

津波浸水深の経験的予測手法

Empirical Model to Estimate Inundation Depth

清水 智¹, 若浦 雅嗣¹

Satoshi SHIMIZU¹ and Masatsugu WAKAURA¹

¹応用アール・エム・エス株式会社 災害リスク事業部
Risk Management Dept., OYO RMS Corporation

This study is intended to build the empirical model to estimate tsunami inundation depth based on the field survey data of The 2011 off the Pacific Coast of Tohoku Earthquake. Firstly, we explain the judgement model whether the objective site is in the inundation area. Secondly, the model to estimate the inundation depth is explained. Both of them are required only three variables, tsunami height at coastline, distance from coastline and ground level of an objective point. Finally, we explain the result of model validation. The model was validated by comparing predicted inundation depth to actual depth in the past tsunami and simulation results of Nankai-trough earthquake. As the result, we could confirm that model can reproduce the inundation area and inundation depth.

Keywords: tsunami, inundation depth, inundation area, empirical model

1. はじめに

2011年東北地方太平洋沖地震が発生する以前から国・自治体によって津波の予測が実施されてきた。例えば、日本海溝周辺では、中央防災会議 日本海溝・千島海溝専門調査会がM8クラスの津波の浸水予測を実施し公表していた¹⁾。しかし、2011年3月11日に発生した東北地方太平洋沖地震は、Mw9.0という多くの専門家が予想していなかった巨大な地震であったため、想定外の高さの津波が太平洋沿岸各地を襲い、岩手県・宮城県・福島県を中心に甚大な被害をもたらした。

津波の浸水予測は一般に数値シミュレーションによって行われてきた。シミュレーションによる津波の予測は、浅水域での波の複雑な挙動が表現でき、かつ詳細な地形を反映した陸域における浸水深・流速・到達時間等を明らかにする事ができる理論的かつ精緻な手法である。反面、波源から評価地点までの海底および陸上の地形データを収集して行う地形のモデル化作業や、膨大な計算など専門的知識と膨大な労力が伴う手法でもある。また、精緻な計算が故に、波源モデル、データの精度、解像度が結果の精度に大きく影響する。したがって、シミュレーションによる津波の浸水予測は、限られた専門家の手にゆだねられているのが現状である。また、様々な波源を対象に広域的（全国的）に浸水予測を実施する場合でも、個々の波源に対して、波源から陸域まで逐次計算を行う必要があり、浸水状況の概況把握にはそれなりの時間と労力が必要である。

このような状況において数値シミュレーションの専門家以外でも利用できる浸水の簡易予測手法があれば、さまざまな海岸線の津波高を用いて浸水予測を行うことで

浸水被害のレベル感を把握したり、近年研究が進んでいる確率論的津波ハザード評価²⁾の海岸線津波高のハザードカーブから確率論的浸水ハザード評価を行うことも期待できる。また、浸水予測の誤差を陽な形でリスク評価に取り込むことも可能であろう。

津波浸水の簡易予測手法に関する先行研究としては、レベル湛水法³⁾や加藤ほか(2007)⁴⁾の方法がある。しかし、これらの方法は、津波波形から算出した浸水流量が海岸線から順に浸水すると考えて浸水域を求め、海岸線と最大遡上範囲を直線で結び評価地点の浸水深を算出するため、海岸線における津波波形が必要となるとともに、ある特定地点の浸水深が知りたい場合でも海岸線から最大遡上範囲の標高データが必要なために、専門家以外が容易に使えるまでには至っていない。

このような観点から、本稿では、①比較的容易に入手できる必要最小限の情報から簡便に浸水状況を予測すること、②広域を対象に浸水状況の概況を容易に把握すること、の2点を実現できる浸水域・浸水深の経験的予測手法を開発した。具体的には、誰もが比較的容易に入手できる評価地点の情報と海岸線の津波高のみから浸水深を評価する、波源情報や波形データが不要な経験的予測手法である。開発した手法は、過去の被害地震における浸水状況と比較を行い、その妥当性について検証した。さらに、シミュレーション結果との比較を行い、開発した手法の課題について考察した。

なお、本手法は、国・保険会社・大企業等の全国にポートフォリオを保有する主体がリスクマネジメント（またはリスクファイナンス）を行うための確率論的リスク評価のための浸水ハザード評価に利用することを念頭に開発した。すなわち、個々の拠点の評価結果よりもポー

トフォリオ全体のリスク評価に利用することを主目的としている。

2. 予測手法の開発方針

図1は、東北地方太平洋沖地震における仙台平野と石巻平野を対象に国土技術政策総合研究所・土木研究所が実施した調査結果⁵⁾をプロットしたものである。図1からは浸水深と海岸線からの距離は非線形な関係にあり、レベル湛水法のように断面形状を線形と仮定した場合、浸水深を過大評価する可能性が考えられた。

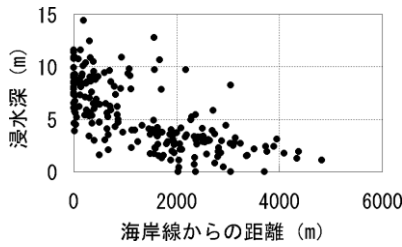


図1 浸水深と海岸線からの距離の関係
(東北地方太平洋沖地震の仙台平野・石巻平野)

一方、図1より、浸水断面形状を下に凸の形状と推測した場合、最大遡上地点付近で高さ方向（浸水深）の変化に対して、遡上距離の変動が大きくなりやすい。仮に、浸水深を被説明変数とする非線形な予測モデルを構築した場合、標高データや予測モデルの誤差が浸水範囲の予測結果に大きく影響することが予想された（図2参照）。

そこで、標高データや予測モデルの誤差が浸水範囲の予測結果に及ぼす影響を低減するため、線形モデルにより浸水域を特定した上で、浸水する地点に対して浸水深の評価を行う2段階の評価を考えた（図3参照）。

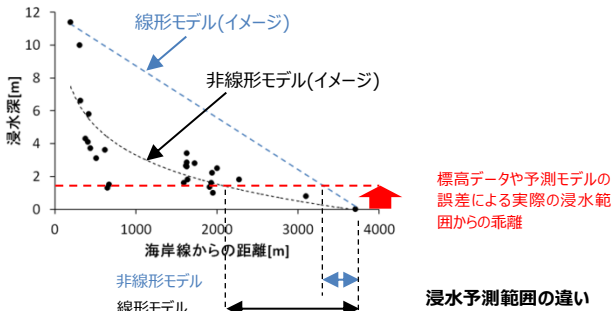


図2 線形モデルと非線形モデルによる標高データや予測モデルの誤差による浸水範囲の違い

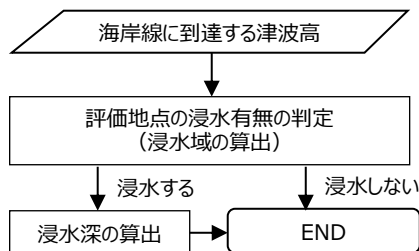


図3 浸水予測の流れ

3. 浸水域の予測手法

東北地方太平洋沖地震では津波痕跡調査⁶⁾により多くの地点で痕跡高が計測された。本研究では、このデータを利用して浸水域を評価する経験式（回帰モデル）を作成した。回帰モデルは、簡便性を重要視し、評価者が情報を容易に入手できる評価地点の情報と海岸線に到達する津波高（以降「海岸線津波高」と称す）から構築するものとした。

(1) 回帰モデル

津波の陸上への遡上現象を単純化すると、海岸線から評価地点が遠いほど、評価地点の標高が高いほど浸水し難い。また、津波の高さによっても浸水状況は大きく変化する。以上の点から、経験的に回帰式の形状を式[1]のように仮定した。

$$z_i = H_i + \alpha h_i + \beta L_i \quad [1]$$

ここで、 z_i ：遡上高[m]
 H_i ：海岸線津波高[m]
 h_i ：標高[m]
 L_i ：海岸線までの距離[m]
 α, β ：回帰係数
 i ：遡上高計測地点

