

数年規模の洪水・高潮の同時生起による 大規模氾濫現象の解析

ANALYSIS OF LOW-LAND INUNDATION DUE TO COMPOUND
EFFECT OF RAIN FALL AND STORM SURGE WITH A RETURN
PERIOD OF SEVERAL YEARS

天羽誠二¹・中野 晋²

Seiji Amou・Susumu Nakano

¹正会員 四国建設コンサルタント株式会社 技術部(〒771-1156 徳島市応神町応神産業団地3-1)

²正会員 博(工) 徳島大学助教授 大学院ソシオテクノサイエンス研究部(〒770-8506 徳島市南常三島町2-1)

Typhoon No.23 of 2004 caused a serious inundation disaster in low-land areas of the Shinkawa River, Naruto City in Shikoku, Japan. This disaster was a typical one due to compound influence of rain fall and storm surge because their return periods were considerably shorter than those of the flood control plan for the river. In this research, influence of each factor was investigated through numerical simulation and field observation. Simulation of the storm surge caused by the typhoon proved that it prevented effective operation of a water gate built at the river mouth. From observations taken during other typhoon event in the same year, raise of water level near the water gate was estimated 0.2-0.3m. Simulation of river water flooding accurately reproduced the inundation process observed at the low-land areas.

Key Words : rain fall, storm surge, wave setup, flood control plan, water gate operation

1. はじめに

平成16年は、我が国に過去最多の10個の台風が上陸した。この内、四国では台風4, 6, 10, 11, 21, 23号の6個が上陸し、10号以外の台風が徳島県を通過した。なかでも、台風23号は徳島県の主要都市部に洪水氾濫被害をもたらした。

本論文では、この台風23号による洪水氾濫被害を被った地域の内、特に沿岸低平地部である徳島県鳴門市の新池川流域において、高潮の影響をも考慮して流域内の洪水氾濫現象の解明を行うとともに、本解析モデルを用いることで、今後の洪水・高潮同時生起における氾濫現象の予測や流域住民へのリアルタイム情報の提供の可能性についても論じるものである。

2. 台風23号並びに流域の浸水特性

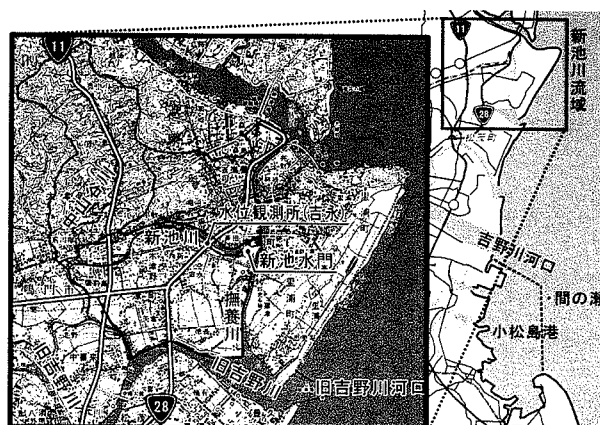
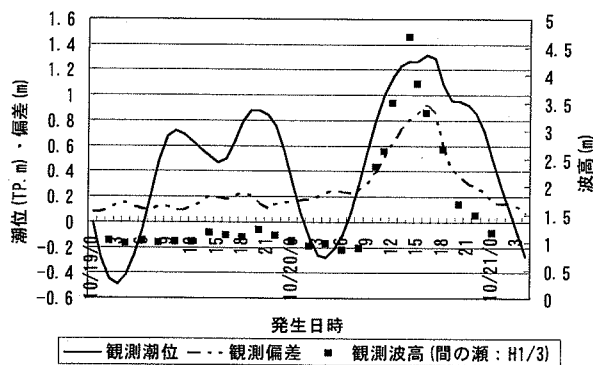
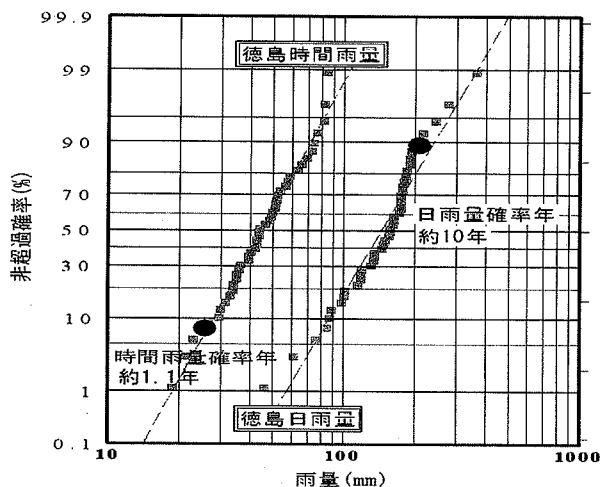
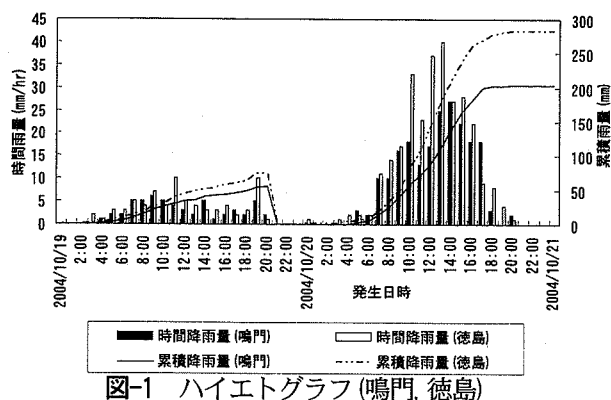
(1) 台風23号の特性

