

港湾における気候変動適応策の実装方針 参考資料

令和5年9月29日

Ⅰ. 気候変動適応策の実装に係る基本的な方針

気候変動適応策に関する動向

2019年9月 IPCC 海洋・雪氷圏特別報告書(変化する気候下での海洋・雪氷圏に関するIPCC特別報告書)

→2100年までの平均海面水位の予測上昇範囲:RCP2.6 では0.29-0.59m、RCP8.5では0.61-1.10m。

2020年8月「今後の港湾におけるハード・ソフト一体となった総合的な防災・減災対策のあり方」(交通政策審議会答申)

(1) 将来にわたる港湾機能の維持

- ① 気候変動の影響による将来の海面水位の上昇量を考慮した港湾計画等の策定
- ② 各港で将来の気候変動に対応するための計画を関係者で策定(フェーズ毎の将来想定する外力の設定や対策を講じる優先順位等を明記)
- ③ 越波等の脆弱性が高い箇所に実施する直前予防対策を港湾BCPに明記
 - ※ 気候変動の影響により、既往最大を超える台風の来襲等の巨大災害が発生することも想定した港湾BCPを策定
 - ※ 三大湾は基幹的海上交通ネットワークの拠点であり、また背後に広大なゼロメートル地帯を抱えることから巨大災害が発生した場合であっても被害を極力軽減

(2) 施設設計への反映

- ① 平均海面水位の上昇量
 - 建設又は改良する施設については、建設又は改良時点の朔望平均満潮位に、当該施設の次の更新時期までに予測される平均海面水位の上昇量を加え、設計等を行うことを基本として、必要な技術基準等の整備
- ① 最大風速の増加
- ② 潮位偏差の極値の増加
- ③ 波浪の極値の増加 等
 - 技術的な知見が一定程度得られた時点で、設計に反映

(3) モニタリングの継続や外力強大化に対応する技術開発

- ① 継続した気象・海象のモニタリングを実施し、施策に反映
- ② 国において、モニタリング結果に基づき、気候変動に起因する高潮・高波の影響予測を実施し、港湾管理者等に情報提供を実施
- ③ 民間企業や研究機関と連携した技術開発

2020年11月 海岸保全基本方針変更(海岸省庁)

・過去のデータに基づきつつ気候変動による影響を明示的に考慮した対策へ転換

→今後、海岸保全基本方針に基づき各都道府県が海岸保全基本計画を変更し、気候変動の影響を考慮した防護水準等を設定

→海岸省庁で「海岸保全施設の技術上の基準の変更」を予定

2020年12月『日本の気候変動2020 — 大気と陸・海洋に関する観測・予測評価報告書 —』

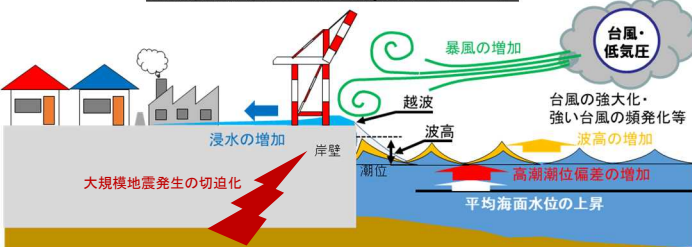
→将来予測:日本沿岸の年平均海面水位は21世紀中に上昇すると見られる(確信度が高い)。21世紀末には、4℃上昇シナリオ(RCP8.5)の下では0.71m(0.46~0.97m)、2℃上昇シナリオ(RCP2.6)の下では0.39m(0.22~0.55m)上昇すると推定される。

港湾分野においても気候変動適応策の実装に向けた取組が必要

I. 臨海部を取り巻く状況

- 近年、台風により既往最大級の波高、潮位等が発生
- 港湾施設に影響を与える大きな地震も頻発
- その中でも、これまでの取組により被害の軽減効果が発現

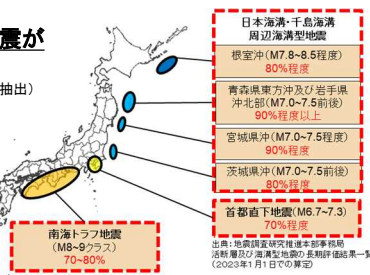
気候変動等による外力強大化イメージ



- 今後、気候変動により、平均海面水位の上昇、猛烈な台風の発生頻度の増加、高潮リスクの増大、極端な高波の波高の増加等、さらなる影響が想定
- 南海トラフ地震・首都直下地震等大規模地震の30年以内発生確率が70%以上と切迫化

今後30年以内に地震が発生する確率

(発生確率70%以上の地震を抽出)



II. 臨海部で想定される災害等のシナリオと課題

想定災害等シナリオ

1. 南海トラフ地震
2. 首都直下地震
3. 日本海溝・千島海溝周辺海溝型地震
4. 大規模台風
5. その他災害等に起因する事象

【災害等対応における課題】

- ・ 気候変動による災害の規模と頻度の増加
- ・ 津波や高潮等による災害リスクの増大
- ・ 暴風・高潮等予報と事前対策の徹底
- ・ 強い余震等による被災情報把握等の遅れ
- ・ 多様な者による施設・海域の管理、一般海域の存在
- ・ 緊急輸送・サプライチェーンが寸断
- ・ 利用可能な港湾施設等残されたリソースの有効活用
- ・ 広域的なコンテナ物流の代替等全体最適化
- ・ 資機材や人員、作業船団等のリソースの不足
- ・ 大規模地震後の被災地の浸水防護水準低下
- ・ 被災地で膨大に発生する災害廃棄物
- ・ 船舶事故、感染症等事態による影響

III. 港湾・臨海部の強靱化の推進に係る施策

1. 災害等に強い海上交通ネットワークの構築

(1)災害時等における海上交通ネットワーク確保のための事前対策

- ① 耐震強化岸壁整備等の加速化
- ② 気候変動適応等

- ・ 埠頭用地の嵩上げ、防波堤の補強・嵩上げ
- ・ 暴風・高潮等予報に基づくコンテナ固縛等、公共や民間企業の事業継続体制構築

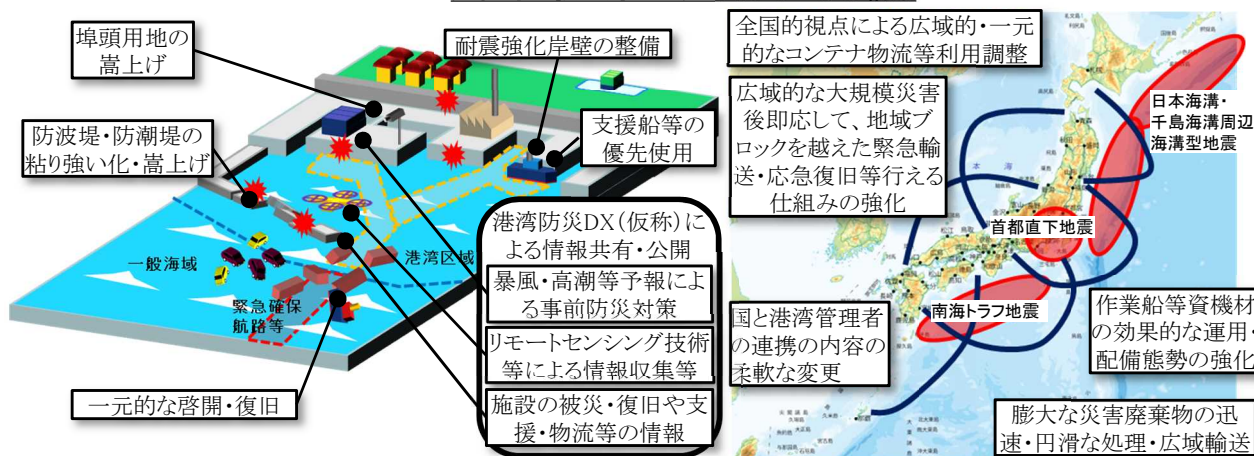
(2)被災後の早期啓開・早期復旧

- ・ リモートセンシング技術等による被災施設の使用可否判断
- ・ 支援船の要請等を踏まえた、効果的復旧
- ・ 航路等危険防止のための周辺部も含めた一元的な啓開・復旧

(3)残されたリソースの最大限の活用

- ・ 港湾被災情報・物流情報等の集約、支援船等との緊密な連携、広域的・一元的な利用調整・仕組みの強化等、支援船等の優先使用、災害廃棄物処分の広域調整

災害等に強い海上交通ネットワークの構築



2. 物流・産業・生活機能が集積し、面的に広がる港湾・臨海部の強靱化(面的強靱化)

(1)災害等に対する脆弱性の評価(リスクの見える化)

高潮等による浸水リスクの把握と、施設の性能照査等を総合した脆弱性評価

(2)官民連携した防災・減災対策の実施

脆弱性評価に基づく、関係者間で整合が取れ、かつ連携した計画による対策の実施、港湾・臨海部の特性を踏まえた水素・アンモニア等の利用環境の整備

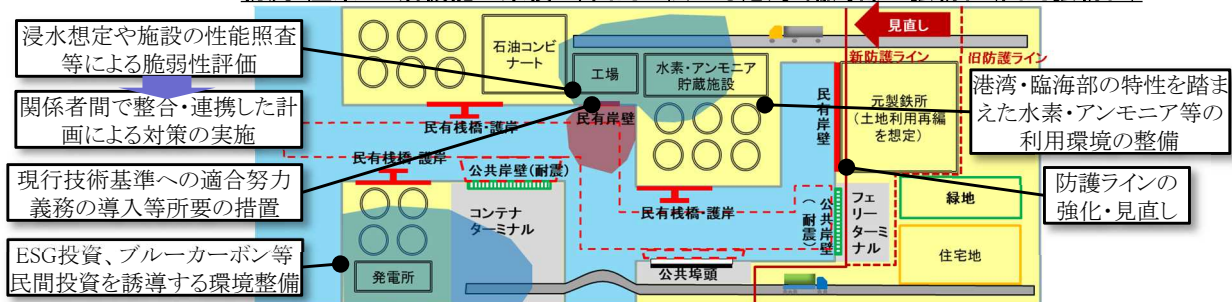
(3)港湾・臨海部を護る事前対策

- ① 海岸保全施設整備等の加速化
- ② 官民が連携した効果的・効率的整備

気候変動を踏まえ、防護ラインの強化・見直し等、整備を加速化

ESG投資やブルーカーボン等民間投資を誘導する環境整備、官民連携した防護ラインの強化、現行技術基準への適合努力義務の導入等所要の措置

物流・産業・生活機能が集積し、面的に広がる港湾・臨海部の強靱化(面的強靱化)



3. 実現のための枠組み

- (1)気候変動適応等を関係者が協働して進めるための枠組み
- (2)港湾防災情報のデジタル化・高度化(港湾防災DX(仮称))
- (3)継続的な取組の強化(計画的な取組、作業船団の維持、新技術)

(高潮等浸水予報、リモートセンシング技術、被災・物流情報等)

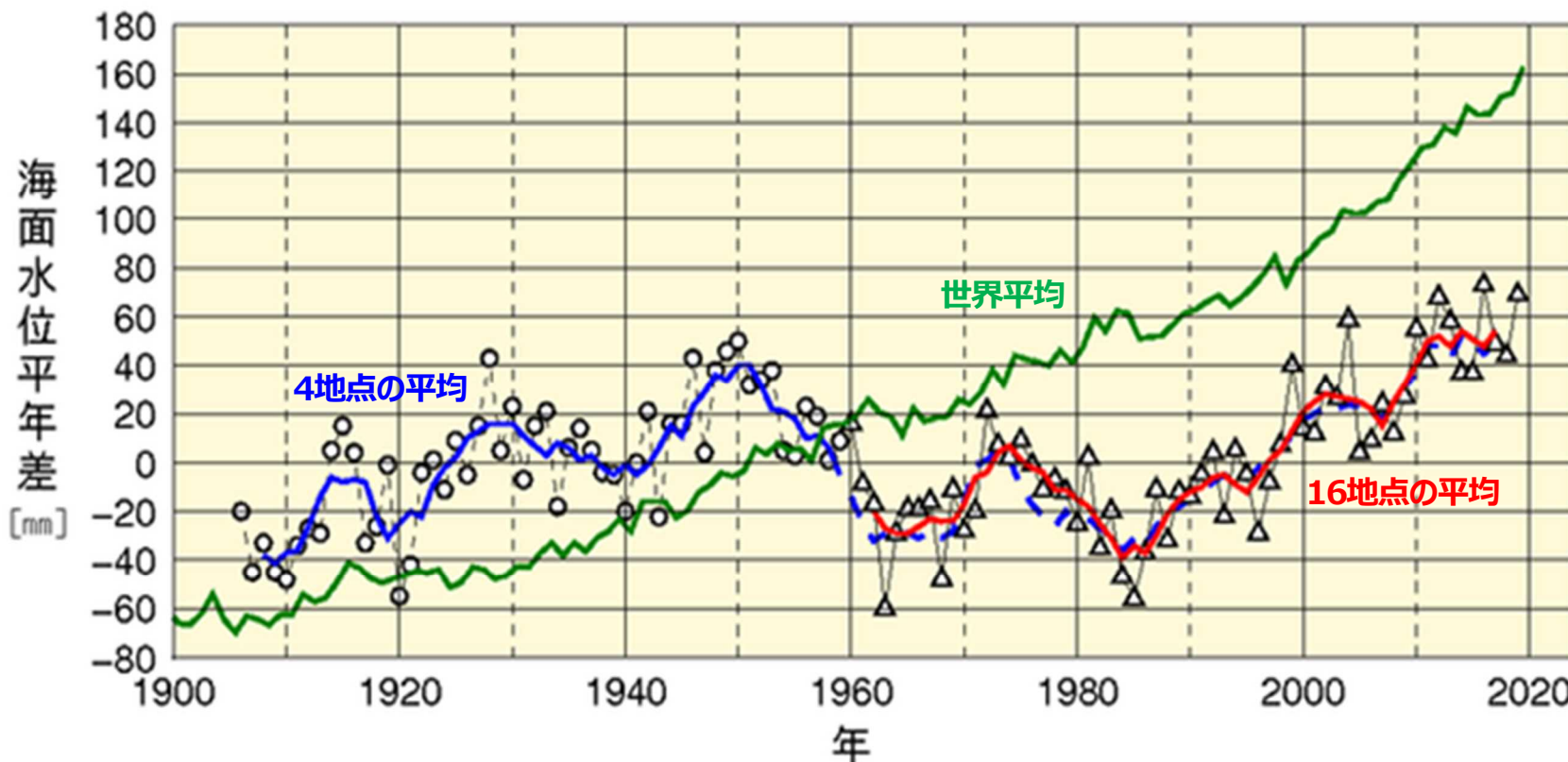
II. 外力の設定

「日本の気候変動2020」での平均海面水位に係る整理

出典：文部科学省及び気象庁「日本の気候変動2020」

観測事実

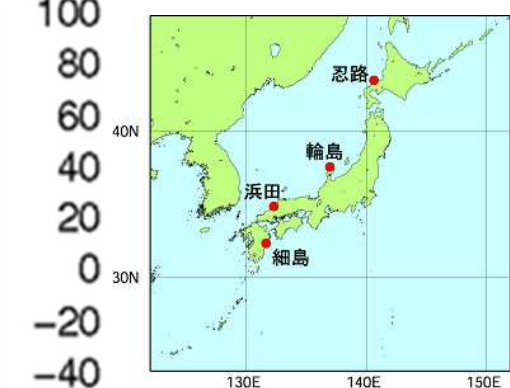
- 日本沿岸の平均海面水位(4地点又は16地点の平均)には、10年から20年の周期を持つ変動と50年を超えるような長周期の変動が卓越しており、世界平均海面水位に見られるような観測期間を通して一貫した上昇傾向は認められない。
- 1980年以降は上昇傾向が明瞭となっており、2006年から2015年の期間では1年当たり4.1mm(0.1~8.2mm)の上昇率となっている。これは、世界平均海面水位の上昇率と同程度である。



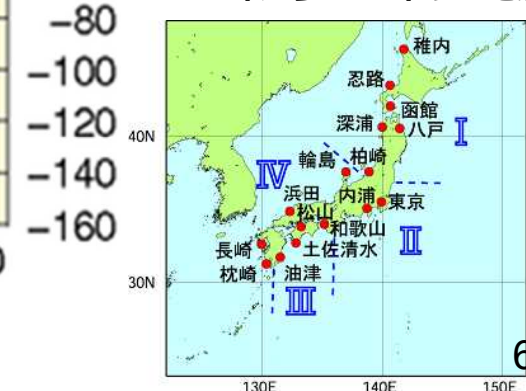
日本沿岸の海面水位変化 (1906~2019年)

(文部科学省及び気象庁「日本の気候変動2020」)に加筆

1906年から1959年の4地点



1960年から2020年の16地点



日本沿岸の平均海面水位の上昇量(将来予測)

『日本の気候変動2020 — 大気と陸・海洋に関する観測・予測評価報告書 —』より

時期	2081~2100年平均(21世紀末)				2100年		
シナリオ	日本沿岸の平均海面水位の上昇量				検潮所 16 地点の 平均値	世界の平均海面 水位の上昇量	世界の平均海面 水位の上昇量 (SROCC※)
	領域 I	領域 II	領域 III	領域 IV			
2°C上昇 シナリオ (RCP2.6)	0.38 m (0.22~0.55 m)	0.38 m (0.21~0.55 m)	0.39 m (0.22~0.56 m)	0.39 m (0.23-0.56m)	0.39 m (0.22~0.55 m)	0.39 m (0.26~0.53 m)	0.43 m (0.29~0.59 m)
4°C上昇 シナリオ (RCP8.5)	0.70 m (0.45~0.95 m)	0.70 m (0.45~0.95 m)	0.74 m (0.47~1.00 m)	0.73 m (0.47~0.98 m)	0.71 m (0.46~0.97 m)	0.71 m (0.51~0.92 m)	0.84 m (0.61~1.10 m)

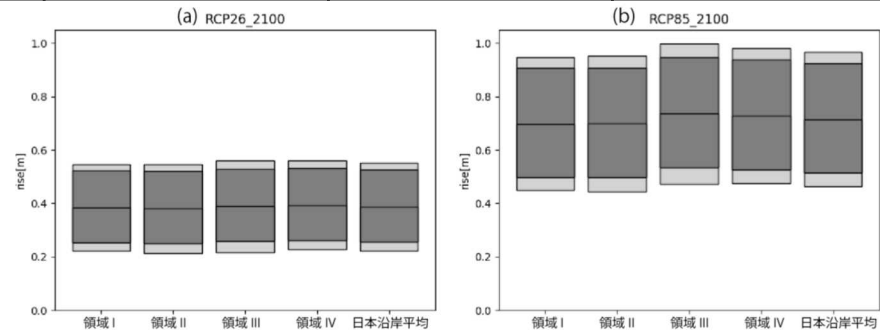
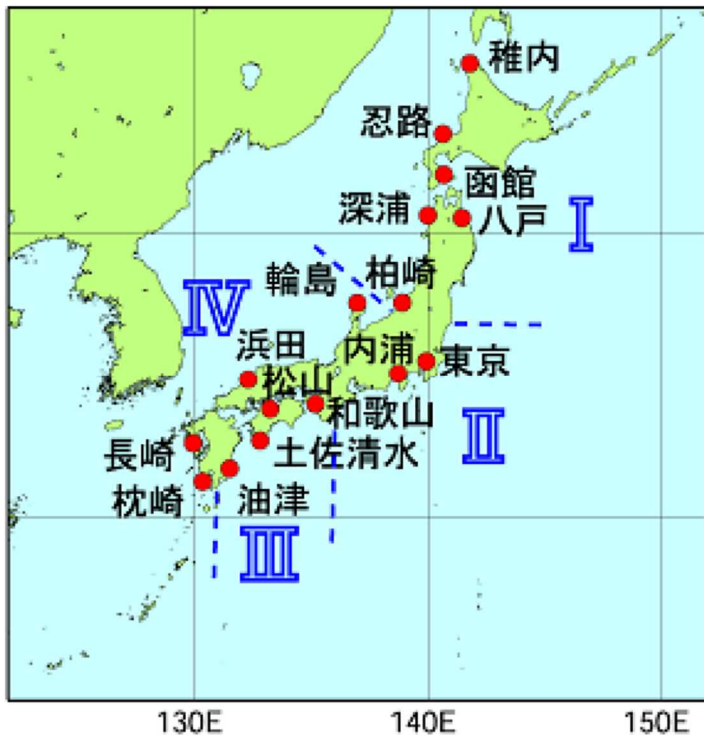


図10.2.4 SI-CAT海洋モデルによる
21世紀末における日本沿岸の領域 I~IV 及び日本沿岸平均の海面水位の 20 世紀末からの上昇幅 (m)

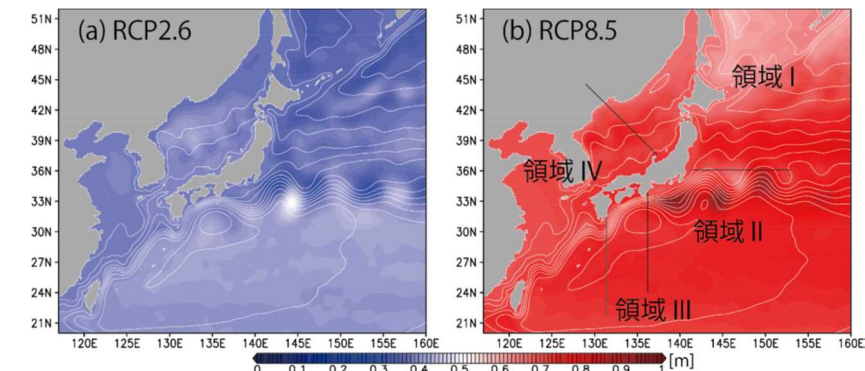
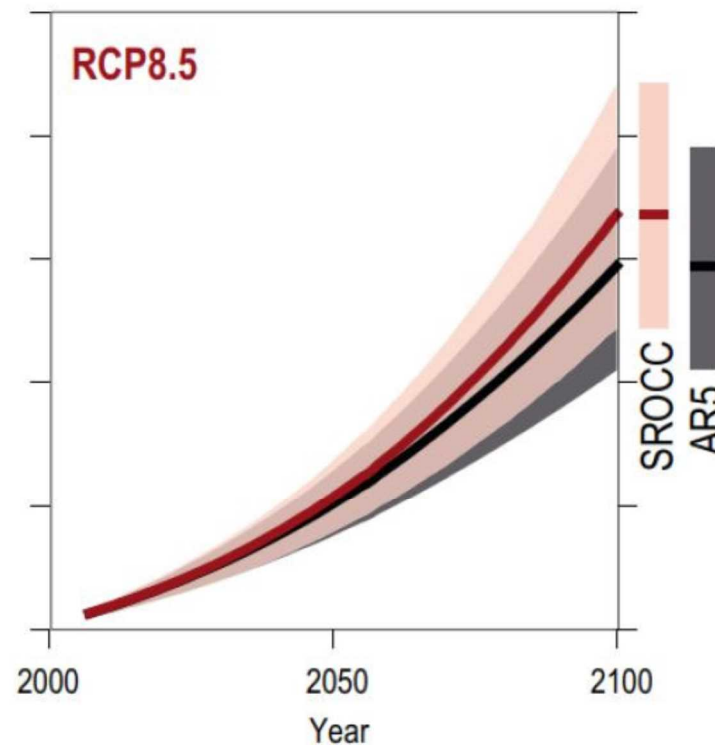
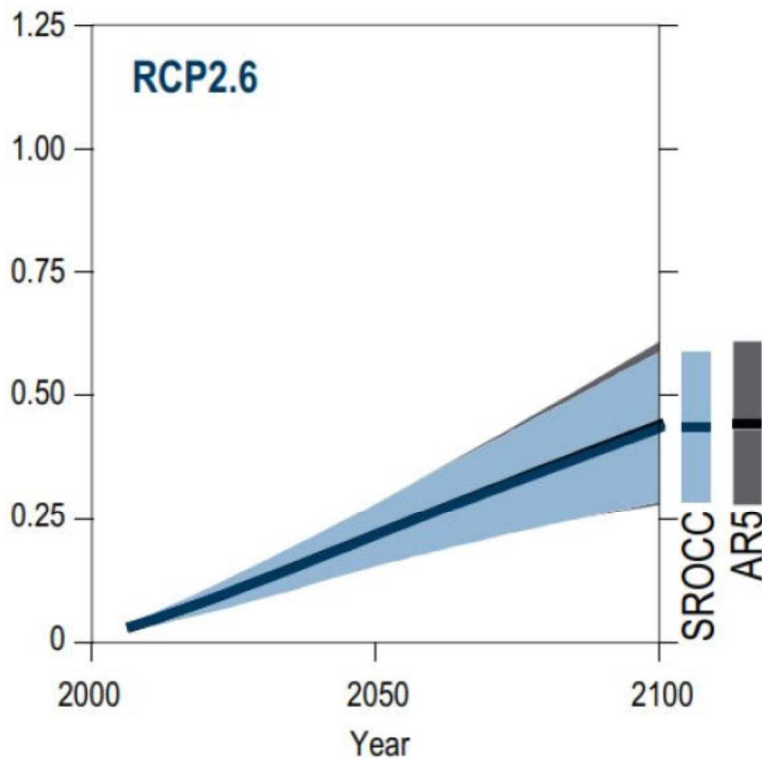


図 10.2.3 SI-CAT海洋モデルによる
21 世紀末における日本近海の海面水位(年平均)の 20 世紀末からの上昇幅(m)

平均海面水位の上昇量の具体的な設定

○将来の平均海面水位の上昇量については予測に幅があることから、具体的な設定方法をあらかじめ定めることが必要。

世界平均海面水位の予測



2°C上昇シナリオ (RCP2.6) は、
 21世紀末※の世界平均気温が、工業化以前と比べて0.9～2.3°C (20世紀末※と比べて0.3～1.7°C) 上昇する可能性の高いシナリオ。
 ➤ **パリ協定の2°C目標が達成された世界であり得る気候の状態に相当。**

4°C上昇シナリオ (RCP8.5) は、
 21世紀末※の世界平均気温が、工業化以前と比べて3.2～5.4°C (20世紀末※と比べて2.6～4.8°C) 上昇する可能性の高いシナリオ。
 ➤ **現時点を超える追加的な緩和策を取らなかった世界であり得る気候の状態に相当。**

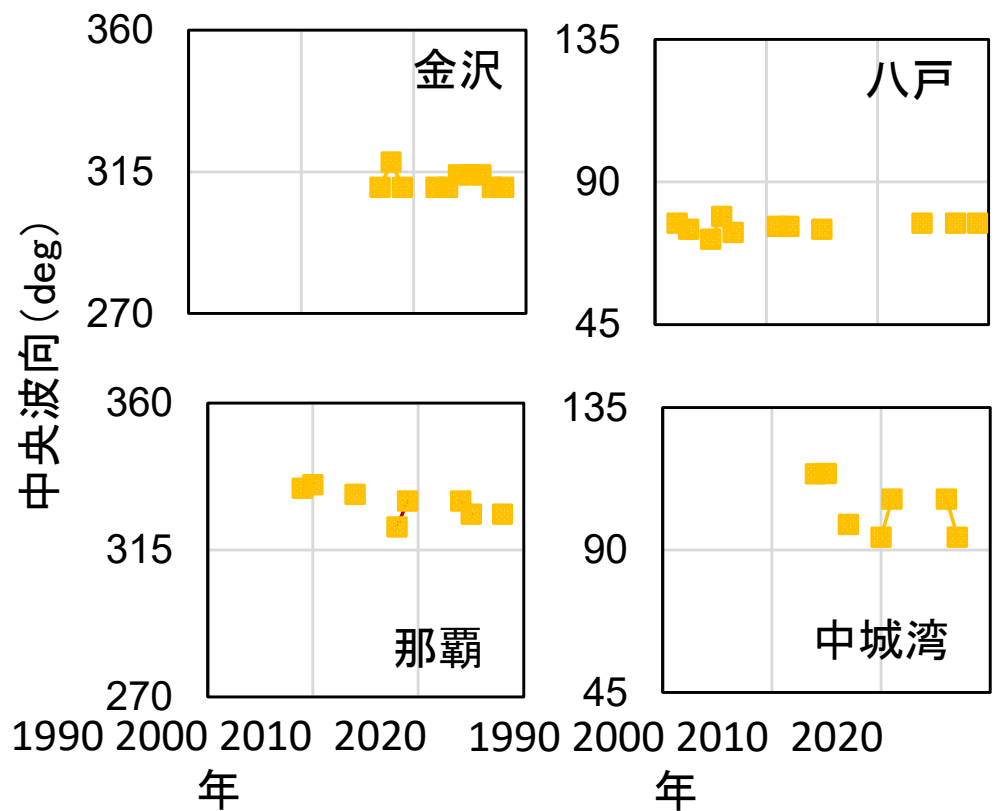
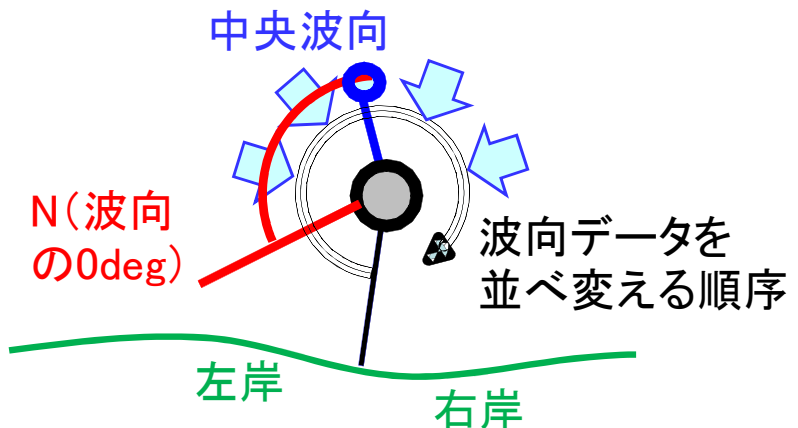
※ 20世紀末: 1986～2005年の平均、21世紀末: 2081～2100年の平均

出典: 日本の気候変動2020

NOWPHAS主要地点における中央波向の経年変化(研究事例)

■中央波向の定義

- ・ NOWPHASでは、20分間の観測データから周波数・波向スペクトルを推定し、そのピークを代表波向としている。
- ・ 1年間に得た代表波向を時計回りに並べ、真ん中の順位に位置する波向を「中央波向」とする。ただし、波エネルギー値の重みをつけて並べる。全ての月である程度の測得率がある年に限る。



■備考

- ・ 波高に比べて波向の観測の歴史は浅い。
- ・ 現地で波高計の向きを精密に維持するのは難しい。
- ・ 推算値で検討した方が良いのではないか。

Kawai, H, Kawaguchi, K and Fujiki, T (2020): Half-century-long Wave Observation in and around Japanese Ports Through NOWPHAS, Proc. Of ISOPE2020 を編集

波浪及び潮位偏差の将来予測

- 波浪や潮位偏差の将来予測にはd4PDFが用いる手法が提案されている。
- d4PDFを用いる場合、ダウンスケーリングやバイアス補正が必要となるが、手法が統一されていない、また、設計波を算出する場合、従前より用いているデータと比較して空間解像度が低いなどの課題がある。

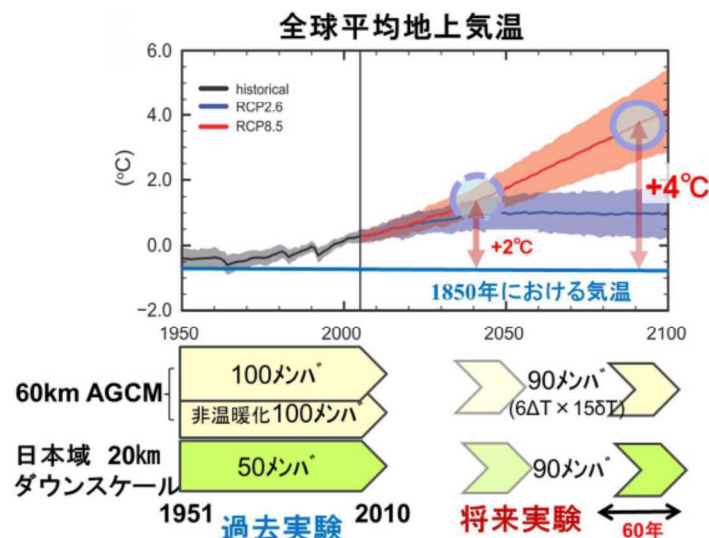
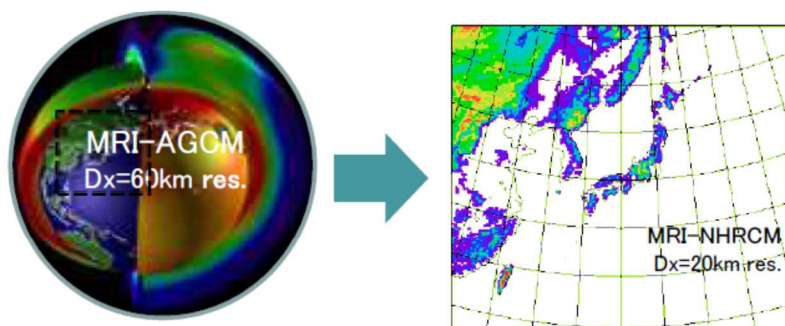
地球温暖化対策に資するアンサンブル気候予測データベース(d4PDF)

- d4PDFとは、分野間で整合した地球温暖化緩和・適応策の検討に利用できるように整備されたアンサンブル気候予測計算結果のデータベース(database for Policy Decision making for Future climate change)
- 高解像度の気候モデルによる多数のアンサンブル計算を行った結果を整理したもので、その活用により、顕著な大気現象について統計的に信頼性の高い将来予測情報が得られることが期待される。

特徴

- 世界に類例の無い大規模アンサンブル・高解像度気候シミュレーションプロダクト。総実験データ量は約2ペタバイト(文科省DIASサーバーで配信)。
- 過去気候変化の再現性が高い。気象庁現業モデルを基にした気候モデル採用。
- 異常高温、集中豪雨、台風等の顕著現象の発現頻度や強度の将来変化を抽出。

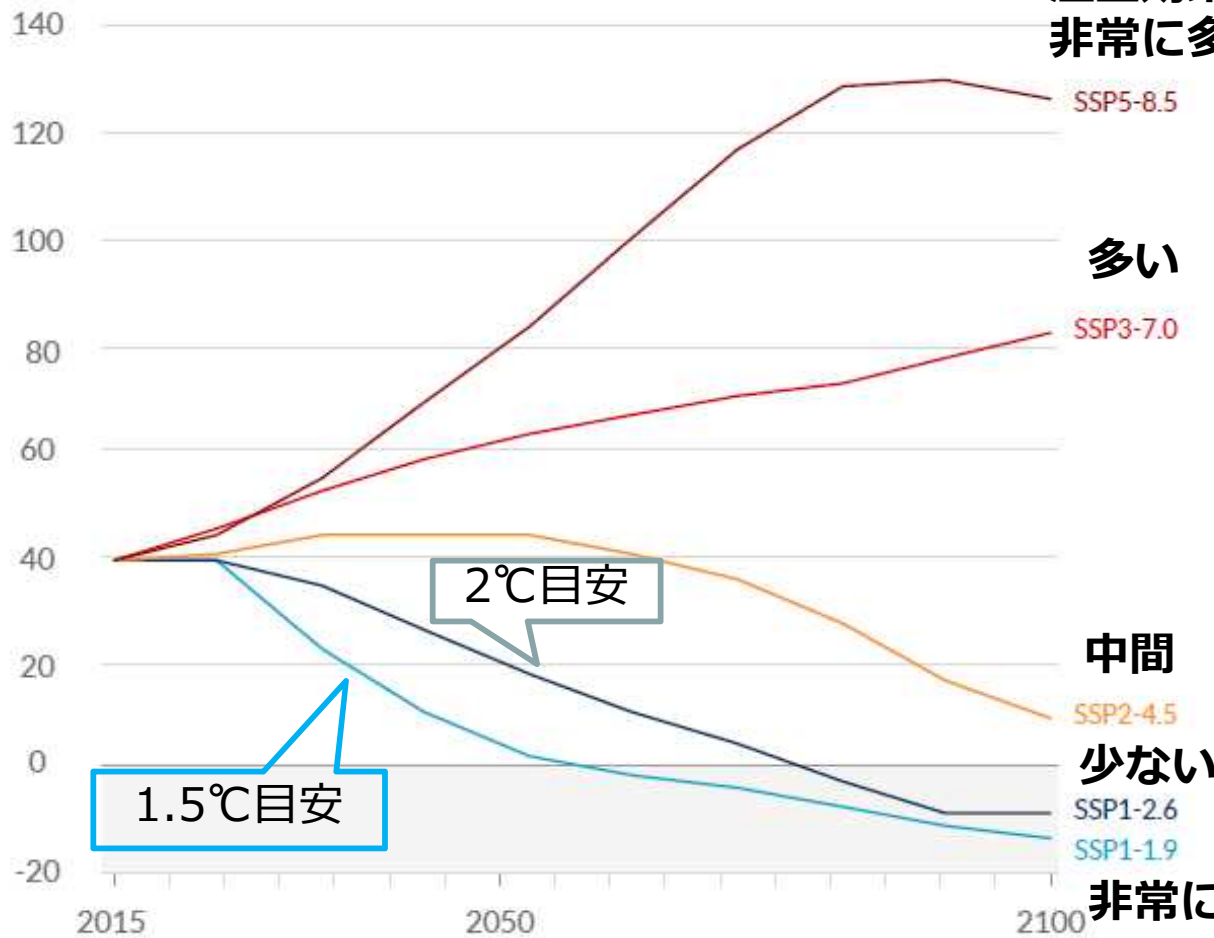
- ・過去実験(6000年) = 温暖化トレンドを入れた過去60年の時間変動 × 観測不確実性を表す100摂動
- ・将来実験(5400年) = 温暖化トレンドを除いた過去60年の時間変動 × 6種のCMIP5温暖化パターン × 観測不確実性を表す15摂動



AR6における温暖化シナリオ

5つの例示的なシナリオにおけるCO₂の将来の年間排出量

二酸化炭素 (GtCO₂/年)



温室効果ガス (GHG) 排出が非常に多い

多い

中間

少ない

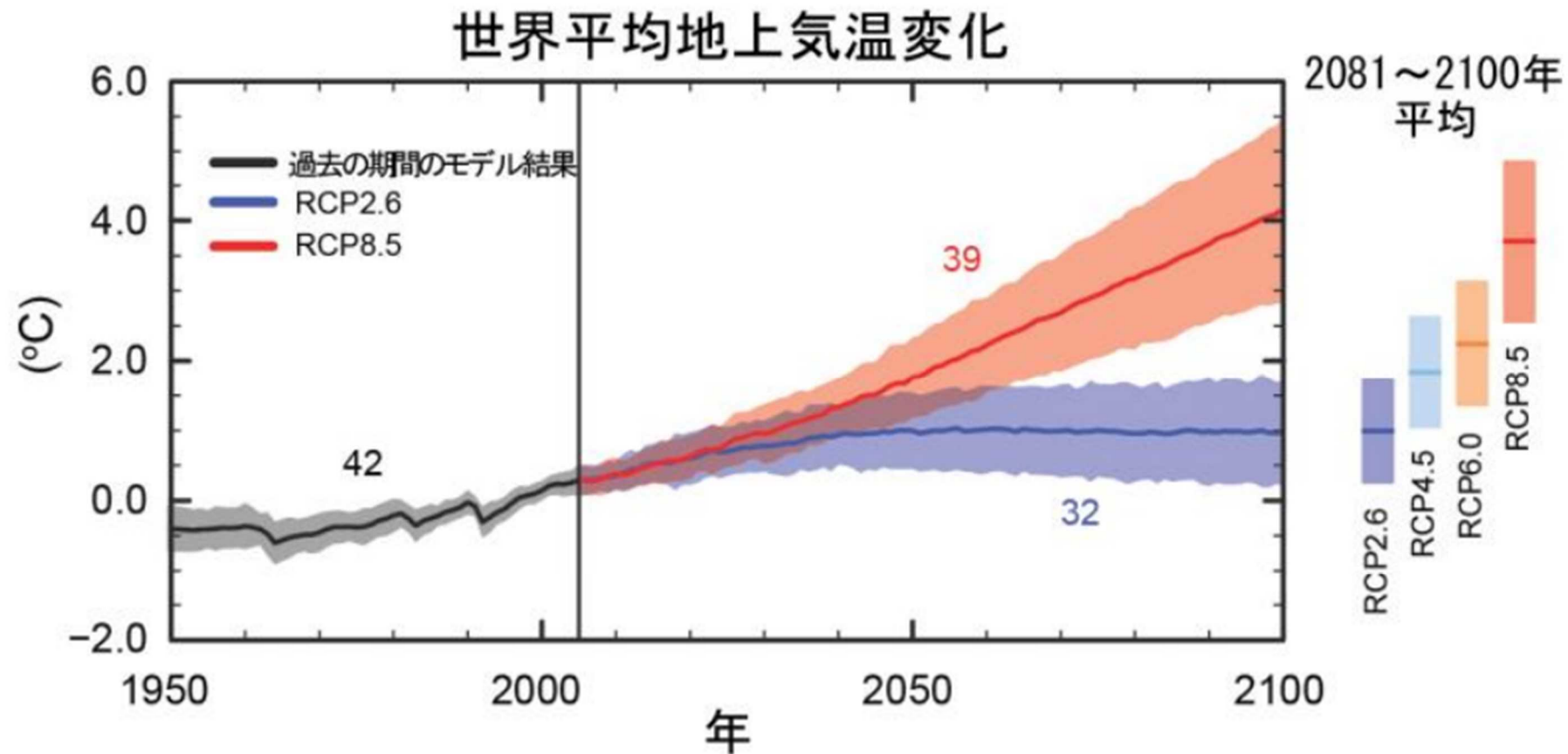
非常に少ない

SSPは**社会経済シナリオ** (Shared Socioeconomic Pathway) の略。

SSPx-yのxはSSPシナリオの番号

- SSP1 : 持続可能
- SSP2 : 中庸
- SSP3 : 地域対立
- SSP4 : 格差
- SSP5 : 化石燃料依存

yはRCPシナリオの数字を示し、21世紀末における大気上端でのおおよその放射強制力 (W/m²) を示す。



CMIP5 の複数のモデルによるシミュレーションによる 1986~2005 年平均に対する世界平均地上気温の変化

出典: IPCC 第5次評価報告書第I作業部会報告書 政策決定者向け要約 気象庁訳(気象庁, 2015)

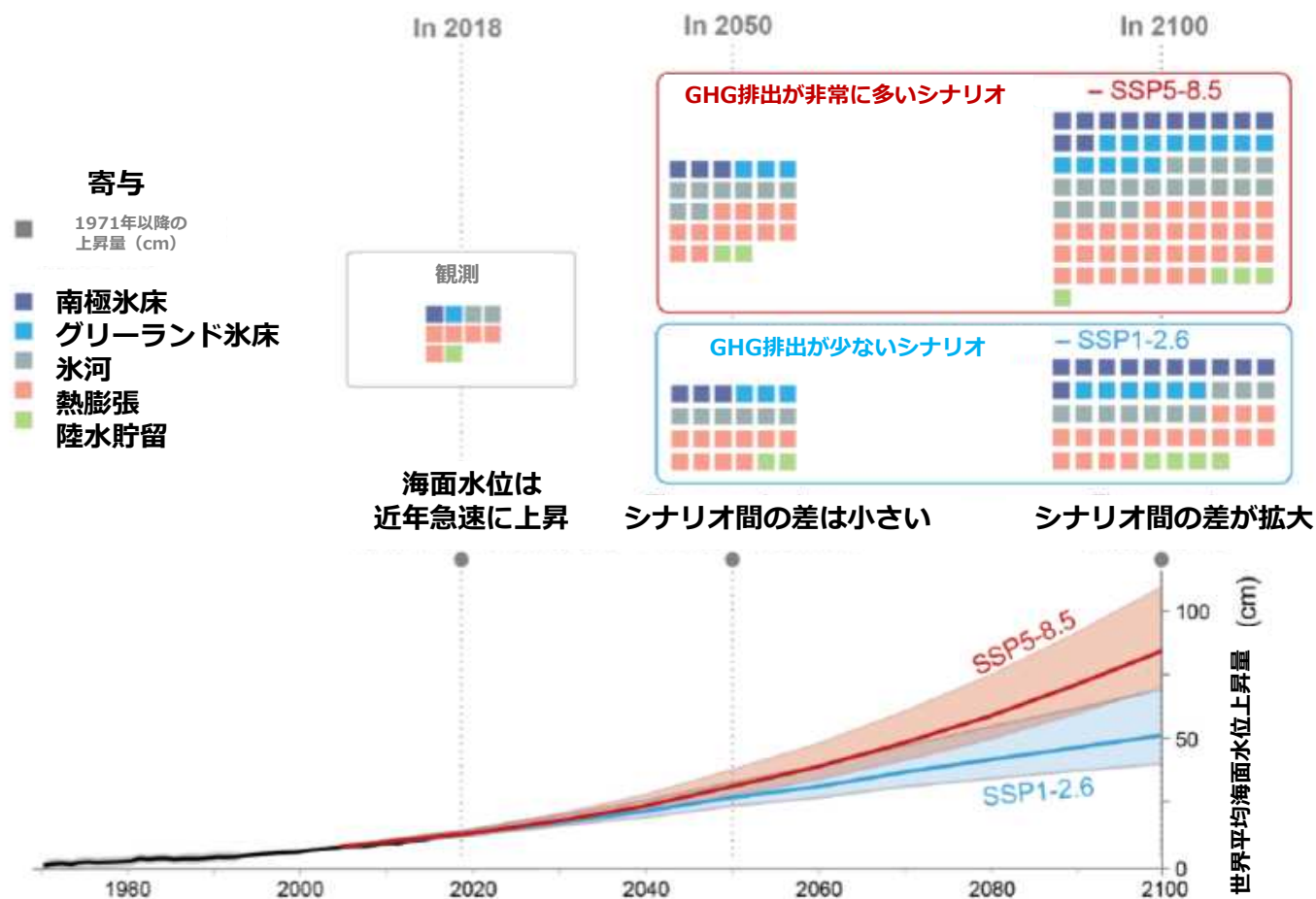
2°C上昇シナリオ(RCP2.6)は青で、4°C上昇シナリオ(RCP8.5)は赤で予測と不確実性の幅(陰影)の時系列を示す。黒線と灰色の陰影は過去の推移。右側の縦帯は、全てのRCPシナリオに対する2081~2100年の平均値と不確実性の幅。数値は、複数モデルの平均を算出するために使用した結合モデル相互比較プロジェクト第5期(CMIP5)のモデルの数。

世界平均海面水位の将来予測

• 2100年の世界平均海面水位の上昇量は、1995～2014年の平均と比べて、GHG排出が少ないシナリオ（SSP1-2.6）では**0.44m (0.33～0.61m)**、非常に多いシナリオ（SSP5-8.5）では**0.77m (0.63～1.02m)**と予測される。

観測および予測された世界平均海面水位上昇と主要な要素からの寄与

() は可能性の高い範囲



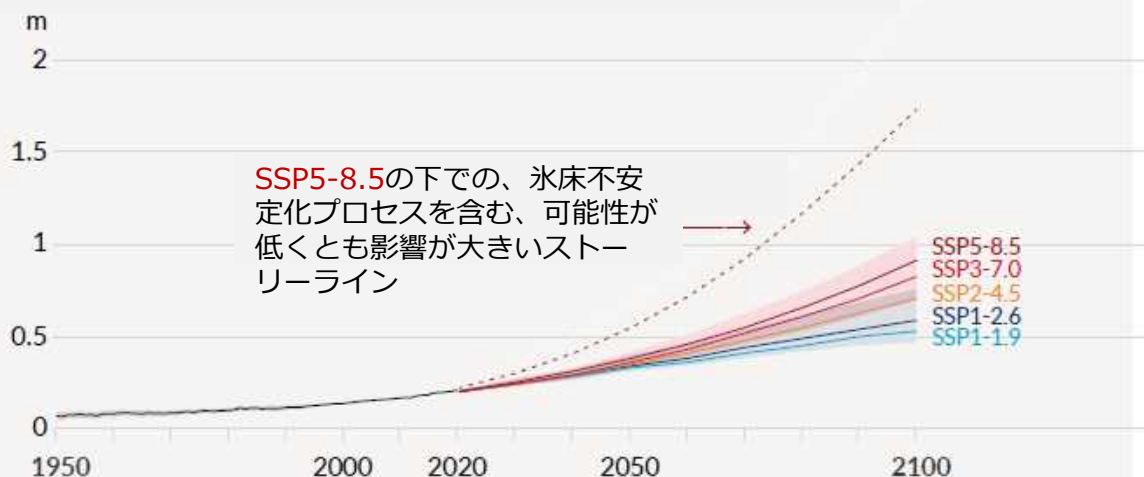
• **AR5**と比較すると、GHG排出が非常に多いシナリオで約**0.1m**上方修正
→**南極氷床の寄与**の増加に起因

