

「融雪流出の概念モデルの相互比較」の課題となった 6 流域の流出解析 (第2報)

菅原正巳*・渡辺一郎**・尾崎睿子***・勝山ヨシ子***

国立防災科学技術センター

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

By

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

National Research Center for Disaster Prevention, Japan

Abstract

In Norrköping Conference for the WMO project, Dr. E. A. Anderson of U.S.A. suggested that there is seasonal change in temperature lapse rate. It means, for our model, that there is seasonal change in the parameter TD and this factor was lacking in our models.

Runoff analysis of the six WMO basins were reopened introducing the seasonal change in TD and T0. Some improvements other than the seasonal change of TD and T0 were also made as follows: 1) In the Durance basin, automatic calibration procedures were repeated for many times and the tank model became much better than before. 2) In the W3 watershed, the snowpack tank was improved and result became better than before.

In spite of many troublesome trials, the effect of the seasonal change in TD and T0 were not so large except the case where the elevation range in the basin is large such as Durance and Dischma.

* 元所長, ** 第4研究部, *** 第4研究部計測研究室

1. はじめに

「融雪流出の概念モデルの相互比較」(菅原正巳ら, 1983)の計算結果を, これに参加した各モデル所有機関がWMOに提出する期限は1982年6月末であった. その提出物の評価をWMOが計算し, モデルの相互比較の結果を検討する会合は, 約半年後にスウェーデンのNorrköping(ノールシェピング)で開かれるということであったが, その後予定より遅れ, 1983年9月となった. その開催少し前, 7月にWMOから, 9月の会合の予備資料の一つとして, 評価値を計算した予備的結果が送られて来た.

WMOが算出した評価はいくつかあるが, 平均2乗誤差を代表的なものとみてよかろう. およその傾向として, 平均2乗誤差がよければ(小さければ), 他の評価値もよいのである. それによって結果を通観すると, アメリカのNWSRFS(National Weather Service River Forecasting System)が, Durance, W3, Dunajecの3流域について, 一番よい結果を出している. ただし, NWSRFSはこの3流域しか結果を出して居ない. 残りの3流域Dischma, Illecillewaet, Kultsjönでは, 当方の結果が一番よく, W3, Dunajecについては, 当方の結果がNWSRFSに次いで2位である. ただし, Dunajecについては, 当方とNWSRFSとは鼻の差の程度で, ある評価については当方の方がよい. W3については, はっきり差がついているが, W3はアメリカの流域であるから, NWSRFSがよい結果を出すのは当然であろう. 今回のモデル相互比較では, 日本の流域は課題流域になっていない. どの国でも, 自国の流域についてはきわめて有利である. 相互比較参加者は, 10年間の資料を受け取るが, 流量だけは後半の4年間で隠されている. 前半6年の資料でモデルのパラメータを定め, 後半4年における適合度で評価が定められる. 自国の河川を解析するモデル所有者が, 後半の隠された4年間の資料をひそかに利用してモデルのパラメータを求めるといような不正をすることはないであろう(そのような不正をすると, 何となく判るものである. そのようなことはしないだろうし, できないものである). しかし, モデル所有者は自国の河川については, 他国のモデル所有者より, はるかに多くの有形, 無形の情報を持っている. たとえば, その流域を訪れることも容易で, 現地を眺めることは, 測り知れない情報をもたらすであろう. もちろん, 公式にはモデル所有者はWMOから与えられた資料だけからモデルのパラメータを決定するのであるが, 表立って使わなくても, その流域について多くの情報を持っていることは, モデル決定にきわめて有利である. このように考えて, 6流域のすべてについて, 2位が取れば, われわれとしては最高であると, 事前に考えていた. 1位はその流域を持つ国のモデル所有者が取るのである. したがって, Dischma, Illecillewaet, Kultsjönの3流域で1位を取り, W3, Dunajecで2位を取れたということは, いわば望外の好成績である. しかし, 各流域について2位が取れば最高であるとはいいながら, 内心ではすべての流域で1位を期待していたから, NWSRFSが3流域で1位を取っ

たことは、当方にとって大きなショックであった。

第1の問題は Durance で当方の結果が大変に悪かったことである。2位どころか、中位の成績であった。検討してみて、われわれの結果が悪かったのは、不注意な失策によるものであることが判った。

表1は当方がWMOに提出した算出流量に対する当方の評価値CRを示している（これはWMOの評価値とは異なるし、前半6年間について算出した値である）。Kultsjön のCR値がよいのは、実測流量に現れる負の値を消すために定数を加えたために、見掛け上よい評価となったもので、実質的には Dunajec 程度の評価に相当する。したがって Durance は6流域中、一番よい評価値を示している。そこで、これでよかろうと思ったのが判断の誤りであった。Durance の結果はもっとよくなるであろうという気は何となくしていた。それはハイドログラフを眺めた感じから得られたものである。しかし評価値CRがよい値になっているから、これでよかろうと思ったのは、重大な誤りである。「ハイドログラフを見た感じ」が何より大切で、評価値などにまどわされてはならないというのが、最大の原則である。それを忘れたのが不注意な失敗であった。Durance 流域には17の雨量観測点、9の気温観測点があり、流域内に3の流量観測所がある。十分な資料があるのだから、もっと努力すべきであった。

表1 WMOに提出した算出流量に対する評価値CR

Table 1 Values of criterion CR for our calculated discharge of six basins presented to WMO

Durance	W3	Dunajec	Dischma	Illecillewaet	Kultsjön
0.339	0.404	0.509	0.382	0.381	0.302

Durance流域で失敗した原因は、雨量の高度による増加に対し、1次近似しかしなかったことにあり、はじめは考えた。Dischma, Illecillewaet で2次近似を試みて結果がよくなったことを考えれば、Duranceにもこれを試みるのが当然であると、まず考えた。しかし、計算をしてみて、Duranceにおける失敗は意外な盲点に基づくものであることを知った。われわれが用いている、タンク・モデルの流出、浸透の係数を修正する自動化方式は、きわめて有効、効率的であって、数回のくり返しでよいモデルに到達する。そこで、流出、浸透以外のパラメータを探し求めるときに併用する自動化方式のくり返しは、6回に固定していた。多くの場合、くり返し4回から5回でよいパラメータが得られ、それから先はかえって評価値CRが悪くなることが多い。それは、ある程度よい結果が出ると、RQ, RD は主として資料の誤差によって支配されることになり、かかるRQ, RDによる修正が、モデルを誤まった方向に修正するからであると考えられる。

しかし、Durance の場合は条件が違っていた。ここでは降水量、気温が多くの地点で測られ、流量は貯水池によって測られ、その誤差はきわめて小さいらしい。そこで、RQ, RD によるフィード・バックがいつまでも有効に作用した。実は、われわれが先に得たモデルは、自動化くり返し8回により得られたもので、その際の最小の評価値は8回目に得られている。したがって、この最終モデルから出発して、さらに自動化による修正をくり返せば、評価値はより減少するに違いない。事実、自動化による修正をさらに6回くり返すと、出発時に $CR = 0.3307$ であったものが（この値が表1の値と異なっているのは、CRの定義式に少し変更があったからである）、6回目には $CR = 0.3203$ にまで減った。最初から数えれば13回目のくり返しにより得られた値である。さらに自動化修正を10回くり返すと、8回目に最小値 $CR = 0.3073$ に達し、以後増加に転じた。最初から数えれば、20回の修正くり返しで得られた値で、先に得られていた評価値 $CR = 0.3307$ に比べれば、約7%の減少である。モデルがある程度よくなると、CRの値を5%小さくするのはかなり大変な仕事であるのに、単に自動化修正をくり返すだけで、CRが7%も小さくなるとは、まったく思ってもいなかったことである。これは、われわれの自動化修正方式の有効性を示すもので、大いにうれしいことであったが、その有効な手段を活かし切れなかったことは残念であった。WMO で用いている平均2乗誤差と、われわれの平均2乗誤差とは異なるから、単純な比較はできないが（われわれの平均2乗誤差は、ピークの1日のずれによる誤差を過大に評価しないように修正されている）、われわれが計算し直した結果であれば、NWSRFSの結果より少しよくなりそうに思われた。この失敗さえなければ、Durance でも1位を取れたかも知れないと、無念の歯をかみしめたが、いまさらいかんともしがたい。

NWSRFSの雪のモデルについては、1973年11月に出された報告があり、菅原はこれを1975年に翻訳し、1976年に印刷されている。この報告の著者 Dr. Eric A. Anderson のモデル・パラメータを探し求める考え方、自動最適化方式に対する批判的態度（彼はこの方式の有効性をあまり信用していないように思われる）等に、菅原は感心したが、モデルそのものについてはあまり感心しなかった。W3流域はこの報告ですでに解析の対象となっているが、そこでは高度による流域の地帯分割は行われておらず、このままでは大流域には適用できないであろうと思われた。この方式では、残雪量が流量の算出に利用される。われわれの方式では、入力資料は日降水量と日気温だけである。残雪量が入力資料として用いられるということは、入力情報が多いことで、その分だけ結果がよくなる可能性がある（今回のNorrköping の会合で、Dr. Anderson は、われわれのモデルが残雪量を使わずによい結果を出すのに感心したようである）。入力情報が多いことは有利である反面、大量の入力を使いこなす難しさが出て来る。NWSRFSでは、残雪量を用い、何回もフィード・バックをくり返してパラメータを定めて行くために、非常に手間が掛かるらしい。今回の相互比較で、NWSRFSが3流域しか解析できなかったのは、解析に多大の時間を要するからであろう。

WMOの「融雪流出の概念モデルの相互比較」の会合は、Norrköpingのスウェーデンの気象水文研究所で9月26日から30日まで開かれた。初日に、各モデル所有者はモデルの紹介をしたが、各自15分ばかりの話では、どんなモデルであるかよく判らない。各モデルの出した結果の評価値のくわしい表や図が配布され、それを眺めて、Dr. Andersonの出したNW SRFSモデルの結果がきわめてすぐれていることを知った。たとえば、彼の出した結果では、流量が与えられている前半6年間における算出流量の評価値と、後半4年間における評価値とが、近い値を示している。実測流量が与えられている前半6年間において算出流量を実測とよく合わせたとしても、その合わせ方が水文学的意味を持たない方式と構造によるものであれば、後半の4年間では合わなくなるであろう。前半6年、後半4年で同様の近似度を示すということは、そのモデルが水文学的に本質的なものをとらえていることを示すと考えてよかろう。われわれのモデルはこの性質を満足していたが、Dr. Andersonの結果もそうであった。彼が3流域で一番よい結果を示したのは、偶然や好運によるものではない。彼は寡黙で、あまり発言をしなかったが、きわめてすぐれた水文学者であることが次第に判った。会合の後半は、モデル部会、評価値部会、データ部会に別れて討議が行われ、報告書が起案された。菅原と彼とはモデル部会に属したが、その席で彼は高度による気温低下率に季節変化があると言った。この発言は部会出席者の大部分にとって、聞き流された感があったが、菅原にとっては重大であった。これより先、会合の2日目、一般討論の場で、菅原は高度による雨量増加率に大きな季節変化があること、不幸にして積雪流域においては、降雪、融雪期間中における季節変化を探し求めることがきわめて困難で、不可能に近いことを述べていたから、あるいはDr. Andersonはそのお返しに、菅原に対して、気温低下率にも季節変化があることを親切に注意してくれたのかも知れない。なお、融雪定数SMELT(degree-day factorと呼ばれる)に季節変化のあることもDr. Andersonによるものである。菅原は1975年に彼の報告を読んだときには、その必要がないと感じた。しかしW3の解析をしてみて、その必要を感じた。その他の流域では、季節変化によるメリットはあまり大きくないようである。

高度による気温低下率に季節変化があるということこそ、われわれのモデルに欠けているものだった。なぜ彼の結果がわれわれのものよりよいのか。彼が残雪量を入力資料として用い、何度もフィード・バックをくり返し、手間を掛けてパラメータ補正を行っていることは確かである。しかし、それだけが理由とは思えなかった。気温低下率の季節変化のことを知って、それこそが決定的理由であると思った。われわれのモデルで言えば、T0、TDに季節変化を与えることになる。実はこのことに、われわれも薄々気づいていた。Kultsjön解析のとき、それを感じていながら、あまりにも便宜的ではないかと、打ち消してしまったのであった。

日本に帰って、T0、TDの季節変化を導入し、6流域の再計算をすることにした。かつ

て解析した流域を再計算してみても、あまりうまく行かないことが多い。ある流域の流出解析を始めるときは、地図、資料を頭にたたき込み、多くの統計的解析、資料の図化を事前に行い、それらを予備知識として解析を行う。そういうものは、再計算のときにはほとんど忘れ去られている。前に作った多くの統計や図表も、作ったときの意図を忘れてしまえば、紙屑にすぎない。かかる悪条件を覚悟して行う再計算である。しかし、これは T0, TD に季節変化を導入して行う一種の手直しにすぎない。それによって、評価値 CR をどのくらいよくすることができるかが目的である。T0, TD の季節変化をあらかじめ組み込んだモデルで、最初から解析を行うならば、多分さらにより結果が得られるであろう。しかし、すでに解析を行い、気持の上で一度完了した仕事を、もう一度最初から始めることは不可能であるから、手直し仕事になるのは致し方ない。

以下、われわれが解析を行った経過にほぼ従いながら、得られた結果を述べる。

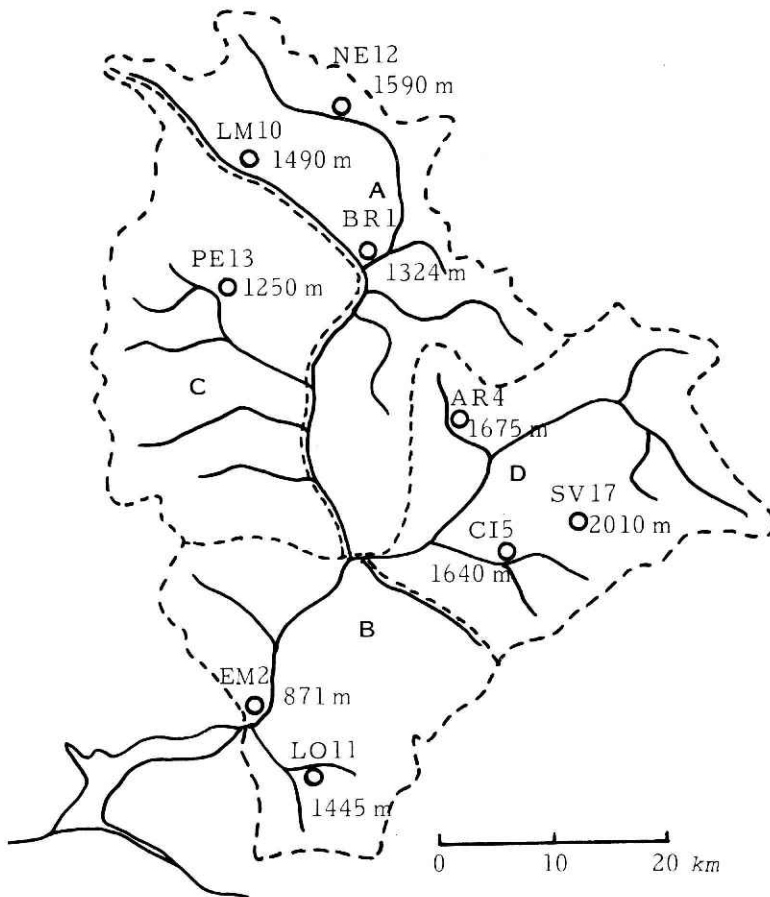


図1 Durance流域地図
Fig. 1 Map of the Durance basin

2. Durance 流域

2.1 2 地点の月平均気温の差に現れる季節変化

Durance 流域には図1に示す9地点の気温観測点があり、日最高、日最低気温が測られている。これから2地点を取り出し、日最高、日最低気温の月平均の差を図示した例が図2

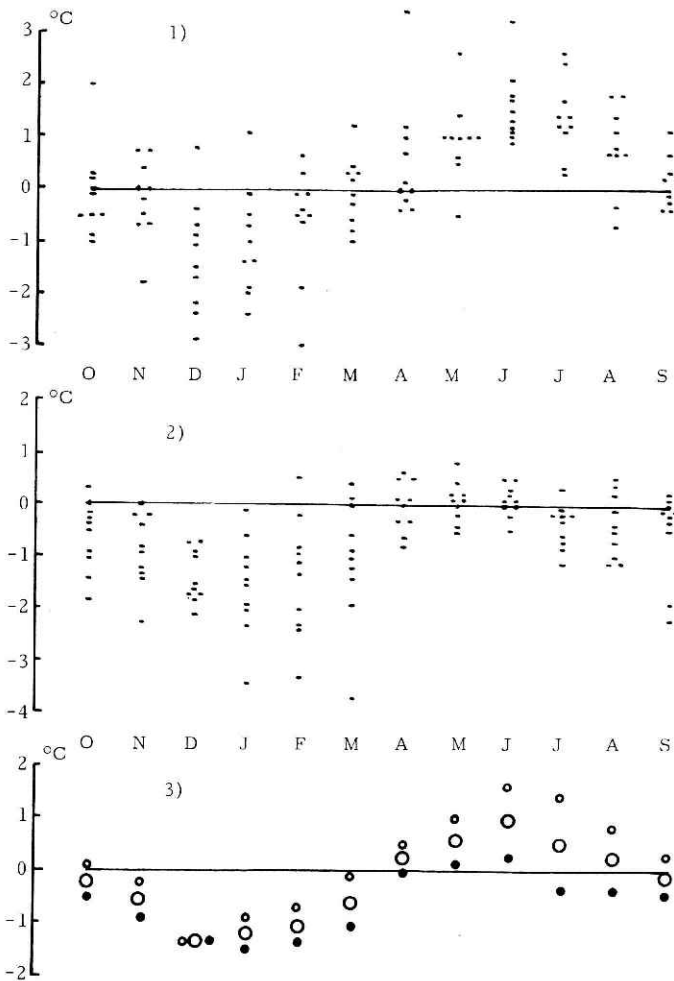


図2 AR4 (1,675 m) , SV17 (2,010 m) 間の月平均気温の差
1) 日最高気温の月平均の差 2) 日最低気温の月平均の差 3) 月平均気温の差の10年平均 (○:最高気温, ●:最低気温, ◐:両者の平均)

Fig. 2 Difference of monthly mean air temperature between AR4 (1,675m) and SV17 (2,010m).

