

表面流モデルの集中化と最適モデル定数の関係

福 島 晟*

Relation of Lumping to Optimum Model Parameters
in Overland Flow Model
Akira FUKUSHIMA

This paper aims to discuss the relation between basin characteristics and runoff model parameters. As a flood runoff model, kinematic wave model of overland flow type is examined by dealing with the data in the Shimokari natural hilly watershed of 1.3 km^2 , the 93% area of which is covered by bushes and bamboo groves. First, a standard watershed model is constructed by applying a stream network system, in which first order streams are defined by using the ratio of wide and length in the contour crenulation on a topological map. The lumped watershed models are based on both Strahler's and N_1 ordering systems. Second, the optimum parameters of overland flow model is identified for standard and lumped watershed models. And the estimating formulae for optimum model parameters have been proposed in relation to the contributing slope length in the ordered watershed model.

Third, simplified runoff model of overland flow type omitted the calculation of channel flow is examined and the applicability is evaluated in relation of lumping the watershed model.

I. まえがき

島根県西部では昭和58年7月豪雨に続き、昭和60年、63年も梅雨期の集中豪雨に見舞われ、多大の被害を被った。このように、数年を経ずして再三発生する豪雨によって引き起こされる大水害は当地域で大きな社会問題となっている。また流域開発ないし土地利用の変化に伴い、洪水流出形態は開発前のそれと著しく変化することから、これら集中豪雨災害を契機として、丘陵山林地帯で着手されている農用地開発事業に対しても、早急に解決・対応すべき検討課題が投げかけられている。

集中豪雨災害あるいは土地利用に関連した洪水流出現象に対し、最近の研究は刮目すべきものが多く、一段と充実した研究成果が得られつつあるが、上述のような異常出水を再三にわたり、身近に体験するとなお未解決な問題が多いことを痛感する。

角屋は「流域開発ないし土地利用変化に伴う流出特性の変化に関する研究は、とりあえずの実用を目的とした

第Ⅰ期研究がようやく終わった段階で、科学的側面を具備した第Ⅱ期はこれから、といっても過言ではないように思う」と指摘している。

本研究は、今一度、流域開発前のいわゆる自然流域の地形形態の特徴を水文学的観点から吟味・検討し、流域地形の計量評価を図った上で、流域特性と出水特性との関連を定量的に把握しようとする基礎的研究の一部であり、さらには流域の地文条件の改変に伴う洪水流出の変化予測への応用を図ることを基本目的としている。ここでは、表面流モデルを用いてこうした研究課題について検討した事例を報告する。

II. 雨水流法

治水計画を目的とする場合の流出解析は一般に直接流出成分を主対象とし、その流出過程に内在する物理的、確率的な内部機構を工学的精度で把握表現し、降雨から計画地点における流量を計算することと定義できる。1932年の Sherman の単位図法の提案以来、数多くの

* 農村工学

研究にもかかわらず、流出解析は現在もお水文学における中心的課題の一つになっている。これは出水現象が非常に広くかつ複雑な境界条件をもつ運動場での現象であり、そのうえ本質的に非線形性をもつことに起因している。したがって、どの流域でも入力である降雨を与えて、計画地点の流出量を適確に推定しようとする洪水流出解析法は確立されていない。

ところで、流出解析の目的が丘陵地、低平地の宅地化、あるいは都市近郊の農林地の開発などによる流域の水文環境の改変に伴う洪水流出形態の変化を予測することにある場合、少なくとも、単位図法のような単に入力と出力の関係を結びつける応答関数を用いた流出モデルの適用は無理である。最近のこうした問題に適用されるべき流出モデルは、その中に流域の斜面系、河道系における洪水伝播を支配する物理的パラメーターを含むことを一つの条件としなければならない。そうした観点からは現在のところ、特性曲線を用いる雨水流法が最も優れた洪水流出モデルと言えよう。これは流域斜面および河道における雨水流の特性を水理学的に追跡する手法であり、特性曲線を利用した雨水追跡法のため特性曲線法、あるいは諸外国で表現されているように *Kinematic wave* 法とも呼ばれている。そして、そのモデルには表面流型、中間流型、および表面流、中間流複合型の雨水流モデルが考えられている。

なお、雨水流法も純粋の物理モデルを用いているとは言いがたく、複雑な流域の幾何学的構造を流出モデルパラメーターにどのように反映させるかの程度により、定数集中型モデル、あるいは準定数分布型モデルとして表現されることになる。すなわち、表面流の発生場である斜面部の表現法として、1) 扇形モデル、2) 矩形モデル、3) 扇形と矩形の合成モデル、および4) カスケードモデルの4つのタイプが提案されており、1) のモデルは定数集中型モデル、2)～4) はモデルパラメーターの与え方により準定数分布モデルとして流出系が表現されることになる。