a) 台風23号の概要

平成16年10月13日午前9時にマリアナ諸島付近で発生し、強い勢力(中心気圧955hpa, 中心付近最大風速40m/s)を保ったまま20日16時頃阿南市付近を通過し、その後紀伊水道から大阪府に上陸、東海・関東地方を縦断し21日午前9時頃温帯低気圧に変わった。台風と前線の影響による総降水量は、四国地方等で500mmを越え、県内の一級河川である吉野川や那賀川で激しい降雨を記録し、危険水位を超過するなど、近年最大の洪水をもたらした。

b) 降雨特性

図-1には対象流域内の降雨観測所(鳴門: 県管理)及び近隣観測所(気象庁徳島地方気象台)におけるハイエトグラフを示す。当該流域では、最大時間雨量(27mm, 10/20 14時)、日雨量(204mm, 10/20)を記録したが、徳島地方気象台観測記録による生起確率値評価¹⁾では、それぞれ1/1.1, 1/10程度と評価され、それほど大きな降雨量ではなかったことが理解される。



新池川は、県一級河川撫養川の左支川で、流域面積0.93 km²(図-4参照)、計画高水流量100m³/s、計画河床勾配1/6、000~1/4、300程度の緩流河川で、上流端に中山谷川が流入し、下流左岸側には鳴門市街地、右岸側は主に水田耕作地である。下流部には防潮水門(新池水門)を有し、排水ポンプ(8.5m³/s)も設置されている。

対象流域の浸水状況については、自治体を中心となって実態調査³⁾を行っている。この調査結果を図-5に示す。流域をほぼ南北に通る国道11、28号および流域内の一部の高標高地盤部以外は、全て浸水している。これによれば、凡例(a~h点)に示すように、判明している浸水深は概ね0.4m~0.5m程度である。また、家屋は床上浸水106戸(浸水深0.2m以下)、床下浸水267戸であった。

b) 新池川河道内および新池水門付近の水位変動状況

台風23号による水位記録は、新池水門の上流約1.1km地点(吉永)と水門地点で得られている。また、水門操作者から当時の水位状況についてもヒアリングを行っている。

これによれば、高潮位時に水門の下流側水位が上流側水位よりも高く、水門を開けることができなかった(20日10時頃~23時まで)との事であり、操作者の目視等によれば、水門上下流での水位状況は図-6に示すようで、この時間帯で高潮位状態にあった模様である。

c) 高潮特性

図-3には、台風23号の小松島港潮位記録を示す。これによれば、最大偏差(92cm、10/20 16時)の生起確率値は約1/10³程度で、特に大きな高潮現象を生じたものではない。

d) 波浪特性

小松島港(間の瀬観測所)における波浪観測結果は図-3に併記したとおりで、高潮発生時間帯では波高(H_{1/3})は概ね2m~4.7mである。これは、同年に来襲した台風における観測波高の中では、最大級の値を示している。

