

諸外国における気候変動による
将来の外力の増加量の考慮の仕方

令和元年12月9日

アメリカにおける気候変動に対する取組

- アメリカ陸軍工兵隊 (USACE) が「公共事業プログラムにおける海面上昇の考慮 (ER1100-2-8162, INCORPORATING SEA LEVEL CHANGE IN CIVIL WORKS PROGRAMS, 2013年12月公表)」において海面上昇量を考慮することを示しており、特に過去の上昇量(トレンド)による最小値は必ず考慮するべきと記載。
- 海面上昇率の算定式は、全米科学アカデミー (National Academy of Science) が1987年に発表した「海面変動への対応 (Responding to Changes in Sea Level)」で提案されたNRC (National Research Council) 曲線を基にしたもの。
- 事業のライフサイクルにわたる計画検討や設計では、将来起こり得る海面上昇率に関し、全ての範囲 (低(low)・中(intermediate)・高(high)の3シナリオ) を考慮しなくてはならない。また、事業の代替案について、事業の有・無それぞれに対し、低・中・高のシナリオについて評価するが、事業内容によって採用する将来シナリオが異なる。
- ハリケーン・サンディで被災したニューヨーク州スタテン島の海岸堤防については、将来の海面上昇量が増加した場合にも適応可能な設計としている。

各シナリオの海面上昇率

- 低(low): 歴史的な海面上昇率(例えば下式では1.7mm/年)
- 中(intermediate): 全米科学アカデミー (NRC) の改定NRC曲線I及び下式により算定し、地域の地盤変化により補正
- 高(high): 改定NRC曲線III及び下式により算定し、地域の地盤変化により補正

$$E(t) = 0.0017t + bt^2$$

$$E(t_2) - E(t_1) = 0.0017(t_2 - t_1) + b(t_2^2 - t_1^2)$$

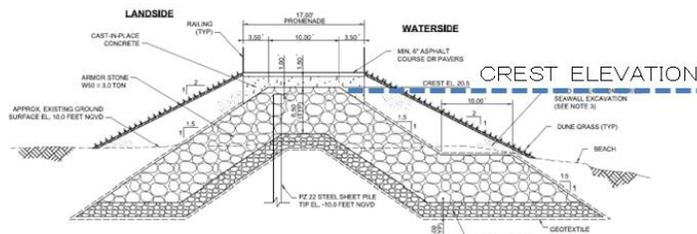
t: 将来時点(年。ただし1986年を起点。)

t₁: 建設時点(年。ただし1992年を起点。)、t₂: 将来時点(年。ただし1992年を起点。)

b: 定数(改定NRC曲線IIについては2.71 × 10⁻⁵、改定NRC曲線IIIについては1.13 × 10⁻⁴)

海岸堤防復旧の事例(ニューヨーク州スタテン島の例)

現在の設計



将来的に適応可能な設計

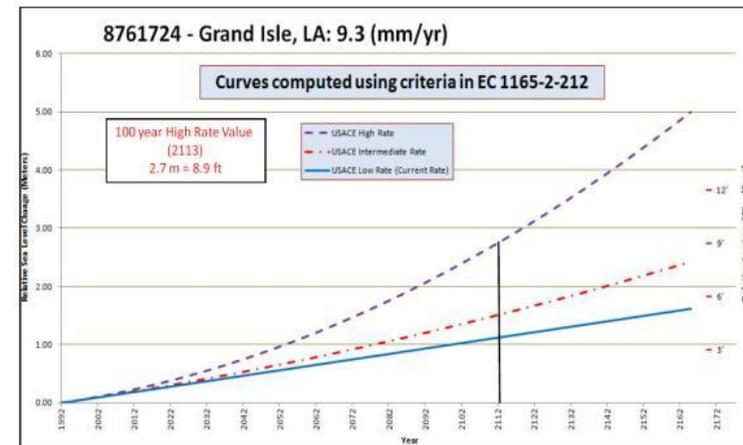
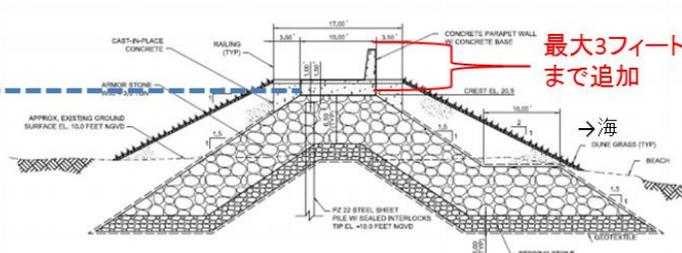


Figure B-10. Example USACE SLC curves for Grand Isle, Louisiana.

