洪水減水期における水みちの形成

MECHANISMS OF CHANNEL FORMATION ON BARS AT RECESSION PERIOD OF HYDROGRAPH

益本 孝彦¹・渡邊 康玄²

Takahiko MASUMOTO, Yasuharu WATANABE

¹ 正会員 株式会社竹中土木 東京本店 (〒 136-8570 東京都江東区新砂一丁目 1 番 1 号)

² 正会員 北見工業大学教授 工学部 社会環境工学科 (〒 090-8507 北海道北見市公園町 165 番地)

Formation of bars indicates meandering of flow and deposition or erosion in river bed. It is necessary for river improvement and water utilization to clarify this phenomenon. Therefore many researches have been conducted on bar formation. In our previous study, it was found that the channel formation process was influenced by the form of hydrograph and duration of discharge recession period.

The purpose of this study is to determine the influence given to channel formation by difference of discharge recession pattern in detail. Experiment conditions are case of constancy and variation in discharge recession speed.

It is found that the channel formation process is strongly influenced by gradient of hydrograph at discharge recession period. That is, the relationship both discharge and gradient of hydrograph (discharge recession speed) is important for the channel formation process. channel width is able to be estimated by the stable channel width theory proposed by Ikeda. In addition, it is found that the active.

Key Words: bars, channel formation, river width, hydraulic experiment, recession period of hydrograph

1. はじめに

砂州の形成は、流水の蛇行や砂州前縁に形成される洗掘あるいは対岸の堆積を意味することから、治水や利水のため、その挙動を解明することが不可欠であった。このことから、砂州の形成および発達過程に関して過去から数多くの研究が行われてきている。これらの成果の一部は、土木学会水理委員会「洪水流の三次元流況と流路形態に関する研究」¹⁾に取りまとめられている。

しかし、これらの研究は、砂州の平衡状態を中心に扱っており、流れが大きく変化する実際の河川への適用はある程度限定的なものとなっていた。近年、数値計算技術の発達によって、より複雑な場での砂州の挙動を明らかにするため、数値計算モデルの開発が行われてきた²⁾。その結果、実際の河川における砂州の挙動についての再現や予測が可能となり、河道計画に利用されるようになってきている。さらに、生物等にとっての河川環境における砂州の重要性も認識され、砂州によって形成される瀬・淵構造に関する研究³⁾も進められてきている。平水時に流水が存在する水みちに関しては、上流からの土砂供給の視点では三輪ら⁴⁾が、砂州と平水時流量との関係は寺本ら⁵⁾が、また砂州の形状変化の観点では渡邊ら⁶⁾が実験、理論解析及び数値計算等で検討を行ってきている。

しかしながら、洪水時において水理量の時間変化に伴う砂州の形状変化や砂州と平水時に形成される水みち

図-1 標津川の固定砂州と河道 (平成 20 年 6 月)

との関係、さらには氾濫源と河道との関係は、未だ十分に解明されていない。図-1 は、標津川の河道に存在する砂州の状況を示したものである。洪水時に形成された砂州に水みちが規定され、水みちが大きく蛇行している様子がわかる。洪水減水期における流量の時間的変化を伴った水理実験は、工藤ら⁷⁾が減水期間が長いほど水みちが形成されやすいことを、益本ら⁸⁾が減水期のハイドロ形状 (凹型、凸型) の違いによる水みち形成機構の違いがあることを示し、流量と川幅との関係が重要であると指摘している。一方で、減水期間内における流量の減水方法や洪水時の流量から平水時の流量への変遷過程において水みち形成に与える影響については未だ十分に明ら

かになっておらず、近年多発しているゲリラ豪雨による急激な水位上昇に伴う砂州上に取り残されるといった被害を防ぐためにも早期の解明が望まれる。本研究では、洪水時の減水期間内での流量の減水方法や減水速度に着目し、洪水時に形成される砂州と平水時に存在する水みちとの因果関係について新たに追加実験を行い、明らかにしようとするものである。

