

## 現場のための水文学 (1)

## —— 流出解析 その1 ——

若手水文学研究会\*

## まえがき

我々河川技術者が洪水に関する資料や論文を見ると、流出解析という言葉をよく目にする。が、むずかしい計算式や、ややこしい理論だけが記述され理解に苦しむ場合が多々あるのではないと思われる。

本来、流出解析とは、簡単にいえばどのくらいの雨が降ったら河川にどのくらい流出するかを計算することである。

つまり、(雨量)→(流出量)の変換である。このことだけから判断するといとも簡単に計算できるような気がするが、流出には地表面からの直接流出のほかに、いったん地下に浸透した雨が地下流出となって流出するものや、積雪によって長期間貯留されたものが融雪により流出される場合もあり、非常に複雑である。

では、流出解析をある程度理解することにより、どのようなメリットがあるのだろうか。

現在、各開発建設部には各々洪水予測システムを所有しているが、予測機の中でどのような計算が行われているかはブラックボックスになっており、予測結果のみを重視しがちである。

したがって、洪水が起きて予測値が異常な値であっても、システムに設定してある予測定数をそのまま使用して実状にそぐわない予測計算を行う危険がある。このような状況は予測の実施過程における現場の混乱を招き、現に昨1992年の洪水時においてもそれが災いするような事態が発生している。ただしこの場合、流出解析法をある程度理解しておけば洪水中でも状況に応じて柔軟な対応ができると思われる。すなわ

ち、的確な流出予測を行うには的確な流出解析が必要といえる。また、予測システムの改善にも役立つ。

ここでは、過去に実際に起こった洪水を例にとり、現在最も一般的な流出解析手法のひとつである貯留関数法をもとに、その基礎と実践をやさしく、かつわかりやすいように解説していくつもりである。

今後、この現場のための水文学は、数回にわたるシリーズを予定している。

なお、今回執筆を担当した若手水文学研究会とは、星 清水工部長を講師として仕事の合間にセミナーを開き、水文学を勉強した有志一同である。執筆はメンバーが分担して行っており、文体やプログラム等各自の個性があってやや一貫性に欠けるきらいもあるが、それぞれが力を合わせた成果を発表することを意図していることに免じ、御容赦願いたい。

(白川俊也)

## 1. 洪水事例の収集

最初に、流出解析に用いるデータ収集を行う。今後、ここで収集したデータをもとに、貯留関数をあてはめて流出解析を行っていく。

## 1-1 1992年鶴川の出事例

洪水事例として、1992年(平成4年)8月9日の台風10号の通過による鶴川の洪水例をあげる。なお、本事例は過去鶴川を襲った出水の中でも屈指のものである。鶴川の流域面積は1228.0 km<sup>2</sup> またその中の穂別観測所における流域面積は949.5 km<sup>2</sup> であり、穂別周辺の流域には図 1.1のように穂別、稲里、福山、占冠の4観測所が点在している。表 1.1に雨量-水位の観測値を示した。なお、雨量は4地点の平均雨量であり、水位は穂別の観測データである。

\*星 清(水工部長)

鳥谷部寿人, 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)



表 1.1 出水時の雨量, 流量, 水位

(鶴川, 穂別, 1992)

