

大規模な氾濫を伴う山地河川の水害の実験的研究

上野鉄男・石垣泰輔*・服部和彦**・山田聡***・川中龍児**

* 関西大学工学部

** 関西大学大学院工学研究科

*** 大鉄工業株式会社

要 旨

著者らが調査した 1998 年の余笹川流域の水害と 2004 年の足羽川の山地流域の水害では、大規模な氾濫が引き起こされて、河道湾曲部において激甚な被害が発生したが、災害時の流況と被害の発生との関係を解明するために実験的検討を行った。その結果、谷底平野において蛇行河道から氾濫する流れは、水面勾配が平地上で局部的に大きくなるため、流速も大きくなり、農地の洗掘などの被害が予想以上に大きくなることなどの新たな知見が得られた。

キーワード：山地河川，洪水災害，水理実験，洪水氾濫，蛇行河道

1. 概 説

近年、山地河川において激甚な水害の発生が目立つようになった。そのような水害として、1998 年の余笹川水害（伊藤ら，2000，2001；中川ら，2000；佐藤，2001；上野，2003，2004，2005；栗山ら，2004），2003 年の北海道豪雨災害における厚別川の水害（長谷川，2004），2004 年の福井豪雨災害における足羽川山地流域の水害（宇治橋・広部，2004；小高ら，2005；上野・石垣，2005），2004 年の台風 23 号による由良川の水害（辻本・井上，2004；馬場ら，2005），2006 年の川内川の山地流域の水害（小松・押川，2006；小松ら，2007）などが挙げられる。山地河川の流域には人口が少ないため、河川改修が遅れており、流域を未曾有の豪雨が襲うと、激甚な水害が発生することになる。

著者らは 1998 年の余笹川流域の水害（上野，2003，2004，2005）と 2004 年の足羽川の山地流域の水害（上野・石垣，2005）について調査した。これらの水害では、洪水流量が河道の流下能力をはるかに超え、大規模な氾濫が引き起こされて、河道湾曲部において激甚な被害が発生したが、どこでも同じように大きな被害が発生したのではなく、河道と谷底平野の形状に応じて被害の発生に大きな違いがあることがわかった。

河道および谷底平野の形状と被害の発生との関係について、その特徴を述べると、余笹川流域においては

河道の湾曲部で河道幅が小さい場合には農地に顕著な新流路が形成されて激甚な被害が発生し、湾曲部の河道幅が大きい場合には氾濫流による農地の洗掘が僅かで被害が小さかった。湾曲部河道の河道幅の違いによって被害の程度が変わることがわかった。一方、余笹川流域の支川黒川の三蔵川合流点から豊富橋までの 8.5km の区間においては、河道湾曲部の内岸側に地盤高が低い農地が河道に沿って帯状に連なっており、災害時には農地の地盤高が低い部分を氾濫流が流下したために、湾曲部の河道幅が小さい場合でも被害が相対的に小さくなった。足羽川の羽生川合流点から上流の約 10km の区間において、谷が蛇行している場所では、多くの場合に河道と山に囲まれた三角形状の平地の上流側では土地と河床との標高差が小さく、下流側では標高差が大きくなっている。すなわち、これは平地の勾配が谷の勾配よりも小さいことを意味するが、河道湾曲部において大規模な氾濫があったにもかかわらず、このような谷底平野の形状を持っていることによって被害が大きい範囲が平地の上流側に限られ、氾濫流の流速が小さくなって、被害は相対的に小さくなった。

本研究は、湾曲部の河道と谷底平野の形状の関係を模式化して実験水路を製作し、計測区間の河道と谷底平野の形状を数ケース変化させて、さらにそれぞれの水路条件の下で流量を変化させて表面流速、水面形および内部流速を計測し、災害時の流況と被害の発生と

の関係を実験的に解明しようとするものである。今年度の研究においては、湾曲頂点の河道幅を変化させた場合の流況を対象にして、表面流速と水面形を計測した結果について報告する。

2. 実験方法

2.1 実験水路

長さ 23m, 幅 2m, 水路勾配 1/800 のコンクリート製の水路の中に、厚さ 1.2cm の合板を 3 枚貼り合わせて形状を整え、深さ 3.6cm の蛇行する河道と谷底の平地を作った。波長が 2m の蛇行河道を 5 波長分つくり、4 波長目で計測を行った。上下流の直線部分を含めると、実験水路の全長は 14.5m である。実験水路の概要を Photo 1 に示すが、画面の上方が上流である。

実験水路の製作に当たっては、現地の河川と谷底平野の形状の実態をできるだけ反映させるように努めた。谷の境界は sin カーブで緩く蛇行(蛇行度は 1.03)させ、谷の蛇行の位相を 20cm 下流にずらして最大偏角 60 度、蛇行度 1.34 の sine-generated curve の蛇行河道を配置した。谷幅および河道幅はそれぞれ 80cm および 20cm で、蛇行河道の蛇行の頂点は谷の境界に接するようにした。余笹川および足羽川の河道の最大偏角と蛇行度を Fig.1 に示す。これらの河川の河道の最大偏角および蛇行度の平均値はそれぞれ 50 度および 1.35 である。実験水路の形状はこれらの値を参考にして決定した。Fig.1 において、大きい赤丸が実河川の平均値、緑のひし形が実験水路の形状として採用した値である。

