

洪水流量逋減曲線の特性を考慮した 流出モデルに関する研究

STUDY ON A RUNOFF MODEL BASED ON THE CONSIDERATION OF FLOOD RECESSON CHARACTERISTICS

吉川 秀夫*・砂田 憲吾**・グエン・ソン・フン***
By Hideo KIKKAWA, Kengo SUNADA and NGUYEN Son Hung

1. はじめに

流出ハイドログラフの逋減部に着目して流域の特性を議論することは従来より試みられてきており、逋減曲線自身を表わす関数形もこれまでにいくつか^{1)~4)}提案されている。流量逋減曲線と流域特性とのかわりを示す初歩的な試みは、まず、表面流出と中間流出と地下水流出のそれぞれの成分分離の際に経験的に導入された¹⁾。やがてタンクモデル⁵⁾の出現に伴って、逋減曲線は逋減率の低いタンクからの流出成分との対応がつけられることになる^{6), 7)}。この場合逋減曲線は数本の指数関数の合成により表現される。最近、四俵⁸⁾は指数関数とは別に逋減曲線が関数 Ae^{-at} によってもよく近似されることを示したが、減衰率スペクトルの概念を導入しつつ、流量逋減曲線の解釈にはやはり単一タンク列の初期貯留量を用いている。竹内⁹⁾は標準逋減曲線^{6), 7)}を利用して各流出ハイドログラフの同曲線への乗り合い点に注目し、その点以後では表面流成分がないと考え、乗り合い点の生起時間を中心に検討している。

本論文では流域系固有のものとしてされる上述の流量逋減曲線の情報を総合し、洪水部を含めた流出のモデル化に積極的に取り入れることを考える。著者らはさきに¹⁰⁾この目的のために初歩的なモデルの検討を行い、地下水流出と表面流出の合成による流出モデルの精度の向上を確かめている。しかし、一方で流域平均浸透能については定量的には依然として未知パラメーターとして課題が残された。ここでは先見的に規定された流域平均浸透能などを用いることなくモデルを構成する。また、モデルの組立ては系がはなはだしい物理的矛盾を生じない程度の簡潔な記述を基本に考えている。したがって、洪水・低

水を含めたモデル全体のなかでは初期損失は二次的ととらえ、本論文ではこの点を考慮しないことにする。

流出現象のマクロ的なアナロジーとしてすぐれているタンクモデルを用いて、地下水流出、中間流出を含めてまず表現する。すなわち、多段の線形タンクを複数並列に配置し順次逋減率の高い流出成分に対応させる。各タンク系のパラメーターとその系への降雨入力、標準逋減曲線および同曲線への各流出ハイドログラフの乗り合い点とを用いて決定される。総流出量に対するこれらの地下流出量の残余は主として表面流成分であろう。この量是对応する残余の降雨入力に対して非線型性を有することが予想されるが、全流出量を対象とする場合よりも扱いは容易となることが期待される。この場合非線型流出モデルの最適パラメーターは自動的に^{10), 11)}決定される。以上によりモデルは主観の介在の余地のほとんどないまま規定されることになる。

さて、流出現象が無限に生起する機会をもつ個々の力学過程のトータルな帰結であることを考えれば、lumped system analysis も distributed system analysis による研究の成果に待つべきものも多い。しかしながら、distributed system analysis とくに dynamic hydrology によるアプローチを一般的な流域系に拡張して総合化するには対象があまりに複雑すぎる。必ずやいずれかの段階で lumped system analysis の立場をとらざるを得ないだろう。lumped system analysis の一つとしてタンクモデルに代表される概念モデルないしは、パラメトリックモデルが、lumping scale の問題¹²⁾はあるにせよ、今日でも実用的解析法として重要な位置を占めている理由の一つがここにある。だとするならば、この種のモデルが、その大胆な等価回路系であることの宿命として、パラメーターによって単に“合わせる”だけで済ませたくないという著者らは考えている。モデル自身に現象の物理的特性をより多く反映させて流域系の特性を具体的に理解できないだろうか。本論文はその試みとして、標準逋減

* 正会員 工博 東京工業大学教授 工学部土木工学科

** 正会員 工修 山梨大学講師 工学部土木工学科

*** 学生会員 東京工業大学大学院修士課程学生

曲線，タンクモデルおよび減衰率スペクトルの概念などを統一した形で，一つの流出モデルを検討したものである。

2. 標準逓減曲線

(1) 標準逓減曲線の定義

流出量ヒドログラフの逓減部の形状は，無降雨でかつ流域内に大きな変化がない場合，個々の流量観測地点で固有のパターンをとることが知られている。各流出における逓減部を時間軸方向に移動して集めると，図-1のように末端部を中心に多くの共通部分を認めることができる。竹内ら^{9),10)}はこの共通部分およびそれから外挿される曲線を標準逓減曲線とよんでいる。ここでもその曲線を標準逓減曲線，特に1次の標準逓減曲線と定義する。無降雨期間ヒドログラフが多数得られれば，長い範囲にわたって標準逓減曲線を描くことが可能である。

(2) 高次の標準逓減曲線

前項の操作により得られる1次の標準逓減曲線をもとの各個のヒドログラフより差し引くことにより，新たなヒドログラフが得られる。このヒドログラフをもとに前項と同様にして描ける標準逓減曲線を2次の標準逓減曲線とよぶことにする。この操作を繰返

せば，さらに高次の標準逓減曲線を得ることができる。

高次の標準逓減曲線では比較的高い流出ヒドログラフが必要となってくる。実際のデータでは高水から低水部まで無降雨のヒドログラフを多数得ることは困難な場合が多いが，このとき高流量の領域では降雨がなく，低流量の領域で短時間の少降雨のあったヒドログラフも用いてデータを増せばよい。この補足データの場合でも，降雨により流域系内の状態の変化が少ないため，低流部で1次の標準逓減曲線に漸近したものが得られる。各洪水流出ヒドログラフの中には完全な条件を満たしたグラフがいくつかあり，低流量部のみで無降雨のデータはさらに多いと考えられる。したがって，これら条件

