

台風特性の感度分析による大阪湾域部での高潮氾濫域の変化

Variation of Flooding Area Due to Storm Surges in Osaka Bay Area

by Means of Sensitivity Analysis of Typhoon Characteristics

中川 一*・井上和也**・島本和仁***・上塚哲彦***

By Hajime NAKAGAWA, Kazuya INOUE, Kazuhito SHIMAMOTO and Tetsuhiko UETSUKA

A numerical simulation model for the simultaneous analysis of storm surges and their inundation of a protected low-lying area is presented. After the check of the model, the effectiveness of current measures against storm surges in Osaka Bay was estimated for the "designed" typhoon. The really worst course for Osaka bay area was examined. It was about 30 km western course of Muroto Typhoon. The influence of typhoon moving speed on the inundation area is also investigated. When the typhoon takes the course, the flooded area increased with the increase of the speed. Zones at risk of storm surge flooding after a sea-level rising due to greenhouse effect also were predicted with this simulation model.

Keywords: storm surge, flooding, typhoon, sea-level rising

1. 緒 言

大阪湾域部に立地する都市は、室戸台風、ジェーン台風、伊勢湾台風、第2室戸台風等によりこれまで、多大の高潮災害を経験してきた。一方で、これらの災害を契機に高潮災害を防止・軽減するための対策が進められてきており、これ以降大規模な高潮氾濫災害は幸いにも発生していない。しかしながら、30年以上も巨大台風が大阪湾域に来襲していないこともあって、高潮災害が忘れられた災害になりつつある中、対策が本当に有効に機能するかどうかは、巨大高潮の経験もないことから不明な点も多い。巨大台風の直撃は極低頻度であっても、一旦これが来襲すれば巨大災害が発生することは想像に難くない。そこで、本研究では過去最大級と言われている伊勢湾台風規模の台風がどのような経路をとった場合が最悪となるのか、また台風の移動速度の影響はどの程度あるのか、等について高潮氾濫規模を指標にして検討する。

2. 基礎式

2.1 高潮とその氾濫の基礎式

高潮現象は、鉛直運動が水平運動に比べて十分小さいと考えられるので長波近似を行い、圧力に静水圧分布を仮定すれば次式に示されるような浅水長波の基礎式が高潮およびその氾濫数値モデルとして適用可能であろう。なお、水平混合項は他の項に比して無視できるとして省略する。

* 正会員 工博 京都大学助教授 防災研究所

(〒611 宇治市五ヶ庄)

** 正会員 工博 京都大学教授 防災研究所

(同上)

*** 学生員 京都大学 大学院生

(〒606 京都市左京区吉田本町)

$$\frac{\partial M}{\partial t} + \frac{\partial(uM)}{\partial x} + \frac{\partial(vM)}{\partial y} = fN - gh \frac{\partial(h+z_b)}{\partial x} - \frac{h}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\tau_{sx}}{\rho} - \frac{\tau_{bx}}{\rho} \quad (1)$$

$$\frac{\partial N}{\partial t} + \frac{\partial(uN)}{\partial x} + \frac{\partial(vN)}{\partial y} = -fM - gh \frac{\partial(h+z_b)}{\partial y} - \frac{h}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} + \frac{\tau_{sy}}{\rho} - \frac{\tau_{by}}{\rho} \quad (2)$$

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial M}{\partial x} + \frac{\partial N}{\partial y} = 0 \quad (3)$$

ここに、 h ; 水深、 u, v ; それぞれ x, y 方向の流速成分、 M, N ; それぞれ x, y 方向の流量フラックスで、 $M = uh, N = vh, z_b$; 地盤標高、 ρ ; 海水の密度、 p ; 平均気圧からの偏差圧力、 f ; コリオリのパラメータで、 $f = 2\omega \sin \phi$ 、 ω ; 地球の回転角速度、 ϕ ; 緯度、 g ; 重力加速度、 τ_{bx}, τ_{by} ; それぞれ水底面での x, y 方向のせん断応力、 τ_{sx}, τ_{sy} ; それぞれ自由水面上での x, y 方向のせん断応力である。

