

鉄道沿線の早期津波浸水予測手法

津野 靖士*

Real-time Prediction Method of Tsunami Inundation for a Railway Line

Seiji TSUNO

To evaluate the influence of tsunami on a railway and take measures of the evacuation, it is necessary to predict tsunami inundation depth of railway facilities. Therefore, author developed a real-time prediction method of tsunami inundation for a railway line, immediately after a large earthquake occurs in the sea area. At first, this method predicts the tsunami water level in the coast, using tsunami water level in the sea and the tsunami propagation function. Secondary, the method predicts the tsunami inundation for the target railway line, using the database of tsunami inundation for scenario earthquakes created in advance.

キーワード：早期津波浸水予測，津波伝播関数，シナリオ地震，津波浸水マップ，データベース，鉄道沿線

1. はじめに

地震による津波が鉄道に与える影響を把握し速やかに避難等の対策をとるためには、地震発生後即時に鉄道施設箇所の津波浸水深を予測することが重要である。そこで、海域で観測された津波データと事前に準備した津波シミュレーション結果を利用した直接的な早期津波浸水予測手法を開発した。2011年東北地方太平洋沖地震以後、東北地方の太平洋沖に海底水圧計が設置され¹⁾、津波に関するそれらデータにデータ同化理論を適用する手法²⁾や津波シミュレーションへ内挿する手法などのリアルタイム津波予測手法が開発されている^{例えば、3)}。一方で、上記2手法は津波警報の即時性と安定性を両立させる手法ではない。そこで、本研究では、1地点の津波データ

を利用することで警報の即時性を、事前に津波伝播関数と津波浸水マップをデータベース化することで警報の安定性を向上させることを目指し、観測された津波データに事前に準備した津波シミュレーション結果を融合させる早期津波浸水予測手法を開発した。さらに、本手法の鉄道への活用例として、本手法による鉄道沿線への津波浸水深の予測結果を提示した。

2. 手法の概要

内陸の早期津波浸水予測手法は2つのステップで構成され、第1のステップでは沿岸の津波水位を早期予測し、第2のステップでは内陸の津波浸水域を早期予測する。図1に、手法の概要を示す。

