

タンク・モデルによるサンゲレ試験流域 S1～S7の流出解析

菅原正巳*・渡辺一郎**・尾崎睿子***・勝川ヨシ子***

国立防災科学技術センター

Runoff Analysis of Sanguère Experimental Basins S1 – S7 by the Tank Model

By

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

National Research Center for Disaster Prevention, Japan

Abstract

Sanguère experimental basins S1 – S7 in north Cameroun locate on a small tributary of the Bénoué, the left tributary of the Niger. In spite of the containing relations among them as shown in Fig. 1, there is a remarkable heterogeneity in Sanguère basins as can be seen in the observed hydrographs in Fig. 2. Another hydrological characteristic is the lacking of some runoff components in some basins: in the basin S4 there appears only peak discharge, the surface runoff, and in the basin S6 the base discharge is lacking. It is evident that the basin S7 is composed of sub-basins of different types such as S2, S4, S5, S6, etc. In analysing small basins, however, we have to conclude that such small basins as S1, S2 and S3 are also composed of some sub-basins having different types. Consider the basin composed of two parts, one having the second and third tanks with the side outlets set in low positions while the other in high positions. At the beginning of the wet season the former sub-basin only becomes active and all basins become active in the second half of wet season. In the dry year, the former sub-basin plays the main part, while in the wet year all basins become active. In such a way, this model can simulate rather complicated hydrological behaviors. The obtained models shown in Table 2 are constructed under such consideration.

After the numerical calculation is finished, we come to the idea that the hydrological characteristics of Sanguère basins must come from the existence of perched ground water. We simulate the Sanguère basins by setting side outlets at high positions. However, it must be far better to construct a model by making a dead storage at the bottom of each tank as shown in Fig. 7. The modification of computer program for such a type of tank model is very easy.

* 前所長, ** 第4研究部, *** 第4研究部計測研究室

1. ま え が き

サンゲレ (Sanguère) 試験流域は、西アフリカ、カメルンの北部、ガルア (Garoua) の近郊にある。ナイジェリアとの国境に近く、北方は山をへだててチャド湖に近い。ニジェール川 (Niger) の左支川ベヌエ川 (Benue, Bénoué) の上流の小支川の流域で、かなり乾燥したサバンナであるらしい (図1)。この試験流域に関しては、Casenave, A., 1978に記述されている。われわれが計算に用いた資料も、すべてこの報告によっている。かかる乾燥地域の河川の流出解析をいかなる目的によって行なうかと言えば、第1は水文学的興味である。われわれは日本という、きわめて湿潤な地域に生まれ、育っている。したがって、乾燥地域のことを知らないし、なかなか理解できない。乾燥地域ではどのようなことが起こるのかそれを知りたい。第2はタンク・モデルの適用例、適用範囲を拡げたい希望である。タンク・モデルや、それにつけ加えられた土壌水分構造が、種々の異った水文学的条件のもとでどのように働くかを知りたい。異った条件に合わせるために、タンク・モデルをどのように手直しすればよいか、自動化プログラムをどのように手直しすればよいか、いろいろの問題があろう。そして第3には社会的要請を感じる。わが国は発展途上国を積極的に援助しなければならない国際的責任があると同時に、国内的にみても日本人の技術者、知識労働者は、海外に出て働かざるを得ない状況になりつつあると思われる。そして海外に出れば、いたる所、乾燥地域である。その意味で乾燥地域河川の流出解析には、現在の社会的意義があろうと考えられる。

