中小河川流域の低渇水に関する研究

著者	木下 武雄
雑誌名	防災科学技術総合研究報告
号	34
ページ	5-14
発行年	1974-03-30
URL	http://id.nii.ac.jp/1625/00002700/

551.579.1：551.482.4：551.577.38(52)

中小河川流域の低渇水に関する研究

木　下　武　雄*
建設省土木研究所

Runoff From Small Basins During a Period of Drought

By
Takeo Kinosita*
Public Works Research Institute, Ministry of Construction, Tokyo

Abstract

This report is prepared for making clear the mechanism of runoff from a small basin during a period of drought.

In recent years, some slopes of hilly areas in West Japan have become orange orchards. The damage caused by drought is serious in such orchards, where irrigation water is taken from only a small stream. It is very important for management of these orchards to forecast the discharge from small streams during the period of drought.

The purpose of this report is focused on the study of low-water runoff in a small basin through two approaches, experimental and computational.

The laboratory experiment of groundwater movement was carried out in order to select adequate formulas of low-water runoff. Dupuit-Forchheimer's equation and the equation of continuity are found to be available for the simulation of unsteady flow of groundwater. Comparison of the computed surface form of groundwater with the measured one shows a very well accordance. The effective porosity must be carefully estimated for the simulation.

Field data were analyzed for the same purpose. The Miwa and Tsukuba experimental basins are profitable because they are located on the hilly areas of 1.36 km^2 and 3.12 km^2, respectively. A "tank model" is applied to investigation of the behaviours of low-water runoff. The parameters of the tank model are developed on the basis of data in 1970. It is found that these parameters are suitable for forecasting of the low-water runoff in 1971.

In conclusion, the recession curve of a small stream is rather steep and the low-water runoff is steady.

目　次

1. まえがき…… 6
2. 過去の経緯…… 6
3. 目　的…… 6
4. 砂層中地下水の不定流実験…… 6
5. 試験地調査…… 8
6. 貯水池による干ばつの防止方法に関する試算…… 13
7. 中小河川の低渇水についての問題点…… 14
8. 結　語…… 14
参考文献…… 14

* 現在：国立防災科学技術センター
* Present address: National Research Center for Disaster Prevention, Tokyo.

1. まえがき

干ばつ時における小流域からの流出機構を明らかにするため，構内実験・試験地調査・現地観測を行ない，電算機によるシミュレーションも行なった．構内実験は砂層の中の地下水の不定流実験であり，試験地調査は裏筑波などすでに土木研究所で行なっている試験流域の降雨流出の観測と解析であり，現地観測は岡山県において実施した．

2. 過去の経緯

昭和42年6月および9月を中心にして西日本におこった干ばつはこの地方の急傾斜地農業に大きな痛手を与えた．この時には「西日本干害に関する特別研究」を行ない，土木研究所は「干ばつ時における中小河川の水文学的研究」[1]について協力し，結果は出版されている．そこでは雨量の時間的・空間的分布および最低流出量として期待できる比流量などの検討を行なった．

昭和43年度は課題を上げずに各種の調査を行なったが，昭和44年度より3カ年計画で本課題を発足させ昭和46年度で終了した．

3. 目　的

近年の干害は傾斜地農業において強く発生する傾向がある。干ばつ時に傾斜地農業がその水源をどこに求めるかは重大問題である．大規模な河川・貯水池がある場合は別として，小河川に依存している場合には小流域からの流出がどんなに変化するかが最も知りたい情報である．例えば，大流域で得られた流出の低減曲線がそのまゝ小流域に適用できるか？本報告で述べる結論はNoである．またこのような事態のためにダムを作る場合，それに対する注意すべき点，また何処まで期待できるかということも大切な知識である．干ばつ時における流出する水の変動とくに低水流出機構を明らかにすることが本研究の目的である．干ばつから干害への移行の機構と過程については他の小課題で論じられるはずであるので，ここでは中小河川の低渇水に焦点をしぼりたい．

このような問題にはどのように接近したらよいか？対象となる傾斜地農業地帯に観測網を設けて干ばつを待つという方法がある．しかし，在勤地からはなれた所に多くの観測施設を持つことは必ずしも得策ではなく，調査期間中に干ばつが来ない確率の方が高い．それで，現地観測も行なうが特に重点をおくわけではなく，むしろ調査期間中に干ばつが起これば役に立つといった程度の消極的な方法とし，重点をすでに多くの設備投資をした裏筑波試験地のデータをこの目的のために有効に解析すること，および低水流出となる地下水のモデルの基礎となる構内実験においた．構内実験では砂層中地下水の不定流実験で変動する地下水の追跡を意図した．斜面地下水の流動は低水流出と密接に関係があるからである．

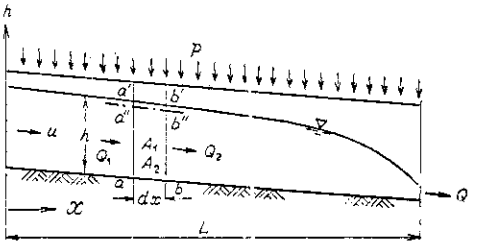
以上の3本立によってこの研究は構成されている．時間的な制約もあって，十分な総合考察ができなかったのは残念である．以下順次報告して行きたい．