世界平均海面水位の今後の変化

- GHG排出が非常に多いシナリオ（**SSP5-8.5**）では、**氷床プロセスの不確実性が大きい**ため、可能性の高い範囲を超えて、**2100年までに2m、2150年までに5m**に迫る可能性も否定できない（確信度低）。
- 過去及び将来の温室効果ガスの排出に起因する多くの変化、特に海洋、氷床及び世界海面水位における変化は、**百年から千年の時間スケールで不可逆的**である。

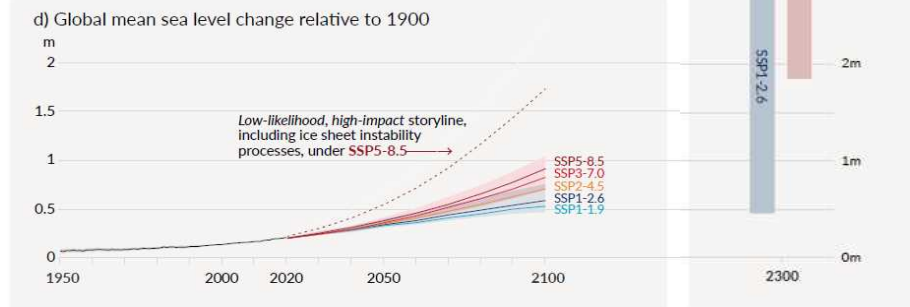
高排出の場合には15mを超える海面水位上昇の可能性も排除できない

1900年を基準とした世界平均海面水位の変化



AR6 SPM Fig. SPM.8

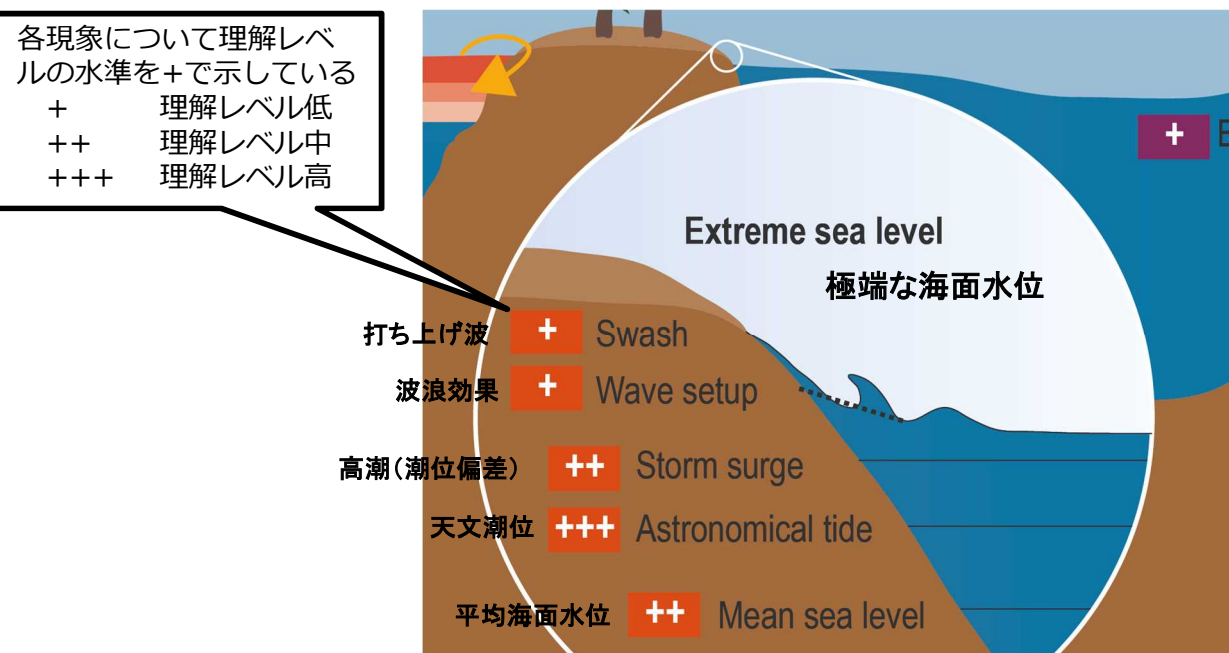
1900年を基準とした
2300年の世界平均
海面水位の変化



極端な海面水位とは

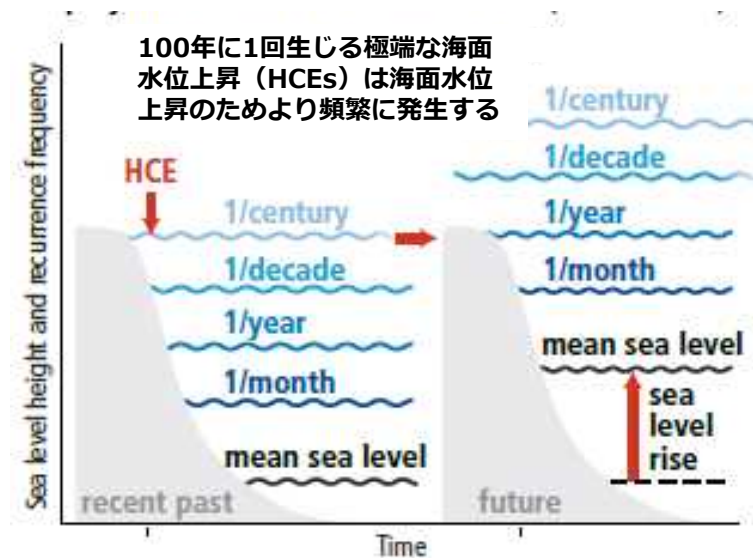
- 極端な海面水位 (**ESL: Extreme Sea Level**) は、短期間の現象 (高潮、潮汐、波浪など) によって生じる局所的な海面水位を指す。
- 地球温暖化に伴う相対的な海面水位の上昇は、平均水位をシフトすることによって直接的に、また潮汐、波浪、高潮の伝搬の深さを変化させることによって間接的に、ESLに影響を与える。

海面水位の変動に関する模式図



SROCC Fig.4.4

地域的な海面水位上昇が予測される極端な海面水位現象に与える影響の模式図 (原寸に比例しない)



SROCC Fig.SPM.4

AR5と比較した世界平均海面水位上昇量

1995-2014年を基準とした2100年の世界平均海面水位上昇量 (m)

AR5

	RCP2.6	RCP8.5
熱膨張	0.14 [0.10~0.19]	0.31 [0.24~0.38]
氷河	0.10 [0.04~0.16]	0.17 [0.09~0.25]
グリーンランド氷床	0.07 [0.03~0.11]	0.14 [0.08~0.27]
南極氷床	0.06 [-0.04~0.16]	0.04 [-0.08~0.14]
陸水貯留	0.05 [-0.01~0.11]	0.05 [-0.01~0.11]
合計	0.41 [0.25~0.58]	0.71 [0.49~0.95]

AR6

	SSP1-2.6	SSP5-8.5
熱膨張	0.14 [0.11~0.18]	0.30 [0.24~0.36]
氷河	0.09 [0.07~0.11]	0.18 [0.15~0.21]
グリーンランド氷床	0.06 [0.01~0.10]	0.13 [0.09~0.18]
南極氷床	0.11 [0.03~0.27]	0.12 [0.03~0.34]
陸水貯留	0.03 [0.02~0.04]	0.03 [0.02~0.04]
合計	0.44 [0.33~0.61]	0.77 [0.63~1.02]

[]は可能性の高い範囲

南極氷床の寄与が増加

AR6 Table.9.8

「日本の気候変動2020」での平均海面水位に係る整理

出典：文部科学省及び気象庁「日本の気候変動2020」

将来予測

- 21世紀末の日本沿岸の平均海面水位は上昇する(確信度が高い)。この海面水位上昇量は、世界平均と同程度である。
- 日本沿岸の平均海面水位は、21世紀末(2081～2100年平均)には、20世紀末(1986～2005年平均)と比べて、4°C上昇シナリオ(RCP8.5)では0.71 m(0.46～0.97m)、2°C上昇シナリオ(RCP2.6)では0.39 m(0.22～0.55 m)と予測される。
- モデルの不確実性の大きさを考慮すれば、平均日本沿岸の海面水位の予測される上昇量に顕著な地域差は確認できない。

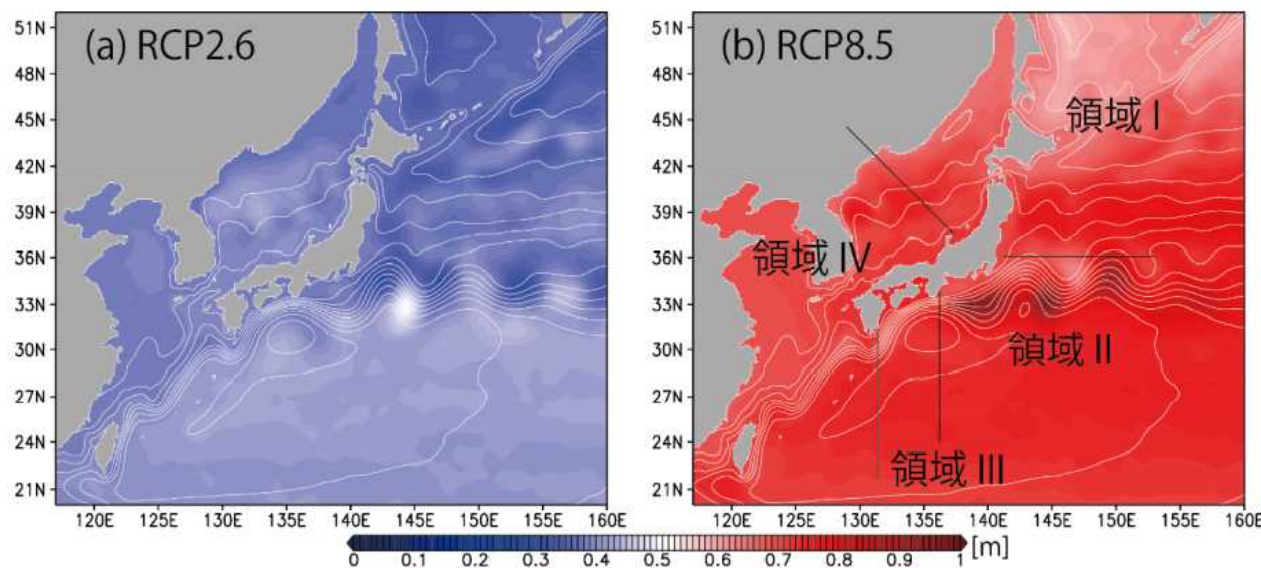


図 10.2.3 SI-CAT 海洋モデルによる

21世紀末における日本近海の海面水位(年平均)の20世紀末からの上昇幅(m)

(a) は2°C上昇シナリオ(RCP2.6)、(b) は4°C上昇シナリオ(RCP8.5)による見積り。等値線はそれぞれの将来気候における海面水位分布を示す。

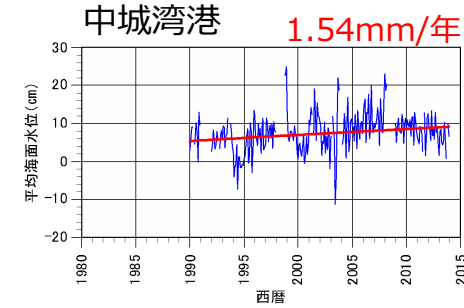
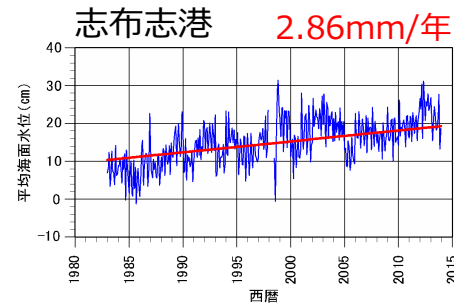
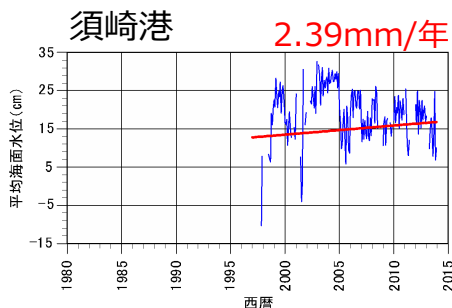
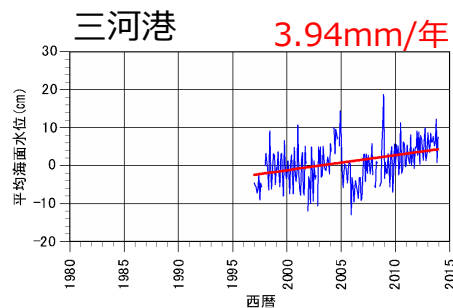
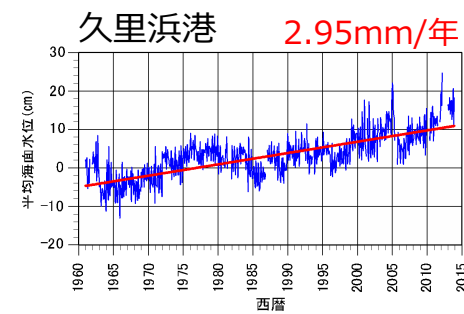
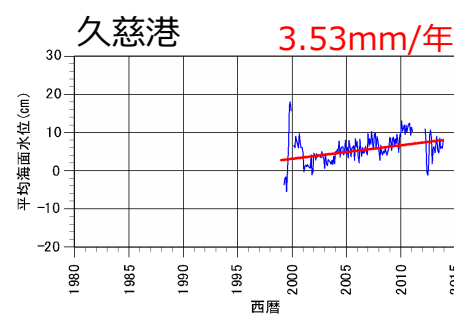
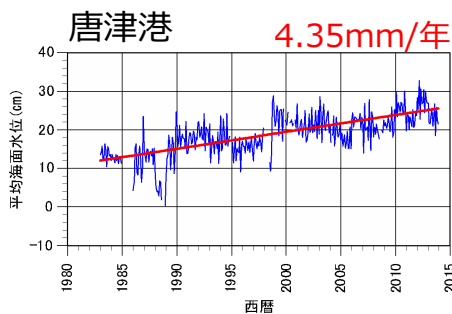
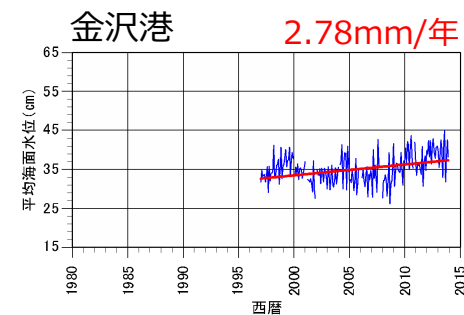
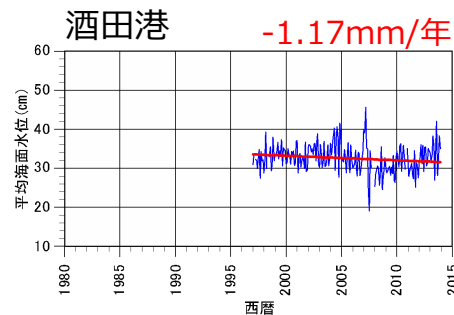
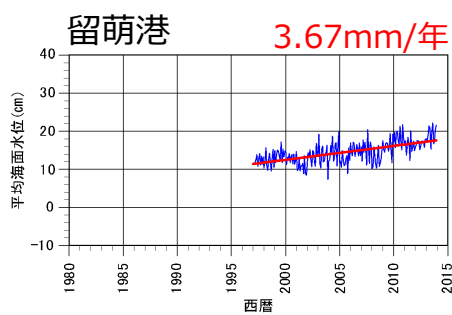
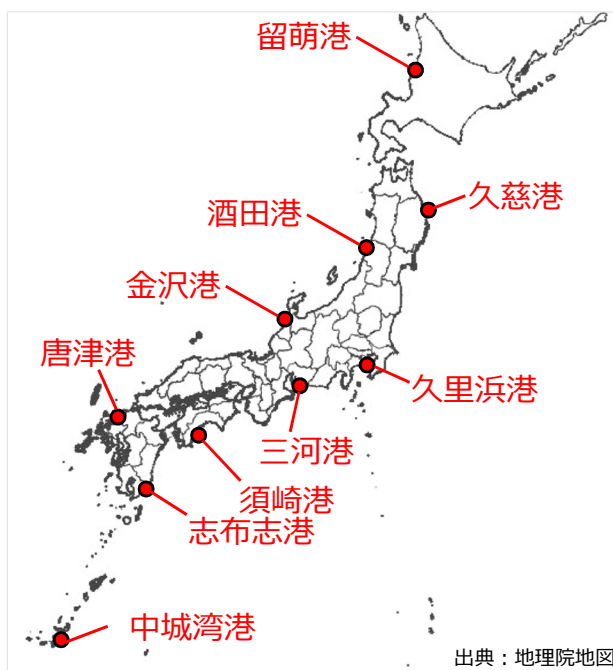
日本沿岸の平均海面水位の上昇量は、2°C上昇シナリオ(RCP2.6)では、領域 I で 0.38 m(0.22～0.55 m)、領域 II で 0.38 m(0.21～0.55 m)、領域 III で 0.39 m(0.22～0.56 m)、領域 IV で 0.39 m(0.23～0.56 m)と予測される。

4°C上昇シナリオ(RCP8.5)では、領域 I で 0.70 m(0.45～0.95 m)、領域 II で 0.70 m(0.45～0.95 m)、領域 III で 0.74 m(0.47～1.00 m)、領域 IV で 0.73 m(0.47～0.98 m)と予測される。

既往研究レビュー①【平均海面水位に係る過去トレンド分析】

出典：港湾の長期検潮記録から地盤変動を除去した平均海面水位の推定とその変動特性(内藤※ら,2015)(国土技術政策総合研究所資料)

- 長期検潮記録から、長期的な海面変動に影響を及ぼすさまざまな要因(ノイズ成分(気圧、潮汐、地盤変動))の影響を除去し、平均海面水位を推定する手法の考え方と手順を示した。
- 対象とした10港湾のうち、酒田港、須崎港及び中城湾港以外においては、海水水位が明瞭な上昇傾向を示すことを確認した。



既往研究レビュー②【平均海面水位に係る過去トレンド分析】

出典：地盤変動を考慮した沿岸域の海面水位上昇量の分析方法(野村※ら,2022)(土木学会論文集B3(海洋開発))

- 北海道沿岸を対象に電子基準点データ(国土地理院)による地盤変動の補正方法を整理し、2004～2019年15年間の観測データにより、水位上昇率と比較して地盤変動率は地域的な変化が大きいことを示した。
- p値が0.05を下回った北海道沿岸14地点の海面水位の上昇率は4.7mm/yearと推定され、海域別では太平洋側が5.3mm/yearと比較的高い。
- 2000年～2100年について、観測データによる海面水位の上昇率に基づく海面水位の経年変化と、FORPとSROCCによる将来2℃上昇気候モデルによる経年変化と概ね一致していることを確認した。

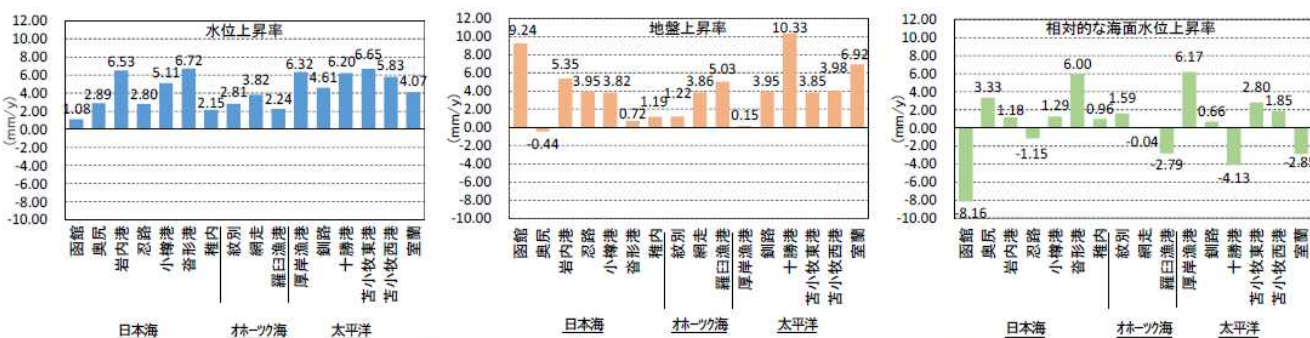


図-7 海面水位上昇率(左)、地盤上昇率(中)、相対的な海面水位上昇率(右)

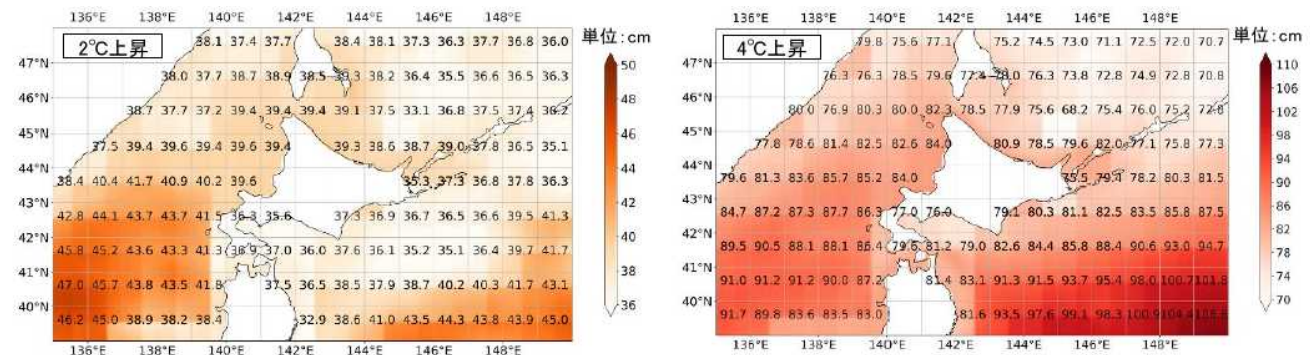


図-8 FORPとSROCCによる2100年における2000年からの海面水位変化量の分布, 将来2℃上昇(左), 将来4℃上昇(右)

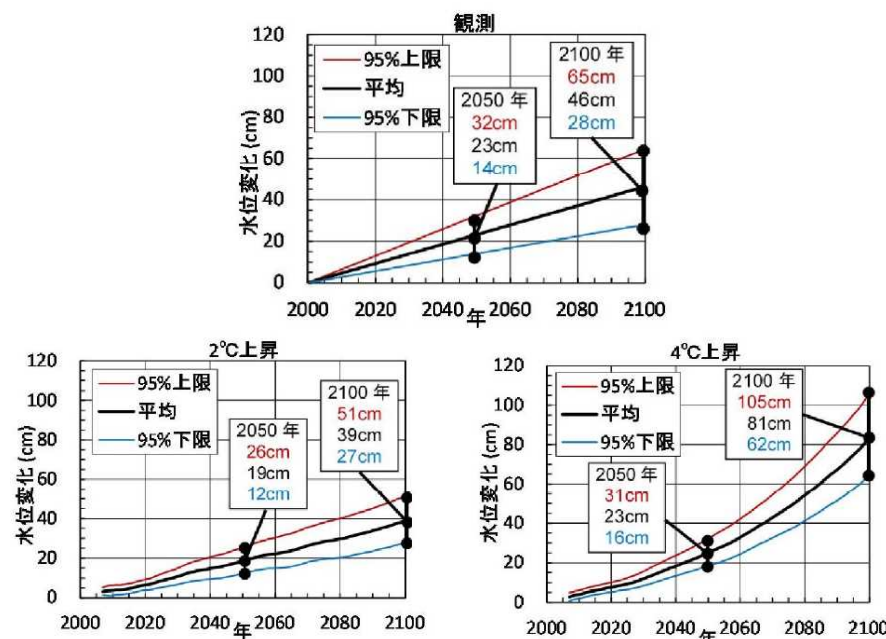


図-9 観測データと気候モデルによる北海道沿岸域の平均海面水位の経年変化, 観測(左), 将来2℃上昇(中), 将来4℃上昇(右)

既往研究レビュー③【平均海面水位に係る過去トレンド分析】

出典：近隣検潮所間における平均海面水位のトレンド比較と変動特性(内藤※ら,2018)(土木学会論文集B2(海岸工学))

- 気圧、潮汐、地盤変動による補正を行った平均海面水位トレンドの推定により、平均海面水位のトレンドは、統計的に有意であると判定された地点においてはいずれも上昇傾向であった。また、近隣検潮所間でも平均海面水位のトレンドの傾向が異なる場合があることを示した。
- 平均海面水位のトレンドと水温上昇トレンドの比較により、水温上昇に対する水位上昇率に地域差があることを示し、近隣検潮所間でも平均海面水位のトレンドの傾向が異なる要因の一つと指摘した。

表-1 港湾域と近隣検潮所の平均海面水位トレンド推定結果

海域	対象港湾	地点	データ期間	データ数	トレンド	標準誤差 mm/年	95%下限	95%上限	p値	有効自由度法による判定
日本海・瀬戸内海	留萌	留萌港	1997-2016	20	3.36	0.59	2.13	4.59	<0.001	○
		稚内	1997-2016	20	-2.93	1.05	-5.12	-0.73	0.012	×
		忍路	1997-2016	20	1.47	0.85	-0.32	3.25	0.101	×
	酒田	酒田港	1997-2016	20	-0.88	0.76	-2.48	0.72	0.263	×
		男鹿	1997-2016	20	7.22	0.78	5.57	8.87	<0.001	○
		鼠ヶ関	1997-2016	19	-0.58	0.73	-2.13	0.96	0.436	×
		金沢	1997-2016	20	2.59	0.90	0.69	4.48	0.010	○
	金沢	輪島	1997-2016	20	-1.33	0.87	-3.15	0.50	0.143	×
		三国	1997-2016	20	1.81	1.12	-0.53	4.15	0.121	×
		宇部	2005-2016	12	5.89	2.94	-0.65	12.43	0.073	×
宇部	広島	2005-2016	12	8.02	1.98	3.61	12.42	0.002	○	
	徳山	2005-2016	12	9.83	1.72	5.99	13.66	<0.001	○	
	唐津	1983-2016	32	4.11	0.52	3.06	5.16	<0.001	○	
	須佐	1983-2016	34	6.43	0.36	5.70	7.16	<0.001	○	
唐津	博多	1983-2016	34	7.87	0.46	6.94	8.79	<0.001	○	
	飯屋	1983-2016	34	9.06	0.59	7.87	10.26	<0.001	○	
	太平洋	久慈	1999-2016	17	2.06	1.00	-0.06	4.19	0.057	×
		宮古	1999-2016	14	-1.44	1.30	-4.27	1.39	0.290	×
釜石		1999-2016	18	-5.89	1.81	-9.77	-2.01	0.006	×	
久里浜	久里浜湾	1961-2016	54	3.04	0.25	2.54	3.54	<0.001	○	
	横須賀	1961-2016	56	2.76	0.24	2.27	3.24	<0.001	○	
	油壺	1961-2016	56	2.33	0.19	1.95	2.71	<0.001	○	
三河	三河港	1997-2016	20	4.59	1.19	2.09	7.09	<0.001	○	
	名古屋	1997-2016	20	4.31	1.31	1.56	7.06	0.004	○	
	鬼崎	1997-2016	20	5.96	1.33	3.17	8.75	<0.001	○	
	鳥羽	1997-2016	20	5.06	1.33	2.26	7.85	0.001	○	
志布志	志布志港	1983-2016	33	4.29	0.50	3.28	5.31	<0.001	○	
	細島	1983-2016	34	11.43	0.83	9.74	13.12	<0.001	○	
	油津	1983-2016	34	7.72	0.49	6.72	8.72	<0.001	○	
中城湾	中城湾港	1990-2016	24	2.59	0.76	1.01	4.16	0.003	○	
	沖縄	1990-2016	27	1.91	0.59	0.70	3.12	0.003	○	
	那覇	1990-2016	27	1.70	0.62	0.44	2.97	0.011	○	

表-2 水温のトレンドと水温による水位上昇トレンドの推定結果

海域	対象港湾	水温のトレンド (°C/100年)			1°Cあたりの水位上昇量 (mm/°C)			水温による水位上昇 トレンド(mm/年)
		トレンド	標準誤差	判定	係数	標準誤差	判定	
日本海・瀬戸内海	留萌港	1.35	1.04	×	10.22	10.64	×	0.14
	酒田港	2.95	0.84	○	32.07	9.11	○	0.95
	金沢港	3.35	0.87	○	17.87	12.14	×	0.60
	宇部港	3.00	1.20	○	-11.01	20.40	×	-0.33
	唐津港	1.86	0.66	○	58.01	18.85	○	1.08
太平洋	久慈港	2.10	1.08	×	23.44	10.86	○	0.49
	久里浜湾	2.53	0.65	○	55.23	16.32	○	1.40
	三河港	1.00	0.84	×	45.31	19.31	○	0.45
	志布志港	3.03	0.78	○	74.90	11.12	○	2.27
	中城湾港	2.01	0.68	○	68.69	13.21	○	1.38

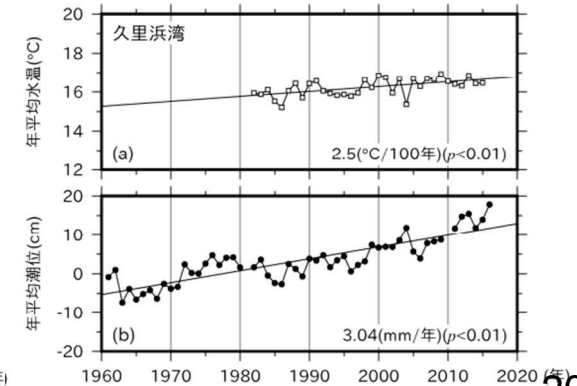
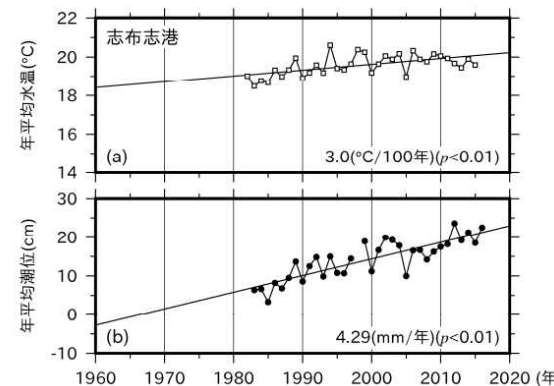


図-8 志布志港での年平均の潮位と海水温のトレンド 図-7 久里浜湾での年平均の潮位と海水温のトレンド
※内藤 了二(国土技術政策総合研究所 沿岸海洋・防災研究部)

既往研究レビュー④【平均海面水位に係る過去トレンド分析】

出典：験潮所のGPS連続観測点を用いた潮位データ解析手法の検討(三浦※ら,2013)(国土地理院時報)

- GPS-P点(験潮所に取り付けられたGPS連続観測点)を用いた験潮所の地盤変動の除去及び気圧・潮汐補正を行った潮位データを用いた日本の海面変動トレンドは、全験潮所平均で1.1mm/yearであった。
- 各験潮所の海面変動トレンドには地域分布が見られ、日本海側及び北太平洋側では海面上昇の傾向が見られるが、静岡県西部から四国にかけての太平洋側は海面下降の傾向が見られ、これらの海面変動トレンドの地域分布には黒潮の影響が大きい。

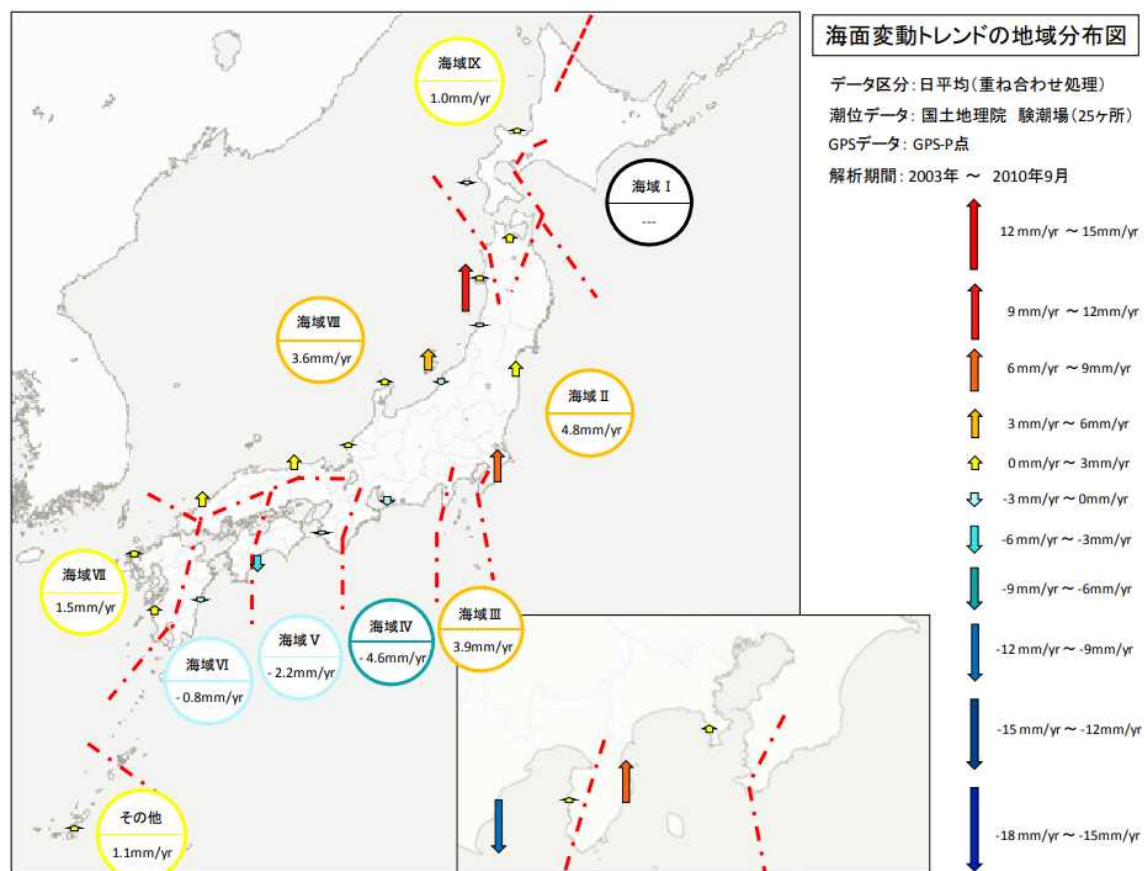


図-10 各海域での海面変動トレンド (GPS-P点を使用)
※ 矢印は、各験潮場での海面変動トレンドを示している。

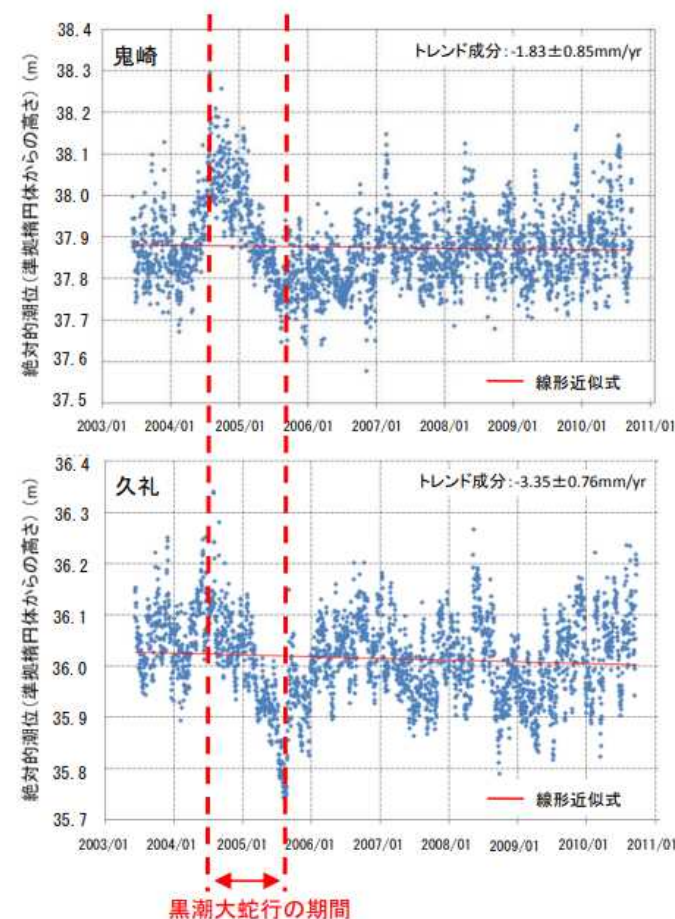


図-12 黒潮大蛇行時の絶対的潮位変化 (鬼崎, 久礼)
※三浦 優司(国土地理院 測地観測センター)

既往研究レビュー⑤【波浪に係る過去トレンド分析】

出典：日本沿岸における最大有義波高の経年変化と設計沖波への影響に関する考察(加藤^{※1}ら,2019)(土木学会論文集B2(海岸工学))

- 日本沿岸における波浪観測データの分析^{※2}により、年最大有義波高は全国的に上昇傾向で、特に日本海側に比べ、太平洋側で年あたりの上昇量が大きい。
- 長期的な全観測期間における年最大有義波高の上昇量よりも、近年10年間の短期的な年最大有義波高の上昇量の方が大きい地点が多い。

※2 抽出された最大有義波高のデータはナウファスの機器や位置の変化や欠測などの影響については考慮していない。

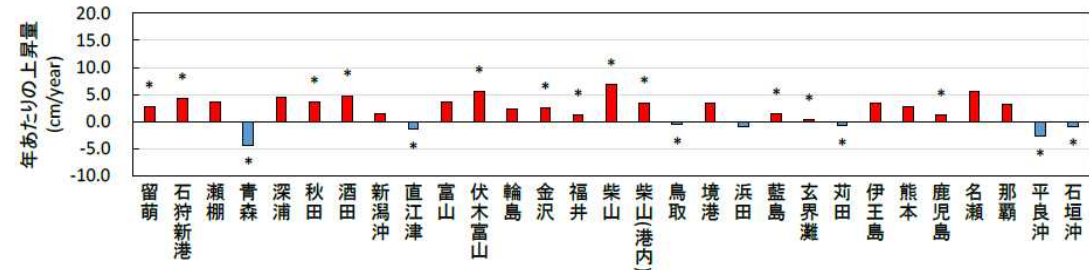
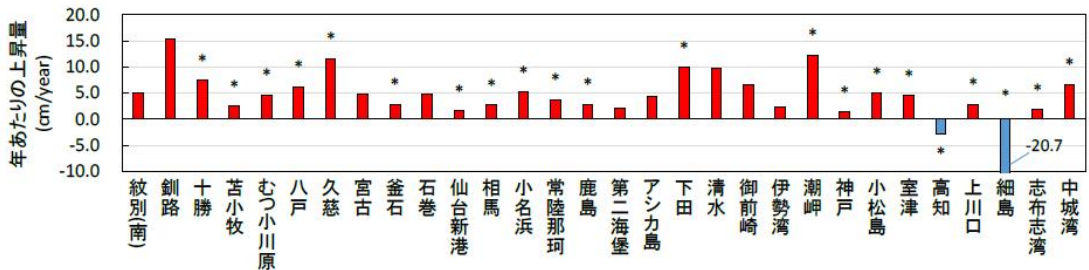


図-2 年最大有義波高の変化傾向 (*印: p<0.05)

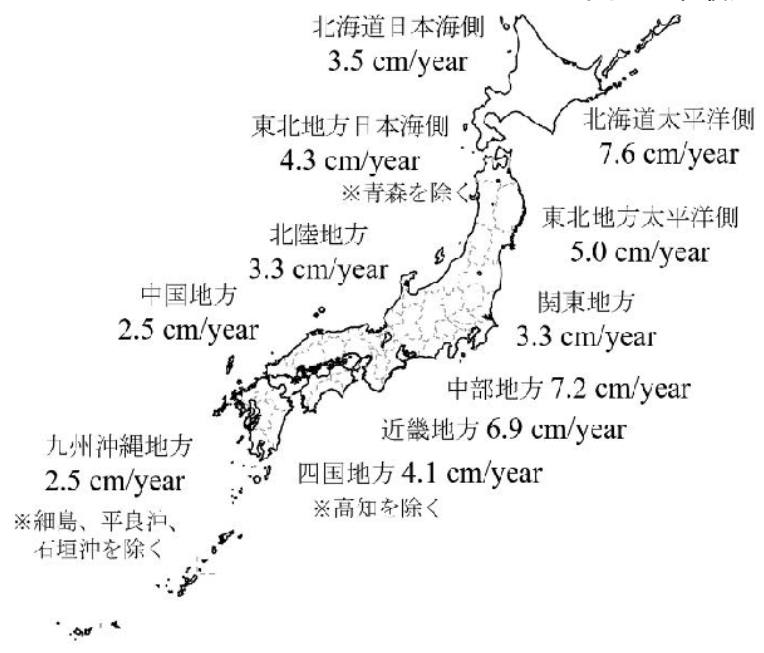


図-3 年最大有義波高の変化傾向 (地域別)

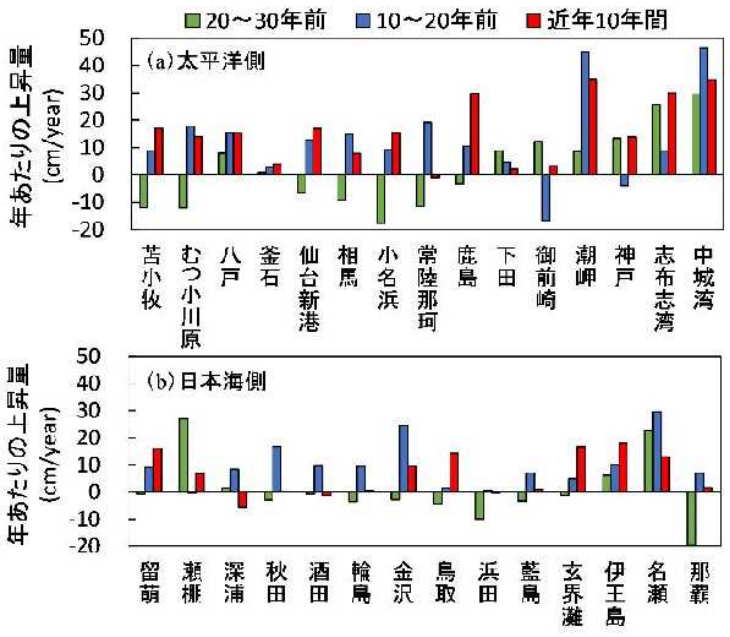


図-4 年最大有義波高の10年ごとの変化傾向
 ※1 加藤 広之((一財)漁港漁場漁村総合研究所)

既往研究レビュー⑥【波浪に係る過去トレンド分析】

出典：東北地方を事例とした波浪推算による確率沖波算定手法の高度化および高波浪の経年変化の検討(田中※ら,2021)(土木学会論文集B3(海洋開発))

- 高波浪の経年的変化傾向を検討するため、極値統計解析期間を20年間として、その期間を10年毎にずらした確率沖波の経年変化を算出し、**東北地方での50年確率波高が増大傾向にあることを示した。**
- 船川港における統計期間の異なる50年確率波の算定により、**最近30年間(1990～2019年)と68年間(1952～2019年)の波高は、主要波向で1.5m程度の差が生じることが確認され、確率沖波算定の際にはトレンドおよび統計期間に対する検討が必要であることを示した。**

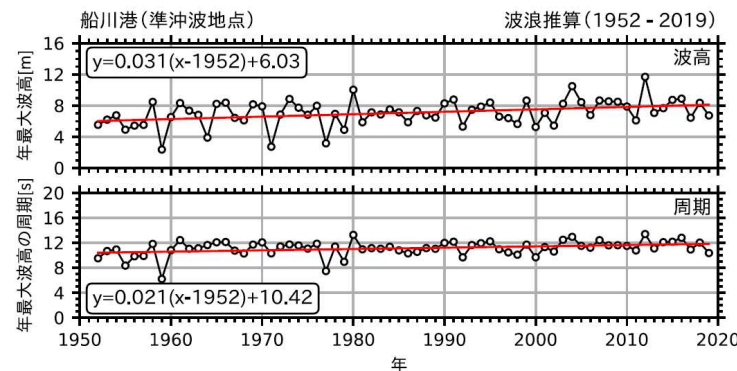
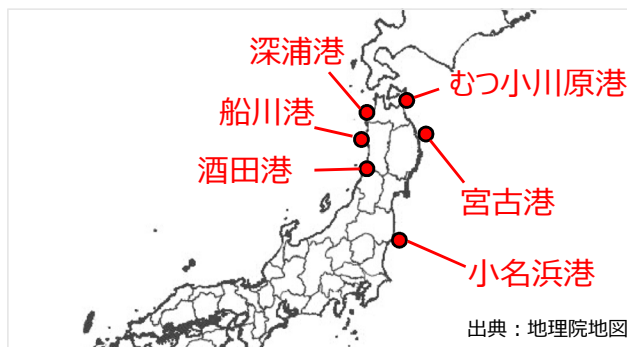


図-6 船川港の年最大波高(推算値)の経年変化

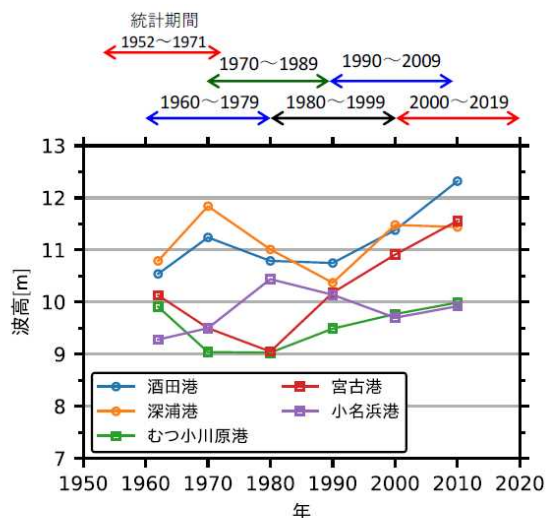


図-7 50年確率沖波の経年変化(各統計期間(20年間)は図上に示す)

