

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

THE EFFECT OF CONFIGURATION ON FLOOD FLOW IN STREAM VALLEY

服部和彦¹・石垣泰輔²・上野鉄男³

Kazuhiko HATTORI, Taisuke ISHIGAKI and Tetsuo UENO

¹学生員 関西大学大学院生 工学研究科 (〒564-8680 吹田市山手町3丁目3番35号)

²正会員 工博 関西大学教授 環境都市工学部 都市システム工学科
(〒564-8680 吹田市山手町3丁目3番35号)

³正会員 工博 元京都大学助手 防災研究所 (〒611-0011 宇治市五ヶ庄)

The flood disaster in a stream valley is discussed with experimental results by water surface flow visualization and water level measurement. From a field survey, it is found that the magnitude of damage is dependent on valley width, which implies the change of flood flow depth on the alluvial plain, and river width at the bend apex. As experimental results, the magnitudes of water surface velocity and divergence around the apex are large for deep condition on the flood plain and narrow channel width at the bend apex, implying that significant erosion can occur around a bend. Thus it is important to understand the effect of configuration on flood flows and appropriate river width at the bend apex to reduce flood damages in a stream valley.

Key Words : flood disaster, stream valley, compound meandering channel flow, water surface velocity, divergence

1. はじめに

近年, 集中豪雨の増加により各地で激甚な水害が発生している. 特に, 時間雨量50mmを超える短時間で集中した豪雨の発生回数が増加した. 山地部は都市部と異なり, 蛇行河川が多く存在し, 湾曲頂部内岸に形成された新たな土地では, 河道幅を狭くするような土地利用がなされている. 一方, これら河道周辺の水害に対する河川整備は進んでいない. このようなことから, 河道の流下能力をはるかに超える未曾有の豪雨が山地部を襲うと激甚な水害が発生する. 山地部における洪水は, 谷幅が狭いために洪水流は谷底平地全体を流れ, 大量の土砂を含んだ流れは流域に深刻な被害をもたらす. 近年報告されている山地部における水害として, 1998年の余笹川水害, 2004年の福井豪雨による足羽川山地流域における水害などが挙げられる. 本研究では, 足羽川水害を対象とし, 山地部蛇行河川における水害について検討を行った.

足羽川水害に関しては, これまでに多くの調査が行われている. 例えば, 足羽川中流部における調査として, 服部・山本¹⁾ は浸食・運搬・堆積作用に焦点をあて調査

を行っている. また上野・石垣²⁾は, 谷底平野の形態・平地の土地利用などに焦点をあて調査を行っている.

本研究では, 既報²⁾で問題提起された流水幅の違いによって被害状況が異なること, 湾曲頂部の河道幅が狭い地域または河道幅は広いが河道内に大量の土砂が堆積して流水幅が狭くなった地域で被害が大きかったこと, また, 河道幅が広く保たれて流水幅が確保されている地域では被害が小さかったという指摘に着目した. このように湾曲頂部の流水幅が被害の大小を決定する1つの要因であることが報告されている. また, 調査報告と航空写真を用いて各地域の土砂の被り具合を比較することで, 谷幅の違いによって被害が異なることが確認されている.

写真-1は, 横越町周辺の被害状況である. 上流の(A)地区と下流の(B)地区で被害状況が異なる. これは, 谷幅が違うことから, 谷底平地を流れる洪水流の水深が変化したこと起因する. 谷幅が狭い地域では, 洪水流の水深は高くなり谷幅全体に土砂が堆積し被害が大きい. 一方で, 谷幅が広い地域では, 水深は低くなり河道湾曲部入り口から湾曲頂部にかけて土砂が広がり局所的に被害が大きい. このように, 谷幅の違いが谷底平地を流れる洪水流の水深に変化をもたらし, 被害状況が異なるとい

