

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5報)

—— 積雪流域において、降水量に掛ける補正係数を  
自動的に探し求める計算機プログラムの開発 ——

菅原正巳\*・尾崎睿子\*\*

国立防災科学技術センター

**Method of Automatic Calibration of the Tank Model (Fifth Report)**  
—— **Automatic or Semi-automatic Procedures to Calibrate the Multiplication  
Factor of the Precipitation in Snowy Basins** ——

By

**M.Sugawara and E.Ozaki**

*National Research Center for Disaster Prevention, Japan*

**Abstract**

Automatic calibration programs were developed for basins of different two types, one is the Turtle River in Ontario, Canada, and another is the Kitakami River in Japan.

In the former case, the period from December to March is the snow depositing season in which snowmelt does not occur and April is the snow melting period. The remaining period is the non-snowy season and, though there are some snowfalls in November, they are negligible. Under the Assumption, that mean areal precipitation of the basin is given as

$$CP(M, K) \times P(K),$$

the parameter  $CP(M, K)$  is determined by successive adjustment. In the above formula,  $M$  is the month index and  $K$  is the index of the precipitation station. In non-snowy season,  $CP(M)$  is adjusted as follows :

$$RNS(M) = \frac{\sum_M (QE(J) + C \times E(J))}{\sum_M (Q(J) + C \times E(J))},$$

$$CP(M) = CP(M) / RNS(M),$$

---

\*元所長, \*\*第4研究部計測研究室

where  $QE(J)$  and  $Q(J)$  are the calculated and observed discharge of the day  $J$ ,  $E(J)$  is the evaporation of the day  $J$ ,  $\sum_M$  is the summation over the month  $M$  and  $C$  is a constant being 0.5 in this case.

In the snowy season, a common CPSS is assumed and it is adjusted as follows :

$$RSM = \frac{\sum_M (QE(J) + C \times E(J))}{\sum_M (Q(J) + C \times E(J))},$$

$$CPSS = CPSS / RSM,$$

where  $\sum_M$  is the summation over the snowmelt season, i.e. April in this case.

There is a special condition in the Turtle basin, that the time constant of the top tank is extraordinary long, i.e. about a month. Therefore, the effect of the input to the top tank in some month appears in the same month about half and in the next month about half. Considering this fact, the above adjusting formulae are modified as follows:

$$CP(M) = CP(M) / \sqrt{RNS(M) \times RNS(M+1)} \quad (\text{for } M=5, 6, \dots, 10)$$

$$CP(11) = CP(11) / RNS(11)$$

$$CPSS = CPSS / \sqrt{RSM \times RNS(5)}$$

In the snow depositing season, infiltration coefficients  $A_0$  and  $B_0$  of the first and the second tank of the tank model are adjusted as follows:

$$A_0 = A_0 / \sqrt{RSD}, \quad B_0 = B_0 / RSD,$$

$$RSD = \frac{\sum_{SD} QE(J)}{\sum_{SD} Q(J)},$$

where  $\sum_{SD}$  is the summation over the snow depositing period.

The adjusting procedure is stopped when the following conditions are satisfied:

$$\left| \frac{\sum_J QE(J)}{\sum_J Q(J)} - 1 \right| \leq 0.01$$

$$\left| \frac{\sum_M QE(J)}{\sum_M Q(J)} - 1 \right| \leq 0.10$$

(for each month  $M$  in non-snowy season)

$$\left| \frac{\sum_{SM} QE(J)}{\sum_{SM} Q(J)} - 1 \right| \leq 0.03$$

$$\left| \frac{\sum_{SD} QE(J)}{\sum_{SD} Q(J)} - 1 \right| \leq 0.03$$

where  $\sum_J$  is the summation over whole period, or the number of iteration reaches five.

The obtained values of  $CP$  are shown in Table 1 and these values could give better result than before. The assumption that the value of  $CP$  is constant during the snowy season can be allowed because total precipitation in the snowy season is not large.

The meteorological condition of the Kitakami basin is very different from that of the Turtle. Temperature in snowy season is not so low and snowmelt occurs frequently during snowy season and precipitation in snowy season is very heavy. In this case, the mean areal precipitation in the zone I and the month  $M$  is given by

$$(1 + CM(M) \times PD(I)) \times P.$$

Adjustment formulae of  $CM(M)$  and  $CMSS$  are given by

$$CM(M) = (RZP + CM(M)) / RNS(M) - RZP,$$

$$CMSS = (RZP + CMSS) / RSS - RZP,$$

where RNS(M) and RSS are same as before but the constant C is better to be set as C = 0.2, and  $RZP = 1 / \sum_1 ZA(l) \times PD(l)$ . The result obtained is shown in Fig.7 for the Waga River, a tributary of the Kitakami. In this method, CM is assumed to be constant during the snowy season, i.e. from December to May. However, it is expected that the above assumption seems to be rather unreasonable. Another method was performed to find different values of CM in winter and spring. The value of CM in winter, CMWI, is set to various values. Then, corresponding value of CM in spring, CMSP, is determined automatically from the water balance. Using such pairs of CMWI and CMSP, discharge is calculated and the evaluating criterion CR is derived. By the comparison of values of CR, the optimum pair of CMWI and CMSP is determined. The obtained results are shown in Table 2 and Fig.8. It shows that CM is nearly constant during the snowy season. However, there is still a question, that whether CM is really constant in spring or not, e.g. whether it is small in May or not.

Then, the trial was made to determine the value of CM for each month in the snowy season. In the Waga basin snowmelt begins in the beginning of April and ends in the middle of May. Under such a consideration, the following adjusting formulae were boldly introduced. In the first stage, the previous method was applied to determine CM(M) in the non-snowy season and a common CMSS in the snowy season. Then, starting from the obtained CMSS, the following adjustment formulae was applied for each month in winter:

$$CM(M) = CM(M) / (RS(M)/2 + RS(4)/3 + RS(5)/6) \quad (\text{for } M = 12, 1, 2)$$

For April and May,

$$CM(M) = CM(M) / RS(M)$$

and for March, CMSS is assumed.

In spite of the presupposed anxiety that this method must be unreliable and difficult to converge, it could give rather reasonable results as shown in Fig.10.

Methods described here seem to be not so reliable because the feedback procedure seems to be not strong against noises. However, in spite of its weak point, this method seems to be hopeful and useful in objective estimation of areal precipitation.

## 1. はじめに

流出解析は、降水量、蒸発散量を入力とし、出力である流量を入力から算出することを目的としている。積雪流域では、気温、積雪に関する情報、太陽放射、地温等を入力として用いることがあり、また上流にダムがあるときは、ダム放流量も入力の一部となることがあるが、とにかく入力として一番大事なのが降水量である。そしてこの降水量は何地点かにおける点観測値として与えられ、しかもほとんどすべての場合、観測点は流域内の平地に存在し、その多くは河沿いの地点である。もちろん山頂や尾根に自動雨量計が設置されることがあるが、これらは冬期の降雪期には撤去され、約半年は欠測である。困ったことに、降水量は平地に比べ、山地で大きいことが多い。したがって、平地の観測点で得られた実測降水量は偏った標本値である。流出解析の入力として用いるには、この標本値に何らかの補正係数を掛けなければならない。

流出モデルには種々のパラメータが含まれ、それへの入力降水量と蒸発散であるが、河川に流量が出て来るのは降水量が蒸発散よりも大きいときで、その大きい方に掛かる補正係数は、流出モデルにおいて、最も効果的なパラメータだといってよい。すなわち、降水量補正係数をどう定めるかが、算出された流量の適合のよさを大きく左右する。

しかもこの補正係数は大きな季節変化を伴う。これはわが国の積雪流域の解析ではじめて発見されたことで、冬期には大きな補正係数が必要であるが、夏期は山地と平地の雨にあまり大きな違いがない。補正係数に現れるこの大きな季節変化は、世界各地の河川についても発見され、アフリカのケニアのある地域では、8月だけ目立って補正係数が大きいという不思議な例もあった。もう一つの不思議なことは、ある時期に、補正係数を1より小さくする必要のある流域がいくつか発見されたことである。降水量は平地で観測されているから、流域全体として入力雨量を観測雨量より小さく見積もる必要があるというのは、その時期に雨が主として平地で降り、山地ではあまり降らないということを示している。そういう不思議な性質を持つ流域が日本でいくつか発見されたが、その後海外でもいくつか発見されている。

