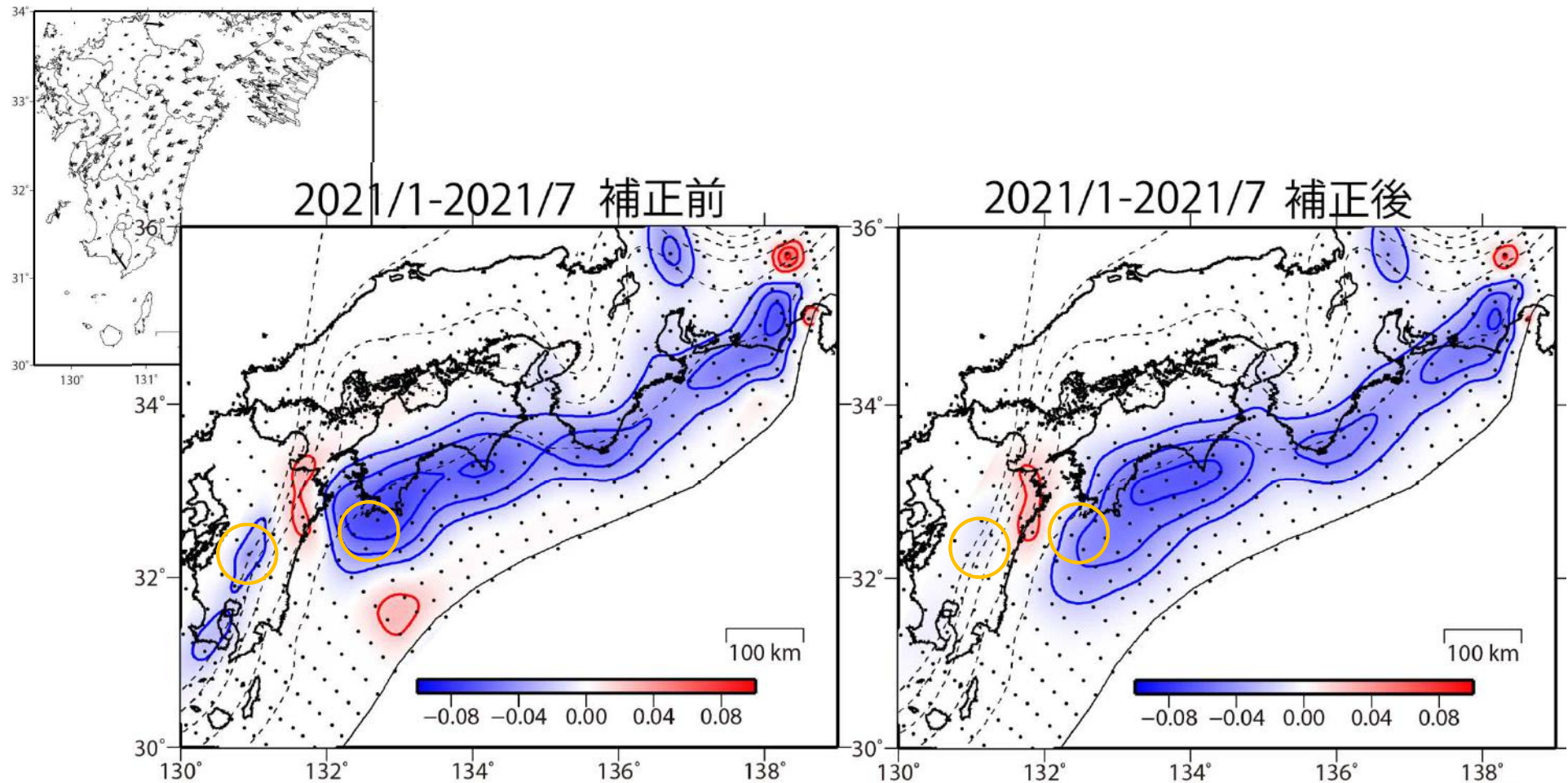
地震4年後から一年間の変動



水藤・他(2017);水藤(2022)

2. プレート間の固着状態の推定

平成28年(2016年)熊本地震の余効変動をモデルを反映



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

(C) プレート内部変形の把握

これまでの成果と今後の予定 (ケース4)

青：実施済
赤：実施予定

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
- ・余効変動モデルの構築・高度化

【現実的な地下構造の考慮 (例) 別府島原地溝帯 (Pollitz et al. 2017)】

- ・干渉SAR時系列による余効変動の時空間分布の把握
- ・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、先行研究の反映

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

南海トラフ地震における地理院の役割：

南海トラフ周辺の地殻活動をより正確に把握し、地殻変動の現状およびプレート間の状態に関する正確な情報を提供することによって、地震発生可能性の評価に貢献する

(本研究により)

