

# 非線形分散波理論による2011年東北地方太平洋沖地震津波の計算

馬場 俊孝

●徳島大学大学院ソシオテクノサイエンス研究部 教授

## 1. はじめに

2011年3月11日に発生した東北地方太平洋沖地震の津波(以下、2011年東北津波)は岩手県、宮城県を中心に甚大な被害を発生させた。この津波の伝搬、遡上の再現計算や南海トラフなどでの将来発生するとされる津波の想定には、非線形長波理論が用いられている。また、計算に必要な津波の初期水位分布は、断層運動による地盤の鉛直変位と同じ形として扱われることが普通である。しかし、2011年東北津波においては、通常用いられるこれらの方法では再現できない現象がいくつか確認された。

我々は、これらの現象の予測を可能にすることを目的として、平面二次元の津波計算コードの高度化を共同で行っている。このコードは開発に参画している機関の頭文字を並べて「JAGURS」と呼ばれる。JAGURSには様々な機能があるが、本稿では、非線形分散波式の適用と津波の初期波形のモデル化を中心にして、2011年東北津波の再現計算を紹介する。

## 2. 非線形分散波モデル

津波が浅海域に達すると徐々に非線形効果が大きくなり、波が切り立ってくる。遠浅の海岸のように海岸線へ到達するまでに十分な時間があると非線形効果と分散効果により、津波の波峰が複数の波に分かれることがあり、これを津波のソリトン分裂という。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<sup>1)</sup>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。

ソリトン分裂が発生すると、波高が高くなり、その後急激に碎波するために、波力が大きくなると考えられる。また、2011年東北津波の際に注目された津波堆積物の原因となる海底土砂の巻き上げが大きくなると予想される。津波のソリトン分裂を再現するには、非線形分散波理論を利用する必要がある。非線形分散波理論は、1983年日本海中部地震をきっかけとして、1990年代に発達したモデルであるが、数値計算的には分散項を陰的に解くため計算負荷が高く、その適用例は必ずしも多くない。

一方、計算機の発展は目覚ましく、約10年で1000倍

のペースで性能向上が続いている。近年では数百から数千プロセッサを使った大規模並列計算も珍しくなく、計算負荷の高い非線形分散波式も、広域に高分解能で数値的に解けるようになってきた。

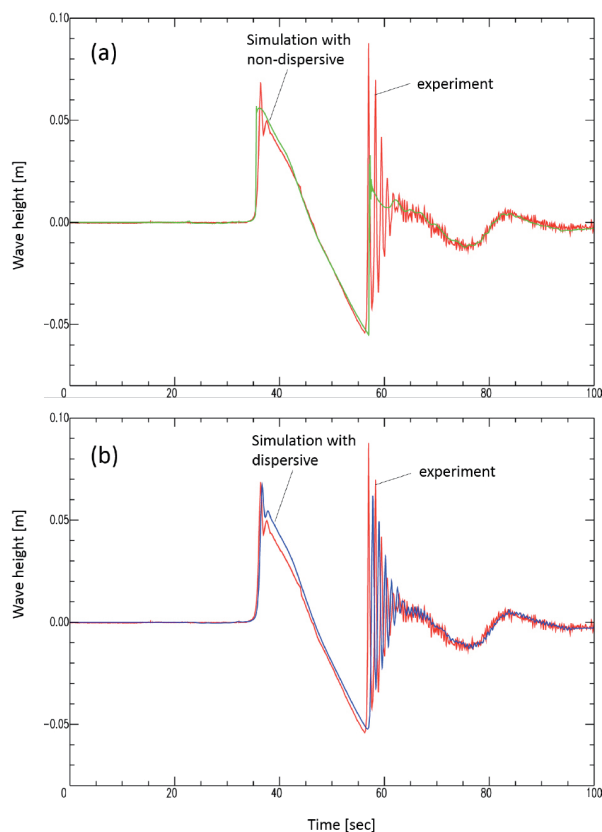


図1 大規模造波実験の再現シミュレーション (a)非線形長波モデル、(b)非線形分散波モデル

JAGURSは非線形分散波式をスタッガード格子のリープフロッグ陰解法形式の差分法で解いている(詳細はBaba et al., 2015<sup>2)</sup>を参照)。ここでは、OpenMPのスレッド並列によるループ分割、MPIによるプロセス並列、それらのハイブリッド並列による処理が可能である。プロセス並列には領域分割法を採用し、あるプロセッサが担当する領域の端の水位、流速の更新処理の際に、別のプロセッサが保持する隣接領域の水位、流速の情報が必要となるが、その場合はMPI通信により、必要な情報を取得している。また、JAGURSでは地形ネスティングが可能である。ネスティング