2.2 実験条件

実験水路の計測区間を Photo 2 の説明入りの写真に

示す。Photo 2 は河道幅が一定 (20cm) の場合の状態を示しており、画面の左側が上流であり、緑の曲線は蛇行河道を、赤の曲線は谷の境界を示す。写真の緑の斜線部を取り換えることにより、実験条件を以下のように変化させることにした。なお、斜線部の合板を取り替えても、それが固定した河道と滑らかに接続するようにした。

1) 湾曲頂点の河道幅を 10cm, 20cm および 30cm の 3 ケースに変化させた。これらの河道の線形は後述の Fig.2 以下に示されている。

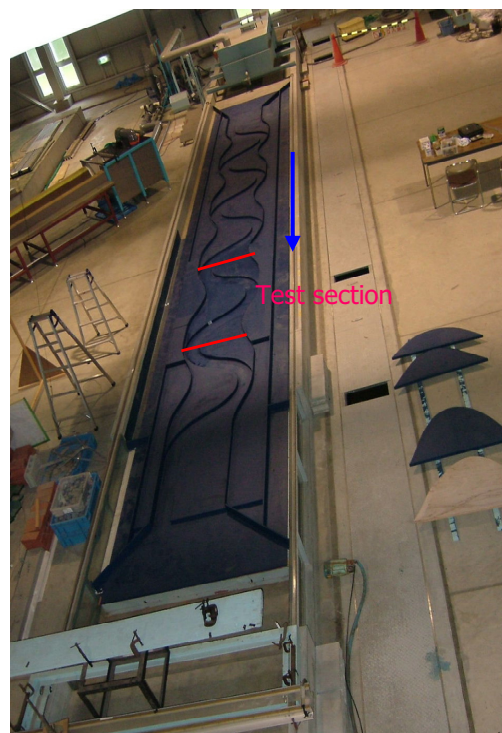


Photo 1 The experimental flume

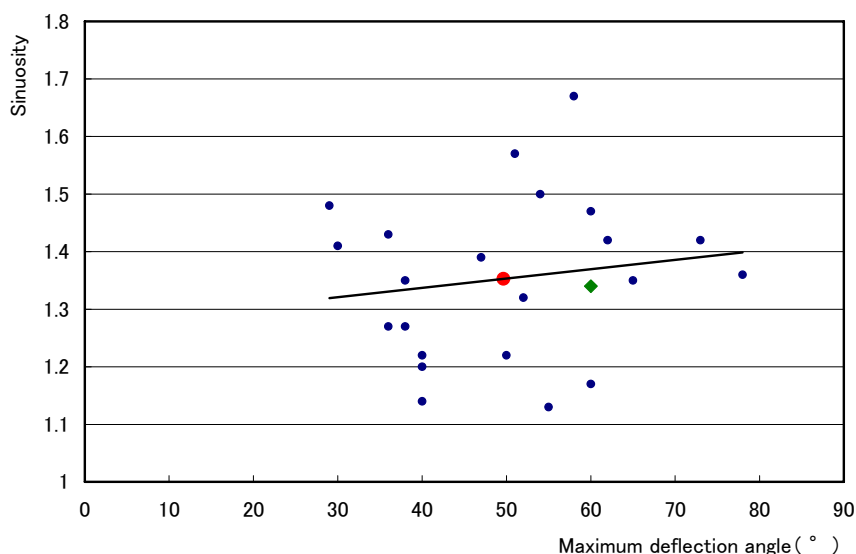


Fig.1 Maximum deflection angle and sinuosity in the Yosasa River and the Asuwa River

2) 湾曲頂点の河道幅が 10cm および 20cm の場合について、湾曲河道の内岸側の帯状領域の平地を 1.2 cm 低くした。このために、河道を形成する 3 枚の合板のうち上部のものを、河道幅が湾曲頂点でさらに 10 cm 広くなる合板に取り替えた。

3) 湾曲頂点の河道幅が 10cm と 20cm の場合について、湾曲河道の内岸側の平地の勾配を小さくした。

以上の地形的条件の下で、流量を変化させることにより、河道幅が一定の区間における氾濫原の水深を 4 通りに変化させて実験を行うことにした。すなわち、河道内の水深に対する氾濫原の水深の割合 Dr を 0, 0.17, 0.31, 0.45 に変化させた。 $Dr=0$ は河道満杯流量の状態を意味している。

2.3 流況の計測方法

実験では、コンクリート製の水路の下流端の堰を調節することにより実験水路内の水面が等流状態になるようにして、蛇行河道 5 波長分のうちの 4 波長目において、表面流速と水位を計測した。将来は、電磁流速計を用いて内部の三次元流況を計測する予定である。

