

雨水流出用演算器について*

正員 石原 安 雄**

ON AN ELECTRONIC ANALOG COMPUTER FOR RUNOFF

By Yasuo Ishihara, C.E. Member

Synopsis : The runoff is a very complicated phenomenon. In this paper, the fundamental equation of runoff, especially during flood, was hydraulically and hydrologically derived, based on the Hayami's excellent theory of runoff. An analog computer for runoff, whose computing circuit was directly represented by the equation analogous to the above one, was designed and constructed. Using this computer, the author obtained some solutions and discussed the characteristics of runoff. As an example, the result of computation for the Yura River basin was explained and it was ascertained that this computer had a good accuracy and was very available for engineering problems in hydraulics and hydrology.

要旨 雨水流出は極めて複雑な現象であるが、京大の速水教授の理論を基礎として、水理学的、水文学的に考察を加え、特に洪水の場合の雨水流出に関する基礎方程式を導いた。つぎに基礎式を直接相似法によつて電氣的に模擬する方法を研究し、雨水流出用演算器を試作した。さらに試作器を用いて基礎式の2,3の性質を調べるとともに、実例として由良川流域に適用し、本器がこうした雨水流出の問題に対して有効なものであることが確かめられた。

1. 緒 言

水害はわが国の地形的環境と台風圏にあるという事実などが招来する宿命ともいえるが、特にわが国の出水は早く大きい。また、水害から国土をまもり、さらに進んで最高度に水資源を利用するためには、解明すべき重要な問題が少なくない。いふまでもなく河水は降雨によつてもたらされるものであるから、降雨に際して何程の流出量があるかといういわゆる雨水流出の実態把握が、こうした課題を解明する第一の要諦といえるだろう。

河川の雨水流出現象を解明するに当つては、降雨特性、流域特性および雨水流などの課題があり、これらは互いに相関した点も少なくないが、本文はこうした課題のうち、主として洪水時の雨水流に関連した問題を取り扱つたものである。

さて、雨水の流出量を推定しようとするところみは、単位図、配分図、流出関数などを用いる経験式的なもの、下水計画などに用いられる古典的な合理法、および京大速水、岩垣両博士などによる水理学的なものに分けられる。

ところで流域に降つた雨水はいろいろの損失をうけた後、いろいろの径路を経て河道へ流出するのであるが、こうした雨水の流出過程において普通われわれが直接観測しようものは、降雨の状態と懸案地点における流出量だけである。従つて、流出現象の解明ははなはだ困難であるといわざるをえない。そのため、従来はこうした流出現象の解明に際して、比較的理論的根拠に乏しい仮定が行われていたようである。例えば、普通の方法で求められた単位図が出水状況の変化によつて異なつてくることが指摘され¹⁾、単位図法の工学的実用性をはかるべく適当な修正法に関する研究^{2),3)}が行われ、また流出関数を用いる場合にも適当な補正を行なつて実用性を高めているようである⁴⁾。

雨水流出はいふまでもなく水の運動に関連した現象であるから、速水⁵⁾、岩垣⁶⁾両博士の研究のように、雨水が地表や地中を流れてやがて河道に流出するまでの過程を水理学的に考察し、その実態を解明すべきであると考えられる。以下ではこうした観点から、雨水流出機構を水理学的、水文学的に考察しその実態把握につとめるとともに、これらの結果を利用して試作した雨水流出用演算器について述べるつもりである。

2. 流出方程式

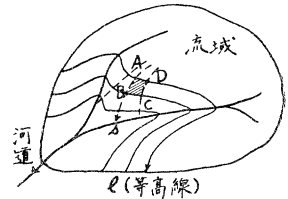
降雨はいわゆる純損失を除くと、表面流出、中間流出、地下水流出などの流出成分にわかれて河道へ流出する。問題を簡単にするため、以下しばらくは表面流出だけについて考えることにする。

* 昭.33.5, 第14回土木学会年次学術講演会にて発表

** 神戸大学助教授, 京都大学防災研究所講師

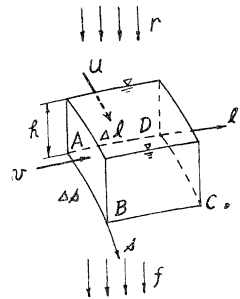
表面流出は、地表を流下する雨水流であるから、連続方程式と運動方程式を考
えなければならない。ところで、河川の流域は、水の流れという観点からすると、
山腹や平地などの面の部分と峡谷や河道などの線の部分から構成されており、こ
れらが複雑に組み合わさっていると考えることができる。従つて表面流出を厳密
な意味で解明することはほとんど不可能である。しかし工学的目的からすると、た
とえ雨水の実質部分の個々の運動が不明であつても、大局的に流出現象の実態が
的確に把握できれば、まず満足しなければならない。こうした意味から、末石氏⁷⁾
は流域を多くの矩形的斜面とこれらを結ぶ河道からできているものと仮定し、等
価流域ともいふべき概念を導入した。しかしこの方法では、流域を分割する際
にどの程度の面積の斜面を単位とするかという点に疑問があると思われるので、こ
こではこうした難点を除くためつぎのように考えた。

図-1 流域説明図
Fig. 1 Schematic map
of basin.



