

四国を対象とした温暖化による 高潮浸水領域の変化の見積

鈴木武¹

¹正会員 国土技術政策総合研究所 沿岸海洋研究部 (〒239-0826 神奈川県横須賀市長瀬 3-1-1)
E-mail:suzuki-t92y3@ysk.nilim.go.jp

温暖化によってもたらされる海面上昇と台風の大規模化は、わが国沿岸に高潮による浸水リスクの増大をもたらす。そのため、海面が上昇し、台風が強まることによって高潮が大きくなった場合、それらの程度によって浸水面積や浸水人口がどれだけ変化するかを四国を対象に見積もった。見積もりは、地形と堤防・護岸を持つモデル空間を作成し、そこに高潮の変化を与え、越流と浸水の計算を行うことによって行った。多数の条件での見積りの結果を整理することにより、ある海面上昇量で、高潮がある割合で大きくなったとき、浸水面積や浸水人口がどれだけになるかを示すグラフを作成した。その結果、浸水面積、浸水人口はともに海面上昇量や高潮増大率の増加に対して直線的に増加することが分かった。また、四国では瀬戸内海沿岸と豊後水道沿岸が高潮に対して脆弱であることが分かった。

Key Words: climate change, storm surge, inundation model, hazard graph

1. はじめに

IPCC¹⁾では、地球の温暖化によって 100 年後に海面が 18~59cm 上昇するとともに、台風が大規模化する可能性が高いことを予測している。温暖化によってもたらされる海面上昇と台風の大規模化は、わが国沿岸に高潮による浸水被害のリスクの増大をもたらす。日本は、海に面する市町村に人口の 46%、工業出荷額の 47%、商業販売額の 77%が集中するなど、沿岸地域は日本の社会・経済において重要な地域となっているため²⁾、温室効果ガスの安定化濃度の目標を設定するにあたっては、温暖化による沿岸地域の高潮リスクの増大による影響を分析しておくことが重要であり、有意義である³⁾。そうした分析を行うことができるようにするため、温暖化による海面の上昇や台風の大規模化の程度によって、高潮による浸水面積、浸水被害を受ける人口（浸水人口）がどの程度になるかを表す関数を求めることが必要である。

高潮による浸水被害を見積もる場合、温暖化の状況に応じてある程度対策が「とられる」ないしは「とる」ことを考慮する必要がある。温暖化による高潮の脅威の増大への備えを、はじめから終局の状況にあわせて行おうとすると、当面の被害を軽減・防止するために短期間に巨大な投資を行わなければならない、社会として許容することが難しい状況になる。温暖化は何十年、何百年にわたって徐々に進行し、高潮による脅威も同じ時間スケールで増大するため、温暖化の進行に合わせて対策を徐々に進めていくことが、社会の資金的負担を軽減し、実効

可能性を高める。そうした対策のシナリオを想定していく基礎とするためにも、温暖化の程度の違いによって、高潮による浸水被害がどのように変化するかを見積もることが必要である。

温暖化による高潮リスクの変化は全国に及ぶため、リスクの変化を全国にわたって集計し、日本全体のリスクの変化を把握することが重要である。そうした全国にわたる集計の第一歩として、四国を対象に、温暖化により海面が上昇し台風が大規模化した場合に、それらの程度の違いによって浸水面積や浸水人口がどれだけ変化するかを見積もりを行った。見積もりは、地形と堤防・護岸を持つモデル空間を計算機上に作成し、そこに高潮の変化を外生的に与え、堤防・護岸からの越流と陸域での浸水を計算することによって行った。そして、それらの結果を整理し、ある海面上昇量が実現し、台風が強まることにより高潮が一定割合大きくなったときに、浸水面積と浸水人口がどれだけになるかを示すグラフを作成した。

2. 計算の体系

温暖化による潜在的な海象被害の大きさを把握するため、高潮または津波の最大潮位以下の土地の面積や居住人口などがリスクの指標として見積もられているが⁴⁾、それだけでは不十分である。わが国の低平地の大部分は堤防や護岸などで防御されているため、既に求められている潜在的なリスクと現実にかかる被害との乖離は大きいし、どれだけ海面上昇や台風の大規模化が起こったと

