

# 流出成分への降雨分離則および部分流出域と 流域貯留の関係について

## LAW OF NONLINEAR SEPARATION OF RAINFALL INTO COMPONENTS AND RELATION BETWEEN PARTIAL SOURCE AREA RATIO AND BASIN STORAGE

日野 幹雄\*・長谷部正彦\*\*

By Mikio HINO and Masahiko HASEBE

The purpose of this paper is, (1) to investigate the rule that divides the total rainfall into rainfall components of subsystem (groundwater, interflow and surface flow), (2) to discuss on the partial source area concept (which asserts that runoff water is produced mainly from certain portions of the watershed where the soil becomes saturated by through flow from upslope by the infiltrating water) and (3) to inquire into relationships among partial source area ratio and basin storage from time series of inversely estimated effective rainfall by the filter separation autoregressive (AR) method (the hydrologic inverse detection method proposed originally for daily and hourly runoff data analysis).

### 1. 序 論

降雨-流出現象の最も著しい特性は、その非線形性にある。従来は、こうした非線形性の原因は主として開水路方程式で運動が記述される表面流の非線形性によるものとみなされることが多かった。しかし、それよりもむしろ降雨の成分分離則の非線形性にあると考えてよいのではないかというのが、著者らの最近のフィルター分離AR法（俗称：逆探法）<sup>1)</sup>による水文学解析からの結論である。また、非線形性ということに表立っては言及していないけれども、最近の“山腹斜面水文学”（Kirkby, 1978）<sup>2)</sup>でも水文学における浸透現象と流出成分の重要性が指摘されている。

さて、著者らの方法では流量時系列から逆に降雨の各流出成分降雨時系列の推定ができ、それらを合計した推定有効降雨時系列と実際の有効降雨時系列（観測降雨時系列に実測の降雨および流量から求まる流出率  $f$  を掛けたもの）とはよい一致を示すことが認められた。したがって、推定した有効降雨の各成分時系列は信頼し得るものと考えてよいであろう。本論文は、フィルター分離

AR法により求められたこの推定有効成分降雨時系列を用いて、(a) 有効降雨の成分分離則を求め、(b) 時間とともに変化する流出寄与域（部分流出域, partial source area）の概念を検討し裏付けをすることを目的とする。

なお、降雨の表面・中間流出と地下水流出の比率については、地球化学分析的な水文観測の結果が二、三あるが、一雨洪水中の平均推定比率であり、細かな点はまだ不明である（たとえば、G.F. Pinder<sup>3)</sup>, 中村<sup>4)</sup>）。また、著者ら（日野・長谷部, 1982）<sup>5)</sup>は、カナダの河川で行われた地球化学的水文資料の解析にフィルター分離AR法（逆探法）<sup>6)</sup>の方法を併用し、成分分離則および化学成分溶出則について論じた。

### 2. 成分分離則に関する理論的推論

実際の水文資料に基づく解析に先立って、その結果が単なる経験式にとどまらぬよう、あらかじめ理論的推論を試みる。

#### (1) 有効降雨・流出率

よく知られているように降雨は初期損失、樹冠遮断、蒸発散等の損失降雨と有効降雨に分けられる。全降雨 ( $R$ ) に対する有効降雨 ( $Q$ ) の比率、流出率 ( $f = Q/R$ ) を知ることが、まず必要であるが、これについて著者ら<sup>2)</sup>

\* 正会員 工博 東京工業大学教授 土木工学科

\*\* 正会員 工博 宇都宮大学助教授 土木工学科  
(〒321 宇都宮市石井町 2753)

は実測水文資料の解析と浸透能理論から次の式を提案した。

$$f = 1 - \frac{A}{\bar{r}_p} \exp(-B \cdot q_A) \dots \dots \dots (1)$$

ここに、 $q_A$ ：初期洪水流量， $\bar{r}_p$ ：平均降雨強度， $A$ ， $B$ ：定数。

有効降雨はさらに地層内で、表面・中間および地下水の各流出成分への入力降雨に分けられる（表一）。

表一 降雨の分離

降雨	有効降雨	表面流出降雨
		中間流出降雨
	損失降雨	地下水流出降雨

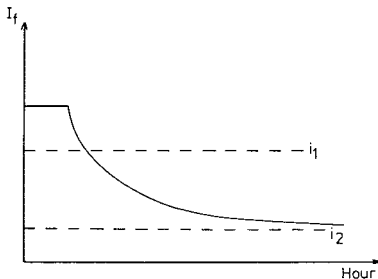
多くの場合、表面流出は中間流出と一緒にして表面・中間流出成分として取り扱ってよく、本論文では地下水流出成分降雨および表面・中間流出成分降雨と全有効降雨との関係を論じることとする。