ルイジアナ州グランドアイル地点における海面変化曲線の事例

イギリスにおける気候変動に対する取組 (UKCP09)

- 「気候変動適応：洪水・海岸侵食リスク管理部署局への助言」では、環境庁、地方政府及び治水組合が洪水及び沿岸侵食リスク管理事業として政府への予算申請を行う場合には、気候変動係数を用いて感度分析を行い、実行可能な推奨策を示すことを求めている。*1
- 例えば、イギリス南部のサウサンプトン市における海岸洪水・侵食管理戦略では、気候変動による海面上昇の変化量を中庸シナリオの95パーセンタイル値を用いて評価しており、高潮については1/200のイベントを評価している。*2

サウサンプトン市における海面上昇量のシナリオ別の予測結果

Table 4-1. Cumulative relative sea level rise changes under different UKCP09 climate change scenarios.

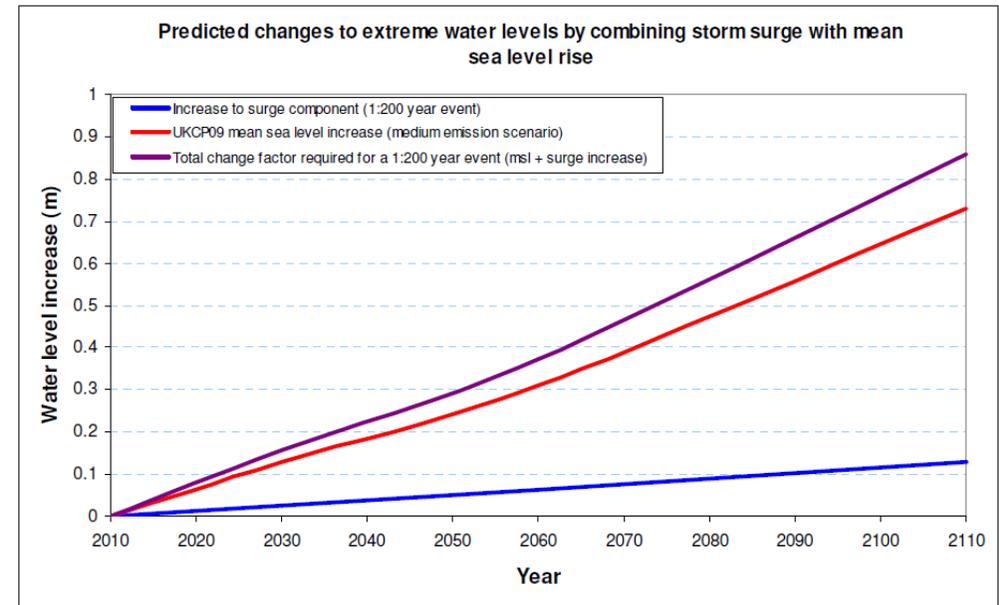
Scenario (total sea level rise in cm)	2015	2030	2060	2110
UKCP 09 Medium (95%tile) – Change Factor*	2.6	11.1	31	72.6
Lower end estimate (UKCP09 low emissions 50%tile)	1.4	5.8	16	37.4
UKCP09 Upper end estimate	2	9.5	34.5	101.5
H++ Scenario	3	15	64	211

サウサンプトン市における海面上昇+高潮による海面上昇量の年代別予測

Table 4-2. Predicted future extreme water levels (mODN) for Southampton based on EA 2011 guidance (95 percentile medium emission scenario for relative sea level rise coupled with recommended storm surge changes).

Return Period (years)	2010	2030	2060	2110
1	2.45	2.60	2.79	3.21
2	2.55	2.69	2.88	3.33
5	2.67	2.81	3.01	3.46
10	2.76	2.90	3.11	3.56
20	2.84	2.99	3.19	3.66
50	2.94	3.10	3.31	3.77
100	3.02	3.17	3.39	3.87
200	3.09	3.25	3.46	3.95
500	3.18	3.35	3.57	4.05
1000	3.25	3.41	3.64	4.14

サウサンプトン市における海面上昇+高潮による海面上昇量の予測



- イギリスにおける気候変動による将来予測シナリオについては、UKCP09までは中庸シナリオを主に用いている。

*1 Adapting to Climate Change: Advice for Flood and Coastal Erosion Risk Management Authorities、イギリス環境庁 2011

https://assets.publishing.service.gov.uk/government/uploads/system/uploads/attachment_data/file/571572/LIT_5707.pdf

*2 Southampton Coastal Flood and Erosion Risk Management Strategy, pp24,25, サウサンプトン市, 2012

