

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)

菅原正巳*・尾崎睿子**・渡辺一郎***・勝山ヨシ子**

国立防災科学技術センター

Method of Automatic Calibration of Tank Model (First Report)

By

M. Sugawara, E. Ozaki, I. Watanabe and Y. Katsuyama

*National Research Center for Disaster Prevention,
No. 4489-1, Kurihara, Sakura-mura, Niihari-gun, Ibaraki-ken, 300-32*

Abstract

Due to its nonlinear character, the tank model lies out of mathematical scheme and, therefore, there have been no mathematical or objective methods to determine its structure. The Only possible way is the method of trials and errors which is not so difficult for those who have some experiences. However, the technique of determining the structure of tank model is difficult in describing and teaching.

This time, effort was made to develop an automatic calibration program for tank model and a successful result was obtained in the first step. After starting from the definite model shown in Fig. 4, the automatic calibration goes on adjusting the parameters successively by the criteria obtained from the hydrograph given by the previous trial. This way of calibration is a sort of trial-and-error method carried out automatically. To define the criteria, the whole period is divided into subperiods which are classified into five groups from the composition of the output of the object tank model, i.e. the tank model of the previous trial. In the subperiods of first group, the output from the upper outlet of the top tank plays the main part, and the second group corresponds to the lower outlet of the top tank. The third, fourth and fifth groups correspond to the second, third and fourth tanks, respectively. In each group of the subperiods the output of the tank model is compared with the observed discharge in the following two points: the discharge amount and the decreasing ratio of the hydrograph. The coefficients at the outlets of each tank are adjusted by these two criteria of corresponding group of subperiods. This way of adjustment somewhat resembles displacement feedback and velocity feedback in automatic control. To avoid divergence, the definition of criteria and the way of feedback must be carefully adjusted and modified. Owing to the quantitative feedback the speed of convergence is very high and a good result can be obtained after 10-30 iterations. The models obtained by the automatic calibration give equally good hydrographs compared with those obtained by manual trial-and-error method.

The automatic calibration of the snow model was also developed and some important parameters are calibrated by computer.

* 前所長 ** 第4研究部計測研究室, *** 第4研究部

1. ま え が き

タンク・モデルが作られてから、およそ20年になる。その間、積雪・融雪の構造が加えられ、農業用水取水の影響が加えられ、乾燥・半乾燥地帯または半年間の乾期を持つ地域に適合させるための修飾が加えられて適用範囲は増大し、多くの河川について、かなりよい結果が得られるようになった。しかし、このモデルについて、一貫して一つの難問があった。モデルの構造を、言葉を変えて言えばパラメータの値をどのようにして定めるかという問題である。河川流出という現象はきわめて非線型の性質が強い。それを受けて、タンク・モデルは非線型構造になっている。不幸にして、既存の数学は非線型問題に対し、概して無力である。タンク・モデルの構造決定に対し、既存の数学はあまり役に立たないように見える。もっとも、数学を線型、非線型に分けるのはあまり合理的でない。非線型にはいろいろな種類があり、ある種の問題は非線型でもとけるし、数学的にとけなくても、数値的にとける場合もある。近年 WMO により、流出モデルの相互比較が行われ、他のモデルの概略を知る機会を得たが、それらをみると、他の多くのモデルは非線型ながらも、既存の数学や、計算法にのるように作られているものが多いようである。タンク・モデルはそうできていない。それを構成する個々のタンクは側面と底面とに出口を持っている。側面の流出孔からの出力は河川流出高の一部を形成するから、これに関する情報はあるが、底面からの浸透についてはほとんど情報がない。底面の出口からの出力の大部分は、変形を経て、下段タンクの側面の流出孔からの出力として流出高の一部を形成するのであるが、底面の出口からの出力と河川流量との間にはへだたりがありすぎる。出力の一部についての情報がほとんどないのだから、入出力解析ができないのである。これに対し、他の多くのモデルは何かの意味で入出力解析ができるような形に作られていることが多い。

これがタンク・モデルの弱点であると同時に、強みでもあると思われる。(次のたとえ話がある。街燈の下で何かを探している人に、何をしているかと聞くと、カギを落としたので探しているという。どこで落としたのかと聞くと、落としたのはあそこだが、あそこは暗いから、街燈の下を探していると答えたと言う。) 数学的にときやすいことは一つの望ましい条件であるが、カギの落ちている所を探すのが何より大切である。水文学、流出解析の対象はきわめて複雑で、どこにカギがあるかがはっきりしない。かかる複雑、多様な対象を細部から構成するのはきわめて困難で、あるいは徒労であろう。それは気体の性質を個々の分子の運動から構成しようとするのと似ているかも知れない。気体の性質は分子の統計的性質から定まるのである。流域に対する接近には、何らかの全般的考察が必要であると思われる。タンク・モデルは流域に対する全般的、マクロ的近似を目指している。したがって、個々のパラメータは、必ずしもミクロの水文学的性質を反映しない。このあたりがタンク・モデルが理解され難い一つの原因になっているのであろう。この接近のときに既存数学を利用しなかったこ

との利点は確かにあったと思われる。数学から離れた代りに、自由が得られた。

我々が数学を離れたのは、致し方なくしてしたことであって、それは非常な苦痛を伴ったが、捨ててみても案外困らなかったのは試行錯誤によるパラメータの決定が割合に容易だったからである。従来の経験によれば、約 10 回の試算により、かなりよい結果が得られる。もちろん、50 回、100 回、200 回と試算を繰り返したことはある。しかし、それは途中で考え方を変えたり、新しい要素を導入したり、資料の欠陥を発見して資料の作り直しをしたりということがあった場合である。一定の型のモデルで、パラメータの修正をするだけであれば、たいてい 10 回程度の試算で、ほぼよい結果が出て来る。試行錯誤はそれほど困難な技術ではない。しかし困ったことに、この技術を他人に教えること、あるいは指導書を書くことがむずかしい。それはある意味で当然である。言語による相互理解は、共通の経験の存在を前提とする。タンク・モデルによる試行錯誤の経験のない人に、その仕方を教えることはとうてい不可能ではあるまいか。一方、困ったことに、タンク・モデルの試行錯誤をした人に対しては、もはやあまり言うこともない。「側面の流出孔の係数ではなく、底面の浸透孔の係数を調節するのがコツです」と教えるのに対し、「なるほど、そうですね」と答えるようなことになる。

我々はタンク・モデルの構造決定を試行錯誤にまかせてよいと考えていた訳ではない、できれば客観的な方式を与えたいと考えていた。計算機による自動化も、過去に 2 回試みているが、いずれも断念した。そして、いくつかの理由から積極的に断念し、自動化よりも、計算機を用いて試行錯誤を行う方が、すなわちフィード・バックの一環の中に人間の総合的判断を加える方式の方がよいと考えていた。

しかし、近年 WMO による流出モデルの相互比較等により、タンク・モデルによい評価を与える人が増し、その適用が世界に広がる可能性が生じて来たのに対応し、タンク・モデルのプログラム・システムが自動化プログラムを持つことが望ましいと考えられて来た。また、他のモデルが持っている自動化プログラムの実態をみて、自動化プログラムと称するものが、完全な自動化でないことを知った。人間の判断による試行錯誤のいくらか助けになる程度のものでも自動化なのである。そういう気持ちで見直せば、タンク・モデルの自動化も可能であろう。ただし、自動化を目指す以上、システムの単なる装飾ではなく、真に有用なものを作りたいと考えた。人間の判断と併用することはかまわないが、実用に適するものを作りたいと考えた。どのようなものを、どのように作ればよいかをいろいろ考えた末、いざプログラムを作り始めてみると、我々のねらいは第一段階において、幸いにも、あっけないほど簡単に成功した。我々の自動化システムはまだ始めたばかりで、解くべき問題は山積しているが、とりあえずここに第1報として報告したい。

真に有用な自動化プログラムは、実用に供することによって試され、修正され、しだいに完成して行くものであろう。したがって、たとえ不十分なものでも、ここに公開することに

より、多くの方々によって使っていただけることが、このプログラムの将来のために有益であると信ずる。

2. 自動化の最初の試み

1962年我々は OKITAC-5090 を利用することができるようになった。コア・メモリ 1,000 語 (1 語=48 ビット)、1 演算当たり約 1 ms の演算速度の計算機であった。それまでクロスバー・メモリ 120 語、1 演算当たり約 1 秒のリレー式計算機 FACOM-128 を利用していた我々にとって、信じられないほどの速さであった。そこでこの計算機を利用すればタンク・モデルの構造決定を計算機により行うことが可能であろうと考えた。OKITAC-5090 によると、機械語でむだのない命令を書き、48 ビット 1 語に 4 個のデータをパッキングすることにより磁気テープとのやりとりを最小限にする等の工夫をしたにもかかわらず、数年間の記録についての流出計算に 20分~30 分程度の時間がかかったと記憶している (当時は雪のモデルを含む流出計算をしており、流域は 3~4 の部分流域に分割され、各部分流域は 4 地帯に分割されていたから、単なるタンク・モデルよりはかなり面倒になっていた)。したがって、計算機による試行錯誤の自動的繰り返しを試みることは事実上不可能であったし、そのことを考えもしなかった。鳥と飛行機とがまったく異なるとび方をするように、計算機には人間の考え方とは異なった道が適するであろうと考え、数学的な時系列解析の方法を用いることにした。雨量、流量の自己相関、相互相関を求め、そのフーリエ変換から応答関数を求めることにより、タンク・モデルの構造に接近できないかと考えたのである。この方式はうまく行かなかった。

この数学的方法が線型であるのに、流出現象の非線型性が強いために、この方式による接近が有効でなかったのが一つの理由であろう。もう一つには、流出現象が振動的現象でないために、フーリエ変換により周波数軸上で考えることが、本質的に有効でないかららしい。もちろんフーリエ変換は一種の直交変換で、座標変換をして考えてはならないということはないが、座標変換をしたときに、現象の本質が見易くなるようなものだけが有効なのである。この点からみて、流出現象を周波数軸で考えることは有効でないらしい。ついでのことながら、流出問題に対し、オート・コレログラム、クロス・コレログラムの利用もあまり有効ではないらしい。統計的に考えれば、コレログラムの利用が正統的方法であるが、振動的性質を持たない流出現象に関してコレログラムを作ると、それは単調に減少し、ある所まで小さくなると誤差 (ノイズ) の影響でゆれ動く。クロス・コレログラムのときは、ある遅れの所で最大値となり、以下単調に減少して、ある所からノイズの影響でゆれ動く。多くの場合、コレログラムはたちまち減少して、ノイズの部分に没入するから、コレログラムから得られる情報は小さい。コレログラムがたちまち減少する性質を表すため AR-MA モデルが利用され、近時流行しているが、もともとノイズに没入している部分が大きいから、コレログラ

ムから得られる情報が大きいとは考えられない。水文現象では、ときどき大きい雨量や流量が現れるのが特徴である。コレログラムは2次のモーメントであるから、大きなデータの値によって左右される。コレログラムはこれら少数の大きな値によって大勢が定まるから、たとえサンプル数が大きくても、実質的には少数例と同様のこととなるらしい。多くの時系列理論はガウスのであることを前提としている。ガウスのであれば、1次、2次のモーメントがすべての情報を含んでいるであろう。しかし、雨や流量の時系列はあまりにもガウスから遠い。これが非線型と並んで、大きな難点の根本原因ではあるまいか。最後に、コレログラムの利用には、当時もう一つの難点があった。OKITAC-5090の演算速度では、コレログラムの計算に時間がかかりすぎるのである。OKITAC-5090を用いる限り、試行錯誤がもっとも効率的であるということになった。

3. 自動化の2度目の試み

1966年から、我々はTOSBAC-3400を利用できるようになった。当時我々が用いたのはコア・メモリ16K語(1語24ビット)、演算速度は乗除算を除き1演算当たり約5 μ sであった。これによるとタンク・モデルの流出計算はたちまちできる。我々は計算結果のハイドログラフをラインプリンタでプロットさせたから、計算所要時間はほとんど印刷時間であると言ってよい。ラインプリンタの代りに、計算結果をDA変換し、ハイドログラフをペンレコーダで描かせてみると、ペンレコーダの追従能力が所要時間を定めることになった。

そこで計算機による自動繰り返しによりパラメータの値を求めることが可能であると思い、再び自動化を試みることにした。ある適当なパラメータの値から出発し、試算しては得られた結果の評価値を算出し、よい評価値の方へ一步一步パラメータを動かし、ついに最良のパラメータに到達しようとする方法である。評価としては、推定値と実測値との差の2乗の和を用いるより致し方あるまい。ただし、流量は高水、低水間のへだたりが大きく、しかも大きい流量には大きな誤差が伴うから、流量の対数について誤差を評価するのが適当であろうと考えた。それは相対誤差の平方和で評価するのとほぼ同じことである。 q_i 、 $\tilde{q}_i$ をそれぞれ実測、推定流量とすると、次の値によって推定流量の近似のよさを評価するものである。

$$\sum_i (\log \tilde{q}_i - \log q_i)^2, \text{ または } \sum_i \left(\frac{\tilde{q}_i - q_i}{q_i} \right)^2.$$

我々は丁度そのころ行っていた熊野川水系北山川の洪水データを用いて、この評価基準の効果を主観的に評価してみた。我々は試行錯誤によって一応最終モデルに到達していたのであるが、試行錯誤によって行ったパラメータ値の変更が、評価基準にどのように現れているかをまず確かめてみた。驚いたことに、ハイドログラフを目で比較した場合、結果はしだいに、ある場合には目に見えてよくなって行くのに、評価基準の方はほんのわずかしが減少しないのである。そのときに用いた北山川の流量は、池原貯水池の水位変化と放流量とから算

出されている。そして貯水池水面の振動の影響で、実測流量がゆれている部分がある。そして誤差評価の大部分はこのゆれた部分から発生している。その誤差に埋もれて、評価はほとんど役に立たないのである。この難点を除くためには、湖面振動によって流量が大きくゆれている部分にマスクを掛け、そこを評価から除けばよかろう。当時我々は計算機による自動化の問題をすこぶる厳格に考えていた。自動化という以上、マスクを掛ける必要があるならば、マスクの掛け方を計算機が定めなければなるまい。それは絶望的にむずかしい問題であると思われた。うまく合わない所に、片端からマスクを掛ければ、評価はよくなるにきまっているからである。そして、マスクの掛け方を人間が主観的にきめるならば、それは計算機による自動化に対する重大な反則だと、当時は考えたのである。一方、マスクを主観的に掛けるくらいならば、評価も主観的に行って、従来通り試行錯誤を行えばよいと考えた。人間がハイドログラフを目で見て比較するとき、わざわざマスクを意識しなくても、人間は自動的にマスクを掛けて判断しているのである。無意識的にマスクを掛けて判断しているその判断行為から、マスクだけを分離するのはかえって余分の手間である。このようにして我々は再びタンク・モデルの自動化を断念することになった。

考えてみると、マスクの問題だけでなく、自動化が絶望的であると思われる根拠はいくつもあった。たとえば図1のタンク・モデルはパラメータを14個持っている。雪の計算を伴う場合は、さらに数個のパラメータが加わる。農業用水の影響を考え、月ごとの蒸発散量もパラメータと考え、各雨量地点のウェイトもパラメータと考えるならば、パラメータの数は30をこえる。これらのパラメータをすべて動かして最適のパラメータを求めることを考える。各パラメータの効果は線型とは限らず、しかも相互に関連するものもあるから、ある2個のパラメータを片方ずつ大きくすると、どちらのときも結果が悪くなるのに、両方を同時に大きくすると結果がよくなることもあり得る。そう考えると、 n 個のパラメータをそれぞれ一定の幅で変化させるとして、 n 次元格子のある点に隣接する格子点 3^n-1 のすべてと比較しなければならない(i 番目のパラメータを動かす可能性は $-A_i, 0, +A_i$ の3通りで、そのすべての組合せ中、 $(0, 0, 0)$ を除いたものが隣接格子点である)。パラメータの数が30個であれば、 $3^{30}-1 \div 2.06 \times 10^{14}$ (約200兆)であって、1回の試算が1秒であっても、隣接格子点をすべて試算するのに約700万年かかる。一番よい隣接格子点に移ってからは、約半分の格子点の計算がすんでいるとしても、これを繰り返して最適のパラメータの値

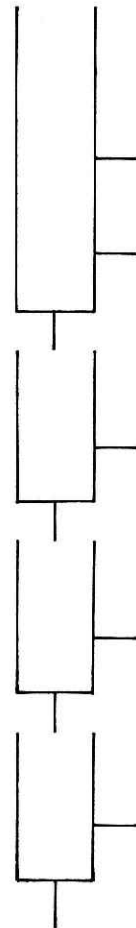


図1 タンク・モデル
 Fig. 1 Tank model

に達することは事実上不可能である。しかも、計算機の演算速度については、今後あまり進歩が期待できない。仮りに、各格子点の近傍で、評価関数がほぼ線型になっているとすれば、 i 番目のパラメータを d_i だけ動かした効果と、 j 番目のパラメータを d_j だけ動かした効果の和が、両者を同時に動かしたときの効果の近似となるから、試算の回数は激減し、逐次によい格子点を探しつつ、山の頂上に到達できるかも知れない。しかし、このようにして到達した頂上が、最高峰の頂上であるか、山のふもとにある小さな丘の頂上であるか、判定の方法はないのである。

かかる技術的な問題の他にもむずかしい問題がある。たとえば我々には流域雨量も流域蒸発散も不明である。何地点かにおける実測雨量、実測蒸発散のそれぞれのある種の荷重平均に、それぞれ係数 α , β を掛けて、流域雨量、流域蒸発散を推定したとする。パラメータ α を大きくするのに応じて β を大きくすれば、推定流出量を大体実測に合わせることができる。この場合、何かの偶然により、 α , β を非現実的に大きくしたとき、推定流量が実測とよく合うということも起こり得る。平行に近い2直線の交点を求めるようなもので、かかる場合、解の信頼性は低いのである。水文学において、これと似た状況がかなり多い。たとえば、4段目のタンクの底面に浸透孔をつけて、流域外への地下流出を表わしたとする。流域雨量を大きく推定し、地下流出を大きくすれば、やはり収支を合わせることができる。元来、タンク・モデルがそのような性質を持っているのである。基底流量を3段目、4段目のタンクからの流出の和で表わすとき、3段目を大きくしようと、4段目を大きくしようと、どちらの方がよいかをはっきり定めるのはきわめてむずかしい。一つの判定基準で決定するよりも、種々の状況を考慮し、他の流域における知見を利用し、総合的に下した判断の方が大切であると思われる。