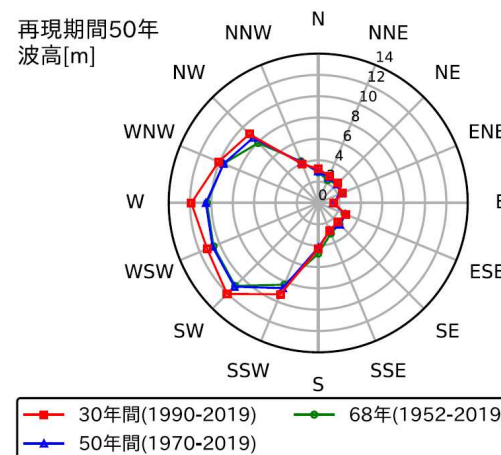


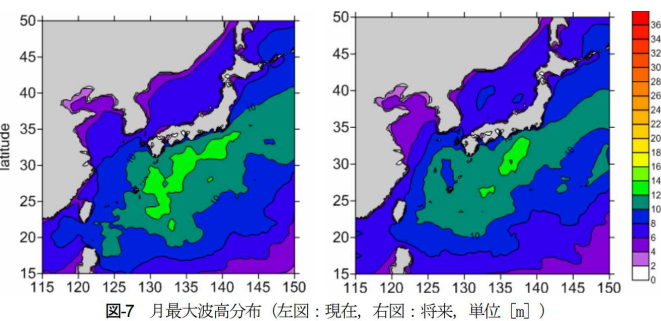
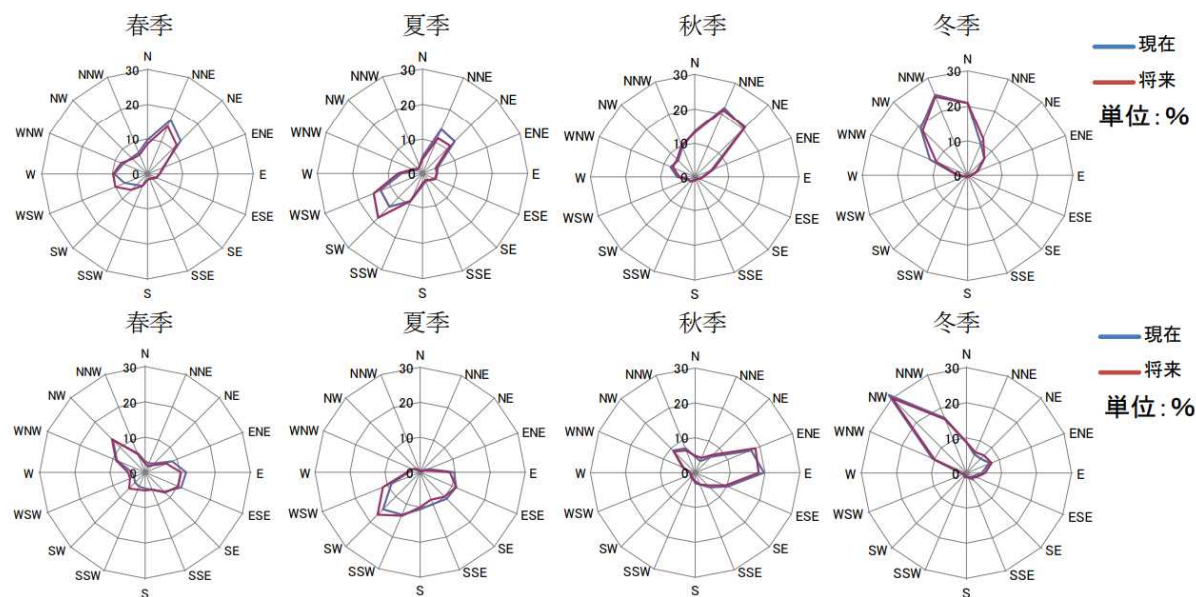
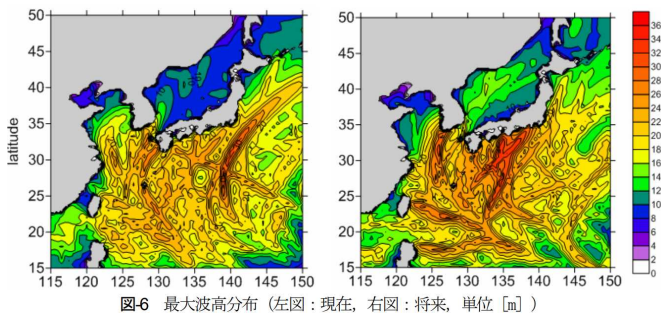
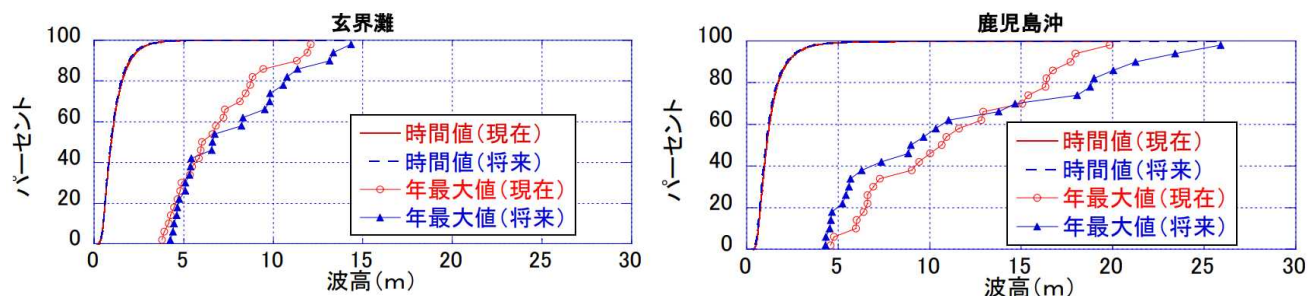
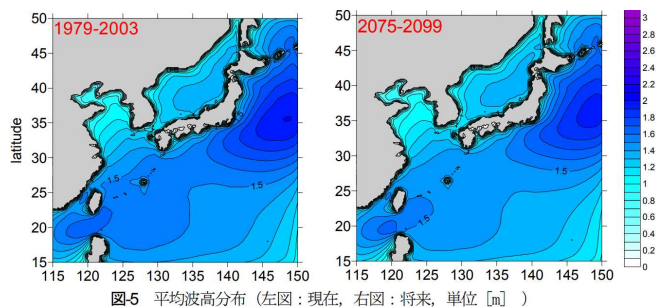
図-8 統計期間の違いによる50年確率波高の変化(船川港)

※田中 陽二((株)エコー)

既往研究レビュー⑦【波浪に係る将来予測】

出典：気候変動予測値に基づく九州沿岸における災害外力の変動特性に関する検討(横田※ら,2012)(土木学会論文集B3(海洋開発))

- 将来の気候予測値(MRI-AGCM3.2S)(2.8℃上昇相当)より、日本に接近する台風の数は減少するものの、強大な台風の個数は増加することが確認された。
- MRI-AGCM3.2Sの風データを基にした波浪推算結果より、九州沿岸では気候変動前後で常時波浪の波高・波向に差は見られず、年最大波高の平均値・中央値も同程度であった。
- 一方、年最大波高の最大値と最小値の差が大きくなり、発生しうる最大波高は増大する傾向が見られた。



※横田 雅紀(九州大学)

港湾の設計に用いる設計高潮位について

既往最高潮位偏差について

H30基準・同解説P111より引用

- 既往最大の潮位偏差は、1959年の伊勢湾台風によって名古屋港で生じた3.5mである。

表-3.2.1 1900～2016年間に観測された瞬間最大偏差2m以上の主要な高潮（気象庁³⁾に加筆）

年月日	発生域	最大偏差 (m)	原因	年月日	発生域	最大偏差 (m)	原因
1917.10.1	東京湾	2.1外	台風	1972.9.16	伊勢湾	2.0	台風7220号
1930.7.18	有明海	2.5外	台風	1991.9.27	有明海	2.7	台風9119号
1934.9.21	大阪湾	3.1外	室戸台風	1995.9.17	八丈島	3.4	台風9512号
1938.9.1	東京湾	2.2外	台風	1996.9.22	八丈島	2.9	台風9617号
1950.9.3	大阪湾	2.4	ジェーン台風	1999.9.24	周防灘	2.1外	台風9918号
1956.8.17	有明海	2.4外	台風5609号	2000.7.8	八丈島	2.5	台風0003号
1959.9.26	伊勢湾	3.5	伊勢湾台風	2002.10.1	八丈島	2.4	台風0221号
1961.9.21	大阪湾	2.5	第2室戸台風	2004.9.7	有明海	2.1	台風0418号
1964.9.25	大阪湾	2.1外	台風6420号	”	瀬戸内海西部	2.1	”
1965.9.10	瀬戸内海東部	2.2	台風6523号	2004.10.20	土佐湾	2.5	台風0423号
1970.8.21	土佐湾	2.4推	台風7010号				

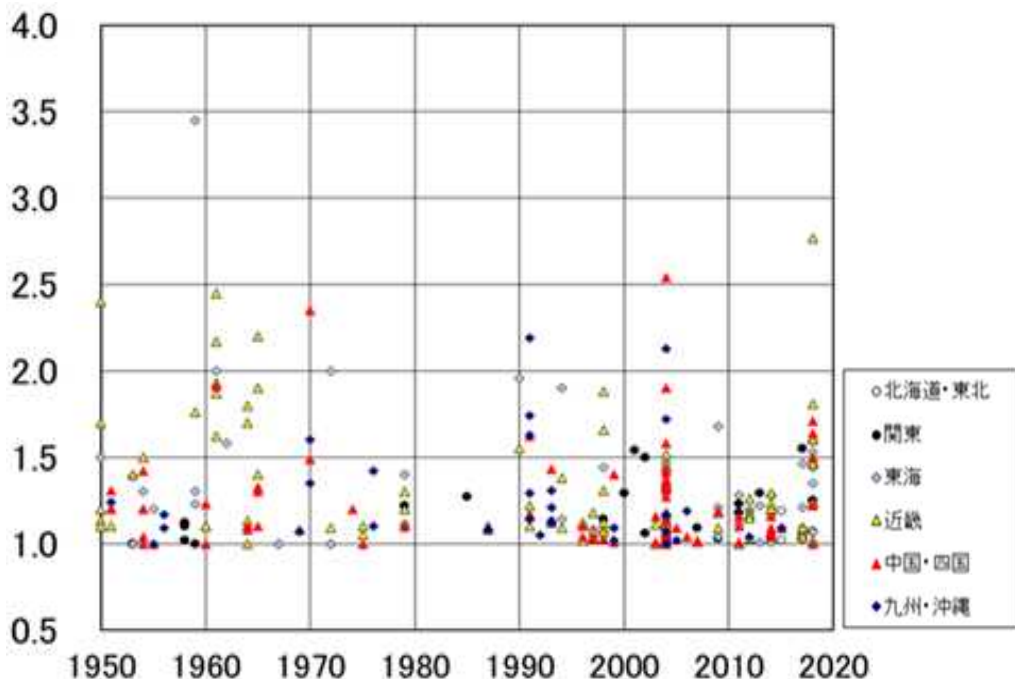
無印：気象庁管轄検潮所の資料、推：推定値、外：気象庁管轄外検潮所の資料による

「日本の気候変動2020」での高潮に係る整理

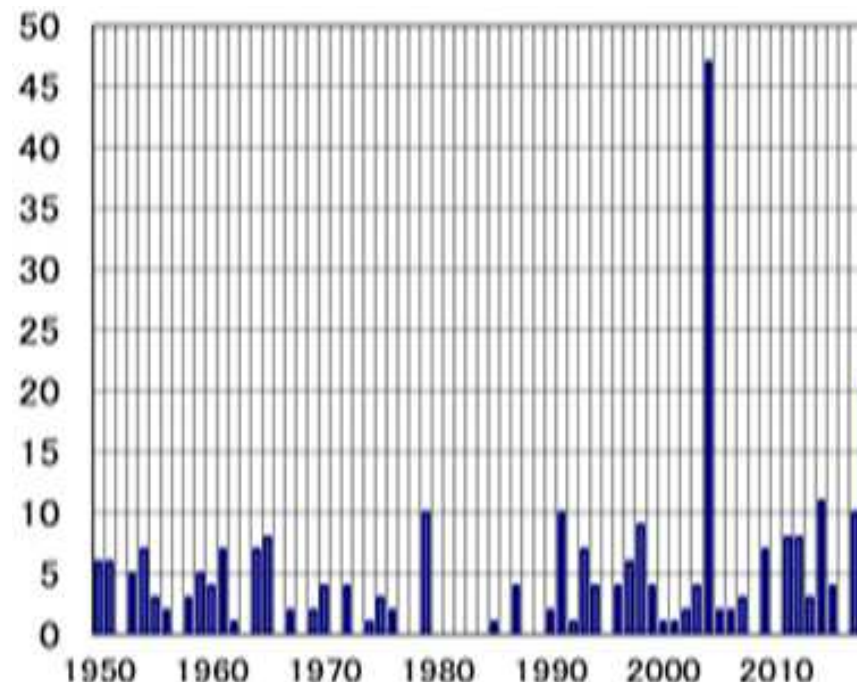
出典：文部科学省及び気象庁「日本の気候変動2020」

観測事実

- 高潮の発生頻度や潮位偏差は、台風の上陸数や強度などに強く影響を受けているが、年ごとの変動も大きく、有意な長期変化傾向は見られない。



各観測地点の潮位偏差の最大値(m)



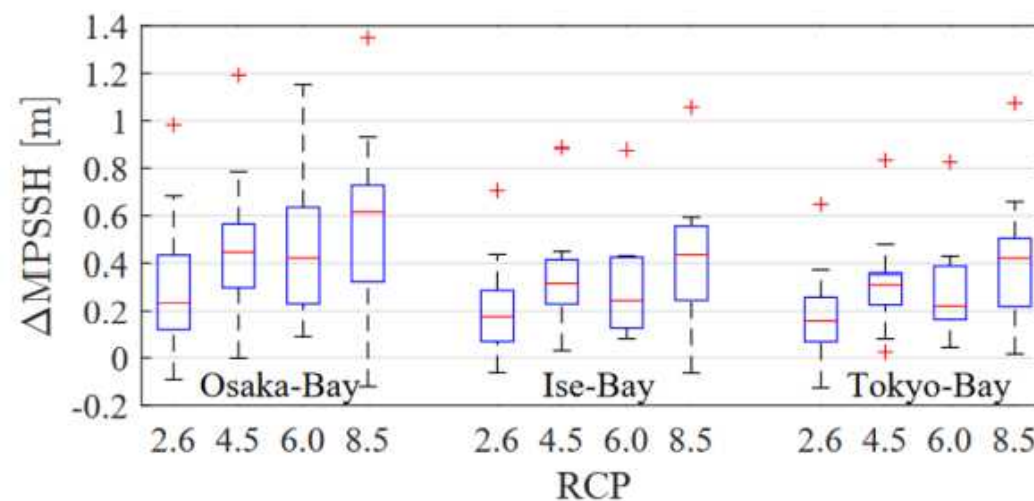
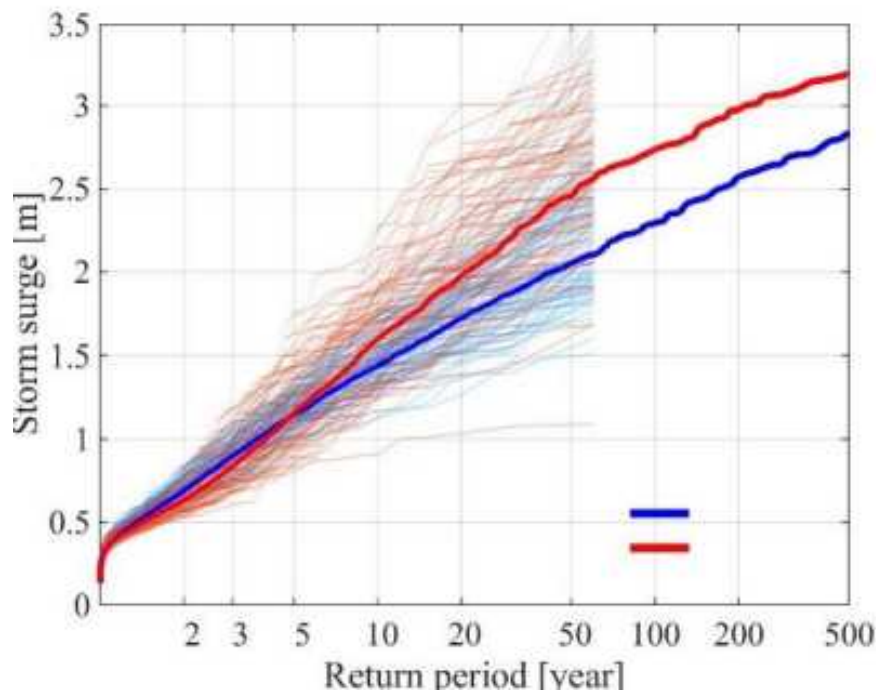
1m以上の潮位偏差の年観測回数

「日本の気候変動2020」での高潮に係る整理

出典：文部科学省及び気象庁「日本の気候変動2020」

将来予測

- 複数の将来予測の結果、多くのケースで将来の台風が強くなり、東京湾、大阪湾、伊勢湾の高潮（潮位偏差）が増大するとの事例研究が報告されている（確信度は中程度）。
- d4PDF を基にした推定では、小規模な高潮の発生数は減少するものの、よりまれで大規模な高潮の発生頻度は増加するとの結果が得られている（確信度は低い）。



可能最大高潮モデルによる最大水位の将来変化量

図 d4PDF をもとに算出した極端な潮位偏差の将来変化(大阪湾)

横軸は再現期間、縦軸は潮位偏差を表す。青線は現在気候(1951～2011年)、赤線は4℃上昇の場合の将来気候、太線はd4PDF全アンサンブル、細線はd4PDF各メンバーの計算結果。(Mori et al. (2019) をもとにリプロット)

既往研究レビュー⑧【潮位偏差に係る将来予測】

出典：気候変動を考慮した我が国の三大湾の高潮最大潮位偏差についての研究レビュー（森^{※1}ら,2020）（土木学会論文集B2（海岸工学））

- 1990年以降の論文^{※2}レビューにより、三大湾の潮位偏差の既往研究結果のアンサンブル平均値は、現在気候では現状の海岸保全施設設計の最大潮位偏差と同等もしくは若干小さいことを確認した。
 - 一方、気候変動後の世紀末では、現状の防災計画の最大潮位偏差を上回る高潮が生じると予測されている。
- ※2 殆どの論文でSRES A1B(2.8℃上昇)もしくはRCP8.5(4℃上昇)シナリオが採用されている

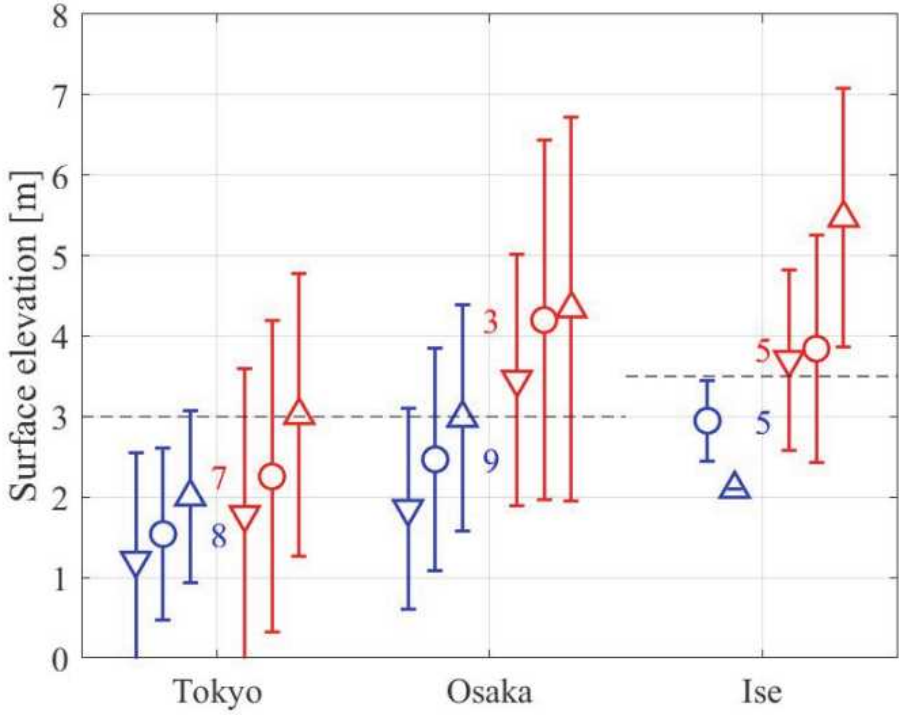


図-1 既往文献にもとづく各湾の最大潮位偏差の平均値 μ と標準偏差 $\mu \pm \sigma$ （青線：現在気候，赤線：将来気候，○：平均的予測，△：予測上位，▽：予測下位，数字は論文数）
注）点線：海岸保全施設設計の最大潮位偏差

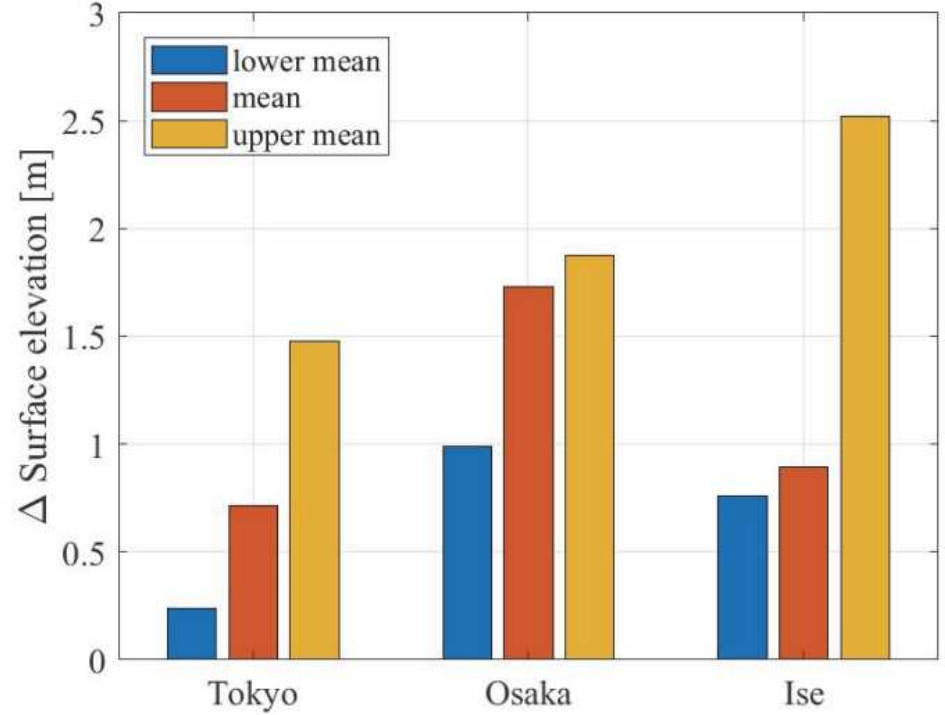


図-2 既往文献にもとづく各湾の最大潮位偏差の将来変化（赤：平均的予測，橙：予測上位，青：予測下位）

※1 森 信人(京都大学)

既往研究レビュー⑨【潮位偏差に係る将来予測】

出典：気候変動に伴う最大クラスの台風経路と高潮偏差および再現期間の推定-伊勢湾における検討(澁谷※ら,2015)(土木学会論文集B2(海岸工学))

- 経験的台風モデルを用いた高潮推算により、伊勢湾台風が最悪コースを通過した場合は名古屋港の潮位偏差が約0.7m増大し、約2.8℃上昇(SRES A1Bシナリオ)の気候変動による気圧低下を考慮した伊勢湾台風が最悪コースを通過した場合は名古屋港の潮位偏差が約1.5m増大することを示した。

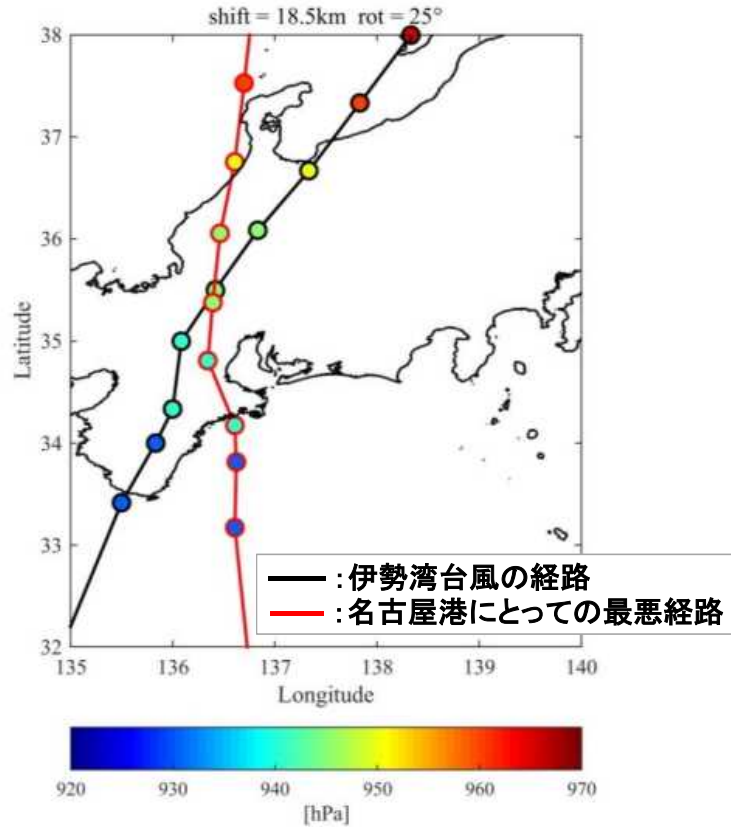


図-6 伊勢湾台風の経路と名古屋港にとっての最悪経路

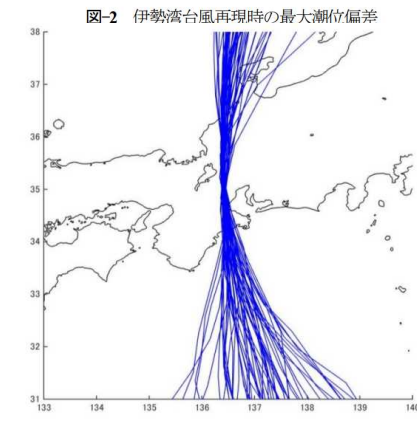
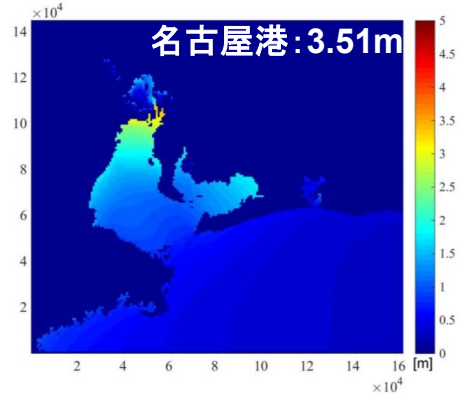


図-12 確率台風モデル25,000年の計算より得られた最大クラスの高潮を引き起こす台風経路

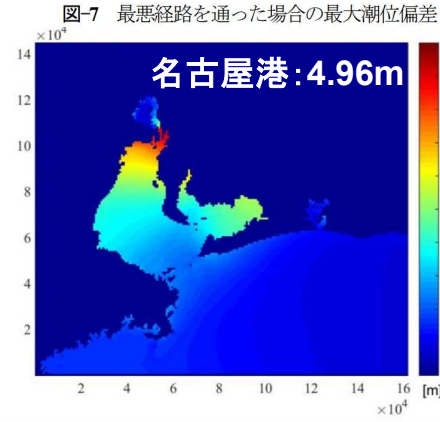
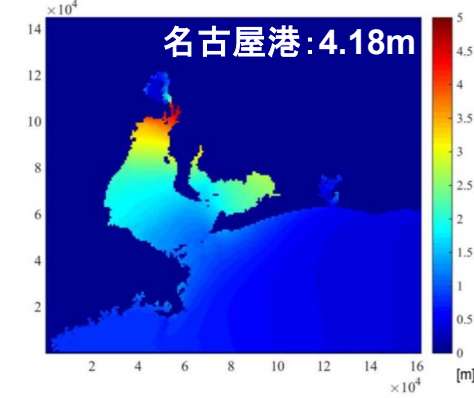


図-11 将来気候条件下において最悪経路を通った場合の最大潮位偏差

※澁谷 容子(鳥取大学)

既往研究レビュー⑩【潮位偏差に係る将来予測】

出典：北西太平洋の台風の最大潜在強度を用いた3大湾における高潮偏差の将来変化予測(有吉※ら,2018)(土木学会論文集B2(海岸工学))

- 台風の最大潜在強度(MPI)の理論に基づく気候的最大高潮偏差(MPSSH)の将来変化予測より、**高位のRCPシナリオほど海面水温(SST)上昇量に対するMPI強度増加量が小さく、また、台風シーズンの三大湾のSST変化に対するMPSSH変化の感度は平均で約0.12m/°Cであった。**
- 気候変動により**MPSSHは平均および分散ともに大きく増加し、特に9月に大きくなる。**また、その変化はRCPシナリオが高位になるほど大きくなる。
- 9月の大阪湾において、**100年に1度の出現頻度で生起する環境場におけるMPSSHは、現在気候に対して4°C上昇シナリオの将来気候は1.5m程度上昇する。**

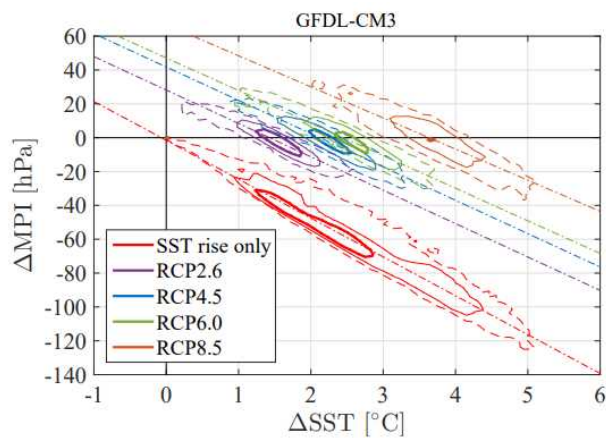
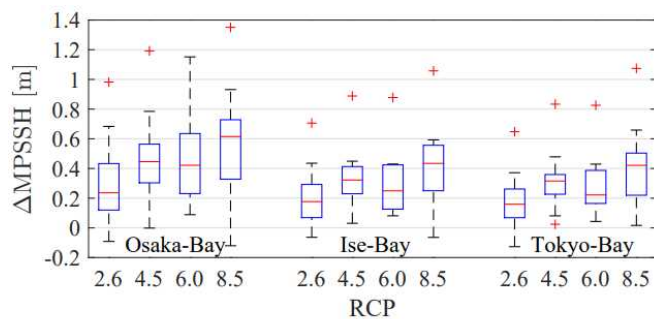
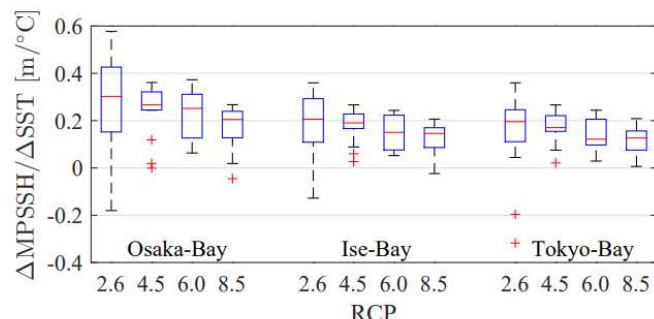


図-5 RCPシナリオごとのSSTとMPIの将来変化量の関係：GFDL-CM3の例(個数密度の破線：10個、実線：100個、太実線：500個、一点鎖線：線形近似直線)

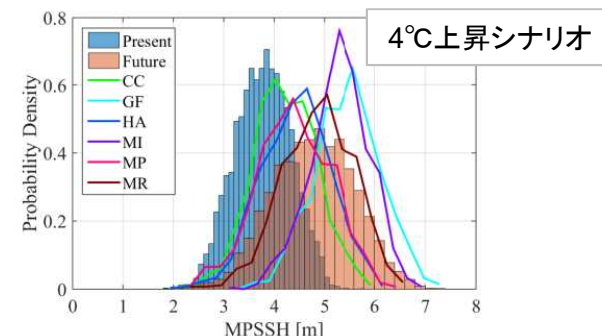


(a) MPSSHの将来変化量



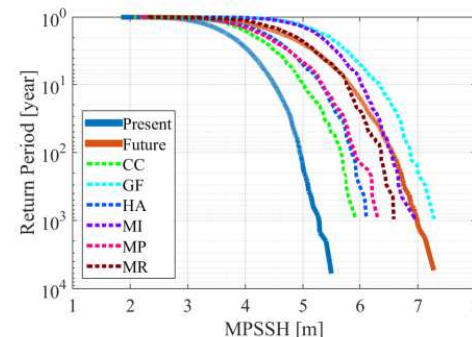
(b) MPSSHのSSTに対する感度(ΔMPSSH/ΔSST)

図-8 9月の三大湾における(a)気候的最大高潮偏差(MPSSH)の将来変化量と(b)MPSSHのSSTに対する感度(赤線：中央値、箱：第一および第三四分位数、ひげ：最大値および最小値、+：外れ値)



(a) MPSSHの確率密度分布

(バー：全データ、線：将来の各SSTアンサンブル)



(b) MPSSHの出現確率

(実線：全データ、点線：将来の各SSTアンサンブル)

図-9 9月の大阪湾におけるMPSSHの確率評価結果

※有吉 望(京都大学)

既往研究レビュー⑪【潮位偏差に係る将来予測】

出典：気候変動による日本主要湾における可能最大クラス高潮の長期変化(森※ら,2021)(土木学会論文集B2(海岸工学))

- 台風の可能最大強度(MPI)の理論に基づいた気候的可能最大高潮(MPS)モデルを用いた評価により、北西太平洋海域でのMPIは昇温に応じて連続的に変化し、2015年から2099年においてRCP2.6シナリオで-3.5hPa、RCP8.5で-8.9hPaであることを確認した。
- また、過去に大きな高潮が発生した湾(東京湾、大阪湾、伊勢湾、有明海)のMPSは将来変化量が大きいことを確認した。

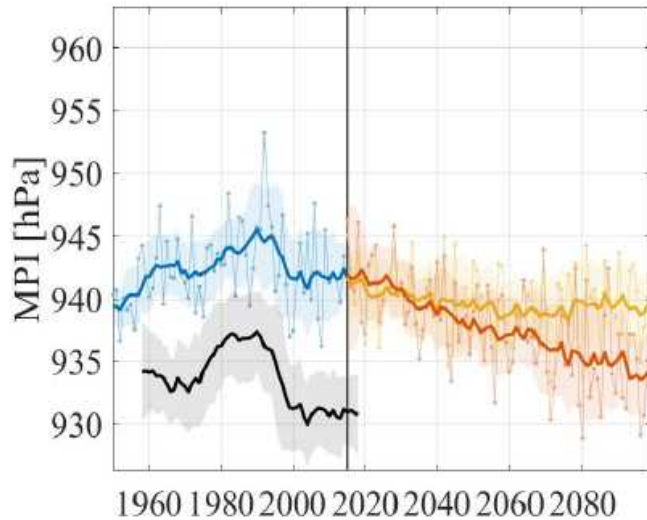
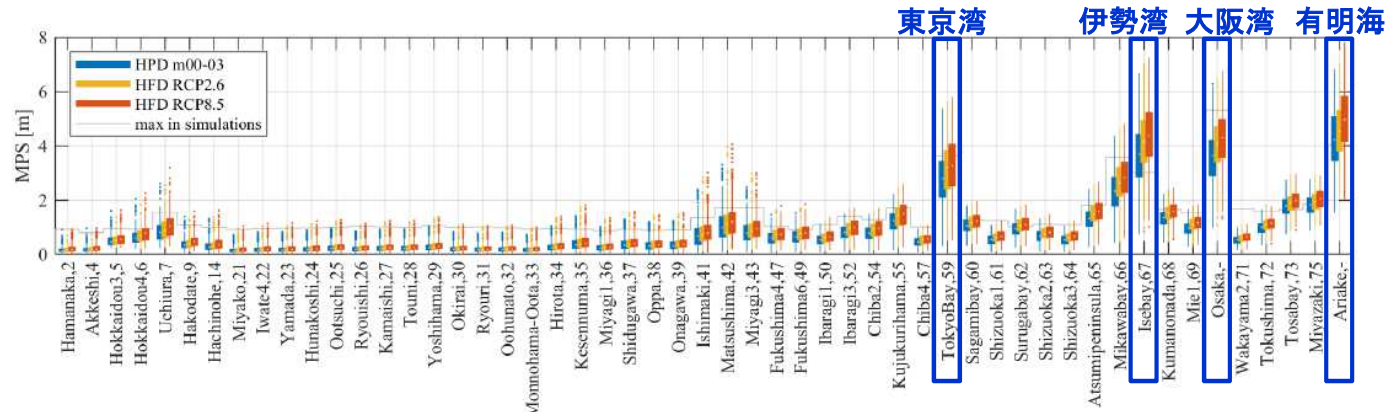
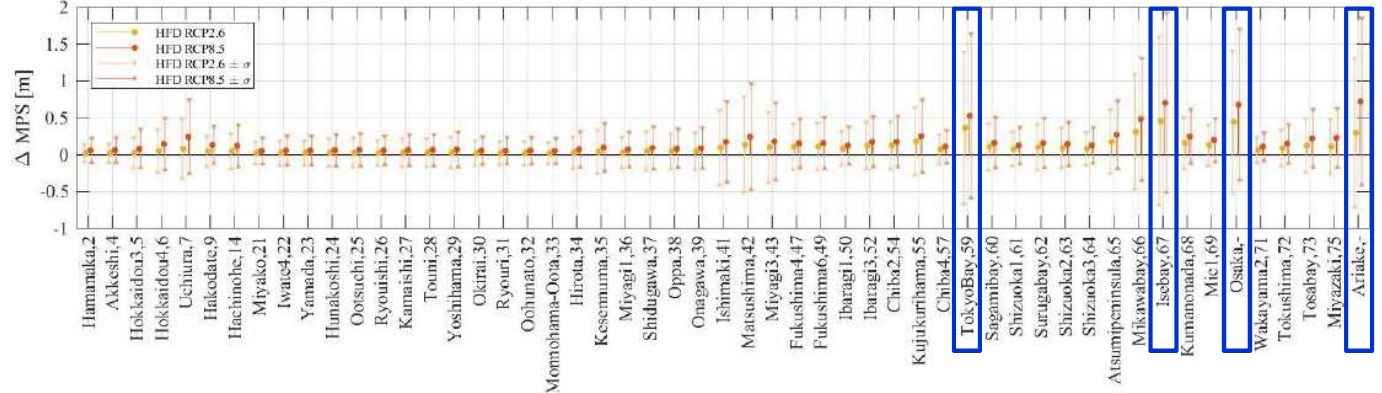


図-5 150年ランによる台風月海域内平均MPIの将来変化
(青色：HPD実験4メンバ平均MPI, 黄色：HFD実験RCP2.6, 橙色：HFD実験RCP8.5, 黒色：JRA-55再解析値, 細線：1年, 太線：10年移動平均値, 網掛け：10年移動分散値, 単位：hPa)



(a) 7~10月平均MPS将来変化 (青：HPD m00-03, 黄：HFD RCP2.6, 赤：HFD RCP8.5, 灰線：力学計算最大値)



(b) 7~10月平均MPS変化 (黄：HFD RCP2.6, 赤：HFD RCP8.5, 点線：将来気候の分散)

図-6 台風月MPS将来変化

(横軸は湾名, 左から右が北から南に対応, 数字は図-2に対応)

※森 壮太郎(中国電力(株))

III. 技術基準上の要求性能の設定

前回までの委員会を踏まえた論点整理及び今後の進め方(案)

論点 今後の検討の方向性【第2回提示】

【第2回での主なご意見】

今後の検討事項(案)

1. 外力設定

①海面水位

海面水位の上昇量の設定

②波浪

a) 常時波浪の波高・波向・周期の設定

b) 異常時波浪の波高・波向・周期の設定

③潮位偏差

高潮偏差の増大量の設定

④風

風圧力の設定

2. 対策

①リスク評価

②対策方針(整備水準、優先順位)の設定

③不確実性の存在

④工法の設定

- ◆ 一定程度の知見が得られているものから、基準類に反映する方向で検討。
- ◆ 基準等については、「最新の知見」を踏まえつつ、それを総合的に勘案して外力を決定する構成を検討。

- ◆ 「設計で用いる潮位」には、現在の気候で生じる潮位に加え、「日本の気候変動2020」を参考として、「供用期間中に生じる海面水位上昇量を加えた潮位」を用いる方向で基準類への記載を検討する。

- ◆ 「静穏度検討に用いる波浪」(常時波浪)については、追加的対策で対応することも念頭に、現段階で気候変動の影響を考慮するかどうかも含めて、基準類での取扱いを検討する。

- ◆ 「施設設計に用いる波浪」(異常時波浪)には、最新の知見で算出した設計沖波を基本としつつ、d4PDFなどの気候モデルや確率台風モデルを用いて算出される将来予測を総合的に勘案する方向で基準類への記載を検討する。

- ◆ 「潮位の設定において考慮する高潮」には、d4PDFなどの気候モデルや確率台風モデルを用いて算出される潮位偏差の将来予測を総合的に勘案する方向で基準類への記載を検討する。
- ◆ d4PDF等のアンサンブル気候予測データベースを用いる場合のダウンスケーリングの手法についても標準化の可能性を検討する。

- ◆ 「荷役機械の風圧力の算定に用いる風」については、供用期間中に気候変動の影響が顕在化する可能性は低いことから、設計時点の風況を前提として基準類での取扱いを検討する。

- ◆ 気候変動適応策の包括的な施策パッケージについて、ガイドライン等への記載を検討。

- ◆ 岸壁や2重パラペット等の越波流量などについて、研究の進捗状況を踏まえ、基準等への記載を検討する。
- ◆ 岸壁の利用形態に応じた許容越波流量の設定について、基準類への記載を検討する。

- ◆ 将来の気候変動に対するゾーン別の適応方針を示したマスタープランの策定を検討する。

- ◆ 手戻りが大きい施設や長期に渡り供用が想定される施設については、追加費用が最小限となるような事前対策の考え方について、基準類への記載を検討する。

- ◆ 海外の事例等も参考にして、供用中の施設の改良にも対応できる工法について、ガイドライン等への記載を検討する。

- ◆ 客観的理由を整理すべき。
- ◆ 設計に見込む外力の増加量は、「平均値」と「上限値」の両方を見て、2つの条件の差を総合的に判断して設定すべき。

- ◆ RCP2.6シナリオを用いることは妥当。
- ◆ 海面水位の上昇量の基本を、「平均値」と「上限値」のいずれを用いるかについて、合理的な整理が必要。

- ◆ 全国のいくつかの港湾を例に、現在までのトレンドと、将来の変化予測を行い、影響を把握すべき。

- ◆ d4PDFにより、いくつかの港湾を例に試算をして、発生しうる事象とその対応を把握して、方針を検討すべき。
- ◆ 設計に用いる値については、将来予測をそのまま用いるのではなく、総合的に判断すべき。

- ◆ これまでのトレンドも分析すべき。
- ◆ 第1段階として、現在の最新の気象条件で外力を設定し、第2段階として、気候変動による影響を見込むという方法も取りうる。

- ◆ 風についてはd4PDFによる将来予測の精度を検証することが必要。

- ◆ 各港の施設の設計条件をデータベース化して、外力が変化した場合の状況を把握することが必要。
- ◆ リスク評価や対策の実施について課題は多いが、技術開発により解決することが必要。

- ◆ 気候変動以前の話として、照査に必要な外力設定の考え方を再検討すべき施設も存在するのではないかと。
- ◆ リスク評価に必要な手法を早期に確立することが必要。
- ◆ 重要度や利用形態に応じた評価を行うべき。

- ◆ 長期的な視点に立って、「港湾全体の適応水準の設定」、「対策スケジュール」やその「主体」を定め、関係者間で合意形成することが必要。そのためにはマスタープランが必要。
- ◆ 海岸保全施設との「整合性」と「違い」に留意すべき。荷役機械や貨物のない岸壁であれば、浸水は許容するが構造的には壊れないという要求性能もあり得るのではないかと。
- ◆ 老朽化対策の際に、将来の改良が容易な構造に変えることが必要。港湾機能を維持する上で重要な施設は優先的に対策すべき

- ◆ 施設毎に「見直し期間」や「供用期間」について具体的な設定手法を示してはどうか。
- ◆ 手戻りの大きな施設は、標準的な外力設定に加えて+αの要素を入れてはどうか。
- ◆ 「補修しやすい構造」と「粘り強い構造」は異なることに留意。

- ◆ 既存の施設に適用できる各種工法を検討すべき。

- ◆ 全国の代表的な港湾を例に、

- ①海面水位
- ②波浪(波高・周期・波向)
- ③潮位偏差

について、

A) 過去からのトレンド分析

B) 気候モデル等を用いた将来予測

を実施し、設計等に使用する外力の考え方を整理。

- ◆ 風について気候モデル等を用いた将来予測について文献等を確認。

※次回(3月)及び令和4年度の委員会で検討予定

- ◆ 本日の議事(4)の結果も踏まえ、

①気候変動を考慮した技術基準体系のあり方

②長期的な視点からのマスタープランの必要性

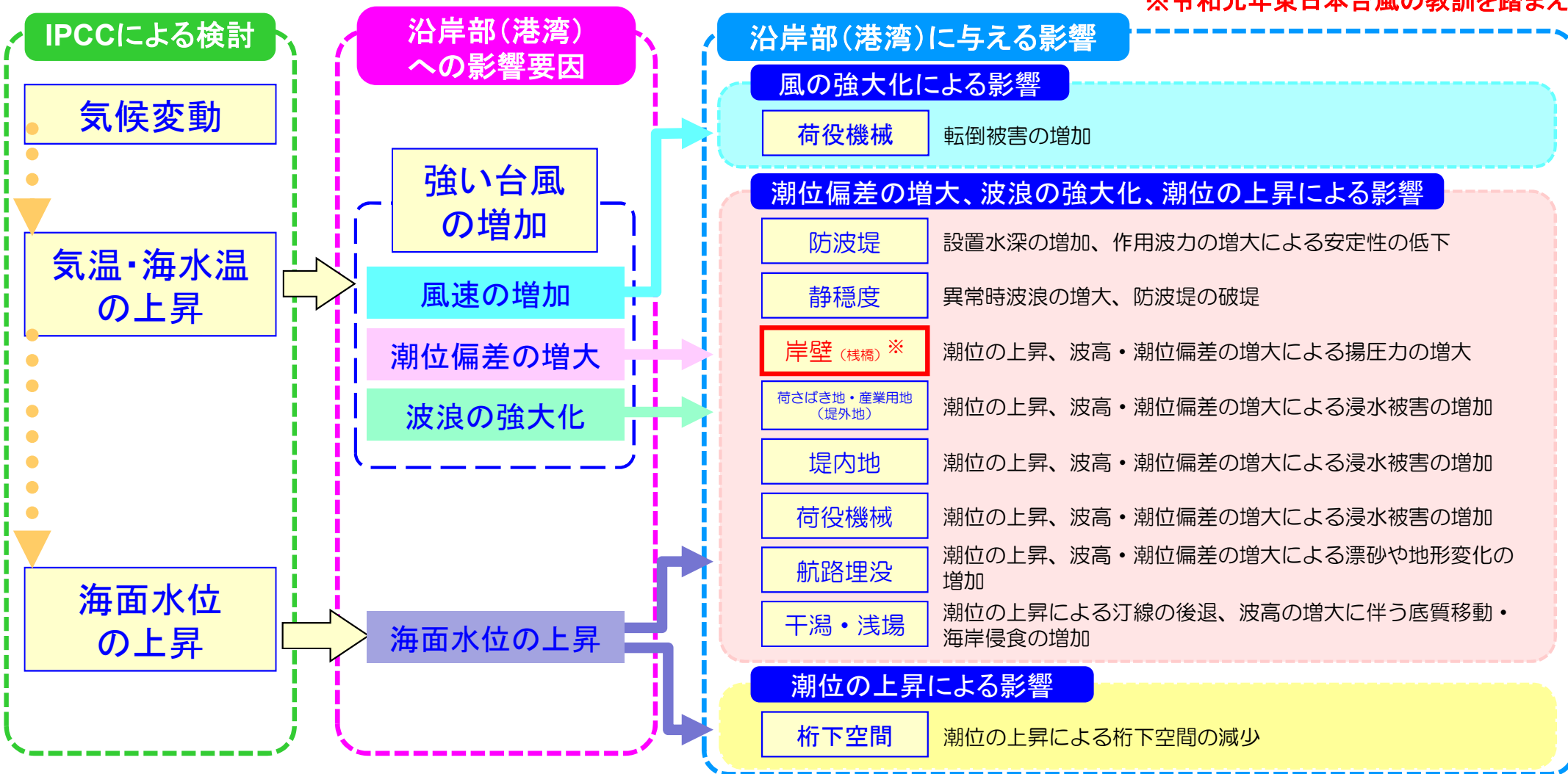
等について、検討を進める。

※次回(3月)及び令和4年度の委員会で検討予定

気候変動が港湾に与える影響

沿岸部(港湾)における気候変動の影響及び適応の方向性検討委員会報告書(平成27年6月)より

※令和元年東日本台風の教訓を踏まえ追加



取り得る適応策(案)