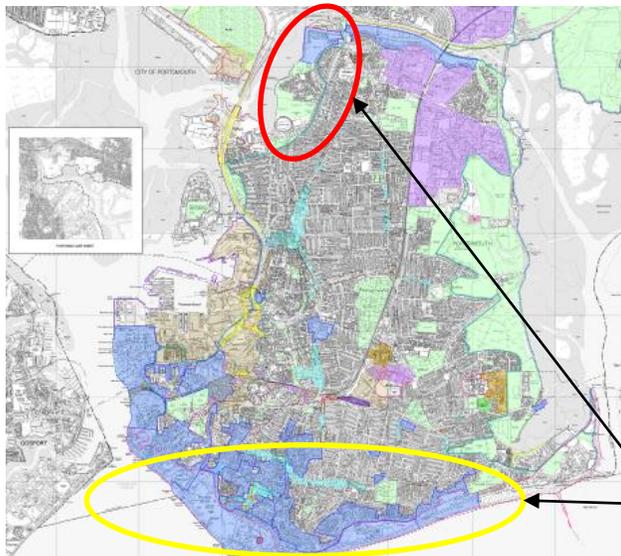
<https://www.southampton.gov.uk/environmental-issues/flooding/managing-flood-risk/southampton-coastal-strategy.aspx>

イギリスにおける気候変動に対する取組事例

- 海岸堤防の天端高を決める際、100年後の海面上昇に適応できるよう、4～6mm／年の海面上昇を見込んだ堤防整備をしている。(例えば、2015年に整備した海岸堤防は2115年時点の上昇分に合わせ天端高を決定。)
- 海岸堤防の安全度は、気候変動による海面上昇を見込んだ1/200としている。
- ポーツマス市では、整備する海岸の特徴に合わせて気候変動による影響の考慮の仕方を変えている。
例えば、内湾の海岸堤防では、気候変動による海面上昇及び高潮を見込んだ1/500の高さの堤防を整備している。(1/200と1/500の堤防高の差が比較的小さいため。なお、増加分の費用は全額地元が負担。)
外洋に面した海岸堤防については、今後、気候変動による海面上昇、高潮、波浪の影響を見込んだ整備を予定している。(2019年12月現在、予算確保に向けた手続き中。)

担当者からの聴き取り(2019年12月)

ポーツマスの海岸堤防 事業位置図



ポーツマス市Webページ地図に加筆

<https://www.portsmouth.gov.uk/ext/documents-external/pln-portsmouth-plan-proposal-map.pdf>



ポーツマスの海岸堤防
(2018年11月完成)

内湾に面した海岸堤防では、気候変動による海面上昇と高潮を考慮(赤枠)
外洋に面した海岸堤防では、気候変動による海面上昇、高潮、波浪を考慮予定(黄枠)



1/200と1/500の海岸堤防の差

イギリスにおける気候変動に対する取組 (UKCP18)

- イギリス気象庁が中心となり、IPCC AR5のRCPシナリオをベースにした新たな気候予測「UKCP18」を2018年11月に発表。
- IPCC AR5を基にした全球モデルは60kmメッシュ、地域モデルは12kmメッシュ、2.2kmメッシュの地域モデルの気候変動予測結果を公表。

イギリス国内における気候リスク評価・適応策検討を支援することを目的に、イギリス気象庁が主導して英国の気候変動予測を実施。

Webサイトでの情報提供例(データセット詳細ページ)

