

台風9918号による広島湾における高潮と それによる氾濫の再現計算

REPRODUCTION SIMULATION OF STORM SURGE AND INUNDATION
CAUSED BY TYPHOON 9918 IN HIROSHIMA BAY

國富 將嗣¹・高山 知司²・川池健司³・井上 和也⁴

Shoji KUNITOMI, Tomotsuka TAKAYAMA, Kenji KAWAIKE, and Kazuya INOUE

³正会員 工修 國富株式会社 (〒737-0822 呉市築地町6-1)

¹工博 工博 京都大学防災研究所教授 (〒611-0011 宇治市五ヶ庄)

⁴学生員 工修 京都大学大学院 工学研究科 (〒611-0011 宇治市五ヶ庄)

²正会員 工博 京都大学防災研究所教授 (〒611-0011 宇治市五ヶ庄)

The coastal area around Hiroshima Bay suffered from the wide inundation due to storm surge and severe wind waves generated by Typhoon 9918. It is of great importance to investigate the causes of the inundation for the mitigation of storm surge disaster. The resent paper has made numerical simulations of the storm surge and wind-generated waves in Hiroshima Bay to check their reproducibility. Though the computation through Myer's typhoon model overestimated wind speed comparing with the observed one, the storm surge numerically simulated by the wind speed well agreed with the observed one under the consideration of the unusual rise of sea level at that time. The wind waves predicted by WAM model were much less than the observed waves. Therefore, the computed wave heights are revised to agree with the observation. The estimated area of inundation due to storm surge and waves quite well agree with the inundation survey area.

Key Words : Typhoon.9918, Storm Surge, Wave over topping, WAM model, Hiroshima Bay

1. 研究目的

1999年9月24日に来襲した台風9918号は、西日本各地において大きな被害をもたらした。八代海の不知火町松合地区では高潮と潮汐とが重なってTP(東京湾中等潮位)上4.5mの高潮が生じ、船溜まりの護岸を越流して、堤内地に流れ込み、12名の犠牲者が出た。周防灘沿岸では、山口宇部空港や建設中の新北九州空港の護岸において倒壊や損壊など大きな被害を及ぼした。一方、中国地方へ再上陸した台風9918号は、日本海へ抜ける頃、吹き返しの強い南西の風により、広島湾沿岸などで大きな高潮と高波高を生起させた。これにより広島湾北部に位置する沿岸部において、広範囲にわたって浸水氾濫が発生した。図-1に示すのは、この時の広島湾北部沿岸の各地区で確認された浸水区域を示すものである¹⁾。浸水区域は斜線のパッチを貼ってある箇所である。これら各地区における浸水氾濫は、防潮堤の天端高さが、生起した潮位より低い箇所だけでなく、波浪の越波による浸水が生起したものと思われる箇所が存在していた。しかしながら、図-1に示すような浸水区域の情報だけでは、浸水の原因を特定することは

困難である。そこで、本報告では、これら各地区における浸水の原因をできるだけ詳細に把握するため、台風9918号によって生起した高潮と波浪を数値計算によって再現し、その結果を用いて広島湾北部沿岸で生起した浸水氾濫域を再現している。

