

## 2 (1) 南海トラフ沿いの巨大地震

「南海トラフ沿いの巨大地震」総合研究グループリーダー 伊藤喜宏  
(京都大学防災研究所)

### 1. 概要と目的

内閣府および地震調査推進本部により南海トラフ沿いの巨大地震の地震シナリオおよび強震動予測は既に公開されている。しかしながら、従来の地震シナリオおよび強震動予測は過去の観測記録および歴史資料に基づき構築されたものであり、現状の測地・地震観測により得られた知見を十分反映したものといえない。南海トラフ巨大地震総合研究グループ（以下、南海総合G）では、南海トラフ巨大地震に関連した50課題の成果に基づき、地震・測地観測網で得られたプレート間固着やスロー地震の知見に基づいた南海トラフ沿いの巨大地震の広域震源モデルの構築に必要な情報を整理する。その上で地震波および津波の伝播モデルに基づき、西南日本地域の強震動および津波浸水モデルを提示するスキームの検討と構築を目的とする。

### 2. 拠点間連携のフレームワークの利用

前5か年計画の地震研究所—防災研究所拠点間連携（H26-H30）では、地震時のリスク評価の高精度化を目的として、震源モデル・シナリオ、地震波速度・減衰構造、浅部地盤応答、および構造物の脆弱性の各モデルを総合的に考慮したリスク評価の手法の提案および高精度化に関する研究を進めた。特に各課題が提案する複数の最適なモデルを組み合わせて不確実性を含む地震リスク評価の計算手法が提案された。南海総合Gでは、前計画の拠点間連携で得られた成果に基づき、各課題で得られた成果を実際に使用して、震源モデル・シナリオ—地震波伝播—工学的基盤までの地震動の計算に向けたスキームの整理と構築を目的とする（図1）。その上で、必要なアウトプットを関連課題の要請に基づき情報を整理する。前5か年計画の拠点間連携で研究対象とした大阪府および高知県について、浅部地盤応答も含めた地震動を求めて、構造物の脆弱性評価や地すべりのリスク評価などへの活用を目指す。

### 3. 令和5年度の成果：成果の社会実装・アウトリーチ・ステークホルダーへの還元

今年度は、次年度以降の新たな5か年の計画に向けて、成果の社会実装・ステークホルダーへの成果の還元を目的とした活動を実施した。

日向灘では、30-35年間隔で繰り返しM7クラスのプレート境界型地震が発生している。また、プレート内でもM6-7の地震が度々発生する。1968年にはM7.5の地震が発生し、津波も観測された。特に1662年にもM7.6の日向灘地震（外所地震）が発生したことが知られている。このような背景の下、2023年8月30日に宮崎県との共催で南海トラフ地震臨時情報に関する自治体向けのセミナーを実施した。宮崎県内の特に沿岸部の市町村の防災担当者らを対象として、「臨時情報に関する解説」、「臨時情報の対応計画に関する全国調査報告」の後、宮崎県と新富町における事例報告を参加者で共有した。その後、参加者を複数のグループに分けた後、グループ毎で臨時情報が発表された場合の自治体対

応の問題点の共有を図るワークショップを開催した。

メキシコ太平洋沿岸部は、将来の巨大地震・津波に伴う災害リスクが高い地域である。特にゲレロ州沖合のゲレロ地震空白域では過去100年間でM8を超える地震が発生しており、将来の巨大地震および津波に伴う災害の軽減に向けた研究・開発が急務となっている地域の一つである。近年、ゲレロ地震空白域の一部ではテクトニック微動の発生が知られており、またその深部延長部では、様々なサイズのスロー地震の発生がよく知られている。2024年2月26-27日にワークショップ「International Joint Workshop on Slow-to-Fast Earthquakes in Mexico」をメキシコシティのメキシコ国立自治大学で開催した。日本から22人の参加者があり、メキシコからの参加者も合わせて68名が参加した。ワークショップの中では南海トラフ沿いのスロー地震、巨大地震及びそれらの相互作用に関する研究報告に加えて、メキシコにおける地震津波災害軽減に向けた学際的な研究報告や社会心理学的な視点からの地震津波防災に向けた国際的な取り組みが紹介された。その上で、研究成果の社会への実装と還元について課題を共有して議論を進めた。

