

地殻構造探査に基づく断層モデルを利用した 1933 年昭和三陸地震の津波計算

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*¹

*¹ 徳島大学 大学院社会産業理工学研究部

本研究では、昨年度構築された日本海溝アウターライズ地震断層モデルを利用して津波計算を実施し、1933 年昭和三陸地震の痕跡津波高と比較した。提案した 33 本の断層モデルのうち断層モデル 10 番が最もよく 1933 年の痕跡津波高を再現した。再現性は既往研究で津波を再現するように作られた断層モデルのものと同色でなかった。このため、断層モデル 10 番が 1933 年昭和三陸地震の断層である可能性が高い。さらに、波の分散性を考慮した津波の計算を実施した。波数分散性を考慮すると、波長の短い波が遅れ、主要な波の後に波群を形成する。一波あたりのエネルギーが減衰し、波の高さが低くなるのが一般的である。しかし、予想に反して、本研究の結果は分散性を考慮したほうが海岸での津波高がおおよそ 10% 高くなった。これは津波の極性が関係していると考えられる。

キーワード：アウターライズ地震、1933 年昭和三陸地震、津波、数値計算、分散性

1. はじめに

2011 年東北地方太平洋沖地震(以降, 2011 年東北地震)は巨大津波を発生させ、東北地方沿岸部を中心に甚大な被害を与えた。内閣府は、2011 年東北地震が発生した北側の北海道沖の千島海溝でも、東北地震と同規模の地震の危険性を指摘している。巨大な東北地震の断層すべりによる地殻内の応力擾乱を考えれば、なにも北側だけでなく、震源域周辺で津波を伴うような別の大地震がいつ発生してもおかしくない。特に震源域の東側の領域では、沈み込むプレート内で発生するアウターライズ地震が発生する可能性が高い。過去の事例では海溝型地震の 1896 年明治三陸地震 (Ms7.2) の後、1933 年にアウターライズ地震である昭和三陸地震 (M8.1) が日本海溝の海溝軸よりも海側で発生した。1933 年昭和三陸地震の津波は最大で 28.7m、死者、行方不明者合わせておよそ 3000 人の被害を出した。海外の事例では千島海溝沖で 2006 年、2007 年に発生した 2 つの地震が有名で、2006 年の M8.3 の海溝型地震の 2 か月後に M8.1 のアウターライズ地震が発生している。

アウターライズ地震はアウターライズで発生する正断層型の地震である。アウターライズとは日本語で外側の隆起帯という意味で、海溝軸よりも外側(海側)に海底が少し隆起している場所があり、その部分を指す。例えば、日本海溝では海溝軸よりも海側には太平洋プレートが存在する。太平洋プレートは、日本海溝で陸側のプレートの下に沈み込む。これにより、太平洋プレートに曲げモーメントが加わり、海溝軸外側で太平洋プレートは少し持ち上がっている。また、太平洋プレートの上半分には引張場が発生し、正断層型地震が発生する。陸側のプレートの沈み込んだ部分の上面でプレート境界型地震が発生すると、沈み込んでいるプレートにさらに曲げモーメントが加えられる。このため、巨大なプレート境界型地震が発生した

後に、アウターライズ地震が発生すると考えられている。

このため、日本海溝のアウターライズ地震の性状の把握を目的とした海域調査が精力的に行われている。アウターライズ地震は、海底にホルスト&グラーベン構造という特徴的な地形を作るため、まずは微地形調査が実施された。さらに、人工震源(エアガン)を用いた地殻構造探査や、自然地震観測などが実施された。その結果、次の