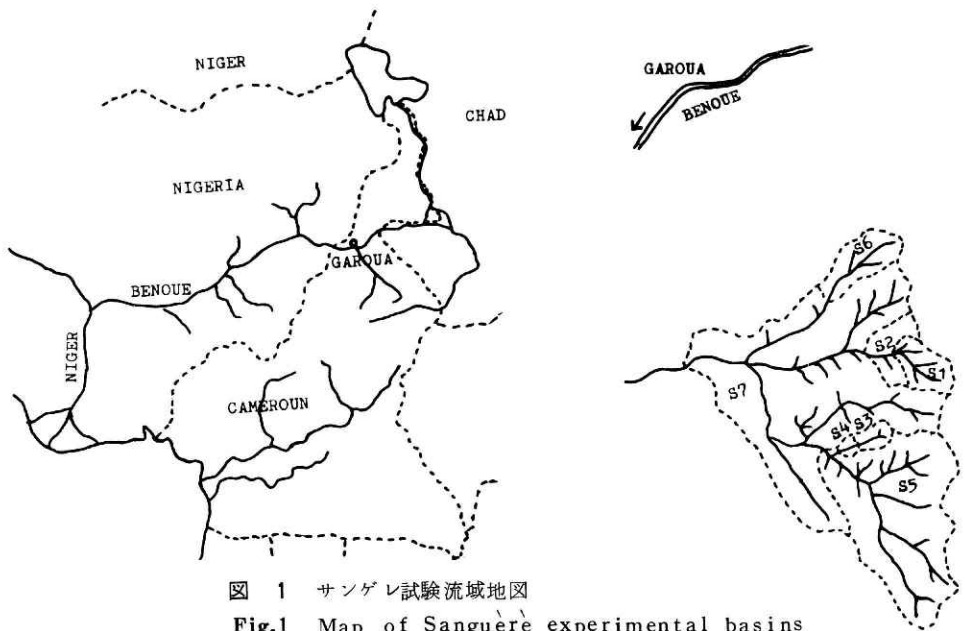


図 1 サンゲレ試験流域地図
Fig.1 Map of Sanguère experimental basins

タンク・モデルによるサンゲレ試験流域S1～S7の流出解析—菅原・渡辺・尾崎・勝山

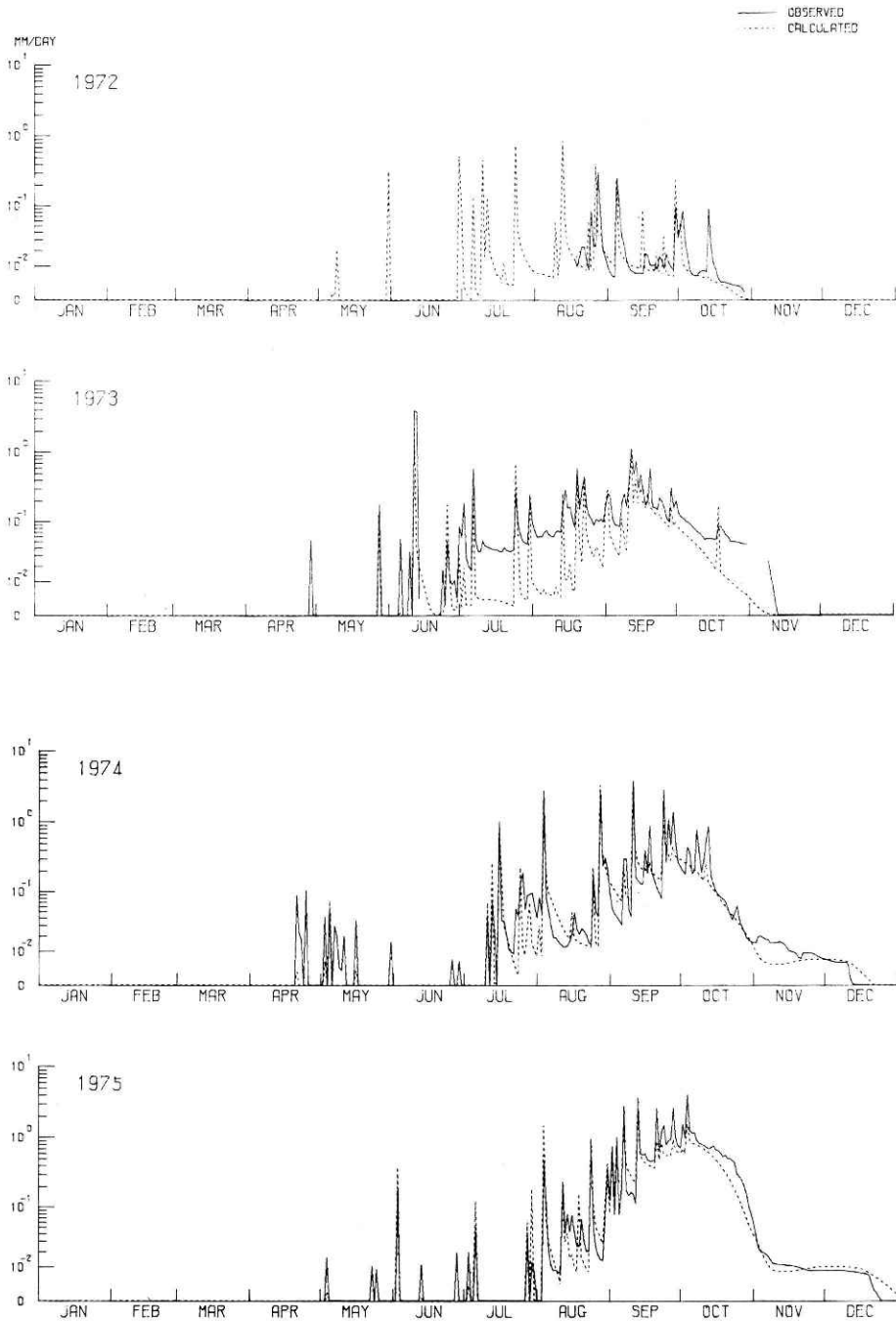


図 2-1 サンゲレ試験流域S1日流量

Fig.2-1 Daily discharge of Sanguère basin S1

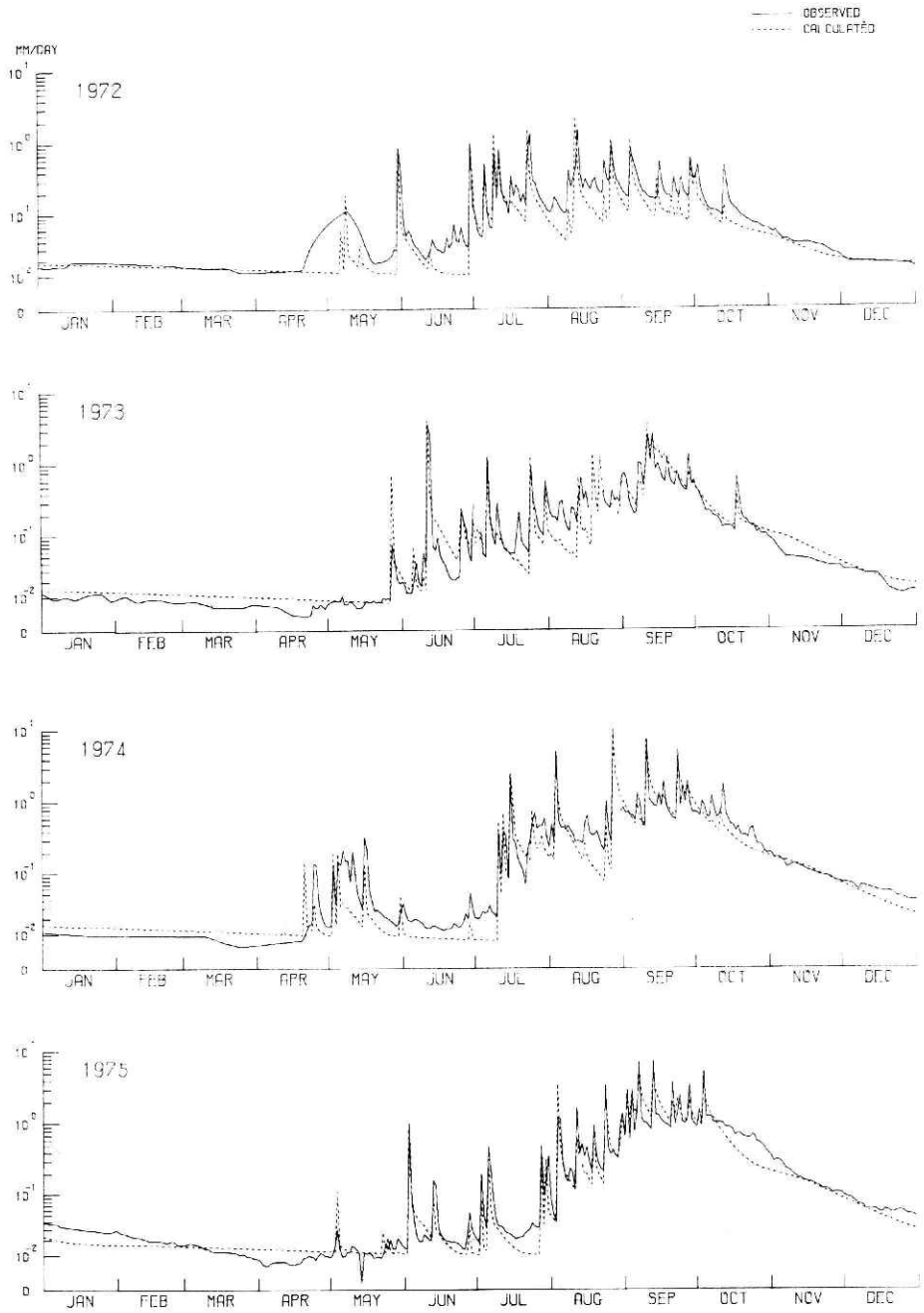


図 2-2 サンゲレ試験流域 S2 日流量
 Fig.2-2 Daily discharge of Sanguerè basin S2

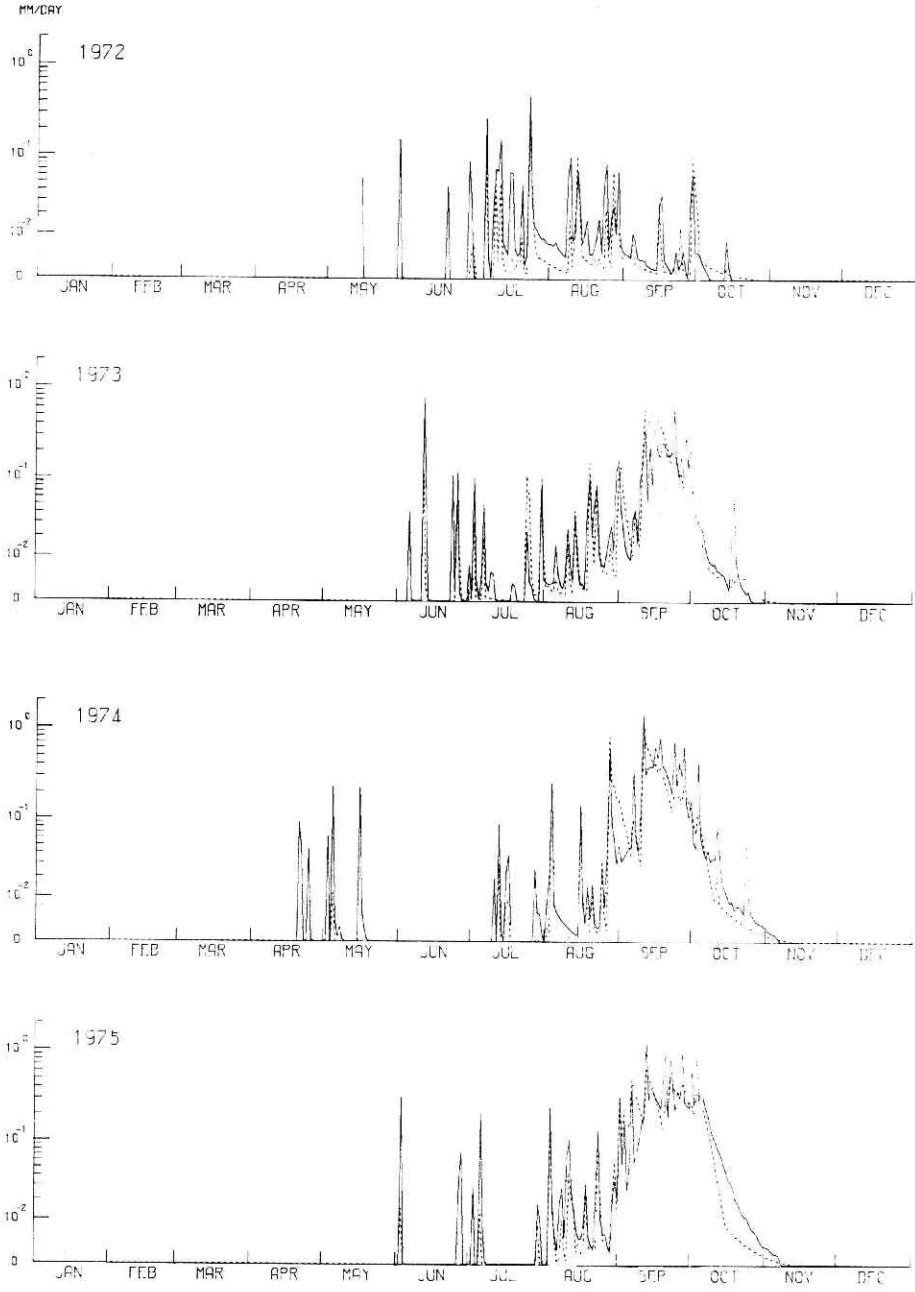


図 2-3 サンゲレ試験流域S3 日流量
Fig. 2-3 Daily discharge of Sanguère basin S3

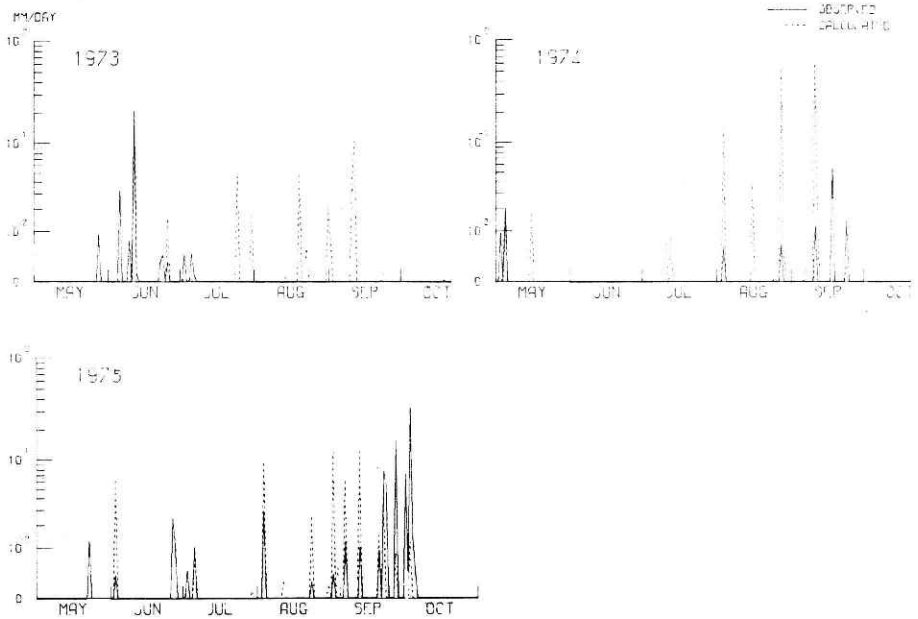


図 2-4 サンゲレ試験流域S4 日流量
 Fig.2-4 Daily discharge of Sanguère basin S 4

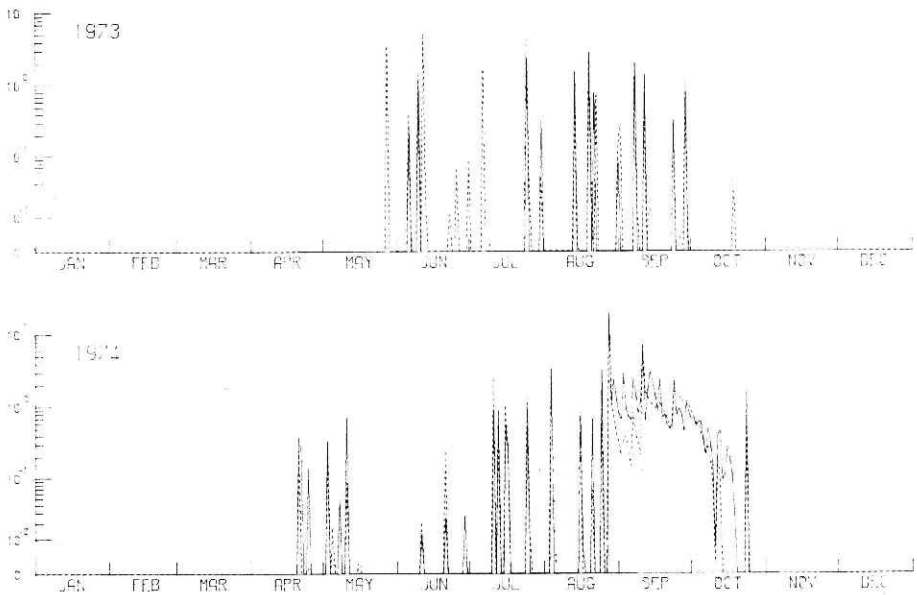


図 2-6 サンゲレ試験流域S6 日流量
