# 現場のための水文学 (2)

## ——流出解析　その2——

若手水文学研究会*

### 3. 線形貯留関数による流出解析

前章で解説したような貯留関数をあてはめた場合の流出解析法を示す。最初に本稿の主旨に沿い，取扱いの容易な線形貯留関数法について解説する。前節の図　2.9 に従って，内容の構成を組みたてる。まず，貯留関数の形態を考えるため，本章 3.1 節で一価の貯留関数式 (2.4) の適用例，3.2 節で二価の貯留関数式 (2.5) の適用例を示す。次に，各節で各々の関数形のパラメータを決定する作業があるが，これは「最適化」という方法によって行うことが望ましい。ただし，これに関しては別途章だてをして解説した方がわかりやすいため，今回は便宜的に簡単な方法でパラメータを推定し，それを用いることとする。「最適化」手法については，後に改めて解説する。最後に貯留関数の解法であるが，ここでは単位図法と微分方程式を差分して漸化式として解く方法（以下，漸化式法と称する）を解説する。詳細については各節で述べる。

3-1　一価の貯留関数による流出解析例

3-1-1　パラメータの推定

一価の貯留関数による流出解析を行う場合，以下の二式を用いる。

$$s = kq \tag{3.1}$$

$$\frac{ds}{dt} = r - q \tag{3.2}$$

ここで，$s$ は貯留高(mm)，$k$ は流出による貯留高のパラメータ，$q$ は流出高(mm/h)，$t$ は時間(hr)，$r$ は降雨量（mm/h）を表わす。

これらの二式(式(3.1)は貯留方程式，式(3.2)は連続の式）は，貯留計算および流出予測においての基礎式となっている。

まず，式（3.1）中のパラメータ $k$ を求める。

パラメータ $k$ を求めるための貯留高 $s$ (mm) および流出高 $q$（mm/h）の値については，表 2.1 の値を用いる。

$k$ を簡便に求める 1 例として，式（3.1）に従いピーク流出高 $q_p$ とその際の貯留量 $s_p$ を用いることとする。表　2.3 より，$q_p$ は 7.877(mm/h)，$s_p$ は 73.901（mm）で，これから，

$$k = \frac{s_p}{q_p} = \frac{73.901}{7.877} = 9.382$$

となる。

3-1-2　単位図法による流出解析例

単位図とは，1 時間で 1 mm の降雨があった場合の流出応答のことである。図　3.1 は，このような単位図を模式的に表わしたものである。入力とした 1 時間で 1 mm の雨量を単位パルスと称し，その線形応答を単位パルス応答と呼ぶ。すなわち，この応答関数で表わされる流出高を単位図と呼ぶ。この単位図をあらかじめ求めておけば，雨量に応じた線形重ね合わせによって実際の流出高が再現できるわけである。以下では数式を用いて，より実際的な単位図について述べていくこととする。式(3.1)，式(3.2)から，次の式を導くことができる。

$$k\frac{dq}{dt} + q = r \tag{3.3}$$

式 (3.3) を解くための準備として $r=u(t)$ とした場合，式 (3.3) の $q$ がどのようになるかを考える必要がある。この場合の解法としては，ラプラス変換が有効である。具体的には例題 2 を参照されたい。なお，$u(t)$ というのは，

*星　清（水工部長）
島谷部寿人，金高州吾，三浦敦禎，市川嘉輝（河川研究室）
中津川　誠，谷　昭彦，山口昌志（環境研究室）
佐伯礼子（北開水工コンサルタント）
白川俊也，柴田春幸（松木設計事務所）

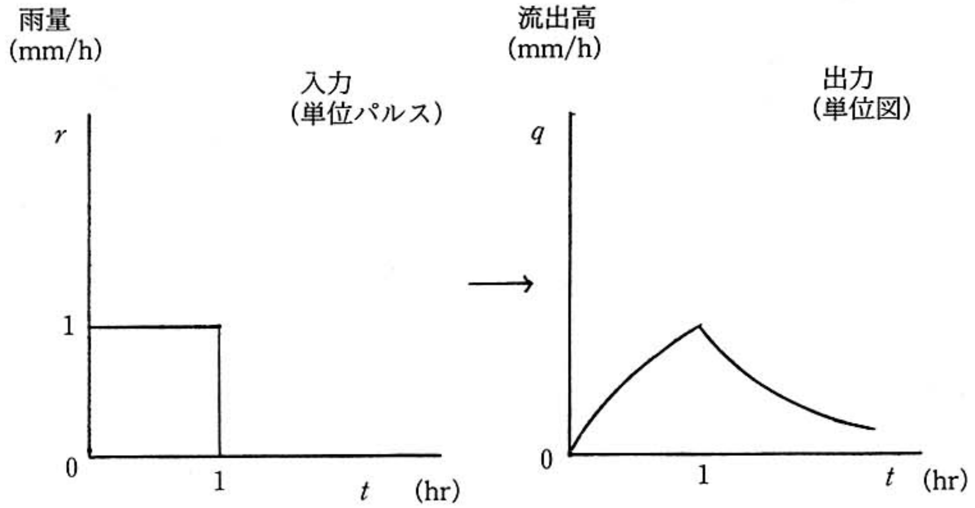



図 3.1 単位図模式図

$$u(t)=\begin{cases}1 & (t\geq 0)\\ 0 & (t<0)\end{cases} \tag{3.4}$$

で定義されるもので，単位ステップ関数と称する。図 3.1のような単位パルス関数は $u(t)-u(t-1)$ で与えられるものなので，$r=u(t)-u(t-1)$ とした場合に式 (3.3) を解いて得られた $q$ が単位図ということになる。詳細は例題 2 で示すとして，結果を次に示す。なお，単位図に表わされる流出高を $h(t)$ とする。

$$h(t)=\begin{cases}1-e^{-t/k} & (t\leq 1)\\ -e^{-t/k}+e^{-(t-1)/k} & (t>1)\end{cases} \tag{3.5}$$

