

# 人的・物的被害軽減に向けた実用的な津波ハザード・被害予測評価手法の提案

---

今井 健太郎\*・今村 文彦\*・岩間 俊二\*\*・サッパシー アナワット\*

---

Tsunami hazard and damage evaluation by using practical method for human casualty and structural damage mitigation

Kentaro IMAI\*, Fumihiko IMAMURA\*, Shunji IWAMA\*\*,  
and Anawat SUPPASRI\*

## Abstract

We aim to estimate run up and high-accuracy inundation process of tsunami in coastal urban areas. Using a previous method of tsunami condition model, and taking into account characteristics of detailed topography, land use in a realistic present, we examined the run up and tsunami inundation process. Using these results we estimated the damage due to tsunami and obtained information for the mitigation of human casualties. Considering the time series from the earthquake occurrence and the tsunami risk, we provide contents of disaster risk information displayed in a tsunami hazard and risk map in order to reduce number of casualties. From the analytical and previous tsunami model (a long wave approximated model) and the high resolution topography (5 m) including detailed data of shoreline, rivers, building and houses, we present an advanced analysis of tsunami inundation considering the land use. Based on the results of tsunami inundation and its analysis; it is possible to draw a tsunami hazard and risk map with information of possible human casualty, building damage estimation, drift of vehicles, etc. Compiling all this information on a tsunami hazard and risk map with the tsunami inundation computations, allow us to create and propose for casualty mitigation strategies.

キーワード：津波災害，ハザード，被害評価，被害軽減

Key words : tsunami disaster, hazard, damage evaluation, damage mitigation

---

\* 東北大学災害科学国際研究所  
International Research Institute of Disaster Science, Tohoku  
University

\*\* 株式会社 防災技術コンサルタント  
Bousai Consultant CO., Ltd.

## 1. はじめに

現在、行政や各自治体が作成し公開している津波のハザードマップは、主に津波浸水深の分布や浸水域や津波到達時刻を示すにとどまっているのが現状である（例えば、高知県など<sup>1)</sup>）。津波のハザードに関する情報は、受け取る側（地域住民、漁業関係者や行政担当者など）の立場によって、その利活用の方法は異なる。また、浸水情報から潜在的な津波被害の可能性をあらかじめ提示しておけば、発災からの行動に大きく寄与できる可能性がある。

市街地における津波氾濫解析手法は、浅水方程式を基礎とした構造格子もしくは非構造格子による解析が多く用いられている（例えば、安田ら<sup>2)</sup>）。非構造格子を用いる場合、土地利用に応じて空間格子サイズを選択出来るため自由度は高いが、格子生成についてはやや実用性に欠ける。現在、津波氾濫解析に用いられる陸上地形の分解能は5 mから10 mの空間格子が一般的であり、この程度の地形分解能データを用いた津波氾濫解析が実際の復興まちづくりの一助として利用されている。さらに、高分解能な地形データと、市街地の構造物を起伏地形と相当粗度係数として取り扱う合成地形モデルによる津波氾濫解析<sup>3)</sup>により、その氾濫過程や流況を詳細に把握することが可能である。

本研究の目的は、2011年東北地方太平洋沖地震による激甚津波被害を受けた自治体である宮城県石巻市におけるヒヤリング調査結果に基づいて、地震発生から発災時に必要であった津波ハザード・リスク情報を集約する。さらに、津波による人的被害、物的被害などの各種被害発生条件を整理し、実用的かつ表現力に富んだ合成地形モデルによる津波氾濫解析を高知県高知市に適用・実装する。これらによって得られる津波ハザード・被害予測マップからどのような対応策が得られるかについて検討を行う。

## 2. 発災時に必要だった津波ハザード・被害予測情報

### 2.1 宮城県石巻市の過去の津波履歴と震災前までの防災対策状況

2011年東北地方太平洋沖地震津波により、東北地方太平洋沿岸では激甚被害が発生した。特に、宮城県石巻市では石巻平野に位置する中心市街地やリアス式海岸である牡鹿半島沿岸で激甚津波被害が発生し、行方不明者を含め3959名（2014年6月12日現在）の尊い人命が失われた。

過去に石巻平野に甚大な被害を記した歴史記録はないものの、1611年慶長地震津波によるものと考えられている津波堆積物が発見されている<sup>4)</sup>。また、1793年寛政宮城沖運動型地震<sup>5)</sup>、1835年天保宮城沖地震、1856年安政八戸沖地震では雄勝などの牡鹿半島沿岸部の浜に家屋流出などの被害が発生しているが、石巻平野部には津波被害は生じなかったようである。明治期以降では、1896年明治三陸地震、1933年昭和三陸地震や1960年チリ津波が東北地方沿岸部に来襲し、牡鹿半島を含む三陸沿岸は甚大な津波被害となったが、石巻市中心市街地の津波被害は少なく、最近の津波被害はおおよそ400年前であったことがわかる。有史以降とすると、869年貞観地震と1611年慶長地震による津波、ただ二つだけ、石巻平野に津波が溢れたことになる。ただし、石巻市がこのような状況下で、まったく津波防災について検討していなかった訳ではない。宮城県が実施した「第三次地震被害想定調査」の結果等に基づいて、宮城県沖地震（運動型）に伴い津波が発生した場合の市内の予想浸水区域を作成し、各地域の避難場所を示していた<sup>6)</sup>。ただし、その浸水域は想定された地震規模がM8クラスだったために、沿岸部や旧北上川の堤防の低い箇所限定されており、今次津波の規模を考えるとひとまわり小さい被害想定であった。こういった経緯の中で、M9クラスの地震規模を持つ2011年東北地方太平洋沖地震による津波が石巻市中心市街地に来襲し、甚大な被害が生じた。