式[1]で海岸線津波高 H_i を説明変数としていないのは、海岸線 ($L=0$ かつ $h=0$) においては $z=H$ が成り立つと考えられるためである。そこで、式[1]の回帰モデルを式[2]のように変形し、被説明変数を遡上高と海岸線津波高の差、説明変数を評価地点の標高・海岸線からの距離とし、式[2]を原点回帰して回帰係数を求めた。

$$D_i = \alpha h_i + \beta L_i \quad [2]$$

ここで、 D_i ： $z_i - H_i$
 z_i ：遡上高[m]
 H_i ：海岸線津波高[m]
 h_i ：標高[m]
 L_i ：海岸線までの距離[m]
 α, β ：回帰係数
 i ：遡上高計測地点

(2) データセット

回帰分析には、遡上高、海岸線までの距離、海岸線津波高、標高のデータが必要である。ここでは、東北地方太平洋沖地震津波合同調査グループによって実施された津波痕跡調査結果⁶⁾の5907地点のうち、信頼度がAまたはBで、青森県から千葉県のパシフィック沿岸地域の遡上高を計測した2260点のデータを使用した。以下、各データの詳細について示す。

a) 遡上高 (z_i)・海岸線までの距離 (L_i)

遡上高および海岸線までの距離は上記データセットの「遡上高」「汀線までの距離」を使用した。ただし、「汀線までの距離」が計測されていない地点は、計測地点から津波で浸水した海岸線までの距離をGISソフトで計測して算出した。

b) 海岸線津波高 (H_i)

東北地方太平洋沖地震の際、海岸線津波高を正確に把握することは難しい。海岸線津波高の推定方法として数値シミュレーションの結果を利用する方法もあるが、実

データに基づき経験的手法を作成することを重視し、本研究では海岸線近傍（海岸線から 50m 以内）の浸水高が海岸線津波高を示すと考え⁽¹⁾、これを線形補間して当時の海岸線津波高を連続的に推定した（図 4・5 参照）。

また、各調査地点に対応する海岸線での津波高 H は調査地点から最短距離の地点の津波高を適用した。

c) 標高 (h_i)

東北地方太平洋沖地震津波合同調査グループの調査項目⁽⁶⁾には調査地点の標高は含まれていない。記事として標高や地盤高の記載がある地点もあるが全体に占める割合はごく僅かである。そのため、既述のように回帰モデルを作成する際、遡上高計測地点のみを利用しこの遡上高を調査地点 i の標高値 h_i として用いた。

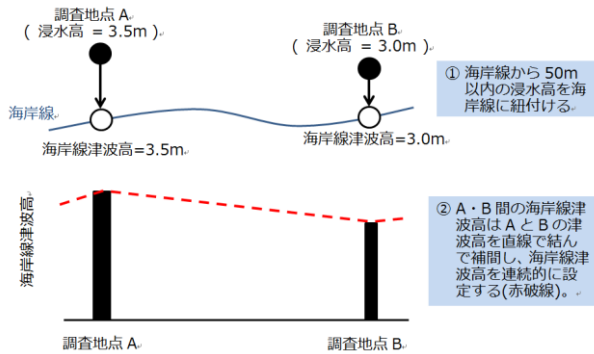


図 4 海岸線津波高の作成方法

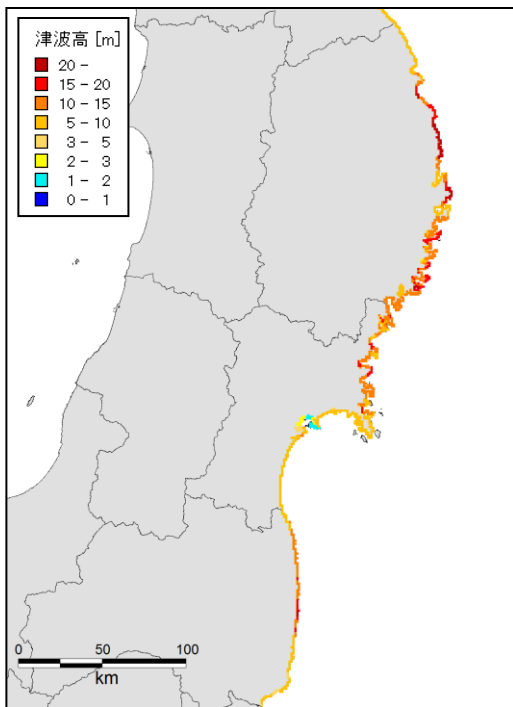


図 5 作成した海岸線での津波高の分布

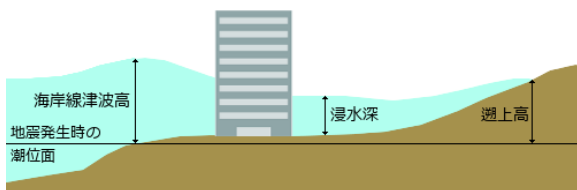


図 6 海岸線津波高・浸水深・遡上高の定義

(3) 回帰分析結果

設定したデータを用いて重回帰分析を行った。得られた回帰式を式[3]に、回帰係数を表 1 に示す。

$$D = 0.2776h - 0.001582L \quad [3]$$

ここで、 D : $z - H$

z : 遡上高[m]

H : 海岸線の津波高[m]

h : 標高[m]

L : 海岸線までの距離[m]

本回帰式の作成目的は、評価地点における遡上高を求めることではなく、浸水するか否かを判定することである。式[3]から求められる遡上高 z ($z = D + H$) が標高 h よりも大きければ評価地点は浸水すると考えられるため、遡上高 z から標高 h を減じた値 ($z - h$) を浸水パラメータ I と名付け、式[3]を式[4]のように変形し、浸水するか否かを式[4]の I 値で判定することとした。

$$I = H - 0.7224h - 0.001582L \quad [4]$$

ここで、 I : 浸水パラメータ ($I = z - h$)

$I > 0$ の場合 → 浸水する

$I \leq 0$ の場合 → 浸水しない

H : 海岸線の津波高[m]

h : 標高[m]

L : 海岸線までの距離[m]

表 1 回帰分析の結果

	推定値	標準誤差	t値	p値
h	0.277600	0.006314	43.96	$2e-16$ 未満
L	-0.001582	0.000072	-22.06	$2e-16$ 未満
Null逸脱度	70353 (自由度2260)			
残差逸脱度	36551 (自由度2258)			

4. 浸水深の予測手法

評価地点の浸水深は、浸水範囲内における浸水断面形状を東北地方太平洋沖地震の津波痕跡調査結果⁽⁶⁾を用いてモデル化することで、予測することとした。

(1) モデル作成に使用したデータセット

浸水断面形状のモデル化を行うため、東北地方太平洋沖地震津波合同調査グループの痕跡調査結果⁽⁶⁾から32の測線を設定し、測線毎に各調査地点の浸水深、海岸線からの距離、標高の値をもつデータセットを作成した。ただし、文献⁽⁶⁾の調査結果は浸水高（または遡上高）のため、数値標高モデル（5mメッシュ標高）⁽⁷⁾から調査地点の標高を求め、浸水深を算出した。

浸水断面の形状は陸上地形の影響を受けると考えられることから、測線は平野とリアス式海岸で各 16 測線ずつ設定した。また、海岸線津波高は、各浸水断面の調査地点のうち最も海岸線に近い点の浸水高を海岸線津波高とした。設定した測線位置を図 7 に、各測線の浸水断面を図 8～11 に示す。

