

防災地学特論・第四回授業資料

「津波災害」

津波とは何か： 2011 年の東日本大震災を振り返れば、津波が、膨大な量の海水が沿海部に進入し堤防を破壊し街や村を流し去る恐ろしい災害であることが自明であろう。東日本大震災における津波が、海溝型の巨大地震で引き起こされたものであることは明らかであるが、詳細に見ると、地震の規模や震源断層の運動量と津波の規模や波高分布との間にはさまざまなズレがある。津波の被害を左右する最大の要素である波高は、必ずしも地震の規模と対応するわけではない。それどころか、地震が起きていないのに突然来襲する津波すら存在する。被害が甚大であった津波の印象は誰しもがもっていることと思うが、津波からの防御方法を考えるためには、その実際の姿を詳しく確認する必要がある。今日は、初めに津波の発生原因・伝播の様式・陸域到着後の挙動などを確認し、次に津波災害の態様を概観し、最後に津波災害からの防御について考えることとする。



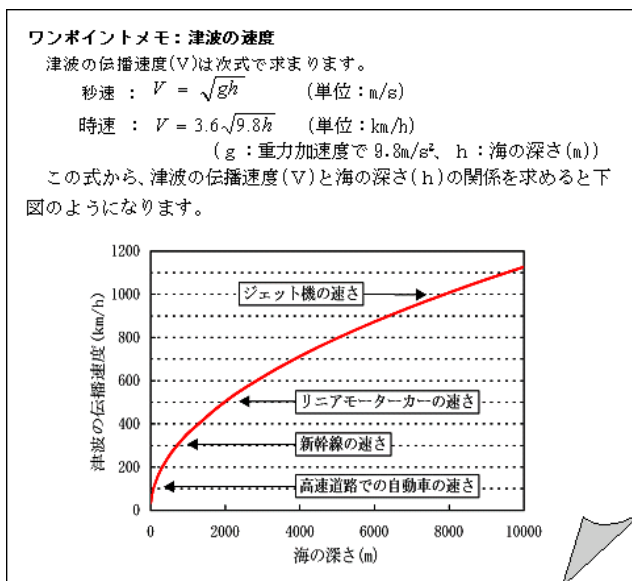
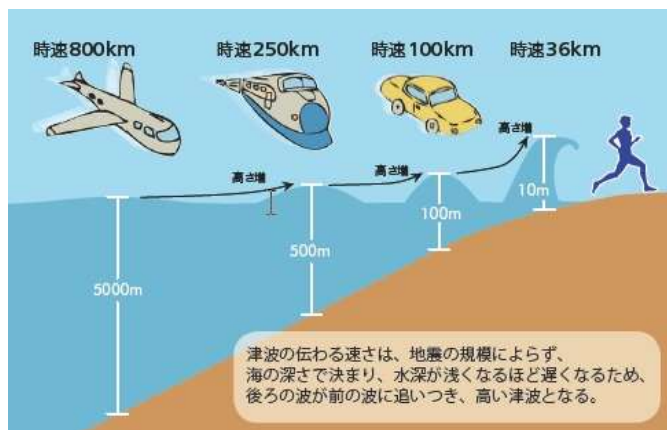
左：東日本大震災で気仙沼の陸地に打ち上げられた貨物船（ザ・テレビジョン）、右：東日本大震災での釜石市鶴住居地区（朝日）

沿岸部を襲う津波： 津波とはそもそも「津」の「波」つまり港の波、である。船で沖に出ていた漁師たちはほとんど気付かないような長波長で小振幅の波を受けるだけなのに、漁を終えてわが町に戻ると津つまり港やその周囲の村が巨波に襲われて手のつけられない状態になっていた、それが「津波」の語源である。津波の恐れが高いとき、港に接岸中の船は大急ぎで出港し、少しでも早く沖に出て津波の波高が低い（つまり波長が大きい）ところでやり過ごすとする。



左：東日本大震災時に緊急出港して津波を乗り越える巡視船（海上保安庁）、右：田老町の防潮堤を乗り越える津波（内閣府）

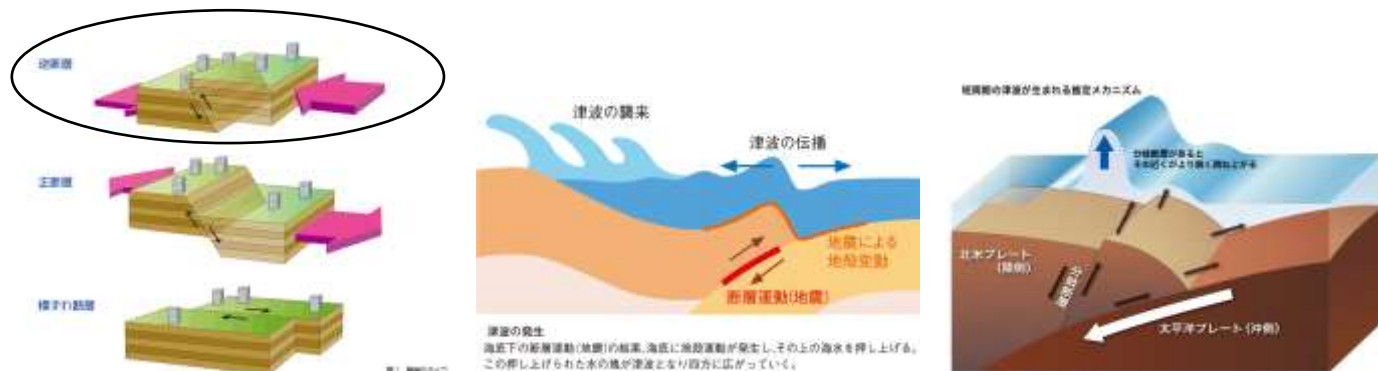
沖合いでは何も問題のなさそうな長波長で小波高の波が沿岸部でなぜ「津波」に化けるかについては、波の進行速度が水深の平方根に比例することから説明できる。津波が海岸に近付き水深が浅くなると伝播速度が低下する。すると波長が短くなりそれに応じて波高が高まる。さらに、先行の波により水深が増加したところに後続の波が接近して「追突」していくことで波高がさらに高まる。



