

山地河川における分岐部流路交番現象 に関する抽出実験とその解析

Experiments and Analysis on Alternating Mainstream Change in the Bifurcated
Channel in Mountain rivers

長谷川和義¹・広瀬 健治²・目黒 嗣樹³

Kazuyoshi HASEGAWA, Kenji HIROSE, Hideki MEGURO

¹正 員 北海道大学大学院工学研究科教授 (〒064-8628 札幌市北区北 13 条西 8 丁目)

○²学生員 北海道大学大学院工学研究科 (〒064-8628 札幌市北区北 13 条西 8 丁目)

³正 員 国土交通国土技術政策総合研究所 (〒305-0804 茨城県つくば市大字旭 1 番地)

This study is devoted to investigate the mechanism of mainstream changes of bifurcated channels in a mountain river by conducting movable bed experiments and analysis based on a new bifurcation mathematical model. From the 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. This model shows that self-excited change of mainstream is caused by deviation of discharge to one side due to evolution of alternating bar in the upperstream of the bifurcated channel, not by alternation of the flow entrance due to the migration of an alternating bar.

Key Words : *mountain river, bifurcated channel, self-excited change of mainstream, alternating bar*

1. はじめに

山地河川には大,中,小,の異なる規模の河床形態の重なりが見られ,実験的にも再現が可能である.本研究は再現実験¹⁾²⁾において観察された分岐部における流路交番現象(分岐流路の片側が交互に閉塞する現象)のしくみを解明するために,単純な形である同幅・同角度(各 20°)の分岐水路を用いて分岐部の抽出実験を行い,その原因を昨年度提案した分岐モデルにさらに改良を加えたモデルにて解析を試みたものである,

こうした流路の閉塞現象は,下流域の流れに非常に大きな影響を与え,土砂流出の,ひいては谷形成の自然の調節機構を成しているものと考えられる.

分岐流路については,川合³⁾によって流量・流砂量配分比に注目した詳しい研究がなされており,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検証をおこなっている.流路の交番現象については,Bolla,Repetto and Tubino⁴⁾が,一様砂を使用した

直線水路の途中で仕切りを取り付けた直線分岐水路実験をおこない,時間とともに左右流路の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,この現象が交互砂州の移動によるものと推察をしているが,理論的な検証はまだされていない.これらは著者らが対象としている山地河川での急勾配,混合砂礫,射流などの条件とは異なっている.

山地河川の分岐流路を対象とする研究としては,長谷川⁵⁾が突然変動的に閉塞が起こる現象を解明するために,射流での分岐部固定床実験や平面 2 次元運動量式による解析を行っており,それらに跳水が関係することを明らかにした.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.

今回は砂礫堆の形成条件にて混合砂礫を使用した移動床実験を行い,対称な分岐部流路においても流路交番現象が生ずることを明らかにするとともに,それに果たす砂礫堆の役割を修正モデルによって解析的に示した.

2. 実験の概要

(1) 実験方法

実験は、図-1に示すような勾配 1/15、長さ 10m、直線水路幅 30cm、分岐角度 20° の分岐水路を設置して行った。実河川の形状を考慮して、分岐部は台形状となっている。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、 n : べき数) に従う最大粒径 3.0cm、べき数が $n=1/4$ の混合砂礫 (B 砂礫) を使用した。この砂礫を 10cm の厚さで平らな状態に敷き詰めて通水を行った。

分岐流路での流量と流砂量は、それぞれの下流端において 1 分毎にコンテナによる採水、サンドトラップによる採取を行って計測した。また、流量が少なく計測が困難な場合は全体の流量から片方の流量を差し引くことで求めた。

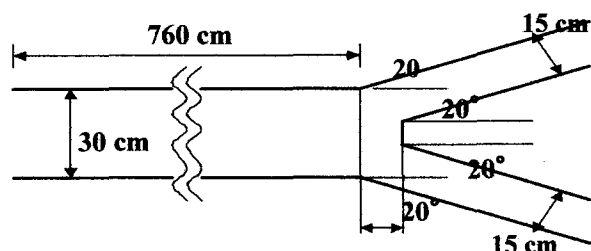


図-1 実験水路の模式図

(2) 実験条件

急勾配混合砂礫水路において砂礫堆形成の条件を与えるために、長谷川・藤田ら⁶⁾による線形不安定解析を行い、図-2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。表-1と図-2中の記号○, △, □は、幅 30cm の直線部分において砂礫堆が発生するであろう領域で、異なる流量の 3 ケースを設定したものを表す。なお、表-1中の Q , τ^*_m , Fr は、それぞれ流量、平均粒径礫 (0.6cm) 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は抵抗則として、Hey の式⁵⁾を用いた。また、上流端より砂礫が流出し、水路底面の露出が起きないように同じ粒度分布の砂礫を給砂した。

