

水みちの形成要因とその挙動に関する水理実験

Hydraulic Experiments on Channel Formation Process

北海道大学工学部土木工学科 ○学生員 近藤 祐介 (Yusuke Kondo)
寒地土木研究所 正 員 渡邊 康玄 (Yasuharu Watanabe)
寒地土木研究所 正 員 野上 毅 (Takeshi Nogami)
北海道大学大学院工学研究科 正 員 清水 康行 (Yasuyuki Shimizu)

1. はじめに

中規模河床形態の形状特性や、それが要因となる河川の蛇行などに関して、これまで多くの研究が行われてきた。しかし、実河川では流量の複雑な変化により砂州が形成され、水みちが形成されていく。そのような地形の変遷を調べた実験例は少なく、まだ把握されていない現象は多い。

洪水時の砂州の変化については、洪水ハイドロを想定した条件で渡邊ら¹⁾、三輪ら²⁾が実験的に、またTubinoら³⁾、渡邊ら⁴⁾が理論解析を用いてそれぞれ検討しており、洪水中に砂州が履歴効果を伴って変化することを指摘している。さらに、長期的時間スパンの流量変化による河床の変化は、上流からの土砂供給の変化の視点で三輪ら⁵⁾が、自己形成流路という立場から竹林ら⁶⁾が、砂州と平水時流量との関係から寺本ら⁷⁾がそれぞれ実験あるいは数値計算を用いて検討を行い、条件によって様々な変形過程をとることを示している。

本研究では大流量時に形成された中規模河床形態がその後の小流量時にどのような変化過程を示して蛇行流路に至るかに着目し、水理実験を行った。

2. 実験条件

出水時に形成された中規模河床形態がその形成流量 Q_a よりも小規模な流量 Q_b 時にどのように変形するかを把握する目的で、大流量通水後に小流量を通水した。

平坦河床から洪水時に形成される河床波を想定した初期河床形状を形成させるために用いた流量 Q_a は、複列砂州が形成され単列砂州へ移行するものを用いた。そのうちCase1は通水時間が長く初期に形成された複列砂州が単列砂州へ移行したことを確認した後に流量を減少させたもの、Case2は複列砂州が形成されてすぐに流量を減少させたものの2種類である。(表-1、図-1) 小規模出水時を想定した流量 Q_b は、実河川の洪水時流量と平常時流量における掃流力を参考にし、水路幅0.9mとした場合に限界掃流力以下となる流量とした。なお、 Q_a の通水時間を T_a 、 Q_b の通水時間を T_b とする。

実験に用いた水路は長さ50m、幅0.9mの直線水路である。水路の側壁には河岸にも粗度をもたせるため粒度60のサンドペーパーを貼付した。水みちによる蛇行流路形成には、河床材料の細粒成分が重要な働きを考えると、河床は4号硅砂($d=0.764\text{mm}$)、7号硅砂($d=0.154\text{mm}$)をそれぞれ6:1の割合で混合し、平均粒径0.66mmのものを用いた。勾配は1/80になるように敷均

して初期河床とし、水路の上下流端には初期河床高と同じ高さの固定堰を設けている。また、実験中の下端の固定堰を落下する掃流砂を計測し同量の砂を給砂している。通水中は10~30分毎に水路の上から写真観測(観測区間は水路下流端の15m上流から26m)を、30分毎に水面上から河床波の波長、波高、水位について観測を行った。

所定の時間(T_a+T_b)を通水後、水路下流端の10.5m上流から26.25m上流までの縦断距離で約15mの区間について縦断方向15cm、横断方向5mm間隔で河床を測定した。ここで砂州形成流量時の水理量についてa、水みち形成時の水理量についてbをそれぞれ添字としている。測定された河床における水面及び流れの状況を把握するため、セメント粉を河床にふりかけ固定させた後、再度通水して水面及び流況を測定し、レーザー砂面計を用いて河床を測定した。また、今回Case1、Case2との比較のため初期通水幅を0.3mとした小流量自由蛇行実験(Case3)も行った。Case1、Case2ともに小流量時の水面幅はおおよそ0.15m~0.4mで、平均は0.3m程度であった。よってCase3では、初期流路幅を0.3mに設定した。

