

(1) 実施機関名：

京都大学防災研究所

(2) 研究課題（または観測項目）名：

（和文）測地・地震観測データに基づく地殻内地震長期予測手法の高度化

（英文）Development of long-term forecast methods for crustal earthquakes using geodetic and seismicity data

(3) 関連の深い建議の項目：

2 地震・火山噴火の予測のための研究

(1) 地震発生の新たな長期予測（重点研究）

イ. 内陸地震の長期予測

(4) その他関連する建議の項目：

1 地震・火山現象の解明のための研究

(3) 地震発生過程の解明とモデル化

(5) 地震発生及び火山活動を支配する場の解明とモデル化

イ. 内陸地震

2 地震・火山噴火の予測のための研究

(2) 地震発生確率の時間更新予測

ア. 地震発生の物理モデルに基づく予測と検証

イ. 観測データに基づく経験的な予測と検証

5 分野横断で取り組む地震・火山噴火に関する総合的研究

(4) 内陸で発生する被害地震

6 観測基盤と研究推進体制の整備

(1) 観測研究基盤の開発・整備

ア. 観測基盤の整備

イ. 観測・解析技術の開発

(5) 本課題の5か年の到達目標：

現在、日本国内の地殻内地震の長期予測は主に活断層調査に基づく過去の地震発生履歴に基づいて行われているが、複数のデータや手法を統合した予測を行うことで、より高精度な地震長期予測モデルを構築できることが先行研究で示されている。このため、本研究では、地殻内地震の長期予測の高度化に寄与することを目指し、測地観測データ（GNSS及びInSAR）や地震活動データに基づく地殻内地震の長期予測手法について、日本列島における予測モデルの高度化を行う。活断層評価に基づく従来の長期予測を含む複数の予測モデルの結合方法を検討し、地震本部が提供する地震動予測地図の高度化に貢献することを目指す。さらに、地震やスロースリップイベント等の地殻活動の時間変化を反映した中期予測について、複数の地域におけるシナリオを検討する。

(6) 本課題の5か年計画の概要：

1. 測地データを用いた定常地震の予測の高度化

・時間変化しない（定常活動）地殻内地震の予測については、GNSSなどの測地データから計算されるひずみ速度を用いて地震発生確率を計算する手法の有効性を今期の観測研究計画で実証した。しかし、計算に用いるひずみ速度以外のパラメータにおいては、地域性が存在するものの、これらが十分に検

討されていない。例えば、測地観測に基づくひずみのうち地震によって解放されるひずみの割合や、地震活動解析から推定されるマグニチュード分布などがそのパラメータとなる。これらの地域性を考慮に入れた予測の有効性を検討するとともに、項目4で実施する多様な測地データを用いたひずみ速度推定手法や地震発生確率計算手法の改良に継続的に取り組む。

- ・余効変動などの影響を含む長期間のGNSSデータを用いて変位速度を安定的に求める手法や観測されたひずみ速度からプレート間カップリングに伴う弾性変形や過去の大地震に伴う粘弾性緩和を補正する手法について標準的な計算手順を整備する。

- ・測地、地震活動及び活断層等の複数の手法に基づく長期予測結果を比較し、その解釈を試みる。また、複数の予測結果の結合方法について検討し、妥当性の検討を行う。

2. 地震活動データを用いた定常地震の予測の高度化

- ・地殻内地震のマグニチュード分布（グーテンベルグ・リヒター則のb値や最大マグニチュード）の地域性と時間変化を検討する。

- ・地震カタログにおける地震検出率の地域性と時間変化を検討する。

- ・リアルタイム震源データを取り入れてデータ同化・パラメータ最適化により予測精度の向上を図る。

3. 地殻活動の時間発展を考慮した地震予測の高度化

- ・多くの事例研究を通じた速度および状態依存型クーロンモデル（RSクーロンモデル）の改良。震源データの質・量ともに優れる2000年以降の日本列島の大地震と広義の余震活動の後ろ向き予測（retrospective forecast）を通じてパラメータの地域特性の解明を図る。