表面流は前述したように斜面上の流れと河道内の流れにわけられるが、いずれ
の流れにおいても、主流の方向はその地点における最急勾配の方向と一致するは
ずである。そこで、図-1 に示すように等高線に沿つて l 軸、それに直交して下
流方向に s 軸をとると、 s 軸の方向は最急勾配の方向であるから、流れの主流方
向と一致することになる。

図-2
Fig. 2



さて、このような直交座標系を考え、図-2 に示すような流域の面素 ABCD の
部分について連続の条件を求めると、

$$\frac{\partial h}{\partial t} \cdot \Delta s \cdot \Delta l + \frac{\partial}{\partial s} (uh \cdot \Delta l) \cdot \Delta s + \frac{\partial}{\partial l} (vh \cdot \Delta s) \cdot \Delta l = (r-f) \cdot \Delta s \cdot \Delta l \dots \dots \dots (1)$$

となる。ここに、 h は水深、 u, v はそれぞれ s 軸、 l 軸方向の断面平均流速、 r は斜面の単位面積単位時間当り
の雨量、 f は同じく浸透水量である。ところが、河川流域では局所的凹凸があり、地被状態も一様でなく、かつ降
雨強度、浸透能なども場所によつて変化しているのが普通である。こうした局所の変動の効果を表わすため、京大
の速水博士の理論⁵⁾に従い、(1) 式に含まれるすべての水理量のある面積について平均し、その平均値を“ $\bar{}$ ”で
表わすと、

$$\left. \begin{aligned} h &= \bar{h} + \delta h, \quad \overline{\delta h} = 0, \\ u &= \bar{u} + \delta u, \quad \overline{\delta u} = 0, \\ v &= \bar{v} + \delta v, \quad \overline{\delta v} = 0, \\ r &= \bar{r} + \delta r, \quad \overline{\delta r} = 0, \\ f &= \bar{f} + \delta f, \quad \overline{\delta f} = 0 \end{aligned} \right\} \dots \dots \dots (2)$$

と書くことができ、 h を \bar{h} の周辺に展開すると、

$$\delta h = - \left(\frac{\partial \bar{h}}{\partial s} \delta s + \frac{\partial \bar{h}}{\partial l} \delta l \right) \dots \dots \dots (3)$$

の関係がえられる。また水流の性質から、

$$\left. \begin{aligned} \overline{\delta u \cdot \delta s} &= \mu_1, \quad \overline{\delta u \cdot \delta l} = 0, \\ \overline{\delta v \cdot \delta s} &= 0, \quad \overline{\delta v \cdot \delta l} = \mu_2, \\ \bar{v} &= 0 \end{aligned} \right\} \dots \dots \dots (4)$$

とおける。そこで、(2) および (3) 式を (1) 式に代入し、さらに、その各項を上述と同じ面積についての平均操
作を施すと結局次式がえられる。

$$\frac{\partial \bar{h}}{\partial t} \cdot \Delta s \cdot \Delta l + \frac{\partial}{\partial s} (\bar{u} \bar{h} \cdot \Delta l) \cdot \Delta s - \frac{\partial}{\partial s} \left(\mu_1 \frac{\partial \bar{h}}{\partial s} \cdot \Delta l \right) \cdot \Delta s - \frac{\partial}{\partial l} \left(\mu_2 \frac{\partial \bar{h}}{\partial l} \cdot \Delta s \right) \cdot \Delta l = (\bar{r} - \bar{f}) \cdot \Delta s \cdot \Delta l \dots \dots \dots (5)$$

ここに、 μ_1, μ_2 は速水博士によつて導入された一種の混合の係数であり、河道を流れる洪水流の場合の流れ方向の
混合係数⁶⁾と同種のものである。

つぎに運動の条件は、横から流入および流出がある場合の運動方程式で与えられるわけであるが、こうした雨水
流の場合には、加速度および水面勾配の項は重力および摩擦抵抗力の項に比して十分小さいと考へてよい^{5), 6), 7)}。

従つて、斜面の勾配を S とすると、上述の平均流に対して、近似的に、

$$\bar{u} = (1/N) \bar{h}^m S^{1/2} \dots \dots \dots (6)$$

なる指数型の平均流速公式を仮定してよいだろう。ここに N, m は常数で、Manning 公式のときは $N=n, m=2/3$ となる。

(5) および (6) 式が表面流出に対する基礎方程式である。

3. 流体系と電気系の対応

流体系を電気系に直接対応させることによつて、表面流に対する computer を構成することができる。その方法は種々考えられるが、(5) および (6) 式が河道用洪水追跡器の基礎式⁹⁾と同型であるため、河道用洪水追跡器の場合と同様の方法によるのが便利である。

すなわち、まず簡単のため“-”を省略して、

$$w_1 = \frac{1}{N} h^{1+m} S^{1/2} - \mu_1 \frac{\partial h}{\partial s}, \quad w_2 = -\mu_2 \frac{\partial h}{\partial l} \dots \dots \dots (7)$$

で定義される水理量 w_1, w_2 を (5) および (6) 式に用いると、

$$\frac{\partial h}{\partial t} \cdot \Delta s \cdot \Delta l + \frac{\partial}{\partial s} (w_1 \cdot \Delta l) \cdot \Delta s + \frac{\partial}{\partial l} (w_2 \cdot \Delta s) \cdot \Delta l = (r-f) \cdot \Delta s \cdot \Delta l \dots \dots \dots (8)$$

がえられる。ここに w_1, w_2 はそれぞれ s 方向、 l 方向の単位幅当りの真の流量である。

つぎに普通用いられるように、流体量と電気量の対応を、

流体量	電気量	
h (水深)	$= \alpha v$ (電圧)	}
$w_1 \cdot \Delta l$ (流量)	$= \theta i_1$ (電流)	
$w_2 \cdot \Delta s$ (流量)	$= \theta i_2$ (電流)	
$r-f$ (雨量)	$= \theta q'$ (電流)	
t (時間)	$= \beta \tau$ (時間)	
s (距離)	$= r \xi'$ (距離)	
l (距離)	$= r \eta'$ (距離)	(9)