| 月 | 日  | 時  | 雨量<br>(mm/hr) | 実績Q<br>(m <sup>3</sup> /s) | 実績H<br>(m) | 月 | 日  | 時  | 雨量<br>(mm/hr) | 実績Q<br>(m <sup>3</sup> /s) | 実績H<br>(m) |
|---|----|----|---------------|----------------------------|------------|---|----|----|---------------|----------------------------|------------|
| 8 | 9  | 1  | 1.00          | 59.38                      | 53.65      | 8 | 10 | 13 | 0.00          | 424.89                     | 54.95      |
| 8 | 9  | 2  | 1.76          | 59.38                      | 53.65      | 8 | 10 | 14 | 0.00          | 392.56                     | 54.86      |
| 8 | 9  | 3  | 1.62          | 59.38                      | 53.65      | 8 | 10 | 15 | 0.00          | 361.51                     | 41.77      |
| 8 | 9  | 4  | 1.24          | 61.28                      | 53.65      | 8 | 10 | 16 | 0.00          | 344.82                     | 54.72      |
| 8 | 9  | 5  | 3.00          | 63.21                      | 53.67      | 8 | 10 | 17 | 0.00          | 325.30                     | 54.66      |
| 8 | 9  | 6  | 2.62          | 67.16                      | 53.69      | 8 | 10 | 18 | 0.00          | 306.36                     | 54.60      |
| 8 | 9  | 7  | 1.00          | 71.22                      | 53.71      | 8 | 10 | 19 | 0.00          | 294.04                     | 54.56      |
| 8 | 9  | 8  | 0.19          | 75.41                      | 53.73      | 8 | 10 | 20 | 0.00          | 279.00                     | 54.51      |
| 8 | 9  | 9  | 3.05          | 81.92                      | 53.76      | 8 | 10 | 21 | 0.00          | 264.36                     | 54.46      |
| 8 | 9  | 10 | 14.78         | 98.15                      | 53.83      | 8 | 10 | 22 | 0.00          | 252.93                     | 54.42      |
| 8 | 9  | 11 | 9.24          | 129.39                     | 53.95      | 8 | 10 | 23 | 0.00          | 241.75                     | 54.38      |
| 8 | 9  | 12 | 5.48          | 179.99                     | 54.14      | 8 | 10 | 24 | 0.00          | 230.83                     | 54.34      |
| 8 | 9  | 13 | 16.08         | 247.31                     | 54.40      | 8 | 11 | 1  | 0.00          | 225.46                     | 54.32      |
| 8 | 9  | 14 | 29.70         | 375.15                     | 54.81      | 8 | 11 | 2  | 0.00          | 214.91                     | 54.28      |
| 8 | 9  | 15 | 23.04         | 614.48                     | 55.42      | 8 | 11 | 3  | 0.00          | 207.17                     | 54.25      |
| 8 | 9  | 16 | 17.43         | 896.51                     | 56.00      | 8 | 11 | 4  | 0.00          | 202.09                     | 54.23      |
| 8 | 9  | 17 | 32.70         | 1198.00                    | 56.56      | 8 | 11 | 5  | 0.00          | 194.58                     | 54.20      |
| 8 | 9  | 18 | 12.52         | 1711.29                    | 57.37      | 8 | 11 | 6  | 0.00          | 189.65                     | 54.18      |
| 8 | 9  | 19 | 4.43          | 2013.37                    | 57.79      | 8 | 11 | 7  | 0.00          | 182.38                     | 54.15      |
| 8 | 9  | 20 | 0.81          | 2111.85                    | 57.92      | 8 | 11 | 8  | 0.00          | 177.62                     | 54.13      |
| 8 | 9  | 21 | 0.00          | 2165.85                    | 57.99      | 8 | 11 | 9  | 0.00          | 172.91                     | 54.11      |
| 8 | 9  | 22 | 0.00          | 2134.91                    | 57.95      | 8 | 11 | 10 | 0.00          | 168.27                     | 54.09      |
| 8 | 9  | 23 | 0.50          | 2058.53                    | 57.85      | 8 | 11 | 11 | 0.00          | 163.69                     | 54.07      |
| 8 | 9  | 24 | 0.00          | 1924.56                    | 57.67      | 8 | 11 | 12 | 0.00          | 158.71                     | 54.05      |
| 8 | 10 | 1  | 0.00          | 1752.94                    | 57.43      | 8 | 11 | 13 | 0.00          | 152.61                     | 54.03      |
| 8 | 10 | 2  | 0.00          | 1562.85                    | 57.15      | 8 | 11 | 14 | 0.00          | 146.62                     | 54.01      |
| 8 | 10 | 3  | 0.00          | 1304.17                    | 56.74      | 8 | 11 | 15 | 0.00          | 143.68                     | 54.00      |
| 8 | 10 | 4  | 0.00          | 1101.86                    | 56.39      | 8 | 11 | 16 | 0.00          | 140.76                     | 53.99      |
| 8 | 10 | 5  | 0.00          | 936.90                     | 56.08      | 8 | 11 | 17 | 0.00          | 137.87                     | 53.98      |
| 8 | 10 | 6  | 0.00          | 818.48                     | 55.85      | 8 | 11 | 18 | 0.00          | 132.19                     | 53.96      |
| 8 | 10 | 7  | 0.00          | 739.16                     | 55.69      | 8 | 11 | 19 | 0.00          | 129.39                     | 53.95      |
| 8 | 10 | 8  | 0.00          | 663.88                     | 55.53      | 8 | 11 | 20 | 0.00          | 126.62                     | 53.94      |
| 8 | 10 | 9  | 0.00          | 618.89                     | 55.43      | 8 | 11 | 21 | 0.00          | 121.18                     | 53.92      |
| 8 | 10 | 10 | 0.00          | 566.98                     | 55.31      | 8 | 11 | 22 | 0.00          | 118.50                     | 53.91      |
| 8 | 10 | 11 | 0.00          | 521.39                     | 55.20      | 8 | 11 | 23 | 0.00          | 115.85                     | 53.90      |
| 8 | 10 | 12 | 0.00          | 477.71                     | 55.09      | 8 | 11 | 24 | 0.00          | 110.64                     | 53.88      |

1-2 直接流出成分の分離と有効雨量の算出

1-2-1 直接流出成分の分離

貯留関数法の計算において, 流出高が必要とされるので表 1.1の観測流量を次式により流出高に変換する。

$$q = \frac{3.6Q}{A} \quad (1.1)$$

ここで,  $q$ : 流出量 (mm/h),  $Q$ : 流量 (m<sup>3</sup>/s),  $A$ : 流域面積 (km<sup>2</sup>)

次に, 表 1.1の雨量と流出高を片対数紙に描くと, 図 1.4のような流出高分離図が得られる。この図のハイドログラフの減水部は直線1, 直線2, 直線3のように3本の直線で近似することができる。このように直線が3本のときは直線2と直線3の折点, すなわち第2折点が直接流出成分(表面流出+中間流出)の終了時であると考えられているため, その点と流出の立上がり点を直線で結ぶことにより, 点線に示す

表-1.2 出水データの前処理結果

(鷓川, 穂別, 1992)

