

# 先鋭な洪水ハイドログラフの流下に伴う 水位と砂州河床高の時間変化特性

STUDY ON ALTERNATE BAR TRANSFORMATION AND WATER-LEVEL CHANGES  
UNDER SHARP-PEAKED FLOOD HYDROGRAPHS

藤堂 正樹<sup>1</sup>・福岡 捷二<sup>2</sup>

Masaki TODO, Shoji FUKUOKA

- 1 正会員 工修 広島大学大学院 工学研究科環境システム専攻 (〒739-8527 東広島市鏡山 1-4-1)  
2 フェロー会員 Ph.D 工博 広島大学大学院教授 工学研究科社会環境システム専攻 (〒739-8527 東広島市鏡山 1-4-1)

The purpose of this research is clarifying response of degradation, aggradation, and water level when a flow characterized by sharp-peaked hydrograph runs in the place where the bed gradient is steep and alternate bars are formed. Attention is also paid to the hysteretic effect of hydrograph repetition of floods. Examinations are made by the flume experiments and numerical computations.

It is found that the variation in riverbed and water level is greatly related to flow change and alternate-bar formation. The shallow water flow in a steep river is characterized by meandering flow, which occurs during decaying and early rising stages of discharge hydrograph during which the degradation tends to go on. The water level is almost in phase with the phase of alternate bar.

It becomes clear that wavelength, wave height, and scouring depth show the characteristic change with time by the hydrograph repetition.

*Key Words* : Flood, alternate bars, sharp-peaked hydrograph, aggradation and degradation, water-level, hysteresis of flood hydrograph

## 1. 研究目的

河川上流域では、集水面積が小さく、また急勾配であるため、一般に流出時間は短く流量ハイドログラフが先鋭となる。加えて集中豪雨やダム放流も視野に入れば、先鋭な流量ハイドログラフの発生頻度は増加しているものと推察される。著者ら<sup>1)</sup>は、断面急変部の多い急流河川を対象とした模型実験によって、洪水時の土砂移動について検討を進めてきた。

河川上流域の治水面の課題は、急激な流量変動に対し、河床高及び水位の変化を明らかにすることである。その際、河道内には砂州が形成されることが一般的であり、非定常流れにおける砂州の運動理解が基礎となる。これに関して渡邊ら<sup>2)</sup>は、複列砂州から単列砂州の発生領域を対象として、幅広水路に非定常流と定常流を与え、水深変化が砂州の成長過程に及ぼす影響に着目した研究を行っている。その結果、非定常流を与えた場合には、波長及び波高はその時点の水深に応じた値とはならず、過去の水深変動の履歴を受けて変化することを示している。なお、渡邊らの実験では定常流との比較の意味から、比

較的継続時間の長い洪水波形を与えている。

著者らの研究の目的は、急流で掃流力が大きくかつ交互砂州が形成される場において、急激な流量変動が生じる場合の河床高と水位の応答解明にある。このため実際の洪水波形を参考に、渡邊らが対象とした洪水波形よりも先鋭度の大きな波形を検討対象とした。継続時間が短くなるため砂州の成長が流量変動に追従できない場合も考えられる。このため、同一波形の繰返し履歴<sup>3)</sup>や異なる波形を連続させた場合について、河床高や水位に与える影響にも着目した。また、工学的に重要な洗掘、堆積、水位の変動を、砂州の形状変化との関係で検討を行った。

検討方法は直線水路を用いた実験と数値計算に拠った。水路実験では、交互砂州の経時的な形状変化を側面から観察し、併せて河床高の平面分布を測定した。その際、一様勾配に整正された「初期河床高(平均河床高)」を基準に砂州形状、洗掘深等の変動過程を観測した。さらに、流量変動に対する流れの応答や、砂州形状の変動原因となる流速、洗掘・堆積場の分布の経時的変化の詳細を数値計算によって検討し、実験結果と比較して評価している。

