



HOKKAIDO UNIVERSITY

Title	河川合流点における流れの機構の研究
Author(s)	板倉, 忠興; Itakura, Tadaoki; 石井, 千万太郎 他
Citation	北海道大學工學部研究報告, 54, 113-134
Issue Date	1969-10-20
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/40964
Type	departmental bulletin paper
File Information	54_113-134.pdf



河川合流点における流れの機構の研究

板倉 忠興*

石井 千万太郎*

(昭和44年4月30日受理)

Study on the Mechanics of a River Confluence

Tadaoki ITAKURA

Chimataro ISHII

(Received April 30, 1969)

Abstract

Various types of river confluences with different geometry are known where the separation zone is formed immediately downstream from the confluence and has various sizes and shapes. It follows that analyzing the flow around a river confluence is a complicated problem.

An analytical and experimental study was carried out on the mechanics of a river confluence in this report. A water flow discharging normally into a main water flow was taken as a simplified model of a river confluence.

The following is an outline of the results obtained from the analysis:

a) The trajectory of positions of maximum velocity along the tributary were normalized to an identical elliptic arc by parameters. These parameters were calculated by the analysis of water-surface profile and velocity distribution.

b) A maximum value of the depth of water appeared immediately upstream from the confluence. On the contrary, the minimum depth occurred at the cross section of the deepest tributary penetration. These values were calculated by a similar mode of analysis as a).

c) The separation zone which was formed immediately downstream from the confluence had similar shapes. Its maximum width and length were normalized by a new parameter. Rouse's parameter⁴⁾ was modified by the ratio of widths of the tributary to the main flow and applied to normalize its maximum width and length.

d) Görtler's solution¹⁰⁾ for a diffusion of a jet was applied to the velocity distribution of the flow in a modified version. A parameter occurring in the solution was obtained from experiments; $\sigma=5.5$ to 6.0 for $l/D \leq 10$ and it increased with distance as $\sigma \propto l^{1/2}$.

e) An attempt was made to evaluate the energy acquisition of the main flow by an analysis which used to be carried out on a junction of pipes. Values of the coefficient of loss of the velocity head were small enough to be neglected as compared with the values in pipes.

* 土木工学科 河川工学講座

目 次

1. 概 説	116
1. 1 研究の目的	116
1. 2 研究の方法	116
1. 3 合流点の流況	116
2. 実 験	117
2. 1 実験装置	117
2. 2 実験方法	118
(i) 流向測定	118
(ii) 流速測定	118
(iii) 水深測定	119
(iv) 死水域の測定	119
3. 解析および考察	119
3. 1 支流中心の軌跡	119
(i) 支流の彎曲偏向特性	119
(ii) y_{\max}	120
(iii) x_{\max}	121
3. 2 主流の水面形	123
(i) 断面 I	123
(ii) 断面 II	123
(iii) 断面 III	125
3. 3 死水域の形状	125
(i) Reattaching Point までの距離	125
(ii) 逆流域の最大幅	127
(iii) 逆流域の形状	127
3. 4 流速分布	128
(i) 静水中に拡散する有限幅二次元自由噴流の流速分布	128
(ii) 直角合流の流速分布	129
3. 5 合流による主流のエネルギー損失	132
4. 総 括	133
あとがき	133

使 用 記 号

B : 主流の幅

b : 断面 IV における流速の漸変部分の幅

D : 支流の幅

f_s : 断面 III における平均流速の補正係数

f_f : 合流による主流のエネルギー損失係数

g : 重力の加速度

h : 水 深

- h_g : 断面 II, $y = y_{\max} \sim B$ における水深
 h_0 : 合流前の主流の等流水深
 h_g : 断面 III における水深
 h_T : 合流前の主流の比エネルギー
 h_{IV} : 断面 IV における平均水深
 l : 支流中心の軌跡の長さ
 p : 定数
 Q_J : 支流の流量
 Q_0 : 主流の流量
 u : 流速
 u_g : 断面 II, $y = y_{\max} \sim B$ における流速
 u_J : 支流の合流前の流速
 u_m : 支流中心の流速
 u_{ml} : 支流中心線上で支流中心線の長さ l における流速
 u_0 : 合流前の主流の等流水深
 u_g : 断面 III における流速
 Δu_g : 同上
 \bar{u}_g : 同上
 u_{III} : 同上
- } (3.1 (ii) 参照)
- u_{IV} : 断面 IV, $y = b \sim B$ における流速
 w : 水の単位体積重量
 x : 支流出口中心から主流方向の距離
 x_c : 逆流域の幅 y_c の点の x 座標 $-\frac{D}{2}$
 x_{\max} : 支流の最大貫入点の x 座標
 x_R : Reattaching Point までの距離
 Y : $u = \frac{1}{2} u_m$ なる点の y' 座標
 y : 支流出口中心から主流に直角方向の距離
 y_R : 逆流域の最大張出し幅
 y_c : 逆流域の幅
 y' : 支流中心線に垂直方向の距離
 y_{\max} : 支流最大貫入点の y 座標
 ε : 仮動粘性係数
 ε_l : 原点からの距離 l における仮動粘性係数
 η : 変数 $x/(\xi - l)$

θ : 支流中心線の接線と x 軸とのなす角度

ξ : 浮動座標

ρ : 水の密度

σ : Görtler による流速分布の実験定数

1. 概 説

1.1 研究の目的

河川の合流点における流れは、合流点の幾何学的形状によって流れの混合拡散の特性、合流点に形成される死水域の大きさ形など流れの流体力学的な性質が変化し極めて複雑な流況を呈する。これは合流点という水路の遷移部付近の水流がきわめて複雑な三次元的性格を示すからであり、河川の合流による水路の水理的特性を明らかにすることは、それ自身が実際の水工計画や工法と密接な関係をもつ開水路水理学上の重要な問題である。

河川の合流点の機構については未だ一般的な解析方法がなく、河川合流点の設計の指針となるものが確立されていない。本研究は河川の合流点の流れを系統的に解析し河川合流部の設計に水理学的な基礎を与えようとするものである。

1.2 研究の方法

河川合流の水理学的な取り扱いには、従来普通に用いられる一次元解析法によって流量の配分や水面形の変化などの水理特性を予測する方法と、水流をポテンシャル流と仮定して複素関数を用い、境界特性を簡単にして等角写像で進めるという方法があるが、いまだ一般的な結論は得られていない。河川合流の定性的な水理特性については、Anwar¹⁾が台形断面を持つ水路を用いて実験を行ない、いくつかの結論を得ている。

著者らは河川合流の最も単純なモデルとして、ともに矩形断面を有する河川が直角に合流する場合をとりあげ、実験と並行して解析を行ない、一般的な河川合流の解析の基礎資料とするための定量的な水理特性を明らかにする事を試みた。また、このモデルは一つの横方向の流れに対して直角に比較的小さな幅を持った流れが流入するものであり、これは、特に気象の分野で広く研究が進められている、有風時における煙突からの煙の拡散の問題に類似している点が多く、それらの結果とも比較して検討した。

1.3 合流点の流況

図1-1は河川合流の一般的な特性を示した略図である。ただし、主流の流れは常流とする。一般に合流点の直下流には図に示すように死水域が形成され、主流の水面形は丁度一様な流れの中に橋脚等の障害物が存在する場合と同じ様な状態を示す。

支流の影響を受けない充分上流(断面 I)では等流水深であり、断面 II に近づくに従って水路の横断方向で支流の流入側から滞流が生じ徐々に水深が増加して断面 II において水深は最大となる。断面 II から断面 III にかけては、支流の影響によって主流の流積が減少し主