| 時間 (hr)           | 実績Q (m <sup>3</sup> /s) | 実績H (m) | 流出高 (mm/hr) | 基底流出高 (mm/hr) | 直接流出高 (mm/hr) | 雨量 (mm/hr) | 有効雨量 (mm/hr) |
|-------------------|-------------------------|---------|-------------|---------------|---------------|------------|--------------|
| 1                 | 59.38                   | 53.65   | 0.225       |               |               | 1.000      |              |
| 2                 | 59.38                   | 53.65   | 0.225       |               |               | 1.760      |              |
| n <sub>1</sub> 3  | 59.38                   | 53.65   | 0.225       | 0.225         | 0.000         | 1.620      |              |
| 4                 | 61.28                   | 53.65   | 0.232       | 0.231         | 0.001         | 1.240      | 0.776        |
| 5                 | 63.21                   | 53.67   | 0.240       | 0.237         | 0.002         | 3.000      | 1.878        |
| 6                 | 67.16                   | 53.69   | 0.255       | 0.243         | 0.011         | 2.620      | 1.640        |
| 7                 | 71.22                   | 53.71   | 0.270       | 0.249         | 0.021         | 1.000      | 0.626        |
| 8                 | 75.41                   | 53.73   | 0.286       | 0.256         | 0.030         | 0.190      | 0.119        |
| 9                 | 81.92                   | 53.76   | 0.311       | 0.262         | 0.049         | 3.050      | 1.909        |
| 10                | 98.15                   | 53.83   | 0.372       | 0.268         | 0.104         | 14.780     | 9.252        |
| 11                | 129.39                  | 53.95   | 0.491       | 0.274         | 0.217         | 9.240      | 5.784        |
| 12                | 179.99                  | 54.14   | 0.682       | 0.280         | 0.402         | 5.480      | 3.430        |
| 13                | 247.31                  | 54.40   | 0.938       | 0.286         | 0.652         | 16.080     | 10.066       |
| 14                | 375.15                  | 54.81   | 1.422       | 0.292         | 1.130         | 29.700     | 18.592       |
| 15                | 614.48                  | 55.42   | 2.330       | 0.298         | 2.032         | 23.040     | 14.423       |
| 16                | 896.51                  | 56.00   | 3.399       | 0.304         | 3.095         | 17.430     | 10.911       |
| 17                | 1198.00                 | 56.56   | 4.542       | 0.310         | 4.232         | 32.700     | 20.470       |
| 18                | 1711.29                 | 57.37   | 6.488       | 0.317         | 6.172         | 12.520     | 7.838        |
| 19                | 2013.37                 | 57.79   | 7.634       | 0.323         | 7.311         | 4.430      | 2.773        |
| 20                | 2111.85                 | 57.92   | 8.007       | 0.329         | 7.678         | 0.810      | 0.507        |
| 21                | 2165.85                 | 57.99   | 8.212       | 0.335         | 7.877         | 0.000      | 0.000        |
| 22                | 2134.91                 | 57.95   | 8.094       | 0.341         | 7.753         | 0.000      | 0.000        |
| 23                | 2058.53                 | 57.85   | 7.805       | 0.347         | 7.458         | 0.050      | 0.031        |
| 24                | 1924.56                 | 57.67   | 7.297       | 0.353         | 6.944         | 0.000      | 0.000        |
| 25                | 1752.94                 | 57.43   | 6.646       | 0.359         | 6.287         | 0.000      | 0.000        |
| 26                | 1562.85                 | 57.15   | 5.925       | 0.365         | 5.560         | 0.000      | 0.000        |
| 27                | 1304.17                 | 56.74   | 4.945       | 0.371         | 4.573         | 0.000      | 0.000        |
| 28                | 1101.86                 | 56.39   | 4.178       | 0.378         | 3.800         | 0.000      | 0.000        |
| 29                | 936.90                  | 56.08   | 3.552       | 0.384         | 3.169         | 0.000      | 0.000        |
| 30                | 818.48                  | 55.85   | 3.103       | 0.390         | 2.713         | 0.000      | 0.000        |
| 31                | 739.16                  | 55.69   | 2.803       | 0.396         | 2.407         | 0.000      | 0.000        |
| 32                | 663.88                  | 55.53   | 2.517       | 0.402         | 2.115         | 0.000      | 0.000        |
| 33                | 618.89                  | 55.43   | 2.347       | 0.408         | 1.938         | 0.000      | 0.000        |
| 34                | 566.98                  | 55.31   | 2.150       | 0.414         | 1.735         | 0.000      | 0.000        |
| 35                | 521.39                  | 55.20   | 1.977       | 0.420         | 1.557         | 0.000      | 0.000        |
| 36                | 477.71                  | 55.09   | 1.811       | 0.426         | 1.385         | 0.000      | 0.000        |
| 37                | 424.89                  | 54.95   | 1.611       | 0.433         | 1.178         | 0.000      | 0.000        |
| 38                | 392.56                  | 54.86   | 1.488       | 0.439         | 1.050         | 0.000      | 0.000        |
| 39                | 361.51                  | 54.77   | 1.371       | 0.445         | 0.926         | 0.000      | 0.000        |
| 40                | 344.82                  | 54.72   | 1.307       | 0.451         | 0.857         | 0.000      | 0.000        |
| 41                | 325.30                  | 54.66   | 1.233       | 0.457         | 0.776         | 0.000      | 0.000        |
| 42                | 306.36                  | 54.60   | 1.162       | 0.463         | 0.699         | 0.000      | 0.000        |
| 43                | 294.04                  | 54.56   | 1.115       | 0.469         | 0.646         | 0.000      | 0.000        |
| 44                | 279.00                  | 54.51   | 1.058       | 0.475         | 0.583         | 0.000      | 0.000        |
| 45                | 264.36                  | 54.46   | 1.002       | 0.481         | 0.521         | 0.000      | 0.000        |
| 46                | 252.93                  | 54.42   | 0.959       | 0.487         | 0.472         | 0.000      | 0.000        |
| 47                | 241.75                  | 54.38   | 0.917       | 0.494         | 0.423         | 0.000      | 0.000        |
| 48                | 230.83                  | 54.34   | 0.875       | 0.500         | 0.376         | 0.000      | 0.000        |
| 49                | 225.46                  | 54.32   | 0.855       | 0.506         | 0.349         | 0.000      | 0.000        |
| 50                | 214.91                  | 54.28   | 0.815       | 0.512         | 0.303         | 0.000      | 0.000        |
| 51                | 207.17                  | 54.25   | 0.785       | 0.518         | 0.268         | 0.000      | 0.000        |
| 52                | 202.09                  | 54.23   | 0.766       | 0.524         | 0.242         | 0.000      | 0.000        |
| 53                | 194.58                  | 54.20   | 0.738       | 0.530         | 0.208         | 0.000      | 0.000        |
| 54                | 189.65                  | 54.18   | 0.719       | 0.536         | 0.183         | 0.000      | 0.000        |
| 55                | 182.38                  | 54.15   | 0.691       | 0.542         | 0.149         | 0.000      | 0.000        |
| 56                | 177.62                  | 54.13   | 0.673       | 0.548         | 0.125         | 0.000      | 0.000        |
| 57                | 172.91                  | 54.11   | 0.656       | 0.555         | 0.101         | 0.000      | 0.000        |
| 58                | 168.27                  | 54.09   | 0.638       | 0.561         | 0.077         | 0.000      | 0.000        |
| 59                | 163.69                  | 54.07   | 0.621       | 0.567         | 0.054         | 0.000      | 0.000        |
| 60                | 158.71                  | 54.05   | 0.602       | 0.573         | 0.029         | 0.000      | 0.000        |
| n <sub>2</sub> 61 | 152.61                  | 54.03   | 0.579       | 0.579         | 0.000         | 0.000      | 0.000        |
| 62                | 146.62                  | 54.01   | 0.556       |               |               | 0.000      |              |
| 63                | 143.68                  | 54.00   | 0.545       |               |               | 0.000      |              |
| 64                | 140.76                  | 53.99   | 0.534       |               |               | 0.000      |              |
| 65                | 137.87                  | 53.98   | 0.523       |               |               | 0.000      |              |
| 66                | 132.19                  | 53.96   | 0.501       |               |               | 0.000      |              |
| 67                | 129.39                  | 53.95   | 0.491       |               |               | 0.000      |              |
| 68                | 126.62                  | 53.94   | 0.480       |               |               | 0.000      |              |
| 69                | 121.18                  | 53.92   | 0.459       |               |               | 0.000      |              |
| 70                | 118.50                  | 53.91   | 0.449       |               |               | 0.000      |              |
| 71                | 115.85                  | 53.90   | 0.439       |               |               | 0.000      |              |
| 72                | 110.64                  | 53.88   | 0.419       |               |               | 0.000      |              |
|                   |                         |         |             |               | 111.010       | 181.740    |              |