自由水面上でのせん断応力は風速の2乗に比例すると考えられており、ここでは次式を用いる。

$$\tau_{sx} = \rho_a f_s W_x \sqrt{W_x^2 + W_y^2}, \tau_{sy} = \rho_a f_s W_y \sqrt{W_x^2 + W_y^2} \quad (4)$$

ここに、 ρ_a ; 空気の密度、 f_s ; 自由水面上での抵抗係数、 W_x, W_y ; それぞれ自由水面上での x, y 方向の風速である。一方、高潮のように自由水面上に大きなせん断応力が作用するような流れの底面せん断応力には、水面上でのせん断応力を考慮した次式を用いることにする¹⁾。

$$\tau_{bx} = \frac{\rho g n^2 u \sqrt{u^2 + v^2}}{h^{1/3}} - k \tau_{sx}, \tau_{by} = \frac{\rho g n^2 v \sqrt{u^2 + v^2}}{h^{1/3}} - k \tau_{sy} \quad (5)$$

ここに、 n ; Manningの粗度係数、 k は定数である。なお、氾濫計算に際し、潮位が堤防天端を越える場合には、越流量を本間の越流公式を用いて評価し、堤防が無い場合にはそのまま氾濫計算を実行する。

2.2 台風モデル

台風モデルには種々のものがあるが、ここでは山下²⁾と同様に、台風の移動速度を考慮した藤井・光田のモデル³⁾を用いることにする。藤井らは、気圧分布が同心円状であるとしたSchloemerの式

$$P = P_c + \Delta P \exp(-r_m/r) \quad (6)$$

を適用し、Blatonの式(7)より気圧場の移動を考慮した傾度風速 U_{gr} を式(8)より求めている。

$$\frac{1}{r_t} = \frac{1}{r} \left(1 + \frac{C}{U_{gr}} \sin \alpha \right) \quad (7) \quad \frac{U_{gr}^2}{r_t} + f U_{gr} = \frac{1}{\rho_a} \frac{\partial P}{\partial r} \quad (8)$$

ここに、 r_t ; 空気塊の流痕跡の曲率半径、 r ; 台風の中心からの距離、 P ; r における気圧、 P_c ; 台風の中心気圧、 ΔP ; 中心気圧低下量、 r_m ; 最大風速半径、 α ; 台風の中心から風を推算する地点へ向く動径ベクトルが気圧場の進行方向となす角度で、進行方向を規準として反時計回りに測った角度、 C は台風の進行速度である。

次に、傾度風速 U_{gr} を地表風速 U_s に変換する必要がある。 U_s と U_{gr} との比は一定ではなく、台風の中心付近で大きくなり、最大風速半径の内側ではその比は1以上にさえる⁴⁾、というスーパーグラディエント効果を考慮するため、藤井・光田らは次式で示されるような関係を提案している。

$$\frac{U_s}{U_{gr}} = G(\xi) = G(\infty) + \left\{ G(\xi_p) - G(\infty) \right\} \left(\frac{\xi}{\xi_p} \right)^{m-1} \exp \left[\left(1 - \frac{1}{m} \right) \left\{ 1 - \left(\frac{\xi}{\xi_p} \right)^m \right\} \right] \quad (9)$$

ここに、 $x = r/r_m$ である。この関数形は、台風の中心から外に向かって x とともに $G(x)$ は増加し、 $x = x_p$ で最大値 $G(x_p)$ をとり、ここからさらに外側では x とともに減少する分布形をとる。なお、式(9)においては藤井・光田らと同様に $m = 2.5$ 、 $x_p = 0.5$ 、 $G(x_p) = 1.2$ 、 $G(\infty) = 2/3$ を用いることとし、 U_{gr} と U_s との間の風向きの偏角については、一般によく用いられている 30° を使用する。結局、 W_x, W_y は次式で与えられる。

$$W_x = -\frac{x + \sqrt{3}y}{2r} U_s, \quad W_y = \frac{\sqrt{3}x - y}{2r} U_s \quad (x^2 + y^2 = r^2) \quad (10)$$

