

# 建物被害データを用いた津波被害関数の構築と 千葉県内の建物被害予測への適用

北村 健<sup>1</sup>・丸山 喜久<sup>2</sup>・山崎 文雄<sup>3</sup>

<sup>1</sup>学生会員 千葉大学 大学院工学研究科 (〒263-8522 千葉市稲毛区弥生町1-33)  
E-mail:k.kitamura@chiba-u.jp

<sup>2</sup>正会員 千葉大学准教授 大学院工学研究科 (〒263-8522 千葉市稲毛区弥生町1-33)  
E-mail:ymaruyam@tu.chiba-u.ac.jp

<sup>3</sup>正会員 千葉大学教授 大学院工学研究科 (〒263-8522 千葉市稲毛区弥生町1-33)  
E-mail:yamazaki@tu.chiba-u.ac.jp

津波災害の新たな評価指標として、津波被害関数の構築とその高度化が検討されている。本研究では、津波を引き起こすと考えられる歴史地震を想定した千葉県内の建物被害を評価するため、津波被害関数を新たに構築した。津波被害関数は、東北地方太平洋沖地震津波における千葉県旭市の建物被害データと津波数値解析の結果から、建物が晒される浸水深等とその被害率の関係を確率分布関数によって表現した。さらに、主に千葉県や神奈川県が実施している津波被害想定に使用されている津波波源モデルを利用した津波数値解析を行い、各地震津波による千葉県内の被害建物棟数を推定し、被害の傾向を分析した。

**Key Words :** *fragility function, tsunami inundation, the 2011 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake, Chiba Prefecture, damage estimation*

## 1. はじめに

津波による建物被害の定量的な推定手法としては、首藤の津波強度指標<sup>1)</sup>が一般的である。例えば木造家屋については、浸水深が2m以上で全壊、1m以上2m未満で部分的破壊という評価指標が提示されている。これは過去の津波災害事例から構築された指標であるが、一方で津波氾濫流の局所性や家屋被害発生の不確実性を考慮するための新しい指標として、津波被害関数が提案されている。津波被害関数とは、対象地域の津波浸水深や流速等の津波外力指標と建物被害率の関係を確率分布関数によって表現するものである。たとえば、越村らは2004年スマトラ島沖地震津波による被害家屋棟数を衛星画像から判読し、津波数値解析で得られた結果と建物被害の関係を津波被害関数<sup>2)</sup>として提案している。

津波被害関数を用いた建物被害想定例としては、内閣府が南海トラフの巨大地震に関する被害想定として、南海トラフ沿いを震源とする断層モデルを設定した津波数値解析と、国土交通省の被災現況調査で得られた被害建物棟数から被害関数を構築し、東海地方から近畿、四国、九州地方の津波被害を推定している<sup>3)</sup>。これによると、千葉県では最大で約2,300棟が全壊被害を受けると

推定されているが、より震源の近い地震の発生を想定した場合に、さらに被害が増加すると見込まれる。また、内閣府の被害想定ではマクロな被害の把握が主な目的であるが、一方で市町村レベルの狭い範囲における被害建物棟数を推定し、各地域の被害規模や被害特性の評価を行う必要もあると考えられる。

本研究では、2011年東北地方太平洋沖地震津波によって、千葉県内で最大の被害を受けた旭市を対象地域として津波数値解析を実施した。解析結果に加え、千葉県旭市の建物被害データを用いることで、津波外力に対する建物被害率を算出し、回帰分析によって津波被害関数を構築した。この際に、全壊、大規模半壊、半壊世帯数とその位置をまとめた旭市の罹災証明発行データを使用し、同一住所の世帯は住家1棟の被害としてまとめることで建物被害データとした。さらに、構築した被害関数を用いて、千葉県に被害を及ぼすと想定される歴史地震が発生した場合の建物全壊棟数および大規模半壊以上の建物棟数を算出し、市町村別の被害特性について分析した。想定した歴史地震は、房総半島周辺に震源をもち、過去に千葉県内で津波被害が生じたとされる1605年慶長地震、1677年延宝房総沖地震、1703年元禄関東地震の3地震である。

## 2. 東北地方太平洋沖地震における千葉県旭市の建物被害状況

千葉県旭市では、2011年東北地方太平洋沖地震とそれに伴う津波によって、3,723世帯の住家が被害を受けた<sup>4)</sup>。旭市全域の被害程度ごとの世帯数は、表-1にまとめた通りである。被害程度とは、内閣府によって定義された住家被害認定基準<sup>5)</sup>に則り、現地調査によって判定された住家被害を指す。例えば、津波による住家被害判定の方法は、まず航空写真または衛星画像を活用して、対象住家が津波により流失したかどうかを確認する。流失した住家については全壊と判定し、流失しなかった住家については、外観の目視調査によって全壊、大規模半壊、半壊、一部損壊の被害程度を判定する。目視による被害程度の判定基準としては図-1を参考に、概ね1階天井まで浸水したと認められる場合に全壊と判定される。

千葉県旭市が発行した罹災証明に基づく建物被害データは、被害を受けた住家の位置、内閣府の被害認定基準に従った被害程度と被害要因(地震動、津波、液状化)をまとめたものである。図-2に示すように、旭市における津波による建物被害は、主に旭市東部の飯岡地区周辺に集中していることがわかる。よって本研究では、津波被害関数の構築に用いる建物被害率を算出する地域を、飯岡地区(飯岡、下永井、行内、横根、萩園、平松の6地域)に限定することとした。その結果、本研究で解析対象とする飯岡地区における津波を被害要因とする被害建物棟数は、全壊178棟、大規模半壊157棟となった(表-1)。なお、著者らの現地調査<sup>6)</sup>で、旭市飯岡では、RC造建物の被害は極めて限定的であり、大半が木造建物の

	住家流失	全壊	<input checked="" type="checkbox"/>
	概ね1階天井まで浸水	全壊	<input checked="" type="checkbox"/>
	床上浸水概ね1m	大規模半壊	<input checked="" type="checkbox"/>
	床上浸水	半壊	<input checked="" type="checkbox"/>
	床下浸水	一部損壊	<input checked="" type="checkbox"/>

図-1 住家被害認定の目視評価基準<sup>5)</sup>

表-1 東北地方太平洋沖地震による千葉県旭市の被害世帯数と飯岡地区の津波による被害世帯数および建物被害棟数

千葉県旭市全域				
全壊	大規模半壊	半壊	一部損壊	合計
336	434	510	2,443	3,723
飯岡地区(括弧内は津波による建物被害棟数)				
196 (178)	169 (157)	115 (103)	-	-

