

都市河川網における洪水追跡に関する二、三の検討

Some Studies on Flood Routing for Urban River Network

神戸大学工学部 正員 ○神田 徹

神戸大学大学院 学生員 桑田明仁

1. まえがき

近年、都市河川流域では内水災害に対処するための下水道網の整備と排水ポンプ場の設置が進められつつある。これらの堤内地排水が流入する河川については、その形状、構造が極めて人為的に改変された結果、多くの分・合流点をもつ開水路網が形成され、あるいは河道に沿う多数のポンプ排水地点で大量の横流入量をうけることがその特徴である。このような特徴から生ずる洪水追跡上の問題を、水理学的特性に関するものと計算手法に関するものに分類すれば、前者では分・合流点における流れの特性、後者では流れの急激な変化（時間的および空間的）による計算の安定性の問題¹⁾、河川網の複雑化・大規模化を克服するための求解アルゴリズムの問題等が主要なものであろう。

分・合流点近傍の流れに関しては、古くはAnwar, E.H.Taylorの研究やunconfined cross flow に流入する噴流を扱ったRouseの研究等があり、近年では confined cross flow 中の噴流の軌跡に関する板倉²⁾、Mikhail³⁾の研究等がある。本研究では、洪水追跡計算へ導入する合流点条件を得ることを目的として、合流部の流れが合流角度、本流と支流の流量比、本流と支流の水路幅比によっていかなる特性をもつかを定量的に検討する。

水路網の流れの解析法に関しては、管路網に対するCross法が有効であることは周知の通りであるが、最近グラフ理論を応用した計算法が常松⁴⁾により提案されている。筆者ら⁵⁾は開水路網に対して、分・合流点の水理学的条件を考慮したシステムのモデル化と行列を用いた計算法を提示した。しかしこの方法に限らず他の逐次計算法においても、基礎方程式の非線形性によって解の収束が保証されないから、大規模な水路網に対しては解の収束の良否がその解法の有効性の重要な鍵を握ることが考えられる。本研究はこの観点から、基礎方程式の非線形性にとまらぬ解の収束性について基礎的な考察を加えたものであり、合流部および分流部についてNewton-Raphson法による解の収束条件をしらべるとともに、全河道システムに対する収束条件とこれらのサブシステムの収束条件との関連性について検討する。

2. 合流部の流れの水理学的特性

2. 1 流況について

実験水路は図-1に示すように真直な本流とこれに合流する支流からなり、底勾配は水平で断面形状は矩形である。

図-2は合流角度が 90° と 30° の場合の縦断方向の水面形を示したものであり、合流角度および本流に対する支流の流量比 Q_2/Q_1 によっては、合流点の上・下流の水位差は無視することができない。図-3は水面での流速分布を示したもので、

支流水路から流入した流れの軌跡が合流角度によって著しく異なることがわかる。

合流角度、流量比によるこのような流況の相異は、合流点下流に生ずる循環渦と密接に関係している。写真-1,2,3に示すように、合流角度が大きい場合には合流点直下流に渦が発生し渦列となって下流に移動する。この

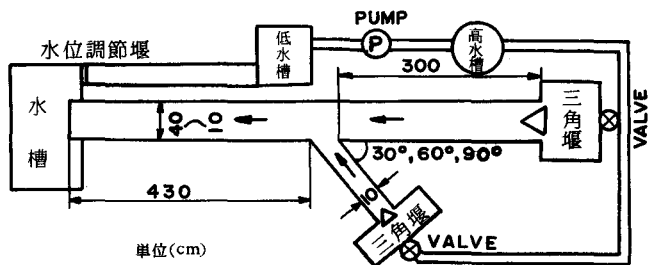


図-1 実験装置

渦領域の規模は渦の変形にともなって不規則に変動するが、その長さ（流れの方向）、幅ともに合流角度の増加、支流流量（あるいは運動量）の増加、本流水路幅の増加とともに増大する。この渦領域の存在によって合流点下流の流速分布は複雑になり、水位も縦横断方向に大きく変化する。これに対して、合流角度が30°になれば渦の規模はほとんど無視しうる程度になり、両水路からの流れは分離したまま平行に流れるので、合流による混合の機構は合流角度90°の場合と異なる。

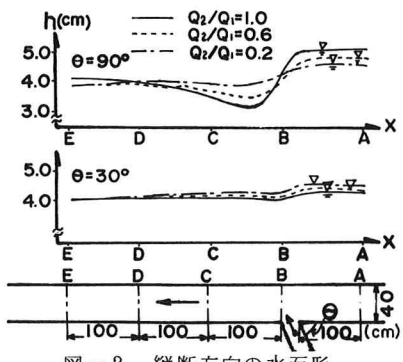


図-2 縦断方向の水面形

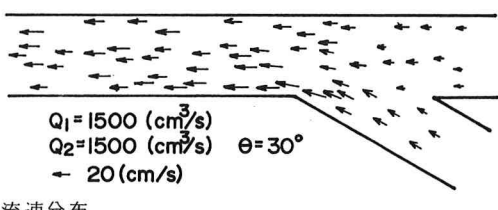
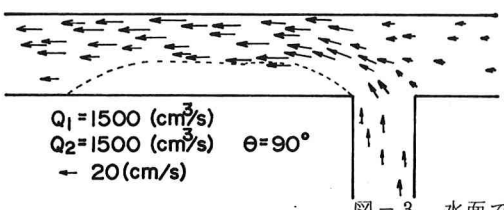


