

台風による高潮被害想定手法の開発

数値シミュレーションによる高潮の再現

はじめに

平成3(1991)年の台風第19号は、支払保険金5,679億円(史上第1位)¹⁾に上る被害を発生させ、保険業界に大きな衝撃を与えた。こうした巨大災害に対し保険業界が寄せる関心事の一つに、最大予想損害額(PML: Probable Maximum Loss)がある。巨大災害は事例が少なく、被災後に防災体制が強化される場合が多いため、統計による予測を適用しにくい。これを補い、現在～将来の防災体制下における被害の予測を行うには、シミュレーション技術が不可欠である。このため、当会では台風による被害想定を行うためのシミュレーション手法の開発に着手し、これまでに風災、水災に関する被害想定手法を確立した。高潮災害の被害想定手法の開発は、これに続くものである。(高潮についての解説は後掲の参考資料を参照。)

折しも、着手した直後の平成11(1999)年の台風第18号(本稿では以後、台風9918号と表記)は、支払保険金が3,147億円(史上第2位(見込み含む))¹⁾に上り、死者を伴う

ものとしては昭和60(1985)年の台風第13号以来、14年ぶりの高潮被害²⁾を八代海および周防灘において引き起こした。現在、海岸堤防、防潮堤や防波堤といった海岸保全施設設計の際の潮位は、原則として既往の最高潮位とするか、朔望平均満潮位に既往の最大潮位偏差を加えた高さとする³⁾となっており、確率の観点や可能最大での評価が行われていないにもかかわらず、近年大きな被害は生じていなかったためか研究者の関心も低く、見直されずに来てしまったが、あらためて考慮の必要があることを認識させられるものであった。

本研究は、数値シミュレーションにより高潮の再現を行い、越流等による水災被害想定手法を検討していくものであり、本稿では、これまで行った高潮シミュレーションの開発状況と台風9918号をモデルとした再現計算の結果について報告する。

1. 台風による高潮被害想定の流れ

図1.1のような流れで、数値シミュレーションによる計算を行う。計算手順は大き

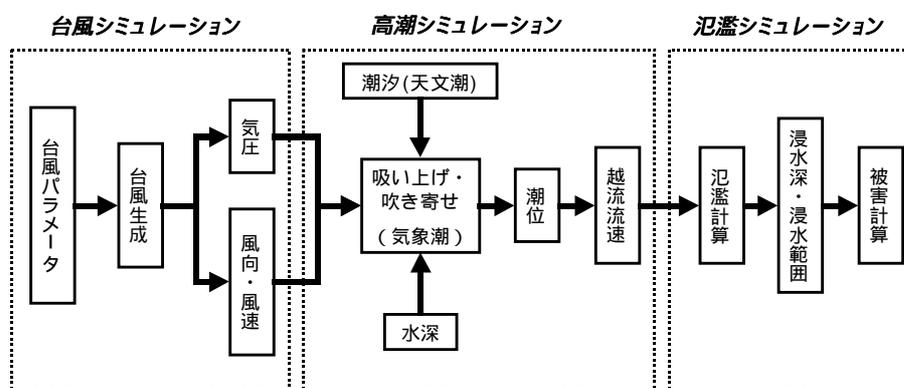


図1.1 高潮被害想定の流れ

く3つの部分に分かれており、台風通過時の気圧、風速・風向を算出する。気象要因、天文潮等を考慮に入れ海岸部の予想潮位を算出する。越流が発生する場合、その地点について越流流速を算出する。越流海水の氾濫計算を行い、浸水被害を算出、その結果をもとに高潮の再現期間や最大予想損害額、高潮危険度等を算出する。という手順を進めていく。なお、前述の通りとに相当する台風シミュレーション、氾濫シミュレーションは既往の研究で既に作成済みである。

2. 計算手法

2.1 台風シミュレーション⁴⁾

風災被害想定用に関与した台風シミュレーションを用いて高潮シミュレーションに入力する風場・気圧場の作成を行う。手法の詳細は既刊のRISK(No.60)の「モンテカルロシミュレーションを利用した台風の風速分布の算出」にて紹介しているため、ここでは概略を述べる。

2.1.1 初期入力データ

台風ベストトラックデータ(気象庁発表)の3時間毎のデータを1時間毎に補間して使用する。また、各地の海面気圧は地上気象観測データ(気象庁発表)を使用する。

2.1.2 客観解析

光田・藤井による台風域内の気圧場の客観解析手法⁵⁾を用いて、台風の諸元を決定する台風パラメータ(中心気圧、最大旋衡風速半径等)を求める。モンテカルロシミュレーションの場合はさらに、この客観解析値をもとに確率分布に従った仮想台風を作成し、台風パラメータを求める。

