

津波被害軽減に向けたアウターライズ地震による津波の高精度計算

課題責任者

馬場 俊孝 徳島大学 大学院理工学研究部

著者

馬場 俊孝 徳島大学 大学院理工学研究部

2011年東北沖地震の後、発生の可能性が指摘されているアウターライズ地震に伴う津波は短波長成分に富むため、その計算においては通常用いられる長波理論ではなく、分散波理論が必要となる。また、大津波は大洋を横断し地球の裏側まで達することができるが、近年、その計算の際に地殻の弾性と海水密度の鉛直分布を考慮することにより予測精度が飛躍的に向上することが明らかとなった。分散波理論に加えて地殻の弾性と海水密度構造を考慮した計算は高負荷となるため地球シミュレータが必要である。本課題ではこの計算を地球シミュレータ上で実現し、2011年東北津波の観測記録と比較し計算精度を評価した。さらに日本海溝より海側の太平洋プレート内で発生するアウターライズ地震津波に適用した。

キーワード：津波, アウターライズ地震

1. はじめに

2011年東北沖地震のようなプレート境界での巨大地震に続いて、沈み込む前の海洋プレート（アウターライズ）内で正断層型巨大地震が発生することが指摘されている。例えば明治三陸地震後の昭和三陸地震がその例であり、昭和三陸地震の際にはその津波により被害が発生した。これまで重点的に研究が進められてきたプレート境界型地震と比較して、アウターライズ地震はその科学的情報が豊富ではないため、現在、アウターライズ潜在断層のマッピングに向けた調査観測が進められている。この調査により近い将来アウターライズ地震の震源断層に関する詳細な情報が得られると期待される。

震源断層イメージングを地震被害の軽減に結びつけるには、その断層を仮定した地震動や津波の予測が必須である。一般に津波は水深と比較して波長が十分に長い長波として扱われる。しかし、アウターライズ地震は陸から見て海溝軸よりも向う側の深海で発生するとともに、高角な断層であるため比較的短波長の津波を発生させる。このため、長波理論が成り立たないケースが想定され、長波理論ではなく分散波理論を用いる必要がある。分散波理論は一般に陰の解法が用いられるため、長波理論に比べて20倍～30倍計算負荷が高く、ESなどの高性能計算機が必要となる（Baba et al., 2015[1]）。そこで本研究ではアウターライズ地震による津波の高精度シミュレーションを目的として、今年度は津波計算コードの開発およびテスト計算を実施した。

2. 津波計算モデル

一般に津波の計算で利用される非線形長波式（浅水理論）は、質量保存則（連続の式）と運動量保存則（オイラー（Euler）の運動の式）を基礎式として、水深に比べて波長が十分に長いという仮定で導かれた平面二次元の波動方程式である。それに基づく津波の数値解法にはスタッガード格子のリーブフロッグ差分法がよく用いられ、さらに海と陸の境界に移動境界条件を適用することにより、波源から津波の伝播、変形、遡上の一連の過程をひとつの計算スキームで再現することができる。

非線形長波理論の大きな特徴のひとつは波速に水位効果が含まれることで、津波の水位が高いところでは波速が大きくなり、水位が低いところでは波速が小さくなる。この性質により波の前面が徐々に急勾配になる前傾化と呼ばれる現象がおきる。津波が前傾化すると波長が短くなり、波長が十分に長いという長波の仮定から離れていく。波長の短い波は波速が小さいために逆に遅れ、波が分裂する。この現象は非線形長波理論では再現できないが、