左：水深と波高のイメージ（防災科学技術研究所）、右：津波の速度と水深の関係（国土交通省）

津波の発生機構： 津波は、地震活動に伴う海底面の断層変位により、海水が持ち上げられたり落ち込んだりすることで発生すると説明されることが多い。しかし、実際にはそうした地震を直接の原因とする機構だけでは説明できない津波も多い。東日本大震災での津波も、海底断層の変位量だけでは説明できないことが分かりつつある。津波の発生機構は、海底地形の急激な変動である。それが起こる理由としては、1) 地震断層の変位であることが多いが、2) 地震を契機とした/しない海底斜面の大規模な地滑りや、3) 巨大な火山や海山の噴火に伴う/伴わない山体崩壊などが知られている。

1) はもっともしばしば説明されている機構である。地震は断層の運動であり、地震を引き起こした断層は、大規模な地震では陸上でも「地震断層」として地表に現れることがある。海溝型地震には大規模なものも多くM8やM9に達する巨大地震であれば、震源断層が海底面に現れる可能性は高い。海溝型地震の断層は、沈み込む海洋プレートが陸側プレートを押しているので、圧縮場で形成される逆断層となることが多い。逆断層は鉛直成分の断層変位をもつので、その運動により海底面深度が短時間に变化すれば、海水が持ち上げられたり落ち込んだりして津波が発生する。



左：断層運動のひとつ逆断層では断層面の片側が隆起する（地震調査研究推進本部）、中：海底地震断層の変位による津波（国交省）、右：海溝型地震に際して分枝断層が発生することで津波がより大規模になる可能性がある（日経 BP）

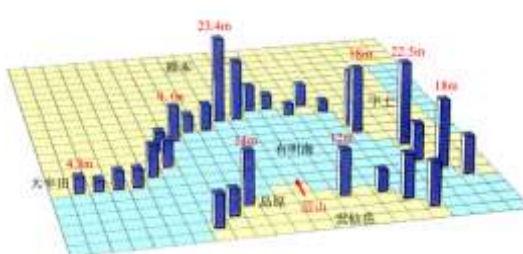
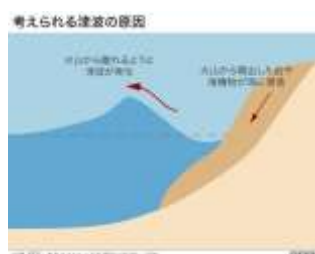
2) については、海底で巨大地震が発生した際に巨大な海底地すべりが発生することは、海底に付設した通信ケーブルの断線などで以前から知られていたが、それと津波との関係性が論じられるようになったのは比較的最近のことである。巨大地震による地震断層による津波と、その震動で発生した大規模な海底斜面の地滑りによる津波が複合して伝播するといった「複合津波」があってもおかしくないと考えられている。大規模な海底地すべりの痕跡は、ハワイ諸島の周囲や駿河湾などで確認されており、海溝型巨大地震が起きた場合に派生して起こる事例が少なくない可能性がある。



左：海底地すべりによる津波の発生（産経）、中：ハワイ諸島沖に多数分布する大規模な海底地すべり地形（ハワイ州観光局）

右：東日本大震災で発生した可能性がある大規模な海底地すべり（日本経済新聞）

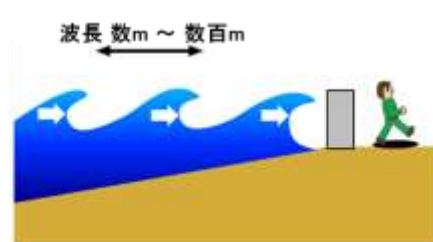
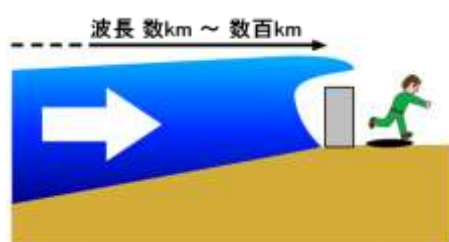
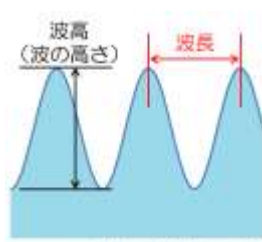
3) の、山体崩壊に伴う津波は、わが国では 1972 年の「島原大変・肥後迷惑」が有名である。このとき、長崎県島原半島の雲仙眉山の山体が突然崩壊し、崩壊土石により山麓の住民多数が生き埋めとなった。崩壊土石はそのまま島原湾に突入して最大波高 20m を超える大津波を引き起こし、対岸の熊本市街を襲ったため津波により熊本側でも住民多数が犠牲になった。犠牲者数は合わせて一万人を超え、我が国の火山災害史上最悪の災害のひとつである。



左：海に面した火山の山体崩壊による津波（BBC）、中：雲仙眉山の山体崩壊で発生した津波の波高分布（防災科学技術研究所）、

右：雲仙眉山の山体崩壊斜面（後方）と崩壊地形堆積物である流山（手前の多数の小島）が浮かぶ島原湾（ながさき旅ネット）

津波の伝播： 津波は、深海では大きな波長と小さな波高で時速数百 km で、浅海では波長が減少して波高が増加して低速になって伝播する。周期が大きく減衰が少ないので長距離を伝播できる。