2.1.3 気圧と傾度風速の算出

得られた台風パラメータより、各地点における気圧と、台風の移動による補正を行った傾度風速を算出する。その際補間を行い、20分毎の値としている。

2.1.4 風速の算出

得られた傾度風速より、各地点の代表的な地表風速(10分間平均最大風速に相当)を算出する。なお、ここでは陸域の地表面の起伏度は考慮していない。

2.2 高潮シミュレーション

高潮シミュレーションの基本は、風・気圧による海水の流動を計算し、潮位偏差を算出する気象潮算出プログラムである。最終的な潮位は、潮汐による潮位変動を考慮する必要があるが、気象潮計算時に同時推算して直接潮位を算出する方法と、別途計算して後で気象潮と足し合わせる方法がある。それぞれにメリット・デメリットがあるが、本報告では後で足し合わせる方法を採用した。

2.2.1 基本方程式⁶⁾

洪水氾濫シミュレーション同様、運動方程式(式2.1)と連続式(式2.2)を基礎方程式とする2次元不定流モデルを使用する。外力として、気圧低下による水位上昇と風によるせん断応力を考慮する。

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial M}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{M^2}{D} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{MN}{D} \right) + gD \frac{\partial(\eta - \eta_0)}{\partial x} &= fN + \frac{\tau_s^{(x)}}{\rho w} - \frac{\tau_b^{(x)}}{\rho w} \\ \frac{\partial N}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{MD}{D} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{N^2}{D} \right) + gD \frac{\partial(\eta - \eta_0)}{\partial y} &= -fM + \frac{\tau_s^{(y)}}{\rho w} - \frac{\tau_b^{(y)}}{\rho w} \end{aligned} \right\} \quad (2.1)$$

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{\partial M}{\partial x} + \frac{\partial N}{\partial y} = 0 \quad (2.2)$$

ここで、

η : 水位上昇量

D : 全水深

η_0 : 気圧低下に対する水位上昇量

M, N : x, y 方向の単位幅あたり流量

f : コリオリ定数

$\tau_s^{(x)}, \tau_s^{(y)}$: 水表面に働く風の摩擦力の x, y 成分

$\tau_b^{(x)}, \tau_b^{(y)}$: 海底に働く摩擦力の x, y 成分

ρw : 海水の密度

である。

また、気圧低下に対する水位上昇量は、

$$\eta_0 = 0.991(1013 - p) \quad (2.3)$$

p : 気圧

せん断応力は、

$$\left. \begin{aligned} \tau_s^{(x)} &= a \tau_s^2 W_x \sqrt{W_x^2 + W_y^2} \\ \tau_s^{(y)} &= a \tau_s^2 W_y \sqrt{W_x^2 + W_y^2} \end{aligned} \right\} \quad (2.4)$$

$$\left. \begin{aligned} \tau_b^{(x)} &= w \tau_b^2 W_x \sqrt{W_x^2 + W_y^2} - \tau_s^{(x)} \\ \tau_b^{(y)} &= w \tau_b^2 W_y \sqrt{W_x^2 + W_y^2} - \tau_s^{(y)} \end{aligned} \right\} \quad (2.5)$$

a : 空気密度

w : 海水密度

τ_a : 海面摩擦係数

τ_b : 海底摩擦係数

W_x, W_y : x, y 方向の風速

: 定数

で表される。

2.2.2 数値モデル

Staggered leap-frog法を用い、プログラミングを行った⁷⁾。計算精度を保ちつつ、メモリ資源と計算時間の節約を図るため、沖合の格子間隔を広くとり、海岸に近づくにつれて順次細分化するネスティングを可能にしてある。本報告では、8km、2km、500mの3種の格子間隔を用い、境界条件は、陸側を壁条件(完全反射、遡上・越流は考慮しない)、沖側を放射条件(自由透過)とした。また、気象データの入力時間間隔が台風シミュレーションの仕様により20分毎となっているため、この間のデータは計算ステップ毎に線形補間している。

3 . ケーススタディ

3.1 概要

近年大きな潮位偏差を記録した台風である台風9918号についてシミュレーション計算を行い、各港湾の潮位を推算した。これと、実際に観測された潮位と比較して妥当性の検証を行った。

3.2 台風9918号の概要⁸⁾⁹⁾

平成11(1999)年9月17日に沖縄の南海上

で発生した熱帯低気圧は、19日午前9時に同海域で台風第18号となった。その後、次第に発達しながらゆっくりとした速さで北東へ進み、22日午前9時に沖縄本島の南西の海上で大型で非常に強い勢力となった。24日の早朝5時前に天草諸島を通過し、午前6時頃、強い勢力で熊本県北部に上陸、九州北部を横断した後周防灘に抜け、午前9時前、勢力を維持したまま山口県宇部市付近に再上陸した。この間、西日本各地で大雨、暴風、竜巻そして高潮による被害を引き起こした。その後、日本海に抜けた台風は、25日午前2時頃、北海道渡島半島付近に再上陸し、午後12時、網走沖で温帯低気圧に変わった(図3.2)。