と仮定しよう。ここに α, β, r および θ は変換係数である。(9) 式を (7) および (8) 式に代入して整理すると、

$$\left. \begin{aligned} -\frac{\partial v}{\partial \xi'} &= \frac{\theta}{\alpha \mu_1 \cdot \Delta \eta'} i_1 - \frac{S^{1/2}}{N} \frac{r \alpha^m}{\mu_1} v^{1+m}, & -\frac{\partial v}{\partial \eta'} &= \frac{\theta}{\alpha \mu_2 \cdot \Delta \xi'} i_2, \\ -\left(\frac{1}{\Delta \eta'} \frac{\partial i_1}{\partial \xi'} + \frac{1}{\Delta \xi'} \frac{\partial i_2}{\partial \eta'} \right) &= \frac{\alpha r^2}{\theta \beta} \frac{\partial v}{\partial \tau} - r^2 q' \end{aligned} \right\} \dots \dots \dots (10)$$

がえられる。さらに上式において、

$$R_1' = \frac{\theta}{\alpha \mu_1 \cdot \Delta \eta'}, \quad R_2' = \frac{\theta}{\alpha \mu_2 \cdot \Delta \xi'}, \quad k' = \frac{S^{1/2}}{N} \frac{r \alpha^m}{\mu_1}, \quad C' = \frac{\alpha r^2}{\theta \beta} \dots \dots \dots (11)$$

とおき、 τ についてはそのままとし、 ξ' および η' についての階差式に書き直すと、

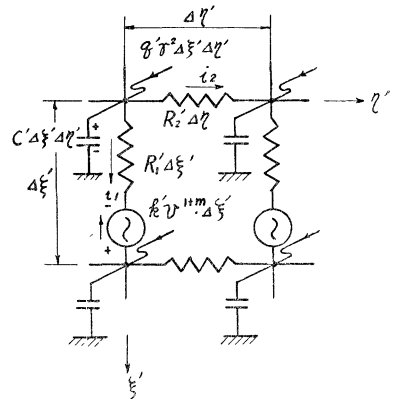
$$\left. \begin{aligned} -\Delta v &= R_1' \cdot \Delta \xi' \cdot i_1 - k' \cdot \Delta \xi' \cdot v^{1+m}, & -\Delta v &= R_2' \cdot \Delta \eta' \cdot i_2, \\ -(\Delta i_1 + \Delta i_2) &= C' \cdot \Delta \xi' \cdot \Delta \eta' \frac{dv}{d\tau} - r^2 q' \cdot \Delta \xi' \cdot \Delta \eta' \end{aligned} \right\} (12)$$

となる。(12) 式は 図-3 に示すように、 ξ' 方向の単位長当りの抵抗が R_1' で、かつ単位長当り $-k'v^{1+m}$ なる非線型分布直列起電力が存在し、 η' 方向に単位長当りの抵抗が R_2' で、さらに単位面積当りの静電容量および強制付加電流がそれぞれ C' および $r^2 q'$ である二次元電気系の場合の方程式をあらわす。従つて、図-3 で示される電気回路において、流域における条件に対応した電気的条件下で電流を流せば、流出量曲線が求められるわけである。この電気回路からわかるように、河道用洪水追跡器と同じ回路⁹⁾を利用すれば、比較的容易に演算器を構成することができ、しかもかなり良好な結果が期待できると考えられる。

4. 流出方程式の簡易化

上で説明した computer では、その基礎式が二次元の偏微分方程式であるため、多数の演算素子を必要とし、演算に対しての調整がかなり複雑となり実用的ではない。それで流出に関する基礎方程式を簡略化し、実用

図-3 (12) 式であらわされる電気回路
Fig. 3 The electric circuit represented by eq. (12).



的 computer の構成を考えよう。

いま基礎方程式 (5) および (6) 式に含まれるすべての水理量に等高線の全長 L について $\int_0^L [] dl/L$ なる平均操作を施し、同式中の “-” は省略し、上述の平均操作による平均値をあらためて “-” で示すと、前と同様に、

$$\left. \begin{aligned} h &= \bar{h} + \delta h, \quad \delta \bar{h} = 0, \\ u &= \bar{u} + \delta u, \quad \delta \bar{u} = 0, \\ &\dots\dots\dots \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (13)$$

と書くことができる。(13) 式の関係を (5) 式に用い、さらに各項を l について 0 から L まで積分すると、形式的に、

$$\begin{aligned} &\int_0^L \frac{\partial(\bar{h} + \delta h)}{\partial t} \cdot \Delta s \cdot dl + \int_0^L \frac{\partial}{\partial s} \{ (\bar{h} + \delta h) (\bar{u} + \delta u) dl \} \cdot \Delta s \\ &- \int_0^L \frac{\partial}{\partial s} \{ (\bar{\mu}_1 + \delta \mu_1) \frac{\partial(\bar{h} + \delta h)}{\partial s} \cdot dl \} \cdot \Delta s - \int_0^L \frac{\partial}{\partial l} \{ (\bar{\mu}_2 + \delta \mu_2) \frac{\partial(\bar{h} + \delta h)}{\partial l} \cdot \Delta s \} \cdot dl \\ &= \int_0^L \{ (\bar{r} + \delta r) - (\bar{f} + \delta f) \} \cdot \Delta s \cdot dl \end{aligned}$$

