4.日本沿岸域における海面上昇に起因する潜在的浸水被害への効率的防護方法の検討

児玉 康希[1]・横木 裕宗[2]

[1]茨城大学　大学院理工学研究科都市システム工学専攻（〒316-8511 茨城県日立市中成沢町 4-12-1）
E-mail: 22nm814r@vc.ibaraki.ac.jp (Corresponding Author)
[2]正会員　茨城大学教授　大学院理工学研究科都市システム工学領域（同上）
E-mail: hiromune.yokoki.hy@vc.ibaraki.ac.jp

日本沿岸域において，2100年時点の海面上昇(SSP1-2.6, SSP2-4.5, SSP5-8.5)に対して潜在的浸水域を3次メッシュで求め，一連なりの浸水域にグループ分けし，浸水域クラスターとして定義した．浸水域クラスターのうち海域に面する海岸線グリッドを全て防護することで，その浸水域クラスターが全体が防護されることになる．また，防護する海岸線グリッド数と減少する浸水影響の割合で防護効率を定義した．防護効率は浸水域クラスターごとに異なり，加えて浸水面積よりも影響人口が総被害を効率的に減らすことができる．東京都，岐阜・愛知・三重県，福岡・佐賀県，高知県，岡山県，広島県，大阪府・兵庫県，神奈川県，などの浸水域クラスターは，浸水面積・影響人口の両観点から防護効率が良く，効率的に浸水被害を防護するためには浸水域クラスター単位での浸水影響評価が重要であることが示された．

Key Words: *sea level rise, inundation area, affected population, effectiveness of adapation*

1. はじめに

IPCC第6次評価報告書[1)]によると，世界平均海面水位が上昇し続けることはほぼ確実であり，1995-2014年を基準とすると，21世紀末に0.28-1.01 m（SSP1-2.6～SSP5-8.5）上昇すると予測されている．日本では海面が30cm上昇すると半分の砂浜が，1m 海面が上昇すると日本全国の砂浜の9割以上が失われると予測されている[2)]ことからも，海面上昇による被害の大きさが窺い知れる．さらに，海面上昇等による浸水被害の程度を評価することは，将来の適切な適応策検討と不可分の関係にある．

日本沿岸域における浸水影響の推計については，大場ら[3)]，児玉ら[4)]の先行研究が挙げられる．大場ら[3)]は，EM-DAT[5)]から導出された被害額推定方式から，CMIP5 (Coupled Model Intercomparison Project Phase 5)におけるMIROC-ESM-CHEMのRCP8.5によって推計された潜在的浸水面積を，2598 km^2，影響人口を約2530千人（SSP1），約5650千人（SSP5）と算出した．一方，児玉ら[4)]は，治水経済調査マニュアル（案）[6)]から，日本版SSP土地利用シナリオ[7)]，CMIP5のMIROC-ESM-CHEM（RCP2.6, RCP8.5）を用いて，潜在的浸水面積を，2100年で2261-2598 km^2，影響人口を約3760～4920千人と算出した．これら研究では，都道府県別の影響評価は報告されているものの，浸水影響を合計し総浸水被害を示している．しかし，全国一律に適応策を実施することはまずなく，地域ごとに順次実施されるのが通常である．その場合，部分的な適応に対する効果（影響の減少量）を推定することが必要となる．

そこで，本研究では海面上昇量の地域別のばらつき，浸水域の面積，人口などを考慮し，グループ分けをして，浸水域をより詳細に分類した．本研究では，2100年を対象として，代表的な浸水被害である潜在的浸水面積と影響人口それぞれの観点から，浸水域ごとの被害を算出し，効率よく防護できる浸水域を発見することを目的としている．また，それら浸水被害の防護効率の違いを明らかにし，今後の浸水影響への適応策実施の基準として検討した．

2. 解析手法

本研究における，潜在的浸水面積と影響人口の算出手法は，児玉ら[4)]と同様であるが，SSPシナリオにSSP2-4.5を追加し，海面上昇データを新たに公開されたCIMP6のMIROC6へ変更した．

