

日単位降雨の流出率と初期流量・降雨強度

Runoff Ratio, Preflood Discharge Rate and Rainfall Intensity of Daily Hydrologic Data

東京工業大学 正会員 日 野 幹 雄

東京工業大学 正会員 長谷部 正 彦

M. Hino & M. Hasebe, Tokyo Institute of Technology

要 旨

著者らは、先に時間単位の流出率 f について種々検討し、浸透能が土壌湿潤度の関数であることを論拠として次の流出率式を提案した。

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

ここに、 $\bar{r}_p$: 平均降雨強度、 q_A : 洪水直前の河川流量 (初期流量)、 A, B : 定数。

本論文は、この考え方を日単位降雨の場合に拡張し検討しようとするものである。

1. 変量の定義

一連の降雨および流量時系列から、大きな降雨－洪水の区間に対し次の量を定義する。 R : 全降雨量、 Q_S : 表面流出量、 Q_G : 地下水流出量、 Q : 全流出量 ($Q = Q_S + Q_G$)、 L : 損失降雨量 ($L = R - Q$)、 L_G : 損失および地下浸透量 ($L_G = R - Q_S$)、 T_e : 有効降雨時間。

これらの諸量は、次のようにして時系列の記録から分離する。

- (1) 降雨および流量時系列のコヒーレンスや、流量時系列の自己回帰係数から、流出分離日数を決定し、後方作用の数値フィルターにより、表面流出と地下水流出量に流出分離する。
- (2) 降雨および流出時系列から、一雨毎に降雨－洪水の流量を選び、その一雨毎の降雨、流出量 (地下水量、表面流出量) の総和を一雨ごとの Q_S, Q_G, Q, R とする。
- (3) 有効降雨時間は、一雨の降雨の初期の降雨量が 2.5 mm/day 以下の降雨を除いた時の一雨の降雨継続時間を有効降雨時間とする。

2. 流出率・損失率に影響する因子について

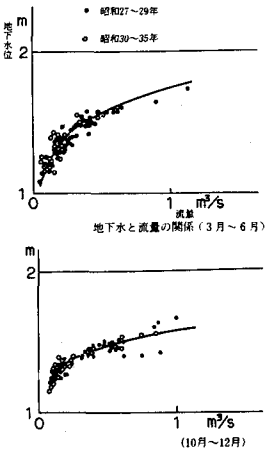
さて、流出率 f や損失速度 l に影響する因子を挙げると; 土壌湿潤度 m 、降雨強度 r_p 、総降雨量 R 、降雨時間 T_e 、蒸発散量 e 、植生状況 C などである。

$$f = F_n[m, r_p, R, T_e, e, C, \dots] \dots\dots\dots (2)$$

$$l = G_n[m, r_p, R, T_e, e, C, \dots] \dots\dots\dots (3)$$

これらの因子のうち、前2者、 m, r_p が特に影響が大きいと思われる。というのは、損失の大部分をしめる地下浸透は土壌の湿潤度 m に大きく関係し、また初期の浸透速度は降雨強度 r_p によることが、浸透機構のミクロな解析から知られているからである。ただし、浸透速度は数十分後には、最終浸透能に落ち着くので影響は m に較べて二義的であろう。

土壌の湿潤度 m を流域内の数点で測定することは可能であろうけれども、流域を代表するもう少し手軽な指標が望ましい。従来、良く用いられていたのは、先行降雨指標 (API) である。しかし、これも計算が面倒であり、これに代るものとして洪水直前の河川流量 (= 初期流量) q_A を用いる方法がある (Linsley, et al., 1949, 岩井・石黒, 1970, 立神, 1954, 日野・長谷部, 1981) が、具体的検討は少ないようである。



図－1 地下水と流量の関係 (江川(5)からの引用)

江川(1981)は、河川流量と地下水位との間の強い相関性を示しているが(図-1)、これは初期流量 q_A を土壌湿潤度 m の代りに用いて良いことの一つの有力な例証と云えるであろう。

ここに、提案した流出率 f に関する式は、浸透機構を踏まえた水文資料の解析から導かれたもので、土壌湿潤度 $q_A(m)$ と降雨強度 r_p の二つの主因子を含んでいる。次に重要な因子は、植生状態 C であるが、一つの流域についてみれば、これは季節の影響ということである。

3. 平均損失率と初期流量(l vs q_A)