と書ける。上式の積分は、 s 軸、 l 軸が複雑な直交曲線座標であるので、容易に計算することができない。そこで普通の直角座標の場合と同様な形式で、

$$\begin{aligned} &\int_0^L \frac{\partial(\bar{h} + \delta h)}{\partial t} \cdot \Delta s dl = \frac{\partial \bar{h}}{\partial t} \cdot L \cdot \bar{\Delta s} + \epsilon_1, \\ &\int_0^L \frac{\partial}{\partial s} \{ (\bar{u} + \delta u) (\bar{h} + \delta h) dl \} \cdot \Delta s = \frac{\partial}{\partial s} (\bar{u} \cdot \bar{h} \cdot L) \cdot \bar{\Delta s} + \epsilon_2, \\ &\dots\dots\dots \end{aligned}$$

とあらわすと、

$$\frac{\partial \bar{h}}{\partial t} L + \frac{\partial}{\partial s} (\bar{u} \cdot \bar{h} \cdot L) - \frac{\partial}{\partial s} \left(\bar{\mu}_1 \frac{\partial \bar{h}}{\partial s} L \right) = (\bar{r} - \bar{f}) L + \frac{\epsilon}{\Delta s}$$

となる。ここに ϵ は近似計算のための誤差 $\epsilon_1, \epsilon_2, \dots$ の代数和をあらわす。さらに、上式において $\epsilon/\Delta s$ の効果を $\bar{\mu}_1$ の中に含ませ、あらためて μ と書き “-” を省略して、

$$\frac{\partial \bar{h}}{\partial t} L + \frac{\partial}{\partial s} (\bar{u} \bar{h} L) - \frac{\partial}{\partial s} \left(L \bar{\mu} \frac{\partial \bar{h}}{\partial s} \right) = (r - f) L \dots\dots\dots (14)$$

と仮定しよう。同様な近似で (6) 式に対しては、

$$u = (1/N) h^m S^{1/2} \dots\dots\dots (15)$$

としてよいだろう。結局、(14) および (15) 式が簡易化された表面流出に対する基礎式となるが、少なくとも (14) 式が成立するかどうかは、実河川の流出問題に適用して検照しなければならないことはいうまでもない。

5. 演算回路の構成

(14) および (15) 式を電気系の方程式であらわすために、

$$w = (1/N) h^{1+m} S^{1/2} - \mu \partial h / \partial s \dots\dots\dots (16)$$

で定義される単位幅当りの真の流量 w を用いると、(14) および (15) 式からつぎの式がえられる。

$$\frac{\partial \bar{h}}{\partial t} L + \frac{\partial}{\partial s} (wL) = (r - f) L \dots\dots\dots (17)$$

さらに、(9) 式の場合と同様に、流体量と電気量の対応を、

$$h = \alpha v, \quad t = \beta \tau, \quad s = \gamma \xi, \quad wL = \theta i, \quad (r - f)L = \theta q \dots\dots\dots (18)$$

と仮定し、(16) および (17) 式に代入して整理すると、それぞれ、

$$\left. \begin{aligned} -\frac{\partial v}{\partial \xi} &= \frac{\theta r}{\alpha \mu L} \cdot i - \frac{S^{1/2}}{N} \frac{\gamma \alpha^m}{\mu} v^{1+m} \\ -\frac{\partial i}{\partial \xi} &= \frac{\alpha r}{\beta \theta} L \cdot \frac{\partial v}{\partial \tau} - r q \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (19)$$

となる。いま、上式において、

$$C = \frac{\alpha r}{\beta \theta} \cdot L, \quad R = \frac{\theta r}{\alpha \mu L}, \quad i_0 = \frac{S^{1/2}}{N} \frac{\alpha^{1+m}}{\theta} \cdot L v^{1+m} \dots\dots\dots (20)$$

とおき、さらに前と同様に τ についてはそのままとし、 ξ についての階差式であらわすと、つぎのようになる。

$$\left. \begin{aligned} -\Delta i &= C \cdot \Delta \xi \, dv / d\tau - r q \cdot \Delta \xi \\ -\Delta v &= R \cdot \Delta \xi (i - i_0) \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (21)$$

上式は洪水追跡器⁹⁾の場合の関係式と同じで、ただ連続の条件式に降雨をあらわす $r q \cdot \Delta \xi$ の強制電流が加わっただけである。従つて、(21)式で示される電気回路は 図-4 のようになる。また演算素子は 図-5 に示されている。ここで注意すべきことは、sharp cut-off 特性を有する五極真空管の $e_g \sim i_p$ 特性を利用して、(20)式の最後の式で与えられる $i_o \propto v^{1+m}$ の強制電流を実現させるため、分圧用の抵抗 R_g を用いて $e_g = av$ (a は分圧比)としてグリッドに加えていることがある。すなわちこうした場合には、(21)式のはじめの式は、

$$- \Delta i = C \cdot \Delta \xi \, dv/d\tau - r q \cdot \Delta \xi + v/R_g \dots \dots \dots (22)$$

となるので、実際の回路では v/R_g が他の項に比して十分無視できる程度に R_g を大きく選ばなければならない。

つきに、(14)および(15)式は t に関して1次、 s に関して2次の偏微分方程式であるので、一つの初期条件と二つの境界条件が必要である。

初期条件は、降雨の初期における条件を与えればよいわけであるが、洪水時を対象とするような場合には、出水の大きさは初期の水深や流量に比して非常に大きいので、普通の場合は簡単のために、 $t=0$ で $h=0$ としてよいだろう。

