

551.579.2: 556.16

「融雪流出の概念モデルの相互比較」
の課題となった6流域の流出解析

菅原正巳*・渡辺一郎**・中根和郎***・尾崎睿子****・勝山ヨシ子****

国立防災科学技術センター

**Runoff Analysis by the Tank Model with Snow Model on Six Basins,
Data of which are given by WMO for the Intercomparison of
Conceptual Models of Snowmelt Runoff**

By

**M. Sugawara, I. Watanabe, K. Nakane,
E. Ozaki and Y. Katsuyama**

National Research Center for Disaster Prevention, Japan

Abstract

1. Outline of the procedures

1.1 Tank model with snow model

In snowy basins, the sum of snowmelt and liquid precipitation is put into the tank model with soil moisture structure (Fig. 1) to be turned into runoff. Then the adequate time lag shown in Table 6 is added to the output from the tank model to be turned into calculated discharge.

The principle of calculating snow deposit and melt is very simple. If the temperature $T^{\circ}\text{C}$ is negative, precipitation is judged as snow and it is accumulated to snow deposit, and if positive, precipitation is judged as rain and, moreover, there occurs snowmelt given by $\text{SMELT} * T + (1/80)P * T$, where SMELT is some constant and P is the amount of rainfall. The second term is derived from the assumption that the temperature of rain water is equal to air temperature, but the second term is nearly negligible compared with the first term. Analysing many snowy basins in Japan, we can get good results by putting SMELT as 6. However, in many other regions, SMELT must be put to smaller values. In the present case, SMELT is put to 4 or to the values shown in Table 3.

The very important point of the snow model is the division of the object basin into zones by elevation. Each of the zones is assumed to be uniform in

* 前所長, ** 第4研究部, *** 第1研究部風水害防災研究室, **** 第4研究部計測研究室

precipitation and temperature. Number of zones need not be large, usually from 4 to 6.

The temperature of I-th zone is assumed to be given by

$$T + T_0 - (I-1) * TD,$$

where T_0 is the correction term and TD is the temperature decrease by zone.

The correction term T_0 is necessary, firstly because the elevation of temperature station does not equal to the mean elevation of the first zone and secondly some temperature stations have their own nature that it is warmer or cooler there than ordinary points after eliminating the effect of elevation, from its surrounding conditions.

Another important point is the zonal increase of precipitation which shows a large seasonal change in some cases. The precipitation of M-th month in I-th zone is assumed to be given by

$$CP(M) * (1 + C(M) * PD(I)) * P$$

where $PD(I)$ is the precipitation increase, $C(M)$ is the factor for seasonal change and $CP(M)$ is the correction factor.

In some basins, the effect of liquid water storage in snow deposit is considered by the snow deposit tank model shown in Fig. 2.

1.2 Method of calibration

Trial and error is the most important and fundamental method in calibration. For the calibration of runoff and infiltration coefficients, such as A_0 , A_1 , A_2 , B_0 , ..., D_1 shown in Fig. 1, the automatic calibration method by means of $RQ(I)$'s and $RD(I)$'s is very useful and effective, and so it is used as an auxiliary method in trial and error, i. e. one subjective trial consists of successive automatic trials by means of $RQ(I)$'s and $RD(I)$'s.

For some parameters, such as parameters of soil moisture structure S_1 , S_2 , K_1 and K_2 or positions of side outlets of the second and the third tanks HB and HC , semi-automatic methods have been developed and there are some improvements in these methods. For the calibration of T_0 and TD , also semi-automatic procedure is developed by means of orthogonal transformation of T_0 and TD .

For the calibration of parameters about the precipitation increase with elevation, trial and error is the only possible way.

2. Description on each of the six object basins

2.1 Durance basin (Fig. 8)

The basin is divided into four subbasins as shown in Fig. 8. Precipitation stations and air temperature stations corresponding to each of the subbasins and their weights are shown in Table 7. Corresponding weighted mean of precipitation and air temperature are the inputs to the tank model with snow model of each of the subbasins. Obtained parameters of the snow model are shown in Table 8, Table 9, and Table 10, and the obtained tank model is shown in Fig. 15, where the soil moisture structure is nearly meaningless in this basin. The obtained results are shown in Fig. 16 and Fig. 17. The results are good, probably because of many precipitation stations and air temperature stations in

the basin.

2.2 W3 watershed (Fig. 18)

The basin is divided into four zones. The type of precipitation, i. e. rain or snow, is determined by the given data. Three-hourly data are used as input, and so some parameters, such as SMELT and the runoff and infiltration coefficients of the tank model, are values for the time unit of three hours. The obtained parameters for the snow model are shown in Table 13, and the obtained tank model with soil moisture structure is shown in Fig. 20. Obtained results are shown in Fig. 21, Fig. 22 and Fig. 23. The results are not so good, firstly because small basins are difficult to analyse and secondly because the given precipitation data are the mean areal precipitation derived by the weights shown in Table 11 and the air temperature data are given at only one station. If the raw precipitation data at several stations and the air temperature data at plural stations are available, the results would be slightly better, we expect.

2.3 Dunajec (Fig. 24)

The basin is divided into three subbasins as shown in Fig. 24. The areal ratio of three subbasins and the areal ratio of six zones of each subbasins are shown in Table 16. Obtained parameters of snow model are shown in Table 17, and the obtained tank model is shown in Fig. 28. The results are shown in Fig. 29 and Fig. 30.

2.4 Dischma (Fig. 31)

Precipitation and air temperature are measured at stations No. 21 and No. 22 respectively, near the mountain top far from the object basin as shown in Fig. 31. It is described that precipitation measured by automatic rain gauge with electric heater is not reliable for snow but the water equivalent of new snow is more reliable. So, precipitation P and the water equivalent of new snow HW are compared everyday to define adjusted precipitation $\hat{P}$, the larger one of P and HW , which is the input to the model. The ratio $\hat{P}/P$ shows large seasonal change as shown in Table 20. Obtained parameters of snow model are shown in Table 22 and the obtained tank model is shown in Fig. 33. The results are shown in Fig. 34 and Fig. 35. The results are fairly good and rather admirable, considering that the precipitation and air temperature are measured at such stations far from the object basin. Such good results will come from the reliability of adjusted $\hat{P}$, we suppose.

2.5 Illecillewaet (Fig. 38)

Precipitation and air temperature are measured at two stations No. 1 and No. 2, shown in Fig. 38. The ratio of mean monthly precipitation at No. 1 and No. 2 shows large seasonal change as shown in Fig. 4, where P_1 and P_2 are the precipitation at No. 1 and No. 2, respectively. By smoothing the curve of P_2/P_1 , we get the coefficients shown in Table 24, and by dividing P_2 by these coefficients, the modified $\hat{P}_2$ are defined. In such a way, we can get two pairs of input data (P_1, T_1) and ($\hat{P}_2, T_2$). As we cannot find any appropriate division of the basin into two parts for No. 1 and No. 2, we calculate two kinds of runoff. The one obtained from (P_1, T_1), and the other from ($\hat{P}_2, T_2$), where the snow model and the tank model are the same for both inputs. Then, two series of calculated runoff are composed with equal weight to make the estimated runoff. Obtained parameters of snow model are shown in Table 26 and the obtained

tank model is shown in Fig. 40. The results are shown in Fig. 41 and Fig. 42. The results are fairly good in spite of the very biased positions of two stations. The existence of both the precipitation and air temperature data for the two stations must be the reason for good results. As shown in Fig. 12, air temperature shows a large fluctuation from point to point in some cases, and so plural stations for air temperature must be necessary for good results, we suppose.

2.6 Kultsjön (Fig. 43)

Precipitation data are given at three stations which will be represented by K, R and M, but air temperature data are given at only one station K (see Fig. 43). Similar to Illecillewaet, three series of runoff are derived from the precipitation at K, R and M, among which temperature data are identical and the models are also identical, and they are composed with an equal weight to make the estimated discharge. Obtained parameters of snow model are shown in Table 30, and the obtained tank model is shown in Fig. 46. The results are shown in Fig. 47 and Fig. 48. As the discharge is derived from the outflow of the Lake Kultrjön, the increment of the storage of the Lake Kultsjön and the inflow to the basin, there are large errors on the discharge data and there often appear negative values. Usually, we use logarithmic scale to represent the hydrograph and so we must avoid negative discharge. Accordingly, we add 2.5 mm/day to both the observed and calculated discharges for the daily hydrograph of Fig. 47, and add 0.5 mm/day to both the observed and calculated monthly mean discharges for the monthly hydrograph of Fig. 48. The results are not so good, probably from two reasons: the first, the discharge data are not so reliable, and the second, there is only one station for air temperature.

1. 概論

1.1 まえがき

WMOの水文・水資源局によって行なわれた「融雪流出のモデル」の相互比較(WMO, 1982)は、1974年に行なわれた「流出モデル(概念モデル)」の相互比較(Sugawara, *et al.*, 1974)の続きである。流出モデルの相互比較においては、積雪・融雪は問題にされなかった。課題に出た6流域のうち、東シベリアのビキン河を除く5流域は、まったく雪が降らないか、または降っても雪の影響を無視し得る程度のものであったし、ビキン河については、雪のない夏期の流量だけが問題とされたのであった。

「雪のモデル」を含む流出モデルの相互比較を行ないたいという話は、「流出モデル」の相互比較の終了とともに出て来たものらしい。その後数年を経て、1980年に具体化した。国立防災科学技術センターは、「雪のモデルを伴うタンク・モデル」を提出して、「融雪流出のモデル」の相互比較に参加した。

「雪のモデル」の相互比較について、「雪のモデル」だけを取り出して比較すべきであるという、いわば無理な注文も出たようであるが、ある流域内で、「ある時点に、雪がどれだけ積もっているか」「ある期間内に雪がどれだけ融けたか」を実際に測ることが不可能である以上、

積雪・融雪モデルと、融雪水および雨水を河川流量に変換する流出モデルを一体とし、算出された流量と実測流量とを比較することにより、そのモデルの適合度を測るより他に方法はないであろう。つまりその意味で、今回の相互比較は「(雪のモデル) + (流出モデル)」の相互比較である。ただし、「雪のモデル」の相互比較を目的とするという主旨から、算出、実測流量の比較は、融雪出水の時期に限って行なわれることになった。

モデルの相互比較の課題となったのは、表1の6流域である。

表1 「融雪流出の概念モデルの相互比較」の課題となった6流域

Table 1 Six object basins for the intercomparison of conceptual models of snowmelt runoff by WMO

	河川または流域名	国名	流域面積 (km ²)
1	Durance	France	2,170.
2	W3 流域	U. S. A.	8.42
3	Dunajec	Poland	681.1
4	Dischma	Switzerland	43.3
5	Illecillewaet	Canada	1,155.
6	Kultsjön	Sweden	*1,109.

相互比較は次の方式で行なわれる。

表1の6流域について、降水量、気温等の入力データは10年間与えられる。出力データである流量は入力を与えられた10年間の前半6年間についてだけ与えられて、後半の4年間は隠されている。モデル提出者(相互比較への参加者)は、流量が与えられている6年間の資料により、モデルのパラメータを決定し、そのモデルを用いて10年間の流量を算出する。この10年間の算出流量のうち、実測流量が隠されている後半の4年間について、モデルの適合度が測られる訳であるが、その4年間のうちの融雪期について、算出流量と実測流量とが比較され、モデルの評価が行なわれる。

この方式は、前の「流出モデルの相互比較」の場合とほぼ同様であるが、前回は実測流量が8年間与えられ、2年間隠されていた点で異なっている。今回、6年と4年にしたのは、評価を融雪期に限るため、比較対象の資料数が減るのを補うためであると説明されている。これはいささか数学的すぎるように感じられる。前回の8年と2年とに分ける方式では、隠された2年間にたまたま豊水年や渇水年が当たったり、何かの事故が起こったりする心配がある。事実、前回のときは6河川中2河川で、隠された2年間に異常なハイドログラフが現われ、その2河川はモデル比較の資料として、あまり役に立たなかったようである。そのこと

を考えると、今回の6年と4年に分ける方式が無難であると感じられる。5年と5年に分けてもよかったのではあるまいか。

与えられた入力データは、流域によって異っている。6流域とも降水量、気温、蒸発量が与えられている点は共通であるが、地点数はいろいろである。日照量、積雪深、積雪水当量、露点、風速等の観測値が与えられている流域もある。われわれの雪のモデルでは、降水量と気温だけを用い、流出モデルには蒸発量も必要であるが、その他は原則的に不要である。しかし、積雪水当量を参考資料として用いたし、また新雪水当量その他を入力として用いた場合がある。

すなわち W3 では、降水が雨であるか雪であるかが資料として与えられている。W3 の気温資料は代表性に乏しいように思われたので、降水が雨か雪かを、気温によらず、雨か雪かの記録によって定めることにした。ただし、この雨か雪かの記録も、あまり代表性がないようである。

Dischma では降水量の他に新雪水当量が資料として与えられている。自記雨量計の雪の捕捉が悪く、雪の場合は新雪水当量の方に信頼性があるらしい。そこで自記雨量計による降水量と、新雪水当量とを比較し、大きい方を降水量とした。

以上の二つの場合を除き、入力資料は日降水量、日最高、最低気温、および日蒸発量である。なお、W3 では降水量、気温の時間資料も与えられている。終局的には、W3 の解析は3時間資料によって行なわれた。

課題6 河川の資料は1981年5月末に到着した。結果の提出期限は1982年7月1日である。約1年間で流出解析に与えられた訳で、時間的制約は感じられなかった。

1.2 雪のモデルを伴うタンク・モデル

1.2.1 タンク・モデル

このたび用いたのは、いままでと同様、4段のタンク・モデルで、1段目には1次、2次の土壤水分構造がついている（図1a）。念のため一応説明する。

1次土壤水分 XP と1段目タンクの自由水 XF とが、1段目タンクの貯留高 XA を作る。雨は XA に加えられ、蒸発は XA から引き去られる。

XA が1次土壤水分の飽和値 $S1$ より小さいとき、 XA はすべて1次土壤水分で、1段目タンクの自由水はない。すなわち、

$$XA \leq S1 \text{ ならば, } XP = XA, XF = 0.$$

XA が $S1$ より大きいとき、1次土壤水分は飽和し、残余は自由水となる。

$$XA > S1 \text{ ならば, } XP = S1, XF = XA - S1.$$

自由水から、側面流出孔からの流出、底面浸透孔からの下段タンクへの浸透が生ずる。2段目以下のタンクについては拘束水は考えない。あったとしても、つねに飽和していると考えられる。1次土壤水分が飽和していないとき、2段目以下のタンクから水分が補給される。補給は

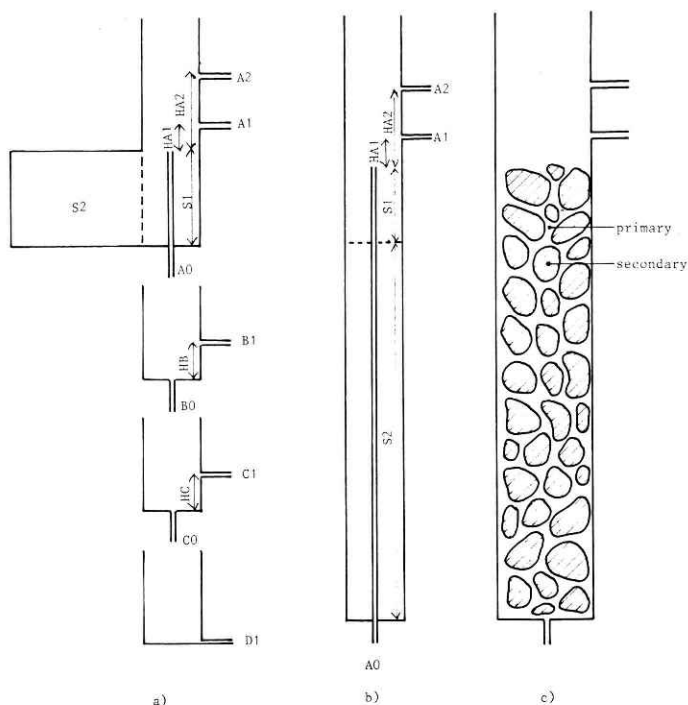


図1 a) 土壌水分構造つきのタンク・モデル
b) 土壌水分構造に対する従来を表わし方
c) 1次, 2次土壌水分のあり方を示す模式図

Fig. 1 a) Tank model with soil moisture structure
b) Former representation of soil moisture structure
c) Schematic representation of primary and secondary soil moistures

まず2段目タンクの自由水から行なわれ, 2段目タンクが空のときは3段目から, 3段目も空のときは4段目から行なわれる. この水分補給は, 1次土壌水分の乾き方に比例し, 次式で与えられる.

$$K1 * (1 - XP/S1).$$

1次, 2次の土壌水分の間に水の移動があり, それぞれの相対湿度の差に比例する水分が, 湿った方から乾いた方に移動する. それは次の式で与えられる.

$$K2 * (XP/S1 - XS/S2).$$

これが正のときは1次から2次への移動, 負のときはその逆である.

各段タンクの側面の流出孔からの流出の和が, 流出高の推定値である.

ここで図1-a)のタンク・モデルの図が従来(菅原ら, 1982-2)と異なり, 2次土壌水分がタンクの側面に置かれていることについて説明する. 従来は図1-b)のように, 2次土壌水分は1次土壌水分の下に置かれていた. 元来, 1次, 2次の土壌水分は上下の関係にあるものではない. そこでわざわざ1次, 2次と名づけ, 上下という修飾語を避けたのである. 1

次, 2次の土壤水分を模型的に表わせば, 図1-c)のようになるであろう. 水分はまず浸入しやすい1次に入り, ついで徐々に2次側に移動する. そして外界, すなわち大気や下層地下水との水のやりとりは, すべて1次土壤水分を通じて行なわれる. しかし図1-c)のように表わすのは面倒だから図1-b)のように上下に置いたのであるが, それでは折角1次, 2次と名づけた意味が薄れるし, 1次土壤水分が乾いたとき, 下層地下水から1次に水が補給されることが不自然に見える. そこで, 2次土壤水分をタンクの側面に置くことに改めたのである. これでわかり易くなると同時にもう一つの利点がある. 2次土壤水分は150 mmとか250 mmとかの大きい値であるのがふつうで, 土壤水分を含めて, 一定の縮尺でタンク・モデルを図示すると, 土壤水分の部分が長くなりすぎて, 全体的な形がとらえにくくなる. そこで従来は, 土壤水分の部分は小さく縮めていた. 1次土壤水分は, HA2, HB, HCなどと比べると, やや大きい程度で, ほぼ似たような大きさである. したがって, 2次土壤水分を側方に置くことにより, 1次土壤水分を含んで, タンク・モデル全体を同一縮尺で描くことができる. これはタンク・モデルの図を眺めて, 流域のおよその性質を理解する上で便利である. 側方に置いた2次土壤水分については, S1とS2の比が面積比で表わされることが図的表示としては望ましいが, 2次土壤水分が大きすぎてバランスがとれないこともあるので, S1:S2の図的表示はあきらめることにした. S1, S2の関係は, 数字で見ていただきたい.

1.2.2 時間遅れ

多くの場合, タンク・モデルからの出力 $Y(J)$ に, ある一定の時間遅れを与えたものが, 推定流出高 $QE(J)$ となる. ここに J は日を表わす番号である. 時間遅れを $TLAG$ とすれば,

$$QE(J) = TLAG * Y(J-1) + (1-TLAG) * Y(J).$$

なお, 上の式は時間遅れが1日以下のときである.

1.2.3 雪のモデル

積雪, 融雪の機構はきわめて簡単である. 気温が 0°C 以下であれば, 降水は雪であると考え, 降水量は積雪量に累加される. 気温が 0°C より上であれば, 降水は雨と考え, さらに積雪の一部が融ける. 融雪量は気温に比例する. この融雪定数を $SMELT$ とする. 気温 0°C 以上の日に降水量 P があれば, その雨水の温度は気温に等しいと考え, 雨による融雪 $(1/80) * P * T$ が加わる. すなわち融雪量は,

$$SMELT * T + (1/80) * P * T$$

で与えられる. 現実には $SMELT * T$ が主要部分で, 雨水による融雪はきわめて小さい.

氷点下の気温の影響は無視される. やかましく考えれば, 氷点下の気温はその後の融雪量にいくらか影響を与えるはずである. 過去の冷たい気温は, 積雪を冷やし, 大地を冷やし, その影響は気温が氷点より上になった時におよび, 融雪量をいくらか小さくする方向に作用するはずである. このことは, ずっと以前, わが国の積雪流域の流出の計算を始めた頃に考えてみたが, この影響を無視し, そしてよい結果が得られた. つまり無視してもよいという

ことであろう。これには次の理由が考えられる。積雪は多孔質であるから熱の伝導が悪く、冷たい外気の影響は内部に浸入しにくい。また雪面はあまり熱を吸収、放散しないから、外気の影響を受けにくいのであろう。

0°C以下の冷たさの影響を無視しているばかりでなく、過去の高温の影響も無視している。たとえば高温の日が続いた後に寒い日が来て雪が降ったとする。地面が温まっていれば、それによる融雪があり得るが、かかる効果も無視する。大地の熱伝導、熱容量と、水の融解潜熱 80 cal/g とを考え合わせれば、無視してもよいのであろう。

積雪、融雪はすべてその日の気温で定まるとするのである。

1.2.4 高度による地帯分割

雪のモデルの一番大切な点は、流域を高度により数個の地帯に分割して計算する所にある。この方式により、冬が来ると高い地帯から積雪が始まり、春になると低い地帯から雪が融け始める。場合により、一番高い地帯では、1年中雪が残ることがある。

地帯分割の数はあまり大きくなくて十分であるらしい。われわれは日本の多くの河川では4地帯に分割して来た。今回は標高差の小さいW3は4分割、他の流域は6分割した。地帯分割した後は、各地帯は一樣であると仮定する。

なお、流域をいくつかの部分流域に分割した上で、各部分流域をそれぞれ地帯分割することもある。

1.2.5 定数 T0, TD

地帯が上になるに従って気温が低下する。地帯ごとの気温低下の定数が TD である。TD のおよその値は、高度 100 m 当たりの気温低下が約 0.6°C であることから定めることができる。しかし流域によって南傾斜であったり、北傾斜であったりすることがある。この場合、高くなるに従って、地帯は北側または南側に移動する。この影響、または他の局地的気候の影響により、始めに推定した TD の値をかなり修正しなければならないことが多い。

TD と並んでというより、より大きい影響を持つパラメータとして、温度補正の定数 T0 がある。われわれには流域内、あるいは流域外の1地点、または数地点で測られた日最高、最低気温が資料として与えられる。われわれはそれら資料のある種の平均を入力気温として用いる以外に仕方がない。

Durance 河流域では、17 地点の雨量と、9 地点の気温が与えられているのであるが、日気温は地点により、かなり大きな変動を示すのである（図 12 参照）。また、地点によりかなりの偏りを示す（図 13 参照）。すなわち、各地点の気温に高度による補正を施し、ある高度に揃えたとしても、ある地点はいくらか暖く、ある地点はいくらか寒い。そこである種の平均で得られた気温を T とするとき、この T である地帯の平均気温を推定するには、何かの補正が必要である。すなわち I 番目の地帯（低い方から 1, 2, 3, ……とする）の平均気温は、次式で与えられるとする。

$$T + T_0 - (I - 1) * TD.$$

ここに T_0 は補正定数, TD は先に述べた地帯ごとの温度低下である. 計算を始めるとき, T_0 の値は, 1番低い地帯の平均高度と, 各気象観測点の高度の平均値との差から, 100 m についての温度低下を 0.6°C として定められる. T_0 の値はすべての地帯に一樣に効くから, きわめて影響が大きいパラメータである. T_0 , TD の定め方は後で説明する.

雪のモデルの最初の所で, 気温が 0°C より上ならば雨, 0°C 以下であれば雪とした. ここで 0°C の代りに, $T_c^{\circ}\text{C}$ より上ならば雨, それ以下であれば雪と, 限界気温 $T_c^{\circ}\text{C}$ を考える方式がある. しかし実際問題として, 何かの気温資料を用いる限り, 上記の補正定数 T_0 が必要で, それを限界気温と補正部分に分離することは不可能であり, かつ無意味であると思われる.

1.2.6 融雪定数 (SMELT)

いままで, 日本の河川では融雪定数を 6 と置いて, よい結果を得ている. 1975 年 12 月東京で開かれた国際水文学会のシンポジウムの折, ある会合の席で菅原がたまたまそのことを言ったのに対し, スイスの Martinec 氏は, それは信じられないほど大きい, 4 程度であると言った. 事実, その後ヨーロッパの河川資料を得る機会があつて計算してみると, 融雪定数を 4 と置いてよい結果が得られた. 日本で 6 という大きな値がよい結果を与えるのは, 日本の大気湿度が高く, 内部エネルギーを多く持っていること等, 何かの気象的原因によるものと思われる.

今回の 6 河川に対しても融雪定数を 4 と置いて計算を進めた. 終り頃になって, W3 流域を 3 時間資料で解析しながら, 2 月, 3 月頃にたまたま現われる高温の日の雪どけ出水を実測に合わせるには, 2 月, 3 月頃の融雪定数を小さくすればよいことに気づいた. アメリカの水文学研究所の雪のモデルでは, 融雪定数に季節変化を与えていることをかねてから知っていたが, W3 の実例を見るまではその必要性を感じなかったのである. W3 に対して定められた 3 時間単位の融雪定数 SMELT の値は表 2 の通りである.

表 2 W3 流域における SMELT の値 (3 時間単位)

Table 2 The obtained values of SMELT for the W3 watershed (time unit: 3 hr.)

1~3月	4月	5月	6~8月	9月	10月	11~12月
0.52	0.71	0.90	0.95	0.90	0.71	0.52

この値は月の始めの日の値で, 他の日に対する値は 1 次補間で定める. なお, この 3 時間資料に対する値を 8 倍したものが, 日資料に対する SMELT になる訳ではない.