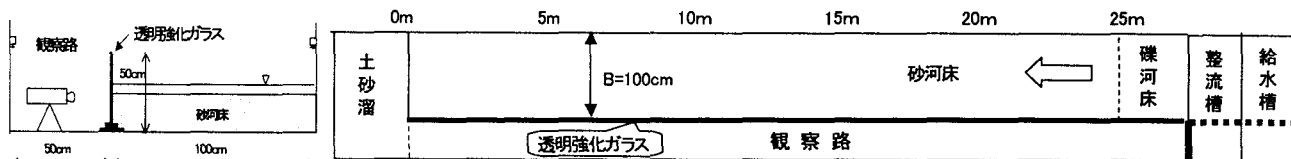


図-1 実験水路概要図

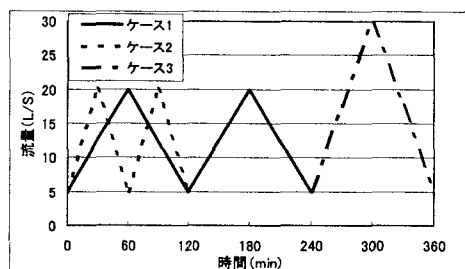


図-2 流量ヒドログラフ

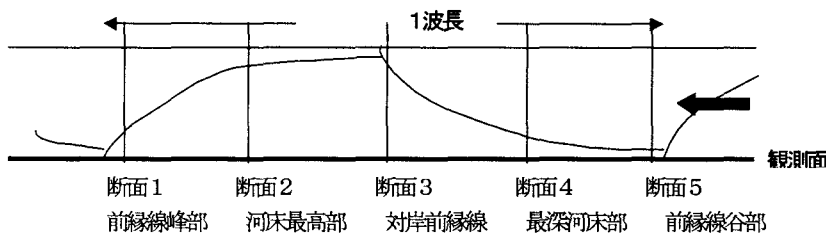


図-3 砂州形状の測定箇所

表-1 実験ケース一覧

ケース No.	流量範囲 Q (l/s)	通水時間 (min)	平均水深 h (cm)	エネルギー勾配 Ie	逆算粗度 n	無次元掃流力 $\tau^*$	下流端流砂量 (l/1サイクル)
1	5~20	120×2サイクル	1.5~4.2	1/101~1/94	0.021	0.15~0.32	266
2	5~20	60×2サイクル	1.5~3.8	1/102~1/97	0.021	0.14~0.32	127
3	5~30	120×1サイクル ※ケース1通水後	2.2~4.6	1/104~1/101	0.022	0.17~0.35	379

なお、水路実験では上流からの先鋭な流量ヒドログラフに影響を与えないような下流端条件としている。すなわち下流端での水位調節は行わず、常時、限界水深をとる条件とした。この理由は、下流端水位を調節した場合には、水路下流側から生じる流路内貯留によって上流から伝播する洪水流が影響を受けることが福岡ら<sup>4)</sup>の研究によって明らかとなっているためである。本実験では、下流部では低下背水となるが、下流端から2m地点で低下背水の影響がほぼ無くなることを確認している。

## 2. 交互砂州形成場での非定常実験

### (1) 実験水路

実験には、幅1.0m、長さ25mの直線水路を用いた。図-1に示すように、河床高及び水位の観察を容易とするために水路の左岸側面は透明強化ガラスとした。初期整正河床は勾配1/100の平坦河床とし、1サイクルの洪水波形通水後は、河床形態を保持した状態で2サイクル目以降の波形を流下させた。河床材料には、 $d=0.8\text{mm}$ 、比重2.65の一樣砂を用いた。また、左岸ガラス面には、勾配1/100の「初期河床高線」を記し、河床高及び水位測定の基準高とした。

### (2) 実験条件

上流端での流量ヒドログラフは、水路上流端に接続する管路に設置された電磁流速計と自動開閉バルブをコンピュータ制御することにより与えている。実験に用いた流量ヒドログラフを図-2に示す。基本となるケース1では、ピーク流量を20l/s、継続時間を120min×2サ

イクルとした。ケース2では、継続時間を半分とし、60min×2サイクルとした。ケース3では、ケース1の2サイクル終了後、継続時間を等しくしてピーク流量を1.5倍とした洪水波形を与えた。

継続時間の設定理由は以下の通りである。著者らは、前報<sup>1)</sup>において実在の急流河川の流れを1/50スケールの模型実験によって検討した。その際、洪水波形は相似則によって最大流量17l/s、継続時間120minと定めた。本実験についても、その水路幅等から実在中小河川の1/50相当のスケールと想定すれば、ケース1の波形は前報で対象とした洪水波形にはほぼ相当する。従って、ケース1の波形の先鋭度は、実河川で発生し得るものであり、ケース2はより先鋭度の高い波形と位置づけられる。

水位と砂州河床高は、側面測定と、横断測定を通水中に行った。側面測定では図-4に示す砂州前縁線地点、最大洗掘及び堆積地点に着目し、縦断位置と河床高及び水位の経時変化を記録した。横断測定は、流下中の特定砂州を対象に図-3に示す5断面について、横断方向に水位3点、河床高10点を記録した。測定は、通水開始後20分ピッチ、ピーク流量付近では10分ピッチで実施した。