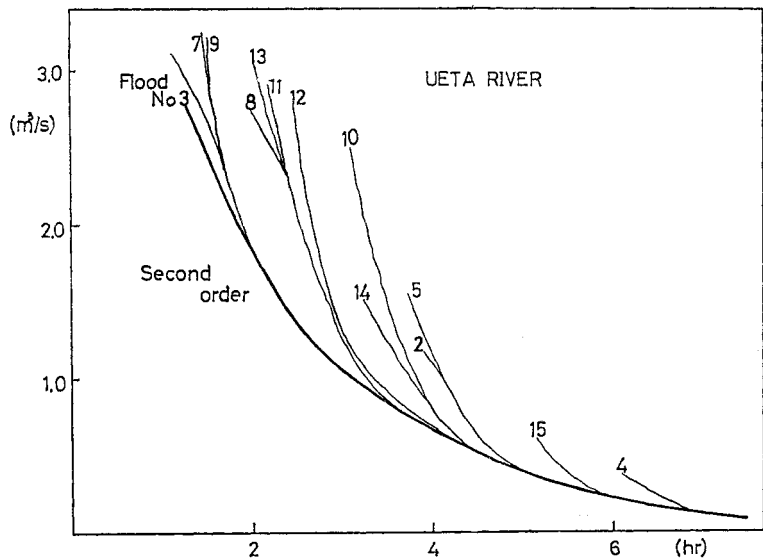
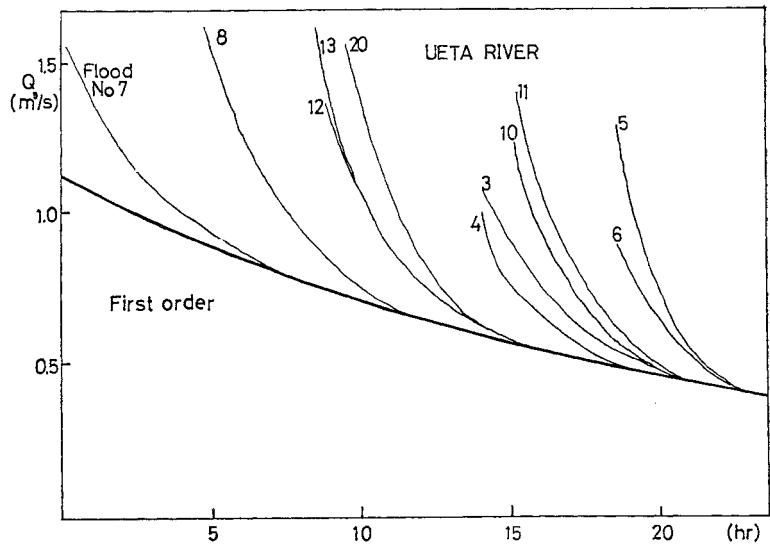


図-1 第1次標準逓減曲線

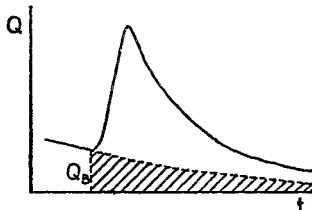


図-2 基底流量の分離

図-3 標準逓減曲線の例(植田川)

にあったものにより1次の標準逡減曲線を作成し、低流量部でこれに近似する補足データを加えて、高流量を必要とする高次の標準逡減曲線を求めればよい。

さて、実際のハイドログラフでは多かれ少なかれ先行降雨による基底流量が存在する。この量は地下水成分であり、対象とする洪水がなければ低い逡減率をもつ $Q_0e^{-\lambda t}$ タイプの減衰を示すと考えられる。したがって、対象洪水のハイドログラフ立上り点での流量 Q_B を Q_0 として、実測流量データから 図-2 の斜線部流量 $Q = Q_0e^{-\lambda t}$ を差し引いて整理するのがより合理的である。このときの λ は近似的に前段に示した方法で求まる1次の標準逡減曲線の逡減率を用いばよい。

図-3 はこうして得られた植田川における1次および2次の標準逡減曲線である。

(3) タンクモデルのパラメーターと逡減率

いま簡単のために3つの並列におかれた単一タンクのモデルを考える。それぞれの初期貯留量を A_1, A_2, A_3 また逡減率を $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$ とすれば、この系からの流出量は次式で示される。

$$q(t) = A_1e^{-\lambda_1 t} + A_2e^{-\lambda_2 t} + A_3e^{-\lambda_3 t} \dots \dots \dots (1)$$

したがって、 A_i が正でかつ $\lambda_1 > \lambda_2 > \lambda_3$ であれば、 λ_i は前節に示した方法によって (4-i) 次の標準逡減曲線から求められる。

(4) 標準逡減曲線への乗り合い点

ハイドログラフのピークを過ぎた流量急変部は各洪水ごとにそれぞれ異なった形状を示すが、前述したように、さらに逡減が進むと標準逡減曲線に収斂する。竹内ら⁹⁾ は各洪水のハイドログラフが、この曲線にほぼ乗る点(急激に収斂する点、乗り合い点とよぶ)の前と後に分けられるとし、乗り合い点より前の部分では主として表面流出による部分で降雨の場所分布や時間的分布の影響を受けるが、乗り合い点後は主として地下水流出による部分で降雨の分布にほとんど関係なく浸透量の大きさに支配されるものと考えている。

ここではこの考えを拡張し、各洪水ハイドログラフの標準逡減曲線への乗り合い点の前後で主要な流出成分の変化があると考え。すなわち、その点前後で表面流出成分等中間流および地下水流出成分の各段階的変化の一つを示すものとみるのであり、その方がより自然な方法と考えられる。さきに高次の標準逡減曲線について述べたが、各次数におけるこの種の乗り合い点でそれぞれ段階的に流出成分の変化が生じていると考えればよい。

3. 流出成分分離モデル

タンクモデルの特長の一つはその構造の単純さにもかかわらず流出量を端的に表現し得る点にある。もちろん非線形流出に対応すべき非線形タンクの配置も重要な特徴ではあるが、線形タンクだけを取り上げてモデルとしてよく定量的な把握をもたらしており、いったんモデルが定められればほとんどの降雨形態に対して適合度の高い流出量の得られることが経験的に認められている。しかしながら、このモデルのパラメーターの決定には試算が必要とされ、また、パラメーターのモデル精度への感度が低い。このことは、流量推定などで大した誤差を与えないという好都合な面もあるが、逆にパラメーターから流域特性を議論するには不都合な点でもある。

本論文では地下水流出成分に対応させた線形タンク系を試算を要しないモデルとして構成する。すなわち流域データだけから客観的に定まる線形タンク系のできる限り現象を表現し、その性状から流域の特性を把握し、残された「表面もしくは表層流出成分」の検討を行ってゆく方法論をとる。このことは、あらかじめ全システムとしてタンクの配置や構造を定め試算によりパラメーターを決めていくのと本質的な違いをもつ。

