

1. は し か き

最近、流域の都市化に伴う流出機構の変化が問題とされ、その予測と推定手法の確立が急がれている。流出の内部機構に関する理論的研究はかなりの成果が得られており¹⁾、こうした成果を基に kinematic wave 法が実用に寄与されている段階である²⁾。しかし、この kinematic wave 法で、従来簡便的に用いられてきた Manning の抵抗則では、実際流域の複雑な流れの場（たとえば、表面流の完全乱流と層流の遷移領域、中間流と表面流の共存場、etc）を説明しきれない。また、次元をもつ Manning の等価粗度係数 N よりも無次元の friction factor を使用する方が普遍的考察には有利と考える。

以上のような Manning type の抵抗則の問題点に注目し、実際流域の種々の雨水流の場を比較的簡単に表現する方法を考察する。まず、流出点におけるさまざまな hydrograph にかなりの精度で適合させることができる black box 的流出解析法としての貯留関数法と、kinematic wave 法との関係について論じ、これらの関係式に等価抵抗係数を用いた概念的抵抗則を新しく導入する。

2. 貯留関数法と kinematic wave 法の関係

いま、流域全体を一つの等価な長方形斜面（斜面長： L 、巾： B 、勾配： I ）で置き換えられるような単位流域を考へる。kinematic wave 法表示によれば、斜面流の連続、および運動方程式は次式のようにかけよう。

$$\frac{\partial(\lambda h)}{\partial t} + \frac{\partial q}{\partial x} = r_e \quad (1), \quad h = k q^p \quad (2)$$

ここに、 r_e ：有効降雨強度、 q ：単位巾当りの流量、 h ：水深、であり、 λ は流れに参与する実質的な水深を表わすための h に対する補正係数とする。 $\lambda=1$ のとき、表面流の流れで、Manning 則のとき $p=2/3$, $k=(N/\sqrt{I})^{3/2}$ となる。 $\lambda=\lambda_0$ （＝表層の空隙率）のとき、中間流（表層内流れ）であり、Darcy 則のとき、 $p=1$, $k=1/KI$, (K ：透水係数）となる。

単位流域では、降雨継続時間は流れが斜面の下流端に到達するのに要する到達時間 t_{pc} より長い場合がほとんどであり、こうした場合について考えることにする。降雨強度が一一定であるとして、(1), (2) 式を解けば、次式

のようである。

$$\text{特性曲線: } x = (r_e t / \lambda k)^{1/p} / r_e \quad (3) \quad \text{上で}$$

$$q = (r_e t / \lambda k)^{1/p} \quad (4) \quad \text{or} \quad q = k x \quad (5)$$

また、到達時間 t_{pc} は次式で与えられる。

$$t_{pc} = \lambda k L^p r_e^{p-1} \quad (6)$$

斜面上の単位面積当りの貯留量を S とすれば、 $\frac{dS}{dt} = r_e - (q/L)$ 、を積分し、 $t=0$ で $S=0$ として、
$$S = \lambda k L^p q^p [1 + p(1 - \frac{x}{L})] / (1+p) \quad (7)$$
ここに、 x は特性曲線が $x=t=0$ を出発して時刻 t まで流下する距離であり、 q_0 は、 $q_0 = q/L$ 、で与えられる単位面積当りの流量である。

一方、貯留関数法による流出の基礎式は次式のようにある³⁾

$$r_e - q_e = \frac{dS_e}{dt} \quad (8), \quad S_e = k' q_e^{p'} \quad (9)$$

ここに、 k' , p' は係数、指数であり、 q_e は $q_e(t)$, $q_0(t)$ の生起時刻 t よりも遅滞時間 T_e だけ後に流出点に現われる単位面積当りの流量であり、次式で定義される。

$$q_e \equiv q_0(t + T_e) \quad (10)$$

また、 S_e は見かけ上の貯留量で、次式：

$$dS_e/dq_e = (dS/dq_e) - T_e \quad (11)$$

で定義され、 S_e はもちろんのこと、 S および T_e も q_e の 1 価関数であると仮定する。したがって、(7) 式を q_e で表わすとき、定常状態すなわち $x=L$ として、