- ・GNSSデータに基づくひずみ速度（応力载荷レート）の時間変化を取り入れたRSクーロンモデルの改良。群発地震活動やスロー地震などにもなう応力载荷レート-地震応答の関係をさぐり、上記地震時応力ステップモデルへの組み込みを行う。

4. 多様な測地データを用いた詳細ひずみ速度分布推定や活断層の活動性の検討

- ・地殻内地震の長期予測に用いられるひずみ速度分布の空間解像度は、現在国土地理院のGEONET観測点の密度である25km程度であるが、ひずみ集中帯や活断層の周辺ではより短波長の不均質なひずみ分布があることが想定される。これらの地域で独自のGNSS観測を行なって、ひずみ速度及び地震長期予測分布の空間解像度を向上させる。さらに、民間企業によって整備されたGNSS観測点網や研究機関による観測網のデータも可能な限り収集してGNSS観測点の速度を計算し、空間解像度の向上に努める。

- ・ALOS2やSentinel-1などの現行SARミッションのみならず、次期SAR衛星ミッション(ALOS4、NISARなど)を踏まえたInSAR時系列解析手法の向上を行なって、広域に面的な地殻変動速度分布を算出する。今期の計画において時系列解析や電離層および大気遅延ノイズ軽減の手法の個別要素の開発を行っていたが、次期の計画においては機械学習による新たなノイズ軽減手法を取り入れつつこれらを統合し、さらにGNSS変位データと融合させることとで、広域で面的な3次元変位及び2次元ひずみ速度分布の高精度推定を行う。これと平行して、個別のノイズを原理的に軽減する手法を大規模化・高精度化する取り組みも行い、変位・歪の推定精度を高める。

- ・GNSSやSAR等の多様な測地データから得られた変位速度分布から、主要活断層帯の深部すべり速度、浅部固着率などの活動性を表すパラメータを推定し、地質学的や地震学的推定結果との比較とその解釈を行う。

各年度の実施計画は、令和6年度:各テーマにおける観測解析の実施及びデータの整理、令和7年度:、令和8年度:各テーマにおける観測解析の実施、令和9年度:各テーマにおける観測解析の実施、テーマ1-3間の予測の統合手法の検討、令和10年度:地震発生確率算出手法の標準化及び成果のとりまとめ。

(7) 令和7年度の成果の概要:

- ・今年度の成果の概要

1. 測地データを用いた定常地震の予測の高度化

ランダムフォレストによる地震発生予測を行い、地震の発生場所の予測には歪速度の貢献度が高いという結果が得られた。活断層の空間分布に適合した高密度な歪速度データを作成するため、民間GNSS観測点も用いた歪推定手法の検討を行った。また、ロバストな決定木予測手法であるLight GBM法の導入を行うためモデルの組み立てや評価手法の検討を実施した。

一方、GNSS速度場から地殻内の「弾性歪」と「非弾性歪」を分離推定し、それらの割合に基づく物理指標 β_{phys} を導入して、内陸地震発生確率の空間分布推定手法を整備・検証した。先行研究では、地震で解放される歪の割合（地震化効率）を経験的・空間一様に仮定する制約があったが、この手法で

は Noda & Matsu'ura (2010) の枠組みにより3次元弾性歪・非弾性歪を分離し、 β_{phys} を空間不均質に推定することで、地域差を取り込んだ地震発生確率推定を可能にした(図1)。

さらに、1次元水平成層構造を仮定した粘弾性緩和計算プログラム(VISCO1D)を用いて、過去に発生した巨大地震の余効変動が現在観測されているGNSS速度場にどの程度影響しているかを評価した。内陸と沈みこみ帯のケースにおいてマグニチュードごとに有意な地殻変動が継続する期間の計算を行い、 M_w 7程度の内陸地震の場合は余効変動は数十年以内にほぼ収束するのに対し、 M_w 9の海溝型巨大地震の場合は数百年間、有意な変動が継続することがわかった。