(1) 3段多列タンクモデル

いま、図-4 のような3段多列のタンクモデルを考える。各サブシステム (System 1, System 2, ..., System s)

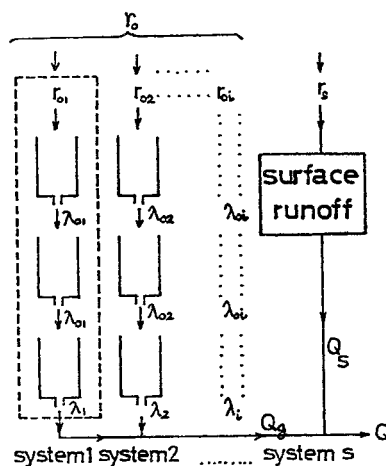


図-4 三段多列タンクモデル

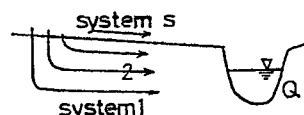


図-5 モデルの解釈の概念図

は流域系への物理的な解釈に対応させれば、図-5 のようなものであり、それぞれの系は互いに独立であると考えている。System 1 は降雨に伴い、初期に鉛直方向移動が卓越し最下不浸透層まで達するもっとも遅れの大きな流出成分を表わす系である。次に System 2 は降雨強度に応じてやや水平移動の大きい流出成分を表わし、System 1 の次に遅れを示す系である。同様に順次遅れの小さいシステムが並べられる。System *s* は表面流出系として表わされるが、必ずしも表面流出成分のみではなく、表層付近の水平方向の卓越した流れ(表層流)をも含めた非線型性を無視できない流出成分を総合したシステムと考えればよい。

λ_{oi}, λ_i は System *i* のタンク系の通減率であり、 r_{oi} は対応するサブシステムへの水供給量である。 r_{oi} は本論文で新たに考慮されたパラメーターである。後にその決定方法が示されるが、流出ハイドログラフの通減特性と降雨継続時間によって定まり、各システムへの降雨量の負荷量が規定される。すなわち r_{oi} はどのような遅れ系にどれだけの降雨が入力として配分されるかを示すもので流域特性の一つを表わす量である。これは四俵の与えた通減率スペクトルを降雨時にまで拡張された形式をもつもので、各線型タンク系への入力配分を線スペクトル r_{oi} で示したことになる。 r_{oi} は成分入力強度スペクトルとでもいうべきものである。ただし、全流出量を対象としない場合には、スペクトル密度としては表わされない。

ところで、このモデルで各列のタンクの段数を3としたのは特別な意味をもつものではない。直列3段タンク系の単位応答関数 $h(t)$ が $t \geq 0$ でピークをもち、 $t=0$ で $dh/dt=0$ となるもっとも単純なタンク系として3段を選んでいる。同様に、第1段タンクと第2段タンクの通減率を等しく置くのも簡単のためである。もちろん、さらに多段でかつ異なる通減率をもつタンクの配置によればより高精度のモデルが期待されるが、モデルの系全体の本質的な差異は小さいだろう。モデルの基本的な妥当性を検討するためには、その系の本質を損うことなくできるだけ単純化されていることが望ましいと考えている。

以上のようにして合成される流量 $Q_a(t)$ は、個々のシステムが線形であるにもかかわらず、 $r > r_{oi}$ が存在するような降雨時系列 $r(t)$ に対して線形ではないことになる。

(2) 3段直列タンクモデル

図-6 は 図-4 における各サブシステムの1つを取り出したものを示している。このとき、最下段タンクからの流出は応答関数の形で表わせば次式のようになる。

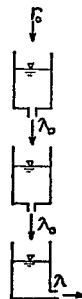


図-6 3段直列タンクモデル

$$h(t) = \frac{\lambda \lambda_0^2}{(\lambda_0 - \lambda)^2} [e^{-\lambda t} - \{1 + (\lambda_0 - \lambda)t\} e^{-\lambda_0 t}] \dots\dots\dots (2)$$

ただし、 $\lambda_0 > \lambda$

いま、一定強度 r_0 の降雨継続時間を t_r とするとき、このモデルからの流出は以下のように求まる。

$$t \leq t_r;$$

$$Q(t) = r_0 \int_0^t h(t-\tau) d\tau = r_0 \left\{ 1 + \frac{\lambda_0 \lambda}{\lambda_0 - \lambda} t e^{-\lambda_0 t} - \frac{\lambda_0^2}{(\lambda_0 - \lambda)^2} e^{-\lambda t} + \frac{(2\lambda_0 \lambda - \lambda^2)}{(\lambda_0 - \lambda)^2} e^{-\lambda_0 t} \right\} \dots\dots\dots (3)$$

$$t \geq t_r;$$

$$Q(t) = r_0 \int_0^{t_r} h(t-\tau) d\tau = r_0 \left[\frac{\lambda_0^2}{(\lambda_0 - \lambda)^2} (e^{\lambda t_r} - 1) e^{-\lambda t} - \frac{\lambda_0 \lambda}{(\lambda_0 - \lambda)^2} (e^{\lambda_0 t_r} - 1) e^{-\lambda t} - \frac{\lambda_0 \lambda}{(\lambda_0 - \lambda)} (e^{\lambda_0 t_r} - 1) t e^{-\lambda_0 t} + \frac{\lambda_0^2 \lambda}{(\lambda_0 - \lambda)} \times \left\{ t_r \frac{e^{\lambda_0 t_r}}{\lambda_0} - \frac{1}{\lambda_0^2} (e^{\lambda_0 t_r} - 1) \right\} e^{-\lambda t} \right] = \frac{r_0 \lambda_0^2}{(\lambda_0 - \lambda)^2} \left[\frac{(e^{\lambda t_r} - 1)}{\lambda} e^{-\lambda t} - \frac{(\lambda_0 - \lambda)(e^{\lambda_0 t_r} - 1)}{\lambda_0} t \cdot e^{-\lambda_0 t} + \frac{1}{\lambda_0^2} \{ \lambda_0 (\lambda_0 - \lambda) t_r e^{\lambda_0 t_r} - (e^{\lambda_0 t_r} - 1)(2\lambda_0 - \lambda) \} e^{-\lambda_0 t} \right] \dots\dots\dots (4)$$

