

II-36

分岐・合流を含む急勾配流れの特性に関する実験的研究

北海道大学 正員 長谷川和義

北海道大学大学院 学生員 石川 伸

北海道大学工学部 学生員 大高 道夫

1. はじめに

著者らはこれまで山地河川の形態と流れの構造について現地調査などを行い、多くの知見を得ている。¹⁾
 -4) そのうち山地河川の大规模河床形態と分岐・合流流路は密接な関係があることが明らかになっている。すなわち、大规模河床形態は谷底平野、挟窄部といった、谷の地形的制約が河床に反映したものであり、分岐・合流流路は谷底平野のような谷幅が広く、勾配が緩いところに発達している。そして、分岐合流流路は洪水時に激しく変動し、しばしば新河道、廃棄河道を生み出し、大量の土砂を生産する。分岐・合流流路の形態の解明を目的とした白水川での調査では、分岐流路入口に礫が堆積しており、それが分岐流路を閉塞して廃棄河道を生み出していることが明らかになった。この礫の堆積を引き起こす原因として、分岐部で跳水が発生することが挙げられるが、どのような機構で跳水が発生するかなど分岐部での流れの水理学的解明は十分といえない。

本研究では山地河川に分岐・合流流路の流れの特性とその変動機構を解明するために、山地河川の流れで特徴的な射流において分岐・合流流れの特性を水路実験より明らかにしようとするものである。射流における分岐・合流流れの研究はほとんど例がなく、水理学的にも非常に興味ある問題である。

2. 実験の概要

本実験に使用した水路は図-1に示すような全長15m、幅80cm、深さ20cmの可傾斜式循環水路である。上部及び下部には水槽が備わっており、上部水槽には2枚の整流板が取り付けられている。分岐・合流流路はこの水路をベニヤ板を用いて図-2のように水路を仕切って作成した。また河床には粒径5mmの礫を張り付け粗度とした。射流実験を行う場合、水路側面から発生する衝撃波の影響が問題となるが、板の継目等には十分な注意を払い滑らかにした。また、上部水槽から分岐までは3mの距離をとり分岐前に等流状態が十分実現するようにした。流量はオリフィスの水位差をマンメーターで読み取り測定された。

実験に用いた流路の幾何形状は、白水川現地調査によって確認された分岐・合流流路をモデルとしている。白水川調査の結

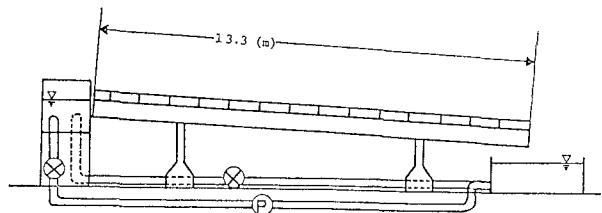


図-1 実験水路概形

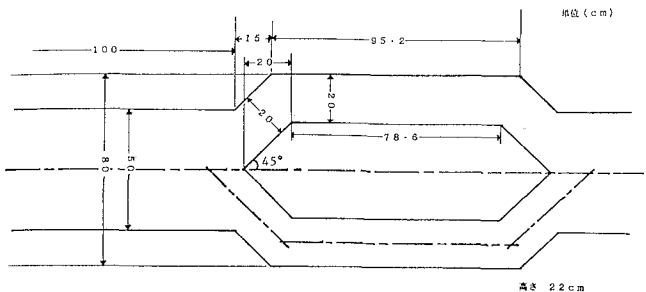


図-2 分岐・合流路平面図

Experimental study on flow hydraulics in a steep channel with branch and junction
 by Kazuyoshi HASEGAWA, Shin ISHIKAWA and Michio OOTAKA

果、河床材料の84%粒径 d_{84} は25cmであった。水路では5mmの一様粒径を用いたので、これより実際の山地河川に対する実験水路の縮尺は1/50である。従って実験流路の主および分岐流路幅50cm、20cmに対して実河川ではそれぞれ25m、10mに相当する。