図-3 水面での流速分布

2.2 合流点近傍の流れの一次元解析⁶⁾

合流部の流れに一次元解析を適用するために、上述の渦領域の存在を考慮して図-4のような検査断面をとれば、運動量方程式と連続方程式は次のように与えられる。ここに下流検査断面Ⅲは合流点から本流水路幅の10倍だけ離れた断面とする。

$$\rho \beta_3 B v_3^2 h_3 - \rho \beta_1 B v_1^2 h_1 - \rho \beta_2 b v_2^2 h_2 \cos \theta = \rho g B \left(\frac{h_1^2}{2} - \frac{h_3^2}{2} \right) + \rho g b \frac{h_2^2}{2} \cos \theta - F \sin \theta \quad (1)$$

$$Q_1 + Q_2 = Q_3 \quad (2)$$

ここに、 β は運動量補正係数、 F は合流部の支流側壁OPに作用する圧力で次式のように仮定する。

$$F = \frac{1}{12} \rho g b (4 h_2^2 + h_2 h_3 + h_3^2) \cot \theta \quad (3)$$

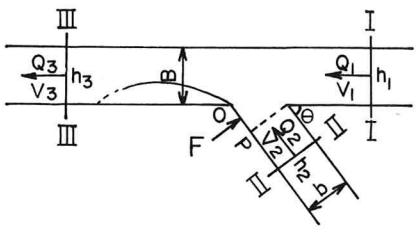


図-4 合流部の control volume

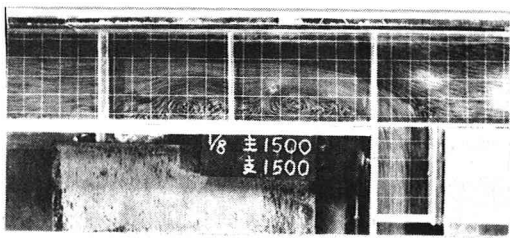


写真-1 $Q_1 = 1500, Q_2 = 1500 (\text{cm}^3/\text{s}), \theta = 90^\circ$

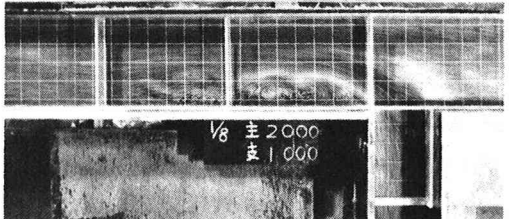


写真-2 $Q_1 = 2000, Q_2 = 1000 (\text{cm}^3/\text{s}), \theta = 90^\circ$

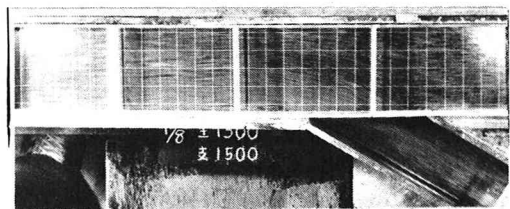


写真-3 $Q_1 = 1500, Q_2 = 1500 (\text{cm}^3/\text{s}), \theta = 30^\circ$

(1), (2), (3)式から、合流点上下流の水位差（本流）に関して次式が得られる。

$$\begin{aligned} & \left(1 - \frac{B'k^2 \cos \theta}{3}\right) \Delta h'^3 + \left(3 + \frac{B'(6k^2 - k)}{6} \cos \theta\right) \Delta h'^2 + \left(2 + \frac{B'(6k^2 - 2k - 1)}{6} \cos \theta - 2\beta_3 F_r^2\right) \Delta h' \\ & + 2\beta_1 F_r^2 \frac{1}{(1+r)^2} + 2\beta_2 F_r^2 \frac{r^2}{B'k(1+r)^2} \cos \theta - 2\beta_3 F_r^2 + \frac{B'(2k^2 - k - 1)}{6} \cos \theta = 0 \end{aligned} \quad (4)$$

ここに、 $\Delta h' = \Delta h_1 / h_3$ 、 $\Delta h_1 = h_1 - h_3$ 、 $k = h_2 / h_1$ 、 $r = Q_2 / Q_1$ 、 $B' = b / B$ 、 $F_r = v_3 / \sqrt{g h_3}$