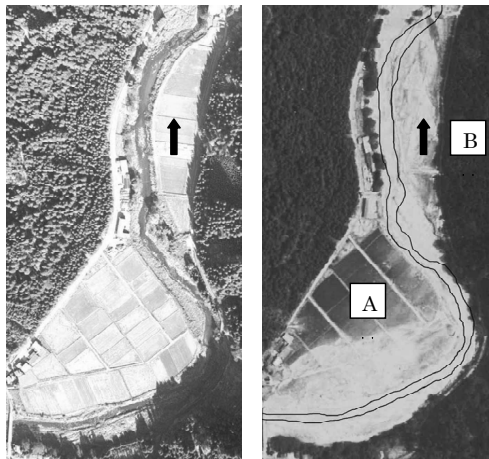


写真-1 足羽川中流域横越町周辺の災害前後の航空写真(左)災害前 (右)災害後

表-1 水理条件

Dr	Q (m ³ /s)	H (m)
Bankfull	0.001335	0.0360
Dr=0.17	0.001140	0.0434
Dr=0.31	0.002347	0.0522
Dr=0.45	0.005986	0.0655

U (m/s)	Fr	Re
0.185	0.36	4900
0.087	0.23	1300
0.116	0.25	2600
0.194	0.34	6400

Dr : 相対水深, Q : 流量, H : 水深, U : 平均流速,
Fr : フルード数 $Fr=U/(gR)^{1/2}$, Re : レイノルズ数 $Re=UR/\nu$

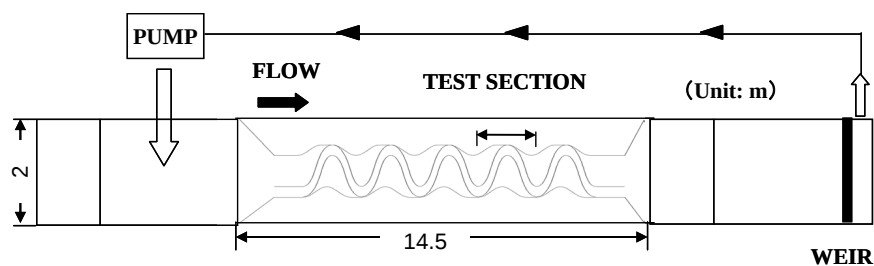


図-1 実験水路

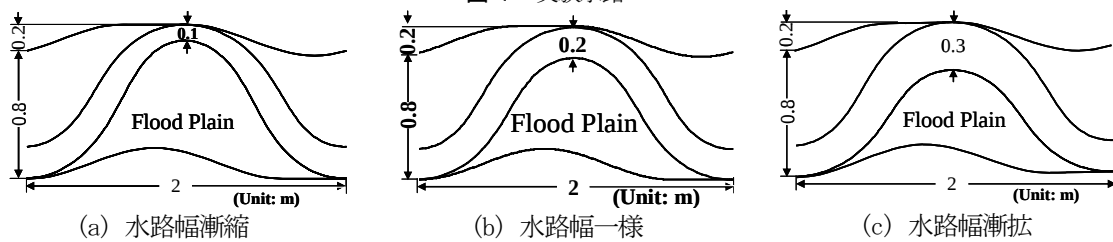


図-2 測定部

う指摘にも着目した。

山地部蛇行河川の両側には谷幅が狭い谷底平野が連続的に存在することにより、洪水流は谷幅全体を流下する。このため、山地部における洪水流は複断面蛇行流と類似した流れと考えることができる。複断面蛇行流については、水路幅一樣かつ高水敷堤防が直線である水路を用いて多くの研究³⁾⁴⁾が行われている。一方で、福岡ら⁵⁾は、より実在の河川を想定し低水路と高水敷上堤防がともに蛇行し、両者の間に位相差をもつ水路を用いて実験を行っている。しかし、福岡ら⁵⁾の実験水路が山地河川の河道特性を反映しているかは疑問である。実際には山地部河川の河道幅は一樣ではなく、谷幅は狭く低水路と谷境界は異なる位相で蛇行している。

本研究は、地形変化が流れにどのような影響を与えるかを検討することを目的とし、地形変化の影響による流れの変化と被害状況とを比較検討することによって水害を軽減させるための見解を得ようとするものであり、以下に示す基礎的な実験を行った。

