津波対策における二段防災とその展開

高知工科大学
学長
磯部　雅彦 氏

プロフィール

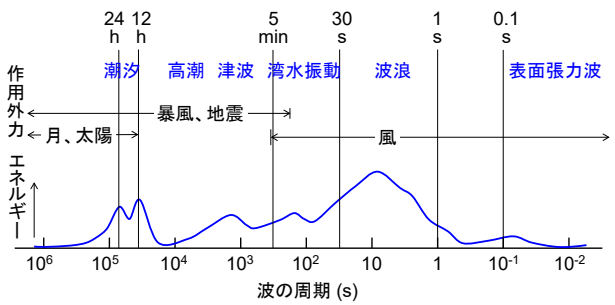
1952年東京生まれ。1975年に東京大学工学部土木工学科を卒業、1977年に東京大学工学系研究科土木工学専門課程を修了。横浜国立大学工学部土木工学科助教授、東京大学工学部土木工学科教授、東京大学大学院新領域創成科学研究科教授・科長等を歴任し、2009年～2011年に東京大学副学長、2013年からは東京大学名誉教授、高知工科大学副学長・教授を経て2015年より現職。海岸工学の第一人者として、海岸法の改正など国家レベルの政策に携わる。

はじめに

本日の講演テーマは、「海岸災害」についてです。海岸災害の主なものとしては津波、高潮、そして海岸侵食などがあります。それに地球温暖化が加わってきたという状況ではありますが、今日はこの中で特に津波と高潮を中心にお話をしていきたいと思います。

1　海の波の周期による分類例

津波も高潮も海の波の一種です。普段、海岸でみることができる波を波浪と呼びますが、波浪は周期が 10 ～ 20 秒程度であるのに対し、津波の周期は 5 ～ 30 分位、高潮になりますと 1 時間～数時間ということになり、周期が相当違ってきます。したがって私たちが感じる現象としても、津波や高潮は波というよりはむしろ流れという感覚です。



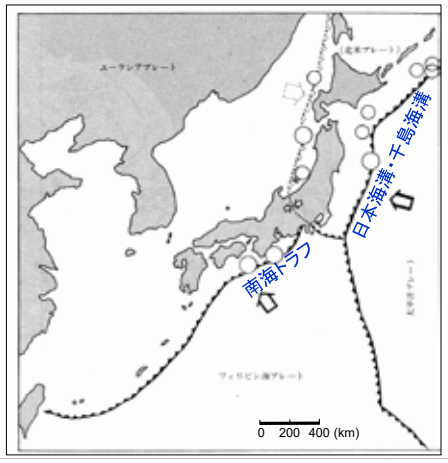
[Kinsman, B., 1965, Wind Waves, Prentice-Hallから作成]

図 1　海の波の周期による分類例

2　巨大津波発生のメカニズム

2.1 プレート運動

初めに、「巨大津波はなぜ起こるのか」ということについて説明します。津波の発生原因は様々です。主なものは地震により地盤が変動し、それによって津波が起こります。【図 2】のように日本周辺の北側については、太平洋プレートがハワイの方から年々移動し、年間 5cm ないしは 10cm というスピードで西の方に向かってきます。そして北米プレートに突き当たり、そこで潜り込みながら歪みを溜め、その溜った歪みが一気に解放される時に断層が滑り、海底が隆起、沈降し、津波が起きます。また、南の方では、フィリピン海プレートが同様にユーラシアプレートの下の方に沈み込み、それが滑る時に南海トラフで津波が起きます。



[渡辺偉夫（1998）：日本被害津波総覧（第2版）．248pから作成]

図 2　プレート運動

2.2 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

2011 年に日本海溝沿いで起きた東日本大震災の津波の高さについて見ていきます。

【図 3】は、東北地方を 90 度倒し、左側が北になるように青森県、岩手県、宮城県、福島県についてそれぞれの地点の津波の遡上高をプロットしたものです。赤が東北地方太平洋沖地震津波、いわゆる東日本大震災の津波、青が明治三陸地震津波です。そして灰色が昭和三陸地震津波です。

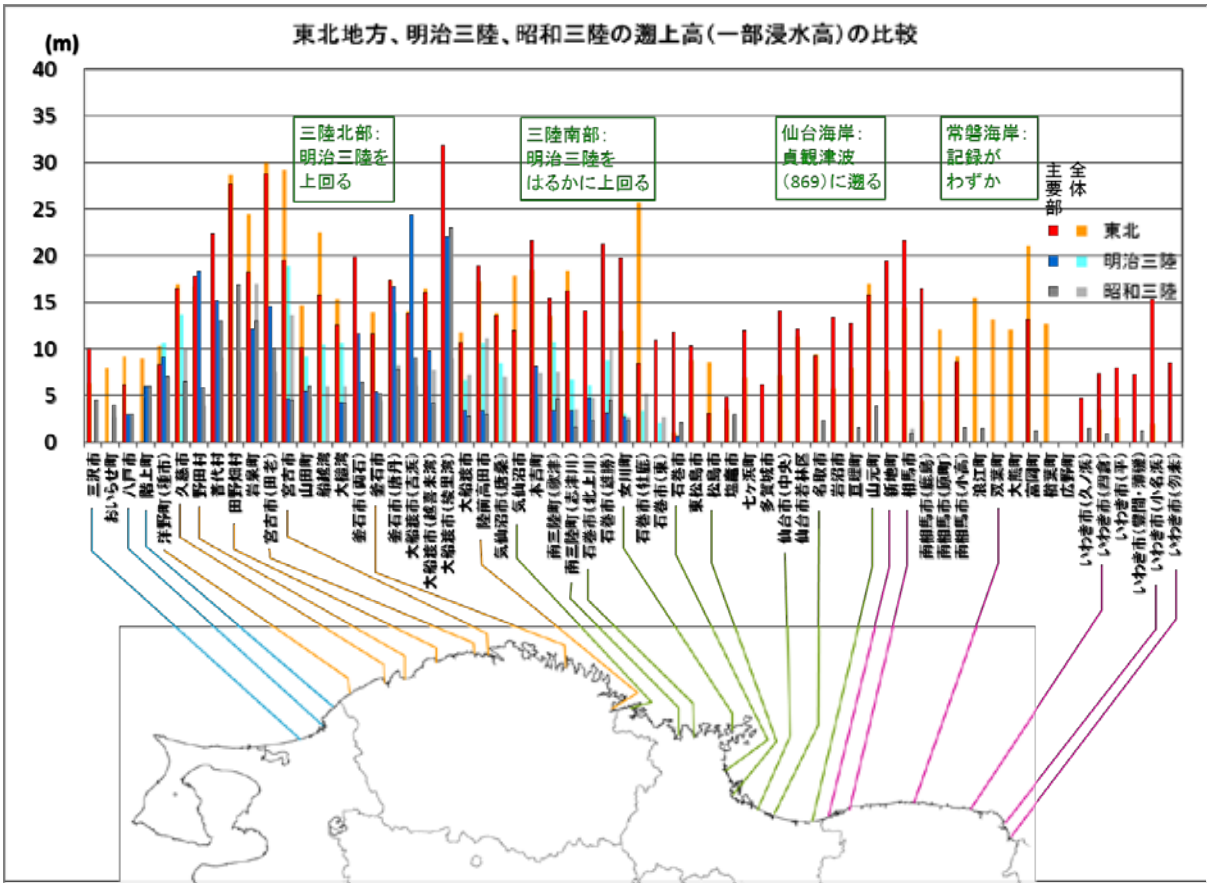
比較すると三陸北部は明治三陸地震津波が高いですが、それよりも東日本大震災の津波が上回ったということになりますし、三陸南部を見てみると明治三陸地震津波を遥かに上回っています。さらに宮城県は明治三陸、昭和三陸では比べものにならず、もし比べるなら平安時代まで遡り 869 年に起きた貞観津波しか比べるものが記録には残っていません。福島県に至っては 2011 年の前は津波の記録がほとんどなかったということで、そのくらい東日本大震災の津波は大きかったということがわかります。

2.3 三陸地方で発生した過去の地震

【図 4】のデータから、過去に三陸沖で起きた 3 つの大きな地震（明治三陸地震、昭和三陸地震、東日本大震災）を比べてみたいと思います。

死者と行方不明者の数をみると、明治三陸地震が 2 万 2000 人、昭和三陸地震が合計して約 3000 人、東日本大震災が約 2 万人ということになっています。これは大変な数ではありますが、流失した家屋の数と比較してみましょう。

全壊、半壊、流失を合わせた家屋数に対する死者＋行方不明者数の割合で見ていくと、完全に同じ条件で比べていないので粗々の数字にはなりますが、明治三陸地震の場合は約 1 万軒の家が流されて、約 2 万人の方が亡くなったので、家 1 軒あたり 2 人が亡くなっていることになります。昭和三陸地震になりますと、その 37 年後なので明治三陸の被害を覚えている方もおられ、「地震が起こったら津波だ」ということで、多くの方が実際に逃げることができたということもあってか、家 1 軒あたりで亡くなった人の数は 0.5 人と大幅に減少しています。さらに東日本大震災では約 40 万軒の流失家屋に対して死者は 2 万人なので家 1 軒あたりで 0.05 人という数値まで下がりました。この数値自体をそのまま信用するわけにはいきませんが、やはり定性的な記述として住民の方々が「地震が起こったら津波が来るぞ」「逃げなければいけない」という意識があって、基本的には多くの方が津波から逃げることができたのではないかと思われます。もちろん、中には逃げ方を間違えたとか、あるいは安心して逃げなかったという方もおられるので、2 万人という大きな犠牲を出している訳ですから、私たちとしてはこのような被害をいかに減らしていくかという事は極めて重大な課題です。ただ全体として評価すると、東日本大震災は相当な人たちが巨



KOCHI UNIVERSITY OF TECHNOLOGY
［東北地方太平洋沖地震津波合同調査グループ（http://www.coastal.jp/ttjt/）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］

図 3　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

大津波から逃げきることができたということが読み取れます。

年月日	名称	地震 M	最高遡上高(T.P.m)	死者（人）	家屋	
					全・半壊、流出（戸）	浸水（戸）
869.7.13	貞観津波	8.6		1,000		
1611.12.2	慶長三陸地震津波	8.1	15–20（田老等、岩手県）		田老、小湊、下摂待、宮古・・・	比率
1896.6.15（19:32）	明治三陸地震津波	6.8	24.4（三陸町、岩手県）	22,072	10,393	3,614 2
1933.3.3（2:30）	昭和三陸地震津波	8.1	23.0（綾里村、岩手県）	1,522（1,542）	5,851	4,018 0.5
2011.3.11（14:46）	東日本大震災	9.1	38.4（重茂、岩手県宮古市）	15,883（2,654）	398,868	0.05

［中央防災会議 http://www.bousai.go.jp/jishin/nankai/model/pdf/chukan_sankou2.pdf、渡辺偉夫（1985）：日本被害津波総覧、東京大学出版会、206p.による］

図 4　三陸地方で発生した過去の地震

2.4 地震による津波の発生

このような犠牲を出す津波がどのように発生するのかということを説明します。東日本大震災のケースですと、ハワイの方から年々移動してきた太平洋プレートが北米プレートの下に潜り込み、その間に歪みが溜って、この歪みが耐えられなくなりポンと跳ね返る、これが地震を起こす断層のずれです。跳ね返った瞬間に海底のある所は隆起し、また別の所では沈降が起こります。海水は瞬間的にはそれに応じて海底が隆起した所は海水面も上がり、海底が沈降した所は海水面も沈むという事が起こり、波の形ができます。それが四方八方、全ての方向に伝わっていくことで津波が起きます。その中でも、東日本大震災は、なぜあんなにも巨大な津波になってしまったのかについて少し考えてみます。