本実験では射流における分岐・合流流れ、特に分岐部での水面形に着目し、水面形測定を行った。水路勾配は等流状態で流れが射流になるように1/38.1に設定した。実験条件は表-1に示した通り、流量を変えて2通り行った。この流量はフルード数で考えると、実河川ではそれぞれ $25\text{m}^3/\text{s}$ 、 $37.5\text{m}^3/\text{s}$ に相当する。ちなみに白水川では、既往最大流量は約 $50\text{m}^3/\text{s}$ 、低水流量は約 $1\text{m}^3/\text{s}$ である。水面形は、通水し、定常状態に達した後、ポイントゲージで流下方向、横断方向に2.5cm間隔で測定する。測定区間は分岐・合流部を含み分岐部から上流側に、合流部から下流側にそれぞれ1mとした。

	水路勾配	流量 Q (cm^3/s)	等流水深 h_0 (cm)	平均流速 u (cm/s)	フルード数 Fr
RUN 1	1/38.1	10000	3.00	66.7	1.23
RUN 2	1/38.1	15000	3.80	78.9	1.29

表-1 実験条件

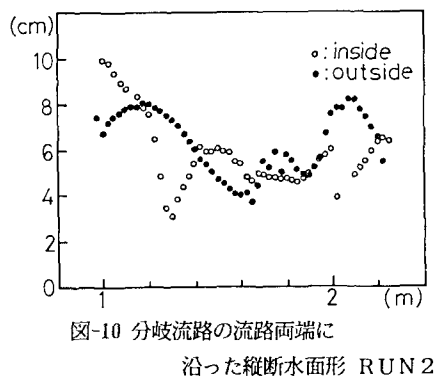
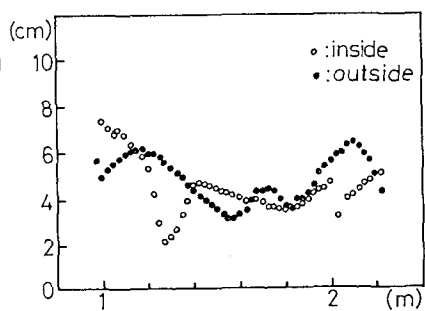
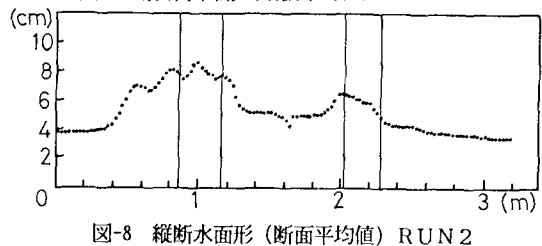
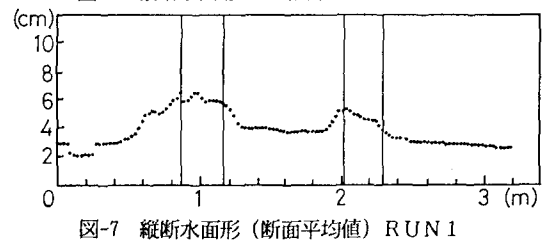
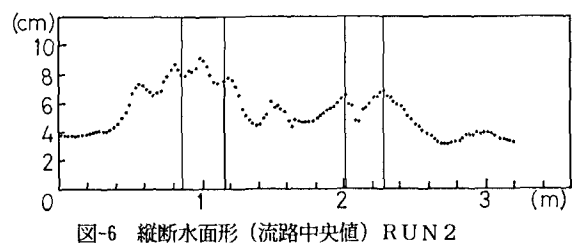
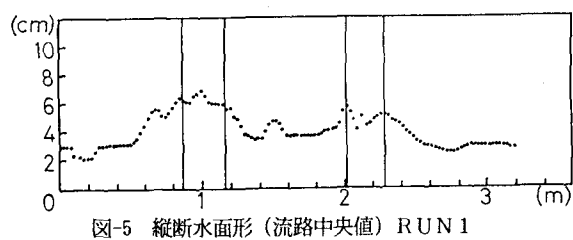
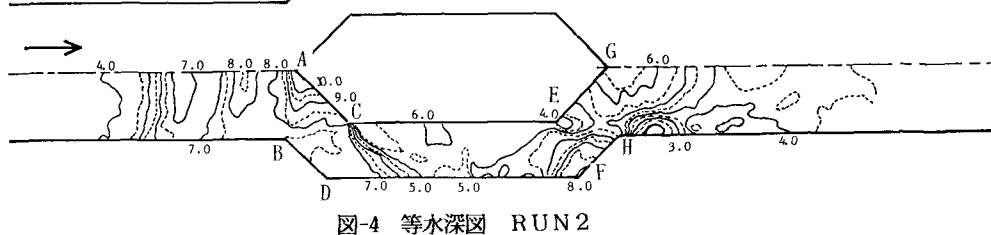
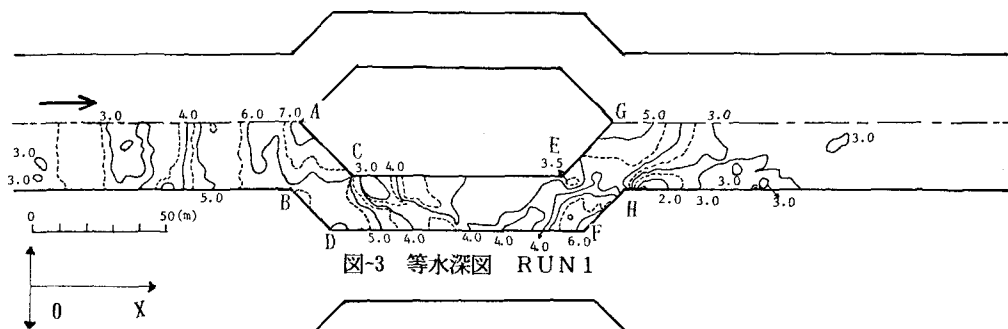
3. 実験結果