 Fig.2-6 Daily discharge of Sanguère basin S 6

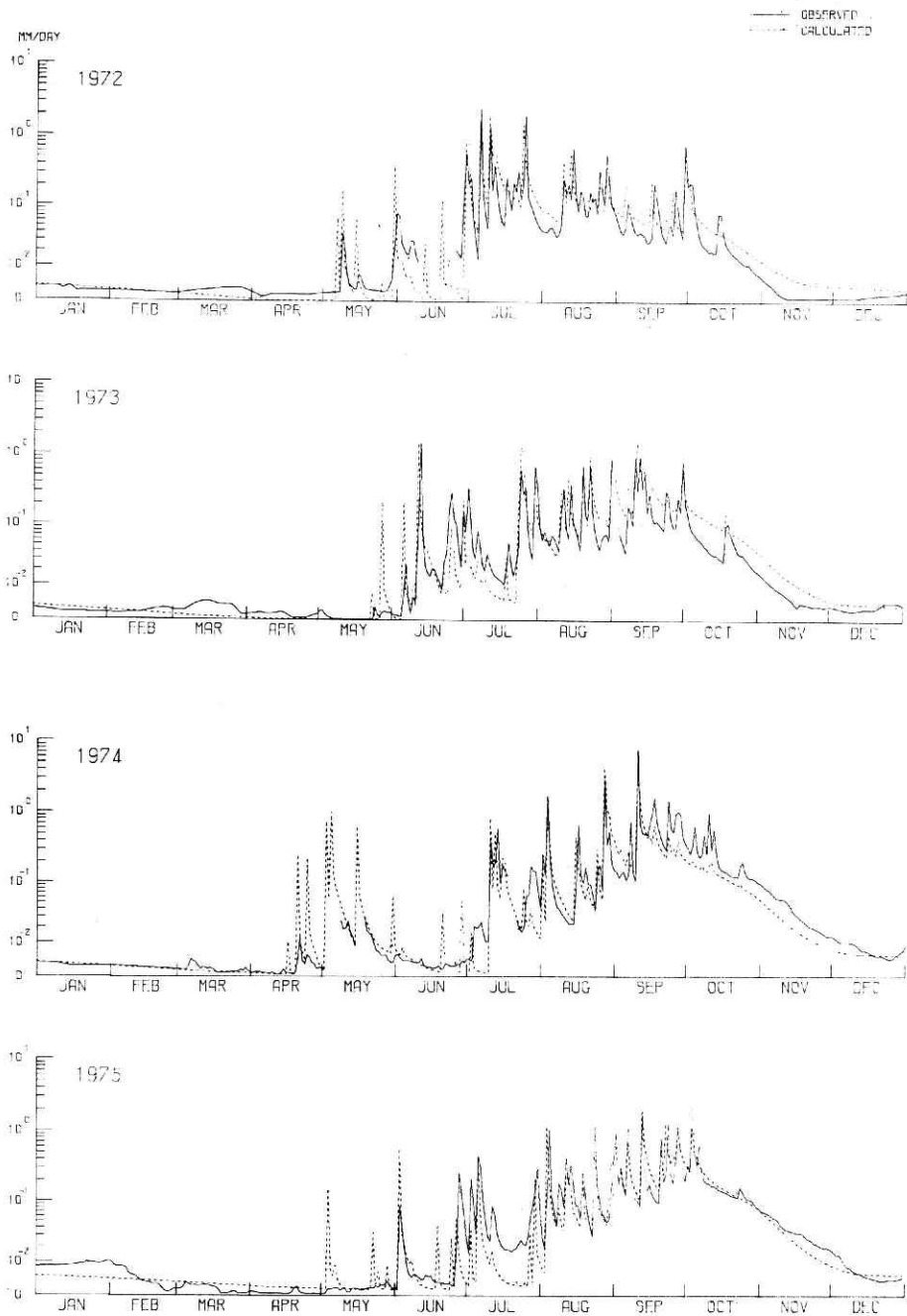


図 2-5 サンゲレ試験流域S5日流量

Fig.2-5 Daily discharge of Sanguerè basin S5

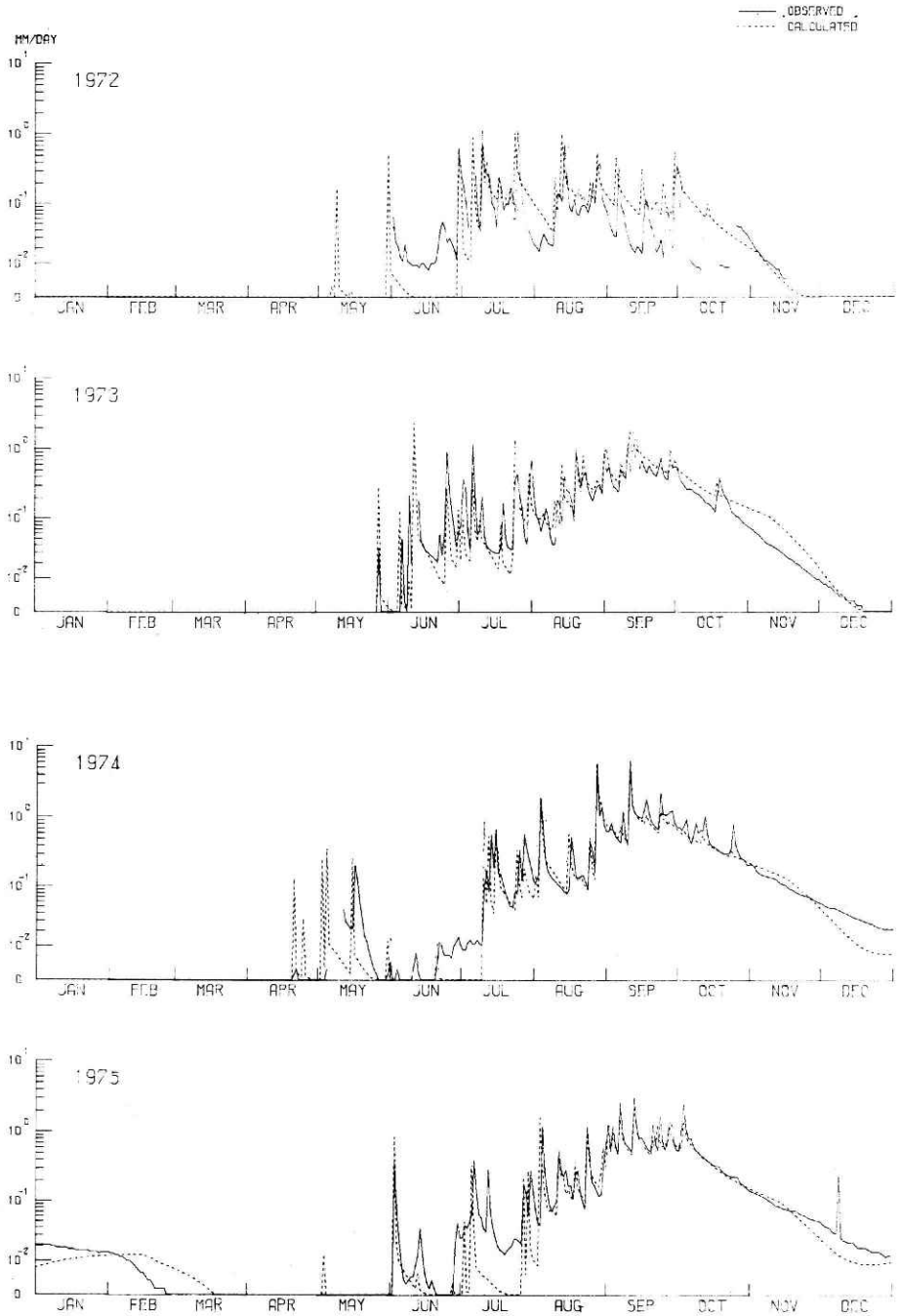


図 2-7 サンゲレ試験流域S7 日流量

Fig.2-7 Daily discharge of Sangrè basin S7

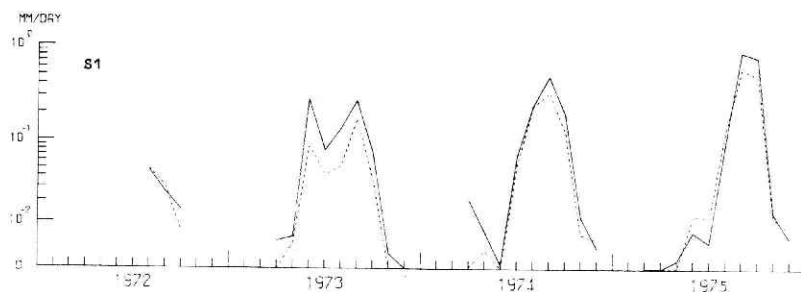


図 3-1 サンゲレ試験流域S1 月平均流量

Fig. 3-1 Monthly mean discharge of Sanguère basin S 1

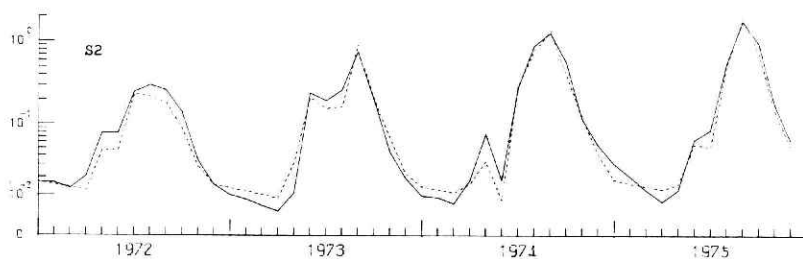


図 3-2 サンゲレ試験流域S2 月平均流量

Fig. 3-2 Monthly mean discharge of Sanguère basin S 2

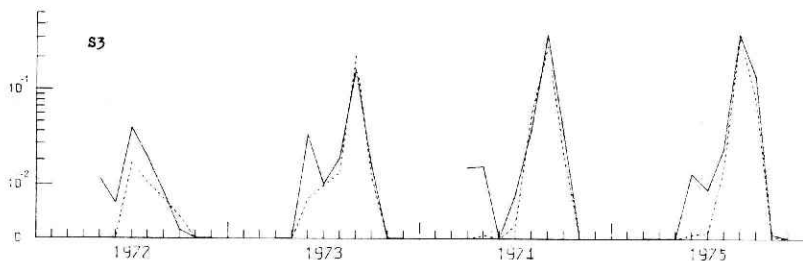


図 3-3 サンゲレ試験流域S3 月平均流量

Fig. 3-3 Monthly mean discharge of Sanguère basin S 3

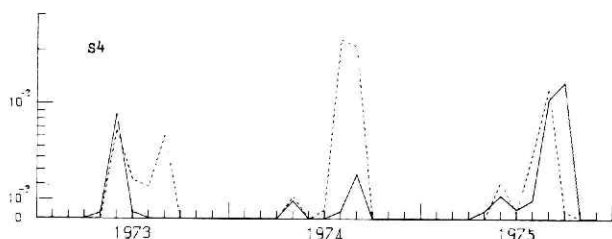