境界条件は、 $s=0$ の最上流端と、 $s=s_0$ の最下流端で与えればよい。 $s=0$ 、($\xi=0$)においては明らかに $w=0$ である。 $s=s_0$ における条件は、一般に複雑で明確に規定することはできない。しかしながら、こうした雨水の流出量を求めようとする地点は山地から平地に出る点に選び、それより下流の有堤部では洪水追跡を行うことが望ましい。換言すると、流出量曲線を求めようとする地点の流量と水深の関係が下流条件の影響をほとんど受けないように、河床勾配がかなり急であるような地点を選ぶことにすると、該地点の流量は(16)式から、近似的に、

$$(wL)_{s=s_0} = [(L/N)h^{1+m}S^{1/2}]_{s=s_0} \dots \dots \dots (23)$$

とすることができる。(18)式を用いて上式を電気系に変換すると、 $\xi = \xi_0$ において、

$$i = \frac{LS^{1/2}}{N} \cdot \frac{\alpha^{1+m}}{\theta} v^{1+m} \dots \dots \dots (24)$$

となり、(20)式の最後の式と同じ形となるので、図-5に示されている電気回路で、 $r q \cdot \Delta \xi$ 、 $R \cdot \Delta \xi$ 、 $C \cdot \Delta \xi$ であらわされている要素を取り除いたもので容易に実現できる。

6. 演算回路の設計

この場合のように、基礎式が偏微分方程式の場合には、(21)式のように ξ についての階差式に書きあらため、演算回路を集中定数回路として設計すると便利である。以下、流出演算器を由良川流域へ適用した例について、比較的無難と考えられる設計法を説明しよう。

対象とした流域は大野ダムより上流の約 345 km² である。この流域の最高標高は 959 m、最低は約 150 m で、標高差が約 850 m である。そこでこの流域を五つの演算素子で代表させることとし、まず標高が 200 m、300 m、……、900 m の 8 個の等高線によつて 9 個の領域に分け、五万分の一の地形図から各等高線の長さおよび相隣る等高線で囲まれた領域の面積を計算する。こうして求められた面積をそれを囲む二つの等高線の長さの平均値 L で割ると、最急勾配方向の平均幅の水平分値がわかり、これと同等高線の標高差 100 m とから平均勾配 S および平均巾が計算される。この例では平均幅の値が約 200 m であつた。これら 9 個の領域を適当にまとめて五つのブロックにするので、設計の平均幅として $\Delta s = 400$ m とした。これを電気系の単位長に対応させると、 $r = 4 \times 10^2$ となる。

つきに、このような演算器では、記録装置、入力装置および演算回路の構成法などを考慮すると slow type とするのが便利であるので、流体系の 1 hr を電気系の 0.1 sec に対応させると、 $\beta = 3.6 \times 10^4$ となる。一方、(20)式のはじめの2式から、

$$CR = r^2/\beta \mu \dots \dots \dots (25)$$

の関係がえられるので、 $\mu = 10^2$ (m-sec 単位) と仮定し、 r と β の値から (25) 式を計算すると、 $CR = 3.2 \times 10^{-2}$ sec となる。従つて、 C と R が電気的に容易に実現できるように、 C と R を分離すればよいが、後述するように強

図-4 (21)式であらわされる電気回路

Fig. 4 The electric circuit represented by eq. (21).

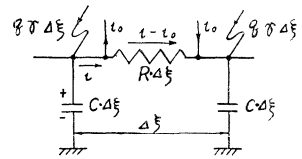
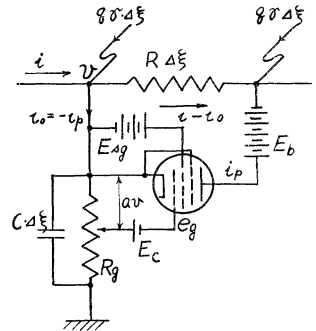


図-5 演算素子回路説明図

Fig. 5 Schematic circuit diagram of computing element.



制電流 $r q \cdot d\xi$ を確実に挿入するためには、演算電圧 v があまり高くないようにすることが望ましい。

さらに五極管として 6SJ7 を使用することになると、(20) 式の $i_0 \propto v^{1+m}$ の特性が保たれる範囲内で真空管を使用しなければならないので、最大プレート電流は $i_p = 5 \text{ mA}$ となる。従つて、少なくともこの値を出水の最大流量に対応させなければならないので、最大流量を $3000 \text{ m}^3/\text{sec}$ と仮定すると、 $\theta = 6 \times 10^5$ がえられる。

最後に (20) 式のはじめの式から、上で求めた値と代表的等高線の長さ $L = 2 \times 10^4 \text{ m}$ を用いて、 $\alpha = 1.5 \times 10^{-2}$ が計算される。

以上で、すべての値が定まつたので、各演算素子の回路常数を計算できる。結果を一括表示すると表-1 のとおりである。

表-1 流体系と電気系の対応
Table 1 The relation of analogy of hydraulic and electric systems.

流 体 系	電 気 系	変 換 係 数
h (meter)	v (volt)	$\alpha = 1.5 \times 10^{-2}$
t (sec)	τ (sec)	$\beta = 3.6 \times 10^4$
s (meter)	ξ (mesh)	$\gamma = 4 \times 10^2$
wL (m^3/s)	i (ampere)	$\theta = 6 \times 10^5$
$\mu = 10^2$ (m-sec 単位) $L = 2 \times 10^4 \text{ m}$		$R = 5.8 \text{ k}\Omega$ $C = 5.55 \mu\text{F}$

以上のようにして演算回路が設計できたわけであるが、演算器において $S^{1/2}/N$ 、 μ および m の値がある程度可変にすることが望ましい。 $S^{1/2}/N$ および μ に対しては洪水追跡器の場合⁹⁾と同様に、それぞれ分圧用抵抗 R_g および直列抵抗 $R \cdot d\xi$ に可変抵抗を用いよう。 m の値は 2/3 前後と考えられるが、これは 図-5 に示されているグリットバイアス E_c を変えることによつて、ある程度変化させることができる。