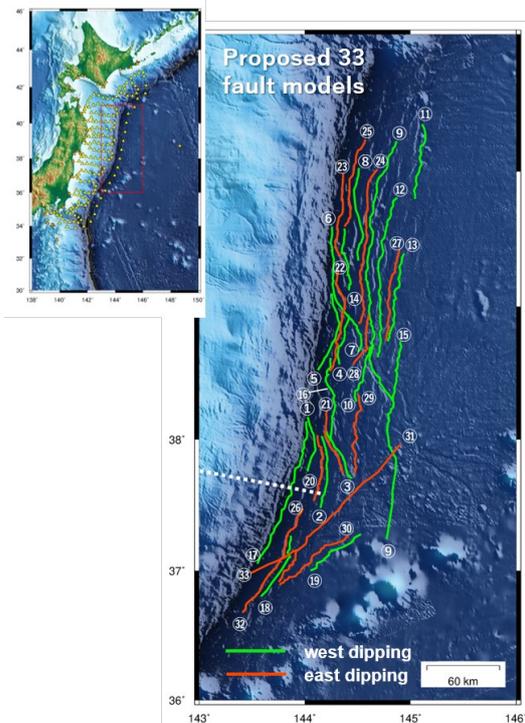


図-1 Baba et al.¹で提案された日本海溝における 33 本のアウターライズ断層モデル

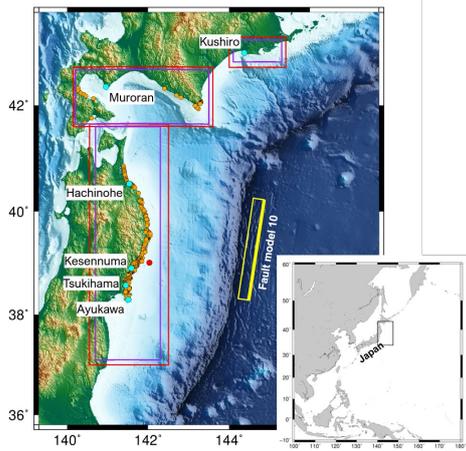


図-2 津波計算領域. 赤, 紫四角はネスティング領域, 橙丸は痕跡データ位置, 赤丸は図-6の波形比較位置. 黄色の四角は断層モデル10番の外形.

ことが明らかになった. ①アウターライズ地震断層の上端は海底に達している. ②断層の傾斜角は45度から75度と高角である. ③アウターライズ地震を起こすと考えられる地震発生層は海底下およそ40kmまでである. ④アウターライズ地震の周辺のプレートの剛性率は約65GPaである. これらの調査結果を総合して, Baba et al.¹は33本のアウターライズ断層のモデルを提案した(図-1).

2. 津波計算方法

アウターライズ地震である1933年昭和三陸地震は図-1の領域内で発生しているので, 提案した33本の断層のうち1本は1933年昭和三陸地震の断層に対応すると考えられる. 断層モデル化の手順および津波計算手法の妥当性

を確認するため, 33本の断層モデルを用いて津波計算を実施し, 1933年の津波の痕跡高と比較する. また, 既往研究で提案された1933年昭和三陸地震の断層モデル²⁻⁴についても同様に津波計算し, 痕跡高と比較した.

断層モデルから半無限均質弾性体の解析解⁵により, 断層運動による海底の地殻変動を計算し, 斜面の水平変位による津波励起⁶も加味した上で海底の上下変動を求める. この上下変動にKajiuraのフィルタ⁷を適用し, 津波の初期水位分布を得る. 初期水位分布の入力時間(ライズタイム)は30秒とした. 津波の計算にはJAGURSの非線形長波式と非線形分散波式の両方を利用した. 津波計算に必要な地形データには2秒角分解能のGlobal tsunami Terrain Model (GtTM)⁸を利用したが, このまま全計算領域に適用すると計算量が膨大になるので, ネスティングアルゴリズムを利用した(図-4). 6秒角, 18秒角の領域の地形データは, GtTMをダウンサンプルして構築した. 比較のための1933年昭和三陸地震の津波痕跡高データは, 津波痕跡データベース(東北大学, last access on 2021.06.04)から得たが, データの信頼度が最も高いものだけ(信頼度A)を利用した(図-2). 再現性の指標には, 次の式で表されるAida⁹の K , κ を利用した.

$$\log K = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \log \frac{\eta_{obs}}{\eta_{cal}} \quad (1)$$

$$\log \kappa = \left[\frac{1}{n} \left\{ \sum_{i=1}^n \left(\log \frac{\eta_{obs}}{\eta_{cal}} \right)^2 - n(\log K)^2 \right\} \right]^{1/2} \quad (2)$$

ここで, n はデータの個数, η_{obs} は津波痕跡高, η_{cal} は痕跡高と同じ場所の計算された最大津波高(または浸水高)である. Aidaの指標では K は1に近いほど, κ は小さいほど, 再現性がよいことを示す. また, K が1を超えると平均して計算値よりも痕跡値が大きく, 1を下回ると平均して計算値よりも痕跡値が小さくなる.