(1) 潜在的浸水面積

浸水域の算定に使用したデータは，標高データ（国土数値情報（標高・傾斜度 3 次メッシュ）[8]，行政区域コード（国土数値情報）[9]，潮汐データ(TPXO9)[10]，海面上昇データ（MIROC6：SSP1-2.6，SSP2-4.5，SSP5-8.5）である．

行政区域コードが与えられたグリッドを陸域として定義した．潮汐データは，天文潮による海面水位変化を考慮して，日常的に起こりえる最高水位を，Egbert and Erofeeva[10]に基づき 2020 年に公表された潮位データ TPXO9 から主要四分潮各々の振幅を合計して求めた．海面上昇データは, MIROC6 の海面水位計算結果（全球平均，全球分布）を用いた．行政区域コードにより陸域と定義したグリッドに標高データを対応させ，潮汐・海面上昇データを合計した水位高と比較することで浸水域を定義し，地球楕円体を考慮[11]して浸水面積を算出した．

(2) SSP に基づく影響人口

影響人口計算には，国立環境研究所(NIES)の日本版 SSP の 3 次メッシュ人口シナリオ第 2 版[12] を使用した．提供されている 3 次メッシュコードを緯度・経度に変換し，浸水域と対応させることで影響人口を算出した．

児玉ら [4]は，各温室効果ガス排出シナリオに応じた優先度の高い SSP と RCP の組み合わせとして，SSP1-2.6 (SSP1-RCP2.6)，SSP5-8.5 (SSP5-RCP8.5)の 2 つを採用した（O'Neil et al.[13]，文部科学省・気象庁 [14]）．SSP1-2.6 は持続可能な発展の下で気温上昇を 2℃未満に抑えるシナリオであり，SSP5-8.5 は化石燃料依存型の発展の下で気候政策を導入しない最大排出シナリオである．本研究では，現在の延長に近い中庸な発展の下で気候変動対策を導入する SSP2-4.5 を追加した．このシナリオは，2021 年 11 月にイギリスのグラスゴーで開催された国連気候変動枠組条約締約国会議 COP26 開始の時点において，各国が掲げる排出削減目標や実施している政策のレベルに近いと考えられている [15].

(3) 浸水域クラスターと防護効率の考え方

算出した浸水域をもとに，3 次メッシュ単位で東西南北いずれかに浸水域が接する場合にそれらを同じグループと定義し独立した浸水域として区分した．本研究では，このグループを浸水域クラスターと呼ぶ．また，浸水域クラスターごとの海岸線グリッド（海域に面する浸水域グリッド）を算出した．これは，浸水域クラスターにおける海岸線グリッドを防護することで，その浸水域クラスター全体が防護されることを意味する．

本研究では，浸水域クラスターごとに，防護する海岸線グリッド数と減少する浸水影響（浸水面積，影響人口）の比を防護効率と定義した．つまり，海岸線グリッドが少なく，浸水影響（減少量）が大きいほど，防護効率のよい浸水域クラスターとした．