## 2.2 ヒヤリングとワークショップから抽出された防災情報

このような激甚被害情報を受け、石巻市総務部危機対策課と著者らの一人は石巻市、消防、警察と自主防組織に対してヒヤリング及びワークショップを実施した。この方法として、グループ形式を用いて、設問をもうけずに発災から1週間までの個人や組織が体験した事象について語ってもらい、その後のワークショップで、それらの事象を時系列的に並べた。

ワークショップで得られた情報のうち、防災情報の改善点に関する事項について記述された情報のみを集約すると、表1のようになる。津波災害に直接関わる情報のみを抽出したため、2011年3月11日から津波注意報が解除された2011年3月13日までのものとしている。

被災地では情報インフラ被害にともなって情報の空白化が発生する。発災から数日間はほとんど外部との情報伝達が断絶し、個人の周辺状況から得られる情報のみであった。このため、被害状況の把握も困難となり、緊急に対応するべき事項についても不明のまま災害対応を行うことになった。加えて、リアルタイムの災害情報の取得も同様に困難となっていた。本地震による津波は被害想定自体を行うことが困難な未曾有の激甚被害を

もたらした。今後の被害想定を行う際には、政府の津波想定指針<sup>7)</sup>にもあるように、各レベルに応じた被害の量的な推定や空間的な広がりについて想定を行っておくことで、情報空白期における災害現況把握を補完することが有用であると考えられる。このような推定や想定を行っておくことにより、事前に想定した災害情報の周知が災害対応の道筋となり得ることがわかる。

また、事前の想定に基づく検討は、次のような具体的な検討も必要であろう。

- ・事前に想定した津波浸水予測と津波暴露人口を照らし合わせ、一時避難施設の充実に加えて、対象とする災害に対して安全が担保されている2次的な避難所の確保を事前に用意しておく。
- ・被災地内外の応急対応連携として、被災地外の自治体が的確な緊急対応を行えるために、相互の想定災害情報を共有・周知しておく。
- ・情報伝達手段やライフラインについても、可能な限り多重化することにより断絶回避を図っていくことが重要といえる。

## 2.3 津波ハザード・被害予測マップの要件

日本列島近海のプレート境界で発生する地震津波は、発生から来襲までの時間的猶予は少ない。

表1 防災情報の改善点に関するヒヤリング調査結果

2011年3月11日	2011年3月12日	2011年3月13日
津波被害に対する意識啓発	災害緊急対応などの情報タイムラグの解消	市外地避難決定のタイミング
津波到達時間の把握	発災直後から行動できる体制	2次的な避難所の設置と備蓄物の確保
避難所・避難路の確認	現況情報の共有化	安否確認手法の整理(避難所名簿)
停電時の情報伝達手段の確保	指定避難所の学校職員の立場の明確化	
被災状況のリアルタイム情報発信	災害対応の調整部署の一元化	
津波を想定した避難所指定の検討	施設立地条件の安全性検討	
季節に応じた避難訓練の実施		
児童の保護者への引き渡し基準(児童を渡さずに一緒に逃げる)		
地域住民とのつながり		

現在では、リアルタイムでの波源推定<sup>8)</sup>や想定浸水域のリアルタイム予測<sup>9)</sup>が可能になりつつある。しかし、得られたハザード情報を周知するまでには上記で述べた情報空白化に対するの整備が必要であり、現地実装にはまだ課題は多い。一方、事前に周知が可能な津波ハザード・被害予測マップの内容充実を図り、防災意識の啓発と日々の訓練を実施することにより、発災直後からの迅速な対応が可能となると考えられる。

これらの要件について、ハザードマップの利用者に対して記載情報を適宜変える必要がある。避難行動を主として考えれば、津波来襲過程を含んだハザード情報が必要となる。想定される津波に対して発災時の自分の居場所とハザードマップを照らし合わせ、どこに逃げれば良いか判断できるものであればよい。発災とほぼ同時に応急対応活動に入る自治体、消防、警察や自衛隊などの組織にとっては、津波の来襲過程に加えて、自動車漂流やインフラ被害などに関する被害予測情報が必要と考えられる。以下に、津波ハザード・被害予測マップにおける記載情報の基礎内容を列挙する。

(1) 基礎的な掲載事項（避難基本事項）

想定外力情報、予想津波到達時間、予想浸水区域、要避難区域、避難場所・経路、津波避難施設の立地を表示する。

(2) 必要に応じて付加が必要な最小限の記載事項

予想浸水開始時間、浸水実績、防護施設状況、公共施設の有無、要避難地下空間に関する情報を付与する。

(3) 上記に加えて災害対応に必要な掲載事項

各種津波被害が予測される情報について、適宜表示を行う。

(1)と(2)については、地域住民に向けた情報であり、避難行動の一助を担うための情報を多く含む。(3)については、応急対応活動を実施する自治体や警察、消防関係者向けの情報となる。いずれにせよ、利用者が有効に活用できるように、最小限の情報量で簡素にまとめ、誰もが理解できる表示方法で記載することが必要と考えられる。

加えて、実務者の意見を積極的に取り入れることで、より実行的なハザード・被害予測マップになり得ると考えられるが、この点については今後の課題とする。

### 3. 津波による被害発生基準に関する検討

#### 3.1 人的被害発生基準

津波による被害発生基準として、人的被害については決定論的手法<sup>10),11)</sup>、確立論的な評価手法<sup>12)</sup>が提案されている。ここでは、津波外力以外の不確実性を考慮した確率論的な評価を行う。

石巻市における人的被害については、犠牲者の居住地とその周辺の平均的な津波浸水深との関係から構築した。その被害関数は式(1)、(2)となる<sup>13)</sup>。

$$P_{CRU} = 0.0172H^{1.19}, \quad P_{CRL} = 0.0011H^{1.83} \quad (1)$$

$$P_{CRU} = 0.0065H^{1.19}, \quad P_{CRL} = 0.0012H^{1.19} \quad (2)$$

ここで、 $H$ は津波浸水深であり、式(1)は石巻市中心市街地（平野部）、式(2)は牡鹿半島沿岸地域（リアス式沿岸部）を示し、下添字のCRUは上限曲線、CRLは下限曲線を示す。図1に石巻市における津波浸水深と人的被害発生率の関係を示す。図中、○は石巻市平野部（中心市街地）、●は同市リアス式沿岸部の値を示す。図から、平野部とリアス式沿岸部の比較から、同じ浸水深であっても、その人的被害率は異なる。これは地形的要因も含まれるが、これまでの津波の履歴や防災教育の実施などが影響している可能性もある。式(1)、(2)においての上限・下限曲線の違いとしては、性別や年齢、地形的把握の有無や災害意識の違いなどが考えられるが、これらの詳細な解釈に