1) Difference of monthly mean of daily maximum temperature 2) Difference of monthly mean of daily minimum temperature 3) Ten years mean of monthly mean air temperature (○ daily maximum temperature, ● daily minimum temperature, ◐ mean of both)

に示される。年によって点は散らばり、分散はかなり大きいけれども、2地点の温度差に季節変化があることは明らかで、これを見落としたのは大きな手落ちであった。分散がかなり大きいとは言え、10年平均が示す曲線はかなり信頼できるであろう。

2地点の気温差の曲線を求めることによって、高度による気温低下率の季節変化が得られるであろうと期待したが、現実には複雑で理解しにくいものであった。9地点から2地点を取り出せば、組合せは36通りである。そのほとんどすべてについて2地点間の気温差の季節変化の曲線を描き、その約半分が図3に示されているが、これに見るように、現れた曲線の型はいろいろで、これから共通の季節変化を取り出したり、地域ごとの型を選び出すのは難しい。図3では簡単のため、最高、最低の平均についてだけを示したが、最高、最低気温のそれぞれについて地点差の曲線を示せば、さらに複雑になる。2地点気温差の季節的变化が、最高、最低気温の場合も似た型を示すこともあれば、かなり異なった型を示すこともある。

(NE 12, PE 13 の2地点の最低気温が他の地点より目立って低く、この2地点のどちらかとの組合せでは、最高、最低気温の場合で、異なった型が現れる)。

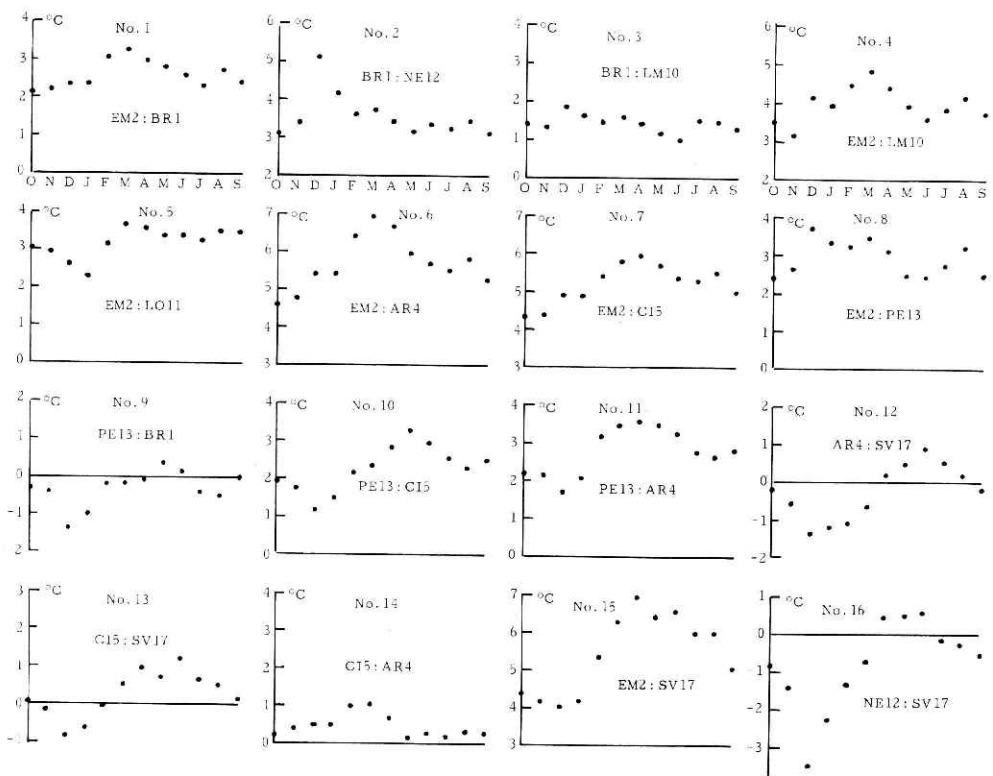


図3 Durance流域における2地点間の月平均気温の差

Fig. 3 Difference of monthly mean air temperature between two points in the Durance basin

実は、図3の曲線を眺め、A、B、C、D4地区それぞれの季節変化の型を定められるだろうと期待したが、無理である。その上、C地区内の気温観測点はPE13だけであり、B地区では2地点EM2とLO11しかない。D地区にはAR4、CI5、SV17の3地点があるが、SV17は高度の割には暖い地点で、いわば特異な点である。高度2,000mの所に人が住んでいるのは、そこが暖いからであろう。そのように考えると、気温観測点のほとんどすべては、何かの意味で異常な地点であろう。たとえば、BR1 (Briançon)はこの地方の古くからの中心的町である。そこに町ができたのは、気候が比較的温暖であるからかも知れない。現在は小さいながらも一種の都市効果によって最低気温があまり下がらないかも知れない。EM2は貯水池の影響で気候が温和になっているかも知れない。このように考えると、NE12、PE13の方が異常でないのかも知れない。流域全体で考えれば、比較的温暖な特異点とも言うべき場所は、面積的にきわめて小さいと考えられるからである。このように考えると、気温資料の偏りを直すための補正が必要で、それにも季節変化があるであろう。各地点の気温に一種の偏りがあるらしいことは図3のNo.14のCI5、AR4の気温差からも判る。この2地点の高度差は僅かに35mで、100m当たりの温度低下を 0.6°C とすれば、この2地点間の気温差は 0.2°C の程度であるはずである。しかし、現実には図3のNo.14の曲線は 0.2°C よりはるかに大きい季節変化を示している。これは高度による温度低下率の季節変化によるものではない。2地点の気温の季節変化の型が異なることから来ている。つまり、図3に現われている季節変化の曲線は、高度による気温低下率の季節変化と、各地点の気温の季節変化の型の相異とが合成された結果であろう。

Durance 流域をA、B、C、Dの4地区に分けるには、地形的条件と、降水量の季節変化の型とを考えたが、気温の季節変化の型を考えて、分け方をもう少し変えた方がよかったかも知れない。同じD地区に属するAR4とCI5とでは、明らかに型が異なるようである。

実は図3の季節変化の型のうち、雪どけに効くのは主として4月から7月までの期間中の型の変化である。4月、5月に高度により気温低下率が大きければ、高所の気温が低く、高所の雪は融けずに残るであろう。6月、7月に気温低下率が小さくなれば、高地まで暖くなり、融雪が進行するであろう。Durance 流域での従来の推定流量の欠点は、7月に融雪水が不足することであった。その点で図3の季節変化の型は有望であるが、期間を4月～7月に限っても、図3の季節変化の型はいろいろで、どの型を各地区の型としてよいか判らない。

2.2 試算 No. 201, No. 202

図3の曲線を眺めて考え込んでいても致し方ないから、思い切って表2に与えた値で、地帯ごとの気温低下の定数TDに季節変化を与えることにした。これは図3の曲線を眺め、地区ごとの季節変化の型をフリー・ハンドで描き、それを各地区の地帯高度幅に合わせて数値化したものである。数値TDD(M)は先に得られているTDに対して季節変化を与えるもの

表 2 各地区のTDに季節変化を与えるTDD(M)

Table 2 TDD (M) which gives seasonal change to TD of each subbasin

	1 月	2 月	3 月	4 月	5 月	6 月	7 月	8 月	9 月	10 月	11 月	12 月
A	0.18	0.27	0.27	0.18	0.03	-0.09	-0.09	-0.09	-0.21	-0.30	-0.18	0.03
B	0.000	0.335	0.469	0.350	0.168	0.000	-0.168	-0.168	-0.201	-0.335	-0.268	-0.168
C	-0.12	0.24	0.52	0.64	0.52	0.24	0.00	-0.24	-0.32	-0.52	-0.56	-0.40
D	-0.352	-0.096	0.160	0.416	0.416	0.320	0.192	0.064	-0.096	-0.256	-0.384	-0.384

で、TDD(M)の年間平均は0になるようにしてある。

このTDD(M)を用い、TD、T0の季節変化を次の考えによって与える。まずTDの季節変化を次式で与える。

$$TD(M) = TD + TDK * TDD(M)$$

ここにTDは、TD、T0に季節変化がないとして先に求めた値、TDKはパラメータでこれを動かして試算をくり返し、最適のTDKを求めていく。

TDに季節変化を与えると、それに応じてT0にも季節変化を与えなければならない。いま気温が何地点かで測られ、その平均高度をHMとする(図4)。この高度HMの気温を第1地帯の中間高度H1の気温に補正するには、地帯ごとの気温低下をTD、地帯高度幅をZHDとすれば、TD/ZHDが高度による気温低下率であるから、

$$T01 = (HM - H1) * (TD / ZHD)$$

が気温観測値に対する高度補正である。しかし、これ以外に、各気温観測点固有の偏りに対する補正が必要である。たとえばSV17は高度に比し、きわめて暖い。その偏りに対する補正をT02とし、

$$T0 = T01 + T02$$

であると考え。先に、T0、TDの季節変化を考えなかったとき、T0、TDの値は直交化の方式により定められ、これらの値はかなり信頼性があると考えてよい。

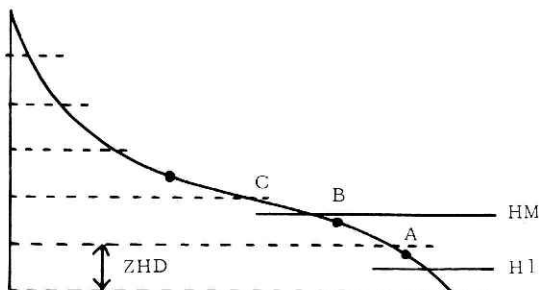


図 4 流域断面模式図 (A, B, C は気温観測点)

Fig. 4 Schematic cross-section of a basin (A, B and C denote temperature stations)

いま TD に季節変化を与え TD(M) とすれば, それに応じて T01 にも季節変化が生じ,

$$\begin{aligned} T01(M) &= (HM - H1) * (TD(M) / ZHD) \\ &= ((HM - H1) / ZHD) * TD(M) = T0K * TD(M) \end{aligned}$$

となる. ただし, $T0K = (HM - H1) / ZHD$ である. 一方, T02 には季節変化がないと仮定し, これを固定する. したがって T0 の季節変化は次式で与えられる.

$$T0(M) = T01(M) + T02 = T0K * TD(M) + T02$$

表3は Durance 流域におけるこれらの定数を示す. T02 がすべての地区で負であるのは, 気温観測点が比較的温暖の方に偏っていることを示している.

試算No. 201 (試算番号をNo. 201 から始めるのは, PD(I) に2次式を当てはめる試算, くり返し回数を増す試算をNo. 101 から始めたからである) は, A, B, C, D各地区に対し, 一斉にTDKを0, 1/3, 2/3, 3/3, 4/3と置いて行われ, 図5の結果が得られた. CRの階差から判断すると, TDK = 0.4のあたりでCRは最小となるらしい. 評価値CRの減少は僅かであるが, TDに季節変化を与えることの効果は確かにあるとみてよさそう.

この試算に用いた表2のTDD(M)は, 実はあまり信頼性がないと思われる. どの地区のTDD(M)には信頼性があり, どの地区のものには信頼性がないかを知るために, 各地区ご

表3 Durance流域におけるT0(M), TD(M)に関する諸定数T0K, T02その他

Table 3 Constants T0K, T02, etc. in Durance basin which relate with T0(M) and TD(M)

	気温観測点, そのウェイト および高度	HM 気温観測点 平均高度	H1 第1地帯 中間高度	ZHD 地帯高度幅	$T0K = \frac{HM-H1}{ZHD}$	T0	TD	$T01 = T0K * TD$	$T02 = T0 - T01$
A	BR1×1, 1324m; LM10×1/2, 1490m; NE12×1, 1590m	1463.6	1150	300	1.045	0.7485	1.9	1.986	-1.238
B	EM1×1, 871m; LO11×1, 1445m	1158	967.5	335	0.569	0.14	2.18	1.240	-1.100
C	PE13×1, 1250m; LM10×1/2, 1490m	1330	1200	400	0.325	-0.2	2.60	0.845	-1.045
D	AR4×1, 1675m; C15×1, 1640m; SV17×1, 2010m	1775	1260	320	1.609	-0.334	1.48	2.382	-2.716

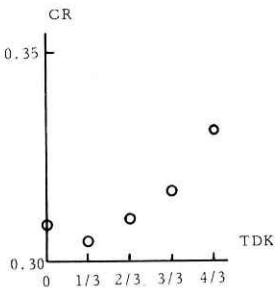


図5 試算No. 201 により得られた評価値CR

Fig. 5 Obtained values of criterion CR by trial No. 201

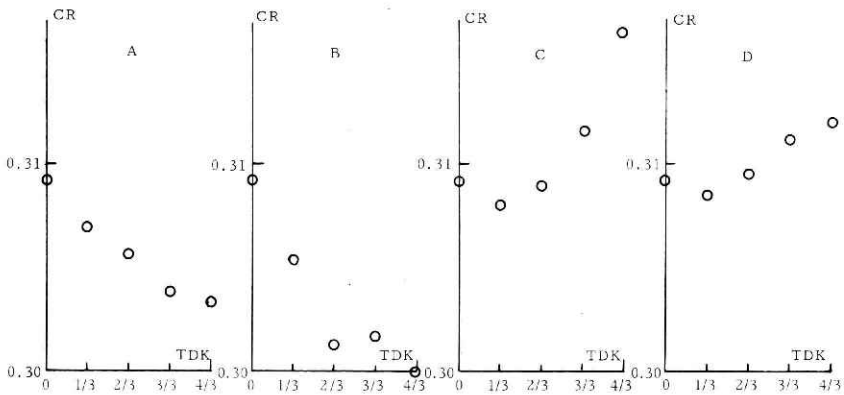


図6 試算No.202により得られた評価値CR (A, B, C, Dは部分流域に対応)

Fig. 6 Obtained values of criterion CR by trial No. 202 (A, B, C and D denote subbasins)

