

2004年福井豪雨による足羽川中流域の洪水氾濫 に及ぼす河道幅の影響について

EFFECT OF RIVER WIDTH ON THE FLOOD FLOW
IN 2004 FLOOD FLOW SIMULATION IN THE ASUWA RIVER BASIN

服部和彦¹・川中龍児²・石垣泰輔³・塩野耕二⁴

Kazuhiko HATTORI, Ryuji KAWANAKA, Taisuke ISHIGAKI and Koji SHIONO

¹正会員 工修 八千代エンジニアリング株式会社 (〒161-8575 東京都新宿区西落合2-18-12)

²学生会員 工修 関西大学大学院 工学研究科 (〒564-8680 大阪府吹田市山手町3丁目3-35)

³正会員 工博 関西大学教授 環境都市工学部 (〒564-8680 大阪府吹田市山手町3丁目3-35)

⁴ Ph.D ラフバラ大学教授 土木工学科 (Loughborough, Leicestershire, LE11 3TU, UK)

In mountainous areas, short, high intensity rainfall events can be particularly destructive. In 2004, the Asuwa river basin in Fukui prefecture, Japan, was badly flooded during such a storm. This paper describes simulations of this event using Telmac-2D in an effort to understand the flooding mechanisms of this river. The work specifically focuses on the width of this meandering reach of river at the bend apex and the influence of this parameter on the flood damage incurred. The results show that increasing the width at this point acts to reduce flood velocities and provides longer evacuation times and thus reduces flood damage. The addition of a traditional embankment structure was also tested but was found to be far less effective in this context.

Key Words : 2004 flood in the Asuwa river basin, river width at the apex, 2D flow simulation, TELEMAC-2D

1. はじめに

近年、降雨形態が変わり、未曾有の豪雨が短時間で局所的に観測されるようになった。このため、山間部において、総雨量が従来の河川計画の基準値より下回っても、河道内の水位が急上昇し、深刻な氾濫がしばしば報告されるようになった。内水氾濫や地下街への被害が多く報告される都市型水害と異なり、山間部では河道内の水が溢れだし、濁流が谷底平野全体を覆い、各地域に甚大な被害をもたらす。近年の例として、1998年の余笹川水害、2004年の福井豪雨による足羽川水害、2006年の川内川の山地流域の水害などが挙げられる。

そこで著者らは、2004年の足羽川水害を対象に、山間部で発生する水害の特徴を把握し、被害軽減のための一例を示すことを目的とし、研究を行った。

初めに、上野、石垣¹⁾は、足羽川中流域の山間部を対象地域とし、現地調査および航空写真を用いた分析を行い、水害の特徴をまとめた。各地域によって被害形態が異なることを指摘し、その要因の一つとして、谷幅や河

道幅の違いといった地形形状の違いを挙げた。特に、堤外地の土地利用や内岸側の土砂の堆積による河道幅の減少が要因で、被害が大きくなったと推測される地域が多く存在した。この点に着目し、山地部の平面形状を想定した二重蛇行複断面水路を用いた水理実験を行った²⁾。低水路幅により流れの挙動が異なり、特に主流部の流速の大きさが変化するため、河道幅の大小が被害形態に影響を与える要因の一つになりうることを示した。

本研究では、TELEMAC-2Dを用いて足羽川中流域を対象に氾濫解析を行った。水害時の河道幅が減少していたケースと河道幅を維持し、一部区間を拡幅したケースとを比較し、被害が大きくなった要因の一つが、河道幅の減少であるか、検証を行った。また、地盤高が低く氾濫水が浸入する箇所では堤防を嵩上げするという、河道整備時を想定した検討も行った。得られた結果より、山地部の水害を軽減するための一例を示した。

2. 既往の研究

2004年に発生した足羽川水害について様々な視点から、被害報告および原因究明がなされている。

服部・山本³⁾は足羽川水害が堆積学的側面でも特異であったことを示し、特に中流域の土石の運搬に焦点をあて調査を行った。直径1mを超える礫が最大秒速10mで流出したことを示した。このような速度で、コンクリート片、巨礫、流木などの漂浪物が、河川の側壁、橋脚に衝突したため、大きな被害が生じたことを示唆した。