3. 大阪湾における高潮

3.1 第2室戸台風の高潮再現計算

ここでは、上記の高潮モデルを用いて第2室戸台風時の大阪湾での高潮の追算を試みる。計算領域は図-1に示すように、大阪湾全体を包含して高潮のみを計算する広領域と、大阪市を中心とした湾域部とその内陸部

を含む高潮とその氾濫を計算する狭領域とから成る。広領域の空間差分間隔は国土数値情報の第3次メッシュに対応した $\Delta x = 1145\text{ m}$, $\Delta y = 922.5\text{ m}$ とし、狭領域はその1/4の大きさである。広領域では陸と海との境界では不透過の条件とし、狭領域では海岸堤防部分では越流を考慮し堤防が無いところではそのまま氾濫することにした。

開境界条件としては、広領域で和歌山(図-1のFG)と東二見(同DE)で M_2, S_2, K_1, O_1 の主要4分潮を与えるとともに、台風による吸い上げと吹き寄せを考慮するためそれぞれ次のような水位上昇量を与えた。

$$\Delta h_p \text{ (cm unit)} = 0.991 \Delta P \text{ (hPa unit)} \quad (11)$$

$$\Delta h_w = \alpha h_p \quad (12)$$

ここに、 Δh_p は気圧低下による水位上昇量、 Δh_w は吹き寄せによる水位上昇量、 α は定数であって、ここではNakatsujiら⁵⁾と同様に $\alpha = 1.0$ とした。狭領域の開境界条件は図-1のABおよびBCで広領域の水理量を与えた。狭領域の地盤高さは基本的には国土数値情報から与えたが、10m以下の低平地では1/2500の地形図から地盤高さを読み取って与えた(図-2)。

1961年9月16日、第2室戸台風は1934年9月21日に来襲した室戸台風とほぼ同じ経路を辿って大阪湾域部を直撃し、死者194人、負傷者4,972人、浸水家屋384,120戸という大災害をもたらした(最大潮位OP+4.12m)。死者5,000人以上を出した観測史上最大の伊勢湾台風とともにこれら3つの台風の経路を図-3に示す。

図-4は大阪千舟橋における観測潮位と狭領域での計算結果を比較したものである。揺れもどし部分で両者に違いがみられるが、前駆波と潮位のピーク値は比較的良く再現されており、ここで用いた高潮モデルが適用可能であることがわかる。なお、不一致の原因については、ここで用いた台風モデルによる風速場が実測風速と異なっている可能性があること、湾内の埋立により当時と地形が異なっていること、単層モデルという制約があること等が考えられる。なお、数値計算に関しては、洪水氾濫計算を対象として開発した中川のモデル⁶⁾を援用することとし、基礎式中の定数には、 $f = 0.0000834(1/s)$, $\rho = 1030(\text{kg}/\text{m}^3)$, $\rho_a = 1.293(\text{kg}/\text{m}^3)$, $f_s = 0.0026$, $n = 0.02(\text{海底})$, $n = 0.06(\text{堤内地})$, $r_m = 60(\text{km})$, $k = 0.25$ を用いた。また、淀川、大和川、神崎川には計画洪水流量である12,000, 5,200, 1,800 m^3/s をそれぞれ与えた。