そして、雨水流法を洪水流出形態の変化予測の問題に適用しようとする場合、次のような点がなお未解決な問題点ないし課題として挙げられる。1) 河道網系の設定法および水文地形の計量法の基準化、2) 河道網系の評価スケールと次数別水文地形量の関係、3) 流域モデルの設定基準と水文地形量の関係、4) 流域モデルの *lumping* と流出モデル定数の関係、5) 雨水流法で入力すべき有効降雨の合理的算定法、6) 流域開発状況あるいは土地利用形態と流出モデル定数の関係、7) 雨水流法による洪水ピーク流量および洪水流出波形の実時間

予測手法、8) 長短期流出両用モデルのように洪水流出と低水流出を同時に解析しようする手法の開発。

以下では、表面流型雨水流モデルを単に表面流モデルと表現し、上述の4) について検討を進めることにする。

III 河道網系の評価法と流域モデルの設定

これまでいくつかの流域の源流部調査を行ってきたが、その結果、1/2.5万の地形図上の等高線の幅奥行き比 $w/l = 1$ 付近まで水路が存在し、洪水時に河道としての役割を果していることを知った。そこで、山地流域では、1/2.5万の地形図上の等高線の幅奥行き比 $w/l = 1$ の地点を水源部最上流端とする河道網を検討の出発点とすることが考えられる。しかし、たとえば集水面積が 27.7 km^2 の串良川流域（鹿屋市）でこの定義に従う河道網においては1次河道数 $N_1 = 302$ となり、1次集水域をそのまま単位流域とするには難点がある。すなわち、 $w/l = 1$ とした河道網系の1次集水域を基準に流域分割し、斜面系、河道系を評価しても工学的精度かつ実用的洪水流出解析を目的とする場合にはその効果が期待され難いといえる。したがって、流域内地形量の *lumping* が必要と判断される。

一方、1/2.5万地形図上に記載の1次河道は著者らの示した河道網の定義による河道網、すなわち1/2.5万の地形図上で $w/l = 1$ の地点までを1次河道とする河道網に対応させると、Strahler 方式ではほぼ2～4次、 N_1 方式では3～5次の河道に相当することを確認している。このことは、流出解析に際して仮に1/2.5万地形図上の1次河道を単位流域に選ぶようなブロック分割を考えても、そこで採用される地形量は現実のそれとかなり異なることを意味する。

そこで、1/2.5万、あるいは1/1万地形図上で等高線の幅奥行き比 $w/l = 1$ の点までを河道とみなし、1次河道の集水域あるいはその残流域によって構成される単位流域を長方形ブロックに置換したものを基準モデルとする。そして流出解析上の実用的観点からさらに集約化した流域モデルを考える場合には、流域モデル単位流域の基準次数を逐次上げ、その際に水文地形量がどのように平均化されるかを吟味しておく必要がある。ただ、この場合河道長をどのように評価すべきかが問題になる。すなわち、1次集水域を単位流域とする流域モデルから逐次単位流域の基準次数を上げ、 u 次集水域を単位流域とする流域モデルにおいて $(u-1)$ 次以下の低次河道をどのように扱うかにより、河道長が大きく変化することになる。これに伴って、斜面長、斜面勾配などの斜面地形量の評価値も異なる。たとえば、流域モデルの外側ブ

ブロックの河道長として、 u 次河道のみを採用すると斜面長が過大評価され、実際の流域形状にそぐわないブロック形になりやすいことが認められた。そこで、 $u \geq 2$ の流域モデルにおいてバランスのとれた流域モデルを構成するために、河道長の評価法を次のようにする。すなわち、流域モデルの外側ブロック (Ex) の河道長として、 u 次河道長 L_u と主流方向の $(u-1)$ 次河道長 L_{u-1} との和によって評価し、内側ブロック (In) ではそのブロックの主河道をとることとする。

また、各ブロックの斜面勾配は次式で与えられる加重平均による谷線法⁴⁾により算定することにする。

$$S_{vm} = \sum h_i / \sum l_i \quad \dots\dots (1)$$

ここに、 l_i は流路に沿って等間隔 (本研究では 50m) に点を取り、その点より左右それぞれの斜面上を各等高線と直交するように分水界まで追跡したときの長さであり、 h_i はその両端の標高差である。