(2) 浸透能変化と成分分離則

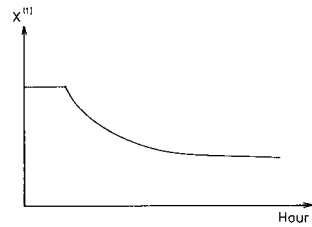
さて、浸透過程に関する最近の研究から土壌の浸透能  $I_t$  は図一に模式的に示すように、降雨の始めて高く時間とともに急速に減少し、やがて多くの場合数十分で飽和状態—最終浸透能—に達する<sup>2)</sup>。したがって、降雨強度が降雨地点の浸透曲線を下回ればその全部が、浸透成分になり、浸透曲線を上回れば、その部分が一応降雨余剰となり表面流出に（ただし、斜面上を流下するにつれて不飽和土壌中への再浸透はあり得る）、残りは浸透成分となる。

簡単のために一定降雨強度の場合を考えると、これが（最終）浸透能を上回るか（図一2(a)）、下回るか（図一2(b)）により降雨初期には異なるもののやがて一定値に落ち着くであろう。

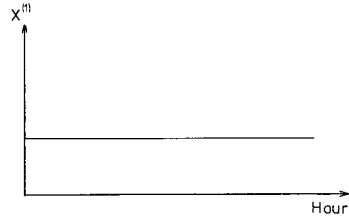
地下への浸透成分はそのまま全部が地下水流出となるのではなく、一部は地下水帯貯留として蒸発散、深部地



図一 浸透能の時間的変化の模式図

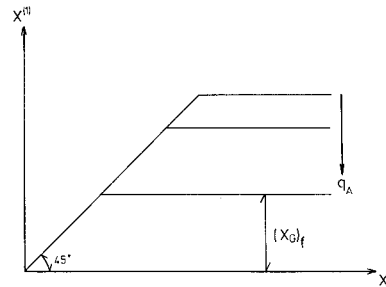


(a)



(b)

図一2 浸透量の時間的変化の模式図



図一3 降雨強度と地下水成分降雨

下水流、他流域への流出等の損失降雨となる。いずれにしても、これらの損失降雨成分は降雨の初期に多く補給されその後は、ほぼ一定の比率で有効地下水成分 ( $Q_c$ ) といゆる損失降雨 ( $L$ ) とに分離されるであろう。このことは先の流出率の論文<sup>7)</sup>で検討したように、浸透速度 ( $(Q_c + L)/T_e$  および  $Q_c/T_e$ 、 $T_e$ ：降雨継続期間) が土壌湿潤度だけに依存し一定速度になることから例証される。また、降雨後数十分で最終浸透能に達することからも、時間単位でみた場合降雨の地下水浸透能は、概略一定と考えられる。したがって、降雨強度と地下水成分降雨の関係は図一3に示すような関係になることが予想される。そして、飽和一定値  $(x_c)_f$  は、土壌の湿潤度に影響され、流出率の論文で検討したように、洪水の始まる前の初期流量  $q_A$  の関数となるであろう。なお、これらの具体例については後に示す。