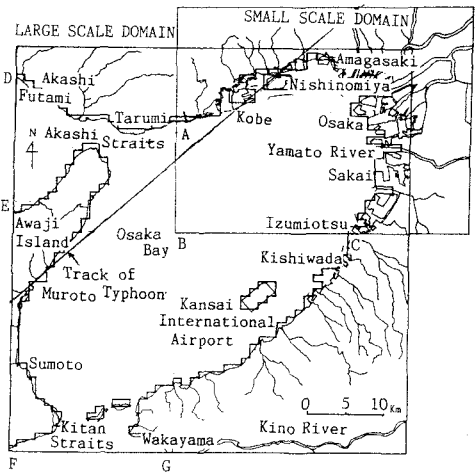


図-1 高潮および高潮氾濫の計算領域

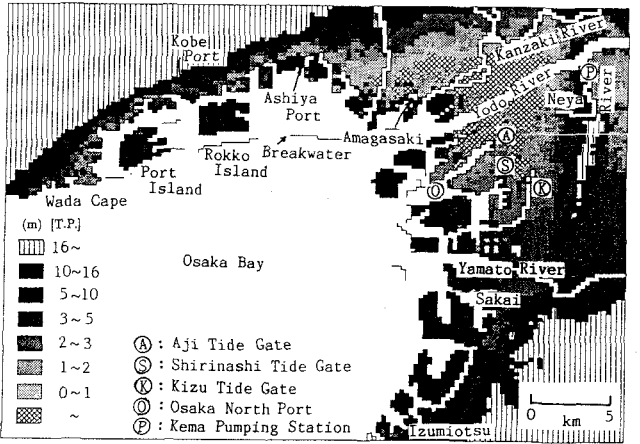


図-2 高潮氾濫場の地盤高の分布

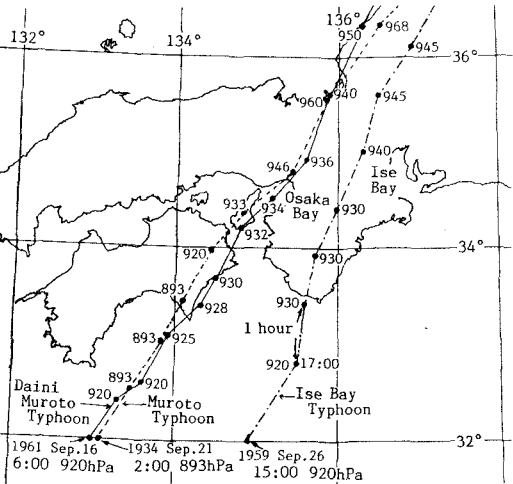


図-3 台風の経路図

3.2 高潮対策⁷⁾

大阪の高潮対策の基幹施設は、安治川、尻無川、木津川に代表される防潮水門と防潮堤である。高潮発生時には防潮水門を閉鎖し、高潮の侵入を防ぐとともに毛馬排水機場を中心とした排水施設により内水を排除することになっている。防潮水門および防潮堤の規模は、伊勢湾台風と同規模の台風が大阪にとって最悪のコースと言われている室戸台風のコースをとって大阪湾が満潮時に来襲するような「計画台風」をもとに策定されている。その結果、防潮水門および防潮堤の計画規準潮位は以下のようにになっている。

防潮水門下流での計画規準潮位 $H_d = H_1 + H_2 + H_3$

防潮水門常流での計画規準潮位 $H_u = H_4 + H_5$

ここに、 H_1 ：台風期(7～10月)の朔望平均満潮位でOP+2.2m、 H_2 ：吹き寄せおよび気圧低下等による潮位偏差で3.0m、 H_3 ：防波堤による低減効果を考慮した変動量で1.4m、 H_4 ：水門を閉鎖した時の計画貯留内水位でOP+3.5m、 H_5 は余裕高で0.8mである。神崎川や淀川の河口部ではOP+8.1mと余裕高を2.9mとっている。

3.3 現状における高潮対策の効果

大阪における現在の高潮対策の有効性を検討するために、「計画台風」を用いた高潮氾濫の数値シミュレーションを実行する。図-5はこの計画台風を用いて計算した大阪北港での潮位である。なお、1995年9月20日の満潮時を対象としている。これより、最高潮位は約TP+4.0m(=OP+5.3m)で、第2室戸台風のTP+2.82mを1.0m以上うわ回っている。図-6はこのときの最大浸水深の分布を示したものである。同図より、大阪市は港湾施設がある若干の地域を除いてほとんど氾濫していないことがわかる。一方、西宮、尼崎、神戸では内陸部での高潮氾濫域がみられる。このように、大阪市においては計画台風規模の台風では高潮氾濫は生じず、高潮対策の有効性が確認された。