沿岸部(港湾)における気候変動の影響及び適応の方向性検討委員会報告書(平成27年6月)より

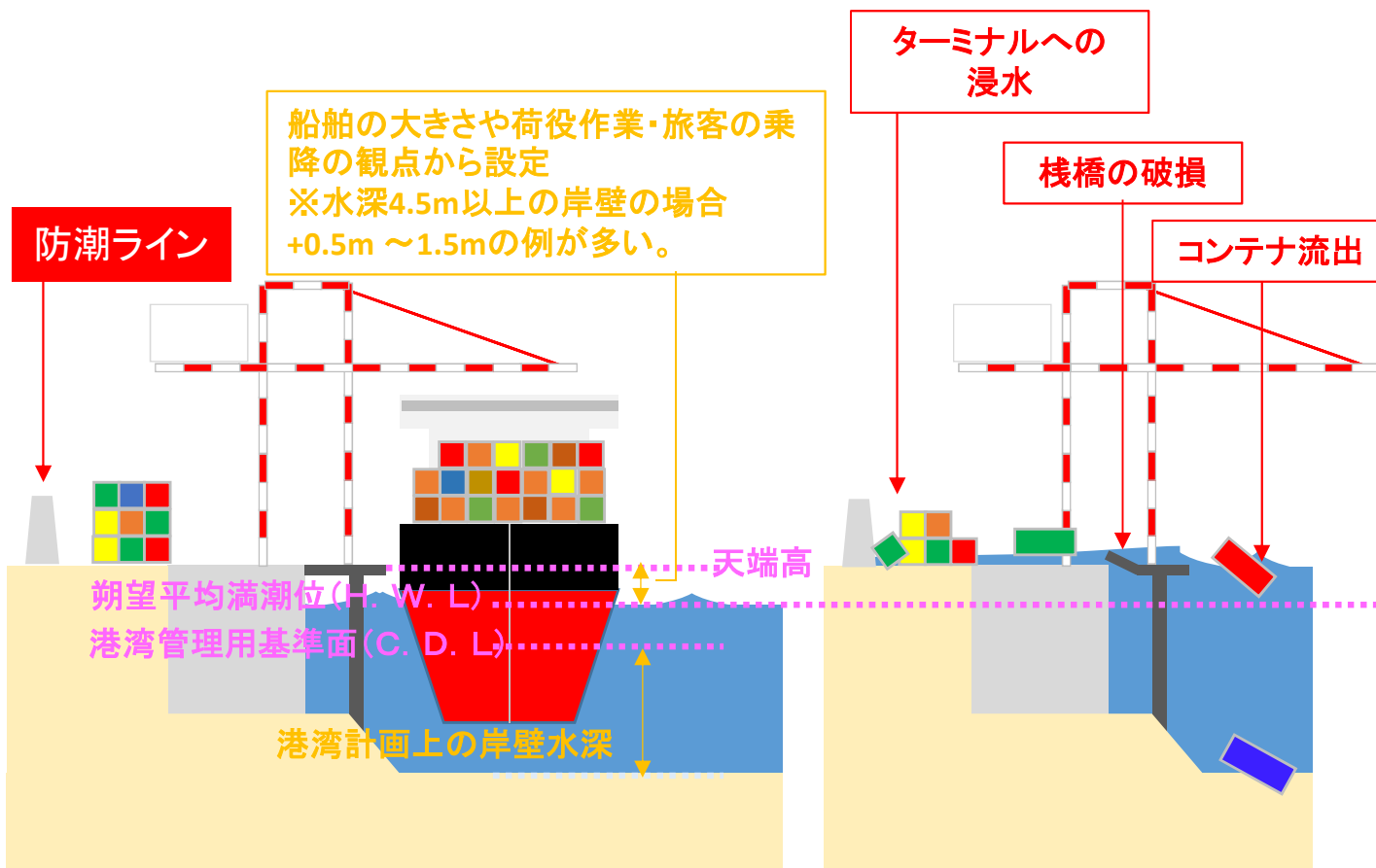
○気候変動の沿岸部(港湾)に与える影響に対して取り得る適応策を例示。個々の場所の特性や気候変動の影響の発現動向に応じ適切な施策を適切なタイミングで講じていくことが肝要。

主な項目	影響	適応策(△:ソフト対策、□:ハード対策)
防波堤等外郭施設及び港湾機能への影響	<ul style="list-style-type: none"> ○海面水位及び波浪条件、高潮偏差の変化に伴う防波堤被災 ○防波堤被災に伴う静穏性の低下 ○海上輸送に係る物流機能の低下 	<ul style="list-style-type: none"> △海象のモニタリング、高潮・高波による影響の予測・情報提供 □係留施設や防波堤の機能維持(外力及び防波堤断面等の見直し) △□粘り強い構造の防波堤、防潮堤等の技術開発・整備 □防砂堤等による航路・泊地の埋没防止・軽減対策 △港湾BCPの作成
堤外地(埠頭・荷さばき地、産業用地等)	<ul style="list-style-type: none"> ○浸水による港湾・産業施設の被害 ○浸水によるコンテナ等の流出被害の拡大 ○強風による荷役機械の倒壊 	<ul style="list-style-type: none"> △気象・海象のモニタリング、高潮・高波による影響の予測・情報提供 △災害リスクの評価及びハザードマップ等による周知 △避難判断に資する情報の分析・提供(リアルタイム情報を含む) □気候変動の影響を考慮した埋立地の地盤高の設定 △□強風によるクレーン逸走対策 □コンテナ等の流出対策の推進 □関係機関と連携した排水機能の確保 □高潮位時の逆流防止対策 △港湾・企業BCPの作成 △自衛防災の促進 △避難計画策定・訓練実施の促進(操作規則との整合確保を含む) △協議会等の組織による地域の防災力の向上
背後地(堤内地)への影響	<ul style="list-style-type: none"> ○浸水による人的被害、建物被害、経済損失の発生 ○長期湛水等による都市機能の麻痺 	<ul style="list-style-type: none"> △海岸保全施設等の防護機能の把握 △防護能力確保等の低コスト化 △ライフサイクルコストを考慮した最適な更新等の考え方の検討 □被災リスクの高い箇所及び更新時期を踏まえた海岸保全施設等の戦略的な整備 □民有施設(胸壁、上屋、倉庫、緑地帯等)の活用 △□粘り強い構造の防波堤、防潮堤等の技術開発・整備 △災害リスクの評価及びハザードマップ等による周知 △避難計画策定・訓練実施の促進 △協議会等の組織による地域の防災力の向上 △災害リスクを踏まえた土地利用の見直し △沿岸域における生態系による減災機能の定量評価手法開発
桁下空間への影響	<ul style="list-style-type: none"> ○桁下空間の減少による船舶通行不可 	<ul style="list-style-type: none"> △海象のモニタリング、高潮・高波による影響の予測・情報提供 △通行禁止区間・時間の明示 □港湾機能の再配置
浅場・干潟への影響	<ul style="list-style-type: none"> ○海面水位及び波浪条件の変化に伴う浅場・干潟面積の減少 ○生態系への影響 	<ul style="list-style-type: none"> △海象のモニタリング、高潮・高波による影響の予測・情報提供 △沿岸域における生態系による減災機能の定量評価手法開発

港湾における堤外地の特徴

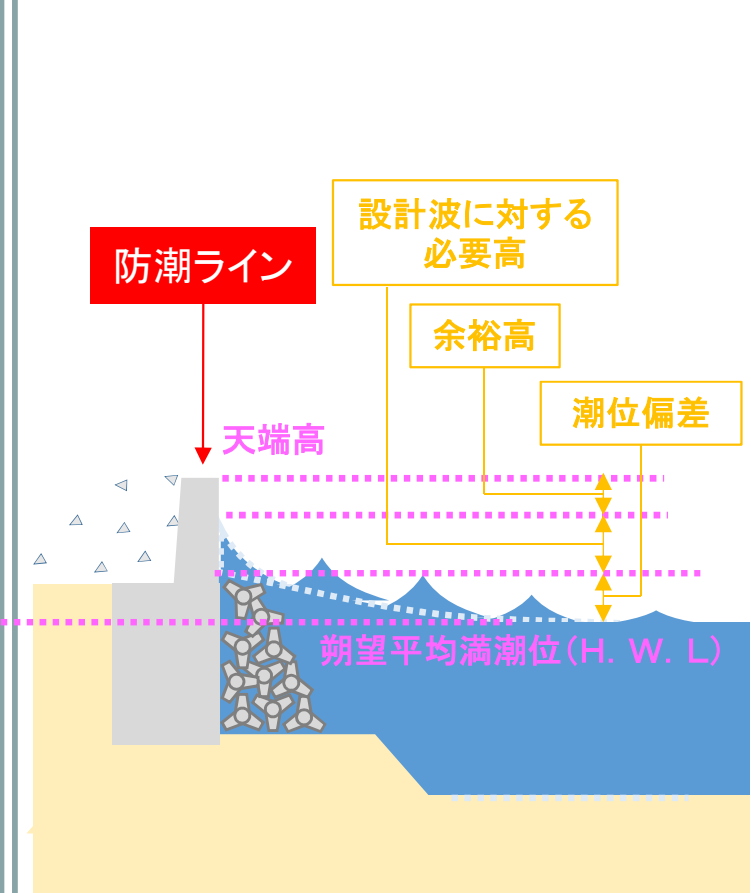
- 港湾においては、防潮ラインの外側(堤外地)に物流機能が集中するとともに多数の従業員が就労。
- 岸壁周辺は荷役作業等の観点から天端高が設定されているため、防潮ラインがターミナルの背後に設定されていることが一般的であり、高潮・高波の影響を受けやすい。
- 海に面しているため、暴風が直接作用する。

岸壁周辺



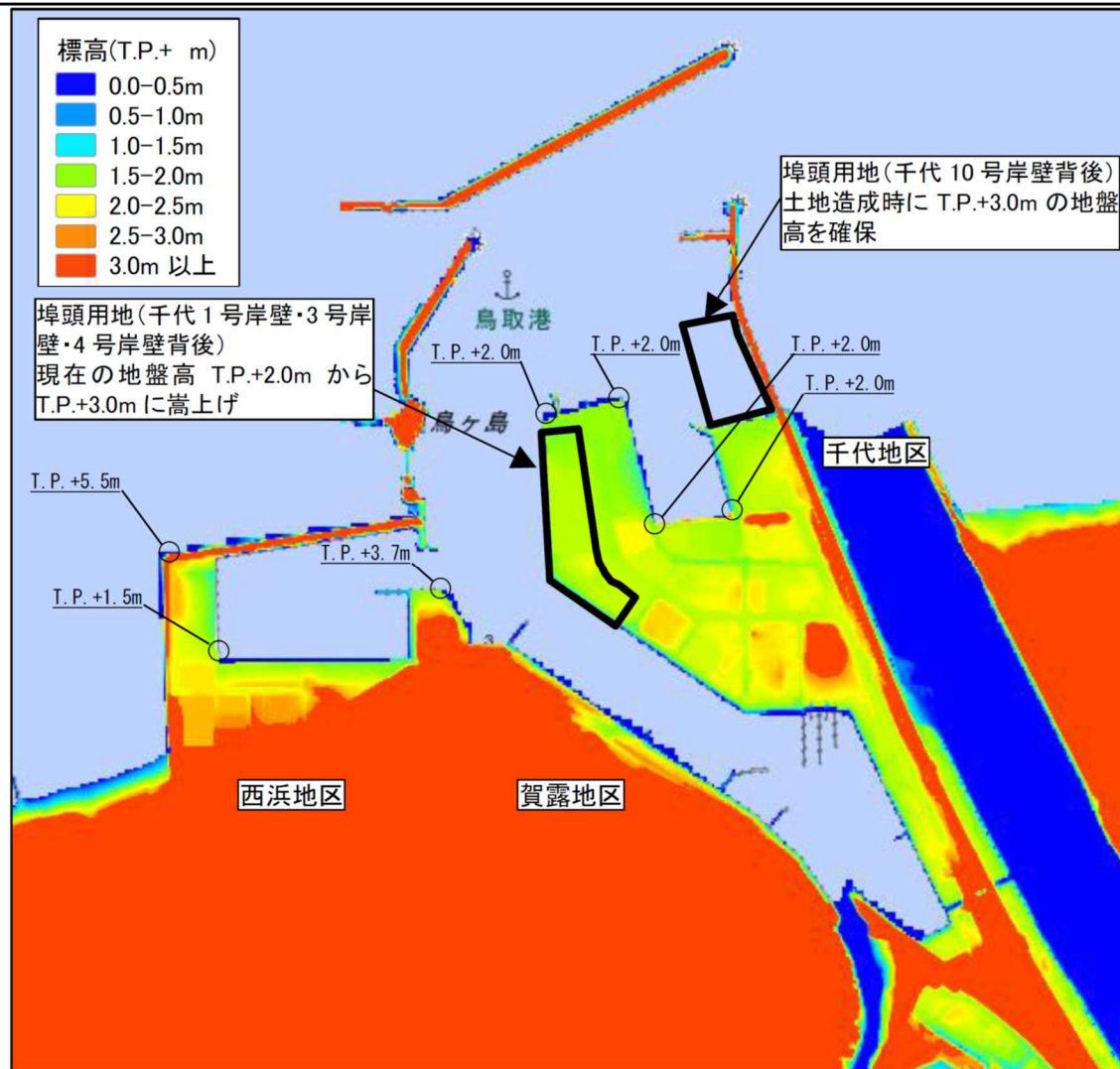
台風来襲時

護岸



波浪や高潮による浸水リスクを示した港湾計画等の策定例

○鳥取港では、波浪や高潮による浸水への対策の強化のため、港湾計画書の参考資料に地盤高を表記し、浸水リスクを示している。



資料：地理院地図

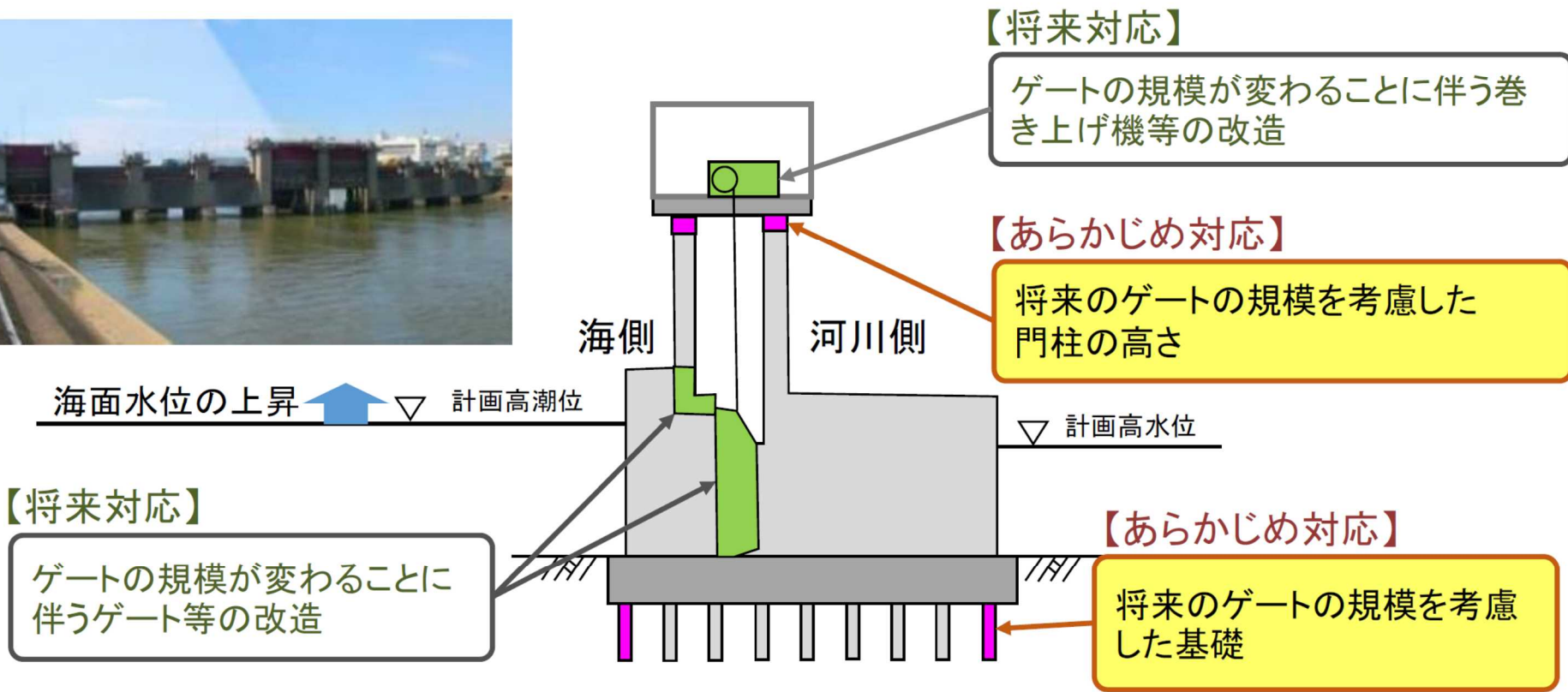
港湾計画への地盤高の表記(鳥取港の事例)

不確実性が伴う気候変動への対応(河川水門の例)

できるだけ手戻りのない施設の設計

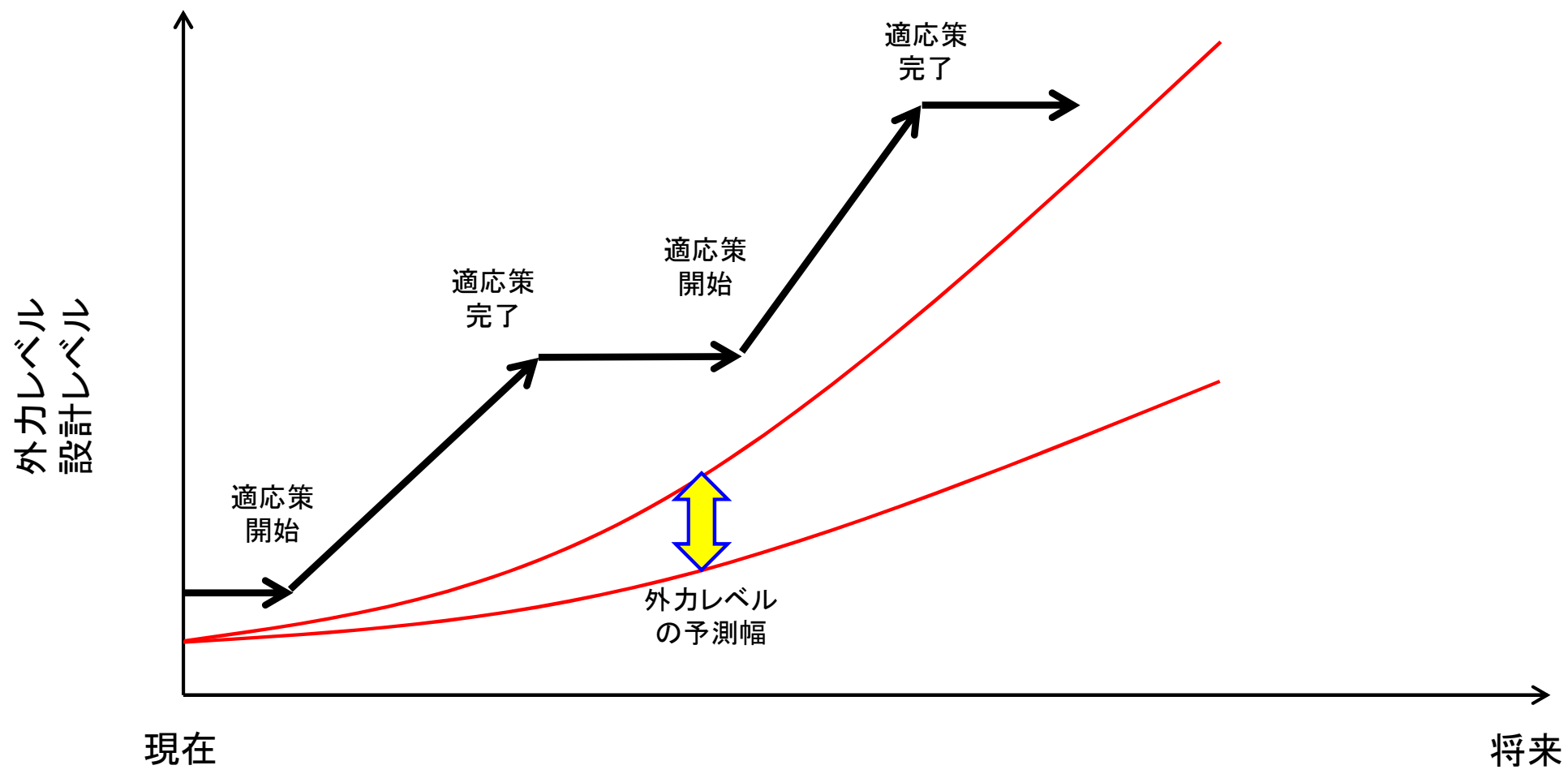
- 将来の海面水位の増加等に対してできるだけ容易に改造ができるよう設計
- 将来の改造が難しい門柱や基礎はあらかじめ対応し、将来交換が必要なゲート等や機械類等については更新時に対応

(例) 海面水位上昇に対する水門設計での対応イメージ



不確実性が伴う気候変動への対応(順応的な適応策)

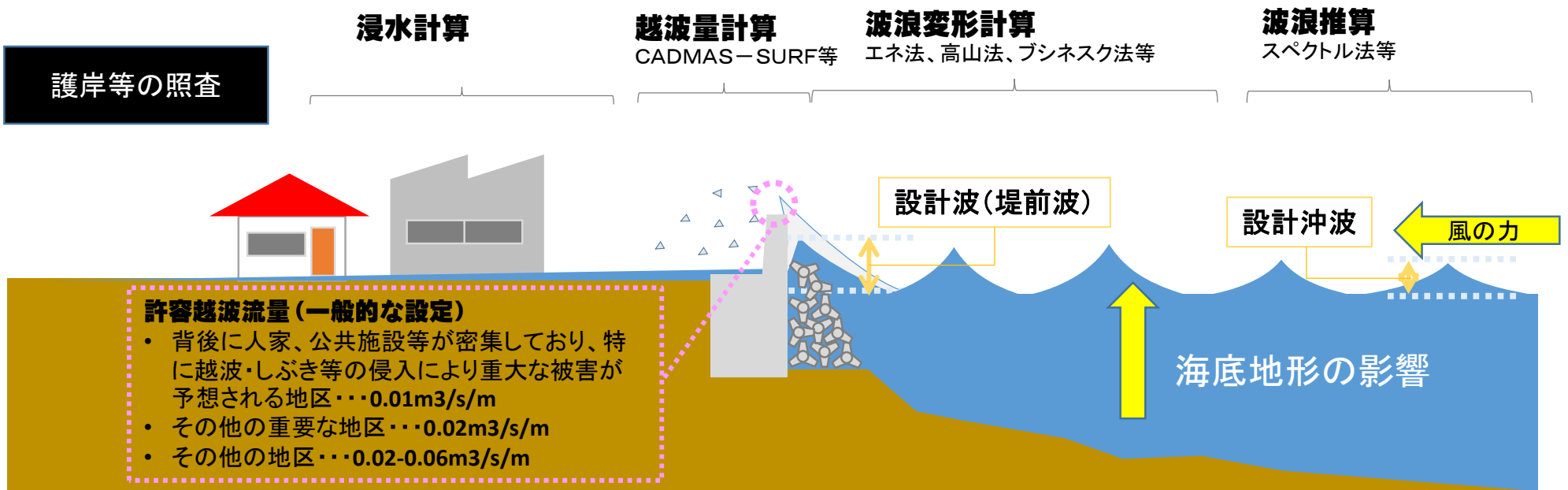
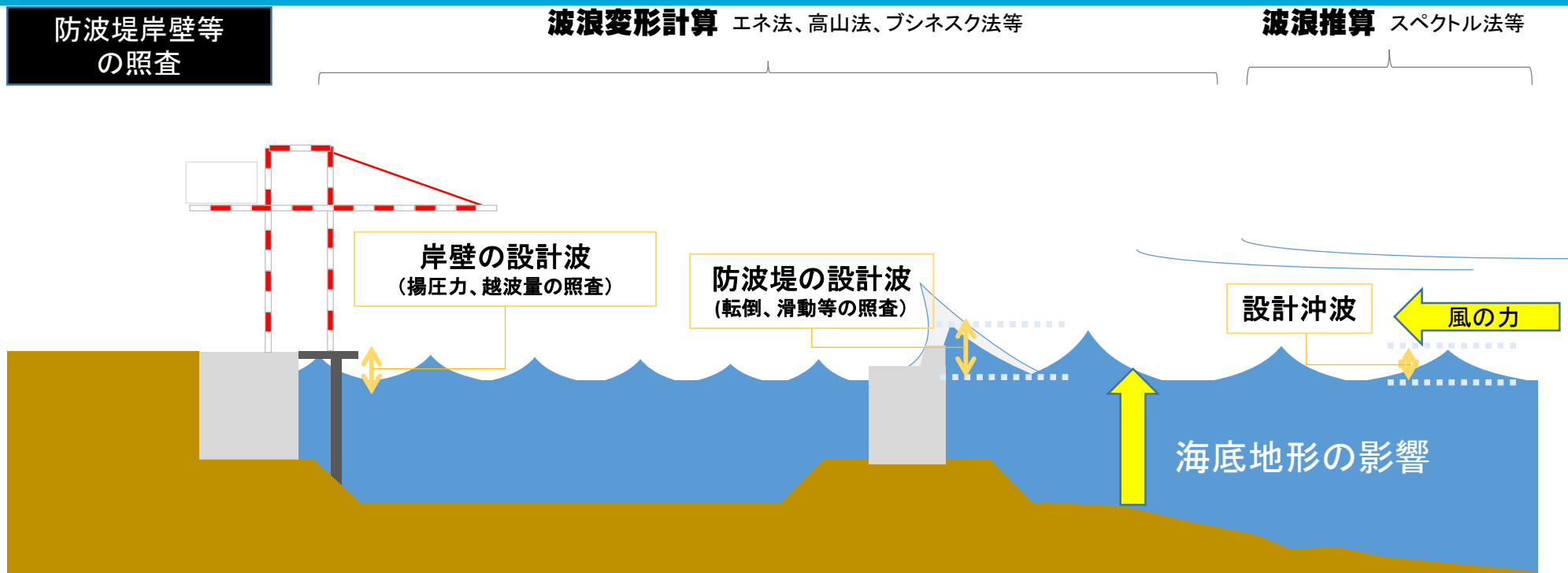
○気候変動の将来予測については、不確実性が存在することから、途中で追加対策を講じる構造を想定した準備工事を可能とすべきではないか。



海岸堤防等の高さに関する設計の考え方

	東京湾	伊勢湾	大阪湾
計画外力	伊勢湾台風(S34.9)	伊勢湾台風(S34.9)	伊勢湾台風(S34.9)
計画高潮位	T.P.+ 4.0 m	T.P.+ 4.5 m	T.P.+ 3.9 m
高潮偏差	3.0 m	3.5 m	3.0 m
朔望平均満潮位	T.P.+ 1.0 m	T.P.+ 1.0 m	T.P.+ 0.9 m
台風経路	伊勢湾台風、キティ台風 他の平行経路を比較し、 最悪のコースを設定	伊勢湾台風実績コース	室戸台風、ジェーン台風 を比較し、被害が大きくなる 室戸台風コースを設定

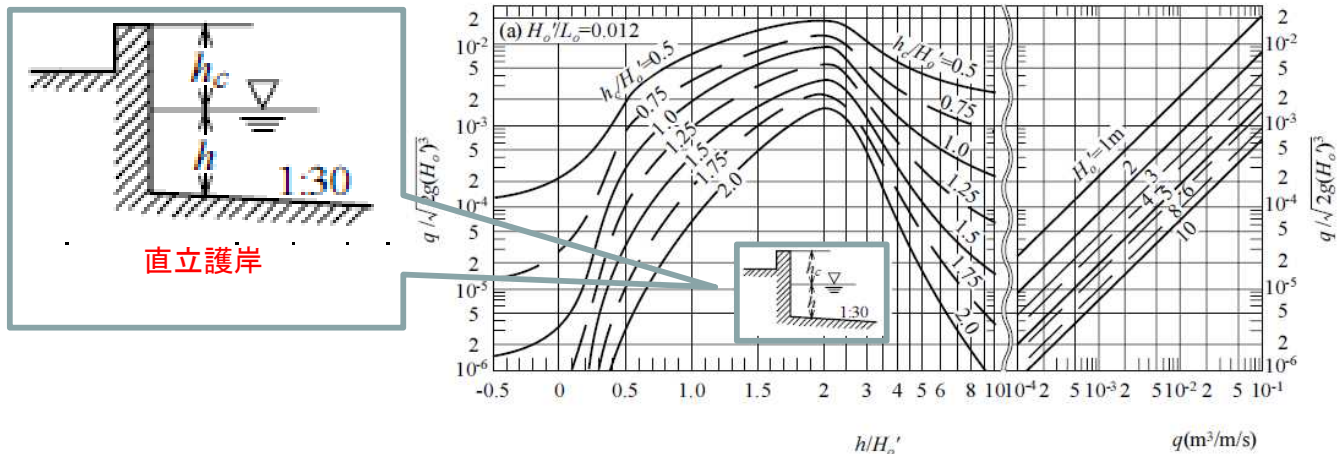
波浪等に対する施設の照査



簡易にリスク評価を行うための手法の検討

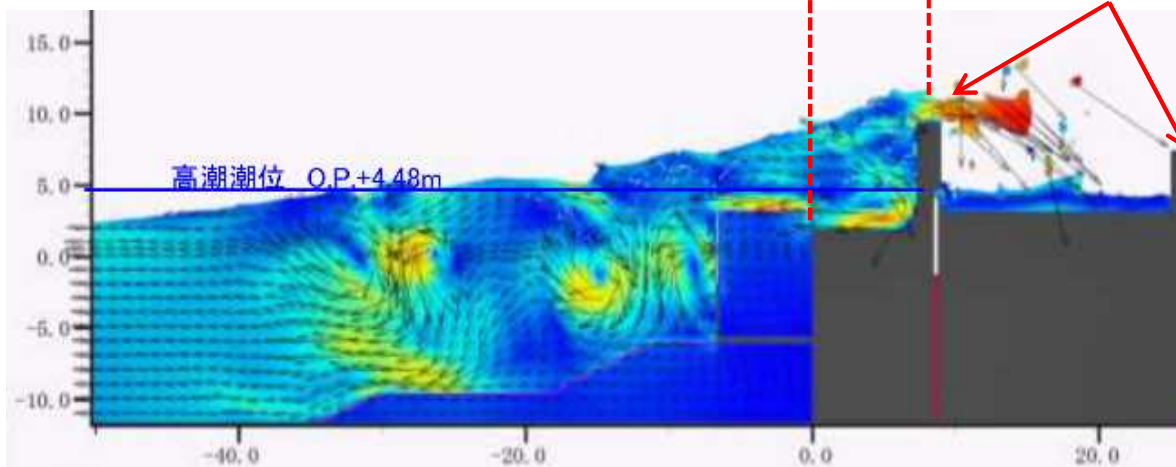
- 複雑な断面を持つ構造物(2重パラペット護岸等)については、簡易に越波量を計算する手法がない。
- 数値シミュレーションは複雑な断面にも適用できるが、時間とコストがかかるとともに、特に碎波を伴う場合には精度が低下し、波力や越波を過小評価する傾向にある。

【現行】算定図を用いた手法



直立護岸等の単純な断面については、波高、護岸前面水深等から算定図を用いて越波流量を算定可能。

【現行】シミュレーション

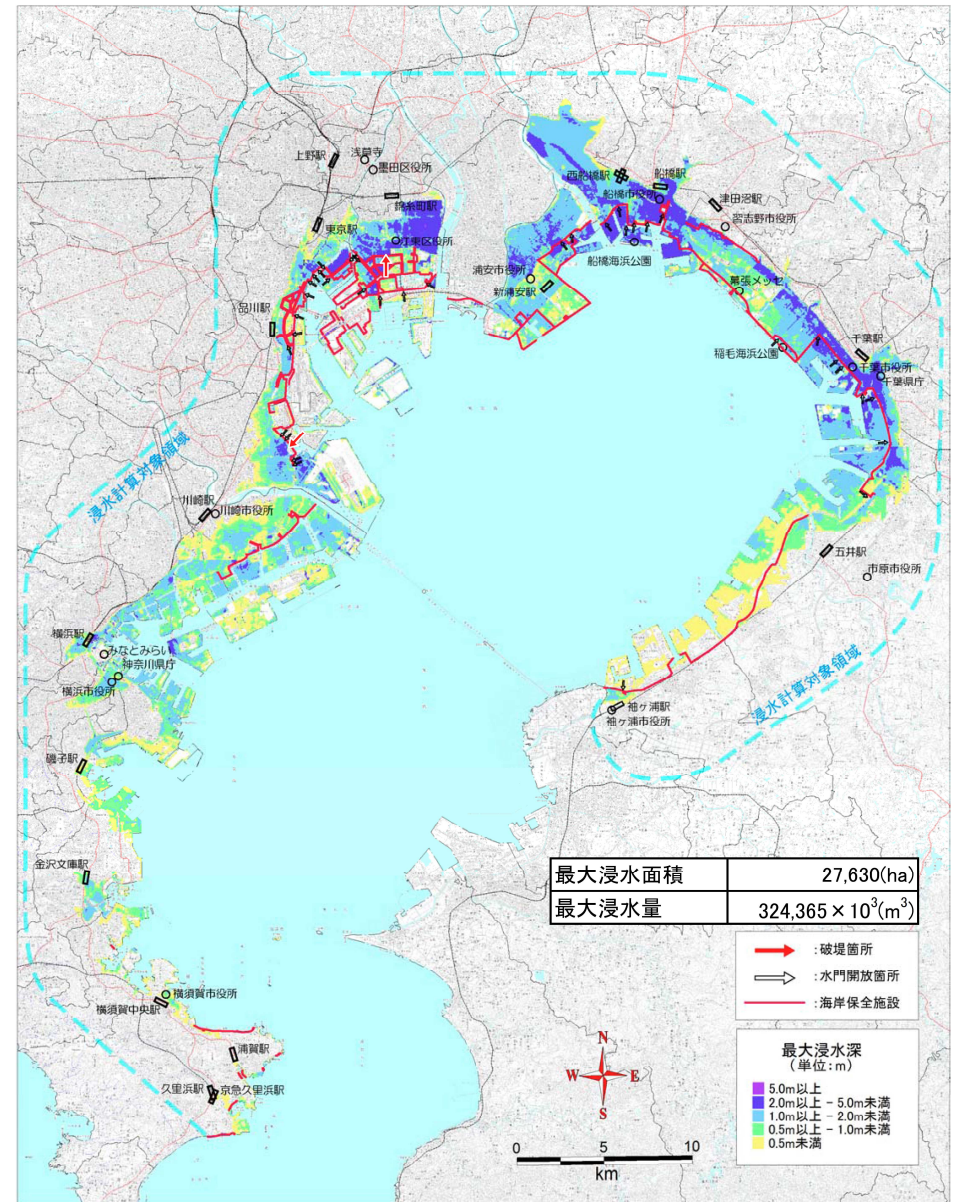
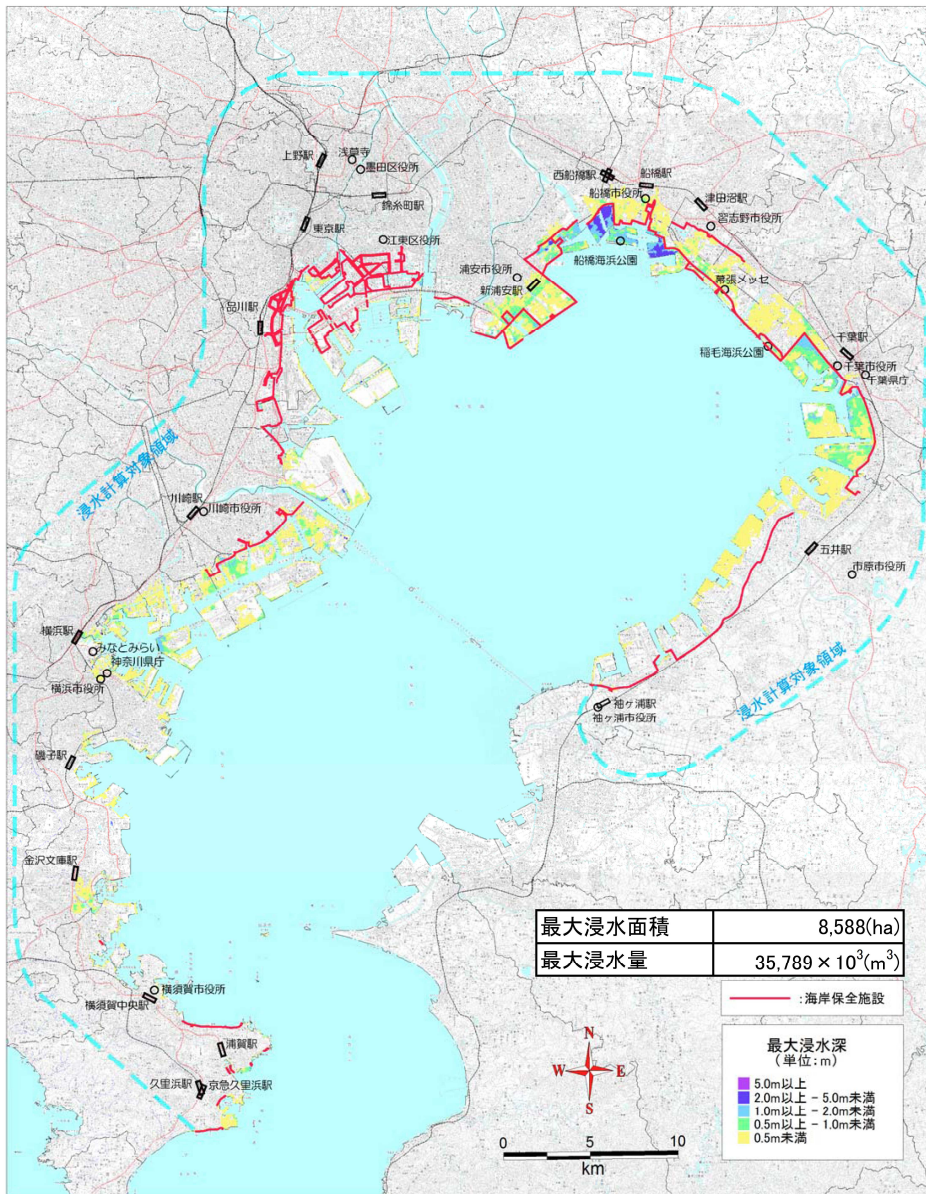


数値シミュレーションは複雑な断面にも適用できるが、時間とコストがかかる。

参考：東京湾における高潮による浸水想定範囲

シナリオ A 海岸保全施設等の機能は正常、伊勢湾台風級
温暖化による水位上昇考慮しない

シナリオ F 全水門開放及びゼロメートル地帯で破堤
室戸台風級、温暖化による水位上昇を考慮 (+0.6m)

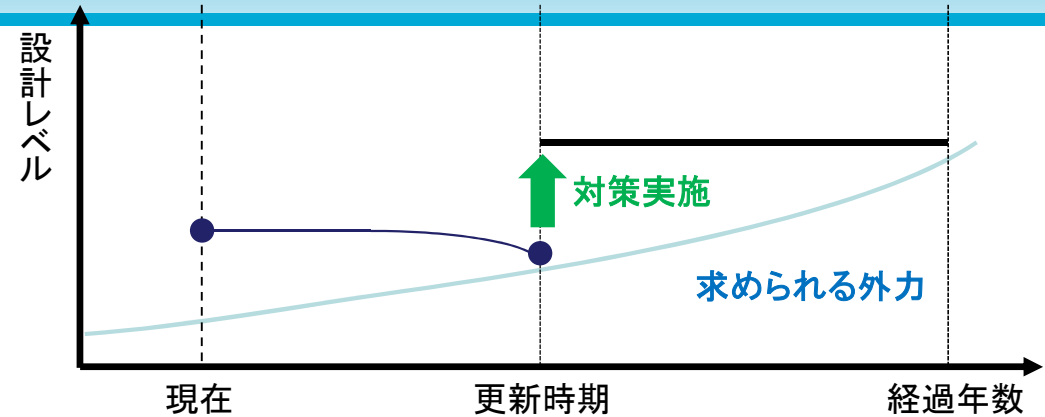


注1: 海岸保全施設については海岸省庁(水産庁、農林水産省農村振興局、国土交通省河川局(当時))及び海岸管理者の協力を得て、平成20年度末の天端高及び耐震化状況を設定。
 注2: 本想定は、東京湾沿岸部分からの越波・越流等による浸水想定結果を示したものであり、河川からの氾濫浸水及び排水については考慮していない。
 注3: 本想定は、東京湾沿岸全体で影響人口が最も大きくなると推測される台風コースを設定した場合の最大浸水深を示したものである。
 地域によっては、台風コースにより、本想定よりも最大浸水深が大きくなる可能性がある。

気候変動適応策の実施タイミング

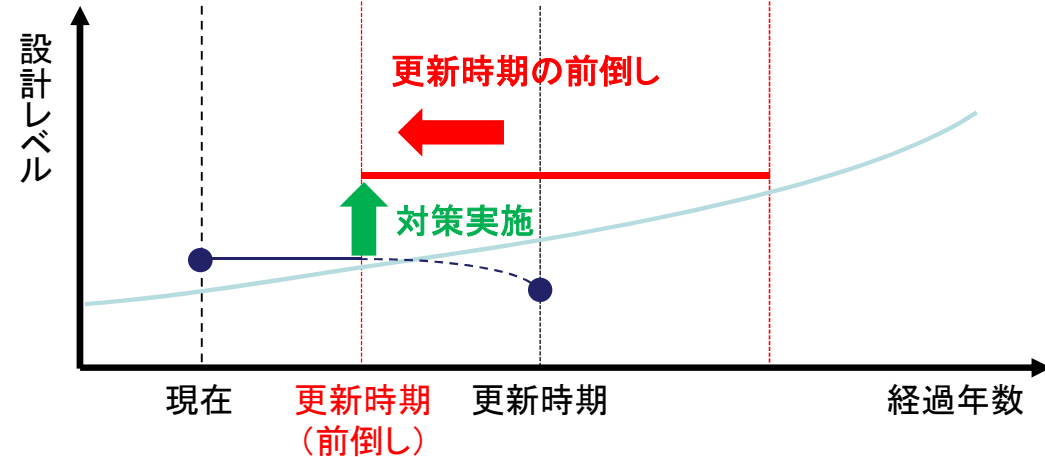
更新時まで必要な性能を満たすケース

- 更新時に将来の気候変動影響の見込みを加味した必要な外力レベルを設定し、それに基づいて対策を実施



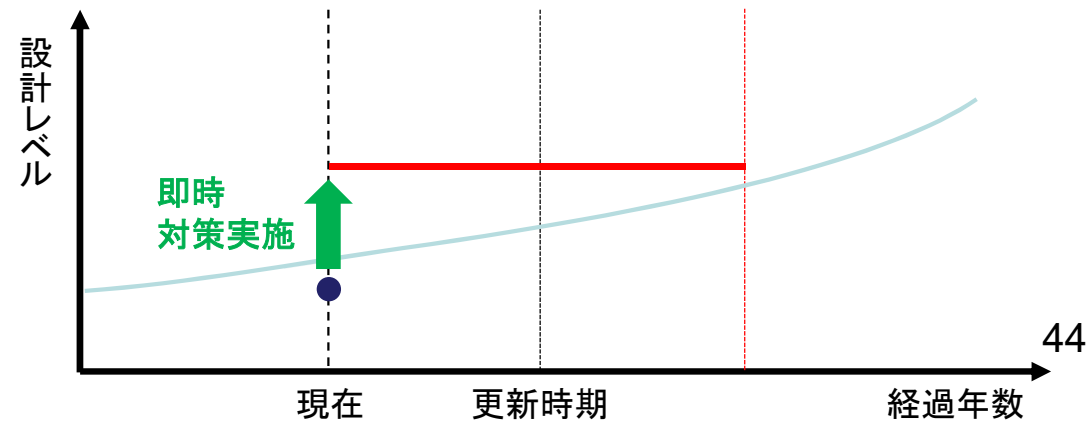
現在は必要な性能を満たしているが、更新時期までに不足するケース

- 更新時期を前倒して、その時点における気候変動影響の見込みを加味した必要な外力レベルを設定し、それに基づいて対策を実施



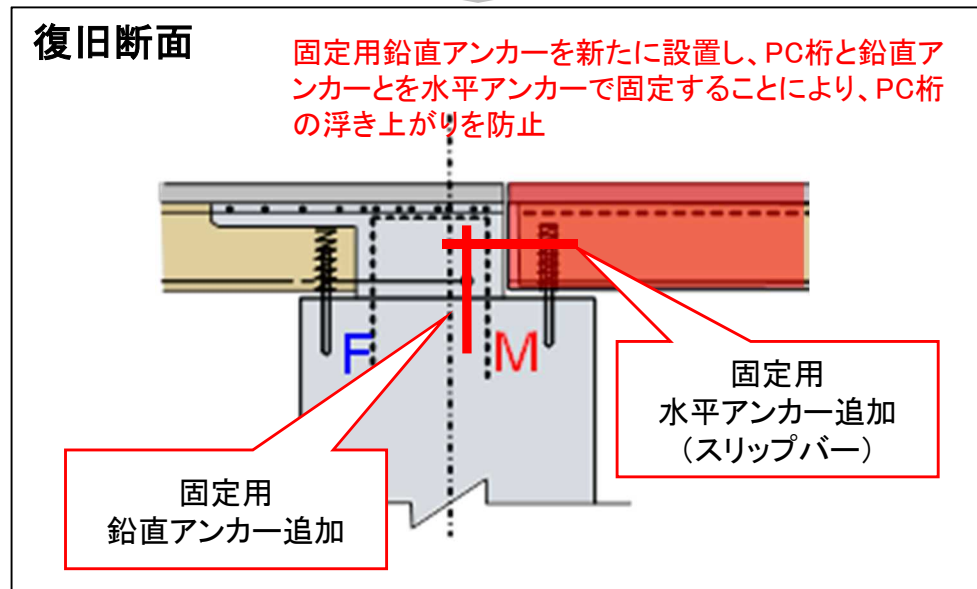
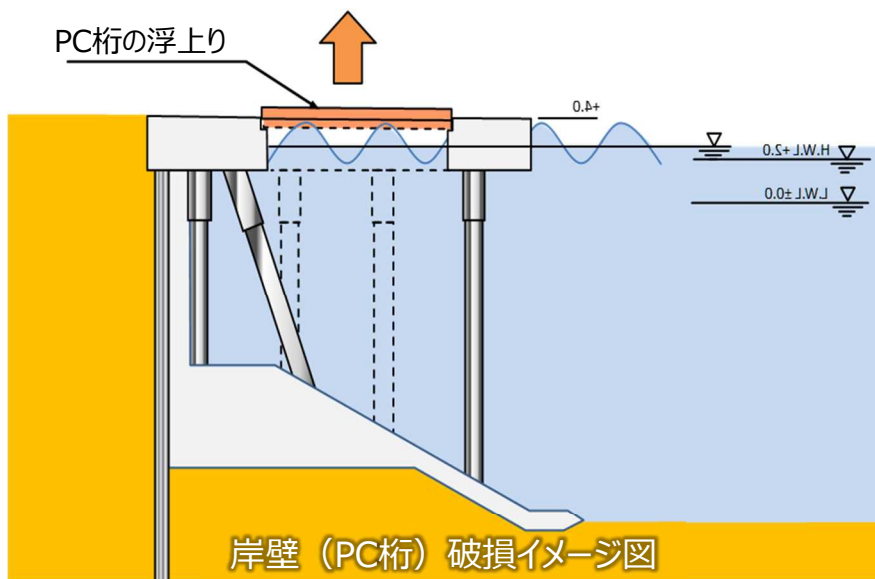
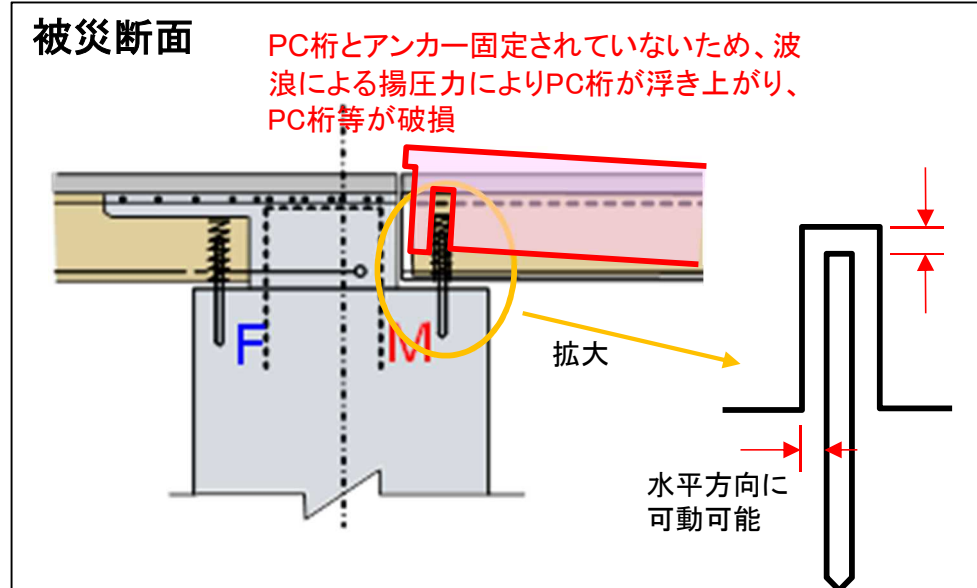
現在、必要な性能を満たしていないケース