- A. 地震直後に粘弾性緩和を考慮した余効すべりの情報が提供可能となる。
- B. 長期間のプレート間すべりに加えて、短期間のプレート間すべりについてもGNSSにもとづく情報が提供可能となる
- C. より精度の高いプレート間固着の情報が提供可能となる



プレート間の状態に関して、よりよい推定が可能となり、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）の評価に貢献できる。

- 概ね予定通りに進捗している。
- 中間評価の時点で以下のような課題が明らかになった。

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
→異なるデータセット（昭和南海・東南海地震後の測量データ、2004年紀伊半島沖後のGNSSデータなど）に基づくモデルの比較・検討を行う予定

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
- すべり推定の時間分解能を向上するため、高時間分解能GNSS座標解の活用が必要

課題C)

- 干渉SAR時系列解析における**想定外のバイアス**（大気遅延誤差の残留分も含む）の解消に向けた検討が必要
- 海底地殻変動データの取り込みが必要

本研究成果のうち

- プレート間すべりの推定で検知した短期的・長期的ゆっくりすべり



南海トラフ沿いの地震に関する評価検討会、地震調査委員会、
地震予知連絡会等で引き続き報告し、地震発生可能性の評価に貢献

- 今後南海トラフ周辺の地下構造モデルを用いて計算される

過去の大地震及び想定巨大地震の粘弾性緩和による地殻変動のモデル計算値



特別研究「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」のなかで基礎データとして活用

以下参考

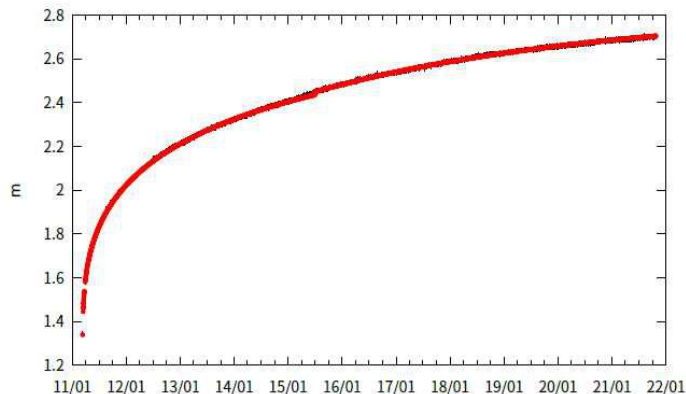
● 余効変動・余効すべり・粘弾性緩和とは？

余効変動は、規模の大きい地震の発生後に震源域周辺で長期間観測される、ゆっくりとした地殻変動である。

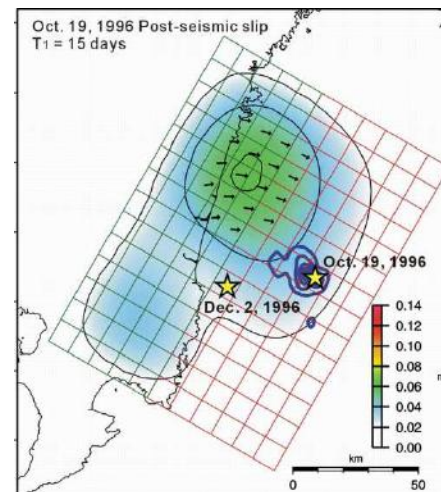
余効変動の発生要因として主なものが**余効すべり**と**粘弾性緩和**である。

余効すべりは、地震断層の周辺領域で起こるゆっくりとしたすべりである。

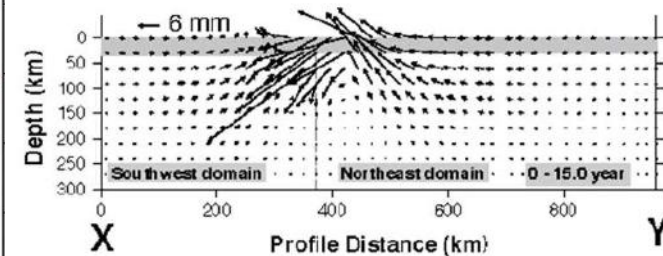
粘弾性緩和は、地下深部の岩石が、地震によりかかった力に応じてゆっくりと数十年スケールで流動する現象である。



余効変動の例(電子基準点宮古；東西)



余効すべりの例(Yagi et al., 2001)