流出モデルの中で、もっとも効果的なパラメータであり、気象学的にも注目すべき季節変化を示すこの降水量補正係数を、自動的に探し求める計算機プログラムを開発することは、きわめて有意義であると思われる。約10年前、ナイル河上流域の諸河川の流出解析を行ったとき、この補正係数を定めることが、流出解析の主要部分であった。そこでこの自動化が何より大切と考えられ、幸いにしてそれに成功した(菅原他, 1978)。

しかし、この方法はそのままでは積雪流域に適用できない。積雪流域に対して有効な、降水量補正係数を探し求める自動化プログラムの開発は、長い間気に掛かっていたが、近頃カナダのタートル河(Turtle River)の流出解析を行いながら、自動化プログラムの開発の必要

性と可能性を感じ、その開発を試みて一応成功した。それに力を得て、北上川を対象河川として、日本の河川について自動化プログラムの開発を試みた。カナダと日本の河川では、気象条件に大きな相異があり、日本の方が難しかったが、これも一応の成功を見た。

カナダと日本とで、異なる自動化プログラムが必要であったことが示すように、今回開発された自動化プログラムはそれぞれの対象流域の特殊性に応じた方式で、その意味では万能の自動化プログラムではない。実はその意味からいえば、いままでに開発された自動化プログラムも、後になって性質の異なる流域に適用してみた経験からいえば、決して万能の自動化プログラムではなかった。しかし、それでも自動化プログラムは有効で効率的であった。

今回のプログラムも、今後適用例の増加に伴って、ある種の手直し、手加減は必要であろうと思われるが、この方式の考え方、およびプログラム全般のわく組みは、通用するであろう。

## 2. タートル河の場合

### 2.1 対象流域の自然条件, 資料その他

カナダのタートル河はオンタリオ州の西部、マニトバ州境に近い所にあり、スペリオール湖(the Lake Superior)とウーズ湖(the Lake of the Woods)のほぼ中間に位置する。流量はマインセンター(Mine Centre)に近い、Q05PP014流量観測点(流域面積4,870km<sup>2</sup>)で測られている。流域面積約5,000km<sup>2</sup>に対し、流域内の高度差は僅か120mにすぎない。きわめて平坦な流域である。

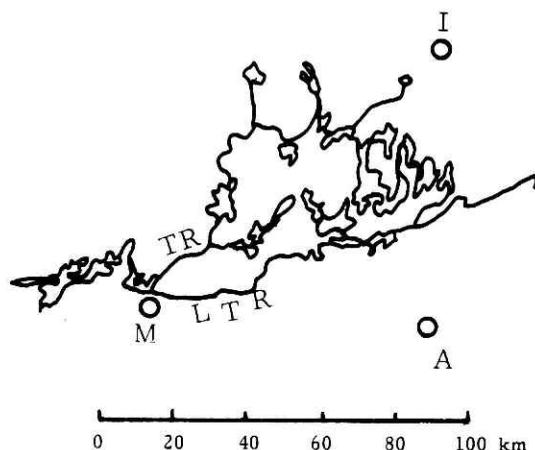


図1 タートル河流域地図

TR: タートル河, LTR: リトルタートル河 M: Mine Centre, A: Atikokan, I: Ignace

Fig. 1 Map of the Turtle River

(TR: Turtle River, LTR: Little Turtle River, M: Mine Centre, A: Atikokan, I: Ignace)

雨量、気温はアティコカン(Atikokan)、マインセンター、イグナス(Ignace)の3地点で与えられている。これら3地点は、図1に見るように、位置的には偏っていないが、いずれも流域外にある。図1は200万分の1の地図からうつしたものであるが、25万分の1の地図を眺めた印象では、流域内の到る所に湖沼が散在し、流域の1/3程度は水面であるように見えた。地図を眺めただけでは、流域の境界が判定できない。なお、この流域は、五大湖を含むセントローレンス水系に属さず、ハドソン湾に注ぐネルソン水系に属する。

## 2.2 得られたモデルおよび結果

図2はこの流域に対して得られたタンク・モデル、およびタンク・モデルの出力に対して

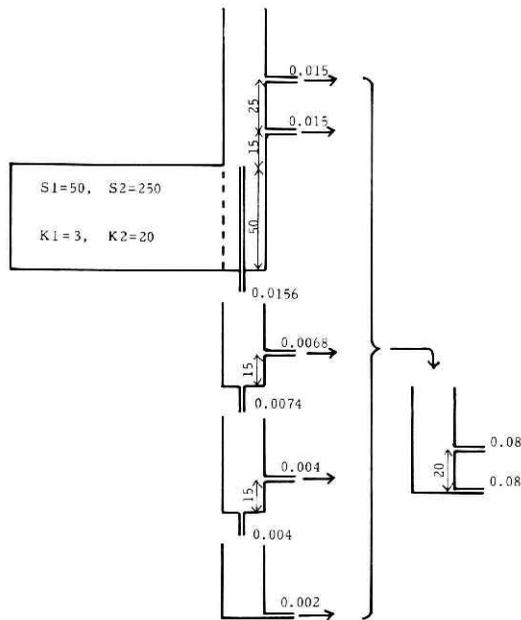


図2 タートル河流域に対する流出モデル

Fig. 2 Runoff Model for the Turtle River

変形を与える貯留型モデルを示す。このモデルの特徴は、約5,000km<sup>2</sup>という広さの流域に対して、この第1タンクからの流出がきわめてゆるやかなことである。これは流域がきわめて平坦であることの現れであろう。このゆるやかな流出が、湖などの貯留効果により、さらに平坦化される。その平坦化作用が、右側の貯留型モデルによって与えられる。図3、図4は得られた結果の一部を示す。

流出モデルは、タンク・モデル以外にもいくつかのパラメータを含んでいる。ここでの主目的は、雨に掛ける補正係数を自動的に探し求めるプログラムの開発にあるから、その他のことは簡単に述べる。