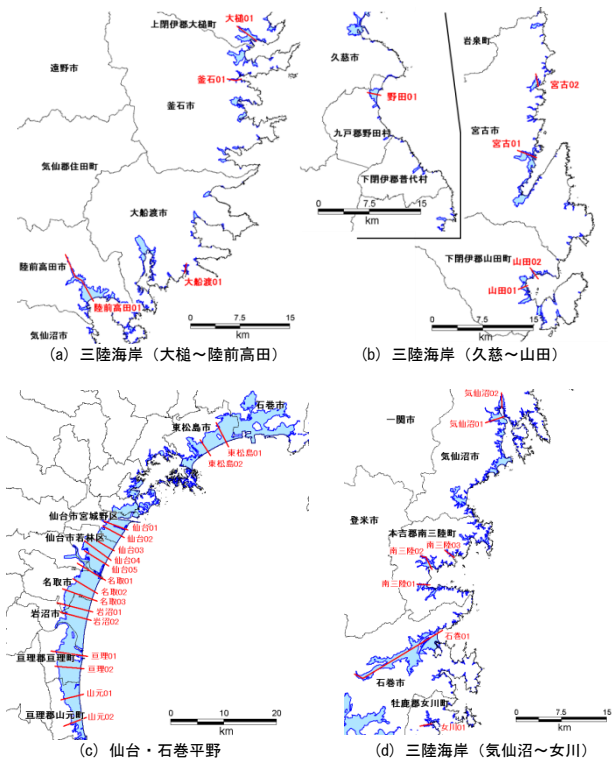


図7 測線の設定位置

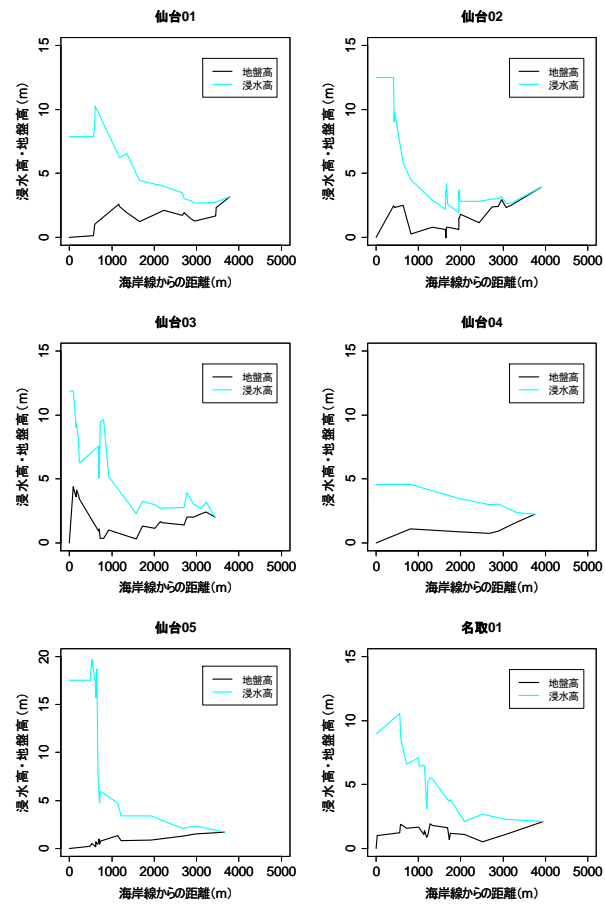


図8 各測線の浸水断面（1）

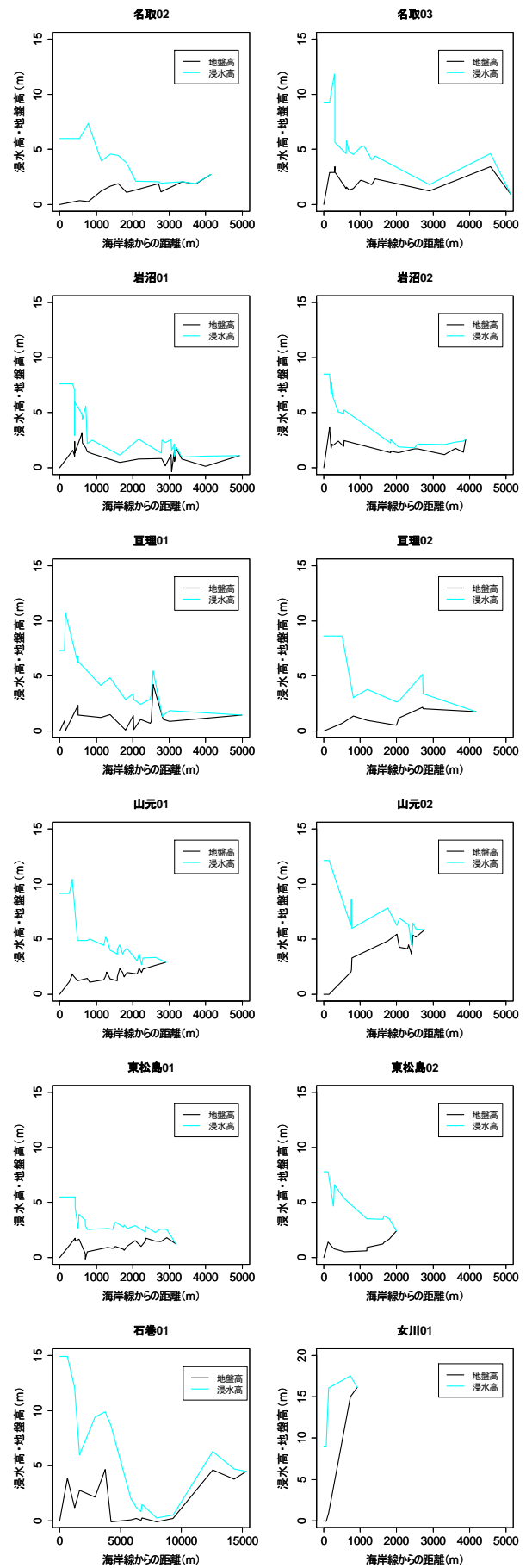


図9 各測線の浸水断面（2）

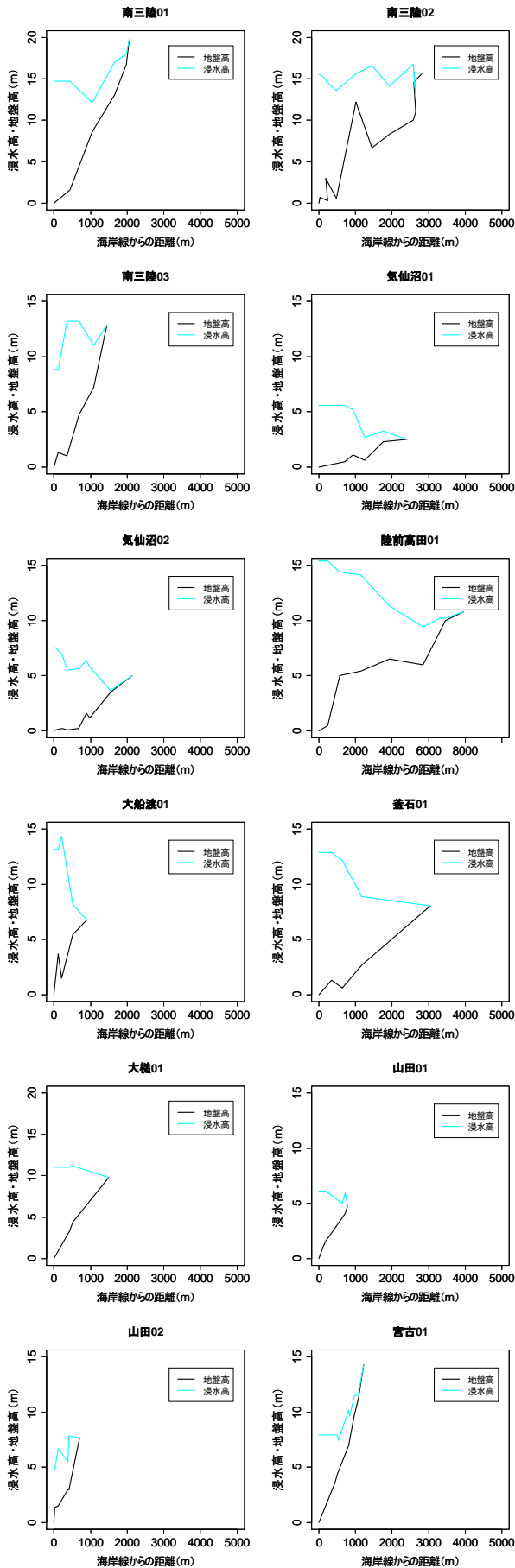


図 10 各測線の浸水断面 (3)

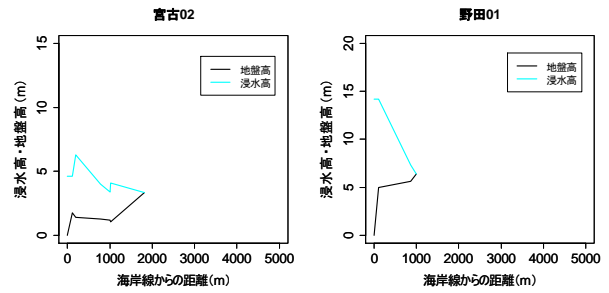


図 11 各測線の浸水断面 (4)

