

台風 0423 号による円山川河口部に位置する 津居山港周辺の浸水原因について

熊谷健蔵¹・市瀬友啓²・平井住夫³・辻尾大樹⁴

台風 0423 号の来襲によって、円山川河口部に位置する津居山港周辺において観測潮位（河口から約 1 km 上流の検潮所：T.P.+1.56 m）が既往最高潮位（T.P.+1.12 m）を大幅に上回り、約 90 戸が床上・床下浸水の被害を受けた。最大潮位偏差は 1.26 m を記録しており、高潮数値計算、不等流計算および氾濫計算の結果から、高潮による寄与率は 12 % 程度であり、不等流計算から河口部付近では 1 m 程度の水位差が生じていることが確認され、浸水の原因としては急激な河川流量の増加による影響が大きいことがわかった。また、河口部付近の水面勾配による浸水範囲への影響は二次元不定流計算からも大きいことが明らかとなった。

1. はじめに

平成 16 年（2004 年）は近年まれにみる災害の年であり、日本に上陸した台風は過去最多の 10 個を数えた。の中で、台風 0416 号、台風 0418 号は瀬戸内海沿岸の広い範囲に高潮・波浪被害をもたらした。兵庫県の播磨灘沿岸においても姫路港などの検潮所で既往最高潮位を上回る潮位を観測し、各地で高潮浸水被害が発生した。

また、10 月 20 日に来襲した台風 0423 号は太平洋岸に高波浪による海岸保全施設や港湾施設の崩壊などの被害をもたらしたが、兵庫県下においては豪雨による河川の氾濫や土砂崩れなどによって、甚大な水害や土砂災害が発生した。特に、豊岡市を流れる円山川では堤防が破堤するなど、豊岡市街地において甚大な被害が発生した。

一方、円山川の河口部に位置する津居山港周辺（図-1 参照）においても、観測潮位が既往最高潮位を大幅に上回り、護岸から海水が越流し、約 90 戸が床上・床下浸水の被害を受けた。津居山港ではこれまでの既往最高潮位 T.P.+1.12 m（1957 年 9 月 27 日、伊勢湾台風）をもとに設計潮位を設定し、海岸保全施設の整備を実施していたが、台風 0423 号来襲時にはこれを大きく上回る T.P.+1.56 m まで潮位が上昇し、浸水被害が発生した。また、最大潮位偏差は 1.26 m を記録していた。

近傍地点の検潮所の記録をみると、舞鶴東港では最高潮位 T.P.+0.76 m、最大潮位偏差 0.44 m を記録しており、津居山港の潮位が周辺海域に比べ非常に高かったことが伺える。台風の進路が舞鶴港の 100 km 南東側を北東方向に進んだことから、浸水原因は台風による高潮（吸い上げ、吹き寄せ）以外の要因が大きいものと考えられる。

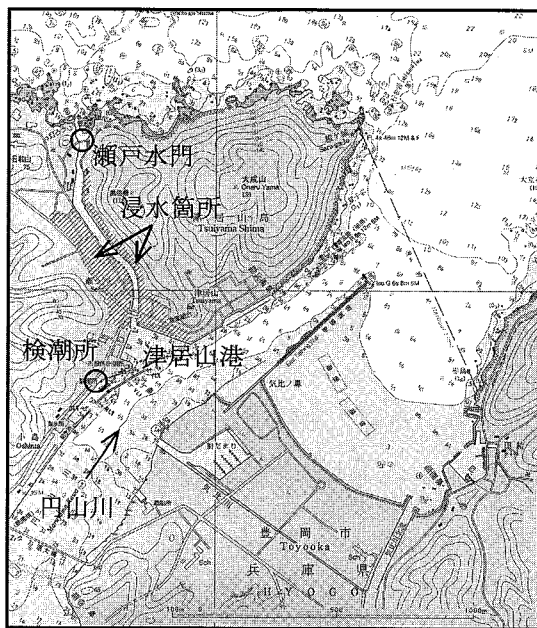


図-1 津居山港及び検潮所の位置

河口部付近の高潮については、高潮と洪水との同時発生について古くから指摘されており（例えば、佐藤ら、1957）、高潮による河川水位への影響、高潮の河川遡上といった視点から議論がされている（例えば、村上ら、1984）。特に、河川の高潮区間における堤防高の設定にあたっては、河川上流側への高潮の遡上や波浪の伝播による影響が大きいことから、高潮区間における堤防高は海側の条件で決定されることが多い。しかし、前述のように津居山港における海面の上昇の現象は海側の条件以外の要因も考えられることから、本研究においては、高潮数値計算を行って台風によって発生した海面の上昇量を把握するだけでなく、河川側の現象も考慮して、高潮位をもたらした要因について分析を行った。河川側の現象として、不等流の計算結果をもとに河口部での水理特