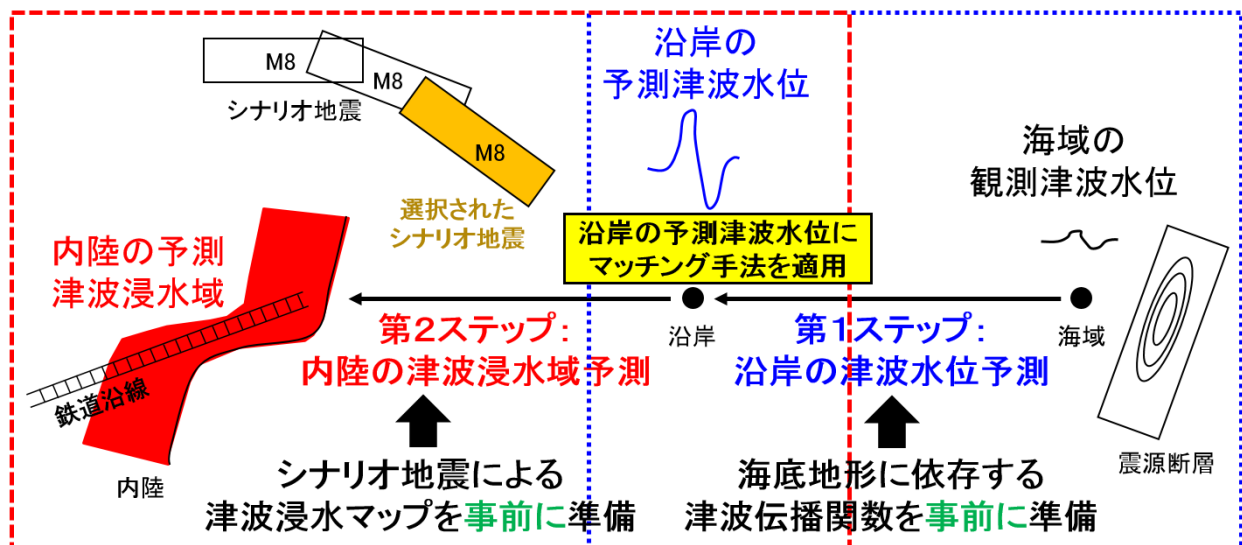


図1 沖合の観測津波データを利用した内陸の早期津波浸水域予測手法の概念図

* 鉄道地震工学研究センター 地震解析研究室

特集：防災技術

本手法の第1ステップとして、海域で観測された1地点の津波データに、2次元津波シミュレーションを用いて事前に準備した津波伝播関数を掛け合わせることで沿岸の津波水位を予測する。第2ステップとして、データベースに蓄積していたシナリオ地震による内陸の津波浸水マップから、沿岸部の予測津波水位と整合する内陸の津波浸水域を抽出する。

3. シナリオ地震と対象地域の津波浸水データベース

3.1 シナリオ地震と対象地域

ここでは第2ステップで利用するデータベースの構築について述べる。断層モデルは、十勝沖～房総半島沖の日本海溝プレート境界にセグメント(図2)の組み合わせに応じたマグニチュード8以上の96個の震源断層を設定した。このモデルにおいては、すべり量の不均質性を特性化し、平均すべり量の2倍の大すべり域、4倍の超大すべり域をマグニチュードに応じて配置した⁴⁾。設定したシナリオ地震断層モデルの一例(番号1:単独破壊,番号22:大すべりを含む4連動破壊)を図3に示す。

石巻市を対象とし、日本海溝シナリオ地震の津波浸水シミュレーションを実施した。作成した石巻市周辺の詳細な地形モデル(格子サイズ15mの領域)を図4に示す。

3.2 対象地域の津波浸水データベース

波源域から対象地域の沿岸部までの2次元津波シミュレーションには線形長波理論を用い、沿岸部から内陸の津波シミュレーションには非線形浅水長波理論⁵⁾を用いた。津波の遡上を表現するための先端条件には遡上境界条件⁶⁾を用いた。2次元津波浸水シミュレーションの計算条件は表1のように設定した。図5に、日本海溝



図2 日本海溝沿いに設置した断層セグメント

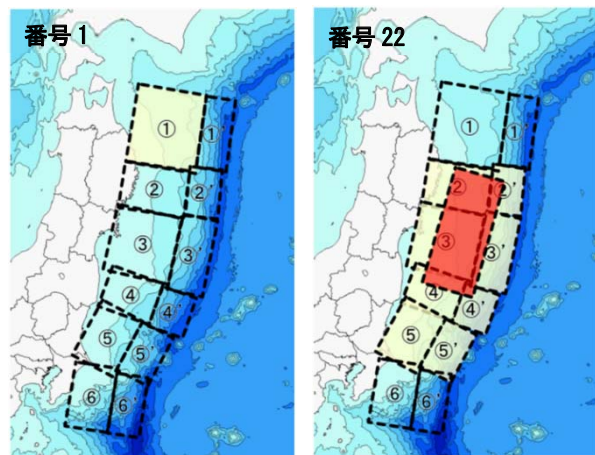


図3 番号1と番号22のシナリオ地震 (■は大すべり域)