牛山⁴⁾は、気象データを用いた検討を行った。4月～10月積算降水量を一律に暖候期降水量とみなし、1979年～2003年の1時間・24時間・48時間降水量極値との関係を調べ、暖候期降水量を説明変数として各時間降水量極値の線形回帰式を提案した。この回帰式を用い、25年間の最大規模豪雨が比較的弱い観測所を豪雨空白域とし、豪雨災害に対する被災ポテンシャルが増加している地域とした。そして、豪雨空白地域の情報を事前に準備を行うことができる防災情報として、活用できることを示した。

また、石野・楳田⁵⁾は福井豪雨により多くの橋脚が倒壊、流出したことから、橋脚の被災原因の調査解析および長寿命化方策の検討を行った。コンクリートの剥離および折損は、作用した流体力が大きかったことが原因であることを示すとともに、洗掘による橋脚の倒壊も発生したことを示した。流体力に関しては、設計では桁に作用する流体力を見込んでないこと、流木による衝撃なども含んでないことから、大きな力が橋脚に作用し、被害が大きくなったことを示唆した。これより、補強工などの対策を行っていく必要があることを示した。

汜濫解析も行われており、廣部・田安ら⁶⁾は、日野川合流域から天神橋12.6km区間を対象に、一般極座標を用いた平面二次元解析を行った。なお、橋脚が多いため橋脚による抗力を考慮し、ポンプ排水の影響も考慮したモデルを使用している。日野川合流点より約4.6kmの地点の破堤は、蛇行の水衝部であることから生じたのではなく、計画を上回る流量によって水位が高くなり、これに加えて橋脚によるせき上げ、蛇行による水位上昇、ポンプ排水による水位上昇が重なったためと推定している。

また、市街地だけでなく、山間部中流域においても解析が行われている。楳田、石田ら⁷⁾は、足羽川中流域の橋梁および周辺河川施設の被害を整理し、谷底平野における洪水汜濫解析を、有限体積法を用いて行った。浸水範囲や洪水流速が定性的に一致していることを示した。しかし、計算水位が実際より低くなったため、橋脚の流水抵抗を考慮した解析を行い、橋脚の被害状況から推定される洪水汜濫状況により近い解析結果が得られたことを示した。さらに、破堤後の河道地形を用いた解析を行い、浸水範囲は増水早期段階に限り違いが生じ、流速に関しては破堤を考慮することで、大きな違いがもたらさ

れることを示した。

このように、足羽川水害について様々な調査・研究が行われており、今後の水害対策へ様々な視点から意見が述べられた。しかし、堤外地の土地利用や内岸側の土砂の堆積による河道幅の減少が洪水流に及ぼす影響については、詳しく検討されていない。そのため本研究の位置づけは、河道幅の減少が水害規模の大小に影響を与える要因の一つであることを検証することである。

3. 解析手法

(1) 数値モデル

数値モデルとして、汎用ソフトTELEMAC-2Dを用いた。TELEMAC-2Dは、Laboratoire National d'Hydraulique, Electricite de France(EDF)で開発され、有限要素法を適用したモデルである。TELEMAC-2Dの妥当性は、足羽川の平面形状を反映させた二重蛇行複断面水路を用いた水理実験の結果と比較することにより確認している⁸⁾。そのため、TELEMAC-2Dを汜濫解析にも適用した。

(2) 基礎方程式

基礎方程式は、Navier-Stokesの方程式を鉛直平均して得られるSaint-Venant方程式を用いており、連続式(1)

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \vec{u} \cdot \overrightarrow{\text{grad}}(h) + h \text{div}(\vec{u}) = 0 \quad (1)$$

と運動方程式(2)(3)

$$\frac{\partial u}{\partial t} + \vec{u} \cdot \overrightarrow{\text{grad}}(u) = -g \frac{\partial Z}{\partial x} + S_x + \frac{1}{h} \text{div}[h v_e \overrightarrow{\text{grad}}(u)] \quad (2)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + \vec{u} \cdot \overrightarrow{\text{grad}}(v) = -g \frac{\partial Z}{\partial y} + S_y + \frac{1}{h} \text{div}[h v_e \overrightarrow{\text{grad}}(v)] \quad (3)$$

