II-179　都市域の雨水流出現象に影響する2,3の要素の実態的検討
（才2報）　都市化による流出ハイドログラフの予測と問題点

建設省都市局　正　稲場紀久雄
〃　土研　正　松原重昭
〃　土研　正○横尾将位

I. まえがき

都市化による流出現象の変化を定量的に把握するため、都市化過程が流出現象に及ぼす顕著な要素を物理的に表現して、等価粗度係数の予測方法を実態的に検討し、等価粗度係数(N_e)が本論で定義した都市化率(U_r)との間に $N_e = \alpha(U_r/I)^{\beta}$ なる関数関係で表わせることを示した。これらの関係から任意の都市化過程に対する等価粗度係数を推定することができ、この推定値を等価粗度法に導入することによって流出パターンの将来予測が可能であると共に、実態値の予測にも適用できることを示した。ここで流出計算法が有効降雨を対象にしたものであるため、実降雨から有効降雨への変換過程で損失パターンをどのように与えるかということが重要な問題になる。

本論では豊富な実態値を利用して $\Sigma R - \Sigma R_L$ 法なる手法で有効降雨を算出したが、実測データがない場合や降雨特性あるいは前期降雨の有無や量の大小によって損失パターンはかなり違ったものになるため、一概に上記手法が採用できるとは思えない。特に都市域では不浸透率が50～80％にもなり、浸透域と不浸透域での損失パターンひいては流出現象ははなはだ違った現われ方をする。こういったことから排水区を一様と考える方法（本論）よりは才一報で扱ったように浸透域と不浸透域で排水区を2分してそれぞれ違った損失パターンを与えて計算する方法がはるかに合理的であるようだ。このようなことから流域特性や降雨特性および前期降雨の有無や量の大小等によって損失パターンをどのように与えるのが合理的であるかを計画性をも含めて検討する必要があろう。

II. 都市化率と等価粗度係数の予測

都市化による流域内の物理的変化には、表面的には不浸透域の増大が上げられ、また下水管網の配置の稠密化が特有の現象であり、これらの進行の結果として表面粗度（等価粗度係数）の減少が誘起されるものと考えられる。上述した3者の物理的因子の変化が流出現象の変化に大きな関係因子となるものと考えて以下の記号で定義した。

不浸透率 … I_p，　下水管網率 … $\delta = \Sigma l / A$　　　… (1)

ただし　I_p＝不浸透面積／排水区面積，Σl＝排水区内の下水管布設総延長，A＝排水区域面積，

都市化による変化は両者共々に変化するものとして，両者の積の大小によって都市化過程を判断することにし，都市化過程（以下都市化率と呼ぶ）を(2)式で定義した。

都市化率　…　$U_r = \Sigma l \cdot I_p / A = \delta \cdot I_p$　　　… (2)

(2)式はU_rが大きいほど都市化が進んでいることを示し，小さいほどその過程が遅れていることを示している。流出現象において，運動の場は流域であり，その特性として重要なものは重力の効果を表

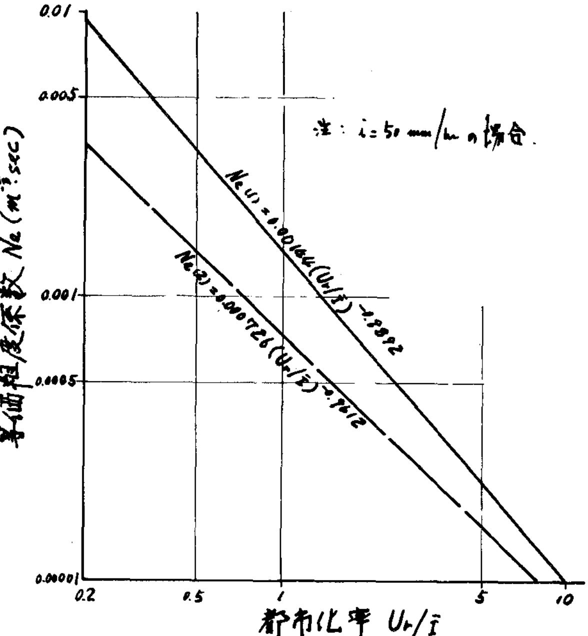
わす勾配と，摩擦効果を表わす粗度とである．この等価粗度係数の実態値は，一排水区を一本の流路を持つ等価な矩形流域に置替えて(3)式のN_eを逆算して求めた。