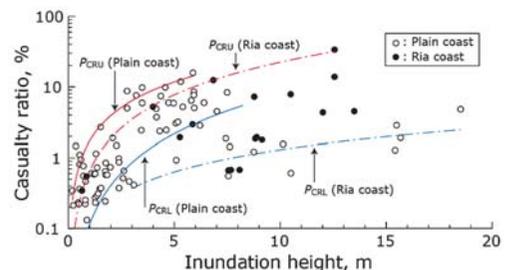


図1 石巻市における津波浸水深と人的被害発生率の関係

については、今後の課題とする。また、式 (1)、(2) は評価対象地区における津波被害の履歴なども影響していると考えられる。あくまで目安として使用することが望ましく、地形条件や市街の歴史的背景を十分に考慮した上での被害関数の適用が必要であるため、より汎用性の高い人的被害に関する被害関数評価については今後の課題である。

### 3.2 構造物被害発生基準

構造物被害についても同様に、決定論的<sup>14), 15)</sup>・確率論的な評価手法<sup>12)</sup>が提案されている。2011年東北地方太平洋沖地震津波の被害状況を見ると、津波流体力のみではなく津波漂流物の衝突による被害も多く存在したため、このような不確定性の影響を考慮した評価手法が望ましいと考えられる。ここでは、家屋構造物に関して確率論的手法で評価を行う。石巻市中心市街地における木造家屋構造物の流出および、全壊被害に関する被害関数は式 (3) で表現される<sup>13)</sup>。

$$P_D = \Phi\left[\frac{D-\mu}{\sigma}\right] = \int_{-\infty}^D \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \exp\left\{-\frac{(t-\mu)^2}{2\sigma^2}\right\} dt \quad (3)$$

ここで、 $D$  は津波浸水深であり、式 (3) 中のパラメータのうち、木造家屋構造物の流出被害のみの場合では  $\mu=4.98$ 、 $\sigma=1.62$  となり、木造家屋構造物の流出を含めた全壊被害の場合では  $\mu=2.34$ 、 $\sigma=0.69$  となる。図2に石巻市中心市街地における津波浸水深と家屋構造物の全壊・流出率の関係を示す。図から、浸水深が2m程度の場合、家屋の全壊率は30%程度、流出率は3%程度となることがわかる。なお、2004年スマトラ地震津波におけるバンダアチェの被害関数<sup>12)</sup>と比べると、その家屋流出率は1/6程度である。

### 3.3 漂流物被害発生基準

漂流物被害としては、まず漂流物となり得るものとして自動車、コンテナ、養殖筏、小型船舶に関して検討する。自動車の走行困難・漂流の指標は、おおそ浸水深で規定される<sup>16)</sup>。コンテナについては、積載重量も関わってくるため、浸水深と流速のみで評価することは難しい<sup>17)</sup>。養殖筏や

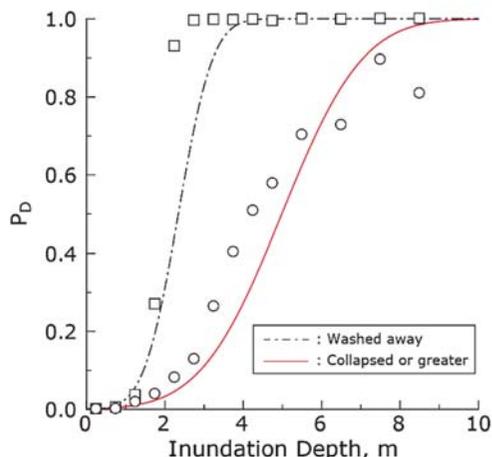


図2 石巻市中心市街地における津波浸水深と家屋構造物の全壊・流出率の関係

小型船舶については、係留の有無で変化はするが、おもに流速で規定されている<sup>18), 19)</sup>。

### 3.4 インフラ被害発生基準

インフラ被害に関する被害発生基準としては、島田・他<sup>20)</sup>によって、土堤や高盛り土道路に関する被害発生に関する実験が行われており、その規準は土堤や高盛り土道路の越流水深や越流流速で規定されている。土堤における越流水深やその流速を評価する場合、高分解能な地形モデルが必要となることや、洗掘の影響を考慮に入れないと詳細な評価は行えないため、3次元の固液混層モデルが必要となる<sup>21)</sup>。本研究で用いた数値モデルでは、流れの3次元性は考慮していないため、本稿では評価対象外とした。

### 3.5 津波による各種被害発生基準のまとめ

津波被害の各種発生基準をまとめたものが表2となる。この表中の各種被害発生基準と津波氾濫解析を組み合わせることによって、津波ハザードに関する情報に加えて、潜在的な津波被害を評価した簡易的な情報提示が可能となる。

