

# 3.11 津波の被害分析と 今後の津波防災

早稲田大学理工学術院 教授  
横浜国立大学名誉教授

柴山 知也 *Tomoya Shibayama*

## 1. 東北地方太平洋沖地震 津波の被害の分析

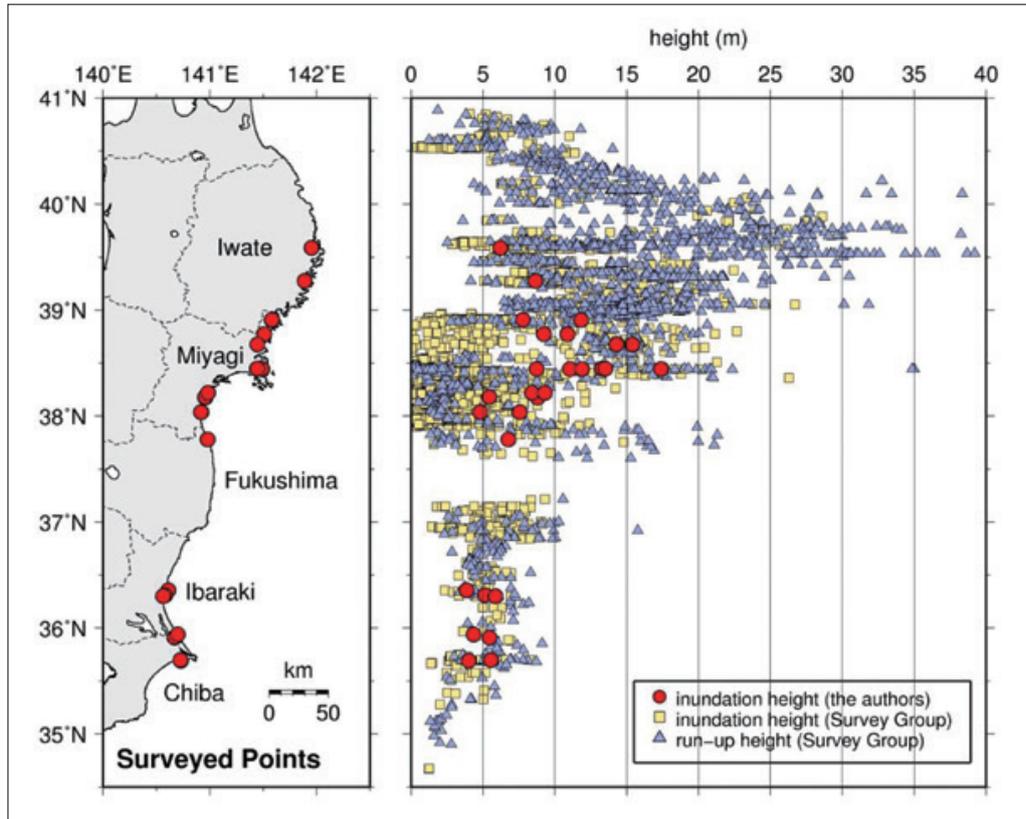
私は、津波、高潮、高波に対する沿岸域の被災機構を解明するために現地調査、数値予測、水理実験の三者を並行して進めている。最近では2004年のインド洋大津波、2005年のハリケーン・カトリーナ高潮(米国)、2006年のジャワ島中部地震津波、2007年のサイクロン・シドル高潮(バングラデシュ)、2008年のサイクロン・ナルギス高潮(ミャンマー)、2009年のサモア諸島沖地震津波、2010年のチリ地震津波、同年のスマトラ島沖地震津波(メンタワイ諸島)、2011年の東北地方太平洋沖地震津波(以下では略して東北津波と呼ぶ)、2012年のハリケーン・サンディ高潮(米国ニューヨーク)などの事例の現地調査を行っている。これらの沿岸災害のうち、特に被害の大きかったのはインド洋大津波(死者と行方不明者で約22万人)、ナルギス高潮(同13万8千人)、東北津波(死者15,782人、行方不明者4,086人)の三つである。インド洋大津波とナルギス高潮は、沿岸域の住民にとって全く予想していなかった「不意打ち」であったことが知られている。一方で東北津波の場合には、あらかじめ宮城県沖津波が予測されていたにもかかわらず、それをはるかに上回る規模の津波が来襲し、「想定外」の事態により、多くの被害者が発生した。