なお、降雨に対応する強制電流 $r q \cdot d\xi$ を各演算素子に挿入しなければならないが、本例では有効降雨強度 $r_e = r - f$ と総強制電流 $q_t = \sum r q \cdot d\xi$ との関係をもとに、流域面積と変換係数から計算すると、

$$q_t = 0.16 r_e \cdot \frac{1}{f} \text{ mA}, r_e : \text{mm/hr} \dots \dots \dots (26)$$

となる。各素子に挿入すべき電流は、上式から計算される電流値を各素子が代表する流域面積で比例配分すればよい。

7. 試作演算器の構成

上述の由良川流域を対象として試作した雨水流出用演算器の概要を述べよう。試作に当り、計算誤差 3% 以内を目標とした。

(1) 演算素子 図-5 に演算素子の回路説明図を示したが、河道用洪水追跡器⁹⁾と全く同様であるので説明を省略する。ただ分圧抵抗 R_g は十分大きいことが必要であるので、これを $10 \sim 15 \text{ M}\Omega$ とした。

(2) 入力装置 入力装置は関数発生装置と強制電流装置からできており、図-6 は前者の原理を示すもので、河道洪水追跡器の関数発生装置を多少改造したものである。一つのポテンシオメータと、多数のバークライト板と銅板とを交互に重ね合わせ銅板 3 枚ずつを $2 \text{ k}\Omega$ の抵抗で結んだ真直な commutator 状のものからできている。前者のポテンシオメータからは 1 volt 間隔に 100 個のタップ [A] が出され、後者からも 100 個のタップ [B] が出されている。いま、銅板 3 枚分を 0.1 sec の割合でブラシを走行させると、タップ [B] のおのおのは 0.1 sec 間隔の時刻に対応する。そこで、タップ [B] の一つ一つにそれぞれの時刻に対応する有効降雨強度に比例した電圧をタップ [A] の中から選んで互いに連結し、有効雨量が零の場合にはアース E に結んでから、ブラシを走行させると、ブラシには有効降雨強度に比例した電圧変化がえられるわけである。普通有効雨量は後述の図-10 に示すように、ある一定時間内の平均値として与えられ、雨量分布

図-6 関数発生装置説明図
Fig. 6 Schematic diagram of function generator.

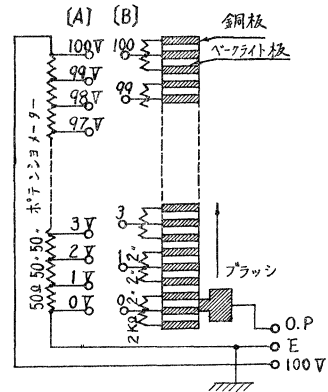
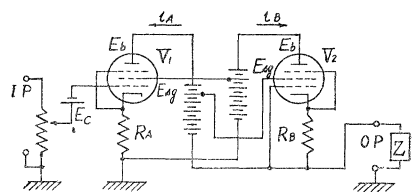


図-7 強制電流発生装置回路説明図
Fig. 7 Schematic circuit diagram of forced current generator.



は棒状グラフのようになるので、上述したような関数発生装置を採用したのである。

つぎにこうしてえられた電圧変化であらわされた有効雨量を強制電流として演算素子へ挿入する装置の回路原理図を示したものが図-7である。五極管 V_1 のスクリーン電圧 E_{sg} を一定に保つとき、プレート電圧 E_b がかなりの範囲で変動しても、プレート電流 i_A はほとんど変化せず、従つてプレート回路 Z に対して強制電流とみなされるといふ特性を利用している。五極管 V_2 は V_1 に適当なバイアス E_c を与えたときの V_1 のプレート電流を打消すためのものであり、 R_A は V_1 の入力電圧と出力電流の直線的関係をよくするために入れた抵抗、また R_B は i_B を一定に保たしめるために入れた抵抗である。図-8はその特性を、入力電圧 v を横軸とし、出力電流 i を縦軸として示したもので、直線性がかなり良好であることがわかる。

(3) 記録装置 記録器にはインキ書きオシログラフを用い、その増幅器には演算素子の回路状態を乱さないため、入力抵抗の高いものを使用した。

(4) 演算器の構成 演算器のブロック・ダイアグラムを図-9に示す。すなわち、まず有効雨量に比例した電圧が関数発生装置 F.G. で作られ、強制電流装置 F.C. を通して強制電流として演算器の入力となる。F.C. は各演算素子 C_i に対して一つずつあるのが望ましいが、不経済なことから取り扱いが不便なため、この図では一つの F.C. で発生された電流を、各演算素子が代表する流域面積に逆比例し、かつ演算素子の回路状態を乱さないような高抵抗 R_1, R_2, \dots, R_5 を通して各素子に送るようにしている。従つて、この場合発生すべき強制電流は、(26) 式で与えられる値とすればよいわけで、取り扱いが非常に簡単となる。しかしこうした回路構成を用いるときは、演算電圧が低いことが必要で、こうした理由から、前述したように変換係数 α の値を比較的大きく選んだのである。

このようにして演算素子に入力として強制電流が挿入されると、演算が行われるわけであるが、図の F.C.I および F.C.II は演算素子において適当なグリッドバイアスを選び、 $-i_p = i_0 \alpha v^{1+m}$ の特性を発揮させるときに流れる base current を吸収するための装置である。つぎに、B.C. は下流端における条件 (24) 式を与える装置であり、さらに抵抗 R を演算電流 i が流れるようにしてその端子電圧を記録させれば所要の解がえられるのである。