		実験条件						通水時間 (minutes)
Run	記号	勾配	Q (l/s)	B (cm)	B/H	τ^*_m	Fr	
BI1-1	○	1/15	2.7	30	14.4	0.140	1.408	30
BI1-2	△	1/15	3.8	30	12.1	0.166	1.519	18
BI1-3	□	1/15	4.9	30	10.9	0.185	1.588	12

表-1 実験条件

3. 実験結果

(1) RunBI1-1 の結果

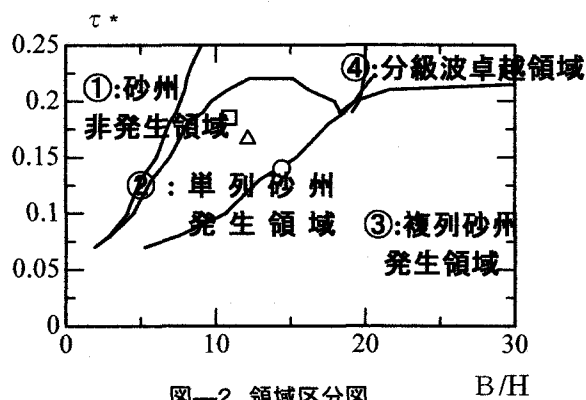


図-2 領域区分図

この通水では、直線部分において明瞭な砂礫堆の形成がみられた。図-4は、水路直線部分の側壁からそれぞれ 4cm ($y=48\text{cm}$ と 72cm) の河床高をあらわしたものである。この図より、波長 120~200cm の砂礫堆が 4 つ生起したことが確認できる。(後出の図-7, 11 も同様の方法で描いた図である。)

図-5の下流端流量比と図-6の下流端流量比のグラフから、通水開始 2 分後より左岸側分岐流路に流量および流砂量が偏るが、15 分を境にして流量と流砂量が右岸側分岐流路に入れ替わっており、この実験通水中に流路交番現象が生じたことが確認できる。さらに、写真-1(a)~(d)は 5 分おきの分岐部写真を示している。それぞれ、(a); 完全に左岸側に流量が偏っている、から(b); 次第に右岸へと流れが少しずつ移動して行き、(c); 両方の流路に同じくらいの流量が流れており、遂には(d); 逆転して完全に右岸側に流量が偏る、へと変遷している。

この通水においては、写真-1 からわかるように交互砂州の発生が流路交番現象に何らかの影響を与えていると考えられる。しかしこの実験における通水時間 15 分の間には砂州の半波長の移動は認められなかった。つまり、砂州の移動そのものが交番現象に影響を与えている、とは言えないだろう。そのため今後さらに実験的・解析的に検討する必要がある。

図-7は、流砂の粒度分布の時間変化をみるために、1.2mm 以下のフルイ通過重量累加割合を示す。図中の破線は、初期河床材料の 1.2mm 以下の累加重量割合を示している。この線より上にある採取流砂は初期河床材料よりも細かい粒度であることを示し、下にある場合には粗い粒度であることを示している。図-7より、流量・流砂量が多い場合には、初期河床材料と同様かもしくは少し粗い粒度の流砂が優勢となり流量・流砂量が少ない場合には初期河床材料よりも細かい粒度をもつ流砂の多いことがわかる。分岐現象が分級を伴う現象であることが理解される。