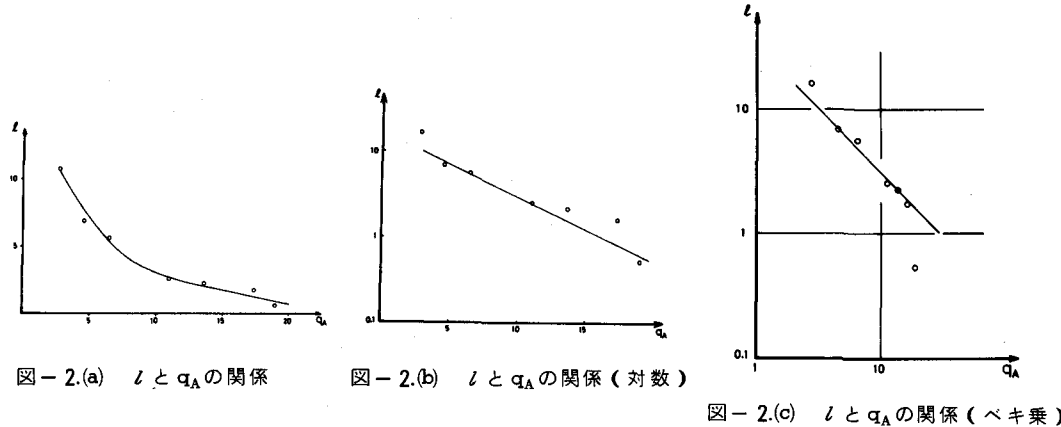
損失降雨は、樹冠遮断や初期損失・蒸発散・深い地下水流などになる成分である。洪水時には、前者の量は相対的に無視できるであろう。そして、後者は一応は地中に浸み込む成分であり、従って主として土壌の湿潤度に依存するであろうと考えられる。

時間降雨の場合と同様に初期流量 q_A を土壌湿潤度の指標と考え損失降雨率、 $l=L/T_e$ を q_A に対してプロットすれば、図-2(a)のように良い相関がみられる。

$$l = f_l(q_A) \dots\dots\dots (4)$$

この関係は次のように対数もしくはベキ乗則で内挿される。(図-2(b), (c))

$$f_l(q_A) = Ae^{-Bq_A} \quad \text{or} \quad f_l(q_A) = A'q_A^{-B'} \dots\dots\dots (5)$$



なお、念のために他の影響パラメーターである平均降雨強度 $\bar{r}_p$ に対して l をプロットすれば、図-3(a)のように一見良い相関が認められる。しかし、これは、偽の相関であろう。というのは、 $\bar{r}_p$ と q_A の間には、たまたま、図-3(b)のような相関がある。降雨はその降雨のもたらした洪水とその後の流量には関連するが、降雨以前の流量とは本来独立であるから図-3(b)は偽の相関である。時間単位の場合では、 $\bar{r}_p$ と q_A の相関は低かった。ただ同図中 $\#7$ の黒点のみは、この相関からはずれている。このはずれに対応し、図-3(a)中の $\#7$ の黒点も相関のある点からはずれている。しかし、図-2では $\#7$ は特別な傾向を示していない。従って、 l と q_A の図-2は、真の相関である。しかし、偶然 q_A と $\bar{r}_p$ の間には相関がみられ、そのため図-3(a)の偽の相関図が得られたと考えられる。

ついでに $l_G(=L_G/T_e)$ と q_A の関係をみると図-4に示すように良い相関がある。

$$l_G = A_G e^{-B_G q_A} \dots\dots\dots (6)$$

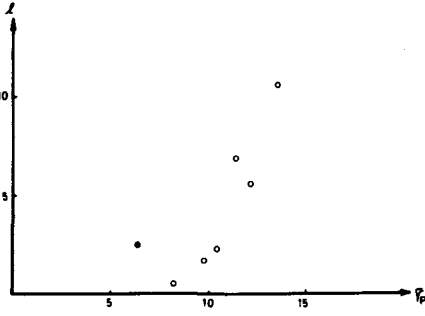


図-3(a) l と $\bar{r}_p$ の関係

4. 地下水流出浸透率と初期流量

上述のことから l_G と l の差、つまり Q_G/T_e も初期流量 q_A と相関をもつはずである。図-5にみられるようにこれは正しい。しかし、 Q_G/T_e は q_A とともに増加している。つまり、土壌湿潤度が高いほど地下水流出成分として浸透する成分が増加している。

これは一見直観（土が湿っているほど、表面流出は増えるが地下水流出成分は飽和に近づく）と反しているように思われる。これは、何故なのか？

この点について次のように考えられる。土壌が湿っているほど、地下浸透による損失分は少なくても良いであろう。その結果、土中に浸透した成分のうち損失分を差し引いたいわば有効浸透成分（地下水流出となる成分）は、逆に増加すると考えられる。言い換えると、一度地下に入れたものの真の貯蔵庫は満杯で、地下水としてあふれ出たものと思えばよい。