2. 実験概要

図-1に実験水路を示す。足羽川・余笹川を対象とした各地域の河道特性の調査結果より平均蛇行度1.35, 平均最大偏角約50°ということが確認された。また、Yalin⁶⁾は理想的な河川形状としてsine-generated curveを挙げている。以上を考慮した上で、山地部蛇行河川の地形変化に着目した複断面蛇行水路を作成した。ただし、河床勾配を考慮していないため、山地河道の実相を反映していない。概略を以下に示す。1波長2mの蛇行部を5波長設定し、更に上流と下流に1mずつ直線水路を設けた。全長は14.5m, 水路勾配は1/800である。低水路を最大偏角60°となるsine-generated curveで描き、蛇行度(=流路長/波長)を1.34とした。また、蛇行に伴う流路変動が谷地形の影響で停止した状態を想定し、高水敷の蛇行はsine curveで描き、蛇行度を1.03とした。低水路幅は0.2m, 谷幅は0.8mであり、高水敷高さを0.036mとした。なお、図-2に上流から4波長目に設定した測定部を示す。

表-1に水理条件を示す。実験では、谷幅の違いにより

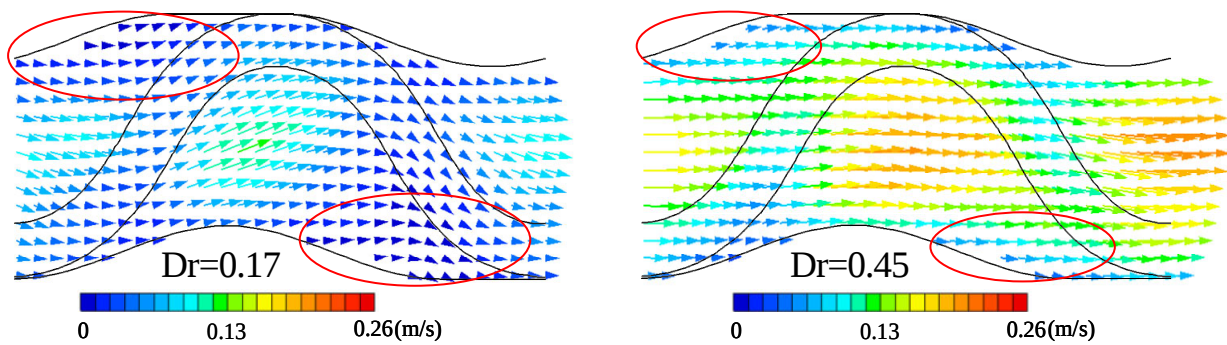


図-3 水路幅一様における表面流速分布図

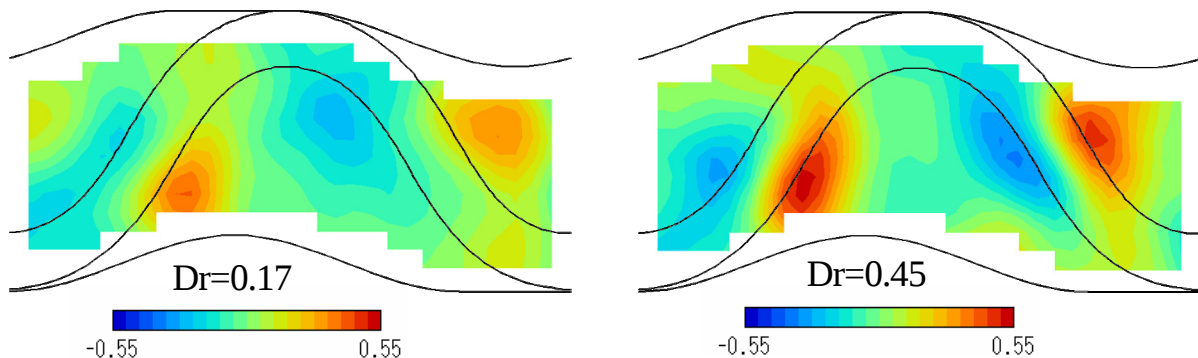


図-4 水路幅一様における発散分布図

平地を流れる水深が変化することに着目し、水路幅一様において高水敷上水深を変化させた実験を行った。高水敷水深の変化の指標として相対水深 $Dr = (H-h)/H$ （ H ：低水路水深、 h ：低水路深さ）を用いた。既存の研究⁷⁾により $Dr=0.25 \sim 0.30$ において流れの構造が変化することが報告されていることより、Bankfull（河道満杯状態）、谷幅が広く平地を流れる水深が浅い時を想定した $Dr=0.17$ 、谷幅が狭く平地を流れる水深が深い時を想定した $Dr=0.45$ 、 $Dr=0.17$ と 0.45 の間で流れの構造が変化すると予測される $Dr=0.31$ の4ケースで実験を行った。その後、低水路幅一様を基準として、湾曲頂部の水路幅の変化が流れにどのような影響を与えるかを検討するために、図-2に示すように水路幅を漸縮または漸拡させて実験を行った。湾曲頂部の水路幅はそれぞれ 0.1m （水路幅漸縮）、 0.3m （水路幅漸拡）である。