IV. 解析対象流域と流域モデル

1. 解析対象流域と河道網

京都市西部を流れる小畑川上流部支流域に下狩川流域 (1.3 km^2) がある。既に、本流域の中流部で宅地開発が行われ、開発前と比較し流域の土地利用状況は大きく変化しているが、ここでは、宅地開発前の自然丘陵地流域を解析対象とする。

宅地開発前の本流域は次のようであった⁵⁾。流域のほぼ 1/3 にあたる源流山地部は古生層で、雑木林に覆われ、

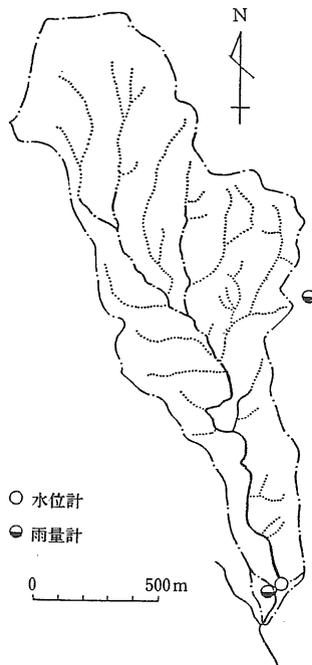


図-1 下狩川流域の概要

また残りの2/3の面積を持つ中下流部は、河川沿いの一部に水田として利用されていた沖積層を含むが、大部分は洪積層 (大阪層群) であって、竹林が多かった。流域内で林地の占める面積は93%、水田5%、道路地2%となっていた。

図-1に宅地開発前の流域の概要を示すが、1/2.5万の地形図には同図の実線部だけが河道 (1.5 km) として記載され、また1/1万の地形図では同図の一点鎖線の分が河道として付加 (1.5 km) されている。

丘陵山地地域において、どこまでを河川と定義するかについて定説はないが、源流部踏査の結果から、1/1万あるいは1/2.5万の地形図において、等高線の幅 w と奥行き l の比がほぼ $w/l = 1$ の点までは、少なくとも降雨時の流路とみてよいと判断している。そこで、ここでは1/1万の地形図を用いて、 $w/l = 1$ の点までを河道 (図-1) とみなすことにする。なお、1/2.5万の地形図に基づく同種の検討も行っており、その結果も併示することにする。これら河道網は表-1の記号を用いることにする。

さて、以上のような河道の定義にしたがい河道網 C_{III} および B_{III} を次数化すると、Strahler 方式による最高次数は、いずれの場合も $u_{max} = 4$ となるが、 N_1 方式³⁾では、河道網 C_{III} で $u_{max} = 6$ 、河道網 B_{III} では $u_{max} = 5$ となる。

表-1 河道網の表示

河道網の記号	地形図縮尺	等高線の幅奥行き比
C_{III}	1 : 10,000	$w/l = 1$
B_{III}	1 : 25,000	〃

2. 流域モデル

前述のように次数化した河道網に基づき、流域を u 次集水域およびその残流域に分割し、それぞれのブロックを、中央部に河道、その両側に左右非対称の斜面を持つような長方形流域に単純化したものを u^* 次流域モデルと呼ぶことにする。このような評価法による u^* 次流域モデルの外側および内側流域ブロック数は表-2のようになる。

また、次数別の各流域モデルの外側ブロック、内側ブロックとも、斜面長は対数正規分布で、斜面勾配は正規分布で近似できることが確かめられた。しかし、外側ブロックと内側ブロックとではこれらの分布形状が異なるため、 u^* 次流域モデルの斜面長および斜面勾配の各分布は2つのモードをもつ分布形状を示すことになる。たとえば、河道網 C_{III} の、 $u^* = 1, 2, 3$ の斜面勾配の分布をヒストグラムで示すと、図-2のようになる。

なお、斜面勾配を前述の加重谷線法を用いて、 $u_* = 1$ の流域モデルで計測した後、流域モデルを lumping するに伴い、斜面勾配の測線としての谷線が逐次省略され、その代わりに、低次河道が当該流域モデルの斜面域の谷線として逐次抽出される。その結果、流域モデルの基準次数 u_* の増大に伴い、 $(u_* - 1)$ 次以下の河道勾配の影響が斜面勾配に組み込まれることになる。図-3に河道網 CIII の流域モデルについての例を示す。同図は斜面勾配の算定における谷線および各次数の河道の算入割合を基準次数 u_* との関係で示したものである。基準次数 u_* の増大に伴い、河道の影響度が次第に大きくなるのが指摘できる。