2 つのプレートが接する場所では、その接点が少しだけ滑ることがあります。これは、量からすると大きくても、ごくごく一部の局所的なものなので、地震のエネルギー、マグニチュードにはあまり関係しません。しかしこの接点が動くと【図 5】の絵を見ても分かるように、直接、海底面の隆起や沈降に結びついてしまいます。非常に局所的なものですが、大きな隆起を起こし、それと同じだけ海面が上りますと、この接点に非常に鋭いピークをもった水面ができ、巨大な津波が起こります。これが伝わっていくと、まさに 2011 年の東日本大震災のような巨大津波が起こります。

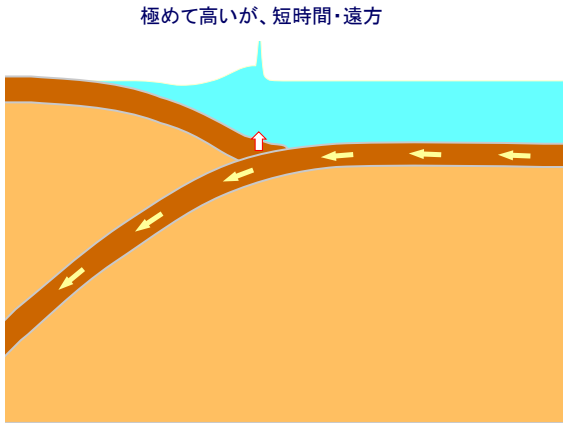
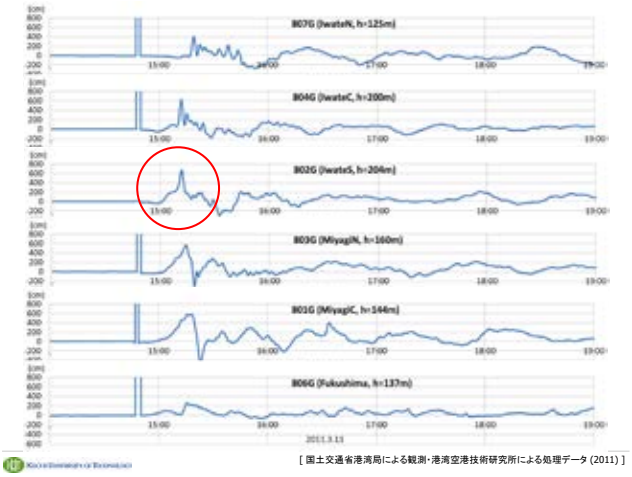


図 5　地震による津波の発生

2.5 波浪計による沖合での津波波形

その様子が、GPS 波浪計という国立研究開発法人港湾空港技術研究所が持っていた波浪計によって捉えられました【図 6】。これを見てみると、地震が起こって最初の段階で約 2m 水位が上がっています。これで終わればそれほど巨大津波ではなかった訳ですが、鋭いピークが起きました。この鋭いピークによって津波は 6 mを超える高さまで上がっており、これが非常に大きな災害を及ぼしたということがこのデータで初めて立証されました。



［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)］

図 6　GPS 波浪計による沖合での津波波形

2.6 津波の伝播・増幅・遡上

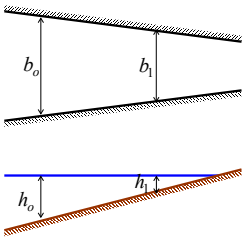
このピークですが、さらに深海から浅い海に伝播してきて増幅されます。この増幅のされ方ですが、【図 7】のように津波のような長波については、水深が浅くなると波高が徐々に大きくなります。また、湾の幅のようなものが狭くなってくるとエネルギーが収斂（しゅうれん）してきて波高が大きくなります。これを式で表すと、水深については 1/4 乗に反比例し、幅については 1/2 乗に反比例して、次第に大きくなっていきます。これは 1/4 乗、1/2 乗ですのでそんなに大きくなる感覚はないですが、例えば水深が 1600 mから 100m というように 1/16 になると波高は 2 倍に、また、幅で考えると 1km あった幅のものが 250m に狭まると、やはりこれも波高が 2 倍になります。

＊津波の増幅

$$(Ec_g b)_o = (Ec_g b)_1 \qquad c_g = cn = \sqrt{gh}$$

$$\rightarrow \frac{1}{8}\rho g H_o^{\,2}\cdot\sqrt{gh_o}\cdot b_o = \frac{1}{8}\rho g H_1^{\,2}\cdot\sqrt{gh_1}\cdot b_1$$

$$\rightarrow \boxed{\frac{H_1}{H_o} = \left(\frac{h_1}{h_o}\right)^{-\frac{1}{4}}\left(\frac{b_1}{b_o}\right)^{-\frac{1}{2}} \quad \text{（Greenの法則）}}$$



水深が1/16　（1,600m→100m）＝＞　波高が2倍
幅が1/4　　（1,000m→250m）＝＞　波高が2倍

図 7　津波の伝播・増幅・遡上

2.7 斜面上の線形重複波の波形

最後に陸上への遡上です。非常に単純化して斜面上の線形重複長波という理論に置き換えて考えてみます【図 8】。斜面上を津波が沖から岸まで伝わってきて、さらに反射し、重複波になったとします。その時に長波ですと水深が小さくなると、1/4 乗に反比例して波高が大きくなる現象があります。これは津波のような長波であれば全て同じです。

ここで、赤い波は長波の中でも比較的長い波の代表を描いたもので、青い波は長波の中でも比較的波長が短い、周期が短い波になります。赤い波も青い波も比較的深い所にあるうちは、同じように 1/4 乗に反比例して波高が次第に大きくなります。これは鋭いピークでも、普通の長い津波でも同じです。しかし実は、最後の一蹴りが違います。ちょうど陸上に遡上する時に赤い波だと、最後の谷から駆け上がる、遡上する一番上というのは、この理論によって谷に対して 2.48 倍になります。それに対して青い波、短い波も同じ様に最後の谷から 2.48 倍されます。しかし赤い波は最後の谷が結構深い所で遠くにあり、あまり増幅されてないものを単に 2.48 倍することに対して、青い波は最後の谷はかなり岸近くの浅い所まできてしまうので、1/4 乗則で相当増幅された後に、さらに 2.48 倍され、非常に大きな遡上高になります。

理論から言うと、増幅率というのが周期の 1/2 乗に反比例することになります。例えば鋭いピークのように、5 分程度の津波が 1/100 の勾配の海岸を水深 1600m のところから伝わってくると、最後の遡上高はこの理論によれば 18.3 倍にもなります。それに対して周期が 30 分と長い波だと 7.5 倍にしかならない。理論が簡単なので数値はそのものとは考えてはいけないですが、この差で分かるように、鋭いピークというのは、ピークという事自体が発生源として大きな津波なので危ないのに加え、途中で伝播しながら増幅し、さらにその過程でも長い波よりも増幅されやすいので、非常に危険な津波だったという事になります。

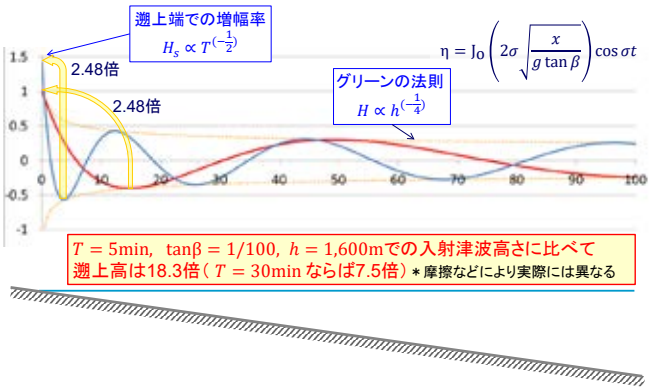
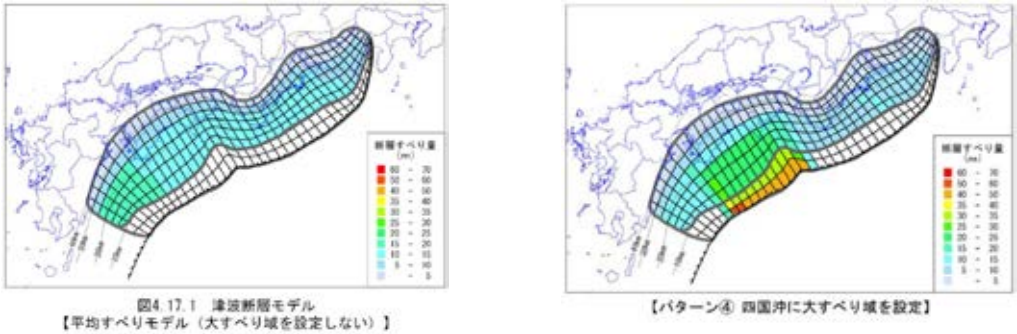
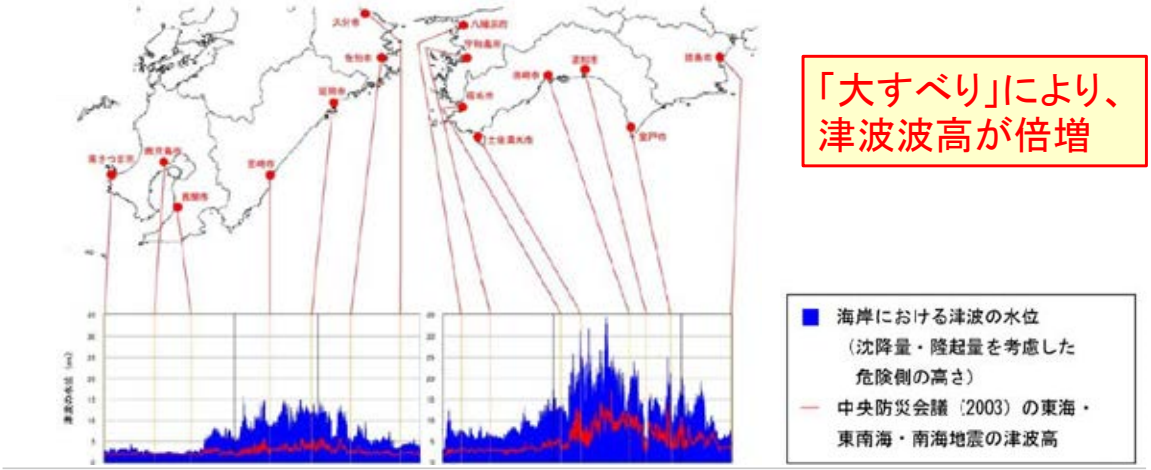


図 8　斜面上の線形重複波の波形

2.8 最大クラスの津波と平均すべりモデル津波との比較

このような津波であったので、東日本大震災は大きな被害を及ぼしましたが、その 1 年後には内閣府の中央防災会議から今度は南海トラフの計算結果が示されました【図 9】。赤い線が 2003 年で東日本大震災の前に予想されていたも





KOCHI UNIVERSITY OF TECHNOLOGY　[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）]

図 9　最大クラスの津波と平均すべりモデル津波との比較

の、青い棒グラフが 2012 年東日本大震災の後に出たものです。簡単に見ると 2 倍にもなっているので「東日本大震災を経験したらなぜ計算値が 2 倍にもなるのか」と、高くなったところの市町村はこの計算結果に対してどう対応すべきか非常に戸惑われました。この原因は中央防災会議で言うところの「大すべり」（周囲に比べて特にすべり量が大きい領域）、つまり「アスペリティ」です。アスペリティをプレートの接する所に少し入れただけで津波の高さにすると倍になってしまう。先程のように東日本大震災では起こったわけですから、今後のことを考えると、当然アスペリティは考慮の対象としなくてはいけないということになりました。