4. 砂層中地下水の不定流実験

低渇水時における中小河川の流出をモデル化して，砂層により構成された地下水実験水路において，浸透水の流動を調べた．[2] 砂層中の水の流動について図－1のように一次元化された浸透流についての運動方程式としてDarcy の基本方程式を用いる．

$$Q = A \cdot u = k \cdot h \cdot B \left(I - \frac{\partial h}{\partial x} \right) \quad \cdots\cdots(1)$$

x：上流から下流方向の横座標（図－1参照，以下同様）
h：浸透流の水深（水路底からの鉛直水位）
B：水路幅
A：地下水流動断面積，$A = B \cdot h$
Q：地下水流動の流量
u：x方向のみかけの流速
I：水路底勾配
k：透水係数



図－1

この式がいわゆるDupuit-Forchheimer の式である．鉛直断面内では地下水表面の勾配が一様に作用していると仮定された式である．連続方程式は図－1のように上層からの浸透降下量を加えて

$$n\frac{\partial A}{\partial t}+\frac{\partial Q}{\partial x}=pB \quad \cdots\cdots(2)$$

t：時間

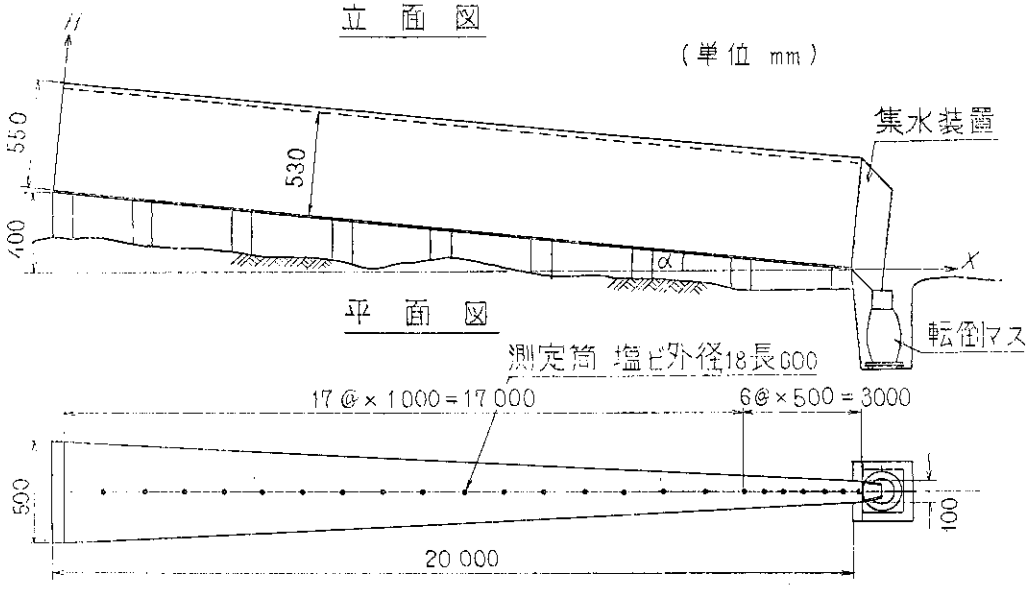
p：上層からの浸透降下量

n：有効空隙率

となる．定常流のときは時間微分は0であるから

$$\frac{dQ}{dx}=pB \quad \cdots\cdots(3)$$

である．



図－2　砂層中，地下水の不定流実験装置説明図

実験装置としては図－2に示すような幅の変る谷状の流域を想定して水路を作成した．勾配$I=0.02$とし，これに川砂（平均粒径$d_{60}=0.26$mm，有効粒径$d_{10}=0.13$mm）を敷いた．用いた砂の空隙率と透水係数を表－1に示す．