W3 流域に対し SMELT に季節変化を与えたのに対応して, 他の河川に対してもそれを試みてみた. 季節変化の型は大体 W3 のものに合わせ, Durance, Dischma, Illecillewaet,

Kultsjön に対して、表3のものをを用いることにした。

表3 Durance, Dischma, Illecillewaet, Kultsjön に対して用いられた SMELT の値 (日単位)

Table 3 The obtained values of SMELT for Durance, Dischma, Illecillewaet and Kultsjön basins (time unit : day)

1～3月	4月	5月	6～8月	9月	10月	11～12月
2.5	3.0	4.0	4.2	4.0	3.0	2.5

これらの河川では、2月、3月に融雪が起こることはほとんどないし、融雪の主要部分は5、6月に起こるのだから、SMELT に上記の季節変化を与えることと、SMELT を4に固定することの間に、実質的な相違はあまりない。なお、Dunajec に対しては SMELT=4 を用いた。

1.2.7 積雪タンク

W3 流域を3時間資料で解析しながら、次のことに気づいた。雪どけが始まる時、算出流量に現われる小さなピークが、実測にはほとんど出て来ないことが多いのである。これは3時間流量にはっきり出て来るもので、日流量でははっきりしない。それは融雪水が積雪中の水分として貯えられるからであろうと考えた。従来のモデルでは、融雪水は雨水と一緒にタンク・モデルに投入され、流出高に変換されていたのであるが、融雪とタンク・モデルの中間に、積雪中の水貯留機構を加えれば、さらに現実になると考えた。

積雪の水貯留機構も、一種のタンク・モデルで表わすことにする。雪どけの始まりの頃は、積雪層が雪どけ水や雨水を蓄えてあまり外に出さないから、時定数の長い不完全積分機構にすればよい。しかし融雪の盛んなときは、雪どけ水をそのままタンク・モデルに投入した

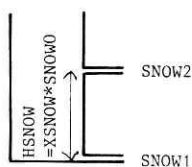


図2 積雪タンク・モデル

Fig. 2 Tank model for snow deposit

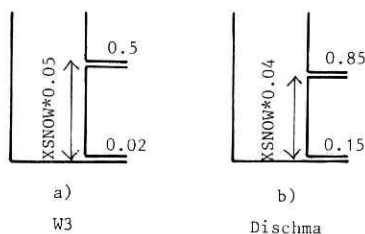


図3 a) W3 流域に対する積雪タンク (3時間単位)
b) Dischma に対する積雪タンク (日単位)

Fig. 3 a) Snow deposit tank model for W3 watershed (time unit : 3 hours)
b) Snow deposit tank model for the Dischma basin (time unit : day)

けでよい結果を与えているのだから、貯留高が大きくなれば時定数の短い不完全積分に変わるようにすればよい。一番簡単なのは図2に示すような2個の流出孔を持つタンクを作ることである。そしてSNOW1を小さく、SNOW1+SNOW2を1に近い値にすればよい。ただし、流出モデルに用いるタンクと異なる点は、上の流出孔の位置HSNOWを積雪量XSNOWに比例させることで、上の流出孔の位置は変動するのである。なお、ここに現われる積雪量水換算XSNOWは、水を除いた上での積雪量である。

この積雪タンクは3時間資料で解析したW3でよい結果を与えたのであるが、他の5流域では積雪タンクなしでもすでにより結果が得られていた。僅かにDischmaでは、これを用いるといくらか結果がよくなる。図3はW3流域、Dischmaに用いられた積雪タンクを示している。

1.2.8 降水量の高度変化

雪のモデルで一番大切なのは地帯分割して、地帯ごとに積雪、融雪を計算することであると述べた。この計算はパラメータT0, TD, SMELTによって行なわれるのであるから、雪のモデルにおいてこの3個のパラメータが大切であるのは当然であるが、融雪出水に大きな直接的影響を与えるのは、入力である降水量に関するパラメータである。多くの場合、雨は山で多く降る。したがって地帯分割すれば、高い地帯ほど降水量を大きくしなければならぬ。簡単のため、降水量の高度変化が線型であるとすれば、各地帯の降水量は

$$1:1*PD:1+2*PD:1+3*PD:\dots\dots$$

の形で与えられる。始めて日本の河で雪の計算をしたとき、PDを大きくしないと融雪期の出水に合わせられないことに驚いた。山の上の方では、平地の2倍、3倍の雪が降るとしなければ、春の雪どけ水に合わせられない。始めて雪のモデルを計算したとき、予め夏期の流出解析を行ない、タンク・モデルを求めて置いたのであるが、雪の降らない夏期では、雨の高度増加は小さくてよいのである。つまりPDには大きな季節変化があり、冬には大きく、夏は小さいとしなければならぬ。信じられないことであったが、解析例を積むに従って、それは確信に変わった。不幸にして、わが国の山地の雨量は、ロボット雨量計により夏期だけ測られているのが普通である。測られている間は、平地の20%~50%増の程度であるが、冬期には2倍~3倍であるとしなければ融雪期の流量が説明できない。

わが国の降雪地帯の冬の降雪は、季節風と山地の組合せによるもので、夏期の降雨が、不連続線、台風、熱上昇気流等によるものであるのとは異っている。実測による証明はないが、山地性降水の高度による増加が大きいののもっともであると理解できた。

1975年9月、チェコスロバキアのブラティスラバで開かれた国際水文学会の「流出モデルに関するワーク・ショップ」で、菅原が降水量の高度増加には季節変化があり、冬の雪は山で多く降るが、夏の雨はそれほどでもないことを述べると、カナダでも同様であるとの発言があつて、これが日本固有の現象でないことを知った。その後、タイ(菅原ら、1976)、ケニ

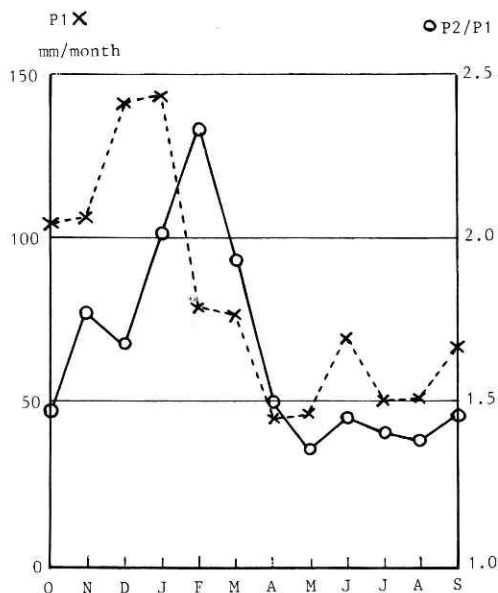


図4 Illecillewaet 流域において、P1, P2/P1 が示す季節的变化 (P1, P2 は No.1, No.2 地点における平均月降水量、図 38 参照)

× P1 ○ P2/P1

Fig. 4 Seasonal change of P1 and P1/P2, where P1 and P2 are mean monthly precipitation at No.1 and No.2, respectively, in the Illecillewaet basin (see Fig. 38)

ア、チェコスロバキアの河の流出解析で、やはり降水量の高度変化に季節変化が認められた。

今回与えられた資料の中に、降水量の高度変化に大きな季節変化があることを明らかにしているものがある。カナダの Illecillewaet 河流域では、雨量、気温が2地点で与えられている。第1地点は流域の南西、流域から少し外れた所にあり高度 456 m, 第2地点は流域の北東流域内で境界に近い所にあり高度 1323 m である(図 38 参照)。図4は第1地点の各月の平均雨量 P1 と、第2地点、第1地点の各月の平均雨量の比 P2/P1 とを示している。この季節変化は、日本での流出解析から期待されたものとよく似ている。

降水量の高度による増加は直線的とは限らないから、 $PD(I)$ で表わすことにする。I は地帯番号である。これに季節変化があるとして、それは $C(M) * PD(I)$ の形で表わされると仮定する。C(M) は季節変化を表わすパラメータで、M は月番号である。そこで J ー日の雨を P(J) とすれば、I ー地帯の降水量は

$$P(J) * (1 + C(M) * PD(I))$$

で表わされる訳であるが、与えられた降水量が流域外地点で測られているときは P(J) に補正をする必要があることもあるし、また雨量計の雪の捕捉率が悪く、その補正の必要もあるから、P(J) に補正係数 CP が必要となる。その補正係数にも季節変化があるから

$$P(J) * CP(M) * (1 + C(M) * PD(I))$$

により地帯平均降水量が与えられることになる。ここに J は日、M は月、I は地帯に対する番号である。

1.3 パラメータの探し求め方

1.3.1 試行錯誤

かつてタンク・モデルのパラメータはすべて試行錯誤によって求められていた。近頃になって、流出、浸透の係数を自動的に求める方式が開発され、(菅原ら, 1977, 1978, 1980)さらに他のパラメータを自動的にまたは半自動的に探し求める方式が開発されつつある(菅原ら, 1982-1)。今回の計算に際しても、自動的にまたは半自動的手法を開発し、それを用いることにつとめたが、振り返ってみて、試行錯誤こそがモデル探究の根幹であることを改めて感ずる。

1.3.2 RQ(I), RD(I)による自動化

6河川のすべてを通じて、流況曲線比較により定義されたRQ(I), RD(I)を用いる、タンク・モデルのパラメータ決定法が用いられた。この手法はいつもうまく動き、いわば試行錯誤法の補助手段となった。タンク・モデルの流出、浸透の係数を探し求める問題は、ほぼ解決したようである。もちろん適切な出発モデルを定めることが大切であるが、試算した結果を眺め、流域のおよその性質を判断して(浸透が大きいのか、小さいか等)、均整のとれた出発モデルを定めることは、あまり難しくないであろう。出発モデルがあまり悪くなければ、1回の試算は4, 5回程度のくり返しで十分である。自動化手法による4, 5回のくり返し計算を1回の試行とし、種々の条件を変えながら試行錯誤をくり返すことにより、タンク・モデル以外のパラメータを逐次探し求めて行くことができる。

1.3.3 評価値

自動的にまたは半自動的手法を試行錯誤の補助手段として用いることになる、どうしても評価値が必要になる。そもそもRQ(I), RD(I)によるフィードバック手法が、ある評価によって最良の結果を定めているのである。その際用いた評価は、1)流量そのものの平均2乗誤差(MSEQ)(流量の平均で割ってある)と、流量の対数の平均2乗誤差(MSELQ)との平均、および2)流況曲線の平均2乗誤差(MSEDC)(流量の平均で割ってある)と、流量の対数の流況曲線の平均2乗誤差(MSELDC)との平均、の両者の和である。

$$CR = (MSEQ + MSELQ)/2 + (MSEDC + MSELDC)/2,$$

$$MSEQ = (\sum_j' (QE(J) - Q(J))^2 / \sum_j 1)^{1/2} / (\sum_j Q(J) / \sum_j 1),$$

$$MSELQ = (\sum_j' (\log QE(J) - \log Q(J))^2 / \sum_j 1)^{1/2},$$

$$MSEDC = (\sum_{NO}' (QE(NO) - Q(NO))^2 / \sum_{NO} 1)^{1/2} / (\sum_{NO} Q(NO) / \sum_{NO} 1),$$

$$MSELDC = (\sum_{NO}' (\log QE(NO) - \log Q(NO))^2 / \sum_{NO} 1)^{1/2}.$$

ここにQは実測流量、QEは算出流量、Jは日番号、NOは流量や、推定流量を大きさの順に

並べたときの番号である。なお、流量、流量の対数値の平均2乗誤差においては、ピークの1日のずれにより生ずる大きな誤差を防ぐために、J-1日の実測流量 $Q(J)$ を、J-1, J, J+1の推定流量 $QE(J')$ と比べ、誤差の一番小さいものをもって、その2乗和をとっている。それを示すために Σ' 、 $QE(J')$ と上式で表わしている。実はこの方式の代りに、J-1日の推定流量 $QE(J)$ を、J-1, J, J+1日の実測流量 $Q(J')$ と比べる方が、いくらかよいらしいが、今回は上記の方法で計算してしまったので、このままにして置く。どちらにしても、本質的にも、実質的にも大した相違はないが、今後は変更する予定でいる。

われわれが用いている $RQ(I)$ 、 $RD(I)$ による修正方式は、四つのタンクのうち具合の悪いのが目立つものから修正して行くようになっている。したがって低水を犠牲にして高水を合わせたり、高水を見捨てて低水に合わせたりするようなことは起こらない。低水を犠牲にして高水を合わせるならば、 $MSEQ$ は小さくなるが $MSELQ$ は大きくなるだろうし、高水を見捨てて低水を合わせるならば、 $MSELQ$ は小さくなるが、 $MSEQ$ は大きくなるであろう。われわれの方式によると、 $MSEQ$ 、 $MSELQ$ 、 $MSEDC$ 、 $MSELDC$ の間に一種の調和があるらしい。そして全般的に見て、 $MSEQ$ 、 $MSELQ$ 、 $MSEDC$ 、 $MSELDC$ の順に小さくなっていることが多いようである。流況曲線比較による $RQ(I)$ 、 $RD(I)$ を用いているから流況曲線についての平均2乗誤差が小さくなること、 $RQ(I)$ 、 $RD(I)$ は相対誤差を小さくするようにできているから、流量の対数の平均2乗誤差が小さくなることは理解できる。

ある河の解析を始め、試行錯誤を数回から10回程度くり返すと(各試行とも、 $RQ(I)$ 、 $RD(I)$ による自動的修正を4, 5回くり返しているから、自動的くり返しを数えれば、くり返し計算は30~50回ということになる)、上記の CR が0.4程度、 $MSEQ$ が0.25程度になることが多い。そのとき、ハイドログラフ(対数目盛で表わしてある)を眺めると、推定は実測によく合っているように見える。かつて試行錯誤で解析していたときであれば、ここで完成と考えたであろう。今回は国際的相互比較ということであり、種々の自動的、半自動的手法を試みてみたい気持ちがあつて、それから多くの試算が重ねられた。努力の割に成果はあがらなかったようである。 CR の値は僅かに小さくなっただけであるし、その CR の改善も、ハイドログラフを眺めた感じからは読みとれないことが多かった。かかる努力にどれだけ意味があるか、正直に言って疑問である。

CR が少しよくなっても、ハイドログラフを眺めた感じではその違いがわからないことがあると同時に、ハイドログラフのある場所で推定流量に欠点があると感じられ、工夫をしてそこを改善したのに CR が悪くなったことがある。どこが悪くて CR が悪くなったかわからないが、悪い所を全体に散らしてしまったのであろう。

いかなる評価値を用いるべきかは、今後の課題である。われわれが用いている評価は、最善ではあるまいが、使ってみていてそう悪いとは思えない。WMOが相互比較に用いる評価値はわれわれのものとは異っている。WMOの評価値には同意できにくい点があつて用いな

いことにした。相互比較は WMO の評価法 (WMO, 1982) を用いて行なわれるのであるが、それは実測流量が隠されている後半の 4 年間について行なわれるのである。したがって、流量が与えられている 6 年間についての WMO の評価のよさは、後半の 4 年間における評価のよさを保証しない。与えられた 6 年間の資料を用いて、できるだけよいモデルを作ることが目標である。われわれの評価は、流量、流況曲線の両方に対して、絶対、および相対誤差を、並行的になるべく小さくすることを目標としているのだから、この評価法を信頼することにしたのである。

1.3.4 流出、浸透係数以外のパラメータ

タンク・モデルの流出、浸透の係数に対しては、 $RQ(I)$ 、 $RD(I)$ による修正方式がほぼ確立したといってよい。その他のパラメータについては、 $RQ(I)$ 、 $RD(I)$ 法を併用する試行錯誤を自動的、半自動的にくり返す方式を開発し、くり返しを組織的、計画的に行なうことにより、なるべく客観性を増すことを心がけるだけである。それはときには非能率的であるかもしれないが、致し方ない。

このとき多数のパラメータを同時に変化させることはできない。できれば 1 個ずつ動かしてきめて行きたい。そのためにはパラメータを直交化すること、つまり相互に関連しないようにパラメータを組み合わせることが大切である。今回は T_0 、 TD の決定で、この直交化の効果があつた。土壤水分構造、流出孔の位置の決定についても、やや改善がみられた。

1.3.5 土壤水分構造

先に考えられた土壤水分構造の探し求め方は次の通りであつた。パラメータ (S_1 , S_2 , K_1 , K_2) に次の変化 T_1 , T_2 , T_3 , T_4 を順次施す。 T_1 では S_1 , K_2 を R_1 倍する。 T_2 では S_1 を R_2 倍し、 K_2 を $(1/R_2)$ 倍する。 T_3 では S_2 , K_1 を R_3 倍し、 T_4 では S_2 を R_4 倍し、 K_1 を $(1/R_4)$ 倍する。 R_1 , R_2 , R_3 , R_4 には 1 ± 0.15 程度の値を用いる。

まずある (S_1 , S_2 , K_1 , K_2) から出発し、 $RQ(I)$ 、 $RD(I)$ による自動化計算を行ない、ある評価 CR を得る。次にパラメータに T_1 を施し、そのパラメータを用いて前と同様の計算を行ない CR を求める。この CR を前のものと比較し、今回の CR の方がよければさらに T_1 を施し、前の方がよければ出発のパラメータに T_1^{-1} を施す。このようにして、パラメータに T_1 , T_1^2 または T_1 , T_1^{-1} のどちらかが施され、出発のパラメータを含めて 3 者が比較され、最小の CR を与えるパラメータが次の出発点となる。それに T_2 が施される。以下同様にして T_4 まで行なう。この一連のくり返し計算が自動的に進行するプログラムが作られた。この一連の計算の結果を眺めて、次の試算を行なうのである。

この方式の欠点は、 CR に伴う雑音の影響を考慮していない所にある。たとえば出発パラメータに対する CR と、 T_1 を施したパラメータに対する CR とを比較し、大小を判定したとき、その大小が雑音に支配されていれば、誤った判断をすることになる。そのことを考えたから、そういうことが起こりにくいようにパラメータの変化率を 15% とかなり大きくしたの

であるが、何分にも CR は鈍感であるから、その大小判定はあまり当てにならない。そこで次の改善策を考えた。

出発パラメータに対し、 $T1^N$ ($N=0, \pm 1, \pm 2$) を施す。そのそれぞれに対して得られた5個の CR に対して、2次曲線を当てはめ、極小値を与える変数値を求める。その変数値を4捨5入して整数 N として、 $(S1, S2, K1, K2)$ に $T1^N$ を施したものを次の出発値とする。何かの偶然により N が遠方に行ってしまうのを防ぐために、 N が -4 より小さいときには $N=-4$ 、 4 より大きいときは $N=+4$ とする。当てはめた2次曲線が上に凸となるときは直線を当てはめ、直線が右上がりならば $N=-4$ 、右下がりならば $N=4$ とする。

$T2, T3, T4$ についても同様のことを順次行なう。

この方式は前のものよりいくらかよい結果を与えた。

1.3.6 流出孔の位置

流出孔の位置を探し求めるには、HB, HC について、または HA1 と HA2-HA1 について、それぞれ2次元のしらみつぶしを行なうより致し方なかった。それに対する改善策として、得られた評価値に対して2次曲面の当てはめを行ない、極小値を与える変数値を求めるプログラムを作った。試算する変数値が 5×5 の場合、 4×4 の場合(ともにパラメータは等間隔で変化させる)のプログラムを作り、試算してみたが、あまりうまく行かなかった。2次曲面が極小値を与えない場合もある。2次曲面がうまく解を与えるときは、人間が評価値を眺めて解を得られるときである。 5×5 または 4×4 の試算をくり返す時間に比べれば、2次曲面を当てはめて解を求める計算に要する時間は無視し得るほどだから、このプログラムをつけ加えて置いても邪魔にならない程度の効果はあると言うべきである。

1.3.7 地帯面積比率

従来は地図を眺め、地帯面積比率を $4:3:2:1$ とか、 $1:1:1:1$ とかに置いた。等高線で等高度幅の地帯に分割するとは言いながら、南側斜面は暖かく、北側斜面は寒い等の他の原因による温度変化があろうから、地帯分割は等高線分割であるべきではないという考えが根底にあった。そこで等高線分割による地帯の面積を測るという手間のかかる仕事をやめ、およその見当で地帯面積比を定めると同時に、それを変化させる余地を残したのである。

今回は等高線による地帯面積をそのまま用いることにした。一つにはすべての流域で、高度と面積の関係を示す曲線が資料として与えられていたからである。この曲線が与えられているということは、地帯分割は当然等高線によって与えられると多くの人々が考えていることを示すものであろう。これは少々誤った固定観念だと思うが、今回の国際的相互比較では、この固定観念に従って置いた方が無難であると考えた。同時に、探し求めるパラメータが減るという大きな利点がある。

いくつかの流域では、流域を部分流域に分け、それぞれを地帯分割した。部分流域の分割はこちらの考え方で行なったから、各部分流域ごとの高度面積曲線を求めなければならない

かった。等高線が囲む面積を求めることはあまり面倒でなかったが、与えられた地図で等高線をたどるのは、場合によりかなり手間と時間のかかる仕事であった。

1.3.8 T0 と TD

T0 と TD を客観的方法で求めることは前に試みられたが(菅原ら, 1982-1), うまく行かなかった。そのときは, T0 を大きくすれば融雪期が全般的に早くなるであろう, TD を大きくすれば, 高い地帯が寒くなり, そこの雪が遅くまで残るから融雪期の終りが遅れ, 融雪期が長くなるであろうと考えた。この性質を利用して, T0, TD を定めることができるであろうと期待した。そこで, 流量をウェイトとする融雪期の時間平均(1次モーメント), その分散(2次モーメント)を考え, 実測と推定の1次, 2次のモーメントを一致させることにより, T0, TD を求めようとしたが, うまく行かなかった。うまく行かなかった一つの原因は, T0 だけでなく, TD も融雪期を早めたり, 遅くしたりする効果があり, その方が主たる効果で, TD は主として2次モーメントに効くであろうという期待が外れたからであるらしい。

TD が1次モーメントに効くことの理由は簡単である。I番目の地帯の平均気温は, $T + T_0 - (I-1) * TD$ で与えられるから, I番目の地帯の面積を $ZA(I)$ ($\sum I * ZA(I) = 1$) とすれば, 流域全体の平均気温は

$$T + T_0 - (\sum (I-1) * ZA(I)) * TD$$

で与えられる。ここで $\sum (I-1) * ZA(I) = TZA$ と置けば,

$$T_0 - TZA * TD$$

が流域全体の平均気温を定める。TDの係数TZAは, 4分割のとき, 1.5程度, 6分割で2.5程度であるから, 流域の雪どけのおよその傾向を定めるであろう平均気温は, T0と同じくTDによって大きく左右されるのである。

そこで思いついたことは, $T_0 - TZA * TD$ を一つのパラメータに選ぶことであり, そうすればもう一つのパラメータは直交する $TZA * T_0 + TD$ にすればよいということである。

以下に示すのは Dischma で行なわれた計算例である。すでに行なわれた計算で, $T_0 = 6.0$, $TD = 1.9$ のあたりがよいことはわかっていた。Dischma では $TZA = 2.36$ であるから, 上の T_0 , TD を出発値として, $T_0 - TZA * TD$ が一定値を保つように, TD を 0.03, T_0 を $0.03 * 2.36 = 0.0708$ の幅で, 正負それぞれ2段階変化させる。次に $TZA * T_0 + TD$ が一定値となるように, T_0 を 0.03, TD を -0.0708 の幅で, 正負それぞれ2段階変化させる。出発値を含め, 9組の (T_0, TD) の値について, $RQ(I)$, $RD(I)$ による自動化計算が行なわれ, それぞれについて最良のモデルと CR が得られる。表4はその結果を示す。

図5のa), b) は, N, N' に応じて CR が変化する様子を示すもので, $N = 0.7$, $N' = 0.7$ のあたりに CR の極小があるように見える。そこで図5のc)のように作図して, $T_0 = 6.07$, $TD = 1.87$ が得られる。

表4 T0, TDを変化させたのに応じて定まるCR (Dischma)

Table 4 Obtained CR's for various values of T0's and TD's

N	T0	TD	CR	N'	T0	TD	CR
-2	5.859	1.84	0.3840	-2	5.94	2.042	0.4170
-1	5.929	1.87	0.3834	-1'	5.97	1.971	0.3960
0	6.000	1.90	0.3821	0	6.00	1.900	0.3821
1	6.071	1.93	0.3823	1'	6.03	1.829	0.3811
2	6.124	1.96	0.3822	2'	6.06	1.758	0.3928

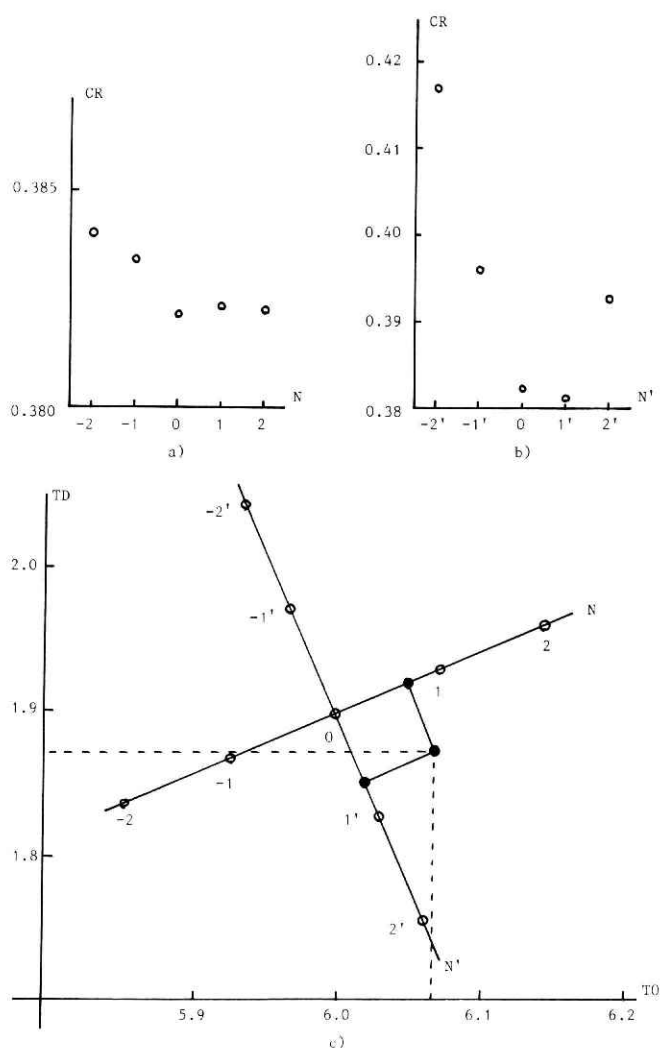


図5 T0, TD の求め方

Fig. 5 How to determine T0 and TD

最小の CR が, N, N' の (−2, 2) 区間外に出てしまったときでも, およその見当で最小の場所はわかるから, そこを出発点として再計算すればよい.

以上の方法で求められた TD は地帯ごとの気温低下であるから, これを地帯高度幅 ΔH で割ると, 気温の高度低下に当たるものが出る. これを 100 m 当たりの気温低下として示したものが表 5 である. Durance, Dunajec, Illecillewaet は部分流域に分割して計算したので, 部分流域ごとの値が出ている. 大体 0.6 に近い値が出ているが, 全般的にみて 0.6 よりやや大きい値を示している. 流域内の気温較差は, 主として高度較差によるものであるが, 南斜面と北斜面の違いなどもあって, 高度較差から期待されるものより大きい気温較差があるのは当然と思われる. したがって表 5 の値が全般的に 0.6 より大きい値を示すのは, もっともである. W3 流域で非常に大きく出たのは, 一つにはこの流域が北西が高く, 南東が低くなっている, 高い地帯ほど北に偏っていること, しかも流域の高度差が小さいから, 見掛け上の高度差の影響が大きく出たのであろう. Dunajec の第 2, 第 3 部分流域はともに北斜面で, とくに第 2 部分流域はゆるい北斜面であるから, 気温の高度低下が小さく出るのは理解できる. Durance の第 4 部分流域に対しては, うまい解釈がない. 後述するように, この部分流域は Durance 流域の中で, 一番難しい部分である.

表 5 気温の高度低下 (100 m 当たり) ($TD/\Delta H \times 100$)

Table 5 Temperature decrease by elevation per 100 m ($TD/\Delta H \times 100$)

流 域	流 域	流 域
0.63	0.61	0.63
0.65	0.47	Illecille- waet 0.69
0.65	0.59	
0.46		
W3 1.12	Dischma 0.76	Kultsjön 0.61

1.3.9 C(M), CP(M)とPD(I)

これは入力である降水量を修飾するパラメータで, 流量に直接影響を与えるから, きわめて重要であるのに, 残念ながら客観的な探し求め方がない.

Illecillewaet のように, 高度の異なる 2 地点の資料が与えられているときは, 高度による降水量増加, およびその季節変化について情報が与えられるけれども, ある場合は雨量観測点は 1 点のみであり, また複数であっても高度の低い所にだけ分布していることが多い.

