地球温暖化影響を考慮した高潮浸水被害 リスクマップと沿岸浸水被害関数の作成

鈴木 武¹

¹正会員 国土技術政策総合研究所 沿岸海洋・防災研究部 (〒239-0826 神奈川県横須賀市長瀬3-1-1)

E-mail:Suzuki-t92y3@ysk.nilim.go.jp

地球が温暖化すれば、海面上昇と台風強化によって高潮による浸水リスクが増大する。そのため、全国の高潮浸水による被害リスクを、将来の海面上昇と高潮偏差の増大を外生的に与えて推計し、その地域分布を表すリスクマップを作成した。そのマップでは、三大湾、瀬戸内海、有明・八代海地域でリスクが大きい一方、北陸、東北、北海道地方では有意なリスクがみられる場所が限定的である。高潮や津波による浸水の被害ポテンシャルを把握するため、作成した浸水被害モデルを使い、陸域が浸水した場合の被害額を様々な浸水水位で計算し、浸水水位と浸水被害額の関係を表す関数を作成した。関数によれば、東京湾、大阪湾および瀬戸内海がT.P.5mまで、茨城・九十九里と南海・東南海がT.P.10mまで被害額の増加割合が大きい。

Key Words : *climate change, storm surge, inundation model, amount of loss*

1. はじめに

IPCC¹⁾は、地球が温暖化すれば100年後に海面が18～59cm上昇し、強い台風の発生が増加する可能性が高いと予測した。海面上昇と強い台風の増加は日本沿岸の高潮による浸水被害のリスクの増大をもたらす。また日本は、面積で全国の3%しかないT.P.5m以下の地域に人口の17%、製造品出荷額等の25%、商品販売額の42%が集まる²⁾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。そうした沿岸地域における高潮浸水による被害リスクを、地球温暖化による影響を考慮に入れつつ全国にわたって把握し、高潮浸水被害リスクの地域的な分布の傾向を把握することが重要である。そのため、温暖化によって高潮偏差が一定の割合で増大すると考えたときの増大率（高潮増大率）と温暖化による海面上昇量とを外生的に与え、その状況の下での高潮浸水による被害リスクを全国各地で推計し、それらの結果を集約し、高潮浸水被害リスクの分布を表す日本全土を対象としたリスクマップを作成する。

ところで、高潮や津波に対する効果的な対策を検討しようとする際に、高潮や津波が生起した場合にそれらによる被害のポテンシャルがどれだけになるかを把握しておくことが有益である。そのため、高潮浸水被害リスクマップを作成する際に使用した被害額推計プログラムを

使い、陸域がある一定の浸水水位になった場合、浸水による被害額がどれだけになるかを推計し、浸水水位とそれに対する浸水被害額を表す沿岸域浸水被害関数を作成する。

2. 計算の体系

地球温暖化による高潮浸水リスクの変化は全国に及ぶため、高潮浸水リスクの変化を日本全国にわたって把握することが必要である。高潮浸水リスクを全国にわたって計算するためには、データの収集・加工作業や計算機の計算負荷を軽減することが重要である。そのため、本研究では計算が簡単なレベル湛水モデルで浸水領域を求める。レベル湛水モデルは浸水の傾向を大まかに表現することはできるが、流入水の動的な挙動や複雑な地形による影響などを表現することができない。

計算を行うために、まず、地表面の形状および高潮から陸域を防護する護岸や堤防等の施設（以下「防護施設」という。）を与えた数値地形を構築する。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する。流入した海水はレベル湛水するものとして各格子で浸水深を計算する。海面上昇量と高潮増大率（≡将来の高潮

偏差／現在の高潮偏差)を外生的に与えてそれらの計算を行い、浸水深が最大となるときに浸水面積、浸水人口(浸水地点に常住する人の数)および浸水被害額を求める。そして、それらの結果を日本地図上に記載することにより高潮浸水被害のリスクマップを作成する。

また、高潮や津波による浸水被害のポテンシャルを把握するため、高潮により一定の高潮位が出現し、それよりも低い地域が全てレベル湛水とした場合に浸水被害額がいくらになるかを、高潮浸水被害リスクマップを作成する際に使用した浸水深から浸水被害を計算するプログラムを使って計算し、浸水水位に対する浸水被害額の関係を表す沿岸域浸水被害関数をグラフとして作成する。この被害額の計算は一定の高さ以下の部分が海水に浸ることによる被害を計算するものであるため、速い流れによる構造物の破壊を引き起こす津波にそのまま当てはめることができない。しかし、海水の浸潤のみによってではあるものの、被害ポテンシャルがどの地域にどれだけ存在するかを知ることができるため、津波対策を検討する際にも初期情報として有益である。