図 3-4 サンゲレ試験流域S4 月平均流量

Fig. 3-4 Monthly mean discharge of Sanguère basin S 4

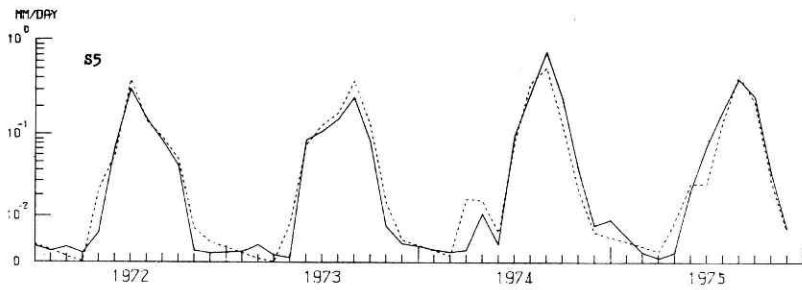


図 3-5 サンゲレ試験流域S5 月平均流量

Fig.3-5 Monthly mean discharge of Sanguère basin S 5

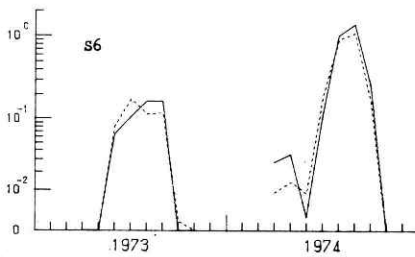


図 3-6 サンゲレ試験流域S6 月平均流量

3-6 Monthly mean discharge of Sanguère basin S 6

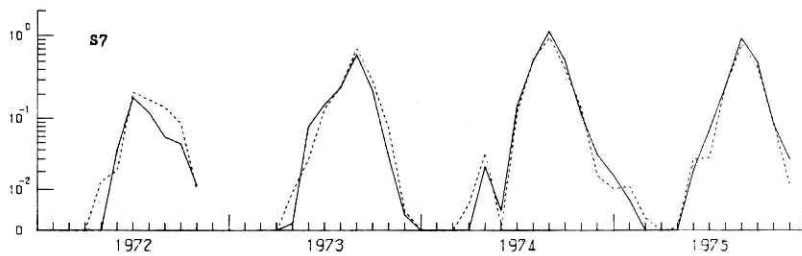


図 3-7 サンゲレ試験流域S7 月平均流量

Fig.3-7 Monthly mean discharge of Sanguère basin S 7

2. 得られたモデルおよび結果

まず得られた結果を図 2 および図 3 に示す。この流域では、乾季にはしばしば流量が 0 になる。したがって、その流量をそのまま対数目盛でプロットすると、低水部分が大きく拡大されすぎるか、または低水部分がある所から切り捨てなければならない。そこで便宜上、流量に 0.005 (mm/日) を加えた上で、対数目盛でプロットすることにした。したがって、図 2, 図 3 の縦軸上の目盛は、 $\log(Q + 0.005)$ である。

