

低平地開水路網の定常流に関する研究

ON THE STEADY FLOW IN OPEN-CHANNEL NETWORKS

伊 藤 秀 夫*
By Hideo Itô

要 旨 低平地開水路網のように緩流速の場合の分合流、弯曲などの局所的流況を、等角写像の方法を用いて解析した。ついで実験を行なって、流線形状・流速比などの諸特性が理論解によってよく表現できることを示した。また Hardy Cross 法を管水路におけるとほとんど同じようにして適用することによってもかなり実用性があることを示し、最後に水路網内の水の流れ方について、若干の実験結果を指摘した。

1. 概 説

近年の急速な都市化に伴って新興都市では、内水量の増加と下水量の増加が目立っている。沖積平野にあってはその排水路はしばしば水路網を形成するが、勾配はおおむねほとんどなく、したがって水が流れにくくなって滞水箇所を生じて都市公害の一因となる場合も少なくない。

水路網における流量配分を適正にし、配分流量に応じた適正断面を計画することによって、適度の流速を得ることによりこの問題の解決がはかられると考えられるのであるが、そのためには複雑な開水路網の水理現象が明らかにされねばならない。

個々の開水路網の形態に応じて流量配分をいかにするかを一般的に論ずることが終局の目的になるであろうが、本論文ではつぎの 2 点に重点をおいた研究を行なった。

まず開水路網の特徴とするところは分流、合流、弯曲などが比較的短い直線区間を連結することであり、したがってこの箇所の流れをまず明らかにする必要がある。分岐については Taylor, E.H. 以来多くの研究があり、ことに Law, S.W. と Raynoldo, A.J. は分流量を分岐の前後のフルード数と関連せしめている¹⁾。また三分岐

におけるエネルギー損失が Rao, B.C.S., Rao, N.S.L. および Shivawamy, M.S. によって研究された²⁾。さらに室田は分水路への自由流出を仮定した主水路内の流れに対するポテンシャル解の計算および分水点付近の遷限界流の研究を行なった³⁾。

本論文の前半においては、低平地開水路網の流れが $F_r=0.2\sim 0.4$ の遅い流れであることに着目し、分流、合流、曲り三水路などに一般に適合できる解を等角写像を用いて求め、流線および流速の解析解を実験を行なって検討し、その適合性を確かめた。さらに分流や曲りの損失係数を実験によって求め、分流や曲りの前後の流速比との間に直線的な関係があることを見出した。

第二に開水路網の適正な水路設計のためには構成水路内の流量の計算が必要である。この点に関しては荒木が Escoffier の不等流公式より出発して与えた連立一次方程式による解法、および Hardy Cross 法の原理を用いた簡略法を提案している⁴⁾。これによって開水路網内の水理計算は方法的には可能になったといえるが、本報においては Hardy Cross 法を管水路におけるとほとんど同じように使用し、水路損失に関しては、上に述べた結果をとり入れて計算を行ない、実験と比較した。

その結果、低平地開水路網の場合にはこの方法でもかなり良い適合性を持ち、実用上十分であった。また水路網内の水の流れは、水路勾配の急な方向が主流となり、これを結ぶ横方向の水路の流れは悪くなる傾向にあり、さらに主流方向でも流入口に近い分岐水路ほど流量が多く、袋小路水路では滞水する結果を得た。

2. 分合流、曲りなどの局所的流れに関する研究

(1) 等角写像法による理論

流れをポテンシャル流れと考えて、不連続流の理論を用いた研究は、直角合流管(T字管)の合流の場合のは

* 正会員 科学技術庁 国立防災科学技術センター第 1 研究部 風水害防災研究室長

く離を伴う流れに対しては、すでに解法が試みられ一応の成果を得ている⁵⁾。いまこの解法を分岐部、曲り部の開水路の流れについて応用して、分岐部、曲り部下流側の自由流線の形状を求め、これから種々な流量を流した場合の流入損失を求める。

a) 分岐部の流れ

図-1 のごとき分流の場合について理論を作ってみる。D 点を座標原点にとり $V_1/V=v_1$, $V_2/V=v_2$ とし、 $\zeta=1/V(-u+iv)$ の速度面を作ると 図-2 のようになる。図-2 で CD が自由流線になるように鏡像の原理を用いて吹き出し、吸い込みをおけば、図-3 のようになる。複素ポテンシャル W は式 (2.1) で表わされる。

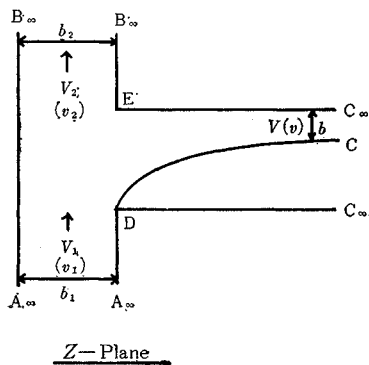


図-1

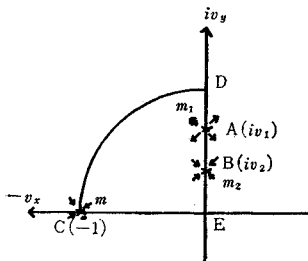


図-2

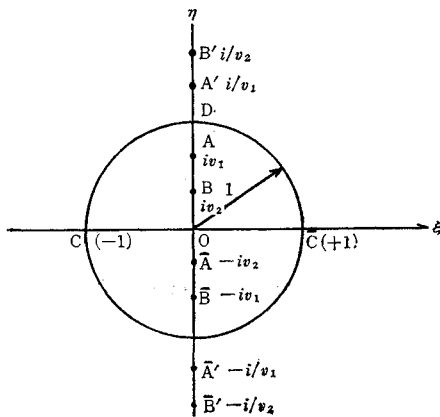


図-3

$$W = -\frac{m_1}{2\pi} \log(\zeta - iv_1)(\zeta - i/v_1)(\zeta + iv_1)(\zeta + i/v_1) + \frac{m_2}{2\pi} \log(\zeta - iv_2)(\zeta - i/v_2)(\zeta + iv_2)(\zeta + i/v_2) + \frac{m}{2\pi} \log(\zeta - 1)(\zeta + 1) \dots \dots \dots (2.1)$$

ここに、 $m_1=2V_1b_1$, $m_2=2V_2b_2$, $m=4bV$ とする。

$$dz = \frac{1}{\zeta} \frac{1}{V} \frac{dW}{d\zeta} d\zeta \text{ より}$$

$$dz = \left[-\frac{m_1}{2\pi V} \left\{ \frac{1}{iv_1(\zeta - iv_1)} + \frac{1}{i/v_1(\zeta - i/v_1)} - \frac{1}{iv_1(\zeta + iv_1)} - \frac{1}{i/v_1(\zeta + i/v_1)} \right\} + \frac{m_2}{2\pi V} \left\{ \frac{1}{iv_2(\zeta - iv_2)} + \frac{1}{i/v_2(\zeta - i/v_2)} - \frac{1}{iv_2(\zeta + iv_2)} - \frac{1}{i/v_2(\zeta + i/v_2)} \right\} + \frac{m}{2\pi V} \left\{ \frac{1}{(\zeta - 1)} - \frac{1}{(\zeta + 1)} \right\} \right] d\zeta \dots \dots (2.2)$$

式 (2.2) を積分して m_1, m_2, m の条件を代入すれば、

$$z = -\frac{ib_1}{\pi} \left\{ \log\left(\frac{\zeta + iv_1}{\zeta - iv_1}\right) + v_1^2 \log\left(\frac{\zeta + i/v_1}{\zeta - i/v_1}\right) \right\} + \frac{ib_2}{\pi} \left\{ \log\left(\frac{\zeta + iv_2}{\zeta - iv_2}\right) + v_2^2 \log\left(\frac{\zeta + i/v_2}{\zeta - i/v_2}\right) \right\} + \frac{2b}{\pi} \log\left(\frac{\zeta - 1}{\zeta + 1}\right) + C \dots \dots \dots (2.3)$$

