気候変動の不確実性を考慮した堤防嵩上げの動的計画

藤見　俊夫[1]・Si Ha[2]・森信人[3]・多々納裕一[4]

[1]正会員　京都大学准教授　防災研究所（〒611-0011 京都府宇治市五ヶ庄）
E-mail: fujimi.toshio.7x@kyoto-u.ac.jp

[2]学生会員　京都大学准教授　防災研究所（〒611-0011 京都府宇治市五ヶ庄）
E-mail: ha.si.5f@kyoto-u.ac.jp

[3]正会員　京都大学　教授　防災研究所（〒611-0011 京都府宇治市五ヶ庄）
E-mail: mori.nobuhito.8a@kyoto-u.ac.jp

[4]正会員　京都大学　教授　防災研究所（〒611-0011 京都府宇治市五ヶ庄）
E-mail: tatano.hirokazu.7s@kyoto-u.ac.jp

本研究では大阪湾を対象に、不確実な温暖化および高潮リスク増大への適応策として動的意思決定モデルを構築し、想定される経済損失を最小化するための堤防嵩上げ高さとタイミングを試算した。対象期間を 2020～2100 年に設定した上で、期間内に一度のみ意思決定が可能な初期計画と、5 年毎に何回でも意思決定を行える動的計画を検討した。温暖化シナリオ、割引率、施工期間によるタイムラグが変化することで堤防嵩上げ最適計画にどのような影響が及ぶのかについて比較を行った．その結果，動的計画によるリスク費用削減効果は堤防嵩上げに伴う施工期間を短縮するほど大きくなることが示された．

Key Words: *climate change, adapataion, dike rising, storm surge*

1. はじめに

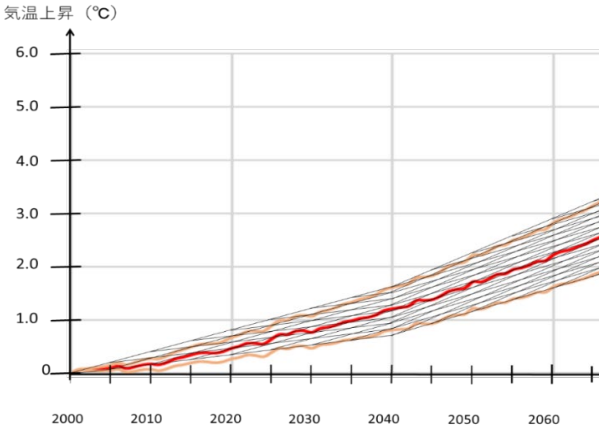
災害の発生を確実に予測できる状況は稀であり，人々の避難を求めるときに不確実な予測情報しか提供できな気候変動により高潮リスクは年々増大することが予想されるため，堤防嵩上げなどの適応策を適切に実施する必要がある．しかし，気候変動による高潮増大リスク予測には不確実性があり，どのタイミングでどの程度の規模の適応政策を実施すべきかは大きな問題である．本小節は，IPCC による二つの気候変動シナリオを基に，各シナリオの不確実性を考慮した下で適応政策の実施タイミングと規模を動的に決定するモデルを構築する．

本研究で検討する気候変動シナリオは IPCC の RCP8.5 と RCP2.6 シナリオである．対象エリアは日本三大湾の一つである大阪湾とし，適応政策は堤防嵩上げとする．堤防嵩上げを実施するにあたり，嵩上げの意思決定の時点と嵩上げ工事が完了して効果を発現する時点には大きな時間差がある．その時間差を本研究ではタイムラグと呼び，タイムラグの長さが最適な堤防嵩上げ計画にどのような影響を及ぼすかも検討する．

