

分水路における流砂の分岐特性に関する研究

Study of sediment bifurcation characteristics at junction flow with free flow condition at branch 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

今までに行われてきた様々な研究 (Taylor¹⁾, Law and Reynolds²⁾, Lakshamana³⁾) は、開水路における流れや流砂の分岐特性を理解するものであった。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。しかしそれとは対照的に、本研究では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目的とした。流れの条件を様々に変化させることで流れの分岐特性を把握し、それを流砂の分岐特性へと適用させた。

そして、本研究では特に流砂の分岐特性を理解するために、分水路における水の流れを観察し、そこを砂がどのように流れるかということを調べた。流砂の分岐特性の研究において、最も重要な流れの特徴は、水路床における分流境界線の位置である。分岐部周辺において流れは複雑な変化をするため、染料によって水路床の分流境界線の位置を特定するのは非常に難しい。そのために、砂に見立てたプラスチック製の球を用いてその軌道を観察し、水路床の分流境界線をたどった。

2. 実験装置

本研究では分水路幅 4.5cm に対して分水路と主水路の比を 1:4, 1:7, 1:10, 1:17 というように変化させて実験を行った (実験 1)。また、水路床の分流境界線に対してアスペクト比 (分水路の幅に対する主水路の水深) の影響を知るために、分水路幅が 10cm で幅比が 1:4 である実験も行った (実験 2)。これらの実験に関する主なデータを表-1 に示す。

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、どちらの水路も勾配はほぼ水平に保たれている。主水路上流側のフルード数 (F_1) は、およそ 0.1 から 0.5 までの範囲で変化可能である。また、主水路の水路床には直径 0.9mm 以下の粒径の砂が張り付いていて、粗度係数は $n=0.012$ となった。分岐部の流れは流量や主水路末端に設けられたゲートを操作することで様々に変化した。また、Bulle⁴⁾ 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 $30^\circ, 60^\circ, 90^\circ, 120^\circ$ とし、その中で 30° の場合が最も砂が効率よく分水路に入るということがわかっているため、分岐部の角度は 30° に固定した。

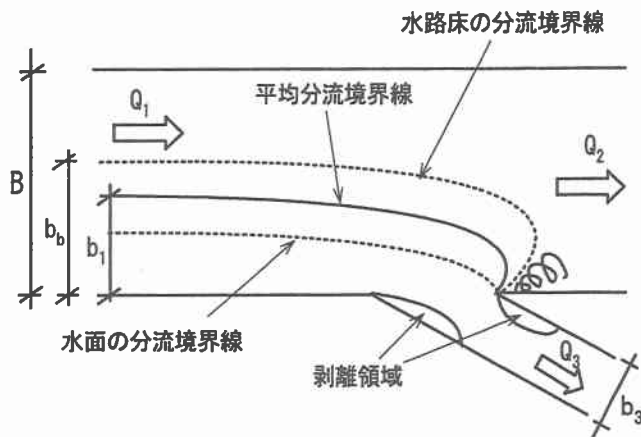


図-1 分岐部周辺の流れ

3. 流れの特徴

分岐部における砂の流れの特性を調べるには、分流境界線、分流境界面、不連続面、剥離領域等、水の流れの分岐特性を知る必要がある。ここで、実験水路における水の流れを図-1 に示すが、これは水路面と水路床における分流境界線、さらにその平均の流線等を示したものである。このような流れの分岐特性に関しては Lama ら^{5), 6), 7)} の研究を参考とする。

水路床においては水面よりも流速が小さくなっているため、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。主水路上流のフルード数 (F_1) が小さい場合、水路床の分流境界線は分水路下流側壁に向かって直接的なものとはならず、一度、分水路入口よりも下流側広がり、その後、分水路の下流側壁に向かって戻りながら変化してきた。 F_1 の増加に伴って主水路に沿った分流境界線の広がりや小さくなり、 F_1 が 0.4 に達すると、水路床の分流境界線は分水路下流側壁にまっすぐ向かった。水路床の分流境界線のこのような性質は、主水路と分水路の幅比が大きい時ほど、より顕著に見られた。