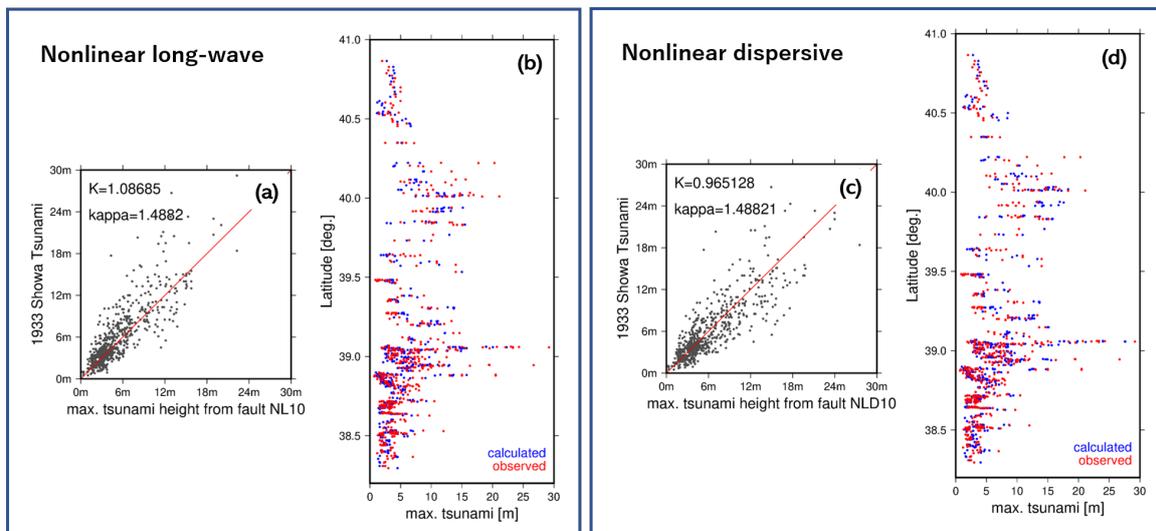


図-3 断層モデル10番で計算された津波と1933年昭和三陸地震の痕跡高データの比較. (a), (b)は非線形長波理論式, (c), (d)は非線形分散波式を利用した.

3. 津波計算結果

Baba et al.¹で提案した33本の断層のうち、10番の断層(L=218km, Mw=8.31, 図2)が最も良く1933年昭和三陸地震の津波痕跡高を説明した。非線形長波式を用いた計算で $K=1.09$, $\kappa=1.49$, 非線形分散波理論を用いた計算で $K=0.97$, $\kappa=1.49$ となった。これらの指標の値は、既往研究で紹介されたモデルと遜色なかった(表-1)。

表-1. 複数の断層モデルから計算された最大津波高と1933年昭和三陸津波の痕跡高との比較

断層モデル	非線形長波式		非線形分散波式	
	K	κ	K	κ
Baba et al. ¹ (断層10番)	1.09	1.49	0.97	1.49
Kanamori ²	1.17	1.55	1.13	1.57
Uchida et al. ³ (2枚断層)	0.72	1.57	0.69	1.58
相田 ⁴	1.03	1.50	0.91	1.49

Baba et al.¹の断層10番について、非線形長波式と非線形分散波式の結果を比べてみよう(図-3)。非線形長波式では $K=1.09$ であり、計算値が痕跡値をやや下回っている。非線形分散波式では $K=0.97$ であり、 K がより1に近いので、非線形長波式より痕跡高の再現性がよいことがわかる。また、非線形分散波式の K は1を下回り、非線形長波式とは逆に痕跡値より計算値がやや大きくなっている。つまり、分散性を考慮することで、考慮しない場合よりも、最大津波高が10%程度大きくなり、痕跡項の再現性が向上した。

4. 分散性による津波の増幅

一般に波数分散性を考慮すると、波長の短い波が遅れ、主要な波の後に波群を形成する。すると、一波あたりのエネルギーが減衰するため、波の高さが低くなる(図-4a)。断層10番の結果は、分散性を考慮した津波計算はしない場合に比べて津波が高くなっており、一般的な理解と矛盾する。これはなぜか？実は津波の極性が関係している。分散性を考慮した津波計算がしない場合に比べて津波の高さが低くなるのは、押し波の津波の場合である。引き波の津波の場合は分散効果で海水が持ち上がり、津波が高くなる(図-4b)。図-4aと図-4bを比較すると、津波に上下逆の分散変形が起こっていることが確認できる。アウターライズ地震は正断層なので海底での地殻変動は沈降が主であり、また、断層が高角なため沈降域は狭い範囲に限られる。結果として、波長の短い引き波の卓越した津波が生成される。