で構成される。ここに、 t は時間、 h は水深、 u は x 方向流速、 v は y 方向流速、 Z は水位(地盤高+水深)を表し、 v_e は渦動粘性係数と動粘性係数の和を表す。また、 S_x, S_y は、 x 方向、 y 方向の底面摩擦項(4)(5)を表す。

$$S_x = -\frac{1}{\cos(\theta)} \frac{g n^2}{h^{4/3}} u \sqrt{u^2 + v^2} \quad (4)$$

$$S_y = -\frac{1}{\cos(\theta)} \frac{g n^2}{h^{4/3}} v \sqrt{u^2 + v^2} \quad (5)$$

ここに、 g は重力加速度、 θ は水路勾配の角度、 n はマニングの粗度係数を表す。

乱流モデルおよび、移流項については、Rameshwaran & Shiono⁹⁾が詳細に検討している。乱流モデルは、0方程式モデルを用い、式(6)に示すように、渦動粘性係数 ν_t と動粘性係数 $\nu (=1.0 \times 10^{-6} \text{m}^2/\text{s})$ の和より求めた。

$$\nu_e = \nu_t + \nu = \frac{1}{6} \kappa u_* h + \nu \quad (6)$$

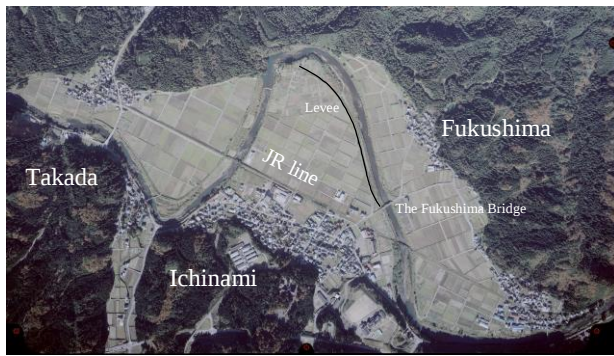


図-1 足羽川中流域市波地区

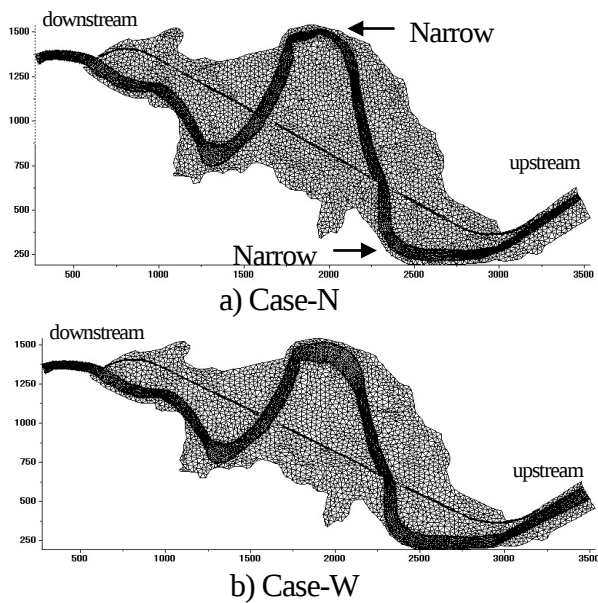


図-2 有限要素格子

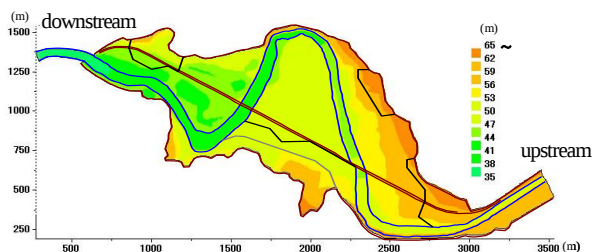


図-3 地盤高(Case-N)