2. ハイドロ形状の設定

既往の水理実験⁸⁾では、実際の洪水減水期のハイドロモデルに、減水期前半の凸型ハイドロと減水期後半の凹型ハイドロで、水みち形成に与える影響を調べるため、減水期間を20分と固定し、凸型ハイドロと凹型ハイドロで、洪水減水期に形成される水みち形成メカニズムを解明した。結果的に、両者ともに水みちが形成されたが、形成機構に差異があった。また目視の観察において、減水期後半に水みちが活発に形成される流量が存在することが明らかになっている。さらにより詳細な水みち形成機構を把握するため、減水期間を2倍の40分に設定して、上述のハイドロ形状で実験を行ったところ、流量がおよそ190(cm^3/s)の時に流水幅が縮小変化し水みち形成が活発に起こっていることが明らかになった。つまり、流水幅が縮小変化し、掃流力が増大する際の流量が水みち形成に寄与していることが明らかになっている。また、水みちが形成される際の流量（以下水みち形成流量）の通水継続時間も水みちを形成する上で重要であることも明らかになっている。

一方で、流量の減水速度を考慮した場合や減水期間において平水時の流量を変化させた場合などは水みちの形成に与える影響が不明である。このため、図-2に示すように、流量の減水速度が一定の場合と異なる場合、さらに平水時の流量を変化させた場合で水みち形成にどう影響を与えるかを把握するために減水期間を40分と固定し上記のようなハイドロを設定することとした。

図-2 時間的に減水速度と減水比が異なるハイドログラフ

図-3 実験水路の模式図

3. 水理実験概要

(1) 実験方法および条件

実験に用いる水路は、図-3に示すような、長さ8m、幅0.3mの直線水路である。移動床実験に用いた河床材料は、益本ら⁸⁾らの研究と同様に、4号珪砂($d_m=0.765\text{mm}$)と7号珪砂($d_m=0.154\text{mm}$)を5:1に配合した混合砂である。この河床材料を水路に敷きつめ、河床勾配1/80の初期河床を形成した。

実験は、洪水減水期のハイドロ形状が、十分に発達した交互砂州地形における水みち形成に与える影響を調べるため、次の二段階で行った。図-4に実験フローを示す。第一段階は、洪水期に形成される交互砂州を形成させるため、十分発達した交互砂州が形成される流量（以

表-1 水路実験における減水方法と減水比

通水ケース	減水方法	減水比 (小流量/大流量)
Case1-1	直線	1/10
Case1-2	直線	1/6
Case1-3	直線	1/4
Case1-4	直線	1/2.5
Case2-1	凹型	1/10
Case2-2	凹型	1/6
Case2-3	凹型	1/4
Case2-4	凹型	1/2.5

図-4 実験フロー

下大流量と呼ぶこととする)を一定時間、定流で通水する。第二段階は、第一段階で形成した交互砂州を初期河床として、流量を後述するハイドロ形状で減少させていき、水みちを形成させる。また本実験の初期水理条件(大流量)は、交互砂州からの水みち形成要因を調べるため、交互砂州が形成されるように、渡邊ら⁹⁾が定常流実験で用いた川幅水深比と中規模河床形態の関係を参考にし決定した。なお、上流の河床低下を抑制し流砂の動的平衡状態とするために、大流量時のみ乾燥砂を上流端から常時供給した。実験に用いたハイドロ形状は、図-2(a),(b)、表-1に示すように、減水期間を40分と固定し、減水速度を時間的に一定にした場合 Case1 と減水速度が時間的に異なる場合 Case2 の実験を行った。また実験では、水みち形成への流量の遞減勾配(以下減水速度とする)の影響を把握するため、平水時の流量と洪水時の流量が異なる場合として、Case1 においては小流量が大流量の1/10(Case1-1),1/6(Case1-2),1/4(Case1-3),1/2.5(Case1-4)とした条件と Case2 においては、小流量が大流量の1/10(Case2-1),1/6(Case2-2),1/4(Case2-3),1/2.5(Case2-4)とした条件で実験を行った。

(2) 測定項目

実験での測定項目は、河床高、流量、浮き州形成時刻およびその位置、流水幅(以下水みち幅)である。水みち幅は、減水期間にバルブ操作を行う前に、目視で最もよく水みち形成している幅をスケールで直接3カ所測定し、平均したものを水みち幅とした。河床高の測定は図-5に示すように、実験の各段階で、交互砂州一対の河床を基準に、砂州の移動を考慮した予備区間を設けて、縦断方向に10cm、横断方向に1cm間隔で砂面計を用いて測定した。流量観測は、流量が想定したハイドロ形状を満

