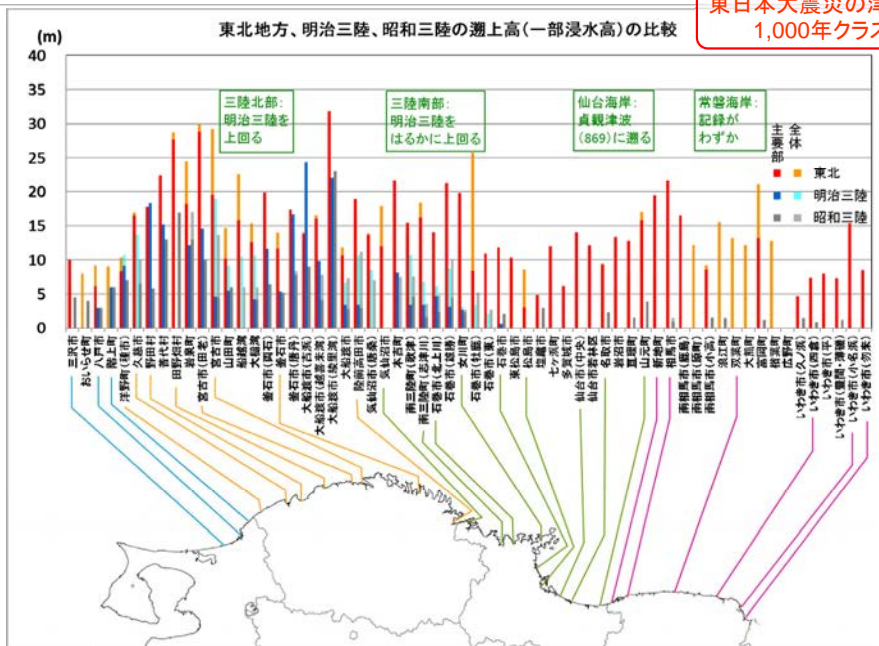


津波・高潮の二段防災体制

高知工科大学名誉教授
東京大学名誉教授
磯部雅彦

東日本大震災における津波の特性

東北地方太平洋沖地震津波と明治・昭和三陸地震津波の比較

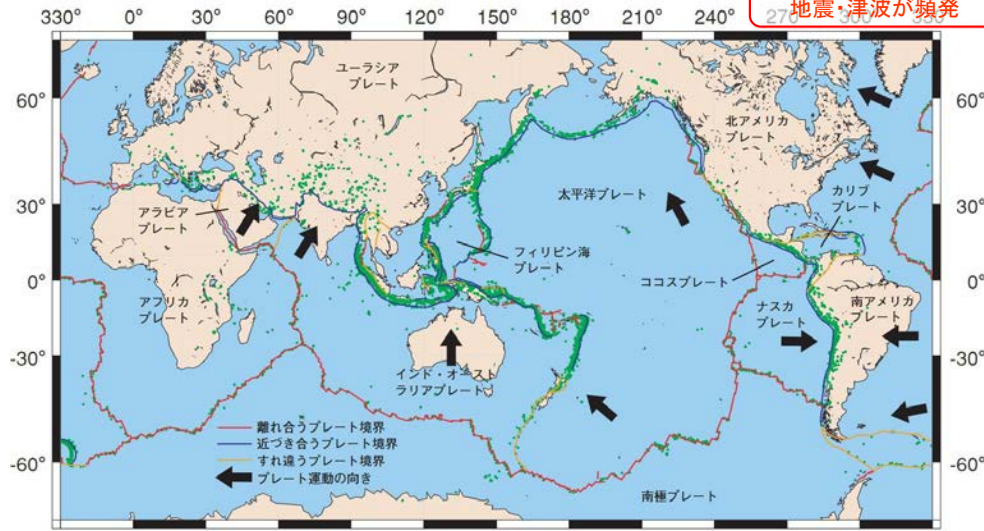


津波の発生メカニズムと津波の増幅

[東北地方太平洋沖地震津波合同調査グループ (<http://www.coastal.jp/tjtj/>)による速報値(2011年4月30日参照)に福島地域を追加して作成]

世界の地震分布とプレート境界

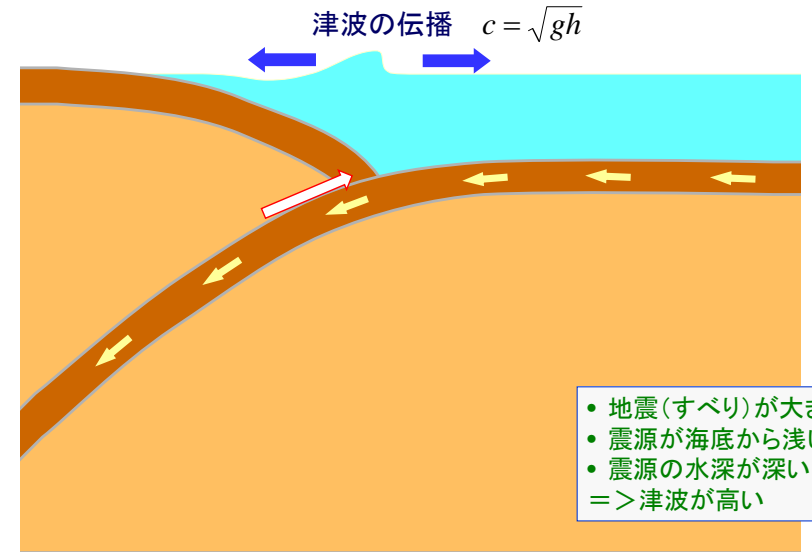
収束型プレート境界で地震・津波が頻発



震央（緑色の点）は、USGS（米国地質調査所）の資料をもとに、1998-2007年、M5以上、100kmより浅い地震を表示（気象庁作成）。プレート境界は、テキサス大学地球物理学研究所（The PLATES Project）の資料をもとに作成。