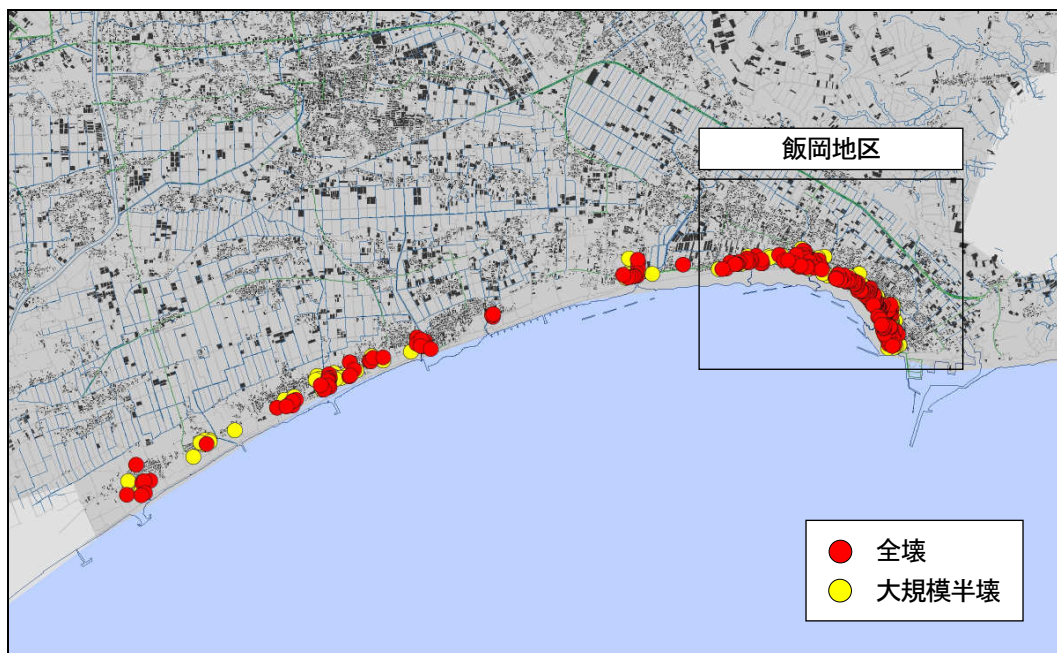


図-2 千葉県旭市が発行した罹災証明に基づく被害建物の位置

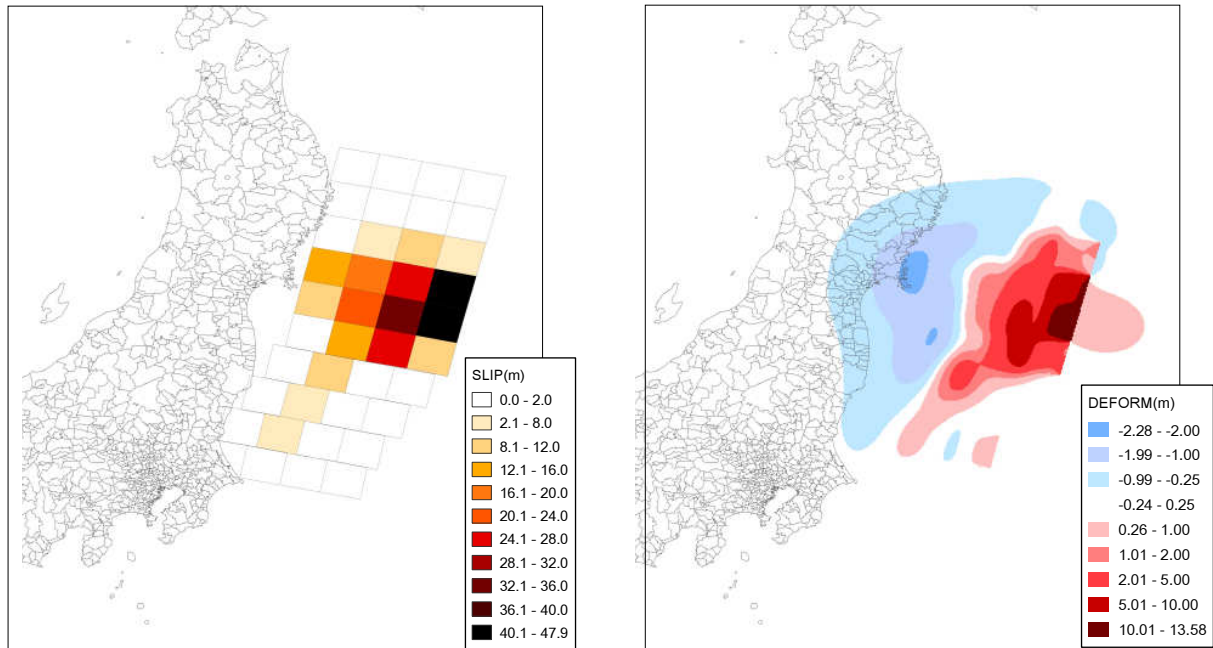


図-3 東北地方太平洋沖地震の津波波源モデル (左:初期すべり量分布<sup>7)</sup> 右:海底地形の鉛直変位)

被害であったことを確認している。

### 3. 東北地方太平洋沖地震の津波数値解析

#### (1) 津波波源モデル

東北地方太平洋沖地震津波の波源モデルとして、藤井らによる津波インバージョン解析に基づいた40枚の小断層からなるモデル (Ver. 4.2)<sup>7)</sup>を使用した。図-3には、初期すべり量分布図と、弾性体理論に基づくOkadaの式<sup>8)</sup>から求めた海底地形の鉛直変位を示す。

#### (2) 計算手法とデータ準備

数値計算は、非線形長波理論に基づく Staggered leap-frog法を用い、以下に示す連続の式(1)と運動量保存から導かれる運動方程式(2), (3)を解く<sup>9)</sup>。

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

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

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

式中の $\eta$ は水位、 $D$ は海底から水面までの全水深、 $g$ は重力加速度を表し、 $n$ はManningの粗度係数で運動方程式中の摩擦項に含まれ、津波の遡上に対する抵抗値として作用する。 $M$ ,  $N$ は式(4), (5)で与えられる $x$ ,  $y$ 方向の線流量である。

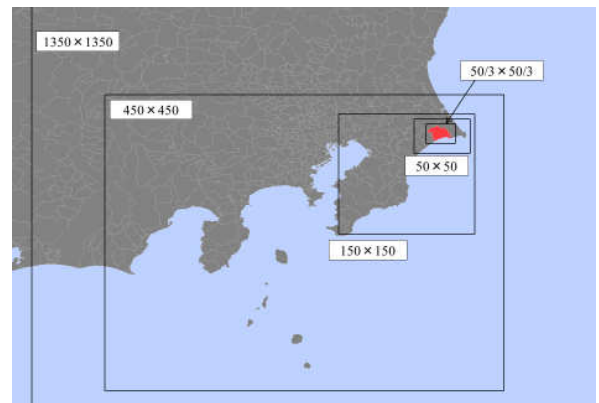


図-4 津波数値解析の計算領域

$$M = \int_{-h}^{\eta} u dz = \bar{u}(\eta + h) \quad (4)$$

$$N = \int_{-h}^{\eta} v dz = \bar{v}(\eta + h) \quad (5)$$

計算の初期条件として、Okadaの式<sup>8)</sup>から算出した海底地形の鉛直変位を海面の初期水位として与え、地震発生から3時間までを計算時間とした。数値解析では、格子間隔1350mの外洋部から陸域に向けてメッシュサイズを1/3ずつ細分化して計算を進め、千葉県旭市の飯岡地区を覆う最小のメッシュは一辺を50/3mとした。各メッシュの位置を図-4に示す。

津波数値解析の実施にあたって、海底地形の鉛直変位データに加えて、対象地域の地形データと土地利用条件に従って決定される粗度データを準備する。地形データとは、計算領域の各格子に対して標高および水深を与え

たもので、陸域については国土地理院の標高データを、海域については日本水路協会が発行する沿岸の海の基本図や海上保安庁の電子海図等をもとにして、各データからTIN (Triangulated Irregular Network ; 三角形不規則網) を構成し、これを線形補完することでデータを作成した。粗度データは、Manningの粗度係数を計算領域の各格子子に与え、土地利用条件に対応した値を設定する。千葉県旭市の土地利用を、国土交通省が整備した国土数値情報に基づいて、建物用地、農地、森林、水域、その他空地に分類した。それぞれの土地利用に対する粗度係数の値は、小谷ら<sup>10)</sup>がまとめた表-2に示す値を使用した。

表-2 土地利用ごとの Manning 粗度係数<sup>10)</sup>

土地利用	粗度係数 (m <sup>-1/3</sup> s)
住宅地	0.040
農地	0.020
林地	0.030
水域	0.025
その他(空地・緑地)	0.025

(3) 津波数値解析結果の検証

津波数値解析によって得られる津波外力指標は、最大浸水深、最大流速、家屋壁面単位幅あたりの最大津波抗力<sup>2)</sup>である。津波抗力とは、浸水深と流速から以下の式