通水中、上流部の河床低下を軽減するために、流量が15l/s以上の時間帯に、その時点での下流端流砂量に相当する60cm<sup>3</sup>/s/mの給砂を行った。

### (3) 実験結果

表-1は、実験結果の概要である。平均水深、エネルギー勾配、 $\tau^*$ は、特定砂州上の水位及び河床高の横断測定結果に基づく値であり、通水時間中の変動幅を示す。逆算粗度nは通水時間内の平均値である。砂州河床高と

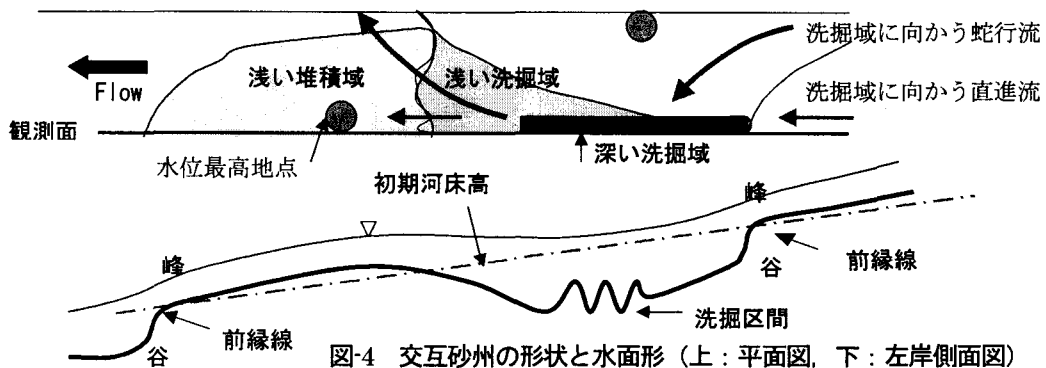


図-4 交互砂州の形状と水面形 (上：平面図, 下：左岸側面図)

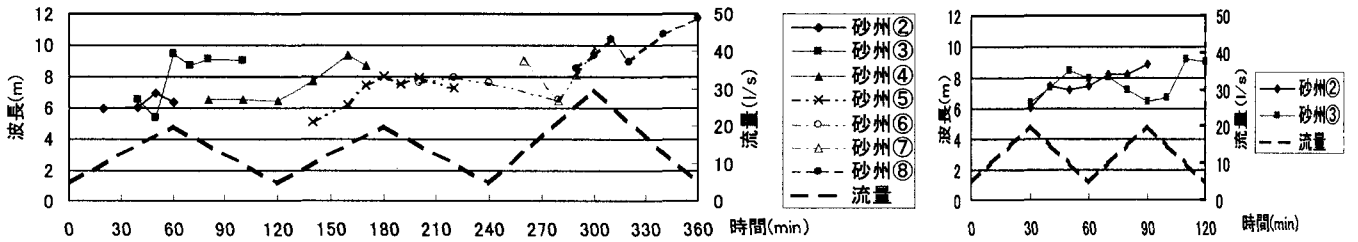


図-5 砂州波長の経時変化 (左：ケース1及び3, 右：ケース2)

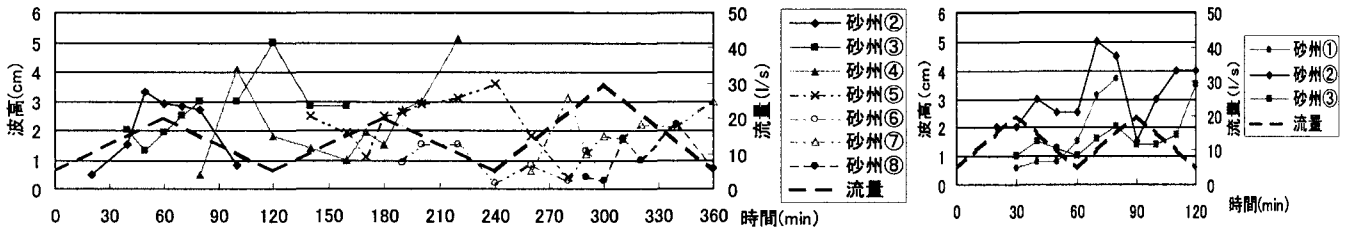


図-6 砂州波高の経時変化 (左：ケース1及び3, 右：ケース2)