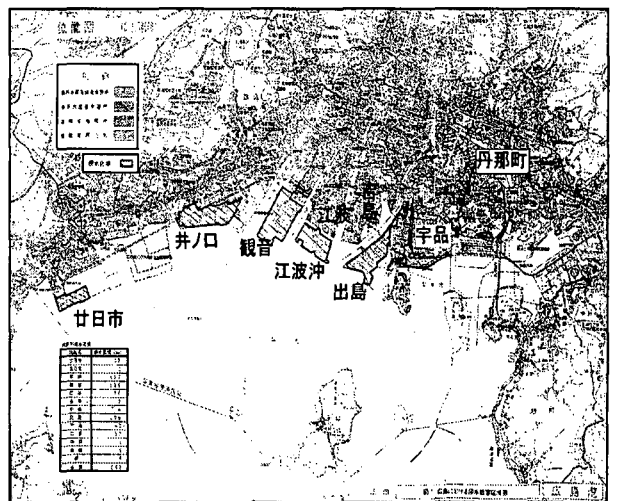


図-1 広島湾沿岸における浸水氾濫区域

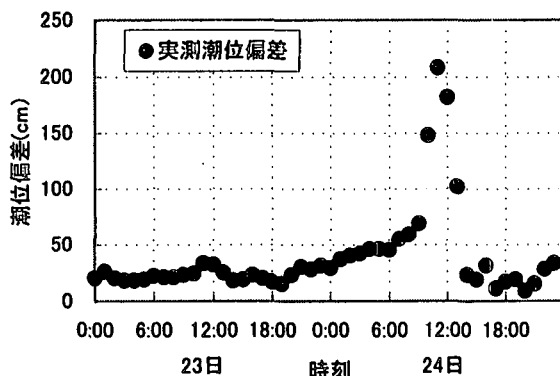


図-2 広島港における実測潮位偏差の変化

2. 潮位と波浪の再現計算

(1) 天文潮位

高潮氾濫解析では、天文潮と潮位偏差を水位として与える必要がある。天文潮は、広島湾の分潮係数から予測されるが、その値と実測の潮位を比較し、その再現性について検討を行った。実測の潮位は、財団法人日本海洋データセンターのものをを用い、この値から天文潮位を差し引いて、潮位偏差を求めた。それを図-2に示す。24日午前11時頃に最大の潮位偏差を示しており、高潮が生起したことがわかる。しかし、その前後を見てみると、高潮が生起する以前から+40cm程度の異常潮位偏差が確認できる。この原因は、はっきりとはわからないが、外洋における黒潮の蛇行などの影響により、異常潮位が生起していたものと考えられる²⁾。従って、氾濫解析に用いる水位のデータには、高潮による潮位偏差にこの異常潮位を考慮して与えるものとした。

(2) 台風

高潮や波浪の追算を行うには、風速場のデータが必要となる。また、高潮計算では、吸い上げの効果を考慮するためにも、気圧場の情報が必要である。

台風モデルとしてはMyersのモデルを用いた。Myersのモデルによる気圧分布は次式で与えられる。

$$p(r) = P_c + \Delta p \exp\left(-\frac{r_0}{r}\right) \quad (1)$$

ここで、 r は台風中心からの距離、 $p(r)$ は r 地点における気圧、 P_c は台風の中心気圧、 Δp は台風の中

心示度、 r_0 は台風中心から傾度風が最大となる地点までの距離である。なお、台風パラメータ r に関しては、広島西飛行場で観測された気圧を用いてMyersの式から逆算して求めた。また、海面摩擦の係数として $C = 0.7$ を与えた。これらの条件で風速場を求めることができる。

観音沖での推算風速と、実測海上風速とを比較した図が図-3である。観音沖での実測値より推算風速が大きい。最大風速はともに10:30に発生しているが、風速の値は実測値で27m/s、推算値で37m/sと、10m/sほど推算値が大きい。風速の最大値の前後で推算値はゆっくり増大し、ゆっくり減衰しているのに対して、実測値の立ち上がりは速く、また、急激に減衰している。そのため、風速の差は大きくなっている。風向きは、立ち上がり部で、実測値がE～SSE方向であるのに対して、推算値はSE～Sと南よりになっている。風速の減衰部では風向きに大きな差はない。このような観測値と推算値における風速の差は、陸上地形の影響が推算には取り入れられていないことが原因だと考えられるが、高潮計算、波浪計算の外力条件としてこの風速場を用いた。

(3) 潮位偏差

潮位偏差を再現するために使用した計算モデルは、後藤によって開発された津波・高潮計算モデルである。高潮を数値計算によって求めるための基礎方程式は、水深方向に平均化した線流量を用いて表す質量保存の式（連続式）と、Navier-Stokesの運動方程式である。この数値モデルを用い、先に再現した風速場を外力として高潮計算を行った。この時、海面における風の抵抗係数 C は0.7である。高潮の計算は外洋からの影響を考慮する必要があるため、西日本全域や南方海上を含む、格子間隔16.2kmの大領域からネスティングを4段階に分けて行った。最終的には200mの格子間隔で広島湾を再現した。

