

流出率と湿润指標としての洪水直前流量

## RELATION BETWEEN RUNOFF RATIO AND ANTECEDENT DISCHARGE AS AN INDEX OF THE HUMIDITY OF A BASIN

日野幹雄\*・長谷部正彦\*\*  
By Mikio HINO and Masahiko HASEBE

## 1. はじめに

水文学における基本的な問題であり、しかも現在なおかつ未解決の問題（というよりは取り上げられることの少ない問題）に流出率（または損失率）がある。それゆえ、現在、水理委員会水文学小委員会は活動テーマの第一に“流出率”を取り上げている。なお、この問題の研究現況については文献 1) の序論に述べたので省略する。

最近、著者ら（日野・フン）は、日降雨強度がほぼ一定の区間（時間にして数日～2週間程度）で降雨・流出・貯留の間にはほぼ平衡状態が成立しているとみなされる期間の平均の全損失（蒸発散、他流域への流出、河川流量として観測にかからない流出等）強度  $\bar{L}$  と平均日降雨強度  $\bar{R}$  の関係を実測資料により調べ、次の点を明らかにした。

- $\bar{L}$  は  $\bar{R}$  の関数である注1). したがって、平均流出強度  $\bar{Q}$  は  $\bar{R}$  の関数である。
  - しかし、 $\bar{L}$  と  $\bar{R}$  は必ずしも比例関係ではなく、(1)  $-e^{-at}$ ) 型の関数の一部分に対応する。
  - $\bar{L}$  と  $\bar{R}$  の関係は流域によっては季節により異なる。これは、損失率、流出率が植生や土壤潤滑度により影響されることを示している。・

\* 正会員 工博 東京工業大学教授

\*\* 正会員 丁博 東京工業大学助手

$$\text{注 1) } \bar{L} = \frac{d}{dt} \left[ \int_0^t \{R(\tau) - Q(\tau)\} d\tau \right]$$

$\bar{L}$  は上式で定義している。これは、日単位の降雨量  $R(t)$  と流量  $Q(t)$  を用いて、 $R(t) - Q(t)$  の差の累積値を時間に対してプロットし、上記の曲線が長期間にわたってほぼ直線になる部分の勾配を平均全損失強度  $\bar{L}$  とし、この期間の降雨強度を  $\bar{R}$  としている。また、神流川の例では、次のようである。

$$\bar{L} = 0.6 \bar{R} \text{ (春雨期)}$$

$$\bar{L} = 0.5 \bar{R} \text{ (梅雨期)}$$

$\bar{L}=0.3\bar{R}$  (台風期)

## 2. 流出率に影響する因子

ある流域の河川流出量  $Q$  (これを大まかに 2 成分に分ける。 $Q = Q_S + Q_G$ ,  $Q_S$ : 表面流出成分,  $Q_G$ : 地下流出成分) に影響する因子としては、降雨量  $R$ , 降雨強度  $r$ , 土の潤滑度  $m$ , 蒸発散量  $e$ , 気温  $T$ , 植生  $C$  などが挙げられる。したがって

と書ける。それゆえ、流出率  $f = Q/R$  もまた、

である

一方、表面流出とは地中に浸透し得なかった部分、要するに地下貯留槽に入り切らなかつた余った部分が流出するわけであるから、問題はどれだけ地中に浸透し得るか、したがつて、地層の空隙など他の条件が同じならばどれだけ流域の土壤の状態が湿潤であるかが問題である。なお、浸透強度は浸透の初期を除いて降雨強度にはほとんど無関係で、ほぼ一定値となることが知られている。

### 3. 濡潤度指標としての洪水直前河川流量

さて、流域上流の湿潤度を土中水分計などによらずに簡単に代表する量があるかどうか問題であるが、洪水直前の河川流量  $q_A$  を土壤潤度を代表する因子と考えることができるである<sup>2)~5)</sup>

渴水状態が永く続き地層の湿潤度が低下すれば、河川流量のうち表面流出成分はほとんどなくなり、地下水流出成分も減少するであろう。また、長雨の場合には地下水位は上昇し、土壤は湿潤化し、その結果地下水流出・表面流出とも増加するであろう。