ここで、

$$Q(t) = K[A \cdot e^{-\lambda t} + B \cdot t e^{-\lambda_0 t} + C e^{-\lambda_0 t}]$$

とおくとき、

$$Q(t) = K A e^{-\lambda t} \left[1 + \frac{B}{A} \frac{t}{e^{(\lambda_0 - \lambda)t}} + \frac{C}{A} \frac{1}{e^{(\lambda_0 - \lambda)t}} \right]$$

である。いま、 $t \rightarrow \infty$ のとき、

$$\lim_{t \rightarrow \infty} Q(t) = K A e^{-\lambda t} \dots\dots\dots (5)$$

すなわち、式(5)は式(4)で表わされる流出量曲線の漸近線である。したがって、時間経過が十分な流出量曲線は式(5)から、

$$Q_a(t) = \frac{r_0 \lambda_0^2}{(\lambda_0 - \lambda)^2} (e^{\lambda t_r} - 1) e^{-\lambda t} \dots\dots\dots (6)$$

なる曲線でほぼ近似できる。

式(6)は線形単一タンクからの流出と同様な形式をもつものであり、その通減率は片対数紙を用いて容易に得られる。

(3) パラメーターの決定

前節での3段タンクモデルの考察に基づき、3段多列タンクモデルを用いて以下の手順により流出成分分離モ

デルのパラメータを決定する。

a) 標準逓減曲線

降雨が時間的に連続して生じ、かつ流量逓減部で長時間降雨がないか、あるいはほとんど無視できるような洪水記録を多数選び、2. で示した方法により標準逓減曲線を求める。その曲線の片対数紙上での傾きを最下段タンク逓減率 λ とする。

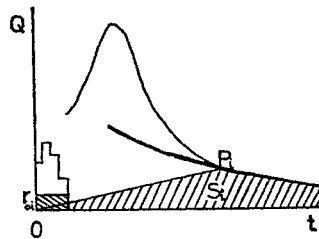


図-7 成分流出総量の計算

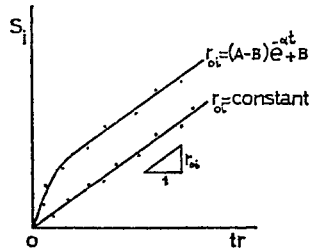


図-8 S_i と t_r の関係

b) 成分流出総量

各個別の洪水記録に対して、その流量逓減部が標準逓減曲線に乗り合う点 P_i を求め、図-7 の面積 S_i を計算する。前述したように乗り合い点 P_i は遅れの異なる2成分のうち遅れの小さい成分が近似的に無視される点である。したがって、 S_i はここで考慮しているサブシステムを経由して流出する遅れの大きい成分の総量の近似値を与えるとしてよい。

c) 降雨継続時間と成分入力降雨強度 (r_{oi})

前項の結果を図-8のようにグラフにプロットする。この結果がある曲線にのればその曲線の勾配が考慮中のタンク系への入力としての降雨強度を表わすことになる。この曲線は浸透能曲線の積分に対応するもので、実際にどのような形を示すか予想できないが、後述する2つの流域では、ばらつきはあるがほぼ直線とみなしてよいようである。直線の場合は簡単で、入力降雨強度は一定 ($r_{oi} = \text{const.}$) となる。これは時間的に早く流域平均的なその系への最終浸透能に達する場合であると理解することができる。 $r_{oi} = \text{const.}$ でなくても解析の方法にはまったく変更はない。

d) 上段タンク逓減率

乗り合い点 P_i と O を直線で結び、浸透総量の近似値が得られたが、 i 列タンクは3次の遅れ系として構成されていることを考慮する必要がある。前項までの手順で定められたパラメータ λ_i および平均値 $r_{oi}(t_{ri})$ を用いて、 λ_{oi} を種々変えて式 (3), (4) を描くと図-9 (a)~(c) のようになる。浸透量の近似の仮定に沿うように、各洪水について、乗り合い点以降の逓減部に best fit する曲線 (図-9 では (b) 曲線) を与える λ_{oi} を上

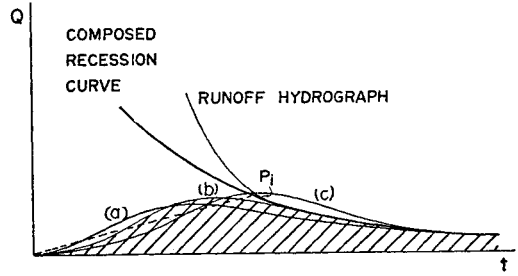


図-9

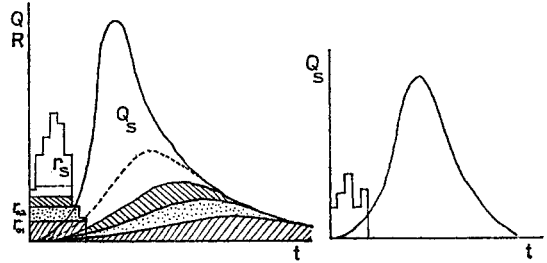


図-10

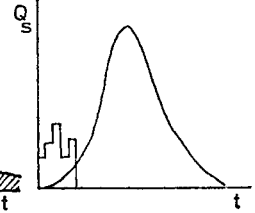


図-11

段タンクの逓減率とする。こうして得られるいくつかの値の平均値をそのタンク系の λ_{oi} とする。

e) 高次の標準逓減曲線

より上位の列のタンク系のパラメータを決定するために以下の準備を行う。定められた $\lambda_i, r_{oi}, \lambda_{oi}$ を用いて、それぞれの洪水記録について、降雨からは r_{oi} を、流出ハイドログラフからは式 (3), (4) をそれぞれ差し引く。得られた各個のハイドログラフの逓減部を用いて高次の標準逓減曲線を求める。

f) 上位のタンク系のパラメータ決定

同様に、以上の a)~e) の操作を繰り返せば、順次より上位のタンク系のパラメータが決定される。

以上の様子を模式的に示せば図-10のとおりである。これは、ちょうどインデンシャル応答が入力レベルのバンドに応じて変化するような形式を示している。

(4) 表面流出モデル

多列の線形タンクモデル系で表現しきれなかった、いわば残余の流出成分をあらためて示せば図-11のようである。この成分 Q_s は表面流および表層内の流れから構成されるものであり、場合によっては比較的遅れの小さい地下浸透流も含まれるだろうが、水平方向移動成分の卓越した流出成分であると考えられる。また、この成分は一般的には多かれ少なかれ、降雨入力 r_s に対して非線形性を有すると思われる。

