

# 日本海溝海側のアウターライズ地震による津波計算

課題責任者

馬場俊孝 徳島大学大学院社会産業理工学研究部

著者

馬場俊孝\*<sup>1</sup>

\*<sup>1</sup> 徳島大学大学院社会産業理工学研究部

2011年東北地方太平洋沖地震の対となるアウターライズ地震は未だ発生しておらず、その発生が予想される。津波の即時予測にはDB検索型システムが一般的だが、DB検索型システムで津波の予測精度を担保するためには、多種多様な地震シナリオを不足なくDBに取り込む必要がある。しかし、実はこれが難しく、DBに格納する断層の深さは何キロ間隔で設定すべきかなどの問いに対して、我々は明確な答えを持ち合わせていない。そこで本研究では、次の手順でアウターライズ地震津波に対する断層パラメタ等の感度解析を行った。まず、地殻構造探査や海底観測の結果を参照して、日本海溝アウターライズ地震の33の基本モデルを設定し、その津波を計算した。次にこの基本モデルの断層パラメタ、計算法を少しずつ変えて津波を計算した。検討したケースは、基本モデルの傾斜を±15度で変化させた場合、長さ50km程度の複数の小断層でモデル化した場合、不均一すべり分布を導入した場合である。その結果、最も基本モデルと予測された津波が大きく異なったのは、異なる断層スケール則を利用した場合であった。

**キーワード：**アウターライズ地震、津波シミュレーション、感度解析、日本海溝

## 1. はじめに

プレート境界浅部巨大地震発生後に海溝海側斜面（アウターライズ）の海洋プレート内で地震活動が活発化することは過去の観測事例から指摘されており、1933年昭和三陸地震や2007年千島海溝地震のように海洋プレート内でM8クラスの巨大正断層地震が発生した事例もある。2011年に発生したM9の東北地方太平洋沖地震に対応するアウターライズ地震が発生し、大津波が襲来する恐れがある。日本海溝の津波予測の高度化のための研究が実施されている。

ひとつ目は地殻構造探査に代表される地球物理学的調査である<sup>[1-4]</sup>。エアガンによる制御震源を用いた地殻構造探査、海底自然地震観測による微小地震活動、震源メカニズム解の推定が行われ、アウターライズ地震発生域の地球物理学的情報が収集された。また、海底のホルストグラーベン地形、長い年月をかけて繰り返し活動したアウターライズ断層の活動で発達していると考えられるため、詳細な海底地形調査も実施された<sup>[5]</sup>。その結果、アウターライズ断層のモデル化において次の重要な知見を得た。  
①断層の傾斜は45度から75度の範囲で変化する。  
②傾斜は海底下浅部でより高角になっている。  
③アウターライズ断層の地震発生層の厚さは海底下およそ40kmである。  
④断層の上端は海底に達している。

ふたつ目はアウターライズ地震の津波の計算法についてで、これは本研究における前報<sup>[6]</sup>により報告したが、2010年に伊豆・小笠原海溝海側のプレート内で発生した正断層成分を持った津波の観測データを利用して、アウターライズ地震の津波を計算するうえで注意すべき点をまとめた。断層の傾斜角が±15度のばらつきがあると津