水位の横断測定結果から得られた断面平均 Fr 数は、0.7～0.9程度の値で推移した。

本実験の河床形態は、発生領域区分<sup>5)</sup>より交互砂州領域の上限に相当する。

ケース1では通水開始後30分程度、ケース2では20分程度で交互砂州前縁線の発生が確認できた。その後、砂州の流下に伴い、新たな砂州前縁線が下流端から20m付近に現れた。観測時間内では、下流端から20m程度の区間に、両岸で5波長程度の交互砂州が存在した。

交互砂州を側面から見た縦断形状を、図-4に示す。形状を上流から辿ると、前縁線峰部は初期河床高とほぼ等しく、谷側はそれよりも低くなる。前縁線下流側には半波長程度の長さの洗掘区間が生じる。その下流は浅い堆積区間が続き、下流側前縁線に至る。なお、測定時間中、平均河床高は初期河床高に保たれている。

砂州の運動と形状に着目して考察する。以下の図では、左岸側面から観察できた左岸側砂州について、下流端を通過した順にNo.を記す。なお、通水終了時に水路内に存在した砂州は下流側から連番としている。

砂州波長の変化を図-5に示す。ケース1, 2共、初期段階の波長は6m程度である。ケース1では、各サイクルのピーク流量付近で最大値8～9m程度まで成長し、その値で推移した。その後波長が短くなることはなかった。ケース2では、1サイクルの時間内では波長が成長

しきれず2サイクル目以降も徐々に増加し、やはり9m程度まで成長する。成長過程で減水期となる場合でも波長の短縮は認められなかった。なお、20L/sの定常流を2時間流下させた観察を別途実施したが、砂州波長は9～11m程度で推移した。ケース3の結果は、図-5の3サイクル目である。砂州波長は、ピーク流量30L/sを過ぎ減水期に入った段階においても増加し、11m程度にまで成長した。波長が大きくなる過程では、砂州No.⑥のように砂州の統合も確認された。3つの非定常実験と定常流実験の結果から、砂州波長は、ピーク流量に対応して単調増加する過程にあったものと推察できる。

砂州波高は、一般に、砂州の横断河床高の最高点と最低点との標高差と定義されるが、本報では、前縁線形状の変動に着目しており、また観察の容易さから、図-4に示す前縁線の峰と谷の高低差を「波高」と定義する。

砂州波高の変化を図-6に示す。波高は、ケース1, 2の1サイクル目では流量増と共に大きくなるが、ピーク流量付近で一旦増加が止まり、減水時に再び増加する。最大値は2ケース共5cm程度であった。また、2サイクル目に入っても波高は成長するが、ピーク流量付近で一旦小さくなりその後再び大きな値となる。ケース3の場合は先の2ケースとは異なり、増水段階では一旦増加するが、ピーク流量付近では、0.5～2cm程度の小さな値となる。側面観察においてもピーク流量付近では前縁線

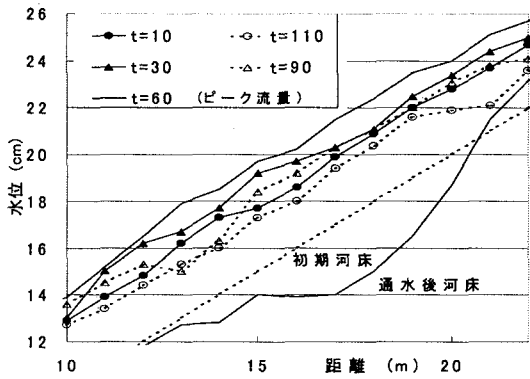


図-7 水位縦断の経時変化

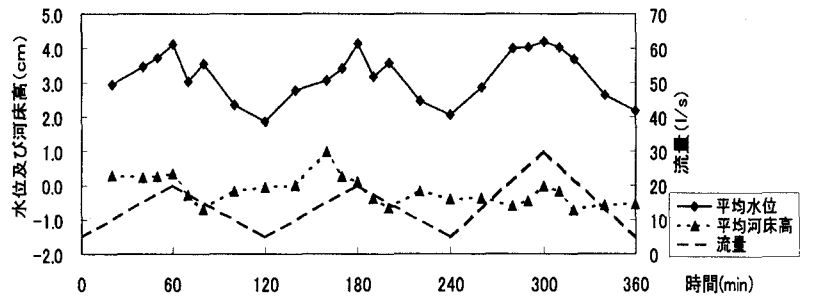


図-8 水路10m地点の水位及び河床高変化(ケース1及び3)