乾燥状態で十分に水表面に浮遊する直径 0.08mm 、比重 1.5 の塩化ビニルのトレーサーを用い測定部上流から散布し、測定部上方に設置したビデオカメラを用いて表面流況を撮影した。撮影された動画から1秒30フレームの静止面を抽出し、インタレース解除、グレースケール化を行った後にPIV解析法を用いて表面流速を求めた。また、水位は測定部の上流側高水敷を基準として超音波水位計を用いて測定した。なお、測定を開始する前に上流側と下流側の水深をポイントゲージにより測定し、等流状態であることを確認した。

更に、山地部の被害状況を検討するため侵食作用を検討したが、ここでは水路床近傍の流速が不明確なため掃流力による十分な検討を行うことができなかった。その

ため、発散を用いた定性的な検討を行った。

3. 実験結果と考察

(1) 相対水深の変化について

図-3に水路幅一様における表面流速分布図を示す。図より、高水敷の水深が増加するとともに流速は速くなり、流れの向きが変化することがわかる。既存の研究³⁾と同様に $Dr=0.17$ では、高水敷の水深が浅いために低水路の流れの影響を受けて湾曲部入り口から湾曲頂部に向かって蛇行するように流れる。一方で、 $Dr=0.45$ では、高水敷の水深が深いために表面流速は低水路の流れの影響を受けずに水路全体を流下方向に直進して流れる。

図-4に水路幅一様における発散分布図を示す。発散の値は以下の式を用いて計算した。

$$\text{div} = \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} \quad (1)$$

u, v はそれぞれ流下方向、横断方向表面流速成分を表す。水表面でのデータであることから、正の値は流体の湧出しを表し、負の値は沈込みを表す。特に、低水路と高水敷の境界部では、正の値は低水路から高水敷への上昇流、また負の値は高水敷から低水路への下降流を表す。そのため、発散は侵食作用を考える上で1つの指標となる。