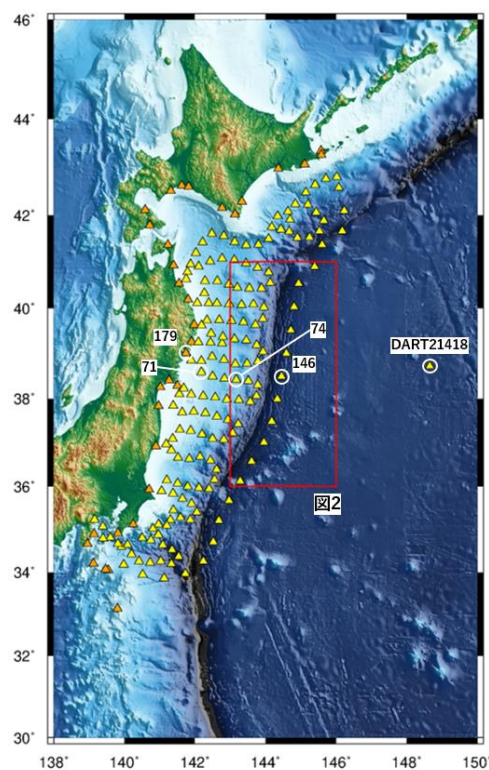


図1 本研究対象領域。赤四角は断層モデルを構築した範囲。三角は津波計算で津波波形を出力したポイント（黄色：沖合、オレンジ：海岸沿い）

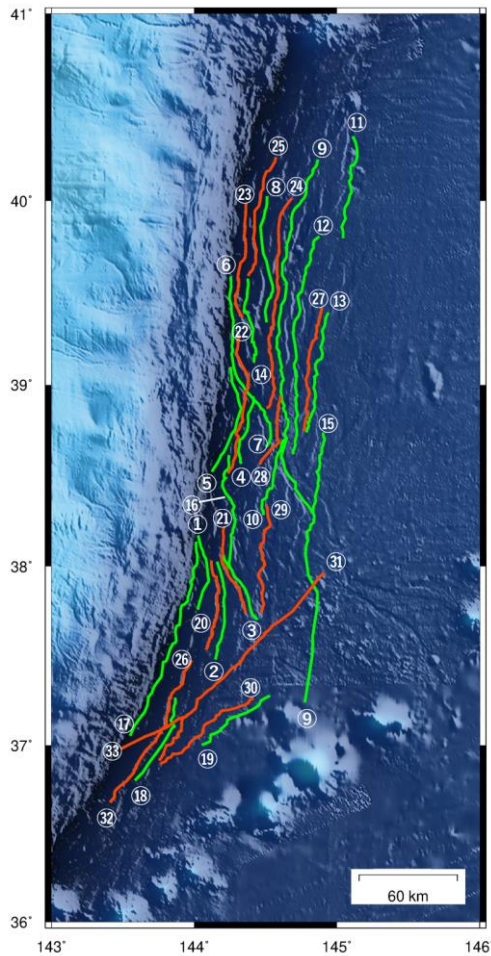


図 2 本研究で定義した 33 本のアウトターライズ地震断層セグメント。緑線は陸側（西側）傾斜。赤線は海側（東側）傾斜。丸内の数字は基本断層モデル番号。

波高がおよそ±15%変化することや、少なくとも沖合の津波波形においては津波の分散性を考慮したほうがよいことなどが明らかになった。

本稿では、これらの知見を踏まえて、日本海溝沖アウトターライズ地震断層による津波を計算した。その際に、前報<sup>[6]</sup>と同様にいくつかのパラメータを変更し繰り返し計算して、計算パラメータの津波予測における感度解析も実施した。

## 2. 日本海溝沿いアウトターライズ地震の断層モデルの構築と津波計算

本研究でアウトターライズ地震の断層モデルを構築した領域は、北緯 36.5 度から 40.5 度、東経 143.0 度から 145.2 度の範囲である（図 1）。海底のホルストグラーベン地形、微小地震活動の連続性、地殻構造調査で解釈された断層の連続性から連続区間を定義した。さらに、定義した連続区間の間の距離が 5km 未満で、かつ、走向、傾斜がほぼ同じ場合は、同時に活動することがあるとして連結し、33 本の断層セグメントを作成した（図 2）。

表 1. 派生モデルの内容

派生モデル番号	基本断層との違い
1	断層傾斜が 45 度
2	断層傾斜が 70 度
3	上半分の断層の傾斜が 70 度, 下半分が 45 度
4	およそ 50km の複数の小断層で断層モデル化
5	すべり角が 245 度
6	すべり角が 285 度
7	Alvarez-Gomez et al. (2012) <sup>[7]</sup> のもう一方の断層スケーリング則を利用
8	Blaster et al. (2010) <sup>[8]</sup> の断層スケーリング則を利用
9	津波の伝播計算に非線形分散波理論を使用
10	断層の北側 1/3 に大すべり域を設定
11	断層の中央 1/3 に大すべり域を設定
12	断層の南側 1/3 に大すべり域を設定