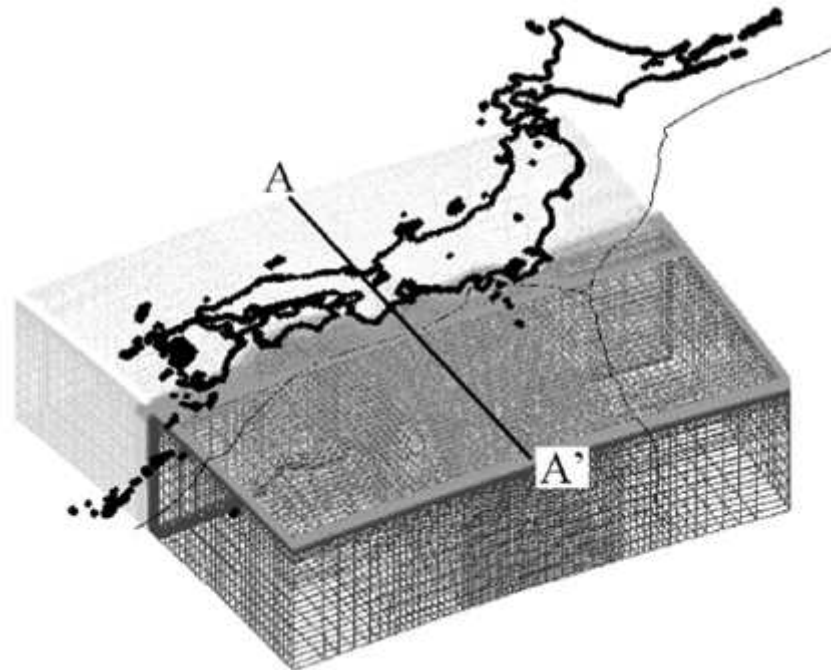


粘弾性緩和の例(Pollitz, 2015)

● 有限要素法とは？

有限要素法は、計算対象（本研究の場合地球）を四面体などに代表される細かい要素（メッシュ）に分割し、適切な物性（剛性率、粘性など）を与えた上で、支配方程式を満たす解を近似的に計算する方法。

本研究では、断層すべりによる力がかかったときの地球の変形を調べている。要素の分割においては、要素の形状を適切に保ちつつ分割する、力が集中する場所をより細かく分割する、など最新の注意が必要となり、高度な技術が要求される。



有限要素メッシュの例（水藤, 2017に加筆）

• プレート間の固着状態の調べ方

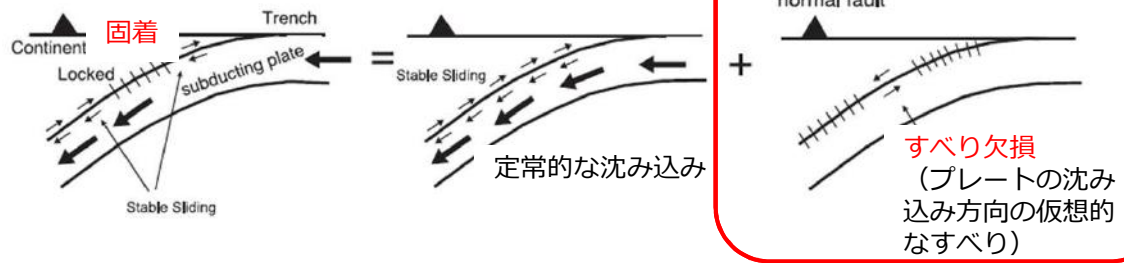
プレート間の固着により陸側のプレートが引きずられる効果は、固着している部分が仮想的にプレートの沈み込み方向にすべっているとして表現できる（すべり欠損モデル）。

観測された地殻変動から、プレート内部変形の影響を適切に除外したうえですべり欠損を推定することで、固着状態を知ることができる。

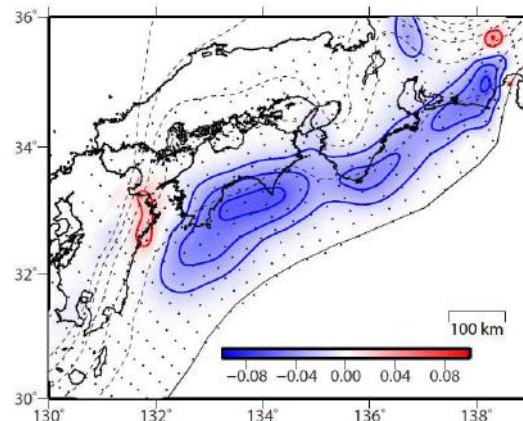


プレートの沈み込み方向

GEONETで観測された地殻変動



すべり欠損モデルの考え方（西村, 2011に加筆）



固着の強さ。青いほど固着が強い（=プレート沈み込み方向の仮想すべりが大きい）