

II-18

分岐部反力が働く射流分岐水路における 流れと土砂堆積

北海道大学 正員 長谷川和義
北海道大学工学部 学生員 水柿 俊直
北海道大学工学部 学生員 納 弘

1. はじめに

著者ら(1991)は、山地河川の分岐水路における閉塞が分岐部で生ずる跳水とその内部への土砂堆積によって発生するものと考え、基礎的な研究をすすめてきている。これまでに、射流の平行分岐水路においても流路幅比と流量配分比が異なる場合には跳水に至り、土砂堆積の生ずることを確認してきた。しかし、流路が閉塞に至る場合には、さらに付加する機構が働くものと思われる。本論文は、あらためて実施した現地観測を参考にして、分岐角が比較的大きく頂部が直接流れに反力をおよぼすタイプの分岐跳水を取り上げ、その流れの特徴を明らかにしようとするものである。分岐部流線の弯曲によって2次流が生じ、掃流砂が分岐水路内に運ばれる現象はよく知られているが、跳水を伴った場合の流況に関してはほとんど知られていない。

2. 閉塞分岐流路の実例

白水川は、石狩川水系豊平川に合流する流域面積16.46km²、長さ8.2kmの山地小支川であるが、分岐合流が著しく発達しており閉塞堆積が多数認められる。観測対象にした1km弱の区間にも12箇所確認された。

図-1～3は、これらの分岐部形状の概要を示したものである。分岐角は45～80度の範囲にあり、平均58度であった。図-1に見られるような主流路（現在流れている流路）弯曲の内側から分岐しているタイプと、図-2のように主流路弯曲の外側から分岐しているタイプ、および主流路が直線で分岐しているタイプ（図-3）が存在する。この観測区間では、それぞれ7、3、2箇所ずつ認められた。内側分岐が多いのは意外な結果であるが、この場合の閉塞土砂堆の高さは低く、堆積礫の径も小さめである。外側分岐の場合は、閉塞土砂が1m以上に堆積しており、礫径も数十cmから1mに近い。外側分岐の中の島は、植生から推定すると上流部先端ほど新しい堆積になっている。そして、これが閉塞堆積に続いている。なお、上流から、より直線に近いほうの流路が主流路となっている。これは上記の3つのタイプ、全てに当てはまる。

流路幅は、分岐上流の幅よりも分岐後の主・支流路幅ともに狭い場合、上流幅よりも主幅が広く支幅が狭い場合、逆に主幅が狭く支幅が広い場合などさまざまである。これらの内、流れに対して分岐頂部の反力が直接およびやすいのは外側分岐の場合で、上流幅が主・支幅よりも広い場合である。

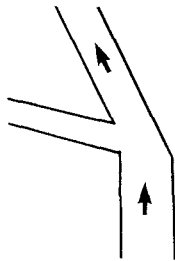


図1.内側分岐

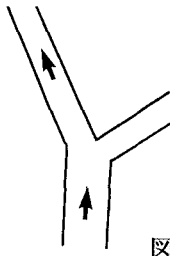


図2.外側分岐

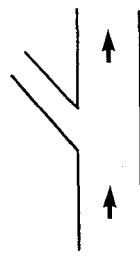


図3.直線分岐

Flow and sediment deposition in a bifurcated supercritical flow influenced by the reaction from bifurcation

by Kazuyoshi HASEGAWA, Toshinao MIZUGAKI, Hiroshi OSAME

3. 実験水路条件の設定

実験に用いる水路は長さ13m、幅80cmの可傾斜水路である。実験水路の幾何形状を、図-4のように定めた。これらは基本的に外側分岐を模したものであり、分岐頂部の反力の影響をより明瞭にするように設定してある。すなわち、分岐前の幅と分岐後の幅の和の変化による跳水発生を避け、また分岐頂部の幅を上流幅の半分にとり、上流からの流れが直接当たるようにしている。分岐角は現地観測の値と使用水路の幅の制限をもとに45度を選んだ。分岐頂部の形状は2種類にかえることにし、それぞれ平面（Run-1）、および三角突起（Run-2）にしている。底面は錆止めペイントが塗られており、滑面に近い状態になっている。通水条件、主要水理条件は下の表に記す。

