

# 津波被害関数を用いた千葉県内の建物被害予測 Building Damage Estimation in Chiba Prefecture Using Tsunami Fragility Function

○北村 健<sup>1</sup>, 丸山 喜久<sup>1</sup>, 山崎 文雄<sup>1</sup>  
Ken KITAMURA<sup>1</sup>, Yoshihisa MARUYAMA<sup>1</sup> and Fumio YAMAZAKI<sup>1</sup>

<sup>1</sup>千葉大学大学院 工学研究科 建築・都市科学専攻  
Graduate School of Engineering, Chiba University

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 number of damaged buildings in Chiba Prefecture are estimated assuming the occurrence of the historical earthquakes.

**Keywords** : 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<sup>2)</sup>。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。

本研究では、2011 年東北地方太平洋沖地震津波で千葉県内最大の被害が生じた旭市を対象地域として、津波数値解析の結果と旭市が発行した罹災証明に基づく建物被害データから新たに津波被害関数を構築した。また構築した被害関数を用いて、千葉県に影響を及ぼすと想定されてい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した。

## 2. 千葉県旭市の建物被害状況

千葉県旭市は、内閣府が定める災害時の住家被害認定基準<sup>3)</sup>に則った罹災証明を発行している。それによると、被害建物の位置は図 1 に示すように旭市東部の飯岡地区に集中していることから、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に限定することとした。本研究で解析対象とした飯岡地区の津波による被害棟数は、全壊 178 棟、大規模半壊 157 棟である。

## 3. 東北地方太平洋沖地震の津波数値解析

津波数値解析の波源モデルとしては、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>4)</sup>を使用した。図 2 には、Okada の式<sup>5)</sup>から求めた海底地形の鉛直変位を示す。数値計算は、非線形長波理論に基づく Staggered leap-frog 差分法を用い、以下に示す連続の式 (1) と運動方程式 (2), (3) を解く。

