



建設ICTマスター養成講座
基礎養成編 選択分野別ソフトウェア実習 地震・津波

都市の地震防災

第3講：都市の津波防災

Tsunami Engineering



Contents

第8章 津波を知る 発生・伝播・遡上

- 津波とは
- 津波の挙動

第9章 津波から人と街を守る 津波被害と津波対策

- 津波被害とは
- 津波被害を想定する
- 津波被害に備える

第8章：津波を知る 発生・伝播・遡上

多くの自然災害の中で、津波は、その規模及び広域性が特筆される。

津波は、なぜ長距離を**減衰せずに伝搬**するのか？なぜ、遠洋より沿岸に**近づくとつれて大きくなる**のか？

波浪は周期が小さく海面付近のみでの運動であるのに対し、
津波は周期が大きく水深方向に**一様な大きなエネルギーでの運動である。**

海域ではその驚異がまだ姿を現さないが、沿岸部で水深が小さくなると**浅水変形から波高が大きくなり**、やがて我々に牙をむく。



8.1: 津波とは 津波の定義

津波とその他の海洋波の区分

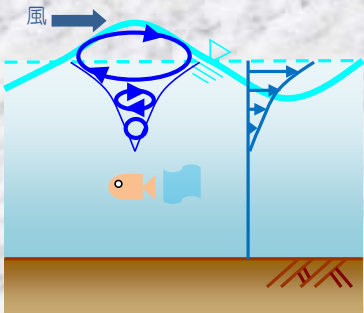
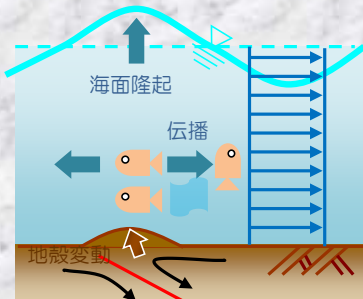
国際語でもある津波（ tsunami ）とは「津」に押し寄せてくる「波」を語源とする。

用語		定義
津波	tsunami	地震、海底地すべり、海底火山噴火、陸域からの土砂・土石流の流入、隕石衝突、核実験等起因する短時間に発生する海洋波の総称であり、古くは高潮に対しても使われた記録があるが、現在用語としては、気象に起因する現象は含まない。
潮汐波, 高潮	tidal wave	潮汐波とは、天体の潮汐力により天体の表面が上下する現象をいい、高潮とは、台風や低気圧により気圧の低下により生じる気圧差から吸い上げ効果での海面の上昇とその吹き寄せをいう。
地震性海洋波	seismic sea-wave	地震に起因して発現する海洋波に対する用語として使われることがあるが、あまり一般化していない。現象としては、既往の津波の多くは、この地震に起因する現象に相当する。

8.1: 津波とは 津波の定義

波浪と津波との相違を、それぞれの現象のメカニズムから見てみよう。

風に起因した波浪と地震に起因した津波とでは、海水移動における相違がある。

区 分	波 浪	津 波
概念図		
流れの分布	海面付近での風によって引き起こされる水粒子の運動は、円軌道になり、海底に届かず閉じる。つまり、 海面付近のみでの拳動 となる。	短時間での広範に及ぶ地殻変動により、海底の上に存在する海水は、横方向へ逃げることなく、鉛直変形分の海面隆起となり、 海中全体での伝播 となる。
海水の移動	波の進行方向への海中での流動は発生しないため、 波の運動量は小さい 。	波の進行方向への海水全体の流動となるため、 波の運動量は大きい 。

同じ波高の波浪と津波であっても、運動エネルギーとしては、波浪では海面部だけの移動で深部における海水の移動の無いのに対し、津波では海底から海面までの海水全体移動となる。

8.1: 津波とは 津波の定義

波浪と津波とで、陸域遡上の性質は如何に異なるのか？

津波は長周期の波である。

区分	波 浪	津 波
概念図	<p>波長が短いため、個々の波力は小さい。</p>	<p>波長が長いため、長時間にわたり波力が持続する。</p>
波の周期と波長	一般に、周期は長くても数十秒程度であり、波長も数百m程度である。	周期は短くとも数分、長い場合には数時間になることもあり、波長も数百kmに及ぶこともある。
陸上遡上	波の波長が短いため、護岸高を超えて海水に浸かることがあっても、すぐに引くため、陸上の奥にまで遡上することはないといえる。	波の波長が長いため、一旦、陸上への遡上した津波は浸水し続ける状態となり、河川を数kmにわたり遡上することもある。

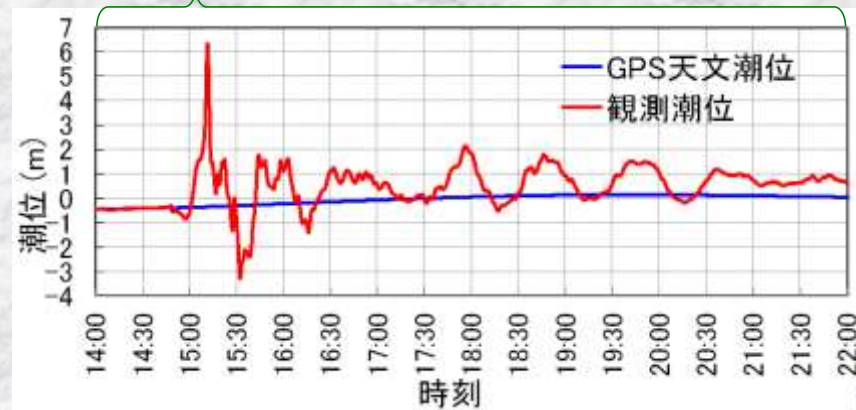
8.1: 津波とは 津波の定義

実際の津波波形は？

高潮や潮汐はいずれも津波とは要因が異なるが、波長としては津波と同様、長波の性質をもつ。

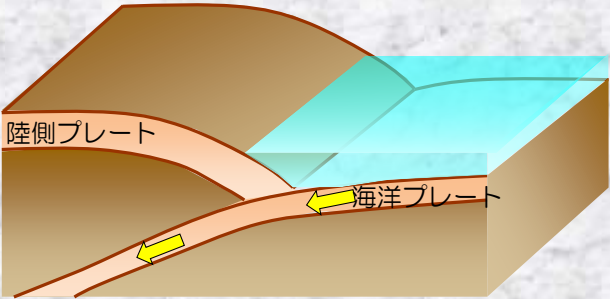
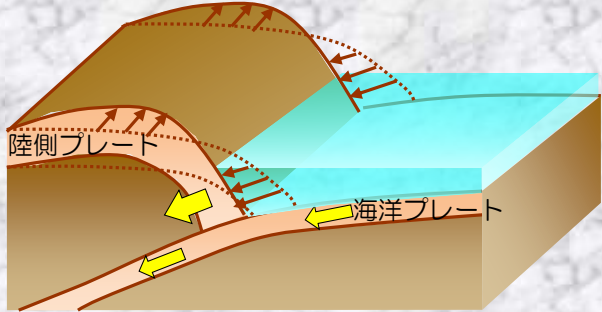