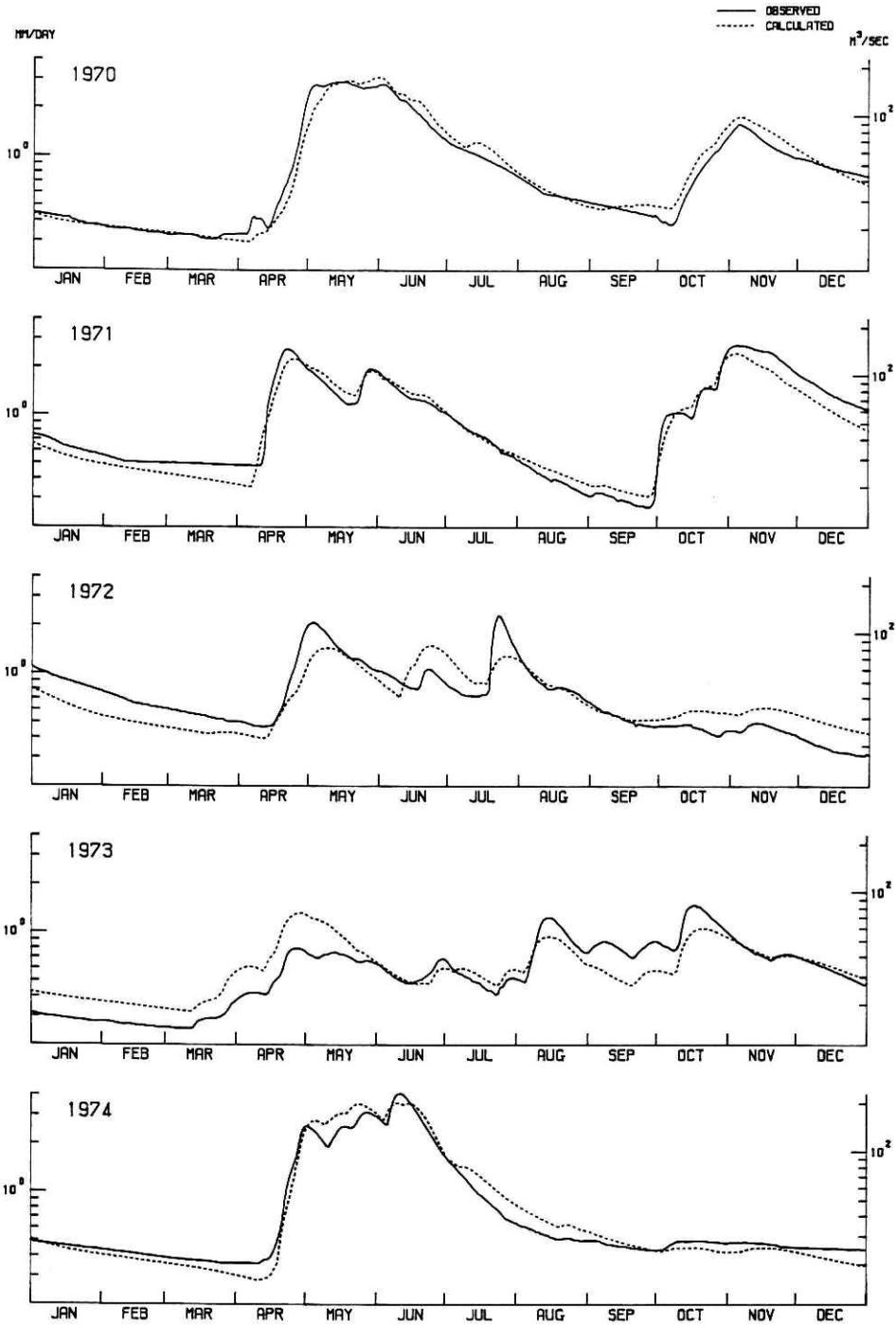


図3 タートル河日流量図

Fig. 3 Daily hydrograph of the Turtle River

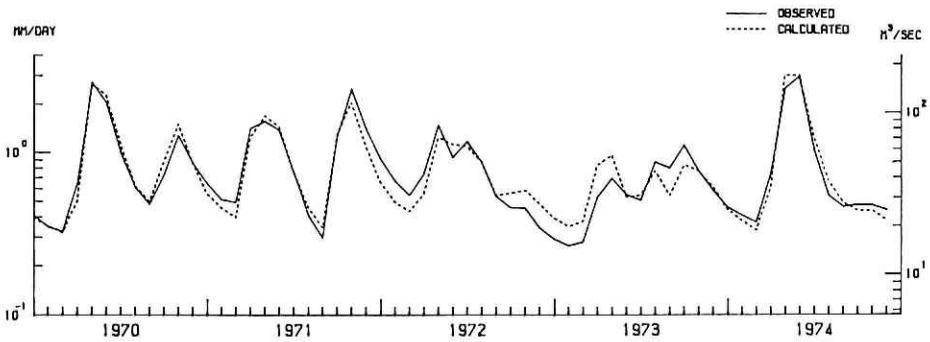


図4 タートル河月流量図

Fig. 4 Monthly hydrograph of the Turtle River

タンク・モデル以外の主要部分は雪のモデルである。雪のモデルでは、流域を高度別にいくつかの地帯に分割するのがふつうである。高度別に分割するのは、元来気温別に地帯分割するのが目的である。そうすれば、雪は寒い地帯から積もり始め、暖い地帯から融け始める。それを高度別分割で近似したのである。しかし、この流域内の高度差は僅かに120mで、高度別分割の効果はほとんど期待できない。しかも、融雪出水のハイドログラフを眺めると、融雪はある期間かかって起こるらしく、それは流域内にかかなりの寒暖の差があることを示している。しかも、流域内の温度分布に関する資料はまったくない。やむを得ず、流域を等面積の4地帯に分割することにした。地帯面積比率ZA(I)は0.25, 0.25, 0.25, 0.25で与えられる。

高度別に地帯分割したときは、高度による雨量増加を、各地帯ごとの雨量増加率PD(I)で与え、さらに季節変化を示す係数CM(M)をPD(I)に掛け、地帯I, 月Mの雨は、雨量観測値Pに対し

$$(1+CM(M) * PD(I)) * P$$

で与えられるとするのがふつうである。しかし、この流域はほとんど平坦だから、高度による雨量増加はほとんど考えられない。そこでPD(I)=0と置く。しかし、高度とは無関係に、流域内の雨量分布にはかなり地域変化があるらしく、流量から推定すると、流域雨量と3地点における地点雨量とはかなりの相異があり、しかもそこに季節変化があるらしい。これは流量からの推定で、それに関する実測資料はまったくない。致し方ないから、月Mにおける、各地帯雨量を

$$CP(M) * P$$

で与えられるとする。Pは雨量観測値である。係数CP(M)は観測地点Kごとに異なると考え、各地帯雨量は

$$CP(M, K) * P(K)$$

で与えられることになる。

雪のモデルにおける大切な定数は、各地帯の気温を与えるT0とTDで、地帯Iの気温は

$$T + T0 - (I - 1) * TD$$

で与えられる。ふつうの場合は、地帯の高度、気温観測点の高度からT0, TDのおよその値を想定し、ついで修正するのであるが、この流域のように平坦な場合は、その方法で想定したT0, TDはどちらも0に近いことになる。しかし、現実にはこの流域内には大きな温度差があるらしい。試算のくり返しにより定めた値は、T0=0.8, TD=1.55である。これは流域内の高度差が1,000m程度の場合に相当する。融雪の定数は、SMELT=4.00に固定した。

### 2.3 CP(M, K)を探し求める自動化プログラムの必要性、およびその考え方

雨量に対する補正係数CP(M, K)は、算出流量に直接的に影響を与える重要なパラメータである。ということは、主観的判断による試行錯誤により、比較的に求めやすいということである。つまり自動化プログラムなど無くてもよいということになる。しかし、雪のある場合は、とくに融雪期に難しい問題があつて、補正係数が求めにくい、主観的判断で求めにくいものが、自動化プログラムでうまく求められるかどうか大いに疑問であるが、ともかくこの問題を解いてみたいと考えていた。

今回のタートル流域についてみると、流域南側の2地点と、北側の1地点とで、雨の降り方にかかなりの違いがあるらしい。そういう場合、試行錯誤でCP(M, K)を求めるのは、大変に手間がかかる。その上、この流域において、秋の9月、10月には流域平均雨量が周辺の3地点の観測雨量より小さいことが、試算の結果からよみとれる。かかる性質を示す流域がいくつかあることは、すでに経験済みであるが、このように平坦な流域でそれが認められるのが不思議であつた。秋の雨が、山ではあまり降らず、おもに平地で降ることがあるというのが、私がかつて得た結論であつたが、このように平坦な流域では、以上の推定を何と表現すればよいであろうか。いかなる微気象的理由によるものか知らないが、これは注目すべきことであろう。

それと同時に、秋には流域平均雨量が、周辺地点における雨量観測値より小さいという不思議な現象を、主観的判断によらずに導くことが望ましい。それが自動化プログラムの開発を必要とする、もう一つの大きな理由であつた。

タートル河流域では、積雪は12月から始まる。もちろん11月にも降雪はあるが、まもなく

融けて、本格的な積雪が始まるのは12月からである。積雪は3月末まで続き、4月になると融雪が始まり、4月末には融けてしまう。季節の移り変りは、冬からいきなり初夏に移る感じである。12月から3月末までの間、融雪はまったく起こらない。

そこで1年を無雪期(5月-11月)、積雪期(12月-3月)、融雪期(4月)に分ける。無雪期では、ナイル川上流域河川の雨季と同様の手法で、各月ごとのCP(M)を定める。すなわち、ある月Mの算出流量QE(J)の和と、実測流量Q(J)の和とを比較し、QE(J)の方が大きければCP(M)を小さくし、またはその逆を行う。その際、流量に蒸発量E(J)にある係数Cを掛けたものを加えたもので、両者を比較する。すなわち

$$R = \sum_M (QE(J) + C * E(J)) / \sum_M (Q(J) + C * E(J))$$

でCP(M)を割ることによって修正を行う。ここに  $\sum_M$  は月Mに属する日Jについての和を表わす。

積雪期には表面流出がまったく起こらないから、基底流量(第3, 第4タンクからの流出)が現れる。それはナイル河上流域河川における乾季と同様である。そこで、この期間の算出、実測流量の比較により、タンク・モデルの第1, 第2タンクの浸透係数A0, B0を修正する。

問題は融雪期である。この短期間に、12月-4月の5か月分の降水量の影響が、ほぼすべて流量に出て来るのであるから、算出、実測流量の比較により、降雪期、融雪期を合わせた雪期全体のCPを修正しなければならない。そこで、雪期の中でCPにどのような季節的変化があるかを知ることは諦めて、雪期全般を通じて一様のCPを仮定することにした。このCPが融雪期の算出流量と実測流量の和の比較によって修正される。幸いにして、タートル流域では冬期の降水量は小さい。したがって、雪期のCPを一定であると仮定したことの影響はあまり大きくない。

## 2.4 降水量補正係数CPを自動的に探し求めるプログラムの細部

- 1) 1年を無雪期、積雪期、融雪期に分ける。
- 2) 無雪期に属する各月ごとに、算出流量と実測流量を比RNS(M)により比較し、これによりCP(M)を修正する。

$$RNS(M) = \sum_M (QE(J) + C * E(J)) / \sum_M (Q(J) + C * E(J))$$

$$CP(M) = CP(M) / RNS(M)$$

ここに、M, Jはそれぞれ、月、日のインデックス、 $\sum_M$  は月Mについての和、QE(J), Q(J)は算出、実測流量、E(J)は蒸発量で、Cはある定数、ここでは0.5を用いる。

- 3) 融雪期において、算出流量と実測流量を比RSMにより比較し、これにより雪期全般に

共通のCPSSを修正する.

$$RSM = \sum_{SM} (QE(J) + C * E(J)) / \sum_{SM} (Q(J) + C * E(J))$$

$$CPSS = CPSS / RSM$$

ここに  $\sum_{SM}$  は融雪期についての和を表す.

