

1. はじめに

IPCC では、地球の温暖化によって 100 年後に海面が 18~59cm 上昇し、強い台風が増加する可能性が高いと予測している (Alley *et al*, 2007)。温暖化によってもたらされる海面上昇と強い台風の増加は、日本沿岸に高潮による浸水の脅威を増大させる。日本は、海に面する市町村に人口、工業、商業が集中し、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 (原沢・西岡, 2003) ため、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、温暖化による海面の上昇や強い台風の増加による高潮偏差の増大がどの程度になるかによって、高潮による浸水の被害がどの程度になるかを予測し、それらの関係を表す関数を作成しておくことが重要である (Parry *et al*, 2001)。

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態にあわせて行おうとするならば、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、実行可能性を高めることになる。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、温暖化の水準の違いによって、高潮による浸水被害がどのように変化するのを見積もることが必要である。

温暖化による高潮被害の変化は全国に及ぶため、日本全体で被害がどの程度になるかを把握することが重要である。そうした日本全土の高潮被害を大まかに把握するため、高潮による被災の危険性が他地域に比べて高い太平洋南岸地域 (関東地方~九州地方) を対象に、温暖化により海面が上昇し高潮偏差が大きくなった場合に、それらの程度の違いによって浸水被害のリスクがどれだけ変化するのを見積もりを行った。高潮による浸水の予測は、地形と堤防・護岸を持つモデル空間を計算機上に設定し、そこに潮位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、ある海面上昇が実現し、強い台風が増加することで高潮偏差が一定割合大きくなったとき (高潮増大率≡将来の高潮偏差/現在の高潮偏差) に、高潮による浸水が起こる面積 (浸水面積) と浸水域内の常住人口 (浸水人口) と浸水による被害額 (浸水被害額) がどれだけ変化するかを予測した。

2. 沿岸部における人口集積と経済活動

日本は南西から北東に細長い島国である。しかも島の中央部の多くを山岳地帯が占めているため、海岸部の平地に都市や産業が発達している。

数値地図 250m メッシュ (標高) の 1km メッシュ平均標高と 2000 年国勢調査地域メッシュ統計の 3 次メッシュ人口、2003 年工業統計メッシュデータの 3 次メッシュ製造品出荷額等、2004 年商業統計メッシュデータの 3 次メッシュ商品販売額を使用し、T.P.15m 以下の地域、常住人口、工業出荷額等、商品販売額の分布を図-1~4 のとおり作成した。作成した図を見比べると、T.P.15m 以下の地域に、日本の人口の多くが集まり、工業出荷額等と商品販売額が大きくなっていることを見て取ることができる。

