

## 復興まちづくりにおける津波数値シミュレーションの活用

東北大学災害科学国際研究所

教授 越村 俊一



## 1. はじめに

2011年3月11日、東北地方太平洋沖地震による大津波が発生し、12都道県で死者・行方不明者18,812人（死者：15,866人、行方不明者：2,946人、警察庁平成24年6月）にのぼる被害をもたらした。被災地では復興計画がまとまり、今後どのようにそれを実現していくかが最も重要な課題となる。

復興計画には、高所移転案を含めた新たな津波対策の検討を加えることになる。津波対策の観点からは、ハード対策・ソフト対策・まちづくりの3軸での総合的な津波対策の基本方針に加え、海岸堤防等の海岸保全施設の整備に必要となる設計津波の水位設定の考え方も新たに示された<sup>1)</sup>。

海岸施設の設計高は、土木構造物のライフタイムや経済性を考慮し、百数十年に一度発生する規模の津波に対して設計基準を与えることとなった（津波防護レベル）。次に、それを超えるような千年規模の津波を「津波減災レベル」と呼び、地域の復興計画にも津波対策を盛り込み、このレベルに対応してハード・ソフトのあらゆる減災対策を講じていくことになる。特に低平地における被災地の復興には、土地利用の考え方を改め、津波に強いまちへの転換を果たしていかなければならない。

沿岸部の海岸保全施設の高さ・配置、またこれからの都市計画および土地利用計画が、どのように津波に強いまちとして機能しうるかをきちんと評価した上で復興計画を推進していかなければならない。そのためツールとして、数値シミュレーションが極めて重要なものはいままでもない。本稿では、東北地方の復興まちづくりにむけた津波数値シミュレーションの活用とその課題について概説する。

## 2. 津波数値シミュレーション

## (1) 津波伝播・遡上の数値モデル

津波の伝播・遡上の再現には、その領域（沖合・沿岸および浅海域の伝播、陸上での遡上）と分解能（空間・時間）に応じて数値モデルを使い分ける必要がある。いずれにせよ、支配方程式を差分法により離散化する方法が一般的である。例えば、水深50m以上の沖合においては、津波伝播・波高増幅の非線形性はほぼ無視できるから、運動方程式については線形長波理論が支配方程式になる。あるいは、長距離を伝播する津波を再現する際には波数分散性が無視できなくなるので、分散波理論を用いる。津波が浅海域に達し、陸上での遡上を再現する場合には、非線形長波の運動方程式（浅水理論）に底面摩擦項を付加したものをしているのが一般的である。

長波理論の差分法に基づく津波数値計算の場合、座標系と支配方程式を、再現する津波の対象（遠地/近地、外洋伝播/遡上）に応じて適切に選択する必要がある。2011年東北地方太平洋沖地震津波の場合、日本近海の津波の再現には直交座標系による非線形長波理論式を、太平洋全体への外洋伝播を含めた津波を再現する場合には球面座標系による分散波理論式および線形長波理論式が必要である。津波数値解析手法における支配方程式や格子間隔の選択、その精度の検証についての議論は、紙数の関係上ここでは割愛するが、参考文献2),3)を参照されたい。

正確な津波の予測・再現には、方程式系の適切な選択、津波初期水位分布（断層運動による海底地盤変動）、詳細な海底・陸上地形の情報と計算の分解能、土地利用状況等による陸上の津波抵抗則の適切なモデル化等が重要な要件となる。検証には、GPS等により観

測された地盤変動（陸上・海底），沖合，沿岸の津波観測波形，現地調査による津波高（浸水高・遡上高，浸水深，浸水範囲），津波来襲状況の映像から得られる浸水深や流速等の情報を用いる。特に，検証データに何を利用したかにより，津波発生モデルが異なることに注意が必要である。

## (2) 津波浸水域の調査<sup>4)</sup>

筆者らの研究グループは，津波発生直後から，浸水範囲の把握を第一義の目的として現地調査を実施した。津波被災地において，漂流物の漂着地点を把握，または現地における聞き取り調査により，津波の浸水限界点の緯度・経度・標高値の高精度 GPS 測位を実施した。調査は 2011 年 3 月 26 日から開始し，宮城県において計約 300 地点における浸水限界点の測定を行った。