海底で地震が発生すると、地盤が上下方向

に変位するため、大きな水の波が発生して周囲に伝わっていくことになる。日本列島の周辺には太平洋プレート、フィリピン海プレート、北米プレートなどいくつかの海底プレートの境界があり、大きな海底地震が発生するため、歴史的に何度も津波に襲われて来た。特に東北の三陸地方沿岸は明治三陸津波(1896年)、昭和三陸津波(1933年)、チリ津波(1960年)など125年程の間に3回も大きな津波に襲われてきたため、湾口津波防波堤、津波防潮堤、津波避難ビルなど何重にも防護の方法を講じていた。ところが東北津波では、津波の大きさが予想されていたものよりもはるかに大きかったため、津波来襲時に地域社会を守る最後の砦である防潮堤を津波が乗り越えてしまい集落を津波が襲った。今回の津波により、大きな津波に襲われた場合、防潮堤などの構造物だけで居住地を守ることは無理であり、早めに高台に避難することが必要となるということがはっきりした<sup>1)</sup>。

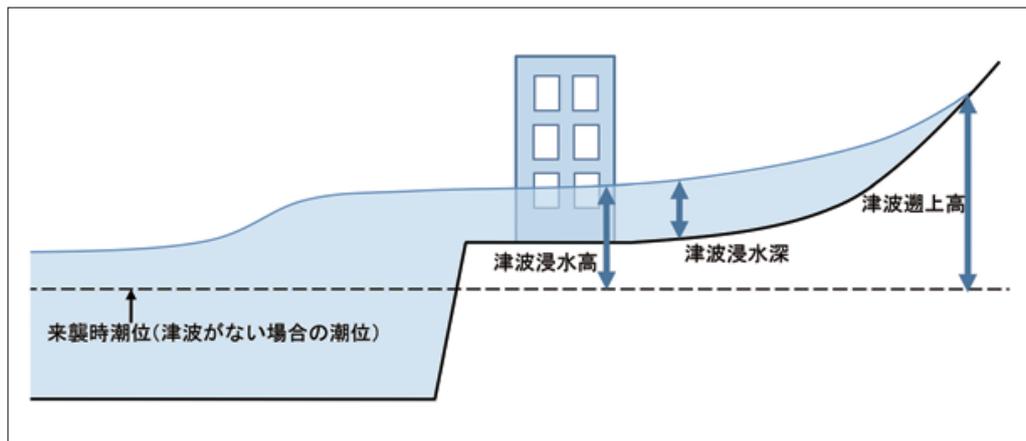
日本の津波研究者たちは、今回の津波発生直後に津波合同調査グループを結成して、重複せず、全体をバランスよく調査できるように調整をしながら津波被災調査を進めた<sup>2)</sup>。**図1**に筆者らの早稲田大学隊のデータを含めたデータの全体を示す。**図2**に示すように津波浸水高は通過していった津波の、来襲時の潮位からの高さを表し、遡上高は丘を登った津波の最高到達点の来襲時潮位からの高さを表す。また、浸水深は地盤表面からの津波水

図1 東北地方太平洋沖地震津波の高さ



(浸水高さ (Inundation Height) (■)と遡上高さ (Run-up Height) (▲)、また●は筆者らの早稲田大学隊の浸水高さのデータを示す。) (柴山ら2011)<sup>3)</sup>

図2 津波の浸水深、浸水高、遡上高の関係



位の高さを表す。

調査終了後、津波研究者たちは土木学会津波特定テーマ委員会を中心として、今後の津波防災の方略を練り上げてきた。メンバーは手分けをして、中央政府、県庁、市町の津波対策検討委員会に参加し、専門家間で練り上げた方針に沿って提言を行ってきた。津波研究者の間では、今後の津波対策には、下記

の二つの異なるレベルを設置して対応することを考えている。

①津波防護レベル：

構造物で対応する津波のレベル(海岸防護施設の設計で用いる津波の高さのこと)で、この高さの津波が発生するまでの期間(再現期間)が数十年から百数十年の津波を対象とし、沿岸部の資産を守ること、住民の津波避難を

助けるために津波の陸上への侵入を低減し遅らせることを目標とする。このレベルはレベルIあるいは頻度の高い津波とも呼ばれている。

## ②津波減災レベル:

避難計画のための津波のレベルで上記①の津波防護レベルをはるかに上回る津波に対して、人命を守るために必要な最大限の措置を行う。これまでの想定よりも高い浸水高さとなるため、地域によっては新たに抜本的な避難計画を策定することが必要となってくる。このレベルはレベルIIあるいは最大規模の津波とも呼ばれる。