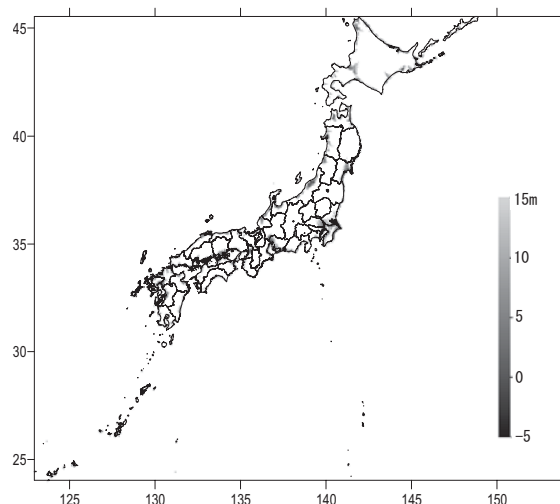


図-1 T.P.15m 以下の地域の標高

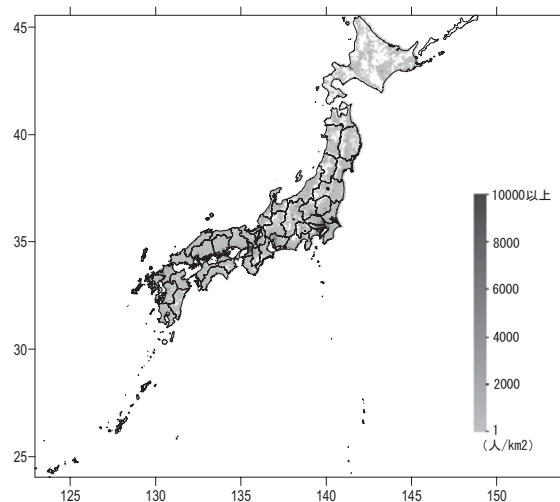


図-2 常住人口

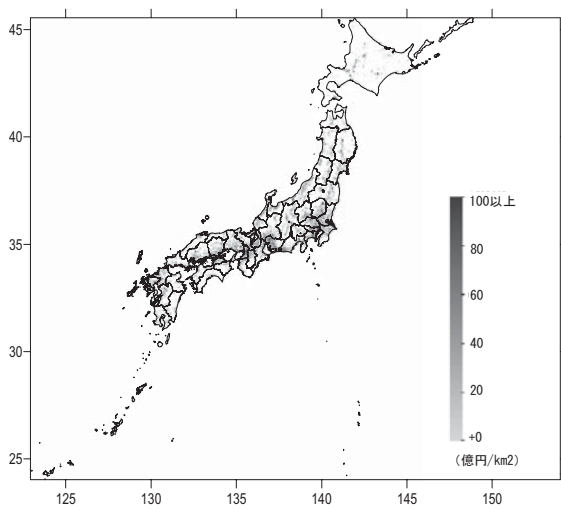


図-3 製造品出荷額等

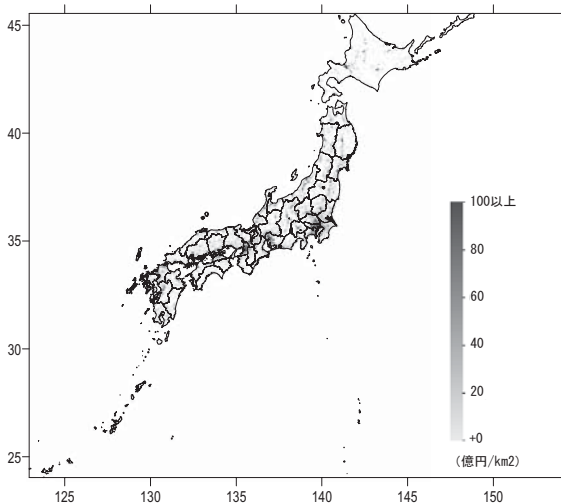


図-4 商品販売額

数値地図 250m メッシュ (標高) の 1km メッシュ平均標高と 2000 年国勢調査地域メッシュ統計の 3 次メッシュ人口, 2003 年工業統計メッシュデータの 3 次メッシュ製造品出荷額等, 2004 年商業統計メッシュデータの 3 次メッシュ商品販売額値を使用し, ある標高以下にある国土の面積, 常住人口, 製造品出荷額等および商品販売額を表-1 のとおり集計した. その際, 国土面積は, 主要な湖沼の面積を除外したうえでメッシュ数から概算で求めたものである.

T.P.0m 以下に 1,157km², T.P.5m 以下に 11,265km², T.P.10m 以下に 19,686km², T.P.200m 以下に 155,534km² の国土がある. それら面積に対して人口は, T.P.0m 以下に 238 万人, T.P.5m 以下に 2,164 万人, T.P.10m 以下に 3,510 万人が, T.P.200m 以下に 11,566 万人が常住している. このときの全国の国土面積は 378 千 km² (国土地理

院, 2003), 常住人口は 12,693 万人 (総務省統計局, 2001) である. メッシュが地形と完全には一致しないことや, データが欠落している部分があることなどから, 国土面積や常住人口のメッシュデータの全国集計値を全国値として標高別の割合を求めた. 全国の国土面積, 常住人口に対する割合は, それぞれ T.P.0m 以下で 0.4%, 2%, T.P.5m 以下で 3%, 17%, T.P.10m 以下で 5%, 28%, T.P.200m 以下で 42%, 91% である.

表-1 標高に対する国土面積・常住人口・製造品出荷額・商品販売額

標高	面積	割合	人口	割合	製造業	割合	商業	割合
0	1,157	0%	2.4	2%	5.0	2%	12.8	3%
1	2,341	1%	4.8	4%	11.5	5%	34.6	7%
2	4,865	1%	10.0	8%	27.4	11%	96.7	19%
3	7,265	2%	14.4	11%	41.8	17%	159.0	31%
4	9,466	3%	18.5	15%	52.4	22%	186.7	37%
5	11,265	3%	21.6	17%	60.7	25%	213.7	42%
6	13,083	4%	24.7	19%	68.5	28%	229.7	45%
7	14,848	4%	27.6	22%	73.3	30%	242.8	48%
8	16,595	4%	30.2	24%	78.5	32%	258.0	51%
9	18,163	5%	32.7	26%	82.5	34%	269.3	53%
10	19,686	5%	35.1	28%	87.3	36%	280.9	56%
11	21,088	6%	37.1	29%	91.7	38%	288.9	57%
12	22,567	6%	39.3	31%	95.3	39%	296.3	59%
13	24,029	6%	41.4	33%	99.6	41%	305.5	60%
14	25,521	7%	43.4	34%	103.5	42%	313.0	62%
15	26,765	7%	45.1	36%	106.0	44%	319.5	63%
16	28,099	8%	47.0	37%	109.3	45%	324.9	64%
17	29,406	8%	48.8	38%	112.2	46%	331.1	66%
18	30,761	8%	50.6	40%	114.9	47%	344.1	68%
19	31,970	9%	52.1	41%	117.4	48%	349.9	69%
20	33,160	9%	53.7	42%	120.2	49%	353.7	70%
50	62,712	17%	84.8	67%	168.0	69%	437.1	87%
100	99,193	27%	103.9	82%	199.0	82%	465.7	92%
200	155,534	42%	115.7	91%	221.1	91%	484.9	96%
全体	369,941	100%	126.9	100%	243.7	100%	505.2	100%

注1) 標高は T.P., 人口は常住人口, 製造業は製造品出荷額等, 商業は商品販売額である.

注2) 単位は, 標高が m, 国土面積が km², 人口が百万人, 製造品出荷額が兆円, 商品販売額が兆円である.

製造品出荷額等は, T.P.0m 以下で 5 兆円, T.P.5m 以下で 61 兆円, T.P.10m 以下で 87 兆円, T.P.200m 以下で 221 兆円である. 商品販売額は, T.P.0m 以下で 13 兆円, T.P.5m 以下で 214 兆円, T.P.10m 以下で 281 兆円, T.P.200m 以下で 485 兆円である. 全国の製造品出荷額等は 276 兆円 (経済産業省経済産業政策局調査統計部, 2005), 商品販売額は 539 兆円 (経済産業省経済産業政策局調査統計部, 2006 年) であるが, メッシュデータの全国集計はそれらより若干小さい. そのため, メッシュデータの全国集計値, 製造品出荷額等 244 兆円, 商品販売額 505 兆円をそれぞれ全国値として標高別の割合を求めた. 全国の製造品出荷額等, 商品販売額に対する割合は, それぞれ T.P.0m 以下で 2%, 3%, T.P.5m 以下で 25%, 42%, T.P.10m 以下で 36%, 56%, T.P.200m 以下で 91%, 96% である (図-5, 6).

