

分岐部周辺における流れの水理特性について

芦田 和 男・川 合 茂

HYDRAULIC BEHAVIORS OF DIVIDING FLOW AROUND JUNCTIONS

By Kazuo ASHIDA and Shigeru KAWAI

Synopsis

Experiments on Y-formed dividing flow were carried out in order to clear the influences of the shape of junction and of the Froude number.

It was made clear that the differences of the shape of junction and of the Froude number produce a change in the degree of development of a secondary flow and in the size of the separation region; consequently the dividing discharge ratio and sediment discharge ratio are forced to undergo a change.

A semi-theoretical method for the calculation of the dividing discharge ratio which implies the influences of the shape of junction and the Froude number, was presented on the basis of energy consideration. The predicted values show a good agreement with the experimental ones.

1. 緒 言

河川の分流は、従来から治水、利水の目的で広く行われているが、分岐部周辺での現象の複雑さのため、有効な分流工の設計と分流に伴う河道の維持管理といった水工学的側面においては、十分な研究が少なく、模型実験に頼らざるを得ない現状にあって、系統的な現象の解明は十分になされていない。河川分流における基本的な問題は流量配分比と掃流砂量配分比であろう。分流に伴って水と土砂が配分され、河道の状態が変化することから、安定な河道の維持のためにも流量配分比や掃流砂量配分比を的確に予測することは重要なことである。

従来の研究は、主に最も簡単な形状、すなわち、直線水路から或る角度を持って分水路が取り付けられた T 型分岐を対象として行われてきた。この場合の掃流砂量配分比に関して、室田¹⁾は、実験により、掃流砂量配分比 κ_g は流量配分比 κ のみの関数となることを見出し、

$$1 - \kappa_g = 4.510(0.530 - \kappa)^2, \quad \kappa > 0.11 \quad \dots\dots\dots (1)$$

なる実験式を得ている。上式は、流量配分比が50%であるとき、掃流砂量配分比が97%になるという Bulle の実験結果とも一致する。また、道上・村雲²⁾は、分岐部での横断方向の水位差を遠心力に起因するとし、力の釣合い条件から分離流線幅を求め、底面近傍での分離流線幅比を掃流砂量配分比に対応させて、

$$\kappa_g = 1.68\kappa (u_m/u_* = 15) \quad \dots\dots\dots (2)$$

のように、掃流砂量配分比は流量配分比のみの関数になることを示した。しかし、実際河川のように種々の分岐形状を持つ場合は、それによって分岐部周辺での二次流の発達程度が異なるために、流量配分比の他に分岐形状もまた掃流砂量配分比に影響を及ぼすことは明らかである。Habermas³⁾は、分岐部周辺に彎曲部を設けた実験によって、分岐形状が掃流砂量配分比に大きな影響を及ぼし、その形状によっては流量配分比が50%であっても掃流砂量配分比は0%になるという結果を得ている。従って、適切な分流の設計を行うためには、T型分岐を対象とした研究のみでは不十分で、分岐形状の分流機構に及ぼす影響を系統的に調べる

必要がある。

一方、流砂量配分比を決める一つの要因である流量配分比の算定は、一般に背水計算により行われており、芦田・土屋・神谷⁴⁾がその方法を提示している。しかし、分岐部周辺でのエネルギー損失を十分に見積ることができず、フルード数が大きくなると、計算された流量配分比の誤差は大きくなる。室田⁵⁾は、有限幅水槽から側壁と垂直方向に流出する対称流出の総流量が常に分水路流入量に等しいという考察から、解析的に流量配分比の算定式を得ている。しかし、この際に設けられた条件から明らかなように、貯水池内のような流れの遅いところからの取水のような場合には有効であるが、フルード数が大きくなると計算値は大きく見積られることになる⁵⁾。また、Taylor⁶⁾は合流および分流に関する考察を行ったが、分流の場合は、前者のように本川と支川の水深が合流部で等しいという条件をおくことができないため、流量配分比は解析的に求められていない。そこで、T型分岐を対象とした実験結果を、主水路と分水路の水深比およびフルード数で整理して流量配分比を求めたが、一般性に乏しい。

分流に関しては、以上のようにかなり強い制約条件下の研究がほとんどで、任意の分岐形状を有する分流に関して、未だ適切な考察はなされていないようである。従って、その水理学的特性を把握するには今後の研究の進展が望まれる。

本研究では、分岐形状やフルード数が分流機構に及ぼす影響を系統的に調べるための第一歩として、Fig. 1に示すようなY型分流水路を対象とし、流量配分比や掃流砂量配分比を実験的に検討するとともに、分岐部周辺の水理特性を考慮して、エネルギー方程式による、より一般性のある流量配分比の算定法について考察を行う。

2. 実験概要

2.1 実験装置の概要

実験水路は、主水路幅 20cm, 分水路幅 10 cm, 深さは上流部 4 m, 主水路, 分水路とも3 mの亚克力製の長方形断面水路で、水路床勾配は1/1000に設定されている。その平面形は Fig. 1に示すよう

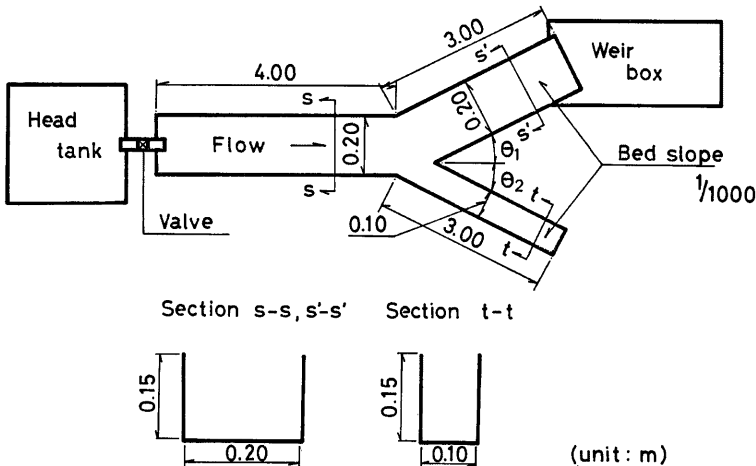


Fig. 1 Experimental flume.

Table 1 Experimental conditions and some results.