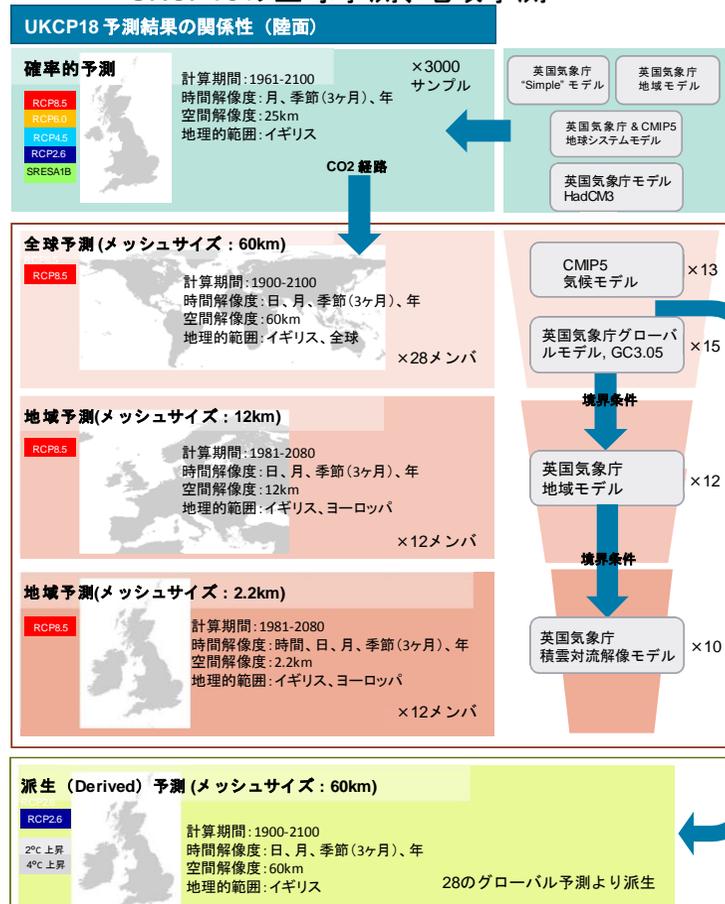


全球予測及び地域予測は、高性能計算機の制約のため、IPCC AR5のシナリオのうち、RCP8.5のみで予測している。

RCPシナリオ毎の海面上昇量

Sea level change at 2100 (m) relative to 1981-2000 average			
	RCP2.6	RCP4.5	RCP8.5
London	0.29-0.70	0.37-0.83	0.53-1.15
Cardiff	0.27-0.69	0.35-0.81	0.51-1.13
Edinburgh	0.08-0.49	0.15-0.61	0.30-0.90
Belfast	0.11-0.52	0.18-0.64	0.33-0.94

UKCP18の全球予測、地域予測

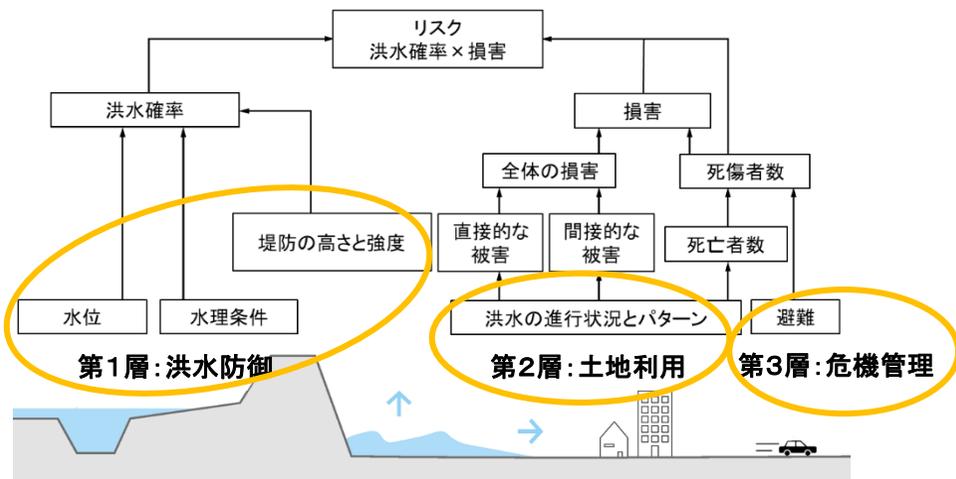


- 環境庁は、イングランドにおける海面上昇に対する気候変動係数としてRCP8.5シナリオの75パーセントイル値、95パーセントイル値を設定する予定。

オランダにおける気候変動に対する取組

- オランダ王立気象研究所 (KNMI) が発表しているKNMI' 14で大気循環と気温上昇の組合せによる4シナリオを考慮している。
- 政府(インフラ環境省及び経済省)は、現在及び将来のオランダを安全かつ魅力的な場所とし続けることを目的とした長期的な計画である「デルタプログラム (Delta Programme)」を策定している。
- 現在、2050年までに洪水による死亡率を年間一人あたり10万分の1以下とする目標達成に向けて、洪水防御、土地利用、危機管理の3段階の対策による重層的洪水リスク管理を実施している。
- 沿岸部の気候変動に対しては海面上昇量の変化を考慮することとしており、高潮変化量、波浪変化量は不確実性が高いことから現段階では考慮していない。※1
- 沿岸部の対策としては、海面上昇を考慮した取組として、養浜を行って海岸保全を図る「沿岸再生2」プロジェクトを2020年まで実施中であり、年間1,200万 m³の砂を供給することとしている。