例えば, T.P.5m 以下の地域は, 大まかにみて高潮によ

る被害を受ける危険が潜在する地域である。その T.P.5m 以下の地域は、面積では全国の 3% を占めるにすぎないが、そこに常住する人口は 17% であり、そこでの製造品出荷額等は 25%、商品販売額は 37% である。つまり、面積ではそう広くない T.P.5m 以下の地域に、非常に多くの人口や経済活動が集まっていることが分かる。そのことは、低地を高潮から防御することが、日本の社会にとって重要な課題の一つであることを意味するものである。

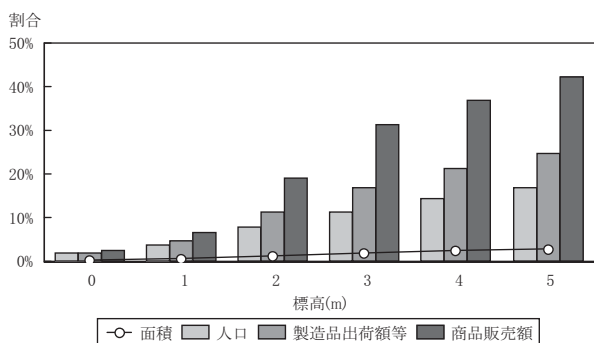


図-5 各種指標の標高に対する累積分布 (T.P. 5m 以下)

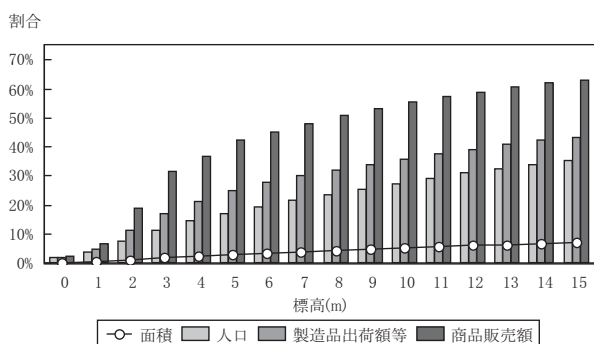


図-6 各種指標の標高に対する累積分布 (T.P. 15m 以下)

3. 高潮浸水被害計算の体系

3.1 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に、平均海面や高潮または津波の最大潮位以下の土地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 (例えば、松井ら、1992)、それだけでは十分とはいえない。日本の低地の大部分は堤防や護岸などで防護されているため、既に求められている潜在的なリスクと現実に起こる被害との間に乖離があるからである。そして、どれだけの海面上昇や台風の大規模化が起こったときに高潮浸水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した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と浸水被害額を計算した。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と浸水被害額のリスクを求めることができるグラフを作成した。

温暖化による高潮浸水リスクの変化は全国に及ぶ。そのため、高潮浸水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浸水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負荷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、本研究では計算が容易なレベル湛水モデルで浸水領域を求めることを基本に浸水モデルを構築した。レベル湛水モデルは流入した水が安定に達したと考えられる状態を幾何学的に想定し、それをもって浸水状況とするものであるため、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などによる影響などを表現することはできない。

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際の浸水面積、浸水人口および浸水被害額を求めた。それらから、高潮偏差の生起確率と潮汐による海面変動の生起確率を重みとして浸水面積、浸水人口および浸水被害額の期待値を求めた。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、ある率で高潮偏差が増大した場合に、高潮による浸水面積、浸水人口および浸水被害額がどれだけになるかを整理した。

3.2 対象地域

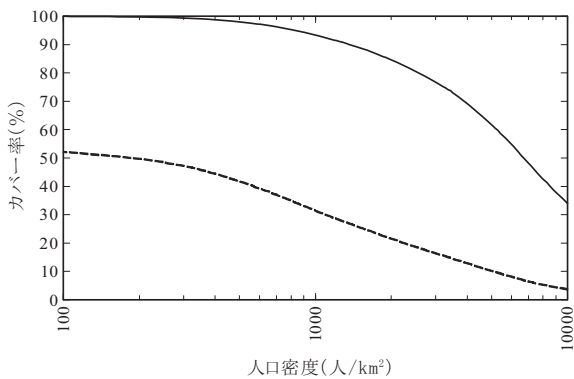
温暖化による高潮被害の変化は全国で起こる。そのため、日本全体で被害がどの程度になるかを把握することが重要である。そうした日本全土の高潮被害を大まかに把握するため、高潮による被災の危険度が相対的に高い

太平洋南岸の地域（関東地方，東海地方，近畿地方，中国地方，四国地方，九州地方）を対象とした。

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単位（以下，「セル」という。）として，多数のセルを設定した．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，データ整理に大きな作業を要するため，データ整理の作業量を小さくする工夫が必要である．しかし，その結果，計算の結果と現実の乖離が大きくなってしまっは推定結果の有用性が低下するため，計算精度の低下を極力抑える必要がある．

国土数値情報 250m メッシュ（標高）で T.P.10m 以下のメッシュを全体としたとき，2000 年国勢調査メッシュ統計 500m メッシュを 250m メッシュに分割したものをもとに，人口密度の下限値を変化させたときに下限値以上となるメッシュの人口の割合（人口カバー率）と面積の割合（面積カバー率）を計算した．結果は図-7 の通りである．

この結果をみると，人口密度が 2000 人/km² を超えたところから人口カバー率の低下が大きくなるのが分かる．その場合は，人口カバー率が約 85%，面積カバー率が約 22%である．



注) 実線は人口のカバー率，破線は面積のカバー率である．

図-7 人口と面積のカバー率

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，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，低地面積が少なく，居住人口も少ないため，島の面積が 100km² 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，全国で対象となる離島は表-2 のとおりで，21 島のみとなる．

表-2 対象となる離島

No	都道府県	島名	面積
1	新潟県	佐渡島	854.44
2	鹿児島県	奄美大島	712.38
3	長崎県	対馬	696.41
4	兵庫県	淡路島	592.19
5	熊本県	天草下島	574.11
6	鹿児島県	屋久島	504.88
7	鹿児島県	種子島	445.02
8	長崎県	福江島	326.37
9	沖縄県	西表島	289.27
10	鹿児島県	徳之島	247.76
11	島根県	島後	241.64
12	熊本県	天草上島	225.34
13	沖縄県	石垣島	222.63
14	北海道	利尻島	182.15
15	長崎県	中通島	168.37
16	長崎県	平戸島	163.64
17	沖縄県	宮古島	159.21
18	香川県	小豆島	153.33
19	北海道	奥尻島	142.74
20	長崎県	壱岐島	133.86
21	山口県	屋代島	128.42