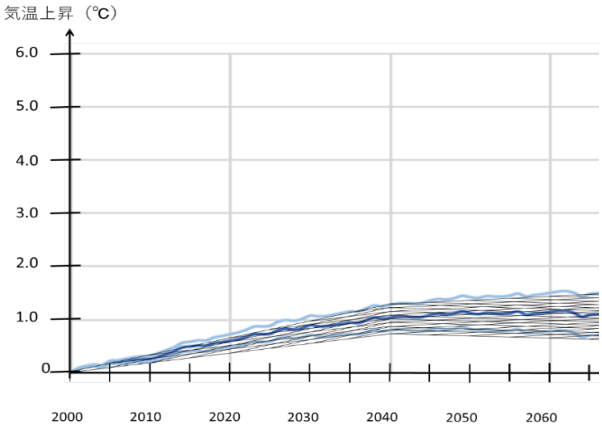
2. 分析モデル

(1) 平均気温上昇の二項過程モデル化

平均気温上昇は RCP シナリオに基づいて推移するが，RCP シナリオには不確実性があるため各時点での平均気温には幅がある。このような不確実性を捉えられるよう，平均気温の推移を 2 項過程としてモデル化を行う。RCP8.5 シナリオで平均気温上昇を 2 項過程としてモデル化したものを**図-1 (a)**，RCP2.6 シナリオで平均気温上昇を 2 項過程としてモデル化したものを**図-1 (b)** に示す．これらの図の中央の赤線が各シナリオで予測された最も代表的な平均気温上昇の推移を表しており、上下の橙色の線が最悪ケースと最善ケースを示している。網の目が 2 項過程モデルで取りうる状態であり、これらの点で堤防嵩上げの意思決定を行う。本研究では，堤防嵩上げの意思決定を 5 年間隔で行うと想定するため、平均気温上昇の変化も 5 年間隔で捉える．また，RCP8.5 シナリオにおける平均気温上昇は 2040 年頃に変曲点が存在するため，2020～2040 年と 2040～2100 年とで気温上昇幅を変化させている．



(a) RCP8.5 シナリオ



(b) RCP2.6 シナリオ

図 1 RCP シナリオに基づく二項過程モデル

(2) タイムラグのある動的計画モデル

本研究で扱う意思決定において，対象期間の各時点で堤防をどの程度嵩上げするのかを判断する基準は，リスクコストが最小となる方策を選択することにある．本研究では，リスクコストを高潮リスクの年間期待被害額と堤防嵩上げ費用の合計額とする．対象期間（2020年～2100年）のリスクコストの割引現在価値を最小化する堤防嵩上げ計画は下記の確率的動的最適計画モデルを解くことで求められる．

$$V_t(s,x) = \max_{a \geq 0} W_t(x+a,s)$$

$$W_t(x+a,s) = -C(a) + \sum_{k=0}^{f-1} \beta^{f-1-k} \sum_{i=0}^{f-1-k} C_i^{f-1-k} p_u^i p_m^{f-1-k-i} EL(x,s+i) + \beta^f \sum_{i=0}^{f} C_i^f \, p_u^i p_m^{f-i} V_{t+f}(x+a,s+i) \;\; if\ a > 0$$

$$-EL(x,s) + \beta\{p_u V_{t+1}(x,s+1) + p_m V_{t+1}(x,s)\} \;\; if\ a = 0$$

s：平均気温上昇量
x：2000 年での堤防高さを 0 と基準化したときの，累積の堤防嵩上げ高さ
a：堤防嵩上げ高さ
p_u：温暖化状態が悪化する確率
p_m：温暖化状態が現状維持の確率（$= 1 - p_u$）
β：割引因子$= 1/(1+r)$　rは割引率
$V_t(x,s)$：気温上昇s，堤防高さx，時点tの厚生
$EL(x.s)$：気温上昇s，堤防高さxでの 1 期間の高潮による期待被害額
$C(a) = 70a \times 430 = 3010a$：堤防高さ$x$のときの嵩上げ$a$の費用
C_i^f：コンビネーション数（f個からi個選ぶ組合せ）

このモデルでは，堤防嵩上げの実施を意思決定してから効果が発現されるまでにf期のタイムラグが生じることを想定している．例えば，t期に堤防嵩上げを実施すると意思決定したとき，$t+f$期に嵩上げが完了して効果が発揮されることになり，その間は次の意思決定を行うことができない．

