

津波伝播特性を利用した早期津波予測手法の開発

津野 靖士* 藤原 了**

Development on the Real-Time Prediction Method of Tsunami, using Tsunami Propagation Effect

Seiji TSUNO Satoru FUJIHARA

Networks of water pressure gauges have been installed in the Pacific Ocean floor around Japan. To predict rapidly Tsunami in the coastal zone where the depth of water is larger than 50m, we proposed a method convoluting Tsunami observed in the sea area and Tsunami propagation effect by a small fault. To predict Tsunami in the coastal zone where the depth of water is less than 50m, we proposed a method using a small-scale Tsunami simulation. In this study, we investigated the validity of the proposed methods, by applying these methods to numerical data of the 2011 off the Pacific coast of Tohoku earthquake.

キーワード：早期津波予測，津波伝播特性，津波シミュレーション，海域，沿岸，2011年東北地方太平洋沖地震

1. はじめに

2011年東北地方太平洋沖地震 (M_w 9.0) の津波では、早期において地震規模を過少評価したために、予想される沿岸域の津波高さについても過少評価された¹⁾。また、沖合のケーブル式海底水圧計の記録を利用した津波警報更新手段も不十分であった¹⁾。2011年東北地方太平洋沖地震による東日本太平洋沿岸の壊滅的な津波被害の経験を受けて、海域で発生した地震直後に適切な地震と津波の予測を行うことを目的に、日本海溝海底地震津波観測網 (Seafloor Observation Network for Earthquakes and Tsunamis along the Japan Trench : S-net)²⁾ が東日本の太平洋沖で整備されつつある。今後、沿岸から遠く離れた海域で津波が地震発生直後に観測されるため、震源域やマグニチュードに対応した海底面変位に還元せず、海域で観測された津波データを利用した沿岸での津波水位の直接的な予測手法の開発が期待されている^{例えば、3) ~ 6)}。本研究では、海域で観測された津波入射波形と事前に準備した海底地形による津波伝播特性を利用することにより、海域での津波入射直後に即時的な沿岸近傍の津波水位波形と沿岸の最大津波水位を予測する手法を開発した。2011年東北地方太平洋沖地震の津波シミュレーション結果を用いて、本手法の有効性を検証した。

2. 2011年東北地方太平洋沖地震の津波シミュレーション

2011年東北地方太平洋沖地震の津波波源モデルについては、内閣府の津波波源モデル⁷⁾ (図1) を用いた。有限差分法より2次元津波シミュレーションを行い、メッシュサイズ (格子間隔) は海域から内陸に向かって段階的に小さくなるように設定した (4段階: 1215m, 405m, 135m, 45m 格子間隔)。津波の1波長に対して20程度の格子を配置し⁸⁾、時間刻みは線形理論で0.81秒、非線形理論で0.09秒とした。各領域の格子中心に、水深・標高データを割り付けて地形モデルを作成した (図2)。水深データについては海上保安庁の海底地形デジタルデータ「M7000シリーズ」⁹⁾、標高データについては国土地理院の「5mメッシュ標高データ」¹⁰⁾ を用いた。津波の初期水位については、半無限弾性体中での鉛直成分の地殻変動¹¹⁾より計算した。式(1)~(3)に、津波シミュレーション¹²⁾で用いる非線形浅水長波理論式を示す。

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{\partial M}{\partial x} + \frac{\partial N}{\partial y} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial M}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{M^2}{D} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{MN}{D} \right) + gD \frac{\partial \eta}{\partial x} + \frac{gn^2}{D^{7/3}} M \sqrt{M^2 + N^2} = 0 \quad (2)$$

$$\frac{\partial N}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{MN}{D} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{N^2}{D} \right) + \frac{gD}{\partial y} \frac{\partial \eta}{\partial y} + \frac{gn^2}{D^{7/3}} N \sqrt{M^2 + N^2} = 0 \quad (3)$$

局所項 移流項 圧力項 海底摩擦

ここで、 x, y : 水平方向座標, z : 鉛直方向座標, t : 時間, g : 重力加速度, η : 水位, h : 水深, $M \cdot N$: $x \cdot y$ 方向の線流量, $D = (h + \eta)$: 全水深, である。