きに温暖化のリスクが急速に増大するかも知ることができないからである。

そのため、高潮による堤防・護岸からの越流と流入水による陸域での湛水の機構を組み込んだ浸水モデルを作成し、海面上昇量と台風の大化で高潮が大きくなる割合（高潮増大率）を様々に与えて高潮被害の基本的な指標である浸水面積と浸水人口を計算した。それらを整理することによって、海面上昇量と高潮増大率が与えられれば、それらの値から高潮によって引き起こされるであろう浸水面積と浸水人口を得ることができるグラフを作成した。

温暖化による高潮リスクの変化は全国に及ぶ。そのため、高潮リスクの変化を全国にわたって集計するなどによって日本全体の高潮リスクの変化を把握する必要がある。そうした広域の計算を行うためには、膨大となるデータの収集・加工作業や計算機の計算量を軽減する必要がある。浸水計算は簡素な体系とする必要がある。このため、本研究では計算が簡単なレベル湛水モデルで浸水域を求めることを基本に浸水モデルを構築した。

計算を行うために、まず、地表面の形状、人口の分布ならびに高潮から陸域を防護する堤防や護岸等の施設（以下、単に「防護施設」という。）の存在を再現したモデル空間を計算機上に構築した。次に、高潮を再現する経時的な潮位の変動を設定し、それに対して防護施設から越流する海水の量を経時的に計算した。そして、流入した海水はレベル湛水するものとして各メッシュで浸水深を計算した。これを高潮偏差を様々に変化させて行い、各条件において浸水深が最大となるとき浸水面積と浸水人口を求めた。それらより、高潮偏差の生起確率を重みとして浸水面積と浸水人口の期待値を求めた。この計算を海面上昇量と高潮増大率を様々に変えて行い、ある海面上昇量が生じ、高潮偏差がある率で増大した場合に、高潮による浸水面積と浸水人口がどれだけになるかを示すグラフを作成した。

3. 対象地域

高潮による浸水域をレベル湛水モデルで求めるため、一体的に浸水すると考えられる地形を持つ地域を一つの計算単位（セル）とした。

計算の対象となるセルは、小さなものまでを含めると数が非常に多く、計算のために膨大な作業を要する。このため、計算を完遂することができるよう、計算のための作業量を小さくすることが必要である。しかし、その結果、計算の結果と現実との乖離が大きくなってしまえば推定結果の有用性が低下するため、計算の精度ができるだけ低下しないようにする必要がある。そこで、本来検討が必要と考えられる地域に対して、計算の対象とす

る地域の総面積と総人口の割合ができるだけ低下しないようにしながら、計算を行うセルの数ができるだけ少なくなることを、および、判別作業のしやすさを確保することを念頭におき、計算の対象とするセルを選定する条件を設定した。設定した条件は次のとおりである。

①日本は島国であり、離島が非常に多い。離島数の大部分を占める陸域面積の小さい離島は、低平地面積が少なく、居住人口も少ないため、島の面積が 100km^2 未満の離島を計算対象から除外する。この条件を当てはめると、四国の場合は、小豆島のみが計算の対象となり、それ以外の離島は対象外となる。

②大きな海面上昇と高潮が発生しても浸水域が計算区域内に収まるように、標高 15m 以下の地域を対象とする。計算区域は陸域のみとし、海、河川、湖沼は計算区域から除外する。

③標高 15m 以下の地域のなかで、被害の規模が相対的に大きくなるセルを対象とする。そのため、ある程度の人口集積が、ある程度の面積があるセルを対象とする。具体的には、人口密度が $2000\text{人}/\text{km}^2$ 以上のメッシュが存在する面積が 1km^2 以上のセル、もしくは、面積が 5km^2 以上のセルを計算の対象とする。

これらの条件に従って四国に計算セルを設定した結果は、図-1 のとおりである。図中の曲線に囲まれた着色部分が一つ一つの計算セルである。また、各セルに添書されている番号は計算セルを識別するための番号である。

計算セルの数は 55 、総面積は $1,066\text{km}^2$ 、総人口は $1,924$ 千人である。四国における標高 15m 以下の地域の総面積は $1,277\text{km}^2$ 、標高 15m 以下の地域における総人口は $2,005$ 千人であるから、面積でみたカバー率は 83.5% 、人口でみたカバー率は 96.0% である。