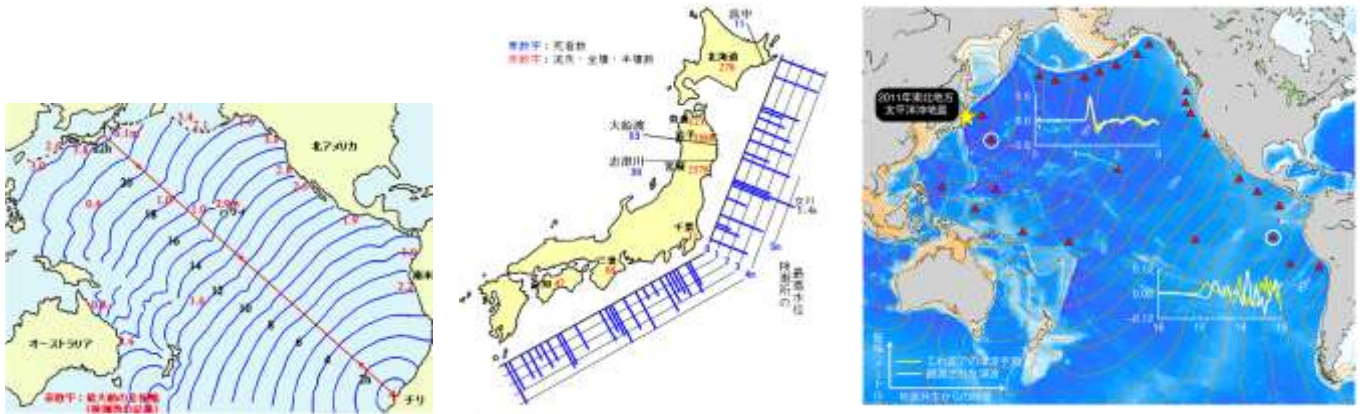


左：津波の波高と波長、中：津波は波長が大きいので海水自体が流入する、右：波浪は海面での上下運動（いずれも気象庁）

[illegible]

津波の波高と遡上高： 津波の大きさを表す数値に波高と遡上高がある。両者は紛らわしいが防災上の違いは重要である。波高は、海岸線に到達したときの津波の水面が平常潮位からどれだけ高いかを示す。遡上高は、陸地に侵入した津波が、平常潮位からどれだけ高い地点まで到達したかを示す。津波は陸に向かって運動しており慣性をもつので、波高よりも遡上高の方が大きくなる。遡上した海水を集中させるような地形をしている場合や、同じ波高でも速度が大きい場合、遡上高は増加する。遡上高よりも高い場所は浸水しないので、津波の被害を考えるうえで重要である。遡上高は波高の二倍を超えることすらある。

遠地津波： 地震による津波は、日本周辺で発生した地震を原因とするだけではない。遠く南米周辺で起きた巨大地震で発生した津波が、2 万 km 近くを伝播して襲来して人的被害を出すことがある。例えば、1960 年にチリ南部で発生した M9.5 の巨大地震で生じた津波は、ほぼ 1 日かけて日本沿岸に到達し、国内で死者 139 名など、大きな被害をもたらした。遠地地震の到来時刻や波高は予測されるがその精度はまだ不十分で、現在も研究が進行中である。



左：チリ沖地震津波の伝播の経過（防災科学技術研究所）、中：チリ沖地震津波の各地の到達波高と被害（防災科学技術研究所）、右：東日本大震災での太平洋岸への津波の伝播（地震調査研究推進本部・綿田辰吾）

津波災害の概要： 人間社会が津波に襲われると、その高さや強さに応じてさまざまな被害を生じる。津波による災害で重要なことは、津波に襲われた地域は単に津波の高さの水深に水没するのではなく、時速数～数 10 km の速度の水の塊が到来し通過することによる凄まじい破壊のエネルギーを被ることである。したがって、木造家屋であれば 1～2m の高さの津波で致命的に損壊するし、鉄筋コンクリート製の重量構造物である防潮堤も、高さが 10 m を超える津波では構造自体が損壊してしまう。膝頭程度の津波でも歩行は不可能になることが多い。したがって、人間が津波に巻き込まれた場合は「泳げれば助かる」という生易しい状況ではない。自動車、壊れた家、木材、何百トンの漁船、そうしたものが折り重なって流れる中に放り込まれた人体が無傷でいられたならば、かなりの幸運といえる。

津波波高と被害程度(首藤(1993)を改変)

RBBTODAY.COM

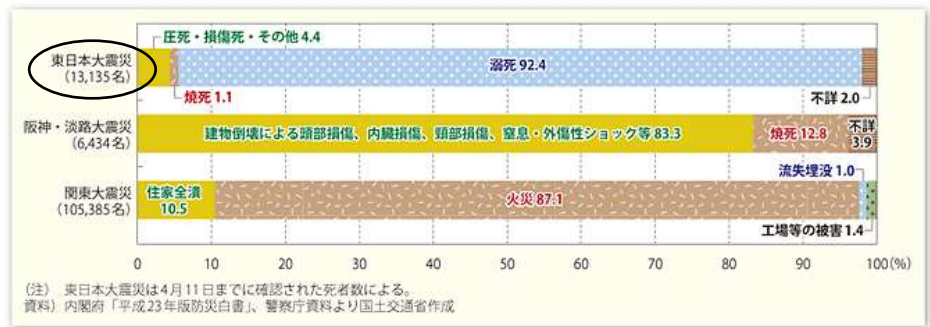
津波波高(m)	1	2	4	8	16	32
木造家屋	部分的破壊	全面破壊				
石造家屋	持ちこたえる			全面破壊		
鉄筋コンクリートビル	持ちこたえる				全面破壊	
漁船		被害発生	被害率50%	被害率100%		
防潮林	被害軽微 津波軽減	漂流物阻止	部分的被害 漂流物阻止	全面的被害 無効果		
養殖筏	被害発生					
音			前面が砕けた波による連続音 (竜巻、暴風雨の音)			
			波で巻いて砕けた波による大音響 (雷鳴の音、遠方では聴きえない)			
			船に衝突する大音響 (遠雷、発破の音。かなり遠くまで聞こえる)			