1 正会員 博(工) パシフィックコンサルタンツ (株)
2 正会員 兵庫県但馬県民局豊岡土木事務所
3 正会員 修(工) 兵庫県県土整備部
4 正会員 修(工) パシフィックコンサルタンツ (株)

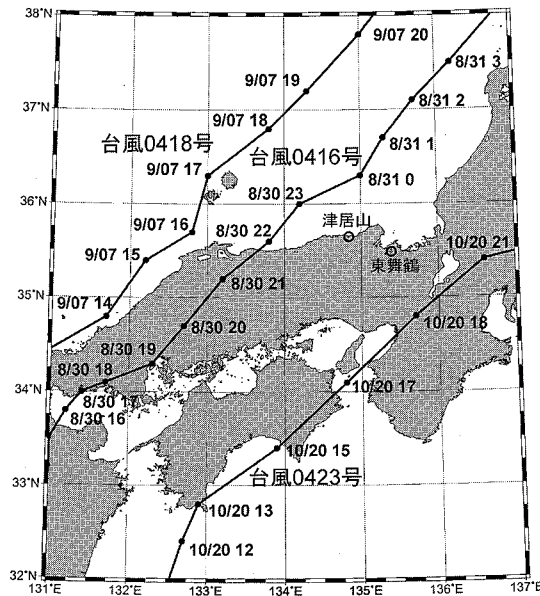


図-2 台風 0423 号の進路

性を把握し、さらに、氾濫計算による浸水範囲の検証を実施して、浸水被害の原因について考察を行い、河口部における今後の高潮対策の一助とすることを目的として本研究を行った。

2. 台風 0423 号来襲時の津居山港の潮位変化

(1) 台風 0423 号来襲時の気象および河川水位

平成 16 年 10 月 13 日に発生した台風 0423 号は図-2 に示すような進路で、20 日 13 時頃高知県に上陸した後、近畿地方、東海地方、東日本を横断した。高知県上陸時の台風の中心気圧は 950 hPa で、津居山港最接近時は 960 hPa であり、津居山港近傍の豊岡測候所の気象記録をみると、最低気圧は 17 時に 989.4 hPa を記録していた。また、風の記録をみると、10 分間平均の最大風速は 12.2 m/s(北北東)で 16 時頃に記録していた。ただし、豊岡測候所の気象記録は 19 時以降は欠測となっている。

降水量については円山川水系にある和田山観測地点(アメダス)の記録をみると、前線や台風の影響によって、前日の 19 日(日降水量 52 mm)から降り始め、台風の接近に伴い、20 日の午後から大雨となり、日降水量は 225 mm を記録した。なお、期間中の総降水量は 294 mm で、記録的な豪雨であった。

図-3 に和田山観測地点の降水量および城崎観測所(河口から約 3 km 上流側の地点)の河川水位の時間変化を示す。降水量は 14 時から 19 時にかけて時間降水量が 20 mm を超えており、河川水位は 15 時頃から上昇し始め、21 時頃にピークとなり 2.77 m の水位を記録していた。

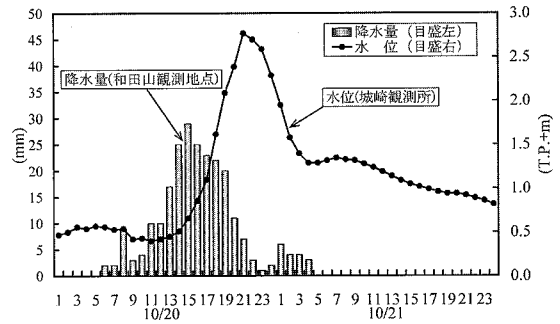


図-3 降水量および河川水位の時間変化

(2) 津居山検潮所の潮位記録

次に、検潮所の潮位記録から津居山港の潮位変化をみると、最高潮位は 10 月 20 日 21 時に T.P.+1.56 m を記録しており、城崎観測所の最高水位の出現時間とはほぼ一致していた。図-3 に示す城崎観測所の水位波形と図-4 に実線で示す潮位波形を比較すると、20 日 15 時頃から 21 日 3 時頃まではほぼ同じような波形で変化していたことがわかる。

