

第5章 防災・沿岸大都市分野

《目次》

5.1 影響のメカニズム	2
(1) 影響のメカニズムの構成要素.....	2
(2) 影響のメカニズム	3
5.2 現在把握されている影響.....	4
(1) 沿岸域	4
(2) 河川	5
5.3 将来予測される影響.....	7
(1) 沿岸域	7
(2) 河川	13
5.4 脆弱性の評価	16
(1) 脆弱性の評価の例	16
(2) 脆弱性評価における課題.....	20
5.5 適応策	21
(1) 適応策メニューとその体系	21
(2) 適応策の選択・実施にあたっての考え方.....	22
(3) 適応策を実施する上でのバリア	25
(4) 適応策として参考にできる既存の事例・政策.....	25
(5) 適応策の評価手法に関する研究動向.....	26
5.6 今後の課題	27
(1) 影響	27
(2) 脆弱性	28
(3) 適応	28
引用文献	30

※図表・写真等の使用に際しては、出典を必ず明記いただけますようお願いいたします。

※ **要通知！** 印のある図表・写真は使用にあたり執筆者等への連絡が必要のため環境省に問合せ願います。

※ **要許諾！** 印のある図表・写真は使用にあたり学会等、引用元の使用許諾等が別途必要ですのでご注意ください。

5.1 影響のメカニズム

(1) 影響のメカニズムの構成要素

防災・沿岸大都市分野における影響は、沿岸域での影響と河川での影響とに分けられる。沿岸域、河川のそれぞれにおける温暖化影響のメカニズムを構成する要素を、表 5-1 と表 5-2 に示す。

1) 沿岸域

表 5-1 沿岸域における影響のメカニズムの構成要素

気候要素の例	気温上昇、水温上昇、海面上昇、降水の変化、台風の強度の増加・進路変化、風向風速の変化、海流の変化 等
自然的要素の例	植生の変化、海岸地形の変化、土質の変化、河道形状の変化、潮位の変化、波高・波向の変化、地下水位の変化、河川流量の変化 等
社会的要素の例	沿岸・低平地域の土地利用・人口密集度の変化、海岸線防護のための海岸構造物（堤防、護岸）整備状況の変化、道路舗装率の変化 等
影響の例	低湿地・干潟の消失、砂浜の減少・消滅、サンゴ礁の消滅、水深・波高の増大、波のうちあげ高・越波量の増大、波力の増大、風圧力の増大、高水流量の増大・高水位の上昇、潟水流量の減少、湖沼水や海水の塩分濃度上昇、地盤支持力の低下、航路の埋没、水産資源の変化、海岸保全施設の機能低下・被災、港湾施設の機能低下・被災、臨海道路・鉄道への影響、排水能力の不足、橋梁桁下高の不足、ダムの治水・利水機能の不足 等

2) 河川

表 5-2 河川における影響のメカニズムの構成要素

気候要素の例	気温上昇、水温上昇、降水の変化（継続時間、総降雨量・空間的広がり等、降水パターンの変化を含む）、豪雨・少雨シーズンの変化、台風の強度の増加・進路変化、風向風速の変化 等
自然的要素の例	河川流量の変化（ピーク流量の増大・低水流量の減少）、地下水位の変化、蒸発散量の変化、融雪量の減少、融雪時期の早期化、土砂生産量の増大、河道形状の変化、樹種の変化 等
社会的要素の例	沿岸・低平地域の土地利用・人口密集度の変化、水利用形態の変化 等
影響の例	外水氾濫 ¹ ・内水氾濫 ² の増大、土砂災害の激化、生態系の変化、水質の悪化、潟水危険性の増大、ダム・堤防等の治水・利水施設の機能低下 等

¹ 外水氾濫とは、川の氾濫、堤防の決壊などが原因で起こる洪水のこと。

² 内水氾濫とは、地域内に降る雨によって起こる洪水のこと。

(2) 影響のメカニズム

防災・沿岸大都市分野における温暖化影響のメカニズムの全体像を図 5-1 及び図 5-2 に示す。

1) 沿岸域

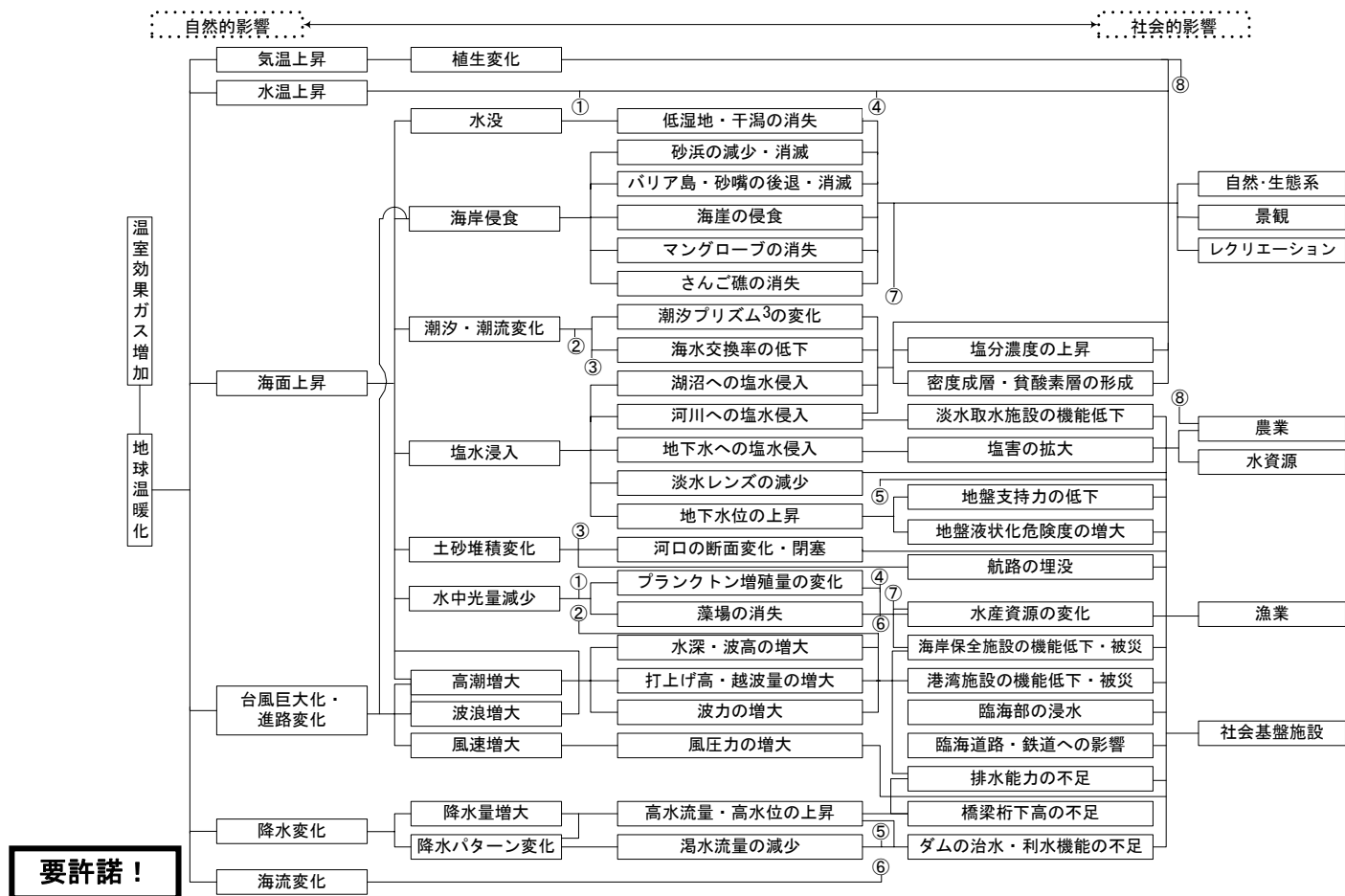


図 5-1 沿岸域の社会基盤施設を中心とする地球温暖化の影響伝播図（土木学会編，1994）

※図中、①などの丸数字は、要素間のつながりを示す。

2) 河川

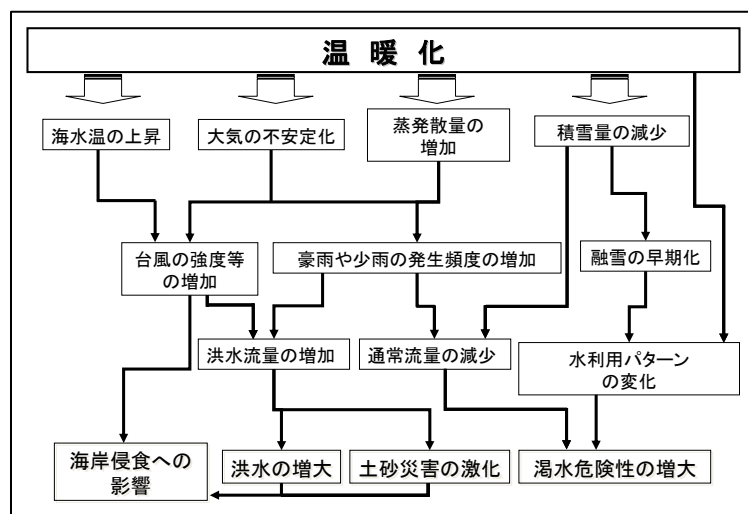


図 5-2 地球温暖化が河川関係にもたらす影響（図作成：京都大学防災研究所 中北英一教授）

³ 潮汐プリズムとは、河口における平均満潮時と平均干潮時の河積（河水の全容積）の差のこと。

5.2 現在把握されている影響

防災・沿岸大都市分野において現在把握されている影響の事例を以下に整理する。なお、ここでは、温暖化による影響であるかどうか現時点では明確には判断し難いが、その可能性が高いと考えられる現象、温暖化が進行すればさらに増加すると考えられる現象も取り扱っている。

(1) 沿岸域

1) 高知県菜生海岸^{なばえ}の被災事例

2004 年台風 23 号は、中心気圧 950 ヘクトパスカル前後で大型の勢力を維持したまま高知県土佐清水市付近に上陸し、いったん海上に抜けた後、室戸市付近に再上陸した。この台風の吹き寄せと気圧低下による水面の吸い上げで高潮を生じ、計画潮位より 0.66m 高い、T.P.⁴ +2.86m を記録した。また、13.5m という、我が国観測史上最大の波が来襲した。高潮位により、減衰されないまま高い波が来襲し、室戸市菜生海岸^{なばえ}では海岸堤防が約 30m にわたって倒壊したため、越波等により背後の家屋が被災し、3 名の方が亡くなる惨事となった（国土交通省，2005）。



図 5-3 高知県菜生海岸^{なばえ}の被災
（写真提供：福濱方哉 国土交通省北陸地方整備局黒部河川事務所長）

2) 高潮による浸水回数の増加

イタリア、ベニス St Mark's Square の冠水回数は、20 世紀はじめには年間 10 回以下であったが、1990 年までに年間約 40 回、1996 年には年間約 100 回にもなった。

一方、我が国の、厳島神社回廊の冠水回数は、1990 年代は年間 5 回以下であったが、2000 年代には年間 10 回程度、また 2006 年には年間 22 回も発生しており、なお冠水回数は増加傾向にある。現状において、地球温暖化の影響であるか明確ではないが、原因となっている可能性が考えられる。