各流域 S 1 ~ S 7 の流域面積は表 1 に示す通りであって、100 km² に満たない小地域の中に散在する小流域が、図 2 に見られるように種々の異った型のハイドログラフを示している。つまり、この小面積地域に、異った水文学的性質を示す小部分が存在するというのである。

これを反映して、小流域 S 1, S 2, S 3 自体も、水文学的性質を異にする小部分流域から成り立っているらしい。したがって、S 1, S 2, S 3 をそれぞれ 1 個のタンク・モデルでシミュレートする努力はうまく行かず、それらの小流域を 2 個または 3 個の部分に分割し、それぞれにタンク・モデルを当てはめ、その和として流量を表さなければならなかった。図 4 は流域 S 2 に対して得られたモデルを示している。流域は 3:7 の比で部分流域に分割され、それぞれ異ったタンク・モデルで表される。両者が相異なるのは、1 次土壌水分の容量および 2 段目、3 段目のタンクの流出孔の高さであって、その他のパラメータは両者に共通である。1 次土壌水分 (菅原他, 1981) 及び流出孔の高さが異っているということは、部

表 1 流域面積
Table 1 Catchment area

S 1	3.4 km ²
S 2	7.1
S 3	1.1 2
S 4	1.6 6
S 5	2 7.1
S 6	3.2
S 7	8 6.5

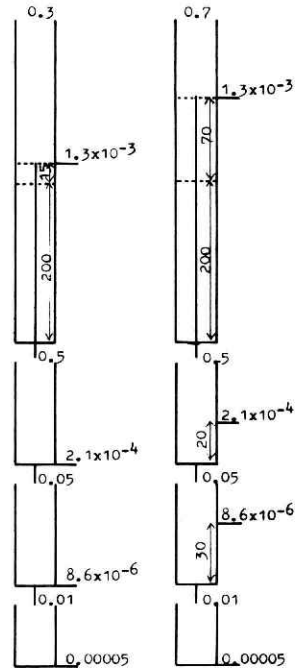


図 4 サンゲレ試験流域 S 2 のタンク・モデル
Fig. 4 Obtained model of the basin S 2

分流域の初期欠損が異っているということである。雨季のはじめには、初期欠損の小さい部分流域だけから流出が現れる。雨季の後半になれば流域の全部から流出が現れる。渇水年には初期欠損の小さい部分流域が主として働く。豊水年には全流域から流出が現れる。このような仕掛けで渇水年、豊水年を含む全年を通じて、ハイドログラフのよい近似を得たいというのが基本的な考え方である。

この方式には、便宜的というか、間に合わせ적であるというか、そんな感じがある。モデルを作った当人にも、そう感じられる。サンゲレ流域の資料は4年しかない。4年の資料に合わせるように流域を4分し、それぞれ合うように調節すれば、よく合うのが当然であるという反論が聞こえて来るような気がする。しかし、図2の7つの流域の実測流量を眺めると、流域分割の方式や、流出孔の高さを変える方式が、必ずしも便宜のためばかりとは考えられない。まず第1は、先にも述べた各部分流域の異質性である。全流域S7が、かかる異質の部分流域を含むとすれば、各小流域が同様に異質な小部分流域に分割されるとする仮定は、とくに無理だとは思われない。

次に特徴的なのは、いくつかの流域に見られる、ある流出成分の欠落である。もっとも顕著なのが流域S4で、かなりの雨が降ると、1日だけ流量が現れて直ちに消える。タンク・モデルで言えば、1段目からの流出成分しか現れず、2段目以下が欠落しているのである。これをタンク・モデルで表すには、2段目以下のタンクの流出孔の位置を高くして、各タンク内の貯留高が流出孔の高さに達しないようにして置けばよい。ついでのことながら、このような流域に日本のように大量の雨が降れば、各タンクの貯留高は流出孔の位置に達し、持続的な流出成分が現れるだろうとわれわれは期待している。

流域S6には2年しか資料がないが、1973年にはS4と同じくピーク流量しか現れない。1974年には持続性の流出成分が現れるが、乾季になるとそれはたちまち消滅する。それはタンク・モデルで言えば、3段目、4段目の流出成分が欠落しているからであろう。

流域S3では基底流量らしいものは現れないし、流域S1では豊水年の雨季の終りに基底流量らしいものがしばらく現れるだけである。流域S5、S7では、乾季には基底流量が消える。4成分とも満足に現れるのは流域S2だけである。これらの事実を見ると、いくつかの成分が消えたり、または全然現れないこと、それを表すために流出孔を高い位置につけることは、きわめてもっともらしいことと思われる。すなわち、流域をいくつかに分割し、ある部分流域では流出孔の位置を高くしてそこからの流出を起りにくくする方式は、単なる便宜や間に合わせではないと思われる。

表2は以上の考えのもとに作られた各流域のモデルで、図2の結果は、このモデルによって算出されたものである。これらのモデルにおいて、1、2、3段目のタンクでは、流出高は流出孔にかかる水頭の平方に比例するものとする。4段目のタンクでは流出高は水頭に比例するとし、浸透高はすべて貯留高の水頭に比例するとする。流域S6の第2タンクだけは

表 2 サンダレ試験流域に対して得られたタンク・モデル
Table 2 Obtained model parameters of Sanguère basins

流域	S1		S2		S3		S4	S5		S6	S7			
	AR	0.03	0.12	0.85	0.3	0.7	0.5	0.5	1	0.5	0.5	1	0.5	0.5
面積	S1	20	30	40	15	70	50	20	10	30	10	20	20	20
土壌	S2	150	150	150	200	200	150	150	200	200	200	200	150	150
水	K1	1.5	1.5	1.5	1	1	1	1	1.5	1.5	1	1.5	1.5	1.5
分	K2	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10
構造	HA	0	0	0	0	0	0	1.5	0	0	10	0	0	0
第1タンク	A0	0.7	0.7	0.7	0.5	0.5	0.5	0.7	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5
第2タンク	A1	5×10^{-4}	5×10^{-4}	5×10^{-4}	1.3×10^{-3}	1.3×10^{-3}	1×10^{-4}	1×10^{-4}	5.1×10^{-4}	5.1×10^{-4}	2×10^{-3}	6×10^{-4}	6×10^{-4}	6×10^{-4}
第3タンク	HB	20	20	20	0	20	10	80	0	30	160	0	20	20
第4タンク	B0	0.08	0.08	0.08	0.05	0.05	0.04	0.04	0.1	0.1	0.018	0.04	0.04	0.04
	B1	4×10^{-5}	4×10^{-5}	4×10^{-5}	2.1×10^{-4}	2.1×10^{-4}	2.3×10^{-6}	1.9×10^{-4}	1×10^{-4}	1×10^{-4}	0.03*	5.25×10^{-4}	5.25×10^{-4}	5.25×10^{-4}
	HC	30	80	130	0	30	(300)	(300)	0	60	(300)	80	120	120
	C0	0.025	0.025	0.025	0.01	0.01	(0.01)	(0.01)	0.02	0.02	(0.01)	0.008	0.008	0.008
	C1	1.6×10^{-4}	1.6×10^{-4}	1.6×10^{-4}	8.6×10^{-6}	8.6×10^{-6}	(0.001)	(0.001)	7×10^{-6}	7×10^{-6}	(0.001)	1.13×10^{-5}	1.13×10^{-5}	1.13×10^{-5}
	HD	250	250	250	0	0	(500)	(500)	450	450	(500)	220	220	220
	D0	0.002	0.002	0.002	0	0	(0.001)	(0.001)	4×10^{-4}	4×10^{-4}	(0.001)	0.0001	0.0001	0.0001
	D1	3×10^{-4}	3×10^{-4}	3×10^{-4}	5×10^{-5}	5×10^{-5}	(0.0001)	(0.0001)	2×10^{-5}	2×10^{-5}	(0.0001)	0.00005	0.00005	0.00005

