

洪水追跡器の実河川への適用について*

正員 石原 安雄**

要旨 この論文は著者らの考案した洪水追跡用アログ・コンピューターを実河川に適用する場合の具体的方法を詳細に説明し、それに含まれている常数を適宜変更することによつて、実河川の洪水追跡に都合よく用いられることを明らかにしたものであつて、その具体例として木曽川及び淀川における洪水追跡の結果を示しておいた。

1. 緒言

著者は石原教授らとともに洪水追跡用アログ・コンピューターの試作研究を行い、洪水予報、洪水流の実態把握、河相の経年変化の究明、河川の諸計画への応用など多方面に利用できることを示し、種々の成果を収めてきた^{1), 2)}。しかしこれを実河川に適用する場合には支派川の流入出、河幅変化の著しい河道、貯水池及び遊水池、河口附近の潮汐の問題など、多くの課題を解決していくなければならない。これらのうち、貯水池の場合についてはすでに若干の成果を発表したが³⁾、その他の課題に対しても十分な解明を行わないと、複雑な条件のもとにあら実河川に洪水追跡器を有効に適用することができないわけである。

本文は上述の諸課題のうちで、とくに支川の流入、河川の合流、河川幅の変化及び遊水池について研究し、その結果に基づいて、木曽川及び淀川に適用した洪水追跡の実例を説明したものであつて、実河川における洪水流の実態把握に資するところが少なくないと思われる。

2. 河川幅が変化している河道

(1) 基礎式に対する考察 著者らが試作した洪水追跡器で採用した洪水流の基礎式は、河川幅が比較的一様な河道を対象とし、速水博士の洪水理論⁴⁾に基づいたものであつて、つぎのように表わされる。

$$\frac{\partial H}{\partial t} + A \frac{\partial H^{3/2}}{\partial x} = \mu \frac{\partial^2 H}{\partial x^2} \quad \dots \dots \dots (1)$$

ここに、 H は水深、 $A = C\sqrt{S}$ 、 C は Chézy の係数、 S は河床勾配、 μ は河相係数、 t は時間、 x は下流方向に測った距離である¹⁾。またこの追跡器を用いて種々の演算を行つた結果、河幅が比較的一様な実河川における測定値とよく一致し、(1) 式の特性も洪水流についての経験的事実と全く合致していることがわかつた^{1), 2)}。従つて河幅が変化している河道の洪水流の基礎偏微分方程式も、(1) 式のような拡散型のものとなると考えられる。

さて、河道の不規則のために生ずる流れ方向の混合を考え、その係数を σ とすると、速水博士の理論に従つて σ は一般には x の函数と考えられる。この σ を考慮すると、断面が矩形に近く河幅が変化する河道における連続の方程式は、 B を河幅、 U を平均流速として、

$$B \frac{\partial H}{\partial t} + \frac{\partial(BHU)}{\partial x} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\sigma B \frac{\partial H}{\partial x} \right) \quad \dots \dots \dots (2)$$

となる。比較的急勾配であるわが国の河川では、

$$U = C\sqrt{SH} \quad \dots \dots \dots (3)$$

が近似的に成立すると仮定し、これを (2) 式に入れると、

$$B \frac{\partial H}{\partial t} + \frac{\partial(ABH^{3/2})}{\partial x} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\sigma B \frac{\partial H}{\partial x} \right) \quad \dots \dots \dots (4)$$

が得られる。この (4) 式は (1) 式と同じ型であり、前述の理由によつて、河幅が変化している河道における洪水流の基礎式としてよいであろう。しかし (4) 式の誘導でかなりの近似をしているから、実測値との比較にまたないと、(4) 式の妥当性を簡単に断言するわけにいかない。さらに (4) 式と (1) 式とを比較して、実用的見地から (4) 式中の混合の係数 σ を河相係数 μ でおきかえると、次式のようになる。

$$B \frac{\partial H}{\partial t} + \frac{\partial(ABH^{3/2})}{\partial x} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\mu B \frac{\partial H}{\partial x} \right) \quad \dots \dots \dots (4)'$$

なお、(3) 式の平均流速公式の代りに Manning の公式を用いると、(4)' 式は n を Manning の粗度係数として、

* 土木学会第1回水理研究会講演会（昭31.5.15）にて1部を発表

** 神戸大学助教授、工学部土木教室

$$B \frac{\partial H}{\partial t} + \frac{\partial (A'BH^{5/3})}{\partial x} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\mu B \frac{\partial H}{\partial x} \right), \quad A' = \frac{\sqrt{S}}{n} \quad \dots \dots \dots (5)$$