4) 積雪期において, 算出流量と, 実測流量を, 比RSDにより比較し, これによりタンク・モデルの第1, 第2タンクの浸透係数を修正する.

$$RSD = \sum_{SD} QE(J) / \sum_{SD} Q(J)$$

$$A0 = A0 / \sqrt{RSD}, \quad B0 = B0 / RSD$$

ここに  $\sum_{SD}$  は積雪期についての和である.

5) 得られた結果を判定するために, 次の評価基準を算出する.

$$CRQ = \sum_J QE(J) / \sum_J Q(J)$$

$$CRNS(M) = \sum_M QE(J) / \sum_M Q(J)$$

$$CRSD = \sum_{SD} QE(J) / \sum_{SD} Q(J)$$

$$CRSM = \sum_{SM} QE(J) / \sum_{SM} Q(J)$$

ここに  $\sum_J$  は対象全期間を通じての和である. またCRSDは前出のRSDと同じものである.

6) あるタンク・モデル(すでにかなりよくなっているものであることが望ましい)と, あるCP(これは全年を通じて1と置いたものでよい)から出発し, 上述の評価値, および修正のための比を算出する. 評価値が次の条件を満足すれば, 用いたCPが目的値である.

$$| CRQ - 1 | \leq \alpha$$

$$| CRNS(M) - 1 | \leq \beta$$

$$| CRSD - 1 | \leq \gamma$$

$$| CRSM - 1 | \leq \gamma$$

条件が満足されないときは、比RNS(M), RSM, RSDにより、CPおよびタンク・モデルを修正し、それを用いて流出計算を行い、評価値および修正のための比を算出する。評価値が条件を満足すれば計算は終了し、そうでなければ修正を行い、くり返し計算する。

7) 評価値が条件を満足しない場合でも、くり返しN回で計算を中止する。何かの誤り、または不適當な条件のもとで、いつまでも無意味なくり返しが続くことを避けるためであり、また多数回のくり返しが雑音の影響を増幅し、全般的な調和が崩れるのを避けるためである。

8) 終了条件として、はじめは $\alpha = 1\%$ 、 $\beta = 5\%$ 、 $\gamma = 2\%$ 、 $N = 20$ を考えていた。しかし、タートル流域に適用してみると、この条件ではなかなか収束しないので、 $\alpha = 1\%$ 、 $\beta = 6\%$ 、 $\gamma = 3\%$ 、 $N = 15$ としてみた。その後、さらに検討して、 $\alpha = 1\%$ 、 $\beta = 10\%$ 、 $\gamma = 3\%$ とし、くり返し回数を $N = 5$ と小さくすることにした。

## 2.5 タートル流域に対する適用

タートル河にこの方法を適用するに当たって、この流域の特殊事情を考えなければならない。この流域の表面流出はきわめてゆるやかで、それにあてはめたタンク・モデルの第1タンクは、土壤水分構造を除くと、およそ図5 a)の形をしている。土壤水分構造を省略したのは、この流域では土壤水分はほとんど常に飽和している、実質的にその必要性がないからである。また、あまり大雨がないから、上の流出孔が働くことはあまりなく、ごく大まかにいって、第1タンクは図5 b)の線型モデルと似た作用をしている。この線型モデルは時定数 $1/0.03 \approx 33$ (日)の不完全積分である。

以後、月を時間単位として考える。いま時定数 $T = 1/\lambda$ の不完全積分を考える。その応答関数(単位流量図)は $\lambda e^{-\lambda t}$ (図6 a))である。これへの入力として、時間区間(0, 1)で1、それ以外で0という $x(t)$ (図6 b))を考える。これは1か月間一様に降り続く雨を想定することではない。いつ降るか判らない雨を、確率的にかかる一様分布で表わすのである。それが図6 a)を応答関数とする不完全積分により変形されると、出力 $y(t)$ は

$$y(t) = \begin{cases} 1 - e^{-\lambda t} & 0 < t \leq 1 \\ (1 - e^{-\lambda}) e^{-\lambda(t-1)} & 1 < t \end{cases}$$

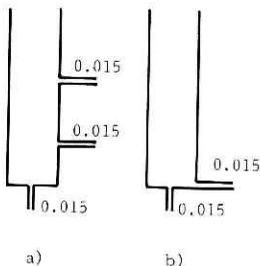


図5 タートル河流域流出モデルの不完全積分による近似

Fig. 5 Linear approximation by the incomplete integral for the runoff model of the Turtle River

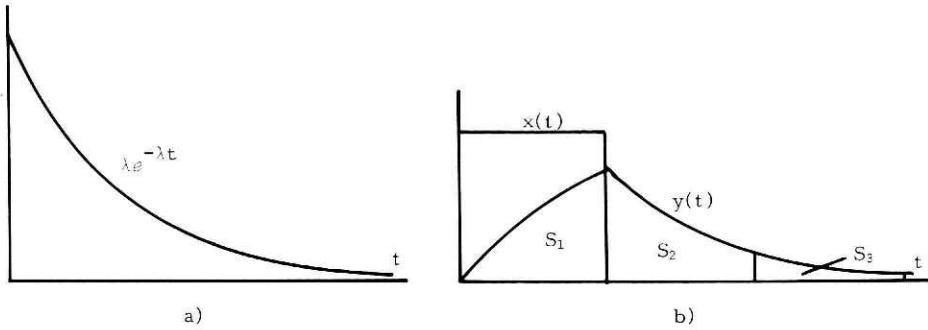


図6 時定数 $1/\lambda$ の不完全積分の応答関数と、入力が一様分布のときの出力  
 Fig. 6 Response function of the incomplete integral with the time constant  $1/\lambda$  and the output  $y(t)$  when the input  $x(t)$  is the uniform distribution

で与えられる(図6b)).

この場合、1月ごとに流出する量、すなわち時間区間(0, 1), (1, 2), (2, 3), ……に流出する量を、 $S_1, S_2, S_3, \dots$ とすれば、

$$S_1 = 1 - (1 - e^{-\lambda}) / \lambda$$

$$S_{2+k} = e^{-k\lambda} (1 - e^{-\lambda})^2 / \lambda \quad (k=0, 1, 2, \dots)$$

タートル流域の場合、時定数がほぼ1月であるから、 $\lambda=1$ と置いて

$$S_1 = 1 - (1 - e^{-1}) = e^{-1} = 0.368$$

$$S_2 = (1 - e^{-1})^2 = 0.400$$

$$S_3 = e^{-1} S_2 = 0.147$$

$$S_4 = e^{-1} S_3 = 0.054.$$

ごく大まかな近似として、今月降った雨は、約半分今月中に、残りの半分が来月中に流出するとみてよい。ある月の雨は、その月と次の月の流量にそれぞれ同程度の影響を及ぼすから、ある月のCP(M)を修正するには、その月のRNS(M)と、次の月のRNS(M+1)とで、半分ずつ修正すればよからうと考え、先に述べた修正式を変更し、

$$CP(M) = CP(M) / \sqrt{RNS(M) * RNS(M+1)}$$

とする。ただし、無雪期の11月に対しては、翌月に対するRNS(M)がないから

$$CP(11) = CP(11) / RNS(11)$$

とする。また融雪期4月の影響は約半分が5月に出るから、

$$CPSS = CPSS / \sqrt{RSM * RNS(5)}$$

により修正する。

## 2.6 得られた結果

タートル流域においては、南側の2地点と、北側の1地点とが異なっているようにみえたので、3地点の降水量、気温を別々に入力して、各地点ごとのCPを求めることにした。

CRQに対して1%、無雪期のCRNS(M)に対して5%、積雪期、融雪期のCRSD、CRSMに対して2%の許容誤差を収束条件として行った計算は、アティコカンでは9回で収束し、マインセンターでは収束せず20回のくり返しで中止、イグナスでは15回で収束という結果になった。