2011年の東北地方
太平洋沖地震時での
観測値



8.1: 津波とは 津波の発生メカニズム

津波は如何にして発生するのか？

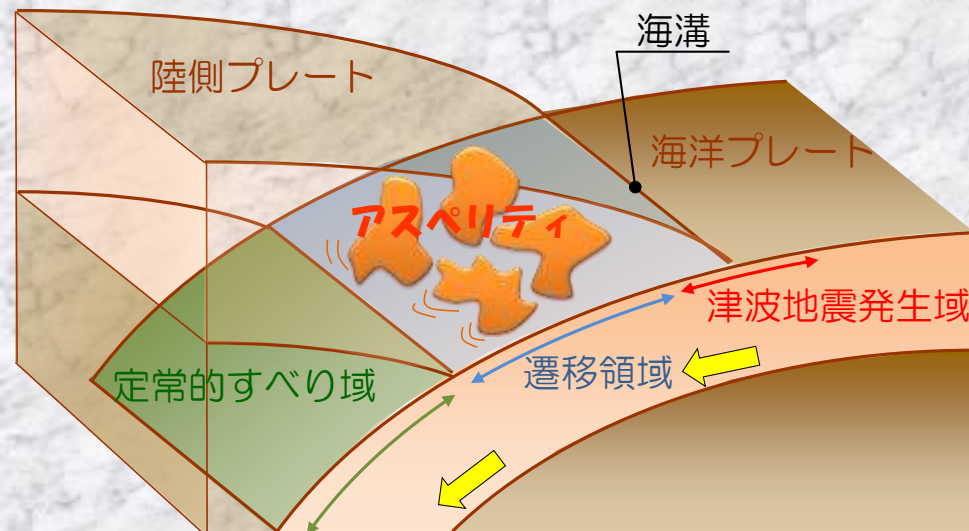
過 程	概 念 図	解 説
海洋プレート の沈み込み過程		<p>地球表面は十数枚のプレートと呼ばれる厚さ数十kmの岩盤で覆われ、マントル対流により移動している。</p> <p>トラフや海溝では、海洋プレートは陸側プレートに比して重いため、陸側プレートの下に潜り込んでいく。</p>
陸側プレート の歪変形成過程		<p>このようなプレート境界域では、各プレートは互いに近づきあうことになる。</p> <p>海洋プレートが陸側プレートの先端を押し込んでいき、歪みによる変形が蓄積される。</p>

8.1: 津波とは 津波の発生メカニズム

そのとき断層面では何が起きているのか？

断層面を覗いてみよう。

プレート境界面における強度（摩擦抵抗）の存在により、二つの性質に大別される。
深部領域では、地震を伴わない定常的なゆっくりとしたすべりにより沈み込む。



アスペリティ領域では固着により歪みが発現し、応力が限界に達すると、すべりが発生する。

8.1: 津波とは 津波の発生メカニズム

浅海底での海底地殻変動に伴う地殻上の海水への衝撃波により起こされる長周期の波

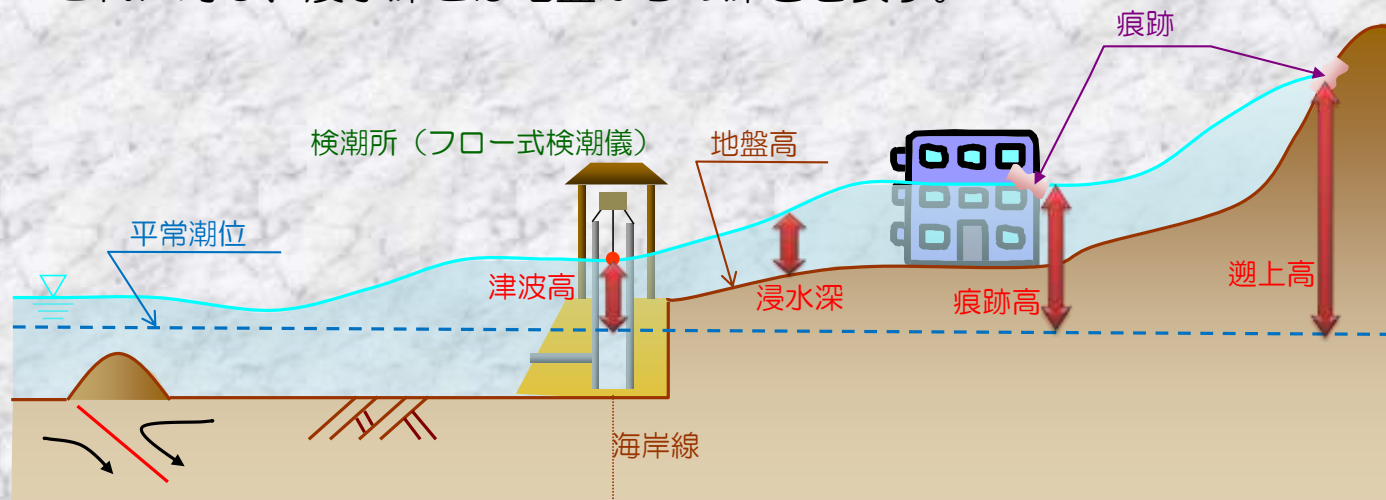
過 程	概 念 図	解 説
地震発生～海面隆起過程		<p>歪みが限界に達すると、アスペリティが外れて、陸側のプレートの先端が跳ね上がり、海底地殻変動が発生する。</p> <p>海底地殻変動は数十秒程度の短時間で広範囲に渡る。一方、その時の海水の運動は静水圧に近く緩やかな状態である。地殻上の海水は横方向に拡散する間もなく拘束され、海底地殻の鉛直変位はほとんど失われることなく、そのまま鉛直方向への海水の移動のエネルギーに変わる。</p>
津波伝播過程		<p>その結果、まず、海底地殻変動分布と同様な海水面分布が発生することになる。この段階では、津波の初期流速はゼロである。</p> <p>この津波波源からの擾乱を初期条件として海面の隆起による位置エネルギーが運動エネルギーに変わり、周囲に伝播していく。これが津波発生メカニズムである。</p> <p>海底での体積変化のエネルギーが消散し、海面に伝わらないような深い震源や、横ずれの卓越した鉛直変位の小さな断層運動では、津波規模は大きくならない。</p>

8.1: 津波とは 津波の高さ

津波高と浸水深と何が違う？

気象庁で発表される「予想される津波の高さ」とは、海岸線における波の高さを表す平常潮位を基準とする。

これに対し、浸水深とは地盤からの深さを表す。



One Point Advice:

津波の長波特性が遠地津波を引き起こす！

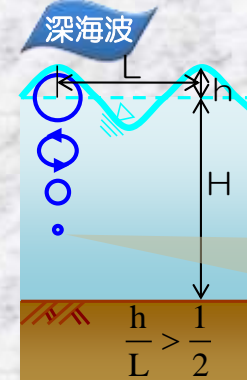
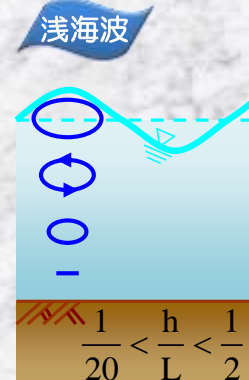
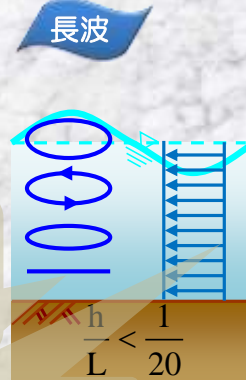
津波は完全流体のごとく、わずかな減衰で伝播し沿岸に達する。

地震も津波も波として伝わるのに、遠く離れたチリ沿岸での地震は日本で感じられることがないが、津波は日本に到達することがある。いわゆる**遠地津波**といわれる現象がある。

