

## 丘陵山地流域モデルと水文地形特性

福島 晟\*

---

### Modeling of Natural Hilly Watershed and Hydro-Geomorphological Characteristics Akira FUKUSHIMA

---

This paper examines the relation between basin modeling being necessary to flood analysis by a kinematic wave runoff model and characteristics of hydro-geomorphological quantities related to runoff phenomena in a river basin, in which hydro-geomorphological quantities are stream length, drainage area, slope length, stream gradient, slope gradient and so on. The outline is as follows.

First, a standard basin model is set up, in which the origin of streams is practically regarded as a point being the ratio  $w/l = 1$  on a topographical map with the scales of  $1/25000$  or  $1/10000$ , where  $w$  is width and  $l$  is depth in the bend of a contour line in a topographical map.

Second, measuring methods of slope gradient for valley side in modeling basin are compared. And it is concluded that a proposed technique named a valley line method by weighted mean is practical use and useful.

Third, it is clarified how the mean and distribution of hydro-geomorphological quantities change with increasing successively the standard order of unit model basin, considering more lumped basin model from the practical standpoint on flood runoff analysis.

### I. ま え が き

雨水流モデルを用いて流出解析を行う場合には、流域を河道網とそれに付随する斜面からなるものとみなして、流域モデルを構築する必要がある。この際、斜面の形状勾配等の水文地形条件は様々であるが、多くの場合、河道を適当な区間に分割し、この区間での水文地形条件は一様であるとして、斜面を長方形のものに単純化するのが普通である。すなわち、流域は河道の合流点、地形や地表条件の変化する点を境に分割され、それぞれが河道と長方形斜面からなるいくつかのブロックに置換されることになる。したがって、洪水流出解析に流域特性を十分反映しようとするれば、流域を地形・土地利用形態に応じた多くのブロックに分割することが望まれるが、実用的にはこれにも限度があり、ある程度マクロに扱わざるを得ない。そこで、流出に関与する地形量、すなわち水文地形量が流域モデルの集中化に伴い、どのように変化するかを明らかにしておく必要がある。本研究ではこうした課題についての検討を試みる。

### II. 河道網系の評価法と流域モデル構成

著者は、これまでいくつかの流域の源流部調査を行い、その結果、山地流域では $1/2.5$ 万の地形図上の等高線の幅奥行比  $w/l = 1$  付近まで水路が存在し、これらが出水時に河道としての役割を果しているとしてよいことを知った。そこで、山地流域の流域モデルの構成やそれに伴う水文地形量の検討では、 $1/2.5$ 万の地形図上の等高線の幅奥行比  $w/l = 1$  の地点を水源部最上流端とする河道網を考察の出発点とする。しかし、たとえば集水面積が $27.7\text{km}^2$ の小流域の串良川流域でも、このような河道網を対象とすると、1次河道数は  $N_1 = 302$  となり、1次集水域をそのまま単位流域とするような流域モデル構成は実用上問題が多い。またこれだけ丁寧にモデルを構成しても実用上それだけの効果が期待できるとは限らない。したがって、流域モデルの集中化が必要となる。

一方、 $1/2.5$ 万地形図上に記載の1次河道は、河道網  $B_m$  の定義<sup>1)</sup>、すなわち、 $1/2.5$ 万地形図上で  $w/l = 1$  の地点までを1次河道とすると、Strahler方式ではほぼ2~4次、 $N_1$ 方式<sup>2)</sup>では3~5次の河道に相当することを確かめている。このことは、流出解析に際し、仮に、

\* 農村工学講座

1/2.5万地形図上の1次河道集水域を単位流域とするようなブロック分割を考えても、そこで計量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1/1万地形図上の等高線の幅奥行比  $w/l=1$  の点までを水源部細流の上流端とした河道網において、1次河道の集水域およびその残流域を単位流域として流域を分割し、それぞれのブロックを長方形ブロックに置換したものを1次流域モデルとする。そして実用的観点から流域モデルの単位流域の基準次数を逐次上げて集中化するに伴い、水文地形量がどのように平均化されるかを吟味することとする。ただ、この場合、流域モデルはブロックの上流側から河道が流入しない外側ブロックと、ブロック上流側に他のブロックが連なり上流側から河道が流入する内側ブロックとから構成されているから、外側ブロック、内側ブロックそれぞれの河道長をどのように定義するかが問題になる。すなわち、 $u$ 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変化し、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変ることになる。