南西諸島や九州地方、中国地方では、接近・通過時の台風の勢力が強かったため南よりの風が強く吹き込み、30m/sを越える暴風を観測した所があった。風速の主な観測値は、沖縄気象台で58.9m/s(35.2m/s)、広島地方気象台で49.6m/s(32.1m/s)、鹿児島地方気象台で53.1m/s(30.8m/s)、熊本県牛深測候所で66.2m/s(27.7m/s)の最大瞬間風速(かっこ内は10分間平均風速の最大値)を観測した。この強風によって各所で高潮が発生したが、この日が大潮にあたる時期であった上、台風の通過が満潮前後の時間帯に重なったため、熊本県の八代海北部沿岸の松合地区では死者12名の惨事となり、周辺の干拓地の多くは流入した海水による塩害を受けた。また、山口県の周防灘沿岸では死者こそ出なかったものの、護岸の破損が多発し、宇部空港が冠水により使用不能になる等、多くの被害が生じた。

なお、台風9918号の諸元ならびに被害状況の詳細は既刊のRISK(No. 54)にて報告されている。



図3.2 台風9918号の経路

3.3 使用データの諸元

台風の再現を行うにあたっての台風初期データとしては、気象庁のベストトラックデータおよび地上気象データを使用した。

高潮計算用の海底地形データは、(財)日本水路協会発行の「日本近海海底地形デジタルデータ(500m、1000mメッシュ)」と、国土地理院発行の「数値地図250mメッシュ(標高)」をもとに作成した。また、潮汐データは、(財)気象業務支援センター発行の「平成11年潮位表」を使用した。

3.4 計算領域と潮位比較点

計算領域は図3.4.1の通り、西日本とその周辺海域である。領域全体を8kmメッシュ、西日本部分を2kmメッシュ、潮位記録点を設定している八代海、関門海峡、広島湾については500mメッシュを配置した。

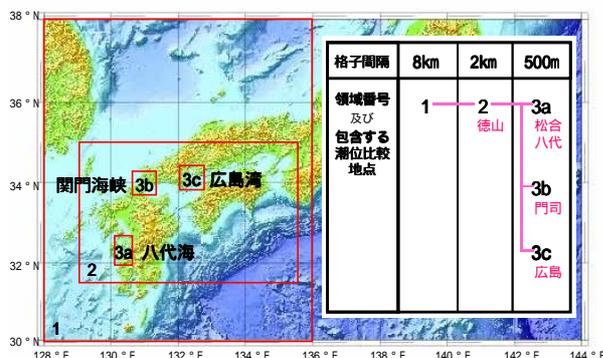
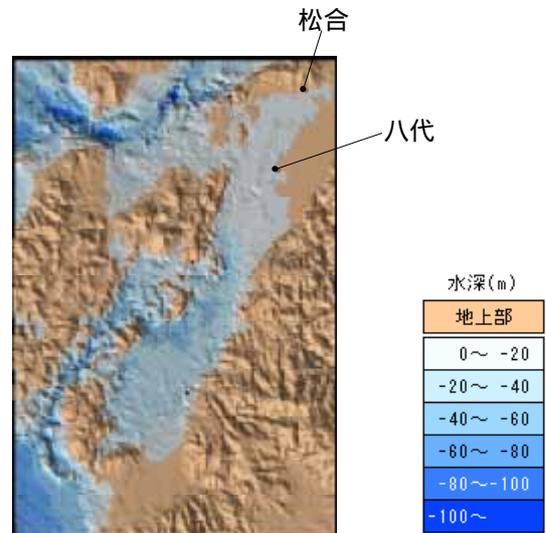
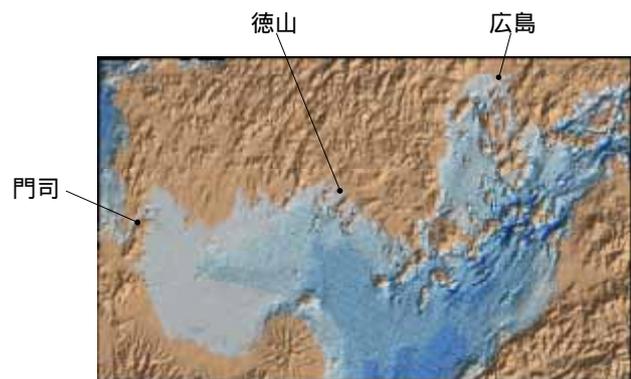


