各種の流出モデルの比較

木下武雄

1 序　章

流出とは雨より河川の流量へ水がその姿を変える過程を言う。地球的にみた水文循環からみれば，ほんの一断面であるが，水文循環のうち最も重要なものの一つと言えよう。この他に重要な断面としては蒸発と蒸散および凝結と降雨があるが，これらは本日の課題にはしない。

この流出は物理現象の一つであるから物理的に解ける筈である。しかし，水文現象というのはおかしなもので，考えているスケール$\triangle x$，$\triangle t$ を小さくして行ったからと言って一つの偏微分方程式に落ちつくとは言い切れない。いや，支配的な要因が変ってくるので全く違った現象となってしまう。フラスコの中の水の蒸発・凝結では簡単な関係法則が明らかになっても流域・大気中でおこっている同じ現象では，皆目見当がつかない。

そこで我々は流出について一つのモデルを考える。モデルの単位としては数十〜数百km^2 をとることが多い。モデルはあくまでもモデルなのであって，そこには一つの越えがたい「現実ばなれ」があるのはやむを得ない。

しかし，モデル作成に当っては発展の可能性のあるモデルを育てるよう心がけるべきである。なるべく広い法則と結びつきのある方法，現象を忠実に表わしているモデルが好ましい。

モデルは相関関係ではない。モデルによる推定値と実測値とが高い相関で一致すべきなのは当然である。しかし，相関係数が1に近ければどんなモデルでもよいとは言い切れない。n 個の実測点からモデルを作成するのにn 個のパラメータを持つモデルを考えれば少くとも，実測点は正確に通る曲線がえがける。しかし，n 個のパラメータとはいかなる意味を持つのか，実測点以外ではどのような曲線形状かを知らなければいけない。

2 流出現象の分類

流出現象と言っても大へん多様なので，便宜的に時定数（Time Constant）によって短期流出・長期流出とに分けることがある。（例えば水理公式集）これはまた，高水（洪水）流出・低水流出というふうにも分けられる。

洪水現象は時定数が短く，短期流出に対応し，低水現象は定時数が長く，長期流出に対応する。

また流出成分で分類することもある。表面流出，中間流出，地下水流出などという分類がそうである。しかし，この考え方自体がモデル化されていて，今あらわれている流出がこれらの成分のうちの何であるかを明解に示すものではない。この3者の他にさらに中間的な流出成分も存在すると思われるので話はもっと複雑になる。

対象流域面積の性状，大きさなどによっても流出現象は変ってくるので，これに対応してモデルも当然変ってくる。たとえば，山岳斜面に設けられた試験流域と，広大な沖積平野を流れる河川の流量観測結果の解析とは単なる時定数以外にも色々の流出現象としての相異（たとえば伏流水）があるから流出モデルはちがってくるだろう。

積雪地帯の河川の流出は無雪地帯のそれとちがったものになるであろう。

次に考えなければいけないのは作ったモデルが何に使われるかということである。計画論として用いられるものか，水文予報に用いられるものかによって流出モデルは異ることもありうる。幸いにして水文予報と言っても電算機の処理能力が気になるような高速性が要求されるものではないので，両者にあまりはっきりした区別はない。しかし含まれている係数の物理的意味がどうやら計画論を意識して構成されているものや，また逆のケースもある。

一般にどんなものでも，使われ方を考慮せずには作られるものではないので，この点に一言しておく。

3　有効雨量

有効雨量とは雨量から損失雨量を差し引いた分なので雨量＝有効雨量＋損失雨量と書くことができる。

有効雨量とは当該流出モデルへの有効に作用するインプットとしての雨量である。しかしモデル上の話なので若干の説明が入用だろう。同じ雨量についても短期流出に対する有効雨量成分と長期流出に対するそれとは異ったものである。その内容を損失雨量の側から見ると，短期流出に対する損失雨量は凹地貯留分・地中への浸透分が主部を占めるが，長期流出に対する損失雨量は蒸発散分・地下深層への浸透分が主部を占める。

有効雨量の算定方法は流出モデルと不可分の関係にあって，流出モデルにより有効雨量のとり方に特徴がある。つまり，以下の章で述べるように，流出モデル相互のちがいはあまり大きくないが，極言すれば各流出モデルの特徴は有効雨量のとり方にありと言えないこともない。損失雨量のとり方は大きく分けると

(1)　初期にまとめて損失雨量をとる

(2)　定率的に損失雨量をとる

(3)　定差的に損失雨量をとる

(4)　浸透能曲線に似た形にする

などの方法があげられる。

ある期間，有効雨量を積分したものは流出流量を積分したものに対応するわけで，これと雨量の積分との比を流出率と呼ぶ。

4　ラショナル式（合理式）と実験式

雨が降って下水道や河川へ流出する量を推定するのにラショナル式（合理式）という方法がよく用いられる。それは

$$Q=\frac{1}{360}C_1 I A'=\frac{1}{3.6}C_1\,I\,A \quad\cdots\cdots(1)$$

と書かれる。ここでC_1：流出係数，I：流達時間内の雨量強度（mm／h），A：集水面積（ha），A：集水面積（km^2）で表わされる。

下水道計画では合理式の他に実験式というのがある。

$$Q=\frac{1}{360}C_2 RA\left(\frac{S}{A'}\right)^{1/P}\quad\cdots\cdots(2)$$

ここでC_2：流出係数, R ：1時間の降雨強度（mm／h），S ：地表の平均こう配（‰），p ：定数（4～6）である。合理式と実験式とは一見まったくことなっているようだが，ちょっとした仮定と変形でまったく同一のものとなることを示そう。