表2 津波被害の各種発生基準

被害対象		指標となる水理諸量	被害種類		評価に必要な水理量
人的被害 <sup>10), 11), 12), 13)</sup>		流体力	歩行困難・漂流の危険		最大流体力時の浸水深と流速・被害関数の利用。
			浸水深身長比とフルード数に依存、フラジリティ関数		
家屋被害 <sup>12), 13), 14), 15)</sup>	木造	流体力	中破	大破	最大流体力時の浸水深と流速・被害関数の利用。
			15.6 - 27.4 kN/m	27.4 - 49.0 kN/m	
	コンクリート・ブロック造	流体力	中破	大破	
			60.7 - 111 kN/m	332 - 603 kN/m	
鉄筋コンクリート造	流体力	N/A	大破		
			N/A	332 - 603 kN/m 以上	
構造種別無し		主に浸水深	家屋流出・全壊発生率		被害関数の利用。
自動車 <sup>16)</sup>		浸水深	走行困難	漂流	浸水深 $D$ が0.2~0.5 mまでは走行不可。 $D$ が0.5 m以上で漂流の危険性有り。
			$0.2 < D < 0.5$ m	$D > 0.5$ m	
コンテナ <sup>17)</sup>		浸水深と流速	漂流開始	漂流	浸水深, 流速。
			浸水深, コンテナ重量に依存	浸水深, 流速とコンテナ重量に依存	
養殖筏 <sup>18)</sup>	係留有り	喫水, 流速	漂流開始		海域での最大流速, 1 m/s以上を漂流の指標とする。
			流速1 m/s以上		
	係留無し	喫水, 流速	漂流開始		
			流速1 m/s以上		
小型船舶 <sup>19)</sup>	係留有り	喫水, 津波高が2m以上の時の流速	漂流開始		海域での津波高2 m以上での最大流速。航行中の船舶については、相対流速と進路と主流方向の角度に依存する。
			津波高2 mかつ、流速2 m/s		
	係留無し	喫水	漂流開始		
			喫水		
航行中	喫水	保針・推進不可			
		保針可能限界図・エンジン出力に依存			
土壌被害 <sup>20)</sup>		流速と越流水深	堤防天端浸食による堤防決壊	堤防基部の浸食による決壊	最大流速が堤防天端で2 m/s以上, 堤防基部で3 m/s以上。
			越流流速2 m/s以上	堤防基部流速3 m/s以上	
インフラ (道路) 被害 <sup>21)</sup>		越流水深	部分破壊	大部分破壊	盛り土高と最大越流水深。
			全壊または流出 藤井・他 <sup>21)</sup> の図-12参照		

## 4. 津波数値解析結果と各種被害発生基準によるハザード・被害予測マップ

### 4.1 津波数値解析

本稿における評価対象地域は、高知県高知市とその沿岸とした。図3に津波伝播解析の対象領域を示す。対象領域はグリッドで囲まれた領域とした。支配方程式は非線形長波方程式<sup>22)</sup>を用い、合成地形モデルを適用する氾濫解析領域としては、高知市を対象とし、空間格子間隔を1350 m, 450 m, 150 m, 50 m, 50/3 m, 50/9 mと段階的に高解像度な地形モデルとなるように変化させ、各領域のCFL条件を満たすように時間間隔を決定し

た。また、50/9 mの領域では、防潮堤、河川堤防や門扉などを考慮し<sup>23)</sup>、構造物を起伏地形と相当粗度で表現する合成地形モデルを用いた。図4に1707年宝永地震モデルの波源域を示す。滑り量については、Furumura et al.<sup>24)</sup>の地震モデルを参考にして、南海トラフにおける沈み込み帯に沿わせるように、 $2 \times 2 \text{ km}^2$ の小断層で表現している。詳細については文献<sup>25)</sup>を参照されたい。

本解析では、合成地形モデルによる津波氾濫解析を実施した。詳細は文献<sup>3)</sup>を参照されたいが、合成地形モデルの概念を説明する。本モデルでは、構造物領域中における空間格子サイズより大きい

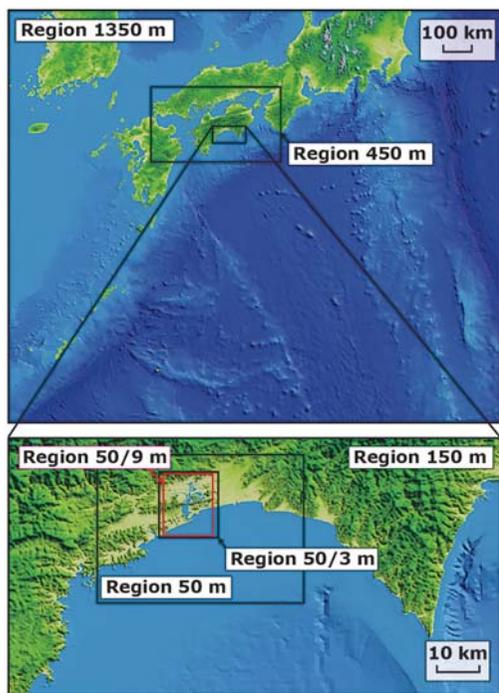


図3 津波伝播解析の対象領域

構造物については、その地盤標高に加えて構造物高さを地形として反映させ、水位が構造物高さを超えない場合は完全反射とする。なお、構造物の流出・破壊は考慮していない。図5に合成地形モデルの概念図を示す。道路部と構造物一部を含む空間格子(メッシュ)は底面摩擦として与える。数値実験の結果に基づき、小谷ら<sup>26)</sup>の相当粗度により考慮した。図6に高知市における最大浸水深分布を示す。合成地形モデルによる最大浸水深は、構造物からの反射などにより、局所的に水位の高まっていることや、氾濫は道路沿いに集中していることがわかる。

#### 4.2 津波氾濫による人的・物的被害予測を考慮したハザードマップの提案

合成地形モデルによる津波氾濫解析結果と津波被害の発生基準を組み合わせた人的・物的被害予測を考慮した津波ハザードマップの作成を行った。表2における各種津波被害発生基準を活用し、津波浸水リスクに加えて、人的被害、家屋被害、