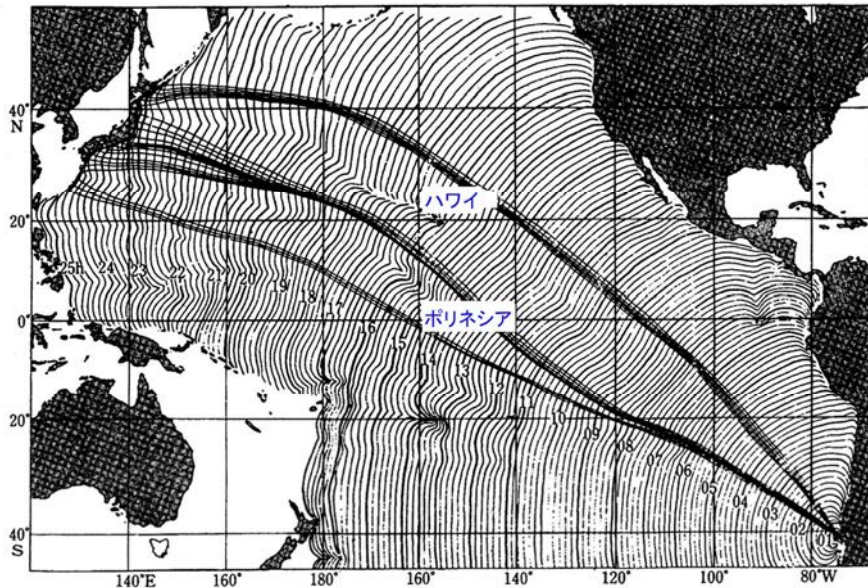
[地震本部（2020.12.14参照）による：https://www.jishin.go.jp/main/pamphlet/wakaru_shiryo/wakaru_shiryo4.pdf]

地震による津波の発生



- 地震（すべり）が大きい
- 震源が海底から浅い
- 震源の水深が深い
- => 津波が高い

太平洋を渡るチリ津波の伝播

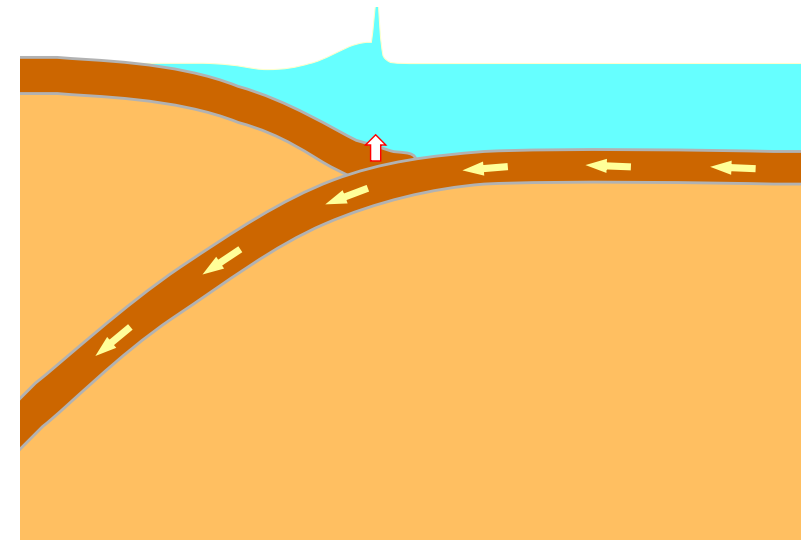


渡辺偉夫：日本被害津波総覧[第2版]，248p.

地震による津波の発生

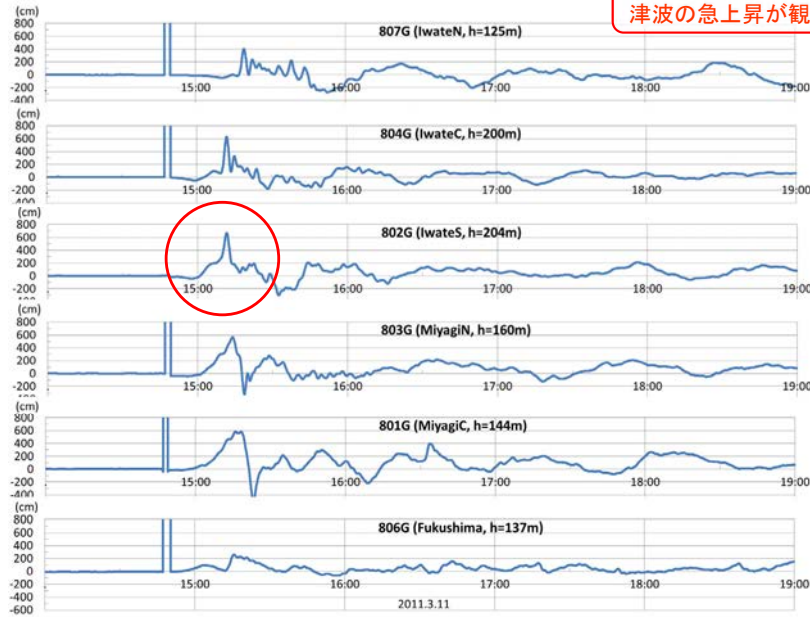
大すべり：極めて高いが、短時間・沖合遠方

大すべりにより海面が急上昇



GPS波浪計による沖合での津波波形

大すべりによる
津波の急上昇が観測された



[国土交通省港湾局による観測・港湾空港技術研究所による処理データ (2011)]