ここでは、流域モデルの外側ブロック河道長  $L_{EX}$  の評価法として、表一に示すように4ケースを考え、内側ブロックではそのブロックの主河道長をとることとする。すなわち、流域モデルの外側ブロックの河道長として、河道長  $L_{EX}$  (case 1) は  $u$  次河道長  $L_u$  のみ、 $L_{EX}$  (case 2) は  $u$  次および  $(u-1)$  次河道長の総計、 $L_{EX}$  (case

表一 外側ブロックの河道長  $L_{EX}$  の評価法

河道長 $L_{EX}$ の評価法	河 道 長
case 1	$L_u$
case 2	$L_u + \sum L_{u-1}$
case 3	$L_u + L_{u-1}$ (主河道部)
case 4	$L_u + \sum L_i$ (主河道部)

3) は  $u$  次河道長  $L_u$  と主流方向の  $(u-1)$  次河道長  $L_{u-1}$  との和、 $L_{EX}$  (case 4) は主流方向の  $1 \sim u$  次河道長の総計によって評価することを意味している。

### III. 斜面地形量の計量法

#### 1. 斜面長の計量

流域モデル各ブロックの斜面長は、いうまでもなく左右岸の集水面積と河道長によって必然的に定まる。したがって、内側ブロックについては大きな問題はないが、外側ブロックについては河道長をどの程度見込むかによ

て大きく左右されることになる。これについてはすでに前述のように4種の定義を検討するが、最終的には斜面長、河道長がバランスよく表現されるものが採用されることになろう。また地形図から直接得られる幾何学的な左右岸の集水面積は必ずしも洪水流出特性の表現に適しているとはいえない。流域モデルにおけるそれぞれの斜面は、流出特性の一様性が期待できる程度に単純化されるべきことを考えると、洪水到達時間の概念を加味して、一部左右岸を入れ換えたモデルにする方が好都合なこともありうる。

#### 2. 斜面勾配の計量

流域の斜面勾配の計測法としてはこれまで種々の方法が提案されているが、どの方法がよいのか、あるいは相互の関係については必ずしも明らかではない。そこで、ここでは通常よく用いられている以下の4種の方法を現実の流域で対比検討する。

(i) 等高線面積法<sup>2)</sup>: 対象集水域内の各等高線の長さを  $l_i$ 、相隣る等高線の帯状面積を  $a_i$ 、等高線間隔を  $h_i$  とするとき、斜面勾配  $s_a$  を次式で求める方法である。

$$s_a = \frac{1}{\sum a_i} \sum h_i l_i \dots \dots \dots (1)$$

(ii) 等高線延長法<sup>2)</sup>: 対象集水域内の各等高線の長さを  $l_i$ 、集水面積を  $A$ 、等高線間隔を  $h_c$  として、斜面勾配  $s_c$  を次式で求める。

$$s_c = \frac{1}{A} h_c \cdot \sum l_i \dots \dots \dots (2)$$

(iii) 谷線法<sup>3,4)</sup>: 流路に沿って等間隔(本研究では50m、または100m)に測点をとり、その点に左右岸から流入する雨水の流れの上で勾配を定義する方法である。すなわち、測点近傍に谷があればその谷に沿って、谷がなければ左右それぞれの斜面上を各等高線と直交するような流水線を挿入しこれを分水界まで追跡してその長さを  $l_i$ 、標高差を  $h_i$ 、測水線数を  $M_s$  とすると、斜面勾配  $s_v$  は次式で求められる。

$$s_v = \frac{1}{M_s} \sum \left( \frac{h}{l} \right)_i \dots \dots \dots (3)$$

ここでは、さらに次式のように流下長  $l_i$  に重みをつけた加重平均値  $s_{vw}$  も算定した。

$$s_{vw} = \frac{\sum l_i s_{vi}}{\sum l_i} = \frac{\sum h_i}{\sum l_i} \dots \dots (4)$$

