土木学会論文集B2（海岸工学）
Vol. B2-65，No.1，2009，351-355

インバージョン手法を応用した即時的な津波浸水予測

Real-time Tsunami Inundation Prediction Based on Inversion Method

辰巳大介[1]・富田孝史[2]

Daisuke TATSUMI and Takashi TOMITA

The real-time tsunami prediction based on the inversion method and the principle of linear superposition can predict the tsunami in near shore area quickly, but it can not predict the tsunami inundation. The present study developed the method to estimate the volume of overflow from the tsunami profile predicted by the real-time tsunami prediction. Moreover, the level fill method was used to predict the tsunami inundation from the estimated volume of overflow. Numerical experiments using the actual topography and the historical earthquakes proved that the combination of the real-time tsunami prediction, the estimation of the volume of overflow, and the level fill method can predict the tsunami inundation quickly from the offshore tsunami observation.

1. はじめに

津波による浸水状況の即時的な予測は，安全かつ的確な避難経路の指示や水門の操作に有効であり，被災状況の早期把握にも役立つ．

著者らは，インバージョン手法と線形重ね合わせの原理を利用して，沖合津波観測情報から沿岸域の津波を即時的に予測する手法（リアルタイム津波予測手法）を開発した（辰巳・富田，2008）．しかし，線形重ね合わせの原理を汀線近傍や遡上へ適用することは無理であり，リアルタイム津波予測手法で津波浸水を予測することは難しい．

本研究では，始めに，リアルタイム津波予測手法による津波予測の結果から越流量を推定するモデルを開発する．次に，推定された越流量からレベル湛水法を用いて津波浸水を予測する手法を構築する．最後に，即時的な津波浸水予測手法を歴史地震へ適用し，精度検証を行う．

2. リアルタイム津波予測手法の予測結果から越流量を推定するモデルの開発

（1）越流量推定モデルの考案

リアルタイム津波予測手法で予測される護岸前面の押し波の振幅η_{max}と水位偏差が正である継続時間Tから，単位幅あたりの越流量qを算定するために，式（1）を考案した．gは重力加速度，zは護岸高である．リアルタイム津波予測手法の予測結果を入力すると，越流量が直ちに推定できる．

$$q = \frac{\alpha T}{2}\left(0.35\sqrt{2g}\left(\beta\eta_{\max} - z\right)^{1.5}\right) \quad \cdots\cdots (1)$$

式（1）は，加藤ら（2007）と同様に，完全越流の場合の本間の越流公式を用いて最大越流量を計算し，越流量の時間変化が最大越流量を頂点とする二等辺三角形分布であると仮定して，最大越流量に$T/2$を乗じた式である．

ただし，加藤ら（2007）は越流時間に関するパラメータαしか考慮していないが，本研究では津波高に関するパラメータβも考慮した．なぜならば，リアルタイム津波予測手法の予測結果は汀線で完全反射を仮定し非線形効果を考慮していないため，実現象とは越流時間も津波高も異なると考えられるからである．

（2）パラメータの同定と越流量推定モデルの精度検証

汀線で完全反射を仮定した線形長波モデルと遡上ありの非線形長波モデルによる津波の数値計算（後藤・佐藤，1993）を予め実施し，パラメータαとβの同定と越流量推定モデルの精度検証を行った．完全反射の線形長波モデルの計算結果はリアルタイム津波予測手法の予測結果に相当する．また，遡上ありの非線形長波モデルの計算結果を実現象に相当するものとして扱う．

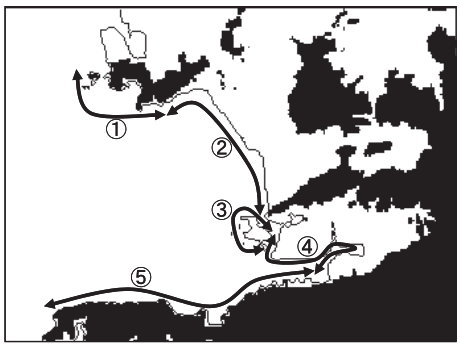

図-1　和歌浦・海南地区の地形（標高10 m以上は黒色で着色）

1　正会員　修（工）　（独法）港湾空港技術研究所津波防災研究センター研究官
2　正会員　博（工）　（独法）港湾空港技術研究所津波防災研究センター上席研究官

表-1　入射波（正弦波）の諸元

振幅（m）	0.5，1.0，1.5，2.0，2.5，3.0
周期（分）	5，10，20，30
波向	西側境界から入射，南側境界から入射

地形データには，和歌山下津港和歌浦・海南地区（図-**1**）の実地形を事例として使用した．空間格子は50m，時間ステップは1秒に設定した．入射波は正弦波1波とし，**表-1**のとおり合計48種類を使用した．