深海波高・長波波高・遡上高の相互関係

$$\text{連: } \frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(hu) = 0$$

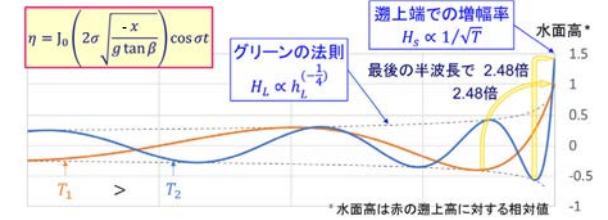
$$\text{運: } \frac{\partial u}{\partial t} + g \frac{\partial \eta}{\partial x} = 0$$

$$\rightarrow X = 2\sigma \sqrt{-x/g \tan \beta}$$

ベッセル方程式:

$$\frac{d^2 \hat{\eta}}{dX^2} + \frac{1}{X} \frac{d\hat{\eta}}{dX} + \hat{\eta} = 0$$

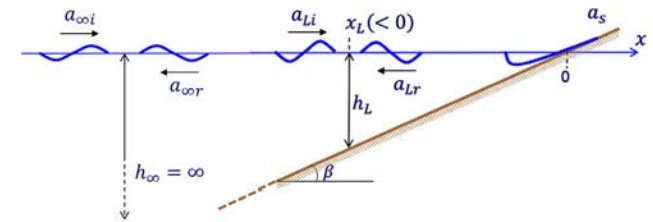
$$\eta(X) = a_s J_0(X) e^{-i\sigma t}$$



$$a_s/a_{\infty i} = \sqrt{2\pi/\tan \beta}$$

$$\frac{a_{Li}}{a_{\infty i}} = \frac{T}{4\pi} \sqrt{\frac{g}{h_L}}$$

$$\frac{a_s}{a_{Li}} = \sqrt{\frac{8\pi^2}{T \tan \beta}} \sqrt{\frac{h_L}{g}}$$



津波の周期と遡上高の関係 (Chat GPT-3.5)

— 津波の遡上高は周期によってどのように変化しますか？ (2023.08)

津波の遡上高は、以下のような要素によって変化します。

- 津波の周期: 津波の周期が長い場合、遡上高は高くなる傾向があります。
- 津波の波高: 津波の波高が高い場合、遡上高は高くなる傾向があります。
- 地形: 地形によって、津波の遡上高に影響があります。例えば、海岸線が湾曲している場合、遡上高は高くなる傾向があります。

以上の要素によって、津波の遡上高は変化します。ただし、津波の遡上高は地域や事例によって異なるため、一概に言えない部分もあります。

— 津波の周期が短いと、遡上高はどうなりますか？ (2023.08)

津波の周期が短い場合、遡上高は低くなる傾向があります。津波の周期が短いと、波の間隔が短くなり、波が海岸に到達する回数が増えるため、遡上高が低くなるとされています。ただし、津波の遡上高は地形や波高などの要素によっても影響を受けるため、一概に言えない部分もあります。

海岸構造物の被災状況

海岸堤防の被災

堤防の破壊は裏法から



④ 堤防の全壊

① 裏法の剥離
裏法戻の洗掘

裏法の強化
3面の一体化
堤体幅の増大
水たたきの延長

③ 表法の崩壊

② 中込土砂の流出

[宮古市金浜]

東日本大震災からの復興の方針 — 二段防災 —

津波対策の枠組み

レベル1・2(二段防災)の津波防災体制

- 東日本大震災復興構想会議:「減災」(2011.6.25)
- 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:二段防災の枠組み(2011.6.26)
- 海岸における津波対策検討委員会:設計津波の水位の設定方法(2011.6.27)
- ← 高い堤防は技術的に可能、しかし、費用、日常生活、生態系、さらなる想定外などの問題

最大クラスの津波(レベル2津波) ←(津波防災地域づくり法)

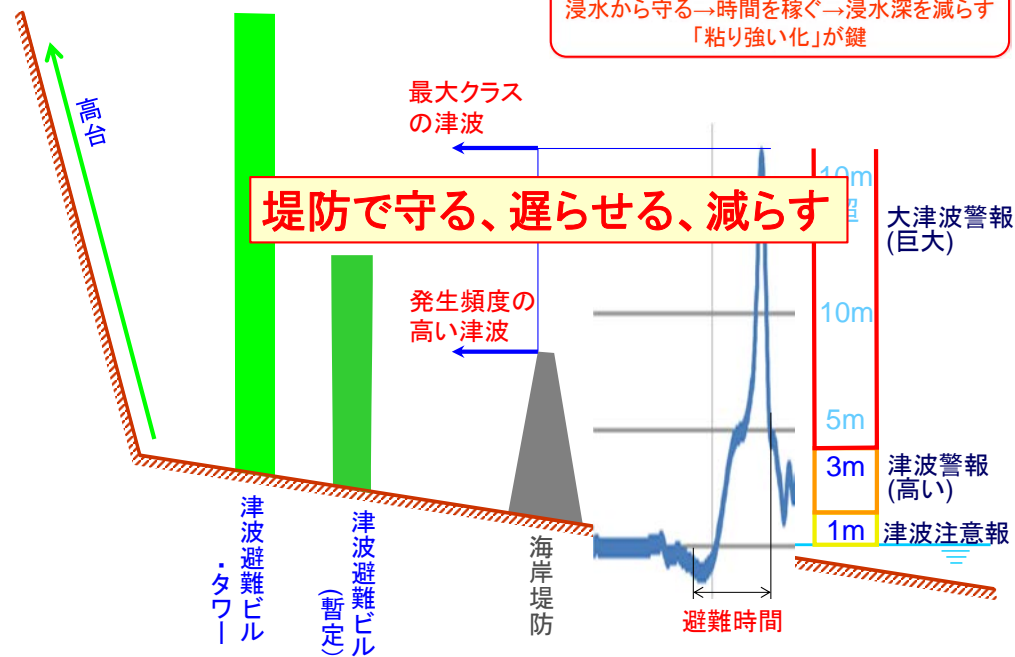
- 発生頻度は極めて低いものの、発生すれば甚大な被害をもたらす最大クラスの津波(千年に1回程度)
- 住民等の生命を守ることを最優先、最低限必要十分な社会経済機能を維持(避難+減災)