Exp. No.	$\theta_1(^{\circ})$	$\theta_2(^{\circ})$	$Q (l/s)$	κ	F_{r0}	
A	1	30	0	1.0	0.300	0.30
	2			2.0	0.350	0.40
	3			3.8	0.389	0.50
B	1	30	30	1.0	0.250	0.28
	2			2.0	0.300	0.37
	3			3.8	0.324	0.49
C	1	30	60	1.0	0.250	0.30
	2			2.0	0.285	0.37
	3			3.8	0.295	0.48
D	1	60	0	1.0	0.330	0.30
	2			2.0	0.360	0.38
	3			3.8	0.421	0.49
E	1	60	30	1.0	0.300	0.30
	2			2.0	0.335	0.37
	3			3.8	0.355	0.48
F	1	60	60	1.0	0.275	0.30
	2			2.0	0.310	0.36
	3			3.8	0.335	0.48

なY型の分岐形状を有しており、分岐部の構造は、種々の分岐形状の実験ができるようにされている。また、水路全区間が常流領域になるように、底面にサイコロ状の人工粗度が付けられている。主水路上流端には定水頭水槽があり、主水路下流端には流量測定用の全幅ゼキが設置されている。

2. 2 実験条件および方法

分岐形状とフルード数が流量配分比や掃流砂量配分比に及ぼす影響を調べるために、Table 1 に示されるように、分岐形状6種類、流量3種類の組み合わせにより、合計18ケースの実験が行われた。主水路および分水路の下流端水位は、それぞれの流量に対する等流水深になるように設定した。全ケースを通して、分岐部周辺の流れに着目して、水深、流速、死水域および分離流線の形状が測定された。

水深はポイントゲージを使用し、流速は直径 5 mm のプロベラ式小型流速計が用いられた。

死水域の測定に関しては、底面近傍、中層部および水面近傍の各位置において、注射針で過マンガン酸カリ溶液を注入し、順流と逆流の継続時間が等しくなるようなところを目視によって定め、死水域とされた。

流速は、上流部で4断面、分岐部周辺では主水路分水路とも分岐開始断面、死水域の幅が最大となるところ、死水域が消滅するところおよびこれより下流の横断水面形がほぼ一様となる断面で測定された。

掃流砂量配分比と流量配分比の相違に対応すると思われる流れのねじれを調べるために、パンチくずや中立粒子を流し、底面近傍と水面で、高速度カメラにより撮影された流跡線から分離流線が求められた。

3. 実験結果とその考察

3. 1 水面形、死水域および流速分布特性

(1) 水面形

Fig. 2 は流量 $Q=3.8 l/s$ の場合の縦断水面形の一例である。分岐部では水路断面が拡大するために、水

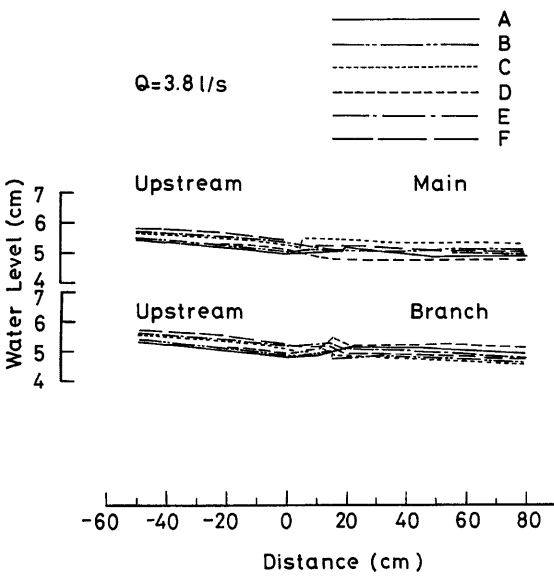


Fig. 2 Longitudinal profiles of water surface.

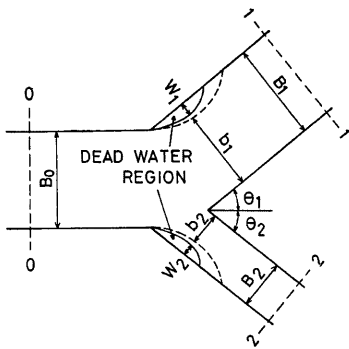


Fig. 3 Definition sketch.

水路断面が拡大すると剝離が生じ、死水域が形成されることはよく知られている。分岐部周辺における死水域は、Fig. 3 に示すように、一般に主水路と分水路の両方に形成されるが、特別の場合として $\theta_2=0^\circ$ (実験 A, D) では、分水路には死水域が生じなかった。

死水域の大きさは、水深方向にも流下方向にも変化する。水面近傍が最も大きく、次に中層部、底面近傍の順に小さくなり、フルード数が大きくなると流下方向に伸びる傾向がある。ここで、死水域の最大幅のみに注目して考察しよう。Fig. 3 の記号を参照して、水路幅で無次元化された死水域の最大幅 W_1/B_1 および

位は分岐部まで低下し、逆に、これより下流に行くにつれて、主水路、分水路とも水位は上昇し、くさびの先端付近で最も高くなる。この水位の低下と回復の度合は、分岐部での水路断面の拡大の程度と分岐形状とによって変わってくる。

上流部では、分岐形状にかかわらず、分岐部での水路幅の拡大の程度、すなわち、主水路と分水路との開き角度 $\theta_1+\theta_2$ により変化するようで、 $\theta_1+\theta_2$ が最も大きい実験 F の水位が一番高く、 $\theta_1+\theta_2$ が一番小さい A が最も低く現われている。そして $\theta_1+\theta_2$ が 60° で等しい B, D や、 90° の C, E は、それぞれほぼ等しい水位を示す。

分岐部より下流では、開き角度 $\theta_1+\theta_2$ の影響は少なく、分岐形状、すなわち、 θ_1 および θ_2 が独立に影響している。主水路では実験 C の水位が最も高く、次に B, F, E, A, D の順となっており、分水路では逆に D の水位が最も高く、ついで A, E, F, B, C の順となっている。

この順序を Table 1 に示される流量配分比 κ (= 分水路流量/全流量) と比べてみると、分水路での水位は κ の一番大きい D の水位が最も高く、流量配分比が減少するにつれて低くなる。一方、主水路では分水路と逆の傾向になっている。

このように、上流部における水位は分岐部のくさびの開き角度によるせき上げの程度によって定まり、分岐部より下流の水位は分岐形状により変化する流量配分比によって定められる。

(2) 死水域特性

W_2/B_2 は、分岐角度や水路幅、分離線幅、上流部の水量および流体の物性などによって定まることが推察される。すると、これらは次のように表示される。

$$\frac{W_1}{B_1} = f_1\left(\theta_1, B_1, \frac{(1-\kappa)B_0}{B_1}, v_0, h_0, \rho, \mu, g\right) \quad \dots\dots\dots (3)$$

$$\frac{W_2}{B_2} = f_2\left(\theta_2, B_2, \frac{\kappa B_0}{B_2}, v_0, h_0, \rho, \mu, g\right) \quad \dots\dots\dots (3)$$