またさらに，流出は線形システムが仮定されているため，重ね合わせの原理を用いることができる。この重ね合わせをどのように行うか，次に示す。最初に式 (3.3) を変形し，

$$\frac{dq}{dt}=-\frac{1}{k}q+\frac{r}{k} \tag{3.6}$$

とする。これを解くため，$e^{t/k}q$ の $t$ に関する微分を考える。

$$\frac{d}{dt}(e^{t/k}q)=\frac{1}{k}e^{t/k}q+e^{t/k}\frac{dq}{dt}$$

$$=e^{t/k}\left(\frac{dq}{dt}+\frac{1}{k}q\right) \tag{3.7}$$

これに式 (3.6) を代入すると，

$$\frac{d}{dt}(e^{t/k}q)=e^{t/k}\frac{r}{k} \tag{3.8}$$

式 (3.8) を 0 から $t$ まで積分すると，

$$[e^{t/k}q]_0^t=\int_0^t\frac{1}{k}e^{\tau/k}r(\tau)\,d\tau \tag{3.9}$$

ゼロ初期条件のもとで，

$$q=\int_0^t\frac{1}{k}e^{-\frac{t-\tau}{k}}r(\tau)\,d\tau \tag{3.10}$$

上式を変数変換すると，

$$q=\int_0^t\frac{1}{k}e^{-\tau/k}r(t-\tau)\,d\tau$$

$$=\int_0^t h(\tau)r(t-\tau)\,d\tau \tag{3.11}$$

ここで，

$$h(\tau)=\frac{1}{k}exp\left(-\frac{\tau}{k}\right)$$

と表わすことができる。この $h(\tau)$ を核関数もしくは瞬間単位図と称する。ここで得られた式 (3.11) が，単位図の重ね合わせを表わす式となる。式 (3.11) を離散表示すると，

$$q_i=\sum_{j=1}^{i}h_j r_{i-j+1} \tag{3.12}$$

となる。ここで $q_i=q(i\Delta t)$，$h_j=h(j\Delta t)$ である。なおここで，降雨量 $r_k$ の定義としては，$(k-1)\Delta t$ 時と $k\Delta t$ 時の間に降ったものとする。例題 3 では，式 (3.5)，式 (3.12) に示す単位図法により，鵡川の事例を解析してみる。

**（例題 2）**

式 (3.3) において $r=u(t)$，$r=u(t-1)$ としたときの解をラプラス変換によって求めよ。また，それから $r=u(t)-u(t-1)$ とした場合の解を得ること。

**（例題　2 の解答）**

ラプラス変換とは，任意関数に次のような変換を施し，解く方法である。

$$F(s)=\int_0^{\infty} e^{-st}f(t)\,dt \quad \cdots\cdots①$$

なお，以下で用いられる主要な関数については，表　3.1 に示すラプラス変換表が実用的である。

単位ステップ関数 $r=u(t)$（図　3.2）での $q$ の解は，表　3.1 のラプラス変換表を参考に求める。

式（3.3）を再度記すると，

$$k\frac{dq}{dt}+q=u(t) \quad \cdots\cdots②$$

であり，そのラプラス変換は表　3.1 より初期条件 $q(0)=q_0$ を考慮して，

$$k[sF(s)-q_0]+F(s)=\frac{1}{s}$$

$$(ks+1)F(s)=kq_0+\frac{1}{s}$$

$$F(s)=\frac{kq_0}{ks+1}+\frac{1}{s(ks+1)}$$

$$=\frac{q_0}{s+\frac{1}{k}}+\left(\frac{1}{s}-\frac{k}{ks+1}\right)$$

$$F(s)=\frac{q_0}{s+\frac{1}{k}}+\left(\frac{1}{s}-\frac{1}{s+\frac{1}{k}}\right) \quad \cdots\cdots③$$