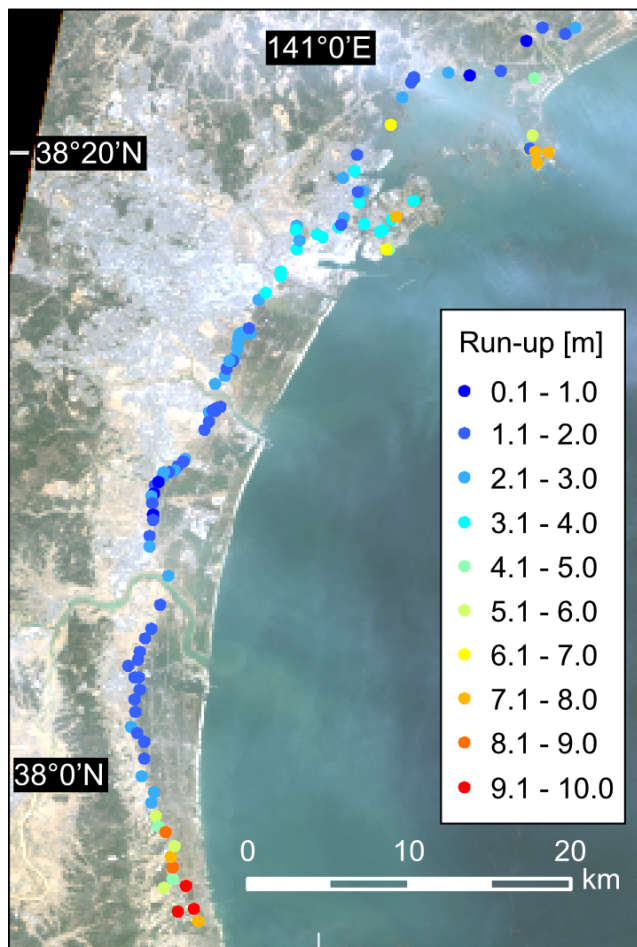


図 1 津波浸水限界および遡上高の測定結果

GPS 測位は，まず調査地域内に私設基準点を設置し，スタティック測位（測位方法の一つ）後に遠方の電子基準点を用いて基線解析を実施し，私設基準点の正確な座標を得た。その後調査者が移動局を持って浸水限界点のスタティック測位を行い，私設基準点のデータを利用して解析・補正した。図 1 に結果を示す。

## 3. 建物の脆弱性と津波被害関数

### (1) 津波被害関数

津波浸水域内の家屋の流失状況を俯瞰して見ることは極めて重要である。建物被害状況と，防波堤・防潮堤等の海岸施設の被害状況と関連づけることで，海岸施設がどの程度被害軽減に寄与したかなど，これまでの津波防災対策の検証を行う必要がある。また，海岸の地形，標高や土地利用などの様々な地理的条件や現地調査・シミュレーションによって得られる津波の流体力学的な諸量（浸水深や流速等）と関連づけ，地域が持つ津波に対する脆弱性を明らかにする必要がある。さらに，復興まちづくりにあたっては，津波被害の実態や地域の脆弱性をきちんと理解し，それらを教訓としてまちづくりに反映させなければならない。このような目的のもと，我々は国土地理院が公開している航空写真を用いて建物の流失状況の判読を行った。図 2 にその一例を示す<sup>5)</sup>。

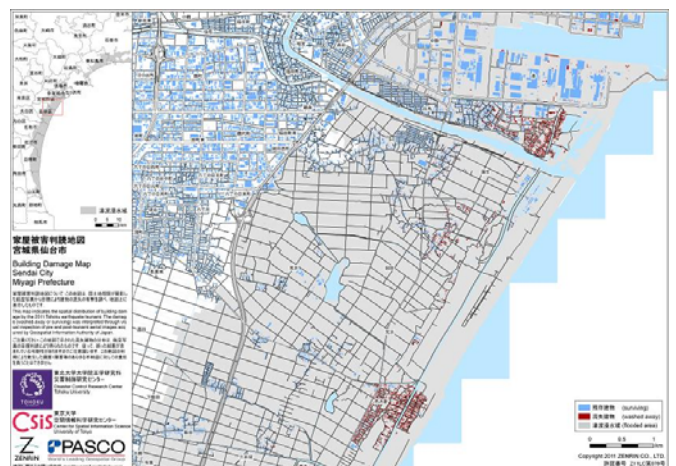


図 2 航空写真の判読による建物被害地図

さらに、津波による建物被害の情報（流失の有無）と、浸水深等の現地調査の情報を統合処理することにより、津波被害関数として建物の脆弱性を知ることができる。津波被害関数とは、建物の被害程度（ここでは流失率）を流体力学的諸量の関数として表現したものである<sup>6)</sup>。図3に示すのは、2011年東北地方太平洋沖地震津波の宮城県における家屋被害関数の例であり、建物の流失率を浸水深に対してまとめたものである。建物にとって、流失する危険性が増すのは浸水深2mからであり、6m浸かると殆どの建物が流失してしまうことが、今次津波における被害実態（建物の脆弱性）として明らかになった。