3. 実データによる成分分離則の検討

(1) 成分分離法

われわれの手にある資料のうちで、最も完備した水

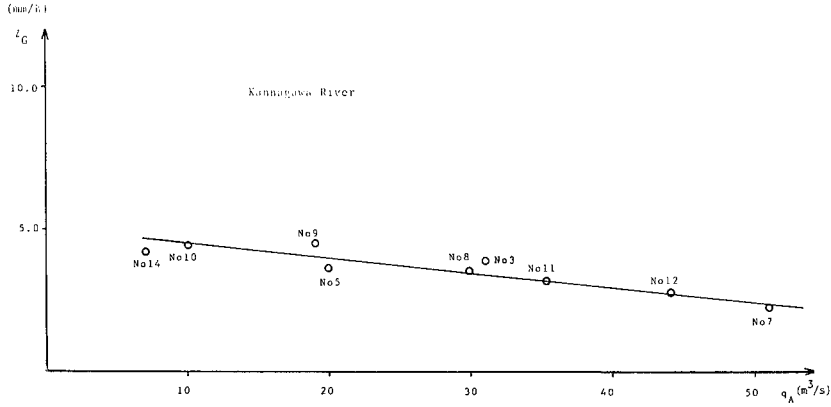


図-4 初期流量と浸透速度

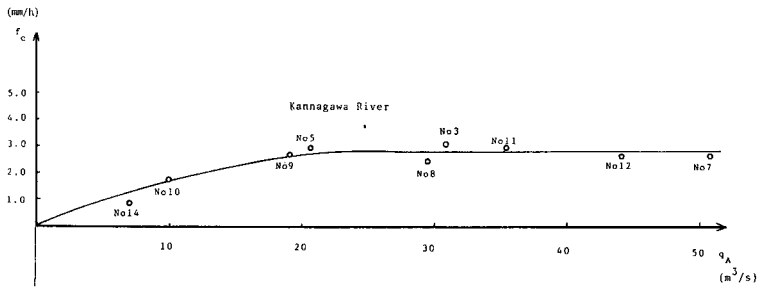


図-5 初期流量と損失降雨速度

文資料である神流川水文資料<sup>8)</sup>(建設省・土木研究所, 1968)の洪水資料についてまず検討する。この水文資料の時間の単位は時間(h)である。

実測流量からの降雨の成分時系列の推定は、先の論文<sup>1),6)</sup>で述べた逆探法(もしくは、フィルター分離AR法)により行う。すなわち、実測流量時系列を後方作用数値フィルターにより長周期時系列と短周期時系列とに分離し、各時系列の逓減部にARモデルを適用してAR係数(いまの場合必要ないがそれを変換した応答関数)を決定する。このAR係数に成分流量時系列を通して、逆に各流出成分への有効降雨時系列 $\hat{x}^{(1)}$ (= $\hat{x}_c$ :地下水成分有効降雨)および $\hat{x}^{(2)}$ (= $\hat{x}_s$ :表面・中間流成分有効降雨)を次式で求める。

$$\hat{x}_i^{(1)} = (y_i^{(1)} - a_1 y_{i-1}^{(1)} - a_2 y_{i-2}^{(1)} - \dots - a_n y_{i-n}^{(1)}) / b^{(1)} \dots (2)$$

$$b^{(1)} = A[1 - a_1 - a_2 - \dots - a_n] / 3.6$$

ここに、 $\hat{x}$ は逆推定降雨を表わし、 $l$ は1(地下水流出)または2(表面・中間流出)、 $b$ は単位換算係数。また、逆推定降雨 $\hat{x}_i^{(1)}$ は現時点 $t = i\Delta t$ よりある遅れ時間だけ前の降雨である<sup>1),6)</sup>。これは貯留関数法の場合と同様である。この2つの時系列の和( $\hat{x} = \hat{x}^{(1)} + \hat{x}^{(2)}$ )が有効降雨時系列である。なお、式(2)で計算される地下水降雨時系列は、地下水帯への入力( $\hat{x}_c^{(1)}$ )であるが(文献1),6)を参照されたし)、この論文中には、入力 $\hat{x}_c^{(1)}$ を

元の観測降雨の継続時間に戻した降雨を $\hat{x}_c^{(1)}$ としている。

(2) 分離総流量による分離則の検討

さて、フィルター分離AR法により、洪水ハイドログラフを地下水流出成分( $y_c$ )と表面・中間流出成分( $y_s$ )に流出分離し、それぞれの総流量を $Q_c$ 、 $Q_s$ とすると、総損失降雨量( $L$ )は次式で求まる。

$$L = R - Q = R - Q_s - Q_c \dots \dots \dots (3)$$

ただし、

$$\left. \begin{aligned} Q_c &= \int_0^t y_c dt \\ Q_s &= \int_0^t y_s dt \\ Q &= Q_c + Q_s \end{aligned} \right\} \dots \dots \dots (3 \cdot a)$$

である。 $R$ :総降水量、 $Q$ :総流出量、 $Q_c$ :総地下水量、 $Q_s$ :総表面・中間流出量。

先の論文<sup>7)</sup>のように有効降雨継続時間( $T_e$ )を考えると有効地下水流出となる分の浸透速度( $Q_c/T_e$ )と損失速度( $L/T_e$ )の和は次式で表わされる。