- 速やかに気候変動影響の加味した必要な外力レベルを設定し、それに基づいて対策を実施



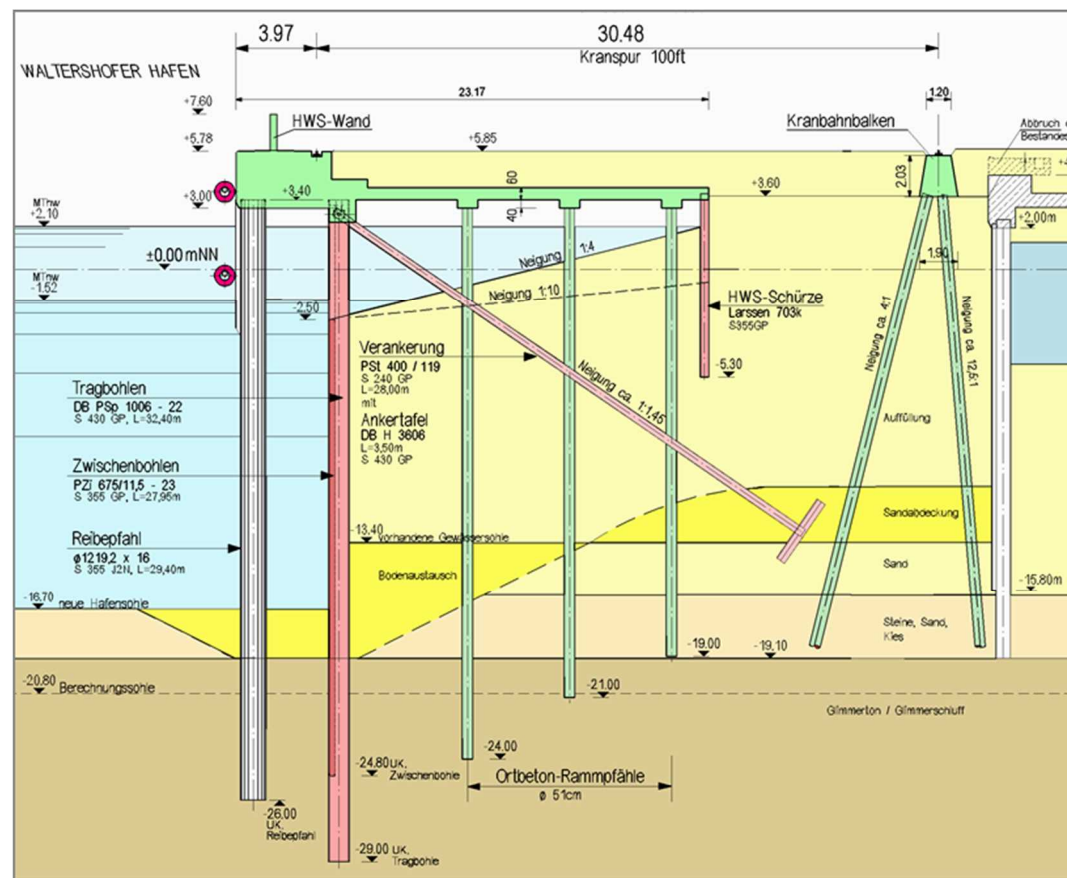
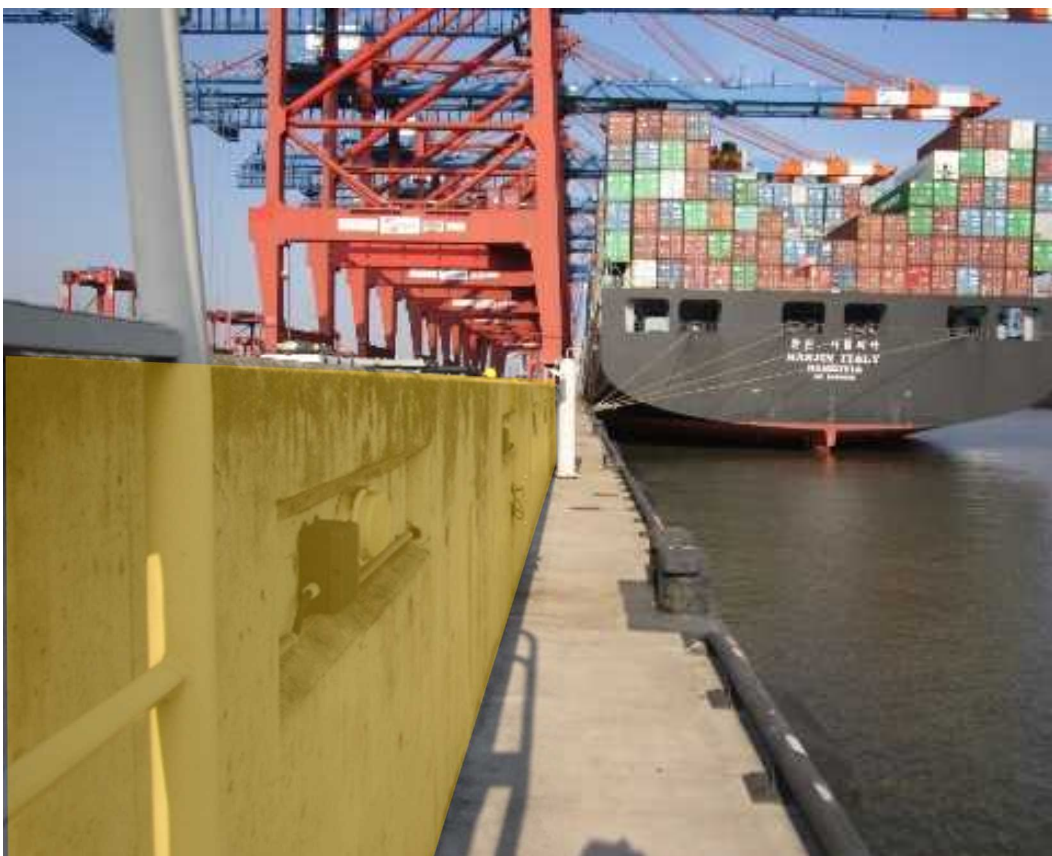
被災外力に対応した復旧(川崎港(東扇島地区)コンテナターミナルの例)

- 令和元年東日本台風では、川崎港東扇島地区において、揚圧力で栈橋の床版が破損する被害が発生。
- 今後も同様の被害が発生することが懸念されるため、再度災害防止の観点から改良復旧を行っているところ。



海外港湾における高潮対策(ハンブルク港コンテナターミナルの例)

○ハンブルク港では、高潮による被害を防止するため、コンテナターミナルの岸壁法線に防潮壁を設置。



気候変動が港湾施設に与える影響(想定)

施設の耐力(安定性)

防波堤	重力式	<ul style="list-style-type: none"> ・ 堤体に作用する波力・浮力の増大により安定性が低下する。 ・ 波高増大による消波ブロック、被覆ブロックの重量が不足する。 	
	岸壁	重力式	<ul style="list-style-type: none"> ・ 堤体に作用する浮力の増大により安定性が低下する。 ・ 残留水圧の増大により安定性が低下する。 ・ 地震時動水圧の増大により安定性が低下する。 ・ 水位上昇により堤体に作用する土圧が低下する。
		矢板式	<ul style="list-style-type: none"> ・ 残留水圧の増大により安定性が低下する。 ・ 地震時動水圧の増大により安定性が低下する。 ・ 水位上昇により堤体に作用する土圧が低下する。
		栈橋式	<ul style="list-style-type: none"> ・ 上部工に作用する揚圧力の増大により安定性が低下する。
護岸・堤防	重力式	<ul style="list-style-type: none"> ・ 岸壁と同様 ・ 波高増大による消波ブロック、被覆ブロックの重量が不足する。 ・ マウンド透過波による背後地盤の吸出しリスクの増大 ・ 波力増大によるパラペットの倒壊 	
	矢板式		

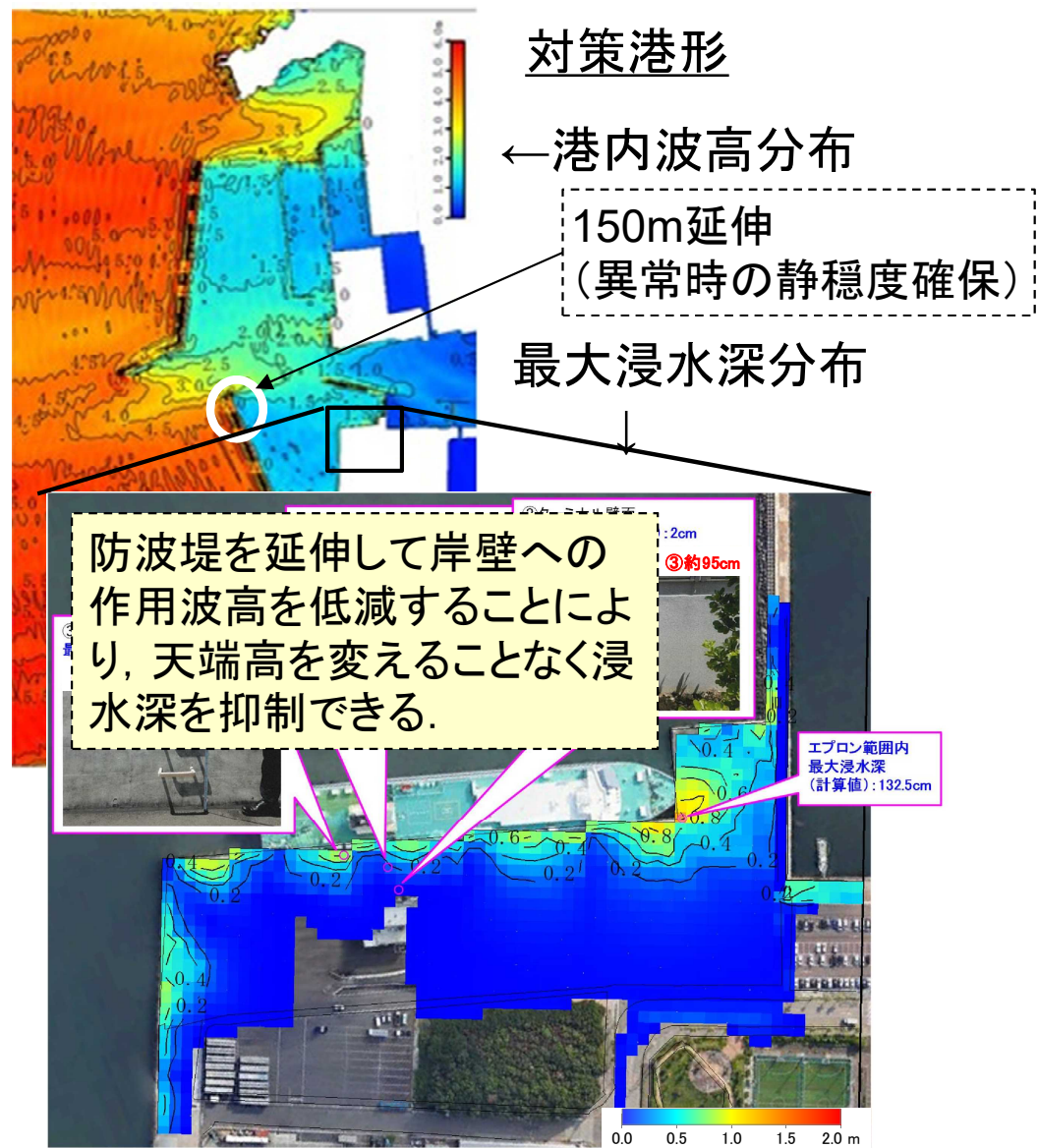
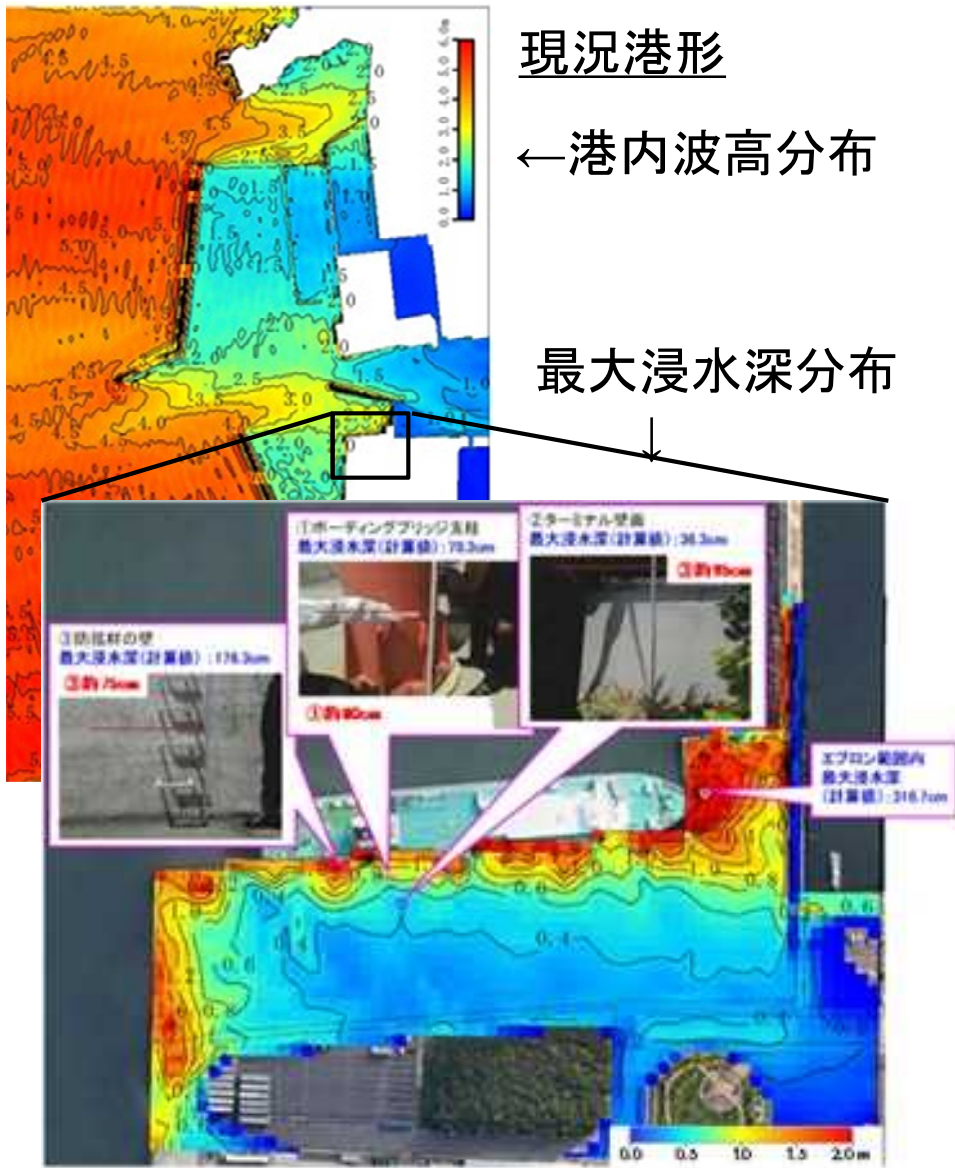
天端高(越波・浸水)

防波堤	重力式	<ul style="list-style-type: none"> ・ 天端高の不足により防波堤背後への越波量が増加する。 ・ 消波構造の反射率が増大する。
岸壁	重力式	<ul style="list-style-type: none"> ・ 天端高不足によりエプロンや荷さばき施設への越波量が増加する。 ・ 雨水・排水の水面勾配の低下により流下能力が低下する。
	矢板式	
	栈橋式	
護岸・堤防	重力式	<ul style="list-style-type: none"> ・ 天端高不足により荷さばき施設や工場等の背後施設への越波量が増加する。 ・ マウンドを透過した水塊による浸水 ・ パラペット倒壊に伴う浸水の増大
	矢板式	

利用性

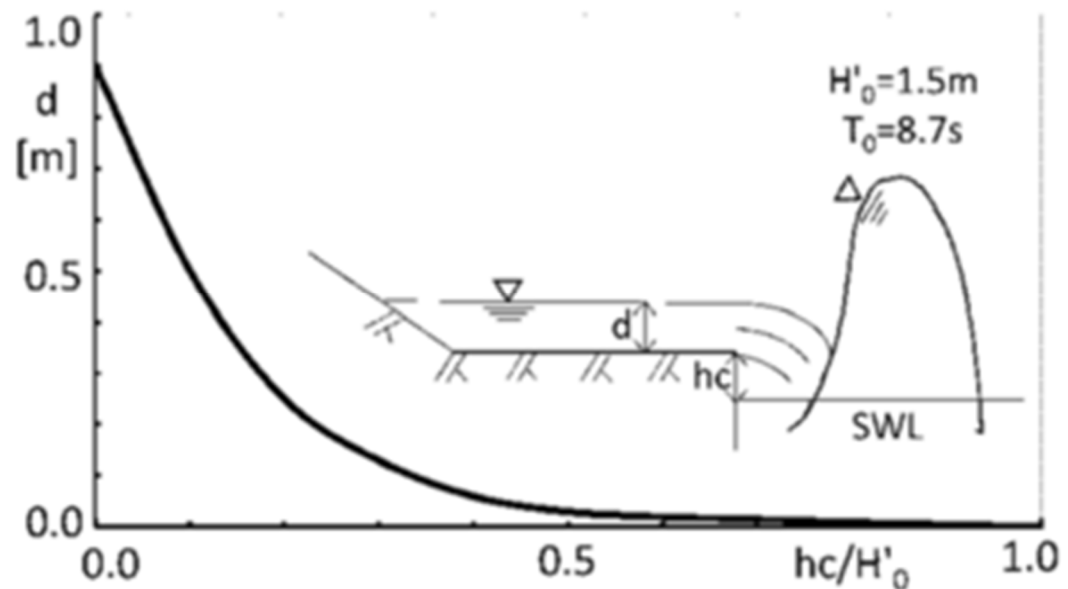
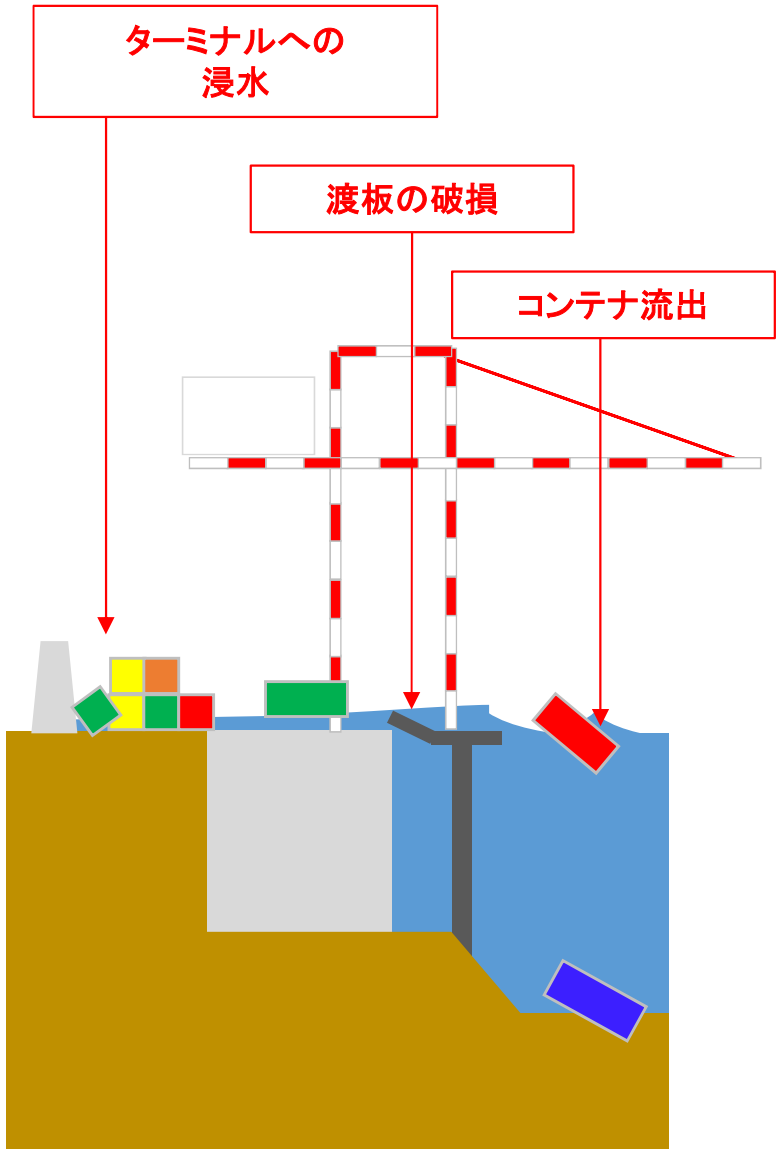
岸壁	重力式	<ul style="list-style-type: none"> ・ 海面が上昇することにより、船体と岸壁天端高の高さ関係が変化する。
	矢板式	
	栈橋式	

岸壁上の平面越波浸水計算(防波堤による岸壁浸水の低減効果の計算事例)



岸壁の越波流量の算定手法の確立

○岸壁の浸水許容量の概念が確立されていないため、許容越波量を定めるために必要な検証を行うとともに、岸壁上の面的な越波浸水算定手法についても検討が必要。



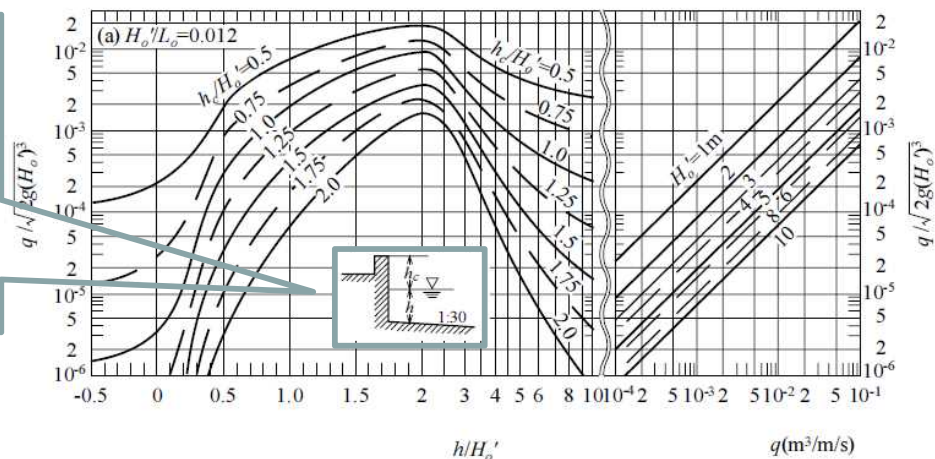
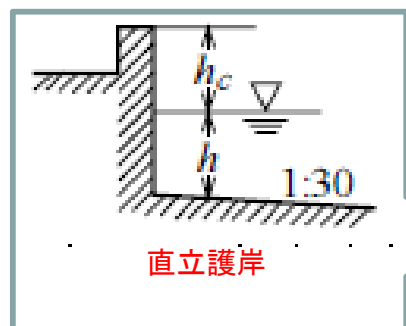
岸壁の相対天端高に対するコンテナヤード内の浸水深

一般的な海岸堤防とは異なり、越波水塊の一部は引き波時に海へと戻るため、想定される護岸越波量と関連づけて浸水域や浸水深を推定することは容易ではない

簡易にリスク評価を行うための手法の検討

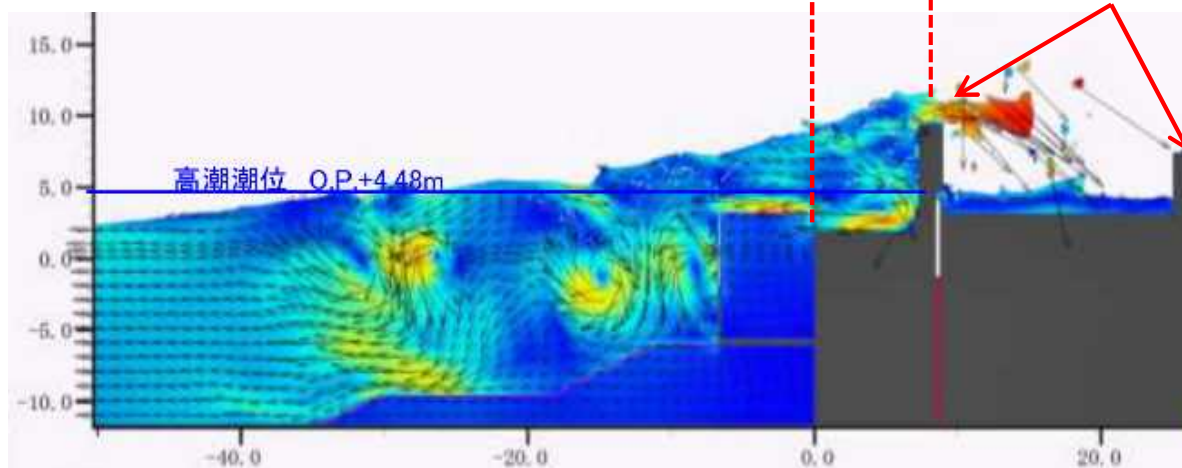
- 複雑な断面を持つ構造物(2重パラペット護岸等)については、簡易に越波量を計算する手法がない。
- 数値シミュレーションは複雑な断面にも適用できるが、時間とコストがかかるとともに、特に碎波を伴う場合には精度が低下し、波力や越波を過小評価する傾向にある。

【現行】算定図を用いた手法



直立護岸等の単純な断面については、波高、護岸前面水深等から算定図を用いて越波流量を算定可能。

【現行】シミュレーション



数値シミュレーションは複雑な断面にも適用できるが、時間とコストがかかる。

許容越波流量の設定について

○許容越波流量については、護岸の構造、護岸背後の土地利用状況、排水施設の能力等によってその値が異なるため、状況に応じて適切に設定することが必要。

表-4.4.5 被災限界の越波流量

種別	被覆工	越波流量 (m ³ /s/m)
護岸	背後舗装済み	0.2
	背後舗装なし	0.05
堤防	コンクリート三面巻き	0.05
	天端舗装・裏法未施工	0.02
	天端舗装なし	0.005以下

表-4.4.7 背後土地利用状況からみた許容越波流量 (2)

利用者	状況など	越波流量 (m ³ /s/m)
歩行者	・越波に注意している者	10 ⁻⁴
	・無警戒の者	3 × 10 ⁻⁵
自動車	・停車あるいは低速走行	0.01~0.05
	・平常走行、車両被害	1.1 × 10 ⁻⁵
建築物	・構造的被害	3 × 10 ⁻⁵
	・建具類への被害	10 ⁻⁶ ~3 × 10 ⁻⁵
	・無被害	10 ⁻⁶

表-4.4.6 背後土地利用状況からみた許容越波流量 (1)

利用者	堤防からの距離	越波流量 (m ³ /s/m)
歩行者	直背後 (50%安全度)	2 × 10 ⁻⁴
	〃 (90% 〃)	3 × 10 ⁻⁵
自動車	直背後 (50%安全度)	2 × 10 ⁻⁵
	〃 (90% 〃)	1 × 10 ⁻⁶
家屋	直背後 (50%安全度)	7 × 10 ⁻⁵
	〃 (90% 〃)	1 × 10 ⁻⁶

表-4.4.8 背後地の重要度からみた許容越波流量 (m³/s/m)

背後に人家、公共施設等が密集しており、特に越波・しぶき等の侵入により重大な被害が予想される地区	0.01程度
その他の重要な地区	0.02程度
その他の地区	0.02~0.06

コンテナの浮遊水深

○コンテナターミナルに許容越波流量を設定する場合は、空コンテナが浮遊する浸水深から設定する方法が考えられる。

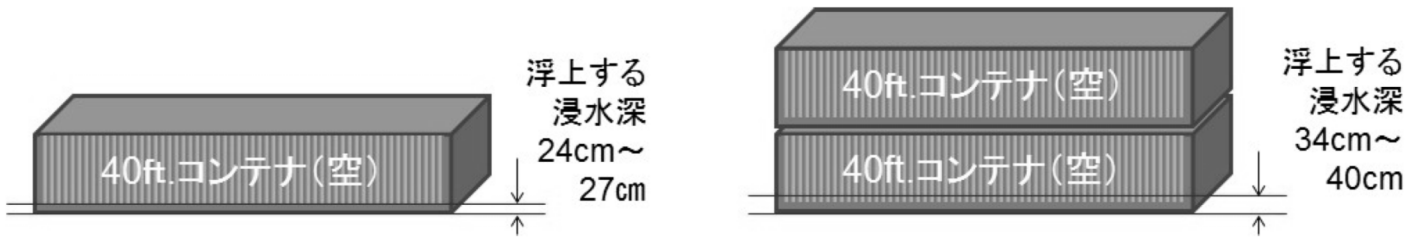


図 1.5.1 40ft.空コンテナが浮遊する浸水深

表 1.5.1 空コンテナが浮上する浸水深

コンテナ	外寸			外容積 (m ³)	自重範囲 (t)	浮上する浸水深 h (cm) ※1	
	長さ L(m)	幅 W(m)	高さ H(m)			空	実入り※2
12ft.	3.715	2.450	2.500	22.8	1.4-1.7	30 - 33	84
20ft.	6.058	2.438	2.591	38.3	1.7-2.4	26 - 31	173
40ft.	12.192	2.438	2.591	77.0	2.9-3.8	24 - 27	115
20ft.リーファー	6.058	2.438	2.591	38.3	2.5-3.5	31 - 38	173
40ft.リーファー	12.192	2.438	2.591	77.0	4.3-5.6	29 - 33	115

※1 浸水深 h=コンテナ重量 / (底面積×海水密度) +15cm (コンテナ底に 15cm の通水性のある部分を考慮)

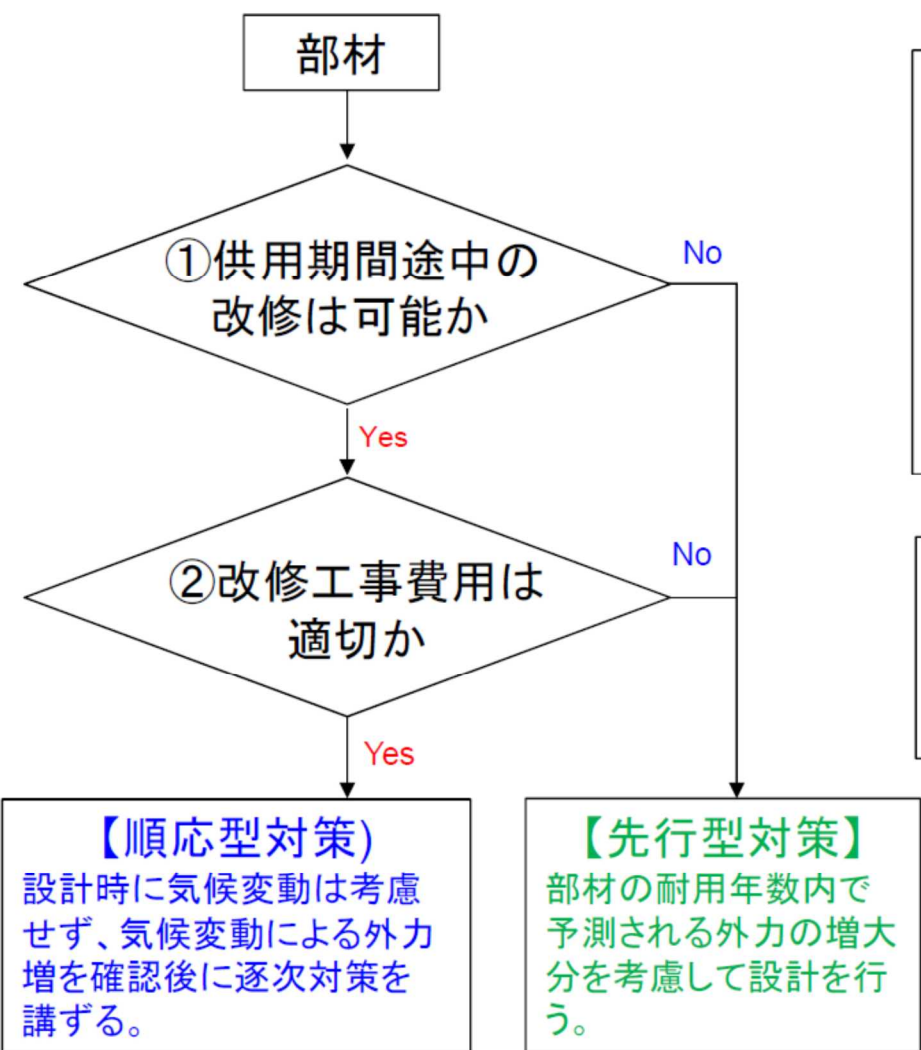
※2 実入りコンテナは、最大積載重量 24.0t (20ft.), 30.5t (40ft.), 6.5t (12ft.)で計算

※国土技術政策総合研究所 沿岸海洋研究部沿岸防災研究室：「三河港における平成 21 年台風第 18 号高潮によるコンテナ漂流被害調査報告」より港湾局作成

不確実性が伴う気候変動への対応(河川水門の例)

気候変動の影響を考慮した設計(考え方)

- 気候変動予測を基に設定した外力には、様々な不確実性が潜在するため、手戻りなく設計すること、また過剰な投資にならないように設計することの両面を考えることが重要である。
- そのため、各部材の設計に際しては、あらかじめ対策を講じておく「先行型対策」と将来における気候変化を確認後に対策を講じる「順応型対策」のどちらか適切な対策方法を選択する。



- ①の主な評価の視点
- 要求性能の確保
 - ・改修中においても、高潮・津波への対応が可能であるか
 - ・航行船舶への影響はないか
 - 実現性
 - ・技術上の観点から実現可能か
 - ・地元や関係者との調整の見通しはどうか

- ②の主な評価の視点
- ・初期費用は妥当か
 - ・改築・供用期間の総費用は妥当であるか

気候変動適応への基本的な考え方

◆「今後の港湾におけるハード・ソフト一体となった総合的な防災・減災対策のあり方」(令和2年8月交通政策審議会答申)では、「施設の更新時期までに予測される平均海面水位の上昇量を加えて設計等を行うことを基本」とされている。

「今後の港湾におけるハード・ソフト一体となった総合的な防災・減災対策のあり方」(令和2年8月交通政策審議会答申)【抜粋】

Ⅲ. 港湾における防災・減災対策の施策方針

2. 気候変動に起因する外力強大化への対応

(2) 施設設計への反映

港湾において、気候変動に起因して強大化する外力として、「平均海面水位の上昇量」、「最大風速の増加」、「潮位偏差の極値の増加」、「波浪の極値の増加」等の影響が想定される。今後、建設又は改良する港湾施設については、将来にわたり施設を供用するため、将来の外力強大化を考慮した施設設計が必要である。

平均海面水位は徐々に上昇し、その影響は継続して作用するものであり、設計潮位や津波水位など設計条件に影響するとともに、橋梁のクリアランスや岸壁高さなど港湾の利用条件にも影響する。平均海面水位の上昇に関しては、現時点において、世界や日本周辺海域の平均海面水位の変化について一定程度の定量化が図られている。このため、今後、建設又は改良する施設については、建設又は改良時点における最新の朔望平均満潮位に、当該施設の次の更新時期までに予測される平均海面水位の上昇量を加え、設計等を行うことを基本として、必要な技術基準等の整備を検討する必要がある。

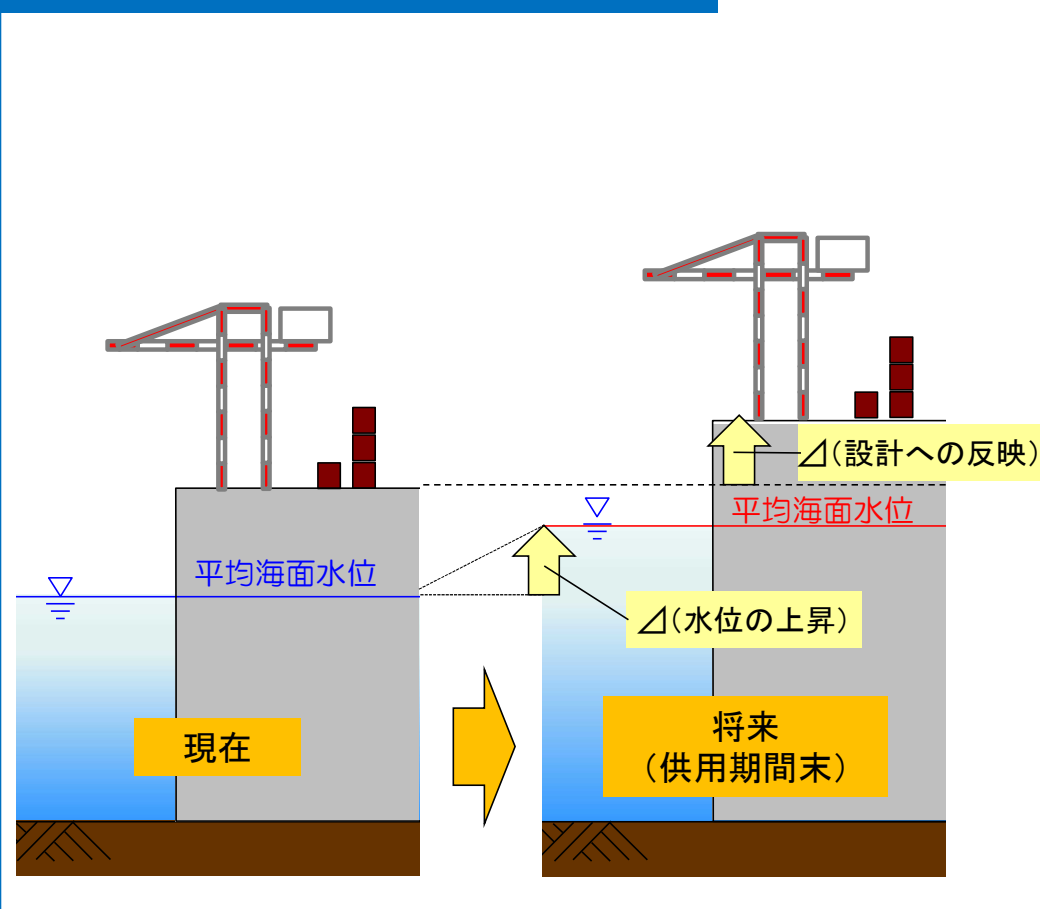
一方で、「最大風速の増加」、「潮位偏差の極値の増加」、「波浪の極値の増加」の将来の予測は、現時点では、平均海面水位の上昇量に比べて不確実性が高いことから、設計に反映するには、現時点では、技術的な知見の更なる蓄積が必要な状況にある。

このため、これらについては、今後、技術的な知見が一定程度得られた時点で、設計に反映することを検討するものとする。

ただし、それまでの間に整備する施設についても、多重防護等による追加的対応が可能となるよう配慮する必要がある。

なお、気候変動への対応については、海岸4省庁の検討状況も参考とする。

供用中の水位上昇を加味した設計イメージ

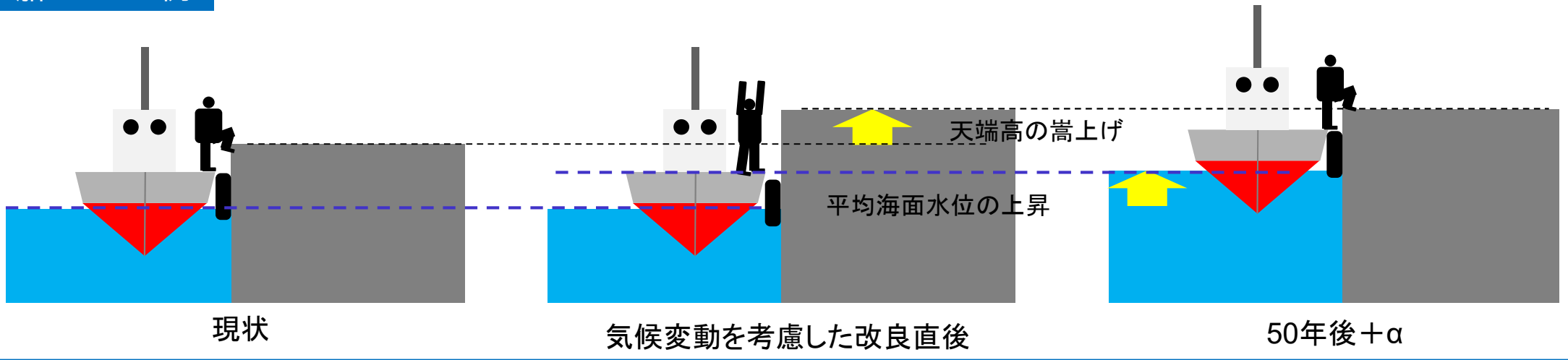


対策を講じる上での実務面の課題

【課題1】

◆ 供用期間末の外力条件を設計した場合、利用に支障を来す可能性のある施設が存在。

船だまりの例



岸壁の標準的な天端高

	潮位差 3.0m以上	潮位差 3.0m未満
大型岸壁 (水深4.5m以上)	+0.5~1.5m	+1.0~2.0m
小型岸壁 (水深4.5m未満)	+0.3~1.0m	+0.5~1.5m

※表中の値は、朔望平均満潮面を基準として表している。

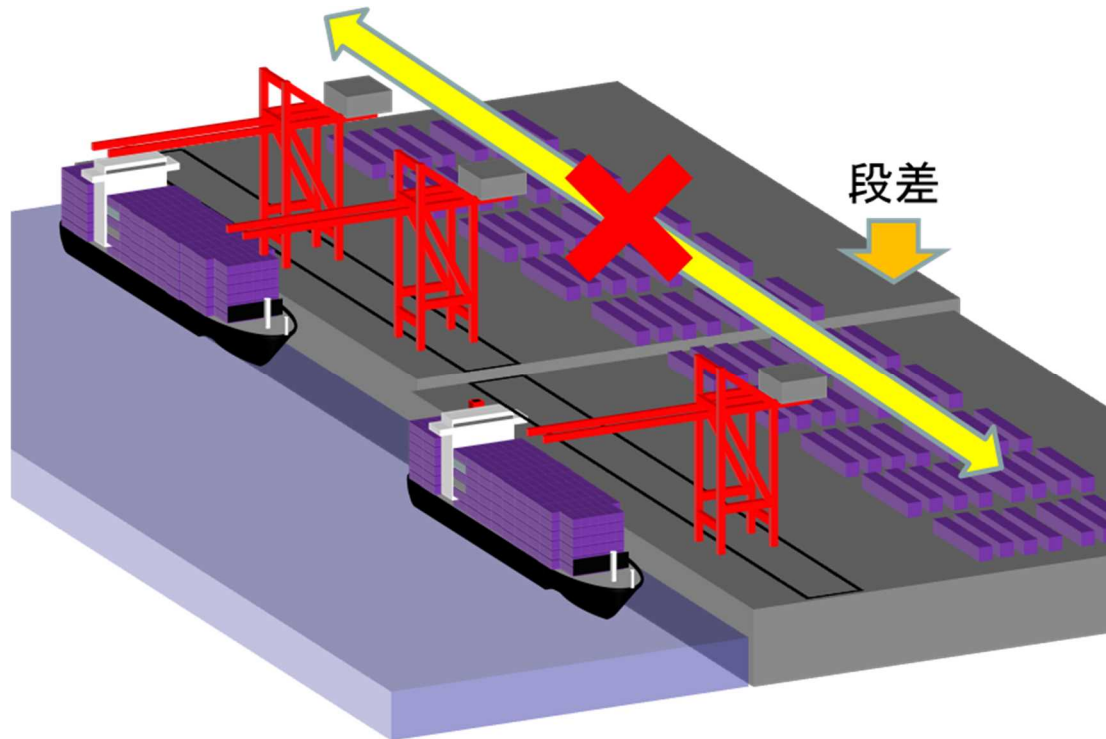
対策を講じる上での実務面の課題

【課題2】

- ◆ 個別施設毎に供用期間末の外力条件で設計した場合、施設の整備時期で高さや断面に差違が生じる。
- ◆ 特に一体的に機能する施設で隣接箇所で高さや断面が異なる場合、施設の利便性や安全性の低下が懸念。