また、降雨強度としては単純な平均降雨強度ではなく、降り始めや降り終りの弱い降雨潮を除いた強い降雨

の統いている時間の平均降雨ピーク強度  $\bar{r}_p$ <sup>注2)</sup> を取ることにする。したがって、流出率  $f$  は次のように書かれる。

ところで、全降雨量  $R$  はまず一次地下貯留  $S_G$ （その中には後に蒸発散となる量も含まれる）と流出量  $Q$  の和である。そして、 $S_G$  は  $q_A$  の関数と考えられる。

$$R = S_G + Q$$

$$= f_n(q_A) + Q$$

したがって、流出率  $f$  よりはむしろ損失量  $L (= R - Q = S_G)$  に関して

$$L=R-Q$$

と表わし得るから、洪水直前河川流量  $q_A$  が土壤潤度を代表するかどうかを見るには  $L$  vs  $q_A$  の関係で表わす方がよいであろう。

こういう予想のもとに洪水の時間単位の降雨-流出記録から、流出率  $f$ ,  $q_A$ ,  $\bar{r}_p$  等の関係を検討した。比較のために従来の方法やその他考えられる次の整理法によっても整理した。

- $f$  と  $q_A$
  - $f$  と  $\bar{r}_p$  (有効ピーク降雨強度)
  - $f$  と  $R$
  - $L$  と  $q_A$

#### 4. 実流域での結果

解析の対象としたのは、次の3流域である。

⑧ 神流川の洪水データ（流域面積  $A = 373.6 \text{ km}^2$ ）（土研、竹内）．この流域のデータは比較的信頼度の高いデータとされ、また他の研究者によても種々流出解析されている。この流域の流域形状は、細長い。地質的には、古生層であり、急勾配であるために土壤の厚さは比較的薄い。そして流域全体は適度に森林に覆われている。

⑥ 山梨県梓川のデータ ( $A=0.396 \text{ km}^2$ )  
 (山梨大, 荻原). この流域のデータは, 小流域で奇妙な流出の仕方 (小流域で流出率が極端に小さく, また小流域にもかかわらず降雨から流出までの遅れ時間は数時間ないし 10 時間) をする. 流域形状は, 卵形で, 地質的には, 下層に古い花崗岩質で上層はそれより新しい輝石

注 2) 一つのハイエトグラフの中で降雨の降り始めと降り終りの降雨で  $0.2 \text{ mm/h}$  以下の降雨量を無視し、これ以上の降雨の期間継続時間 ( $T_e$ )、総降雨量 ( $R$ ) とすると  $\bar{r}_p$  は  $R/T_e$  である。

安山岩で構成されている。

④ 相模川のデータ ( $A=1\,201.3 \text{ km}^2$ ) (神奈川県, 企業局). 大流域で流出率が安定しているが, 火山性の浸透度の高い地層をもつ. この流域は, 富士山の北西にあって, 富士・箱根両火山の噴火活動と偏西風の影響を受けて, 流域の大部分は厚い火山灰の堆積のために地形は全体に丸みを帯びている.

## (1) 流域特性の検討（おもに洪水直前河川流量と他の因子 ( $f$ , $R$ , $\bar{r}_b$ , $L$ , $L_p$ , $LG_p$ ) との関係）

a) 総降雨量 ( $R$ ) と流出率 ( $f$ ) の関係

図-1, 2, 3 に総降雨量 ( $R$ ) と流出率 ( $f$ ) の関係を、梓川、神流川、相模川の順に示す。なお、流量  $Q$  の定義は、次のようなである。洪水直前河川流量（以下、初期流量とよぶ） $q_A$  から、洪水の逓減部の流量が初期流量  $q_A$  に一致する流量までの流量の総和とする。

ここに,  $t_1$ : 初期流量  $q_A$  の時刻,  $t_2$ : 過減部の流量が初期流量と一致する流量の時刻.