$\zeta = e^{i\theta}$ を代入して $z_D(\theta = \pi/2) = 0$ を用いれば、

$$z = -\frac{ib_1}{\pi} \left\{ \frac{1}{2} (1 + v_1^2) \log\left(\frac{1 + v_1^2 + 2v_1 \sin \theta}{1 + v_1^2 - 2v_1 \sin \theta}\right) + i(1 - v_1^2) \tan^{-1}\left(\frac{2v_1 \cos \theta}{1 - v_1^2}\right) \right\} + \frac{ib_2}{\pi} \left\{ \frac{1}{2} (1 + v_2^2) \log\left(\frac{1 + v_2^2 + 2v_2 \sin \theta}{1 + v_2^2 - 2v_2 \sin \theta}\right) + i(1 - v_2^2) \tan^{-1}\left(\frac{2v_2 \cos \theta}{1 - v_2^2}\right) \right\} + \frac{2b}{\pi} \left\{ \frac{1}{2} \log\left(\frac{1 - \cos \theta}{1 + \cos \theta}\right) + i \frac{\pi}{2} + \frac{b_1}{\pi} \left\{ (1 + v_1^2) \log\left(\frac{1 + v_1}{1 - v_1}\right) - (1 + v_2^2) \log\left(\frac{1 + v_2}{1 - v_2}\right) \right\} - ib \dots \dots \dots (2.4)$$

$$\therefore x = \frac{b_1}{\pi} \left\{ (1 - v_1^2) \tan^{-1}\left(\frac{2v_1 \cos \theta}{1 - v_1^2}\right) - \frac{b_2}{\pi} \left\{ (1 - v_2^2) \tan^{-1}\left(\frac{2v_2 \cos \theta}{1 - v_2^2}\right) \right\} + \frac{b}{\pi} \log\left(\frac{1 - \cos \theta}{1 + \cos \theta}\right) \right\} \dots \dots \dots (2.5)$$

$$y = \frac{b_1}{2\pi} \left\{ -(1 + v_1^2) \log\left(\frac{1 + v_1^2 + 2v_1 \sin \theta}{1 + v_1^2 - 2v_1 \sin \theta}\right) + \frac{b_2}{2\pi} (1 + v_2^2) \log\left(\frac{1 + v_2^2 + 2v_2 \sin \theta}{1 + v_2^2 - 2v_2 \sin \theta}\right) + \frac{b_1}{\pi} \left\{ (1 + v_1^2) \log\left(\frac{1 + v_1}{1 - v_1}\right) \right\} \right\}$$

$$-(1+v_2^2) \log\left(\frac{1+v_2}{1-v_2}\right) \dots\dots\dots(2.6)$$

$b_1=b_2=1$ とすれば $y(\theta=\pi)+b=1$ であるから、

$$\frac{1}{\pi} \left\{ (1+v_1^2) \log\left(\frac{1+v_1}{1-v_1}\right) - (1+v_2^2) \log\left(\frac{1+v_2}{1-v_2}\right) \right\} + b = 1 \dots\dots\dots(2.7)$$

$$v_1=v_2+b, v_2/v_1=\lambda \dots\dots\dots(2.8)$$

b) 曲り部の流れ

同様にして 図-4 のごとき曲り部のはく離の自由流線を求めてみる。図-5 で CD が自由流線になるように鏡像の原理を用いて吹き出し、吸い込みをおけば 図-6 のようになる。

複素ポテンシャル W は

$$W = -\frac{m_1}{2\pi} \log(\zeta - iv_1)(\zeta - i/v_1)(\zeta + iv_1)(\zeta - i/v_1) + \frac{m}{2\pi} \log(\zeta - 1)(\zeta + 1) \dots\dots\dots(2.9)$$

ここに $m_1=2V_1b_1$, $m=4Vb$, $b_1=1$ とすれば, $m_1=2V_1$, $m=4bV$, $dz = \frac{1}{\zeta V} \frac{dW}{d\zeta} d\zeta$ を積分して

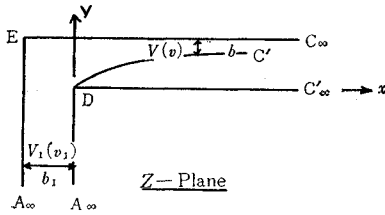


図-4

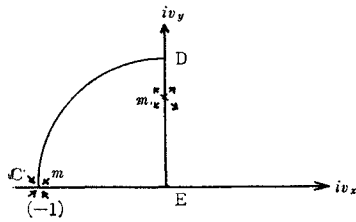


図-5

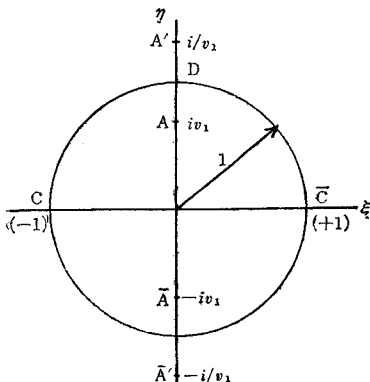


図-6

$$z = -\frac{i}{\pi} \left\{ \log\left(\frac{\zeta + iv_1}{\zeta - iv_1}\right) + v_1^2 \log\left(\frac{\zeta + i/v_1}{\zeta - i/v_1}\right) \right\} + \frac{2b}{\pi} \log\left(\frac{\zeta - 1}{\zeta + 1}\right) + C \dots\dots\dots(2.10)$$

$z_D(\theta=\pi/2)=0$ より

$$C = \frac{i}{\pi} (1+v_1^2) \log\left(\frac{1+2v_1+v_1^2}{1-2v_1+v_1^2}\right)^{1/2} - ib$$

$$\therefore x = \frac{2b}{\pi} \log\left(\frac{1-\cos\theta}{1+\cos\theta}\right)^{1/2} + \frac{1}{\pi} \left\{ \tan^{-1}\left(\frac{v_1+\sin\theta}{\cos\theta}\right) - \tan^{-1}\left(\frac{\sin\theta-v_1}{\cos\theta}\right) \right\} + \frac{1}{\pi} v_1^2 \times \left\{ \tan^{-1}\left(\frac{v_1 \sin\theta + 1}{v_1 \cos\theta}\right) - \tan^{-1}\left(\frac{v_1 \sin\theta - 1}{v_1 \cos\theta}\right) \right\} \dots\dots\dots(2.11)$$

$$y = \frac{1}{\pi} \left\{ 2b \left(\tan^{-1} \frac{\sin\theta}{\cos\theta - 1} - \tan^{-1} \frac{\sin\theta}{\cos\theta + 1} \right) - \pi h - \log\left(\frac{1+2v_1 \sin\theta + v_1^2}{1-2v_1 \sin\theta + v_1^2}\right)^{1/2} - v_1 \log\left(\frac{1+2v_1 \sin\theta + v_1^2}{1-2v_1 \sin\theta + v_1^2}\right)^{1/2} + (1+v_1^2) \log\left(\frac{1+2v_1+v_1^2}{1-2v_1+v_1^2}\right)^{1/2} \right\} \dots\dots\dots(2.12)$$

$$\therefore x = \frac{b}{\pi} \log\left(\frac{1-\cos\theta}{1+\cos\theta}\right) + \frac{1}{\pi} (1-v_1^2) \tan^{-1}\left(\frac{2v_1 \cos\theta}{1-v_1^2}\right) \dots\dots\dots(2.13)$$

$$y = \frac{1}{2\pi} (1+v_1^2) \log\left(\frac{1+2v_1 \sin\theta + v_1^2}{1-2v_1 \sin\theta + v_1^2}\right) + \frac{1}{\pi} (1+v_1^2) \log\left(\frac{1+v_1}{1-v_1}\right) \dots\dots\dots(2.14)$$