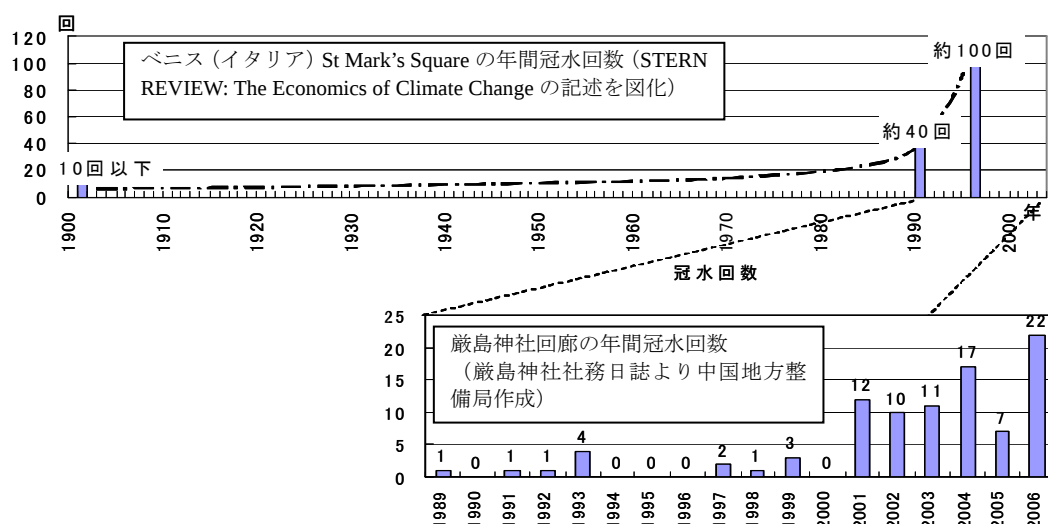


図 5-4 高潮による浸水回数の増加（国土交通省河川局，2007）

⁴ T.P.とは、その場所の高さを示す際の基準となる水準面として東京湾中等潮位（＝海抜）を使用しているという意味で、TOKYO Peil の略。

3) 異常な高潮位が及ぼす災害

2006 年 10 月上旬、急速に中心気圧が低下する非常に強い低気圧により、北日本の太平洋沿岸では高潮と暴波に見舞われた。特に茨城県内では、大洗港でのこれまでの最高潮位 T.P. +123cm を上回る T.P. +160cm と史上最高水位を記録するなど、沿岸全域で潮位が上昇した。

既往最高潮位より 3~40cm の潮位上昇と、暴浪を受けたこととあいまって、大規模な護岸崩壊、離岸堤沈下、砂丘崩壊、大規模侵食が生じた。また、越波による床上浸水や通行止めとなった道路もあり、総海岸延長が 180km を越える茨城県沿岸全域で高潮被害を受けた。被害額の総計は、保安林護岸災害と護岸崩壊で 50 億円を超す試算となっている（信岡ら，2007）。

4) 地下街、地下鉄、地下式ガレージの浸水被害

1999 年 6 月、梅雨前線による記録的な豪雨が九州地方北部を襲い、福岡市博多駅周辺地区で地下施設を持つビル 182 棟のうち、地下が浸水したビルは 71 棟に上り、そのうち地下 3 階まで浸水したビルが 3 棟、地下空間が完全に水没したビルが 10 棟あり、地下階の総浸水面積は約 5 万 m² となった。この時の地下浸水では、地下に電気施設を備えたビルなどで停電が相次いだ。

また地下鉄では、地下 1 階にあるコンコースの筑紫口側で道路の水が出入口階段から流入し、エスカレーターを伝って地下 3 階の地下鉄ホーム、線路へと流れ込み、線路の冠水で地下鉄は一時運転を見合わせた（建設省，1999）。

5) 島嶼国における海岸侵食の事例

マーシャル諸島のマジュロ環礁では、近年州島先端の海岸侵食が進んでおり、今後海面上昇が生じると海岸侵食が加速すると予測される（横木ら，2004）。

2) 河川

1) 豪雨の増加

温暖化によって狭領域・短期集中型の豪雨頻度が増大してきていると、ここ数年毎年強調されている。図 5-5 は全国雨量観測所において、年ごとに 50mm 以上の時間雨量が発生した件数を示したものである。これにより、10 年平均でみた発生回数が増大していることが示されている。温暖化によるものか都市化によるものかの検討や、地域によりどう異なるかの詳細な検討は、現在進められているところであり、今後の研究課題でもある。

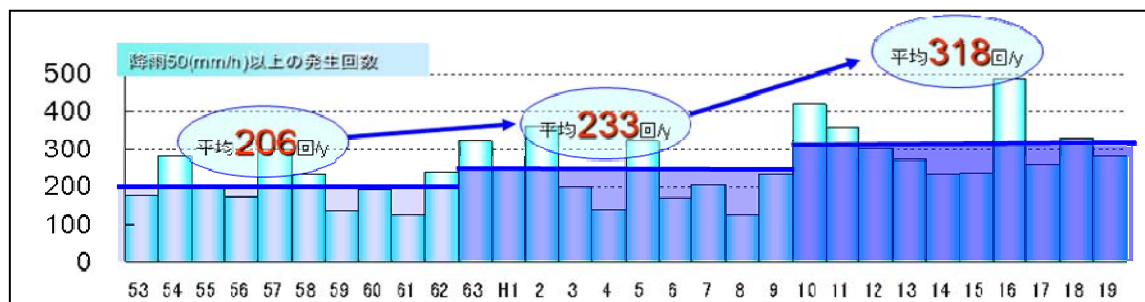
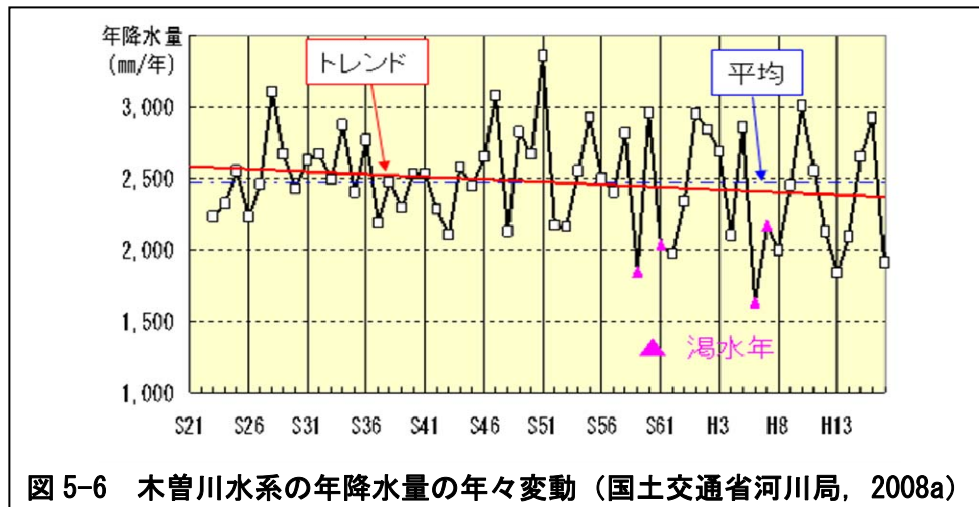


図 5-5 10 年ごとの 50mm 以上の時間降水量の発生件数（国土交通省河川局，2008a）

2) 渇水の増加

ダム等が計画された昭和 20~40 年代に比べて、近年は少雨傾向で年間降水量の変動幅も大きい。図 5-6 は、木曽川水系の年降水量の年々変動を示したものである。これにより、木曽川水系では、ダムからの安定供給可能量が低下していることが示されている。例えば、近年（1979 年（昭和 54

年)～1998年(平成10年))では計画当時に比べて約4割低下し、近年最大渇水(1994年(平成6年))では計画当時に比べて約7割低下した(国土交通省河川局, 2008a)。



5.3 将来予測される影響

防災・沿岸大都市分野において将来予測される影響について、最新の科学的知見をもとに、以下に整理する。

(1) 沿岸域

1) 台風

① 台風の強度の増加

IPCC の報告書によれば、より強い台風の発生が予測され、頻度も減ることはないとある。しかし、気候研究者の間では現在も活発な議論が交わされており、気候変動が熱帯低気圧の発生頻度・強度の変化に影響を与えることについては認識が一致しているものの、どのように変化していくのかについては個々の気候モデルによる違いが大きく議論の分かれるところである（筒井，2007；原沢，2006 など）。

② 台風の進路の変化

日本の南方で発生した台風は、東風が吹く低緯度では西へ流されながら北上し、上空で偏西風が吹く中・高緯度に来ると北東へ進む。台風の進行方向に向かって右側（図 5-7 の斜線部）では、台風吹き込む風向きと台風の進行方向が一致することから規模の大きな高潮を生じる。我が国に来襲する台風は、南西から北東に向かって進む（図 5-7 の①のコース）ことが多い。そのため、これまで、東京湾、伊勢湾、大阪湾など南西に開いた湾で大きな高潮被害を生じてきた。しかしながら、温暖化が進み、仮に図 5-7 の②のように、台風の進路が北に寄るなどの影響があった場合、日本列島を南東から横切るため、南東に開いた湾ではこれまで経験しなかった規模の高潮が発生する可能性がある。2004 年の台風 10 号は、北西に進路をとり、四国から中国地方へと横切った。台風の進路の変化によりこれまで想定していなかった地域でも高潮被害の検討が必要である（福濱，2007）。

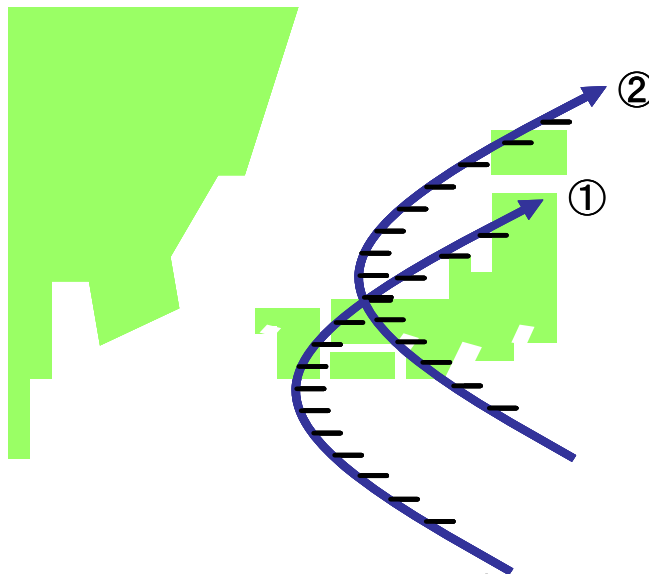


図 5-7 台風の進路（福濱，2007）

なお、台風を含め低気圧の進路の変化により、吹送距離⁵が長くなる場合があるので注意が必要である。吹送距離が長くなると、波浪の長周期化をもたらし、波のうちあげ高が大きくなるので思わぬ被害を招くことがある。2007 年 9 月の神奈川県における西湘バイパスの被災、翌年 2 月の富山県等における高波災害はいずれも長周期の波の来襲によるものである。

⁵ 吹送距離とは、ほぼ一定の風向と風速をもった風の海面における風上端からの距離のこと。

③ 風速の増大

台風は強風と高波をもたらす。台風における気圧分布は Myers の式と呼ばれる計算モデルによってモデル化されることが多い。これを用いて風速を計算すると、気圧深度、すなわち台風の中心と外側との気圧差 Δp の平方根に比例することがわかる。つまり、気圧深度 Δp が10%増大すると風速は約5%増大する。

④ 波浪の増大

風波の簡便な推算法は SMB 法と呼ばれるものであり、海上10mの風速が与えられた場合の有義波高⁶と有義波周期が計算できる。これによれば、有義波高は気圧深度 Δp の平方根に比例するので、気圧深度 Δp の10%の増大に対応して約5%増大することがわかる。

2) 高潮

海面が上昇した上に高潮が重なると被害が拡大することが懸念される。例えば1959年の伊勢湾台風の際には、高潮による最大偏差は3.4mとなった。

図5-8に示すように、高潮は、気圧の低下によって海面が吸い上げられることと、沖から岸に向かって吹く風によって岸側に海水が吹き寄せられることによって生じる。複雑な地形や台風の移動も考慮した動力学的な高潮の予測は、電子計算機を用いて数値計算される。しかし、上述の高潮の発生メカニズムを考慮した簡便な予測式が得られている。