図-4に広島宇品における高潮偏差の計算結果と観測結果の比較を示す。図中の実線が計算による高潮偏差の値である。図中の黒丸は宇品で観測された潮位偏差を示している。計算では、9月24日の6:00頃までは海面の上昇はほとんどないが、それ以降徐々に上昇し始め、9:00頃から急な上昇を見せた後、11:00にピークを迎えている。その後は下降し始め、13:00頃に少し上昇するもののそれ以降は減衰して

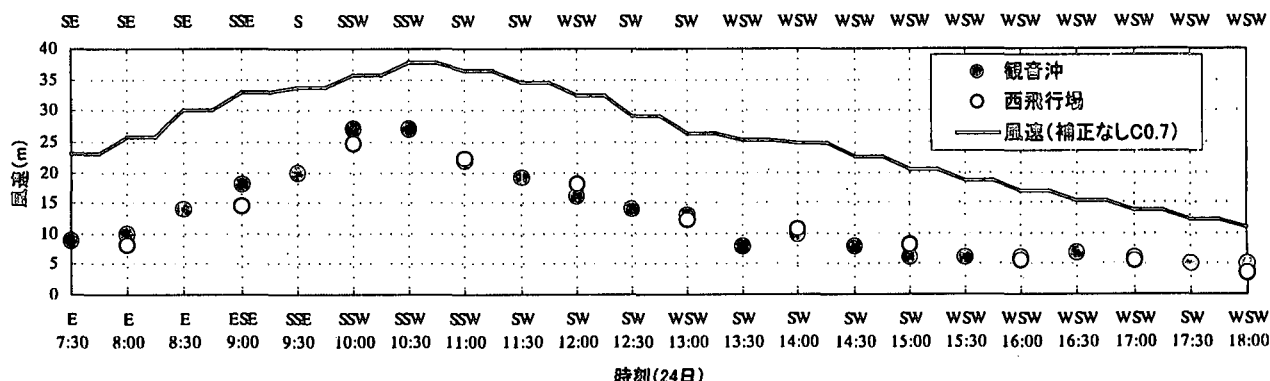


図-3 広島港観音沖における風速と風向

いる。なおピーク時での潮位偏差は1.5m近くに達した。

一方、観測値は、6:00の段階で既に0.3~0.5mの偏差を示している。以後9:00まで徐々に上昇し、9:00頃から急激な水位上昇を見せ、計算値と同様に11:00に最大の潮位偏差になった。それ以降は急激に減衰している。偏差の最大値は、2.1mで、計算値より約60cm高くなっている。そこで、潮位の再現の時に存在を確認した異常潮位40cm分を計算結果に反映させた結果を太い実線で示す。この修正により計算値は比較的良好に観測地に一致するようになることがわかる。計算による高潮最大偏差も約2.0mとなり観測結果を概ね再現できた。

しかしながら、下降時における潮位は、計算値が観測地よりかなり高くなっている。また、潮位偏差のピーク時以降での観測値の下降具合は、計算値より急である。特に計算結果で表われた再度の水位上昇は観測値には表われていない。この理由として考えられるのは、風の精度の問題である。(2)で示した風の再現値は、特に風向きにおいて観測値とズレが生じている。今回の台風風速場の再現は、一般的なMyersの台風モデルを用いて行ったため、対称湾域を囲む陸域の複雑な地形に影響されるような風速場を再現することは困難であった。これを修正するためには、陸上地形の影響を考慮した風の推算法を使用する必要があるように思われる。

(4) 波浪

波浪の再現計算は、第3世代波浪推算モデルWAMを用いて行った。波浪推算で用いられる基礎式は、エネルギー平衡方程式である^{3), 4)}。これは、周波数 f 、進行角 θ 、緯度 ϕ 、経度 λ 、時刻 t で示される二次元波浪場のスペクトル $F(f, \theta, \phi, \lambda, t)$ を用いて表される。

広島湾は宮島や能美島、倉橋島に囲まれており、外洋からの波が進入し難い湾になっている。これらの島より外側の海域で発生した波が進入する可能性もあることを考慮して、少し広く計算領域を設定するのがよい。そこで、これらの島よりさらに南に位置する屋代島から北側の海域を計算領域とした。

