

## 河道網系の最高次数と河道数分布

福 島 晨\*

Akira FUKUSHIMA

### Maximum Order and Distribution of Stream Number in Stream Network Systems

#### 1. ま え が き

本来、分布系である雨水流出システムを集中化し、実用的な雨水流出モデルで流出解析しようとする場合、モデル構造が確定していることを前提としても、流出モデル定数の推定についてはなお検討すべき点が残されている。これは雨水の変換場としての流域の特性、ないし雨水伝播の境界場としての地文条件と流出特性との定量的な関係がまだ十分吟味されていないことによる。

したがって、たとえば農地造成などにより流域内の土地利用形態の変化に伴う洪水流出特性を議論しようとしても、流出モデル定数と流出に関与する地形・地文条件の関係が必ずしも明確でないため、モデル定数をどのように変えればよいかの基準も不明である。

ところで、流出に関与する流域地形の評価については計量地形学分野での研究成果を応用することが考えられる。たとえば、水文学的観点からは雨水流の伝播過程を特徴づける河道配列構造が一つの重要な流域特性としてあげられる。この河道配列の定量的表示についてはHortonの河道次数の提唱以来、種々の次数化方式が提案されているが、流出特性の分析には、こうした河道分類法と流出モデル定数とを関連づけた議論が必要と思われる。

本研究はそうした流域地形の計量評価により、流出モデル定数の合理的推定法を探索するための基礎的研究として、河道次数およびStrahler方式による河道網系の次数化による次数別河道数について検討したものである。

#### 2. 単位流域と河道網系の最高次数

流出現象を対象とした単位流域の設定法として、i) 実用上、流出解析に考慮しなければならない最小流域、

ii) 流出現象そのものを忠実に表現しうる最小流域の2通りが考えられる。いまi)の見方で単位流域を設定しようとする場合、すなわち、流域末端での流量をある精度以内で推定しようとする場合、単位流域の大きさはいくらにすべきか、また流出特性を表現する流出モデル定数と単位流域との関係はどうかという問題が生ずる。

たとえば、kinematic wave法による流出解析では流域をいくつかのブロックに分割し、流域モデルが作成される。この流域分割は一応、河道の合流点、地形や地目の急変する点を境にして流域のブロック化がなされるが、流域地形特性と流出モデル定数との関連を議論しようとする場合、なお検討すべき点が残されている。

ところで、国土地理院発行の $\frac{1}{5}$ 万、 $\frac{1}{2.5}$ 万地形図上に表示される河川は、平水時において常時水流のある水路であって、その川幅が1.5m以上、かつ図上長が2cm( $\frac{1}{5}$ 万)、または1cm( $\frac{1}{2.5}$ 万)以上とされている。しかし、二、三の流域について源流部を現地踏査したところ、地形図には表示されていない流路が非常に多く、また現に水路ではない山間道でも豪雨時には流路としての役割を果しているものが多いことがわかった。こうした河道としての機能をもつ細流の実態は、現地踏査をしないかぎり不明であるが、現実の問題として、現地踏査は多くの困難を伴う。したがって洪水流出過程におけるこれら細流の効果、役割についてはなお議論すべき点が多いが、これについては逐次解明を続けたいと考えている。

さて、河道網の定量的分類法として地形解析に常用されているStrahlerの方法はi)水源部上流端の河道を1次河道とし、ii)次数 $u$ と次数 $v$ の河道が合流してできる河道部分の次数は $u > v$ のときは $u$ 次河道、 $u = v$ のときは $u + 1$ 次河道とする手法である。

表-1は $\frac{1}{20}$ 万、 $\frac{1}{5}$ 万、 $\frac{1}{2.5}$ 万、および $\frac{1}{1}$ 万地形図に記載の河道網における1次、2次河道数ならびに最高次

\* 農業水工学研究室

数を比較した例である。このように同一流域でも地図スケールにより、次数別河道数、流域の最高次数は異なりまたある地図スケールの河道網における1次河道を基準に流域分割した場合、流域分割数は大流域ほど増大する。