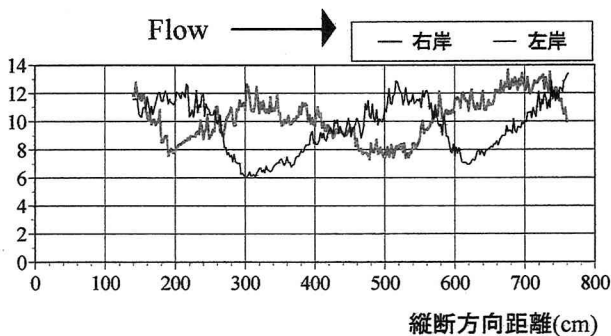


図-4 RunBI1-1における左右岸河床高変化

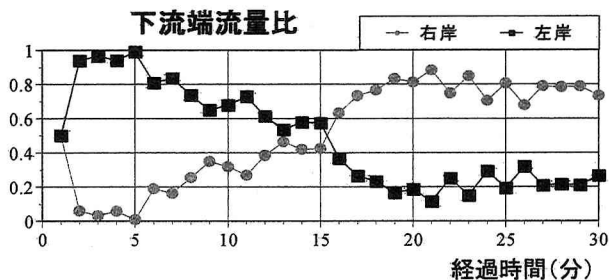


図-5 RunBI1-1における下流端流量比

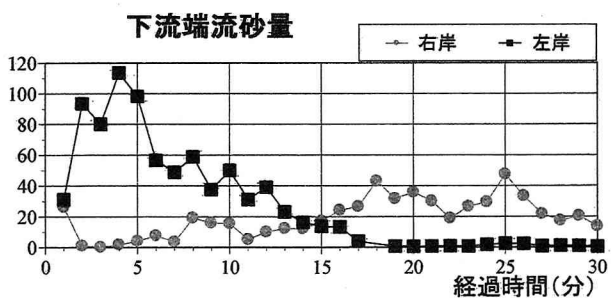


図-6 RunBI1-1における下流端流砂量

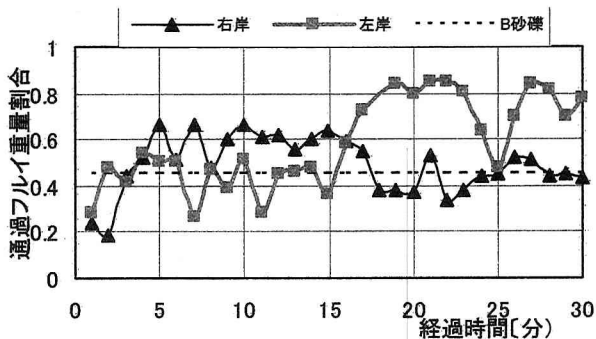
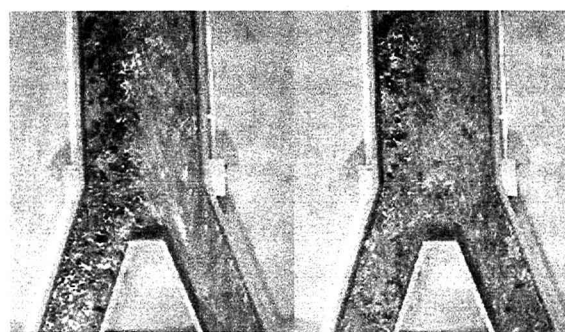


図-7 RunBI1-1における流砂粒度分布比較図

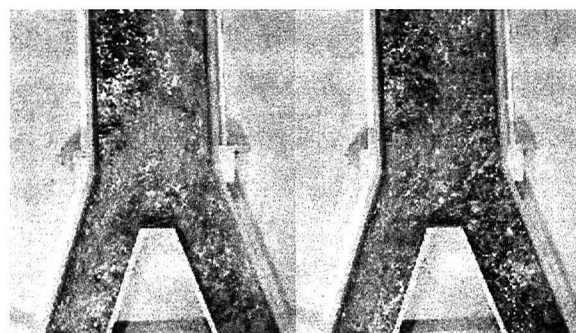
(2) RunBI1-2の結果

この通水では、砂礫堆の形成と縦横断交互分級波との共存河床形態が発生した。図-8より、波長が180～250cmの砂礫堆が生起したことがわかる。また、写真-2より縦横断交互分級波が砂礫堆に重なって生じている様子を見ることができ、縦横断交互分級波とは、砂礫堆形成実験で発見されたもので、河床表層において縦断方向、横断方向に砂礫の粗い部分と細かい部分が交互に現れる現象である。その波長は、約180cmの砂礫堆の部分で約100cm、約250cm砂礫堆の部分で約140cmであった。それぞれの波長