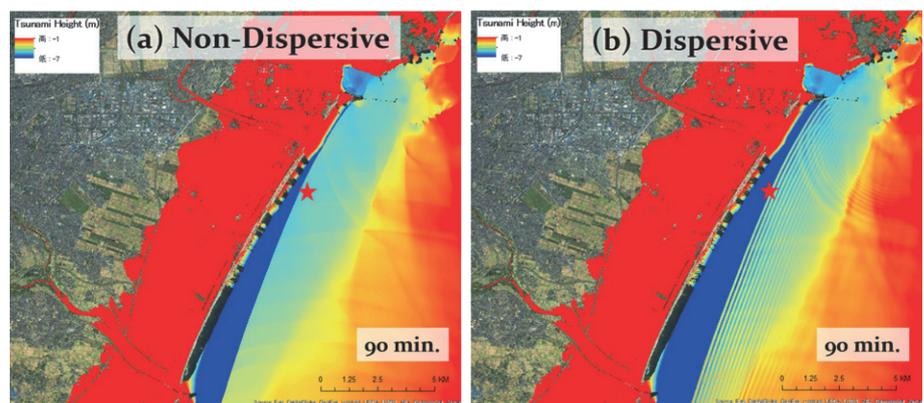


図1 2011年東北地方太平洋沖地震発生90分後の海面変動。(a)は非線形長波理論式、(b)非線形分散波理論式による。(b)では短波長の波群（ソリトン分裂波）の発達が確認できる。図中星印の位置の水位時系列を図2に示す。

非線形長波理論を基本として分散項を加えることにより再現でき、本稿ではこれを分散波理論と呼ぶことにする。この時、水位が高いところでは波速が大きくなるという効果と、波長が短い波は波速が小さくなるという相対する二つの効果が合わさるのだが、この両者がバランスすると波のどの部分でも同じ速度で進み、波の形が変化しなくなる。1波だけであればソリトン波（孤立波）、周期性を持って繰り返すのであればソリトン分裂波と呼ばれる。

分散性が現れる別の例として長距離を伝播する津波がある。そもそも津波波源にはさまざまな波長の波が含まれており、近地であれば波長に依存する波速の違いの効果は無視できるものの、大洋を横断するような津波は伝播距離が長いとその効果が顕著になってくる。この波数分散性も分散波理論で再現可能である。分散波理論が必要か否かの指標は Kajiura (1963[2]) によって提案されている。

近年、2010年チリ地震津波および2011年東北地方太平洋沖地震による津波の DART 観測点の遠地記録と数値シミュレーションの比較から、到着時刻の系統的なずれと第1押し波の前の小さな引き波が再現できないという問題点が指摘された。その後、Watada (2013[3]) や Watada et al. (2014[4]) などの研究から、津波の荷重による地球の微小な弾性変形と海水の圧縮性を考慮することによって説明可能であることが発見された。Allgeyer and Cummins (2014[5]) はその効果を平面二次元モデルに取り込む方法を示した。

本研究では上述の非線形、分散性、地殻の弾性、海水の圧縮性というすべての効果を取り入れた平面二次元の数値シミュレーションモデルを開発した。

3. 津波シミュレーションモデルの精度検証

実際にアウトラーサイズ地震の津波に適用する前に、2011年東北地方太平洋沖地震津波に適用し、本研究で開発した津波計算モデルの精度を確認する。

2011年東北津波の時には仙台平野沖で自衛隊のヘリコプターによりソリトン分裂波が撮影された。ビデオ記録の分析（村嶋ほか、2012[6]）によれば、分裂波の波長は百mから数百m程度、波高は数m程度であると推定された。

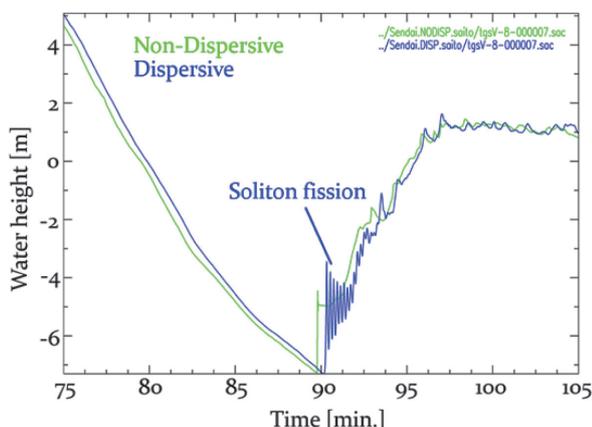


図2 図1中の星印の場所での非線形長波式（緑）と非線形分散波式（青）の時系列水位波形の比較。

この分裂波の再現を試みる。

波長の短い分散波を再現するために、地形ネスティングにより効果的に研究対象地域である仙台平野沖の空間分解能を向上させた。最も内側のネスティンググリッドの地形分解能は2/9秒（約6m）と設定した。伝播・遡上計算に必要な地形格子データは海底地形デジタルデータ M7000 シリーズ、海洋研究開発機構がコンパイルしたデータ、グローバル地形データ GEBCO を利用して構築した。陸上の地形は国土地理院の5mDEM から作成した。