※津波波高(m)は、船舶、養殖筏など海上にあるものに対しては概ね海岸線における津波の高さ、家屋や防潮林など陸上にあるものに関しては地図から測った浸水深となっています。
※上表は津波の高さと被害の関係の一例の目安を示したもので、それぞれの沿岸の状況によっては、同じ津波の高さでも被害の状況が大きく異なることがあります。
※津波による音の発生については、周期5分～10分程度の近地津波に対してのみ適用可能です。



左：津波の波高と被害程度（気象庁）、右：かろうじて屋上だけが浸水を免れた建物に引っかかった大量の瓦礫（朝日新聞）

人的な被害： 東日本大震災のような大災害では、津波の犠牲者の芯は死亡統計上は溺死が圧倒的だが、検視の運用は平常時とは全く違う。実際には圧死、多発性外傷、失血死なども相当数含まれると指摘されている。



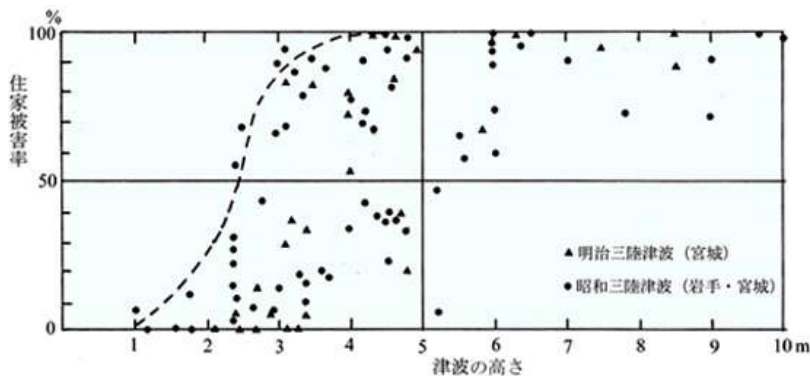
左：東日本大震災では津波の犠牲者が圧倒的（国交省）、右：スマトラ島沖地震の津波での救助活動（北海道国際交流センター）

発生年月日	地震名	規模(M)	死者・行方不明者数
1896. 6. 15 (明治29年)	明治三陸地震津波	8.5	21,259
1933. 3. 3 (昭和 8 年)	昭和三陸地震津波	8.1	3,064
1944.12. 7 (昭和19年)	東南海地震	7.9	1,223
1946.12.21 (昭和21年)	南海地震	8.0	1,443
1960. 5. 23 (昭和35年)	チリ地震津波	8.5	142
1983. 5. 26 (昭和58年)	日本海中部地震	7.7	104
1993. 7. 12 (平成 5 年)	北海道南西沖地震	7.8	230



左：東日本大震災以前の津波犠牲者の多かった地震（消防白書）、右：瓦礫に覆われる海面での搜索活動（海上保安庁）

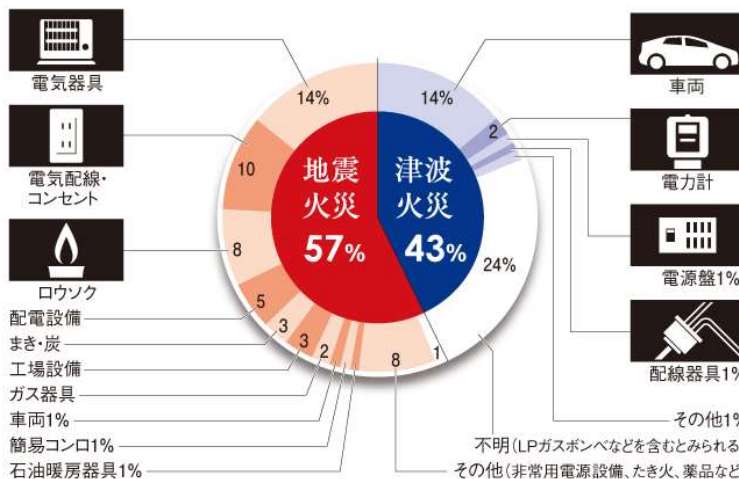
物的な被害： 津波による物的な損害には、水のエネルギーが直接作用することで生じる物理的破壊と流失、および破壊された燃料タンクから漏れ出た油に引火することで発生する火災と焼失が挙げられる。