(6)によって求められる津波外力指標の一つである。式中の $C_D$ は、壁面の形状や津波氾濫流の粘性によって変化する抗力係数で、本研究では簡単のため1.0を用いる。 $\rho$ は水の密度 (=1000kg/m<sup>3</sup>) ,  $v$ ,  $d$ は流速および浸水深を表す。

$$F = \frac{1}{2} C_D \rho v^2 d \tag{6}$$

図-5は、数値解析の結果としてとくに建物被害の集中した旭市東部の飯岡地区における最大浸水深、最大流速、最大津波抗力を示している。津波は飯岡地区沿岸に設置された約4mの堤防を越流し<sup>9)</sup>、浸水深が最大5m程度の氾濫流として住宅地へ広がったものと考えられる。

数値解析結果の妥当性の検証として、著者らが既往の研究において行った衛星画像の目視判読等による津波浸水域の推定結果<sup>9)</sup>と、本研究の津波数値解析における最大浸水深結果を比較したところ、解析対象地域に設定した飯岡地区の住宅地では、西部の河川沿いの地域で浸水深が浅い浸水域がやや過大に広がる傾向があるものの、建物被害率が高い東部では両者の浸水域が概ね一致している(図-5)。また、東北地方太平洋沖地震津波合同調査グループが調査した旭市飯岡における津波浸水深<sup>11)</sup>と比較を行ったところ、飯岡漁港周辺(1~9番)では、数値解析の結果がやや過大であるものの、とくに住宅地