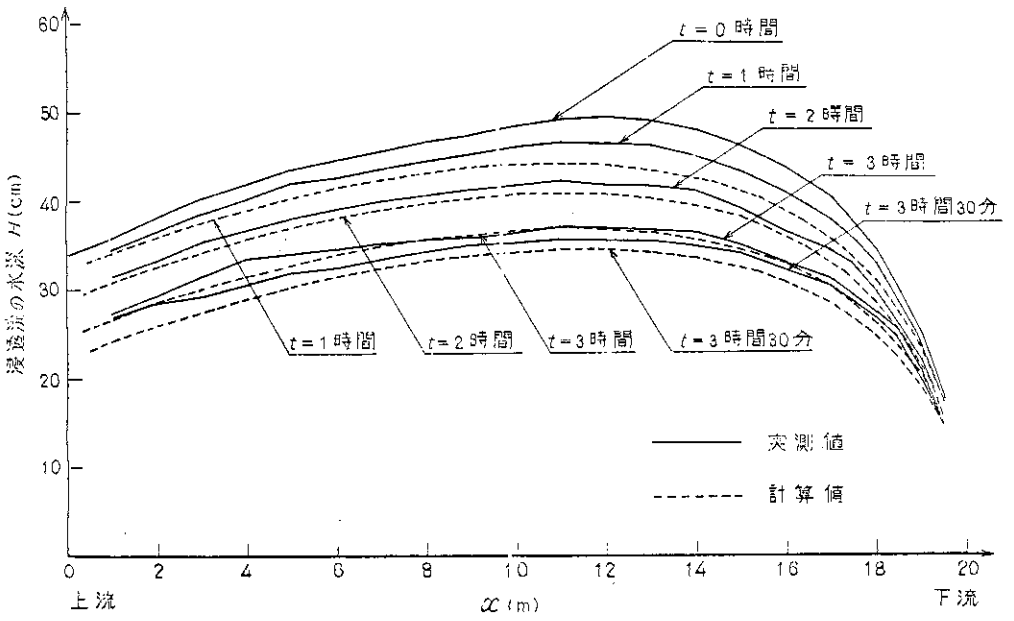
表－1

	空　隙　率	有効空隙率	透水係数 cm/sec
1	0.40	0.032	0.06
2	0.40	0.023	0.06
平均	0.40	0.028	0.06

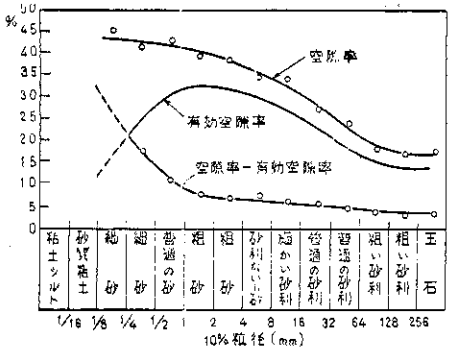
散水は如露を用いて入念に行ない，雨に代るものとした．地下水位の測定には内径13mmの塩化ビニールパイプの円筒を底面まで埋めて測定した．

他方，上述の式(1)，(2)を差分化して，初期条件・境界条件を入れて解き，実験値との対比を行なった．初期条件は$t=0$としたときの実測の地下水位を，境界条件としては上流端で流入量を0とした．差分は式(1)のxについては前方差分をとり，連続式(2)については後方差分をとる．実験結果および計算結果の比較は図－3に示す．補給水すなわち散水強度は0.1mm/時以下で，時間的に減少させる方法で実験を進めた．図－3はその一例で，散水強度を1時間毎に1.0，0.8，0.5，0.0mm/時と変化させた場合の実験結果である．実験初期に実験値と計算値の差があるが，これは砂の有効空隙率（浸透水が流動している部分の空隙率）や透水係数の，水面形や流動量が落ち着くのに及ぼす影響が大きいのに，これを正確に測定するのが困難なためである．そのような難点を伴いながらも，おゝむね非定常の地下水流動へのDupuit-Forchheimer式の適用が認められる．

有効空隙率とは土砂中の空隙中を浸透する水が毛管力の支配を受けることなく流動する空隙の体積の，全土砂層の体積に対する百分比をいう．こ



図－3　砂層中地下水不定流実験の結果と電算機によるシミュレーション比較図



図－4　有効空隙率と粒径

れは粒径によっても変化するので，その例を図－4に示す．測定は思いのほか困難であるが，本実験の有効空隙率はn＝0.028である．図－4より求めた有効空隙率はn＝0.11程度であり測定値との差が大きい．この有効空隙率については今後も検討する必要がある．

5. 試験地調査

土木研究所は幾つかの試験地について水文諸要素の観測を行なって来た．ここでは干ばつとは直接関係ないが，現在観測している裏筑波試験地と，かって観測していた美和試験地とにおけるデータについて，主として低水流出を解析し，小流域の低水流出の実態を明らかにした．この場合，Operationalな点 － すなわち現実に干ばつが今日からはじまって，明日以後低水流出を予測するというような観点 － に立って，ある時期の水文データによりモデルを作成し，そのモデルに次の時期の降雨等のデータを与え，推算値と実測値とを比較するというようなWMOなどでしばしば行なわれている比較手法を用いた．図－6はモデル作成のための比較を行なった図，図－7は予測の適合性を示す図である．干ばつの発生する流域ではこの試験地調査にならって，低水流出モデルを作成しておくと，図－7のように有効であろう．

裏筑波は茨城県にあり，筑波山北斜面と，加波山へつづく山脈の一部とから成る流域で，流域面積は3.12km²である．基岩は花崗岩，花崗斑岩より成り風化はすゝんでいる．この川は山口川と呼ばれ，平野に出て真壁町市街地の南を流れて利根川支川の桜川に合流する．観測地点には複断面四角堰を設け，水位を観測し水位流量曲線により流量を求めている．

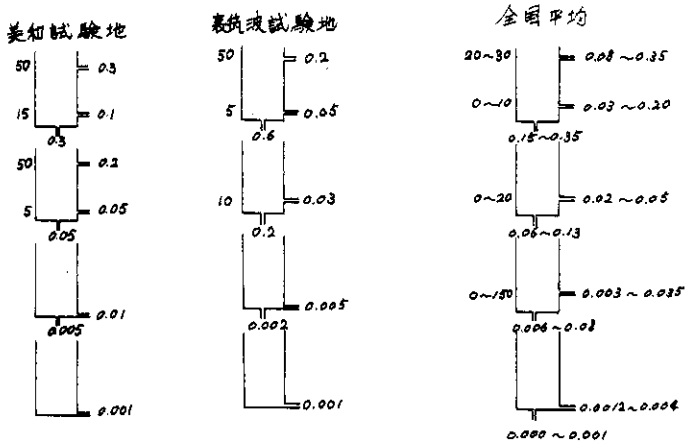
美和試験地は長野県にあり，赤石山脈の中を流れる三峯川に築かれた美和ダムへ直接入る小犬沢にある．流域面積1.36km²，地質は石英片岩・千枚岩・緑泥片岩が交互にあらわれ，一部は蛇紋岩化している．ここに直角三角堰を設けて水位を観

測し水位流量曲線により流量を求めている．

これら両流域の日雨量・日流量のデータを用いてタンクモデルで解析した．タンクモデルはよく知られているように，直列に並べた仮想タンクの横孔からの流出をもって河川の流出と考え，雨量は上段のタンクへ補給され，タンクの下孔からの流出はその下のタンクへ流入するとしている．この場合の損失は蒸発だけを考えた．手法は無降雨日は表－2のような数値を蒸発として上段のタンクから差引く．もし上段が空なら次のタンクから

