

交互砂州を有する水路における流砂の分岐特性に関する研究

Sediment diversion through the branch channel with account of alternate bar bed form at the main channel

北海道大学大学院工学研究科 ○学生員 工藤圭太 (Keita Kudoh)
 北海道大学大学院工学研究科 学生員 スニール・クマール・ラマ (Sunil Kumar Lama)
 北海道大学大学院工学研究科 フェロー 黒木幹男 (Mikio Kuroki)

1. はじめに

分岐部周辺における流れや流砂の特性を理解することは、分水路を効率良く機能させるために非常に重要であり、開水路における流れや流砂の分岐特性に関して、これまでに様々な研究が行われてきた (Taylor¹⁾, Law and Reynolds²⁾, Lakshamana³⁾). それらの研究における目的の一つは、様々な流れの条件の下で、いかに多くの水を分水路へ流すかということであった。本研究ではそれに加えて、どれだけ多くの砂を分水路へ流すことができるかということをも目的とした。

これまでの研究では分岐部を有する直線水路において、平坦な固定床における流砂の分岐特性を理解してきた⁴⁾⁵⁾。分岐部周辺の流れの特徴は図-1からわかるとおり、水路床の分流境界線は水面の分流境界線よりも主水路右岸から遠くに広がっていた。また、分岐部入口より下流側の水路床には渦が発生し、さらに分水路の両側にはフルード数や主水路と分水路の幅比によってでき方の異なる、剥離領域が発達した。そして、分岐部付近における流れの特性は、主に主水路上流のフルード数 (F_1)、主水路と分水路の幅比 (b_3/B)、主水路の水深 (d_1) と分水路幅 (b_3) の比であるアスペクト比 (d_1/b_3) に依存するということが示された。

これらの結果を踏まえ、本研究では、実際の河川での砂州を想定し、砂州による分岐特性の影響を知ることを試みた。現象を扱いやすくするために、砂で固めた交互砂州模型を設置した実験水路を用い、分流境界線・流砂量配分比を調べることとした。

2. 実験装置

実験で用いた水路の主水路長は 8m で、分水路は主水路の端から 3m の位置から始まっている。その長さは 2m で、アクリルプラスチック製であり、勾配はほぼ水平に保たれている。主水路幅 (B) は 45cm、分水路幅 (b_3) は 4.5cm であり、主水路と分水路の幅比 (b_3/B) は 1:10 となった。主水路の勾配はおおよそ 1/500 に定めた。また、Bulle⁶⁾ による過去の分岐特性に関する研究で、分水路の主水路に対する角度を 30° に設定した場合に、砂が最も効率よく分水路に入るということが示されたため、分岐部の角度は 30° に固定した。

砂州模型を作成するにあたり、そのモデルとなる砂州の水利条件は既に行われた実験を参考とした⁷⁾。主水路幅は 90cm、勾配は 1/250、平均粒径は 0.58mm、主路上流側のフルード数 (F_1) は 0.7 である。実験データから完全な交互砂州が発達した場合の

形状と大きさを選び出し、平均粒径が 0.5mm の砂を本研究で用いる実験水路に敷き詰め、河床を接着剤で固定した。砂州模型の条件は、できる限り実験データと合わせるようにし、砂州の波長 (L) は 3.52、波高 (Z) は 1.9、主水路幅 (B) は 45cm、 L/B は 7.8 とした。

水利条件は主水路の流量によって変化させた。砂州の波高 (Z) と主水路の平均水深 (d) との比である相対波高 (Z/d) は 0.48 から 1.06 まで変化した。平均水深は縦断方向に 8cm 間隔で、横断方向に 2.5cm 間隔で計測し、それを用いて求めた主路上流のフルード数 (F_1) は 0.42 から 0.7 まで変化した。この F_1 は実験では形状がほとんど変化しないような小さな範囲のものであると考えた。