8. 実河川への適用

由良川の由野ダムより上流の流域を対象とした適用例について述べるが、その前に 2, 3 の問題点について若干の考察を加えておく。

(1) 有効降雨と流出成分 はじめに述べたように、流出成分には表面流出、中間流出および地下水流出がある。河道に直接降つた雨水の流出は地表面における現象であるから、ここでは一応表面流出に含ませることとする。地下水流出は雨水が地中へ浸透し地下水面に達した後、地下水流となつて流出する成分であり、その流出現象は非常に緩慢で、かつ洪水流量に比してかなり小さい。一方中間流出は雨水が一度地中へ浸透し地下水面に達することなく再び地上に現われる成分で、洪水期間において比較的变化の割合が大きく、かつその量も大きいといわれている。また、B.C. van't Woudt の実測¹⁰⁾によると、こうした中間流出となる成分は、地表近くのごく浅い部分を流れ再び地上にあらわれることが観測されている。

河川流出量をいろいろの成分に分離して流出機構を解明しようとする研究が行われ貴重な成果が収められているが⁹⁾、直接観測できるものが降雨量と流出量だけであるので、現在のところこうした流出成分の分離法には不明確な点が多いようである。そこで、地下水流出はその量が小さく分離も比較的容易で、かつ分離の際の誤差が洪水の peak 付近の流量推定におよぼす影響が小さいこと、および中間流出が比較的浅い土層に限られるということなどを考慮して、ここでは流出成分として一応表面流出と中間流出を一諸にした直接流出と地下水流出の二つにわけて考えることにする¹¹⁾。

従つて、直接流出とは地表付近に限られた現象と考えることができるだろう。直接流出をこのように考えると、

図-8 入力電圧 v と出力電流 i との関係
Fig. 8 The relation between input voltage v and output current i .

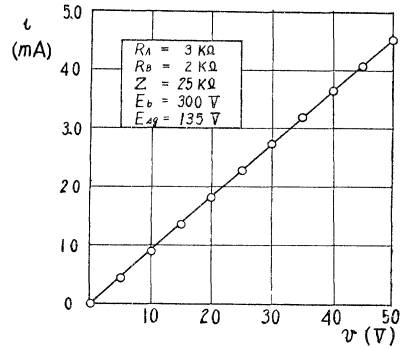
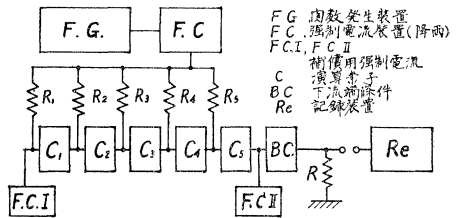


図-9 ブロック・ダイアグラム
Fig. 9 Block diagram of computer.

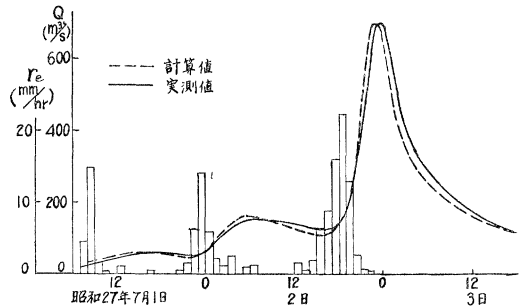


等価な h, N, m などを仮想することによつて、前節までに述べた表面流出に対する考察をそのまま直接流出に拡張して適用してよいことになり、また有効雨量 $r-f$ の算定に当つては、 f として Horton 型の浸透能曲線を用いればよいことになる。

(2) N, m および μ の値の決定 演算を行うに当つて、 N, m および μ の値を知る必要がある。草地などを流れる雨水流についての V.J. Palmer の実験¹²⁾によると、 $m=2/3$ となり、近似的に Manning 公式が適用できるといわれている。しかし、いまの場合は等価な h, N, m, μ などを用いているので、これらの値をいろいろに変えて演算を行い、その結果を実測値と比較して、もつとも良く適合するときの N, m および μ の値をもつて所要の値としなければならない。

(3) 雨水流出演算の実施例 昭和27年7月の洪水について、試作演算器による計算値と実測値とを比較したのが 図-10 であつて、結果はかなり良好であることがわかる。この場合、有効雨量および流出量の分離については、本流域についての石原教授らの研究成果¹⁾を用い、Horton 型の浸透能曲線を採用した。この適用例で調整された演算素子の特性から m の値を求めたところ $m=2/3$ となり、こうした直接流出を対象として等価水深を用いる場合にも、ほぼ Manning 型の平均流速公式を用いてよいことがわかつた。また m -sec 単位で μ の値は $10 \sim 10^2$ 、 N の値は $2 \sim 3$ の程度であつたが、混合係数 μ は河道における値 10^4 程度と較べてかなり小さく、一方 N は Manning の粗度係数 n と較べると非常に大きいようである。なお、この演算結果がかなり良好であることから、現在のところ工学的実用性という点では、流出問題に対し Horton 型の浸透能曲線を用いて、流出量を直接流出と地下水流出の二つの成分にわけて考えるのが有効であるように思われる。

図-10 由良川洪水に対する適用結果の一例
Fig. 10 An example of application to the floods in the Yura River.