線形長波理論を用いた2次元津波シミュレーションより、海域から沿岸近傍 (水深50m程度¹³⁾) の津波水位

* 鉄道地震工学研究センター 地震解析研究室

** 伊藤忠テクノソリューションズ株式会社 原子力・エンジニアリング部

特集：防災技術

を計算した。線形解析では、上記式(2)・(3)における移流項と海底摩擦項を考慮しない。線形波動場では、津波は $c = \sqrt{gh}$ で表現される深さ依存の波速で伝播する。一方、非線形浅水長波理論を用いた2次元津波シミュレーションより、沿岸近傍から沿岸の津波水位を計算した。非線形波動場では、津波は $c = \sqrt{g(h+\eta)}$ で表現される波速で伝播する。

図3に、一例として、宮城県中部沖での計算された津波水位とGPS波浪計¹⁴⁾により観測された津波水位を比較した¹⁵⁾。計算された津波水位波形は観測水位波形を良く再現することから、全断層すべりによる2次元津波シミュレーションの妥当性が分かる。以後、本研究では、本2次元津波シミュレーション結果を正解(仮想の観測波形)として、次章で提案する手法の検証を行う。

3. 早期津波予測手法

3.1 概要

海域で観測された津波入射波形と事前に準備した海底

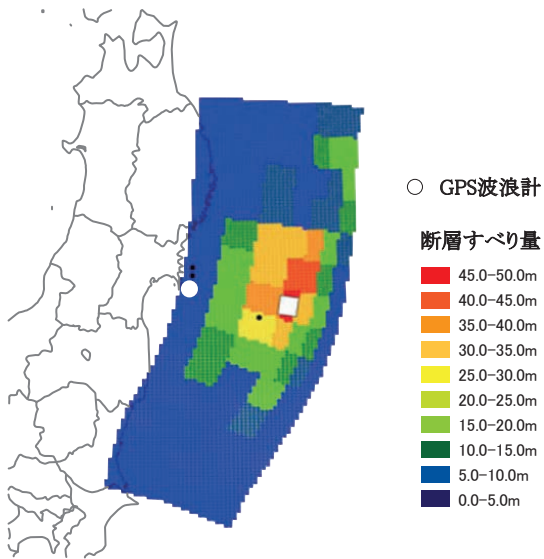


図1 2011年東北地方太平洋沖地震の断層すべり⁷⁾
(□は主要断層すべり領域)

地形による津波伝播特性を利用することにより、津波入射直後に即時的な沿岸近傍の津波水位波形と沿岸の最大津波水位を予測する手法を開発した。具体的には、図4に示した2つのステップにより沿岸の即時的な津波水位波形と最大津波水位の予測を行う。

- (1) 海域で観測された津波入射波形と事前に準備した津波伝播特性を利用することにより、沿岸近傍の

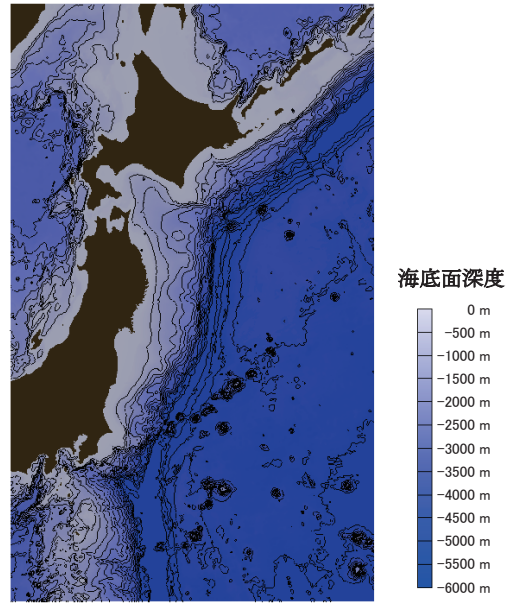


図2 海底地形モデル⁹⁾
(格子間隔 1215m, 等深線間隔 500m)