しかし、洪水流出現象は大流域ほど平均化される傾向にあるから、実用上、流域面積に応じた単位流域の大きさを設定することが可能と考えられる。

一方、 $\frac{1}{2}$ .5万地形図上等高線の幅奥行き比  $w/l=1$  の点までを河道とみなし、それによって構成される河道網は豪雨時の水みちを形成する溪流部までほぼ評価されることになるが、たとえば串良川流域（流域面積  $A=27.7\text{km}^2$ ）の場合、表-2のように1次河道数  $N_1=302$  となる。いま  $u$  次河道を基準に単位流域を構成したものを  $u_*$  次流域モデルとすると、1, 2, 3次流域モデルのブロック数はそれぞれ603, 150, 35となり、河道に付随する左右非対称の斜面数はそれぞれ1206, 300, 70となる。したがって、この場合1, 2, 3次流域モデルでは流出計算の単位となる斜面数が多くかなり煩雑な計算を必要とすることになり、かつ流出計算に必要な斜面定数、河道定数の推定のあいまいさも加わるから、実際にはさらに高次の集水域を単位流域とする集約した流域モデルによって流出解析を行い、流出モデル定数を同定するのが実用的といえる。

さて、kinematic wave 法による流出解析では前述のように流域をいくつかのブロックに分割して流域モデル

が作成される。丘陵山地流域の河道網系においては、Strahler 方式の最高河道次数を  $w$  とすると、この分割基準として  $(w-2)$  次ないし  $(w-3)$  次程度の支流域<sup>1)</sup>を単位ブロックとすればよいという考えがある。したがって、ある特定の流域において河道網系の最高次数が何次程度になるかの評価法が得られれば、単位流域の選定問題をより具体的に議論することが可能となる。

河道網系において何次河道が最高次数となり、また低次の河道が何本形成されるかについては、河川流域の統計則より導かれたつぎの $\frac{1}{4}$ 則により近似的な推定が一応可能である。

$$\frac{1}{4}\text{則} : N_u/N_{u-1} = \frac{1}{4}, u=2, 3, 4, \dots, w \dots\dots(1)$$

ここに、 $N_{u-1}$ ,  $N_u$  はそれぞれ  $(u-1)$  次,  $u$  次河道数。

流域の1次河道数  $N_1$  が与えられた場合、 $w$  と  $N_1$  との関係は(1)式より

$$w = 1.0 + 1.66 \log_{10} N_1 \dots\dots(2)$$

と表わされる。

一方、河道網に関して河道配分数の期待値を与える $\frac{3}{4}$ 則<sup>2)</sup>がある。

$$\frac{3}{4}\text{則} : {}_vN_u/N_u = (\frac{3}{4}) (1/4)^{v-u-1}, v=u+1, u+2, \dots, w \dots\dots(3)$$

ここに  ${}_vN_u$  は  $u$  次河道のうち  $v$  次河道に流入する河道数。

表-1 地図スケールと河道数

流域名	流域面積 (km <sup>2</sup> )	u=1				u=2				最高次数 (MAP 3)	
		MAP 1	MAP 2	MAP 3	MAP 4	MAP 1	MAP 2	MAP 3	MAP 4	St. 方式	N <sub>1</sub> 方式
白川	5.66	1	1	1	24	0	0	0	6	1	1
小畑川	12.46	1	2	8	21	0	1	2	6	3	4
串良川	27.74	2	7	8	—	1	2	3	—	3	4
大迫ダム	111.29	12	38	46	—	5	10	12	—	4	6
湯田ダム	570.98	49	161	200	—	13	40	45	—	5	8

\*MAP 1; 1/200000, MAP 2; 1/50000, MAP 3; 1/25000, MAP 4; 1/10000

表-2  $u_*$  次流域モデルのブロック数

流域モデル基準次数	外部リンク数	内部リンク数	流域分割ブロック数
$u_*=1$	302	301	603
=2	76	74	150
=3	18	17	35
=4	5	4	9
=5	1	0	1

表-3 河道次数  $u$  と河道数  $N_u$  (Strahler 方式)

流域地形図	河道次数	
	斐伊川	湯田ダム
	1 : 50,000	1 : 50,000
$u=1$	$N_u=123$	$N_u=161$
=2	= 28	= 40
=3	= 8	= 7
=4	= 2	= 3
=5	= 1	= 1

(1), (3)式より1本の  $u$  次河道には, 平均として3本の  $(u-1)$  次河道が付随し, そのうち2本は  $u$  次河道の上流端で合流し, 残りの1本は  $u$  次河道のほぼ中央で合流することが期待される. 表-3は河道網系をStrahler方式で次数化した場合の次数別河道数の1例である. 同表より確かに低次においてはほぼ $\frac{1}{4}$ 則が成立しているが, 高次では $\frac{1}{4}$ 則からはずれる傾向にある. この傾向は $\frac{1}{4}$ 則についても指摘される.  $\frac{1}{4}$ 則,  $\frac{1}{2}$ 則はともに  $N_u$  が十分大きい場合に成立することを前提としているから, 有限領域で境界づけられる実流域の河道網では高次河道について $\frac{1}{4}$ 則,  $\frac{1}{2}$ 則からのズレは当然予想されるところである. したがって, (2)式から推定される最高次数  $w$  は過小評価される傾向にあるといえる.