リッド間の通信も同様に、更新の際に情報が足りない場合は、それを保持する別のプロセッサからMPI通信で取得するという方法を採用している。京コンピュータをはじめとするスパコンや中規模クラスタ計算機、PCでも実行が可能である。

### 3. 非線形分散波モデルによる大規模水路実験の再現

まず、JAGURSの計算結果と水理実験を比較する。Matsuyama et al. (2007)<sup>3)</sup>は、長さ約200mの大規模造波水路を用いた水理実験によりソリトン分裂現象を再現した。大規模造波水路には大陸棚を模擬した1/150の地形が設置され、地形勾配と造波周期と振幅をさまざまに変えて繰り返し実験を行った。

本稿では、この実験のうち明瞭なソリトン分裂が発生した地形勾配1/200、造波周期20秒、片振幅0.03mのケースを対象とした時系列水位波形とJAGURSを用いて計算した結果を比較した。非線形長波モデル(図1a)では実験で記録された分裂波を全く再現できていないのとして、非線形分散波モデル(図1b)では、分裂波の振幅、周期共にほぼ再現できていることがわかる。

### 4. 非線形分散波モデルによる2011年東北津波の再現

次にJAGURSを用いて2011年東北地震の再現計算を実施する。研究対象領域は自衛隊ヘリからソリトン分裂現象が確認された仙台平野沖とし、図2に示す領域で津波を計算した。そこでは、四角で示されように5層のネスティンググリッドを設定し、研究対象領域に向かって、地形分解能を向上させた。ビデオ分析<sup>1)</sup>よ

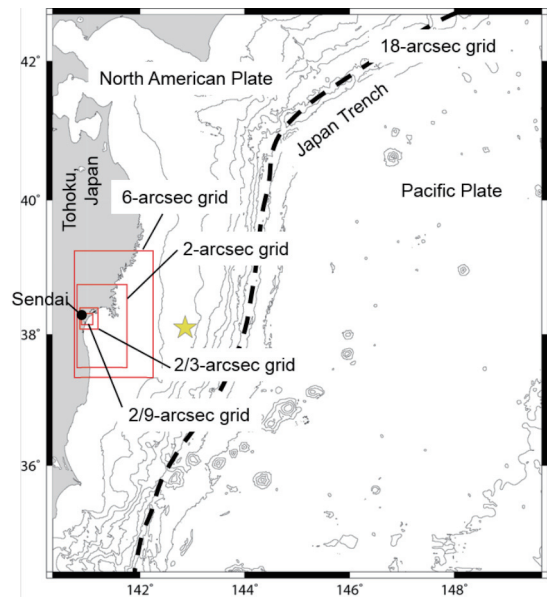


図2 2011東北津波の計算領域。沿岸付近の四角はネスティンググリッド領域を示す。

て分裂波の波長は百mから数百m程度と読み取られており、これを再現するために最も内側のネスティンググリッドの地形分解能は2/9秒格子(約6m)と設定した。

2011年東北津波の初期水位分布としてSaito et al. (2011)<sup>4)</sup>の提案モデルを利用した。津波の伝搬計算には非線形分散波理論を用い、海底摩擦のマニングの粗度係数は一律に $0.025 \text{ s/m}^{1/3}$ とした。陸上への遡上も考慮した。差分計算の安定条件を満たすため、時間ステップ幅を0.1秒に設定し、3時間分の津波伝搬を計算した。計算には理化学研究所の京コンピュータ192ノード(1,536コア)を利用した。計算を終えるまでに必要

