

山地河川における分岐流路変動と 土砂移動に関する実験的研究

EXPERIMENTAL STUDY ON BIFURCATED CHANNEL CHANGES AND SEDIMENT TRANSPORT IN A MOUNTAIN RIVER

目黒嗣樹¹・長谷川和義²・中村健作³

Hideki MEGURO, Kazuyoshi HASEGAWA, Kensaku NAKAMURA

¹学生会員 北海道大学大学院 工学研究科 修士課程 (〒060-8628 札幌市北区北13西8)

²正会員 工博 北海道大学大学院 工学研究科 教授 (〒060-8628 札幌市北区北13西8)

³学生会員 北海道大学大学院 工学研究科 博士課程 (〒060-8628 札幌市北区北13西8)

Movable bed experiments with large-scale bed forms and bifurcated channels were conducted by using a steep slope channel and heterogeneous bed materials in order to investigate mechanisms of stream channel change and sediment transport in a mountain river. From the experimental results and observation, it was found that a bifurcated channel in a mountain river has unstable mechanism such a mainstream changes alternately from one to another at the nodal point of bifurcated channel, and that bed evolution and sediment discharge in the lower reach are obviously influenced by the mainstream alternations. For interpretation of the mechanism, a simple mathematical model was introduced, which was derived from the sediment continuous equation. Self-excited change of a mainstream due to the change of sediment transport rate at the nodal point was shown by the model without considering influence of alternating bar migration.

Key Words : mountain river, bed form, bifurcated channels, movable bed experiments, sediment transport

1. はじめに

最近, 河川法の改正を契機に水系一貫の土砂管理を行うことが求められるようになり, また環境問題への社会的関心の高まりによって, 山地流域においても河床形態・流れおよび土砂の動態を把握する研究が必要となっている。

土砂流出機構は, 河床形態と密接に関係しているため, 山地河川においても河床形態の成因・性質を詳しく調べて把握した上で, 形態を考慮した土砂流出を考える必要がある。本研究においては山地河川の河床形態を[1]水深スケールの小規模波, [2]流路幅スケールの中規模波, [3]谷幅スケールの大規模波の重なりによって構成されているという事実に基づいて考えている(長谷川・藤田¹⁾, 森ら²⁾, 長谷川³⁾)。

これら3つの形態のうち, これまでに小規模波に関して礫列・礫段といった2種類の河床形態の成因や性質が明らかにされてきた^{4) 6)}。また, 小規模波形成河床における土砂輸送の研究もなされている。中規模波に関しては, 沖積河川の交互砂州に類似した砂礫堆であることが明らかにされている^{5) 6)}。大規模河床波に関しては, 著者らの前報⁷⁾においてそれらが洪水時に形成される長波長の(複列)砂礫堆であることを, 実験水路に大・中・小規模河床波の共存河床形態を再現することによって明らかにした。しかし, 成因の1つを明

らかにしたにとどまり, その性質の詳細や土砂輸送との関係を明らかにするには至らなかった。

本研究では, 前報⁷⁾に追加して行った3形態再現実験の河床データを用いて, 分岐・合流を伴う河床形態と土砂輸送との関係を指摘した。また, 実験中に観察された分岐部における主流路の交番現象を対象とした解析モデルの構築を試みた。こうした主流路の交番現象は, 分岐部での閉塞や新流路の形成等と密接に関係しているばかりでなく, 下流側の流路形態や土砂動態に大きな影響をおよぼし, 山地河川の土砂輸送を解明するうえでカギとなっていると考えている。

2. 実験の概要

実験は, 前報の3形態の再現実験と同様に, 溪谷の侵食を伴う大規模変動を想定した大流量・複列砂州形成領域を通水し, 河床高計測後に, 生起した河床形態に対してははじめよりも小さい流量を通水するという手順で行った。

(1) 実験方法

実験は, 勾配1/15, 長さ10m, 幅1.2mの木製直線水路を用いた。実験砂礫には, タルボット型の粒度分布 $P = (d/d_{max})^n$ (P : 粒径 d の砂礫の通過重量比率, d_{max} : 最大粒径) に従う最大粒径1.5cm, べき数が $n=1/4$

表-1 実験条件と砂礫増減より算出した土砂量(表中の -印は、算出されていないことを示す。)