そこで, 「地質的影響が強く作用しない場合には, 自然の河道網はトポロジックランダムである」という仮定を用いた Shreve の研究成果<sup>3)</sup>を基礎にして河道網系の最高次数  $w$  の形成確率を検討してみる.

Shreve はマグニチュード理論によりマグニチュードと河道次数との関係を定式化しているので, これを利用すると, 1次河道数が  $N_1$  本ある集水域を Strahler 方式で次数化した場合, 河道網の最高次数が  $w$  となる確率  $P(w)_{N_1}$  は次式で表わされることになる.

$$P(w)_{N_1} = \frac{(2N_1-1)2^{(2N_1-1)}}{\binom{2N_1-1}{N_1}} p(N_1, w) \left. \begin{array}{l} p(N_1, w) = \frac{1}{2} \sum_{\alpha=1}^{N_1-1} \left[ p(\alpha, w-1) \right. \\ \left. \cdot p(N_1-\alpha, w-1) + 2p(\alpha, w) \right. \\ \left. \sum_{\beta=1}^{w-1} p(N_1-\alpha, \beta) \right] \end{array} \right\} \dots\dots (4)$$

ただし,  $p(1, 1) = \frac{1}{2}$ ,  $p(N_1, 1) = 0$ ,  $p(1, w) = 0$ ,  $N_1, w = 2, 3, 4, \dots$

$N_1 = 2^i$  ( $i=3, 4, \dots, 10$ ) としたときの  $N_1$  と  $w$  および  $P(w)_{N_1}$  の関係を表-4に示す. なお, 同表には河道網を  $N_1$  方式<sup>4)</sup>すなわち  $u = \lceil \log_{10} 2N_1 / \log_{10} 2 \rceil$  (ここに  $\lceil \ \rceil$  はガウス記号) で次数化した場合の最高次数  $u_m$  も併記してある.

表-4より河道網系を Strahler 方式で次数化した場合,  $N_1=8, 16$  の集水域ではともに  $w=3$ ,  $N_1=32, 64$  の集水域では  $w=4$ ,  $N_1=128, 256$  の集水域では  $w=5$ ,  $N_1=512, 1024$  の集水域では  $w=6$  となる確率が最も高く, 約0.74~0.85となっている. またそれらの次数より1次低次ないし高次の集水域に評価される確率も0.15~0.26であることが指摘される.

また図-1は集水域の1次河道数  $N_1$  の増大に伴い

最高次数  $w$  の形成確率  $P(w)_{N_1}$  がどのように変化するかを  $w=2\sim 7$  について数値計算した結果を示したものである. 図-1より  $w=3$  以上の各  $w$  に対し  $N_1$  と  $P(w)_{N_1}$  との関係は次式で表わされるといえる.

$$P(w)_{N_1} \approx \frac{a}{\sigma_n \sqrt{2\pi}} \exp \left[ -\frac{1}{2} \left( \frac{\ln N_1 - \mu_n}{\sigma_n} \right)^2 \right] \dots(5)$$

ここに,  $\mu_n$  は  $\ln N_1$  の平均値,  $\sigma_n$  は  $\ln N_1$  の標準偏差,  $a$  は定数である. 各  $w$  に対する  $\mu_n, \sigma_n, a$  の値を表-5に示す.