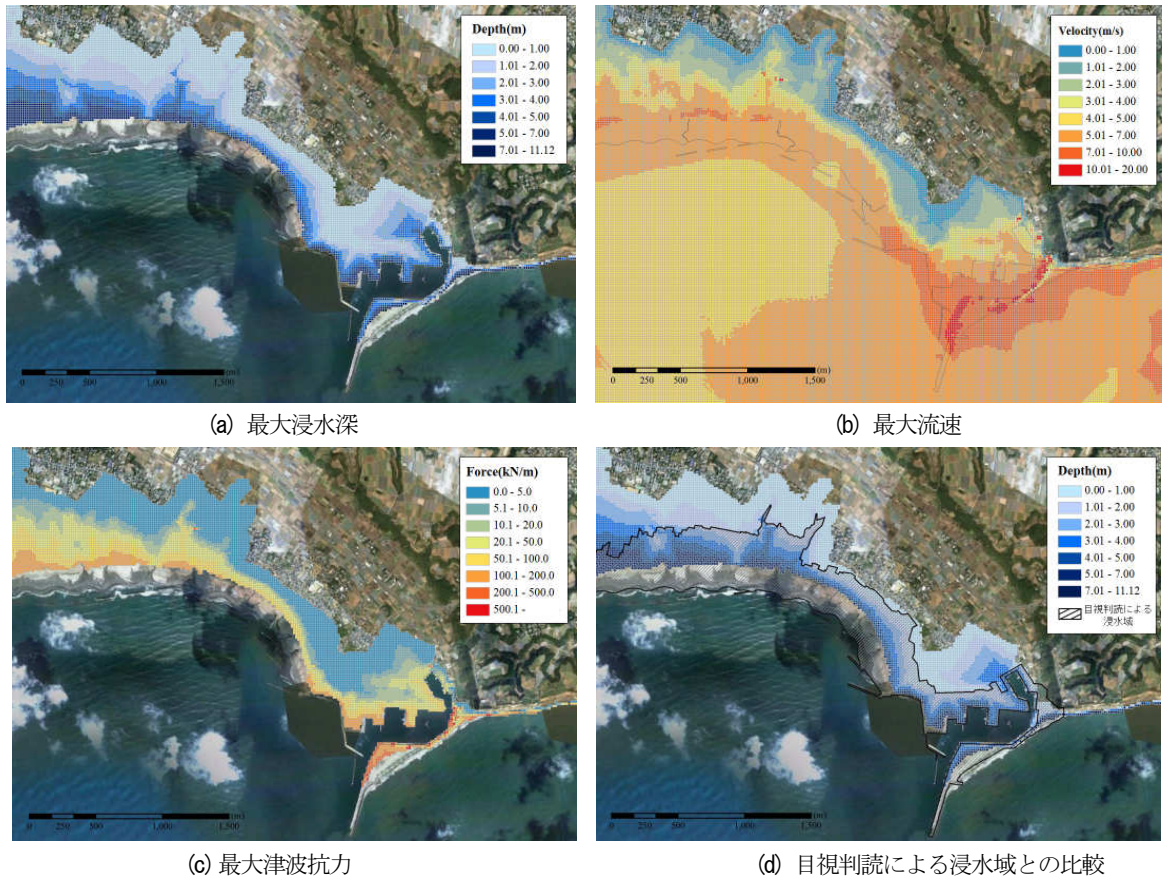


図-5 千葉県旭市飯岡地区の津波数値解析結果

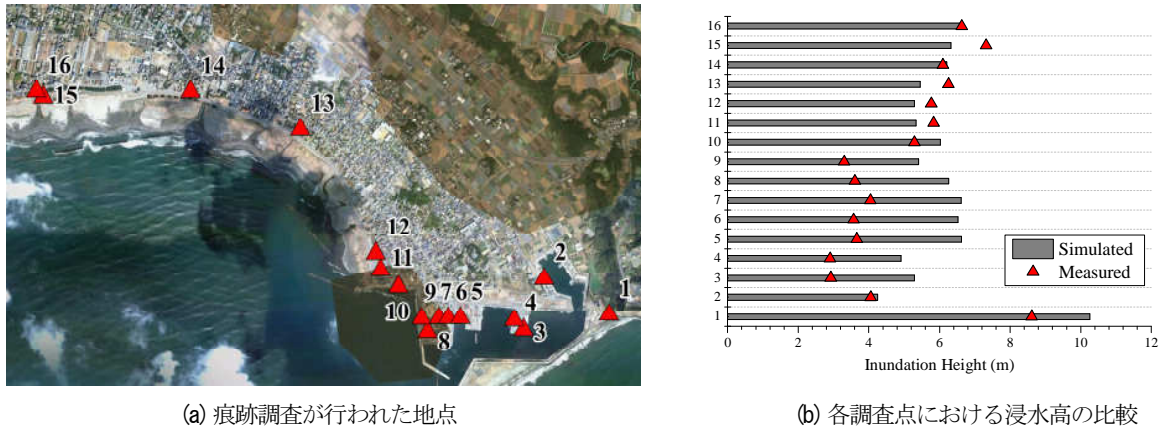


図-6 津波数値解析結果と津波合同調査グループによる痕跡調査結果の比較

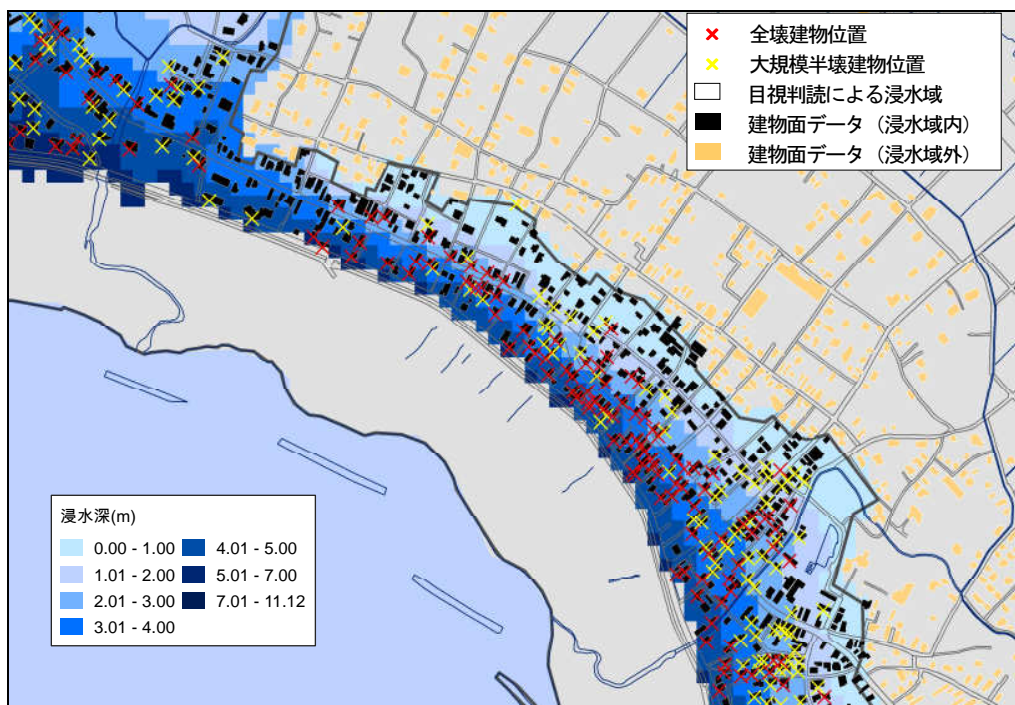


図-7 千葉県旭市における浸水域、浸水深、建物被害の位置関係

(10~16番) では精度良く再現できていることが分かった (図-6) .

$$P_D(x) = \Phi \left[ \frac{x - \mu}{\sigma} \right] \quad (8)$$

#### 4. 津波被害関数の構築

##### (1) 建物被害率の算出と被害関数の構築

被害関数とは、構造物の被害率 $P_D$ と外力の関係を以下の式(7)あるいは(8)で与えられる対数正規分布や正規分布の確率分布関数として表現したものである。

$$P_D(x) = \Phi \left[ \frac{\ln x - \lambda}{\xi} \right] \quad (7)$$

ここで、 $x$ は地震や津波外力の指標値を、 $\lambda$ および $\mu$ は $\ln x$ または $x$ の平均値、 $\xi$ および $\sigma$ はこれらの標準偏差を表す。地震工学の分野では、被害関数に関する研究事例は数多くあり、物部が関東地震などにおける木造建物被害率と推定震度の関係を確率分布関数として表現した<sup>12)</sup>のを先駆けに、1995年兵庫県南部地震後に地震動に対する建物被害関数が構築されている<sup>13),14)</sup>。

津波数値解析で得られる50/3×50/3m領域毎の最大浸水深、最大流速、最大津波抗力の3種類の津波外力指標と、各領域に含まれる建物の全壊率および大規模半壊以上の被害率を用いて、確率紙上で最小二乗法にもとづく回帰分析を行う。関数形には、式(7)に示した対数正規分

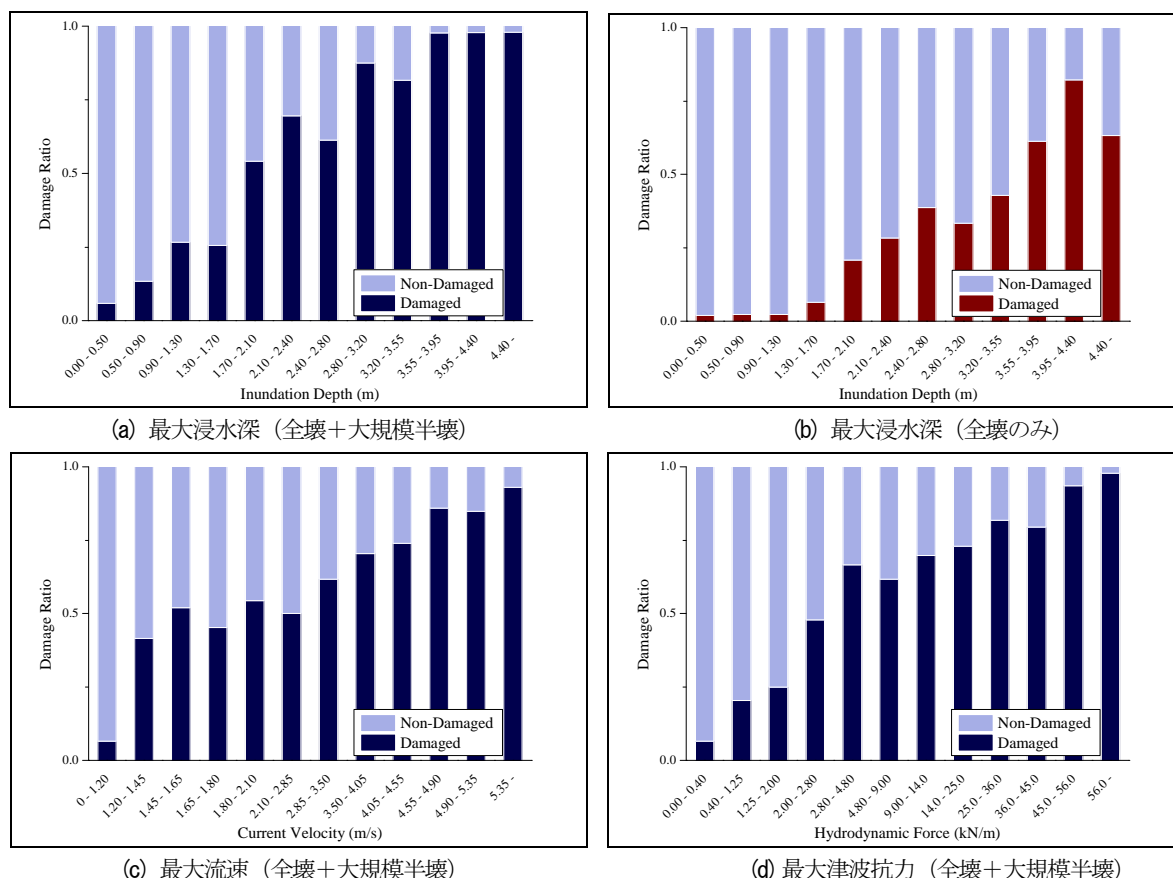


図-8 津波外力ごとの建物被害率

表-3 回帰式のパラメータと決定係数

外力		対数平均 $\lambda$	対数標準偏差 $\delta$	決定係数 $R^2$
最大浸水深 (旭市飯岡)	全壊	1.263	0.843	0.846
	大規模半壊以上	0.392	0.675	0.883
最大流速	大規模半壊以上	0.720	0.855	0.898
最大津波抗力	大規模半壊以上	1.281	1.950	0.926
最大浸水深 (国交省, 浸水全域)	全壊	0.723	0.807	0.901
	大規模半壊以上	0.260	0.905	0.925

布を仮定する。建物被害率は、地理情報システム (GIS) を用いて津波外力ごとの被害建物棟数と建物総数を集計し、これらの比をとることで求める。なお、GIS上で被害建物の位置データと被災前後のGoogle Earth衛星画像を統合し、目視によって罹災証明の発行状況を確認したところ、津波が原因で流失したと考えられる18棟の建物が罹災証明の発行を受けていなかった。本研究では、これらの建物を全壊建物として取り扱う。

被害率を算出する際の分母となる建物総数は、建物面データ (Zmap-TOWN II, 2009年度版) を使用して集計した。著者が既往の研究<sup>10)</sup>で構築した千葉県旭市における津波浸水域内にある住家建物のみを集計の対象とした (図-7)。図-8に、建物被害率と3種類の津波外力指標の関係を示す。また、回帰式のパラメータと決定係数

を表-3、構築した津波被害関数を図-9に示す。

## (2) 津波被害関数の比較

本研究で構築した津波被害関数を既往の研究において構築された津波被害関数と比較する。また、津波外力に浸水深を用いて構築した被害関数に関しては、国土交通省が東北地方太平洋沖地震津波の浸水区域全域を対象に実施した被災現況調査結果<sup>15)</sup>を用いて同様の手順で構築した被害関数とも比較する。

