

周防灘海域における台風 9918 号による高潮被害および 危険度判定手法について

佐藤孝夫* ・山本 悟** ・橋本典明***・平石哲也***
北澤壮介****・松島健滋*****・大川郁夫*****

1. はじめに

大型で強い台風 9918 号は 1999 年 9 月 24 日未明, 九州南部ほぼ全域を暴風域に巻き込みながら北上し, 午前 3 時ごろ甕島を通過し, 同 6 時ごろ熊本県北部に上陸, 九州北部を横断して周防灘西部海域を抜け, 山口県宇部市に同 8 時ごろ再上陸したあと日本海に抜けた。この間, 九州・山口県各地域で既往最高潮位程度を越える高潮を記録し, 異常潮位と波浪により防波堤や護岸の滑動, 倒壊など港湾・海岸施設に甚大な被害を与え, 背後地にも大きな被害を生じさせた。

本研究では, まず, 今回の高潮被害の特性について検討し, 高潮シミュレーションによる台風 9918 号高潮偏差の再現計算を実施した。さらに, モデル台風による周防灘海域の高潮偏差予測計算を行い, この結果を利用した高潮災害危険度判定システムの提案を行った。

2. 台風 9918 号による高潮被害の特性

台風 9918 号による高潮災害は鹿児島湾, 八代海, 周防灘海域において顕著であった。被害は港湾漁港施設に多く, この他に山口宇部空港や周南流域下水道終末処理場などが高潮と波浪により甚大な被害を受け都市機能が麻痺した。

表一は周防灘西部における台風 9918 号通過時の気象・海象観測記録である。いずれも大きな値を示しているが, 特に潮位は既往最大値に近い値を記録した。台風 9918 号は九州上陸後も勢力が強かったことが伺える。しかし, 台風の勢力, 規模としては, 表二に示すように台風 9919 号 (りんご台風) の方がさらに上回っている。

今回の台風 9918 号が周防灘沿岸に大きな被害をもたらした原因は, ①大潮満潮時と台風の通過時刻が重なり, 潮位が最も上昇する最悪の条件となったこと (図一), ②周防灘西部において東寄りの強風が吹き続けたこと

(図二に示す松山観測所では 25 m/s 以上の東風が約 2 時間半にわたって吹いていた), ③荇田沖合において周期 8.1 s, 有義波高 3.46 m の波が観測されており, 台風により発生した外洋性の高波が豊後水道から進入し, 瀬戸内海沿岸で発生した高波と合成されて設計波を越える波高が発生した可能性があることなどが考えられる。

表一 台風 9918 号通過時の気象・海象

項目	観測場所	起時	観 測 値
風	荇田港沖合	7:00	最大風速 : 33.0 m/s 風向 : NE (8:00 以降風速は欠測)
	松山観測所	7:00	最大風速 : 39.6 m/s 風向 : E
波浪	荇田港沖合	8:00	有義波高 : 3.46 m (70 年確率) 周期 : 8.1 s 波向 : ESE
	荇田港	7:37	実測値 : +5.58 m 予測値 (天文潮位) : +3.57 m 既往最大値 : +5.72m (S25.9.13)

表二 台風 9918 号と 9919 号の比較

項 目	台風 9918 号	台風 9919 号
気象官署で観測された最大瞬間風速	66.2 m/s (牛深)	58.9 m/s (広島)
暴風域 (25 m/s 以上の風域) の最大範囲	200 km	390 km
強風域 (15 m/s 以上の風域) の最大範囲	650 km	750 km
九州上陸時の中心気圧	950 hPa (9/24 6 時)	940 hPa
〃 中心付近の風速	40 m/s (9/24 6 時)	50 m/s
〃 移動速度	45 km/h	50 km/h

3. 高潮推算モデル

(1) 基本的考え方

高潮推算では, 気圧低下による海面の吸い上げおよび強風による海水の吹き寄せの 2 つの効果をモデル化した。台風の気圧分布については Myers の式を用い, 台風により発生する風は, 気圧差に起因する傾度風と台風が移動することによって生じる風の成分を合成して与えた。