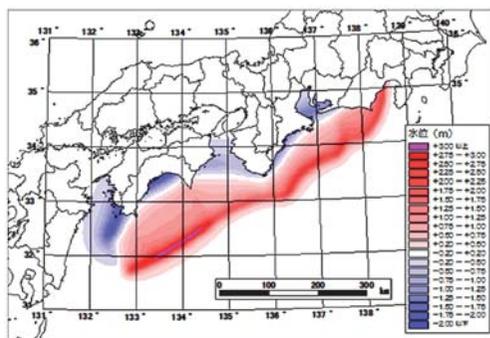
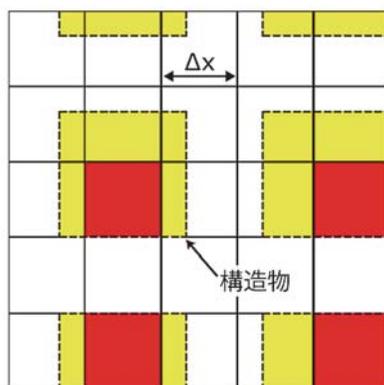


図4 1707年宝永地震モデルによる波源



- : 道路領域
- : 地形として取り扱う構造物領域
- : 粗度として取り扱う構造物領域

図5 合成地形モデルの概念図

自動車被害、養殖筏と小型船舶をハザード評価対象とした。

土堤・道路被害については、本稿で実施した計算格子分解能よりさらに詳細なものが必要なことや、3次元性を考慮したより高度な固液モデルが必要になるため、評価の対象外とした。コンテナの漂流についても、その積載重量などのより詳細な情報が必要となるため、評価の対象外とした。

高知県により、南海トラフ巨大地震による被害想定を公表されている<sup>27)</sup>。この評価結果は、本研究で取り扱う波源や津波数値解析における市街地の取り扱いが異なるため、本稿においてはこれらとの比較は行わず、本研究で提案したハザード・被害予測マップから得られる情報とそれに基づいた対応策について検討を行った。

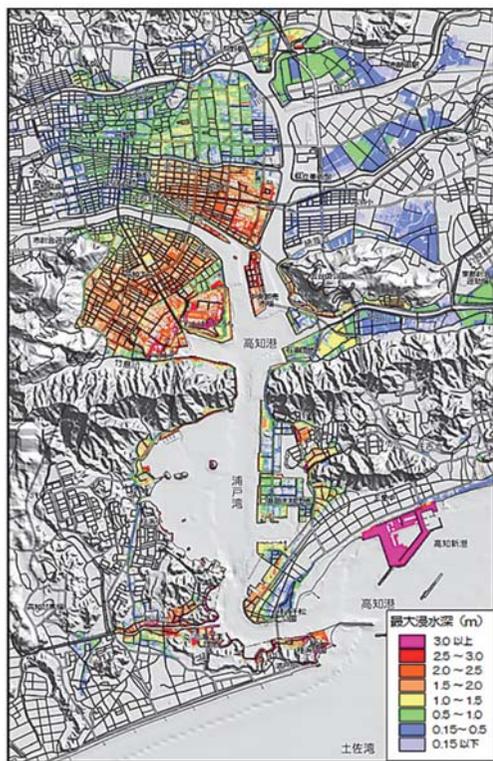


図6 高知県沿岸の津波高分布と高知市における津波最大浸水深分布

各被害評価については、地震発生から被害が拡大していく過程を示すために、30分後、60分後、120分後、240分後、360分後の被害分布についても図示した。

#### (1) 津波ハザード評価の一例

本解析を用いた津波ハザード評価の一例を図7に示す<sup>3)</sup>。実用的かつ高解像度な合成地形モデルを用いることにより、地震発生からの時間と人的被害が発生し得る津波浸水深0.2mの到達範囲を詳細に可視化することが可能となる。浦戸湾外の沿岸部では地震発生から40分で津波が到達するため、津波避難施設、あるいは高台避難施設の整備が人的被害軽減に寄与すると考えられる。一方、高知市中心市街地では1~2時間程度の猶予が残されていることがわかる。この地域では、強震動の後に津波が来襲すると予測されているため、震害から身を守り、確実な津波避難経路の整備と避難の実施を行う事により、人的被害軽減に結びつ

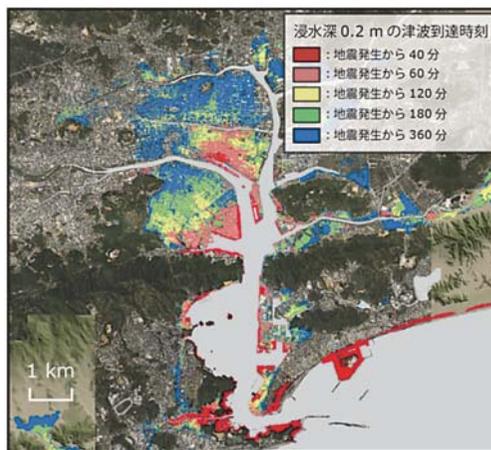


図7 津波ハザード評価の一例(津波到達時刻の時間推移)

くと考えられる。

#### (2) 人的被害評価

人的被害評価については、高知市市街地の平野部に適用するために地形条件の類推と津波災害の履歴などを考慮して、式(1)の下限曲線を採用した。ただし、観光客の流入により季節によって津波暴露人口が変動する地域(例えば、浦戸湾口沿岸の桂浜周辺)もあるため、どの曲線を採用するかについては議論の余地がある。

図8に人的被害確率分布を示す。浦戸湾口付近の高知新港や桂浜では、地震発生から30~60分後で人的被害率が1%以上となっていることや、高知市中心市街地においては、地震発生から120分後で河川沿いに人的被害率が大きくなっていることがわかる。また、240~360分後には、人的被害確率0.5%未満のエリアが広範囲に拡大していることがわかる。これらから、沿岸部では津波到達は30分以内であるため、迅速な避難行動が求められる一方で、中心市街地では、60分程度の避難行動に関する時間的猶予が残されていることがわかる。

発生時間帯に関して、高知市全体の昼間夜間人口比は1.043である<sup>28)</sup>。この比を乗ずることにより、非常に粗い評価になるが地震発生時間帯に応じた人的被害率の増減についても算出が可能である。しかし、浸水域には商業地区、オフィス地区