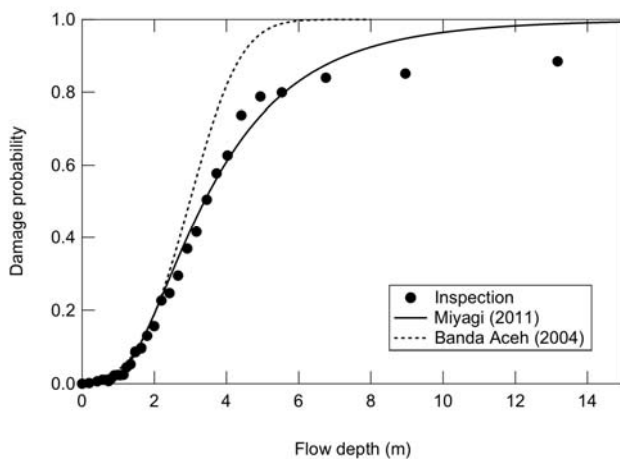


図3 宮城県における津波被害関数

## (2) すまいの再建

大津波を海岸の防潮堤や防波堤だけで防ぐのは不可能である。津波被害関数から考えると、これからの海岸防護施設や多重防護、移転等によるまちづくりにおいて、居住地が2m以上浸かることのないように、その配置などを考える必要がある。あるいは、これからは2m以上浸水する危険性のある場所には、戸建ての住宅は建てないようにする。また、浸水深2m以下になる場所で住宅再建をする場合には、津波によって流されにくい、浮きにくい構造にすることが必要である。そんな家屋があるのかということになるが、私は豪雪地帯の住宅の姿にヒントがあると考えている。

たとえば、新潟県では、特別豪雪地帯等における住

宅で、積雪時における出入りの確保等のため床下部分を通常より高くした住宅（高床式住宅という）に係る床面積及び階の算定の特例基準があり、高床式の構造が県の条例で認められている。具体的には、床下部分の高さが1.8m以下で、一体の鉄筋コンクリート造、鉄骨造（軽量鉄骨造を除く）とした場合、その部分は建築物の床面積や階数の算定において除くことができるのである。

豪雪地帯の家屋を参考に、津波に強い家屋の要件を考えると、基礎部分（およそ2m近くあることが望ましい）を頑丈なコンクリート造にして、その上に家屋部分を建てればよい。このような構造の住宅建設を推奨し、インセンティブを高めるための支援を継続することが重要である。また、この考え方は事前復興にも適用できる。被災地の建物再建だけでなく、今後の津波浸水の危険がある地域においても実現されることを強く望みたい。被害が発生してから再建よりも、被害が発生する前の再建（事前復興）の方が、減災の面でも経済性の面においても合理的なのは明らかなのだから。

## 4. 津波に強いまちへの工学的検討

### (1) 津波に強いまちの要件とは

平野部での広範囲にわたる浸水や地盤沈下により、沿岸のまちは依然壊滅的な状況である。安全であるということに加えて、安心して住み続けることができるまちをどのようにしてつくるかということが、これからの新しいまちづくりの課題である。さらに、今回のような、再来周期が数百年から千年規模の津波に対しては、海岸の防潮堤や防波堤だけで防ぐということは不可能である。土木構造物の寿命や維持管理の問題を考えると、百数十年確率規模の津波を基準として施設高を考えるのが現実的である。

したがって、あらゆる規模の津波から命や住まいを津波から守るために、海岸での防潮堤・防波堤だけでなく、その背後の緑地や防災林、さらに幹線道路や鉄道などの交通施設を盛土構造として堤防機能を付与し、居住エリアなどのまちの配置も考え直すことで