3 津波災害の特徴

3.1 仙台平野の津波浸水高の計算と実測の比較

前述のように、東日本大震災では大きな津波が最後に陸上に遡上して被害を及ぼしました。次に、陸上への遡上を考える時の海岸保全施設の効果についてお話ししたいと思います。

仙台平野で浸水深を実測と計算で比べたのが【図 10】ですが、色合いはだいたい同じにしてあります。右側が実測で、左側の 2 つが計算したものです。中央にあるのは仙台海岸の海岸堤防が全く壊れずにいたら浸水深はどうなるのかという計算結果で、左側は海岸堤防が完全に無くなり壊れてしまったか、そもそもなかった場合の浸水深を計算したものです。

この 2 つの計算値を実測値と比べると、この実測値は堤防が壊れなかった場合の計算値にほとんど同じということが一目瞭然です。つまり人間側からすると、堤防は色々な所で損傷を受け、もう 1 回作り直さなければいけないほど非常に大きな被害を受けましたが、視点を変えて海の水とか津波の立場から見てみると海岸堤防がしぶとく残っていて、陸上に浸水してやろうと思うが邪魔されてなかなか入れなかったとなります。さらに細かいですが、宮城県山元町あたりで見ると、堤防ありの計算値よりも、堤防なしの計算値に実測値が近いような所があり、この辺は堤防が機能していたとは言えないという所があります。

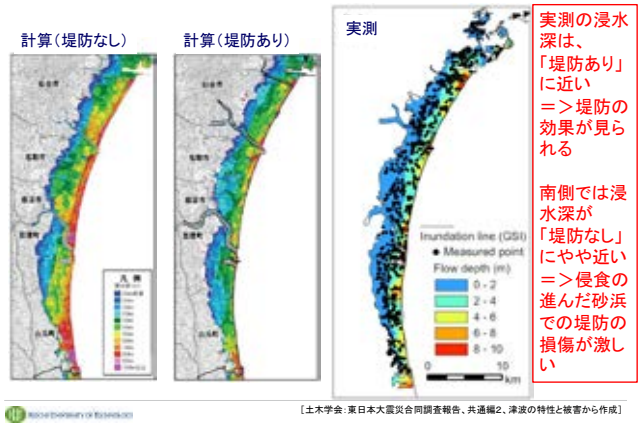


図 10　仙台平野の津波浸水高の計算と実測の比較

3.2 海岸侵食状況と海岸堤防被害の比較

現地の写真【図 11】ですが、右側は深沼海水浴場で仙台平野でも北側にある所です。左側が南にある坂元駅地先という場所で、それぞれ津波前（1 年前）と津波後（発生直後）に撮影した写真です。北部の方は、実は牡鹿半島の遮蔽域に入っているので津波の高さが低かったことも頭には入れながら私の独断と偏見も含めて言うと、津波が来る前からここには堤防があり、その前に幅の広い砂浜が広がっていましたので、津波が来ても津波とともに土砂が移動し、津波はこの堤防を越えることがありましたが、津波の力は比較的小さく、堤防全体としてはそのまま残っていた。最終的に堤防が生き残ったので、津波が陸上に侵入するのをある程度防ぐことができたと考えられます。

図 11　海岸浸食状況と海岸堤防被害の比較

それに対して南部の坂元駅地先（山元町）は、津波前から海岸浸食が激しく、砂浜がなくなっており、直接、護岸に当たるので仕方がなく消波ブロックを前に置くという状況で、津波がきた時も直接、護岸に津波が当たっていたと思われます。その結果、写真の津波前の赤い線が、津波後の赤い線と同じ場所になるのですが、海岸堤防（護岸）が全壊してしまっているので、浸水が相当激しかったのではないかと想像できます。

3.3 海岸堤防の被災

海岸堤防については、越流が起こっても壊れないでほしいという気持ちがあるのですが、そのような思いで現地をみた一例を紹介します。【図 12】は岩手県の宮古湾の湾奥の金浜というところです。この金浜をずっと歩くと海岸堤防がほとんど壊れてない箇所もあり、全く無くなったところもあります。それを壊れてない順番に並べてみると、宮古湾から津波が押し寄せて、堤防を超える時に海側は押す力になるので、内側の堤体の土砂がある限り、コンクリートが押されるだけなので、写真にはありませんが壊れてはいません。ところが越流を起こした箇所の裏側を見ると、初めに壊れ始めるのが裏法のコンクリート被覆で、これが剥がれてきます。剥がれ

ると、本体の土砂が流出し、空洞になります。空洞になると今度は海側も持たなくなるので、海側のコンクリートも壊れて最終的には堤体全体がなくなるというプロセスが現地で見てとれます。

図 12　海岸堤防の被災

3.4 裏法の剥離の可能な原因

そこで実験も行ってみました【図 13】。堤体があり、そこへ津波が越流すると流線が剥離して後流域ができ、遠心力も働くことで裏側の圧力が下がってきます。裏側の圧力が下がると、この裏法のコンクリートを剥がす方向に力が働き、最終的には剥がれてしまいます。この実験結果を見て「裏側が壊れなければ堤体全体も残った」という思いがあって、「堤体は粘り強い構造にすべきである」ということを現地でも感じました。技術的な解決法はその時は分からなかったのですが、漠然とそういうものが必要だと感じました。今後の課題としては、粘り強さの極限として、最大の津波波力があるとすれば、それでも壊れないようにしておけば、越流してもかなり効果を発揮することができるのではないかということ。これも海岸に限らず河川でも同じ考えですし、こういうことが大事だと思いました。

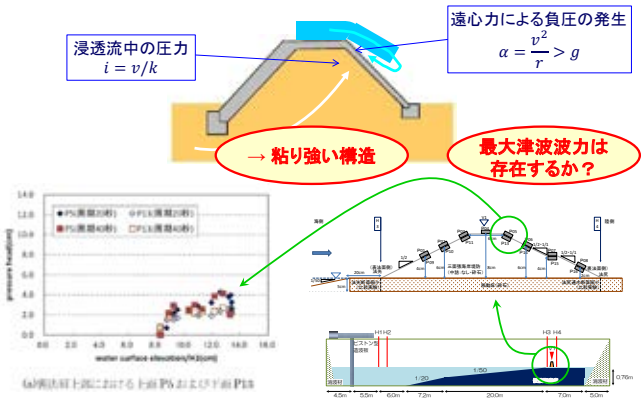


図 13　裏法の剥離の可能な原因

4　津波に対する“二段防災„

4.1 二段防災

復旧復興について国土交通省の方々などが色々と議論される時に私も参加させていただきました。その中に、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」があり、一部の委員の方々からは「これだけ大きな津波が来たのだから 20m の海岸堤防を全部作ると言わないのですか？」という質問もありました。しかしそれでは海と陸が完全に切り離されますし、費用的にも現実的ではありません。また、環境や生活を考えると妥当ではないので、「津波を 2 つのレベルに分けて対応する」というのが委員会の結論となりました。国土交通省や土木学会を中心に議論し、お手伝いすることができたのです。

まず、1000 年に 1 回位のイメージの最大クラスの津波（レベル 2 津波）に対しては、避難によって生命を守ることを最優先させて、最低限必要十分な社会経済機能を維持する事になりました。これが甲村理事長からご紹介のあった津波防災地域づくり法につながっているものであります。

それに対して数十年から百数十年に 1 回というような比較的発生頻度の高い津波（レベル 1 津波）に対しては、堤防を作り、浸水を防ぐことで住民の方々の財産も生命も自動的に守られる事を目指すことにしました。ただし、従来では堤防の設計をしたら設計条件を超えた外力については考えなくてもいいということにしていたのですが、明らかにレベル 1 を超える津波もやって来る可能性がありますので、できるだけ壊れないような粘り強い構造物にしようということで復旧復興が進んでいきました。法律でいうと海岸法の下で進むということになります【図 14】。

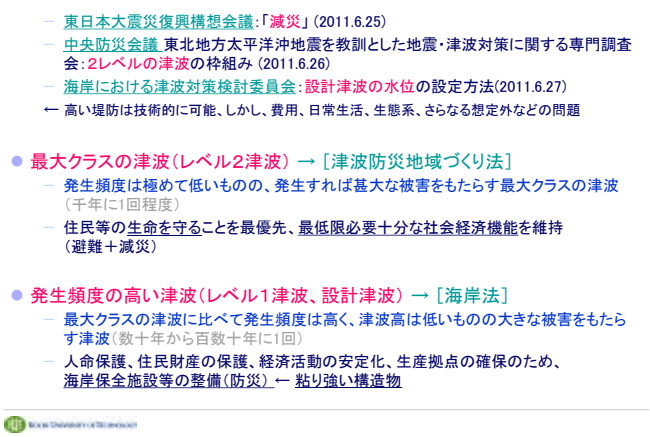
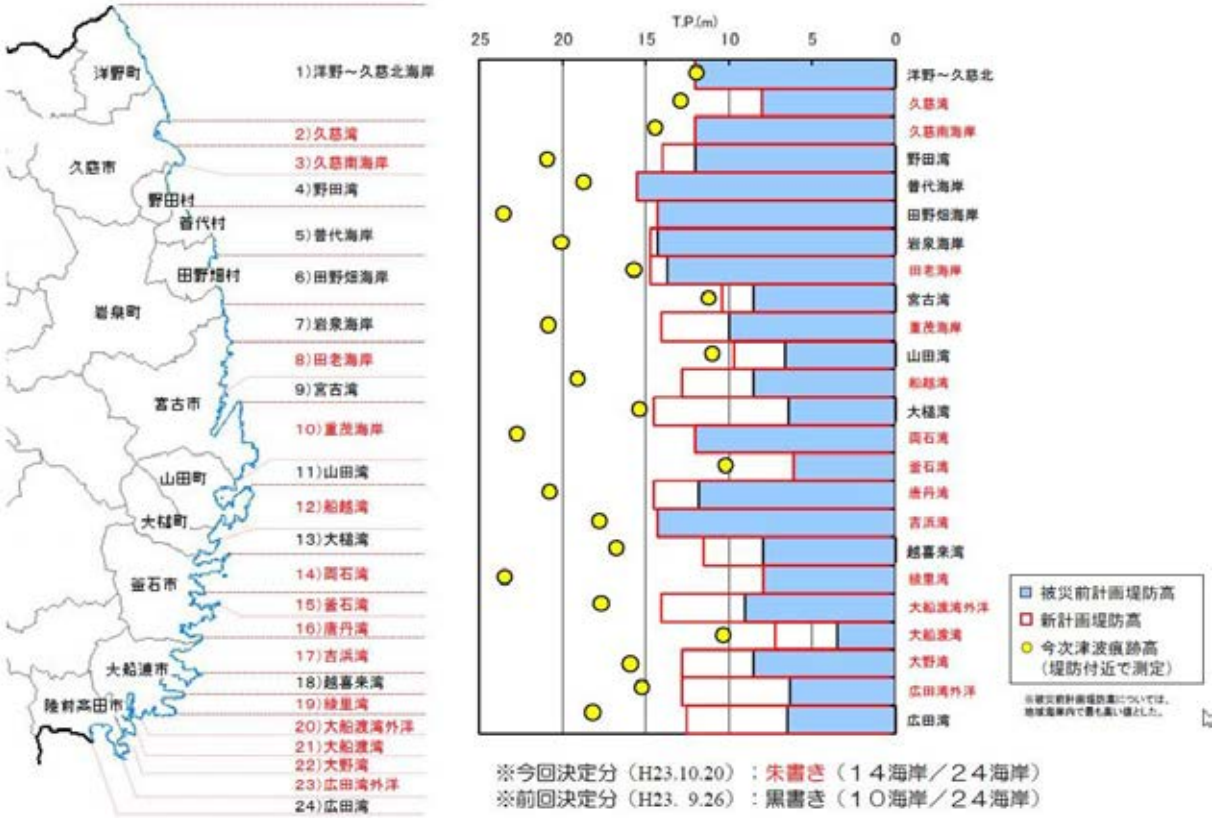