雨量強度I についてはシャーマン型を仮定する。

$$I = R \cdot a / t^{m} \qquad (3)$$

ここにR は1時間の降雨強度（mm／h)で，t は流達時間(分)，a は係数であるが実は60^{m} に等しい。

流達時間t はAha の正方形流域の対角線を流れる時間とみなすと，流速にマニングの式を用いて

$$t = \frac{長さ}{流速} = \frac{100\sqrt{2A'}}{60\frac{1}{n}h^{2/3}(S/1000)^{1/2}}$$

となる。数字は単位を分にするための換算係数である。

これを合理式に代入すると

$$Q = \frac{1}{360}C_1 RA\left(\frac{S}{A'}\right)^{m/2} \cdot \left[60 \cdot \frac{1}{n}h^{2/3}\left(\frac{1}{1000}\right)^{1/2} \times \frac{1}{\sqrt{2}} \cdot \frac{60}{100}\right]^{m}$$

ここで第1にいえることは，$m = \frac{1}{2} \sim \frac{1}{3}$とすれば形式はまさに実験式と一致する。事実1，2の例では$m = 0.49$ などの値が用いられている。

第2に，もし〔 〕内の値が1となれば合理式と実験式とは一致する。ここでn，h を仮りに$n = 0.1$, $h = 0.1^{m}$ とすれば$[\ \ ]^{m} = 1.32$ となる。これは諸係数の不確定性を考えれば十分に納得のいく一致である。

合理式と実験式とは対立した公式のように考えられる場合もあるが，ある仮定の下では十分一致しているといえる。

5 ラショナル式と単位図

ラショナル式は主としてピーク流量の算出に用いられ，単位図など他の流出モデルではピーク流量のみならず，流出のハイドログラフ（波形）を算出するのに用いられるのが大きな相違である。しかし本質的にちがいがあろうはずはなく，少なくともピーク付近においては同じことを述べているはずである。

単位図（ユニットハイドログラフ）では，時刻t における流出高Q(t)はそれ以前の雨R(t)，R(t－1)，R(t－2)・・・・・・・・・・にそれぞれ係数U(0)，U(1)，U(2)・・・・・・・・・・を掛けて加え合わせたもので表わされるとしている。式で書けば

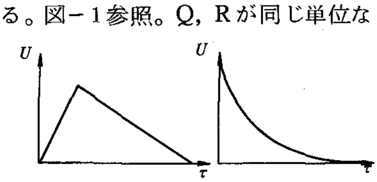
$$\begin{aligned} Q(t) &= R(t)U(0) + R(t-1)U(1) + R(t-2)U(2) + \cdots \\ &= \sum_{\tau=0}^{\infty} R(t-\tau)U(\tau) \qquad (4) \end{aligned}$$

これを積分形で書けば，たたみこみ積分となる。

$$Q(t) = \int_0^{\infty} R(t-\tau)U(\tau)d\tau \qquad (5)$$

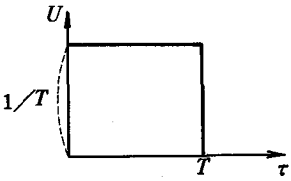
換言すれば，流量は過去の雨の荷重平均として求められるということで，荷重の比率がUである。このU(τ)は実用的には三角波形や指数減衰波形が用いられる。図－1参照。Q，Rが同じ単位なら面積は1でなければならない。

ここでU(τ)に長方形波を与えたらどうなるか。図－2参照。



図－1　単位図の模式的の例

これは時間Tについて$R(t)$を足し合わせて，Tで割ることを意味している。このTが流域の流達時間であれば合理式で定義された雨量強度Iが求められたことになる。あとは流出係数を掛けて，面積を掛ければ流量になることは明らかである。つまり時間長を流達時間ととった長方形波形の単位図は合理式とまったく同一のものである。



図－2　合理式と同じ単位図

6　ラショナル式と不定流追跡

次に流出の不定流追跡と比べよう。

縦長の長方形流域を考える。雨が降って流出がおこる場合を考えるが，単純のため流出係数を1とる。すなわちトタン張りの流域を考える。雨水の流下を不定流で追跡すれば任意の降雨波形に対する流出波形が水理学的に求められるが，ここでは大胆に流速V＝一定という仮定を設ける。この流域の長さをLとすると，最遠点からの流達時間TはT＝L／Vで表わされる。今降った雨のうち，最上流点に降った雨水は時間Tの後に懸案地点に流出となって現われる。ただし流下中にその後降る雨を順次上にのせて一定速度Vで流下する。つまり時間Tに降った雨の総和が流出となるわけで，流出高$Q(t)$については，