表-1 実験条件

実験名	初期流路幅 B_0 (m)	Q_a 大流量			Q_b 小流量		
		Q_a (l/sec)	τ^*	T_a 通水時間(min)	Q_b (l/sec)	τ^*	T_b 通水時間(min)
Case1	0.9	5.3	0.137	360	0.5	0.033	120
Case2	0.9	5.3	0.137	20	0.5	0.033	120
Case3	0.3	—	—	—	0.5	0.069	50

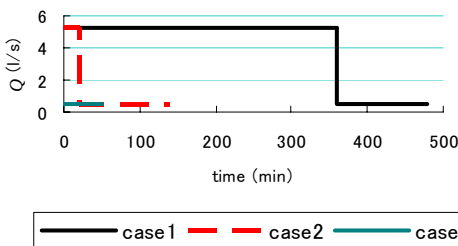


図-1 流量ハイドログラフ

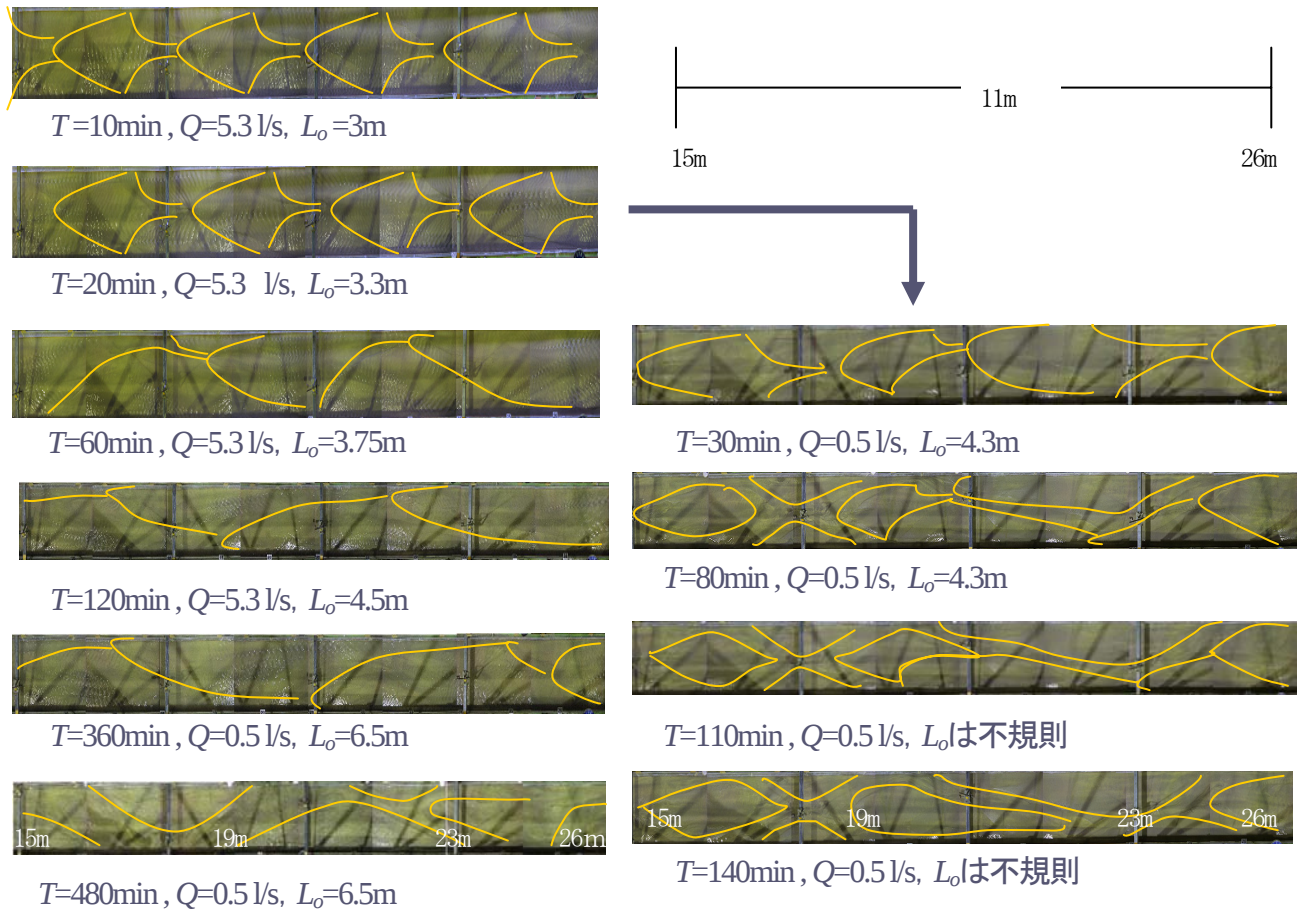


図-2 砂州の形状変化 (左 : case1 右 : case2)