また、潮位偏差は 12 時頃から大きくなり始め、最大潮位偏差 1.26 m は最高潮位の出現時間とはほぼ同時刻に出現しており、21 日 3 時頃には 10 cm 程度まで低下していた。

ここで、1959 年から 2004 年までの 45 年間の潮位資料を用いて極値確率統計分析を行い、台風 0423 号で記録した最高潮位と最大潮位偏差の発生確率を算出した。その結果、最高潮位は約 150 年確率規模、最大潮位偏差は約 180 年確率規模であった。なお、極値確率統計分析

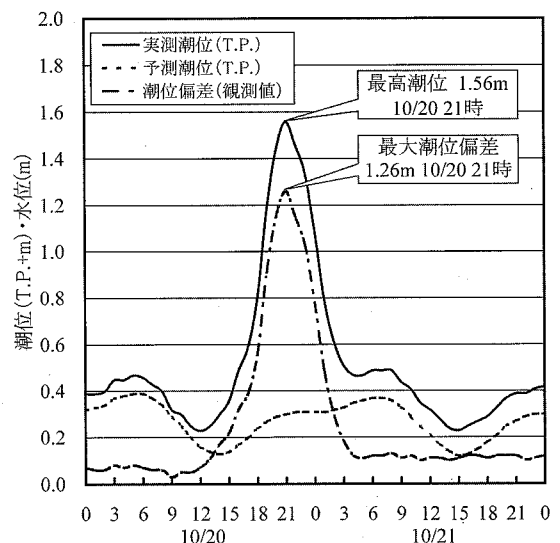


図-4 津居山検潮所の潮位及び偏差の時間変化

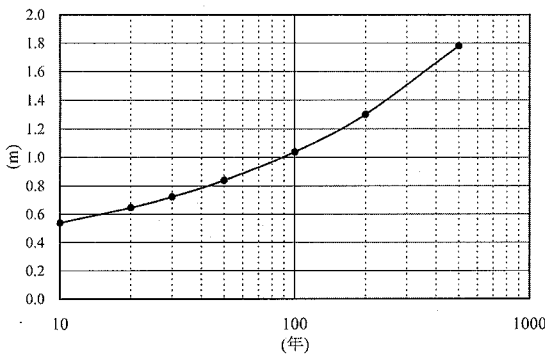


図-5 潮位偏差の発生確率

表-1 津居山港最大潮位偏差上位 5 傑(1959 年以降)

順位	発生日月	最大潮位偏差	気象擾乱
1	2004 年 10 月 20 日	1.26 m	台風 0423 号
2	1959 年 9 月 27 日	0.69 m	伊勢湾台風
3	1964 年 2 月 17 日	0.62 m	—
4	1981 年 7 月 2 日	0.58 m	—
5	1962 年 1 月 2 日	0.52 m	—

は年間の最大値（年最高潮位と年最大潮位偏差）を用い、最高潮位、潮位偏差ともに極値分布関数は極値Ⅱ型 ($k=2.5$) を採用した（最高潮位の相関係数は 0.981, MIR は 0.406, 偏差の相関係数は 0.972, MIR は 0.602）。図-5 に潮位偏差の確率規模別の計算結果を示す。また、表-1 に 1959 年以降に記録した潮位偏差の上位 5 傑を示す。台風 0423 号で記録した 1.26 m は伊勢湾台風来襲時に記録した値を大きく上回っていることがわかる。

なお、図-2 には台風 0423 号の台風進路の他に、瀬戸内海沿岸に高潮被害をもたらした台風 0416 号、台風 0418 号の進路を併記したが、この時の最高潮位は台風 0416 号では T.P.+0.70 m（潮位偏差 0.28 m）、台風 0418 号では T.P.+0.75 m（潮位偏差 0.35 m）であり、台風 0423 号に比べそれほど潮位が高くなることはなかった。台風来襲時の降水量をみると台風 0416 号では総降水量 50 mm、台風 0418 号では 24.5 mm と少なく、河川水位も城崎観測所では最高水位が 1 m 以下であった。