図-5に断層モデル10番の沖合20km、水深200mのポイントでの非分散式(長波式)、分散式で得られた津波時系列波形と、そのスペクトルを示す。非分散、分散の間に最大津波高、波長ともに違いがみられる。また、水深200mよりも深い場所のみ分散性を考慮し、水深200mよりも浅い場所の分散性を無視した試算を試みしたが、結果が

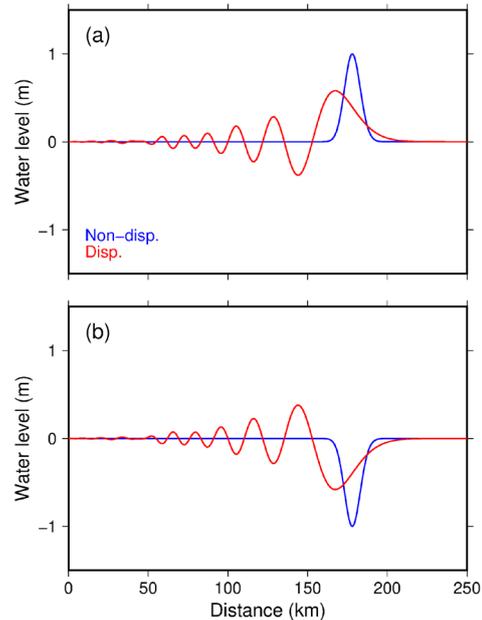


図-4 津波の分散による変形。Xの正の向きに(a)押し波と(b)引き波の津波を伝播させて、長波式(青)と線分散波式(赤)で解いた。水深は4000mで一定。(a)の押し波では長波式の最大水位が高いが、(b)の引き波では分散波式の最大水位が高い。

ほぼ変わらなかった。だから、非線形性と分散性の影響で遠浅海岸においてソリトン分裂が発生し津波が増大することがあるが、本検討の場合はソリトン分裂の寄与はさほど大きくない。分散性を考慮したことによる津波の増幅は、波長の短い引き波津波が深海を伝播する間に波数分散性による変形したことによる。

津波被害軽減の第一歩は津波ハザードマップの整理である。現存する津波ハザードマップは、著者の知る限りでは、すべて分散性を考慮していない。これは分散性の計算負荷が高いことに加えて、図-4aで見たように分散を考慮しないモデルの方が一般に高い津波を予測すると考えられていたためである。防災対策においては、多少の過大評価は認められる。一方、過小評価は予期しない被害を発生させる恐れがあるため、避けなければならない。本研究で示した重要なポイントは、アウターライズ地震の津波予測においては、従来の非分散モデル(非線形長波理論式)を用いた計算では、過小評価になることがある点である。アウターライズ地震の津波予測においては注意が必要である。