- 1) カッコ内の数字は現れない流出成分に対応し、仮りに置かれた数値
- 2) 斜体字は部分流域によって異なるパラメータ
- 3) *印 (S6のB1) は、流出が水頭に比例するとした係数

表 3 サンゲレ試験流域の月および日蒸発量 (mm)

Table 3 Monthly and daily evaporation in Sanguère basins

	1月	2月	3月	4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月	11月	12月	年
1972	305	(370)	396	266	163	110	73	57	62	114	257	281	2455
	9.9	(13.2)	12.8	8.9	5.3	3.7	2.4	1.9	2.1	3.7	8.6	9.1	6.8
1973	337	316	425	308	219	116	80	57	(49)	113	245	309	2574
	10.9	11.3	13.7	10.3	7.1	3.9	2.6	1.9	(1.7)	3.6	8.2	10.0	7.1
1974	283	(306)	409	262	140	121	69	64	(58)	91	202	270	2277
	9.1	(11.4)	13.2	8.7	4.5	4.0	2.2	2.1	(2.0)	2.9	6.7	8.7	6.2
1975	258	324	380	421	188	125	72	61	(52)	103	206	(255)	2445
	8.3	11.6	12.2	14.0	6.1	4.2	2.3	2.0	(1.8)	3.3	6.9	(8.5)	6.8

例外で、流出高は水頭に比例するとしている。

蒸発量は与えられた表3の値を用いた。補正係数を掛けることなく、表3の日蒸発量をそのまま1段目タンクの自由水から引き、ついで1次土壤水分から引く。ただし10月から乾季になると、1次、2次の土壤水分は速かに減少し、12月の末までには消滅してしまう。以後、2段目以下のタンクの自由水から、毎日K1ずつの水分が1次土壤水分に補給され、それが蒸発で消えるから実質的には、2段目以下の自由水から毎日K1 (mm) ずつが蒸発するのと同じことである。したがって、表3の2～4月における大きな蒸発量は、現実には水収支に効かず、水収支に大きな影響を与えるのはK1の値である。したがって、年間の実蒸発量は表3の年蒸発量より、はるかに小さいものとなる。

表2でかっこに入れてある数字は、現実には現れて来ない流出成分に対するものである。したがってこの数値にあまり意味はない。流出計算の際は、この数値を置いて計算した。たとえ現れないとしても3段目や4段目のタンクの貯留高がどのような値を示すかは、水収支を考える上で意味があると思うからである。いくつかの流域で、いくつかの成分は現れて来ない。それが地下流出として流域外に大量に出るか、出るとしてもその量は僅かで問題とするに足りないかは、水収支の上からも、水資源の問題としても重大な意味がある。表2のモデルでは、流域S2を除き、D0にある程度の値が与えてあり、したがって流域外への地下流出、またはさらに深層の地下水への浸透があるように見えるが、それは実は少量で、D0=0として全部貯めこんでも大した量にならない。貯まった水は1次土壤水分に補給され、蒸発して消えるだけである。そのようなことを知るために、現れない流出成分に対するタンクにも、一応、流出、浸透の係数を与えて置いたのである。この地域にある年かたりの雨が降ったとする。その時には、いままでかくれていた成分が現れるかもしれない。そういうことがあれば現在かっこの中に入っている係数は、現実の資料によって改めて決定されるであろう。ただし、現在かっこの中に置かれている数値は、大雨によって決定可能になった場合の数値を予測しているものではない。

表2を見て判るように、部分流域によって異なるのは、1次土壤水分容量と、流出孔の高さ

で他のパラメータは共通である。唯一の例外は流域S3で、第2タンクの流出係数B1が異なった値になっている。ただしこの場合も、表2の値の代わりに、部分流域の面積を1.2%と98.8%とし、 $B1 = 0.95 \times 10^{-4}$ を共通の値にすることにより、表2のモデルとほぼ同じ結果を導くことができるのである。それは表2に示されたモデルの持つ、ある種の不確定性によるのである。流域S3のモデルでは、1段目タンクは两部分流域とも同じである。したがって、2段目タンクに行く浸透量は、単位面積当たり、つまりmm/日で考えれば同じである。それを受けた2段目タンクからの流出を合成するとき、部分流域の面積が掛けられる。したがって、流出の係数と部分流域の面積との積が、流量に効くのである。つまり $AR \times B1$ の値を変えない限り、AR、B1を変化させる自由度がある。表2のS3のモデルでは、部分流域の面積を半々にしてB1の値を変えてあるが、B1の値を共通にして面積で調節することもできる。もちろん複数のタンクで、たとえば2段目、3段目のタンクで、B1、C1が部分流域ごとに異なるとき、面積で調節してB1、C1を両方とも共通の値にすることはできないが、ともかく表2のパラメータにはある種の自由度があつて、流出解析の立場だけからでは、パラメータの値を確定することができないのである。たとえば、流域を水文地質学的に眺め、部分流域の面積比率が決定されれば、それにより流出係数は定まって来る。

流出モデルには、さらに別種の不確定性がある。表2のモデルでは、流域を部分に分割し、各部分にタンク・モデルをあてはめている。表2のモデルにつき全般的に言えることは、4段目タンクを除き、浸透に比べて流出がはるかに小さいことである。1段目～3段目のタンクでは、流出は水頭の2乗に比例させているから、貯留高が大きくなれば流出は大きくなる訳であるが、現実には雨が少なくて貯留高が大きくならないから、浸透に比べ流出は小さい。表2のモデルでは、浸透の係数は各部分流域に共通になっているから、流出が浸透に比べて十分小さいということは、現実にも雨を入力したとき、各段のタンクの貯留高は部分流域が違ってそれぞれ似た値を示すことになる。そうであれば図5の1)に示す並列のタンクを、2)の2つの流出孔を持つ1個のタンクに置き変えても、結果にはあまり変化がないことになる。

この方針のもとに、サンゲレ流域のモデルを作ることできる。図6に示したものは得られたモデルの例で、流域S5とS7に対し、図6のモデルは図2とほぼ同様の結果を与える。

図6の型のモデルを考えると、また別種の可能性が出て来る。たとえば図6の流域S5のモデルの2段目タンクの流出を

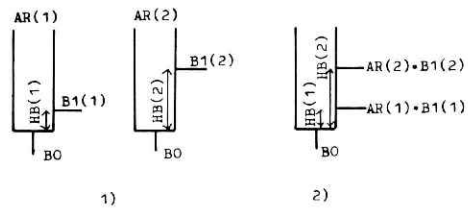


図5 ほぼ等値な、流出孔1個の並列タンクと、流出孔2個の単一タンク

Fig.5 Two nearly equivalent types, parallel two tanks each with one outlet and single tank with two outlets

$$y = (2.3 \cdot 10^{-5}) x^{2.24}$$

で近似することもできる。この近似はあまりよくないけれども、図6のモデルが与える結果の近似度に比較すれば、上の関数の近似は十分の精度を持っている。

かくして、流域を分割してタンク・モデルを並列させるか、各タンクに複数の孔をつけることにより流域分割をやめるか、複数の流出孔の代わりに $y = c x^\alpha$ の形の流出を用いるかの不確実性が見れる。数学的には $y = c x^\alpha$ の方がよいと考える人もあろうし、その考え方によれば、4段のタンクより、1段または2段にして、関数型で工夫する方が数学的であるという意見も現れるであろう。数学的には線型演算の方が都合がよいから単位図法を基本にして、それに修飾を加えるのがよいという意見も現れるであろう。しかし、われわれは流域を分割し、各タンクに1個の流出孔をつけることを原則として、表2のモデルを作ったのである。種々の型のハイドログラフを示す小流域が現実に存在すること、ある流出成分の欠落する流域が現存することを考えると部分流域に分割し、流出孔の高さを変えて調節する方式の方が、水文学的に意味があると考えからである。

要約すると、表2のモデルは次の原則で作られている。

- 1) 流域を分割し、各部分ごとにタンク・モデルを当てはめる。
- 2) 各タンクは流出孔を1個持つ。
- 3) 各段のタンクの浸透係数は、部分流域に共通にする。そして流出係数もなるべく共通にする。