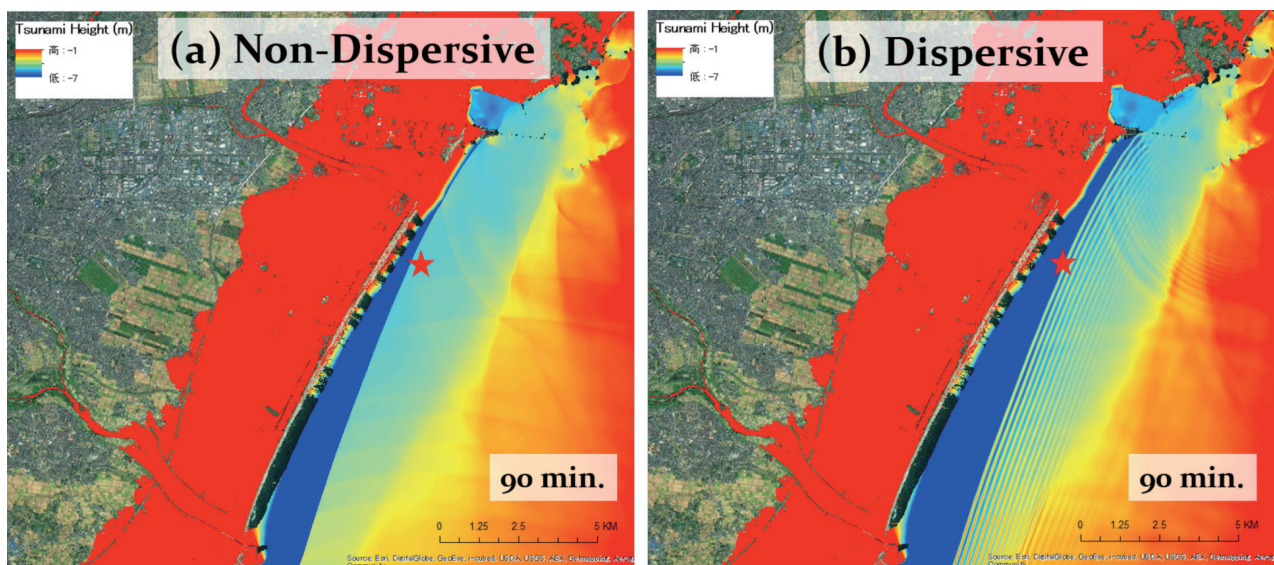


図3 非線形長波モデル(左)と非線形分散波モデル(右)によって得られた2011年東北地方太平洋沖地震発生後90分の仙台平野周辺での水位分布。

だった時間は約9.5時間であった。比較のため非線形長波モデルでの計算も行った。

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3に示す。また、図3中星印で示した位置での水位の時系列を図4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。

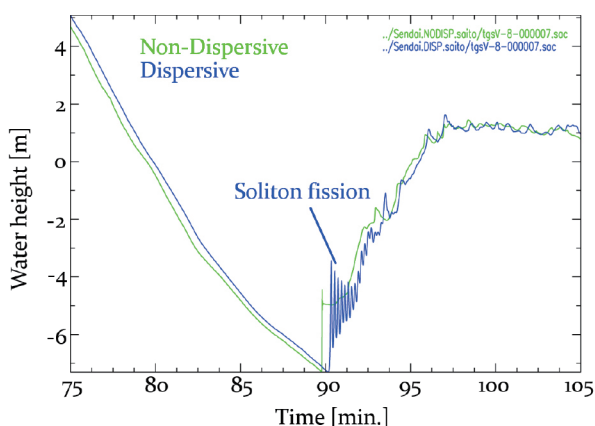


図4 図3中星印の位置の時系列水位波形 分散波モデルではソリトン分裂(Soliton fission)が確認できる。

## 5. 津波の初期水位分布のモデル化

最後に、津波発生過程モデル化についての考察を行う。津波は断層運動などによる海底の地殻変動によって、海水が持ち上げられることによって発生する。津波の計算に必要な初期波形は、断層運動による地盤の鉛直変位と同じ形を入力するのが一般的である。しかし、海底斜面が水平移動すると、見かけのうえでは水深が変化し、これによって津波が発生することがある<sup>5)</sup>。特に2011年東北地方太平洋沖地震では、断層運動より海底が約50mも水平変位したと報告されている<sup>6)</sup>。さら