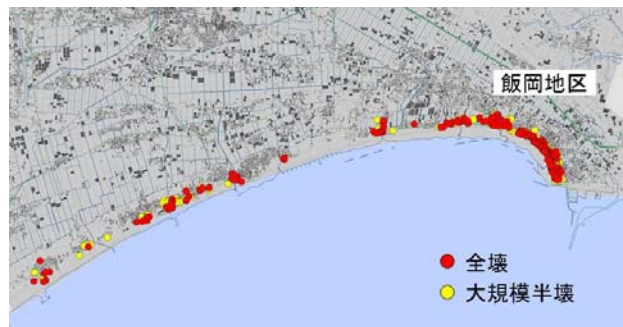


図 1 千葉県旭市が発行した罹災証明に基づく被害建物位置

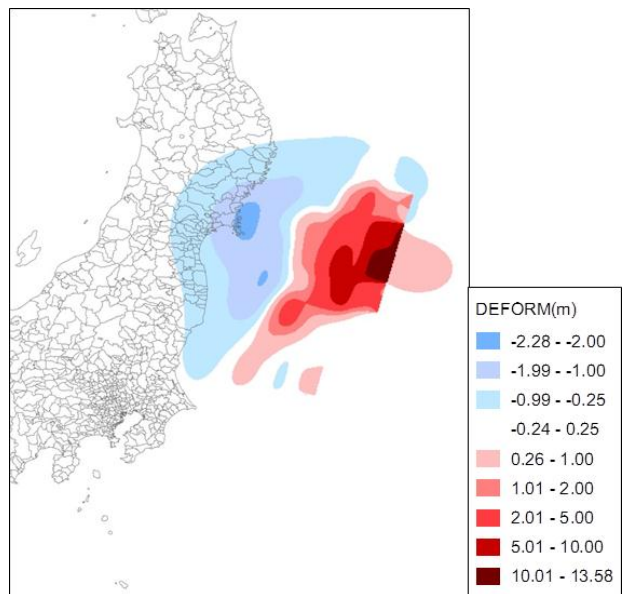


図 2 藤井らの波源モデル<sup>4)</sup>から推定した東北地方太平洋沖地震における海底地形の鉛直変位

表 1 Manning 粗度係数の設定値<sup>6)</sup>

土地利用(国土数値情報)	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

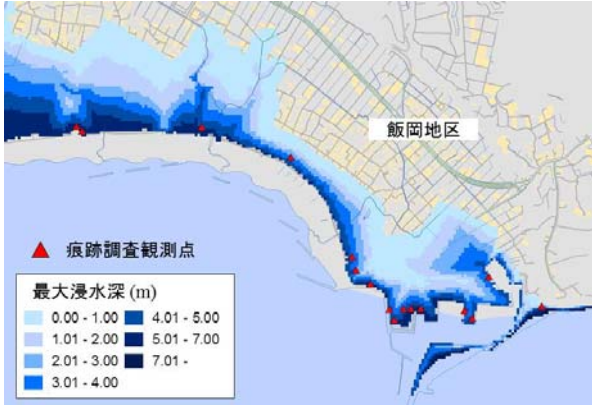


図 3 数値解析に基づく東北地方太平洋沖地震における最大浸水深 (千葉県旭市飯岡)

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

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

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

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,  $n$  は表 1 に示す土地利用条件に従った Manning の粗度係数<sup>6)</sup>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扱う。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 ずつ細分化して進める。図 3 は, 数値解析結果の一例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を示している。数値解析の妥当性評価のため, 東北地方太平洋沖地震津波合同調査グループが現地観測により調査した旭市飯岡の数地点における津波浸水深<sup>7)</sup>と比較を行ったところ, 図 4 に示すように, とくに住宅地(10~16 番)では精度よく再現できていることが分かった。

#### 4. 津波被害関数の構築

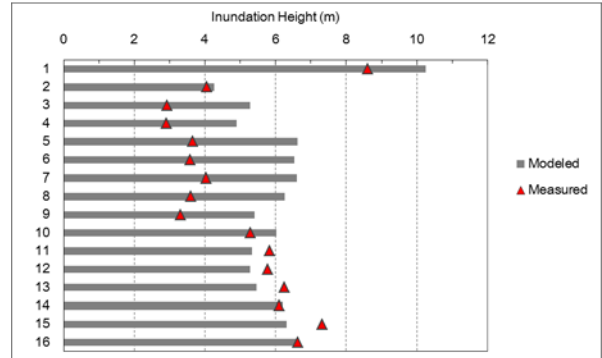
津波被害関数は, 数値解析結果の 50/3 × 50/3m 領域毎の最大浸水深と, 各領域に含まれる建物の被害率(全壊率 + 大規模半壊率, 図 5)から回帰分析を行い, 式(4)に示す対数正規分布関数として定義する。

$$P_D(x) = \Phi \left[ \frac{\ln x - \lambda}{\xi} \right] \quad (4)$$

建物被害率は, 地理情報システム(GIS)を用いて浸水深毎に被害建物棟数と建物総数を集計(図 6)し, これらの比をとることで求める。被害建物棟数の集計には, 旭市の罹災証明による被害建物データ(図 1)を, 建物総数の集計には千葉県旭市の建物面データ(Zmap-TOWN II, 20



(a) 痕跡調査が行われた地点



(b) 各調査点における浸水深の比較

図 4 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

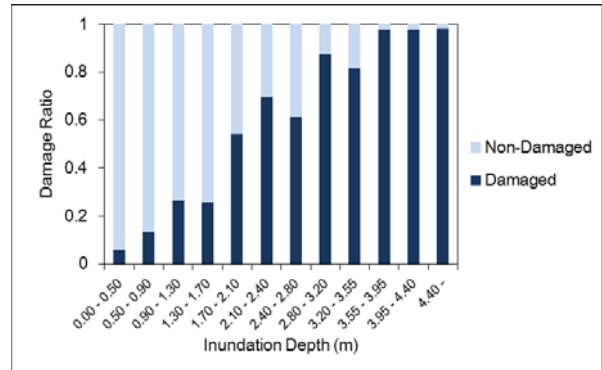


図 5 最大浸水深に対する建物被害率 (全壊 + 大規模半壊)