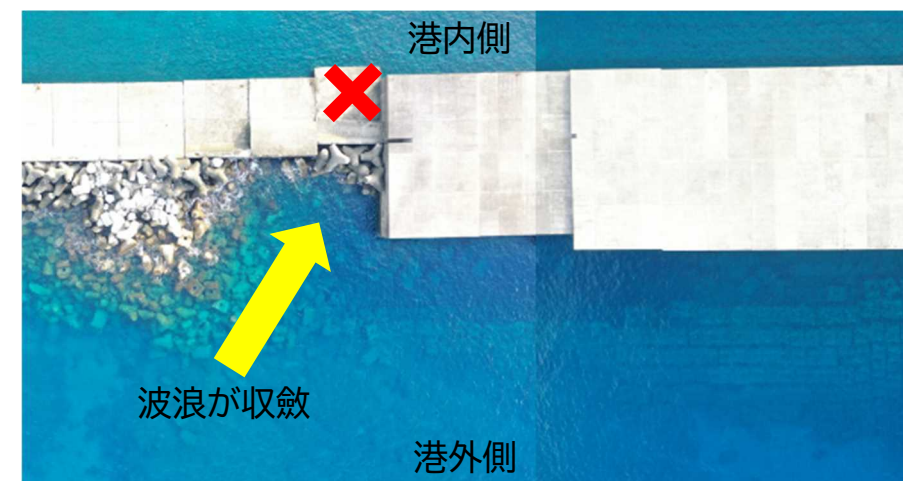
コンテナターミナルの例

岸壁高さやガントリークレーンのレールに段差が生じ、連続バスとしての一体運用が困難に。



断面変化点で被災した防波堤の例

断面変化点に波力が集中し、施設の弱点になる場合がある。

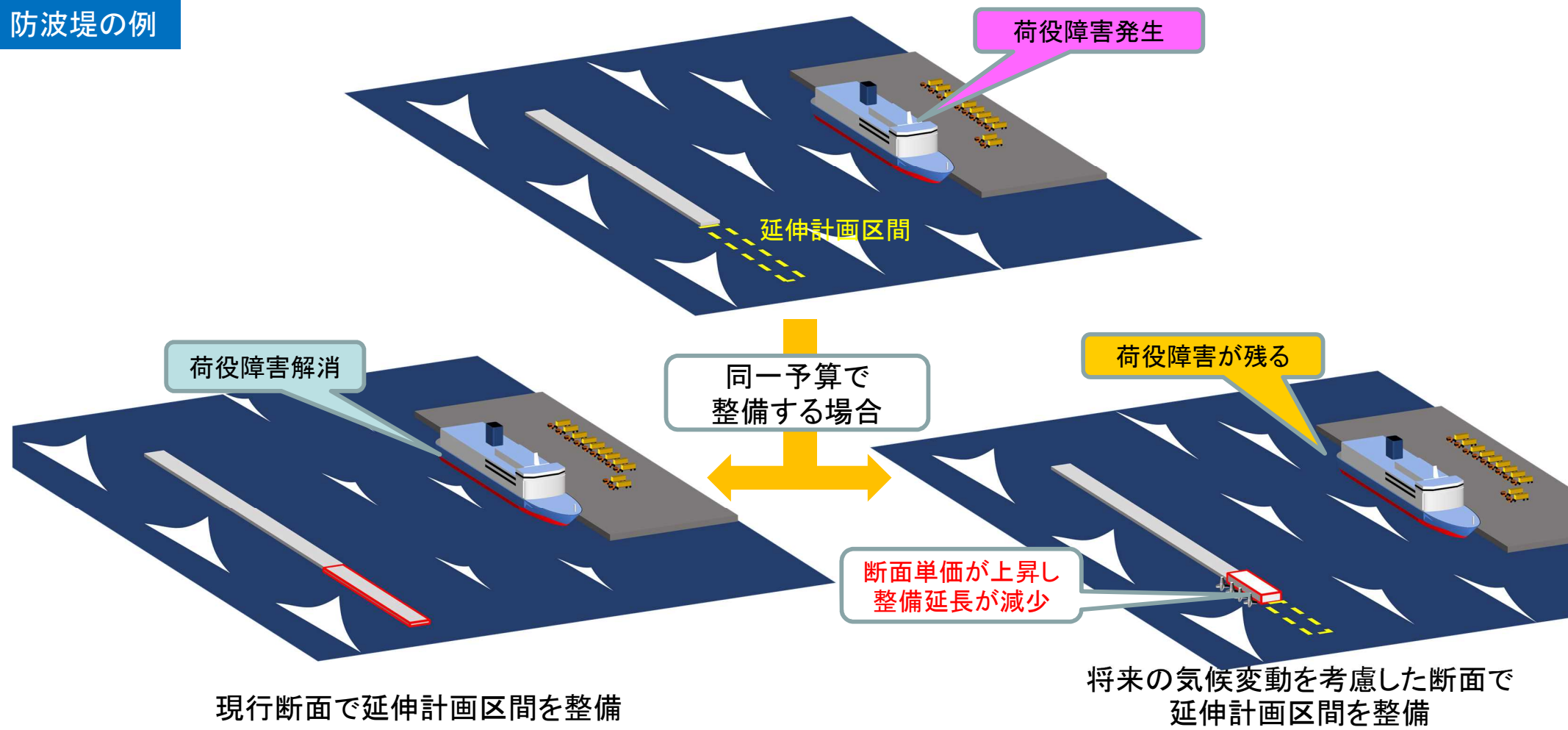


対策を講じる上での実務面の課題

【課題3】

◆ 予算が限られる中で、既に事業化した施設について気候変動を考慮した外力条件に変更した場合、断面単価が上昇して、当初予定していた効果の発現時期が遅れ、利用者等に大きな影響を及ぼす可能性。

防波堤の例



対策についての論点①

【論点1】

- ◆ 段階的な整備を前提とした技術基準体系が必要ではないか？

現行の技術基準の適用の考え方

- ◆ 原則、施行日以降に新規に設計に着手する施設に対して一律に適用。
※供用期間末の外力条件で設計することを明示した場合、各施設に対して一律に適用。



気候変動を考慮した技術基準体系の方向性（案）

- ◆ 供用時期や利用に対する要請を勘案して、当初から供用期間末の外力条件を適用するか、モニタリングを踏まえた事後的対策を前提として現行の外力条件を適用するか選択することができないか。
- ◆ 事後的対策を前提とする場合は、維持管理計画に「具体的な気候変動適応策を着手すべき条件」を明記することで、実効性を担保できないか。

<考慮すべき要素>

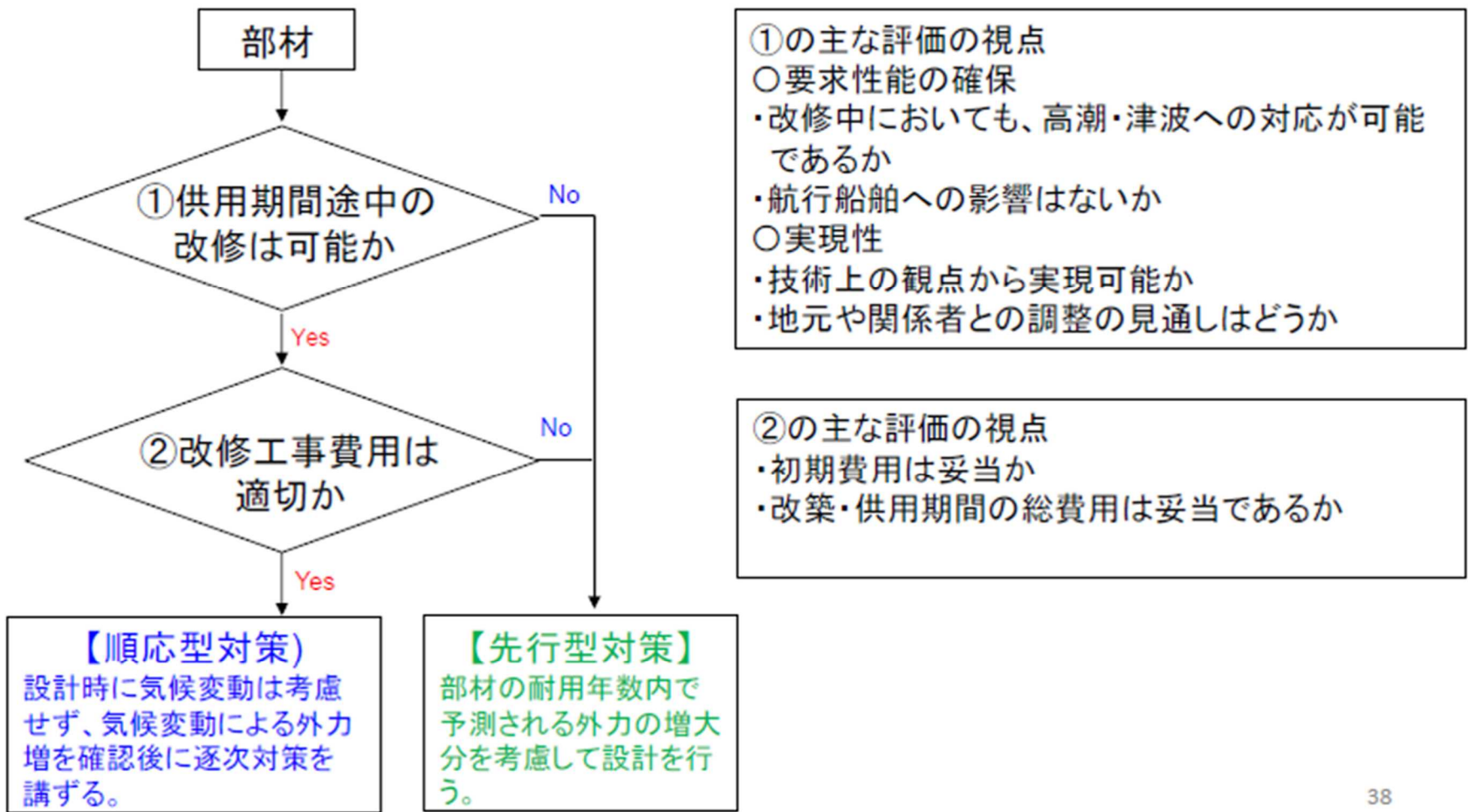
- 手戻りの大きさ、トータルでの経済性
- 一体に利用する既存施設との高さ・断面との整合性
- 利用者の要請
- 追加的対策の容易性

防潮水門の気候変動への対応例(1/2)

5. 三大水門更新事業について 「できるだけ手戻りの無い設計」



- 気候変動予測を基に設定した外力には、様々な不確実性が潜在するため、手戻りなく設計すること、また過剰な投資にならないように設計することの両面を考慮することが重要である。
- そのため、各部材の設計に際しては、あらかじめ対策を講じておく「先行型対策」と将来における気候変化を確認後に対策を講じる「順応型対策」のどちらか適切な対策方法を選択する。



防潮水門の気候変動への対応例(2/2)

5. 三大水門更新事業について 「できるだけ手戻りの無い設計」

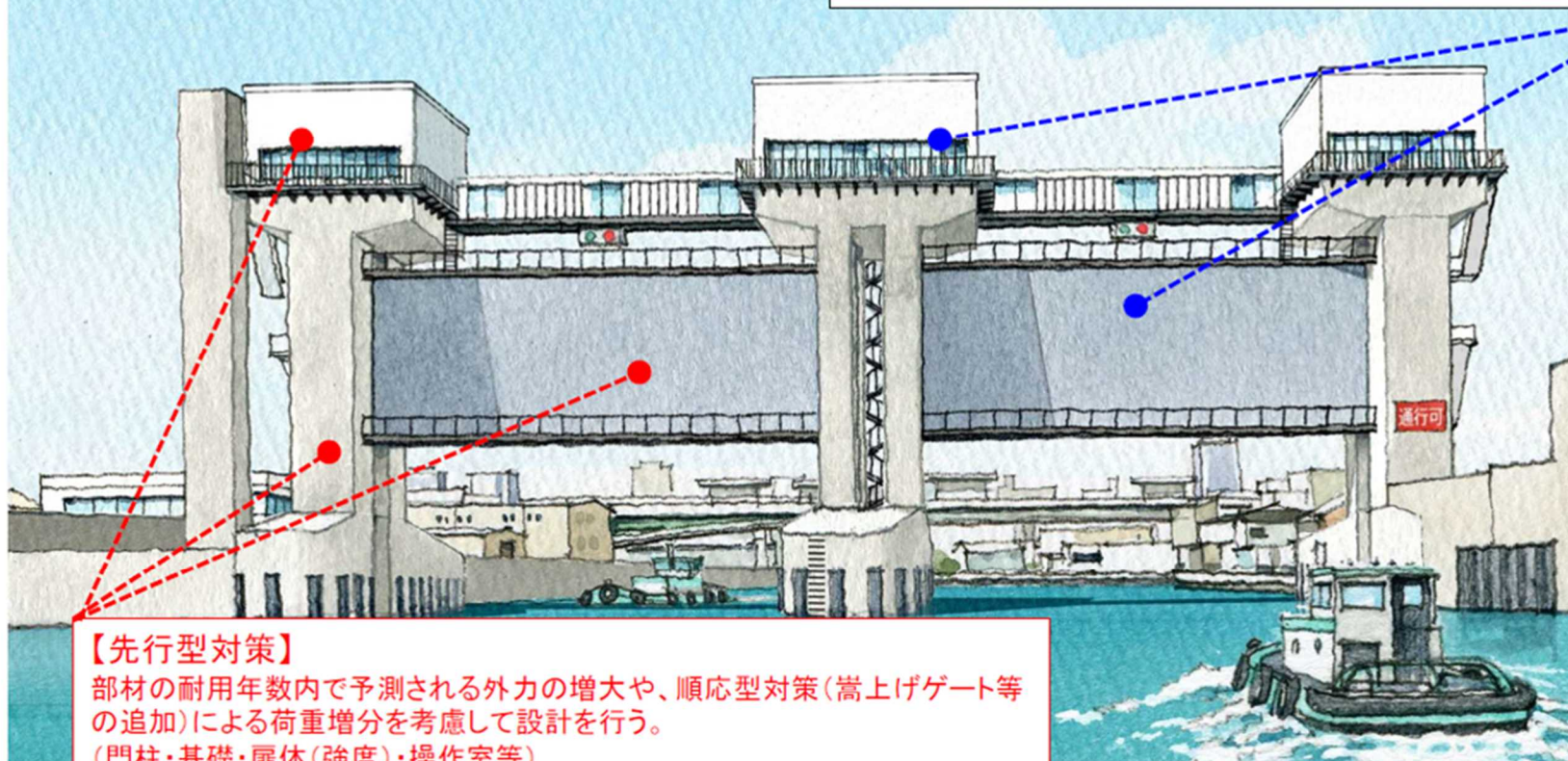


- 新水門は、津波対策も兼ねるため津波に対する安全性や停電時などの緊急時にも速やかにゲートを閉鎖する機能が求められることから、引上げ式構造ローラーゲートを採用する。
- 気候変動予測を基に設定した外力には、不確実性が潜在するため、各部材の設計に際しては、あらかじめ対策を講じておく「**先行型対策**」と将来における気候変化を確認後に対策を講じる「**順応型対策**」のどちらか適切な対策方法を選択する。

■新木津川水門の完成イメージ（下流側）

【順応型対策】

気候変動による外力増により扉体(高さ)の不足を確認後、嵩上げゲート、嵩上げゲート用の巻き上げ機等を増設する。
(扉体(高さ)・巻き上げ機等)

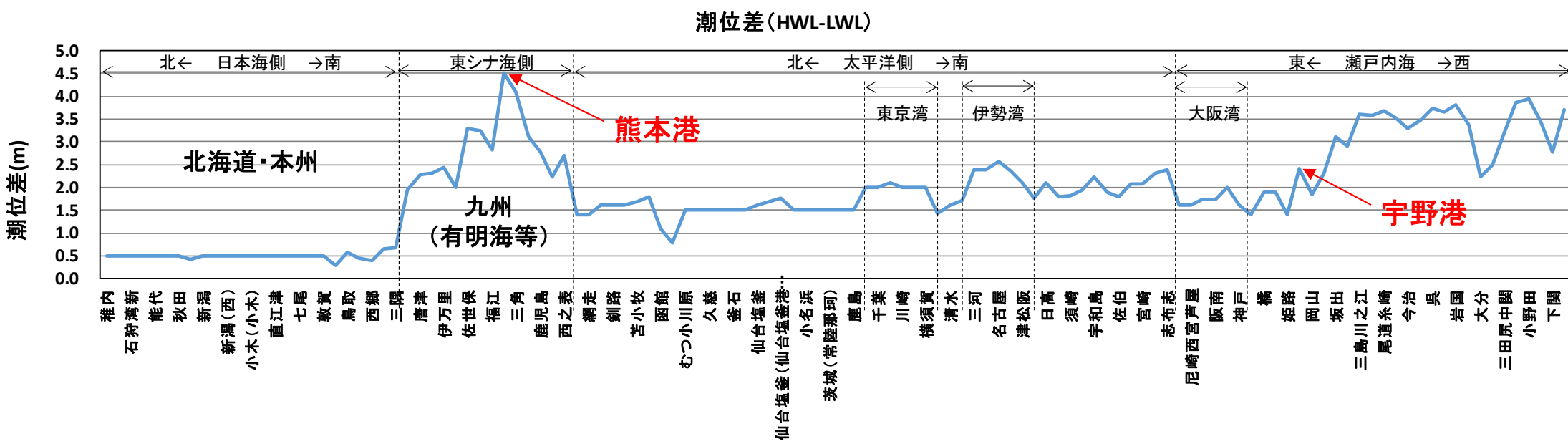


【先行型対策】

部材の耐用年数内で予測される外力の増大や、順応型対策(嵩上げゲート等の追加)による荷重増分を考慮して設計を行う。
(門柱・基礎・扉体(強度)・操作室等)

全国港湾における潮位差(H.W.L - L.W.L)

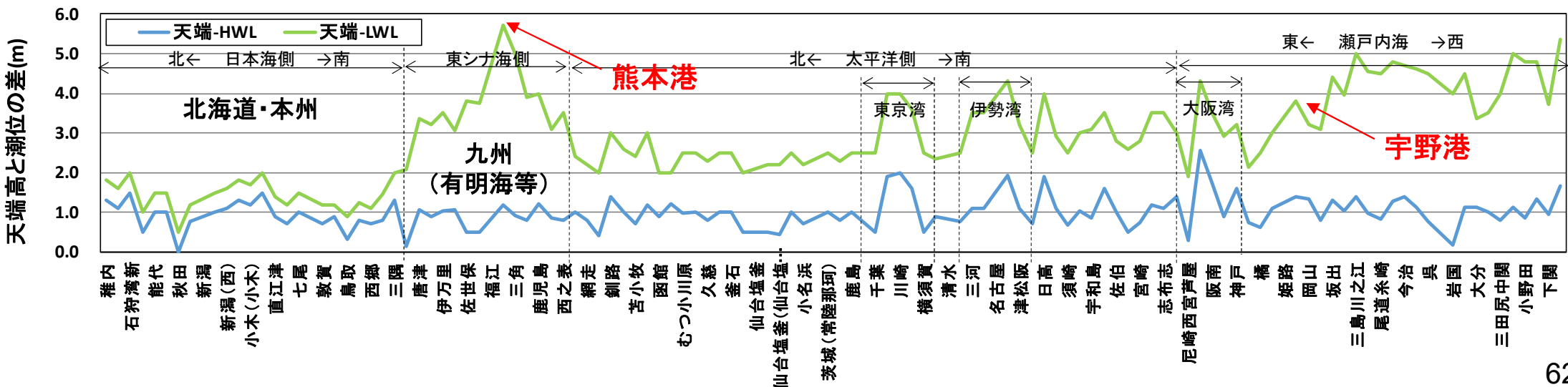
- 北海道・本州の日本海側では、潮位差は概ね0.5mで一様である。
- 東シナ海側の九州の港湾では、複雑に入り組んだ内海に位置する港湾が多く、潮位差が大きい。熊本港において、最大4.5mの潮位差が生じている。
- 北海道・本州の太平洋側では、潮位差は概ね1.5m前後であり、東京湾・伊勢湾でやや増大する。
- 瀬戸内海側では、本州・四国間の海峡幅が狭くなる宇野港以西で潮位差が増大し、3.5m程度の潮位差となる。



全国港湾における天端高と潮位の差(水深4.5m未満の施設)

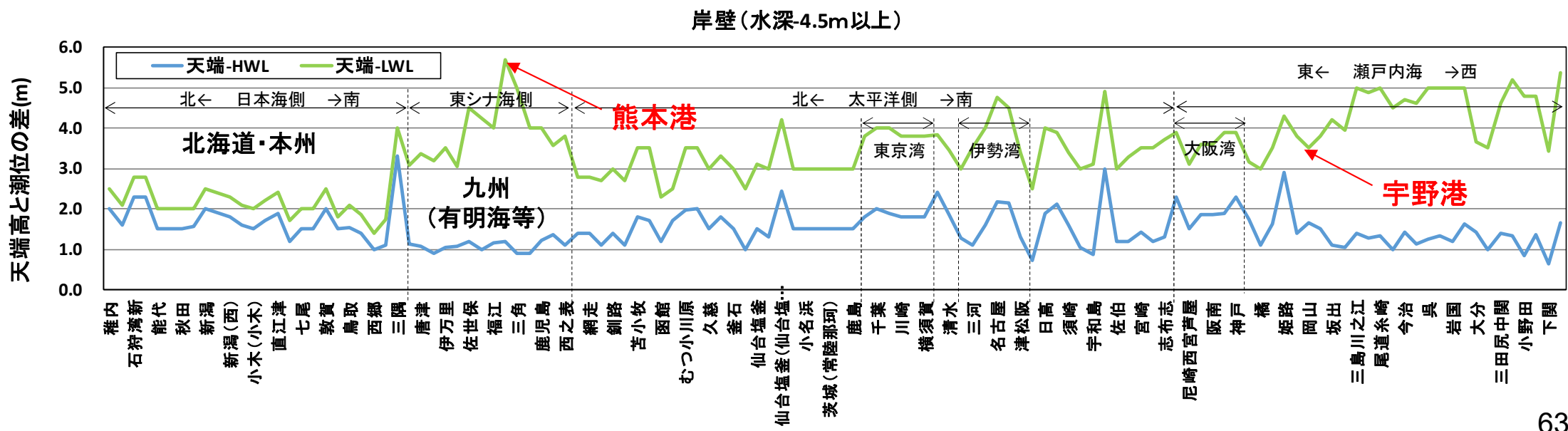
- 水深4.5m未満の比較的小規模な岸壁について、各港湾の代表的天端高(最も施設数が多い天端高)を抽出し、潮位(H.W.L及びL.W.L)との関係を整理した。
- 天端高とH.W.Lとの差は、全国で概ね1m前後であるが、三大湾では2m程度の差となる。
- 北海道・本州の日本海側では、天端高とL.W.Lとの差は1~2m程度となる。
- 東シナ海側の九州の港湾では、天端高とL.W.Lとの差が大きく、2~6m弱程度となる。熊本港において、最大5.7mの差が生じている。
- 北海道・本州の太平洋側では、天端高とL.W.Lとの差は概ね2~4m程度であり、東京湾・伊勢湾で4m程度まで増大する。
- 瀬戸内海側では、本州・四国間の海峡幅が狭くなる宇野港以西で天端高とL.W.Lとの差が増大し、4~5m程度の値となる。

岸壁(水深4.5m未満)



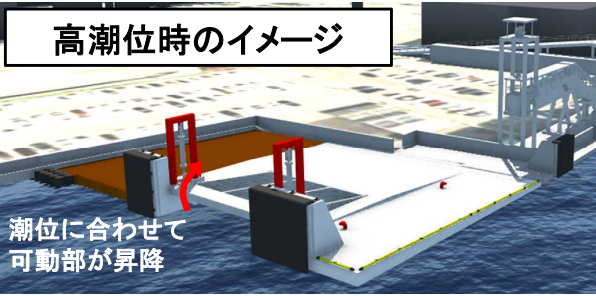
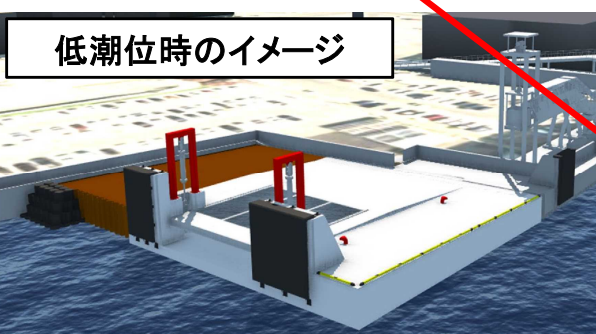
全国港湾における天端高と潮位の差(水深4.5m以上の施設)

- 水深4.5m以上の比較的大規模な岸壁について、各港湾の代表的天端高(最も施設数が多い天端高)を抽出し、潮位(H.W.L及びL.W.L)との関係を整理した。
- 天端高とH.W.Lとの差は、水深4.5m未満の施設と比較して、全体的に0.5~1.0m程度増大する。
- 北海道・本州の日本海側では、天端高とL.W.Lとの差は2~3m程度となる。
- 東シナ海側の九州の港湾では、天端高とL.W.Lとの差が大きく、3~6m弱程度となる。熊本港において、最大5.7mの差が生じている。
- 北海道・本州の太平洋側では、天端高とL.W.Lとの差は概ね3~4m程度であり、東京湾・伊勢湾で4~5m程度まで増大する。
- 瀬戸内海側では、本州・四国間の海峡幅が狭くなる宇野港以西で天端高とL.W.Lとの差が増大し、4~5m程度の値となる。



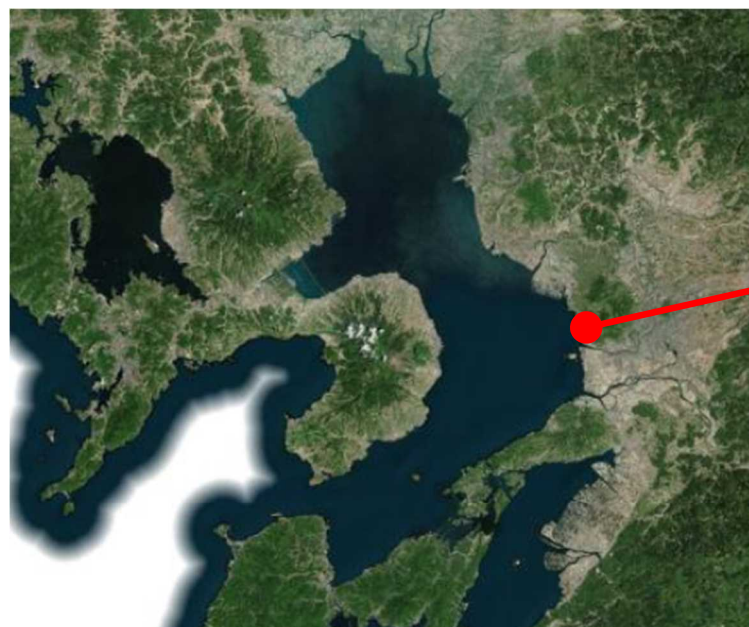
天端高と潮位の差が大きい港における利用上の工夫～瀬戸内海における事例～

- 瀬戸内海の港湾や漁港では、小型船舶の係留に浮棧橋を用いる例が多い。
- フェリー岸壁では、フェリー側に加えて係留施設側にも可動橋を設置して潮位差に対応している場合もある。



天端高と潮位の差が大きい港における利用上の工夫～九州における事例～

○ 古くに整備された岸壁は、潮位差に対応するため、階段形状にしている事例が多い。



©NTT InfraNet, Maxar Products. ©Maxar Technologies.



事前対策と事後的対策の比較(防波堤を例とした試算)

試算条件	外力条件	施設断面 (高さ×幅)
	2025年時点の外力	19m×16m
	2025年時点の25年後想定外力	20m×17m
	2025年時点の50年後想定外力	21m×18m
	2050年時点の25年後想定外力	21m×18m 【22m×19m】

試算にあたっての前提条件

- ・水深-18m、マウンド高さ-15m、重力式混成堤(ケーソン)
- ・ケーソンはFD製作
- ・工事費単価は「港湾土木請負工事積算基準」より算定

※【】内は2025年時点の予測から上振れした場合

A. 事前対策

B. 事後的対策

C. 事後的対策

(腹付けコンクリートのみ先行)

検討パターン

(当初より供用期間末の想定外力を適用)

A-1 (上振れなし)

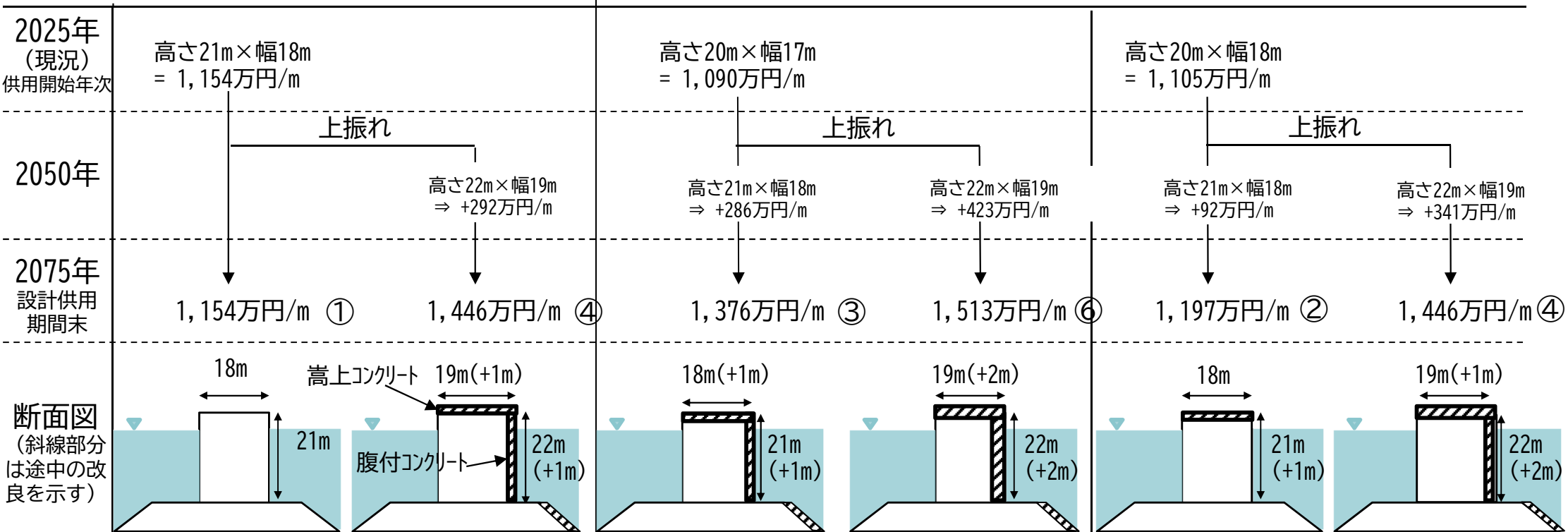
A-2 (上振れあり)

B-1 (上振れなし)

B-2 (上振れあり)

C-1 (上振れなし)

C-2 (上振れあり)



- 事前対策 (A) は、事後的対策 (B・C) に比べて初期投資額は高い。気候変動予測から上振れがなければ (A-1) 設計供用期間中における改良は不要であるが、上振れした場合 (A-2) は改良が必要となる。
- 事後的対策 (B) は、他のパターンに比べて初期投資額は最も安い。しかしながら、上振れ如何によらず2050年に相対的に大規模な改良が必要となり、上振れなし・ありそれぞれのパターンの中で総費用は最も高くなる。
- 事後的対策 (腹付けコンクリートのみ先行) (C) についても、2050年に改良が必要となるが、上振れなしの場合、1m嵩上げのみの改良であるため、総費用は事前対策 (A) に次いで安い。上振れありの場合、2mの嵩上げと1mの腹付けとなるが、総費用は、事後的対策 (B-2) よりも安く、事前対策 (A-2) と同額になる。

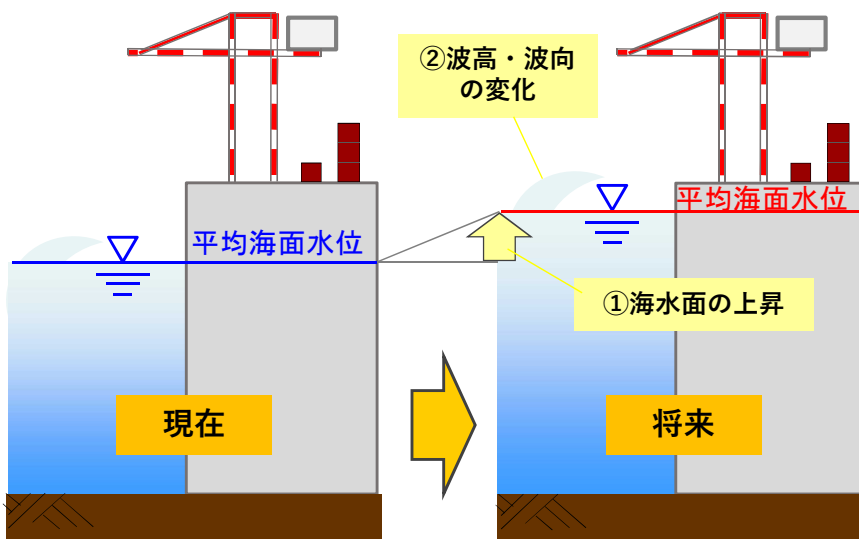
設計供用期間中に変化する外力

- 技術基準対象施設の設計において、気候変動による設計供用期間中の潮位及び波浪の変化を勘案して設定することを基本とする。(基準告示の改正)
- IPCC第6次評価報告書(AR6)におけるシナリオSSP1-2.6(AR5におけるRCP2.6に相当)を基本として、将来外力を設定(海岸保全施設の計画外力の設定方法等に整合)することができる。(基準・同解説で例示)

設計供用期間中の外力変化

気候変動による設計供用期間中の下記の外力変化を見込む。

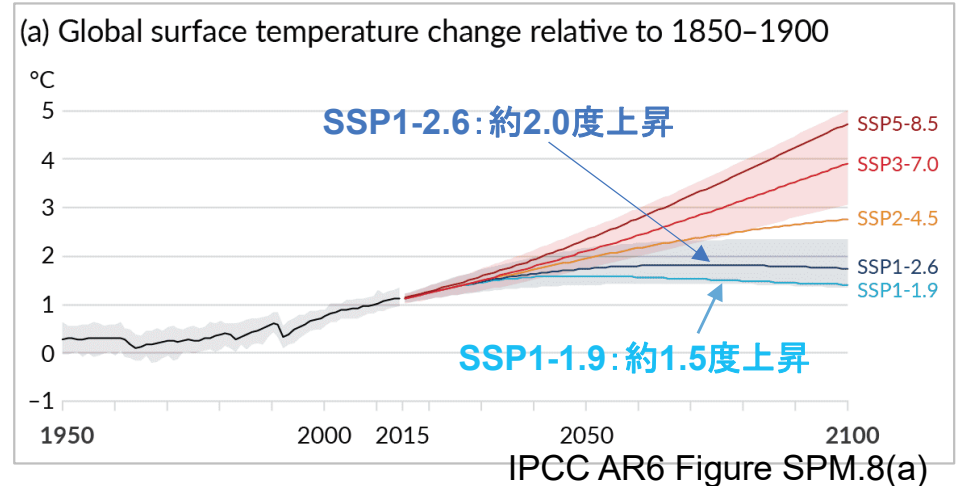
- ① 海水面の上昇
- ② 来襲波浪の変化



IPCC AR6におけるシナリオSSP1-2.6

SSPx-y表記におけるx,yの数値の意味について

x	y
SSP(社会経済)シナリオの番号を示す。 SSP1: 持続可能 SSP2: 中庸 SSP3: 地域対立 SSP4: 格差 SSP5: 化石燃料依存	RCPシナリオの数字を示し、21世紀末における大気上端でのおおよその放射強制力(W/m ²)を示す。



外力が変化する場合の要求性能

- 気候変動により外力が変化しても、施設の役割が変化しなければ、施設に必要とされる性能は変わらず、よってその施設における要求性能は供用期間に渡って変化しない。

要求性能とは、「技術基準対象施設に必要とされる性能」(基準省令第1条第1号)であり、使用性、修復性、安全性、供用性、施工性及び維持管理性(解釈通達)に分類される。

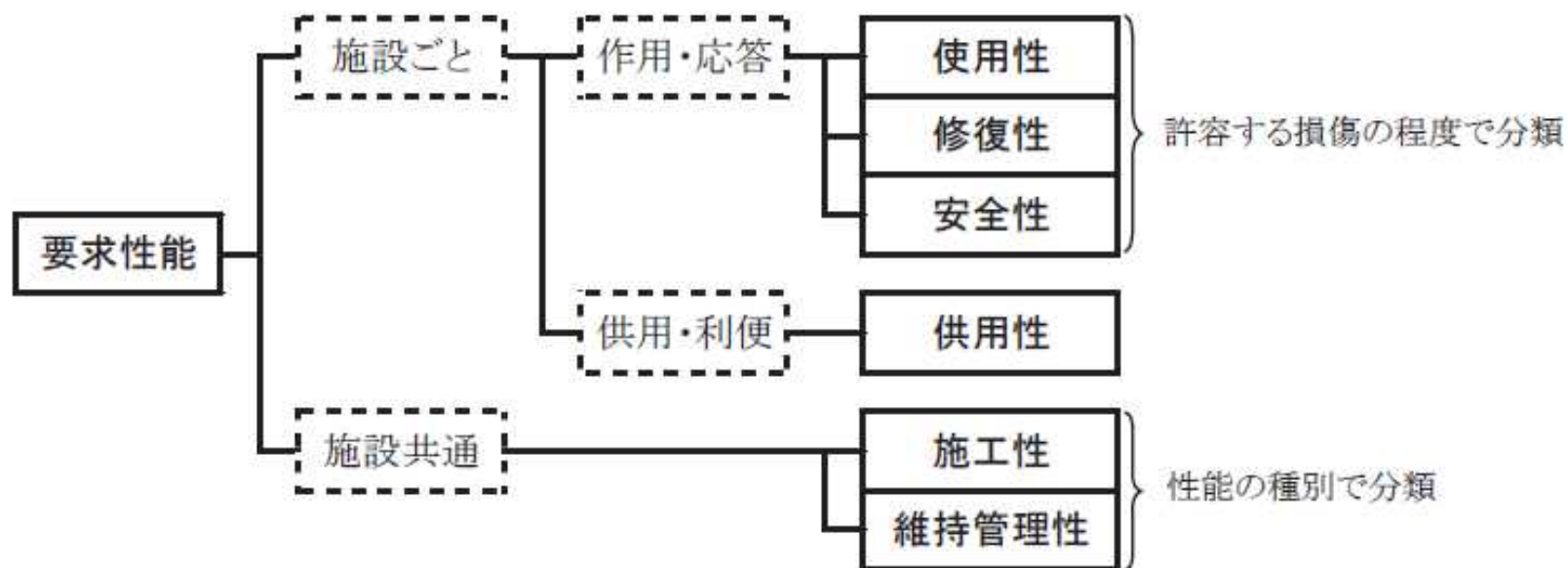


図-3.7.1 要求性能の分類

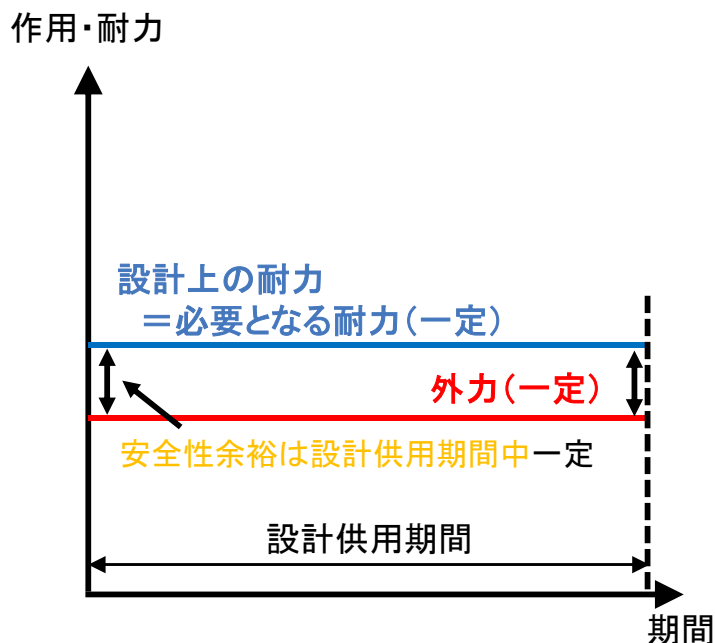
要求性能の担保の考え方

- 当初設計時点から将来時点（設計供用期間末）にかけて、時間的に変化する外力への対応を考慮した要求性能の担保の考え方を導入する。

当初設計時点において、設計供用期間中の外力（作用）の変化を考慮した上で、設計供用期間終了時における構造物の安全性余裕を確保することとする。

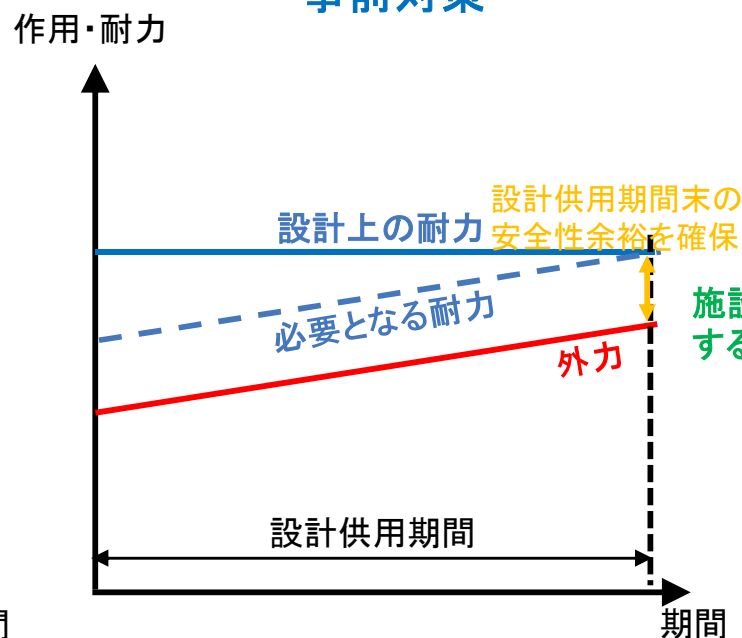
また、事後的対策による場合も、設計供用期間中の外力（作用）の変化を考慮した上で、各対策の実施時点での構造物の安全性余裕が確保されていることを確認し、必要となる対策を実施する。

外力が変化しない場合の作用・耐力（従来手法）

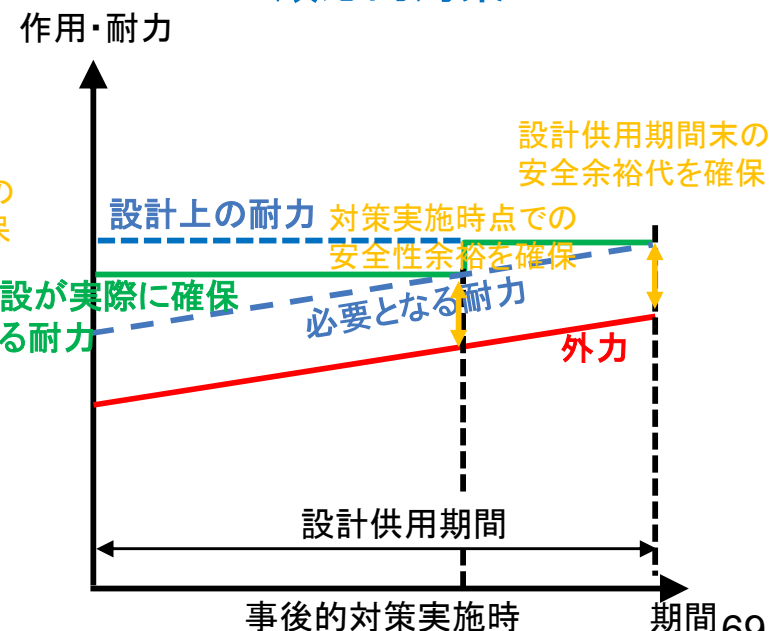


外力が変化する場合の作用・耐力（気候変動に対応した手法）

事前対策



順応的対策



※ 耐力は経年劣化や被災により、経時的に低下するが、ここでは気候変動適応策の説明のため、耐力一定と想定した。

外力変化をモニタリングする維持管理

- 技術基準対象施設においては、維持管理計画に気候変動による外力変化のモニタリング計画を盛り込むものとする。(維持告示の改正)

維持管理計画の構成イメージ

総論

- 供用期間(建設、改良当初は設計供用期間で設定)
- 維持管理の基本的な考え方(維持管理レベルの設定等)
- 施設が置かれる諸条件
- 初回点検診断の結果

点検診断計画

- 点検診断計画の策定
- 点検診断の基本的考え方
- 劣化度の判断及び性能低下度の評価の方法
- 点検診断の結果及び性能低下度の評価結果の記録・保存
- **外力変化のモニタリング計画 ← 追加**

総合評価

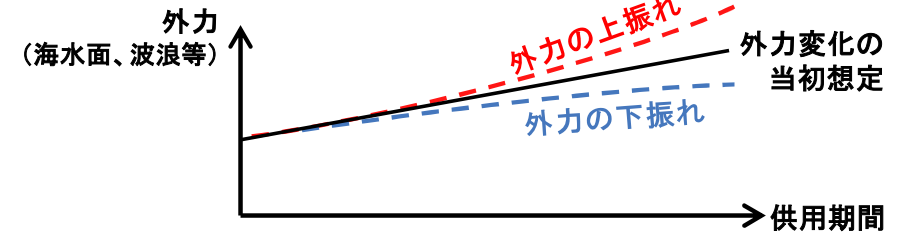
- 工学的知見・判断に基づく評価
- 現場的・行政的判断に基づく評価
- 施設の維持管理に関する方針

維持補修計画

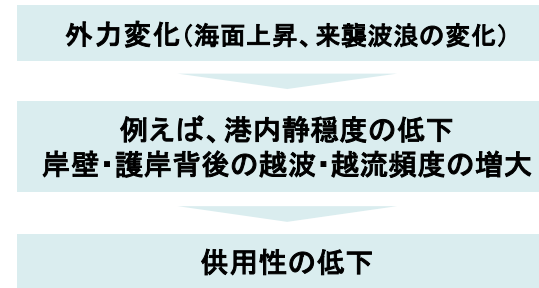
維持補修の方法や実施時期等を計画

外力変化のモニタリングの必要性

①気候変動による外力変化

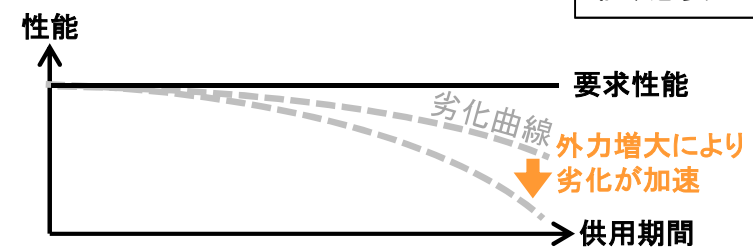


②外力増大に伴う供用性の低下



数年おきに実施される点検診断でモニタリングを実施することにより、供用性の低下及び施設劣化の加速可能性を評価、必要に応じて対策

③施設劣化の加速



船舶と係留施設とのインターフェースを中心に検討



1. 係船
(係船柱・フェンダー)
2. 船内荷役
3. 船用品等の物資、
船員やギャング等の移動、
バンカリング、陸電供給等

コンテナ船のオペレーションイメージ
(出展: PIANC WG135 Report)

船舶と係留施設とのインターフェースを中心に検討



1. 係船
(係船柱・フェンダー)
2. 乗客の乗降
3. 船用品等の物資、
船員等の移動、
バンカリング、陸電供給等
4. エプロンでの物品の
仮置き

クルーズ船のオペレーションイメージ
(出展: PIANC WG152 Report)

異なる船種・利用形態に配慮した検討を行う

想定される対策

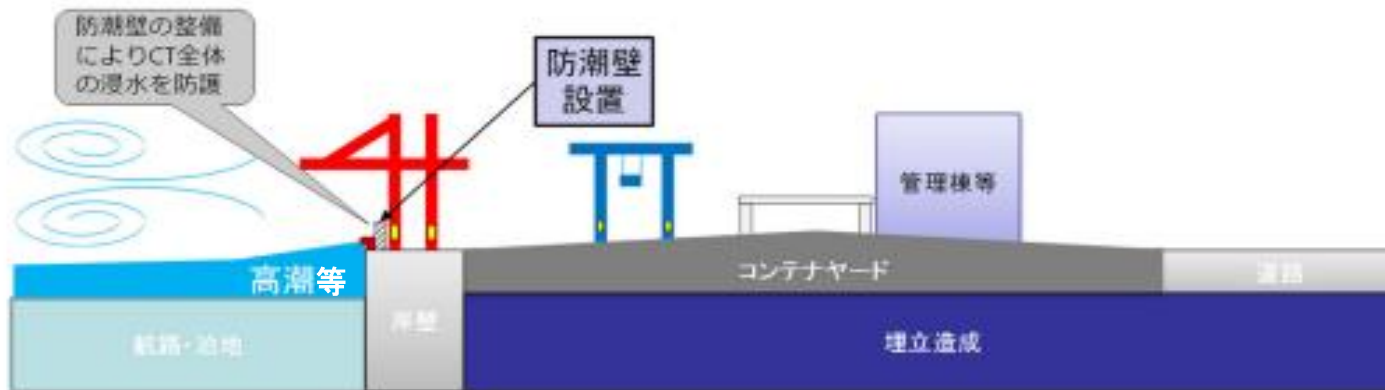
岸壁等の嵩上げを行う(新規整備時・既設改良時)