となる。以下においては、(4)'式または(5)式を河幅が変化している場合の洪水流の基礎式とする。

(2) 河道素子の回路構成 河幅が比較的一様な河道を対象とし、(1)式に基づいて作った演算素子(河道素子)を、河幅が変化する場合の(4)'式を用いたときに、いかに変えればよいかを考えよう。(5)式を用いたときも、全く同様に取り扱うことができる。

いま問題としている河道において、ある標準となるような河幅を B_0 (一定) とし、

$$\eta = B/B_0 \quad \dots \dots \dots (6)$$

とすると、(4)式はつきのように変形される。

$$\frac{\partial H}{\partial t} + \frac{1}{\eta} \frac{\partial (\eta AH^{5/2})}{\partial x} = \frac{1}{\eta} \frac{\partial}{\partial x} \left(\eta \mu \frac{\partial H}{\partial x} \right) \quad \dots \dots \dots (7)$$

さらに、上式において

$$q = \eta \left(AH^{5/2} - \mu \frac{\partial H}{\partial x} \right) \quad \dots \dots \dots (8)$$

とおくと、

$$-\frac{\partial H}{\partial t} = \frac{1}{\eta} \frac{\partial q}{\partial x} \quad \dots \dots \dots (9)$$

となる。ここに、 q は河道を流れる真の流量を標準河幅 B_0 で割った値である。

つぎに、普通に行われているように、変換係数 α, β, r 及び θ を用い、流体量と電気量との対応を

$$\left. \begin{array}{l} H(\text{水深}) = \alpha v(\text{電圧}) \\ q(\text{流量}) = \theta i(\text{電流}) \\ t_{hy}(\text{時間}) = \beta t_{el}(\text{時間}) \\ x_{hy}(\text{距離}) = r x_{el}(\text{距離}) \end{array} \right\} \quad \dots \dots \dots (10)$$

と仮定し、これらを(8)式及び(9)式に代入すると、

$$-\frac{\partial v}{\partial x_{el}} = R_1 i - k_1 v^{3/2} \quad \dots \dots \dots (11)$$

$$-\frac{\partial i}{\partial x_{el}} = K_1 \frac{\partial v}{\partial t_{el}} \quad \dots \dots \dots (12)$$

$$\text{ここで}, \quad K_1 = \frac{\alpha r}{\beta \theta} \cdot \eta = K_0 \eta, \quad R_1 = \frac{\theta r}{\alpha \mu} \cdot \frac{1}{\eta} = R_0 \cdot \frac{1}{\eta}, \quad k_1 = \frac{A \alpha^{3/2} r}{\mu}, \quad \left. \right\} \quad \dots \dots \dots (13)$$

$$\text{ただし}, \quad K_0 = \frac{x r}{\beta \theta}, \quad R_0 = \frac{\theta r}{\alpha \mu}$$

つぎに、(11)式において、

$$i_{01} = k_1' v^{3/2}, \quad \text{ただし}, \quad k_1' = k_1 / R_1 = A \alpha^{3/2} \eta / \theta \quad \dots \dots \dots (14)$$

とおくと、次式のようにならわす。

$$-\frac{\partial v}{\partial x_{el}} = R_1(i - i_{01}) \quad \dots \dots \dots (15)$$

さて、洪水追跡器では河道を適当な距離で区切って、集中定数回路として演算回路を構成するのが普通である¹⁾。それで(12)式及び(15)式を x_{el} についての階差式に書きかえ、添字 el を省略すると、それぞれ次式となる。

$$\left. \begin{array}{l} -\Delta i = K_2 \frac{dv}{dt} \\ -\Delta v = R_2(i - i_{02}) \end{array} \right\} \quad \dots \dots \dots (16)$$

$$\text{ここで}, \quad K_2 = \bar{K}_1 \cdot \Delta x - K_0 \bar{\eta} \cdot \Delta x, \quad R_2 = \bar{R}_1 \cdot \Delta x - R_0 \cdot \Delta x / \eta, \quad \left. \right\} \quad \dots \dots \dots (17)$$

$$i_{02} = \bar{i}_{01} = \bar{i}_0 \cdot \bar{\eta}, \quad \text{ただし} \quad i_0 = (A \alpha^{3/2} v^{3/2}) / \theta$$

上式にて $\bar{K}_1, \bar{R}_1, \bar{i}_{01}, \bar{\eta}$ はそれぞれの量の Δx 区間についての平均値をあらわす。