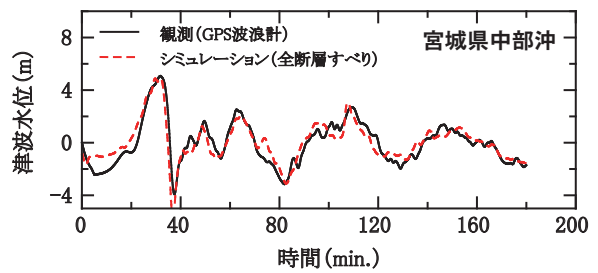


図3 宮城県中部沖における観測津波波形¹⁴⁾と線形長波理論を用いた計算津波波形の比較¹⁵⁾

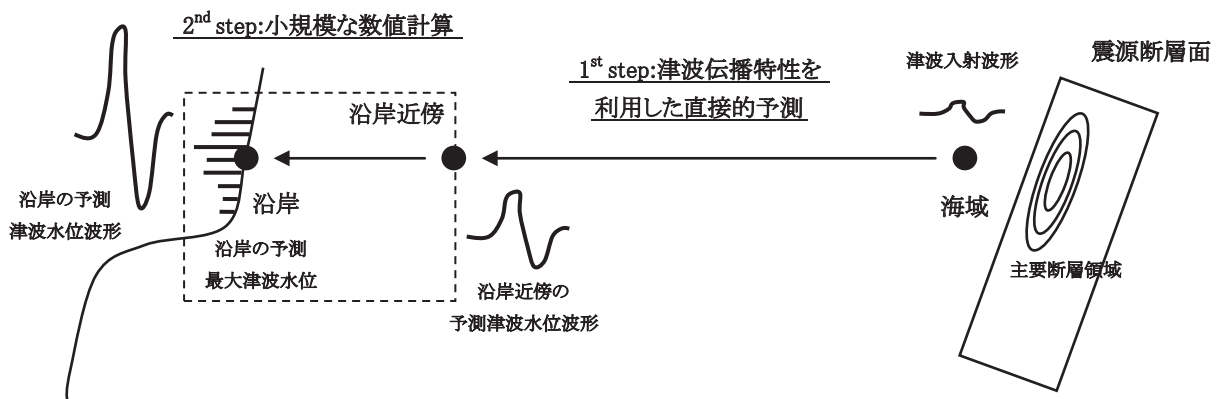


図4 本手法の概念図

津波水位波形を予測する。(1st step)

- (2) (1) で予測した沿岸近傍の津波水位波形を用いて、沿岸近傍～沿岸の対象地点を含めた小規模な 2 次元津波シミュレーションを行うことにより、沿岸の最大津波水位を予測する。(2nd step)

本手法の 1st step では、海域で観測された津波入射波形と事前に準備した海底地形による津波伝播特性を利用することにより、沿岸近傍の津波水位波形を予測する。津波入射波形は前章で説明した 2011 年東北地方太平洋沖地震の全断層すべりによる線形長波理論を用いた 2 次元津波シミュレーション結果を利用する。海底地形による津波伝播特性については、なるべく小さな断層領域を対象とし、海域入射地点と沿岸近傍予測地点の津波伝播特性を抽出する必要がある。そこで、2011 年東北地方太平洋沖地震の主要断層すべり (図 5 中の□: 25km 四方) による 2 次元津波シミュレーションを線形長波理論より行い、その結果を用いて海域入射地点と沿岸近傍予測地点の津波伝播特性を事前に準備した。本手法の検証では、全断層すべりを用いた 2 次元津波シミュレーション結果を正解とし、本手法による計算結果の比較対象とした。

3.2 津波伝播特性を利用した沿岸近傍の津波予測

3.2.1 津波伝播特性の抽出

津波伝播特性 $G_2(\omega)$ は、主要断層すべりに対する海域入射地点の津波水位 $S_2(\omega)$ と沿岸近傍予測地点の津波水位 $X_2(\omega)$ を周波数領域で除することにより算出した (式 (4))。その津波伝播特性 $G_2(\omega)$ と全断層すべりに対する海域入射地点の津波水位 $S_1(\omega)$ を掛け合わせ

る (式 (5)) ことにより、沿岸近傍予測地点の津波水位波形 $Y_1(\omega)$ を簡便にかつ即時的に算出することが出来る。 ω は角周波数である。

$$G_2(\omega) = X_2(\omega) / S_2(\omega) \tag{4}$$

$$Y_1(\omega) = S_1(\omega) \cdot G_2(\omega) \tag{5}$$

入射波形と出力波形、津波伝播関数には、以下のデータ処理¹⁶⁾を施した。

- (1) 入射波形には、移動平均によるローパスフィルタ (180 秒のタイムウィンドウ) を施し、後続波を除外するためにデータ長を主要動含む 48 分程度に短縮化した後、コサイン・テーパを施した。

$$fc = 0.443 \cdot fs / M \tag{6}$$

fs はサンプリング周波数 (1Hz)、 M はサンプル数 (180)、 fc は遮断周波数である。これにより、式 (6) の fc (6.77 分) 以上の高周波信号を遮断した。