(iv) 格子点勾配法<sup>3,4)</sup>: 対象集水域の地形図上に適当な間隔(本研究では1/2.5万あるいは1/5万地形図上で1cm間隔)の格子をかけ、格子の交点から各等高線と直交する最大傾斜方向への線をひく。この線上で適当に等高線を選びこの等高線間の法線距離を  $d_i$ 、その標高差

を  $h_i$ 、測点数を  $M_s$  として、斜面勾配  $s_g$  を次式で求める方法である。

$$s_g = \frac{1}{M_s} \sum \left( \frac{h}{d} \right)_i \dots \dots \dots (5)$$

このような斜面勾配の計測法を適用すると、斜面勾配の評価値は河道次数により、あるいは河道網の定義によって異なることも予想される。そこで、ここでは、入野川、串良川流域を対象として、1/2.5万地形図を用いた河道  $B_m$  の定義<sup>1)</sup>により対象流域の河道網を設定し、これを Strahler 方式で次数化した後、1～3次の集水域および2、3次の各残流域について、上記の各測定法を適用した結果を対比することにした。その結果を要約すると以下のようである。

まず、等高線延長法において  $h_c$  を 10m と 20m とした場合のそれぞれの測定値を比較した結果、等高線間隔  $h_c$  を 20m としてもほぼ妥当な値が得られることが分かった。しかし、 $h_c=50m$  とすると、計測が粗になりすぎ測定値のばらつきが大きく、不適当と判断された。

次に、谷線法による  $s_v$  と  $s_{vw}$  との関係を比較すると、加重平均による  $s_{vw}$  の方が小さく評価され、 $s_v/s_{vw}$  の値は 1.06 となった。 $s_{vw}$  の値は集水域の形状が暗に考慮されていることから、谷線法での推定には  $s_{vw}$  による方が妥当といえる。

図一は谷線上の  $s_{vw}$  と等高線面積法の  $s_a$  の比較例であり、1～3次河道に対し、 $s_a/s_{vw}=0.92$  という結果が得られた。 $s_a$  の値には集水域の等高線の配列状況より、河道部の勾配が組み込まれた形になっており、これは当然、2～3次河道よりも1次河道に対して大きく影響しているといえる。したがって、一般に  $s_{vw} \geq s_a$  の傾向にあるといえる。なお、等高線面積法において、等高線間隔  $h_i$  を等しくとれば、集水域の上、下流端部の僅かな影響が入るが、推定値は等高線延長法によるものとはほぼ等しくなる。ここでは原則として  $h_i=20m$  とし、地形条件により部分的に 40～50m とした。

図二は格子点勾配法の  $s_g$  と谷線法の  $s_{vw}$  との比較例である。格子の交点のランダム性あるいは谷線として評価し難い溪流部の影響が格子点勾配法に入り、 $s_g \geq s_{vw}$  の傾向にある。

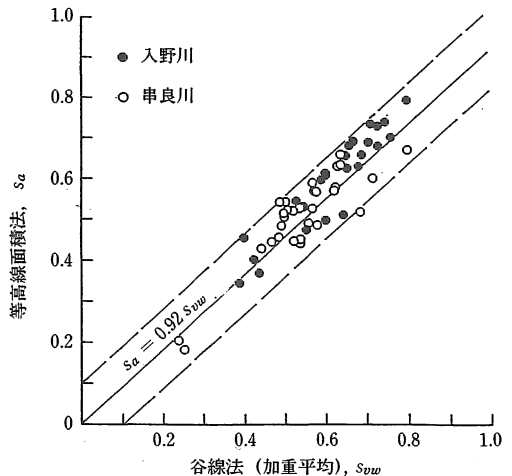
以上の結果から各測定法の特徴より予想される  $s_g \geq s_{vw} \geq s_a$  の関係がほぼ成立するといえる。

