

宮崎大学工学部 正会員 石黒政儀
 宮崎大学工学部 学生員 ○伊藤澄夫
 宮崎大学工学部 学生員 本山彰彦

1 はしがき

都市下水道および各種排水計画において基本的問題の1つとして降雨と流出の水文学的問題があげられる。本文は昭和40年度から宮崎大学工学部構内の全排水渠を利用した降雨量、流出量の自記記録設備を用い、この問題を昨年度に引き続いて行なった研究報告である。オ1報では本試験流域の特性と実測設備およびラショナル式とビュルク系実験式による実測、算定値の相違とその修正法、および流出係数などを報告し、オ2報ではあらたに付加された実測装置と浸透能曲線による有効雨量と単位図による流出量および等価粗度係数値について報告したが、本文では本年度の実測記録をも用いてあらたに損失能(浸透能)による有効雨量推定法および、下水処理場や水質管理などで要望されている降雨からの流出量(ピーク流量)を予報する方法としてAPIを用いない共軸相関図法を提唱し特性曲線法に基づく等価粗度法による流出量算定法で必要な等価粗度係数についても報告する。なお流域特性と実測記録装置はオ1、オ2報と同じものである。

2. 損失能曲線を用いる有効雨量の分離

有効雨量と損失雨量の分離法について、浸透能理論がある。浸透能についてはHortonが次式を示している。⁴⁾⁵⁾

$$f = f_c + (f_0 - f_c)e^{-Kt} \quad \text{----- (1)}$$

ここに、 f は浸透能、 f_0, f_c はそれぞれ初期、最終の浸透能、 K は流域特性による定数、 t は降雨継続時間である。オ2報において、この実験式が自然流域における凹地貯留なども含めた損失能の時間的変化を与えるものと仮定し、本流域での損失曲線と損失能減衰曲線を推定した。

$$F = 1.38t + 16.5(1 - e^{-1.02t}) \quad \text{--- (2)}$$

$$f = 1.38 + 16.83 \cdot e^{-1.02t} \quad \text{--- (3)}$$

$$F = 1.38t + 8.1(1 - e^{-1.02t}) \quad \text{--- (4)}$$

$$f = 1.38 + 8.26 \cdot e^{-1.02t} \quad \text{--- (5)}$$

ここに、 F は累加損失雨量である。なお石原博士らは、由良川における損失曲線を次式で示している。⁶⁾

$$F = 0.27t + 24.2(1 - e^{-0.15t}) \quad \text{--- (6)}$$

$$f = 0.27 + 17.9(1 - e^{-0.15t}) \quad \text{--- (7)}$$

図-1. 損失曲線

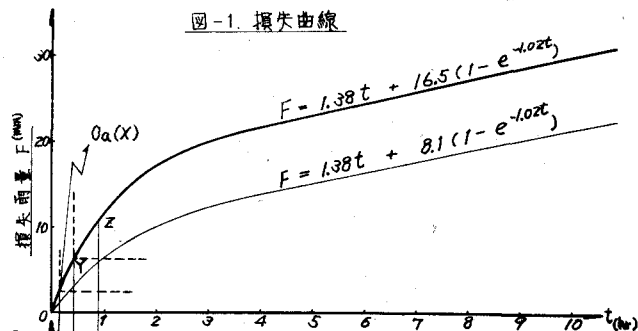


図-2. 損失能減衰曲線

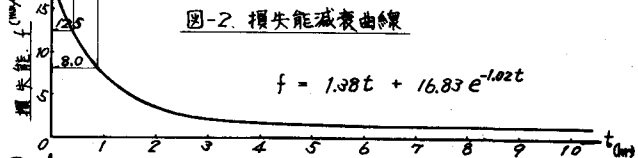
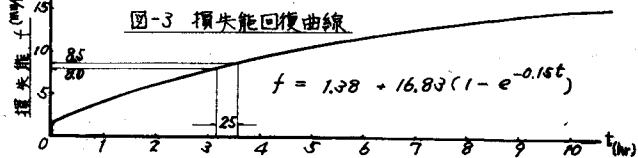