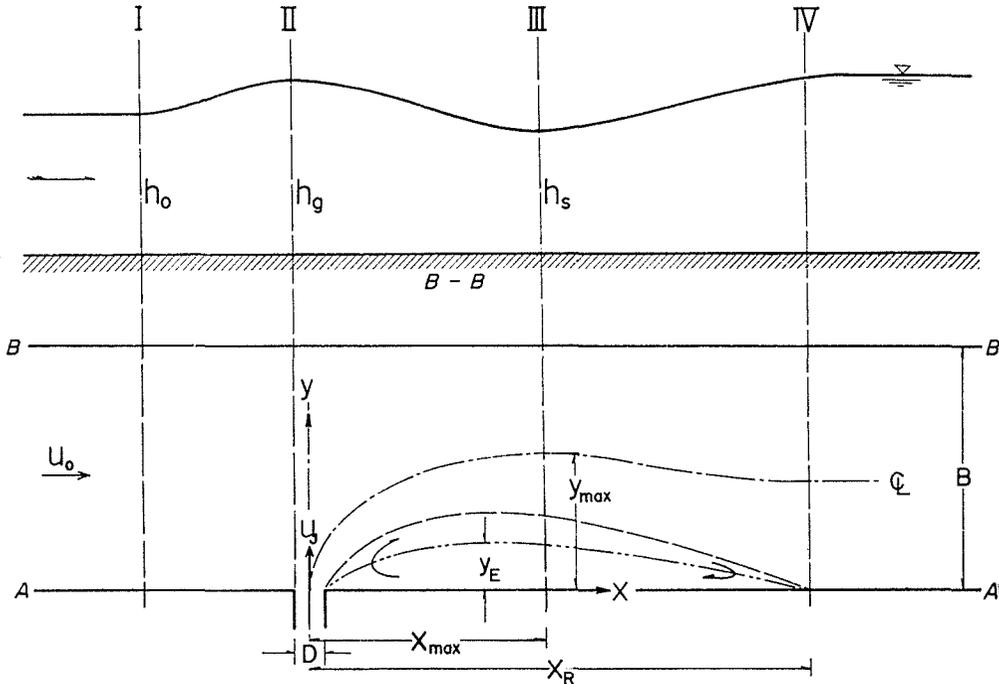


図 1-1 Schematic Representation of River Confluence

流の流速は増大する。これに伴って水深は徐々に減少し、断面 III 即ち、支流の最大貫入点で水深は最小値をとる。また横断的にみると断面 II と断面 III の間の水深の分布は死水域側 (境界 A) で小さく、境界 B に向かって増大する。この傾向は支流の流向が主流方向に曲げられるに従って徐々に減少し、支流の最大貫入点、断面 III、に達すると横断方向には一樣な水深となる。断面 III から断面 IV に向って主流と支流との混合は充分に発達し始め、それに伴って流速は減少し、水深は徐々に増大して等流水深に漸近して行く。

2. 実 験

河川が直角に合流する場合の水理特性を詳細に検討するため、実験水路を用いて主流の幅および主流と支流との流量を変えて実験を行なった。

2.1 実験装置

実験装置は水理実験室内に組立てられた鉄骨の台上に製作された。実験用水路は木製であり、水路底面は固定床で合板を用い、表面はペンキで仕上げてある。水路の底勾配は水平である。概略の寸法は図 2-1 の通りである。主流は実験室外の貯水槽から大型揚水ポンプで、三角堰の上流部に設けられた高水槽に汲み上げられる。その流量は直角三角堰によって測定し、整水槽を経て主流水路に導かれる。水路の終端には越流堰を設けて実験水路全体の水深が 5 cm となるように調節した。

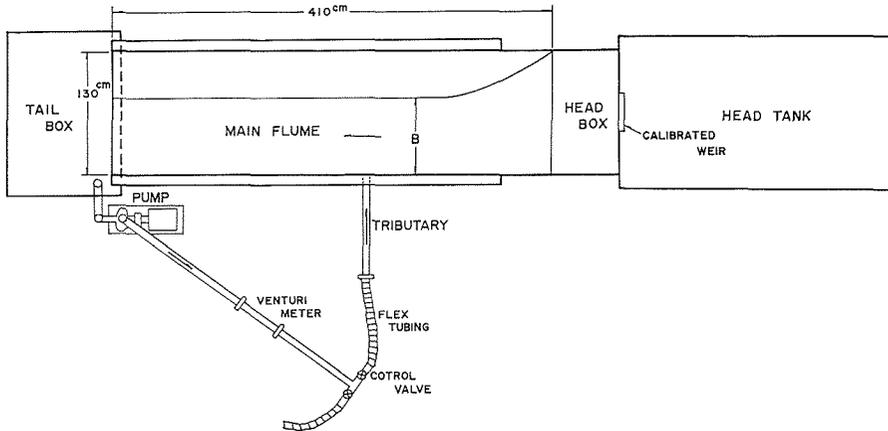


図 2-1 General View of Experimental Equipment

主流に直角に流入する支流は、主流水路終端で集水し、それを小型揚水ポンプによって汲み上げ、円形ビニール管で異形ベンチュリー管に導き流量を測定する。更にダクトホースによって一辺 50 mm の正方形断面を持つアクリル樹脂管に導かれ主流に直角に流入する。

2.2 実験方法

主流と支流の幅の比および主流と支流の流量比を変えて流速分布、水面形、さらに合流点直下流に形成される死水域の形状を測定した。主流と支流の川幅の比については、支流幅 $D=5$ cm に対して、主流幅 $B=40$ cm, 50 cm, 80 cm, 100 cm, 130 cm ($B/D=8, 10, 16, 20, 26$) の 5 つの場合について行ない、さらに各々の主流幅について、 $(Q_1/D)/(Q_0/B)=1, 1.5, 2, 3$ について実験を行なった。主流のフルード数は 0.1~0.4, 支流については 0.4~1.1 である。

(i) 流向測定 ピトー管の先端に取り付けた糸片と過マンガン酸カリウム水溶液、更にパンチクズを併用して測定を行なった。

支流の流速測定断面を定めるための流向測定は、支流の渦側流線と主流側流線とを知る事にあるが、これはパンチクズおよび過マンガン酸カリウムを流すことによって測定できた。

また流速測定点における流向はピトー管の先端に取り付けた糸片によって測定した。

(ii) 流速測定 流速の測定は内径 1 mm のピトー管を用いて行なった。流速測定は支流の流速分布を求めるものと、主流の流速分布を求めるものとに分けられる。支流の流速分布を求めるためには、(i) で述べたような流向測定によって支流の流れの状態を知り、支流の流心に直角に交わる断面を決める。次にこの断面を測定の前にはあらかじめ水路床に書き、この断面に沿って測定を行なった。また主流の流速分布は水路の横断方向に行なった。

測定断面の一点の測定においては、本実験では二次元流を考えているので、流速は水路底面より、5, 25, 45 mm の 3 点での測定値の平均値を取った。またピトー管の向きは、その先端に取り付けた糸片の方向と一致させた。

マンノメーターは水平面と $\theta = \sin^{-1}(1/10, 2/10)$ なる角度を持った傾斜型マンノメーターを使

用した。

(iii) 水深測定 水深の測定は 1/10 mm 読みのポイントゲージを用いて行ない、水路の横断方向に測定して、水路全体を覆った。

(iv) 死水域の測定 死水域の形状は、死水域に過マンガン酸カリウム水溶液又はパンチクズを投入する事によって測定した。死水域の終端の位置は側壁付近に過マンガン酸カリウム水溶液を滴下し、色素が上流側と下流側に分れる境界をもって知った。支流と逆流域との境は過マンガン酸カリウム水溶液を用い、色素が支流方向とその反対の方向に流れる境をもって逆流域の境界とした。

3. 解析および考察

3.1 支流中心の軌跡

(i) 支流の弯曲偏向特性 一般に無限の拡がりの中へ側圧を受けながら噴流が直角に流入する場合に、その噴流が拡散しない完全流体の渦無し流れであると考え、噴流軸の弯曲偏向特性は円弧となる事が明らかにされている(新津, 加藤²⁾)。

河川が直角に合流する場合も上述の噴流の場合と類似した点が多い。ただし河川合流の場合には主流は或る有限の幅を有しており、その為に主流中への支流の貫入は抑制されるはずである。前述の円弧の軌跡が如何に変形されるかを実験によって検討した結果は次のようである。

主流に流入する支流中心の軌跡は、支流出口から、支流の最大張り出し点 (x_{max}, y_{max}) までは 図 3-1 の様に任意の $B/D, Q_j/Q_0$ に対して相似性が見られその関係は (3-1) 式の様