とにTDKを動かすことにして、試算No.202が行われた。たとえばA地区のTDKを0, 1/3, 2/3, 3/3, 4/3と動かし、他の地区ではTDK = 0に固定する。これをA, B, C, D各地区ごとに行う。その結果が図6である。A, B地区ではTDに季節変化を与える影響が大きい、C, D地区ではほとんど効果がない。これは、C, D地区に用いた表2のTDD(M)が適切でなかったことを示すものであろう。なお、A, B地区で、それぞれTDK = 4/3と置いたとき、CRが小さくなったからと言って、両地区で同時にTDK = 4/3と置いてよい評価値が得られる訳ではない。A地区のTDだけに季節変化を与える場合、A地区については過剰修正になりながら、他の地区の分での結果をよくした効果が、図6には現れているからである。

2.3 試算No.203

以上の結果はT02は不変という仮定のもとで行われた。試算No.203では、T02にも季節変化があると考え、T02に表2のTDD(M)で季節変化を与えてみた。これはNo.201の結果に合わせ、各地区のTD(M)はTDK = 1/3によって与えた。試算の結果、T02に季節変化を与えてもあまり効果はないようである。そこで一応T02は不変であるとして、以下の試算を行う。

2.4 試算No.204～No.208

試算No.202の結果から、図3の曲線を眺めて定めた表2のTDD(M)にこだわる必要はないと感じた。そこでTDD(M)として正弦曲線を用いることとし、試算No.202で、A, B地区に用いたTDD(M)がよい結果を与えたことから、2月に最大値1となる正弦曲線、3月

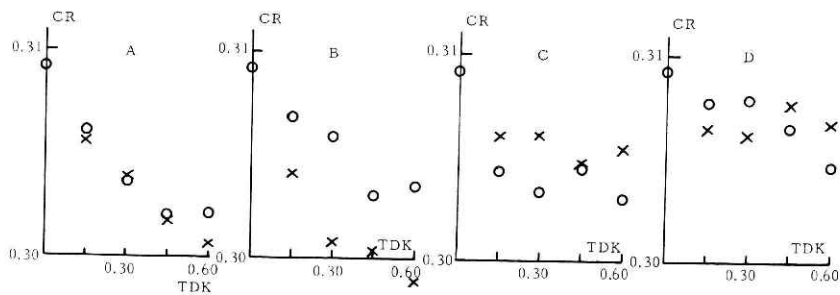


図7 試算No.204により得られた評価値CR (○2月に最大となる正弦曲線, ×3月に最大となる正弦曲線)

Fig. 7 Obtained values of criterion CR by trial No. 204 (○ and × correspond to cases in which sine curves with their maxima in February or March respectively)

に最大値1となる正弦曲線によりTDD(M)を与えることにして、それぞれ試算No.204 A, No.204 Bが行われた。得られた結果は図7に示される。結果はNo.202よりはるかによくなり、A, B地区のTDD(M)には3月に最大値となる正弦曲線を、C, D地区には2月に最大値となる正弦曲線を当てはめるのがよいらしい。

そこで次の試算No.205を行う。A, B地区のTDD(M)には3月に最大値1となる正弦曲線を、C, D地区には2月に最大値1となる正弦曲線を当てはめ、各地区一斉にTDKを0, 0.075, 0.150, 0.225, 0.300と変化させる。得られた評価値CRが図8に示される。TDK=0.3でCR=0.2968となったが、CRの持つ誤差を考え、CRの階差から判断すると、TDK=0.225のあたりでCRが最小となるらしい。

そこでTDK=0.2を出発点として、各地区ごとにTDKを動かしてみる。すなわち、B,

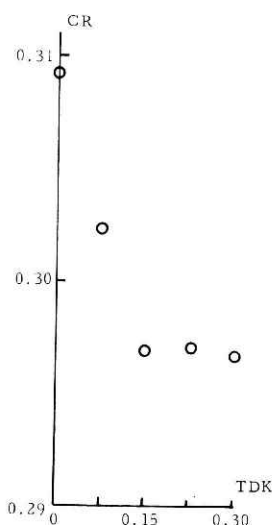


図8 試算No.205により得られた評価値CR

Fig. 8 Obtained values of criterion CR by trial No. 205

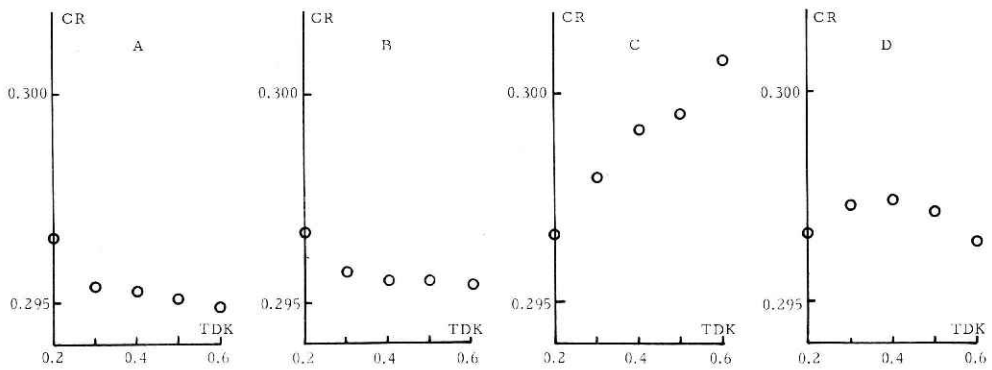


図9 試算No.206により得られた評価値CR (A, B, C, Dは部分流域に対応)

Fig. 9 Obtained values of criterion CR by trial No. 206 (A, B, C and D denote subbasins)

C, D各地区の TDK を 0.2 に固定し, A 地区の TDK を 0.3, 0.4, 0.5, 0.6 と動かす. B, C, D 地区についても同様のことを行う. これが試算 No. 206 で, 図 9 はその結果を示している. これを見ると, A, B 地区については TDK を 0.2 より大きくし, C 地区については小さくした方がよいらしい. D 地区については何とも言えない.

そこで, C 地区に対しては TDK = 0 に固定し, A, B 地区については TDK = 0.4, 0.6 の二つの場合, D 地区については TDK = 0.2, 0.4, 0.6 の三つの場合, つまり $2 \times 2 \times 3 = 12$ 通りの場合について計算してみた. これが試算 No. 207 で, 結果は表 4 に示されている. 期待に反し, 評価値 CR は前より少し悪くなった. TDK の値の組合せが (0.4, 0.6, 0, 0.2), (0.6, 0.6, 0, 0.2) の場合がともに CR = 0.2956 で, これが最小であるが, No. 206 で得られた CR の最小値 0.2949 より少し悪い.

この結果を見て, 表 5 に示す TDK の値を用いて試算 No. 208 を行い, 表 5 に示す CR の値が得られた. 今回の結果も, No. 206 で得られた CR = 0.2949 より悪いのであるが, CR に伴う誤差を考えれば, 差はないとみてよい. そこで, およそ均整のとれた TDK の値 (0.4,

表 4 試算No.207, 試算された TDK の組合せ, および得られた評価値 CR

Table 4 Trial No. 207: values of TDK used for trial and obtained values of CR

TDK の値					CR	TDK の値					CR	TDK の値					CR
A	B	C	D			A	B	C	D			A	B	C	D		
0.4	0.4	0.0	0.2		0.2964	0.4	0.4	0.0	0.4		0.2969	0.4	0.4	0.0	0.6		0.2964
0.4	0.6	0.0	0.2		0.2956	0.4	0.6	0.0	0.4		0.2965	0.4	0.6	0.0	0.6		0.2963
0.6	0.4	0.0	0.2		0.2963	0.6	0.4	0.0	0.4		0.2965	0.6	0.4	0.0	0.6		0.2962
0.6	0.6	0.0	0.2		0.2956	0.6	0.6	0.0	0.4		0.2970	0.6	0.6	0.0	0.6		0.2971

表5 試算No.208

Table 5 Trial No. 208

A	T D K の 値			C R
	B	C	D	
0.4	0.4	0.2	0.2	0.2951
0.4	0.4	0.2	0.3	0.2960
0.35	0.35	0.2	0.2	0.2958
0.35	0.35	0.2	0.35	0.2970
0.3	0.3	0.2	0.3	0.2958

0.4, 0.2, 0.2)に一応満足することにする。

2.5 試算 No. 209, No. 210

以上、正弦曲線によりTDに季節変化を与え、それに応じてT0にも季節変化が与えられたが、そこではT02は不変であると仮定されている。そこで、一応TDの季節変化をNo.208のように定めた上で、さらにT02に季節変化を与えてみることにする。季節変化の型としては、2月、4月、6月に最大値1となる正弦曲線を用いることにし、これを試算No.209A～Cとする。このとき、地区ごとに変化の型が異なるかもしれないことを考え、まずB、C、D地区のT0KKを0に固定し、A地区のT0KKを0, ±0.1, ±0.2と変える。同様のことをB、C、D地区についても行う。ここにT0KKは正弦曲線に掛ける係数で、TD、T0は次の式で与えられる。

$$TD(M) = TD + TDK * TDD(M)$$

$$T0(M) = T02 + T0K * TD(M) + T0KK * TM(M)$$

TDD(M), TM(M)は、それぞれTD, T02に季節変化を与えるもので、ここでは正弦曲線が用いられている。

図10は試算の結果を示す。2月に最大となる正弦曲線は適さないらしい。4月～6月に最大となる型がよいらしい。図3に示した、2地点温度差の季節変化のグラフで、4月、5月に最大を示す型がかなり多く現れたことと、これは対応するのであろう。

4月、6月に最大となる正弦曲線でT02に季節変化を与えると、T0KK=0.2で最小値を示す場合が多いし、CRの減り方から判断して、T0KKを0.2より大きくしても、あまり効果はなさそうである。図10から判断して、A、B、C、Dの全地区に対し、同じ型と、等しい係数T0KKを用いて、4地区一斉に同じ季節変化を与えてみることにした。

変化の型として、4月、5月、6月に最大値1となる正弦曲線を用い、T0KKはA、B、C、D地区一斉に、0.1, 0.15, 0.20, 0.25, 0.30と動かした。これが試算No.210A～Cで、図11はその結果を示している。

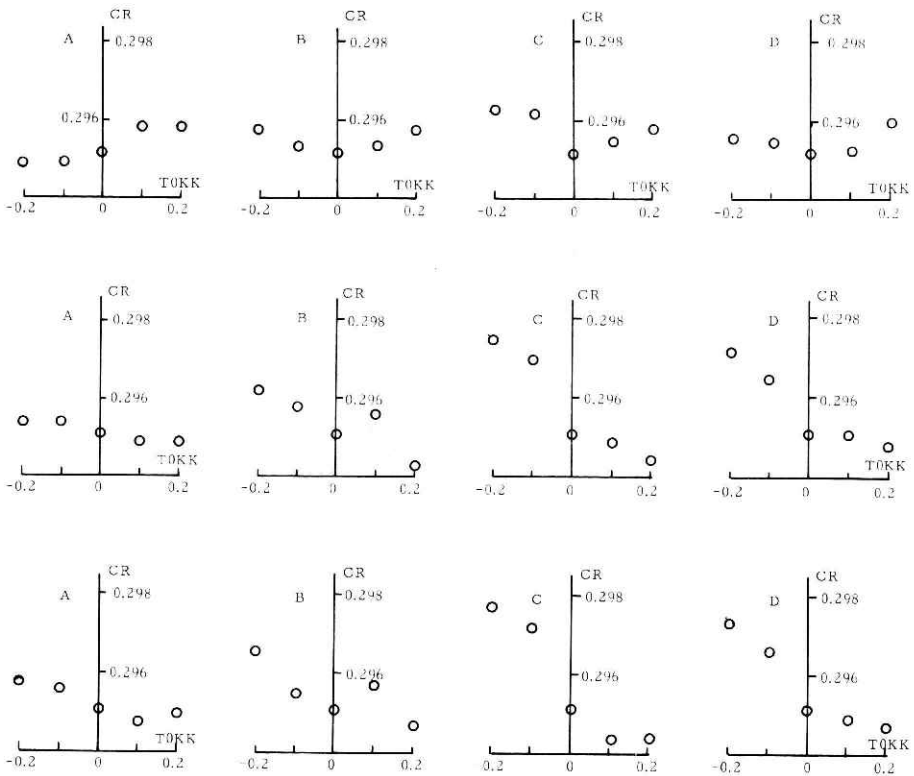


図10 試算No. 209 により得られた評価値CR (上段：2月最大の正弦曲線，中段：4月最大の正弦曲線，下段：6月最大の正弦曲線)

Fig. 10 Obtained values of criterion CR by trial No. 209 (upper: the sine curve with its maximum at February, middle: the sine curve with its maximum at April, lower: the sine curve with its maximum at June)

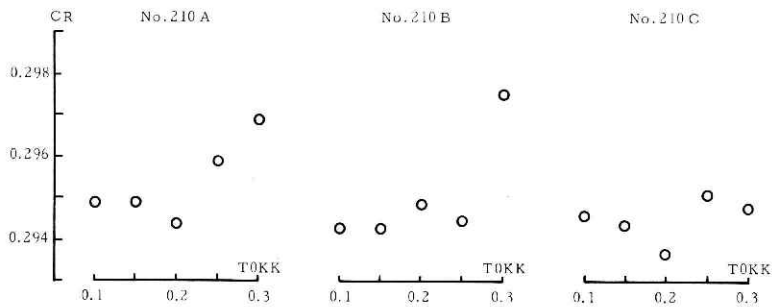


図11 試算No. 210 により得られた評価値CR (No. 210 A：4月最大の正弦曲線，No. 210 B：5月最大の正弦曲線，No. 210 C：6月最大の正弦曲線)

Fig. 11 Obtained values of criterion CR by trial No. 210 (No. 210A, No. 210B and No. 210C correspond to the cases in which sine curves with their maxima in April, May and June are used respectively)

CR の持つ誤差を考えれば、わずかな CR の差からどれが一番よいかを定めるのは難しいが、一応ここに現れた最小の CR の値から、6 月に最大となる正弦曲線を変化の型とし、 $T0KK = 0.2$ を最終モデルと定める。これに対する評価値は $CR = 0.2937$ である。

2.6 評価値 CR はどのように減少したか

モデルの相互比較に提出したわれわれの算出流量の評価値は $CR = 0.3307$ であった。これは自動化修正を十分に施していないものであった。十分に自動化修正を施すことによって、評価値は $CR = 0.3073$ になった。約 7 % の減少である。

次に TD に季節変化を与えることにより($T02$ は固定されている)、評価値は $CR = 0.2951$ になった。約 4 % の減少である。

次に $T02$ に季節変化を与えることにより、評価値は $CR = 0.2937$ になった。約 0.5 % の減少にすぎない。

もっとも効果があったのは、十分に自動化修正を施すことで、不注意な失策をしないことがどんなに大切かということである。それに比べれば、TD に与える季節変化の効果は小さい。しかし、最終段階に近づいて 4 % も CR が減るのは、かなり大きい効果である。 $T02$ に与える季節変化の効果はきわめて小さく、無視し得る程度のものである。しかし、6 月に最大になる正弦曲線が効果を与えたというのは、図 3 の季節変化の型と考え合わせて注目すべきである。つまり、各地点の気温の偏りに季節変化があり、それが雪どけの計算に影響するということである。

3. Illecillewaet 流域

3.1 気象観測点 No. 1, No. 2 の気温差

この流域には図 12 に示すように、No. 1, No. 2 の 2 地点に気象観測点がある。

No. 1 は流域の南西の流域外、No. 2 は流域の北東の境界上にあり、ともに位置が偏っているばかりでなく、降水量、気温ともに、かなり偏って居り、やゝ代表性に欠けているように感じられる。

図 13 は No. 1, No. 2 地点の月平均気温の差の 10 年平均を示す。この季節変化の型はやや特異で、正弦曲線からかけ離れている。日最高、日最低気温の平均の差の 10 年間の年間平均は 5.08°C で、これを 2 地点の高度差 867 m で割ると、100 m 当たり 0.59°C の気温低下で、これは妥当な値である。

表 6 は No. 1, No. 2 地点の月平均気温(日最高、日最低気温の平均)の差、およびこれから年平均値 5.08°C を引いた値を示す。さらにこの値を 2 地点の高度差 867 m で割り、地帯高度幅 367 m を掛けた値を TDD(M) とし、表 6 に示す。この TDD(M) により、TD や $T0$ に