図-4より低水路と高水敷の境界部で発散の絶対値が大きいことがわかる。特に、湾曲頂部周辺で沈込みの絶対値が大きく、強い下降流の影響により侵食作用が激しくな

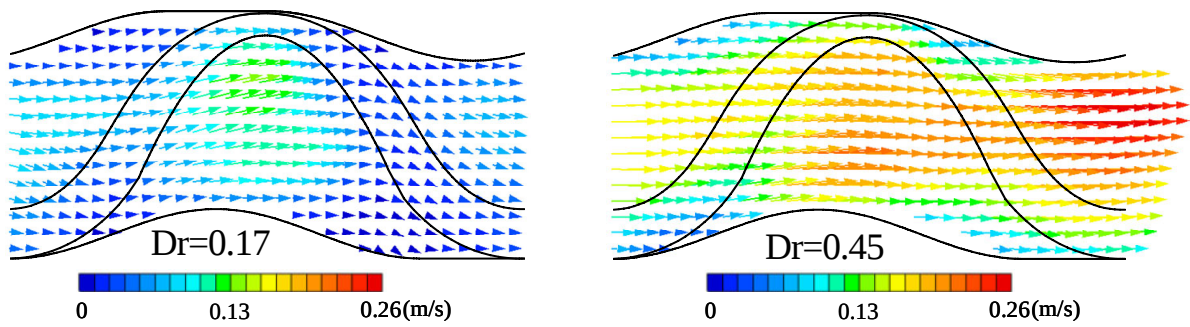


図-5 水路幅漸縮における表面流速分布図

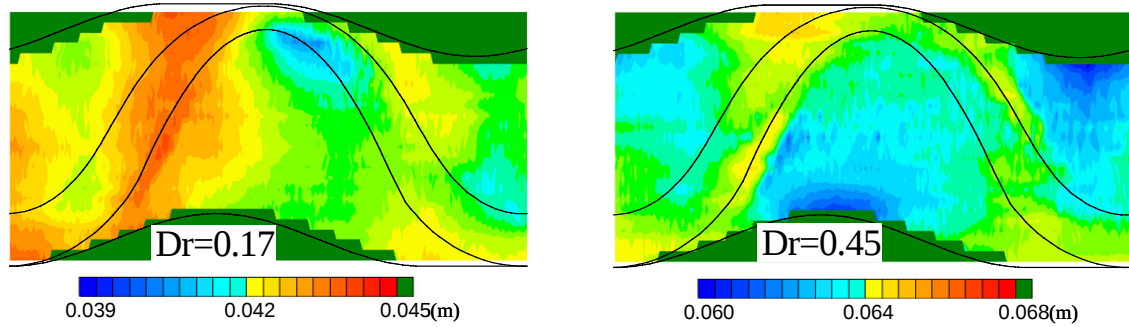


図-6 水路幅漸縮における水深分布図

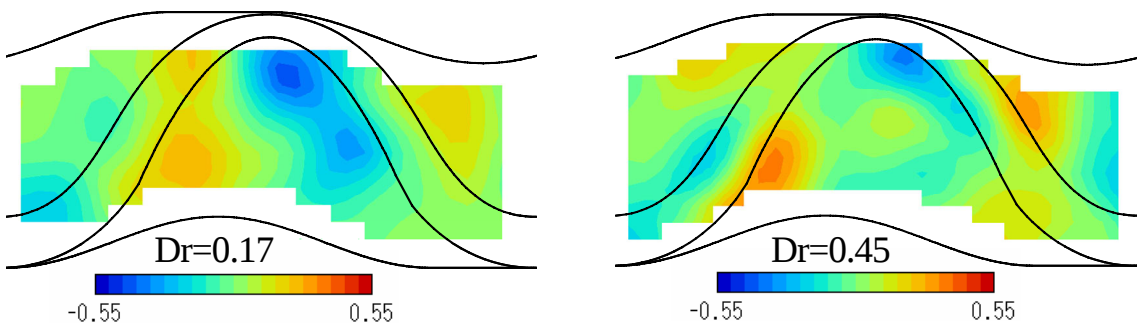


図-7 水路幅漸縮における発散分布図

ることを示唆する。なお、高水敷水深の増加に伴い発散の絶対値が大きくなるため、侵食作用がより激しくなることが予測される。

また、谷の蛇行の影響が谷境界付近で見られる。図-3の赤丸に示すように、谷の蛇行の影響により、谷の湾曲頂部で谷の蛇行に沿った流れが剥離するため、その下流側で周辺より表面流速が小さく水深が深くなる後流域の存在が見られる。これは、福岡ら⁵⁾の研究における堤防先行位相において、高水敷流れが低水路向きの堤防法線の影響を受け、その下流側が死水域に近い状況を示している事と類似している。

以上の結果と被害状況を比較すると、谷幅の広い地域で河道湾曲部入り口から湾曲頂部にかけて土砂が広がり被害が局所的であったことは、高水敷の水深が浅いケースにおいて表面流速と発散の絶対値が大きい箇所と表面流速の流れの向きが等しいことと一致している。また、谷幅が狭い地域で谷幅全体に土砂が被り被害が大きかったことは、高水敷の水深が高いケースにおいて谷幅全体に流れが広がり、表面流速が大きく発散の絶対値が大きいことと一致している。これより、流れの構造から谷幅