a）パラメータの同定

パラメータαとβは地形などの影響を受けるため，汀線に位置する各計算格子において固有の値をとると考えられる．遡上ありの非線形長波モデルで計算された越流量と完全反射の線形長波モデルで計算された押し波の振幅・水位偏差が正である継続時間を比較して，汀線の各計算格子においてパラメータαとβを同定した．汀線で完全反射を仮定した場合の津波高は，遡上を考慮した場合と比較して重複波により最大で2倍に達することから，パラメータβの取りうる値は0.5～1.0と想定できる．そこで，パラメータβを0.5から1.0まで0.1刻みに変化させながら，推定誤差の二乗和を最小化するパラメータαを求め，推定モデルのあてはまり具合を表す決定係数が最大となるように，パラメータαとβの最適な組み合わせを同定した．

和歌浦・海南地区の汀線には495点の計算格子があり，パラメータαの平均値は0.28，パラメータβの平均値は0.73であった．水位偏差が正である継続時間は，水位偏差が護岸高を上回って越流する時間よりも長いため，パラメータαは1.0よりも小さくなった．

b）越流量推定モデルの精度検証

図-2は，横軸に完全反射の線形長波モデルで計算された津波波形から式（1）を用いて推定した越流量，縦軸に遡上ありの非線形長波モデルで計算された越流量をとって，越流量の推定結果をプロットした図である．

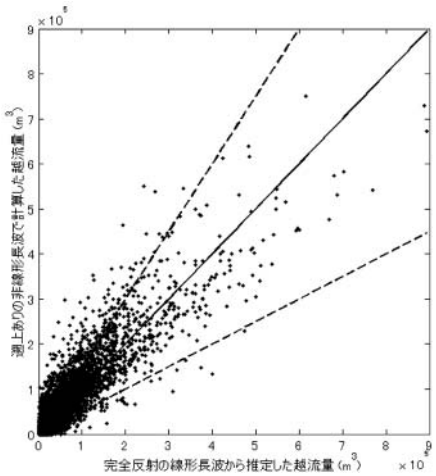

図-2　越流量の推定結果（破線は±50％の範囲）

遡上ありの非線形長波モデルで計算された越流量は，完全反射の線形長波モデルから推定した越流量の±50％の範囲におおむね収まっており，越流量がある程度正確に推定できることを確かめた．

3. レベル湛水法による津波浸水予測

越流量の推定結果から津波浸水を予測するために，レベル湛水法（農林水産省農村振興局ら，2004）を使用する．レベル湛水法では，「海面を基準にした浸水高が背後地の中で等しくなるよう浸水する」という仮定を設けているため，越流量から津波浸水を即時的に予測できる．

汀線のある区間で越流した水塊がその背後地のみに浸水し，汀線の他の区間の背後地へは浸水しないよう，和歌浦・海南地区の汀線を**図-1**のとおり5個に分割して，レベル湛水法を適用した．事前の検討によると，和歌浦・海南地区では津波高が10mより低いので，標高10mの等高線を参考に汀線の分割および背後地の設定を行った．

2. と同じ入射波条件において，実現象に相当する遡上ありの非線形長波モデルで計算された浸水状況と，リアルタイム津波予測手法の予測結果と同等の完全反射の線形長波モデルから予測した浸水状況を比較して，精度検証を行った．