(a) 5分後

(b) 10分後



(c) 15分後

(d) 20分後

写真-1 分岐部の様子

は、多少バラツキがみられるが、以前に著者らが行った砂礫堆実験⁸⁾での砂礫堆および縦横断交互分級波のものとはほぼ同じ値である。

また、この実験においても流路の交番現象がみられた。この様子は、RunBI1-1と同様に図-7の流量配分比および図-8の流砂量より、通水開始より右岸に偏っていた流量・流砂量が8分を境にして逆転し、左岸側に变化したことが確認できる。加えて、図-9より通水開始8分までに流量・流砂量が左右岸で1～2回入れ替わる現象が見られた。これは流量・流砂量の変化が大きくないこと、周期が2～4分と非常に短いことから砂礫堆の前進が理由というよりは、通水中に生起した縦横断交互分級波などが別の要因として考えられる。しかし、この通水においては図-8を参照してみても粒度分布が左右岸で逆位相にならないので、縦横断交互分級波が直接影響していると言うことはできないだろう。

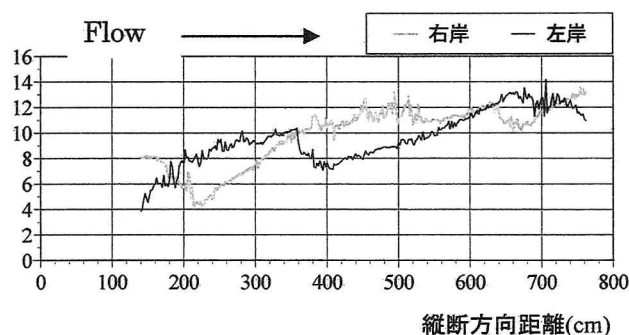


図-8 RunBI1-2における左右岸河床高変化

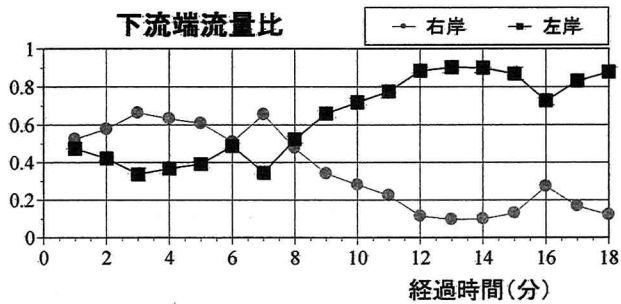


図-9 RunBI1-2 における下流端流量比

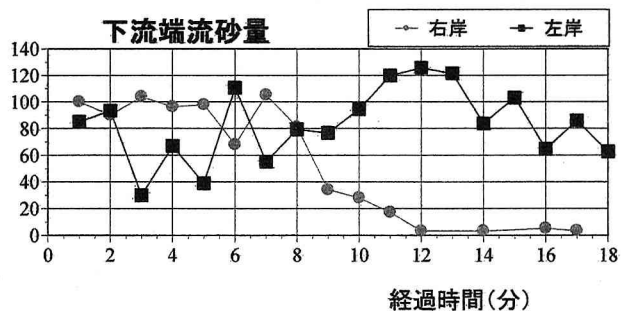


図-10 RunBI1-2 における下流端流砂量

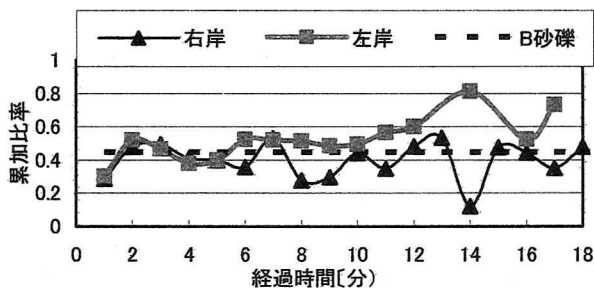


図-11 RunBI1-2 における流砂粒度分布図

(3) RunBI1-3 の結果

RunBI1-3 の通水で、通水開始初期から激しく土砂が流出しており、河床波の発達を観察することはできなかった。また、上流部で急激に河床低下が進行し水路床が見えてしまった。実験後の河床は図-14 より左右岸片寄りなく平らな状態になった。分岐部においては、粗い砂礫の部分が左右交互に堆積しているようであったが、上記の理由から水路全面で形成されたかどうかはわからない。図-12 から流量は通水時間の間ほとんど変動していないことが、図-13 より流砂量については通水初期には左右流路で違いが生じているが時間経過とともに変動しなくなっていることがわかる。図-15 の流砂粒度分布も左右岸で変化に違いはほとんどみられないが、6～12 分の間で若干ではあるが粒度分布が左右岸で入れ替わる(変動が逆位相をもつ)様子がみられる。この変動は、河床形態に縦横断交互分級波が見られたことや、変化が流砂の粒度分布に見られることから、分級波の形成と移動(前進)の影響を反映したものであったと考えられる。