$$Q(t)=\int_0^L R\left(t-\frac{x}{V}\right)dx$$

$$\therefore Q(t)=\frac{L}{T}\int_0^T R(t-\tau)\,d\tau \quad \cdots\cdots(6)$$

となる。

これは図－2に示した単位図とまったく同一である。従ってラショナル式とまったく同一である。

7　ラショナル式のその他の性質

いま長方形の仮想流域で，降雨の時間的変化が

$$R(t)=A\sin\omega t+B\cos\omega t+C \quad \cdots\cdots(7)$$

と表わせるとしよう。降雨は周期が$T_0=2\pi/\omega$のサイン曲線としている。これを(6)の式に代入すると，

$$Q(t)=\frac{L}{T}\int_0^T R(t-\tau)\,d\tau$$

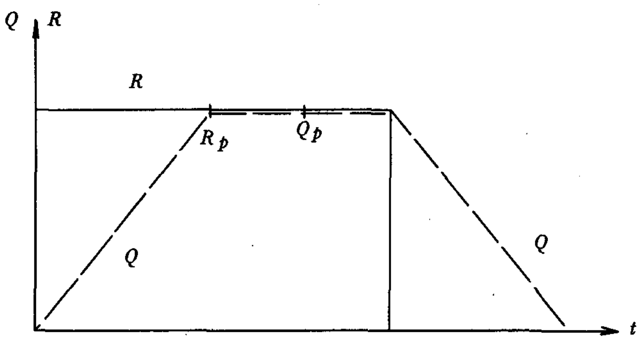
$$=\frac{L}{T}\int_0^T\{A\sin\omega(t-\tau)+B\cos\omega(t-\tau)+C\}\,d\tau$$

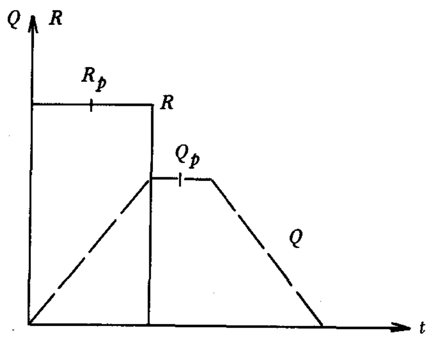
$$=L\frac{\sin\frac{\omega T}{2}}{\frac{\omega T}{2}}\left\{A\sin\omega\left(t-\frac{T}{2}\right)+B\cos\omega\left(t-\frac{T}{2}\right)\right\}+CL \quad \cdots\cdots(8)$$

となる。この式の意味は①流量は流域長Lに比例する。②流出の時間おくれは$T/2$　つまり流域の中心に降った雨が流出してくるまでの時間である。③雨量変動分にかかる係数$\sin(\omega T/2)/(\omega T/2)$は$\sin(\pi T/T_0)/(\pi T/T_0)$とおけるので，$\pi T/T_0>\pi$になるとほぼ0に近づく。換言すれば$T>T_0$，あるいは最遠点から流下する時間Tより短い周期をもつ雨量変動は消えてしまって，LC　つまり定常な雨量成分だけが残る。④この因子は逆にほぼ$\frac{\pi T}{T_0}<1$すなわち$3T<T_0$で1に近くなる。換言すれば，全流域を流下する時間の3倍より長い周期の降雨変動は全く平均化されないことを意味し

てる。

またR(t)に図－3のような長方形の降雨を与えたとするとQ(t)の積分を行なってもよいし，また単純な図式解から同図のような流出波形がえられる。





図－3

これによって，降雨ピークR_pから流出ピークQ_pまでの時間は流域の中心に降った雨が流出してくるまでの時間となる。そして，流出量はその時間内の平均雨量ということになる。

ラショナル式の流出係数fは，もともと損失が雨量のいかんを問わず，一定率的におこると仮定しその比率と考えられている。これは山岳斜面で，ある程度以上の降雨のときに近似的に受け入れられる関係で，そうでない場合は流出係数はきっと単純ではないであろう。たとえば相当量の雨がしばらく降った後では損失は地中への浸透のみとなりこれが一定量と仮定されれば流出係数を一定と考えるのはおかしくなる。

6，には流域斜面を長方形としたが，すりばち形とか甘藷形にすれば上の関係は成立たなくなるし，雨の時間分布が3角波だと困ってしまう。流出係数fは，それらは含んですべてを調整し，なおかつ水理公式集の数値などは計画論的配慮もなされている数字のように見うける。