我々はうまく行かないから、タンク・モデルの自動化を消極的に断念したというより、むしろ水文学にとって、自動化は有害無益であると考えて、積極的に断念したのであった。何も自動化をしなくても、試行錯誤により、あまり困難なくパラメータを探し求めているのだから、それで十分であると考えた。我々はそれを次のたとえ話で説明することにした。街路で自動車を運転する自動制御装置や、計算機プログラムを作ることはきわめて困難、というより多分不可能であろう。しかし、多くの人が容易に自動車を運転している。人間の能力には、数学や計算機とは異なるものがあり、その人間の能力を活用することを恥じる必要はあるまい。これに対し、自動車の運転や、芸術的分野に人間の能力を活用するのはよいが、科学の分野に、数学や論理で律し切れない人間の能力を利用するのは那道であるという意見も出るであろう。その意見に対しては、科学の論文が、数学や論理では律し切れないきわめて人間的な言語を用いて書かれていることを指摘したい。しかも、相互の理解を深めるためには、論文だけでは不十分で、対話や討論が重要であることを想起したい。

このように考えていた我々が、このたびなげタンク・モデルの自動化を思い立ったかを、以

下に述べたい。

4. 自動化の動機と目標

1970 年ごろから始まり、1974 年に終点に達した WMO の「概念モデルの相互比較」に、我々はタンク・モデルによる計算結果を提出した。ここにおいて、我々は他国のいくつかのモデルを知る機会を得、知る必要を生じた。アメリカ合衆国の二つの主要モデル、NOAA (米気象庁) の河川予報システム (これはスタンフォード流域モデル IV にいくつかの修飾をしたものである)、およびサクラメント・モデル (前のモデルと本質的には大差がない) の報告書を読んで、これらアメリカのシステムに含まれる、パラメータ決定の自動化プログラムの大要を知ることができた。ある意味で、我々も彼等も、同じように考え、同じことに気がついていて、大きな相違は、我々が否定的で、彼等が肯定的だったことで、そこでは我々の敗けである。もっとも、自動化プログラムを作り上げた当時は、彼等もあまり難点に気がつかなかったらしい。その後しばらく使ってみて欠点に気がついたと見え、後に出た雪のモデルに関するプログラムの報告書では、自動化プログラムの本質を明確にとらえている。

1) 自動最適化プログラムは、試行錯誤法で十分よいモデルが得られた上で用いるものである。試行錯誤では不可能なパラメータの微調整を行うのが自動最適化で、それはみがき上げ (polishing) である。

2) 自動最適化の対象とするパラメータはなるべく少ない方がよい。大部分のパラメータは試行錯誤により、または物理学的、水文学的意味から定め、最終的には3個とか4個とかのパラメータについて最適化を行うのがよい。最適化の対象には、なるべく効果的なパラメータを選ぶとよい。たとえば雪のモデルにおいて、降雪に対し、雨量計の補そく率というパラメータがあり、実測降水量に対し補正を行う。このパラメータを変えれば入力値が変わるから、これは効果的なパラメータである。

3) 相互に関連するパラメータを含んで最適化を行うと、非現実的な値が解として出て来ることがある。これを防ぐために、すべてのパラメータにあらかじめ上限、下限を設定して置く。また非現実的な値に収束しない場合でも、相互に関連するパラメータを含んで最適化を行うと、一度変な値の方に移動した後で、よい値の方にもどって来ることがあったりするから、相互に関連するパラメータは、なるべく同時に最適化しない方がよい。

4) 最適化で得られた結果をそのまま信用してはならない。最適化は誤差の2乗の和で評価するが、他の統計値を参照し、場合によって最適解以外の他の値を選んだ方がよい。

この他に気がついた大切な点として、最適化プログラムにはオプションとしてマスクが用意され、具合の悪いデータの所にはマスクを掛け、評価から除くことができるようになっている。マスクはプログラムを使う人が主観的に掛けるのである。これらをながめると、いず

れもかつて我々が考えていたことで、ある意味で彼等はそれを避けて通っている。避けることは一つの解法で、我々はそれを称賛しなければならないが、その代り最適化プログラムの実質的有用性はかなり少ないものと言わざるを得ないであろう。

1975 年 9 月菅原はスロバキアの Blatislava で開かれた「水文学における数学的モデル」に関する IAHS のワーク・ショップおよびシンポジウムに出席し、そこで米国気象庁水文部の Sittner 氏に会った。彼は最初の発言で、水文学モデルに対する試行錯誤と自動車運転のたとえに強い共感を示した。菅原はアメリカも実質的には試行錯誤でモデルを作っていて、自動最適化は装飾にすぎないことを察した。シンポジウムの帰途、菅原はジュネーブの WMO により、ここで Sittner 氏に再会した。折りから開発途上国出身の WMO 職員が自動最適化のことを質問中であった。菅原が、実質的効果の少ない自動最適化を単なる美化のために持つのは無用というよりむしろ有害ではないかと、単刀直入に質問したのに対し、彼は率直に、それがみがき上げであり、試行錯誤を十分に行わず、モデルがよくなっていない段階で自動最適化を行うと、収束しなかったり、変な解に収束したりすることを述べた。さらに、彼等の研究所から離れた所にある共同利用の計算センター (CDC-6600) を利用する関係で、1 回の計算につき多数回の試算の自動的繰り返しをしたいため、自動最適化が必要である事情を説明した。大型計算機の共同利用に関し、考えるべき重要な一側面を示すものである。

前記の WMO 職員は、菅原の質問が終った後も、熱心に自動最適化のことを質問し続けていた。Sittner 氏が、主要部分が試行錯誤であることを明言したにもかかわらず、質問者の期待が、計算機のボタンを押せば最適のモデルが出て来るプログラムにあるらしく感じられた。菅原は開発途上国に対しては、自動最適化がきわめて重要であることを感じた。

わが国が開発途上国に知的技術を輸出することは、双方にとって有益で大切なことと信じられる。知的能力を持ち、勤勉で、しかも天然資源、原料を持たないわが国にとって、ソフトウェアの輸出は最適なものの一つではあるまいか。その際、気に染まないがショーウィンドウを飾ることも止むを得ないなどと言うべきではあるまい。ショーウィンドウを飾るのは一番大切な仕事の一つであると言うべきである。

しかしながら、今回我々がタンク・モデルの自動化を試みようと思いついたについて、以上の考え方が皆無であったとは言わないが、きわめてわずかであった。菅原は 1976 年 4 月からタイのバンコックに行き、そこで水文学の指導をする予定であったが、健康上の理由から取り止めになった。菅原は既に若くないし、開発途上国の直接指導ができないことになれば、それに代る何かが必要となる。我々が多年の経験から蓄積したタンク・モデルに関する知見を、どのように計算機のプログラムに移すかは、水文学にとっても、計算機のソフトウェアにとってもきわめて魅力のある問題である。

さらに、米国より遅れて自動化を試みる以上、米国のシステムにあるみがき上げ以上の実用性のあるものを作りたいと考えた。雨量、流量のデータを入力すれば、人間が試行錯誤で

苦心して発見したモデルに比べればいくらか劣る点はあるにしても、とにかく実用になる程度のモデルが自動的に出て来るプログラムを目標とした。もちろん、このような第1近似モデルを自動的に作るプログラムに成功すれば、仕上げ用のみがき上げプログラムを追加することはむしろ容易であろう。

5. 自動化プログラムについての基本的考え方

タンク・モデルの自動化は、我々が試行錯誤をしているときの判断の仕方をもとにしてプログラムを作れば、容易であろうという気がする。もしそれが容易であれば、ものをつかむ機械、歩く機械、字を読む機械、音声タイプライタ等が容易にできるはずである。問題は、我々がどのように判断しているかが、判断している当人に不明な所にある。自動化の問題を最初に考えたときに、次のように思った。人の話を聞くこと、字を読むことを、我々は幼少の時に習い覚えてしまった。したがって学習体験を記憶していない。また、学習時に、自分がどのように学習しているかを内省的に考察するなどのことをしなかったに違いない。音声タイプライタや字を読む機械の製作がむずかしいのは当然である。それに反し、タンク・モデルのパラメータを定めることは、我々が成人してから始めたことで、工夫を重ねながら現在実行中のことである。したがって、これをソフトウェア化することは、むしろ容易に違いない。

しかし、問題はそう簡単ではなかった。試行錯誤のとき、どのように判断しているかが、自分には判らないのである。他のことに気が散っていたり、疲れたりしているときは、よいモデルができず、無駄な試行の繰り返しになる。気力を充実して試行錯誤を行えば、たちまちよい結果が出て来る。したがって、計算機から答がもどって来るまでの待ち時間を、他のことに有効利用してはならない。見掛けの有効利用は大きなむだになるのである。自分がどのように判断しているかを考えることは、実は雑念であって、雑念を持てばよい判断ができない。

さらに考え直してみると、どのように感じ、どのように考え、どのように判断したかを分析し、記述すること、実はこの報告もその一種であるが、それは一つのフィクションであってよいのであろう。もっともらしく、つじつまが合い、説得力があればよいのであろう。それが定式化、形式化というものであろう。どのように感じ、考え、判断したかは不可知であり、記述不能かも知れないが、それに関してある種の形式化を行い、記述することは可能であり、必要である。その意味から言えば、我々もすでにタンク・モデルにつき講義を行い、解説書を書いている。そこに書かれていることは、我々の判断方式とは必ずしも一致しないであろうが、それなりに有用であつたらしい。そこで、かつて講義を行い、解説書に書いた程度のことをソフトウェア化すればよいと考えた。

タンク・モデルのパラメータの修正の仕方を人に話すとき、原則はおよそ次のようになる。我々は試算結果をラインプリンタで打ち出すとき、実測流量、推定流量の他に、推定流量の

成分別をいずれも対数目盛でプロットする。すなわち、実測流量を q 、タンク・モデルの各タンクからの流出高をそれぞれ y_1, y_2, y_3, y_4 とするとき (図 2)、

$$\log q, \log(y_1+y_2+y_3+y_4), \log(y_2+y_3+y_4), \\ \log(y_3+y_4), \log y_4$$

を打ち出すのである。ここに $\bar{q}=y_1+y_2+y_3+y_4$ が推定流量である。このハイドログラフをながめると、推定流量が実測流量と合わない主要原因が何番目の流出成分にあるかがわかる。たとえば2番目の流出成分を修正する必要があるとする。2番目のタンク (図 3・a)) の側面の流出孔を底面の高さまで下げて、図 3・b) のタンクに置き換えれば、これは時定数 $1/(\beta_0+\beta_1)$ の1次遅れ系である。したがって $\beta_0+\beta_1$ を大きくすれば時定数は短くなり、 $\beta_0+\beta_1$ を小さくすれば時定数は長くなる。一方、図 3・b) の構造で、出力は $\beta_1:\beta_0$ の比で、流出と浸透とに分配される。したがって和 $\beta_0+\beta_1$ によって減衰率が定まり、比 $\beta_1:\beta_0$ によって流出比率が定まる。この二つのことを考えて β_0, β_1 を修正すればよい。

以上の原則をソフトウェア化するとき困るのは、各段のタンクのパラメータ値の出発値を定め、ついでそれを修正するに用いる情報を、ハイドログラフのどの部分から得るかである。流量の大きい部分で1段目タンクの構造を定め、低濁水の部分で3段目、4段目の構造を定める。大きな流量に続き、低濁水への移り変りの部分で2段目の構造を定めればよいのであるが、流量をどこで区切れればよいであろうか。

いろいろ考えた末、思いついたのが図4のモデルから出発することである。このモデルは、事前に何の知識もないとき、ある川の日流量の解析にかなり有効なものである。このモデルに解析対象河川の流域雨量を投入し、その出力の成分別によって、流量の区分を行うのである。

1) 1 段目タンクの上の流出孔からの流出がある日。

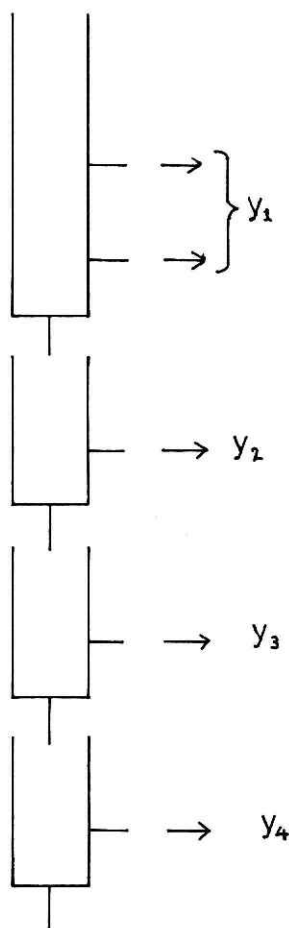


図 2 タンク・モデルからの出力成分

Fig. 2 Output components from tank model

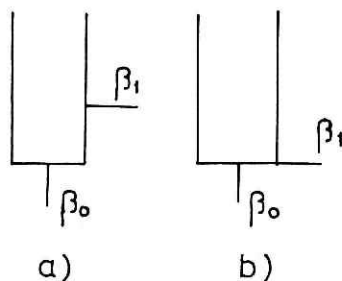


図 3 a) 2 段目タンク b) その線型近似
Fig. 3 a) Second tank and b) Its linear approximation

2) 1 段目タンクの下の流出孔からの流出があり、かつ 1) に属さない日.

3) 2 段目のタンクから流出があり、かつ 1), 2) に属さない日.

4) 3 段目のタンクから流出があり、かつ 1), 2), 3) に属さない日.

5) 4 段目からの流出だけがある日.

実際には、1), 2), ... の順に、どの区分に属するかを調べて行くから、上の条件に述べた、かつ 1) に属さない等の条件は、自動的に満足されることになる.

以上の区分による 各区分における 実測流量と算出流量との比較から、各段のタンクのパラメータの修正を行えばよい. すなわち、1), 2) の区分の所から得られた情報で 1 段目タンクの修正を、3), 4), 5) の区分の所からの情報で、それぞれ 2 段目、3 段目、4 段目のタンクを修正すればよい. その際の修正の原則は上に述べた通りで、流出量からのフィード・バックでパラメータの比率を修正し、ハイドログラフの減衰の様子（数学的に言えば微分係数の値）でパラメータの和を修正する. 自動制御的に言えば、いわば変位と速度により、各区分ごとに、それぞれに対応するタンクにフィード・バックを掛けるのである.

流出成分による上記各区分につき、流出量に関する評価値は次のものを用いる.

$$RQ(I) = \Sigma \bar{q}(n) / \Sigma q(n) \quad (I=1, 2, \dots, 5)$$

ここで、 $q(n)$, $\bar{q}(n)$ は実測、算出流量、和は I (1, 2, ..., 5) の区分に属する日についての和である. 日の区分は算出流量によって行われるから、たまたま雨量観測点に局地的大雨が降り、算出流量では大出水となるが実測ではほとんど出水のないことがあり得るし、その逆のこともあり得る. それらは誤差として無視し、実測流量を顧慮することなく区分を行い、評価値を算出するのである.

減衰率に関する評価値は次のものを用いる.

$$RD(I) = \Sigma' (\log \bar{q}(n-1) - \log \bar{q}(n)) / \Sigma' (\log q(n-1) - \log q(n)) \quad (I=1, 2, \dots, 5)$$

ここに和 Σ' は、 I の区分に属する日で、しかも算出流量が減少状態にある場合、すなわち $\log \bar{q}(n-1) - \log \bar{q}(n) > 0$ となる場合についてだけの和を表わす. 前と同じく実測流量については顧慮しない. ある I の区分に属し、算出流量の減少が続く、連続した一つの期間について考えると、その期間における和 $\Sigma' (\log \bar{q}(n-1) - \log \bar{q}(n))$ は、その期間の初日の前日

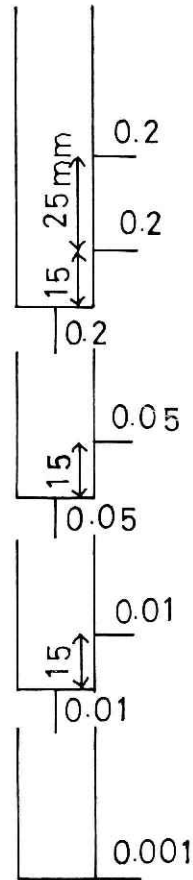


図 4 出発モデル
Fig. 4 Starting tank model

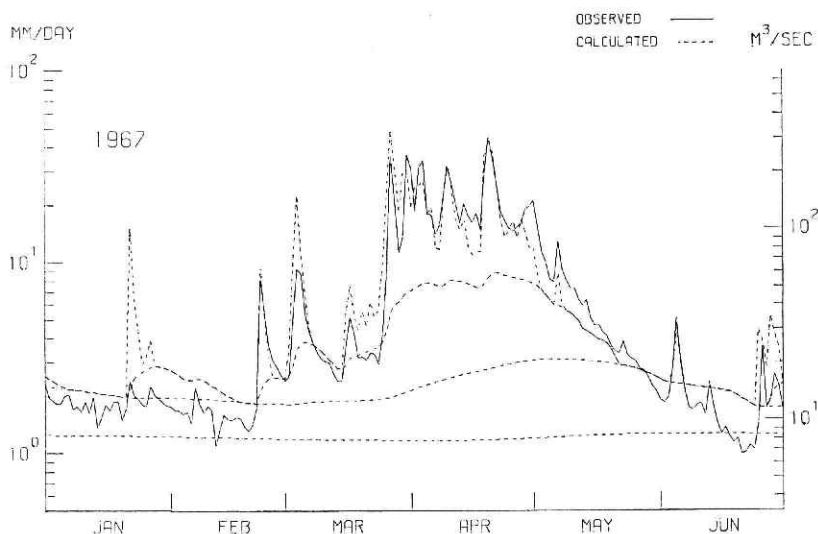


図5 実測流出高(実線) および図4の出発モデルによる成分別算出流出高(破線) 北上川水系和賀川湯田

Fig. 5 Observed discharge (real line) and calculated discharge by the starting model of Fig. 4 showing its components (broken line)—River Waga tributary of River Kitakami at Yuta

から、期間の末日までの間の $\log \bar{q}$ の減少である。その期間内で、実測流量はノイズによる不規則振動を行うであろうが、和 $\Sigma'(\log q(n-1) - \log q(n))$ は、期間の初日の前日と、期間の末日までの間の $\log q$ の減少を表わすから、大部分のノイズは消え、RD(I) により、推定流量と実測流量との減衰の違いが評価できるであろうと期待した。

図5は北上川水系和賀川湯田の実測流量と、図4のタンク・モデルによる成分別の算出流量のハイドログラフを対数目盛で示したものである。RQ(I), RD(I) がどのような意味を持つか、この図から推察していただきたい。

先に考えた原則によれば、RQ(1), RQ(2), RQ(3), ... により $(A_2+A_1)/A_0$, A_1/A_0 , B_1/B_0 , ... を修正し、RD(1), RD(2), RD(3), ... により $A_0+A_1+A_2$, A_0+A_1 , B_0+B_1 , ... を修正すればよい。ここに $A_0, A_1, A_2, \dots$ は流出孔、浸透孔のパラメータで、その意味は図6に示すものである。しかし考えてみると、 $RQ(1) = \Sigma \bar{q} / \Sigma q$ の分母分子の中には2段目以下の流出成分が含まれているから、RQ(1)をそのまま $(A_1+A_2)/A_0$ の修正に適用してよいかどうかは不明である。RD(1)にしても、雨が降り続くときは $\log \bar{q}(n-1) - \log \bar{q}(n)$ は $A_0+A_1+A_2$ をそのまま反映はしない。そこで RQ, RD でパラメータの比と和とを修正する代りに、定性的に考えて、より簡単な修正方式をとることにした。

RQ(1)が1より大き(小)ければ、 A_1+A_2 を割り引き(増し)し、 A_0 を割り増し(引き)すればよい。その変化率を等しくするならば、 A_1+A_2 を $\sqrt{RQ(1)}$ で割り、 A_0 に $\sqrt{RQ(1)}$ を掛けるのが一つの方法であろう。

$$AM1+AM2=(A1+A2)/\sqrt{RQ(1)}$$

$$AM0=A0\sqrt{RQ(1)}$$

ここに $AM0$, $AM1$, $AM2$ は修正されたパラメータである.