計算領域の格子間隔は0.01度(距離にして1km弱)として地形の再現を行った。広島湾内の水深は10~20mと比較的浅いけれども、湾内発生波の周期

は5~6sと考えられ、屈折の影響は受けてもその効果は小さいと推測できる。

高潮計算で用いた風と同じ風速場で、波浪推算を行った。広島湾の湾内波については、観音沖で観測がなされている。観測はステップ式波高計を用いて行われた。観測値の有義波高の変化と同一地点における計算結果を比較したのが図-5である。この図によると、観測波高は8:30に0.6mであったものが、急激に増大して、10:30には2.5mに達している。12:00までは波高が2.5m程度を推移し、それ以降急激に波高が減衰している。このような観測値の変化に対して、計算値は、非常にゆっくり増幅し、12:00に最大の1.1mに達する。しかしながら、計算値は、実測値の半分以下であり過小評価している。高潮の計算では、この風によって比較的良好に推定できたことから、風速が小さいことによる原因とは考えられない。そこで、波浪推算モデルWAMの特性やその影響について調べた。WAMはその格子間隔に依存して、波浪の発達に限界値(リミッター)を設けているが、この計算が浅海域における波浪発達には必ずしも適していないと考えられる⁵⁾。

3. 氾濫解析

(1) 氾濫解析モデル

氾濫解析には、デカルト座標系による手法を用いた、井上モデルを用いた。基礎式は、高潮計算と同様である。ただし、隣り合う格子の地盤高さと水位との関係に依存し、条件によっては以下に示す越流公式または段落ち式⁶⁾を用いた。

$$\begin{cases} M = \mu h_1 \sqrt{2gh_1} & \text{越流公式} & h_1 = H_i - z_h \\ M = \mu h_h \sqrt{gh_h} & \text{段落ち式} \end{cases} \quad (2)$$

式(2)の上側の越流公式において、 H_i は隣り合う地盤高が低い方の水位、 z_h は他方の地盤高であり、 $H_i > z_h$ の場合に用いられる。また、この時の μ は0.35である。下側の段落ち式は、地盤高の低い方の水位が他方の地盤高よりも低い場合に用い、 h_h は地盤の高い方の水深である。段落ち式の μ は段落ち部のエネルギー水頭に依存する値であり、井上の式⁷⁾から一定値 $\mu = (2/3)^{3/2}$ を用いた。なお、氾濫水の移動限界水深は、岩佐・井上・水鳥(1980)⁸⁾に従い、

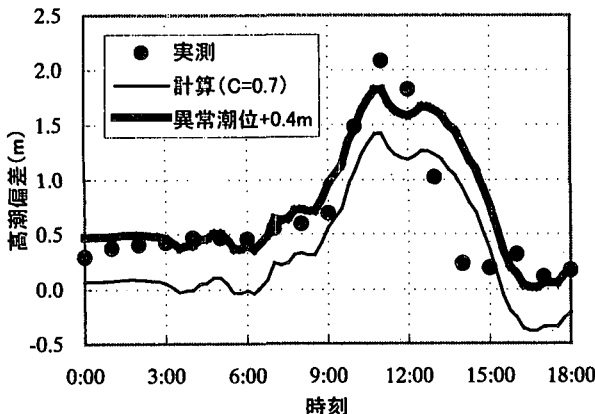


図-4 広島港における潮位偏差の変化

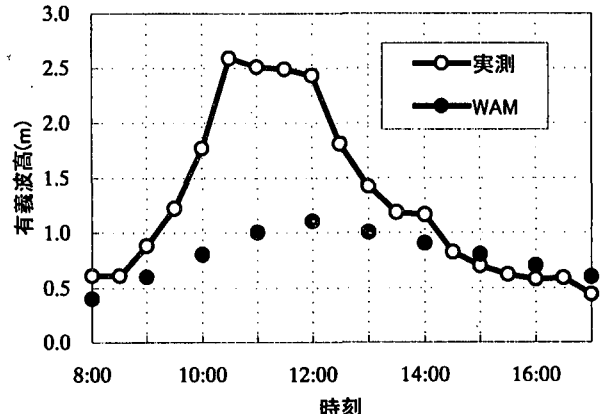


図-5 広島港における有義波高の変化

0.001mとした。

(2) 氾濫解析領域

氾濫解析を行う際、氾濫水がどのような挙動を示すかを詳細に知るためには、より細かな領域情報が必要とする。そこで、図-6に示す50mメッシュの領域で計算を行った。なお、データ作成に用いた元データは、(財)日本地図センター発行の数値地図(CD-ROM)から読み取った。このデータは、1.0m区切りであり、10cmの単位は四捨五入されている。広島における地盤高さの最低値は、DL+4.0m程度である。