「多重」の防御を図り、災害を完全に抑止することは出来ないという考えの基に被害を最少化する減災を指向したまちづくりの考え方が重要である。そのために、津波防護施設の計画や新しいまちづくり案（土地利用案）による地形モデルを作成して、コンピュータシミュレーションによって、それらの効果を確認する必要がある。

(2) 数値シミュレーションによる復興計画の評価

まず、2011年東北地方太平洋沖地震津波の再現をして、数値シミュレーションの妥当性を評価する。図4に示すのは、仙台市における津波浸水計算（今次津波の再現）の結果であり、浸水深の空間分布を示したものである。現地調査で得られた浸水深・浸水高分布、また国土地理院による浸水範囲の調査結果等で検証を行った。

図5は、仙台市の復興計画における、沿岸部の防潮堤整備（7.2m）、県道塩釜・亘理線の嵩上げ（6m）を想定して実施した今次津波を想定したシミュレーションの結果（最大浸水深）である。防潮堤・防波堤の整備や道路の嵩上げにより、今次津波に対して、特に県道から西側で浸水範囲の減少、浸水深の減勢効果が期待できる。しかしながら、津波を封じ込めることは依然不可能であり、さらに県道の東側は津波が反射することで浸水深が増加している。東側の土地利用方策と、さらにその地域で活動する人々の生存空間や避難経路を確保するための方策が準備できるかどうか重要な要件になるだろう。

道路の嵩上げに限らず、多重防御による被害軽減効果を明らかにし、その被害軽減効果やメンテナンスも含めた費用対効果についての社会的合意を得る必要がある。浸水面積、浸水域内の人口、流失家屋の減少効果などを評価尺度にして定量的な検討が必要である。さらに、防御施設は越流することを想定して、裏法尻（施設裏の法面と地盤との接合部）をコンクリートやアスファルトで覆う（盛土のすぐ後に道路があった場合には、盛土部の被害が減少しているという事実がある）などの対策により粘り強い構造にできるかどうか重要である。

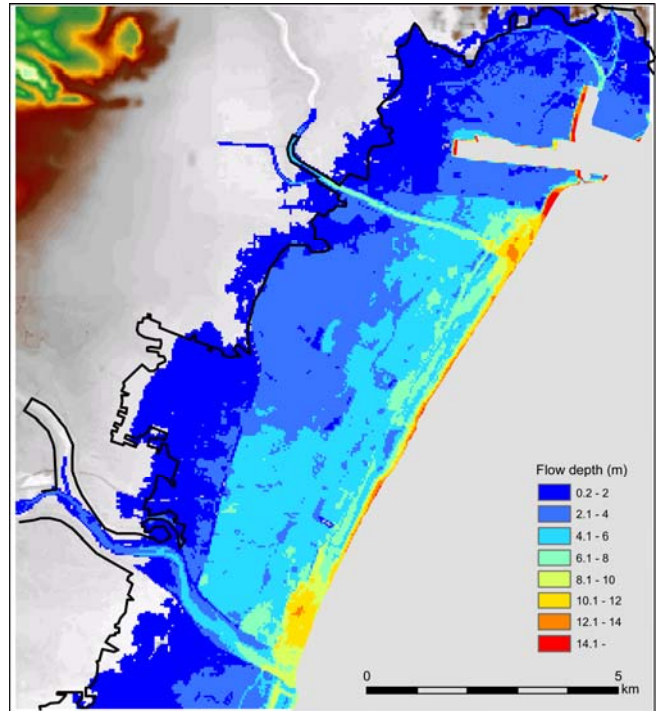


図4 2011年東北地方太平洋沖地震津波の仙台市における再現シミュレーションの結果（津波浸水深と浸水範囲）。図中の実線は、国土地理院により報告された浸水限界のライン。