（1）越流量から最大浸水量への変換

本研究の津波浸水予測では，特に，地震発生から一定時間経過後の最大浸水深の空間分布の予測を目的とする．最大浸水深を予測する場合，式（1）を用いて推定した越流量をそのままレベル湛水法へ入力することは妥当ではない．なぜならば，式（1）の推定結果は越流量としては正しいが，陸域から海域への流下を考慮していないため，最大浸水深の空間分布から算定される浸水量（以下，最大浸水量と呼ぶ）よりも過大になると考えられるからである．そこで式（2）のとおり，式（1）で推定した越流量qの和を計算し，分割した汀線・背後地に特有のパラメータγを乗じて，最大浸水量Qを推定する．ただし，nは分割した汀線に含まれる計算格子の総数である．

$$Q = \gamma \sum_{i=1}^{n} q_i \quad \cdots\cdots (2)$$

図-3は，和歌浦・海南地区の最奥に位置する汀線④を例に，完全反射の線形長波モデルから式（1）を用いて推定した越流量の和と，遡上ありの非線形長波モデルで計算された最大浸水量を比較した図である．推定誤差の二乗和を最小にするようパラメータγを同定した結果，

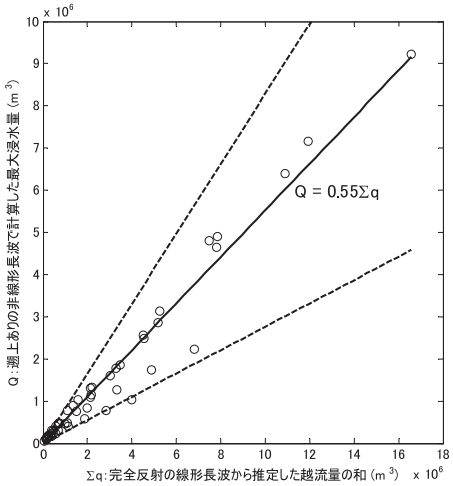

図-3　汀線④における越流量の和と最大浸水量の比較（破線は±50％の範囲）

汀線④では0.55と同定された．最大浸水量は，式（1）で推定した越流量の和に0.55を乗じた実線の周りに分布しており，式（2）から最大浸水量を推定できることが確かめられた．

汀線①～③，⑤に関しても推定誤差の二乗和を最小にするようパラメータγを同定した結果，それぞれ0.20，0.92，0.23，0.25と同定された．

（2）レベル湛水法による津波浸水予測の精度検証

図-4は，完全反射の線形長波モデルから式（1）と（2）によって越流量と最大浸水量を推定し，レベル湛水法を用いて予測した浸水面積と，遡上ありの非線形長波モデルで計算された浸水面積を比較した図である．レベル湛水法を用いて予測した浸水面積は，遡上ありの非線形長波モデルで計算された浸水面積よりも過大になりやすいが，誤差は±50%の範囲におおむね収まっており，レベル湛水法で浸水面積をある程度正確に予測できた．レベル湛水法で予測した浸水面積が過大になりやすい要因は，後述するように，汀線から離れた地点でも地盤が低い地点は一律に浸水するためである．

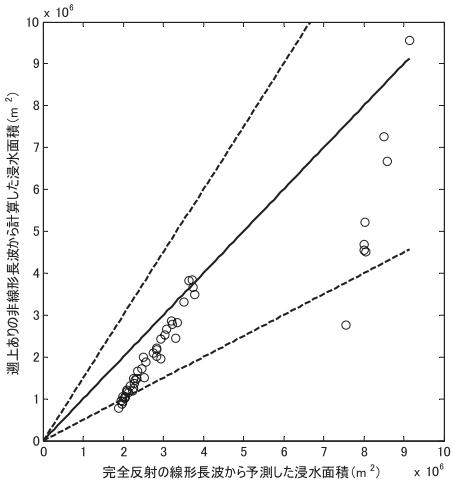

図-4　浸水面積の予測結果（破線は±50％の範囲）

レベル湛水法による津波浸水予測結果の特徴を，振幅3.0m，周期30分，西の波向の入射波条件における最大浸水深（**図-5**）を例に説明する．なお，**図-5**は上段が遡上ありの非線形長波モデルの計算結果，下段が完全反射の線形長波モデルからレベル湛水法を用いて予測した結果であり，最大浸水量は図の上段と下段でほぼ同じである．

遡上ありの非線形長波モデルと異なり，レベル湛水法では，地点（A）のように汀線から離れていても地盤の低い場所が浸水する．一方，地点（B）のように汀線から近くても周囲より地盤の高い丘状の場所は浸水しない．また，丘状の場所の海側前面において堰上げ効果により最大浸水深が大きくなる現象も予測できない．レベル湛水法は一定時間に越流する水塊の総量と地盤高のみに基づいて浸水を予測するため，時間と共に変化する遡上した津波の挙動が考慮できず，地震発生から何時間後の浸水状況を予測するかということが予測精度に影響を与える．