$y_i(\theta=\pi)+h=1$ より

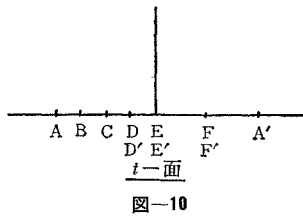
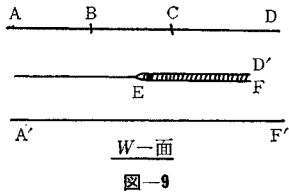
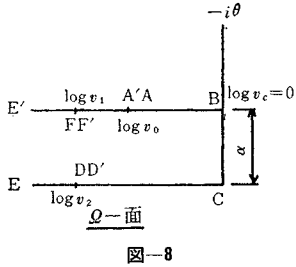
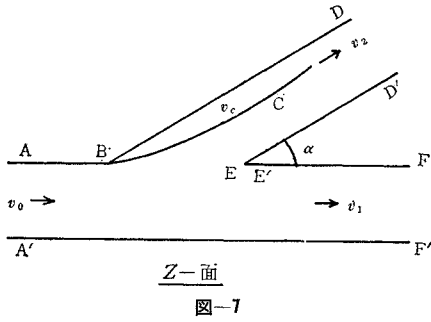
$$\frac{1}{\pi} (1+v_1^2) \log\left(\frac{1+v_1}{1-v_1}\right) + b = 1 \dots\dots\dots(2.15)$$

$$v_1 b_1 = b \dots\dots\dots(2.16)$$

式 (2.15) と式 (2.16) から, v_1, b を求めこれを x, y の式に代入すれば種々の θ , $\frac{\pi}{2} \leq \theta \leq \pi$ について z 平面上の自由流線が計算できる。

つぎに任意分岐角を有する不連続流と任意曲り角を持った曲り部では不連続流の解を求めてみるとつぎのごとくである。 z 面を速度面 (Q -面) に変換し, Q -面, W -面を Schwarz-Christoffel の変換を用いても t -面に変換すると, 式 (2.17), (2.18) になり, 一方 W -面と z -面, Q -面との関係は式 (2.19), (2.20), (2.21), (2.22) になる。最後に z -面と t -面との関係式 (2.23), (2.24) が求められ, これから任意角を持った場合の自由流線 BC が求められる。曲り部の場合についても同様にして, 式 (2.31) から任意の曲り角を持った自由流線 BC, FE が求められる。

① 任意の分岐角の場合:



$$\frac{dQ}{dt} = K(t-t_B)^{-1/2}(t-t_C)^{-1/2} \dots\dots\dots(2.17)$$

$$\frac{dW}{dt} = M(t-t_D)^{-1}t(t-t_F)^{-1} \dots\dots\dots(2.18)$$

$$\frac{dW}{dz} = u-iv \dots\dots\dots(2.19)$$

$$\log \frac{dW}{dz} = \log q - i\theta = Q \dots\dots\dots(2.20)$$

$$\frac{dW}{dz} = e^Q \dots\dots\dots(2.21)$$

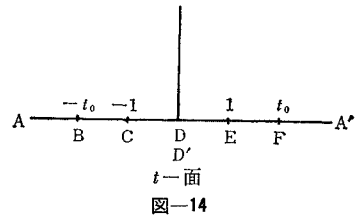
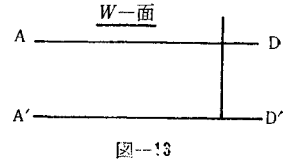
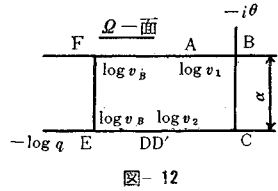
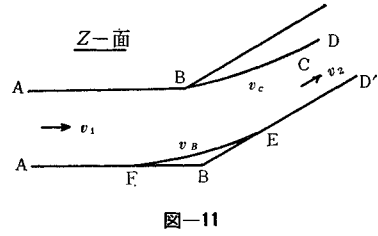
$$dz = e^{-Q} dW \dots\dots\dots(2.22)$$

$$dz = e^{-\int K(t-t_B)^{-1/2}(t-t_C)^{-1/2} dt} M(t-t_D)^{-1} t \times (t-t_F)^{-1} dt \dots\dots\dots(2.23)$$

$$\therefore z = \int e^{-\int K(t-t_B)^{-1/2}(t-t_C)^{-1/2} dt} M(t-t_D)^{-1} t \times (t-t_F)^{-1} dt + C \dots\dots\dots(2.24)$$

② 任意の曲り角の場合 :

$$W = A \log t + B \dots\dots\dots(2.25)$$



$$dW = \frac{A}{t} dt \dots\dots\dots(2.26)$$

$$\frac{dQ}{dt} = \frac{K}{\sqrt{(t-1)(t+1)(t+t_0)(t-t_0)}} \dots\dots\dots(2.27)$$

$$Q = \int \frac{K dt}{\sqrt{(t-1)(t+1)(t+t_0)(t-t_0)}} \dots\dots\dots(2.28)$$

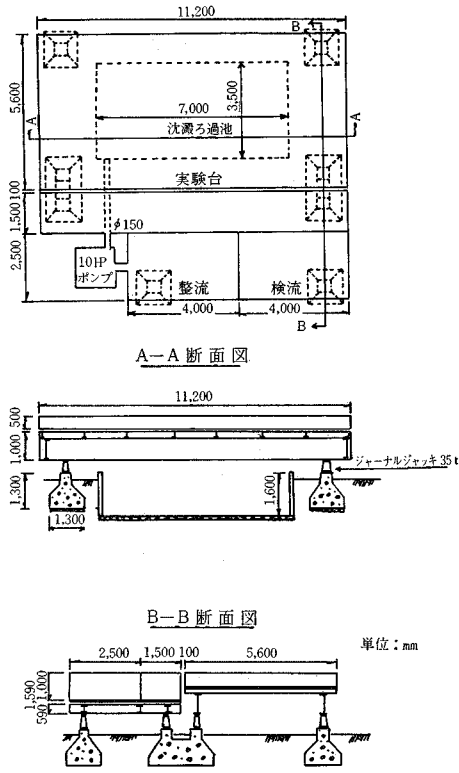
$$dz = e^{-Q} dW \dots\dots\dots(2.29)$$

$$dz = \left\{ e^{-\int \frac{K dt}{(t^2-1)(t^2-t_0^2)}} \frac{A}{t} \right\} dt \dots\dots\dots(2.30)$$

$$z = \int e^{-\int \frac{K dt}{(t^2-1)(t^2-t_0^2)}} \frac{A}{t} dt + C \dots\dots\dots(2.31)$$

(2) 実験設備と実験方法

図-15 のとき 11.2m×5.6m×0.5m の大きさの勾配が自由に変えられる実験台上に、図-16、写真-1 の水路網を作り、水路網の分流部、曲り部の流線の状況を見るためにこれらの写真撮影を行なった(図-17 参照)。写真撮影は針金の先にウォーターブルーをつけて分流部、曲り部、合流部のはく離による流線を明らかにして撮影を行なった。写真撮影は Q=6.87, 4.05, 3.70, 3.67, 2.16 l/sec, Fr=0.18~0.31 で、勾配が i=1/1 000, i=1/200 の場合と勾配 1/1 000 で、流量 Q を Q=6.87, 3.70, 3.67 l/sec の 3 通りに変えた場合とを行なった。