実験条件										算出土砂量	
Run	記号	勾配	Q (l/s)	B (cm)	B/H	$\tau^* m$	Fr	通水時間 (minute)		全流出土砂量 (cm^3)	単位時間流出土砂量 (cm^3/sec)
L4	○	1/15	2.09	30	19.9	0.203	1.201	6.5	-	-	-
L4-1	△	1/15	0.843	15	11.0	0.183	1.134	70	34655	8.25	-
L5	○	1/15	2.09	30	19.9	0.203	1.201	6.5	-	-	-
L5-1	○	1/15	2.09	30	19.9	0.203	1.201	10.5	-	-	-
L5-2		1/15	0.87	15	10.8	0.186	1.143	42.5	22638	8.88	-
L5-3	◇	1/15	0.88	15	10.8	0.187	1.147	27.5	6412	3.89	-
L5-4		1/15	0.87	15	10.8	0.186	1.143	32.5	14675	7.53	-

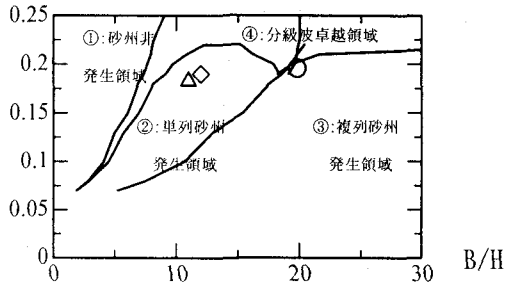


図-1 領域区分図

の混合砂礫を使用した。この砂礫を12cmの厚さで平らな状態に敷き詰めたのち、初期谷幅を想定して水路中央に深さ2.0cm、幅30cmの矩形の水みちを作成した。初期の通水は、この水みちに対して行った。

(2) 実験条件

急勾配混合砂礫水路において分岐流路を再現するために複列砂州の発生条件を与える。この条件を決定するために、長谷川・藤田ら⁸⁾による線形不安定解析を行い、図-1のような領域区分図を作成した。これをもとに表-1に示すような実験条件を決定した。図-1と表-1中の記号は、それぞれ○(RunL4, RunL5, L5-1)は流路幅を30cmとしたときの複列砂州形成領域であることを表し、△(RunL4-1)と◇(RunL5-2, RunL5-3, RunL5-4)は流路幅を15cmとしたときの単列砂州形成領域であることを表す。なお、表-1中の Q 、 τ^* 、 Fr は、それぞれ流量、平均粒径礫(0.3cm)に対する無次元掃流力、フルード数であり、これらを求める際に抵抗則として、Heyの式⁹⁾ $U/U^*=5.75\log(11.16H/3.5d_{84})$ 、(U^* :摩擦速度、 U :平均流速、 H :平均水深、 d_{84} :84%通過粒径)を用いた。また、L4シリーズは無給砂、L5シリーズは上流端より給砂の条件で行った。給砂量およびその粒度分布は、RunL4シリーズで水路末端で採取した流砂量データの平均値を与えることとし、流砂が平衡状態に近くなることを期待した。ちなみに、大流流量時(RunL5とRunL5-1)は、約120(g/s)、小流量時(RunL5-2～RunL5-4)は、約20(g/s)であった。

(3) RunL4シリーズ実験結果

RunL4は、網状化の要因となる複列砂州の形成条件で、大規模河床波が生起するような大洪水を想定したものである。この通水では、通水開始からまもなくして、縦断方向 $x=250\sim450cm$ の左岸側の複列砂州を発

端として複列砂州(波長:約200cm)が発達し、水路全体で見るとやや変則的ではあるがモード3の複列砂州が生起した。その後は、時間経過とともに、上流側で侵食傾向が強まり、生起した分岐流路は閉塞した。一方、下流側($x=600cm$ 付近)では堆積傾向がみうけられ、流路を左右に振りながら網状流路を形づくっていた。複列砂州が明確になった時点で通水を停止した。