しかし、実際にはこれらの関係が満足されない場合もかなりあり、また満足されても差が大きい場合もある。たとえば、 $s_{vw} \leq s_a$  となるのは集水域が小さいとき、および等高線長がうまく評価されていないときに生じる傾向にある。また、 $s_{vw} \gg s_a$  となるのは細流が相当奥深く

入っているとき、 $s_{vw}$  の値が斜面の最急勾配で評価されやすいためである。とくに、集水面積が小さい場合、谷線が 1～2 本しか引けないから、 $s_{vw}$  と  $s_a$  の間に差が強く出やすい。一方、細流が奥深く入らなくとも、奥に山腹が長く続くような集水域では、 $s_{vw}$  が  $s_a$  に対してやや小さめに評価される傾向にある。さらに、斜面勾配が概して緩やかな集水域では、山頂まで谷線を延ばすという誤りを犯す可能性もあるが、このときの  $s_{vw}$  の値は小さめに評価され、山腹勾配の変化点で止めると  $s_{vw}$  が  $s_a$  より大きくなる可能性がある。

そこで、比率  $s_g/s_{vw}$ 、 $s_a/s_{vw}$  または差  $s_g-s_{vw}$ 、 $s_{vw}-s_a$  を用い、この比または差が集水面積および斜面勾配と無関係か否かを検討することにした。すなわち、集水面積あるいは斜面勾配を適当に 4～6 階級に分けて、それぞれの階級における統計量を検討した結果、各階級の分散値に有意な差が認められなかった。しかし、集水面積が小さいほど、また斜面勾配がゆるやかな集水域ほどこれら測定値の比あるいは差の分散が大きくなる傾向が認められた。したがって、集水面積が小さいほど、また斜面勾配がゆるやかな集水域ほど斜面勾配の測定法による測定誤差が入りやすいといえる。

等高線面積法によれば、面的な評価値が得られることから、流域の平均勾配が最も正確に算定され、また個人誤差が入りにくいという利点があるが、 $s_a$  の推定には多大の労力を必要とするのが難点である。そこで、とくに小面積の場合を除くと、流出解析の基礎資料としての斜面勾配の測定には、加重平均による谷線法が実用的と判断される。



図一  $s_{vw}$  と  $s_a$  との比較

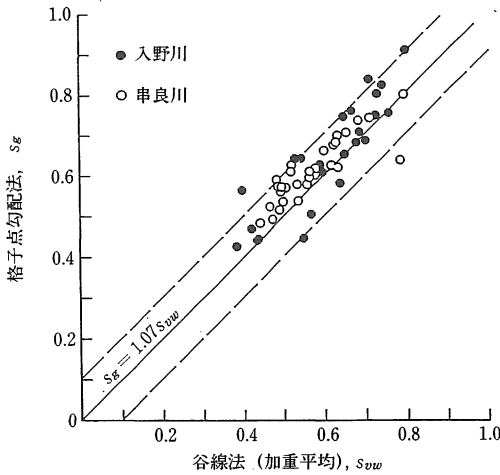


図-2  $s_{vw}$  と  $s_g$  との比較

IV. 流域モデル構成と水文地形量

以下では、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も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。そして、 $u$  次流域モデルの外側ブロックおよび内側ブロックの水文地形量に添字記号  $EX, IN$  を付加することにする。なお、以下に示す水文地形量の計測例は入野川、串良川、大迫ダム、下狩川および鴨川流域におけるものである。

1. 片側斜面数およびブロック数

図-3 は流域モデルの基準次数  $u^*$  を変えた場合の流域モデルの片側斜面数の変化の一例である。流域ブロック数はほぼこの  $1/2$  である。同図より、流域モデルの集中化に伴い片側斜面数は指数関数的に減少し、Horton の河道数則に類似の性状がみられる。なお、片対数紙上で直線部からのずれは当該流域特有の河道配列構造に基因しているものと判断される。