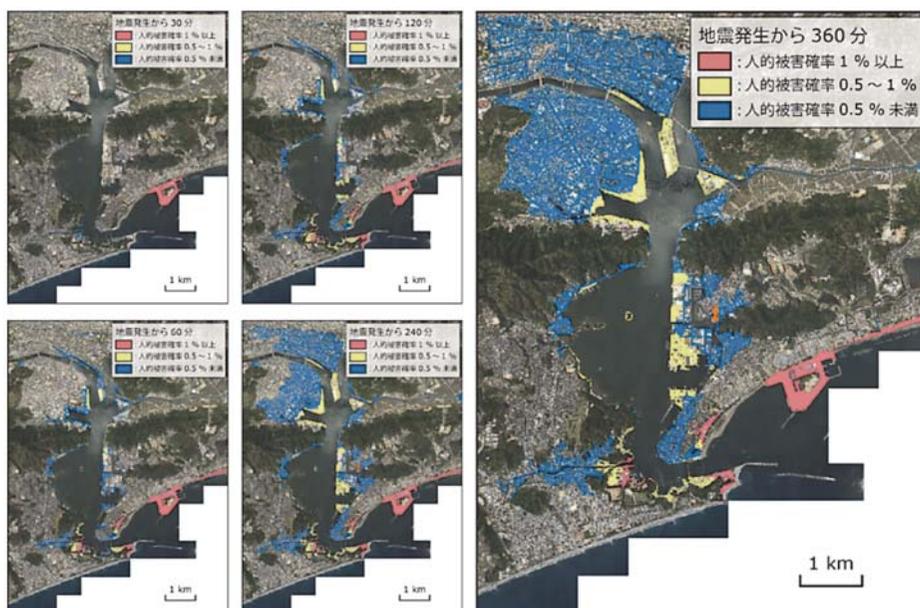


図8 津波による人的被害確率分布の時間推移

や歓楽街地区なども含まれているため、詳細な検討にはパーソントリップ調査結果などを用いて、町目に分類して評価する必要がある。

季節の影響について、特に高知市沿岸域の観光名所である桂浜においては、年間18万人程度の観光客数であり、5月と8月に観光客数は年平均数の1.5～2.0倍となる(平成17年1～12月の数値)<sup>29)</sup>。また、高知市中心市街の観光客数上半期で206,648名(平成22年4～9月)<sup>30)</sup>であるため、観光シーズン期となると津波暴露人口とその人的被害確率も変化すると考えられる。特に、観光資源で成り立っている沿岸市町村の人的被害に関する津波被害予測評価を行う場合には、注意が必要である。

このような人的被害に関する津波被害予測マップを作成することにより、津波避難ビルを要する地域の選定や、観光客を対象とした避難行動を速やかに行えるような避難誘導指示の工夫を要する地域の特定が容易となる。

### (3) 家屋構造物の被害評価

家屋構造物の被害評価について、高知県高知市の家屋構造物被害予測を行う上では、地形条件や河湊として発達してきたという街の歴史的背景が

近い宮城県石巻市中心市街地の被害関数を用いることができると考えられる。そこで、石巻市平野部における家屋構造物の被害関数を利用し、安全側の評価となるように式(3)の全壊被害のパラメータを用いた。図9に家屋構造物被害発生率分布を示す。図から、地震発生から240分後に中心市街地において家屋構造物の被害発生率が増加していることがわかる。また、街路沿いにその被害率は高まっていることもわかる。

家屋構造物の津波被害に関する予測評価により、どの地域に被害が生じるかを把握することができるようになるほかに、各家屋の諸情報を組み合わせることで津波による瓦礫算出量についても概算することが可能となる。瓦礫概算量を把握しておくことにより、事前に瓦礫保管用地の確保目安となるため、地震・津波被害発生から復旧活動へ円滑に進むことが可能となると期待される。

### (4) 自動車・船舶の漂流に関する評価

自動車の漂流や船舶の漂流に関する評価手法は表2に従い設定した。図10に自動車漂流被害発生分布を示す。地震発生から60分後までは、中心市街地の一部は自動車の移動は可能である。ただし、震害により大規模な停電となる可能性が大き

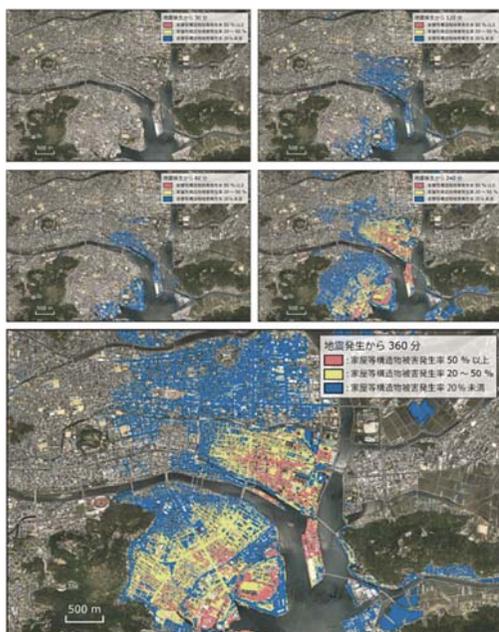


図9 津波による家屋構造物被害の時間推移

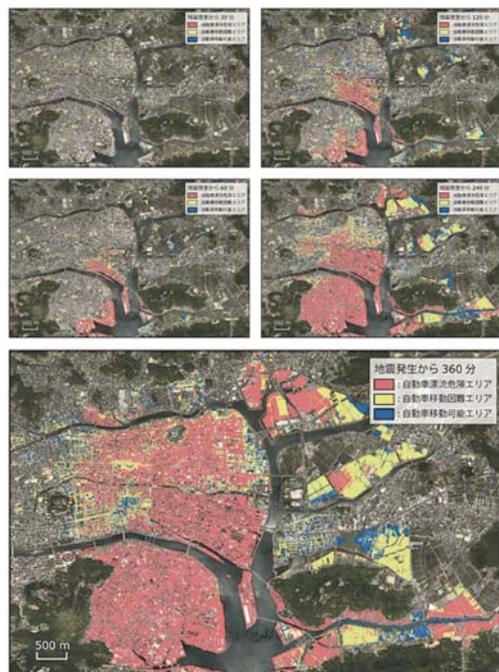


図10 津波による自動車漂流リスクの時間推移

く、信号機の機能しない都市道路では、渋滞の発生による避難行動の遅れや交通事故の危険性が大きく高まるため、自動車による避難は浸水域外でも他のリスクへの注意が必要といえる。地震発生から240分後には市街地のほとんどが漂流危険エリアとなっていることがわかる。