再度，表　3.1 の関係式より逆ラプラス変換を行うと，次式となる。

$$q(t)=q_0e^{-t/k}+(1-e^{-t/k}) \quad \cdots\cdots④$$

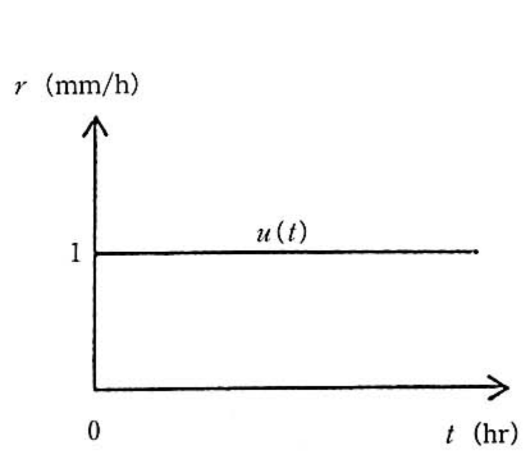



図　3.2　ステップ関数

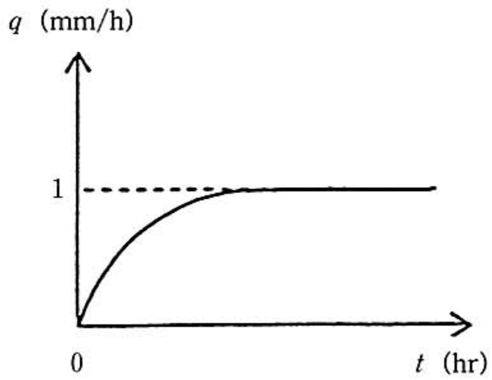



図　3.3　単位ステップ応答図

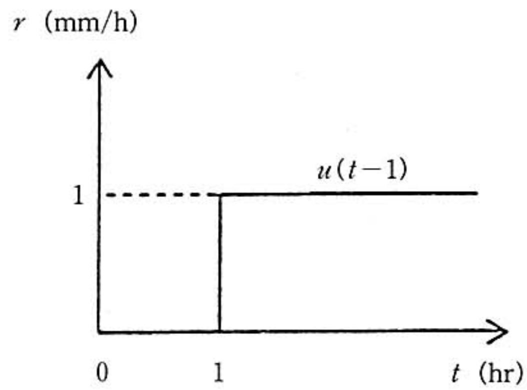



図　3.4　移動ステップ関数図

この時初期流量が 0 の場合，初期条件は $q_0=0$ であり，④式は次式で表わされる。

$$q(t)=1-e^{-t/k} \quad \cdots\cdots⑤$$

また，⑤式を図示すると図　3.3 のようになる。

なお，これ以後の解析では初期条件は $q_0=0$ とする。

次に，移動単位ステップ関数 $r=u(t-1)$（図 3.4）での解は，同じく表　3.1 のラプラス変換表を参考に以下のように表わされる。

$$ksF(s)+F(s)=\frac{1}{s}e^{-s}$$

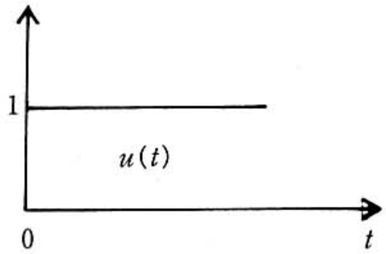
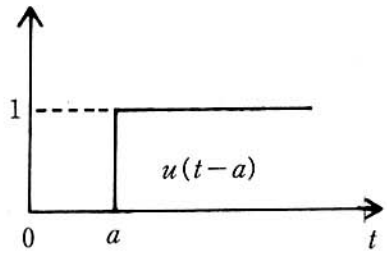
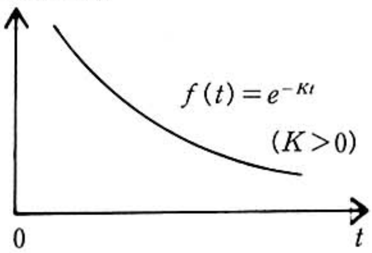
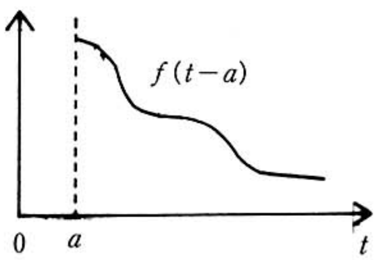
$$F(s)=e^{-s}\frac{1}{s(ks+1)}$$

$$F(s)=e^{-s}\frac{1}{s}-e^{-s}\frac{1}{s+\frac{1}{k}} \quad \cdots\cdots⑥$$

⑥式を表　3.1 のラプラス変換表を用い，逆ラプラス変換すると，

$$q(t)=u(t-1)-u(t-1)e^{-(t-1)/k} \quad \cdots\cdots⑦$$

表　3.1　ラプラス変換表

| $f(t)$ | $F(s)$ |
|---|---|
| ステップ関数<br> | $\dfrac{1}{s}$ |
| 移動ステップ関数<br> | $\dfrac{1}{s}e^{-as}$ |
| 指数関数<br> | $\dfrac{1}{s+K}$ |
| 時間遅れ<br><br>$u(t-a)f(t-a)$ | $e^{-as}F(s)$ |

$$f(s)=\int_0^\infty e^{-st}f(t)\,dt$$

| | | |
|---|---|---|
| $\dfrac{df}{dt}$ | $\longleftrightarrow$ | $sF(s)-f(0)$<br>$f(0)$ は初期条件 |
| $f$ | $\longleftrightarrow$ | $F(s)$ |