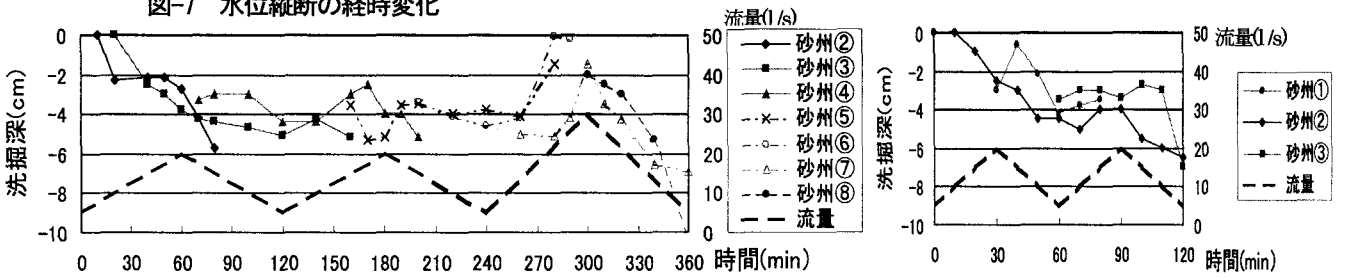


図-9 洗掘深の経時変化(左:ケース1及び3, 右:ケース2)

は存在するものの、形状はやや不明瞭となる。ケース3のピーク流量付近では、ケース1の2サイクルの波形で形成された砂州河床の凹凸が一旦平坦化に向かい、減水期に入って、ケース1とは異なる波長と波高を持つ砂州が再び形成される過程にあることが明らかとなった。

3つのケースを詳細に見ると、峰高は、初期河床高に対して $-0.5 \sim +1\text{cm}$ 程度で推移し、ピーク流量付近で低い値をとる傾向にあった。一方、谷高の変動はやや大きく、初期河床高に対し $-1 \sim -4\text{cm}$ 程度の値で変動する。ピーク流量付近で最も上昇しその後低下する。波高の変動は、谷高の変動に拠るところが大きい。

観察より、砂州の移動速度は流量に応じて増減することが判った。1サイクルでの移動距離は、ケース1では $10.2 \sim 16.5\text{m}/120\text{min}$ 、ケース2では $7 \sim 7.5\text{m}/60\text{min}$ 、ケース3では、 $13.6 \sim 16.9\text{m}/120\text{min}$ 程度であった。

#### (4) 水位変動及び洗掘・堆積

図-7は、流量変動に伴う縦断水面形の時間変化を、ケース1の1サイクル目を対象とした側面での水位観察より示した結果である。図には、通水後の河床高も示している。上流端から流入する増水期と減水期の同じ流量時の水位縦断形を比較すると、増水期(実線)は減水期(破線)に比べ水面形は急勾配となっており、また、H-Q関係はループを描く。この結果は、固定床で行われた複断面蛇行水路での実験結果<sup>4)</sup>と同じであり、急勾配直線水路であっても、流れの非定常性と河床形状の大きな変化により、流路内に貯留が生じることを示している。

水面形と砂州形状との関係は、図-4に示す通り、河床の凹凸とほぼ同位相となる。“初期河床高からの水位”が最も大きくなるのは、砂州上の浅い堆積域の中央部付近である。洗掘区間の水位は比較的小さい。ただし、流

量変動によって水面形状は変わる。ピーク流量付近では一様勾配に近い水面形となるが、小流量の段階では、砂州堆積中央部と洗掘区間とは、初期河床からの水位に $2\text{cm}$ 程度の差が認められた。

下流端から10m地点で、水位及び河床高の定点測定を行った。横断方向の測定点は、水路中央と中央から左右岸50cm地点の3点とした。ケース1及び3の測定結果を図-8に示す。プロットは3測点の平均値である。ケース1の2サイクルでは、河床高は砂州の流下の影響を受けて変動し、水位もほぼ流量変動に応じた値となる。平均水深は、流量5l/s時点で $2.2\text{cm}$ 、ピーク流量20l/s時点で $3.9\text{cm}$ であった。ケース3では、特徴的な水位変動を生じた。流量増に応じて水位上昇する傾向は同一であるが、ピーク流量付近では水位上昇は止まる。ピーク時水位は、ケース1の値とほぼ等しい。河床は先述のように平坦化するため平均水深は流量に応じて増減する結果となった。30l/s時の平均水深は、 $4.2\text{cm}$ であった。