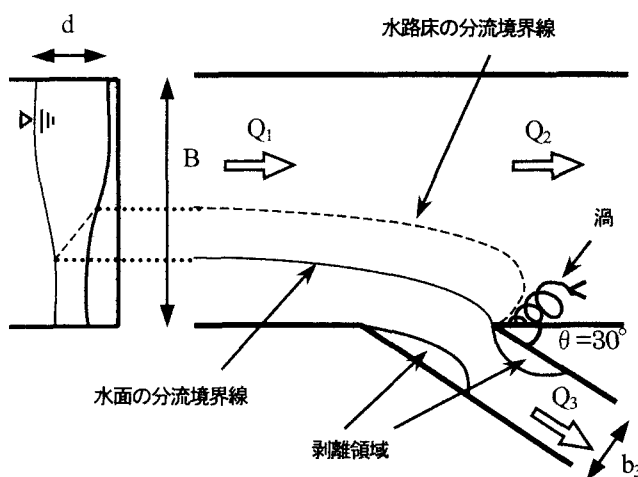


図-1 実験装置と分岐部周辺の流れ

3. 実験のパターンと手法

流砂の量的な分析をするために、水路床の分流境界線の位置を定めるのは非常に重要である。実験では染料を用いて分流境界線を調べたが、染料では下流に流れるにつれて拡散してしまうため、正確な分流境界線を見ることができない。そこで、比重 1.17、直径 3mm であるプラスチック製の円筒形の小球を流し、その動きをたどった。ここではこの小球 100 個を、分岐部上流の同じ地点から流し、球を投入する位置である主水路の右岸側からの距離を測り、分水路に流れ込んだ球の数を測定した。これによって、水路床における分流境界線、流砂量配分比を調べた。分岐部入口付近は流れの乱れや渦によって複雑な三次元流れになるため、分水路に入った球の数は、主水路右岸から球

を投入する位置までの距離によって様々に変化した。

この実験において、水路床における分流境界線を考える際に、流した球のうち80%が分水路に入った時の右岸側からの距離を測定して、水路床における水の分流境界線の位置とすることに決めた。水路床の分流境界線よりも内側、つまり主水路右岸に近い側を流れる球はすべて分水路へ入るものとした。

また、本研究では砂州前縁と分岐部の位置によって、3種類の砂州の模型実験を行い、各々の分流境界線をたどった。砂州の先端の位置に分岐部を設けたものを Setup1、正反対の位置にあるものを Setup2、その中間に設けたものを Setup3 とした (図-2)。

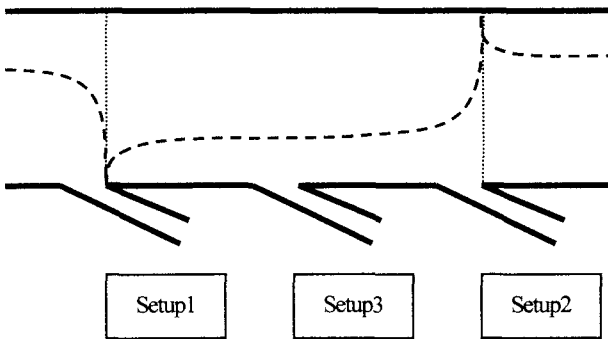


図-2 実験パターン

4. 流量に関する理論的分析

主水路が平坦で、主水路床と分水路床が同じレベルであると想定する場合、分水路の流量を計算するために運動量方程式と連続式が用いられた¹⁾。分水路のフルード数 (F_3) は運動量方程式と連続式を含み、簡略化された (1) 式で表される。ここで、 d_3 は分水路の水深、 d_1 は分岐部付近の主水路の水深、 C_c は分水路における伸縮係数であり、ここでは $C_c=0.95$ を与えている。

$$F_3 = \sqrt{\frac{0.40 + 0.4 \frac{d_3}{d_1} - 0.72 \left(\frac{d_3}{d_1}\right)^2}{C_c \left(\frac{d_3}{d_1}\right)^2}} \quad (1)$$