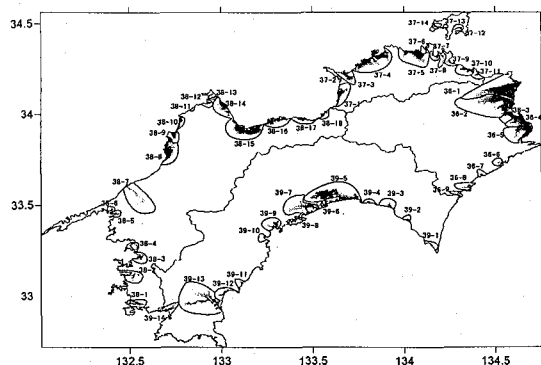


図-1 四国において設定した計算セル

4. 浸水モデル

(1) 地形

高潮による浸水が起こった場合にどれだけの浸水深になるかを計算するためには、浸水計算の対象とする地域の地形情報が必要である。地形情報は、計算機での処理が容易な標高値をメッシュ単位で持つデータ（メッシュデータ）を使用した。使用したデータは数値地図 50m メッシュ（標高）で、市販されている全国を網羅する標高データの中では最も空間解像度が高い。このデータは国土地理院の 25000 分 1 地形図の等高線をベクトル化し、それから求めた数値標高モデルから得られたデータで、国土地理院が刊行しているものである。

(2) 人口

人口は総務省統計局が作成した 2000 年国勢調査地域メッシュ統計を使用する。この統計はメッシュサイズが約 500m の 1/2 地域メッシュまでしかデータが作成されていない。このため、各メッシュ値を 1/100 に分割し、それらを細分化された各 50m メッシュに当てはめ、それを使用した。

(3) 防護施設

防護施設は全国の海岸防護施設の天端高と延長を区間ごとに調べ、それを使用した。

(4) 高潮

高潮は、台風の大きさ、形状、進路、速度などによってその波形を様々に変化させる。高潮の継続時間は、台風の大きさ、進行速度、進路などの関係から、長時間に及ぶものもあれば、短時間のものもある。潮位偏差の立ち上がりと減衰は、立ち上がりが鋭く減衰が緩やかなものもあれば、その逆のものもある。また、潮位偏差の時系列は、鋭いピーク形状を持つものもあれば、なだらかなピーク形状を持つものもある。そうした中での一つの割り切りとして、本研究では、河合ら⁹⁾の定式化に倣い、高潮波形を継続時間 5 時間、ピーク時刻を高潮開始から 2.5 時間後、高潮の時系列形状を三角形とした。

高潮の生起確率は、極値統計の理論から導かれた幾つかの分布形に従うものとし^{9,7)}、潮位偏差の年間最大値を使い、合田の方法⁹⁾により確率分布関数を推定した。推定に使用した確率分布関数は極値 I 型分布、極値 II 型分布、Weibull 分布で、最小二乗法により各母数を推定した。（極値 I 型分布）

$$F(x) = \exp \left[-\exp \left(-\frac{x-B}{A} \right) \right] : -\infty < x < \infty \quad (1)$$

（極値 II 型分布）

$$F(x) = \exp \left[-\left(1 + \frac{x-B}{kA} \right)^{-k} \right] : B - kA \leq x < \infty \quad (2)$$

（Weibull 分布）

$$F(x) = 1 - \exp \left[-\left(\frac{x-B}{A} \right)^k \right] : B \leq x < \infty \quad (3)$$

ここで、 x は高潮偏差、 A 、 B および k は分布関数の母数である。

(5) 湛水

数値地図 50m メッシュ（標高）は標高データの分解能が 1m であるため、温暖化による浸水範囲の変化を調べるには精度が十分ではない。このため、各メッシュ内では、標高値がメッシュに与えられている値の $\pm 1m$ の間で均等に分布していると仮定して計算を行った。そのモデル化の下では、標高値 h_g の確率密度 $f(h_g)$ は次式のとおりに表現される。

$$f(h_g) = \begin{cases} 0, & h_{mg} + 1 < h_g \\ 1/2, & h_{mg} - 1 \leq h_g \leq h_{mg} + 1 \\ 0, & h_g < h_{mg} - 1 \end{cases} \quad (4)$$