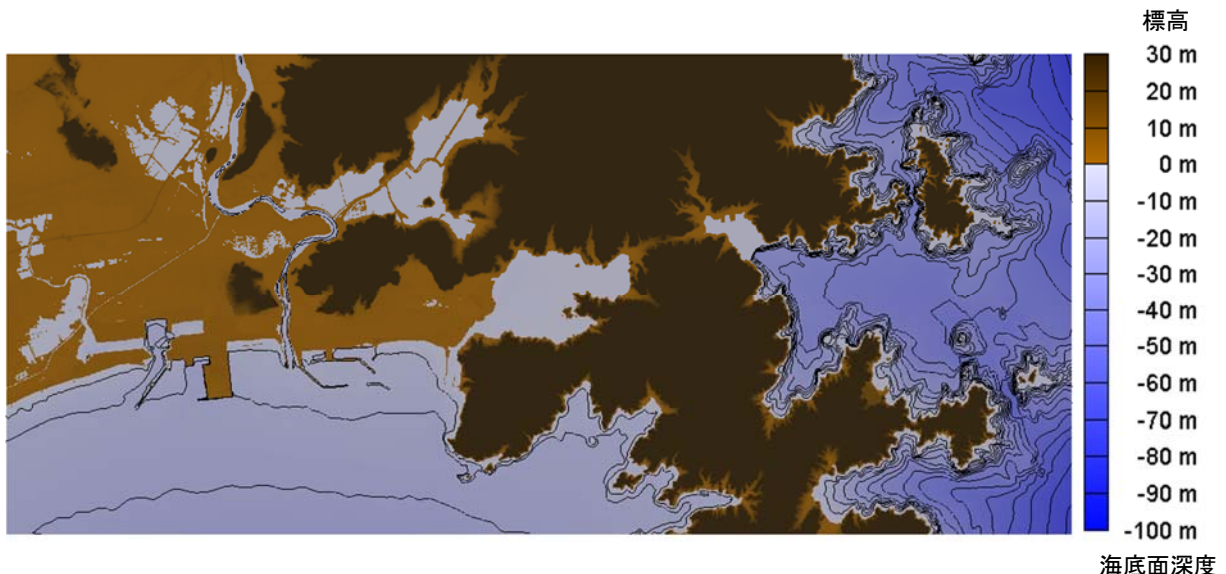
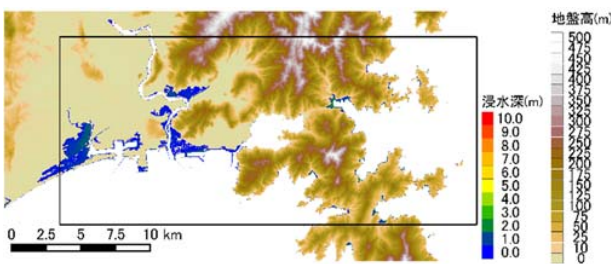


図4 石巻市周辺の詳細な地形モデル(格子間隔15m)

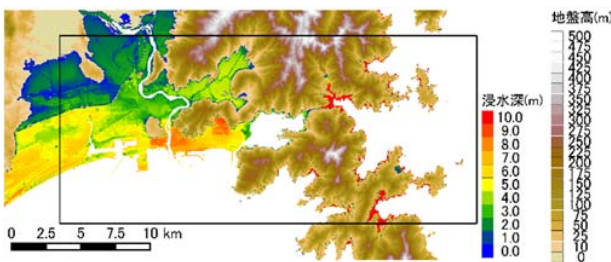
表1 津波シミュレーションの諸条件

項目	計算条件												
格子サイズ	<ul style="list-style-type: none"> ・ 沖合で最大 1215m, 405m, 135m, 45m, 15m と徐々に細かい格子サイズを設定 ・ 45m, 15m の格子領域には陸上を含む ・ その他の 135m 及び 405m の格子分割は海域部のみを設定 												
計算時間間隔	格子サイズに合わせて 0.9 ~ 0.1 秒と各領域の CFL 条件に応じて細かく設定 <table border="1" style="margin-left: auto; margin-right: auto;"> <tr> <td>格子間隔 (m)</td> <td>1215</td> <td>405</td> <td>135</td> <td>45</td> <td>15</td> </tr> <tr> <td>時間間隔 (s)</td> <td>0.9</td> <td>0.9</td> <td>0.3</td> <td>0.3</td> <td>0.1</td> </tr> </table>	格子間隔 (m)	1215	405	135	45	15	時間間隔 (s)	0.9	0.9	0.3	0.3	0.1
格子間隔 (m)	1215	405	135	45	15								
時間間隔 (s)	0.9	0.9	0.3	0.3	0.1								
基礎方程式	線形長波理論 (波源域~沿岸部), 非線形長波理論 (沿岸部~内陸)												
初期条件	Okada (1992) ⁷⁾ の方法により算出された地殻変動量を初期水位として適用												
境界条件	沖側：完全透過条件 陸側：45m, 15m の遡上解析対象領域では小谷ほか (1998) ⁶⁾ の遡上境界条件												
摩擦係数	海域は一律マンシングの粗度係数 = $0.025m^{-1/3}s$, 陸域は土地利用条件に応じて設定												
計算対象時間	地震発生後 6 時間												