断層セグメントの両端を断層の端点として、断層モデルの走行および断層長を定義した。傾斜は探査結果の平均の 60 度とした。なお、傾斜は海側（東側）、陸側（西側）傾斜の双方あり、構造探査断面を参考にして決めた。すべり角は正断層すべりの 270 度とした。断層幅は厚さ 40km とした地震発生層の下端に達するまでは、断層長と同じとした。断層下端が地震発生層の下端に達した場合は、断層幅はそこで頭打ちとした。Álvarez-Gómez et al. (2012)<sup>[7]</sup>の断層スケーリング則を用いて、断層長からマグニチュード（サイスミックモーメント）を求め、剛性率  $5.0 \times 10^{10}$  N/m<sup>2</sup> として、すべり量を定義した。このようにして、33 本のアウトターライズ断層モデル（以降、基本断層モデルと呼ぶ）を構築した。

33 本のアウトターライズ断層から発生する津波を下の非線形長波式により計算した。

$$\begin{aligned} \frac{\partial M}{\partial t} + \frac{1}{R \sin \theta} \frac{\partial}{\partial \varphi} \left( \frac{M^2}{H + \eta} \right) + \frac{1}{R} \frac{\partial}{\partial \theta} \left( \frac{MN}{H + \eta} \right) \\ = -g \frac{H + \eta}{R \sin \theta} \frac{\partial \eta}{\partial \varphi} - fN \\ - \frac{gn^2}{(H + \eta)^{7/3}} M \sqrt{M^2 + N^2} \end{aligned} \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial N}{\partial t} + \frac{1}{R \sin \theta} \frac{\partial}{\partial \varphi} \left( \frac{MN}{H + \eta} \right) + \frac{1}{R} \frac{\partial}{\partial \theta} \left( \frac{N^2}{H + \eta} \right) \\ = -g \frac{H + \eta}{R} \frac{\partial \eta}{\partial \theta} + fM \\ - \frac{gn^2}{(H + \eta)^{7/3}} N \sqrt{M^2 + N^2} \end{aligned} \quad (2)$$

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} = -\frac{1}{R \sin \theta} \left( \frac{\partial M}{\partial \varphi} + \frac{\partial N \sin \theta}{\partial \theta} \right) \quad (3)$$

ここで、M, N は経度（φ）、緯度（θ）方向の線流量、R は地球半径、H は静水深、η は水位、g は重力加速度、f は

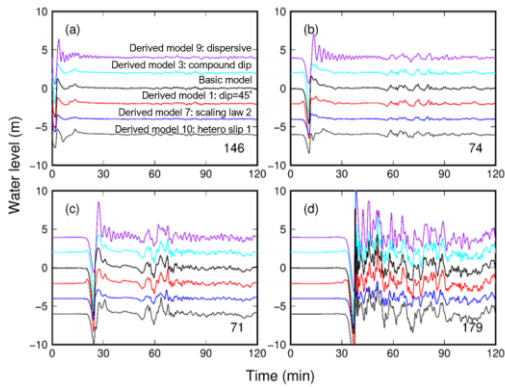


図 3 計算された津波波形の比較. 基本断層モデル 9 番とその派生モデル 1,3,7,9,10 の計算津波波形. 波形出力点の場所は図 1 を参照のこと.

コリオリ係数,  $n$  はマンニングの粗度係数,  $t$  は時刻である. 数値解法にはスツカード格子のリーブフロッグ差分法を利用した. 計算に必要な海底地形データは海上保安庁の公開データおよび GEBCO を利用した. 計算格子の分解能は 18 秒間隔である. 断層番号 9 (長さ 332km,  $M_w$  8.7) による津波が最も大きく, 海岸で最大津波高 27.0m となった.