の変化による被害状況を予測できる。

(2) 水路幅の変化について

a) 水路幅が漸縮する場合

図-5、図-6に水路幅漸縮における表面流速分布図と水深分布図を示す。水深分布図は低水路底面から測った水深を表した図である。上流側の水深が高くなり右岸高水敷上の表面流速が増加する。これは、低水路幅の漸縮に伴って低水路内の流下能力が減少し、湾曲頂部で流れが堰き上がり上流側の流れの構造に影響を与えた結果、上流側の水深が高くなり水面勾配が急となったためである。表-2に右岸高水敷上の水面勾配を示す。水面勾配は各ケースの表面流速分布図で右岸高水敷上の流速が最大であるベクトルの向きに沿ってそれぞれ求めた。水路幅漸縮と他の形状を比較すると、水路幅漸縮のケースで水面勾配が最も急となるために高水敷上の表面流速は他の形状と比べて速くなる。

図-7に水路幅漸縮における発散分布図を示す。水路幅一様のケースと比較すると湾曲頂部付近で沈込みの絶対値が大きく、高水敷から低水路へ流れる下降流が強いこ

表-2 右岸高水敷上の水面勾配

	水路幅漸縮	水路幅一樣	水路幅漸拡
Bankfull	1/157	—	—
Dr=0.17	1/169	1/256	1/483
Dr=0.31	1/294	1/323	1/769
Dr=0.45	1/556	1/667	— 1/5556