上式において、 F_r 、 r 、 B' 、 θ 、 β_i ($i = 1, 2, 3$)、 k の値が与えられると $\Delta h'$ が求められ、水位差 ($h_1 - h_3$) および ($h_2 - h_3$) が得られる。ここに B' 、 θ は水路条件から定まり、 r 、 F_r は流量と下流水深が与えられれば定まる。一方、 β_i 、 k は本来、 $\Delta h'$ と同様に未知量であるが、本研究では実験定数とみなして実験的にその値を決定する。

ここで、合流点の上・下流断面間の比エネルギーの変化を、管路における取扱いに準じて次式で表わす。

$$\Delta h_{D1} = \left(\alpha_i \frac{v_i^2}{2g} + h_i\right) - \left(\alpha_3 \frac{v_3^2}{2g} + h_3\right) \equiv f_{D1} \frac{v_3^2}{2g} \quad (i = 1, 2) \quad (5)$$

ここに、 α はエネルギー補正係数、 f_{Di} は次式で定義される係数である。

$$\left. \begin{aligned} f_{D1} &= \frac{\alpha_1}{(1+r)^2 (\Delta h' + 1)^2} - \alpha_3 + 2 \frac{\Delta h'}{F_r^2} \\ f_{D2} &= \frac{\alpha_2 r^2}{(1+r)^2 B'^2 k^2 (\Delta h' + 1)^2} - \alpha_3 + \frac{2}{F_r^2} (k \Delta h' + k - 1) \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

2.3 実験結果と考察

検査断面における流速分布から算定した β および α の値は、本流水路幅が20 cmより狭い場合にはほぼ1.0の値をとり、水路幅が40 cmの場合には下流検査断面での値が流量比の増加とともに大きくなり、流量比が1.0のとき合流角度が 60° 以下では $\beta_3 \approx 1.05$ 、 $\alpha_3 \approx 1.1$ 、合流角度が 90° では $\beta_3 \approx 1.1$ 、 $\alpha_3 \approx 1.3$ の値をとる。また水深比 $k = h_2 / h_1$ の値は図-5に示すように、水路幅比 $B' = 0.25$ 、合流角度 $\theta = 90^\circ$ の場合を除けば、 $k = 1.00 \pm 0.03$ の範囲にある。係数 f_{D1} 、 f_{D2} について、(5)式から求めた実験値と(4)、(6)式から求めた計算値とを比較すれば図-6に示すごとくである。両者の一致は良好であ

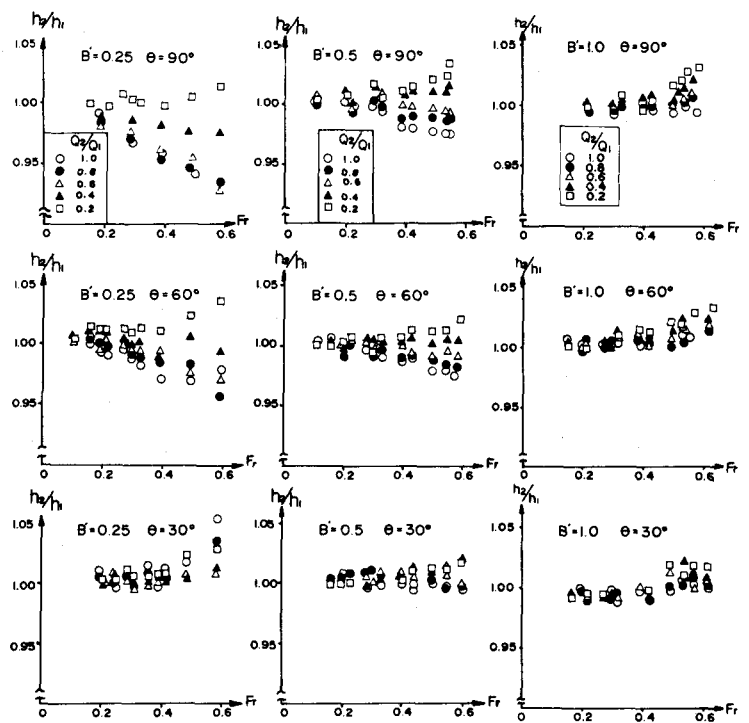


図-5 水深比、 $k = h_2 / h_1$

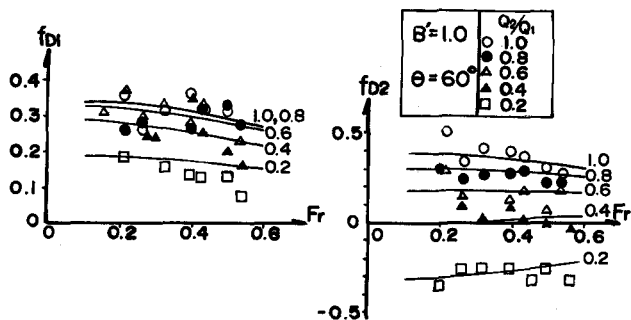


図-6 f_{Di} の計算値と実験値との比較

り、したがって運動量方程式を用いて f_{D1} , f_{D2} の値を求め得ることが確認された。また、図-6 から明らかに、 f_{D1} , f_{D2} の値に対する下流フルード数 Fr の影響は小さいから、合流角度、水路幅比、流量比が一定であれば、比エネルギーの変化量は $(v_3^2/2g)$ にほぼ比例する。