左：津波の波高と木造家屋の倒壊率の関係（防災科学技術研究所）、右：東日本大震災の津波で倒壊した海岸沿いの民家（Gooddo）

特定できた出火原因

日本火災学会地震火災専門委員会調べ

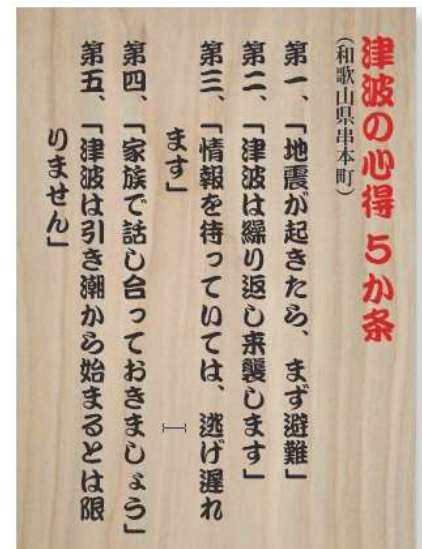
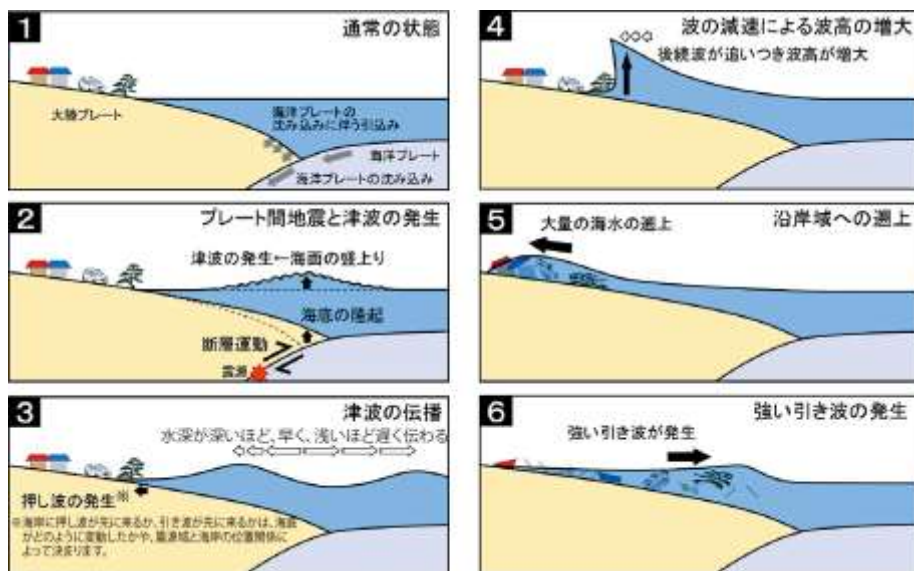


左：東日本大震災で発生した火災の半数は津波火災（朝日新聞）、右：東日本大震災の気仙沼の津波火災（小宮路勝・朝日新聞）

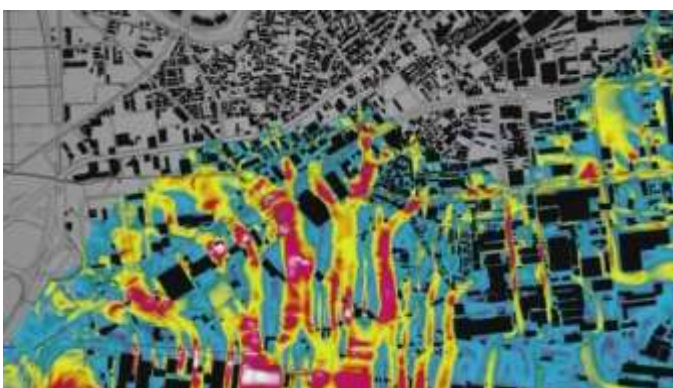
津波災害の留意点： 津波災害への防御や避難を的確に行うために、さまざまな点に留意する必要がある。

- ・地震が小さいまたは全く揺れがなくても来襲の可能性あり…遠地地震による津波や発生機構の多様性による。
- ・避難は時間との戦い…沖合い近傍が震源や海底地すべりの発生場所であった場合、地震発生から数分で来襲する可能性すらある。陸域地震において徐々に類焼する火災からの避難などとは時間的尤度が全く違う。

- ・災害弱者の避難の困難性…避難に許された時間が少ないため、避難困難者の避難方法は日頃から確認しておく、あるいは居住地の選定から考慮する必要がある。
- ・波高予測の困難性…津波情報で知られる波高は想定される範囲の高めであり、空振りになることも多い。だからといって対応しないでいると、いつかは必ず予報どおりあるいはそれを上回る津波が来襲することは間違いない。
- ・俗説の誤り…例えば、潮が引いてから津波が来るとするのは俗説であり、いきなり押し波から来る津波が半数。
- ・伝承の尊重…「ここから下に家を建てるな」の石碑など、過去の大津波での教訓は防災の基本となる。
- ・必ず反復する…押しと引きを繰り返しながら何回も反復するので、一旦引いたからと言って街に戻るのは禁忌。
- ・第一波が最大と限らない…潮位差などと同様に海岸線や海底地形などさまざまな要因により、地域や発生源により最大波高の番目が違う。第一波が最大波高である保障は全くないので、第一波からの避難に成功してもさらに高い波が来襲することを想定する必要がある。
- ・強い引き波がある…押し波に巻き込まれて内陸側へ流された場合、必ず潮の返しがきて沖に引き戻される。流された場合は潮が止まった時は脱出の好機。そのまま潮に乗り続けるとはるか沖合いに流される。
- ・河川を遡上する…河口に侵入した津波は、河川流路の流水抵抗が小さいために高速で遡行して短時間で内陸部に到達し、河川から内陸部に被害をもたらす。河川に近い地域では、河川津波からの避難の検討が不可欠である。
- ・都市型激流の可能性…都市部では鉄筋コンクリートや鉄骨製の建造物などの強固な構造物により遡行した津波の流路が制約されると、限定された流路を波高も流速も増幅した都市型激流が暴れまわる可能性が高い。