(2) 高潮推算の基礎方程式

高潮の伝播は, 連続の式と運動方程式によって記述できる。これらを鉛直方向 (z 方向) に積分し, 整理する

* 正会員 工修 運輸省第四港湾建設局
** 運輸省第四港湾建設局
*** 正会員 工博 運輸省港湾技術研究所
**** (財)沿岸開発技術研究センター
***** (財)沿岸開発技術研究センター
***** (株)東京久栄 環境水理部

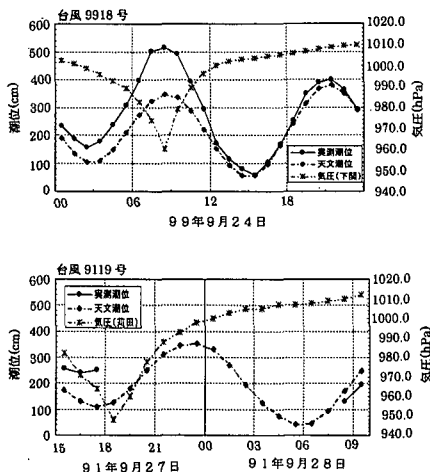
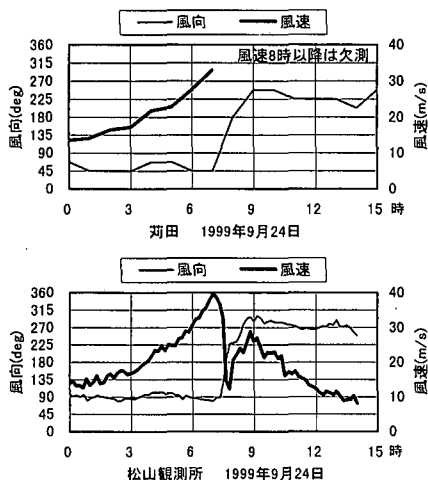


図-1 苅田港沖合における潮位と気圧の経時変化



注1: "苅田"は苅田港沖合の波浪観測点(地上10m)。“松山観測所”は苅田港北側埋立地の北東端(地上30m)に位置する。
注2: 風向は北を0degとして右回りに風が吹いてくる方向を示す。つまり、90degは東風、270degは西風である。

図-2 風向・風速の経時変化

と次式が得られる。

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{\partial M}{\partial x} + \frac{\partial N}{\partial y} = 0$$

$$\frac{\partial M}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{M^2}{D} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{MN}{D} \right) = fN - gD \frac{\partial \eta}{\partial x} - \frac{D}{\rho_w} \frac{\partial p_0}{\partial x} + \frac{\tau_{sx} - \tau_{bx}}{\rho_w} + A_h \left(\frac{\partial^2 M}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 M}{\partial y^2} \right)$$

$$\frac{\partial N}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{MN}{D} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{M^2}{D} \right) = -fN - gD \frac{\partial \eta}{\partial y} - \frac{D}{\rho_w} \frac{\partial p_0}{\partial y} + \frac{\tau_{sy} - \tau_{by}}{\rho_w} + A_h \left(\frac{\partial^2 N}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 N}{\partial y^2} \right)$$

$$M = \int_{-h}^{\eta} u dz = u(h + \eta) = uD$$

$$N = \int_{-h}^{\eta} v dz = v(h + \eta) = vD$$

$$\tau_{sx} = \rho_a C_D W_x \sqrt{W_x^2 + W_y^2}, \tau_{sy} = \rho_a C_D W_y \sqrt{W_x^2 + W_y^2}$$

$$\tau_{bx} = \frac{\rho_w g n^2}{D^{1/3}} M \sqrt{M^2 + N^2}, \tau_{by} = \frac{\rho_w g n^2}{D^{1/3}} N \sqrt{M^2 + N^2}$$

ここに、 u, v :それぞれ x, y 方向の流速成分、 h :静水深、 η :静水面から上向きの水面偏差、 f :コリオリ係数、 g :重力加速度、 p_0 :海表面での大気圧、 ρ_w :海水密度、 ρ_a :大気密度、 A_h :水平渦動粘性係数、 C_D :抗力係数、 W_x, W_y :それぞれ海面上 10 m の風速、 n :Manning の粗度係数である。