2. 地震活動データを用いた定常地震の予測の高度化

階層時空間ETAS (HIST-ETAS) モデルを用いて全日本の地震活動に対する背景強度を算出し、その空間分布がM7クラス地震の震央位置と良く対応することを明らかにした。さらに、内陸部および南千島・日本海溝周辺では、背景強度と繰り返し地震の活動度との間に顕著な相関が認められた(図2)。

4. 多様な測地データを用いた詳細ひずみ速度分布推定や活断層の活動性の検討

電離層擾乱除去手法(split-spectrum法)の改善および解析ツールLiCSBASのALOS-2への適用試行により、InSAR解析の精度と汎用性を向上させた(図3)。糸魚川-静岡構造線北部から飛騨山脈南方延長に至る歪速度場を高分解能で推定して、地質構造との対比を行うとともに、能登半島地震後も飛騨山脈北部で歪集中が継続していることを検出した。トルコ・東アナトリア断層周辺では地震間・地震時・地震後の各変動を分離し、それぞれの断層すべり領域が空間的に棲み分けられていることを明らかにした(図4)。また、四国東部の中央構造線周辺においてプレート固着に起因する地殻変動を確認し、広域変動と断層周辺の変動を分離評価するための基盤を構築した(図5)。また、ソフトバンク独自基準点と国土地理院GEONETおよび京都大学のGNSS観測データの統合解析から、京阪神地方の地震間詳細地殻変動分布を推定した(図6)。有馬-高槻断層帯周辺に顕著なひずみ速度の集中が見られ、16km以深で7-9mm/年程度の右横ずれ深部滑りが推定された。

・「関連の深い建議の項目」の目的達成への貢献の状況と、「災害の軽減に貢献する」という目標に対する当該研究成果の位置づけと今後の展望

測地観測データを用いた予測に関しては、測地観測に基づく地殻内変形の「蓄積(弾性)／散逸(非弾性)」を分離して扱うことで、長期確率推定の根拠(地震化効率)を経験則から物理モデルへと接続し、地域差を反映した長期予測手法の高度化に資することができ、活断層評価や地震履歴が乏しい地域でも、GNSS観測から得られる歪場に基づき「相対的に高リスクな領域」を抽出し得る点で、監視・調査優先度付けや防災計画(重点地域設定)の基礎情報を補完する。今後は対象地域の全国展開、プレート境界影響の取り扱い、推定誤差(不確実性)の定量化を進める。

地震活動データを用いた予測に関しては、海域における地震発生の予測強度(空間確率)とGutenberg-Richter則に基づくシミュレーションにより、各地の長期的な津波リスクなどを定量的に評価できる。

(8) 令和7年度の成果に関連の深いもので、令和7年度に公表された主な成果物(論文・報告書等)：

・論文・報告書等

Ogata Y, 2026, Seismicity insights and forecasting with Delaunay-based hierarchical models, 78, 25, doi:10.1186/s40623-025-02351-1, 査読有, 謝辞無

尾形良彦, 2025, 統計地震学の現場から: ETASモデルで地震活動を読み解く(招待論文), 月刊統計 2025年12月号, 36-43, 査読有, 謝辞無

熊澤 貴雄・尾形 良彦, 2025, 日向灘沖南部の余震活動について, 地震予知連絡会会報, 114, 429-439., 査読無, 謝辞無

尾形良彦, 2025, 地震予測の統計地震学の進歩と課題: 阪神・淡路大震災から30年, 地震予知連絡会会報, 113, 480-489, 査読無, 謝辞無

・学会・シンポジウム等での発表

尾形 良彦, 2025, 地震予測における異常現象の確率評価と実用化への課題, 日本地震学会2025年度秋

季大会, S22-12

熊澤 貴雄, 尾形 良彦, 2025, 余震活動におけるETASパラメータ変動についての予備的考察, 日本地震学会2025年度秋季大会, P09-12

尾形 良彦, 2025, 大地震の確率予測の展望 — 多項目予測法の活用 —, 2025年度統計関連学会連合大会, 4FPM2-01

熊澤 貴雄, 尾形 良彦, 2025, 点過程モデルを用いた異常地震活動の解析と余震の収束性について, 2025年度統計関連学会連合大会, 4CPM1-03

尾形 良彦, 2025, 階層型時空間ETAS (HIST-ETAS) モデルを用いた広域地震予測および診断解析, 日本地球惑星科学連合(JpGU)2025年大会, S-SS12