3. 解析結果

(1) 浸水域クラスター

浸水域クラスターごとの浸水被害と海岸グリッドの関係を，浸水面積について**図-1，2** に，影響人口について**図-3，4** に示す．本論文では例として SSP1-2.6，SSP5-8.5 について示す．2100 年時点で全国の潜在的浸水域は SSP1-2.6 では 334，SSP2-4.5 では 340，SSP5-8.5 では 367 の浸水域クラスターに区分された．浸水域クラスターのうち，最大の潜在的浸水面積をもつのは，福岡・佐賀にまたがる浸水域で 481 km^2（SSP1-2.6），481 km^2（SSP2-4.5），487 km^2（SSP5-8.5），次いで岐阜・愛知・三重にまたがる浸水域で，452 km^2（SSP1-2.6），461 km^2（SSP2-4.5），469km^2（SSP5-8.5）であった．また，最大の影響人口を有するのは，東京都で 1538 千人（SSP2-4.5），2034 千人（SSP1-2.6），2347 千人（SSP5-8.5），次いで岐阜・愛知・三重県で 594 千人（SSP2-4.5），691 千人（SSP1-2.6），837 千人（SSP5-8.5）であった．シナリオを通して浸水域クラスターの分布に大きな変化は見られないが，SSP5-8.5 の大阪府・兵庫県の浸水域クラスターでは海岸線グリッド数が大幅に増加している．SSP1-2.6 では，大阪湾の海岸線周辺に点在していた別々の浸水域クラスターが SSP5-8.5 で一体化し，一つの浸水域クラスターになったことが原因である．また，**図-1，2** では正の相関が見られるが，**図-3，4** には見られない．海岸線グリッド数が少なく，浸水影響が大きい浸水域クラスター，つまり，**図 1～4** で左上に位置する浸水域クラスターほど防護効率が良いため，影響人口の方が効率的な防護が可能であるということが示唆された．また，すべての SSP シナリオを通して，似通ったグラフになることから，効率よく防護できる浸水域は，シナリオ間で共通する地域が多いことが推察される．

(2) 効果的な防護順序の検討

図-5，6，7 に，浸水面積，影響人口それぞれの防護効率順に並び替えた累積浸水影響と累積海岸線グリッド数の関係を SSP シナリオごとに示す．防護効率順に並び替えた場合のグラフは，指数関数的な減少となり，全体に対してわずかな個数の海岸線グリッドを防護することで，大半の浸水被害を防護可能であることがわかる．さらに，被害の減少率は浸水面積よりも影響人口の方が大きく，例えば全国の浸水域の海岸線グリッドのうち約 1 割を防護することで，浸水面積は約 5 割，影響人口は 8 割以上減少させることができる．