また $\sqrt{RQ(1)}$ の代りに $(1+RQ(1))/2$ を用いても, 実際にはかまわない.

$RD(1)$ が1より大き(小)ければ, $A0, A1, A2$ を一斉に割り引き(増し)すればよいから, $A0, A1, A2$ を $RD(1)$ で割ればよからう. さらに考えれば, $RQ(1), RD(1)$ の効き方を, あるいは増幅し, あるいはしぼる必要があるかも知れないが, 仮りに上式のように, そのままの形でフィード・バックするとして, 次の式が得られる.

$$AM1+AM2=(A1+A2)/\left(\frac{1+RQ(1)}{2} * RD(1)\right)$$

$$AM0=A0 * \frac{1+RQ(1)}{2} / RD(1)$$

$RQ(2), RD(2)$ のフィード・バックは同様にして

$$AM1=A1 / \left(\frac{1+RQ(2)}{2} * RD(2)\right)$$

$$AM0=A0 * \frac{1+RQ(2)}{2} / RD(2)$$

$AM0$ 関しては修正式が2通できるから, 仮りに両者の平均をとる, 次の修正式が得られる.

$$AM0=A0 * \left(\frac{1+RQ(1)}{RD(1)} + \frac{1+RQ(2)}{RD(2)}\right) * \frac{1}{4}$$

$$AM1=A1 / \left(\frac{1+RQ(2)}{2} * RD(2)\right)$$

$$AM2=(A1+A2) / \left(\frac{1+RQ(1)}{2} * RD(1)\right) - AM1$$

上のタンクを修正すれば, その影響は下のタンクに及ぶのであるが, それを無視し, 2段目のタンクは $RQ(3), RD(3)$ により修正し, 3段目のタンクは $RQ(4), RD(4)$ により修正することにする. 修正の仕方は上の方式と同じである.

$$BM0=B0 * \frac{1+RQ(3)}{2} / RD(3)$$

$$BM1=B1 / \left(\frac{1+RQ(3)}{2} * RD(3)\right)$$

$$CM0=C0 * \frac{1+RQ(4)}{2} / RD(4)$$

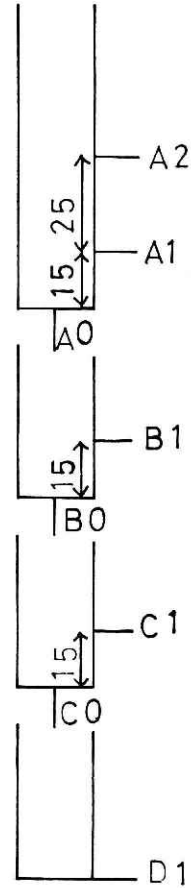


図6 図4のモデルから出発したときの可変パラメータ

Fig. 6 Variable parameters when the starting model is the one shown in Fig. 4

$$CM1 = C1 / \left(\frac{1 + RQ(4)}{2} * RD(4) \right)$$

最後に4段目のタンクの修正であるが、図6のタンク・モデルで、4段目のタンクは底面の浸透孔を持たない。我々はしばらく、流域外への地下流出を無視し得る場合だけを考えることにするからである。我々は、雨量から流域雨量を求めるときの補正定数、雪のモデルの主要パラメータ等もすべて自動的に決定することを目指している。それらのパラメータの多くは、水収支の観点から定めることになるが、そのためには流域外への地下流出を無視し得ることが必要である。そこで4段目のタンクには浸透孔がないとするのである。

4段目のタンクは流出孔が1個だけである。減衰に関するフィード・バックは $RD(5)$ により

$$DM1 = D1 / RD(5)$$

でよいが、流量に関するフィード・バック $RQ(5)$ は、上方のタンクからの水の供給を調節しなければならない。 $RQ(5)$ が1より大き(小)ければ、上方のタンクからの水の供給を減らさ(ふやさ)なければならない。それには上方のタンクの浸透孔のパラメータを割り引き(増し)すればよいが、 $A0, B0, C0$ への修正は、それぞれ $1/8, 1/4, 1/2$ だけ効くと仮定し、次のようにする。

$$AM0 = A0 * (1 - (RQ(5) - 1) * 1/8)$$

$$= A0 * (9 - RQ(5)) * 1/8$$

$$BM0 = B0 * (1 - (RQ(5) - 1) * 1/4)$$

$$= B0 * (5 - RQ(5)) * 1/4$$

$$CM0 = C0 * (1 - (RQ(5) - 1) * 1/2)$$

$$= C0 * (3 - RQ(5)) * 1/2$$

ただし、上式の右辺の $A0, B0, C0$ はすでに修正済みの係数であるとする(右辺の $A0, B0, C0$ の代りに $AM0, BM0, CM0$ と書き、等号を FORTRAN の等号の意味としてもよい)。

なお、 $RQ(I), RD(I)$ が何かの偶然により、1とはなはだしくへだたった値を示すとき、それがそのままフィード・バックされることを避けるため、 $RQ(I), RD(I)$ が2より大きいときは2に置き換え、 $1/2$ より小さいときは $1/2$ に置き換えることにした。

我々は図4のモデルから出発し、 $RQ(I), RD(I)$ によりパラメータを修正していくことにより、すなわち計算機による自動的試行錯誤により、よいタンク・モデルが得られることを期待した。なお、パラメータが修正されれば、次の試行では修正されたタンク・モデルによる算出流量により、 $I=1, 2, \dots, 5$ の区分が行われ、その区分に応じて $RQ(I), RD(I)$ が算出されるのである。

試算には、主として北上川水系和賀川湯田の資料が用いられ、それに加えて猿ヶ石川田瀬の資料も用いられた。始めはうまく行かなかったが、区分の仕方、 $RQ(I), RD(I)$ の算出方式、

フィード・バック方式等を少しずつ手直していくうちに発散がとまり、プログラムが動き始めてから5日目、6回目の試算で、ともかくある程度の収束がみられた。しかもそこで得られたタンク・モデルが算出した推定ハイドログラフの実測との一致は、一応満足すべきものであった。我々の自動化の目標は、仕上げ用みがき上げプログラムを作ることではなかったから、ある程度のものが出て来れば、一応の成功とみてよい。仕上げ、みがき上げのプログラムはむしろ容易であると考えていた。

その上、我々の方式の長所は、収束の速さである。推定値、実測値の差の2乗の和を評価値とする自動最適化方式は、いわば手探りで一步一步よい所に近づいて行く。それに対し、我々の方式は、RQ(I), RD(I) により、いわば目標までの距離を目測しつつ近づいて行くのである。したがって 10~30 回程度の繰り返して、よい解に近づく。

数回目の試算でかなりよい結果を得たことに力を得て、さらにいくつかの手直しを試みるうち、我々が試行錯誤で得たモデルと、ほぼ同程度によいハイドログラフを産出するモデルが出て来るようになった。次にその経過を略述する。

6. 評価方式、フィード・バック方法に対する修正

6.1 区分けの仕方についての修正

試算 No. 1 は発散した。修正がある方向に偏り始めると、その方向にだけ動いてバランスが崩れ、あるタンクだけに水が集まってしまった。その原因は、RQ(I), RD(I) が対応するタンクの性質をよく反映していないからであろうと考えた。たとえば、一番上の流出孔からの流出があれば、その流量は RQ(1), RD(1) のためのデータとして用いられるが、一番上の流出孔からの流量が小さいときは、それはむしろ RQ(2), RD(2) のためのデータとして用いるべきであろう。実は、そのことについては始めから心配していて、次のように考えていた。

- 1) 1 段目のタンクの上の流出孔からの流出が、それ以下の流出孔からの流出の α_1 倍をこえる日
- 2) 1 段目タンクの下流出孔からの流出が、それ以下の流出孔からの流出の α_2 倍をこえ、かつ 1) に属さない日

以下同様にして、1), 2), ..., 5) の区分けをすべきである。試算 No. 1 では簡単のため $\alpha_1 = \alpha_2 = \dots = 0$ としたのである。試算 No. 2 ではこの点を手直して、 $\alpha_1 = \alpha_2 = \dots = 1/2$ とした。これも失敗で発散した。

$\alpha_1, \alpha_2, \dots$ を別々に変えてみるのは複雑にすぎるので、以後 $\alpha_1 = \alpha_2 = \dots = \alpha_5$ とし、これを定数 CC で表すことにした。CC は 0% で始まり、50%, 25%, 10%, 5% を試みた末、最終的には 10% に落ちついた。

6.2 RD(I) のフィード・バック効果を小さくすること

試算 No. 2 の発散の原因の一つは、種々の原因から誤差の混入が多く、信頼性が低い RD(I) のフィード・バックが強すぎるからであろうと感じた。そこで RD(I) のフィード・バックは $1/4$ にしぼることにした。すなわち

$$RD(I) = 1 + (RD(I) - 1) * 1/4$$

と置き換えてから、パラメータの修正に用いるのである (上式の等号は FORTRAN の意味)。

後に RD(I) に混入する誤差が減るような手直しが行われ、そうなると効果を $1/4$ にしぼるのは過剰修正であると感じられたので、 $1/2$ にしぼることになり、その値に落ちついた。

6.3 RQ(I), RD(I) のうち、1 から大きくへだたったものだけについてフィード・バックを行うこと

試算 No. 2 が発散したもう一つの原因は、すべて RQ(I), RD(I) を同時にフィード・バックしたため、相互に干渉したのではないかと考えた。同時に多くのパラメータに手を着けるなどというのが、試行錯誤の際の大事な心得である。どこを修正するか、まず重点を探し、重要な不良個所から一つずつ直して行くことが大切である。これは人間の注意力の限界から来るもので、計算機がするときには、一斉にパラメータを修正しても大丈夫であろうと考えたが、そうではないらしい。1 からあまりへだたっていない RQ(I), RD(I) による修正までを含めて一斉に行った結果、1 からへだたっている悪い RQ(I), RD(I) をさらに悪化させることがある。そして、ある限界をこえて RQ(I), RD(I) が悪くなると、一方的に動いて発散するらしい。そこで $|RQ(I) - 1|$, $|RD(I) - 1|$ が大きいものについてだけ、フィード・バックを行うことにした。すなわち CRQ, CRD という限界値を設定し、 $|RQ(I) - 1| \geq CRQ$, $|RD(I) - 1| \geq CRD$ となるものだけについてフィード・バックを行う。そのためには、上の条件に合わない RQ(I), RD(I) は 1 に置き換えればよい。

RD(I) の効果を $1/4$ にしぼり、 $|RQ(I) - 1| \geq 0.25$, $|RD(I) - 1| \geq 0.50$ の場合だけフィード・バックする (CRQ=1/4, CRD=1/2) ことにして行った試算 No. 3 では、発散は起こらなかった。

和賀川について行った試算 No. 3 が一応の収束を示したので、猿ヶ石川についても試算し、これも収束した。ここで仮りに収束というのは、すべての RQ(I), RD(I) が CRQ, CRD で与えられた限界に納まることを言っている。我々は始め、RQ(I), RD(I) が $(100 \pm 5)\%$ 、または $(100 \pm 10)\%$ の中に納まれば成功であると期待していた。試算 No. 3 が達したのは RQ(I) が $(100 \pm 25)\%$ 、RD(I) が $(100 \pm 50)\%$ に入ること、これではまだ実用にほど遠いと思われる。

そこで、次に述べる RD(I) に対する改善を行った上、CRQ=25%, CRD=50% で行っ

た試算 No. 4 が収束に終わったとき、そこで得られた最終モデルを出発点とし、 $CRQ=10\%$ 、 $CRD=20\%$ と置き直して試算 No. 5 を続行した。これは 8 回の繰り返し計算で収束した。この最終モデルを出発点とし、 $CRQ=5\%$ 、 $CRD=10\%$ と置いて、さらに試算 No. 6 を続行したが、これは 20 回の繰り返しにもかかわらず収束せず、かつ収束しそうな気配がなかった。プログラムは 20 回の繰り返しで収束しないときは、中止するようにできている。収束はしなかったが、このときの 20 回目に出て来たモデルで推定ハイドログラフを打ち出してみると、かなりよい結果を示した。一応、世間には通用する程度のものであって、我々のねらいが第 1 段階で達せられたことを示した。

一応の成功を示した試算 No. 6、およびそれに先行する No. 5 は、No. 4 の延長であって、単に CRQ 、 CRD を順に小さくして行ったものにすぎない。そこで $CRQ=25\%$ 、 $CRD=50\%$ から出発し、収束すれば 10% 、 20% に自動的に置きかえ、それが収束すれば 5% 、 10% に置きかえ、試行錯誤を自動的に継続するプログラムを作った。これは No. 4、No. 5、No. 6 を一つにまとめたもので、これを試算 No. 4' とした。

その後、評価値 $RQ(I)$ 、 $RD(I)$ に対し、フィード・バック方式に対し、種々の改善を行ったにもかかわらず、 $CRQ=5\%$ 、 $CRD=10\%$ ではうまく収束せず、 $CRQ=7\%$ 、 $CRD=15\%$ とすると収束した（試算 No. 12、No. 13）。これは流域雨量、実測河川流量に伴う誤差にもとづく、基本的な原因から来るものらしい。我々は何地点かの地点雨量から流域雨量を作り、タンク・モデルに入力する（いまの段階で、我々は等荷重平均にある補正定数を掛けたものを流域雨量とする。さらにより流域雨量を作ること、自動化プログラムの一部として予定している。なお北上川では雪に関する計算が必要で、始めのうちは以前に我々が得た雪に関するパラメータをそのまま利用してタンク・モデルへの入力を作っていた。その後、タンク・モデルのパラメータ自動修正プログラムと並行して、雪のモデルの自動化も進行したので、自動化プログラムで得られたパラメータで積雪、融雪の計算を行い、タンクモデルへの入力

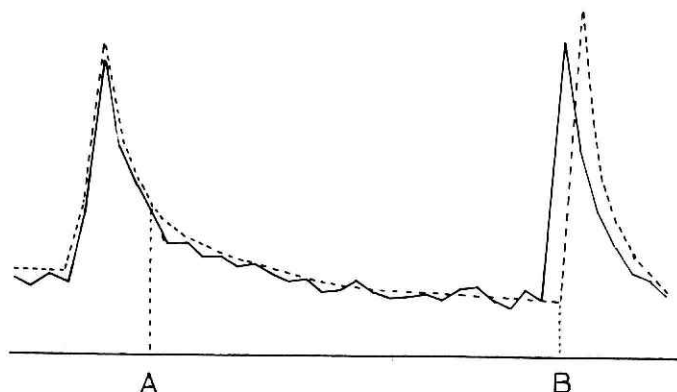


図 7 ピークのずれ
Fig. 7 Shift of discharge peak

とした). この推定流域雨量は現実の流域雨量と一致しないし, 実測流量にも誤差が伴うから, $RQ(I)$, $RD(I)$ には必然的に誤差が伴う. そこで $RQ(I)$, $RD(I)$ が 1 に近づいて来ると, そのフィード・バックにおいてノイズの影響が大きくなり, 発散することになるらしい. その限界が $CRQ=7\%$, $CRD=15\%$ と, $CRQ=5\%$, $CRD=10\%$ との間にあるらしい. もちろんこれはデータの質に関係するのであって, 雨量地点が 1 地点のときと, 数地点のときとでは, 相違が明らかである.

後に, 限界値 CRQ , CRD を段階的に変化させる代りに, $|RQ(I)-1|$, $|RD(I)-1|/2$ のうち, 大きい方から 2 個をとり, その 2 個だけをフィード・バックする方式をとることにした (試算 No. 14 以降). この方式で猿ヶ石川田瀬の計算を行い, 繰り返し約 40 回で, ようやく $RQ(I)$ が $(100 \pm 5)\%$, $RD(I)$ が $(100 \pm 10)\%$ の範囲に入った. このあたりが, ぎりぎりの限度で, しかも猿ヶ石川はかなり条件のよい場合であるらしい.