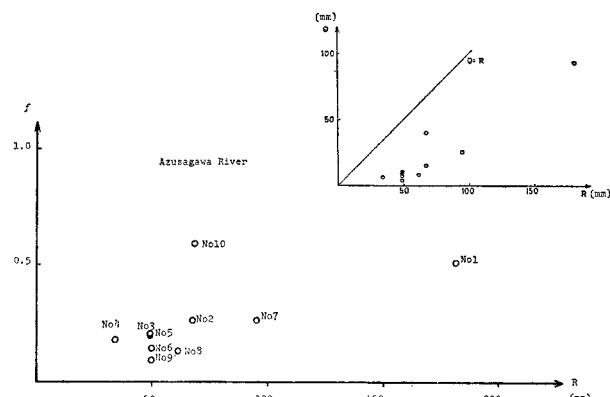


図-1  $R$  と  $f$  の関係 (梓川)

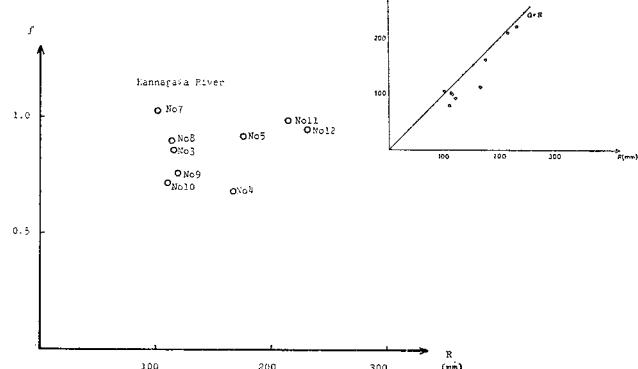


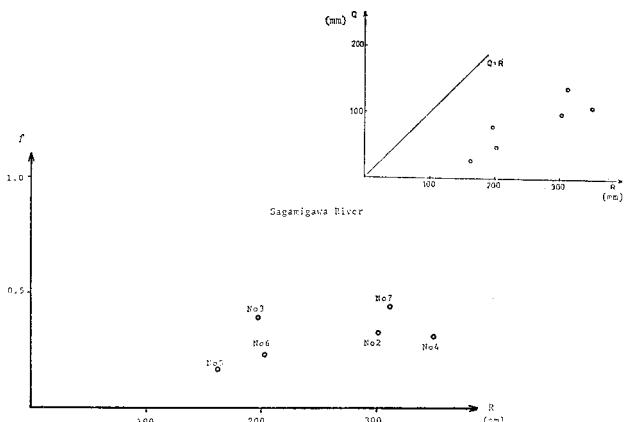
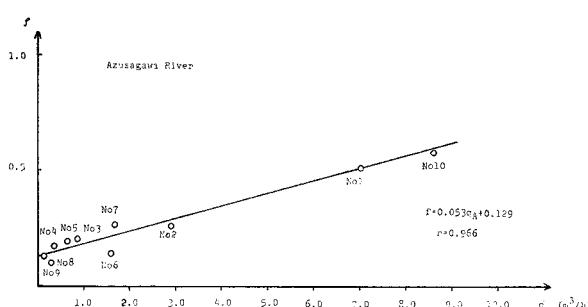
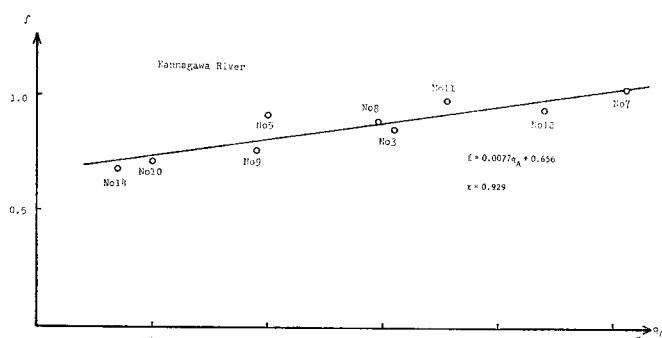
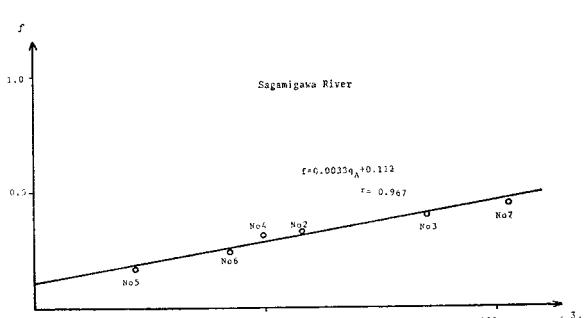
図-2  $R$  と  $f$  の関係（神流川）