流速
 $v = \sqrt{gH}$

波長
 $L = T \cdot \sqrt{gH}$

波長に比して水深が小さいと、水粒子の円運動は海底にぶつかり、押しつぶされる。



流速
 $v = 1.56T$

波長
 $L = 1.56T^2$

水粒子の円運動は海底まで達せず、深くなるにつれほぼゼロになる。

海面から海底までほぼ一様の運動

相対水深による波長の区分

長波とは、水深に比して波高が小さい場合に、水粒子の鉛直加速度が重力加速度に比べ、十分に小さいという特徴の波である。

波源付近では、水深に比べて波長が長く波は長波近似となり、**海底から海面までの水平方向の水粒子の速度は一樣**であると考えてよい。

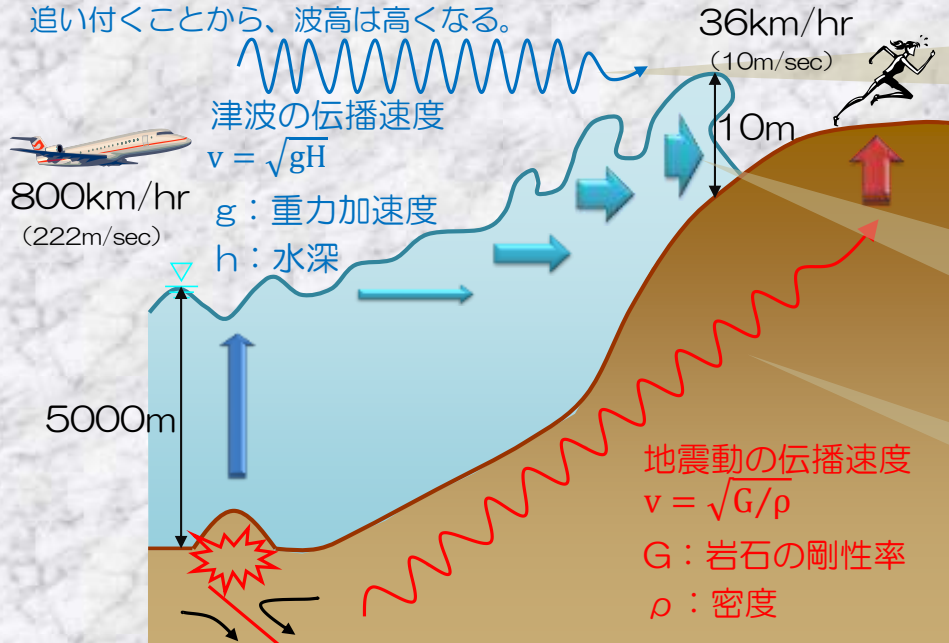
つまり、速度勾配の無い深さ方向に一定分布であるため、水の粘性力がはたらかず、**海底摩擦による津波のエネルギー損失が発生せず保存**される。

8.2: 津波の挙動 津波の速度

なぜ津波は地震の後から遅れてくるのか？

沿岸部で感じられる地震動に対して、津波が沿岸部に達するまでの時間は様々である。
地震も津波もともに波であるが、この到達時間の相違は、それらの波の伝達速度に起因する。

水深が浅くなると、流速が徐々に遅くなるため、背後の波が前の波に追いつくことから、波高は高くなる。



水を媒体とした伝播。
長波であるため、ほとんど減衰することなく、遠方まで伝わる。

沿岸に近づくにつれ流速が小さくなり波高が高くなる性質があるため、むしろ、沿岸部で増長する性質をもつ。

岩盤を媒体とした伝播。
地震は離減衰するため、遠方の場合には伝わらない。

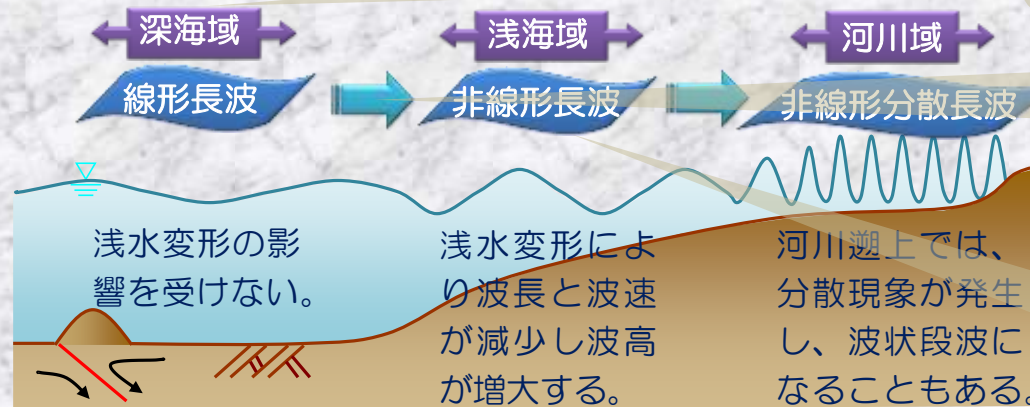
8.2: 津波の挙動 津波の変形特性

津波は伝播過程において、異なった表情を見せる？

広範で速い地殻変動に対し、直上の海水は横方向へ逃げきれず、地殻変動の鉛直変形分だけ海面が隆起することになるので、一般に**地殻変動量と初期水位変動量は同程度**となる。

なぜ**沿岸部での津波高と地殻変動量には相関がなく**、沿岸部でときに十数mもの高い波になって被害を及ぼすのか？

津波はその伝播過程において変化しているのである。



沖合では津波は波高に比べて水深が深いため、海底面の摩擦の影響を受けない線形長波で近似できる。

沿岸方向に進行するにつれて、津波が受ける海底面の影響は徐々に増す。

水深が減少すると、流速が小さくなり波高が大きくなる浅水変形が発現する。

8.2: 津波の挙動 津波の変形特性

浅水変形とは？

沖での津波の波長は長く、
感じ難い。

沖での津波の波
高は低い。

10~100km

流速が遅くなり背
後の波が追い付き、
波力は増す。

波高

水深

水深が浅くなるに従い
波高は増していく。

波形勾配が増し、波の
形状は徐々に前傾して
いく。

波長 L は流速 v と周期 T との積で表され、流
速 v は水深に応じて小さくなるため、周期
 T 不変の条件では沿岸に近づくとも波長は短
くなる。

8.2: 津波の挙動 津波の変形特性

津波の方向は、なぜ海岸線に向かって反れることなく進行し被害を及ぼすのか？

海底地形が段状に変化している海洋での沿岸方向への津波の伝播を考えてみよう。

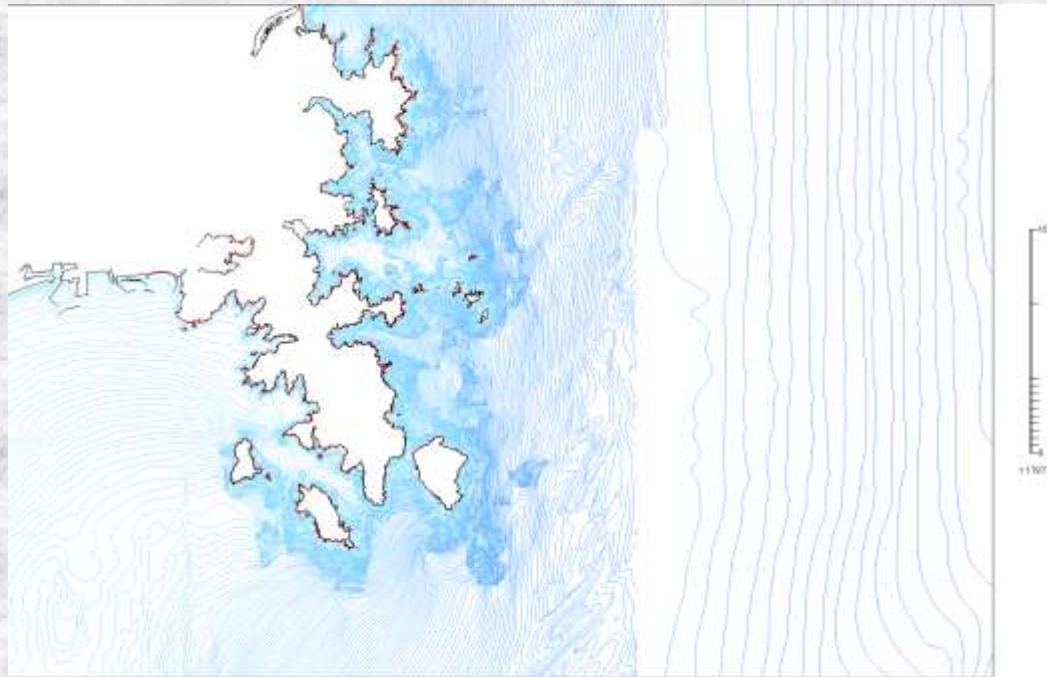
項目	津波の屈折	スネルの法則
概念図		
伝播特性	水深変化部で津波の流速が変わるため、その流速差から水深が浅い方向に巻き込まれるように曲がりながら進む。	津波の入射角と屈折角との関係は、次式で表せる。 $\frac{v_1}{\sin \theta_1} = \frac{v_2}{\sin \theta_2}$

伝播速度は水深に依存するため、地形変化により流速が変化することから、**地形変化地点での流れには速度差が生じる**。この速度差から、津波は水深が浅い方向に巻き込まれるように伝播する。

8.2: 津波の挙動 津波の変形特性

津波の屈折: 津波が向かってくる?