荷役活動等への影響は起こりにくいと考えられる

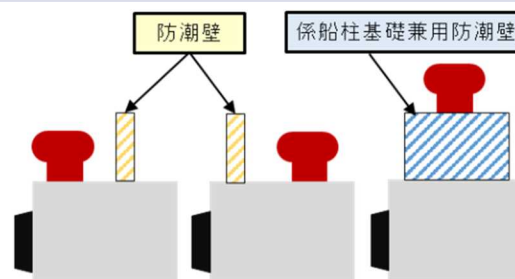
水位上昇が顕在化するまで、低潮位時のオペレーションに影響がでる可能性

防潮壁を設置する



設置位置によっては荷役活動等へ影響する可能性

国内外で実績あり



利用者へのヒアリング調査によりこれまでに得られている知見

船種		コンテナ船	クルーズ船
平均海面水位上昇による影響		<ul style="list-style-type: none"> ・係船作業への影響は少ない。 ・揚程は満潮位を基準に設定されているが一般的には水位変動分程度の余裕はある。 ・近年大型化しているコンテナ船のサイズに配慮して荷役機械を導入しているターミナルが一般的である。 	<ul style="list-style-type: none"> ・係船作業への影響は少ない。 ・船側に設けられたハッチから貨物や乗客の乗降を行うが、ハッチが決められたデッキに設置されていることが多く、船体上昇の影響は大きい。 ・乗客についてはブリッジの傾斜が大きくなりバリアフリー面で問題は発生し、また貨物についてはフォークリフトで持ち上げる高さが高くなり危険性が増す。 ・船側でハッチの数を増やす（複数デッキに設ける）対応を行えば、影響が軽減できる可能性がある。
対策と利用者の意向	海面上昇を見越した天端高で岸壁等の嵩上げ 【新規整備】	事前対策	<ul style="list-style-type: none"> ・予め水位上昇を見越した天端高としても、低潮位時の係留や荷役には一般的に影響はない。
	段階的な岸壁等の嵩上げ 【既存施設の改良】	段階的対策 (事後対策)	<ul style="list-style-type: none"> ・既設ターミナルの場合には、通常オペレーションへの影響が懸念される。 ・代替地が確保できれば対応可能。
	岸壁法線際への防潮壁の整備 【既存施設の改良】	段階的対策 (事後対策)	<ul style="list-style-type: none"> ・問題はないが、係船柱と防潮壁の位置関係に配慮が必要。係船柱よりも防潮壁が海側に設置される場合には、係船索が防潮壁に擦れることに配慮が必要。
	エプロン背後での防潮壁の整備 【既存施設の改良】	段階的対策 (事後対策)	<ul style="list-style-type: none"> ・エプロンより内陸側に防潮壁を設置する場合、車両の通行に支障が出る懸念がある。
			<ul style="list-style-type: none"> ・予め水位上昇を見越した天端高とした場合、低潮位時に貨物の出し入れに支障が出る可能性。 ・実際の水位上昇に合わせて段階的に天端高の高さを上げることが望ましいが、通常オペレーションへの影響も想定される。 ・岸壁法線上に防潮壁がある場合、荷役や乗客の乗降に影響が出る。 ・問題はない。 ・車両の通行に配慮して可動式の陸間を設置している場合がある。

注：本表は船社等の港湾利用の関係者（それぞれ1者）に対して行ったヒアリング結果を整理したものである。

利用者へのヒアリング調査によりこれまでに得られている知見

船種		フェリー（国内）	RORO船（国内）
平均海面水位上昇による影響		<ul style="list-style-type: none"> ・係船について係船索の張力が変わる可能性はあるが水位上昇1 m程度であれば問題はない。 ・バラスト調整により、現在でも一定の（3～4 m程度の）潮位差に対応している。 ・車両乗降のランプについて水位上昇への対応はできるが、乗客乗降のブリッジについては傾斜が大きくなりバリアフリー面で影響が出る。 ・岸壁が浸水した場合の影響が懸念される。 	<ul style="list-style-type: none"> ・係船については防舷材と船舶との位置関係が変わることに留意する必要がある。 ・車両乗降のランプについて水位上昇した場合車両の乗降に影響が出る可能性がある。ランプが凍結する地域の場合、乗降時の危険性が増す可能性がある。 ・荒天時の浸水リスクが高まる。
対策と利用者の意向	海面上昇を見越した天端高で岸壁等の嵩上げ【新規整備】	事前対策	<ul style="list-style-type: none"> ・予め海面上昇を見越した天端高とした場合でもバラスト調整で一定の対応は可能。
	段階的な岸壁等の嵩上げ【既存施設の改良】	段階的対策（事後対策）	<ul style="list-style-type: none"> ・既設ターミナルの場合には、通常の実運用への影響が懸念される。公共性の高い輸送のため、運航は止められない。 ・代替地が確保できれば対応可能だが、現在の港湾利用状況を勘案すると空間的に余裕はない。
	岸壁法線際への防潮壁の整備【既存施設の改良】	段階的対策（事後対策）	<ul style="list-style-type: none"> ・問題はないが係船柱と防潮壁の位置関係に配慮が必要。 ・すでにこのような対応を実施している港湾がある。防潮壁設置と合わせ電源設備などの位置を上げる。
	エプロン背後での防潮壁の整備【既存施設の改良】	段階的対策（事後対策）	<ul style="list-style-type: none"> ・エプロンより内陸側に防潮壁を設置する場合、駐車スペースが減少する。
			<ul style="list-style-type: none"> ・予め海面上昇を見越した天端高とする場合、ランプの位置が下がりすぎて岸壁に接触しないよう配慮する必要がある。 ・既設ターミナルの場合には、通常の実運用への影響が懸念される。 ・ランプを用いた車両の乗降に支障が出る。 ・エプロンより内陸側に防潮壁を設置することは可能だが、車両が通行できるよう一部をゲート式とする必要がある。

注：本表は船社等の港湾利用の関係者（それぞれ1者）に対して行ったヒアリング結果を整理したものである。

利用者へのヒアリング調査によりこれまでに得られている知見

船種		バルク船（石炭）	バルク船（穀物）
平均海面水位上昇による影響		<ul style="list-style-type: none"> ・アンローダーによる荷役に関し、揚程は水位変動分程度の余裕はある。 ・栈橋下部に水面があるが、水位上昇した場合に浮力が働くことで床版への影響が懸念される。 ・装置への影響は、それが設置された水面からの高さによるが、既存装置については問題はないと想定される。 	<ul style="list-style-type: none"> ・アンローダーによる荷役に関し、ある程度の水位の上下では荷役作業への大きな支障はないと想定している。 ・装置への影響は、それが設置された水面からの高さによるが、既存装置については問題はないと想定される。
対策と利用者の意向	施設の嵩上げ	<ul style="list-style-type: none"> ・荷役からコンベアを経て背後の貯炭場に至るまで輸送装置が一体化しており、一旦整備をしてからの嵩上げは容易にはできない。 	<ul style="list-style-type: none"> ・ある程度の水位の上下では荷役作業への大きな支障はないため、予め栈橋のみを嵩上げした場合でも荷役への問題はないと想定される。 ・荷役からコンベアを経て背後のサイロに至るまで輸送装置が一体化しており、一旦整備をしてからの嵩上げのためには大規模な工事が必要。
	防潮壁の整備	<ul style="list-style-type: none"> ・貯炭場の浸水は許容されないため、これを防止できる適切な位置に防潮壁の整備が必要。 	<ul style="list-style-type: none"> ・問題はないが、雨水の排水への配慮が必要。

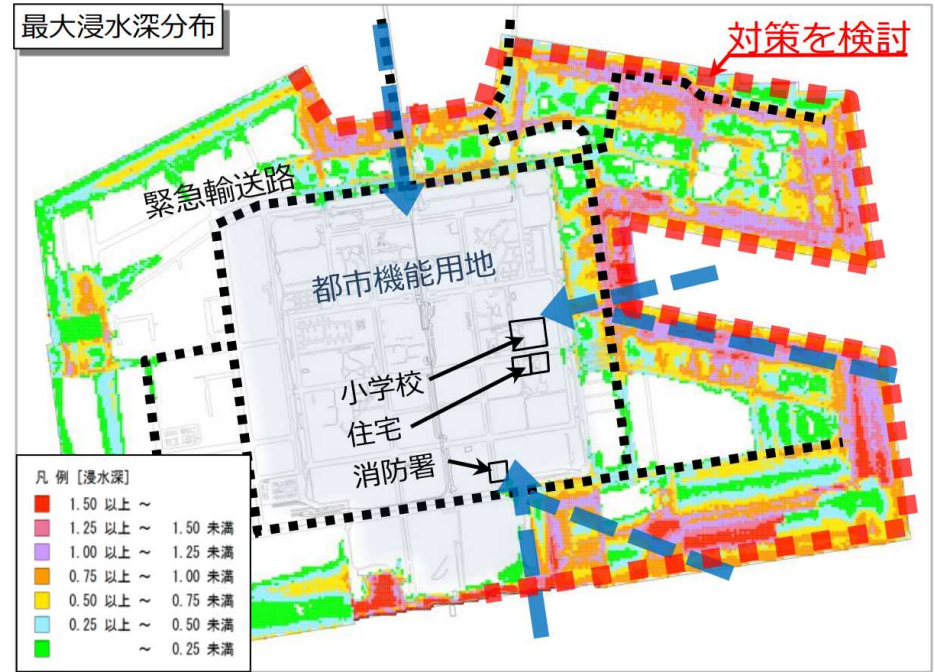
注：本表は港湾関係者（2者）に対して行ったヒアリング結果を整理したものである。

既設ターミナルの嵩上げの特性と配慮事項

ターミナルの継続的な利用を極力阻害しない配慮が必要。

(例) 神戸港六甲アイランドでの高潮浸水対策

- 神戸港ではH30台風21号により広範囲に浸水被害が発生
- 同被害を受け、「大阪湾港湾等における高潮対策検討委員会(神戸港部会)」で対策を検討し、六甲アイランドでは、ヤード嵩上げ等の対策を実施中



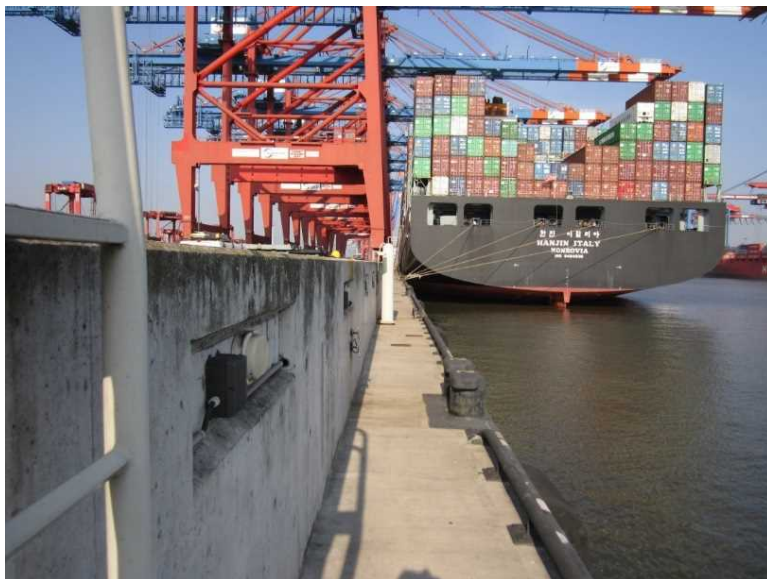
※第3回大阪湾港湾等における高潮対策検討委員会(神戸港部会)より引用

既設ターミナル嵩上げにおける配慮事項例

- 区画に分け段階的に段取り替えしながら嵩上げを実施し、施工中の部分は避けて荷役を行うよう利用者と調整する。
- 部分嵩上げにより生じる段差にスロープを設け、荷役機械等の往来を可能とする。
- 同一港湾内の空きスペース利用や隣接するターミナルとの連携を検討する。
- ターミナルの稼働状況等を勘案し、中長期的な視点で適切な嵩上げの実施時期を計画する。

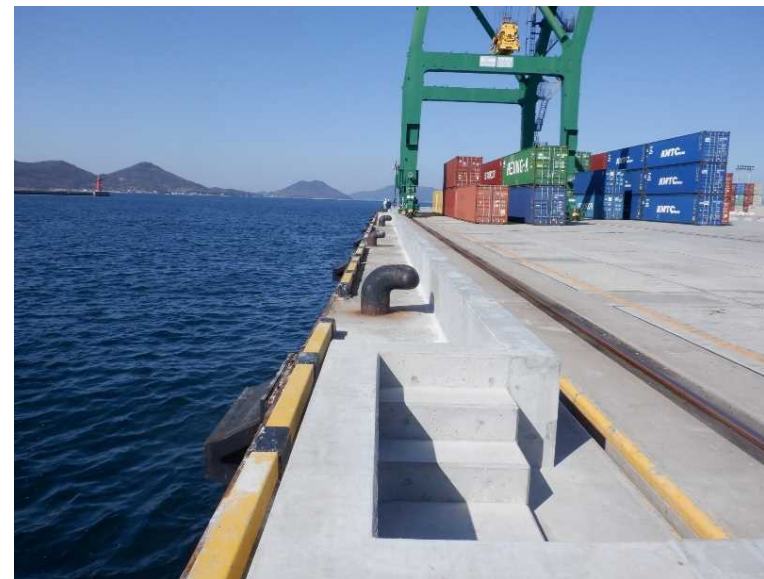
岸壁水際線の防潮壁設置の特性と配慮事項

岸壁水際位置等での活動を阻害しない配慮が必要。



ハンブルグ港の事例

- 係船柱近傍に陸閘を設置し、係留作業に配慮



高松港の事例

- 要所に階段を設け、作業員の往来に配慮

岸壁水際線の防潮壁設置における配慮事項例

- 防潮堤内外の作業員等の往来に配慮し、乗り越し階段又は陸閘等を設ける。
- 防潮壁と係船柱との離隔を係船作業に支障の無いよう定める。
- コンテナ岸壁の場合、荷役機械や構内トレーラー等の走行に支障の無い位置に防潮壁を設ける。
- 海側のガントリークレーンの設置・撤去に支障の無いよう配慮する。

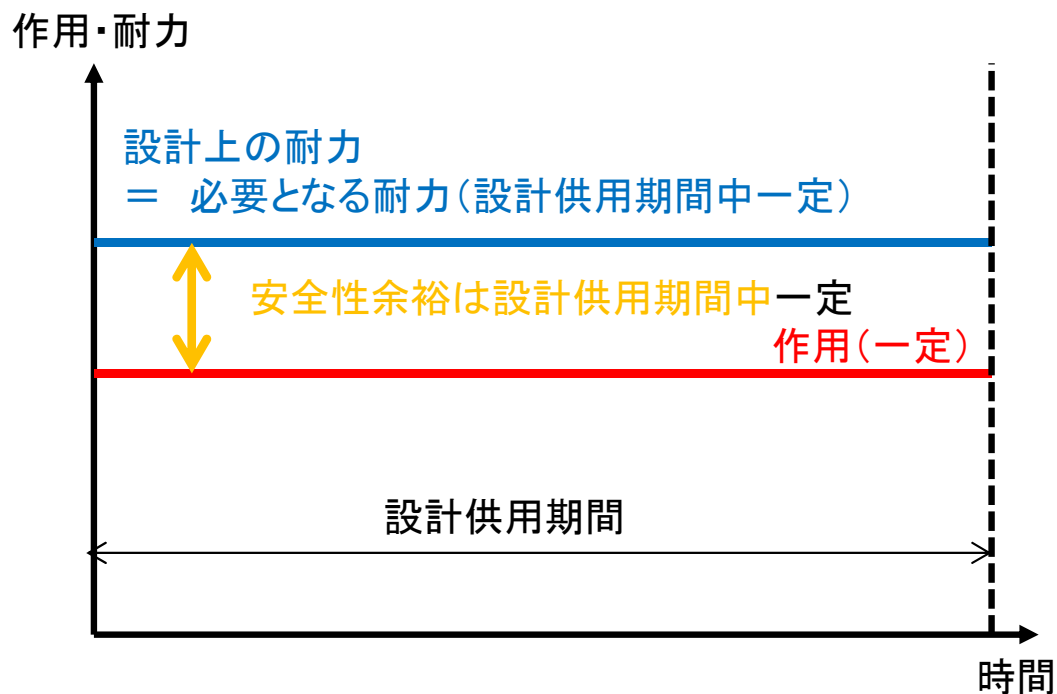
気候変動に関連する基準・同解説(総論部分)の対応(1)

【課題1】

気候変動下における技術基準対象施設の要求性能の確保の考え方。

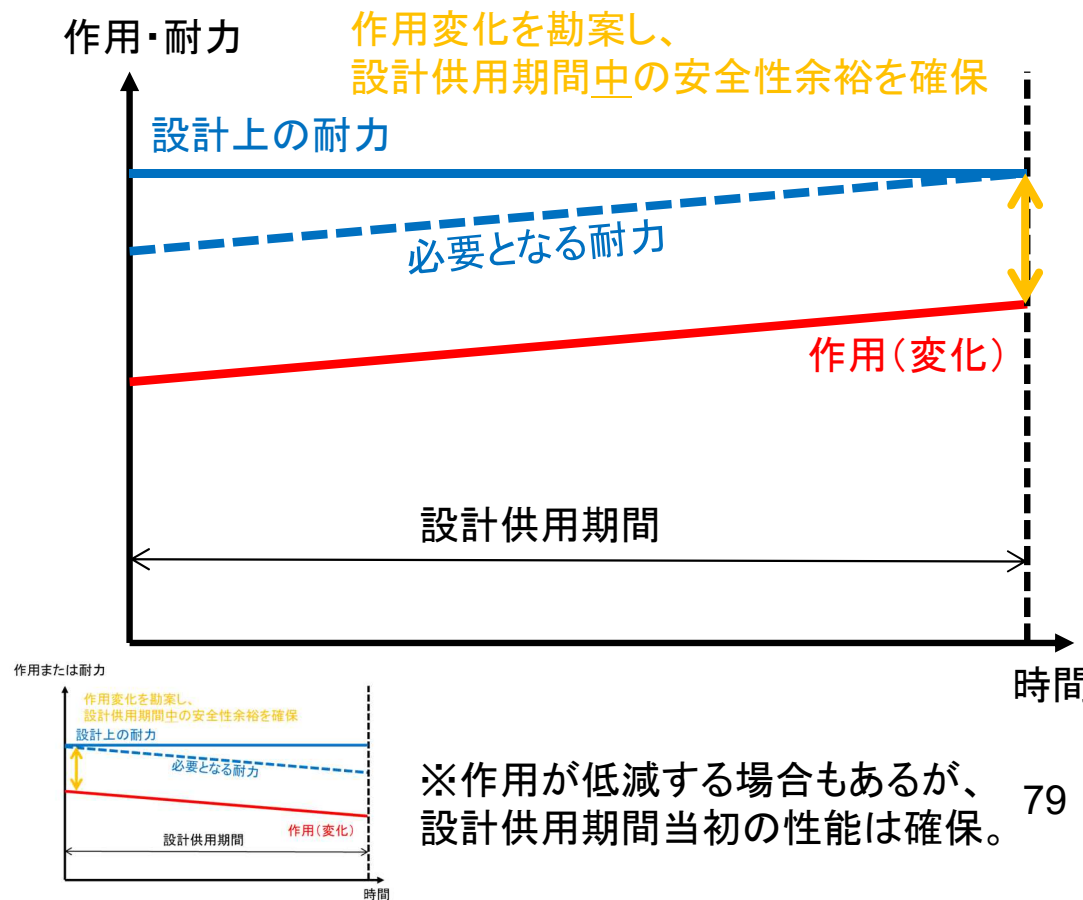
「技術基準対象施設の設計に用いる平均海水面や異常潮位、波浪、残留水位等は、設計供用期間中の変化を勘案した上で、当該期間中にわたって技術基準対象施設の要求性能を確保する必要がある」旨を明記。

従来の考え方



※耐力は劣化や被災により経時的に低下する可能性があるが、ここでは一定として模式図化。

設計供用期間中の作用変化を考慮



※作用が低減する場合もあるが、設計供用期間当初の性能は確保。

気候変動に関連する基準・同解説(総論部分)の対応(2)

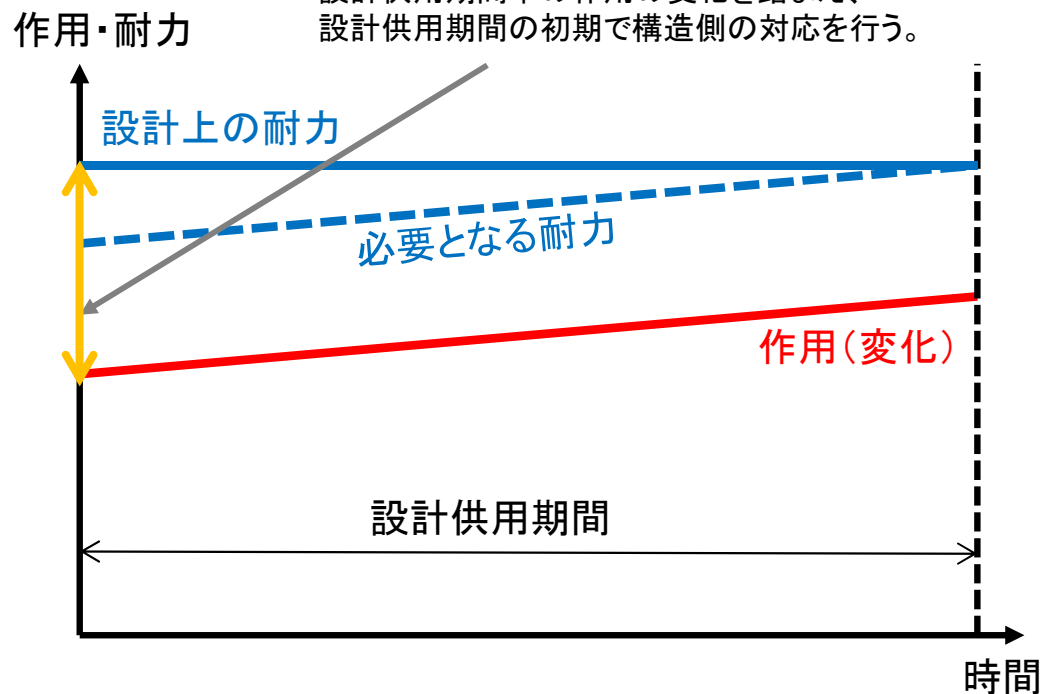
【課題2】

技術基準対象施設の設計供用期間中の要求性能の確保方法の整理。

「設計供用期間内に想定される作用変化に対し、施設の要求性能を確保する方策として、①設計供用期間の初期段階で対応する「事前適応策」と、②段階的に対応する「順応的適応策」の2種類の適応策が考えられる。技術基準対象施設に対する両適応策またはその組み合わせの適用は、各施設の利用状況や構造的な特性等に応じて判断する。」旨を追記。

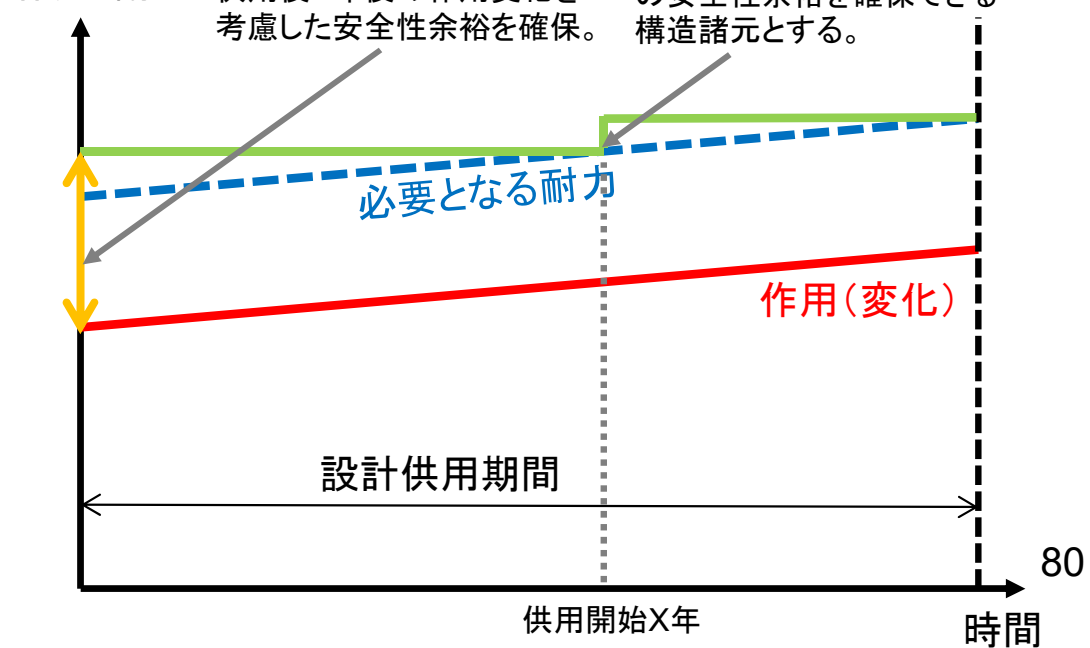
事前適応策

設計供用期間中の作用の変化を踏まえ、設計供用期間の初期で構造側の対応を行う。



順応的適応策

設計供用期間の初期では、供用後X年後の作用変化を考慮した安全性余裕を確保。X年後に、設計供用期間末の安全性余裕を確保できる構造諸元とする。



事前適応策と段階的適応策の組合せ ～防波堤を例に～

事前適応策と段階的適応策は、どちらか一方に限定する必要性はなく、適切に組み合わせることができる。

設計供用期間中の
波力増大に対応した
パラペットや上部工の嵩上げ
(事前または段階的)

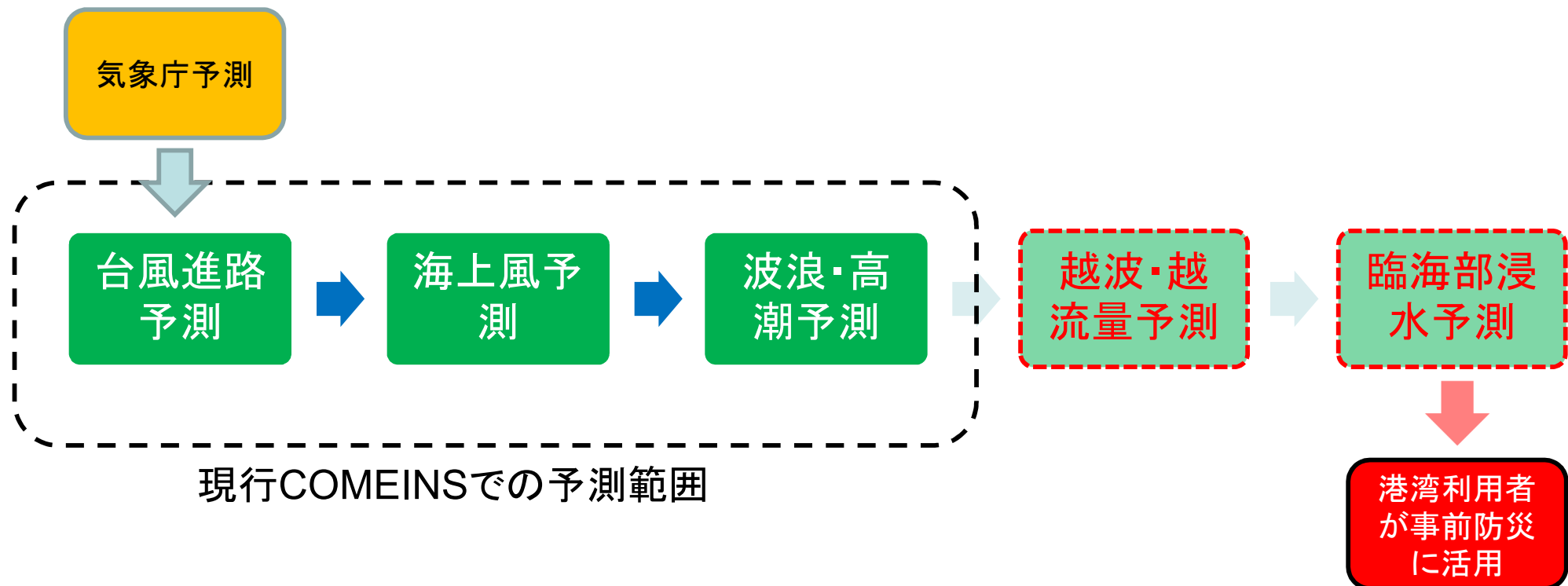
設計供用期間中の
波力増大に対応したマウンド等拡幅
(事前または段階的)

ケーソン・マウンド拡幅等に伴い必要な
地盤改良
(段階的対応は比較的困難 ⇒ 事前対応)

地盤改良(既存)

気候変動による外力強大化が港湾に及ぼす影響

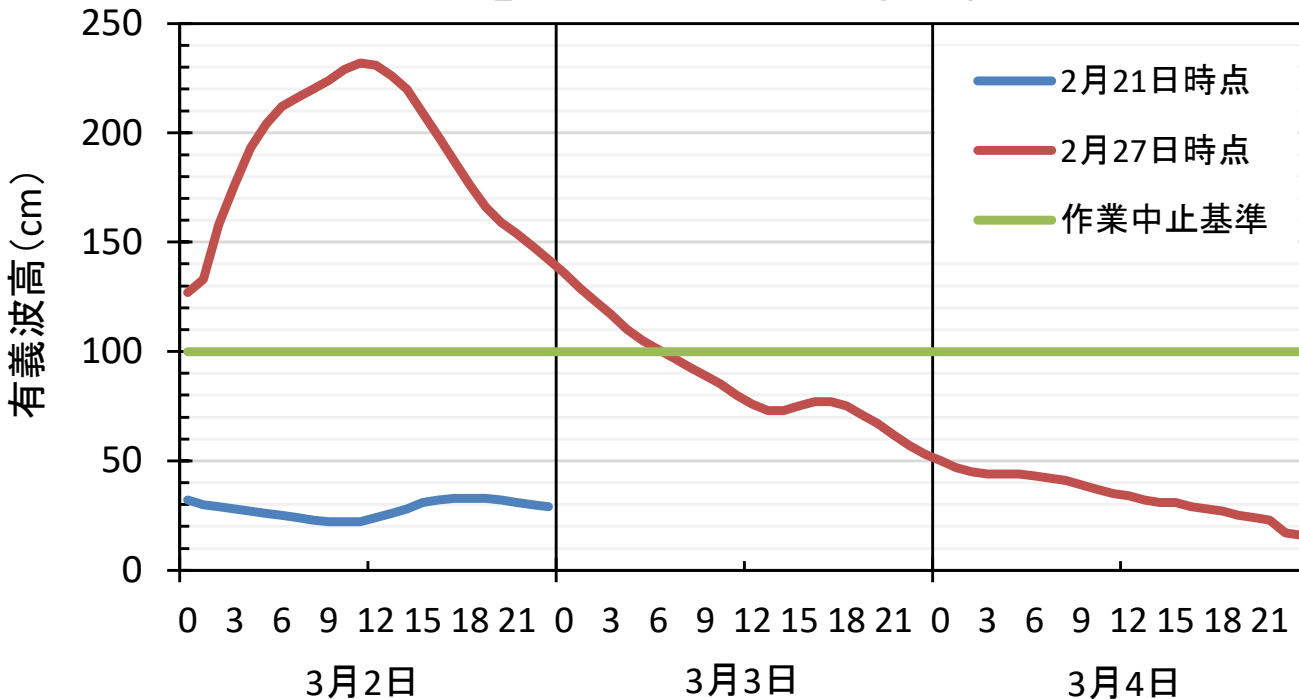
- 気候変動により潮位の上昇及び波浪の増大が想定され、岸壁や護岸を越波・越流し臨海部に浸水被害が発生する可能性が高まっている。
- 事前に臨海部の浸水リスクを評価して関係者に共有できれば、例えばコンテナ避難や固縛等の事前対策をとることにより、被害を軽減することが可能。
- 現在、沿岸気象海象情報配信システム(COMEINS:カムインズ)が運用されており、気象業務法に基づく、波浪予報または高潮予報が為され、港湾工事の実施判断や災害体制の発令等に活用されている。
- 上記カムインズの予報値など従来の知見を活用して、臨海部の浸水リスク評価を実施予定。



波浪・潮位予測の利用事例(浜田港)

- 浜田港(島根県)では、ケーソン製作用台船で製作したケーソンの進水・仮置を今年3月4日から開始。
- 海上作業日は、カムインズによる波浪予測を踏まえ、決定。
- 直前の作業中止となるリスクを下げ、手戻りを減らすなど作業の円滑化に貢献。

『COMEINS』による浜田港の有義波高の予測



- ・2月21日時点の予測値(青)に基づき、ケーソン進水・仮置作業開始日を3月2日に決定。
- ・2月27日時点の予測値(赤)で3月2日の波が高いことを把握し、作業開始日を3月4日に変更。変更に係る関係機関との調整を円滑に実施。
- ・3月4日、穏やかな海象条件の中、作業実施(3月6日に完了)。



ケーソン製作状況

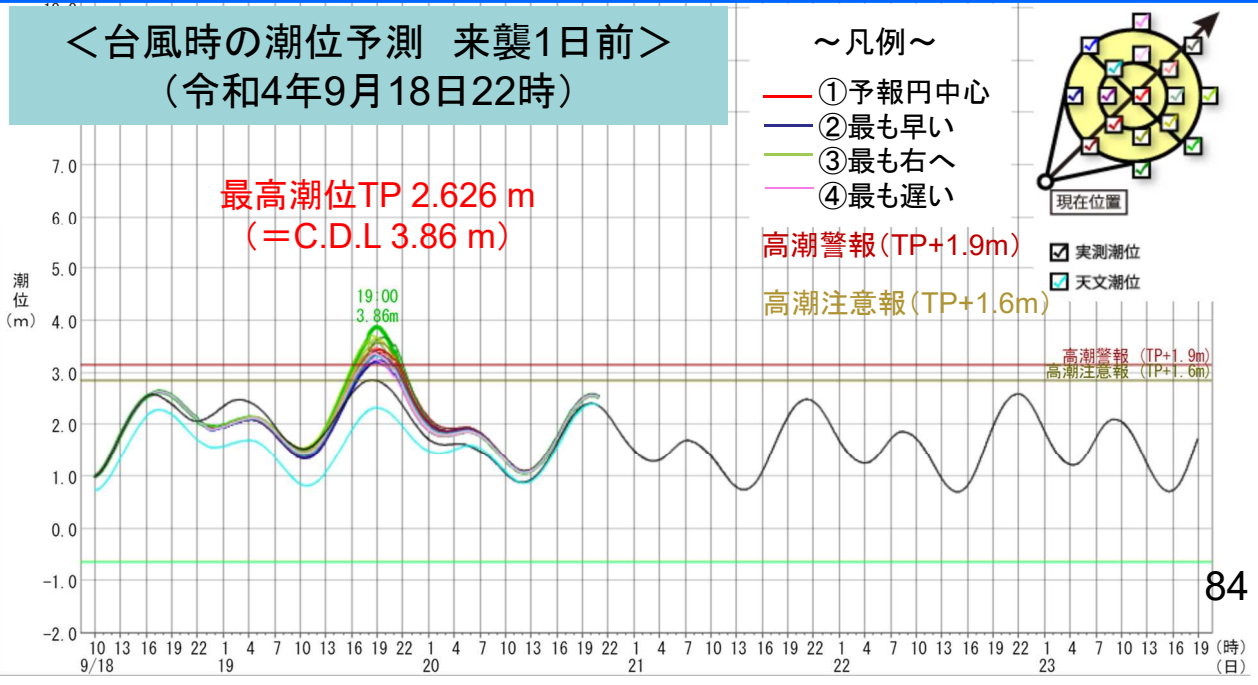
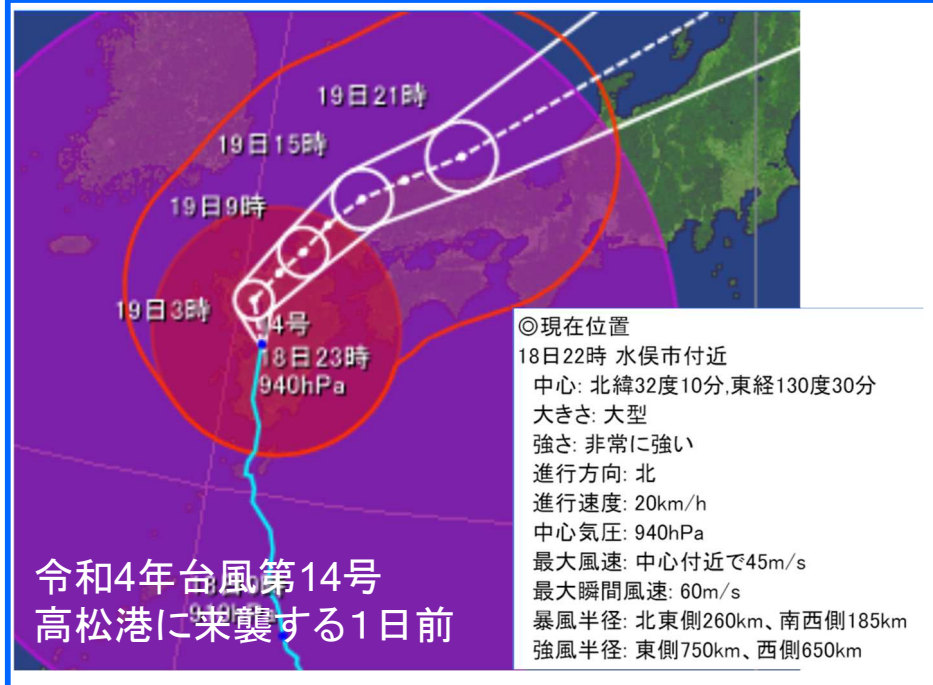


進水場所へのえい航状況 (3月4日)

波浪・潮位予測の利用事例(高松港)

○ 高松市(香川県)沿岸部では、平成16年台風第16号による浸水被害を踏まえ、海岸保全施設の整備を進め、さらにカムインズの潮位予測により、浸水の危険性の把握に努めている。

○ 昨年の台風14号でも、来襲1日前に堤外地の係留施設が浸水する可能性を察知したため、警戒を行った。(結果的に実測値は予測値を下回り、被害はなかった)



波浪・潮位予測の活用について(越波流量の計算)

- 『COMEINS』の台風時高波及び潮位予測値を使って、越波量を計算し、臨海部の浸水リスクを評価予定。
- 具体的には、沖縄県の中城湾港から東京港に至るまで太平洋側の港湾9箇所の地点で計算を実施。
- 越波量計算は、合田らによる越波流量推定図を改良した田中らの式※を用いる。

※田中陽二、鈴木勝之、樋口直人、柴木秀之：堤前波高を用いた越波モデルの改良と越波越流統合モデルの作成、土木学会論文集B2(海岸工学)、Vol.74、No.2、pp.l_1015-l_1020、2018

越波流量の計算式

地形・施設条件として天端高、堤脚水深及び海底勾配、また海象条件として潮位及び堤前波高を与えることにより、以下の式により越波流量 q を計算する。

$$\frac{q}{\sqrt{gH_{s,toe}^3}} = \exp \left\{ - \left(A + B \frac{h_c}{H_{s,toe}} \right) \right\}$$

$$A = A_0 \tanh A_1 + A_2$$

$$B = B_0 \tanh B_1 + B_2$$

$$A_0 = \frac{3.4 - \min(15.0 \tan \theta + 0.22, 3)}{2}$$

$$A_1 = \max(18.0 \tan \theta + 0.60, 1.0)x - 11.7 \tan \theta - 0.51$$

$$A_2 = \frac{3.4 + \min(15.0 \tan \theta + 0.22, 3)}{2}$$

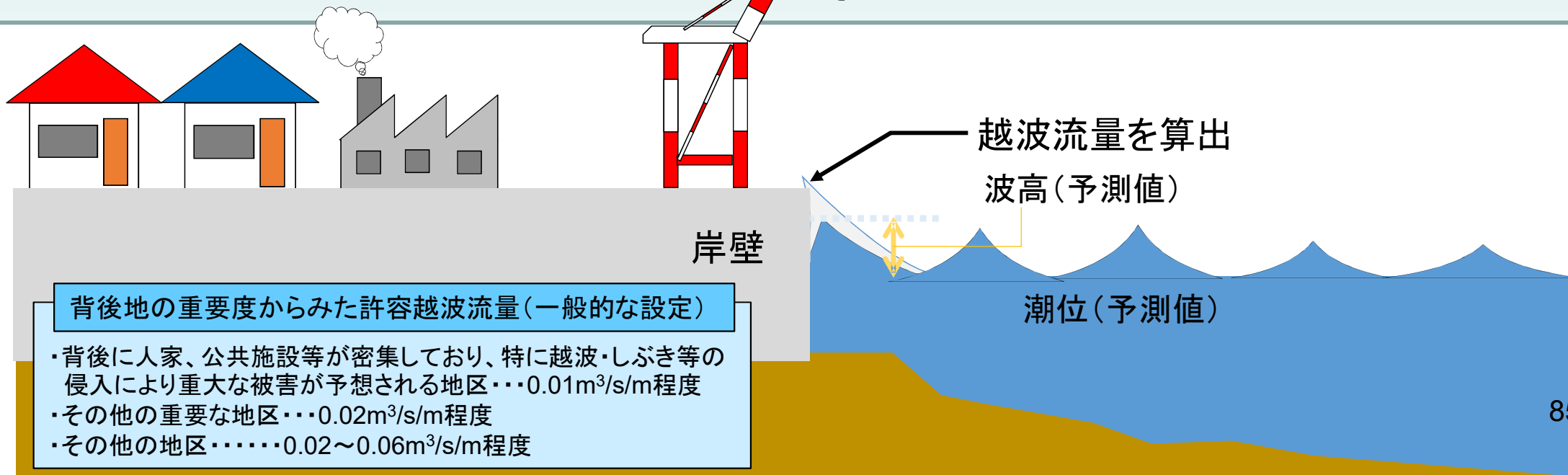
$$B_0 = 2.3$$

$$B_1 = (1.50 \tan \theta + 0.45)x + 0.965 \exp(-5.62 \tan \theta)$$

$$B_2 = \frac{2.25 \tan \theta + 0.225}{\sqrt{2\pi wx}} \exp \left[- \frac{\{\ln(x) - 0.577 + 4.09 \tan \theta\}^2}{2w^2} \right]$$

ここで、 $w = 1.50 \tan \theta + 0.11$

q : 越波流量
 $H_{s,toe}$: 底前波高
 h_t : 堤脚水深
 h_c : 天端高
 $\tan \theta (= i)$: 海底勾配

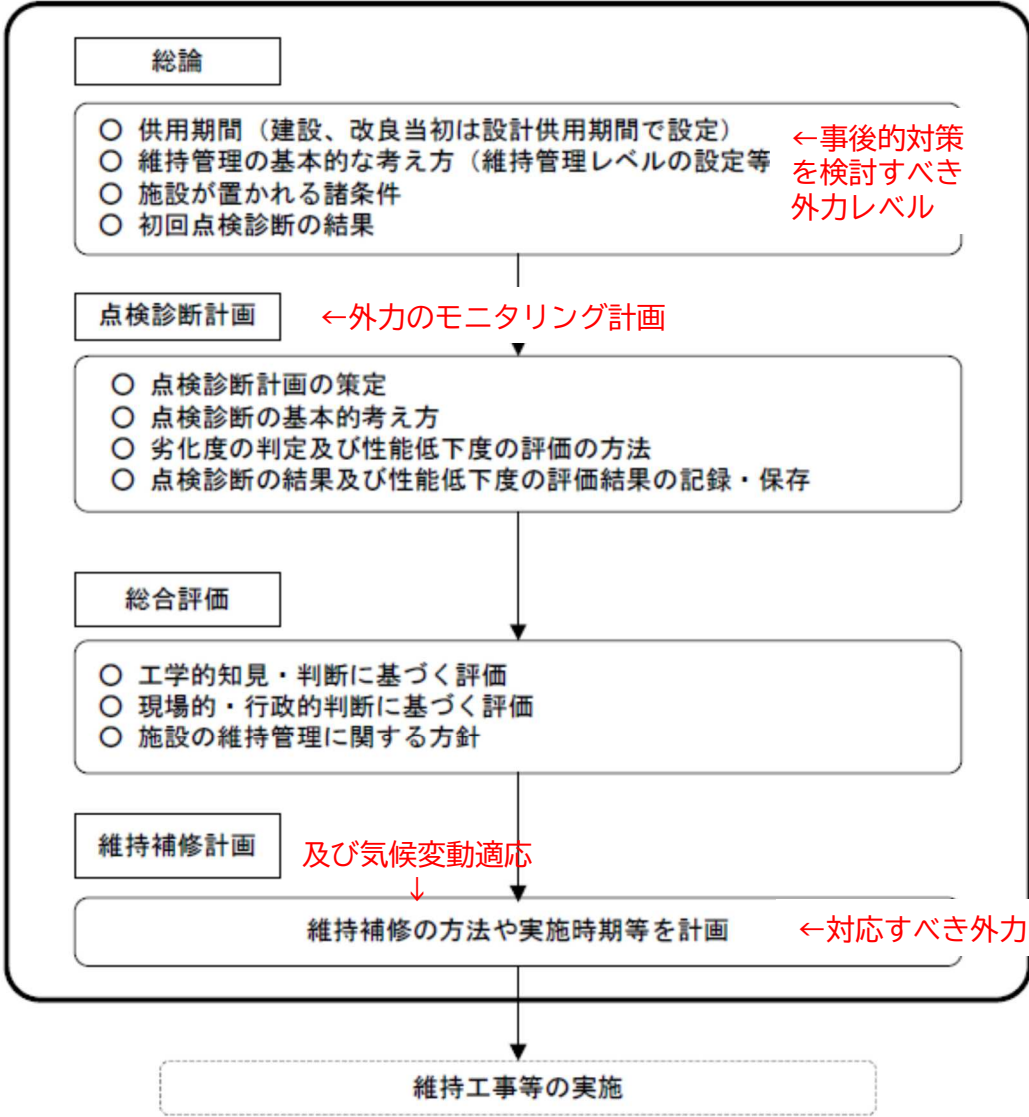


IV. 供用段階での継続的な性能把握

維持管理計画に気候変動適応策を明記するイメージ

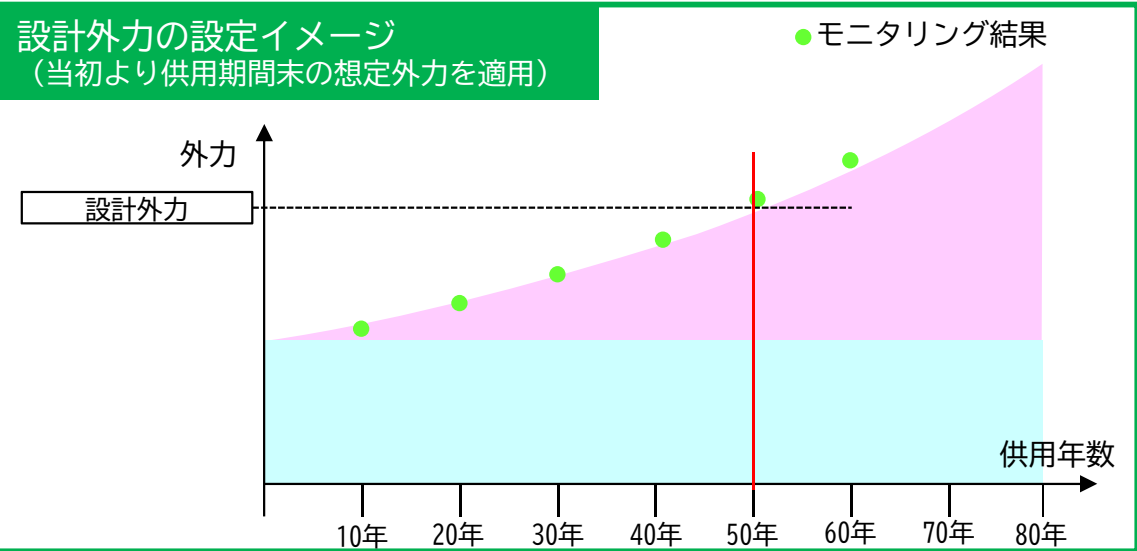
維持管理計画の構成イメージ

維持管理計画の策定範囲

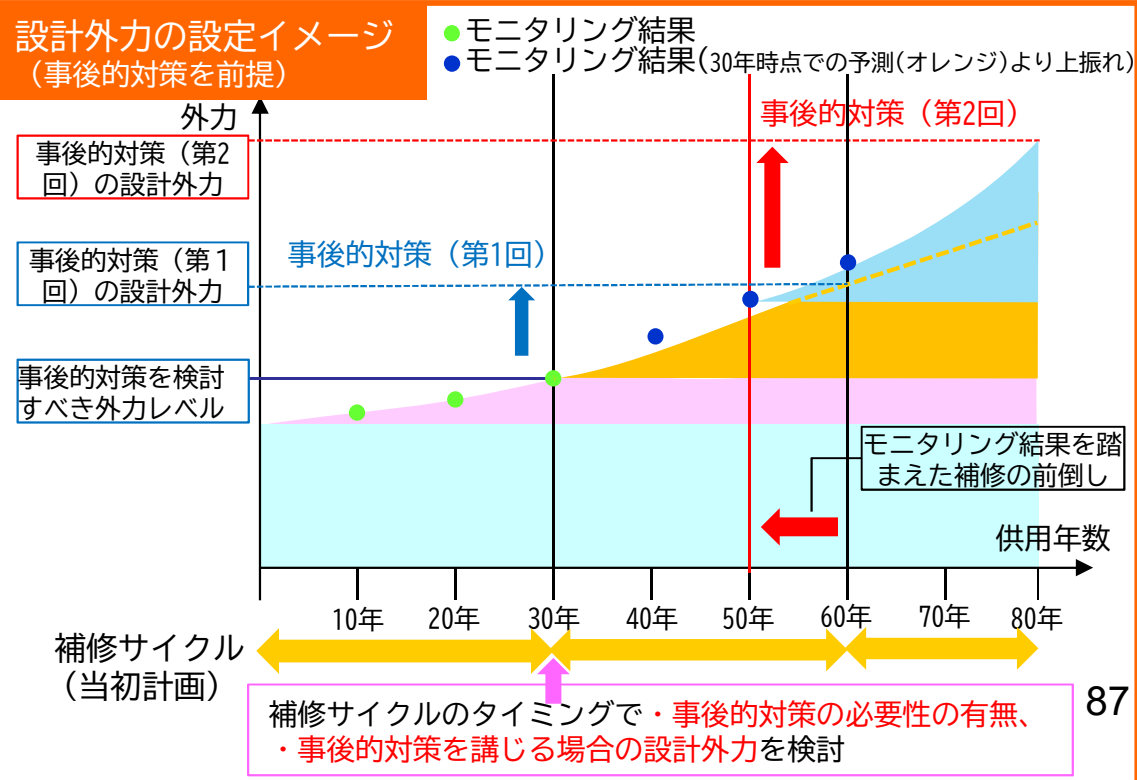


※赤字の項目を追加

設計外力の設定イメージ (当初より供用期間末の想定外力を適用)



設計外力の設定イメージ (事後の対策を前提)



V. 気候変動適応マスタープラン

気候変動適応策のガイドラインの例(ニューヨーク市)

○ニューヨーク市では、気候変動適応策のガイドラインを公表。



将来の氾濫原における施設の基本洪水高度と設計氾濫原の設定方法

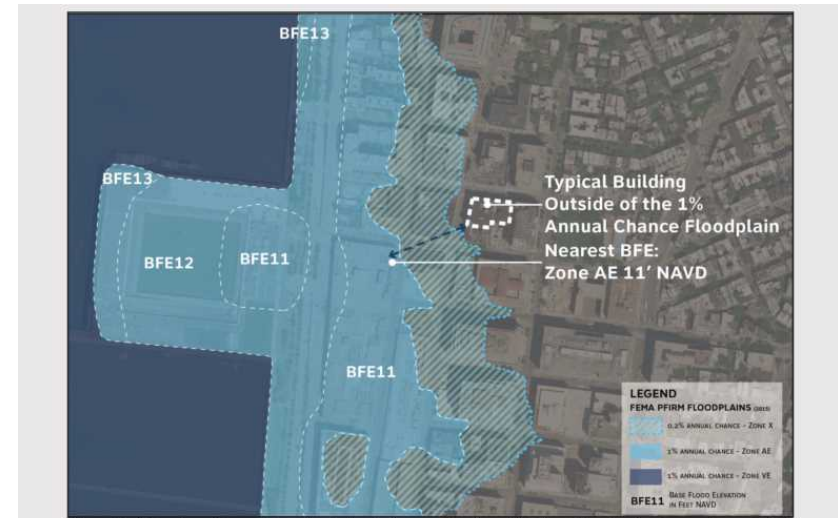


Figure 13 - This schematic map shows how to locate the nearest adjacent 1% floodplain elevation from a given project site.