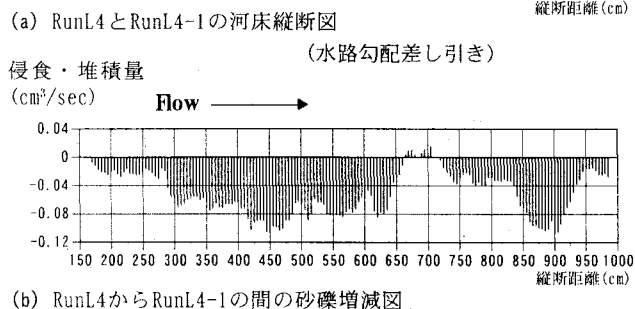
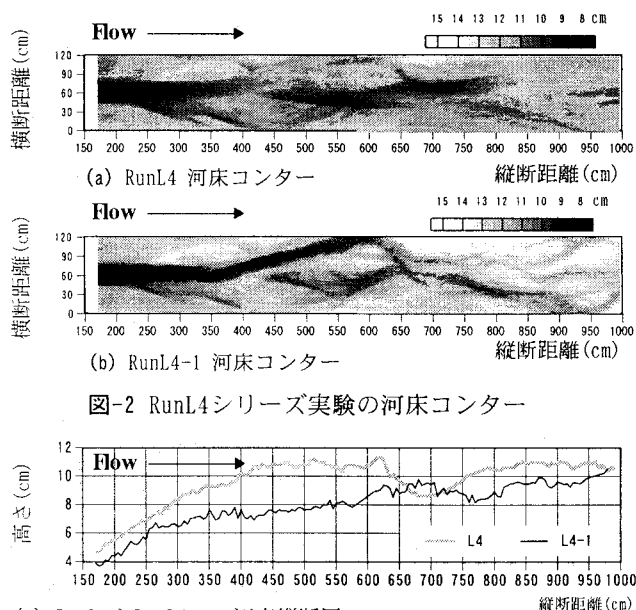
Run. L4-1は、Run. L4で形成された河床に、やや小さい流量の通水を重ねて行ったものである。通水初期から $x=300cm$ 付近で侵食傾向が強く見られた。このため $x=350\sim550cm$ 、 $450\sim650cm$ の左岸側に存在している分岐流路が閉塞し、流路が1本に集中した。河床が粗粒化して小規模河床波の発達が顕著になるまで通水を行った。また、この通水後の計測から大・中・小規模河床波の共存が確認された。それぞれの通水終了後の河床コンターを図-2に示す。

(4) Run L5シリーズ実験結果

RunL5は、上流端から給砂した実験で、無給砂実験のRunL4との比較を行う目的で実施された。給砂以外の実験条件・通水時間(6.5分)は、RunL4のときと同様である。この実験では、明確な複列砂州および網状流路の発達に至らずRunL4との比較が困難であったので、通水を継続し、10.5分通水の結果をRunL5-1とした。ここでは、明瞭な複列砂州が形成され、網状流路もみられた。

RunL5-2、L5-3はRunL4-1と比較を行うために、通水時間の合計(70分)が、RunL4-1と同じに設定した実験である。これは実験設備の都合上、通水を2回に分けて実施したので、初めの42.5分通水をRunL5-2、次の27.5分通水をRunL5-3とした。給砂以外の条件はRunL4-1とほぼ同じである。これらの通水中に $x=450cm$ より上流側で時間経過とともに流路本数が順次減少していく様子、 $x=500cm$ からの分岐流路で主流路が左右交互に入れ替わる現象が観察された。さらに、部分的に、小規模河床波の発達する様子も観察された。

RunL5-4は、RunL5-3に続いて同じ条件で流路変動を観察するために行ったものである。主流路の交番現象と $x=500cm$ 付近やほかの分岐・合流地点での若干の変動は見られたものの通水30分後までに大きな変動が見られなかったので32.5分で通水を終了した。それぞれの河床コンターを図-4と図-8の一部に示す。



3. 河床形状と土砂移動に関する検討

(1) 流路形態と砂礫増減について

ここでは、河床データと砂礫増減をみていくことにする。図-3(a)は流路沿いの河床最深部を結んであらわした河床縦断図である。ただし、この図は水路勾配1/15を差し引いて表している。図3-(b)は、図-2に利用した河床高データをもとに縦断方向5cmごとに算出した横断面ごとの砂礫体積の増減である。これ以降、河床縦断図、砂礫増減図はこれと同様の方法で描いたものである。まず、RunL4-1についてみると図-3(a)の縦断図から、分岐地点前後に位置する河床が高まっているところ(大規模河床波の起伏)が侵食されて平坦化していることがわかる。また、図-2(a)のコンターと図-3(b)の砂礫増減図より、 $x=650\sim 750\text{cm}$ の分岐点に土砂がたまり、分岐点が上流側に移動している。

次に、RunL5-1で生じた河床とRunL5-2をとばして通水時間がRunL4-1と同じになるRunL5-3と比較してみる。図-5(a)(b)の縦断図と図-4(b)(c)のコンターより $x=450, 800\text{cm}$ の複列砂州の分岐合流地点ではあまり侵食低下していないが、 $x=300, 630\text{cm}$ 付近の湾曲部で強い侵食低下を起こしていることがわかる。砂礫増減の外形はRunL4-1とRunL5-3では似ている点がある。それは、図-3(b) $x=600, 750\text{cm}$ 、図-5(b)