氾濫水の挙動に影響するマンニングの粗度係数は、建造物や道路の影響も本来なら取り入れる必要があるが、計算が広範囲であり、個々に粗度係数を与えることは困難であったため、市街地における一般的な粗度係数 $n=0.067$ を氾濫解析領域全域に与えた。入力は、高潮計算によって得られた結果と天文潮位を用い、防潮堤の前面における水位を時系列的に与えた。

護岸の天端高さは既存護岸の現状を記した詳細地図から読み取ることでデータを作成した。概ねDL+5.0m前後の防潮堤護岸である。ただし、護岸高さのデータが無い部分においては、防潮堤が無いものとして扱った。その個所においては、浸水は地盤の高さに依存する。防潮堤は、基本的に陸域と海域の境界に与えているが、宇品港奥の埋め立て地域周辺では陸域に高潮防御構造物がある状態となっている。また、陸間なども完全に閉め切られた状態を想定し、設計基準通りの高潮防御機能を発揮することを想定している。なお、計算時間間隔は0.2秒とし、1時間ごとに氾濫域を出力した。

(3) 越波量の考慮

高潮氾濫解析に越波量の効果を導入するため、波浪計算によって求めた有義波高・有義波周期を用いて防潮堤堤内地への越波流量を求める。越波量は、合田ら⁹⁾の実験から、海底勾配、波高、堤体前面水深、天端高を用いて推定することが可能である。さらにこれらの実験結果から高山ら¹⁰⁾は、越流量の算定式を提案した。この公式は、海底勾配や波高、天端高などの諸条件を導入することで越流量を算定することが可能であるという利点を持つ。本研究では、

高山らによって提案された越流公式を用いて越流量の算定を行った。

Shoaling Zoneにおける単位幅、単位時間当たりの越波量 q は、無次元量として次式で定義される。

$$\log\left(\frac{q}{\sqrt{2gH_0^3}}\right) = \text{Max}(q_2, q_3) \tag{3}$$

ここに q_2 、 q_3 は、

$$q_2 = a \log\left(\frac{h}{H_0}\right) + b \quad q_3 = -1.17 - 2.43 \frac{h_c}{H_0} \tag{4}$$

であり、 q_2 の a と b は、

$$\left. \begin{aligned} a &= -0.94 - 2.2 \frac{h_c}{H_0} + 32 \frac{H_0}{L_0} \\ b &= -0.65 - 0.2 \frac{h_c}{H_0} - 34 \frac{H_0}{L_0} \end{aligned} \right\} \tag{5}$$

である。なお、 h_c は護岸の天端高さ、 H_0 は沖波波高、 L_0 は沖波波長、 g は重力加速度である。

ここで求まる、単位幅、単位時間当たりの越波量 q を氾濫計算に供するためには、堤体前面の水位に変換する必要がある。氾濫解析では、浸水を越流として取り扱うため、越波による効果は、天端高よりも高い水位として与える必要がある。そこで、まず潮位と天端高の相対関係から、越流していないものに関してのみ越波の効果を与えるものとし、水位を与えることとした。越波量の水位への変換は、越流公式を用いて流量フラックスから堤体前面水位に変換して求めた。