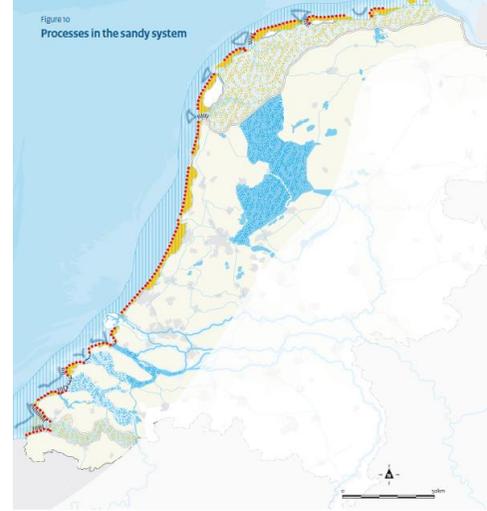
リスクベース・アプローチ概略図※2



重層的洪水リスク管理の概要※3

対策名	各層の詳細
第3層:危機管理 	◎あらゆる洪水に対応する危機管理 情報提供(洪水警報、リスクマップなど)、避難施設の整備
第2層:土地利用 	◎洪水被害を抑制する土地利用 氾濫流の抑止 土地利用など
第1層:洪水防御 	◎予防策を実施する洪水防御 洪水防御基準を満たすために、定期点検(6年毎)、ハード対策の実施

養浜を行う海岸線(地図中赤点)※4



出典:

※1 担当者からの聴き取り(2019年12月)

※2 The Ministry of infrastructure and the Environment and The Ministry of Economic Affairs, Delta Programme 2014: Work on the delta, 2013.9, pp36(※3), pp83(※4), <https://english.deltacommissaris.nl/delta-programme/documents/publications/2013/09/17/delta-programme-2014>

※3 The Ministry of infrastructure and the Environment and The Ministry of Economic Affairs, Delta Programme 2015: Working on the delta, 2014.9, pp14, <https://english.deltacommissaris.nl/documents/publications/2014/09/16/delta-programme-2015>

※4 The Ministry of infrastructure and the Environment and The Ministry of Economic Affairs 2015: National Water Plan 2016-2021 pp52, <https://www.government.nl/documents/policy-notes/2015/12/14/national-water-plan-2016-2021>

オランダにおける海岸侵食に対する取組事例(サンド・モーター)

○気候変動による影響

オランダの海岸の砂浜は、毎年、海流により砂が削られていた。
砂浜の消失は、海拔ゼロメートル地帯にある市街地への海水侵入へつながる。

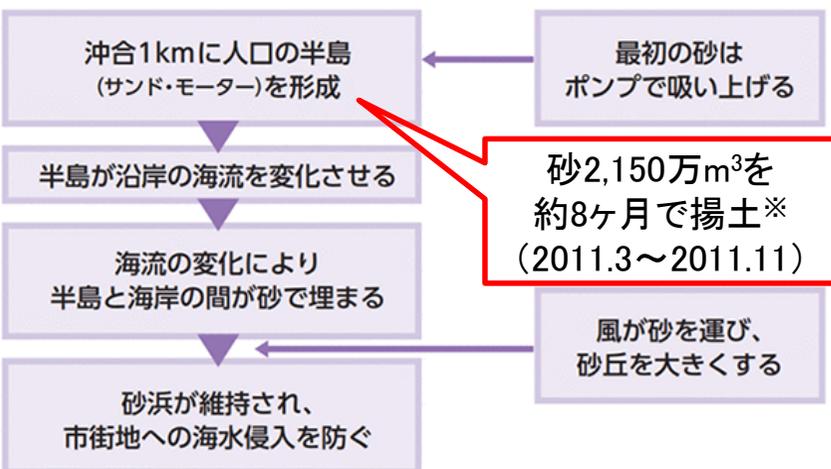
○取組

海面水位の上昇によるこうした被害を防ぐため「サンド・モーター(サンド・エンジン)」という事業が考案された。
「自然を生かした沿岸づくり」というコンセプトの下、海岸に堆積させた砂を風・波・海流によって、歳月をかけて自然に拡散させ、失われた海岸を再形成することを目指している。

○効果／期待される効果等

この方法は砂を堆積させる回数が少ないため、従来の侵食対策よりもコストが抑えられる。
まだ実験段階だが、砂浜が拡大したことで、観光客が増え、沿岸域に生息する動植物の種類が増えた。

(出典:気候変動適応情報プラットフォーム オランダ沿岸の「サンド・モーター」https://adaptation-platform.nies.go.jp/db/measures/report_008.html)



サンド・モーターのしくみ
(出典:環境省「STOP THE 温暖化 2017」)

※(出典:THE SAND MOTOR INTRODUCTION
<https://www.dezandmotor.nl/en/the-sand-motor/introduction/>)