(2) 洪水氾濫特性

a) 流域の浸水状況

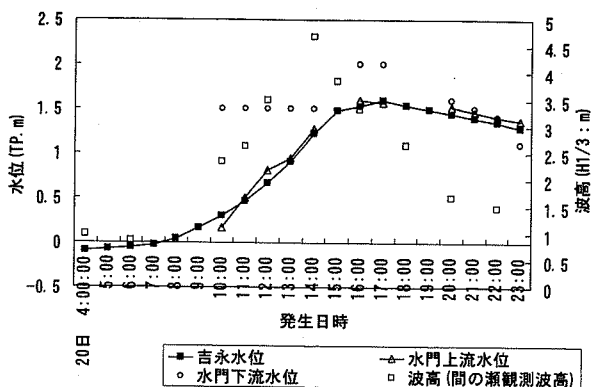


図-6 新池水門上下流観測水位と波高(間の瀬)の関係

3. 高潮現象の解析

(1) 台風23号の高潮解析

ここでは、対象流域に降った降雨に伴う洪水流の挙動を支配する外的条件である潮位(高潮)変動について推算する。

a) 高潮解析手法

移動性低気圧に伴う気象擾乱の空間スケールは水深の大きさに比べて非常に大きいので、長波近似が可能であることから、鉛直方向の水圧分布を静水圧分布に近似して、次式で示される。

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{\partial M}{\partial x} + \frac{\partial N}{\partial y} = 0 \quad (1a)$$

$$\frac{\partial M}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{M^2}{d} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{MN}{d} \right) + gd \frac{\partial}{\partial x} (\eta - \eta_0) = fN + \frac{\tau_s^{(x)}}{\rho_w} - \frac{\tau_b^{(x)}}{\rho_w} + A_h \left(\frac{\partial^2 M}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 M}{\partial y^2} \right) \quad (1b)$$

$$\frac{\partial N}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{MN}{d} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{N^2}{d} \right) + gd \frac{\partial}{\partial y} (\eta - \eta_0) = -fM + \frac{\tau_s^{(y)}}{\rho_w} - \frac{\tau_b^{(y)}}{\rho_w} + A_h \left(\frac{\partial^2 N}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 N}{\partial y^2} \right) \quad (1c)$$

ここに、 t : 時間、 x, y : 東方向、北方向軸の平面直交座標、 η : 海面上昇量、 η_0 : 気圧低下による海面上昇量、 d : 全水深 ($d = \eta + h$)、 A_h : 水平渦動粘性係数 $= \alpha (L)^{4/3}$ 、 $\alpha = 0.01 \sim 0.05$ 、 $L = 2\text{km}$ 、 f : コリオリ力 ($= 2\omega \sin \phi$)、 ω : 地球自転の角速度 $= 7.29 \times 10^{-5} \text{rad/s}$ 、 ϕ : 計算地点の緯度、 $\tau_s^{(x)}, \tau_s^{(y)}$: 暴風による海面剪断力の x と y 方向成分である。

高潮解析は村上ら⁴⁾が提案したADI手法を採用した。計算領域は、四国を囲む北緯 $32.5^\circ \sim 34.7^\circ$ 、東経 $130.7^\circ \sim 135.5^\circ$ の範囲の太平洋、紀伊水道、瀬戸内海および播磨灘海域とし、 2.0km メッシュサイズとした。

また、気圧推定式はMyersモデルを用いた。

$$P = P_c + \Delta p \exp\left(-\frac{r_0}{r}\right) \quad (2)$$

なお、台風域の風速設定は一般風と中心対称風とした。

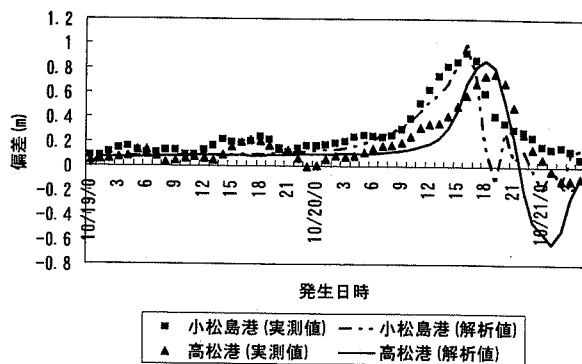


図-7 台風23号高潮再現結果(小松島港と高松港)