3. 対象地域

高潮による浸水領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領域(以下、「セル」という。)と考える。

計算の対象とするセルは、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をできるだけ少なくすること、そして判

図-1 計算対象セルを設定した地域

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以下の通り設定する。

①陸域面積の小さい離島は、低地面積が少なく、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。

②大きな海面上昇と高潮が発生しても浸水領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、人口密度が 2000 人/ km^2 以上となる格子の面積が 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計算対象セルを設定した地域は、図-1 のとおりである。図中の着色部分がセルを設定した地域である。

セルの数は 842 、総面積は $26,693\text{km}^2$ 、総人口は $47,070$ 千人である。TP.15m 以下の地域の全面積は $29,216\text{km}^2$ 、TP.15m 以下の地域における全人口は $48,033$ 千人であるから、面積でみたカバー率は 91.4% 、人口でみたカバー率は 98.0% である(表-1)。

4. 浸水モデル

(1) 地形・防護施設

地形情報は数値地図 50m メッシュ(標高)を使用し、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、それを使用する。東北・関東地方の太平洋沿岸は、東北地方太平洋沖地震津波からの復旧がどうなるか必ずしも明確ではないため、護岸の天端高を東北地方太平洋沖地震以前まで修復されるものとする。

表-1 計算対象セルの数とカバー率

地方	セル数	セル面積	セル人口	全面積	全人口	面積カバー率	人口カバー率
北海道	99	5,031	1,940	5,408	1,994	0.930	0.973
東北	109	5,392	3,965	5,650	4,036	0.954	0.982
北陸	38	1,238	1,558	1,344	1,586	0.921	0.982
関東	79	4,657	13,586	4,804	13,694	0.969	0.992
東海	101	2,907	6,802	3,019	6,868	0.963	0.990
近畿	77	1,404	8,333	1,507	8,429	0.932	0.989
中国	97	1,715	3,391	1,989	3,551	0.862	0.955
四国	55	1,066	1,924	1,277	2,005	0.835	0.960
九州	148	3,122	5,203	3,855	5,444	0.810	0.956
沖縄	39	161	368	363	426	0.444	0.864
計	842	26,693	47,070	29,216	48,033	0.914	0.980

1) ここでは東北地方に新潟県を含めて整理している。2) 単位は面積が km^2 、人口が千人である。3) 全面積および全人口は各地方におけるTP.15m以下の地域の面積および人口である。

(2) 潮位

高潮波形は、河合ら³⁾の定式を参考に継続時間 5 時間、ピーク時刻を高潮開始から 2.5 時間後、時系列形状を三角形とする。

高潮の生起確率は幾つかの分布形に従うものとし^{4,5)}、潮位偏差の年間最大値を使い、合田の方法⁶⁾により確率分布関数を潮位観測点をもとに設定した 56 ブロックごとに推定した。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。推定の結果、合田の当てはめ方法を行った際の相関係数は平均が 0.987、標準偏差が 0.008 であった。

潮汐については、海面が潮汐により HWL と LWL の間を正弦振動しているとみなして計算を行う。

(3) 越流

海面水位が防護施設の天端を超えると越流が生じる。その際の単位幅あたりの越流量 Q を本間の公式^{7,8)}を用いて計算する。計算式は次のとおりである。
(完全越流)

$$Q = 0.35H_1\sqrt{2gH_1}, \quad H_2 \leq \frac{2}{3}H_1 \quad (1)$$

(潜り堰越流)

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

ここで、 H_1 は流入側の堤防天端上の水深、 H_2 は流出側の堤防天端上の水深である。

(4) 湛水

レベル湛水モデルで浸水領域と浸水深を求める。レベル湛水モデルは流入した水が陸域に湛水し流動が停止した状態を想定し、それをもって浸水状況とするものである。

5. 浸水被害の推計方法

(1) 被害指標

浸水面積は浸水が発生した格子を合算することによって、浸水人口は浸水が発生した格子に常住する人口を合算することによって求める。人口は 2000 年国勢調査地域メッシュ統計を使用する。

浸水被害額は図-2 の方法によって求める。

平成 12 年国勢調査地域メッシュ統計の一般世帯数、農漁家世帯数、平成 13 年度事業所・企業統計調査の産

図-2 浸水被害額推計の手順

業大分類別の事業所従業員数を整理する。そして、平成 9 年国土数値情報（1/10 細分区画土地利用）の「田」と「その他農地」のデータから格子ごとのそれらの面積を求める。それらに都道府県別 1 戸あたり評価額、1 世帯あたり家庭用品評価額、農漁家 1 戸あたり償却資産評価額および在庫資産評価額、産業大分類別事業所従業員 1 人あたり償却資産評価額および在庫資産評価額、都道府県別農地面積あたり農産物産出額を乗じて、家屋資産額、家庭用品資産額、農漁家資産額、事業所資産額、農地生産額を求める。