8　指数関数形の単位図とタンクモデル

図－4のようなタンクからの流出を見よう。雨がないとすると右下の穴からの流出q は水圧hに比例すると考える。

$$q = \lambda h \quad \cdots\cdots (9)$$

λは比例定数で単位は1／時，1／日等である。これが大きければ流出は急激である。タンクの水量の変化は

$$-q = \frac{dh}{dt} \quad \cdots\cdots (10)$$

である。つまり，減った水位分だけ流出高となっているという式である。

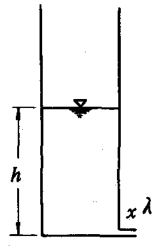
(9)と(10)とを連立して

$$\frac{dq}{dt} = -\lambda q \quad \cdots\cdots (11)$$

とし，t ＝0でq＝q_0　の流出があったと仮定すると，

$$q = q_0 e^{-\lambda t} \quad \cdots\cdots (12)$$

または，t ＝0で瞬間的に単位の雨量があったとすると，



図－4　もっとも単純なタンクモデル

$$全流量 \int_0^\infty q\,dt = 1$$

という条件から

$$q = \lambda e^{-\lambda t} \quad \cdots\cdots (13)$$

という，よく知られた指数形で減衰する流出波形を示す。

もし，雨r (t)が図－4のタンクに連続的に降っている場合には，(10)式は

$$r - q = \frac{dh}{dt} \quad \cdots\cdots (14)$$

となって，この解は

$$q\,(t) = \int_0^\infty r\,(t-\tau)\,\lambda e^{-\lambda\tau} d\tau \quad \cdots\cdots (15)$$

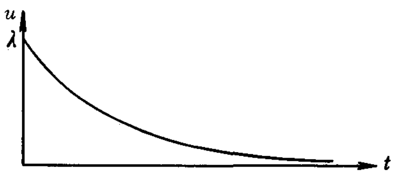
となる。

他方，単位図u (t)は単位雨量に対する流出の波形をあらわしている。任意の有効雨量をr (t)とすると，τ時間前の雨量r (t －τ) にu (τ)という重みを掛けていろいろなτについて加え合わせたものが流出$q(t)$となるわけであるから，

$$q\,(t) = \int_0^\infty r\,(t-\tau)\,u\,(\tau)\,d\tau \cdots (16)$$

という形における。(15)と(16)とを比べると，

$$u\,(\tau) = \lambda e^{-\lambda\tau} \quad \cdots\cdots (17)$$

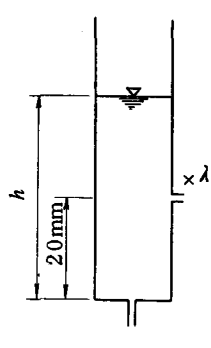


図－5　指数減衰形単位図

とおけば，まったく同じ式となっている。よく見かける例だが，単位図に指数減衰形のカーブを採用しているということは，言いかえれば図－4のようなタンクモデルで計算したというのとまったく同じである。

以上は有効雨量で論じたが損失雨量はどのように組み入れられているか。単位図などで，損失を初期損失に集中して考えるモデルがあるが，その場合は図－6のようなタンクモデルによって対応つけられる。この例では初期損失20㎜である。このタンクの底に穴があって，ここからも溜った雨水が徐々に流出すると仮定し初期損失を漸減できるようにしておけば，API (Antecedent Precipitation Index) に相当する初期損失のとり方ができる。

単位図などで，雨量に一定率を掛けて有効雨量とする方法がある。それには図－7のようなタンクモデルが対応する。その一定率とは $\lambda / (\lambda + \lambda_0)$ である。

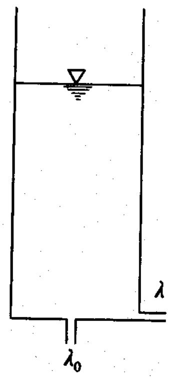


図－6

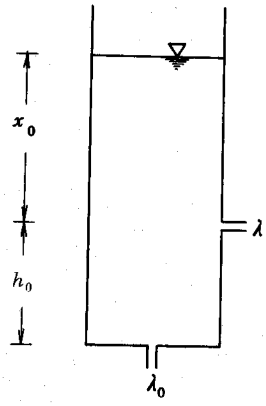
このように，タンクモデルでは雨量を直接にモデルへのインプットとするのに対し単位図では予め決められた方式に従って有効雨量を算出してこれをインプットとする。そのため単位図では総流出率としてどれだけかということがわかりやすいが，タンクモデルではわかりにくい。図－8のような場合の流出率（横穴から出る総流出量の全量$h_0 + x_0$に対する比率）は

$$\frac{1}{h_0 + x_0}\left(x_0 - \frac{\lambda_0 h_0}{\lambda} log\ \frac{\lambda x_0 + \lambda_0 h_0}{\lambda_0 h_0}\right)$$

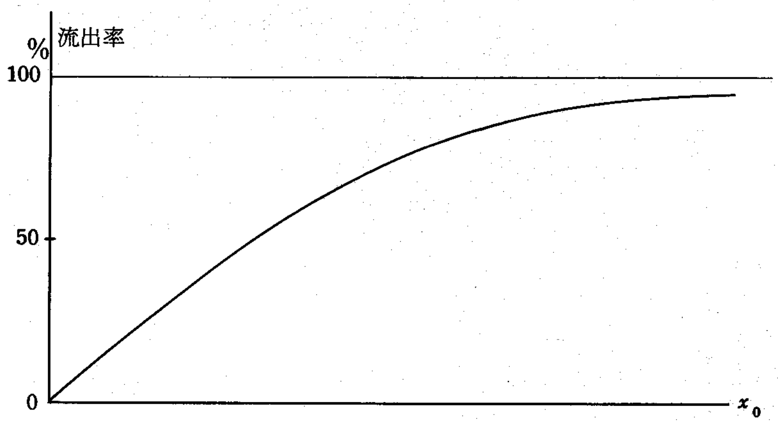
となる。通常の状態を考えた係数で，x_0によってこの値がどのように変るかを図－9に示す。