### 3. 12 個の派生モデルを使った感度解析

基本断層モデルでは, 傾斜 60 度, すべり角 270 度を利用したが, 観測からもわかるように, 実際にはこれらの値にはばらつきがある. これらのばらつきがどの程度予測値に影響を与えるかについて, 各基本断層について 12 個の派生モデルを生成して同様に津波を計算し, 結果を比較した. 12 個の派生モデルの内容は表 1 に示す.

なお, 派生モデル 10 から 12 の不均一滑りモデルでは, 大すべり域のすべり量は基本断層のすべり量の 2 倍で, 大滑り域以外のすべり量は基本断層のすべり量の 1/2 である. このため, すべり分布は異なるが, サイスマックモーメントの総量は変わらない.

派生断層についても基本断層と同じ方法で津波を計算した. よって, トータルで  $33 \times (1+12) = 429$  回の津波計算を実施した. 基本断層モデル 9 番とその派生モデル 1, 3, 7, 9, 10 の計算津波波形を図 3 に示す.

図 3 から分散の有無や断層スケールリング則の違いで津波波形が異なっているが, より定量的に評価するため Aida (1987) [9] の  $K, \kappa$  を導入する. それぞれ次のように定義される.

$$\log K_i = \frac{1}{m} \sum_{j=1}^m \log \frac{\eta_{i,j}^{\max}}{\eta_{0,j}^{\max}} \quad (4)$$

$$\log \kappa_i = \sqrt{\frac{1}{m} \left\{ \sum_{j=1}^m \left( \log \frac{\eta_{i,j}^{\max}}{\eta_{0,j}^{\max}} \right)^2 - m (\log K_i)^2 \right\}} \quad (5)$$

ここで,  $\eta_{i,j}^{\max}$  は派生モデル  $i$  の観測点  $j$  の最大津波高さ

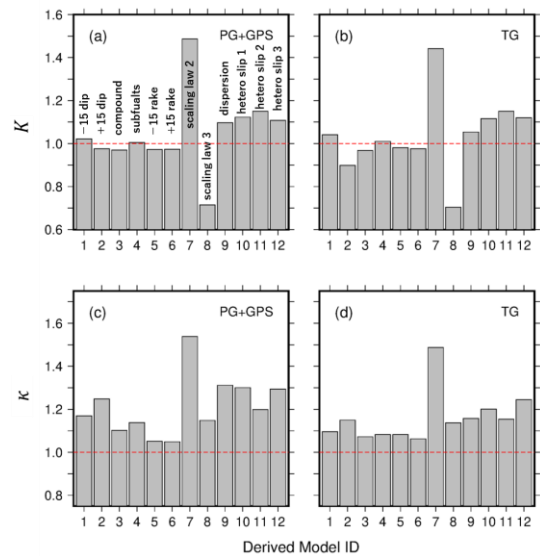


図 4 派生モデルごとの (a,b)  $K$  と (c,d)  $\kappa$ . (a,c) 沖合観測点と (b,c) 沿岸観測点を分けて算出した.

で,  $i=0$  は基本断層モデルである. なお, 派生モデルごとに  $K$  と  $\kappa$  を求めた. つまり, 求めた  $K$  と  $\kappa$  は基本断層 33 ケースの平均で,  $m$  は比較する観測点数  $\times 33$  である. 比較する観測点は沖合と沿岸と分けて扱い, 沖合は図 1 の黄色の三角の点の位置, 沿岸は図 1 のオレンジの三角の点の位置である. 得られた派生モデルごとの  $K$  と  $\kappa$  を図 4 に示す.

図 4 から予測する津波高に最も影響を与える要因は断層スケールリング則の選択であることがわかる. その次は断層の不均一すべり, 津波伝播における分散性の効果が続く. 今回の検討では, 傾斜角などの断層の形状については, 予測される津波高への影響は相対的に小さかった.