ここで、 h_{mg} はメッシュに与えられている標高値である。

このとき、当該メッシュで浸水位（基準面からの高さ） h_w の浸水が起こった場合、メッシュ内の浸水面積 S_w は、次式の通りとなる。

$$S_w(h_w) = \begin{cases} S_m, & h_{mg} + 1 < h_w \\ (h_w - h_{mg} + 1) \cdot S_m / 2, & h_{mg} - 1 \leq h_w \leq h_{mg} + 1 \\ 0, & h_w < h_{mg} - 1 \end{cases} \quad (5)$$

このとき、メッシュ上に存在する水の体積 V_w は、次式の通りとなる。

$$V_w(h_w) = \begin{cases} (h_w - h_{mg}) \cdot S_m, & h_{mg} + 1 < h_w \\ (h_w - h_{mg} + 1)^2 \cdot S_m / 4, & h_{mg} - 1 \leq h_w \leq h_{mg} + 1 \\ 0, & h_w < h_{mg} - 1 \end{cases} \quad (6)$$

また、浸水人口 P_w は次式の通りとなる。

$$P_w(h_w) = P_m \cdot S_w \quad (7)$$

ここで、 P_m はメッシュ内の人口である。

レベル湛水モデルで各メッシュの浸水深を求めるために、あらかじめ湛水位を 10cm 単位で変化させ、前述の

関係式を用いて各計算セル内の湛水容積を求め、湛水容積と湛水位の関係求めておき、計算に使用した。

(6) 越流

海面水位が防護施設の天端を超えた場合、越流が生じる。その際の単位幅あたりの越流量 Q を本間の公式^{9,10)}を用いて計算した。計算式は次のとおりである。

(完全越流)

$$Q = 0.35H_1\sqrt{2gH_1}, \quad H_2 \leq \frac{2}{3}H_1 \quad (8)$$

(潜り堰越流)

$$Q = 0.91H_2\sqrt{2g(H_1 - H_2)}, \quad H_2 > \frac{2}{3}H_1 \quad (9)$$

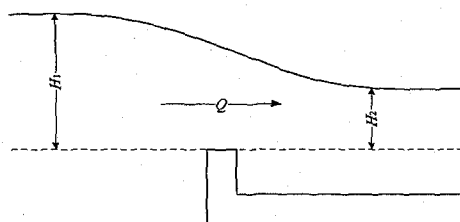


図-2 越流断面の模式

5. 影響の整理

作成した浸水モデルを使い、高潮による浸水面積と浸水人口の期待値を求めた。その計算手順は次のとおりである。

- ① ある偏差を持つ高潮が発生したと仮定し、計算セルごとに浸水モデルを使って高潮による浸水の予測を行う。
- ② それらの結果から得られる計算セルごとの最大浸水位から、メッシュごとの浸水面積と浸水人口を求め、それらを合算することによって計算セルごとの浸水面積と浸水人口を求める。
- ③ 高潮偏差を 10cm から 10cm 単位で増加させ、区間内の生起確率が 1/10000 を超える範囲で浸水面積と浸水人口を計算する。
- ④ それらの計算結果を高潮偏差の生起確率を重みとして平均し、計算セルごとの浸水面積と浸水人口の期待値を求める。
- ⑤ それらを、四国内の全ての計算セルについて合算することにより、四国における浸水面積と浸水人口の期待値を求める。
- ⑥ そうした計算を海面上昇量と高潮増大率を様々に変

化させて行う。

計算を行う海面上昇量の値は、IPCC 第 4 次評価報告書第 1 作業部会報告書政策決定者向け要約¹⁾で予測されている範囲を余裕を持って包含し、高潮浸水の変化を検知できる分解能を持つものであると想定し、0cm から 10cm 単位で 100cm までと設定した。台風の大型化については、温暖化により高潮偏差が一定率で増大することになると仮定し、高潮増大率が温暖化による高潮影響の大小を規定するもう一つの指標であるとして採用した。その値は 1 を基準に ± 0.3 ずつ変化させ、0.4 から 1.6 までの値を計算の対象として設定した。

それらの各条件の下で浸水面積と浸水人口を求め、それらを整理し、ある量の海面上昇が起こり、そのときに高潮増大率がある値になったとしたときに、浸水面積と浸水人口の期待値がどれだけになるかを示すグラフを作成した。