注) 国土地理院（2007）：平成 18 年全国都道府県市区町村別面積調べによる．面積は 2006 年 10 月 1 日時点のもので，単位は km² である．北方領土は地形等のデータが得られなかったため，対象外とした．

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，T.P.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．

③T.P.15m 以下の地域の中かで，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か，ある程度の面積を持つセルを対象とする．具体的には，人口密度が 2000 人/km² 以上となるメッシュの面積が 1km² 以上のセル，もしくは，面積が 5km² 以上のセルを計算の対象とする．



図-8 セルを設定した地域

表-3 地方ごとのセル数とカバー率

地方	セル	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
関東	67	4,657	13,586	4,804	13,694	0.969	0.992
東海	94	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
計	538	14,871	39,239	16,451	39,991	0.904	0.981

注1) 面積は km², 人口は千人である。

注2) 全面積および全人口は各地方における T.P.15m 以下の地域の面積および人口である。

これらの条件に従ってセルを設定した地域は、図-8 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 538, 総面積は 14,871km², 総人口は 39,239 千人である。対象地域における T.P.15m 以下の地域の総面積は 16,451km², T.P.15m 以下の地域における総人口は 39,991 千人であるから、面積でみたカバー率は 90.4%, 人口でみたカバー率は 98.1%である (表-3)。

4. 浸水モデルの構成

4.1 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。

4.2 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した。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。

4.3 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。調査時点は主に 2004 年であるが、一部追加調査を行った。

4.4 高潮

高潮は台風の大きさ、形状、進路、速度などによって高潮偏差の時系列形状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。そうした中で一つの割り切りとして、本研究では河合ら (2002) の定式化と東京湾における高潮の継続時間の分析を参考に、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 (Gumbel, 1958 ; 合田, 1970), 潮位偏差の年間最大値を使い、合田 (1975) の方法により確率分布関数を、潮位観測点をもとに設定した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。

(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。

4.5 潮汐

海面は、潮汐により HWL と LWL の間を正弦振動しているとみなして潮汐による潮位偏差の生起確率を求め、それを高潮浸水計算に使用した。そのようにして求められた潮汐偏差の生起確率は以下のとおりである。

$$P_{td} = \frac{1}{\pi} \cos^{-1} \left(1 - \frac{H_{td}}{Z_0} \right) \quad (4)$$

ここで、 P_{td} は潮汐による潮位偏差の生起確率、 H_{td} は LWL を 0 とした場合の潮汐による潮位偏差、 Z_0 は潮汐の振幅である。

4.6 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、メッシュに与えられている標高値の $\pm 1m$ の間で標高が均等分布していると考え、確率密度関数を設定し、計算を行った。その場合、標高値 h_g の確率密度関数 $f(h_g)$ は次式により表現される。

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

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。

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

ここで、 S_m はメッシュに与えられている面積である。

また、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。

$$V_w(h_w) = \begin{cases} (h_w - h_{mg}) \cdot S_m, & h_{mg} + 1 < h_w \\ (h_w - h_{mg} + 1)^2 \cdot S_m / 4, & h_{mg} - 1 \leq h_w \leq h_{mg} + 1 \\ 0, & h_w < h_{mg} - 1 \end{cases} \quad (7)$$

さらに、浸水人口 P_w および浸水被害額 D_w は次式の通りとなる。

$$P_w(h_w) = P_m \cdot (S_w / S_m) \quad (8)$$

$$D_w(h_w) = \frac{D_m}{S_m} \int_{h_{mg}-1}^{h_w} R(h) \cdot s(h) dh \quad (9)$$

ここで、 P_m はメッシュに与えられている人口、 D_m はメッシュに与えられている資産もしくは産出額、 h は水位、 $R(h)$ は水位 h の場合の被害率、 $s(h)$ は水位 h となるメッシュ内面積の水位に対する存在確率密度である。

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セル内の湛水容積を求め、湛水容積と湛水位の関係性を求めておき、計算に使用した。

4.7 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 (1940a, 1940b) の公式を用いて計算した。計算式は次のとおりである。また、その場合の越流の様子は図-9 のとおりである。

(完全越流)

$$Q = 0.35 H_1 \sqrt{2g H_1}, \quad H_2 \leq \frac{2}{3} H_1 \quad (10)$$

(潜り堰越流)

$$Q = 0.91 H_2 \sqrt{2g(H_1 - H_2)}, \quad H_2 > \frac{2}{3} H_1 \quad (11)$$

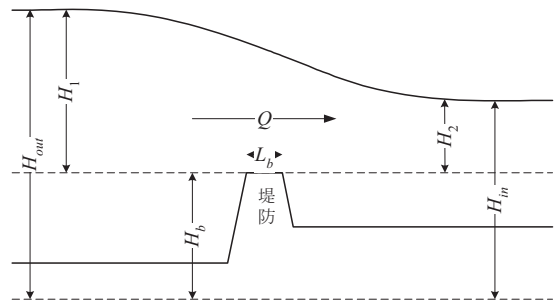


図-9 越流断面

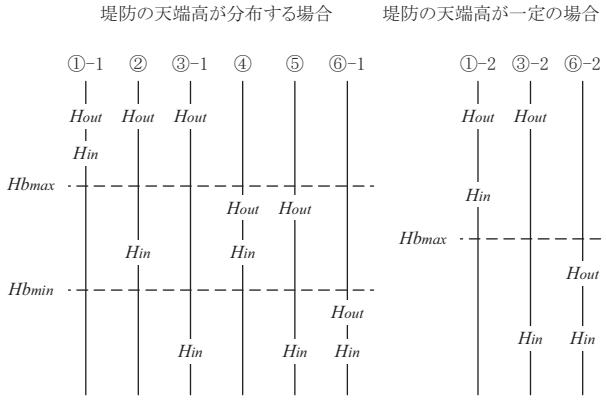


図-10 越流高と天端高の組合せ

堤防の地区ごとに越流量を計算するが、地区ごとの堤防天端高が幅を持って与えられている場合には、天端高がある幅 $[Hb_{min}, Hb_{max}]$ に一樣に分布していると仮定して越流量を計算した。