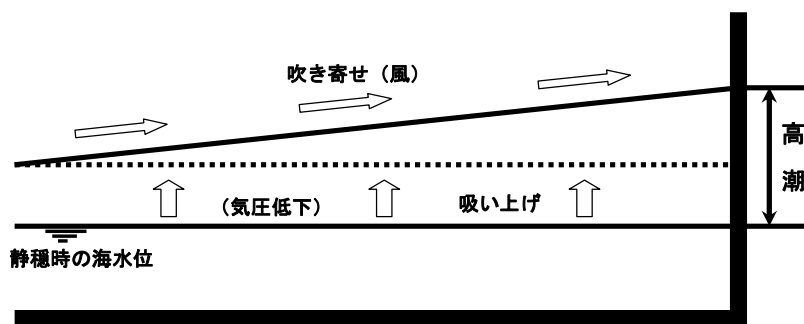


図5-8 高潮における吸い上げと吹き寄せ（磯部ら，1991）

予測式で用いられる海域ごとに決められた経験定数については、表5-3の結果が得られている（宇野木・磯崎，1966）。また、予測式を用いて、65cmと130cmの海面上昇量及び現状と強度が増加した台風の組み合わせについて、高潮偏差を比較したものが表5-4である。計算において風の寄与を表す項の定数 b は水深に反比例すると考えられるので、現状の東京湾の平均水深を15mとし、海面上昇による水深の増加に対応した分だけ補正した値 b_{mod} を用いた。高潮による水位上昇量は、気圧深度と風速の増大によって増大する分があるが、海面上昇による水深増加によって b が減少するための減少分があるためにほとんど変化しない。したがって、高潮時の最高潮位に対する現状との差は、台風の変化によらずほぼ海面上昇量と等しくなる。

表5-3 高潮予測のための経験定数（宇野木・磯部，1966）

地名	$a(\text{cm}/\text{mb})$	$b(\text{cm}/[\text{m}/\text{s}]^2)$
東京	1.059	0.138
名古屋	1.674	0.165
大阪	2.167	0.181
串本	1.490	0.036
高知	2.385	0.033

⁶ 有義波高とは、波群中で波高の大きいものから数えて全波数の1/3に相当する波を抽出し、それらの波高を平均した値（H1/3）。有義波周期は、全波数の1/3に相当する波を抽出し、それらの周期を平均した値（T1/3）。

表 5-4 温暖化にともなう高潮時の最高潮位の変化（磯部ら，1991）

η_{SLR} : 海面上昇量 (cm)	b_{mod} : 高潮予測式中の 風の影響係数 (cm/[m/s] ²)	Δ_P : 気圧低下量 (hPa)	U_{10} : 風速 (m/s)	η_{SS} : 高潮による 水位上昇量 (cm)	$\eta_{SLR} + \eta_{SS}$: 合計潮位 (cm)	現状との差 (cm)
0	0.138	70	34.9	168	168	
65	0.132	70	34.9	161	226	58
65	0.132	77	35.8	170	235	67
130	0.127	70	34.9	155	285	117
130	0.127	77	35.8	163	293	125

3) 波のうちあげと越波

① 波のうちあげ

海岸構造物に対する波のうちあげ高は、海面上昇と波浪条件によって変化する。海面上昇による波のうちあげ高の増大については宇多・小俣（1989）によって試算されている。

図 5-9 は波のうちあげ高の算定図表の一例であり（海岸保全施設築造基準連絡協議会，1987）、海底勾配が 1/30 の海岸に法面勾配が 1/0.5 の構造物が設置されている場合の波のうちあげ高を算定することができる。

今、現状での静穏時の満潮位における堤脚水深を 1m とした場合に、高潮発生時の堤脚水深及び波浪条件を現状及び温暖化後について表 5-3 及び表 5-4 によって定め、これから図 5-9 を用いてうちあげ高を求めると、表 5-5 のようになる。ここではうちあげ高に対する海面上昇の影響が増幅されるような条件が設定されているため、65cm と 130cm の海面上昇に対して、最高うちあげ水位の現状との差はそれぞれ約 2.5 倍及び 3 倍に増幅されることがわかる。このような条件のもとでは、海岸構造物に対する海面上昇の影響は非常に大きい。

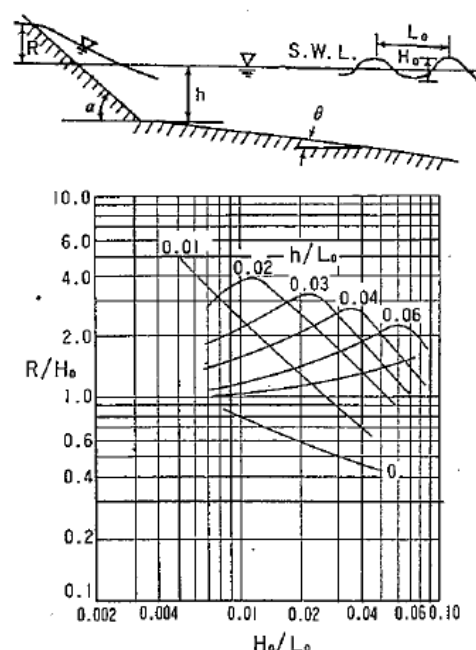


図 5-9 波のうちあげ高の算定図表（海岸保全施設築造基準連絡協議会，1987）

表 5-5 温暖化にともなう高潮時の波のうちあげ高の変化（磯部ら，1991）

η_{SLR} : 海面上昇量 (cm)	h : 設置水深 (m)	$H_0 = H_{1/3}$ 波高(m)	$T = T_{1/3}$ 周期(s)	h/L_0 : 水深 波高比	H_0/L_0 : 波形勾配 (cm)	R/H_0 : 相対うち あげ高	R : 波のうち あげ高(m)	$R+h$: 最高うちあ げ水位 (m)	現状と の差 (m)
0	2.68	4.2	6.6	0.040	0.062	1.63	6.85	9.53	
65	3.26	4.2	6.6	0.048	0.062	1.89	7.94	11.20	1.67
65	3.35	4.4	6.7	0.048	0.063	1.84	8.10	11.45	1.92
130	3.85	4.2	6.6	0.057	0.062	2.22	9.32	13.17	3.64
130	3.93	4.4	6.7	0.056	0.063	2.16	9.50	13.43	3.90

② 構造物上の越波流量

海面上昇が起これば、波にともなって海岸構造物を越えて陸上に進入する水塊の量、すなわち越

波流量も増大する。図 5-10 は越波流量の算定図表の一例であり（日本港湾協会，1989）、海底勾配が 1/30 の海岸に直立護岸が設置されている場合に、沖波波形勾配が 0.036 の不規則波が来襲したときの越波流量 q を算定することができる。前節の結果から、静穏時の満潮位における堤脚水深を 1m とした場合、高潮偏差が 1.68m、うちあげ高が 6.85m であるから、これに余裕高 0.47m を加えて護岸の天端高を堤脚部から 10.0m としたとする。この条件で高潮発生時の越波流量を、海面上昇量と台風規模の組み合わせのそれぞれについて算定すると表 5-6 のようになる。ただし、実際の沖波波形勾配と等しい条件での算定図表がないので、すべて図 5-10 を使用した。表より、海面上昇によって相対的に天端高が低くなると越波量が急激に増加することがわかる。

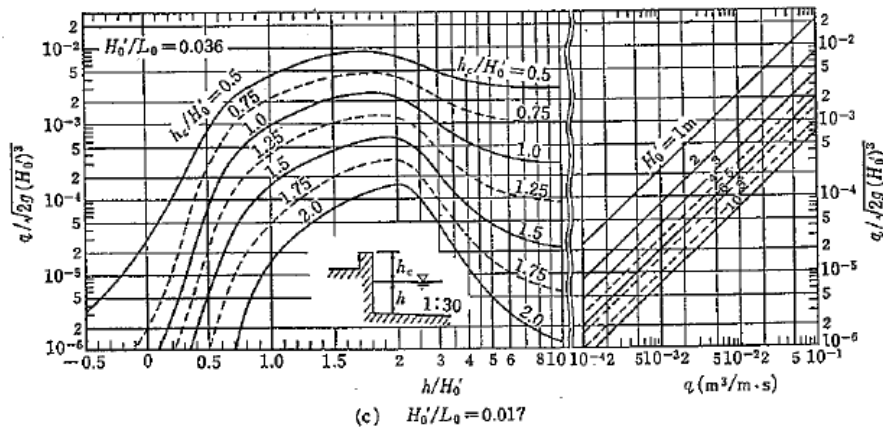


図 5-10 越波流量の算定図表（日本港湾協会，1989）

表 5-6 温暖化にともなう高潮時の越波量の変化（磯部ら，1991）

η_{SLR} : 海面上昇量 (cm)	h : 設置水深 (m)	h_c : 越波天端高 (m)	$H_0 = H_{1/3}$: 波高(m)	h/H_0 : 相対水深	h_c/H_0 : 相対天端高	$q/\sqrt{2gH_0^3}$: 相対越波流量	q : 越波流量 (m³/m·hr)
0	2.68	7.32	4.2	0.64	1.74	6.0×10^{-6}	0.8
65	3.26	6.74	4.2	0.78	1.60	3.8×10^{-5}	5.2
65	3.35	6.65	4.4	0.76	1.51	5.5×10^{-5}	8.1
130	3.85	6.15	4.2	0.92	1.46	1.4×10^{-3}	19
130	3.93	6.07	4.4	0.89	1.38	1.8×10^{-3}	26

4) 構造物に作用する波力

海岸・海洋構造物に作用する波力は、海面上昇による水深変化の直接的影響だけでなく、水深変化にともなう波浪変形の変化や、台風の強度の増加が起こればそれにとともなう沖波波高の増大の影響も受ける。

防波堤のケーソンに作用する波力は、図 5-11 に示すような分布が採用されている。

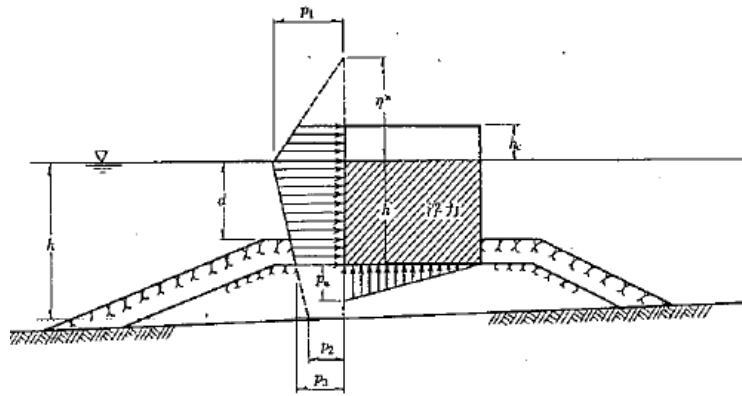


図 5-11 ケーソンに作用する波圧分布（磯部ら，1991）

図から明らかなように、海面上昇が起こるとまずケーソンに作用する浮力が増すために、ケーソンが滑動しやすくなる。また、特に設計波高が砕波によって規定される場合には、水深の増加は設計波高の増加につながり、したがって波力は増大する。高山（1990）は、このときに安全率がどれほど低下するかを理論的に導いている。

防波堤の補修という観点に立つと、まず防波堤の天端高は、海面上昇分程度のかさ上げが必要となる。その時に、波力に対してケーソンが安全となればよいが、転倒に対して不安定になったり、地盤支持力が不足したりすると大きな問題となる。

捨石または消波ブロックを設置する場合には、波に対する安全性を確保するための必要重量をハドソン公式と呼ばれる式によって算定する。

表 5-7 捨石の被害率と安定係数値（磯部ら，1991）

被害率(%)	$H/H_{D=0}$: 設計波高の 比率	K_D : 安定係数
0~1	1.00	3.2
1~5	1.18	5.1
5~15	1.33	7.2
10~20	1.45	9.5
15~40	1.60	12.8
30~60	1.73	15.9

この式によれば、海面上昇と台風の強度の増加によって設計有義波高が増大すると、その 3 乗に比例して必要重量が増すことになる。逆に表 5-7 から、波高が増大しても捨石の重量を一定とした場合に、どれだけ被害率が増大するかがわかる。

5) 海岸侵食

海面上昇が起こればまずその分だけ海岸線は後退する。それだけでなく、底質の粒径と波浪条件が与えられると、それに対応する平衡状態での海浜横断面形状が存在し、その形状に向かって横断面形状が変化すると考えられている。Bruun の法則に従えば、図 5-12 の実線のような平衡海浜に海面上昇がおき、その水位での平衡地形に向かうとすれば、海岸侵食が生じることになって、海面の上昇分以上に海岸線は後退する。