また、 b_3 を分水路幅、 B を主水路幅とすると、流量配分比は (2) 式で表される。

$$Q_r = \frac{Q_3}{Q_1} = \frac{b_3}{B} \frac{F_3}{F_1} \left(\frac{d_3}{d_1}\right)^3 \approx \frac{b_3}{B} \cdot \frac{\text{constant}}{F_1} \quad (2)$$

(2) 式における $F_3 (d_3/d_1)^{3/2}$ は d_3/d_1 が 0.85 までの範囲ではほとんど変化せず、流量配分比の計算には一定値である 0.45 を用いた。よって、流量配分比は水路幅比 (b_3/B) と主水路上流のフルード数 (F_1) に依存することがわかる。 d_3/d_1 の値が 0.85 を越えた場合は、 $F_3 (d_3/d_1)^{3/2}$ の値は減少していくため、(1)、(2) 式を用いて計算する。

しかしながら、実際の多くの直線河道では下流方向にほぼ一定速度で移動する交互砂州を有している。交互砂州を有する場合、分水路に砂が流れ込むものの、分岐部の主水路の河床高は分水路床に比べて高くなる。この河床高の差 (Δ) は分岐部における砂州形状の位置によって異なり、砂州の先端が分岐部に位置する場合は、最も小さくなると思われる。(1) における F_3 の計算において、分水路の水深 d_3 を正確に知るために、図-3 における圧力 P_1 と P_3 が同じ大きさであると想定し、 d_3 には、 d_3' から Δ を差し引いたものを用いることとした。また、分岐部付近の水深は、水路全体の平均水深 (d) と差があるため、主水路と分水路の水深比 (d_3/d_1) には分岐部付近の水深 d_1 を用いた。こうして計算された流量配分比と計算によるものを比較すると、おおよそ同じ値を示すことがわかる (表-1、図-4)。

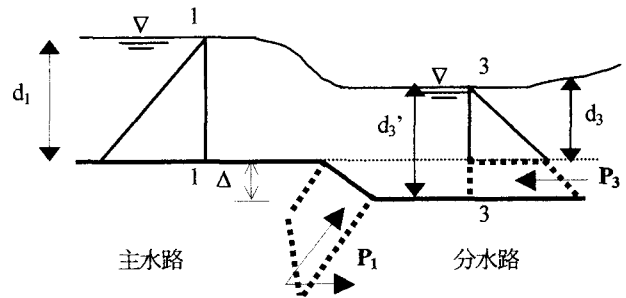


図-3 主水路と分水路の河床高の差

表-1 流量配分比の実験値と計算値

Run No.	F_1	d_3' (cm)	d (cm)	d_1 (cm)	Δ (cm)	d_3/d_1 (cm)	Q_3/Q_1 Meas. (%)	Q_3/Q_1 Theo. (%)
Setup 1								
1	0.43	2.9	1.8	1.5	1.73	0.78	14.81	11.03
2	0.52	3.5	2.6	2.27	1.73	0.78	11.73	9.12
3	0.63	4.4	3.5	3.14	1.73	0.85	9.89	7.04
4	0.7	5	4	3.65	1.73	0.90	8.61	5.89
Setup 2								
5	0.43	2.75	1.8	2.5	0.75	0.80	13.46	10.87
6	0.52	3.18	2.6	3.2	0.75	0.76	10.97	9.24
7	0.63	3.72	3.5	4.1	0.75	0.72	9.19	7.74
8	0.7	4.5	4	4.3	0.75	0.87	7.88	6.14
Setup 3								
9	0.43	2.79	1.8	2.48	0.47	0.94	12.87	8.76
10	0.52	3.38	2.6	3.22	0.47	0.90	10.96	7.81
11	0.63	4.11	3.5	4.14	0.47	0.88	9.61	6.74
12	0.7	4.47	4	4.37	0.47	0.92	7.78	5.66