河道から斜面に沿い距離 b_0 をとったとき、そこに含まれる斜面面積の流域面積に対する比率を示したものを集中斜面長分布、または集中斜面長図と命名し、とくに50%確率に対応する値を、代表斜面長 B_c と呼ぶことにする。表-3に各流域モデルの B_c の値を示す。同表に

表-2 流域ブロック数

基準次数	河道網		C II 1 : 10000 $w/l=1$				B II 1 : 25000 $w/l=1$			
			Strahler		N ₁		Strahler		N ₁	
	Ex	In	Ex	In	Ex	In	Ex	In		
			Ex	In	Ex	In	Ex	In		
$u_* = 1$	32	30	32	30	24	22	24	22		
$u_* = 2$	9	8	9	11	7	6	7	8		
$u_* = 3$	3	2	3	4	2	1	4	3		
$u_* = 4$			1	2	1	0	1	1		
$u_* = 5$	1	0	1	1	1	1	1	1		
$u_* = 6$			1	0			1	0		

Ex : 外側ブロック数 In : 内側ブロック数

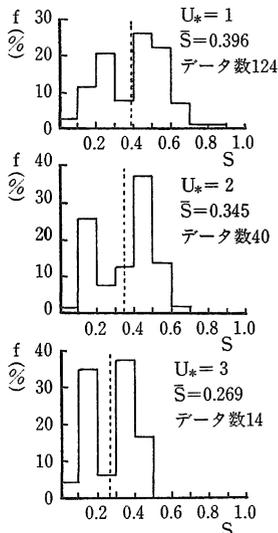


図-2 斜面勾配の分布

は、各流域モデルの片側平均斜面長 B の値も併示してある。

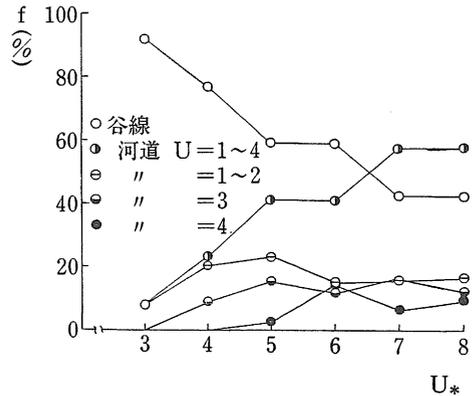


図-3 斜面勾配の算定値における谷線、および河道の算入割合

表-3 片側平均斜面長 B 、代表斜面長 B_c (単位 ; m)

基準次数	河道網		C II 1 : 10000 $w/l=1$				B II 1 : 25000 $w/l=1$			
			Strahler		N ₁		Strahler		N ₁	
	B	B_c	B	B_c	B	B_c	B	B_c		
			B	B_c	B	B_c	B	B_c		
$u_* = 1$	63	33	63	33	77	41	77	41		
$u_* = 2$	95	51	96	51	106	55	110	57		
$u_* = 3$	185	101	185	95	220	110	164	85		
$u_* = 4$	338	169	304	155	296	148	298	149		
$u_* = 5$			415	216				180		
$u_* = 6$			546	273						

V. 表面流モデルと解析対象出水

1. 表面流モデル

周知のように、表面流モデルにおける斜面流および河道流の基礎式は次式で与えられる。

$$\text{斜面流} : h = kq^p, \frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial q}{\partial x} = r_e \quad \dots\dots (2)$$

$$\text{河道流} : W = KQ^p, \frac{\partial W}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = q_I \quad \dots\dots (3)$$

ここに、 h : 水深、 q : 斜面単位幅流量、 r_e : 有効降雨強度、 W : 河道流量、

Q : 流量、 q_I : 河道単位長流入量、 t : 時間、 x : 距離、 k, p : 斜面流定数、

K, P : 河道流定数。

このモデルにおいて、斜面流が Manning の抵抗則に従うとすると、斜面流定数 k, p は次式のような意味を持っている。

$$k = \left[\frac{N}{\sqrt{s}} \right]^p, p = 3/5 \quad \dots\dots (4)$$

になる。

なお、最適等価粗度 N_{opt} の値を±10~40%増減させた場合、ピーク流量、評価基準 E_1 、相対誤差 $E_R(\%)$ 等がどの程度変化するかを検討例を表-8に示す。この例

では観測ハイドログラフの再現性を相対誤差で10%程度まで許容するならば、等価粗度は N_{opt} (1±0.2) の範囲まで変化させてもよいと言える。最適等価粗度 N_{opt} による本解析例ではピーク流量が過少評価の傾向にあるた

表-4 最適モデル定数 N, k (河道網CⅡ, Strahler 方式)