水面形計測の結果を等水深線図にしたものが図-3、図-4で、それぞれRUN 1、RUN 2の場合である。これを見ると分岐部に近づくにしたがって水深が増し、図中のA点付近で水深が最も高くなっている。この部分に跳水が発生していることがわかる。さらに合流部のG点付近でも水深が高くなっている。また、C点、H点付近では流路の屈曲による強い剥離現象が現れている。流路の屈曲の影響はD点、E点、F点付近にも現れており、流路外側の水深が遠心力のために高くなっている。これらの現象はRUN 1、RUN 2とも同じである。図-5、図-6は流路中央の水深を流下方向に示したものである。縦にいたれた直線は流路が屈曲している位置を示している。これらの図より分岐部直前に発生している跳水の様子がよくわかる。ここに発生している跳水は明確に3つのピークを持ち、下流にいくにしたがって大きくなっている。このような跳水は波状跳水と呼ばれるものである。フルード数はRUN 1、RUN 2それぞれ1.23、1.29であるのに対して、最初のピークの位置の水深を用いて算定したフルード数はそれぞれ0.50、0.49である。分岐後は再び流れは射流になり、合流前でも跳水が発生している。また、1.5m付近および合流直前の水面には乱れがみられる。これは流路に屈曲があるため遠心力が働き、それが水面に反映したものと考えられる。そこで、横断方向に平均した水深によって縦断水面形を描いてみると図-7および図-8のようになる。跳水の様子はほとんど変化がみられないのに対し、流路屈曲の影響はなくなっている。このことは、発生している跳水が2次元的なものであることを示す。同時に1.5m付近に現れた水深変化が遠心力によって引き起こされていることを示している。

次に、分岐部の跳水に着目して、その発生原因について考える。表-2は跳水前後の実測水深と、跳水の共役水深の関係より求めた跳水後の水深、さらに中の島により流れが一旦せき止められるとしてベルヌーイ式より計算した水深を示した。これによると、跳水後の実測水深は共役水深よりかなり大きく、せき止め水深により近い値となっている。特に、RUN 2の場合は実測値とせき止め水深は非常に一致を示している。このことは、この跳水が中の島の反力の作用を受けて生じていることを示すものであ

	RUN 1	RUN 2
上流のフルード数 Fr	1.23	1.29
跳水前の実測水深 (cm)	3.00	3.80
跳水後の実測水深 (cm)	6.5 (平均値) 6.8 (中央値)	8.7 (平均値) 9.1 (中央値)
共役水深 (cm)	3.92	5.31
堰止め水深 (cm)	7.55	9.25