伊藤 武男, 2025, GNSSを用いた非弾性変形トモグラフィー手法による変形様式の推定, 日本地球惑星科学連合(JpGU)2025年大会, S-GD03

(9) 令和7年度に実施した調査・観測や開発したソフトウェア等のメタ情報：

(10) 令和8年度実施計画の概要：

1. 測地データを用いた定常地震の予測の高度化

Light GBMを利用した地震発生予測スキームの開発を継続する。また、非弾性変形を考慮した内陸地震の発生確率分布の計算では、(1) 対象地域の拡張：解析対象を四国等の一地域から全国へ拡張し、主要構造帯・内陸地震多発域での比較検証、(2) 不確実性の定量化：観測誤差・モデル化誤差・正則化依存性を整理し、確率推定に信頼区間（または感度解析）の付与、(3) プレート境界影響の取り扱い：プレート境界固着・SSE等の寄与をより明示的に扱い、内陸地震の長期確率へ混入する成分の評価を実施する予定である。

2. 地震活動データを用いた定常地震の予測の高度化

宇津・安芸による多項目地震予測法を発展させ、HIST-ETASモデルの背景地震空間強度（今年度までの成果）を基準に、大地震確率のリアルタイム予測基盤を整備する。短期・中期・長期予測を併せた時空間的確率利得を定量的に評価する。

4. 多様な測地データを用いた詳細ひずみ速度分布推定や活断層の活動性の検討

糸静線、新潟神戸歪集中帯、中央構造線、道北等の主要活断層帯において、InSARと超稠密GNSSを統合した高解像度歪速度場の検出と変動地形との対比を継続する。能登半島地震後の応答特性の精密検出に向けたGNSS観測網の維持、下部地殻の粘弾性変形を考慮したモデリングの導入、プレート固着起因の広域変動と断層周囲の局所変動の分離手法の検討も実施する。また、民間GNSSデータを利用した地震間地殻変動の詳細分布の解明についても引き続き実施する。

(11) 実施機関の参加者氏名または部署等名：

西村卓也（京都大学防災研究所）

他機関との共同研究の有無：有

高橋浩晃（北海道大学大学院理学研究院）、高田洋一郎（北海道大学大学院理学研究院）、遠田晋次（東北大学国際災害研究所）、福島洋（東北大学国際災害研究所）、青木陽介（東京大学地震研究所）、尾形良彦（統計数理研究所）、伊藤武男（名古屋大学大学院環境学研究科）

