

沿岸域の津波に対する耐性を高めるための研究

沿岸海洋・防災研究部長

鈴木 武

沿岸域の津波に対する耐性を高めるための研究

沿岸海洋・防災研究部長 鈴木 武

1. はじめに

内閣府に設置された「南海トラフの巨大地震モデル研究会」は発生しうる最大クラスの地震・津波（南海トラフでの巨大地震）の規模や強度を推計し（例えば、図-1.1），平成24年8月に発表した。その中で津波について，最大津波高34m，20mの津波で到達時間は7～20分，浸水面積は最大10万haと推計した。また中央防災会議はそれらの推計結果を基にそれらによる被害額を推計（平成25年3月）し，資産等への被害を97.6～169.5兆円，経済活動への影響を35.1～50.8兆円とした。それらを踏まえて中央防災会議は「南海トラフ巨大地震対策について（最終報告）」を平成25年5月にとりまとめ，その中で津波についての基本的な考え方を「津波対策の目標は津波から「命を守る」ことであり，海岸保全施設等の整備・維持を前提として，住民等の避難を軸に，情報伝達体制，避難場所，避難施設，避難路を整備するとともに，最も重要なことは，一人ひとりが主体的に迅速に適切に避難することであり，防災教育，避難訓練，災害時要援護者支援等の総合的な対策を推進する必要がある。」などと整理した。また，海岸保全施設等の整備については「海岸堤防等については，海岸管理者が設定する「発生頻度は比較的高く，津波高は低いものの大きな被害をもたらす津波」を基本として，環境保全や費用対効果等を考慮しつつその整備が行われるものである。」，「最新の知見に基づいたレベル1の津波に対応できるよう，海岸堤防等について計画を見直し，必要に応じて海岸堤防等の整備を行う必要がある。」などとした。平成23年3月に東北地方太平洋沖地震津波（以下、東日本大震災）による大規模な被害を経験した日本社会は，中央防災会議の最終報告を重く受け止め，沿岸域における津波に対する耐性をどのように高めていくかについて関心を寄せている。

中央防災会議の最終報告を受け，国土交通省も南海トラフ巨大地震に対する取り組みを強化し，「国土交通省南海トラフ巨大地震対策計画中間とりまとめ」を平成25年8月に公表した。その中間とりまとめは「南海トラフ巨大地震による国家的な危機に備えるべく，広域の見地や現地の現実感を重視しながら，国土交通省の総力を挙げて取り組むべきリアリティのある対策」をまとめたものである。中間とりまとめをまとめるにあたり国土交通省は「駿河湾沿岸や紀伊半島沿岸等のようなトラフ軸近傍では地震発生の数分後には5mを超える津波が襲来する。関東から九州の太平洋沿岸にかけて広

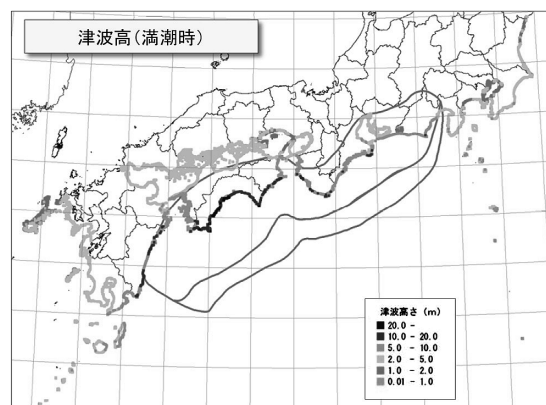


図-1.1 南海トラフ巨大地震による津波高の例¹⁾

範囲にわたる沿岸域に巨大な津波が来襲し、地域によっては 30m を超える巨大な津波が来襲する。」ことを前提においた。

中央防災会議の最終報告にもあるように、津波への備えは、被害の発生を抑える施設による防御を一定水準までしっかり行うことと、人命を守るための避難の実行と実効を確保することが重要である。それらを技術面から支えるために沿岸海洋・防災研究部で取り組んでいる①胸壁の耐津波性能の向上のための調査分析、②船舶の被害を軽減するための調査分析、③海洋レーダーによる津波計測のための研究、④津波避難シミュレーションの研究について研究の内容を紹介する。

2. 東日本大震災における胸壁の被災の特徴

2. 1 東日本大震災による胸壁の被災

平成 23 年 3 月 11 日に発生した東日本大震災は、2 万人近くの死者・行方不明者が出る甚大な被害をもたらした。とくに地震によって引き起こされた津波は、すさまじい破壊力をもって沿岸に押し寄せた。今回の震災による死者の 9 割は水死であったと言われており、津波に対する沿岸で暮らし活動する人々の安全を確保することが重要な課題となっている。

堤防、護岸、胸壁等の海岸保全施設の多くが津波により被災した。その原因は、堤体に作用する海水の大きな水平力に加えて、天端を越流した津波が堤体背後で強い流れとなり背後地盤を洗掘したり、引き波時の強い戻り流れが作用したりすることにより、堤体の安定性を低下させたことにあると考えられている（写真-2.1 及び図-2.1～2.2）。これまでの設計では堤体天端の越流を許していないため、設計の考え方を修正する必要性が生じた。



(a) 堤体が陸側に倒壊した事例
(大船渡港海岸茶屋前地区)



(b) 海側が洗掘された事例
(釜石港海岸須賀地区)

写真-2.1 東日本大震災により被災した海岸保全施設（胸壁）²⁾

これに対して中央防災会議の「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」は平成 23 年 9 月 29 日に報告³⁾を公表し、今後は比較的頻度の高い一定

程度の津波に対して海岸保全施設等を整備していくこと、そして設計対象の津波高を超えた場合でも施設の効果が粘り強く発揮できるような構造物の技術開発を進め、整備していくことを求めた。

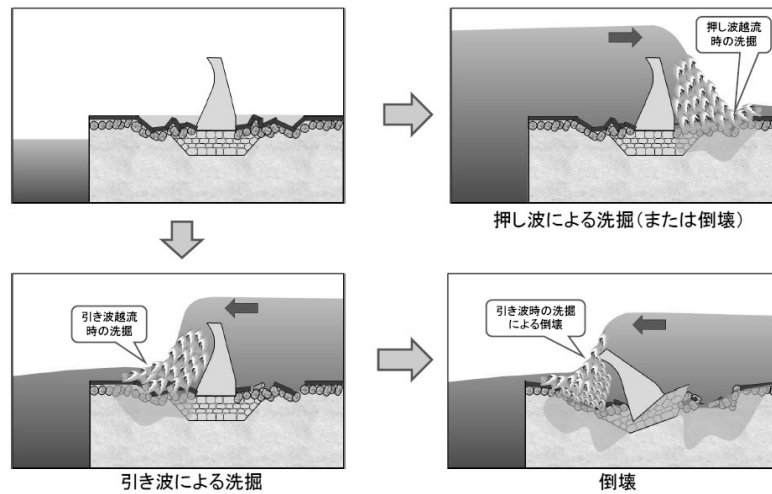
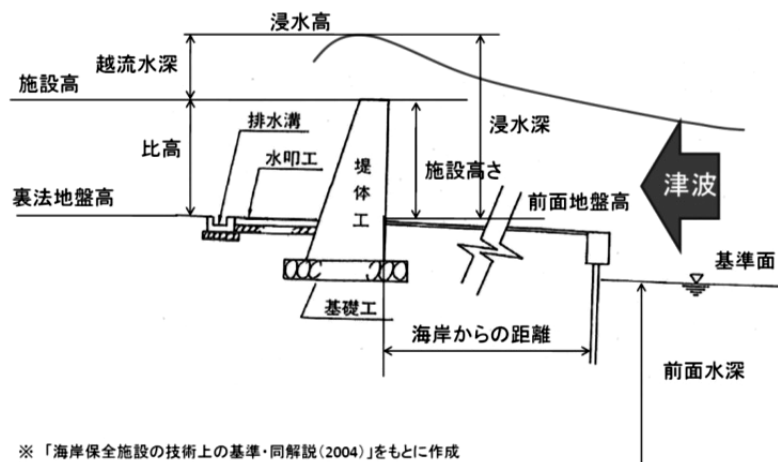