越流量 Q の計算式は、堤内外の水位 H_{in} 及び H_{out} と堤防天端高の最小値 Hb_{min} と最大値 Hb_{max} の関係ごとに決まり、流入の場合は次式のようになる。

①-1 の場合

(完全越流) $H_{in} - Hb_{min} \leq \frac{2}{3} H_{out} - Hb_{min}$

$$Q = 0.4C_1 \frac{(H_{out} - Hb_{min})^{2.5} - (H_{out} - Hb_{max})^{2.5}}{Hb_{max} - Hb_{min}} \quad (12)$$

(潜り堰越流) $H_{in} - Hb_{max} > \frac{2}{3} (H_{out} - Hb_{max})$

$$Q = 0.5C_2 \left(\frac{H_{out}}{-H_{in}} \right)^{0.5} \frac{(H_{in} - Hb_{min})^2 - (H_{in} - Hb_{max})^2}{Hb_{max} - Hb_{min}} \quad (13)$$

(混合越流)

$$Q = 0.4C_1 \frac{3^{2.5} (H_{out} - H_{in})^{2.5} - (H_{out} - Hb_{max})^{2.5}}{Hb_{max} - Hb_{min}} + 0.5C_2 \left(\frac{H_{out}}{-H_{in}} \right)^{0.5} \frac{(H_{in} - Hb_{min})^2 - 4(H_{out} - H_{in})^2}{Hb_{max} - Hb_{min}} \quad (14)$$

②の場合

(完全越流) $H_{in} - Hb_{min} \leq \frac{2}{3} H_{out} - Hb_{min}$

$$Q = 0.4C_1 \frac{(H_{out} - Hb_{min})^{2.5} - (H_{out} - Hb_{max})^{2.5}}{Hb_{max} - Hb_{min}} \quad (15)$$

(混合越流)

$$Q = 0.4C_1 \frac{3^{2.5} (H_{out} - H_{in})^{2.5} - (H_{out} - Hb_{max})^{2.5}}{Hb_{max} - Hb_{min}} + 0.5C_2 \left(\frac{H_{out}}{-H_{in}} \right)^{0.5} \frac{(H_{in} - Hb_{min})^2 - 4(H_{out} - H_{in})^2}{Hb_{max} - Hb_{min}} \quad (16)$$

③の場合 (完全越流)

$$Q = 0.4C_1 \frac{(H_{out} - Hb_{min})^{2.5} - (H_{out} - Hb_{max})^{2.5}}{Hb_{max} - Hb_{min}} \quad (17)$$

④の場合

(完全越流) $H_{in} - Hb_{min} \leq \frac{2}{3} H_{out} - Hb_{min}$

$$Q = 0.4C_1 \frac{(H_{out} - Hb_{min})^{2.5}}{Hb_{max} - Hb_{min}} \quad (18)$$

(混合越流)

$$Q = 0.4C_1 \frac{3^{2.5} (H_{out} - H_{in})^{2.5}}{Hb_{max} - Hb_{min}} + 0.5C_2 \left(\frac{H_{out}}{-H_{in}} \right)^{0.5} \frac{(H_{in} - Hb_{min})^2 - 4(H_{out} - H_{in})^2}{Hb_{max} - Hb_{min}} \quad (19)$$

⑤の場合 (完全越流)

$$Q = 0.4C_1 \frac{(H_{out} - Hb_{min})^{2.5}}{Hb_{max} - Hb_{min}} \quad (20)$$

⑥の場合 (無越流)

$$Q = 0 \quad (21)$$

ここで C_1 および C_2 は越流係数であり、ここでは本間の公式に対応する 1.55 および 4.03 とした。

4.8 間接流入

一連の浸水が考えられる低地の内部に連続して少し標高の高い部分があり、それによって低地への浸水が2段階になると考えられるセルが存在する。

そうした一連の低地を、少し標高の高い部分で分けられた2つのセルとみなし、奥のセルは少し標高の高い部分を通して海側のセルから間接的に海水が流入するとして浸水を計算した。海側のセルを親セル、奥のセルを子セルとし、親セルから子セルには境界部分の少し高くなった地形の標高を超えた分が流入するとして計算した。親セルと子セルがそれぞれが独立したセルであるとした場合の浸水深に対する湛水容積をそれぞれ V_{mo} , V_{chi} とすると、親セルと子セルを組み合わせた複合セルでは、複合セルの浸水水位 H_{cmb} に対する湛水容積 V_{cmb} は次式により表される。

$$V_{cmb} = \begin{cases} V_{mo}(H_{cmb}), & H_{cmb} \leq H_{bdr} \\ V_{mo}(H_{cmb}) + V_{chi}(H_{cmb}), & H_{bdr} + 0.1 \leq H_{cmb} \end{cases} \quad (22)$$