図-5の Q_G/T_e と q_A の比例傾向が一般的に成立するのか、神流川流域の特性なのかは、今後検討すべき点である。

5. 流出率と初期流量・降雨強度

實際上、われわれが知りたいのは、流出率 f

$$f = \frac{Q}{R}$$

である。ここに、 R ：総降雨量、 Q ：総流出量。しかし、流出とは、地下に浸透・貯留されなかった部分を主とするいわゆる損失の余部であるから、むしろ損失量(l)あるいは損失速度はどれだけから問題である。

$$\begin{aligned} l &= \frac{L}{T_e} \\ &= \frac{R - Q}{T_e} \dots\dots\dots (7) \end{aligned}$$

ここに、 L ：総損失量、 T_e ：有効降雨時間。

ところで、式(7)を変形すると

$$\begin{aligned} l &= \frac{R}{T_e} \left(1 - \frac{Q}{R}\right) \\ &= \frac{R}{T_e} (1 - f) \dots\dots\dots (8) \end{aligned}$$

である。逆に、 f は l に関して次のように表わされる。

$$\begin{aligned} f &= 1 - l \cdot \frac{T_e}{R} \\ &= 1 - \frac{1}{\bar{r}_p} \cdot l \dots\dots\dots (9) \end{aligned}$$

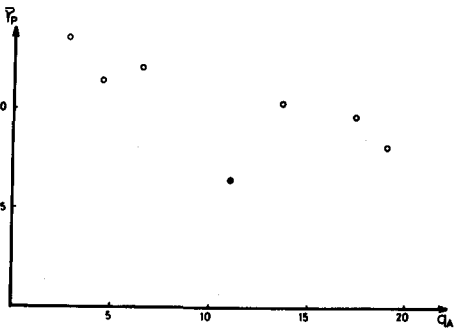


図-3(b) $\bar{r}_p$ と q_A の関係

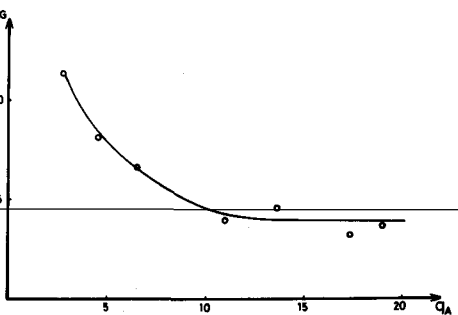


図-4 l_G と q_A の関係

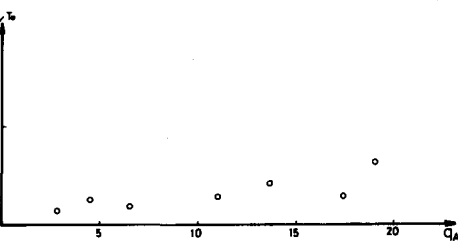


図-5 Q_G/T_e と q_A の関係

ここに、 $\bar{r}_p = R/T_e$: 平均降雨強度。したがって、もし損失速度 l の関係式がわかると、これから流出率 f に関する式が与えられる。

なお、表面流出 Q_s に関する流出率 f_s は、

$$\begin{aligned} f_s &= \frac{Q_s}{R} \\ &= \frac{Q - Q_G}{R} \\ &= f - \frac{T_e}{R} \cdot \frac{Q_G}{T_e} \\ &= f - \frac{1}{\bar{r}_p} l_G \\ &= 1 - \frac{1}{\bar{r}_p} (l + l_G) \end{aligned}$$

である。ここに、地下成分浸透速度 l_G もまた q_A の関数であることが示されている。

神流川流域の水文資料の解析により、3 節に述べたように、 l と q_A の関係は次のように求まる。

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

または (10)

$$f = 1 - \frac{A'}{\bar{r}_p} q_A^{-B'}$$

と表わされる。式(4)の内挿式を用いて、 f vs q_A の関係を $\bar{r}_p$ をパラメーターとして示したのが図-6で、同図には実測点も記入されている。

付・記録

(1) この流出率に関する研究は、流出率の解析を目指して直接的に行われたものではない。もともと著者らの“逆探法”で求められた逆算による有効降雨強度($\hat{x}$)と地下水流出成分降雨強度($\hat{x}_G$)との間の降雨の分離則の研究から始まった。時間降雨について一洪水の f と $\hat{x}$ との間には

$$\hat{x}_G = \begin{cases} = \hat{x} & (\hat{x} < (\hat{x}_G)_m) \\ = (\hat{x}_G)_m = \text{一定} & (\hat{x} > (\hat{x}_G)_m) \end{cases}$$