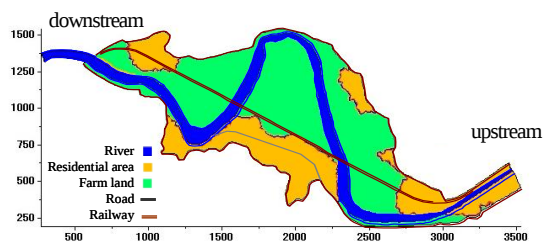


図-4 地形分類図(Case-N)

ここで、 κ はカルマン定数($=0.41$)である。 u_w は、底面摩擦速度である。また、移流項は、SUPG(Stream Upwind Petrov-Galerkin)法を適用した。なお、離散化などの詳細な情報は、参考文献¹⁰⁾を参照されたい。

4. 2004年足羽川水害の氾濫解析

(1) 解析対象範囲と2004年の水害について

2004年7月18日に、福井市街地および足羽川山間部を集中豪雨が襲った。96mm/hr、254mm/6hrといった短時間の激しい雨は、近年に例を見ない降雨であり、各地に大きな被害をもたらした。

足羽川の流域は流域面積415.6km²中356.8km²が山地部として分類され、大部分が山地河川を形成している。図-1に示す解析対象範囲である市波地区は、下流から17km～21km区間の中流域に位置し、河床勾配1/250～1/200を有している。JRの軌道は盛土であり、市街地と田畑を分断している。

(2) 氾濫解析条件

河道幅の減少による水害形態の違いを照査するために、上流側から一つ目と二つ目の湾曲部周辺の河道幅を変化させた。一つ目は拡幅工事が行われていることによる河道幅の増加、二つ目は、堤外地の農地利用による河道幅の減少を考慮した形状である。図-2に作成した有限要素格子を示す。Case-Nは水害時の河道幅が減少しているケース、Case-Wは河道幅を維持し、更に拡幅工事で一部河道幅を広くしたケースである。有限要素格子は、高水敷では1辺約30m、低水路では幅5～8m、長さ20mの大きさで分割した。また、図-3に1/5000の地図に記載されている三角点と現地調査の結果を反映した地盤高を示す。

解析対象範囲は、図-4に示すように河道、農地、住宅地に分類し、各粗度係数を、0.04、0.025、0.067とした。

下流では、下流端の水路を延長した部分での等流状態を下流端の条件とした。一方で、上流端の境界条件には、図-5に示すハイドログラフを使用した。ハイドログラフは、図-6に示すハイトグラフで有効雨量を50%とした時間雨量分布を用いて、kinematic wave法により算定した。解析対象範囲の市波地区より上流側314.8km²を117の支川に分割し、山地部と丘陵地の粗度係数を0.7と0.3として、流出流量を算出した。最終的に、対象地域より5km下流側の天神橋で、ピーク流出流量が2400m³/sと観測されており、これと比較することによりハイドログラフが妥当であるかを判断した。

差分時間は0.05sとし、24時間の解析を行った。ただし、氾濫開始時に定常状態を得るために、平水量を20m³/sとし、3時間の解析時間を余分に解析対象時間前に加え、計27時間の解析を行った。