また，潜在的浸水面積の防護効率に基づいて順位付けした浸水域クラスターの例として，SSP5-8.5 の上位 20 位

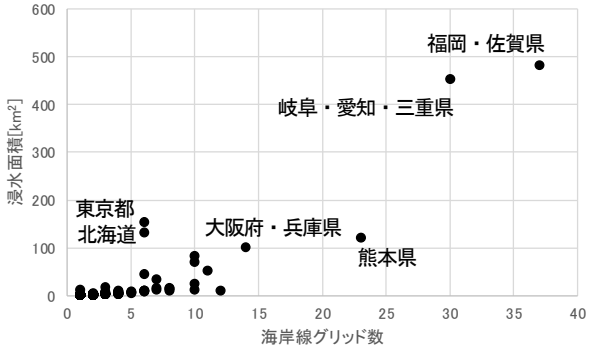


図-1　SSP1-2.6 浸水面積

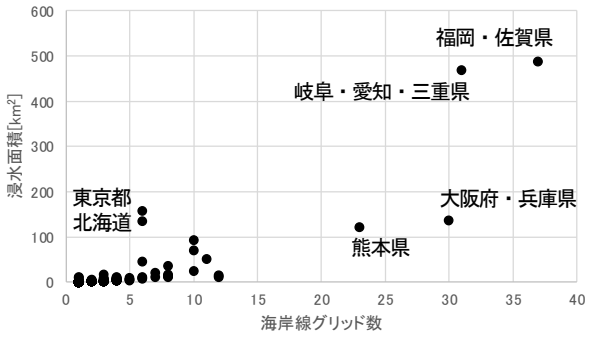


図-2　SSP5-8.5 浸水面積

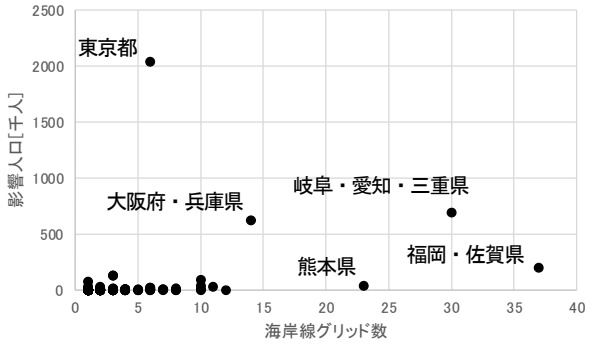


図-3　SSP1-2.6 影響人口

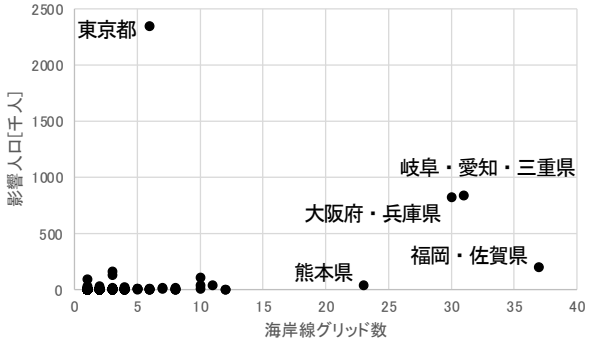


図-4　SSP5-8.5. 影響人口

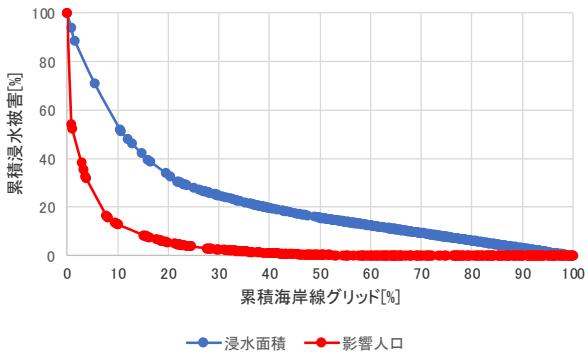


図-5　SSP1-2.6 効率的に並び替えた浸水影響

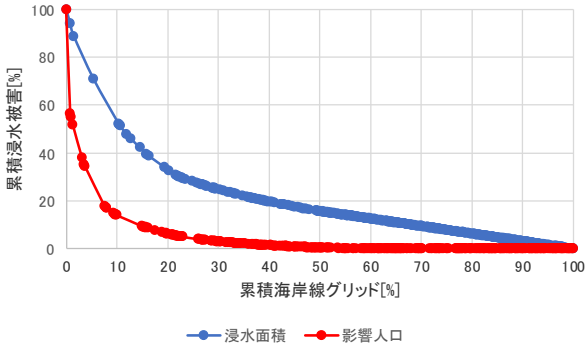


図-6　SSP2-4. 5 効率的に並び替えた浸水影響

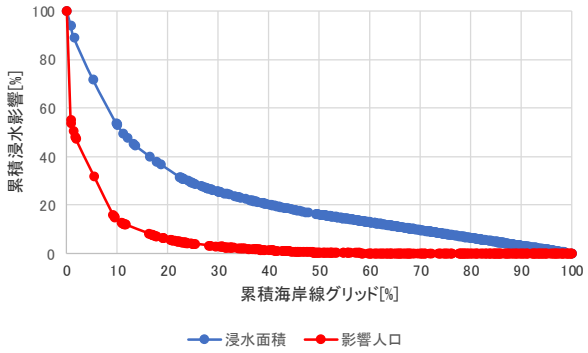


図-7　SSP5-8.5 効率的に並び替えた浸水影響

の浸水域を**表-1** に示す．表の右端欄に影響人口の防護効率順位を示し，浸水面積・影響人口の両観点から重要である浸水域クラスターについても考察した．浸水面積・影響人口の防護効率が共に 1 位となる東京都の浸水域クラスターは，23 区東部に位置しており，SSP1-2.6, SSP2-4.5 のシナリオにおいても両防護効率は 1 位となっている．この浸水域クラスターは SSP5-8.5 において，浸水面積の防護効率は海岸線グリッドあたり約 26.3 km^2, 影響人口の防護効率は海岸線グリッドあたり約 39 万人である．**表-1** のうち，浸水面積防護効率とともに，影響人口防護効率が上位の浸水クラスターは，岐阜・愛知