A-A 断面図

B-B 断面図

図-15

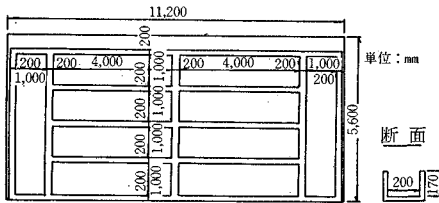


図-16 水路平面図

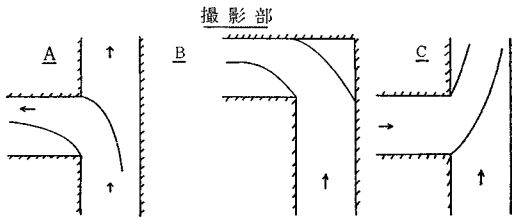


図-17

流速は電界型流速計（カレントメーター）を用いて測定し、水位はポイントゲージとレベルを使用し 1/10 mm まで測定した。

(3) 実験結果とその考察

分岐部、曲り部、合流部の流況を写真-2, 3, 4 に示す。分岐の場合については、式 (2.7) と式 (2.8) に λ を与えて v_1, v_2, b を求め、その結果は表-1 に示すとおり

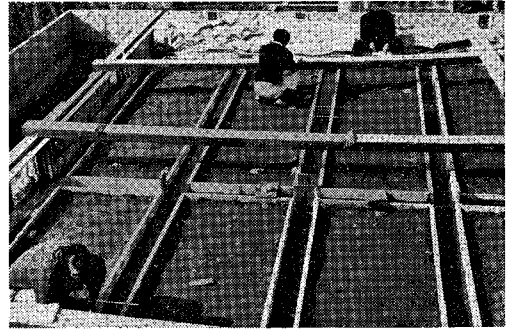
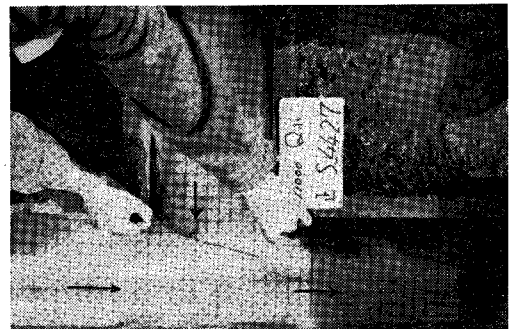
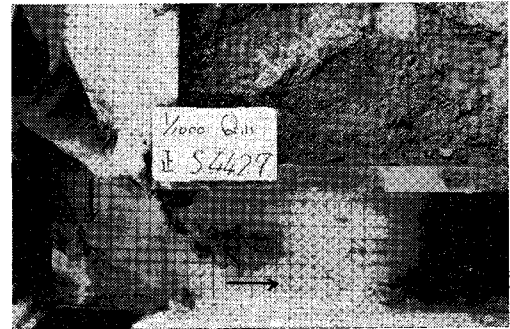


写真-1

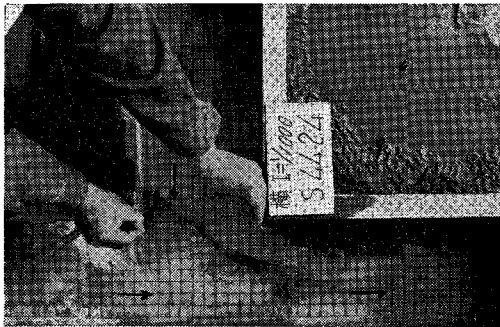
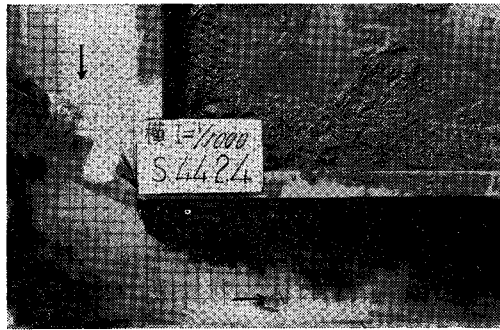


$i=1/1000, Q=2.16 \text{ l/sec}$

注：Q 小は流量が小さい場合を示し、正とは実験台の勾配が実験台の長辺方向に傾斜した場合を示す。

写真-2

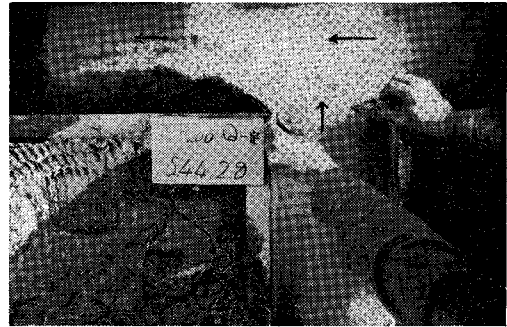
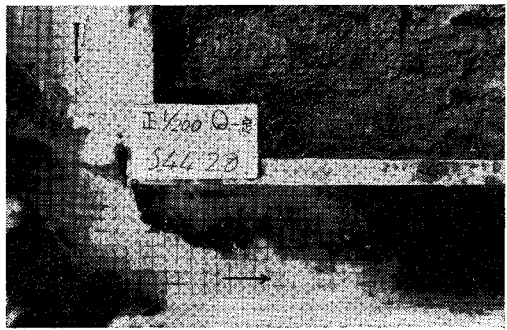
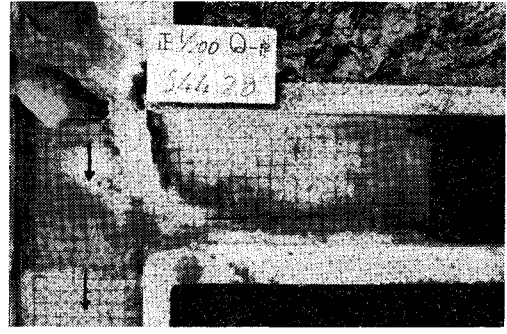
になった。表-1 の中で λ の実験条件にあった v_1, v_2, b を用いて式 (2.5), 式 (2.6) から x, y を求めた。実験



$i=1/1000, Q=3.76 \text{ l/sec}$

注：写真中横とは実験台の勾配が実験台の短辺方向に傾斜した場合を示す。

写真-3



$i=1/200, Q=4.05 \text{ l/sec}$

注：写真中止とは実験台の勾配が実験台の長辺方向に傾斜した場合を示す。

写真-4

結果と計算結果との対比を図に表わしてみると 図-18, 19, 20, 21のごとくである。曲りの場合も同様にして式(2.15), (2.14)の両式を満足する v_1, b を求めると表-2のとおりであり、表-2の中で実験条件にあった v_1, b を用いて式(2.13), (2.14)から x, y を求めた。実験結果と計算結果を対比して図に表わしてみると 図-22, 23のごとくである。流線は前述したごとく細い針金の先にウォーターブルーの塊をセメダインでつけて、これを表面中央、底などにおいているが、その結果分岐部、曲り部の流線の方向および形状は表面、中央、底(底面から2~3mm上に置いた)いずれの流線もほとんど変化がなかった。しかし底面に落したウォーターブルーの画く流線は多少異なり、中央表面の流線より分岐部、曲り部で

より早く分岐、曲りの姿勢をとる。これを境界層の影響で、境界層内は流速がほとんどないために慣性力も小さく、さらに圧力のために流線は内側に向うが、境界層より上層は流速があるために慣性力があって、流線は外側

表-1

λ	v_1	v_2	b
0.1	0.561	0.066	0.505
0.2	0.599	0.120	0.479
0.3	0.640	0.192	0.448
0.4	0.684	0.274	0.410
0.5	0.732	0.366	0.366
0.6	0.784	0.470	0.313
0.7	0.840	0.588	0.252
0.8	0.900	0.722	0.179
0.9	0.958	0.863	0.096