評価基準	u_*	N	E_1 or E_2	$E_R(\%)$	$Q_{pc}(m^3/s)$	k	E_1 or E_2	$E_R(\%)$	$Q_{pc}(m^3/s)$
E_1	1	14.52	0.05	6.6	8.56	6.96	0.05	6.2	8.60
	2	8.79	0.07	7.7	8.44	5.31	0.05	6.2	8.62
	3	5.03	0.04	5.1	8.79	3.96	0.04	5.6	8.71
	4	2.62	0.04	5.2	8.81	2.99	0.04	5.2	8.81
E_2	1	13.37	0.16	6.0	8.73	6.67	0.15	5.8	8.73
	2	7.83	0.17	6.7	8.67	5.14	0.15	5.7	8.78
	3	4.74	0.14	4.9	8.92	3.80	0.15	5.4	8.83
	4	2.49	0.15	5.1	8.88	2.90	0.15	5.1	8.88

表-5 最適モデル定数 N, k (河道網 CⅡ, N_1 方式)

評価基準	u_*	N	E_1 or E_2	$E_R(\%)$	$Q_{pc}(m^3/s)$	k	E_1 or E_2	$E_R(\%)$	$Q_{pc}(m^3/s)$
E_1	1	14.52	0.05	6.6	8.56	6.96	0.05	6.2	8.60
	2	8.75	0.06	7.1	8.55	5.34	0.05	6.0	8.65
	3	4.34	0.06	7.1	8.54	3.70	0.06	7.2	8.50
	4	2.76	0.04	5.1	8.80	2.99	0.04	5.4	8.78
	5	2.00	0.04	5.1	8.81	2.64	0.04	5.2	8.82
	6	1.54	0.04	5.4	8.78	2.35	0.04	5.3	8.83
E_2	1	13.37	0.16	6.0	8.73	6.67	0.15	5.8	8.73
	2	8.00	0.16	6.5	8.76	5.17	0.15	5.8	8.79
	3	3.97	0.17	6.6	8.71	3.52	0.17	6.6	8.66
	4	2.65	0.14	5.0	8.88	2.93	0.15	5.3	8.83
	5	1.98	0.15	5.1	8.81	2.60	0.15	5.2	8.87
	6	1.48	0.15	5.2	8.82	2.33	0.15	5.2	8.82

表-6 最適モデル定数 N, k (河道網 BⅡ, Strahler 方式)

評価基準	u_*	N	E_1 or E_2	$E_R(\%)$	$Q_{pc}(m^3/s)$	k	E_1 or E_2	$E_R(\%)$	$Q_{pc}(m^3/s)$
E_1	1	10.49	0.05	6.6	8.62	6.17	0.04	5.7	8.68
	2	8.09	0.05	6.4	8.60	5.36	0.04	5.2	8.75
	3	3.93	0.04	4.9	8.79	3.64	0.04	5.5	8.72
	4	2.56	0.04	5.3	8.89	2.98	0.04	5.3	8.89
E_2	1	9.63	0.16	6.2	8.82	5.91	0.14	5.4	8.82
	2	7.47	0.16	6.1	8.78	5.19	0.14	5.1	8.85
	3	3.76	0.14	4.8	8.88	3.51	0.15	5.3	8.82
	4	2.49	0.14	5.0	8.92	2.93	0.14	5.0	8.92

表-7 最適モデル定数 N, k (河道網BⅡ, N_1 方式)

評価基準	u_*	N	E_1 or E_2	$E_R(\%)$	$Q_{pc}(m^3/s)$	k	E_1 or E_2	$E_R(\%)$	$Q_{pc}(m^3/s)$
E_1	1	10.49	0.05	6.6	8.62	6.17	0.04	5.7	8.68
	2	7.29	0.06	6.7	8.63	5.11	0.04	5.8	8.64
	3	5.20	0.05	5.9	8.68	4.29	0.04	5.4	8.72
	4	2.81	0.04	5.2	8.75	3.08	0.04	5.5	8.74
	5	2.36	0.04	5.6	8.75	2.89	0.04	5.6	8.75
E_2	1	9.63	0.16	6.2	8.82	5.91	0.14	5.4	8.82
	2	6.71	0.16	6.2	8.81	4.92	0.15	5.5	8.74
	3	4.92	0.15	5.6	8.79	4.20	0.14	5.1	8.79
	4	2.72	0.14	5.1	8.83	2.98	0.15	5.4	8.86
	5	2.19	0.15	5.4	8.88	2.76	0.15	5.4	8.88