表－2　蒸　　発

	蒸　　発
1月　2月	0.5 mm／day
3　4	1.0
5　6	1.5
7　8	2.0
9　10	1.5
11　12	1.0



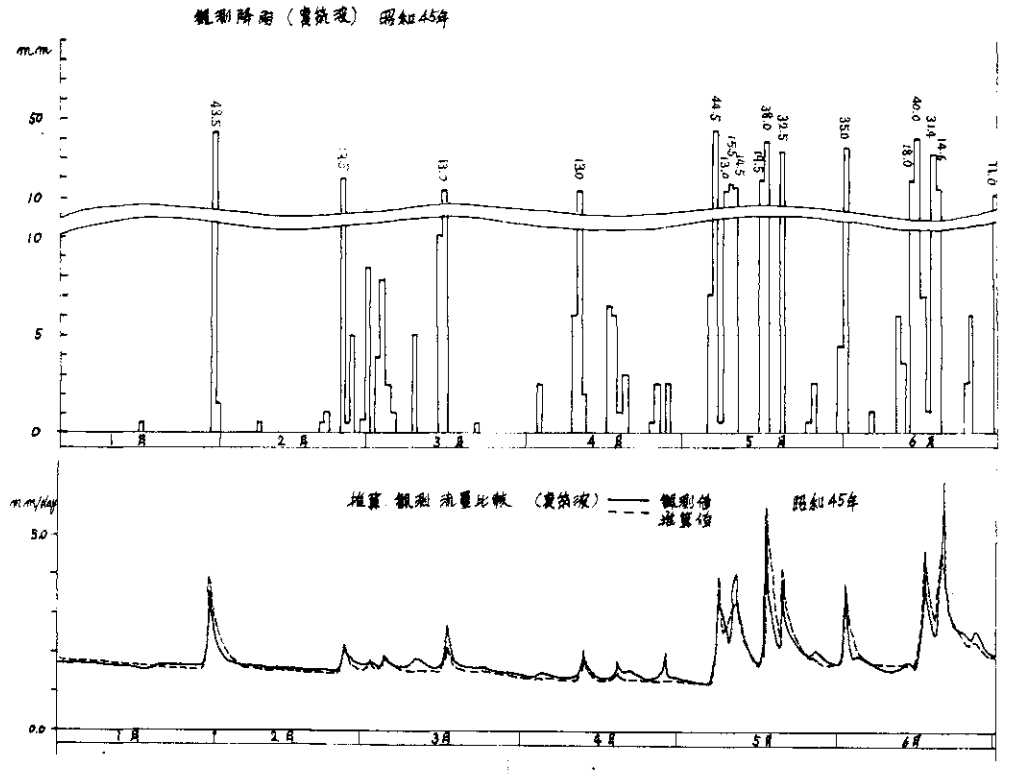
図－5　タンクモデル（土木研究所が行なった小流域の例と菅原正己による全国例の平均）

というふうに順次差引く．降雨日は同表の$\frac{1}{2}$量を差引いた．このようにしてえられたタンクモデルを図－5に，結果の推定値とそれに対応する実測値とを図－6，7，8に示す．また，菅原[3]が求めた他の流域の日流出のタンクモデルの諸係数の概略値も同図に示した．これには流域面積が数100 km²以上の大河川が多いので，裏筑波・美和両試験地のモデルとのちがいは流域面積・地質などの要素のちがいと考えられる．

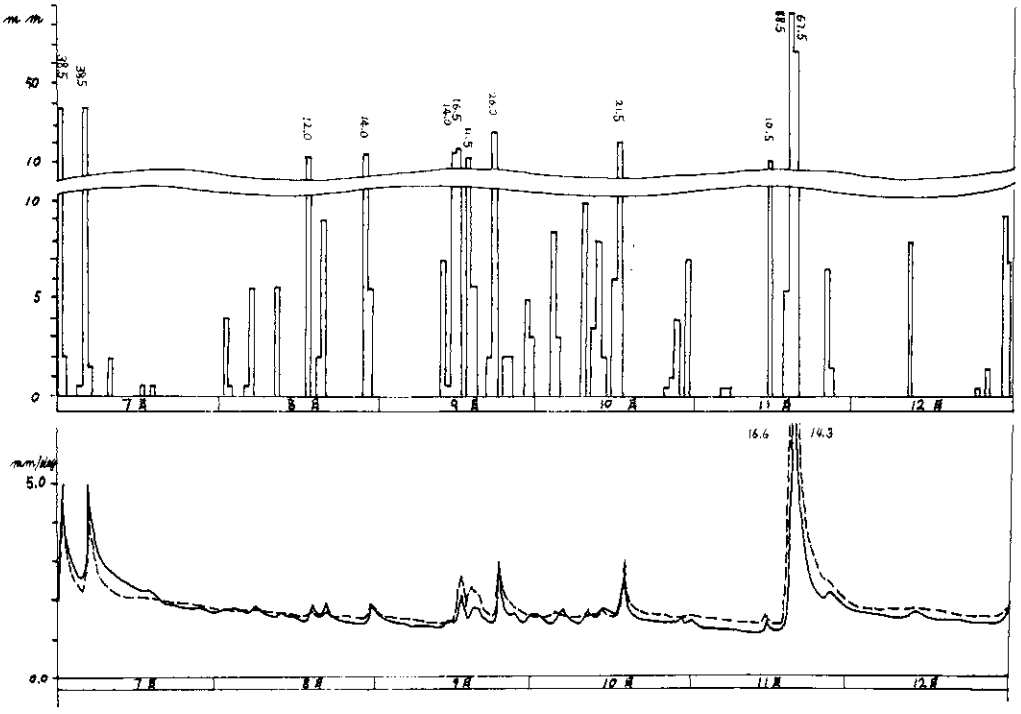
裏筑波試験地の流出モデルの特徴は次の通りである．(1)最上段タンクの浸透孔は大きく，流出孔（横への孔）はあまり大きくない。(2)第2段・第3段タンクの流出孔の位置は低くて出やすい形になっている．極端な表現を許してもらえば，表面流出は速く減衰し，地下水流出は大へん長く持続することを意味する．大流域では流域斜面も長く，扇状地・沖積平野を流れるため地下水・伏流水との交換があり，貯留効果，従って低減緩和効果が効くが，山地小流域ではそのような効果がないためであろう．