図－7



図－8



図－9

9　タンクモデルと貯留関数

貯留関数とは流出量q と流域の貯留量s との間に

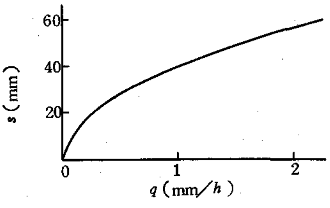
$$s = kq^{p} \qquad (18)$$

という関係を導入し，もう一つ，連続の式として

$$r - q = \frac{ds}{dt} \qquad (19)$$

が成立する。(19)は(14)と同じものである。もし，p ＝ 1 とおけば，(18)は(9)と同じになって，貯留関数も，単位図もタンクモデルもまったく同じになってしまう。流出の減衰を片対数方眼紙にのせて，直線で近似するのはこの見地に立っているわけである。

ところが，一般にはp は 1 ではない。経験的にはp は 0.3〜0.6 の値である。いま，一例としてs ＝ 4 0q$^{0.5}$ とするとs とq との関係は図－10のようになる。

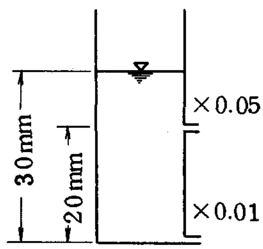


図－10　s ～ q 関係

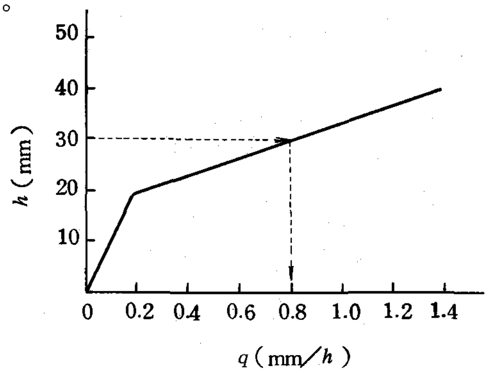
他方，タンクモデルで二つの孔があいた場合にはどうなるか？図－11のような場合には流出量は次のように計算される。

下の孔から　30mm×0.01　　＝0。3mm／h
上の孔から　(30－20)×0.05＝0.5
　　　　　　　　　　　　計　0.8mm／h

図－11の場合のs or h ～q 関係は図－12のようになる。つまり曲線のs ～q 関係は折線によって近似できそうである。

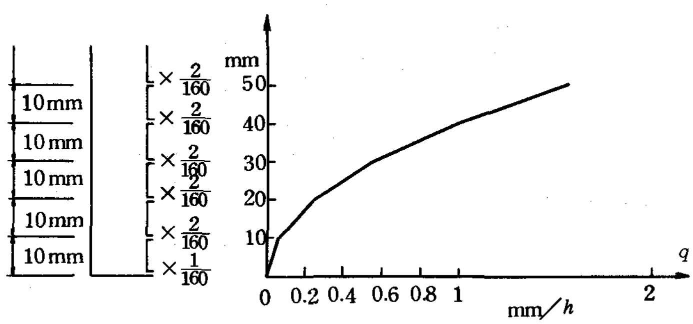


図－11　2孔のタンクモデル



図－12　2孔タンクのh～q関係

そこで，図－13のようなタンクを考える。これは，その右の図のようなs or h～q　関係となって図－10の $s = 40q^{0.5}$ とほとんど違いない折線となっている。折線では誤差があるからいやだという読



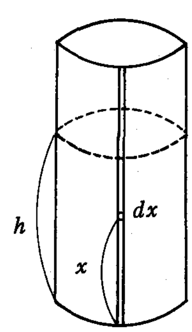
図－13　タンクモデルと貯留関数

者のためには，図－14のようなスリットのあいたタンクはどうだろうか？　孔からの流出が連続的に分布したと考えて，

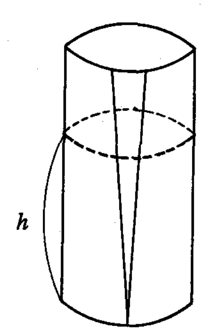
$$q = \int_0^h K(h-x)\,dx = K\frac{h^2}{2}$$

$$h = s = \left(\frac{2}{K}q\right)^{0.5} \quad \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots (20)$$

となつて，この $s = kq^{0.5}$ のタイプの貯留関数は図－14のタンクで完全に表わされる。さらに，$s \sim q^{1/3}$ のタイプなどはどうなるか？　それには図－15のような幅の変わるスリットのタンクを考えればよい。下からx mmにおける幅を