3. 高潮数値計算

(1) 高潮計算モデル

気象擾乱（台風）に伴う気圧変化と風によって引き起こされる海面の上昇量を高潮の数値計算によって求めた。解析モデルは浅水長波理論に基づく基礎方程式をモデル化したものを用い、気圧分布は藤田の式（例えば、宮崎, 2003）で、風速分布は台風の進行による場の風と気圧勾

配による傾度風の合成風速で与えた。計算領域は、大領域として日本海南部を格子間隔 2,700 m で、中領域として若狭湾と隠岐を含む沖合の外海域を格子間隔 900 m で、小領域として舞鶴湾から兵庫県沿岸全域を格子間隔 300 m で、それぞれ設定した。なお、中領域・小領域においては基礎方程式を非線形長波として取り扱い、海底摩擦として粗度係数を 0.03 で与えた。

(2) 高潮による水位上昇量

図-6 に実測の潮位記録から求めた潮位偏差と高潮数値計算から求めた潮位偏差の時系列変化図を示す。

高潮数値計算の結果では津居山港の最大潮位偏差は 0.33 m となり、観測値に比べて約 1/4 程度の偏差で、潮位偏差のピークの出現時間も観測値よりも 2 時間程度早く、19 時に出現している。

そこで、津居山港の数値計算結果の妥当性を評価するために、近傍の舞鶴港において高潮数値計算を行ったところ、最大潮位偏差の観測値が 0.44 m であったのに対して、高潮数値計算による計算値もほぼ同じ値となり、出現時間も 18 時頃とほぼ同時刻であったことから、津居山港の計算値の再現性は概ね妥当な値であると判断できる。

したがって、数値計算から求めた潮位偏差が台風によって発生した海面の上昇量に相当するものと考えられることから、高潮による水位の上昇への影響は小さく、高潮以外の要因が大きかったことが示唆される。

なお、津居山港における最大潮位偏差の観測値がピークとなった 21 時における、高潮数値計算から求めた潮位偏差は約 15 cm であった。

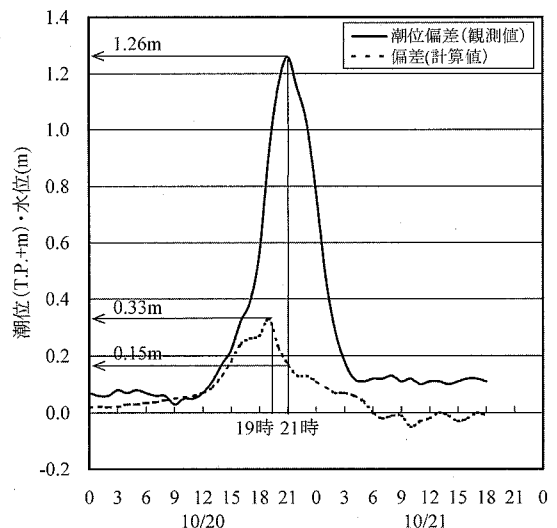


図-6 潮位偏差の観測値と計算値の比較

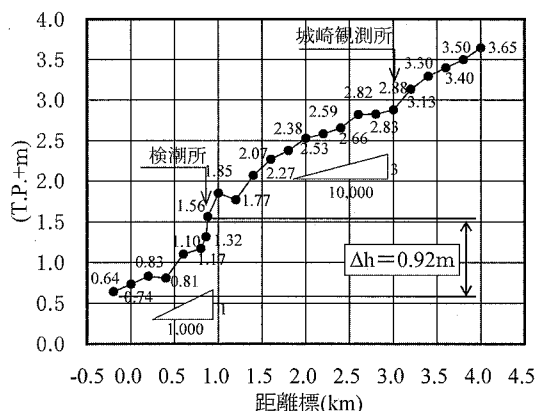


図-7 河川流量ピーク時における河口部付近の水位変化

4. 出水時における河川水位の縦断変化

(1) 不等流計算による河川水位の縦断変化

台風 0423 号来襲時における円山川のピーク流量は立野観測所（河口から 13 km 地点）で $4,900 \text{ m}^3/\text{s}$ （出所：「円山川緊急治水対策の概要」国土交通省豊岡河川国道事務所）であった。この時の不等流計算によって求めた河川水位の縦断変化を図-7 に示す。計算条件として河道断面（出水前の平成 16 年資料を用いた）を 200 m 間隔で与え、粗度係数は低水路を 0.025、高水敷を 0.030 とした。なお、検潮所は河口から約 1 km 上流に設置されているため、検潮所での水位が T.P.+1.56 m となるように、河口の水位をトライアルで与え、河口での水位を推定した。その結果、河口での水位を T.P.+0.64 m で与えた時に、検潮所での水位が T.P.+1.56 m となり、観測値と一致した。