なお、他に従来までの定義により、 $Q$  を変えて計算したが、流出率はそれほど、変化しなかった。この結果、3流域とも $R$  と $f$  との相関は低い。上記の図の右上には、 $R$  と $Q$  の関係を示す。 $R$  と $Q$  の関係もばらついていることがわかる。このことより、流出率は、降雨開始時における流域の土壤の乾湿度の程度によって異なることが推測される。

### b) 初期流量 ( $q_A$ ) と流出率 ( $f$ ) の関係

さて、前にも述べたように流域の乾湿度を表わす因子として考えられる初期流量を考える。

初期流量 ( $q_A$ ) は、流域各地点からの流出がすべて関与することから流域特性を代表す

図-3  $R$  と  $f$  の関係 (相模川)図-4  $q_A$  と  $f$  の関係 (梓川)図-5  $q_A$  と  $f$  の関係 (神流川)図-6  $q_A$  と  $f$  の関係 (相模川)

る因子と考えられる。図-4, 5, 6 に梓川、神流川、相模川の各流域の  $q_A$  と  $f$  の関係を示す。これらの図から、3 流域とも初期流量と流出率との間には、高い相関があることがわかる。また、 $q_A$  と  $f$  との間に回帰式をあてはめ、さらに相関係数  $r$  をも計算して下記に示す。

$$\left. \begin{array}{l} f = 0.053 \cdot q_A + 0.129 \\ r = 0.966 \text{ 梓川} \\ f = 0.0077 \cdot q_A + 0.656 \\ r = 0.929 \text{ 神流川} \\ f = 0.0033 \cdot q_A + 0.112 \\ r = 0.967 \text{ 相模川} \end{array} \right\} \quad (6)$$

さらに、上式の回帰係数が統計的に有意であるか否かを検定する。回帰係数の検定は次のように行われる。

いま、回帰式 ( $y_i = ax_i + b$ ) とすれば、回帰係数  $a$  の母集団の回帰係数を  $\beta$  とし、確率分布が  $t$  分布とすると下記式になる。

$$t = \frac{a - \beta}{S_b}$$

ここで、

$$S_b^2 = \frac{\sum_{i=1}^N \{(y_i - \bar{y}) - a(x_i - \bar{x})\}^2}{(N-2) \sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2} \quad (7)$$

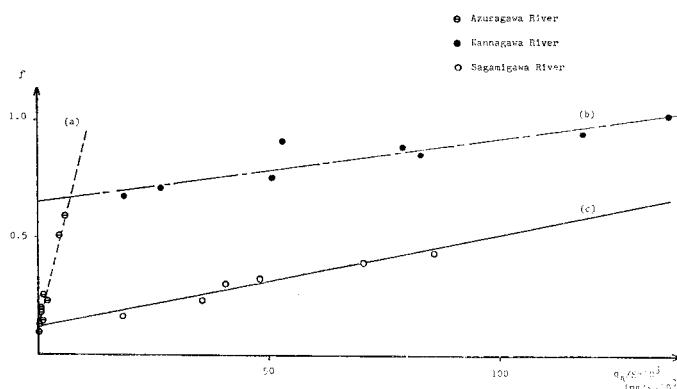
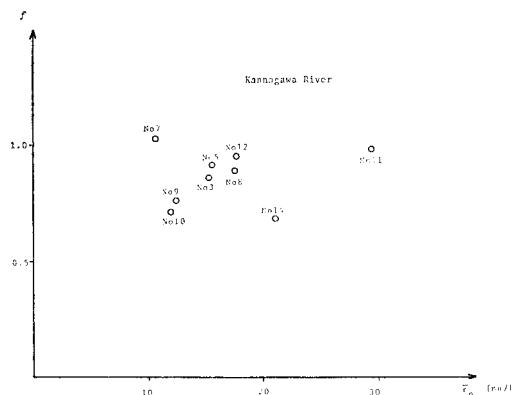
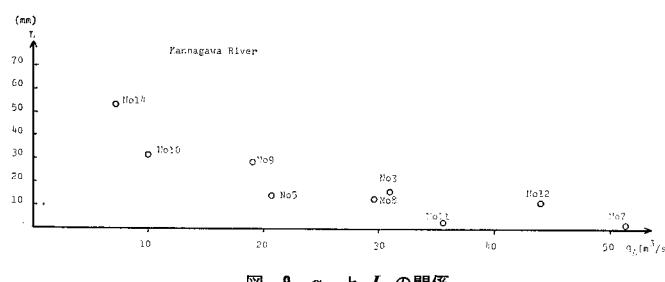
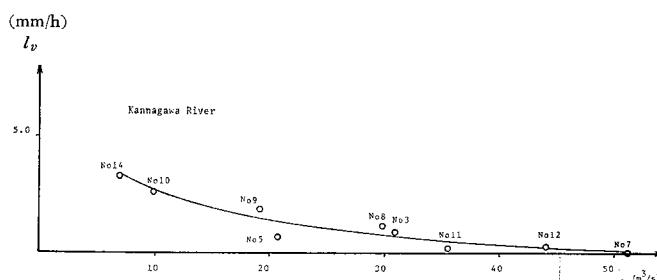
$$N: \text{標本数}, \bar{x} = \sum_{i=1}^N x_i / N, \bar{y} = \sum_{i=1}^N y_i / N$$