また、図に示した通り、分岐部入口より下流側の水路床には渦が発生した。これは水路床の分流境界線の曲がりによるものであり、分水路入口へ向かう向きに対して半時計回りに回転していた。この渦はフルード数が大ききときにはより顕著に表れ、小さいときにはあまり発達しなかった。そして、主水路の水深と分水路の水深の差が大きい時には、渦の大きさや回転する速度も大きくなる傾向が見られた。

また、 F_1 が小さい場合、分水路へ流れ込む水の割合の影響で

表-1 実験データ

実験 1 (分水路幅 : 4.5cm)、 $1 < d_1/b_3$

F_1	d_1	d_3	d_3/d_1	F_3	F_3/F_1	Q_1	Q_3	$Q_3/Q_1(\%)$	$b_b(\text{cm})$	$b_l(\text{cm})$	$Q_s/Q_t(=b_b/b_l)$
0.258	8.22	4.59	0.559	1.14	4.40	3.43	1.50	43.7	17	7.9	2.16
0.31	7.3	4.25	0.582	1.08	3.47	3.45	1.26	36.6	13.5	6.6	2.05
0.376	5.81	3.61	0.621	0.98	2.62	2.97	0.90	30.4	10.5	5.5	1.92
0.412	5.98	3.95	0.66	0.90	2.18	3.39	0.94	27.79	9	5.0	1.80

実験 2 (分水路幅 : 10cm)、 $0.5 < d_1/b_3 < 1$

F_1	d_1	d_3	d_3/d_1	F_3	F_3/F_1	Q_1	Q_3	$Q_3/Q_1(\%)$	$b_b(\text{cm})$	$b_l(\text{cm})$	$Q_s/Q_t(=b_b/b_l)$
0.183	8.47	6.18	0.73	0.76	4.16	6.35	3.48	54.7	39.2	24.6	1.59
0.253	6.98	5.89	0.844	0.56	2.20	6.57	2.37	36.0	26.5	16.2	1.64
0.308	7.94	6.58	0.829	0.58	1.89	9.71	2.93	30.1	24.5	13.6	1.81
0.378	5.52	5.02	0.909	0.44	1.17	6.91	1.48	21.4	13.5	9.6	1.40

水路床においては流速が小さくなるため、この渦の発生する、分岐部入口より下流側の地点において、分水路に入らなかった球は停滞することがしばしばあった。主水路と分水路の幅比が小さい場合、特にその傾向が見られた。

4. 剥離領域の発達

様々な流れの条件において、分水路の両側には剥離領域が発達した。これはフルード数や主水路と分水路の幅比によってでき方は違うと思われる。

アスペクト比が1よりも大きく、かつ、 F_1 が0.3までの値である実験 1 の場合、剥離領域は常に分水路の下流側壁に沿って発達した。 F_1 がその値を越えると、主水路の流れは十分に勢いを増し、分水路上流側壁にも同様に流れの剥離が見られるようになった。さらに F_1 が大きくなると、分水路上流側壁の剥離領域は大きくなったが、下流側壁のそれは小さくなった。実験 1 において、剥離領域のでき方と F_1 、主水路と分水路の幅比の関係を図-2 に示す。

アスペクト比が0.5から1である実験 2 の場合、剥離領域は分水路の両側壁に形成され、 F_1 の増加に伴って分水路の上流側壁にのみ見られた。

分水路床に砂が堆積したという、幅比が小さい1:2.5の場合(Nearby[®])と比べて、本研究では砂がこの部分を通過しても複雑な動きをせずに、まっすぐ分水路を流れた。これは、分水路下流側壁の剥離領域では上方から見て時計回りに渦が少しだけ存在するが、それは水路床には至っていないため、砂は剥離領域の影響を受けずに分水路に流れ込んだ。