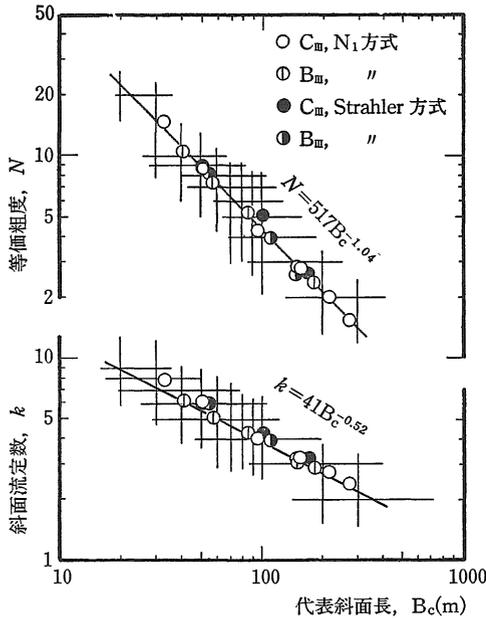


図-4 代表斜面長 B_c と最適モデル定数 N, k との関係

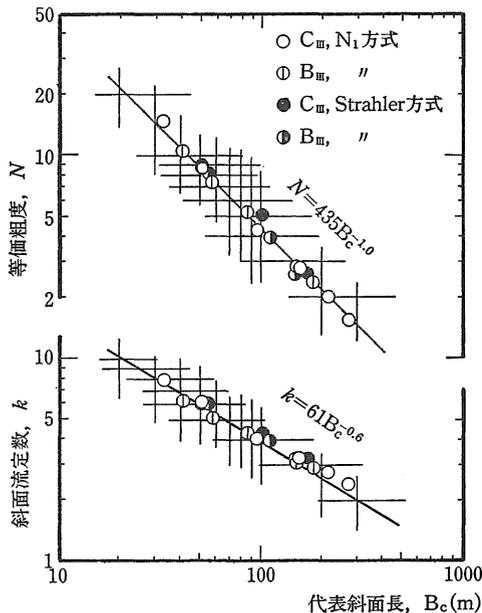


図-5 代表斜面長 B_c と最適モデル定数 N, k との関係

表-8 等価粗度 N の変化とハイドログラフ再現性の関係

等価粗度 N	N の増減 (%)	ピーク Q_{pe} (m^3/s)	評価関数 E_1 (mm/hr)	相対誤差 E_R (%)
0.92	-40	9.30	0.38	17.9
1.08	-30	9.17	0.23	13.3
1.23	-20	9.06	0.12	8.8
1.39	-10	8.95	0.06	6.1
1.54	0	8.78	0.04	5.4
1.69	+10	8.62	0.06	7.3
1.85	+20	8.42	0.10	10.3
2.00	+30	8.21	0.17	13.5
2.16	+40	8.06	0.26	17.0

め、ピーク流量を勘案した場合、最適値から2割程度小さな等価粗度による解析がむしろ妥当な結果を与えることになっている。

以上の結果から、現実の河道網系を忠実に表現した低次の流域モデルが必ずしも良好な解析結果を与えるとは限らず、むしろ流域モデルを最も lumping した単一の流域ブロックによる解析が良好な傾向を与えていることが指摘された。このことは、表面流モデルの集中化、あるいは集中定数型の雨水流モデルによる解析の可能性を示唆していると思われる。そこで、河道流計算を省略し、表面流モデルの集中化の可能性を以下検討してみる。

2. 河道流計算を省略した解析 (Case II)

角屋らは中小河川の洪水到達時間実用推定式の検討過程で次式を得ている。

$$t_c/t_s \approx 0.14 A^{0.1} r_e^{0.1} \dots (10)$$

ここに、 t_s : 力学的最遠斜面上の雨水擾乱の伝播時間、 t_c : 前述斜面より下流側河道部での河道流の伝播時間で、 $t_p = t_s + t_c$ が洪水到達時間を与える。また、 A : 流域面積 (km^2)、 r_e : 有効降雨強度 (mm/h) である。

(10)式から、流域面積が大きくなるほど、また降雨強度が大きくなるほど、洪水到達時間における河道効果が大きくなると指摘され、たとえば $1 \leq A \leq 10 km^2$, $10 \leq r_e \leq 50 mm/h$ で $t_c/t_s = 0.18 \sim 0.26$, $t_c/t_p = 0.15 \sim 0.21$ と推定されている。

ただ、(10)式において河道長は主河道長のみが考慮され、主河道長と流域面積の間に Hack の法則が成立するものとして誘導された式であり、流域モデルの lumping と流出モデル定数との関係の議論にそのまま当てはめることには問題があるが、(10)式で与えられる t_c/t_s ,