### 4. 議論

図 4 は断層スケールリング則の扱いを誤ると, 津波予測に大きな誤差を生むことを示しているが, 基本断層のスケールリング則と派生モデル 7 のスケールリング則 2 はともに, 同じデータセットを使って Álvarez-Gómez et al. (2012) [7] により得られたものである. マグニチュードデータとの回帰を断層長でおこなったか (基本断層モデル), あるいは, 断層面積でおこなったか (派生モデル 7) の違いでしかない. それぞれ決定係数が 0.78 は 0.66 と, 断層長で回帰したほうがやや良かったので, 断層長で回帰したモデルを基本断層で利用した. つまり, 断層スケールリング則は津波の予測においてかなり敏感であり, 利用の際には注意しなければならない.

近年, 津波予測において不均一すべり分布の重要性はよく指摘され, 本研究においてもそれを支持する結果が得られた. しかしながら, 著者は, 確かにばらつきを示す  $\kappa$  は大きくなるだろうが, 津波高の比の平均を示す  $K$  は

1に近いと予想していた。なぜなら、大すべりの前面に位置する観測点では、不均一すべりモデルのほうの津波高が高くなるが、背景領域（大すべりではない場所）の前面では、基本断層モデルよりもすべり量が小さいため津波高が小さくなる。このため、平均すると  $K$  は1程度になる、と考えていた。しかし、 $K$  はおよそ1.1で、不均一すべりモデルのほうの基本断層モデルよりも平均して約10%津波高が高くなった。ただし、今回検討した不均一性は非常に小さく、海底地形や津波の伝播距離にも関係してくると思われる、さらなる検討は必要でと思われる。

現状、実用している津波予報・警報の第一報では断層の不均一すべりの情報までは含まれていないが、本当に不均一すべり分布が津波予測に影響するのであれば、リアルタイムで断層のすべり分布を求めることが必要になる。すべり分布を求める地震波形のリアルタイム解析の重要性が増すとともに、地震波形だけでなく、近年展開された海底水圧計観測網などで得られる沖合津波観測データのリアルタイム解析も高度化しなければならない。

アウターライズ断層の傾斜は高角、かつ、断層上端が海底まで達しているため、海溝型地震よりも短波長の津波を発生させる。このため、高精度に津波を予測するためには、分散性の考慮が必須である。図3を見ても分散性を考慮した沖合の津波波形は明らかに基本断層モデルによる津波波形と異なる。一般には分散性を考慮すると短波長成分が遅れ、津波のエネルギーが前後に延びるため、最大津波高は低くなるが、図4を見るとそうはならず、分散性を考慮したほうが高くなっている。この点はアウターライズ地震津波の特徴である。この分散性の強い津波が浅水変形を受けてどのように沿岸まで変形するかについては、実は本研究の結果のみでは結論付けられない。これを結論付けるためには、ネスティングアルゴリズムなどを用いて、空間分解能を向上させた計算や、沿岸で発生する砕波のモデル化も必要になる。これらの点については次年度以降の課題である。

## 5. まとめ

本研究では、日本海溝沖のアウターライズ地震断層モデルを提案するとともに、各種計算パラメタのばらつきを踏まえた感度解析を実施した。その結果、最も津波高予測に影響する要因としては断層スケーリング則の選択であった。その後、断層面上不均一すべりの考慮の有無、津波伝播における分散性の考慮の有無が続いた。一方、傾斜角などの断層の形状そのものについては、ばらつき度合いが海域調査によってかなり抑えられていたため、津波高予測に与える影響は相対的に小さかった。

## 謝辞

本研究は科学研究費補助金、JP15H05718, JP19K04970, JP19H02409 の支援を受けています。津波計算には地球シミュレータを利用させていただきました。記して、感謝いたします。