図-2.1 胸壁の被災メカニズム³⁾

専門調査会の報告を踏まえて、海岸4省庁は「海岸における津波対策検討委員会」の提言として、平成23年11月に「平成23年東北地方太平洋沖地震及び津波により被災した海岸堤防等の復旧に関する基本的な考え方」⁴⁾を公表し、一般海岸で代表的な構造形式である海岸堤防等について「粘り強い構造」の考え方を示した。

港湾や漁港では、海岸線に様々な施設が存在し、利用の面から海岸線直近に堤防、護岸等を設置することが困難な場合が多いため、胸壁を設置することが多い(図-2.2)。しかし胸壁については被災やその対策についての知見が十分に得られておらず、胸壁に関する被災情報を収集し、整理するとともに、それらを踏まえた効果的な対策を検討することが求められている。



※「海岸保全施設の技術上の基準・同解説(2004)」をもとに作成

図-2.2 胸壁の概要

2. 2 胸壁の被災の特徴とその要因

東日本大震災により被災した胸壁について、被災の特徴とその要因を整理した⁵⁾。調査の対象は、岩手県、宮城県の胸壁が設置されている港湾（岩手県4港、宮城県4港）および漁港（岩手県30港、宮城県29港）に設置されている海岸保全施設である。港湾における胸壁の被災事例が少なかつたため、漁港の被災事例を加えている。分析には自治体等が実施した被災状況調査のデータを収集して用いた。対象とした海岸保全施設の延長の合計は37.9kmである。

まず胸壁の被災パターン別に施設延長の割合を示す(図-2.3)。被災ありとされた施設延長の割合は約1/4(24.9%)であり、大規模な被災(=移動及び転倒)に限ると1割以下(9.1%)である。これは、胸壁は延長が数百mから数kmの規模があり、コンクリート構造の堤体であるため、1箇所の堤体が移動・転倒した場合に周辺に与える影響が、盛土構造の堤防と比べて限定的であるためと考えられる。

被災状況の平面的な分布(図-2.4)を見ると、胸壁の延長の一部分、構造的に弱い部分や防波堤の開口部、胸壁の隅角部など津波高さが増大する箇所で被災していることがわかる。堤体の移動・転倒により開口した部分に向かって流れが集中するため、堤体に沿って周辺の地盤に激しい洗掘の跡がみられている。このため、周辺施設への被災の拡大を防ぐためには洗掘対策が重要と考えられる。

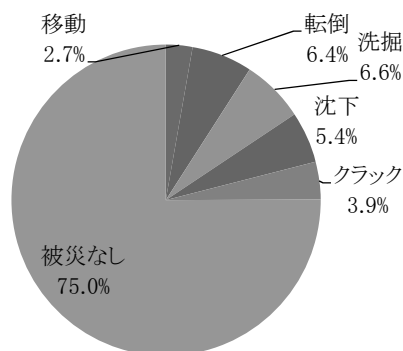
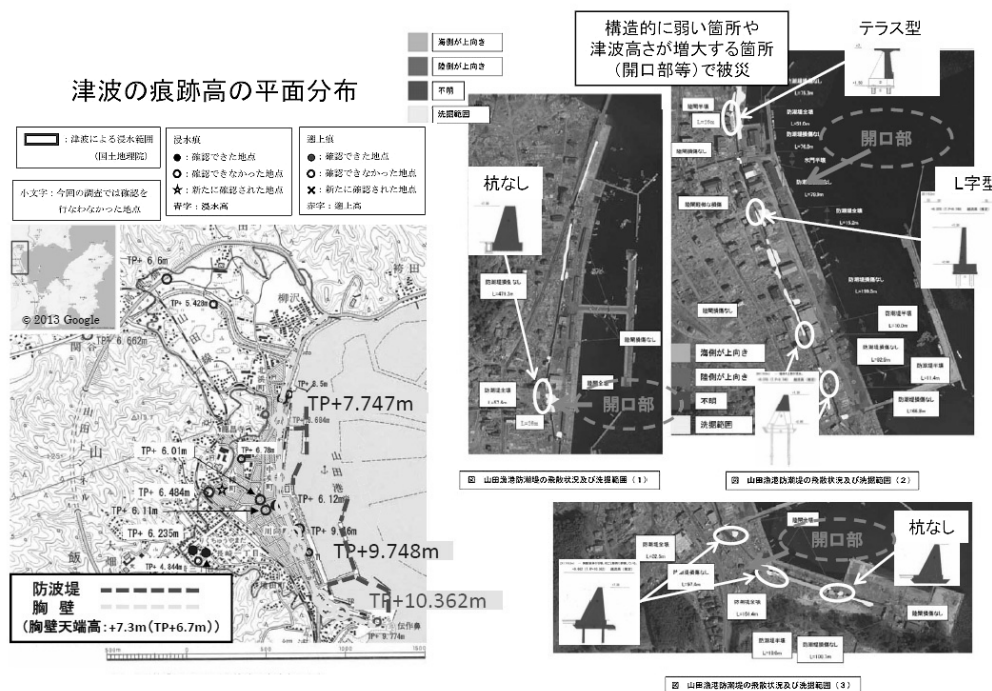


図-2.3 被災パターン別の施設延長の割合



2. 3 胸壁の構造条件が被災に与える影響

被災拡大の要因と考えられる洗掘は、堤体の天端を越える流れが堤体背後の地盤に打ち付けられることにより発生する。図-2.5 は比高と越流水深の変化に対する被災の発生状況を示している。比高は $\{(越流水深) + (比高)\}$ で無次元化し、越流が地盤に落下する高さを表している。比高が大きくなると、越流水深が小さな場合でも被災しており、越流の高さが大きくなることにより洗掘等が発生しやすくなっていると考えられる。

図-2.6 は海岸線からの距離と浸水深の関係を示している。浸水深は各施設に入射した津波痕跡高さの最大値を表している。海岸線からの距離による被災傾向の差は認められない。国土交通省住宅局⁶⁾は津波による建築物の被災事例を分析し、堤防や前面の建物等による軽減効果が見込まれる場合のうち海岸等からの距離が離れている場合（500m 以遠）