あるいは t_c/t_s の値は出水特性を表す一指標を与えるものと理解される。

そこで、本流域で解析対象とした出水について(10)式を適用すると、 $A = 1.32 \text{ km}^2$ 、 $r_s = 24.2 \text{ mm/h}$ として、 $t_c/t_s = 0.20$ 、 $t_c/t_p = 0.17$ と推定される。さらに、角屋らの洪水到達時間実用推定式を用いると、 $t_p = 101$ 分となる。したがって、 $t_s = 84$ 分、 $t_c = 17$ 分と算定される。

このような洪水伝播特性をもつ本出水に対し、表面流モデルの解析で河道流計算を省略した Case II による流出解析を行った結果、表-9 に示すようなモデル定数が算定された。同表から、次の点が指摘される。(1) 上述の洪水到達時間における河道効果の算定例からも推察されるように、流域ブロック数が多くなる低次の u_* 次流域モデルによる解析ほど、誤差評価基準 E_1 、あるいは相対誤差が大きくなり、観測ハイドログラフの再現性は低下している。(2) しかし、河道網 C_{III} の N_1 方式では $u_* = 4$ 以上、Strahler 方式では $u_* = 3$ 以上についての解析結果は、モデル定数の N 、 k のいずれを用いても、ピーク流量および観測ハイドログラフの再現性は Case I とほぼ同程度の良好な結果となっているといえる。また、河道網 B_{III} の流域モデルでも同じ傾向が認められる。(3) Case I による解析結果と比較して、等価粗度 N は 6~24%、斜面流定数 k は 5~14% 大きく評価されることが指摘される。(4) lumping を進

めた流域モデルによる解析では、河道流計算を省略してもモデル定数 N 、 k の値を増大させることにより、Case I による解析結果をほぼ維持できるが、低次流域モデルによる解析ではモデル定数 N 、 k の値を変化させることにより、河道系における洪水伝播特性の効果を補うには限界がある。なお、図-6 は最適斜面流定数 k を用いた解析例であり、観測ハイドログラフの再現性は実用的には十分良好であることが認められる。

このように、Case II による適用法では河道効果が大きくなる流域モデルほど、ピーク流量、観測ハイドログラフの再現性が低下する傾向にあるから問題は残るが、流域モデルの代表斜面長 B_c とモデル定数との関係を最小二乗法で算定すると以下のようになる。

N_1 方式の流域モデルに対して、

$$\text{河道網 C}_{III}; N = 892 B_c^{-1.12}$$

$$\text{〃 } k = 53 B_c^{-0.55}$$

$$\text{河道網 B}_{III}; N = 766 B_c^{-1.10}$$

$$\text{〃 } k = 57 B_c^{-0.57}$$

また、Strahler 方式の流域モデルに対して、

$$\text{河道網 C}_{III}; N = 823 B_c^{-1.09}$$

$$\text{〃 } k = 53 B_c^{-0.55}$$

$$\text{河道網 B}_{III}; N = 999 B_c^{-1.16}$$

$$\text{〃 } k = 66 B_c^{-0.60}$$

表-9 各流域モデルの最適モデル定数 N 、 k

C _{II}	u_*	N	E_1	$E_R(\%)$	$Q_{pc}(m^3/s)$	k	E_1	$E_R(\%)$	$Q_{pc}(m^3/s)$
Strahler	1	18.06	0.092	8.80	8.48	7.90	0.079	8.06	8.54
	2	10.87	0.122	10.79	8.36	6.00	0.081	8.16	8.57
	3	5.77	0.053	6.34	8.87	4.32	0.059	6.61	8.80
	4	2.90	0.053	6.23	8.80	3.18	0.053	6.24	8.97
N_1	1	18.06	0.092	8.80	8.48	7.90	0.079	8.06	8.54
	2	10.68	0.108	9.57	8.42	6.06	0.080	8.14	8.55
	3	5.05	0.087	6.68	8.57	4.01	0.090	8.55	8.50
	4	3.10	0.048	6.03	8.86	3.23	0.055	6.63	8.81
	5	2.19	0.046	5.89	8.86	2.78	0.047	6.00	8.89
	6	1.63	0.046	5.89	8.87	2.43	0.046	5.87	8.87
B _{III}	u_*	N	E_1	$E_R(\%)$	$Q_{pc}(m^3/s)$	k	E_1	$E_R(\%)$	$Q_{pc}(m^3/s)$
Strahler	1	12.98	0.101	9.24	8.50	6.94	0.073	7.76	8.64
	2	9.81	0.093	8.76	8.52	6.00	0.061	6.93	8.70
	3	4.46	0.053	6.38	8.85	3.96	0.058	6.69	8.74
	4	2.90	0.057	6.87	8.81	3.21	0.057	6.86	8.81
N_1	1	12.98	0.101	9.24	8.50	6.94	0.073	7.76	8.64
	2	8.68	0.099	8.93	8.50	5.73	0.072	7.78	8.60
	3	5.99	0.076	7.86	8.63	4.68	0.061	6.87	8.73
	4	3.11	0.055	6.47	8.79	3.28	0.054	6.50	8.81
	5	2.55	0.054	6.33	8.80	3.03	0.054	6.33	8.79