津波波源には Saito et al. (2011[7]) を利用し、時間ステップ幅0.1秒として、3時間分の津波を計算した。マニングの粗度係数は海域陸域ともに0.025sm-1/3とした。外側境界には吸収境界9)を利用し、計算範囲の端からの反射を軽減した。

自衛隊ヘリが撮影した頃（地震発生90分後）の仙台平野沖の計算結果を図1に示す。また、図1中星印で示した位置での水位の時系列を図2に示す。非線形分散波モデルの計算結果では少なくとも13個の分裂波が確認できる。分裂波の波長は約200m、波高は最大3mであり、自衛隊ヘリから撮影された分裂波の特徴をほぼ再現した。また、計算で得られた分裂波の周期は約13秒であった。これらの特徴はビデオで確認された実際のソリトン分裂波の特徴とほぼ一致している。

2つ目の検証材料として、太平洋を伝播する遠地津波を取り上げた。2011年東北地方太平洋沖地震の遠地津波のシミュレーションを実施した。計算領域は太平洋全体を含むように東経120-300°、南緯60-北緯60°とした（図3）。計算に必要な地形データはGEBCOを利用し、差分計算の格子間隔は30秒とした。近地の計算と同様津波波源を利用した。時間ステップ幅0.5秒として、28時間分の津波を計算した。外側境界には吸収境界を設けた。

図4に本研究で使用した DART 観測点位置と津波波形の比較を示す。非線形分散波理論による計算（図4a, b）では津波波形の形は観測とよく似ているものの、津波到達時刻はハワイ付近の DART51407 では約7分、チリ付近の DART32401 では約15分早い。また、観測波形には初めの押し波の前に小さな引き波が見られるが、一方、計