河床高が初期河床高よりも低くなる洗掘区間は、前縁線の downstream 側にはほぼ半波長程度の長さで生じる。その横断幅は $10 \sim 20\text{cm}$ 程度である。図-9は、洗掘区間内の初期河床からの低下量の経時変化である。以下、この低下量を洗掘深と表記する。ピーク流量が等しく継続時間のみを変更したケース1, 2の洗掘深は、増水段階ではほぼ単調に増加する。ピーク流量付近で洗掘は一旦止まり、減水期に再び進行する。2サイクル目の増水段階で洗掘深はやや減少するが、ピーク流量を過ぎると洗掘が進み、最大 $5 \sim 6\text{cm}$ 程度で推移する。ケース3の場合、通水開始時点で $4 \sim 5\text{cm}$ 程度の洗掘深は流量増と共に減少し、ピーク流量付近では $0 \sim 2\text{cm}$ 程度となる。これは、堆積区域の土砂が流送され、河床全体が平坦化される結果と考えられる。ピーク流量時を過ぎると短時間の間に急激

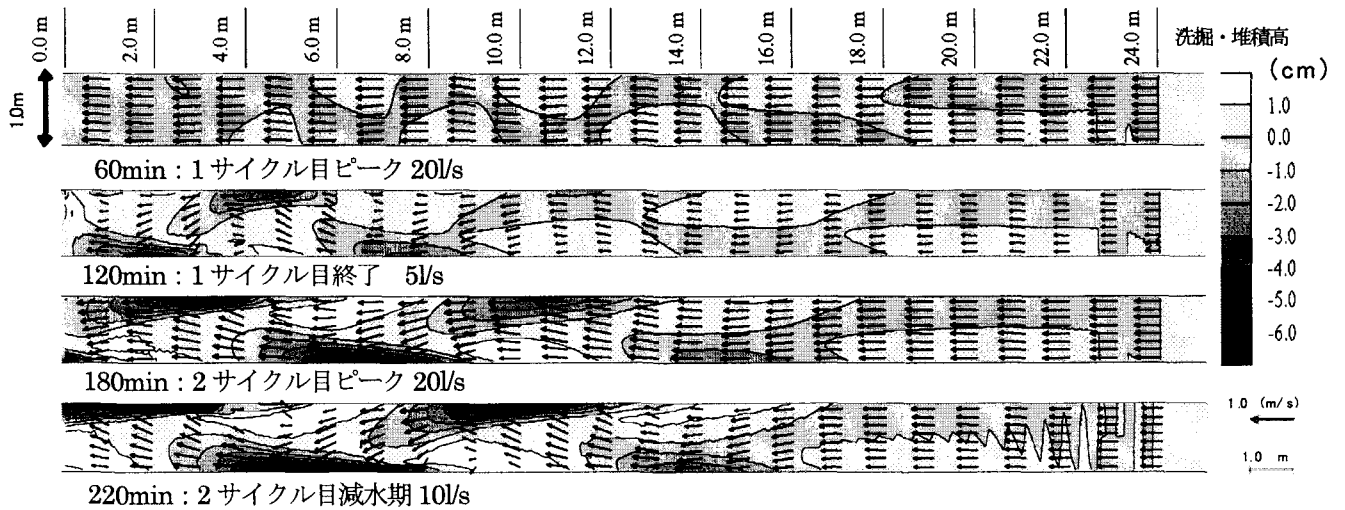


図-10 洗掘／堆積コンターと流速ベクトルの経時変化 (ケース1)

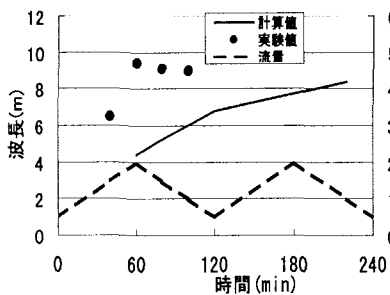


図-11 砂州波長の経時変化

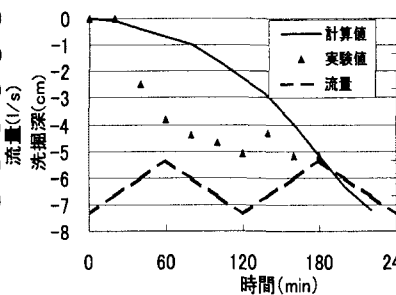


図-12 洗掘深の経時変化

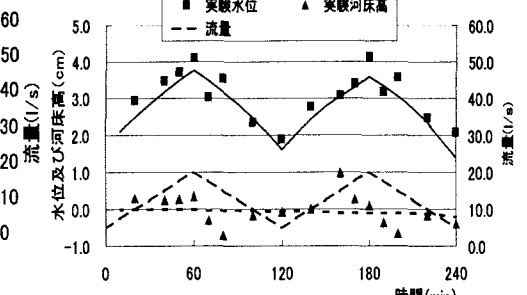


図-13 水位の経時変化

に洗掘が生じ、ケース1, 2よりも大きい7~10cm程度にまで達する。

洗掘深に影響を与えるのは、図-4に示すように、前縁線下流部に生じる蛇行流と直進流の合流による流れの集中である。特に、対岸の洗掘区間から当該洗掘区間に流入する蛇行流の影響が大きい。蛇行流の発生は、ケース3に明らかなように減水時に特に顕著となるため、洗掘はこの段階で進行し易い。