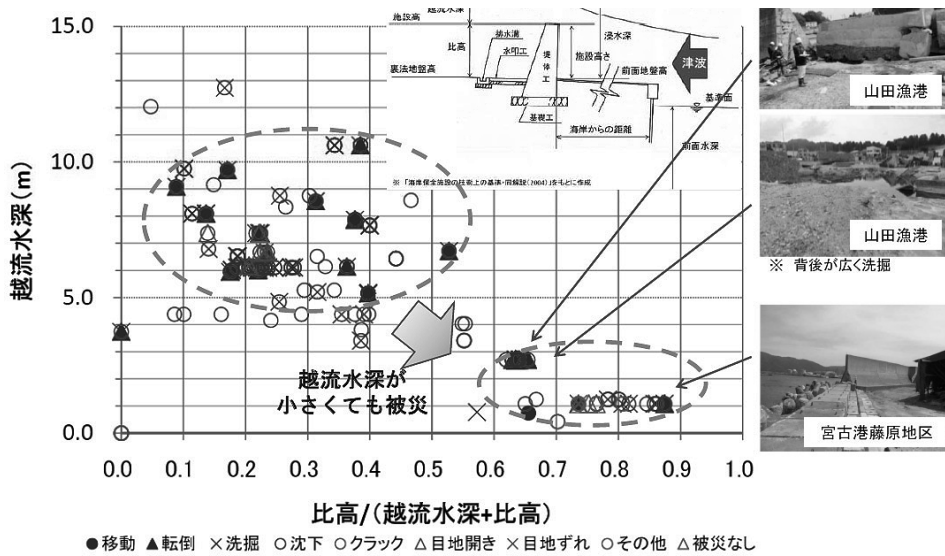


図-2.5 比高と越流水深の関係⁵⁾

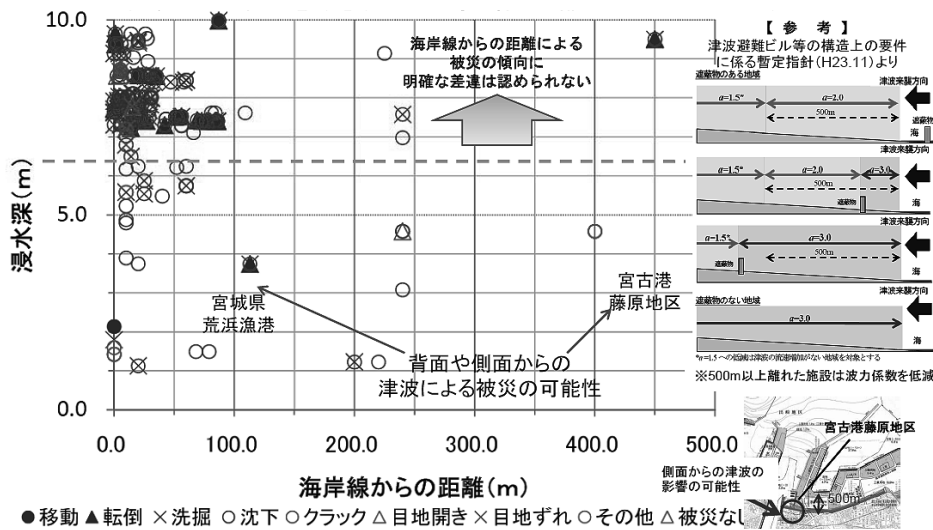


図-2.6 海岸線からの距離と浸水深の関係^{5),6)}

は津波荷重が低減できるとしている。調査対象とした胸壁は、沖合に防波堤が設置されているもののそのほとんどは海岸線から 100m 以内にあり、津波波力の低減が期待できないと考えられる。

また、海岸線から 10m 以内に設置された施設では浸水深が小さくても被災する場合があります。前面の護岸や岸壁等を通過する際の急激な水深の変化により衝撃的な波力が作用していることが考えられる。

2. 4 胸壁の構造上の脆弱性・冗長性と粘り強さについて

防波堤の耐津波設計ガイドライン⁷⁾は、設計で対象とする津波の水準を超える津波（以下、設計津波を超える津波と呼ぶ）が来襲する場合であっても、津波の波力や越流等により防波堤の機能が可能な限り損なわれないように付加的に対策を施し、津波に対して倒壊しにくい「粘り強い構造」を目指すとしている。粘り強い構造を目指すためには、津波が来襲した場合に堤体のどの分からだのどのようなメカニズムで破壊するかを把握し、これを構造上の脆弱性として評価し、対策を行うことが有効である。また、堤体の構造上の冗長性を把握し、設計津波を超える津波が来襲した際の余裕代とすることも有効である。

海岸線に沿って整備される海岸保全施設は延長が長く、一度被災すると復旧に多大な時間と費用を要する。また、被災調査や維持管理の点検においても多大な労力を求められるため、整備・維持管理の効率化が求められている。このため、被災事例にもとづき胸壁の構造のもつ脆弱性や冗長性を抽出し、復旧や点検調査の効率化に向けた課題について評価・検討を行うことが重要である。

胸壁の構造上の脆弱性の代表例として越流に対する脆弱性があげられ、越流の結果として洗掘による堤体の倒壊が発生している。具体的には、2. 1 で示したように、設計津波を超える津波が来襲する場合、胸壁の天端高を超えて流下する越流により背後の地盤が大きく洗掘し、堤体の転倒に至った事例が見られる。この対策として水たたき部の舗装や堤体と水たたき部、排水溝の間隙をなくすことが考えられる。

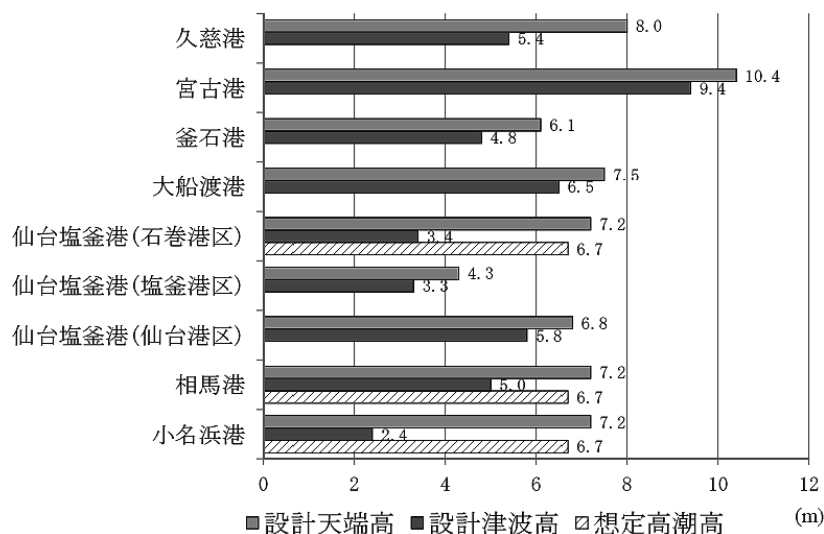


図-2.7 東北3県の各港湾の設計波高

胸壁の構造上の冗長性の代表例として、設計天端高の設定時の冗長性の確保があげられる。図-2.7は、東北3県の主要な港湾における今回の津波を受けた海岸堤防の設計天端高を示す。設計津波は発生頻度の高い津波もしくは既往津波である。石巻港、相馬港、小名浜港では高潮時の潮位により設計天端高が決まっており、設計津波高との差は1.7m～4.3mである。図-2.8は、各港に設置されている単塊型の胸壁について、設計津波に対する安全率を試算した値である。設計津波高と設計天端高の差分だけ設計波を超える津波に対する冗長性が確保される。ただし天端高を高くすると、同じ設計津波高に対して壁体断面が縦長になるため、転倒に対する脆弱性が増加する。

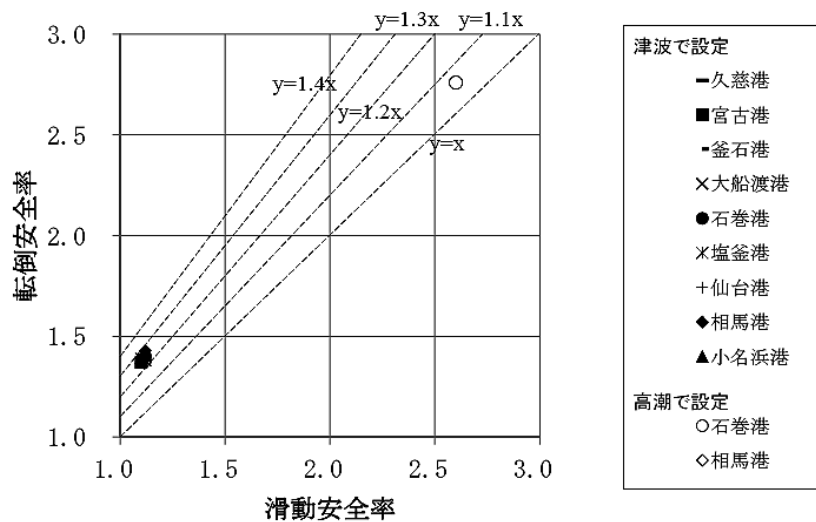


図-2.8 天端高の余裕による安全率の変化⁸⁾

2. 5 胸壁の更新及び点検診断、維持補修の効率化

胸壁等の海岸保全施設の多くは築造後長い年数を経て老朽化が進行し、維持管理が重要になっている。日本の投資余力の低下を考慮するならば、海岸保全施設の耐津波性能を高めていく際に長期的視点に立った計画的な取り組みが重要である。

3. 東日本大震災での港内船舶の被害

平成23年3月の東北地方太平洋沖地震津波によって、プレジャーボート、漁船をはじめ、従来は津波に対して比較的安全と考えられていた大型船舶にも甚大な被害が生じた。具体的には、津波による陸上への乗り上げ、引き波による水位低下が原因と考えられる座礁、また流れによる係留索の破断、沈没等の各形態に代表される被害が生じている。このため、各種の文献調査、港湾管理者からの在港船舶に関する情報収集、船舶所有会社等への聞き取り調査などを行い、船舶被害の実態を整理した。また、各港湾に来襲した津波諸元と船舶被害との関係を調べ、津波に対する港内船舶の安全性に関する目安を把握した。