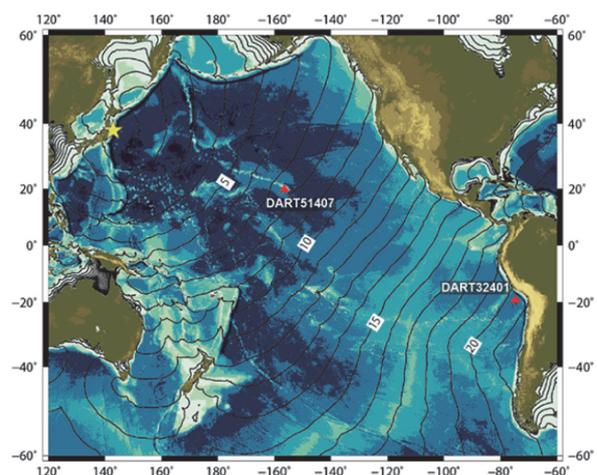


図3 本研究で比較に用いた DART 観測点 (51407, 32401) の位置。

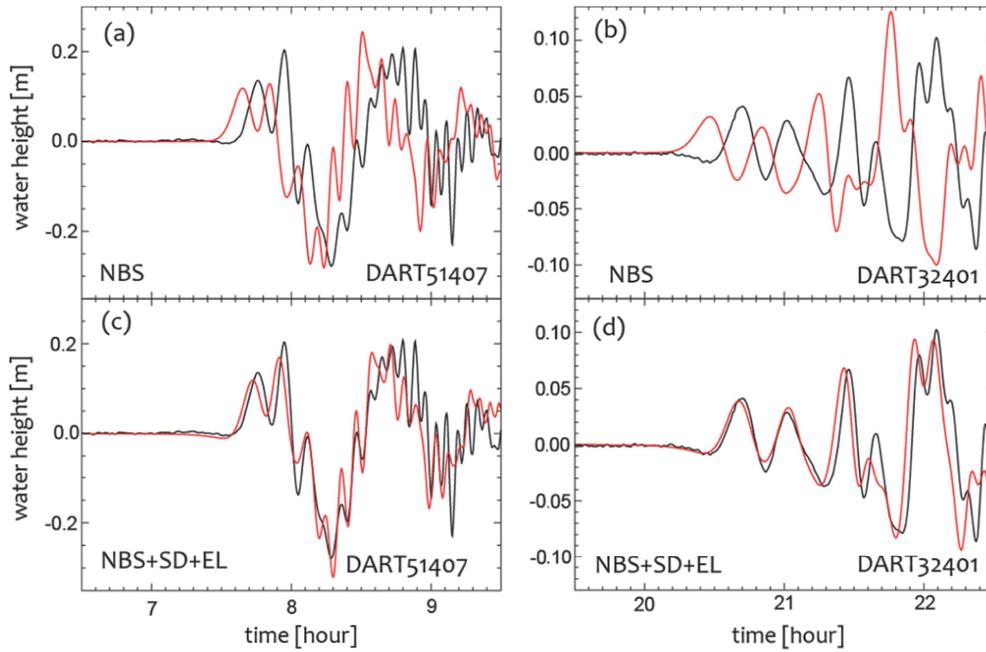


図4 DART51407と32401での観測記録とシミュレーション波形の比較。黒が観測、赤がシミュレーション。(a)、(b)は非線形分散波理論式によるもの。(c)、(d)は非線形分散波式に地殻の弾性と鉛直方向の海水密度構造を連続の式に考慮したもの。

算波形にそれは存在しない。地殻の弾性と海水の圧縮性を考慮したモデル（図4c, d）では、計算波形の津波到着時刻が遅れ、観測波形をほぼ再現できるようになっていることがわかる。また、初めの押し波の前の小さな引き波もシミュレーションにおいても確認される。

4. アウターライズ地震津波の計算

ここで開発した津波計算コードを用いて、日本海溝沖アウターライズ地震の代表である1933年昭和三陸地震の津波計算を実施した。図5に示す比較的近地のGPS波浪計位置(GPS801, 804)とDART21418では分散性の効果が少し見られた。遠地の観測点では分散性に加えて地殻の弾性変形による効果、海水の鉛直密度構造により大きく津波波形が変化することがわかった。