表-4 河道網系の最高次数と  $P(w)_{N_1}$  の関係

1次河道数 $N_1$	$N_1$ 方式	Strahler 方式	$P(w)_{N_1}$
$N_1 = 8$	$u_m = 4$	$w = 2$	0.1492
		$= 3$	0.8485
		$= 4$	$0.2331 \times 10^{-2}$
$N_1 = 16$	$u_m = 5$	$w = 2$	$0.1690 \times 10^{-2}$
		$= 3$	0.7533
		$= 4$	0.2450
		$= 5$	$0.1031 \times 10^{-6}$
$N_1 = 32$	$u_m = 6$	$w = 2$	$0.7382 \times 10^{-7}$
		$= 3$	0.1714
		$= 4$	0.8206
		$= 5$	$0.7997 \times 10^{-2}$
		$= 6$	
$N_1 = 64$	$u_m = 7$	$w = 3$	$0.3072 \times 10^{-2}$
		$= 4$	0.7432
		$= 5$	0.2537
		$= 6$	$0.3825 \times 10^{-5}$
$N_1 = 128$	$u_m = 8$	$w = 3$	$0.3460 \times 10^{-6}$
		$= 4$	0.1763
		$= 5$	0.8141
		$= 6$	$0.9541 \times 10^{-2}$
$N_1 = 256$	$u_m = 9$	$w = 4$	$0.3479 \times 10^{-2}$
		$= 5$	0.7408
		$= 6$	0.2557
		$= 7$	$0.6073 \times 10^{-5}$
$N_1 = 512$	$u_m = 10$	$w = 4$	$0.4777 \times 10^{-6}$
		$= 5$	0.1775
		$= 6$	0.8125
		$= 7$	$0.9933 \times 10^{-2}$
$N_1 = 1024$	$u_m = 11$	$w = 5$	$0.3584 \times 10^{-2}$
		$= 6$	0.7402
		$= 7$	0.2563
		$= 8$	$0.6744 \times 10^{-5}$

さらに、(4)式による数値計算結果より各  $w$  に対して、 $P(w)_{N_1}$  が80%以上あるいは50%以上となる  $N_1$  の範囲を求めると表-6 のようになる。たとえば最高次数  $w=5$  となる確率が最も高いのは  $N_1=171$  の集水域で、この場合  $P(w)_{N_1}=0.8945$ 、また  $N_1=125\sim 233$  の集水域は80%以上の確率で、 $N_1=86\sim 341$  の集水域は50%以上の確率で  $w=5$  となる。これらの結果より、 $P(w)_{N_1}$  が10%以上となる  $N_1$  を対象とする限り、任意の  $N_1$  に対し最高次数  $w$  は高々2通りと考えてよいといえる。

一方、国土地理院発行の1/2.5万、1/5万地形図上の河道網系における単位面積当りの1次河道数と流域面積との関係を図示すると図-2 のようになる。これより1/2.5万地形図上の河道網では  $N_1/A \approx 0.20\sim 0.50$  で平均0.30、1/5万地形図上では  $N_1/A \approx 0.15\sim 0.35$  で平均0.25と評価される。

以上の  $N_1 \sim w$  および  $N_1/A = \text{const.}$  の関係を用いると、Strahler方式で河道網系を次数化した場合、流

域面積  $A(\text{km}^2)$  と最高河道次数  $w$  との関係は次式で近似されることになる。

$$\frac{1}{2.5}\text{万地形図} : w = 1.65 \log_{10} A + 0.47 \dots \dots (6)$$

$$\frac{1}{5}\text{万地形図} : w = 1.65 \log_{10} A + 0.34 \dots \dots (7)$$

$w$  は整数値をとるから上式による  $w$  の推定値は四捨五入するものとする。また、河道網系を  $N_1$  方式で次数化した場合、 $A$  と  $u_m$  の関係は次式で近似される。

$$\frac{1}{2.5}\text{万地形図} : u_m = [3.32 \log_{10} A - 0.74] \dots \dots (8)$$

$$\frac{1}{5}\text{万地形図} : u_m = [3.32 \log_{10} A - 1.0] \dots \dots (9)$$

ここに  $[ ]$  はガウス記号である。

これらの式より推定される  $A \sim w$ 、 $A \sim u_m$  の関係を表-7に示す。表-7の値は河川流域の河道網系の最高次数の目安を与えよう。また他の定義による河道網系に対しては  $N_1/A$  の値が変化するため、上式の定数項のみが変わり、やはり同形式の推定式が得られることにな