年間降水量と, 年流出高に年蒸発量を加えたものとの相関を調べれば, ある地点の降水量をどのくらい割増しすれば流量に合わせられるか, およその見当がつくが, それを高度別どのように配分するか (PD(I)の決定), どんな季節変化を与えればよい (CP(M)),

$C(M)$ の決定)は、わからない。

先にナイル河上流域河川の流出解析を行なったとき、 $CP(M)$ を客観的に求めるプログラムを開発した。ここは熱帯で雪はなかったから、パラメータ $C(M)$ 、 $PD(I)$ は不要であり、月別に推定流出高を実測と比較することにより、月ごとに $CP(M)$ を修正することができた。雪がある場合は、冬の間の降水は積雪として蓄積され、4月、5月になって出て来るのだから、冬の間の $CP(M)$ や $C(M)$ がどのような変化をするか見当がつかない。Illecillewaetの例に見るように、冬期にも大きな変化をしているのである。

この6河川の解析に着手する前は、 $CP(M)$ 、 $C(M)$ 、 $PD(I)$ を探し求める客観的手法が開発できはしないかと期待していたが、残念ながら成功しなかった。

1.3.10 その他のパラメータ

雪のモデルにおいて、融雪の定数 $SMELT$ という大切なパラメータがあるが、これについてはあまり試算が行なわれていない。大部分の計算は $SMELT=4$ に固定して行なわれ、終りに近くなって $W3$ 流域で季節変化が与えられ、それに伴って他流域でも季節変化を伴う $SMELT$ が試算されただけである。

$SMELT$ を日本で6、ヨーロッパや北アメリカで4と固定して、それでかなりよい結果が出るというのは、このパラメータが多く気象的要因の合成的効果を表わしているということで、つまり気温は一種の指標であるということであろう。

したがって $SMELT$ は $T0$ 、 TD とも関連を持つであろう。Dischma では $T0$ 、 TD を固定して $SMELT$ を動かし、 $SMELT=4$ が一番よいことを確かめてはいるけれども、 $SMELT$ 、 $T0$ 、 TD を動かして、一番よいものを探すとすると、大変な手間である。

先にも述べたように、評価値 CR は0.4程度になると、それ以上に評価をよくすることは難しくなる。0.4の評価を5%小さくして0.38にするのには、大変な手間がかかるのである。われわれは $SMELT$ を4に固定して、他のパラメータを探し求めていたので、後になって $SMELT$ を動かしてみても、評価値はあまりよくならないのである。 $SMELT$ に関して、問題は残っていると思われるが、今回はこれ以上の検討は難しい。

その他のパラメータとして、雨量地点のウェイトがある。Illecillewaet では2地点、Dunajec、Kultsjön では3地点で降水量が与えられている。各地点にどんなウェイトを与えればよいかという問題で、結局はいくつかのウェイトを試算して比較したが、あまりよい方法はない。

その他に積雪タンクのパラメータがある。これも何回かの試算により定めた。

1.3.11 時間遅れ

パラメータを探し求める試算は、時間遅れを0または1(日)に固定して行なわれた。流況曲線比較による自動化計算では、時間遅れの影響がないし、われわれの評価値 CR では、ピークの遅れの不規則変化によって生ずる誤差を逃げるために、前後1日の遊びが作ってあるか

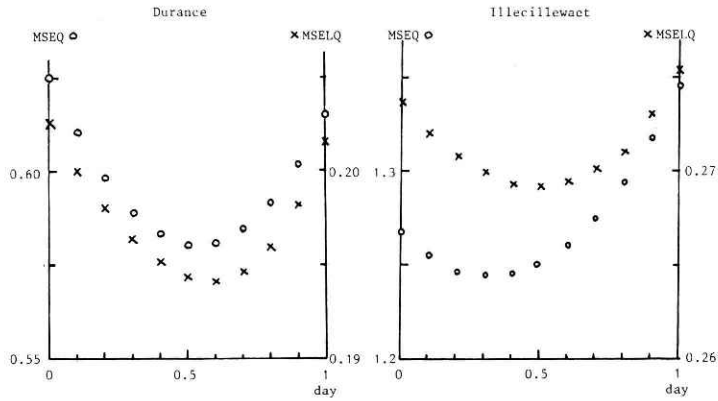


図6 時間遅れの求め方

Fig. 6 How to determine time lag

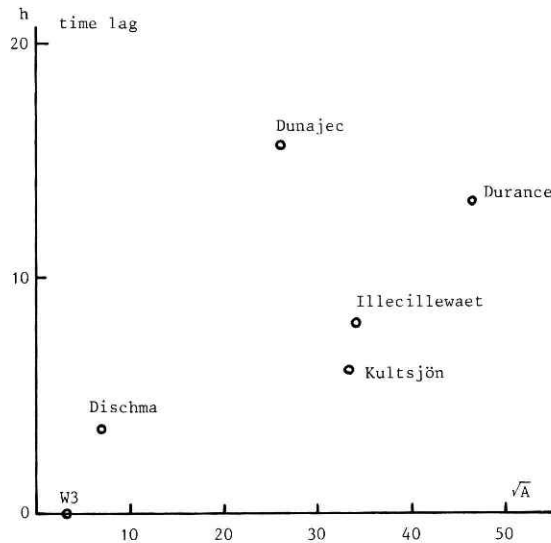


図7 流域面積の平方根と時間遅れの相関関係

Fig. 7 Correlation between time lag and square root of basin area

ら、試算の間は時間遅れの心配をする必要がないのである。しかし WMO による相互比較では、ふつうの平均 2 乗誤差を用いるから、適当な時間遅れを与えて平均 2 乗誤差をなるべく小さくした方がよい。そこで、試算を打ち切り、これを最終結果とすると決心した所で、次の方式により時間遅れを決定した。

最終方式による推定流量を $Y(J)$ とし、これに時間遅れ $TLAG$ を与え、推定流量

$$QE(J) = TLAG * Y(J-1) + (1-TLAG) * Y(J)$$

を作る。TLAG は 0 から 1.0 まで、0.1 刻みに変化させ、それぞれの $QE(J)$ と実測 $Q(J)$ との間の平均 2 乗誤差を求める。これは流量そのものと、流量の対数値について計算する。図 6 は得られた結果の一部を図示したもので、これから時間遅れを定める。表 6 は 6 流域に対して定められた時間遅れを示す。

図 7 はこの時間遅れと、流域面積の平方根との間の相関を示す。いろいろな点で難点があり、あまりよい結果が得られなかった Dunajec を除けば、相関はかなり良好で、時間遅れが流域面積の平方根、つまり河川の長さにおよそ比例することを示している。したがって、時間遅れはハイドログラフの伝播速度によるものと考えて大過なからう。図 7 にみるように、Dunajec を無視すれば、1 時間に約 4 km、秒速約 1 m に当たる時間遅れで、あまり無理のない値であろう。なお、タンク・モデル自体に遅れを与える働きがあり、表 6 の時間遅れは、タンク・モデルの出力にさらに与えるものである。

表 6 求められた時間遅れ (時間)

Table 6 Obtained time lag (time unit: hr.)

Durance	W3	Dunajec	Dischma	Illecillewaet	Kultsjön
13.2	0	15.6	3.6	8.0	6.0

2. 6 流域のそれぞれについての流出解析

2.1 Durance

2.1.1 流域の概況

この流域は、Rhône 河にアビニョンの近くで東側から合流する Durance 河 (流域面積 14,225 km²) の上流部で、三方をアルプス南部の山々で囲まれ、最高地点は西の流域境にある 4,105 m の峰である。三方を 3,000 m 級のアルプスの山々で囲まれた上流部に発し、それが間もなく 13 m の高度で Rhône 河に合流するのだから、荒れ河として有名で、Durance はラテン語の *durentia* (悪い) から来ている。ガリアで一番困る河として知られていた。

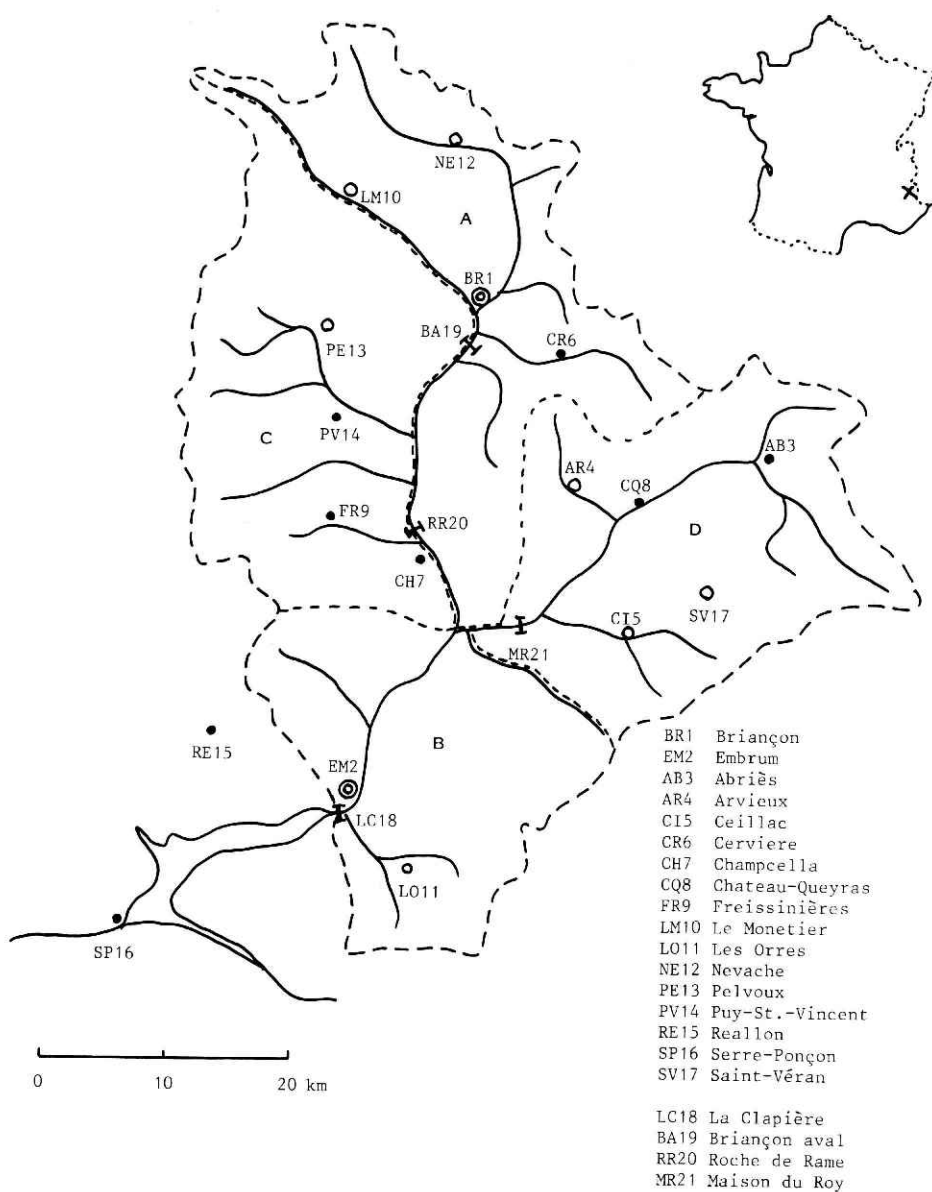


図8 Durance 流域地図

◎気象観測点 ○降水量・気温観測点 ●降水量観測点

Fig. 8 Map of Durance basin

◎meteorological station ○precipitation and air temperature station ●precipitation station

2.1.2 与えられた資料

1) 流量

La Clepière (2,170 km²) における流量が与えられている。これは Serre Ponçon 貯水池への流入口で、何かの理由で欠測したときは、貯水池への流入量から、貯水池へのもう一つの流入河川 Ubaye の流量を差し引いたもので補われている。貯水池への流入量で絶えずチェックされているからであろうか、この流量の精度はきわめてよいように感じられる。

この他に Briançon aval (548 km²)、Roche de Rame (984 km²)、Maison du Roy (580 km²) の流量が与えられている。このうち Maison du Roy の流量はやや精度に欠けると思われる。前の二つはかなりよいが、La Clepière の精度には及ばないようである。

2) 降水量

降水量は図8に示された17地点で与えられている。流域内に15地点が与えられ、しかもそれがほぼ均等に分布しているのは、降水量資料としてきわめて恵まれているが、それでも図8に見るように、ほとんどすべての地点は河沿いである。図9はDurance流域の高度面積曲線およびその上に降水量地点を落としてみたものを示すが、この図に明らかなように、地点は低地に偏在している。

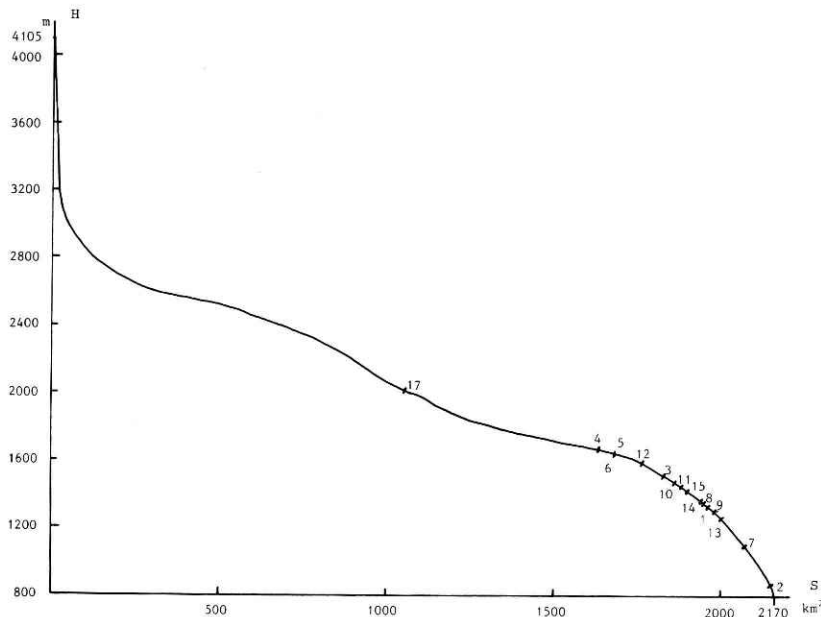


図9 Durance流域の高度面積曲線

Fig. 9 Area-elevation curve of the Durance basin

降水量が高度により、どのように変化するかを見る目的で、17地点の高度と、10年間の平均年雨量との相関を調べたものが図10である。これを見ると、高度と降水量とは無関係に近い。降水量が大きいのは、PE13, FR9, SV14, RE15等の西側の地点である。

図11は西側の2地点PE13とFR9の月別平均雨量の平均と、中央の2地点BR1とEM2の月別平均雨量の平均の比に、大きな季節変化があることを示している。これにより、図10に示された西側地点の年降水量の大きいことは、主として冬の降雪が大きいことによるものであることがわかる。2地点、または2地域の平均月雨量を比較したとき、そこに大きな季節変化が現われることは、ある地点の雨からある地域の雨を推定するとき、補正乗数CP(M)に季節変化が必要であることを示している。

3) 気温

気温は図8に示される9地点で与えられている。降水量は地点による変動が大きく、それ

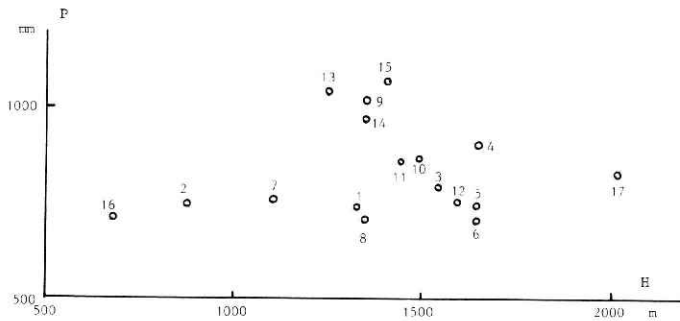


図 10 高度と年平均降水量の相関図 (Durance)

Fig. 10 Correlation between annual precipitation and elevation in the Durance basin

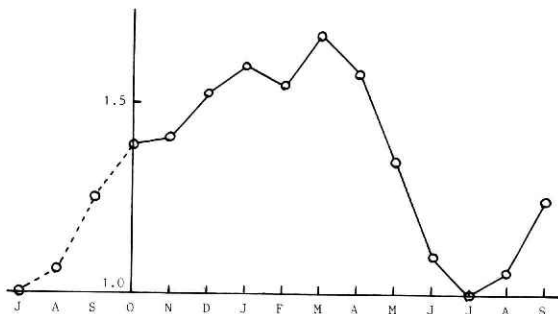


図 11 流域西側の平均月降水量と、流域中央部の平均月降水量との比が示す大きな季節変化 (Durance)

Fig. 11 Large seasonal change of the ratio PW/PM , where PW and PM are mean monthly precipitation in the western and the central part of the Durance basin, respectively

が直接流量に効くから、流域の大小にかかわらず、数地点の降水量がほしいというのが、われわれの従来の考えであった。気温は降水量ほどには地点による変動があるまい、気温は1地点でも十分であろうといままでは考えていたが、この流域の資料は気温の地点による変動が、場合によりきわめて大きいことを示している。

図12は1972年5月1日から15日までの、4地点の日最高気温を示している。最低気温に

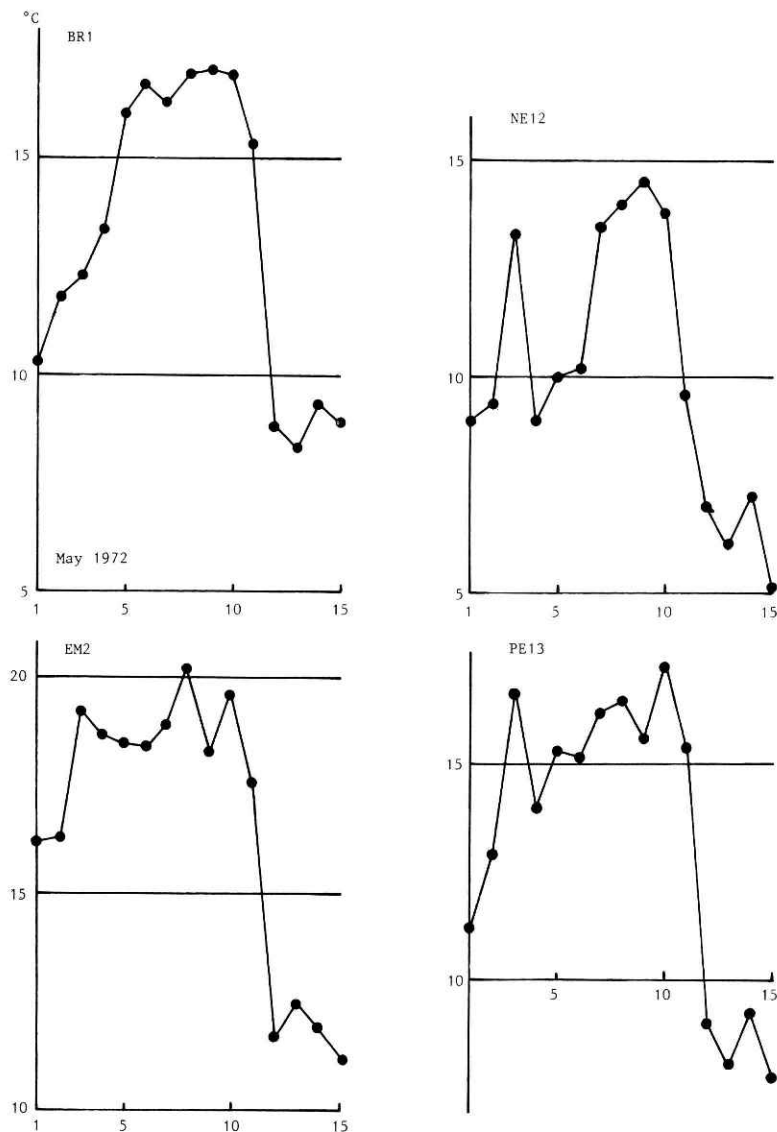


図 12 日最高気温の地点による大きな変動 (Durance)

Fig. 12 Large fluctuation of daily maximum air temperature at some points in the Durance basin

ついても、また 9 地点全部を通じて、図 12 に示されたと同様の地点ごとの大きな変動が示されるのである。5 月のはじめは雪どけが始まる時期で、どの地点の気温を用いるかで、雪どけ出水の形が異って出て来る。気温の高い所で雪どけが始まり、気温の低い所では雪どけが起こらないから、平均気温では雪どけに合わないことになる。

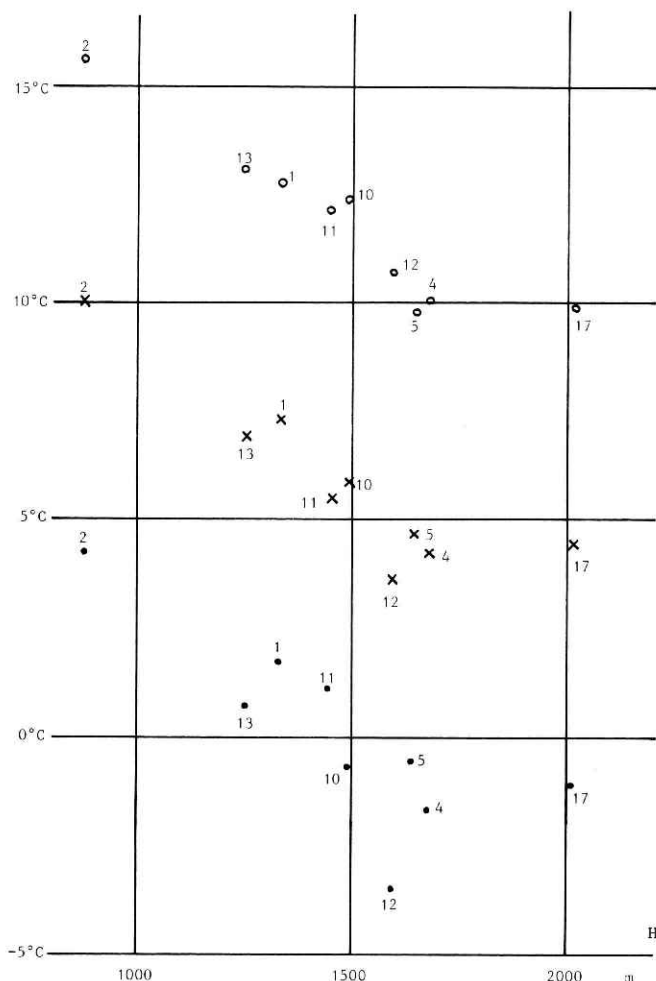


図 13 年平均気温と高度との相関 (Durance)

- 日最高気温の 10 年平均
- 日最低気温の 10 年平均
- × 日最高、最低気温の平均の 10 年平均

Fig. 13 Correlation between mean annual temperature and elevation in the Durance basin

- ten years' mean of daily maximum temperature
- ten years' mean of daily minimum temperature
- × ten years' mean of the mean of daily maximum and minimum temperature

図 13 は 9 地点について、高度と年平均気温 (10 年平均) との関係を示している。高い所ほど寒い傾向があるのは明らかであるが、地点により特徴があることも確かで、たとえば NE12 は寒く、SV17 は暖い。温度補正の定数 $T0$ が必要であることがわかる。

4) 蒸発

BR1 と EM2 で、5 月から 10 月まで 6 か月間の、Piche 蒸発計で測られた日蒸発量が与えられている。10 年間の月蒸発量について、2 地点間の相関図を作ると、相関はよくない。月平均気温と月蒸発量の相関を作ると、EM2 のものと比べて、BR1 の方が悪い。結局、蒸発量としては EM2 を使い、BR1 は捨てることにした。

5) その他の資料

BR1, EM2 の気象観測点では、気温、風速、日照量等の資料が与えられ、また何地点かにおいて、積雪深、積雪水当量が与えられ、また雪線の高さ等が与えられているが、われわれのモデルには関係ないので、利用しなかった。

2.1.3 得られたモデル

1) 部分流域への分割

流域を図 8 に示してあるように、4 つの部分流域に分割する。この流域が気候的に異なる上流部、下流部、西部、東南部に分かれることは、資料と一緒に来た説明書にも出ているが、境界線をどこに引くかには問題がある。便宜上、図 8 に示すような境界を用いたが、A 地区、C 地区の境界を河にしないで、分水界を用いるべきであったかもしれない。LM10 の降水量が、上流地区と西側地区の中間のように思われたこと、CH7 の雨が他の西側地区の雨とやや異っていることから、図 8 の境界線を引いた。ただし、境界線を少し変えた所で、最終結果はあまり異らないであろう。

2) 降水量と気温

表 7 Durance 各部分流域に対応する降水量観測点、気温観測点およびそのウェイト

Table 7 Precipitation stations and air temperature stations corresponding to each of the Durance subbasins and their weights

部分流域		降 水 量					気 温		
A	観 測 点	BR1	CR6	CH7	LM10	NE12	BR1	LM10	NE12
	ウエイト	1	1	1/2	1/2	1	1	1/2	1
B	観 測 点	EM2	CH7	LO11	RE15		EM2		LO11
	ウエイト	1	1/2	1	1/2		1		1
C	観 測 点	FR9	LM10	PE13	PV14		LM10		PE13
	ウエイト	1	1/2	1	1		1/2		1
D	観 測 点	AB3	AR4	CI5	CQ8	SV17	AR4	CI5	SV17
	ウエイト	1	1	1	1	1	1	1	1

各部分流域の降水量と気温とは、それに含まれる降水量観測点、気温観測点での測定値の平均を用いる。ただし、境界に近い地点はウェイトを1/2として、両方の部分流域で用いる。すなわち表7に示すウェイトによる平均を、各部分流域における入力降水量、入力気温として用いる。なお、気温は日最高、最低の平均を用いる。

3) 蒸発

蒸発はEM2の値を用いる。その値の0.5倍をタンク・モデルから差し引く。ふつうに用いられる0.7~0.8より小さい0.5を用いたのは、EM2が871mと低い所にあり、流域平均高度が2,000m程度であることを考えたからである。

4) 地帯分割

部分流域ごとに、等高線の囲む面積を測り、図14に示す高度面積曲線を作り、これにより各部分流域を等高度間隔で6分割した地帯面積を求めた。表8はその結果を示す。なお部分流域A、B、C、Dの面積比率は

$$27 : 18 : 26 : 29$$

である。

表8 部分流域ごとの地帯面積比率および部分流域面積比 (Durance)

Table 8 Areal ratio of six zones in each of the Durance subbasins and ratio of area of Durance subbasins

	地帯分割の仕方	地帯面積比率 (低い方から)
A	1,000m~2,800mを300mずつに6分割	8 : 10 : 15 : 24 : 24 : 19
B	800m~2,810mを335mずつに6分割	14 : 15 : 16 : 19 : 20 : 16
C	1,000m~3,400mを400mずつに6分割	12 : 18 : 22 : 24 : 16 : 8
D	1,100m~3,020mを320mずつに6分割	5 : 12 : 20 : 27 : 24 : 12

$$S(A) : S(B) : S(C) : S(D) = 27 : 18 : 26 : 19$$

5) 降水量の高度変化

I番目の地帯の、M月における降水量は、入力降水量に $CP(M) * (1 + C(M) * PD(I))$ を掛けて得られるとするのであるが、これらのパラメータを求めたものが表9に示される。

このPD(I)は、降水量が高度により直線的に変化し、増加率が100mにつき0.0375であるとして定めたものである。各部分流域のPD(I)は、雨量観測点の高度の平均値、各地帯の中間高度から定まる。

6) T0とTD

入力気温をTとすると、I番目の地帯の気温は、 $T + T0 - (I - 1) * TD$ で与えられる。各

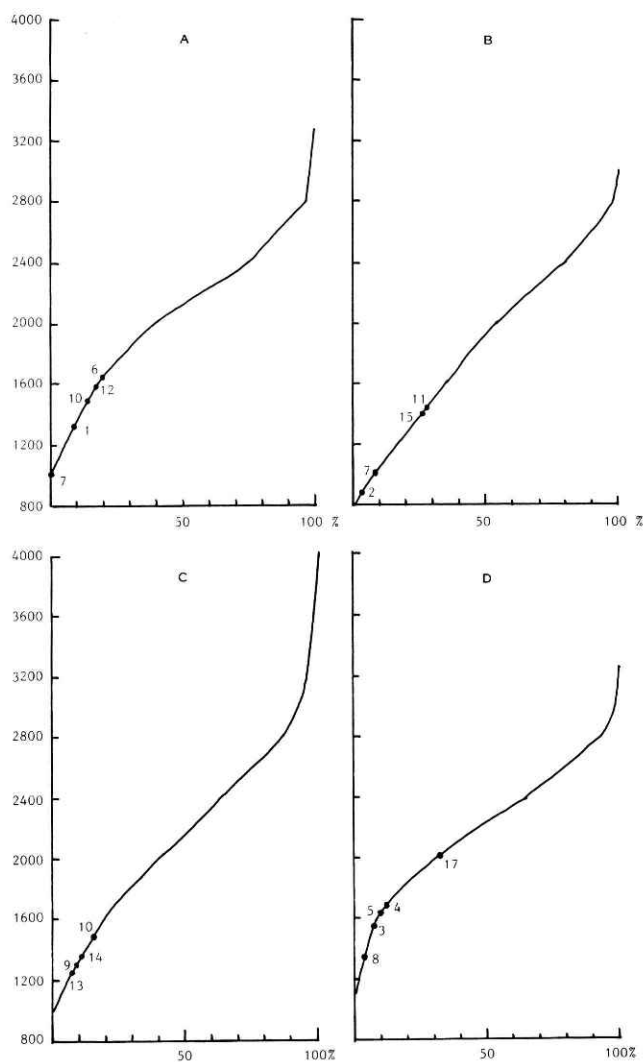


図 14 Durance 各部分流域の高度面積曲線

Fig. 14 Area-elevation curves of the Durance subbasins

表 9 Durance 各部分流域に定められた降水量高度変化のパラメータ

Table 9 Obtained parameters about the precipitation increase by elevation for each of the Durance subbasins