昭和45年の日雨量・日流出量から求めたタンクモデルが図－5であるので，このモデルに昭和46年の日雨量を与えて，日流量を推算したものが図－7である．ピーク付近も低減部も実測とよく一致している．このモデルのすぐれた適合性を示すものと言えよう．なお基底流量が1.5 mm／day 程度なのは全国的にもやゝ多目の値を示している．

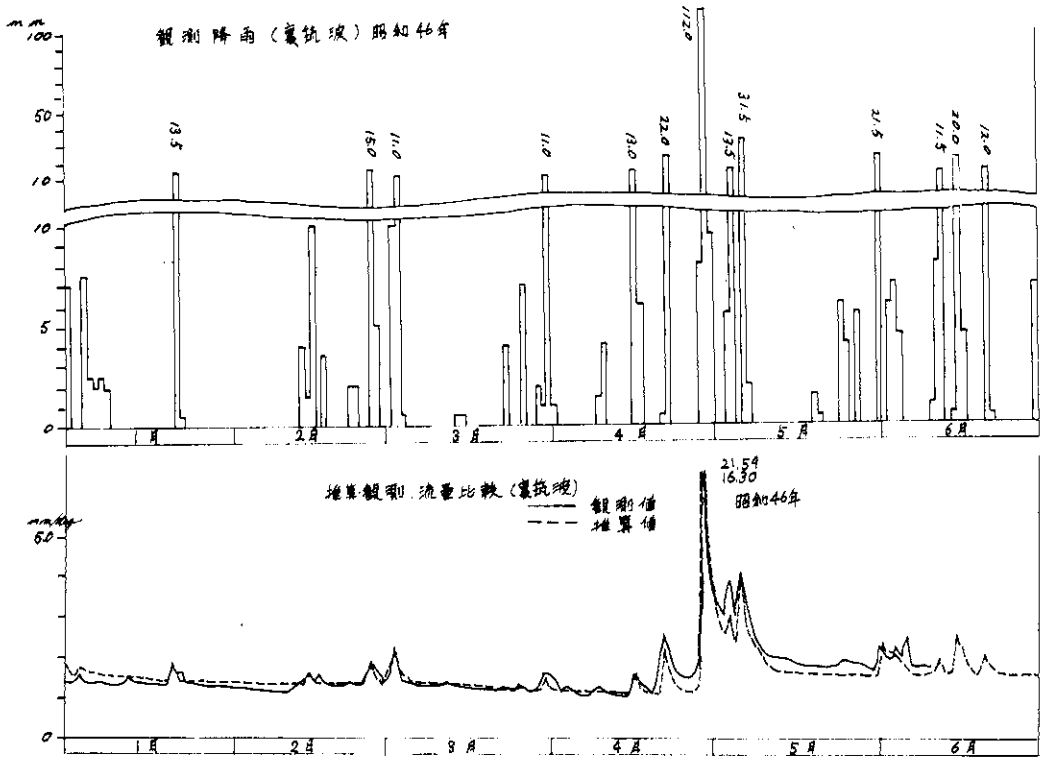
美和試験地の流出モデルの特徴は次の通りである．(1)流出モデルは裏筑波のモデルと全国平均との中間的なモデルである．(2)第1段・第2段のタンクの高いところに大きな係数をもった孔があいているがこれは洪水流出のためだからあまり問題にしなくてもよい．たゞこのモデルで言う限り大雨のときには急激な流出がある．(3)第3段・第4段のタンクの流出孔は底についている．これらの特徴は必ずしも有意な意味づけをできない面もあるが，裏筑波の流出モデルと比べて若干のちがいがあるのは興味ふかい．基底流量は1 mm／day