この係数の値に及ぼす流量比、合流角度、水路幅比の影響を示せば図-7 のようである。水路幅比を一定とすれば、合流角度の増加とともに f_{D1} , f_{D2} は大きな値をとる。合流角度を一定とすれば、水路幅比の増加とともに f_{D1} は大きな値をとり、 f_{D2} は小さな値をとる。また合流角度、水路幅比にかかわらず、流量比の増減にともなう f_{D1} の値の変化は僅かであるが、 f_{D2} は水路幅比が小さい場合には流量比の増加とともにかなり大きな値をとる。

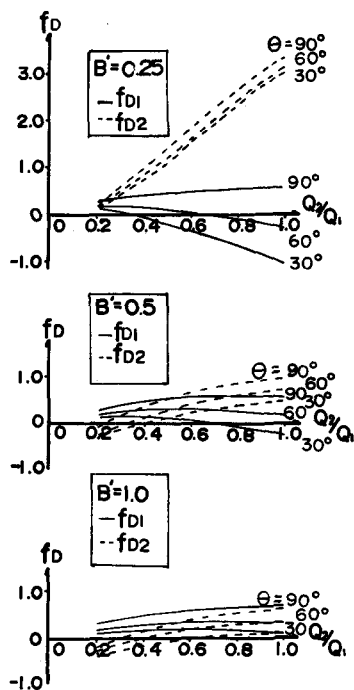


図-7 $f_{Di} \sim Q_2/Q_1, B', \theta$

開水路網における洪水流計算では、河道形状から合流角度と水路幅比が定まるから、 f_{D1} , f_{D2} の値を流量比の関数として指定すればよい。本実験の範囲ではその変動幅は比較的小さく ($f_{D1} = -1.0 \sim 0.7$, $f_{D2} = -0.4 \sim 2.9$)、また合流角度、水路幅比の変化に対しても連続的に変化することから、(5)式による合流点条件の定式化は妥当なものと考えられる。

3. 河川網における数値解の収束性

3.1 基礎方程式

開水路網を、分・合流部や曲がり部のように水理量が急変する部分と摩擦損失によって水理量が漸変する部分の2つのサブシステムから構成されるものとして図-8 のように有向グラフで表わす。ここに、節点定義量として水深を与え、枝定義量として流量を与える。

基礎方程式は以下のように表わされる。

(1) 連続方程式

$$A Q = Q_i \quad (7)$$

ここに、節点数を n 、枝数を m とすれば、 A は $(n-1, m)$ の接続行列、 Q は m 行の列ベクトル、 Q_i は系外から流入する流量を成分とする $(n-1)$ 行の列ベクトルである。

(2) 運動方程式

$$\varphi_x - \varphi_{x+1} = \Delta h_y \quad (8)$$

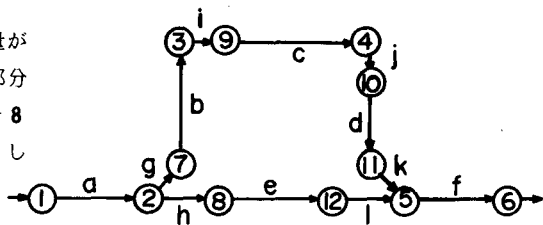


図-8 河川網の有向グラフ表示

ここに、 φ_x, φ_{x+1} は枝 y をはさむ節点 $x, (x+1)$ における全水頭、 $\varphi = v^2/2g + h + z$ 、 Δh_y は摩擦損失水頭、あるいは合流、分流、曲がりによる比エネルギーの変化量である。合流部に対する Δh_y として前節で定式化した合流点条件を導入し、また分流部に対してもこれに準ずれば、運動方程式はそれぞれ次式で表われる。

(合流部)

$$\left. \begin{aligned} \frac{Q_a^2}{2gB_a^2h_1^2} + h_1 - \frac{Q_c^2}{2gB_c^2h_3^2} - h_3 - f_{Da} \frac{Q_c^2}{2gB_c^2h_3^2} &= 0 \\ \frac{Q_b^2}{2gB_b^2h_2^2} + h_2 - \frac{Q_c^2}{2gB_c^2h_3^2} - h_3 - f_{Db} \frac{Q_c^2}{2gB_c^2h_3^2} &= 0 \\ -Q_a - Q_b + Q_c &= 0 \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