図11に小型船舶等漂流被害発生分布を示す。図から、地震発生から30分で浦戸湾内や湾口の狭窄部で漂流危険エリア（水域）が発生している。これは地殻変動にともなった引波の影響である。浦戸湾内の沿岸部では、地震発生から360分を経過しても、待機可能エリアが存在する。一方、沿岸域では、地震発生から60分で待機・漂流危険エリアが拡大していることがわかる。浦戸湾のような湾口が狭窄している形状の湾においては、湾内の待機可能エリアに速やかに小型船舶を移動させることで、漂流被害を低減させ得ることがわかる。

## 5. おわりに

激甚被災自治体からの“生の声”を今後の津波防災に活かすべく、石巻市総務部危機対策課と著者らの一人が実施した東日本大震災の災害検証に関するヒヤリング調査結果を用いて、これまでの防災情報の内容・表示法に関する問題点や改善すべき項目について抽出を行い、災害想定的重要性を示した。

各種津波被害の発生基準をまとめ、実用的な津波氾濫解析に簡便に実装できる方法を提案した。さらに、高知市を対象として、合成地形モデルによる津波氾濫解析を実施し、各種被害発生基準を考慮した津波ハザード・被害予測マップの作成を行った。人的被害、家屋構造物被害、自動車・船舶漂流のハザード・被害予測について可視化を行い、地震発生から6時間までの高知市における津波ハザード・被害予測の時間推移について評価を行った。

本稿で実施した津波ハザード・被害予測マップにより、想定される津波ハザード情報に加え、潜在的な被害情報を得ることができる。これらの情報、防災啓発、災害に備える各種訓練などにより、津波災害からの人的被害軽減に寄与することが期

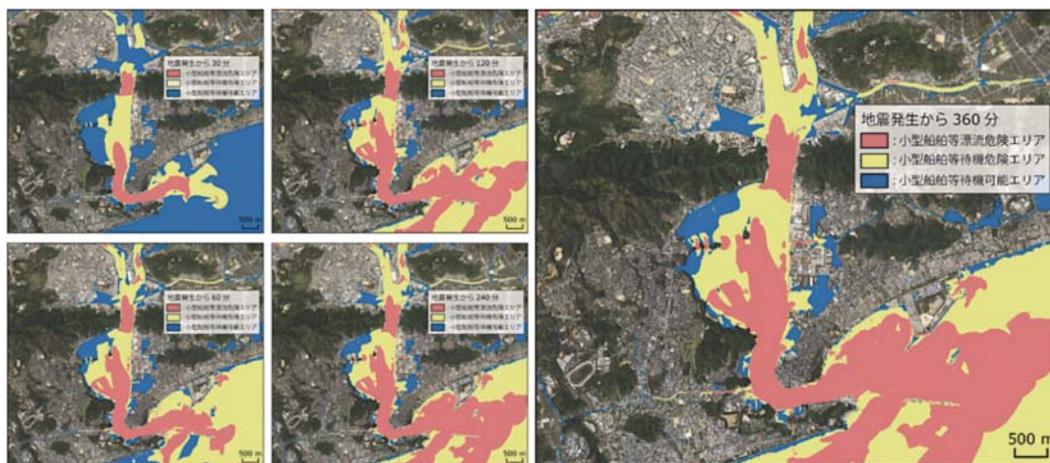


図 11 津波による小型船舶等漂流被害リスクの時間推移

待される。

### 謝辞

石巻市における家屋被害・人的被害データの一部は国土交通省（東日本大震災による被災現況調査（平成 23 年度））から提供頂きました。災害検証に関するデータは石巻市役所（平成 23 年度 東日本大震災災害検証及び石巻市災害マニュアル作成業務）から提供頂きました。ヒヤリングデータの取得・分析には東北大学災害科学国際研究所 助教 佐藤翔輔氏、(株)サーベイリサーチセンター 復興・防災調査部部长 岩崎雅宏氏に多大なるご助力を頂きました。本研究は、平成 20-24 年度文部科学省「東海・東南海・南海地震の連動性評価研究プロジェクト-②連動性を考慮した強震動・津波予測及び地震・津波被害予測研究」（研究代表者：東京大学教授 古村孝志）の一環として行われました。ここに記して、感謝の意を表します。

### 参考文献

- 1) 高知県, 南海トラフの巨大地震による震度分布・津波浸水予測について: <http://www.pref.kochi.lg.jp/soshiki/010201/nannkai-3.html>, 2014 年 4 月 18 日
- 2) 安田浩保, 白土正美, 後藤智明, 山田正: 高速演算性と精緻性を有する浸水予測システムの開発, 水工学論文集, 第 45 卷, pp. 889-894. 2001.
- 3) 今井健太郎, 今村文彦, 岩間俊二: 市街地にお