発生頻度の高い津波(レベル1津波、設計津波) ←(海岸法)

- 最大クラスの津波に比べて発生頻度は高く、津波高は低いものの大きな被害をもたらす津波(数十年から百数十年に1回)
- 人命保護、住民財産の保護、経済活動の安定化、生産拠点の確保のため、海岸保全施設等の整備(防災) → 粘り強い構造物

津波避難(減災)態勢の整理

堤防で
浸水から守る→時間を稼ぐ→浸水深を減らす
「粘り強い化」が鍵



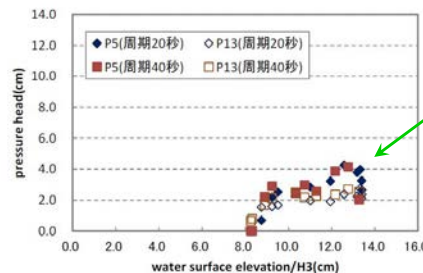
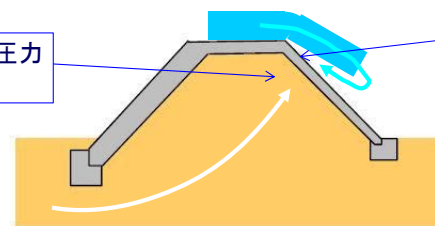
海岸構造物の減災効果

裏法の剥離の可能な原因

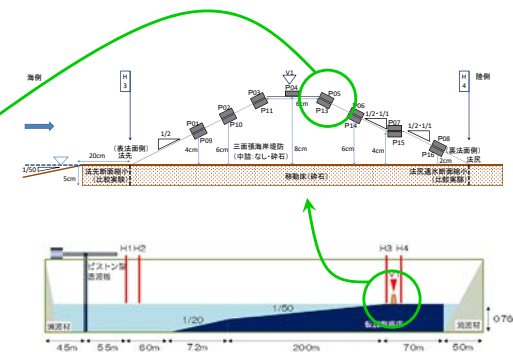
裏法の負圧が破壊の始まり

浸透流中の圧力
 $i = v/k$

遠心力による負圧の発生
 $\alpha = \frac{v^2}{r} > g$



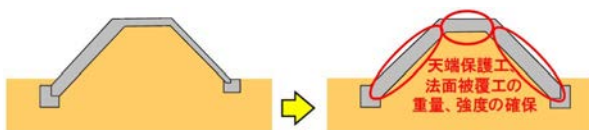
(a)裏法肩上部における上面 P5および下面 P13



海岸堤防等の粘り強い構造

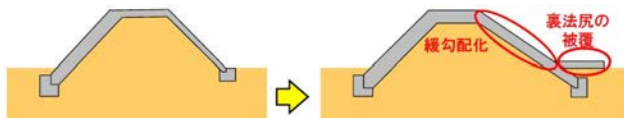
裏法の強化が粘り強い構造へ

裏法尻部、裏法勾配

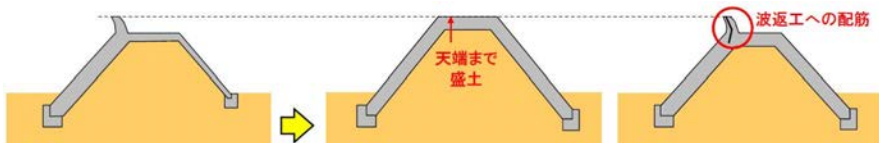


粘り強い構造

天端保護工、裏法被覆工、表法被覆工



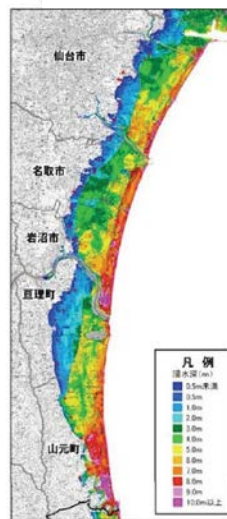
波返工



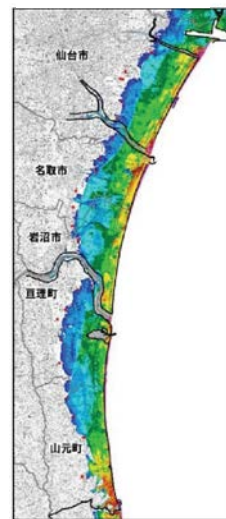
[国土交通省資料より]

仙台平野の津波浸水高の計算と実測の比較

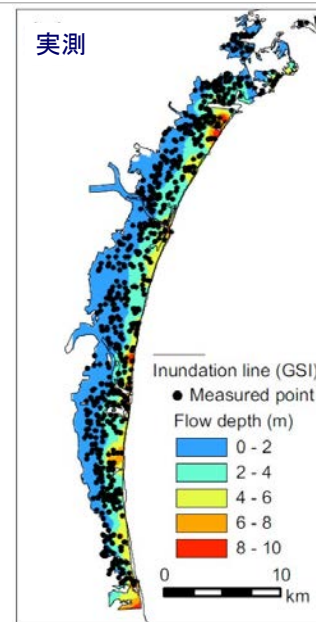
堤防があれば浸水深を下げられる効果
計算(堤防なし)



計算(堤防あり)