上式で自由度 ( $N-2$ ) の  $t$  分布をすることから、回帰係数  $a$  の有意性を次式から検定できる。

$$P[a - t \cdot S_b \leq \beta \leq a + t \cdot S_b] = 1 - \alpha \quad (8)$$

$\alpha$  は危険率 (%) である。神流川の例では、

$N=9$ ,  $\alpha=5\%$  より,  $t=2.365$  となり,  $\beta$  は,  $0.0066 \leq \beta \leq 0.0088$  となる。ゆえに, 母集団の  $\beta$  には,  $\beta=0$  を含まず, さらに 95% の信頼率で回帰係数  $a$  は,

図-7 ( $q_A/A$ ) と  $f$  の関係図-8  $r_p$  と  $f$  の関係図-9  $q_A$  と  $L$  の関係図-10  $q_A$  と  $l_v$  の関係

母集団のそれに含まれているので、この回帰直線は、統計的に有意であることが確かめられた。同様に、梓川、相模川に関しても、この回帰直線は統計的に有意 ( $\alpha=5\%$ ) であることが認められた。

以上、前に述べた予想どおりに、初期流量が流出率に影響していることが明らかになった。

次に、3 流域の流出特性を比較検討するために、 $q_A$  を流域面積 ( $A$ ) で除して、新たに  $f$  と  $q_A/A$  の関係で示す(図-7)。式(6)を変形して、 $f$  と  $q_A/A$  の回帰式を示す。

$$\left. \begin{aligned} f &= 75.56 \times 10^3 \cdot (q_A/A) + 0.129 \text{ 梓川} \\ f &= 2.88 \times 10^3 \cdot (q_A/A) + 0.656 \text{ 神流川} \\ f &= 3.96 \times 10^3 \cdot (q_A/A) + 0.112 \text{ 相模川} \end{aligned} \right\} \dots (9)$$

この結果、流域の保水性は、神流川流域が一番よい。また、これらの直線の傾きから判断すると、神流川と相模川の傾きは、割合、似ているので初期流量が増加するにつれて、流出率の変化の仕方も似ている。このような流出率 ( $f$ ) と初期流量と流域面積の比 ( $q_A/A$ ) の回帰式の勾配や切片の相違は、流域を構成している地質、地形、流域面積等の違いによるものと思われる。

c) 流出率 ( $f$ ) と平均降雨ピーカ強度 ( $\bar{r}_p$ ) の関係

図-8 に  $f$  と  $\bar{r}_p$  の関係を示す。これらの図は、流出率 ( $f$ ) と平均降雨ピーカ強度 ( $\bar{r}_p$ ) の相関は、低いことを示している。