図-3. 損失能回復曲線



$$F = 0.27t + 11.1(1 - e^{-0.05t}) \text{ ----- (8)}$$

これらの式は種々の無降雨日数に対して与えられている。すなわち無降雨日数を初期条件としているので多くの式を必要とする。しかるに同一の流域に対して示された式は、いま a, b を定数とすれば、 $F' = F - a$, $t' = t - b$, と置換されて唯一の式に導くことができる。たとえば、本流域で求めた式(4)において、 $F' = F - 9.4$, $t' = t - 0.7$, とおくと式(2)と同一のものとなる。前期無降雨日数あるいはAPIは流域の乾湿状態を表わすものであるが、これは初期損失能で表わされる。この初期損失能は a, b と対応する。従ってある流域における最大損失曲線とその損失能減衰曲線を推定し、降雨の初期損失能を求めると最大損失曲線上でそれらの損失能に対応した点を原点として同曲線上を追跡すればその降雨の損失曲線となる。

次に降雨時の初期損失能を求めるために無降雨時の損失能回復曲線と利用する方法を考究する。立神博士は初期損失雨量を次式で与えている。⁷⁾

$$I_L = -K \cdot Q_L + C \text{ ----- (9)}$$

ここに、 I_L は初期損失雨量、 Q_L は初期地下水流量、 K, C は流域特性と季節による定数である。また $Q_L = Q_0 e^{-\alpha t}$ と表わされるので式(9)は逆に次のような損失能関係におきかえることができる。

$$f' = (f_0 - f_c)(1 - e^{-\alpha t}) + f_c \text{ ----- (10)}$$

ハイドログラフ低減部(表面流出終了後)の低減係数 $e^{-\alpha}$ は流域の保水状態を表わすものであり、従って式(10)の $(1 - e^{-\alpha t})$ は損失能回復特性を示すと考えたことになる。本流域では実測ハイドログラフから $\alpha = 0.15$, となり次の損失能回復曲線式を得た。

$$f' = 1.38 + 16.83(1 - e^{-0.15t}) \text{ ----- (11)}$$

式(11)を用い無降雨時の損失能を追跡することによって降雨時の初期損失能は推定できる。

降雨継続中に降雨強度が損失能より小さい場合、全雨量が損失雨量となる。この降雨終了時の損失能は次の降雨の初期損失能であり、降雨強度が損失能より大きい場合、損失能曲線によって損失雨量は求められる。

このような理論に基づいて有効雨量の新分離法を提唱する。新分離法の実例として昭和43年7月10日の降雨を用い例示する。

① 7月9日に82mmの降雨が14時30分に終り、次の降雨は10日の4時45分に始まった。前期降雨終了時(14時30分)の損失能は14mmである。そこで図-3の回復曲線上に14mmをとってその点から無降雨時間、12時間15分後を読み、 $f = 16.3 \text{ mm}$ と推定される。

② 初期損失能 $f = 16.3 \text{ mm}$ を図-2にとり、この点より

図-4 損失雨量解析図

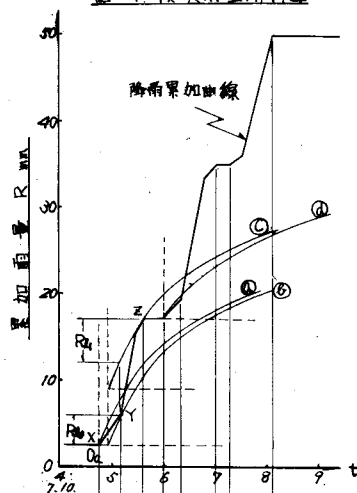


図-5 降雨強度

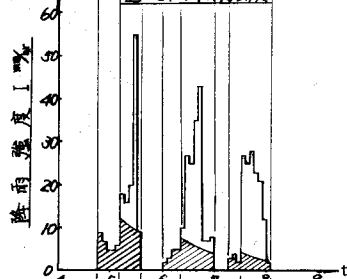


図-6 損失能追跡図

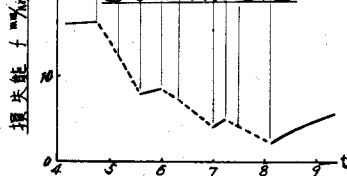


図-1のF曲線へ垂線を引けばその交点 Q_0 がその降雨の損失曲線の原点となる。そこでこの損失曲線を図-4の降雨累加曲線の立ち上り点Xに重ねる。

③ ここで降雨累加曲線の傾きが損失曲線④の傾きより小さいことは降雨強度が損失能より小さいことを意味する。そこで④曲線を横軸(x)方向に平行移動し(⑤曲線)、降雨累加曲線に接する点Yを求める。点Yはこれ以前の全雨量が初期損失であり、以後は損失能より降雨強度が大きくなることを示している。図-1の点Yから図-2に垂線を下しf曲線との交点を読み、 $f = 12.5 \text{ mm/hr}$ となる。このときの初期損失は図-4の $R_{L0} = 3.5 \text{ mm}$ となる。