(正面図)

図-5 河床高測定区間

たしているかを確認するため、流量バルブを操作する度に行った。バルブ操作のタイミングは、上流端の給水タンクにおける貯留効果を考慮して決定した。浮き州形成時刻および場所は、水みちが形成される契機となるため、通水開始から浮き州形成までの時間と発生位置を把握することとした。

4. 実験結果および考察

(1) ハイドロの減水速度の比較

図-6、図-7にそれぞれ無次元掃流力と流量、水みち幅と流量の関係を示す。無次元掃流力の算出方法を以下に示す。

$$\tau^* = \frac{hi}{sd}$$

無次元掃流力 τ^* 、水深 h 、河床材料の水中比重 s 、河床材料の粒径 d 、縦断的平均河床勾配 i である。なお、(a)~

(d) は減水速度が一定の Case1 の実験結果であり、(e) ~ (h) は凹型ハイドロの Case2 の実験結果である。図-6 の (a),(b),(c),(d) の結果から減水速度が一定の場合では、減水比に影響することなく、(a) を除いて概ね先行の実験結果と同様に流量減少過程で掃流力が増加した。また、最も減水勾配の大きい Case1-1 である (a) の結果では、水みち形成の現象が明瞭に表れなかったのに対し、(c) および (d) の緩やかな減水勾配である Case1-3 および Case1-4 では減水期後半にかけて無次元掃流力が増加し、水みち形成の現象が明瞭に表れているように見える。しかしながら、目視観察では砂州を発達させるような洪水減水期前半の大流量が長期化した影響で、十分に発達した交互砂州の両岸に形成される深掘れが進行・拡大しながら流水によって、水みちが形成されたため、この現象により水みち形成流量に達する前に、十分に発達していない水みちが形成された。つまり、水みち形成流量に達する前に、さほど側方への浸食を伴っていない水みちが形成されたものと考えられる。また、(c),(d) では水みちが活発に形成される前に通水を終了したため、その後の水みち変遷過程を把握できなかった。

以上をまとめると、減水速度が一定の場合では、水みち形成流量に達しかつ Case1-1 に比較し減水勾配の緩い Case1-2 が最も明瞭に水みち形状を呈した。

一方で、図-6(e),(f),(g),(h) の結果から、減水速度が時間的に異なる場合（減水方法：凹型）においても、減水比に影響することなく、流量減少過程で概ね掃流力が増大した。また、減水勾配が相対的に急でかつ水みち形成流量に達した Case2-1 や Case2-2 である (e),(f) では、水みち形成の現象が明瞭に呈したのに対し、緩勾配の Case2-3 および Case2-4 の (g),(h) の結果では、減水方法が直線型の Case1-1(a), Case1-3(c), Case1-4(d) と同様に、現象が明瞭に表れなかった。この原因として、減水において水みちを形成させるような流量に達していなかったことが考えられる。以上の結果より、水みちが明瞭に形成されるためには、流量が水みち形成流量になる過程が必要である。

次に水みち幅に着目する。図-7 での Case1 の結果を示す (a),(b) から、減水速度が時間的に一定の場合では、減水比が変化しても通水終了前の最終的な水みち幅はそれぞれ 8cm, 10cm と 8 ~ 10cm に収束している。また減水勾配が比較的大きい Case1-2 では、水みち形成流量（約 $190\text{cm}^3/\text{s}$ ）で形成された水みち幅が若干縮小変化しているものの平水時の流量まで維持されている。すなわち、水みち形成流量よりも小さな流量になると、側方への浸食がなくなり、水位のみ低下して水みちの形状はそのまま維持されるため、水みち形成流量通水時に最終的な水みち幅が決定されている。対称的に、より緩勾配の実験である Case1-3(c) および Case1-4(d) では、Case1-1 および Case1-2 の現象とは異なり、通水中水みち幅が縮小変化し続けている。