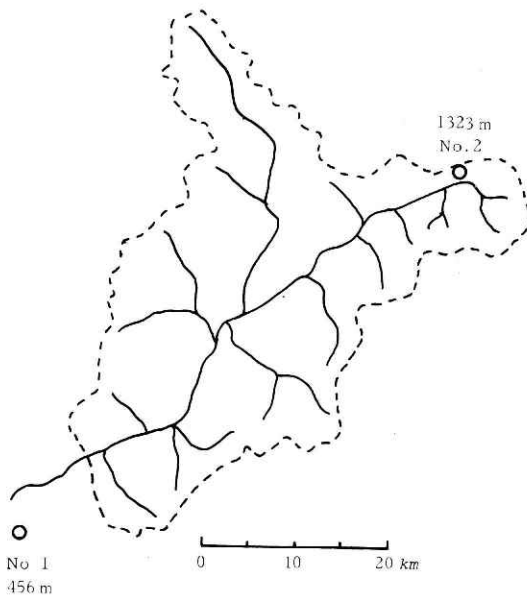


図12 Illecillewaet流域地図

Fig. 12 Map of the Illecillewaet basins

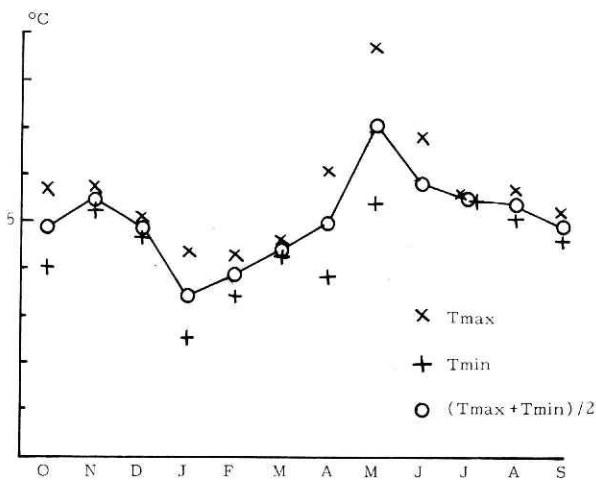


図13 No. 1, No. 2 地点の月平均気温の差

Fig. 13 Difference of monthly mean air temperature at two stations No. 1 and No. 2 (ten years mean)

表 6 No. 1, No. 2 の月平均気温の差

Table 6 Difference of monthly mean temperature at points No. 1 and No. 2

	1 月	2 月	3 月	4 月	5 月	6 月	7 月	8 月	9 月	10 月	11 月	12 月
T No 1 - T No 2	3.44	3.86	4.38	4.96	7.04	6.32	5.48	5.36	4.92	4.87	5.48	4.88
年平均値からのずれ	-1.64	-1.22	-0.70	-0.12	1.96	1.24	0.40	0.28	-0.16	-0.21	0.40	-0.20
TDD(M)	-0.694	-0.512	-0.296	-0.051	0.830	0.525	0.169	0.119	-0.068	-0.089	0.169	-0.085

季節変化を与えることを試みる。

3.2 試算 No. 101, No. 102

図13の気温差の季節変化の型があまりにも正弦曲線からかけ離れているので、正弦曲線ではなく、この型そのものをTDD(M)に用いることにした。表6のTDD(M)の値である。

試算 No. 101 では、No. 1, No. 2 のTDに、同時に季節変化を与えることとし、TDKを0, 1/3, 2/3, 3/3, 4/3 と変化させた。効果はほとんどなかった。TDK=1/6のあたりで、CRが少し小さくなる程度である。なお、表7はTDに季節変化を与えるとき、T0もそれに応じて季節変化が与えられるので、それに必要な定数である。

試算 No. 101 では、上と同様の方式で、No. 1 地点に対するTDに季節変化を与えた。No.101よりは少し効果があったが、ほとんど効果はないと考えた方がよい。

表7 Illecillewaet流域におけるT0(M), TD(M)に関する諸定数T0K, T02その他

Table 7 Constants T0K, T02, etc. in Illecillewaet basin which relate with T0(M) and TD(M)

	HM 気温観測点 高度	H1 第1地帯 中間高度	ZHD 地帯高度幅	$T0K = \frac{HM-H1}{ZHD}$	T0	TD	$T01 = T0K * TD$	$T02 = T0 - T01$
No. 1	456	683.5	367	-0.6199	-1.53	2.31	-1.432	-0.098
No. 2	1323	683.5	367	1.7425	3.54	2.54	4.426	-0.886

3.3 試算 No. 103, No. 104

以上の試算がうまく行かないのは、Durance 流域と同様に、気温資料から求めた型が実状に適さないからであろうと考えた。そこで図13の型から離れ、正弦曲線によりTDD(M)を与えることとした。ただし、図13の季節変化の型では、5月に最大値、1月に最小値になっているので、これに合わせ、5月に最大値1となる正弦曲線、6月に最大値になる正弦曲線をTDD(M)に当てはめ、それぞれ試算No. 103 A, No. 103 Bを行った。これらの試算では、まずNo. 2に対するTDKを0に固定し、No. 1に対するTDKを1/4, 2/4, 3/4, 4/4と動かし、つぎにNo. 1のTDKを0に固定し、No. 2のTDKを同様に動かす。

結果はすべて否定的で、試算 No. 101, No. 102 より悪い。気温資料から得られた型にとらわれ、5月、6月に最大となる正弦曲線を用いたのが悪かったのかと考え、3月、4月にそれぞれ最大となる正弦曲線を用い、試算 No. 104 A, No. 104 Bを行ったが、前より少しよい結果が出た程度で、やはり効果はないと判定してよい。

3.4 試算 No. 105

以上の試算ですべてほとんど効果がなかったのも、No. 1, No. 2 両地点の気温差は、主とし

表 8 No.1 地点の気温を補正する TM(M) (試算No.105)

Table 8 TM(M) which modifies air temperature at No. 1 station

1 月	2 月	3 月	4 月	5 月	6 月	7 月	8 月	9 月	10 月	11 月	12 月
3.5	4.0	4.5	5.0	7.0	6.2	5.4	5.4	5.0	5.0	5.0	5.0

て平地にある No.1 地点の気温の特異性によるものではないかと考えた。すなわち、図13に示された 2 地点の気温差を No.1 地点の毎日の気温から差し引くことにより補正して、No.2 地点の気温に相当するものに変換すれば、よい結果が得られるのではないかと考えた。その準備として図13(表 6)の 2 地点の気温差を平滑化して表 8 の型を作り、これによって No.1 地点の気温を補正する。

試算No.105 では、No.1 地点の気温から表 8 の TM(M) を差し引いて、これを No.1 地点の気温に置き換える。No.2 地点の気温はそのままである。T0, TD としては、No.2 地点に対して先に定めた $T0 = 3.54$, $TD = 2.54$ を両方の地点に対して用いる。このような気温を入力資料として用いた上で、3 月に最大値 1 となる正弦曲線 4 月に最大値 1 となる正弦曲線により TDD(M) を与え、それぞれ試算No.105 A, No.105 B を行った。

結果はともに失敗で、評価値 CR は前より悪くなった。

3.5 試算 No.106, No.107

試算 No.105 の失敗の原因は、2 地点の気温差を No.1 地点の特異性だけによると考えた点であろう。むしろ、No.1, No.2 の両方に偏りがあり、双方の偏りの差が図13の季節変化の型として現れたと考えるべきであろう。この考え方のもとで、次の試算No.106 が行われた。

No.1, No.2 両地点の気温差の季節変化の型から、その年間平均を引き去ったもの(表 6 の 2 段目の値)を平滑化、単純化して表 9 の値を定める。これを TM(M) とし、これにより T0 の季節変化を与える。

すなわち、

$$T0(M) = T0 + T0KK * TM(M)$$

によって T0 に季節変化を与える。TD は固定する。まず No.2 地点に対しては $T0KK = 0$ に固定し、No.1 の $T0KK$ を 0, ± 0.1 , ± 0.2 と動かし、次に No.1 地点の $T0KK$ を 0 に固定し、No.2 の $T0KK$ を同様に動かす。結果は図14に示すように、意外なほどの成功であった。ここでもう一つ意外だったのは、No.1, No.2 両地点ともに、 $T0KK$ を負の方向に動かしたときに CR が小さくなったことであった。No.1, No.2 両地点の気温が 5 月に大きいということは、No.1 地点が 5 月に異常に暖いか、または No.2 地点が 5 月に異常に寒いかであろうと考えた。したがって、No.1 地点に対しては寒くする方向に修正し ($T0KK$ を負にす

表9 T0に季節変化を与えるTM(M)(試算No.106)

Table 9 TM(M) which modifies T0 in trial No. 106

1月	2月	3月	4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月	11月	12月
-1.5	-1.0	-0.5	0	2.0	1.0	0	0	0	0	0	0

る方向), No.2地点に対しては暖かくする方向に修正すると,よい結果が得られるであろうと期待した.しかし念のため,両地点ともにT0KKを0, ± 0.1 , ± 0.2 と正負両方向に動かしてみたのであるが,意外にも双方ともにT0KKを負の方向に動かして,CRが小さくなった.つまり,5月には,どちらの地点も流域全般と比べて暖かすぎる(高度補正を加えた上で)ということである.

図14の結果を見ると,T0KKをもう少し小さくしたあたりにCRの最小があるらしい.そこでT0KKを,No.1,No.2両地点それぞれに対し,-0.1,-0.2,-0.3,-0.4と動かし, $4 \times 4 = 16$ 通りのすべての場合につき試算し,評価値CRを求めた.表10は得られた結果を示す.

この試算No.107は成功し,評価値CRはNo.106の場合より小さくなったが,表10から判断すると,No.1に対してはT0KK=-0.25,No.2に対してはT0KKが-0.4より少し小さいあたりで,CRが最小になるらしい.

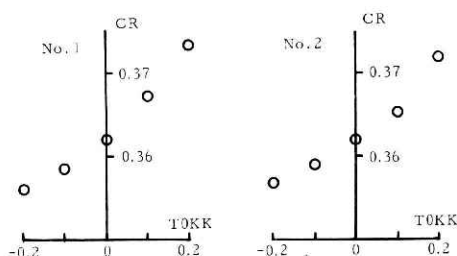


図14 試算No.106により得られた評価値CR (No.1, No.2は地点)

Fig. 14 Obtained values of criterion CR by trial No. 106 (No. 1 and No. 2 denote stations)

表10 試算No.107, 試算されたT0KKの組合せおよび得られた評価値CR

Table 10 Trial No. 107: pairs of T0KK used for trial and obtained values of CR

No. 1 \ No. 2	-0.1	-0.2	-0.3	-0.4
-0.1	0.3562	0.3540	0.3529	0.3534
-0.2	0.3541	0.3521	0.3515	0.3524
-0.3	0.3529	0.3514	0.3513	0.3525
-0.4	0.3518	<u>0.3507</u>	0.3509	0.3525

表11 試算No.107', 試算されたT0KKの組合せおよび得られた評価値CR

Table 11 Trial No. 107': pairs of T0KK used for trial and obtained values of CR

No. 2 \ No. 1				
	-0.15	-0.20	-0.25	-0.30
-0.45	0.3519	0.3514	0.3513	0.3519
-0.50	0.3519	0.3515	0.3514	0.3521
-0.55	0.3524	0.3521	0.3521	0.3528

そこで、No.1地点に対してはT0KK=-0.15, -0.20, -0.25, -0.30と動かし、No.2地点に対してはT0KK=-0.45, -0.50, -0.55と動かし、 $3 \times 4 = 12$ 通りのT0KKの組合せについて、試算No.107'が行われ、表11に示す評価値が得られた。表10, 表11から判断すると、T0KKが(-0.25, -0.4)のあたりで、CRが最小となるらしい。

3.6 試算No.108, No.109

T0KKを(-0.25, -0.4)に固定し(このときCR=0.3504となる)、その上でTDに正弦曲線の型で季節変化を与えてみた。これが試算No.108で、3月に最大値となる正弦曲線、4月に最大値になる正弦曲線を用いて、試算No.108A, No.108Bが行われた。No.1地点のTDKを1/4, 2/4, 3/4, 4/4と動かし、No.2地点のTDKを0に固定する場合、No.1地点のTDKを0に固定し、No.2地点のTDKを動かす場合とを試算したが、ともに効果がない。この結果を見て、あるいは逆方向に、TDKを-1/4, -2/4, -3/4, -4/4と動かせば効果があるかと、試算No.108A', No.108B'を行ったが、効果がなかった。TDKを負の方向に少し動かすと、CRがほんの少し小さくなるらしいが、効果は無視し得る程度である。

念のため、5月に最大値になる正弦曲線でTDD(M)を与えてみたが(試算No.108C)、これも効果がなかった。

TDに正弦曲線の型で季節変化を与えても効果がないので、あるいは気温資料から導いた表9のTM(M)をTDD(M)に用いればよいかと考えて試算No.109が行われたが、これも効果がなかった。

結局、表9の値でT0に季節変化を与え(T0KKは-0.25, -0.4)、TDには季節変化を与えないというのが、最終結果となった。これにより、最初CR=0.3620であったものが、CR=0.3504となった。3.3%の減少で、一応効果はあったとみてよい。

4. Dunajec 流域

4.1 気象観測点間の気温差

この流域では Czarny Dunajec (676 m), Zakopane (857 m), Hala Gasiencowa (1,520 m)の3地点で気温が測られている(図15)。以下、この3地点をA, B, Cと呼ぶ。流域は図15に示すように3地区に分割され、それぞれA, B, C地点の降水量, 気温で代表される。

A, B, C 3地点から2地点を取り出し、日気温(日最高, 日最低の平均)の月平均の差の10年平均を作る。その2地点気温差の季節変化の型から年間平均値を引き、季節変化を平均値からのずれで表わしたものを、2地点の高度差で割り、100 m 当たりの変動としたものが図16である。100 m 当たりの気温低下は約 0.6°C であるから、図16に示された季節変動はかなり大きい。とくに、A, B 2地点の気温差から出した季節変動が大きいのは、2地点の高度差が181 m と比較的小さいために、両地点の気温の季節変化の型の相異の影響が大きく現れたものである。図16に見るように、3地点ともにおよそ似た型を示し、これはDurance 流域のD地区で得られた型と似ている。

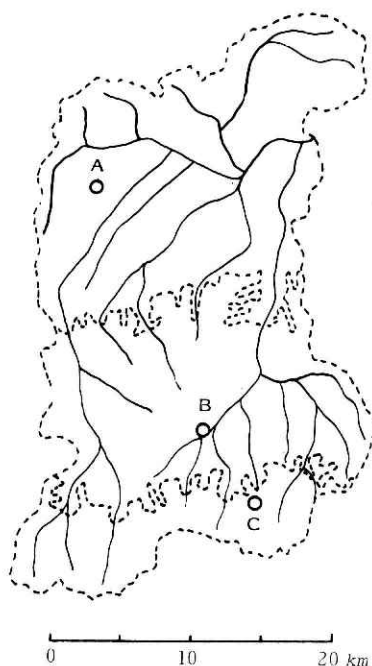


図15 Dunajec 流域地図

Fig. 15 Map of the Dunajec basin

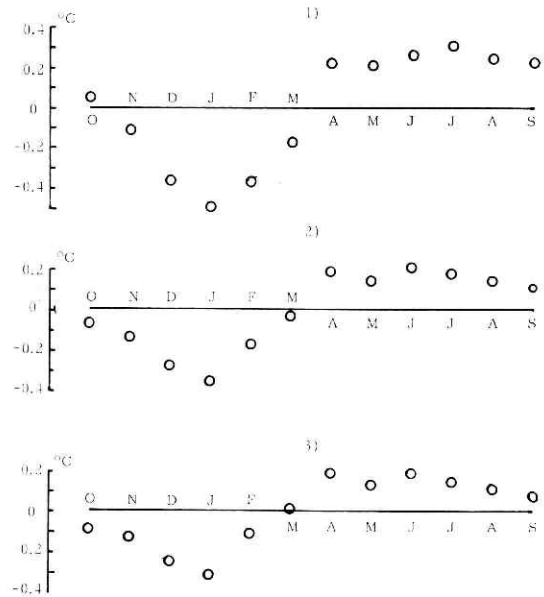
4.2 試算 No. 101, No. 102

図16に示された季節変化の型によって TD に季節変化を与えることを考える。A, B 2地

図16 Dunajec流域内の2 地点間の月平均気温の差の季節変化の型（高度差 100 m 当りに換算した値）
 1) A, B 2 地点間の気温差から導いた型
 2) A, C 2 地点間の気温差から導いた型
 3) B, C 2 地点間の気温差から導いた型