左：津波のさまざまな特性（地震調査研究推進本部）、右：津波心得（和歌山県串本町）



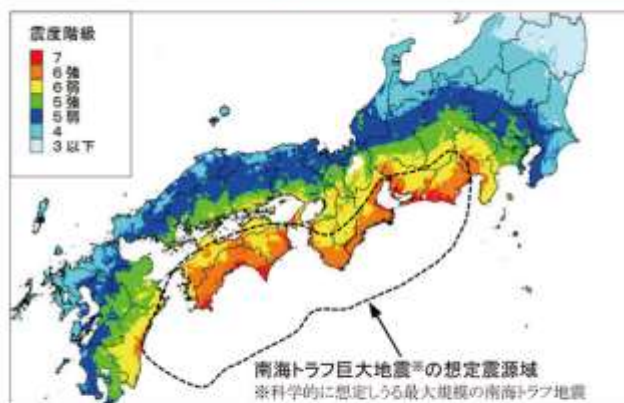
左：都市部に遡上した津波は強固な建物の間の狭い流路で勢いを増す都市型激流となる（赤色が通りに沿って激流化する部分）、
右：津波は真っ先に河川を遡上し河川から街へ侵入する（いずれも NHK）

津波の発生危険度： 海溝型地震は、内陸型に比べると発生周期や規模の概要が予測しやすい。一定の期間に地震の発生確率がどの程度になるかは、津波防災を考えるうえでの重要な情報となる。南海トラフの海溝型地震はいつ来ても全く不思議のないことあって、来るか来ないかではない。地震の発生周期から考えられる発生予想時期には差し掛かっており、「満期」の状態にある。南海トラフは、東北日本大震災の震源域である日本海溝と比べて陸に近いため、地震発生から津波到来までの時間が短いためより短時間の避難が求められる。



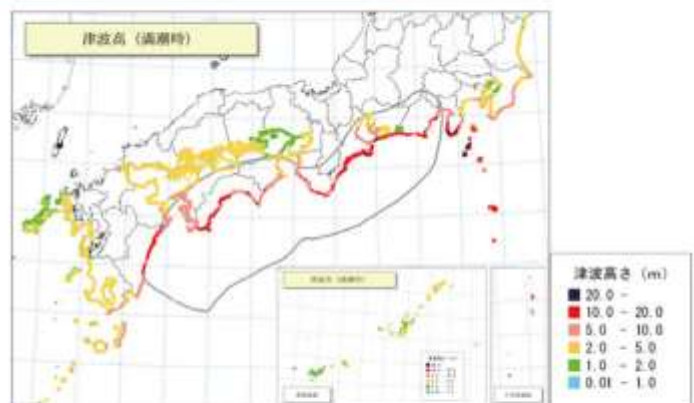
南海トラフ巨大地震で発生する可能性の高い津波は、最大波高が10～20 m 場所によってはそれ以上に達し、最大遡上高はそれを上回る。つまり東日本大震災級またはそれを上回る可能性すらある。したがって、避難すべき場所の標高はそれよりも高い必要がある。また、南海トラフ地震で警戒されている点として、逐次発災が挙げられる。海溝型地震が、短かい時間間隔、例えば数日とか数ヶ月の間に相次いで起きる可能性である。逐次に災害の発生を考えると、救助活動の遅れや初期避難状態の長期化などを想定した備えが必要になる。

南海トラフ巨大地震の想定震源域と震度分布・津波高



南海トラフ巨大地震の震度分布
(複数の想定されるケースの最大値の分布)

「南海トラフ巨大地震の被害想定(第二次報告)」(中央防災会議, 2013)



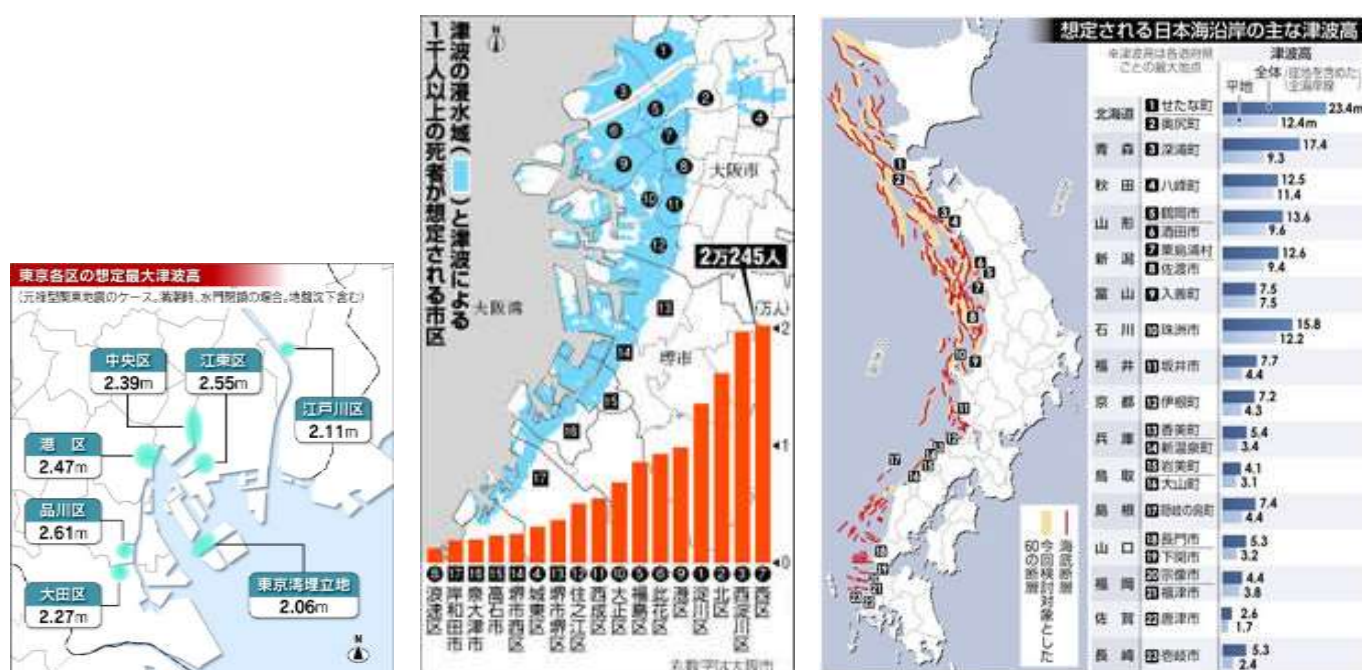
南海トラフ巨大地震の津波高

(「駿河湾～紀伊半島」に「大すべり域+超すべり域」を設定した場合)