3. 1 被災船舶の実態調査

平成23年3月の東北地方太平洋沖地震の発生時に東北地方及び関東地方太平洋側の主要港湾に在泊していた大型船舶120隻について、津波時にどのような状態にあったかを調査した。その結果を図-3.1に示す。57%の船舶が港外に退避し、残りの43%が港内に残った。また船舶の被害状況について調べたところ、全体の内60%に被害がなかったものの、座礁や乗り上げ被害など自力での航行が不可能になった船舶が全体の20%であった。また港外へ退避した船舶は被害率12%程度であったが、港内に残ったものは約80%が何らかの被害にあっていた。

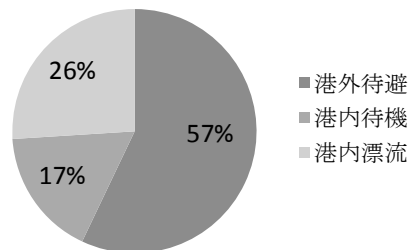


図-3.1 津波時の港内船舶の動き

3. 2 津波諸元と船舶被害との関係

津波高さと船舶被害との関係、津波到達までの時間と船舶被害との関係、また船舶係留地点での津波高さ、津波流速と船舶被害との関係についてとりまとめた。漁船等の小型船舶について津波高さと被害との関係を明らかにした事例はいくつかあるが、大型船舶についてそれらを明らかにした事例は見当たらない。とりまとめの結果は、基本的に津波高さが大きくなるほど津波による船舶の被害も多く発生し、津波到達までの時間が長いほど被災船舶が少なくなるという傾向を示していた。20GT以上の船舶が係留されていた地点での津波高さと津波流速の計算値を用いて、船舶被害とそれらの関係を整理したものを図-3.2に示す。船舶の係留場所の津波の最大波高が4m以上、最大流速が4m/s以上の領域で船舶の被害が大きくなっている。

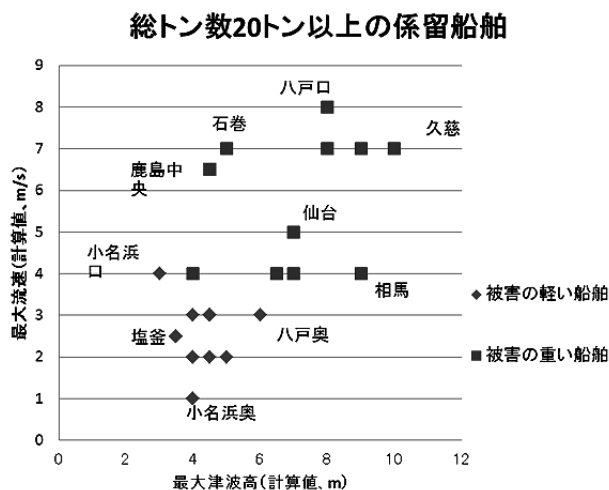


図-3.2 津波諸元と船舶被害の関係

3. 3 船舶の状況に関する実態調査

津波来襲時に個別の船舶がどのようにして津波に関する情報を入手したか、また何を根拠として港外退避等の行動に移ったかを、文献調査やヒアリング等によって調べた。その結果、海上保安庁から提供される国際VHFを通じて津波情報を入手した船舶がもっとも多く、ついでテレビから津波情報を入手した船舶が多くなっていた。船舶の港外退避等の行動は、船長の判断に基づくものが半数以上であり、危険物バースのバースマスターや旅客

船の運航管理者など、船長経験のある者の判断が避難した船舶の80%近くであった。

3. 4 今後必要となる津波対策

船社等からの聞き取りを行い、船社等が今後必要と考えていた津波対策を把握した。ハード対策としては、防波堤の耐津波化、荷役機械の停電に対処するための非常用電源の設置、船舶の乗員乗客のため避難施設の整備があげられていた。またソフト対策としては、津波対応に不慣れな外国人船員の意識向上、災害経験を伝承するための教材の整備などがあげられていた。

それらの対策を今後順次実施していけば、荷役機械が船舶に引きずられて被害に遭うといった事態を回避することにつながるほか、船舶の港外への早期避難の増加などが期待される。それらの結果、船舶の安全性が向上して津波による港湾活動の停滞が抑えられ、港湾や関連地域での経済被害が軽減されることにつながると考えられる。

4. 海洋レーダーによる津波の計測

東北地方太平洋沖地震によって発生した津波による流速場を日本、米国およびチリ・ドイツの研究グループが海洋レーダーを使ってとらえることに成功した^{9), 10), 11)}。これによりBarrick (1979)¹²⁾以降、多くの研究者によって理論的・数値的に検討されてきた海洋レーダーによる津波検知の可能性¹³⁾が実証された。Hinata ら(2011)⁹⁾は、和歌山市湊地区に設置された短波海洋レーダーの視線方向流速の解析から、津波第1波から第3波までは進行波としての性格が強いこと、それ以降は水道内に副振動が発達していたことを明らかにした。日向ら(2012)¹¹⁾は、和歌山市雑賀崎に設置されているもう1局の視線方向流速も併せて解析することにより、進行波と副振動により駆動された流速場の空間構造について調べた。また、実際の津波計測から明らかになった津波・副振動計測に関する本海洋レーダーシステムの現時点での技術的課題についても報告した。

ここでは、それらの結果を紹介するとともに、レーダーを津波減災に活用するための技術的課題について述べる。

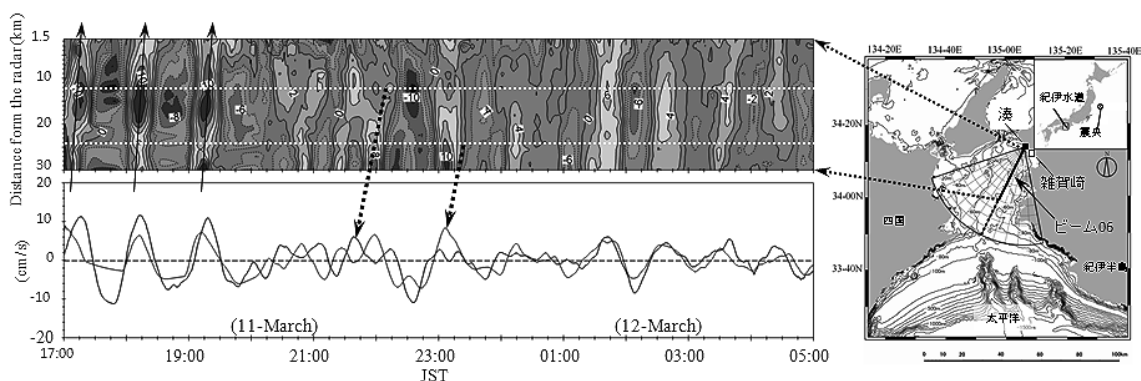


図-4.1 レーダー配置（右）と視線方向流速（ビーム06）の時間変化（左）

4. 1 短波海洋レーダー観測

近畿地方整備局が和歌山市雑賀崎と湊地区に常設している短波海洋レーダーによって取得されたデータを解析に用いた（図-4.1）。各レーダー局は、1本の送信アンテナと8本の受信アンテナから構成されており、各アンテナは3エレメント八木アンテナである。中心周波数は24.515MHzであり、0.5秒の間に24.465MHzから24.565MHzまで周波数を掃引する。レーダー形式は送信と受信を交互に繰り返す送受切替型FMCW（FMICW）である。レーダー前面 $\pm 45^\circ$ の海域の表層流速を距離分解能1.5km、方位分解能 7.5° で計測する。