6.4 $RD(I)$ に大きな値や, 負の値が現れるのを防ぐための修正

$RD(3)$, $RD(4)$, $RD(5)$ に大きな値や負の値, しかも絶対値が大きい負の値が現れることがある. これが生ずる原因は図 7 の状況からであろうと想像される. 期間 AB が仮りに 4) の区分けに相当し, 時点 B で大雨が降って急激の出水があったとする. 実測流量と推定流量に 1 日の相違が生ずるのは, どうしても避けられない. 継続時間の短い大雨の降ったのが, 観測時間の直前であるか直後であるかによって, 日雨量として 24 時間に近い相違となるのだから, どんなによい推定方式でも, ときどき 1 日の違いが出て来る. かくして図 7 のようなことが起これば, 区分けは推定流量で行うから, 時間の末日に大流量が現れ, その期間 AB で $\Sigma'(\log q(n-1) - \log q(n)) = \log q(A-1) - \log q(B)$ は負で絶対値の大きい値となる. $RD(I)$ の分母の一部に, このようにして負の値が含まれる結果, $RD(I)$ の分母が 0 に近い正や負の数になり, $RD(I)$ に妙な値が現れるのであろう. 図 7 の状況は $RQ(I)$ にも影響を及ぼすが, $RD(I)$ ほどこに大きくはない. これを防ぐには, 3), 4), 5) の期間から, 1), 2) の期間に移るときは, 用心のために期間の末日を捨てることにした. 実測流量はノイズにより不規則に変動するから, 実測流量について何かの判定をして捨てるか捨てないかをきめるのは手間がかかる. 捨てることによるサンプル数の減少の被害はあまり大きくないから, 疑わしいものは使わないことにしたのである. 試算 No. 4, したがって No. 5, No. 6, No. 4' は, この方法で算出した評価値によって, フィード・バックを行った.

以上の修正をしても, なお心配が残ったので, 後に, 試算 No. 16 以後では, 期間 3), 4), 5) から 1), 2) に移るときは, 期間の末日を捨てる他に, その前日に 3 mm 以上の雨があればその日を捨て, さらにその前日に 3 mm 以上の雨がなければその日を捨てと, さかのぼって捨てることにした. なおここで雨というのは, 積雪, 融雪の補正を施した後のもので, タンク・モデルへの入力となるものである.

6.5 RD(5) の無視, および RQ(5) のフィード・バック方式の変更

上記の手直しの後も, RD(5) の不安定さは残るので, ついに RQ(5) を無視することにし, 4 番目のタンクの流出係数 $D1$ は一定値とすることにした. 始めは $D1=0.001$ としてあったが, これは時定数 2.7 年で, 計算を開始してから 4 段目の成分が安定するまでに時間がかかりすぎる. そこで試算 No. 12 以後は, $D1=0.003$ に固定することにした. これは時定数 11月であるが, 実質的には $D1=0.001$, と $D1=0.003$ の間に大差はなく, 4 段目からの流出はほぼ一定となる.

また RQ(5) のフィード・バックは, 上方のタンクからの水の供給を変えるようにしたのであるが, $A0$, $B0$, $C0$ に及ぼす効果は, それぞれ $1/8, 1/4, 1/2$ にしてあった. これでは RQ(5) の補正がはかばかしく行かないので, 試算 No. 12 以降は, $A0$, $B0$, $C0$ に対する補正を $1/4, 1/2, 1$ として行うことにした.

RD(3), RD(4) に対する期間末の補正, RD(5) の無視, $D1=0.003$, RQ(5) のフィード・バック方式の修正を盛った試算 No. 12 は, 図 4 のモデルから出発し, 3 回の繰り返して RQ(I), RD(I) がそれぞれ (25%, 50%) の範囲内に収束し, ついで 13 回の繰り返して (10%, 20%) の範囲内に入り, さらに 11 回の繰り返して (7%, 15%) の範囲内に収束した. 合計 27 回の繰り返して (7%, 15%) の範囲に収束し, しかも得られたモデルは良好なハイドログラフを与えた. そのまま最終結果として提出し得る程度のものであった.

6.6 収束を加速するためのフィード・バック方式の修正

一応の満足すべき結果を与えた試算 No. 12 の収束の仕方を検討すると, 収束を加速できる見込みがあった. 一つは RD(I) のフィード・バックを $1/4$ にしぼったのは, しぼり過ぎであった. そこで RD(I) のフィード・バックは $1/2$ にもどすことにした. もう一つの欠点は RQ(3), RQ(4) のフィード・バックである. たとえば, 2 段目のタンクからの流出が不足 ($RQ(3)<1$) のとき, 従来方式では, 2 段目のタンクの側面の流出孔の係数を大きくし, 底面の浸透孔の係数を小さくする. そうすると, 2 段目のタンクからの流出は増大するが, 3 段目への水の供給は減る. 2 段目からの流出が不足し, 3 段目からの流出が多すぎるときは ($RQ(3)<1$ で $RQ(4)>1$) この修正法はよいが, 2 段目, 3 段目ともに水不足のときは, 2 段目の修正が, 3 段目の修正をよび起こし, それが 4 段目の RQ(5) に及び, RQ(5) から $A0, B0, C0$ にフィード・バックがかけられることになる. いずれ上のタンクに反射して来るから, やがて収束するのであるが, これが収束の悪さの原因であると思われる. そこで, 2 段目のタンクからの流出が不足で, さらに 3 段目からの流出が不足であるときは, 1 段目タンクからの水の供給を増すようにフィード・バックをかけることにした. 逆に, 2 段目, 3 段目からの流出がともに過剰のときは, 1 段目からの供給を減らす. 3 段目, 4 段目につい

でも同様である。

すなわち RQ(3)−1, RQ(4)−1 が同符号のときは, A0 を A0/RQ(3) に変え, B0, B1 を B0/RD(3), B1/RD(3) に変えることによってフィード・バックを行う。ただしこの A0 は, RQ(1), RD(1), RQ(2), RD(2) によって修正ずみのものとする。RQ(3)−1, RQ(4)−1 が異符号のときは, 従前のフィード・バックを行う。

RQ(4)−1, RQ(5)−1 が同符号のときも同様で, B0 を B0/RQ(4) に, C0, C1 を C0/RD(4), C1/RD(4) に変える。ここに B0 は RQ(3), RD(3) による修正ずみのものとする。

フィード・バック方式にこの手直しをしてから行った試算 No. 13 を, 和賀川に試みた結果によると, 3 回の繰り返しで RQ(I), RD(I) は (25%, 50%) の範囲に, ついで 4 回の繰り返しで (10%, 20%) の範囲に, そしてさらに 3 回の繰り返しで (7%, 10%) の範囲に納まった。No. 12 では計 27 回の繰り返しで (7%, 15%) の範囲内に収束したのに対し, No. 13 ではわずかに 10 回で収束したのである。我々の試行錯誤の経験では, モデルの型がきまっでいて, パラメータを探すだけであれば, 約 10 回の試算でよい結果に達するのであるが, この試算 No. 13 で, 計算機もほぼ人間並みに達したのである。ただし, No. 13 の成功に力を得て, RQ(I), RD(I) を (5%, 10%) の範囲に納めようとしたが, これは発散した。

6.7 時間遅れに関する問題およびその対策

試算 No. 13 はよい結果を示したが, その際 CRQ, CRD を (7%, 15%) にすれば収束し, (5%, 10%) にすると収束しない。(6%, 12%) ならばあるいは収束するのかも知れないが, かかる状況を見ると, CRQ, CRD の範囲を次第に狭めて行くのはあまりよい方法とは思えない。そこで 1 からのへだたりが大きい方から 2 個とり, フィード・バックする方式を用いることにした。

ここまで来て, 手直しを続けて来たプログラムを整理, 再編し, それに伴う試算をしているうちに, 重要なことに気づいた。時間遅れが大きく影響することである。多くの河川では, 日流量に 1 日の遅れを与えたものを推定流量とすると, 実測とよく合うのである。ところが, 和賀川湯田では遅れなしの方がよく合うのである (流量が貯水池流入量であるときに, このことがよく現れるような気がする)。そして和賀川湯田において, 算出流量の 1 日遅れと実測値を対応させると, 我々の自動化方式はうまく収束しない。遅れの与え方が重大な要素であることがわかる。

表 1 時間遅れ α による相関係数の変化
Table 1 Correlation coefficient versus time lag α

α	Q	log Q
0.1	0.929	0.938
0.2	0.932	0.941
0.3	0.933	0.942
0.4	0.932	0.942
0.5	0.930	0.941
0.6	0.926	0.939
0.7	0.921	0.936
0.8	0.914	0.933
0.9	0.906	0.929

時間遅れに関するもう一つの問題は、ピークの遅れに関する不可避免の変動である。日雨量、日流量で解析する以上、流量ピークが実測と推定で1日狂うことは避けられない。それがRD(3), RD(4)に大きく影響することは前に気づき、その手当てをしたが、RQ(1), RQ(2)などにも影響することがわかり、その対策が必要になった。対策として、次のものが考えられた。

a) $\tilde{Q}(n)$ に $(1-\alpha)Q(n)+\alpha Q(n+1)$ を対応させること

元来日雨量の多くは9時観測、流量は0時～0時の値で、雨量の方が始めから9時間遅れている。その上、雨から流量になる過程で遅れが加わるから、多くの河川では雨量から算出した流量に1日の遅れを与えると、実測値とよく合う。しかし、和賀川湯田のように遅れなしの方がよい場合もある。遅れを日単位で与えることは、粗すぎると考え、 n 日の雨から出した推定流量 $\tilde{Q}(n)$ に対し、 $(1-\alpha)Q(n)+\alpha Q(n+1)$ を対応させることにし、 $\alpha=0.1, 0.2, \dots, 0.9$ と変え、相関係数が最大になる α を求めることにした。流量 $Q(n)$ を推定する最良のものを求める立場から言えば、 $Q(n)$ と $(1-\beta)\tilde{Q}(n-1)+\beta\tilde{Q}(n)$ との相関が最大になる β を求めるべきであろうが、いま我々は $\tilde{Q}(n)$ により区分を行い、 $\tilde{Q}(n)$ を中心にしてフィード・バックを行うから、 $\tilde{Q}(n)$ に一番よく合う $(1-\alpha)Q(n)+\alpha Q(n+1)$ を探すのである。

表1は和賀川湯田についての計算例で、 $\tilde{Q}$ としては図4の出発モデルで算出したものを用いる。相関係数は $\tilde{Q}(n)$ と $(1-\alpha)Q(n)+\alpha Q(n+1)$ の間、および $\log \tilde{Q}(n)$ と $(1-\alpha)\log Q(n)+\alpha \log Q(n+1)$ との間で算出した。 $\alpha=0.3\sim 0.4$ のあたりに相関の最大がある。雨量と流量の間に9時間(0.375日)のずれがあることを考えると、 $\alpha=0.3$ とするのは不合理であるから、 $\alpha=0.4$ を用いることにした。

b) 移動平均(または移動和)を用いること

時間遅れの影響を軽減する一つの方法は移動平均(または移動和)をとることである。推定流量として $\tilde{Q}(n)+\tilde{Q}(n+1)$ を用い、それに $(1-\alpha)Q(n)+Q(n+1)+\alpha Q(n+2)$ を対応させるならば、時間遅れに伴う誤差の影響は薄まり、よい結果が出はしないかと期待した。移動平均を用いることにより、明らかに実測と推定との間の誤差は減少する。しかし、移動和を用いたことによりRQ(I), RD(I)の誤差が減り、収束が早くなるとは思えなかった。念のため4日の移動和をとり、 $\tilde{Q}(n)+\dots+\tilde{Q}(n+3)$ と $(1-\alpha)Q(n)+Q(n+1)+\dots+\alpha Q(n+4)$ とを対応させ、相関係数最大の α を定め、その α を用いて試算を行ったが、効果はなかった。移動和の利用については試算 No. 19, No. 20, No. 21, No. 22, No. 24を試みたが、結局、利用しないことになった。

c) ピークの時間遅れの不規則変動への対策

この問題については、先にRD(3), RD(4)に対する対策として、期間の末日を除くことにした。今回、RQ(1), RQ(2)等への影響も無視できないことになったので、期間1)の始まる日、および期間1)から2)に移る場合を除き、期間2)の始まる日、およびその前日は

RQ(I), RD(I) の評価から除くことにした。これは先の RD(3), RD(4) への対策を中に含んでいる。

先に RD(3), RD(4) に関する対策を考えたとき、RQ(1), RQ(2) のことをしばらく無視したのは次の事情による。多くの出水においては、初日がピークである。したがって、期間1)や2)が始まる日を評価から除くことは、大部分のピーク流量を評価基準のデータとして用いないことになる。ピーク流量というきわめて大切な情報を、時間遅れの不可避的変動のために捨てるのは、あまりに惜しいと考えていたが、ついに捨てざるを得なかった。

ピークの時間遅れの変動の影響を避けて、高水流量に関する実測、推定の比較を行う一つの方法は、流況曲線で比較することであろう。現在我々が試みている自動化方式で、大部分のピーク流量を評価対象から除く以上、我々の得たモデルの評価の際に、流況曲線の比較を加えることは必要であろう。しかし、流況曲線の比較を計算機に行わせ、そのフィード・バックの自動化を行うのは、いまの所、難問である。

ピークの時間遅れの変動の問題はアメリカでも困ったとみえ、概念モデルの相互比較のとき、評価方式の中に、流況曲線が入っていたし、月最大流量についての評価もあった。月統計を用いれば難点が避けられるというのは、2 日移動和、4 日移動和を用いるのと同じ考え方であるが、我々はかつて、月末に降った大雨が翌月の流量となったため、目で見るとハイドログラフはよく合っているのに、月流量統計が悪く出て（日流量のハイドログラフは悪くとも、月流量にするとよく合うのがふつうである）、残念な思いがしたことがある。

6.8 出発モデルの多様化

我々の方式は図 4 のモデル（後に 4 段目タンクの流出の係数を 0.003 に改めた）から出発し、流出、浸透の係数を修正して行く。したがって、得られたモデルは図 6 の型で、流出孔の位置は固定されている。一方、かつて我々が試行錯誤によって得たモデルは、たとえば図 8 の a), b) に示すように図 6 の型とは一致しない。これに関しては、現在のフィード・バック方式は第 1 近似を得るためのもので、この方式でかなりよい結果が出てから、仕上げの段階で流出孔の位置のパラメータを動かせばよいと考えていた。しかし、予期した以上に、RQ(I), RD(I) によるフィード・バック方式の収束が速かで、しかも結果がよいので、出発モデルの多様化を考えることにした。そのとき、図 8 b) の猿ヶ石川田瀬のモデルと図 6 の型のモデルとの相違は無視し得ると思われる。すなわち猿ヶ石川田瀬は図 4 のモデルから出発して、十分よい結果が出ることが予想され、実際にそうであったが、図 8 a) の和賀川湯田のモデルと図 6 の型のモデルとの相違は大きい。図 8 a) の型のモデルでは、小雨に対してもいくらかの流出が 1 段目のタンクから出て来る。これが出るか出ないかは RD(I) の値に影響する。しかも図 8 a) の型は、幾春別川、最上川、和賀川、胆沢川等、いくつかの適用例がある。そこで、図 8 c) のモデルを図 4 のモデルと並んで、出発モデルに用いること

にした。ただし、簡単のため、および従来のプログラムに大改訂を加えないですませるために、1 段目タンクの下の2個の流出孔は一緒にして取り扱うことにした。すなわち、図 8 d) に示すように、下の 2 個の係数の和を、図 6 の型のモデルの下の流出孔の係数 A1 と同じに取り扱い、この A1 を 2:1 に配分したものを、それぞれの係数とする。別な言い方をすれば、A1 を 2:1 に配分すれば和賀川型となり 1:0 に配分すれば従来の図 6 の型となる。なお図 8 c) のモデルでは、和賀川のモデルに合わせ、3 段目タンクの流出孔を底面の高さにつけているが、これを 15 mm の高さにつけても、その相違は大きくない。和賀川で試算してみると、図 8 c) を出発モデルとすると、結果は明らかによくなった (試算 No. 18)。

今後、自動化プログラムを多くの河川に適用して行くうちに、出発モデルの多様化はある程度進行するものと思われる。しかし、あまりに多様化するのは考えものであろう。実際に自動化プログラムを利用するとき、図 4, 図 8 c) のモデルから出発するより、対象河川と似ていて、すでによりタンク・モデルが得られている河川があるときは、そのモデルから出発する方が明らかに有利であろう。しかし、偏った予見により、あまりに特殊なモデルから

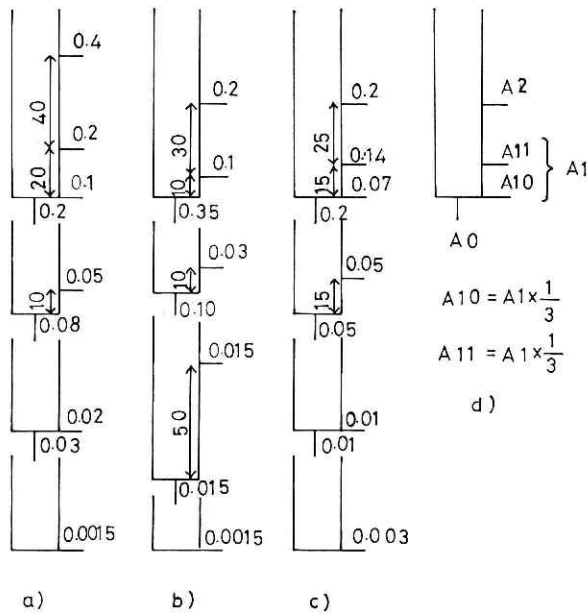


図 8 a) 和賀川湯田 試行錯誤モデル
 b) 猿ヶ石川田瀬 試行錯誤モデル
 c) 和賀川用出発モデル
 d) 和賀川型モデルの 1 段目タンクの構造

Fig. 8 a) Tank model obtained by manual trials and errors in the past for the River Waga at Yuta
 b) Tank model obtained by manual trials and errors in the past for the River Sarugaishi at Tase
 c) Starting tank model for the River Waga at Yuta and
 d) The structure of its top tank