実際の等深線は海岸線に近づくにつれて複雑に変化するため、沿岸付近における津波の挙動には様々な変化が見られる。



実際の等深線((財)日本水路協会M7000シリーズ三陸沖)



8.2: 津波の挙動 津波の変形特性

沿岸付近における津波の変化特性としてのエネルギー集中

典型的な変化特性として、島や半島、岬等での津波のエネルギー集中は**津波の屈折や回折**から説明できる。

波向線間隔での津波のエネルギーは保存されるため、突出地形部で**波向線の間隔が狭くなるに従い、水位は上昇**する。

遠浅の湾内では囲まれた地形からその中で**反射を繰り返し、複雑な流れ**となり、水位が上昇する傾向がある。

湾横断幅より湾縦断方向の長さ ℓ が大きい湾では湾の長さで決まる**固有周期 T_0** をもっている。

項目	概念図	津波の挙動
津波のエネルギー集中		<p>半島や岬のように、舌状に突き出した地形では、沿岸での海底傾斜から等深線は半島を囲むような形状となる。</p> <p>海底地形が海岸に向かって徐々に浅くなるため、屈折により津波が集中する。</p>
湾地形での波高の上昇	<p>反射による遠浅湾内での流れ込み</p> $T_0 = \frac{4\ell}{\sqrt{gH}}$ <p>T_0: 湾内水の固有周期 H: 湾内平均水深</p> <p>湾, V字谷, U字谷</p>	<p>遠浅の湾やV字谷、U字谷地形では、地形では浅海域への流れ込んだ内は反射を繰り返した挙動となる。</p> <p>津波の周期が湾形状から決まる湾内の固有周期と一致すると、共振により波高が大きくなる。</p>

One Point Advice:

コリオリの力により津波の伝播方向は変わる！

波源からの津波の伝播における指向性

水の貯まった容器の水面上でそっと指を触れると、波が起こって同心円状に伝わっていくことを観察できる。

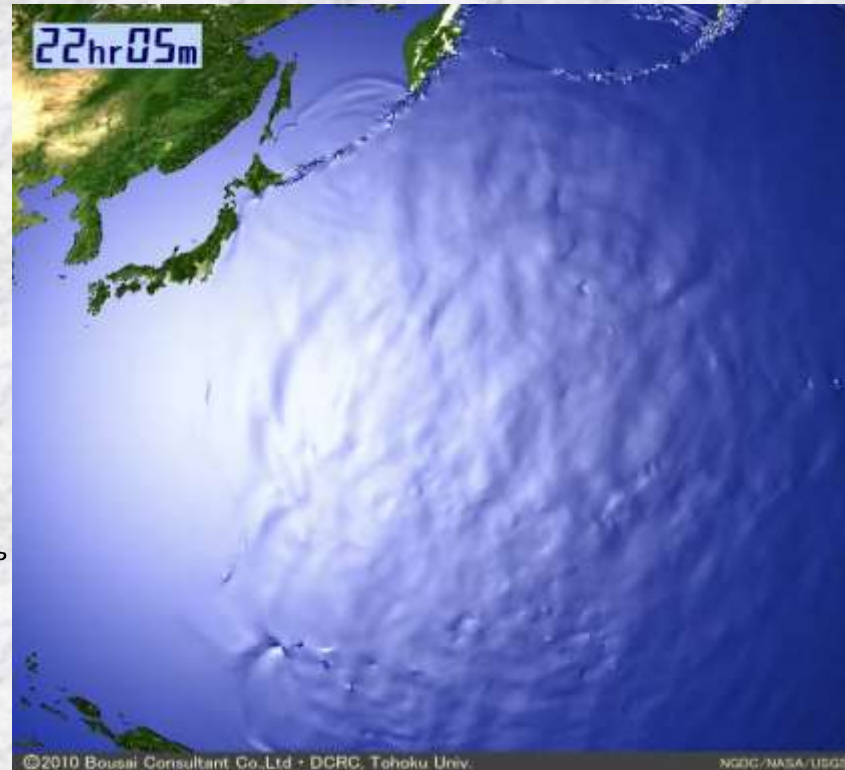


水平な底の容器の中では水深が一定であるため速度が一定であり、かつ水は均質なので流れの等方性からすべての方向に均等に波が伝わる。

では、津波の伝播の場合はどうか？



津波の方向性は初期水位変動及び海底地形、地球の自転に依存する。



©2010 Bousai Consultant Co., Ltd. + DCRC, Tohoku Univ.

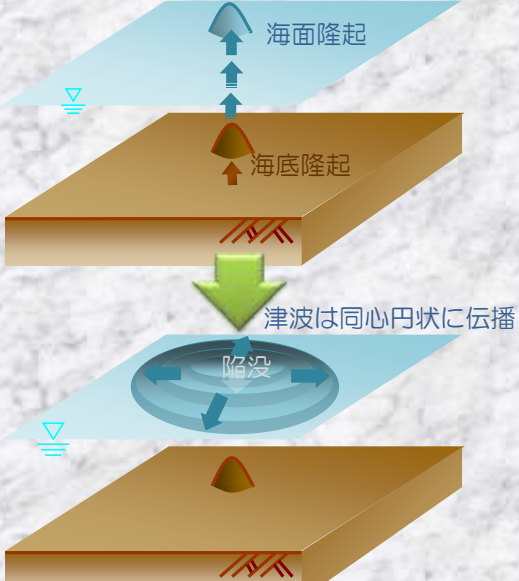
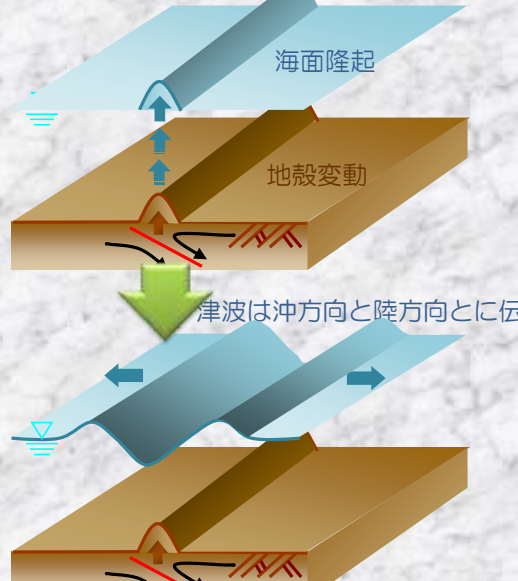
NGDC/NASA/USGS

東北大学津波研究室より提供

One Point Advice:

コリオリの力により津波の伝播方向は変わる！

実際には、海底地殻変動は有限長であり、長方形または楕円で近似される。

区分	平坦な地形での点源からの伝播	細長い波源からの一次元伝播
概念図		
伝播特性	<p>地殻変動が局所的であれば、海面の初期水位分布も局所的となり、海面の初期水位変動は点状となり、擾乱は同心円状に伝わる。</p>	<p>海底地殻変動はプレート収束帯のような線状となる。仮に非常に細長い波源を仮定すると、一次元伝播とみなすことができ、海面の初期水位分布が線状となり、擾乱は各方向に50%で伝わる。</p>

One Point Advice:

コリオリの力により津波の伝播方向は変わる！



地球は曲率をもった球体であり24時間に一回転で自転している。

遠洋からの津波では、地球の曲率と自転によるコリオリ力から、伝播方向にズレが発現する。

区 分	北半球での南方向移動が受ける力	北半球で北方向移動が受ける力
概念図	<p>一日一周西から東へ 自転方向</p> <p>緯度により自転速度が異なる</p> <p>流向が西側にそれる</p> <p>地軸</p>	<p>一日一周西から東へ 自転方向</p> <p>緯度により自転速度が異なる</p> <p>流向が東側にそれる</p> <p>地軸</p>
自転の影響	南に向かうに従い、自転速度が遅くなるのに対し、出発点での自転速度が小さいため、追いつかれて、流向は真南より西側にそれる。	北に向かうに従い、自転速度が遅くなるのに対し、出発点での自転速度が速いため、追い越して、流向は真北より東側にそれる。

第9章:津波から人と街を守る

津波被害と津波対策

津波避難サインは、日常生活から目にすることから、反射的に認識できる必要がある。

無意識に理解し易い効果とは？



色彩	意味	対比色	形状	意味
	義務的行動 指示			禁止 義務行動
	注意 危険			警告 (JIS: 注意の意)
	安全 避難			情報 (指示を含む)