潮流や吹送流を対象とした通常観測では、30分から1時間毎に512秒間電波を送受信し表層流速を計算する（観測周期30/60分、サンプリング8.5分間）。具体的には128秒間データを1/2区間オーバーラップした7回分のドップラスペクトルをスタッキングし視線方向流速を計算している。今回の津波観測では3月11日17:00から3月14日0:00までの間、観測周期15分、サンプリング10分間の観測モードで計測を実施した。2回分のドップラスペクトルをスタッキングし、1分間隔で視線方向流速を計算した。通常モードからの切替は電話回線を使用して行った。ただし、この間、雑賀崎局は頻繁に欠測が発生したため、3月11日17:00から22:38までの観測結果を解析した。観測時間が短くなることによってSN比が低下し視線方向観測距離は通常観測時の50km程度から30km程度へと小さくなった。後述するように短時間観測によるSN比の低下は今後“津波レーダー”を開発する上での技術的ポイントの一つである。解析には、調和解析によって潮流成分を除去したデータを使用し、データ回収および視線方向流速計算を含む全てのデータ解析はオフラインで行っている。

4. 2 短波海洋レーダー観測結果

図-4.1は湊局の中心ビーム上で計測された視線方向流速のうち10-200分の周期帯を用いて作成した時間-距離ダイヤグラムである。また、レーダーから12kmと24km地点での視線方向流速を抜き出しその下に時系列として示してある。モード切り替え後、最初の2時間で3回の明確な押し波と2回の引き波が沖合から伝搬していることが分かる。押し波の伝搬の様子（コンターラインの傾き）から津波の伝搬速度を見積もると約23m/sとなる。視線方向沿いの平均水深が約50mであるからこの伝搬速度は $(gh)^{1/2}$ にほぼ等しい値である。津波は線形長波の波速で水道内を沖合から岸に向かって概ねビーム6に沿って伝搬したものと考えられる。進行波としての津波は第3波以降急激に減衰する。その後、20:00頃から23:00頃にかけて流速は一見複雑な変動パターンを示す。しかしながら、12km地点と24km地点の時系列を見ると岸近くと沖合の流速が互いに逆位相の形で変動していることに気づく。この変動は水道内に発達した高次の副振動によるものであり、振動の周期は30-40分である。この間、ここでは示さないが和歌山県の海南では約130cmの最大波を21:30頃に記録している。そして、23:00以降から翌朝にかけては岸近くから沖合まで流速変動の位相が揃う形となる。雑賀崎局の欠測によってこの間の流速ベクトルを求めることは出来ないが、おそらくより低次の副振動によってビーム6沿いに一様な流速振動が発達したのではないかと考えられる。このように、津波到達から12時間程度の間が発生した水道内

の流速変動は3つのステージに分類できる．続いて海洋レーダーで観測された進行波および高次の副振動による流速分布について紹介する．

4. 2. 1 津波進行波による流速及び水位分布

第1波から第3波の周期を時系列(図-4.1)から直接見積もると60-70分程度である．そこでこの周期帯を含む40-100分周期帯の流速変動成分をバンドパスフィルタにより抽出し，進行波により駆動された流速場を求めた(図-4.2)．岸側では流速ベクトルは等水深線に直交し，沖側では南北方向の等水深線に沿う形となっている．ただし，沖側ではビーム交差角度が小さく南北方向に計測誤差が生じやすいことに注意が必要である．

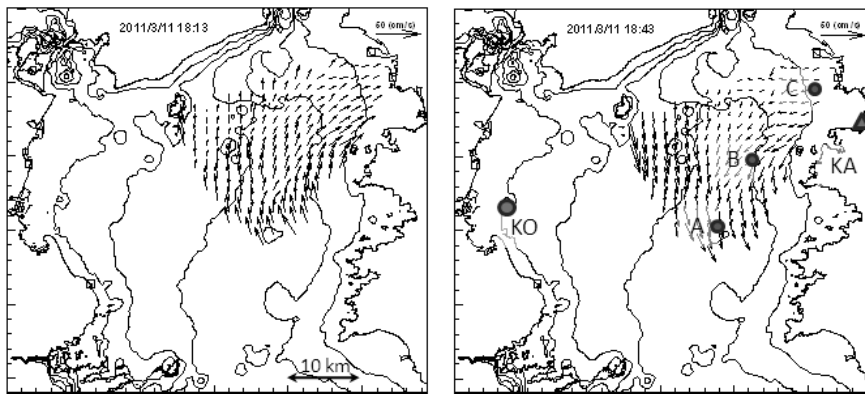


図-4.2 第2波による流速場：押し波(左)，引き波(右)

海洋レーダーで計測された津波流速分布から水位分布を推測できれば津波対策上極めて有益である．そこで，海洋レーダーで計測した第1波から第3波の流速分布を用いて水位分布を推定した(図-4.3)．小松島港沖の海象計(水深20m)で観測された第1波から第3波の波高(60cm程度)は水深に比べて十分小さかったことから，これらの波を線形長波と仮定し $V=C\eta/h$ の関係式を用いて流速から水位に変換した．ここに V は波向き方向の流速成分， η は水位， C は線形長波の波速， h は観測地点の水深である．押し波による最大流速発生時の流向を正の波向きとした．

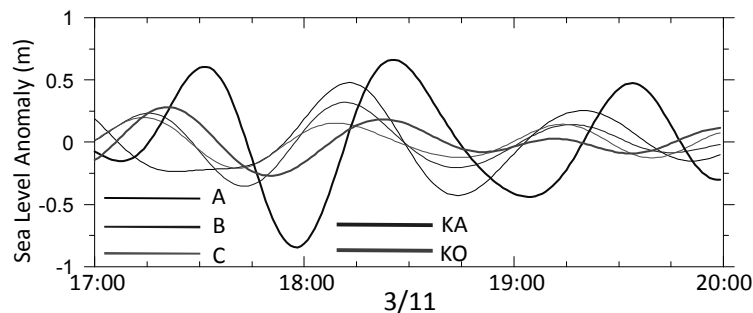


図-4.3 レーダー流速場から推定した水位(図4.2中のA, B, C点)と実測水位(図4.2中のKA, KO)との比較

水位時系列を示した3地点の水深はそれぞれA: 64m, B: 61m, C: 33mである．推定

した振幅の大きさは小松島港沖(KO)での観測結果とほぼ同程度であり、岸に位置する海南(KA)の約半分である。第1波では沖合の地点ほど位相が進んでいるが2波目以降はほぼ同位相となっている。また、C点での位相は海南に比べて約15分程度進んでいる。Cと海南間の線形長波の伝搬時間は平均水深20mとすれば約11分であり推定結果よりも若干短い。この様に、進行波としての性格が強い第1波から第3波による水道内の水位変動を推測し、概ね良好な結果を得た。しかしながら、現時点ではその精度については不明であり、今後、数値モデル等による検証が必要である。

4. 2. 2 副振動モード

まず、2局の海洋レーダーから求めた視線方向流速に対してバンドパスフィルタを用いて30-40分周期帯の変動成分を抽出し、それらを合成して流速ベクトルを計算した。続いて経験的固有関数法(EOF)により流速ベクトルから重複波モードの固有ベクトルを計算した。図-4.4(a)に示す第1モード(EOF1)は変動エネルギーの約56%を説明する。レーダー観測範囲中央部には節が存在し、その両側で発散(あるいは収束)する流れのパターンがみてとれる。