$FT=4.38, T=177.36, qCT=111.01, f=\frac{qCT}{T}=0.626$

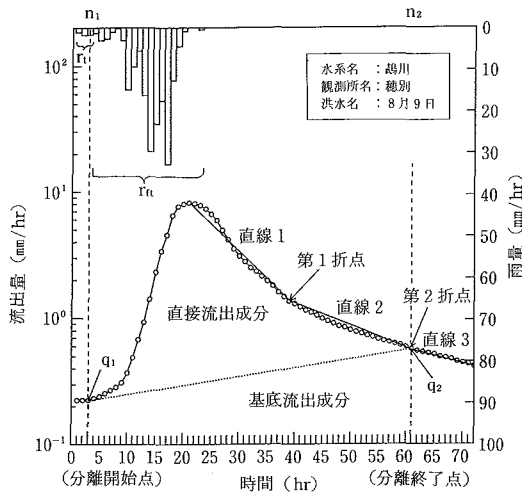


図 1.4 流出高分離図

ように直接流出成分を分離する。すなわち、点線より上が直接流出成分、下が基底流出成分となる。直接流出成分の当手法が対象としている表面流出に対応する。なお、ハイドログラフが2本の直線で近似できるときは、その折点が直接流出成分の終了時と考えると、同様に直接流出成分を分離する。

### 1-2-2 直接流出成分の計算

直接流出成分は流出高から基底流出成分を差引くことにより、計算できる。図 1.4および表 1.2に示される記号を用いると、基底流出成分は次式で計算できる。

$$q_B = q_1 + n \frac{q_2 - q_1}{n_2 - n_1} \quad (1.2)$$

ここで、 $q_B$  : 基底流出高 (mm/hr),  $n_1$  : 分離開始点,  $n_2$  : 分離終了点,  $q_1$  : 分離開始点の流出高 (mm/hr),  $q_2$  : 分離終了点の流出高 (mm/hr),  $n$  :  $n_1, n_2$  間の任意の時刻 ( $n_1$  を 0 時とした時刻)。

表 1.2によれば  $n_1 = 3, n_2 = 61, q_1 = 0.225, q_2 = 0.579$  であることがわかる。直接流出高は次式により計算できる。

$$q_C = q - q_B \quad (1.3)$$

ここで、 $q_C$  : 直接流出高 (mm/hr),  $q$  : 流出高 (mm/hr),  $q_B$  : 基底流出高 (mm/hr)。

分離後の流出高を表 1.2に示す。

### 1-2-3 有効雨量の計算

直接流出に寄与する降雨を有効降雨という。

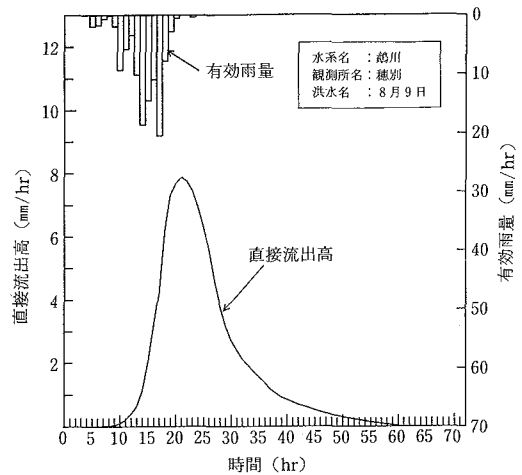


図 1.5 有効雨量と直接流出高

有効降雨量は実雨量に流出率を乗じて得られる。作業としては最初に降雨資料を直接流出高の分離開始点  $n_1$  の前後で分離し、分離点  $n_1$  以前の総降雨量を初期損失雨量  $r_{FT}$ ,  $n_1$  以降の総降雨量を総雨量  $r_T$  とする。総直接流出量  $q_{CT}$  は次式で計算できる。

$$q_{CT} = q_C(1) + q_C(2) + q_C(3) + \dots + q_C(j) + \dots + q_C(j_n) \quad (1.4)$$

$j = 1, 2, 3, \dots, j_n$

ここで、 $q_{CT}$  : 総直接流出高 (mm),  $q_C(j)$  : 直接流出高系列,  $j_n$  : 直接流出高資料数。

表 1.2によれば  $r_{FT} = 4.38$  (mm),  $r_T = 177.36$  (mm),  $q_{CT} = 111.01$  (mm) であることがわかる。流出率  $f$  は次式で計算される。

$$f = \frac{\text{総直接流出高}}{\text{総雨量}} = \frac{q_{CT}}{r_T} \quad (1.5)$$

鶴川の事例では、 $f$  は 0.626 であることがわかる。有効雨量は分離開始点  $n_1$  以降の降雨資料に、一率に流出率  $f$  を乗じて計算する。

$$\text{有効雨量}(r_e) = \text{雨量}(r) \times \text{流出率}(f) \quad (1.6)$$

直接流出高系列と有効雨量系列を図 1.5, 表 1.2のように整理し、以降で行う流出計算に用いる。

(金高州吾)