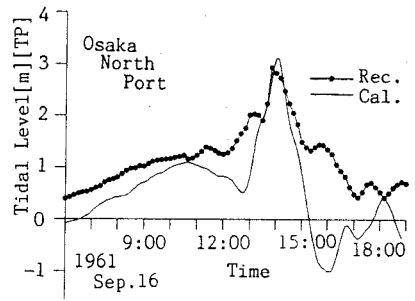


図-4 潮位の観測値と計算値の比較

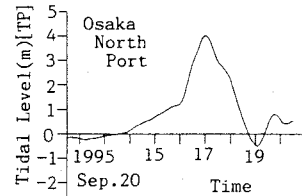


図-5 大阪北港の計算潮位

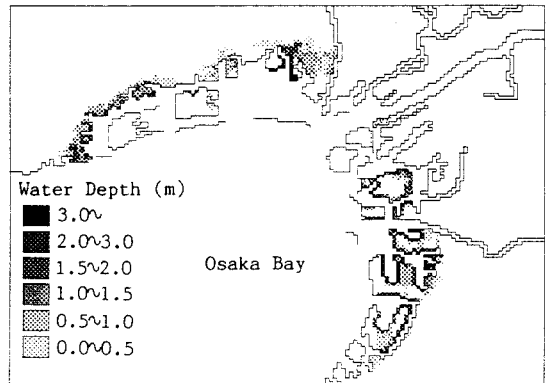


図-6 高潮氾濫による最大浸水深の分布

4. 台風特性の変化に伴う高潮氾濫域の変化

4.1 台風経路と氾濫域特性

計画台風を対象として現在大阪市は高潮対策を講じているが、そのときの台風の経路は室戸台風のものである。しかしながらこの経路が大阪湾域都市部にとって最悪の経路かどうかは不明である。そこで、ここでは計画台風の経路を室戸台風の経路と平行に10km毎に変化させ、どのような経路を取った場合が大阪湾域都市部にとって最悪の経路となるかを検討する。

図-7は室戸台風の経路を0kmとして、それより西側と東側にそれぞれ-60kmと+60kmまで経度方

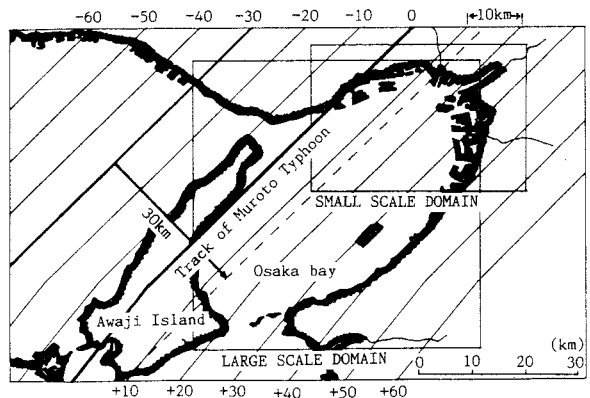


図-7 感度分析のための台風経路図

向に10 km毎にとった台風の経路を示している。この13通りの経路を計画規模の台風がとったときのそれぞれの氾濫面積の時間変化を図-8に示す。これより、室戸台風より西に30 kmずれたコースを移動させた場合に氾濫面積が最大になることがわかる。これは、最大風速半径を60 kmとした時に、実際に最大風速が生じる半径はスーパーグラディエント効果を考慮しているので $x_p = 0.5$ 、すなわち $r = r_m/2 = 30 \text{ km}$ となるからである。すなわち、台風の中心が大阪湾を縦断するような経路ではなくて、図中の破線で示したような最大風速半径の半分の距離が大阪湾を縦断するような経路が最悪の経路となるのである。もちろん、これは台風モデルによるもので、自然現象としての必然性はない。図-9は、台風がこの最悪の経路をとったときの最大浸水深の分布を示したものである。これより、堺、西宮、芦屋、神戸で2 m以上の氾濫が発生しているが大阪市の大部分は浸水していないことがわかる。また、図-6と比較して氾濫域が拡大していることも確認でき、室戸台風のコースよりもむしろこのコースの方が大阪湾域部にとって危険なコースであると言える。