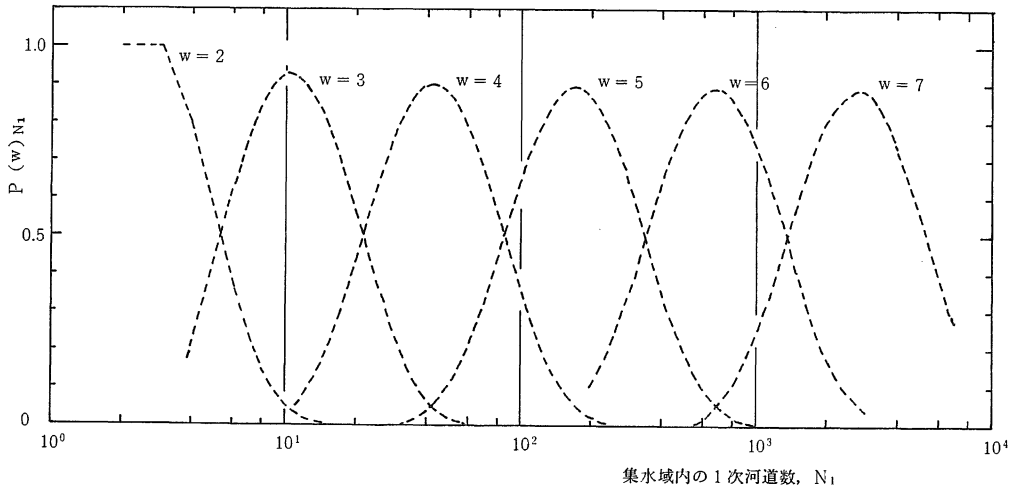


図-1 1次河道数  $N_1$  本を含む集水域における最高河道次数  $w$  の形成確率  $P(w)_{N_1}$

表-5 各  $w$  に対する  $\mu_n, \sigma_n, a$  の値

$w$	$\mu_n$	$\sigma_n$	$a$
$w = 3$	2.30	0.538	1.36
$w = 4$	3.76	0.574	1.38
$w = 5$	5.14	0.584	1.38
$w = 6$	6.53	0.585	1.38

表-6 各  $w$  に対して  $P(w)_{N_1}$  が最大、80%以上および50%以上となる  $N_1$

最高次数 (Strahler 方式)	最大値		$P(w)_{N_1} \geq 80\%$	$P(w)_{N_1} \geq 50\%$
	$N_1$	$P(w)_{N_1}$	$N_1$	$N_1$
$w = 2$	2, 3	1.0	2~ 4	2~ 5
$w = 3$	10	0.9231	8~ 14	6~ 21
$w = 4$	43	0.9004	31~ 53	22~ 85
$w = 5$	171	0.8945	125~ 233	86~ 341
$w = 6$	683	0.8927	501~ 931	343~1366
$w = 7$	2727	0.8887	2016~3680	1372~5430

る。

### 3. 河道網系における河道数分布

Shreve は河道網系を Strahler 方式で次数化した場合、最高次数が  $w$  となり、かつ次数別河道数が  $(N_1, N_2, \dots, N_{w-1}, 1)$  となるトポロジー的に区別しうる河道網（以下、TDCN と略称する）の総数を次式のように定式化している。

$$N(N_1, N_2, \dots, N_{w-1}, 1) = \prod_{u=1}^{w-1} 2^{(N_u - 2N_{u+1})} \binom{N_u - 2}{N_u - 2N_{u+1}} \dots \dots (10)$$

ここに  $N_u$  は  $u$  次河道数である。

そこで、1次河道数を  $N_1$  本含む Strahler 方式による最高次数が  $w$  となる TDCN の総数で  $N(N_1, N_2, \dots, N_{w-1}, 1)$  の TDCN の数を割ると、(10) 式で表わされる TDCN の形成確率  $p(N_1, N_2, \dots, N_{w-1}, 1)$  を計算することができる。

しかしこの計算結果からは一般に  $N_u$  がどのような確率分布をするかは不明である。

このように集水域内の1次河道数  $N_1$  が同一でも、 $u$  次河道数  $N_u$  は平均としては  $1/4$  則にしたがう値が期

待されながらも、ある分布をすることになる。以下、集水域内の1次河道数が与えられた TDCN において  $u$  次河道数  $N_u$  はどのような分布様相を示すか検討する。

さて、1次河道数を  $N_1$  本含む集水域の最下流部において図-3のようにマグニチュード  $\nu$  と  $(N_1 - \nu)$  のリンクが合流し、マグニチュード  $N_1$  のリンクを形成する確率  $P_{\nu, N_1}$  は次式で与えられる。

$$P_{\nu, N_1} = (2 - \delta_{\nu, \frac{N_1}{2}}) \frac{2N_1 - 1}{2(2\nu - 1)\{2(N_1 - \nu) - 1\}} \binom{2\nu}{\nu} \binom{2(N_1 - \nu)}{N_1 - \nu} / \binom{2N_1}{N_1} \dots \dots (11)$$