$$l_c = \frac{R - Q_s}{T_e} = \frac{Q_c + L}{T_e} \dots \dots \dots (4)$$

$l_c$ と初期流量( $q_A$ )との関係を神流川の洪水について計算した結果を図-4に示す<sup>註1)</sup>。

注1) 流出率の論文<sup>7)</sup>の解析例に、さらに神流川洪水No.3の解析例を増やした。

損失速度 ( $L/T_e$ ) と初期流量 ( $q_A$ ) の関係は、先の流出率の論文<sup>2)</sup>に示してある。

式(4)から  $L/T_e$  を差し引くことにより、すなわち、有効地下水流出となる成分降雨(速度)と損失降雨成分(速度)とに分離して有効地下水の浸透速度 ( $f_c$ ) が求められる。図-5は、有効地下水流出となる成分降雨速度  $f_c (=Q_c/T_e)$  と初期流量  $q_A$  の関係を示す。この図から、初期流量  $q_A$  が増加するにつれて  $f_c$  が大きくなり、やがて有効地下水の浸透速度が一定値になる。また、図-6は、有効降雨継続時間 ( $T_e$ ) になるまでの初期継続時間 ( $t_L$ ) で初期損失量 ( $R_L$ ) を割った初期損失速度と初期流量  $q_A$  の関係を示す。これらの図によれば、初期流量  $q_A$  が増加するにつれて初期損失速度 ( $R_L/t_L$ ) が減少しやがて初期損失強度がほとんど一定になることが示されている。このことは降雨の降り始めに大部分の初期損失が存在することにも対応していると考えられる。

一方、有効地下水の浸透速度は、 $q_A$  が大きくなるにつれて増加し、やがて一定の浸透速度になっている。有効地下水への浸透速度のこのような挙動により降雨の非

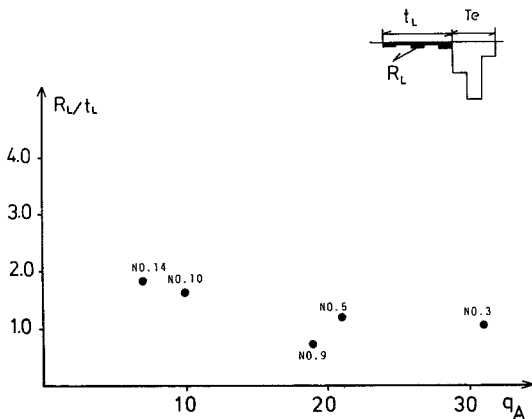


図-6 初期流量と初期損失強度

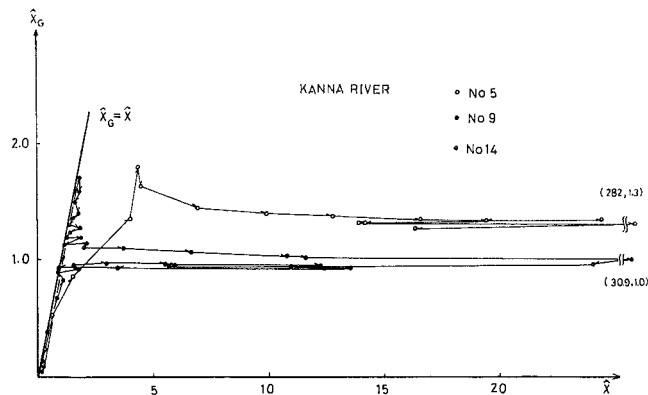


図-7  $\hat{x}$  と  $\hat{x}_c$  の関係

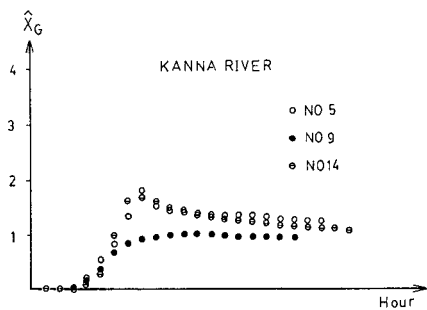


図-8  $\hat{x}_c$  の時間的变化

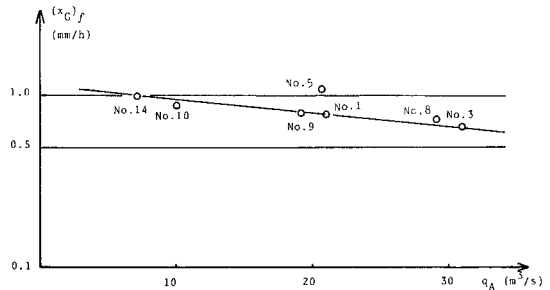


図-9 初期流量  $q_A$  と  $(x_c)_f$  の関係

線形分離則が説明できる。

(3) 逆推定降雨による分離則の検討

降雨強度 ( $\hat{x}$ ) と有効地下水流出(となる)成分降雨強度 ( $\hat{x}^{(1)} = \hat{x}_c$ ) の関係を図-7に示す。この図は、最終浸透能は一洪水について一定の浸透能になっていることを示している。また、 $\hat{x}_c$  の時間的变化を図-8に示す。この図から、降雨の地下水への浸透量は、降雨の降り始めで高く、その後時間がたつにつれて減少し、やがて一定な浸透量に落ち着くことがわかる。なお、図-7, 8の降雨初期の立ち上り部は、すでに述べたように浸透能が小さいのではなく、降雨の大部分が損失降雨となることを意味している。