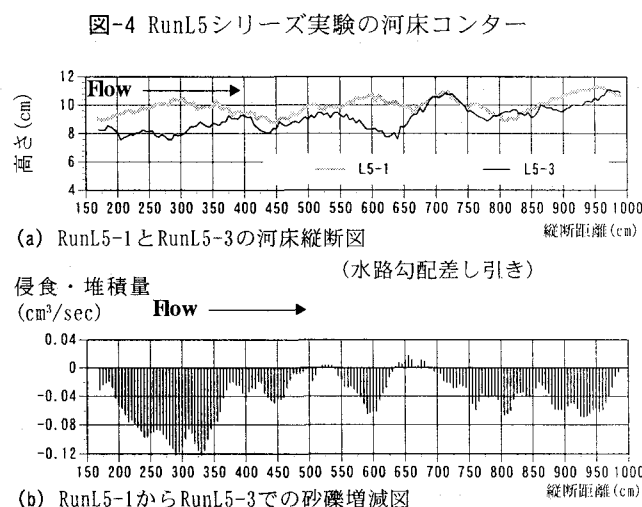
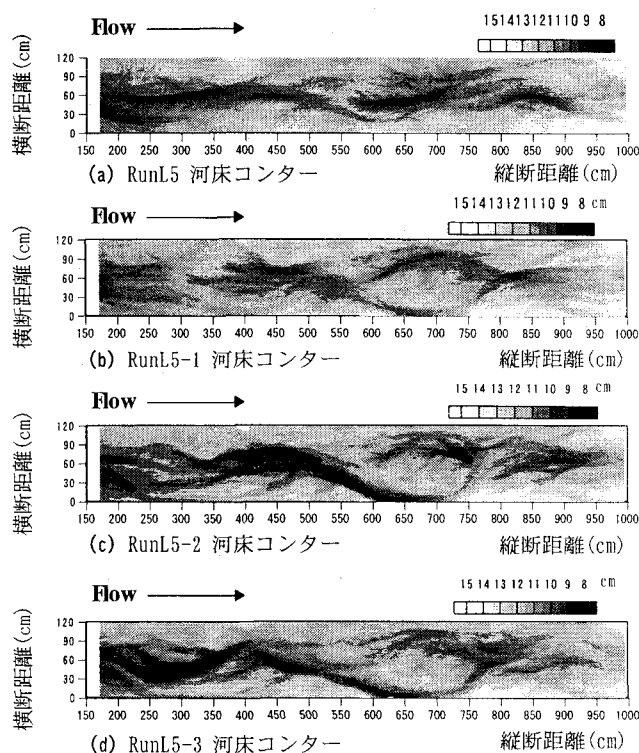
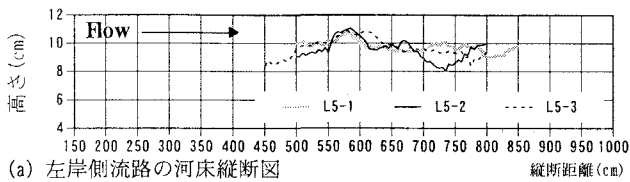


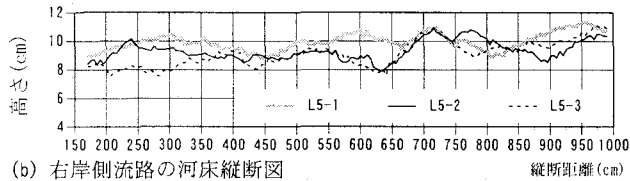
図-5 RunL5-1とRunL5-3の比較図

$x=400, 550\text{cm}$ の分岐地点に土砂がたまり、分岐が上流側に移動したため、その直前が侵食低下し、その下流の湾曲部が強く侵食しているという点である。

RunL5-1からRunL5-3までを通して見ると上記のようであるが、RunL5-2のデータを使ってこの間の状況について見ると興味深い点がある。図-6(a)(b)はRunL5-2, L5-3の河床縦断変化を示し、図-7(a)(b)はそれぞれRunL5-2, L5-3の砂礫増減である。RunL5-2では $x=300\text{cm}$ から侵食が現れている。これは、このあたりの流路本数が減少し統合されたことと関係しているものである。コンターと図-6(a)(b)の河床縦断変化から、 $x=600, 730\text{cm}$ の侵食はそれぞれ分岐流路の右岸側、左岸側の湾曲部の侵食に対応していることがわかる。さらに、 $x=770\text{cm}$ の合流点で堆積がみられる