出発すると、予見が誤っていたときには、かえって損をするであろう。我々の自動化方式の適用例があまり多くないから確言はできないが、図4、図8c)のモデルから出発して、5回か10回の繰り返しで、かなりよいモデルに達する。したがって、その段階でどちらがよいかを判定し、よい方の試算を継続すれば、出発モデルの多様化による繰り返し回数の増大はあまり大きくならないであろう。また、このような自動化プログラムを作ることも、そう困難ではない。

日本以外の地域でも、湿潤地域であれば、地域の水文学的特徴に応じて幾つかの出発モデルを与えることにより、現在方式にわずかな修正を与えるだけで、うまく行くのではないかと期待している。

6.9 1 段目タンクからのフィード・バック停止

以上の経過で得られたフィード・バック方式(試算 No. 23)は、和賀川湯田、猿ヶ石川田瀬について、きわめてよい結果を与えた。和賀川湯田については、先に試行錯誤で得たものと比べると、自動化モデルの方が全般的には優れ、試行錯誤モデルは低渇水時に、随所できわめてよい所を見せる。いわば一長一短である。猿ヶ石川田瀬については、両者優劣がつけ難いが、自動化モデルの方がいくらかよいであろう。図9は、和賀川湯田、猿ヶ石川田瀬について、試行錯誤モデルと、自動化モデルを示している。得られたハイドログラフがかなり似ているにもかかわらず、両者のモデルはかなり異っている。相異の第1点は、1段目タンクの上の流出孔の係数が、試行錯誤モデルの方が大きいことである。この影響は算出されたハイドログラフに現れていて、試行錯誤モデルでは大きな出水のピーク流量が全般的に過大に出ている。これは明らかに、自動化モデルに比べて短所であるが、その原因は、試行錯誤の際、意識的、無意識的に、日雨量と日流量を用いる流出解析では、大出水のピークを合わせることにあまり重きを置かなかったことから来ている。大きな出水は、時間雨量、時間流量を用いなければ合うはずがないから、高水のことはあまり気にせず、低水を合わせることに重点を置いたからである。二つのモデルの相違は、1段目タンクの構造だけに限らないが、これについては、次の「評価基準と収束について」の所で考えることにする。

和賀川湯田、猿ヶ石川田瀬でよい結果が出たので、雫石川御所、北上川四十四田、胆沢川石淵について試算を行い、御所、四十四田については、試行錯誤モデルと同程度のよい結果が得られた。御所、四十四田については、前に試行錯誤を行ったとき、どうしてもよく合わない所があった。何か別の理由があるものと考えて、合わせることを断念したのであるが、そのようなデータを用いて自動化を行ったとき、どのようなことが起こるであろうか、あるいは発散しないだろうか、半ば期待し、半ば心配していたのであるが、無事に収束し、試行錯誤モデルに優るとも劣らない程度の結果が出て来た。試行錯誤でどうしても合わなかった場所にはあらかじめマスクしなければ収束しないのではないかと(もしそうならば、自動化は

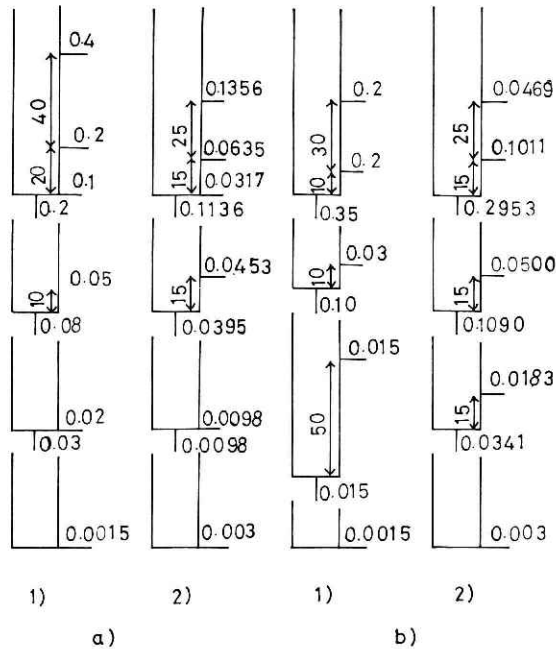


図 9 a) 和賀川湯田, b) 猿ヶ石川田瀬に対する. 1) 試行錯誤によるモデルと,
 2) 自動化によるモデル
Fig. 9 1) Tank model obtained by manual trials and errors and 2) The one obtained
 by automatic calibration—
 a) River Waga at Yuta, b) River Sarugaishi at Tase

実用上あまり役に立たない) と心配していたのに、マスクなしで収束し、その上、試行錯誤モデルで合わなかった所は、自動化モデルでも合っている。自動化プログラムは一つの難関を通過したと言うべきであろう。

胆沢川石淵についての試算は、ある所から振動を始めた、石淵では、雨量は石淵ダムの 1 地点に過ぎない。1 地点雨量による流域雨量は大きな誤差を伴うから、毎日の雨量に大きく支配されるピーク流量は、あるいは大きく、あるいは小さく出る。したがって RQ(1), RQ(2), RD(1), RD(2) にも大きな誤差を伴う。かくして 1 段目タンクを修正すると、下の方で合わなくなり、そこで 1 段目に修正が施されてもとにもどるということで振動が生じたい。我々が試行錯誤を行うとき、大出水はある程度以上合わないのが当然と、軽く評価している。その考え方が、自動化のフィード・バックにも必要であると考えられる。そこでまず、1 段目タンクについての RQ(I), RD(I) (I=1, 2) の効果を従来の 1/2 にする方式をとってみたが、うまく行かず、振動が始まる前のモデルを出発点とし、以後 RQ(I), RD(I) (I=1, 2) からのフィード・バックを停止して、以後の計算を進めることにした。プログラムでは RQ(I)=1, RD(I)=1 (I=1, 2) と置き換えればよい。この方式はうまく収束し、得られたモデルが算出したハイドログラフは低水部分でよい形となり、先に得られていた試行錯誤モデルとはほぼ

同様の結果を示した。

雨量地点が1地点の場合、それを流域雨量とすれば、それが大きな不規則変動を伴うことは止むを得ない。したがって、自動修正をある程度行った後、1段目タンクからのフィード・バックを停止して自動修正を継続することは必要であると思われる。タンク・モデルはその非線型の構造により、大きな不規則変動の主要部分を、1段目タンクの流出孔、とくに上の流出孔から溢れさせてしまう。したがって何回かの修正で1段目タンクの大体の形を合わせた後、1段目タンクからのフィード・バックを切れば、流域雨量に伴う不規則変動の大きな部分が除去され、以後の繰り返し修正で下の段のタンクがよい形になるものと思われる。

石淵の場合だけに限らず、自動化の繰り返し修正が一応収束した所で、1段目タンクからのフィード・バックを切ってさらに自動修正を続ければ、低水部分のハイドログラフの形はさらによくなるであろう。ただし、低水部分がよくなる代りに、高水部分はいくらか悪くなるだろうから、高水部分の評価を軽くするような方式を作らない限り、よくなったことを示すことができない。

7. 評価基準と収束とについて

1) 収束の意味

我々はこれまで収束という言葉をあいまいに使って来た。それはフィード・バックの繰り返しによる接近が、数学における収束のようにはっきりしたものでないからである。先に述べ、図9に示すように、試行錯誤で得たモデルと、自動化で得たモデルとは、かなり相違している。我々は最初、フィード・バックの自動的繰り返しにより、先に得られた試行錯誤モデルに近づいて行くことを期待したが、試算を始めて間もなく、そうは行かないことを知った。試みに、先に我々が得ていた試行錯誤によるモデルを出発点として、自動化フィード・バックを繰り返すと、それはある所まで動いて行き、それから発散する。その試算で得られた一番よさそうなモデル（評価方法が定まらない以上、何が最良か不明であるが、RQ(I), RD(I), 平均2乗誤差をながめて総合的に判断した）は、図4のモデルから出発したときの終点と異っている。我々が出発点として用いた試行錯誤によるモデルは、高水のピークが大きく出すぎるという欠点があったから、自動化により、よりよいモデルの方に動くのは当然であるが、その終点が図4のモデルから出発した場合の終点とかなり異なるのを見て、失望した。しかし、モデルの形はかなり異っているのに、それが与えるハイドログラフはよく似ているのである。このことを知ってみると、それはある意味で、我々の過去の経験と合うことであった。タンク・モデルのパラメータはある意味でかなり鈍感であって、パラメータをある程度変化させても、出て来るハイドログラフにあまり変化はないのである。

パラメータが鈍感であることは、終点となるべき点がはっきりしないことであり、終点ははっきりしない以上、収束の意味がはっきりしないのも致し方ないと思われる。我々には、

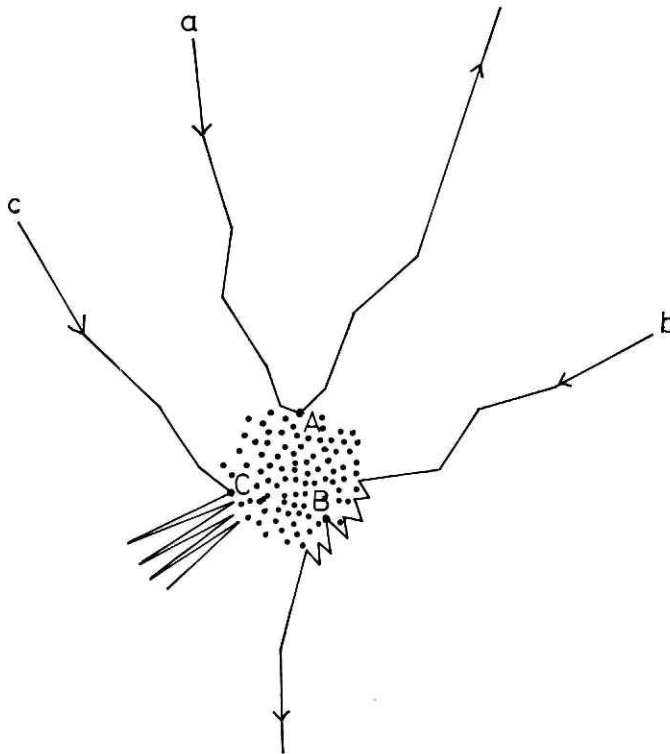


図 10 収束の仕方を示す模式図

Fig. 10 Schematic figure showing the ways of convergence

フィード・バックの自動的繰り返しによる接近の仕方が図 10 のようになっていると思われる。我々は $RQ(I)$, $RD(I)$ のフィード・バックにより目的に近づくのであるが、目的に近づくに従って $RQ(I)$, $RD(I)$ は 1 に近づく。そうすると $RQ(I)$, $RD(I)$ に含まれる誤差の影響が大きくなり、 $RQ(I)$, $RD(I)$ が持つ有効な情報は少くなる。したがって $RQ(I)$, $RD(I)$ に従って動いても、目的地に近づくとは限らない。目的地の近くには多くの障害物があつてはね返されるのである。そして、一度はね返されてバランスが崩れると、フィード・バックが悪い方への加速を始めて、目的から遠ざかってしまうことが多い。もちろん、図 10 の b のように、目的地の近くをしばらくうろろう動き回ってから遠ざかるものや、c のように振動を繰り返すものもあるが、ともかくある程度まで近づくと、反発力がはたらいて、それ以上近づけないらしい。図 10 を見れば、一番近づいた点 A, B, C が、出発点により異なることも当然のこととして理解できるであろう。資料の期間が短いとか、雨量地点の数が少ないとか、河床変動が大きく水位流量曲線が不安定であるとかすれば、誤差は大きくなり、それは図 10 で言えば、障害物のある範囲が大きいことに相当する。したがって、3 点 A, B, C の距離も大きいことになる。しかし、たとえ 3 点 A, B, C が互いに離れていても、誤差が大きいことを考えれば、A, B, C は似ていることになるのである。

誤差に邪魔されて、これよりは近づけない所まで行けば、それが収束であると考えより致し方あるまい。

2) タンク・モデルの解の一意性の得難さと、その鈍感さについて

タンク・モデルの解の一意性が得られにくいこと、したがって得られた解の最適性が保証しにくいことは、パラメータの鈍感さによるものと思われるが、この鈍感さはある意味で、タンク・モデルの長所であると考えられる。鈍感ということは、操縦性が悪く、その代り安定で暴走しないことを意味する。操縦性が悪いから、データが大きな誤差を含むとき、または代表性に乏しい雨量が与えられたとき、タンク・モデルはそれに追従できない。試行錯誤によるにせよ、自動化フィード・バックによるにせよ、タンク・モデルは、ある場合には、与えられた実測ハイドログラフのよい近似を与えることができない。それにもかかわらずというか、それゆえにというか、そのタンク・モデルは、その後新たにデータが加わった場合、その新しい期間において大過ない推定を与えることができるのである。このことは、WMOの概念モデルの相互比較のときにも認められて、タンク・モデルは予報にすぐれているという評価が与えられた。

近時、計算機の発達に伴い、リニア・プログラミングとか、ダイナミック・プログラミングなどの手法が開発され、最適解が大切にされる。最適解が得られることは数学的には審美感を満足させるし、実用上からは説得に便利であるから、重要視されるのは無理もないが、ある種の最適解は不安定で、条件や評価法のわずかな変動により、大きくゆれ動く。最適解と大差がない多くの解が広い範囲に分布しているときは、前提条件や評価を少し変えることによって、最適解が広い範囲を動き回るのである。こういう場合、最適解の利点は、実質上の利益より、説得力の方にあることになろう。場合によっては、ある解を最適解とするための前提条件や評価法が、あとで探し求められる。どんなに工夫しても、ある解を最適解とするための条件や前提条件が発見できないことがあるから、最適化手法は現実には有益であるという極端な意見もあるが、それはさておき、最適化の解が得られるのは、いくつかの条件により土俵を限定するからである。土俵を限定し、その中で最適化することは、多くの場合、土俵外の世界に何かの損失を与えることによって達せられる。最適解を追う考え方は、つねに総論賛成、各論反対に導かれるのではなかろうか。流出モデルは水文学の一小部分に過ぎない。流出モデルが鈍感で、多くの変更を許容する余地を持つことは、水文学の全般的立場からは一つの利点であると思われる。

最適解の考え方に異議を提出し、最適解よりもむしろ安定性、鈍感さの方が大切であるという、それは最適化を狭い範囲で考えるからで、安定性、鈍感さが広く考えた場合の最適解となるということではないかという、もっともな反論がある。しかし我々はこの反論にも納得しない。いくら広く考えても、広さは単に相対的なものに過ぎない。最適解だけを目的とせず、いくらかの幅を持って、最適解と実質的には大差のない領域の内でものを考えるゆ

とりが大切であると思う。

タンク・モデルで解の一意性が得られにくい他の一つの理由は、パラメータの間に関連性があることである。たとえば、2 段目、3 段目のタンクで、流出孔の位置を上げれば、流出は減り、浸透が増すが、それに対応して、流出の係数を増し、浸透の係数を減らせば、ある程度似た結果が出て来る。我々が図4の出発モデルで、流出孔の高さを固定したのは、このことを考え、固定しても大過あるまいと考えたからである。

以上は1 個のタンク内におけるパラメータの関連性であるが、異ったタンクのパラメータ間にも関連性がある。たとえば安定な低水流量は、第3、第4のタンクからの流出の和で表わされるが、両者の比率をいろいろ動かしても、双方の、とくに3 段目タンクの時定数をそれに応じて変えれば、実測と合わせることができる。

パラメータ間に関連性が深いことには不利な点もあって、自動化フィード・バックの繰り返して、近似がある限度まで達し、誤差によって反発されたとき、バランスが崩れて一方的に動き出し発散するのは、ここに原因があると思われる。

3) 平均2乗誤差に対する手直し

あるモデルのよさを見るには、推定、実測のハイドログラフを比較するより致し方ない。二つのハイドログラフの間の距離として、他に適当なものがみつけない以上、平均2乗誤差を用いるより致し方あるまい。ハイドログラフの形、減衰の仕方が似ていることも一つの大切な点であると考え、導関数間の距離も利用したいと考えたが、実測ハイドログラフに乗っている雑音が微分により増幅されるため、うまく利用できなかった。雑音の影響を除くため、平滑化して微分することも考えたが、ハイドログラフは、大出水のとき、突然大きく上昇する。かかる大切な情報は、平滑化で大きくゆがめられてしまう。結局、導関数間の距離を今回はあきらめることにした。

平均2乗誤差を用いるとして、流量そのものを用いるより、流量の対数について誤差を計算した方がよいと考えていた。流量について求めた誤差は、高水時の誤差で大勢がきまり、低水時の評価ができないからである。しかし、ともかく両方とも算出し、 $RQ(I)$, $RD(I)$ と、この二つの標準誤差

$$\{\sum(\tilde{Q}(n)-Q(n))^2/N\}^{1/2}, \{\sum(\log \tilde{Q}(n)-\log Q(n))^2/N\}^{1/2}$$

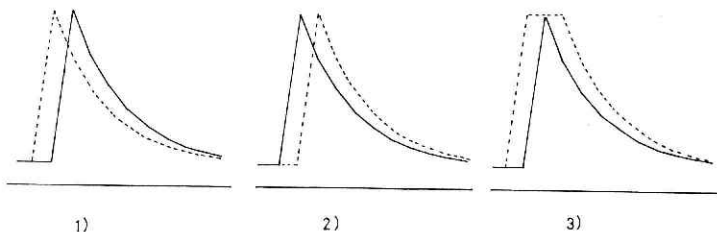


図 11 ピークのずれ
Fig. 11 Irregular shift of discharge peak

をながめて、総合的な判断を下すことにした。

上記の標準誤差のどちらを用いるにしても、以前から困っていたのは、不可避免的にしばしば起こるピークの1日ずれの問題である。日雨量、日流量を用いる以上、この不規則変動を避けることはできない。しかも大出水が1日ずれば、その1日で生ずる誤差は、その日を除く残り1年分の誤差に匹敵する。今回はきわめて便宜的な方法により、この難点を避けることにした。実はこの案は前から持っていたが、あまりに便宜的なので使う気がなかったが、今回は必要に迫られて用いることにした。

