

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

鈴木武¹

¹正会員 国土技術政策総合研究所 (〒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変化するかを日本南岸地域（関東地方から九州地方）を対象に見積もった。見積もりは、地形と護岸・堤防を持つ数値地形を作成し、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。また、高潮悪化への備えを防護施設の増高として防護水準を様々に変化させ、その場合の被害を推定した。その結果、日本南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な状態にあり、防護水準のある再現期間の高潮を防ぐ水準とした場合、浸水被害は再現期間に対して概ね累乗で減少することが分かった。

Key Words : global warming, storm surge, inundation model, adaptation, amount of loss

1. はじめに

IPCC¹⁾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た。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ことになる。

日本の沿岸域は多くの人口、資産、経済活動を集積しているため、地球温暖化による高潮の脅威の増大への備えを予め検討しておくことの重要性は高い。数値地図 250m メッシュ（標高）、2000 年国勢調査地域メッシュ統計、2003 年工業統計メッシュデータおよび 2004 年商業統計メッシュデータを使用し、ある標高以下の国土面積、人口、製造品出荷額等および商品販売額を 1km 格子で集計すると、面積で全国の 3% である 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% が集まっている（図-1）。

地球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。沿岸域の浸水危険度を全国的に見積る作業は、使用できるデータの少なさからできることが大きく制約され、これまでは高潮浸水の潜在的被害規模である満潮位以下の土地面積、居住人口、資産集積を調べることで行われてきた²⁾。しかしその方法では、どれだけ温暖化が進行したときにどれだけの被害が出るのか、防護施

設を改修したときに被害がどれだけ減少するのかを把握することができないため、温暖化の対策を検討するには不十分である³⁾。

そのため、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高潮による浸水被害がどれだけ変化するかを見積もった。見積りは、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日本南岸地域（関東地方、東海地方、近畿地方、中国地方、四国地方および九州地方）を対象にした。高潮による浸水の予測は、地形と護岸・堤防を持つ数値地形を計算機上に構築し、そこに潮位の変化を外生的に与え、護岸・堤防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、高潮悪化への備えを防護施設の増高と想定し、防護

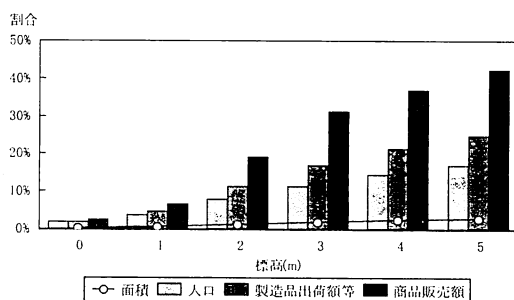


図-1 標高に対する各種指標の累積分布

水準を様々に変化させ、その場合の被害を推定した。それらにより温暖化の進行と高潮被害の関係、防護水準と高潮被害の関係、そして、そこから導かれる高潮対策への示唆を整理した。

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。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。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ことを基本的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、単に「防護施設」という。）の存在を再現した数値地形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格子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の浸水面積、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（高潮増大率≡将来の高潮偏差／現在の高潮偏差。将来の高潮偏差は現在の高潮偏差×高潮増大率であると考えられる。）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。

構築した浸水被害推計手法を用い、高潮悪化への備えを防護施設の増高と想定し、防護の水準を様々に変化させ、それらの場合の被害を推定した。

3. 対象地域

地球温暖化による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相対的に高い日本

南岸地域を対象とした。

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ができるだけ少なくすること、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以下の通り設定した。

- 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 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被害の規模が相対的に大きくなるセルを対象とし、人口密度が 2000 人/km² 以上となる格子の面積が 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-2 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。

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。

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



図-2 計算セルを設定した地域

とに調べ、それを使用した。

(2) 潮位

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。そのため一つの割り切りとして、河合ら⁹⁾の定式を参考に、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⁹⁾、潮位偏差の年間最大値を使い、合田の方法⁷⁾により確率分布関数を潮位観測点をもとに設定した42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った。

(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⁸⁾⁹⁾を用いて計算した。計算式は次のとおりである。

(完全越流)

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

(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) 被害指標

浸水面積は浸水が発生した格子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格子に常住する人口を合算することによって求めた。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。

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」と「その他農地」のデータから格子ごとの面積を求めた。

それらに都道府県別家屋 1m^2 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¹⁰⁾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。

そして、一般資産被害額に公共土木施設比率、公益事業等比率¹⁰⁾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。

5. 浸水影響の分析方法

(1) 浸水影響

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、格子ごとの浸水面積、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。
- 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、日本南岸地域の全ての計算セルについて合算することにより、日本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¹⁾で予測されている範囲を包含し、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までとした。強い台風の増加に関しては、地球温暖化により高潮偏差が一定割合で増大すると仮定し、その割合(高潮増大率)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、高潮増大率がある値になった場合に、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。