- (2) 出力波形、津波伝達関数についても、移動平均によるローパスフィルタを施した。移動平均の際のタイムウィンドウは、出力波形に対しては 60 秒、津波伝播関数に対しては 200 秒とした。

3.2.2 沿岸近傍の津波予測

東北地方太平洋沖地震の全断層すべりを用いた 2 次元津波シミュレーションにより計算された 846 と 895 の 2 地点の津波水位波形 (本研究では、海域地点で入射された観測津波波形と仮想) を図 6 に示す。最大振幅に顕著な差は見られないものの、最大振幅が出現する時間が異なっていることが分かる。一方で、本手法の 1st step に

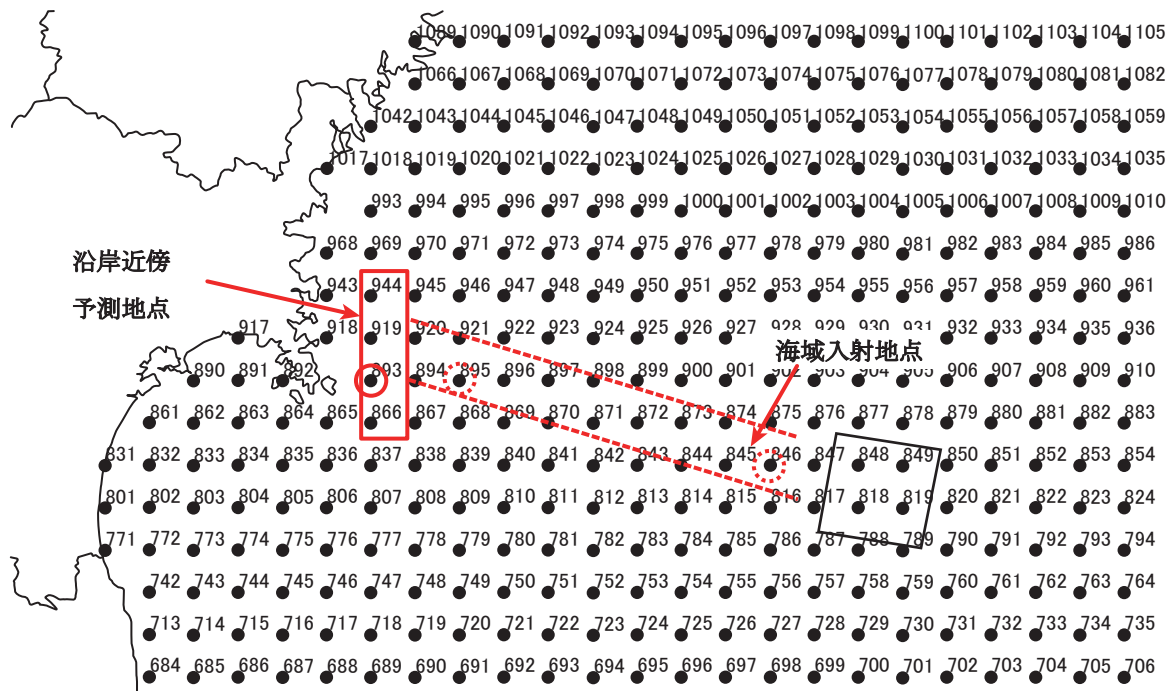


図 5 津波シミュレーションの評価地点と主要断層すべり領域の□ (●は約 10km 間隔)

特集：防災技術

より計算された沿岸近傍地点 893 の予測水位波形 (図 7) については、海域入射地点 846 と 895 を利用した 2 つの予測波形の最大振幅出現時間に顕著な差はなく、このことは海域入射地点と沿岸近傍予測地点の津波伝播特性が適切に評価されていることによる。また、波形全体については、沿岸近傍予測地点と海域入射地点が近距離に位置する方 (海域入射地点 895) が、予測結果と正解の整合性が高く、津波が沿岸に近づいてきた際には本手法の予測精度が向上することが示唆される。