一方、河幅が比較的一様な河道では、(1)式が成立するが、(7)式で $\eta=1$ とおくと(1)式が得られる。従つてこの場合には、(17)式において $\bar{\eta}=1$ とおけば、(16)式に対応して、

$$-\Delta i = K_0 \cdot \Delta x \frac{dv}{dt}, \quad -\Delta v = R_0 \cdot \Delta x(i - i_0) \quad \dots \dots \dots (18)$$

が得れる。(18) 式は河幅が比較的一様な河道に対する洪水追跡器の基礎式であつて、 $K_0 \cdot 4x$ はコンデンサーの静電容量、 $R_0 \cdot 4x$ は電気抵抗、 $i_0 = A(\alpha v)^{3/2}/\theta$ は強制電流を示している¹⁾。

さて、(16) 式と (18) 式とを比較すると、形式的に全く同じであるから、河幅が変化している河道の場合にも、河幅が一様な河道に対する河道素子をそのまま利用して差支えないことがわかる。ただその場合には、

$$\left. \begin{array}{l} K_0 \cdot 4x \text{ の代りに, } K_2 = K_0 \cdot 4x \cdot \bar{\eta} \\ R_0 \cdot 4x \text{ の代りに, } R_2 = R_0 \cdot 4x / \bar{\eta} \\ i_0 \text{ の代りに, } i_{02} = i_0 \cdot \bar{\eta} \end{array} \right\} \quad \dots \dots \dots \quad (19)$$

で与えられる静電容量、電気抵抗及び強制電流を挿入することが必要である。これらの関係を図示したものが図-1 であり、図中 (a) は (18) 式であらわされる電気回路を、(b) は (16) 式であらわされる電気回路を示している。

なお、基礎式として (5) 式を用いると、(17) 式の最後の式が (20) 式となるだけで、(16), (17), (18) 及び (19) の諸式はそのまま成立する。

$$i_0 = A'(\alpha v)^{3/2}/\theta \dots \dots \dots \quad (20)$$

従つて河道素子の中の非線型特性を、 $\% \times$ 乗から $\% \times$ 乗に変更するだけよい。

3. 遊水池、河川の合流及び支川の流入

(1) 遊水池 いうまでもなく遊水池は、洪水時に水を一時貯留して下流の洪水を遮減さすためのものであるが、

その形式としては、その中を洪水が流下する非常に幅の広い河道と考えられるものと、河道と無関係にただ単に水を貯留するだけのもの及びこれらの中間的なものが考えられる。この内で最後のものは前二者の形式の遊水池の組合せと考えられるから、始めの二つの形式の遊水池を考察すれば十分であろう。

第1の場合、すなわち洪水が遊水池の上流側から流入し、その中を流下して下流側の河道に流れ去るような形式の遊水池を考えると、洪水は遊水池の中を直接流下するのであるから、非常に広い河幅の河道と全く取扱いが同一であるといえよう。従つて前節の方法によつて、その電気的模擬を行うことができる。ただ、普通の河道の場合と異なつて、遊水池の幅が一般にその出入口附近で急激に変化しているから、追跡器の設計ではこうした局部的影響を十分に取り入れられるように、一つの河道素子が代表する区間をなるべく短く選ぶことが必要である。

つぎに第2の場合、すなわち単に水を貯留するだけの形式の遊水池では、洪水の流れに直接的な関係はない。従つて河道素子をそのまま利用することはできない。ところがこの研究では、流体量と電気量との対応を (10) 式のように仮定しているから、洪水時にその水の一部分を遊水池に貯留するという現象は、電流の一部分をとつてコンデンサーに貯えることに相応する。また、(17) の第1式からわかるように、コンデンサーの静電容量は流体系の湛水面積に対応している。従つてこの形式の遊水池の電気的模擬は、その湛水面積に相当した静電容量を有するコンデンサーの挿入によつて実現することができる。

(2) 河川の合流及び支川の流入 この両者は全く同じような現象であるが、まず合流の場合を考えよう。

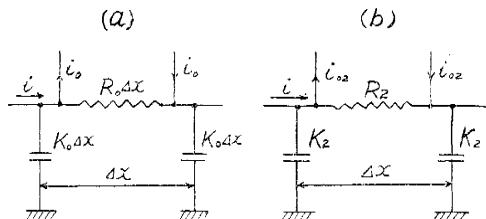
いま、二つまたはそれ以上の河道が一点で合して一つの河道を形成するものとし、これらの河道を合流点で切り離したとする。この場合、合流点以下の河道については、合流点を上流端の水位与点と考えれば、单一の河道とみることができるから、全く問題はない。