(2) 適応を考慮した場合の影響

海面が上昇し、高潮偏差が大きくなれば、何らかの対策がとられ、高潮による浸水被害が低減すると考えられる。本研究では、防護施設を改良してその天端を高める対策が全ての脆弱区間でとられるものと仮定して分析を行った。

防護施設の天端高は、高潮偏差の再現期間を指標とし、それが一定水準以上を確保するように改変されるものとした。想定した防護の水準は再現期間 50 年、100 年、150 年、200 年、300 年、500 年である。

分析の対象とする海面上昇量は、IPCC 第 4 次評価報告書¹⁾に示されている 100 年後の海面上昇量の幅 20cm～60cm をもとに 0cm、20cm、40cm、60cm とし、高潮増大率は現在の状態である 1.0 から本研究で計算する最大値である 1.6 までとし、高潮増大率と海面上昇量が温暖化により並行して増大することを勘案し、計算の対象とする海面上昇量と高潮増大率の組合せを表-1 の通りとした。設定した海面上昇量と高潮増大率の組合せのもとで防護水準を変化させて高潮による浸水被害を予測し、その結果を考察した。

6. 結果と考察

作成した高潮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-3～5 のとおりである。この結果は高潮増大率が 1.6 の場合でも浸水面積 1,023km²、浸水人口 278 万人、被害額 60 兆円であり、松井ら²⁾の見積りによる海面が 1m 上昇した場合の平均海面以下の土地 2,339km²、常住人口 410 万人、資産 109 兆円に対して論理的に整合する大小関係を持っている。

推計された被害指標は、まれに発生する大きな高潮に

表-1 海面上昇量と高潮増大率の条件

| Case | 海面上昇量 | 高潮増大率 |
|------|-------|-------|
| C1 | 0 | 1.0 |
| C2 | 20 | 1.1 |
| C3 | 20 | 1.2 |
| C4 | 40 | 1.2 |
| C5 | 40 | 1.3 |
| C6 | 60 | 1.3 |
| C7 | 60 | 1.6 |

注) 海面上昇量の単位は cm である。

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り、毎年のようにこのような被害が起こることを表している訳ではない。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若干大きくなる傾向が見られるが、いずれも全体的に強い屈曲がみられない緩やかな曲線である。また、曲線は高潮増大率が大きくなる

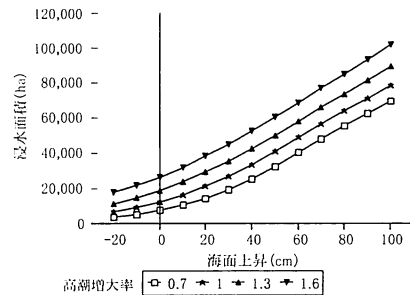


図-3 海面上昇に対する浸水面積

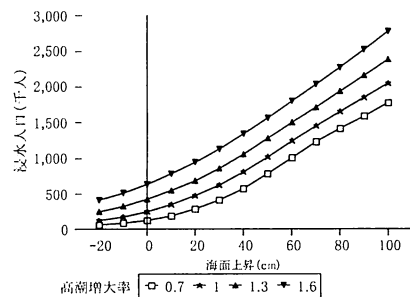


図-4 海面上昇に対する浸水人口

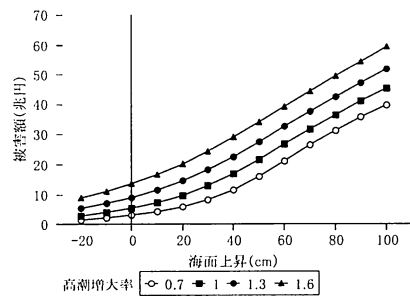


図-5 海面上昇に対する浸水被害額

と直線性が強くなる傾向がある。

海面上昇量が一定で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で増加する。

これらのことは、温暖化によって海面が上昇し、高潮が大きくなると、被害は温暖化の進行に合わせて徐々に大きくなっていくことを表している。被害の増加がこのような形になるのは、モデルの構造から考えて、防護施設の高さが大小様々であるため、弱い箇所から浸水が徐々に起こるためである可能性がある。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、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、それを越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など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あたる海面上昇量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日本南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-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、日本南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



図-6 高潮による浸水被害額の地域分布

な地域が散見される。

図-6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となった地域は、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、それらが想定通り機能するならば、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