のシナリオ地震 (番号 1 と番号 22) に対する石巻市の津波浸水シミュレーション結果の例を示す。番号 1 のシナリオ地震はすべり域が石巻市から遠方に位置するため (図 3 左), 津波浸水は小規模である。一方で, 番号 22 のシナリオ地震はすべり域が石巻の近傍に位置するため (図 3 右), 津波浸水は大規模となっている。このように, 多様な津波浸水域を示す 96 個の日本海溝のシナリオ地震による石巻市の津波浸水域をデータベース化した。



(a) 番号 1 のシナリオ地震



(b) 番号 22 のシナリオ地震

図 5 番号 1 と番号 22 のシナリオ地震による石巻市の津波浸水域 (図中, □は格子サイズ 15m の領域)

4. 鉄道沿線の早期津波浸水予測

4.1 沿岸部の早期津波水位予測

図 1 の第 1 ステップに示すように, 海域の観測津波水位と海底地形に依存する津波伝播関数を利用して, 沿岸部の津波水位を早期予測した⁸⁾。以下に, 日本海溝で発生した 2011 年東北地方太平洋沖地震津波を例に, 本手法の検証を行った, 本手法の具体的な手順を示す。

- ・ 海域の観測津波水位には, 2011 年東北地方太平洋沖地震 (Mw 9.0) の内閣府モデル⁹⁾ を利用した 2 次元津波シミュレーション結果における津波入射地点の津波水位を用いる。

- ・ 津波伝播関数は, 要素断層に対する津波入射地点の 2 次元津波シミュレーション波形と津波評価地点の 2 次元津波シミュレーション波形をデコンボリューションすることにより算出する。図 6 に, 日本海溝 (十勝沖~房総半島沖) に設定した 50km x 50km の領域面積を有する要素断層を示す。図 7 に, 図 6 中の番号 56 の要素断層に対する津波入射地点と津波評価地点の一例を示す。

- ・ 海域の津波入射地点における正解津波水位と, 要素断層に対する津波入射地点 - 津波評価地点間の津波伝播関数を掛け合わせるにより, 沿岸の津波評価地点の津波波形を即時的かつ安定的に算出する。