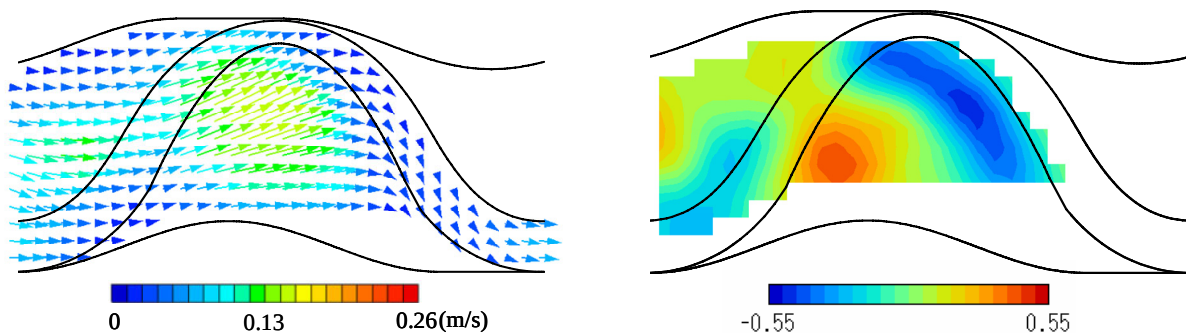


図-8 水路幅漸縮のBankfullにおける(左)表面流速分布図と(右)発散分布図

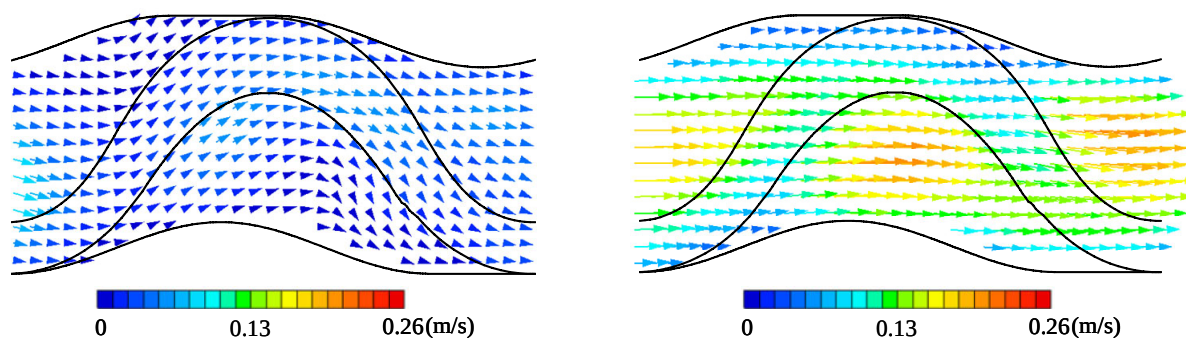


図-9 水路幅漸拡における表面流速図

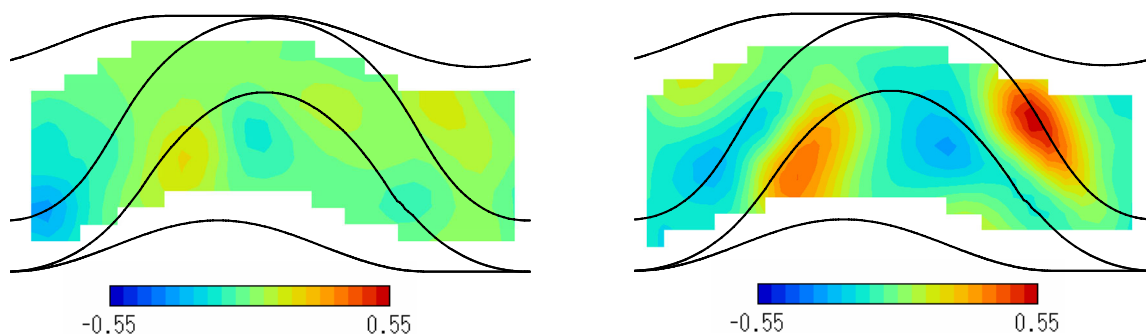


図-10 水路幅漸拡における発散分布図

とが示唆される。水面勾配が急になったことが1つの要因であり、この結果湾曲頂部周辺における侵食作用が大きいことが予測される。

特に注目する点としてBankfullのケースが挙げられる。図-8にBankfullの表面流速分布図と発散分布図を示す。表面流速、沈込みの絶対値がDr=0.17よりも大きい。水路幅が漸縮するために低水路内の流下能力が減少し上流側で流れが高水敷へ乗り上げる。しかし、下流側では低水路幅は一樣時の広さに戻るために乗り上げは発生しない。その結果、上流と下流の水深差が大きくなり、水面勾配はDr=0.17よりも急となり表面流速は速くなる。また、水面勾配が急となったことにより湾曲頂部付近の沈

込みの絶対値は大きくなり、その範囲は広く低水路への下降流が下流側で激しくなることが予測される。

以上のことより、湾曲部頂部が狭いケースでは、水路幅が漸縮し水路幅一樣のケースと比較すると表面流速が増加し、湾曲頂部付近の沈込みが大きくなるため侵食作用が激しくなることが予測される。これは、湾曲頂部の流水幅が狭い地域で被害が大きくなることの要因であると考えられる。また、BankfullとDr=0.17の比較により湾曲頂部が狭い地域では、越流が始まる洪水の初期段階で被害が大きくなることが予測される。

b) 水路幅が漸拡する場合

図-9、図-10に水路幅漸拡における表面流速分布図と

発散分布図を示す。Dr=0.17において、表面流速は水路幅一様のケースよりも小さく、発散の絶対値も小さい。これは、水路幅の漸拡にともない低水路の流下能力が増加し、より多くの流量が低水路内を流れるためである。また、下流側で水路幅が一様に戻るために低水路内に収まらなかった流れが高水敷上へ溢れ出すため下流側低水路周辺で水深が高くなる。その結果、右岸高水敷上の水面勾配は緩やかになり表面流速は遅くなるとともに、湾曲頂部付近での発散の絶対値は小さくなり水路幅一様の時と比べて侵食作用が弱いことが予測される。

しかし、高水敷上の水深が大きくなるDr=0.45では、Dr=0.17と同様の傾向は見られない。これは、低水路を流れる流量よりも高水敷を流れる流量のほうが多いことと、相対水深が大きくなると、全般に高水敷上の流れが低水路内の流れよりも卓越する³⁾ことより低水路形状の変化の影響をほとんど受けないためである。