(2) 浸水断面のモデル化と浸水深の算出方法

(1)のデータは、測線毎に海岸線の津波高や遡上距離が異なっており、統一的に扱うことは難しい。そこで、浸水深を海岸線の津波高で、海岸線からの距離を最大遡上距離で各々規準化した上で浸水断面形状のモデル化を試みた。

$$RL = L / L_{max} \quad [5]$$

$$RD = D / H \quad [6]$$

ここで、 RL ：相対距離

L ：評価地点から海岸線までの距離[m]

L_{max} ：最大遡上距離[m]

RD ：相対浸水深

D ：浸水深[m]

H ：海岸線の津波高[m]

また、浸水断面の形状は、平野部にある測線「仙台02」のように遡上高 R が海岸線津波高 H よりもかなり低い場合と、リアス式海岸にある測線「南三陸03」のように遡上高 R が海岸線津波高 H より高くなる場合では浸水深の断面形状が異なることが予想された。そこで、海岸線での津波高 H と遡上高 R の比を HR とし、各測線毎に HR を求めた。

$$HR = R / H \quad [7]$$

この結果、32測線の HR の値は表2のようになった。

表2の HR 値に着目すると、仙台・石巻平野の測線では $HR < 0.5$ であり、リアス式海岸部では大部分の測線で $HR \geq 0.5$ であった。そこで、測線を「 $HR < 0.5$ 」「 $HR \geq 0.5$ 」の2種類に分類し、式[5][6]に示した相対距離 RL と相対浸水深 RD の関係を整理した(図12参照)。

表2 各測線毎の津波高・遡上高とHR値

測線名	地点数 n	海岸線津波高 H[m]	遡上高 R[m]	HR	測線名	地点数 n	海岸線津波高 H[m]	遡上高 R[m]	HR
仙台01	15	7.87	3.18	0.404	石巻01	15	14.90	4.5	0.302
仙台02	22	12.48	3.93	0.315	女川01	4	9.03	16.1	1.783
仙台03	22	11.86	2.01	0.169	南三陸01	4	14.69	19.7	1.341
仙台04	6	4.86	2.25	0.463	南三陸02	11	15.55	15.65	1.006
仙台05	15	17.50	1.67	0.095	南三陸03	5	8.85	12.83	1.450
名取01	20	9.03	2.09	0.231	気仙沼01	5	5.57	2.5	0.449
名取02	11	5.96	2.72	0.456	気仙沼02	7	7.52	5	0.665
名取03	15	9.29	0.93	0.100	陸前高田01	8	15.40	10.77	0.699
若沼01	22	7.60	1.09	0.143	大船渡01	4	13.13	6.79	0.517
若沼02	15	8.50	2.60	0.306	釜石01	4	12.90	9.8	0.760
巨理01	18	7.30	1.46	0.200	大槌01	3	11.00	8.06	0.733
巨理02	8	8.62	1.76	0.204	山田01	4	6.12	4.1	0.670
山元01	20	9.13	2.90	0.318	山田02	5	4.81	7.63	1.586
山元02	13	12.14	5.85	0.482	宮古01	7	7.89	14.3	1.812
東松島01	22	5.50	1.22	0.222	宮古02	6	4.62	3.32	0.719
東松島02	9	7.80	2.40	0.308	野田01	2	14.20	6.4	0.451

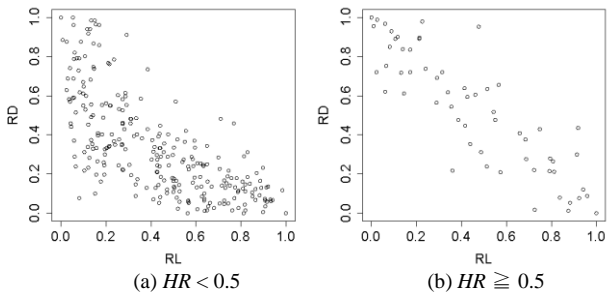


図12 相対浸水深と相対距離の関係

図12からは、「 $HR < 0.5$ 」の場合、 RD と RL の関係は非線形性が強く、 $RL > 0.2$ では $RD < 0.6$ となっており、津波がある一定距離を遡上すると（相対）浸水深が大きく低下する関係が読取れる。一方、「 $HR \geq 0.5$ 」の場合、 $RD-RL$ のプロットは、 $RL=0, RD=1$ と $RL=1, RD=0$ の点を結んだ直線上にばらついていて関係が読取れる。

以上の点から、浸水断面形状は「 $HR < 0.5$ 」「 $HR \geq 0.5$ 」の2つのタイプに分けて、相対距離 RL と相対浸水深 RD の関係をモデル化した。モデル化にあたっては、 RL と RD がそれぞれ相対化されて定義域が $[0,1]$ であることから確率分布のベータ分布の累積分布関数の関数形を利用した式[8]~[10]の回帰式を用いた。ベータ分布は変数の定義域が $[0,1]$ であり、累積分布関数は確率の定義から $[0,1]$ の値をとるため、それぞれ $[0,1]$ を逸脱することはない。また、ベータ分布は2つのパラメータで柔軟にその形状を決めることができるため、累積分布関数で表現した時、ほぼ直線から強い非線形性の形状まで表現できる（なお、ここでのベータ分布はその関数形状を利用するもので、式[8]に示す通りデータの分布としては正規分布を仮定する）。

$$y_i = f(x_i) + e_i, e_i \sim N(0, \sigma), \quad [8]$$

$$f(x_i) = 1 - \int_0^1 \text{beta}(x_i; \alpha, \beta) dx \quad [9]$$

$$\text{beta}(x_i; \alpha, \beta) = x_i^{\alpha-1} (1-x_i)^{\beta-1} \left(\int_0^1 x^{\alpha-1} (1-x)^{\beta-1} dx \right)^{-1} \quad [10]$$

y を相対浸水深 RD 、 x を相対距離 RL として、パラメータの推定にあたっては数値最適化による最尤法（最小二乗法）を用いた。推定パラメータを表3、推定されたモデルのプロットを図13に示す。

表3 推定パラメータ

	α	β	σ
$HR < 0.5$	0.3994	0.9337	0.0326
$HR \geq 0.5$	1.0186	0.9335	0.0322

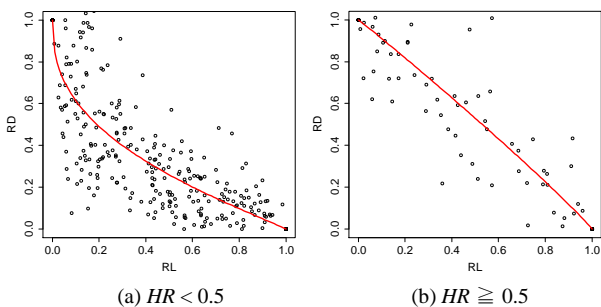


図13 推定されたモデルのプロット

5. 予測手法の検証

3. および4. で作成した浸水域・浸水深の予測手法（以降では「経験的手法」と称す）の妥当性を確認するため、過去に発生した被害地震を対象に、経験的手法による予測値と実際の浸水状況について比較した。対象とした被害地震は以下の5地震である。

- ① 2011年東北地方太平洋沖地震
- ② 1944年東南海地震
- ③ 1946年南海地震
- ④ 1960年チリ津波
- ⑤ 1993年北海道南西沖地震

また、検証を実施する際の評価単位、海岸線からの距離や標高のデータを表4に示した。検証対象地域、海岸線津波高は地震毎に表5に示した。

表4 検証の際のデータ諸元（1）

評価単位	50mメッシュ
海岸線からの距離	評価地点と海岸線の最短距離（直線距離）
標高	相馬市以北は数値標高モデル（5m標高データ ⁷⁾ を、同データが整備されていない南相馬市以南は中央防災会議（2006） ¹⁾ の標高データを元データとし、これを50mメッシュ単位で平均化した標高データを検証に利用した。

表5 検証の際のデータ諸元（2）

地震名	検証対象地域	海岸線津波高
2011年東北地方太平洋沖地震	岩手県・宮城県・福島県	図5の津波高
1944年東南海地震	三重県尾鷲市	5.0m ※1
1946年南海地震	和歌山県海南市	3.5m ※1
1960年チリ地震	岩手県陸前高田市	5.0m ※2
1993年北海道南西沖地震	北海道奥尻町青苗	津波痕跡データベース ¹⁰⁾ の海岸線付近の津波高を線形補間し、これを海岸線津波高として与えた。