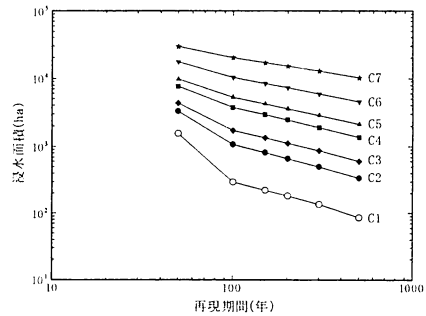


図-7 防護施設の改良水準に対する高潮浸水面積

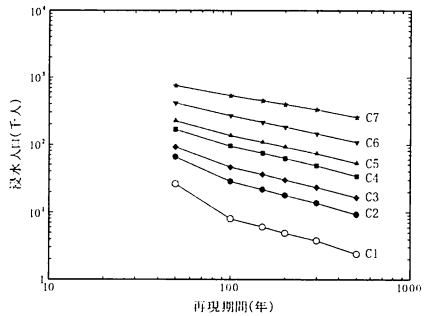


図-8 防護施設の改良水準に対する高潮浸水人口

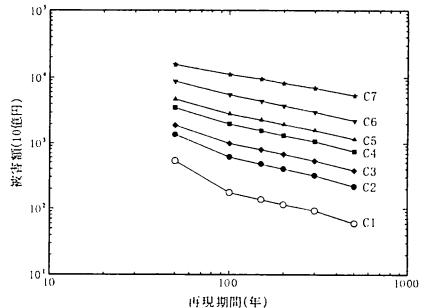


図-9 防護施設の改良水準に対する高潮浸水被害額

が生じないと考えられる。

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、日本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求められる。

高潮浸水に対する緩和策として、護岸や堤防を改修し、それらの天端を高める対策を考えることができる。そうした対策を実施する場合、護岸や堤防の最低天端のある再現期間に対応する高潮を防御できる水準にするとするならば、高潮の浸水面積、浸水人口、浸水被害額は図7～9のとおりとなる。それらを見れば、高潮による浸水被害は再現期間に対して累乗で減少することが分かる。そうした傾向にはあるものの、再現期間100年までは若干速いペースで被害が減少するため、再現期間100年という水準が適応を考える際の一つの注目点となる可能性がある。

護岸や堤防の天端を高める対策として、再現期間100年の高潮を防御できない区間で護岸や堤防のパラペットを撤去し、そこに若干天端の高いパラペットを新設する対策を考え、その対策費用を試算する。パラペットはRC構造、既設天端高1m、新設が最大1.5mとし、パラペットの撤去と新規構築の工事費を試算すると、日本南岸地域で1,400億円となった。その値は、オーダーからみて被害軽減額より小さいと考えられるため、護岸や堤防のパラペットを若干増高する対策は十分な投資効果を持つと考えられる。ただし、その工事費は、護岸や堤防の本体や基礎が十分な耐力を有していて、パラペットの改良に伴い本体や基礎の改良を必要としないことを前提としている。しかし、多くの施設が40年以上を経過していることを考えると、実際の工事費はこれよりもかなり大きくなる可能性がある。また、高潮による浸水被害もデータや計算が粗いものであるため、数値に大きな誤差・偏差を含んでいる可能性がある。それらを理解して結果を解釈する必要がある。同時に、パラペットの更新による若干の増高をそのまま行うことが、長期的にみて合理的であるとは限らない。対策の長期的な合理性について十分な検討がなされる必要があろう。

7. おわりに

日本南岸地域を対象に地球温暖化で海面が上昇し、強い台風が増え大きな高潮が増えた場合に、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がどれだけになるかを見積った。そして、高潮悪化への備えを防護施設の増高とし、防護の水準を様々に変化させ、その

場合の被害を推定した。それらにより温暖化の進行と高潮被害の関係、防護水準と高潮被害の関係およびそれらから導かれる高潮対策への示唆を整理した。

高潮浸水モデルを使った浸水計算の結果によれば、日本南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可能性が高い。そして、防護水準のある再現期間の高潮を防ぐ水準とした場合、再現期間と浸水被害額は概ね累乗の関係で減少する傾向があることが分かった。

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、合理的な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(S4)(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) 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.
- 3) Parry, M., *et al.*: Millions at Risk, Global Environment Change, Vol.11, No.3, 2001.
- 4) 河合弘泰・竹村真治・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.
- 5) Gumbel, E.J.: Statistics of Extremes, 375p, Columbia Univ. Press, New York, 1958.
- 6) 合田良実：防波護岸の越流流量に関する研究，港湾技術研究所報告，Vol.9，No.4，pp.3-41，1970.
- 7) 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.
- 8) 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.
- 9) 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.
- 10) 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.

ESTIMATION OF STORM SURGE INUNDATION DAMAGE WITH ADAPTATION IN SOUTHERN JAPAN DUE TO GLOBAL WARMING

Takeshi SUZUKI

The numerical model that describes probability of storm surge hitting, overtopping seawall and inundation in low-lying land was built up. The model covers the southern Japan. By the model, inundation area, inundated population and inundation damage were estimated corresponding to changes of sea level rise, storm tide and protection level of seawall. The result shows that the low-lying lands at Three Major Bays, Seto Inland Sea and north west part of Kyusyu have high storm surge inundation risk. And also the result shows that as protection level rise, the inundation risk decreases rather to powers.