(3) 大阪湾を対象としたケーススタディの条件設定

本研究は，上記の堤防嵩上げの動的最適化モデルを，2020年から2100年までの100年間において大阪湾を対象に実施する．対象エリアを**図-2**に示す．堤防嵩上げaの単位は0.5mとし，最大5.0mとする．また，累積堤防嵩上げ高さxも現状＋0mから0.5m刻みで現状＋5.0mまでの11パターンを考える．堤防をaだけ嵩上げするのに要する費用$C(a)$は，レジリエンス確保に関する技術検討委員会で報告されている堤防嵩上げの単位費用を70万円/m^{2}を用い，対象地域である大阪湾の海岸延長430kmを掛け合わせることで定義している．高潮による期待被害額$EL(x.s)$は下記の設定における高潮氾濫解析シミュレーションによって求めている（**図-3**）．

①海面上昇h：0, 10,…, 110cm
②高潮最大潮位偏差（MPS）k：0, 10,…, 70cm
③堤防高さx：現状＋0m から 0.5m 刻みで＋5.0m まで

上記の各パターンの全ての組み合わせ（12×8×11=）1056パターンで氾濫解析を実施して，浸水エリアと浸水深さを予測する．その氾濫解析結果から治水経済マニュアルに従って高潮氾濫被害額のマトリックス$L(h,k,x)$を算出し，最大高潮偏差kの 1 期間における発生確率で$L(x,h,k)$の期待値$EL(x,h)$を算出する．このとき，平均温度上昇sと海面上昇hは一対一に対応させているので、$EL(x,s)$をも求められる．海面上昇の刻みの間に、必要

な平均温度上昇量がある場合は線形補完して算出する．

社会的割引率rは公共事業で標準的に用いられている4%と，近年の経済成長から推定されている 2%を用いて，それぞれ堤防嵩上げの最適計画を算出した．タイムラグについても，海岸整備の予算をどの程度集中的に投資するかによって異なるので，0 年（意思決定の直後に嵩上げ完成），10 年，20 年，30 年の 4 ケースを検討した．

本研究の動的決定モデルは後ろ向きに解くため，最終期の設定が結果に影響を及ぼす．ただし，その最終期の設定の影響は社会的割引率を用いた割引により計算期間を長くすればするほど減少する．そこで，本研究では計算期間の最終期は 2300 年として 300 年間の計算を行い，そのうちの最初 80 年間である 2020 年から 2100 年までの堤防嵩上げ最適計画を，本研究の結果として用いる．