流域S4は特異で、ピーク流量しか現れない。しかも、何かの人為的影響を受けているらしく、7月半から9月半にかけてかなりの大雨が降っても、全然流量が出て来ない。これを一つの水文的モデルで表すことはできないと考え、7月11日から9月15日までの間は、表2のモデルで算出した流量QEに、次の規則で変形を与える。

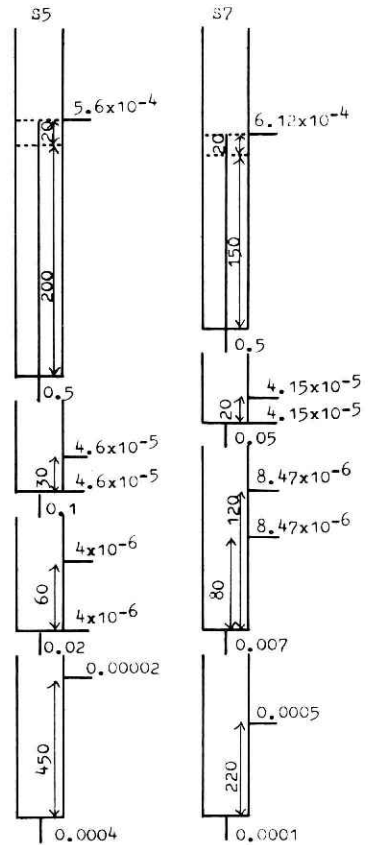


図6 流域S5, S7に当てはめられた、流出孔2個のタンクから成るタンク・モデル

Fig.6 Tank model composed of tanks with two side outlets for basins S5 and S7

$$\begin{aligned}
 QE &= 0.016 * (QE - 0.1) & QE > 0.1 \text{ のとき} \\
 QE &= 0 & QE \leq 0.1 \text{ のとき}
 \end{aligned}$$

流域S4は部分流域としてS3を含んで居り、S3である程度の流量が現れているときにもS4では消えることがあるのだから、S3のようなモデルで一度流量に変換し、それを何かの操作で消してピークを残す方がより合理的であるのかもしれない。しかし、残念ながら現地の事情が不明だから、うまい工夫もできない。流域S4では、実測と推定量との一致はあまりよくないが、何かの人為的影響があるらしく、あまりよい結果が出て来そうにもない。

S6も奇妙な流域で、1973年にはピーク流量しか現れず、1974年には持続的成分が現れるが、それは不安定で雨季が終ると急速に消滅している。表2のモデルでは、その成分を2段目タンクで表している。しかし、表2に見るように、2段目タンクの浸透係数は $B_0 = 0.018$ で、これは他の流域のモデルの2段目のタンクの浸透係数と比べて小さい。どちらかと言えば、3段目タンクの浸透係数とした方が似合うくらいである。そこで、2段目タンクをかくれた成分とし、3段目を現れる成分とする型のモデルを試算してみたが、うまく行かなかった。これは、この型のモデルではうまく行かないということではない。何度も試算すれば、あるいはうまく行くかもしれない。流域S6の2段目タンクだけで、流出が水頭に比例する方式を用いていることも気になるが、何分にも資料が2年しかないから、いろいろ工夫するだけの意味がないと思われる。S3とS4の関係のように、持続的流出成分を消す機構（たとえば何かの人為的な）があるのかもしれない。

図2に見るように、算出流量と実測との一致はあまりよくないが、いくつかの部分では、実測値の方に何かの誤りがあるのではないかとと思われる。

- 1) 流域S1の1973年の実測流量は、7月から10月にかけて低水時に $0.04 \sim 0.1$ (mm/日)程度の値を示している。これは何かの故障で、水位計が下がらなかったというような誤りがあったのではなからうか。10月末に欠測があり、その後、流量は急激に減少し、消滅している。その落ち込み方が不自然であることが、前の低水の大きい値が不自然であることを示しているのではないだろうか。
- 2) 流域S2の1972年4月下旬から5月中旬にかけての流量は不自然である。ただし、これはあまり重要なことではない。
- 3) 流域S7で1972年8月から10月中旬まで、低水時に現れる小さい流量は何かの誤りではあるまいか。10月に2回の欠測期間があり、その後、流量は突然大きくなり、そして次第に減少して行く。この最後の部分で、推定は実測とかなりよく合っている。この実測流量が示した突然の増大は、過去の低水の示した小さい値が誤りであったことを示すものではないか。

3. 最終モデルに到達するまでの経過

表2のモデルがどのようにして得られたかを簡単に述べる。一般論として言えば、小流域の流出解析は難しいことが多い。そこで包含関係にあるいくつかの流域を解析する場合、小流域の流量を参考に眺めながら、大流域の方から着手することが多い。多くの場合、流域内の雨量地点はあまり多くないから、小流域を対象にすると流域内の雨量地点の数が減り、雨量の信頼性が落ちる。したがって、流量面積の大きい方が解析しやすいし、結果もよいという場合が多い。しかし、サンゲレ試験流量の場合は、事情がいろいろと異っている。第1は、雨量観測点が多数あることで、全流域に81地点が、ほぼ均等にばらまかれている。幸いにして、その雨量資料を磁気テープに入れたものをORSTOMの好意で貰って来てあるが、欠測は少く、眺めて見た所、良質の資料であると思われる。したがって、どの小流域をとっても、内部に何個かの雨量地点が含まれている。雨量地点の数から考えると、とくに小流域を避ける理由はない。

7流域S1～S7のハイドログラフを眺めて、まず驚いたのは、いろいろと異った型のハイドログラフが現れること、およびいくつかの流域では、いくつかの流出成分が欠落していることであった。全流量S7が異質の部分から成り立っているとすると、S7の流出解析は難しいであろう。そうであれば、各部分流域の流出解析を先に行い、それを合成してS7を構成するのが筋であろうと考えた。1975年12月、東京で水文学の国際シンポジウムが開かれたとき、閉会式直前の委員会の討議の席で、菅原は、

①流出解析の対象流域はある程度広い方がよい(1000 km² ~ 2,000 km²)、10万 km²の流域を1個のモデルでシミュレートしてかなりよい結果を得たこともある。

②したがって小さな試験流域にそれほど意味はない。小さな試験流域の資料をいくら積んでも、大流域に関する知見なしには、小流域の性質を大流域に拡張する法則は得られないと主張した。

これに対し、フランス系の人達は、小流域から積み上げることを主張して譲らなかった。今回、このサンゲレ試験流域の資料に接して、彼等が小試験流域を主張するわけをやや理解できる気がする。もっとも、後に再論するように、小流域から積み上げる方式には、依然としてあまり賛成できない。

サンゲレ試験流域の流出解析を小流域から着手することにし、各流域のハイドログラフを眺めた上、流域S2の解析から始めることにした。S2では、1年中基底流量が絶えることなく、ハイドログラフも、まともな形をしていると感じられたからである。流域S2のモデルが得られたならば、それからいくつかのタンクを欠落させて行くことにより、他の流域のモデルを作ることは容易であろうと期待した。

期待に反し、流域S2の解析はうまく行かなかった。30回をこえる試算を行なったが、

よい結果が出て来ない。数回の試算で見当が付き、10回も試算すればよい結果が出るのがふつうで、30回試算しても見当がつかないのは、どこかに根本的に欠陥があることを示している。そこでS2の流量に何かの誤りがあるかと疑い、どちらかと言えばヒドログラフがまともな形をしているS5、S7を試算してみたが、やはりよい結果が出て来ない。

ここで、小流域S2自体が、S7と同様に異質な部分流域から構成されているのではないかという考えが浮んだ。流域S2を5%、45%、50%に3分し、それぞれに順次流出孔の位置を高くしたタンク・モデルを置き、合成すると結果はよくなり（試算No.34）、ついでそれを少し修正すると、従来より目立ってよい結果が出て来た。ここで5%という小流域を考えたのは、雨季のはじめや、渇水年に現れる僅かな流出を現すためである。この試算当時は、流出を水頭に比例させていたので、このように小さい部分流域が必要であった。後に流出を水頭の2乗に比例させることになって、この5%の部分流域は不要となった。

流域S2を部分流域に分割しなければならないとすれば、とくにS2に重点を置いて解析する必要はない訳で、流域面積の大きいS5、S7、特異なヒドログラフを示すS4、S6を除き、S1、S2、S3を対象にして、平行して解析をすすめることにした。数回の試算の後、S1、S3ともに、部分流域への分割が必要であることを知った。