本結果は、2011 年東北地方太平洋沖地震により発生した津波については、主要断層すべり領域と内陸を結んだある測線上に海域入射地点と沿岸近傍予測地点がある場合には、本手法より簡便かつ適切に津波の振幅と位相を予測することが出来ることを示している。

3.3 沿岸域の小規模な津波シミュレーション

小規模の 2 次元津波シミュレーションの計算領域を図 8 (左) に示す。牡鹿半島汀線 (図 8 中、太線) に於いて、沿岸の最大津波水位を予測した。図 4 に示した 2nd step では、東側境界面 (図 8 中、点線) に対して 1st step で算出された沿岸近傍点の予測津波水位波形を入射する。図 9 に、海域地点 846 の津波入射波形から予測された解析領域の東側境界に並ぶ沿岸近傍 4 地点 (944, 919, 893, 866) の津波水位波形を示す。その 4 地点の予測波形が振幅と位相ともに同程度あることから、2nd step の東側境界面 (図 8 中、点線) への一様な入射波形として、1st step で算出された沿岸近傍点 919 の予測津波水位波形を利用した。解析領域の北側、南側、西側の境界面を解放境界とし、それら 3 境界では津波が入射せず、東側の境界面では入射波により励起される津波波動場の流入が自由な状態とした。本津波シミュレーションは、非線形浅水長波理論に基づき、45m 格子間隔、0.09 秒時間刻みで行った。

入射波形として沿岸近傍点の予測津波水位波形 (海域入射地点 846 からの予測津波水位波形) を利用した小規模の 2 次元津波シミュレーションより牡鹿半島汀線での最大津波水位上昇量を算出した。その結果を図 8 (右) に示す。ただし、図 8 (右) の縦軸は汀線を直線に引き伸ばした形で表現されている。全断層すべりをを用いた 2 次元津波シミュレーション結果 (本検討では正解) と比較して、本手法による結果は最大津波水位上昇量に差は認められるものの、その形状は概ね一致し空間分布の傾向を概ね捉えていることが分かる。北側の境界面付近の整合性が低いことは、解析範囲外から回折等してくる津波の寄与を本手法の条件 (東側境界面のみ入射) では考慮していないためである。ある断層モデルによる津波痕跡高と計算値の空間的な適合度を表す指標¹⁷⁾として、幾何平均 K と幾何標準偏差 κ (K, κ とともに 1 が完全調

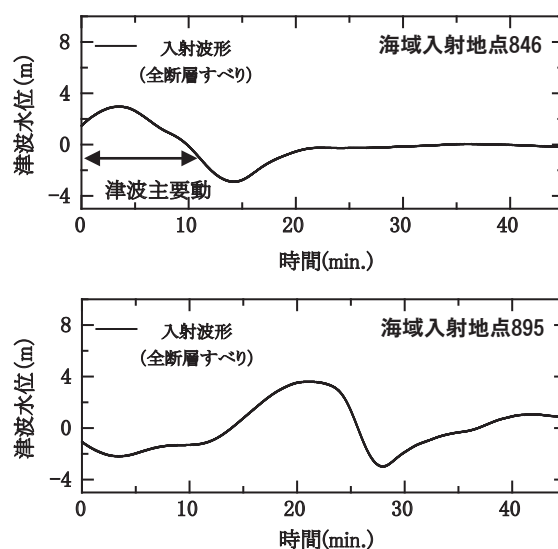


図 6 海域入射地点 (846, 895) の津波水位波形

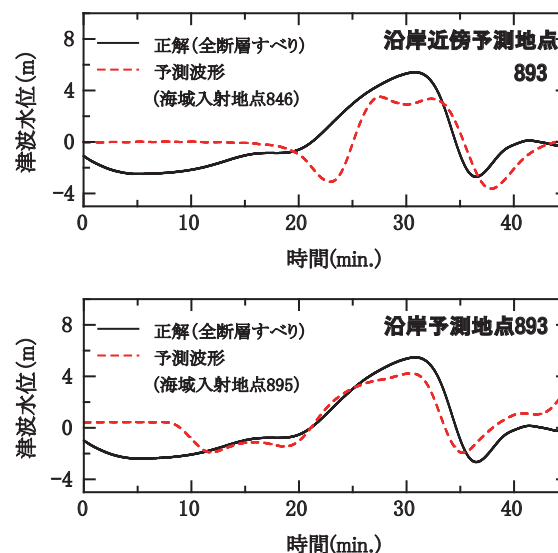


図 7 沿岸近傍予測地点 (893) の津波水位波形

和) があり、参考までに本ケースで得られた値は $K=1.6$, $\kappa=2.3$ である。本手法は、海域で入射された津波水位波形を利用し、沿岸での 10m を超える最大津波水位上昇量を予測しており、即時的な沿岸の最大津波水位予測としての利用価値は高い。