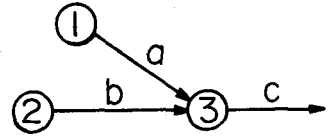


図-9 合流部

(分流部)

$$\left. \begin{aligned} \frac{Q_a^2}{2gB_a^2h_1^2} + h_1 - \frac{Q_b^2}{2gB_b^2h_2^2} - h_2 - f_{Db} \frac{Q_b^2}{2gB_b^2h_2^2} &= 0 \\ \frac{Q_a^2}{2gB_a^2h_1^2} + h_1 - \frac{Q_c^2}{2gB_c^2h_3^2} - h_3 - f_{Dc} \frac{Q_c^2}{2gB_c^2h_3^2} &= 0 \\ -Q_a + Q_b + Q_c &= 0 \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

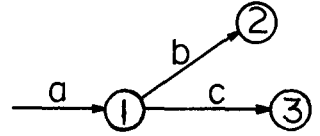


図-10 分流部

同様に各枝に対する運動方程式をたて、それらを行列表示すれば次式となる。

$$\begin{aligned} F(h, Q) &= \frac{1}{2g} (BQ_2 A_1^t + K_1 BQ_2 A_2^t) h_2 - \frac{1}{2g} BQ_2 D_1 + A^t(h+z) - D_2 \\ &- \frac{1}{2g} FL \{ B|Q|Q(A^U R + A^M) + K_1 B|Q|QK_2 \} h_2 + B|Q|QD_3 \} = 0 \end{aligned} \quad (11)$$

ここに、 A_1^t, A_2^t は A の転置行列から得られる行列、 B は $1/B_m^2$ を対角成分とする (m, m) の対角行列、 h_2 は $1/h_n^2$ を成分とする $(n-1)$ 行の列ベクトル、 Q_2 は Q_m^2 を対角成分とする (m, m) の対角行列、 D_1, D_2, D_3 は最下流点の水理量のみを有する m 行の列ベクトル、 L は枝の長さ L_m を成分とする (m, m) の対角行列、ただし、合流部、分流部、曲がり部では $L_m = 1$ 、 A^U は水路部のみに関係する $(m, n-1)$ の行列、 A^M は分流部、曲がり部のみに関係する $(m, n-1)$ の行列である(記号の詳細は文献5)を参照されたい)。

3.2 合流部および分流部の解の収束性

(9)式、あるいは(10)式において、 $h_1, h_2, h_3, Q_a, Q_b, Q_c$ のうち3つを既知量、残りの3つを未知量として解を求める。解法はNewton-Raphson法である。表-1, 2は、未知量である流量(2個)、水深(1個)の組合せおよびそれらの初期仮定値 Q_0, h_0 によって、どのような収束状況があらわれるかを示したものである。ここに、計算条件は、合流部—— $B_a = 0.8, B_b = 1.0, B_c = 1.0(\text{m}), f_{Da} = 1.5, f_{Db} = 1.0,$

$h = 0.42 \sim 0.52(\text{m}), Q_a = 0.24, Q_b = 0.16, Q_c = 0.40(\text{m}^3/\text{s})$ 。分流部—— $B_a = 1.0, B_b = 0.8, B_c = 1.0(\text{m}), f_{Db} = 4.0, f_{Dc} = 2.5, h = 0.48 \sim 0.50(\text{m}), Q_a = 0.40, Q_b = 0.16, Q_c = 0.24(\text{m}^3/\text{s})$

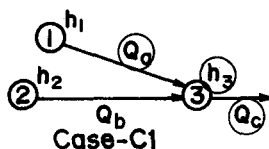
表-1, 2から、合流部と分流部の解の収束性について次のような事項が明らかになった。

(1) 正しい解(常流水深)に収束させるためには、初期水深の値を大きくとればよい。初期流量の値は若干影響するが、非常に大きな初期値を仮定しない限り、初期水深の与え方が解の性状に対して支配的である。

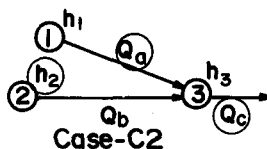
(2) 分流部ではいかなる初期値を与えても流量は正しい解に収束する。水深は3種類の解(常流水深、射流水深、負の値)があらわれ、初期水深に正解値(常流解)より小さな値を与える場合に射流解が生ずる。

(3) 合流部では合流点下流の水深が未知の場合(Case-C1, Case-C5)には、流量に負の値があらわ

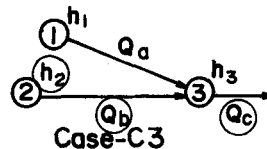
h ₁	Q ₁	Q ₂	Q ₃	Q ₄	Q ₅	Q ₆	Q ₇	Q ₈	Q ₉	Q ₁₀
0.1	5	6	14	7	6	13	14	2	29	14
0.2	7	4	8	18	11	11	7	5	7	7
0.3	8	6	4	3	9	26	18	19	13	11
0.4	9	7	5	14	4	4	8	17	24	26
0.5	9	8	5	11	7	5	5	5	9	5
0.6	10	8	5	8	4	7	6	5	6	5
0.7	10	8	7	13	17	9	7	6	5	5
0.8	10	8	7	16	12	5	9	7	6	5
0.9	10	9	7	10	5	11	11	8	7	6
1.0	11	9	7	6	7	9	5	10	6	7