※1 渡辺(1998)⁹⁾による値

※2 チリ地震津波合同調査班(1961)⁹⁾による値

(1) 2011年東北地方太平洋沖地震

初めに、経験的手法により東北地方太平洋沖地震の浸水域・浸水深がどの程度再現可能かを検証した。対象とした地域は、同地震で津波被害の中心となった岩手県・宮城県・福島県の太平洋沿岸の市町村である。

浸水域の再現計算は、表4・5の条件下で、50mメッシュ毎に式[4]の浸水パラメータ I を算出し、浸水する場合は当該50mメッシュ全体が浸水するとして浸水面積を算出した。表6に市町村別浸水域の予測値と実績値¹¹⁾の一覧を示した。図14には仙台平野と陸前高田における予測した浸水範囲と実際の浸水範囲¹²⁾の比較を示す。

経験的手法により予測した浸水面積と実際の浸水域を比較すると、岩手・宮城・福島3県全体の予測値は実績値の1.15倍であり、概ね浸水域を再現する結果となった。特に、石巻平野（石巻市・東松島市）や仙台平野（仙台市・名取市・岩沼市・山元町）などの平野部では精度よく浸水域が再現できた。これは、評価地点の浸水有無の判定（式[4]）に線形回帰モデルを適用することにより、標高に対する感度を低減させた効果と考えられる。一方、岩手県北部や福島県南部などの検討対象地域の端部では、予測結果が実際の浸水域よりも過大評価となる傾向が得られた。これは、回帰モデルの構築に利用した遡上高の痕跡調査地点の分布が被害が大きかった岩手県南部から福島県北部に多く分布している影響と考えられる。

次に、津波痕跡調査結果と痕跡調査地点の標高から推定される浸水深（以降「実績値」と称す）と経験的手法による浸水深（以降「予測値」と称す）の比較を行った（図15参照）。浸水深の実績値と予測値の差の平均値は

0.84mとなり、予測値は実測値よりもやや大きめの評価となったが、四分位偏差は2.3mで、誤差分布も正規分布に近い結果が得られた。この結果は、経験的手法により評価地点の情報と海岸線津波高からある程度の精度で浸水深予測（概算）が可能であることを示している。また、予測値と実測値の差と海岸線からの距離の関係をみると、海岸線に近いほど予測値と実測値のばらつきは大きく、海岸線から離れるほどばらつきは小さくなる傾向が見られた（図15参照）。予測値と実測値の誤差が2σ以上乖離した地点は、宮古市・気仙沼市・南相馬市・檜葉町で10地点を超えていた。これらの地域は浸水域の予測結果が過大評価となった地域であり、浸水域の予測精度の影響が原因と考えられる。

表6 市町村別浸水面積の予測値と実績値の比較
(東北地方太平洋沖地震)

岩手県・宮城県							
	予測値 [km ²]	実績値 [km ²]	予測値/ 実績値		予測値 [km ²]	実績値 [km ²]	予測値/ 実績値
岩手県洋野町	2	1	2.00	宮城県気仙沼市	24	18	1.33
岩手県久慈市	8	4	2.00	宮城県南三陸町	13	10	1.30
岩手県野田村	5	2	2.50	宮城県女川町	5	3	1.67
岩手県普代村	2	1	2.00	宮城県石巻市	62	73	0.85
岩手県田野畑村	1	1	1.00	宮城県東松島市	39	37	1.05
岩手県岩泉町	2	1	2.00	宮城県松島町	4	2	2.00
岩手県宮古市	14	10	1.40	宮城県利府町	0.5	0.5	1.00
岩手県山田町	7	5	1.40	宮城県塩釜市	5	6	0.83
岩手県大槌町	4	4	1.00	宮城県七ヶ浜町	6	5	1.20
岩手県釜石市	12	7	1.71	宮城県多賀城市	6	6	1.00
岩手県大船渡市	12	8	1.50	宮城県仙台市	46	52	0.88
岩手県陸前高田市	15	13	1.15	宮城県名取市	22	27	0.81
				宮城県岩沼市	26	29	0.90
				宮城県亘理町	31	35	0.89
				宮城県山元町	23	24	0.96
岩手県計	84	57	1.47	宮城県計	312.5	327.5	0.95

福島県			
	予測値 [km ²]	実績値 [km ²]	予測値/ 実績値
福島県新地町	10	11	0.91
福島県相馬市	30	29	1.03
福島県南相馬市	59	39	1.51
福島県浪江町	10	6	1.67
福島県双葉町	7	3	2.33
福島県大熊町	5	2	2.50
福島県富岡町	5	1	5.00
福島県檜葉町	6	3	2.00
福島県広野町	3	2	1.50
福島県いわき市	40	15	2.67
福島県計	175	111	1.58
合計	571.5	495.5	1.15

さらに、経験的手法の予測精度が津波シミュレーションと比較してどの程度かを比較するため、津波シミュレーションで断層モデルの適合性を判断する場合に用いられる相田(1977)¹³⁾の幾何平均Kや幾何標準偏差κを算出した。

$$\log K = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \log K_i \quad [10]$$

$$\log \kappa = \left[\frac{1}{n} \left(\sum_{i=1}^n (\log K_i)^2 - n(\log K)^2 \right) \right]^{1/2} \quad [11]$$

ここで、n：地点数

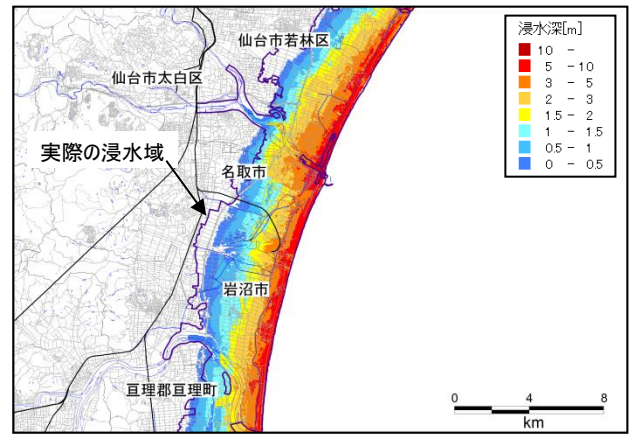
$K_i = R_i / H_i$

R_i ：地点*i*での痕跡高[m]

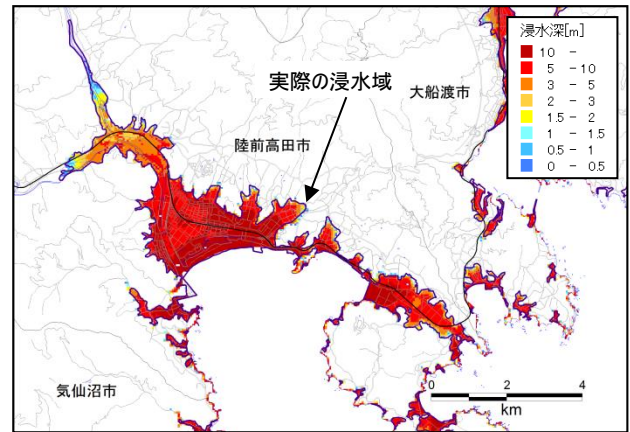
H_i ：地点*i*での浸水深の予測値[m]

経験的手法によって得られた予測値と実績値を用いてKおよびκを算出した結果は、 $K=0.90$ 、 $\kappa=1.48$ となった（表7参照）。土木学会原子力土木委員会(2002)¹⁴⁾では、沿岸の痕跡高をよく説明できる断層モデルの目安として、

$0.95 < K < 1.05$ 、 $\kappa < 1.45$ を推奨している。経験的手法のK値、κ値はこれを満たしてはいないが、概ね近い値を示していることが確認できた。