4. 津波予測の精度検討

4.1 津波入射距離による精度検討

異なる海域入射地点に対して、沿岸近傍予測地点と牡鹿半島汀線の最大津波水位上昇量を比較検討し、津波入射距離による予測精度を検討した。異なる海域入射地点に対する沿岸近傍予測地点 919 と牡鹿半島汀線の最大津波水位上昇量を図 10 と図 11 に各々示す。沿岸近傍予測地点 919 の最大津波水位上昇量 (1st step による本手

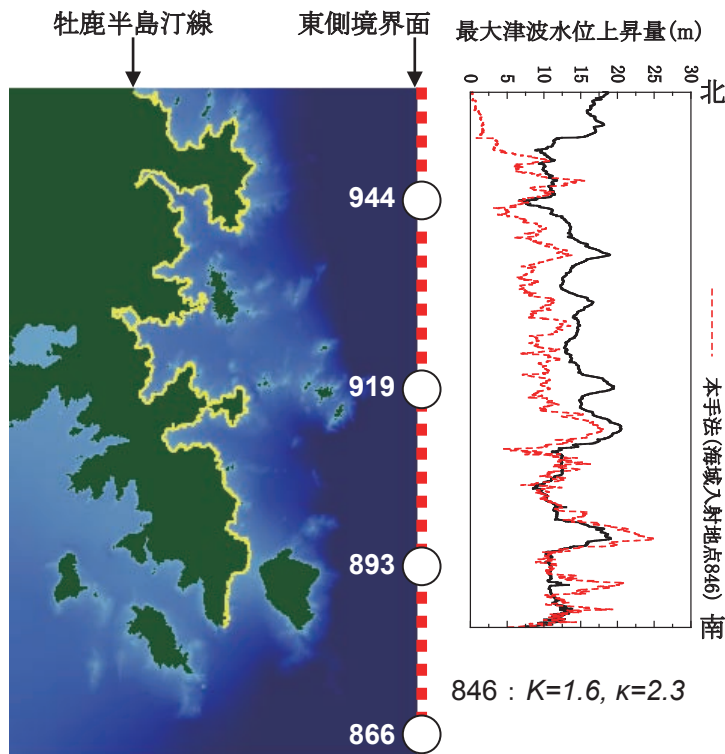


図8 牡鹿半島汀線での最大津波水位上昇量の比較（地形図の太線は最大水位抽出地点）

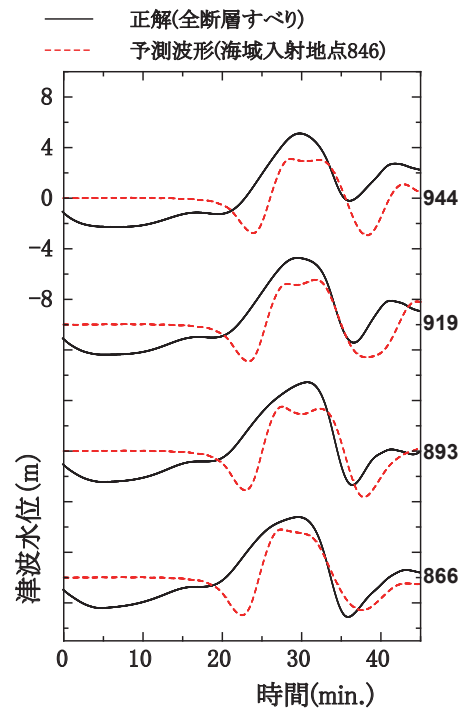


図9 海域地点 846 の津波入射波形から予測された沿岸近傍 4 地点 (944, 919, 893, 866) の津波波形

法の結果)は距離が遠いほど誤差が増す傾向にあるが、100km以上離れた海域地点での津波入射を用いた場合でも50%以内の精度で予測可能である。また、牡鹿半島汀線での最大津波水位上昇量(2nd stepによる本手法の結果)に対しても同様の傾向が認められた。沿岸近傍予測地点から20km程度離れた地点を海域津波入射とすれば20%程度の精度で予測が出来ており、沿岸近傍予測地点と海域入射地点の距離が近いほど、津波予測結果の精度が向上することを確認した。