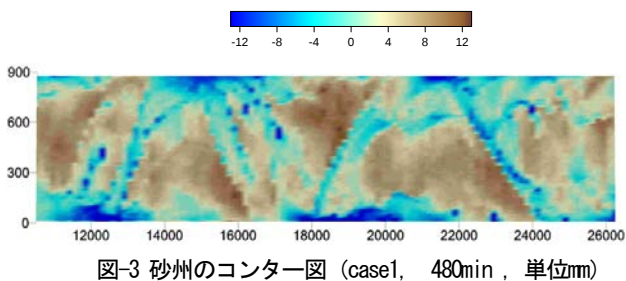


図-3 砂州のコンター図 (case1, 480min, 単位mm)

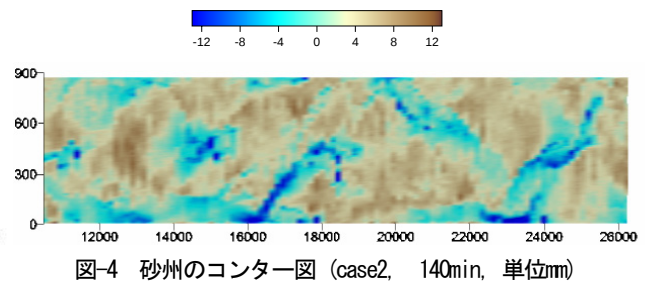


図-4 砂州のコンター図 (case2, 140min, 単位mm)

3. 実験結果

3.1 砂州の形状変化

(1) Case1

Case1の砂州の変化を写真で撮影したものが図-2である。黄色い線で示したものが砂州の前縁を表したものである。大流量 Q_0 を20分通水する頃には複列砂州が形成され、その後1時間を越えたあたりから単列砂州へとモード移行が見られた。単列砂州に移行してからは30分から1時間周期で砂州の先端が前進と停止を繰り返していた。それに伴い波長と波高も変化し、波長が長くなる(9m)時には波高は低く(1.1cm)なり、波長が短くなる(6m)時には波高は高く(1.9cm)なった。6時間経過後には十分に単列砂州に移行したと判断し流量を減少させた。この時の状態は波長と波高が周期的な変化に対して平均値となる

状態である。流量を低下させ Q_0 を通水した直後は河床全体に広がるように流れていたが、1時間を経過するころから水みちが形成され始め最終的に図-3のコンター図で示すような一本の蛇行する水みちが見られた。

(2) Case2

大流量を約20分程通水させると図-2のような複列砂州が形成された。砂州の波長は2.75m波高は1cmである。その後流量を減少させ観測を続けた。流量を低下した直後は砂州によって形成された河床の低みに水みちが集中していた。その中には砂州の前縁に沿うものもあれば、壁沿いに形成された砂州の先端を流れる水みちも見られた。1時間程度経過すると細かい粒径の河床砂が掃流され水みちが二つに集約していった。流量を低下してから2時間がたつころには図-4で示す河床が形成