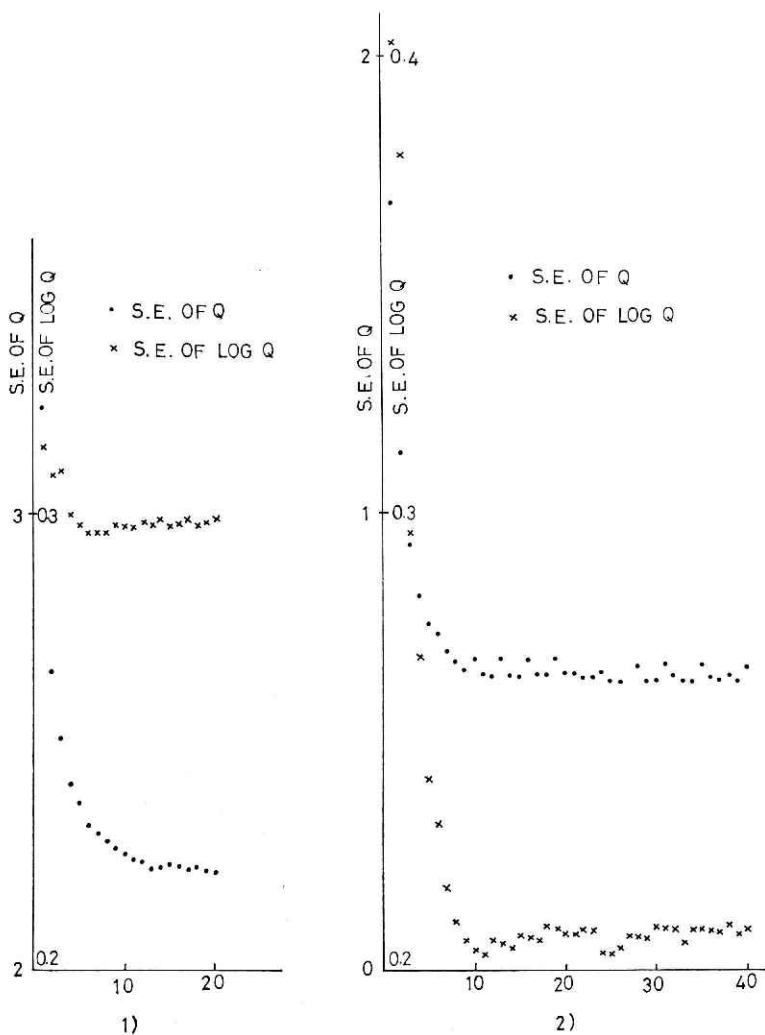


図 12 繰り返しによる標準誤差の変化

1) 雫石川 御所 2) 猿ヶ石川 出瀬

Fig. 12 Change of standard error in the course of iterations

1) River Shizukuishi at Gosho

2) River Sarugaishi at Tase

方法はきわめて単純で、ある日の推定流量を、その日の実測と比較するだけでなく、前日および翌日の実測流量と比較し、そのうち一番近いものとの差をとって、その日の誤差とするのである。この評価法によると、図 11 の 1), 2) の場合はともに、誤差が小さくよい推定であることになる。これで一応、ピークの遅れの不規則変動の影響を逃れることができたが、この方式によると、図 11 の 3) のような場合にも、誤差は小さくなりよい評価が与えられるという欠点が生ずる。しかし、現実にはこういう変なことはほとんど起こらないであろうから、実質的にはあまり欠点とならないであろう。

なお、何かの原因によるものであろうが、低水中、雨がなにもに 1 日だけ大きい流量が出たり、1 日だけ小さい流量が出たりすることがある。この場合、推定流量の方はなめらかなハイドログラフが出るのであるが、この評価法では実測値の 1 日異常は評価からは無視される。これは多分、この評価法の一つの長所と考えてよからう。

和賀川湯田についての計算例では、流量についても、流量の対数についても、この方式を用いることによって、標準誤差は約 2/3 に減少した。

4) 評価基準の定め方

フィード・バック方式に手直しを加えながら試算を続けているとき、我々は一番よいと思われるモデルを、RQ(I), RD(I) と上記の 2 個の標準誤差をながめて、総合的に判断していた。

表 2-1 繰り返し計算による、評価値の変化。(北上川水系, 和賀川, 湯田)

Table 2-1 Values of criteria versus iteration No.
(River Waga tributary of River Kitakami at Yuta)

No.	RQ(1)	RQ(2)	RQ(3)	RQ(4)	RQ(5)	標準誤差(Q) 標準誤差 (log Q)	RQ, RD の評価	誤差 評価	総合 評価
	RD(1)	RD(2)	RD(3)	RD(4)					
1	1.0663 1.4900*	0.9357 1.6123*	0.8569 1.1038	0.9676 0.9017	—	2.7458 0.2796	0.1537	3.9188	4.2093
4	1.0200 1.0603	0.9761 1.1998*	0.8940* 1.1485	0.9745 1.0281	—	2.3664 0.2714	0.0607	3.6008	3.6516
7	1.0203 1.0713	0.9707 1.0780*	0.9488* 1.0355	0.9879 1.0331	—	2.3517 0.2692	0.0305	3.5745	3.5875
10	1.0158 1.0203	0.9801 1.0389	0.9671* 1.0567*	0.9931 0.9897	—	2.3398 0.2695	0.0196	3.5690	3.5744
13	1.0120 1.0060	0.9830 1.0428*	0.9841 1.0516*	1.0014 0.9767	—	2.3292 0.2692	0.0156	3.5598	3.5632
16	1.0135 1.0056	0.9806* 1.0262	0.9834 1.0598*	1.0007 0.9814	—	2.3300 0.2687	0.0158	3.5565	3.5600
○19	1.0097 1.0033	0.9812* 1.0290	0.9986 1.0370	1.0082 1.0475*	—	2.3228* 0.2674*	0.0143*	3.5420*	3.5449*
20	1.0103 1.0022	0.9818 1.0359	0.9919 1.0396*	1.0068 1.0418*	—	2.3253 0.2676	0.0146	3.5451	3.5481

表 2-2 繰り返し計算による評価値の変化. (北上川水系, 猿ヶ石川, 田瀬)

Table 2-2 Values of criteria versus iteration No.
(River Sarugaishi tributary of River Kitakami at Tase)

No.	RQ(1)	RQ(2)	RQ(3)	RQ(4)	RQ(5)	標準誤差(Q)	RQ, RD の評価	誤差 評価	総合 評価
	RD(1)	RD(2)	RD(3)	RD(4)		標準誤差 (log Q)			
1	1.8154* 2.0414*	1.1704 1.9701	0.8100 1.5120	0.6478 1.4255	0.4959	1.6885 0.4046	0.4378	4.3842	6.1961
5	1.1579* 0.5837*	1.1154 1.2369	0.9753 1.2018	0.8433 0.9834	0.8719	0.7571 0.2423	0.1280	2.5385	2.8429
9	0.9942 -3.7823*	1.0684 1.0892	0.9795 1.0171	0.9453 0.8362*	1.0045	0.6591 0.2066	0.7982	2.1686	8.2716
13	1.1371* 1.2689*	1.0124 1.1222	0.9910 0.9367	0.9431 0.8316	0.9971	0.6857 0.2060	0.0761	2.1711	2.3008
17	1.0609 1.3692*	1.0355 1.1004	1.0009 0.9466	0.9436 0.8551*	0.9876	0.6501 0.2065	0.0752	2.1649	2.2917
21	1.0606* 1.3709*	1.0366 1.0978	1.0054 0.9415	0.9394 0.9111	0.9787	0.6521 0.2081	0.0736	2.1808	2.3017
○25	1.0551* 1.0850	1.0095 1.0238	1.0054 0.9296	0.9567 0.8768*	1.0008	0.6337 0.2038*	0.0365	2.1342*	2.1653*
27	0.8409 -2.0495	1.0450 1.0212	1.0144 0.9460	0.9570 0.9068	0.9589	0.6300* 0.2077	0.5120	2.1704	5.5607
29	1.0406 1.3853*	1.0165 1.0291	1.0160 0.9122	0.9578 0.9029*	0.9597	0.6372 0.2069	0.0724	2.1649	2.2828
33	1.0332 1.3661*	1.0208 1.0535	1.0133 0.9012	0.9600 0.8783*	0.9724	0.6333 0.2064	0.0703	2.1590	2.2704
◎37	1.0042 0.9835	1.0288 1.0400	1.0162 0.9034*	0.9577 0.9047*	0.9649	0.6344 0.2084	0.0320	2.1784	2.2018
38	1.0104 0.9695	1.0356 1.0219	1.0178 0.9255	0.9554* 0.9133	0.9566*	0.6427 0.2103	0.0319*	2.1990	2.2221

表 2 はフィード・バックの自動的繰り返しの進行に伴い, RQ(I), RD(I) および 2 個の標準誤差がどのように変わっていくかの一部を示している. 表中, RQ(I), RD(I) の欄に——があるのは, その対象が出現せず, したがってその値が得られなかったことを示す. なお, この表では, 繰り返し回数の多いものは, 2 つおき, 3 つおき等に結果を示し, また発散部分を省略してある. この表の RQ(I), RD(I) に * 印があるのは, 1 とのへだたりが大きい 2 個で, これだけがフィード・バックに用いられたのである. また標準誤差に * 印のあるのは, 最小値である.

表 2 を見ると, Q の標準誤差, $\log Q$ の標準誤差の最小が一致すること, 近くで起こることもあるが, かなりへだたっていることもある. 標準誤差の最小で最良のモデルを定めようとすると, 2 個の評価が異なることは困るのであるが, 方眼紙にプロットしてみると, 図 12 に示すように, 標準誤差は初めの 5~10 回のフィード・バックで急速に小さくなり, 以後は小さく一進一退することが多い.

表 2-3 繰り返し計算による評価値の変化. (北上川水系, 雫石川, 御所)

 Table 2-3 Values of criteria versus iteration No.
 (River Shizukuishi tributary of River Kitakami at Gosho)

No.	RQ(1)	RQ(2)	RQ(3)	RQ(4)	RQ(5)	標準誤差 (Q)	RQ, RD の評価	誤差 評価	総合 評価
	RD(1)	RD(2)	RD(3)	RD(4)		標準誤差 (log Q)			
1	1.2892 3.4402*	0.9001 1.6071*	0.8648 0.9600	0.8454 1.2581	—	3.2417 0.3151	0.4655	4.5208	6.4891
5	1.1059* 1.0775	1.0146 1.1749	0.9139 1.0288	0.9100* 1.0072	—	2.3705 0.2981	0.0674	3.8086	3.8678
6	1.0925* 0.9867	1.0184 1.1417*	0.9453 0.9981	0.9405 0.9883	—	2.3222 0.2964*	0.0507	3.7654	3.7993
7	1.0778* 0.9745	1.0306 1.1072*	0.9572 0.9965	0.9598 0.9464	—	2.2998 0.2966	0.0421	3.7532	3.7767
9	1.0633* 0.9067*	1.0429 1.0628	0.9872 0.9907	0.9826 0.9572	—	2.2711 0.2981	0.0353	3.7476	3.7641
13	1.0493* 0.9355	1.0302 1.0212	1.0239 0.8889*	1.0148 0.9821	—	2.2282 0.2981	0.0325*	3.7217	3.7359
17	1.0388 0.9089*	1.0337 0.9899	1.0392 0.9203*	1.0243 0.9271	—	2.2214 0.2993	0.0350	3.7273	3.7437
19	1.0424* 0.9330	1.0263 0.9672	1.0385 0.9504	1.0142 0.9038*	—	2.2191 0.2987	0.0326	3.7211*	3.7353*
○20	1.0391 0.9013*	1.0322 0.9589	1.0459* 0.9339	1.0155 0.9196	—	2.2146* 0.2993	0.0362	3.7232	3.7408

元来, 雨量は大きい不規則変動を伴うもので, 大きな出水の中には, 推定と実測とがどう
 しても合わないものがあるし, また雪の計算の場合, 寒さと雨との時間的ずれから, 計算値
 では雪となったのに, 実測では大きな出水であったりする. 標準誤差のかかなりの部分が, こ
 れらの場所から発生するから, ある程度まで標準誤差が小さくなると, それから先はほとん
 どよくなるのである. 我々は $\log Q$ の標準誤差ならば, 高水のウェイトが小さくなるから,
 いくらか有効であろうと期待したが, 図 12 に見るように, 両者の動き方は似たような
 ものである. 誤差評価が 2 個あるのは不便であるから, 適当なウェイトで合成して 1 個にま
 とめたい. ウェイトをいくらにするかで迷い, いくつか試みたが, 図 12 に見るように, $\log Q$
 の標準誤差を目盛りを 10 倍にしておいて, Q の標準誤差と大体つり合うから, 仮りにウェイト
 を 1:10 とし,

$$\{(\Sigma(\bar{Q}-Q)^2/n)+(100 \Sigma(\log \bar{Q}-\log Q)^2/n)\}^{1/2}$$

を誤差評価とする. 表 2 に出ているのはこの値である.

誤差評価の他に, RQ(I), RD(I) が大切な判断の基準であるが, 計算機に判断させるとす
 れば, これも 1 個の数値にまとめる必要がある. やはり 2 乗平均を用いることにし

$$\{(\Sigma(RQ(I)-1)^2+\Sigma(RD(I)/2-1)^2)/n\}^{1/2}$$

表 2-4 繰り返し計算による試価値の変化. (北上川水系, 北上川, 四十四田)

Table 2-4 Values of criteria versus iteration No.
(River Kitakami tributary of River Kitakami at Shijushita)

No.	RQ(1)	RQ(2)	RQ(3)	RQ(4)	RQ(5)	標準誤差(Q) 標準誤差 (log Q)	RQ, RD の評価	誤差 評価	総合 評価
	RD(1)	RD(2)	RD(3)	RD(4)					
1	2.0873* 1.7229	1.1969 2.5489	0.7858 2.0221	0.5843 3.4734*	0.4475	2.2101 0.4666	0.6885	5.1630	8.6050
3	— —	1.3508 2.0690*	0.8228 2.0413	0.6479 2.8577*	0.6028	1.5914 0.4016	0.5149	4.3198	6.7210
5	1.1182 —	1.2164 1.5231	0.8988 1.6045*	0.7190 2.7905*	—	1.1832 0.3175	0.3984	3.3883	5.2302
7	1.4225* 0.9971	1.0788 1.9077*	0.9279 1.2825	0.7594 1.5279	—	1.1397 0.2778	0.2606	3.0027	3.9760
9	1.2261* 1.2659	1.0095 1.3586	0.9846 1.1770	0.7920 2.5873*	—	0.9811 0.2578	0.3127	2.7584	4.1697
11	1.1632 1.1107	0.9869 1.3419*	0.9672 1.1327	0.8184* 1.3158	—	0.9460 0.2632	0.1237	2.7968	3.0583
○13	1.1264* 1.0839	0.9659 1.2527	0.9659 1.0226	0.9259 1.5305*	—	0.9347 0.2573*	0.1183*	2.7375*	2.9823*
14	1.0857 0.9957	0.9442 1.2787*	0.9457 1.0404	0.8926 1.5389*	—	0.9309 0.2657	0.1211	2.8154	3.0649
15	1.0707 1.1424	0.9239 1.1896	0.9067 1.1029	0.8328* 1.6553*	—	0.9613 0.2836	0.1464	2.9945	3.3333

表 2-5 繰り返し計算による評価値の変化. (北上川水系, 胆沢川, 石淵)

Table 2-5 Values of criteria versus iteration No.
(River Izawa tributary of River Kitakami at Ishibuchi)

No.	RQ(1)	RQ(2)	RQ(3)	RQ(4)	RQ(5)	標準誤差(Q) 標準誤差 (log Q)	RQ, RD の評価	誤差 評価	総合 評価
	RD(1)	RD(2)	RD(3)	RD(4)					
1	1.1547 1.5234*	1.0273 1.5627*	0.9831 1.1934	0.9481 0.9484	—	3.5057 0.3015	0.1522	4.6239	4.8679
2	1.1443* 1.1838	1.0623 1.4220*	0.9807 1.1450	0.9514 0.9369	—	3.1897 0.3001	0.1041	4.3795	4.5015
3	1.1381* 1.1512	1.0568 1.2653*	1.0267 1.1073	0.9821 0.9435	—	3.1272 0.2989*	0.0793	4.3259	4.3980
4	1.1316* 1.0836	1.0662 1.1633*	1.0686 1.0672	1.0084 1.0287	—	3.0925 0.3005	0.0673	4.3120*	4.3642*
○5	1.1174* 1.0376	1.0814 1.1048	1.1009* 1.0345	1.0360 1.0006	—	3.0735* 0.3035	0.0664*	4.3194	4.3702
6	1.1150* 1.0104	1.0884* 1.1105	1.0837 1.0959	1.0248 0.9118	—	3.1110 0.3050	0.0671	4.3567	4.4080
7	1.0992 0.9582	1.1053* 1.0584	1.1351* 1.0769	1.0658 0.8782	—	3.0871 0.3093	0.0790	4.3700	4.4409
8	1.1119* 0.9541	1.0852 1.0951	1.0943* 1.1129	1.0316 0.8173	—	3.1403 0.3075	0.0742	4.3951	4.4572