CPが修正されて行く経過を眺めると、いたずらに修正をくり返すと、雑音の影響を受け、かえって有害であるように思われた。そこで収束条件をゆるやかに改め、CRQは1%、無雪期の各月についてはCRNS(M)は6%、雪期についてはCRSD、CRSMともに3%を許容誤差とし、くり返しは15回以内としてみた。これによると、アティコカンで7回、マインセンターで10回、イグナスで12回で収束した。

一応はこの結果で満足したが、後になって、さらに検討しなおすと、得られたCPの値に不自然な所がある。修正のくり返しが多いと、雑音の影響で不自然な値が出て来るらしい。そこで、さらに収束条件をゆるめることにした。CRQは1%、CRNS(M)は10%、CRSD、CRSMはそれぞれ3%を許容誤差とし、くり返し回数は5回以内とした。この条件のもとで、アティコカンについてはくり返し4回で収束、マインセンター、イグナスでは収束条件を満足することなく、5回のくり返しで中止になった。その中止の際、マインセンターではCRQに1.6%、8月のCRNS(M)に17%の誤差があり、イグナスではCRSDに6.5%の誤差があった。実は、8回の修正をくり返せば、どちらの地点でも収束条件は満足されるのであるが、評価値が多少悪くても、あまり修正をくり返さない方がよいように思われる。

表1は上記の最後の条件、くり返し5回の計算で得られたCPの値を示す。

表1の一番下の欄には、前に主観的判断で求めたCPの値が示してある。これは3地点共通に適用したもので、およその見当として自動化プログラムで得た値と似ている。表1の結果を眺めると、7月から11月の期間は3地点ともおよそ似たCPの値を示している。秋(9月-11月)に、流域平均雨量が、周辺の3地点より小さいことは確実らしい。5月、6月にマインセ

表1 得られた降水量補正係数 CP

Table 1 Values of CP obtained

	雪 期	無 雪 期						
		5月	6月	7月	8月	9月	10月	11月
Atikokan	1.050	1.163	1.240	1.122	1.048	0.901	0.745	0.698
Mine Centre	0.898	1.434	1.434	1.089	1.053	0.874	0.798	0.938
Ignace	1.273	1.108	1.187	1.173	1.025	0.813	0.818	0.951
前に定めた値	1.05	1.05	1.4	1.4	0.8	0.8	0.8	0.8

ンターで、雪期12月—4月にイグナスで、CPが大きな値を示すのが特徴的であるが、イグナスで冬期CPが大きいのは、あるいはイグナスの雨量計の雪の補促が悪いからかもしれない。

このようにして得られたCPの信頼性の問題であるが、このCPを用いて流出計算を行い、得られた算出流量に対する評価CRがよくなることが、信頼性を示すものと考えより致し方ない。タートル河の流出解析では、種々の細部修正による改善が行われたが、CPを求める自動化プログラムを適用した段階で、評価値はCR=0.3642から0.3456へと、約5%減少した。この時の自動化プログラムは、ここで述べた前段階のもので、用いたCPの値は表1のものとは少し異なっている。その前は、表1の下の欄のCPを用いていたので、すでに季節変化を伴うCPは導入されていた。評価値CRが0.35程度であるのは、結果がかなりよくなっているときで、そこでCRが5%減ったというのは、かなりの効果があったものと考えてよい。

### 3. 北上川の場合

#### 3.1 対象流域

日本の積雪流域に対して降水量補正係数を自動的に探し求めるプログラムを開発したいと考え、対象流域として北上川水系の和賀川と猿ヶ石川を選んだ。ともに、かつて自動化プログラムを開発したとき(菅原他, 1977, 1978, 1982)、対象としたものである。和賀川は流量観測所は湯田(流域面積583km<sup>2</sup>)、降水量と気温は湯田、沢内、若畑で与えられている。流量観測はダム地点で行われているから、流量測定精度はよい。資料が与えられているのは、1966年から1970年までの5年間である。猿ヶ石川の流量観測所は田瀬(流域面積740km<sup>2</sup>)、降水量と気温とは田瀬、遠野、付馬牛で与えられている。流量観測はダム地点で行われ、資料の期間は和賀川と同じである。

#### 3.2 プログラム作成の考え方(1)

##### 1) CM(M)に対する修正式

日本の流域を考えると、タートル流域と異なるのは、降水量補正係数、およびそれに掛

かる季節変化係数の型である。これはタートル流域がむしろ特殊な場合で、積雪流域であるにかかわらず、流域雨量を $CP(M) * P$ の形で与えたが、一般の積雪流域では、地帯 I, 月Mの雨量を

$$(1 + CM(M) * PD(I)) * P$$

の形で与える。この $CM(M)$ を自動的に求めるプログラムの開発が目的である。

地帯 I の降水量が上式で与えられるとき、これに地帯面積 $ZA(I)$ を掛けて、Iについて加えれば、流域降水量が得られる。

$$\begin{aligned} \sum_I ZA(I) * (1 + CM(M) * PD(I)) * P \\ = (1 + (\sum_I ZA(I) * PD(I)) * CM(M)) * P \\ = (1 + ZAPD * CM(M)) * PD \end{aligned}$$

ただし、ここで $ZAPD = \sum_I ZA(I) * PD(I)$ 。つまりタートル流域での $CP(M)$ の代りに、 $1 + ZAPD * CM(M)$ が現れる。

したがって、 $CP(M)$ に対する修正式

$$CP(M) = CP(M) / RNS(M)$$

の代りに

$$(1 + ZAPD * \overline{CM(M)}) = (1 + ZAPD * CM(M)) / RNS(M)$$

とすればよい。ここに $\overline{CM(M)}$ は、修正された $CM(M)$ である。この式を $ZAPD$ で割り、 $RZP = 1 / ZAPD$ と置けば、

$$RZP + \overline{CM(M)} = (RZP + CM(M)) / RNS(M)$$

したがって、

$$CM(M) = (RZP + CM(M)) / RNS(M) - RZP$$

が、FORTRAN式に書いた $CM(M)$ に対する修正式である。これは無雪期の月Mに対する式であるが、雪期についても同様である。

## 2) 第1段階(雪期, 無雪期への分割)

以上の $CP(M)$ から $CM(M)$ への変形は、形式的なことで難しくないが、北上川がタートル

河よりも難しいのは、冬の間でも暖い日は部分的に降雨があり、融雪があつて河川が増水することで、積雪期と融雪期とに分割できないのである。

そこでまず、雪期と無雪期への分割から始める。和賀川流域では、積雪は12月に始まり、5月半ばで終る。11月末に積雪が生ずることもあるが、無視し得るほどであるし、融雪出水が終る時期も年によっていくらか変化するが、およそ5月15日である。はじめは5月を15日で2分してみたが、後には簡単のため12月から5月までを雪期、6月から11月までを無雪期とした。

無雪期に対しては、月ごとのCM(M)を、雪期に対しては共通のCMSSを、逐次修正により探し求める。そのため算出流量と実測流量とを次式により比較し、この比を用いて、CM(M)、CMSSを修正する。

$$RNS(M) = \sum_M (QE(J) + C * E(J)) / \sum_M (Q(J) + C * E(J))$$

$$RSS = \sum_{SS} (QE(J) + C * E(J)) / \sum_{SS} (Q(J) + C * E(J))$$

ここに  $\sum_M$  は無雪期の月Mについての和、 $\sum_{SS}$  は雪期についての和である。修正式は次式で与えられる。

$$CM(M) = (RZP + CM(M)) / RNS(M) - RZP$$

$$CMSS = (RZP + CMSS) / RSS - RZP.$$

3地点の平均雨量、平均気温を入力して計算すると、この方式はきわめて速かに収束し、得られたCMの値は図7に示すように、もっともらしいものであった。秋の雨が主として平地で降り、山地ではあまり降らないという特殊な流域の存在に気づいたのがこの和賀川の解析のときであつて、この自動化プログラムから得られた結果では、図7に示す通り、9月、10月にCMが負の値を示している。

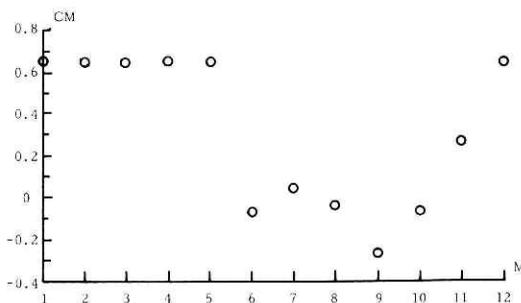


図7 和賀川に対して求められたCM (雪期のCMを一定とした場合)