ここで、水面勾配をみると河口から 1 km までは約 1/1,000 で、上流側に比べ河口部付近で水面勾配が大きくなっていることが伺える。これは、円山川河口部付近の地形特性や河口部付近での河床の変動の大きさなど、様々な要因が影響しているものと推察される。

以上のことから、台風 0423 号来襲時においては、検潮所では出水時による河川水の影響を受け、外海に比べて水位が高くなっていたものと考えられる。

(2) 出水時における外海と検潮所との水位差の変化

前節における不等流計算結果をもとに、出水時に河口部付近で水面勾配が発生することを示したが、実際に河口部において水位差がどの程度生じるかを確認するために、外海側の潮位の連続測定を実施し、検潮所の潮位記録と比較を行った。

観測は図-1 に示す瀬戸水門の外海側に簡易水位計を設置し、2005 年 9 月 1 日から 10 月 31 日の 2 ヶ月間、連

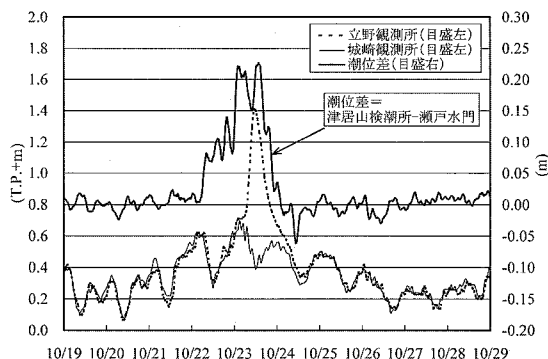


図-8 河川流量ピーク時における河口部付近の水位変化

続測定を行った。その間、大規模な出水は発生しなかったが、10 月 22 日から 23 日かけて総降水量 71 mm の降雨があり、立野観測所の水位が 1.4 m 程度まで上昇する出水があった。

その期間の前後の瀬戸水門と検潮所の水位差と立野・城崎観測所の水位変化をプロットしたものを図-8 に示す。

出水がみられた 22 日から 23 日かけて、検潮所の潮位が外海側に比べて最大で 20 cm 程度高くなっており、その期間の前後の変化と比べ、明らかに顕著な水位差が生じていることから、出水の影響によって河口部付近で水面勾配が発生していることが確認できた。

5. 氾濫計算による浸水範囲予測

(1) 計算方法

台風 0423 号による津居山港周辺における浸水の実績範囲が把握されていることから、境界条件の違いにより浸水範囲がどのように実績と違うのかを明らかにするために、浸水範囲の予測計算を行った。計算方法は、河口部における水面勾配を考慮しないで検潮所記録を用いたレベル湛水法と、水面勾配を考慮した二次元不定流計算の二つの方法で比較を行った。

(2) 計算結果

図-9 にレベル湛水法と二次元不定流計算によって求めた浸水想定区域図を示す。

浸水範囲を比較すると、河口部に近い左岸側で浸水範囲が異なっている。河口部左岸側では、護岸高および地盤高が T.P.+1.56 m よりも低くなっているため、図-9 の上図に示したレベル湛水の結果では河口部左岸付近が浸水する結果となっている。地元ヒアリングによると実際の台風来襲時には浸水していないことが確認されていることから、レベル湛水による浸水範囲の予測結果は、浸水実績よりも広がっており、検潮所の潮位記録をもとに、水面勾配を考慮しない浸水予測計算では実