Fig. 16 Seasonal change pattern of difference of monthly mean air temperature at two points in Dunajec basin (reduced to per 100m altitude difference)

- 1) Derived from temperature difference at A and B
- 2) Derived from temperature difference at A and C
- 3) Derived from temperature difference at B and C



点の気温差から出した型をA地区に，A，C 2 地点の気温差による型をB地区に，B，C 2 地点の気温差から出した型をC地区に用いる．図16の型は 100m 当たりの気温差であるから，これを各地区の地帯高度幅に合わせて換算したものをTDD(M)として用いる．TD，T0に季節変化を与えるのに必要な諸定数を表12に示す．

試算 No. 101 は，3 地区一斉に TDK を 0，1/4，2/4，3/4，4/4 と動かして行われた．効果は認められなかった．

試算 No. 102 では，B，C 地区の TDK を固定し，A 地区の TDK を 0，1/4，2/4，3/4，4/4 と動かしてみた．わずかに効果があったが，実質的には効果がないとみてよい．

表12 Dunajec流域におけるT0(M)，TD(M)に関する諸定数T0K，T02その他

Table 12 Constants T0K, T02, etc. in Dunajec basin which relate with T0(M) and TD(M)

地 区	HM 気温観測点 高度	H1 第1地帯 中間高度	ZHD 地帯高度幅	T0K $= \frac{HM-H1}{ZHD}$	T0	TD	T01 $= T0K * TD$	T02 $= T0 - T01$
A	676	640	80	0.45	-0.63	0.49	0.2205	-0.8505
B	857	815	70	0.6	0.09	0.33	0.198	-0.108
C	1520	1175	150	2.3	0.75	0.88	2.024	-1.274

4.3 試算 No. 103, No. 104

Durance のD地区の例から見て，地点気温差から導いたTDD(M)は役に立たないと考え，正弦曲線によりTDD(M)を与えることにした．一応は図16の型を尊重し，位相を大体合わ

せ、6月に最大値1となる正弦曲線によりTDD(M)を与える。試算No.103は、まずB、C地区のTDKを0に固定し、A地区のTDKを0.06、0.12、0.18、0.24と動かし、次にA、C地区のTDKを0に固定し、B地区のTDKを0.04、0.08、0.12、0.16と動かし、最後にA、B地区のTDKを0に固定し、C地区のTDKを0.11、0.22、0.33、0.44と動かして行われた。地区ごとにTDKを動かす幅を変えたのは、各地区のTDにおよそ比例させたのである。

効果はまったく認められない。図16の型から導いたTDD(M)が効かなかったのだから、それと位相を合わせた正弦曲線が効かないのは当然であった。

そこで、4月、5月にそれぞれ最大値1となる正弦曲線でTDD(M)を与え、試算No.104A、No.104Bが行われた。TDKの動かし方はNo.103とほぼ同様であるが、A地区ではTDKを0.09、0.18、0.27、0.36、B地区では0.06、0.12、0.18、0.24、C地区では0.15、0.30、0.45、0.60と動かすことにした。

効果はいくらか認められた。4月に最大となる正弦曲線を用いた場合、A地区でTDK = 0.18のときCR = 0.5492、B地区でTDK = 0.24のときCR = 0.5488、5月に最大となる正弦曲線を用いた場合、A地区でTDK = 0.36のときCR = 0.5487、B地区でTDK = 0.24のときCR = 0.5490となった。はじめにCR = 0.5509であったのが、CR = 0.549程度になったのは、約0.35%の減少で、効果はあまりにも小さい。なお、C地区では効果がまったく認められない。

3月に最大となる正弦曲線も試算すべきであるが、TDに対する季節変化の試算は一応中止して、T0に季節変化を与えてみることにした。

4.4 試算 No. 105

ここではTDを固定し(表12の値を用いる)、

$$T0(M) = T0 + T0KK \times TM(M)$$

によりT0に季節変化を与える。TM(M)としては、試算No.101でTDD(M)に用いたもの、すなわち2地点間の気温差から導いた型を用いる。まずB、C地区のT0KKを固定し、A地区のT0KKを±0.1、±0.2と動かし、つぎにB、C地区についても同様のことをする。

結果は、A地区でかすかに効果があった程度で、ほとんど効果は認められない。特に、C地区においては、反応がまったく認められない。

4.5 試算 No. 106

これまでの試算はすべて成功しなかったが、そのときC地区だけは効果がないというより、反応がないことが多かった。TDやT0に季節変化を与えたとき、その季節変化が不適当なものであれば、変化を与えることにより、評価値CRは悪くなるはずであるが、C地区にお

いては、評価値が少し悪くなるだけで、あまり変化しないことが多い。これは季節変化を与える以前のものが、よくないことを示すものであろう。つまり、C地点の気温資料そのものに代表性が乏しいからであろう。ポーランド国境に近い山の北斜面の1,500mの高さに人が住んでいるのは、この地点が高い割に暖かく、特異な地点だからであろう。このように考えて、C地点の気温の代りに、A、B両地点の気温の平均から 3.35°C を引いたものを用いることにした。

これが試算No. 106で、評価値は $\text{CR} = 0.5509$ から 0.5504 に減少した。この程度の差は、CRの誤差の範囲というべきで、これによりC地点の気温を使わない方がよいとは言えないけれども、少なくともC地点の気温が積極的に有用だと言えないのは確かであろう。C地点の気温の代りに、A、B地点の気温の平均から 3.35°C を引いたものを用いることにより、TD、T0に季節変化を与えたときの効果を期待できるであろう。

4.6 試算 No. 107, No. 108

A、B両地点の気温の平均から 3.35°C を引いたもので、C地点の気温に代用した上で、TDに正弦曲線で季節変化を与える。3月、4月にそれぞれ最大値1となる正弦曲線を用いたのが試算No. 107A、No. 107Bで、TDKの動かし方は試算No. 104と同様である。図17はその結果で、いくらか効果が認められる。4月に最大となる正弦曲線の方がよいらしい。試算No. 107

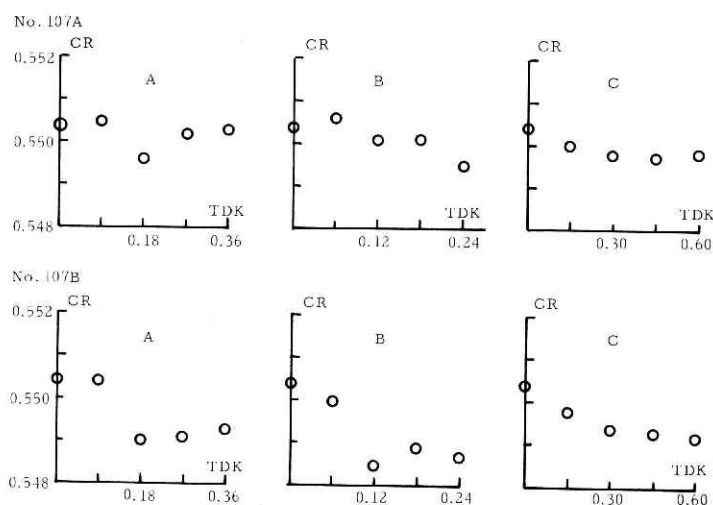


図17 試算No. 107により得られた評価値CR (上は3月最大の、下は4月最大の正弦曲線。A、B、Cは部分流域に対応)

Fig. 17 Obtained values of criterion CR by trial No. 107 (upper and lower correspond to cases in which sine curves with their maxima in March and April are applied respectively. A, B and C denote subbasins.)

Bの結果では、A、B、CでそれぞれTDKが0.18、0.12、0.60のときにCRが最小となっている。

そこで3地区のTDKを $0.18 : 0.12 : 0.60 = 3 : 2 : 10$ の比に保ちつつ動かすことにして、試算No.108を行った。すなわち、A、B、C3地区に対し、TDKをそれぞれ $0.03K$ 、 $0.02K$ 、 $0.10K$ ($K = 1, 2, \dots, 10$)と動かして計算をくり返し、評価値CRを求めた結果が図18である。

$K = 6$ のとき、すなわちA、B、C各地区に対するTDKが(0.18, 0.12, 0.60)のとき、 $CR = 0.5463$ が最小の評価値である。

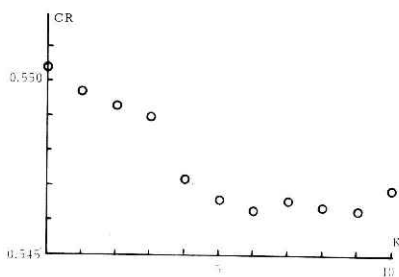


図18 試算No.108により得られた評価値CR
Fig. 18 Obtained values of criterion CR by trial No. 108

4.7 試算No.109, No.110

次にTDの季節変化の上に、さらに T_0 の季節変化を与えることを試みる。すなわち、 $TD(M)$ は試算No.108で求められたものを用い、

$$T_0(M) = T_{02} + T_{0K} * TD(M) + T_{0KK} * TM(M)$$

により、 T_0 に季節変化を与える。 $TM(M)$ として、6月、7月、8月にそれぞれ最大値1となる正弦曲線を用い、 T_{0KK} は ± 0.1 、 ± 0.2 と動かして、試算No.109が行われた。 $TM(M)$ として、6月、7月、8月に最大となる正弦曲線を用いたのは、図16の2地点気温差から導いた季節変化の型で、6月頃が最大、1月が最小であるから、これは6月、7月に最大となる正弦曲線で近似できるからであり、またTDに与える季節変化として4月に最大となる正弦曲線が用いられ、それは図16の型より位相が前にずれているから、 T_0 に対する季節変化としては、図16の型よりやや位相が遅れている方がよからうと考えたからである。これは図16の型が、気温低下率の季節変化の型と、各地点の偏りの季節変化の合成結果と考えられることから来ている。

図19は試算No.109の結果である。評価値CRの変化はわずかで、CRの持つ誤差を考えれば判断は難しいが、A、B両地区に対しては6月に最大の正弦曲線を適用し、 T_{0KK} を負の側に動かし、C地区には8月に最大の正弦曲線を適用し、 T_{0KK} を正の側に動かせばよからう。

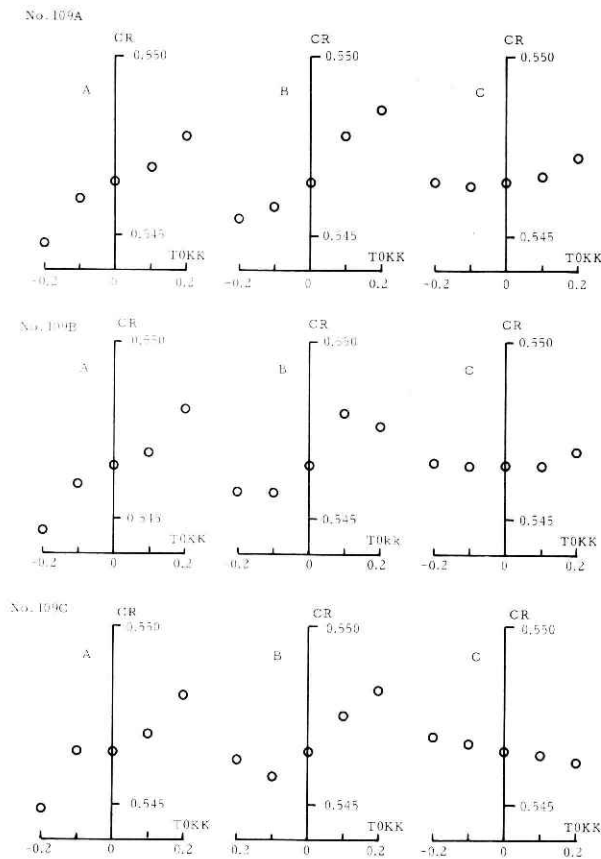


図19 試算No.109により得られた評価値CR
(No.109A, No.109B, No.109Cはそれぞれ6月, 7月, 8月に最大となる正弦曲線を適用, A, B, Cは部分流域に対応)

Fig. 19 Obtained values of criterion CR by trial No. 109 (No. 109A, No. 109B and No. 109C correspond to the cases in which sine curves with their maxima in June, July and August are applied respectively. A, B and C denote sub-basins.)

以上の判断から次の試算No.110を行う。A, B両地区には6月に最大の, C地区には8月に最大の正弦曲線によりそれぞれ $TM(M)$ を与え, $T0KK$ は $-0.07K$, $-0.07K$, $+0.07K$ ($K=1, 2, \dots, 5$)と変化させる。その結果が図20で, $K=4$ で $CR=0.5423$, が最小の評価値である。このとき $T0KK$ は $(-0.28, -0.28, +0.28)$ である。

評価値は, はじめ $CR=0.5509$ で, C地点の気温を使わないことにして $CR=0.5504$ になった。ただし, ここでは実質的には評価値の減少はないとみてよい。ついでTDに季節変化を与えることにより $CR=0.5463$ となり, $T0$ に季節変化を与えることにより $CR=0.5423$ となった。評価値は, それぞれ0.8%ずつ減少し, 合わせて1.6%の減少である。T0, TDに季節変化を与えたことによる効果は僅少であるが, それでもいくらかの効果は認めてよからう。

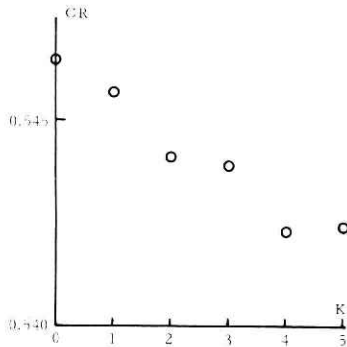


図20 試算No.110により得られた評価値CR

Fig. 20 Obtained values of criterion CR by trial No. 110

5. Dischma 流域

5.1 必要な定数

この流域に対する気象観測点は、流域外の 2,677m の高所にある 1 地点だけで、気温に関する情報はこれ以外に何もない。したがって試算はある意味では簡単で、いくつかの正弦曲線を当てはめて T_0 、 T_D に季節変化を与え、その効果をみるより致し方ない。 T_0 、 T_D に季節変化を与えるに必要な定数を表13に示す。

表13 Dischma流域における $T_0(M)$ 、 $T_D(M)$ に関する諸定数 T_0K 、 T_02 その他

Table 13 Constants T_0K , T_02 , etc. in Dischma basin which relate with $T_0(M)$ and $T_D(M)$

HM 気温観測点 高度	H1 第1地帯 中間高度	ZHD 地帯高度幅	T_0K $= \frac{HM-H1}{ZHD}$	T_0	T_D	T_01 $=T_0K \cdot T_D$	T_02 $=T_0 - T_01$
2,677	1,791.15	246.3	3.5966	6.07	1.87	6.726	-0.656

5.2 試算 No. 101

正弦曲線を用い T_D に季節変化を与えることをまず試みる。 $TDD(M)$ として、2月、3月、4月にそれぞれ最大値1となる正弦曲線を用い、 TDK を0、1/4、2/4、3/4、4/4と動かしてみた。これが試算No.101A～Cで、図21はその結果を示している。どの場合も効果がない。

ここで T_D に対する季節変化は効果がないと誤った判断を下だし、 T_0 に対して季節変化を与える試算No.102を行ったが、考え直してみると、 T_D に季節変化を与える試算を試みる余地が残っている。そこで、1月、12月、11月にそれぞれ最大値1となる正弦曲線により $TDD(M)$ を与え、 TDK を0、1/4、2/4、3/4、4/4と変化させて試算No.103A～Cが行われた。図22はその結果を示している。

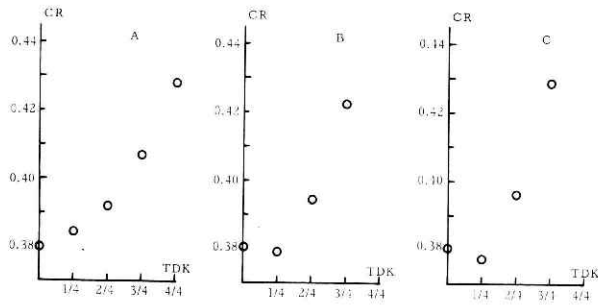


図21 試算No. 101 により得られた評価値CR (左, 中, 右はそれぞれ2月, 3月, 4月に最大となる正弦曲線を用いた場合)

Fig. 21 Obtained values of criterion CR by trial No. 101 (Left, middle and right correspond to the cases in which sine curves with their maxima in February, March and April are applied respectively)

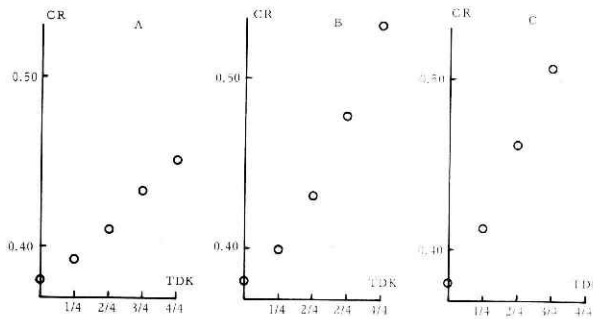


図22 試算No. 103 により得られた評価値CR (左, 中, 右はそれぞれ1月, 12月, 11月に最大となる正弦曲線を用いた場合)

Fig. 22 Obtained values of criterion CR by trial No. 103 (Left, middle and right correspond to the cases in which sine curves with their maxima in January, December and November are applied respectively)

ここでも判断が誤って居り, TDK は負の方向に変化させるべきであった. それは試算 No. 101 Aの結果から当然予想できることであった. そこでTDKを -0.07 , -0.14 , -0.21 , -0.28 と動かして, 試算No. 103' A~Cが行われ, 図23に示す結果が得られた. ここでも TDKの動かし方の見積りがまずく, CRは -0.28 で最小になっている.