部分流域	CP(M)	C(M)	PD(I)					
A	1	1	-0.12	-0.01	0.11	0.22	0.33	0.44
B	1	1	-0.08	0.04	0.17	0.29	0.42	0.55
C	1	1	-0.05	0.10	0.25	0.40	0.55	0.70
D	1	1	-0.14	-0.02	0.10	0.22	0.34	0.46

部分流域に対して定められた T_0 , T_D が表 10 に示される。

表10 Durance 各部分流域に対して定められた T_0 と T_D ($^{\circ}\text{C}$)

Table 10 Obtained values for T_0 and T_D in each of the Durance subbasins

	A	B	C	D
T_0	0.7485	0.14	-0.2	-0.334
T_D	1.9	2.18	2.60	1.48

7) 融雪の定数

融雪の定数 SMELT は季節変化のある表 3 の値を用いる。ただし、実質的には $\text{SMELT} = 4$ としても、結果はほぼ同じである。

8) 土壌水分構造

$S_1=50$, $S_2=250$, $K_1=2$, $K_2=20$ を用いた。ただし、この流域では土壌水分構造はあまり効果を与えない。

9) タンク・モデル

図 15 は得られたタンク・モデルを示す。計算は部分流域ごとに行なわれ、タンク・モデルの出力は、部分流域の面積比 27:18:26:29 のウェイトで合成され、これに時間遅れ 0.55(日)が与えられ、推定流出高となる。なお、積雪タンクは用いられない。

10) 初期貯留値

計算開始の際のタンクの初期値は、10 年間の資料をループにして無限回くり返し計算したときの安定値とする。その値は 3 回のくり返し計算から算出される。この方法によると、10 年目の資料の終りの方に雨があるため、1 段目タンクにかなりの貯水がある所から出発し、1 年目の始めの実測流量と合わない。そこで、とくに $XA=50$ と置く。1 次土壌水分は飽和し、1 段目の自由水は無いという状態である。

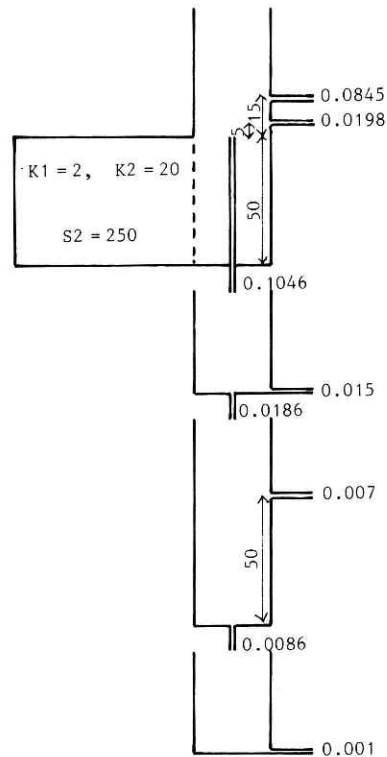


図 15 Durance に対して定められたタンク・モデル

Fig. 15 The obtained tank model for the Durance basin

11) 得られた結果

以上のモデルで算出された日流量，月平均流量をそれぞれ実測と比較して示したものが図16，図17である．図16は6年のうちの2年をさいころで選んである．以後，他の流域でもこの方式を用いる．

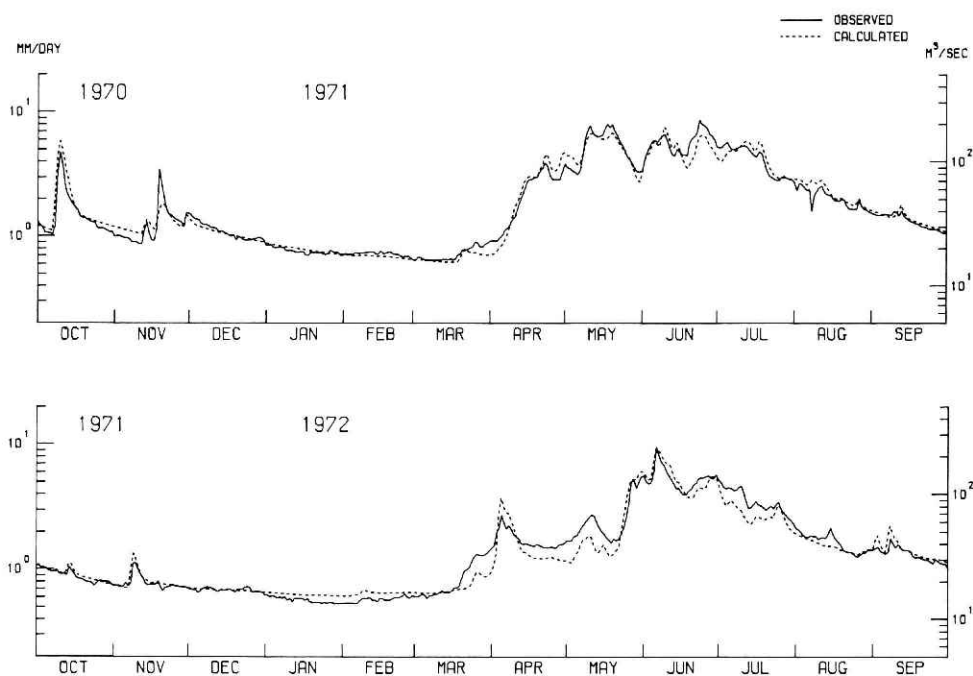


図 16 Durance 日流量

Fig. 16 Daily discharge of the Durance basin

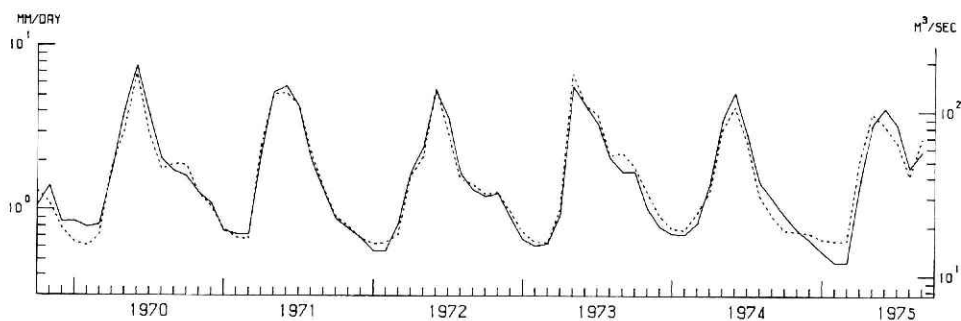


図 17 Durance 月平均流量

Fig. 17 Monthly mean discharge of the Durance basin

得られた結果に対する評価は、 $MSEQ=0.229$, $MSELQ=0.162$, $MSEDC=0.174$, $MSELDC=0.114$, $CR=0.339$ であって、きわめてよい結果である。これは La Clapière の実測流量がよいこと、流域内に多数の降水量、気温の観測点があることによるものと思われる。欲を言えば、気象条件が不安定な D 部分流域に問題があるように感じられる。

2.1.4 最終モデルが得られるまでの経過

1) 部分流域に分割することなく、高度幅 600 m の 4 地帯分割により、試算 No. 1~No. 7 が行なわれた。降水量は流域内 14 地点（当時 CI5 に疑問があつて捨てた）の平均、気温は BR1, EM2 の平均を用いた。降水量の地帯増加 PD は 0.2 に落ち着き、季節変化はないことに落ち着いた。600 m の地帯幅に対し、0.2 ずつの降水量増加は、100 m 当たり 0.0333 の増加に当たる。(T0, TD) は、(0, 3.6) から出発し、(-1.2, 4.0) となった。TD=4.0 は 100 m につき 0.67°C の低下で、PD, TD ともに、最終結果に近い値である。評価 CR は、No. 1 で 0.744 であったのが、No. 6 では 0.511 までになった。

2) 気温の地点による変動が大きく、それが雪どけに効くことを知り、流域を 2 等分し、降水量は前と同じ平均を、気温は BR1, EM2 を別々に用いることにした。No. 8~No. 10 の試算がこの方式で行なわれ、No. 10 で $CR=0.451$ となった。CR を 0.4 程度にするのが一応の目標で、なお多くの不満は残るものの、 $CR=0.45$ になると、ハイドログラフを眺めた感じでは、かなり結果がよくなった。そこで一時解析を打ち切り、他の河川に移った。

3) 2 か月半の中断の後、4 部分流域に分割、それぞれ 6 地帯分割で計算を行なうことにした。予備的試算 No. 11~No. 14 の後、等高線の囲む面積の実測値に基づく地帯面積比率を用いて、試算 No. 15 が行なわれた。T0, TD は 100 m 当たりの温度低下を 0.6°C として、気温観測点の高度の平均と、地帯の中央高度とから算出した。PD(I) は雨量観測点の高度の平均と、地帯の中央高度から、直線関係として定めた。試算 No. 15 で用いたのは、100 m 当たりの降水量増加率が 0.0125 であった。No. 15 では $CR=0.650$ で、よい結果でなかったが、その原因は入力降水量の不足によるものであった。そこで No. 16 は PD(I) を 2 倍にしてみたが、それでも不足で、No. 17 では PD(I) を No. 15 の 3 倍にした。すなわち 100 m 当たりの降水量増加を 0.0375 にした。No. 17 は $CR=0.366$ という、きわめてよい結果を与えた。ここでまた他の河川の解析に移り、3 月半の中断となった。

4) 以後は細部調整である。HB, HC を動かす半自動的計算が No. 18, No. 18', No. 18'' と行なわれ、HB=0, HC=50 と定められた。これにより CR は 0.366 から 0.353 に減った。僅か 3.6% 小さくなっただけで、ハイドログラフを眺めたのでは、どこがよくなったのかわからない。

5) 次に T0, TD を動かす半自動的計算が行なわれた。四つの部分流域の T0, TD がそれぞれ動かされ、結局表 10 の値が得られた。これにより CR は 0.353 から 0.344 となった。僅かに 2.5% 小さくなっただけで、No. 17 の 0.366 と比べても 6% の改善にすぎない。これで事

実上の完成で、また 3 月の中断となった。

6) W3 流域で SMELT に季節変化を与えたのに応じて、表 3 の SMELT を用い、 $CR = 0.331$ となった。 CR にのるノイズのことを考えると、 CR が 0.344 から 0.331 になったという違いで、表 3 の SMELT と、4 に固定された SMELT との優劣を判断することは疑問があるが、一応 W3 流域に合わせて、表 3 の SMELT を用いることにする。

7) いままでの計算では、タンク・モデルの初期値（計算開始のときの、各タンクの初期貯留量）を、出発時の流量に合うように与えていた。これを改めて、10 年間の資料をループにして、くり返し計算した場合の安定値（3 回のくり返しで、この安定値を推定する）に置き換えることにした。これで評価値はいくらか悪くなるが、推定流量に無理が無くなり、いわば安全性が増すであろう。 $CR = 0.339$ である。

8) いまになって思うと、 $PD(I)$ についての検討が不十分であった。 $PD(I)$ を部分流域ごとに動かし、直線的でなく、放物線的に変化させれば、もう少し結果はよくなったであろう。しかし CR が 0.34 程度になると、 CR に伴うノイズの影響もあり、実際に意味のある改善は難しかったであろう。

9) $PD(I)$ を変えるとすれば、部分流域ごとに変えなければならぬまい。そのためには部分流域ごとに流出解析を試みなければならぬまい。事実そのことも考えて、上流の Briançon aval (548 km²)、中流の Roche de Rame (984 km²)、左支流の Maison du Roy (580 km²) の流出解析を始めてみたが、あまり役に立ちそうもないので中止した。Briançon aval, Roche de Rame とともに流出高にしてみると、La Clapière と似ている上に、精度はやや劣ると思われるし、一番問題があると感じられる部分流域 D に対応する Maison du Roy の流量資料は、観測年数が短く、また信頼性に乏しいらしく、役に立つと思えなかった。

2.2 W3 流域

2.2.1 流域の概況

W3 流域はアメリカ合衆国バーモント州の東北部、カナダに近い所にある 8.42 km² の流域である（図 18）。バーモント州とニュー・ハンプシャー州の境を流れるコネティカット河の支流 Passumpsic 河に流れ込む Sleepers 川の一支流 Pope Brook の上流部である。流域は高度 346 m から 695 m の範囲にあり、平均高度は 490 m である。図 19 は高度面積曲線と、降水量観測点の高度分布を示している。

年平均気温約 4°C、1 月の平均気温約 -8°C、7 月の平均気温約 20°C、年雨量の平均が約 1,200 mm、年可能蒸発散量の平均が約 530 mm ということで、わが国の旭川くらいの気候である。

積雪は年によって変るが、積雪深はおおよそ 1 m 程度、積雪水当量の最大は 200～300 mm の程度である。

2.2.2 与えられた資料

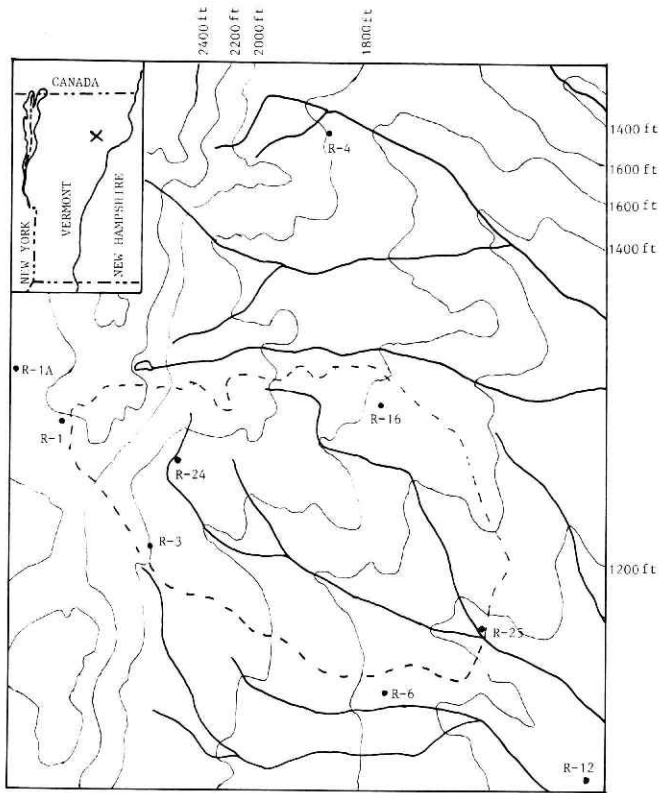


図 18 W3 流域地図

Fig. 18 Map of the W3 watershed

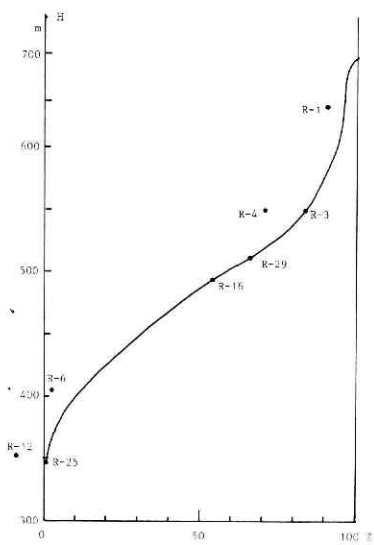


図 19 W3 流域の高度面積曲線

Fig. 19 Area-elevation curve of the W3 watershed

1) 流量

流量は堰で測られている。1時間ごとの瞬間流量と、日平均流量とが与えられている。事故があり、推定によって埋められた流量は、年月日と、結水とか時計の停止とかの事故原因が、一覧表として出してあるから、良心的なよい流量資料と考えられる。

2) 降水量

流域平均面積降水量として、時間降水量、日降水量が与えられている。流域面積降水量は表11のウェイトによるものである。

降水量が原資料でなく、加工資料として与えられているのは残念であった。

なお、降水量の他に、それが雨であるか雪であるかが、時間資料として与えられている。

表11 W3の流域平均降水量を出すに用いたウェイト

Table 11 Thiesen weight for the mean areal precipitation of W3 watershed

R-1+R-1A	R-3	R-6	R-16	R-25	R-29
0.10	0.11	0.23	0.29	0.08	0.19

3) 気温

気温はR-3(高度552m)1地点だけで与えられている。それは時間資料、および日最高、日最低で与えられている。気温が1地点だけしか与えられていないことも残念である。気温も意外と地点変動を示すものらしく、たとえ小流域であっても、何地点かの気温が与えられることが望ましいと考えられる。

4) 可能蒸発散量

日可能蒸発散量が、計算値として与えられている。これは気温、露点、風速、日照量から算出されたものである。

5) 積雪深および積雪水当量

R-1, R-3, R-16, R-25における積雪深および積雪水当量が、かなり頻繁に(3月、4月は毎日に近い)測られている。これはモデルのチェックに用いられた。

6) その他の資料

R-3における露点、風速、日照量が時間資料として与えられている。われわれのモデルとは関係がないので、利用されなかった。

2.2.3 得られたモデル

1) 地帯分割

高度346mから695mまでを、高度幅87mずつに4分割する。地帯面積比率ZA(I)は、低い方から

表12 日蒸発散から3時間蒸発散を導く係数 (W3)

Table 11 Coefficients that derive three-hourly evapotranspiration from daily potential evapotranspiration in the W3 watershed

0 ^h ~3 ^h	3 ^h ~6 ^h	6 ^h ~9 ^h	9 ^h ~12 ^h	12 ^h ~15 ^h	15 ^h ~18 ^h	18 ^h ~21 ^h	21 ^h ~24 ^h
0	0	0.1	0.2	0.4	0.2	0	0

表13 W3流域に対して定められた雪のモデルのパラメータ

Table 13 Obtained snow model parameters for the W3 watershed

地帯面積比率ZA (I)		20：45：25：10									
地帯降水量 変化	CP (M)	1~3月	4月	5月	6月	7月	8,9月	10月	11月	12月	
		1.1	1.2	1.3	1.05	0.85	0.75	0.8	0.85	0.95	
	C (M)	1									
	PD (I)	-0.06		0		0.06		0.12			
地帯温度補正および低下		T0=-0.8, TD=0.98									
融雪の定数 SMELT		1~3月	4月	5月	6~8月	9月	10月	11,12月			
		0.52	0.71	0.90	0.95	0.90	0.71	0.52			
積 雪 タ ン ク		SNOW0=0.05, SNOW1=0.02, SNOW2=0.5									

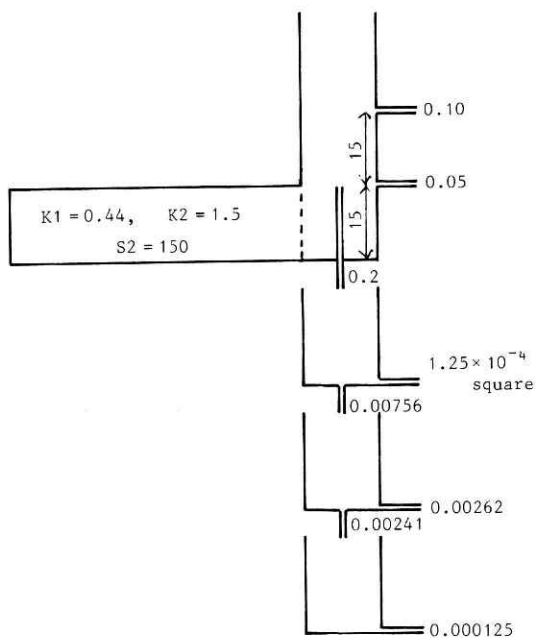


図 20 W3流域に対して定められたタンク・モデル (3時間単位)

Fig. 20 The obtained tank model for the W3 watershed (time unit: 3 hr)

20 : 45 : 25 : 10

である。

2) 入力資料

与えられた降水量，気温の時間資料から，3時間降水量，3時間平均気温を作り，それを入力資料とする。降水が雨か雪かは，与えられた資料，降水の型によって定める。したがって3時間降水量 P は，雨 PR と雪 PS とに分離する。

蒸発は可能蒸発散が日資料として与えられているから，それに表12の係数を掛けたものを，各3時間の蒸発散とする。この係数の和は0.9であるから，実蒸発散を可能蒸発散の90%としたことになる。

3) 雪のモデルのパラメータ

積雪，融雪の計算に必要なパラメータを求めた結果が表13に示されている。

上表の $SMELT$ は，先に表2に出したもの，積雪タンクは図3 a) に示したものである。

4) タンク・モデルおよび土壌水分構造

図20は得られたタンク・モデルと土壌水分構造を示す。なお2段目のタンクからの流出は，貯留高の2乗に比例するとする。ここに示す係数は3時間単位のものである。2段目以下のタンクの流出，浸透の係数，および土壌水分構造の係数 $K1$ ， $K2$ については，これらを8倍したものが日資料の場合の係数であると考えてよい。事実，これらの係数は，日資料の解析で得られたパラメータを3時間資料用に8で割って換算したものである。しかし，1段目タンクについては，これを日単位に換算できない。

5) 時間遅れ

タンク・モデルの出力を，時間遅れなしにそのまま推定流出高とする。

6) 初期貯留高

計算は表14の初期値から出発した。この値は10年間を通して計算した結果から判断して，一応大過ないものと思われる。

表14 W3流域に対する初期値

Table 14 Initial values for the W3 watershed

XA	XS	XB	XC	XD	XSNOW			
					1	2	3	4
15	100	0	5	450	0	0	0	0

7) 得られた結果

図21，図22，図23は上述のモデルにより算出された流量を実測と比較したもので，それぞれ3時間流量，日流量，月平均流量のハイドログラフである。

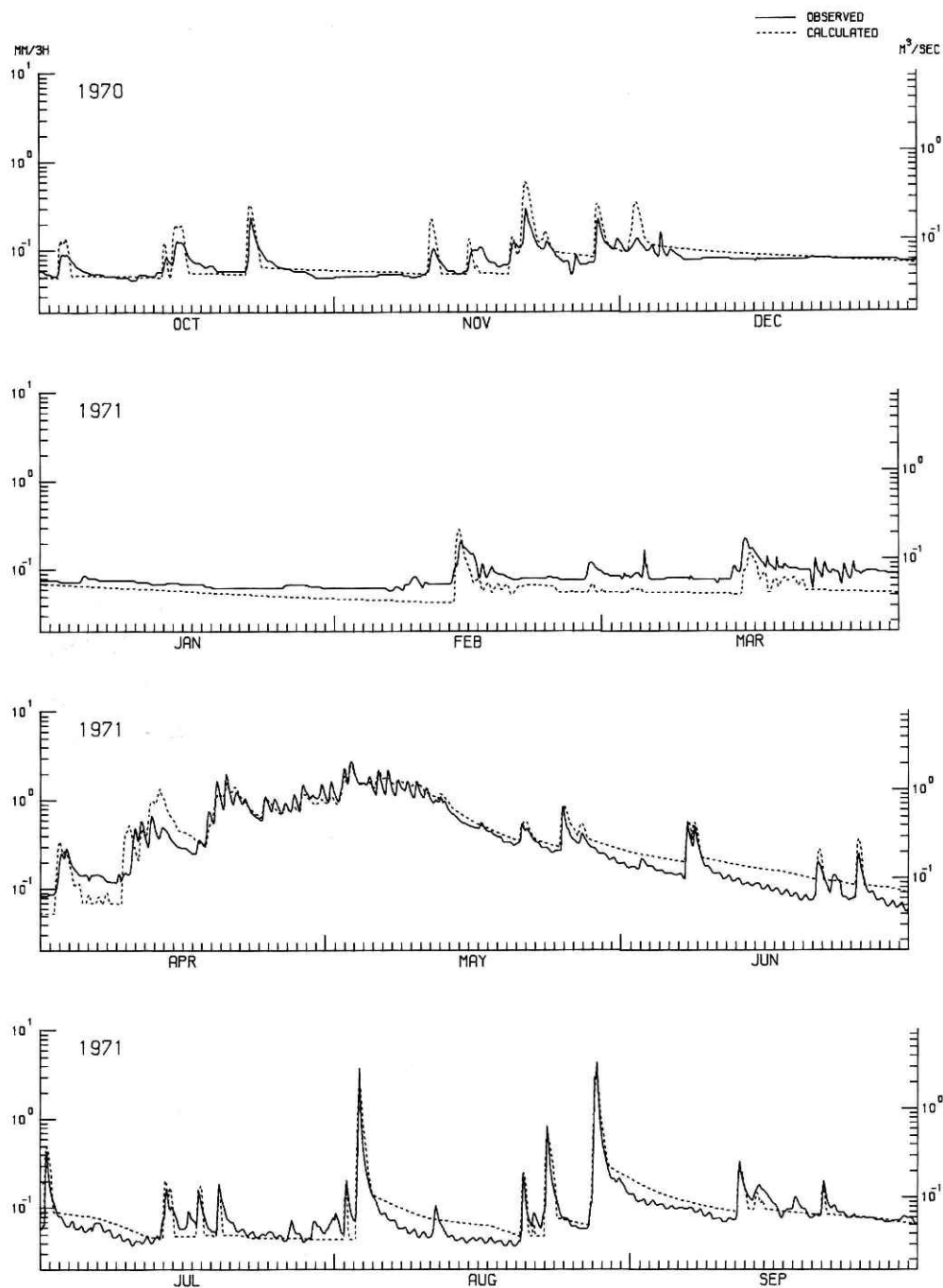


図 21 W3 流域 3 時間流量

Fig. 21 Three-hourly discharge of the W3 watershed

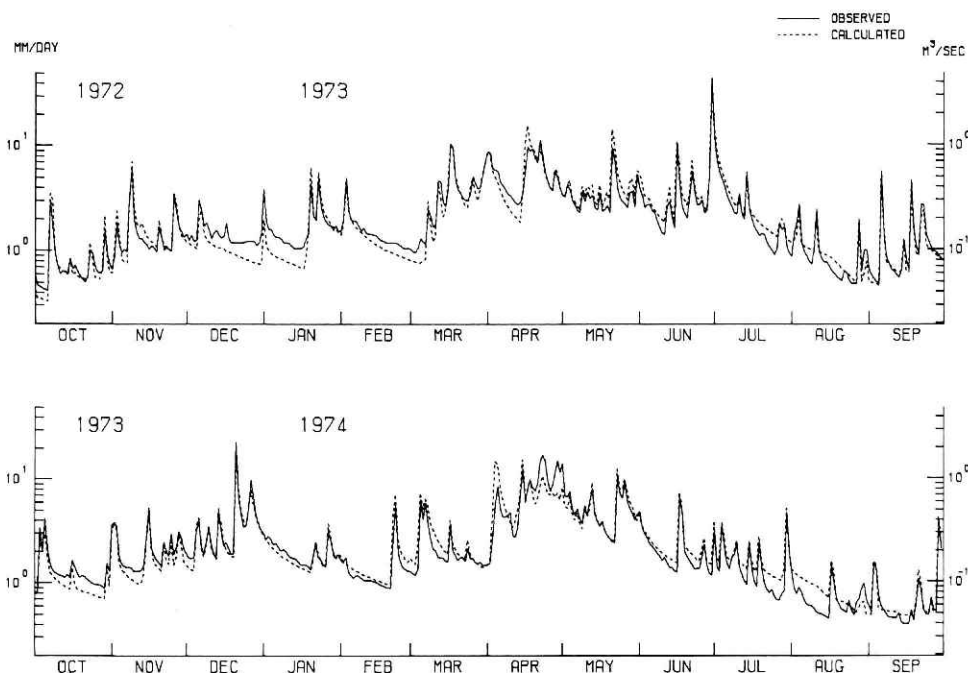


図 22 W3 流域日流量

Fig. 22 Daily discharge of the W3 watershed

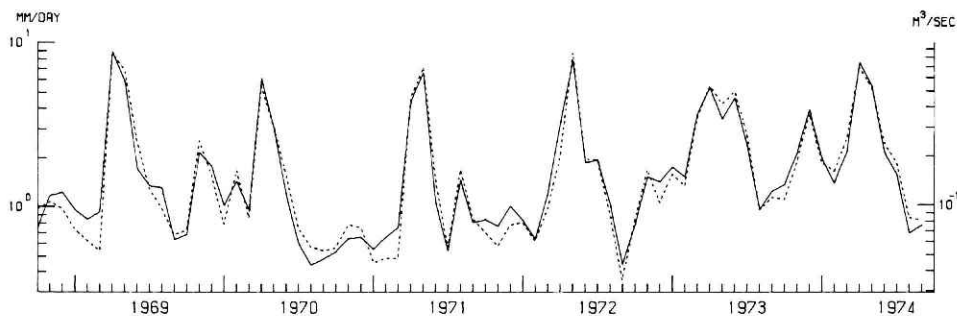


図 23 W3 流域月平均流量

Fig. 23 Monthly mean discharge of the W3 watershed

日流量について計算された評価値は, $MSEQ=0.275$, $MSELQ=0.224$, $MSEDC=0.188$, $MSELDC=0.122$, $CR=0.404$ である。