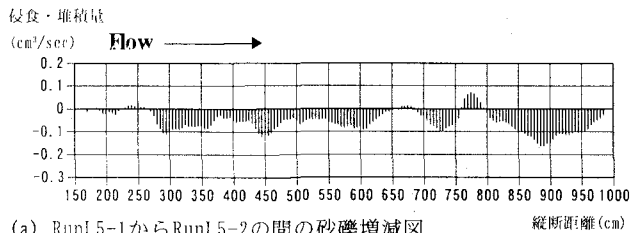


(a) 左岸側流路の河床縦断面図

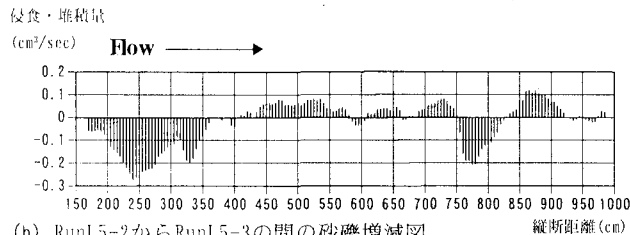


(b) 右岸側流路の河床縦断面図

図-6 RunL5-1, L5-2, RunL5-3の間の河床縦断面図



(a) RunL5-1からRunL5-2の間の砂礫増減図

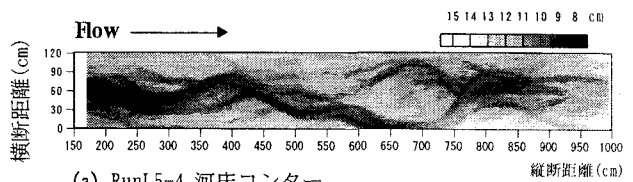


(b) RunL5-2からRunL5-3の間の砂礫増減図

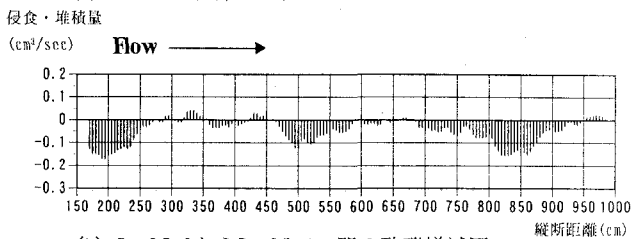
図-7 RunL5-1, RunL5-2, RunL5-3の砂礫増減図

のは、通水終盤において分岐の右岸側に流量が集中していたので、同時に流砂量も集中した結果であると推測される。一方、図-7(b)より、RunL5-3では上流側で侵食が強まっていたことがわかる。これは、複数の流路が統合して2本になったことにより侵食が強まったことが考えられる。また、 $x=450\text{cm}-750\text{cm}$ では堆積傾向が見られる。これは、上流からの供給土砂が急激に増加したことが原因であると考えられる。さらに、図-7の(a)と(b)では侵食傾向と堆積作用が反対になっているところがある。 $x=725\text{cm}$ 付近左岸側流路を例にとってみると、図-6(a)の左岸側流路の河床縦断面変化より、RunL5-2では侵食低下、RunL5-3では埋め戻し(堆積)が見られる。これは、上流側からの土砂供給量の違いもあるが、分岐地点での主流路が時間経過とともに左右交互に入れ替わる流路の交番現象と関連して流量と流砂量配分の変化が引き起こしたものであると考えられる。

図-8は、RunL5-4の河床コンターと砂礫増減であり、この図より、 $x=200, 500, 800\text{cm}$ 分岐合流部分のみ侵食され、その他はほとんど変化が生じていないことがわかる。表-2中に示す単位時間あたりの流出土砂量が $7.53\text{cm}^3/\text{s}$ とRunL4-1の $8.25\text{cm}^3/\text{s}$ と大差はないにもかかわらず分岐合流地点の侵食変化しか認