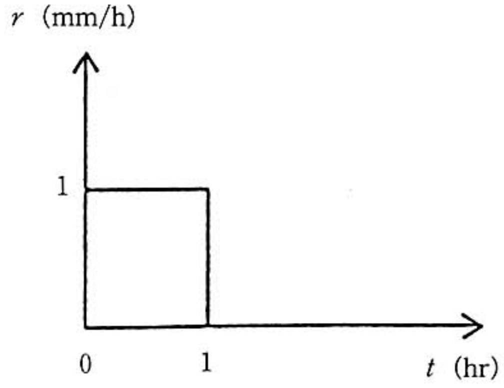



図 3.5 パルス関数図

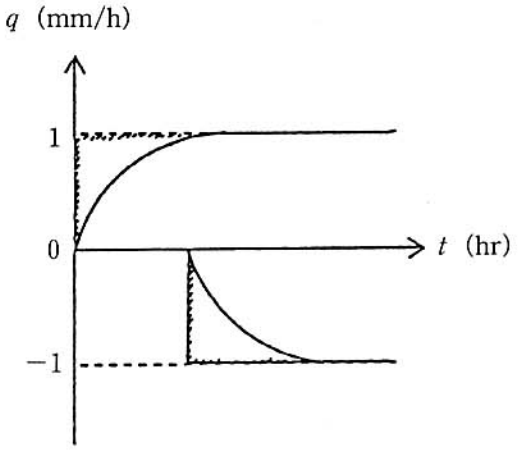



図 3.6 単位パルス関数図

⑤式と⑦式を比較すると，ハイドログラフの形状は同一であり，単に時間軸の移動であるにすぎない。すなわち，降雨入力の時間移動は流量出力の時間移動をもたらすにすぎない。

この特徴は，線形流出系のひとつの原理である。

図 3.5 に示すような単位パルス関数（時間長 1 hr，降雨強度 1 mm/h）に対する線形応答を，単位図と呼ぶことは先に示したとおりである。

この単位パルス関数は，次式で与えられる。

$$r = u(t) - u(t-1) \qquad \cdots\cdots⑧$$

このとき，単位図は図 3.6 に示すように，$r=u(t)$の応答から $r=u(t-1)$の応答を差引いたもので，⑤式および⑦式から次式で表わされる。

$$q = \begin{cases} 1 - e^{-t/k} & t \leq 1 \\ -e^{-t/k} + e^{-(t-1)/k} & t > 1 \end{cases} \qquad \cdots\cdots⑨$$

**（例題 3）**

表 1.2 に示す鵡川の事例より（3.5）式によって単位図を求め，(3.12)式によって流出高を計算すること。

**（例題 3 の解答）**

単位図を用いて流出高を計算するために必要なデータは 3-1-1 で計算したパラメータ，雨量である。これらの値を（3.5）式に適用して単位図を求め，その結果を用いて（3.12）式より流出高を計算する。まず，単位図を求める。

$$h_1 = 0$$
$$h_2 = 1 - e^{-1/9.38} = 0.1011$$
$$h_3 = -e^{-2/9.38} + e^{-(2-1)/9.38} = 0.0909$$
$$h_4 = -e^{-3/9.38} + e^{-(3-1)/9.38} = 0.0817$$
$$\vdots$$

次に，流出高を求める。

$$q_1 = h_1 r_1 = 0$$
$$q_2 = h_1 r_2 + h_2 r_1 = 0.0785$$
$$q_3 = h_1 r_3 + h_2 r_2 + h_3 r_1 = 0.2604$$
$$q_4 = h_1 r_4 + h_2 r_3 + h_3 r_2 + h_4 r_1 = 0.4$$
$$\vdots$$

これらの作業を計算機で行った結果を表 3.2 に示すとともに図 3.7，図 3.8 として示すこととした。また，計算プログラムのフローチャート，解説，リストは補遺に示す。