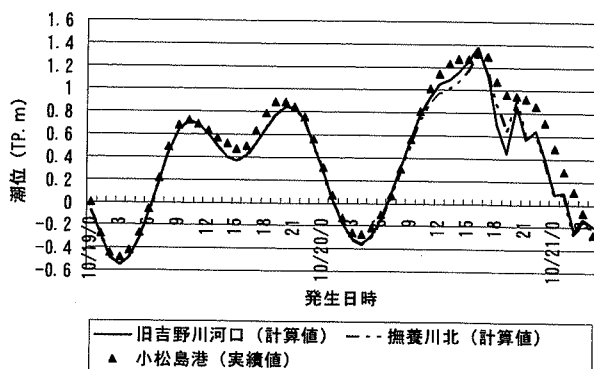


図-8 対象地点の高潮推算結果

b) 高潮解析結果

前述の基礎式に基づいて、台風23号による高潮の再現解析を実施し、対象流域河口部での潮位変動を推定した。

図-7には、解析モデルの妥当性を評価するため、小松島港および高松港における再現解析結果を示す。

両地点とも前駆波、末期高潮の再現性は良好とまでは言えないが、ピーク値およびその発生時間帯は十分に再現できていると判断される。

この解析結果を用いて、対象流域の河口部である旧吉野川河口および小鳴門海峡の潮位変動を推定し、図-8に示した。地理的にも距離が近く、両地点の発生潮位は殆ど同形態を呈していると推定される。

ここで、図-6に示したように、新池水門下流側の水位は一定の時間高潮位状態を呈していたと推察される。この図-6には同時刻の観測波高(間の瀬)を合わせて示している。水位増加時間帯からピーク時にかけて、観測波高は $2\text{m} \sim 4.7\text{m}$ 程度を呈している。当然、対象流域下流の旧吉野川河口部にも同様規模の波高の来襲が見られたものと推察される。

c) 水門下流水位の上昇に対する考察

図-6に示した水門下流側の水位上昇は、操作者の目視等から得たものではあるが、これを先の高潮解析からは再現することはできない。このため、同年に来襲した台風16号、18号時に新池水門から北に約 500m 離れた地点でメモリー式水位計により観測した撫養川水位と、小松島港潮位ならびに間の瀬観測波高の関係から、この水位上昇