図－14　スリットタンク



図－15　幅の変わるスリットタンク

Lx^p とおくと，

$$q = \int_0^h Lx^p\ (h-x)\,dx = L\ \frac{h^{p+2}}{(p+1)(p+2)} \cdots\cdots(21)$$

p ＝1つまり三角ゼキのようなタンクモデルでは

$$h = s = \left(\frac{6}{L}\right)^{1/3} q^{1/3} \cdots\cdots(22)$$

となるほか，いろいろの貯留関数をタンクモデルでおきかえられる（普通の三角ゼキの公式とは若干異なる)。

貯留関数といえども実験式であるからタンクはなにもきっちり貯留関数に合わせる必要はない。実際に計算するときには，折線つまり孔をいくつか並べたタンクモデルの方が計算しやすいので，スリット方式を用いる必要はない。

流域が大きくて，流出の時間おくれが大きい場合には貯留関数においては遅滞時間 T_l を 用いてそれを表わす。つまりおくれのために，貯留関数が一価関数にならない場合 T_l を導入して一価関数とする。これは極めて人為的な操作ではあるが，流出の時間おくれを概括的によく表わしていて便利である。タンクモデルでは人為的なおくれを作らずに，雨量はとにかくインプットとしてモデルに与え，タンクを直列に何段か並べることにより，おくれを表現する。（次章参照）

10　直列タンクと流出関数

流出関数は一般的に

$$f\ (t) = \frac{1}{t_0}\cdot\frac{1}{\Gamma(n)}\cdot\left(\frac{t}{t_0}\right)^{n-1} e^{t/t_0} \cdots\cdots(23)$$

と書ける。もちろん

$$\int_0^\infty f\ (t)\,dt = 1$$

つまり，単位の降雨に対して流出も時間的に積分すれば1とならねばならない。この流出関数(23)式は単位図の式(16)の u (τ)に入れて流出推算に用いられるものである。(23)で $n=1$ とおけば $f(t)$は(13)式と同形になって $1/t_0 = \lambda$ である。

直列に同じ寸法のタンクをn 段並べたら，その場合の流出はどうなるか？図−16のように記号をつけると

$$q_0 - q_1 = \frac{dh_1}{dt} \cdots\cdots(24)$$

$q_1 = \lambda h_1$とおいて（(11)と同じように）上式に代入すれば

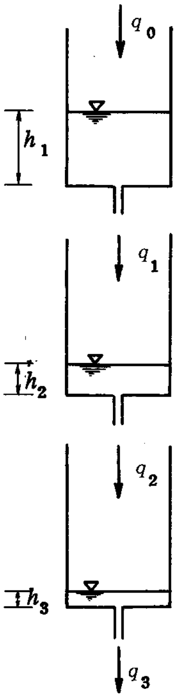
$$q_0 - q_1 = t_0\ \frac{dq_1}{dt} \cdots\cdots(25)$$

ここで，$t_0 = 1/\lambda$で時間のディメンションをもつ。これを書きかえると

$$q_0 = \left(1 + t_0\frac{d}{dt}\right) q_1 \cdots\cdots(26)$$

同様の関係から

$$q_1 = \left(1 + t_0\frac{d}{dt}\right) q_2$$



図−16　直列タンモデル

$$q_2 = \left(1 + t_0 \frac{d}{dt}\right) q_3$$

$$\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots$$

$$q_{n-1} = \left(1 + t_0 \frac{d}{dt}\right) q_n$$

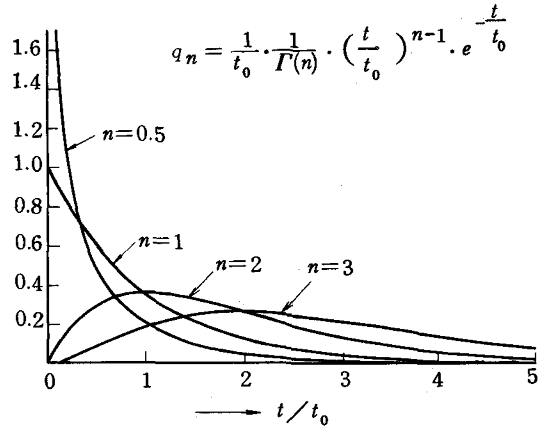
となる。よって

$$q_0 = \left(1 + t_0 \frac{d}{dt}\right)^n q_n \quad \cdots\cdots (27)$$

と書ける。q_0として単位の雨が瞬間的に降ったとし，はじめにタンクは空であったと仮定すると，ラプラース変換により

$$q_n = \frac{1}{t_0} \cdot \frac{1}{\Gamma(n)} \cdot \left(\frac{t}{t_0}\right)^{n-1} \cdot e^{-t/t_0} \quad \cdots\cdots (28)$$

とおける。任意の雨に対しては(11)式の解(13)式を(14)式の解(15)式にしたような一般化を行なえばよい。つまり，(15)式の $\lambda e^{-\lambda t}$ の代わりに(28)式を用いれば，任意の雨r(t)に対する解が作られる。(28)式は(23)式で示した流出関数である。つまり，同じ形状のタンクを直列につなげば（直列に線形系を並べれば）流出関数の一般形を表わしている。この説明でnは整数と仮定してはじめたが，nは分数の場合もありうるので，