09 年度版)を使用した。

構築した津波被害関数を図 7 に, 回帰式のパラメータを表 2 に示す。被害関数の妥当性を検証するため, 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>8)</sup>から同様の手順で構築した被害関数と比較する(図 7)と, 両者は似た傾向を示している。本研究では千葉県旭市の詳細な被害データのみを用いているものの, 広域的な津波被害の傾向を説明し得る被害関数が構築できたものと考えられる。

#### 5. 千葉県の建物被害想定

##### (1) 被害建物棟数の推定

千葉県旭市の建物被害に基づい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建物被害棟数を算出する。各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

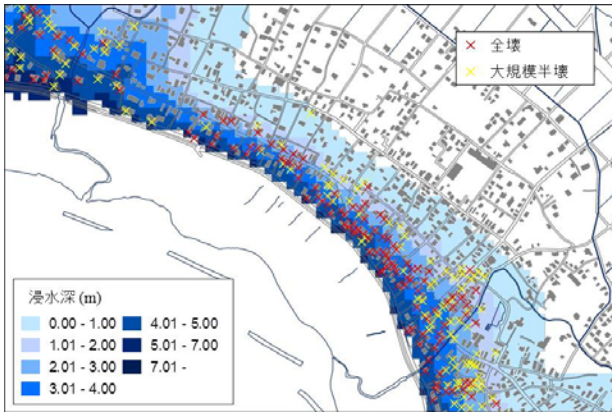


図 6 GISによる被害建物棟数と建物総数の集計

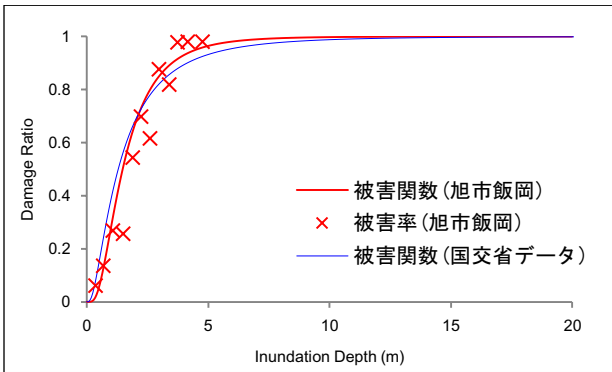


図 7 本研究で構築した津波被害関数 (全壊+大規模半壊)

表 2 被害関数のパラメータと決定係数

データ	平均 $\lambda$	標準偏差 $\xi$	決定係数 $R^2$
旭市飯岡	0.392	0.675	0.883
国交省 (浸水全域)	0.260	0.905	0.925

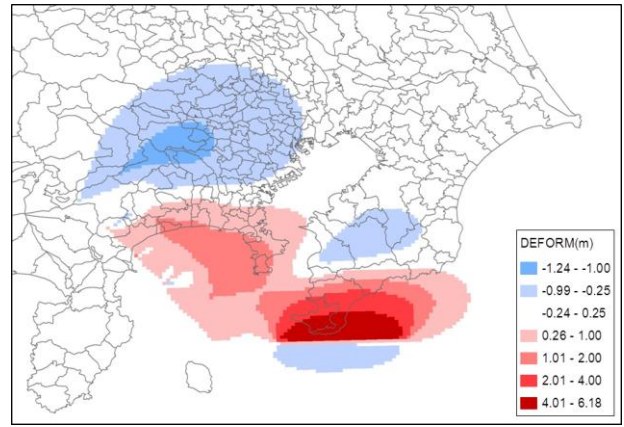
られた最大浸水深と構築した津波被害関数によって建物被害率を求める。次に GIS を使用して、千葉県地震被害調査報告書<sup>9)</sup>に基づく県内の建物棟数分布と解析領域毎の被害率を空間結合し、両者を乗じることで被害建物棟数を推定する。以下には各歴史地震が発生した場合の、千葉県内の建物被害想定結果をまとめる。