(3) 計算メッシュ

計算メッシュは 16200 m の第 1 領域から順次 3 分割していき、最小 200 m 間隔まで設定した。

4. 高潮シミュレーションによる台風 9918 号高潮偏差の再現

周防灘における台風 9918 号による高潮再現計算を実施したところ、本来のモデルによる計算では、台風経路の西側に当たる周防灘西部海域での高潮偏差が実測に比べて小さい傾向になった。これは、周防灘西部における風の再現が不十分であったためである。そこで、風の場の算定式における吹き込み角および傾度風を海上風に変換する係数 ($c1$ および $c2$) を図-3 のように時間的に調整して再現性を確保した。すなわち、推算風速を苅田および松山観測所の観測値に合うように $c1$ および $c2$ を最大 1.0 まで変化させ、風向についても周防灘海域内について補正を行った。その結果、図-4 に示すように高潮偏差の再現が可能となった。

周防灘西部で推算風速が観測値と一致しにくい原因として、以下のような要因が挙げられるが、現在のところ特定はできていない。①周防灘が周囲を複雑な陸上地形で囲まれた海域であり、台風に伴う風はこれら陸上地形の影響を受けていたことが考えられる。②さらに、周防灘は東西に長い海域であり、台風の進行方向に直交する方向の風が重要であることが現象の再現をさらに難しくしている。③また、周防灘に台風が来襲した時には、台風は九州を横断した後であるため、台風の形がくずれて風の分布も歪んでいた可能性がある。

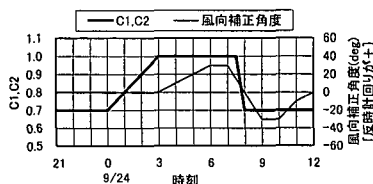
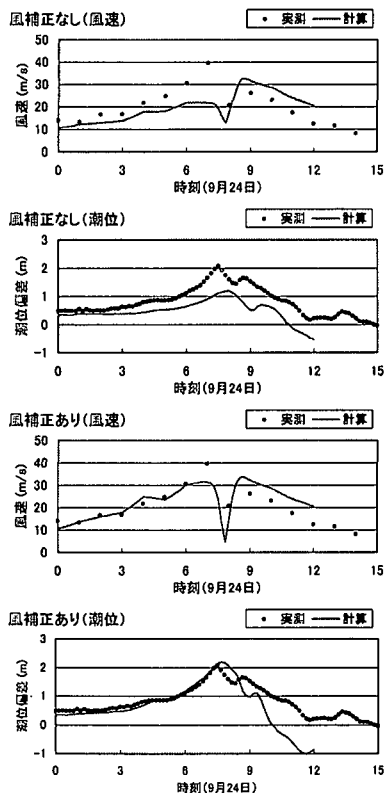
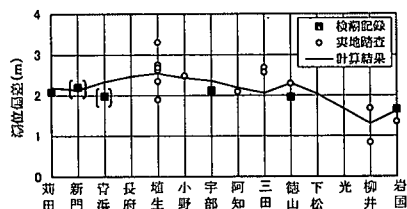


図-3 推算風速算定のための係数補正調整図



(注) 風速は菊田松山地区北東端の松山観測所、
潮位偏差は菊田港の値。

図-4 風の補正



(注) 新門司, 長門の検潮記録は欠測しているピーク付近を補完した推定値である。

図-5 台風 9918 号による高潮偏差の再現

今後の課題として、周辺陸上地形の影響等を取り込んで精度良く風を再現できるモデルへの改良が必要であろう。

5. 高潮災害危険度判定システムの提案

(1) 危険度の検討方法

前章で示したように、高潮推算モデルの精度向上が今後も必要であるが、一方で、台風 9918 号に伴う高潮により熊本県不知火町松合地区において尊い人命が失われたような悲劇を繰り返さないために、高潮による危険度を予測できるシステムの一日も早い構築が望まれる。

そこで、多くのモデル台風を設定して、それによる高潮偏差予測値を蓄積することにより、危険度を予測する手法を提案する。モデル台風の設定に際しては、実際に来襲した台風をいくつか選定し、この原型モデル台風経路を東西にずらしていくこととした。