つぎに合流点より上流側の河道については、合流点附近では合流による背水の影響があると考えられる。しかし普通の場合には、背水の影響が貯水池の場合ほど大きいとは考えられず、また (1) 式及び (4)' 式または (5) 式を導くときに用いた仮定が、そのまま成立していると見られる程度に、背水の影響を小さいとしてよいであろう。こうした考え方をすると、合流の条件としては合流点における連続の条件だけをとればよいことになる。流体系における諸条件を上述のように仮定すると、これに対応する電気系としては、各河道に対応した河道素子を合流点で単に結び合わせただけよいはずである。

つぎに支川の流入は合流と同じ現象と考えられるが、支川は本川に比して一般にかなり小規模であつて、流入水量も少ない。従つて合流の場合とは異なり、支川の河道に対する河道素子を設げずに、支川からの流入量だけを与える程度でよいと考えられる。また支川の勾配は比較的大きいことが多いが、こうした場合の支川の流入は、

図-1 (18) 式または (16) 式であらわされる電気回路

Fig. 1 The electric circuits represented by eq. (18) or eq. (16).



化し、しかも遊水池を有する実例と考へることができる。図-2は演算結果の1例であつて、実測値とかなりよく一致している。

(b) 淀川：淀川は木津川、宇治川及び桂川の3河川が合流して、大阪湾に注いでいる。対象とした演算区間は、木津川の加茂、宇治川の宇治及び桂川の亀岡より下流の約116kmであつて、21箇の河道素子を用いた。加茂及び亀岡を上流端の水位与点とし、宇治川は1種の支川と考え、宇治を流量与点とした。図-3は演算結果と実測値との比較を示した1例であつて、合流、支川の流入及び河幅が変化している河道が組み合わされた実例と考へることができよう。

以上、二つの実例について述べたが、これらの結果から、前述の考察に従つて河幅が比較的一様な河道に対する洪水追跡器の回数常数を変更し、あるいは附加的装置を挿入することによつて、河幅の変化、遊水池、合流及び支川の流入などのある場合の洪水追跡器を、十分な精度で実現できることが確認されるとともに、前述の考察の妥当性が実証されたように思われる。

5. 結 言

本研究で明らかにされた諸点を結論的に列挙すると、

1. 河幅がかなり変化している河道における洪水流の基礎式は、(4)'式あるいは(5)式によつて与えられる。

2. 河幅がかなり変化している河道に対する洪水追跡器は、河幅が比較的一様な河道に対する河道素子をそのまま用い、その中に含まれる回路常数を、河幅に応じて(17)式のように変更することによつて、容易に実現することができる。

3. 遊水池の場合、それが河道と似た機能をもつているときは、2.と同様にして取り扱うことができ、その機能が単に水を一時貯留する効果だけであるときは、単にコンデンサーを挿入してやればよい。

4. 河川が合流する場合には、背水の影響が特に大きくなり、河道素子を結び合わせればよく、また支川が流入している場合には、強制電流として導入することにより洪水追跡器を構成することができる。

以上の成果に基づいて木曽川及び淀川に適用したところ、きわめて良好な計算結果を得たことは、われわれの洪水追跡器が実河川における洪水流の実態解明に有力な手段たり得ることを示すものであり、貯水池用洪水追跡器と併用することによつて、貯水池による総合的洪水調節効果の究明に資することも少なくないと思われる。これらについては、改めて研究結果を発表するつもりである。

ここに示した二つの適用例は、それぞれ建設省中部地建及び近畿地建の委託によつて、京大防災研究所で製作された洪水追跡器を用いた結果であり、関係方面並びに絶えず御指導を賜つた京大石原藤次郎博士及び近藤文治博士に深謝の意を表する。

参 考 文 献

- 1) 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、昭.30.4, pp.44~57.
- 2) T. Ishihara, S. Hayami and S. Hayashi : On the Electronic Analog Computer for Flood Routing, Proceedings of the Japan Academy, Vol.30, No.9, 1954, pp.891~895.
- 3) 石原藤次郎、石原安雄：貯水池用アナログ・コンピューターの試作について、土木学会誌、第41巻、第2号、昭.31.2, pp.18~23.
- 4) S. Hayami : On the Propagation of Flood Wave, Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University, Bulletin No.1, Dec. 1951.

(昭.31.6.29)

図-3 淀川における洪水追跡の計算例

Fig. 3 A calculating example for flood routing in the Yodo River.