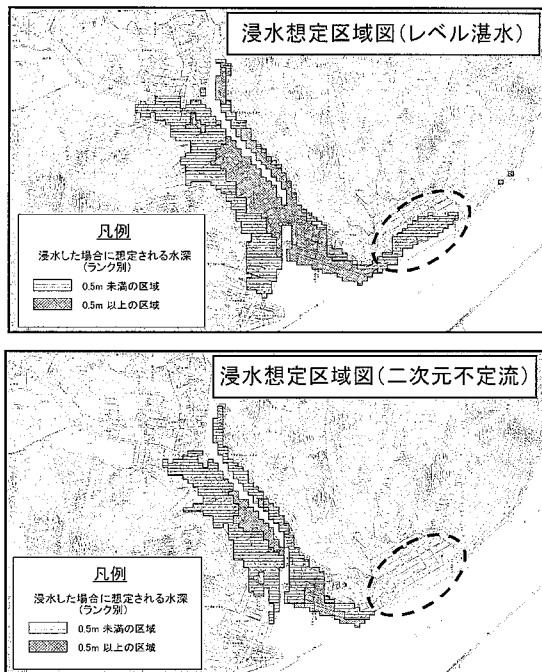


図-9 氾濫計算による浸水範囲予測

績を再現できないことがわかる。

そのため、境界条件として検潮所と河口までの水面勾配を考慮した水位波形を与え、二次元不定流計算による氾濫計算を行った。図-9 の下図に示した計算結果をみると、河口部に近い左岸側では浸水しない結果となっており、実績の浸水範囲を再現できている。したがって、河口部左岸側において護岸高および地盤高が T. P. +1.56 m よりも低い箇所があるにもかかわらず、実際には浸水していない要因は、河口部付近で発生している水面勾配による影響が大きいものと考えられる。

このことから、河川流量のピーク時には河口部付近で発生した水面勾配が浸水範囲に大きな影響を及ぼしたことが示唆される。

6. 台風 0423 号における水位上昇の原因

台風 0423 号の来襲によって津居山検潮所で記録した最大潮位偏差は 1.26 m であったが、高潮数値計算の結果から、台風による吹き寄せ、吸い上げに起因する潮位偏差は 0.15 m であり、最大潮位偏差に対する寄与率は 12 % 程度と小さいものであった。

一方、円山川のピーク流量時 ($4,900 \text{ m}^3/\text{s}$) における

不等流計算から求めた河口から検潮所にかけての水位差が 0.92 m であったことから、最大潮位偏差の大部分は出水の影響によって生じた水面勾配によるものであると考えられる。

以上のことから、台風 0423 号による津居山港周辺における水位上昇の原因は高潮による影響は小さく、急激な河川流量の増加によって河口部付近で発生した水面勾配が主要因であることがわかった。

7. 結論およびまとめ

今回の研究によって得られた、主要な結論を以下にまとめる。

- ① 津居山検潮所で記録した最大潮位偏差の生起確率は約 180 年規模で、既往の観測値を大幅に上回るものであり、発生原因は高潮以外の要因が大きいことが示唆された。
- ② 高潮数値計算により、高潮による寄与率は 12 % 程度であり、不等流計算から河口部付近での水面勾配が 0.92 m であることが確認されたことから、浸水の原因としては急激な河川流量の増加による影響が大きいことがわかった。
- ③ 河口部付近の水面勾配による浸水範囲への影響は二次元不定流計算からも大きいことが明らかとなった。
- ④ 河口部における高潮対策は、海側の高潮や波浪などを条件として実施することが多く、河口港の設計潮位も近傍の検潮所の記録をもとに設定している。しかし、今回のように河川側の要因で河口港の潮位が上昇する場合があることから、河口部付近において高潮対策を講じる場合は、河川の水利特性にも十分に留意して検討を行う必要があることがわかった。

謝辞：最後に、国土交通省近畿地方整備局豊岡河川国道事務所調査課より円山川に関する貴重な資料のご提供をいただいた。ここに、感謝の意を表します。

参考文献

- 佐藤清一・岸力・富永正照(1957)：利根川下流部の水理的特性に関する研究(1)－利根川河口の気象と潮位偏差について－，土木研究所報告
- 村上和男・森川雅行(1984)：河川遡上を考慮した高潮の数値計算，第 31 回海講演文集，pp. 213-217.
- 国土交通省河川局：水文水質データベース(オンライン)，<http://www1.river.go.jp/>
- 宮崎正衛(2003)：高潮の研究－その事例とメカニズム，成山堂書店，pp. 64-68.