ここで、 H_{bdr} は親セルと小セルの境界の高さである。複合セルへの湛水量 V_{cmb} 、親セルの浸水水位 H_{mo} と湛水量 V_{mo} 、子セルの浸水水位 H_{chi} と湛水量 V_{chi} の関係は次の通りとなる。

$$H_{mo} = \begin{cases} H_{cmb}, & H_{cmb} \leq H_{bdr} \\ H_{bdr}, & H_{bdr} < H_{cmb} < H_{bdr} + 0.1 \\ H_{cmb}, & H_{bdr} + 0.1 \leq H_{cmb} \end{cases} \quad (23a)$$

$$V_{chi}(H_{chi}) = V_{cmb} - V_{mo}(H_{mo}) \quad (23b)$$

ただし、得られた H_{chi} が $H_{chi} > H_{mo}$ となる場合は、 H_{chi} に H_{mo} の値を代入する。

5. 被害指標

浸水面積はメッシュ内で浸水が発生した面積を合算することによって、浸水人口はメッシュの常住人口にメッシュ内で浸水が発生した面積の割合を乗じたものを合算することによって求めた。また、浸水被害額は次の方法によって求めた。

平成12年国勢調査地域メッシュ統計(500mメッシュ)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(500mメッシュ)の産業大分類別の事業所従業員数をまず整理した。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、その他農地のデータからメッシュごとの面積を求めた。それらに都道府県別家屋1m²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業産出額を乗じて、家屋資産額、家庭用品資産額、農漁家資産額、事業所資産額、農地生産額を求めた。

浸水計算によって得られた最大浸水深をもとに浸水高別資産項目別被害率(農林水産省・国土交通省, 2004)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た。

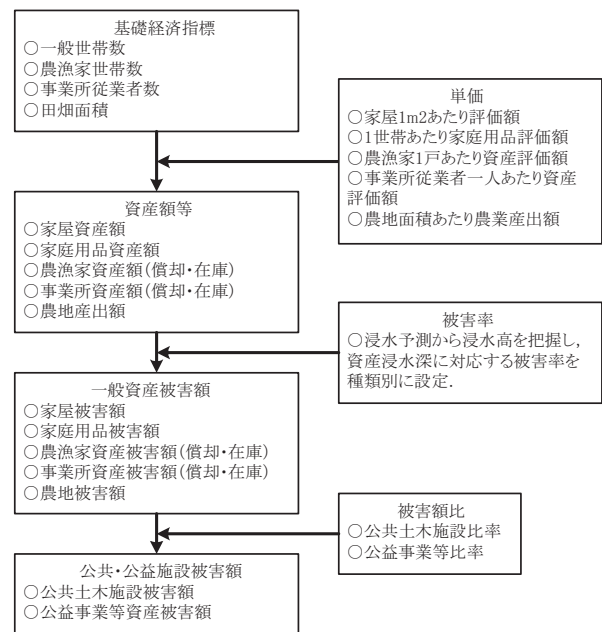


図-11 浸水被害額推計の手順

また、一般資産被害額に公共土木施設比率、公益事業等比率(農林水産省・国土交通省, 2004)を乗じ、公共土木施設被害額、公益事業等被害額を求めた。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した(図-11)。

6. 影響の整理

作成した浸水モデルを使い、以下の計算手順に従って高潮による浸水面積、浸水人口および浸水被害額の期待値を求めた。

- ① ある偏差を持つ高潮が発生したと仮定し、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 以上の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。

⑤ それらを，太平洋南岸地域の全てのセルについて合算することにより，太平洋南岸地域における浸水面積，浸水人口および浸水被害額の期待値を求める。

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 (Alley *et al*, 2007) 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ものとして，-20cm から 10cm 単位で 100cm までと設定した。強い台風の増加については極値の分布形の変化を予想することが困難なため，温暖化により高潮偏差が一定率で増大すると仮定し，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 ±0.1 ずつ変化させ，0.7 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，浸水人口および浸水被害額を求め，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場合に，浸水面積，浸水人口および浸水被害額の期待値がどれだけになるかを予測し，その結果を考察した。

計算を行う生起確率の上限値は，オランダの南北ホルラント州の海岸における設計外力の生起確率が年 1/10000 に設定されている (Kabat *et al*, 2009) ことを参考に設定した。

これまで高潮防護施設の整備水準の目安として多く使われてきた伊勢湾台風級の台風の気圧深度が，温暖化によって室戸台風級になるように台風が強まる場合を想定すれば，台風の気圧深度は温暖化で 1.3 倍に増大することになる (表-4)。高潮偏差は台風の気圧深度と風速の自乗に比例し，風速の自乗は気圧深度に比例する傾向があり，以下の経験式が知られている (水谷，2002)。

$$\eta = a(1010 - P) + b \cdot W^2 \cos \theta \quad (24a)$$

$$W = 6\sqrt{1010 - P} \quad (24b)$$

ここで， η は最大潮位偏差， P は中心気圧， W は最大風

速， θ は湾の長軸方向と最大風速時の風向のなす角度， a ， b は定数である。

それらは，高潮偏差が概ね気圧深度に比例して大きくなることを表しており，気圧深度が 1.3 倍になるときの高潮増大率は概ね 1.3 になると考えることができる。そこで，その高潮増大率 1.3 を結果をみる際の一つの目安として使用する。

表-4 大きな高潮を引き起こした台風の上陸時諸元

項目	室戸台風	伊勢湾台風	第 2 室戸台風
年月日	1934/8/21	1959/9/26	1961/9/16
地点	室戸	名古屋	室戸岬
起時	5:10	20:37	9:38
中心気圧	912hPa	935hPa	931hPa
気圧深度	98hPa	75hPa	79hPa

注) 宮崎 (2003) をもとに作成。

7. 結果と考察

作成した浸水モデルによる計算結果をもとに，海面上昇量と高潮増大率を説明変数として整理した日本の太平洋南岸地域における浸水面積，浸水人口および浸水被害額の期待値のグラフは図-12~17 のとおりである。この結果はまれに発生する大きな高潮によって引き起こされる大きな被害を平均化したものであるため，毎年のようにこのような被害が起こる訳ではない。また，大まかなモデル化のもとでの計算結果であるとともに，非常に低い生起確率の部分までを計算しているため，推定値にずれが生じている可能性もある。それらを理解したうえで結果を解釈することが必要である。