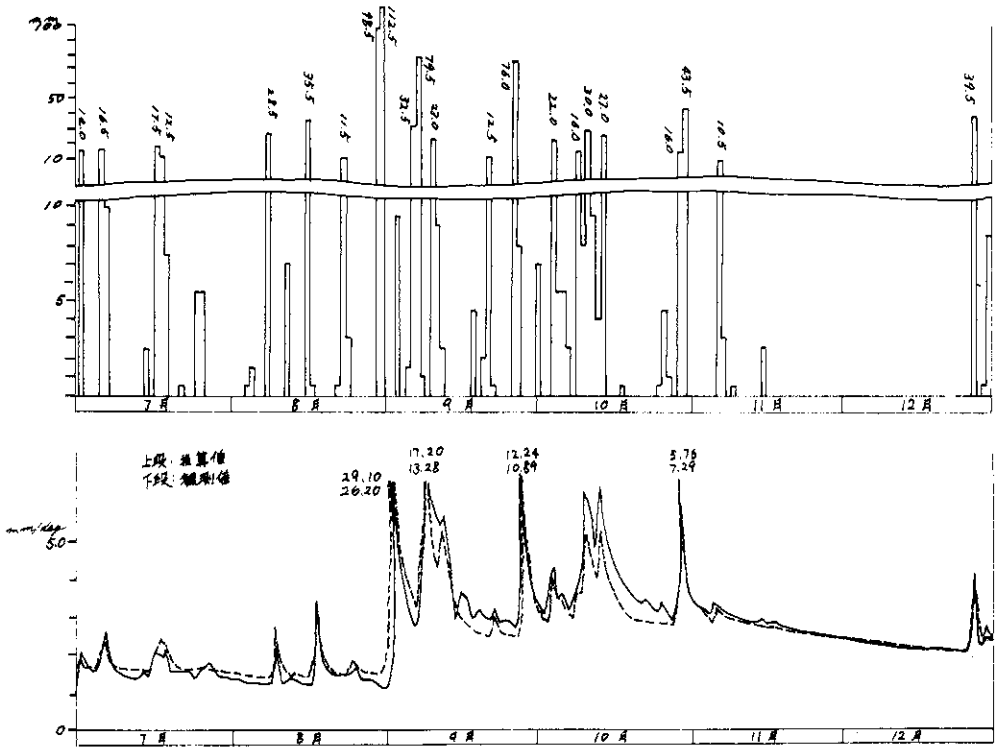
図－６－１　裏筑波試験地流出モデル作成（図－５参照）



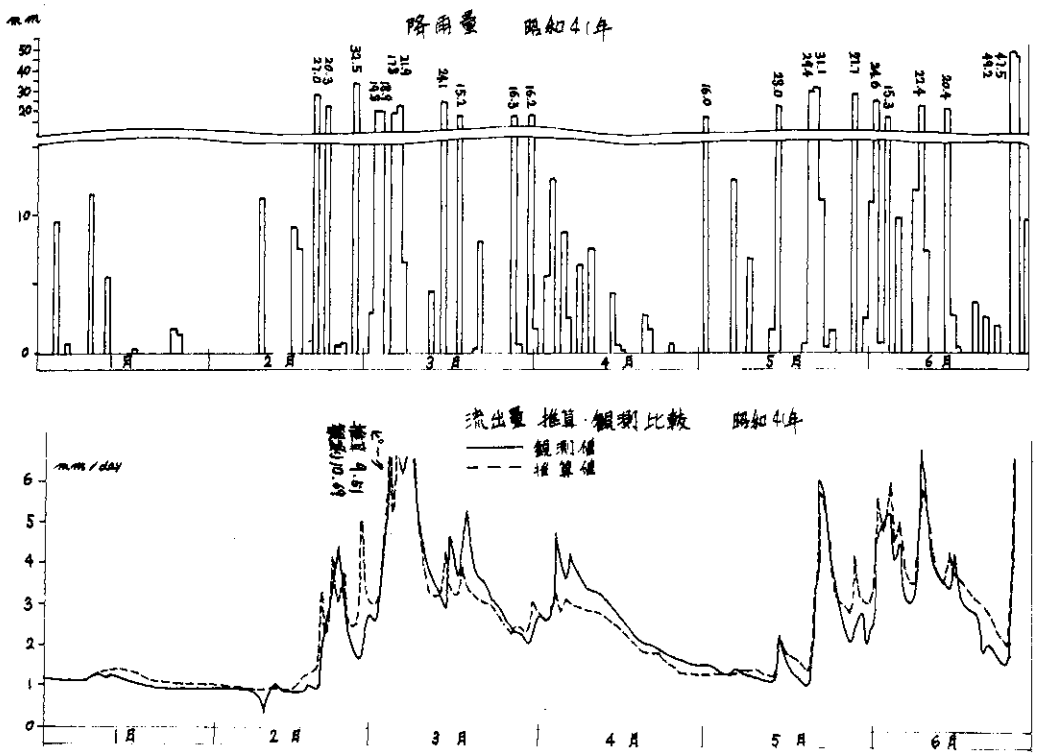
図－６－２　つ　づ　き



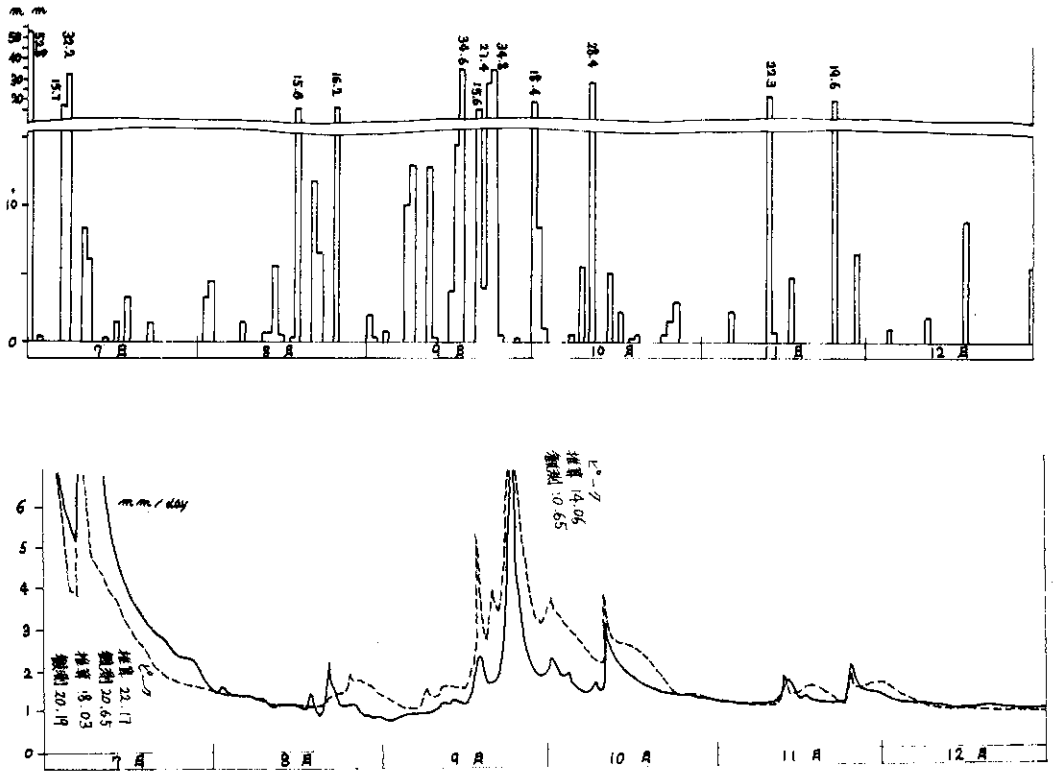
図－7－1　裏筑波試験地流出予測とその検証
（モデルは図－6により作られたもの）



図－7－2　つ　づ　き

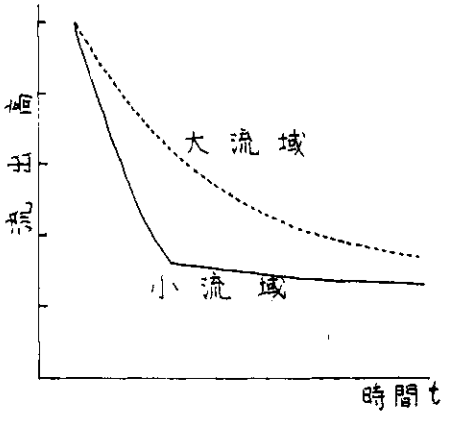


図－8－1　美和試験地流出モデル作成（図－5参照）



図－8－2　つ　づ　き

程度で全国平均に近い値を示している．さきにも述べたように地質は中央構造線の変成岩帯なので，流域面積が小さい割には大流域的な性格を持っているのであろう．



図－9　流出の相違模式図

裏筑波と美和との両試験地では若干の差があるが，流出の特徴を大流域・小流域について言い表わせば図－9のようになる．すなわち大流域はゆるい低減カーブを描くのに対し，小流域では急に減水し，基底流量を維持するといった傾向を示す．小流域の干ばつ対策を考える上で重要である．

6. 貯水池による干ばつの防止方法に関する試算

貯水池によって，出水を貯え，干ばつ時に放水して水の利用効率を上げる方法は現在では小学生でも知っている．大きいダムで，何人かの管理者がついて操作する場合にはその可能性は大きい．しかし，小さいダムで無人操作に近い場合にも同様の可能性を期待できるだろうか．

概略のオーダーを見ることを目的として，次のような線型貯水池を設けた場合の流量調節の可能性を検討してみよう．流入波形に単振動を用いているのは簡単化のためで，2種以上の振動が複合すると位相差によってはいろいろ複雑な現象がおこるからである．

線型貯水池は次の仮定に基づく．貯水池の越流部はいつも開いていて水は流れているとする．