## 2. 貯留関数法の概念

### 2-1 貯留関数法の考え方

流出解析の代表的な手法のひとつとして、貯

留関数法がある。この貯留関数法は、降雨と流出の関係を連続条件と貯留形態を定式化した数学的モデルにより表わした手法である。

はじめに、降雨によってもたらされる流域への流入が、どのようにして流出するかを考えてみる。

図 2.1のように、降雨によってもたらされる雨量は、地表において表面流として流出するもの、また、地中からの中間流として流出するもの、さらに地下への浸透によって地下水面から地下水流として流出するものに分類される。これらのトータルが流域からの流出高となる。この際、降雨から流出へいたる過程には時間遅れが生じる。そこで、上記の流入過程の時間変化を『貯留効果』という形で表現する。これらの関係を簡単に示した図が図 2.2で、これを定式化すると (2.1) 式になる。

$$\text{連続式: } \frac{ds}{dt} = r(t) - q(t) \quad (2.1)$$

$$q(t) = \frac{3.6}{A} Q \quad (2.2)$$

ここで、 $s$ : 貯留高 (mm),  $t$ : 時間 (hour),  $r$ : 雨量 (mm/h),  $q$ : 流出高 (mm/h),  $Q$ : 流量 ( $\text{m}^3/\text{s}$ ),  $A$ : 流域面積 ( $\text{km}^2$ )

この (2.1) 式が、降雨と流出の関係を表わし

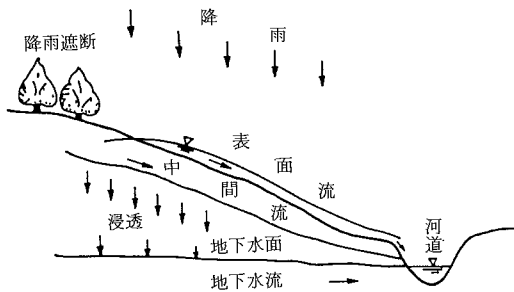


図 2.1 流出過程

た連続式である。ここで、この手法において、貯留高 ( $s$ ) と流出高 ( $q$ ) の関係式 (貯留方程式) を求める必要がある。貯留方程式については次項で述べるが、貯留高と流出高の関係を線形および非線形として定式化したものに分類される。

以上のような連続式と実績の貯留現象に見合う貯留方程式 (ここでは、貯留方程式の選定および係数の決定) から、洪水現象の再現を図ろうと考案されたものが貯留関数法である。

## 2-2 貯留高と流出高の関係

実績の貯留高と流出高の関係は、(2.1) を差分化することで簡単に求まる。

$$s(t+1) = s(t) + \left\{ r(t+1) \cdot \Delta t - \frac{q(t+1) + q(t)}{2} \Delta t \right\} \quad (2.3)$$

初期値:  $s(0) = 0$

図式的に示すと、図 2.3のようにハイエトグラフとハイドログラフから、各時間間隔の面積

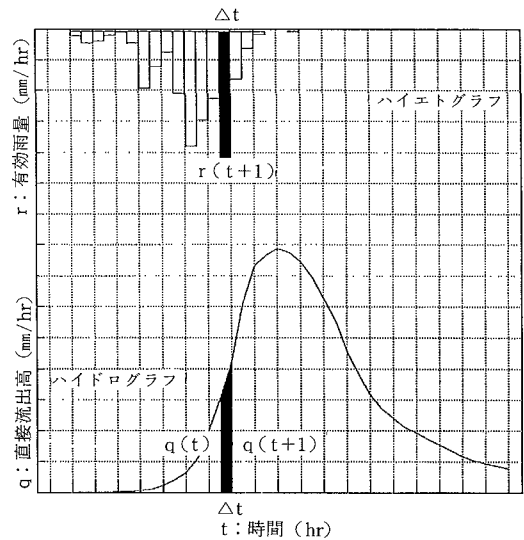


図 2.3 貯留高の算定

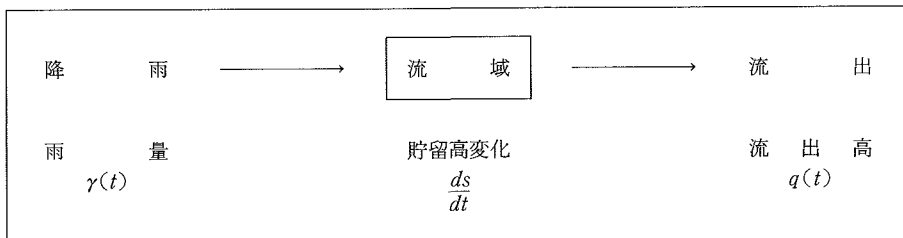


図 2.2 流出過程模式図

の差を求めることにより貯留高が求まる。この結果、貯留高と流出高の関係は図 2.4のように、ピークの流出高を境にループを描くグラフが表現される。

一連の降雨による洪水現象は増水から減水の過程があり、貯留高と流出高の関係は、図 2.5に示すようなハイドログラフの上昇期の傾きと減水期の傾きの違いによってピークを境に往復し、ループを描くことによる。よって、流出高が与えられたとき、このループ現象により貯留高は図 2.4に示すとおり、2つの値が求められることになる。このような関係を二価関係とい