実測



実測の浸水深は、「堤防あり」に近い
=>堤防の効果が見られる

南側では浸水深が「堤防なし」にやや近い
=>侵食の進んだ砂浜での堤防の損傷が激しい

[土木学会：東日本大震災合同調査報告、共通編2、津波の特性と被害]

南海トラフ巨大地震津波対策

最大クラスの津波と平均すべりモデル津波との比較

大津波の原因は大滑り

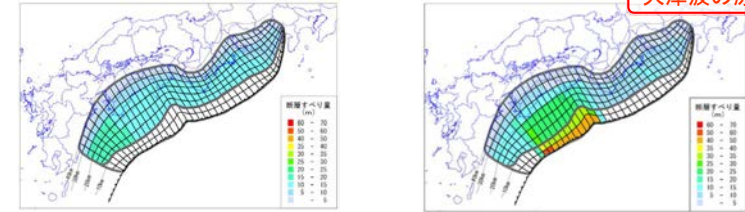
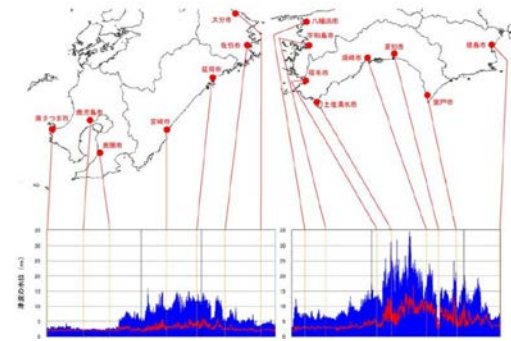


図4.17.1 津波断層モデル
【平均すべりモデル (大すべり域を設定しない)】

【パターン④】西国沖に大すべり域を設定



「大すべり」により、津波波高が倍増

■ 海岸における津波の水位
(沈降量・隆起量を考慮した危険側の高さ)
— 中央防災会議 (2003) の東海・東南海・南海地震の津波高

[中央防災会議 南海トラフの巨大地震モデル検討会(2012.3.31): 南海トラフの巨大地震による震度分布・津波高について(第一次報告)]

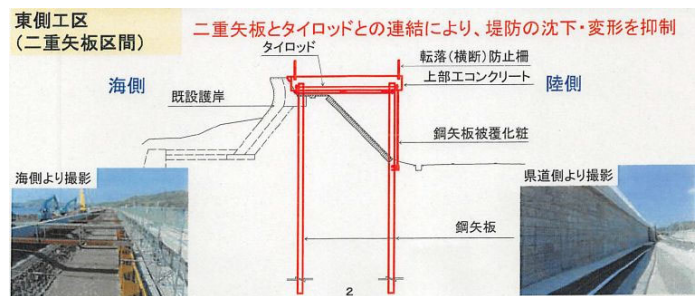
高知県における津波対策の現状

二段防災システム

レベル2対策
(津波避難タワー)



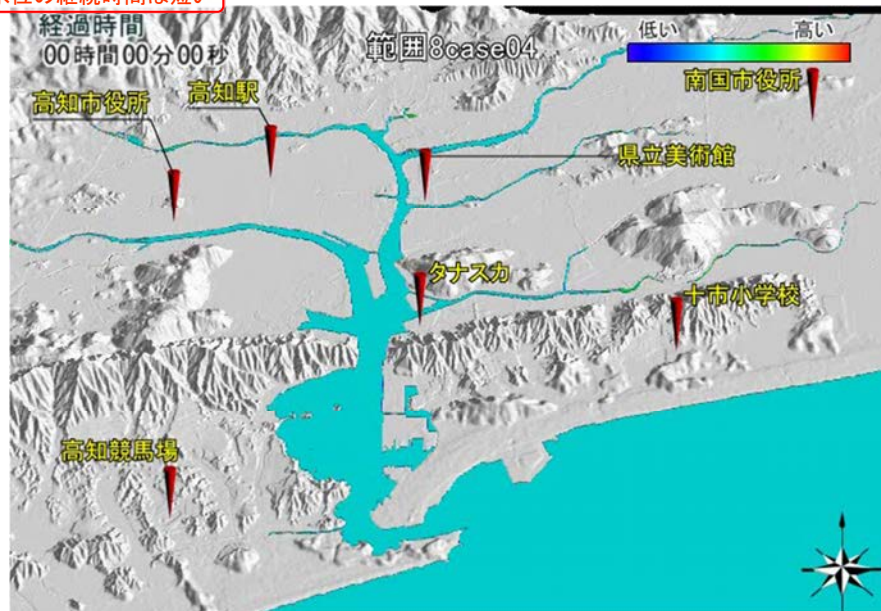
レベル1対策
(堤防の粘り強い化)