4.2 津波入射時間による精度検討

海域入射波形のデータ長に対して、沿岸近傍予測地点と牡鹿半島汀線の最大津波水位上昇量を比較検討し、津波入射時間による予測精度を検討した。海域入射地点846の異なる津波水位波形データ長に対する沿岸近傍予測地点919と牡鹿半島汀線の最大津波水位上昇量を図12と図13に各々示す。データ長が短いほど誤差が増す傾向にあるが、15分程度の津波主要動(図6)が入射されれば全波形を用いた場合と同程度の精度で最大津波水位上昇量を予測出来ることを確認した。

5. おわりに

津波水位波形・最大津波水位の早期予測手法として、津波伝播特性を利用した沿岸近傍の津波水位波形予測手

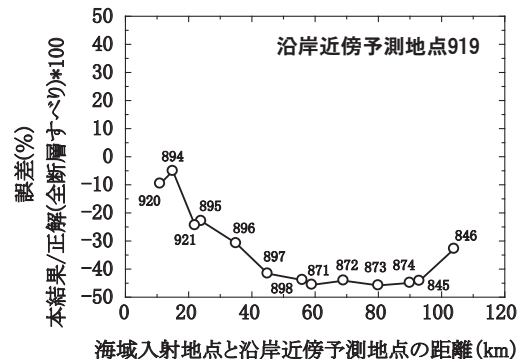


図10 異なる海域入射地点に対する沿岸近傍予測地点919の最大津波水位の誤差評価

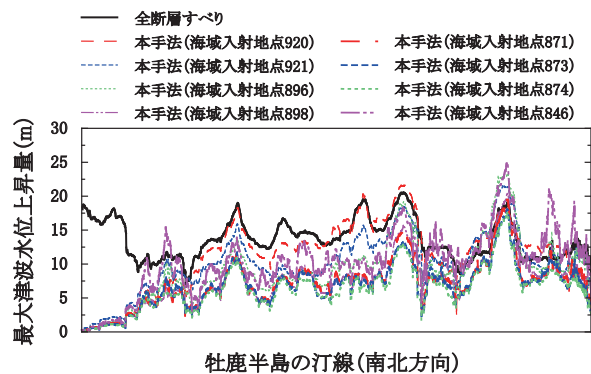


図11 異なる海域入射地点に対する牡鹿半島汀線での最大津波水位上昇量

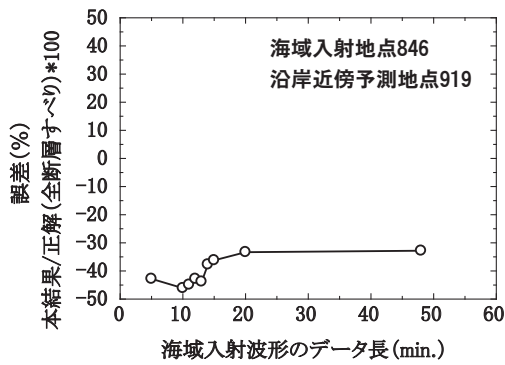


図 12 海域入射波形（地点 846）の異なるデータ長に対する沿岸近傍予測地点 919 の最大津波水位の誤差評価

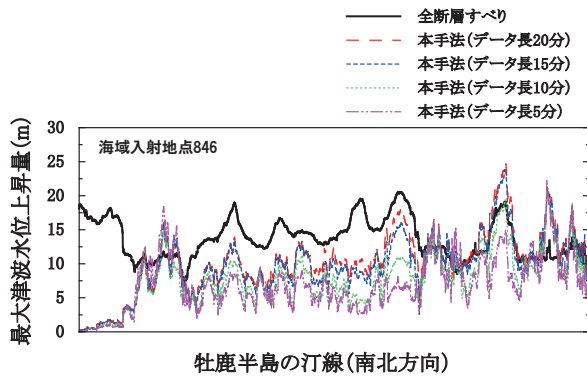


図 13 海域入射波形（地点 846）の異なるデータ長に対する牡鹿半島汀線での最大津波水位上昇量

法と小規模な 2 次元津波シミュレーションを利用した沿岸の最大津波水位予測手法を開発した。2011 年東北地方太平洋沖地震 (M_w 9.0) の全断層すべりによる 2 次元津波シミュレーション結果と比較検討し、本手法の有効性を確認した。また、津波入射の距離と時間に対する津波予測の精度を検討し、100km 離れた海域地点とデータ長 10 分間の津波入射波形を利用した場合でも 50% 以内の精度で沿岸域の津波水位を予測可能であることを示した。

本手法による沿岸近傍及び海岸線汀線の津波水位波形と最大津波水位の即時予測は、避難行動を取る際の余裕時間や最大津波水位の程度を把握する上で非常に有効であるが、必ずしも市民や各種事業者が利用しやすい早期津波警報の情報とはなっていない。今後は、対象領域で想定される海溝型巨大地震の津波遡上シミュレーション結果を利用して、沿岸近傍水位と最大浸水マップの関係をデータベース化し、沿岸近傍の津波水位から内陸の津波浸水マップを瞬時に抽出する手法の開発を行う。

文献

- 1) 干場充之, 尾崎友亮: 2011 年東北地方太平洋沖地震での緊急地震速報と津波警報, 地震 第 2 輯, 第 64 巻, 第 3 号, pp.155-168, 2012
- 2) 金沢敏彦: 日本海溝海底地震津波観測網について, 地震ジャーナル, Vol.55, No.6, pp.28-33, 2013