表-1　SSP5-8.5 2100年 浸水面積の防護効率上位の浸水域クラスター

順位	浸水域クラスターの所在	浸水面積 [km^2]	影響人口 [千人]	海岸線グリッド数	総被害に対する浸水面積割合[%]	総被害に対する影響人口割合[%]	人口効率順位
1	東京都	157.9	2347.633	6	5.8	44.8	1
2	北海道	135.2	0.049	6	5.0	5.0	209
3	岐阜・愛知・三重県	469.8	837.259	31	17.4	17.4	7
4	福岡・佐賀県	488.0	195.846	37	18.1	18.1	16
5	高知県	12.9	27.538	1	0.5	0.5	5
6	青森県	9.7	0.012	1	0.4	0.4	205
7	岡山県	93.3	108.295	10	3.5	3.5	10
8	長崎県	45.4	1.248	6	1.7	1.7	146
9	熊本県	71.5	37.988	10	2.6	2.6	23
10	広島県	18.1	127.700	3	0.7	0.7	4
11	熊本県	122.6	36.462	23	4.5	4.5	49
12	愛知県	52.9	38.013	11	2.0	2.0	26
13	北海道	36.6	0.036	8	1.4	1.4	218
14	大阪府・兵庫県	136.6	823.565	30	5.1	5.1	6
15	三重県	4.2	2.355	1	0.2	0.2	34
16	神奈川県	10.5	161.962	3	0.4	0.4	3
17	広島県	3.2	3.813	1	0.1	0.1	22
18	大阪府	3.2	2.217	1	0.1	0.1	38
19	千葉県	3.1	0.083	1	0.1	0.1	171
20	徳島県	21.3	9.772	7	0.8	0.8	52
－	合計	2702.7	5238.438	820	100	100	－

・三重県，福岡・佐賀県，高知県，岡山県，広島県，大阪府・兵庫県，神奈川県である．これらの浸水域クラスターは，浸水面積だけでなく影響人口を効率よく防護できるため，浸水被害を減らすために優先して防護するべきであると言える．

4. おわりに

本研究では，日本沿岸域を対象として海面上昇による浸水域を浸水域クラスターとして詳細に区分し，浸水面積・影響人口の防護効率の違いを明らかにした．主要な結論を以下に示す．

1) 海岸線グリッドを防護することで，浸水影響が指数関数的に減少することから，適切な浸水域クラスターを優先的に防護することで，全国の浸水被害を効率的に防護可能である．
2) 浸水被害の減少量は，浸水面積よりも影響人口が大きく，より少ない海岸線グリッドを防護することで，多くの影響人口を防護可能である．
3) 浸水面積と影響人口では，浸水域クラスターごとに防護効率が異なる．浸水面積・影響人口の被害を効率よく減らすためには，それぞれ異なる防護方法を検討しなければならない．
4) 東京都，岐阜・愛知・三重県，福岡・佐賀県，高知県，岡山県，広島県，大阪府・兵庫県，神奈川県，などの浸水域クラスターは，浸水面積・影響人口の両観点から防護効率が良いことが明らかになった．これら浸水域クラスターを優先的に防護することが，適切な適応策を講じる上で合理的である．

以上のように，効率的に浸水被害を防護するためには浸水域クラスター単位での浸水影響評価が重要であることが示された．今後の浸水影響評価はより地域的な特徴を考慮することが望ましいと言える．本研究が，地域の特性に合わせた適応策検討に向けての橋渡しとなることを願う．

謝辞：本研究は，環境研究総合推進費 S-18-3(1) (JPMEERF20S11811)の支援を受けて実施された.