震度分布と津波高は複数の想定ケースの一例であり、実際には、これより大きな震度や高い津波となる可能性もある。

南海トラフ巨大地震の想定深度分布と想定津波波高 (地震調査研究推進会議)

津波来襲の危険性への対策が必要なのは、南海トラフ沿岸地域だけではない。東京湾も、外洋での地震に対しては比較的安全とはいえ、東京湾口直近の相模トラフでのM8クラスの高海溝型地震の発生や東京湾内における未知の活断層によるM7クラスの地震とそれによる津波発生の可能性がある。東京都心部では波高数mほどでも、河川津波が遡行して防潮堤を乗り越えて市域に津波が進入する可能性がある。ゼロメートル地帯の一部の低層家屋密集地での垂直避難対象面積の不足や速やかな避難の困難性、ゼロメートル地帯での地下鉄開口部からの津波の流入による地下鉄路線網や大規模地下街の水没防止対策など、課題が山積している。阪神圏や中京圏に広がる低標高地域についても、都心部と同様あるいはそれ以上に津波の危険性に向き合う必要がある。ゼロメートル地帯の居住人口が最大なのは東京だが、面積が最大なのは中京地区である。また、標高5m以下の低地の居住人口は東京と大阪が300万人以上と最大で、三大都市圏ではどこの都道府県も100万人以上の低地居住人口がある。太平洋岸と比べると津波の発生頻度が小さいとはいえ、日本海側についても巨大津波のリスクがないわけではない。歴史上の津波についての巨大かどうかで見解が分かれているケースもある。ユーラシアプレートと北米プレートの境界型でM8クラスの地震が起こる可能性はあり、そうした地震が起これば太平洋側と同等の巨大津波が発生しうる。



左：相模トラフにおける海溝型地震が発生した場合に想定される都心部の津波波高（日本経済新聞）、中：南海トラフ巨大地震発生時の大阪湾での津波浸水予想域（朝日新聞）、日本海側で想定される地震津波の波高分布（東京新聞）

津波災害に対する防御：津波の多くは巨大地震によって引き起こされ、その巨大地震の発生日時の予知は不可能なので、津波の発生予知も不可能である。また、他の発生原因である巨大海底地すべりや海中・沿岸の火山の山体崩壊の予知もできない。したがって津波対策の前提として、災害の発生日時の情報が予め得られることはない、つまりよくても「数分から数十分後に」発生する。その対策としては、日頃から避難方式や避難経路を想定したうえで訓練を重ねて問題点をつぶしていくなどして、発災時の避難の円滑化を図ることに尽きる。津波避難の原則は「より早く」「より高く」であり、地域によって地形的高所、人工の避難用高台、津波避難タワー、津波避難ビルなどさまざま避難先がある。避難に際しては、津波の襲来経路や様式についての想定も重要である。大きな河川は津波の最初の遡上経路になるので、避難経路はできるだけ大河川との関わりを避けるべきである。大きなビルの林立する大都市では、津波は激流化する可能性があり、その場合わずかな水深でも避難は困難になるので、近くのビルなどでの垂直避難が重要な選択肢となる。自然災害全体で共通するが、ハザードマップ（災害予測値図：HM）に対して「理解はするが信用はしない」姿勢が求められる。HMをよく理解しておくことは必要だが「安全」とされている領域は絶対ではない。「作成時の想定条件であれば」という理解が不可欠で発災時には、状況を観察しながら臨機応変に対応する必要がある。



左：津波避難の大原則「より高く」は高台か高い建物（兵庫県）、中左：津波避難の原則「遠くより高く」（日本気象協会）、
中右：海岸平野に造成された津波避難用の高台（仙台市）、右：近くに高台がない場所に建設される津波避難タワー（朝日新聞）



左：都市部の標高の低い土地で津波の際に避難できるようにした津波避難ビル（芦屋市）、中：都市部では公共施設も津波避難ビルに指定される（国交省）、右：高齢者などの避難困難者は地域で協力して一緒に避難できるよういろいろな工夫がされる（朝日新聞）



地震発生日	地震	マグニチュード	発出した津波警報・注意報(回)	津波の観測された最大(cm)	観測点	人的被害(死者・行方不明者)	その他の被害(主なもの)
1982.3.21	瀬戸内地震	7.1	津波	78	瀬戸	なし	
1983.5.26	日本海中部地震	7.7	大津波	194	能代港	104	漁船転覆、ケーシング破壊、等
1989.11.2	能登半島の地震	7.1	津波	53	宮古	なし	
1993.7.12	北海道南西沖地震	7.8	大津波	175以上	江差	230	建物全壊、漁船の打ち上げ、等
1994.10.4	北海道東方沖地震	8.2	津波	168	釧路市花咲	北方領土で死者・行方不明者	船舶被害、等
1994.12.28	三陸はるか沖地震	7.8	津波	50	八戸	なし	農産物被害
1996.2.17	インドネシア、スマタラジャ沖の地震	8.1	津波	104	父島	なし	船舶の転覆、流失
2003.9.26	十勝沖地震	8.0	津波	255	十勝港	2	漁船の転覆、等
2004.9.5	紀伊半島沖(三重県熊野灘沖)の地震	7.1	津波注意報	66	津波津港	なし	小型船舶17艘転覆
	東海沖(三重県南東沖)の地震	7.4	津波	101			