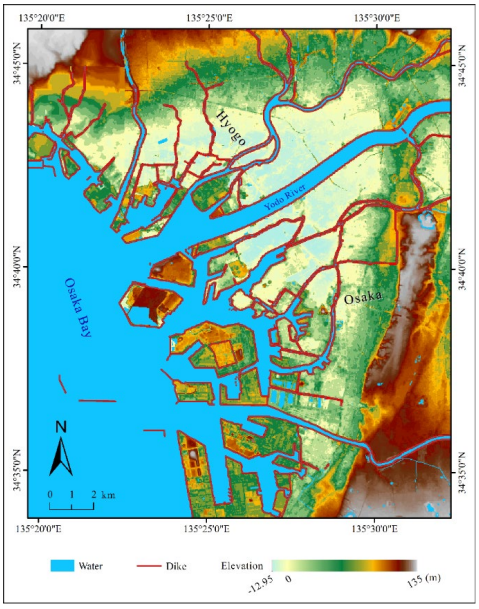


図 2　分析対象エリア（大阪湾岸）

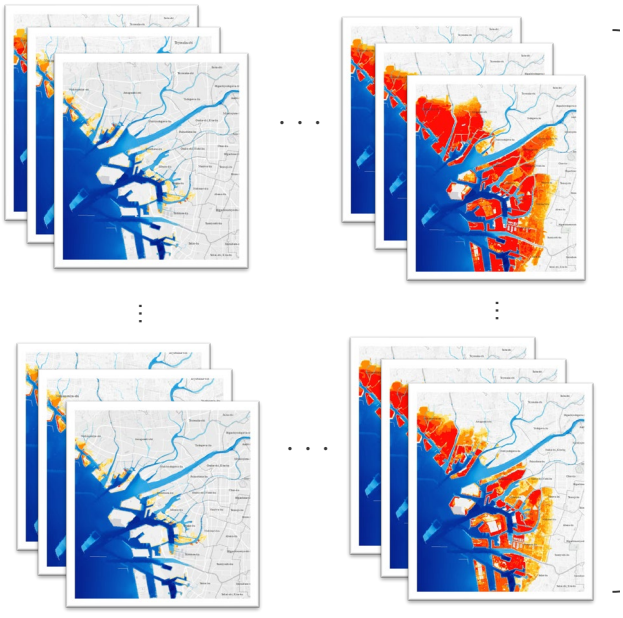


図-3　高潮による期待被害損失関数 EL(x,s)の推定

3.　最適堤防嵩上げ計画の算出結果

(1)　年間リスク費用の試算結果

気候変動の不確実性を考慮した大阪湾岸の堤防嵩上げの最適計画による年間リスク費用（高潮による期待被害額と堤防嵩上費用の合計の年換算額）を，各条件ごとに**表-1** に示す．この表で，「現状放置」は現状の堤防高さのまま放置する計画である．「初期計画」では，現時点で気候変動による海面上昇の全てパスを考慮して堤防嵩上計画を決め，その後はどのパスが実現しても計画を変更しないと設定する．「動的計画」は，各期（5 年刻み）ごとに海面上昇の実現値を観測し，それをもとに堤防嵩上高さを決定する計画である．

表-1　分析対象エリア（大阪湾岸）

		年間リスク費用（億円）			
		RCP2.6		RCP8.5	
割引率		2%	4%	2%	4%
現状放置		218	168	546	261
初期計画	タイムラグ				
	0年	95	147	162	170
	10年	114	168	186	210
	20年	132	168	210	243
	30年	149	168	234	261
動的計画	タイムラグ				
	0年	95	142	146	167
	10年	114	161	173	202
	20年	132	167	200	224
	30年	149	168	227	239
年間リスク費用比率					
動的計画/現状放置	タイムラグ				
	0年	0.43	0.84	0.27	0.64
	10年	0.52	0.96	0.32	0.77
	20年	0.61	0.99	0.37	0.86
	30年	0.68	1.00	0.42	0.92
動的計画/初期計画	タイムラグ				
	0年	1.00	0.97	0.90	0.98
	10年	1.00	0.96	0.93	0.96
	20年	1.00	0.99	0.95	0.92
	30年	1.00	1.00	0.97	0.92