図 8 に示した予測結果は, 本手法により, 2011 年東北地方太平洋沖地震津波に対して沿岸部の津波評価地点の津波波形を精度良く算出できることを示している。

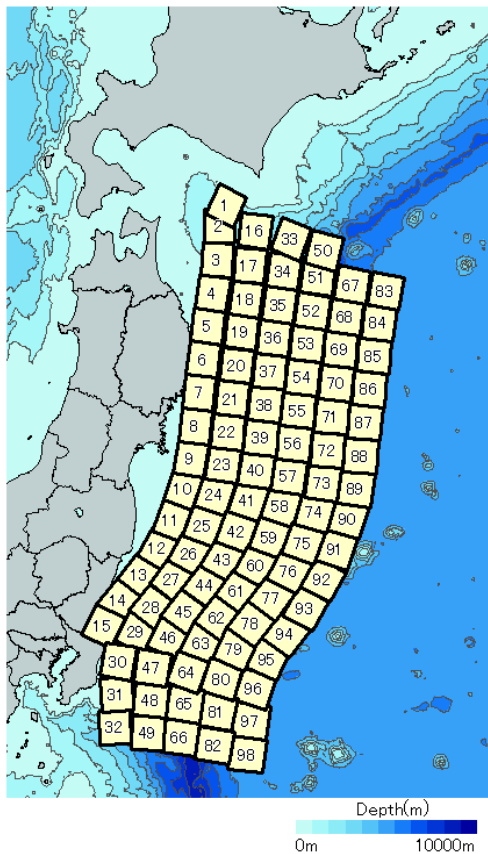


図6 日本海溝に設定した要素断層 (50km x 50km の領域面積) モデル

4.2 内陸部の早期津波浸水域予測

次に、図1の第2ステップに示すように、沿岸の予測津波水位とシナリオ地震による津波浸水マップを利用して、内陸の予測津波浸水域を早期予測した。以下に、日本海溝で発生した2011年東北地方太平洋沖地震津波により検証を行った、本手法の具体的な手順を示す。

- ・第1ステップから得られた沿岸の津波評価地点における予測津波水位とシナリオ地震による同一津波評価地点における津波水位の類似性を利用したマッチング手法を適用し²⁾、シナリオ地震を選定する。

- ・選定されたシナリオ地震による対象地域の津波浸水域をデータベースから抽出する。

図9に、図8に示す津波評価地点の津波水位から選定されたシナリオ地震と正解とした内閣府モデルを示す。選定されたシナリオ地震の断層領域の面積は内閣府モデルと整合するものの、選定されたシナリオ地震の断層領域は内閣府モデルよりやや南方に位置し、詳細なすべり分布も異なっている。一方で、選定されたシナリオ地震による石巻市の津波浸水域と正解とした内閣府モデルによる津波浸水域を比較した結果(図10)、内閣府モデルの浸水面積(81km²)に対してシナリオ地震の浸水面積(76km²)は90%以上の整合率を有しており、浸水域の対応も良好である。

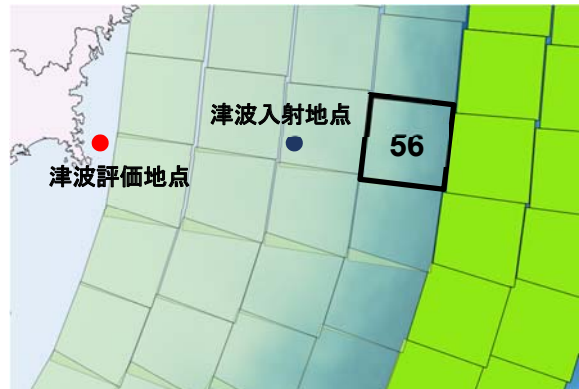


図7 津波入射地点と沿岸部の津波評価地点

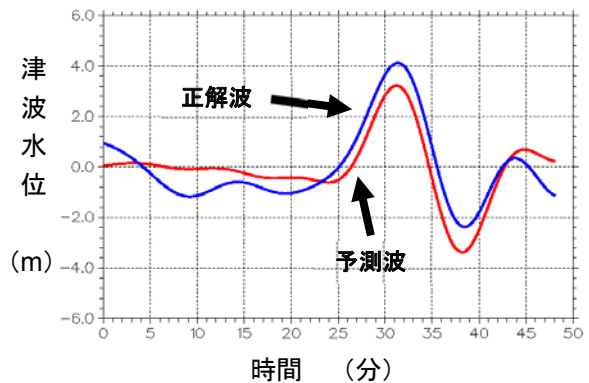
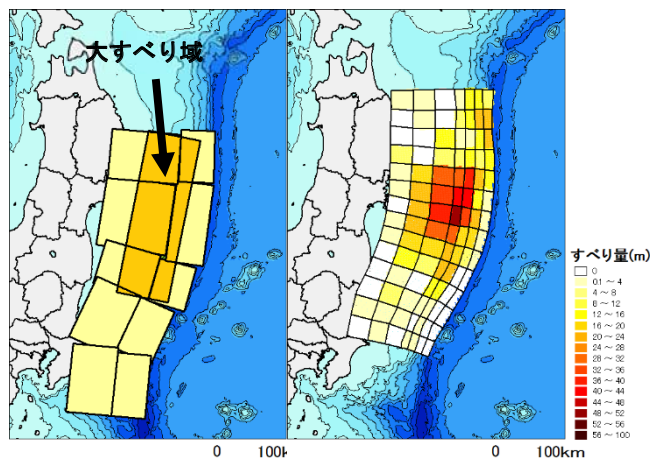