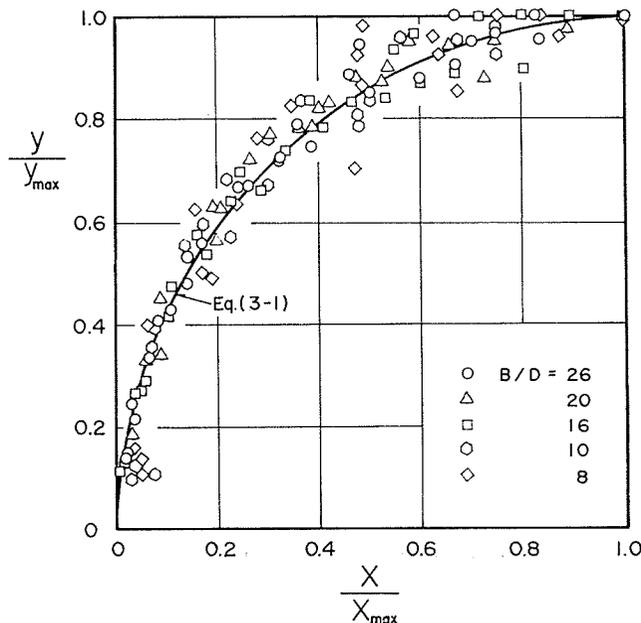


図 3-1 Trajectory of Maximum Velocity Arc

される事を知った。図 3-1 中の曲線は (3-1) 式によるものである。

$$\left(\frac{y}{y_{\max}}\right)^2 + \left(\frac{x}{x_{\max}} - 1\right)^2 = 1 \quad (3-1)$$

(3-1) 式は支流中心の軌跡を x_{\max} , y_{\max} によって標準化したものであり、この x_{\max} , y_{\max} を如何にして求めるかが次に問題となる点である。

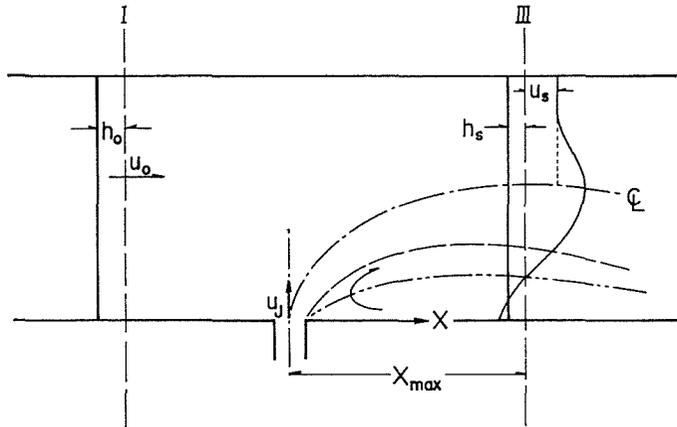


図 3-2 Definition Sketch of Flow at Section I and Section III

(ii) y_{\max} 図 3-2 のように断面 I と断面 III とに着目して考える。1.2 でも概略を述べたが、断面 I は合流点の充分上流で流れは等流状態で横断方向にも一様である。断面 III は支流の最大貫入点であって、水深は最小値をとり横断方向にはほぼ一様である。断面 I と断面 III で x 方向の運動量を考える。支流の方向は 90° 曲げられてもその運動量は保存されると考えると

$$\frac{\omega}{2} h_0^2 B + \rho Q_0 u_0 = \frac{\omega}{2} h_s^2 B + \rho Q_0 u_s + \rho Q_J u_J \quad (3-2)$$

ベルヌーイ式は

$$h_0 + \frac{u_0^2}{2g} = (h_T) = h_s + (1 + f_s) \frac{u_s^2}{2g} \quad (3-3)$$

また、断面 III において主流は支流の影響で単に幅が縮小されて流積が減少し、かつ支流と主流の流量比に等しいだけ平均的に流速が増大すると仮定すると、連続の式は

$$Q_0 = (B - y_{\max}) h_s \left(1 + \frac{Q_J}{Q_0}\right) u_s \quad (3-4)$$

以上の (3-2), (3-3) 及び (3-4) 式中において、未知数は y_{\max} , h_s , u_s の 3 個であり、それぞれの値を決定する事ができる。 f_s は次に述べるように、断面 III における主流の流速分布を (3-7) 式によって平均化するための補正係数であり、実験結果と比較して $f_s \approx 0.1$ である事を知った。

ところで、連続の式 (3-4) で行なった仮定は次に述べるような根拠に基づくものである。

図 3-3 に示すように支流中心線を主流と支流の境界と考え、そこでの流量の出入はないものと仮定すると断面 I と断面 III の間の連続の式は

$$Q_0 = (B - y_{\max}) \cdot h_s \cdot \bar{u}_s \quad (3-5)$$

但し

$$\bar{u}_s = \left(\frac{1}{B - y_{\max}} \right) \int_{y_{\max}}^B u_{III}(y) dy \quad (3-6)$$

また \bar{u}_s は (3-7) 式のように 2 つの要素に分けて考える事ができる。

$$\bar{u}_s = u_s + \Delta u_s \quad (3-7)$$

$$\Delta u_s = \left(\frac{1}{B - y_{\max}} \right) \int_{y_{\max}}^B \{u_{III}(y) - u_s\} dy \quad (3-8)$$

即ち u_s は単に主流幅が B から $(B - y_{\max})$ に縮小されると考えた時の断面 III の平均流速であり、 Δu_s は支流と主流の速度差によって生ずる支流の流速拡散による平均的主流流速増加分である。さらに、支流の流速拡散による主流流速の増加分 Δu_s は支流流速と主流流速の比 (u_J/u_0) が増すに従って増加するものと考えられる。また一般の噴流の拡散のように支流流速の横方向の拡散量はその輸送距離と共に増加する関係があり、この輸送距離を示す代表寸法として支流の幅をとりそれぞれ無次元化してべき乗の関係を考える

$$\frac{\Delta u_s}{u_s} \propto \left(\frac{u_J}{u_0} \cdot \frac{D}{B} \right)^p$$

主流と支流の水深は合流点では等しいとすると

$$\frac{\Delta u_s}{u_s} \propto \left(\frac{Q_J}{Q_0} \right)^p \quad (3-9)$$

(3-9) 式の実験結果と比較すると図 3-4 のようになる。図中の直線は (3-10) 式である。

$$\frac{\Delta u_s}{u_s} = \frac{Q_J}{Q_0} \quad (3-10)$$

従って式 (3-10) を (3-7) 式へ代入し更にこれを (3-5) 式へ代入すると断面 I と断面 III の間の連続の式として (3-4) 式が得られる。

(iii) x_{\max} 図 3-5 のように断面 II と断面 III で囲まれた部分に

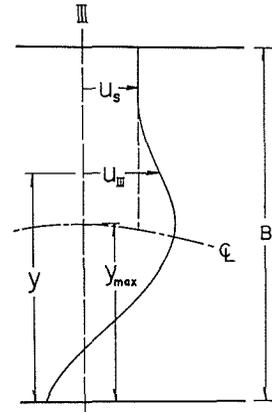


図 3-3 Definition Sketch of Flow at Section III

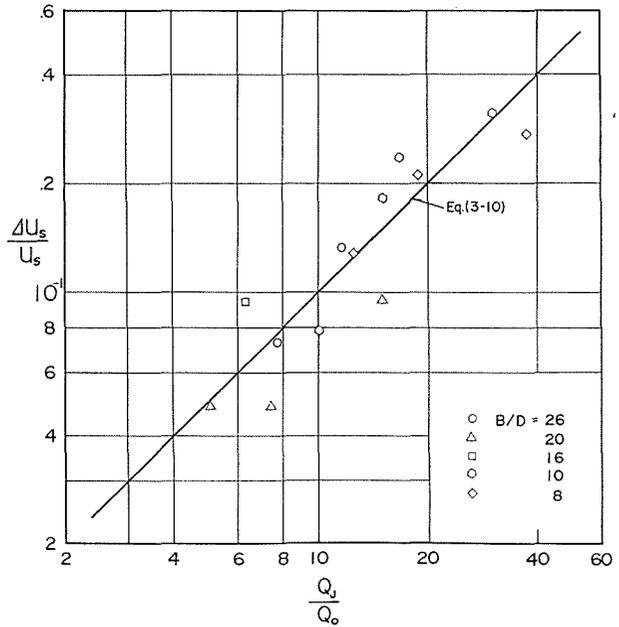


図 3-4 $\Delta u_s/u_s$ as a Function of Q_J/Q_0

ついて、 y 方向に運動量式を適用すると

$$\begin{aligned} \rho Q u_T + \frac{\omega}{2} h_T^2 D + \frac{\omega}{2} \int_{-\frac{D}{2}}^{x_{\max}} \{h(x, 0)\}^2 dx \\ = \frac{\omega}{2} \int_{-\frac{D}{2}}^{x_{\max}} \{h(x, B)\}^2 dx \end{aligned} \quad (3-11)$$