図－17　直列タンクモデルすなわち流出関数

著者は実際のデータからn＝0.5となった場合を知っている。

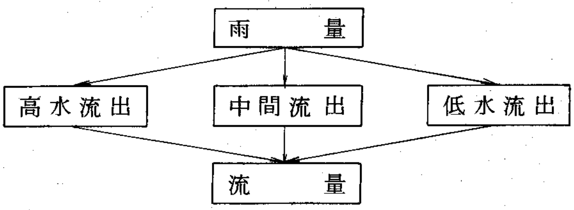
流出関数(23)または(28)をグラフにしたのが図－17である。この式によってもわかるとおり，n＝1を除いて減衰部は決して指数関数形になっていない。低水流出とはダルシーの法則にしたがう線形系を経て来たものとして解釈されているが，線形系を経たからといって，かならず指数関数減衰をしなくてはならないというのは間違いである。

直列タンクでは図－17にみるように1段通るごとに遅れができるので，タンクモデルだけで遅れを生じさせるには幾段ものタンクを直列に並べればよい。

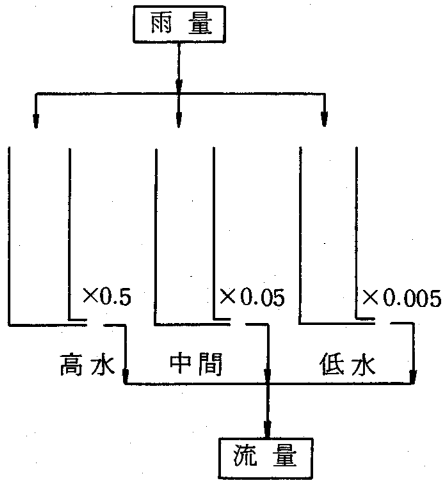
11　並列モデル

並列モデルとは図－18のように雨量を分割して，各モデルで計算し，出て来た流量を加え合わせる。図－18には三つの成分しかないが，これは任意個数でよい。タンクモデルでは，いくつかの例が計算されている。たとえば，図－19のようなモデルで表現できる。

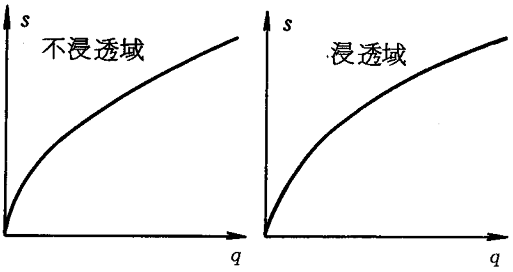
貯留関数では，やはり浸透域の貯留関数と不浸透域のそれとに分けて，並列的に計算している例もある。後でも述べるが，損失雨量に対して飽和雨量という量を考え，その値までは浸透流域からは流出がないとしている。飽和雨量に達すると，浸透，不浸透両流域から流出するとして計算する。これは，す



図－18　並列モデル



図－19　並列タンクモデルの一例



図－20　並列貯留関数

なわち並列モデルである。

このような方法は単位図にも適用される。高水流出用の単位図，中間流出用の単位図，低水流出用の単位図を設けて，雨量もそれぞれに分けて図－18のように計算し，各流出を加えたものが実測された流出であるとする方法がある。ただし，今の例でいって3個，一般にはn個の単位図をどうやって客観的にきめるかには，若干の数学的手法が必要のようである。しかし，こうすれば流出の減衰曲線は片対数上で曲線になり，ピーク流量付近の適合もよく，非線形性に似た効果も導入される。

飽和雨量を用いた貯留関数法は，初期損失のとり方に顕著な工夫がこらされている。すなわち，雨量が飽和点（仮想）に達するまでは浸透域からの流出がないとしているので，ある意味で，浸透能曲線を折線で近似したと考えることができる。

12　等価粗度法と貯留関数法

流域を一種の水路とみなし，そこを流下する表面流出を，丁度不定流追跡のように考えて行なう流出計算法に等価粗度法というのがある。これは運動方程式と連続の式を立てて解くので，そのとき特性曲線を用いることから，特性曲線法とも呼ばれる。

運動方程式としては何を用いるべきか問題だがManningの公式が用いられる。もちろん幅広い長方形断面の水路と仮定すると流量Qは次のようになる。

$$Q=\frac{1}{n}Bh^{5/3}i^{1/2} \quad \cdots\cdots (29)$$

B：水路幅，h：水深，n：Manningの粗度係数，i：勾配。この式から

$$h=\left(\frac{n}{i^{1/2}B}\right)^{3/5}Q^{3/5}$$

さらにBおよび水路長Lを掛けて流域貯留量S ＝hBLがえられる。

$$S = hBL = BL\left(\frac{n}{i^{1/2}\ B}\right)^{3/5} Q^{3/5} \qquad (30)$$

この式は貯留関数のS＝kq^{p}の式に似ている。事実P＝0.6とすれば一致するが，貯留関数では流域を一つの塊として取扱うのに対し，等価粗度法では，この運動方程式で流域内の表面流出を追跡しようというところが著しい差異である。

