

21. 太平洋岸地域における地球温暖化による 高潮浸水被害の予測

鈴木武^{1*}

¹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

温暖化によって海面が上昇し、大きな高潮の発生が増加した場合、浸水面積、浸水人口および浸水被害額がどれだけ大きくなるかを太平洋沿岸地域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、そこに潮位の変化を与え、越流と浸水の計算を行うことによって行った。そして、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、浸水人口および浸水被害額がどれだけになるかを定量的に評価した。その結果、浸水面積、浸水人口および浸水被害額はいずれも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、太平洋沿岸地域では大きくみて三大湾、瀬戸内海、九州西部沿岸の地域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, amount of loss*

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、強い台風の発生が増加する可能性が高いと予測している。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、日本沿岸の高潮による浸水被害のリスクを増大させる。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、温暖化による海面の上昇や強い台風の増加による高潮偏差の増大の水準がどの程度かによって、高潮による浸水の被害がどの程度になるかを出力する関数を予め作成しておくことが必要である³⁾。

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度が他地域に比べて高い太平洋沿岸の地域を対象に、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かの見積もりを行った。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構築し、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、台風が強まることによって高潮が一定割合大きくなったときに、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予測した。

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⁾、それだけでは十分とはいえない。わが国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かかる被害との乖離が大きいからである。そして、どれだけの海面上昇や台風の強大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、海面上昇量と強い台風の増加で高潮偏差が大きくなる割合（高潮増大率 $\equiv$ 将来の高潮偏差／現在の高潮偏差）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による被害額のリスク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、本研究では計算が簡単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まで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とき浸水面積、浸水人口（浸水地点に居住する人の数）および浸水被害額を求めた。それらより、高潮偏差の生起確率を重みとして浸水面積、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、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、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. 対象地域

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度が相対的に高い太平洋岸の地域（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、データ整理に膨大な作業を要する。このため、作業の遂行を助けるため、データ整理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つては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。

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か、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。

これらの条件に従って計算セルを設定した地域は、図-1のとおりである。図中の着色部分が計算セルを設定した地域である。



図-1 計算セルを設定した地域

表-1 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 パー率	人口カ パー率
関東	66	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	75	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	535	14,871	39,239	16,451	39,991	0.904	0.981

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

計算セルの数は 535、総面積は 14,871km²、総人口は 39,239 千人である。標高 15m 以下の地域の総面積は 16,451km²、標高 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-1)。

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）である。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。

(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

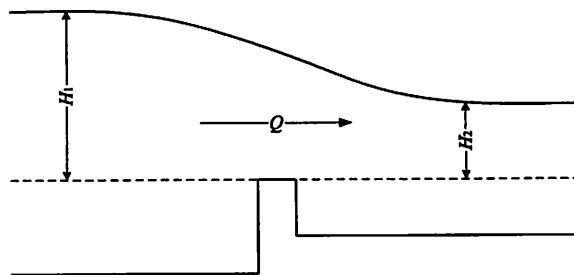


図-2 越流断面の模式

ものもあれば、短時間のももある。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⁹⁾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^{6,7)}、潮位偏差の年間最大値を使い、合田の方法⁸⁾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。

(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、各メッシュ内ではメッシュの標高値が与えられている値の $\pm 1\text{m}$ の間で均等分布すると考え、確率密度関数を設定し、計算を行った。

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を求めておき、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^{2),10)}を用いて計算した。計算式は次のとおりである。また、その場合の越流の模式は図-2 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)

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

(7) 被害指標

浸水面積は浸水が発生したメッシュの面積を合算することによって、浸水人口は浸水が発生したメッシュに居住する人口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¹¹⁾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。

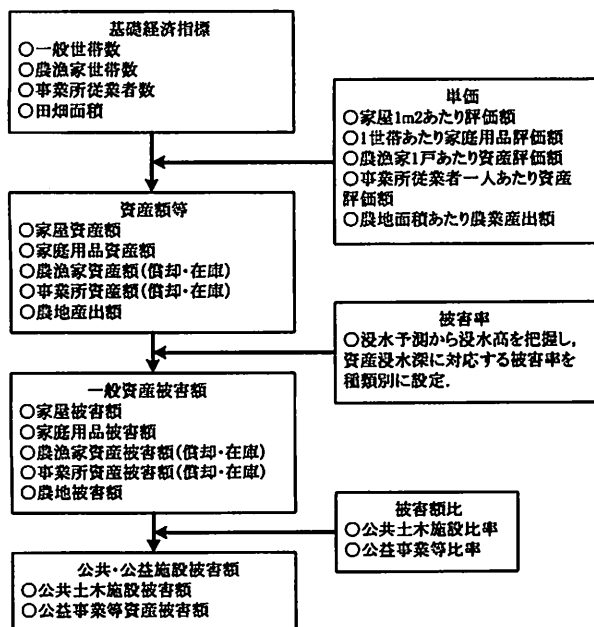


図-3 浸水被害額推計の手順

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¹¹⁾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-3)。

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、浸水人口および浸水被害額の期待値を求めた。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、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計算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、区間内の生起確率が1/10000を超えるところまで浸水面積と浸水人口を計算する。その際に使用する高潮偏差の上限値の分布は図-4のとおりである。
- 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、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、太平洋沿岸地域の全ての計算セルについて合算することにより、太平洋沿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¹²⁾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、0cm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