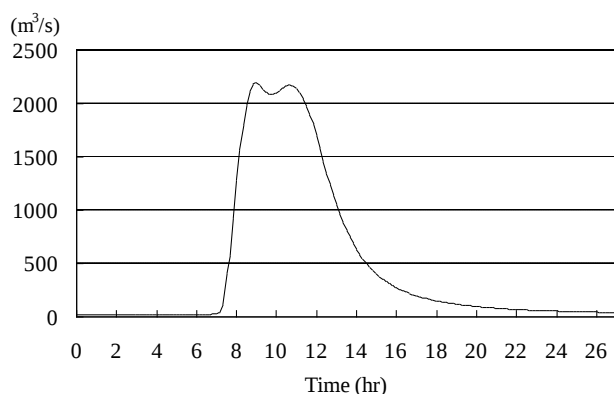


図-5 流入流量

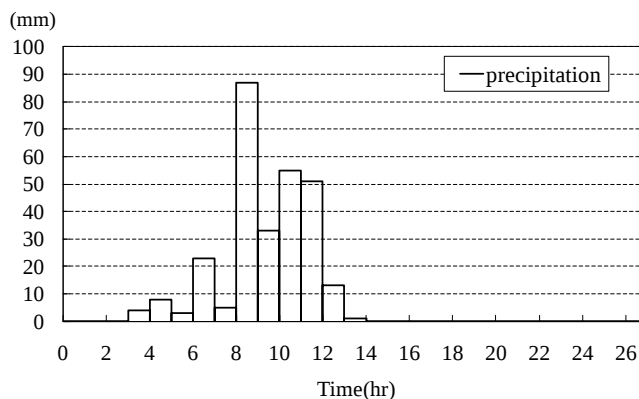


図-6 1時間降雨量



図-7 浸水範囲

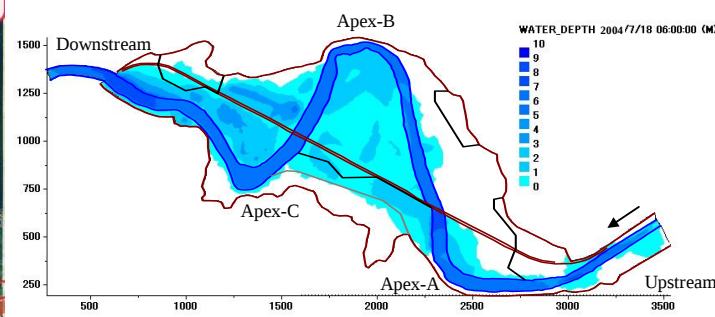


図-8 解析結果の最大氾濫域

(3) 氾濫解析の結果

最初に、2004年の足羽川水害が発生した時の地形状況を再現したCase-Nで解析を行った。図-7に、観測された氾濫水の広がり性を示した写真を示す。赤枠で囲まれた地域が浸水範囲を示し、谷底平野全体にほぼ氾濫水が広がっていることがわかる。図-8に解析結果の最大氾濫域(氾濫開始から75分後の氾濫水の広がり)を示す。氾濫水の広がり、観測された浸水範囲と定性的に一致しており、氾濫解析においても、TELEMAC-2Dは適用可能であることを確認した。

次に、氾濫過程を図-9に示す。氾濫開始時、氾濫開始15分、30分、45分後の結果である。最大氾濫域を示すのは75分後であるが、45分後には、ほぼ同面積にわたり氾濫水が広がっており、短時間で氾濫水が谷底平野全体に広がることがわかる。この結果より、短時間に集中して未曾有の豪雨が山間部を襲うと、避難時間や避難経路の確保が難しくなると言え、被害軽減のためには事前に情報を受け取り避難することが大切であることがわかる。

5. 河道幅の大小が氾濫形態に与える影響

水害時に堤外地が土地利用されず、河道幅が維持できていた状態に加え、水害後に行われている一部区間の拡幅工事による河道幅拡大を考慮したCase-Wとの比較検

討を行い、河道幅の減少が被害を大きくする要因の一つであるか検証を行った。拡幅工事による河道幅拡大については、現地調査で行った簡易測量の結果を用いた。

図-10にCase-Wの氾濫過程を示す。氾濫開始時刻は、氾濫水の広がりには違いはあるが、Case-Nと同時刻である。しかし、河道幅を維持し、拡大したことにより河道の流下能力が向上し、氾濫水の広がり解析上で15分ほどの遅れを示した。これは、氾濫水の広がり急速である山間部において、より長く避難時間を確保できることを示している。一方で、河道の流下能力向上による氾濫面積の抑制は確認できず、河道幅拡大による効果は未曾有の豪雨に対しては期待できない。また、流速についても比較を行った。図-11に氾濫水が谷底平野全体にほぼ広まった、ある時刻のCase-NとCase-Wの流速分布図を示す。河道幅を減少させなかったApex-B周辺の氾濫原および上流側の河道内で流速低減効果がみられた。流速の低下は、流体力を低減させ、水衝部や河道内の橋脚への負荷の軽減、河床洗掘の軽減をもたらすため、河道幅の減少を防ぐことは、減災に対して重要な要素の一つであると言える。実際に、赤丸で囲った箇所は、橋脚が破壊され落橋が観測された個所であり、解析結果では、流速が最速を示す箇所の一つである。河道幅を確保できていれば、流速が軽減され破壊を免れた可能性もある。