REFERENCES

1) IPCC: *Climate Change 2021: The Physical Science Basis, Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*.
2) 三村信男, 井上馨子, 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) 予想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, 第 41 巻, pp.1161-1165.
3) 大場真裕子，横木裕宗，田村誠：日本沿岸域を対象とした海面上昇による浸水予測と最新の社会経済シナリオ(SSP)を用いた経済評価, 土木学会論文集 G（環境）, Vol.77, No.5, pp.I_243-I_249, 2021. [Oba, M., Yokoki, H., Tamura, M.: Impact of sea level rise on Japanese coastal areas and economic assessment via shared socioeconomic pathways, *Journal of Japan Society of Civil Engineers G (Environment)*, Vol.77, No.5, pp.I_221-231, 2021.]
4) 児玉康希，横木裕宗，田村誠：人口・土地利用シナリオに基づく日本沿岸域の海面上昇の社会経済影響評価，土木学会論文集 G（環境），Vol.78, No.5, pp.I_349-I_357, 2022. [Kodama, K., Yokoki, H., Tamura, M.: Assessing socioeconomic impacts of sea level rise on Japanese coasts via scenarios of population and land use, *Journal of Japan Society of Civil Engineers G (Environment)*, Vol.78, No.5, pp.I_349-I_357, 2022.]
5) CRED: *EM-DAT: The International Disaster Database*, http://www.emdat.be/, 2022（参照 2017/1/20）.
6) 国土交通省：治水経済調査マニュアル（案）令和 2 年 4 月版，国土交通省河川局，2020. [MLIT: *Manual for Economic Evaluation of Flood Control Investment (draft)*, River bureau, Ministry of Land, Infrastructure, Transport and Tourism, 2020.]
7) 国立環境研究所（NIES）：日本版 SSP 別土地利用シナリオ－環境研究総合推進費 2-1805 成果－, 2021. [NIES: *Tertiary Mesh SSP Landuse Scenarios: Product of Environment Research and Technology Development Fund 2-1805*, National Institute for Environmental Studies, 2021.]
8) 国土交通省：国土数値情報（標高・傾斜度 3 次メッシュデータ），https://nlftp.mlit.go.jp/ksj/gml/datalist/KsjTmplt-G04-a.html（参照 2023/5/31), 2011. [MLIT: *Digital National Land Information: Digital Ele-vation Model*, Ministry of Land, Infrastructure, Transport and Tourism.]
9) 国土交通省：国土数値情報（行政区域コード），https://nlftp.mlit.go.jp/ksj/gml/datalist/KsjTmplt-N03v3_1.html（参照 2023/5/31), 2022. [MLIT: *Digital National Land Information: Administrative Boundaries*, Ministry of Land, Infrastructure, Transport and Tourism.]
10) Egbert, G.D., Erofeeva, S.Y.: Efficient inverse modeling of barotropic ocean tides, *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, Vol.19, No.2, pp.183-204, 2002.
11) 国立天文台：理科年表 平成 29 年（机上版），丸善出版株式会社，地 2（583-585），2016. [National Institutes of Natural Sciences (NINS): *Chronological Scientific Tables 2016*, Maruzen Publishing, 2016.]
12) NIES：日本版 SSP 別人口シナリオ（第 2 版）－環境研究総合推進費 2-1805 成果－, https://adaptation-platform.nies.go.jp/socioeconomic/population.html（参照 2023/5/31), 2021. [NIES: *Tertiary Mesh SSP Population Scenarios (2nd Edition) : Product of Environment Research and Technology Development Fund 2-1805*, National Institute for Environmental Studies, 2021.]
13) O'Neill, B.C., Tebaldi, C., van Vuuren, D.P., Eyring, V., Friedlingstein, P., Hurtt, G., Knutti, R., Kriegler, E., Lamarque, J.F., Lowe, J., Meehl, G.A., Moss, R., Keywan Riahi, K., Sanderson, B.M.: The scenario model intercomparison project (scenarioMIP) for CMIP6, *Geoscientific Model Development*, Vol.9, No.9, pp.3461-3482, 2016.
14) 文部科学省・気象庁：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－, 2020. [MEXT and JMA: *2020 Climate Change in Japan: Report of Atmospheric/oceanic Observation and Projection*, Ministry of Education, Culture, Sports, Science and Technology (MEXT) and the Japan Meteorological Agency (JMA), 2020.]
15) UNEP: Emissions Gap Report 2021, https://www.unep.org/resources/emissions-gap-report-2021（参照 2023/5/31）