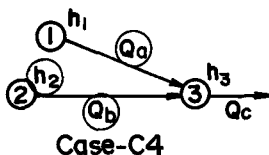
h ₁	Q ₁	Q ₂	Q ₃	Q ₄	Q ₅	Q ₆	Q ₇	Q ₈	Q ₉	Q ₁₀
0.1	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5
0.2	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4
0.3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3
0.4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4
0.5	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4
0.6	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4
0.7	4	4	3	4	4	4	4	3	3	3
0.8	5	5	4	4	4	4	4	4	4	4
0.9	5	5	4	4	4	4	4	4	4	4
1.0	5	6	4	4	4	4	4	4	4	4



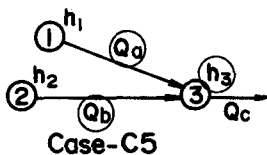
h ₁	Q ₁	Q ₂	Q ₃	Q ₄	Q ₅	Q ₆	Q ₇	Q ₈	Q ₉	Q ₁₀
0.1	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5
0.2	5	4	4	4	4	4	4	4	4	4
0.3	4	3	3	3	3	3	3	3	3	3
0.4	5	5	3	3	3	3	2	2	2	2
0.5	5	10	4	3	3	3	3	3	3	3
0.6	5	4	4	4	4	4	4	4	4	4
0.7	4	7	5	4	4	4	4	4	4	4
0.8	5	9	5	4	4	4	4	4	4	4
0.9	5	8	7	5	4	4	4	4	4	4
1.0	5	7	11	6	5	5	5	5	5	4



h ₁	Q ₁	Q ₂	Q ₃	Q ₄	Q ₅	Q ₆	Q ₇	Q ₈	Q ₉	Q ₁₀
0.1	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4
0.2	4	3	3	3	3	3	3	3	3	3
0.3	4	4	3	3	3	3	3	3	3	3
0.4	5	5	4	4	4	4	4	4	4	4
0.5	5	4	4	4	4	4	4	4	4	4
0.6	4	7	8	4	4	4	4	4	4	4
0.7	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5
0.8	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5
0.9	4	11	11	5	5	5	5	5	5	5
1.0	4	8	7	5	5	5	5	5	5	5



h ₁	Q ₁	Q ₂	Q ₃	Q ₄	Q ₅	Q ₆	Q ₇	Q ₈	Q ₉	Q ₁₀
0.1	7	5	5	4	4	4	4	4	4	4
0.2	7	5	5	3	3	3	4	4	4	4
0.3	7	5	5	3	3	3	4	4	4	4
0.4	7	4	5	4	3	3	4	4	4	4
0.5	7	5	6	5	4	3	4	4	4	4
0.6	7	5	6	6	5	4	3	3	4	4
0.7	7	5	4	6	5	5	4	3	3	3
0.8	7	5	4	10	5	5	4	4	4	4
0.9	7	5	5	7	5	8	6	5	5	5
1.0	7	5	5	9	5	5	6	9	10	7



(h), (Q) : unknown

h, Q : known

○ 常流水深 } 正しい
● 射流水深 } 流量解
△ 負の水深 }

▲ 負の流量

⊗ 負の水深, 正しくない流量

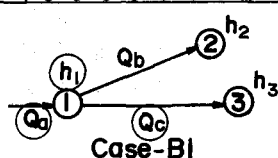
添字は収束回数

表-1 合流部の解の収束性

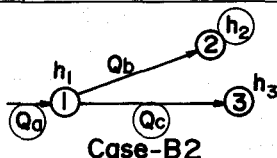
れたり、正の値であっても正しい解と程遠い値をとる場合がある。そしてこの流量に対して種々の水深が存在する。このケース以外は分流部と同様に、流量が正解でそれに対する8種類の水深が得られる。これらは次の理由によるものと考えられる。(9)式において、一般に流量の収束性が水深の収束性よりもすぐれている。したがって、流量が正解値に近づいた段階ではCase-C2, Case-C3, Case-C4では(9)式中の1つの式だけに未知量 h が含まれ、解は比較的収束しやすい。これに対してCase-C1, Case-C5では未知量 h は2つの式にまたがっているため、水深、流量ともに正解値に近づきにくいと考えられる。

(4) 各ケースの収束状況は未知量がどの水路に分布しているかに関係している。すなわち、合流部では上流の2つの水路、分流部では下流の2つの水路に未知量が分散している場合(Case-C2, Case-B2)の方が、一方の水路に未知量が集まっている場合(Case-C3, Case-B3)に比べて収束性がよい。