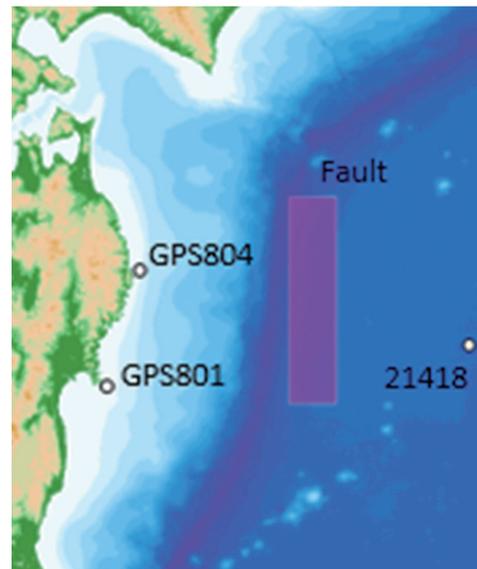


図5 アウターライズ地震津波シミュレーションに用いた断層(紫)と近地観測点

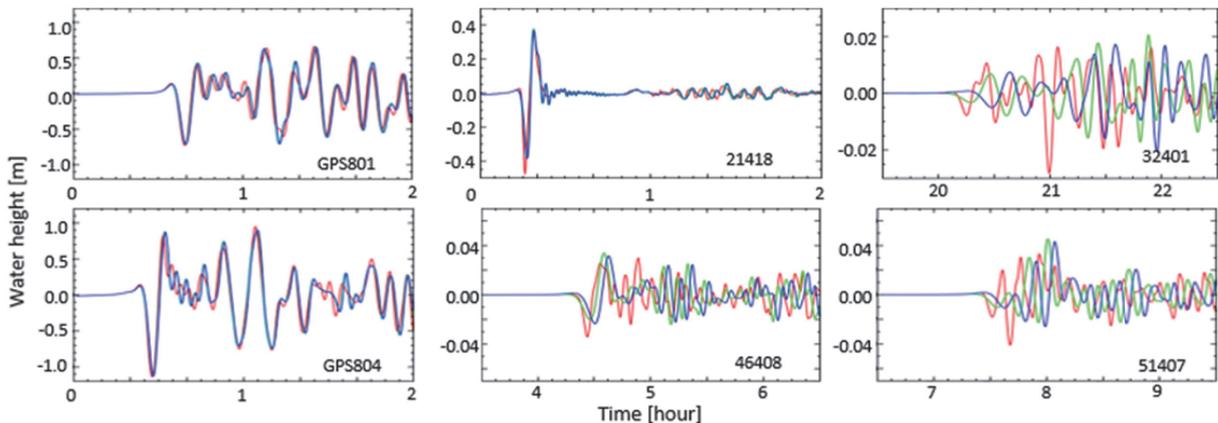


図6 アウターライズ地震による津波波形の比較（すべて計算）赤：非線形浅水波理論、緑：非線形分散波理論、青：非線形分散波理論に地殻の弾性、海水の鉛直密度構造を考慮したもの。

5. まとめ

本研究で開発した非線形、分散性、地殻の弾性、海水の圧縮性を考慮した平面時に次元の津波計算コードを開発し、2011年東北地方太平洋沖地震の津波を利用して、その精度検証を実施し、高精度で津波現象をシミュレートできることを確認した。来年度以降は本コードを利用してアウターライズ地震による津波を詳細に検討していく予定である。

謝辞

本研究の実施にあたり、海洋研究開発機構地球情報基盤センターより、多大なご尽力と賜りました。特に上原均氏、今任嘉幸氏には業務の枠を超えて、本研究の実施にご協力いただきました。記して感謝いたします。

文献

- [1] Baba, T., N. Takahashi, Y. Kaneda, K. Ando, D. Matsuoka, and T. Kato, Parallel implementation of dispersive tsunami wave modeling with a nesting algorithm for the 2011 Tohoku tsunami, *Pure appl. Geophys.*, doi:10.1007/s00024-015-1049-2, 2015.
- [2] Kajiura, K.: The leading wave of a tsunami, *Bull. Earthquake Res. Inst. Univ. Tokyo*, 41, 535–571, 1963.
- [3] Watada, S., Tsunami speed variations in density-stratified compressible global oceans, *Geophys. Res. Lett.*, 40, 4001–4006, doi:10.1002/grl.50785, 2013.
- [4] Watada, S., Kusumoto, S., Satake K., Traveltime delay and initial phase reversal of distant tsunamis coupled with the self-gravitating elastic Earth, *J. Geophys. Res. Solid Earth*, 119, 4287–4310, doi:10.1002/2013JB010841, 2014.
- [5] Allgeyer, S., and Cummins, P.R.: Numerical tsunami simulation including elastic loading and seawater density stratification, *Geophys. Res. Lett.*, 41, 2368–2375, doi:10.1002/2014GL059348, 2014.
- [6] 村嶋陽一, 越村俊一, 岡秀行, 村田泰洋, 藤間浩司, 杉野英治, 岩淵洋子: 非線形分散波理論モデルによる東北地方太平洋沖地震津波のソリトン分裂の再現、*土木学会論文集 B2(海岸工学)*, Vol. 68, pp. I_206-I_210, 2012.
- [7] Saito, T., Y. Ito, D. Inazu, and R. Hino, Tsunami source of the 2011 Tohoku - Oki earthquake, Japan: Inversion analysis based on dispersive tsunami simulations, *Geophys. Res. Lett.*, 38, L00G19, doi:10.1029/2011GL049089, 2011.