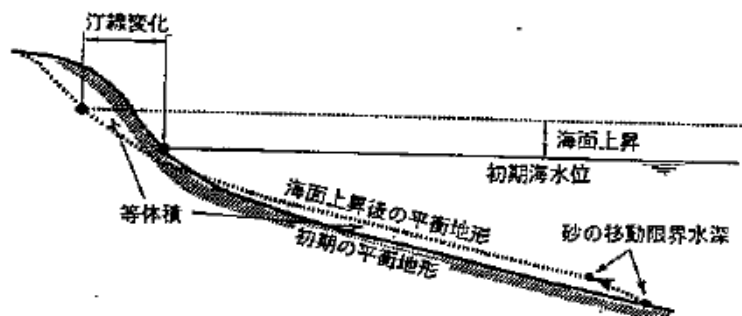


図 5-12 平衡海浜縦断面形状と海面上昇による海岸侵食（磯部ら，1991）

6) 砂浜の消失、その他

このような考え方に従って、海面上昇による日本全国の砂浜の侵食を求めたところ、1m の海面上昇により、90%の砂浜が失われるという結果が得られている（三村ら，1994）。現在でも日本全国の砂浜を平均して年間約 1/6m の海岸侵食が起こっている中で、海面上昇によってさらに加速される侵食問題をどのように解決するかは今後の大きな課題である。

また、海面上昇により沖ノ鳥島が沈む可能性がある。

(2) 河川

1) 河川流量

① 上流からの河川流量増大への影響

国土交通省では、1990年代後半に入り建設省土木研究所が、気温上昇や降水量変化が流域水収支や水利用パターンの変化を通して水資源に及ぼす影響の評価を始めている。これは、気候モデル（GCM）による予測結果を用いるのではなく、気温上昇や降水量変化に関して独自のシナリオを立てて脆弱性の評価を行ったものである（建設省土木研究所・北海道開発庁土木研究所，1996；建設省土木研究所ダム部水工水資源研究室，1997）。

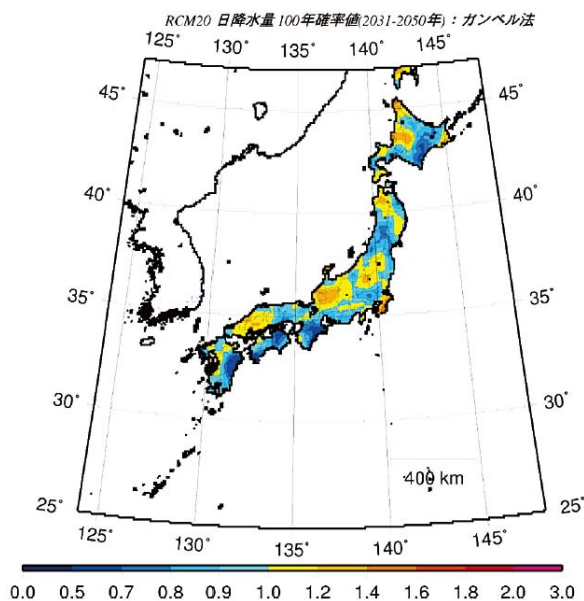


図 5-13 50 年後 100 年確率最大日降水量
の変化率 (和田, 2006)

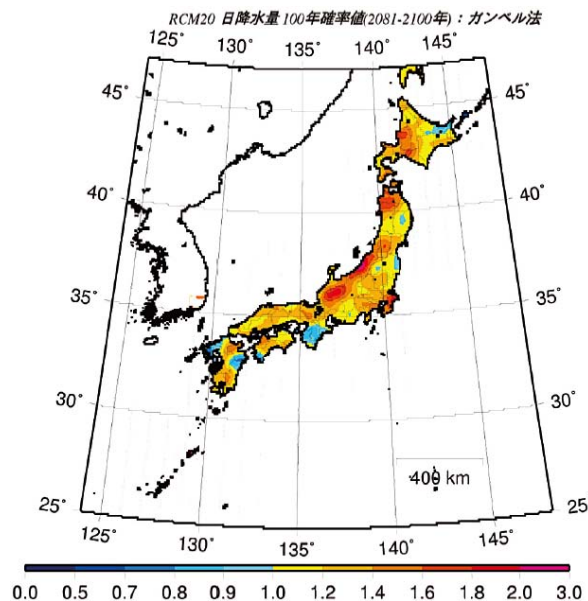


図 5-14 100 年後 100 年確率最大日降水量
の変化率 (和田, 2006)

研究が進み、一日程度で 20km 程度の時間・空間的にきめ細かな情報が全球気候モデル（GCM）や領域気候モデル（RCM）により出力されるようになるに伴い、2000 年代半ばから、国土交通省国土技術政策総合研究所（以下「国総研」という）が、気象庁気象研究所と共同して、近未来、21 世紀末の季節降水量、月降水量、年最大日降水量の出現頻度を指標に、洪水リスク、渇水リスクの評価を行ってきている（和田ら，2005a、2005b、2008）。GCM を用いるか RCM を用いるかにより推定は若干異なるが、概ね北海道西部、東北北部、北陸、紀伊半島、南西諸島で洪水リスクが高まること、北海道を除く地域で冬から春にかけて渇水リスクが高まることを推定している。

2008 年には国土交通省河川局において、全国 82 水系各流域の計画対象降雨量の世紀末までの増大を概算推定した上で、治水安全度の低下量を推定している（国土交通省河川局，2008b）。結果的に、計画対象降雨量は世紀末に、新潟・関東以西では 1.05～1.15 に、それ以北ではそれ以上になると推定するとともに、現在目標としている治水安全度が概ね半減すると推測している。例えば、現行計画では 1/200 の治水安全度（200 年確率の治水安全度）が、概ね 1/100 の治水安全度（100 年確率の治水安全度）に低下すると推測している。

一方、国土交通省土地・水資源局では、降雨量、降雪量の地表到達量の変化を見積り、温暖化が河川流量に及ぼす影響を全国主要流域について推定し、世紀末では本州の多くの流域で 3～6 月の

河川流量が減少すると推測しており、農業用水の需要期に影響があることを懸念している（国土交通省土地・水資源局，2008）。（ただし、世紀末より近未来の方が洪水発生頻度が多いのは、たまたま用いた気候モデルの出力特性によるものであり、モデルにより逆転することもあり得る。）

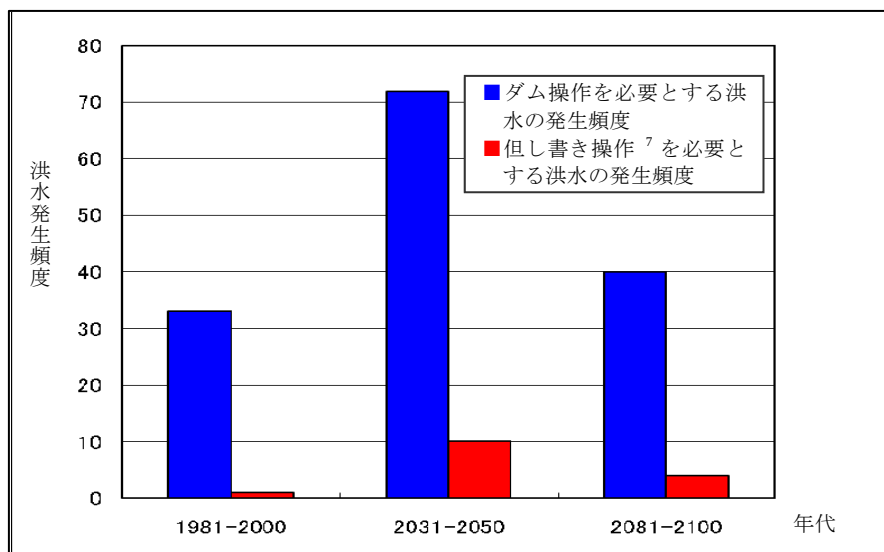


図 5-15 通常ならびに緊急ダム操作を必要とする洪水の発生頻度の気候モデル出力を用いた推算例（佐山ら，2007）

以上の検討は、GCM、RCM による日雨量出力をベースに行われている。しかし、我が国の流域に於いて洪水流量を評価するためには、時間雨量が必要である。そのために、京都大学防災研究所では、GCM、RCM 出力を時間降雨量に確率的に変換することをベースに、河川流出計算とタイアップした推定を行っている。一つは、気圧配置等のパターン認識を通して、GCM による予測結果から木曾川流域やその部分流域の大雨時に限定した降雨時間系列を多数発生させて流量評価を行っている（藤原ら，2007）。もう一つは、気圧パターンを用いない代わりに RCM 出力の日降雨量をベースに淀川流域や部分流域の平均降雨量の時間降雨量時系列（20 年分）を確率的に多数発生させて、現行の貯水池操作をも流出モデルに組み込んで、各ダム貯水池が洪水調整に入る頻度を、現気候、近未来、世紀末で比較し、頻度が増大することを示している（佐山ら，2007）。

② 上流からの河川流量増大による影響

これに関しては、気候変動予測とタイアップした研究はまだない。気候変動により水位増大予測ができたとしても、堤防のどこが危険かを確定的に予測することができないからである。しかし、水位や破堤箇所の相違により浸水パターンがどう違うかは氾濫計算により推定することは可能であるので、国土交通省河川局（2007）により、氾濫パターンによりどう対処するか氾濫後の対応策が検討され始めている。

2) 土砂流出量の増大による沿岸域への影響

2007 年度には、降雨パターンが斜面崩壊に及ぼす研究、流域全体としての斜面崩壊に及ぼす影響が研究され、今後土石流発生への影響評価がなされる予定であるが、これらが沿岸域へどのような影響を及ぼすかは、今後の研究課題となる。

⁷ ダムを守るためにダム湖への流入量以上の放流を行うこと。

3) 内水氾濫への影響

内水氾濫への降雨の影響に関しては、寝屋川流域に関して、想定降雨の空間・時間集中度をベースにした研究が進められている（大塚ら，2008）。現在、領域気候モデルの出力による降雨生起特性とタイアップした研究が計画されている。

4) 融雪による土砂災害の発生増加

温暖化により融雪が早くなるとともに量も多くなり土砂災害が増える。

定量的な予測結果としては、「1℃の気温上昇により日本海側のほとんどの山地は発生確率 80% 以上を示す」（川越ら，2007）等が言われている。

5) 洪水の多発によるダム運用への影響

洪水調整用や渇水調整用に、よりメリハリをつけたダム貯水池の利用目的の変更や、制限水位の変更、リアルタイム運用規則の変更などの検討が今後求められる。

5.4 脆弱性の評価

(1) 脆弱性の評価の例

防災・沿岸大都市分野における脆弱性の評価手法及び評価事例の結果について、最新の科学的知見をもとに以下に整理する。

1) 沿岸域

① 日本の沿岸域の特性

我が国は、北海道、本州、四国、九州をはじめ多数の島々からなっているため、狭い国土に対し約 35,000km と非常に長い海岸線を有している。また、国土の 7 割が山地であることから、人口は居住空間が広い低平地を有する沿岸域に集中する傾向が強く、それに伴い産業も沿岸域を中心に発達してきた。例えば、海岸に面する市町村には人口の 5 割にあたる約 6 千万人が居住し、産業活動も工業製品出荷額の 5 割、商業年間販売額の 6 割が集中している。

さらに、白砂青松の海岸に代表されるように砂浜、砂丘、干潟など様々な海岸地形が発達し、生態系や人間の営みを支える基盤としても貴重な空間であり、我が国では沿岸域を生活の基盤として利用してきた。

しかしながら、沿岸域はこのように人口、資産が集中するという利便性の反面で、高潮、高波等の自然現象に対して影響を受けやすいという脆弱性を有し、過去にも幾度となく自然災害を経験してきた。例えば伊勢湾では、伊勢湾台風により死者、行方不明者は 4,500 人余り（愛知・三重両県）に達し、全壊、半壊家屋約 12 万 5 千戸に及ぶ被害が生じた（地球温暖化に伴う海面上昇に対する国土保全研究会，2002）。