定義・学習・啓発



注意・警告・喚起



避難先

「津波防災サインガイドライン(案案),2012.5.15,
公益社団法人 日本サインデザイン協会」より



9.1: 津波被害とは 津波被害から学ぶ

東日本大震災での未曾有の津波被害は、津波防災対策における多くの教訓をもたらした。

津波波源となるプレート境界が沿岸から近い日本では、津波の到達時間は短く、津波発生に対する**被害ポテンシャルは高い**。

稀にしか発生しない一方、ひとたび発生した場合には、甚大な被害となるリスクを抱えている「**低頻度大規模災害**」への備えが、**土木技術者としての責務**となる。

被災時の記録映像は、津波による**被災の実態を把握する機会**となり、これらの有用な情報は、今後の津波防災対策に活かすべき課題となる。



9.1: 津波被害とは 津波被害から学ぶ

東日本大震災での未曾有の津波被害は、津波防災対策における多くの教訓をもたらした。



衛星: IKONOS 撮影日2011年3月12日

衛星画像(a) 福島県南相馬市(被災前及び震災翌日)

高さ680kmの宇宙からの災害監視

近年のリモートセンシング技術の進歩により、衛星に備えられた各種センサにより様々な高精度情報を得ることができ、期待される用途の一つに防災面での活用が挙げられる。

安全面から被災地への立ち入り制限や上空の飛行が困難な場合において、地上の事物の判読に長けた衛星からの情報は、**広域的な被害実態の把握**を可能とする。

広域における**被災前後の地形の差分抽出**から、津波被害の実態が見えてくる。



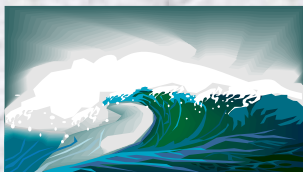
9.1: 津波被害とは 津波被害から学ぶ

東日本大震災での未曾有の津波被害は、津波防災対策における多くの教訓をもたらした。



衛星: GeoEye-1 撮影日2011年13日

衛星画像(b) 岩手県陸前高田市(被災前及び震災二日後)



9.1: 津波被害とは 津波被害の分類と形態

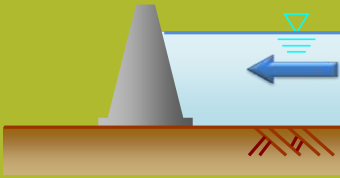
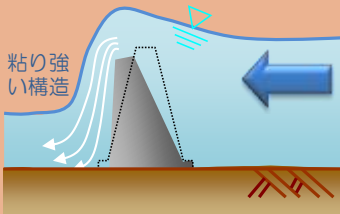


発生時刻や生活環境、避難状況の相違に伴い、被害形態は様々な側面を有する。

被害種別	内 容	
人命被害	形態	溺死、漂流物による打撲・骨折、漂流中の異物呑込みによる病気等。
	原因	津波軽視、警報非伝達、立ち返り、交通渋滞等による避難行動の遅れ。
家屋・財産被害	形態	家屋の流出・破壊・浸水。浸水による電気製品などの障害。自動車の流失。
	原因	津波による波力・浮力・流水力。流木・流出船舶・流出家屋・車の衝突力。
防災構造物被害	洗掘による破壊、倒壊、変位。漂流物衝突に起因する破損。落石防止工の転倒。	
沿岸構造物被害	原子力 発電所	送電線鉄塔の倒壊に伴う外部電力の喪失、非常用ディーゼル発電機の海水水没に伴う故障、ポンプ施設、電気設備の浸水に伴う機能喪失。
	空港	滑走路の津波浸水、車や船等の漂流物衝突に伴う航空機被害・建物被害、海水水没に伴う電源設備の故障、アクセス鉄道トンネルの冠水。
交通障害	鉄道	法面洗掘、道床決壊、軌条移動、鉄橋変位、臨港線埋没。
	道路	漂流物衝突による変位や落橋、漂流物堆積による交通閉鎖。
	港湾	局所洗掘による港湾構造物の破壊、流出物による港口閉塞等の機能障害。
ライフライン被害	水道	漂流物衝突による消化栓・給水栓破壊、河川よりの取水口の破壊。
	電力	電柱倒伏・流出による送電停止、発電所浸水による障害や停電。
	通信	電柱や架空ケーブルの被害、電話機の冠水被害。
	下水道	排水溝を通じての浸水。
水産業被害	養殖筏や漁網の流出、水産物流失・死滅、漁船流出・破壊、漁船発火焼失。	
農業被害	冠水による作物被害、流入土砂による農耕地埋没、用水路埋没。	
火災	流出家屋台所から出火、漁船機関室からの出火、漏電による発火。	
地形変形	河口砂州切断、浅瀬の変化、砂浜の変形、河川内堆砂。	