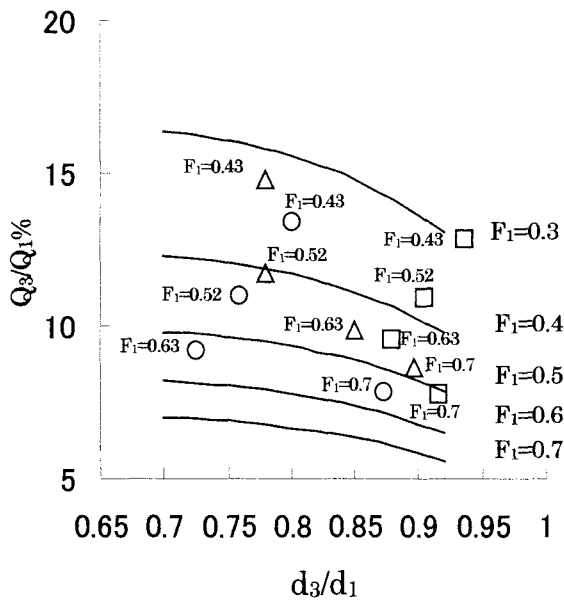


図-4 流量の実験値と理論値の比較

5. 流砂量

水路床が平坦な場合と異なり、砂州を有する場合、砂は水の流下方向と平行に流れないと考えられる。また、主水路の各横断面における流砂量は異なり、かつ断面の平均流砂量も断面ごとに变化する。図-5は実験による断面ごとの流砂量を断面の平均流砂量で除したものを砂州の半波長だけ示したものである。また、砂州の形状によっては砂が移動しない領域も存在し、実際に砂が移動する領域は断面ごとに異なる。よって、流砂量配分比は砂州に対する分水路の位置によって様々に变化することがわかる。ここでは数値計算によって水路全体の流砂の動きと断面ごとの流砂量を把握し、球を用いた実験と合わせて解析を行うこととした。

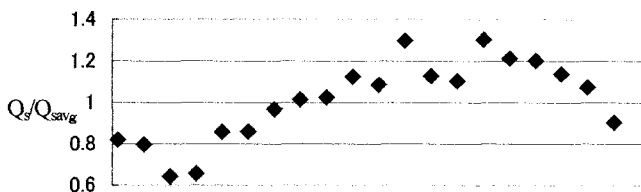


図-5 各断面の流砂量の変化 (実験)

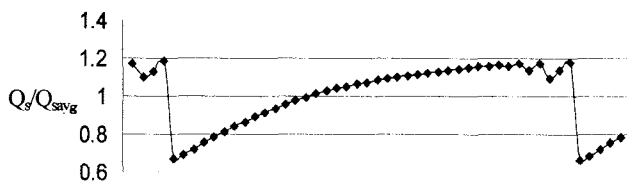


図-6 各断面の流砂量の変化 (計算)

6. 数値計算のデータと実験値の比較

数値計算は分岐部を有しない直線水路を仮定した場合における、二次元浅水流モデルによるものを用いた⁸⁾。ここでは、実験で考慮した水理条件にできる限り近い条件によって数値計算を行い、これよって、水路の各断面における流砂量を考えた。実際の砂を用いた実験⁷⁾によるデータ(図-5)と比較すると、ほぼ同じ傾向であることが理解できる(図-6)。

図-7に各横断面における流砂量 Q_s を全体の平均流砂量 Q_{avg} で除したものが等しい割合になる場所を結んだ線を示す。実験により得られた分流境界線と数値計算による等流砂量線を各 F_1 で重ね合わせることで、実際の流砂量配分比 Q_{sr} を知

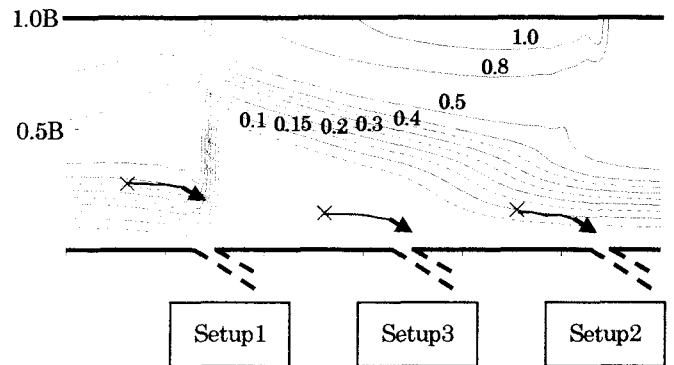


図-7(a) Q_s/Q_{avg} の割合 ($F_1=0.52$)