#### 4. 5か年の成果：地震・津波災害の予測の高度化に向けた5か年の取り組み

##### (1) 地震・地殻変動モニタリングに基づく震源モデル・シナリオの高度化

昭和東南海・南海地震やそれより以前の震源モデルに基づく地震シナリオに加えて、現在の測地学・地震学モニタリングにより得られる知見に基づく地震シナリオの作成の準備が必須である。特に、陸上GNSSおよび海底GNSS-A観測から得られるデータに基づき、将来の地震時すべり域の設定とシナリオの検討が重要である。最近、地震間にGNSS観測で得られる地殻変動記録に基づき地震間のすべり欠損をモデル化して巨大地震の破壊シナリオを提案する新たな手法が示された(防災科学技術研究所[課題番号:NIED03], Noda et al., 2021)。ここでは、GNSS記録から予測される断層上の歪エネルギーと断層すべりにより解消される歪エネルギーの差に注目し、エネルギー収支の観点から起こりうるシナリオが検討される。応力蓄積期間を150年として、起こりうるシナリオを複数評価した結果、そのシナリオの1つは過去の南海地震で得られたモデルとよく一致することが示された。これらのモデルには南海トラフ全体を破壊するシナリオも含まれる。すなわち、地殻変動や地震のモニタリング結果をリアルタイムで取り入れ、起こりうるシナリオの逐次評価が重要となる。

スロー地震のモニタリングおよび過去の研究事例に基づき、破壊の開始点の想定も必要であろう。今後は、特に東北地方太平洋沖地震やメキシコ、チリのプレート間大地震に先行したスロースリップと破壊の開始点の位置関係を参考に(例えば、京都大学防災研究所[課題番号:DPRI01], Cruz-Atienza et al., 2021), 破壊の開始点をいくつか設定した上で、強震動の予測に至るプロセスの検討も重要となる。

##### (2) 地下構造とプレート境界モデルの高度化

地下構造、特にプレート形状に関する研究は、震源モデルの高度化に加えて、強震動予測の上でも重要となる。特に、西南日本の深部のプレート境界モデル(京都大学防災研究所[課題番号:DPRI02])や、浅部のJAMSTECによる構造探査に基づくプレート境界モ

ルの構築状況（海洋研究開発機構[課題番号：JAMS01]）を整理する必要があった。従来の陸海域で実施された地震波構造探査に基づくモデルや、レシーバ関数、地震波トモグラフィーや、それらをコンパイルして得られた結果から、プレート境界モデルがいくつか公開されている（例えば、海洋研究開発機構[課題番号：JAMS01]、Bassett et al., 2022）。また、全国1次地下構造モデル（JIVSM）は、地震調査研究推進本部により作成され、防災科研では地震ハザードステーション（J-SHIS）で公開する全国地震動予測地図の作成で利用されている。

特に紀伊半島から四国下のプレート境界モデルの調査を、リニア地震計アレイ観測記録に基づくレシーバ関数解析により構築した。ここでは、スラブ上面に相当する低速度層上面からの変換波が四国側から中国地方中央部までを詳細にイメージングした。さらに、その下部には海洋モホ面に相当する高速度層上面からの変換波が、同様に中国地方中央部までイメージングされた。結果として、特に四国中央部から瀬戸内海、中国地方中央部まで低角に沈み込む明瞭なフィリピン海プレートが確認された（京都大学防災研究所[課題番号：DPRI02]）。

深部のスラブ形状について従来の結果と比較したところ、全体の傾向は一致するものの、詳細に見るといいくつかの地域や深さにおいて、相違点が見出された。具体的には、四国西部の足摺岬から八幡浜に至るプレートの沈み込み方向にはほぼ並行な測線では、特に深部（八幡浜の直下）で従来のモデルよりもプレートの沈み込み角が大きい。また徳島から八幡浜に至る沈み込み方向にはほぼ直交する測線では、徳島の直下付近でプレート上面の深さが従来のモデルと比べて5 km以上深い。特に室戸岬から倉敷に至る測線（プレートの沈み込み方向にはほぼ並行）では、プレート上面の深さが従来のモデルと比べて10 km以上深い（京都大学防災研究所[課題番号：DPRI02]）。