に向うものと思われる。分岐部、曲り部のはく離した流線の形状に対して勾配，下流の条件たとえばせき上げ等

の影響はみられず，分岐する前の流速あるいは曲り部前の流速の大小によって多少はく離の形状は違うが，大きな違いはないことがわかった。下流側に対する分岐部，曲り部の影響はかなり大きく，水路幅の7倍ぐらいまで影響すること，不連続流れによる計算値と実験値は分岐部，曲

表-2

v_1	b
0.1	0.936
0.2	0.866
0.3	0.785
0.4	0.687
0.5	0.563
0.6	0.400
0.7	0.177

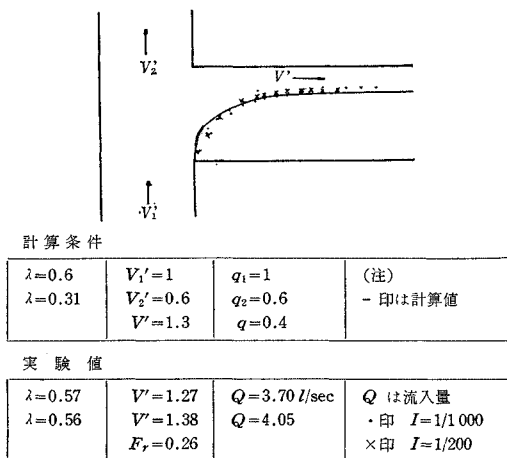


図-18

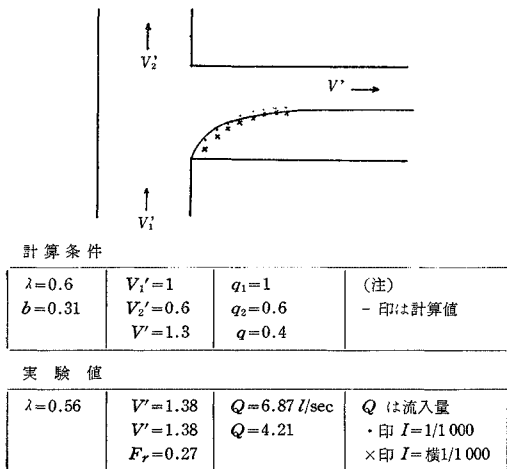


図-19

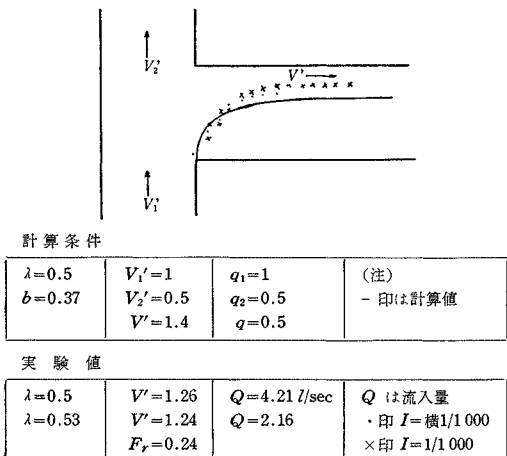


図-20

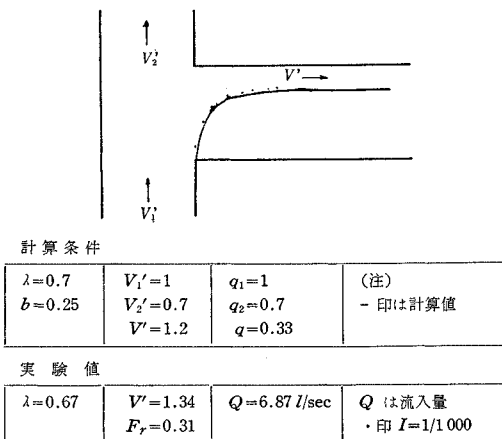


図-21

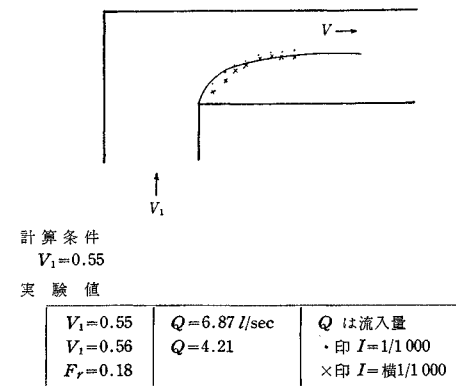


図-22

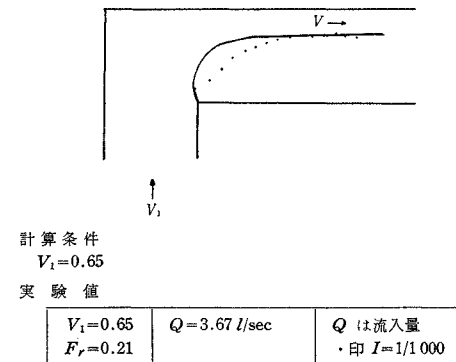


図-23

り部、いずれも実験値と良く合うことがわかった。またこの不連続流れによる取扱いは2つの水路の合流部にも適用され、水路または河川等の分流部、曲り部、合流部等の死水域の計算に利用できる。

3. 水路網における分岐、曲りの損失に関する研究

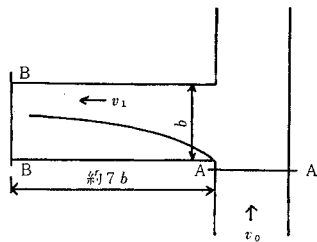
(1) 分岐、曲りによる損失

開水路の損失は摩擦、分岐、曲り、流速の変化による損失である。われわれの使う低地部の流れは流速が遅いので速度による損失を省略し、摩擦、分岐、曲りによる損失だけを考えた。分岐、曲りの損失を検討するために図—24、25のごとき箇所の水平面から水面までの高さの差 $4h$ および流速 v_0 を測定し、分岐、曲りの損失係数 f_0, f_b はつぎの式のように表わした。

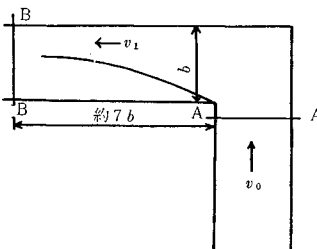
$$\Delta h = f_0 \frac{v_0^2}{2g} \quad f_0 = \frac{\Delta h}{\frac{v_0^2}{2g}} \dots\dots\dots(3.1)$$

$$\Delta h = f_b \frac{v_0^2}{2g} \quad f_b = \frac{\Delta h}{\frac{v_0^2}{2g}} \dots\dots\dots(3.2)$$

一般に全損失水頭 ΔH は摩擦損失と分岐、曲り速度などの損失によって表わされる。開水路において分岐、曲りの局所的損失は下流または上流部に一様に影響せず局部に止まると考えられている。しかし実験によると分岐、曲りの損失水頭は水路幅の20倍の距離でも残っていて、勾配 1/1000 の場合で 0.5 mm 前後、勾配 1/200 の場合で 1 mm 前後の損失水頭の値を示している。この



図—24



図—25

値は水路幅の20倍の距離の摩擦損失水頭とほぼ同じ値である。したがって全損失水頭 ΔH を摩擦損失と分岐、曲り損失の和の形で表わす。

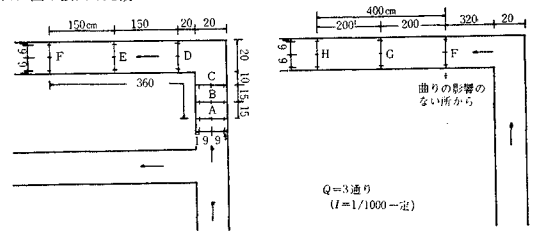
$$\Delta H = Q^2 \left(\sum_{i=1}^P \frac{f_{bi}}{2gA_i^2} + \sum_{i=1}^P \frac{f_{oi}}{2gA_i^2} + \frac{l_i}{C_i R_i A_i^2} \right) \dots\dots\dots(3.3)$$