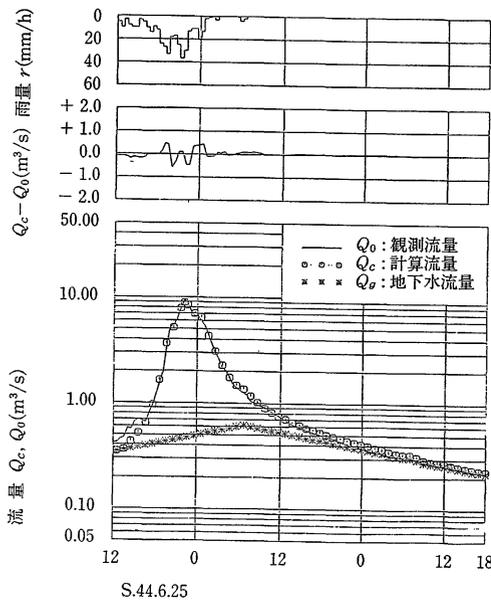


図-6 流出解析例 (Case II)
($u_* = 6, \Delta t = 1800 \text{sec}$)

VII. あとがき

丘陵山地小流域である下狩川流域を対象として、本流域の河道網、河道次数に基づく流域モデルを設定した後、表面流モデルを用いて、流域モデルの lumping、あるいは表面流モデルの集中化と流出モデル定数についての検討結果を述べたが、その主要成果を総括すると次のようである。

1) 1/1万、あるいは1/2.5万地形図上で等高線の幅奥行き比 $w/l = 1$ の点までを河道とみなし、1次河道の集水域あるいはその残流域によって構成される単位流域を長方形ブロックに置換したものを基準モデルとして、流域モデルの lumping と表面流モデルの適応性を吟味した。その結果、 $Q_p = 7 \text{ m}^3/\text{s}/\text{km}^2$ 程度の大出水に対し、いずれの流域モデルに対しても表面流モデルはきわめて良好な適応性を有し、流域を単一ブロックに lumping した流域モデルによる解析結果も、実用上まず良好な結果が期待される。

2) 表面流モデルにおいて、河道流計算を省略し、斜面流計算のみによる流出解析を行い、表面流モデルの集中化の可能性を検討した。その結果、lumping を進めた流域モデルによる解析では、河道流計算を省略してもモデル定数 N, k の値を増大させることにより、観測ハイドログラフの再現性はほぼ維持できるが、低次流域モデルによる解析ではモデル定数 N, k の値の変化により、河道系における洪水伝播特性の効果を補うには限界がある。

3) 流出モデル定数最適値は、流域モデルの精粗により異なるが、表面流モデル定数を代表斜面長の関数として表現すると、流域モデルの精粗に依存しない、きれいなモデル定数実用推定式が得られる。むろん今後の詳細な検討が必要である。

最後に、本研究を進めるにあたり、下狩川流域の水文資料を提供して頂き、かつご指導を頂いた京都大学防災研究所角屋 睦教授、および計算、資料整理に協力を頂いた農業水利工学専攻生の森山正人、大鳥圭己、吉田圭一君に感謝の意を表する。

なお、本報告は平成2年度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情報処理センターのIBM3084-GX3システムを利用したことを付記する。

参考文献

- 1) 角屋 睦：土木論集，第363号/II-4.， pp.23-34, 1985.
- 2) 角屋 睦：農土学会誌，56-11, pp.5-9, 1988.
- 3) 福島 晟・角屋 睦：自然災害特別研究成果A-52-5, pp.14-24, 1977.
- 4) 角屋 睦：福島 晟：農土学会講演要旨集，pp.114-115, 1974.
- 5) 角屋 睦：福島 晟・佐合純造：京大防災研年報，21, B-2, pp.219-233, 1978.
- 6) 角屋 睦：農土学会誌，48-8, pp.39-44, 1988.
- 7) 角屋 睦：福島 晟：京大防災研年報，19, B-2, pp.143-152, 1976.