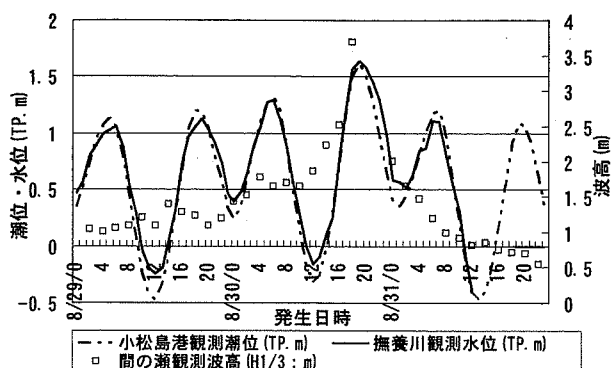


図-9 台風16号時の3者の関係

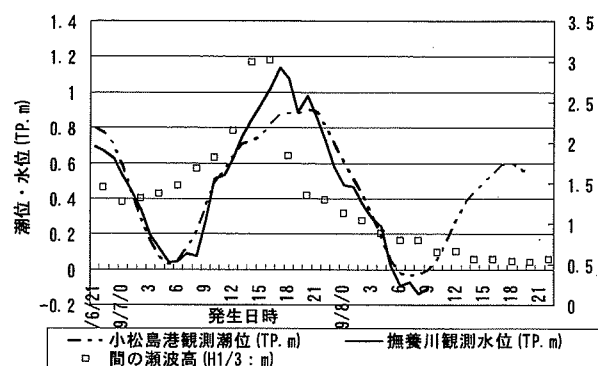


図-10 台風18号時の3者の関係

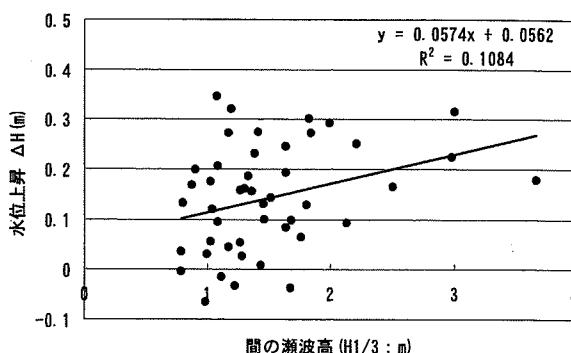


図-11 撫養川水位上昇量(ΔH)と来襲波高(間の瀬: $H_{1/3}$)の関係

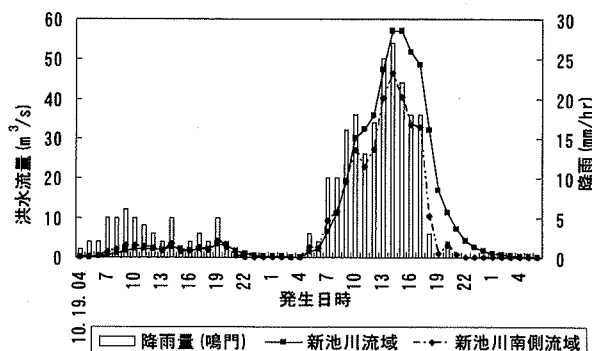


図-12 流出解析結果

現象について分析・評価する。

台風16号、18号時の3者の関係は、図-9、10に示すとおりで、高潮位時に高波高の来襲が見られる。台風23号も図-3に示すとおり、同現象が発生している。よって、この図-9、10を用いて小松島港観測潮位に対する撫養川水位の上昇量(ΔH)と間の瀬観測波高($H_{1/3}$)の関係を整理した結果、図-11に示す関係が得られた。 $H_{1/3} < 2\text{m}$ でのバラツキが大きく、来襲波高と河道内水位上昇の間には明確な関係は得られていないが、少なくとも $H_{1/3} > 2\text{m}$ では、旧吉野川河口部に来襲する波高により20cm～30cm程度の河道内の水位上昇効果を示すものと考えられる。

この水位上昇関係に基づけば、ピーク時には波高4.7mに達した台風23号来襲時には、撫養川の水位は20cm～30cm程度上昇していたものと推察される。操作者の目視観察と言う精度を考慮したとしても、水門下流側水位のwave setupを伴った高潮のため、異常な水位上昇が発生していたことは間違いの無い事実と判断される。

このことは、当該流域のように河川水位が外水位となり、かつその河口部には高波浪が来襲するような河川においては、防潮水門に併設すべき排水ポンプ能力等の検討に際しては、単に既往の高潮位を設定するのではなく、実際の地形状況やwave setup的な潮位変動特性に十分配慮した上で、外水位設定を行わなければならないことを示唆しているものである。

4. 洪水氾濫現象の解析

(1) 降雨流出解析

対象流域は図-4にも示すように、北側に山地を控え、ここに源を発する中山谷川が南流し、新池川上流端に流入する。この新池川は平地部を東流し撫養川に流出する。市街地はこの新池川沿いおよび北側に開け、南側は水田、畑、果樹耕作地として利用されている。本検討では鳴門の降雨記録を用いてこの土地利用を考慮した有効雨量(累加損失雨量は山地64mm、水田55mm、宅地24mm)を算定し、簡便的に単位図法により流出解析を行った。

(2) 洪水氾濫解析

洪水氾濫解析は平面二次元モデルにより実施する。

a) 二次元氾濫解析手法概要

二次元不定流モデルの基礎式を以下に示す。

(連続式)

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

(運動方程式)

$$\frac{\partial M}{\partial t} + \frac{\partial(uM)}{\partial x} + \frac{\partial(vM)}{\partial y} = -gh \frac{\partial H}{\partial x} - \frac{gn^2 u \sqrt{u^2 + v^2}}{h^{1/3}} \quad (3b)$$

$$\frac{\partial N}{\partial t} + \frac{\partial(uN)}{\partial x} + \frac{\partial(vN)}{\partial y} = -gh \frac{\partial H}{\partial y} - \frac{gn^2 v \sqrt{u^2 + v^2}}{h^{1/3}} \quad (3c)$$