浸水計算によって得られる最大浸水深をもとに浸水高別資産項目別被害率⁹⁾より資産分類ごとの被害率を求め、資産額に乗じて一般資産被害額を求める。

一般資産被害額に公共土木施設比率、公益事業等比率⁹⁾を乗じ、公共土木施設被害額、公益事業等被害額を求める。そして、それらに一般資産被害額を加え、高潮浸水による被害額とする⁹⁾。

(2) 浸水被害リスク

作成した浸水モデルを使い、高潮による浸水面積、浸水人口および浸水被害額のリスクを求める。その計算手順は次のとおりである。

- ① ある海面上昇が起こり、ある偏差を持つ高潮が発生した状態を想定し、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セルごとの最大浸水位から、メッシュごとの浸水面積、浸水人口および浸水被害額を求め、それらを合算することによってセルごとの浸水面積、浸水人口および浸水被害額を求める。
- ③ 高潮偏差を 10cm から 10cm 単位で増加させ、生起確率が年 1/10000 を始めて超えるところまで浸水面積、

浸水人口および浸水被害額を計算する。

④ それらの計算結果を高潮偏差と潮汐偏差の生起確率を重みとして平均し、セルごとの浸水面積、浸水人口および被害額の年あたりの期待値を求める。

計算を行うにあたり、海面上昇量は、IPCC 第 4 次評価報告書⁹⁾で予測された 100 年後の海面上昇量の最大値に相当する 60cm とする。また高潮増大率は、これまで高潮防護施設の整備の目安として多く使われてきた伊勢湾台風級の台風が室戸台風級になる場合を想定し、1.3 倍とする。

(3) 沿岸浸水被害関数

高潮によりある高潮位が出現し、それよりも低い地域が全て高潮の潮位まで一様に湛水すると仮定した場合に浸水被害額がいくらになるかを、5.1)被害指標の計算方法に従い計算した。計算した結果を東京湾、伊勢湾、大阪湾、瀬戸内海、茨城・九十九里、東海、南海・東南海地域(図-3)ごとに集計し、それらをもとに浸水水位に対する浸水被害額を表す沿岸域浸水被害関数を地域ごとに作成する。

6. 結果と考察

海面上昇が 60cm、高潮増大率が 1.3 の場合における高潮による浸水面積、浸水人口および浸水被害額のリスクの地域分布は図-4~6 のとおりである。図中の着色した部分の濃淡はセルを単位とした浸水面積、浸水人口および浸水被害額の大小で、浸水面積は 1ha 以上の、浸水人口は 1000 人以上の、浸水被害額は 10 億円以上のセルを表示したものである。

これによれば、大きくみて東京湾、伊勢湾、大阪湾、瀬戸内海および有明・八代海の沿岸地域が高潮浸水による被害リスクが高いことが分かる。また、それら以外の地方は有意なリスクがみられる地域が限定的である。北

陸、東北および北海道地方では沿岸に面する低平地の幾つかで有意なリスクがみられる。

高潮浸水被害リスクがあまりないと見込まれる地域では、高波、津波、高潮対策のために高い防護施設が設けられているか沿岸部に高い地形を持っている。そのうち、高い防護施設が設けられている地域は、防護施設が健全に機能するならば、地球温暖化によって海面が上昇し、高潮が大きくなっても被害リスクの上昇は相対的に小さい。それらが現実のものとなるためには防護施設が想定通りに機能することが前提であるため、防護施設が想定

図-4 高潮による浸水面積の地域分布

図-5 高潮による浸水人口の地域分布

図-3 沿岸域浸水被害額の地域区分

図-6 高潮による浸水被害額の地域分布

通りの機能を発揮するように適切な点検・整備・運用・管理がなされることが必要である。

三大湾、瀬戸内海および有明・八代海の沿岸を始めとする高潮浸水被害リスクが高い地域では、地球温暖化を考慮した高潮対策の検討が重要だと考えられる。また、日本の南岸地域は他の地域に比べて台風の来襲が多いため、早期の高潮対策が望まれるが、長期の対策を考慮に入れて効果と効率の高い対策を練り、計画的に実行していくことが重要である。

高潮によってある高潮位が出現し、それよりも低い地域が全て高潮の潮位まで浸水するとしたときに浸水被害額がいくらになるかを計算し、それらを集約して浸水水位に対する浸水被害額の関係を表す沿岸浸水被害関数を図-7～8のとおり作成した。