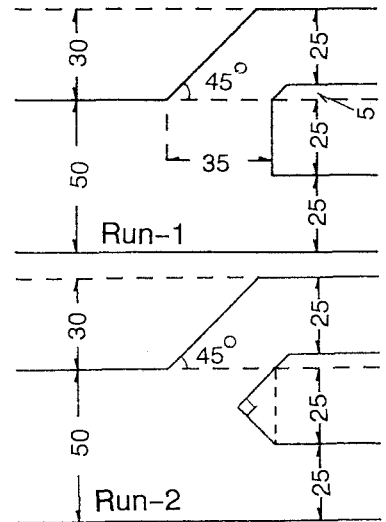


図4.実験水路の形状

4. 実験の概要

水面形は分岐壁の100cm上流より、横断方向12.5cm間隔、縦断方向2.5cm間隔をポイントゲージで計測した。

流速測定はプローブ径5mmの2次元電磁流速計を用いた。計器の仕様により、各点、底から1.1cmの点からのデータであり、水深方向に0.5cm毎、測定している。測点は図-5に示す。

礫の流れを調べるためにビデオカメラを、水路から約1.8mの高さに設置し、Run-2の状態を録画した。

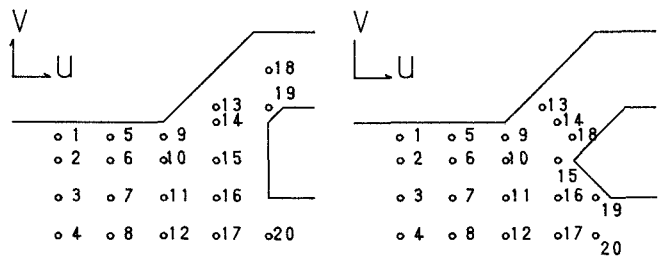


図5.流速測定点

表 実験条件および主要水理量

	流量(1/s)	底面勾配	射流等流水深(cm)	射流フルード数	主流路流量配分比
Run-1	35.3	0.016	4.57	2.31	0.61
Run-2	35.4	0.016	4.60	2.29	0.64

5. 跳水を伴う分岐部の流れ

5.1.1 水面形について

図-6はRun-1、2の跳水の水面形を等水深線で示したものである。両ケースとも、分岐頂部の反力は上流水路幅の半分にだけ作用するはずであるが、跳水は幅全体に生じている。反力のない側の跳水は、幅比と流量配分比の不整合によって生じたもの（長谷川ら¹）と解釈される。またRun-1のほうが反力が大きく、Run-1の跳水発生の位置は、Run-2より上流に位置している。

5.1.2 堰上げ水深との比較

水面形の変化を図-7のように考える。このとき h_1 と h_2 の関係は式(1)で表される。

$$h_2/h_1 = 0.5 (\sqrt{8F^2 + 1} - 1)$$

F: 上流等流水深におけるフルード数 …… (1)

さらに h_3 が、流速=0の堰上げ水深とした場合、ベルヌーイ式より式(2)の関係が求められる。

$h_3 = V_2^2 / 2g + h_2 \dots (2)$ 。式(1), (2)と連続の式、 $V_1 h_1 = V_2 h_2 \dots (4)$ から式(5)が導ける。

$$h_3/h_1 = 0.5 (\sqrt{8F^2 + 1} - 1) + 2F^2 / (\sqrt{8F^2 + 1} - 1)^2 \dots (5)$$