ここに、添字0, 1, 2 はそれぞれ上流部、主水路および分水路に関するものであり、 κ は流量配分比、 ρ は水の密度、 μ は水の粘性係数および g は重力加速度である。

いま、 ρ, g, h_0 を基本量に選んで次元解析を行い、流体粘性の影響が無視できるとすれば、主水路および分水路に対して次式が得られる。

$$\frac{W_1}{B_1} = f_1\left(\theta_1, \frac{(1-\kappa)B_0}{B_1}, \frac{v_0}{\sqrt{gh_0}}\right) \quad \dots\dots\dots (4)$$

$$\frac{W_2}{B_2} = f_2\left(\theta_2, \frac{\kappa B_0}{B_1}, \frac{v_0}{\sqrt{gh_0}}\right) \quad \dots\dots\dots (5)$$

式中現われているフルード数は、死水域の長さには影響を及ぼすが、その幅にはあまり影響せず、水路形状が支配的と考えられる。従って、(4)、(5)式においてフルード数を除いた2個のパラメーターで実験資料を整理すると **Fig. 4**, **Fig. 5** が得られる。同図は中層部のものであり、データのばらつきはあるが、主水路、分水路とも分岐角度が大きくなると死水域の幅は拡がり、 $(1-\kappa)B_0/B_1$ や $\kappa B_0/B_2$ が大きくなると縮小する傾向がみられる。そしてデータのばらつきに関しては、その大部分がパラメーター $(1-\kappa)B_0/B_1$ や $\kappa B_0/B_2$ に依存するようであるが、死水域の測定のためには明瞭ではなく、また、分岐角度が60度の場合には、除外されたフルード数が若干影響を及ぼすようである。

(3) 流速分布特性

上流部における横断方向の流速分布は、分岐部まではほぼ同様であるが、それより下流においては、主水路、分水路とも非常に歪んだ形となる。その一例が **Fig. 6**, **Fig. 7** で、上流部の4断面、主・分水路の開始断面、死水域が最大となる断面および終端付近の断面、横断水面形が同様となる断面の水深方向に平均した流速の横断分布形が示され、同時に、測定断面における水面形の横断形状が示されている。

いずれの実験においても、程度の差はあれ、同図と同様なパターンを示す。主水路において、開始断面では、まだ死水域の影響がなく、主水路と分水路を分けるくさびの影響で、右岸に憩流点ができ、水位は高く、右岸側の流速は左岸側より遅くなっている。しかし、死水域が形成される領域においては、水面形は回復し始めるが、流れの集中のため右岸側の流速が極端に速くなる。死水域の終端付近では、右岸側の歪みが取れ、ほぼ直線分布を示す。これより下流へ行くに伴ない様な分布に回復していく。しかし、分岐部での死水域や水路の曲りの影響によって水流が蛇行するため、分布形は歪んでいる。分水路においても、主水路と同様な挙動を示すが、開始断面では、主水路の場合と異なり、死水域の影響を受け、下流部に似た分布形を示す。これは分水路幅が小さく、水路幅に対する死水域の幅が、主水路のそれらに比べて大きいことによる影響であると思われる。

こうした分布形の歪みは、フルード数が大きくなると死水域が伸びることから、フルード数が大きいと、水面形が回復しても死水域の影響を受けて仲々回復しない。

上述の分布形の歪みは次元解析で重要な意味をもつ。そこで、流速分布の測定に基づいて、運動量補正係数 η およびエネルギー補正係数 α の縦断変化を調べよう。**Fig. 8** に示されるように、上流部ではほぼ同様な分布を示すが、分岐部周辺において η, α は急に大きくなり、すぐには元に戻らない。しかし、分岐形状によりその様相は異なる。例えば、実験Bの場合は η, α も分水路の方が大きくなり、 $\theta_2=0^\circ$ の実験Dの場合は逆に主水路の方が大きく、死水域が形成されない分水路においては同様な分布に近づいている。

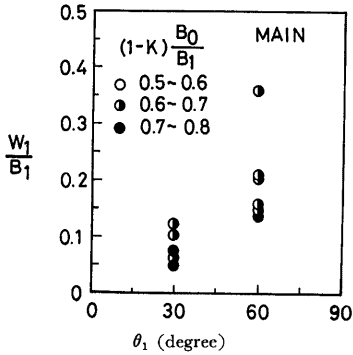


Fig. 4 The relation of W_1/B_1 to θ_1 and $(1-\kappa)B_0/B_1$.

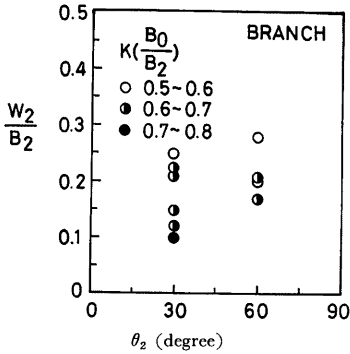


Fig. 5 The relation of W_2/B_2 to θ_2 and $\kappa B_0/B_2$.

3. 2 分岐部周辺におけるエネルギー損失

分岐部周辺においては、前述したように、流速分布が歪み、そのため壁面摩擦以外に分岐によるエネルギー損失が生じる。その例が Fig. 9, Fig. 10 で、死水域が主水路および分水路の両方に形成される場合 (Fig. 9) と主水路のみに形成される場合 (Fig. 10) のものである。分岐によるエネルギー損失は、流量配分比が小さいと Fig. 9 (実験 C) のように分水路側で顕著に、流量配分比が大きいと Fig. 10 (実験 A) に示されるように主水路側で顕著に現われる。一方、Fig. 9 の場合の主水路および Fig. 10 の場合の分水路においては、分岐によるエネルギー損失は少なく、壁面摩擦による損失が大部分であると考えられる。この分岐によるエネルギー損失と、

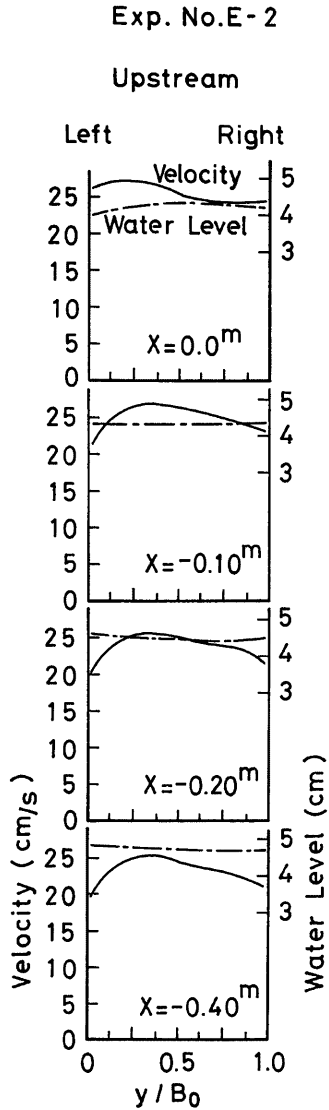


Fig. 6 A change of transverse velocity profiles at each section.