- ける実用的な津波氾濫解析手法の提案, 土木学会論文集 B2 (海岸工学), 69-2, pp.311-315, 2013.
- 4) 穴倉正展, 澤井祐紀, 岡村行信, 小松原純子, Than Tin Aung, 石山達也, 藤原治, 藤野滋弘: 石巻平野における津波堆積物の分布と年代, 活断層・古地震研究報告, 7, pp.31-46, 2007.
- 5) 行谷佑一, 都司嘉宣, 上田和枝: 寛政五年 (1793) 宮城県沖に発生した地震の詳細震度分布と津波の状況, 歴史地震, 19, pp.80-99, 2003.
- 6) 石巻市: 津波からの避難について (暫定版), <http://www.city.ishinomaki.lg.jp/d0010/d0010/d0050/index.html>, 2014 年 4 月 18 日
- 7) 中央防災会議「東北地方太平洋沖地震を教訓とした地震・津波対策に関する専門調査会」: 東北地方太平洋沖地震を教訓とした地震・津波対策に関する専門調査会中間とりまとめ～今後の津波防災対策の基本的考え方について～, <http://www.bousai.go.jp/kaigirep/chousakai/tohokukyun/pdf/teigen.pdf>, 2014 年 6 月 27 日
- 8) Tsushima, H., R. Hino, H. Fujimoto, Y. Tanioka, and F. Imamura: Near field tsunami forecasting from cabled ocean bottom pressure data, J. Geophys. Res., 114, B06309, doi:10.1029/2008JB005988, 2009.
- 9) 馬場俊孝, 高橋成実, 金田義行, 安藤和人, 松岡大裕, 加藤利広, 非線形分散波理論に基づく地形ネスティング可能な並列津波計算コードの開発, 2013 年度日本地震学会講演予稿集, p.166, 2013.
- 10) 越村俊一, Harold Mofjeld, 片田敏孝, 河田恵昭,

- 津波の市街地氾濫による人的被害に関する一評価法-米国シアトル, ウォーターフロントにおけるケーススタディ, 土木学会海岸工学論文集, 49, 1441-1445, 2002.
- 11) 伊東慎一, 大町達夫, 井上修作: 歩行者に作用する津波力の定式化とスマトラ沖地震津波のビデオによる検証, 土木学会海岸工学論文集, 53, 176-180, 2006.
  - 12) 越村俊一, 行谷佑一, 柳澤英明: 津波被害関数の構築, 土木学会論文集 B, Vol.65, No.4, 320-331, 2009.
  - 13) Suppasri, A., K. Imai, F. Imamura, S. Koshimura, Comparison of casualty and building damage between Sanriku ria coast and Sendai plain coast based on the 2011 Great East Japan Tsunami, Proceedings of Coastal Engineering, JSCE, 3, 76-80, 2012.
  - 14) 飯塚秀則, 松富英夫: 津波氾濫流の被害想定, 土木学会海岸工学論文集, 47, 381-385, 2000.
  - 15) Yeh, H., Design Tsunami Forces for Onshore Structures, Journal of Disaster Research, Vol. 2, No.6, 531-536, 2007.
  - 16) 須賀撓三: 利根川の洪水, 山海堂, 1995.
  - 17) 熊谷兼太郎, 小田勝也, 藤井直樹: 津波によるコンテナの漂流挙動シミュレーションモデルの適用性, 土木学会海岸工学論文集, 53, 241-245, 2006.
  - 18) 永野修美, 今村文彦, 首藤伸夫: 数値計算による沿岸域でのチリ津波の再現性, 土木学会海岸工学論文集, 36, 183-187, 1989.
  - 19) 橋本貴之, 越村俊一, 小林英一: 津波による大型船舶の漂流挙動解析-インドネシア・バンダアチェにおける事例-, 土木学会海岸工学論文集, 56, 316-320, 2009.
  - 20) 島田友典, 渡邊康玄, 横山洋, 辻珠希: 千代田実験水路における横断越水破堤実験, 土木学会水工学論文集, 53, 871-876, 2009
  - 21) 藤井裕之, 首藤伸夫, 堀田新太郎, 高木利光: 津波越流による沿岸道路の破壊に関する研究, 土木学会海岸工学論文集, 57, 246-250, 2010.
  - 22) 後藤智明, 小川由信: Leap-Frog 法を用いた津波の数値計算法, 東北大学工学部土木工学科, 52p, 1982.
  - 23) 文部科学省研究開発局, 東京大学大学院情報学環: 「東海・東南海・南海地震の運動性評価プロジェクト」②運動性を考慮した強震動・津波被害予測研究, 平成 22 年度成果報告書, pp.124-127, 2010.
  - 24) Furumura, T., K. Imai, and T. Maeda : A revised tsunami source model for the 1707 Hoei earthquake and simulation of tsunami inundation of Ryujin Lake, Kyushu, Japan, Journal of Geophysical Research, Vol. 116, B02308, doi:10.1029/2010JB007918, 2011.
  - 25) 文部科学省研究開発局, 東京大学大学院情報学環: 「東海・東南海・南海地震の運動性評価プロジェクト」②運動性を考慮した強震動・津波被害予測研究, 平成 23 年度成果報告書, pp.17-22, 2012.
  - 26) 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, 第 45 巻, pp.356-360, 1998.
  - 27) 高知県: 南海トラフ巨大地震による被害想定について, <https://www.pref.kochi.lg.jp/soshiki/010201/higaisoutei-2013.html>, 2014 年 6 月 27 日
  - 28) 高知市: 高知市の人口 (平成 17 年度国勢調査結果の概要) 第 2 章, <http://www.city.kochi.kochi.jp/uploaded/attachment/2043.pdf>, 2014 年 4 月 18 日
  - 29) 四国運輸局: 平成 22 年度上半期 四国の主要観光地入込状況について, [http://www.tb.mlit.go.jp/shikoku/soshiki/kikaku/img/irikomi\\_h22\\_k4.pdf](http://www.tb.mlit.go.jp/shikoku/soshiki/kikaku/img/irikomi_h22_k4.pdf), 2014 年 4 月 18 日
  - 30) 高知市: 観光の概況, [www.city.kochi.kochi.jp/uploaded/attachment/2125.xls](http://www.city.kochi.kochi.jp/uploaded/attachment/2125.xls), 2014 年 4 月 18 日

(投稿受理: 平成 26 年 4 月 18 日)