水害を軽減させるために、河川整備でよく行われることとして、堤防設置または堤防の嵩上げが考えられるが、

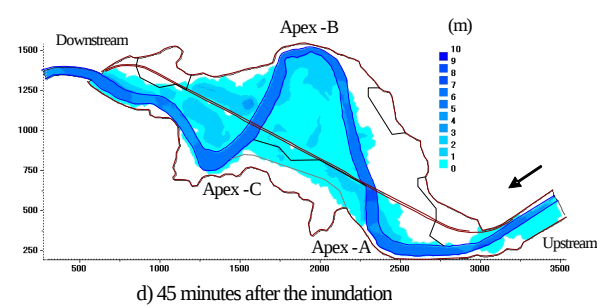
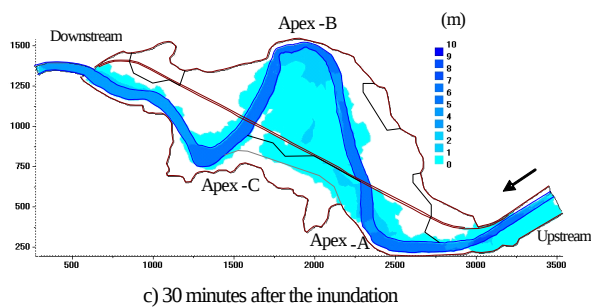
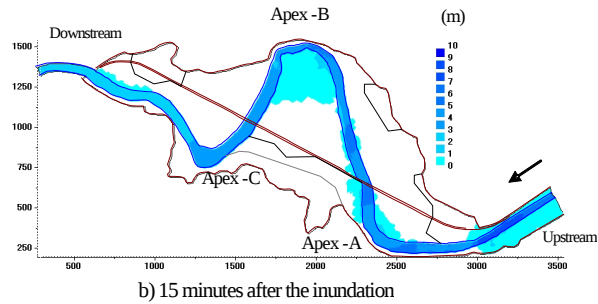
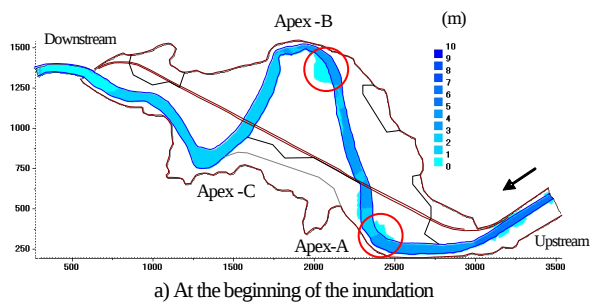


图-9 氾濫過程(Case-N)

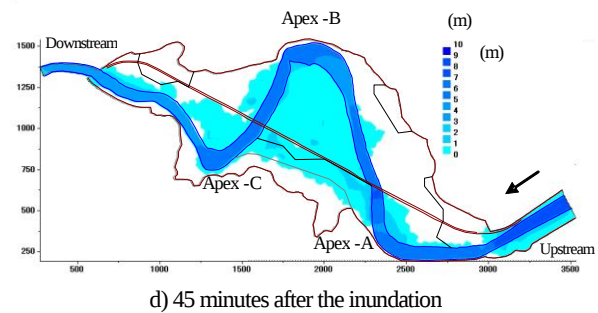
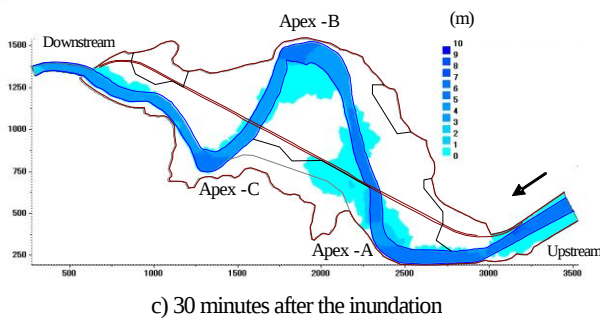
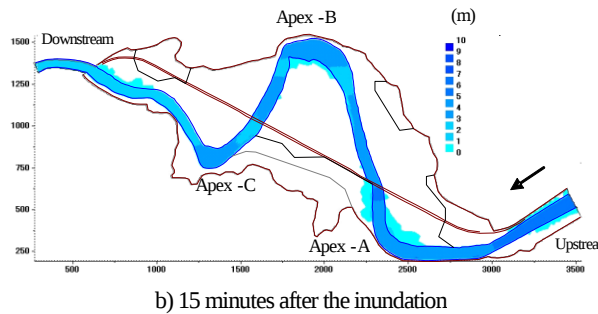
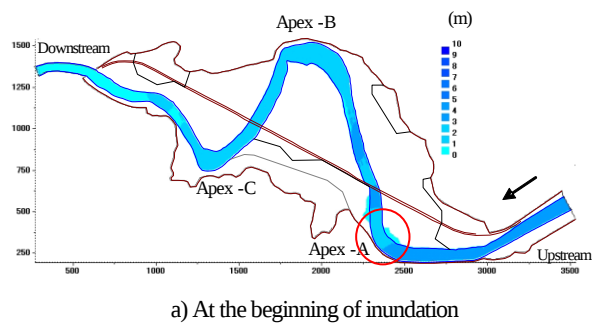