Exp. No. E-2

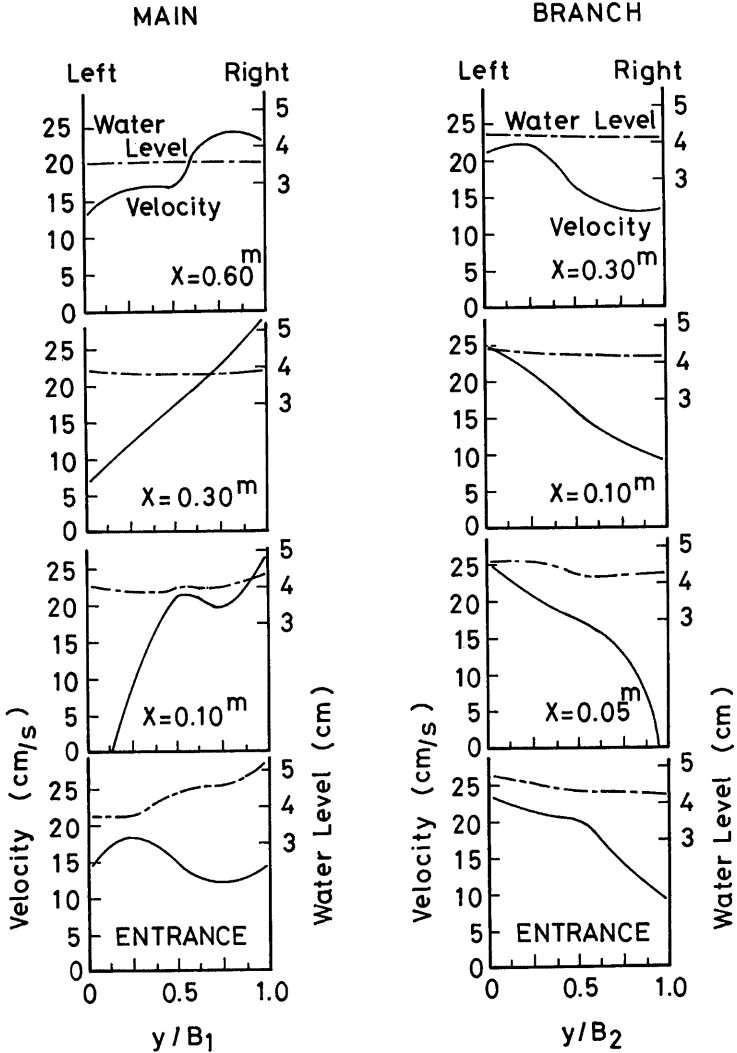


Fig. 7 A change of transverse velocity profiles at each section.

Fig. 11 に示されるような断面急拡部におけるエネルギー損失とを比べると、両者とも分岐や断面変化に伴う流速分布の歪みが大きい領域で損失が卓越し、その損失は同様な形態を示す。こうした分岐によるエネルギー

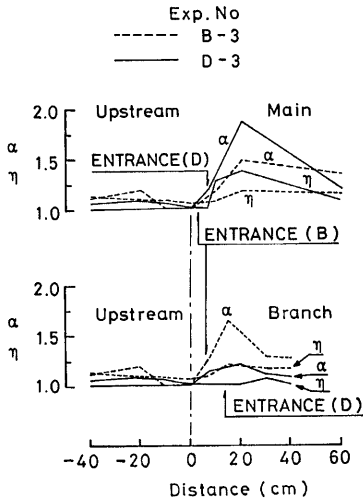


Fig. 8 Momentum (η) and energy (α) correction coefficients.

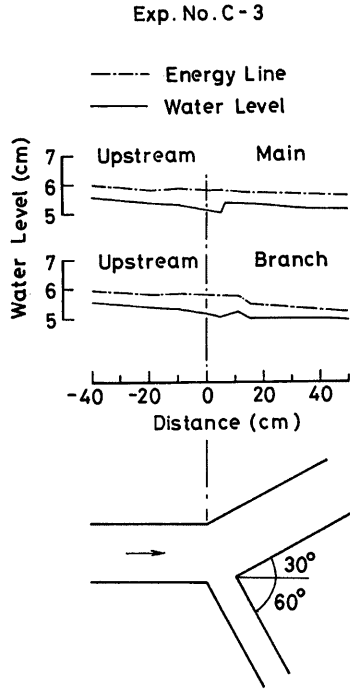


Fig. 9 A state of head loss around the junction.

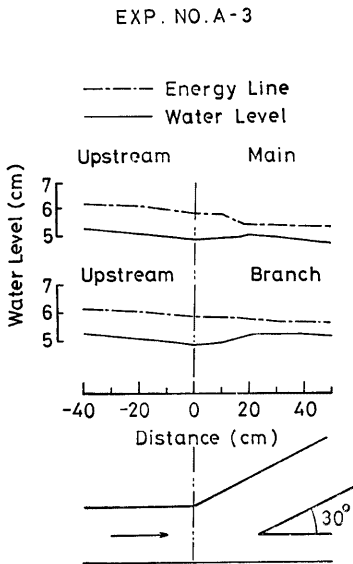


Fig. 10 A state of head loss around the junction.

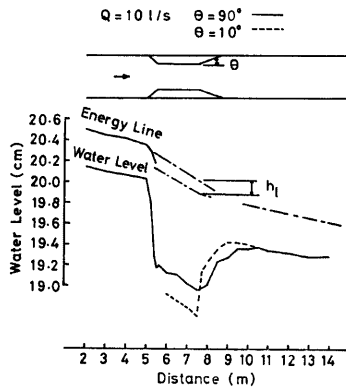


Fig. 11 Comparison of head loss in a gradual expansion and in abrupt one according to Ashida⁷⁾.