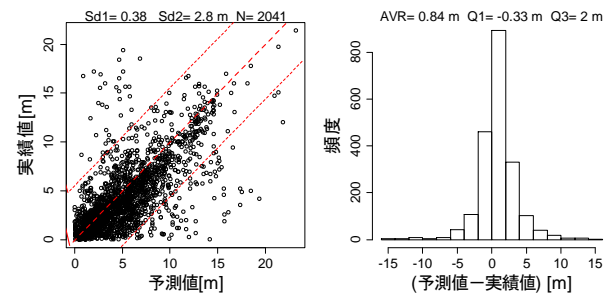


(東北地方太平洋沖地震：仙台平野)



(東北地方太平洋沖地震：陸前高田)

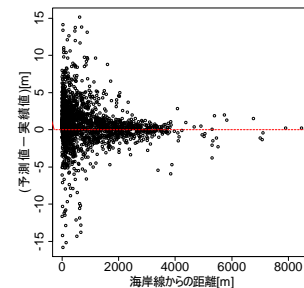
図14 本手法による浸水深分布と実際の浸水域



(a) 実績値と予測値の比較

(b) 残差のヒストグラム

※ Sd1は対数標準偏差、Sd2は標準偏差 ※ AVRは平均値、Q1・Q3は第一および第三四分位点の値
※ 図中の赤細破線は±2σの範囲



(c) 残差と海岸線からの距離の関係
図15 浸水深の予測値と実績値の比較

表 7 各地震における浸水深・痕跡高の誤差

地震名	Sd1	Sd2[m]	K	κ	N
1944年東南海地震	0.437	0.8	0.76	1.20	58
1946年南海地震	0.294	1.5	1.07	1.35	12
1960年チリ地震	0.118	0.8	0.95	1.16	8
1993年北海道南西沖地震	0.278	1.4	0.86	1.16	24
2011年東北地方太平洋沖地震	0.380	2.8	0.90	1.48	2041

※ Sd1・Sd2は浸水深の指標、K・κは痕跡高の指標である。

(2) その他の地震

(1)では経験的手法の構築に利用した東北地方太平洋沖地震が概ね再現できることを示した。ここでは、他の地震でどのような結果となるか検証するため、実際の浸水域・痕跡高の両方のデータを揃えることができた表 5 の 3 地震（1944 年東南海地震、1946 年南海地震、1960 年チリ地震）の 3 地域のほか北海道南西沖地震の奥尻島青苗地区を対象に浸水深の比較を行った。検証に利用したデータは表 4・5 に示す通りである。なお、1944 年東南海地震の尾鷲、1946 年南海地震の海南は、埋立等により地震発生当時と現在の海岸線位置が異なるため、図 16 に示すように当時の航空写真¹⁵⁾に基づき海岸線を再現して海岸線から各評価地点の距離を計算した上で、浸水域・浸水深を予測し、実績値⁹⁾¹⁰⁾¹⁶⁾¹⁷⁾と比較を行った。図 17 には各地震による経験的手法による浸水域・浸水深の分布と実際の浸水域の比較を、図 18 には各痕跡調査地点における浸水深の実績値と予測値の比較を、表 7 には各地震の実績値と予測値の誤差指標を示した。

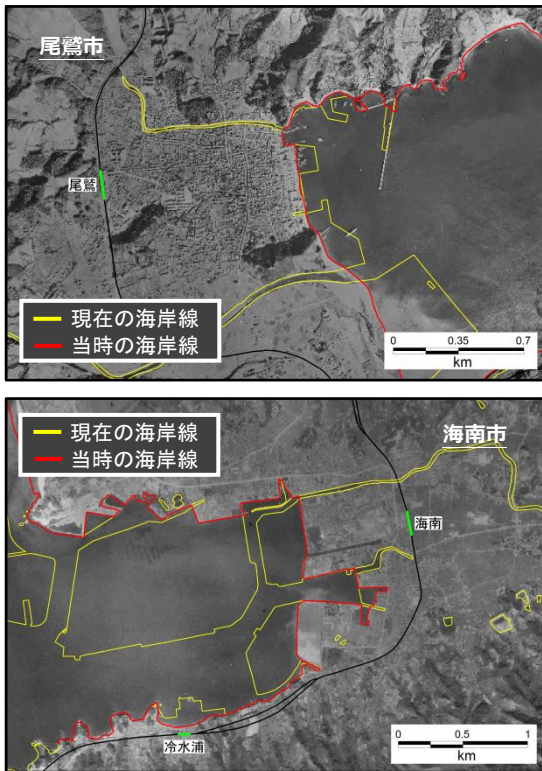


図 16 地震発生当時と現在の海岸線の比較

実際の浸水域を把握できた 3 地震では、経験的手法の浸水域は実際の浸水域を概ね再現する結果となった（図 17 参照）。また、浸水深は東南海地震（尾鷲）で過大評価となる傾向があるが、それ以外の地震では対数標準偏差で 0.12~0.29、標準偏差で 0.8~1.5m となった。海南（1946 年南海地震）で極端に予測値が実測値よりも小さ

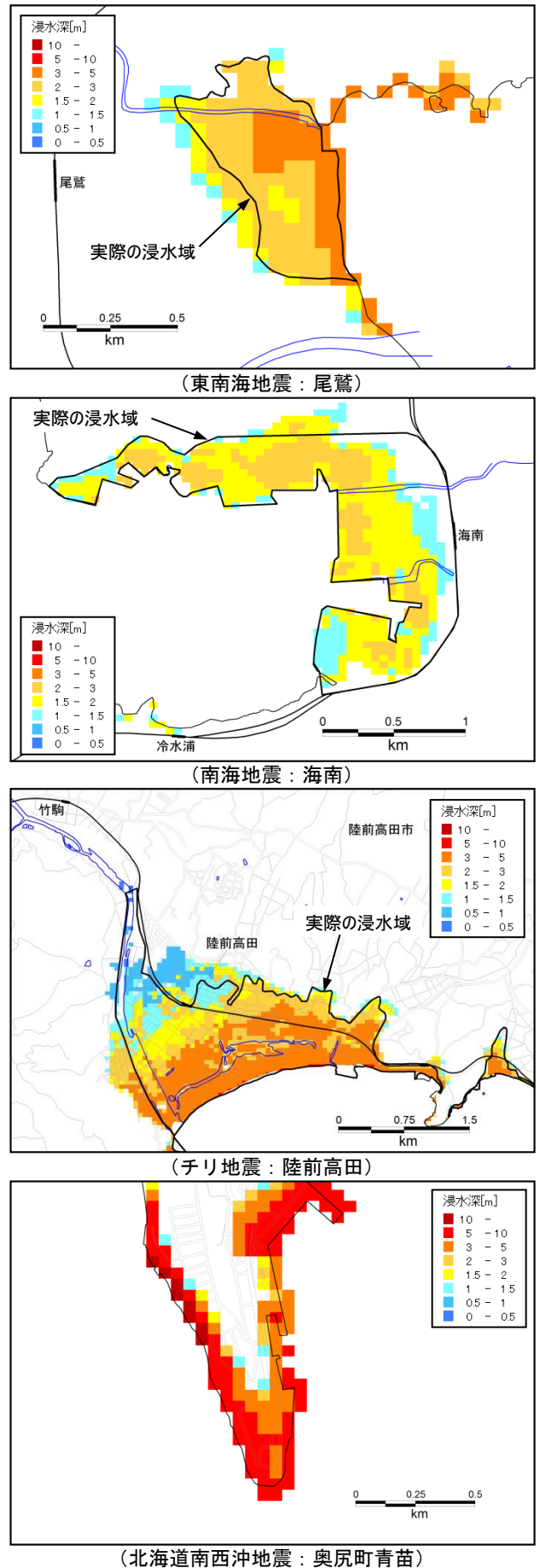
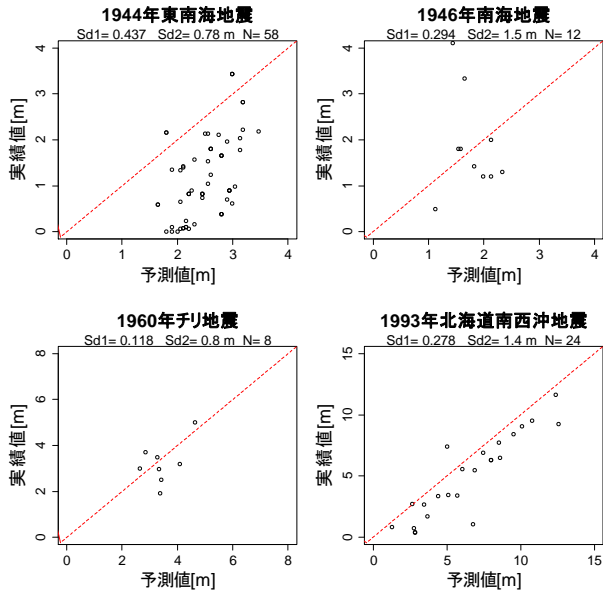