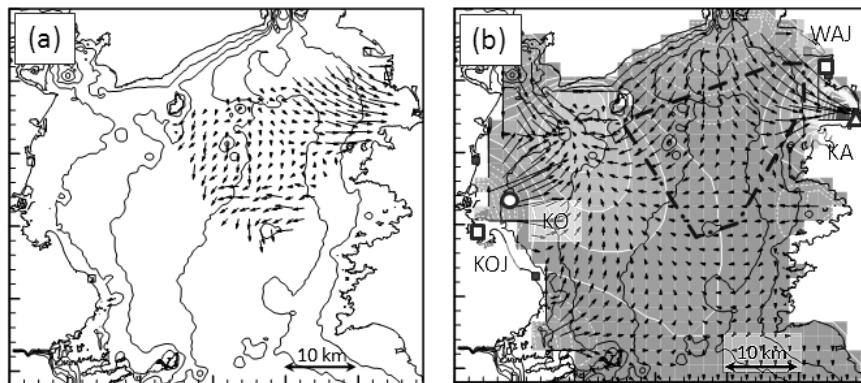


図-4.4 (a) 30-40分周期流速成分 EOF 第1モード, (b) Loomis (1973) の方法で求められた 33.5分周期の副振動モード

数学的に求めたこの EOF1 が物理的に存在し得るかどうかを Loomis (1973)¹⁴⁾の方法を用いて検証した。その結果、30-40分周期帯には4つの固有モードが計算され、このうち34分の周期を持つ固有モード(速度ポテンシャルと流速ベクトルの相対値)を図-4.4(b)に示す。EOF1 とパターンが良く一致していることが分かる。また、速度ポテンシャル分布は水位変動パターンと見なせるので、副振動による水位変動は海南(KA)と小松島港(KOJ)で相対的に大きく和歌山(WAJ)と小松島港沖(KO)で相対的に小さいこと、さらに KA, WAJ と KO, KOJ では水位変動が逆位相になることが推測される。ここには示さないが、実際、KA, KOJ では他の2点に比べて卓越周期帯の変動エネルギーが大きく、34分周期のラグを計算すると KO と KOJ は KA に対してそれぞれ 145°と 173°位相が遅れていた。以上、これまで水位データと計算から推測されてきた副振動モードを海洋レーダーの観測結果から直接求められることを示した。

今回の地震では何故 30–40 分周期帯の副振動が水道内で発達したのであろうか？ Rabinovich (1997)¹⁵⁾の方法を用いて津波波源域での水位変動スペクトルを水道沿岸で観測された水位に基づいて推定したところ、波源域では 30–40 分に明確なピークが、また 50–60 分周期帯にもややなめらかなピークが存在していたと推測された。さらに、津波波源域の水平スケールを 500km×200km と仮定し、平均水深を 4000m と仮定すると、短軸方向スケール (200km) から決まる第 1 モードの周期は約 34 分となる。以上より、今回の津波が波源域でこの卓越周期帯により多くのパワーを有していたことが、今回紀伊水道内で 30–40 分周期帯の副振動が最も発達した理由と推測された。

4. 3 “津波レーダー” 開発の方向性

上述した様に海洋レーダーで来襲する津波や副振動を計測することは可能であり、それらの計測をリアルタイムで安定的に行うことが出来れば津波対策上極めて有益である。例えば、数 10km～沖合で伝搬してくる津波を計測することで気象庁予報の過小評価防止や住民避難等に活用することができる。沿岸域 (水道や閉鎖性内湾) では、地震発生後から数日間副振動による水位変動が続くことがある。今回、紀伊水道では翌日の 3 月 12 日になって最高水位を計測した地点がある。この様に沿岸では副振動をモニタリングすることが警報解除や航路啓開作業のタイミングの決定に役立つであろう。地震あるいは津波によって臨海工業地帯から重油や化学物質が沿岸域に流出する事態も考えられる。これらの拡散状況を把握するためには津波や副振動ではなく数時間～数日程度の時間スケールで変動する吹送流、密度流や潮流を計測することが重要である。つまり、短周期の津波・副振動と長周期 (バックグラウンド) の流れを同時に計測することが必要となる。また、例えば視線方向流速から津波流速成分を抽出し、津波波源インバージョン¹⁶⁾に利用することも考えられる。

5. 津波避難シミュレーションの開発

2011 年東北地方太平洋沖地震の津波による死者・行方不明者は 18,564 人 (警察庁, 2013)¹⁷⁾, 死因の 9 割が溺死と報告されている (同, 2012)¹⁸⁾。こうした被害をふまえ、大規模な津波に対する避難の取組みを考える必要がある。

取組みの一つとして、津波避難シミュレーションの活用が挙げられる。具体的には、シミュレーションを用いて、ある地域を対象に現時点の避難安全性を評価したり、対策を講じた場合の将来時点の避難安全性を評価した



写真-5.1 避難ビルへの避難状況
(訓練の様子、高知市提供)

り、いくつかの対策の中から優先的に講じるべき対策を決定するためにそれぞれの対策の効果の相互比較を行ったりするものである。

ここでは、沿岸海洋・防災研究部沿岸防災研究室が開発を進めている津波避難シミュレーションシステム NILIM-TESS2 を例に、津波避難シミュレーションの仕組みと津波からの避難安全性を評価した事例について説明する。

5. 1 津波避難シミュレーションの対象範囲と対象者

まず、シミュレーションの対象範囲、対象者などをどのように決めるべきであろうか。対象範囲の大きさはニーズにあわせて自由に決めればよいものであるが、津波が来る前に移動できる距離に限界があり、避難場所の最適解を求める際の計算負荷（この点については後述する.）、結果の活用にあたってシミュレーション結果を一覧で見ようとしたときの限界などにより、ある程度の大きさに限られてくる。「津波避難対策推進マニュアル検討会報告書」（総務省消防庁，2013）によれば、「避難できる限界の距離は最長でも 500m 程度を目安とする」とあり¹⁹⁾、1つの地区を一体で分析することを考えると、概ね数百 m～数 km 四方を対象範囲の大きさとすればよいと考えられる。例えば試算した事例²⁰⁾では、1.5 km×2.5km の市街地を対象範囲としている。

対象者は、国勢調査の結果などを使って対象範囲内の総人口を決定するが、一般に昼間人口と夜間人口とは異なるので注意が必要である。また、人口増加・減少が著しい場合、利用可能なデータと現状の人口のギャップを埋めるため、近年の変動傾向をもとに推定するなどの作業が必要である。

5. 2 建物・街路ネットワークデータ

建物と街路をデータ化したネットワークデータを作成する必要がある。建物や街路の位置関係は地図などを参考に GIS ソフトウェアなどを用いて作成するが、例えば建物については位置の情報だけではなく、床面積、階数、構造形式等の情報が必要となる。その理由は、一般に、津波に先立って地震の強い揺れが想定されるため、建物が倒壊することの影響をシミュレーションで考慮する必要があるためである。建物の倒壊確率を構造形式等の



(1) 建物の構造形式、階数等の調査



(2) 街路幅員、塀倒壊危険度、階段等の調査

写真-5.2 建物及び街路の現地調査

情報をもとに推定し、倒壊して発生するガレキの量を床面積及び階数から推定し、ガレキの量、建物前面の街路の幅員等から街路を閉塞判定するというステップを進める。閉塞した街路はシミュレーション上では通行不能として表現する。ここに述べた情報を得るため、市街地で建物と街路の現地調査をそれぞれ行う（写真-5.2）ことになる。

5.3 避難者の初期配置

建物や街路上に避難者を初期状態として配置する。図-5.1は、2011年東北地方太平洋沖地震の発生時に自宅にいた人数を岩手県について調べたものである。それによると、地震発生時に1~2名が在宅していた場合が約7割を占めていて、不在の場合は約1割と比較的少ない結果となっている。そこで、昼間の初期配置を与えるため、まず住宅1棟あたりの人数を配置する。対象範囲に配置したい総人口から住宅に配置した人数を差し引き、残りの人数を大規模建物（ホテル、工場、市役所、学校、病院、魚市場など）に配置する。

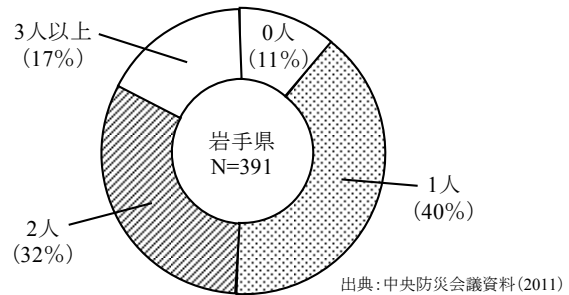


図-5.1 地震発生時に自宅にいた人数²¹⁾

現実には、大規模建物のなかでも所在する人数に偏りがあつたり、街路上に歩行者がいたり、イベントで一時的に多数の人が集中していたりするので、シミュレーション結果の分析と並行して初期配置のデータを修正し、精度を高める必要がある。