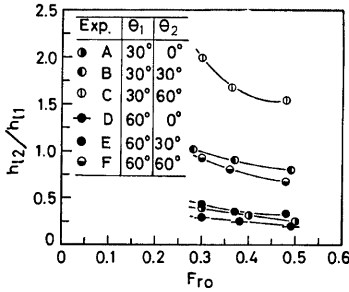


Fig. 12 Changes of the head loss ratio h_{12}/h_{11} with shape factor and Froude number of upstream region.

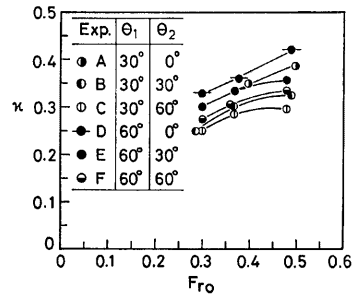


Fig. 13 Changes of discharge ratio κ with shape factor and Froude number.

ギー損失は、Fig. 8 の比較からもわかるように、分岐形状によってその現われ方が異なる。また、死水域の大きさがフルード数によって変ることから、フルード数によってもエネルギー損失は変化するであろう。そこで、これらがエネルギー損失に及ぼす影響を調べてみよう。

Fig. 12 は分岐によって生じる主水路の損失水頭 h_{11} 、分水路の損失水頭 h_{12} の比 h_{12}/h_{11} と、上流部のフルード数 Fr_0 および分岐形状との関係を示したものである。まず h_{12}/h_{11} と Fr_0 との関係を見ると、 Fr_0 が増加すると h_{12}/h_{11} は減少し、分水路での損失が相対的に少なくなる。しかし、その減少の仕方は、 $\theta_1=0^\circ$ の実験 A および D が直線的で、他のケースはいずれも Fr_0 が大きくなると、 Fr_0 が小さいときに比べその減少は小さくなるようで、 h_{11} と h_{12} の変化が同程度に近づく傾向がみられる。次に、 h_{12}/h_{11} に及ぼす分岐形状の影響をみると、主水路の分岐角度 θ_1 が大きくなると h_{12}/h_{11} は減少し、分水路の分岐角度が大きくなると h_{12}/h_{11} は増加する傾向がある。そして、 θ_1 と θ_2 の組み合わせにより、同図に示されるような分岐形状による変化が現われると考えられる。

この h_{12}/h_{11} の変化は、Table 1 との比較から流量配分比の変化と対応すると考えられる。すなわち、 h_{12}/h_{11} が大きくなることは相対的に分水路の損失水頭が増えることであり、流量配分比の減少につながり、また、 h_{12}/h_{11} が小さくなると分水路の損失水頭が減少し、流量配分比が増大するものと考えられる。

3. 3 流量配分比および掃流砂量配分比

(1) 流量配分比

分岐部におけるエネルギー損失は分岐形状によって異なり、その結果として流量配分比が変化することを明らかにした。この流量配分比 κ の変化を上流部のフルード数 Fr_0 と分岐形状について調べたのが Fig. 13 である。同図から、 κ は分岐形状と Fr_0 によって変化することが明らかである。

まず Fr_0 に対する κ の変化をみると、どの分岐形状においても、 Fr_0 が大きくなると κ は大きくなる。しかし、その変化は分岐形状によって異なり、分水路の分岐角度 θ_2 が 0° の場合（実験 A および D）はほぼ直線的に κ は増大するが、 θ_2 が 30° および 60° の場合は、いずれも Fr_0 が大きくなると κ の増加は小さく、一定値に近づく傾向がみられる。これは、Fig. 12 にみられる h_{12}/h_{11} と Fr_0 の関係に対応していることがわかる。

次に、分岐形状による κ の変化を調べよう。分岐部におけるエネルギー損失の考察からもわかるように κ は分岐形状の影響を大きく受けて変化し、T型分岐に関して言われている「 κ は分岐角度 (θ_2) にかかわらず変化しない」という結果と際立った相異を示す。すなわち、主水路の分岐角度 θ_1 が大きくなると κ は増大し、 θ_2 が大きくなると逆に減少する。従って、今回の実験範囲においては、 θ_1 が最大の 60° と θ_2 が最小

の0°の組み合わせの実験Dの流量配分比が最も大きく、A ($\theta_1=30^\circ; \theta_2=0^\circ$), E ($60^\circ, 30^\circ$), F ($60^\circ, 60^\circ$), B ($30^\circ, 30^\circ$)の順に小さくなり、 θ_1 が 30° 、 θ_2 が 60° の実験Cにおいて最も小さく現われる。こうした κ の分岐形状による変化は、Fig. 12 に示されるエネルギー損失の分岐形状による変化と良く対応している。

(2) 掃流砂量配分比

掃流砂量配分比 κ_g は、河床近傍の流れに支配されることから、分岐部周辺における主水路と分水路の形状に対応して形成される二次流の発達程度により定まることが考えられる。T型分岐では、分水路の形状による二次流が形成されるが、掃流砂の大部分は分水路へ流れ込み、 κ_g は流量配分比 κ の約2倍に達する。しかし、Habermaas³⁾ が指摘しているように、主水路へ向う二次流が形成されるような分岐形状を持つと、同じ κ であっても κ_g は減少し、 $\kappa_g < \kappa$ となる場合もある。

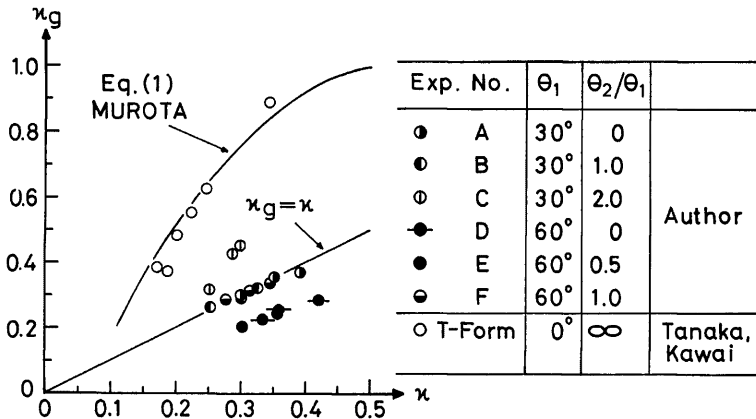


Fig. 14 Changes of sediment discharge ratio κ_g with shape factor and discharge ratio κ .