ここに、 M, N : x, y 方向流量フラックス、 u, v : x, y 方向流速、 H, h : 水位、水深、 n : 粗度係数(農地0.06、道路0.047、

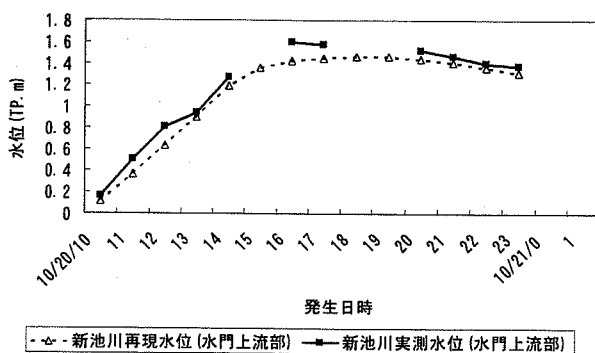


図-13 新池水門上流側水位の再現結果

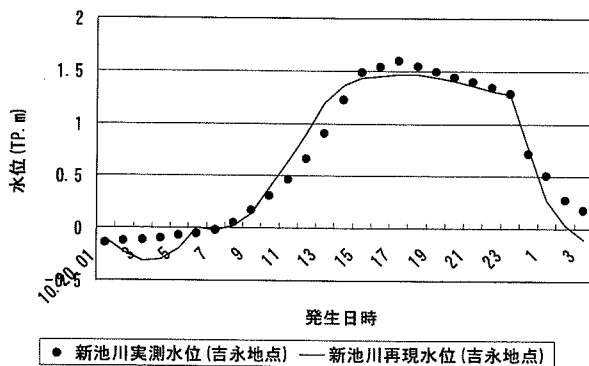


図-14 新池川河川水位(吉永)の再現結果

宅地0.09, 河道0.035)である。

b) 氾濫解析モデル

対象流域を50m間隔の格子状に分割し、メッシュ標高は国土交通省所有の既存調査成果により作成した。また、堤内河川は現地測量調査結果に基づいて河床高や堤防高を設定した。なお、標高の高い堤防や国道等は越流域界として与え、新池水門には排水ポンプ能力を設定した。流域の氾濫解析は、前述した新池川流域の降雨流出量と排水先の撫養川水位(潮位)変動量を与えた。

c) 再現解析結果

台風23号来襲時の洪水氾濫現象に関する再現解析結果は、以下に示すとおりである。

図-13は、新池水門の上流側観測水位を再現した結果であるが、解析値はやや低めの値を呈しているものの、時間変動状況も良く再現されている。また、図-14は新池水門上流に位置する水位観測所(吉永)の水位変動とその再現結果を示したものであるが、出現水位とその時間変動状況を十分な精度で再現し得ている。

また、流域全体の浸水現象の再現解析結果を図-15に示す。実際の浸水状況は図-5に示したように、殆ど全域で浸水し、国道28号沿いの一部およびその西側に向かう県道の一部沿線で浸水を免れている。再現解析結果でも、この国道28号沿いおよび流域中央部西側に一部非浸水箇所が見受けられ、実際の浸水状況を再現できている。

また、この浸水深に着目すれば、新池川上流端の氾濫箇所では0.5m程度(図-5のh点痕跡水位0.7m)、新池川下流および国道28号沿いに広がる市街地部で0.3m~0.5m(図-5

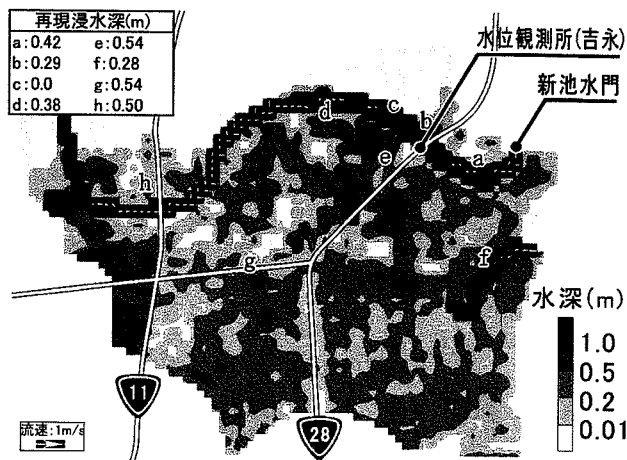


図-15 流域浸水状況再現結果
(10/20 22:30頃、最大浸水時)