$$S = \lambda k L^p q_e^p / (1+p) \quad (12)$$

$$\text{また、} \quad q_e = q_0 [1 + p(1 - \frac{x}{L})]^{1/p} \quad (13)$$

ここで、 $q_0(t) = r_e x / L \equiv r_m$, $q_e = q_0(t + T_e) = k' x' / L \equiv r_m'$, (14) とおき、(13) 式に (3), (4), (14) 式を代入すれば、次式が得られる。

$$T_e = \lambda k p r_e^{p-1} L^p (1-m) m^p \quad (15)$$

これを (11) 式に用いて、積分すれば、（積分定数無視）

$$S_e = S - \int_{T_e}^{q_e} T_e dq_e = \frac{\lambda k L^p}{1+p} q_e^p [1 - (1+p) \delta(p, m)] \quad (16) \\ \equiv k' q_e^{p'}$$

$$\text{ただし } L, \delta(p, m) = p \int_0^{m'} (1-m) m^p dm' / m'^p, m' = m [1 + p(1-m)]^{1/p} \quad (17)$$

$$\text{したがって、} p' = p, \quad k' = \frac{\lambda k L^p}{1+p} [1 - (1+p) \delta(p, m)] \quad (18)$$

また、 T_e と t_{pc} の間には (6), (15) 式より、

$$T_e = p(1-m) m^p t_{pc} \quad (19)$$

結局、(10), (19) 式より、 p と p' はまったく同一のものであり、 k と k' , T_e と t_{pc} の間には密接な関係があることが明ら

かとなる。従来、貯留関数法で流出解析の場合、 $p=\frac{2}{3}$ に一致しないことが多く、極端なときには $p=\frac{1}{2}$ 、あるいは $p>1$ となることがあったが、このことは逆にManning則では不十分であることを裏付けるものであろう。

3. 等価抵抗係数とその推定法

表面流、中間流を含む統一的な抵抗則として、次式のような平均流速式を次元解析的に設定する。

$$u = \frac{1}{F} \nu^{\frac{1-p}{2}} g^{\frac{1+p}{2}} I^{\frac{2-p}{2}(y-2)+1} h^p \quad (20)$$

ここに、 u : 斜面流の平均流速、 ν : 動粘性係数、 g : 重力加速度、 y : 水深の指数、である。 F は流域全体の平均的抵抗を表す無次元の係数で、これを等価抵抗係数と名付けることにする。(20)式で、 $y=1/2$ とすれば、 $u = \sqrt{g h^3} / F$ 、すなわち Darcy-Weisbach の形になり、 $y=2$ とすれば、 $u = g h^2 / F \nu$ 、となり周知の層流表示の形となる。また、 $y=0$ とすれば、 $u = (\nu g)^{1/3} I / F$ 、となり Darcy 則とよく似た形になる。

さて、(20)式と(2)式は等価なはずであるから、

$$y = (1-p)/p \quad (21), \quad R = F \nu^{\frac{1-p}{2}} g^{\frac{1+p}{2}} I^{-\frac{2-p}{2}} \quad (22)$$

ここに、 $R = 1 + \frac{2}{3} \frac{(1-p)}{p} \frac{(1-3p)}{p}$ 、である。Manning の等価粗度係数 $N = h^{1/6} I^{1/2} / u$ と F の関係は次式のようにある。

$$N = F^{\frac{1}{2}} \nu^{\frac{1}{2}} g^{-\frac{1}{2}} I^{\frac{1}{2}-\frac{5p}{2}} R^{\frac{5p-1}{2}} \quad (23)$$

ここに、 $R_g = g_0 L / \nu$ 、である。

実際に等価抵抗係数 F を求めるには比較的解析の簡単な貯留関数法で、まず p, R, T_e , etc を求めておけばよいだろう。(15), (18) 式によれば、

$$T_e / [p(1+p) R' R^{p-1}] = (1-m) m^p / [1 - (1+p) \delta(p, m)] \quad (24)$$

であるから、(24)式の左辺は定まり、 $m' = R'/L$ は 1 に近いことを考慮して、parameter: m or m' を求めれば、(18), (22) 式より F が得られる。すなわち、

$$F = \left(\frac{g}{\nu} \right)^{1/p} I^{\frac{1}{p}} \left[\frac{R' (1+p)}{\lambda \{1 - (1+p) \delta(p, m)\}} \right]^{1/p} \cdot \frac{\nu}{L} \quad (25)$$