$$M = \mu h_1 \sqrt{2gh_1} \tag{6}$$

この際に用いた μ の値は、0.35である。なお、 h_1 は、天端高と堤体前面水位の差である。この式の流量フラックス M に、式(17)から求まる、

$$q = 10^{\text{Max}(q_2, q_3)} \sqrt{2gH_0^3} \tag{7}$$

を導入し、 h_1 を逆算することが可能である。従って、 h_1 は、次式で求めることができる。

$$h_1 = \sqrt[3]{\frac{q^2}{2g\mu^2}} \tag{8}$$

(4) 高潮氾濫浸水の再現

高潮計算で得られた水位を用いて氾濫解析を

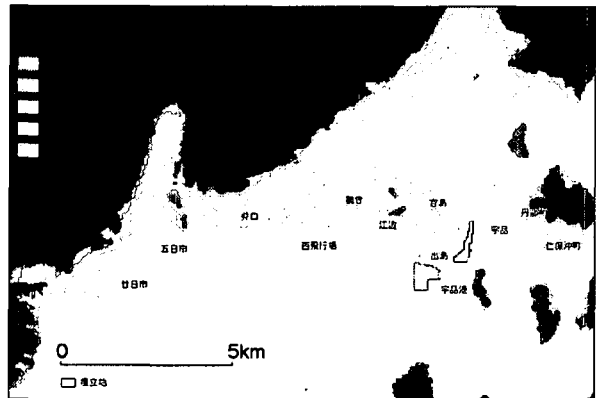


図-6 高潮氾濫解析の計算領域および地盤高分布

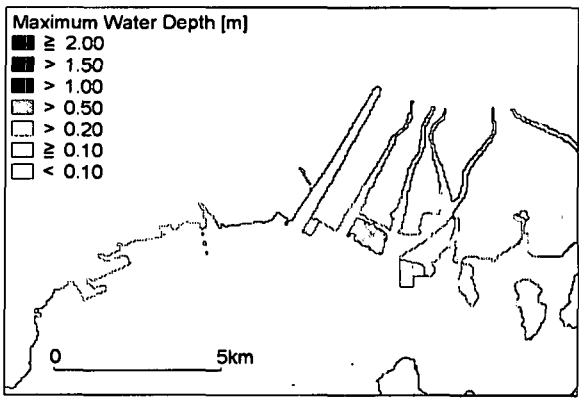


図-7 最大浸水深図（潮位のみ）

行った。使用した潮位偏差は、+40cmの異常潮位を考慮した結果である。氾濫解析には潮位と高潮の影響のみを考慮した。図-7は、この時の最大浸水深図である。具体的な氾濫状況を実測と比較するため、解析と実測の浸水面積比を地区ごとにまとめた(表-1)。なお参考のために実際の浸水面積を表-2に示す。

氾濫解析の評価は、廿日市・五日市地区、井ノ口地区、観音地区、江波沖、江波地区、吉島、出島・宇品地区の7つの領域ごとに行った。

五日市・廿日市地区及び井ノ口地区では浸水が無く実測の浸水域は再現されなかった。廿日市において浸水が無かったのは、潮位偏差を含む潮位よりも防潮堤の天端高さが高いことが原因である。実測では廿日市地区の埋立地で浸水が確認されていることを考えると、閘門の閉め忘れなどによる局所的な浸水や、越波による浸水があった可能性がある。

井ノ口地区では、護岸が無いにも関わらず、浸水が起きていないのは、地盤高が潮位よりも高いことに原因がある。この井ノ口地区では、海岸付近のみDL+5.0mとなっているが、隣接する地域はDL+4.0mである。地盤高の精度は1.0m刻みであることを考えると、四捨五入により標高データに50cm程度の誤差が生じ、地盤高を過大に評価している可能性がある。また、越波による浸水の影響が入っていないことも要因の一つと考えられる。

観音地区における浸水面積比は0.6であった。面積的には浸水域を過小評価しているが、越波の影響が含まれていないためと思われる。解析では、西側の西飛行場において護岸データが無く、地盤高に依存して浸水が発生したのと考えられる。南側及び東側の護岸がある部分からの浸水は確認されなかった。

江波沖側の出島部分の地区は地盤高DL+4.0mと低く、護岸も無いため全域が浸水している。実測においても同様であり、この地区においては浸水域を完全に再現することができた。

江波地区、吉島地区においては解析では浸水はなかった。実測の方も2~4ha程度の小さい浸水域であったことを考えると、概ね再現することができたと言える。

出島・宇品地区においては、出島南部の新規埋立地において浸水が確認された。しかし、埋立地での

実測の浸水データは無いため比較することはできなかった。一方、出島北側の防潮護岸はDL+4.8mの箇所があり、そこから浸水があったことが解析によって確認された。しかしながら、出島地区での地盤高はDL+5.0mであり、護岸を越流しうる潮位が発生していたにも関わらず、浸水が示されたのは北部のごく一部におけるDL+4.0mの地点のみであった。従って井ノ口地区と同様に、地盤の標高データに誤差がある可能性があるものと考えられる。