d) 損失量 ( $L=R-Q$ ) と初期流量 ( $q_A$ ) の関係

式(4)で計算された  $L$  と  $q_A$  の関係を、神流川流域の例で図-9に示す。この結果、初期流量 ( $q_A$ ) が増加すると損失量 ( $L$ ) が減少していく傾向がみられる。このことは、流域の土壤が乾いた状態では(初期流量が小さい場合) 損失量が大きく、土壤が湿った状態(初期流量が大きい場合)になると逆に損失量が少ないことを表わしている。

e) 損失速度と初期流量の関係

損失量 ( $L$ ) を降雨の有効継続時間 ( $T_e$ ) で割ると損失速度 ( $l_v$ ) が、次式で求まる。

$$l_v = \frac{L}{T_e} = \frac{R-Q}{T_e} \dots (10)$$

$l_v$  と  $q_A$  の関係を図-10に示す。図から、損失速度は、初期流量が増えるとともに、指數関数的に減少していることが示される。

先に  $L=R-Q$  を  $q_A$  の関数としたがむ

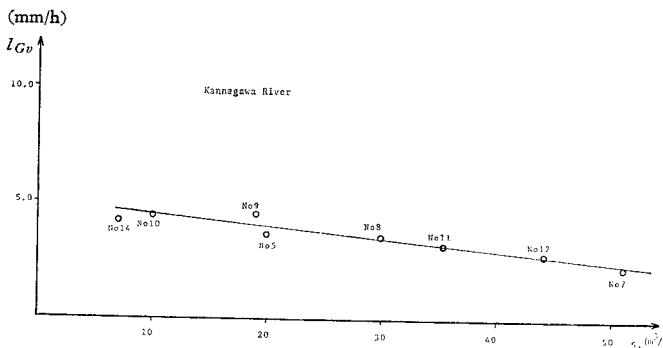


図-11  $q_A$  と  $l_{Gv}$  の関係

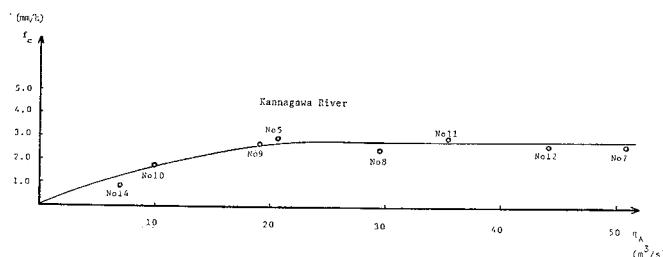


図-12  $f_c$  と  $q_A$  の関係

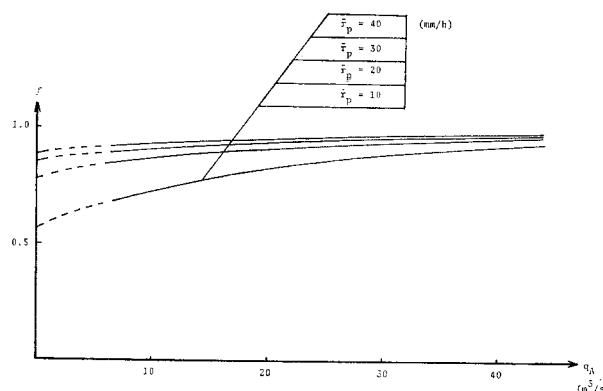


図-13  $\bar{r}_p$  をパラメーターとしての  $f$  と  $q_4$  の関係

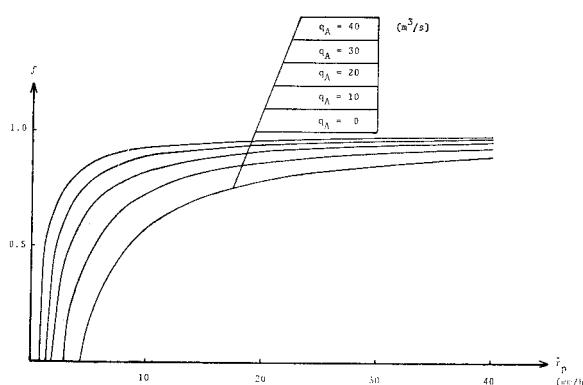


図-14  $q_A$  をパラメーターとしての  $f$  と  $r_s$  の関係

しろ、損失速度  $l_v$  が  $q_A$  の関数であるとすべきであろう。

次に、フィルター分離 AR 法により流出量を成分に流出分離して、表面流出量  $y_s$  を求める<sup>6)</sup>。この表面流出量の総和を  $Q_s$  とする。