④ 降雨強度が損失能より小さくなる点を求めるために⑤曲線を縦軸(R)方向に平行移動し(⑥曲線)、降雨累加曲線と接する点Zを求める。この期間の損失雨量は図-4の R_{L2} で表わされる。図-1でこのときの損失能は $f = 8.0 \text{ mm/hr}$ である。以後25分間無降雨であるから図-3上に $f = 8.0 \text{ mm/hr}$ をとり無降雨時間25分追跡すれば次の降雨の初期損失能が得られる。以下同様の手順をくりがえし、 $R_{L0} = 3.5 \text{ mm}$ 、 $R_{L1} = 5.0 \text{ mm}$ 、 $R_{L2} = 5.5 \text{ mm}$ 、 $R_{L3} = 4.0 \text{ mm}$ を得る。これらの値から有効雨量は $R_{e1} = 6.0 \text{ mm}$ 、 $R_{e2} = 12.5 \text{ mm}$ 、 $R_{e3} = 11.0 \text{ mm}$ と推定した。図-7に本分離法による推定値と実測値の適合度を示す。

3. 共軸相関図による下水道の降雨時ピーク流量予報

流域の大きい河川などの流量予報として共軸相関図が有効に用いられている。²⁾⁾本文では下水道や小流域からの流出量に影響すると思われる支配的な因子として、① R^{mm} : 降雨開始より降雨ピークまでの累加雨量、② r^{mm} : 降雨ピーク10分間雨量、③ T^{min} : 降雨開始より降雨ピークまでの継続時間、④ $f^{\text{mm/hr}}$: 前記損失能追跡図の降雨開始時の値、の4要素を用いる。

流域の乾湿状態を表わすものとして、一般にAPI(先行降雨指数)が用いられているが、乾湿状態には流域土質によってある飽和点がありそれ以上の降雨量は流出する。しかるに、このAPI値はその日の雨量と前日のAPI値とを加え低減係数Kを乗ずるので、降雨が多い時期には非常に大きな値となりその上限値がない。そこで先に述べた損失能を用いて流域の乾湿状態を表わすことにする。

共軸相関図の作図法 [I] オイ象限: 実測記録よりRの有効雨量を推定するために、Rを横軸、実測有効雨量を縦軸にとり実測記録をプロットする。その点のf値を記入し、最も湿った状態($f = 1.9 \text{ mm/hr}$)を45°の直線

図-7 適合度検定図

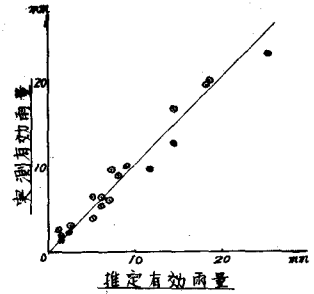


図-8 採用降雨因子の関係

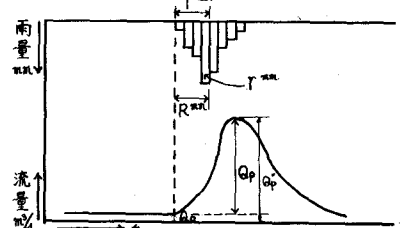
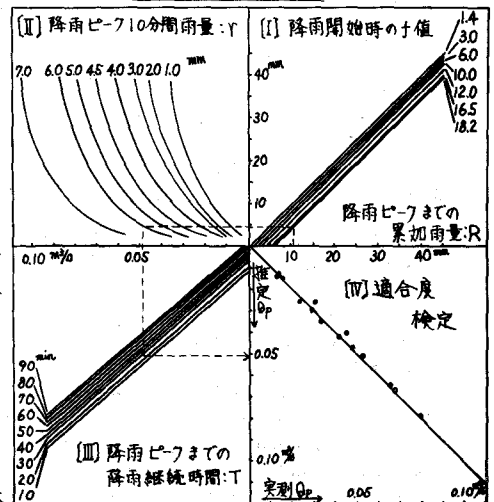