図 14 津波に対する「二段防災」

4.2 岩手県沿岸の海岸堤防高の設定

実際に、一例として岩手県ではどうなっているのかを見ていきます。【図 15】の黄色い丸印が東日本大震災での津波の高さです。青い部分が震災前に津波または高潮によって考



［岩手県沿岸における海岸堤防高さの設定について（第2回）：岩手県、2011.10.20］

図 15　岩手県沿岸の海岸堤防高の設定

えられていた海岸堤防の計画天端高になります。それに対してその中間にある赤い棒グラフが新たに決められたレベル 1 を対象とした津波の高さで、従来の計画天端高と東日本大震災の実測値の中間くらいになります。ただし、海岸堤防を作る時には総合的に勘案して計画天端高を最終的に決定して進むこととなりました。

4.3 津波防災地域づくり法

それに対してレベル 2 は、津波防災地域づくり法で最大クラスの津波に対して津波浸水予測計算をして、そこの浸水地域については避難の計画を立てるとか、あるいは危険性がもっと高い所については、建物の建て方について制限をかけながら復旧復興していくということになりました【図 16】。

［国土交通省資料］

図 16　津波防災地域づくり法

4.4 津波避難（減災）態勢の整理

これらをまとめると、結局のところ、津波に対しては初めにレベル 1 という数十年から百数十年に 1 回の津波がきても耐えられる海岸堤防を作っておけば、大体の津波は防ぐことができるということ。そうすることで、例えば若い人が海岸の近くに家を新築したとしても「一生を通じて運が悪くなければ津波はこないので、安心して住める」というメッセージにもなります。ただ運悪く、100 年に 1 度を超えるような津波がきた時には、この堤防を越えてしまうかもしれない。しかし、鋭いピークというのは、プレートを接する所で相当沖合なので遠く、津波がくるまでには相当時間がある。レベル 1 の堤防を作っておくと、その前にやって来る津波はほとんど防げるケースが多いので時間稼ぎができる。その間に「住民は高台とか、もしなければ津波避難ビルや津波避難タワーに避難をしましょう」「避難をする時間はこの海岸堤防で十分とれるはずです」というストーリーで、レベル 1 とレベル 2 というものを上手く組み合わせながら、人命と財産を守っていくというシステムになってきました。堤防で小さい津波からは守るし、大きい津波が来た時は時間を稼いで遅らせるし、あるいは来ても壊れなければ、被害を減らすことができるということです【図 17】。

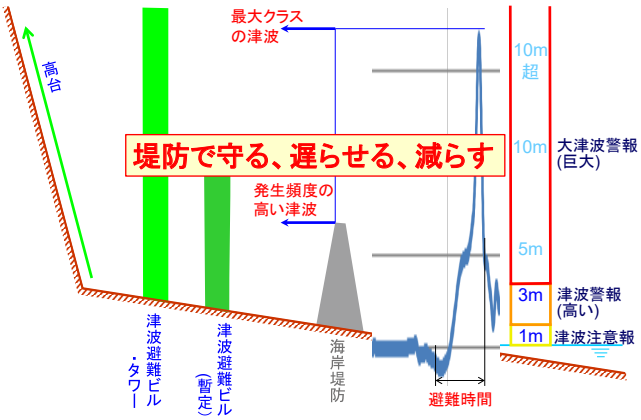


図 17　津波避難（減災）態勢の整理

5　高知県における津波対策の現状

5.1 南海トラフで発生した過去の地震

一例として私が今住んでいる高知県の津波対策の現状を紹介したいと思います。

間隔（年）	年月日	名称	地震 M	最高遡上高（T.P.m）	死者（人）	家屋 全・半壊、流出（戸）	家屋 浸水（戸）
	684.11.29	白鳳地震	8 1/4				
203	887.8.26	仁和地震	8.0～8.5				
212	1099.2.22	康和南海地震	8.0～8.3				
(186)	(1185)	文治？					
(176)	1361.8.3	正平南海地震	8 1/4～8.5				
(137)	(1498?)	明応？					
(107)	1605.2.3	慶長南海地震	7.9	8～10*（佐喜浜、高知県）	2,400以上		
102	1707.10.28	宝永地震	8.6	8～10（尾鷲、三重県）	5,000以上	3万以上	
147	1854.12.24	安政南海地震	8.4	7～8（宇佐、高知県）	3,000	61,000	
92	1946.12.21	昭和南海地震	8.0	5.5（串本、和歌山県）	1,330	36,529	33,093
今後30年(70%)							

*八丈島を除く

［中央防災会議 http://www.bousai.go.jp/jishin/nankai/model/pdf/chukan_sankou2.pdf、渡辺偉夫（1985）：日本被害津波総覧、東京大学出版会、206p.、都司嘉宣（2012）：歴史地震の話、高知新聞社、307p.による］

図 18　南海トラフで発生した過去の地震

【図 18】のように先ほどの南海トラフで発生した過去の津波、不確定なものも一部入っていますが、それも含めるとかなり年数の間隔が一定しています。100 年から 200 年に 1 回、特に江戸時代の慶長から見ていくと 102 年、147 年、92 年ですから、最後の昭和南海地震からすでに 75 年くらい経っているので、今後 30 年に 70% という発生確率は、信頼度の高い予測値だと思われますので、何とか対策を打っていく必要があります。

5.2 昭和南海地震後の高知市内と現在との比較

【図 19】のように実は直前の昭和の南海地震津波は、歴代でみると小さい津波でしたが、それでも現在の高知市街の全体が水没してしまうほどでした。これをどうしていくかが高知県の今後の大きな課題となります。

図 19　昭和南海地震後の高知市内と現在との比較

5.3 レベル 2 対策

(1) 津波避難タワー

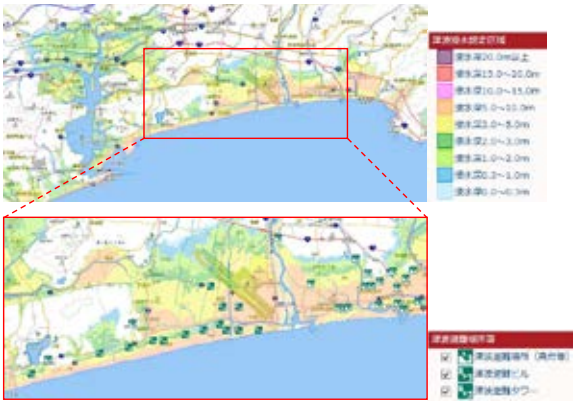
高知県は、レベル 2 の津波に対してについては津波避難タワーをいち早く作り、現在 120 基程度できています。住民の思い入れが色々とあり、様々な形の津波避難タワーができました。タワーによっては、お年寄りが階段を登り降りするなど散歩代わりに使っておられるようなケースもあるようです。

図 20　津波避難タワー

(2) 津波浸水域と津波避難施設の表示

津波避難タワーを作り、避難出来るようにするのですが、初めに近くに山があればそこに避難路をつくり山に逃げ、市街地であればビルがたくさんありますので、そのビルを津波避難ビルとして指定して避難できるようにしました。しかし、実はビルも山もない平地の農地もあるため、そこに津波避難タワーを 600m に 1 個ぐらい作ることになり、実際に津波避難タワーが高知空港の近くにも出来ています。600m に 1 個というのは東西 300m 歩けば 1 個あるということになります。そして都合がよかったのは、津波避難タワーを作る所は、農地が多く人口密度はそれほどありませんから、200 ～ 300 人程度収容できるタワーを作っておけば、周りに住んでいる方全てが避難できる。今、高知県では地震が起こって逃げる行動が取れる人にとっては、逃げる時間も場所もある

というように、人命を守るようなシステムが出来ています。



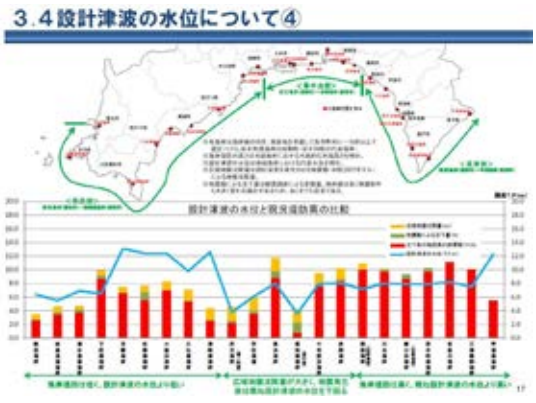
［高知県HP（http://bousaimap.pref.kochi.lg.jp/）］

図 21　津波浸水域と津波避難施設の表示

5.4 レベル 1 対策

(1) 設計津波の水位の決定（高知県）

それに対して今度はレベル 1 ですが、【図 22】の青い線がレベル 1 の津波の高さで、特に東半分については、台風の常襲地帯で潮が高かったということがあり、赤で示されているようにもともと海岸堤防の高さが高いです。従って、堤防をさらに「粘り強い化」してやれば、ほぼレベル 1 の津波にも対応できる状況になっています。

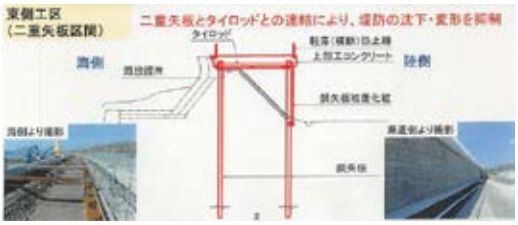


［高知県（2013.11.1）：第3回高知県地震・津波防災技術検討委員会資料］

図 22　設計津波の水位の決定（高知県）

(2) 津波＋粘り強さ対応の海岸堤防の整備

【図 23】のように現実には、通常の 3 面張りの海岸堤防を二重鋼矢板にして、耐震・液状化対策を含めて「粘り強い化」するなど、改良をしながらレベル 1 の津波にも対応をしていくということになります。

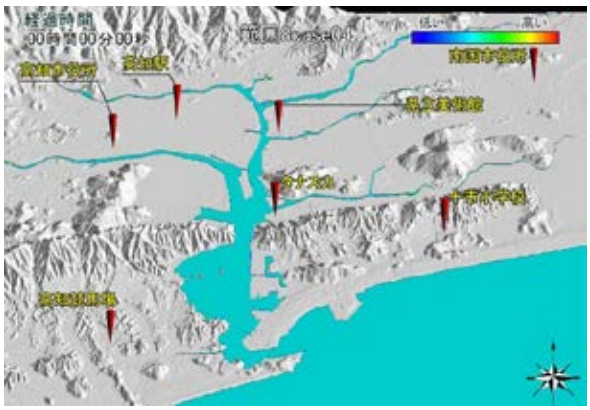


［国土交通省 水管理国土保全局 海岸室資料］

図 23　津波＋粘り強さ対応の海岸堤防の整備

(3) 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

特殊な例を紹介します。高知市は土佐湾から浦戸湾を通じてその湾奥に市街地があります。従って津波がくる場合、土佐湾から狭い所を通り浦戸湾の外側、浦戸湾の内側、そこから高知の市街地に入ることになります。【図 24】を見ると、地震が起きても最初はそれほど高い津波は来なくて、30 分以上も経過すると高い津波がやってきます。これが狭い所を通って、初めに浦戸湾の外側に水が溜まります。それがさらに狭窄部を通って徐々に浦戸湾の内側に入り、最後に市街地が浸水するということです。津波は何波かあり、再度高い津波がやってくる時もありますが、これもまた外側に水が入り、それが内側に伝達されて市街地に染み込むことになります。これから分かるのは、入り口を狭くして津波が入りにくくしておけば、浸水を減らす効果が得られるということ。最初にお話ししたように鋭いピークというのは確かに高いが、継続時間は短いので、その間に水が入りにくくなるような工夫ができれば浸水を減らせるということになります。