得られた評価 $CR=0.404$ は, 先の Durance, 後に出て来る Dischma, Illecillewaet より悪い。これは一つには小流域の流出解析が難しいことによると思われるが, その他の重要な理由として, 降水量が流域平均として与えられたこと, 気温が R-3 でしか与えられなかったことによると思われる。春先, 気温が急上昇して雪どけが始まる。そのような不安定な気象条

件のとき、気温は小流域内でもかなりの地点変動を示すのではあるまいか、図12に示すDurance流域の例がそれを示している。

2.2.4 最終モデルが得られるまでの経過

1) まず日資料による解析から始めた。試算No.1～No.12が、4地帯分割、 $CP(M)$ 、 $C(M)$ に季節変化を与える方針のもとで行なわれたが、評価CRは、はじめ0.7～0.8程度であったのが0.6程度に減ったに過ぎなかった。いろいろパラメータを変えても、あまりよい結果が出ないのである。

2) ハイドログラフの減衰の形から、流出を貯留高の2乗に比例させるとよいのではないかと考え、4段目タンクを除き、2乗に比例する型に変えた。浸透の方はすべて線型である。試算No.13～No.15がこの方式で行なわれ、No.15で $CR=0.558$ になった。

3) 推定と実測とがよく合わない所の気温に注意してみても、 $R-3$ の気温に代表性がないらしいことに気づいた。そこで降水が雨か雪かを気温で定めることをやめ、資料として与えられた降水の型によって定めることにした。この方式で試算No.16が行なわれ、 $CR=0.505$ になった。 CR を0.558から約10%減らして0.505にするのは、大きな進歩なのである。以後、雨か雪かは、この方式で定めることにした。

4) これまでは降水量の季節変化を $C(M)$ で与える方針で、 $CP(M)=1$ と置いていた。しかし $C(M)$ では調節が効かないことがわかった。雨量地点の平均高度が第2地帯にあり、第2地帯の面積が47%であることから、 $C(M) \cdot PD(I)$ による降水量の変化は期待できないのである。そこで $CP(M)$ に季節変化を与えて入力降水量を調節することにした。この方針で試算No.17～No.21が行なわれ、No.21で $CR=0.464$ となった。このときの $CP(M)$ は最終方式のものと大体似ている。No.21では $TD=1.2$ を用いている。100m当たりの気温低下を 0.6°C とすると、地帯幅87m当たりの気温低下は 0.52°C で、No.1では $TD=0.5$ と置いた。試算してみると、 TD を大きくしないと実測に合わせられないことがわかり、 TD は次第に大きくなった。最終方式では $TD=0.98$ であるが、気温低下を大きくしなければならないことは、はじめからわかっていた。No.21の $CR=0.464$ はかなりよい値で、ハイドログラフを眺めた所では、どこをどう修正すればよいかわからない。そこで他の河川の解析に移り、1月余りの中断となった。

5) $W3$ のような小さい流域を日単位で解析することがそもそも無理であろう。そこで3時間資料で解析することにした。3時間資料による試算はNo.101, No.102, …と表わすことにする。

3時間資料で計算すると、計算量が大きくなる。流出計算そのものの時間は大したことないが、印刷結果が従来の8倍になり、それに目を通して判断を下すことは不可能に近い。まずしなければならないことは3時間資料に対するタンク・モデルを求めることで、それは雪の影響のない夏期について試算すればよい。すでに日資料により、かなりよいタンク・モデル

ができてから、2 段目タンク以下はわかっている。問題は 1 段目タンクの形を定めることで、そのためならばある 1 年の夏だけ試算すればよい。

6) 1973 年 6 月 1 日から 9 月 30 日までの 4 か月を対象とし、試算 No. 101～No. 106 が行なわれた。2 段目以下のタンクの流出、浸透の係数、土壌水分についての K1, K2 は、No. 21 のモデルの係数を 8 で割ったものに固定され、1 段目タンクだけが目標である。思い違いによる失敗などがあって、無駄な試算があったが、No. 106 はかなりよい結果を与えた。ここでは 1 段目タンクは 2 個の流出孔を持つふつうの型が用いられた。2 段目、3 段目は No. 21 と同じく 2 乗に比例する型である。

7) 3 時間資料に対するタンク・モデルが大体できたので、雪のモデルを考える。問題は融雪の定数 SMELT をいくらに置くかである。日資料で雪どけを計算するとき、入力気温として、日最高、日最低気温の平均

$$T = TW * TMAX + (1 - TW) * TMIN$$

を用いる。ふつうは $TW = 0.5$ を用いているが、0.3 とか 0.7 を用いると結果がよくなることもある。この平均気温に SMELT が掛けられるのであるが、3 時間資料にしたときには SMELT を 8 で割ればよいことにはならない。雪どけが始まる頃は、TMAX は正、TMIN は負である。それを 3 時間資料で計算すれば、3 時間平均気温が負のときは雪どけが起こらないのだから、3 時間気温が正のときに沢山雪をとかさなければ、日合計が合って来ない。

8) $SMELT = 1$ とし、No. 106 のタンク・モデル、SMELT 以外の雪のパラメータは No. 21 のものを用いて、試算 No. 107 が、1971 年 3 月～5 月の融雪期について行なわれた。各地帯の積雪量は試算 No. 21 の 1971 年 2 月末日の値を初期値とするのである。この計算結果によると、雪どけが始まるとき、推定では大きな流量が出るのに、実測には出て来ないのである。それは雪どけ水が積雪層中に蓄えられ、すぐには地表に供給されないからであろうと考えた。そこで積雪タンクが導入された。積雪タンクのパラメータ、T0, TD, SMELT 等を動かして、試算 No. 108～No. 113 が行なわれた。

以上は 3 時間資料についての予備的試算で、ある 1 年の夏、または融雪期だけの試算である。さらに結果をよくするためには、日資料による解析を進める必要があると感じられた。

9) 約 2 か月の中断の後、日資料による計算が再開された。まず No. 21 のモデルを出発点とし、土壌水分構造のパラメータを動かしてみた。それまでは $S1 = 50$, $S2 = 250$, $K1 = 2$, $K2 = 20$ に固定されていたのである。試算 No. 22～No. 24 が行なわれて、 $S1 = 15$, $S2 = 110$, $K1 = 3.5$, $K2 = 12$ が得られ、 $CR = 0.443$ となった。No. 21 で $CR = 0.463$ であったのと比べて、僅かに 4.5% の減である。

10) 次に HB, HC を動かしてみた。それまでの試行錯誤で、HB, HC をいろいろ動かしているが、2 乗に比例する方式にしてからは、 $HB = 0$, $HC = 0$ を用いて来た。HB, HC を動かしてみる試算 No. 27, No. 27', No. 27'', No. 28 はあまりうまく行かなかった。結局 $HB =$

22, $HC=0$ にすることにしたが, No. 28 で $CR=0.437$ である. これは No. 24 の $CR=0.443$ に比べ, 僅かに 1.4% の減で, これでは CR のノイズと考えた方がよいかもしれない.

さらに $C(M)$, $CP(M)$ を動かしたり, T_0 , TD を動かしたりして, 試算 No. 29~No. 35 が行なわれたが, よい結果は出て来なかった.

11) No. 28 を出発点とし, 3 時間資料による試算を再開する. 1 段目タンクは No. 106 のものを用いる. 計算は 1971 年 3 月 1 日~5 月 31 日について行なう. No. 116 では T_0 , TD を動かし(直交化の手法による), $T_0=-1.1$, $TD=0.9$ が得られた. No. 117 では 1 段目タンクを 2 乗に比例させてみたが, 明らかにふつうの型のタンクの方がよい.

No. 118 からは, 6 年間全部の融雪期の所をとり出し, それについて計算を行なうことにした. No. 119 で T_0 が, No. 120 では積雪タンクが修正され, No. 121, No. 122 で SMELT に季節変化が与えられることになった. $SMELT=0.9$ を用いると, 2 月, 3 月の雪だけによる流量が大きき出すぎ, 流域全体の温度を下げたり, 積雪タンクに水を蓄えたりすることでは修正が効かない. 雪だけを少なくするより致し方ないことになって, 2 月, 3 月の SMELT を小さくすることになった.

No. 123 では積雪タンクが修正され, 最終モデルのものとなった. この No. 123 のモデルで, 6 年間全部を通じて計算が行なわれ, それを日流量にしたものが印刷され, その評価値が出された. $CR=0.448$ で, これは日資料で行なわれた試算 No. 24 の 0.443 や, No. 28 の 0.437 より, ほんの少し悪い.

ここまでの 3 時間資料による解析は, ハイドログラフを眺めて試行錯誤を行なうものであるから(3 時間資料の場合の自動化プログラムは, その時点ではできて居なかった), 評価値がやや劣るのは致し方ない.

12) ここでまた日資料による解析に戻った. 日資料による解析は, $RQ(I)$, $RD(I)$ による自動化修正を用いて居り, それによって得られたモデルは, 2 段目, 3 段目タンクの時定数の間の相違が少なく, その結果, 2 段目タンクがあまり働いていない欠点がある. そこで出発モデルを変え, 2 段目, 3 段目のタンクがあまり近づかないようにできないかと, 試算 No. 36-1~No. 36-3 を行なったが, いずれもうまく行かなかった.

13) 実測流量がときどき小さくなることがあり, 推定はそれに追いつかない. それを出す目的で, No. 37 では 4 段目タンクの時定数を短くしてみたがうまく行かなかった. 同じ目的で, No. 38 では 4 段目タンクに浸透孔を作り, 流出孔の位置を少し上に上げてみたが, これもうまく行かなかった.

14) No. 36 で 2 段目, 3 段目タンクの引き離しがうまく行かなかったので, No. 39 では 2 段目タンクの流出は 2 乗に比例させ, 3 段目はふつうの線型にすることにした. これはある程度うまく行って, $CR=0.448$ になった. この No. 39 を出発点とし, HB , HC を動かしてみたのが No. 40 で, $HB=0$, $HC=0$ が得られ, $CR=0.434$ となった.

15) 試算 No. 40 はモデルとして簡単で、しかも評価がよいから、これを出発点として、3 時間資料による解析を行なうことにした。

No. 126 では、2 段目以下のタンクは No. 40 のものを用い、その他のパラメータは No. 123 とほとんど同じものを用い、 $CR=0.407$ が得られた。

No. 127 では、No. 126 から出発して T_0 , TD を求める半自動的手法が試みられ、 $T_0=-0.8$, $TD=0.98$ が得られ、 $CR=0.406$ となった。No. 126 の 0.407 と、No. 127 の 0.406 の実質的差はないと言ってよからう。

16) No. 128 では SMELT を動かしてみた。表 15 は試算した SMELT の値と、それに対する評価を示している。結局 2) の値が定められ、それに対する評価値が 0.404 である。これが先に示した最終モデル (表 13) である。

表15 W3 に対し試算された SMELT の値と、それに対応する評価 CR

Table 15 Values of SMELT used for trials and their corresponding criteria in the W3 watershed

	SMELT							CR
	1～3月	4月	5月	6～8月	9月	10月	11～12月	
1)	0.45	0.68	0.90	0.95	0.90	0.68	0.45	0.4117
2)	0.52	0.71	0.90	0.95	0.90	0.71	0.52	<u>0.4041</u>
3)	0.60	0.75	0.90	0.95	0.90	0.75	0.60	0.4060
4)	0.68	0.79	0.90	0.95	0.90	0.79	0.68	0.4132
5)	0.75	0.82	0.90	0.95	0.90	0.82	0.75	0.4225
6)	0.82	0.86	0.90	0.95	0.90	0.86	0.82	0.4318
7)	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90	0.4426

17) ときどき現われる小さな流量等、推定が実測に合わないいくつかの点を改善し、かつ評価値を何とか 0.4 より小さくしたいと、なお、2, 3 の試算を行なったが、うまく行かなかった。

2.3 Dunajec

2.3.1 流域の概況

この流域は、その流域がポーランドの大半を占める大河 Wisla の右支川の上流部で、ポーランドの南部、スロバキアとの国境地帯、カルパチア山脈中のタトラ山群の北側にある (図 24)。流域面積は 681.1 km^2 、高度は 577 m から $2,301 \text{ m}$ の間にあり、平均高度は 810 m である (図 25)、平均年雨量は A, B, C 各地点で、それぞれ約 800 mm , $1,200 \text{ mm}$, $1,800 \text{ mm}$ 、平均年流出高約 700 mm である。A, B, C 各地点の年平均気温は、それぞれ約 6°C , 5°C , 2°C 、1 月の平均気温はそれぞれ約 -4°C , -4°C , -5°C 、7 月の平均気温はそれぞれ約 15°C , 14°C , 10°C である。

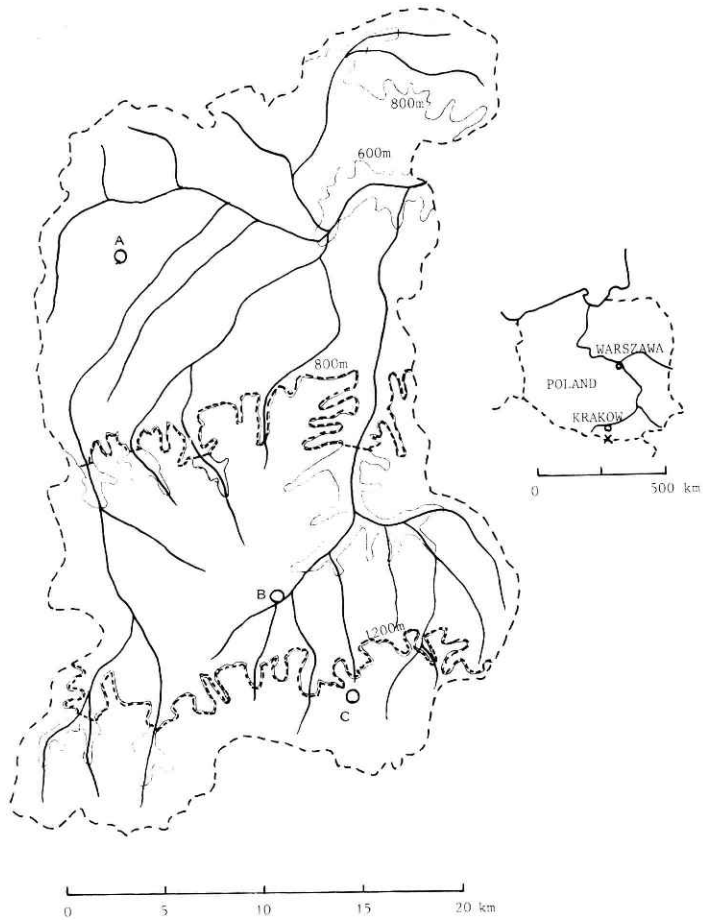


図 24 Dunajec 流域地図

Fig. 24 Map of the Dunajec basin

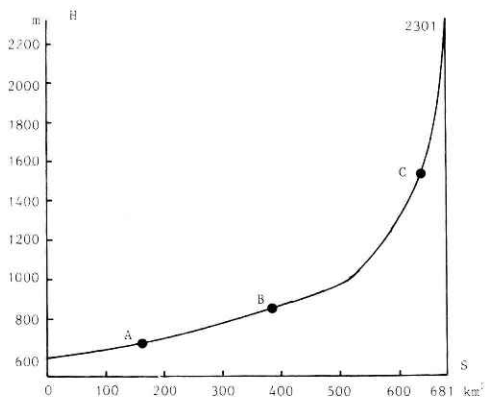


図 25 Dunajec 流域の
高度面積曲線

Fig. 25 Area-elevation
curve of the
Dunajec basin

2.3.2 与えられた資料

1) 流量

流量は3時間流量と日流量とが与えられている。日流量表には、河の水の状況が記号で示されているが、河に氷があるときの流量の中に、信頼性に欠けるものがあるように感じられる。この流域では、推定と実測との一致が思わしくなかったのであるが、流量の信頼性にあるいは問題があるのではなかろうか。

2) 降水量

図24に示されている3地点 A (Czarny Dunajec, 676 m), B (Zakopane, 857 m), C (Hala Gasiencowa, 1520 m) で日降水量が与えられている。また年降水量と高度の関係が図26で与えられている。ただし、これらの降水量観測点がどこにあるかは不明である。

この3地点の年降水量の間の相関は、どの2地点をとってみてもよくない。月ごとに、2地点の月雨量の相関をとったものも、あまりよくない。かなり相関がよい月もあるが、きわめて悪い月もある。年流出高と年蒸発量にある係数を掛けたものとの和と、年降水量(3地点降水量をあるウェイトで平均したもの)との相関もよくない。蒸発量に掛ける係数を変えても、降水量を平均するウェイトを変えても、よい相関は得られない。これらは前途多難を暗示するものであった。

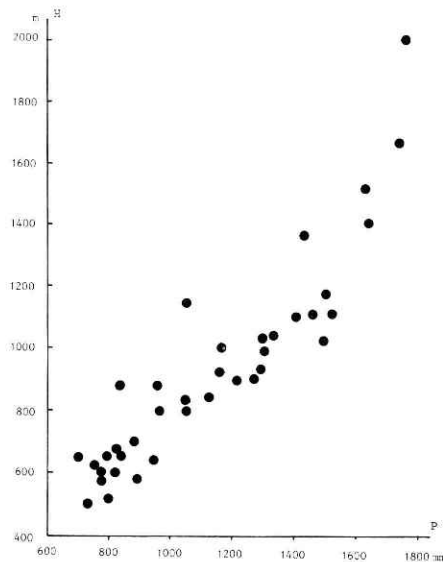


図 26 年雨量と高度の相関 (Dunajec)

Fig. 26 Correlation between annual precipitation and elevation in the Dunajec basin

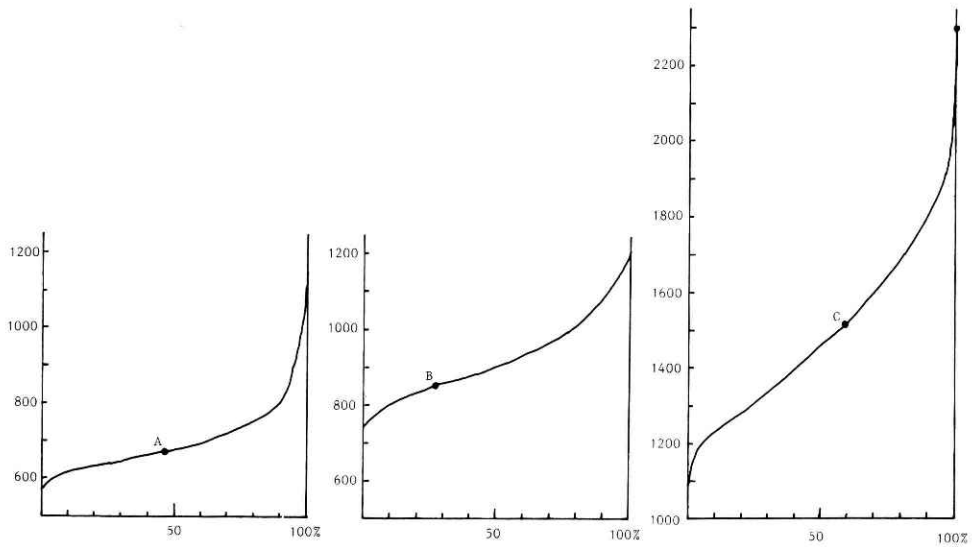


図 27 Dunajec 各部分流域の高度面積曲線

Fig. 27 Area-elevation curves of the Dunajec subbasins

表16 Dunajec 各部分流域の6地帯への分割および各部分流域の面積比

Table 16 Areal ratio of six zones in each of the Dunajec subbasins and ratio of area of Dunajec subbasins

分割の仕方		地帯面積比率 ZA (I) (低い方から)
A	600m から1,080m までを80m ずつに6分割	50 : 29 : 13 : 3 : 3 : 2
B	780m から1,200m までを70m ずつに6分割	29 : 24 : 20 : 12 : 8 : 7
C	1,100m から2,000m までを150m ずつに6分割	14 : 25 : 22 : 19 : 11 : 9

部分流域面積比 S(A) : S(B) : S(C) = 47.5 : 37.5 : 15.0

表17 Dunajec に対し定められた PD(I), CP(M), C(M)

Table 17 Obtained values for PD(I), CP(M) and C(M) in the Dunajec basin

PD(I)	A	-0.075	0.092	0.259	0.427	0.595	0.763		
	B	-0.064	0.043	0.149	0.255	0.362	0.386		
	C	-0.057	-0.032	-0.008	0.017	0.042	0.068		
CP(M)	1~2月	3~4月	5月	6月	7~8月	9月	10月	11月	12月
	1.45	1.50	1.15	0.95	0.85	0.70	0.78	0.95	1.10
C(M)	1								

3) 気温

3地点 A, B, C で日最高, 日最低, および日平均気温が与えられている。日平均気温は 6 時, 12 時, 18 時の平均であるが, われわれは用いなかった。

4) 蒸発

B 地点における可能蒸発量の計算値が与えられている。これは負となることもある。結露が蒸発を上廻る場合である。

5) その他の資料

A, B, C の 3 地点で, 露点, 風速, 雲量, 相対湿度, 積雪深, 積雪水当量が与えられ, B 地点ではさらに, 土の温度, アルベド, 日照量が与えられている。その他, 流域内 8 地点の雪の資料から推定された雪線の高さ, 同様にして推定された雪に覆れた部分の流域面積に対する比率が与えられている。これらは利用されなかった。

6) 資料の訂正

データ・カードを揃えるときに生じた誤りであろうとしか考えられない所があつて, 当方の考え方に従つて訂正した。他の流域で早期に発見した誤りは WMO に通報し, 訂正が公式に行なわれたが, この流域の誤りは発見が遅かったので, 混乱を心配し, 当方だけで訂正した。

a) C 地点の降水量と気温において, 1971 年 1 月 3 日, 4 日, 5 日の所に, 同年 9 月 27 日, 28 日, 29 日の資料を入れる。もとの 1 月 3 日から 9 月 26 日までの資料は, 3 日ずつ後へ順送りする。

b) A 地点の降水量と気温において, 1974 年 1 月 7 日から 13 日までの 7 日間の資料を, 同年 4 月 28 日から 5 月 4 日までの所に入れる。1 月 14 日から 5 月 4 日までの所に入っていた資料は, 7 日ずつくり上つて, 1 月 7 日から 4 月 27 日までの所に入る。

2.3.3 得られたモデル

1) 部分流域への分割

図 24 に示されているように, 流域を 3 つの部分流域に分割する。それは南側の 800 m の等高線, および 1,200 m の等高線によるものであるが, 深く浸入した谷間は切り離れた。3 部分流域の面積比率は

$$47.5 : 37.5 : 15.0$$

である。図 27 は各部分流域についての高度面積曲線で, A, B, C 各地点の高度も示してある。各部分流域は A, B, C 3 地点の降水量, 気温でそれぞれ代表されと考える。

2) 地帯分割

図 27 の高度面積曲線を用い, 各部分流域は表 16 に示されるように 6 地帯に分割される。

3) 降水量高度増加

図 26 の相関図, および地点 A, B, C の平均年降水量と高度との関係を考え合わせて, 表 17 の PD(I) が定められた。また, 3 部分流域共通に, 表 17 に示されている CP(M) が定め

られた。C(M)は1とした。

4) T0 と TD

各部分流域に対して、表18のT0, TDが定められた。

表18 Dunajec 各部分流域に対し定められた T0, TD

Table 18 Obtained values for T0 and TD in each of the Dunajec subbasins

	A	B	C
T0	-0.63	0.09	0.75
TD	0.49	0.33	0.88

5) 融雪の定数

SMELT=4を用いる。季節変化は与えない。

6) タンク・モデルおよび土壌水分構造

図28は得られたタンク・モデルおよび土壌水分構造を示している。ただし土壌水分構造はこの流域ではあまり意味を持たない。パラメータは仮りに置いてあるだけである。なお、蒸発は、与えられた可能蒸発散量の80%とした。

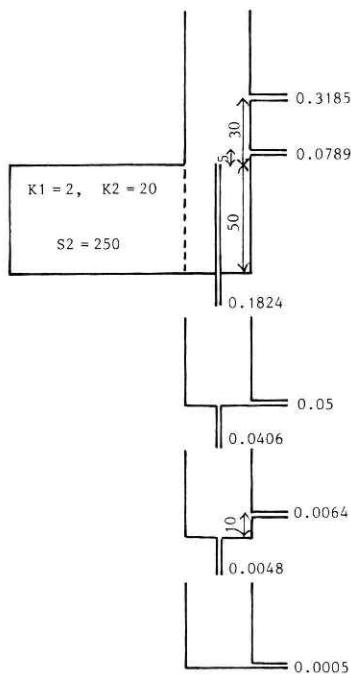


図 28 Dunajec 流域に対して定められたタンク・モデル

Fig. 28 The obtained tank model for the Dunajec basin

7) 初期値

計算は表 19 の初期値から出発した。この表でたとえば A 地区で $YB=0.15$, $YC=0.14$ とするのは、2 段目タンクからの流出高の初期値が 0.15 mm/日 、3 段目タンクからの流出高の初期値が 0.14 mm/日 であることを示す。流出高が与えられた初期値になるように、貯留高の初期値を置くのである。RQ(I), RD(I)による自動的修正方式を用いると、流出、浸透の係数が修正により変化するから、流出高の初期値を与えたときは、流出の係数の変化に応じて貯留高の初期値が変わるように、プログラムが作られている。

表19 Dunajec の計算に用いた初期値

Table 19 Initial values for the Dunajec basin

	XA	YB	YC	XD	XS	XSNOW					
						1	2	3	4	5	6
A	50	0.15	0.14	300	250	0	0	0	0	0	0
B	50	0.40	0.28	440	250	0	0	0	0	0	0
C	50	0.65	0.57	670	250	0	0	0	0	0	0

8) 得られた結果

上述のモデルにより算出された日流量、月平均流量を、それぞれ実測と比較したものが図 29、図 30 である。得られた評価値は、 $MSEQ=0.361$, $MSELQ=0.217$, $MSEDC=0.302$, $MSELDC=0.138$, $CR=0.509$ である。評価値として悪いし、ハイドログラフを眺めてもよいと思えないが、よりよくする見込みがつかない。

2.3.4 最終モデルが得られるまでの経過

1) 流域を南側の 700 m の等高線、 $1,100 \text{ m}$ の等高線で 3 地区に分割する方式で試算 No. 1 が行なわれた。3 地区 A, B, C の面積の比は $40:43:17$ である。この分割は、A と B とはほぼ同じウェイト、C のウェイトを小さくする方針で定められた。C 地点の降水量の代表性が乏しいらしいことは、予備的考察でわかっていた。PD(I)は最終方式のものと似ている。 $C(M)=1$, $CP(M)=1$ とし、 $T0$, TD は 100 m 当たりの温度低下を 0.6°C として定めた。算出された流量の評価値は $CR=0.652$ で、試算 No. 1 としては悪くないが、融雪期の流量が全般的に小さすぎる。