ここでは上述の内容を考慮しながら、表面流を Q_s の主たる成分と考え、図-11のモデルとして貯留関数法を用いる。表面流のモデルとしては必ずしもこの方法に

限られるものではないが、結果として得られる貯留関数により流量・貯留量間の非線形性について基本的な議論が行いやすいことなどからこの方法を用いて検討する。

このとき、連続式、貯留関係式はそれぞれ次式で示される。

$$\frac{dS_s}{dt} = r_s - Q_s \dots (7)$$

$$S_s = k \cdot Q_s^p$$

ここに、 S_s は流域表面貯留量、 k, p は定数。

これら2個のパラメーターの同定は著者らがすでにその有効性を確かめている感度解析¹⁰⁾によればよい。

4. 実河川流域への適用

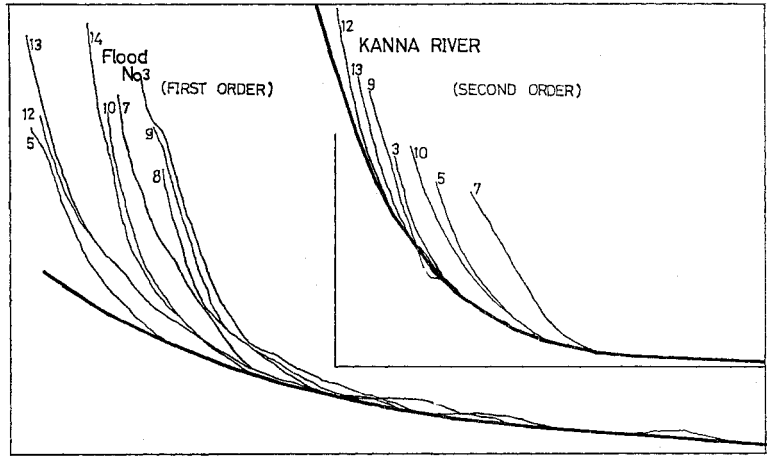
多段多列タンクモデルを実河川流域に適用し、流出の推定法としての妥当性とモデルパラメーターの示す流出特性について検討する。

ここでは流域面積に大きな差をもつ2つの河川流量時間データについて適用した。一つは神流川 ($A=373 \text{ km}^2$) であり、他は富士川小支川梓川 ($A=0.4 \text{ km}^2$) である。

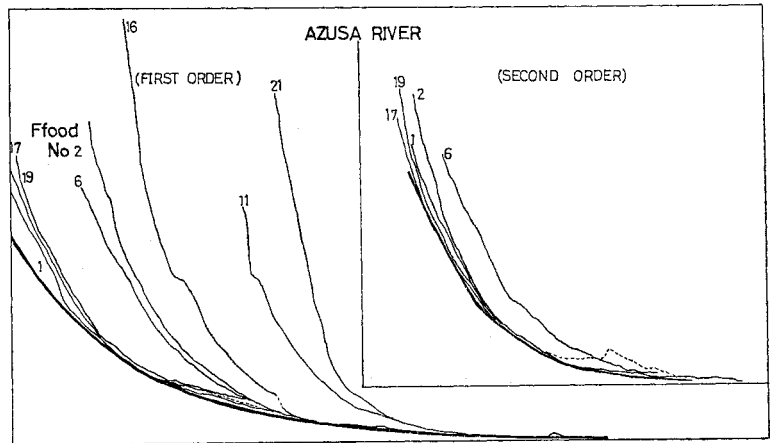
(1) 標準透減曲線の例

図-12 (a), (b) は解析に用いた神流川、梓川の流量透減部から得られる1次と2次の標準

透減曲線(太実線)を示している。これらを片対数紙上に描き直したものが図-13 (a), (b) であり、1次、2次とも透減率はほぼ一定値となっている。

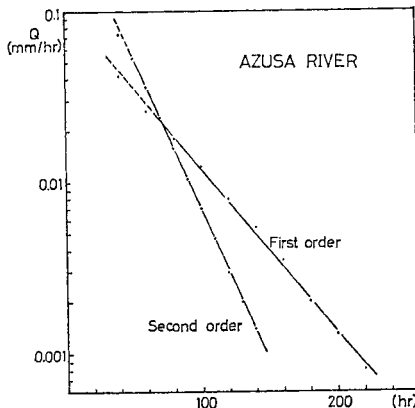


(a) 神流川

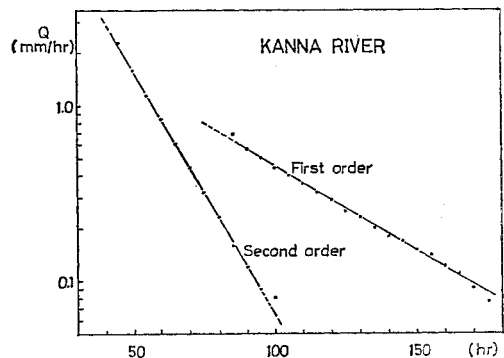


(b) 梓川

図-12 標準透減曲線



(a) 神流川



(b) 梓川

図-13

(2) モデルパラメーターの決定

a) 3段2列の線形タンク系

前節では3段多列のモデルが示されたが、実河川流域流出データの扱いでは必ずしも多列のモデルを設定し得ない場合もある。降雨が継続して比較的“まとまった”パターンを示し、途中で降雨の生じていない十分長い通減曲線をもつデータがこの2種の流域では豊富とはいえないようである。したがって、ここでは3段2列のモデル(図-14)として検討した。2列にとどめるのは確かに流出推定の精度や特性の把握に完全さを欠くが、本論文の目的とするモデルの本質を否定するものではないと考えられる。すなわち、パラメーターが試算によらず一義的に決定され、流域特性の理解を深め得ることの意味は保たれている。ただし、成分入力強度スペクトルなどを求めるには多数の列のタンク系を定める必要があるため、実際のデータの精度・個数などからして困難であるし、能率も悪い。したがって、ここではこのスペクトル

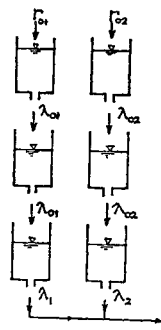
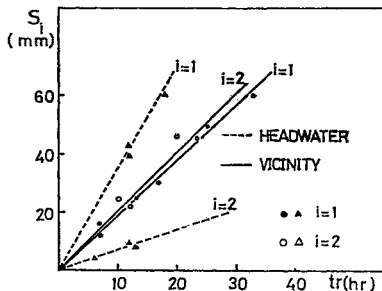