表面流速の計測では、直径 0.08mm の塩化ビニルのトレーサーを計測区間の上流側から散布し、水路の上方に設置したビデオカメラを用いて表面流況の可視化撮影を行った。得られた動画から 1 秒間 30 フレームの静止画を抽出し、PIV 解析プログラムを用いて表面流速を求めた。また、水位は超音波水位計を用いて計測した。

3. 実験結果と考察

3.1 表面流速の特徴

河道幅が一樣な水路において、氾濫原の水深を 4 通りに変化させた場合の表面流速分布を Fig.2 に示す。

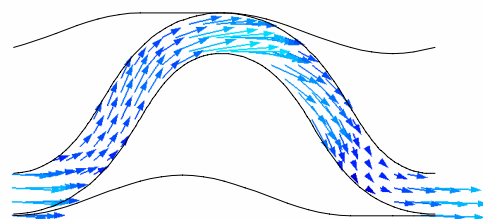
(a) 図は河道満杯流量を流した場合であるが、河道湾曲の頂点付近の表面流速が大きく、速い流れが湾曲部の外岸に衝突していることがわかる。氾濫原の水深が河道内の水深の 0.17 倍の場合 ($Dr=0.17$) の (b) 図においては、表面流速が大きい領域が氾濫原の上であり、そこでの流速ベクトルは横方向成分が大きくなっている。表面流速が大きい領域を流下方向に繋ぐと、氾濫流が谷を蛇行しながら流下していることがわかる。

(b) 図、(c) 図および (d) 図を比較すると、氾濫原の水深が大きくなるほど氾濫流の表面流速が大きくなり、氾濫流の流速ベクトルの横方向成分が小さくなって、氾濫流の主流の蛇行が小さくなることがわかる。

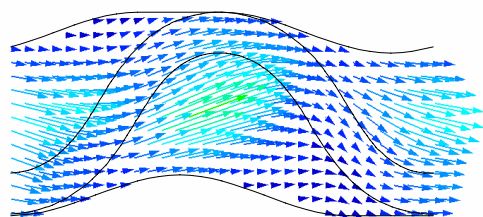
湾曲頂点の河道幅が 10cm および 30cm の水路において、河道幅が一定の区間において河道満杯になる流量を流した場合の表面流速分布を Fig.3 に示す。(a) 図



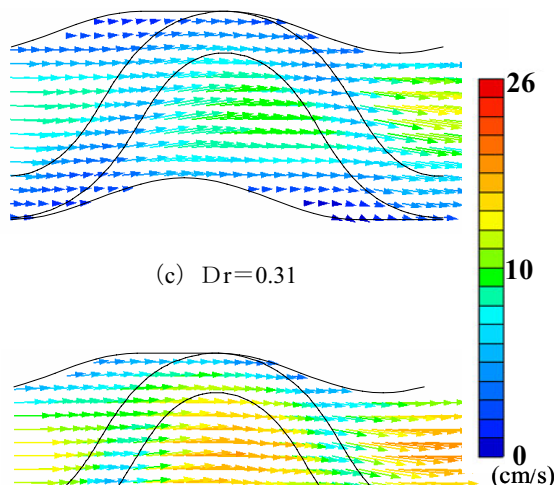
Photo 2 The test section of experimental flume



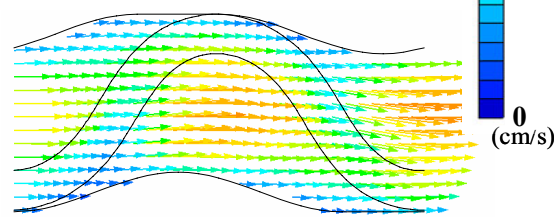
(a) $Dr=0$ (Bankfull)



(b) $Dr=0.17$



(c) $Dr=0.31$



(d) $Dr=0.45$

Fig.2 Water surface velocity in uniform channel

(湾曲頂点の河道幅が 10cm の水路)においては河道の湾曲部が狭いために、湾曲部の内岸側で氾濫流が発生すると同時に、氾濫は谷の上流側にも及んでいることがわかる。(a) 図と Fig.2 の (b) 図 (一様水路の $Dr=0.17$ の場合) とを比較すると、両者の表面流速分布のパターンはよく似ているが、一様水路で流量が相対的に大きい場合よりも河道幅が小さい水路で河道満杯流量を流した場合の方が、氾濫流の表面流速が大きくなることがわかる。このことは注目すべき内容である。また、(b) 図 (湾曲頂点の河道幅が 30cm の水路) と Fig.2 の (a) 図 (一様水路の河道満杯流量の場合) とを比較すると、一様水路では速い流れが湾曲部の外岸に衝突しているのに対して、湾曲頂点の河道幅が大きい場合には湾曲部の外岸側の流速が遅くて好ましい流れになっていることがわかる。