$$T_c=\frac{5\cdot(N_e\cdot B_1)^{3/5}}{3\cdot i^{2/5}\cdot S_1^{3/10}}+\frac{K\cdot L^{Z}}{(i\cdot B_2)^{1-Z}}\quad\cdots(3)$$

(3)式中の係数K・Zは，流路（下水幹線）の水理特性から求められる。前述した如く，こうして求めたN_eとU_rおよび地盤平均勾配$\bar{I}$との3者の間にはかなり密接な関係があり，その一例を図−1に示すように3者の間には

$$N_e=\alpha(U_r/\bar{I})^{\beta}\quad\cdots(4)$$

なる関数関係で表わせる。地盤平均勾配$\bar{I}$は特定の排水区に対しては固有値を持つ（都市化による宅地造成や整備等で多少変化する可能性はある）もので，$\bar{I}$が一定だとすると都市化率U_rが大きくなるほど等価粗度係数N_eは小さくなる．また降雨強度iとN_eの間には，iが大きくなるほどN_eはわずかながら増加する傾向にあるが排水区特性等によってまちまちであり一定していない。こうして計画年次の都市化率U_rがわかれば計画年次の等価粗度係数N_eを予測でき，ひいては流出ハイドログラフの予測が可能である。



図−1．$N_e-U_r/\bar{I}$ 相関

Ⅲ．都市化と流出ハイドログラフの予測

本論で適用した流出計算法は，特性曲線を利用した等価粗度法により，従来の対数図式法を更に改良して無次元化した方法によった。無次元式による連続・運動の方程式は各々

1). 斜面流出に対して

$$\frac{\partial\eta}{\partial\tau}+\frac{\partial\varphi}{\partial\xi}=\gamma\ (\text{連続の式}),\qquad 1-\frac{w^2}{\eta^{4/3}}=0\ (\text{運動方程式})\quad\cdots(5)$$

2). 河道流下に対して

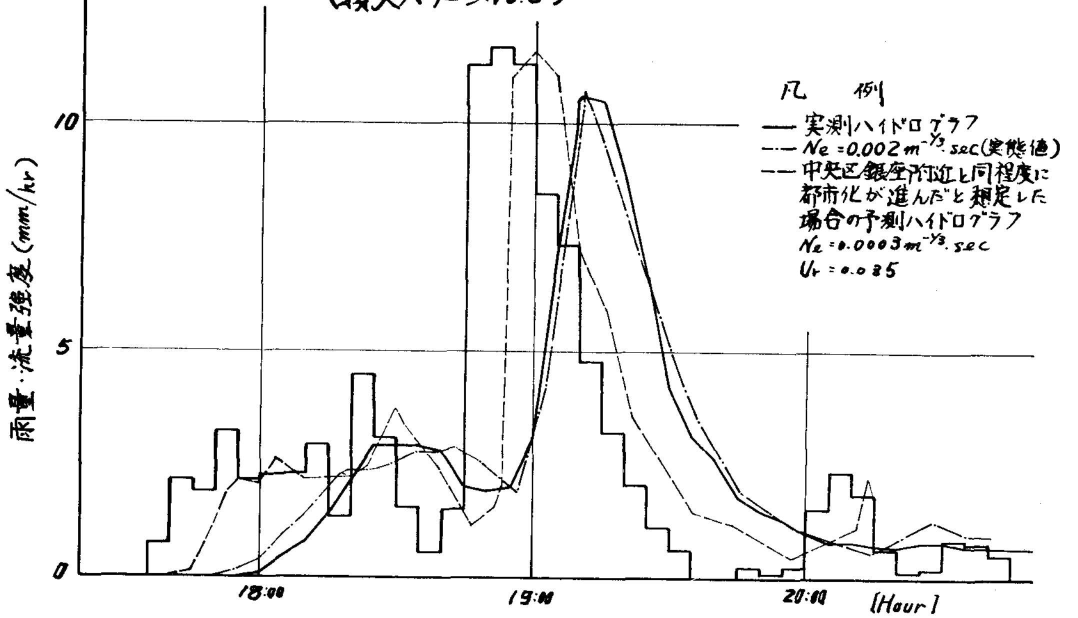
$$\frac{\partial S}{\partial T}+\frac{1}{m'}\frac{\partial\psi}{\partial\lambda}=\frac{\varphi_e}{m'}\ (\text{連続の式}),\qquad 1-\frac{V^2}{S^{2(P-1)}}=0\ (\text{運動方程式})\quad\cdots(6)$$