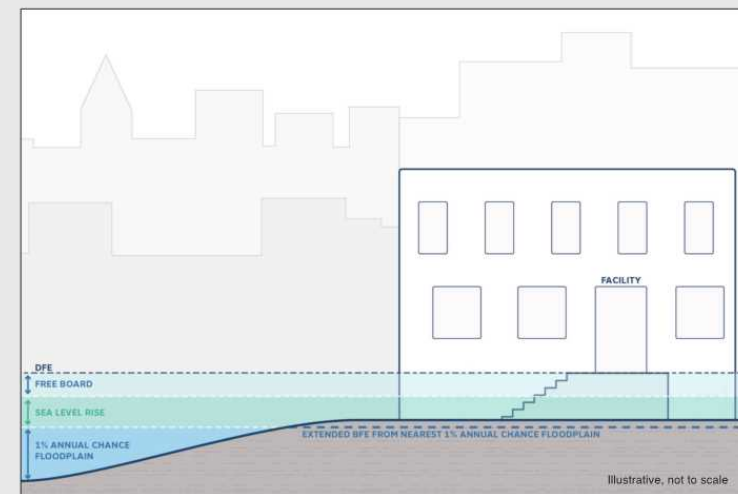


Figure 14 - This schematic shows how to use a base flood elevation in the current floodplain, with sea level rise and freeboard, added, to determine a design flood elevation for a facility located in the future floodplain.

気候変動適応策のガイドラインの例(ニューヨーク市)

○ニューヨーク市のガイドラインでは、社会資本の耐用年数の経過時に予測される気候条件に耐えるように施設を設計することとしている。

C. Useful Life of Capital Projects

A resilient facility is one built to withstand, or recover quickly from, natural hazards, as well as to perform to its design standard throughout its useful life in a changing climate. To meet this goal, facilities should be designed to withstand climate conditions projected for the end of the facility's useful life. Full useful life represents the extended service life of a facility (assuming regular maintenance). Some new facilities built today, including some buildings, may have an extended useful life beyond the values listed after undergoing substantial improvements. Therefore, this list is illustrative and not exhaustive. Project teams should utilize professional judgment to determine the useful lives of the facility and components in design.

Climate change projections for NYC, as defined by the NPCC, are broken into decadal projections. In the Guidelines, the following decadal projections are associated with specific time spans:

- 2020s projection = present to 2039
- 2050s projection = 2040 to 2059
- 2080s projection = 2070 to 2099
- 2100 projection = end of century and beyond

Table 1 below provides examples of how to select climate change projections for specific facilities and components.

Table 1 – Facilities and components and associated climate change projections	
Climate change projections (time period covered)	Examples of building, infrastructure, landscape, and components grouped by typical useful life
2020s (through to 2039)	<ul style="list-style-type: none"> • Interim and deployable flood protection measures • Asphalt pavement, pavers, and other ROW finishings • Green infrastructure • Street furniture • Temporary building structures • Storage facilities • Developing technology components (e.g., telecommunications equipment, batteries, solar photovoltaics, fuel cells) <p><i>Temporary or rapidly replaced components and finishings</i></p>
2050s (2040-2069)	<ul style="list-style-type: none"> • Electrical, HVAC, and mechanical components • Most building retrofits (substantial improvements) • Concrete paving • Infrastructural mechanical components (e.g., compressors, lifts, pumps) • Outdoor recreational facilities • At-site energy equipment (e.g., fuel tanks, conduit, emergency generators) • Stormwater detention systems <p><i>Facility improvements, and components on a regular replacement cycle</i></p>
2080s (2070-2099)	<ul style="list-style-type: none"> • Most buildings (e.g., public, office, residential) • Piers, wharfs, and bulkheads 港湾施設 • Plazas • Retaining walls • Culverts • On-site energy generation/co-generation plants <p><i>Long-lived buildings and infrastructure</i></p>
2100+	<ul style="list-style-type: none"> • Major infrastructure (e.g., tunnels, bridges, wastewater treatment plants) • Monumental buildings • Road reconstruction • Subgrade sewer infrastructure (e.g., sewers, catch basins, outfalls) <p><i>Assets that cannot be relocated</i></p>

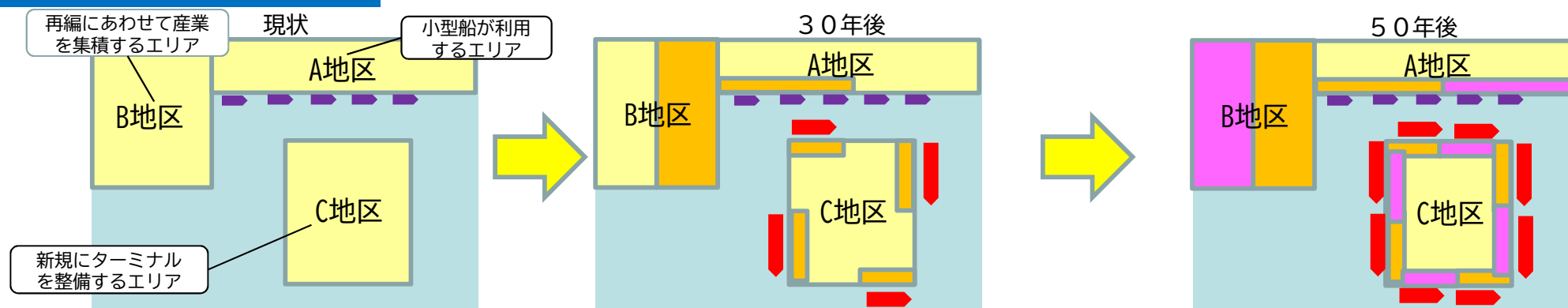
対策についての論点②

【論点2】

近隣施設の高さや断面の整合性を確保し、計画的な対策を講じるため、エリア毎に長期的な視点に立った「土地利用」、「目指すべき「適応水準」」、具体的な「整備順序」や「対策手法」を整理したマスタープランが必要ではないか？

マスタープランが無い場合

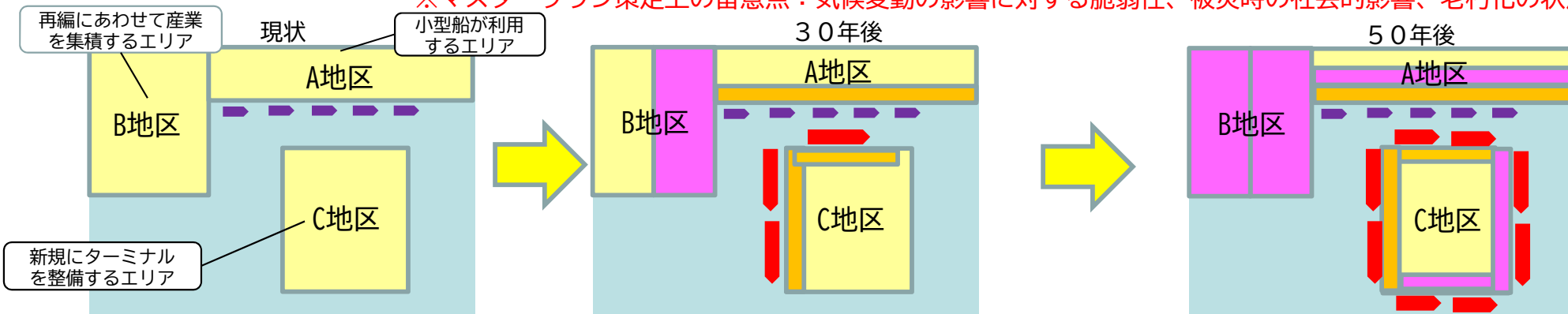
施設の整備時点により地区内に「適応水準」の異なる施設が混在



マスタープランがある場合

地区ごとに「適応水準」を設定することで、施設の高さ等の整合性を確保

※マスタープラン策定上の留意点：気候変動の影響に対する脆弱性、被災時の社会的影響、老朽化の状況



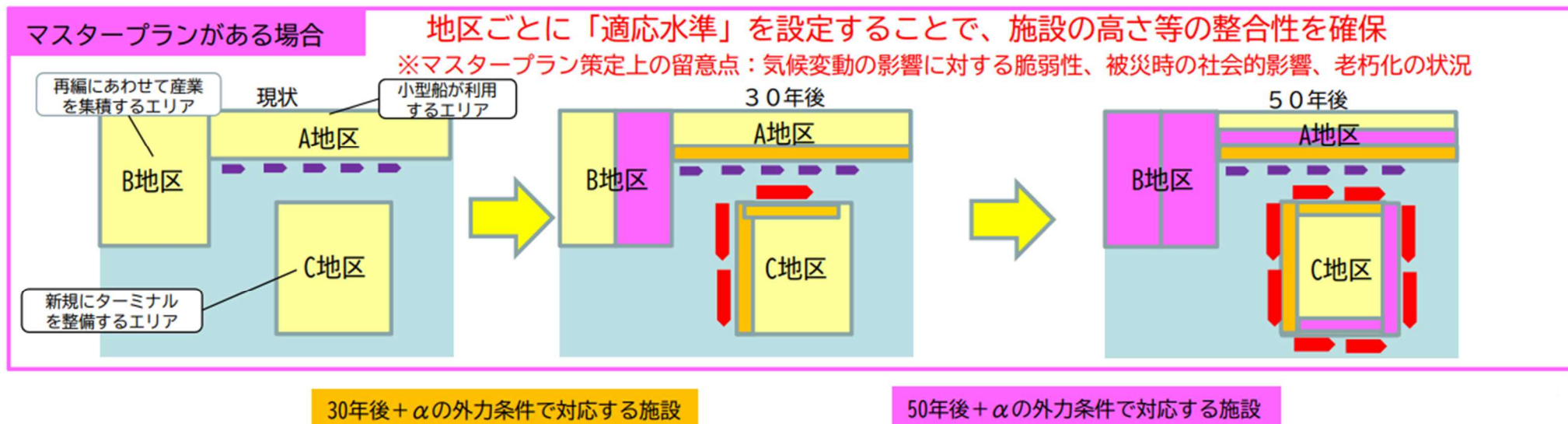
30年後 + α の外力条件で対応する施設

50年後 + α の外力条件で対応する施設

気候変動適応策を実装する施設の考え方

- 技術基準対象施設を新設、改良する場合は、気候変動への対応方針について検討のうえ、適応策を実装するものとする。
- 港湾継続利用に向けた気候変動適応計画(マスタープラン)がある場合は、同計画との調和を勘案して判断する。

マスタープランにおいて示した、港湾全体として維持すべき機能の水準等に対する、個々の施設の位置づけを踏まえ、気候変動への対応方針を検討する。



(マスタープランとは)

近隣施設の高さや断面の整合性を確保し、計画的な対策を講じるため、エリア毎に長期的な視点に立った「土地利用」、「目指すべき「適応水準」」、具体的な「整備順序」や「対策手法」を整理

事例1 EnviCom WG Report (PIANC)

- 将来の気候変動の可能性を理解するために、世界の代表的な港湾で想定されている気候変動シナリオについて紹介。
- また、気候パラメータが港湾施設に与える影響について例示。

各港で想定する気候変動シナリオ

港	項目	想定するシナリオ(外力)
ロンドン	気温	2080年代までに平均+3~4℃
	海面水位	2100年までに+0.2~0.9m(最大+2.7m)
	降雨量	2080年代までに冬期+10~20% 夏季-20~30%
	霧	2080年代までに+20%アップ(冬季の頻度)
コロンビア	気温	2050年代までに+1.2~2.2℃、2080年代までに+1.7~3.7℃ (ダウンスケールモデルでは2050年代までに+6℃)
	海面水位	2100年までに+0.5m(観測データによる予測) 上位シナリオでは2100年までに+1.3m
	降雨量	0.6%/年で降雨日が増加(観測データによる予測)
	風	2020年代までに+0.2m/s、2050年代までに+0.5m/s 3~10m/sの風速の発生頻度上昇
ロングビーチ (アメリカ)	気温	2050年までに+0.6~6.4° F(+0.33~3.56℃)、2100年までに +4.1~8.6° F(+2.28~4.78℃) 2050年までに95° F(35℃)以上の日の頻度が2~3倍
	海面水位	2050年までに+0.13~0.61m、2100年までに+0.43~1.68m
	降雨量	2050年までに総降雨量-9%、日降雨量-13% 2100年までにハリケーンによる降雨量+10~25% 2100年までに20年確率ハリケーンが4~15年確率に変化
	酸性化	2050年までに-0.5pH
ベルギー	気温	2100年までに+3.7~7.2℃、年間2~9回の熱波
	海面水位	2100年までに+0.6m、最大+2.0m
	波浪	1mの海面上昇量に対して波高+4.0m
	降雨量	冬期:2030年までに+3%、2100年までに+12% 夏季:2030年までに-4%、2100年までに-15%

航路	外郭施設	岸壁	荷捌き地	港湾設備	倉庫 / 事務所	加工 / 製造	背後地との接続
気候パラメータ		気候パラメータ		気候パラメータ		気候パラメータ	
気温 水温 降雨強度 / 降水量 平均海面 / 天文潮 風況 / 台風 水質		気温 降雨強度 / 降水量 平均海面 / 天文潮 風況 / 台風 水質		気温 降雨強度 / 降水量 風況 / 台風		気温 水温 降雨強度 / 降水量 平均海面 / 天文潮 風況 / 台風 水質	
影響		影響		影響		影響	
着氷 雪又は雹 霧又は可視性 水深変化 潮流変化 堆積物 波の特性 風荷重 生物学的変化 腐食	着氷 越流 洗掘 波圧 生物学的変化 腐食	着氷 霧又は可視性 水深変化 潮流 洗掘/堆積 波の特性 風荷重 生物学的変化 腐食	過度の熱 / 湿気 着氷 雪又は雹 霧又は可視性 浸水 越流 水深変化 波圧 風荷重 生物学的変化 腐食	過度の熱 / 湿気 着氷 雪又は雹 霧又は可視性 浸水 越流 内水氾濫 負の遺産 風荷重 腐食	過度の熱 / 湿気 着氷 雪又は雹 霧又は可視性 浸水 越流 水深変化 潮流変化 洗掘/堆積 波の特性 内水氾濫 負の遺産 風荷重 生物学的変化 腐食	過度の熱 / 湿気 着氷 雪又は雹 霧又は可視性 浸水 越流 水深変化 潮流変化 洗掘/堆積 波の特性 内水氾濫 負の遺産 風荷重 生物学的変化 腐食	

気候パラメータと港湾施設への影響

事例1 EnviCom WG Report (PIANC)

- 「安全性」「経済効果」「地域社会への影響」「持続可能性」の観点から、気候変動による影響度合いを判断する指標を紹介。
- 指標を基に、港湾資産に対する気候変動適応策の適応性について整理方法を例示。
- 外力の設定方法等について引き続き検討中。

気候変動の影響度合いの判断指標

影響の規模:	安全性	経済効果,事業継続性	地域社会への影響	環境の持続可能性とコンプライアンス	致命的?
壊滅的	大人数の重症・死亡リスク	サプライチェーン・ビジネスの崩壊、または長期的な崩壊リスク	不可欠なサービスが失われ、日常生活が耐えられなくなり、容認できない身体的苦痛が生じる	回復不可能な損害、明確な違反、企業の罰則の可能性	Yes
大	小人数の重症・死亡リスク	ビジネスに深刻な影響を与える、大きな復旧措置が必要となる	日常生活の深刻な混乱、高いレベルの身体的苦痛	重大かつ継続的な損失、コンプライアンス違反に対処するために多大な管理努力が必要	Probably
中	小人数の怪我のリスク	ビジネスの継続性を守る行動が必要	重要なサービスの頻繁な中断;日常生活困難、中等度の身体的苦痛	軽度の回復可能な損傷、コンプライアンスの問題でアクションが必要	Unlikely
小	軽傷のリスク	個別の問題(例: サプライチェーンに代替品が存在する)	必要不可欠なサービスと日常生活が断続的に中断され、身体的苦痛が少ない	ごくわずかな損傷、小さな違反で簡単に解決	Not critical

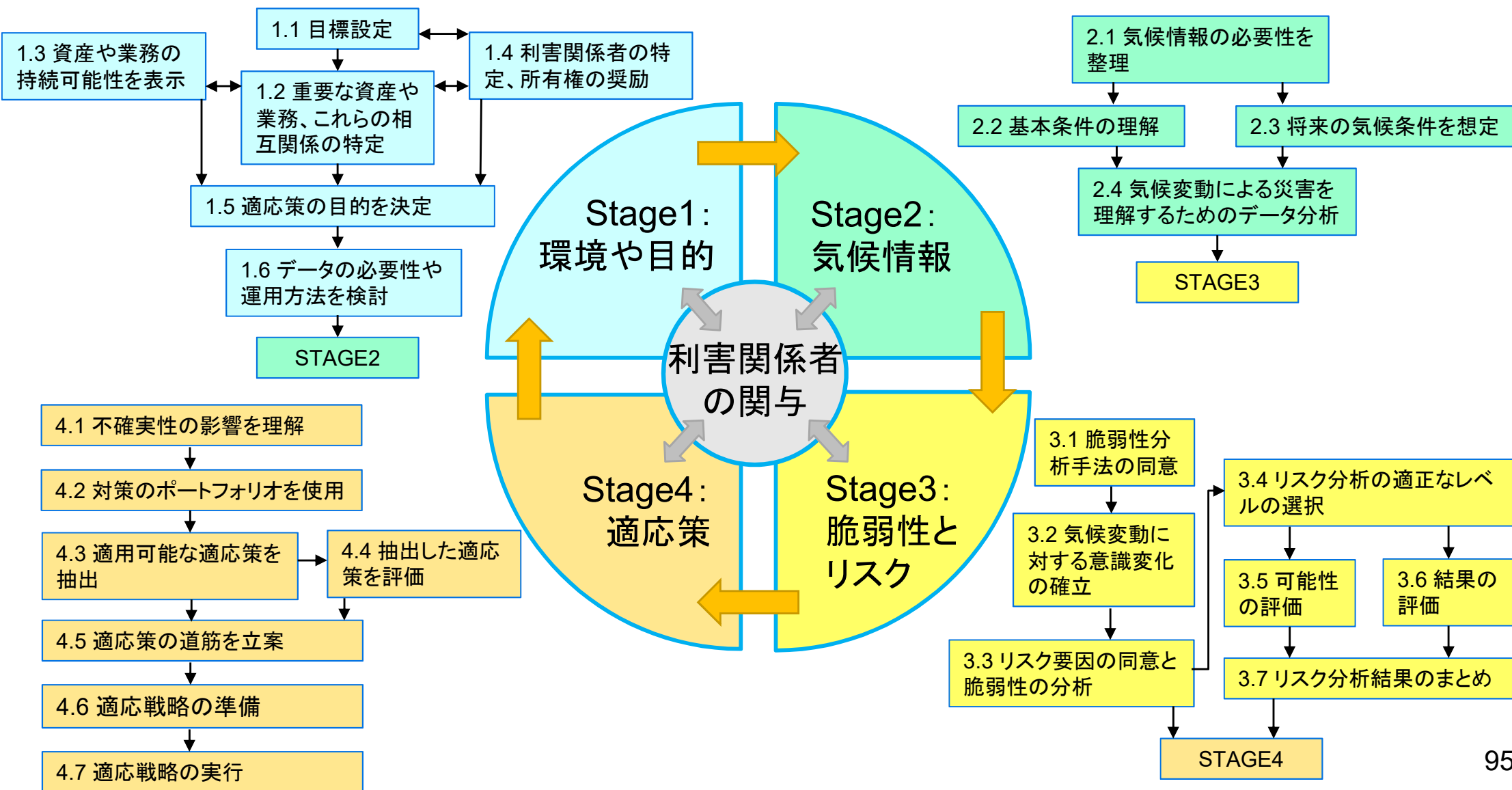
港湾施設の適応能力の評価例

海上および陸上の港湾インフラ		致命的か?				影響を及ぼすハザードへの耐性										主な内容										
		Not critical	Unlikely	Probably	Yes	浸水	越波	流速 / 高波	河川流量の減少	水深の変化	河床または堤防の浸食	霧または視界不良	風向きの変化	極端な寒さ・氷・氷結	極端な暑さ・湿度	水質環境の変化	生物学的変化	設計データ			資産の状態			性能について		取り得る適応策の有無
																		供用期間(年)	建設年月日	残存寿命	良好	適度	悪い	維持管理費	費用対効果	
資産	構造物	岸壁 (i)				○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	50	1994	25	○	○	↔	✖	✖	✖
		岸壁 (ii)				○				○	○	○	○					50	2014	45	○		↔	✓	✓	✓
		防舷材			○							○	○	○	○			15	2014	10	○		↔	✓	✓	✓
	はしご			○							○	○	○	○			15	2014	10	○		↔	✓	✓	✓	
	船揚場	○																								
物理システム	防食			○					○			○		○			10	2014	5	○		↔	✓	✓	✓	
	資源				○	○	○			○	○	○	○				N/A	1950	N/A	○		↑	✓	✖	✖	
事業内容	養浜			○		○	○	○	○						○		15	2018	14	○		↔	↔	↔	↔	
	水先案内				○		○	○	○	○	○	○					N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	↔	✓	✓	
	浚渫(しゅんせつ) / 廃棄			○			○	○	○	○	○						N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	↑	✖	✖	✖
	セーリング / ウォータースポーツイベント		○																							
水上スポーツ競技用ブイ		○																								

凡例	金額が高い	適度	金額が低い
増加	↑	↔	↔
安定	↔	↔	↔
削減	↓	↔	↔

事例1 EnviCom WG Report (PIANC)

○気候変動に対する適応計画の検討手順を4つのステージに分類して示している。

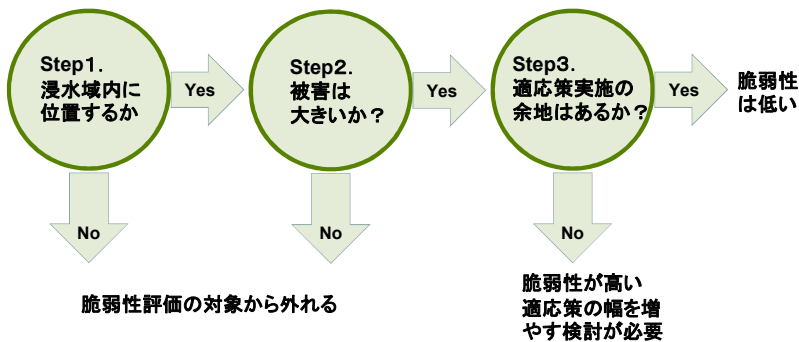


事例2 ロサンゼルス港における平均海面水位上昇に対する適応策（アメリカ）適応策(アメリカ)

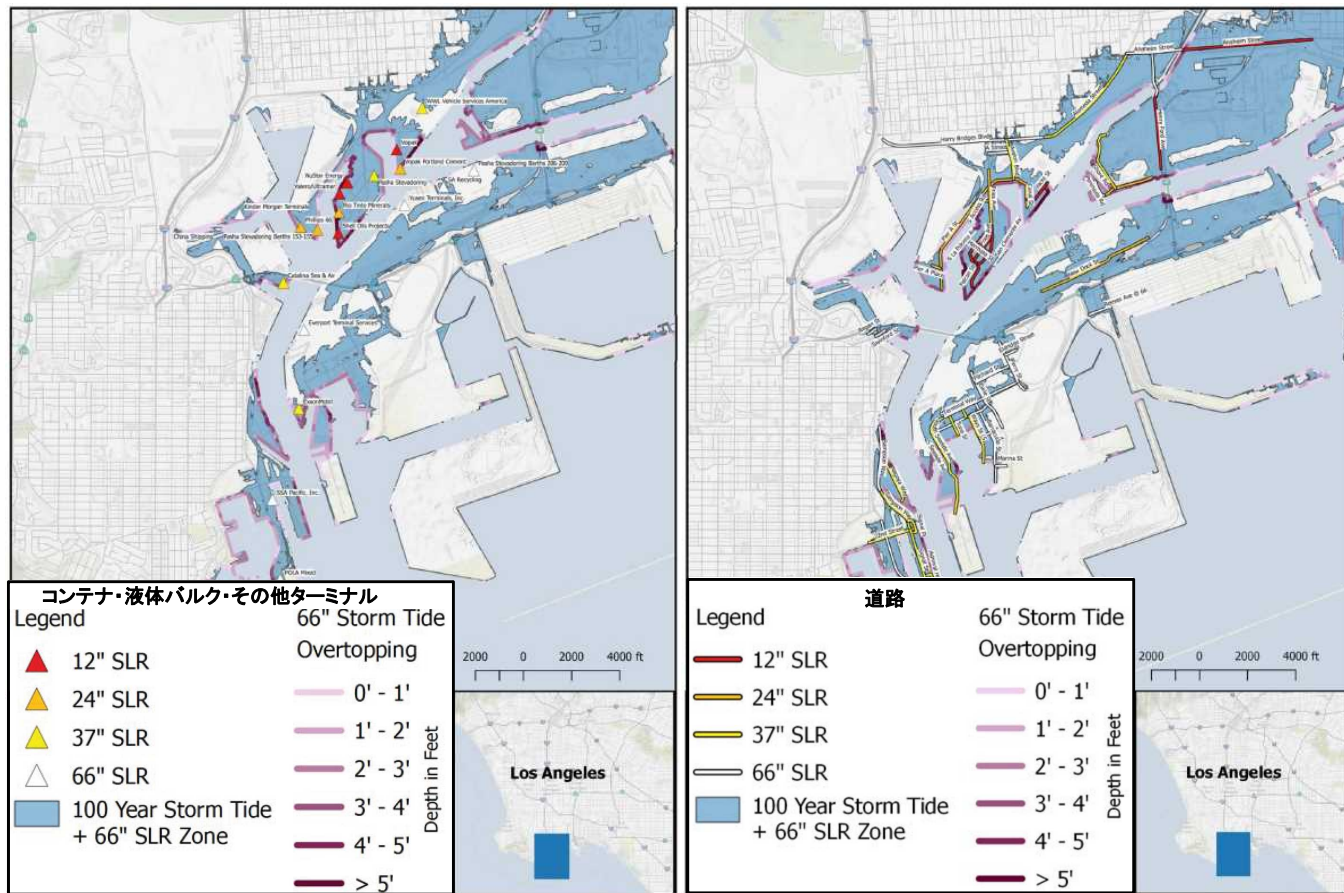
- ロサンゼルス港はNRC (National Research Council)の2030年、2050年、2100年における海面上昇量の予測値を対象に、気候変動に対する適応策を検討。
- 複数シナリオの海面上昇量に対する浸水予測結果を踏まえ、脆弱性評価の検討フローに基づいた港湾施設の評価を実施。

2000年に対する海面上昇量の予測

年	海面上昇量
2030	5.8 in ± 2.0 in (14.7 cm ± 5.1 cm)
2050	11.2 in ± 3.5 in (28.4 cm ± 8.9 cm)
2100	36.7 in ± 9.8 in (93.2 cm ± 24.9 cm)



脆弱性評価の検討フロー



浸水域内の資産の例
(左:コンテナ・液体バルク等、右:道路)

ロサンゼルス港における平均海面水位上昇に対する適応策(アメリカ)

- 脆弱性評価を踏まえて海面上昇量のシナリオ毎に適応策を整理し、各適応策の実施計画を「Immediate(5年以内)」「Soon(2030年まで)」「Future(2030年以降)」の3パターンで分類。
- 検討に際して関係者とのワークショップを開催。

海面上昇に対する基本計画の例

対象シナリオ	適応策	時間枠
全シナリオ	海面上昇の影響に関する適応策を検討 1.港湾マスタープラン 2.エンジニアリング設計ガイドライン(2009年) 3.LAウォーターフロントデザインガイドライン(2011年)	Immediate
94cmの海面上昇	脆弱性ゾーンマップを作成 最も可能性が高い予測である37インチの海面上昇量シナリオに基づくマップの作成を推奨	Immediate
全シナリオ	港湾計画・設計の手順書に海面上昇の可能性の影響と適応戦略に関する内容を記載	Immediate
全シナリオ	パンフレット作成・配布など、海面上昇に関する周知を実施	Immediate
全シナリオ	5年毎に海面上昇量に関する科学的知見を確認し、必要に応じて脆弱性評価を見直す	Immediate

海面上昇に対する地域連携の例

対象シナリオ	適応策	時間枠
全シナリオ	個別に気候変動に関する研究を実施しているPOLB、ロサンゼルス市、ロングビーチ市が協力し、情報交換や費用分担を実施	Immediate
全シナリオ	地域連携－太平洋気候変動作業部会への参加。	Immediate
全シナリオ	CAPA(カリフォルニア州港湾局協会)の海面上昇グループに参加	Immediate
全シナリオ	海面上昇に対する適応策に関するワーキンググループを立ち上げ	Immediate
全シナリオ	海面上昇に対する天然資源・生息地(湿地など)の防護・適応戦略を策定	Immediate

ふ頭の気候変動適応策の例

対象シナリオ	適応策	時間枠
30cmの海面上昇 +高潮	約91cmの浸水からバルクターミナルを防護するように防潮壁を整備(延長約152m)	Immediate
94cmの海面上昇 +高潮	防潮壁を約61cm嵩上げ(延長約152m)	Future

重要施設の気候変動適応策の例

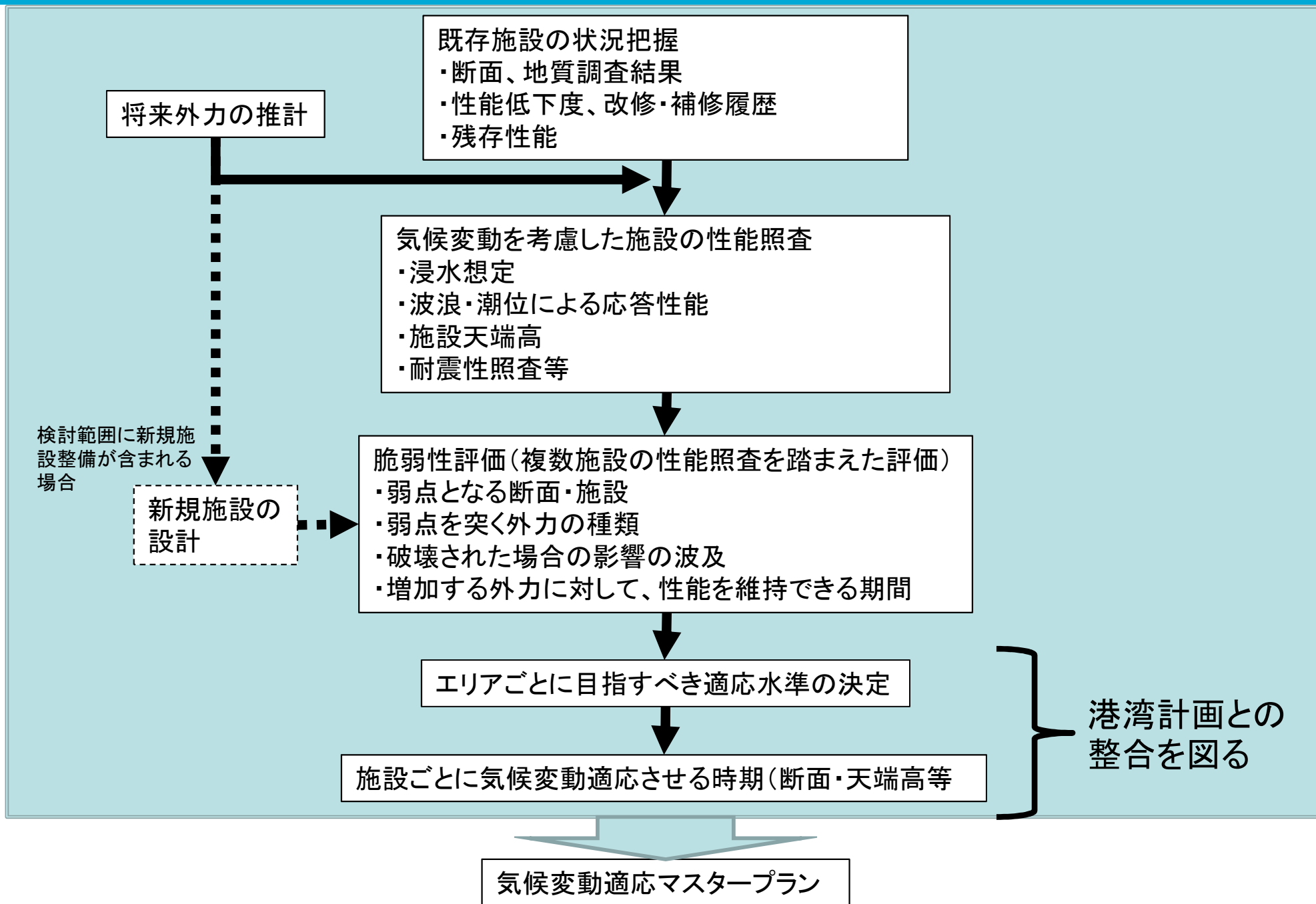
対象シナリオ	適応策	時間枠
61cmの海面上昇 +高潮	電気設備を約2.7m嵩上げ	Soon
94cmの海面上昇 +高潮	約2.7mの嵩上げで約0.9mの浸水	Future

輸送・交通の気候変動適応策の例

対象シナリオ	適応策	時間枠
30cmの海面上昇 +高潮	Water St.を約0.9m嵩上げ(延長約52m) Nissan St.を約0.9m嵩上げ(延長約69m) Yacht St.を約0.9m嵩上げ(延長約299m) ⇒消防署へのアクセスを確保	Immediate
61cmの海面上昇 +高潮	Water St.を嵩上げ(延長約511m増大) Nissan St.を嵩上げ(延長約62m増大) Yacht St.を嵩上げ(延長約11m増大)	Soon
94cmの海面上昇 +高潮	Nissan St.を嵩上げ(延長約56m増大) Yacht St.を嵩上げ(延長約11m増大)	Future

Immediate : 5年以内
 Soon : 2030年まで
 Future : 2030年以降

気候変動適応マスタープランの検討フロー



既存施設の状況把握

○維持管理計画書、設計報告書、竣工図等より、既存施設の断面、土質調査結果、性能低下度、改修履歴、残存性能等の既存施設の状況を把握・整理する。

項目	把握方法	備考
既存施設図面 (平面図・断面図)	・維持管理計画書、設計図、竣工図	
地質調査結果	・土質調査報告書、設計報告書、維持管理計画書	
深淺測量結果	・深淺測量報告書、設計報告書、維持管理計画書	
施設の性能低下度	・維持管理計画書(点検結果)	
改修・補修履歴	・維持管理計画書、改良工事竣工図	
残存性能	・設計報告書、維持管理計画書(点検結果)等より算出	

気候変動を考慮した施設の性能照査の例

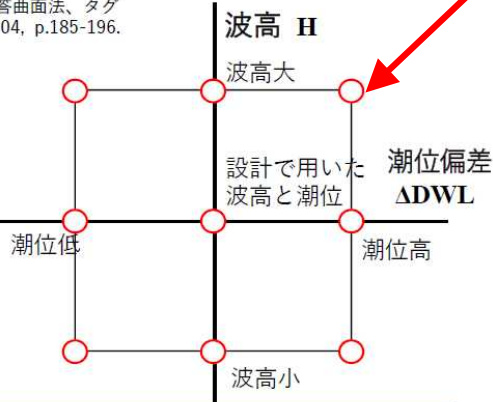
- 気候変動による海面上昇や潮位偏差・波高・周期の増大の予測結果には不確実性が含まれるため、新規防波堤の断面や、既存防波堤の補強断面・補強タイミングの決定が困難。
- ⇒ 予め幅のある設計条件に対する安定性(安全率、作用耐力比、破壊確率等)を感度分析的に計算し、応答曲面関数を作成することで、任意の設計条件の変化に対して安定性を即座に算出。
- 将来変化比に基づき算出するA年後の外力と、作用耐力比が1.0を上回る外力の比較により、必要断面諸元や補強タイミングを考察。

【応答曲面関数の検討イメージ】

(参考) 山田 秀: 「実験計画法 方法編—基礎的方法から応答曲面法、タグチメソッド、最適計画まで」, 日科技連出版社, 2004, p.185-196.

○感度分析

- ・合計9ケースの作用耐力比を計算
- 単一の設計条件に加えて、波高(周期も同時に変化)と設計潮位がそれぞれ変化した場合の条件を追加、



○応答曲面関数(滑動の場合)の作成 ⇒ 2次関数を仮定

($H_{1/3}$: 波高, ΔDWL : 潮位偏差, $a \sim f$: 係数)

$$S_d / R_d_slide = a + b * H + c * \Delta DWL + d * (H * \Delta DWL) + e * (H)^2 + f * (\Delta DWL)^2$$

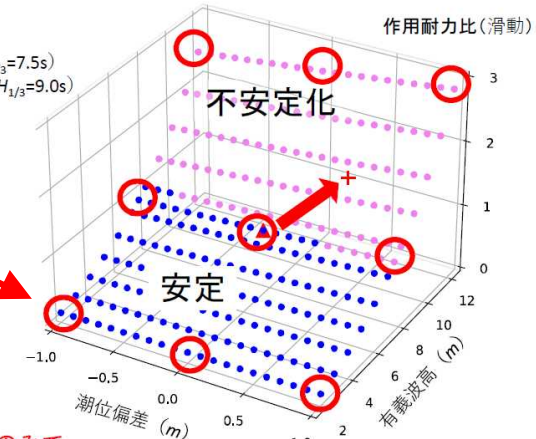
9点において最も適合する $a \sim f$ を最小二乗法により算定。

任意の潮位と波高の組合せ条件ついて、作用耐力比を算出可能となる!

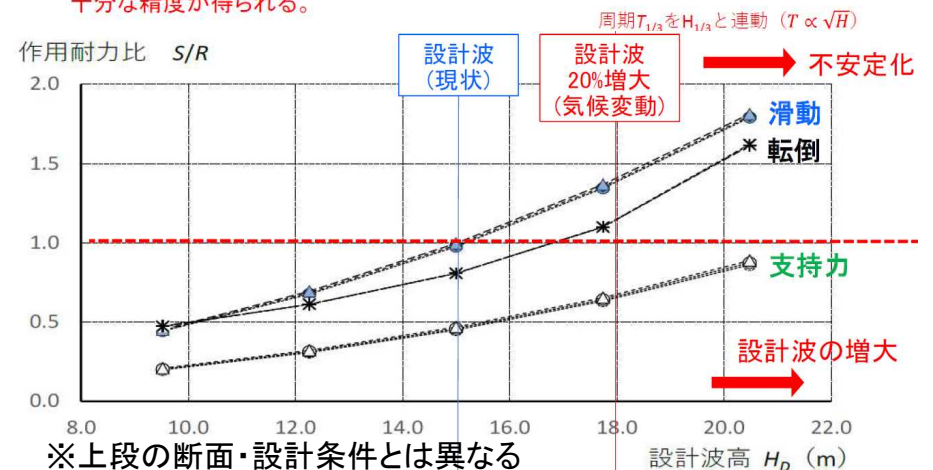
○: 作用耐力比を算出する代表ケース

【凡例】

- : 作用耐力比 ≤ 1.0
- : 作用耐力比 > 1.0
- ▲: 設計条件 ($w=0.0m, H_{1/3}=7.5s$)
- + : 因子変化例 ($w=0.5m, H_{1/3}=9.0s$)



・この曲面の関数化
→ 9条件での安定計算のみで、十分な精度が得られる。

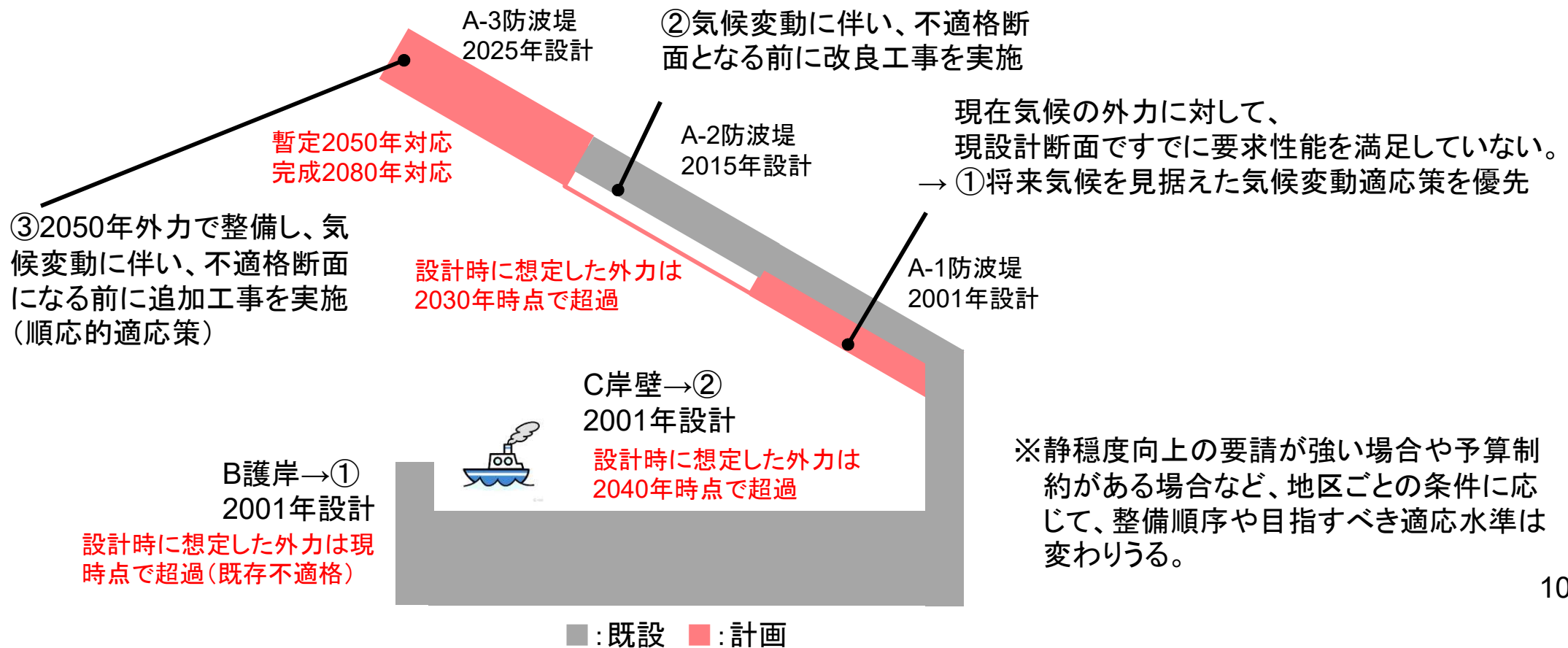


※上段の断面・設計条件とは異なる

設計波高 H_D (m)

エリアごとに目指すべき適応水準の決定

- 各施設の性能照査・脆弱性評価を踏まえ、隣接施設や影響範囲の施設で整合の取れた「エリアごとの目指すべき適応水準」を設定する。
- 例えば、既存不適格の防波堤に隣接して、2080年外力を基に防波堤を整備することが、一連の防波堤を総体で捉えたときに必ずしも最適な整備方法で無い可能性がある。
- その場合、現在外力に対し、すでに要求性能を満足していない断面について、2050年外力を基に気候変動適応策を実施し、一連の施設群としての性能を向上することが効果的である可能性がある。



複数の施設の照査結果の整理案

- 気候変動を考慮した複数の施設(防波堤、護岸、岸壁等)の性能照査結果の整理案を下記に示す。
- 照査項目として「天端高」「安定性」に着目した整理を行うことが挙げられる。
- 施設の配置や破壊時の相互の影響を考慮し、目指すべき適応水準や整備順序を決定。

		A-1防波堤	A-2防波堤	A-3防波堤	B護岸	C岸壁
現在の波浪・潮位 に対する性能照査	天端高	○	○	○	×	○
	安定性	×	○	○	×	○
性能不足となる年次		(既に×)	2030	(暫定)2050	(既に×)	2040
天端高の性能(供用性)		-	-	-	×許容越波流量超過	○⇒×岸壁利用支障
安定性指標	滑動	×	○⇒×	○⇒×	×	○
	転倒	○	○	○	○	○
	支持力	○	○	○	×	○
	部材耐力	○	○	○	○	○
影響の大きい作用		波浪	波浪	潮位偏差	波浪	潮位偏差
目指すべき適応水準		暫定2050年、完成2080年				
整備順序		①	②	③	①	②