三重防護による 高知港・高知市の津波対策

南海トラフ巨大地震津波による高知市の浸水アニメーション

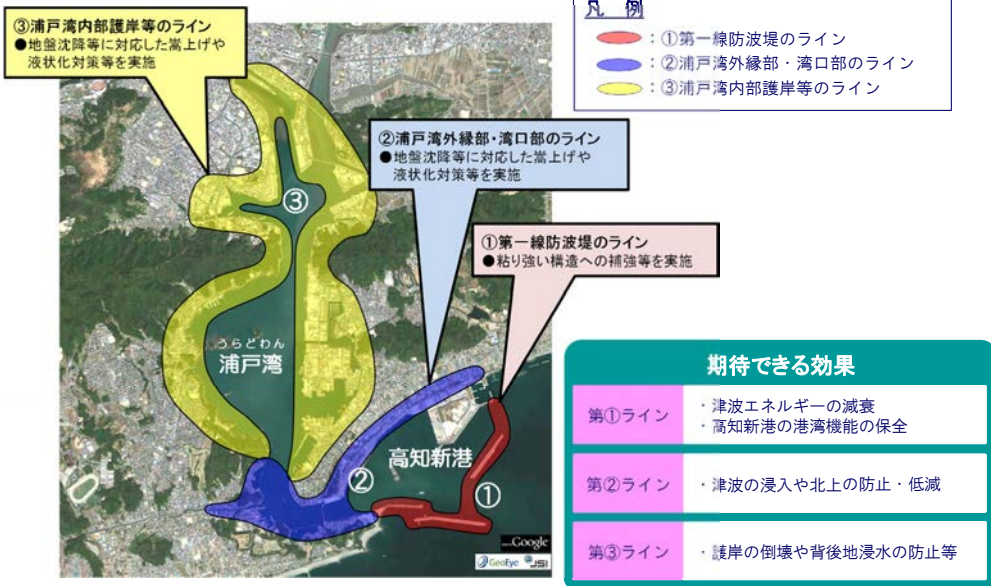
高水位の継続時間は短い



[高知県危機管理部HP]

三重防護による高知港の地震津波対策

高知港の三重防護



[国土交通省四国地方整備局・高知県(2014.11.17):第3回 高知港における地震津波防護の対策検討会議資料]

種崎千松海岸(高知県)堤防の景観・利便性

景観・利便性を備えた堤防

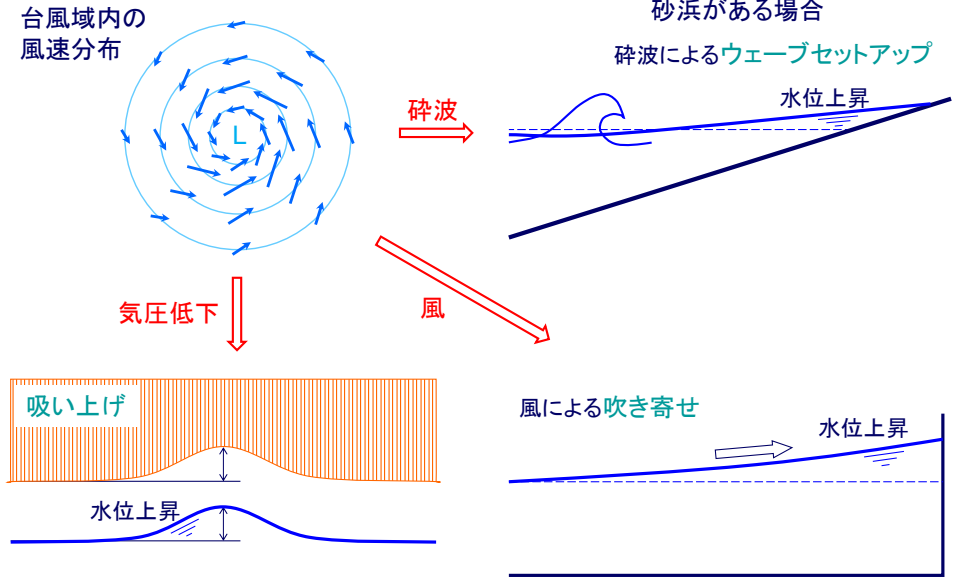


[第6回高知港海岸景観・利便性等検討会資料より作成]

高潮の発生メカニズムと これまでの高潮対策

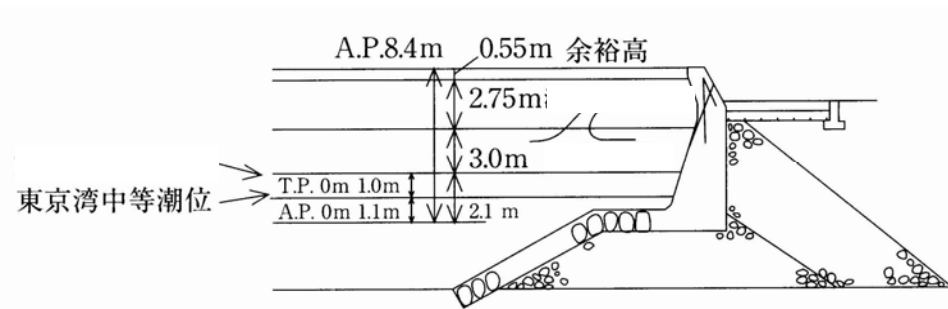
高潮発生のしくみ

高潮 = 吸い上げ + 吹き寄せ
+ ウェーブセットアップ



高潮堤防の設計天端高

天端高 = 期望平均満潮位
+ 高潮偏差 + 波の打上げ



最大クラスの高潮への対策

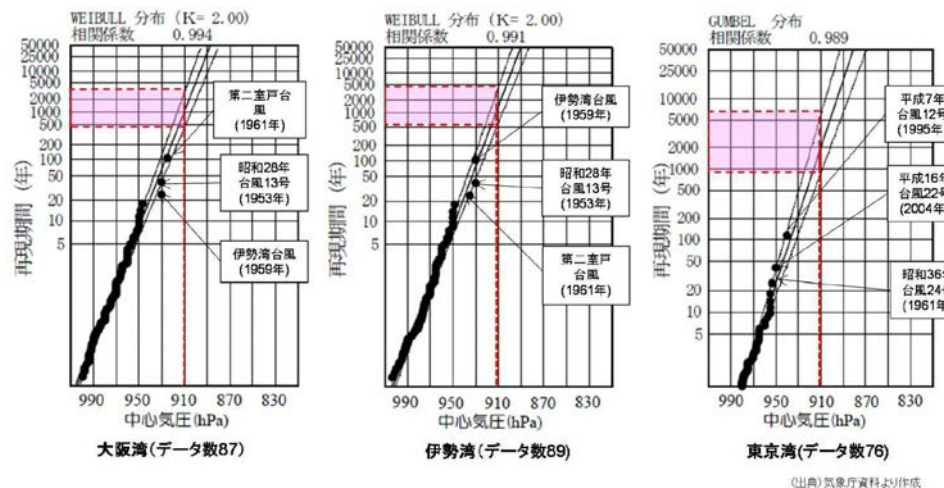
最大規模の洪水・雨水出水・高潮 (H27改正 水防法)