［高知県危機管理部HP］

図 24　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

(4) 三重防護による高知港のレベル 1 津波対策

それが今、高知港で行われている三重防護というものです。第 1 線となる港の防波堤を使って津波の力を減じ、津波の力が小さくなったところで、第 2 線で入り口も狭くし、海岸堤防も高くして、津波が浦戸湾や陸側に入りにくくする。それでも多少は入ってくるので、最後に入ってくる分について

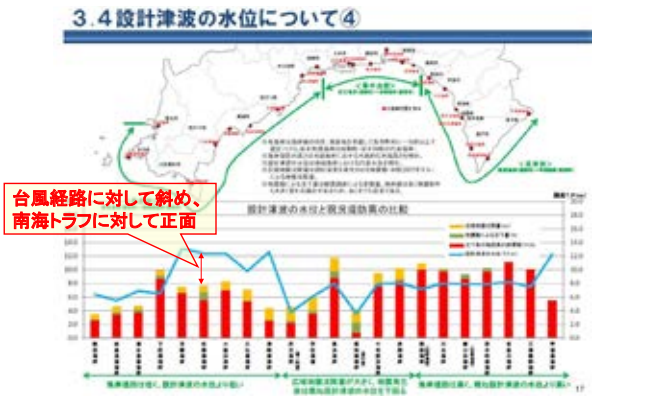
は護岸を高くしておきます。この護岸はおおよそ 1m 程度高くすれば足ります。地形によってはこのような事も工夫が出来るという例です【図 25】。

［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］

図 25　三重防護による高知港のレベル 1 津波対策

(5) 設計津波の水位の決定（高知県）

【図 26】のように今後、残された問題は高知県の西半分です。県の西側に位置する黒潮町は日本で一番津波の予測高が高い所なのですが、【図 9】からもわかるように、実は土佐湾の西側の向きに対して南海トラフというのは大体、平行線にあり、南海トラフの真正面ですから津波の高さがかなり高くなると想定されています。それにもかかわらず西側は、台風はおおよそ西向きから東向きに進行方向を変えて上がるので、西側は台風による高潮が低いため堤防も低くなっています。堤防が低いのに、津波は高くなってしまうので、この差がかなり出来てしまうことになります。これを今後どうするのかは非常に大きな課題ですので、総合的に工夫をしていかなくてはいけないと考えています。



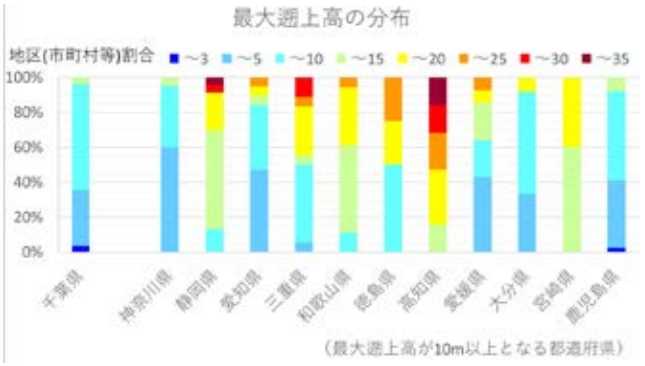
［高知県（2013.11.1）：第3回高知県地震・津波防災技術検討委員会資料］

図 26　レベル 1：設計津波の水位の決定（高知県）

5.5 高知県全体の津波対策

(1) 都道府県別の津波最大遡上高

津波の最大遡上高のグラフ【図 27】をみると、高知県は津波が 30m を超える遡上高になる所が多くあります。日本の都道府県で言えば一番厳しいところなので、津波対策も進んでいます。



［内閣府中央防災会議南海トラフの巨大地震モデル検討会（2012.8.29）：南海トラフの巨大地震による津波高・浸水深等（第二次報告）から作成］

図 27　都道府県別の津波最大遡上高の地区割合（東京島嶼部を除く）

(2) 都道府県別の津波高 10m の到達時間

ただ少し見方を変えて、【図 28】のグラフでみると、高知県は、最大は高いが 10m の津波がくるまでの時間は 30 分から 60 分ほどあり、比較的に時間がとれます。それに対して静岡県は駿河湾が目の前にあり地震が起こると 5 分ないし 10 分の間に 10m の波がやってきます。グラフで見ても 10 分から 20 分の間に津波はやってくるが想定されるので、避難を考えると深刻な地域と思われます。和歌山県も実は比較的近くに「大すべり」があり、早く津波がやってきてしまう所があります。今後はこういう地域の津波対策が焦点になってくると考えられます。

［内閣府中央防災会議南海トラフの巨大地震モデル検討会（2012.8.29）：南海トラフの巨大地震による津波高・浸水深等（第二次報告）から作成］

図 28　津波高 10m の到達時間の都道府県別分布（東京島嶼部を除く）

■コラム：南海トラフと高知県

南海トラフがあるため、高知県は地震や津波の危険がある地域とされています。フィリピン海プレートがユーラシアプレートの下に沈み込み地震を起こすから大変だとされているのです。沈み込む時に上の方で沈み込みきれなかったものがユーラシアプレートの上に乗っかってきます。これを付加体と言います。乗っかってくるという事は、これらのプロセスを考えても、下から上へどんどん押しているというような状況で、押しながら陸に上がった所が室戸岬です。室戸にはジ

オパークがあり、タービダイトが見えるとか、メランジュがあるとか、非常に地質学的に興味深く、学術的にも貴重な場所でもあります。又は岩の形を見るだけでも面白いと観光地にもなっています。さらにそれが山の上に上がってみると、前のほうが低くて、奥に行けば行くほど高くなる山々を見ることができます。高知県には、稜線が 5 つも見えるようなところもあり、山の端が幾重にも重なる絶景を楽しむこともできます。さらに付加体の中には、フィリピン海プレートの南の方から石灰岩のもとになるようなものが堆積した鍾乳洞（龍河洞）もあり、地表に上がれば四国カルストもあるなど、観光資源もたくさんあります。

さらに、石灰岩はセメントの材料になりますので、高知県ではセメント産業が盛んです。また石灰岩は鉄を製鉄する時の副材料になりますので、「高知県の石灰岩が出て行かなかったら、東京湾の製鉄場も成り立たない」と言われるほど、重要な役割も果たしています。

さらにフィリピン海プレートが北上する間に色々な岩石が堆積し、付加体として山に上がって、それを河川が浸食します。仁淀川（によどがわ）の河口を見ますと、色々な岩石の種類、色の石があります。赤や緑、黒、灰色、白という 5 色の砂利が、仁淀川に降り、それを波が運んできたのが桂浜です。桂浜は 5 色の砂利で有名な風光明媚な観光地です。私としては、「高知県は南海トラフがあって地震や津波があって大変ですけど、大変だけじゃありません」「やっぱりいいこともたくさんあって、いいこと悪いこと全部含めて暮らしていくっていうのが高知県の良いところ」と伝えたいです。こういうことを全部含めて地域に住むということなのではないかと思っています。

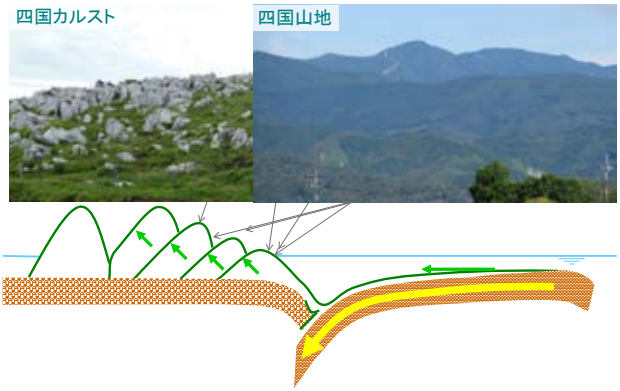


図 29　南海トラフと高知県

6　これまでの高潮災害と対策

6.1 高潮発生のメカニズム

高潮は近年、平成 30 年台風 21 号などの台風により、相当な切迫感が市民の間でも広がっていると思われます。「高潮はなぜ起こるのか」ということですが、日本では特に台風が高潮の原因になっています。【図 30】のように台風の中心は気圧が非常に低いので、気圧が低い分だけ海面を吸い上げて水面が盛り上がる吸い上げ効果が生じます。また、台風は非常に強い風をもたらすので、その風が運悪く湾の入り口の方から湾の奥に向かって吹いた場合には、摩擦力で水位が徐々に奥に向かって上がっていきます。これが吹き寄せです。

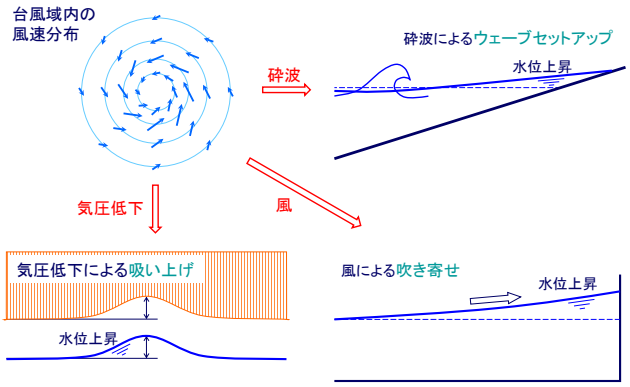


図 30　高潮発生のメカニズム

それに加えて、海岸の砂浜でも砂利浜でもいいですが、浜がある所や斜面がある所はウェーブセットアップと呼ばれる水位上昇が起こります。昭和 45 年台風 10 号による高知海岸の高潮はこの現象を考えないと説明がつきません。

6.2 ウェーブセットアップ

それでは、なぜウェーブセットアップが起こるのかということをみていきます。

波浪があった時に波は寄せては返す、プラスもあればマイナスもある、平均すればゼロではないか、ということなのですが、実はそうではない面もあるのです。

例えば圧力を考えてみます。【図 31】を見ると、波の峰がきた時は当然、盛り上がるので静水状態の点線に比べれば圧力は高くなります。谷がくれば逆に静水状態より低くなり、水圧は低くなります。高くなったり低くなったりするので平均は同じではないかと考えられます。谷よりも下の所は確かに平均すると静水圧と同じですが、この谷よりも上を考えると、峰がきた時には水圧が上がっています。しかし、波の谷がきた時は水がない大気中ですので圧力 0 でマイナスには下がらない、つまり 0 になります。0 とプラスを平均すると、【図 31】上部の点線（静水圧）にはならずに、もう少し大きくなります。この部分だけ余分に圧力が働いてしまいます。赤で塗り潰したところは、実は波がある事により余分に水圧が働いているということで、左から右に押す格好になります。押すとは言っても、作用反作用の法則があるので、波高が変わらない分には、左から右も押しているし、右から左も押しているので、何も起こりません。とにかく釣り合ってはいるけど力は働いているということになります。