関数をみると、三大湾や瀬戸内海の沿岸地域は外洋に面する沿岸地域（ここでは茨城・九十九里地域、東海地域および南海・東南海地域の沿岸地域）の10倍程度の被害額である。浸水水位がT.P.5mからT.P.10mのあたりでは、被害額が最も大きいのは東京湾で、次いで大阪湾、瀬戸内海、伊勢湾、南海・東南海、東海、茨城・九十九里地域の順である。東京湾、大阪湾および瀬戸内海地域はT.P.5mまでが、茨城・九十九里浜および南海・東南海はT.P.10mまでが被害額の増加率大きい。

本研究の目的が地球温暖化を考慮した場合の高潮浸水被害リスクを全国規模で把握・分析することであるため、計算に使用したデータや計算方法はかなり粗いものである。そのため、計算の結果には大きな誤差・偏差を含んでいる可能性がある。本研究で得られた成果は、全国規

図-7 沿岸浸水被害関数（三大湾、瀬戸内海）

図-8 沿岸浸水被害関数（外洋地域）

模で高潮浸水被害リスクの特徴を把握するに留め、個別地域の高潮対策を検討する場合には、それに見合った精度のシミュレーションを地域ごとに行い、それに基づいて議論を進める必要がある。

7. まとめ

地球温暖化が進行し、海面が60cm上昇し、高潮偏差が1.3倍になった状態を想定し、その状況での高潮浸水による被害リスクを全国各地で推計し、それらの結果を集約し、高潮浸水による被害リスクの地域的な分布を表すリスクマップを作成した。作成したリスクマップによれば、三大湾、瀬戸内海および有明・八代海地域でリスクが大きい一方、北陸、東北および北海道地方では有意なリスクがみられる場所が少ない。

高潮や津波に対する対策の検討を始める際の初期情報を提供するため、どれだけの浸水水位のときにどれだけの浸水被害のポテンシャルがあるかを表す沿岸域浸水被害関数を作成した。関数は、高潮等によって陸域が一樣にある浸水水位になった場合に浸水による被害額がどれだけになるかを、高潮浸水被害リスクマップを作成する

際に使用した被害額の推計プログラムを使って推計し、それらをもとに東京湾、伊勢湾、大阪湾、瀬戸内海、茨城・九十九里、東海および南海・東南海の沿岸地域を対象にそれぞれ作成したものである。得られた沿岸域浸水被害関数は、三大湾や瀬戸内海の被害額が南海・東南海、東海、茨城・九十九里地域の 10 倍程度であることや、東京湾、大阪湾および瀬戸内海が T.P.5m まで、茨城・九十九里浜および南海・東南海が T.P.10m まで被害額の増加割合が大きいことを表している。

計算の結果見出された高潮に脆弱である可能性がある地域では高潮対策の検討が求められる。関係者の尽力に期待したい。

謝辞：本文は、環境省地球環境推進研究（S-8）（H22－H26）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感謝する。

参考文献

- 1) IPCC: “Summary for Policymakers. In: Climate Change 2007”, Solomon, S., D *et al* (eds.), Cambridge University Press, 2007.
- 2) 鈴木武：日本南岸地域における地球温暖化による適応を考慮した高潮浸水被害，環境システム研究論文集，Vol.38, pp.247-253, 2010.
- 3) 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, 2002.
- 4) Gumbel, E.J.: Statistics of Extremes, 375p, Columbia Univ. Press, New York, 1958.
- 5) 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.
- 6) 合田良実：港湾構造物の耐波設計－波浪工学への序説－，333p, 鹿島出版会，1990.
- 7) 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.
- 8) 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.
- 9) 農林水産省農村振興局・農林水産省水産庁・国土交通省河川局・国土交通省港湾局：海岸事業の費用便益分析指針（改訂版），2004.

JAPAN’S INNUNDATION RISK MAP OF STORM SURGE UNDER GLOBAL WARMING AND INNUNDATION DAMAGE FUNCTION OF COASTAL AREA

Takeshi SUZUKI

Sea level rise and intensified storm caused by global warming increase inundation risk of storm surge. The author assessed inundation damage risks of storm surge on many areas, and put them on a map of Japan. The map shows that Three Major Bays, Seto Inland Sea and Ariake - Yatsushiro Sea region have high risk and that risk areas are limited in Hokuriku, Tohoku and Hokkaido region.

Using the inundation damage model, the author calculated inundation damages as functions of inundation height at various regions. Obtained relationship between damages and inundation height showed that the damages rapidly increase with inundation height up to T.P.5m in the regions of Tokyo bay, Osaka bay and Seto Island sea, whereas damages are relatively lower and increase up to inundation height of T.P.10m in the regions of Ibaraki – Kujukurihama and Nankai – Tonankai.