Fig. 14 は、こうした κ_g と κ との関係を示すものであり、 κ_g の算定に関しては、底面近傍での分離流線幅比が掃流砂量配分比に対応するものとして求められており、また、T型分岐に関する田中・川合³⁾の移動床実験結果および室田の実験式が示されている。同図から明らかなように、 κ_g には、 κ の場合と同様に、分岐形状が関係している。いずれのケースにおいても、 κ が増大すると、 κ_g は増大する。一方、分岐形状による κ_g の変化をみると、主水路の分岐角度 θ_1 が大きくなると κ_g は減少し、分水路の分岐角度 θ_2 が大きいと κ_g は増大する傾向がある。そして、流量配分比の場合と同様に、 θ_1 と θ_2 の組み合わせによって κ_g は定められる。すなわち、同じ流量配分比であっても、室田の実験式および田中・川合の実験値より明らかなように、 κ_g はT型分岐の場合が最も大きく現われる。今回の実験範囲では、 $\theta_1=30^\circ, \theta_2=60^\circ$ の実験Cのケースが最大で、 κ_g は κ の約1.5倍となる。一方、 $\theta_1=60^\circ, \theta_2=30^\circ$ の実験Eのケースが最小で、 κ_g は κ の約0.7倍となる。こうした分岐形状の掃流砂量配分比に及ぼす影響は、流量配分比の場合とは逆に働き、水路の曲りによる二次流が大きく影響することがわかる。

今回の実験に関するデータをさらに詳しくみると、次のことが言える。 $\theta_1=\theta_2$ の実験、すなわち、ケースB、Fでは $\kappa_g=\kappa$ なる関係が認められる。これは、流量配分比を定める表層および中層の分離流線と、掃流砂量配分比を定める底面近傍の分離流線がほぼ同じところに位置することを意味する。 $\theta_1=30^\circ, \theta_2=0^\circ, 30^\circ, 60^\circ$ のケースA、B、Cの結果をみると、ケースA、Bに対して $\kappa_g=\kappa$ で、ケースCは $\kappa_g > \kappa$ となってい

る。 $\theta_1=60^\circ$ で、 $\theta_2=0^\circ, 30^\circ, 60^\circ$ のケース D, E, F の結果については、掃流砂量配分比が D, E で等しく、しかも $\kappa_g < \kappa$ となっている。これらのことを総合すると、 $\theta_1=\theta_2$ ならば $\kappa_g \approx \kappa$ 、 $\theta_1 > \theta_2$ ならば $\kappa_g < \kappa$ 、 $\theta_1 < \theta_2$ ならば $\kappa_g > \kappa$ となる。また、 θ_1 および θ_2 が 30° 程度の小さい範囲においては、いずれの水路においても分岐直上流の底面近傍の分離流線が、表層および中層のそれから大きくずれるような顕著な二次流の発達がないものと言える。

今回の実験結果から、このように興味深い考察が可能である。しかし、これを用いて、T型分岐に関する室田や田中・川合の結果を説明するには、さらに形状特性に関する検討が必要である。

4. 流量配分比の算定法

分岐部周辺においては、主水路および分水路に剝離領域が生じ、分岐部においては、これによるエネルギー損失が卓越する。前述したように、このような流れの特性は断面急拡部のそれに極めて類似した現象であると言える。そこで、本章ではエネルギー損失を、断面急拡部で行われている方法で評価し、エネルギー方程式に基づいて流量配分比の算定を試みる。

4.1 基礎式

Fig.3 に示すように、分岐前後に検査断面をとり、主水路上・下流および分水路を添字 0, 1, 2 を付けて表わすと、エネルギー方程式は次のように表わされる。

$$\begin{aligned} E_0 &= z_0 + h_0 + \alpha_0 \frac{v_0^2}{2g} = z_1 + h_1 + \alpha_1 \frac{v_1^2}{2g} + h_{11} \\ &= z_2 + h_2 + \alpha_2 \frac{v_2^2}{2g} + h_{12} \end{aligned} \quad \dots\dots\dots (6)$$

ここに、 z ：位置水頭、 h ：水深、 v ：平均流速、 h_l ：損失水頭、 α ：エネルギー補正係数である。

流量配分比を κ とすると、連続式は次のように書ける。

$$Q_1 = (1 - \kappa) Q_0 \quad \dots\dots\dots (7)$$

$$Q_2 = \kappa Q_0 \quad \dots\dots\dots (8)$$

断面 1 および断面 2 で等流状態にあるものとする、それぞれの断面での流速は、

$$v_1 = \varphi_1 \sqrt{gh_1 i_1} \quad \dots\dots\dots (9)$$

$$v_2 = \varphi_2 \sqrt{gh_2 i_2} \quad \dots\dots\dots (10)$$

と表わされる。ここに、 φ ：流速係数、 i ：水路勾配である。また、損失水頭 h_{11} および h_{12} を損失係数を用いて次のように表わす。

$$h_{11} = \zeta_1 \frac{v_1^2}{2g} \quad \dots\dots\dots (11)$$

$$h_{12} = \zeta_2 \frac{v_2^2}{2g} \quad \dots\dots\dots (12)$$

(7)~(12) 式を (6) 式へ代入すると

$$\begin{aligned} & \left\{ 1 + (\alpha_1 + \zeta_1) \frac{\varphi_1^2 i_1}{2} \left(\frac{1 - \kappa}{B_1 \varphi_1 \sqrt{g i_1}} \right)^{2/3} \right. \\ & \left. - \left\{ 1 + (\alpha_2 + \zeta_2) \frac{\varphi_2^2 i_2}{2} \left(\frac{\kappa}{B_2 \varphi_2 \sqrt{g i_2}} \right)^{2/3} \right\} \right\} = \frac{z_2 - z_1}{Q_0^{2/3}} \end{aligned} \quad \dots\dots\dots (13)$$

を得る。ここで、 $z_1 = z_2$ とし、また、断面 1 および 2 では流速分布は一様と考えられるから、 $\alpha_1 = \alpha_2 = 1.0$ として、(13) 式を流量配分比 κ について整理すると次式が得られる。

$$\kappa = \frac{1}{1 + \Omega} \quad \dots\dots\dots (14)$$

$$\Omega = \frac{B_1}{B_2} \cdot \frac{F_{r1} \{ F_{r2}^2 (\zeta_2 + 1) + 2 \}^{3/2}}{F_{r2} \{ F_{r1}^2 (\zeta_1 + 1) + 2 \}} \quad \dots\dots\dots (15)$$

ここに、 B は水路幅である。

(14), (15) 式で流量配分比を求めるためには、 F_{r1} , F_{r2} , ζ_1 および ζ_2 が与えられる必要がある。 F_{r1} , F_{r2} は κ が仮定され、粗度がわかれば求められるが、後者の2つ、すなわち、 ζ_1 および ζ_2 の推定が問題となる。そこで、この ζ_1 および ζ_2 を断面急拡大部の水理に関する研究成果により求める。