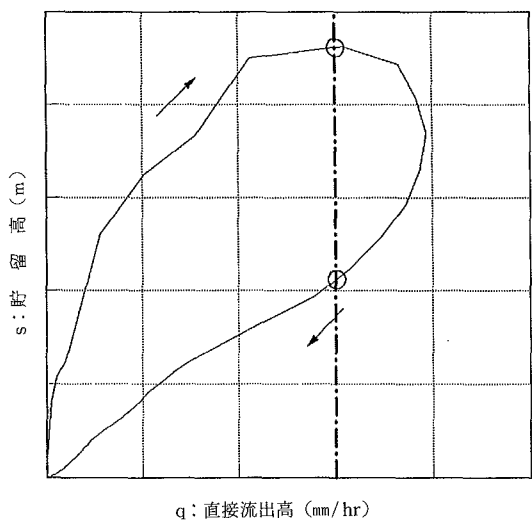


図 2.4 流出高と貯留高の関係

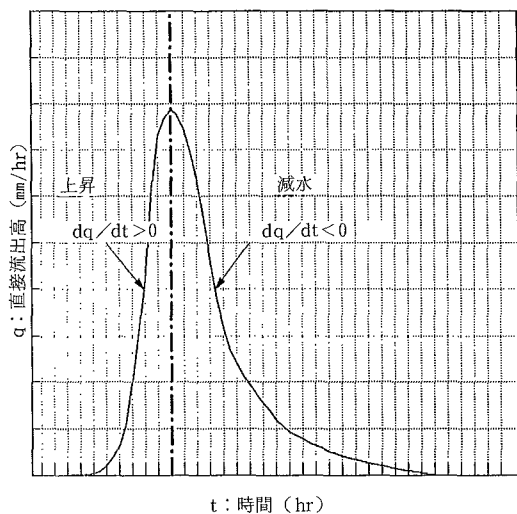


図 2.5 ハイドログラフ

表 2.1 穂別地点データ

| 時<br>間<br>t<br>(hr) | 直接流出高<br>q<br>(mm/hr) | 有効雨量<br>r<br>(mm/hr) |
|---------------------|-----------------------|----------------------|
| 3                   | 0.000                 |                      |
| 4                   | 0.001                 | 0.776                |
| 5                   | 0.002                 | 1.878                |
| 6                   | 0.011                 | 1.640                |
| 7                   | 0.021                 | 0.626                |
| 8                   | 0.030                 | 0.119                |
| 9                   | 0.049                 | 1.909                |
| 10                  | 0.104                 | 9.251                |
| 11                  | 0.217                 | 5.783                |
| 12                  | 0.402                 | 3.430                |
| 13                  | 0.652                 | 10.064               |
| 14                  | 1.130                 | 18.589               |
| 15                  | 2.032                 | 14.421               |
| 16                  | 3.095                 | 10.909               |
| 17                  | 4.232                 | 20.467               |
| 18                  | 6.172                 | 7.836                |
| 19                  | 7.311                 | 2.773                |
| 20                  | 7.678                 | 0.507                |
| 21                  | 7.877                 | 0.000                |
| 22                  | 7.754                 | 0.000                |
| 23                  | 7.458                 | 0.031                |
| 24                  | 6.944                 | 0.000                |
| 25                  | 6.287                 | 0.000                |
| 26                  | 5.560                 | 0.000                |
| 27                  | 4.573                 | 0.000                |
| 28                  | 3.800                 | 0.000                |
| 29                  | 3.169                 | 0.000                |
| 30                  | 2.714                 | 0.000                |
| 31                  | 2.407                 | 0.000                |
| 32                  | 2.115                 | 0.000                |
| 33                  | 1.939                 | 0.000                |
| 34                  | 1.736                 | 0.000                |
| 35                  | 1.557                 | 0.000                |
| 36                  | 1.385                 | 0.000                |
| 37                  | 1.179                 | 0.000                |
| 38                  | 1.050                 | 0.000                |
| 39                  | 0.926                 | 0.000                |
| 40                  | 0.857                 | 0.000                |
| 41                  | 0.777                 | 0.000                |
| 42                  | 0.699                 | 0.000                |
| 43                  | 0.646                 | 0.000                |
| 44                  | 0.583                 | 0.000                |
| 45                  | 0.521                 | 0.000                |
| 46                  | 0.472                 | 0.000                |
| 47                  | 0.423                 | 0.000                |
| 48                  | 0.376                 | 0.000                |
| 49                  | 0.349                 | 0.000                |
| 50                  | 0.303                 | 0.000                |
| 51                  | 0.268                 | 0.000                |
| 52                  | 0.242                 | 0.000                |
| 53                  | 0.208                 | 0.000                |
| 54                  | 0.183                 | 0.000                |
| 55                  | 0.149                 | 0.000                |
| 56                  | 0.125                 | 0.000                |
| 57                  | 0.101                 | 0.000                |
| 58                  | 0.078                 | 0.000                |
| 59                  | 0.054                 | 0.000                |
| 60                  | 0.029                 | 0.000                |
| 61                  | 0.000                 | 0.000                |

い、この曲線を関数形で表わすと二価関数のあてはめが必要となる。ただし、上昇期と減水期の傾きが近似している場合、貯留高と流出高の関係が直線的な比例関係に近くなるため、一価関数の貯留方程式で表わすことも可能となる。つまり、実績の貯留高のループにより近い線形、非線形関数をあてはめることで洪水現象の再現を図ることができるわけである。

**(例題 1)**

表 2.1は、1992年8月9日台風10号の鷓川水域穂別地点での直接流出高と有効雨量データである。このデータから貯留高を計算し、貯留高と直接流出高の関係を求めよ。