結果として、海側、つまり沈み込み帶浅部では、従来のモデルと大きな差異は見出されておらず、先に述べたすべり欠損の見積もりに際して従来のプレート境界モデルの妥当性が検証された。深部のプレート境界モデルは精査されるべきであるが、災害軽減の視点として、特に震源モデルの構築においては、特に深部のスロー地震発生域と巨大地震との関連は未だ不明であり、今後より慎重に議論されるべきである（京都大学防災研究所[課題番号：DPRI01]、伊藤、2023a、伊藤、2024）。

### （3）地盤応答モデルの高度化

地盤応答モデルの高度化では、既に構築された地盤応答モデルが注目する周波数帯域の応答をどの程度再現できるかが、強震動予測の上で重要となる。ここでは、石川県邑知潟平野の地盤応答調査と強震動シミュレーションの事例に着目する（拠点間連携共同研究[課題番号：CTOC27]）。また、令和元～3年度に文部科学省が重点的な活断層調査の一環として実施した「奈良盆地東縁断層帶における重点的な調査観測」により京都盆地と奈良盆地で得られた浅部地盤構造モデルにも着目する（京都大学防災研究所[課題番号：DPRI08]）。

石川県の邑知潟平野は邑知潟断層帶の北西に位置する。邑知潟断層帶は今後30年の地震発生確率が日本の主な断層帶の中でもやや高いグループに属しており、その規模は地震調査研究推進本部によりM7.6程度と推定されている。邑知潟平野で常時微動観測を行

い、単点観測による微動 H/V スペクトルとアレイ観測による位相速度分散曲線から 3 次元地盤構造モデルを構築した。また、邑知潟断層による想定地震ケース（地震調査研究推進本部）を用いて、新たに得た 3 次元地盤構造モデルと J-SHIS 深部地盤構造モデルによる強震動シミュレーションの結果を比較し、強震動シミュレーションにおける地盤構造の影響を調べた。その結果、新たな 3 次元地盤構造モデルを用いたシミュレーションでは、J-SHIS モデルと比べて、邑知潟平野内で最大速度 (PGV) が 0.6 m/s を超える範囲が広がること、特に邑知潟平野の中部から南西部の盆地南東端に沿って PGV が大きくなることが確認された（拠点間連携共同研究[課題番号：CT0C27]）。

南海トラフ大地震を含む将来の大地震の強震動評価の高度化のため、西南日本の堆積平野や堆積盆地の地盤構造モデルの高度化を進めた。特に奈良盆地・京都盆地に関して、反射法地震探査・ボーリング・微動観測のデータを用いることで、水平方向 250 m メッシュ、深さ方向 1 m メッシュでの新たな浅部地盤構造モデルの構築に成功した（京都大学防災研究所[課題番号：DPRI08]）。

奈良盆地中央付近を流れる大和川付近では、その南側で層厚が相対的に厚く 40 m に達する。ここでは工学的基盤面 (S 波速度 350 m/s) に SH 波を鉛直入射させ、Haskell Matrix 法で地震応答を計算することで、周波数別の地盤增幅率を求めた。その結果、浅部地盤構造による地盤增幅率は、周波数 1 Hz では調査対象領域全体で小さく、大阪平野で先に得た結果と異なっていた。2 Hz では、京都盆地南部の三川合流域周辺や奈良盆地南部での增幅が顕著であり、3 Hz 以上となると、京都府南部の木津川流域（木津川低地帯）も含め、ほぼ対象領域全体で地震動の增幅が見られた。

現在、J-SHIS 深部地盤構造モデルの公開に伴い、全国的に地盤応答モデルの構築が可能となった。一方で、建物被害の予測に際して特に重要な 1-2 Hz 付近の地盤応答モデルの高度化に向けて、今後も地域毎のより詳細な調査が必須である。建物や人的被害の地震リスク評価の高度化に向けて、地盤構造の調査及びモデル化を今後も強力に推進すべきである。