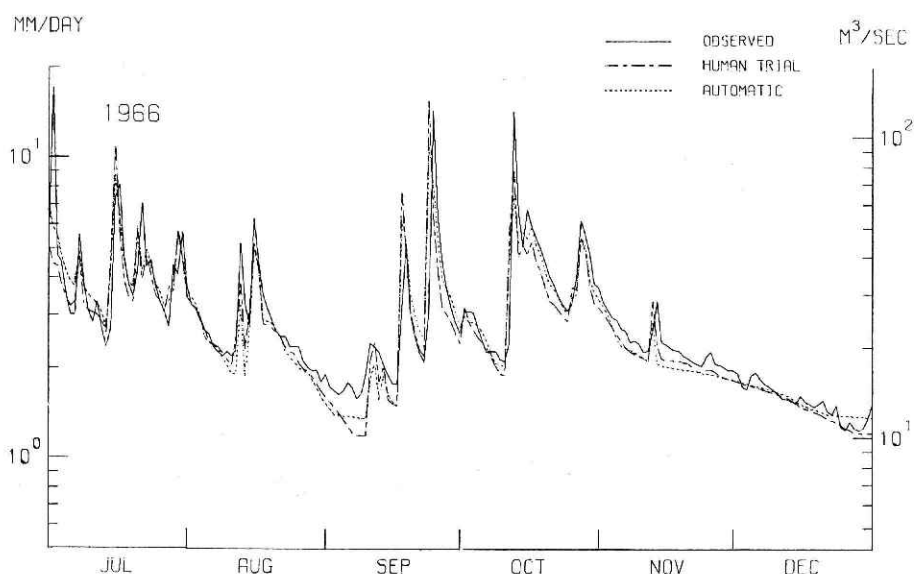


図 13 最終結果の例
Fig. 13 An example of final results

を用いることにした。ここに n はふつう 9 であるが、 $RQ(I)$, $RD(I)$ に欠けたものがあるときは 9 より小さい。表 2 に RQ , RD の評価として出ているのがこの値である。この値を計算してみると、表 2 に見るように、 RQ , RD の評価の最小は、誤差評価の最小とほぼ一致する。結局どちらで判定しても大差あるまい。判定基準を 1 個にするためには、やはりこの両者を合成してまとめなければならない。仮りに 1:10 の比で合成し、

$$\{(\text{誤差評価})^2 + (10 \times (RQ, RD \text{ の評価}))^2\}^{1/2}$$

を総合評価とすることにした。表 2 に出ているものである。

我々が先に、 $RQ(I)$, $RD(I)$ と標準誤差とをながめて定めた終点は、表 2 の No. の欄に○印で示してある。猿ヶ石川田瀬では No. 25 にするか No. 37 にするか迷って、No. 37 にしたのである。これと上記の総合評価による終点とは、ほぼ一致している。上記の総合評価はきわめて便宜的に仮りに定めたものであるが、一応役に立つであらう。この No. 37 と人間が試行錯誤で求めたものと実測値とを示したのが図 13 である。

8. 雪のモデルのパラメータの決定法

1) 雪のモデル、およびその自動化の重要性

わが国の大河川のほとんど全部は、上流が積雪地域である。したがって、積雪・融雪のモデルなしでは、河川流出モデルの価値は激減する。現在、我々が持っている雪のモデルの原理はきわめて簡単であるが、それにもかかわらず、かなりよい結果を与えて来た。その際困るのはパラメータの定め方で、試行錯誤でどのようにして定めるのか、筋の通った説明に欠

けていた。したがって、雪のモデルのパラメータの定め方をプログラム化することはきわめて重要である。今回得られた方式には、不十分な点が多く、いずれ改善するつもりであるが、ともかく一応の役に立つものと思われる。なお、雪のモデルは流出モデルに先行するもので、冬から春にかけて、タンク・モデルへの入力は、雪の計算によって与えられる。その意味からも、雪のモデルの自動化ができないうちは、タンク・モデルの自動化ができたとは言えないのである。

2) 雪のモデルのあらまし

自動化の説明の前に、まず雪のモデルのあらましを説明しなければならない。冬になると、雪は山の上から積もり始め、春になると山すそからとけて行く。これを高度別地帯分割によって表す。流域を等高度間隔の等高線で4地帯に分割する。 i 番目の地帯の毎日の平均気温 T_i は

$$T_i = T + T_0 - (i-1)\Delta T \quad (i=1, 2, 3, 4)$$

で与えられるとする。ここに T は各気象観測点の日気温の平均、 T_0 は補正值、 ΔT は地帯ごとの温度低下で、100 m につき 0.6°C の温度低下として ΔT を定めている。気象観測点は一般に平地にあり、第1地帯の平均高度と気象観測点の高度の平均とは異なるから、補正 T_0 が必要となるのである。

気象観測点の日気温 T は、

$$T = \alpha T_{max} + (1-\alpha) T_{min}$$

で与えられるとする。 T_{max} 、 T_{min} は日最高、最低気温である。

ある日の地帯 i の降水量が P_i であったとする。 i 地帯の平均気温 T_i が 0°C 以下ならば、 P_i は雪で、それは積雪量に加えられる。 T_i が 0°C より高ければ、 P_i は雨で、その上、気温および雨により積雪量の一部が融ける。融雪量は次式で与えられる。

$$mT_i + (1/80)T_i P_i$$

ここに m は融雪の定数で、我々は $m=6$ を用いる。上式の第2項は雨水の温度が気温に等しいとし、雨水が積雪を融かす量である。ただし第2項は、第1項に対し、無視し得るほど小さい。

雪のモデルの中で一番大切なのが、地帯別降水量増加で、高度が高くなるにつれ、降水量は1次式として増加し、地帯ごとの降水量は

$$1+d, 1+2d, 1+3d, 1+4d$$

と比率でふえると仮定する。あるいは流域によっては、ある程度の高さから降水量増加は停滞するとし、地帯別高水量は、次のように与えられるとする。

$$1+d, 1+2d, 1+3d, 1+3d$$

北上川の各支流量で、 $d=0.25\sim 0.35$ の程度であるが、 $d=0.3$ とすれば、山の中腹以上では、雨量観測点における実測降水量の2倍程度の降水量ということになる。このように d を大きくしないと、春の雪どけ水を実測流量に合わせられないにもかかわらず、夏期の出水に対しては、流域雨量と雨量観測点雨量とを同じ程度の大きさとしないと (10~20% 程度の割り

増しをした方がよいこともある), 実測に合わない. 夏期も, 雨量は高度につれて増加するであろうが, 夏と冬とで増加率に大きな変化があるとしなければならない.

かくして, m 月の地帯 i における雨量 P_{mi} は

$$P_{mi} = (1 + C_m d_i) CP$$

で与えられるとする. ここに d_i は $(d, 2d, 3d, 4d)$ または $(d, 2d, 3d, 3d)$, C_m は冬期 12 月, 1 月, 2 月は $C_m=1$, 夏期 5 月~9 月は $C_m=0$ とする. 夏期に $C_m=0$ とする代りに, 年間を通じて補正定数 C を用いて, 夏期の流域雨量補正を表わしているのである. 秋から冬への移り変わり, 冬から春への移り変りのときの C_m をいくらしにするかは問題であるが, 仮りに 11 月は $C_m=1/2$, 3 月は $C_m=1$, 4 月は $C_m=1/2$ とする.

ここで不思議なのは, 最上川, 琵琶湖, 北上川のいくつかの流域で, 10 月の C_m を負にする必要が生じたことである. 我々は長いこと 5 月~10 月で $C_m=0$ として計算して来たが, 最上川本川上流部, 琵琶湖, 和賀川で, 共通して, 10 月の推定流量が実測より大きくなった. いろいろな方式で補正を行おうとしてうまく行かず, 10 月の流域雨量は平地雨量より小さいと仮定せざるを得なかった. これらの流域において, 平地の雨量観測点でいくらか高度差があるものについて比較してみると, 10 月の降水量は高度について負のこう配を持つ傾向が認められる. そこで 10 月の C_m だけは別に定める必要がある. 冬から春への変り目の 4 月, 5 月にもそのようなことがあるのかも知れないが, 雪どけ出水にかくされて検出することができない. 結局季節変化の係数として, 表 3 のものを用いることになる.

3) 地理的条件から定めるパラメータ

(a) 流域の高度範囲 これは地図をながめてきめる. 最低点は測水所の高度である. まれに, 測水所が深い谷底にあり, その高度が流域内の低地よりいちじるしく低いときは, 主な低平地の低い高度を高度の下限とする. 高度の上限を, 孤立した最高峰にするのを避け, それよりやや低い所を, およその見当で高度の上限とする. この高度範囲の定め方に, あまり気を使う必要はない. この高度範囲を 4 等分して地帯の高度幅を定め, この高度幅から, 地帯温度降下 ΔT を定める. ΔT は 0.1°C の精度で定めるが, 高度差 100 m を 0.6°C とするから, 0.1°C は 17 m に当たる. すなわち, 地帯高度幅は 17 m 程度の許容幅を持ち, 流域の高度範囲は $17 \times 4 = 70(\text{m})$ の許容幅を持つ. したがって高度範囲は 50 m 程度の許容幅, つまり 100 m 単位で流域の高度範囲を定めればよいのである.

(b) 地帯面積比率 やはり地図をながめ, これが等差数列になるように, およその見

表 3 降水量地帯別変化に対する季節変化定数
Table 3 Seasonal change constant for zonal change of precipitation.

月	1~3	4	5~9	10	11	12
C_m	1	1/2	0	C_{10}	1/2	1

当で定める. それにはある定数 d_z を定め,

$$1/4 + 1.5 d_z, 1/4 + 0.5 d_z, 1/4 - 0.5 d_z, 1/4 - 1.5 d_z$$

により 4 地帯の面積比率を表せばよい. d_z として, 0~10% を用いる. 0% は山地流域, 10% はかなり広い平地がある場合で, ふつうは 4~6% を用いればよい (表 4).

地帯別面積は, 等高線で地帯に分割し, 地面の面積を測れば出て来るから, 手間を掛けて精密に求めたい気がするが,

その必要はない. 我々は先に, 地帯を等高線で分割すると述べたが, 実は説明の便宜にすぎない. 地帯分割の目的は, 積雪融雪の起こり方を段階的に近似するためである. その分割は高度に支配される部分が大きいであろうが, 斜面の方位, 緯度, その他種々の要素にも左右されるであろう. かかる不明の部分が大きいから, 地帯面積比率を等差数列で近似し, 1 個の定数 d_z で表すのである. したがって, まず d_z をおよその見当で定め, 必要があれば後で調節すればよい.

実は d_z と降水量の地帯増加 d との間には密接な関係があり, 山地の面積を小さく見積もったときは, 降水量増加 d を大きく見積もることによって埋め合わせがつくのである. 後で, 地帯増加 d の調節が行われるから, d_z はおよその見当で定めればよい.

(c) 地帯温度降下 ΔT 100 m 当たり気温低下を 0.6°C として, 地帯高度幅から定める. ふつう 100 m 当たりの温度低下は 0.55°C と言われている. しかし, 流域内には南斜面も北斜面もあるから, 流域内温度較差は, 高度差よりも大きいであろう. 我々がかつて試算により, 100 m あたり 0.6°C の温度低下の方にきめたのは, かかる事実に対応するものであろう.

(d) 温度補正定数 T_0 . 気象観測点の高度の平均と, 第 1 地帯の平均高度 (第 1 地帯の高度の上限と下限の平均で代用する) との差から, 100 m が 0.6°C に当たるとして算出する. ただし, 気象観測点の微気象的条件その他により, このようにして定めた T_0 が適しているかどうか不明である. T_0 は敏感なパラメータであるから, 後で補正する.

4) 日気温の定め方, 融雪の定数, および蒸発散

(a) 最高, 最低気温に対する荷重 日気温を, 日最高, 日最低気温から $\alpha T_{max} + (1-\alpha) T_{min}$ として定めるときの α を, かつてはいろいろ変化させてみたことがあるが, ここでは $\alpha=0.6$ に固定する. ふつう最高気温と最低気温の差は約 10°C である. α を 0.1 変えると, 日気温に約 1°C の違いができるが, それは補正定数 T_0 を動かすことで補正できる. そこで, α と T_0 とを変えることにより, 雪の積もり方, 融け方をよく合わせたいと欲張ったことがあるが, 今回はそういう細工はやめて, $\alpha=0.6$ に固定するのである.

(b) 融雪の定数 温度 1°C につき, 雪がいくら融けるかという係数で, $m=6$ に固定する. スイスでも, 我々の方式と似た方法で積雪・融雪の計算を行って居り, m は 5 より小

表 4 地帯別面積比
Table 4 Areal ratio of zones

d_z	S_1	S_2	S_3	S_4
0%	25%	25%	25%	25%
2	28	26	24	22
4	31	27	23	19
6	34	28	22	16
8	37	29	21	13
10	40	30	20	10

さいそうで、我々が用いている $m=6$ が大きいのに驚いていた。日本の空気は湿度が高く、潜在エネルギーを大量に持っているからではあるまいか。米国の雪のモデルでは、 m に季節的变化を与え、12月、1月には m が小さく、5月、6月には m が大きくなるようにしている。米国の雪のモデルでは流域の地帯分割を行わないので、 m に季節変化を与えない限り、早く雪がとけて、5月まで持ちこせないのであろう。なお、我々が $m=6$ に固定しているのは、 m が鈍感なパラメータだからである。

(c) 蒸発散 近くの气象台、測候所の蒸発計で測った、過去30年の月蒸発量の平均値を用いる。これを各月の日数で割り、場合によってはいくらか修正して平滑化したものを、流域の日蒸発散とする。修正するのは6月の蒸発量で、統計値をそのまま用いると、6月の蒸発は5月より小さくなる。それを5月より少し大きいくらいにする。我々の計算規則では、雨の日(日雨量1mm以上)は、湿度が高く、蒸発はないとする。雨量1mm以上の日は年に100日ぐらいあり、この規則により、流域の年蒸発量は、蒸発計蒸発量の70%程度になる。先に、6月の蒸発量を大きく修正したが、この規則で、実際の6月の月蒸発量は小さく出るし、空梅雨のときには6月の月蒸発量は大きくなる。この方式には問題があるが、一応これを用いる。実は、わが国の蒸発散は、流出問題ではそれほど重要でない上に、蒸発散を大きく見積もったときは、それに応じて流域雨量を大きく見積もれば、やはり収支は合うことになる。したがって、ある規則で、一応固定して置くことの方が大切であると思う。

5) 流量との対応で定めるパラメータ C, d, C_{10}

a) 流域雨量補正定数 C

ふつうの河川では5月中に雪どけが終る。そこで6月1日から9月30日までの水収支から、流域雨量のための補正定数 C を定める。長期間についての合計を考えれば、地下水貯留量の変動の影響は無視し得ると考える。収入は $C\Sigma P$ 、支出は $\Sigma Q + \Sigma' E$ である。ここに、 Σ は6月1日から、9月30日までの和を、全年度についてとったもの、 P は雨量観測点の実測降水量の地点平均値、 Q はmm/日で表した実測流量、 E は蒸発量で、 Σ' は $P < 1$ の日についての和を表す。この収支が等しいと考えれば、 C は次式で定まる。

$$C = (\Sigma Q + \Sigma' E) / \Sigma P$$

(b) 地帯降水量増加率 d

山に降雪が始まるのは11月半頃からで、5月末までにとける。したがって11月16日から5月31日までの期間の中で水収支を考え、長期間の合計で考えれば、雪の形での貯蓄の影響も、地下水貯留の影響もないと考えてよい。11月、4月の $C_m = 1/2$ 、5月の $C_m = 0$ であるが、これらの月の降水量はあまり大きくないから、仮りに全期間を通じて $C_m = 1$ とする。そうすれば、 P を日降水量としたとき、

第1地帯の日降水総量： $(1/4 + 1.5d_2) \times (1+d)CP$

第2地帯の日降水総量： $(1/4 + 0.5d_2) \times (1+2d)CP$

第3地帯の日降水総量： $(1/4 - 0.5 d_s) \times (1 + 3d) CP$

第4地帯の日降水総量： $(1/4 - 1.5 d_s) \times (1 + (1/3)d) CP$

したがって流域の日降水量は次式で与えられる。

$$\left(1 + \left(\frac{2.5}{2.25}\right)d - \left(\frac{5}{3.5}\right)d \cdot d_s\right) CP$$

これを11月16日から5月31日まで加えたものが収入で、それが支出 $\Sigma Q + \Sigma' E$ に等しいから

$$\left(1 + \left(\frac{2.5}{2.25}\right)d - \left(\frac{5}{3.5}\right)d \cdot d_s\right) C \Sigma P = \Sigma Q + \Sigma' E$$

ここに Σ は11月16日から翌年5月31日までの和を長期間について作ったもの、 Σ' は $P < 1$ の日についての和である。これから

$$d = \left(\frac{\Sigma Q + \Sigma' E}{C \Sigma P} - 1 \right) / \left(\left(\frac{2.5}{2.25} \right) - \left(\frac{5}{3.5} \right) d_s \right)$$

(c) 10月に対する C_{10}

10月の地帯降水量増加率が $C_{10}d$ であるから、上の d の決定法と同様に

$$C_{10}d = \left(\frac{\Sigma Q + \Sigma' E}{C \Sigma P} - 1 \right) / \left(\left(\frac{2.5}{2.25} \right) - \left(\frac{5}{3.5} \right) d_s \right)$$

が得られる。ただしここで Σ は、10月1日から10月31日までの和を長期間を通じて作ったもの、 Σ' は $P < 1$ の日の和である。この両辺を既に得られている d で割れば、 C_{10} が得られる。

6) パラメータの修正

以上で雪の計算に必要なすべての定数は一応定まったのであるが、次にその修正を行う。修正は、一番重要な地帯降水量増加率 d と、敏感な温度補正定数 T_0 について行う。その他、いくつかの定数について、修正を試みたが、うまく行かなかった。

(a) 地帯降水量増加率 d の修正

流出モデルは入力である降水量を出力である流量に変換するものである。出て来た推定流量の良否が、流出モデルのよさによるのはもちろんであるが、実は入力のよしあしが決定的に効くのである。したがって、冬期間の流域降水量を定める d の値は、雪のモデルにおいて一番重要である。先に d の値をきめるとき、11月、4月、5月の C_m をすべて1と置いてあるから、この点からも d の値の修正は必要である。

d の値の修正は次のようにして行う。先に定めた雪の定数、および図4のタンク・モデル（出発モデル）を用いて流出計算を行う。図4のモデルを用いるのは、雪のモデルの決定はタンク・モデルの決定に先行し、その際どんなタンク・モデルがよいか不明だからである。さて、図4のタンク・モデルで算出された推定流量 $\bar{Q}$ と実測流量 Q とを雪どけ出水の時期で比較し、 d を修正するのである。修正は次のように進行する。

- (1) 最初の d を d_1 とし, d_1 を用いて算出した推定流量 $\tilde{Q}$ を, 融雪期2月1日～5月31日の期間における総流出量の点で, 実測値 Q と比較し,

$$R_1 = \Sigma \tilde{Q} / \Sigma Q$$

により, d_1 を修正する. ここに Σ は2月1日から5月31日までの和で, 初年度は前の年から繰り越す積雪量が不明だから捨てる. ここで,

$|R_1 - 1| < 0.01$ ならば, 計算を終了し, d_1 を d の値として用いる. そうでないときは, 修正値を次式で与える.

$$d_2 = d_1 + (1 - R_1) / 2$$

- (2) d_2 を用いて, 再び流出計算を行い, 得られた推定流量 $\tilde{Q}$ により d_2 の評価を行う. すなわち

$$R_2 = \Sigma \tilde{Q} / \Sigma Q$$

とし, $|R_2 - 1| < 0.01$ ならば, 計算を終了し, d_2 を d の値として用いる. そうでないときは, d のわずかな変化の影響は R に1次的に効くと仮定し, 次の3回目の修正を行う.

$$d_3 = d_1 + \frac{1 - R_1}{R_2 - R_1} \times (d_2 - d_1)$$

- (3) d_3 を用いて流出計算を行い, 得られた推定流量により評価値 R を算出し, d_3 がよい値であることを確かめて, d_3 を d の値と定める.