## 文献

- [1] Fujie, G., Kodaira, S., Sato, T. & Takahashi, T. Along-trench variations in the seismic structure of the incoming Pacific plate at the outer rise of the northern Japan Trench, *Geophys. Res. Lett.*, 43, 666-673, 2016.
- [2] Obana, K., Fujie, G., Takahashi, T., Yamamoto, Y., Nakamura, Y., Kodaira, S., Takahashi, N., Kaneda, Y., & Shinohara, M., Normal-faulting earthquakes beneath the outer slope of the Japan Trench after the 2011 Tohoku earthquake: Implications for the stress regime in the incoming Pacific plate, *Geophys. Res. Lett.*, 39, L00G24, doi:10.1029/2011GL050399, 2012.
- [3] Obana, K., Fujie, G., Takahashi, T., Yamamoto, Y., Tonegawa, T., Miura, S., & Kodaira, S., Seismic velocity structure and its implications for oceanic mantle hydration in the trench-outer rise of the Japan Trench, *Geophys. J. Int.*, 217, 1629-1642, <https://doi.org/10.1093/gji/ggz099>, 2019.
- [4] Obana, K., Nakamura, Y., Fujie, G., Kodaira, S., Kaiho, Y., Yamamoto, Y., & Miura, S., Seismicity in the source areas of the 1896 and 1933 Sanriku earthquakes and implications for large near-trench earthquake faults, *Geophys. J. Int.*, 212, 2061-2072, doi: 10.1093/gji/ggx532, 2018.
- [5] Kodaira, S., Ohira, A., Fujie, G., No, T., Nakamura, Y., Kaiho, Y., & Miura, S., Seismic image of the incoming oceanic crust entering the central part of the Japan Trench: structural variation caused by petit-spot, bend fault and seamount, Japan Geoscience Union Meeting 2019, SCG60-07, 2019.
- [6] 馬場俊孝, 伊豆・小笠原海溝海側で発生したアウターライズ地震による津波計算, 平成30年度地球シミュレータアニュアルレポート, 2019.
- [7] Álvarez-Gómez, J.A., Gutiérrez, O.Q.G., Aniel-Quiroga, Í., & González, M., Tsunamigenic potential of outer-rise normal faults at the Middle America trench in Central America, *Tectonophysics*, 574-575, 133-143, 2012.
- [8] Blaser, L., Krüger, F., Ohrnberger, M., & Scherbaum, F., Scaling relations of earthquake source parameter estimates with special focus on subduction environment, *Bull. Seism. Soc. Am.*, 100, 2914-2926, doi:10.1785/0120100111, 2010.
- [9] Aida, I., Reliability of a tsunami source model derived from fault parameters, *J. Phys. Earth*, 26, 57-73, 1978.

# Tsunami Simulations of Possible Outer-rise Earthquakes along the Japan Trench

Project Representative

Toshitaka Baba

Graduate School of Technology, Industrial and Social Sciences,  
Tokushima University

Author

Toshitaka Baba\*<sup>1</sup>

\*<sup>1</sup> Graduate School of Technology, Industrial and Social Sciences, Tokushima University

An outer-rise earthquake, which is a series of earthquakes from the 2011 Tohoku earthquake, has not been occurred yet. This study aims to predict tsunami from the outer-rise earthquake using faults well-modeled by the marine seismic surveys and observations. We created 33 fault models for possible outer-rise earthquakes in a region from 36.5° to 40.5° in latitude and from 143.0° to 145.2° in longitude in the Japan Trench. The maximum tsunami of 27.0 m at the Tohoku coast was calculated from fault ID 9 which fault length is 332 km, Mw is 8.7. We also conducted a sensitivity test by varying fault parameters. The calculated tsunami height was changed very much from the original fault model when using different fault scaling laws. Slip heterogeneity and tsunami dispersion effect also have a large impact on the predicted tsunami.