5. 実験結果とその分析

5.1 水路床の分流境界線

主水路から分水路に流れ込む砂のほとんどは水路床からのもの

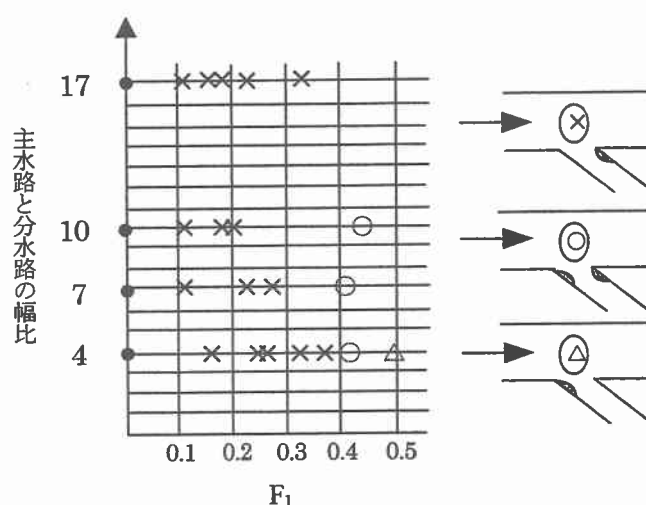


図-2 分水路における剥離領域のでき方 (実験 1)

のであり、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。そこで、前述の実験水路それぞれにおいて、水よりも少しだけ重い、比重 1.06、直径 6mm のプラスチック製の丸い球 100 個を、分岐部上流の同じ地点から流し、その動きを観察した。この際に、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、流砂量配分比等を調べた。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な変化をした。

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。そして、主水路右岸からこの水路床の分流境界線までの距離を b_b と呼ぶこととした。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。

さらに、運動量方程式と連続式により求めた、Lama らの理論モデル式^{6, 9, 11)}により、分水路の流量 Q_3 を用いて、水路床と水面における分流境界線までの幅の平均値を求めた。そして、主水路右岸からこの平均分流境界線までの距離を b_1 と呼ぶこととした。

5.2 流量配分比、流砂量配分比の関係

次に、流砂量配分比を Q_{sr} 、流量配分比を Q_r とし、それらの関係を考えた。ここで分水路と主水路の流砂量をそれぞれ Q_{s3} 、 Q_{s1} 、分水路と主水路の流量をそれぞれ Q_3 、 Q_1 、主水路幅を B 、主水路上流側の水深を d_1 、主水路上流の平均流速を V_1 、砂の直径を ϕ 、砂の流速を V_s とすると、 Q_{sr} 、 Q_r はそれぞれ、

$$Q_{sr} = \frac{Q_{s3}}{Q_{s1}} = \frac{b_b \cdot \phi \cdot V_s}{B \cdot \phi \cdot V_s} = \frac{b_b}{B}$$

$$Q_r = \frac{Q_3}{Q_1} = \frac{b_1 \cdot d_1 \cdot V_1}{B \cdot d_1 \cdot V_1} = \frac{b_1}{B}$$

となり、

$$\frac{Q_{sr}}{Q_r} = \frac{b_b}{b_1}$$

と表すことができる。これと主水路上流側のフルード数 F_1 との関係について調べたところ、図-3(a) (b) のような傾向が見られた。図-3(a) (b) はそれぞれ、実験 1、実験 2 の場合を示している。ここで、 d_3 は分水路の水深を表し、主水路上流側の水深 d_1 との比である d_3/d_1 の値は、各データ間での平均を取ったものを用いた。また、実験 1 に関しては、主水路と分水路の幅比が 1:4 よりも大きい場合に、その統一性については Lama により理解されているため⁷⁾、ここではすべてのデータを同じ図の中で表した。

図-3(a) (b) わかるように、それぞれの水路において d_3/d_1 ごとに、ある程度、等間隔に線を描くことができる。ここで 1 つの線に関して着目すると、 F_1 が大きくなるにつれて b_b/b_1 も大きくなることがわかるが、ある F_1 の値を超えると b_b/b_1 はあまり変化しなくなる傾向がある。そこには微小な上に凸の曲線が見られ、ある限界点が存在するように思われる。しかしながらその定式化には至っていない。