これと分岐中央の実験値を比較したのが、図-8である。非常に近い値となっている。

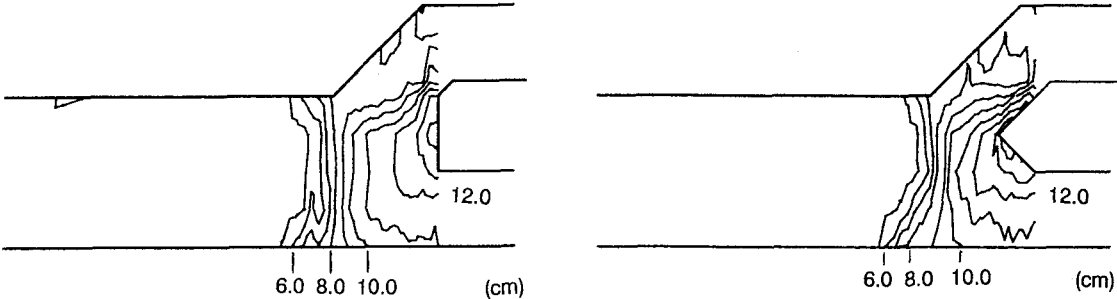


図6.等水深図

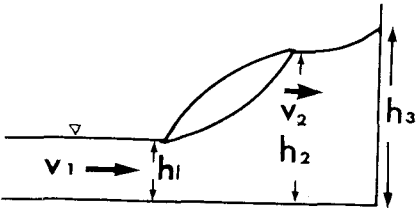


図7.水面形の変化

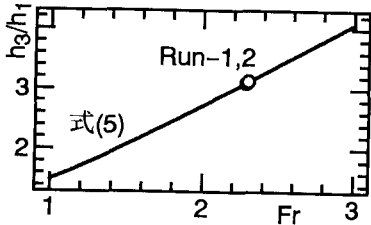


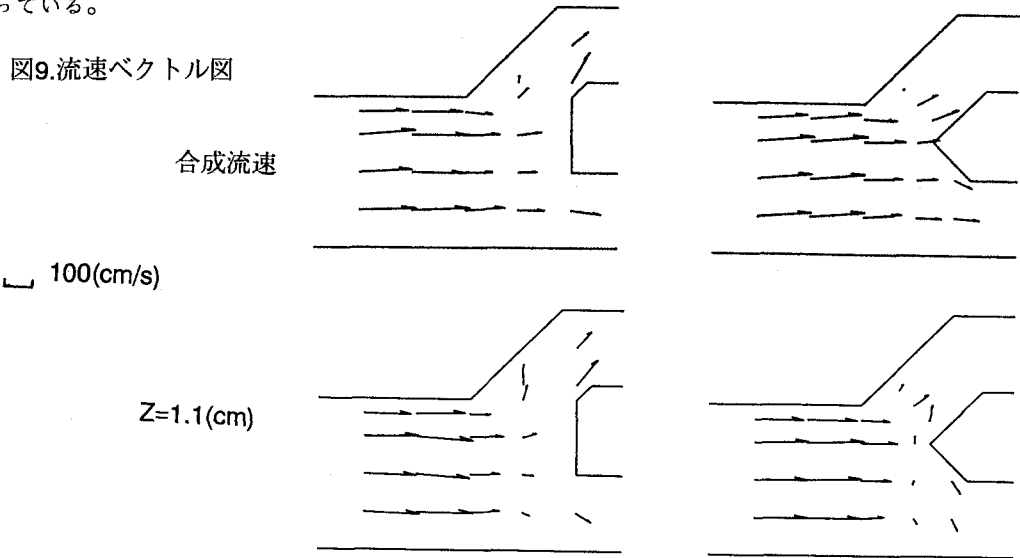
図8. h_3/h_1 とFrの関係

5.2.1 流速分布の特徴

図-9の一連の図は、Run-1, 2の合成流速と所定的水深における流速ベクトル図である。
 跳水に入る前は、水路の側壁の凹凸による斜め波が少々存在しているが、ほぼ射流等流状態になっている。
 跳水内に入ると流速は急激に減少し、水路壁に沿う方向の流れ(分岐流)になっている。