図3.4.1 計算領域

潮位比較点は、瀬戸内海西部の験潮所と、人的被害の生じた松合に近い八代港とした。潮位比較点の場所とその周辺地形を以下の図3.4.2に示す。



(a)八代海



(b)瀬戸内海西部

図3.4.2 潮位比較点と周辺地形

3.5 計算結果

計算は、初期水位を全域偏差0mとし、1999/09/23 23:40 ~ 09/25 00:00 (JST)の期間について行った。以下に潮位偏差の各港湾の実測値との比較や分布状況を示す。なお、本報告では、潮位はTP^{注)}基準で表記する(図・表含む)。

注) Tokyo Peil : 東京湾平均海面の略。国内の高さの基準で、標高0mを指す。

3.5.1 各地の潮位と潮位偏差の比較

図3.5.1に1999年9月24日の各地の潮位状況を示す。左側は天文潮位¹³⁾と観測潮位の比較、右側はシミュレーション結果より求めた潮位偏差と観測値の比較である(松合は潮位偏差の計算値のみ)。観測潮位データは、門司、徳山、広島は海上保安庁水路部¹⁰⁾、八代は運輸省港湾局^{11)注)}の各験潮所の

の験潮記録を使用した。

注) 現・国土交通省港湾局。文献11のp.22のプロットを引用。