以上、図-7, 8より最終浸透能あるいは最終浸透量(飽和一定値)は、一洪水については一定値であるが各洪水ごとに異なることがわかる。この理由としては、次のように考えている。最終浸透能は、流域の年変化と季節的变化により変化すると考えられる。つまり年変化をする理由としては、土地利用の変化、一年生植物の特性が変化し、多年生植物の生育段階の進化等、季節的变化としては、土壌特性(組成、構造深さ、初期水分量、粘土の鉱物的性質)や植生の被覆条件、植生根群の腐植などによる土壌構造の変化によるものと考えられる。そこで、流出率の場合と同じように土壌の湿度度を表わす洪水直前の初期流量  $q_A$  と飽和

一定値 ( $x_0$ )<sub>f</sub> の関係を図-9 に示す. この図から, 最終浸透量 (能) は, 洪水直前の初期流量と強い相関があることがわかる.

4. 伸長効果と初期流量

地下水流成分降雨は先の論文で述べたように土壌への浸透過程で時間的に引き伸ばされ, その後地下水流出系の入力となる. そこで, 地下水降雨の伸長率 (観測降雨の継続時間と地下水帯への入力となる降雨の継続時間の比) と初期流量の関係を実データにより調べる (図-10). なお, 地下水帯への入力となる降雨  $\hat{x}_i$  は, 流出分離した地下水流量時系列の通減部から AR 係数を求めて, この AR 係数から式 (2) で  $\hat{x}_i$  を計算する. この  $\hat{x}_i$  の総降雨量は等しくし, 継続時間を観測降雨の継続時間にあわせて圧縮して降雨強度を増加して  $\hat{x}_i$  を求める. この結果, 伸張率は, 神流川の例では 2 または 3 倍であるが, No. 3 を除いては, 初期流量が  $q_A \approx 20 \text{ m}^3/\text{s}$  を境にして分かれている. つまり,  $q_A$  が小さいときには浸透速度が小さいので伸長率が 3 倍になり,  $q_A$  が大きくなると浸透速度がほぼ一定となり伸長率が 2 倍になっている. なお, 伸長率は計算の都合上整数値の 2 または 3 倍になっているが, 実際の流出系では,  $q_A$  とは連続的に滑らかな関数になっているであろう.

5. フィルター分離 AR 法による流出解析からのパーシャル・ソース・エアリア概念の裏付け

次に, 表面・中間流出に寄与する有効降雨から, partial source area concept を検討していく.

今までは, フィルター分離 AR 法から, 逆推定された地下水分に寄与する有効降雨により, 降雨-流出系の非線形の原因である降雨の非線形分離則を検討し, 土壤湿潤度の示標である洪水初期流量  $q_A$  とうまく関連づけられた. この章では, 表面・中間流出分に寄与する有効降雨 ( $\hat{x}_s$ ) からパーシャル・ソース・エアリア概念を検討してみる. まず, 地下水降雨の場合と同じように,  $\hat{x}_s$  と  $t$  の関係を整理した (図-11). しかし, これらの間には何らの関係も見出さなかった. そこで, 次のよう

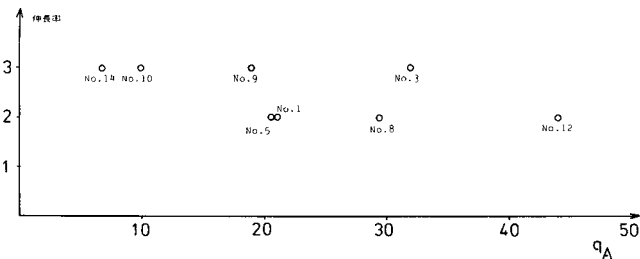


図-10 初期流量と伸長率

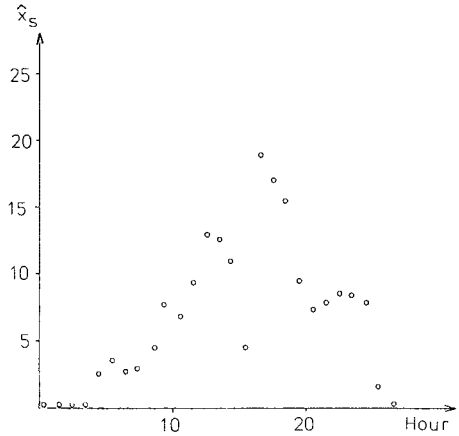


図-11  $\hat{x}_s$  と  $t$  の関係

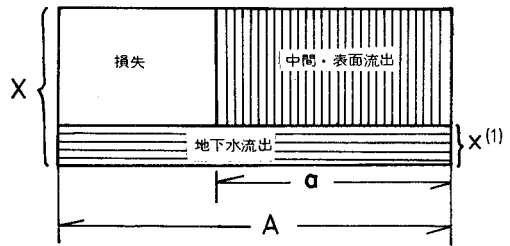


図-12 P. S. A. 概念の模式図

に考えてみた.