Fig. 7 CM obtained for the Waga River (CM is assumed to be constant in snowy season)

なお、この修正方式で、はじめ蒸発に掛ける係数を $C=0.5$ と置いた。しかし、それでは修正が控え目になるらしいので、 $C=0.2$ に改めてみた。この方がいくらか収束が速かである。 $C=0$ と置いても、収束する。ナイル河上流域河川では、 $C=0$ では発散したのである。 $C=0.2$ でも多分発散するであろう。日本では降水量が大きく、基底流量も大きく、蒸発の影響が小さいからであろう。

### 3) 第2段階(雪期の分割)

実はこれからが問題で、半年間の雪期を通じて一定のCMSSを仮定することに対する疑問である。タートル河と異なり、わが国の日本海側では冬の降水量が大きい。冬期、北西の季節風もたらす降雪期と、春になって、雪が融けるときとは、CMの値に変化があるだろうという期待があり、これを何とかして求めたいというのが、このプログラムを開発する主目的であった。

和賀川流域において、流域内の積雪は12月から始まり、2月末まで積雪量はほぼ単調に増え続ける。雨が降り、低地の雪が融けて流出することはあっても、流域全体でみれば、積雪量が増えているのがふつうである。3月に入ると、積雪量はほぼ平衡状態になる。年により、3月末まで積雪量が増加し続けることもあり、3月半ばから融雪が始まって流域全般の積雪量が減少することもあるが、およその見当で3月は平衡期である。4月になると融雪が始まり、5月15日頃雪は消える。実は、この積雪量の時間的変化は、計算結果を眺めて得たものである。雪のモデルには、地帯面積比率ZA(I)、降水量の高度増加係数PD(I)、その季節変化係数CM(I)、気温定数T0、TD、融雪定数SMELT等があり、これらのパラメータを動かせば計算結果は変わるわけであるが、積雪量の時間的変化を定める圧倒的要因は、自然から与えられる気温である。冬になると気温が下がり、春になると上がる。それが積雪量の変化の大勢を定め、モデルのパラメータを動かしても細部が変化するだけである。

以上のように考えて、雪期を増雪期、平衡期、融雪期に分割する。12月、1月、2月が増雪期、4月、5月が融雪期で、3月は年により、あるいは増雪期、融雪期、平衡期に振り分けるが、仮りに3月はすべて平衡期としてもよい。3月をとくに平衡期として増雪期と区別したのは、3月になると気圧配置も変わるから、それに伴いCMの値も変化するであろう、それを探し求めたいと期待したからである。

増雪期には、およその傾向として積雪量が増え続けるから、流出量が積雪から出て来る影響を考える必要はない。われわれのモデルは雪のモデルを含んでいるから、増雪期には降水量の一部を積雪量に変えて蓄積しておいてくれる。ある程度モデルの修正が進んだ時点で雪のパラメータにはある程度の適切な値が与えられていると考えれば、算出流量と実測流量が増雪期によく合わないのを合わせるには、CMを調節して、降水量を動かせばよい。これは無雪期の各月におけるCM(M)の修正と同様である。

この方式により、増雪期、および平衡期に対するCMの値、CMI、CMSが定められる。こ

のとき融雪期に対しては前に定めたCMSSをそのまま用いる。

#### 4) 第3段階(融雪期のCMの決定)

増雪期, 平衡期のCMが定まった上で, 融雪期のCMを求める。すでに12月—3月のCMが定まっているから(簡単のため3月を平衡期とする), 3月末の流域内積雪量は定まっている。それが融けて流出するものに加えて, 4月, 5月の降水量による流出がある。そこで算出, 実測流量を合わせるためには, 雪からの流出はすでに定まらうているから, 融雪期のCMの調節による以外方法がない。この原則のもとに, 融雪期のCMが探し求められる。

和賀川について, この計算を実行してみた結果は失敗であった。融雪期に対し, 非現実的に大きいCMの値が出て来たのである。水文諸現象, とくに降水量には大きな偶然的変動が伴っている。増雪期, 平衡期のCMを調節して, 実測, 算出流量を合わせると, 雑音の影響は算定された積雪量にしわよせされる。12月—3月の4か月間の雑音が積雪量にしわよせされ, それが4月, 5月の2か月間に融雪出水として出て来る。その上に, 4月, 5月の雑音も加わるのであるから, 出て来るCMの値が信頼できないものになるのは当然であろう。

前期(増雪期, 平衡期)のCMをまず定め, ついで後期(融雪期)のCMを定めるという方式が悪いのである。両者を公平にらみ, 雑音の影響を公平に分散する方式でCMを求めなければならない。

### 3.3 プログラム作成の考え方(2)

#### ——冬期と春期のCMを, しらみつぶし的に求めること——

雪期の前期と後期のCMを同時に定める方式として, しらみつぶし的な次の方式を思いついた。まず, 和賀川を例にして考える。第1段階は前と同じで, 雪期と無雪期とに分割し, 無雪期には月ごとのCM(M)を, 雪期には共通のCMSSを求める。第2段階で, 雪期を12月—2月の冬期と, 3月—5月の春期とに分割する。これはほぼ増雪期, 減雪期に相当するが, 今回の分割は気象条件によるものとする。冬期には一定のCMWIであり, 春になるとCMSPに変化すると仮定し, そのCMWI, CMSPをしらみつぶし的に求めようとする。まずCMWIを, すでに求められたCMSSを中心として, たとえば15%幅で, 5段階に変化させる。つまりCMWIを $CMSS \times (0.7, 0.85, 1, 1.15, 1.3)$ と変化させる。

先にCMSSおよび無雪期のCM(M)を定めたとき, CRQは1%以内, CRSSは3%以内の誤差に押さえてある。つまり, 水収支はよく合っているのだから, CMWIを動かせば, それに応ずるCMSPの方は水収支の方から定まる。

いま冬期のCMWIを, CMSSから比率でDWだけ変化させて $CMSS * (1+DW)$ にすれば, 日J, 地帯Iの降水量は

$$(1+CMSS * (1+DW) * PD(I)) * P(J)$$

で与えられる。これに地帯面積比率ZA(I)を掛けてIについて加え、さらに冬期に属するJについて加えれば、

$$\sum_w \sum_I ZA(I) * (1+CMSS * (1+DW) * PD(I)) * P(J)$$

$$= \sum_w (1+ZAPD * CMSS * (1+DW)) * P(J).$$

ここにZAPD =  $\sum_I ZA * PD(I)$ ,  $\sum_w$  は冬期のJについての和である。

したがって、CMWIをCMSSから比率でDWだけ変化させたことによる冬期総雨量の変化は

$$ZAPD * CMSS * DW * \sum_w P(J)$$

で与えられる。一方、春期のCMSPをCMSSから比率でDSだけ変化させたときの、春期総雨量の変化は、同様にして

$$ZAPD * CMSS * DS * \sum_s P(J)$$

で与えられる。雪期の総降水量を不変に保つとすれば、上の両式の和を0と置くことにより

$$DW * \sum_w P(J) + DS * \sum_s P(J) = 0.$$

したがって

$$DS = -(\sum_w P(J) / \sum_s P(J)) * DW.$$

この条件を満足させながら、冬期、春期のCMWI, CMSPを動かし、一方無雪期については第1段階で得られたCM(M)を用い、それぞれのCMを用いて流出計算を行い、得られた流量について評価値CRを算出する。CMSSに対し15%の幅で変化させた5種類のCMWIの値、それに応ずるCMSPの値、およびそれを用いて算出した流量に対する評価値の値を示したのが表2である。CRの値の変化の仕方から考えると、3番目と4番目の中間、CMWI=0.684、

表2 試算したCMWI, CMSPの組及び得られた評価値(和賀川)

Table 2 Paires of values of CMWI and CMSP used for trials and the criterion values obtained

	1	2	3	4	5
CMWI	0.521	0.586	0.651	0.716	0.781
CMSP	0.830	0.741	0.651	0.561	0.472
CR	0.3859	0.3781	0.3741	0.3747	0.3770

CMSP=0.606のあたりが一番よいらしい。それを用いて流出計算を行うと、CR=0.3741が得られた。CR自身が雑音を含んでいるから、期待通りさらに小さくなるとは限らないことも起る。