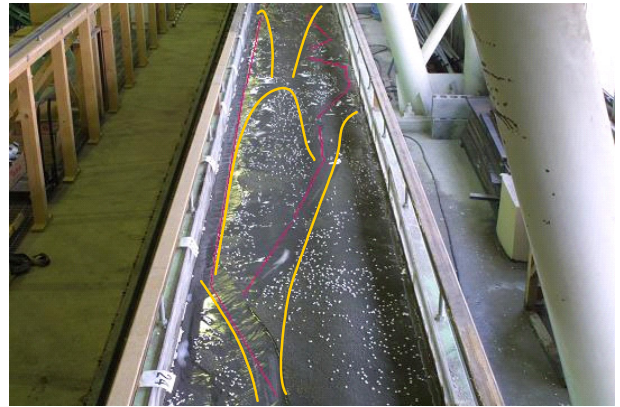
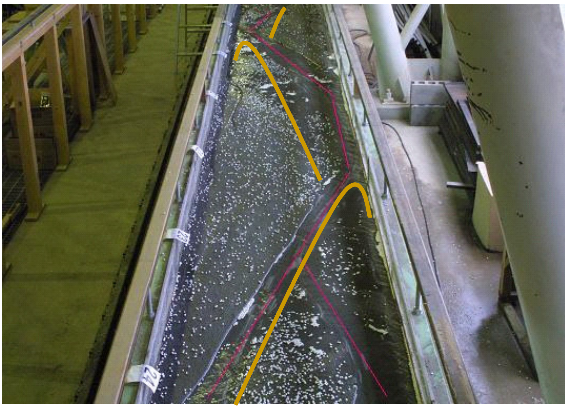


図-5 河床固定後の斜め写真 (左: Case1 右: Case2)



$T = 0 \text{ min}$ $b = 30 \text{ cm}$ $T = 50 \text{ min}$

図-6 小流量自由蛇行実験 Case3

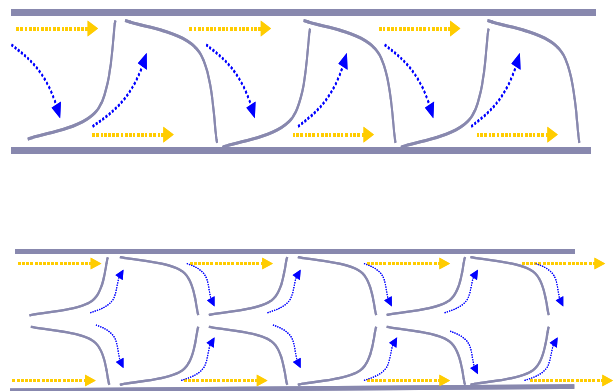


図-7 流量減少後に考えられる水みち
(上: 単列時, 下: 複列時)

表-2 実験結果

	ケース名	$Q_a(\text{l/s})$	$T_a(\text{min})$	$Q_b(\text{l/s})$	$T_b(\text{min})$	$B_a(\text{m})$	$B_b(\text{m})$	$h_a(\text{cm})$	$h_b(\text{cm})$	I	$d(\text{mm})$	$Z(\text{cm})$	実験値 $L_o(\text{m})$
実験 値	Case1	5.3	360	0.5	120	0.9	0.3	1.2	0.6	1/80	0.66	1.97	6.5
	Case2	5.3	20	0.5	120	0.9	0.4	1.2	0.5	1/80	0.66	1.65	不規則
	Case3	—	—	0.5	50	0.3	0.4	0.6	0.5	1/80	0.66	1.1	2.3

表-3 実験結果の水理量からの砂州波長計算値と実験値の比較

	実験値 $L_o(\text{m})$	$L_{ca}(\text{m})$	$L_{cb}(\text{m})$	$L_{ea}(\text{m})$	$L_{eb}(\text{m})$
Case1	6.5	6.652	2.23	9	3
Case2	不規則	6.652	2.39	9	4
Case3	2.3	—	2.39	—	4

された。水みちの中に砂州が形成され流路が分断され網状化する箇所も見られ、流路が一本化されることはなかった。

(3) Case3

今回Case1, Case2と比較するために小流量における自由蛇行実験も行った。結果は図-6の写真である。砂州形成条件としては複列と単列の間の条件である。通水開始から30分程で単

列砂州が形成され、単列砂州が形成されると深掘れ箇所側の側壁が削られ始め50分がたつ頃には図-6右のような蛇行流路へ変化していった。

3.2 水みちの形成過程

Case1, Case2において実験時の観測結果から水みちに発達すると考えられる箇所は図-7に示すように主に二つあった。一つは砂州の前縁に沿った低みに従い蛇行し流下するもの（青線）、もう一つは側壁に沿ってまっすぐ流下するもの（黄線）である。形成された砂州をそれぞれ比較したところ、これらが水みちの形成へ至るか否かの要因は、砂州波高、砂州波長、砂州の形状などで決定される河床の縦横断方向の局所勾配が関係していると考えられる。実験では波長が長く、波高が高い箇所において横断方向の流れが卓越した。すなわち、横断方向への流れが卓越することにより蛇行した水みちが形成された。