#### （4）津波浸水モデルの高度化

津波浸水モデリングの高度化に関して、1662 年日向灘地震（外所地震）による津波浸水モデルに注目する（京都大学防災研究所[課題番号：DPRI01]，Ioki et al.，2023）。日向灘では、30-35 年間隔で繰り返し M7 クラスのプレート境界型地震が発生している（例えば、京都大学防災研究所[課題番号：DPRI01]，Yamashita et al.，2021）。また、プレート内でも M6-7 の地震が度々発生する。1968 年には M7.5 の地震が発生し、津波も観測された。1662 年にも M7.6 の日向灘地震（外所地震）が発生したことが知られている。この地震による被害は現在の宮崎市南部で特に大きく、宮崎市青島と並んで海側に突き出した位置にあった外所村が海中に没したとの記録が残されている。

宮崎県沿岸部での津波堆積物の調査結果に基づき、1662 年日向灘地震の震源モデル及び津波波源モデルを構築し、津波浸水シミュレーションにより観察された津波堆積物の分布を説明した。得られた震源モデルは 1968 年日向灘地震の震源域とは重ならず、その南西に位置し、海岸線下の深さ 25 km 付近からからトラフ軸に向かって深さ 10 km の範囲にプレート境界に沿って幅 70 km、長さ 70 km の範囲に広がる。この震源モデルには

1996年10月と12月にそれぞれ発生したM6.9とM6.7の地震の震源域がほぼ含まれる。また、震源モデルの浅部側は、その一部が浅部スロー地震発生域と重なり、すべり量も8mと深部側の2mと比べて大きい（京都大学防災研究所[課題番号：DPRI01]）。

1662年日向灘地震に関して新たに得た震源モデルは直近100年の地震活動のみからの予測は難しく、津波堆積物の調査と津波浸水シミュレーションにより得られた新たな知見として注目すべき成果と言える。さらに重要な点として、得られた知見は、宮崎県の防災担当者らと即時共有され、地震・津波防災の見直しに向けた取り組みが開始された（京都大学防災研究所[課題番号：DPRI01]）。

得られた津波浸水モデルに基づき小中学校等での津波避難訓練を検討するなど、成果の社会実装・アウトリーチ・ステークホルダーへの還元に向けた取り組みが実施されつつあり、理学的な知見で得られた成果を社会に還元できた一つのモデルケースとしても注目に値する。

## 5. 成果の社会実装・アウトリーチ・ステークホルダーへの還元と今後の展望

2024年以降に実施される新たな5か年の計画では、成果の社会実装・ステークホルダーへの成果の還元を目的とした活動が重要となる。

先に述べた日向灘の大地震の成果（京都大学防災研究所[課題番号：DPRI01], Yamashita et al., 2021）を受けて、2023年8月30日に宮崎県との共催で南海トラフ地震臨時情報に関する自治体向けのセミナーを実施した。宮崎県内の特に沿岸部の市町村の防災担当者らを対象として、「臨時情報に関する解説」、「臨時情報の対応計画に関する全国調査報告」の後、宮崎県と新富町における事例報告を参加者で共有した。その後、参加者を複数のグループに分けた後、グループ毎で臨時情報が発表された場合の自治体対応の問題点の共有を図るワークショップを開催した。同様のセミナーやワークショップは、今後も継続的に実施されるべきである。

メキシコ太平洋沿岸部は、将来の巨大地震・津波に伴う災害リスクが高い地域である（京都大学防災研究所[課題番号：DPRI01], 伊藤・吉岡, 2021, 伊藤, 2023b）。特にゲレロ州沖合のゲレロ地震空白域では過去100年間でM8を超える地震が発生しておらず、将来の巨大地震および津波に伴う災害の軽減に向けた研究・開発が急務となっている地域の一つである。近年、ゲレロ地震空白域の一部ではテクトニック微動の発生が知られており（京都大学防災研究所[課題番号：DPRI01], Plata-Martinez et al., 2021），またその深部延長部では、様々なサイズのスロー地震の発生がよく知られている。2024年2月26-27日に学術変革領域研究（A）Slow-to-Fast地震学と共同で、ワークショップ「International Joint Workshop on Slow-to-Fast Earthquakes in Mexico」をメキシコシティのメキシコ国立自治大学で開催した。ここでは、南海トラフ沿いのスロー地震、巨大地震及びそれらの相互作用に関する研究成果の共有に加えて、メキシコにおける地震津波災害軽減に向けた学祭的な研究報告や社会心理学的な視点からの地震津波防災に向けた国際的な取り組みについて情報が共有された。その上で日本とメキシコにおける地震・火山災害の共通の問題点の抽出が重要であるとの理解に至った。