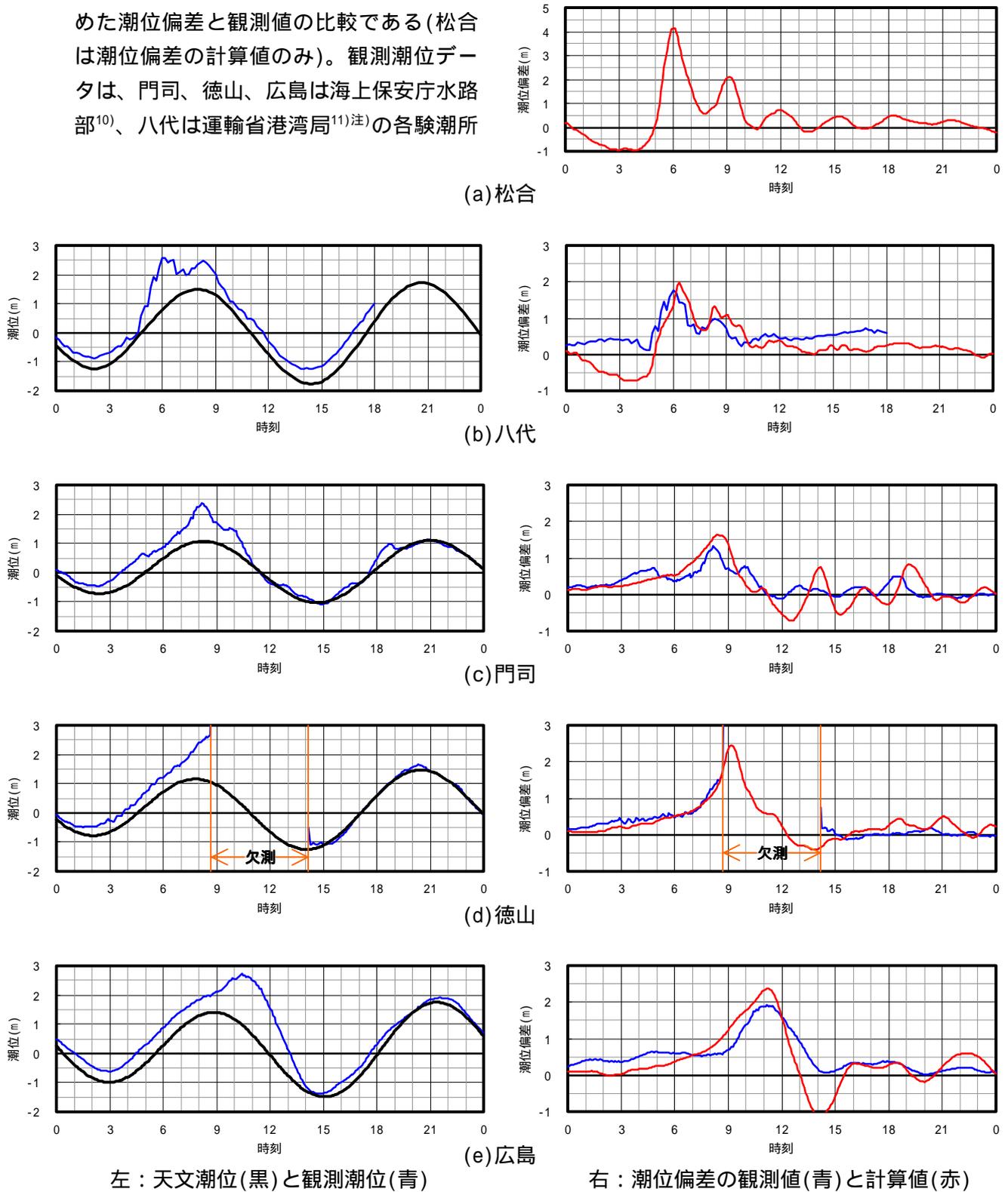


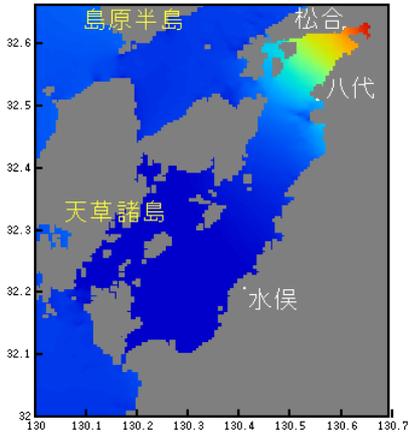
図3.5.1 各地の潮位と潮位偏差の比較

3.5.2 各時刻の潮位偏差の分布

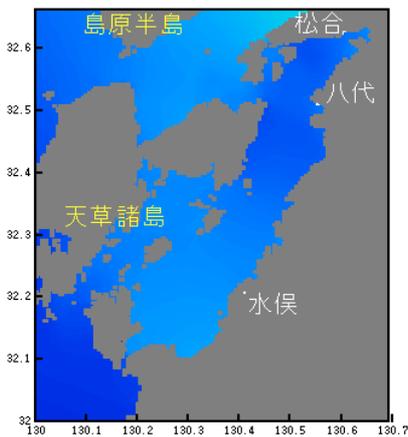
図3.5.2にシミュレーション結果より求めた9月24日の6時から9時の八代海と、7時

から11時の瀬戸内海西部の各時刻における潮位偏差の分布を示す。

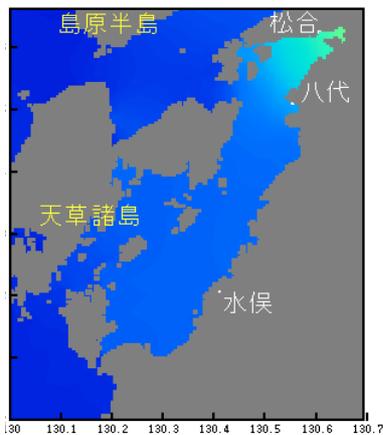
1999/09/24 06:00 (JST)



1999/09/24 07:30 (JST)

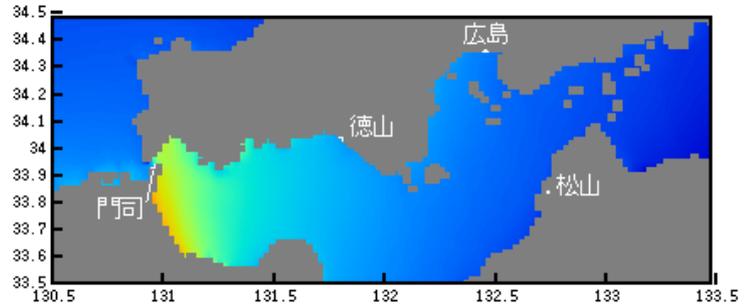


9/09/24 09:00 (JST)

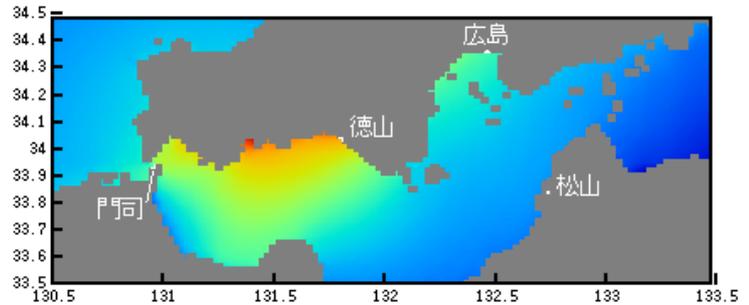


(a)八代海

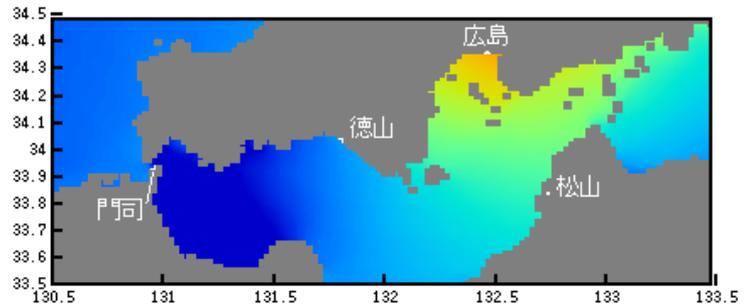
1999/09/24 07:00 (JST)