ここに  $\delta_{\nu, \frac{N_1}{2}}$  はクロネッカーのデルタ記号である。

上式の関係を用いると、1次河道数が  $N_1$  本ある集水域において、 $u$  次河道が  $N_u$  本形成される確率  $P(u, N_u)_{N_1}$  は次式のように表わされる。

$$P(u, N_u)_{N_1} = \sum_{\nu=1}^{\nu_1} \sum_{\alpha=0}^{\alpha_1} (2 - \delta_{\nu, \frac{N_1}{2}}(\alpha, \beta)) P_{\nu, N_1} \cdot P(u, \alpha)_{\nu} \cdot P(u, \beta)_{N_1 - \nu} \dots \dots (12)$$

ここに、 $\nu_1 = \lfloor N_1/2 \rfloor$ ,  $\alpha_1 = \lfloor \nu/2^{u-1} \rfloor$ ,  $\beta = N_u - \alpha$ ,  $P(2, 1)_2 = P(2, 1)_3 = 1$ ,  $N_1 \leq 2^{u-1} - 1$  のとき  $P(u, 0)_{N_1} = 1$ 。

また  $\nu = N_1/2$  でかつ  $\alpha \neq \beta$  の場合、 $\delta_{\nu, \frac{N_1}{2}}(\alpha, \beta) = 0$ 、その他の場合  $\delta_{\nu, \frac{N_1}{2}}(\alpha, \beta) = 1$  である。

また(12)式による数値計算をすすめるに際し、Strahler の河道次数の定義により、リンク  $\nu$  と  $(N_1 - \nu)$  の河道次数が等しい場合、リンク  $N_1$  の河道次数は1次だけ増加することを考慮しなければならない。

表-8は  $N_1 = 32$  の集水域において2次および3次河道数の形成確率  $P(u, N_u)_{N_1}$  を示したものである。この場合、2次、3次河道の可能最大数はそれぞれ16, 8であるが、表8の結果よりこのような河道配列が期待されることは皆無と考えてよさそうである。2次、3次河道数のモードはそれぞれ8, 2となっており、平均としては河道数に関しての  $1/4$  則が成立している。図-4は  $N_1 = 8, 16, 32, 64, 128$  の集水域において形成される  $u=2$  の河道数のヒストグラムを示したものである。

また図-5は同様に  $u=3$  についての確率分布を示したもので、正規確率紙上で直線近似される。

これらの結果、また他の  $N_1$  についての  $N_u$  および  $P(u, N_u)_{N_1}$  の数値計算結果より、 $N_u$  の分布は

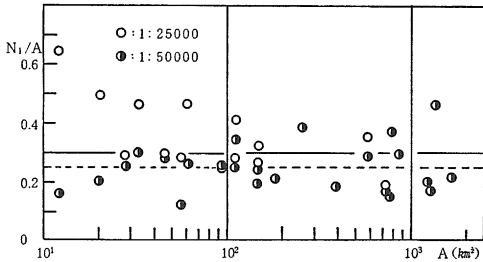


図-2 流域面積と単位面積当りの1次河道数との関係

表-7 流域面積と河道網系の最高次数との関係

流域面積 (km <sup>2</sup> )	1 : 25000		1 : 50000	
	St. 方式	N <sub>1</sub> 方式	St. 方式	N <sub>1</sub> 方式
A = 10	w = 2	u <sub>m</sub> = 2	w = 2	u <sub>m</sub> = 2
= 50	= 3	= 4	= 3	= 4
= 100	= 4	= 5	= 4	= 5
= 200	= 4	= 6	= 4	= 6
= 300	= 5	= 7	= 4	= 7
= 500	= 5	= 8	= 5	= 7
= 1000	= 5	= 9	= 5	= 8
= 1500	= 6	= 9	= 6	= 9
= 2000	= 6	= 10	= 6	= 9

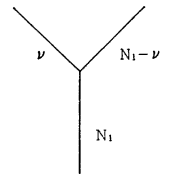


図-3 マグニチュード  $\nu$  と  $(N_1 - \nu)$  の合流によるマグニチュード  $N_1$  のリンクの形成

表-8 2次および3次河道数の形成確率  
 $P(u, N_u)_{N_1}$ , ( $N_1=32$ )