(1) パーシャル・ソース・エアリア概念による表面・中間流出降雨の検討

観測降雨 ( $X_i$ ) から地下水有効降雨 ( $\hat{x}_i^{(1)}$ ) を差し引いた降雨が ( $X_i - \hat{x}_i^{(1)}$ ) がどうなるかを考える. この地下水浸透となり得ない降雨が, 流域の全体でなくその一部の流出寄与面積 ( $a$ ) から発生する (図-12) とすれば, 中間・地表流分として単位時間内に流出する容量 ( $V_s$ ) は, 次式で求まる.

$$V_s = a \cdot (X_i - \hat{x}_i^{(1)}) \dots \dots \dots (5)$$

残りの ( $X_i - \hat{x}_i^{(1)}) \times (A - a)$  の容量は, 蒸発散, 樹冠遮断等の損失量と考えられる.

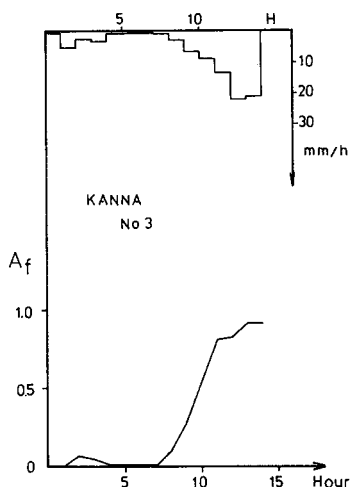
逆探法により推定された中間・表面流成分の降雨 ( $\hat{x}_i^{(2)}$ ) は, 流域面積 ( $A$ ) 全体を通して流出してきたものと考えたので, この中間・表面流分の容量は,

$$V_s = A \cdot \hat{x}_i^{(2)} \dots \dots \dots (6)$$

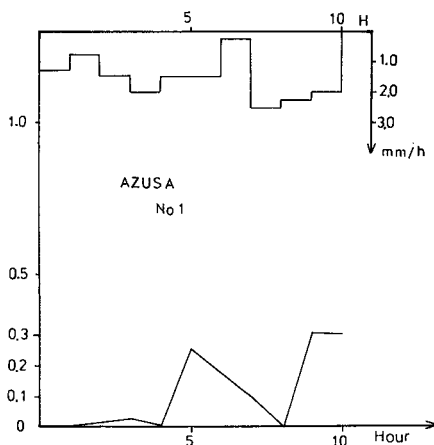
となる.

式 (5) と式 (6) とにより部分流出域 (流出寄与率・partial source area ratio) は, 次式で与えられる.

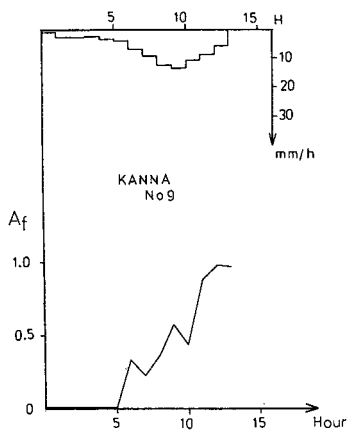
$$A_f(i) = \frac{a}{A} = \frac{\hat{x}_i^{(2)}}{(X_i - \hat{x}_i^{(1)})} \dots \dots \dots (7)$$



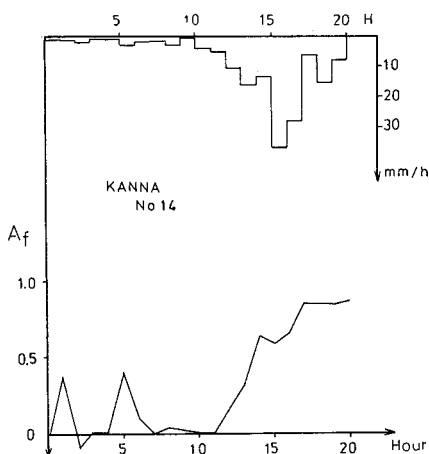
図一三 流出寄与率の時間



図一六 流出寄与率の時間的变化



図一四 流出寄与率の時間的变化



図一五 流出寄与率の時間的变化

ここに、 $A_f$ ：流出寄与率、 $\hat{x}^{(1)}$ ：地下水有効降雨、 $\hat{x}^{(2)}$ ：中間・表面流有効降雨、 $X$ ：観測降雨、 $A$ ：流域面積、 $a$ ：部分流出域の面積。ここでの部分流出域は、流域の土壌構造、植性等を考えて求めたのではなく中間・表面に寄与する降雨の容量よりマクロにみた部分流出域を求めた。