図-9 共軸相関図



とし各点を代表する直線群を引く。[II] オII象限：[I]より求められた推定有効雨量に対して実測 Q_p 値をプロットする。その点の r を記入し各 r を代表する平滑な曲線群を引く。[III] オIII象限：[I][II]によるオI推定 Q_p 値に対して実測 Q_p 値をプロットする。その点の T を記入し各 T を代表する直線群を引く。さらに試算により[I][II][III]図を順次修正共軸相関図を完成する。[IV] オIV象限：[I][II][III]による推定 Q_p 値と縦軸、実測 Q_p 値と横軸にとって適合度検定図を作る。

図-9に本流域の共軸相関図を示す。ピーク流量を推定する実例を示せば、昭和43年9月27日 $R=10.5\text{mm}$, $f=18.2\%$, $r=6.0\text{mm}$, $T=30\text{min}$, のとき本共軸相関図を用いると(図-9の破線) $Q_p=0.051\%$ ($Q_0=0.0015\%$)となり、推定 Q_p は 0.0525% である。

4 本流域の等価粗度係数値

新しい流出量算定法として特性曲線法を応用した等価粗度法があるが¹⁰⁾、この方法では各流域の等価粗度係数値 n_e を求めねばならない。本流域の n_e 値については、オ2報に引き続き本年度の実測記録をも用いて求め、特に n_e 値と既往の流出係数 C との関係を検討した。 C と n_e との関係は次式で表わされる¹¹⁾。

$$C = t^{0.5} \cdot \sin^{1/2} \theta \cdot i^{1/2} / B \cdot n_e \text{----- (12)}$$

ここに、 B は流域を矩形としたときの流入幅、 i は平均降雨強度、 θ は流域の平均地表勾配、 t は流入時間である。図-10に $(i \cdot t)^{0.5}$ をパラメーターとしてこの関係を実線で示す。図-10において実測値はほぼ式(12)の関係にある。このことは、従来等価粗度係数値は各流域で一定とされてきたが等価粗度係数値は流出係数が大きくなるに従って小さくなるといえる。これは流域の湿度度に関係すると思われるがこの関係を明らかにするには、より正確な等価粗度係数値の逆算法と、より多くの資料を必要とする。今後さらに研究を進めこの関係を究明したい。

5 むすび

小流域での雨水流出関係は短時間の降雨特性によって大きく左右され、有効雨量の分離やピーク流量の予報を行なうには一般河川で用いられている方法では精度が落ちるので、これを改善するために前述の損失能を用いる方法や共軸相関図を提示した。また等価粗度係数値については次報にて詳しく報告する予定である。最後に本研究は昭和43年度文部省科学研究費特定研究(内水災害)の補助によるものであり謝意を表する。

参考文献

- 1) 石黒政儀：雨水流出量諸公式と今後の研究動向。下水道協会誌。Vol.4. No.39. 1967年6月
- 2) 石黒、岡田、広瀬：下水道計画における降雨と流出の実測的研究(オ1報) 土木学会西部支部昭和41年度研究発表会論文集 1967年1月
- 3) 石黒、上原、佐藤：下水道計画における降雨と流出の実測的研究(オ2報) 土木学会西部支部昭和42年度研究発表会論文集 1968年2月
- 4) R.E.Horton: An Approach toward A physical Interpretation of Infiltration Capacity. Soil Society Proceedings. 1940
- 5) R.E.Horton: The Rate of Infiltration in The Hydrologic Cycle. Trans. A.G.L. Vol.14. 1933
- 6) 石原藤次郎、田中重三、金丸昭治：わが国における単位図特性について。土木学会誌。Vol.41. No.3 1956年3月
- 7) 立神弘洋：洪水流出の新解析法 昭和30年6月。および 水理公式集 昭和38年増補改訂版 オ1編 河川 P27
- 8) 石黒政儀：降雨からの貯水池流入量予測法。水道協会誌。昭和41年12月
- 9) 高瀬信忠：共軸座標による河川高水位の推定。土木学会誌。昭和39年4月
- 10) Tomitaro Suzaki: Runoff Estimation Sower Using Equivalent Roughness. Trans. of J.S.C.E. No.91 1963年3月
- 11) 寺西靖治：合理法・等価粗度法による市街地雨水流出観測値の解析。下水道協会誌。Vol.5. No.49. 1968年6月