図-4 高潮偏差の上限

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。

6. 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太平洋沿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-5～7 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、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。それらを理解して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場合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と浸水人口の増加率が、海面上昇量が20cmのあたりから浸水被害額の増加率がわずかに大きくなる傾向が見られるが、どちらも全体に強い屈曲がみられ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と曲線の直線性が強くなる。

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等間隔に増加する。

このことは、温暖化によって海面が上昇し、強い台風が増加する場合、被害は温暖化の進行に合わせて徐々に増えていくということを意味している。被害の増加がこのような形になるのは、防護施設の高さが大小入様々であるため、弱い箇所から浸水が徐々に起こるためである。そこから、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、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。

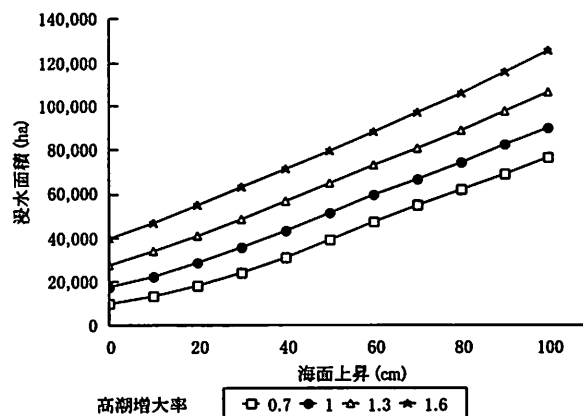


図-5 海面上昇に対する浸水面積

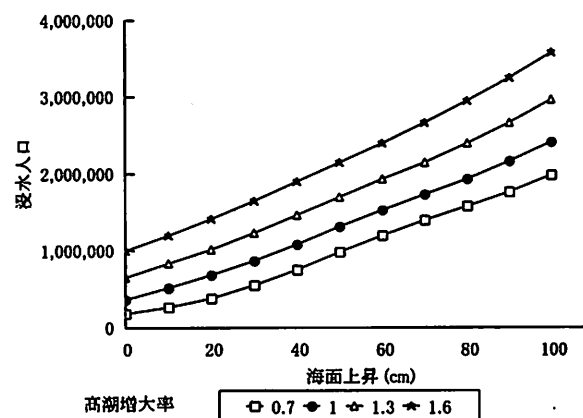


図-6 海面上昇に対する浸水人口

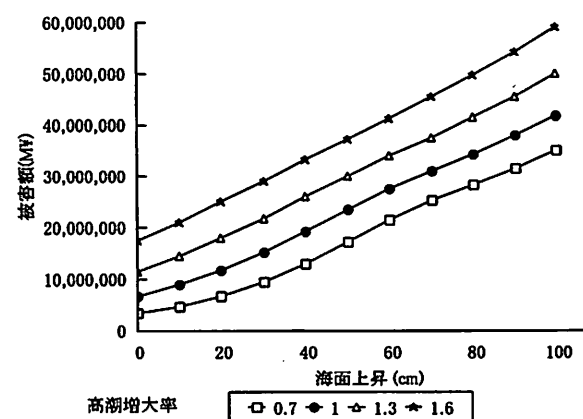


図-7 海面上昇に対する浸水被害額



図-8 高潮による浸水被害額の地域分布

IPCC 第4次報告書¹⁾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、計算した中で高潮の増大が中位となる条件である高潮増大率1.3の場合について求めた、太平洋沿岸地域における高潮による浸水被害額の期待値の分布は図-8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額の大小で、10億円以上の被害額のセルを表示している。

この結果によれば、太平洋沿岸地域では大きくみて三大湾、瀬戸内海、九州西部沿岸の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。そして、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な地域が散見される。

図-8の被害額を東と西に分けて集計すると、関東～近畿が13兆円、中国～九州が21兆円と人口や経済の規模が下回る中国～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地域は、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大きな被害リスクが生じないのではないかと考えられる。

三大湾、瀬戸内海、九州西部沿岸の地域を始めとする高潮に脆弱な地域では、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、太平洋沿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求められる。

7. おわりに

太平洋沿岸地域を対象に、温暖化で海面が上昇し、強

い台風が多くなり大きい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期待値がどれだけになるかを見積り、それらの特徴とそこから導かれる対策への示唆を整理した。

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、入力条件である台風と海面上昇の予測精度の向上が重要であり、気候モデルの進展が期待される。

また、浸水モデルを使った浸水計算の結果から、太平洋沿岸地域では大きくみて三大湾、瀬戸内海、九州西部沿岸の地域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の検討が求められる。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 ―自然・人への影響予測―，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.
- 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.
- 11) 農林水産省農村振興局・農林水産省水産庁・国土交

ESTIMATION OF STORM SURGE INUNDATION DAMAGE ALONG PACIFIC OCEAN DUE TO GLOBAL WARMING

Takeshi SUZUKI¹

¹Coastal and Marine Research Dept., National Institute for Land and Infrastructure Management

Japan has large low-lying land 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 damage, the author built up numerical model that describes probability of storm surge hitting, overtopping seawall and inundation in low-lying land. The model also covers the region along Pacific Ocean. Then, using the model, the author estimated inundation area, inundated population and inundation damage 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, inundated population and inundation damage rather linearly increase. And also the result shows that the low-lying lands at Three Major Bays, Seto Inland Sea and West part of Kyusyu have high storm surge inundation risks from a wide perspective.