4.2 エネルギー損失係数

分岐部では、Fig. 7 に示される流速の横断分布形からも明らかなように、その分布形は歪み、流水断面幅が縮小する。また、この断面の近傍におけるエネルギー損失の形態は、3. 2 で述べられたように、断面急拡大部のそれと類似している。従って、エネルギー損失は主に断面縮小部から下流への断面の急拡大によって生じると考えられる。そこで、Fig. 15 に示されるような芦田⁷⁾により求められた断面急拡大部のエネルギー損失係数 ζ を分岐部周辺のそれに適用する。この ζ を求めるに際して、断面の拡大比 $1/r$ を求める必要があるが、分岐部においてはこの r を急拡大部のように水路形状によって決めることができない。そこで、流水断面の縮小幅を、その断面での横断流速分布形から運動量解析によって、有効な流水断面幅（以下等価断面幅と呼称する）を求め、 r を決める。

(1) 等価断面幅

有効な流水断面幅が最小となる断面において、Fig. 16 に示されるような横断流速分布形を持つ場合、幅 B' および等価断面幅 b における運動量が等しいとすると、

$$H \int_0^{B'} u(y)^2 dy = H' U'^2 b \tag{16}$$

と表わされる。また、連続式は、

$$B'UH = bU'H' \tag{17}$$

となる。ここに、 B' ：水路全幅から死水域を除いた幅、 b ：等価断面幅、 U ：幅 B' 内の平均流速、 U' ：等価断面幅で定義される流速、 H ：幅 B' 内の平均水深、 H' ：等価断面幅内の平均水深である。(16) 式と (17) 式より等価断面幅 b は次のように表わされる。

$$b = \frac{1}{\eta} \cdot \frac{H}{H'} B' \tag{18}$$

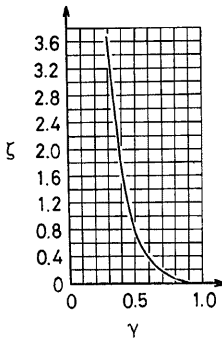


Fig. 15 The relation between head loss coefficient ζ and inverse of expansion ratio γ according to Ashida⁷⁾.

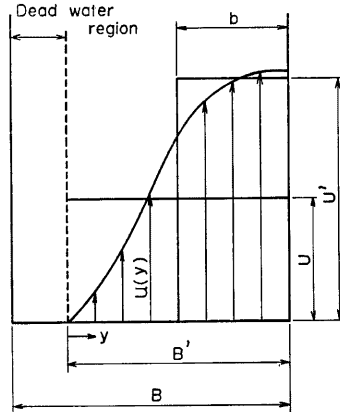


Fig. 16 Definition sketch for the calculation of equivalent width.

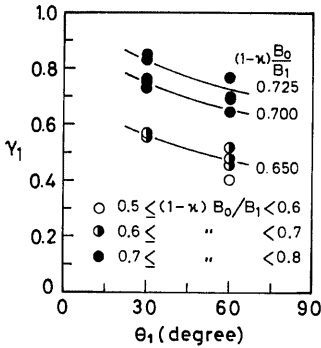


Fig. 17 The relation of r_1 to θ_1 and $(1-\kappa)B_0/B_1$.

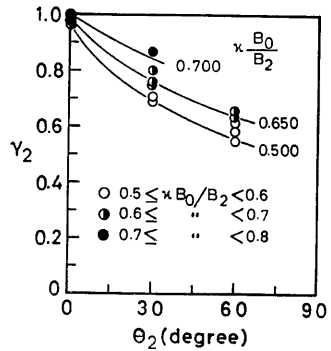


Fig. 18 The relation of r_2 to θ_2 and $\kappa B_0/B_2$.

ここに、 η は運動量補正係数で次式に示される。

$$\eta = \frac{1}{B'} \int_0^{B'} \frac{u(y)^2}{U^2} dy \quad \dots\dots\dots (19)$$

従って、水路幅に対する等価断面幅の比 r は次のようになる。

$$r = \frac{b}{B} = \frac{1}{\eta} \cdot \frac{B'}{B} \cdot \frac{H}{H'} \quad \dots\dots\dots (20)$$

(2) r_1 および r_2 の特性

r_1 および r_2 は、死水域の幅が最大となる断面、また、死水域が形成されない場合は流速が最小となる断面における実測の横断流速分布形をもとに (20) 式により求められた。

3.1 の (2) における考察と同様に、 r_1 、 r_2 はそれぞれ次式のように表わされるものと考え、

$$r_1 = g_1(\theta_1, \frac{(1-\kappa)B_0}{B_1}) \quad \dots\dots\dots (21)$$

$$r_2 = g_2(\theta_2, \frac{\kappa B_0}{B_2}) \quad \dots\dots\dots (22)$$

実験値によりその関係を調べたものが、Fig. 17, Fig. 18 である。データは (21) 式あるいは (22) 式の関数関係を示しており、 r_1 と r_2 はそれぞれ分岐角度 θ_1 、 θ_2 が大きくなると、小さくなり、また $(1-\kappa)B_0/B_1$ 、 $\kappa B_0/B_2$ が大きくなると、大きくなる傾向がある。

分岐形状がわかり、 κ を仮定すると、今回の実験範囲内においては、Fig. 17, Fig. 18 より r_1 、 r_2 が求められる。従って、 r_1 および r_2 が求まると Fig. 15 より主水路および分水路におけるエネルギー損失係数 ζ_1 および ζ_2 を求めることができる。

4. 3 流量配分比の算定

前節までの結果をもとに流量配分比を算定することができるが、その手順を示したものが Fig. 19 である。

- (i) 全流量 Q_0 および相当粗度 k_s を与える。
- (ii) 流量配分比 κ' を仮定する。
- (iii) (i), (ii)より主水路および分水路のフルード数 Fr_1 、 Fr_2 を計算する。
- (iv) Fig. 17, Fig. 18 によって、分岐形状と κ' から r_1 および r_2 を求める。
- (v) 断面急拡部の $r \sim \zeta$ の関係 Fig. 15 より、 r_1 、 r_2 に対応した ζ_1 および ζ_2 を求める。
- (vi) (14) 式および (15) 式によって流量配分比 κ を計算する。

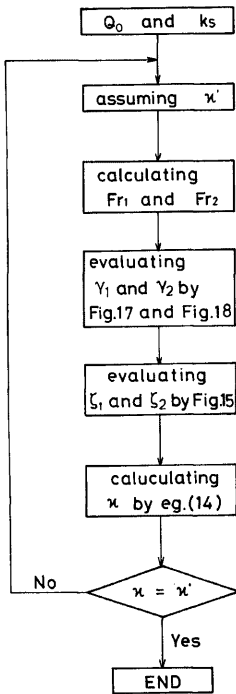


Fig. 19 Flow chart for the calculation of discharge ratio.