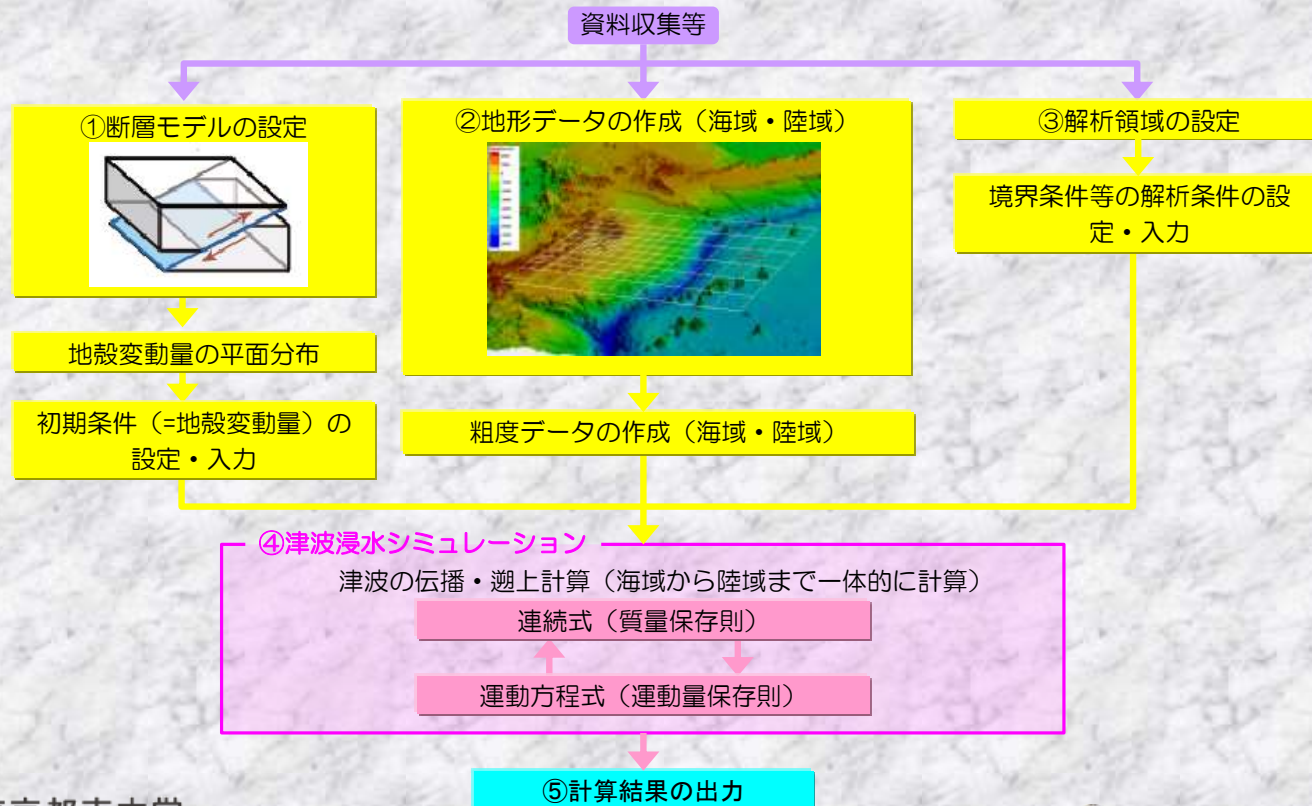
9.1: 津波被害とは 津波被害の想定

東日本大震災を契機として、2段階レベルの津波を想定することとなった。

津波レベル		比較的頻度の高い津波	最大クラスの津波
			
		海岸保全施設等の建設を行う上で想定する津波	総合的防災対策を構築する上で想定する津波
津波レベルの定義		発生頻度は高く、津波高は低いものの大きな被害をもたらす津波	発生頻度は極めて低いものの、甚大な被害をもたらす最大クラスの津波
津波の発生頻		数十年～数百年に一回程度の発生確率	数百年～千年に一回程度の発生確率
達成すべき防災目標		・人命を守る。	
		・財産（堤内地）を守る ・経済活動（堤内地）の継続 ・発生直後に必要な港湾機能の継続	
総合的津波対策	防災施設	・堤内地の浸水を防止するような計画・設計	
	土地利用	・堤外地の重要な港湾施設が被災しないよう計画	
	避難対策	・最悪のシナリオを想定して計画	
		・経済的損失の軽減 ・大きな二次災害の防止 ・早期復旧	
		・堤内地の浸水を許すが、破堤等により被害が拡大しないよう計画・設計 ・必要に応じ多重防御を検討 ・堤内地の浸水を前提として計画	

9.1: 津波被害とは 津波被害の想定

最大クラスの津波に対する被害想定を実施するための手段が、津波浸水シミュレーション

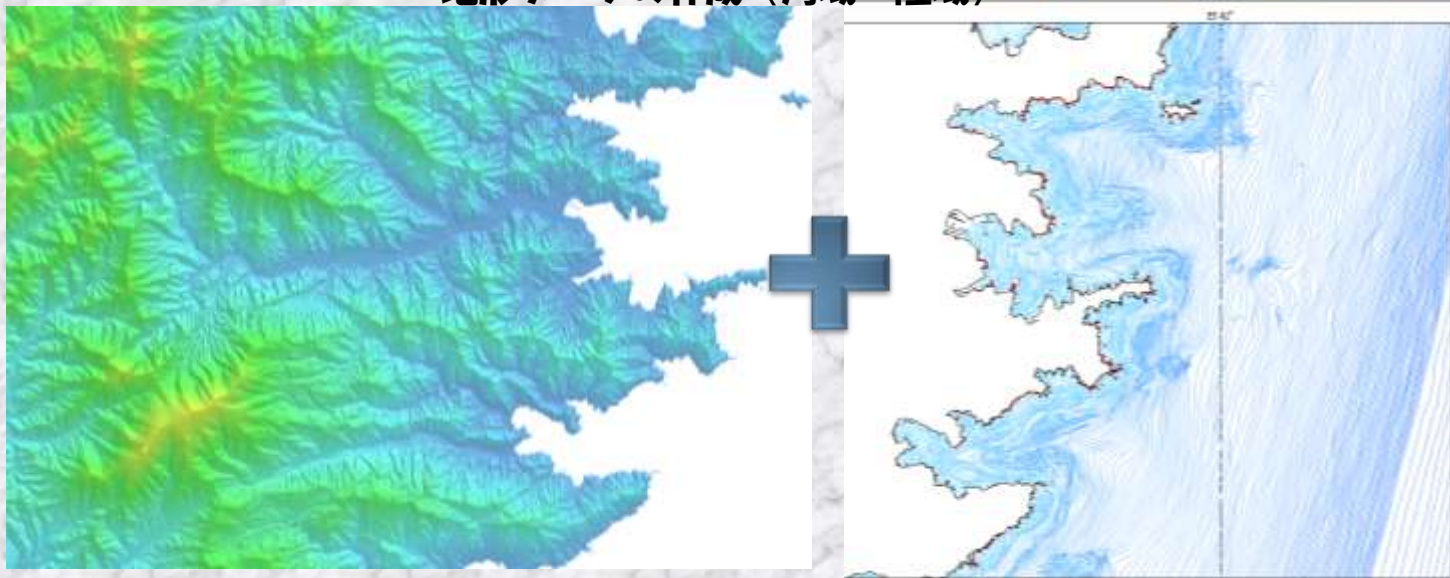


9.1: 津波被害とは 津波被害の想定

最大クラスの津波に対する被害想定を実施するための手段が、津波浸水シミュレーション

発生実績のない津波レベルに対する浸水域や津波挙動の把握、被害想定を行うためには、津波浸水シミュレーションが有効な手段となる。

地形データの作成（海域・陸域）



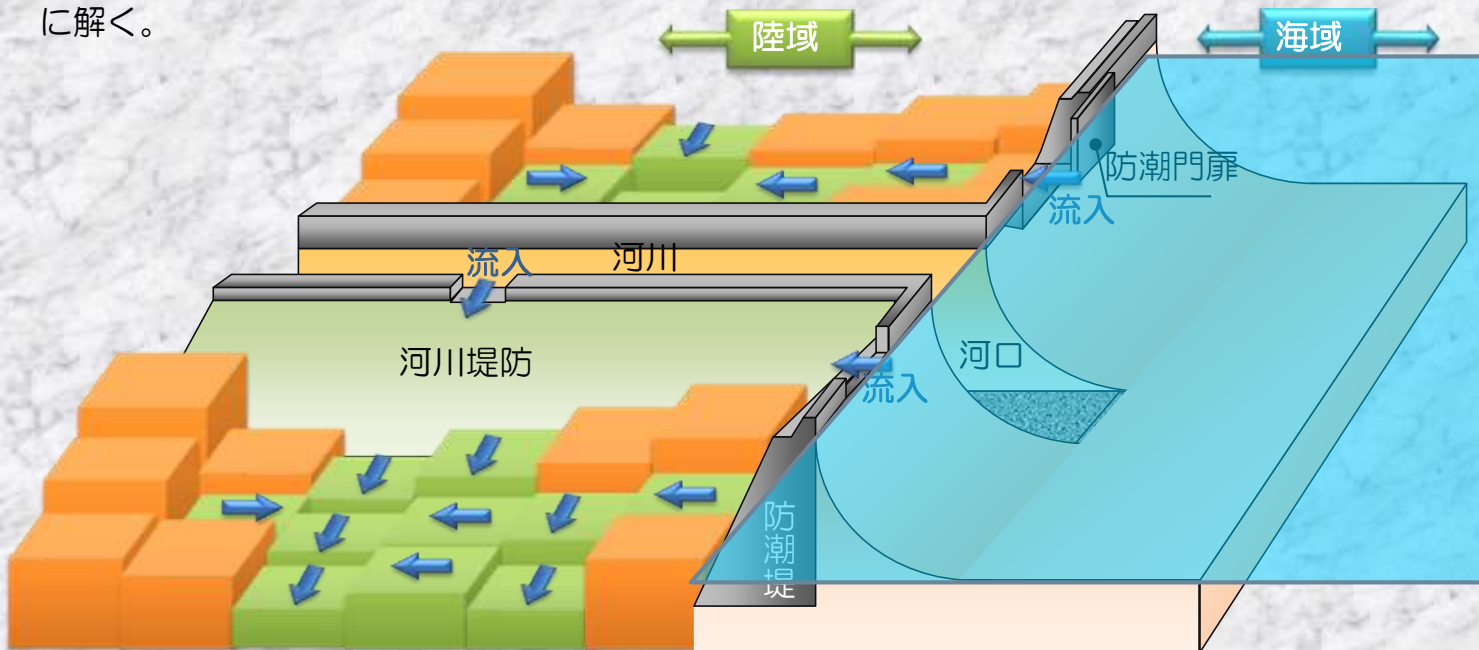
陸域の地形データと海域の等深線データから作成した海底地形とを合成することから作成



