一提案としての〈多重層流出モデル〉

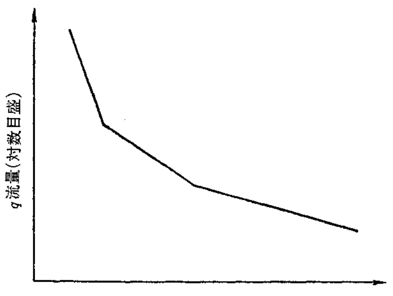
小　寺　隆　夫*

1. はじめに

降水あるいは，かんがい用水が，地中にいったん浸透して再び地表水に還元してくる現象を解明するために「多重層流出モデル」を提案し，そのかんがい用水の還元への応用を示したものである。

流域内に無降雨が継続しているときの河川流量の低減の一般的な様子を見ると，図―1 のようである。

図―1　無降雨期間内における河川流量の低減状況



このときの河川流量は，流域からの地下水流出によって組成されていると考えてもよい。

したがって，図―1 の曲線を解析することによって，流域の地下水流出に関する水文学的構造を解明することができると考える。

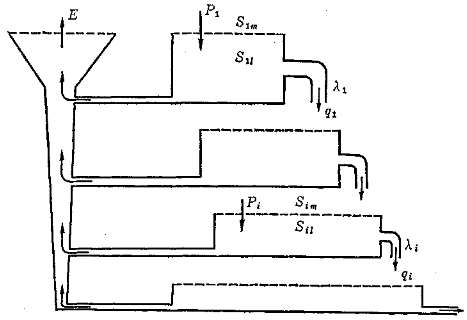
本論では，次式でこの曲線を表現し，それに適合するモデルを考え，これを「多重層流出モデル」と名づけた。

$$q_i=q_{i-1,l}e^{-\lambda_i t_i}$$
$$q_{i+1,m}<q_i<q_{i-1,l}$$

すなわち，適当な q の範囲ごとに，低減係数 λ を一定と考え，図―1 の曲線を，折線によって近似させたわけである。そして，これに蒸発損失を加味して，図―2 のような「多重層流出モデル」を考えたわけである。

* 正会員　経済企画庁資源局　水資源課主査

図―2　多重層流出モデル



しかして，このモデルは，つぎのような性質をもっているものと考えた。

① i 層の流出流量 q_i は，$(i+1)$ 層すなわち直下層が満水するまで全量 $(i+1)$ 層へ浸透する。

② i 層の浸透流量 P_i は，$(i-1)$ 層すなわち直上層の流出流量 q_{i-1} のみとする。

③ i 層の流出流量 q_i は，$(i+1)$ 層すなわち直下層が満水しているときは $(i+1)$ 層へ $q_{i+1,m}$ だけ浸透し，それ以外はすべて直接このモデルの外に越出する。

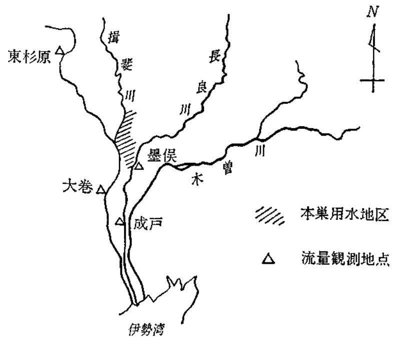
④ i 層の最大流出能 q_{im} は，$(i-1)$ 層すなわち直上層の最小流出能 $q_{i-1,l}$ に等しい。また，最小流出能 $q_{i,l}$ は，$(i+1)$ 層，すなわち直下層の最大流出能 $q_{i+1,m}$ に等しい。

⑤ i 層の流出流量 q_i は，その層の貯水量 S_i に1次比例する。

ただし，新期の浸透が開始された場合，その新期の浸透流出量にもとづく流出は，その新期の浸透流量によって，その層が満水された後において開始されるものとする。すなわち，層に空虚がある間は，従前の貯水量にもとづく流出が継続するものとする（図―4 参照）。