**Keywords** : Outer-rise earthquake, Tsunami simulation, Sensitivity Analysis, Japan Trench

## 1. Introduction

In this study, we predicted tsunamis on the basis of numerical simulations from the set of 33 outer-rise faults along the Japan Trench. Because actual earthquakes do not exactly match the assumed fault parameters, we conducted a sensitivity analysis to explore the effects of uncertainties in the assumed fault parameters, using the reliability indicators<sup>[1]</sup>. We focused in particular on the effects on tsunami propagation of uncertainties in dip angle and rake angle of the faults, the scaling law used to determine slip amounts, wave dispersion, and slip heterogeneity.

## 2. Tsunami simulation using 33 basic faults

Intensive marine surveys were carried out in the outer-rise area of the Japan Trench region. The important findings of the surveys are these: (1) the upper edges of outer-rise faults are consistent with the horst-and-graben topography at the seafloor; (2) dip angles of these faults are steep, reaching a maximum of 75° at shallow subseafloor depths; (3) dip angles are more likely to be moderate at greater depths, ranging from 45° to 60°; and (4) the seismogenic zone for outer-rise earthquakes is approximately 40 km thick. We mapped the seafloor traces of outer-rise faults using the survey data to obtain 33 seafloor traces (Figure 1).

The 33 seafloor traces were extended below the seafloor into rectangular fault planes, referred to here as “basic faults”, for tsunami calculations. The upper edge of the basic faults was placed at 0.1km below the seafloor. Dip angles of the basic fault planes were set at 60°. The rake angle was set at 270° under the assumption of pure normal faulting. The width of the basic faults was the same as the fault length ( $L = W$ ) unless the lower edge of the basic fault was deeper than the base of the seismogenic zone (40 km), in which case the width was shortened to match the 40 km depth. The slip amount on the basic fault was determined by

the scaling law<sup>[2]</sup>. The tsunamis from the basic faults were calculated by the non-linear shallow water equations. The maximum tsunami of 27.0 m at the Tohoku coast was calculated

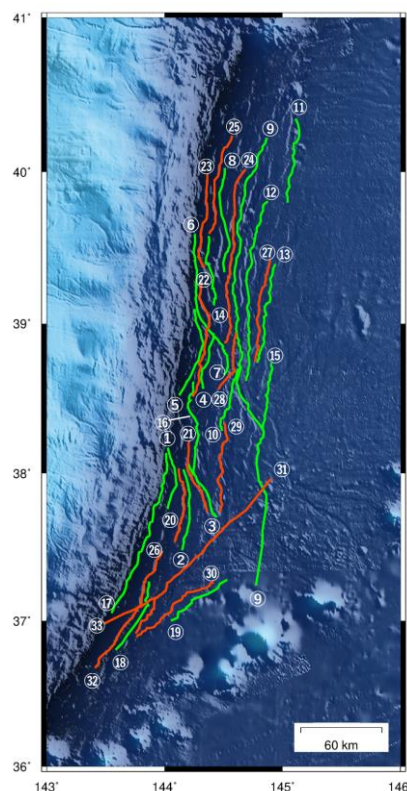


Figure 1. Shaded-relief bathymetric map of the Japan Trench study region (location on Figure 1) showing modeled outer-rise normal fault traces. Green and red lines indicate faults dipping landward (west) and seaward (east), respectively. Basic faults are identified by the encircled numbers.

Table 1. Derived models

Derived model ID	Difference from basic fault
1	Dip angle is 45°
2	Dip angle is 70°
3	Dip angle of the upper half of the fault plane is 70° and dip angle of the lower half is 45°
4	Modeled by a set of subfaults
5	Rake angle is 245°
6	Rake angle is 285°
7	Use the other scaling law in Álvarez-Gómez et al. (2012) <sup>[2]</sup>
8	Use a scaling law in Blaster et al. (2010) <sup>[3]</sup>
9	Solve the dispersive tsunami equations
10	Define a large slip area in the northern 1/3 part
11	Define a large slip area in the middle 1/3 part
12	Define a large slip area in the southern 1/3 part

from fault ID 9 which fault length is 332 km, Mw is 8.7.