$$Q = Q_0 + q \quad \cdots\cdots(4)$$

流量Qは定常分Q_0と変動分qに分かれ，堰の公式からそれぞれ次のようにおかれる．

$$Q_0 = C B H_0^{3/2} \quad \cdots\cdots(5)$$

$$q = \frac{3}{2} C B H_0^{1/2} h \quad \cdots\cdots(6)$$

ここでCは堰の越流係数1.785（m系単位），Bは堰幅，H_0は定常越流水深，hは越流水深の変動分とする．この関係は$Q = C B (H_0 + h)^{3/2}$を展開してえられる．

貯水池への流入量 I も $I_0 + i$ と分離され，定常流入量 I_0 は Q_0 に等しい筈だから，流入流出の関係は

$$A \frac{dh}{dt} = -q + i \quad \cdots\cdots(7)$$

となる．Aは水深H_0 の付近の貯水池面積である．これを変形して

$$\frac{1}{\lambda} \frac{dq}{dt} + q = i \quad \cdots\cdots(8)$$

とし，次のように解く．但し，

$$\lambda = \frac{3}{2} C B H_0^{1/2} / A \quad \cdots\cdots(9)$$

$$q = \int_0^\infty i\ (t-\tau)\ \lambda e^{-\lambda\tau} d\tau \quad \cdots\cdots(10)$$

ここでiに振動成分を与えると

$$i = m \sin \omega t + n \cos \omega t \quad \cdots\cdots(11)$$

$$q = \frac{\lambda}{\sqrt{\omega^2 + \lambda^2}} (m \sin \omega (t - T_0) + n \cos \omega (t - T_0)) \quad \cdots\cdots(12)$$