9.1: 津波被害とは 津波被害の想定

海底での摩擦と移流項を勘案した非線形長波理論(浅水理論)による数値解析手法

解析領域を構造格子で分割し、非線形長波理論の運動方程式と連続式を数値解析により経時的に解く。

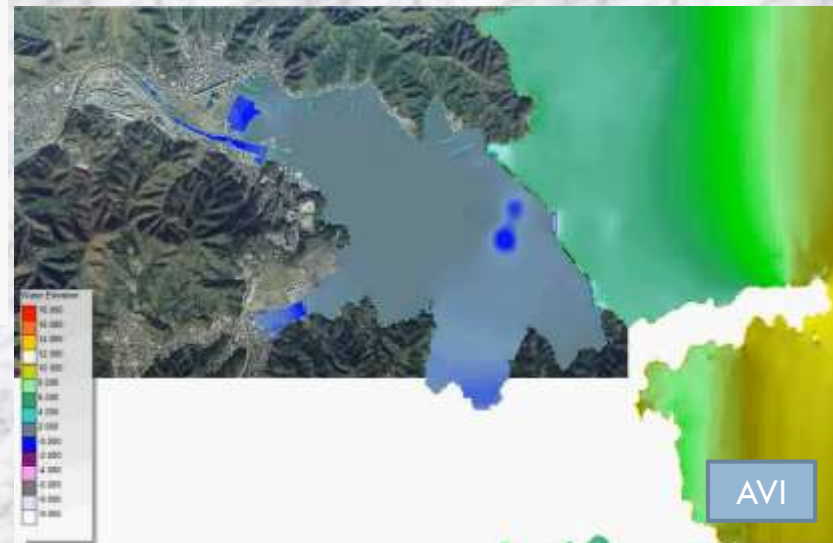


津波が海域をどのように伝播し、どのように陸域に到達、河川を遡上、浸水していくか数値解析でシミュレートできる。

9.1: 津波被害とは 津波被害の想定

最大クラスの津波に対する被害想定を実施するための手段が、津波浸水シミュレーション

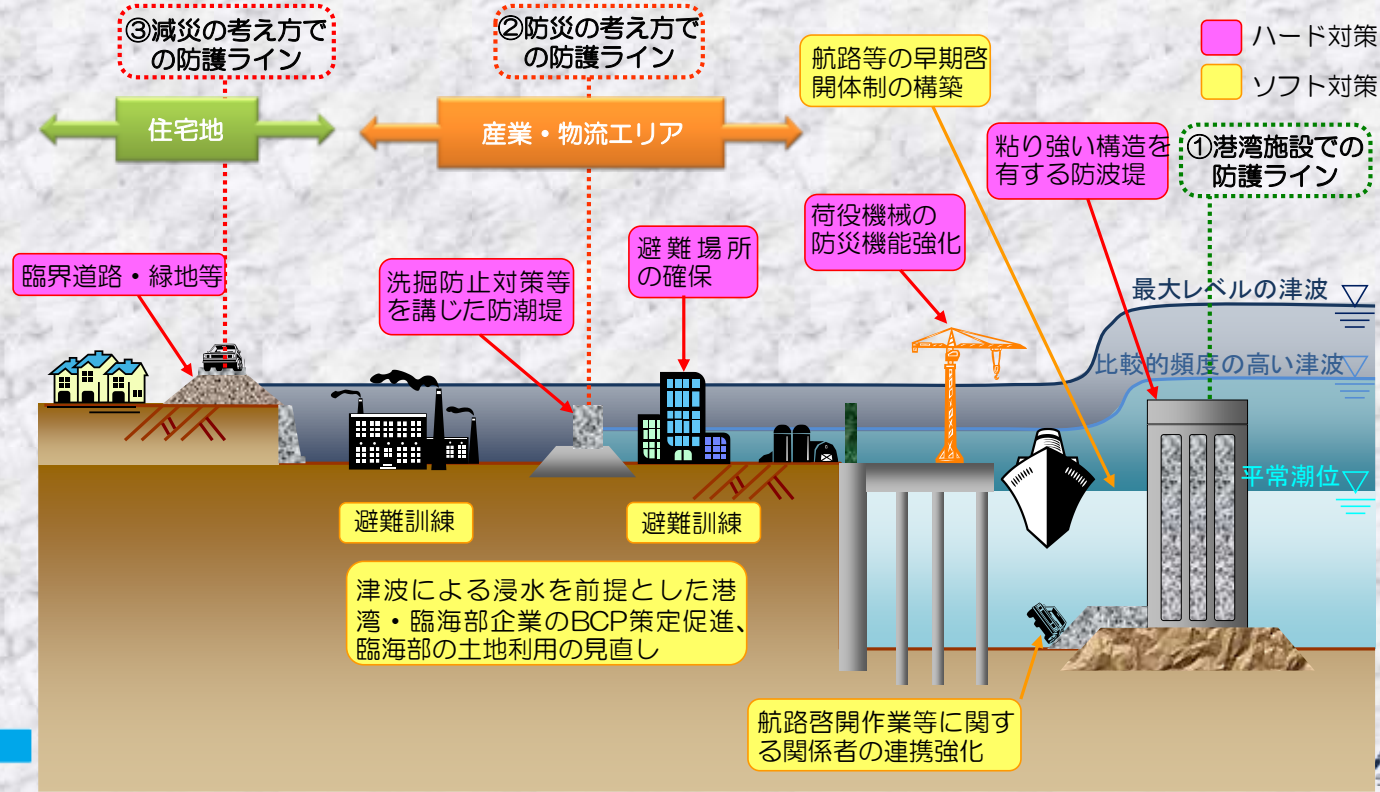
津波の初期水位は初期条件として与える方法
と境界条件として与える方法とがある。



9.1: 津波被害とは 津波被害に備える

「多重防御」による津波対策とは？

東日本大震災を契機として、ハード対策での「一線防御」から、ハードとソフトの施策を柔軟に組み合わせた「多重防御」による「地域づくり」での津波防災への転換が図られている。