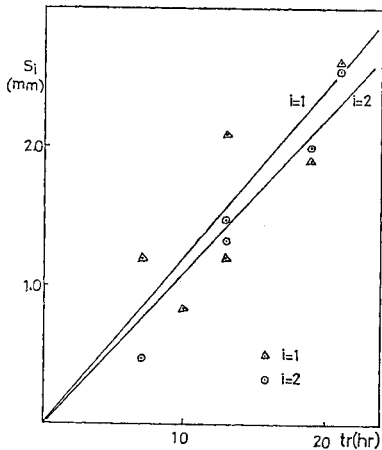
図-14 3段2列タンクモデル

を求めることを除外して考える。

図-15は図-8に対応して得られる各列タンクにおける総入力量 S_i と降雨継続時間 t_r との関係を表わしている。図-15(b)の梓川の場合ばらつきは大きいがほぼ一つの直線で近似できる。一方、神流川の場合は二つの直線に乗る傾向を示す。これは神流川流域の形状が本川流下方向に細長い形をしており、流域内における降雨の重心の位置に原因するものと考えられる。すなわち下流側に多く降雨のある洪水は第1列タンクでは上流側より r_0 は小さくなる。 r_0 は標準通減曲線への乗り合い点に大きく影響される。竹内ら⁹⁾もこの乗り合い点までの時間と降雨の位置との関係を調べ、この場合と同様の事実を見出している。しかしながら、第2列タンクではこの傾向は逆転している。その理由は次のように考えられる。いま、試みに降雨グループごとに r_{01} と r_{02} の和をとるとほぼ等しい。上流降雨のグループは流量観測地点まで遠く、遅れの大きい成分として観測され、第1列タンクの成分として示される量は相対的に大きい。地下浸透能が流域内でほぼ一様とすると、浸透量の残余としての第2列の成分は相対的に小さい。下流降雨グループのデータではちょうどこの逆の傾向をもつものと思われる。



(a) 神流川の場合



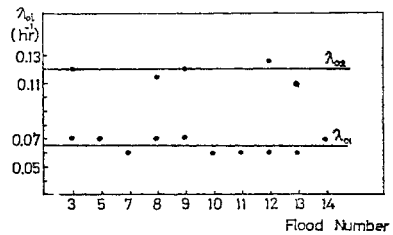
(b) 梓川の場合

図-15 S_i と t_r の関係

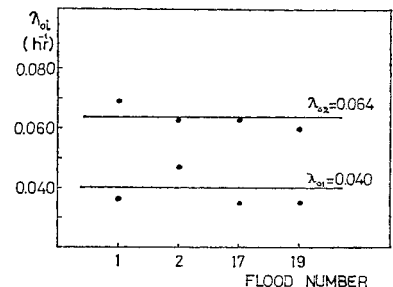
図-16は上で得られたパラメーター λ_i, r_{0i} を一定として、式(3)、(4)を各洪水通減部にあてはめ、そのbest fitとして求められた λ_{0i} の結果である。

b) 表面流出

この場合のパラメーターの同定には感度解析の手



(a) 神流川の場合



(b) 梓川の場合

図-16 λ_{0i} の結果

法^{10),11)}を適用した. 評価関数 J は, 残余の流出成分に対するモデル流出の適合度として次式により定義している.

$$J(P) = \int_{t_1}^{t_2} e^2 dt = \int_{t_1}^{t_2} \{Q_M(t) - Q_S(t)\}^2 dt$$

ここに, P は表面流出モデルにおけるパラメーターベクトルである.

(3) 結果と考察

a) モデルパラメーターについて

前節で定められたパラメーターの結果をまとめれば表-1 のようになる.

一般に流域の規模により遅れ時間が異なるために, 逓減率 λ の絶対値を用いての両流域での相互の比較はできない. 高木¹²⁾は本論文での逓減率とは異なるが, 低減特性 (K) を定義しその値が流域面積などにより一義的に定まらないことを示している. 逓減率, 特にその複数を同時に考慮して, 流域間相互の λ の関係を議論するのは今後の課題としたい. ここでは一つの流域内でのパラメーターの相対的な大きさが検討されるだけであるが, 表-1 によれば両流域で, $\lambda_{01} \approx \lambda_{02}$ が共通している. 2列の結果だけからは不十分ながらも, このことは図-5 によるモデルの解釈に具体的な示唆を与える可能性もあり興味ある点である.

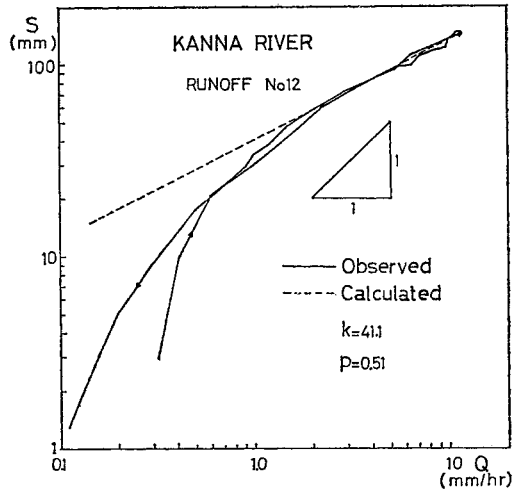
神流川の場合, 偏在した降雨によるデータを一括して使用するのは 図-15 (a) の結果からも適当でない. ここでは, 下流域におもに生じた降雨グループのデータについて表面流成分を解析した. 表-1 はその場合の最適パラメーターである. すなわち, 下流域に多い降雨の場合の表面流出特性値が示されている.