### (2) 1703 年元禄関東地震津波

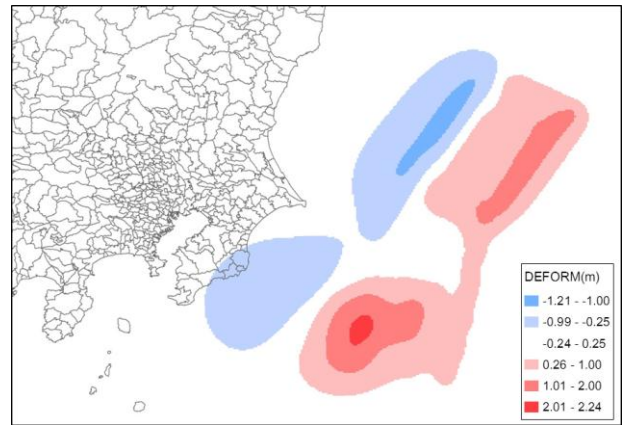
元禄関東地震は房総半島南部近傍を震源としており、房総半島から相模湾沿岸で最大 5m 以上の津波が観測されたと推定されている<sup>10)</sup>。被害建物棟数を算出するための津波数値解析には、図 8-(a) に示す千葉県の被害想定と同様の震源断層モデル(行谷ら)<sup>11)</sup>を使用する。千葉県内の建物被害総数は約 9900 棟と推定され、市町村別(図 9)に見れば大網白里町や白子町、九十九里町といった九十九里・外房沿岸地域で被害が大きくなると予測された。

### (3) 1677 年延宝房総沖地震津波

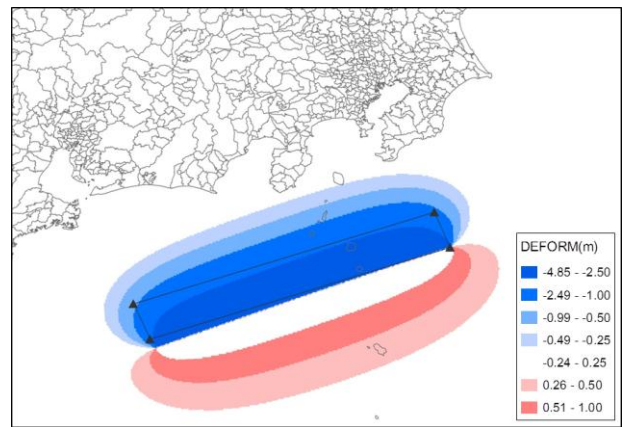
延宝房総沖地震は房総半島東方沖を震源として、福島県、茨城県、千葉県の沿岸地域で津波が観測されたことが被害記録から分かっている<sup>12)</sup>。津波数値解析に使用する震源断層モデルは、図 8-(b) の千葉県が被害想定で使用しているモデル<sup>13)</sup>とする。延宝房総沖地震津波による千葉県内の被害建物棟数は約 21,600 棟と推定された。勝浦市、いすみ市、鴨川市など、震源域に近い九十九里・外房地域を中心に、元禄関東地震津波の 2 倍以上の被害が見込まれる(図 9)。



(a) 元禄関東地震



(b) 延宝房総沖地震



(c) 慶長地震

図 8 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(鉛直変位は Okada の式<sup>5)</sup>より推定)

### (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>14)</sup>。震源断層モデルとして、図 8-(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>15)</sup>を使用し、津波数値解析を実施した。千葉県内の被害建物棟数は約 52,000 棟と推定され、市町村別(図 9)を見ると館山市や富津市、木更津市など千葉県の内房地域にも被害が拡大した。さらに、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。