それを補って試算 No. 103'' A, Bが行われ, TDKは -0.35 , -0.42 , -0.49 と動かされた. 図24によれば, 12月に最大値1となる正弦曲線を用い, $TDK = -0.28$ のとき, $CR = 0.3696$ が評価の最小値を与えている. それは6月に最大値1となる正弦曲線を用い, $TDK = 0.28$ ということで, これを一応 TDの季節変化と定める.

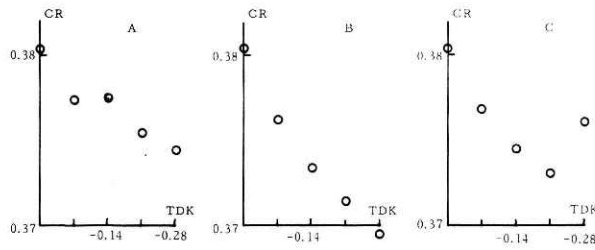


図23 試算No.103'により得られた評価値CR (左, 中, 右はそれぞれ1月, 12月, 11月に最大となる正弦曲線を用いた場合)

Fig. 23 Obtained values of criterion CR by trial No. 103' (Left, middle and right correspond to the cases in which sine curves with their maxima in January, December and November are applied respectively)

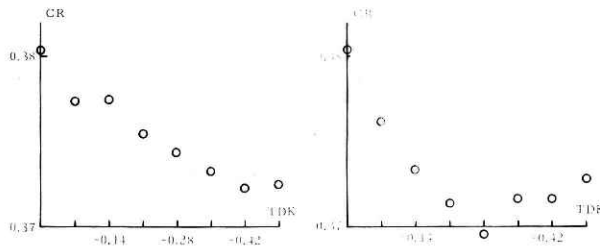


図24 試算No.103''により得られた評価値CR (左, 右はそれぞれ1月, 12月に最大となる正弦曲線を用いた場合)

Fig. 24 Obtained values of criterion CR by trial No. 103'' (Left and right correspond to the cases in which sine curves with their maxima in January and December are applied respectively)

5.3 試算 No. 104

先に試算 No. 102 として, TD に季節変化を与えず, 2月, 3月, 4月にそれぞれ最大値1となる正弦曲線によりTM(M)を与える試算が行われ, 2月に最大となる正弦曲線を用い, $TDK = -0.15$ のあたりでよい結果が得られている. 以上の結果を考え, TM(M)として, 1月, 2月, 3月にそれぞれ最大値1となる正弦曲線を用い, TDK を0, -0.1 , -0.2 , -0.3 , -0.4 と動かして, 試算 No. 104A~Cが行われた. このとき, TD は先に最小評価値の得られたものに固定して置く, 図25はこの試算の結果を示す.

2月に最大となる正弦曲線がよいらしいが, TDK が -0.4 より小さい場合を計算してみる必要がある. TDK を -0.5 , -0.6 , -0.7 , -0.8 と置いて試算が続行され, 図26の結果が得られた. 2月に最大となる正弦曲線を用い, $TDK = -0.6$ というのは, 8月に最大となる正弦曲線を用い, $TDK = 0.6$ ということである.

結局, TD に季節変化を与えることにより, CRは0.3804 から0.3696に減り, ついで

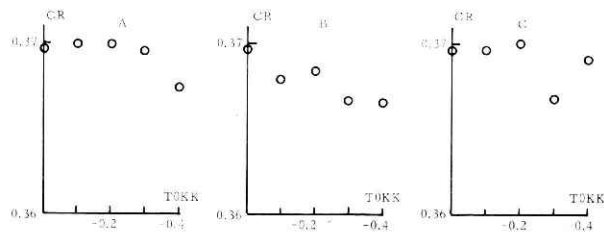


図25 試算No.104により得られた評価値CR(左, 中, 右はそれぞれ1月, 2月, 3月に最大となる正弦曲線を用いた場合)

Fig. 25 Obtained values of criterion CR by trial No. 104 (Left, middle and right correspond to the cases in which sine curves with their maxima in January, February and March are applied respectively)

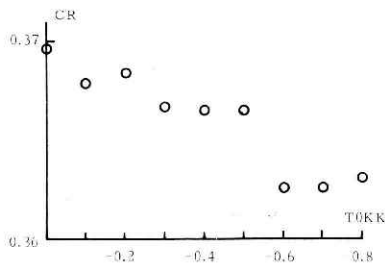


図26 試算No.104Bおよびその延長により得られた評価値CR

Fig. 26 Obtained values of criterion CR by trial No. 104B and its extension

T02に季節変化を与えることにより0.3626になった。CRの減少率は、それぞれ2.8%, 1.9%で、合わせて4.7%の減少である。一応かなりの効果があったとみてよい。

6. Kultsjön 流域

6.1 必要な定数

この流域にも、Dischmaと同様、気温観測点は1地点だけである。表14はT0, TDに季節変化を与えるのに必要な定数を示す。

表14 Kultsjön流域におけるT0(M), TD(M)に関する諸定数T0K, T02その他

Table 14 Constants T0K, T02, etc. in Kultsjön basin which relate with T0(M) and TD(M)

HM 気温観測点 高度	H1 第1地帯 中間高度	ZHD 地帯高度幅	$T0K = \frac{HM-H1}{ZHD}$	T0	TD	$T01 = T0K * TD$	$T02 = T0 - T01$
570	595	110	0.2273	0.46	0.67	-0.152	0.612

6.2 試算 No. 101

まずTDに季節変化を与える。TDD(M)には、2月、3月、4月にそれぞれ最大値1となる正弦曲線を用い、TDKは0、0.08、0.16、0.24、0.32と動かした。これが試算No.101 A～Cで図27はその結果を示す。

ここで判断を誤り、TDについて試算を中止し、T0に季節変化を与える試算No.102、No.103を行ったのであるが、後で考え直し、TDに与える季節変化をさらに試みることにした。すなわち、1月、12月、11月にそれぞれ最大値1となる正弦曲線によりTDD(M)を与え、TDKを0.1、0.2、0.3、0.4と動かして試算No.104 A～Cを行い、図28の結果が得ら

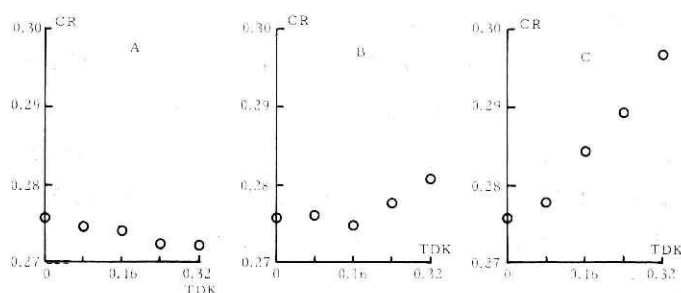


図27 試算No.101により得られた評価値CR (左、中、右はそれぞれ2月、3月、4月に最大となる正弦曲線を用いた場合)

Fig. 27 Obtained values of criterion CR by trial No. 101 (Left, middle and right correspond to the cases in which sine curves with their maxima in February, March and April are applied respectively)

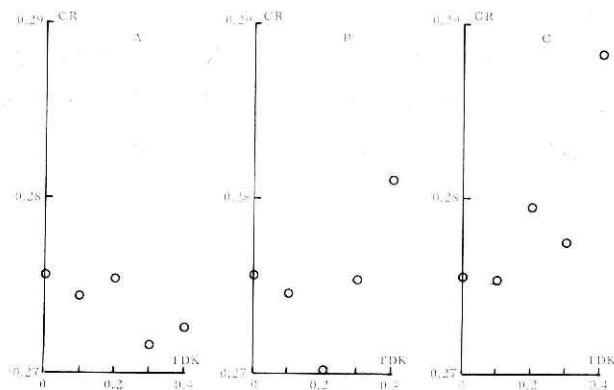


図28 試算No.104により得られた評価値CR (左、中、右はそれぞれ1月、12月、11月に最大となる正弦曲線を用いた場合)

Fig. 28 Obtained values of criterion CR by trial No. 104 (Left, middle and right correspond to the cases in which sine curves with their maxima in January, December and November are applied respectively)

れた。

12月に最大値1となる正弦曲線を用い、 $TDK = 0.2$ のとき、最小の評価値 $CR = 0.2702$ が得られた。評価値が $TDK = 0.2$ で突然小さくなる点がやや不自然に感じられたので、 TDK を0.15, 0.17, 0.19, 0.21, 0.23と動かして確かめてみたが、 $TDK = 0.2$ のあたりに CR の最小があるのは確からしい。ただし、 $CR = 0.2702$ は、 CR の誤差の影響もあって、たまたま小さい値となったらしい。

6.3 試算 No. 105, No. 106

TD の季節変化は、12月に最大値1となる正弦曲線と、係数 $TDK = 0.2$ で与えることとし、つぎに $T0$ に季節変化を与えることを試みる。

先に試算No.102として、2月、3月、4月にそれぞれ最大値1となる正弦曲線により $TM(M)$ を与え、 $T0KK$ を ± 0.1 , ± 0.2 と動かしてみたが効果は認められなかった。このときは TD に与える季節変化が上記のものと少し異なっているが、その影響はほとんどないと言ってよからう。試算No.102の結果を考え、今度は5月、6月、7月にそれぞれ最大値1となる正弦曲線により $TM(M)$ を与え、 $T0KK$ を ± 0.2 , ± 0.4 と動かして、試算No.105を行ったが、やはり効果は認められない。

先に、 $T0$ に正弦曲線により季節変化を与えた試算No.102で効果が認められなかったとき、Illecillewaet流域で用いた表9の値を $TM(M)$ に用いて試算No.103を行い、わずかに効果があると思った。Kultsjön, Illecillewaet両流域は種々の条件が異なっているが、大陸の西側の高緯度にあり、暖流の流れる海の影響を山越しに受ける点でいくらか似ていると考えたからである。そこで試算No.106として、再び表9の値によって $TM(M)$ を与え、 $T0KK$ を ± 0.1 , ± 0.2 と動かしてみたが、今度は効果が認められない。

結局、12月に最大値1となる正弦曲線を用い、 $TDK = 0.2$ と置くことにより、評価値は $CR = 0.2756$ から、 0.2702 に減り、一方 $T0$ に与える季節変化は効果がないということになった。評価値の減少は約2%で、わずかに効果が認められる。

7. W3 流域

7.1 必要な定数

W3の流域にも気温観測点は1地点だけである。W3流域の解析は、最終的には3時間資料によって行われた。 $T0$, TD に対する季節変化の導入も、3時間資料で計算するべきであるが、種々の正弦曲線に対する試算をすべて3時間資料で行うと、計算時間が掛かりすぎる。そこで先ず日資料による予備的計算を行い、大体の見当がついた所で、3時間資料による計算に切り換えることにする。表15は TD , $T0$ に季節変化を与えるときに必要な定数である。

表15 W3流域におけるT0(M), TD(M)に関する諸定数T0K, T02その他

Table 15 Constants T0K, T02, etc. in W3 watershed which relate with T0(M) and TD(M)

HM 気温観測点 高度	H1 第1地帯 中間高度	ZHD 地帯高度幅	$T0K = \frac{HM-H1}{ZHD}$	T0	TD	$T01 = T0K * TD$	$T02 = T0 - T01$
552	389.5	87	1.868	1.5 -0.8	1.2 0.98	2.241 1.830	-0.741 -2.630

上の数字は日資料, 下の数字は3時間資料に対して用いられる.

7.2 試算 No. 201, No. 202

3時間資料による最終モデルは, 日資料により行われた試算 No. 40 で得られたモデルに基づいて作られている. そこで試算 No. 40 で得られたモデルから出発して, TD, T0に季節変化を与えることにする. 調べてみると, 試算 No. 40 により得られたモデルは, 自動化修正くり返しの最終回6回目に得られている. したがって Durance の場合と同じく, さらに修正をくり返すことにより, 評価値がよくなる可能性がある. そこで試算 No. 200 (先に3時間資料による試算を No. 101 から始めたから, 今回の試算は No. 200 から始める)として, 先の試算 No. 40 において, 自動化修正をさらにくり返してみた. くり返し9回目にCR=0.4550と最小値になった. 6回目にはCR=0.4604であるから, CRは1.2%減少した. ここで得られたモデルを出発点として, まずTDに季節変化を与える.