今後は地震・火山災害の軽減に向けた学際的な研究を国際共同研究として推進することに加えて、それぞれの地域で得られる成果の比較研究が重要となろう。

## 成果リスト

- Bassett D., A. Arnulf, S. Kodaira, A. Nakanishi, A. Harding, and G. Moore, 2022, Crustal Structure of the Nankai Subduction Zone Revealed by Two Decades of Onshore - Offshore and Ocean - Bottom Seismic Data: Implications for the Dimensions and Slip Behavior of the Seismogenic Zone, *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 127(10). doi:10.1029/2022jb024992.
- Cruz-Atienza V. M., J. Tago, C. Villafuerte, M. Wei, R. Garza-Giron, L. A. Dominguez, V. Kostogrodon, T. Nishimura, S. I. Franco, J. Real, M. A. Santoyo, Y. Ito, and E. Kazachkina, 2021, Short-term interaction between silent and devastating earthquakes in Mexico, *Nature Communications*, 12(1), 2171. doi:10.1038/s41467-021-22326-6.
- Ioki K., Y. Yamashita, and Y. Kase, 2022, Effects of the Tsunami Generated by the 1662 Hyuga-Nada Earthquake off Miyazaki Prefecture, Japan. *Pure and Applied Geophysics*, 180(6), 1897-1907, doi:10.1007/s00024-022-03198-3
- 伊藤喜宏, 2023, 南海トラフ沿いの巨大地震のメカニズム: 事前の備えと心構え, *日本旅行医学会学会誌*, 18(1), 67-73.
- 伊藤喜宏, 2024, 南海トラフ沿い巨大地震の地震像とスロー地震の関係—その巨大地震への備え日に向けて—, *消防防災の科学*, 155, 5-12.
- 伊藤喜宏, 2023b, SATREPSにおける地震防災分野の国際協力 メキシコ沿岸部の大地震・津波災害の軽減に向けた総合的研究, *日本地震工学会誌*, 48, 19-22.
- 伊藤喜宏・吉岡祥一, 2021, メキシコにおける巨大地震・津波災害の軽減に向けた学際的研究の立ち上げと地震学的成果, *神戸大学都市安全研究センター研究報告*, 25, 145-152.
- Noda A., T. Saito, E. Fukuyama, and Y. Urata, 2021, Energy - Based Scenarios for Great Thrust - Type Earthquakes in the Nankai Trough Subduction Zone, Southwest Japan, Using an Interseismic Slip - Deficit Model. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 126(5), doi:10.1029/2020jb020417
- Plata-Martinez R., S. Ide, M. Shinohara, E. S. Garcia, N. Mizuno, L. A. Dominguez, T. Taira, Y. Yamashita, A. Toh, T. Yamada, J. Real, A. Husker, V. M. Cruz-Atienza and Y. Ito, 2021, Shallow slow earthquakes to decipher future catastrophic earthquakes in the Guerrero seismic gap, *Nature Communications*, 12, 3976, doi:10.1038/s41467-021-24210-9
- Yamashita Y., M. Shinohara, and T. Yamada, 2021, Shallow tectonic tremor activities in Hyuga-nada, Nankai subduction zone, based on long-term broadband ocean bottom seismic observations. *Earth, Planets and Space*, 73(1). doi:10.1186/s40623-021-01533-x

成果の社会実装・アウトリーチ・ステークホルダーへの還元

南海トラフの地震・津波リスク評価

## 「南海トラフ沿いの巨大地震」



図 1. 「南海トラフ沿いの巨大地震」研究グループのワークフロー