図 17 本手法による浸水域・浸水深と実際の浸水域

くなっている地点があるが、予測した浸水域が実際のものよりも若干狭くなったため、浸水深の予測値が実績値よりも小さくなったと考えられる。一方、尾鷲（1944年東南海地震）で予測値が実績値よりも全般的に大きくなった。経験的手法では実際の浸水限界付近でも浸水深が2~3m程度になっており、浸水域の過大評価が誤差の原因と考えられる。なお、 K 値は0.76~1.07の範囲内にあり、東北地方太平洋沖地震の津波痕跡データに基づき作成した経験的手法による予測値は、過去の津波においてもについてもある程度説明できているものと考えられる。



※ 図中のSd1は対数標準偏差、Sd2は標準偏差、Nは地点数を示す。
 図18 浸水深の予測値と実績値の比較

6. シミュレーションとの比較

浸水深の予測は津波シミュレーションによるものが一般的である。そこで、経験的手法と津波シミュレーションの結果について、どの程度の差異があるか確認した。ここでは、内閣府が2012年に実施した南海トラフ巨大地震の津波シミュレーションのデータ¹⁸⁾（以降、「SIM」と称す）を利用して、同地震における浸水域及び浸水深の予測結果を比較した。

SIMは11ケースの結果が公表されているが、ここでは基本的な検討ケースのうち、駿河湾～紀伊半島沖に大すべり域+超大すべり域を設定したケース1、四国沖に大すべり域+超大すべり域を設定したケース4について検討した。

経験的手法を適用する際の評価単位・海岸線からの距離・標高については表4と同様である。また、海岸線津波高は内閣府の公開データ（ケース1・4）を利用した。堤防は考慮していない。

以降では、浸水域及び浸水深の比較結果について示す。

(1) 浸水域

浸水域の検討は、南海トラフ地震の影響の大きい静岡県・愛知県・三重県・和歌山県・徳島県・高知県の太平洋沿岸の市区町村を対象に行った。表8に経験的手法とSIMの浸水面積を示した。SIMの結果は、堤防がない条

件と同等の結果と考えられる「地震発生から3分後に堤防が破壊するケース」を示した。

表8 浸水面積の比較（検証対象地域全体）

単位:km ²	ケース1		ケース4			
	経験的手法	SIM	経験的手法/SIM	経験的手法	SIM	経験的手法/SIM
静岡県	283.6	196.2	1.45	101.9	62.4	1.63
愛知県	100.1	256.5	0.39	52.1	183.9	0.28
三重県	193.6	277.4	0.70	95.2	208.0	0.46
和歌山県	121.6	97.7	1.24	149.2	118.9	1.26
徳島県	116.6	131.5	0.89	180.9	157.8	1.15
高知県	207.9	142.3	1.46	319.8	218.7	1.46
合計	1023.3	1101.5	0.93	899.1	949.5	0.95

対象地域全体でみた場合、経験的手法による浸水面積はSIMの0.93~0.95倍となった。このことから、経験的手法は広域的な浸水域を概略的には捉えていると言えそうである。ただし、愛知県や三重県では、SIMよりかなり小さな値となった。これらの地域の多くは、伊勢湾・三河湾の湾内に位置している。伊勢湾・三河湾は湾口も狭く、太平洋に面した他の地域と比較すると、様々な地形の影響を受けやすい。本検討結果は、伊勢湾・三河湾といった内湾に面した地域で経験的手法を適用するには精度上の課題があることを示している。

また、経験的手法は高知県や静岡県でほかの地域よりも過大評価の傾向がやや大きい。その原因を確認するため、経験的手法とSIMのケース1の静岡県内の市町村別の浸水面積を比較したところ（図19参照）、菊川市・袋井市で特に乖離が大きい結果となっていた。菊川市は内陸の市であり、隣接した沿岸市町村（掛川市・御前崎市）の浸水域の評価の違いが菊川市の浸水面積の違いとして現れたものと考えられるが、海岸線に面した袋井市における2つ手法の結果の差は非常に大きい。袋井市周辺の浸水域の分布を確認すると経験的手法による浸水域は内陸3~5km程度まで広がっているが、SIMの浸水域は河川部を除くと海岸線から500m程度で留まっている（図20参照）。この原因は袋井市周辺の標高分布にあると考えられる。この地域の沿岸部では、海岸線付近に標高10m前後の砂丘（図21の砂丘①）が発達し、その後背に低地が広がっている。SIMは海岸線から内陸に向かって逐次計算するため、海岸線付近にある砂丘①を考慮した形となり、内陸にはあまり浸水しない結果となるが、経験的手法は津波高と評価地点の標高・海岸線からの距離からのみで浸水域を評価するため、途中の経路上の影響が考慮されない。袋井市周辺のような海岸線付近に標高の高い地域があり、その後背に低地が広がるような地域では、経験的手法はシミュレーション結果よりも浸水域を大き

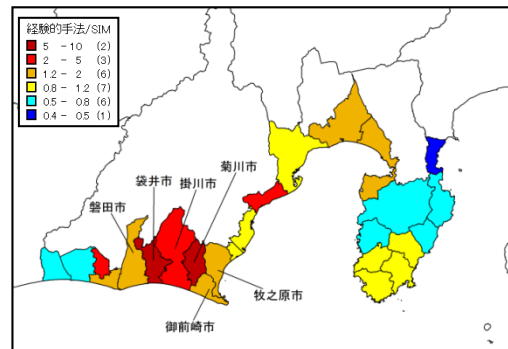


図19 経験的手法とSIMの市町村別浸水面積の比較（ケース1）

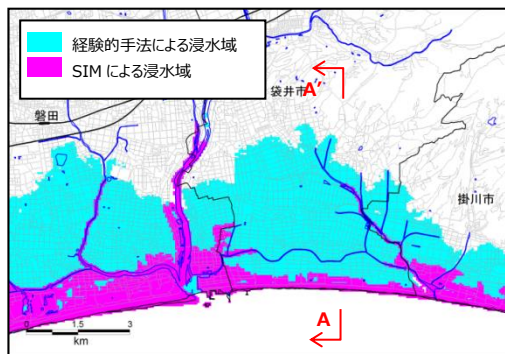


図20 経験的手法とSIM（ケース1）の浸水域の比較

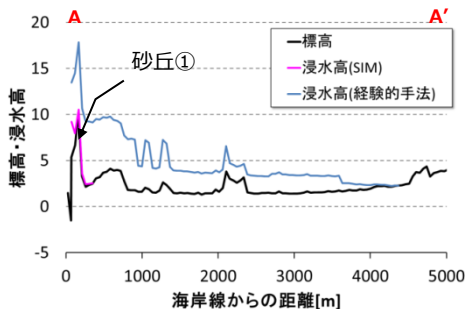


図21 図20のA-A' 断面

く評価する傾向がある。この点に関しては、海岸線津波高に応じて海岸線から評価地点までの距離のとり方を変化させるなどの方法で改善が必要と考えられる。

(2) 浸水深

経験的手法とSIMの浸水深を比較した。ただし、全浸水メッシュで比較を行うことは計算量が膨大となることから、ここでは6.の(1)で検討対象とした市町村から6市町村（各県1市町村ずつ）を選択し、その浸水メッシュを対象に比較を行った。本項における検討対象市町村とその浸水面積を表9に示す。