2) No. 1 の欠点は流域全体の気温が高すぎることから来ると考え、 $T0$ を小さくしてみた。3 地区とも一斉に $T0$ を小さくして、6 種類の $T0$ について試算してみたところ、No. 1 のものより約 1.2°C 小さくした所で、 $CR=0.622$ と一番よい結果になった。これが試算 No. 2 で、やはり融雪期の流量が小さすぎる。

3) 融雪期の流量が小さすぎるのを、 $C(M)$ に季節的变化を与えることで修正できないか

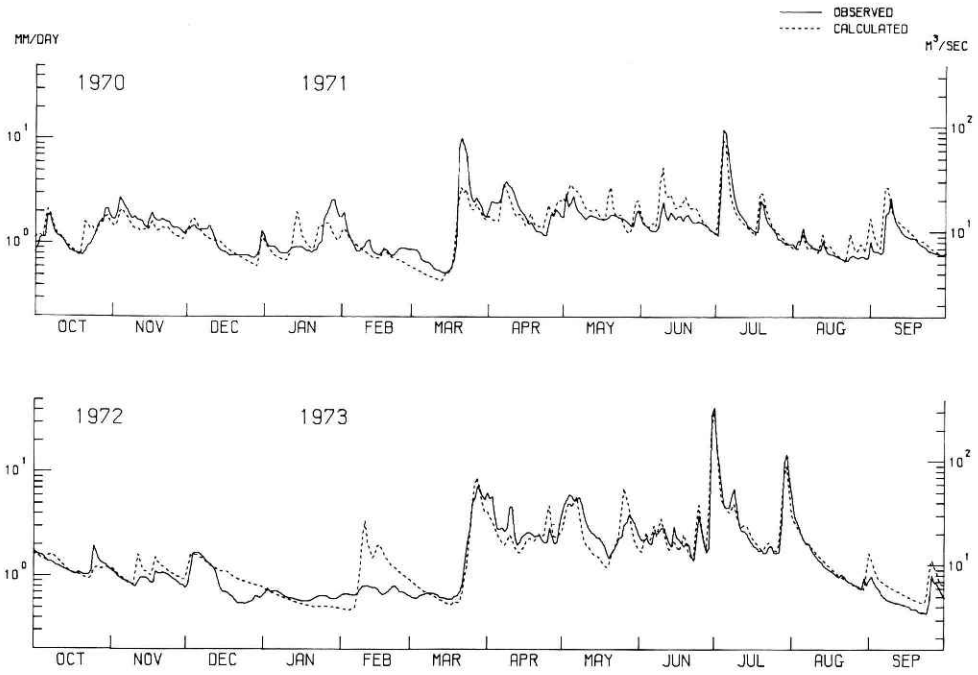


図 29 Dunajec 日流量

Fig. 29 Daily discharge of the Dunajec basin

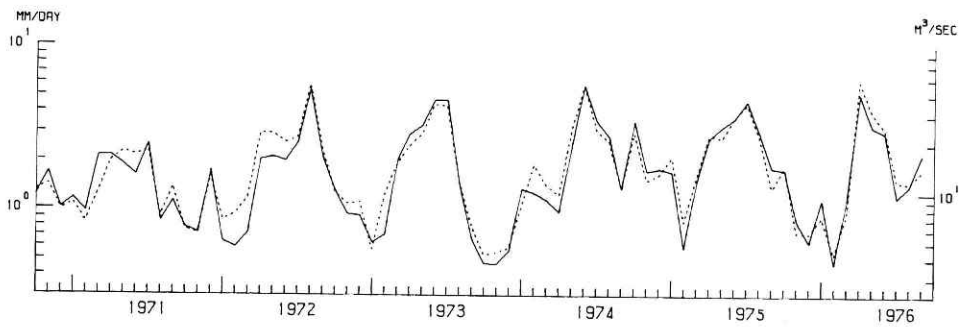


図 30 Dunajec 月平均流量

Fig. 30 Monthly mean discharge of the Dunajec basin

と考えた。A, B, C 3 地点の月雨量と高度との関係を月ごとに調べて $C(M)$ を定め、試算 No. 3 を行なったが、評価は $CR=0.630$ とかえって悪くなった。 $C(M)$ の修正によりよい結果を得ることは望みがないと思われた。

4) 融雪期の流量が小さく出るのを修正するためには、冬の降水量を大きく修正するより致し方ない。それには降水量に係数 $CP(M)$ を掛けるより致し方ない。雨量観測点は、それぞれの部分流域の中央部に近い所にあり、これに大きな補正係数を掛けるのは好ましくないが、それ以外に方法がない。 $CP(M)$ をいろいろ変化させて、試算 No. 3~No. 9 が行なわれ、冬期の $CP(M)$ を大きくすることにより $CR=0.550$ にまでなった。

5) 推定と実測とが一致しない所で、どのようにモデルを修正しても、一致させるのは難しだろうと思われる所がある。それは多分、実測流量に何かの誤りがあるのであろう。そういう場所のうち、河に氷がある時のものは、氷による何かの誤りと考え、そこにマスクを掛けることにした。マスクを掛けた場所は、 $RQ(I)$, $RD(I)$ の計算からも、評価の対象からも除かれる。マスクを掛けての計算は、試算 No. 10 として行なわれ、 $CR=0.523$ となった。

6) 試算 No. 11, No. 12 では、 T_0 , TD を動かし、最適のものを求める半自動的手法が試みられた。求められた T_0 , TD は最終方式のものと似ていて、得られた評価は $CR=0.515$ である。これは No. 10 の $CR=0.523$ に比べ、僅かに 1.5% の減にすぎない。

7) No. 13 では HB , HC を動かす半自動的手法が試みられ、 $HB=0$, $HC=0$ が得られた。得られた評価は $CR=0.514$ で、 CR の改善はないに等しい。

8) もはや動かすべきパラメータが見当たらないから、A, B, C 各地点の降水量、気温から出した地区別推定流量を合成するウェイトを動かしてみた。合成ウェイトは No. 1 以来用いられて来た 40:43:17 から、46:38:16 に修正され、評価は $CR=0.507$ となった。これが試算 No. 14~No. 16 で、評価は No. 13 の 0.514 に比べ、僅かに 1.4% の減である。

9) 元来 3 地区 A, B, C のウェイトは、等高線により分割した地区の面積比から定めたもので、地帯面積比率 $ZA(I)$ 等のパラメータは、もとの等高線分割に合わせて定められている。それらのパラメータをそのままにして、合成ウェイトだけを変えるのは論理的でない。そこで上に求められた比率 46:38:16 にほぼ合うように、3 地区分割を変更することにした。その考え方で、図 24 に示された、800 m, 1,200 m の等高線による分割が行なわれ、その分割に応じて地帯面積比率 $ZA(I)$ 、降水量の高度変化 $PD(I)$ が定められた。

この地区分割のもとで、 $CP(M)$ や、 T_0 , TD を動かす試算 No. 17~No. 22 が行なわれ、No. 22 が最終モデルとなった。その評価は $CR=0.509$ で、試算 No. 16 の $CR=0.507$ より少し悪いが、その差は無視してよい。試算 No. 17 以後は、論理の筋を通すというだけのことであった。なお、表 3 の SMELT はかえって悪い結果を与えたので、SMELT は 4 を用いた。

10) 何とかして評価値を 0.5 より小さくしたいと思ったが、うまく行かなかった。地点 A, B, C が各地区の中央に近いよい位置にあり、しかも冬期の $CP(M)$ を大きくしないと合わない

いのは、あるいは雨量計の問題、つまり雨量計が雪をうまく捕えていないことによるものであろう。雪のときは70%程度しか捕えていないので、冬期には補正係数1.5が必要になるのかもしれない。雨量計が雪を捕える比率は条件によって変わるであろうから、問題は測られた降水量の信頼性の問題になる。降水量に信頼性がないとすれば、評価値が0.5程度にとどまるのはやむを得ない。うまく行かないときは、流量や雨量が悪いと考えるのは、よい態度とは言えないが、この流域については、今後いくらモデルを手直ししても、あまりよい結果は期待できないように思われる。

モデルを修正して行く過程を眺めてみると、思い違い、見込み違いで評価を悪くすることはあっても、解析を開始し、ある所までは評価が目に見えてよくなって行く。やがて評価の減少は遅くなり、以後いろいろ手間を掛けても、評価はあまり小さくならない。T0, TDを変える, HB, HCを変える等は、いわば細部修正である。

何かの新しい思いつきがない限り、評価が目に見えて改善されることはない。そういう思いつきは、実測、推定のハイドログラフを眺めて比較することから得られるので、ハイドログラフを眺めて手の打ちようがなければ、見込みはないと考えざるを得ない。

この流域についてみると、CP(M)を動かしてNo.9で $CR=0.550$ になり、ついで流量が誤りではないかと思われる所で、しかも河に氷がある所にマスクをして、No.10で $CR=0.523$ となった。これ以後は、目立った改善はなかったのである。試算をくり返して、評価が0.5を割ったとしても、それは $CR \approx 0.49$ 程度のもので、単なる気安めにすぎないだろう。

2.4 Dischma

2.4.1 流域の概況

この流域はスイスの東部、ダボスの東南に位置し、ライン河水系に属する(図31)。流域面積 43.29km^2 、高度は1,668 mから3,146 mの間にあり、平均高度は2,372 mである。図32は高度面積曲線を示す。流域の39%が岩、58%が牧場、3%が森林、湖水が0.12%、氷河が2.56%である。

2.4.2 与えられた資料

1) 流量

日平均流量が与えられている。年流出高は、与えられた6年間については、少ない年で約900 mm、多い年で約1,450 mm、平均で約1,200 mm、わが国のふつうの河に似ている。2月が最渇水期で、最低時の流出高は約0.5 mm/日である。

2) 降水量

降水量はダボスの谷を距て、流域の反対側の山の上、高度2,540 mのNo.21地点で測られている。これは電熱で温められた雨量計で測られているが、アルプスの気候のもとでは、この雨量計の雪の計測はきわめて悪いと述べられている。この降水量を用いると、多くの流域で年降水量が年流出高より小さくなるという。この欠点を補う意味で、同じ地点で測られて

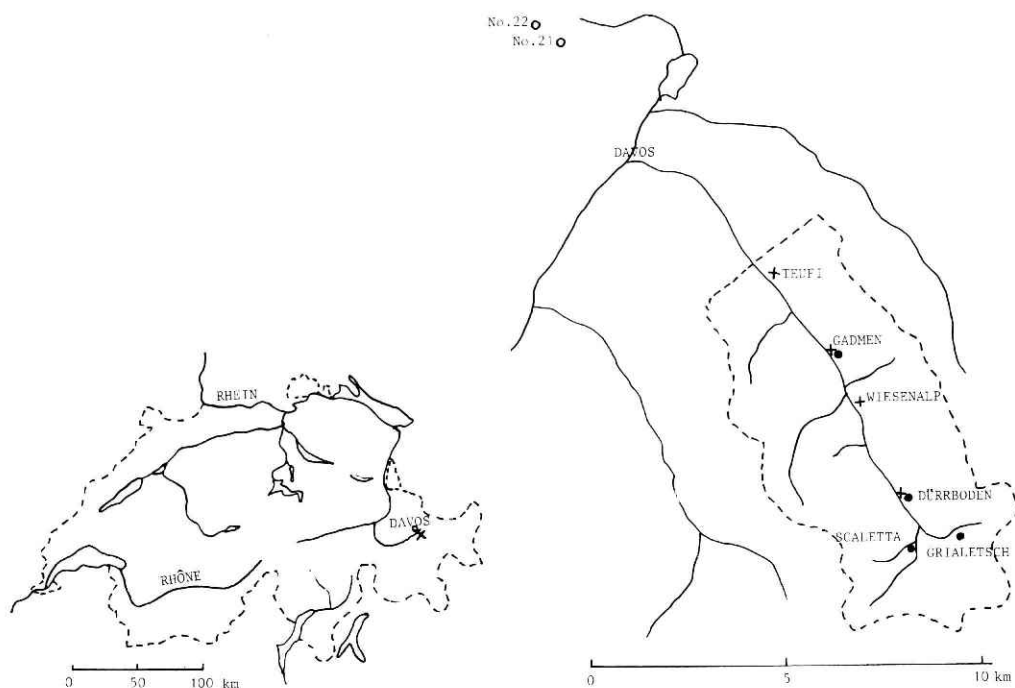


図 31 Dischma 流域地図

○気象観測点 ●蓄積型降水量計 +積雪調査点

Fig. 31 Map of the Dischma basin

○meterological station ●totalizer +sonw course

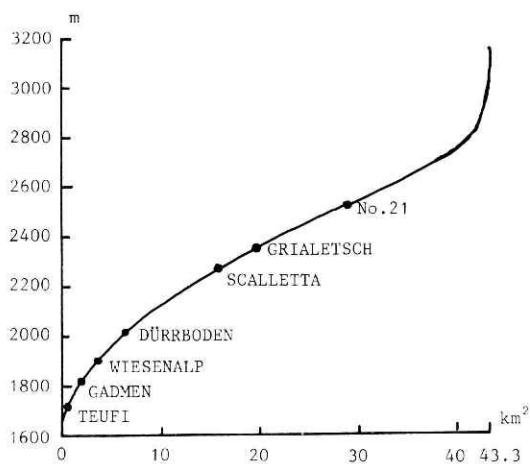


図 32 Dischma 流域の高度面積曲線

Fig. 32 Area-elevation curve of the Dischma basin

いる新雪の水当量 HW というものが与えられている。そして1日中、雪が降った日については、一般的に HW の方が降水量より大きく、信頼できると述べられている。しかし、雨の日もあるし、雪と雨とが混る日もあるから、 HW だけを信用する訳に行かない。致し方ないから、便宜的に、降水量 P と、新雪水当量 HW とを比較し、そのうちの大きい方をとって、それを修正された降水量 $\hat{P}$ と定め、これを入力降水量とする。雨と雪とが混る日には、この $\hat{P}$ が真の降水量より小さくなることもあるかもしれないが、やむを得ない。

雨量地点 No. 21 の年降水量を P で求めれば、10年間のうち最小で約 750 mm、最大で約 1,400 mm、平均が約 1,100 mm である。修正された $\hat{P}$ では、最小で約 1,000 mm、最大で約 1,850 mm、平均が 1,550 mm である。 $\hat{P}$ についての平均年 1,550 mm は、平均年流出 1,200 mm に対してもっともらしい値である。年流出高と、年降水量との相関図を作ると、 $\hat{P}$ で作ったものの方が、いくらか相関がよい。

表 20 は 10 年間の資料による $\hat{P}$ と P の月平均と、その比 $\hat{P}/P$ を示す。

10 月から 4 月まで、降水は多分すべて雪であろう (11 月から 4 月まで、日最高気温の月平均は負である)。そして比 $\hat{P}/P$ は 10 月から 2 月まで安定して約 1.65 程度の値を示しているのに、3 月、4 月に突然大きくなって、2.1 程度の値になる。風の吹き方等の影響であろうか。

いまになって考えると、W3 や Dunajec で用いた $CP(M)$ は、実はこの $\hat{P}/P$ に対応するものであろう。 $CP(M)$ を春に大きくする方がよいらしいことに気がついては居ながら、突然大きくすることをためらっていた。表 20 を参考にして $CP(M)$ を変えれば、W3 や Dunajec の結果が、あるいはもう少しよくなったかもしれない。

表20 修正された降水量 $\hat{P}$ と未修正降水量 P の月平均、およびその比 (Dischma)

Table 20 Mean monthly precipitation of adjusted $\hat{P}$ and non-adjusted P , and their ratio $\hat{P}/P$ in the Dischma basin

	10月	11月	12月	1月	2月	3月	4月	5月	6月	7月	8月	9月	年
$\hat{P}$	110	153	128	110	137	130	111	120	138	152	158	100	1,546
P	66	91	79	65	84	61	54	91	122	144	155	93	1,101
$\hat{P}/P$	1.66	1.68	1.62	1.69	1.63	2.13	2.06	1.32	1.13	1.09	1.02	1.08	1.40

3) 気温

日最高、最低気温が高度 2,677 m の No. 22 地点で測られている。1 月の平均気温が約 -8°C 、7 月の平均気温が約 5°C 、年平均が約 -2°C である。この地点は流域平均高度より約 300 m 高いから、流域平均高度ではもう少し暖いであろうが、全般的にきわめて寒い。夏でも最低気温が 0°C 以下になることは珍らしくないし、雪が降ることもある。

4) 蒸発

蒸発は与えられていない。与えられた温度から、表 21 の値を想定した。ただし、この流域では蒸発はあまり重要な役を演じない。

表21 Dischma に対し想定された日蒸発量 (mm/日)

Table 21 Assumed daily evapotranspiration for the Dischma basin
(mm/day)

1～4月	5月	6月	7月	8月	9月	10～12月
0	0.5	1.0	2.0	2.0	1.0	0

5) 積雪量，年降水量

図 31 に示された 4 地点で、積雪深、積雪水当量が何日かおきに与えられて居り、また図 31 に示された 4 地点で年降水量が蓄積型雨量計により与えられている。

6) その他の資料

日最高、最低気温が測られている高度 2,677 m の地点 No. 22 で日照量が、近くの高度 2,693 m の地点で、日平均気温、相対湿度、雲量、風速が与えられている。これらは利用されなかった。

また流域を 2,100 m、2,600 m の等高線で 3 地区に分け、それぞれの地区ごとに、雪に覆れた面積の比率を融雪期に、何日かについて示している。

2.4.3 得られたモデル

1) 地帯分割

1,668 m から 3,146 m までの間を、高度幅 246.3 m ずつの 6 地帯に分割する。地帯面積の比率は

$$8 : 18 : 25 : 31 : 15 : 3$$

である。

2) 入力資料

入力降水量として、上述の修正された降水量 $\hat{P}$ を用いる。

入力気温としては、 $T = 0.6 * T_{MAX} + 0.4 * T_{MIN}$ を用いる。

高度 2,677 m の気温観測点が稀に気温の逆転を示すことがある。すなわち、冬期に高い気温が現われ、それに 100 m につき 0.6°C の温度低下を適用すると、Dischma 流域は全体としてきわめて高温となり、その日に大きな融雪出水が現れることが計算上は出て来る。しかし現実には融雪出水はまったく現れないのである。1 地点の気温資料だけからでは、かかる気温の逆転を検出することはできない。この現象は、流量が与えられている 6 年間に 2 日だけ現れた。この 2 日を除外する目的で、10 月 15 日から 2 月末日まで、最高、最低気温をすべて

-10°Cと置くことにした. ともかく10月15日から2月末日までの間に融雪が生じないようにすればよいのである. 流量の隠されている4年間については, 幸いにして10月15日から2月末日までの間, 気温の逆転らしい日は発見されなかった.

3) 雪のモデルのパラメータ

積雪, 融雪の計算に必要なパラメータを定めた結果が表22に示されている. この表のSMELTは前に表3として出したもの, 積雪タンクは前に図3b)として図示したものである.

表22 Dischma に対して定められた雪のモデルのパラメータおよび地帯面積比率

Table 22 Obtained parameters of the snow model for the Dischma basin and the ratio of six zones

地帯面積比率 ZA(I)		8	18	25	31	15	3
地帯降水量 変 化	PD(I)	-0.26	-0.26	-0.18	-0.02	0.22	0.54
	CP(M)	1					
	C(M)	1					
地帯温度補正および低下		$T=0.6 * TMAX + 0.4 * TMIN$ $T0=6.07, \quad TD=1.87$					
融雪の定数 SMELT		1~3月	4月	5月	6~8月	9月	10月 11~12月
		2.5	3.0	4.0	4.2	4.0	3.0 2.5
積 雪 タ ン ク		SNOW0=0.04, SNOW1=0.15, SNOW2=0.85					

4) タンク・モデルおよび土壤水分構造

図33は得られたタンク・モデルおよび土壤水分構造を示す. ただし, この流域では土壤水分構造はほとんど意味を持たない. タンク・モデルの出力に0.15日の遅れが与えられて, 推定流出高となる. なお, 蒸発は表21の値そのままを差し引く.

5) 初期値

計算は表23の初期値から出発する. 10年間を通じて計算した結果を眺めると, この初期値で大過ないものと思われる.

6) 得られた結果

上のモデルから得られた日流量, 月平均流量を実測と比較したものが図34, 図35である. このモデルから得られた流量に対する評価値は $MSEQ=0.220$, $MSELQ=0.208$, $MSEDC=0.165$, $MSELDC=0.170$, $CR=0.382$ である. この評価はかなり良好である. この流域のように, 降水量, 気温がただ1地点で与えられ, しかもそれが流域外の遠く離れた山の頂上にあるという悪条件にもかかわらず, かかるよい評価値が得られたのは驚きである. その理由は,

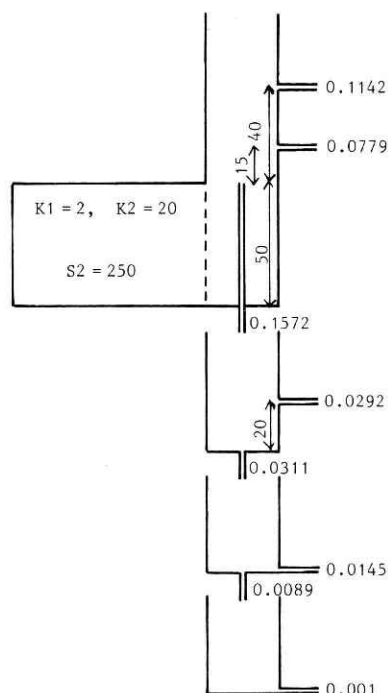


図 33 Dischma 流域に対して定められたタンク・モデル

Fig. 33 The obtained tank model for the Dischma basin

表23 Dischma に対する初期値

Table 23 Initial values for the Dischma basin

YA	YB	YC	XD	XS	XSNOW					
					1	2	3	4	5	6
0.4	0.5	0.9	500	250	0	0	0	0	30	2,000

実測流量に信頼性があること、および降水量が新雪水当量によって修正され、信頼性が高いものになったことによるものであろう。

2.4.4 最終モデルが得られるまでの経過

1) 流域内 4 地点において、1974～1977 の 4 年間について年降水量が与えられている。この外に、流域外の No. 21 地点で修正雨量 $\bar{P}$ が与えられている。この資料から、雨量観測点の高度と、年降水量との関係を示したのが図 36 である。

この図に見るように、年によって変動があり、高度と降水量の関係はあまり明らかでない。そこで 4 年間の平均年雨量について、高度と年降水量の関係を眺め、一番低い Gadmen、一

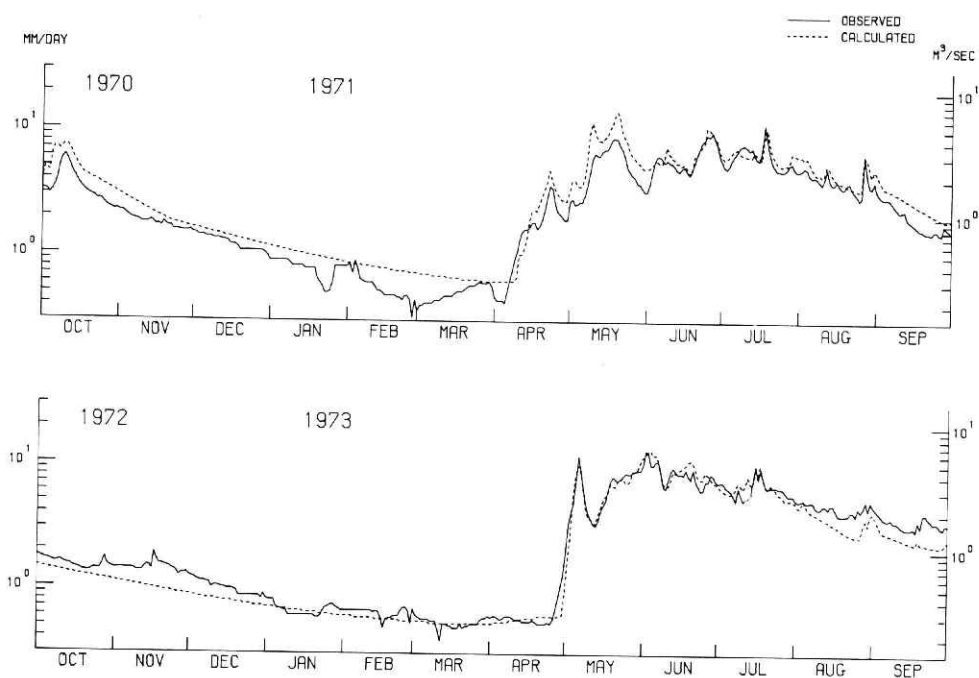


図 34 Dischma 日流量

Fig. 34 Daily discharge of the Dischma basin

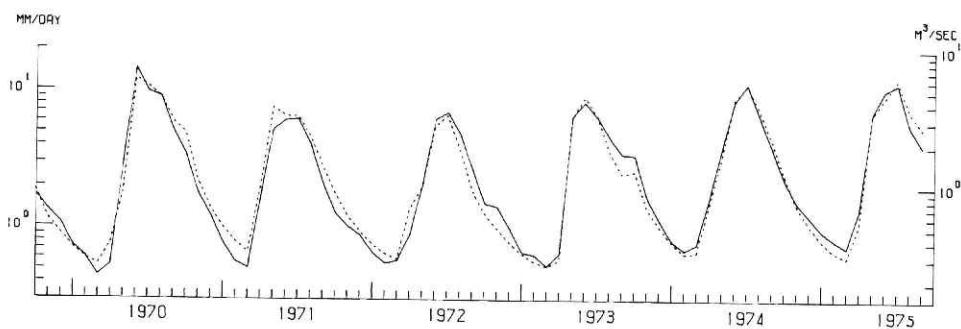


図 35 Dischma 月平均流量

Fig. 35 Monthly mean discharge of the Dischma basin

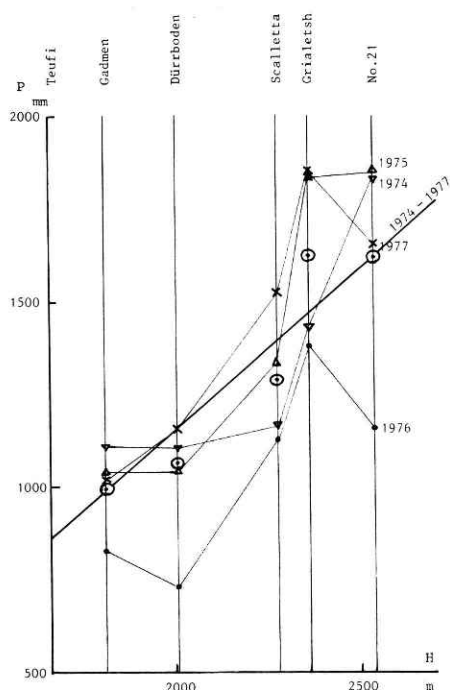


図 36 高度の年雨量の関係 (Dischma)

⊙ 1974 年～1977 年の平均

Fig. 36 Relation between annual precipitation and elevation in the Dischma basin
⊙ mean in the period from 1974 to 1977

番高い No. 21 地点を結ぶ直線で高度と降水量の関係を与えることにする。この直線から、地点 No. 21 の降水量と、六つの地帯の降水量との関係を定める PD(I)が、次のように定まる。

$$-0.41 \quad -0.27 \quad -0.14 \quad 0 \quad 0.13 \quad 0.26$$

2) 上の PD(I), 100 m につき 0.6°C の温度低下から定めた $T_0=5.8$, $TD=1.6$, $C(M)=1$, $CP(M)=1$, $SMELT=4$ 等のパラメータを用いて試算 No. 1 が行なわれ、評価値 $CR=0.590$ が得られた。試算 No. 1 としてはよい結果である。

3) 流域全般を寒くするために $T_0=5.0$ にして試算 No. 2 が行なわれ、No. 1 とほぼ同じ結果になった。ここで、冬期に実測にないのに、計算では 2 回現われた大きな融雪出水が、気温の逆転によるものであることを知った。それを除去するために、10 月 15 日から 2 月末日まで、最高、最低気温をともに -10°C に固定し、冬期の降水はすべて雪として蓄積し、融かさないことにして試算 No. 3 が行なわれ、 $CR=0.508$ となった。