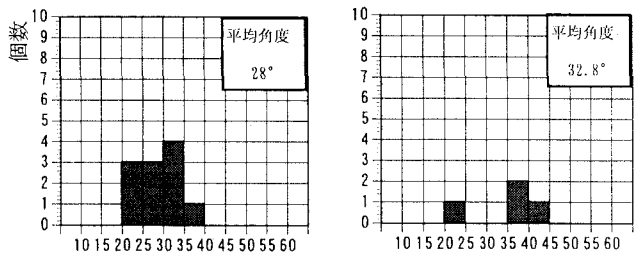


(a) RunL5-4 河床コンター



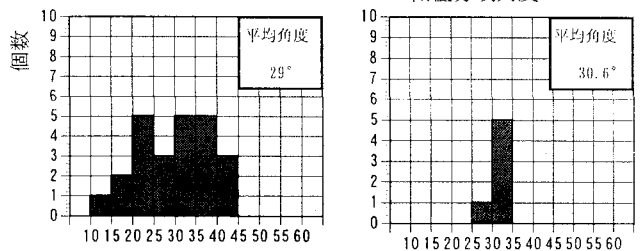
(b) RunL5-3からRunL5-4の間の砂礫増減図

図-8 RunL5シリーズ追加通水の河床



(a) RunL4シリーズ
開放分岐角度

(b) RunL4シリーズ
閉塞分岐角度



(c) RunL5シリーズ
開放分岐角度

(d) RunL5シリーズ
閉塞分岐角度

図-9 分岐角度のヒストグラム

められない。これは分岐部の流量・流砂量配分の調節作用により、侵食・埋め戻し(堆積)が分岐流路で順次交互にコントロールされ、結果的にバランスしたことによる結果であると推測する。

(2) 分岐角について

図-9に示した分岐角は各シリーズの各通水ごとに測定したものである。したがって、新しく形成したものだけではなく既存の分岐も重複してカウントされている。図中、(a)(c)の開放分岐角は、通水終了時点で分岐を保持しているものであり、(b)(d)の閉塞分岐角はその通水中に分岐流路を形成していたが通水終了までに閉塞したものである。なお、分岐角度は2つのみずみち中央間の角度である。まず、図-9(a),(c)の開放分岐角についてみると、平均値はそれぞれ 28° 、 29° とほぼ同じであるが、角度の範囲はRunL5シリーズの方

が広いようである。これは、まずサンプル数が多いということが考えられる。しかし、これ以上に分岐部が流量と流砂量をコントロールすることで分岐部形状を変化させながら分岐流路を保持しようとするのが影響していると考えられる。次に、図-9(b)(d)の閉塞分岐角度についてみると、RunL4シリーズは $35^{\circ} \sim 45^{\circ}$ 、RunL5シリーズは $30^{\circ} \sim 35^{\circ}$ の範囲にある。この違いは、RunL4シリーズで生じた閉塞は、大流量通水時のもので、RunL5シリーズは、小流量通水時に生じたものである。つまり、給砂・無給砂の違いによるということではなく、大きな流路変動をとともうものかそうではないかによるようである。

4. 分岐モデルによる流路交番現象の検討

(1) 最近の分岐についての研究

山地河川を対象と分岐モデルについて、長谷川¹⁰⁾は射流での分岐部実験や平面2次元運動量式による解析を行っている。その結果、突然変動的に閉塞を起こす現象には跳水が関係することを明らかにしている。しかし、今回対象としている流路の交番についてはふれられていない。また、Bolla, Repetto and Tubino¹¹⁾は、流路を一次元、分岐部分のみ2次元として扱うモデルによる片方閉塞するか両方開放しているかどうかについての安定解析を行い、興味深い結果を報告している。

(2) 分岐流路の交番現象に関する検討

流路の交番現象についてBolla, Repetto and Tubino¹¹⁾は、直線水路の途中に仕切りを取り付けて2つに分けた実験により時間とともに左右流量が互いに逆位相で変動していること示している。彼らは、この現象を交互砂州の移動によるものと推察しているが理論的な検証はされていない。また、川合¹²⁾も交互砂州の移動が分岐部での流量・流砂量配分変動に影響するとして固定床実験で砂州位置を変化させることで検証している。

しかし、本研究において実験中に観察された分岐部における交番現象は、交互砂州の移動に関係すると考えるのはむずかしい。なぜならば、著者らによって以前行われた中規模河床波の再現実験において、礫を含む混合砂礫実験において発達した砂礫堆は一度生起するとなかなか動かないことがわかっている。本実験においても交互砂州が移動しているような現象は確認されていない。そこで、今回は分岐部での河床高の変化が流出流砂量に変化を与えてと考えて、分岐部を図-10のように水路は1次元、分岐地帯を2つの部分に分割して2次元的に考えるモデルを使って考察してみることとする。さらに、今回は、簡単のため水流は等流状態を仮定し、分岐部における流砂連続の条件についてのみ考えることにした。