(12) 公開時にホームページに掲載する問い合わせ先

部署名等：京都大学防災研究所

電話：

e-mail：

URL：<https://www.dpri.kyoto-u.ac.jp/>

(13) この研究課題（または観測項目）の連絡担当者

氏名：西村卓也

所属：京都大学防災研究所地震災害研究センター

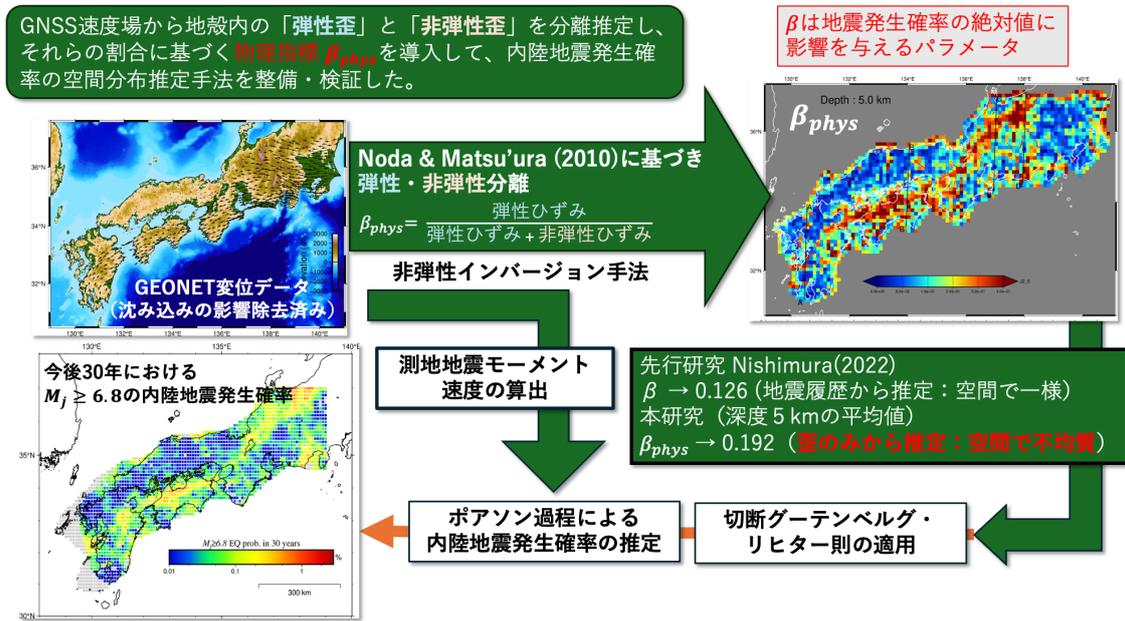


図1. 非弾性ひずみを考慮した内陸地震発生確率の計算方法

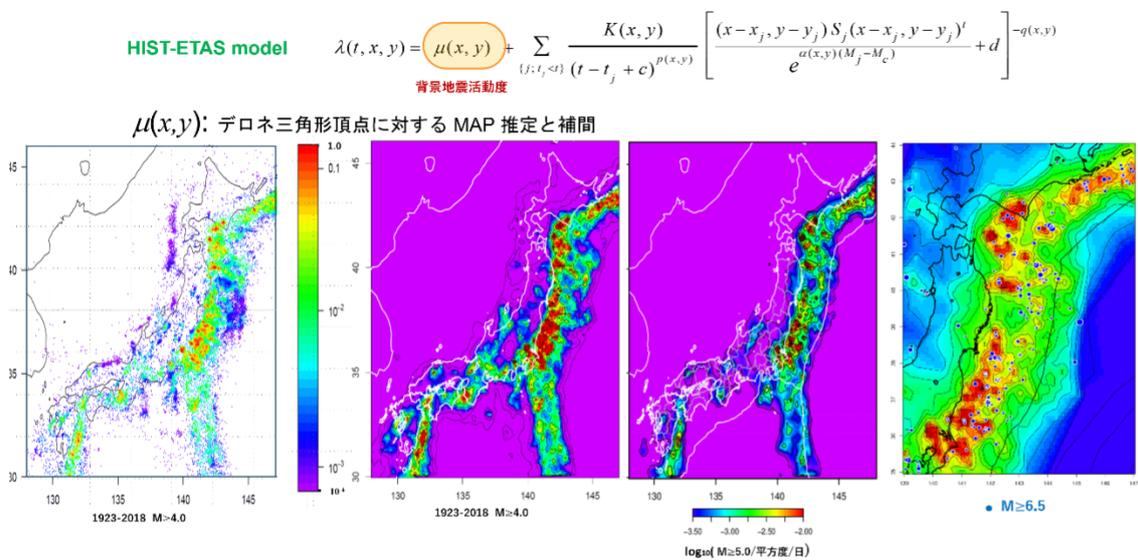


図2. 階層時空間ETASモデルを用いて推定した全日本の背景地震活動度

電離層擾乱の影響を軽減する手法

(a) 干渉画像(補正なし)