5. まとめ

本研究では、地殻構造探査などの情報を基に構築された日本海溝アウターライズ地震の断層モデルを利用した津波計算を実施し、1933年昭和三陸津波の痕跡高と比較し

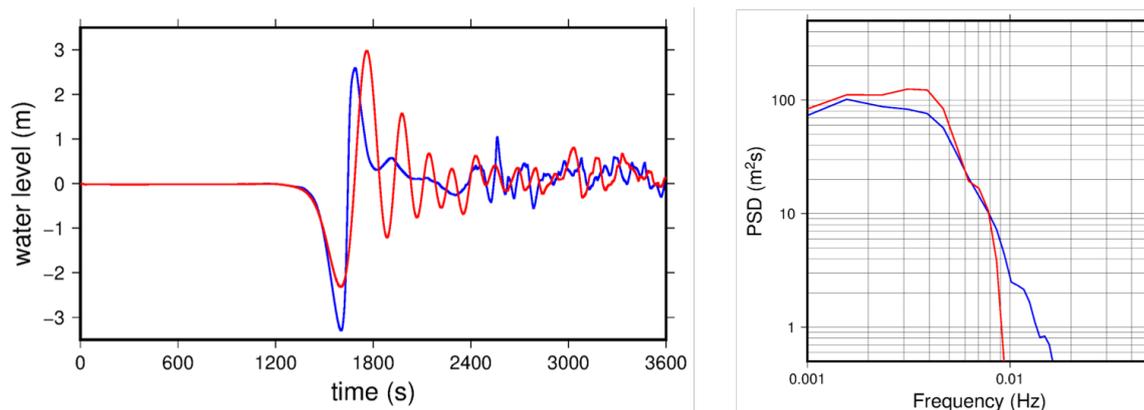


図-5 図-4の赤丸位置で計算された津波波形(右)(赤:非線形分散波,青:非線形長波)とパワースペクトル(左)

た。その結果、最も痕跡データを再現したモデルは断層番号10番の断層モデルで、フォワードモデリングにも関わらず、既往研究の断層モデルと遜色ない再現精度であった。さらに、アウトラーズ地震の場合は、波の分散性により最大水位上昇量が大きくなることもあり、ハザードマップの作成においては注意が必要である。

謝辞

本研究は科学研究費補助金, JP19H02409, JP20H00294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] Baba, T., Chikasada, N., Nakamura, Y., Fujie, G., Obana, K., Miura, S. & Kodaira, S. Deep investigations of outer-rise tsunami characteristics using well-mapped normal faults along the Japan trench. *J. Geo. Res. : Solid Earth* **125**, e2020JB020060, <https://doi.org/10.1029/2020JB020060>, 2020.
- [2] Kanamori, H. Seismological evidence for a lithospheric normal faulting - the Sanriku earthquake of 1933, *Phys. Earth Planet. Inter.* **4**, 289-300, 1971.
- [3] Uchida, N., Kirby, S.H., Umino, N., Hino, R. & Kazakami, T. The great 1933 Sanriku-oki earthquake: reappraisal of the mainshock and its aftershocks and implications for its tsunami using regional tsunami and seismic data. *Geophys. J. Int.* **206**, 1619-1633 doi:10.1093/gji/ggw234, 2016.
- [4] 相田勇 三陸沖の古い津波のシミュレーション, *地震研究所彙報*, **52**, 71-101, 1977.
- [5] Okada, Y. Surface deformation due to shear and tensile faults in a half-space. *Bull. Seism. Soc. Am.* **75**, 1435-1154, 1985.
- [6] Tanioka, Y., & Satake, K. Tsunami generation

by horizontal displacement of ocean bottom. *Geophys. Res. Lett.* **23**, 861-864, 1996.

- [7] Kajiura, K. The leading wave of a tsunami, *Bull. Earthquake Res. Inst.*, **41**, 535-571, 1963.
- [8] Chikasada, N., Global tsunami Terrain Model, <https://kiyuu.bosai.go.jp/GtTM/>. doi:10.17598/NIED.0021, 2021.
- [9] Aida, I., Reliability of a tsunami source model derived from fault parameters, *J. Phys. Earth*, **26**, 57-73, 1978.

Tsunami Simulations for the 1933 Showa-Sanriku Earthquake Using Normal Fault Models Constructed by Marine Seismic Surveys

Project Representative

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

Author

Toshitaka Baba*¹

*¹ Graduate School of Technology, Industrial and Social Sciences, Tokushima University

To assess the risk of tsunamis from outer-rise events, we proposed 33 models for normal faults along the Japan Trench based on seismic observations and surveys in the previous report. The 1933 Showa-Sanriku earthquake, a large (M 8.3) outer-rise event, occurred in the area of the fault models. If our modeling procedure is reasonable, one of the fault models should explain the 1933 tsunami. Therefore, we compared the calculated and observed tsunami heights from this event in the tsunami database compiled by Tohoku University and the Nuclear Regulation Authority. Our fault model ID 10 was comparable with the previously proposed fault models for the 1933 Showa-Sanriku earthquake. This paper also demonstrates that frequency dispersion effects amplified the 1933 Showa-Sanriku tsunami.