一方、図-7 での Case2 の実験結果を示す (e),(f),(g),(h) から、減水速度が時間的に異なる場合では、減水比

図-6 減水速度が一定の場合と異なる場合における無次元掃流力と流量の関係

図-7 減水速度が一定の場合と異なる場合における水みち幅と流量の関係

が大きくなるにつれ、最終的な水みち幅がそれぞれ 8cm, 8cm, 15cm, 15cm と特定の水みち幅に収束せず大きくなる傾向がある。減水勾配が大きい Case2-1 および Case2-2 では、Case1-2 と (b) の結果と同様に、水みち形成流量で形成された水みち幅が流量減速に伴っても縮小変化せず、最終的な水みち幅が決定されている。対称的に、減水勾配の緩い Case2-3 および Case2-4 は水みち幅が流量の減少とともに時間的に縮小傾向を呈しているものの (a),(b) に比較して、明瞭な水みちが形成されなかった。この理由としては、前述のとおり水みち形成流量まで達しない流量設定であったためと考えられる。

次に水みち形成流量や減水速度の影響による水みち形成の違いを詳しく調べるために、最も水みちの形状が明瞭であった Case2-2 の水みち形成流量（約 $190\text{cm}^3/\text{s}$ ）と減水速度で、全ての通水ケースの流量と減水速度をそ

図-8 無次元流量と無次元速度の関係

図-9 水みち形状での判定判例 (○ : 完全な水みち、△ : 不完全な水みち)

それぞれ無次元化したものを図-8にまとめた。水みちが明瞭に形成されている状態を○とし、水みちが一本に収束せずに分岐する場合や、河床の明瞭な浸食を伴わず表面流のみが一筋の流水となった場合等不完全な水みちを△とし、水みち状のものが全く形成されていない場合を×とした。図-9に水みち形状の判定の一例を示す。図-8より、無次元流量と無次元速度がともに1以下である場合に、水みちが形成されたと判断される結果となった。すなわち、減水後期の減水勾配が緩い場合でかつ減水過程で水みち形成流量を経験する場合にのみ明瞭な水みちが形成されることを示している。以上の実験結果より、水みちの形成要因には、減水後期の流量と減水勾配が重要な要素であると考えられる。また、流量の減少に伴い、流水が砂州前縁部を横切る際に段落ち状の局所的な射流となり、ヘッドカット現象が生じる。明確な水みち形成には、この現象がある程度継続する必要があることから、減水期にこの流れの状態が生じる流量とその継続時間が重要な要素となる。

(2) 実験での水みち幅と理論的な川幅の関係

礫床河川の川幅と水理量との関係は、池田¹²⁾によって、式(1)で表されている。ここでは、実験で得られた水みち幅と水理量との関係を把握するために、式(1)における川幅を水みち幅として検討することとした。すなわち、与えられた水理量で式(1)から求められた川幅を理

図-10 礫床河川の安定横断形状模式図

図-11 実験で得られた水みち幅と理論的な川幅の関係

論川幅とし、実験で得られた水みち幅との比較を行った。

ここで、式(1)は河岸の流砂の安定から導かれたものであり、川幅の拡幅を前提としており、本論文で扱っている流量が減少していく現象には、適用できないものと判断される。しかしながら、今回の実験では水みちの形成過程においては、流量が減少中においても、水みち形成が活発な時点では、水みち中央部の流砂が活発であり水みち両側岸部が浸食しながら水みちが明瞭化する傾向がみられたため、本実験結果と池田の理論とを比較することとした。

$$B = \frac{Q}{D_c \sqrt{g D_c I} 2.5 \ln \left(11 \frac{D_c}{k_s} \right)} + \left[2.57 + \frac{2.07}{\ln \left(11 \frac{D_c}{k_s} \right)} \right] D_c \quad (1)$$

理論川幅 B 、粒径 k_s 、重力加速度 g 、流量 Q 、河床勾配 I 、水路中央部における水深 D_c である。

また、河床材料と河床抵抗の関係には、Engelund & Hansen の式を適用した。なお理論川幅は流量、粒径、河床勾配、川幅中央の水深のみで決定される。図-10、図-11に、それぞれ安定横断形状の模式図と実験で得られた水みち幅と理論式で得られた川幅の関係を示す。