3-1-3 漸化式法による流出解析例

前節では単位図を求め，重ね合わせの原理を

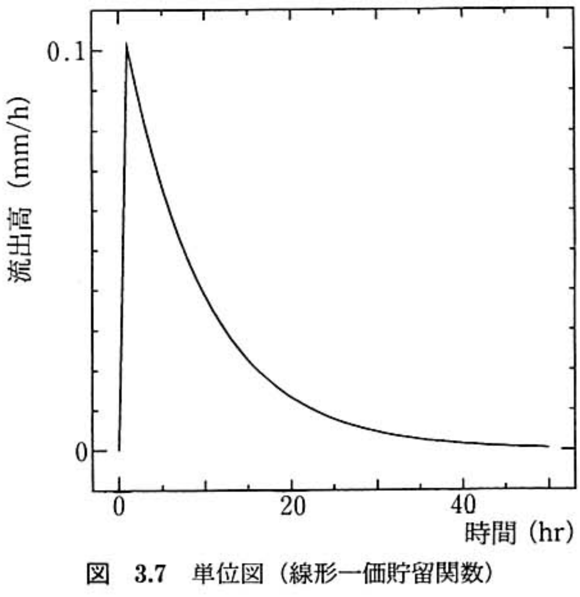



図 3.7 単位図（線形一価貯留関数）

表 3.2 計算結果

| 時間 $t$ (hr) | 有効雨量 $q$ (mm/h) | 直接流出高 $r$ (mm/h) |
|---|---|---|
| 3 | 0.000 | |
| 4 | 0.776 | 0.0785 |
| 5 | 1.878 | 0.2604 |
| 6 | 1.640 | 0.4000 |
| 7 | 0.626 | 0.4228 |
| 8 | 0.119 | 0.3921 |
| 9 | 1.909 | 0.5455 |
| 10 | 9.251 | 1.4258 |
| 11 | 5.783 | 1.8664 |
| 12 | 3.430 | 2.0246 |
| 13 | 10.064 | 2.8375 |
| 14 | 18.589 | 4.4304 |
| 15 | 14.421 | 5.4407 |
| 16 | 10.909 | 5.9936 |
| 17 | 20.467 | 7.4572 |
| 18 | 7.836 | 7.4955 |
| 19 | 2.773 | 7.0180 |
| 20 | 0.507 | 6.3596 |
| 21 | 0.000 | 5.7165 |
| 22 | 0.000 | 5.1384 |
| 23 | 0.031 | 4.6219 |
| 24 | 0.000 | 4.1545 |
| 25 | 0.000 | 3.7344 |
| 26 | 0.000 | 3.3568 |
| 27 | 0.000 | 3.0173 |
| 28 | 0.000 | 2.7122 |
| 29 | 0.000 | 2.4379 |
| 30 | 0.000 | 2.1914 |
| 31 | 0.000 | 1.9698 |
| 32 | 0.000 | 1.7706 |
| 33 | 0.000 | 1.5916 |
| 34 | 0.000 | 1.4306 |
| 35 | 0.000 | 1.2859 |
| 36 | 0.000 | 1.1559 |
| 37 | 0.000 | 1.0390 |
| 38 | 0.000 | 0.9339 |
| 39 | 0.000 | 0.8395 |
| 40 | 0.000 | 0.7546 |
| 41 | 0.000 | 0.6783 |
| 42 | 0.000 | 0.6097 |
| 43 | 0.000 | 0.5481 |
| 44 | 0.000 | 0.4926 |
| 45 | 0.000 | 0.4428 |
| 46 | 0.000 | 0.3980 |
| 47 | 0.000 | 0.3578 |
| 48 | 0.000 | 0.3216 |
| 49 | 0.000 | 0.2891 |
| 50 | 0.000 | 0.2598 |
| 51 | 0.000 | 0.2336 |
| 52 | 0.000 | 0.2100 |
| 53 | 0.000 | 0.1887 |

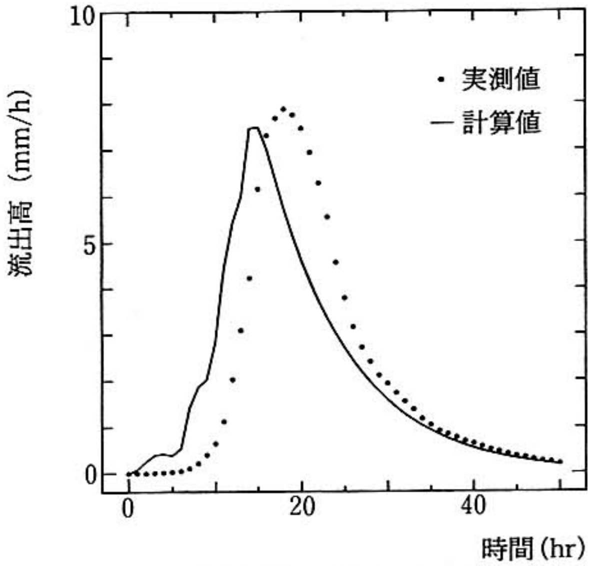


図 3.8 流出解析結果（線形一価貯留関数）

用いた計算法について述べてきた。しかし，計算機が広範に利用できる現在では，流出解析も多くの場合計算機を用いるのが実状である。ここでは，計算機の利用に最も適した微分方程式の解法を紹介する。式 (3.3) を再度変形して記す。

$$\frac{dq}{dt} = -\frac{1}{k}q + \frac{1}{k}r = aq + x \qquad (3.13)$$

ここで，$a$ は係数で $a=-1/k$，$x=r/k$ である。任意の降雨量 $r$ を与えた場合の式 (3.13) の解の求め方は星[1]によって詳しく述べられているので，ここでは省略するが式 (3.6) の解法を参照すればよい。

$$q(t) = e^{at}q_0 + \int_0^t e^{a(t-\tau)}x(\tau)\,d\tau \qquad (3.14)$$

ここで，$q_0$ は $q$ の初期値である。式 (3.14) は積分表現であるため，実用的にはまだ使いづらい。われわれが対象とする観測値は，あるサン

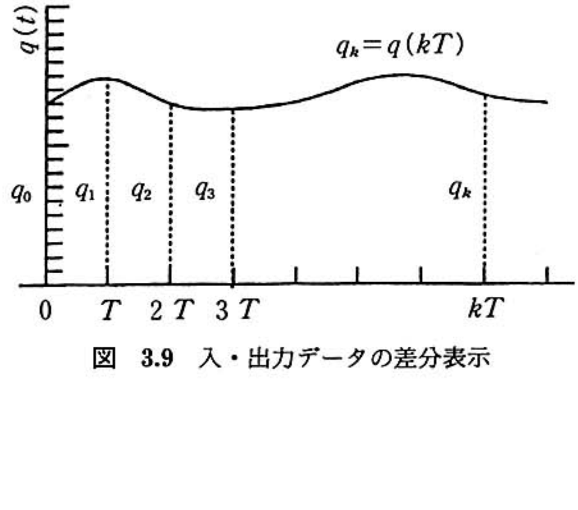


図 3.9 入・出力データの差分表示

プリング時間間隔 $T$ ごとの離散量である。例えば，図 3.9 に示されるように，連続関数 $q(t)$ を階段状関数で近似し，時間 $T$ ごとに $q_0$，$q_1$，……，$q_k$ の離散量でサンプリングしている。今，$q_k=q(kT)$ とし，$kT$ から $(k+1)T$ までのサンプリング時間間隔での解は式 (3.14) より次式で与えられる。