⑥ 蒸発損失 E は，上位の層から順次およぶものとする。

図—3 本巣用水地区位置図



2. 機能解析

（1） このモデルの外部から P_1 なる浸透が続いた場合の各層の満水時間 t_{im},

$E=0$ と考える。

第1層 $t_{1m}=S_{1m}/P_1=q_{1m}/(\lambda_1 P_1)$

第2層以下 $t_{im}=S_{im}/q_{i-1,m}=q_{im}/(\lambda_i \cdot q_{i-1,m})$

$P_1 > q_{i-1,m}$ とする。

（2） 全層が満水している状態のとき，外部からの浸透が止まり，E なる損失が続く場合の各層の減水時間

第1層

① 流出が止まるまでに要する時間 t_{1l}

$t_{1l}=1/\lambda_1 \times \log\{(q_{1m}+E)/(q_{1l}+E)\}$

② 流出が止まってから空になるまでの時間 t_{10}

$t_{10}=S_{1l}/E=q_{1l}/(\lambda_1 E)$

第2層以下

① 直上層からの浸透が止まってから流出が止まるまでに要する時間 t_{il}

a） 直上層が空になる前に流出が止まる場合

$t_{il}=1/\lambda_i \log(q_{im}/q_{il})$

b） 流出の途中において直上層が空になり E なる損失がおよぶとき

まず，直上層が空になった時の流出流量 $q_i{}^*$ を求める。

$q_i{}^*=q_{im}\ e^{-\lambda_i t_{i-1,0}}$

つぎに $q_i{}^*$ を次式に代入して，直上層が，空になってから流出が止まるまでに要する時間 $t_{il}{}^*$ を求める。

$t_{il}{}^*=1/\lambda_i \log\{(q_i{}^*+E)/(q_{il}+E)\}$

$t_{il}=t_{il}{}^*+t_{i-1,0}$

② 流出が止まってから空になるまでの時間 t_{i0}

$t_{i0}=S_{il}/E=q_{il}/(\lambda_i \cdot E)$

3. 低減係数 λ

低減係数 λ は，実際の観測から得られる $t\sim q$ の資料から求めることができる。

すなわち，流量が q_1 から q_2 に連続して減衰するのに要する時間を t とすれば，λ は次式で求められる。

① E なる損失が働いている場合

$\lambda=1/t \log\{(q_1+E)/(q_2+E)\}$

② E が作用しない場合

$\lambda=1/t \log(q_1/q_2)$

ここにおいて，E が働くかどうかは試算によって確かめなければならない。いま上記で求められる λ を，

$\lambda_{q_1\sim q_2}=\lambda_{(q_1+q_2)/2}$

で表わすことにする。

任意の層のλ を求めるためには，λ が q の指数関数であると考えて，次式により求める。

$\lambda_q=\lambda_{q_b} e^{-\alpha(q_b-q)/q}$

$\alpha=q_a/(q_b-q_a)\times\log(\lambda_{q_b}/\lambda_{q_a})$

λ_{q_a}, λ_{q_b}：観測により求められた低減係数

4. 層の設定

「多重層流出モデル」の層を何層にするか，また流量分割をどのようにするかは，実際の観測によって得られる $t-\log q$ 曲線から適当に判断して決める。

本論では，計算の便宜上から 1 mm/day の流出能を最大流出能とする層を最終層とし，逐次直下層の最大流出能の2倍の最大流出能を有する層を考えることとした。

すなわち，流出流量が半減したとき，流出が休止するといった分割である。

5. 農業用水の還元問題への応用

農業用水，ことに水田のかんがい用水は，数カ月のかんがい期に集中して，ある場合には数千 mm に達することさえある。これらの一部は，葉水面蒸発として空中に亡失するが，大部分は地中への浸透水であると考えられる。この地中へ浸透した水が，再びどのようにして流出しくるのか，すなわち農業用水の還元の問題は，高度の水資源開発計画をたてる場合にはぜひとも解明されなければならない。前述した「多重層流出モデル」を，実際に長良川流域におけけ農業用水の還元について応用してみることにする。

（1） 地区の概要

適用する地区として，長良川下流の還元に影響があると考えられる揖斐川水系に水源を有する本巣用水地区 5 095 ha をとりあげた。本巣用地区は，いわゆる「ザル田」と称せられており，減水深が 50 mm/day 以上に達する地区である。減水深の半旬別変化は表—1 のとおりで