Keywords : Outer-rise earthquake, 1933 Showa-Sanriku earthquake, Tsunami simulation, Dispersion, Japan Trench

1. Introduction

Outer-rise earthquakes sometimes occur soon after large interplate earthquakes. An outer-rise earthquake off the Kuril Islands in 2007 was probably relevant to an adjacent interplate earthquake in 2006. After the 2011 Tohoku earthquake in Japan Trench, outer-rise earthquakes accompanied by tsunamis may happen shortly. We, therefore, carried out marine topographic and seismic surveys and proposed 33 normal fault models in the previous paper¹. The current report assesses the reliability of the proposed 33 fault models by comparing observed tsunami heights at the coast by the 1933 Showa-Sanriku tsunami that occurred in the area of the fault models. We used the nonlinear long-wave equations and nonlinear dispersive equations for the tsunami calculations. We found a vital implication during the tsunami calculations that the non-dispersive model does not always provide larger tsunami heights than the dispersive model.

2. Tsunami Calculation Methods

We performed tsunami calculations using the following procedure. Vertical crustal displacement at the seafloor was calculated assuming that the crust is a homogeneous elastic half-space², and horizontal movement effects³ were included. A hydraulic filter based on linear potential theory⁴ was applied to estimate the initial sea-surface displacement, which assumed a rise time of 30 s. To model tsunami propagation, we used nonlinear long-wave (non-dispersive) equations and nonlinear dispersive equations. The time integrations were solved using JAGURS, open-source software that solves either the non-dispersive or dispersive equations with a nesting algorithm using a leapfrog, staggered-grid, finite-difference method. For bathymetry, we used the Global tsunami Terrain Model⁵ (GtTM), which compiled open data around Japan to make gridded data

with an interval of 2 arc-sec.

We compared the calculated and observed tsunami heights from the 1933 Showa-Sanriku tsunami in the Japan tsunami trace database compiled by Tohoku University and the Nuclear Regulation Authority. Using the database, we calculated Aida's⁶ K and κ , as follow, for all of the calculated tsunamis in this study to find the best-fit fault model for the 1933 Showa-Sanriku earthquake.

$$\log K = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \log \frac{\eta_{obs}}{\eta_{cat}} \quad (1)$$

$$\log \kappa = \left[\frac{1}{n} \left(\sum_{i=1}^n \left(\log \frac{\eta_{obs}}{\eta_{cat}} \right)^2 - n (\log K)^2 \right) \right]^{1/2} \quad (2)$$

3. Results

The outer-rise tsunamis were calculated from the 33 fault models by solving the nonlinear long-wave (non-dispersive) equations in a finite difference scheme. Fault model 10 (L = 218 km, Mw = 8.31) best simulated the observed tsunami inundation heights of the 1933 tsunami with $K = 1.09$ and $\kappa = 1.49$ (Fig. 1 and Table. 1). We applied the same procedure to evaluate several previously proposed fault models of the 1933 Showa-Sanriku earthquake. Fault model 10 was comparable with the previously proposed fault models for the 1933 Showa-Sanriku earthquake⁷⁻⁹. Whereas the previous studies adjusted the fault parameters to predict the observed 1933 tsunami, we implemented the tsunami calculations using a completely forward-looking method. We conclude that our tsunami prediction procedures, including the method to construct the fault models, are appropriate for predicting tsunamis caused by future outer-rise earthquakes in the Japan Trench.

We recalculated the outer-rise tsunamis from fault models using the dispersive equations. In the dispersive tsunami