1.3 で略述したように断面 II における水面形は実験結果から、 $y=0$ で最大 ($h=h_T$) であって上流部の比エネルギーに等しく、 $y=0 \sim y_{\max}$ までは直線的に減少し以後は一定値 ($h=h_g$)

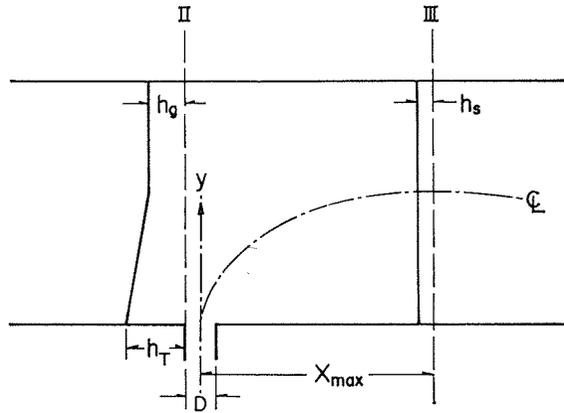


図 3-5 Definition Sketch of Flow at Section II and Section III

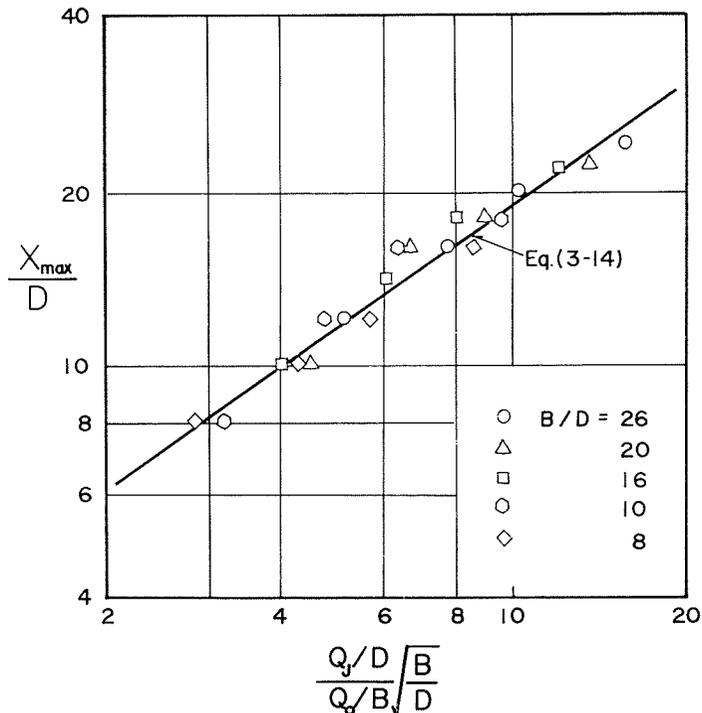


図 3-6 Position of Deepest Penetration of Tributary Flow

をとる事を知った。この水面形は後に 3.2 で述べるように断面 I との間で連続式及びベルヌーイ式を適用して求める事が出来る。以上の事から (3-11) 中の $h(x, 0)$ 及び $h(x, B)$ を断面 II から断面 III まで (3-12) および (3-13) 式の様に変化するとすると (3-11) 式から x_{\max} の値を求める事が出来る。

$$h(x, 0) = h_s \quad (3-12)$$

$$h(x, B) = h_g - (h_g - h_s) \frac{x + \frac{1}{2}D}{x_{\max} + \frac{1}{2}D} \quad (3-13)$$

この x_{\max} に関しては現在のところ実験による検討が不充分であり、仮定の適否が明確ではない。実用的には x_{\max} に対して (3-14) 式の実験式を得ている。

$$\frac{x_{\max}}{D} = 3.8 \left(\frac{Q_j/D}{Q_0/B} \sqrt{\frac{B}{D}} \right)^{0.7} \quad (3-14)$$

図 3-6 は (3-14) 式を実測値と比較して示したものである。(3-14) 式の右辺のパラメーターに関しては 3.3 で述べている。

3.2 主流の水面形

主流の水面形については、1.3 及び 3.2 でも触れているが本節ではそれらをも加えて水面形に関する解析を総括する。図 3-7 は水面形の略図である。主流の流れは常流である。

(i) 断面 I 断面 I は合流点の充分上流であり支流の流入による影響を受けない点である。流れは等流状態であり、水深は等流水深 h_0 で一様である。

(ii) 断面 II 断面 II ($x = -D/2$) における水面形は 3.1 (iii) で略述したように、実験結果からよみ点 $y=0$ で最大 ($h=h_g$) であってこの値は前述の断面 I における比エネル

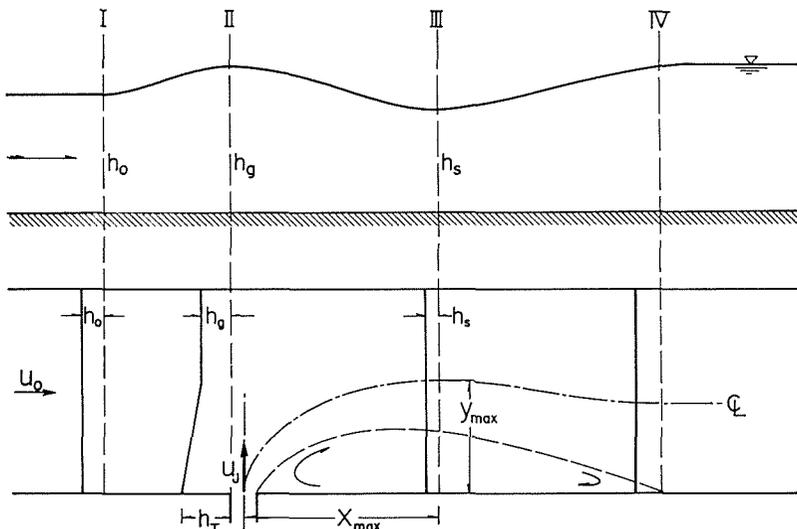


図 3-7 Schematic Representation of Distribution of Depth of Flow

ギーに等しく、 $y=0 \sim y_{\max}$ までは直線的に減少し、以後は ($y=y_{\max} \sim B$) 一定値 ($h=h_0$) をとる事を知った。即ち

$$h\left(-\frac{D}{2}, y\right) = \begin{cases} h_r - (h_r - h_0) \frac{y}{y_{\max}} & \text{但し } 0 \leq y \leq y_{\max} \\ h_0 & \text{但し } y_{\max} < y \leq B \end{cases} \quad (3-15)$$

断面 I, 断面 II 間でのベルヌーイの式は

$$h_0 + \frac{u_0^2}{2g} = h_r = h_0 + \frac{u_0^2}{2g} = h + \frac{u^2}{2g} \quad (3-16)$$

同じく連続の式は

$$Q_0 = (B - y_{\max}) h_0 u_0 + \int_0^{y_{\max}} h u dy \quad (3-17)$$

(3-15) 式を (3-16) 式へ代入すると $0 \leq y \leq y_{\max}$ に対して (3-18) 式が得られる。

$$u = \sqrt{\frac{2g}{y_{\max}} (h_r - h_0) \cdot y^{\frac{1}{2}}} \quad (3-18)$$

(3-15) 式と (3-18) 式とから

$$\begin{aligned} \int_0^{y_{\max}} h u dy &= \int_0^{y_{\max}} \left\{ h_r - (h_r - h_0) \cdot \frac{y}{y_{\max}} \right\} \left\{ \sqrt{\frac{2g}{y_{\max}} (h_r - h_0) \cdot y^{\frac{1}{2}}} \right\} dy \\ &= \frac{2}{15} (2h_r + 3h_0) \sqrt{2g(h_r - h_0)} y_{\max} \end{aligned} \quad (3-19)$$