(h) 干渉画像(補正後)

Nagaoka et al. (2025)

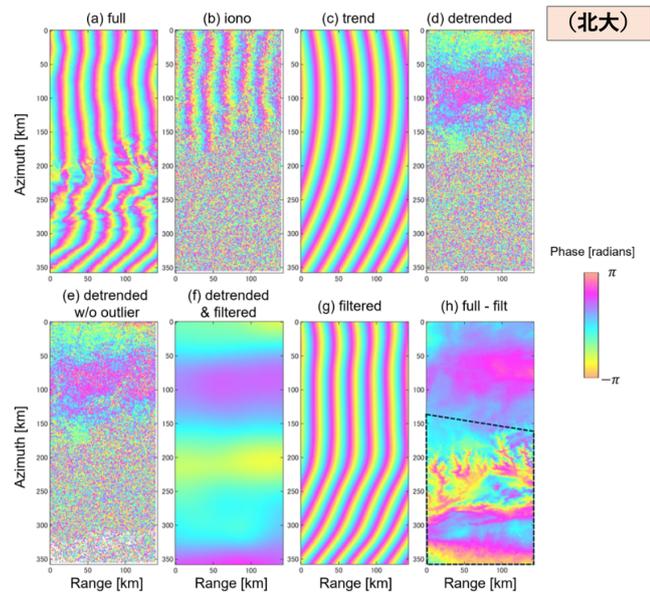
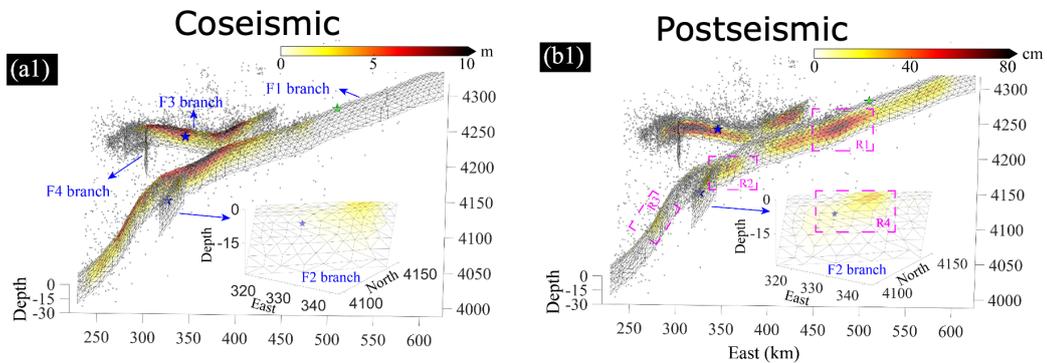


図3. InSARの電離層擾乱を軽減する手法 (Split-spectrum法) の適用例

After slip of the 2023 Kahramanmaraş earthquake sequence

(東大地震研)



- Coseismic slip and afterslip are complimentary.
- Afterslip appears to be deeper than the coseismic slip.

図4. 2023年Kahrmanmaras地震(トルコ) の地震時すべりと余効すべりの比較

- ・データ：ALOS-2, 北行軌道（西上空からの観測）
- ・解析：RINCで干渉解析、LiCBASで時系列解析
- ・対象領域：四国東部 (Path/Frame 21/2940)
- ・対象期間：2014/09/26~2025/03/14