湾曲頂点の河道幅が 10cm および 30cm の水路において、 $Dr=0.17$ の場合の表面流速分布を Fig.4 に示す。

(a) 図 (湾曲頂点の河道幅が 10cm の水路), (b) 図 (湾曲頂点の河道幅が 30cm の水路) および Fig.2 の (b) 図 (一様水路の $Dr=0.17$ の場合) を比較すると、湾曲頂点の河道幅が小さいほど氾濫流の表面流速が大きくなり、氾濫流の流速ベクトルの横方向成分が小さくなって、氾濫流の主流の蛇行が小さくなることがわかる。また、(a) 図と Fig.3 の (a) 図 (河道満杯流量の場合) とを比較すると、湾曲頂点の河道幅が小さい水路においては、流量が相対的に大きい場合 ($Dr=0.17$) よりも河道満杯流量を流した場合の方が、氾濫流の表面流速が大きくなることがわかる。このことは注目すべき内容である。

湾曲頂点の河道幅が 10cm および 30cm の水路において、 $Dr=0.45$ の場合の表面流速分布を Fig.5 に示す。

(a) 図 (湾曲頂点の河道幅が 10cm の水路), (b) 図 (湾曲頂点の河道幅が 30cm の水路) および Fig.2 の (d) 図 (一様水路の $Dr=0.45$ の場合) を比較すると、いずれの場合にも氾濫流の流速ベクトルの横方向成分が小さくなって、氾濫流の主流の蛇行が小さいこと、湾曲頂点の河道幅が小さいほど氾濫流の表面流速が大きくなることがわかる。

以上の実験結果から注目すべき実態として、湾曲頂点の河道幅が小さい水路において河道満杯流量を流した場合には、同じ水路や一様水路で流量が相対的に大きい場合 ($Dr=0.17$) よりも、氾濫流の表面流速が大きくなることが明らかになった。

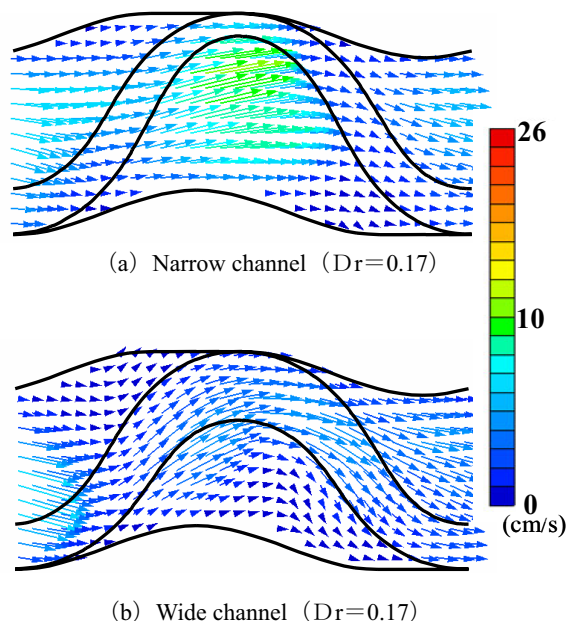


Fig.4 Water surface velocity in shallow depth condition

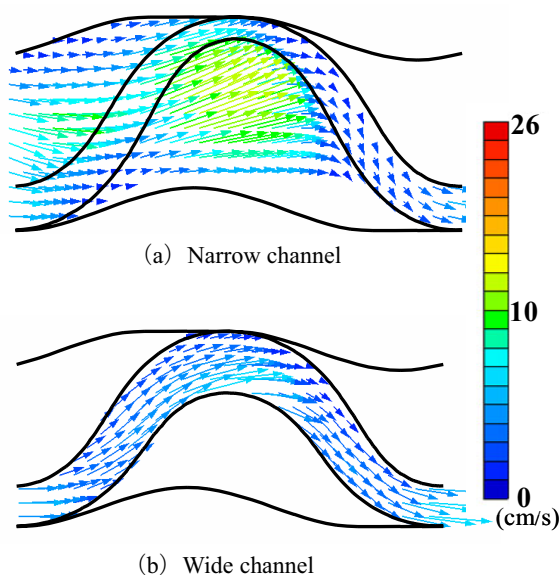


Fig.3 Water surface velocity in bankfull condition

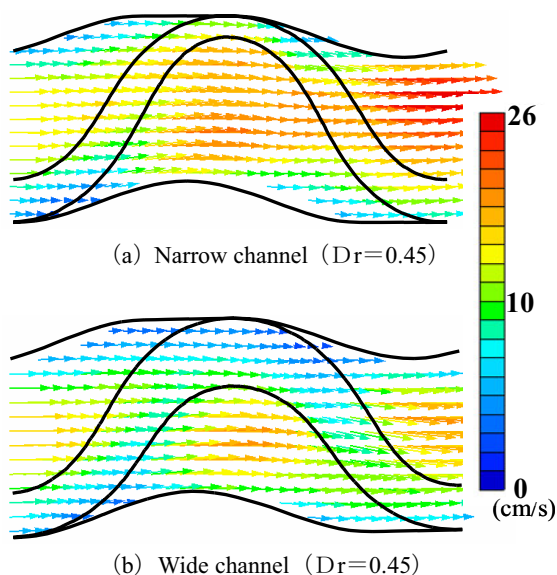


Fig.5 Water surface velocity in deep depth condition

3.2 表面の発散分布の特徴

上述のように、湾曲頂点の河道幅が小さい水路においては特徴的な流況が発生することが明らかになった。したがって、ここではまず湾曲頂点の河道幅が小さい水路の流れにおける表面の発散分布について検討する。