減水速度が時間的に一定の場合、減水比に関係なく減水が進行するにつれて形成された水みち幅が、池田の理

図-12 実験 B/理論 B と Q/T (減水速度) の関係

論川幅に収束していることがわかる。また最終的な水みち幅も、理論川幅に収束していることがわかる。減水速度が時間的に異なる場合においても、Case2-1, Case2-2 においては、水みち形成流量で形成された水みち幅も最終的な水みち幅も理論川幅に収束した。しかしながら、Case2-3, Case2-4 においては理論川幅に完全に収束しなかった。この理由として、前述したように Case2-3, Case2-4 に関しては、水みちの形成現象が水みち形成流量に達することなく、通水が終了したために、水みちが十分に形成されることなく、縮小変化しなかったものであると考えられる。

図-12 に、実験で得られた水みち幅を池田の理論川幅で無次元化したものと、減水速度 (Q/T) との関係を示す。図-12 より、減水速度に依存することなく、水みち形成時の流量では、水みち上での流砂が活発化し、水みちの拡幅現象が一時的に生じるため、水路実験で得られた水みち幅は池田の安定横断形状を適用した理論川幅に収束するものであると考えられる。水路実験において水みち形成流量で形成された水みち幅は池田の安定横断形状を適用した理論川幅と比較すると、今回の実験で再現可能であることが明らかとなった。

5. おわりに

本研究の結論は、以下の通りである。

- ・ 水みち形成要因として、洪水減水後期の流量と減水速度が重要であることが明らかとなった。
- ・ 池田の理論川幅と実験で得られた水みち幅を比較

すると、水みち形成流量で形成される水みち幅と最終的な水みち幅は、理論川幅を用いることによって推定可能となった。

洪水時の水理量の時間変化に伴う砂州の形状変化や洪水時に形成された砂州と平水時に形成される水みちとの関係において、本研究では洪水時に形成される砂州と平水時に存在する水みちとの因果関係を明らかにすることを試みた。その結果、ハイドロの減水勾配(減水速度)や減水比が、水みち形成に影響していることを明らかにした。今回の結果とこれらの課題は、将来の河川・河道管理に対して、治水安全度や自然生態系保全の観点より、重要な指標としての位置づけになりうるものであると考えられる。

謝辞：本研究は、科学研究費補助金基盤研究(B)(代表:渡邊康玄、課題番号:20360224)の助成を受けて行われた。記して謝意を表す。

参考文献

- 1) 土木学会水理委員会「洪水流の三次元流況と流路形態に関する研究」(研究代表者：芦田和男) 土木学会論文集 第345号, pp41-52, 1984.
- 2) 清水康行; 沖積河川における流れと河床変動の予測手法に関する研究, 開発土木研究所報告 第93号, pp1-197, 1991.
- 3) 知花武佳, 佐々木学, 辻本哲郎: 交互砂州が形成された河道に生じる水際環境に関する研究, 応用生態工学研究会第7回研究発表会講演集, pp231-234, 2003.
- 4) 三輪浩, 大同淳之, 横川純: 交互砂州における水みち形成過程に及ぼす土砂供給と砂礫の分級の影響, 土木学会水工学論文集 第49巻, pp949-954, 2005.
- 5) 寺本敦子, 辻本哲郎: 自己形成流路の形成過程と形成水理条件, 土木学会論文集 第667号, pp75-86, 2001.
- 6) 渡邊康玄, 安田浩保, 島田友典: 中規模河床波の低流量時における形状変化過程に関する水理実験, 土木学会水工学論文集 第51巻, pp1039-1044, 2007.
- 7) 工藤拓也, 渡邊康玄, 清水康行: 流量変化を伴う砂州形成後の水みちの形成過程に関する実験, 土木学会北海道支部論文報告集 第64号, pp59-74, 2008.
- 8) 益本孝彦, 渡邊康玄, 佐々木章允: 洪水減水期における水みち形成に関する実験, 河川技術論文集 第15巻, pp225-230, 2009.
- 9) 渡邊康玄, 桑村貴志: 複列砂州のモード減少過程に関する水理実験, 土木学会水工学論文集 第48巻, pp997-1002, 2004.
- 10) 渡邊康玄, 早川博, 清治真人: 安定解析に基づく川幅の自律形成機構, 土木学会水工学論文集 第53巻, pp739-744, 2009.
- 11) 渡邊康玄, 佐藤耕治, 大山史晃: 非定常流の下での砂州形成実験, 土木学会水工学論文集 第46巻, pp725-730, 2002.
- 12) 池田駿介: 詳述 水理学, 技報堂出版, pp400-405, 1999.

(2010.9.30 受付)