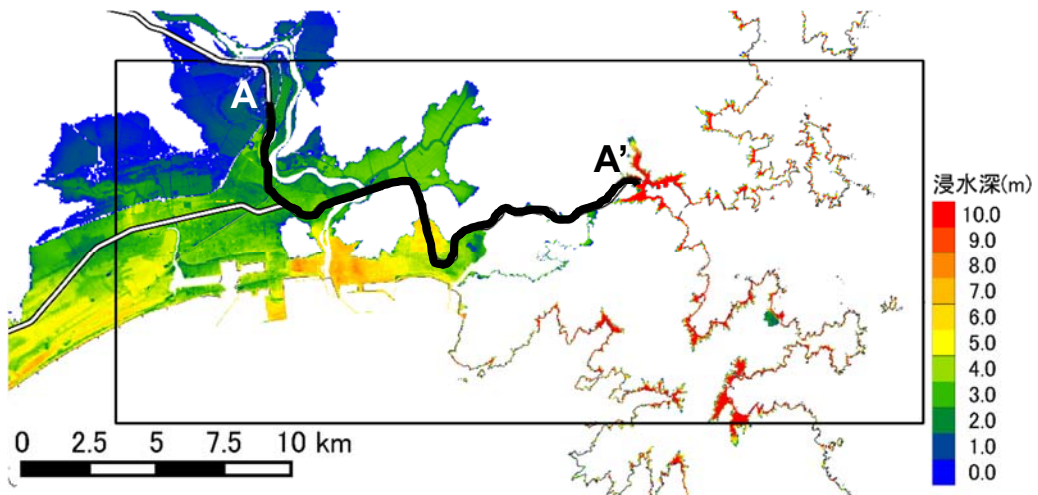
図8 沿岸部の予測津波水位(予測波)と2次元津波シミュレーション結果(正解波)の比較

さらに、選定されたシナリオ地震による石巻市の津波到達余裕時間を図11に示す。海域の津波データから津波浸水域を抽出する演算時間は1分以内であり、2011年東北地方太平洋沖地震発生後の石巻市のケースはおおむね1時間以上の余裕時間を確保できることが分かった。