表5はいくつかの計算例を示す. 3回目で誤差はほとんど0になっている.

- (b) 温度補正定数 T_0 およびその他のパラメータの修正の試み

T_0 と ΔT の組合せ 我々はかつての試算から, T_0 が敏感なパラメータであることを知っていた. そこで T_0 と ΔT とを修正すればよからうと考えた. 2個のパラメータの修正には, 2個の評価値を用いればよい. それには融期雪間の平均 μ と, 融雪期間の拡がり σ を用いればよいと考えた. ここに μ は日付 n を変数とし, その日の流量 $Q(n)$ をウェイトと考えたときの1次のモーメント, σ は μ の周りの2次のモーメントの平方根である. つまりハイドログラフをヒストグラムと考えたときの平均値, 標準偏差が μ , σ であり, 実測流量 Q の代りに, 推定流量 $\tilde{Q}$ をウェイトにして求めたものが $\bar{\mu}$, $\bar{\sigma}$ である.

T_0 を大きくすれば, 全体的に暖くなるから, 雪どけは早くなり, $\bar{\mu}$ は小さくなるであろう. そのとき $\bar{\sigma}$ はあまり変化しないであろう. 次に, T_0 を変えずに ΔT を大きくすれば,

表 5 地帯降水量増加率 d の修正
Table 5 Adjustment for the zonal increasing ratio d of precipitation

		1	2	3
和賀川	d	0.2758	0.3224	0.3580
湯田	R	0.9068	0.9596	0.9996
猿ヶ石川	d	0.1775	0.2282	0.2387
田瀬	R	0.8985	0.9827	1.0001
北上川	d	0.2139	0.2328	
四十四田	R	0.9621	0.9915	
雫石川	d	0.2223	0.2780	0.3172
御所	R	0.8884	0.9540	0.9997
胆沢川	d	0.1872	0.2410	0.2736
石淵	R	0.8924	0.9594	0.9995

高い地帯は寒くなるから、雪どけの終りは遅くなるであろう。一方、低い地帯の温度は変わらないから、雪どけの始まりは変わらないであろう。したがって $\bar{\sigma}$ は大きくなるであろうと期待した。したがって、 ΔT を変えずに T_0 を少し変え、次に T_0 を変えずに ΔT を少し変え、 T_0 、 ΔT の変化が $\bar{\mu}$ 、 $\bar{\sigma}$ に及ぼす影響を測った上で、 T_0 、 ΔT を計画的に動かせば、 $\bar{\mu}$ 、 $\bar{\sigma}$ を目的値 μ 、 σ の十分近傍に動かせると期待した。しかし、この方式は失敗した。 ΔT の変化は $\bar{\mu}$ には効くが、 $\bar{\sigma}$ にはほとんど効かないのである。したがって、 T_0 、 ΔT の変化が $\bar{\mu}$ 、 $\bar{\sigma}$ に及ぼす影響を表わす行列の行列式の値は0に近くなり、これを解いても現実的な解は出て来ないのである。

T_0 と d_z との組合せ T_0 、 ΔT がうまく行かないから、 T_0 と地帯面積比率を定める定数 d_z を組合せることにした。 d_z を小さくすれば、高い地帯の面積が増加するから、山の雪が最後まで残り、 $\bar{\sigma}$ が大きくなるであろうと期待した。これも、うまく行かない。

T_0 と融雪定数 m との組合せ ΔT 、 d_z のどちらもうまく行かないから、融雪定数 m を変えてみることにした。これが鈍感な定数であることはかねて知っていたが、 m を小さくすれば、山の雪が消えずに残り、 $\bar{\sigma}$ が大きくなると期待した。我々が用いている $m=6$ が、スイスの例に比べて大きいという話もあり、 m を変えて、最適の m を求めてみることも必要と考えたのである。これもうまく行かなかった。

T_0 と地帯降水量増加率との組合せ 我々は地帯降水量増加に対し、二つの型 $(d, 2d, 3d, 4d)$ と $(d, 2d, 3d, 3d)$ とを用いている。始め $(d, 2d, 3d, 4d)$ を用いてみたが、 $(d, 2d, 3d, 3d)$ の方がよい結果が出る場合がかなりあるので、両者を併用している。北上川についていうと、和賀川湯田、胆沢川石淵については $(d, 2d, 3d, 3d)$ の方がよく、猿ヶ石川田瀬、北上川四十四田、雫石川御所では $(d, 2d, 3d, 4d)$ の方がよいらしい。これにはいくらか説明が付きそうである。 $(d, 2d, 3d, 3d)$ の型に対しては、雨量は八合目あたりが一番多いという話が昔からある。頂上に近くなると、湿った大気は峰をよけて逃げてしまうのであろう。ところで、猿ヶ石川等については、中央山脈をこえて来た大気の下層は途中で水分を失い、高層の大気はなお水分を残しているのではあるまいか。したがって、山の上に行くほど降水量が大きくなるのであろう。この考え方からすれば、高度とともに、加速度的に降水量を増加させることも考えられる。すなわち、地帯ごとの差を $d, d+\Delta, d+2\Delta$ とし、 $(d, 2d, 3d+\Delta, 4d+3\Delta)$ で地帯降水量増加を表せばうまく行くのではないかと期待した。 $\Delta=-d/3$ とすれば $(d, 2d, 2.67d, 3d)$ となり、 $\Delta=+d/3$ とすれば $(d, 2d, 3.33d, 5d)$ となる。この試みもうまく行かなかった。

以上、 T_0 と組合せる相手を ΔT 、 d_z 、 m 、 Δ と変えて、いずれも成功しなかったが、それは σ を評価値としたこと、図4の出発モデルを用いて推定流量を算出していることあたりによるのであろう。この問題はさらに考えたい。

T_0 の補正 結局 T_0 の補正だけを行うことになった。方法は d の補正と同じである。

T_0 と、図4の出発モデルを用いて流出計算を行い、 $\tilde{\mu}$ を求める。これを実測流量による μ と比較するのであるが、このとき $\tilde{\mu}$ は時間遅れなしの推定流量から求めたものであるから、仮りに時間遅れを0.5日として、 μ と $\tilde{\mu}+0.5$ とを比較する。時間遅れは出発モデルによる算出流量と実測との比較から求めているのであるが、雪のモデルが未定の間は算出流量も出ない訳で、したがって仮りに0.5日に固定するのである。 T_0 の補正は次のように行われる。

表6 温度補正定数 T_0 の修正
Table 6 Adjustment for the correction constant T_0 of temperature

		1	2	3	μ
和賀川	T_0	-0.2	0	-0.0596	14.80
湯田	$\tilde{\mu}$	14.92	14.04	14.29	
猿ヶ石川	T_0	0.8	1.0	1.226	6.53
田瀬	$\tilde{\mu}$	6.91	6.50	6.12	
北上川	T_0	1.7	1.9	2.118	9.14
四十四田	$\tilde{\mu}$	9.79	9.24	8.50	
雫石川	T_0	0.7	0.9		15.73
御所	$\tilde{\mu}$	15.93	15.26		
胆沢川	T_0	-1.5	-1.3	-1.217	20.82
石淵	$\tilde{\mu}$	21.35	20.62	20.20	

(a) T_0 を用いて算出した $\tilde{\mu}$ について、

$|(\tilde{\mu}+0.5)-\mu|<0.1$ ならば計算を終了し、 T_0 をそのまま用いる。そうでないときは、次の修正を行う。

$$(\tilde{\mu}+0.5)-\mu>0 \quad \text{ならば} \quad T'_0=T_0+0.2$$

$$(\tilde{\mu}+0.5)-\mu<0 \quad \text{ならば} \quad T'_0=T_0-0.2$$

(b) T'_0 を用いて流出計算を行い、 $\tilde{\mu}$ を出す。それを $\tilde{\mu}'$ とする。このとき

$|(\tilde{\mu}'+0.5)-\mu|<0.1$ ならば計算を終了し、 T'_0 を用いる。そうでなければ、次の修正を行う。

$$(c) \quad T''_0=T_0+\frac{(T'_0-T_0)(\mu-(\tilde{\mu}'+0.5))}{\tilde{\mu}'-\tilde{\mu}}$$

この T''_0 を用いて流出計算を行い $\tilde{\mu}''$ を出し、 $\tilde{\mu}''+0.5$ が μ に近いことを確めて計算を終る。

表6は計算結果の実例を示す。3回目の修正で μ と $\tilde{\mu}''+0.5$ との差は、最大0.14日で、一応満足してよからう。なおこの μ の値は4月1日を1としてある。すなわち $\mu=14.8$ は4月14.8日が平均値であることを示す。この μ の計算の際、期間を一律に2月1日から5月31日にとった。実質的には4月中に雪どけがすんで、5月はふつうの雨による出水になっている流域もあるから、 μ の値は融雪出水期の平均とも言えない。ただし、 T_0 の第1次補正を μ と $\tilde{\mu}$ の比較ですることは、許されるであろう。

9. 残された諸問題

タンク・モデルの自動化は、現在第1段階が成功した所で、なお多くの問題が残されてい

る。不完全であることを知りながら敢えて発表するのは、この種の試みは多くの事例で試められることによってのみ、発展すると考えるからである。今後多くの事例により、思いがけない新しい問題が発生し、それを逐次解決して行かなければならないと思うが、以下に現在我々が予想している問題点をあげ、見通しを述べておきたい。

1) 自動化プログラムのシステムの全般的構成、およびその流れ

今回の我々の自動化プログラムは、雪のモデルの部分と、タンク・モデルの部分とからなっている。後者が自動化プログラムのシステムの主要部分であると思われるが、自動化プログラムのシステムを完備するためには、解くべき多くの各論がある。それらは雪のモデルの他に、農業用水取水の影響の計算、雨量地点ウェイトの決定、出発モデルの多様化、よくないデータの部分にマスクを掛けること等々である。これらの問題については、個々の問題の解決と並んで、それを全体のシステムのどこに組み入れるかという問題がある。今回我々は主として、北上川を資料として自動化プログラムを作った。北上川は最近に解析を行った河川であり、和賀川、猿ヶ石川はよい資料であると感じていたからである。その代り、雪のモデルの併用が必要であった。雪のパラメータ決定を一部自動化したのは、必要に迫られたからである。雪のモデルはタンク・モデルの決定に先立つから、出発モデルを用いて、雪の地帯増加率 d と、温度補正定数 T_0 の修正を行った。その他のパラメータの修正に成功しなかった一半の原因に、推定流量の算出に出発モデルを用いていることにあると思われる。そこで次の対案が考えられる。

- (1) 出発モデルを用い、雪のモデルの第1次修正を行う。
- (2) 得られた雪のモデルを用い、タンク・モデルの第1次近似を行う。
- (3) 得られたタンク・モデルを用い、雪のモデルの第2次修正を行う。
- (4) タンク・モデルの第2次修正を行う。

これに関して、二つの問題がある。一つは、第1次のタンク・モデル近似の際、繰り返しをあまり行わず、適当な所で停止することであり、もう一つは、第1次近似終了の時点で、雪のパラメータの第2次修正のみならず、1 段目タンクからのフィード・バックの停止、農業用水、雨量地点ウェイト、マスク、出発モデルの多様化等の問題を考えることである。

第1次のタンク・モデル近似の際、あまり繰り返しを行わないで停止するのがよいと思われるのは、従来の計算経過を見ると、急速に収束するのは 5～10 回までで、以後は小さな動きを繰り返していることが多いからである。したがって、タンク・モデルのパラメータのみにとらわれず、ある程度タンク・モデルがよくなった時点で、他の要因に対する接近を試みる方が、はるかに効果的で、かつより真実に近づき得るのではあるまいか。およその流れは表7のようになるであろうが、これをどのように構成するかが問題である。

各段階において、近似をどの程度で打ち切るかは大切な問題で、それには評価の問題とと

もに、人間の総合判断が、どの段階で、どのように介入すべきかという問題がある。元来、雨量も流量もかなり大きい誤差を持っているから、あまりに合わせ過ぎると、インクのしみに種々の意味を求めるロールシヤハ・テストと似たことをしている心配も生ずるのである。

次におおのこの問題について簡単に述べる。

2) 雪のモデルの第2次近似 今回行った、融雪期のハイドログラフの1次、2次のモーメントを用いる

方法は、まずかったようである。融雪期をいくつかに分割し、各期間ごとの、各地帯別の積雪の収支と、推定・実測流量とを見合わせて、いくつかのパラメータを修正する方式を考えたい。

3) 農業用水 農業用水は5月末～9月の低水時のハイドログラフに大きい影響を与える。取水された農業用水のかなりの部分は、間もなく河川に還元され、その部分は実質的には河川流量にほとんど影響を与えない。長時間かかって還元される部分だけが、河川流量に影響を与える。この長期成分を試行錯誤で求めていたのであるが、これを自動的に求めるプログラムを作るのが目標である。

4) 雨量地点ウェイト 従来の経験によれば、地点雨量の荷重平均をタンク・モデルで流量に変換するよりは、各地点雨量をタンク・モデルで変換してから荷重平均をとった方が結果はよいようである。問題はそのウェイトときめ方である。

5) マスク いくつかの河川での計算例では、人間の試行錯誤で合わなかった所は、自動化によるモデルでも同様に合わなかった。マスクを掛けなくても、自動化の近似は一応収束したのであるが、マスクをすれば収束はどのくらいよくなるであろうか。計算の流れのどこでマスクを掛けるか、その効果、逆効果、人間の判断の介入の仕方等に問題があると思われる。なお、雨量地点が1地点の場合、ある所で1段目のタンクからのフィード・バックを中止すると、よい結果が得られる。これもマスクの一種であるが（高水部分にマスクを掛けることに相当する）、どこでマスクを掛ければよいか、マスクを掛けて低水部分の形をよくした後、マスクを取れば、低水部分のよさが残って、さらに高水もよくなるのか、そうは行かないのか、問題は残っている。

6) 出発モデルの多様化 北上川の各支川では図4または図8c)のタンク・モデルを

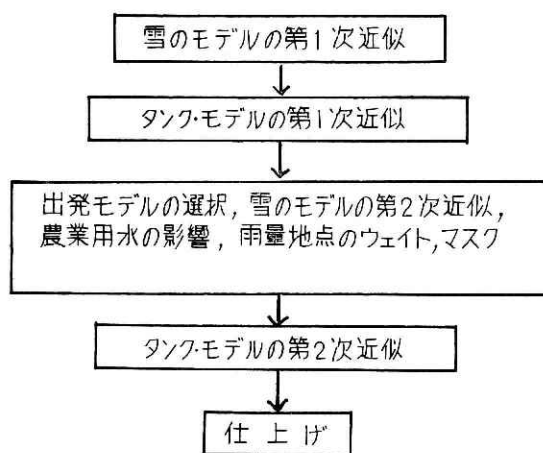


図 14 自動化システムの流れ
Fig. 14 Flow chart of the automatic calibration system

出発点としたが、日本各地の河川を対象とするならば、もう少し出発モデルの型が多い方がよいかも知れない。出発モデルを多様化し、効率的に選択するためには、タンク・モデルの第1次近似の際の繰り返し回数の少いことが必要である。

7) 仕上げ用プログラム　これが米国のシステムの最適化プログラムに相当する部分である。我々のパラメータ修正方式では、流出孔の位置についての修正は行わないのだから、どこかでそれを行わなければならない。しかし、標準誤差を評価基準とする最適化を、最終段階で施しても、効果があるか、実質的な意味があるかは疑問である。図12に見るように、RQ, RDによるフィード・バックをある程度繰り返すと、標準誤差はある限度に達し、あとは小さくゆれ動くのみで、それがハイドログラフのよさを表わすことができるとは思えない。したがって、RQ, RDによるフィード・バックで第2次のパラメータ修正を施した後の仕上げは、種々の統計値、たとえば流況曲線、いくつかの階級に分類したときの流量分布、流量の季節的変化等について、有意な偏りを除去するような修正を行うべきであろう。かかる修正が、どの程度自動化できるかは、かなり疑問であると思われる。

8) 洪水用モデル　洪水用タンク・モデルの自動化はあまりむずかしくないであろう。これは日流量解析とは別に、行ってみたい。

9) $m \times n$ 型タンク・モデル　乾燥、半乾燥地域、半年の乾季を持つ地域のために、土壌水分の構造を持ち、流域を河沿い地帯から次第に山に向かっていくつかに分割して、 $m \times n$ 型（現在用いているのは 4×4 型）のタンク・モデルが作られている。目下、かかる地域の資料の手持ちが少いこと、したがって我々の試行錯誤の経験も乏しいことが弱点であるが、この型のモデルに対し、パラメータを自動的に定めるプログラムを作ることが必要である。

10) プログラムおよびフロー・チャート　この報告にプログラムとフロー・チャートを載せたいとも考えたが、今回はやめることにした。一つには、我々の方式が未完成で、プログラムは到る所、手直し、仮工事になって居り、お目に掛けるようにはできていないからである。もう一つには、我々がいま用いている計算機 TOSBAC-8400 がコア・メモリー16K語（1語24ビット）という小さい計算機で、コア・メモリーの容量制限により、無理なプログラムになっているからである。我々の計算機は近いうち（昭和52年春）、より大きいものに替ることになっているから、新しい計算機でプログラムの試運転をすませてから公開した方が、使う方々にとっては便利であろう。しかし、目下使用中のプログラムを御希望の方には、リスト、カード、磁気テープ（7トラック、800 BPI）のいずれの形でも、喜んで差し上げることができる。

（1976年10月25日原稿受理）