## 2. 首都圏の今後の津波減災対策

震災後の具体的な作業として全国の都道府県では、過去に作成した津波ハザードマップの再検討を行い、県レベルでの津波被害想定を見直す作業を行った。これまで生起する確率が低いと考えられて防災計画に含まれていなかった地震にも焦点を当て、津波の歴史的検討とともに津波の予測シミュレーションの波源モデルを修正して、来襲する津波の予想波高をより高く設定しなおす必要があった。歴史的な記述が残されていない地域では、ボーリング調査により過去の津波の陸上への氾濫によってもたらされた砂泥の層を発見し、津波の歴史を再構築する調査も行っている。

検討に際しては、日本国全体を見渡して最悪の津波を設定する視点と個々の地域での最悪を設定する視点は異なるということに注意する必要がある。さらに個々の地域でも例えば横浜市、鎌倉市、東京都などに大きな津波を発生させる地震はそれぞれ異なるため、それぞれの地域ごとのシナリオ設定が必要となる。また地震による津波の波源域をどのように設定するかにより、地域に押し寄せる津波の高さは大きく変化することとなる。日本全

体からみれば、東海、東南海、南海地震の三連動型が最大の懸案事項となるが、一方で湘南海岸から見れば明応東海地震(1498年)型津波、慶長地震(1605年)型津波および元禄関東地震(1703年)型津波が、また東京の臨海部にとっては慶長型地震津波と東京湾北部地震津波が関心事となる。

地震の予測のみではなく、津波のシミュレーションにもいくつかの仮定が含まれており、結果として出てくる津波の予測値にはあいまいさが含まれている。地形についても計算機の中ではある程度の粗い地形を用いて算定するためそれぞれの地域の津波の予測値には不確実な要素が含まれている。以上のことから、津波の想定値には不確実な部分が含まれていて、それを理解したうえで想定値を用いる必要があることが解る。避難計画の策定は各市町が行うことになっているが、策定に当たっては、避難場所の選定を地域の特性に応じて適切に行う必要があり、想定値を超える場合についてもシステムの維持ができるように設計する必要もある。津波の想定高さには必ずある程度の不確実性を伴うため、それを踏まえて避難計画を作る必要がある。この場合、市町の置かれた地形条件を場所ごとに分析して、避難場所を安全度に応じて分類して設定することが考えられる。カテゴリーAは絶対に安全な場所で、背後に標高の高い後背地を有する丘である。田老地区の避難場所の赤沼山や釜石市の天王山口は、まさにそのような場所である。避難場所の後ろの丘がさらに高くなっているため、まず赤沼山や天王山口に逃げて、さらに津波が来そうな場合にその後ろに逃げていけるため、このような場所がカテゴリーAとなる。カテゴリーBは堅固な7階建て以上の建物か、20m以上の地盤高の丘である。この場合には、津波来襲時には孤立する可能性があり、カテゴリーBとなる。カテゴリーCは堅固な4階建て以上の建

図3 南三陸の避難ビル



物である。これは、場合によって水位が屋上を超える可能性があるが、ほかに津波来襲時までには到達できる避難場所がなければ逃げ込むという場所としておく。東北津波の場合には、南三陸町の4階建ての津波避難ビル(図3)の屋上の床から71cmの高さまで浸水した例があるので、注意が必要である。信頼度のカテゴリでABCのランクを付け、来襲する可能性のある津波ごとに何人が時間内にそこに到達できるかという観点から避難場所の整理を行い、必要な場合に津波避難タワーなどの施設を新たに造っていく必要がある。

### 3. 東京湾の津波

東北津波以前には、東京湾については湾外から来襲する津波として元禄関東地震(湾内の津波高さ2m程度)、湾内で起きる津波として東京湾北部地震(津波高さ1m程度)が考えられていた。この程度の津波では、すでに建設されている高潮防潮堤を越えることはないため、津波の被害については比較的軽視されてきた。ところが、地震による津波の波源域