宇品及び仁保沖町まで広範囲な浸水が確認できるが、これは旦那町の低い防潮堤のある個所からの浸水である。宇品・出島地区での浸水を実測と比較すると浸水面積比で1.1であり解析結果の方が若干広範囲な浸水域を示していることが分かる。この原因としては、地盤データが1.0m単位の精度であり平坦な地形が多いことや、今回使用した氾濫解析手法では、複雑な市街地の構造物などの影響を取り入れることができず、実際の地形の影響が反映されていないことに起因するものと考えられる。ただし、図-7を見ると広範囲に渡る浸水域は何れも10~20cm以下の浸水深であることを考えると、実際の被害として考慮すべき浸水域はより狭い範囲であると考えられる。

以上の結果は波浪による越波の影響を含まず、潮位だけで解析を行ったものである。また、地盤高の精度が1.0mであることを考えると、井ノ口地区や出島地区におけるDL+5.0m地点では、実際よりも50cm程度低い標高を示している可能性もある。従って、地盤の標高データの誤差および波浪による越波の影響について検討する必要がある。

そこで、次に越波の影響と標高データの修正の両

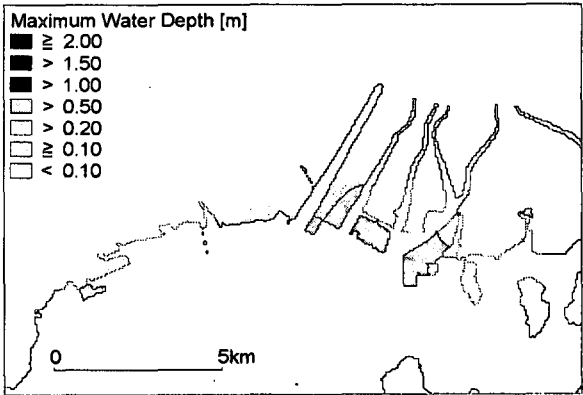


図-8 最大浸水深図(越波考慮・地盤変更)

表-1 浸水面積比(対実測)

浸水面積比	潮位のみ	越波考慮	防潮堤なし
廿日市・五日市	0.0	2.5	2.8
井ノ口	0.0	1.6	1.9
観音	0.6	1.5	1.4
江波沖	1.0	1.0	2
江波	0.0	5.1	9.4
吉島	0.0	0.0	173/0
出島・宇品	1.1	2.1	3.2

表-2 実測の浸水面積

浸水面積比	浸水面積(ha)
廿日市・五日市	45.0
井ノ口	117.0
観音	139.0
江波沖	76.0
江波	1.0
吉島	2.0
出島・宇品	142.0

者を考慮して解析を行った。標高データについては、防潮堤の天端高より地盤高の高いと思われるDL+5.0m地点について、50cm下げた地盤データを用いた。越波については、(3)で述べた手法を用いて水位に反映させて計算を行った。このときの最大浸水深の結果を図-8に示す。なお、波高は実測値を用いて計算値を修正して与えた。

地盤高を修正した井ノ口、出島・宇品の両地区とも、広い範囲で浸水が生じた。表-5の浸水面積比の結果を見ると、井ノ口地区では浸水面積比が1.6であり、図-8からも概ね実測の浸水域を再現することがわかる。

宇品地区での浸水は、宇品岸壁の一部からの浸水が確認されるが、実測の浸水域を完全には再現できなかった。この理由としては、実際の高潮来襲時において陸閘門が破損し、防潮堤の機能が発揮されなかった点が挙げられる。従って、陸閘門の損壊がない場合は、計算結果のように浸水は生じせず、宇品付近の浸水は、損壊した陸閘門からの浸水であったことが示された。

出島地区においてはほぼ実測の浸水域を再現している。ただし、丹那町からの浸水が大きく、浸水面積比では2.1と過大評価する結果となった。これらの原因は、排水機能を考慮していない点と、地形が平坦であるため浸水箇所からの水が実際よりも広範囲に広がることに起因すると考えられる。この点を勘案すると、概ね実測の浸水域は再現されたものと考えられる。