なお、モデル台風による高潮推算時には、9918 号再現計算時のような風況に係る諸係数の補正は行っていない。

(2) モデル台風の設定

まず、過去に周防灘近辺を通過した台風の中から、モデル台風の原型となる台風を選定した。図-6 に主な台風の中心気圧の比較を、表-3 には周防灘における高潮偏差の観測値を示す。

この中で、台風 9918 号及び周防灘台風は、台風の強さは顕著ではないが、大潮の満潮時と重なって周防灘で大きな災害をもたらしたことから原型モデル台風を選定した。北緯 32°~34° における中心気圧を比較すると、室戸台風、伊勢湾台風、第二室戸台風の順で勢力が強い。しかしながら、これらの台風はその経路が周防灘からは大きく東に外れているため、今回のモデル台風の対象から除外した。これら以外では、枕崎台風、りんご台風が勢力が強い。枕崎台風は周防灘東部を通過したため、顕著な高潮の記録は残されていないが、その勢力の強さから原型モデル台風を選定した。また、りんご台風は周防灘通過時の天文潮位が低かったために高潮被害は免れたが、大きな潮位偏差を記録している台風であり、これも原型モデル台風を選定した。

以上のことから、表-4 及び図-7 に示す 4 台風を原型モデル台風として選定した。

この 4 台風について本来の台風経路をベースに、その経度を 0.25° (北緯 34° で約 23 km) 単位でずらして高潮計算を行い、それぞれのコースについて、各地点での潮位偏差全てを比較し、その中の最大値を抽出した。

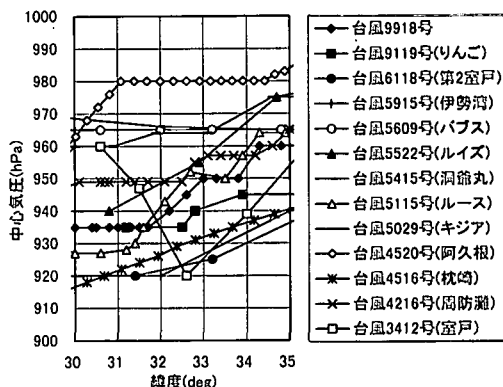


図-6 台風中心気圧の比較

表-3 主な台風による高潮偏差

[単位: cm]						
台風名	苅田	苅浜	宇部	三田尻	徳山	柳井
台風 4216 号 周防灘	150	166	163			
台風 4516 号 枕崎	129					
台風 5029 号 ギジア		131		150	100	80
台風 5115 号 ルース		124				71
台風 5412 号 ジェーン				112	131	105
台風 5415 号 洞爺丸			62	129	113	80
台風 5522 号 ルイズ			158		153	
台風 5609 号 パブス			127		96	
台風 5612 号			88	89	73	
台風 5914 号 宮古島		47				
台風 6515 号	134				103	
台風 9119 号 りんご	190	244	193		162	
台風 9918 号	207	197	211		195	

表-4 原型モデル台風の選定

原型モデル台風	主な選定理由
台風 9918 号	大潮の満潮時と重なって大きな災害をもたらした
台風 9119 号(りんご)	勢力が強く大きな潮位偏差を記録している
台風 4516 号(枕崎)	周防灘付近を通過した台風の中では最大勢力
台風 4216 号(周防灘)	大潮の満潮時と重なって大きな災害をもたらした

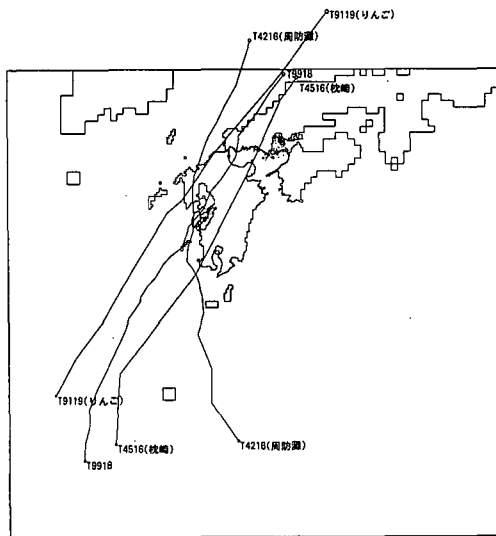
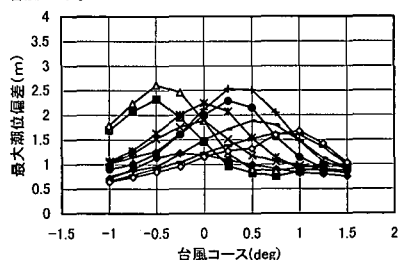