グラフによれば，海面上昇量が増加する一方で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 の場合をみると，海面上昇量が 10cm のあたりから浸水面積，浸水人口および浸水被害額の増加率がわずかに大きくなる傾向がみられるが，全体としては強い屈曲のない緩やかな曲線である。そして，高潮増大率が大きくなるにつれて曲線の直線性が強まる傾向がみられる。

また，海面上昇がない場合に高潮増大率が増加する場合をみると，浸水面積，浸水人口および浸水被害額はいずれも概ね直線的に増加する。

これらのことは，温暖化によって海面が上昇し，高潮偏差が増大する場合，高潮の浸水による被害リスクは温暖化の進行に合わせて徐々に増えていくことを意味する。被害リスクの増加がこのような傾向を持つのは，防護施

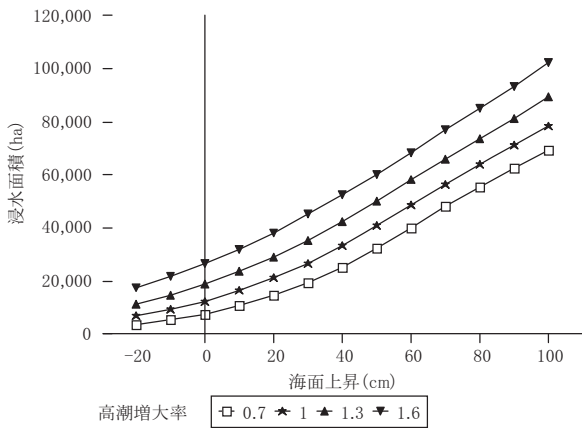


図-12 海面上昇に対する高潮浸水面積

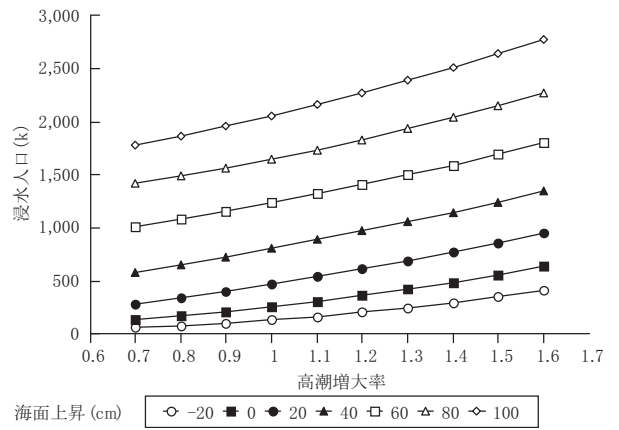


図-15 高潮増大率に対する高潮浸水人口

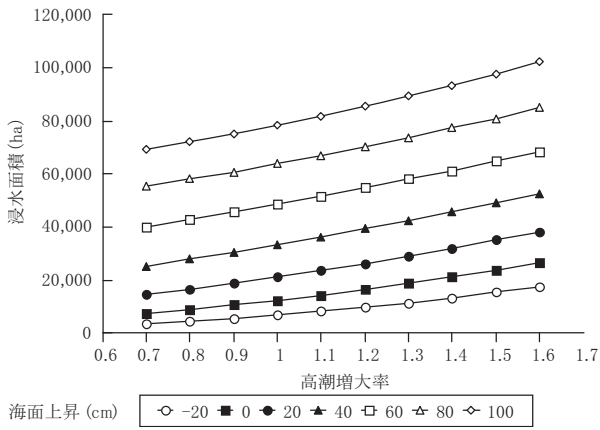


図-13 高潮増大率に対する高潮浸水面積

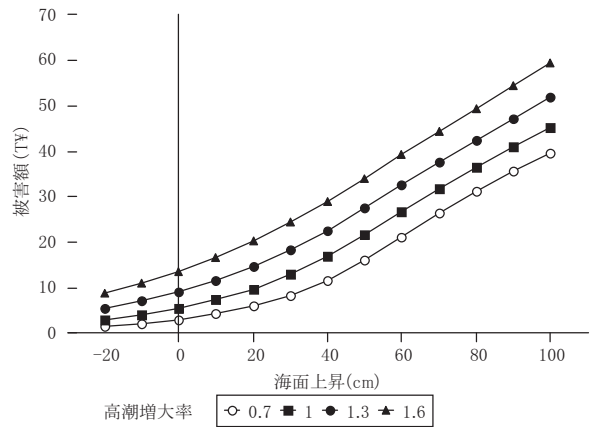


図-16 海面上昇に対する高潮浸水被害額

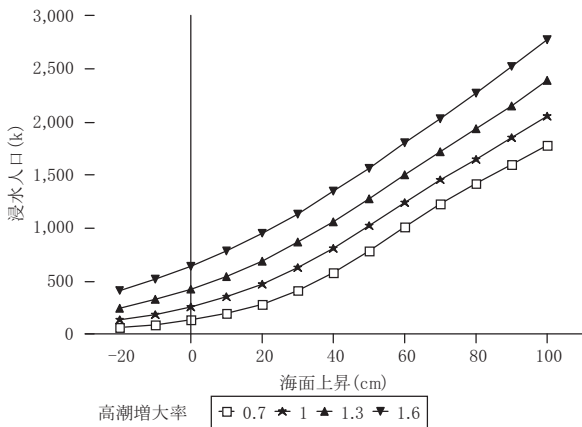


図-14 海面上昇に対する高潮浸水人口

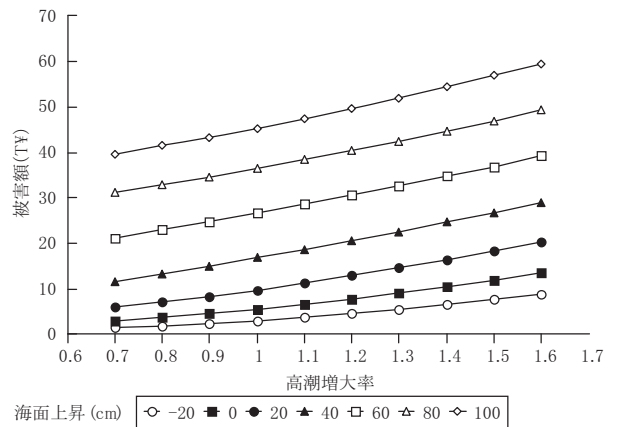


図-17 高潮増大率に対する高潮浸水被害額



図-18 高潮による浸水面積の地域分布



図-19 高潮による浸水人口の地域分布



図-20 高潮による浸水被害額の地域分布

設の高さにばらつきがあり、弱い箇所から徐々に浸水が起こることによって考えられる。そのことから、温暖化の進行に併せて弱い箇所から徐々に防護施設を改修することで、温暖化による高潮の激化に効率よく対処できるという示唆が得られる。

以上をまとめると、「ある危険な水準までは高潮への備えをあまりしなくてよいが、それを超える危険が高ま

った時点でまとまった対応が求められる。」というのではなく、「大きな被害を出さず、対策の負担のピークを大きくしないためには、温暖化の進行に合わせて適切な対策を徐々に講じていくことが合理的である。」ということになる。ただし、気象モデルの進歩等により高潮偏差の極値分布の形状変化の情報が得られるならば、徐々に被害が大きくなるという傾向が変化する可能性は残されている。

IPCC 第4次報告書 (Alley *et al.*, 2007) 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、高潮増大率が1.3の場合について求めた、日本の太平洋南岸地域における高潮による浸水面積、浸水人口、浸水被害額の期待値の地域分布は図-18～20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被害リスクの大小で、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。

この結果によれば、日本の太平洋南岸地域では大きくみて三大湾、瀬戸内海、九州北西部の沿岸地域が高潮浸水による被害リスクが高い地域であることが分かる。また、それら以外の地域でも、入り江や河口部に高潮に対して脆弱と見込まれる地域が散在している。

図-20の被害額を関東地方～近畿地方と中国地方～九州地方に分けて集計すると、関東～近畿が10兆円、中国～九州が23兆円と、人口や経済の規模で下回る中国～九州の方が被害額が大きいことが分かる。それは、関東～近畿が中国～九州より高潮に対する防御の水準が相対的に高く、高潮による浸水の発生が相対的に小さいためである。

高潮に対して脆弱では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ため、それらが健全に機能するならば、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と考えられる。それは防護施設が想定通り機能することが前提であるため、防護施設が想定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前提である。