5.4 短波海洋レーダー観測

歩行速度は、年齢、単独・グループ歩行の違い、階段の有無などによって変化する。図-5.2は、年齢と歩行速度の関係を示したものであるが、一般に年齢とともに歩行速度は低下する²⁰⁾。またグループ歩行の場合、階段がある場合などの既往の調査結果を整理すると、老人の単独歩行速度は1m/sをやや下回る値、老人以外の歩行速度では1.2~1.3m/s程度であり、グループ歩行速度は0.8~1.3m/s程度でばらつきがある²⁰⁾。歩行者の個人属性を考慮する場合、このような避難者を年齢、グループ歩行の有無等で分類した区分を適宜設けて避難者の歩行速度をそれぞれ設定する。歩行者の個人属性を考慮しない場合、例えば総務庁消防庁（2013）では歩行速度の目安として1.0m/sを示している¹⁹⁾。

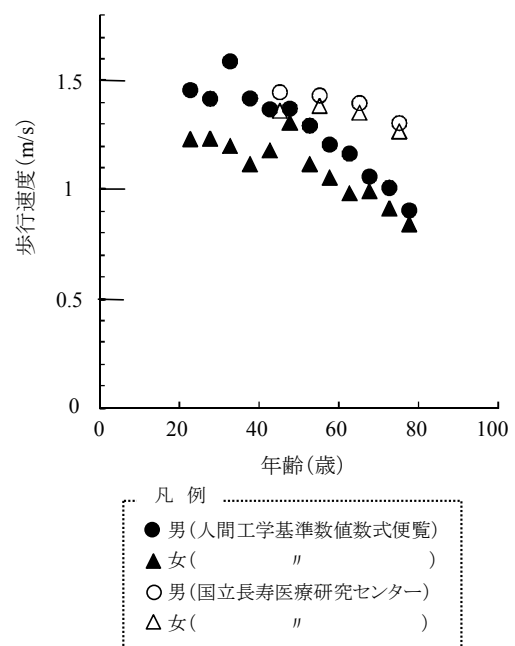


図-5.2 年齢と歩行速度の関係

国土交通省都市局（2013）によれば、2011年

東北地方太平洋沖地震の際の平均歩行速度は 0.62m/s となっている²²⁾。この値は、年齢や単独・グループ歩行の違いという「個人属性の効果」、平野部、リアス海岸沿岸部などの「地形的な効果」、混雑、逃げ惑い、街路閉塞の有無等の「主に市街地構造に起因する効果」等の影響を全て含んで平均した値である。従って、ここで考えているような地域を特定した避難シミュレーションにおいては、この値を単純に適用すると分析の精度を低下させる可能性がある。

車を利用した避難行動については、移動速度が異なる、経路選択にあたって距離よりもアクセスの容易さを優先する場合がある等、徒歩と異なる特性を持っているので、別途モデル上の工夫が必要である。

5. 5 浸水シミュレーション

「津波浸水想定の設定の手引き」(国土交通省, 2012)²³⁾等を参考に、津波の浸水シミュレーションを実施する。この結果と、避難シミュレーションより得られる人の動きとの重ねあわせによって、浸水からの避難における安否を判定する。

このように浸水計算と避難行動計算とを別々に行うと、「津波が浸水してくる様子を目撃し、避難する方向を当初予定から変更した」という避難行動が再現できないことになる。しかし、津波の避難は津波の浸水前に避難場所に到着することが原則であること、津波が陸上に遡上して進行する速度が時速 40km ほどにもなり、接近してきた津波から走って逃げ切るのが難しいことから、浸水の計算と避難行動の計算とを別々に行った場合でも安否の判定結果には一定の妥当性があると考えられる。

5. 6 避難場所の収容人数

避難場所の収容人数を把握する。写真-5.3 は、自治体が指定する津波避難場所の例である。広場部分は幅が約 14m、奥行が約 7m であるため、面積は $14 \times 7 = 98\text{m}^2$ である。総務省消防庁(2013)によると、避難場所の収容人数は「最低限 1 人あたり 1m^2 以上を確保することが望ましい」とされているので¹⁹⁾、この避難場所については $98\text{m}^2 \div 1\text{m}^2/\text{人} \div 100$ 人となる。



写真-5.3 自治体が指定する避難場所

避難シミュレーションを行うと、収容人数に達する避難場所が発生し、最短距離ではない避難場所が避難者に割り当てられるケースが発生する場合がある。そのため避難場所の収容人数の設定値は、避難訓練の際の実績等を参考に慎重に調整し、計算結果の精度を高める必要がある。

5. 7 シミュレーションモデルと計算負荷

図-5.3 に NILIM-TES2 の処理フローを示す。まずデータ及び条件設定ファイルを読み込む。

次に、避難場所・経路を各避難者に与えるため、線形計画問題ソルバーで最適解（対象者の避難距離平均値が最短となる解）を得る。こうして得られた避難者ごとの経路情報について、歩行速度、混雑に伴うロスタイム等を考慮して避難所要時間を算出・出力する。

計算負荷をみるため、処理時間が大きい避難場所・経路を避難者ごとに割り当てる過程の処理時間を調べてみた。約4,700人を約20箇所に振り分ける場合、汎用的なパソコン環境では数分程度で処理することができた。

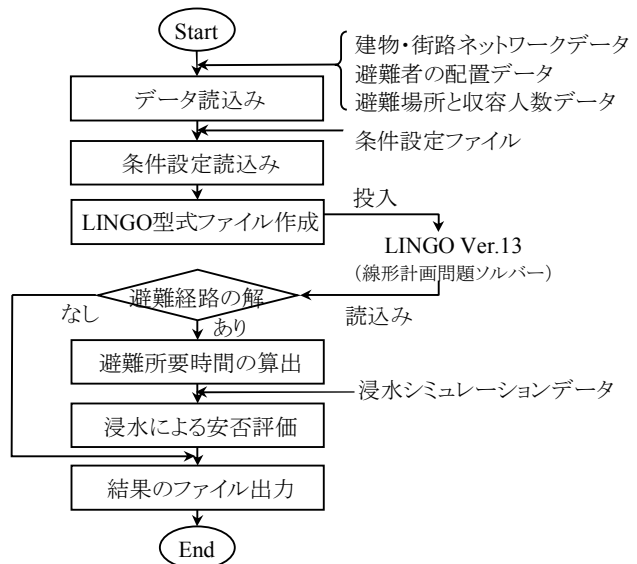


図-5.3 プログラムの処理フロー

5.8 避難安全性の評価

避難シミュレーションを用いた避難安全性の評価の既往の研究事例の主なものとしては、渡辺ら（2007）による住宅耐震化の効果の検討²⁴⁾、片田ら（2012）による最適な車避難者の比率に関する検討²⁵⁾、仙台市（2013）の避難施設整備の効果の検討²⁶⁾などがある。

図-5.4は、NILIM-TE22を用いて2011年東北地方太平洋沖地震の津波の避難行動を再現したものである。図で、横軸は避難を開始してからの時間である。縦軸は避難を完了した人が全避難者に占める比率であり、0はまだ誰も避難を完了していない状態、1は全員が避難を完了した状態である。破線と一点鎖線は、対象範囲で行われたいくつかのアンケートのうち代表的な二つの結果であり実際の避難行動を示している、実線はシミュレーション結果を示している。