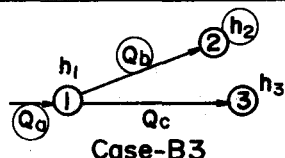
Q ₀	Q ₁	Q ₂	Q ₃	Q ₄	Q ₅	Q ₆	Q ₇	Q ₈	Q ₉	Q ₁₀
0.1	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4
0.2	0.3	0.4	0.4	0.2	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3
0.3	0.3	0.4	0.4	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3
0.4	0.4	0.6	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4
0.5	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4
0.6	0.5	0.5	0.5	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4
0.7	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5
0.8	0.5	0.5	0.6	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5
0.9	0.6	0.5	0.6	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5
1.0	0.5	0.5	0.5	0.5	0.6	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5



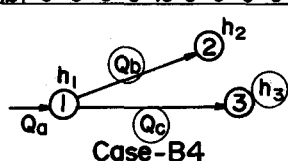
Q ₀	Q ₁	Q ₂	Q ₃	Q ₄	Q ₅	Q ₆	Q ₇	Q ₈	Q ₉	Q ₁₀
0.1	0.5	0.5	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4
0.2	0.5	0.5	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4
0.3	0.5	0.5	0.4	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3
0.4	0.5	0.6	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4
0.5	0.5	0.6	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4
0.6	0.5	0.6	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5
0.7	0.5	0.6	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5
0.8	0.5	0.7	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5
0.9	0.5	0.7	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5
1.0	0.6	0.7	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6



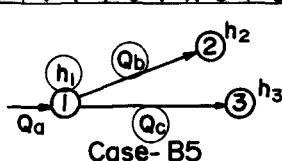
Q ₀	Q ₁	Q ₂	Q ₃	Q ₄	Q ₅	Q ₆	Q ₇	Q ₈	Q ₉	Q ₁₀
0.1	0.1	0.5	0.5	0.7	0.7	0.7	0.6	0.10	0.9	0.7
0.2	0.5	0.5	0.4	0.6	0.10	0.5	0.5	0.4	0.4	0.4
0.3	0.7	0.4	0.5	0.4	0.4	0.4	0.4	0.3	0.4	0.4
0.4	0.7	0.5	0.5	0.5	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3
0.5	0.7	0.5	0.5	0.8	0.7	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4
0.6	0.8	0.5	0.4	0.8	0.5	0.8	0.5	0.5	0.4	0.4
0.7	0.8	0.6	0.5	0.7	0.6	0.4	0.4	0.6	0.8	0.6
0.8	0.8	0.6	0.5	0.5	0.4	0.4	0.4	0.9	0.5	0.5
0.9	0.8	0.6	0.5	0.6	0.15	0.4	0.5	0.4	0.5	0.5
1.0	0.8	0.6	0.5	0.6	0.5	0.5	0.4	0.5	0.4	0.5



Q ₀	Q ₁	Q ₂	Q ₃	Q ₄	Q ₅	Q ₆	Q ₇	Q ₈	Q ₉	Q ₁₀
0.1	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4
0.2	0.4	0.7	0.4	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3
0.3	0.5	0.4	0.5	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4
0.4	0.6	0.4	0.8	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5
0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5
0.6	0.5	0.7	0.6	0.6	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5
0.7	0.7	0.5	0.5	0.8	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5
0.8	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6
0.9	0.6	0.7	0.6	0.4	0.8	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6
1.0	0.9	0.6	0.8	0.6	0.13	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6



Q ₀	Q ₁	Q ₂	Q ₃	Q ₄	Q ₅	Q ₆	Q ₇	Q ₈	Q ₉	Q ₁₀
0.1	0.5	0.6	0.4	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3
0.2	0.5	0.6	0.4	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3
0.3	0.5	0.6	0.4	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3
0.4	0.4	0.5	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4
0.5	0.4	0.5	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4
0.6	0.4	0.6	0.6	0.5	0.5	0.5	0.4	0.4	0.4	0.4
0.7	0.4	0.4	0.11	0.4	0.7	0.16	0.7	0.7	0.5	0.5
0.8	0.4	0.4	0.5	0.7	0.7	0.6	0.5	0.5	0.4	0.4
0.9	0.4	0.4	0.5	0.7	0.7	0.6	0.6	0.9	0.10	0.12
1.0	0.4	0.4	0.4	0.6	0.7	0.14	0.8	0.7	0.6	0.6



(h), (Q) : unknown

h, Q : known

○ 常流水深

● 射流水深

△ 負の水深

添字は収束回数

表-2 分流部の解の収束性

3.3 河川網の解の特性

(7)式, (11)式をNewton-Raphson法で解き, 12本の枝の流量と11個の節点の水深を求める。各枝に同一の初期流量を仮定し, また各節点に同一の初期水深を仮定する。表-3(a)は収束状況を示したもので, 白丸は正解に収束したケース, 黒丸は繰返し回数, 10回では収束せず種々の値に発散するケースである。