河道数 $N_u$	$P(u, N_u)_{N_1}$	
	$u=2$	$u=3$
$N_u = 0$	0.0	$0.7382 \times 10^{-7}$
= 1	$0.7382 \times 10^{-7}$	$0.1714 \times 10^0$
= 2	$0.8028 \times 10^{-5}$	$0.5095 \times 10^0$
= 3	$0.2529 \times 10^{-3}$	$0.2805 \times 10^0$
= 4	$0.3425 \times 10^{-2}$	$0.3742 \times 10^{-1}$
= 5	$0.2363 \times 10^{-1}$	$0.1185 \times 10^{-2}$
= 6	$0.9097 \times 10^{-1}$	$0.7087 \times 10^{-5}$
= 7	$0.2058 \times 10^0$	$0.4393 \times 10^{-8}$
= 8	$0.2811 \times 10^0$	$0.2950 \times 10^{-13}$
= 9	$0.2343 \times 10^0$	
=10	$0.1184 \times 10^0$	
=11	$0.3553 \times 10^{-1}$	
=12	$0.6056 \times 10^{-2}$	
=13	$0.5435 \times 10^{-3}$	
=14	$0.2240 \times 10^{-4}$	
=15	$0.3200 \times 10^{-6}$	
=16	$0.6666 \times 10^{-9}$	

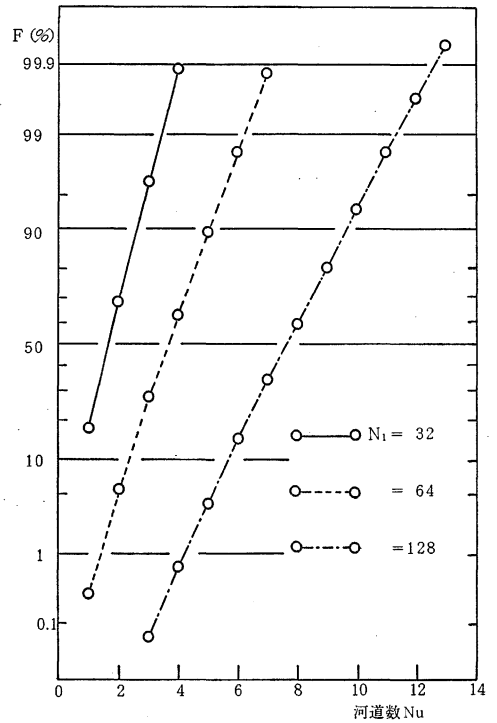


図-5 河道数  $N_u$  の確率分布 ( $u=3$ )

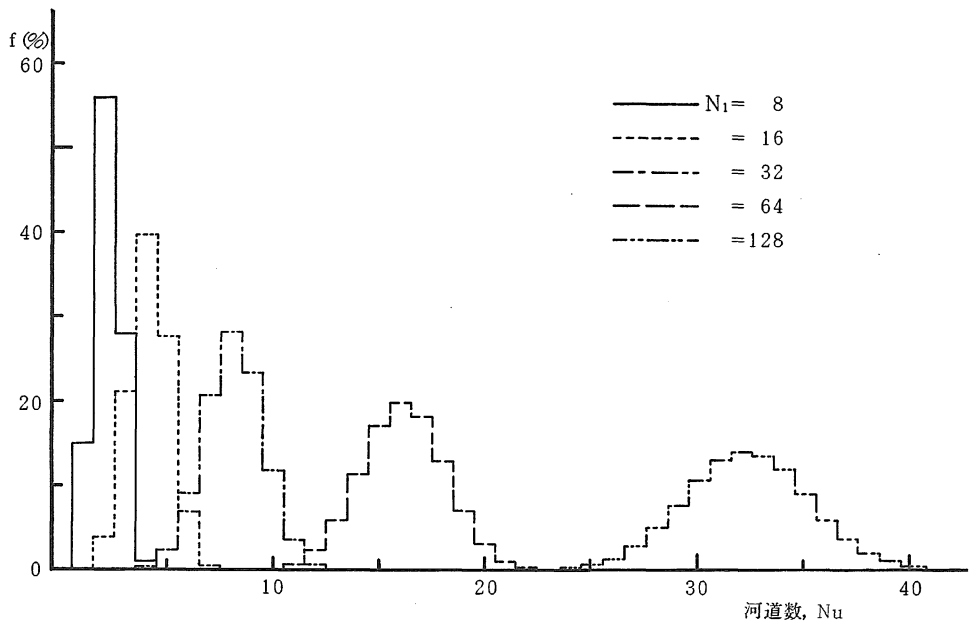


図-4 河道数  $N_u$  のヒストグラム ( $u=2$ )