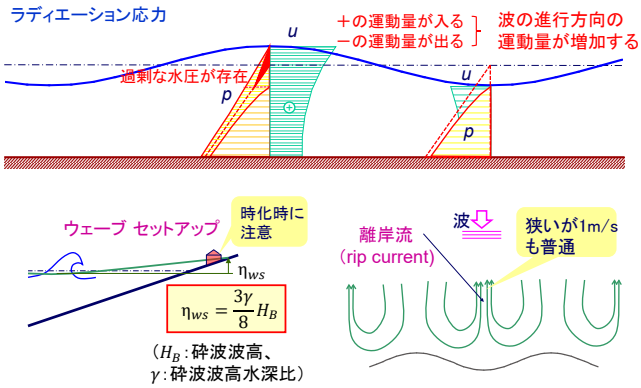


図 31　ウェーブセットアップ

さらに分かりにくいかもしれませんが、波の峰がきた時には、岸向きをプラスと考えれば、プラスの流速を持った水の粒子が入り込んでくるので、右側は左側から運動量を貰うという格好になり、増えるということになります。そこで、波の谷がきた時は、今度は出ていくので、貰うのではなくあげるになるかというと、あげるはあげるのですがマイナスの流速をあげる格好になります。マイナスをあげてしまえば、残りは相対的にプラスになるので、谷がきた時も運動量が増えることになります。そして、運動量変化は力積に等しいという法則がありますから、実は力が働いたのと同じということになります。圧力を考えても、流速を考えても、波の進行方向に力が働いていることになるのです。これをラディエーション応力、あるいはラディエーションストレスと言います。

例えば時化（しけ）の時に海岸に波がやってきて、そこに浜茶屋のようなものが建っていると仮定します。海水浴に行くお盆前などは大した波はこない上に、浜茶屋はかなり陸側にあるので、水がくる心配をせずに遊んでいるとします。しかし 8 月のお盆過ぎ、大きな波がくるようになると、寄せては返すといいながら、水位が上がってきます。なぜなら、砕波点は非常に大きな力が働いているが、波は砕けてしまうので、汀線（ていせん）に来ると余分なラディエーション応力は 0 になります。だから、左側の砕波点から押しているけど、汀線（ていせん）では押し返す力はなくなってしまうので、別の力と釣り合わないといけない。その力が水位上昇になって現れ、普段はほとんど水に浸かる心配のない所が水に浸かってしまいます。大波の時に安心して海水浴していると波にさらわれるのもこれが結構大きく効いてきている現象です。これも高潮の一つのファクターになります。

高潮とは直接関係ありませんが、今の力を考えると、今度はラディエーション応力の大きい所から小さい所に向かっていれば流れが起きて、この流れで沿岸流とか離岸流と呼ばれている流れが出来ることもあります。これも危険の一つです。

これらを考えた上で高潮は、吸い上げ、吹き寄せ、そしてウェーブセットアップと、3 つの原因で起こるということになります。

6.3 高潮の歴史的な被害

(1) 画期をなす高潮災害（国内）

【図 32】のように高潮の被害について歴史的なものを辿ってみます。過去に日本の高潮対策の曲がり角になった大きな台風、高潮というのが幾つかあり、その一つが昭和 28 年（1953 年）の台風 13 号です。これをきっかけに 1956 年に海岸法ができ、システマティックに海岸保全が進むようになりました。また昭和 34 年（1959 年）の伊勢湾台風は、高潮偏差の値が 3.4m という既往最大値で、一番大きな高潮被害を及ぼしました。この伊勢湾台風がきっかけとなり、直接的に被害を受けなかった東京湾や大阪湾も含め全部、高潮対策は伊勢湾台風をモデルに進めていくことになりました。

海岸法（1956）制定　　三大湾の設計モデル高潮

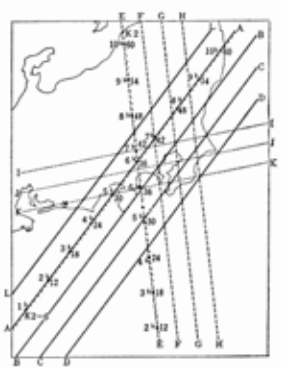
年月日	台風名	被害区域	上陸時中心気圧（hPa）	最高潮位（T.P. m）	高潮偏差（m）	死者・不明（人）	全壊・半壊・流出（戸）
1917.10.1(T.6)	台風	東京湾	—	3.0	2.1	1,324	60,175
1934.9.21(S.9)	室戸台風	大阪湾	911	3.1	2.9	3,036	92,323
1953.9.25(S.28)	台風13号	伊勢湾	948	2.8	1.5	478	26,071
1959.9.26(S.34)	伊勢湾台風	伊勢湾	929	3.9	3.4	5,098	91,572
1970.8.21(S.45)	台風10号	土佐湾	960	3.1	2.4	13	4,479
1991.9.27 (H.3)	台風19号	瀬戸内海	941	2.8	1.7	86*	15,464*
1999.9.24(H.11)	台風18号	八代海	944	3.1	1.8	31	3,972
2004.8.30(H.16)	台風16号	瀬戸内海	954	2.6	1.4	17	71

［「海岸50年のあゆみ」（全国海岸協会）、「災害をもたらした気象事例」（気象庁）等から作成、*は連続する台風17～19号の合計値］

図 32　画期をなす高潮災害（国内）

(2) 伊勢湾台風が東京湾を襲った場合の高潮予測

東京湾には伊勢湾台風は来ていない訳ですから、その当時としては最新鋭のコンピューターを使い、シミュレーションを行いました。【図 33】を見ると、その結果、一番高いのは千葉で 2 m 67cm という数字が出ています。



経路	最大計算偏差（cm）		
	千葉	築地	横浜
A	267	178	86
B	244	131	78
C	179	89	62
D	99	59	48
E	199	208	109
F	217	166	111
G	197	131	92
H	146	88	61
I	247	161	72
J	179	147	83
K	82	125	78

東京湾での高潮は気圧低下量(hPa)の3~4倍(cm)の水位上昇（高潮偏差）になる

図 33　伊勢湾台風が東京湾を襲った場合の高潮予測

(3) 高潮堤防の設計天端高

湾奥全体の最大値 3m で対策をすることになり、平均海

面から朔望平均満潮位（大潮の満潮位）が 1m 上にあり、それを基準にして、さらに高潮がどれだけ上がるのかを考えました。場所により違いますが、浦安あたりの例でいえば 3m を上げて、さらに高潮がきている時は台風が来て高波もあるので 2.75m というのが波の打ち上げ高だと考え、そこに余裕高も少し見て堤防の高さを決め、堤防を作りました。

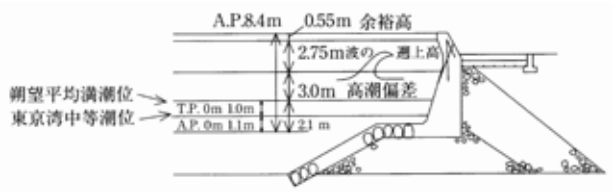


図 34　高潮堤防の設計天端高

(4) 東京の高潮防災施設

東京都は【図 35】のように堤防が張り巡らされています。川も上流に向かい同じように堤防の高さを維持していくということです。小さな河川とか運河まではやりきれないので、水門を作り小さな運河や河川には高潮が入らないようにする。その代わりに、水門で閉じてしまうので降った雨水が陸側に溜まらないようにポンプ場、排水機場を作って外に出すことで高潮の対策ができています。

外郭堤防
（人工島は別）

河川堤防

水門

排水機場

内部護岸

図 35　東京の高潮防災施設

(5) 各海岸保全施設の整備の進展

【図 36】のように全国でも 1956 年の海岸法をきっかけに、大々的に海岸保全施設の建設が始まり、急ピッチで海岸保全が進みました。

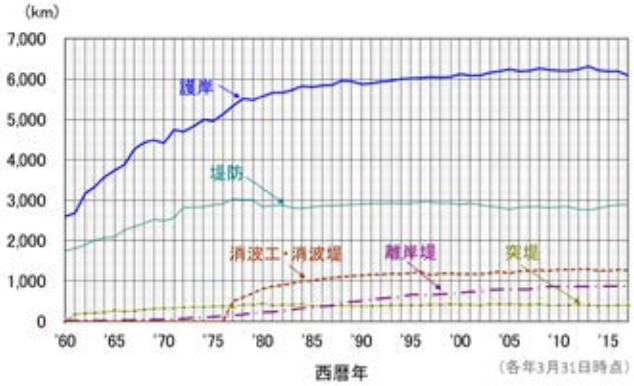


図 36　各海岸保全施設の整備の進展

(6) 各年最大の上陸時気圧低下、高潮偏差、（一台風による）死者・行方不明者数と海岸保全施設有効延長

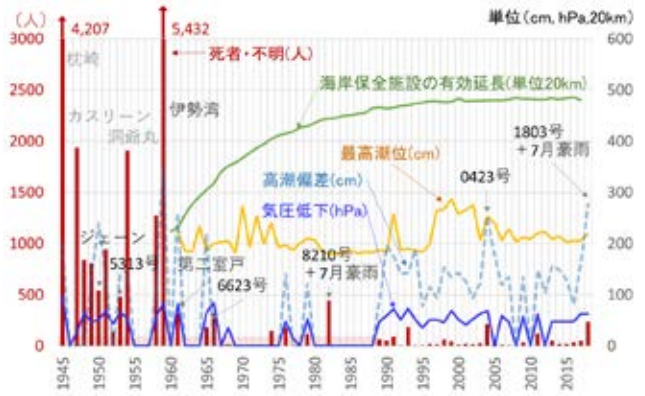
【図 37】は、少し分かりにくくて申し訳ないですが、海岸保全の効果についてのデータです。初めに赤い棒は、一つの台風で海岸だけでなく内陸も含めて何人の方が亡くなったかをプロットしてあります。1950 年代位までの終戦直後は、毎年のように台風により大きな被害を受けていますが、その後は比較的人的な被害は少なくなりました。それに対して、台風による気圧低下や高潮偏差を見てみますと、大きな被害を受けていた時に強い台風がきていたのは間違いありません。その後、1970 年代、1980 年代と比較的低い時期があります。1990 年代になると平成 3 年台風 19 号、平成 11 年台風 18 号など記憶に残っているのがありますが、かなり高くなっています。高潮偏差も結構大きくなっていますが、人的被害は少なく、被害全体も少なくなっています。

気象庁のデータについてですが 1989 年を境に、統計の示し方が変わっています。1989 年より前は 100 人以上の被害があったものだけを取り上げ、1989 年より後は顕著なものは全部取り上げるという統計方法なので、同じレベルで考えることはできません。そこで違うデータもプロットしてみました。それは 1 時間毎の全国の潮位の一番高い所を拾ったものです。このデータは 1 時間毎であるがゆえに、高潮の本当のピークは外してしまう可能性がありますが、それでも 1970 年代、1980 年代の低いものに比べると、1990 年代から相当高くなっていることがわかります。

結局、被害が大きかった 1950 年代までに比べ、1960 から 80 年代は台風が弱まったが、再び 1990 年代から台風が大きくなっても被害は大きくはならなかったということです。それを先ほどの海岸保全施設の有効延長と合わせてみると、ちょうど懸命に堤防護岸を作っている時代は、比較的大きな台風が来なくて助かり、それで大きな台風が来るようになった 1990 年代には、かなりの所まで海岸保全ができていたということわかります。つまり、海岸保全が大きな効果を発揮したと言えます。

しかし最近では、このレベルを超えるような台風も来てい

ます。また地球温暖化による海面上昇がかなり顕在化してきているので、これからさらなる対策が必要で、これで大丈夫と安心出来ない状況にあります。



[気象庁：災害をもたらした気象事例(http://www.data.jma.go.jp/obd/stats/data/bosai/report/index.html)、海岸統計等より作成。偏差・気圧は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・社会的関心が大の台風のみ対象]

図 37　各年最大の上陸時気圧低下、高潮偏差、(一台風による)
死者・行方不明者数と海岸保全施設有効延長

7　高潮に対する“二段防災„

7.1 近年の巨大高潮災害（海外）

高潮に対しても最近、ハザードが大きくなってきたので対応しなくてはいけません。世界的に見ても【図 38】の一覧表のように非常に大きなトロピカルサイクロン（地域により、台風、あるいはサイクロン、ハリケーンと呼ばれる）が起こり、高潮災害が深刻化してきています。