従って、天文潮位、高潮偏差、越波の影響および地盤高の修正を考慮した氾濫解析によって台風9918号来襲時の広島湾沿岸における高潮氾濫は再現できるものと考えられる。

最後に比較のために防潮堤がなかった場合に、どのような浸水が生じるか解析を行った。与えた計算条件は越波の影響と地盤高を修正したケースと同じである。その結果を図-9に示す。また、浸水面積比を、表-1に示す。現状の防潮堤がある場合の浸水域よりも、より広範囲に浸水域が広がることが見て取れる。全体的な浸水面積比で、実際の浸水域を概ね再現したと思われる越波を考慮した結果よりも、約2.8倍の浸水域を示した。従って、現状においてもT9918号のような台風が来襲したときでも、ある程度の高潮防御機能を発揮していることがわかった。

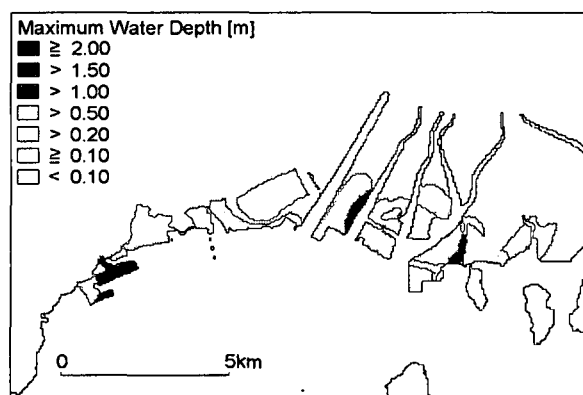


図-9 最大浸水深図（防潮堤の無い場合）

4. 結語

以上のことから得られた結論としては以下のとおりである。

- ・Myersの台風モデルから作成した風速場を用いて高潮計算から得られた偏差に、異常潮位を考慮することで、概ね実測の潮位偏差を再現することができた。
- ・WAMでは広島湾の波浪場を小さく見積もり、うまく再現することはできなかった。その原因については、さらに検討する必要がある。
- ・広島湾沿岸における高潮氾濫については、越波の影響と地盤高の修正を行うことで、概ね再現することができた。
- ・高潮氾濫解析により、防潮堤の低い箇所からの越流浸水や、越波による浸水箇所など、広島湾沿岸にわたって浸水の原因を把握することができた。
- ・防潮堤の無い場合の氾濫解析結果から、現状防潮堤でも、ある程度の高潮防御機能を有していることが確認された。

謝辞

最後に、本研究遂行に当たり、広島県空港港湾局、旧運輸省第三港湾建設局、同広島港湾空港工事事務所、旧建設省太田川工事事務所の各方面から多数の資料提供いただいた。ここに深く感謝申し上げる。

参考文献

- 1) 広島県広島港湾振興局・中電技術コンサルタント(株)：広島港浸水被害調査報告書，121p，1999
- 2) 山下隆男，山本圭介，土屋義人：伊勢湾，大阪湾・紀伊水道，土佐湾における異常潮位，高潮に及ぼす黒潮の影響，京都大学防災研究所年報，第31号 B-2，1988
- 3) Komen, G. I., S. Hasselmann and K. Hasselmann: On the existence of a fully developed windsea spectrum, J. Physic. Oceanogr., Vol.14, pp.1271-1285, 1984
- 4) The WAMDI Group: The WAM Model - A third generation ocean wave prediction model, J. Physic. Oceanogr., Vol.18, pp.1775-1810, 1988
- 5) 平尾博樹：閉鎖性湾内における浅海波浪推算モデル(SWAN)の適用性に関する研究，京都大学修士論文，2001
- 6) 武田誠：高潮の氾濫解析手法とその都市域への応用に関する研究，京都大学学位論文 1997
- 7) 井上和也：開水路非定常流とその遂行學への応用に関する研究，京都大学学位論文，pp.172-177 1986
- 8) 岩佐義朗，井上和也，水鳥雅文：氾濫水の水利の数値解析法，京都大学防災研究所年報，第23号 B-2，pp.305-317, 1980
- 9) 合田良実，岸良安治，神山 豊：不規則波による防護護岸の越波流量に関する実験的研究，港湾技術研究所報告，第14巻 第4号，pp.3-44, 1975
- 10) 高山知司，永井紀彦，西田一彦：4. 各種消波工による越波流量の減少効果，港湾技術研究所報告，第21巻 第2号，pp.151-205, 1982