(3-17) 式へ (3-15) 式および (3-19) 式を代入すると

$$Q_0 = \sqrt{2g(h_r - h_0)} \left\{ (B - y_{\max}) h_0 + \frac{2}{15} (2h_r + 3h_0) y_{\max} \right\} \quad (3-20)$$

従って (3-20) 式に 3.1 (ii) で求めた y_{\max} の値および断面 I での比エネルギー h_r を代入

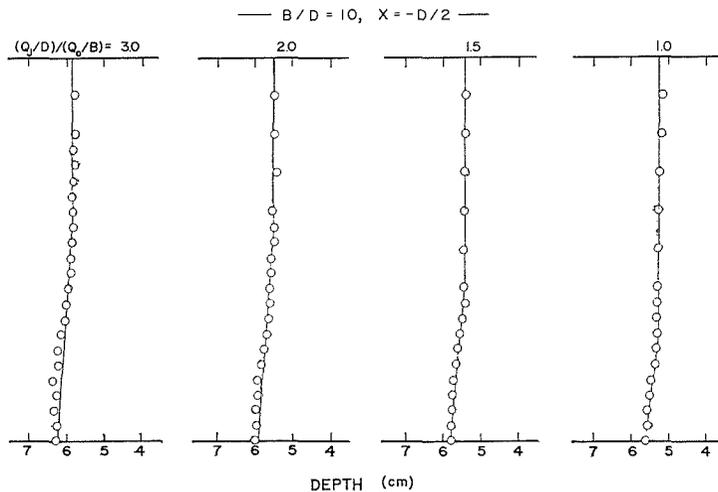


図 3-8 Distribution of Depth of Flow at Section II

すれば h_g の値が求められ、断面 II の水面形が得られる。図 3-8 は計算値と実測値とを比較して示したものである。

(iii) 断 面 III 支流の最大貫入点の断面である。水深 h_s は主流中での最小値をとり横断的には一様である。この値は 3.1 (ii) で詳述したように下記の 3 式から求められる。

$$\frac{w}{2} h_0^2 B + \rho Q_0 u_0 = \frac{w}{2} h_s^2 B + \rho Q_0 u_s + \rho Q_J u_J \tag{3-2}$$

$$h_0 + \frac{u_0^2}{2g} = h_s + (1 + f_s) \frac{u_s^2}{2g} \tag{3-3}$$

$$Q_0 = (B - y_{\max}) h_s \left(1 + \frac{Q_J}{Q_0} \right) u_s \tag{3-4}$$

断面 III 以下は漸次水深が増加し、断面 IV を経て主流流量に支流流量を加えた流量に対する等流水深に漸近して行く。

3.3 死水域の形状

一般に河川合流点の直下流には死水域が形成され、推砂が生じて河道を維持する上にもその大きさを知る事は重要な問題である。著者らはその大まかな性質を知る目的で、死水域の形状を表わす代表的な量として Reattaching Point³⁾ までの距離 x_R と死水域の中における逆流域が主流中に張出す最大幅 y_E に着目して実験による解析を試みた。

(i) Reattaching Point までの距離
Rouse⁴⁾ は滑走路上の霧を除去するために滑走路の風上側端から垂直に空気を噴出させ滑走路上に定常渦を作る事を目的として、低速風洞中で行なった実験結果を報告している。これは無限の拡がりを持つ横風中の拡散に対するものであり、主流が有限の幅を持っている場合とは異なるが、著者らの実験と比較した結果は図 3-9 のようである。 Q_J/D と Q_0/B との比が大になるにつれ、また B/D が小となるに従って Rouse の実験式と著者らの実験との相違は大きくなっている。