$$q_{k+1} = e^{aT}q_k+\int_0^T e^{a(T-\tau)}\, x_{k+1}d\tau$$
$$= e^{aT}q_k + (e^{aT}-1)a^{-1}x_{k+1} \qquad (3.15)$$

あるいは，

$$q_{k+1} = \phi q_k + \gamma x_{k+1} \qquad (3.16)$$

ここで，

$$\begin{cases} x_{k+1} = \dfrac{r_{k+1}}{k},\ kT \le t < (k+1)T \\ \phi = e^{aT} \\ \gamma = (e^{aT}-1)a^{-1} \end{cases} \qquad (3.17)$$

式 (3.16) はサンプリング時間ごとのシステム出力 $q$ を計算するための漸化式であり，実際の計算も容易に行えることがわかる。また，係数 $\phi$ と $\gamma$ はサンプリング時間間隔 $T$ が決まると定数となる。式 (3.16) の漸化式を繰返し適用することによって，システム出力は次のように計算される。

$$\begin{cases} q_1 = \phi q_0 + \gamma x_1 \\ q_2 = \phi q_1 + \gamma x_2 = \phi^2 q_0 + \phi\gamma x_1 + \gamma x_2 \\ \vdots \\ q_k = \phi^k q_0 + \sum_{i=1}^{k} \phi^{k-i}\gamma x_i \end{cases} \qquad (3.18)$$

**(例題 4)**

鵡川の洪水事例(表 1.2)を用いて式(3.16)，(3.17) から漸化式法による流出高を算出せよ。この際，3-1-1 節より便宜的に決定されたパラメータ値 $k=9.38$ を用い，サンプリング時間間隔は $T=1$ hr とせよ。また，初期流出高は $q_0=0$ とする。

**(例題 4 の解答)**

計算例として，一価の線形貯留方程式を用いる。

表 3.3 例題 4 の計算結果

| | | |
|---|---|---|
| T= 0(h) | R= 0.000(mm/h) | Q=0.0000(mm/h) |
| T= 1(h) | R= 0.776(mm/h) | Q=0.0785(mm/h) |
| T= 2(h) | R= 1.878(mm/h) | Q=0.2604(mm/h) |
| T= 3(h) | R= 1.640(mm/h) | Q=0.4000(mm/h) |
| T= 4(h) | R= 0.626(mm/h) | Q=0.4228(mm/h) |
| T= 5(h) | R= 0.119(mm/h) | Q=0.3921(mm/h) |
| T= 6(h) | R= 1.909(mm/h) | Q=0.5455(mm/h) |
| T= 7(h) | R= 9.251(mm/h) | Q=1.4258(mm/h) |
| T= 8(h) | R= 5.783(mm/h) | Q=1.8664(mm/h) |
| T= 9(h) | R= 3.430(mm/h) | Q=2.0246(mm/h) |
| T=10(h) | R=10.064(mm/h) | Q=2.8375(mm/h) |
| T=11(h) | R=18.589(mm/h) | Q=4.4304(mm/h) |
| T=12(h) | R=14.421(mm/h) | Q=5.4407(mm/h) |
| T=13(h) | R=10.909(mm/h) | Q=5.9936(mm/h) |
| T=14(h) | R=20.467(mm/h) | Q=7.4572(mm/h) |
| T=15(h) | R= 7.836(mm/h) | Q=7.4955(mm/h) |
| T=16(h) | R= 2.773(mm/h) | Q=7.0180(mm/h) |
| T=17(h) | R= 0.507(mm/h) | Q=6.3596(mm/h) |
| T=18(h) | R= 0.000(mm/h) | Q=5.7165(mm/h) |
| T=19(h) | R= 0.000(mm/h) | Q=5.1384(mm/h) |
| T=20(h) | R= 0.031(mm/h) | Q=4.6219(mm/h) |
| T=21(h) | R= 0.000(mm/h) | Q=4.1545(mm/h) |
| T=22(h) | R= 0.000(mm/h) | Q=3.7344(mm/h) |
| T=23(h) | R= 0.000(mm/h) | Q=3.3568(mm/h) |
| T=24(h) | R= 0.000(mm/h) | Q=3.0173(mm/h) |
| T=25(h) | R= 0.000(mm/h) | Q=2.7122(mm/h) |
| T=26(h) | R= 0.000(mm/h) | Q=2.4379(mm/h) |
| T=27(h) | R= 0.000(mm/h) | Q=2.1914(mm/h) |
| T=28(h) | R= 0.000(mm/h) | Q=1.9698(mm/h) |
| T=29(h) | R= 0.000(mm/h) | Q=1.7706(mm/h) |
| T=30(h) | R= 0.000(mm/h) | Q=1.5916(mm/h) |
| T=31(h) | R= 0.000(mm/h) | Q=1.4306(mm/h) |
| T=32(h) | R= 0.000(mm/h) | Q=1.2859(mm/h) |
| T=33(h) | R= 0.000(mm/h) | Q=1.1559(mm/h) |
| T=34(h) | R= 0.000(mm/h) | Q=1.0390(mm/h) |
| T=35(h) | R= 0.000(mm/h) | Q=0.9339(mm/h) |
| T=36(h) | R= 0.000(mm/h) | Q=0.8395(mm/h) |
| T=37(h) | R= 0.000(mm/h) | Q=0.7546(mm/h) |
| T=38(h) | R= 0.000(mm/h) | Q=0.6783(mm/h) |
| T=39(h) | R= 0.000(mm/h) | Q=0.6097(mm/h) |
| T=40(h) | R= 0.000(mm/h) | Q=0.5481(mm/h) |
| T=41(h) | R= 0.000(mm/h) | Q=0.4926(mm/h) |
| T=42(h) | R= 0.000(mm/h) | Q=0.4428(mm/h) |
| T=43(h) | R= 0.000(mm/h) | Q=0.3980(mm/h) |
| T=44(h) | R= 0.000(mm/h) | Q=0.3578(mm/h) |
| T=45(h) | R= 0.000(mm/h) | Q=0.3216(mm/h) |
| T=46(h) | R= 0.000(mm/h) | Q=0.2891(mm/h) |
| T=47(h) | R= 0.000(mm/h) | Q=0.2598(mm/h) |
| T=48(h) | R= 0.000(mm/h) | Q=0.2336(mm/h) |
| T=49(h) | R= 0.000(mm/h) | Q=0.2100(mm/h) |
| T=50(h) | R= 0.000(mm/h) | Q=0.1887(mm/h) |