の関係があることが認められたが、一定値 $(\hat{x}_G)_m$ は、洪水ごとに異なることがわかった。恐らく土壌の湿潤度の影響であろうと思い、その指標として洪水直前流量 q_A と $(\hat{x}_G)_m$ と比較したところ一つの傾向が認められた。しかし、

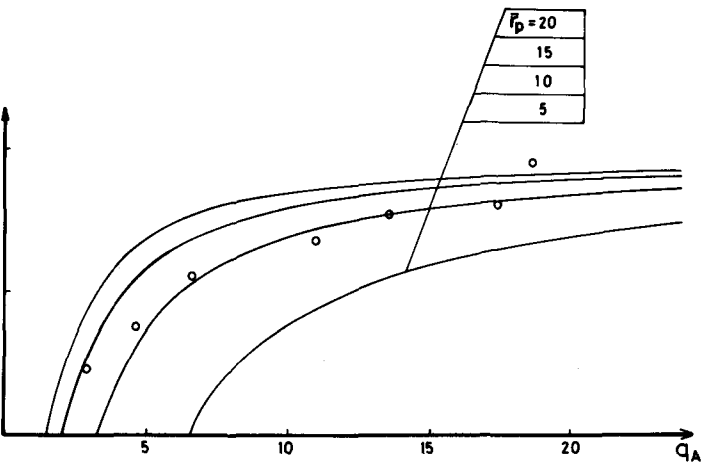


図-6 f と q_A の関係 ($\bar{r}_p$ をパラメーター)

逆探解析のケースは少なく、十分のデータがなかったので、いつそのことと流出率 f と q_A の関係を調べ良い相関があることがわかった。その後、損失率

$$l = \frac{(L-Q)}{T_e}$$

と q_A の間に $l = f_e(q_A)$ の関係も認められ、これを变形すれば流出率 f は、

$$f = 1 - \frac{1}{\bar{r}_p} f_l(q_A)$$

となることを示し得た。

(2) 流出率 f に関しては、Linsley ら (1949) による co-axial 法が良く知られている。しかし、この図の作成データは十分にはなく、この方法は実際にはあまり使用されていない。この Linsley 法には洪水初期流量が変数として考えられていることを知った。岩井・石黒 (1970) には、この Linsley の本をふまえて、洪水初期流量が流出率の指標となることの例が示されているのに気付いた。

(3) こうして、初期流量 q_A を土壌の湿潤度と考えて良いと結論されたちょうどその頃、江川 (1981) が学位論文において山の中腹にある井戸の水位とその下の谷を流れる河川流量が良い相関を示すことを述べているのに出くわした。これは、 q_A が土壌湿潤度の指標であることのより直接的な例証である。

先に、日野・フン (1981) は、略一定強度の降雨が続いて平衡状態に達している場合には、長期間の平均損失率 $\bar{L}$ と平均降雨強度 $\bar{R}$ との間に関数関係のあることを示した。これは上述の l が r_p には無関係で q_A により決まるという結論と矛盾しているように見えるかもしれないが、実はそうではない。というのは、降雨-流出系は、大略、平衡状態に達している場合を考えているから、このときには

$$\bar{L} = \bar{R} - \bar{Q}$$

であって、今回の結論からは前報の結論をむしろ、 $\bar{L}$ は $\bar{Q}$ に依存すると云い直しても良いであろう。

謝 辞

また、高棹琢馬教授 (京大) からは、立神弘洋氏の学位論文 (とくに、初期損失率と初期流量の関係) について紹介され、心から感謝の意を表します。

参考文献

- (1) Linsley, R. K., M. A. Kohler and J. L. H. Paulhus: Applied Hydrology, McGraw-Hill, 1949.
- (2) 岩井重久, 石黒政儀: 応用水文統計学, 森北出版, 1970
- (3) 立神弘洋: 木曾川洪水の水文学的研究, 学位論文, 1954
- (4) 日野幹雄, 長谷部正彦: 初期流量と流域特性および損失量との関係について, 第 86 回年講, 1981
- (5) 江川太朗・四俣正俊: 流域の地形・地質と流量逓減曲線, 愛工大研究報告, №16, 1981
- (6) 日野幹雄, グェンソンフン: 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
- (7) 神流川流域水文観測資料: 建設省土木研究所