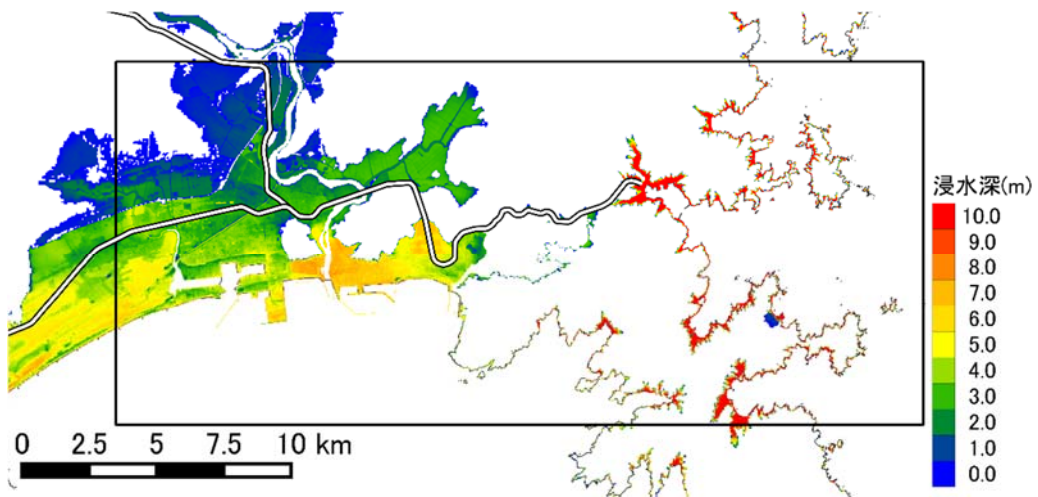


(a) シナリオ地震 (b) 内閣府モデル

図9 選定されたシナリオ地震と内閣府モデルの比較(シナリオ地震の大すべり域のすべり量は18.74m、背景すべり域のすべり量は5.35m)



(a) 選定されたシナリオ地震による石巻市の津波浸水域 (浸水面積：76km²)



(b) 内閣府モデルによる石巻市の津波浸水域 (浸水面積：81km²)

図10 選定されたシナリオ地震と内閣府モデルによる石巻市の津波浸水域
(図中、太線は鉄道路線、□は格子サイズ15mの領域)

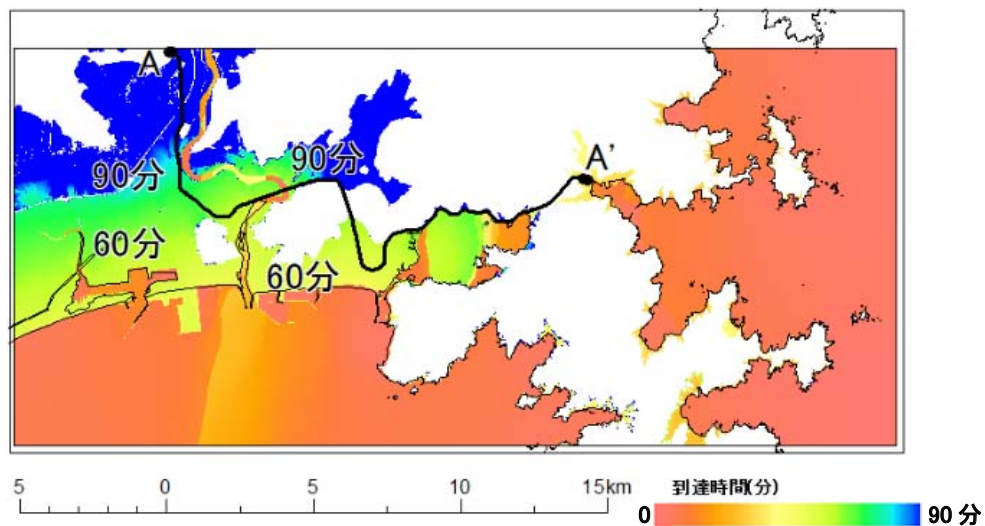


図11 選定されたシナリオ地震による石巻市の津波到達余裕時間 (図中、太線は鉄道路線)