洗掘区間では、ピーク流量付近の断面平均フルード数が0.9程度となる段階で波長20cm、波高5cm程度の流下反砂堆が発生した<sup>6)</sup>。数十秒程度で減衰するため、洗掘深及び水位への影響は少ないものと考えられる。

堆積区間は、洗掘区間の下流側にほぼ半波長程度の長さで生じる。図-4に示すように深い洗掘区間から下流側に土砂輸送され、比較的広い範囲に浅い堆積が生じる。堆積高が最大となるのは、図-3に示す断面2の左岸側及び断面4の右岸側である。特定砂州の追跡観察では最大堆積高は、1.8cm程度であった。

### 3. 数値計算による実験結果の再現

#### (1) 数値計算の目的と手法

水位と砂州河床高の時間変化の原因となる平面的な流速及び主流線の変化特性を明らかにする目的で、実験ケース1を対象に数値計算を行った。

流れの計算手法は、前報<sup>1)</sup>と同様である。鉛直方向

の運動方程式に対して静水圧分布を仮定した準3次元解析手法とし、方程式の離散化はFEM手法に拠った。1メッシュのサイズは、4cm×8cmの直角三角形とした。計算は、幅1.0m、1/100勾配の平坦河床を初期河床として行った。粗度係数は、実験結果の逆算値 $n=0.021$ を与えた。砂州の発生を促すための初期擾乱として、既往研究例<sup>7)</sup>を参考に上流端より2m地点の右岸側に水路幅の半分相当の幅48cm、縦断長48cm、高さ5mmのマウンドを設定した。下流端条件は、実験と同様に限界水深を与えている。上流部との水深差は最大5mm程度であり、下流端から4m程度の範囲では低下背水の影響が存在した。計算時間ピッチは1/200秒である。

#### (2) 計算結果

図-10は、各流量段階の河床変動量コンターに流速ベクトルを重ねたものである。洪水波形1サイクル目の流量ピーク時60分段階から砂州形状が明瞭に現れてくる。

砂州波長の変化を図-11に示す。波長は、発生段階では5m程度であり、その後時間経過と共に成長を続け、2サイクル目の終了時点では、8.5mまで成長する。この値は実験値と比較すると若干小さく、砂州の成長速度は実験に比べてやや遅い。初期の砂州形成が遅い点については、初期擾乱の与え方も関係があるものとする。

洗掘深の変動を図-12に示す。20分経過時点で下流端から16m付近に生じた洗掘部は、180分経過時点ではほぼ下流端に達する。その間、洗掘深は2サイクル目に入

っても単調に増加し、7cmに達した。この値は、実験の最大値 5.7cm よりも大きい。また、洗掘深の増加は、1 サイクル目の減水期から 2 サイクル目の増水期にかけて顕著になる。実験結果でも触れたように、洗掘原因となる前縁線下流での流れの集中は、流量の小さい段階で特に顕著である。図-10 の流速ベクトルからも、流量が 5 ~10l/s 程度の段階においては、洗掘域から対岸の洗掘域に向かう主流線が確認できる。流速は 60cm/s 程度となる。一方、ピーク流量時点では流速ベクトルは直進性を増して水路内を一様に流れるようになる。

10m 地点の初期河床高を基準とした水位及び河床高の断面平均値について、計算値と実験値との比較を図-13 に示す。計算値はメッシュ横断方向の 26 点平均値、実験値は図-8 と同様である。

上記の結果より、流量変動に伴う水位及び主流線の変化は実験結果を再現できたものと考えられる。一方で、砂州の進行速度や洗掘深については、実験結果との差異が生じた。これらの点に関し、限界掃流力の設定、流砂量の観点から今後検討が必要と考えられる。

#### 4. 結論

先鋭なハイドログラフの特徴は、短い継続時間と流量変動幅の大きさにある。加えて先鋭なハイドログラフが流下する場合は、ほぼ例外なく急流であり、川幅水深比の小さな流れ場で砂州河床となることが多い。従って、水位及び河床高の時間変化の解明には、流れの把握と共に砂州の運動と形状変化の理解が不可欠である。