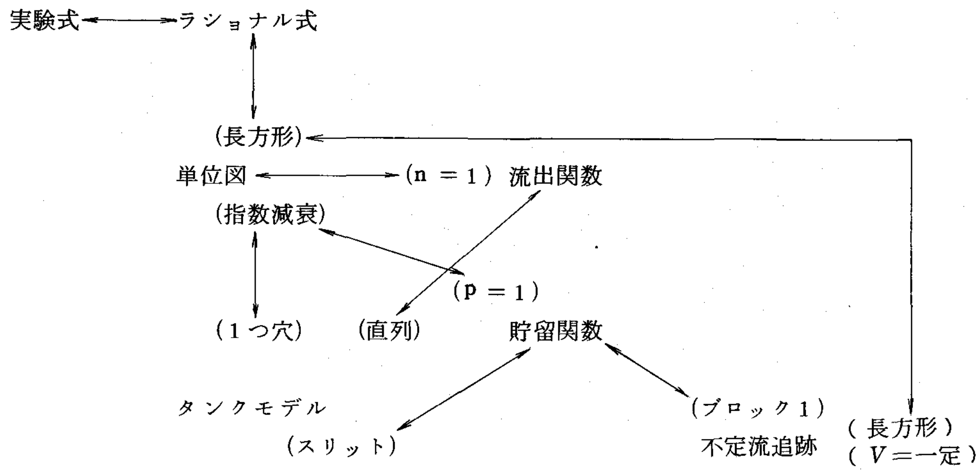
連続の式については，いずれも

$$I - O = \frac{ds}{dt} \qquad (31)$$

つまり流入Iと流出Oとの差が流域貯留の時間的増分と仮定している。しかし，貯留関数法では流域単位が大きいため遅滞時間によって，時間おくれを調整しながら計算しているのに対して，等価粗度法では，流域の各点で，この関係式を成立せしめているので，特に遅滞時間を用いなくてもよい。

実際の流域をどこまで斜面とおきかえ，どこまでを水路とし，それぞれの不定流に粗度係数（水路で通常言われている値よりずっと大きい値になる）をどのように適用するかという問題点をかかえた等価粗度法と流域を一塊とみる貯留関数法とは，似た式を用い違ったアイディアであると言えよう。

13 まとめ



14 誤差のない水文学はない

流出モデルの検討はこれまで，あまりにも手軽に行なわれすぎたのではないか。雨量と流量のデータなら概ね公刊されているし，そうでなくても関係機関へ行けば見せてもらえる。しかし，その精度の吟味からしてかかる人は何人いるだろうか。雨量も流量も直接測定では測れないことを第一に銘記しなければならない。口径２０cmの雨量計が100km²に１個の割で置いてあれば，この面積比は約３２億倍となる。３２億倍の代表性というのは全世界の人口から１人だけ連れだして，これこそ人間だと叫んでいるような頼りない話なのだ。流量観測にしても，自ら手を下してみればわかる通り，冷汗の出るようなデータが多い。

だから流出モデルの研究をするに当っては，①観測精度を考慮して，どこまで実測値と合わせればよいかを考える。②手法としても，ただ電算機を使ったというのではなく，解の安定性に注意する。③そ

れでもうまく行かない時には，実測データの再検討が必要である。
実測データの再検討としては次のような項目がある。

① 自記記録用紙（以下自記紙という）の時刻は正確か。

② 自記紙読み取りは正確か。例えば記録が反転する自記紙が多いが，反転を正しく読み取っているか。

③ 流量観測がどのように行なわれているか。（規定通りか）

④ 記録されている水位等が常識的にうなづける値か。（例えば，堤防天端を何メートルも越えているような水位はおかしい）

⑤ 自記紙読取りの日界：雨量は9時，水位は6時，18時が読取り時刻になっている場合そのずれが結果に影響を及ぼさないか。

⑥ 水位流量曲線は妥当か。

⑦ 流出率はおおよそうなづける値か。等々

例で述べると，次のような有効雨量と流出があったとしよう。

有効雨量　10，20mm/hr

流出高　2，9，13，6mm/hr

これに対する単位図は簡単に求められる。

単位図　0.2，0.5，0.3

しかし，もし流出高に少々の誤差がはいったとしよう。

流出高　1.9，9.1，13，6mm/hr

これでは単位図は求められないという危険がある。

15 おわりに

これで流出モデルをすべて尽くしたとは言えない。何しろ流出モデルは年産数個と言われているぐらいだから。しかし極く基本的な数個のモデルについての説明だけはしたので，他のモデルについての見当はつくと思う。

流出モデルは，ある流域のある流出状態（例えば洪水）をモデル化するものであるため，本質的にはある流域の流出モデルを隣の流域には使えないかも知れない。とは言え，我々はあくまで普遍性を求めているので，流出モデルの総合化，または相互比較を行ないたい気持はある。そのために本稿をおこしたのではあるが，相互比較について一言すると，それをどう評価（ひらたく言えば採点）すればいいかは問題である。ピーク値を合わせるように工夫されたモデルでは洪水の立ち上がりや引きの部分を十分あらわせないのは当然だし，低水流出用モデルで，洪水が合わなくても誰の責任でもない。

$$A=\Sigma\left(\frac{q_{calc}-q_{obs}}{q_{peak}}\right)^2$$

というような形でAを定義し，Aで評価しようとするのはそのような意味で好ましくない。

何が意味のあるモデルかは水文学にとって永遠のテーマかも知れない。