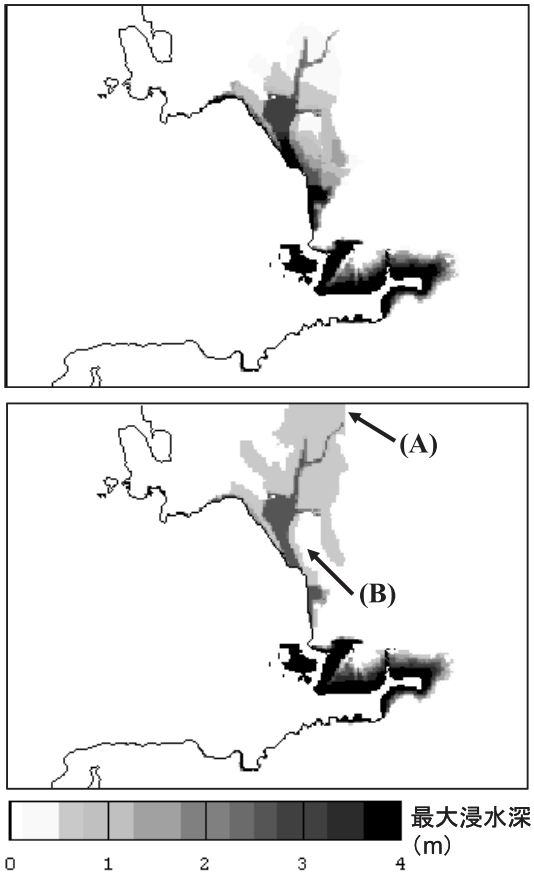

図-5　最大浸水深の予測結果（上段：遡上ありの非線形長波で計算，下段：完全反射の線形長波から予測）

4. 歴史地震への適用

（1）数値実験の概要

リアルタイム津波予測手法を用いて沖合津波観測情報から沿岸域の津波を予測し，予測された津波から式（1）と（2）で越流量と最大浸水量を推定してレベル湛水法により津波浸水を予測する手法を，歴史地震へ適用した．

地形データには，和歌浦・海南地区を事例として実地形を使用した．歴史地震には，宝永地震（1707年，マグニチュード8.4）と昭和南海地震（1946年，マグニチュード8.0）を用いた．歴史地震の断層パラメータ（佐藤，1989）に基づいて津波の初期水位分布を計算し，遡上ありの非線形長波モデルにより津波の数値計算を行って，沖合津波観測点における津波波形や浸水状況の観測値を作成した．

リアルタイム津波予測手法に使用した沖合津波観測情報は，**図-6**に示す5点の沖合津波観測点で地震発生後15分間に観測された津波波形である．沖合津波観測点の配置はGPS波浪計（Katoら，2005；国土交通省，参照2009-05-15）に基づき，陸からの距離は約20kmである．

リアルタイム津波予測手法，越流量と最大浸水量の推定，レベル湛水法はいずれも計算所要時間が非常に短いため，観測終了後数分間（地震発生後約20分間）で津波浸水を予測できる．なお，地震発生後15分間の沖合津波観測情報しか使用しないため第1波以降の予測精度は余り高くないと考えられるので，第1波による浸水が支配的である，地震発生2時間後までの津波を予測対象とした．