##### (1) 水位変動及び洗掘、堆積

急勾配の直線水路であっても、流れの非定常性と河床形状の大きな変化によって、増水時と減水時の水面形は異なり、流路内で貯留が生じる。局所的な水面形状は、砂州の凹凸とほぼ同位相の形状を取り、砂州の峰部分に相当する位置での水位は高くなる。ピーク流量時に河床が平坦化する場合、全断面流下の傾向となり、水深は増加するものの水位上昇はさほど顕著とはならない。なお、縦断的な水位波形の経時変化と砂州形状変化との関連については検討が十分でなく、今後の課題である。

砂州河床側岸部での洗掘原因は、流量急変による主流線の変化である。小流量時には“流れの集中”により砂州前縁線下流に洗掘が生じ、ピーク流量時には河床は平坦化傾向となる。河床変動の評価は、ピーク流量のみに着目するのでは不十分である。また、河床変動が急激であることが短い継続時間がもたらす結果である。

これらの点は急流中小河川における特徴的な水理現象であり、既往技術書<sup>8)9)</sup>等では十分に触れられていない。水位検討や護岸等の基礎高検討の際の留意点である。

##### (2) 先鋭なハイドログラフの履歴

先鋭なハイドログラフのもたらす履歴については、い

くつかの新しい知見を得た。水位と河床変動の「履歴」を検討する場合、1 洪水波形のピーク流量値、洪水継続時間及び波形の繰返しについて考慮が必要である。

同規模の洪水波形を繰返した場合、砂州波長は時間変化と共に増加し、ピーク流量を定常流で流下させた場合の値に漸近していく。ただし、洪水波形の先鋭度が大きい場合、1 洪水の継続時間内では波長の成長が流量変動に追従できない場合が生じるが、繰返し波形を与えることで一定値に漸近していくことが確認された。砂州波高は流量増加と共に成長するが、ピーク流量付近では一旦小さくなり、その後再び増加する。波形の繰返しによってもピーク時に波高が小さくなる傾向は現れる。なお、波高の変動はピーク時に谷高が変動するために生じるところが大きい。洗掘深は、各時点の流量ではなく、前縁線下流の蛇行流の影響を受けて増減する。同規模の洪水波形の繰返し実験では、砂州波長の場合と同様に洗掘深は一定の値に漸近していく傾向が確認された。

本ケース 3 の第 3 波のように過去の洪水履歴よりも大きい流量の洪水波形が流下した場合には、新たな砂州を形成しようとする過程が確認できた。ケース 3 のピーク流量時の水理量から判断すると、砂州非形成に近い領域であった<sup>3)</sup>。その場合、河床はピーク時に平坦化傾向を示し、減水する短時間の間に過去の波長や波高よりも大きな砂州形状を再度形成し、洗掘深も大きな値となった。これを実河川に当てはめれば、既往最大規模の洪水が生じた場合には、1 洪水で急激に河床形態を変えてしまい、特に減水時に洗掘の危険が大きいことを示唆している。

##### 謝辞：

研究遂行にあたり、広島大学水工学研究室の山本輝君、尾崎修一君の協力を得た。また数値計算では蒲生嶺行氏に助力を頂いた。記して謝意を表す。

##### 参考文献

- 1) 藤堂正樹、福岡捷二、浜口憲一郎：断面の急変する急流河川に先鋭な流量ハイドログラフが流下した場合の水理現象、土木学会河川技術論文集 Vol19, 2003.
- 2) 桑村貴志、渡邊康玄：幅広水路における非定常流下での砂州形成実験、水工学論文集第 47 巻, 2003.
- 3) 三輪浩、大同淳之、横川純：流量変化に伴う交互砂州の発達・変形過程、水工学論文集第 47 巻, 2003.
- 4) 福岡捷二、渡邊明英、關浩太郎、栗栖大輔、時岡利和：河道における洪水流の貯留機能とその評価、土木学会論文集 No. 740/II-64, 2003. 8
- 5) 岸力・黒木幹男：中規模河床形態の領域区分に関する理論的研究、土木学会論文報告集第 342 号, 1984.
- 6) 福岡捷二、興津一夫、山坂昌成：急勾配移動床流れにおける河床波の形状・伝播特性、土木学会論文集第 323 号, 1982.
- 7) 横山洋、渡邊康玄、清水康行：非定常流における砂州の数値計算、水工学論文集第 46 巻, 2002.
- 8) 中小河川計画検討会、中小河川計画の手引き(案), 1999.
- 9) 全国防災協会、美しい山河を守る災害復旧基本方針, 2002.

(2003.9.30 受付)