表-2 に、串良川、大迫ダム流域を対象として、 $u^*$  次流域モデルの外側ブロック数 ( $N_{u^*}EX$ ) と内側ブロック数 ( $N_{u^*}IN$ ) を比較した例を示す。同表では、Strahler 方式の場合には、外側ブロック数が内側ブロック数より 1 ~ 2 個多く、 $N_1$  方式の場合には逆に外側ブロック数が内側ブロック数より少なくなる傾向となっている。このように Strahler 方式の場合には、外側ブロック数と内側ブロック数がほぼ同数であるのに対し、 $N_1$  方式の場合に外側ブロック数が内側ブロック数より少なくなる傾向は、河道網の次酸化方式の特性に基因している。すなわち、Strahler 方式では同次数の河道が合流したときのみ河道次数が 1 次増加するため、 $u$  次集水域を単位流域とし

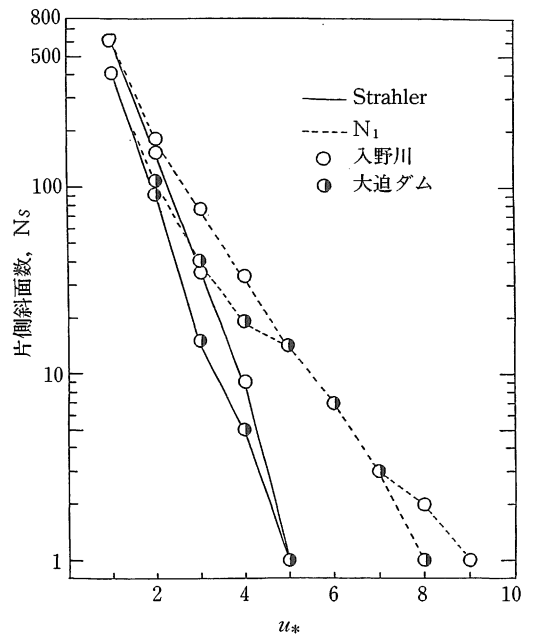


図-3 基準次数  $u^*$  と  $u^*$  次流域モデルの片側斜面数  $N_s$  との関係

表-2  $u^*$  次流域モデルを構成する外側ブロック数 ( $N_{u^*}EX$ ) と内側ブロック数 ( $N_{u^*}IN$ )

流域名	基準次数 $u^*$	Strahler 方式		$N_1$ 方式		流域名	基準次数 $u^*$	Strahler 方式		$N_1$ 方式	
		$E_x$	$I_n$	$E_x$	$I_n$			$E_x$	$I_n$	$E_x$	$I_n$
串良川	1	302	301	302	301	大迫 ダム	1	203	202	203	202
	2	76	74	76	103		2	46	45	46	103
	3	18	17	32	44		3	8	7	16	24
	4	5	4	15	18		4	3	2	5	14
	5	1	0	6	8		5	1	0	5	9
	6			3	4		6			3	4
	7			1	2		7			2	1
	8			1	1		8			1	0
	9			1	0						

て流域分割すると、外側ブロックは内側ブロックより1個多くなる傾向があり、また河道数に関する3/4則が成立するとすれば、平均的に3本のu次河道が(u+1)次河道に流入することになるから、外側ブロックが内側ブロックより2個多くなることになる。これに対して、N<sub>1</sub>方式の場合には、集水域内の1次河道数によって集水域の次数が規定されるため、u次集水域を単位流域として流域分割すると、内側ブロックを形成する残流域は(u+1)次の残流域ブロックからさらに高次の残流域ブロックに連結したブロック構成となる傾向にある。したがって上述の串良川、大迫ダム流域の例に示すように、N<sub>1</sub>方式によるu\*流域モデルでは外側ブロックは内側ブロックの4~8割程度のブロック数となる。ただし、u\*が流域の最高次数に近づくにつれ、この傾向はなくなり、外側ブロック数と内側ブロック数の差は±1の範囲になる。