ある。

表—1　本巣用水地区半旬別減水深

月	6			7						8						9		
半　旬	4	5	6	1	2	3	4	5	6	1	2	3	4	5	6	1	2	3
減水深 (mm/day)	35	47	49	49	49	49	51	51	47	47	47	46	42	42	37	37	34	32

つぎに葉水面蒸発量であるが，これは，その地区の蒸発計蒸発量に係数を乗じて求めることができるわけであるが，一応**表—2** のとおりとする。

表—2

6　月	5 mm/day
7　月	7 mm/day
8　月	10 mm/day
9　月	6 mm/day

(2)　低減係数 λ

λ は流量記録から求められる。かんがい関係の流量は得がたく，また完全なものは少ない。一方，新期に開田または，排水改良事業が行なわれる場合には，この λ は推定しなければならない。本論では，対象農地の近傍の河川における流量資料から λ を推定する方法を採用する。本巣用水地区は，揖斐川水系と長良川水系にはさまれた地域にあるので，揖斐川と長良川の **表—3** に示す流量観測所の資料を用いることとした。

表—3

河　川　名	地　点　名	流域面積 (km²)
揖　斐　川	大巻地点	1 605
〃	東杉原地点	263
長　良　川	墨俣地点	1 914

本論では，水資源開発計画に役立つ農業用水の還元問題を論じているので，洪水流出問題において用いられるような大きな低減係数については，考える必要はない。

すなわち，水資源開発計画は，普通，半旬単位で立案されるからである。本論では，$1/\lambda$ が5日以上のものについて求めることとした。上記観測地点における $1/\lambda$ が5日以上の低減流出が行なわれているのは，8 mm/day 以下の流量時なので，**表—4** のようにもとめられた。

表—4　揖斐川，長良川流域における低減係数 λ (day^{-1})

	平　均	大　巻	東杉原	墨　俣
$\lambda_{8-4}=\lambda_6$	0.146	0.150	0.113	0.173
$\lambda_{4-3}=\lambda_{3.5}$	0.137	0.120	0.151	0.141
$\lambda_{2\sim1.5}=\lambda_{1.75}$	0.027	0.028	0.035	0.018

この場合，λ_{8-4} に対しては，蒸発損失 E が最初から作用しているものと考えて，λ を求めた。任意の q における低減係数 λ_q は，$\lambda_{3.5}$ と $\lambda_{1.75}$ の値から次式をつくり，それにより計算によって求めることとした。

$$\log_{10}\lambda_q=-0.1583-2.46/q$$

(3)　層の設定

前述したように，最終層を 1 mm/day 以下の流出を行なう層として，つぎのように層を設定した。

第1層　8 mm/day から 4 mm/day までの流出を行なう層

第2層　4 mm/day から 2 mm/day までの流出を行なう層

第3層　2 mm/day から 1 mm/day までの流出を行なう層

第4層　1 mm/day 以下の流出を行なう層

これら各層の λ は，つぎのとおりである。

$\lambda_1=0.146$

$\lambda_2=0.1051$

$\lambda_3=0.01591$

$\lambda_4=0.002408$

各層の貯水容量は次式によって求められる。

$S_{im}=q_{im}/\lambda_i$

第1層　55 mm

第2層　38 mm

第3層　126 mm

第4層　416 mm

つぎに各層の最大浸透能 P_{im} は，直上層の最大流出能に等しいという仮定から，つぎのようになる。

$P_{1m}=16$ mm/day

$P_{2m}=q_{1m}=8$ mm/day

$P_{3m}=q_{2m}=4$ mm/day

$P_{4m}=q_{3m}=2$ mm/day

(4)　貯　溜　能

かんがいされた水量が刻々地下に貯溜されるとき，その量を mm/day で表わし，貯溜能と名づけることとする。初期条件として「多重層流出モデル」の各層が空であると考えれば，かんがい期間中における貯溜能には，4つの段階が考えられる。すなわち，