b) $S-Q$ 曲線

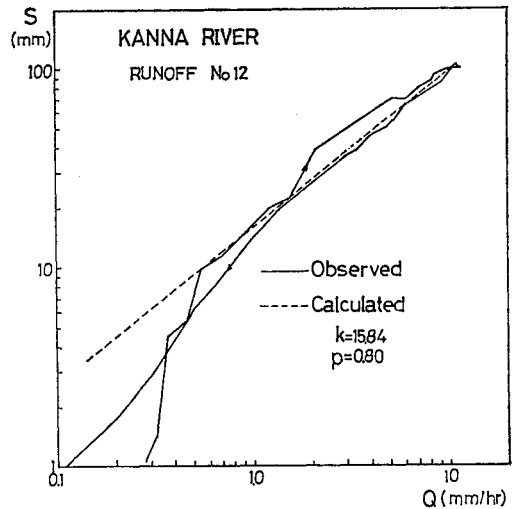
図-17 は神流川 No. 12 洪水データの場合の, (a) 成分分離を行わない場合, (b) 1列タンク系だけ分離した場合, (c) 2列タンクまで分離した場合の S_S-Q_S 曲線 (以後単に $S-Q$ 曲線とよぶ) と貯留関数法による計算最適パラメーターの結果を示している. (b) の場合は従来の経験的な流出成分の分離法に近いものである. 図-17 は (a)→(b)→(c) の順に $S-Q$ 関係の1価性の度合が向上し, その傾きは1に近づいて線形化される傾向に

表-1

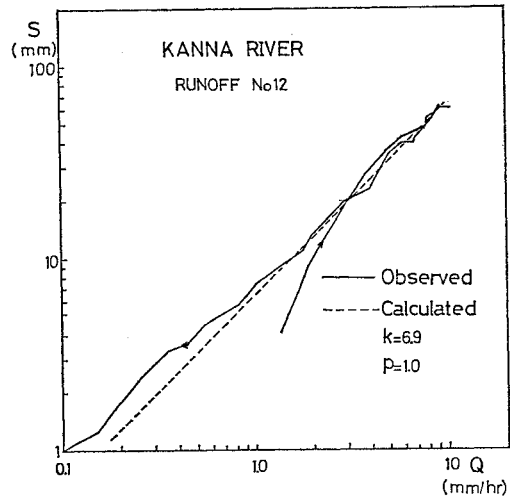
i	KANNA RIVER		AZUSA RIVER	
	1	2	1	2
λ_i (hr ⁻¹)	0.022	0.064	0.022	0.041
r_{0i} (mm/hr)	1.9	2.0	0.12	0.11
λ_{0i} (hr ⁻¹)	0.065	0.120	0.041	0.064
k	5~9		15~20	
p	ほぼ 1.0		ほぼ 1.0	



(a) 分離しない場合



(b) 1列まで分離した場合



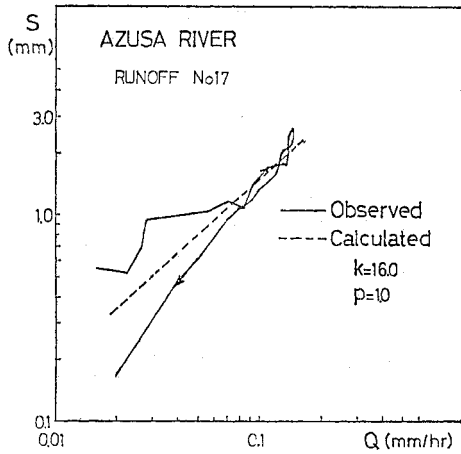
(c) 2列まで分離した場合

図-17 $S-Q$ 曲線 (神流川)

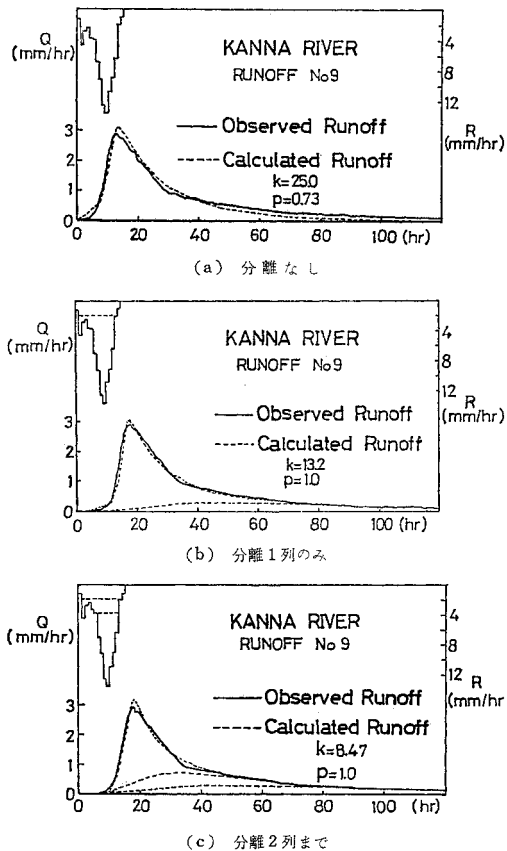
ある。

図一18 は同様に梓川の場合の結果である。

この結果は、より多数のタンク系によってさらに非線形性が弱まることを保証するものではないが、両流域の他のデータについても同様な傾向にあることから、少なくとも2列までの分離は残余の $S-Q$ 関係を線形化させ



図一18 $S-Q$ 曲線 (梓川)



図一19 神流川流出計算

ると考えてよい。

さらに、分離効果によって各洪水に対するパラメータ k, p の値の範囲は狭くなる傾向が認められた。

c) 流出計算

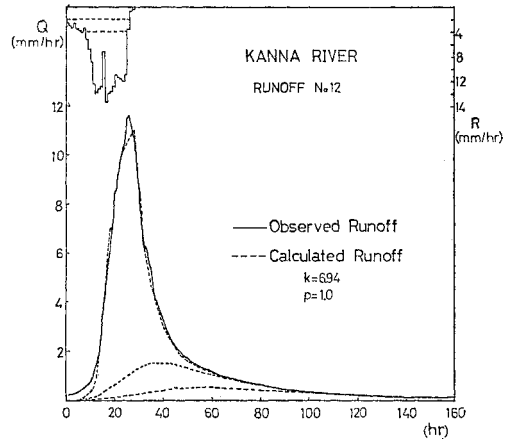
図一19~23 は二つの流域における洪水流出の計算と実測のハイドログラフを示したものである。

図一19 は、(a) 成分分離をしない場合、(b) 1列タンク系だけ分離した場合、(c) 2列まで分離した場合の結果であり、ここでも、(a)→(b)→(c) の順に計算精度の向上していることがわかる。(a)~(c) は洪水部分だけを対象とする通常広く適用されている貯留関数法によるものと若干異なっているが、分離の効果はよく表われている。