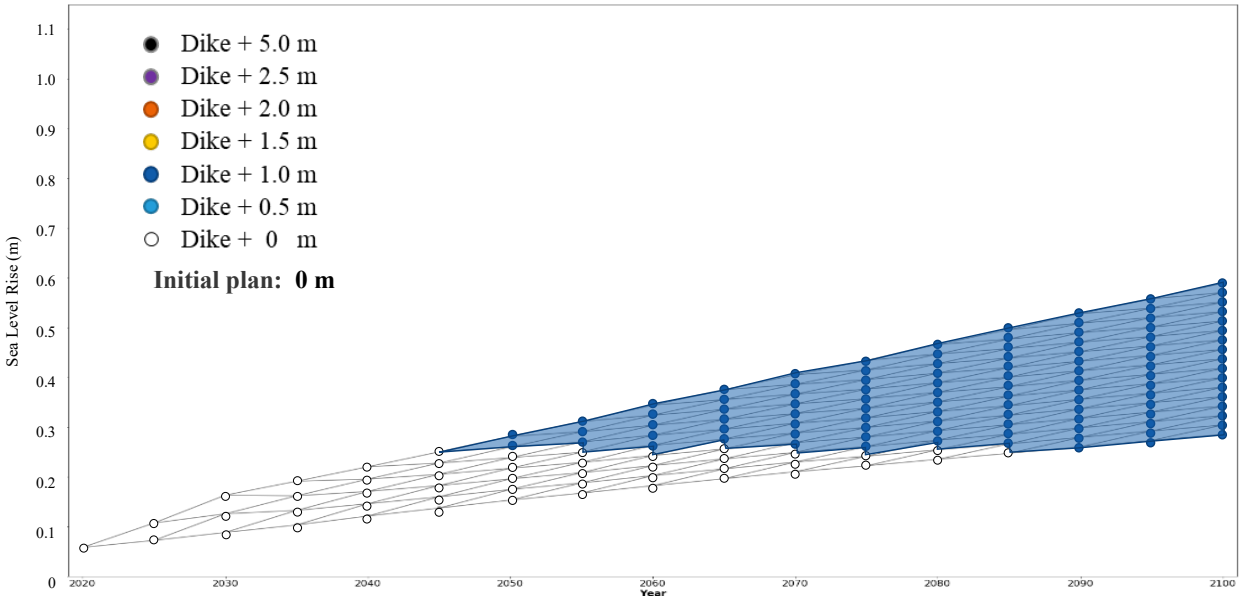


図-4 堤防嵩上の最適動的計画：RCP 2.6，割引率 4%，タイムラグ 10 年

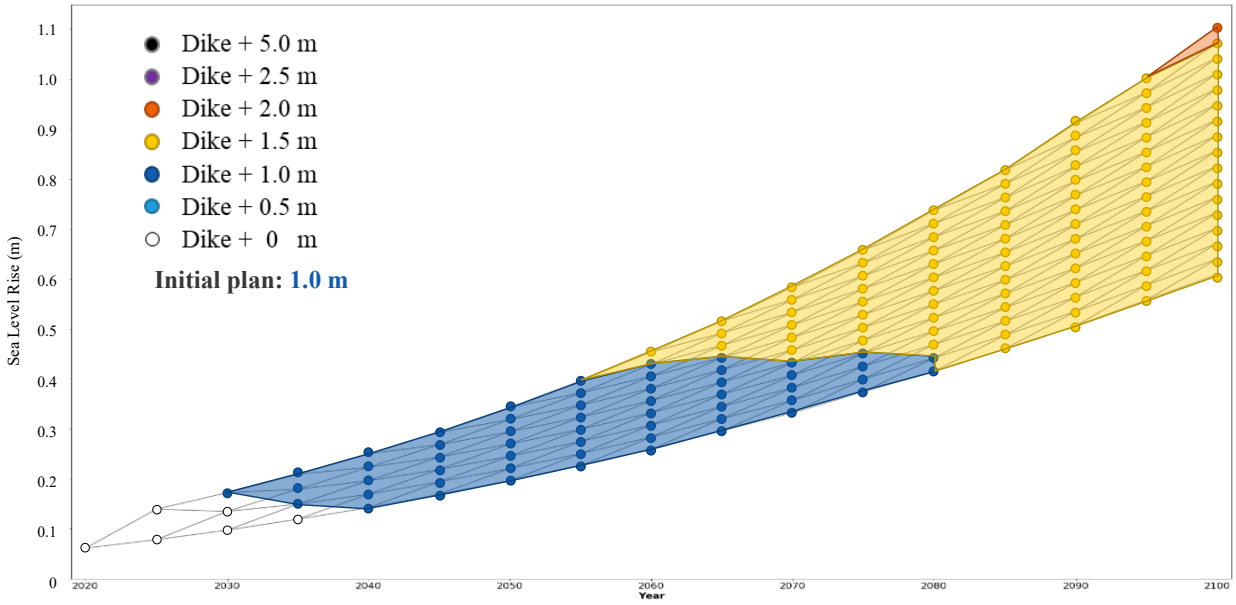


図-5 堤防嵩上の最適動的計画：RCP 8.5，割引率 4%，タイムラグ 10 年

表-1 から，動的計画では、堤防嵩上を全くしない場合より、このことから，RCP2.6 と RCP8.5 の両方でリスク費用を大幅に削減できることが明らかになった．このことから，気候変動による高潮浸水リスクの増大を無視することはできないことが示された．しかし，タイムラグが長くなるほど、堤防嵩上による年間リスク費用の削減率は低下することが示されており，堤防嵩上の工期を短くすることが重要であることがわかる．特に，割引率 4%のケースでは，工期が 30 年以上かかると堤防嵩上による便益はほぼ失われてしまう．