$$\begin{cases} s = kq \\ \dfrac{ds}{dt} = r - q \end{cases} \quad \cdots\cdots ①$$

すなわち,

$$k\frac{dq}{dt} + q = r \quad \cdots\cdots ②$$

あるいは,

$$\frac{dq}{dt} = -\frac{1}{k}q + \frac{1}{k}r \quad \cdots\cdots ③$$

ただし, $q(0)=0$ とする。

式 (3.13) と上記③式を比べると, 次の関係式が成立する。

$$a = -\frac{1}{k} = -\frac{1}{9.38} = -0.107$$

また, 式 (3.17) によって係数 $\phi$ と $\gamma$ が計算される。

$\phi = e^{aT} = 0.899$, $\gamma = (e^{aT}-1)a^{-1} = 0.944$

これを式 (3.16) に代入し, 以下のように流出高が求められる。

$$q_1 = \phi q_0 + \gamma x_1 = 0.0785$$
$$q_2 = \phi q_1 + \gamma x_2 = 0.2604$$
$$q_3 = \phi q_2 + \gamma x_3 = 0.4000$$

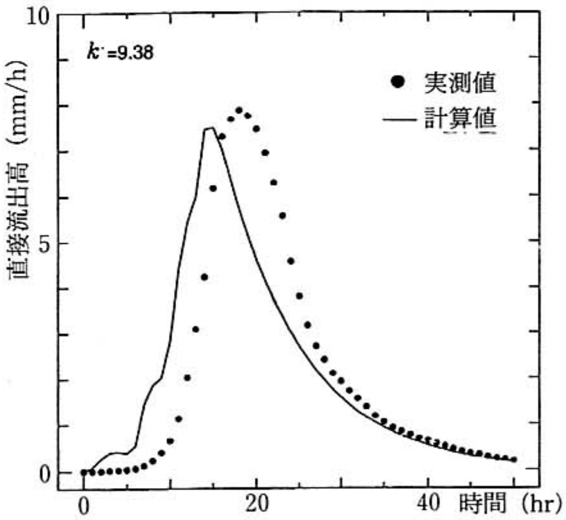



図 3.10 例題 4 の流出解析結果(鵡川, 穂別, 1992.8.9)

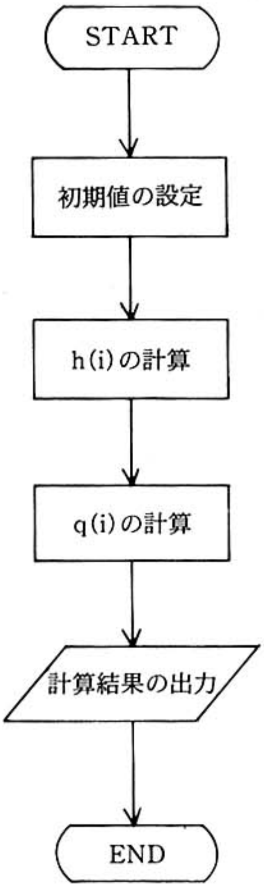
計算結果は表 3.3, 図 3.10 に示す。ここで得られた結果は, 例題 3 の単位図法で得られた結果 (表 3.2) と同じであることが確認されている。なお, 計算プログラムのフローチャート, 解説, リストは補遺に示されている。

(鳥谷部寿人, 三浦敦禎, 市川嘉輝)