6. 結果と考察

作成した浸水モデルを使って算出した、海面上昇量と高潮増大率を説明変数として整理した四国における浸水面積の期待値のグラフは図-3~4、浸水人口の期待値のグラフは図-5~6 のとおりである。

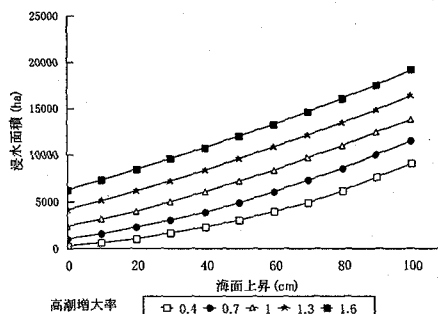


図-3 海面上昇に対する浸水面積

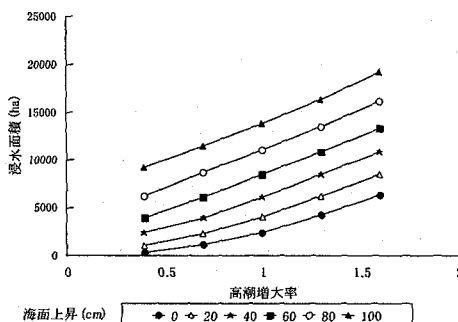


図-4 高潮増大率に対する浸水面積

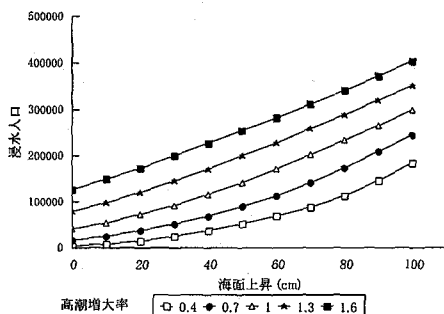


図-5 海面上昇に対する浸水人口

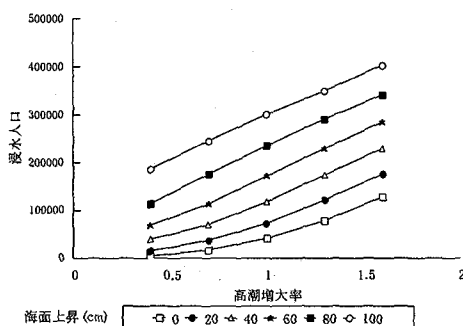


図-6 高潮増大率に対する浸水人口

グラフによれば、海面上昇量が増加する場合、高潮の発生状況が現状と変化しない場合、つまり高潮増大率が1の場合についてみると、海面上昇量が20cmのあたりから浸水面積の増加率が、海面上昇量が30cmのあたりから浸水人口の増加率が若干大きくなる傾向が見られるが、どちらも全体としてはほぼ直線であるとみることができる。高潮増大率が大きくなれば、その直線性はさらに強くなる。

また、台風の強度が大きくなり高潮が現在より大きくなる場合、つまり高潮増大率が増加する場合、海面上昇がない場合でみると、浸水面積と浸水人口はともに直線的に増加する傾向がある。海面上昇量が大きくなると、その直線性はさらに強まる。

IPCC第4次報告書⁷⁾で予想されている100年後の海面上昇の予測幅の上限に相当する海面上昇量60cmの場合で、計算した中で高潮が最大となる条件である高潮増大率1.6の場合について求めた、四国における高潮による浸水深の期待値の分布は図-7のとおりである。図中の色の薄い部分は標高15m以下の地域を、濃色の部分の色の濃淡は浸水深を表している。

この結果によれば、浸水する領域は太平洋側と紀伊水道側に少なく、瀬戸内海側と豊後水道側に多いことが分

かる。太平洋側と紀伊水道側は高波浪や南海地震津波対策のために高い防護施設が設けられているため、温暖化によって高潮が大きくなって大きな浸水が生じないと計算されたためだと考えられる。これに対して、瀬戸内海側や豊後水道側では、港湾地帯や漁港地帯、それらの中でもとりわけ海側と陸側の間で車両等の往来が求められる埠頭地帯で、防護施設の耐高潮性能が他の区間に対して低い区間が多く見られる。瀬戸内海側や豊後水道側の主要な人口集積地区の前面は港湾や漁港になっている場合が多く、それらでの防護施設の耐高潮性能の低さが、高潮浸水のリスクを高める大きな要因になっていると考えられる。