越村らは、1993年北海道南西沖地震津波における北海道奥尻島青苗地区や、2004年スマトラ島沖地震津波におけるインドネシアのBanda Acehでの建物被害を被災前後の衛星画像から目視判読し、津波数値解析の結果と対応させて被害関数を構築している<sup>2)</sup>。これらの被害関数と

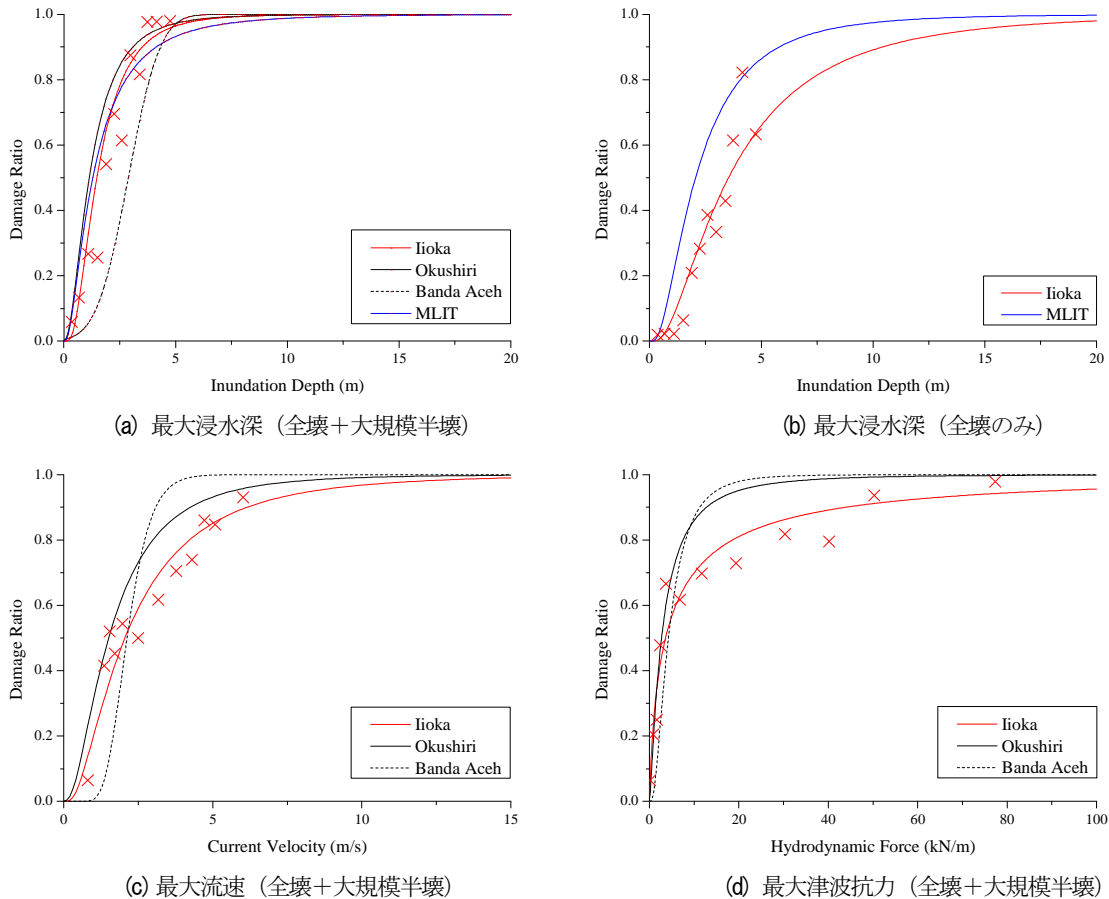
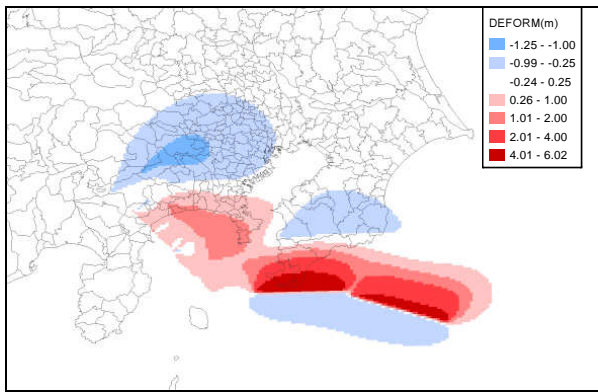


図-9 本研究で構築した被害関数と既往の研究<sup>2)</sup>との比較

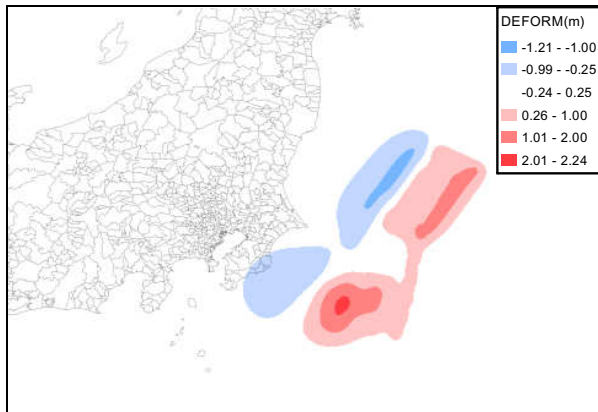
本研究で構築した被害関数を比較すると、図-9に示したように、浸水深に関する被害関数については、奥尻島青苗地区の建物被害率から構築された被害関数と近い傾向を示していることが分かる。一方で、流速や津波抗力に関する被害関数については、本研究の方が被害率はやや小さい。このような差異が生じた主な理由として、広域を対象とした一般的な津波数値解析では、津波漂流物の堆積や対象地域における街路の形状などによる流速や流体力の変化を十分に考慮できていないことが考えられる。密集家屋群は津波の流下を阻害し、また幅員の広い道路では、海岸線からの距離に対する流速の低減率が小さくなるのが水理模型実験から分かっている<sup>16)</sup>。また、津波漂流物の有無が流速に影響を与えることも十分に考えられる。このことから、これらの津波外力指標に対する被害関数を構築することを考える場合、道路と家屋群を考慮した詳細な粗度係数の設定や、計算格子間隔の更なる細分化を行う必要があると思われる。なお、インドネシアのBanda Acehにおける被害関数は、対象としている建物の構造種別が大きく違うことから、他の被害関数と異なる傾向を示している。

国土交通省は、東北地方太平洋沖地震津波の浸水区域

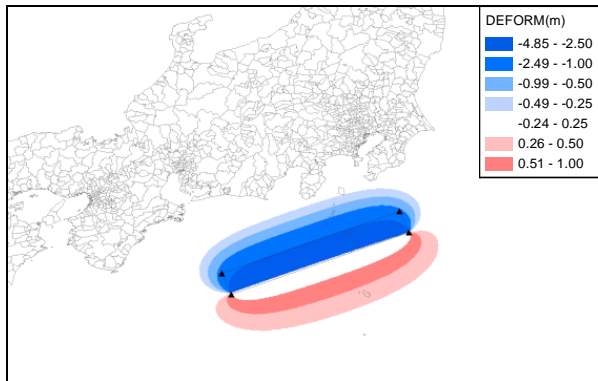
全域で現地調査を行い、津波浸水深ごとの建物被害棟数をまとめている<sup>15)</sup>。そこで、この被災現況調査結果から回帰分析によって被害関数を構築した。これを千葉県旭市の飯岡地区における建物被害データに基づいた被害関数と比較したところ(図-9)、大規模半壊以上の建物被害率を表す被害関数については両者が近い傾向を示した。このことから、本研究で構築した被害関数は限られた地域における詳細な建物被害データをもとにしたものであるが、広域の津波被害の傾向をある程度説明することができるものと考えられる。一方で、全壊率に関する被害関数は、旭市飯岡地区では浸水深が6m以上となる地域がほとんど存在しなかったことなどが影響して、浸水区域全域のものと比較すると被害率が全体的に小さくなる傾向を示した。以上のことから、次章にて行う建物被害の推定では、大規模半壊以上の被害建物棟数には本研究で構築した津波被害関数を、全壊棟数には千葉県旭市飯岡地区の被害関数と、国土交通省の被災現況調査結果に基づいた被害関数の両方を用いることとする。