また、 d_3/d_1 が変化しても流量配分比はほとんど変化しないことがわかっているが (Lama^{6, 9, 11)}、図-3(a) (b) を比較すると、同じ水理条件下でも水路床の分流境界線幅に大きな影響があると思われる。水路床の分流境界線幅はアスペクト比が大きい場合の方が広いということが推測された。

横軸に d_3/d_1 、縦軸に b_b/b_1 を取り、主水路上流と分水路のフルード数の比である F_3/F_1 によって、測定されたすべてのデータを

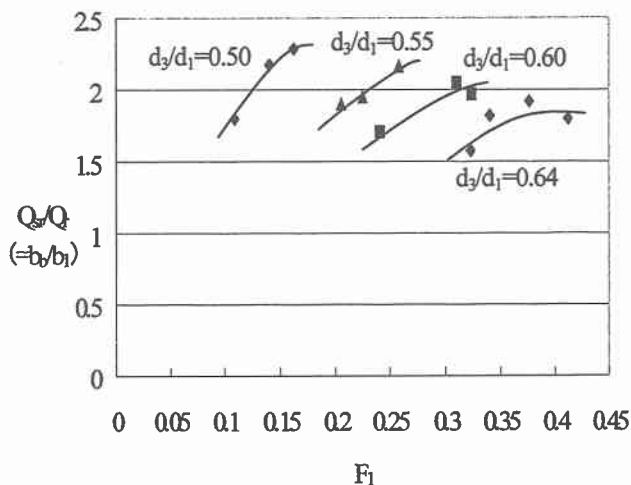


図-3 (a) Q_{sr}/Q_r と F_1 の関係 (実験 1)

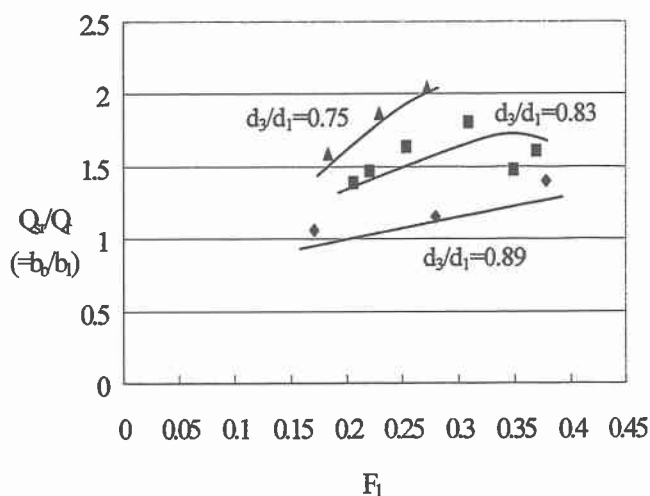


図-3 (b) Q_{sr}/Q_r と F_1 の関係 (実験 2)