(2) 結果

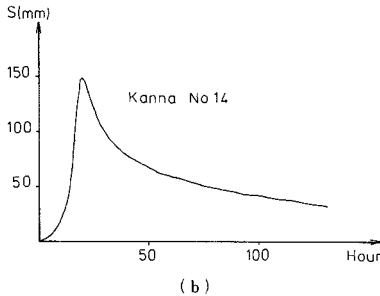
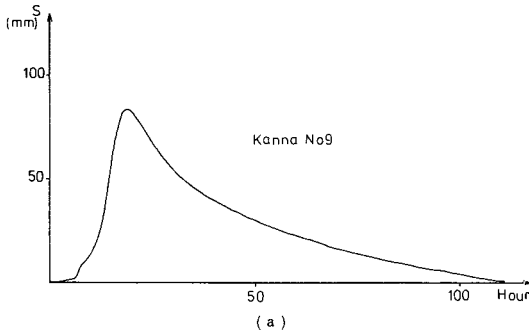
神流川 ( $A=373.6 \text{ km}^2$ ) (No. 3, No. 9, No. 14) と梓川 ( $A=0.396 \text{ km}^2$ ) の水文資料をフィルター分離 AR 法により解析し、地下水流出降雨、表面・中間流降雨を求めた。式 (7) により流出寄与率を求め、図一13~15 に神流川の結果を示す。この結果、神流川の水文資料の例では、流出寄与率 ( $A_f$ ) は、最終的にはほぼ 90% までに達している。この値は、パーシャル・ソース・エアリアとしては大きいように思われる。この流出分離した表面・中間流出成分は、狭い意味での表面流ではなく、中間流(側方流)をも含むためと考えられる。ゆえに、斜面表面上を流出する表面流のみを考えると流出寄与率は、小さくなるであろう。洪水 No. 14 では、降雨初期には、 $A_f$  のばらつきが大きい。この理由は、観測降雨の初期の損失降雨のばらつきが大きいためであろう。

次に、流域の小さい梓川流域の流出寄与率の結果を図一16 に示す。この結果、流出寄与率は約 30% に達している。また、梓川の例では、降雨が二山になっており、そのために  $A_f$  も降雨のやんだときに一度零になると考えられる。

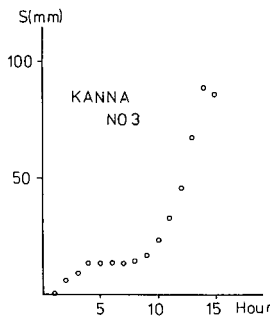
6. P. S. A. と流域貯留量の関係

ここでは、貯留量を介して、実水文資料(神流川)から貯留量と P. S. A. の関係を検討する。

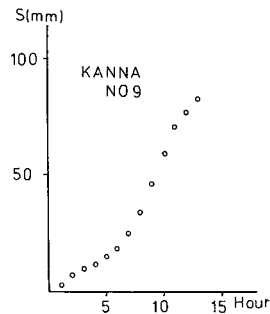
P. S. A. の増加は、流域内の貯留量  $S$  の増加に関連していることは、その物理機構を考えるとただちに予想