上記の結果を参照して、著者らは主流の幅の効果をも考慮したパラメーターによる解析を試みた。

図 3-9 から明らかのように、

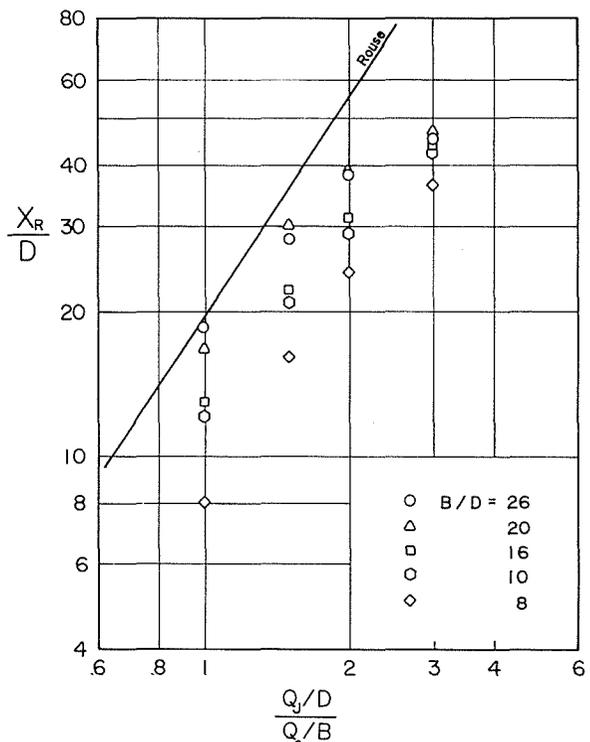


図 3-9 Position of Reattachment

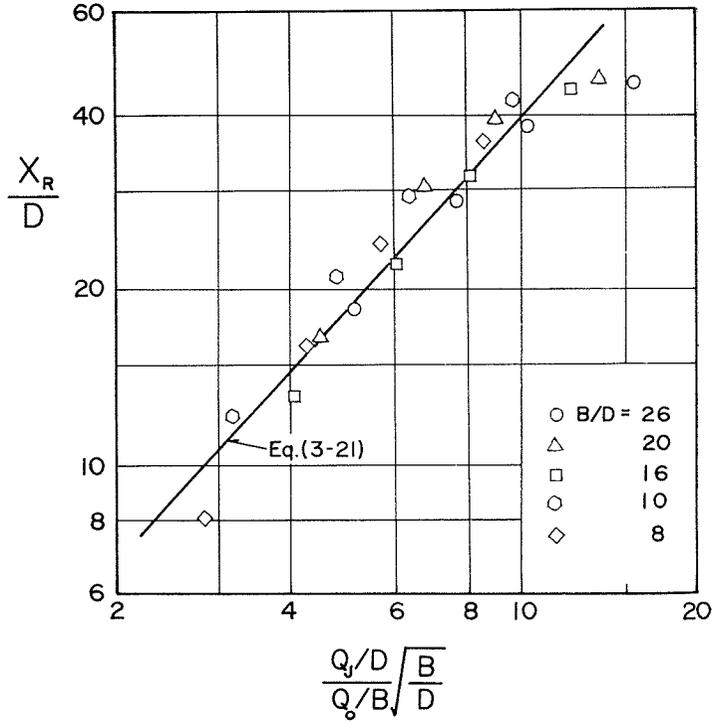


図 3-10 Position of Reattachment

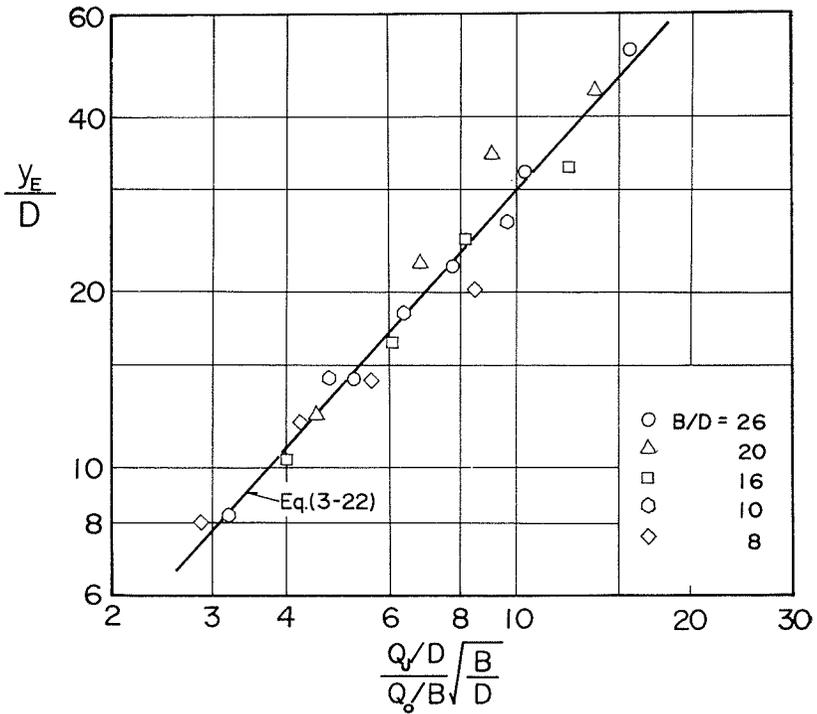


図 3-11 Maximum Width of Flow of Opposite Direction to Main Flow

Reattaching point までの距離 x_R は主流の幅の減少と共に抑制されて小となる傾向を示している。主流の幅を支流の幅によって無次元化して、べき乗の関数形を仮定し、実験による定数の決定を試みた結果、(3-21) 式の関係が得られた。図 3-10 は実測値と (3-21) 式とを比較して示したものである。

$$\frac{x_R}{D} = 3.2 \left(\frac{Q_j/D}{Q_0/B} \sqrt{\frac{B}{D}} \right)^{1.1} \quad (3-21)$$

(ii) 逆流域の最大幅 死水域が主流中に張り出す幅を代表する量として逆流域の大きさ、即ち比較的測定しやすい流速が 0 となる点までの距離に関して解析を行なった。逆流域が主流中に張り出す幅について (i) と同様な方法を適用した結果、(3-22) 式を得た。

図 3-11 は実測値と (3-22) 式とを比較したものである。

$$\frac{y_E}{D} = 0.23 \left(\frac{Q_j/D}{Q_0/B} \sqrt{\frac{B}{D}} \right)^{1.1} \quad (3-22)$$

(iii) 逆流域の形状 3.1 (i) で述べたように、支流中心の軌跡が相似である事から逆流域の形状も相似である事が予想される。

(3-21) 式および (3-22) 式から (3-23) 式の関係を得る事ができ、死水域の形状についても相似性のある事が明らかとなった。

$$\frac{y_E}{x_R} \doteq 0.07 \quad (3-23)$$

図 3-12 は逆流域の実測値を示したものである。

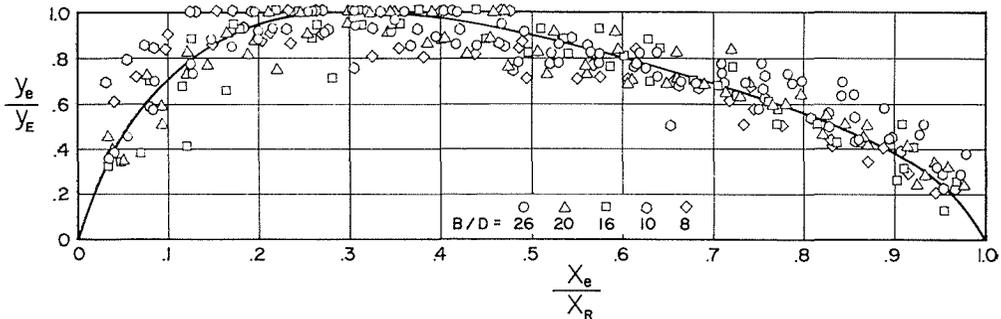


図 3-12 Distribution of Width of Flow of Opposite Direction to Main Flow

Rouse⁴⁾ は (i) で述べた実験から、渦全体の幅と x_R との比 (Relative eddy height) に関して図 3-13 中に実線で示した関係を得ている。もし死水域中の流速分布が対称であって、渦の幅が流速 0 の点までの距離の 2 倍と仮定すると Rouse の得た関係は図 3-13 中の破線のようにになる。 $(Q_j/D)/(Q_0/B)$ が小のところでは著者らの実測値と一致しているが $(Q_j/D)/(Q_0/B)$ が大となるに従って、実測値の方が下まわっている傾向にある。つまりこの事は著者らの実測値には主流の幅による影響が表われている事を示すものである。

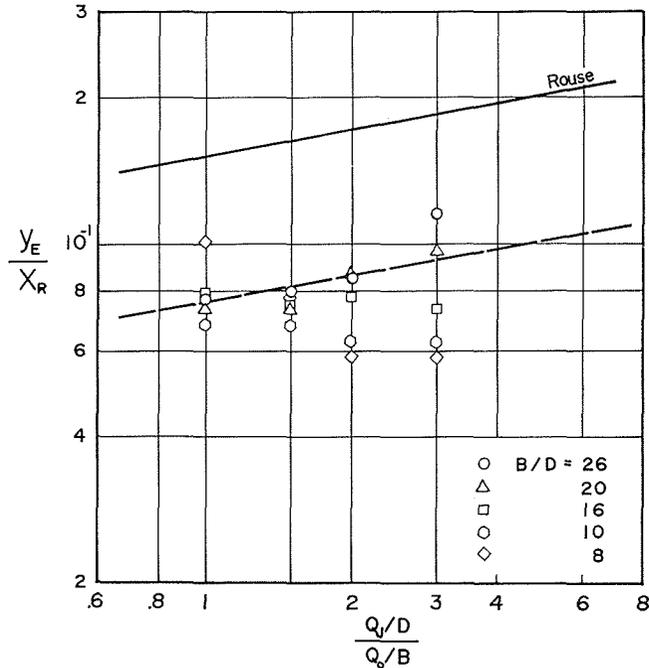


図 3-13 Relative Eddy Hight

3.4 流速分布

(i) 静水中に拡散する有限幅二次元自由噴流の流速分布^{5)~7)} 幅が無限に小さい slit から発する二次元自由噴流の流速分布に関しては古くから種々の理論的並びに実験的な解析が行なわれている^{8),9)}。それぞれ仮定などは異なっているが、最終的な分布型は細部を除けば非常に類似した型となっている。

Görtler¹⁰⁾ は Prandtl の第二仮説を用いて (3-24) 式の仮定から (3-25) 式の解を得ている。

$$\left. \begin{aligned} u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} &= \varepsilon \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \\ \varepsilon &= \varepsilon_l \sqrt{\frac{x}{l}}, \quad \sigma = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{l u_l}{\varepsilon_l}} \end{aligned} \right\} \quad (3-24)$$

$$\frac{u}{u_{ml}} = \sqrt{\frac{l}{x}} \left(1 - \tanh^2 \sigma \frac{y}{x} \right) \quad (3-25)$$

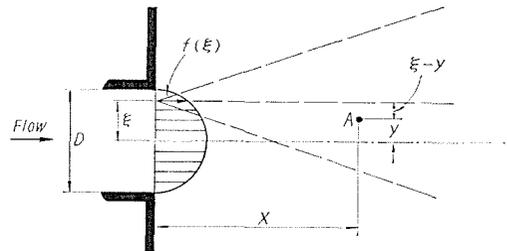


図 3-14 Schematic Representation of Diffusion of Jet with a Finite Width

いま、図 3-14 のような有限の幅 D を持った噴流を、無限小幅の噴流の集合と考え更に噴流の運動量は保存されると仮定すると、図 3-14 において $x=0, y=\xi$ から発した一個の無限小幅噴流の A 点における運動量は

$$\left(\frac{u}{u_{ml}} \right)^2 = \frac{l}{x} f(\xi)^2 \left(1 - \tanh^2 \sigma \frac{y-\xi}{x} \right)^2 \quad (3-26)$$

但し

$$L = (B - y) \sec \theta$$

(i) で述べたように Görtler の解は線形方程式によるものではないので、ここでは式中の実験定数 σ は一定とせず l によって変化すると考え、その中に解の重ね合わせの影響による変化も含めて考えるものとした。また、(3-29) 式の y' の範囲は θ によって大きく変化する事になるが、実際に (3-30) 式の計算を行なうと、支流の流速による影響 (右辺第一項) は y' の比較的小さな範囲で止まり、以後は一様な流速分布となるという事実に基づいて行なった近似である。