表-2 跳水前後の水深の関係



る。また、中の島により流れが2分され方向が変化する。このため流体には遠心力が作用し、流路の内側と外側の水深に差が生じる。その様子を示したのが 図-9、図-10であり、流路の屈曲に呼応して内側、外側の水深が変化していることが分かる。この水位差が外力として作用し、跳水の発生に関与していることが考えられる。分岐部での跳水の発生原因には流路分岐による運動量の抜け出しが第一に考えられるが、実験の結果より中の島の反力、遠心力等の流体に作用する外力も大きく関わっていることが明らかになった。

4. 分岐部における水理学的考察

実験において分岐部直前に跳水が発生することが確認されたが、この跳水の発生原因として、①分岐による運動量の抜け出し、②流路幅変化、③中の島の反力が挙げられる。分岐部ではこれらの要因が複雑に作用しているものと考えられる。特に、分岐による運動量の抜け出しには分岐部での流量配分比が重要な意味を持つ。流れが常流の場合は分岐流路や合流部の条件によって分岐部での流量配分

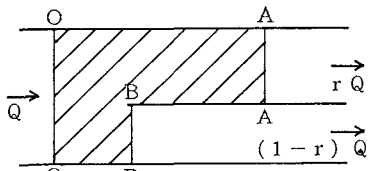


図-11 スリットモデル

は調節され、決定される。しかし、射流では下流の条件が上流に伝わらないので流量配分は分岐部の入口条件のみによって決定され、下流の流況をも支配する。ここでは従来研究されたことのなかった①運動量の抜け出しに着目して、射流における分岐流量配分比および跳水の発生機構を図-11 のようなスリットモデルにおいて考察する。

図-11 において上流からの流量を Q 、分岐流量配分比を r 、水深を h 、流速を u 、流路幅を b とする。添字の 0 、 a 、 b はそれぞれ断面 $O-O$ 、 $A-A$ 、 $B-B$ での値を示す。いま分岐部前後に検査断面 (斜線部) をとり運動量式を適用し、分岐後の流れの状態を考えるが、断面 $B-B$ の水深が必要である。そこで断面 $O-O$ 、 $B-B$ 間にベルヌーイ式をたてると次式のようになる。

$$\frac{u_0^2}{2g} + h_0 = \frac{u_b^2}{2g} + h_b + h_z \quad (1)$$

この式を連続関係より整理すると、

$$z^3 - \left(\frac{1}{2} Fr^2 + 1 - \frac{h_z}{h_0} \right) z^2 + \frac{1}{2} Fr^2 \frac{(1-r)^2}{\eta_b^2} = 0 \quad (2)$$

ここに、 $z = h_b / h_0$ 、 Fr は上流側のフルード数、 $\eta_a = b_a / b_0$ 、 $\eta_b = b_b / b_0$ である。この3次方程式は1つの負根を必ず持つ。断面 $B-B$ で定常な流れが存在するためには式(2) が3つの実根を持つ必要がある。そこで式(2) の判別式より3実根を持つ領域を、縦軸に上流側のフルード数、横軸に流量配分比 r とり示したのが図-12である。斜線部がその領域である。ただし、簡単のため $h_1 = 0$ 、 $\eta_a = \eta_b = 0.5$ とした。

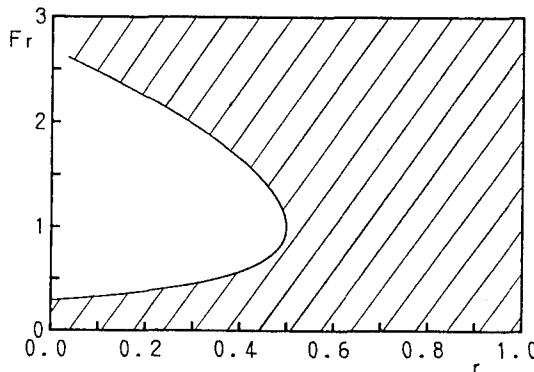


図-12 ベルヌーイ式の解の存在範囲 ($\eta_a = \eta_b$)