# 補遺　計算プログラム概要

## ［1］　例題　3

### (1)　プログラムのフローチャート




### (2)　プログラムの解説

| 文番号 | 解　説 |
|---|---|
| 1～20 | 初期値の設定，q；流出高，h；単位図<br>r；雨量，t；時間，a；流域面積，k；定数 |
| 24～30 | h(i)の計算 |
| 31～38 | q(i)の計算 |
| 42～47 | 計算結果の出力 |

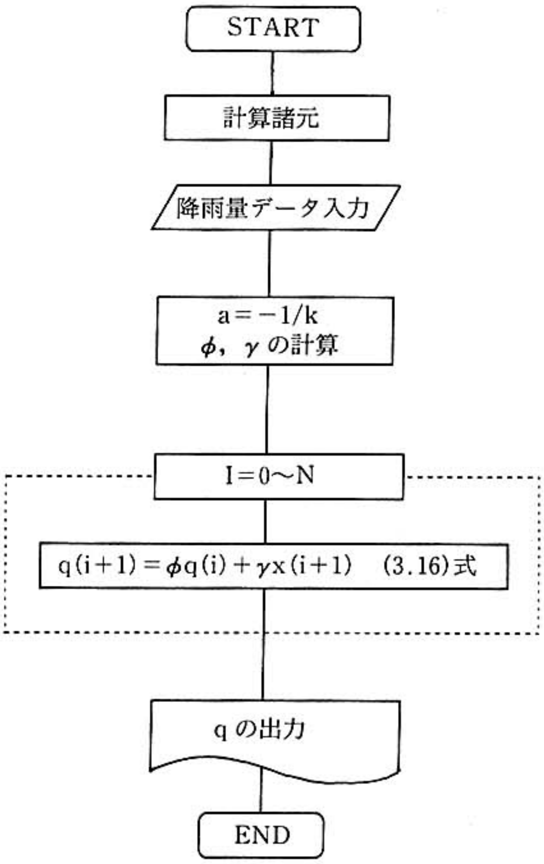
### (3)　プログラムのリスト

```
1        parameter(ni=51)
2        real*4 q(ni),h(ni),r(ni)
3        integer*4 t(ni)
4        real*4 a,k
5        data a/1228.0/
6        data k/9.38/
7  c
8  c----- yomu t data ------
9  c
10       do i=1,ni
11        t(i)=real(i-1)
12       end do
13 c
14 c----- yomu r data -------
15 c
16       open(18,file='rdata.d')
17       do l=1,ni
18        read(18,'(f6.0)') r(l)
19       end do
20       close(18)
21 c
22 c----- keisann ---------
23 c
24       do i=1,ni
25        if(t(i).le.1) then
26         h(i)=1-exp(-t(i)/k)
27        else
28         h(i)=-exp(-t(i)/k)+exp(-(t(i)-1)/k)
29        end if
30       end do
31       do i=1,ni
32         sq=0.
33        do j=1,i
34         dq=h(j)*r(i-j+1)
35         sq=sq+dq
36        end do
37         q(i)=sq
38       end do
39 c
40 c----- data dasu -------
41 c
42       open(16,file='out.dat')
43       do i=1,ni
44        write(16,'(3f9.4)') t(i)*1.,h(i),q(i)
45       end do
46       close (16)
47       end
```

# 補遺　計算プログラムの概要

［2］　例題　4

(1)　プログラムのフローチャート




(3)　プログラムのリスト

```
1000 'SAVE"C:¥EXAM4.BAS",A
1010 REM 1ST-ORDER DIFFERENTIAL EQUATION
1020 REM S=KY
1030 DIM R(200),Q(200),X(200)
1040 K=9.38:Q(0)=0:DT=1:NI=50
1050 OPEN "C:¥MUKAWA.DAT" FOR INPUT AS #1
1060 OPEN "C:¥MUKAWA.OUT" FOR OUTPUT AS #2
1070 FOR I=0 TO NI-1
1080 LINE INPUT #1,A$
1090 R(I)=VAL(LEFT$(A$,6))
1100 X(I)=R(I)/K
1110 NEXT I
1120 A=-1/K
1130 FAI=EXP(A*DT)
1140 NU=(EXP(A*DT)-1)*A^(-1)
1150 FOR I=0 TO NI-1
1160  Q(I+1)=FAI*Q(I)+NU*X(I+1)
1170 NEXT I
1180 FOR I=0 TO NI
1190  LPRINT USING"TIME=##(h)  R=##.###(mm)
      Q=###.####(mm/h)";I,R(I),Q(I)
1200  PRINT #2,USING"  ##   ##.###
      ##.####";I,R(I),Q(I)
1210 NEXT
1220 STOP
1230 END
```

(2)　プログラムの解説

| 文番号 | 解　　説 |
|---|---|
| 1030 | 降雨と流出高の配列の大きさを決める |
| 1040 | K：パラメーター，Q(0)：流出高の初期条件，DT：単位時間(hr)，NI：繰返し回数 |
| 1050 | 入力データファイルの呼出 |
| 1060 | 出力結果ファイルの呼出 |
| 1070 ～1100 | 入力データ(降雨)の読込み |
| 1120 | φ の計算 |
| 1130 | γ の計算 |
| 1140 ～1160 | 流出高の計算 |
| 1170 ～1200 | 流出高の出力 |