図-10は図-5のRun-1, 2における②⑩⑮の水深方向の流速分布である。Run-1⑮の流速分布からは図-11に示すような水の巻き返しが考えられる。Run-2⑮も同様のことが言えるが、分岐形状の違いから流速分布の形が異なっている。

図9.流速ベクトル図



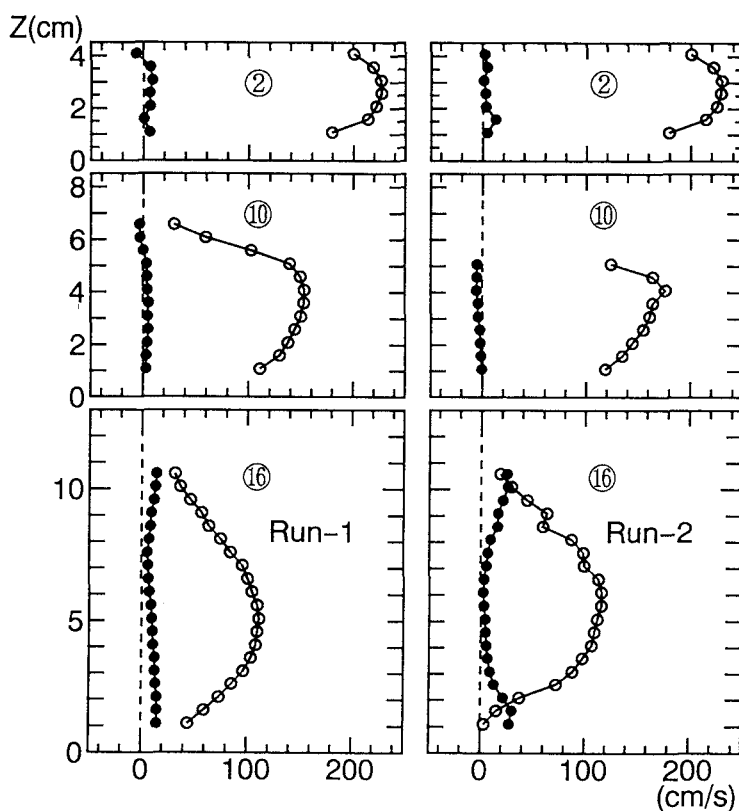
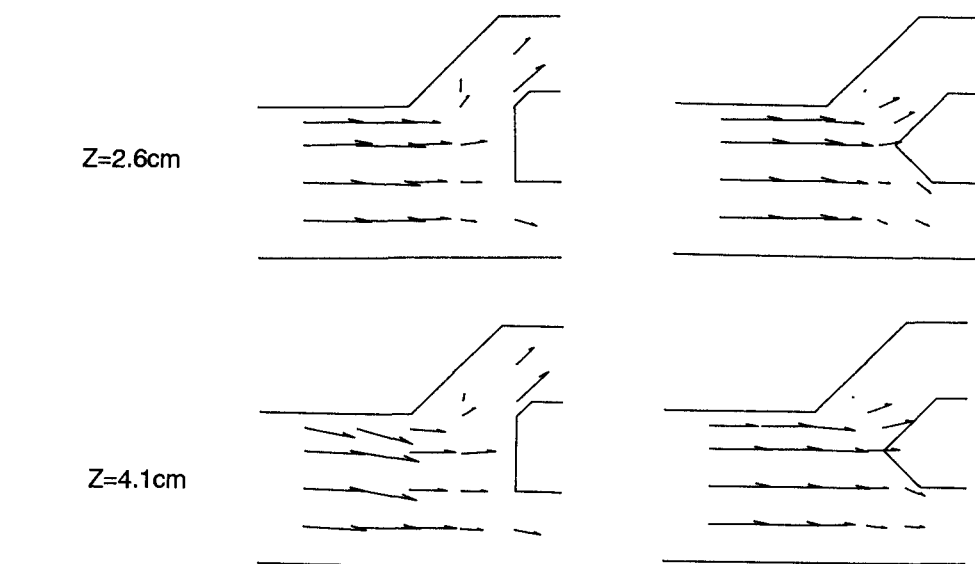