また、水みちは下流側から砂州による深掘れ箇所を起点に斜め上流方向にヘッドカット状に掘られて形成される。特にCase1の時には砂州波高が高いためその落差から顕著に現された。その時混合粒径の細粒成分が活発に流砂し、水みちは深く発達した。時間により浸食のスピードには大きな差があるが侵食が進むときには約10秒に1cmの割合で進み、水みちが発達していった。また水みちの中には局所洗掘が発生するところもあり水みちの挙動に大きく影響を与えていた。

3.3 蛇行波長値との比較

実験で得られたデータを表-2に示した。また、交互砂州の線形安定性理論や河道の蛇行の発達に関する線形理論から求めた流路内に形成される単列交互砂州の波長と実験値との比較を表-3に示した。ここで、 Il は勾配、 d は粒径、 Z は砂州波高、 L_o は砂州の実測波長で、 L_c は式(1)⁸⁾を、 L_e は式(2)⁹⁾を用いて計算したものである。

$$L_c = 5 \sqrt{\frac{Bh}{C_f}} = \frac{5Q}{h\sqrt{BgI}} \dots (1)$$

$$C_f = \frac{ghI}{v^2}$$

$$L_e = 5 \sim 15B (\approx 10B) \dots (2)$$

式(1)において Q , h , B , I は実験結果の水理量を用いた。なお C_f は摩擦係数である。

計算結果と実験結果を比較するとCase1の場合、式(1)による水みち形成時流量の計算値 L_{cb} と実験結果 L_o には大きな差がで

き、砂州形成時流量の計算値 L_{ca} とほぼ一致した。また、実河川で用いられている波長関係式、式(2)の計算値 L_{eb} と比較したが、実験値 L_o が計算値 L_{eb} よりも2.1倍ほど大きな値を示した。これらの結果から分かるように大流量時にできた砂州の影響が水みちに大きく影響していると言える。

Case2では、水みちが複数に分かれてしまい規則的な波長を観測できなかった。

Case3では、実験値 L_o と計算値 L_{cb} がほぼ同様な値を示し、式(1)の関係式は今回の実験においても適合している。計算値 L_e においては若干数値に差があるが、実河川で用いられている簡略化した式であるため、許容できる範囲といえる。

また、今回の実験では、平坦床から小流量で通水したと仮定した時に想定される蛇行波長よりも、砂州形成後に小流量を通水した蛇行波長は3倍程度大きな値であった。

4. 結論

今回、大流量時に形成された砂州が、その後の小流量時にどのような形成過程で水みちとなり、またどのような挙動を示すかを検討するために水理実験を行った。その結果を以下に示す。

- 1) 砂州の形状によって、砂州の前縁に沿った低みに従い蛇行するものとそうでないものがある。
- 2) 実験値と計算値を比較することで、大流量で形成された地形の持つ砂州波長によって、小流量の時に形成される水みちの蛇行波長が決定される。

参考文献

- 1) 渡邊康玄, M. Tubino, G. Zolezzi : 非定常流における交互砂州の安定解析, 土木学会第 56 回年次学術講演概要集第二部, pp172-173, 2001.
- 2) 三輪浩, 池田香織, 谷和憲 : 正弦波状流量変化による交互砂州の発達・変形過程, 土木学会第 55 回年次学術講演会講演概要集第二部, pp540-541, 2000.
- 3) Tubino, M., G. Zolezzi : Growth of alternative bars in unsteady flow, Water Resources Research, Vol27, No1, pp37-52, 1991.
- 4) 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.
- 5) 三輪浩, 大同淳之, 横川純 : 交互砂州における水みちの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.
- 6) 竹林洋史, 江頭進治 : 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, Vol. 677, pp75-86, 2001.
- 7) 寺本敦子, 辻本哲郎 : 砂州形状の特性と平水時の流路構造, 土木学会水工学論文集第 50 巻, pp961-966, 2006.
- 8) 池田駿介 : 詳述水理学, 技報堂出版, pp392-403, 1999.
- 9) 末次忠司 : 河川の減災マニュアル, 山海堂, pp8, 2004.