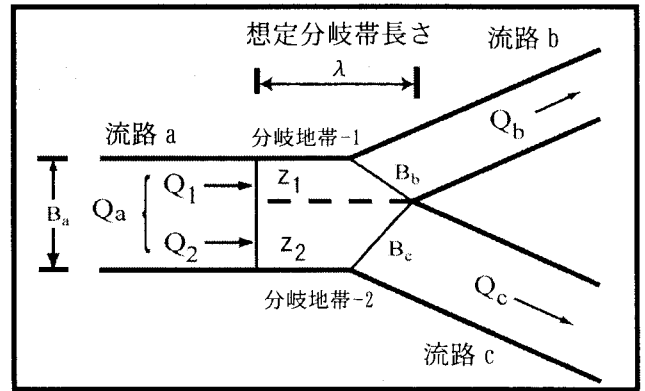


図-10 分岐部モデル

解析は、分岐地帯1, 2における流砂連続式と分岐部全体の流砂連続式を使って行う。それぞれの式は、

$$\frac{dz_1}{dt} = \left(\frac{1}{B_b \lambda} \right) \left\{ Q_1 - \left(1 - k \frac{z_1}{\lambda} \right) Q_b \right\} + \varepsilon \frac{z_2 - z_1}{B_a} \frac{Q_1}{B_b \lambda} \quad (1)$$

$$\frac{dz_2}{dt} = \left(\frac{1}{B_c \lambda} \right) \left\{ Q_1 - \left(1 - k \frac{z_2}{\lambda} \right) Q_c \right\} + \varepsilon \frac{z_1 - z_2}{B_a} \frac{Q_2}{B_c \lambda} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt} (z_1 B_b \lambda + z_2 B_c \lambda) \\ = Q_a - \left(1 - k \frac{z_1}{\lambda} \right) Q_b - \left(1 - k \frac{z_2}{\lambda} \right) Q_c \end{aligned} \quad (3)$$

ここで、 z_1, z_2 は分岐部1, 2での河床高、 B_a, B_b, B_c と Q_a, Q_b, Q_c はそれぞれ流路a, b, cの流路幅と空隙を含んだかたちの流砂量を表す。 λ は分岐部の長さ、 k は分岐地点における平均的波形勾配が流砂量におよぼす効果にかかわる係数であり、昇り(下り)勾配で流砂量が小(大)となる程度を示す。また、式(1)(2)では $\varepsilon = \sqrt{\tau_{*c} / \mu_s \mu_k \tau_*}$ であり、分岐地帯1, 2間の流砂量関係を横断方向流砂量と見立てて長谷川の式によって見積もったときの係数である。ちなみに、 τ_{*c} :無次元限界掃流力、 μ_s :静止摩擦係数、 μ_k :動摩擦係数、 τ_* :掃流力である。

分岐部へ流入する流砂量の配分は式(4)に示すようにに分岐後の流路幅に比例すると仮定している。

$$Q_1 = \frac{B_b}{B_b + B_c}, \quad Q_2 = \frac{B_c}{B_b + B_c} \quad (4)$$

したがって、式(3)は式(1)と式(2)の和となっているので、変数は、 z_1 と z_2 ということになる。これらの式を z_1 についてまとめると式(5)に示す2階の微分方程式となる。

(i) k が0ではない場合

$$\frac{d^2 z_1}{dt^2} + 2\alpha \frac{dz_1}{dt} + \beta^2 = A_1 \quad (5)$$

ただし、

$$2\alpha = \frac{\varepsilon Q_1}{B_a \lambda} \left(\frac{1}{B_b} + \frac{1}{B_c} \right) - \frac{k}{\lambda^2} \left(\frac{Q_b}{B_b} + \frac{Q_c}{B_c} \frac{Q_1}{Q_2} \right)$$

$$\beta^2 = \frac{Q_b Q_c}{B_c^2 \lambda^4} k^2 - \frac{\varepsilon Q_1 (Q_b + Q_c)}{B_a B_b B_c \lambda^3} k$$

であり、 A_1 は、定数である。

この微分方程式の一般解は、 $\alpha^2 < \beta^2$ の場合において、 D を定数として

$$Z_1 = D \exp(-\alpha t) \cos(\sqrt{\beta^2 - \alpha^2} t + \delta) \quad (5)$$

のようになるので、周期変動を起こすことがわかる。

一方、式(1)～(3)において $k=0$ として、同様の整理を行うと、式(6)のようになる。

(ii) k が0の場合

$$\frac{dz_1}{dt} + 2\alpha z_1 = A_2 \quad (6)$$

ただし、

$$2\alpha = \frac{\varepsilon Q_1}{B_a \lambda} \left(\frac{1}{B_b} + \frac{1}{B_c} \right)$$