をどのように設定するかにより、地域に押し寄せる津波の高さは大きく変化することとなるため、東北での大津波の発生を受けて、首都圏でも地域ごとに大きな津波の来襲について再検討することとなった。相模湾では元禄関東地震型津波、慶長地震型津波、明応東海地震型津波が大きな被害をもたらすものとなる。一方、東京の臨海部にとってはそれらと共に東京湾北部(直下型)地震が、外房では宝永地震(1707年)型津波などが最大の関心事となる。東京湾内については、さらに湾口部で発生する津波として三浦半島断層群と房総半島鴨川低地断層群の連動した場合を加えて検討する必要がある。

東京湾岸では、1)低平地のうち特に古い埋め立て地(例えば川崎市における明治以来の埋め立て地などでは地盤が低く、液状化の対策も行われていない)、2)横浜市の帷子川のように中小河川を遡った津波の氾濫域、3)高潮防潮堤の外の港湾施設のある堤外地、の3つが沿岸域の弱点となっている。また、東京湾内は埋立地で囲まれており、直立した海岸護岸が多いため、津波はこれらの護岸でエ

エネルギーを保存したまま完全反射し、何度も海岸を襲うことになる。その場合、運河として残してある水面の複雑で細かな地形のために波の重合が起これ、さらに水路が次第に細くなることなどにより津波のエネルギーが密度を高め、局所的に津波の高さが高くなる場所が出てくる。湾内に注ぐ中小河川にも津波が遡上して、内陸深くに入り込む通り道となる。さらに埋立地の特性として地盤の液状化、護岸が海方向に水平に移動して陸側が沈下する側方流動などにより地盤沈下が起こった後に津波が来襲することになる。さらに東京湾の場合には防潮堤の外側(堤外地と呼ぶ)に港の施設が集中しており、昼間は働いている人が多数いる。その人たちの避難場所を確保することも重要な課題となっている。さらに直下型の東京湾北部地震の場合には湾岸域の地下に断層があり、その上に構築された防潮堤

や防潮水門は地震時に機能を失う可能性がある。

津波伝播計算の結果(高島・柴山、2012)<sup>4)</sup>では、東京湾内に最も高い波高を生じさせるのは慶長型地震津波であり、**図4**に示すように東京港全体として東京湾平均海面から平均約1.5mの水位上昇が見込まれることが分かった。また、東京湾全体では湾奥より湾口部に近い個所で高い波高が生じることが分かっている。氾濫計算の結果、地震動により堤防や構造物による減災効果が失われたとした場合に東京港沿岸部で氾濫被害が生じる可能性が高い地域を例示すると、堤内地については、品川区東部、北十間川沿西部、堅川沿西部、小名木川沿西部、江東区南部の一部などであり、最大で1mから数十cm程度の浸水深の氾濫がゼロメートル地帯で起こる可能性がある。堤外地においては、品川埠頭、建材埠頭、

図4 最大水位分布図(東京湾平均海面を基準、慶長型地震津波の場合) (高島、柴山2012)