このようにし得られたCMの値を図8に示す。前に得られた図7の値と、実質的にはほとんど変わらない。

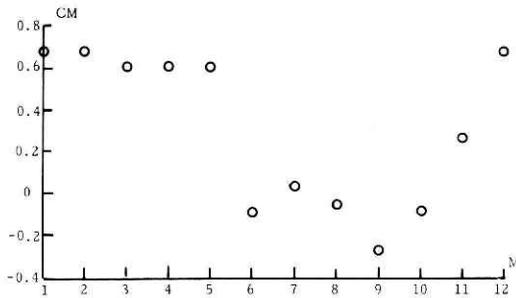


図8 和賀川に対して求められたCM  
(冬期, 春期のCMをそれぞれ一定とした場合)

Fig. 8 CM obtained for the Waga River  
(CM is assumed to be constant in winter and spring, respectively)

和賀川での一応の成功に力を得て、この方式を猿ヶ石川に適用してみると、思わしい結果が出て来ない。3地点平均の降水量と気温とを入力として、この方式でCMを求め、そのCMを用いて流出計算を行い、評価値を求めると、それはずっと以前に主観的判断から定めたCMの値、1月、2月に1、12月、3月に0.5、その他の月は0とした場合より、明らかに悪いのである。

算出、実測流量を比較し、それによってCMを修正して行く方式が雑音に対して弱いことは、修正の経過を眺めるとよく判るのである。猿ヶ石川の場合は雑音の影響で信頼性の劣るCMの値が得られたのであろうと考えた。雑音の影響を受けやすいのは、たとえば無雪期の月ごとのCM(M)を求める場合である。月ごとに考えるのでは、それに含まれる日流量資料の数が小さく、したがって雑音の影響が大きい。雑音の影響を小さくする方向で、次の方式を考えたい。

### 3.4 プログラム作成の考え方(3) —— なるべく長い期間についてCMを定めること ——

1) まず雪期と無雪期にわけて、それぞれに対してCMを求める。

計算の仕方は前と同じで、無雪期で月ごとのCM(M)を求める代りに、無雪期に共通のCMNSを求める。求められたCMSS, CMNSを用いて流出計算を行い、評価値CRを算出する。

2) 第2段階で、無雪期を夏と秋に分割する。和賀川では6月～8月を夏、9月～11月を秋とし、猿ヶ石川では5月～8月を夏とする。第1段階で求めたCMSS, CMNSから出発し、夏に対してCMSUを、秋に対しCMAUを前と同じ方法で求める。求められたCMSU, CMAUとCMSSとを用いて流出計算を行い、評価値CRを算出する。

3) 第3段階では、すでに得られたCMSS, CMSU, CMAUから出発し、無雪期において月ごとのCM(M)を求め、次に雪期を冬と春に分割し、前と同じ方式でCMSSを中心に、CMWI, CMSPを動かす。それらのCMWI, CMSP, CM(M)を用いて流出計算を行い、評価値CRを算出する。ここは前の方式とまったく同じで、CMの出発値が異なるだけである。

今度の方式が前のものと異なるのは、第1段階で無雪期全般の、第2段階で夏と秋のCMを求めている点で、細部構造を無視する代わりに、雑音の影響を減らすことを目的としている。

4) 和賀川に適用した結果では、第1段階では雪期に0.664, 無雪期に-0.028のCMが得られた。冬と夏とで、大きな変化があることを示している。第2段階では、出発時の条件が収束条件を満足し、そのまま終了となった。つまり、夏と秋のCMが同じという結果になった。9月, 10月の負のCMと, 11月の正のCMとが消し合って、そういう結果になったのであろう。第3段階で、前とほぼ同じ結果が出て来た。第3段階は、第1, 第2段階より、よい結果を与えた。

猿ヶ石川に適用してみると、第1段階で、雪期には0.593, 無雪期には0.009のCMが得られ、冬と夏とのはっきりとした違いを示すのは、和賀川と同じである。第2段階で、夏に0.027, 秋に-0.079というCMの値が得られたが、算出された流量に対する評価値は、第1段階のものより少し悪くなった。その相異は誤差の範囲と認めるべきものであるが、これは夏秋に現れるCMの季節変化はむしろ雑音と見るべきだということである。第3段階で、無雪期には月ごとのCM(M)を定め、冬と春のCMを動かしてみても、評価値はほんの僅かよくなるだけで、第1段階のCRに比し、約0.25%の減少にすぎない。

つまり第1段階で得られた結果、12月~3月で $CM \approx 0.6$ , 4月~11月で $CM \approx 0$ というのが得られた結果と考えてよいが、これはずっと以前に主観的に定めた値、1月, 2月に $CM = 1.0$ , 12月, 3月に $CM = 0.5$ , 4月~11月に $CM = 0$ と比較すると、CRの点で明らかに悪いのである。

### 3.5 プログラム作成の考え方(4) —— 雪期も月ごとにCM(M)を探し求める方式 ——

どの方式も猿ヶ石川ではうまく行かない。しかし、和賀川の場合でも、CMは5月まで大きく、6月に突然小さくなる。それはCMWI, CMSPをそれぞれ一定と仮定しているからで、5月のCMをうまく定めることができれば、3月のCMが大きいく、5月の小さくて、CMの変化はいくらかなめらかなになるのかもしれない。猿ヶ石川について定めた今回の結果では、11月から12月になるとき突然大きくなり、4月まで大きくて、5月に突然小さくなる。かつて主観的に定めたCMでは、12月と3月は0.5と移り変りの値にしていた。そう定めた合理的な根拠はなかったのであるが、現在の問題は雪期にも月ごとのCMが求められないかということである。最初に述べた方式は、雪期の月ごとのCMを求めるものであったが、成功しなかった。そこで、次の方式を思い切って実行することにした。この方式は、最初に試みて失敗

した方式より以前に思いついていたが、信頼性があると思えず、実行を控えていたものである。

まず和賀川について説明する。12月に始まる積雪は、12月、1月、2月と単調に進行し、3月はほぼ平衡状態にあり、4月はじめから減少し、5月15日にほぼ消滅する。そこで、12月、1月、2月と蓄積された雪の2/3が4月に、1/3が5月に融けると考える。この考えのもとに、雪期の月ごとのCM(M)の修正式を作る。

第1段階では雪期と無雪期とに分割し、無雪期については月ごとのCM(M)を、雪期については共通のCMSSを求める。ここまでは従前通りである。このCMSSから出発する。

まず3月については $CM(3) = CMSS$ と固定する。3月は不安定だから触れない。3月を除く雪期の各月につき、

$$RS(M) = \sum_M (QE(J) + 0.2 * E(J)) / \sum_M (Q(J) + 0.2 * E(J))$$

を算出し、これにより雪期各月のCM(M)を修正する。

12月、1月、2月の増雪期においては、その月、および減雪期4月、5月の流出の両方を考えてCMを修正する。たとえば、当月の算出流量が不足すれば、当月のCMを大きくしたい。しかし、減雪期のことも考えなければならない。4月の算出流量が過大ならば、CMを小さくしたいし、5月の算出流量が不足ならばCMを大きくしたい。これらをどのように組み合わせるかが問題であるが、影響の半分は当月のRS(M)で、あとの半分の2/3が4月の、1/3が5月のRS(M)で修正されると考える。

すなわち、 $M=12, 1, 2$ に対する修正式は次式で与えられる。

$$CM(M) = CM(M) / (RS(M) / 2 + RS(4) / 3 + RS(5) / 6)$$

4月、5月については、修正式は次式で与える。

$$CM(M) = CM(M) / RS(M)$$

この方式の収束や信頼性に対して自信が持てないので、いくらかでも発散を防ぐ意味で、さらに次の再修正をする。すなわち、雪期のCM(M)を次式で修正する。

$$CM(M) = CM(M) / RSS$$

ここに

$$RSS = \sum_{SS} (QE(J) + 0.2 * E(J)) / \sum_{SS} (Q(J) + 0.2 * E(J))$$

である。

以上の修正を5回くり返して終了ということにした。収束条件はあえてつけないことにし

た。5回の修正の結果をよく眺めて、よさそうなものを探し出す方がよいと考えた。

猿ヶ石川では、雪期は12月～4月で、12月、1月が増雪期、2月が平衡期、3月、4月が減雪期である。そこで12月、1月に蓄積された雪が、3月、4月に半分ずつ融けると考える。この考えのもとに、12月、1月に対するCM(M)の修正式を次式で与える。

$$CM(M) = CM(M) / (RS(M) / 2 + RS(3) / 4 + RS(4) / 4)$$

3月、4月に対しては

$$CM(M) = CM(M) / RS(M)$$

とし、2月に対しては、CMSSをそのまま用いる。RS(M)に対する定義式は和賀川の場合と同じであるし、この修正されたCM(M)をRSSでさらに修正するのも、和賀川と同じである。