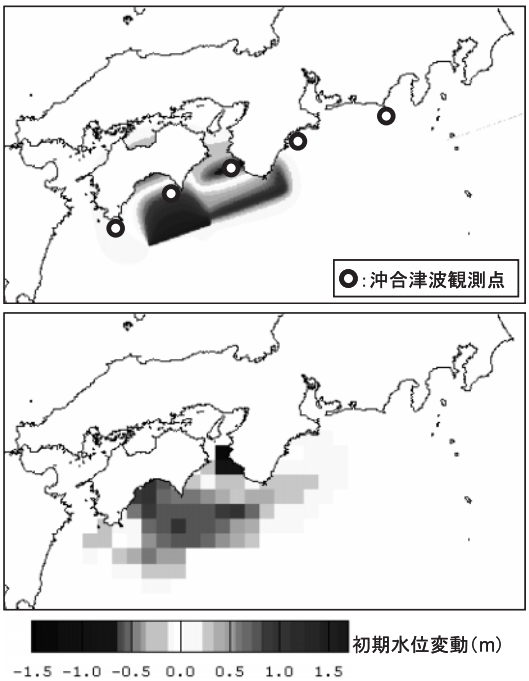

図-6　昭和南海地震の津波の初期水位分布（上段が観測値，下段が予測結果）

（2）津波予測および津波浸水予測の結果

a）昭和南海地震

図-6は津波の初期水位分布，**図-7**は津波波形を，昭和南海地震の観測値と予測結果の間で比較した結果である．**図-7**の上段は和歌浦・海南地区の港外（水深68.1m），下段は港内の汀線近く（水深0.2m）である．

港外の津波波形は，観測値と比較して予測結果の初動の引き波が過大であるが，押し波の第1波の到達時刻や振幅は正しく予測されている．地震発生後15分間の沖合津波観測情報しか使用していないため，押し波の第1波のピーク（地震発生後60分）以降は予測精度が余り良くない．観測時間が短いために第1波以降の予測精度が低いことは，初期水位分布の予測結果からも明らかである．

また港内の汀線近くの津波波形は，リアルタイム津波予測手法で遡上や非線形効果が考慮されていないので，港外ほどは予測精度が良くない．

図-8と**表-2**は最大浸水深を，昭和南海地震の観測値と予測結果の間で比較した結果である．リアルタイム津波予測手法による沿岸域の津波予測の誤差が小さかったため，最大浸水量は観測値の164.7%という精度で正しく予測できた．また，観測値と比較すると，浸水面積の予測結果は152.1%と過大，最大浸水深の最大値の予測結果は70.2%と過小であるが，おおむね±50%の誤差で予測できた．

浸水面積の予測結果が過大，最大浸水深の最大値の予測結果が過小となった要因は，レベル湛水法では内陸部（**図-8**の地点（A））まで浸水し，丘状の場所の海側前面（地点（B））における堰上げ効果を再現していないためと考えられる．また，地点（C）は前面を構造物で防護された地盤の低い埠頭であり，観測値では津波の集中す

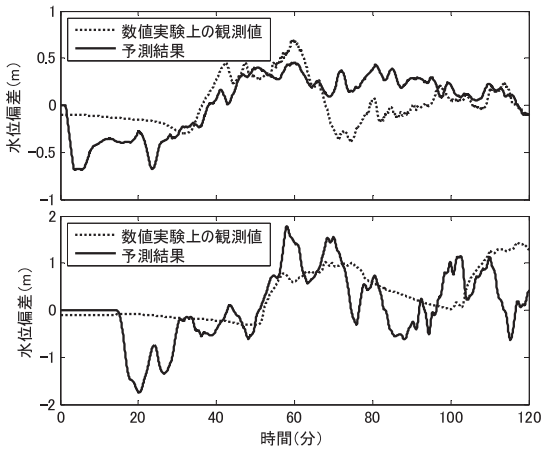

図-7　和歌浦・海南地区における昭和南海地震の津波波形（上段が港外，下段が港内の汀線近く）

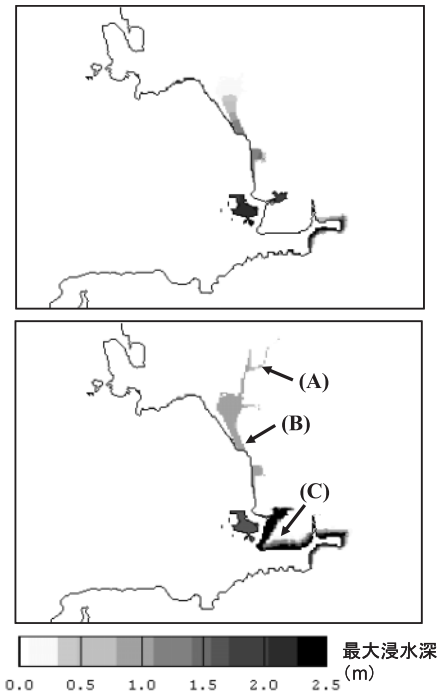

図-8　昭和南海地震の最大浸水深（上段が観測値，下段が予測結果）

表-2　津波浸水予測の結果（カッコ内は，観測値に対する予測結果の百分率）

	観測値		予測結果	
地震の名称	宝永	昭和南海	宝永	昭和南海
最大浸水量（m^2）	2,920,088	2,384,375	3,790,562 (129.8 %)	3,927,159 (164.7 %)
浸水面積（m^3）	2,452,500	2,077,500	3,107,500 (126.7 %)	3,160,000 (152.1 %)
最大浸水深の最大値（m）	3.46	3.29	2.27 (65.6 %)	2.31 (70.2 %)