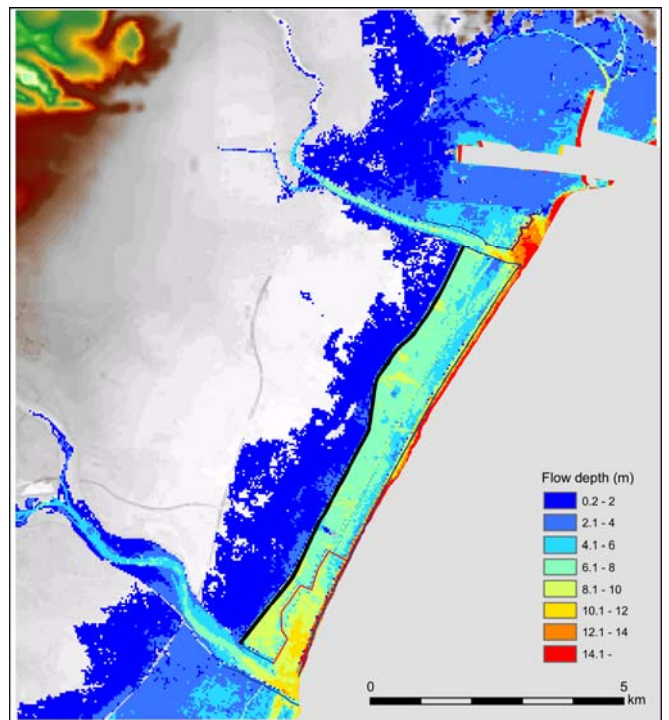


図5 仙台市の防潮堤整備と県道嵩上げによる津波浸水域の軽減効果のシミュレーション結果。図中の太い実線は嵩上げする県道の線形（計画中のもの）。

## 5. まとめ

津波被災地の復興計画における津波数値シミュレーションの活用について概説した。津波の陸上における振る舞いは複雑である。復興計画において描かれる新しいまちが「津波に強いまち」として成立しうるかどうかを、数値シミュレーションを用いて評価する必要がある。

たとえば、沿岸部の低平地を緑地公園化して盛土し、鎮魂の場とすると同時に、津波防護施設の機能を持たせて、さらに一次避難場所として有効な丘を整備する案が出されている。この考え方自体には、筆者も賛同する部分はあるが、この案が工学的に成立するかを見極める必要がある。津波というのは、いったん陸に上がると洪水のような非常に強い流れとなる。したがって、津波の防御機能を期待される緑地公園や丘に求められる性能というのは、生存空間を確保するためにしっかりとした高さをもつだけではなく、強い流れにも浸食されない、津波が駆け上がりにくい、津波の流れに逆らわない配置や構造が必要である。想定したまちづくり案や海岸防護施設の配置に基づいて数値シミュレーションを実施し、復興計画におけるゾーニングおよびリスク評価を実施した上で地域での合意を図る必要がある。

今後、津波リスクの高い地域においては、事前復興の有効性、合理性を再認識し、実現に向けて努力すべきである。東日本大震災の被害額は16兆円から25兆円と試算され、復興予算には19兆円が投じられるが、今後南海トラフで発生しうる巨大地震津波災害の被害額はこれを優に超えるだろう。事前復興を実現することが、尊い人命を救い、被害を軽減できるならば、その一步を踏み出してこそ、東日本大震災の教訓を真に活かすことができると言えるのである。

## 注

本論文は、「静電気学会誌」36, 2, 2012, 78-83) に寄稿した論文「防災・減災における津波数値シミュレーションの活用」を元に加筆したものである。

## 謝辞

本研究は、科学研究費補助金、および東北大学運営交付金(特別)東北太平洋沿岸における緊急津波実態調査の補助を受けて実施した。また、建物被害の判読には国土地理院撮影の航空写真を利用させて頂いた。住宅地図は、東京大学・空間情報科学研究センターとの共同研究の一環で、株式会社ゼンリンから提供いただいた。ここに記して謝意を表する。

## 参考文献

- 1) 国土交通省、「設計津波の水位の設定方法等」について ～復興計画策定の基礎となる海岸堤防の高さ決定の基準～ (2011)
- 2) たとえば佐竹健治：水工学に関する夏期研修会講義集, 42, 土木学会, B-7-1-20 (2006)
- 3) 高橋智幸：水工学に関する夏期研修会講義集, 38, 土木学会, B-5-1-20 (2002)
- 4) 東北大学大学院工学研究科災害制御研究センター：東北地方太平洋沖地震津波情報共有プラットフォーム(2011), <http://www.tohoku-tsunami.jp>
- 5) 越村俊一, 郷右近英臣, 柴山明寛, 今村文彦：2011年東北地方太平洋沖地震津波による建物被害地図 (2011) [http://www.tsunami.civil.tohoku.ac.jp/tohoku2011/mapping\\_damage.html](http://www.tsunami.civil.tohoku.ac.jp/tohoku2011/mapping_damage.html)
- 6) 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)