图-10 氾濫過程(Case-W)

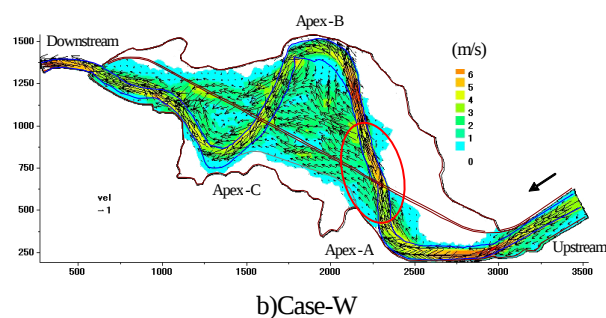
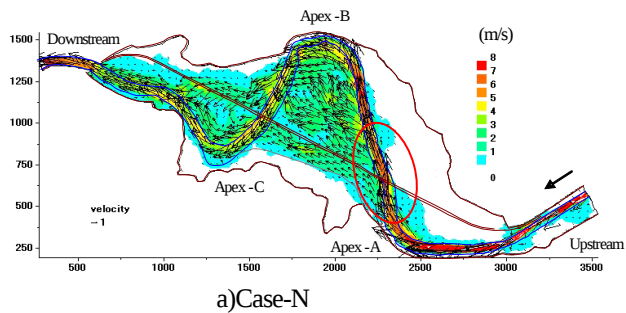


图-11 流速分布图

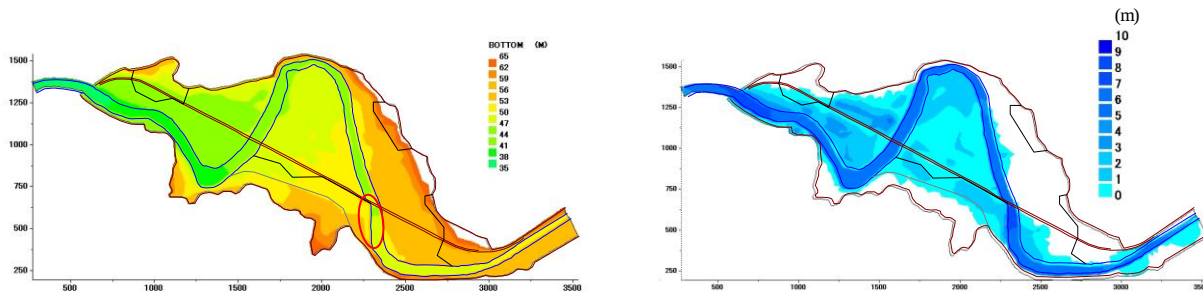


図-12 堤防を設置したと仮定した時の地盤高(左)と最大氾濫領域(右)

コスト面で地方自治体などに大きな負担がかかる。実際に堤防を嵩上げて、2004年の福井豪雨による被害が軽減できたか検討を行った。そして、河道幅を維持する時と比較し、どのくらいの違いがでてくるか検証を行った。