る埠頭の北西部以外は越流・浸水しない．しかしレベル湛水法では，埠頭の北西部や埠頭東側の港の最奥部で越流した水塊が，地盤が低い埠頭の周縁部を一様に浸水し，浸水面積を増大させている．

b）宝永地震

昭和南海地震と同様に宝永地震に関しても，**表-2**のとおり，最大浸水量・浸水面積・最大浸水深の最大値を±50%の誤差で予測できた．また，観測値と比較して，浸水面積の予測結果が過大，最大浸水深の最大値の予測結果が過小となる傾向が認められた．ただし宝永地震の場合は，式（1）と（2）による越流量と最大浸水量の推定やレベル湛水法による津波浸水の予測における予測誤差よりも，リアルタイム津波予測手法による沿岸域の津波予測の誤差が大きかった．昭和南海地震と比較すると宝永地震の津波波源は広大であり，隆起・沈降も複雑であるため，リアルタイム津波予測手法の予測誤差が大きかったと考えられる．

5. おわりに

リアルタイム津波予測手法の予測結果から越流量を推定する簡便なモデルと，推定された越流量からレベル湛水法を用いて津波浸水を予測する手法を開発した．開発した手法をリアルタイム津波予測手法と組み合わせることで，沖合津波観測情報から津波浸水を即時的に予測することが可能になった．実地形と歴史地震を使用した数値実験を行った結果，最大浸水量・浸水面積・最大浸水深の最大値を約±50%の誤差で予測できることを確かめた．ただし，予測結果は浸水面積が過大，最大浸水深の最大値が過小となる傾向があった．

今後の課題は2点ある．まず，越流量と最大浸水量の推定モデルで用いたパラメータα・β・γと，地形・構造物・津波の諸元との関係を検討し，推定モデルの適用範囲や事前計算によるパラメータの同定手法を明確にする必要がある．次に，レベル湛水法では内陸部まで浸水しやすく，丘状の場所の海側前面における堰上げ効果を再現できないので，汀線や背後地の分割手法を検討し，レベル湛水法を改良する必要がある．

謝辞：本研究を遂行するにあたり，科学研究費補助金基盤研究（A）（代表者：加藤照之，課題番号17201038）の補助を受けた．ここに記して，感謝の意を申し上げる．

参　考　文　献

加藤史訓・福濱方哉・藤井裕之・高木利光・児玉敏雄（2007）：堤防高を考慮した実効的な津波被害想定手法，海岸工学論文集，第54巻，pp. 261-265.

国土交通省：GPS波浪計による沖合波浪観測情報の公表について－平成21年3月17日（オンライン），http://www.mlit.go.jp/report/press/port05_hh_000005.html，参照2009-05-15.

後藤智明・佐藤一央（1993）：三陸沿岸を対象とした津波数値計算システムの開発，港研報告，第32巻第2号，pp. 3-44.

佐藤良輔　（1989）：日本の地震断層パラメター・ハンドブック，鹿島出版会，pp. 126-127，p. 211.

辰巳大介・富田孝史（2008）：震央位置を考慮したインバージョン手法によるリアルタイム津波予測，海岸工学論文集，第55巻，pp. 246-250.

農林水産省農村振興局・農林水産省水産庁・国土交通省河川局・国土交通省港湾局（2004）：海岸事業の費用便益分析指針（改訂版），pp. 33-48.

Kato T., Y. Terada, K. Ito, R. Hattori, T. Abe, T. Miyake, S. Koshimura, and T. Nagai (2005): Tsunami due to the 2004 September 5th off the Kii peninsula earthquake, Japan, recorded by a new GPS buoy, Earth ,Planets, and Space, Vol. 57, pp. 297-301.