上陸年月日	名称	国名	中心気圧(hPa)	最高潮位(m, ft)	高潮偏差(m, ft)	死者・不明数(人)
1970.11.12	ボーラ	東パキスタン	966	—	—	500,000
2005.8.25	カトリーナ	米国	902	ミシシッピ州 Ocean Springsで、4.04m ※1	最大偏差 3.53m※1	1,335
2007.11.	シドル	バングラデッシュ	944	浸水高さ調査に基づく高潮の数値シミュレーション結果の最大値 6.7m ※2	—	4,234 (報告分のみ) ※2
2008.4.27	ナルギス	ミャンマー	962	—	—	138,366
2013.10.	サンディ	米国	940	マンハッタンで既往最高潮位13.88ft(4.2m)を記録※3	最大偏差約9.5ft (2.9m) ※4	170
2013.11.	ヨランダ (ハイヤン)	フィリピン	895	—	—	7,951※5

※1　ハリケーン・カトリーナについて□気象研究所台風研究部□□・榊原均□□・中澤哲夫□高野洋雄□日本気象学会機関誌「天気」2006年による
※2　2007 年バングラデシュ・サイクロンSIDR 高潮水害調査報告書土木学会バングラデシュ水害調査に対する災害緊急調査団　2008 年 (平成20 年) 3 月による
※3　米国ハリケーン・サンディに関する現地調査報告書(第二版)□平成25 年7 月　国土交通省・防災関連学会合同調査団による
※4　米国ハリケーン・サンディに関する現地調査報告書(第二版)□平成25 年7 月　国土交通省・防災関連学会合同調査団の11p図による
※5　国土交通省　気候変動に適応した治水対策検討小委員会による

図 38　近年の巨大高潮災害（海外）

7.2 画期をなす高潮災害（国内）

【図 39】のように日本では、伊勢湾台風は大きかったのですが、中心気圧でいうと昭和 9 年の室戸台風がもっと大きく、伊勢湾台風から比べても 3 割は大きな台風でした。室戸台風の被害の経験もあるし、さらに海面上昇で大きくなる懸念もあることを考え、また最近では実際に大きな台風が次々に来ていることを考えると、ここの対応をしっかりとしていかなくてはいけないと考えています。

上陸時の中心気圧の最低記録

年月日	台風名	被害区域	上陸時中心気圧(hPa)	最高潮位(T.P.m)	高潮偏差(m)	死者・不明(人)	全壊・半壊・流出(戸)
1917.10.1(T.6)	台風	東京湾	—	3.0	2.1	1,324	60,175
1934.9.21(S.9)	室戸台風	大阪湾	911	3.1	2.9	3,036	92,323
1953.9.25(S.28)	台風13号	伊勢湾	948	2.8	1.5	478	26,071
1959.9.26(S.34)	伊勢湾台風	伊勢湾	929	3.9	3.4	5,098	91,572
1970.8.21(S.45)	台風10号	土佐湾	960	3.1	2.4	13	4,479
1991.9.27 (H.3)	台風19号	瀬戸内海	941	2.8	1.7	86*	15,464*
1999.9.24(H.11)	台風18号	八代海	944	3.1	1.8	31	3,972
2004.8.30(H.16)	台風16号	瀬戸内海	954	2.6	1.4	17	71

[「海岸50年のあゆみ」(全国海岸協会)、「災害をもたらした気象事例」(気象庁)等から作成。*は連続する台風17～19号の合計値]

図 39　画期をなす高潮災害（国内）

7.3 平成 27 年改正 水防法

【図 40】のように平成 27 年に、国土交通省を中心にして水防法の改正がありました。その中に高潮も入っていました。高潮についても、津波と同じような言い方ができると思いますが、想定し得る最大規模の高潮に対して、高潮浸水想定区域を指定する。指定したら今度は高潮特別警戒水位という、浸水する少し手前でその水位を決めて情報を出す。そして避難に結びつけるという流れに変わりました。

- 室戸台風(>伊勢湾台風)の経験、地球温暖化、洪水との複合災害
- 第14条の3
  - 想定し得る最大規模の高潮であつて国土交通大臣が定める基準に該当するものにより当該海岸について高潮による氾濫が発生した場合に浸水が想定される区域を高潮浸水想定区域として指定するものとする。
- 第13条の3
  - 高潮特別警戒水位を定め、・・・水防管理者及び量水標管理者に通知するとともに、・・・一般に周知させなければならない。
- 第15条
  - 洪水予報等の伝達方法、
  - 避難施設その他の避難場所及び避難路その他の避難経路、
  - 洪水、雨水出水又は高潮に係る避難訓練の実施、
  - ・・・を定める

図 40　平成 27 年改正 水防法

7.4 三大湾における室戸台風相当の台風の確率年

過去の台風データから考えると、最大規模の台風は、【図 41】のように室戸台風級ということになりました。室戸台風を除いて確率をプロットしてみると、だいたい室戸台風が 1000 年に 1 回位の規模なので、津波と同じような確率と考えても良いでしょう。

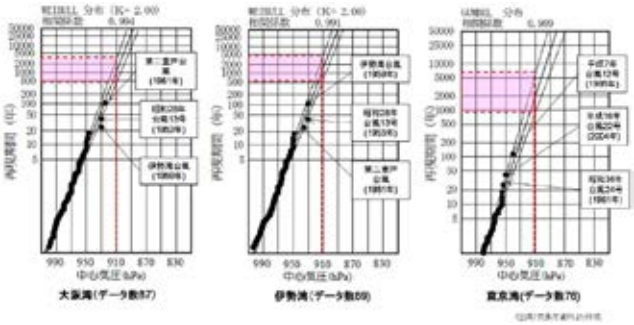


図 41　三大湾における室戸台風相当の台風の確率年

7.5 海面抵抗係の風速による変化

過去の台風データを用いて計算をするとなると、まだ分からないことが結構あります。先ほど高潮は、吸い上げ、吹き寄せ、ウェーブセットアップという話をしましたが、吹き寄せが一番大きな効果を持っています。吹き寄せは、風による海面の摩擦抵抗によって起きるわけで、その摩擦の力を表現するのに風速の二乗に定数をかけます。その定数が海面抵抗係数です。これが室戸台風のような巨大な台風がもたらすほどの風速まで、海面抵抗係数がいくらになるという実測値は実はありません。【図 42】のように低いところで提案した式を外挿していきますと、線形に大きくなっていくことがあります。例えば 1 のものが 2 になれば、吹き寄せ効果 2 倍になる位の影響を持っています。そこで唯一、長期間に観測をして海面摩擦係数を測った論文が 2008 年に出ました。そんなに線形に上げていかなくても、ある程度のところで頭打ちにしてもいいようなデータに見えますが、一つだけ飛びぬけたオレンジ色の点があります。これだけの風速のデータはそう取れないので、このオレンジ色の点が違うとも言えないし、正しいとも言いきれません。結局のところ、室戸台風レベルの風速での海面抵抗係数については、最大クラスなので、45m までは線形に上げて、そこから先はデータもないので一定値にしましょうというようなことになり、まだ技術的には幾つか問題は残っています。

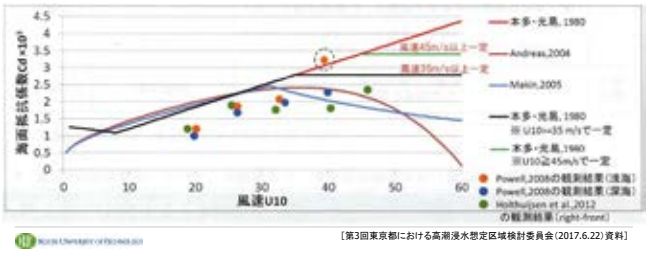
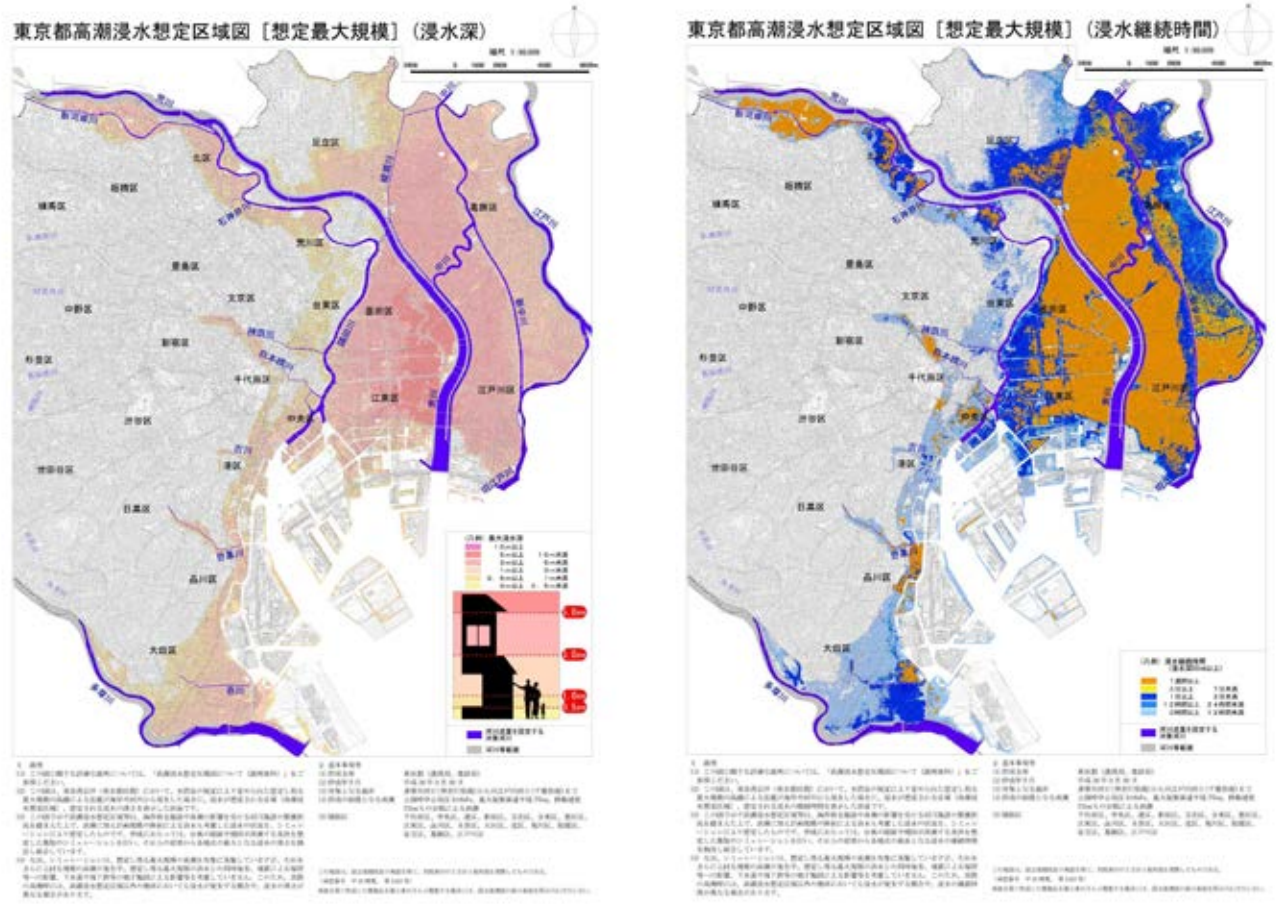


図 42　海面抵抗係数の風速による変化



「東京都高潮浸水想定区域図（2018.3）」

図 43　最大規模の高潮による浸水深と浸水時間

7.6 最大規模の高潮による浸水深と浸水時間

また海岸堤防も越流した瞬間に本当に壊れるのかというと、現実にはそう簡単には壊れる訳ではありません。しかし、最悪に近い状況を念頭に置いて計算をすると、【図 43】のように江東デルタ地帯は完全に水没してしまいます。場所によっては浸水深 5m を超える事がありました。