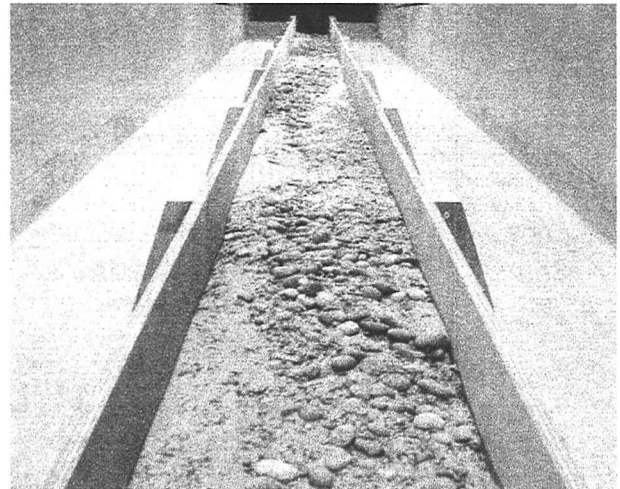


写真-2 通水後河床の様子

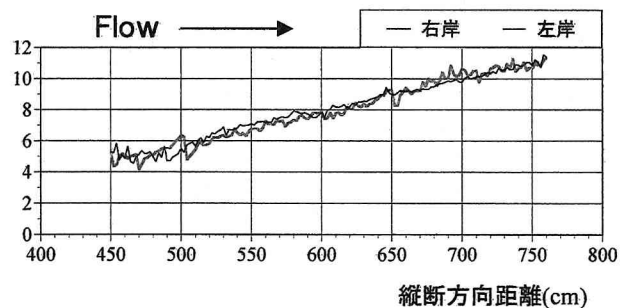


図-12 RunBI1-3 における左右岸河床等高図

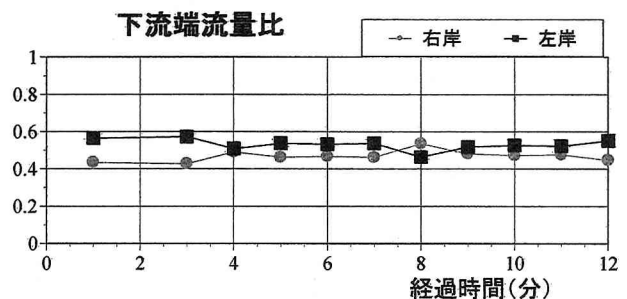


図-13 RunBI1-3 における下流端流量比

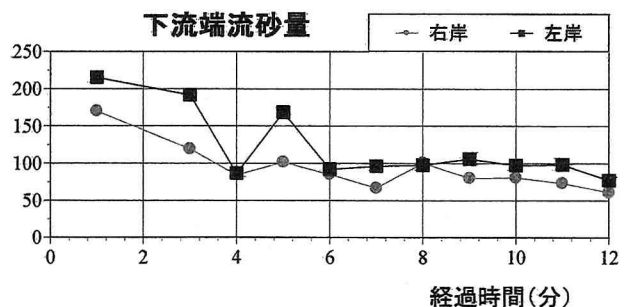


図-14 RunBI1-3 における下流端流砂量

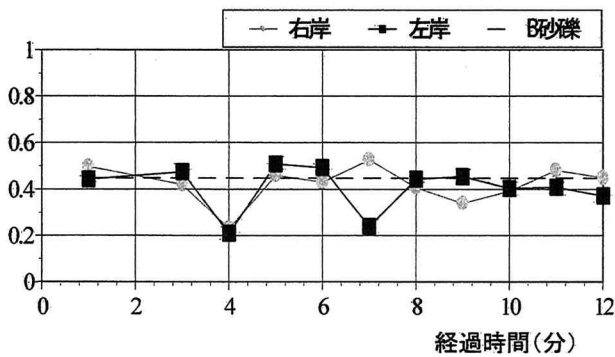


図-15 RunBI1-3における流砂粒度分布比較図

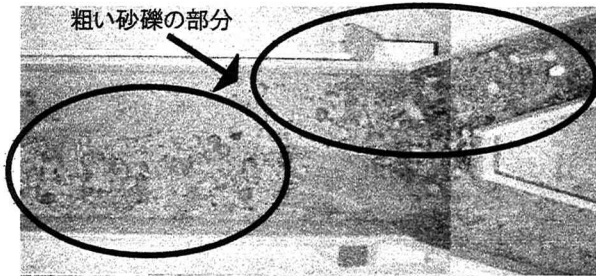


写真-3 通水後の河床の様子

4. 分岐モデルによる流路交番現象の検討

(1)分岐流路の交番現象に関する検討

昨年度²⁾において、交番現象を表現する方程式を提案したが、検証データが得られなかったために結論には至らなかった。本年度は前半に示した分岐部抽出実験による検討を試みたが、振動条件が得られなかった。そこで新たに下記のような修正を加えた現象方程式を提案し、交番現象の原因を検討する。

解析は、昨年度と同様に図-13のように分岐地帯1、2、に分け、それぞれにおける流砂連続式を使って行なう。分岐部1における河床の初期河床からの変位を Z_1 とした時、 Z_1 の時間変化は上流からの流砂量 Q_1 と下流への流出流砂量 Q_b の差によって表されるほか、横断方向への流砂の影響を受ける。 Q_b は分岐部1での河床勾配 Z_1/λ の増加とともに減少する、とするのは昨年と同様である。 Z_1 は λ の区間の平均的な河床高であり、この区間の勾配は図-16下部に示すように、およそ Z_1/λ にて評価される。分岐部1における河床高 Z_1 の変化が、流れを通じて分岐部2における河床勾配 Z_2/λ の影響を強く受け、