最大規模の
洪水・内水・高潮の予測

- 浸水想定区域(第十四条、第十四条の二、第十四条の三)
 - ー 想定最大規模降雨による洪水浸水想定区域・雨水出水浸水想定区域、最大規模の高潮による高潮浸水想定区域の指定
- 特別警戒水位(第十三条、第十三条の二、第十三条の三)
 - ー 洪水特別警戒水位、雨水出水特別警戒水位、高潮特別警戒水位の通知・周知
- 避難態勢(第十五条)
 - ー 市町村地域防災計画において、①洪水予報等の伝達方法、②避難場所・避難路等、③避難訓練、④地下街等・要配慮者利用施設・大規模工場の所在地、について定める
- 水害(津波・高潮、洪水・内水氾濫)の全般で最大規模浸水予測へ

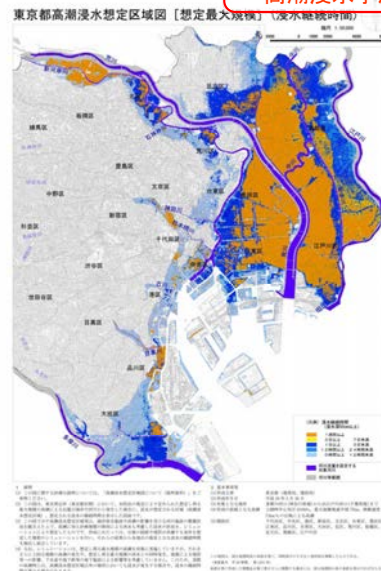
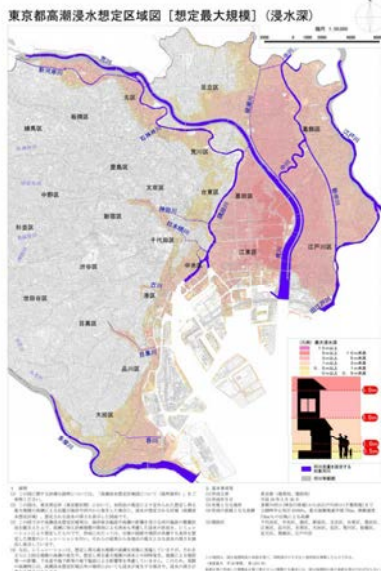
三大湾における室戸台風相当の台風の確率年