湾曲頂点の河道幅が 10cm の水路において、氾濫原の水深を 4 通りに変化させた場合の表面の発散分布を Fig.6 に示す。図において、発散分布が正の領域では上昇流が発生しており、発散分布が負の領域では下降流が発生していると解釈することができる。(a) 図は河道満杯流量を流した場合であるが、河道の狭窄部の上流側から氾濫する流れに強い上昇流が発生していることがわかる。また、氾濫流が河道に戻る辺りでは沈み込みが強いことがわかる。(a) 図から (d) 図までを比較すると、(b) 図、(c) 図および (d) 図においては氾濫原の水深が大きくなるほど上昇流と沈み込みが強くなるが、三者とも (a) 図の河道満杯流量を流した場合よりも上昇流と沈み込みがかなり弱くなっていることがわかる。すなわち、湾曲頂点の河道幅が 10cm の水路において河道満杯流量を流した場合には、特別な流況が発生していることが理解できる。また、災害時の農地の洗掘に対しては、このように河道の湾曲部の上流側で平地に乗り上げるような上昇流の役割が大きいと考えられる。

河道幅が一樣な水路において、氾濫原の水深を 3 通りに変化させた場合の表面の発散分布を Fig.7 に示す。(a) 図から (c) 図までを比較すると、流量が大きくなって氾濫原の水深が大きくなるほど上昇流と沈み込みが強くなることがわかる。

湾曲頂点の河道幅が 30cm の水路において、氾濫原の水深を 3 通りに変化させた場合の表面の発散分布を Fig.8 に示す。(a) 図から (c) 図までを比較すると、流量が大きくなって氾濫原の水深が大きくなるほど上昇流と沈み込みが強くなることがわかる。

以上の考察から、河道から氾濫するような流量を与えた場合には、いずれの水路においても、流量が大きくなって氾濫原の水深が大きくなるほど上昇流と沈み込みが強くなると言える。ところが、湾曲頂点の河道幅が 10cm の水路において河道満杯流量を流した場合には、特別な流況が発生しており、この場合の上昇流と沈み込みの強さは、河道幅が一樣な水路と湾曲頂点の河道幅が 30cm の水路において上昇流と沈み込みが最も強くなる $Dr=0.45$ の場合の上昇流と沈み込みの強さと同程度であることが注目される。

3.3 水面形状の特徴

湾曲頂点の河道幅が 10cm および河道幅が一樣な水路において、 $Dr=0.17$ の場合の水深分布を Fig.9 に示

す。図において、水深分布は各地点の水深を平均水深で除した値で示している。

図において、水深が相対的に大きくなっている場所は、これらの図に対応する表面の発散分布図の Fig.6 (b) 図および Fig.7 (a) 図において上昇流が強くなっている場所とほぼ一致することがわかる。すなわち、