これが解で，$\sin \omega T_0 = \omega / \sqrt{\omega^2 + \lambda^2}$，$\cos \omega T_0 = \lambda / \sqrt{\omega^2 + \lambda^2}$となる．$i$と$q$とを比べるとおくれ$T_0$がついて，減衰係数$\lambda / \sqrt{\omega^2 + \lambda^2}$が掛っている．減衰係数の概略を知るため，次のような貯水池を考える．

$B = 10\,\mathrm{m}$，$h = 0.1\,\mathrm{m}$，$A = 10000\,\mathrm{m}^2$を用いて$\lambda = 0.0008\ \mathrm{sec}^{-1}$．これに対し10日周期で干ばつが来ても$\omega = 6.28 / 864000 = 0.000007\ \mathrm{sec}^{-1}$で，$\lambda \gg \omega$となり減衰係数はほとんど1，つまり貯水池の効果はない．さらに周期の長い干ばつにはもっと無益になる．$A = 1000000\,\mathrm{m}^2$になってはじめて$\lambda \fallingdotseq \omega$となり減衰係数は0.7程度となる．つまり，流入流量の減少を7割程度にして下流へ放流することができる．

勿論これは自然調節なので利用水深が小さい．人が手を加えればこれよりはるかに有利になるが，人工調節によって10倍の効率にしたとしても，小流域の小貯水池には大きな期待をかけられないこ

とを示している．

7. 中小河川の低渇水についての問題点

これまで，中小河川の低渇水に関係ある幾つかの調査について，この研究計画の項目に従って述べたが，これまで研究していて気のついたことも含めて，中小河川の低渇水についての問題点を明らかにして行こう．

(1) 干ばつは広範囲にわたること：

洪水については特に最近は集中豪雨などと言われるように，局地性の強い降雨が注目される．しかし干ばつには局地的な干ばつというものはなく，昭和32年の例に見る如く，西日本というような広い範囲で発生する．従って現在考えられている程度の広さの水資源計画では間に合わない．また長時間に及ぶことにも注目しなければいけない。その代り，このような広域的な現象は予測がある程度可能であるから，もし危険が感じられたら早めに対策を講じることができる．貯水池を持っている場合はその有効な操作を早めに考えておくことが必要である．

(2) 流　　出：

低水流出は単位面積あたり日量1mm が標準である．これは次に述べるように流域の状態によって変るが，もし資料がない場合には，多くを期待しないで，この量で事がおさまるような地域開発計画を樹てておくべきである．ダムを作って水を貯え必要に応じて放流する場合でも，流域面積が小さく，貯水容量が小さければ長時間に及ぶ干ばつにはそれだけ効果的運用はむづかしいので，その点に注意が必要である．

(3) 地形，地質：

流出が平均して1mm／dayと述べたが，これは地形・地質によっても変って来ることは明らかである．雨量・流出のデータがあれば，裏筑波と美和の小流域との比較のようにできるが，一般的にはデータは乏しい．長さLの長方形斜面において，透水係数k，勾配i，有効空隙率n，水深h，流出qとおくと，Dupuit-Forchheimerの式(1)を更に単純化して$q=kiBh$，連続の式(2)を$nLB\frac{dh}{dt}=-q$と仮定して解けば，$q\cdot exp(-\frac{ki}{nL}t)$となることはよく知られている。つまり勾配ゆるく，斜面長ながく，透水係数小さく，有効空隙率大きいという地形・地質条件だと流出の低減がおそいことがわかる。裏筑波と美和の小流域のデータからは十分な対比ができなかったが，調査箇所をふやして行くと，地形・地質による何らかの分類と推定ができるかも知れない．

(4) 水源を他に求めること：

河川の流量に限界がありとするなら，水源を他に求めなければならない．普通考えられるのは地下水である．流域斜面で地下水を汲むことは早く流出させるのと同じことで自分の首をしめるだけである．それに地下水の流動速度は極めておそいから，地下水は緊急時用と考えておく方が無難であろう．

ここで提案する水源は下水の処理水である．1人1日300 ℓというのが凡その排水量であるが，人口1万人の町だと1日に3000 m³となる．これは低水流量1mm／dayから逆算すれば3 km²に相当する．つまり，人口1万人の処理場から処理水を引くことは3 km²の流域に利水施設を作って，低水流量を引くのと同じである．畑地潅漑なら排水基準BOD20 ppmは恐らく害はないと考えられるし，重金属などを含む工場排水さえなければ有効な水源である．

8. 結　　語

水文学というのは大規模な現象 ― たとえば大河川の洪水 ― と小規模な現象 ― たとえば土壌水分と小流域の流出とは連続的にはつながりにくいものである．中小河川の低渇水に関する研究もそのような観点から接近して行かなければならない。このような調査は金よりも時間，時間よりも人が必要なので，金にも負けず時間にも負けずひたすら努力する人が望まれるわけである．小流域の低水流出に関してはあまりデータもないので，とりあえず，土木研究所におけるデータで解析した．多くの小流域で観測がすゝみ地形・地質と関連づけた低水流出特性が明らかにされ傾斜地農業の水利計画に有効な答が出せることを望んでやまない。

参　考　文　献

1) 木下武雄：干ばつ時における中小河川の水文学的研究，防災科学技術総合研究報告第20号
2) 山口和一郎：地下水流動式の実験的検討，土木技術資料 Vol．13，No.4，p．25
3) 科学技術庁資源調査会：水資源の循環機構に関する調査報告，資源調査会報告47号，昭和44年1月28日