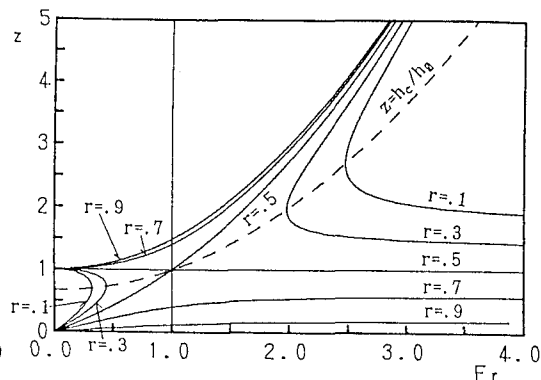


図-13 ベルヌーイ式の流れの表示 ($\eta_a = \eta_b$)

また、図-13 は縦軸に解 z 、横軸に上流側のフルード数を取り、 r をパラメーターとして表したものである。図-13より、ある上流側のフルード数に対して分岐流量比が 0.5 以上ならどんな値でも式(2)の解は存在することがわかる。すなわち断面 B-B での定常な水深 h_b が存在し、分岐流路でも定常流れが存在する。しかし 0.5 より小さい流量配分比では、フルード数によって定常な h_b が存在しえない場合がでてくる。また図-13中の破線は $z = h_o / h_g$ を表している。この破線より上は常流解、下は射流解である。解が存在する時の 2 つの解はそれぞれ常流解、射流解になっている。これにより、運動量の抜け出しのみ考えた場合でも分岐部で跳水が発生することが明らかになった。分岐直前に跳水を起こす流れは $Fr = 1.0$ より右、かつ破線より上側に現れる。

一方、斜線部の検査断面に対する運動量式は、

$$\rho r Q u_a - \rho Q u_o = \frac{1}{2} \rho g h_o^2 b_o - \frac{1}{2} \rho g h_a^2 b_a - \frac{1}{2} \rho h_o^2 b_b - \rho (1-r) Q u_b \quad (3)$$

となり、連続関係を用いて整理すると次式になる。

$$y^3 + \left\{ 2Fr^2 \frac{(1-r)^2}{z \eta_a \eta_b} + z^2 \frac{\eta_b}{\eta_a} - 2Fr^2 \frac{1}{\eta_a} - \frac{1}{\eta_b} \right\} y + 2Fr^2 \frac{r^2}{\eta_a^2} = 0 \quad (4)$$

ここに、 $y = h_a / h_g$ である。式(4)の y についても式(2)と同様な解の存在範囲を求め、図-12 と同様な図を作る。式(4)の判別式 D は次式のようになり、 $D > 0$ のとき式(4)は 3 実根を持つ。

$$D = -4 \left\{ 2Fr^2 \frac{(1-r)^2}{z \eta_a \eta_b} + z^2 \frac{\eta_b}{\eta_a} - 2Fr^2 \frac{1}{\eta_a} - \frac{1}{\eta_b} \right\}^3 - 54Fr^2 \frac{r^2}{\eta_a^2} \quad (5)$$

式中の z は式(2)より求めるが、あるフルード数および分岐流量比に対して正実根が 0 あるいは 2 つ存在する。解が 2 つ存在する場合には、それぞれについて式(5)により y の解の存在範囲を求める。すなわち、 y は最大で 4 つの正実根をもつ。図-14 はそのようにして求めた y の正実根の存在範囲を表したものである。図中の I の領域は 4 つの解が存在する範囲であり、この場合は z の 2 正根それぞれに対し y が 2 正根を持つ。II の領域は解が 2 つ存在する範囲であり、 z の 2 正根に対し一方は y が 2 正根を持ち、もう一方は正根を持たない。III の領域は y が正根を持たない範囲を示している。 z が 2 正根を持たない場合も III の領域である。また図-15 はフルード数と y についての関係を r をパラメーターにして表したものである。これらの図は非常に複雑なものになっているが、あるフルード数に対して r は任意にとりうることを示しており、またどんなフルード数に対しても $\eta_a = \eta_b = 0.5$ なので、 $r = 0.5$ は自明な解として存在する。山地河川の河道は不整であるので、分岐部でのちょっとした礫の堆積が分岐流量比を変化させ、図-14 の III の領域すなわち解が存在しない領域にはいることは十分有り得る。そのような場合、流れは定常では存在できず、非定常な現象に