**(例題 1の解答)**

(2.3)式から、以下の表 2.2に示すように貯留高が求まる。

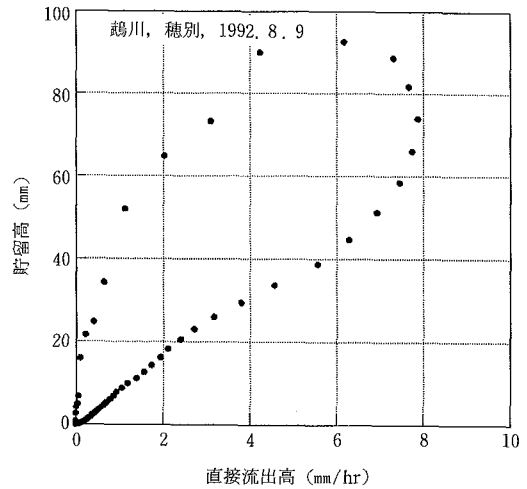


図 2.6 直接流出高と貯留高の関係

この結果、貯留高は表 2.3、貯留高と直接流出高の関係は図 2.6に示すとおりとなる。このことから、一見して貯留高がループを描くこと

表 2.2 貯留高の計算

| 時 間<br>$t_n(\text{hr})$ | 直接流出高<br>$q_n(\text{mm/hr})$ | 有効雨量<br>$r_n(\text{mm/hr})$ | 貯 留 高<br>$S_n(\text{mm})$<br>$S_n = S_{n-1} + \left\{ r_n \cdot \Delta t_n - \frac{q_n + q_{n-1}}{2} \Delta t_n \right\}$                                 |
|-------------------------|------------------------------|-----------------------------|---|
| $t_3=3$                 | $q_3=0.000$                  |                             | $S_3=0.000$ : 初期値, $\Delta t_n = t_n - t_{n-1} = 1(\text{hr})$  |
| $t_4=4$                 | $q_4=0.001$                  | $\gamma_4=0.776$            | $S_4 = S_3 + \gamma_4 \times \Delta t_4 - \frac{q_4 + q_3}{2} \times \Delta t_4$<br>$= 0.000 + 0.776 \times 1 - \frac{0.001 + 0.000}{2} \times 1 = 0.776$ |
| $t_5=5$                 | $q_5=0.002$                  | $\gamma_5=1.878$            | $S_5 = 0.776 + 1.878 \times 1 - \frac{0.002 + 0.001}{2} \times 1 = 2.652$   |
| $t_6=6$                 | $q_6=0.011$                  | $\gamma_6=1.640$            | $S_6 = 2.652 + 1.640 \times 1 - \frac{0.011 + 0.002}{2} \times 1 = 4.285$   |
| $\vdots$                | $\vdots$                     | $\vdots$                    | $\vdots$  |
| $t_{61}$                | $q_{61}$                     | $\gamma_{61}$               | $S_{61}$  |

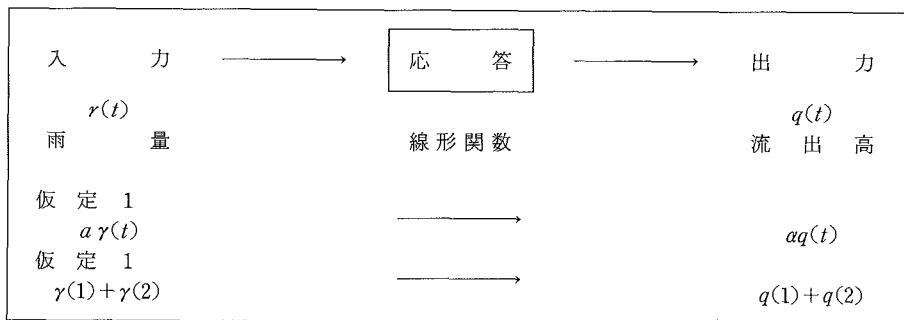


図 2.7 線形関数の流出過程模式図



表 2.3 種別地点データ

| 時 間<br>t<br>(hr) | 直接流出高<br>q<br>(mm/hr) | 有効雨量<br>r<br>(mm/hr) | 貯 留 高<br>s<br>(mm) |
|------------------|-----------------------|----------------------|--------------------|
| 3                | 0.000                 |                      | 0.000              |
| 4                | 0.001                 | 0.776                | 0.776              |
| 5                | 0.002                 | 1.878                | 2.652              |
| 6                | 0.011                 | 1.640                | 4.285              |
| 7                | 0.021                 | 0.626                | 4.895              |
| 8                | 0.030                 | 0.119                | 4.988              |
| 9                | 0.049                 | 1.909                | 6.858              |
| 10               | 0.104                 | 9.251                | 16.032             |
| 11               | 0.217                 | 5.783                | 21.655             |
| 12               | 0.402                 | 3.430                | 24.775             |
| 13               | 0.652                 | 10.064               | 34.312             |
| 14               | 1.130                 | 18.589               | 52.011             |
| 15               | 2.032                 | 14.421               | 64.851             |
| 16               | 3.095                 | 10.909               | 73.197             |
| 17               | 4.232                 | 20.467               | 90.001             |
| 18               | 6.172                 | 7.836                | 92.635             |
| 19               | 7.311                 | 2.773                | 88.667             |
| 20               | 7.678                 | 0.507                | 81.679             |
| 21               | 7.877                 | 0.000                | 73.901             |
| 22               | 7.754                 | 0.000                | 66.086             |
| 23               | 7.458                 | 0.031                | 58.512             |
| 24               | 6.944                 | 0.000                | 51.311             |
| 25               | 6.287                 | 0.000                | 44.696             |
| 26               | 5.560                 | 0.000                | 38.772             |
| 27               | 4.573                 | 0.000                | 33.705             |
| 28               | 3.800                 | 0.000                | 29.519             |
| 29               | 3.169                 | 0.000                | 26.034             |
| 30               | 2.714                 | 0.000                | 23.093             |
| 31               | 2.407                 | 0.000                | 20.533             |
| 32               | 2.115                 | 0.000                | 18.272             |
| 33               | 1.939                 | 0.000                | 16.245             |
| 34               | 1.736                 | 0.000                | 14.408             |
| 35               | 1.557                 | 0.000                | 12.762             |
| 36               | 1.385                 | 0.000                | 11.291             |
| 37               | 1.179                 | 0.000                | 10.009             |
| 38               | 1.050                 | 0.000                | 8.895              |
| 39               | 0.926                 | 0.000                | 7.907              |
| 40               | 0.857                 | 0.000                | 7.016              |
| 41               | 0.777                 | 0.000                | 6.199              |
| 42               | 0.699                 | 0.000                | 5.461              |
| 43               | 0.646                 | 0.000                | 4.789              |
| 44               | 0.583                 | 0.000                | 4.174              |
| 45               | 0.521                 | 0.000                | 3.622              |
| 46               | 0.472                 | 0.000                | 3.126              |
| 47               | 0.423                 | 0.000                | 2.678              |
| 48               | 0.376                 | 0.000                | 2.279              |
| 49               | 0.349                 | 0.000                | 1.916              |
| 50               | 0.303                 | 0.000                | 1.590              |
| 51               | 0.268                 | 0.000                | 1.304              |
| 52               | 0.242                 | 0.000                | 1.049              |
| 53               | 0.208                 | 0.000                | 0.824              |
| 54               | 0.183                 | 0.000                | 0.629              |
| 55               | 0.149                 | 0.000                | 0.462              |
| 56               | 0.125                 | 0.000                | 0.325              |
| 57               | 0.101                 | 0.000                | 0.212              |
| 58               | 0.078                 | 0.000                | 0.122              |
| 59               | 0.054                 | 0.000                | 0.056              |
| 60               | 0.029                 | 0.000                | 0.015              |
| 61               | 0.000                 | 0.000                | 0.000              |