2月, 3月, 4月にそれぞれ最大値1となる正弦曲線をTDD(M)に用い, TDKを0.1, 0.2, 0.3, 0.4と動かして, 試算 No. 201A~Cが行われ, 図29の結果が得られた. この結果を見ると, 3月, 4月に最大値となる正弦曲線の場合 (No. 201B, C) には, TDKを負の側

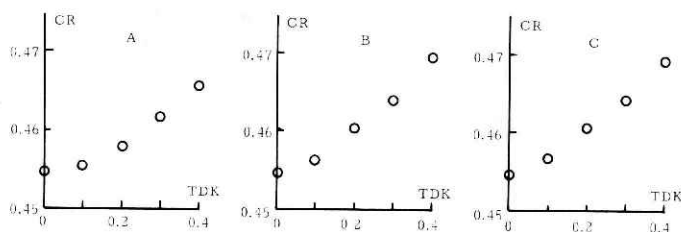


図29 試算No.201により得られた評価値CR (左, 中, 右はそれぞれ2月, 3月, 4月に最大となる正弦曲線を用いた場合)

Fig. 29 Obtained values of criterion CR by trial No. 201 (Left, middle and right correspond to the cases in which sine curves with their maxima in February, March and April are applied respectively)

に動かすと、CR がいくらか小さくなりそうである。そこで、3月、4月、5月にそれぞれ最大値1となる正弦曲線をTDD(M)に用い、TDKを -0.05 、 -0.10 、 -0.15 、 -0.20 と動かして試算No. 202 A～Cが行われ、図30の結果が得られた。この図から判断すると、6月、7月に最大となる正弦曲線を試算してみる必要がある。かくして、試算No. 202 D、E が追加された。図31はその結果を示す。図31の縦軸の目盛りは図30に比べて10倍になっているので、6月に最大となる正弦曲線の方が目立ってよいというほどではないが、ともかく、ここでTDK $=-0.1$ のときに、CR は最小値0.4541になる。減少はわずかに0.13% にぎない。ここでTDK $=-0.1$ であるから、12月に最大値1となる正弦曲線をTDD(M)に用い、TDK $=0.1$ と言った方がよい。3月に変曲点がある正弦曲線である。

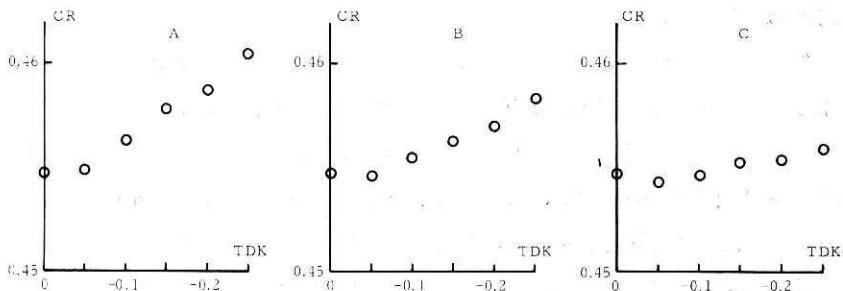


図30 試算No.202A～Cにより得られた評価値CR (左、中、右はそれぞれ3月、4月、5月に最大となる正弦曲線を用いた場合)

Fig. 30 Obtained values of criterion CR by trial No. 202 A, B and C (Left, middle and right correspond to the cases in which sine curves with their maxima in March, April and May are applied respectively)

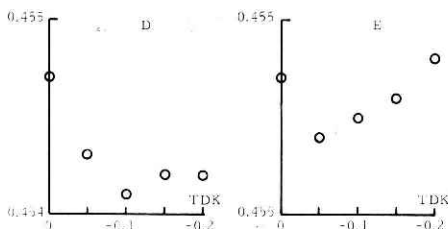


図31 試算No.202D、Eにより得られた評価値CR (左、右はそれぞれ6月、7月に最大となる正弦曲線を用いた場合)

Fig. 31 Obtained values of criterion CR by trial No. 202 D and E (Left and right correspond to the cases in which sine curves with their maxima in June and July are applied respectively)

7.3 試算 No. 203

以上でTDに季節変化を与える試算を終り、次にT0に対して季節変化を与える。TM(M)を2月、4月、6月に最大値1となる正弦曲線と与え、T0KKを0、 ± 0.1 、 ± 0.2 と動かしてみたのが試算No. 203 A～Cで、図32はその成果を示す。

2月、4月にそれぞれ最大となる正弦曲線は効果がなく、6月に最大となる正弦曲線はい

くらか効果を示し、 $TOKK$ は正の方向に動かせばよい。そこで $TM(M)$ を5月、6月、7月に最大値1となる正弦曲線で与え、 $TOKK$ を0、0.1、0.2、0.3、0.4と動かして、試算No.203 A～Cを行った。図33はその結果を示す。6月に最大値1となる正弦曲線で $TM(M)$ を与え、 $TOKK = 0.2$ のとき、評価値の最小 $CR = 0.4524$ が得られる。出発時の0.4541に比べ、わずか0.4%の減少にすぎない。

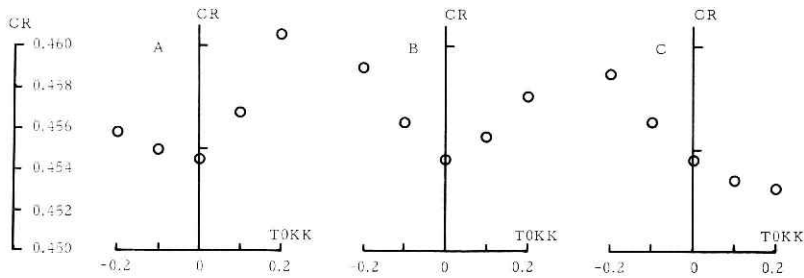


図32 試算No.203により得られた評価値 CR (左, 中, 右はそれぞれ2月, 4月, 6月に最大となる正弦曲線を用いた場合)

Fig. 32 Obtained values of criterion CR by trial No. 203 (Left, middle and right correspond to the cases in which sine curves with their maxima in February, April and June are applied respectively)

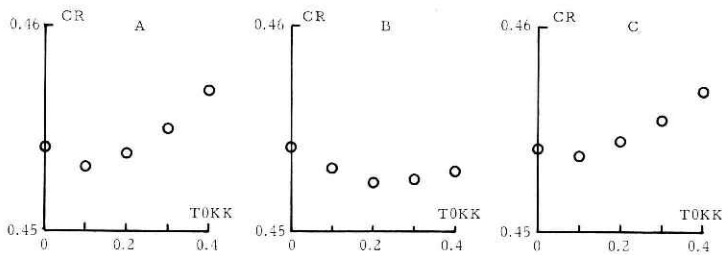


図33 試算No.203'により得られた評価値 CR (左, 中, 右はそれぞれ5月, 6月, 7月に最大となる正弦曲線を用いた場合)

Fig. 33 Obtained values of criterion CR by trial No. 203' (Left, middle and right correspond to the cases in which sine curves with their maxima in May, June and July are applied respectively)

7.4 試算 No. 204, No. 205 (3 時間資料による試算)

日資料により得られた以上の結果は、12月に最大値1となる正弦曲線により $TDD(M)$ を与え $TDK = 0.1$ と置き、6月に最大値1となる正弦曲線で $TM(M)$ を与え、 $TOKK = 0.2$ と置くものである。この結果を出発点と考え、3時間資料に対しても、 $TDD(M)$ は12月に最大値1となる正弦曲線で、 $TM(M)$ は6月に最大値1となる正弦曲線与え、 TDK は0.08、

0.10, 0.12 と動かし, T0KK は 0.15, 0.20, 0.25 と動かして, $3 \times 3 = 9$ 通りの場合を試算してみた. これが試算 No. 204 で, 表16はその結果を示す. 計算時間節約のため, 自動化修正を3回しかくり返さなかったこともいづらか関係したとみえて, 評価値の変化が微小で, 判断を下し難いが, T0KK は 0.2 でよからう. しかし, TDK をさらに大きくして試算してみる必要がある. それが試算 No. 205 で, TDK を大きくして行くと, CR は徐々に減少して行く. 3 回も試算が続行され, 結局図34に示す結果が得られ, T0K = 0.5 で CR = 0.4779 が最小のCRとなった.

表16 試算No. 204 により得られた評価値CR

Table 16 Obtained values of CR by trial No. 204

T0KK \ TDK	0.08	0.10	0.12
0.15	0.4811	0.4809	0.4808
0.20	0.4810	0.4808	0.4806
0.25	0.4810	0.4808	0.4806

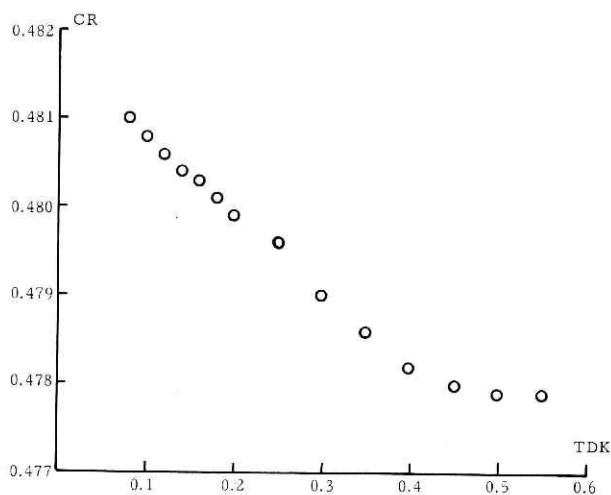


図34 試算No. 205 により得られた評価値CR

Fig. 34 Obtained values of criterion CR by trial No. 205

7.5 積雪タンクの改良

実は以上の計算は、積雪タンクを使わないで行われた。積雪タンクを通すのを忘れたのである。通してみると、かえって評価値は悪くなった。積雪タンクを通すと、かえって評価値が少し悪くなることは、以前から知っていた。積雪タンクを用いることにより、雪どけの始まる時期のハイドログラフの形は、見た目に明らかによくなる。雪どけが盛んに進行し、河川が増水しているとき、積雪タンクを用いようと、用いまいと、ハイドログラフの違いは目で見た限りではよく判らない。そこでCRの値が少し悪くなることを気にしないでいたのであるが、今回のようにCRのわずかな相違をたよりに、よいパラメータの値を探しているときには、CRの値を気にしないわけには行かない。

従来の積雪タンクは図35 a) に示されたものである。このタンクを通すと、雪どけが始まる頃のハイドログラフは明らかによくなる。それにもかかわらずCRの値が悪くなるというのは、雪どけが盛んなときに、積雪タンクはハイドログラフの形を悪くしているに違いない。一方、積雪タンクを通さない方がCRの値がよいということは、雪どけが盛んなときには積雪タンクは無用ということで、そのときには積雪タンクが実質的に作用しなくなるようにすればよい。つまり積雪層がある限度以上水を含めば、融雪水や雨水は単に通り返けるだけ、つまり出力が入力に等しくなるようにすればよい。そう考えて、積雪タンクにさらに流出孔を1個つけたし、図35 b) のモデルを作った。

この改良された積雪モデルはきわめてよい結果を示し、CRは0.4667になった。積雪モデルなしのときのCR = 0.4779 に比べ、2.3%の減少である。一応これを最終モデルとする。

すなわち 12月に最大となる正弦曲線でTDD(M)を与えTDK = 0.5, 6月に最大となる正弦曲線でTM(M)を与えTOKK = 0.2, 図35 b) の積雪タンクを用いるのが最終モデルである。

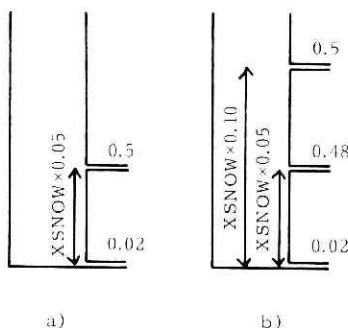


図35 W3 に用いた積雪タンク (3時間単位)
a) 以前のもの b) 改良したもの

Fig. 35 Snowpack tank applied to W3
a) previous model b) revised model

8. 6 流域に対して定められた最終モデル，およびそれにより算出された流量に対する評価値

8.1 時間遅れ

以上で6流域に対し，T0，TDの季節変化の導入を中心とするモデルの改良が終了したわけであるが，このモデルにより算出された流量に対し，適当な時間遅れを与える必要がある．これは算出された流量に対し，WMO方式による評価を適用するとき効果を表わす．

時間遅れ TLAG をタンク・モデルの出力 $Y(J)$ に与えると，

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

により，流量 $Q(J)$ を近似することになる．この $QE(J)$ と $Q(J)$ との平均2乗誤差を最小にするような TLAG を求める問題には，最小2乗法により，次の解が与えられる．

$$TLAG = \frac{1}{2} - \frac{S(0) - S(1)}{2(R(0) - R(1))}$$

ただし，ここで

$$R(0) = \sum_{j=1}^N Y(J)^2, \quad R(1) = \sum_{j=2}^N Y(J-1) * Y(J),$$

$$S(0) = \sum_{j=1}^N Y(J) * Q(J), \quad S(1) = \sum_{j=2}^N Y(J-1) * Q(J).$$

たまに現れる洪水の資料で結果が大きく左右される場合のことを考え，同様の計算を流量の対数を取った値を用いて，さらに計算する．

この方式によって得られた時間遅れを表17に示す．流量そのものから得られた値と，流量の対数から得られた値とがかなり相違する場合があります，どのように時間遅れを定めるかについて問題があるが，便宜的に単純平均をとることにした．

表17 定められた時間遅れ(単位：日，ただしW3においては3時間)

Talbe 17 Values of time lag obtained (time unit: day except W3 where time unit is 3h)

	Durance	W3	Dunajec	Dischma	Illecillewaet	Kultsjön
流量から求めた値	0.4114	0.3449	0.5982	0.1793	0.2054	0.2933
流量の対数から求めた値	0.3889	0.5405	0.6689	0.0559	0.3590	0.2632
上記の値の平均	0.4002	0.4427	0.6336	0.1176	0.2822	0.2783
時間遅れ(時間)	9.6	1.3	15.2	2.8	6.8	6.7

このようにして定められた時間遅れと、流域面積の平方根との相関関係を示すのが図36である。何かの理由でよい結果の得られない Dunajec を例外として除けば、相関はきわめて良好で、以前に得られた相関図よりはるかに相関がよい。これは多分、今回の再計算が実質的に意味のある改善であったことを示すものであろう。なお表17で、実流量、対数値から求められた時間遅れの1:1の平均により時間遅れを定めたのは、図36の相関図を考えてのことであった。

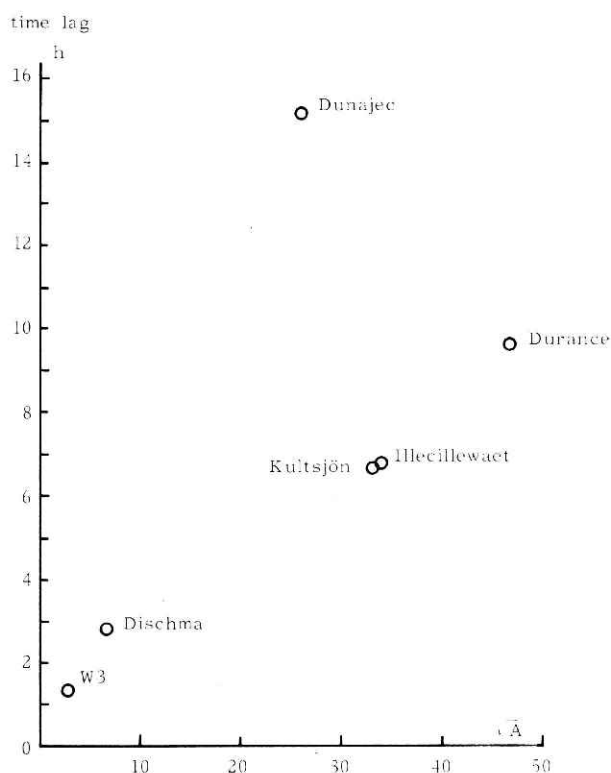


図36 時間遅れと流域面積の平方根の間の相関関係

Fig. 36 Correlation between time lag and square root of catchment area

8.2 得られたパラメータの値

WMO から与えられた 6 流域に対し、以上の試算によって定められたパラメータの値を表18にまとめて示す。

表18 6流域に対して得られたパラメータ

Table 18 Parameter values obtained for the six WMO basins

部分流域面積比		1) Durance											
		27:18:26:19	27:18:26:19	27:18:26:19	27:18:26:19	27:18:26:19	27:18:26:19	27:18:26:19	27:18:26:19	27:18:26:19	27:18:26:19	27:18:26:19	27:18:26:19
地帯面積比	A	8:10:15:24:24:19											
	B	14:15:16:19:20:16											
	C	12:18:22:24:16:8											
	D	5:12:20:27:24:12											
地帯別降水量を定める定数	CP(M)	1											
	C(M)	1											
	A	-0.12	-0.01	0.11	0.22	0.33	0.44						
	B	-0.08	0.04	0.17	0.29	0.42	0.55						
気温補正項T0および地帯気温低下定数TD	C	-0.05	0.10	0.25	0.40	0.55	0.70						
	D	-0.14	-0.02	0.10	0.22	0.34	0.46						
融雪定数(SMELT)	T0(M)	0.783	1.009	1.166	1.209	1.130	0.948	0.712	0.486	0.330	0.286	0.365	0.548
	TD(M)	2.100	2.246	2.300	2.246	2.100	1.900	1.700	1.554	1.500	1.554	1.700	1.900
	T0(M)	0.081	0.238	0.368	0.438	0.427	0.340	0.200	0.043	-0.087	-0.157	-0.147	-0.060
	TD(M)	2.380	2.526	2.580	2.526	2.380	2.180	1.980	1.834	1.780	1.834	1.980	2.180
積雪定数(SMELT)	T0(M)	-0.317	-0.235	-0.144	-0.068	-0.027	-0.033	-0.083	-0.165	-0.256	-0.333	-0.373	-0.368
	TD(M)	2.773	2.800	2.773	2.700	2.600	2.500	2.427	2.400	2.427	2.500	2.600	2.700
	T0(M)	-0.229	-0.113	-0.056	-0.074	-0.161	-0.296	-0.440	-0.556	-0.613	-0.596	-0.508	-0.374
	TD(M)	1.653	1.680	1.653	1.580	1.480	1.380	1.307	1.280	1.307	1.380	1.480	1.580
タシ	融雪定数(SMELT)	2.5	2.5	2.5	3.0	4.0	4.2	4.2	4.2	4.0	3.0	2.5	2.5
	タシ	なし											
タシモデル定数	A0:00924, A1:00184, A2:00685, HA1:5, HA2:15												
	S1:50, S2:250, K1:2, K2:20												
	B0:00161, B1:00175, HB:0												
	C0:00069, C1:00056, HC:50, D1:0001												
時間遅れ	04002(day):9.6h												