Case-Nの結果、湾曲部頂点Aのすぐ下流側で、地盤高が低いため氾濫が早い段階で開始し、住宅地に被害を与えていたことがわかった。そこで、避難時間の確保および氾濫水の侵入を防ぐため、2mの堤防の嵩上げを赤丸で囲った箇所に設定した。図-12に堤防の嵩上げを想定した時の最大氾濫域を示す。堤防を設置しても、福井豪雨のような未曾有の豪雨では、氾濫を防ぐことができず、最大氾濫域も堤防を嵩上げていない時とほぼ同面積となる。これより、山間部で河道能力をはるかに超えるような短時間の集中豪雨に対しては、堤防などのハード面を整備しても、確実に防ぐことはできないと言える。

以上の結果をまとめると、一部区間において、河道幅の減少を防ぐことにより、ある程度の減災効果がみられたことが言える。しかし、上下流の河道条件によっては、効果がなくなる。そのため、山地部の水害を軽減させるためにも、全流域にわたって河道幅を維持管理していくことが大切であることを再確認する必要がある。

6. まとめ

本研究は、2004年に発生した足羽川水害を対象とし、山地部で発生する水害について検討した。河道幅の減少により被害が大きくなったという指摘に焦点をあて、河道幅が水害形態に与える影響について検証を行った。また、堤防を嵩上げた時の被害形態の違いについても検討を行った。以下に、主な結論を示す。

1. 水害時の地形形状を再現し、概ね氾濫水の広がりを再現することはできた。
2. 河道幅を維持し、更に拡幅させることにより、氾濫水が広がる時間を遅らせ、より避難時間を確保できる。一方で、氾濫域を抑制する効果はない。
3. 河道幅を維持し、更に拡幅させることにより、周辺地域および氾濫原の流速を低減することが可能である。

4. 地盤高が低い箇所でも堤防を嵩上げしても、短時間の集中豪雨では、効果は期待できない。

洪水流が谷底平野全域を覆うように流下する山地部の水害では、流域の一部区間のみでなく、全流域の河道幅を保つことによって、初めて水害を軽減させることができる。そのため、全流域にわたって土地利用や河道整備の在り方を再度見つめ直すことが、減災につながっていくと考えられる。

参考文献

- 1) 上野鉄男、石垣泰輔：足羽川山地流域における2004年水害について、京都大学防災研究所年報、第48号B,pp651-671,2005.
- 2) 服部和彦、石垣泰輔、上野鉄男：山地部蛇行河川の洪水流に及ぼす地形形状の影響について、水工学論文集、第52巻,pp799-804,2008.
- 3) 服部勇・山本博文：平成16年7月の福井豪雨の堆積学的側面(足羽川中流部における浸食、運搬、堆積作用)、福井市自然史博物館研究報告 第52号、1-11、2005.
- 4) 牛山素行：2004年新潟・福島、福井豪雨と“豪雨空白域”、水工学論文集、第49巻,pp445-450,2005.
- 5) 石野和男・楳田真也・玉井信行：2004年福井豪雨における鉄道橋梁の被災原因の調査解析と今後の長寿命化方策の検討、河川技術論文集、第11巻,pp157-162,2005.
- 6) 廣部英一・田安正茂・楳田真也・宇治橋康行・玉井信行：平成16年7月福井豪雨における足羽川の洪水災害と洪水流解析、河川技術論文集、第11巻,pp133-138,2005.
- 7) 楳田真也・石田啓・玉井信行：福井豪雨における足羽川山間渓流域洪水氾濫解析、日本海域研究、第40号,pp19-30,2009.
- 8) 服部和彦・石垣泰輔・塩野耕二・島田広昭：TELEMACの二重蛇行複断面流れへの適用性について、第63回年次学術講演会講演概要集、2-247、2008.
- 9) P.Rameshwaran and K.Shiono: Computer modeling of two-stage meandering channel flows Proceedings of ICE-Water and Maritime Engineering, 156, pp. 326-339, 2003.
- 10) M.G.Anderson etc.(EDT):FLOOD PLAIN PROCESSES, Wiley, 1999.

2009. 9. 30受付