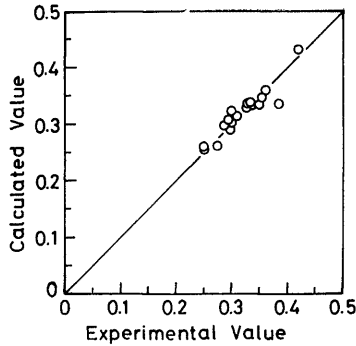


Fig. 20 Comparison between calculated value and experimental one concerning κ .

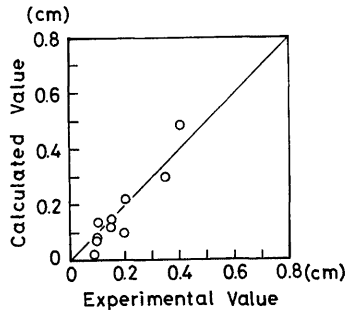


Fig. 21 Comparison between calculated value and experimental one concerning h_1 .

㉒ はじめに仮定した κ' と ㉒ で得た κ が一致しなければ ㉒ に戻り κ' を仮定し直して一致するまで繰返す。

以上のような手順で κ の算定を行なった。算定に際して、実験条件より $B_1=2B_2$, $i_1=i_2=1/1000$ とし、フルード数 Fr_1 および Fr_2 は、実験値より求めた相当粗度 k_s を用いて計算した。また、分岐形状に対応した r_1 および r_2 を Fig. 17, Fig. 18 より内挿して求めた。

このようにして算定した流量配分比と実測値とを比較したのが Fig. 20 である。計算値と実験値は良く一致している。また、流量配分比の算定に際して得られた分岐による損失水頭と実測値の損失水頭を比較したのが Fig. 21 である。計算値と実測値との多小のずれはあるが、十分に損失水頭は評価されていることがわかる。すなわち、断面急拡部の損失係数を用いて分流における流量配分比の算定を行うことが可能であることを示している。

ここで提案した流量配分比の算定法は、流量配分比に影響を与えるフルード数や分岐形状が考慮されているために、従来の算定法より一般性が高く、よりの確に流量配分比を算定することができる。しかし、等価断面幅を推定する Fig. 17, Fig. 18 は、その一般性に問題が残る。等価断面幅の推定は、この流量配分比の

算定法において、重要なことである。今後、より合理的に等価断面幅を推定するため、死水域幅や流速分布特性について、さらに検討していく必要がある。

5. 結 語

本研究では、Y型分流水路を用いた固定床実験により、流量配分比や掃流砂量配分に及ぼすフルード数および分岐形状の影響を検討するとともに、この結果に基づいて、エネルギー方程式を用いた流量配分比の算定法を提案し、次のような興味ある結果を得た。

- (i) 断面の平均水位は、分岐による断面拡幅の影響により、分岐部上流では低下背水になり、分岐部で回復する。また、上流部では開き角度 $\theta_1 + \theta_2$ が大きい程水位は高くなる。
- (ii) 死水域の幅は、分岐角度が大きい程拡がり、分岐角度が 0° の場合、死水域は形成されない。
- (iii) 横断方向の流速分布は、上流部ではほぼ一様であるが、分岐直下流から大きく歪み、横断水面形が一様になってもその歪みは残る。さらに、フルード数が大きい程、流速分布の歪みの回復はより下流側に移る。
- (iv) 分岐部でのエネルギー損失の形態は、断面急拡部のそれに極めて類似している。また、この損失は分岐形状によって異なり、流量配分比はほぼこれによって定められる。
- (v) 流量配分比は、フルード数が大きくなると増大する。また、主水路の分岐角度 θ_1 が大きくなると増大し、一方、分水路の分岐角度 θ_2 が大きくなると減少する。
- (vi) 掃流砂量配分比 κ_g は、流量配分比 κ が増加するに伴い大きく、また、分岐部に形成される二次流の影響を受けて、 θ_1 が大きくなると減少し、 θ_2 が大きくなると増大し、ほぼ次のような関係で表わされる。
 $\theta_1 = \theta_2$ ならば $\kappa_g \simeq \kappa$ 、 $\theta_1 > \theta_2$ ならば $\kappa_g < \kappa$ 、 $\theta_1 < \theta_2$ ならば $\kappa_g > \kappa$ となる。
 しかし、分岐角度が 30° 程度の小さい範囲においては、顕著な二次流の発達がない。
- (vii) (18) 式で示される等価断面幅を用い、分岐部のエネルギー損失を断面急拡による損失として評価して、流量配分比を算定する式を誘導し、その妥当性を実験により確かめた。

今後は、3.3 で述べたように、T型分岐の特性を再検討するとともに、流量配分比の算定において、等価断面幅の推定が重要であることから、死水域および流速分布特性を、さらに検討する必要がある。

最後に、本研究を進めるにあたり終始御協力頂いた京都大学防災研究所江頭進治助手、実験に際し多大の労をわずらわした吉田義則技官に深謝する。

参 考 文 献

- 1) 室田 明：開水路分水路の研究，土木学会論文集，第70号別冊1-1，1960。
- 2) 道上正規・村雲 治：分水路における土砂配分，土木学会 第32回年次学術講演会概要集，第2部，1977，pp. 313-314。
- 3) Habermaas, F: Geschiebeeinwanderung in Werkkanale und deren Verhinderung, Wasserkraft und Wasserwirtschaft, 1935, pp. 97-103.
- 4) 芦田和男・土屋昭彦・神谷隆太郎：河川分流の設計法(2)，土木技術資料，2-4，1960，pp. 131-132。
- 5) 田中祐一朗・川合 茂：河川分流に関する実験的研究，舞鶴工業高等専門学校紀要，第12号，1977，pp. 139-153。
- 6) Taylor, E.H.: Flow Characteristics at Rectangular Open-Channel Junctions, Transactions, ASCE,

Vol. 109, 1944, pp. 893-902.

- 7) 芦田和男：開水路断面急拡部の水理とその適用に関する研究，京都大学防災研究所年報，第5号A，1962，pp. 223-251.