7.7 特別高潮警戒水位

台風の予測精度を上げ、できるだけ早く避難するのはもちろんです。しかし、本当に最後の切迫した時に逃げるために、水防法改正における【図 44】のように特別高潮警戒水位というのがあります。

これは堤防を高潮が超える時刻よりも 30 分前を目処に情報が出せるようするというものです。あっという間に水位が上がってしまうわけですから、ギリギリで出すと逃げる時間がなくなってしまう、早めに出すと精度が悪いから当たらない場合が増える。そこで苦労して 30 分前にどの位の水位になっているかを計算した結果、千代田区、中央区で A.P.（荒川工事基準面上）3.6m、これは朔望平均満潮位が 2.1m ですから、大潮の満潮時なら高潮偏差が 1.5m で警報が出るようになりました。墨田区、江東区、江戸川区でも 3.9m 位。このくらいであれば、十年以上に一度程度の警報が出る。出た時は本当に切迫して 30 分位しか余裕がありませんから、しかも台風がきているので外を歩くわけにもいかないので、これは最後通牒で、最後に「とにかく垂直避難でも何でもして下さい」という情報を出せるようになりました。

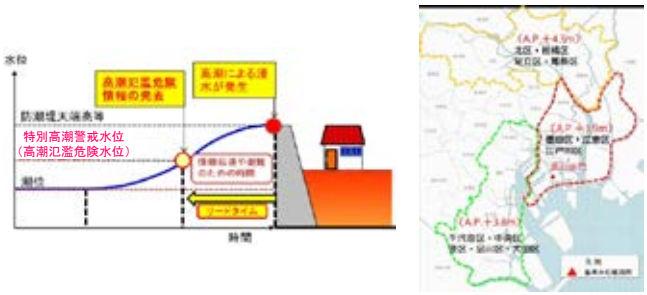


図 44　特別高潮警戒水位

7.8 高潮に対する「二段防災」

高潮に対しても二段防災の体制が整いつつあります。しかし、【図 45】のようにレベル 1 に対しても課題は堤外地をどうするのか、海岸堤防の海側をどうするのかという問題はまだ残っています。それに加えて最大クラスは取りかかり始めたばかりなので、高潮特別警戒水位情報をどういう風に発信するのか、そしてどう避難体制を整備していくのか。東京ですから何百万人の人が逃げるため、歩行者で渋滞し、逃げられなくなってしまう。これは非常に深刻な問題になってくると思います。

- 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）
  - 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
  - 国難につながる地域（東京）での、L2対応の防潮堤の検討

図 45 高潮に対する「二段防災」

8　気候変動（地球温暖化）

8.1 海面上昇による波の打ち上げ高の上昇

高潮は今となっては気候変動、地球温暖化と切り離せません。地球温暖化の中でも特に信頼度も高く深刻なのが海面上昇です。特殊な例ですが、例えば海岸に堤防が出来ていて、そこに海面上昇が例えば 50cm、1m と 起こった時に堤防を 50cm、1m と上げればいいかというと、そうではないのが難しい所です。この図では浅い所の海岸堤防なので、水位が上がり水深が深くなると、今は波が沖の方で砕けて堤防の所に来た時は小さい波になっているので、打ち上げ高も小さくなっています。しかし水深が大きくなると、砕波点が岸の方に寄ってきて、それで堤防の所で波高が結構高く残っているため打上高も高くなるということで、海面上昇よりさらに堤防を上げなければという問題が起きます。実際に打上げ高の高い所でみてみると、海面上昇の 3 倍を超えるような増幅率になる所があります。

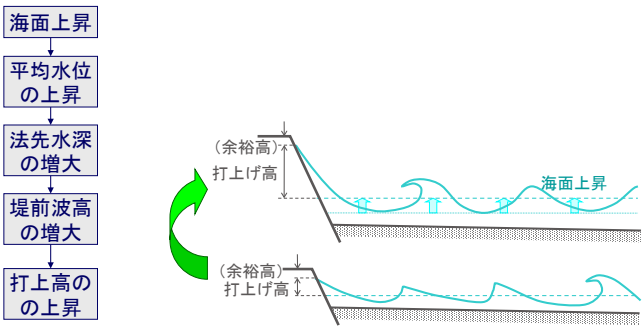


図 46　海面上昇による波の打ち上げ高の上昇

8.2 海岸保全施設の漸近的適応策

例えば今、堤防を造っていて必要な天端高があり、それに対して余裕高がとってあれば、【図 47】が描けます。

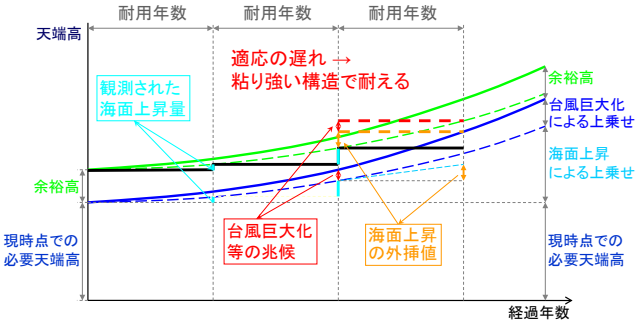


図 47　海岸保全施設の漸近的適応策

そこでこの堤防が供用期間内に海面上昇は起こってくるかもしれないが、余裕高がある所はそれで吸収してもらい頑張って、それで更新をするときには海面上昇の分だけ、対応する分だけ嵩上げをして造ってみます。場合によってはまた更新する時には実績としての海面上昇だけではなくて、将来予想される海面上昇分とか、あるいは場合によっては台風の巨大化なども考慮に入れて海岸堤防を更新していく。全部をすぐに作り変えるというのは現実的ではないと思いますので、新設、更新時期をうまく使いながら、対応していってはどうかという事が一つの考え方ではないかと思います。

9　今後の沿岸防災システム

9.1 二段防災の目的

今後、海岸災害をどう対応していくべきかを考えてみました。【図 48】の横軸がハザードレベル、台風の強さとか津波の大きさ、縦軸に被害レベルを取ると対策がなければ、小さなハザードから被害が出て段々大きくなります。ただし、レベル 2 対策でソフト的に避難をすれば、財産については失われるかもしれませんが、人命はかなり助かるので無対策よりは良い。レベル 1 対策で防災施設や海岸堤防を作っておけば、ある程度の所までは浸水しないので、被害をゼロに抑えることができますが、その先は被害が徐々に増えていく。特に物的な被害は無対策に比べれば少ないですが、人的な被害は逃げないと人命が損なわれ、ハード対策だけでは上手くはいきません。これを組み合わせながら防いだり、時間稼ぎをしたり、減らしたりをしていく。災害についても「粘り強い化」とか様々な組み合わせをして、国難に至るような最大限の被害は出さない所を、レベル 1、レベル 2 を組み合わせながら考えるべきです。

そのヒントというのは、予測や避難をどう強化していくかが一つであり、また施設にしても設計外力を超えた外力に対してどのような挙動を示せるのか、どのような効果を表せるのかを、科学的に検証していくことが大事です。それを取り入れながら被害レベルの天井を抑えることをやっていくべきではないかと思います。

高潮の例で言いますと、1970 年当時の東パキスタン（現在のバングラデシュ）で起こった高潮というのは、50 万人の方が犠牲になり、その次の年に東パキスタンからバングラデシュが独立するきっかけにもなったような高潮でした。それに類するような事を日本では絶対に起こさないようにという意味で、天井を抑える対策を考えていく必要があります。

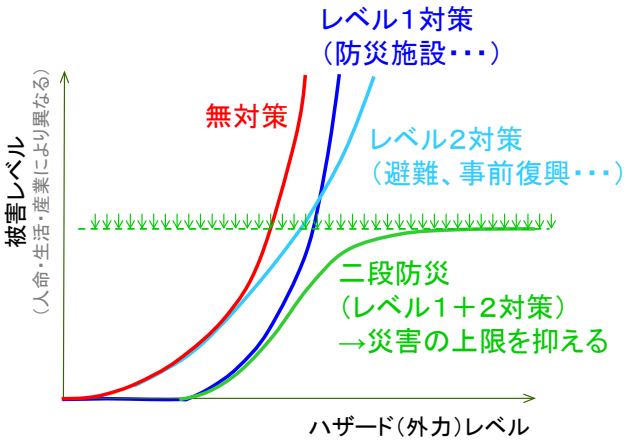


図 48　二段防災の目的

10　まとめ

津波、高潮、そして少し気候変動の話もさせていただきました。行政的にも法律に基づいた津波防災地域づくり法、あるいは水防法の改正があり、気候変動適応法の制定もあったわけですが、海岸という場は一つなのでこれを統合的に考えなくてはいけない。しかし、ある海岸では津波に比べると高潮の方がずっと深刻なので、初めにそちらの対策を行えば良いで済んでしまうかもしれませんが、別の海岸ではその逆もあるかもしれませんし、両方もあるかもしれません。整理をする必要はあると考えています。

その上で今、枠組みができたレベル 1、レベル 2 の対策というものを着実にやっていく。その中のキーワードは構造物の「粘り強い化」、さらにレベル 2 では「逃げる気があり、逃げる人は人命が助かります」と言いましたが、逃げない限りは助からない。構造物による防護で言えば、技術者、専門家に任せておきなさい、住民の皆さんは黙っていても助かりますということでしたが、やはり住民自身が能動的に避難をしない限りは助かりません。しかし、それが実際には出来ていないという調査結果もあり、そこをどうしていくかは意外と深刻なテーマになります。

また「長期的に考えていく」というテーマも別にあります。今は単純に「堤防を作ります、あとは逃げます」という取り組みの話しか出来ませんでしたが、同じ防護にするといっても、防護、順応、あるいは撤退など色々な手段があります。一言で言うと、危険な所には住まないという事ですが、危険

な所から出て行けというよりは、ここが安全なので来ませんかと言い方の方が私としては良いと思います。私たち土木に関わる者、あるいは都市計画に関わる者は安全な所を保証して作るということも、同時にやっていく必要があると思います。

また、保険とか課徴金制度の導入や、土地利用計画制限を厳格にしなければという意見もありますので、まずは総合的に沿岸域防災システムの構築を行っていかなくてはいけないと感じています【図 49】。

- 背景
  - 東日本大震災 → 津波防災地域づくり法（浸水予測、避難、土地利用）、L1・L2津波
  - 水防法改正(H.27.5)：最大規模の洪水・内水・高潮に係る浸水想定区域の公表
  - 気候変動適応法（H.30.6）
  - → 統合化が必要・可能
- 当面の課題
  - L1対策＋海岸保全施設の維持・更新・新設（老朽化対策）【粘り強い化】
  - L2対策（浸水予測、避難計画、BCP（減災対策、道路啓開、排水計画）、事前復興）
- 長期的課題：沿岸域防災システムの構築
  - 気候変動、L2津波・高潮を含むハザードの統合 → L2ハザードの想定・対策
    ハザードレベルに応じ、地域ごとに最適な防災・減災（防護・順応・撤退の組合わせ）
  - （誘導策：災害危険地域からの移転）
    （安全な生活・産業地区の開発・吸引、保険・課徴金制度、土地利用計画・制限）

図 49　まとめ：統合的な沿岸域防災システムの構築

本内容は 2020 年 7 月 3 日に第 34 回技術研究発表会における特別講演としてご講演いただいたものです。

本講演を映像でご覧になれます。
■国土技術研究センターの YOUTUBE チャンネル
https://www.youtube.com/watch?v=lNm2aHaYcpw