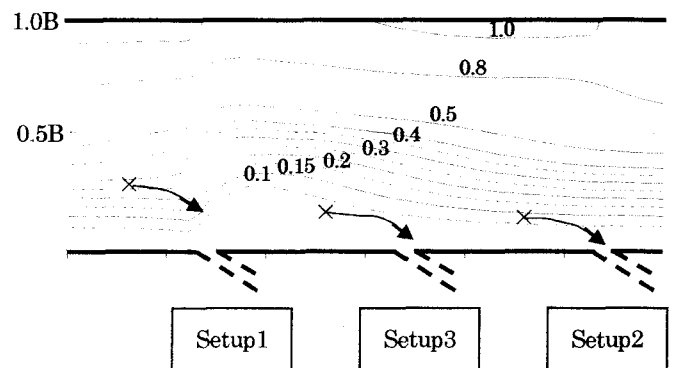


図-7(b) Q_s/Q_{avg} の割合 ($F_1=0.63$)

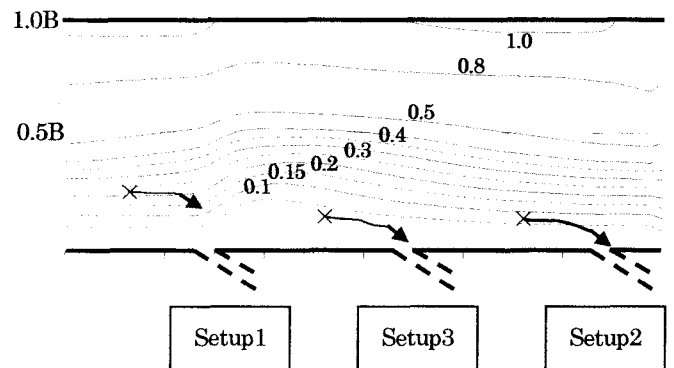


図-7(c) Q_s/Q_{avg} の割合 ($F_1=0.7$)

ることができると考えられる。なお、 F_1 が0.43の場合の数値計算データが得られなかったため、その他の F_1 について考察することとした。

分流境界線は分岐部に対して一定の距離から投入した小球が分水路へ流れる線であり、その投入点の幅から流砂量配分比を考えることとした。図-7より、どの F_1 で比べてもSetup1の場合が最も流砂量配分比が大きく、Setup3の場合が最も小さいことが理解できる。Setup3に関して、小球の投入場所は、数値計算上では砂が動かない範囲に存在する。これは主に数値計算上では考慮されていない分岐の影響が考えられる。また、分岐がない場合にも、砂州模型に用いられたものと同じ砂を流したならば恐らく移動しないであろうが、この実験ではプラスチック製で水よりも比重が重いものをトレーサーとして用いたために、小球は動いたものと考えられる。

7. 流量・流砂量配分比

等流砂量線を用いることにより得られた流砂量配分比 (Q_{sr}) と理論的分析により得られた流量配分比 (Q_r) を表-2に示す。また、これらの比 (Q_{sr}/Q_r) と、主路上流のフルード数 (F_1) の関係を表したものが図-8である。これによりSetup1の場合に Q_{sr}/Q_r がより大きな値を示すことがわかった。つまり、砂州の先端が分岐部入口付近にある場合の Q_{sr}/Q_r が最も大きくなるということである。そして、流量配分比の2から3倍の流砂量配分比を示し、効率よく流砂を分水路に流し込むことができると想定できる。これは、分岐部入口の水深が大きく、かつフルード数も小さくなり、さらにSetup2, Setup3の場合よりも、主水路における分岐部入口の下流側端に発生する渦の大きさや回転する速度も大きくなることもあって、より多くの砂が分水路に流れると考えられる。