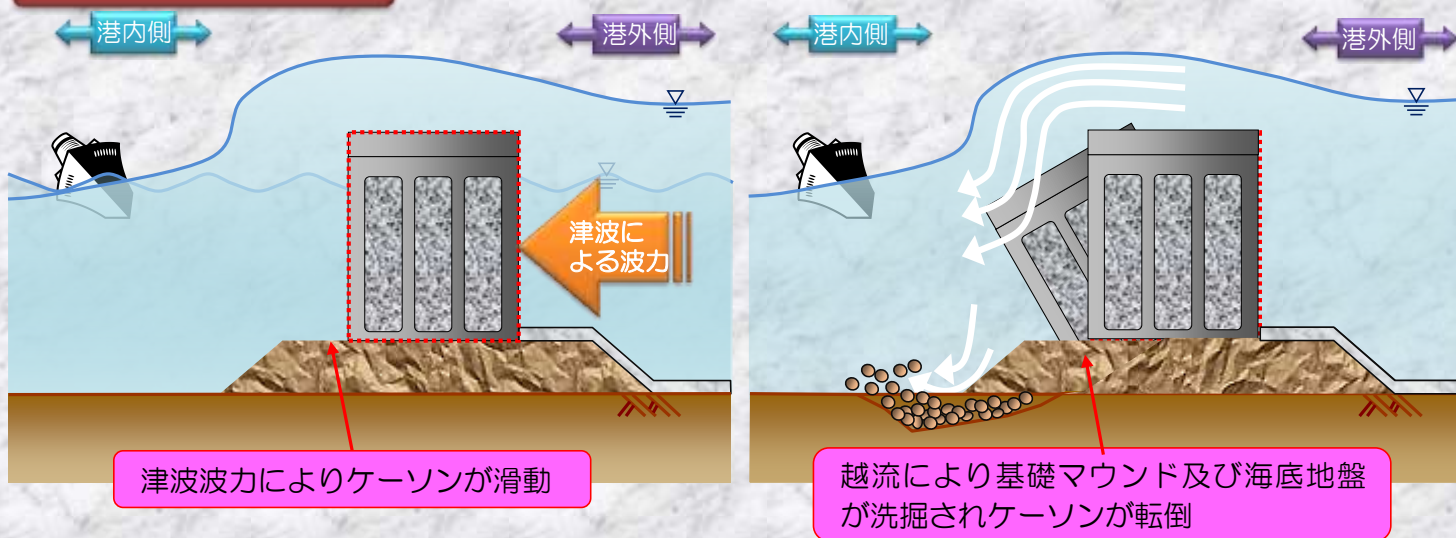
9.1: 津波被害とは 津波被害に備える

解明された被災メカニズム

東日本大震災における津波被害の特徴として、施設天端を超波した津波による裏法尻の洗掘が挙げられる。

この裏法尻の洗掘から基礎地盤が崩れ、裏法被覆工の流出、堤体土の流失、倒壊に至る過程が指摘される。

防波堤の被災メカニズム



9.1: 津波被害とは 津波被害に備える

粘り強い構造とは？

震災から得られた知見の一つとして、全壊に至らなかった防波堤や堤防等が被害軽減に限定的ではあるが寄与していたことが確認された。

海岸防護施設の高さを超えることを前提とした最大クラスの津波に対する防災対策においては、防御効果が‘粘り強く’発揮される構造の導入が進められている。

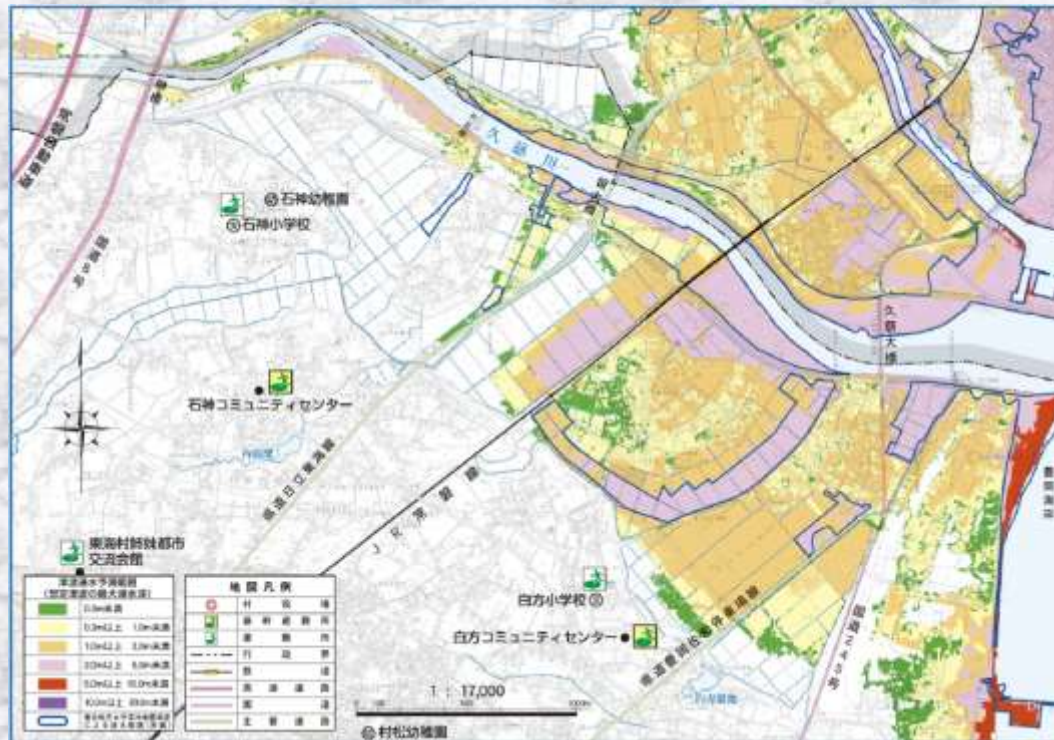
粘り強い構造の防波堤





9.1: 津波被害とは 津波被害に備える

津波ハザードマップとは？



市町村地域防災計画に基づき、**情報伝達方法、避難施設及び避難路**等の事項が記載された地図

津波浸水シミュレーションから得られる**津波浸水想定(最大クラスの津波に対し想定される浸水域及び浸水深)**が地図上で色別表示され、津波到達時間や海拔等の高さ情報が記述されることもある。

津波ハザードマップの例(茨城県東海村)

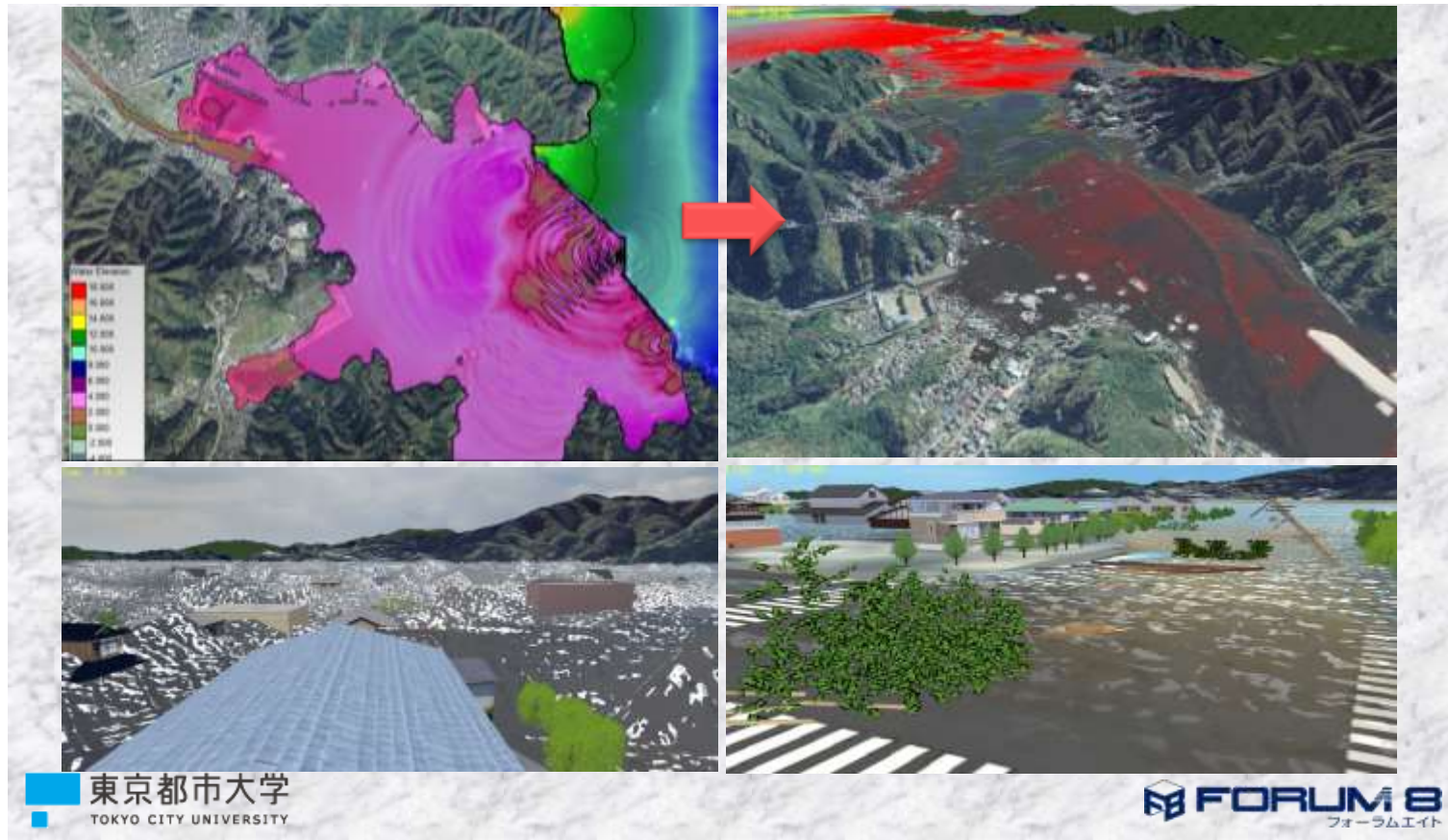
One Point Advice: バーチャルリアリティで考える津波対策



One Point Advice:

バーチャルリアリティで考える津波対策

津波浸水シミュレーションを如何に活用して実際の減災に活かせるか？



One Point Advice:

バーチャルリアリティで考える津波対策

津波浸水シミュレーションを如何に活用して実際の減災に活かせるか？





地震・耐震・津波・減災を学ぶ

都市の 地震防災

Earthquake Engineering
Seismic Engineering
Tsunami Engineering
Disaster Prevention & Reduction

ご清聴ありがとうございました。

 **東京都市大学**
TOKYO CITY UNIVERSITY

 **FORUM 8**
フォーラムエイト