4.2 台風移動速度と氾濫域の特性

図-10は横軸に台風の移動速度を、縦軸に最大氾濫面積をとり、計画台風を室戸台風経路（図中黒丸）と前述の最悪経路（図中白丸）とでどのように氾濫面積が異なるかを比較したものである。室戸台風経路では台風の移動速度が40 km/hのときに氾濫面積が最大となり、これよりも移動速度が大きくなっても氾濫面積は減少している。これは、高潮に対する気圧低下による吸い上げについては台風の移動速度と長波の伝播速度との比が0.8に近付けば湾と共振状態となると言われていることから、大阪湾の平均水深を20 mとすれば台風の移動速度がちょうど40 km/hでこの共振状態となったものと解釈できる。一方、最悪経路では台風の移動速度が大きいくほど氾濫面積も増大している。これは、共振状態が気圧の低下による吸い上げ効果によるものであるのに対し、最悪経路の場合はこれを凌駕する吹き寄せ効果が作用したためであると考えられる。

5. 海面上昇に伴う氾濫域の変化

1990年に提出されたIPCCの報告書⁸⁾によると、なんらかの対策を講じなければ21世紀末には二酸化炭素濃度の増加により地球の平均気温は約3°C上昇し、これにより海水面は平均で約65 cm上昇すると言われている。このような海面上昇は高潮規模を増大し、高潮氾濫災害が激甚化するのではないかと懸念されている。そこで、現在の高潮対策が約65 cmの海面上昇に耐え得るのかどうかについて「計画台風」を用いて検討する。なお、計算対象日は2100年9月21日である。

図-11は65 cmの海面上昇を与えたときの大阪北港における潮位の時間変化を示したものである。これより、

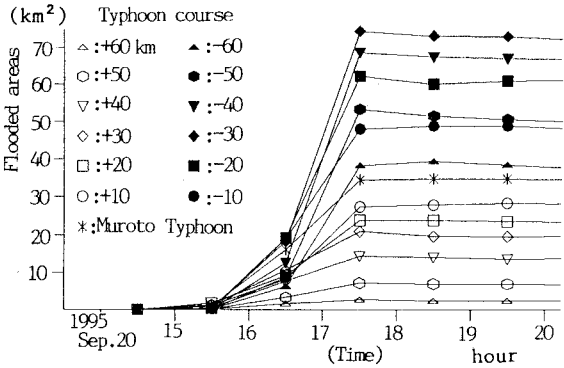


図-8 各経路の氾濫面積の時間変化

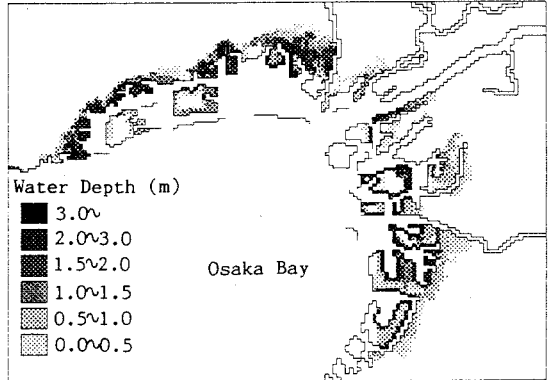


図-9 最悪経路時の最大浸水深の分布

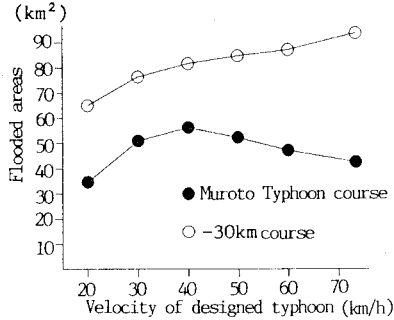


図-10 台風移動速度と氾濫面積との関係

高潮の最高潮位はTP+4.6 m (OP+5.9 m)程度で、図-5の潮位をそのまま65 cm 上乗せしたような時間変化を呈している。図-12は海面上昇後の氾濫域を示したものである。図-6と比較すると、海面上昇前の氾濫面積は約35 km²であるのに対して、海面上昇後は約63 km²で、約1.8倍も氾濫域が拡大していることがわかる。しかしながら、大阪市ではほとんど氾濫しておらず、防潮水門下流での計画潮位であるOP+6.6 mである程度対応できることを示している。ただし、越波による氾濫は本研究では考慮されていないので、これに対する検討が今後の課題である。