表-2 フルード数と流砂量配分比の関係

Run No.	F_1	d_3/d_1 cm	$Q_r=Q_3/Q_1$ (%)	$Q_{sr}=Q_{s3}/Q_{s1}$ (%)	Q_{sr}/Q_r
Setup 1					
1	0.43	0.78	14.81		
2	0.52	0.78	11.73	36	3.07
3	0.63	0.85	9.89	26	2.63
4	0.7	0.90	8.61	22	2.55
Setup 2					
5	0.43	0.80	13.46		
6	0.52	0.76	10.97	9	0.82
7	0.63	0.72	9.19	8	0.87
8	0.7	0.87	7.88	7	0.89
Setup 3					
9	0.43	0.94	12.87		
10	0.52	0.90	10.96	0	0
11	0.63	0.88	9.61	3	0.31
12	0.7	0.92	7.78	2	0.26

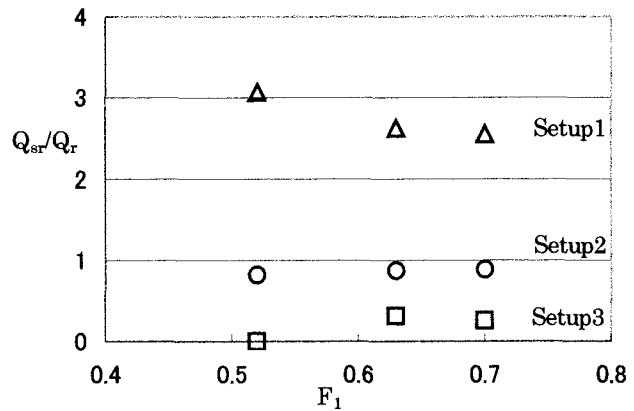


図-8 フルード数と流砂量配分比の関係

8. 終わりに

砂州の先端が分岐部入口付近にある場合 (Setup1) が、流砂量配分比は最も大きな値を示すことがわかり、より多くの流砂をバイパスすることができると想定できた。今回用いた数値計算のデータは分岐部を有しない直線水路におけるものであるため、分岐部を有する場合の流砂量の変化を正確に知るには至っていないが、今後は本研究で行った場所と異なる場所に分水路を設けた場合を考え、各実験における分流境界線の位置を求める必要がある。さらには、砂州を固定するのではなく、移動床における流砂の分岐特性を調べることも重要と思われる。

参考文献

- 1) Taylor, E. H. "Flow characteristics at Rectangular Open Channel Junction," *Transactions, ASCE*, Vol. 109, 1944.
- 2) Shiu Wai Law, Alan J. Reynolds "Dividing Flow in Open Channel" *Proceedings ASCE*, 1966. Discussion by N.S Lakshamana Rao and K. Sridharan
- 3) Lakshamana R.N.S, Sridharan K. "Division of Flow in open Channels" *Journal of the Central Board of the Irrigation and Power*, Vol. 24, No. 4, 1967
- 4) Lama Sunil Kumar, Keita Kudoh, Mikio Kuroki : Study of flow characteristics of dividing flow at open channel junction , *Proceedings IAHR XXX Congress, Thessaloniki, 2003*
- 5) Keita Kudoh, Lama Sunil Kumar, Mikio Kuroki : Study of sediment bifurcation at open channel junction with free flow condition at branch channel, *Proceedings IAHR XXX Congress, Thessaloniki, 2003*
- 6) Hermann Bulle "Untersuchungen Über Die Geschiebeableitung Bei Der Spaltung Von Wasserläufen" 1926, Berlin
- 7) 黒木幹男：砂州河床における流砂量について、土木学会第29回年次学術講演会講演概要集、1974
- 8) 中西哲、松山洋平、黒木幹男、板倉忠興：水路長が交互砂州形状に与える影響の研究、土木学会第56回年次学術講演会講演概要集、2001
- 9) 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