もし、 p と t_{pc} があらかじめ知られている場合は、(19)式と(22)式から得られる次式で F は与えられる。

$$F = (g \nu)^{1/p} I^{\frac{1}{p}} [t_{pc} R^{1-p} / \lambda L]^{1/p} \quad (26)$$

ここに、 $R_{er} = R_e L / \nu$ 、である。

4. 山地小流域における解析例

農林省、流出試験の内、万力山、南宮原、立花および逆川の資料⁴⁾を貯留関数法により解析し、推定到達時間 T_e および N , etc を求めて見ると表-1 のようである。実際の hydrograph と計算値を示せば図-1(a)~(f) のようであり、実測値と計算値の適合性がきわめてよい。このことは、逆

に、表-1 から明らかなように、単位流域であっても、Manning 則の $p=\frac{2}{3}$ が保証されるとは限らないことを実証するものであろう。解析例が少なく明言しかねるが、表-1 の F, t_{pc}, N etc の値はこうした貯留関数と統一的抵抗則による等価抵抗係数の推定法の妥当性を示すものと考えられる。また、従来の等価粗度係数 N よりもここで提案した F の方が有利と思われ、今後、室内実験と実際流域の資料を追加して、 p と F の関係 etc の詳細な検討により理論の充実に努めたい。

表-1 p, t_{pc}, F, N

NO.	流域	$q_{0, \max}$ (mm/hr)	p	t_{pc} (hr)	F	N ($m^{1/2} s$)
1	万力山	2.58	.5943	6.57	1.297×10^1	.5475
2	"	3.25	.7591	12.46	1.714×10^0	1.8555
3	南宮原	1.03	.3938	8.10	4.778×10^{-3}	.2769
4	"	1.81	1.3210	7.88	5.949×10^{-8}	.3851
5	立花	1.64	.8710	6.99	4.504×10^{-1}	.7617
6	逆川	6.20	1.0112	12.88	9.133×10^{-3}	.4628

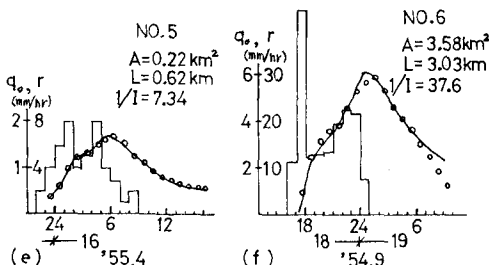
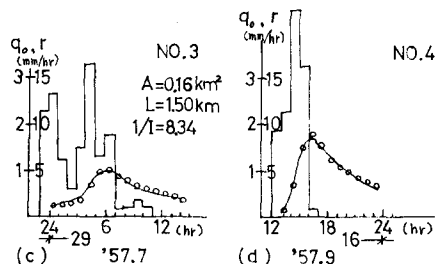
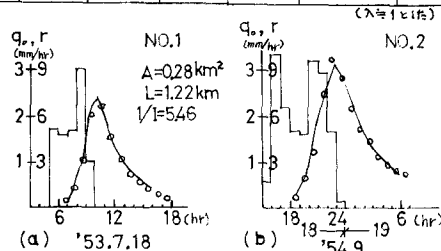


図-1 実測 hydrograph (open) と計算値 (solid)

(参考文献)

- 1) 高柳琢馬; 洪水流出の分析と総合に関する基礎的研究, 京大工学論文, 昭.46.6
- 2) 角屋・国; 市街地域の雨水流出特性, 京大防災研年報, 第14号B, 昭.46.4
- 3) 木村俊晃; 洪水流出の推定法に関する研究(1), 土木研究所報告, 第102号, 昭.44.3
- 4) 金子良他; 小流域における流出機構の研究, 農研報告, F, 第12号, 昭.35.3