② 日本の沿岸域の脆弱性評価の事例

(a) 海水面の設定水位

脆弱性評価においては、まず、対象とする代表的な海水位として平均海水位、満潮時の海水位及び異常時（高潮または津波来襲時）における最高海水位（表 5-8 において、満潮位+偏差+波高の 10% であり、波高の 10% を波の遡上分とした）をとりあげ、沿岸域別にそれらの値を設定した。海面上昇後の設定水位はそれらに海面上昇分を加えたものである。そして、国土数値情報を用いてそれらの設定水位以下の土地の面積、人口、及び試算を算出した。

表 5-8 水位設定に用いた地域ごとの規準値（土木学会，1994）

	朔望平均 満潮位 (T.P. m)	高潮または 津波偏差 (m)	有義波高 の 10% (m)
日本海	0.6	0.6	0.6
太平洋北	0.6	2.4	0.6
太平洋南	1.0	1.1	0.7
東京湾、大阪湾等	0.9	2.8	0.3
瀬戸内海	1.6	2.5	0.5

(b) 低地帯の面積・人口・資産の評価結果

標高 5m 以下の地域を調べると、根釧台地、石狩平野、仙台平野、新潟平野、関東平野、濃尾平野、大阪平野、幡磨平野、岡山平野、筑紫平野に広い低地帯がみられる。

図 5-17 は、全国の 1m ごとの標高値以下の土地の面積、人口、及び資産をプロットしたものである。いずれも T.P.2m から 4m 付近の勾配が急になっており、この標高付近での海水面変動の影響が大きいことがわかる。

(c) 設定水位以下の面積・人口・資産の評価結果

表 5-9 は、表 5-8 のように設定した各水位以下の土地の面積、人口、及び資産を示す。特に、現状の朔望平均満潮位において水面下となる面積が 861km²、人口が 200 万人、資産が 54 兆円であるのに対し、1m の海面上昇により面積が 2.7 倍の 2,339km²、人口が 2 倍以上の 410 万人、資産が 2 倍の 109 兆円になることがわかる。これは全国面積の 0.6%、人口の 3%、資産の 4% である。

なお、海面上昇に対する防護費用は、運輸省（当時）などによって試算されている。

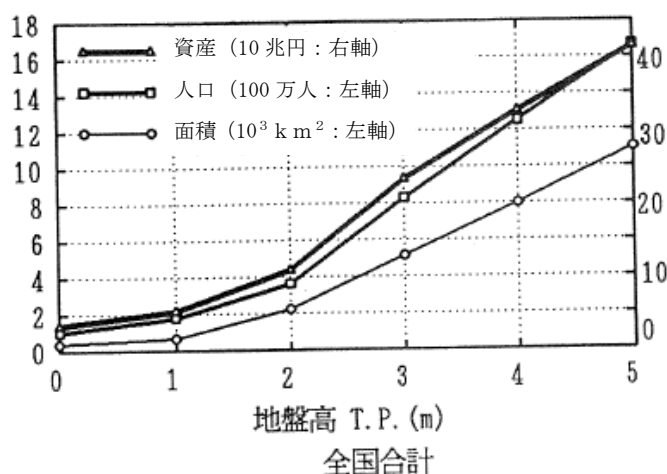


図 5-17 各標高値以下の土地の面積・人口・資産（土木学会，1994）

表 5-9 現状と海面上昇後との海面下地域の面積・人口・資産の比較（土木学会，1994）

平均海水面	平均海面時			満潮時			高潮または津波発生時		
	面積 (k m ²)	人口 (万人)	資産 (兆円)	面積 (k m ²)	人口 (万人)	資産 (兆円)	面積 (k m ²)	人口 (万人)	資産 (兆円)
現状	364	102	34	861	200	54	6268	1174	288
海面上昇 0.3m	411	114	37	1192	252	68	6662	1230	302
海面上昇 0.3m	521	140	44	1412	286	77	7583	1358	333
海面上昇 1m	679	178	53	2339	410	109	8898	1542	378

③ 三大湾の潜在的浸水域

構造物による防護がないと考えたときの、潜在的浸水域を海面上昇 59cm、大潮の満潮位、既往の高潮偏差に対して求めたものが図 5-18 である（横木，2007）。この図を用いた算定では、東京湾、伊勢湾、大阪湾で、満潮位での潜在的浸水面積がそれぞれ約 120, 390, 60 km² なのが、59cm の海面上昇と既往最大の高潮偏差を加えると、それぞれ約 320, 670, 380 km² に増大する。このことは、三大湾の都市域が地形的に非常に脆弱であること、そして現状では構造物によって高度に防護されていることを示している。

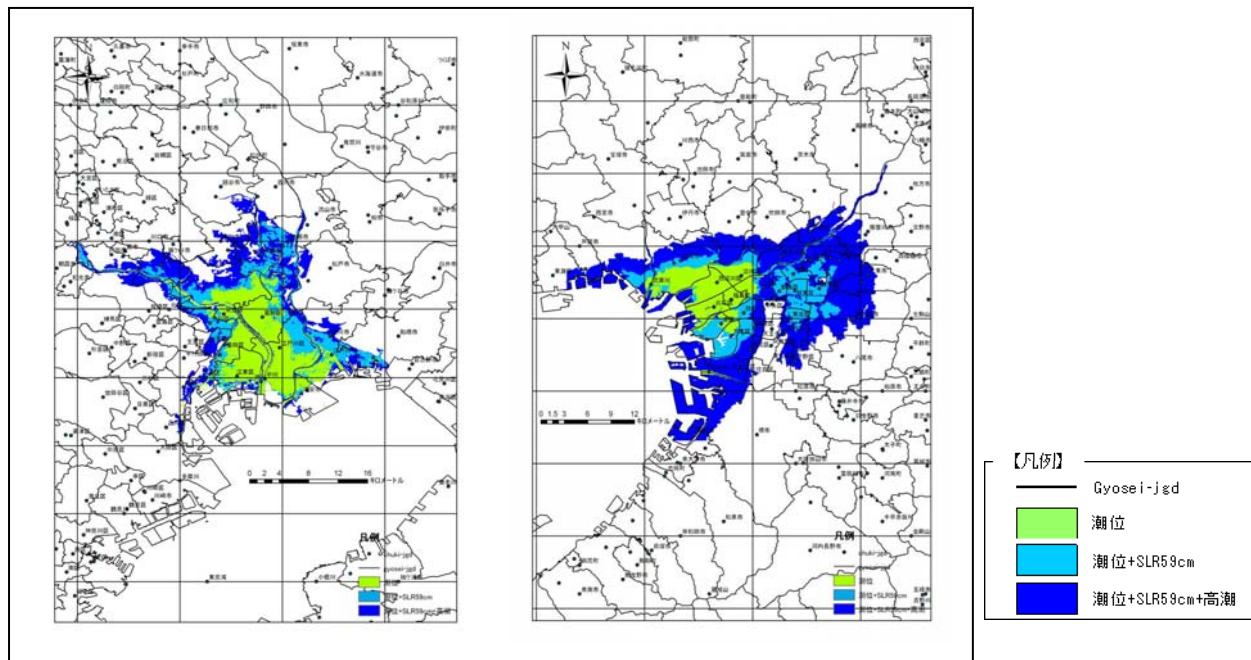


図 5-18 東京湾（左）・大阪湾（右）沿岸域の潜在的浸水域
（構造物による防護がないと仮定した場合）

（図提供：茨城大学工学部 桑原祐史講師）

表 5-10 浸水面積及び人口（構造物による防護がないと仮定した場合）

（表提供：茨城大学工学部 桑原祐史講師）

平野名	シミュレーション条件	面積 (km ²)	人口 (千人)
関東平野	潮位変動のみ	117.3	2,319
	潮位変動＋海面上昇 59cm	204.5	3,233
	潮位変動＋海面上昇 59cm＋高潮	322.2	4,159
濃尾平野	潮位変動のみ	389.4	1,113
	潮位変動＋海面上昇 59cm	396.4	1,117
	潮位変動＋海面上昇 59cm＋高潮	665.4	1,851
大阪平野	潮位変動のみ	59.3	731
	潮位変動＋海面上昇 59cm	133.8	1,976
	潮位変動＋海面上昇 59cm＋高潮	384.0	4,204

（人口は 2000 年度国勢調査より）

④ アジア太平洋の沿岸域への気候変動の影響評価

佐藤ら（2000）、三村ら（2000）では、NOAA の編集による 1949 年～1988 年の 40 年間の台風の風速データから、アジア太平洋沿岸域に対する高潮偏差を算定した。そして 1m の海面上昇を仮定

したときにアジア太平洋諸国の沿岸域における（潜在的）水没面積を算定した。また、世界銀行の人口推計値をもとに水没人口を算定した。この結果、国・地域別の水没面積と影響人口から、台湾、ベトナム、カンボジア、ブルネイ、バングラデシュ、グアムなどで影響人口が10%を越えるなど脆弱性が高いことが示された。これらの解析では解像度が低いため南太平洋の島嶼国の影響は算定できなかった。

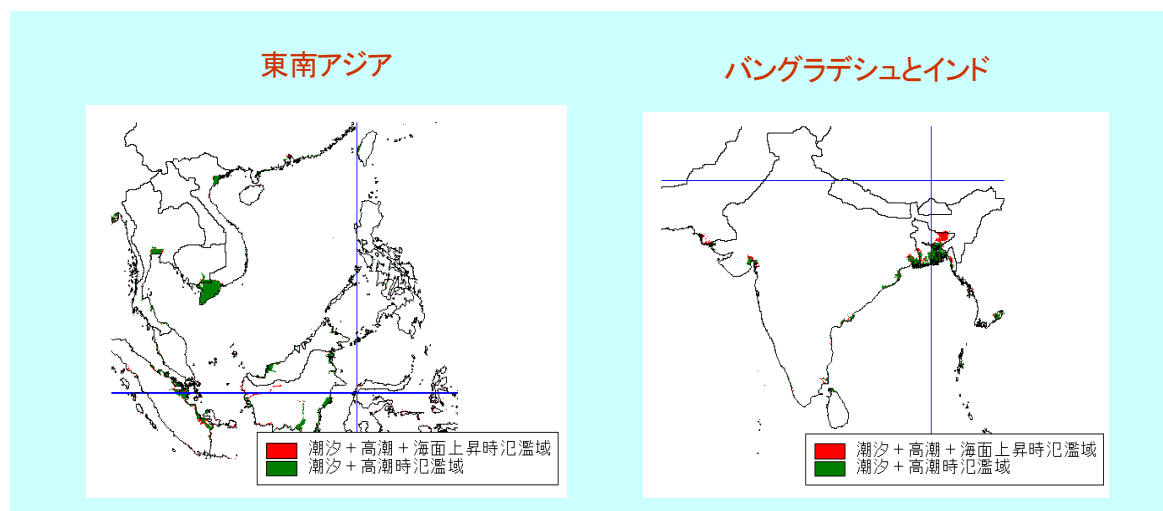


図 5-19 アジア太平洋沿岸域に対する高潮偏差（佐藤ら (2000) を一部改変）

⑤ 地域特性を評価指標とした研究事例

国土数値情報より沿岸地域の人口変動と背後地の社会資本の整備状況に着目し、人口、標高、し尿処理施設、浄水場、空港、発電所、道路、鉄道、流域界のデータより、人口増減、人口密度、災害弱者、危険度、交通・エネルギー、浄水・し尿処理施設の6指標に整理し、沿岸地域を特性付けたうえで沿岸防災について考察を試みている（野口ら，2007）。

将来「温暖化で台風属性値の時間変化量が空間的に北へ緯度で1.5°移動する。」と仮定し、九州から関東に至る太平洋沿岸を対象に、現在及び将来の気候条件下で台風を確率台風モデルで与え、高潮偏差や潮位の極値や継続時間を比較した結果、九州西岸や瀬戸内海において現在より大きな高潮偏差が見られ、特に大阪湾の奥など現在の気候条件下で既に高潮が顕著な海域で大きい。また、東京湾、伊勢湾、大阪湾の計画高潮位は、現在再現確率数百年であるが、このような高潮偏差と海面上昇が生じれば、再現確率は数十年になる可能性がある（河合ら，2007）。