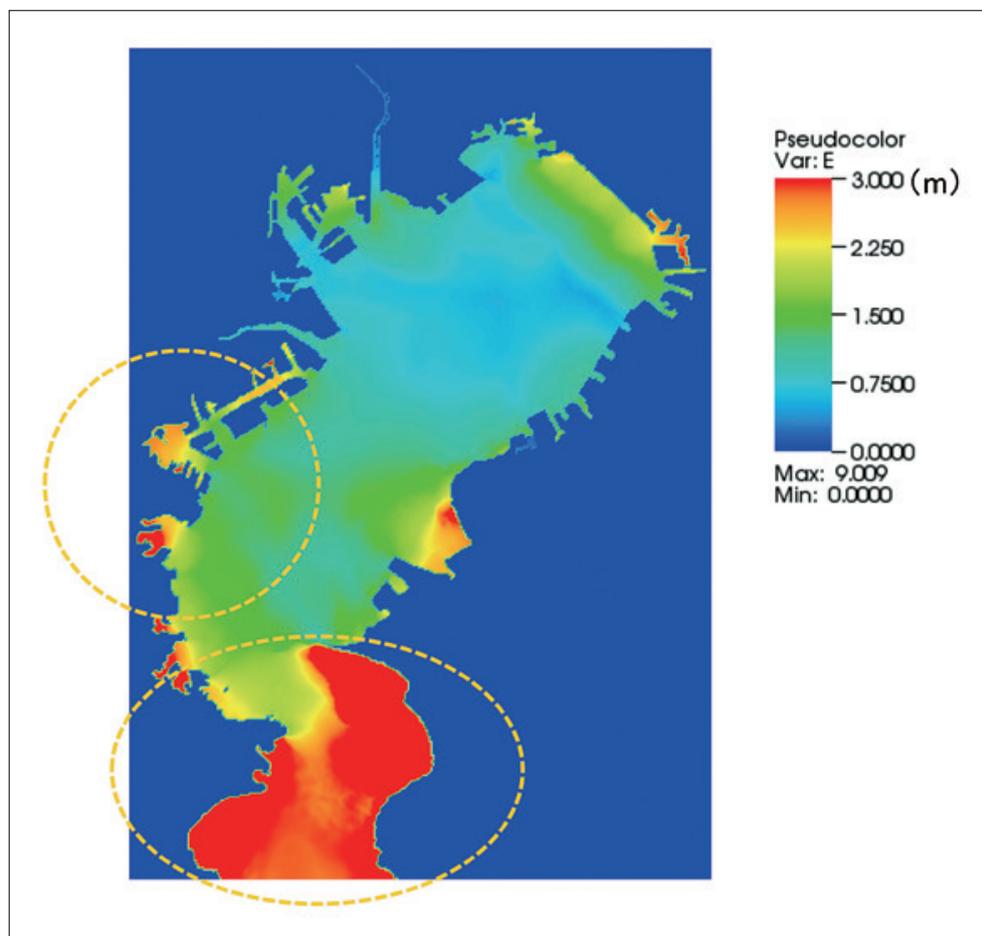


図5 サンディ高潮により浸水したニューヨーク市の地下鉄駅の例



辰巳埠頭、東京木材埠頭、フェリー埠頭、芝浦埠頭、竹芝埠頭、豊海周辺、日の出埠頭などがある。堤外地では、敷地内に置かれた木材やコンテナ、乗用車、機械類などが津波により流出し、周辺に漂流する可能性が考えられる。建材埠頭や辰巳埠頭、東京木材埠頭、日の出埠頭は漂流物が流出するとされる0.5m以上の浸水高が予測されるため、こうした漂流物による被害が生じる可能性がある。

図5は2012年10月に米国ニューヨーク市で発生したサンディ高潮により浸水した地下鉄の入口の写真であるが、東京、横浜などの地下利用密度の高い都市で津波による浸水が起こった場合には地下空間への浸水を阻止する必要もある。東京湾内の津波災害を単独で考えることは適当ではなく、地盤災害、油流出と火災、地下空間への浸水などとの複合災害を考慮した防災計画の検討を行うことが必要である。江東デルタを始めとして、東京の低平地はもともと通常でも高潮防潮堤、高潮水門など構造物で守ることによって臨海域に水が入って来ないように維持しており、これ

らの構造物が地震により機能を失った場合を考える必要がある。構造物のみに頼って守るのではなく、浸水の挙動を予測して、洪水への対応を考えることが大切である。

#### 参考文献

- 1) 柴山知也 (2011) : 3.11 津波で何が起きたか—被害調査と減災戦略、早稲田大学出版会。
- 2) 東北地方太平洋沖地震津波合同調査グループ : 調査結果、<http://www.coastal.jp/tjtj/>。
- 3) 柴山知也・松丸亮・高木泰士・Miguel Esteban・三上貴仁(2011) : 2011年東北地方太平洋沖地震による津波災害の宮城県以南における現地調査、土木学会論文集 B2 (海岸工学), Vol.67, No.3, 1301-1305。
- 4) 高島知行, 柴山知也 (2012) : 東京港における高潮・津波の危険予測、土木学会論文集 B3 (海洋開発), Vol.68, No.2, 1894-1899。

#### しはやま●ともや

1977年東京大学工学部土木工学科を卒業。その後、東京大学助教授、Associate Professor, Asian Institute of Technology, 横浜国立大学教授などを経て、現在は早稲田大学理工学術院教授を務める。横浜国立大学名誉教授の称号と工学博士(東京大学)の学位を有する。専門は土木工学、沿岸域防災で、主な著書に「3.11津波で何が起きたか」(早稲田大学出版部)、「Coastal Processes---Concepts in Coastal Engineering and Their Applications to Multifarious Environments」(World Scientific, 2009)、「建設技術者の倫理と実践-増補改訂版」(丸善、2001)などがある。沿岸防災、津波、高潮に関する学術論文が多数ある。