(a) 元禄関東地震



(b) 延宝房総沖地震



(c) 慶長地震

図-10 千葉県に被害を及ぼすと考えられる歴史地震の津波波源モデル

## 5. 千葉県の建物被害推定

### (1) 被害建物棟数の推定

本研究で構築した津波被害関数を用いて、千葉県に被害を及ぼすと考えられる歴史地震が発生した場合の千葉県内における被害建物棟数を算出する。自治体が地震津波被害想定に使用している震源断層モデルを用いて津波数値解析を実施し、解析結果として得られた最大浸水深と構築した津波被害関数によって、建物全壊率および大規模半壊以上の被害率を求める。次にGISを使用して、

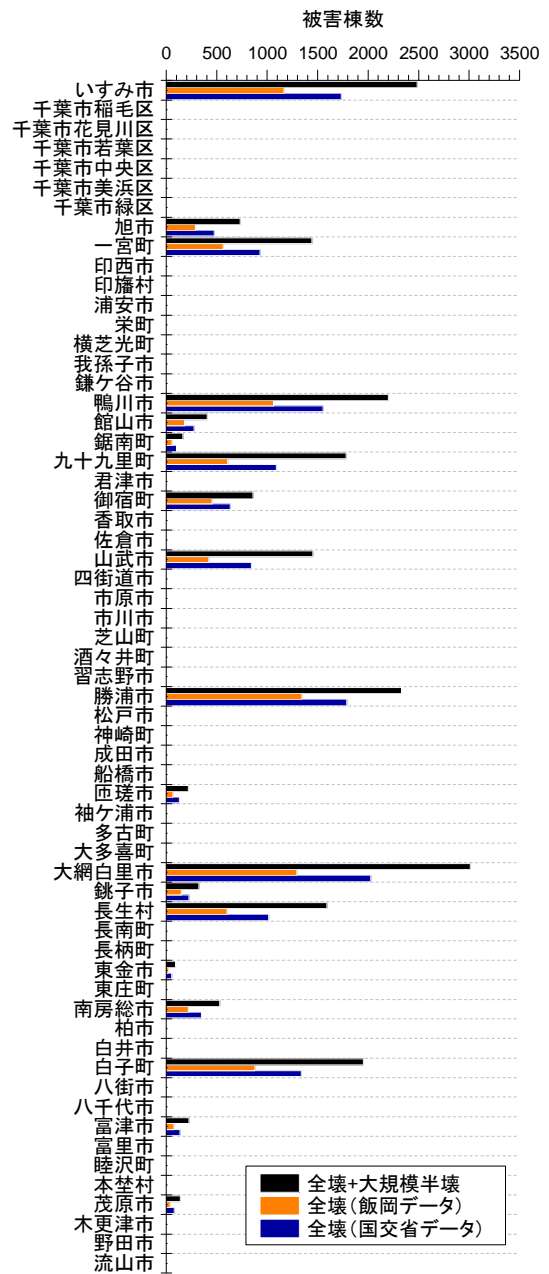


図-11 1703年元禄関東地震津波が発生した場合の千葉県内における市町村別の被害建物棟数

地震被害想定<sup>17)</sup>に用いられている千葉県内の建物棟数分布と解析領域ごとの被害率を統合し、両者を乗じることによって被害建物棟数を推定する。以下には各歴史地震が発生した場合の建物被害の推定結果をまとめる。

### (2) 1703年元禄関東地震津波

元禄関東地震は房総半島南部近傍を震源とし、房総半島から相模湾沿岸で最大5m以上の津波が観測されたと推定されている<sup>18)</sup>。被害建物棟数を算出するための津波数値解析には、図-10(a)に示す震源断層モデル<sup>19)</sup>を使用する。数値解析結果によると、震源に近い房総半島南端



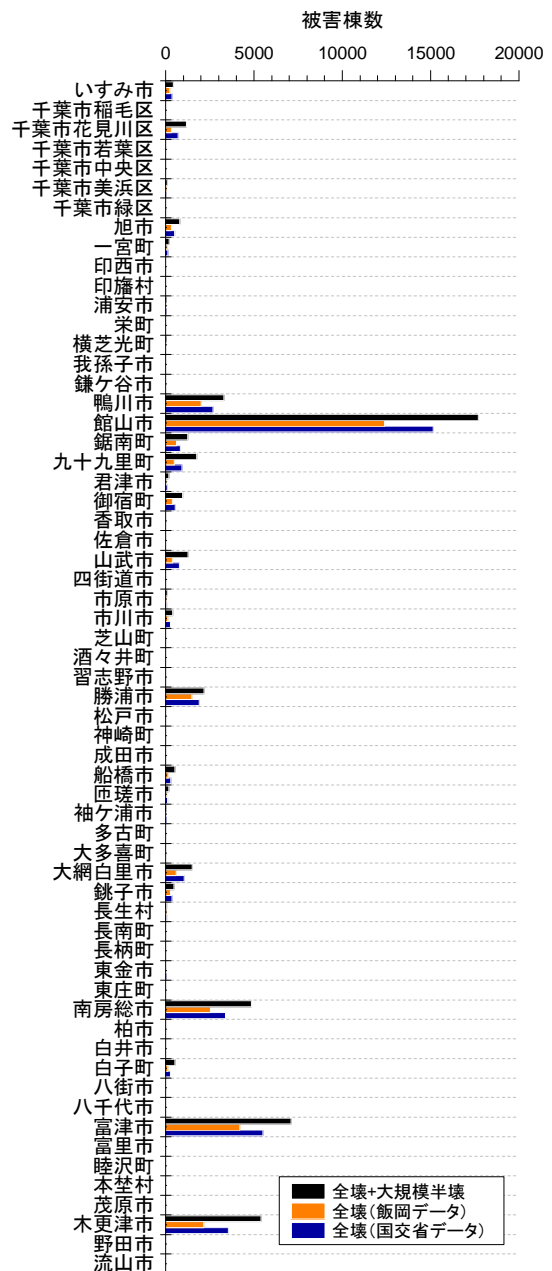
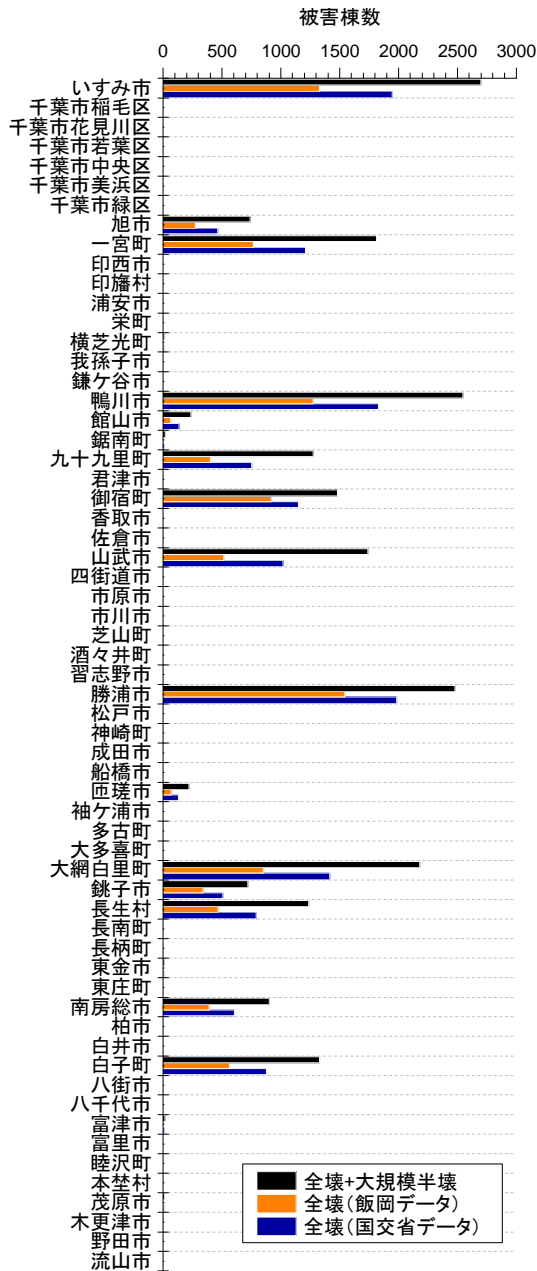