4) 試算 No. 4 で $T_0=5.0$, $TD=1.45$ とし、結果は悪くなり、試算 No. 5 では No. 3 に戻し、 $RQ(I)$, $RD(I)$ による自動化修正の出発モデルを変更した。これが効いて、 $CR=0.442$ になった。

5) No. 6 では、それまで $T=0.5 * T_{MAX}+0.5 * T_{MIN}$ であったのを、 $T=0.6 * T_{MAX}+0.4 * T_{MIN}$ に変え、 $T_0=5.3$, $TD=1.6$ として、 $CR=0.406$ となった。評価が 0.4 になれば一応成功で、ここで 4 か月の中断となった。

6) 以後、細部調整となる。試算 No.7 では、No.6 を出発点とし、HB, HC を定める半自動的手法が行なわれた。これにより、従来 $HB=15$, $HC=15$ と置かれていたものが、 $HB=20$, $HC=0$ となった。ただし評価は No.6 の 0.406 が 0.402 と、僅かに 1%減っただけである。

7) No.7 を出発点とし、 T_0 , TD を定める半自動的手法が、試算 No.8, No.8' として行なわれ、 $T_0=6.025$, $TD=1.907$ が得られ、評価は $CR=0.390$ となった。No.7 の $CR=0.402$ に対し、3%の減である。

8) 次に、SMELT を 3.6, 4.0, 4.8, 5.2 と動かしてみたが、 $SMELT=4.0$ が一番よいということになった (試算 No.9)。

9) 上の $SMELT=4.0$ が一番よいという結論には信頼しかねる点がある。 $SMELT=4.0$ と置いて、最適の T_0 , TD を定めたのだから、その T_0 , TD を用いて最適の $SMELT$ が 4.0 であると出たからと言って安心できない。そこで $SMELT=4.4$ と置いて、最適の T_0 , TD を求める半自動的手法を試みた (試算 No.9')。得られた T_0 , TD は、 $SMELT=4$ のときに得られたものと同じである。一応 $SMELT=4.0$ でよいらしい。

10) HB , HC ; T_0 , TD を探し求める半自動的計算では、時間と物資の節約のため日流量を印刷しない。そこで、No.7, No.8 の結果を確認するため、 $HB=20$, $HC=0$; $T_0=6.0$, $TD=1.907$ の条件で、結果を印刷し、ハイドログラフを眺めた。この試算 No.10 では $CR=0.389$ で、結果はかなりよかった。この試算では、 $RQ(I)$, $RD(I)$ による自動的修正のくり返し回数を多くしているので、 CR が少しよくなっている。

11) さらによい結果を望み、 $C(M)$, $CP(M)$ をいろいろ動かし、試算 No.11~No.21 が行なわれたが、よい結果は得られなかった。

12) そこで試算 No.10 に戻って考えてみた。この結果はかなりよいが、4月の推定流量が大きく、雪どけ期の5, 6, 7月の流量がやや小さく出る傾向がある。これを $CP(M)$, $C(M)$ で修正しようとしてうまく行かなかったから、 $PD(I)$ によって修正することを考えた。低い地帯の降水量を小さく、高い地帯の降水量を大きくすれば、上の欠点が修正できるという考えである。

図37は試算された $PD(I)$ を図示したもので、それに対して得られた評価値の値も示してある。このようにして、表21に示された最終モデルの $PD(I)$ が得られた。

この放物線状の $PD(I)$ (2次階差が一定) が得られてみると、これは図36とよく対応している。図36から、何かの理由で特別であると考えられる Grialetsch を除外してみると、残りの4点はほぼ放物線状に並んでいる。この4点の並び方は、上に得られた $PD(I)$ と非常によく一致するとは言えないが、およその傾向として合っている。

13) $PD(I)$ を動かす試算 No.22, No.22', No.22'' の結果を確認するため、得られた $PD(I)$ を用いて算出した流量を印刷してみたのが、試算 No.23 で、得られた評価は $CR=0.378$ である。No.10 の $CR=0.389$ に比べ、僅か 2.8%の減である。

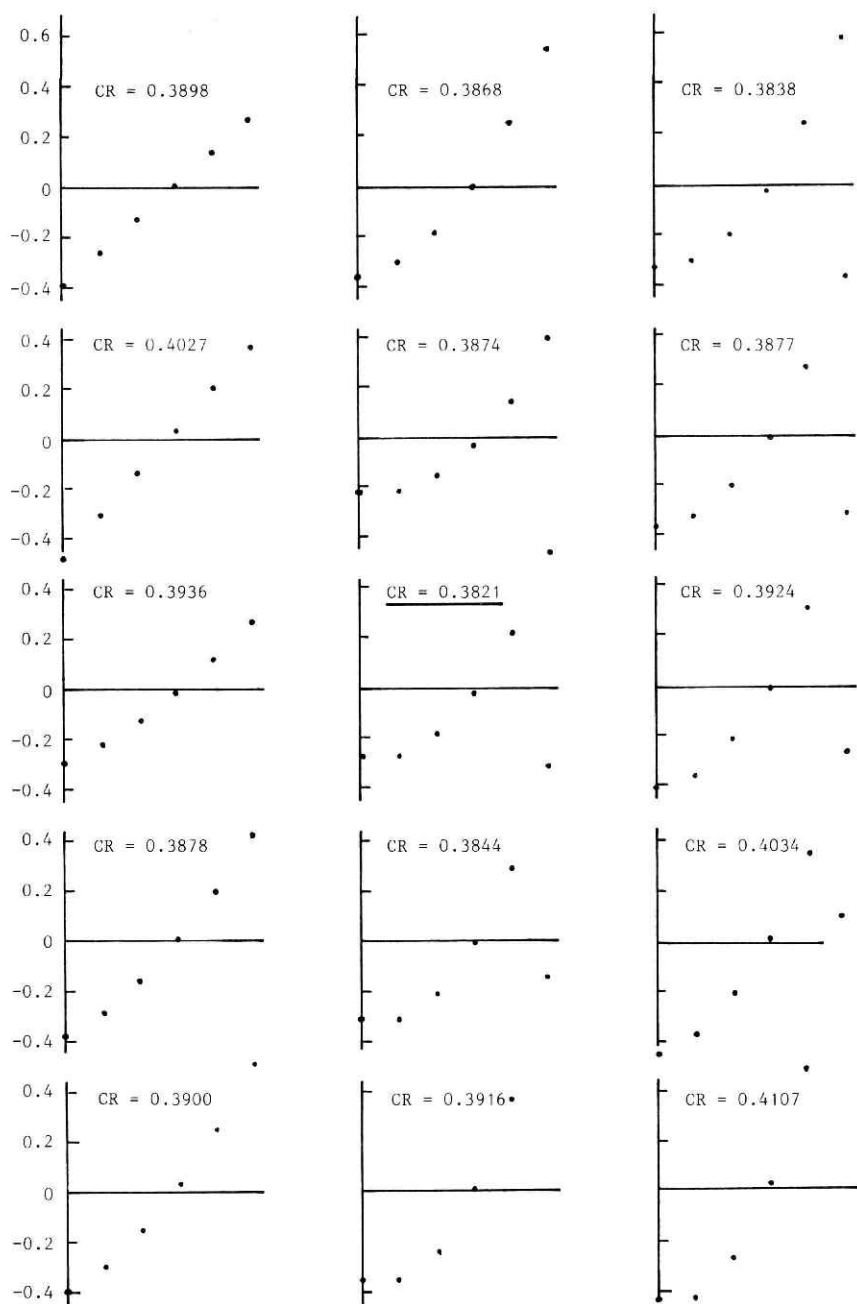


図 37 Dischma 流域に対し試算された PD(I)

Fig. 37 PD(I)'s used in trials for the Dischma basin

このハイドログラフを眺めると、雪どけが始まるときに、推定が大きすぎる欠点が見える。それを W3 にならって、積雪タンクで改善することにした。積雪タンクを導入した試算 No. 25 で、雪どけ開始時のハイドログラフの形はよくなったが、評価 CR はかえって悪くなった。試算 No. 25-1~No. 25-5 が行なわれ、積雪タンクのパラメータを動かし、結局表 21 に示したパラメータになった。

14) ここでまた T_0 , T_D を求める試算が行なわれ、 $T_0=6.07$, $T_D=1.87$ が得られた(図 5 参照)。これが最終モデルのものである。

15) 最後に SMELT に季節変化を与える試算 No. 28 が行なわれ、表 3 の SMELT の方が少しよい評価を与えるので、それを用いることにした。そして 10 年間を通じた計算を眺め、一応もっともらしく見える初期値が定められた。

2.5 Illecillewaet

2.5.1 流域の概況

この流域は北アメリカ太平洋側の大河コロンビア河の上流にある。コロンビア河は、氷河にはさまれたロッキー山地溝中のコロンビア湖に発し、ロッキー地溝を北西に約 300 km 流れ、ここで大きく反転して南流する。この反転の所から約 100 km 下流、Revelstroke の所で東側から流入するのが Illecillewaet 河である(図 38)。

流域面積は $1,155 \text{ km}^2$ 、高度は 500 m から 3,000 m の間にある。図 39 は高度面積曲線を示す。流域の 63% は森林で、それは 2,100 m 以下の高度に分布し、高度 1,800 m 以下の部分の 90% は森林である。氷河の全面積は 76 km^2 で、全流域の 6.6% に当たる。氷河は 2,100 m 以上の高度に分布し、2,700~3,000m の部分の 20 km^2 はすべて永河、2,400m~2,700m の部分の約半分が永河である。

2.5.2 与えられた資料

1) 流量

日平均流量が与えられている。信頼度はかなりあると思われる。与えられた 6 年間の資料によると、年間流出高は少い年で約 1,250 mm、多い年で約 1,700 mm、年平均約 1,500 mm で、日流出高にして約 4.2 mm/日である。流量は豊富である。渇水時の流量は約 0.5 mm/日程度である。

2) 降水量

降水量は図 38 に示された No. 1, No. 2 の 2 地点で測られている。No. 1 は流域の南西、流域外の Revelstroke の空港にあり、高度は 456 m である。No. 2 は流域の北東、流域の境界に近い Glacier の部落に近く、カナダ横断道路の峠道に沿った傾斜上にあり、高度は 1,323 m である。

10 年間の資料でみると、No. 1 地点の年降水量は少い年で約 600 mm、多い年で約 1,200 mm、平均 1,000 mm 弱である。No. 2 地点では、少い年で約 1,200 mm、多い年で約 2,100 mm、



図 38 Illecillewaet 流域地図

○気象観測点 ●積雪調査点

Fig. 38 Map of the Illecillewaet basin

○precipitation and air temperature station ●snow course

平均で約 1,650 mm である。地図上の位置からみても、年降水量の値からみても、この 2 地点は偏りが大きいのが難点である。No. 2 地点は図 39 に見るように、流域内であまり高い所に位置していない。もし高度と降水量の関係を No. 1, No. 2 の資料から定め、そのまま高い所の降水量を推定するならば、流域降水量が年流出高と比べて大きく出すぎるであろう。

No. 2 のある峠道の所は、太平洋方面から吹く湿気のある風が河沿いに流れて来てコロンビア河上流部に吹き込む道に当たっているのであろう。多分そのような理由で、No. 2 地点は降水量が多い特別な所ではあるまいか。

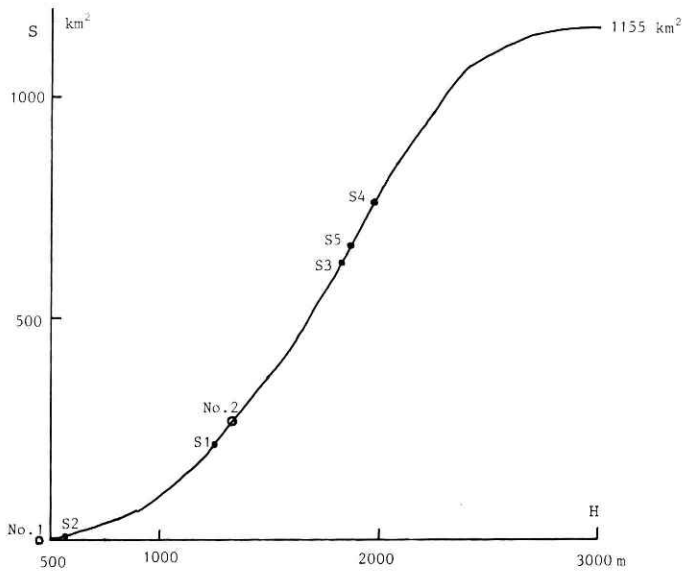


図 39 Illecillewaet 流域の高度面積曲線

Fig. 39 Area-elevation curve for the Illecillewaet basin

年降水量と年流出高との相関図を作ると、No. 1, No. 2 ともにより相関を示す。とくに No. 2 の方がよい相関を示すが、回帰直線 $Q = A * P + B$ を引くと、係数 A が 1 より小さくなる。相関がよいというのは、よい情報を含んでいるということであるが、 A が 1 より小さいということは、No. 2 地点の降水量を割引きして使えということである。降水量は高度とともに増すと考えると、No. 2 の降水量は難問を含んでいる。

そこで No. 1, No. 2 の月降水量の関係を調べた。それが先に図 4 として出したものである。図 4 に示した比 $P2/P1$ の値は、僅か 10 年間の資料から出したものであるから、大きな標本誤差を含んでいると考え、これを滑らかな曲線で結んだのが表 24 の値である。No. 2 地点の降水量 $P2$ を、この表 24 の係数で割ることにより、No. 1 地点の降水量 $P1$ と同等のものに換算されると考える。上の係数で割って修正された $P2$ を $\tilde{P}2$ で表わすことにする。

年降水量 $\tilde{P}2$ ($\tilde{P}2$ の年合計) と年流出高 Q との相関、年降水量 $P1$ と $\tilde{P}2$ との平均 (ウェイ

表24 $P2$ を修正する月ごとの係数 (Illecillewaet)

Table 24 Monthly coefficients that modify the precipitation $P2$ for the Illecillewaet basin

1 月	2 月	3 月	4 月	5～9 月	10 月	11 月	12 月
2.1	2.3	1.9	1.5	1.4	1.5	1.65	1.8

ト1:1のもの, 1:2のもの)と年流出高 Q との相関は, いずれも良好である。しかも回帰直線 $Q=A * P+B$ の係数 A は1より大きな値を示す。降水量の高度増加を考えれば, 降水量をある程度割り増すのが当然であるから, $P_1, \hat{P}_2$ により流量を推定する方式は有望であると思われた。

3) 気温

気温も降水量と同じく, 地点 No. 1, No. 2 で与えられている。No. 1 の月平均気温は, 1 月に約 -6°C , 7 月に 23°C , 年平均約 9°C で, No. 2 地点はこれより約 5°C 低い。気温の日較差は夏大きく, 冬小さい。No. 1 地点で, 日最高, 日最低気温の月平均の差は, 1 月に約 6°C , 7 月に約 15°C である。No. 1, No. 2 の月平均気温は, およそ 5.2°C の差で並行しているが, No. 1 地点の5月の最高気温は目立って高い。5月は雪どけで一番大切な時期であるから, その時に異った性質を示す2地点の気温が与えられていることは, 雪どけの解析に対して役に立つであろう。

4) 蒸発

蒸発の資料は与えられていない。気温から次の値を想定した。(表 25)

表25 Illecillewaet に対し想定された蒸発量 (mm/日)

Table 25 Assumed daily evapotranspiration for the Illecillewaet basin (mm/day)

1～2月	3月	4月	5月	6月	7月	8月	9月	10～12月
0	0.5	1.0	2.0	3.0	2.5	1.5	0.7	0

5) 積雪深および積雪水当量

図 38 に示された5地点で, 積雪深および積雪水当量が与えられている。

2.5.3 得られたモデル

1) 地帯分割

流域は500 m から3,000 m までの範囲にあるが, 2,700 m 以上の部分は無視し, 500 m から2,700 m までを, 高度幅367 m ずつの6地帯に分割する。各地帯の面積比率は

$$5 : 13 : 21 : 26 : 26 : 9$$

である。

2) 降水量, 気温および合成比率

降水量, 気温は地点 No. 1, No. 2 で与えられている。No. 2 については, 降水量を表 24 の係数で割った $\hat{P}_2$ を入力降水量とする。かくして, 地点 No. 1, No. 2 に対し, (P_1, T_1) , $(\hat{P}_2, T_2)$ の入力資料が与えられる。そこで仮りに, 全流域に (P_1, T_1) を入力とした場合の推定流量, $(\hat{P}_2, T_2)$ を入力とした場合の推定流量を算出し, それを1:1の比率で合成したも

のを推定流量とする．あるいは流域を2等分し，各部分流域が同じ高度面積分布（同一の地帯面積比率 $ZA(I)$ ）を持つと考えてもよい．

3) 雪のモデルのパラメータ

積雪，融雪の計算に必要なパラメータを定めた結果が表26である．なお，表中の $SMELT$ は表3のものと同一である．

表26 Illecillewaet に対して定められた雪のモデルのパラメータおよび地帯面積比率

Table 26 Obtained parameters of the snow model for the Illecillewaet basin and the ratio of six zones

地帯面積比率	ZA(I)	5	13	21	26	26	9			
地帯降水量 変化	PD(I)	0.17	0.17	0.25	0.41	0.65	0.97			
	C(M)	1月 2.1	2月 2.3	3月 1.9	4月 1.5	5~7月 1.4	8月 1.0	9,10月 0.8	11月 1.65	12月 1.8
	PC(M)	1								
地帯温度補正 および低下	No.1	T0=−1.53, TD=2.31								
	No.2	T0= 3.54, TD=2.54								
融雪の定数 SMELT		1~3月 2.5	4月 3.0	5月 4.0	6~8月 4.2	9月 4.0	10月 3.0	11~12月 2.5		
積雪タンク		なし								

4) タンク・モデルおよび土壌水分構造

図40は得られたタンク・モデルおよび土壌水分構造を示す．ただし土壌水分構造はこの流域ではあまり意味を持たない．仮りに置いてあるだけである．No. 1, No. 2の入力に応ずるタンク・モデルの出力は1:1で合成され，それに時間遅れ0.33日が与えられたものが，推定流量となる．なお蒸発は表25の値の50%が用いられた．

5) 初期値

計算は表27の初期値から出発する．

表27 Illecillewaet の計算に用いられた初期値

Table 27 Initial values for the Illecillewaet basin

	YA	YB	YC	XD	XS	XSNOW					
						1	2	3	4	5	6
No. 1	0.3	1.0	0.5	270	250	0	0	0	0	70	200
No. 2	0.3	1.0	0.5	270	250	0	0	0	0	80	2,500

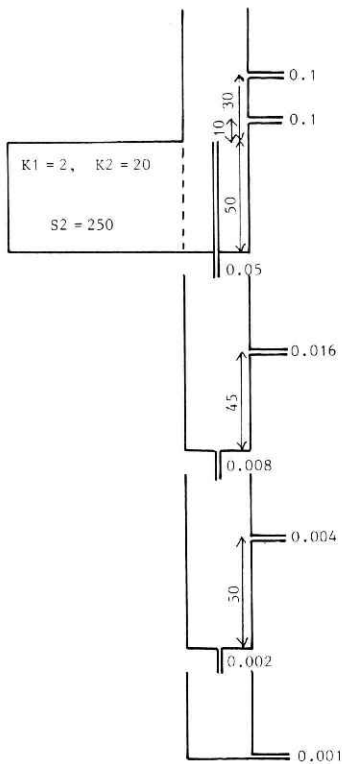


図 40 Illecillewaet に対して定められた
タンク・モデル

Fig. 40 The obtained tank model for the
Illecillewaet basin

6) 得られた結果

上のモデルから算出された日流量，月平均流量を実測と比較したものが図 41，図 42 である．この日流量に対する評価は， $MSEQ=0.240$ ， $MSELQ=0.232$ ， $MSEDC=0.151$ ， $MSELDC=0.139$ ， $CR=0.381$ である．降水量，気温が偏った 2 地点で与えられたという条件を考えると，得られた CR の値は意外なほどよい．たとえ位置が偏っていても，降水量，気温ともに 2 地点で与えられたことが，よい結果の出た理由であろう．

2.5.4 最終モデルが得られるまでの経過

1) P_2 を表 24 の係数で割って $\hat{P}_2$ を作り， P_1 と $\hat{P}_2$ とを入力降水量とすることは，最初からの方針であった．

試算 No.1 では， P_1 ， $\hat{P}_2$ の 1 : 2 の荷重平均を入力降水量とし，温度は No.2 地点の T_2 を用いた．はじめの頃は No.2 地点の方に代表性があると考えていたからである．流域を 4 地帯分割し， $PD(I)$ として 0.1, 0.3, 0.5, 0.7 を， $C(M)$ としては表 24 の係数を， $T_0=3.3$ ， $TD=3.3$ を用い，得られたのは $CR=0.795$ である．試算 No.2 では出発モデルを修正して $CR=0.692$ ，No.3 では出発モデルと T_0 ， TD を修正して $CR=0.526$ ，No.4 では $T_0=2.5$ ， $TD=3.7$ として $CR=0.514$ となった．初期の試算で CR が 0.5 に近くなれば一応の成功である．

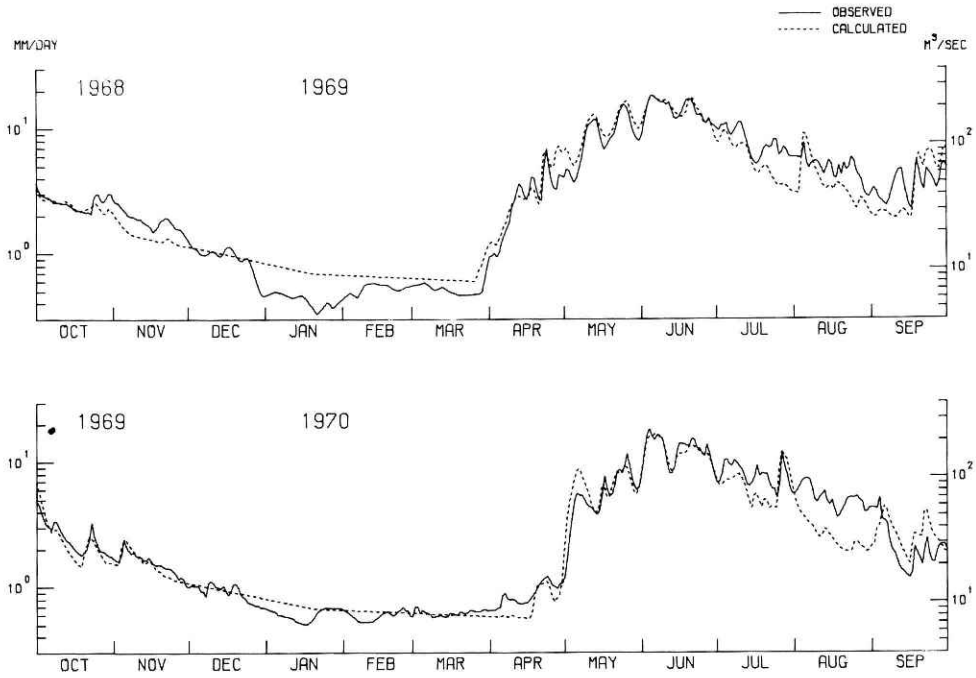


図 41 Illecillewaet 日流量

Fig. 41 Daily discharge of the Illecillewaet basin

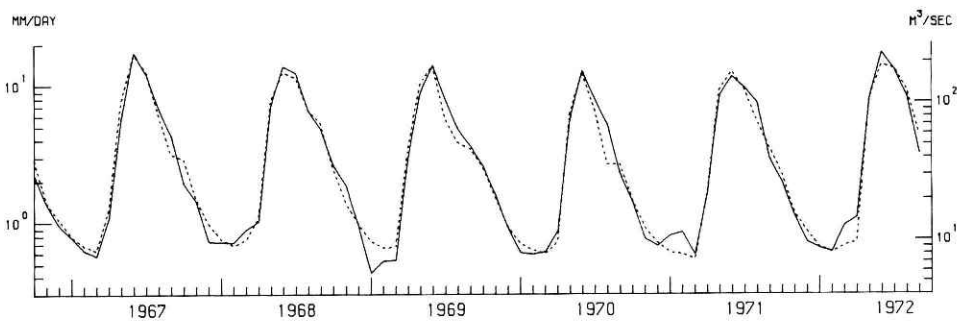


図 42 Illecillewaet 月平均流量

Fig. 42 Monthly mean discharge of the Illecillewaet basin

2) 試算 No.5 では流域を2分し, (P1, T1), (P2, T2)をそれぞれ入力とし, 流出高に換算してから1:2の比率で合成することにした. 流域2分とは, 仮想的な2分で, ZA(I), PD(I), C(M)はNo.1と同じものを共通に用いる. No.1はNo.2より約5.2°C暖かいから, T1に対し, $T_0 = -2.7$, T2に対し $T_0 = 2.5$ を用い, $TD = 3.7$ は共通である. これはNo.4の方式そのままに, T1を入力に導入し, 流域を2分するということである. 得られた評価は $CR = 0.414$ である. 一応満足すべき結果で, 1か月の中断となった.

3) 試算 No.6以降は6地帯に分割することにした. 4分割が6分割になるのに応じて, PD(I), T_0 , TDの値が変わる. 4地帯分割で行なった試算No.5のパラメータを6分割用に換算し, 地点No.1, No.2に対する合成比を1:1にして試算No.6が行なわれ, $CR = 0.418$ が得られた.

試算No.7では, 地点No.1, No.2に対する T_0 を-1.8, 2.4とし, 共通の $TD = 2.4$ を用い, 合成比を1:2にして, $CR = 0.406$ となった. 試算No.5の $CR = 0.414$ とほぼ同程度の結果で, 4分割を6分割にしても, あまりよくなるらない.

4) 試算No.8からNo.35まで, 3週間あまりの間, いろいろなパラメータを動かしてみたが, すべてうまく行かなかった. 手当たり次第にパラメータを動かしてみても, あまり役に立たないということである.

5) ここで約4か月の中断があり, No.7のモデルに戻り, そこを出発点として細部調整を行なうことにした. 試算No.36, No.36'では, HB, HCを定める半自動的手法が試みられ, No.7で $HB = 30$, $HC = 50$ であったのが, $HB = 45$, $HC = 50$ となった. $CR = 0.403$ で, No.7の $CR = 0.406$ と比べて大差ない.

ついで試算No.37, No.38で, T_0 , TDを動かす半自動的手法が試みられた. T_0 , TDが少し変化して, $CR = 0.402$ となった. 結局, HB, HC: T_0 , TDを動かしてみたが, ほとんど効果がなかったということである.

6) 試算No.39, No.39'では, 合成のウェイトを動かしてみた. それまでは地点No.2の方に代表性があると思い, 1:2のウェイトを多くの場合用いて来たが, 合成ウェイトを変えてみると, 両者ほぼ同じウェイトの方がよいらしい. ウェイトが0.42:0.58のとき, $CR = 0.396$ となった.

7) 合成ウェイトを42:58に固定し再び T_0 , TDを動かしてみた. 今度はNo.1, No.2に対し, (T_0 , TD)を別々に動かしてみることにした. いままではTDは両者共通にしたのである. 別々に動かした結果, (T_0 , TD)の値は, No.1に対し(-1.53, 2.31), No.2に対し(3.54, 2.54)になった. これが表26に出ている最終モデルの値であるが, TDを共通にしなかったことについては今となって疑問が残る. これが試算No.40, No.40'で, $CR = 0.389$ となった.