$N_1$  の増大とともに正規分布に漸近するといえるが、分散は大きくなる傾向が指摘される。

また、表-9は  $N_1=4, 8, 16, 32, 64, 128$  の河道網系における  $u=2, 3, 4$  の平均河道数  $\bar{N}_u$  および  $N_u$  の標準偏差  $s$  を示したものである。これより1次河道数を  $N_1$  本含む集水域内の平均  $u$  次河道数は河道数に関する $\frac{1}{4}$ 則をほぼ満足し、 $N_u$  の標準偏差は  $N_1$  の増大とともに直線的増加傾向にあるといえる。

表-9 次数別平均河道数と標準偏差

$N_1$	$u=2$		$u=3$		$u=4$	
	$\bar{N}_u$	$s$	$\bar{N}_u$	$s$	$\bar{N}_u$	$s$
4	1. 20	0. 40	0. 20	0. 40	—	—
8	2. 15	0. 67	0. 85	0. 36	0. 0	0. 05
16	4. 14	0. 98	1. 25	0. 44	0. 24	0. 43
32	8. 13	1. 40	2. 19	0. 76	0. 84	0. 39
64	16. 13	1. 99	4. 17	1. 10	1. 26	0. 46
128	32. 10	2. 82	8. 16	1. 57	2. 20	0. 78

#### 4. あとがき

本研究では河道網系における河道配列構造の定量的表示法に用いられている河道次数および次数別河道数の分布について、河道網のトポロジー的ランダム性の仮定を基礎にして若干の検討を行った。その結果、河道網系を Strahler 方式で次数化した場合、河道網系の最高次数の形成確率が集水域内の1次河道数  $N_1$  をパラメータにしてどのように変化するかが明らかになった。また、Strahler 方式で次数化した場合、最高次数の形成確率は対数正規分布式を利用して推定しうること、最高次数の形成確率が10%以上となる1次河道数  $N_1$  を含む

集水域を対象とする限り、任意の  $N_1$  に対し最高次数  $w$  は高々2通りと考えてよいことがわかった。さらに $\frac{1}{2}$ .5万、 $\frac{1}{4}$ 万地形図上の単位面積当りの1次河道数がほぼ一定値とみなされるものとして、流域面積と河道網系の最高次数との関係の近似式を得た。ついで河道網系を Strahler 方式で次数化した場合、次数別河道数  $N_u$  の形成確率を再帰的表現で定式化し、 $N_1$  の増大に伴い  $N_u$  の分布は正規分布で近似されることを示した。

これらの結果は、たとえば kinematic wave 法による流出解析を行う場合の流域分割の基準ないし単位流域の選定問題、さらには流域地形の計量評価、流域地文条件と流出特性を表現する流出モデル定数との関連を今後検討していくうえにおいて有用な指針を与えるものと思われる。

最後に、本研究にあたり御指導を賜った京都大学防災研究所角屋睦教授、島根大学農学部田中礼次郎教授、および計算・資料整理に御協力を賜った本学の堀江昭彦事務官ならびに農業水理工学専攻生の前田祐一君、河原俊明君に深甚なる感謝の意を表する次第である。

なお、本報告は文部省科学研究費による研究成果の一部であり、また数値解析には島根大学 FACOM M140-F を用いたことを付記する。

#### 参 考 文 献

1. 角屋睦：農土学会誌48(6)：419-425, 1980
2. 石原藤次郎・高棹琢馬・瀬能邦雄(現姓、友杉)：京大防災研年報12-B：345-365, 1969
3. SHREVE, R. L. : J. Geol. 75(2) : 178-186, 1967
4. 福島辰・角屋睦：自然災害特別研究成果 A-52-5 : 12-24, 1977.
5. SHREVE, R. L. : J. Geol. 74(1) : 17-37, 1966

### Summary

Problems of stream order and distribution of stream number in stream network systems were studied by starting from the basic postulate of the statistical theory that natural stream network systems in the absence of strong geologic controls are very nearly topologically random.

First, the occurrence probability of maximum order in stream network systems by Strahler ordering was computed for given number of first-order streams. The results were shown that the occurrence probability of maximum order by Strahler ordering can be expressed by means of formula for lognormal probability density function.

Also, the approximate formulas for the relations between basin area and maximum stream order in stream network systems were obtained by using the result of statistical theory in stream network systems and the value of first-order stream number per unit area.

Second, the occurrence probability of stream number for each order in stream network systems ordering by Strahler method was given by the simple recurrent formula. Moreover, the calculations were carried out by this recurrent formula and it was found that the distribution of Strahler stream number drawn from an infinite topologically random stream network systems is approximately given by the normal probability density function.