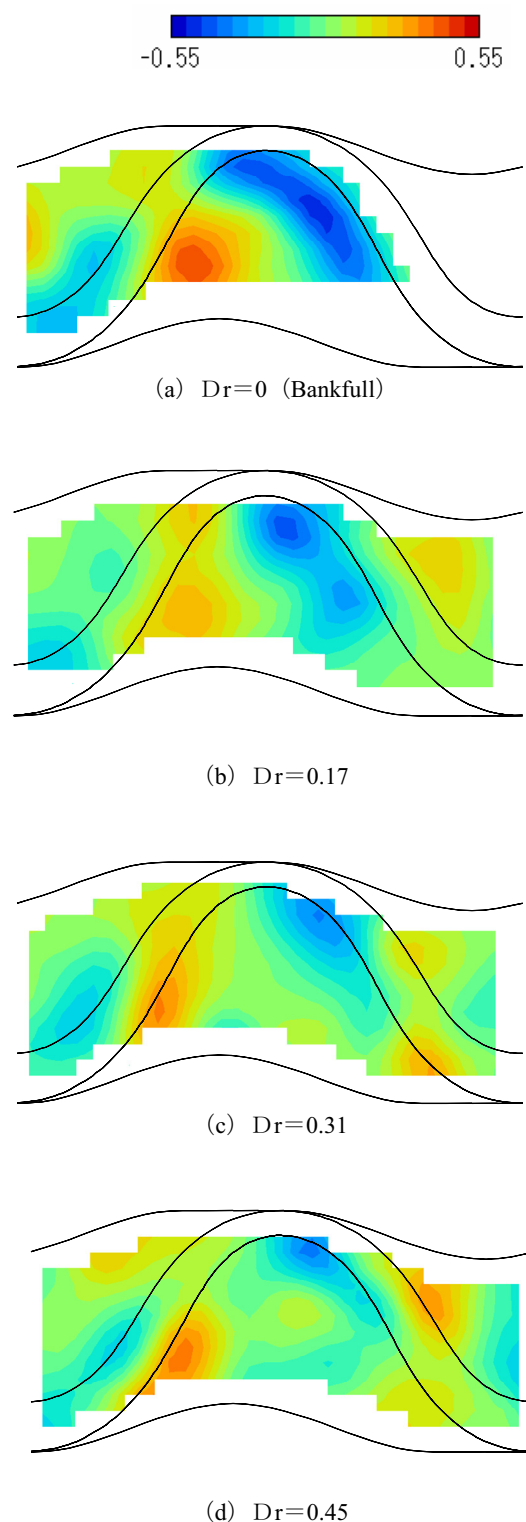


Fig.6 Divergence in narrow channel

河道から流れが氾濫する条件の下では、湾曲部の上流側で河道から平地に乗り上げる上昇流によって水面が上昇して水深が局部的に大きくなると考えられる。

さらに、これらの図に対応する表面流速の分布図の Fig.4 (a) 図および Fig.2 (b) 図においては、水深が大きい場所の下流側において氾濫流の表面流速が大きくなっていることがわかる。すなわち、氾濫流の流速は、流量の大きさだけではなく、水面勾配によっても大きな影響を受けると考えられる。今、水深が大きい場所の下流側の平地上の氾濫流の局所的な水面勾配を計算すると、湾曲頂点の河道幅が 10cm の場合の Fig.9 (a) 図では約 1/170、河道幅が一般的な水路の場合の Fig.9(b) 図では約 1/260 となる。これらの勾配は、実験水路の勾配の 1/800 よりかなり大きいことが注目される。

以上の考察から、谷底平野において蛇行河道から氾濫する流れは、水深の分布に河道の形状に対応する周期的な変化を与え、その結果として水面勾配が平地上で局部的に大きくなるため、流速も大きくなり、農地の洗掘などの被害を発生させる力が予想以上に大きくなると考えられる。

また、湾曲頂点の河道幅が 10cm の水路において河道満杯流量を流した場合に発生した特別な流況は、氾濫流の水面勾配が大きくなったために生じたものと考えられる。すなわち、Fig.6 (a) 図において、河道満杯流量を流した場合には河道の狭窄部の上流側から氾濫する流れに強い上昇流が発生することを指摘したが、このために氾濫原の上流側の水深が大きくなると推察される。一方、ここで氾濫した流れは下流の河道に戻