(3-30) 式を用いて支流の渦の側の流速分布の実測値から $Y = (y')_{u = \frac{1}{2} u_m}$ における値に対して σ を算出した結果を図 3-16 に示した。 $l/D \leq 10$ の範囲では σ はほぼ一定と考えられ $\sigma = 5.5 \sim 6.0$ である。(i) で述べたように著者らは、静水中への有限幅をもつ二次元自由噴流に対して $\sigma = 8.8$ を得たがその相違は、支流 (噴流) がその拡散係数 (静水中) よりも大きな拡散係数を持つ流水中へ流入するため、その影響を受けて見かけ上支流の拡散係数が大きな値となったものと考えられる。 $l/D \geq 10$ では、主流の幅の影響を受けて支流の拡散が抑制され σ は見かけ上増大するものと考えられる。

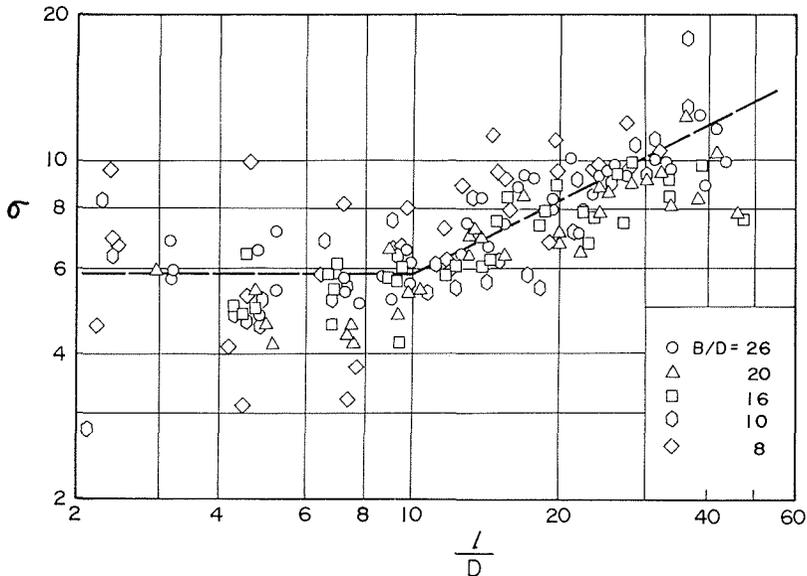


図 3-16 Variation of the Parameter, σ , with Distance along the Maximum Velocity Arc

著者らの実測では $\sigma \propto \sqrt{l}$ に近い傾向を示している。尚、斎藤¹⁶⁾ は Dodd の提案したモデルを用いた Coanda 効果に関する実験で $\sigma = 6.0$ を得ている。

σ の変化を図 3-16 中の直線のように仮定して (3-30) 式から求めた支流中心流速の変化の一例を実測値と比較して図 3-17 に示した。図 3-18 は支流の幅を表わす代表的な量として Y をとり、同様に (3-30) 式と実測値とを比較した一例である。図 3-19 は流速分布の一例である。

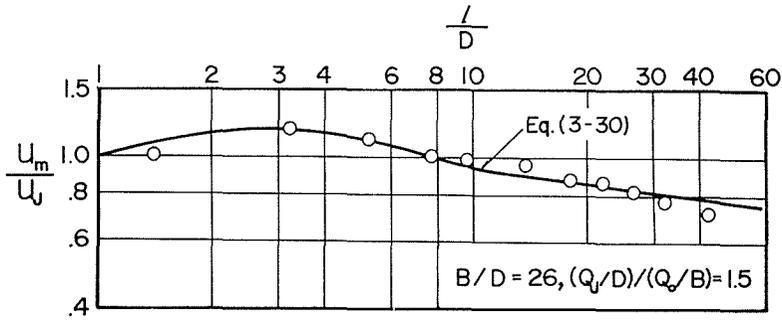


図 3-17 Variation of Maximum Velocity with Distance along the Maximum Velocity Arc

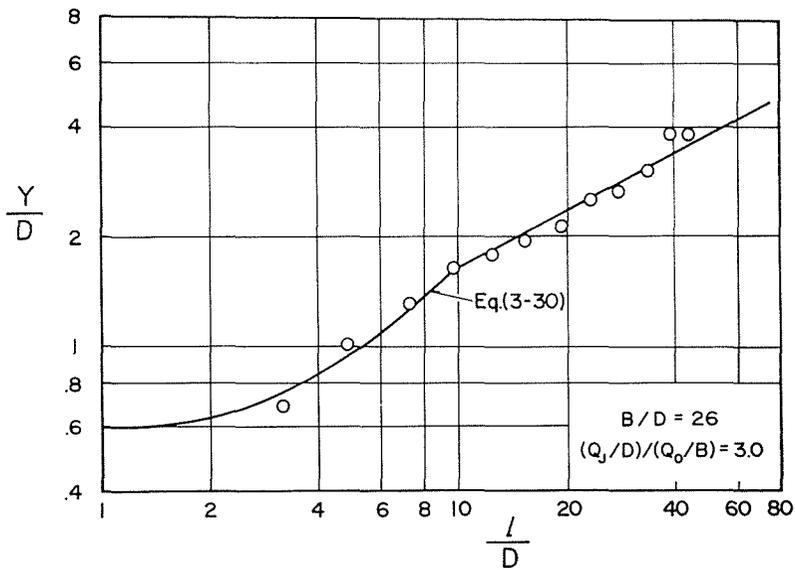


図 3-18 Variation of Width of Tributary Flow with Distance along the Maximum Velocity Arc

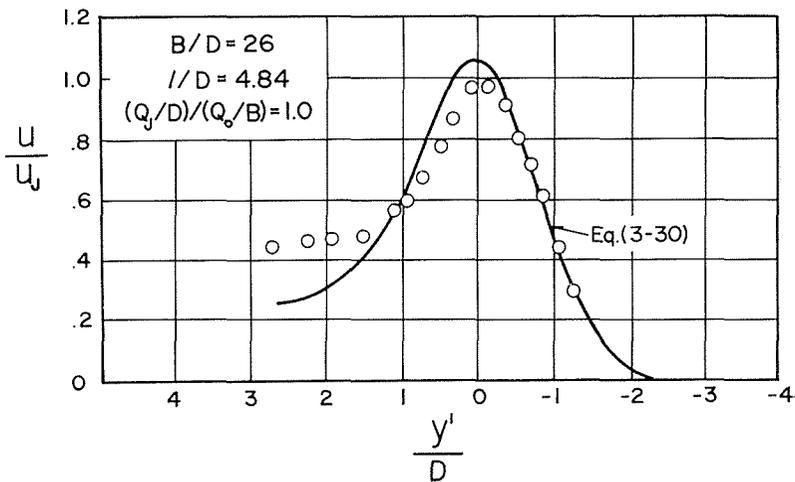


図 3-19 Lateral Velocity Distribution

3.5 合流による主流のエネルギー損失^{13),14)}

図3-20は $x = x_R$ (断面 IV) における実測の流速分布の一例を示したものである。この結果から断面 IV における流速分布を台形と仮定して、合流による主流のエネルギー損失を求めた。図3-21のように断面 I と断面 IV とを考え、 u_{IV} , b および h_{IV} を未知数とし、水深はともに横断方向には一様とする。

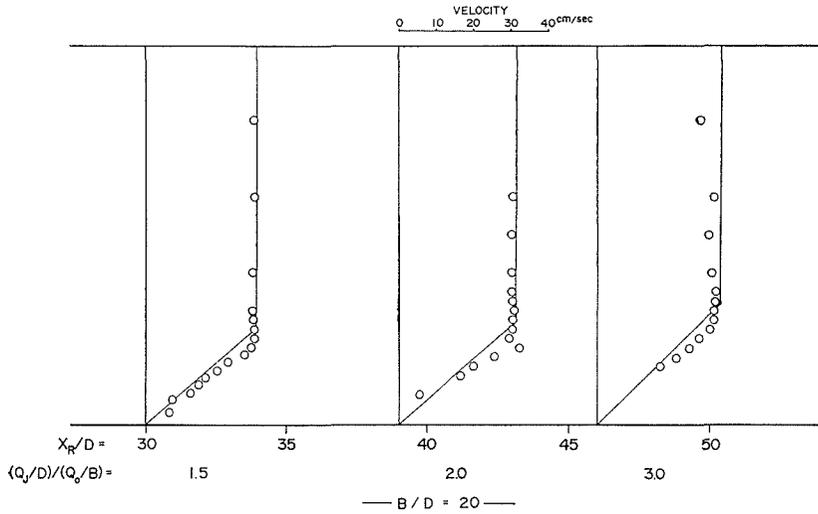


図 3-20 Lateral Velocity Distribution at the Reattaching Point (Section IV)