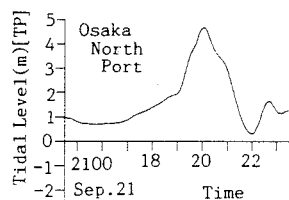


図-11 海面上昇後の大阪北港での潮位の時間変化（計画台風）

6. 結 語

本研究においては、まず高潮とその氾濫解析モデルを提示するとともに、その妥当性を第2室戸台風時の大阪港での潮位記録によって検討した。ついで、このモデルを用いて現在の大阪湾域都市の高潮対策の効果を検討した。その結果、計画台風規模の台風では西宮、尼崎、神戸の堤内地で氾濫が見られたが、大阪市では高潮氾濫はほとんど発生せず、高潮対策の効果が確認できた。高潮対策を講じる上で計画台風をどの様に設定

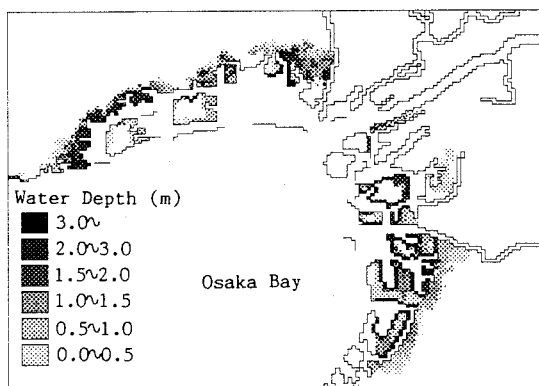


図-12 海面上昇後の最大浸水深の分布

するかが問題になるが、台風の経路や移動速度といった台風特性の感度分析を行って計画台風を設定することが重要である。そこで、これまで大阪にとって最悪の経路と言われた室戸台風の経路が本当に最悪なのかどうかを、氾濫面積を判断基準に用いて検討した。その結果、台風の経路については室戸台風の経路よりさらに30 km西よりの経路が最悪となることがわかった。さらに、台風の移動速度の影響について検討したところ、室戸台風の経路では共振状態となって吸い上げ効果が卓越し、40 km/hのときに氾濫面積が最大となったが、それより30 km西よりの経路では吹き寄せの効果が卓越し、移動速度が増加するにつれて氾濫面積が増大することがわかった。最後に、海面上昇が高潮の氾濫に与える影響について検討した。その結果、大阪市周辺の各都市では氾濫域が増大するものの、大阪市ではほとんど氾濫せず、現在の高潮対策が65 cmの海面上昇に対してもある程度対応できることが確認された。

なお、本研究の一部は、文部省科学研究費（一般研究 (B) 課題番号 05452376 および一般研究 (C) 課題番号 05680368）の補助を受けて行なったものであり、関係各位に記して深謝する。

参考文献

- 1) 岩垣雄一・榎木 享：海岸工学，共立出版，1982，p.224.
- 2) 山下隆男：1991年サイクロンによるバングラデシュの高潮・強風災害，京大防災研究所年報，第35号A，1992，pp.136-148.
- 3) 藤井 健・光田 寧：台風の確率モデルの作成とそれによる強風のシミュレーション，京大防災研究所年報，第29号B-1，1986，pp.229-239.
- 4) 光田 寧・文字信貴・塚本 修・浅井東洋：八重山群島を襲った台風5号(7705)の気象学的特性について，京大防災研究所年報，第21号B-1，1978，pp.405-415.
- 5) Nakatsuji, K., Watanabe, S., Kurita, H. and Yamane, N.: Greenhouse Effects on Storm Surges, A Case Study at Osaka Bay, Japan, Proc. 25th Cong. of IAHR, Vol.IV, 1993, pp.56-63.
- 6) 中川 一：氾濫水・土石流の動態とその解析，土木学会水理委員会，水工学シリーズ，1992，pp.A-9-1-A-9-20.
- 7) Osaka Prefectural Government: Comprehensive Flood Control Measures in Urban Area, Urban River Division, Departments of Public Works.
- 8) 霞が関地球温暖化問題研究会：IPCC地球温暖化レポート，中央法規，1991，pp.75-78.