表面流出に寄与する降雨以外の損失速度( $l_{Gv}$ )は、次の式で計算できる。

$$l_{Gv} = \frac{\int r dt - \int y_s dt}{T_e} = \frac{R - Q_s}{T_e} \quad \dots \dots \dots (12)$$

$I_{Gv}$  には、地下水に寄与する降雨量の浸透速度と蒸発散や植性による損失の割合を含んでいる。 $I_{Gv}$  と初期流量の関係を 図-11 に示す。

## (2) 地下水系への浸透速度

式(12)から式(10)を引くことにより、純粋に地下水になる降雨  $Q_G$  の浸透速度( $f_c$ )が求まる。

$$f_c = l_{Gv} - l_v = \frac{Q - Q_s}{T_e} = \frac{Q_G}{T_e} \dots (13)$$

$f_c$  と  $q_A$  の関係を 図-12 に示す。この結果、初期流量  $q_A$  が小さく流域の土壤が乾いた状態にあるときには、地下水に浸透する量より、蒸発散や植生等による損失量が大きい。一方、初期流量が大きく流域の土壤が湿った状態になっているときには、地下水の浸透速度は一定になっていると推定される。また、この関係は、降雨の非線形分離則をも示している。

### (3) 流出率と初期流量と降雨強度の関係

式(10)を変形すると

$$l_v = \frac{R-Q}{T_s} = \frac{R}{T_s}(1-f) \dots\dots\dots(14)$$

である. 式 (14) を  $f$  に書き直すと次式になる.

$$f = 1 - \frac{1}{\bar{x}_v} \cdot l_v \quad \dots \dots \dots \quad (15)$$

$$\bar{x}_s \equiv R/T$$

図-10 より、 $l_v$  と  $q_A$  の関係を指數関数で内挿して求めると

となる。神流川の場合には、 $A=4.237$ ,  $B=0.045$ である。よって、流出率  $f$  は、式

(15), (16) より次式になる.

図-13, 14 に  $q_A$ ,  $\bar{r}_p$  をパラメーターとした  $f$  を求める図を示す。

以上のようにして流出率  $f$  は、降雨強度  $\bar{r}_p$  と洪水直前流量  $q_A$  から推定されることが示された。結果は、以上に示したように、他の表示による相関がみられないのに反し、 $f$  vs  $q_A$  は、どの流域に関してもこれらの間に強い相関がある。また、流出率について検討し、浸透能が土壤湿潤度の関数であることを論拠として流出率を平均有効降雨強度  $\bar{r}_p$  と洪水直前流量  $q_A$  により推定する式を提案した。

最後に貴重な資料を提供してくれた山梨大学の荻原研究室の皆様、また、神奈川県の企業庁と土木部の皆様に

心から感謝の意を表します。

## 参 考 文 献

- 1) 日野幹雄・グエンソンフン：降雨の平均損失強度の推定およびその特性について，第25回水理講演会論文集，1981。
  - 2) Linsley, R.K., M.A. Kohler and J.L.H. Paulhus : Applied Hydrology, McGraw-Hill, 1949.
  - 3) 岩井重久・石黒政儀：応用水文統計学，森北出版，1970。
  - 4) 立神弘洋：木曾川洪水の水文学的研究，学位論文，1954。
  - 5) 江川太郎・四俵正俊：流域の地形・地質と流量逐減曲線，愛工大研究報告，No. 16, 1981。
  - 6) 日野幹雄・長谷部正彦：フィルタ一分離 AR 法による非線型流出系の同定と予測，土木学会論文報告集，No. 324, 1982。
  - 7) 日野幹雄・長谷部正彦：単位降雨の流出率と初期流量・降雨強度，第26回水理講演会論文集，1982。
  - 8) 建設省土木研究所：神流川流域水文観測資料。

(1981.5.12・受付)