### 3. Sensitivity analysis using 12 derived models

For simplicity, the dip and the rake angles were set at 60° and 270°, respectively, in the basic faults. However, actual outer-rise earthquakes would vary from these fixed values. To understand how differences in the fault parameters would affect the accuracy of the tsunami predictions, we conducted a sensitivity analysis by changing the values of selected parameters to derive 12 models from each basic fault model (Table 1).

The results were evaluated using the reliability indicators<sup>[1]</sup>,  $K$  and  $\kappa$  (Figure 2).  $K$  is the geometric average of the ratio between the maximum tsunami heights of derived model and those of the basic model; values above 1 signify that the maximum tsunami heights from the derived model are larger on average than those of the basic model.  $\kappa$  is the geometric standard deviation indicating the variance of  $K$ ; values close to 1 are better. The most influential factor in the prediction of the maximum tsunami height was the choice of scaling law. The maximum tsunami height calculated by the derived model 7 was as much as 1.5 times greater compared to the basic model, and the derived model 8 produced tsunamis about 30% smaller on average than the basic model. The heterogeneous slip models increased the maximum tsunami height by 10–15% on average over the basic model. Consideration of dispersion increased the maximum tsunami height by about 10% at the offshore stations and about 5% at the coastal tide stations. Changes in dip angle caused both increases and decreases in tsunami height, depending on the case, but the average difference was less than 5% except for the derived model 2 (75° dip), in which the tsunami height was

systematically reduced by about 10% on average at the coastal stations. The compound model, the subfaults model, and the different rake angle models changed tsunami heights by no more than about 3%.

### Acknowledgement

This study was supported by Japan Society for the Promotion of Science KAKENHI Grants JP15H05718, JP19K04970, JP19H02409. The tsunami calculations were conducted on the Earth Simulator. We deeply thank staff who served on the operations of the Earth Simulator.

### References

- [1] Aida, I., Reliability of a tsunami source model derived from fault parameters, *J. Phys. Earth*, 26, 57-73, 1978.
- [2] Álvarez-Gómez, J.A., Gutiérrez, O.Q.G., Aniel-Quiroga, Í., & González, M., Tsunamigenic potential of outer-rise normal faults at the Middle America trench in Central America, *Tectonophysics*, 574-575, 133-143, 2012.
- [3] Blaser, L., Krüger, F., Ohrnberger, M., & Scherbaum, F., Scaling relations of earthquake source parameter estimates with special focus on subduction environment, *Bull. Seism. Soc. Am.*, 100, 2914-2926, doi:10.1785/0120100111, 2010.

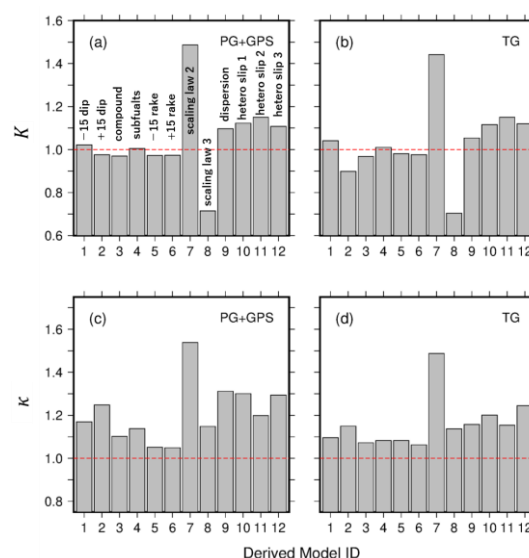


Figure 2. Values of  $K$  and  $\kappa$  for the 12 derived models. (a)  $K$  for offshore stations of pressure gauges and GPS buoys (PG+GPS). (b)  $K$  for coastal tide gauges (TG). (c)  $\kappa$  for offshore stations. (d)  $\kappa$  for coastal tide gauges.