図-12 1677年延宝房総沖地震津波が発生した場合の千葉県内における市町村別の被害建物棟数

図-13 1605年慶長地震津波が発生した場合の千葉県内における市町村別の被害建物棟数

に位置する館山市や南房総市においては浸水深が最大で5~8mに達する地域が見られ、また浸水が広域に拡大した九十九里・外房地域では5m程度の浸水深が予想された。東京湾内への津波の流入は少なく、千葉市や浦安市などでは浸水深は1m以下となった。

津波数値解析の結果と、構築した津波被害関数によって算出される千葉県内の被害建物棟数は、大規模半壊以上が約22,000棟、全壊棟数は旭市飯岡の被害関数を使用した場合で約9,500棟、国交省の被災現況調査結果に基づいた被害関数を使用した場合で約15,000棟と推定された。図-11は、千葉県の市町村別の被害棟数を示してお

り、これによると大網白里町やいすみ市、勝浦市といった九十九里・外房地域での被害が顕著であることが確認できる。

### (3) 1677年延宝房総沖地震津波

延宝房総沖地震は房総半島東方沖を震源として、福島県、茨城県、千葉県の沿岸地域で津波が観測されたことが過去の被害記録から分かっている<sup>20)</sup>。津波数値解析に使用する震源断層モデルは、図-10(b)に示す千葉県が被害想定で使用しているモデル<sup>21)</sup>とする。震源に近い九十九里・外房地域では浸水深が最大で5m程度まで達し、

表-4 歴史地震ごとの建物被害想定結果

地震名		大規模半壊以上	全壊(飯岡データ)	全壊(国交省データ)
元禄関東地震		21,951	9,485	14,778
延宝房総沖地震		21,650	9,778	14,850
慶長地震	千葉	52,441	28,981	39,457
	神奈川	67,586	37,828	51,048
	東京	431	116	250
	合計	120,458	66,925	90,755

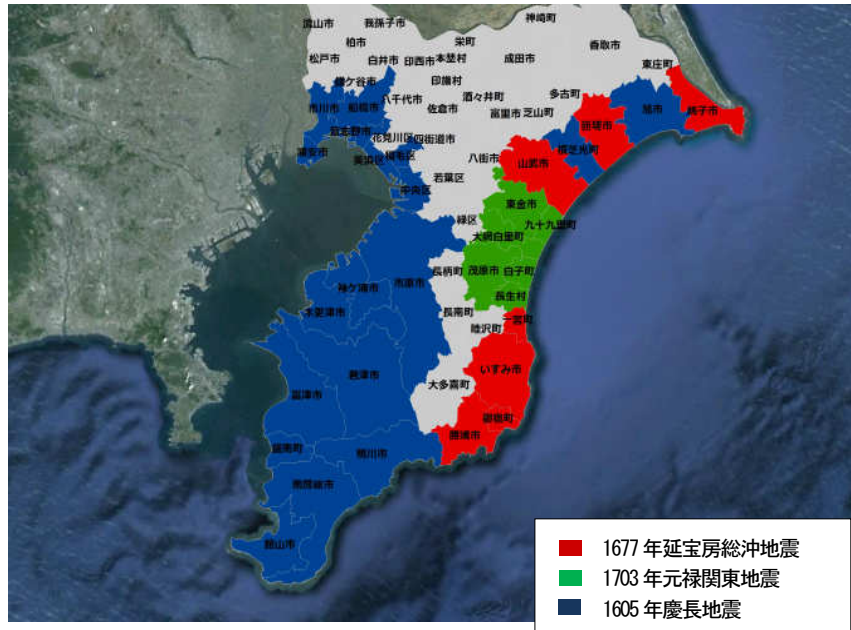


図-14 最大被害を与える歴史地震津波の市町村別の比較

千葉県内における浸水深の分布は、地域差はあるものの元禄関東地震津波と同程度の結果が得られた。また、東京湾内への津波の流入は極めて少なかった。

千葉県内の被害建物棟数は、大規模半壊以上で約22,000棟、全壊棟数は旭市飯岡の被害関数を使用した場合で約9,800棟、国交省の調査結果に基づく被害関数を使用した場合で約15,000棟と推定された。市町村別(図-12)に見ると、御宿町では全棟数の3割近くに当たる約1,500棟が大規模半壊以上の被害を受ける結果となった。勝浦市、いすみ市、鴨川市など、震源域に近い九十九里・外房地域を中心に、元禄関東地震津波と同程度の被害が見込まれる。また、東北地方太平洋沖地震津波では、旭市の大規模半壊以上の被害棟数は335棟であったが、この津波では約740棟と2倍程度の被害が推定された。

(4) 1605年慶長地震津波

南海トラフ沿いが震源域と推定される慶長地震は、地震動による被害は少なかったが、太平洋沿岸の広範囲で津波が観測され甚大な被害を出したと考えられている<sup>2)</sup>。震源断層モデルとして、図-10(c)に示す神奈川県が津波

浸水予測図の作成に用いた東海道沖の断層モデル<sup>23)</sup>を使用し、津波数値解析を実施した。前述した2つの津波と比較して、慶長地震津波では内房地域の浸水被害が非常に大きく、東京湾の入口に位置する富津市や館山市では浸水深が10m以上に達するという結果が得られた。一方で九十九里・外房地域では、元禄関東地震津波や延宝房総沖地震津波に比べて浸水範囲は小さいものの、勝浦市や鴨川市の一部地域では最大で7m程度の浸水深が予測された。

慶長地震津波による千葉県内の被害建物棟数は、大規模半壊以上で約52,000棟、全壊棟数は旭市飯岡の被害関数を使用した場合で約29,000棟、国交省の調査結果に基づいた被害関数を使用した場合では約39,000棟と推定された。図-13に示した市町村別の被害を見てみると、館山市では全壊棟数だけでも10,000棟を超えることが想定されるほか、富津市や木更津市など内房地域を中心に被害が拡大した。東京湾内へも津波が流入することから、千葉市中央区や船橋市など中心部への被害も懸念される。

慶長地震が発生した場合、千葉県だけでなく神奈川県の大相模湾沿岸に対しても非常に大きな津波を引き起こす

ことが予想される。本研究では、慶長地震津波に対しては神奈川県と東京都を含めた1都2県の被害想定を併せて行った。この際には、両都県の地震被害想定<sup>24), 25)</sup>で用いられている建物棟数データを使用した。その結果、大規模半壊以上の被害棟数は神奈川県だけで65,000棟以上、1都2県の合計では約120,000棟と推定され、全壊棟数は旭市飯岡の被害関数を使用した場合で約67,000棟、国土省の調査結果に基づく被害関数を使用すれば約90,000棟という推定結果となった(表-4)。国土交通省によれば、東北地方太平洋沖地震津波による浸水区域全域の全壊棟数が約12万棟であったことから、慶長地震を含めた南海トラフ沿いの大地震が発生した場合には、津波による被害だけでもそれを上回る結果が予想される。

最後に、各市町村に対して最も大きな被害を及ぼすと想定される歴史地震を図-14のように示した。この図によれば、延宝房総沖地震津波と元禄関東地震津波は九十九里・外房地域に、慶長地震津波は房総半島南部から内房地域に対して被害を及ぼしており、地域ごとに被害が最大となる地震津波が異なることが分かった。