2) 河川

「3 将来予測される影響」の「(2) 河川」の部分に述べたような脆弱性が見られる。

(2) 脆弱性評価における課題

脆弱性評価のための手法・ツール等に関する現状の課題について、以下に整理する。

1) 沿岸域、河川に共通的な課題

① 脆弱性評価のための信頼性の高いデータの不足

将来の浸水被害を予測するためには、詳細な標高データだけではなく、堤防や護岸などの防護構造物（位置・高さ）のデータが必要となる。

しかしながら、海岸堤防の構造図は必ずしも完全に保存されておらず、構造のわからないものが多々存在する。また、構造図が揃っていても、地盤の沈下・侵食など経年的に構造物や周囲の環境が変化しており、このような変化は十分把握されていない。点検による現状の把握が第一に必要である。

2) 沿岸域

① 護岸・堤防の余裕高の取り扱い

沿岸域に設置される護岸、堤防などの設計では通常余裕高が含まれている。したがって、この余裕高の範囲内の海面上昇であれば現在の設計のままでも浸水を防護する機能を果たしうる可能性がある。しかし、一方で構造物の安定計算では余裕高まで上昇した水位を対象としておらず、そのような水位で構造物が安定である保証はない。結局のところ、予測される海面上昇に対して、余裕高により浸水を防ぐことができるという保証はないこととなる。従来の脆弱性評価では設定水位で構造物が安定かどうかの視点はなく、今後の課題といえる。

② 海岸保全施設の性能評価

海岸保全施設の設計は、2004年に「海岸保全施設の技術上の基準」が策定されるまで、構造が仕様規定されており、構造物の安全に関する性能評価が十分でなかった。脆弱性評価にあたっては、想定される外力の条件の下で、施設の性能を評価していく必要がある。

③ 評価結果の共有

低平地域では、浸水が予想される地域でも、海岸から遠いため、海岸の脆弱性への関心が薄れがちである。脆弱性の評価結果を、行政、住民が共有できるよう、GIS等による情報システムの構築が望まれる。

3) 河川

① 外水氾濫に関して

外水位の評価はそれほど難しくなく研究が進むと考えられるが、重要な点は堤防の脆弱性評価手法を確立することにある。

② 貯水池オペレーションの適応化

外水位は、洪水、水資源の観点ともに、降雨状況だけでなく、ダム貯水池のオペレーションの方法にも依存する。今後、ダム貯水池のオペレーションを内在した流出モデル計算を駆使して、温暖化に伴う降雨形態の変化、降雨予測技術の進展に見合った、ダム貯水池のオペレーション方法の、計画論的、リアルタイム的、導入を図ってゆく必要がある。

5.5 適応策

(1) 適応策メニューとその体系

適応策の具体的なメニュー及びその体系を以下に示す。

1) 沿岸域

表 5-11 適応策メニューとその体系（沿岸域）

目的	適応策メニュー	実施内容
土地利用変更等に関する対策		
防災を考慮した土地利用の変更	緩衝帯（バッファ）の整備	砂丘保全・整備、防風、防砂林の保全・整備、洪水対策としての空間確保、海岸侵食対策
	遊水池等の整備	集落等への浸水被害を低減するための遊水池・貯水池等の整備
土地利用の変更・規制	住居等の移転	危険区域（浸水予想区域）内の住居等の移転、移転支援
	危険区域内の建設禁止・制限	危険区域（浸水予想区域）内の新規の建設禁止・制限
	沿岸域特定区域の開発規制	沿岸域保全を主目的として建築行為等の制限
建築様式等の変更	建築物の強化・嵩上げ等	高床式化（ピロティ）、鉄筋コンクリート化、地盤の嵩上げ等
	セットバック ⁸	危険区域（浸水予想区域）内の新規建築の際にセットバックを義務付け
総合的沿岸域管理（ICZM）	管理制度の整備、法律の制定・変更	沿岸域管理を主目的とした法律に基づき、関連計画を策定・実施
無対策	特段の対策を採らない	自然特性の保全を最優先とし、短期的な侵食対策を行わない
防災体制の充実等に関する対策		
迅速な避難支援	避難路・避難地の整備	高台等の避難地及び安全な避難路を整備
情報提供、啓発・教育 地域防災力強化	ハザードマップの作成・配布	浸水想定区域、避難地、避難経路を図示した防災地図を作成し住民等へ配布（必要に応じて住民参加ワークショップを開催）
	情報提供（施設の整備、Web の活用）	観測情報、予測情報等の収集・提供施設の整備（防災センター等）
	防災訓練の実施	地域住民等が参加する防災訓練を定期的に行い、地方自治体職員の防災に関するスキルアップ
	防災教育の実施	専門家等による地域住民や児童に対する防災教育の実施、教材作成及び人材育成
	自主防災組織の設置	町内会単位の自主防災組織の設置や高齢者等の避難支援を行う防災ボランティア組織の設置
災害時の支援	災害復旧基金、補助金の創設	行政からの出資金、寄付等により基金を創設
	防災活動の支援	止水板、土嚢の常備、救援路・復旧用資材輸送ルート確保
経済的誘導	浸水保険制度の創設	住民等が加入する保険制度を創設
モニタリング体制の高度化		
長期的モニタリング	情報収集、蓄積体制の強化	波浪観測、潮位観測、汀線測量、深浅測量
リアルタイムモニタリング	災害時の情報収集・伝達体制の強化	津波、高潮検知システム
施設整備等による対策		
浸水等の防止	海岸保全施設等の整備・改良・現況評価	堤防・護岸の整備（維持・管理）、沖合消波施設の整備、水門・陸こうの自動化・遠隔化、老朽化施設の点検・改良など
浸水被害の軽減	排水システムの強化	ある程度の浸水・越流を許容した上で浸水被害を最小限とするための排水ポンプ等の整備、排水システムの防水化
砂浜の保全	河川・海岸の総合的土砂管理	養浜、サンドバイパス ⁹ 、ダム堆砂の排砂

⁸ セットバックとは、建築物を建てる際に危険区域等の境界線から安全区域側に後退すること。

⁹ サンドバイパスとは、構造物などにより片側に過剰にたまった砂を、たまった場所からへった場所に運ぶという方法。

2) 河川

表 5-12 適応策メニューとその体系（河川）

目的・適応策メニュー	実施内容
土地利用変動等に関する対策	
被害を最小化する土地利用や住まい方への転換	連続堤から輪中堤などへの転換による、守るべき区域の限定、スーパー堤防
災害危険区域の指定	災害危険区域の指定による土地利用規制
建物タイプの区域に依存した規制	高床式（ピロティ）構造など
防災体制の充実等に関する対策	
広域防災ネットワークの構築	堤防・緊急用河川敷道路・高架道路等と広域防災拠点による連携
インフラの早期復旧	地方整備局・国総研・土研・自治体・民間の連携 被災状況調査・応急対応・災害危険度予測・対策の企画立案・高度な技術指導・復旧工事支援など
水害危険度に関する事前情報の共有	ハザードマップや水害痕跡の明示
リアルタイム情報の共有	雨量や水位等の携帯・インターネット・防災無線等による共有 リアルタイムシミュレーションによる予測情報の共有
モニタリング体制の高度化	
長期的モニタリング	降水量観測、積雪量観測、流量観測
リアルタイム観測システムの高度化	最新型機器への更新、降雨量観測の高密度化
施設整備等による対策	
新規施設の整備	河道の整備、堤防強化、スーパー堤防、洪水調整施設の整備
既存施設の有効活用・長寿命化	既設貯水池の堆砂除去
施設の信頼性の向上	性能評価、老朽化対策
ダム群の再編	利水容量の治水への活用、容量振り替え

(2) 適応策の選択・実施にあたっての考え方

適応策の選択・実施にあたっての考え方を以下に整理する。

1) 沿岸域における適応策の基本的な考え方

① 適応策の基本的な考え方

適応策は、防護、順応、撤退に大別される。防護は、地球温暖化の影響を構造物等で防ぐことであり、堤防や護岸の天端を嵩上げして高潮災害を防ぐというのがこれに相当する。3大湾を始めとして日本では人口や資産が集中する地域が海岸線付近に多い。このような地域は、構造物によって高潮などの災害に対して高水準の防護を行う必要がある。このような防護は、年齢や体力などにかかわらずすべての人とすべての資産が守られるという長所を有する。それだけの集積がなされている地域には積極的に防護策を推進すべきである。ただし、海岸の環境や利用面を考慮すると、護岸や堤防の形状などを工夫することによって、単なる天端の嵩上げにならないような技術開発の余地がある。

順応とは、浸水などが起こっても被害にならないように生活様式や利用方式を工夫することである。アメリカのフロリダ州のように高床式の住居にして、予測される高潮の水位より上に床を作るのがこれに相当する。また、ハザードマップを作成して、避難態勢を整えるのもこれに含まれる。順応は、想定を越える高潮のような外力に対しても対応しやすいという長所をもっているが、日常生活を含めて、人間活動はある程度の制約を受けることになる。

住民がいない地域や、人口がきわめて希薄な地域においては、防護することなしに撤退し、自然に任せて高潮や海岸侵食を受け入れることも可能性の一つとなる。人口減少の中で予算が限られている状況では、限られた地域についてはこのような適応策が有力となろう。

防護、順応、撤退という適応策は、単独で用いるだけでなく、組み合わせて進めることも考え

られる。特に、高潮などに対する現状の目標レベルに対しても海岸の防護が完成せず、さらに台風の強度の増加を含む将来の不確実な外力レベルに対してまですべての海岸の防護水準を上げることとは不可能であろう。こういった状況では、ある程度のレベルまでは構造物などによって完全に防護するが、それを越えた外力に対しては、順応策を取り入れて被害を最小にするという考え方が必要である。地球温暖化に対する海岸での適応策をきっかけに、海岸保全一般についても、組み合わせによる二重の防災・減災態勢を目指すべきであろう。

② 適応策のタイムスケジュール

地球温暖化に対する適応策の実施に際しては、手遅れにならないように計画的にすることと、他方で、事前の対応が過剰になって無駄な投資にならないようにすることが重要である。図 5-20 は、防護を念頭に置いた場合の、地球温暖化への適応策の実施のタイムスケジュールを示すものである。

堤防や護岸の天端高を念頭に置くと、左端は現有の構造物を建設した時点での必要天端高を示しており、実際には余裕高を加えて建設されている。その後の海面上昇によって、現在の必要天端高は若干上昇している。また、現状では不確定であるが、台風の強度の増加等も起こりつつある可能性がある。それらによって必要天端高が上昇する様子を右上がりの曲線が表している。しかし、それらは今のところ余裕高に吸収される程度であると考えられるので、構造物の機能は所定の水準を保っている。しかし、そのままの状態を続ければ、やがて機能水準が不十分となる。そこで、現在の構造物の更新や災害復旧の際に、まずはそれまでに実際に観測された海面上昇分を取り入れて、更新時期での最新の海水面高を使って設計を行うようにする。これで起こってしまった海面上昇への対応がなされたことになる。さらに後の更新時には温暖化現象がより明確になるであろうから、海面上昇の実績だけでなく耐用期間中の上昇予測値も加えたり、さらには台風の強度の増加の現象が明らかであればその分も加えたりして、設計を行う。

このような手順により、地球温暖化に対する適応が、手遅れになることもなく、また、無駄な投資に終わることもなく、漸近的に行われていくことになる。地球温暖化が確実になった現在でも、その定量的な将来予測については不確実性が残っているから、適応策の実施の中でその不確実性を吸収するような工夫が必要である。

ただし、上述の適応戦略の実施に際しては、技術的に解決しておかなければならない問題がある。例えば、10 年オーダーの海水面の上下変動などが含まれる潮位記録から、長期的な海面上昇量をどのように抽出するかということもあるし、設計条件を越えて余裕高にかかるような外力の超過が起こった場合に、構造物の耐力が保証されるかなどもある。そのような技術的な問題を解決した指針を早急に策定する必要がある。

日本では、1990 年代に地球温暖化の影響と対応策の検討が、学問的課題として、さらに行政的課題として盛んに行われた。しかし、対応策が実施されるには不確実性の壁が高かったように思われる。地球温暖化が確実なものと断じられた今、それに対する対応の長期的な見通しを是非持たなければならない。