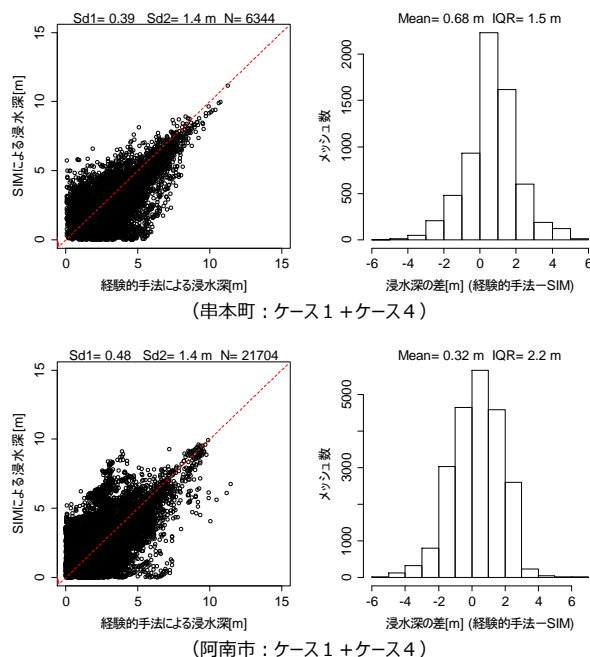
表9 経験的手法とSIMの浸水面積の比較

	ケース1			ケース4		
	経験的手法	SIM	経験的手法/SIM	経験的手法	SIM	経験的手法/SIM
静岡市	26.76	20.59	1.30	5.35	7.67	0.70
西尾市	15.08	42.39	0.36	9.98	32.65	0.31
尾鷲市	5.41	8.93	0.61	3.38	6.69	0.51
串本町	13.49	11.66	1.16	12.67	11.02	1.15
阿南市	28.10	31.59	0.89	43.11	37.83	1.14
黒潮町	17.96	10.31	1.74	25.10	14.17	1.77

本検討においてはSIMの浸水メッシュにおいて経験的手法で浸水深予測値を算出し、SIMと経験的手法の比較を行った。図22には串本町と阿南市の2つの手法による浸水深の比較例を示す。また表10には検証対象市町村の2つの手法の差の標準偏差を示した。

この結果、太平洋に面している串本町・黒潮町・尾鷲市ではSIMと経験的手法による値は対数標準偏差で0.4以下となるとともに、2つの手法の浸水深の差のヒストグラムをとると正規分布に近い形となり、経験的手法の予測値はSIMのある幅を持った中で予測できる結果となった。一方、静岡市・阿南市・西尾市の経験的手法の結果はSIMとの差が大きい。これらの地域は駿河湾・紀淡海峡・三河湾に面しており、波源域から海岸に到達する

までに大きく回折しており、経験的手法がSIMのように津波の複雑な挙動を反映した評価ではないことが乖離の一因と考えられる。



※ Sd1は対数標準偏差、Sd2は標準偏差、Nは地点数、Meanは平均値、IQRは四分位偏差

図22 経験的手法とSIMの浸水深の比較

表10 経験的手法とSIMの標準偏差

	ケース1			ケース4		
	Sd1	Sd2[m]	N	Sd1	Sd2[m]	N
静岡市	0.43	1.3	7518	0.46	0.7	2407
西尾市	0.62	1.2	6797	0.55	0.9	4344
尾鷲市	0.31	1.7	2455	0.37	1.2	1582
串本町	0.38	1.4	3280	0.40	1.4	3064
阿南市	0.51	1.3	9444	0.46	1.6	12260
黒潮町	0.37	2.1	3576	0.27	2.5	5000

Sd1: 対数標準偏差 Sd2: 標準偏差 N: 地点数

7. まとめと今後の課題

本研究では、比較的容易に入手できる最小限の情報から簡便に広域的な浸水域・浸水深の概況を容易に予測できる経験的手法を開発した。開発した経験的手法は過去の被害地震の浸水域や浸水深を概ね再現していることを示した。内閣府(2012)¹⁸⁾のシミュレーション結果と比較しても全体的な浸水状況は経験的手法で把握可能なことを示した。

開発した経験的手法は、国・保険会社・大企業等の全国にポートフォリオを保有する主体がリスクマネジメント（リスクファイナンス）を行うための、確率論的リスク評価のための、浸水東北地方太平洋沖地震の被災地全体の浸水実績に基づいたポートフォリオ全体の浸水ハザード評価や、評価地点の浸水ポテンシャルを簡便に評価する際に有用と考えられる。

一方、検証の結果、以下のような課題も明らかになった。

- ① 静岡県袋井市にあるように海岸線付近に微高地があり、その背後に低地が広がるような地域では、

海岸線から逐次計算を行っているシミュレーションでは浸水しない地域でも経験的手法では浸水する結果となる。

- ② 伊勢湾・三河湾などの内湾や海峡などに面した地域では、浸水域や浸水深の予想値がシミュレーション結果と大きく異なる。

これらの点については、今後改善していきたい。

謝辞

本研究にあたり、東北地方太平洋沖地震津波合同調査グループの痕跡調査結果を利用させていただいた。また、2名の査読者より有益な助言を頂いた。記して謝意を表します。

補注

- (1) 海岸線津波高の作成に用いた浸水高データ

本稿で東北地方太平洋沖地震の海岸線津波高を連続的に再現するために用いた海岸線近傍の津波浸水高のデータは海岸線から50m以内にある浸水高のデータである。海岸線からどの程度の距離の浸水高が海岸線津波高を表すかについては様々な意見があると思われるが、海岸線からの距離をあまり小さくとると浸水高計測地点数が限定され、対象地域全体の津波高を精度よく表現することはできない。逆に海岸線から大きく離れた地域にある浸水高を対象とすると、実態と合わないものとなると考えられる。そこで、海岸線からの距離を30m以内、50m以内、100m以内それぞれの浸水高データを用いて算出された連続的な海岸線津波高の分布を確認した。その結果、対象とした浸水高計測地点分布が極端に疎な地域が少なく、海岸線津波高も実態に整合していると思われた50m以内の浸水高のデータを使った海岸線津波高を採用することとした。

参考文献

- 1) 中央防災会議 日本海溝・千島海溝周辺海溝型地震に関する専門調査会,
http://www.bousai.go.jp/kaijirep/chuobou/senmon/nihonkaiko_chisimajishin/index.html.
- 2) 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.
- 3) 損害保険料率算出機構：津波浸水予測シミュレーションに関する研究，地震保険研究16，2008.
- 4) 加藤史訓・福濱方哉・藤井裕之・高木利光・児玉敏雄：堤防高を考慮した実効な津波被害想定手法，海岸工学論文集，vol.54，pp.261-265，2007.
- 5) 国土技術政策総合研究所・土木研究所：平成23年（2011年）東北地方太平洋沖地震土木施設災害調査速報，国総研資料第646号，2011.
- 6) 東北地方太平洋沖地震津波合同調査グループ (<http://www.coastal.jp/tjt/>) による速報値（2012年12月29日）.
- 7) 基盤地図情報サイト：<http://www.gsi.go.jp/kiban/index.html>.
- 8) 渡辺偉夫：津波被害総覧[第2版]，東京大学出版会，1998.
- 9) チリ津波合同調査班：1960年5月24日チリ地震津波に関する論文及び報告，1961.
- 10) 東北大学災害科学国際研究所津波工学研究分野・原子力安全基盤機構：津波痕跡データベース，<http://tsunami-db.irides.tohoku.ac.jp/>.
- 11) 国土地理院：津波による浸水範囲の面積（概略値）について（第5報），2011.
- 12) 国土地理院：2万5千分1浸水範囲概況図，
<http://www.gsi.go.jp/kikaku/kikaku40014.html>.
- 13) 相田勇：三陸沖の古い津波のシミュレーション，東京大学地震研究所彙報，Vol.52，pp.71-101，1977.
- 14) 土木学会原子力土木委員会津波評価部会：原子力発電所の津波評価技術，2002.
- 15) 国土地理院：地図・空中写真閲覧サービス，
<http://mapps.gsi.go.jp/maplibSearch.do>.
- 16) 羽鳥徳太郎・相田勇・岩崎伸一・日比谷紀之：尾鷲市街に遡上した津波の調査—1944年東南海・1960年チリ及び1854年安政津波，東京大学地震研究所彙報，Vol.56，pp.245-263，1981.
- 17) 水路部：昭和21年南海大地震報告 津浪編，水路要報増刊号，1948.
- 18) 内閣府：南海トラフの巨大地震モデル検討会（第二次報告），<http://www.bousai.go.jp/jishin/nankai/model/index.html>，2012.

(原稿受付 2015.9.19)

(登載決定 2016.1.23)