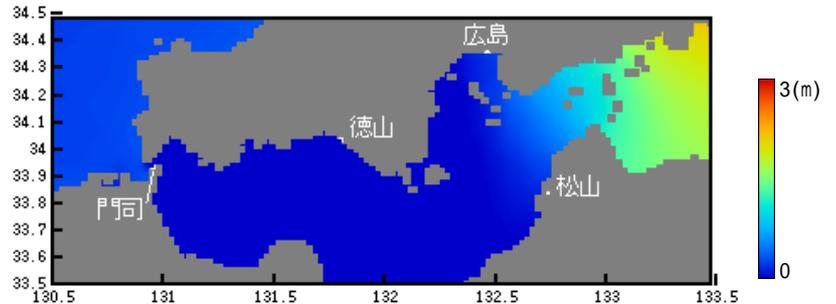
1999/09/24 09:00 (JST)



1999/09/24 11:00 (JST)



1999/09/24 13:00 (JST)



(b)瀬戸内海西部

図3.5.2 各時刻の潮位偏差の分布

3.5.3 最大潮位偏差の分布

図3.5.3にシミュレーション結果より求めた9月24日の西日本主要部の最大潮位偏差

差の分布を示す。

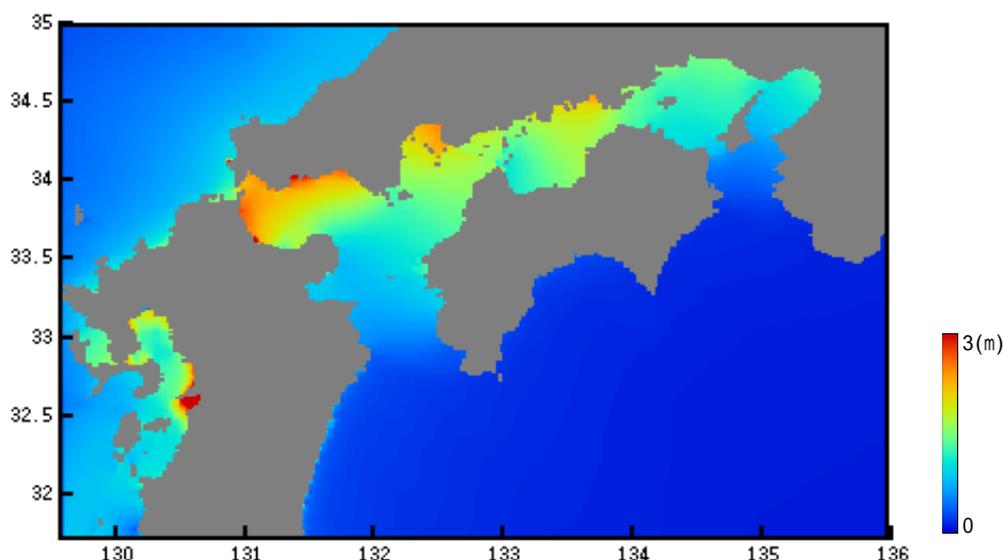


図3.5.3 最大潮位偏差の分布

3.6 考察

図3.5.3の最大潮位偏差の分布を見ると、基本的に八代海、周防灘、広島湾といった台風コース東側に位置し、北東側が陸になる閉じた場所で偏差が大きくなっているのがわかる。これは、実際に高潮被害が発生した地域と概ね一致しており、台風9918号による高潮発生地の一般的な特徴がわかる。

八代海についてシミュレーション結果を見ると、図3.5.1(a)の松合では、6時付近に最大のピーク(4.1m)があり、その後約3時間おきにピークが減衰しつつ並ぶのが特徴的である。松合には漁港はあるが、潮候改正数(周囲の主要港の天文潮位から換算を行うためのパラメータ)が示されていない⁷⁾ため、天文潮位を三角、八代の6時頃の値から推測すると、0.8mほどであると思われる、合わせて4.9mとなる。験潮所は設置されていないため当日の潮位状況は不明であるが、痕跡高より最大潮位は4.5m¹¹⁾¹²⁾とされており、これと比べると若干過大評価