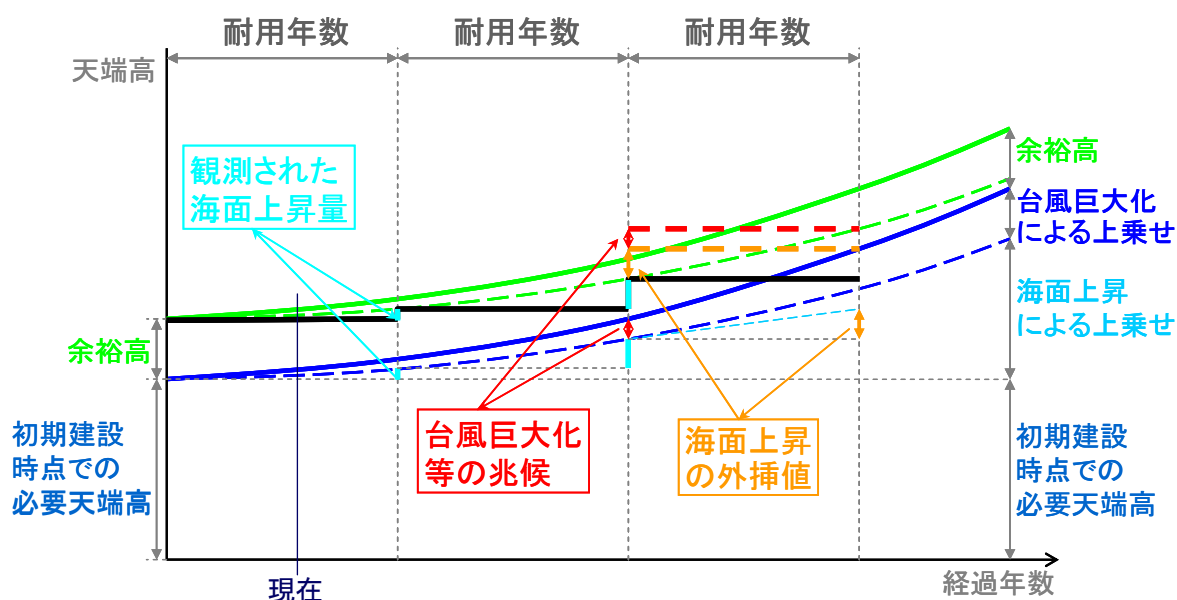


図 5-20 地球温暖化に対する漸近的適応策（磯部，2008）

2) 河川における適応策の基本的な考え方

① 基本的な考え方

災害等からすべてを完全に防御することは困難なため、「犠牲者ゼロ」に向けた検討を進める。また、首都圏のように中枢機能が集積している地域では、国家機能の麻痺を回避するなどの重点的な対応に努め、被害の最小化を目指す（国土交通省河川局，2008d）。

② 温暖化予測の技術進歩に応じた施策

温暖化予測には、まだ不確実性がある。ただ、5 年程度ステップでその精度は高まってゆくだろう。それに応じて、適応策の重点化も変化するはずなので、温暖化予測の確度の進展に応じて、施策の見直しや焦点をアダプティブに変化させる適応策（計画）を考える必要がある。

③ 貯水池オペレーションの適応化

外水位は、洪水、水資源の観点ともに、降雨状況だけでなく、ダム貯水池のオペレーションの方法にも依存する。今後、ダム貯水池のオペレーションを内在した流出モデル計算を駆使して、温暖化に伴う降雨形態の変化、降雨予測技術の進展に見合った、ダム貯水池のオペレーション方法の、計画論的、リアルタイム的、導入を図ってゆく必要がある。

(3) 適応策を実施する上でのバリア

適応策を実施する上でのバリア（法制度面の課題、技術的課題、経済的課題、知識・情報面での課題など）を以下に整理する。

地球温暖化に対する防災関連の適応策として、施設整備のみによる防護を考えると莫大な経費を要するとともに、それだけで完全な防災が実現するわけではない。それゆえ、現実的な経費の範囲内で、最大の防災・減災効果を挙げるには、個々の対策を事後対策的に実施するのではなく、防護・順応・撤退の概念を効率的に組み合わせた予防的な戦略をうち立てる必要がある。その中には、人口の粗密をはじめとする自然社会的な条件によって、防護すべき地域と、撤退も視野に入れる地域とを区別しなければならないが、国土管理の現状からすると非常に難しい課題である。

また、防護・順応・撤退のいずれにしても海水面や台風規模などの外力レベルの正確な把握が不可欠である。特に撤退や順応は新たに展開すべき対策であるが、このためには、リアルタイムで降雨・流量・津波・高潮などの外力をモニタリングするシステムを従来に比べて格段にレベルアップする必要がある。

三大湾などのように人口や経済活動が高密度な地域は防護が必然になると考えられるが、そのために現状の施設の嵩上げなどの投資をするには莫大な経費を必要とする。現実的には、供用期間中の施設への投資を最小限に押さえる一方で、耐用年数を超えたり被災したりしたときの施設の更新時に温暖化対策を設計に取り入れるのが効率的であろう。特に、災害復旧において回復すべき原状は、施設の建設時の安全度であり、その後の海面上昇などのために同じ安全度を確保するためには、施設の性能はより高いものにすることが必要となる。そのための制度変更や技術開発が必要である。

このように、地球温暖化への対策を戦略的に実施するためには、従来とは異なった体制の整備が必要となる。

(4) 適応策として参考にできる既存の事例・政策

防災・沿岸大都市分野における適応策として参考にできる既存の事例及び政策を以下に整理する。既に実施されている事例に加え、研究的要素の強い事例、試行段階・計画段階の事例等も含む。

1) 沿岸域

① 高潮情報システムの構築

台風接近の前に気象庁が発表する高潮や高波の予・警報は、予報範囲が沿岸単位と広く、また、各々の海岸で波のうちあげ高が堤防を上回るかどうかわからない。そのため、国土交通省等では、水防活動などへの情報提供を目的として、気象庁が予測した沿岸の潮位及び沖合域の波浪の情報をもとに、海岸での波のうちあげ高をリアルタイムで予想するシステムを構築中である（加藤ら，2007）。

② 建築物の強化・嵩上げ等

アメリカのフロリダ州においては、予想される高潮水位より上に床が位置するようにピロティ方式の建物を義務づけて被害を軽減したり、バングラデシュにおいてはサイクロンシェルターにより人命だけは救われるようにしている。

③ 河川・海岸の総合的土砂管理

オランダにおいては、海面上昇による海岸侵食に対して、養浜により現在の海岸線を維持するようにしたが、これは高潮に対する被害を軽減するとともに、海岸環境の保全にもつながる。

④ 国家が行う災害保険制度

国家が行っている災害保険制度としては、米国の「国家洪水保険制度（National Flood Insurance Program）」がある。これは、1968年に発効した国家洪水保険法に基づく制度で、連邦危機管理局（Federal Emergency Management Agency）が管轄している。この制度は、高潮などの洪水災害に対する連邦政府の保険制度で、災害にあった個人の財産に対し税金より保険金の支払いを可能とした財政的な保護と災害軽減プログラムよりなっている（Institute for Water Resources, 1996）。災害軽減プログラムは、洪水災害を受けやすい地域における特別ゾーニングや建設・建築基準による災害の防止や軽減を図っている。また、保険金額を高額にすることにより災害多発地域の開発を規制したり、保険金の一部を支払うことにより危険区域にある建物の撤退を促進させたりしている（National Research Council, 1990）。

2) 河川

以下は、洪水防御の現施策の中で取られている方法であるが、温暖化対応により、加えて洪水防御施策をとる必要のある領域が増すことを考えると、先例となる事例である。

例えば、阿武隈川で堤防のない地区であった二本松・安達地区に対し、1998年の洪水の復旧計画として国土交通省は、地形・氾濫形態・資産及び想定被害状況等から対象区域を8ブロックに分割し、従来の改修方式である「連続堤防方式」のほか、財産や暮らしを優先的に浸水から守る「輪中堤方式」や「地上げ移転方式」などの各方式により事業費の比較を行い、事業費が少なく早期に効果を出せる方式を各ブロックの整備方式としている（国土交通省東北地方整備局福島河川国道事務所ホームページ）。

一方、小貝川では浸水区域に点在する家屋を集約化して輪中堤方式に近い形で守ることにより、広大な水田域を遊水池化（母小島遊水池）している（国土交通省河川局，2008b）。

また、隅田川や淀川では、破壊的な被害発生を防止するため、洪水による浸透や越水しても壊れない堤防として、建物が上にのるほど幅が広く裏面勾配の緩やかな高規格堤防（スーパー堤防）を順次構築している。

(5) 適応策の評価手法に関する研究動向

適応策のうち、施設の強化による防護に対してはコスト評価が可能であり、港湾区域での対策費用などが算定されている。人口の稠密な地域においては施設の強化が必然であろうが、全国の海岸の施設を強化するのは環境面などから得策ではないし、また必要経費面で実行可能ではない。防護・順応・撤退を含めたあらゆる適応策の中で実現可能なものの中で最も効率の良い選択肢を与えるような方法論の開発と、合意形成の進め方を研究する必要がある。

5.6 今後の課題

(1) 影響

1) 外力情報の精緻化

影響評価及び脆弱性評価は、気候予測モデルの出力を用いて行われる。防災分野では、海面上昇、降水量、台風の強度・進路・頻度などが重要な外力となる。これらの外力情報の推定精度が向上することはもちろん、例えば、海面上昇量の日本沿岸での分布や世界沿岸での分布などのような、空間解像度が向上することも望まれる。

2) 海面上昇が津波や河川洪水のリスクに及ぼす影響の研究

海面上昇は、津波や河川洪水による氾濫の危険度・規模を増大させる。潮位が上昇した状態で津波が来襲すると津波の到達高さを上昇させ、洪水時には河口域での水位を上昇させる。特に低平地ではこれらの影響が大きい。そのため、津波や河川洪水のリスクについて研究する必要がある。

3) 温暖化による海面上昇が海岸侵食に与える影響の研究

海面上昇とともに海岸の侵食が激化するが、海岸の侵食が進むと、外力が強大化しなくとも来襲する波浪が激化するため、この点を踏まえた海岸侵食のリスクについて研究する必要がある。また、降雨量の増加により、斜面崩壊の頻度増に伴う上流での土砂生産量の増大、洪水の頻度増加に伴う土砂供給量の増大に関する研究も必要である。

4) 沿岸域での気候変動・海面上昇と他の災害との複合影響に関する研究

海面上昇に伴い地下水位が上昇し、そこに地震が発生すると、液状化の危険度が増大する。また、山地で降水量が増加すると、地盤がゆるんだ状態になり、そこに地震が発生すると、斜面崩壊が生じやすくなる。このように気候変動・海面上昇と地震等との複合的な影響の危険度について研究する必要がある。

5) 内水氾濫に対する影響の研究

内水に直接的に影響を及ぼすのは降雨の時間・空間集中度である。これまでの GCM・RCM の出力では、20km 空間分解能での日雨量がもっともきめ細かいものであったが、現在では 1~5km、10 分~1 時間の出力を得、解析することが可能となってきた。気候変動予測のこれらの現気候出力の信頼性を評価するとともに、それをベースにした近未来、世紀末の生起確率を不確実性とともに評価する必要がある。

あわせて、内水氾濫に関して、シナリオベースに、影響を及ぼす降雨の時空間特性を明確化して、上記研究とタイアップさせる必要がある。

6) 外水氾濫に対する影響の研究

都市域の外水氾濫に関しては、様々な検討が必要である。すなわち、大河川流域の降雨特性の変化、それを通しての水位の変化、また、降雨特性の変化によりどのように貯水池操作を変更してゆくべきかの研究が必要である。

(2) 脆弱性

1) 内水氾濫に対する影響の研究

内水氾濫に関して、シナリオベースに、影響を及ぼす降雨の時空間特性を明確化して、降雨特性変化の研究とタイアップさせる必要がある。加えて、下水道、地下河川を通した雨水排除施設計画や、そればかりでなく運用方法（オペレーション）の見直しも必要である。