流域分割を含む試行のくり返しは、はじめての経験で、試行は難行した。ある程度結果がよくなれば、各タンクの貯留高が部分流域によってあまり変わらないことを利用し、貯留高と実測流量とを見比べ、両者の関係からモデルの修正をすることにより、合理的、効果的に修正を行なうことができるが、それはいわば仕上げの段階である。RQ(I)、RD(I)による自動化プログラムは（菅原他1977、1978）、初期の試算から併用された。しかし、根本に何かの欠陥のある時は、かかる自動化は役に立たない。ピークにおける実測と推定との一致がよくないので、ヒドログラフ比較によるRQ(I)、RD(I)は利用できないと考えた。しかし流況曲線比較法にも大きな難点があった。雨季の初期にいくつかのピークが現れる。それらは1段目タンクからの流出によるから、期間1、2に属する訳であるが、それらのピーク流量は小さいので、流況曲線を作ると、その左側に期間1、2の流量が集まることにならない。このようにして、流況曲線の区分が、不適当なものになるのである。致し方なく、ヒドログラフ比較によるRQ(I)、RD(I)を用いることにした。この場合、ピークの時間遅れの不規則変動による影響を避ける目的で、3、4、5の期間から1、2の期間に移るとき、その前後を除去している。しかるに、サンゲレ流域のピークは多くの場合1日だけだから、上の規則により、ピークの資料はほとんどすべて捨てられる。つまり1段目タンクの修正の自動化はできないことになる。1段目タンクの修正は人間が行なうことにし、2段目以下の修正を自動化プログラムにまかせることにした。またRD(I)による修正も、うまく働かないのでやめることにした。結局、RQ(3)、RQ(4)だけを用い、

$$B1 = B1 / RQ(3) \quad C1 = C1 / RQ(4)$$

による流出係数の修正が、主要部分となる。浸透係数の方は、ハイドログラフを眺めて人間が行なう。

ピークの流量がうまく合わないのは、雨量の地点変動によるものであろうと、はじめは考えた。しかし、地点雨量を調べてみると、熱帯にもかかわらず、地点変動は割合に少ない。われわれは入力雨量として、与えられた流域平均雨量を用いたのであるが、ピーク流量の推定がよく合わないのは、流域平均雨量を用いたからではないらしい。そうなると、その理由は、日雨量を用いていることにあると考えざるを得ない。ピーク流量は、小さなフラッシュ洪水であろう。それは10分雨量等の短時間雨量に大きく関係するに違いない。日雨量を用いている限り、ピーク流量がよく合わないのは致し方ないと思われる。

個々のピーク流量を合わせることはあきらめるとして、平均的に合わせるためには、自動化方式を用いた方がよいと考えた。そのためには、ピーク流量の時間遅れの不規則変動の影響を避けなければならない。この流域は小さいから、大部分のピーク流量は雨の日に出るが、たまには前日に少し出たり（原因不明）、翌日に出たりする。そこで実測流量に手を加え、前日または翌日に流量として出たものは、雨の日に移し、ピーク流量の時間遅れの変動を取り除いた。この修正された実測流量によるRQ(I)を用いて、流出係数の自動的修正を行なった。表2のモデルにおいて、流出係数が切りのよい数値になっていないものは、自動的修正で得られたものである。

土壌水分構造については、十分な試算が行なわれていない。地下の自由水から土壌水分に吸い上げる係数 K_1 の影響はきわめて大きい。表2では K_1 として、1または1.5が用いられているが、たとえば $K_1=2$ とすると、地下の自由水の消滅は目に見えて早くなる。各タンクの時定数は浸透係数ではぼ定まる（流出は浸透に比べて小さいから）のであるが、現実には K_1 の影響が大きい。そういう所までを含めての試算は十分には行なわれていない。

4. 残された問題

残された問題は多いが、とくに大切と思われるものについて述べる。

第1は地下にある自然の貯水池、宙水の存在である。このことは試算を終え、報告を作製中に気がついたのである。今回は、地域を分割し、部分流域ごとに流出孔の高さを変えたモデルを作ったが、流出孔の高さを変えるより、各タンクの底に貯水池を作った方がよいと思う。つまり宙水である。サンゲレ



図7 宙水の模型を含むタンク・モデル

Fig.7 Tank model composed of tanks having dead storage at the bottom corresponding to perched groundwater

流域では、高温の乾季の間に、地下の水たまりは完全に乾き切ってしまうであろう。したがって、地下の大きな水たまりの上にある小流域では、それが満水するまではそこからの流出は始まらない。かくして、ある流出成分が欠落したり、または雨季のはじめ頃にはなかなか現れなかったり、渇水年と豊水年とで水の出方が異ったりするのであろう。そうであれば、それに対するタンク・モデルは、流出孔の位置を高くするよりも、図7のようにタンクの底に水たまりを作る方がよいと思われる。この型のモデルにすると、本報告で出した結果よりも、いくつかの点でよくなることが期待できる。たとえば図2に見るように、流域S1において1974年、1975年の11月から12月にかけて、流域S7において1975年の1月から2月にかけて、基底流量が僅かながら増大し、それから消滅している。この不自然さは、図7の型のモデルを用いれば出て来ないはずである。実はこの不自然さを眺めて、宙水の存在に気がついたのである。図7のモデルへの改造のためのプログラムの修正はごく僅かなもので容易である。わが国でサンゲレ流域のようなことに出会わなかったのは、地下の水たまりが、つねに満水に近い状態にあるからであろう。図7の型のモデルの方がよいことが判っているのであれば、それを用いて計算をやり直す方がよいのであるが、目下他の仕事を始めてしまって、やり直しに手が廻らない。それと図7の型のモデルを使ったとしても、実質的な改善はあまり大きなものではないと思われる。大切なのは宙水の存在に気がついたこと、それに対するモデルが考案されたということである。

第2は土壌水分構造の問題である。現在われわれの用いている土壌水分構造は、1次、2次の部分から成り、それは数日程度の短い時定数を持つ成分と、数か月程度の長い時定数を持つ成分に支配されている。しかし、フラッシュ洪水の解析を行なうためには、地表の自由水と、1次土壌水分との間に、前1次土壌水分とも言うべき構造が必要であろう。それは洪水と同程度の短い時定数に支配されるものであろう。このような構造をつけ加えない限り、かかる乾燥地域の雨季のはじめにおけるピーク流量の解析はできないのではあるまいか。

最後に小流域に関する個人的意見をつけ加える。サンゲレ流域のように、小流域ごとに異なる型のハイドログラフが現れる例に接すると、小流域が大切であるように見えるが、今回の解析結果が示すように、小流域S1、S2、S3でさえ、さらに小部分流域に分割しないと、よい結果が出て来なかったのである。つまり、小流域であるから水文学的に均質で、したがって解析に便利であるという訳ではないように思われる。

サンゲレ流域の示す特質が、地下の水たまりの存在によるものであるかどうか、実態は不明であるが、地下に平方メートル単位の広さの小さい水たまりが散在する地域を仮りに考える。乾季にこの水たまりが乾けば、雨季のはじめには、この水たまりの影響が大きく現れて来る。このとき、小流域を解析の対象とすると、地下の水たまりに当たるか、当たらないかで、外見上の水文学的性質は大きく変動するのであろう。一方、ある程度の大流域を対象とするならば、地下の水たまりの影響を統計的に処理することができて、かえって簡単にな

るのではないだろうか。

本研究はORSTOMの出版物による公開資料によって行なわれた。しかし、表だって使われなかったとは言え、全雨量観測地点の日雨量資料その他をORSTOMから受けている。貴重な資料を磁気テープにコピーして与えて下さった好意に対し、M. Roche氏をはじめとするORSTOMの方々には厚くお礼を申し上げる。なお、フランスのORSTOMは、Office de la Recherche Scientifique et Technique Outre-Mer (海外科学技術研究所)の略である。

参 考 文 献

- 1) Casenave, A. (1978) : Étude hydrologique des bassins Sanguèrè, Cahiers O. R. S. T. O. M., Sér. Hydrol., vol 15, n^{os} 1, 2.
- 2) 菅原, 尾崎, 渡辺, 勝山 (1977) : タンク・モデルの構造を自動的に定める計算機プログラムの開発 (第1報). 国立防災科学技術センター研究報告, No. 17, 41-86.
- 3) 菅原, 渡辺, 尾崎, 勝山 (1978) : タンク・モデルの構造を自動的に定める計算機プログラムの開発 (第2報). 国立防災科学技術センター研究報告, No. 20, 157-216.
- 4) 菅原, 尾崎, 渡辺, 勝山 (1981) : タンク・モデルに付加された土壌水分構造の性質. 国立防災科学技術センター研究報告, No. 27, 193-206.

(1981年10月26日 原稿受理)