① 16 mm/day の貯溜能が続く段階

$S_{1m}/P_{1m}=55/16\fallingdotseq3.4$ 日$\fallingdotseq$1 半旬

② 8 mm/day の貯溜能が続く段階

$S_{2m}/P_{2m}\fallingdotseq4.7$ 日$\fallingdotseq$1 半旬

③ 4 mm/day の貯溜能が続く段階

$S_{3m}/P_{3m}=7$ 半旬

④ 2 mm/day の貯溜能が続く段階

$S_{4m}/P_{4m}=42$ 半旬

貯溜能が続くのは 51 半旬，すなわち8カ月以上に達し，これ以後は各層が満水しているので，貯溜能はゼロとなる。

いま，前述した減水深の期別に合わせるため，6月4

半旬において「多重層流出モデル」の全層が空であると考えて，半旬別の貯溜能を示せば表—5のとおりである。

表 5 半旬別貯溜能

月	6			7						8						9		
半 旬	4	5	6	1	2	3	4	5	6	1	2	3	4	5	6	1	2	3
貯溜能 (mm/day)	16	8	4	4	4	4	4	4	4	2	2	2	2	2	2	2	2	2

（5） 還 元 水 量

還元水量は次式で求められる。

減水深－(葉水面蒸発量＋貯溜能)＝還元水量

また，これを m³/sec 単位にするには，次式によればよい。

$$\frac{\text{還元水量 (mm/day)} \times \text{かんがい面積 (ha)}}{86\,400 \times 1\,000}$$

$$= \text{還元流量 (m}^3\text{/sec)}$$

表—6 本巣用水地区からの還元量

月	6			6						8						9		
半 旬	4	5	6	1	2	3	4	5	6	1	2	3	4	5	6	1	2	3
還元水量 (mm/day)	14	34	40	38	38	38	40	40	36	35	35	34	30	30	25	29	26	24
還元流量 (m³/sec)	8	20	24	22	22	22	24	24	21	21	21	20	18	18	15	23	15	14

本巣用水地区の還元水量は，長良川の墨俣地点と成層地点の間において還元流入するものと考えられている。この両地点における流量観測の結果は，常にこの間における大きな流量増加を示しており，反復利用を考慮しても，オーダー的には符合する。

（6） 減水深と浸透能の関係

ここに採用した「多重層流出モデル」の最大浸透能は，16 mm/day であるが，本巣用水地区の減水深は 50 mm/day に達する。葉水面蒸発量を差引いても，30 mm/day 以上の浸透があるわけであるが，これは，このモデルの上に層を積み重ねればよいのであるが，この場合それらの層の低減係数は流量に比して非常に大きいので，したがって，貯水容量は小さく，先にも述べたように，半旬単位で立案する水資源開発計画においては無視することができる。

6. おわりに

以上「多重層流出モデル」の提案と，その農業用水の還元問題への応用について述べた。

流域が，種々の低減係数を持った貯水槽から組成されているものとしての洪水流出の研究が，菅原博士等によってなされている。

ここに提案した多重層流出モデルは，つぎの点でそれと異なった特質を有している。

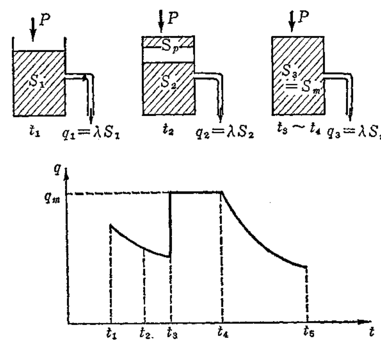
（1） 流出孔をサイフォン式として，各層が無限時間流出を行なわないようにしてある。

このことによって，モデル設定が試行錯誤によらず，流量記録から一義的に求められる。

（2） モデルに損失機構をとり入れ，浸透，貯溜，損失，還元を一元的に取扱かえるようにしている。

（3） 流出流量計算に用いる貯溜量に，図—4 に示すような仮定を設けて，計算を簡便ならしめた。

図—4 浸透の再開，休止と流出の関係



「多重層流出モデル」は将来において，流域の大きさ，地形，地被，地質，緯度，経度，季節，気候などのデータにより低減係数を推定することを開発することにより，低水流出の一般的解法として用いられることが考えられる。このために，雨量，流量，蒸発量等の水文資料の充実が強く望まれる。 **(1965.11.20・受付)**