- 3) 谷岡勇市郎: 震源域近傍の海底津波計の観測記録から津波数値計算を開始する手法の開発, 2015 年度地震学会秋季大会, S17-05, 2015
- 4) 津野靖士, 藤原了, 是永真理子, 橋本紀彦: 津波伝播特性を利用した津波予測手法に関する検討, 2015 年度地震学会秋季大会, S17-03, 2015
- 5) 山本直孝, 青井真, 平田賢治, 鈴木亘, 功刀卓, 中村洋光: 沖合水圧記録を用いた津波即時予測手法の開発, 日本地震工学会大会, 梗概集, P4-35, 2015
- 6) 鈴木亘, 青井真, 平田賢治, 中村洋光, 山本直孝, 武田哲也, 松原誠, 功刀卓, 鈴木進吾, 根本信: 沖合水圧記録を用いた津波即時予測のための津波シナリオバンクの検討, 日本地震工学会大会, 梗概集, P4-34, 2015
- 7) 内閣府: 南海トラフの巨大地震モデル検討会, 第 12 回会合参考資料, 2012
- 8) 長谷川賢一, 鈴木孝夫, 稲垣和男, 首藤伸夫: 津波数値実験における格子間隔と時間積分間隔に関する研究, 土木学会論文集, 第 381 号 /II-7, No. 2, pp.111-120, 1987
- 9) 海上保安庁: 海底地形デジタルデータ「M7000 シリーズ」
- 10) 国土地理院: 「5m メッシュ標高データ」
- 11) Okada, Y.: Internal Deformation due to Shear and Tensile Faults in a Half-Space, Bull. Seismol. Soc. Am., Vol. 82, No. 2, pp.1018-1040, 1992.
- 12) Imamura, F., Shuto, N. and Goto, C.: Numerical Simulations of the Transoceanic Propagation of Tsunamis, 6th Congress APD-IAHR, pp.265-272, 1988.
- 13) 後藤智明: 津波数値計算, 1986 年度 (第 22 回) 水工学に関する夏期研修会講義集 B コース, 土木学会 水理委員会, B-3-1 ~ B-3-21, 1986
- 14) ナウファス: 国土交通省港湾局 全国港湾海洋波浪情報網
- 15) 藤原了, 田宮貴洋, 是永真理子, 橋本紀彦: 津波波源モデルの違いによる津波波力の差異の評価, 2013 年度日本地震学会秋季大会, 2013
- 16) 江原義郎: デジタル信号処理, 東京電機大学出版局, p.38, 1991
- 17) 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, pp.71-101, 1977