ただし $m'=T_r/T_s$，上記の(5)(6)式を基礎式として計算するが詳細は参考文献[2]に譲り，ここでは実降雨(S.44.9.17出水)，東京都桃園川排水区での計算例を示すと，計算条件は，

$F=5.106\,Km^2$，$L=3940\,m$，$B=1296\,m$（片側斜面），$\bar{I}=0.0172$，$r_0=10\,mm/hr$，$\Delta t=5\,min=300\,sec$

有効雨量の算出は，雨量・流出量の観測結果から$\Sigma R-\Sigma R_L$の間に$\Sigma R_L=0.701\,\Sigma R^{0.943}$なる関係を得ているのでこれを適用した。斜面の等価粗度係数N_eは，$N_e=0.002\,m^{-1/3}\cdot sec$（実態値）とした。また同排水区が仮りに東京都中央区銀座附近と同程度に都市化が進行したと想定した場合のN_eは同地区の都市化

図-2. 東京都桃園川排水区　S.44.9.17 出水
（損失パターン NO.3）



率U_rの値から$N_e=0.0003m^{-1/3}\cdot sec$と想定した。ただし有効雨量は便宜的に同一値を使用した。以上の計算結果は図-2に示している。上述した計算法では従来のようにN_eを仮定してtrial計算をする手順が省け一回の計算で実態値にほとんど等しいハイドロを求められる。計算結果によると都市化が進むほど流出パターンは降雨パターンに相似していくことを示し，流達時間は短かくなり流出量は増加する。ここで検討した等価粗度係数の予測方法は，将来予測はもちろん実態値の予測にも十分適用できるが，この予測精度の向上やその一般化と共に今後に残された2,3の問題点として

1). 損失パターンひいては有効降雨の将来予測
2). 流域や降雨特性と損失パターンの有機的な関係

等を究明する必要があるが，2)については多少検討した結果を次に簡単に述べよう。

IV. 流域や降雨特性と損失パターンの関係について

有効雨量の算出方法には色々な方法があるが，ここでは5ケースの損失パターンに対する有効雨量から同様の流出計算を行なって流出ハイドログラフへの影響度を検討し妥当な損失パターンの与え方について初歩的な検討を試みた。即ち損失パターンとして，