High-accurate Simulation of Tsunami Caused by Outer-rise Earthquake for Disaster Mitigation

Project Representative

Toshitaka Baba Tokushima University

Author

Toshitaka Baba Tokushima University

Occurrence of an outer-rise earthquake is highly expected along the Japan Trench after the 2011 Tohoku earthquake and tsunami. We at first need to produce an accurate prediction of the tsunami in order to mitigate damage associated by the tsunami from the outer-rise earthquake. For the tsunami simulation of the outer-rise tsunami, dispersive effects cannot be neglected because the short-wavelength tsunami is likely caused by the faulting with high angle. Large tsunami can propagate over the long distance across the ocean. The recent studies showed the prediction accuracy of the trans-pacific tsunami is dramatically improved by considering the effects of elasticity of the Earth and sea water compressibility. In this study, we combined all the effects of reflection and refraction on the actual bathymetry, nonlinearity, frequency dispersion, seawater density stratification, and elastic loading using a single FDM code and attempted to apply it to a high-accurate simulation of tsunami caused by the outer-rise earthquake.

Keywords: Tsunami, Outer-rise earthquake

1. Introduction

Interplate earthquakes were often followed by outer-rise earthquakes. A pair of the 1896 Meiji-sanriku earthquake and 1933 Showa-sanriku earthquake is an example of the sequence. Another one can be seen in a pair of the 2006 and 2007 Kuril earthquakes. In Japan, the 2011 Tohoku earthquake generated severe tsunami disasters along the coast of the northeastern Japan, but is not yet followed by an outer-rise event near the Japan trench. We therefore anticipate the occurrence of an outer-rise event accompanied by tsunami.

The shallow water equations used in the tsunami calculations assume that the tsunami wavelength is much longer than water depths. It is valid when we calculate tsunami caused by the interplate earthquake such as the 2011 Tohoku earthquake. However, tsunami generated by an outer-rise earthquake contains short-wavelength component comparison with the water depth because of high-angle fault slip beneath the deep ocean. The assumption of the long wave may not be valid any more. Therefore, we would include the dispersive (Boussinesq) term to the shallow water equations to simulate the tsunami cause by the outer-rise earthquake. The dispersive model requires computational cost 20-30 times larger than that of the simple shallow water model because we use an implicit method to solve the dispersive term (e.g. Baba et al., 2015[1]).

In addition to the dispersive term, the tiny elastic deformation of the Earth due to tsunami load and seawater compressibility are important to improve prediction accuracy of tsunami in far-field (e.g. Watada, 2013[2]; Watada et al., 2014[3]). Allgeyer and Cummins (2014[4]) successfully suggested a practical

method to add these effects in the conventional numerical FDM scheme. This study combined the module of Allgeyer and Cummins (2014) with the Baba's (2015) code for an accurate calculation of tsunami caused by outer-rise event.

2. Validations of tsunami numerical model

Analysis of a video of the Tohoku tsunami (Murashima et al. 2012[5]) has indicated the occurrence of the split wave, called soliton fission which is short-period waves around tsunami crest caused by combination of wave nonlinearity and dispersion. The wavelengths of the split waves ranged from 100 m to several hundred meters, and the amplitudes were several meters. If soliton fission occurs, the leading wave is amplified dramatically, the result being a larger tsunami force on coastal structures.

We accordingly used a new tsunami calculation code solving the nonlinear shallow water equations with the Boussinesq terms with a nested algorithm on a staggered, leap-frog finite difference scheme to calculate the soliton fission during the 2011 Tohoku tsunami. Good agreement was apparent between the dispersive wave model results and the tsunami waveforms observed offshore.

In the trans-pacific tsunami simulation, we considered using the shallow water equations and accounting for the effects of Boussinesq dispersion, seawater density stratification, elastic loading, and gravitational potential change in a finite difference scheme. By comparing numerical simulations that included and excluded each of these effects with the observed waveforms of the 2011 Tohoku tsunami, we found that all of