水路の底は必ずしも平らでないで、水平面から水面までの高さの差を全損失と考えた。

(2) 実験と実験結果

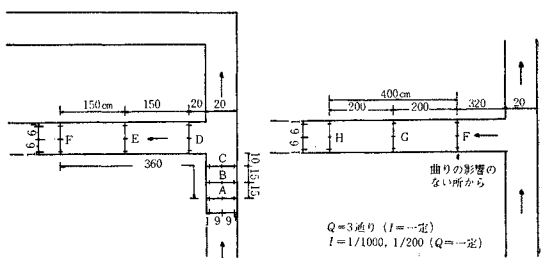
水路網の分流量を計算するのに曲り、分岐部の損失について検討する必要があるので、分岐の影響が完全に終る約 4 m 間と分岐、曲りの影響のない約 4 m 間の直線部について、電界型流速計を用いて流速をポイントケージとレベルを使用して水位を測定した。図—26、27、28のように流速は水路幅方位に3点、深さに応じて深さ方向に1点~2点測定した。水位は水路幅方向3点について測定し、平均を取った。実験水路における摩擦、分岐、曲りの損失水頭を求めた実験値の一部を示すと、図—29のような場合については表—3~5のような、また、図—30のような場合については表—6~8のような結果が得

(1) 曲り損失の比較



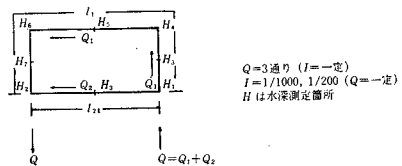
図—26

(2) 流入損失の比較



図—27

(3) 基本水路網の測定



図—28

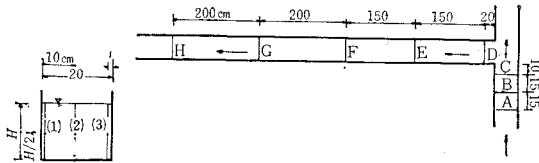


図-29

表-3 $I=1/1000 \quad Q=3.70 \text{ l/sec}$ 測点1

断面	水深	流速		
		(1)	(2)	(3)
A	$H=6.47 \text{ cm}$	19.5 cm/sec	20.8	17.0
B	5.69	20.2	19.6	17.5
C	6.61	20.0	18.9	16.6
D	6.60	4.0*	4.9*	23.0
E	7.18	4.4	7.5	10.0
F	7.59	4.2	6.9	6.0
G	7.19	6.4	5.9	4.6
H	7.77	7.7	8.0	7.0

* 印 逆向きの流速

表-4

$I=1/1000 \quad Q=2.29 \text{ l/sec}$ 測点1

断面	水深	流速		
		(1)	(2)	(3)
A	$H=5.15 \text{ cm}$	14.6 cm/sec	17.6	16.4
B	5.14	17.3	17.2	18.1
C	5.17	16.8	15.9	15.5
D	5.26	5.5*	13.2	19.9
E	5.96	0.0	5.3	6.9
F	5.97	3.8	4.8	4.5
G	6.15	3.6	3.8	4.6
H	6.15	4.0	4.0	3.9

* 印 逆向きの流速

表-5

$I=1/200 \quad Q=4.05 \text{ l/sec}$ 測点1

断面	水深	流速		
		(1)	(2)	(3)
A	$H=5.00 \text{ cm}$	29.5 cm/sec	19.1	9.5
B	5.25	27.8	18.4	7.4
C	5.24	28.3	17.7	6.9
D	4.65	5.4*	22.4	41.9
E	6.19	8.5	15.4	16.1
F	7.29	10.9	11.6	12.2
G	7.59	11.1	10.7	11.9
H	8.99	9.2	9.2	8.4

* 印 逆向きの流速

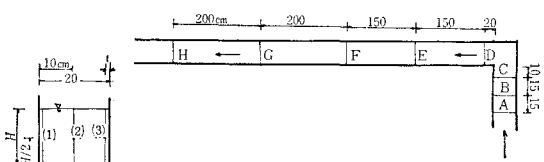


図-30

られた。

そこで分岐、曲りによる損失係数 f を縦軸に、前後の

表-6

$I=1/1000 \quad Q=3.70 \text{ l/sec}$ 測点2

断面	水深	流速		
		(1)	(2)	(3)
A	$H=6.46 \text{ cm}$	14.8 cm/sec	10.9	6.2
B	6.46	14.4	10.8	8.0
C	6.49	14.4	11.3	6.2
D	6.72	5.4*	12.1	22.6
E	7.21	8.2	4.2	10.7
F	7.23	4.4	10.0	9.6
G	7.27	7.0	8.2	6.8
H	7.46	8.2	8.9	8.6

* 印 逆向きの流速

表-7

$I=1/1000 \quad Q=2.29 \text{ l/sec}$ 測点2

断面	水深	流速		
		(1)	(2)	(3)
A	$H=4.91 \text{ cm}$	11.9 cm/sec	8.0	5.7
B	5.18	10.5	7.5	5.7
C	5.26	10.3	8.6	5.2
D	5.24	4.4*	11.9	14.0
E	5.83	0.0	4.8	5.9
F	6.23	3.7	3.8	4.0
G	5.76	4.2	5.1	4.3
H	6.41	4.0	4.3	4.6

* 印 逆向きの流速

表-8

$I=1/200 \quad Q=4.05 \text{ l/sec}$ 測点2

断面	水深	流速		
		(1)	(2)	(3)
A	$H=4.56 \text{ cm}$	33.6 cm/sec	42.4	31.0
B	4.72	34.0	40.0	31.1
C	4.85	34.7	38.4	30.7
D	4.64	12.4*	22.7	47.9
E	6.21	5.6	4.7	12.7
F	6.92	9.4	10.2	8.6
G	7.76	9.4	10.7	9.4
H	8.92	8.1	9.1	8.2

* 印 逆向きの流速

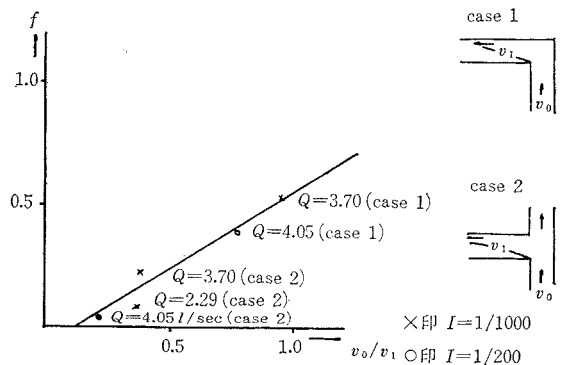


図-31 $f \sim v_0/v_1$ の関係図

流速比 v_0/v_1 を横軸にプロットすると 図-31 が得られ、これによって f と v_0/v_1 との関係は直線的に示されることがわかる。したがって前章の方法によって v_0/v_1 が

求められれば 図-31 を用いて損失係数 f を得ることができる。

(3) 基本水路網

実験によって求めた損失係数を用いて式 (3.3) が成立し、分流量がどのように算出されるかを見るために、つぎに基本水路網 図-28 について分流量を求め、実験値と比較する。