Z_2/λ が増加するとともに Q_b が増加するように働くものとする。これらに関しては、本来流れ方程式によって明確に表現すべきであるが、非常に複雑になるので、現象論的にこのような表現をすることに

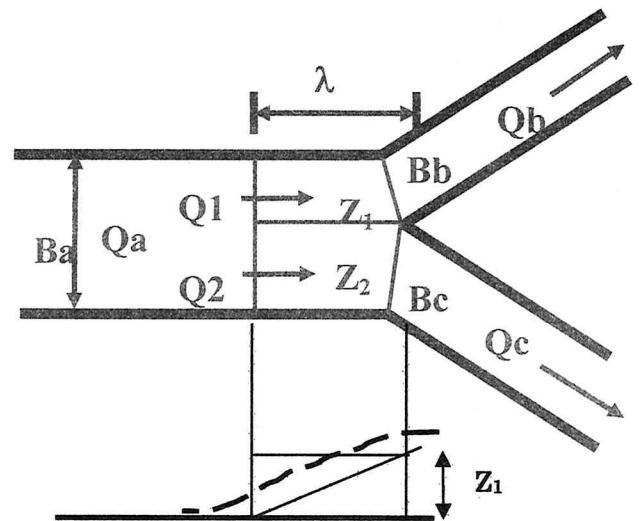


図-16 分岐部モデル

する。 Z_2 についても同様の議論が成り立つ。これらを流砂連続式に代入してまとめると以下ようになる。 m は係数である。

$$\frac{dZ_1}{dt} = \frac{Q_1}{B_b \lambda} \left(\frac{k}{\lambda} Z_1 - \frac{m}{\lambda} Z_2 \right) + \frac{2\varepsilon Q_a}{B_a^2 B_b} (Z_2 - Z_1) \quad (1)$$

$$\frac{dZ_2}{dt} = \frac{Q_2}{B_a \lambda} \left(\frac{k}{\lambda} Z_2 - \frac{m}{\lambda} Z_1 \right) + \frac{2\varepsilon Q_a}{B_a^2 B_c} (Z_1 - Z_2) \quad (2)$$

この式で出てくる m の入った項が昨年提案した式との違いである。なお、 Z_1, Z_2 は分岐部1、2での初期河床からの変位、 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、 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 $\varepsilon = \sqrt{\tau_{*c} / \mu_s \mu_s \tau_{*c}}$ 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。