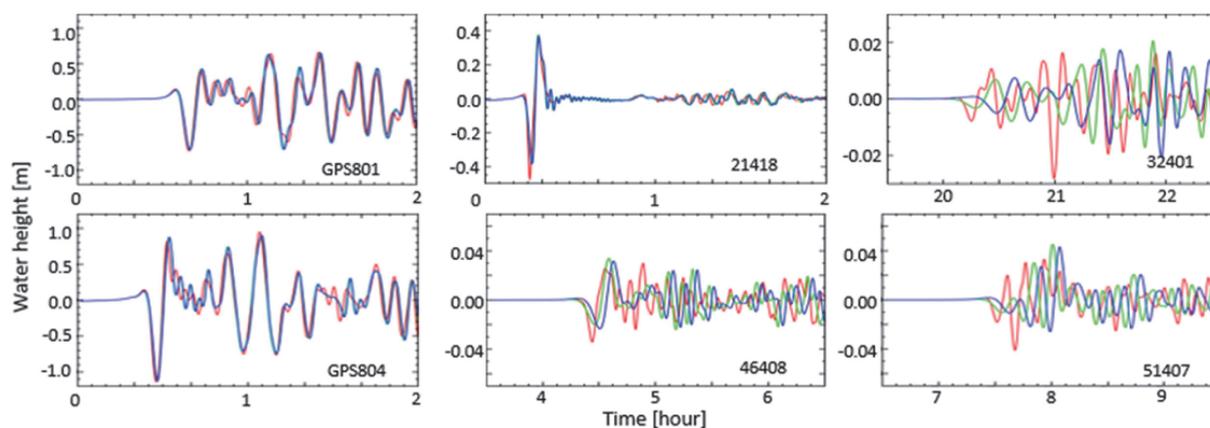


Fig. 1 Comparisons of calculated tsunami waveforms by assuming an outer-rise event near the Japan Trench. Red : Nonlinear shallow water equations, Green: Nonlinear shallow water equations with Boussinesq terms, Blue: Nonlinear shallow water equations with Boussinesq terms and including effect of Earth elasticity and sea water density stratification.

these effects are significant and resolvable in the far field by the current generation of deep ocean-bottom pressure gauges. Our calculations using previously published, high-resolution models of the 2011 Tohoku tsunami source exhibited excellent agreement with the observed waveforms to a degree that has previously been possible only with near-field or regional observations.

3. Preliminary result of outer-rise earthquake tsunami simulation

We applied the tsunami simulation code developed in this study to the 1933 Showa-sanriku outer-rise earthquake. This is still a preliminary consideration because we used only one bathymetric grid, thus the nested grid algorithm was not applied in the calculation. In any case, we compare the tsunami waveforms at GPS801, 804 and DART21418 in near field and DART46408, 32401, and 51407 in far field in Figure 1. We found that dispersive effect can be seen in both near and far fields while the effect of the elasticity of the Earth and sea water density stratification were significant the waveforms in far field only.

For the further study, we will apply the nested grids to the tsunami simulation of the outer-rise event to investigate tsunami deformation near the coast.

Acknowledgement

We received kind supports from Center for Earth Information Science and Technology. Especially, we thank Mr. Yoshiyuki Imato and Dr. Hitoshi Uehara for continuous technical supports.

References

- [1] Baba, T., N. Takahashi, Y. Kaneda, K. Ando, D. Matsuoka, and T. Kato, Parallel implementation of dispersive tsunami wave modeling with a nesting algorithm for the 2011 Tohoku tsunami, *Pure appl. Geophys.*, doi:10.1007/s00024-015-1049-2, 2015.
- [2] Watada, S., Tsunami speed variations in density-stratified compressible global oceans, *Geophys. Res. Lett.*, 40, 4001–4006, doi:10.1002/grl.50785, 2013.
- [3] Watada, S., Kusumoto, S., Satake K., Traveltime delay and initial phase reversal of distant tsunamis coupled with the self-gravitating elastic Earth, *J. Geophys. Res. Solid Earth*, 119, 4287–4310, doi:10.1002/2013JB010841, 2014.
- [4] Allgeyer, S., and Cummins, P.R.: Numerical tsunami simulation including elastic loading and seawater density stratification, *Geophys. Res. Lett.*, 41, 2368–2375, doi:10.1002/2014GL059348, 2014.
- [5] Murashima, Y., S. Koshimura, H. Oka, Y. Murata, K. Fujima, H. Sugino, Y. Iwabuchi, Numerical simulation of soliton fission in 2011 Tohoku tsunami using nonlinear dispersive wave model, (in Japanese with English abstract), *J. Japan Society of Civil Engineers (B2)*, 68, I_206–I_212, 2012.