いま水路の全損失水頭を ΔH とすると、次式が成立する。

$$H_1 - H_2 + \sum_0 l = \Delta H = Q_1^2 \left(f_{b1} \frac{1}{2gA_1^2} + f_{b2} \frac{1}{2gA_2^2} + \frac{l_1}{C_1^2 R_1 A_1^2} \right) \dots\dots\dots (3.6)$$

$$= Q_2^2 \left(f_{01} \frac{1}{2gA_2^2} + \frac{1}{C_2^2 R_2 A_2^2} \right) \dots\dots\dots (3.7)$$

$$Q = Q_1 + Q_2 \dots\dots\dots (3.8)$$

ここで、

f_b : 曲り損失係数

f_0 : 分岐損失係数

A : 各流路長の平均断面積

R : 各流路長の平均径深

H : 水深

\sum_0 : 流路勾配

l : 流路長

$$Q_1 = \frac{Q \left(\frac{f_{01}}{2gA_2^2} + \frac{l_2}{C_2^2 R_2 A_2^2} \right)^{1/2}}{\left(\frac{f_{b1}}{2gA_1^2} + \frac{f_{b2}}{2gA_1^2} + \frac{l_1}{C_1^2 R_1 A_1^2} \right)^{1/2} + \left(\frac{f_{01}}{2gA_2^2} + \frac{l_2}{C_2^2 R_2 A_2^2} \right)^{1/2}} \dots\dots (3.9)$$

$$Q_2 = Q - Q_1 \dots\dots\dots (3.10)$$

表-9

(1) $I=1/1000$ $Q=2.25$ l/sec

		計算値	実測値
	Q_1	1.37 l/sec	1.29 l/sec
	Q_2	0.88	0.96
	Q_2/Q_1	0.77	0.74

表-10

(2) $I=1/1000$ $Q=4.69$ l/sec

		計算値	実測値
	Q_1	3.05 l/sec	2.63 l/sec
	Q_2	1.64	2.06
	Q_2/Q_1	0.54	0.78

表-11

(3) $I=1/200$ $Q=4.47$ l/sec

		計算値	実測値
	Q_1	2.53 l/sec	2.74 l/sec
	Q_2	1.94	1.73
	Q_2/Q_1	0.77	0.63

式 (3.9), (3.10) から求めた分流量の理論値と実験値との比較を表-9~11 に示す。このように一致は比較的良好いことがわかった。

4. 水路網における分流量

(1) ハーディクロス法による分流量

管路網の流量計算に用いられているハーディクロス法を開水路網に適用して、各水路網の流量を計算してみる。いまハーディクロス法を開水路に適用するに必要な曲り、分岐、摩擦損失等の考え方と適用方法を述べてみれば、つぎのごとくである。図-32 のような開水路網についていま考えてみる。一定流量 Q が流入、流出している場合、各支線の両端の損失水頭の差を h_i で表わすとそれぞれの支線について

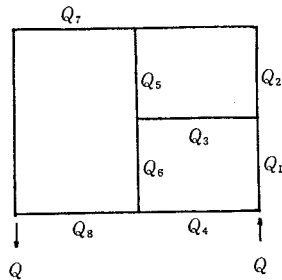


図-32

$$h_i = k_i Q_i^2 \dots\dots\dots (4.1)$$

$$i=1, 2, \dots, n$$

図-32 では $n=8$

開水路網では任意の支線 i での曲りと摩擦の損失を考慮してみると、

$$k_i = \sum_{i=1}^P \frac{f_{bi}}{2gA_i^2} + \frac{l_i}{C_i^2 R A_i^2} \dots\dots\dots (4.2)$$

ここで、

P : その支線内における曲りの箇所数

A_i : 各流路の平均断面積

R_i : 各流路の平均径深

f_b : 曲りの損失係数

l_i : 任意支線の長さ

それぞれのサーキットについて水路を1周した場合(たとえば左まわりを正の方向とし、各支線の流向を一致した場合を+, 反対の場合を-とする) 水頭損失は代数和で0になるから、

$$\sum h_i = 0 \dots\dots\dots (4.3)$$

式 (4.3) がサーキットの数だけ成立する。実際には Q_i を連続の条件を満足するように仮定し、式 (4.1) を計算して式 (4.3) を満足するような Q_i が解となる。しかし

一般には仮定流量 Q_i を用いて式 (4.3) を計算すると必ずしも満足されないから、補正流量 ΔQ_j を加えた流量 $Q_i + \Delta Q_j$ に対応する水頭損失を $h_i + \Delta h_i$ とすると

$$h_i + \Delta h_i = k_i(Q_i + \Delta Q_j)^2$$

式 (4.4) の右辺を展開して ΔQ_j の 1 次の項までとると式 (4.1) を用いて、

$$\Delta k_i = 2 k_i Q_i \Delta Q_j$$

さらに $\sum(h_i + \Delta h_i) = 0$ の条件よりそれぞれのサーキットに対して

$$\sum h_i + \sum \Delta h_i = \sum h_i + 2 \Delta Q_j \sum k_i Q_i = 0 \dots (4.6)$$

式 (4.6) が成立し

$$\Delta Q_j = -\frac{\sum h_i}{2 \sum k_i Q_i} = -\frac{\sum k_i Q_i^2}{2 \sum k_i Q_i} \dots (4.7)$$

となる。式 (4.5) を導くとき ΔQ_j の 2 次以上を省略したことによる誤差があるので、補正流量 ΔQ_j を加えた流量を用いて再計算し、 ΔQ_j が十分小さくなるまで計算を行なう。

以上は管路網の場合と変わらないが、これは境界条件として水路網内の水位は一定として与えられているためである。

(2) 実験

種々な形状の水路網の分流量を見るために、つぎに示す水路網の組合せを考えた。分岐部の流量は表面流速の測定と水位の測定から推定した。流入口での流入量は流出部の流量を直接ますで測定することによって推定した。

a) 実験条件

- 1) 勾配 1/4 000, 1/1 000, 1/500

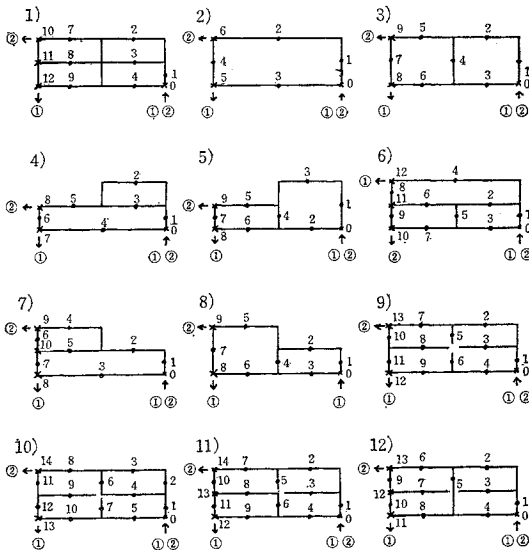


図-33

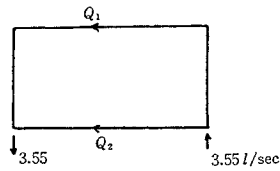
- 2) 水路網の組合せ
- 3) 流出口 2 通り

1), 2), 3) の各組合せを考えて実験を行なった (図-23 参照)。

(3) 実験結果とその考察

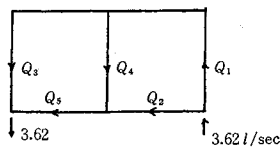
ハーディクロス法を用いて計算した結果と実験結果を表-12~19 に示した。種々な水路網に対する流れを観

表-12



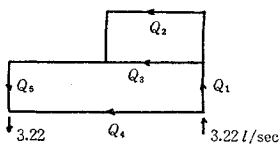
2-1		Q_1	Q_2
実験値		1.62	1.93 l/sec
計算値	$n=0.037$	1.49	2.06
	0.020	1.45	2.10
	0.012	1.35	2.20
K	$n=0.037$	6 872	3 537
	0.020	2 180	1 034
	0.012	989	372