8) 試算No.39, No.39'で合成ウェイトを動かしてみたが, そのときには合成比1:2の

あたりがよいという先入観念があつて、1:1のあたりはよく探していなかった。改めて1:1のあたりを動かして、合成ウェイト46:54が得られた。これが試算No.41である。

9) 合成ウェイト46:54の代りに1:1を用いることにした。そもそも評価には大きなノイズを伴っているのだから、評価の僅かな相異を気にするよりも、パラメータが簡単な方がよいと考えたのである。

合成ウェイトを1:1として、PD(I)を動かしてみた。表28は試算されたPD(I)と、得られた評価とを示している。2番目のPD(I)が最良のCR=0.3798を与える。これが表26に与えられている、最終モデルのPD(I)である。

表28 Illecillewaet に対し試みられた PD(I) とそれに対応する CR

Table 28 PD(I)'s used for trials for the Illecillewaet basin and their criteria

	PD (I)						CR
1)	0.06	0.16	0.29	0.45	0.64	0.85	0.3829
2)	0.17	0.17	0.25	0.41	0.65	0.97	<u>0.3798</u>
3)	0.03	0.08	0.21	0.42	0.71	1.08	0.3847
4)	0.13	0.18	0.28	0.43	0.63	0.88	0.3816
5)	0.075	0.145	0.265	0.435	0.655	0.925	0.3801
6)	0.08	0.16	0.28	0.44	0.64	0.88	0.3816

10) 最後に、10年間を通じて計算した結果を眺めて、大過ないと思われる初期値を定めた。これによってCR=0.381と、結果は少し悪くなったが、10年間を通じて無理がないという安全性の方が大切である。なお、SMELTに季節変化を与えても、与えなくても結果はほとんど同じである。一応表3の値を用いたが、SMELT=4と固定しても、実質的な相違はほとんどない。

2.6 Kultsjön

2.6.1 流域の概況

この流域はスウェーデンの北部、北緯65°のあたりにあり、流域の一部はノールウェイにも属している(図43)。流域面積は1,109km²、高度は540mから1,580mの範囲にあり、流域内の湖の面積が6%、沼沢地が6%、森林限界以下の面積が51%である。図44は高度面積曲線を示す。

2.6.2 与えられた資料

1) 流量

この流域の流量は、Kultsjön湖の出口の所にある水力発電所で測られた流量と、Kultsjön湖の貯水量の増分との和から、Ramsaren湖からの流入量を差し引いたものとして与えられ

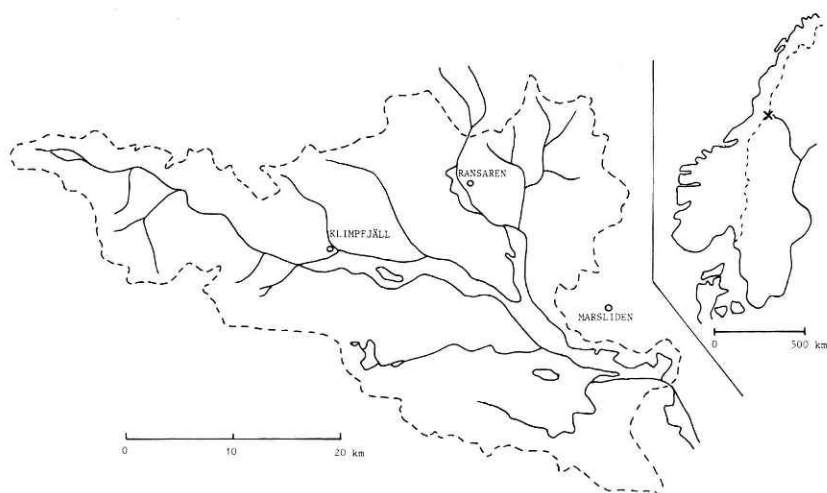


図 43 Kultsjön 流域地図

Fig. 43 Map of the Kultsjön basin

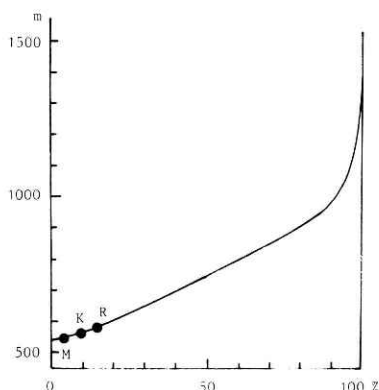


図 44 Kultsjön 流域の高度面積曲線

Fig. 44 Area-elevation curve of the Kultsjön basin

ている。その結果、流量の誤差は大きく、冬期の渇水時には負の流量がしばしば現われる。

6年間の資料でみると、年間流出高は少い年に約 500 mm、多い年に約 1,000 mm、平均約 800 mm である。2 月、3 月、4 月が渇水期で、日流量に負の値が現われるから、渇水量がいくらであるか判断が難しいが、月合計の流出高が 5 mm を割ることがある。0.15 mm/日程度の流量になることがある訳で、渇水時の流量はかなり小さい。豊水期は 5 月、6 月で、この 2 か月で年流出の約半分が占められている。

2) 降水量

降水量は図 43 に示された Klimpfjäll, Ramsaren, Marssliden の 3 地点で与えられている。以下、これを K, R, M 地点と略記することにする。この 3 地点の平均年降水量は、10 年間

でそれぞれ約 600 mm, 700 mm, 650 mm 程度で, 平均年流出高 800 mm と比べれば, 山地でかなりの降水があるとしなければ, 収支が合わない. 3 地点の高度はそれぞれ 570 m, 585 m, 550 m で, 高度差はないとみてよい. この 3 地点の月降水量の相関を調べると, K, R 2 地点間の相関はかなりよいが, M 地点は K, R 2 地点のどちらともあまり相関はよくない. M 地点は流域外にあるし, 少し様子が異なるらしい.

図 45 は 3 地点の平均月降水量を示す. 12 月を中心とする小さなピークと, 7 月を中心とする大きなピークとがある点で, 3 者共通であるが, 季節変化の様子は 3 地点で少しずつ異っている. 図 45 にはついでに, 月流出高の季節変化も示した.

年流出高と年降水量との相関を調べると, PK (K 地点の雨) と Q, PR と Q の相関はかなりよいが, PM と Q の相関はあまりよくない. PK と PR の平均と Q との相関, PK, PR, PM の平均 (1 : 1 : 1 の平均, 1 : 1 : 1/2 の平均を試算した) と Q との相関はかなり良好である. 降水量にはかなりの代表性があるらしい.

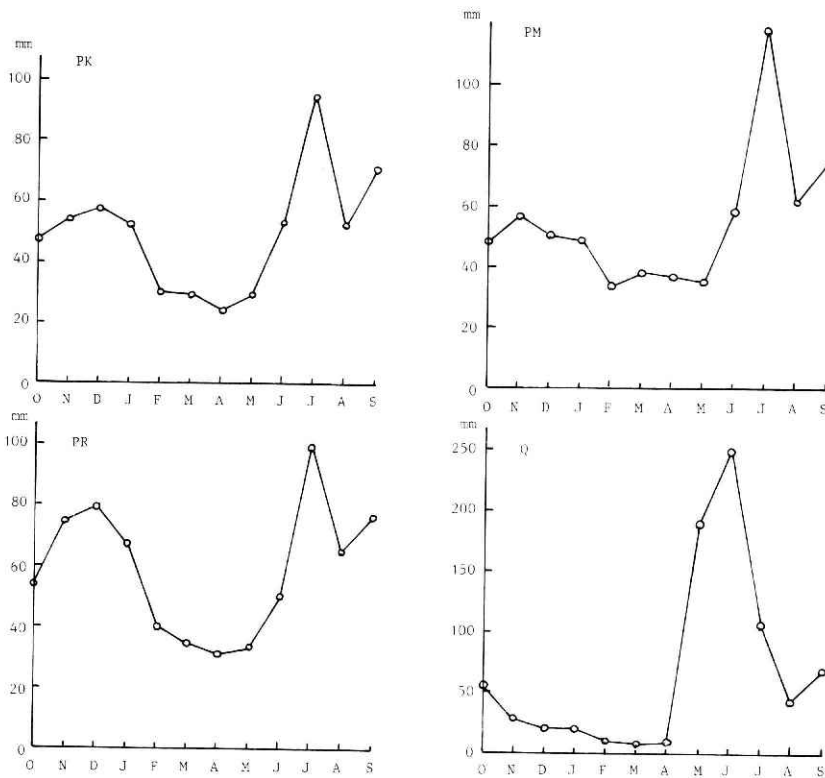


図 45 Kultsjön 流域 3 地点の平均月降水量および平均月流出高

Fig. 45 Mean monthly precipitation at three stations in Kultsjön basin and mean monthly runoff of the basin

3) 気温

気温はK地点だけで与えられている。日最高、日最低の平均は、1月の平均が約 -10°C 、7月の平均が約 12°C 、年平均が約 0°C で、緯度が高い割には寒くない。気温の日較差は年平均で約 7°C 、夏期6、7、8月には日較差が大きく7月の平均が約 8.5°C 、秋の9、10、11月には日較差が小さく、10月の平均が約 5°C である。

表29は日最高、最低気温の月平均の10年間の資料から平均と標準偏差とを求めたもので、夏期は最高気温が比較的不安定で最低気温の方が安定、冬期には逆に、最高気温の方が比較的安定で最低気温の方が不安定であることを示している。

表29 日最高気温、日最低気温の各月平均の平均(m)と標準偏差(σ) (Kultsjön 流域 Klimpfjäll)

Table 29 Mean (m) and standard deviation (σ) of monthly mean of daily maximum and minimum temperature at Klimpfjäll in the Kultsjön basin

	1月	2月	3月	4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月	11月	12月
日最高気温 m	7.2	-6.3	-2.0	1.0	7.6	14.3	16.2	14.1	8.3	3.1	-3.0	-4.9
σ	3.9	3.6	1.9	1.2	1.4	2.4	1.7	1.1	1.3	1.2	1.9	4.0
日最低気温 m	-14.4	-13.8	-9.8	-6.2	-0.3	4.8	7.6	5.8	1.8	-1.7	-9.4	-12.2
σ	4.7	4.8	3.1	1.7	0.5	1.3	1.3	0.6	1.4	1.5	2.3	5.3

2.6.3 得られたモデル

1) 地帯分割

流域は540 m から 1,580 m の範囲にあるが、1,200 m をこえる部分はきわめて小さいから、540 m から 1,200 m までを高度幅 110 m ずつの 6 地帯に分割する。地帯面積比率は

$$30 : 24 : 22 : 15 : 5 : 4$$

である。

2) 入力資料および合成比率

K, R, M 3地点の降水量を、それぞれ入力降水量とする。気温はK地点のものだけである。日最高、最低気温を 0.3 : 0.7 のウェイトで平均したものを入力気温とする。

K, R, M 3地点の降水量がどの部分流域を代表するか不明であるから、それぞれの降水量を全流域への入力降水量として流量を算出し、その単純平均を推定流量とする。流域が3等分され、それぞれの部分流域が同一の地帯面積比率に分割され、それがK, R, M 3地点で代表され则认为てもよい。

3) 雪のモデルのパラメータ

積雪、融雪の計算に用いるパラメータを求めた結果が表30に示されている。地点K, R,

表30 Kultsjön に対して定められた雪のモデルのパラメータおよび地帯面積比率

Table 30 Obtained parameters of the snow model for the Kultsjön basin and the ratio of area of six zones

地帯面積比率 ZA (I)		30	24	22	15	5	4
地帯降水量 変 化	PD (I)	0.65	0.65	0.80	1.10	1.55	2.15
	C (M)	1 ～ 4 月	5 ～ 8 月	9 月	10月	11～12月	
	CP (M)	1.4	0.2	0.5	0.8	1.4	
地帯温度補正および低下		T=0.3* TMAX+0.7* TMIN T0=0.46, TD=0.67					
融雪の定数 SMELT		1～3月	4 月	5 月	6～8月	9 月	10月 11～12 月
		2.5	3.0	4.0	4.2	4.0	3.0 2.5
積 雪 タ ン ク		な し					

M に対し、共通のパラメータが用いられる。融雪の定数 SMELT は表 3 に出ているものと同じである。

4) タンク・モデルおよび土壌水分構造

図 46 は求められたタンク・モデルと土壌水分構造を示す。土壌水分構造はこの流域では無意味で、仮りに置いてあるにすぎない。なお蒸発は与えられた値の 70% とした。

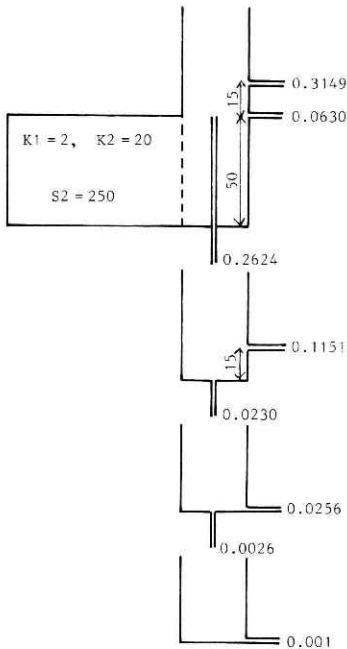


図 46 Kultsjön 流域に対して定められたタンク・モデル

Fig. 46 Obtained tank model for the Kultsjön basin

5) 初期値

計算は表 31 の初期値から始められた。なお、K, R, M の 3 地点に対し、同一の初期値が用いられた。

表31 Kultsjön の計算に用いられた初期値
Table 31 Initial values for the Kultsjön basin

XA	XB	YC	XD	XS	XSNOW					
					1	2	3	4	5	6
50	30	0.20	170	250	0	0	0	0	0	0

6) 得られた結果

上述のモデルにより算出された日流量, 月平均流量を実測と比較したものが, 図 47, 図 48 である。実測流量にはしばしば負の値が現われる。それを対数目盛で表わす訳には行かないから, 実測, 推定日流量ともに 2.5 mm/日を加えたものの対数をとって図示したものが図 47 である。月平均流量にはさすが負の値は現われないから, そのまま対数をとることができるが, そうするとあまり信頼性のない渇水時における推定, 実測の不一致が拡大されるので, 推定, 実測ともに 0.5 mm/日を加えたものの対数をとって図示したのが図 48 である。すなわら図 47, 図 48 の縦軸目盛は $\log(x+2.5)$, $\log(x+0.5)$ の関数尺となっている。

実測日流量に負の値が現われるから, 流量の対数をとったものの平均 2 乗誤差 MSELQ, MSELDC を計算する訳には行かない。そこで実測, 推定ともに 2.5 mm/日を加えたものについて, 平均 2 乗誤差を求めた。その結果は, $MSEQ=0.182$, $MSELQ=0.181$, $MSEDC=0.126$, $MSELDC=0.115$, $CR=0.302$ である。この評価は他の 5 流域と比較してきわめて良好に見えるが, それは流量に 2.5 mm/日に加えてあるからである。MSEQ は平均 2 乗誤差を平均流量で割ったものである。平均 2 乗誤差を求めるとき, 推定流量, 実測流量の差の平方和を作るから, 推定, 実測の双方に加えられた 2.5 mm/日の影響は消えるが, 平均流量で割る所で大きな影響が出る。この流域の平均流量は 2.23 mm/日だから, 2.23 で割る代わりに $2.23+2.5=4.73$ で割った結果, $MSEQ=0.182$ と出たのである。2.5 mm/日を加えなければ, MSEQ, MSEDCE は $(4.73/2.23)$ 倍となり, $MSEQ=0.386$, $MSEDCE=0.267$ となる。この値は Dunajec に対する評価 $MSEQ=0.361$, $MSEDCE=0.302$ とほぼ同程度である。つまり得られた結果はあまり良好とは言えない。

この流域で得られた推定流量の評価があまりよくないのは致し方ないことと思われる。実測流量そのものが, 出口の流量（これは発電所の使用水量と溢水路流量から出したものだから信頼性は高いと思われる）に, 湖水の貯水量の増分を加え, さらに流入量を差し引いたも

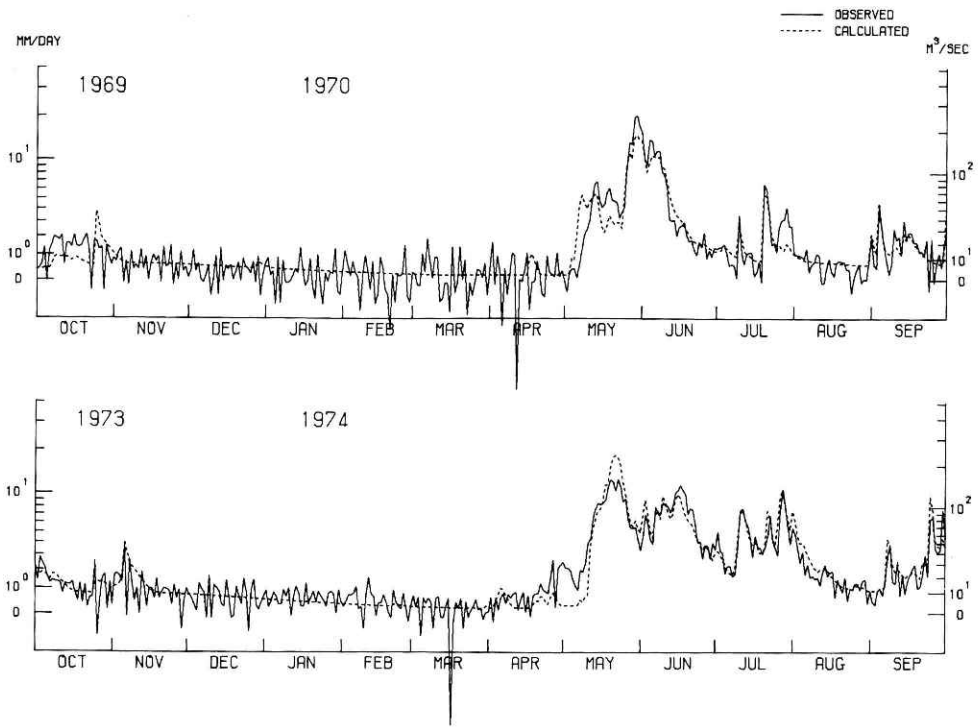


図 47 Kultsjön 日流量

Fig. 47 Daily discharge of the Kultsjön basin

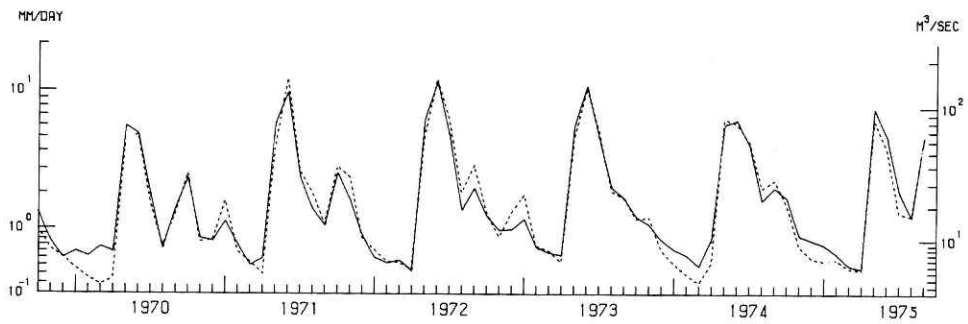


図 48 Kultsjön 月平均流量

Fig. 48 Monthly mean discharge of the Kultsjön basin

のである結果、大きいノイズを伴っているからである。そのノイズが大きいことは、しばしば現われる負の流量が示している。得られた評価の悪さのもう一つの原因は、気温が1地点でしか与えられなかったことによると思われる。降水量が3地点で与えられたのと同様に、気温が3地点で与えられていたら、結果はもう少しよくなったであろう。

2.6.4 最終モデルが得られるまでの経過

1) K, R, M 3地点の降水量を1:1:1/2のウェイトで平均したものを入力降水量とし、流域を4地帯に分割して計算が始められた。試算 No. 3 では、 $PD(I)$ を0.2, 0.7, 1.2, 1.7とし、 $T_0 = -1.0$, $TD = 1.5$, $C(M) = 1$, $CP(M) = 1$ として、評価が $CR = 0.397$ となった。これは流量に2.5 mm/日を加えたものに対する評価だから、得られた結果はあまりよくないのである。

2) 試算 No. 4, No. 5 では、流域を3分割し、それぞれをK, R, M3地点で代表させる方式を試みたが、うまく行かなかった。予備的試算の段階で、部分流域への分割などをすると、混乱するばかりでうまく行かないのである。

3) 試算 No. 6 では No. 3 に戻り、 $C(M)$ に季節変化を与えることにした。No. 7 では冬に $C(M) = 1.5$, 夏に $C(M) = 0.7$ とし、 $PD(I)$ や T_0 , TD にも少し修正を加えて、 $CR = 0.366$ となり、ややよい結果になった。

4) 試算 No. 8~No. 13 で、 $C(M)$, $PD(I)$, T_0 , TD がいろいろ動かされ、No. 13 では $C(M)$ を冬に1.4, 夏に0.2と置き、 $CR = 0.360$ となった。この $C(M)$ は最終モデルのものに近い。 $C(M)$ を夏に小さく、冬に大きくすることは必要らしい。

5) 以上の試算の結果に共通した欠点があった。1970年、1974年の5月は暖かく、雪どけ出水が計算上では大きく出て来るのに、実測ではそれほど大きくないのである。その原因は、1970, 1974年の5月、6月の最高気温が高いことによるらしい。夏には最高気温が不安定で、大きな変動を示す。そこで従来 $T = (T_{MAX} + T_{MIN}) / 2$ を用いて来たのを改め、最高気温のウェイトを小さくすれば、70年、74年の5月の雪どけ出水を小さくできると期待した。 $T = (0.3 * T_{MAX} + 0.7 * T_{MIN})$ を用い(それに応じて、 T_0 を大きくする)、試算 No. 14, No. 15 が行なわれ、70年、74年の雪どけは実測と合うようになったが、冬の積雪期にたまに出る出水の方が合わなくなった。冬期は最高気温に比べ、最低気温の方が不安定で、最高気温のウェイトを小さくすると、冬期に悪い結果が出るのである。

6) はなはだ便宜的であるが、積雪期9月1日~4月30日と、融雪期5月1日~8月31日とで、最高、最低気温のウェイトを変えることにした。すなわち、最高、最低気温に対するウェイトとして、積雪期には(0.5, 0.5)を、融雪期には(0.3, 0.7)を用いることにする。それに応じて、 T_0 も積雪期と融雪期とでは異ったものにする。試算 No. 16, No. 17 がこの方式で行なわれ、No. 17 で $CR = 0.336$ となった。

7) 積雪期、融雪期に分ける方式のもとで、地帯6分割による試算 No. 19~No. 23 が行な

われ、試算 No. 21 で $CR=0.322$ となった。No. 21 では、 $PD(I)$ が 0.55, 0.75, 0.95, 1.15, 1.35, 1.55, $C(M)$ は冬期に 1.4, 夏期に 0.2, T_0 は積雪期に $-0.8^{\circ}C$, 融雪期に $0.7^{\circ}C$, $TD=0.67^{\circ}C$ である。ここで約 5 か月の中断となった。

8) No. 21 を出発点として、HB, HC を定める半自動的手法が試みられ、No. 21 では $HB=30$, $HC=50$ と置かれていたのが、 $HB=15$, $HC=0$ となり、 $CR=0.321$ となった。しかし、 $CR=0.322$ が 0.321 になったに過ぎず、どの HB, HC がよいか、はっきりしない(試算 No. 24)。

9) 試算 No. 25 では T_0 , TD を定める半自動的手法が試みられ、積雪期に $T_0=-0.45$, 融雪期に $T_0=0.54$, 両者を通じて $TD=0.7224$ が得られた。融雪には最高気温のウェイトを小さくするから平均気温は低くなり、それに応じて T_0 は大きくなるのである。得られた評価は $CR=0.320$ で、No. 24 の 0.321 に比べ、進歩はないと言ってよい。

10) これまで、実測、推定流量に 2.5 mm/日を加えて来た。これは負の流量の出現に対する対策である。試算 No. 26, No. 26' では移動平均による平滑化で負の流量を避けることを試みたが、うまく行かなかった。

11) 試算 No. 27, No. 27' では、 $PD(I)$ を動かしてみた。表 32 は試算された $PD(I)$ と、得られた評価とを示している。この表の 8 番目にある $PD(I)$ が最小の CR を得て、これが表 30 にある最終モデルのパラメータ値となった。

表 32 Kultsjön に対し試算された $PD(I)$ とその評価

Table 32 $PD(I)$'s used in trials for the Kultsjön basin and their criteria

	PD(I)						CR
1)	0.55	0.75	0.95	1.15	1.35	1.55	0.3228
2)	0.63	0.78	0.93	1.08	1.23	1.38	0.3221
3)	0.47	0.72	0.97	1.22	1.47	1.72	0.3217
4)	0.56	0.71	0.91	1.16	1.46	1.81	0.3181
5)	0.61	0.70	0.87	1.12	1.45	1.86	0.3175
6)	0.46	0.76	1.01	1.21	1.36	1.46	0.3263
7)	0.64	0.69	0.84	1.09	1.44	1.89	0.3164
8)	0.65	0.65	0.80	1.10	1.55	2.15	<u>0.3144</u>
9)	0.72	0.72	0.82	1.02	1.32	1.72	0.3158
10)	0.59	0.70	0.88	1.13	1.45	1.84	0.3165

12) これまでは入力降水量として、K, R, M 3 地点の降水量の $1:1:1/2$ の荷重平均を用いて来た。ここで $1:1:1/2$ を中心にしてウェイトを動かしてみて、ウェイト $8:8:7$ のとき、 $CR=0.310$ となった。

13) $8:8:7$ よりも、簡単なウェイト $1:1:1$ を用いることにし、K, R, M 各地点の降

水量をそれぞれ流量に変換し、それを1:1:1のウェイトで合成することにした。それが試算 No. 29 で $CR=0.311$ であった。

14) 試算 No. 16 以来、積雪期と融雪期で、異なるウェイトで最高、最低気温の平均を作っていた。これはいかにも便宜的である。融雪期に合わせるために、最高、最低のウェイトを(0.3, 0.7)にしたのであるが、そのままでは冬期に合わなくなる。冬期の融雪を小さくするためには、冬期の SMELT を小さくすればよい。それは W3 の SMELT に対応する。そこで表3の SMELT を用いて試算 No. 30 が行なわれ、 $CR=0.299$ が得られた。ついで、10年間の計算結果を眺めて初期値が定められ、評価は $CR=0.302$ と少し悪くなった。これが最終モデルである。

参 考 文 献

- 1) Sugawara, M., Ozaki, E., Watanabe, I. and Katsuyama, Y. (1974): Tank model and its application to Bird Creek, Wollombi Brook, Bikin River, Kitsu River, Sanaga River and Nam Mune. Research Notes of the National Research Center for Disaster Prevention, No. 11.
- 2) 菅原正巳・尾崎睿子・渡辺一郎・勝山ヨシ子 (1976) : チャオ・ピヤ河およびその支流上の諸地点における日流量をタンク・モデルにより算出する方法について (英文), 国立防災科学技術センター研究速報, No. 24.
- 3) 菅原正巳・尾崎睿子・渡辺一郎・勝山ヨシ子 (1977) : タンク・モデルの構造を自動的に定める計算機プログラムの開発 (第1報), 国立防災科学技術センター研究報告, No. 17, 43—89.
- 4) 菅原正巳・渡辺一郎・尾崎睿子・勝山ヨシ子 (1978) : タンク・モデルの構造を自動的に定める計算機プログラムの開発 (第2報), 国立防災科学技術センター研究報告, No. 20, 157—216.
- 5) 菅原正巳・渡辺一郎・尾崎睿子・勝山ヨシ子 (1980) : タンク・モデルの構造を自動的に定める計算機プログラムの開発 (第3報) —洪水解析用の自動化プログラムの開発—, 国立防災科学技術センター研究報告, No. 24, 159—181.
- 6) 菅原正巳・渡辺一郎・尾崎睿子・勝山ヨシ子 (1982—1) : タンク・モデルの構造を自動的に定める計算機プログラムの開発 (第4報) —流出孔の位置, 土壤水分構造, 農業用水のパラメータを定める半自動的プログラムの開発—, 国立防災科学技術センター研究報告, No. 27, 229—245.
- 7) 菅原正巳・渡辺一郎・尾崎睿子・勝山ヨシ子 (1982—2) : タンク・モデルに付加された土壤水分構造の性質, 国立防災科学技術センター研究報告, No. 27, 193—206.
- 8) World Meteorological Organization (1982) : WMO project for the intercomparison of conceptual models of snowmelt runoff. Proceedings of the Exeter Symposium, July 1982, IAHS Publication, No. 138.

(1982年11月9日 原稿受理)