サンド・モーター
(出典:Rijkswaterstaat, Interim results 2011-2015)

サンドモーター位置図



(出典:THE SAND MOTOR
<https://www.dezandmotor.nl/uploads/2015/09/280778-factsheet-zandmotor-engels.pdf>)

諸外国における気候変動に対する取組

	アメリカ	イギリス(UK Climate Projections (UKCP))		オランダ
		UKCP09	UKCP18	
気候変動の対象シナリオ	<ul style="list-style-type: none"> 陸軍工兵隊(USACE)が過去の上昇トレンドの延長による最低限の上昇シナリオ及び過去のトレンドに係数補正した2つのシナリオの合計3シナリオを用意 	<ul style="list-style-type: none"> イギリス気象庁(Met office)及び環境庁(EA)が発表しているUKCP09でSRES:A1FI, A1B, B1に相当する3シナリオを用意 極端な事例としてH++シナリオを用意 気候変動(海面上昇)の事業評価での取り扱いについては環境省がガイダンスを発行(調査中) 	<ul style="list-style-type: none"> 2018年から順次公表が開始されたUKCP18において、海面上昇量と高潮に関する将来予測結果を公表 	<ul style="list-style-type: none"> オランダ王立気象研究所(KNMI)が発表しているKNMI' 14で大気循環と気温上昇の組合せによる4シナリオを用意
海面上昇量の取り扱い	<ul style="list-style-type: none"> ETL1100-2-1において海面上昇の3シナリオについて記載 具体的な海面上昇量は陸軍工兵隊のWEBで検索可能 	<ul style="list-style-type: none"> Adapting to Climate Change: Advice for Flood and Coastal Erosion Risk Management Authoritiesにおいて海面上昇量を記載 年間海面上昇量については確率分布の90パーセンタイル値と極端なH++シナリオについて年代別に提示 	<ul style="list-style-type: none"> RCP2.6, RCP4.5, RCP8.5のシナリオ毎に年代別の海面上昇量を提示 	<ul style="list-style-type: none"> KNMIのシナリオ毎に全球平均、北海平均の海面上昇量を記載
高潮の変化量	<ul style="list-style-type: none"> 連邦緊急事態管理庁(FEMA)の洪水保険研究(FIS)において高潮の変化量について記載(調査中) North Atlantic Coast Comprehensive Study(NACCS) Coastal Storm Hazards from Virginia to Maineにおいて北大西洋地域における高潮について調査(調査中) 	<ul style="list-style-type: none"> Adapting to Climate Change: Advice for Flood and Coastal Erosion Risk Management Authoritiesにおいて高潮の変化量を記載 2020年代, 2050年代, 2080年代における確率分布の90パーセンタイル値の高潮の変化量を提示 	<ul style="list-style-type: none"> 200年確率の嵐による海面上昇量の変化を提示(温暖化による海面上昇を除く) RCP8.5シナリオで1mm/年であり、温暖化による海面上昇の1割 	<ul style="list-style-type: none"> 高潮に影響を及ぼす風速について記載 高潮に関する言及なし
波浪の変化量	<ul style="list-style-type: none"> 調査資料では変化量記載なし 	<ul style="list-style-type: none"> Adapting to Climate Change: Advice for Flood and Coastal Erosion Risk Management Authoritiesにおいて極端な波高の変化量を記載 年代別に波高の変化量の割増を提示 	<ul style="list-style-type: none"> RCP8.5シナリオにおける増加量を提示(有義波高で約10~20%増加) 	<ul style="list-style-type: none"> 波浪に影響を及ぼす風速について記載 波浪に関する言及なし
気候変動に対する具体的取組	<ul style="list-style-type: none"> ハリケーン・サンディで被災したニューヨーク州スタテン島の海岸堤防の復旧事例 海面上昇量: ミニマムのシナリオで0.7ft(約21cm) 高潮変化量: 1/100年確率水位 12.6ft(約3.84m) 波浪変化量: 直接的には考慮無し(Coastal Engineering Manual 1999に基づく算出のみ) 	<ul style="list-style-type: none"> サウサンプトン市の海岸洪水・侵食管理戦略における記載(2012年策定) 採用シナリオ: 中庸、95パーセンタイル値 海面上昇量: 2110年で+72.6cm 高潮変化量: 2110年1/200確率の海面上昇量+高潮変化量で水位3.95m 波浪変化量: 記載無し ポーツマス市の海岸堤防整備では、気候変動による海面上昇、高潮、波浪の変化を考慮(場所に応じて考慮する項目を選択) 	<p style="text-align: center;">—</p>	<ul style="list-style-type: none"> 北海における海面上昇量 低シナリオ: 25~60cm、高シナリオ45~80cm 高潮変化量、波浪変化量の考慮なし。