図一七 貯留量の時間的变化



図一八 貯留量の増加部分の時間的变化

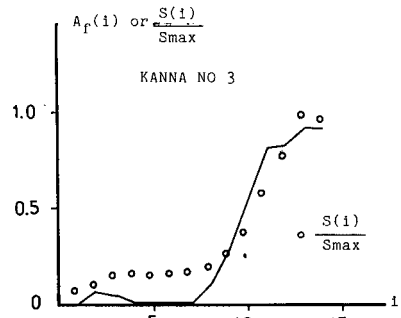


図一九 貯留量の増加部分の時間的变化

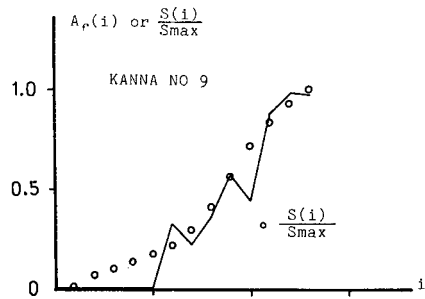
される。そこで、 $S$  を次式で求めた (図一七)。

$$S(i) = \sum_{t=1}^i (X_t - y_t) \dots \dots \dots (8)$$

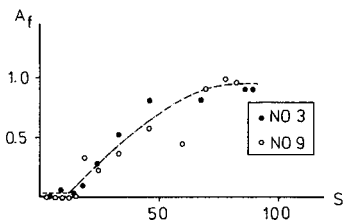
ここに、 $S$  : 貯留量,  $X$  : 観測降雨,  $y$  : 流出量



図一20  $S/S_{max}$  と  $A_r(i)$  の関係



図一21  $S/S_{max}$  と  $A_r(i)$  の関係



図一22 貯留量 ( $S$ ) と  $A_r(i)$  の関係

次に、P.S.A. 率 (partial source area ratio) と関係のあると思われる流域の貯留量 ( $S$ ) の増加部分を神流川の洪水 No. 3, 洪水 No. 9 の例で、図一18, 19 に示す。

また、P.S.A. の部分流出寄与率 ( $A_r$ ) および貯留量/最大貯留量 ( $S/S_{max}$ ) と降雨継続時間 ( $i$ ) の関係を図一20, 21 に示す。なお、図中の  $A_r(i)$ ,  $S(i)$  は、式 (7), (8) で時間ステップ  $i$  の関数にしているの、横軸は時間ステップ  $i$  を用いている。

この結果、 $i$  が小さいときには  $x_i(i)$  の分があるので合わないが、 $i$  が大きくなると両者が一致している。

最後に、 $A_r(i)$  と  $S(i)$  との関係を図一22 に示す。この図から  $A_r(i)$  と  $S(i)$  との間に図一22 に示した点線のような関係にあることが示された。

以上のように、神流川の例では、部分流出域と貯留量の間には、図一20, 21, 22 に示すような関係があるこ

とがわかった。

## 7. 結 論

降雨の流出成分の分離則と部分流出域と流域貯留との関係を検討した主な結果を述べる。

(1) 有効地下水流となる成分降雨の浸透速度は、降雨強度が大きくなるにつれて増加し、やがて一定の浸透速度になっている。このような挙動から降雨の非線形分離則が説明できる。

(2) 最終浸透量は、初期流量と強い相関がある。

(3) 神流川の例では、P.S.A. 率は、ほぼ90%までに達している。この値は、大きいように思われるが、この流出分離した中間・表面流成分は狭い意味での表面流ではなく、中間流(側方流)をも含むためと考えられる。

(4) 部分流出域(率)  $A_r(i)$  と  $S(i)/S_{\max}$  との関係では、降雨継続時間  $(i)$  が大きくなると両者が一致し、また、 $A_r(i)$  は、貯留量  $S(i)$  の増加とともに増加し、その間には図—22のような関係があることが示された。

## 参 考 文 献

- 1) 日野幹雄・長谷部正彦：流量時系列のみによる降雨時系列，流域の流出特性および流出分離の推定について，第23回水理講演会論文集，1979-2.
- 2) Kirkby, M.J. (Editor) : Hillslope Hydrology, John Wiley & Sons, Inc., 1978 (日野ほか訳：新しい水文学，朝倉書店，1983.
- 3) Pinder, G.F. and Jones, J.F. : Determination of the groundwater components of peak discharge from the chemistry of total runoff, W. R. R., Vol. 5, No. 2, April, 1969.
- 4) Nakamura, R. : Runoff analysis by electrical conductance of water, Journal of Hydrology, Vol. 14, 1971.
- 5) 日野幹雄・長谷部正彦：地球化学的手法と逆探法を併用した流出系の成分溶出法則の推定について，土木学会論文報告集，第319号，1982-3.
- 6) 日野幹雄・長谷部正彦：フィルター分離AR法による非線形流出系の同定と予測，土木学会論文報告集，第324号，1982-8.
- 7) 日野幹雄・長谷部正彦：流出率と湿潤指標としての洪水直前流量，土木学会論文報告集，第328号，1982-12.
- 8) 建設省土木研究所：神流川水文資料，1968.
- 9) 岩井重久・石黒政儀：応用水文統計学，森北出版，1970.
- 10) C.O. ウィスラー & E.F. プレーター：水文学入門(五十嵐正次訳)，彰国社刊。

(1983. 11. 7・受付)

1) 日野幹雄・長谷部正彦：流量時系列のみによる降雨時系