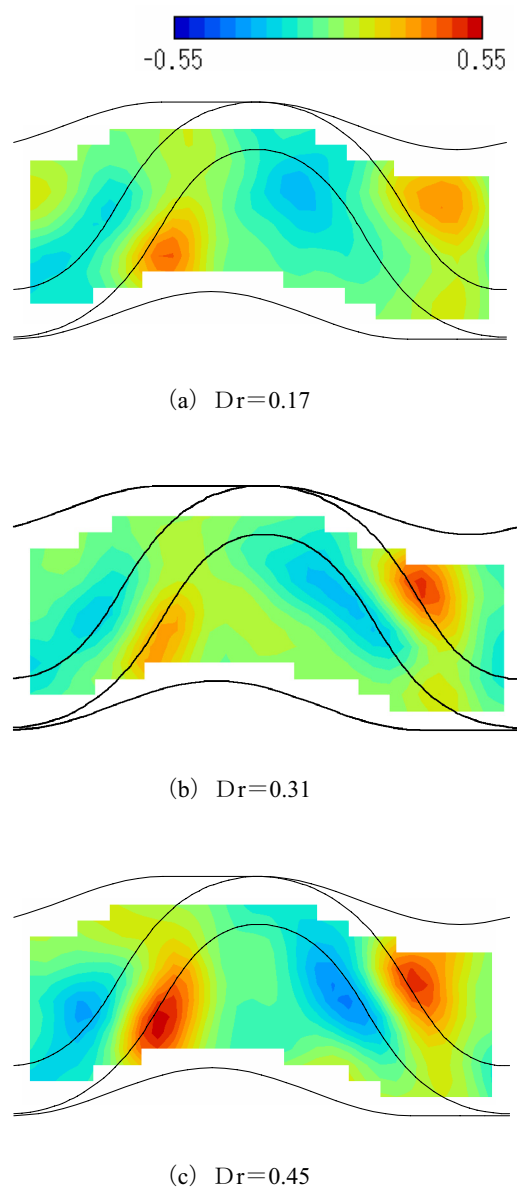


Fig.7 Divergence in uniform channel

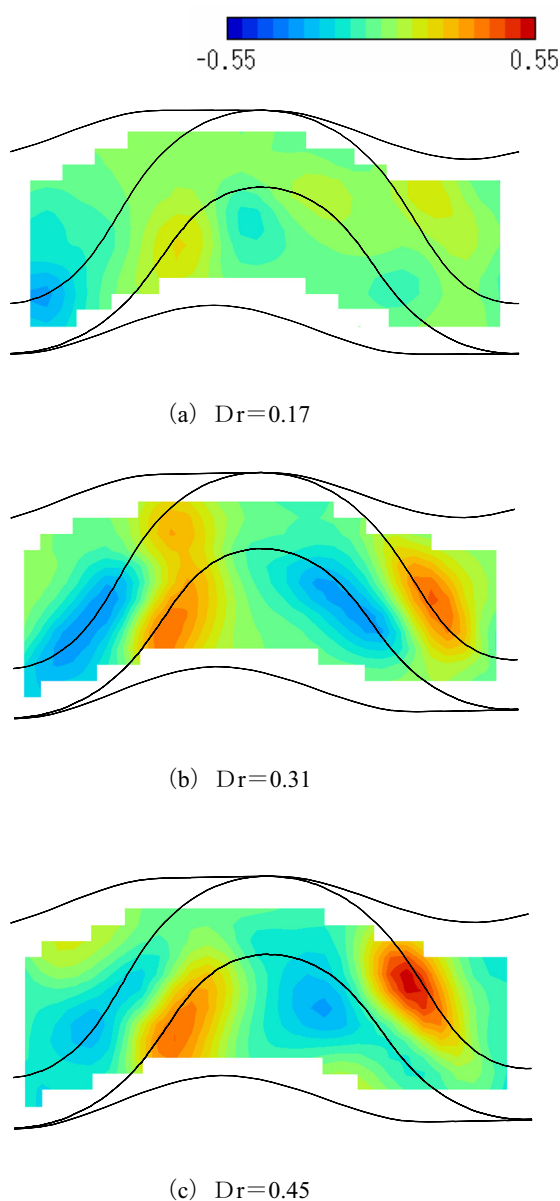


Fig.8 Divergence in wide channel

るが、Fig.3 (a) 図に見られるように、それより下流では流れは河道内に収まっているので、下流で河道に戻る流れの水深は小さくなると考えられる。したがって、この場合にも氾濫流の水面勾配が大きくなるために、氾濫流の流速が予想以上に大きくなったと考えられる。湾曲頂点の河道幅が 10cm の水路において河道満杯流量を流した場合の平地上の氾濫流の局所的な水面勾配を計算すると、それは約 1/160 であった。

4. 結 語

著者らが調査した 1998 年の余笹川流域の水害と 2004 年の足羽川の山地流域の水害では、大規模な氾濫がひき起こされて、河道湾曲部において激甚な被害が発生したが、災害時の流況と被害の発生との関係を説明するために水理実験を行った。本年度行った実験は実験方法において述べた全体の実験計画の一部であるが、本研究によって以下のことが明らかになった。

1) 湾曲部の河道幅が小さいほど、氾濫する流量が大きくなると同時に、氾濫流の主流の蛇行が小さくなる。
2) 流量が大きくなって氾濫する流量が大きくなるほど、氾濫流の流速が大きくなると同時に、氾濫流の主流の蛇行が小さくなり、氾濫流が谷の下流に向かって直進的に流下する。

以上の結果は、当然予想できることである。本研究で指摘したいことは、実験的検討によって山地河川の水害に関して、以下に述べるような新たな知見が得られたことである。

1) 谷底平野において蛇行河道から氾濫する流れは、水面勾配が平地上で局部的に大きくなるため、流速も大きくなり、農地の洗掘などの被害を発生させる力が予想以上に大きくなる。
2) 湾曲部の河道幅が小さい場合には、洪水の氾濫が始まった直後から流速が大きい流れが平地に押し寄せるために、農地の洗掘などの被害が予想以上に大きくなる。

以上の知見に基づくと、大洪水が発生する場合に、山地河川の水害を軽減するためには、湾曲部の河道幅を直線部よりも大きくすることが重要であると言える。計画規模より小さい洪水が発生する場合にも、湾曲部の河道幅が大きい方が好ましい流況になることが本実験によって明らかにされている。ただし、このような場合には河道の湾曲部の内岸側には土砂礫が堆積しやすいので、河川の維持管理に努める必要がある。

今後、本研究で行った実験条件のうち特徴的な流況が発生する条件を抽出して、電磁流速計を用いて内部の三次元流況を計測する予定である。また、地形的条件を変化させることにより、湾曲河道の内岸側の帯状