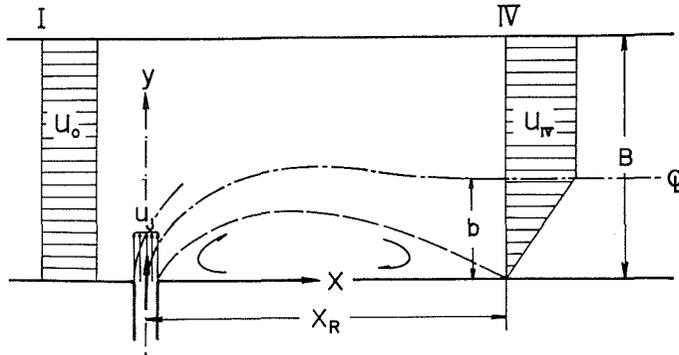


図 3-21 Schematic Representation of Flow at Section I and Section IV

x 方向の運動量の式は

$$\rho h_0 B u_0^2 + \frac{\omega}{2} B h_0^2 = \rho (B-b) h_{IV} u_{IV}^2 + \frac{1}{3} \rho b h_{IV} u_{IV}^2 + \frac{\omega}{2} B h_{IV}^2 \quad (3-31)$$

連続の式は

$$Q_0 + Q_J = (B-b) h_{IV} u_{IV} + \frac{1}{2} b h_{IV} u_{IV} \quad (3-32)$$

$y = B$ に沿ったベルヌーイの式は

$$\frac{u_0^2}{2g} + h_0 = (1-f_f) \frac{u_{fv}^2}{2g} + h_{fv} \quad (3-33)$$

(3-31) 式, (3-32) 式および (3-33) 式による計算値と実測値とを比較した結果, 合流前と合流後におけるエネルギーの損失係数 f_f の値は $f_f=0.02\sim 0.04$ であり, 主流の幅による影響についての傾向は明確ではなかった。管路の合流に対して同様の取扱いを行なった場合には $f_f=0.1\sim 0.3$ である事が知られて居り¹⁷⁾, 著者らの実測値の約 10 倍となっている。従って開水路の合流による主流のエネルギー損失は非常に小さく, 少なくとも著者らの実験の範囲内では殆んど無視できる大きさである。

4. 総 括

河川の合流が直角に行なわれる場合をモデル化し実験と併せて解析した結果, 大要次のような結論を得た。

i) 主流中に張出す支流中心の軌跡は, 川幅の比および流量の比に関係なく相似であり, 支流の最大貫入点までは楕円で表わされる。その軌跡を標準化する量については, 主流の水面形および流速分布から, 一つの補正係数を用いて決定する事ができる。

ii) 主流の最大水深は合流点の直上流に生じ, その横断的な分布は相似であり, i) で求めた値から決定する事ができる。一方, 主流の最小水深は支流の最大貫入点で生じ, 横断的にはほぼ一様である。その値はその点の速度水頭に主流の流速を支流と主流の流量比による補正を行なって求める事ができる。

iii) 合流点直下流に形成される死水域の形状は川幅および流量比に関係なく相似であり, 逆流域の長さおよび主流中に張り出す最大幅については, Rouse の示したパラメーターに川幅による影響を取り入れたパラメーターを提示した。

iv) 支流の流速分布に対しては噴流の集合によるモデルを考え Görtler による噴流の流速分布を適用して実験定数を定めた。 $l/D \leq 10$ では $\sigma=5.5\sim 6.0$ とほぼ一定であり自由噴流の場合と比較して小さな値を取る。 $l/D > 10$ では $\sigma \propto \sqrt{l}$ なる傾向がある事を知った。

v) 合流によるエネルギー損失はいずれの場合も非常に小さく, 管路の合流と同様の取扱いを行なうとその約 1/10 であった。

あ と が き

以上は河川の直角合流の単純なモデルについて, 解析を行なった結果であるが, 今後も継続してより複雑な場合に関して, より適格な解析の方法を研究して行く予定である。

この研究については本研究室の岸 力教授に懇切な御指導を戴いた事を記し, 著者らは深く感謝の意を表します。また, 実験および計算等に際して協力戴いた, 当時の土木工学科学生増永防夫, 小原欣五および同大学院学生須藤靖彦の三君に深く感謝致します。

参 考 文 献

- 1) Anwar, H.: Strömungsverhältnisse bei Flussvereinigungen, Karlsruhe, 1955, 石原藤次郎・本間仁編, 応用水理学, 中 II, 丸善, 昭和33年, pp. 81-82 より.
- 2) 新津 靖・加藤孝夫: エア・カーテンの性能および設計に関する研究, 衛生工業協会誌, 第34巻, 第12号, pp. 10-24, 昭和35年12月.
- 3) Bourque, C. and Newman, B. G.: Reattachment of a Two-Dimensional, Incompressible Jet to an Adjacent Flat Plate, *The Aeronautical Quarterly*, Vol. XI, pp. 201-232, 1960.
- 4) Rouse, H.: Diffusion in the Lee of a Two-Dimensional Jet, *Extracts of Proceedings, IXth International Congress of Applied Mechanics*, Vol. 1, pp. 307-315, 1957.
- 5) 岸 力・板倉忠興: Wall Jet に関する研究, 第18回土木学会年次学術講演会講演概要, II-37, 昭和38年5月.
- 6) 板倉忠興: 静水中における Jet の拡散, 第19回土木学会年次学術講演会講演概要, II-84, 昭和39年5月.
- 7) Itakura, T.: The Diffusion of a Skewed Horizontal Jet in a Still Water Basin on a Rough Flat Plate, *Progress Report, Hydraulics Laboratory, Engineering Research Center, Colorado State University*, September 1965.
- 8) Pai, S. I.: Fluid Dynamics of Jets, pp. 77-138, D. Van Nostrand Co., 1954.
- 9) 板倉忠興: 噴流の拡散について, 土木学会北海道支部研究発表会論文集 (技術資料第23号), pp. 23-28, 昭和42年2月.
- 10) Görtler, von H.: Berechnung von Aufgaben der freien Turbulenz auf Grund eines neuen Näherungsansatzes, *Z.A.M.M.*, Bd. 22, Nr. 5, pp. 224-254, Okt. 1942.
- 11) Newman, B. G.: The Deflexion of Plane Jets by Adjacent Boundaries—Coanda Effect, Ed. Lachmann, *Boundary Layer and Flow Control*, pp. 232-264, Pergamon Press, 1961.
- 12) Förthmann, E.: Über turbulente Strahlausbreitung, *Ing. Archiv*, Bd. 5, pp. 42-54, 1934.
- 13) 板倉忠興・石井千万太郎・増永防夫: 河川合流点における流れの機構の研究, 第22回土木学会年次学術講演会講演概要, II-72, 昭和42年5月.
- 14) Kishi, T. and Itakura, T.: Studies on Mechanics of River Confluence (Studies on Water Jets Discharging Normally into Water Flow), *Synthetic Hydrological Study for the Ishikari River Basin, 1966 Annual Report, Hydrology Research Group, Hokkaido University*, pp. 103-115, June 1967.
- 15) 板倉忠興・石井千万太郎: 河川合流点における流れの機構の研究, 第23回土木学会年次学術講演会講演概要, II-82, 昭和43年10月.
- 16) 斎藤 隆: 境界の影響を受ける水平噴流の特性, 第23回土木学会年次学術講演会講演概要, II-96, 昭和43年10月.
- 17) 土木学会編: 水理公式集 (昭和38年増補改訂版), pp. 154-155, 土木学会, 昭和38年.