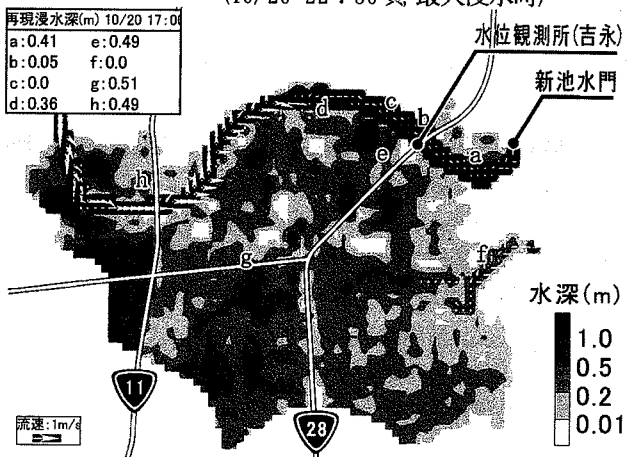


図-16 流域氾濫過程の推定結果例(10/20 17:00)

のa~g点痕跡水位0.4m~0.5m)程度を呈しており、痕跡調査結果をほぼ再現できている。なお、図中の矢印は河川からの氾濫状況を示すもので、新池川中・上流部での越水現象がうかがえる。

(3) 対象流域の洪水氾濫原因について

台風23号来襲時の対象流域の洪水氾濫原因は、氾濫再現解析結果に基づけば次のとおりと推察される。

図-16には流域氾濫過程の一例を示す。新池川の中流部から上流部にかけては下流部に比べて川幅も狭く、かつ現況の堤防天端高が低いことから、十分な疎通能力が確保されていない(50m³/s程度以下)。

加えて、本期間中の新池水門下流側水位(潮位)は、高潮と高波浪に伴う水位上昇が約10時間程度継続・発生しており、水門は閉鎖状態となり、排水ポンプのみによる排水を余儀なくされた。その結果、洪水による流入流量と排水能力とのアンバランス・絶対的な能力不足により、河川水位の上昇を招き、その背水影響が上流部区間にまで及んだことから、河川からの越水現象をさらに助長したものと推察される。

つまり、対象流域の洪水氾濫原因を再整理すると、以下のとおりにとまとめられる。

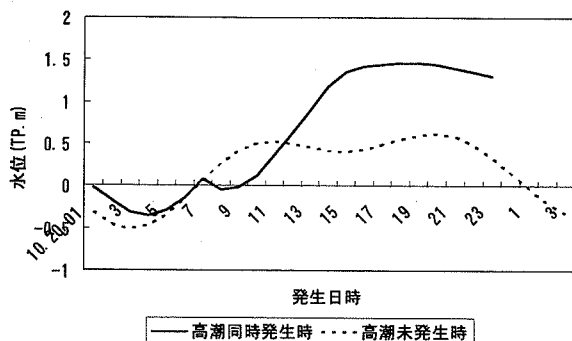


図-17a 新池川河川水位の予測結果

- ①高潮位状態が約10時間継続し、新池川下流の防潮水門がその間閉鎖されたままであったこと。
- ②下流防潮水門の閉鎖による背水影響に伴う河川上流部の水位上昇を低減できるだけの排水ポンプ能力(現況水門併設ポンプ8.5m³/s)がなかったこと。
- ③新池川は河床勾配が緩く($i \approx 1/6,000$)、かつ上流部で一部疎通能力不足の区間が存在したこと。

ここで、台風23号では高潮と降雨流出が同時生起したが、もしこの高潮が発生していなければ、対象流域の洪水氾濫現象にどのような違いが生じたかについて、仮想検討を実施した。解析結果は図-17に示すとおりである。