である。しかし、海岸堤防(国道兼用・天端高4.8m)上を越えていた痕跡¹²⁾や住民の証言もある事から、誤差の範囲と考えると良いと思われる。また、約3時間おきのピークであるが、これは八代海のような閉鎖性の地形に起因する固有振動が表現されていると考えられ、1つ目のピークである高潮が、湾内で反射して副振動になっていると思われる。この様子を図3.5.2(a)の八代海の潮位偏差分布で見ると、最初のピークにあたる6時は松合を含む北端部の偏差が著しく大きくなっており、それが1時間半後の7時30分には南端部に移り、反射して9時に戻ってくるのが見て取れる。そして、図3.5.1(b)の八代での観測値と比べてもピーク時刻、偏差とも概ね一致することから、海域の特性を良く表現できていると思われる。

瀬戸内海について図3.5.2(b)を見ると、周防灘を通過した台風によって引き起こされた高潮が、台風の移動とともに瀬戸内海

を東へ伝播していく様子がわかる。このことは図3.5.1(c,d,e)において最大偏差時刻が東に位置するほど遅れていくことからもうかがえる。また、偏差自体は若干過大評価気味であるものの、時刻は観測値と概ね一致しており、高潮の挙動を再現できているものと思われる。

全体的に最大偏差となったピークの後、強いマイナスの偏差が生じているが、これは、2次元不定流モデルの特性によるものと思われる。被害想定という点ではマイナスの偏差は考慮の必要がないため、純粋に水理学的な立場で行われるシミュレーションと違い、ここは無視して良いと考える。

4．おわりに

高潮シミュレーションの精度は、海底地形と、駆動力となる風場の再現性に依存している。湾口・後背地に山岳を有するような場所では、地上地形による局所的な風場が予想されるが、これが高潮の挙動に大きく影響するかどうかについては、今後検証を行う予定である。また、地形に関しては、海岸、特に都市部の埋め立て地に囲まれた港湾部では区域毎に固有振動を持つため、その影響を計算に入れるならば、それを再現できるだけの解像度での計算が必要になる。

さらに、大都市周辺の港湾部では多くの場合地盤沈下が起こっており、計画通りの地盤・堤防高を確保できていない可能性がある。越流・氾濫計算を行う上で、精度を高めてゆくには、これらの問題をクリアしていかなばならず、現状そして将来の正確な状況を表すデータの入手が不可欠であるが、近年になって、行政機関が保有する地理情報を横断的に管理する気運が高まってきており、入手できるようになることを期待している。

今後は、各地の港湾特性を考慮して、高潮被害をもたらす台風の想定を行い、予想潮位を計算した上で、氾濫シミュレーションにより氾濫被害等を算出していく予定である。

(研究部研究第一グループ)

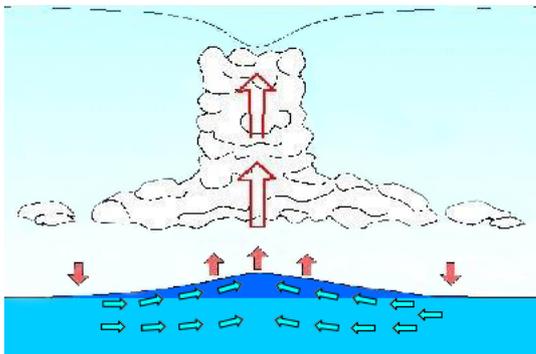
【参考】高潮について

1 高潮とは²⁾⁶⁾

高潮とは、台風や強い低気圧等の気象要因によって、潮位が異常上昇する現象である。発生主なメカニズムは、以下の2つに分けられる。

(1)気圧低下による吸い上げ

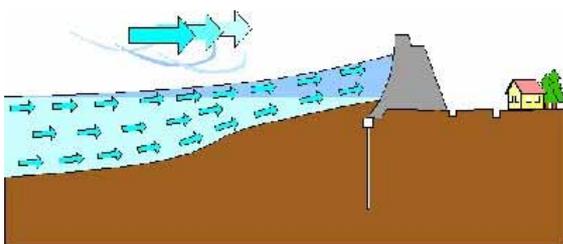
台風の中心気圧が低いため、その部分の空気が海面を吸い上げるように作用する結果、海面が上昇する。概ね、気圧が1hPa低くなると、海面は約1cm上昇する。



気圧低下による吸い上げ

(2)風による吹き寄せ

強風が沖から海岸に向かって吹くと、海水が吹き寄せられ、沿岸部で海面が上昇する。



風による吹き寄せ

両図とも国土交通省ホームページ²⁾より引用

さらに、強風下では大きな波(うねり)も発生するため、波浪による海面の上昇効果も加わって、潮位は堤防の下にもかかわらず越波による浸水が起きるといった場合がある。

2 発生しやすい場所²⁾

風による吹き寄せ効果は、水深が浅い海域ほど、また、風上に開けている湾奥ほど大きくなる。また、V字谷の地形や急に浅くなる場所等で局所的に増幅しやすく、津波危険との類似点も多い。日本では東京湾・伊勢湾・大阪湾の3大港湾と有明海、周防灘がこうした場所にあたる。