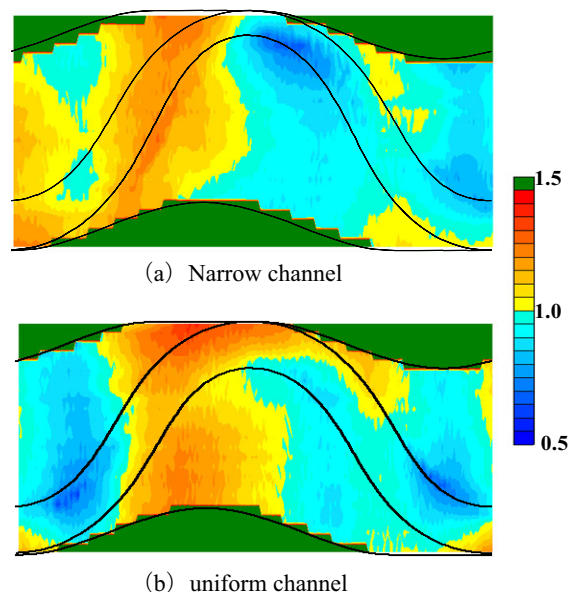


Fig.9 The distribution of water depth in shallow depth condition ($Dr=0.17$)

領域の平地を低くする場合、平地の勾配を小さくする場合についても、実験的検討を行う予定である。

参考文献

- 伊藤和典・須賀堯三・茂木信祥・池田裕一 (2000) : 平成 10 年 8 月末的那須出水による余笹川の流路変化の特性, 水工学論文集, 第 44 巻, pp. 407-412.
- 伊藤和典・須賀堯三・池田裕一 (2001) : 余笹川にみる低頻度大洪水による横侵食性河道変化の実態とその考察, 水工学論文集, 第 45 巻, pp. 781-786.
- 上野鉄男 (2003) : 余笹川の 1998 年 8 月水害と治水対策について, 京都大学防災研究所年報, 第 46 号 B, pp. 591-612.
- 上野鉄男 (2004) : 余笹川流域の 1998 年 8 月水害の研究, 京都大学防災研究所年報, 第 47 号 B, pp. 545-564.
- 上野鉄男・石垣泰輔 (2005) : 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, pp. 657-671.
- 上野鉄男: 余笹川流域の 1998 年水害の発生構造について (2005), 自然災害科学, Vol. 24, No3, pp. 303-321.
- 宇治橋康行・広部英一 (2004) : 2004 (平成 16) 年 7 月福井豪雨災害の速報, 土木学会誌, 第 89 巻第 9 号, pp. 49-52.
- 栗山卓也・川口広司・末次忠司・日下部隆昭・最上谷吉則 (2004) : 平成 10 年余笹川洪水による国道 4 号橋梁上下流の河床変動と河岸侵食, 水工学論文集, 第 48 巻, pp. 1087-1092.

- 小高猛司・岡二三生・横田善弘・竜田尚希・角南 進
(2005) : 河川上流部の被害, 平成 16 年 7 月福井豪
雨による地盤災害調査報告書, pp. 38-57.
- 小松利光・押川英夫 (2006) : 2006 年 7 月豪雨によ
る九州南部の被害等について (速報), 土木学会誌,
第 91 巻第 10 号, pp. 46-49.
- 小松利光・押川英夫・橋本彰博 (2007) : 平成 18 年 7
月豪雨による九州の災害の特徴と今後の課題, 平成
18 年度河川災害に関するシンポジウム, pp. 1-17.
- 佐藤照子 (2001) : 1998 年 8 月那珂川水害の被害と土
地環境, 主要災害調査第 37 号 北関東・南東北地方
1998 年 8 月 26 日～31 日豪雨災害調査報告, 防災科
学技術研究所, pp. 137-216.
- 辻本哲郎・井上和也 (2004) : 台風 21～23 号による豪
雨災害緊急調査 (速報), 土木学会誌, 第 89 巻第 12
号, pp. 23-29.
- 中川 一・高橋 保・里深好文 (2000) : 1998 年洪水
による那珂川水系余笹川の河道変動について, 水工
学論文集, 第 44 巻, pp. 395-400.
- 馬場康之・井上和也・戸田圭一・中川 一・石垣泰輔・
吉田義則 (2005) : 台風 0423 号による由良川流域の
水害に関する調査報告, 京都大学防災研究所年報,
第 48 号 B, pp. 673-682.
- 長谷川和義 (2004) : 平成 15 年台風 10 号による北海道
豪雨災害の概要と特徴, 平成 15 年度河川災害に関す
るシンポジウム, pp. 21-38.

Experimental Study on the Extensive Flooding in Mountainous River

Tetsuo UENO, Taisuke ISHIGAKI*, Kazuhiko HATTORI**, Satoshi YAMADA***
and Ryuji KAWANAKA**

* Faculty of Engineering, Kansai University

** Graduate School of Engineering, Kansai University

*** Daitetsu Kogyo

Synopsis

Severe flood disasters due to heavy rainfall occurred in the Yosasa River basin on August 27, 1998 and in the Asuwa River basin on July 18, 2004. On the basis of the field survey and aerial photographs taken before and after the flood, it had been cleared that the damage due to flooding was related to the width of curved river channels and the configuration of flood plains in valley. We investigated the characteristics of the extensive flooding under various conditions in the experimental channel. The water surface velocity, vorticity, divergence and water surface profile were measured.

Keywords: mountainous river, flood disaster, hydraulic experiment, extensive flooding, meandering river