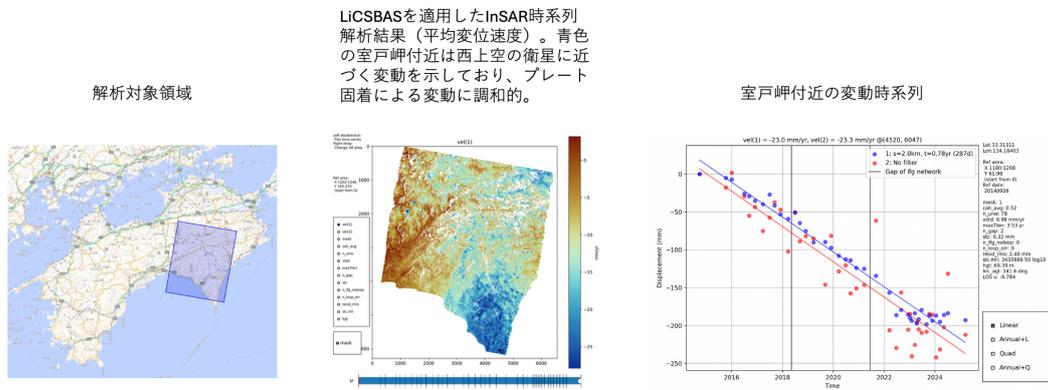


図5. InSAR時系列解析によって得られた室戸岬周辺の地震間地殻変動

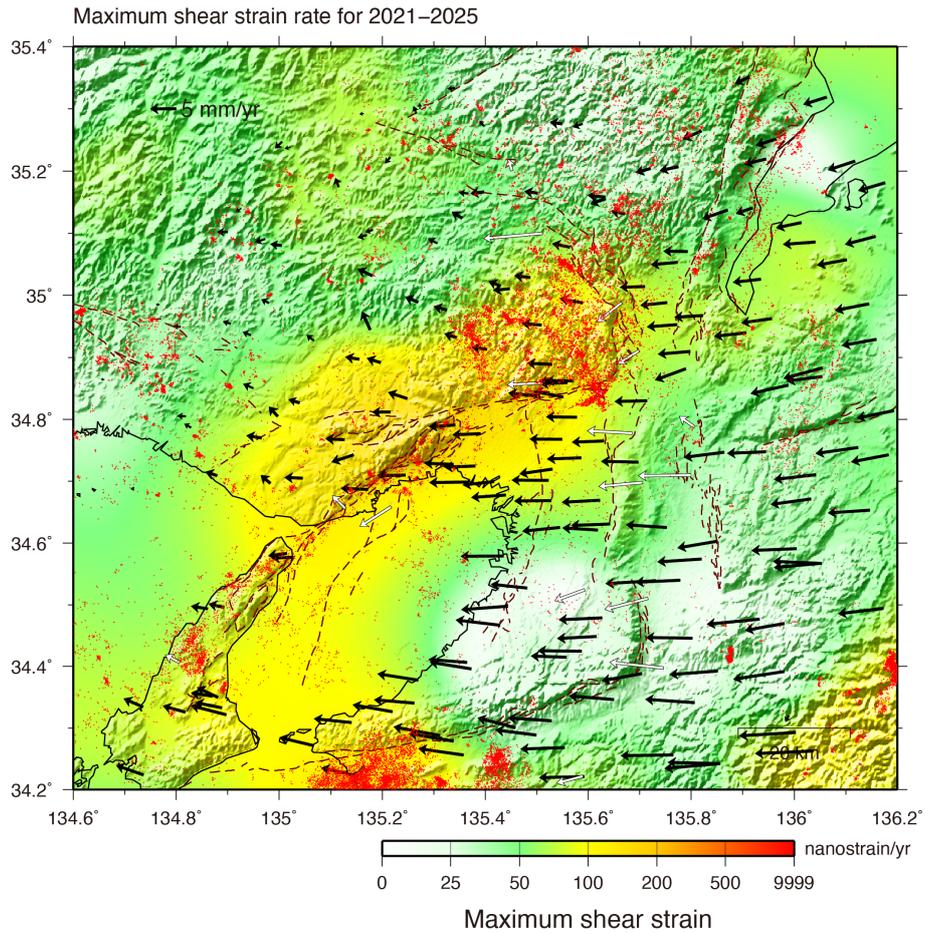


図6. ソフトバンクGNSSデータを用いた京阪神地方の変位速度と最大剪断ひずみ速度の分布