3 高潮の大きさ⁶⁾¹³⁾

潮位自体は、静穏時でも天体の影響により潮の満ち引き(潮汐)として常に変動しており、この潮汐のみを考えた理論的な潮位変動を「天文潮」と呼ぶ。これに対し気象要因によって起きる潮位変動を「気象潮」と呼ぶ。高潮の大きさそのものを表す尺度は、この気象潮による潮位上昇分を抽出した「潮位偏差」であるが、危険度を算出する上では全体としての潮位が問題となる。満潮時と干潮時の差は場所によっては5mにも及ぶ場合があり、高潮が満潮時に発生した場合は大きな脅威となる。

4 過去の主な高潮災害²⁾

海岸の整備状況が未熟であった1960年代頃まで、強力な台風が来襲する度に高潮災害が発生していた。次頁に日本の主な高潮災害を記す。戦後しばらくの間は特に台風の「当たり年」が多く顕著な被害が度々発生しているが、1961年の第2室戸台風を最後に、大きな高潮災害は発生していない事がわかる。このことが結果的に、被災の記憶・経験の伝承から地域住民を遠ざけることとなり、防災のソフト面の後退を招いているとも考えられる。

日本における20世紀中の主な高潮災害

年/月/日	主な被害区域	最大潮位 偏差(m)	人的被害(人)			建物被害(戸)			備考
			死者	負傷者	行方不明	全壊	半壊	流失	
1917/10/01	東京湾	2.1	1,127	2,022	197	34,459	21,274	2,442	
1927/09/13	有明海	0.9	373	181	66	1,420		791	
1934/09/21	大阪湾	2.9	2,702	14,994	334	38,771	49,275	4,277	室戸台風
1942/08/27	周防灘	1.7	891	1,438	267	33,283	66,486	2,605	
1945/09/17	九州南部	1.6	2,076	2,329	1,046	58,432	55,006	2,546	枕崎台風
1950/09/03	大阪湾	2.4	393	26,062	141	17,062	101,792	2,069	ジェーン台風
1951/10/14	九州南部	1.0	572	2,644	371	21,527	47,948	3,178	ルース台風
1953/09/25	伊勢湾	1.0	393	2,559	85	5,985	17,467	2,615	台風13号
1959/09/26	伊勢湾	3.4	4,697	38,921	401	38,921	113,052	4,703	伊勢湾台風
1961/09/16	大阪湾	2.5	185	3,879	15	13,292	40,954	536	第2室戸台風
1970/08/21	土佐湾	2.4	12	352	1	811	3,628	40	台風10号
1985/08/30	有明海	1.0	3	16	0	0	589	-	台風13号
1999/09/24	八代海	3.9	12	10	0	52	99	-	台風18号

国土交通省ホームページ²⁾より引用

【参考文献】

- 1) (社)日本損害保険協会：日本の損害保険 ファクトブック2001, (社)日本損害保険協会, p.86, 2001.
- 2) 国土交通省：高潮防災のために, <http://www.mlit.go.jp/river/kaigandukuri/takashio/Index0.htm>, 2001.
- 3) 海岸保全施設築造基準連絡協議会：海岸保全施設築造基準, (社)全国海岸協会, 1987.
- 4) 損害保険料率算定会：RISK No.60, 損害保険料率算定会, pp.15-22, 2001.
- 5) 藤井健：台風域内の気圧場の客観解析手法, 京都産業大学論集, 第4巻, 第1号, pp.77-90, 1974.
- 6) 土木学会 水理委員会：水理公式集[平成11年版], pp.485-488, (社)土木学会, 1999.
- 7) 土木研究所 河川部総合治水研究室：2次元不定流モデルによる氾濫解析, 土木研究所, 1992.
- 8) 損害保険料率算定会：RISK No.54, 損害保険料率算定会, pp.1-21, 1999.
- 9) 気象庁監修：2000年版 気象年鑑, pp.143-146, 大蔵省印刷局, 2000.
- 10) 海上保安庁水路部：リアルタイム験潮データ, http://www.jhd.go.jp/cue/ENGAN/real_time_tide/htm/kck_main.htm, 1999.
- 11) 桂順治 他：台風9918号に伴う高潮の発生と竜巻の発生・発達と被害発生メカニズムに関する調査研究, pp.1-59, 平成11年度科学研究費補助金(特別研究促進費)研究成果報告書, 2000.
- 12) 土木研究所 河川部海岸研究室：高潮災害に関する研究, 土木研究所, 2001.
- 13) 気象庁：平成11年 潮位表, (財)気象業務支援センター, 1998.