図-7 原型モデル台風の経路

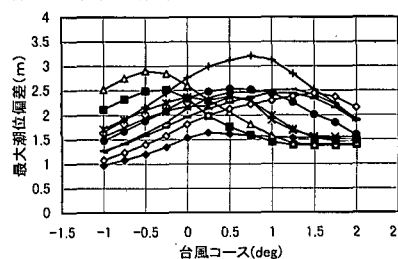
(3) 計算結果

図-8 にモデル台風コースと最大潮位偏差の関係を示す。台風接近前に、台風勢力、規模等から、類似したモデル台風の型を当てはめ、進行速度や偏西風の強さ等から台風のコースと来襲時刻を予測することにより、天文潮と偏差を足し合わせ、どの地区が危険であり、どの程度の高潮が発生するかを予測し、危険度を判定することが可能になると考える。なお、図-9 は、周防灘において

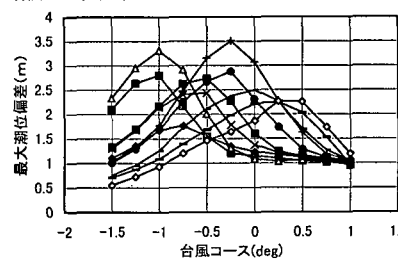
台風 9918 号



台風 9119 号(りんご台風)



台風 4516 号(枕崎台風)



台風 4216 号(周防灘台風)

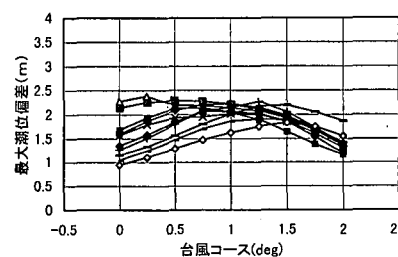
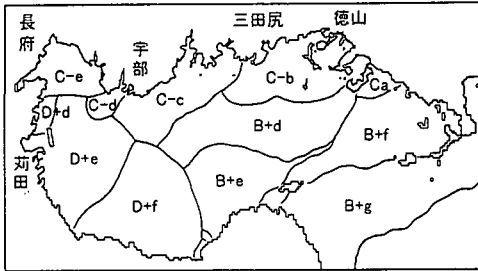


図-8 モデル台風コースと最大潮位偏差

どの台風がどのコースを通過した時に危険であるかを平面的に示したものである。また、図-10 は今回検討した全モデル台風による最大潮位偏差の平面分布を示している。この結果は台風 9918 号による被災箇所とほぼ一致している。

(4) 高潮災害危険度判定システム

今回の検討ではモデル台風の原型として、過去に来襲した 4 つの台風を選定し、高潮の危険度を算定した。これらを整理すると、図-11 に示すような高潮災害危険度判定システムの構築が可能となる。すなわち、モデル台風による計算値をデータベースとして保存し、実際の台風の来襲時にデータベースの中から類似のモデル台風



(注) 図中の英大文字は台風の種類を、小文字はコースを表している。小文字の符号は“-”が西側のコースを、“+”が東側のコースであることを表している。

大文字の意味		小文字の意味	
記号	原型台風の種類	記号	台風コース
A	台風9918号	a	元来の台風コース
B	台風9119号(りんご台風)	b	0.25° 経度をずらしたコース
C	台風4516号(枕崎台風)	c	0.5° "
D	台風4216号(周防灘台風)	d	0.75° "
		e	1.0° "
		f	1.25° "
		g	1.5° "