ベネチア 過去50年で最も高い高潮洪水(2019年11月12日)

【概要】

- イタリアのベネチアでは、強風、大雨、季節的な高潮により、過去50年で最悪の高潮洪水が発生。*1
- ベネチアの高潮は、11月12日夜に187cmを記録*1(1966年の194cmに次ぐ高さ)*2

【被害】

- 死者は2人(うち一人は感電死)。*2 市長によると被害額は日本円で1,200億円に上る。*3
- 高潮洪水により、多くのホテルで停電が発生、カ・ペーザロ国際近代美術館を含む数箇所で火事が発生。*2
- 多くのホテルでは排水ポンプが不足。*2

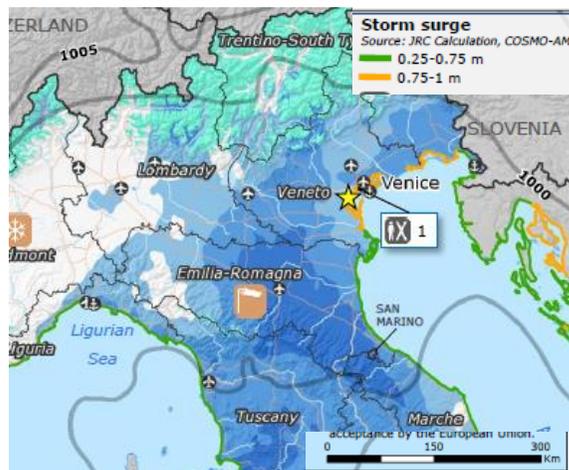
【モーゼ(MOSE)計画】

- モーゼ(MOSE)計画は今回の高潮で稼働せず。
(ベネチア市長の発言「MOSEが稼働していたら、この例外的な高潮を回避できただろう。」)*4

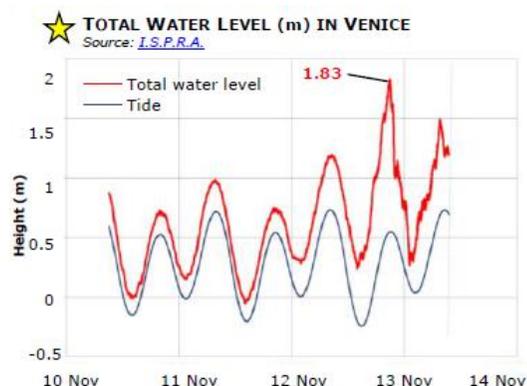
【政府の対応】

- ベネチア市では、市民や事業主に補償申請に備えて被害記録を集めておくよう呼びかけ。*5
- イタリア政府は、ベネチアでの高潮洪水を受け、14日に非常事態を宣言。首相は2,000万ユーロの資金援助を命じた。*6,7

11/13の高潮予測*8

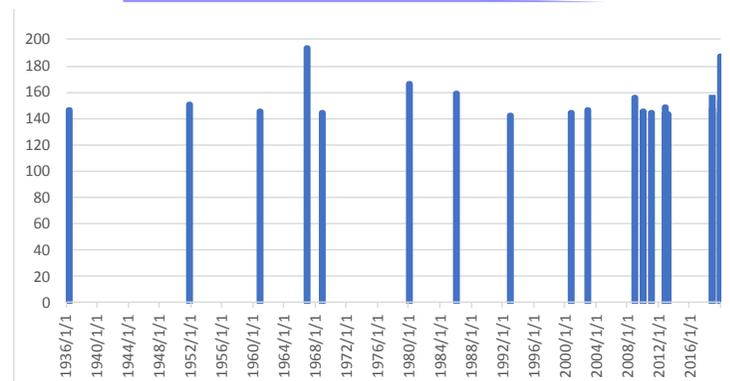


ベネチアの水位*8



参照データ: イタリア環境保護研究所 (ISPRA)
観測結果がベネチア市公表と異なる

140cmを超える高潮の記録*2



参照データ: ベネチア市

*1 Italy - Storms Turn Deadly, Worst Flooding in 50 Years in Venice FloodList 13 Nov 2019

<http://floodlist.com/europe/italy-venice-floods-november-2019>

*2 Two people die as Venice floods at highest level in 50 years The Guardian 13 Nov 2019

<https://www.theguardian.com/environment/2019/nov/13/waves-in-st-marks-square-as-venice-flooded-highest-tide-in-50-years>