以上のことより、水路幅が漸拡する湾曲頂部が広いケースでは、水路幅が一様のケースと比べて谷底平地を流れる水深が低い地域、つまり谷幅が広い地域で被害状況が小さくなることが予測できる。一方で、谷幅が狭く谷底平地を流れる洪水流の水深が高くなる地域では十分に流水幅を確保しても、地形の変化が流れの構造に影響を与えなくなり被害をより減少させることは難しいと考えられる。

4. 結論

本研究では、地形変化が流れの構造にどのような影響を与えるかを検討した。ここで得られた結果を列举すると以下のようである。

(1) 谷幅の違い(平地を流れる水深の違い)

高水敷の水深が低い時、低水路の流れの影響を受け表面流速は蛇行して流下する。一方で、高水敷の水深が高い時、流れは水路全体を直進しながら流下する。また、高水敷水深の増加に伴い表面流速と発散の絶対値は増加し、湾曲頂部付近で侵食作用が大きくなり被害が大きくなることが予測される。

(2) 流水幅の違い

a) 流水幅が漸縮する場合

水路幅一様と比較し、水路幅漸縮では低水路の流下能力が低下するため、流れが湾曲頂部で堰き上がり上流側の流れの構造に影響を与える。その結果、右岸高水敷上の水面勾配は急となり表面流速と沈込みの絶対値が増加する。このため、侵食作用は大きくなり水路幅一様と比べて被害が大きくなることが予測される。

b) 流水幅が漸拡する場合

水路幅一様と比較し、水路幅漸拡では低水路の流下能

力が増加するために低水路内を流れる流量が増加し、水面勾配は緩やかとなる。その結果、表面流速は低下し、発散の絶対値も小さくなる。このため、侵食作用が弱まり水路幅一様と比べ被害が小さくなることが予測される。しかし、高水敷水深の上昇とともに、この傾向は弱まり水路幅一様のケースと同様の流れに近づく。このことから、流水幅を十分に確保しても高水敷水深が高くなるにつれて被害を減少させることは難しくなる。

以上のことより、地形の変化が流れの構造に影響を与えることが示された。山地部において、谷幅が狭く集落が存在する地域、河道幅を狭くするような土地利用をしている地域や河道幅が広くても河道内に大量の土砂が堆積し流水幅が狭くなっている地域では、被害が大きくなることが予測される。そのため、山地部の被害を軽減させるために、谷幅が狭い地域では早期避難を行うことや、山地部全域で流水幅が狭くならないような土地利用の在り方を考え、河道幅を十分に確保できるように河道及び河川周辺の整備を進めることが減災上考慮すべき事項の1つであると言える。

本研究では、地形の変化が流れに与える影響に着目し、基礎的な研究を行った。今後は、地形変化による流れの変化を数値解析を用いて検討することや侵食・堆積を考慮した移動床現象を検討することなどが必要である。

謝辞：本研究を行うにあたり、京都大学防災研究所宇治川オープンラボラトリーより実験施設を提供して頂いた。ここに記し謝意を表す。

参考文献

- 1) 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。
- 2) 上野 鉄男・石垣 泰輔：足羽川流域における2004年水害について、京都大学防災研究所年報第48号B、pp. 657-671、2005。
- 3) 武藤 裕則・塩野 耕二・今本 博健・石垣 泰輔：複断面蛇行開水路流れの水利特性について(1)、京都大学防災研究所年報 第38号 B-2、pp. 561-580、1995。
- 4) 福岡 捷二・大串 弘也・加村 大輔・平生 昭二：複断面蛇行流路における洪水流の水利、土木学会論文集No. 579/II-41、pp. 83-92、1997。
- 5) 福岡 捷二・大串 弘也・岡部 博一：複断面蛇行流れに及ぼす堤防と低水路の蛇行度と位相差の影響、水工学論文集第42巻、pp. 961-966、1998。
- 6) M. Selim YALIN : *River Mechanics*, PERGAMON PRESS, 1992。
- 7) 石垣 泰輔・武藤 裕則：複断面蛇行開水路流れの構造と底面せん断分布について、水工論文集第42巻、pp. 901-906、1998。

(2007. 9. 30受付)