図10.水深方向流速分布

○ :u方向
● :v方向

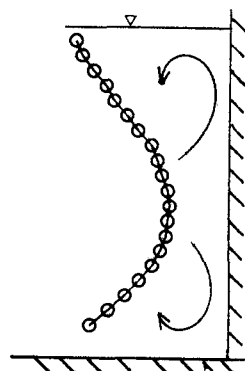


図11.水の巻き返し

5.2.2 分岐流発生モデル

跳水に入ってから分岐流速に関しては次のような2つのモデルが考えられる。

モデル1: 2次元的な噴流が壁にぶつかり、向きを変える(図-12)。このときベルヌーイの式、 $V_2^2/2g+h_2+Z_2=V_4^2/2g+h_4+Z_4$ ・・・(6)において $h_2=h_4$ 、 $Z_2=Z_4$ とすると、 $V_2=V_4$ ・・・(7)となる。

モデル2: 堰上げ水深から水が流れ落ちる(図-13)。ベルヌーイの式より、 $h_3 = V_4^2 / 2g + h_4$ 。これを变形すると式(8)になる。

$$V_4 / V_1 = \sqrt{2g h_3 (1 - h_4 / h_3)} / V_1 \quad \dots (8) \qquad (h_3 \text{は式(2)で求めたものを使用した。})$$

この2つのモデルによる分岐流速と実験値をグラフにしたのが図-14である。実験値は、Run-1, 2とも図-5の⑬⑭⑮の水深平均流速を用いている。Run-1は式(7)、Run-2は式(8)の値に近く、このモデルで分岐流の概略値を表すことが可能なのである。また図-11, Run-1⑮の流速分布は噴流のそれと似ており、上記の仮定と一致している。

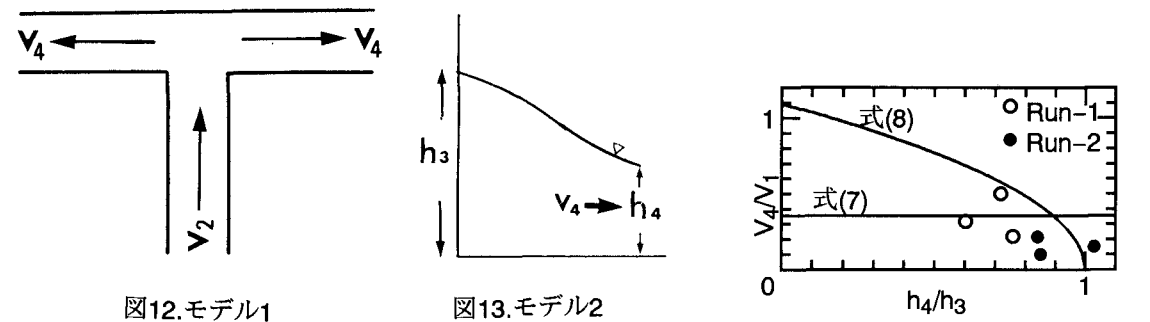


図12.モデル1

図13.モデル2

図14. V_4/V_1 と h_4/h_3 の関係

6. 礫の流れと堆積

6.1 礫の流れと堆積の状況

水路上流より礫を流すと、Run-1, 2のいずれの場合にも跳水の位置で礫が停止した。これは今までと同様の結果(長谷川ら)である。跳水に入る前の射流における礫の移動経路は、礫の形状や慣性力の影響で左右にぶれるが、ほぼ流れに沿っている。跳水の中に入ると分岐頂点(三角形の頂点)から支流側では、比較的大きな分岐流の影響を受け、礫が跳水内に留まらずに左岸の剥離域に入り、停止、堆積するものが多い。また大きい礫は小さい礫よりも慣性力が大きいため、停止せずに流出するものが多い。