2) W3流域(3時間単位)

地帯面積比		20:45:25:10											
地帯別降水量 を定める定数	CP(M)	1月	2月	3月	4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月	11月	12月
		1.1	1.1	1.1	1.2	1.3	1.05	0.85	0.75	0.75	0.8	0.85	0.95
	C(M)	1											
気温補正項T0 および地帯気温 低下定数TD	PD(I)	-0.06 0 0.06 0.12											
	T0(M)	1月	2月	3月	4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月	11月	12月
		-0.164	-0.433	-0.800	-1.167	-1.435	-1.533	-1.435	-1.167	-0.800	-0.433	-0.164	-0.066
融雪定数(SMELT)	TD(M)	1.413	1.230	0.980	0.730	0.547	0.480	0.547	0.730	0.980	1.230	1.413	1.480
		0.52	0.52	0.52	0.71	0.90	0.95	0.95	0.95	0.90	0.71	0.52	0.52
積雪タシク		SNOW 01=0.05, SNOW 02=0.1, SNOW 1=0.02, SNOW 2=0.48, SNOW 3=0.5											
		A0:0.2089, A1:0.05, A2:0.1, HA1:0, HA2:15											
タシクモデル定数		S1:15, S2:110, K1:0.44, K2:1.5											
		B0:0.0006034, B1:0.858×10 ⁻⁴ (2乗に比例)											
		C0:0.00023375, C1:0.0002625, HC:0, D1:0.000125											
時間遅れ		0.4427(3h):1.3h											

3) Dunajec

部分流域面積比		4 7.5 : 3 7.5 : 1 5.0											
地帯面積比	A	5 0 : 2 9 : 1 3 : 3 : 3 : 2											
	B	2 9 : 2 4 : 2 0 : 1 2 : 8 : 7											
	C	1 4 : 2 5 : 2 2 : 1 9 : 1 1 : 9											
地帯別降水量 を定める定数	CP (M)	1月	2月	3月	4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月	11月	12月
		1.45	1.45	1.50	1.50	1.15	0.95	0.85	0.85	0.70	0.78	0.95	1.10
	C (M)	1											
気温補正項 T0および 地帯気温低下 定数TD	A	-0.075	0.092	0.259	0.427	0.595	0.763						
	B	-0.064	0.043	0.149	0.255	0.362	0.386						
	C	-0.057	-0.032	-0.008	0.017	0.042	0.068						
融雪定数 (SMELT)	T0 (M)	1月	2月	3月	4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月	11月	12月
	A	-0.388	-0.450	-0.560	-0.689	-0.802	-0.870	-0.872	-0.811	-0.700	-0.571	-0.458	-0.391
	B	0.490	0.580	0.646	0.670	0.646	0.580	0.490	0.400	0.334	0.310	0.334	0.400
積雪タシ	T0 (M)	0.332	0.266	0.152	0.022	-0.090	-0.154	-0.152	-0.086	0.028	0.158	0.270	0.334
	B	0.330	0.390	0.434	0.450	0.434	0.390	0.330	0.270	0.226	0.210	0.226	0.270
	C	0.508	1.160	1.703	1.990	1.945	1.580	0.992	0.340	-0.203	-0.490	-0.445	-0.080
タシクモデル定数	TD (M)	0.880	1.180	1.400	1.480	1.400	1.180	0.880	0.580	0.360	0.280	0.360	0.580
		4											
		な し											
時間遅れ	A0:0.1704, A1:0.0491, A2:0.3377, HA1:5, HA2:30												
	S1:50, S2:250, K1:2, K2:20												
	B0:0.0350, B1:0.0478, HB:0												
融雪定数 (SMELT)	C0:0.0046, C1:0.0062, HC:10, D1:0.0005												
		4											
		な し											
時間遅れ	A0:0.1704, A1:0.0491, A2:0.3377, HA1:5, HA2:30												
	S1:50, S2:250, K1:2, K2:20												
	B0:0.0350, B1:0.0478, HB:0												
時間遅れ	C0:0.0046, C1:0.0062, HC:10, D1:0.0005												
		4											
		な し											
時間遅れ	A0:0.1704, A1:0.0491, A2:0.3377, HA1:5, HA2:30												
	S1:50, S2:250, K1:2, K2:20												
	B0:0.0350, B1:0.0478, HB:0												
時間遅れ	C0:0.0046, C1:0.0062, HC:10, D1:0.0005												
		4											
		な し											

4) Dischma

地帯面積比		8:18:25:31:15:3												
地帯別降水量 を定める定数	CP (M)	1												
	C (M)	1												
	PD (I)	-0.26	-0.26	-0.18	-0.02	0.22	0.54							
気温補正項 T0		1月	2月	3月	4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月	11月	12月	
および地帯気温	T0 (M)	4.678	4.966	5.550	6.273	6.942	7.377	7.462	7.173	6.590	5.866	5.198	4.763	
低下定数TD	TD (M)	1.628	1.730	1.870	2.010	2.112	2.150	2.112	2.010	1.870	1.730	1.628	1.590	
融雪定数 (SMELT)		2.5	2.5	2.5	3.0	4.0	4.2	4.2	4.2	4.0	3.0	2.5	2.5	
積雪タソク		SNOW0 = 0.04, SNOW1 = 0.15, SNOW2 = 0.85												
タソクモデル定数		A0:0.1585, A1:0.0756, A2:0.1152, HA1:15, HA2:40												
		S1:50, S2:250, K1:2, K2:20												
		B0:0.0287, B1:0.0270, HB:20												
		C0:0.0089, C1:0.0145, HC:0, D1:0.001												
時間遅れ		0.1176 (day) : 28h												

1) 日降水量, 新雪水当量の両者のうち大きい方を改訂日降水量とする.

2) $T = 0.6 * T_{MAX} + 0.4 * T_{MIN}$

5) Illecillewaet

地帯面積比		5:13:21:26:26:9											
CP (M)		1											
地帯別降水量 を定める定数	1月	2月	3月	4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月	11月	12月	
	2.1	2.3	1.9	1.5	1.4	1.4	1.4	1.0	0.8	0.8	1.65	1.8	
	PD (I)	0.17	0.17	0.25	0.41	0.65	0.97						
気温補正 項 T0および地帯	1月	2月	3月	4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月	11月	12月	
	-1.155	-1.28	-1.405	-1.53	-2.03	-1.78	-1.53	-1.53	-1.53	-1.53	-1.53	-1.53	
気温低下 定数 TD	2.31	2.31	2.31	2.31	2.31	2.31	2.31	2.31	2.31	2.31	2.31	2.31	
	4.14	3.94	3.74	3.54	2.74	3.14	3.54	3.54	3.54	3.54	3.54	3.54	
融雪定数 (SMELT)	2.54	2.54	2.54	2.54	2.54	2.54	2.54	2.54	2.54	2.54	2.54	2.54	
	2.5	2.5	2.5	3.0	4.0	4.2	4.2	4.2	4.0	3.0	2.5	2.5	
積雪タシ		なし											
タシクモデル定数	A0:0.05, A1:0.1, A2:0.1, HA1:10, HA2:30												
	S1:50, S2:250, K1:2, K2:20												
	B0:0.008, B2:0.016, HB:45												
	C0:0.002, C1:0.004, HC:50, D1:0.001												
時間遅れ	0.2822 (day): 6.8h												

6) Kultsjön

地帯面積比		3 0 : 2 4 : 2 2 : 1 5 : 5 : 4											
地帯別降水量 を定める定数	CP (M)	1											
		1 月	2 月	3 月	4 月	5 月	6 月	7 月	8 月	9 月	10 月	11 月	12 月
	C (M)	1.4	1.4	1.4	1.4	0.2	0.2	0.2	0.2	0.5	0.8	1.4	1.4
	PD (I)	0.65	0.65	0.80	1.10	1.55	2.15						
気温補正項T0 および地帯気温 低下定数TD		1 月	2 月	3 月	4 月	5 月	6 月	7 月	8 月	9 月	10 月	11 月	12 月
	T0 (M)	0.421	0.437	0.460	0.483	0.499	0.505	0.499	0.483	0.460	0.437	0.421	0.415
	TD (M)	0.843	0.770	0.670	0.570	0.497	0.470	0.497	0.570	0.670	0.770	0.843	0.870
融雪定数 (SMELT)		2.5	2.5	2.5	3.0	4.0	4.2	4.2	4.2	4.0	3.0	2.5	2.5
積雪タシ	な し												
タシクモデル定数	A0:0.2693, A1:0.0478, A2:0.3232, HA1:0, HA2:15												
	S1:50, S2:250, K1:2, K2:20												
	B0:0.0181, B1:0.0907, HB:30												
	C0:0.0026, C1:0.0256, HC:50, D1:0.001												
時間遅れ		0.2783 (day) : 6.7 h											

1) $T = 0.3 * T_{MAX} + 0.7 * T_{MIN}$

2) K, R, M各地点の入力から算出された出力の単純平均を推定流量とする。

8.3 得られた評価値

上述のようにして得られたモデルを用いて10年分の流量を算出し、モデル評価のための後半の4年間に於いて、実測流量と計算値との比較によって得られた評価値が表19である。なお Durance, W3, Dunajec の3流域に対しては、参考のため NWSRFS の計算流量に対する評価値も示してある。Norrköping の会合において、いままで隠されていた後半4年間の実測流量や、各モデル所有者が提出した10年分の算出流量が、すべてのモデル所有者に与えられた。したがって、われわれも後半4年間に於ける評価値を計算できるのである。

表19に見られるように、Dunajec を除き、改定されたモデルは以前よりよい評価値を示す。Dunajec に対しては、モデルはかえって改悪されたのである。

Dunajec については、試算をくり返しているときから、評価値に現れる反応について疑問があった。そもそも評価値に現れる効果がきわめて小さかった。C地点の気温を使わないことにきめたとき、CRの変化は無きに等しかった。TDやT0の季節変化を定めたときのCRの減少は、それぞれ1%にならなかった。それは、CRを確率変数と考えたときの誤差変動を考慮すれば（それが未知であることが問題であるが）、有意な差とは考えにくかった。そうと知りながら、あえてTD、T0に季節変化を与えたのであるが、結果としては前のモデルより悪いことになった。

表19 新旧モデルによる、後半4年の評価期間における算出流量に対する評価値CR

Table 19 Values of criteria of the calculated discharges in the verification period derived by the revised and previous models

		MSEQ	MSELQ	MSEDC	MSELDC	CRHY	CRDC	CR
Durance	旧モデル	0.2491	0.2050	0.2087	0.1220	0.2271	0.1653	0.3924
	新モデル	0.2002	0.1939	0.1583	0.1225	0.1970	0.1404	0.3375
	NWSRFS	0.1905	0.1933	0.1639	0.1438	0.1919	0.1539	0.3458
W3	旧モデル	0.3456	0.2459	0.2286	0.1545	0.2957	0.1915	0.4873
	新モデル	0.3476	0.2403	0.2226	0.1459	0.2940	0.1843	0.4783
	NWSRFS	0.2844	0.2104	0.1574	0.1614	0.2474	0.1594	0.4068
Dunajec	旧モデル	0.3570	0.2836	0.2972	0.1668	0.3203	0.2320	0.5523
	新モデル	0.4078	0.3034	0.2556	0.1868	0.3556	0.2212	0.5769
	NWSRFS	0.3233	0.2841	0.2727	0.1550	0.3037	0.2139	0.5176
Dischma	旧モデル	0.2314	0.2314	0.1537	0.1784	0.2314	0.1660	0.3975
	新モデル	0.2173	0.2111	0.1478	0.1717	0.2142	0.1597	0.3740
Illecillewaet	旧モデル	0.2248	0.2072	0.2602	0.1755	0.2160	0.2179	0.4339
	新モデル	0.2155	0.2093	0.2436	0.1830	0.2124	0.2133	0.4257
Kultsjön	旧モデル	0.1725	0.1071	0.1447	0.0601	0.1398	0.1024	0.2422
	新モデル	0.1765	0.1069	0.1342	0.0605	0.1417	0.0974	0.2391

「結果を少しよくするために、モデルを複雑化することはしてはならない」というのが、元来われわれが持っていた一つの原則であった。自動化プログラムを使うようになってからは、流出、浸透の係数に何個もの数字が並ぶようになったが、試行錯誤でモデルを定めていたときは、流出、浸透の係数や、流出孔の位置はなるべく切りのよい簡単な数値を用いることにしていた。それが誤差の影響から逃れる一つの方法であった。その原則を忘れたことが、Dunajec で失敗した原因である。Dunajec の流量資料にはかなり大きい誤差が含まれているらしい。われわれのモデルは雪に関する資料を利用せず、算出流量と実測値との比較だけによって、モデルのパラメータを定める。したがって、実測流量に大きな誤差があるときは、得られたモデルが信頼性に欠けるのは致し方ない。

Dunajec を除けば、改定されたモデルは前よりよい評価値を示した。表19に示すように、評価値の減少は、Durance で14%と大きい。これの大半は自動化操作のくり返し回数を増して、タンク・モデルをよくしたことによるもので、TD の季節変化による評価値の減少は数パーセント程度のものであろう。Dischma では評価値の減少は約6%で、これは、TD、T0 の季節変化によるものである。Durance、Dischma とともに、流域内の高度差が大きいから、TD の季節変化の効果が大きく現れたのであろう。W3、Illecillewaet では、評価値の減少は約2%であるが、W3 については積雪タンクの改良による効果が主要部分であり、Illecillewaet ではNo.1、No.2 地点の気温に対する偏りの訂正による効果である。Kultsjön においては、評価値の減少はわずかに1.3%で、いくらか有意の差であろうが、ほとんど評価値CRの誤差と同程度のものであろう。

以上を概観すれば、大変な手間をかけたにもかかわらず、TD、T0 に季節変化を導入した効果はあまり大きいとは言えない。流域内の高度差が大きいときに、TD の季節変化を考えることが、いくらか効果を与える程度である。T0 の季節変化は、ある地点の気温の偏りに季節変化があるということで、この効果は確かに認められたが、あまり大きいものではない。

TD、T0 の季節変化の導入により、NWSRFS のモデルよりよい結果が得られるのではないかという期待は、残念ながらうまく行かなかった。Durance については、NWSRFS よりわずかによい評価値が得られたが（ハイドログラフについての評価ではNWSRFSの方がまさり、流況曲線についての評価ではわれわれの方がまさり、CRでわずかにわれわれの方がまさったが、WMOの評価は主としてハイドログラフで行われ、対数値による評価をしないのだから、多くの評価でNWSRFSの方がよい評価になる）、W3、DunajecではNWSRFSの方が明らかにすぐれている。これは積雪量を入力として用いていることにより、生じた差であろう。Norrköping の会合の席で、Anderson 博士は菅原に対して「あなたは雪に関する資料を全然使わないのか」と、あきれたような感じで話しかけて来たことを考えると、彼のモデルでは雪に関する資料が、きわめて有力な入力として用いられているものと思われる。

雪どけ流出の計算に、積雪に関する資料を用いるのが有利であるのは当然であるが、今回の相互比較で、改定モデルまで含めれば、Durance, Dischma, Illecillewaet, Kultsjön の4流域できわめてよい結果を示し（多くの評価値があるから、最良とは言いきれないが、一般的に見て、ほぼ最良であったとみてよかろう）、W3でNWSRFSにつぐよい結果を示したことから考えて、われわれは当分積雪量を入力として用いない方式を続けるつもりでいる。わが国のように、流域の大部分が急斜面で、かつ大部分が森林でおおわれている場合は、流域全般の積雪調査はきわめて困難であり、また航空写真、人工衛星写真による調査も困難であると思われるからである。そして、積雪情報がなくても、融雪による流量の信頼性はきわめて高いのである。

参 考 文 献

- 1) 菅原・渡辺・中根・尾崎・勝山(1983):「融雪流出の概念モデルの相互比較」の課題となった6流域の流出解析. 国立防災科学技術センター研究報告, No. 30, pp. 85 - 165.