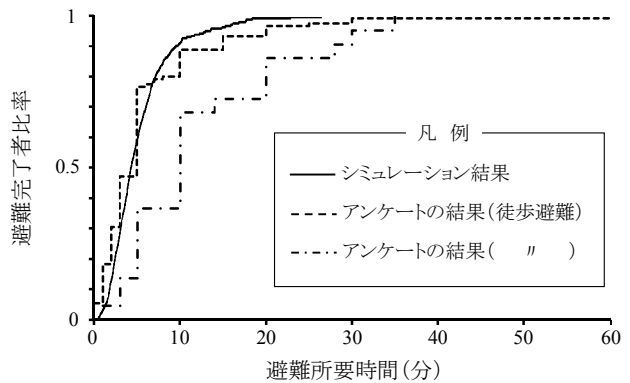


図-5.4 避難所要時間の分布の試算例

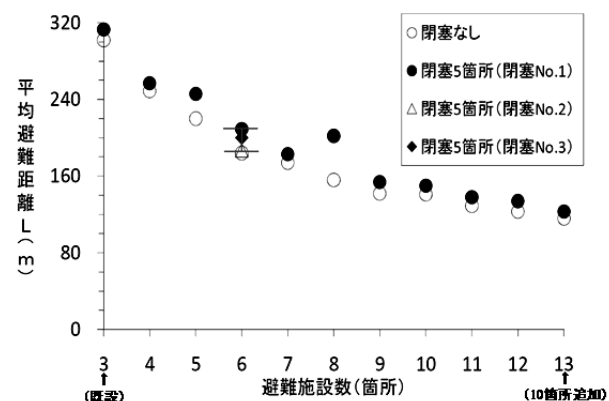


図-5.5 避難施設を整備した効果の試算

これによると、実線は二つのアンケート結果のうち破線のアンケート結果に近い形状を示している。長距離を避難する行動など再現できていない部分はあるものの、徒歩避難者の避難行動をある程度は再現できていると考えられる。

図-5.5は、先の試算での地区とは別の地区で、避難施設を現状よりも増やした場合の効

果を試算した結果である。図で、横軸は避難施設の数で、3は既設の避難施設の数であり現状を示す。横軸を右に進むにつれて避難施設を1箇所ずつ増やした条件である。縦軸は避難者の避難距離の平均値である。

これによると、基本的には避難施設を整備すると避難距離の平均値が小さくなっている。建物倒壊による街路閉塞を考慮しないケースでは、現状（横軸で3の位置）の避難距離は約310mであるが、新たに5箇所整備した場合（横軸で8の位置）は避難距離が約160mになる。その差は150mとなり、歩行速度を仮に1m/sとすると³⁾、避難施設の整備によって避難所要時間が一人あたり換算で150秒(2分30秒)短縮されることが考えられる。

5. 9 今後の検討

ここでは津波避難シミュレーションの構成と、津波からの避難安全性を評価した事例を紹介した。避難シミュレーションにあたっては、ここで挙げた以外にも様々な心理的特性や身体的特性が避難行動に影響すると考えられる。ここでは避難者が避難場所をあらかじめ知っているとしてシミュレーションを行ったが、避難開始時点ではとりあえず海から遠ざかる方向に移動し、途中から周囲の人の動きに追随するといった行動をとる可能性もある。また、長い距離を移動する場合に、疲労によって歩行速度が低下する可能性もある。こうした現象を表現するためにはモデルにおいて個別に工夫が必要であり、今後も津波避難シミュレーションの改良を進めていく予定である。

6. おわりに

中央防災会議の南海トラフ巨大地震による非常に大きな津波の発生の予測やいまだ鮮明さを失わずに人々に共有されている平成23年の東北地方太平洋沖地震津波の記憶などから、大規模な津波に対して沿岸域の耐性を高めていくことに社会が関心を寄せている。推測された南海トラフ巨大地震による津波は、それまで考えられていた津波を大きく超える大きさのものであり、それに対して人々の生命や財産、地域の経済や産業をどのように守っていくのか、千年に一度とも言われる時間スケールに対してどのように時を乗り越えていくのか、容易に答えにたどり着くことのできない問題である。そうした問題に対していくつかの視点から具体的な取組を始めている、その状況を紹介した。はじめから答えを見通して取組を進めることができるものではないが、想像力を働かせ、持てる力をしっかり出し、問題解決に向かって一步一步進んでいきたい。

参考文献

- 1) 内閣府：南海トラフの巨大地震による津波高・浸水域等（第二次報告）及び被害想定（第一次報告）について、2013.
- 2) 交通政策審議会港湾分科会防災部会：港湾における総合的な津波対策のあり方(答申)，

- 2012.
- 3) 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報告，2011.
 - 4) 海岸における津波対策検討委員会：平成 23 年東北地方太平洋沖地震及び津波により被災した海岸堤防等の復旧に関する基本的考え方，2011.
 - 5) 浅井正：2011 年東北地方太平洋地震における胸壁の被災状況及びその要因，第 68 回年次学術講演会講演概要集第 2 部門，土木学会，pp.371～372，2013.
 - 6) 国土交通省住宅局長：津波に対して構造耐力上安全な建築物の設計法等に係る追加的知見について（技術的助言），国住指第 2570 号，2011.
 - 7) 国土交通省港湾局：防波堤の耐津波設計ガイドライン，2013.
 - 8) 浅井正・永廣迪：防潮堤（胸壁）の被災に対するリダンダンシー解析の適用に関する考察，第 68 回年次学術講演会講演概要集第 2 部門，土木学会，pp.331～332，2013.
 - 9) Hinata, H., S. Fujii, K. Furukawa, T. Kataoka, M. Miyata, T. Kobayashi, M. Mizutani, T. Kokai and N. Kanatsu : Propagating tsunami wave and subsequent resonant response signals detected by HF radar in the Kii Channel, Japan, Estuarine, Coastal and Shelf Science, Vol.95, pp. 268–273, 2011.
 - 10) Lipa, B., D. Barrick, S. Saitoh, Y. Ishikawa, T. Awaji, J. Largier and N. Garfield : Japan tsunami current flows observed by HF radars on two continents. Remote Sensing, Vol.3, pp. 1663–1679, 2011.
 - 11) 日向博文・藤良太郎・藤井智史・藤田裕一・花土弘・片岡智哉・水谷雅裕・高橋智幸：紀伊水道における短波海洋レーダーを用いた津波・副振動観測，土木学会論文集 B2(海岸工学)，Vol.68, No.2, I_196-I_200, 2012.
 - 12) Barrick, D. E. : A coastal radar system for tsunami warning, Remote Sensing of Environment, Vol.8, pp. 353–358, 1979.
 - 13) 藤井智史・徳田正幸：津波・海象監視予測装置，特許番号第 2721486 号，1997.
 - 14) Loomis, H.G. : A new method for determining normal modes of irregular bodies of water with variable depth, Hawaii Institute of Geophysics reports HIG-73-10 (NOAA-JTRE-86), 27 pp, 1973.
 - 15) Rabinovich, A. B. : Spectral analysis of tsunami waves: Separation of source and topography effects. J. Geophys. Res., Vol.102 (C6), pp.12663–12676, 1997.
 - 16) 藤良太郎，日向博文，藤井智史，高橋智幸：海洋レーダーを利用したインバージョンに対するレーダー観測時間の影響，土木学会論文集 B2(海岸工学)，Vol.69, No.2 (印刷中).
 - 17) 警察庁：平成 23 年東北地方太平洋沖地震の被害状況と警察措置，2p.，2013 年 4 月 10 日.
 - 18) 警察庁：東日本大震災と警察，p.14，広報誌焦点，第 281 号，2012.
 - 19) 総務省消防庁：津波避難対策推進マニュアル検討会報告書，194p.，2013 年 3 月.
 - 20) 熊谷兼太郎：2011 年東北地方太平洋沖地震津波の避難行動への津波避難シミュレーションの適用性，国土技術政策総合研究所資料 No.742，22p，2013.

- 21) 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第7回会合，参考資料1，p.131，2011年8月16日．
- 22) 国土交通省都市局：津波避難を想定した避難路，避難施設の配置及び避難誘導について（第3版），p.101，2013年4月．
- 23) 国土交通省：津波浸水想定の設定の手引き，Ver.2.00，86p.，2012．
- 24) 渡辺公次郎ら：防災に関するソフト的施策を評価するための津波避難シミュレーションモデルの開発，都市計画研究講演集，日本都市計画学会，Vol. 5，pp. 17-20，2007．
- 25) 片田敏孝ら：津波襲来時における自動車避難と人的被害の関係に関する一考察，日本災害情報学会第14回研究発表大会予稿集，pp.152-155，2012．
- 26) 仙台市：避難施設配置案等に係る効果検証（避難行動シミュレーション），津波避難施設の整備に関する検討委員会，第5回，資料2，2012年11月28日．