これによれば、新池水門地点等では河川水位も低いため、市街地(新池川左岸側、例えば図-17bのa~d, h)での氾濫は見られず、上流部の疎通能力不足区間のみでしか越水現象が発生しないと考えられる。

5. まとめ～沿岸部低平地における治水対策上の課題～

これまで、沿岸部低平地の高潮・洪水同時生起による氾濫現象について、新池川流域を事例として、その発生原因について検討を行った。

この結果、台風23号による高潮の発生と共に、来襲波浪によって新池水門の下流側水位(撫養川水位)がさらに上昇し、洪水時の水門の開閉操作を制限したことが、洪水氾濫現象をさらに助長したことが明らかになった。

ここでは、この事例を参考としつつ、沿岸部低平地における高潮・洪水同時生起時の治水対策において考慮すべき事象について示す。

通常、計画外水位として既往の最大実績高潮位等を考慮した解析が行われているが、高潮の実測データは全ての沿岸部で得られている訳ではない。このため、対象とする箇所の地形的な特性や来襲波浪に伴う水位上昇等の検証は十分に行われていない場合も多く、適切な外水位(高潮位)が与えられていない、あるいは与えられない場合が多い。よって、計画検討時の外水位の設定に際しては、既往の来襲台風による当該地点の高潮解析に基づく潮位設定や、その際の来襲波高の推算を行い、これらによる水位

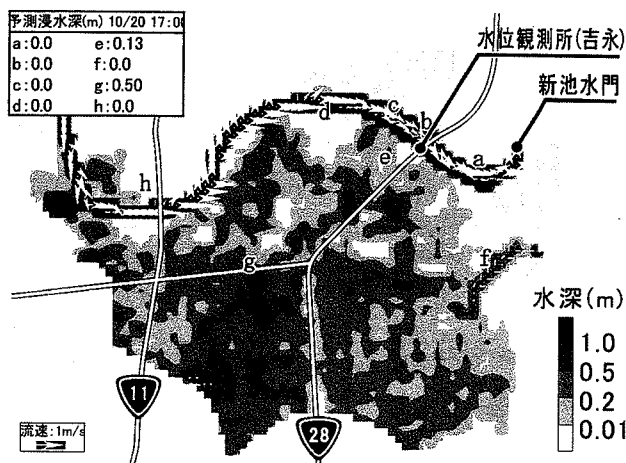


図-17b 流域氾濫過程の予測結果例(10/20 17:00)

上昇の有無等について十分な検討を行った上で設定することが望まれる。

今回の台風23号に伴う当流域の洪水氾濫現象の一要因には、高潮以上の水位上昇が河道内で発生したことによるものであること等を考えれば、来襲波浪に伴う水位上昇効果も決して無視できないものと思われる。モデル作成に当たっては、現地調査による実態把握や波浪解析による影響評価を行う等、より適切な外水位の設定が必要である。

また、洪水氾濫現象等流域住民へのリアルタイムな情報発信は、防災上非常に有益である。今回の解析モデルに数時間後の台風位置情報と短期降雨予想データを利用して、高潮推算、降雨流出解析結果を用いることにより、流域における被害発生の可能性やその規模について予測することが可能となる。

謝辞：本検討を行うに当たり、新池水門管理記録のご提供を頂いた鳴門市危機管理対策室、新池川河川測量図面等のご提供を頂いた徳島県県土整備部河川課、間の瀬観測波高データのご提供を頂いた国土交通省四国地方整備局小松島港湾・空港整備事務所、50m平均地盤高データのご提供を頂いた国土交通省四国地方整備局徳島河川国道事務所の各関係者の方々に、ここに記して謝意を表します。

参考文献

- 1) 端野道夫・田村隆雄：台風10号、23号の豪雨と洪水流量の再現。平成16年台風災害に関する学術調査成果報告書(平成16年台風災害徳島大学学術調査団)，pp. 1-14, 2005
- 2) 国土交通省四国地方整備局高松港湾空港技術調査事務所：管内主要港高潮検討調査報告書，2002
- 3) 徳島県県土整備部：平成16年台風23号浸水痕跡マップ，472 p, 2005
- 4) 村上和男・森川雅行・堀江毅：ADI法による高潮の数値計算法，港湾技研資料，No. 529, pp1-35, 1985

(2006. 4. 6 受付)