## 6. 結論

2011年東北地方太平洋沖地震津波において、千葉県内で最大の被害が生じた旭市を対象地域とした津波数値解析の結果と、千葉県旭市が発行した罹災証明に基づく建物被害データを使用して、津波被害関数を構築した。この被害関数は、全壊、大規模半壊などの被害程度ごとに被害建物棟数を予測できる点で、自治体等が被害想定を実施する際に有用であると考えられる。構築した津波被害関数を用いて、千葉県に被害を及ぼすと考えられる歴史地震津波が発生した場合の、県内における被害建物棟数を推定した。

津波被害関数は、浸水深、流速、津波抗力の3つの津波外力に対して構築したが、津波漂流物の影響を受けやすいと考えられる流速や津波抗力に対する被害関数は、既往の研究結果との整合性が取れなかった。一方、浸水深に関する被害関数は、大規模半壊以上の被害率に着目すれば、本研究で構築した旭市の罹災証明データに基づく被害関数と国土交通省が浸水域全域についてまとめた被害データを使用した場合で大きな差異は見られなかった。このことから、本研究で構築した被害関数は、限られた地域の詳細な被害データをもとにしたものであるが、津波による広域の被害傾向を表現できるものと考えられる。

歴史地震の発生を仮定し、千葉県を対象として建物被害推定を行ったところ、1605年慶長地震津波では大規模

半壊以上の建物が50,000棟以上と推定されたが、九十九里・外房地域においては1677年延宝房総沖地震津波や1703年元禄関東地震津波が発生した場合による被害の方が大きくなる地域が多かった。慶長地震津波について、東京都と神奈川県についても同様に建物被害を予測したところ、大規模半壊以上の被害棟数が1都2県の合計で100,000棟を超える結果となった。

今後より詳細な建物被害想定を行うための課題として、多様な対象地域を選定し、その地形的特徴や建物群の構造種別ごとにタイプ分けを行い、数パターン被害関数を構築する必要がある。これによって、被害想定を行う地域に適合した被害関数を選択することができ、津波被害関数を用いた被害想定の高高度化に寄与できるものと考えられる。

**謝辞：**本研究で使用した津波数値解析プログラムであるTUNAMI-CODEは、東北大学災害科学国際研究所の越村俊一教授に提供していただいた。記して謝意を表す。

## 参考文献

- 1) 首藤伸夫：津波強度と被害，津波工学研究報告，第9号，pp.101-136，1992。
- 2) 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，pp.320-331，2009。
- 3) 内閣府：南海トラフの巨大地震に関する津波高，浸水域，被害想定公表について，[http://www.bousai.go.jp/nankaitrough\\_info.html](http://www.bousai.go.jp/nankaitrough_info.html) (2012年9月20日閲覧)。
- 4) 千葉県旭市：東北地方太平洋沖地震(東日本大震災)旭市災害状況，[http://www.city.asahi.lg.jp/section/soumu/bousai\\_001.html](http://www.city.asahi.lg.jp/section/soumu/bousai_001.html) (2012年10月18日閲覧)。
- 5) 内閣府：災害に係る住家の被害認定基準運用指針(内閣府)，2009。
- 6) 北村健，丸山喜久：衛星画像を用いて推定した千葉県旭市の津波浸水域と数値シミュレーション結果の比較，日本地震工学会論文集，第12巻，第6号，pp.86-103，2012。
- 7) 藤井雄士郎，佐竹健治：2011年3月11日東北地方太平洋沖地震の津波波源(暫定結果，Ver.4.2)，独立行政法人建築研究所HP(<http://www.kneke.go.jp/>) (2012年9月20日閲覧)。
- 8) Okada, Y.: Surface Deformation Due to Shear and Tensile Faults in a Half-Space, *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol. 75, No.4, pp.1135-1154, 1985.
- 9) Koshimura, S., Imamura, F., and Shuto, N.: Characteristics of on-slope tsunami propagation and the accuracy of the numerical model, *Tsunami Research at the End of a Critical Decade*, pp.163-177, 2001.
- 10) 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。
- 11) 東北地方太平洋沖地震津波合同調査グループ：痕跡調査結果，<http://www.coastal.jp/tjt/> (2012年3月21日閲覧)。
- 12) 物部長徳：土木工事震害調査報告，震災予防調査会，第100号，1926。
- 13) 村尾修，山崎文雄：自治体の被害調査結果に基づく兵庫県南部地震の建物被害関数，日本建築学会構造系論文集，

- 第 527 号, pp.189-196, 2000.
- 14) 翠川三郎, 藤本一雄: 計測震度と住家被害率の関係—罹災証明を用いた検討—, 日本地震工学会論文集, 第 2 巻, pp.15-22, 2002.
  - 15) 国土交通省: 東日本大震災による被災現況調査結果(第 1 次報告) 関連資料について, 国土交通省 HP ([http://www.mlit.go.jp/toshi/city\\_plan/crd\\_plan\\_tk\\_000005.html](http://www.mlit.go.jp/toshi/city_plan/crd_plan_tk_000005.html)) (2012 年 9 月 20 日閲覧) .
  - 16) 福岡捷二, 川島幹雄, 松永宣夫, 前内永敏: 密集市街地の氾濫流に関する研究, 土木学会論文集, No. 491, pp. 51-60, 1994.
  - 17) 千葉県: 千葉県地震被害想定調査報告書, 2008.
  - 18) 羽鳥徳太郎: 東京湾・浦賀水道沿岸の元禄関東(1703), 安政東海(1854)津波とその他の津波の遡上状況, 歴史地震, 第 21 号, pp.37-45, 2006.
  - 19) 行谷佑一, 佐竹健治, 宍倉正展: 南関東沿岸の地殻上下変動から推定した 1703 年元禄関東地震と 1923 年大正関東地震の断層モデル, 活断層・古地震研究報告, No. 11, pp. 107-120, 2011.
  - 20) 竹内仁, 藤良太郎, 三村信男, 今村文彦, 佐竹健治, 都司嘉宣, 宝地兼次, 松浦健郎: 延宝房総沖地震津波の千葉県沿岸～福島県沿岸での痕跡高調査, 歴史地震, 第 22 号, pp.53-59, 2007.
  - 21) 千葉県県土整備部: 平成 17 年度 県単海岸調査委託(津波対策・シミュレーション業務) 報告書, 2006.
  - 22) 宇佐美龍夫: 新編日本被害地震総覧(増改訂版 416-1995), 東京大学出版会, pp.493, 1996.
  - 23) 神奈川県県土整備局: 新たな津波浸水予測図解説書, 神奈川県 HP (<http://www.pref.kanagawa.jp/cnt/f360944/>) (2012 年 1 月 23 日閲覧) .
  - 24) 神奈川県: 神奈川県地震被害想定報告書, 2009.
  - 25) 東京都: 首都直下地震による東京の被害想定, 2006.

(2012.11.14 受付, 2013.2.4修正, 2013.2.23受理)

## DEVELOPMENT OF TSUNAMI FRAGILITY FUNCTION BASED ON BUILDING DAMAGE DATASET AND ITS APPLICATION FOR DAMAGE ASSESSMENT IN CHIBA PREFECTURE

Ken KITAMURA, Yoshihisa MARUYAMA and Fumio YAMAZAKI

A tsunami fragility function is developed to assess building damage because of tsunami. The fragility functions are expressed with respect to the inundation depth to predict the damage ratio of buildings. Asahi City, Chiba Prefecture, suffered from serious damage after the 2011 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake and Tsunami. The fragility function is constructed using the results of numerical simulation of tsunami propagation and the building damage dataset compiled by Asahi City after the earthquake. Employing the fragility function, the numbers of damaged buildings in Chiba Prefecture are estimated assuming the occurrence of the historical earthquakes.