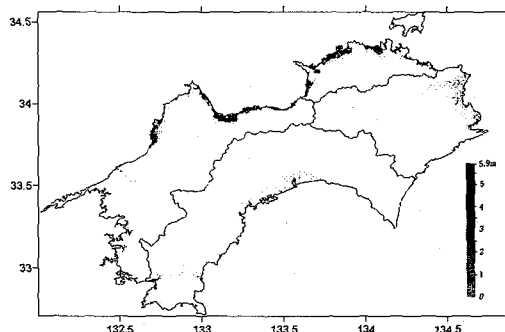


図-7 高潮による浸水深の地域分布

7. おわりに

四国を対象に、温暖化で海面が上昇し、台風が強くなり高潮が大きくなった場合に、それらの程度によって浸水面積や浸水人口の期待値がどれだけになるかを見積り、それらを整理したグラフを作成した。

こうした研究の成果が積み上がり、温暖化による高潮浸水リスクが全国にわたって見積もられ、その結果がGHG安定化濃度の議論に役立つことになることを期待する。

また、浸水モデルを使った浸水計算の結果から、四国では瀬戸内海沿岸と豊後水道沿岸が高潮に対して脆弱であることがわかった。

計算の結果見出された高潮に脆弱な地域では、高潮対策の計画的な実施が求められる。高潮対策は、その遂行に多くの時間と費用を必要とするため、高潮対策の内容は、時間軸も考慮に入れてできるだけ多くの選択肢を作り出し、それらを様々な角度から分析し、最適な組み合わせを見出していくことが必要である。関係者の尽力を期待したい。

謝辞：本文は、環境省地球環境推進研究（S-4）（H18-H21）の一環として行われた研究の一部をまとめたものである。本研究の遂行に際し協力をいただいた方々に深く感謝する。

参考文献

- 1) Richard B. Alley *et al.*: "Summary for Policymakers: Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change", 18p, IPCC, 2007.
- 2) 原沢英夫・西岡秀三 編著：地球温暖化と日本 第三次報告 ー自然・人への影響予測ー，古今書院，2003.
- 3) Parry, M., *et al.*: Millions at Risk, Global Environment Change, Vol.11, No.3, 2001.
- 4) 松井貞二郎・立石英機・磯部雅彦・渡辺晃・三村信男・柴崎亮介：海面上昇に伴う日本の沿岸域の浸水影響予測，

- 海岸工学論文集, Vol.39, pp.1031-1035, 土木学会, 1992.
- 5) 河合弘泰・竹村慎治・原信彦：東京湾における台風による高潮と高波の同時性と継続時間特性，海岸工学論文集, Vol.49, pp.251-255, 土木学会, 2002.
 - 6) Gumbel, E.J.: Statistics of Extremes, 375p, Columbia Univ. Press, New York, 1958.
 - 7) 合田良実：防波護岸の越派流量に関する研究，港湾技術研究所報告, Vol.9, No.4, pp.3-41, 1970.
 - 8) 合田良實：港湾構造物の耐波設計ー波浪工学への序説ー，333p, 鹿島出版会, 1990.
 - 9) 本間仁：低溢流堰堤の流量係数，土木学会誌, Vol.26, No.6, pp.635-645, 1940.
 - 10) 本間仁：低溢流堰堤の流量係数，土木学会誌, Vol.26, No.9, pp.849-862, 1940.

ESTIMATE OF STORM SURGE INUNDATION AREA IN SHIKOKU ISLAND DUE TO GLOBAL WARMING

Takeshi SUZUKI

Japan has large low-lying land area on the coasts, in which large population and assets are accumulated. In the areas, inundation risks by storm surges are increased by sea level rise and typhoon strengthening due to the global warming. For estimating such risks, the author built up numerical models that describe probability of storm surge hitting, overtopping seawall and inundation in low-lying land. The model also covers Shikoku region. Then, using the models, the author estimated inundation areas and population corresponding to changes of sea level rise and of storm tide. According to the calculation, as sea level rise and storm tide increase, the inundation area and inundated population rather linearly increase. And also the result shows that the low-lying lands at Seto Inland Sea side and Bungo Suido side have high storm surge inundation risks.