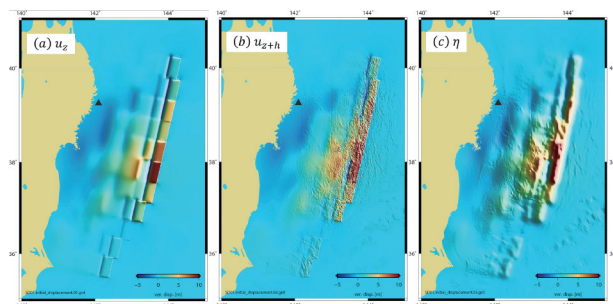


図5 モデル化の違いによる初期水位分布の違い。(a)海底地殻変動の鉛直成分と同じ。(b)海底斜面の水平移動の効果<sup>5)</sup>を考慮したもの。(c)さらにローパスフィルタ<sup>7)-8)</sup>をかけたもの。

に、この場合、合算した海底の変位に短波長成分が含まれるが、短波長成分は海面には現れないため、ローパスフィルタが必要となることが理論的に示されている<sup>7)-8)</sup>。

JAGURSは津波の伝搬・遡上だけでなく、初期水位分布も断層パラメタに基づいて内部で計算できる。ここでは、半無限均質弾性体を仮定した海底地殻変動<sup>9)</sup>、斜面の水平移動の効果<sup>5)</sup>、ローパスフィルタ<sup>7)-8)</sup>を扱える。Satake et al. (2013)<sup>10)</sup>が提案した断層モデルに基づいてJAGURSより計算した津波の初期水位分布を図5で比較する。図5aは海底地殻変動の鉛直成分のみを海面に入力した場合の初期水位分布、図5bは図5aに海底斜面の水平移動による見かけ上の隆起を加えたもの、図5cはさらにローパスフィルタを施したものである。図5では断層破壊の時間発展は考慮されていないが、巨大地震の場合、すべての断層が破壊し終わるまでに5分以上かかることもある。Sakake et al. (2013)<sup>10)</sup>が示した断層破壊の時間発展も考慮した場合の入力海水位を図6に示す。

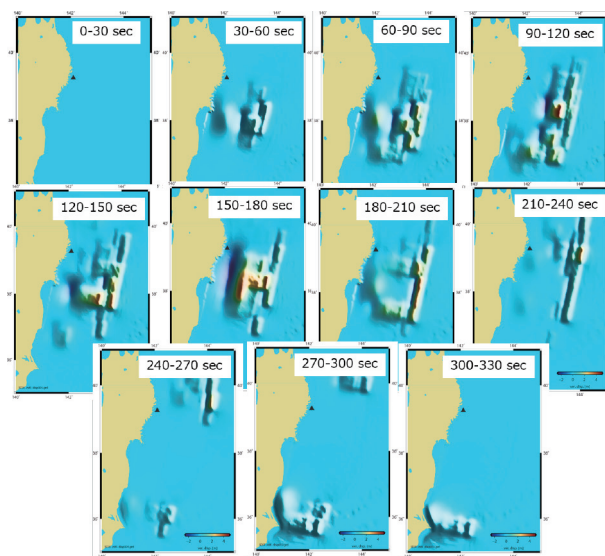


図6 図5cに加えて断層の破壊伝搬の効果を考慮したものの初期水位変動。30秒毎の入力水位を示す。

各初期水位モデルから計算されたGPS波浪計（図5中三角位置）での時系列津波波形を図7に示す。断層運動に起因する海底の鉛直変位成分のみを考慮した場合 ( $U_z$ )、斜面の水平移動の効果も加味した場合 ( $U_{z+h}$ )、それに短波長成分をカットするフィルタを施した場合 ( $\eta$ )、断層破壊の時間発展も考慮した場合 ( $\eta_{\text{time-dependent}}$ ) を示している。また、観測された津波波形を点線(obs)で示した。斜面の水平移動の効果を検討すると津波高が大きくなり、ローパスフィルタをかけるやや小さ