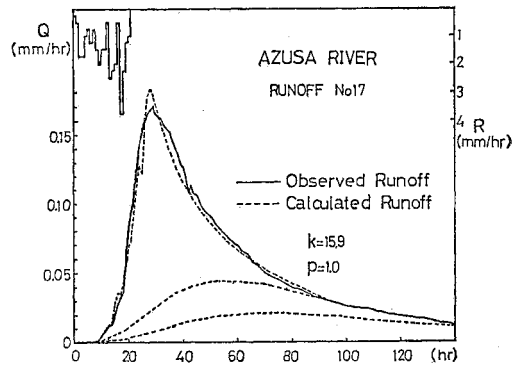
図一20, 21 はそれぞれ、神流川でのさらに大きな洪水の場合および梓川の場合の適用例である。

図一22, 23 は洪水部のパラメータ決定に用いられなかったデータについて、それぞれの流域で得られたパラメータの平均値 (\bar{k}, \bar{p}) により流出計算を行ったものである。

成分分離モデルによるこれらの結果は、部分的に実測値との不一致もみられるが、低水部・高水部を通じて全



図一20 神流川流出計算



図一21 梓川流出計算

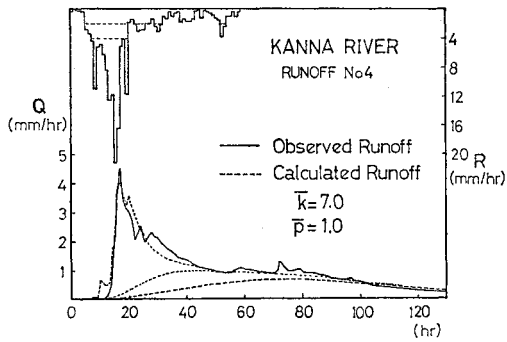


図-22 神流川流出計算

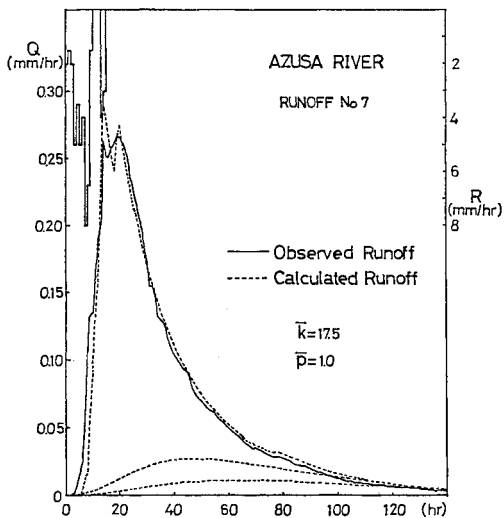


図-23 梓川流出計算

一般的に良好な一致を示している。

5. 結 論

本論文では流量逓減曲線から得られる情報を積極的に取り入れようとする流出モデルについて検討した。従来の、流量逓減部とタンクモデル、標準逓減曲線と各洪水曲線の乗り合い点の関係および逓減率スペクトル概念などを拡張しそれらを総合した形で流出成分分離モデルを提案し、中小2つの実河川流域に適用して考察を加えた。

本研究で得られた結果を要約すれば、以下のようである。

(1) 標準逓減曲線の逓減率は各流域で一定値をとり、新たに定義された高次の標準逓減曲線についてもその逓減率はほぼ一定となることが知れた。

(2) 地下水流出系に対応した線形タンク系のパラメーターは試算を経ることなく逓減特性から一義的に定め得る。

(3) 表面流出系に対応した非線形モデルのパラメーターの決定の自動化に用いられた感度解析の手法は有効であることが再確認された。

(4) 表面流出成分は従来の経験的な成分分離によるよりも $S \sim Q$ 関係の非線形性が扱いやすい形となり、解析はより容易なものとなる。

(5) 本モデルを面積などの特性の異なる二実河川流域に適用したところ、流出推定計算に両者ともほぼ満足すべき結果を示した。

(6) 成分入力強度スペクトルは流域特性の記述に大きな情報を与え得るものと考えられる。

線形タンク系のより多列なものが求めれば、モデルの精度とともに流域の特性もさらに明らかなものとなるだろうが、成分入力強度スペクトルなどを具体的に得るためには、適当な関数による展開などの別な手段も用いる必要があるとも考えている。

最後に、本研究を進めるにあたり貴重なご助言を賜りました防衛大学校 竹内俊雄 教授ならびに有益なご討議をいただきました東京工大土木工学科水工学研究室の皆様にご感謝の意を表わします。

参 考 文 献

- 1) Linsley, R.K. and Others: Applied Hydrology, McGraw-Hill, pp. 396, 1949.
- 2) Linsley, R.K. and Others: Hydrology for Engineers, McGraw-Hill, pp. 223, 1975.
- 3) 土木学会水理委員会: 水理公式集, 土木学会, pp. 128, 1971.
- 4) 高木不折: 低水流出の逓減特性に関する研究, 土木学会論文集, 第128号, 1966.
- 5) 菅原正己: 流出解析法, 共立出版, pp. 31, 1972.
- 6) 土木学会文献調査委員会: 低水流出解析法の紹介, 土木学会誌, 第52巻, 第4号, pp. 67-74, 1967.
- 7) 四俣正俊: 洪水流量逓減曲線の解釈, 土木学会論文報告集, 第245号, pp. 59-64, 1976.
- 8) 竹内俊雄: 水資源講座2・地表水, 土木学会誌, 第46巻, 第11号, pp. 51-57, 1961.
- 9) Egawa, T. and T. Takenouchi: Characteristics of the Shape of the Recession, Proc. of Tokyo Symposium, IAHS, pp. 58-61, 1975.
- 10) 吉川秀夫・砂田憲吾・鈴木 顕: 流量逓減部の特性を考慮した流出モデル, 第22回水理講演会論文集, pp. 175-180, 1978.
- 11) Vemuri, V. and Others: Sensitivity Analysis Method of System Identification and Its Potential in Hydrologic Research, Water Resources Research, Vol. 5, No. 2, pp. 341-349, 1969.
- 12) 高木不折・F.G. ローデ: 地下水流出の流域における特性変化と場所的スケール, 土木学会論文報告集, 第270号, pp. 99-108, 1978.
- 13) 建設省中部地建庄内川工事事務所: 庄内川流出試験地水文資料, 1975.
- 14) 土木研究所水文研究室編: 神流川流域水文観測資料, 土木研究所資料, No. 324, 1968.

(1978.4.18・受付)