式を Z_1 と Z_2 について整理すると2階の微分方程式を得る。

$$\frac{d^2 Z_1}{dt^2} + 2\alpha \frac{dZ_1}{dt} + \beta^2 Z_1 = 0 \quad (3)$$

$$\alpha = -\frac{1}{2} \left\{ \left(\frac{kQ_1}{B_b \lambda} - \frac{2\varepsilon Q_a}{B_a^2 B_b} \right) + \left(\frac{kQ_1}{B_c \lambda^2} - \frac{2\varepsilon Q_a}{B_a^2 B_c} \right) \right\} \quad (4)$$

$$\beta^2 = \left(\frac{kQ_1}{B_b \lambda^2} - \frac{2\varepsilon Q_a}{B_a^2 B_b} \right) \left(\frac{kQ_2}{B_c \lambda^2} - \frac{2\varepsilon Q_a}{B_a^2 B_c} \right) - \left(\frac{mQ_1}{B_b \lambda^2} - \frac{2\varepsilon Q_a}{B_a^2 B_b} \right) \left(\frac{mQ_2}{B_c \lambda^2} - \frac{2\varepsilon Q_a}{B_a^2 B_c} \right) \quad (5)$$

この微分方程式は

$$\beta^2 - \alpha^2 > 0 \quad (6)$$

の場合に減衰振動方程式となる。式(3)を実験条件に合わせて $B_a = B_b$ として Z_1 について解き、振動の周期を求めると式(7)のようになる。

$$T = \frac{B\alpha^2}{2Qa} \times \frac{\pi}{\sqrt{(m^2 - k^2)Q^2 - (m^2 - k^2)Q + \left(4\varepsilon^2 \lambda^2 - 2\varepsilon \lambda m + \frac{1}{4} k^2 \right)}} \quad (7)$$

ただし、 $Q_{1*} = Q_1 / Q_*$ 。

RunBI1-1 および RunBI1-2 において明瞭な振動周期が得られているので、これらの値を当該実験の諸水理量を用いることにより、不明の係数 m, k を求めるを試みる。式(7)の周期に2つの値を与え、連立化して解くと、 $k = 0.63, m = 1.18$ となる。この数値が一般性を持つものかどうかについては問題があるが、突飛な値ではない。モデルとして用いる際にまるめた値を用いるものとして、 $k = 0.6, m = 1.5$ 、とすることにした。一方、 k, m 、が与えられた場合に、式(6)の条件を満たすためには、 Q_* がある範囲を満たす必要がある。

RunBI1-1 では $\varepsilon = 0.714$ 、その時の Q_{1*} の範囲は

$$Q_{1*} < 0.007, \quad 0.993 < Q_{1*} \quad \text{であり、}$$

RunBI1-2 では $\varepsilon = 0.656$ 、その時の Q_{1*} の範囲は

$$Q_{1*} < 0.092, \quad 0.909 < Q_{1*} \quad \text{である。}$$

つまり、振動現象が生じるためには、分岐部での流砂量が大きく偏ることが必要条件となる。実際、RunBI1-3 では交互砂州の発生を見ず、流砂量の偏りも顕著ではないため、交番現象が生じていない。

以上の検討から、流路の交番現象において交互砂州は系の強制外力として働くのではなく、直線水路における流量の偏りを生み出し振動条件を付与するものであることが理解される。

5. おわりに

[1] 同幅、同角度の分岐水路においても、流路交番現象の生ずることが実験的に確認された。ただし、交互砂州の存在しているケースにおいてのみ、である。

[2] 流路の交番現象の要因としては、交互砂州の移動によるものとする説がある。しかし現象の観察と分岐モデルによる解析から、流砂量が直線水路において左右どちらかへ大きく偏ることにより振動方程式の条件を満たし、交番現象につながる事が明らかになった。

[3] 今回の実験は、最も単純な同幅・同角度分岐のケースで、しかも砂礫堆の形成領域のみで行った実験である。分岐部での流路変動機構を解明するためには、今後、幅比や分岐角度の異なるケース、複列砂州形成領域、非砂州領域などで実験・解析を行ってデータの蓄積をする必要がある。

謝辞: 本研究は、科学研究費補助金(基盤研究C(2)13650558 代表長谷川和義)の助成を受けて行われた。記して謝意を表する次第である。

参考文献

- 1) 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.
- 2) 目黒嗣樹・長谷川和義・中村健作：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，水工学論文集、第46巻，pp.755-760, 2002.
- 3) 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.
- 4) 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.
- 4) 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
- 5) Hey, R.D.: Flow resistance in gravel bed rivers, *Journal of Hydraulic Division ASCE*, Vol.105, No.4, pp.365-379, 1979.
- 6) 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.
- 7) 長谷川和義・藤田豊彦・目黒嗣樹・竜澤宏昌：河床不安定および分級不安定をとまなう急勾配混合砂礫河床の形態，水工学論文集，第44巻，pp.659-664, 2000.

(2002. 9. 30 受付)