つぎに, 分流部の初期値だけを変化させ, 他の部分の初期値はすべて $Q_0 = 0.4$, $h_0 = 0.5$ (表-3(a)の◎印)に固定する。すなわち, Q_a, Q_g, Q_h と h_2, h_7, h_8 に表-3(b)のような初期値を仮定する。同様に他の部分の初期値を $Q_0 = 0.4$, $h_0 = 0.5$ に固定し, 合流部の Q_k, Q_l, Q_f と h_{11}, h_{12}, h_5 の初期値を変化させた場合の結果を表-3(c)に示す。また, 表-3(d)は他の部分の初期値をすべて $Q_0 = 0.4$, $h_0 = 0.2$ (表-3(a)の●印)に固定して分流部を変化させた場合, 表-3(e)は同様に合流部を変化させた場合の収束状況を示す。

これらの表から, 河川網全体の解が次のような性質をもつことがわかる。水深の初期値に正解値(常流解)

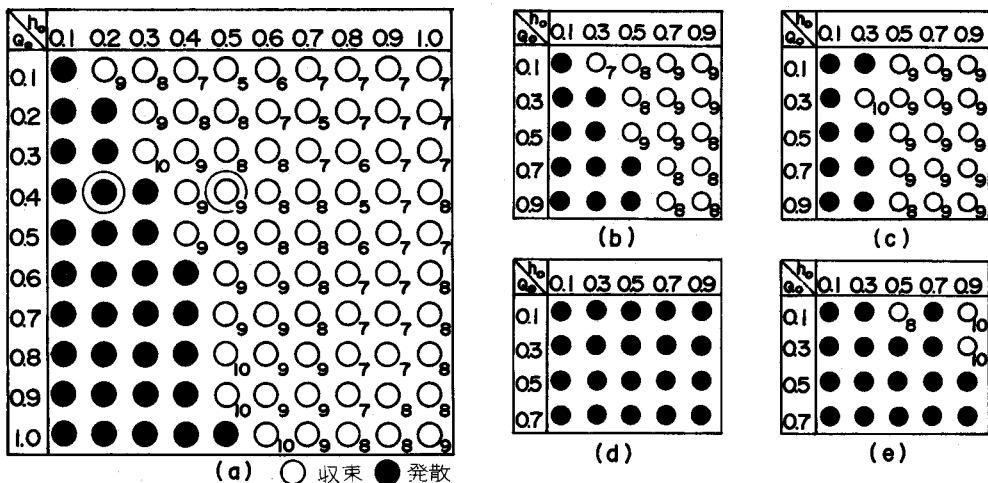


表-3 河川網の解の特性

より大きな値を与える場合に収束する。初期流量は小さな値を仮定する方が収束性がよい。この収束範囲が前述の合流部、分流部の収束範囲と同じ傾向を示すことは興味深い。また、表-3(b),(d)によれば、分流部、合流部での初期値の与え方によっては正しい解に収束しない場合があり、さらに表-3(c)によれば合流部の初期値の与え方によって全システムの解が正解値に収束する場合が生ずる。このことから、合流部と分流部の水理条件が全体の解の収束性かなりのウェイトをもつことがうかがえる。

4. 結語

合流点近傍の流況が合流角度、流量比、水路幅比によって変化し、これらのパラメータの値によっては合流点での水位差が無視できないことを確認した上で、洪水追跡計算へ応用するための合流点条件を定式化した。また、河川網における数値計算に関して、合流部と分流部での解の収束性と初期仮定値との関係を明らかにした。全システムに対する収束条件とサブシステムの収束条件との関連について示唆的な特性を得たが、その詳細は今後検討を重ねていきたい。

最後に、本研究に対する有益な御助言を賜った、神戸大学篁源亮教授ならびに大阪大学室田明教授に謝意を表します。また、実験および計算に御助力を頂いた、富士通ファコム(株)山崎篤、神戸大学学生川端康彦、辻貴之の諸氏に御礼申し上げます。本研究の一部は文部省科学研究費、自然災害特別研究(代表者、京都大学防災研究所、角屋睦教授)の援助を受けた。記して謝意を表する。

参考文献

- 1) Kanda, T., and T.Kitada: An Implicit Method for Unsteady Flows with Lateral Inflows in Urban Rivers, Proc. of the 17th Congress of IAHR, Aug., 1977.
- 2) 板倉忠興, 他: 河川合流点における流れの機構の研究, 土木学会年次学術講演会, 昭和44年, 45年.
- 3) Mikhail, R., et al.: The Reattachment of a Two - Dimensional Turbulent Jet in a Confined Cross Flow, Proc. of the 16th Congress of IAHR, July, 1975.
- 4) 常松芳昭: 管路水輸送システムのグラフ理論的解析, 土木学会論文報告集, 第229号, 昭和49年.
- 5) 神田 徹・井澤元博: 開水路網定常流のマトリックス解析法, 土木学会論文報告集, 第262号, 昭和52年.
- 6) 神田 徹・山崎 篤: 開水路合流部の流れの水理学的特性, 建設工学研究所報告, No. 19, 昭和52年.