現在、都市雨水排除の計画、オペレーションは、計画降雨を排除するのに都市内各セクション単独で排水することで施設計画・運用計画が立案されている。しかし、温暖化により降雨がより局所的になれば、他のセクションでは強雨がない場合が想定できる。このような視点で、強雨がもたらされていない他セクションも通して雨水が排除できる計画・システムの構築の可能性がある。これは、気候変動が伴わない現時点に対しても当てはまることである。

したがって、レーダー等の観測手段を通して、都市内という狭い領域での降雨分布特性をより詳細に研究する余地が残されている。

2) 外水氾濫に対する影響の研究

水位の変化特性以外に、堤防の脆弱性に関する研究が、益々希求される。

3) 貯水池の利用目的の変更、オペレーションの適応化

外水位は、洪水、水資源の観点ともに、降雨状況だけでなく、ダム貯水池のオペレーションの方法にも依存する。今後、ダム貯水池のオペレーションを内在した流出モデル計算を駆使して、温暖化に伴う降雨形態の変化、降雨予測技術の進展に見合った、ダム貯水池の利用目的の変更やオペレーション方法の新たな構築を計画論的・リアルタイム的の両方の立場から進めてゆく必要がある。

(3) 適応

1) 土地利用規制による適応に関する研究

一般に、適応策の必要な海岸ほど土地利用が著しく、堤防用地の確保が困難であるため、堤防の嵩上げが必要になったときに備えて事前に堤防敷を確保しておく必要がある。このように、温暖化に対する適応策の観点から、沿岸地域の土地利用規制のあり方について研究する必要がある。

2) 海岸へ供給可能な砂の定量的な把握

山地から供給可能な砂の量を定量的に把握することは、今後の沿岸地域の砂浜の保全対策において重要である。また、温暖化により降水量が増えれば、土砂生産量は増えると考えられるため、沿岸域への砂の供給量も増えることとなる。このように、海岸に供給可能な砂の量について、定量的に把握する手法を研究する必要がある。

3) 避難意思の促進

どのような対策を施しても、温暖化に伴い、被災ポテンシャルの増大は免れないと推察される。人命を守る最も確かな手段は事前の避難である。そのため、心理学的、社会学的な観点も交え、避難を促進する手法を検討する必要がある。

4) 適応策の実施における全体最適化

実際に対策を行う際には、個々の対策のみに着眼するのではなく、全体としての整合性・適合性が重要となってくる。それぞれの適応策の長所、短所、適合性などを考慮した全体最適化に関する検討・研究を行っていく必要がある。

5) 従来とは異なる制度や体制の整備

地球温暖化に対する防災関連の適応策の実施において、個々の対策を事後対策的に実施するのではなく、防護・順応・撤退の概念を効率的に組み合わせた予防的な戦略をうち立てる必要がある。その中では、人口の粗密をはじめとする自然社会的条件の動向を把握した上で、適切かつ計画的な土地利用等により、防護に加えて順応や撤退の方向に向かう地域もありうるが、具体的にどのように進めるかは今後の課題である。

また、防護・順応・撤退のいずれにしても海水面や台風規模などの外力レベルの正確な把握が重要であるが、他方で不確定な外力の下でも有効な適応策を講じていく必要がある。

さらに、三大湾などのように人口や経済活動が高密度な地域は防護が必然になると考えられるが、供用期間中の施設への投資を最小限に押さえる一方で、耐用年数を超えたり被災したりしたときの施設の更新時に温暖化対策を設計に取り入れるのが効率的であろう。そのための制度変更や技術開発が必要である。このように、地球温暖化への対策を戦略的に実施するためには、従来とは異なった制度や体制の整備が必要となる。

引用文献

- 土木学会編, 1994: 地球温暖化の沿岸影響, 221.
- 原沢英夫, 2006: 温暖化がもたらす異常気象とその社会影響, 環境情報科学, 35-3, 4-7.
- 藤原洋一, 田中賢治, 渡邊裕裕, 長野宇規, 小尻利治, 2007: 気候モデル・ダウンスケーリング手法・水文モデルによる温暖化影響評価の不確実性について, 応用水文, 20 (印刷中).
- 福濱方哉, 2007: 地球温暖化による海面上昇や台風の変化が海岸に与える影響と対応について, 高压ガス, 9, 5-8.
- Institute for Water Resources, 1996: Analysis of U.S. Army Corps of Engineers Shore Protection Program, IWR Rep.96-PS-1.
- 磯部雅彦, 三村信男, 灘岡和夫, 1991: 地球温暖化による海面上昇・海象変化と海岸への影響評価, 環境工学連合講演会講演論文集, 6, 1-6.
- 磯部雅彦, 2008: 気候変動の海岸への影響と適応策, 河川, 1, 35-40.
- 海岸保全施設築造基準連絡協議会編, 1987: 改訂海岸保全施設築造基準解説, 269.
- 加藤史訓, 福濱方哉, 橋本典明, 三島宣明, 松藤絵里子, 宇都宮好博, 2007: 内湾を対象としたリアルタイム波浪予測システムの開発, 海洋開発論文集, 23, 225-230.
- 河合弘泰・橋本典明・松浦邦明, 2007: 確率台風モデルを用いた内湾の高潮の極値と継続時間の推定, 海岸工学論文集, 54, 301-305.
- 川越清樹, 風間聡, 沢本正樹, 2007: 融雪に起因する土砂災害のリスクモデル, 水工学論文集, 51, 367-372.
- 建設省河川局: 災害列島 1999 ～平成 11 年の水害を検証する～
(http://www.mlit.go.jp/river/pamphlet_jirei/bousai/saigai/1999/home.htm).
- 建設省土木研究所, 北海道開発庁土木研究所, 1996: 地球温暖化による水収支への影響評価に関する研究, 環境庁地球環境研究推進費終了研究報告書, 246.
- 建設省土木研究所ダム部水工水資源研究室, 1997: 地球温暖化が水資源に及ぼす影響に関する考察, 土木研究所資料, 3478, 74.
- 国土交通省, 2005: 菜生^{なばえ}海岸災害調査検討委員会報告書
(http://www.mlit.go.jp/river/shinngikai_blog/past_shinngikai/shinngikai/kondankai/nabae/pdf/houkoku_0503.pdf)
- 国土交通省河川局, 2007: 第 1 回 気候変動に適応した治水対策検討小委員会資料 資料 3.
(http://www.mlit.go.jp/river/shinngikai_blog/shaseishin/kasenbunkakai/shouinkai/kikouhendou/01/pdf/s3.pdf)
- 国土交通省河川局, 2008a: 第 5 回 気候変動に適応した治水対策検討小委員会資料 資料 5.
(http://www.mlit.go.jp/river/shinngikai_blog/shaseishin/kasenbunkakai/shouinkai/kikouhendou/05/pdf/s5.pdf)
- 国土交通省河川局, 2008b: 第 5 回 気候変動に適応した治水対策検討小委員会資料 資料 6.
(http://www.mlit.go.jp/river/shinngikai_blog/shaseishin/kasenbunkakai/shouinkai/kikouhendou/05/pdf/s6.pdf)
- 国土交通省河川局, 2008c: 第 7 回 気候変動に適応した治水対策検討小委員会資料 資料 7.
(http://www.mlit.go.jp/river/shinngikai_blog/shaseishin/kasenbunkakai/shouinkai/kikouhendou/07/pdf/s7.pdf)
- 国土交通省河川局, 2008d: 水災害分野における地球温暖化に伴う気候化への適応策のあり方について (答申案), 56.
(http://www6.river.go.jp/riverhp_viewer/entry/y2008e95c8bb83cbe81f705a64c483b464d541ce1ef73f.html)
- 国土交通省河川局, 2008e: 「地球温暖化に伴う気候変動が水関連災害の及ぼす影響について」, 土木学会河川懇談会話題提供資料, 3 月 (http://www.mlit.go.jp/river/basic_info/jigyoku_keikaku/gaiyou/kikouhendou/pdf/080401_shiryo_all.pdf)
- 国土交通省土地・水資源局, 2008: 平成 19 年度版日本の水資源について,
(<http://www.mlit.go.jp/tochimizushigen/mizsei/hakusyo/H19/index.html>)
- 国土交通省東北地方整備局福島河川国道事務所ホームページ (二本松・安達地区河川整備計画)
(<http://www.fks-wo.thr.mlit.go.jp/nihonmatu/index.htm>)
- 三村信男, 井上響子, 幾世橋慎, 泉宮尊司, 信岡尚道, 1994: 砂浜に対する海面上昇の影響評価(2) --予測モデルの妥当性の検証と全国規模の評価, 海岸工学論文集, 41, 1161-1165.
- 三村信男, 佐藤圭輔, 大高京子, 横木裕宗, 2000: 地球環境情報を用いたアジア・太平洋地域に対する海面上昇の影響評価, 地球環境シンポジウム講演論文集, 8, 149-156.
- National Research Council, 1990: Managing Coastal Erosion, National Academy Press, 182.
- 日本港湾協会編, 1989: 港湾の施設の技術上の基準・同解説 (上・下), 日本港湾協会, 上巻 469 下巻 499.
- 信岡尚道, 加藤史訓, 武若聡, 松浦健郎, 2007: 2006 年 10 月上旬の茨城沿岸高潮の発生要因, 海岸工学論文集, 54, 306-310.
- 野口賢二, 福濱方哉, 五味久昭, 五十嵐竜行, 板橋直樹, 鈴木純平, 2007: 気候変動に対応可能な長期的沿岸防災計画に向けた地域特性分析, 海洋開発論文集, 23, 147-152.
- 大塚健太, 戸田圭一, 米山望, 2008: 短時間集中豪雨に対する中小河川の洪水氾濫危険度評価手法の提案, 平成 20 年度土木学会関西支部年次学術講演会講演概要集, II-32.
- 佐藤圭輔, 三村信男, 町田聡, 2000: アジア・太平洋の海岸・沿岸域に対する気候変動の影響評価, 海岸工学論文集, 47, 1236-1240.
- 佐山敬洋, 立川康人, 寶 馨, 増田亜美加, 鈴木琢也, 2008: 地球温暖化が淀川流域の洪水と貯水池操作に及ぼす影響の評価, 水文・水資源学会誌, 21(4) (発刊予定) (<http://www.kakushin21.jp/eng/brochure/2007brochure.pdf>)
- 高山知司, 1990: 防波堤の滑动安定性に及ぼす海面上昇の影響, 海岸工学論文集, 37, 873-877.
- 地球温暖化に伴う海面上昇に対する国土保全研究会, 2002: 研究会報告書
(http://www.mlit.go.jp/kisha/kisha02/05/050502/050502_02.pdf)
- 筒井純一, 2007: 地球温暖化による熱帯低気圧の変化に関する研究動向, 海洋開発論文集, 23, 45-50.

宇野木早苗, 磯崎一郎, 1996 : 高潮における気圧と風の効果の比較, 海岸工学講演会講演集, 13, 248-253.

宇多高明, 小俣篤, 1989 : 海岸保全に及ぼす海面上昇の影響, 土木研究所, 5.

和田一範, 2006 : 地球温暖化に伴う洪水・渇水リスクの評価に関する研究, 地球環境, Vol.11, No.1, 67-78.

和田一範, 村瀬勝彦, 富澤洋介, 2005a : 地域気候モデルを用いた地球温暖化に伴う洪水・渇水リスク評価に関する考察, 水工学論文集, 49, 493-498.

和田一範, 村瀬勝彦, 富澤洋介, 2005b : 地球温暖化に伴う降雨特性の変化と洪水・渇水リスクの評価に関する研究, 土木学会論文集, No.796/II-72, 23-27.

和田一範, 川崎将生, 富澤洋介・楠 昌司・栗原和夫, 2008 : 高解像度全球モデルおよび地域気候モデルを用いた地球温暖化に伴う洪水リスク評価, 水文・水資源学会誌, 21(1), 12-22.

横木裕宗, 佐藤大作, 山野博哉, 島崎彦人, 安藤創也, 南陽介, 高木洋, 茅根創, Albon Ishoda, 2004 : 環礁州島における地形維持機構とラグーン内波浪場の関係に関する現地調査, 土木学会, 海岸工学論文集, 51, 1381-1385.

横木裕宗, 2007 : 気候変動・海面上昇が沿岸域災害へ及ぼす影響, 海岸, 47(1), 16-20.