くなる。さらに断層の時間発展を考慮すると、波形の位相が遅れるとともに津波高がさらに小さくなる。このように初期水位モデルの扱いによって、得られる津波波形が明らかに異なることがわかる。つまり、2011年東北津波の初期水位分布のモデル化には、従来の海底地殻変動の鉛直成分のみならず、海底斜面の水平移動の効果やローパスフィルタが必要であると言える。

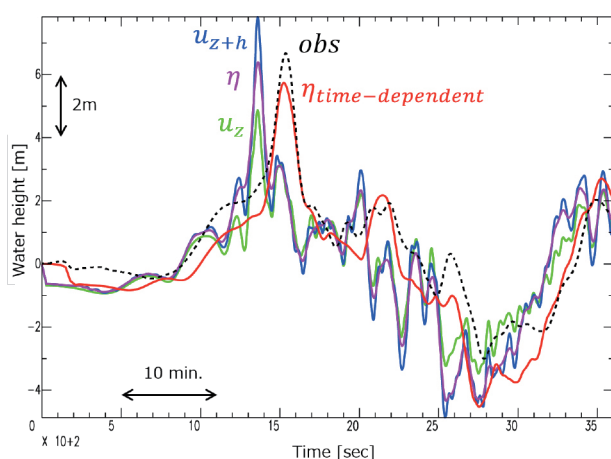


図7 初期水位のモデル化の違いに由来するGPS波浪計位置(図5中三角印)での津波波形の違い。

## 6. まとめ

本稿では、非線形分散波理論の適用と初期水位分布のモデル化の違いの影響について、2011年東北津波の観測データと数値計算結果を比較しつつ議論した。そして、これらの影響を考慮する／しないによって、津波波形が大きく違うことを示した。2011年東北地方太平洋沖地震はマグニチュード9.0という超巨大地震であるため、これらの効果が顕著であったのかもしれないが、その他の超巨大津波の再現シミュレーションや、南海トラフの超巨大地震による津波の想定においても、同様にこのような効果を考慮しなければならないケースがあると考えられる。

## 参考文献

- 1) 村嶋陽一他：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.
- 2) Baba, T. et al. : Parallel Implementation of Dispersive Tsunami Wave Modeling with a Nesting Algorithm for the 2011 Tohoku Tsunami, Pure Appl. Geophys., Vol. 172, pp. 3455-3472, 2015.
- 3) Matsuyama, M. et al. : A study of tsunami wave fission in an undistorted experiment, Pure Appl. Geophys., Vol. 164, pp.617-631, 2007.
- 4) Saito, T. et al. : Tsunami source of the 2011 Tohoku - Oki earthquake, Japan: Inversion analysis based on dispersive tsunami simulations, Geophys. Res. Lett., Vol. 38, L00G19, doi:10.1029/2011GL049089, 2011.
- 5) Tanioka, Y. et al. : Tsunami generation by horizontal displacement of ocean bottom, Geophys. Res. Lett., Vol. 23, pp. 861-864, 1996.
- 6) Fujiwara, T. et al. : The 2011 Tohoku-oki earthquake: displacement reaching the trench axis, Science, Vol. 334, p. 1240, 2011.
- 7) Kajiura, K. : The leading wave of a tsunami, Bull. Earthq. Res. Inst., Vol. 41, pp. 535-571, 1963.
- 8) Tanioka Y. et al. : Sediment effect on tsunami generation of the 1896 Sanriku tsunami earthquake, Geophys. Res. Lett., Vol. 28, pp. 3389-3392, 2001.
- 9) Okada, Y. : Surface deformation due to shear and tensile faults in a half-space, Bull. Seism. Soc. Am., Vol. 75, pp. 1435-1154, 1985.
- 10) Satake, K. et al. : Time and space distribution of coseismic slip of the 2011 Tohoku earthquake as inferred from tsunami waveform Data, Bull. Seismol. Soc. Am., Vol. 103, pp. 1473-1492, doi: 10.1785/0120120122, 2013.



馬場 俊孝 (ばば としたか)

1998年金沢大学卒、(独)海洋研究開発機構研究員を経て現職、博士(理学)、専門分野：津波