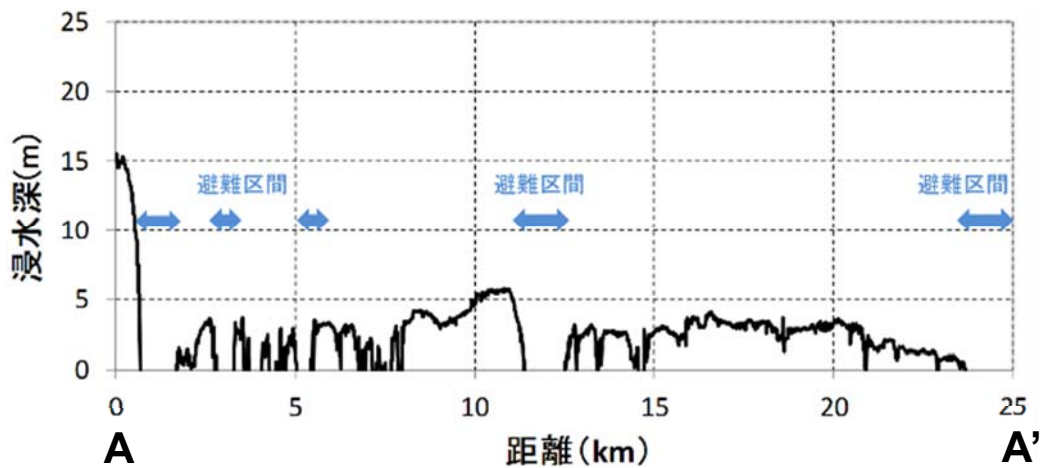


図 12 鉄道沿線 (A-A' 測線) における津波浸水深の予測結果

4.3 鉄道沿線の早期津波浸水予測

本手法の鉄道への活用例として、図 10 に示した鉄道沿線に対する 2011 年東北地方太平洋沖地震津波の早期予測浸水深を図 12 に示す。鉄道沿線の区間によっては、5m 以上の津波浸水深があるものの、標高が高い区間では津波が到来しない箇所もあり、そのような区間に走行列車を避難させることで鉄道の耐津波安全性が確保される。本手法より、海域での津波観測直後に、鉄道沿線への津波浸水深の予測結果を提示することで、津波到来前に走行列車に避難区間を伝達することが可能になることが期待される。以上のように、本手法を利用することで、即時にかつ安定的に、鉄道沿線に対する津波浸水を早期予測できることが示された。

5. まとめ

鉄道の津波被害軽減を目的として、鉄道沿線に対する津波浸水の早期予測手法を開発した。早期津波浸水予測手法として、観測された津波データに、事前に準備した津波シミュレーション結果を融合させる早期津波浸水予測手法を開発した。本手法は、1 地点の津波データを利用することで警報の即時性を、事前に津波伝播関数と津波浸水マップをデータベース化することで警報の安定性を向上させる独自の特徴を有している。本手法を 2011 年東北地方太平洋沖地震に適用し、内閣府モデルによる津波浸水域と検証した結果、両者の早期津波浸水域は浸水面積に対し 90% 以上の整合率を有することを確認した。海域での津波観測直後、本手法を利用することで、鉄道沿線への津波浸水深の予測結果を提示することができる。

謝 辞

本研究の一部は、国土交通省の鉄道技術開発費補助金を受けて実施した。

文 献

- 1) 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
- 2) Yamamoto, N., Aoi, S., Hirata, K., Suzuki, W., Kunugi, T., and Nakamura, H., “Multi-index method using offshore ocean-bottom pressure data for real-time tsunami forecast,” *Earth, Planets and Space*, 68:128, 2016.
- 3) Tanioka, Y. and Gusman, A.R., “Near-field tsunami inundation forecast method assimilating ocean bottom pressure data: A synthetic test for the 2011 Tohoku-oki tsunami,” *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, Vol.283, pp.82-91, 2018.
- 4) 藤原広行，平田賢治，中村洋光，長田正樹，森川信之，河合伸一，大角恒雄，青井真，松山尚典，遠山信彦，鬼頭直，村嶋陽一，村田泰洋，井上拓也，斉藤龍，秋山伸一，是永眞理子，阿部雄太，橋本紀彦：日本海溝に発生する地震による確率論的津波ハザード評価の手法の検討，防災科学技術研究所研究資料，第 400 号，2015
- 5) Imamura, F., Shuto, N., Goto, C., “Numerical Simulations of the Transoceanic Propagation of Tsunamis,” 6th Congress APD-IAHR, pp.265-272, 1988.
- 6) 小谷美佐，今村文彦，首藤伸夫：GIS を利用した津波遡上計算と被害推定法，海岸工学論文集，Vol.45，pp.356-360，1998
- 7) 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.
- 8) 津野靖士，藤原了：津波伝播特性を利用した早期津波予測手法の開発，鉄道総研報告，Vol. 30, No. 3, pp. 41 - 46, 2016
- 9) 内閣府：2012 平成 23 年（2011 年）東北地方太平洋沖地震の津波断層モデルについて，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 1，2012