であり、 A_2 は、定数である。

この場合の一般解は減衰指数関数となるので振動は生じないことになる。

以上のことから、分岐部における流路交番現象は、分岐地帯において、勾配変化と係数 k によって流砂量がコントロールされることに誘発されることが指摘できる。したがって、交互砂州の移動とは別の要因で交番現象が生じうることになる。

しかし、このモデルでは、河床が変化したときの、水の流れが全く考慮されていないため、通水中に周期的に生じている交番現象をあらわせたわけではない。さらに、分岐流路の現象は複雑な現象（たとえば、局所的な河床変動・流量や流砂量の配分比の関係・分岐角度など）が相互に関わりあっているはずであるので、これらの点について、さらに検討を加えたモデルの構築・改良を目指したい。

5. まとめ

3形態再現実験結果とモデルによる検討から得られた知見をまとめるとつぎのようになる。

- 1) 3形態再現実験より、分岐部において主流路の交番現象が生じていることを指摘した。
- 2) 河床コンター、河床縦断面図、砂礫増減図と実験中の観察、ビデオによる確認から分岐部での交番現象と関連して河床の侵食・埋め戻し(堆積)が生じていたことを指摘した。

- 3) 分岐角度は $20^\circ \sim 40^\circ$ となっており、閉塞が角度の大きさに依存するような傾向は見られなかった。したがって、分岐が維持される場合には分岐領域で、ある角度の範囲の中で流路交番現象を繰り返しながらバランスをとっているものと考えられる。
- 4) 簡単なモデルを用いて、流路の交番現象は交互砂州の移動による土砂の流入が周期的に変化するという原因だけではなく、分岐部における土砂流出をコントロールする作用によっても誘発されることを示した。
- 5) 実際の現象は、水流と河床変動の相互関係や平面形状特性の影響などを含んで複雑である。これらの点を考慮したモデルへの改良、および実験的な検証を進めていく必要がある。

謝辞:本研究は、平成13年度科学研究費補助金基盤研究(c)(2)(課題番号:13650558, 研究代表者:長谷川和義), ならびに(財)北海道河川防災センター平成13年度研究の助成を受けて行われた。記して関係の方々へ謝意を表す。

参考文献

- 1) 長谷川和義・藤田睦博:ステップ・プールに視点を置いた山地河道の流れの抵抗, 第30回水理講演会論文集, pp.79-84, 1986.
- 2) 森明巨・黒木幹男・岸力・戸嶋光映・谷口伸也:山地河川における階段状河床形の分類と形成機構に関する研究, 第30回水理講演会論文集, pp.229-234, 1986.
- 3) 長谷川和義:山地河川の形態と流れ, 水工学シリーズ88-A-8, pp.1-22, 1988.
- 4) 長谷川和義:溪流の淵・瀬の水理とその応用, 1997年度(第33回)水工学に関する夏期研修会テキスト, pp.A-9-1 ~ A-9-20, 1997.
- 5) 長谷川和義・藤田豊彦・竜澤宏昌・林日出喜・森高信:山地河川に見られる中規模・小規模共存河床形態の実験的検証, 水工学論文集, 第43巻, pp.749-754, 1999.
- 6) 竜澤宏昌・林日出喜・長谷川和義:溪流の小規模河床形態に関する研究-魚類等の生息環境保全対策への応用を目指して-, 土木学会論文集, No.656/II-52, pp.83-101, 2000.
- 7) 目黒嗣樹・長谷川和義・大塚剛史・竜澤宏昌:山地河川に見られる大・中・小規模共存河床形態の再現実験, 水工学論文集, 第45巻, pp.733-738, 2001.
- 8) 藤田豊彦・長谷川和義・目黒嗣樹・竜澤宏昌:急勾配混砂礫床における中規模河床形態の領域区分, 土木学会北海道支部論文集, 第56号(B), pp.292-297, 2000.
- 9) Hey, R.D.: Flow resistance in gravel bed rivers, Journal of Hydraulic Division ASCE, Vol.105, No.4, pp.365-379, 1979.
- 10) 長谷川和義:分岐部跳水が引き起こす土砂移動停止による山地河道の突然変動気候の解明, 平成5年度科学研究費補助金(一般研究C)研究成果報告書
- 11) Bolla Pittaluga M., Repetto R. and Rubino M., Channel Bifurcation in One-dimensional Models: A Physically Based Nodal Point Condition, Symposium on RIVER, COASTAL AND ESTUARINE MORPHODYNAMICS, IAHR, pp.305-314, 2001.
- 12) 川合茂:開水路分岐部における流量・流砂量配分に関する研究, 京都大学学位論文, 1991. (2001.10.1受付)