また図 10 のように、最も影響の大きな歴史地震を市町村別に示したところ、元禄関東地震津波と延宝房総沖地

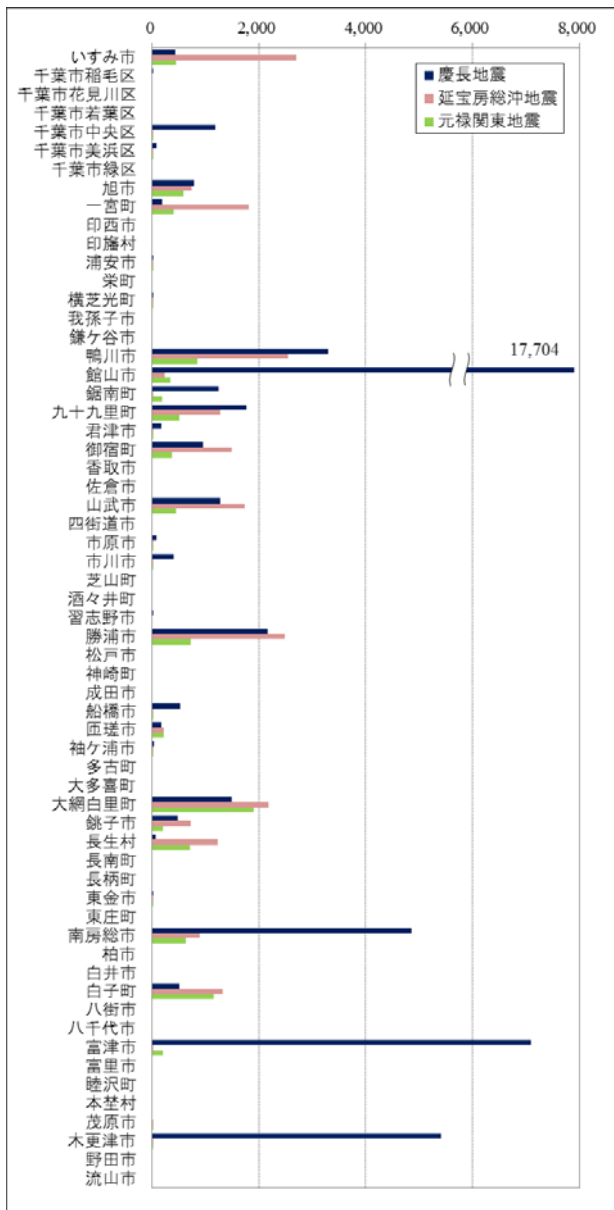


図9 歴史的な地震津波が発生した場合の千葉県市町村別の想定被害棟数（全壊+大規模半壊）



図10 最大被害を与える歴史的な地震津波の市町村別比較

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、地域ごとに被害原因となる地震津波が異なることがわかる。

## 6. まとめ

2011年東北地方太平洋沖地震津波において千葉県旭市が発行した罹災証明に基づく建物被害状況と、津波数値解析結果を使用し、新たに津波被害関数を構築した。さらにこれを用いて、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千葉県内における被害建物棟数を推定した。1605年慶長地震津波は千葉県内に50,000棟以上の被害をもたらすと推定されたが、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。今後は、大規模半壊を除く全壊棟数、あるいは建物種別に着目して木造家屋の被害棟数の推定を行い、各歴史地震による被害規模および被害特性の分析を進める。

## 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，萱場真太郎：1993年北海道南西沖地震津波の家屋被害の再考—津波被害関数の構築に向けて—，日本地震工学会論文集，第10巻，pp.87-101，2010。
- 3) 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。
- 4) 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.knekne.go.jp/>），2011。
- 5) 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。
- 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，第45巻，pp.356-360，1998。
- 7) 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，東北地方太平洋沖地震津波合同調査グループHP（<http://www.coastal.jp/tjtj/>）
- 8) 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)），2011。
- 9) 千葉県：千葉県地震被害想定調査報告書，2008。
- 10) 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。
- 11) 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。
- 12) 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。
- 13) 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。
- 14) 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。
- 15) 神奈川県県土整備局：新たな津波浸水予測図解説書，2012。