あまり期待しないでこの方式を実行してみたところ、予想外によい結果が出て来た。雪期を含めて、月ごとのCM(M)をこの方式で求めた結果を図9に示す。月ごとに求めたCM(M)の値は雑音の影響を受けやすいから、ある程度の不規則性、でこぼこを示すのはやむを得ない。しかし、和賀川、猿ヶ石川ですでに得た結果、雪期のCMはほぼ一定であるというのと、図9の結果とは大体合っている。CMは雪期、無雪期の境界で急激に変化するらしい。

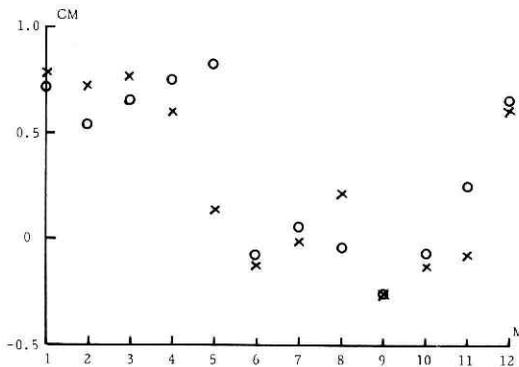


図9 和賀川、猿ヶ石川に対して、月ごとに求められたCM (○和賀川、×猿ヶ石川)  
 Fig. 9 Monthly values of CM obtained for the Waga River and the Sarugaishi River (○R. Waga, ×R. Sarugaishi)

ところが、猿ヶ石川については問題が残っている。猿ヶ石川について今回行ったいくつかの計算は、雪期にはCMの値が大きく、そしてほぼ一定、無雪期にはCM≒0でほぼ一定という結果を示した。この条件のもとで算出した流量に対する評価値は、ずっと前に仮定したもの、1月、2月にCM=1、12月、3月にCM=1/2、4月～11月にCM=0から算出した流量の評価値より、明らかに悪いのである。

これは、CMを探し求めるプログラムの入力として、3地点平均の降水量、気温を用いたのが悪かったのではないかと気がついた。3地点の気象条件が異なっていることが、大きな雑音源になっているのではあるまいか。

そこで、3地点、田瀬、遠野、付馬牛の降水量、気温をそれぞれ別々に入力とし、各地点

ごとに、月ごとのCM(M)を最後の方式で求めてみた。得られた月ごとのCM(M)を示したものが図10である。田瀬と遠野とは、ほぼ似たCM(M)を示すが、付馬牛は日立って異なった型

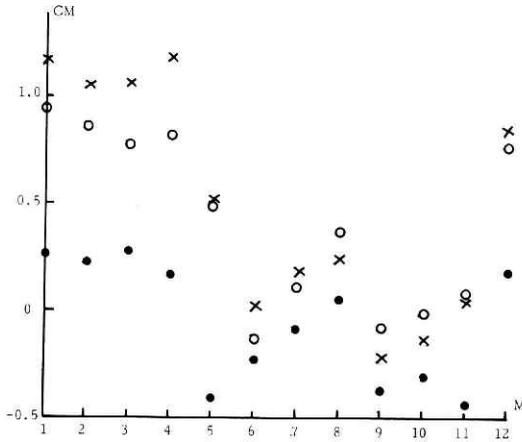


図10 猿ヶ石川の3地点に対して、月ごとに求められたCM(○田瀬, ×遠野, ●付馬牛)  
 Fig. 10 Monthly values of CM for three stations, respectively, in the Sarugaishi basin  
 (○Taze, ×Tohno, ●Tsukumoushi)

を示している。それは地図上に見る付馬牛の位置からもうなづかれる。付馬牛の雪期のCM(M)がかなり小さいことは、付馬牛の雪期の降水量が、かなり流域平均に近いことを示すものである。付馬牛が、田瀬、遠野と大きく異なったCM(M)の型を示すということは、CM(M)がある意味で、降水量観測点の降水量に関する季節特性を示すものであることを意味している。われわれに与えられる降水量実測値は、標本地点における観測値なのであるが、それがそれぞれ季節特性を持っているということである。

図10を眺め、月ごとの小さいでこぼこを除き、およその見当で、表3のCM(M)を定めた。このCM(M)を用いて算出した流量に対する評価値はCR=0.3439で、これは前に得た評価値CR=0.3420に比べ、僅かに約0.5%だけ大きい。この程度の差は誤差の範囲と認めてよからう。まだ問題は残っているけれども、CM(M)を求める自動化プログラムは、和賀川、猿ヶ石川に対して、ほぼ成功したと考えてよからう。

表3 猿ヶ石川の3地点に対し想定したCM(M)

Table 3 Assumed values of CM(M) for three rainfall stations in the Sarugaishi basin

	1月~4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月	11月	12月
田瀬, 遠野	1.0	0.5	0.0	0.1	0.3	-0.1	-0.1	0.0	0.8
付馬牛	0.2	-0.4	-0.25	-0.1	0.0	-0.3	-0.3	-0.3	0.2

#### 4. 残された問題

今回得られた自動化プログラムについて、多くの問題が残っている。一番重要なのが、得られたCMの値の信頼性の問題である。月ごとのCM(M)には、かなりの誤差を伴うらしいから、小さなでこぼこは消して、主観的にもっともらしいと思われる形のCM(M)を作り、それを用いるより致し方ないと思うが、冬が来たとき、また春が来たとき、CMの値は急激に変化するらしい。したがって、フーリエ展開的平滑化や、単なる移動平均は、かえって有害であるう。

今回の自動化で得られた結果をみると、和賀川において、12月から5月までCMが大きく、6月から急に小さくなり、5月にこのように大きなCMの値が得られることが、かなり気になっていたし、いまでも疑問に思っている。流域を地帯分割したとき、一番高い、または一番寒い地帯の面積や、PDを大きくしたり、または温度低下のパラメータTDを大きくとれば、高い所に雪が蓄積され、それが融雪期の終りになって融けて流出して来る。そのようなパラメータにして置けば、12月、1月、2月の降水のより多くの部分が5月になって流出するから、5月のCMを小さく置き、その代り12月、1月、2月のCMを大きく置くことで、5月の流量を合わせられるのではないか。つまり、ZA、PD、TDと、融雪期のCMとの間には相互関連があると思われる。そのことを考えて、ZA、PD、TDを動かす試算をいくつか試みたが、思わしい結果が得られなかった。もしも、組織的に、しらみつぶしの試算を行うとすれば、大変な手間になる。一方、ZAは地図の等高線から、およその値は定まるし、TDは流域の高度差から、およその値が定まる。PDを大きくすれば、それに応じてCMが小さくなるだけであって、これらパラメータを動かしても、あまり効果はないように思われた。積雪、融雪は、自然が与える気温によって、大勢が定まるからである。

ここで行った考察が示すように、CMは他のパラメータに関連して定まる。したがって、CMを探し求める自動化プログラムは、多くのパラメータの値がほぼ定まり、算出流量が実測とかなりよく合うようになった段階で適用すべきであろう。そのときには、月流量の推定値、実測値の比較により、CMの季節変化の型も、およそ判明しているであろう。その段階で、CMを求める自動化プログラムを適用し、主観的判断によりすでにおよその形が知られているCMの季節変化を確認するのが、このプログラムの主要目的である。

タートル河への適用はこの例であったし、北上川はずっと以前に行った解析のむし返しであった。北上川のように、いままで何回も試算の対象として利用されているものは、かえって不適當な点がある。かつて主観的に定めたいくつかのパラメータ値は、どのようにして定めたかの記憶が失われているし、それが適切な値であると、かえって自動化手法の適用の邪魔になったりする。

今後、新たに解析する河川に対して、この考え方のプログラムを適用しながら、次第によ

りよいものにして行きたいと考えている。また、解析例、適用例が増せば、CMの季節変化の型の例も増し、それについての知見も増すであろう。それが、この自動化プログラムの結果のチェックにも役立ち、そしてまた自動化プログラムの改善に役立つことを期待している。

#### 参 考 文 献

- 1) 菅原・尾崎・渡辺・勝山(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, No17, 41-86
- 2) 菅原・渡辺・尾崎・勝山(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, No20, 157-216
- 3) 菅原・渡辺・尾崎・勝山(1982): 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). 国立防災科学技術センター研究報告, No27, 229-245
- 4) Sugawara, M., Watanabe, I., Ozaki, E. and Katsuyama, Y. (1984): Tank model with snow component. Research Notes of the National Research Center for Disaster Prevention, No65 293.pp.

(1986年10月23日 原稿受理)