左：標高5 m 以下の土地に暮らしている人の都道府県別人口（朝日新聞）、右：東日本大震災以前の主な津波災害（気象庁）

津波警報等の種類	解説	予想される津波の高さ
津波警報	大津波	高いところで3 m程度以上の津波が予想されますので、厳重に警戒してください。
	津波	高いところで2 m程度の津波が予想されますので、警戒してください。
津波注意報	高いところで0.5 m程度の津波が予想されますので、注意してください。	0.5 m
津波予報	(地震発生後、0.2 m未満の海面変動が予想される場合など、津波による災害が起るおそれがない場合に発表)	—



左：津波に関する注意報と警報、右：津波警報・注意報の発令の手順（いずれも気象庁）

津波からの復興＝次なる津波への防災： 東日本大震災で津波の被害の大きかった地域のうち、岩手県や宮城県は 1896 年明治三陸津波、1933 年昭和三陸津波、1960 年チリ地震津波など繰り返し津波被害を受けてきた。そのため多くの街が高さ 10m 前後の巨大な防波堤や防潮堤を築造して街を防御したが、2011 年東日本大震災での波高 10m を超える津波の来襲では、その多くが越波損壊した。これにより、単に高く厚く重い防潮堤の築造だけに頼る津波防災の考え方に対してさまざまな代案が提案され、その後の復興で具体化されてきている。



左：東日本大震災では従来型の堤防の多くが損壊、右：より強靱な新工法の提案例（いずれもギケン）

津波に対する防御性を高める新しいタイプの街づくりとしては、地形や街の特徴に適合させた多様性からの選択や、想定する津波の規模に応じて「被害の根絶」「人命の確保」「津波エネルギーの減衰と避難のための時間稼ぎ」といった段階的な防御構造の構築などが挙げられる。

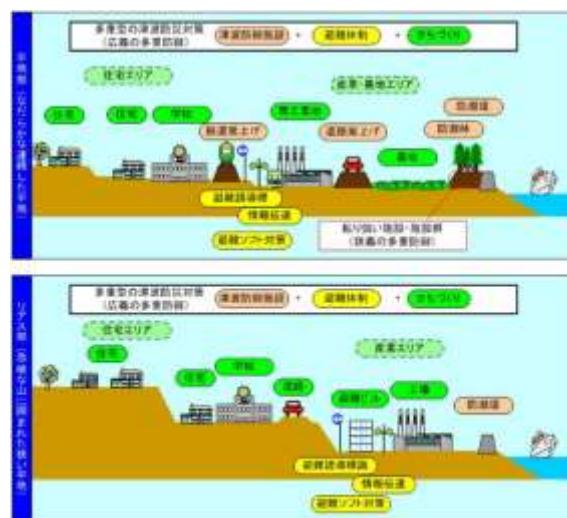
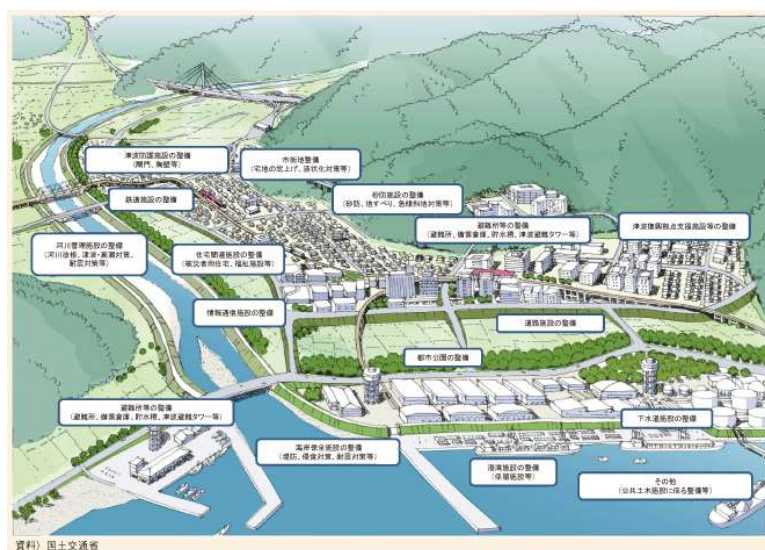
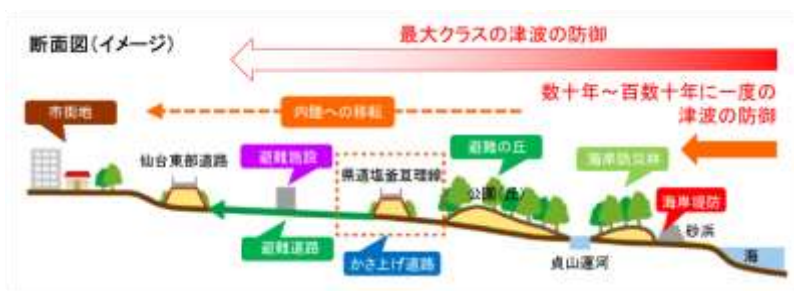


図-10津波防災対策概念図

左：津波被災地の復興のモデルプラン（国交省）、右：立地に応じた町の復興の概念（パシフィックコンサルタント）



左：仙台東部復興道路の様子（河北新報）、中：仙台東部復興道路の路線（河北新報）、右：仙台平野における津波に対する多重防御の考え方（仙台市役所）