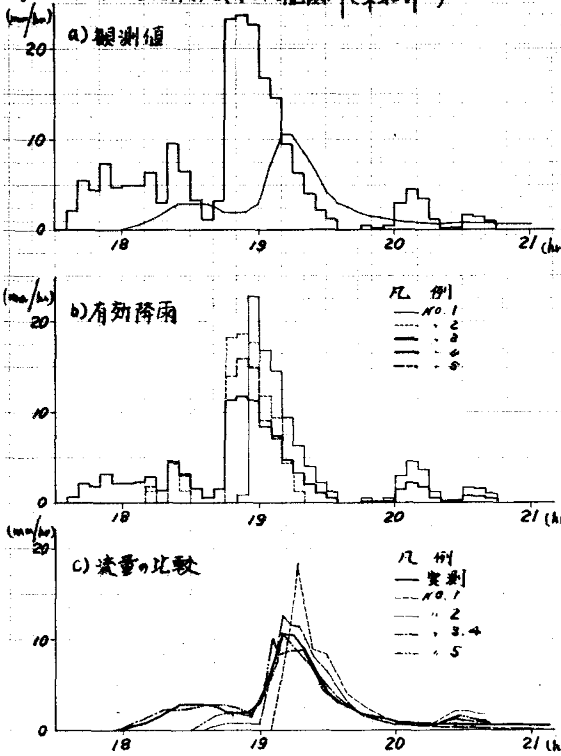
1). ケースI：$\Sigma R_L=\Sigma R(1-f)$を全部初期損失として降雨初期から差引く。
2). ケースII：$\Sigma R_L=f_0+\Sigma R_t(1-f)$とし，$f_0$を初期損失として降雨初期から差引き，残りは$R_t$から$(1-f)$に相当する量を順次差引く。
3). ケースIII：$\Sigma R_L=K\cdot\Sigma R^P$から$R_t$に対する有効降雨を求める。
4). ケースIV：不浸透率I_Pから排水区を浸透域と不浸透域に2分し，不浸透域の$f\fallingdotseq 1$とし，浸透域からは$(1-f)$に相当する量が流出するものとする。即ち有効雨量を$R_{r(t)}$とすると，

$R_r(t) = R(t)\cdot I_p + R(t)(1-I_p)(1-f)$ となる。tは時刻を表わす。

5). ケースⅤ：基本的な考え方はケースⅣと同じだが、浸透域、不浸透域で各々初期損失として、3mm, 1.5mm を見込んでいる。

以上の5ケースによる計算結果を図－3に示している。図のb),c)に示すように（ケースⅢ・Ⅳは）有効降雨のパターンも流出ハイドロもほとんど同一値を示し実測流出ハイドログラフともかなり良く一致している。特に都市域ではケースⅢ以下の方法が合理的であるようだ。またケースⅠ,Ⅱは山地の流出解析には適用できようが、不浸透率が50%以上にもなる都市域での流出現象とは矛盾している。即ち都市域では非常に小さな降雨であってもかなりの流出が現実に起っており、このことは損失がほとんど浸透域によるものであり、不浸透域からはすぐ流出すると考えれば説明がつく。降雨特性や前期降雨の有無や量の大小と損失パターンの関係についてはもっか検討中であるが、これらの有機的な関係を明確にし、計画論に折込めるような定量的な解析が必要だ。

1969.9.17 出水 桃園川（東京都）



図－3. 損失パターンと流出ハイドログラフの比較

Ⅴ. 結 論

幾多の流出計算法が発表されその一部はすでに流出解析に広く実用化されているが、従来の流出計算法は実態解析が主で定数決定などに多くのtrial計算を必要とした。こういった訳で従来の流出計算法は実態に追随した追随計画であったといえる。ところが計画が将来計画である以上計画年次の流出パターンを予測することが当然必要である。特に都市化現象の激しい地域では流出現象も急速に変化し、度々新興開発地域で浸水被害が誘発し、計画の再検討が必要になってきた。このような観点から予測手法の究明に当り等価粗度法の利点を利用し、極めて理論性には欠けるが予測手法の解明に一つの目安を与えた。今後もこういった方向の研究と同時に、水の循環機構を3分するなら従来の主研究である流出現象の前後に当る研究が必要であろう。即ち

1). 降雨パターンの予測から最適設計降雨の取り方等

2). 排除方式の検討（滞水池導入や人工湖等）から工事の実施順序等

流出現象の前後関係を明確にし、降雨の予測から処理処分の終端まで一環した計画がなされるようなシステムの開発が必要であると筆者は信じている。主な参考文献を2,3紹介しておく。

1). 上下水道における集配水の合理化に関する基礎的研究：末石冨太郎、京大学位論文、S.36.7.

2). 雨水流出量に関する基礎的研究：上田年比古、九大学位論文、S.36.8.

3). 東京都における雨水流出量調査報告書：土研資料第599号、土木研究所下水道研究室、S.45.3.