表-13



3-1		Q_1	Q_2	Q_3	Q_4	Q_5
実験値		2.15	1.47	1.24	0.91	2.38 l/sec
計算値	$n=0.037$	1.64	1.98	1.69	-0.05	1.93
	0.020	1.63	1.99	1.63	0.00	1.99
	0.012	1.65	1.97	1.58	0.07	2.04
K	$n=0.037$	3 244	2 212	3 378	1 160	2 561
	0.020	1 051	712	1 037	328	700
	0.012	471	333	442	119	263

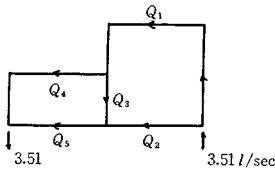
表-14



4-1		Q_1	Q_2	Q_3	Q_4	Q_5
実験値		1.55	0.73	0.82	1.67	1.55 l/sec
計算値	$n=0.037$	1.66	0.77	0.89	1.56	1.66
	0.020	1.64	0.75	0.89	1.58	1.64
	0.012	1.63	0.75	0.88	1.59	1.63
K	$n=0.037$	597	3 396	2 549	5 306	3 360
	0.020	171	1 055	778	1 584	1 083
	0.012	63.2	460	341	709	521

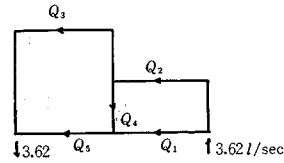
×印 水位測定箇所
○印 流量測定箇所

表-15



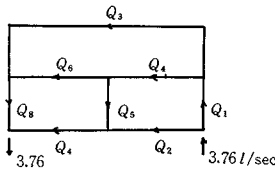
5-1	Q_1	Q_2	Q_3	Q_4	Q_5	
実験値	1.51	2.00	0.15	1.36	2.15 l/sec	
計算値	$n=0.037$	1.50	2.01	-0.14	1.64	1.87
	0.020	1.48	2.03	-0.10	1.58	1.93
	0.012	1.49	2.02	-0.01	1.50	2.01
K	$n=0.037$	4992	2753	615	3315	2561
	0.020	1703	908	171	1038	700
	0.012	891	470	63.2	476	263

表-18



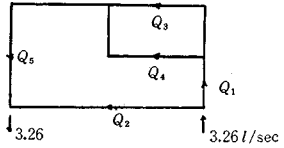
8-1	Q_1	Q_2	Q_3	Q_4	Q_5	
実験値	1.98	1.64	1.29	0.69	2.33 l/sec	
計算値	$n=0.037$	1.74	1.88	1.63	0.11	1.99
	0.020	1.73	1.89	1.50	0.23	2.12
	0.012	1.75	1.87	1.39	0.36	2.23
K	$n=0.037$	2609	2233	3805	580	2561
	0.020	898	741	1411	150	700
	0.012	396	351	687	52.2	263

表-16



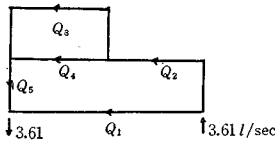
6-1	Q_1	Q_2	Q_3	Q_4	Q_5	Q_6	Q_7	Q_8	
実験値	2.82	0.94	1.48	1.34	0.37	0.97	1.31	2.45 l/sec	
計算値	$n=0.037$	2.14	1.62	0.97	1.17	0.03	1.14	1.65	2.11
	0.020	2.11	1.65	0.94	1.17	0.02	1.15	1.67	2.09
	0.012	2.10	1.66	0.91	1.19	0.01	1.18	1.67	2.09
K	$n=0.037$	295	1058	2789	1056	295	890	915	298
	0.020	85.7	300	878	324	85.7	263	263	88.9
	0.012	30.8	111	375	132	30.8	93.3	95.5	34.0

表-19



10-1	Q_1	Q_2	Q_3	Q_4	Q_5	
実験値	1.53	1.73	0.86	0.67	1.53 l/sec	
計算値	$n=0.037$	1.61	1.65	0.79	0.82	1.61
	0.020	1.53	1.73	0.67	0.86	1.53
	0.012	1.51	1.75	0.67	0.84	1.51
K	$n=0.037$	583	5272	3299	3252	4205
	0.020	171	1550	1539	975	1525
	0.012	60.0	675	664	413	700

表-17



7-1	Q_1	Q_2	Q_3	Q_4	Q_5	
実験値	1.93	1.68	0.14	1.54	1.68 l/sec	
計算値	$n=0.037$	1.72	1.89	0.81	1.08	1.89
	0.020	1.76	1.85	0.75	1.10	1.85
	0.012	1.83	1.78	0.67	1.11	1.78
K	$n=0.037$	4941	2803	3489	2090	597
	0.020	1400	889	1290	600	171
	0.012	525	402	605	221	63.2

察してみると、流れの強さ、向きの影響を与えるものは、1) 流出口の位置、2) 流入口と流出口までの各水路網の長さ、3) 流入方向と水路との方向の関係、4) 水路網の形、5) 水路勾配の大きさ、6) 主水路勾配の方向と水路方向との関係、7) 連続水路と袋小路水路との関係などである。定性的に水路網内の水の流れは、水路勾配の急な方向が主流となり、これを結ぶ横方向の水路の流れ

れは悪くなる傾向にあり、主流でも流入口から流出口に向う距離の小さい方から分岐流量が大であり、これに流入方向の影響が多少入る程度である。そして袋小路水路内の流れはほとんどないことがわかった。計算結果と実験値との比較によれば水路の損失は摩擦によるのが最も大きく、曲り分岐による損失は小さいと思われる。実験流量と計算流量を比較してみると、各水路網とも比較的良く一致しているが、一般に主流に対して横方向の水路に関する一致が悪く、計算値が実験値に比して小さく出ている。主流に対して横方向の水路内の流れは流速が小さく、かなりデリケートな流れを示し、流速の測定が困難であるので、実験値にも多少の誤差が入っていると思われる。

5. 結論

これまでの実験結果および解析結果からつぎのことがいえる。

(1) 分岐部および曲り部のはく離した自由流線は不連続流による写像理論で求められる。

(2) 分岐損失, 曲り損失は分岐および曲り前後の流速比と関係があつて 図—31 のごとくである。

(3) 水路網の各分流量の計算は分岐損失, 曲り損失, 摩擦損失の項を入れてハーディクロス法によって簡単に求められたが, 実用上はこれで十分であった。

本研究に対し, ご懇切なるご指導を賜つた東北大学工学部 岩崎敏夫 教授に深く感謝致すとともに, 本実験を遂行するにあたり, ご配慮を賜つた第1研究部長 有賀世治氏, 資源科学研究所各位, 実験および取りまとめするに当りセンター職員の岸井徳雄, 木下 舜, 町田勝, 青木尚子各位の援助を賜つた。各位に深く謝意を表す。

参 考 文 献

- 1) Law, Shiu Wai and Reynoldo, Alan, J. : Dividing Flow in An Open Channel, A.S.C.E Hydraulics Division, Vol. 92, Mar. 1966.
- 2) Rao Bezzam C. Syamala, Rao Nagar S. Lakshmana, and Shivaswamy Muthu S. : Distribution of Energy Losses at Conduit Trifurcations, A.S.C.E Hydraulics Division, Vol. 94, Nov. 1968.
- 3) 室田 明 : 開水路分水工の研究 : 土木学会論文集, 第 70 号, 昭和 35 年 10 月.
- 4) 荒木正夫 : 複雑な開水路網の一解法, 土木学会論文集, 第 67 号, 昭和 35 年 3 月.
- 5) 池田隆治・渡辺 喬 : 直角合流管 (T 字管) のはく離を伴う流れの計算, 日本機械学会第 753 回講演会.

(1969. 9. 10・受付)