三大湾、瀬戸内海、九州北西部の沿岸を始めとする高潮に脆弱と見込まれる地域では、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、日本の太平洋南岸地域は他地域に比べて台風の来襲が多いため、短期の対策と長期の対策をうまく組み合わせて効果と効率の高い対策を実施していくことが重要である。

8. おわりに

日本の太平洋南岸地域を対象に、温暖化で海面が上昇し、強い台風が多くなり大きな高潮が多くなった場合に、それらの程度に応じて浸水面積、浸水人口および浸水被害額のリスクがどれだけ変化するかという感度を見積り、それらの傾向とそこから導かれる対策への示唆を整理した。なお、構築した高潮浸水モデルは過去の研究によるものよりは高度になっているが、考慮出来ていない要素がなお残り、またデータや計算の精度も必ずしも十分に高いとは言い切れない。そのため、浸水面積、浸水人口、浸水被害額の値は、それらの値をそのまま具体的な対策の検討に使用するのではなく、影響発現の傾向を把握するにとどめておくことが必要である。具体的な対策を検討するには、地域ごとに精度の良いモデルを構築し、丁寧な分析を行うことが必要である。

温暖化による高潮影響を広域にわたって予測する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、その結果が温室効果ガスの安定化濃度の議論に役立つことを期待する。その際、入力条件である海面上昇と台風の予測精度の向上が重要であり、気候モデルの精度が高まることが望まれる。

また、浸水モデルを使った浸水計算の結果から、関東地方から九州地方にかけての地域では、大きくみて三大湾、瀬戸内海、九州北西部沿岸の地域が高潮に対して相対的に脆弱であるという示唆を得た。計算の結果、高潮に対する脆弱性が高いと見込まれた地域では、高潮対策の計画的な実施についての検討が求められる。関係者の尽力を期待したい。

(2009年8月25日受付)

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

Alley, B.R. *et al* (2007): "Summary for Policymakers: Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change", IPCC, 18p.

Gumbel, E.J. (1958): *Statistics of Extremes*, 375p, Columbia Univ. Press, New York.

Kabat, P., *et al* (2009): Dutch coasts in transition, *Nature*

Geoscience, Vol.2, July 2009, pp.450-452

Parry, M., *et al* (2001): Millions at Risk, *Global Environment Change*, Vol.11, No.3.

河合弘泰・竹村慎治・原信彦 (2002): 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, 土木学会, pp.251-255.

合田良実 (1970): 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.

合田良實 (1975): 港湾構造物の耐波設計, 鹿島出版会, pp.118-125.

農林水産省・国土交通省 (2004): 海岸事業の費用便益分析指針 (改訂版).

原沢英夫・西岡秀三 (2003): 地球温暖化と日本 第3次報告 -自然・人への影響予測-, 古今書院.

本間仁 (1940a): 低溢流堰堤の流量係数, 土木学会誌, Vol.26, No.6, pp.635-645.

本間仁 (1940b): 低溢流堰堤の流量係数, 土木学会誌, Vol.26, No.9, pp.849-862.

松井貞二郎・立石英機・磯部雅彦・渡辺晃・三村信男・柴崎亮介 (1992): 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, 土木学会, pp.1031-1035.

水谷武司 (2002): 自然災害と防災科学, 東京大学出版会, 207p.

宮崎正衛 (2003): 高潮の研究, 成山堂, 134p.