*3 高潮続々イタリアのベネチア 被害額は1200億円 NHK NEWS WEB 2019年11月18日

<https://www3.nhk.or.jp/news/html/20191118/k10012181271000.html>

*4 Climate change blamed as floods overwhelm Venice, swamping basilica and squares CNBC 13 Nov 2019

<https://www.cnbc.com/2019/11/14/climate-change-blamed-as-floods-overwhelm-venice-swamping-basilica.html>

*5 Acqua alta: si invitano cittadini e imprese a documentare i danni subiti ベネチア市Web 13 Nov 2019

<https://live.comune.venezia.it/it/raccolta-danni-acqua-alta-venezia-12-novembre-2019>

*6 Venice floods: Italy to declare state of emergency over damage

<https://www.bbc.com/news/world-europe-50416306> BBC 14 Nov 2019

*7 Giuseppe Conte首相Twitter 15 Nov 2019

https://twitter.com/GiuseppeConteIT/status/1195037050833121285?ref_src=twsrc%5Etfw%7Ctwcamp%5Etweetembed&ref_url=https%3A%2F%2Fwww.dw.com%2Fen%2Fvenice-floods-italys-conte-declares-state-of-emergency%2Fa-51236682

*8 ECHO Daily Map of 14 November 2019 DG ECHO, EU(欧州委員会人道支援・市民保護総局) 14 Nov 2019

<https://ercportal.jrc.ec.europa.eu/getdailymap/docId/3128>

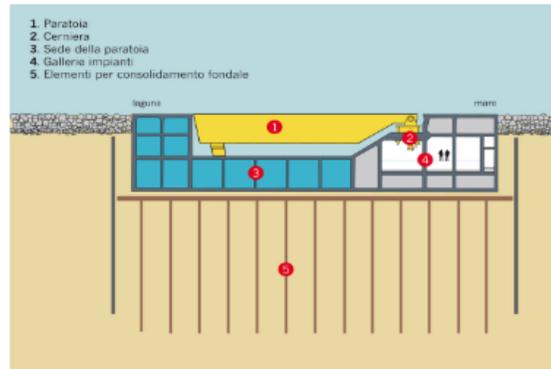
ベネチア モーゼ計画(高潮対策)

- ベネチアは外敵の侵略から逃れるため干潟内の島等に建設された都市であり、近年「高潮被害」「海岸侵食」「干潟環境の悪化」に直面。高潮対策として干潟と外海(アドリア湾)とを結ぶ3つの水路に可動堰を設置するモーゼ計画に2003年着工。(2018年5月時点で堰等のハード施設はほぼ完成、運用開始は2021年を予定。)
- 整備費用は国が負担し、地元の建設会社等で構成されるベネチア事業連合(CVN)が工事を実施。
- モーゼ計画のバリア稼働の基準水位は110cm。(ベネチアの平均標高が110cm。)
- 整備費用は約55億ユーロ(約6,600億円)、維持管理費は年間0.8億~1億ユーロ(約100~120億円)※。
- 2021年までに最終テストを完了し、ベネチア市に引き渡される予定。 ※1ユーロ=120円で換算
- モーゼ計画では地球温暖化による海面上昇を見込んでおり、60cmまでの海面上昇に対応。

モーゼ計画でのバリア位置図

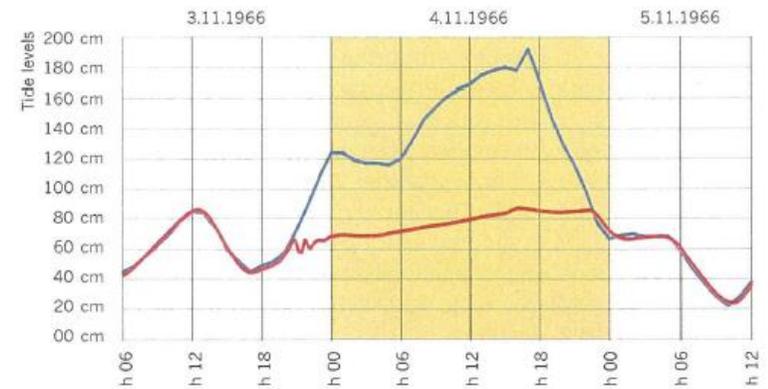


バリアの主要素



1. 待機状態のゲート
2. ヒンジ
3. 基礎構造
4. 管理用通路
5. 地盤改良杭

モーゼ計画のバリア稼働によるシミュレーション



1966年の高潮(青線)に対して、モーゼ計画のバリアが稼働した場合のシミュレーション結果(赤線)