海面上昇の実現値を観測しながら堤防嵩上高さを決める動的計画と，現時点で堤防嵩上プランを確定してまう初期計画を比較したところ，前者のほうがリスク費用を削減できることが明らかになった．その削減幅は年間で数%であるが，リスクコストの金額が大きいことと対象期間が長いことから，総額でみれば大きな削減額につながると考えられる．初期計画と比較して動的計画が削減できるリスクコストの比率も，タイムラグが長くなるほど小さくなるため，堤防嵩上の工期短縮が重要であることが示される．

(2) 堤防嵩上の最適計画の試算結果

つぎに，動的計画において最適な堤防嵩上計画を試算した結果を検討する．割引率 4%でタイムラグ 10 年のケースで， RCP 2.6 と RCP 8.5 シナリオの結果を図-5 と図-6 にそれぞれ示す．RCP 2.6 では，およそ 0.2 m 海面上昇し

た時点で堤防を 1.0 m 嵩上することが最適になっており，それ以上の海面上昇について追加の堤防嵩上は必要ないという結果が得られている．また，1.0 m の堤防嵩上のタイミングは経年（西暦）とは関係なく，0.2 m 海面上昇に達したときであった．RCP 8.5 については，0.2 m 海面上昇したときに堤防を 1.0 m 嵩上し，0.4 m 海面上昇したときに 1.5 m 嵩上（追加的に 0.5 m 嵩上）し，1.0 m 海面上昇したときに 2.0 m 嵩上（追加的に 0.5 m 嵩上）すべきことが明らかになった．この場合でも，堤防嵩上のタイミングは経年（西暦）とは関係なく，ほぼ海面上昇で決まっている．

4. まとめ

本研究では大阪湾を対象に、不確実な温暖化および高潮リスク増大への適応策として動的意思決定モデルを構築し、想定される経済損失を最小化するための堤防嵩上げ高さとタイミングを試算した。対象期間を 2020～2100 年に設定した上で、期間内に一度のみ意思決定が可能な初期計画と、5 年毎に何回でも意思決定を行える動的計画を検討した。IPCC による温暖化シナリオ、割引率、そして施工期間によるタイムラグが変化することで、これらの堤防嵩上げ計画とその効果へどのような影響が及ぶのかについて比較を行った。これらによる成果を以下にまとめる。

- 動的計画では、多くの条件において初期計画よりも経済損失が大きく軽減された.
- 割引率が低いほど将来の高潮被害が高く見積もられ、早期から嵩上げを実施する傾向が見られた.
- 意思決定から嵩上げ完了までのタイムラグが長いほど推定される経済損失は大きくなり、より遅い時期に嵩上げが意思決定された.
- タイムラグ短縮による経済損失の軽減については、割引率が低いほど大きな効果が期待され、RCP8.5 ではさらに大きく軽減された.
- 堤防嵩上のタイミングは経年（西暦）とは関係なく，ほぼ海面上昇で決まっていた.

以上を踏まえ、将来において経済損失が大きく推定される条件としては、温暖化の進行が早いこと、割引率が低いこと、そしてタイムラグ期間が長いことが挙げられる。この中で温暖化の進行とタイムラグの長さについては、今後の取り組み次第で改善の余地があることから、社会全体の協力により経済損失のさらなる最小化を図ることが求められる。特に，堤防嵩上げに伴う施工期間を短縮する効果はさらに増していくことが考えられる.

DYNAMIC PROGRAMMING ON DIKE RISING UNDER UNCERTINTY IN CLIMATE CHANGE

Toshio FUJIMI

In this study, a dynamic decision-making model was developed for Osaka Bay as a measure to adapt to uncertain global warming and increased storm surge risk, and the height and timing of dike raising to minimize possible economic losses were estimated. The target period was set to 2020-2100, and an initial plan that allows a decision to be made only once during the period, and a dynamic plan that allows decisions to be made as many times as needed every five years were considered. Comparisons were made on how the optimal plan for levee raising is affected by changes in the time lag due to the global warming scenario, discount rate, and construction period. The results showed that the risk-cost reduction effect of dynamic planning increases as the construction period for raising the embankment is shortened.