がわかる。

2-3 貯留方程式の分類

雨量と流出高の関係は連続方程式によって表わされるが、先に述べたように貯留方程式は線形式、非線形式に分類される。

線形、非線形の貯留方程式は、次の関係によって表わすことができる。

・線形方程式

$$\text{一価関数: } s = ky \quad (k: \text{定数}) \quad (2.4)$$

$$\text{二価関数: } s = k_1y + k_2 \frac{dy}{dt}$$

$$(k_1, k_2: \text{定数}) \quad (2.5)$$

・非線形方程式

$$\text{一価関数: } s = ky^p \quad (k, p: \text{定数}) \quad (2.6)$$

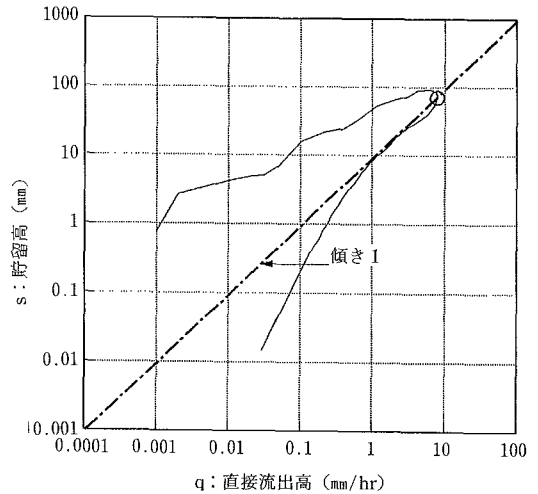


図 2.8 流出高と貯留高の関係 (両対数)

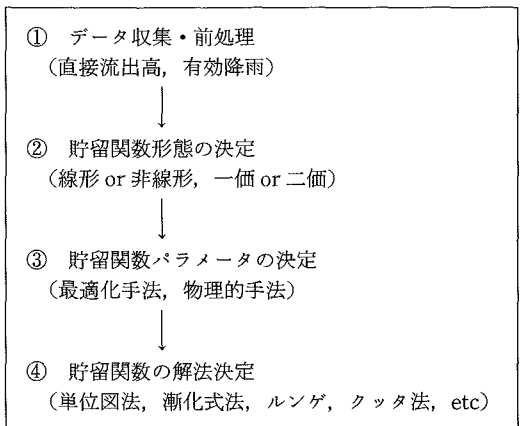


図 2.9 貯留関数法適用の手順概略

$$\text{二価関数： } s = k_1 y^p + k_2 \frac{dy}{dt} \\ (k_1, k_2, p: \text{定数}) \quad (2.7)$$

$$s = k_1 y^{p_1} + k_2 \frac{dy}{dt} y^{p_2} \\ (k_1, k_2, p_1, p_2: \text{定数}) \quad (2.8)$$

線形方程式の例としては、(2.4) 式のような一価関数、(2.5) 式のような二価関数をあてはめたものがあげられる。また、非線形方程式としては、一価の(2.6)式、二価の(2.7)、(2.8)式が考えられる。なお、(2.7)式はプラサドモデル、(2.8)式は星モデルといわれるものである。

線形関数とは、図 2.7に示したような仮定に従うような応答関数である。すなわち、

- $\alpha$  倍の降雨による雨量の入力があった場合、流出は  $\alpha$  倍のハイドログラフとなる (仮定 1)。
- 一定時間ごとの降雨が逐次入力された場合、出力は各単位時間降雨のハイドログラフが足し合わさったものとなる (仮定 2)。

である。

しかし、実際には降雨から流出にいたる過程で植生による流入の遮断、蒸発散、表層・下層での飽和状態の違いにより損失状態が異なるため、上記の出力が得られないのが実情であり、この応答が1価の(2.6)式および2価の(2.7)

式、(2.8)式の非線形関数として表わされる。とはいえ、流出現象をより簡便に捉えることを考えれば線形の貯留方程式に用いることが有効であろう。

そこで、図 2.4の貯留高と流出高の関係を両対数紙で表わしてみる。この際、ピークをとめる直線を引くと図 2.8に示すように直線の傾きが1に近い場合、(2.4)式のような線形関数のあてはめが可能である。またそうでない場合、(2.6)式の  $p$  は1にならないこととなり、非線形関数の適用が望まれる。

以上に貯留方程式の関数形について示したが、実状の非線形現象から流出現象を非線形関数で表現することは正論ではあるが、流出現象の基本的な考え方および解法をマスターするため、今回は線形方程式での解法を次章で述べることとし、非線形に関する解法は次回に報告する。

#### 2-4 貯留関数法の適用手順

貯留関数法を実際に適用するに際し、以下に適用の概略を示す。個々のプロセスの詳細は以後、順を追って解てくが、作業の位置づけとしては、すべて図 2.9に帰着するものとなることを留意していただきたい。なお、すでに①の作業については第1章で完了している。

(谷 昭彦)