つぎに、本流域における流出量曲線の基礎的特性をみるために、 $t \geq 0$ に一定の有効雨量がある場合と、一定の降雨が続いた後 $t=0$ で急に雨がやんだ場合とについて、流出量曲線をこの演算器を用いて計算した結果は 図-11 のとおりである。前者の場合の流出量曲線の上昇率と後者の場合の減少率とを比較すると、いずれの降雨強度に対しても、はじめは上昇率および減少率が大きいが、時間がたつにつれて小となり、とくに前者の場合に早く定常状態に近づくようである。なお、こうした性質は降雨強度が大きい場合ほど顕著である。これらの事実は、大洪水の場合の単位図が小洪水の場合のそれと比較して、ピークの到達時間が早く、かつその大きさも大きいということと一致する性質であつて、きわめて興味深い結果といえよう。

図-11 降雨条件と流出量曲線との関係 (1)

Fig. 11 The relation between rainfall condition and runoff curve (1).

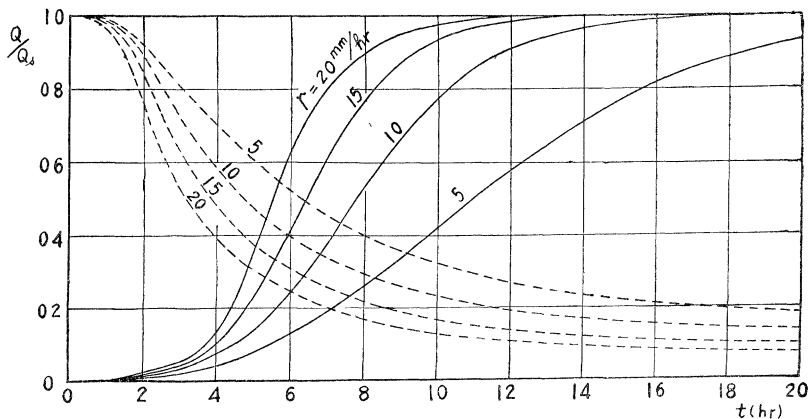


図-12 は継続時間の異なつた二つの同じ強度の降雨が 4 hr おいて降つた場合の流出量曲線を求めたもので、はじめに継続時間の小さい降雨がある場合が逆の場合に較べて、急峻であつてピーク流量も大きくなつてゐる。このことは、はじめに降雨があると流域に雨水がたまり、後続の大きい降雨が流出しやすくなるためであつて、流

出現象に関するわれわれの経験的事実と一致している。

8. 結 論

雨水流出の基礎方程式，雨水流出用演算器およびそれを用いて行つた演算例について述べたが，明らかにされた諸点を結論的に述べるとつぎのようである。

1. 雨水流出の基礎方程式は (5), (6) 式であらわされ，**図-3**のような電気回路で相似演算回路が構成されて，かなり良好な結果が期待される。
2. (5), (6) 式の簡易式として (14), (15) 式を用いて雨水流出用演算器を構成することができ，洪水追跡用演算素子をそのまま使用できることがわかつた。
3. **図-6**および**図-7**に示された関数発生装置および強制電流装置を用いることによつて，十分な精度をもつ入力装置を構成することができた。
4. 表面流出と中間流出を同時に考慮して計算した方が便利であり，由良川に適用した結果は良好であつた。
5. 由良川流域に対して，2, 3の典型的な降雨条件の下で演算を行つた結果，こうした流出問題に対して興味ある結果がえられた。

以上のように良好な結果がえられたが，さらにこの試作演算器は雨水の流出機構の解明や洪水予報および洪水防禦など治水上の重要問題の解決に大いに役立つものと考えられる。

最後に本研究に対し文部省科学研究費が交付せられ，京大防災研究所において石原藤次郎，速水頌一郎，矢野勝正および近藤文治の各教授から懇篤な御指導を受けたことを明記し，深謝の意を表する次第である。

参 考 文 献

- 1) 石原藤次郎，田中要三，金丸昭治：わが国における単位図の特性について，土木学会誌，第 41 卷，第 3 号，102~107，昭.31.3
- 2) 立神弘洋：木曾川洪水の水文学的研究，昭.29.4
- 3) 石原藤次郎，金丸昭治：降雨条件の変動による単位図の変化について，土木学会論文集，第 32 号，50~56，昭.31.3
- 4) 石原藤次郎，高瀬信忠：流出関数による由良川出水の解析，土木学会論文集，第 56 号，昭.33.7 予定
- 5) 速水頌一郎：降雨の流出解析について，京大防災研究所，創立 5 周年記念論文集，168~180，昭.31.11
- 6) Iwagaki, Y.: Fundamental studies on the runoff analysis by characteristics, Disaster Prevention Research Institute, Kyoto Univ., Bulletin No. 11 (1955)
- 7) 末石富太郎：特性曲線法による出水解析について，土木学会論文集，第 29 号，74~87，昭.30.12
- 8) Hayami, S.: On the propagation of flood waves, Disaster Prevention Research Institute, Kyoto Univ., Bulletin No. 1 (1951)
- 9) 石原藤次郎，石原安雄：洪水追跡用アナログ・コンピューターについて，土木学会論文集，第 24 号，44~57，昭.30.4
- 10) van't Woudt, B.D.: On factors governing subsurface storm flow in volcanic ash soils, New Zealand, Trans. AGU, Vol. 35, 136~144 (1954)
- 11) Linsley, R.K., Kohler, M.A. and Paulhus, J.L.H.: Applied Hydrology, McGraw-Hill Book Co., 400~403 (1949)
- 12) Palmer, V.J.: Retardance coefficients for low flow in channels lined with vegetation, Trans. AGU, Vol. 27, 187~197 (1946)

(昭. 33. 7. 8)

図-12 降雨条件と流出量曲線との関係 (2)
Fig. 12 The relation between rainfall condition and runoff curve (2).