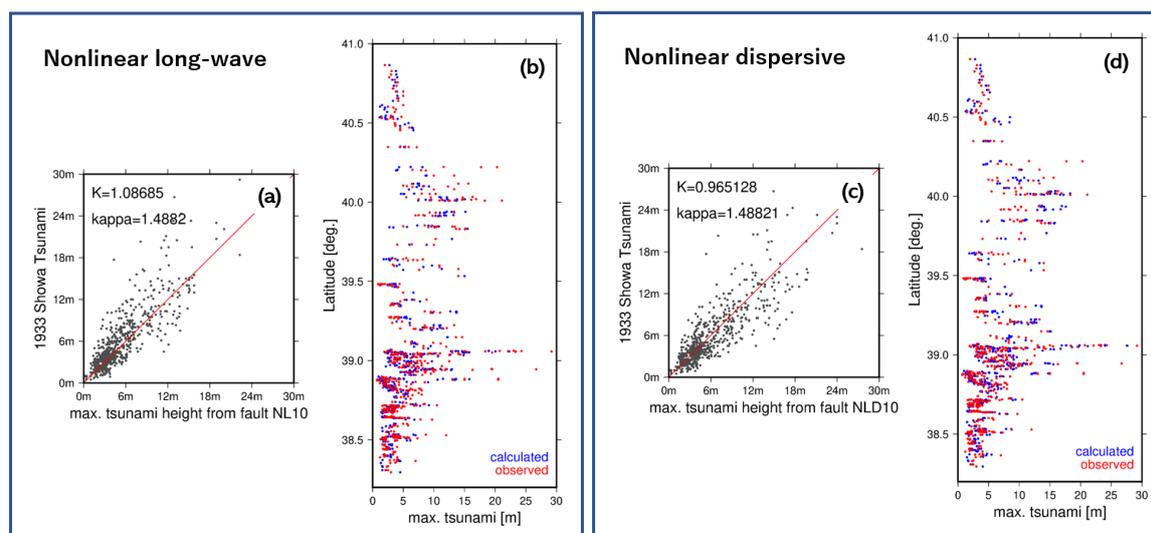


Figure 1 Correlation between the observed inundation heights of the 1933 Showa-Sanriku tsunami and the calculated heights for fault model 10 using (a, b) non-dispersive equations and (c, d) dispersive equations

modeling, the tsunami caused by fault model 10 showed the best match with the observed inundation heights of the 1933 tsunami (Fig. 1 and Table 1; $K = 0.97$ and $\kappa = 1.49$). The decrease in K from 1.09 to 0.97 indicates that the tsunami inundation heights in the dispersive calculations were about 10 % larger than those in the non-dispersive calculations, resulting in better agreement with the observed data. Contrary to conventional practice, we conclude that dispersive calculations are essential when preparing hazard maps for outer-rise tsunamis.

Table 1. Calculated K and κ

Fault models	Long-wave eq		Dispersive eq.	
	K	κ	K	κ
Baba et al. ¹ (Fault ID 10)	1.09	1.49	0.97	1.49
Kanamori ⁷	1.17	1.55	1.13	1.57
Uchida et al. ⁸ (Compound model)	0.72	1.57	0.69	1.58
Aida ⁹	1.03	1.50	0.91	1.49

Acknowledgement

This study was supported by Japan Society for the Promotion of Science KAKENHI Grants P19H02409, JP20H00294. The tsunami calculations were conducted on the Earth Simulator. We deeply thank staff who served on the operations of the Earth Simulator.

References

- [1] Baba, T., Chikadasa, N., Nakamura, Y., Fujie, G., Obana, K., Miura, S. & Kodaira, S. Deep investigations of outer-rise tsunami characteristics using well-mapped normal faults along the Japan trench. *J. Geo. Res.: Solid Earth* 125, e2020JB020060, <https://doi.org/10.1029/2020JB020060>, 2020.
- [2] Okada, Y. Surface deformation due to shear and tensile faults in a half-space. *Bull. Seism. Soc. Am.* 75, 1435–1154, 1985.
- [3] Tanioka, Y., & Satake, K. Tsunami generation by horizontal displacement of ocean bottom. *Geophys. Res. Lett.* 23, 861–864, 1996.
- [4] Kajiura, K. The leading wave of a tsunami. *Bull. Earthquake Res. Inst.*, 41, 535–571, 1963.
- [5] Chikadasa, N., Global tsunami Terrain Model, <https://kiyuu.bosai.go.jp/GtTM/>. doi:10.17598/NIED.0021, 2021.
- [6] Aida, I., Reliability of a tsunami source model derived from fault parameters, *J. Phys. Earth*, 26, 57-73, 1978.
- [7] Kanamori, H. Seismological evidence for a lithospheric normal faulting - the Sanriku earthquake of 1933, *Phys. Earth Planet. Inter.* 4, 289–300, 1971.
- [8] Uchida, N., Kirby, S.H., Umino, N., Hino, R. & Kazakami, T. The great 1933 Sanriku-oki earthquake: reappraisal of the mainshock and its aftershocks and implications for its tsunami using regional tsunami and seismic data. *Geophys. J. Int.* 206, 1619–1633 doi:10.1093/gji/ggw234, 2016.
- [9] Aida, I. Simulations of Large Tsunamis Occurring in the Past off the Coast of the Sanriku District. *Bulletin of the Earthquake Research Institute* 52, 71-101, 1977. (in Japanese with English abstract).