図-9 最も危険な台風コース

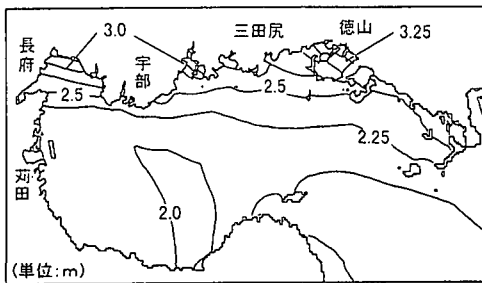


図-10 全モデル台風による最大潮位偏差

を抽出する。そして、その最大偏差を沿岸での予測値として最高潮位を来襲前に予測するものである。

これによって簡便に高潮危険度が予測でき、速やかな対策を取って人的被害を最小限に食い止めることに貢献できると考える。

6. 結 論

本検討の主たる結果を以下に示す。

(1) 台風 9918 号による高潮被害の特性：高潮と波浪により多くの港湾漁港施設が甚大な被害を受け都市機能が麻痺した。今回の高潮被害は、大潮満潮時と台風の来襲時間が重なり、潮位が最も上昇する最悪の条件となったこと、周防灘西部において東寄りの強風が吹き続けたこと、台風により発生した外洋性の高波が豊後水道から進入し、瀬戸内海沿岸で発生した高波と合成されて想定外の波浪が発生した可能性があることなど、複合的な要因により周辺地域に甚大な被害が及んだものと推察される。

(2) 周防灘海域の高潮偏差予測結果：台風 9918 号高潮偏差再現計算において、台風経路の西側である周防灘西部海域での高潮偏差が小さかったため、風速分布の

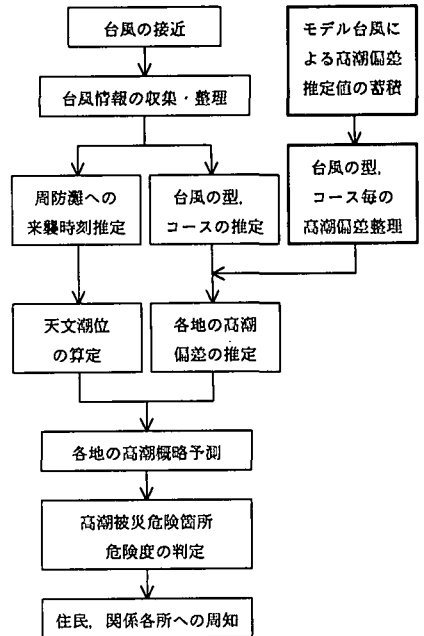


図-11 高潮災害危険度判定システムの構想

合わせ込みを行い再現性を確保した。今後、台風上陸後の気圧や風の場の変動、陸地の標高差による風向風速の推定精度について更に詳細な検討が必要である。

(3) 高潮災害危険度判定システムの提案：周防灘海域における最も危険な台風コース及び高潮偏差を海域毎に判定した結果は台風 9918 号による被災箇所ともほぼ合っており、モデル台風による周防灘海域の高潮偏差予測計算から得られた最大高潮偏差分布から、周辺沿岸部の高潮災害危険度の概略把握が十分可能であると考えられる。このシステムにより、高潮来襲前に、沿岸の最高潮位を予測し、危険度の判定が可能である..

参 考 文 献

運輸省第四港湾建設局下関調査設計事務所 (1992): 台風による管内港湾施設の被災状況について。
海上保安庁 (1998): 平成 11 年潮汐表, 454 p.
気象庁 (1999): 平成 12 年潮位表, 289 p.
気象庁海洋気象部・第四港湾建設局 (1962): 瀬戸内海西部高潮の総合調査報告, 気象庁技術報告第 16 号。
気象庁海洋気象部・第四港湾建設局 (1963): 有明海高潮の総合調査報告, 気象庁技術報告第 28 号。
気象庁海洋気象部・第四港湾建設局 (1965): 鹿児島湾および八代海高潮の総合調査報告, 気象庁技術報告第 44 号, 62 p.
福岡管区気象台 (1969): 九州および山口県の高潮, 福岡管区気象台要報第 24 号, 167 p.
本多忠夫・光易 恒 (1980): 水面に及ぼす風の作用に関する実験的研究, 第 27 回海岸工学講演会論文集, pp. 90-93.
Myers, Vance A. and W.Malkin (1961): Some properties of hurricane wind field as deduced from trajectories, U.S. Weather Bureau, National Hurricane Research Project, Rept. 49, pp. 1-45.