大量の礫を流すと、堆積した際に礫どうしがかみあい流されにくくなる。これは堆積閉塞の重要な要因の1つと思われる。分岐壁直前では図-11に示すような水の巻き返しにより、礫は堆積する事ができない。このためRun-1、Run-2とも、主、支流側どちらの水路も閉塞するまでには到らなかった。この非堆積領域はRun-1のほうが大きい。

また、多少の堆積では跳水の位置、水面形に変化は生じなかった。これは平行分岐において横流入で生じる跳水の場合(長谷川ら)と著しい相違である。後者は堆積によって跳水条件が崩れたのに対し、前者は恒久的な分岐反力が存在するため、跳水位置が保たれるからである。

6.2 礫の通過位置の度数分布

図-15のように水路を区分する。①、②の断面でそれぞれ礫が通過したときの横断方向位置、②～③の区間で堆積(流出も含む)した位置をビデオで追跡した。のべ、大51個、小62個の礫の移動が確認された。礫は長径5cmをもって、大小2つに区分している。その結果が図-16である。

分岐頂点より左岸側の部分を通った礫数の比率を①、②、②～③毎にだした。大礫は(29%、27%、37%)、小礫は(25%、31%、44%)となっている。どちらも跳水にはいった後、分岐頂点より右岸側から礫が流入していることが分かる。

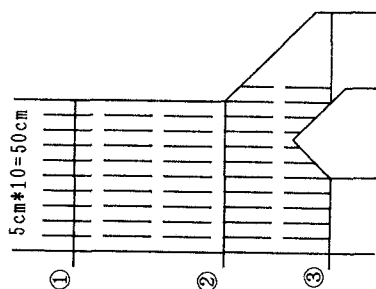


図15.水路区分

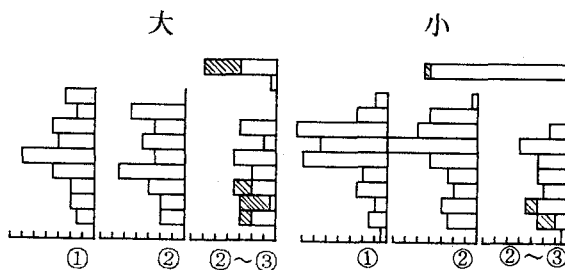


図16.度数分布 (1目盛2個 ハッチングは流出を示す)

7. まとめ

- ・現地観測の結果、分岐閉塞の生ずる流路形状にはいくつかのタイプがあることが判明した。
- ・分岐反力を伴う射流の場合には、確実に跳水が発生し、安定している。
- ・分岐壁直前の水深は堰上げ水深にはほぼ等しい。
- ・分岐流速は噴流衝突、自由流出のような簡単なモデルによっても説明がつく。
- ・分岐反力の存在下では、多少の堆積でも跳水が崩れなく、堆積の安定とさらなる堆積が可能である。
- ・分岐反力のため、分岐壁近傍では水の巻き返し強く、礫の堆積が生じない。
- ・跳水内の分岐流により、支流側に入り込む礫が存在する。

謝辞：本研究は、文部省科学研究費一般(C)「分岐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機構の解明」（代表 長谷川）の補助を受けた。記して関係者の方々に深謝の意を表する次第である。

参考文献

- 1)長谷川和義・納弘・石川伸(1992):射流分岐水路における跳水の発生条件、第36水理講演会論文集
- 2)長谷川和義・納弘・石川伸(1992):急勾配分岐水路における跳水の発生と土砂堆積、土木学会北海道支部論文報告集、平成3年度
- 3)長谷川和義(1988):山地河川の形態と流れ、水工学シリーズ88-A-8