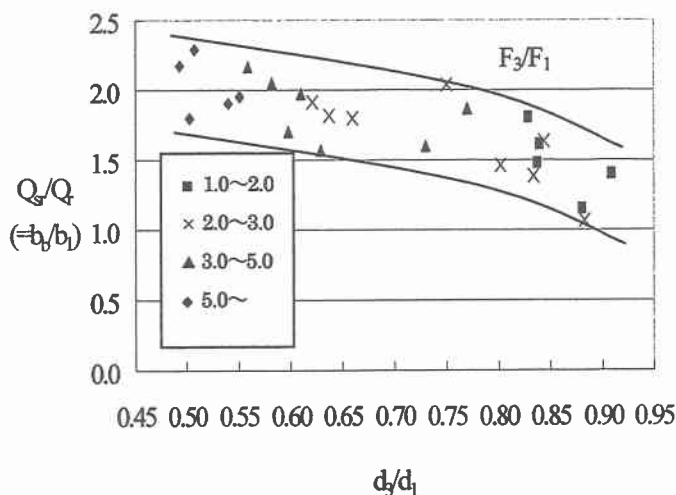


図-4 Q_{sr}/Q_r と d_3/d_1 の関係

図に表したものが図-4である。実験1のようにアスペクト比が大きい場合、 d_3/d_1 の値は小さくなったが、実験2のようにアスペクト比が大きい場合、 d_3/d_1 も大きくなった。このように、実験1における結果が図の左側に偏り、実験2による結果が図の右側に偏った。この図において、 d_3/d_1 が大きくなるにつれて、徐々に b_2/b_1 が小さくなっていくことが示された。

表-1、図-4からわかるとおり、実験1と2で同じ F_1 と比較すると、 d_3/d_1 が小さいほうが F_3 の値は大きい傾向が読み取れる。これは分水路の水路幅が小さいほど d_1 と d_3 の差が大きく、分水路に流れる流速 F_3 が大きいということであり、その影響もあって b_2/b_1 の値も大きいということがわかる。

また、 d_3/d_1 の値がほぼ同じあたりに着目すると、 b_2/b_1 の値にばらつきが見られる。これは、 F_1 が大きくなっても F_3 はあまり変化が無いため、 F_3/F_1 は小さくなっていく。 F_1 が大きくなると b_2/b_1 は小さくなっていくため、このようなばらつきが見られると思われる。

6. おわりに

今回の実験で定まった水路床の分流境界線 (b_2) は、あくまでも均一な砂が流れ込んだ場合を想定したものであり、大きさの違う砂が混ざり合った場合の水路床の分流境界線は同様のものとなるかどうかは定かではないが、およそその砂の分岐特性が理解できた。

まず、水路床における分流境界線幅は、恐らく F_1 と d_3/d_1 に依存しているということが推測された。また、同じ F_1 で比べた場合に、 d_3/d_1 自体はアスペクト比に依存していることも確認された。

また、今回の実験では結果として、 F_1 が小さい場合、 Q_3/Q_1 の値がおおよそ1.5から2.5の間に集中するということがわかった。これは、流砂量配分比が非常に高い割合であるということを示している。そして、これらの実験において、 d_3/d_1 が小さいほど b_2/b_1 が大きくなり、 Q_3/Q_1 も数パーセント程度しか変化しないということがわかったため、主水路の水深と分水路の水路幅にあまり違いが無いほうが、つまりアスペクト比が大きいほう

が、より効率的に砂を分水路に流し込むことができるものと推測される。

さらに、 F_1 が小さいとき流量配分比 Q_3 は大きくなり、流砂量配分比 Q_s はその2から2.5倍の値を示すため、流れた砂はすべて分水路に流れ込むことがわかったが、これは同時に分水路に入り込む水の量も多いということを示していると思われる。よって、ある程度フルード数が大きい場合に、どのように多くの流砂を分水路に流し込むことができるか、今後さらに検討が必要である。

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) Hermann Bulle "Untersuchungen Über Die Geschiebeableitung Bei Der Spaltung Von Wasserläufen" 1926, Berlin
- 5) Lama Sunil Kumar : Study of flow bifurcation at the open channel junction with the large width ratio of branch and main channel, 土木学会北海道支部論文報告集, 第58号, 2002
- 6) Lama Sunil Kumar : Study of flow bifurcation at the 30° open channel junction with the various width ratios of the main and branch channel, 土木学会第57回年次学術講演会講演概要集, 2002
- 7) Lama Sunil Kumar : Study of flow bifurcation at the 30° open channel junction when the width ratio of branch channel to main channel is large, 水工学論文集, 第47巻, 2002, 投稿中
- 8) Vincent S. Neary, Brian Barkdoll, A. Jacob Odgaard "Sandbar formation in side-diversion channels" Hydraulic Engineer '94, proceedings
- 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, 1991