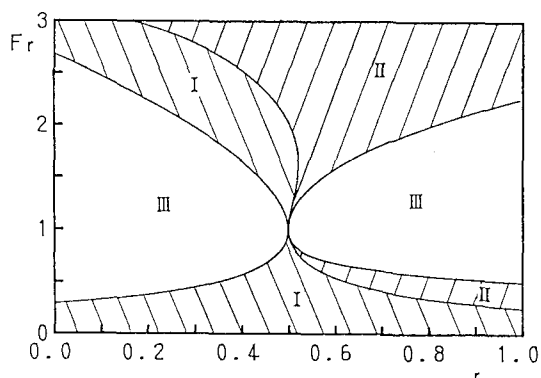


図-14 運動量式の解の存在範囲 ($\eta_a = \eta_b$)

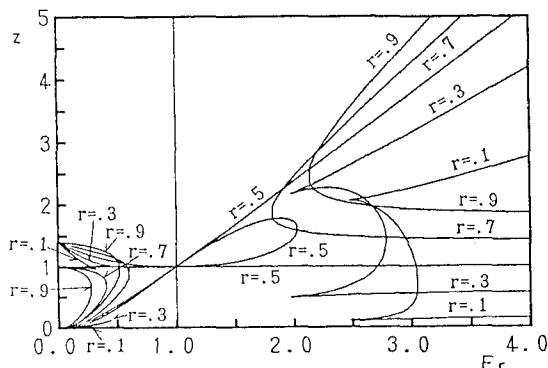


図-15 運動量式の流れの表示 ($\eta_a = \eta_b$)

なり解が存在する領域に上流の条件を変化させる。この現象の一つが分岐直前に発生する跳水であると考えられる。

5. まとめ

本研究では射流における分岐・合流流れの水路実験を行い分岐部直前で跳水が発生することを確認した。その跳水は波状跳水である。分岐後、流れは再び射流になり、合流部直前でも跳水を起こす。跳水前後の水深は、中の島によって流れが一旦せき止められるものとしてベルヌーイ式より求めた水深の関係とよく一致する。このことより、跳水の発生には中の島の反力が関わっていることが確認された。また、中の島、流路の屈曲等によって流向が変化すると流体に遠心力が加わり、流路の内側と外側に水深差が発生する。全体としてこの水深差が外力として流体に作用し、跳水の原因となる。

一方、流れが射流の場合下流の条件が上流に伝わらないので、この場合分岐部での条件が非常に重要となる。スリットモデルにおける考察により、分岐部では運動量の抜け出しのみでも跳水が発生することが明らかになった。ここでは流量配分のみに着目して、射流分岐・合流流れを考察したが、分岐部での流れを支配する要因は数多くあり、それらが複雑に絡み合っている。特に中の島の反力は無視できず、実験においても流路の内側と外側の水深差は大きかった。このような影響を加味すれば、定常解の存在範囲を示す図は一層複雑になると考えられる。さらに分岐流量配分比の決定すなわち、入口条件の決定には、混合砂礫の影響が大であると考えられる。これらについてはさらなる研究の必要がある。今後の課題としたい。

謝辞：本研究は、北海道開発局の受託研究費によって進められた。末尾ではあるが記して深謝の意を表す次第である。

【参考文献】

- 1) 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、1988
- 2) Hasegawa, K., Mori, A. and Ishikawa, S.: Bed Topographies and Sediment Transport during Flood in Mountainous Rivers, International Conf. on RIVER FLOOD HYDRAULICS, pp327-336, 1990
- 3) 長谷川和義・石川伸・高橋一浩:山地河川の分岐流路形態とその変動—白水川調査より、道支部論文報告集第46号、II-18, pp269-274, 1990
- 4) 長谷川和義・石川伸:山地河川における分岐・合流流れの数値計算法、道支部論文報告集第46号、II-17, pp263-268, 1990