最大規模の台風
= 室戸台風



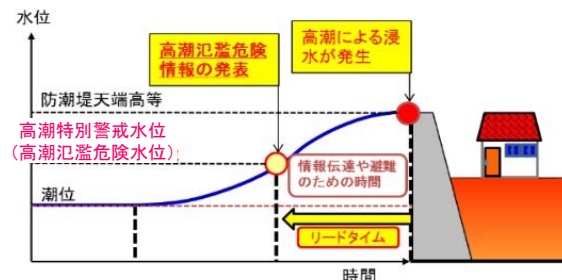
最大規模の高潮による浸水深と浸水時間

最大規模の
高潮浸水予測



高潮特別警戒水位

高潮警戒水位



室戸台風に
洪水が
重なったら
↓
浸水を予告する
高潮特別
警戒水位
(高潮氾濫
危険情報)
= 警戒レベル5
= 高潮氾濫
発生情報



高潮に対する二段防災システム

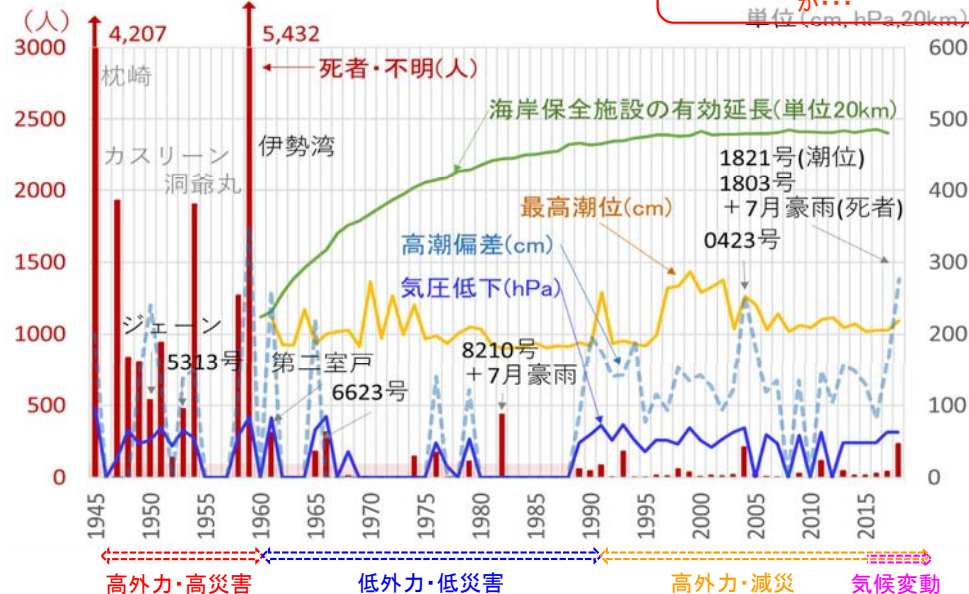
高潮も二段防災へ

- 設計クラスの高潮(レベル1高潮)対策
 - 設計クラス(レベル1)高潮に対する浸水からの防護(狭義の防災)
 - 気候変動適応法から、
海岸保全基本方針に基づき海岸保全基本計画に海面上昇等を反映
 - 堤外地の安全性
- 最大クラスの高潮(レベル2高潮)対策
 - 最大クラス(レベル2)の高潮の浸水予測シミュレーション
 - 最大クラス(レベル2)での避難・早期復旧態勢の整備(減災)
高潮のモニタリング・予測・高潮特別警戒水位(高潮氾濫危険情報)の発信
避難体制の整備(浸水が広域、暴風来襲前の避難が必要)
=>広域避難・垂直避難、救援物資、インフラ、医療、排水設備、仮設住宅
 - (L2にも)粘り強い構造物の開発(三面張りの発展形)
 - (打ち上げを除く)高潮偏差分の天端高の確保

気候変動にともなう 今後の高潮対策

高潮の規模と被害の経年変化

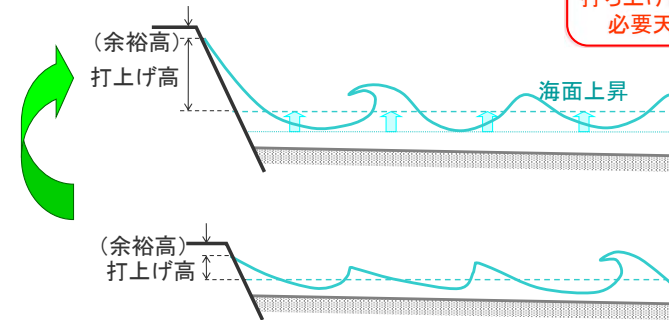
60-80年代の静穏時期の
急速な堤防建設が効果を挙げる
が...



[気象庁HP: 災害をもたらした気象事例、海洋データセンターHP、海岸統計等より作成。1945-1988年は気象庁命名および死者100人以上の台風、1889からは被害・社会的関心が最大の台風のみ対象]

海面上昇による打上げ高の増大

海面上昇により
堤前の水深・波高が増大し、
打ち上げ高の増大を招いて、
必要天端高は激増する



海面上昇	堤脚水深	波高	周期	打上げ高	最高水位	差
η_{rms}	h	$H_{1/3}$	$T_{1/3}$	R	R-h	
[cm]	[m]	[m]	[m]	[m]	[m]	[m]
0	2.42	4.2	6.6	5.75	8.17	
65	3.00	4.2	6.6	7.31	10.31	2.14

気候変動を踏まえた海岸保全のあり方 (2020.7 (R.2))

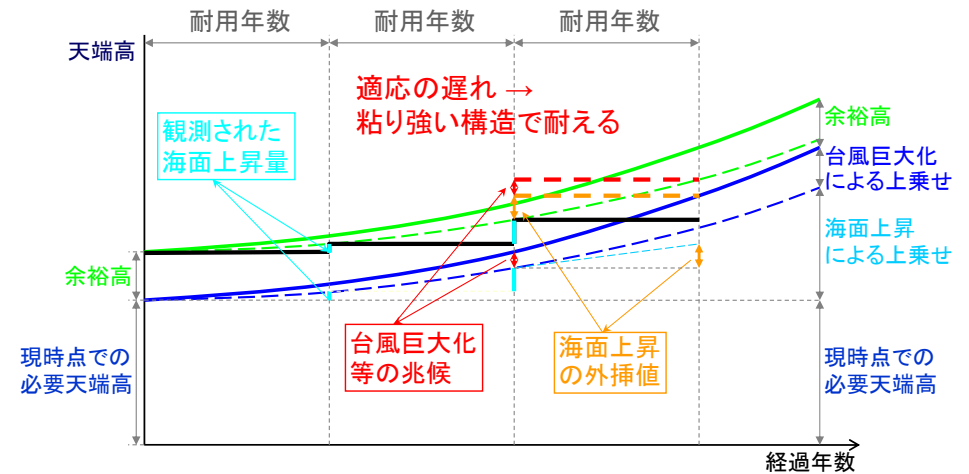
- 「沿岸部(海岸)における気候変動の影響及び適応の方向性」(H.27.7)の発展
- RCP2.6(2°C上昇相当)における予測の平均的な値を基本とすることが妥当
- 手戻りなく対応→、平均海面水位は、RCP8.5 (4°C上昇相当)も考慮すべき
- 平均海面
 - RCP2.6で、第5次報告書は21世紀末0.39 (0.26~0.53)m、2100年SROCCは0.29~0.59m
 - 最新の朔望平均満潮位+(外挿) 予測データで将来の上昇を考慮
- 高潮の潮位偏差
 - 将来予測される潮位偏差の長期変化量を推算し、適切に考慮
- 波浪
 - 平均では有義波高・周期は減少、波向変化
 - 台風強大化により年最大波・設計波は増大の想定
 - 長期間の統計解析+波浪の長期変化量を推算し適切に考慮
- 海浜地形と漂砂
 - 日本の砂浜は、RCP2.6で約6割、RCP8.5で約8割消失
 - 総合土砂管理の下、モニタリングと気候変動の影響予測で順応的に対応
- 海岸保全の基本的な方針 → 海岸保全基本方針の改訂 (2020.11.20)

2°C上昇シナリオでの海面上昇・台風巨大化に対応する

[気候変動を踏まえた海岸保全のあり方 提言(2020.7)]

海岸保全施設の漸進的適応策

気候変動の進行に合わせて施設を更新する



水災害に対する二段防災システム

水災害(津波・高潮・洪水・内水)に対して気候変動も加味した二段防災体制となった