2. 河道長

図-4は、串良川流域における外側ブロックについて、表-1のcase 3の定義を採用したときの各ブロックの河道長とその集水面積との関係を示す。同図からStrahler方式、N<sub>1</sub>方式のいずれのモデルでも、外側ブロックの河道長L<sub>EX</sub>とそれに付随する面積Aの間には、主河道長と流域面積の関係と同様Hackの法則が成立する。

$$L_{EX} = \kappa A^\epsilon \tag{6}$$

ただし、同図に示すようにStrahler方式で流域モデルを構成した場合のεの値は、一般的に見られる0.60に近い0.57となっているのに対し、N<sub>1</sub>方式による流域モデルではε=0.46とやや小さい。なお、各流域モデル外側ブ

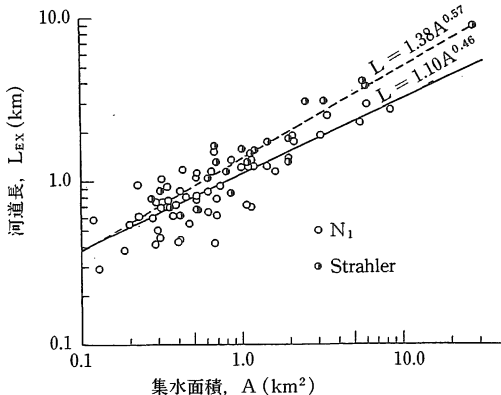


図-4 外側ブロックの河道長L<sub>EX</sub>(case3)とその集水面積A(km<sup>2</sup>)との関係(串良川流域、河道網B<sub>IIIa</sub>)

ックの河道長L<sub>EX</sub>を表-1に示す4種の計測法で測定し、(6)式のκ, εを算定すると、表-3に示す値が得られた。

いずれにしても外側ブロックの平均河道長L<sub>EX</sub>についてL<sub>EX</sub>(case 1) < L<sub>EX</sub>(case 3) ≤ L<sub>EX</sub>(case 2) < L<sub>EX</sub>(case 4)の関係が見られ、かつ、Strahler方式による流域モデルの方がN<sub>1</sub>方式に比較して外側ブロックの河道長をやや長く評価することになる。

基準次数u\*と外側ブロックおよび内側ブロックの平均河道長L<sub>EX</sub>, L<sub>IN</sub>との関係を整理すると、基準次数u\* = 1の場合、Strahler方式、N<sub>1</sub>方式のいずれの流域モデルにおいてもL<sub>EX</sub>/L<sub>IN</sub>=1.2程度である。また基準次数u\*が2以上の流域モデルについては以下ようになる。Strahler方式による流域モデルではcase 1のときのL<sub>EX</sub>/L<sub>IN</sub>の値は1に近く、外側ブロックと内側ブロックの河道長がバランスした形となっている。case 2ではL<sub>EX</sub>/L<sub>IN</sub>=2.2~2.7と外側ブロックと内側ブロックの河道長の差が大きく、case 3ではL<sub>EX</sub>/L<sub>IN</sub>=1.6程度となっている。

一方、N<sub>1</sub>方式のcase 1ではu\* = 1~5の範囲でL<sub>EX</sub>/L<sub>IN</sub>=1.2~0.5と漸減しているのに対し、case 2, 3では逆にL<sub>EX</sub>/L<sub>IN</sub>の値は1以上となっている。とくに、case 2のu\* = 2ではL<sub>EX</sub>/L<sub>IN</sub>=2.3と外側ブロックと内側ブロックの河道長に2倍以上の差が生じる結果となっている。

結局、Strahler方式では、

$$L_{EX}(\text{case 1}) < L_{EX}(\text{case 3}) < L_{EX}(\text{case 2})$$

N<sub>1</sub>方式では、

$$L_{EX}(\text{case 1}) < L_{EX}(\text{case 3}) \leq L_{EX}(\text{case 2})$$

の関係となる河道長が評価されることになる。

3. 集水面積

基準次数u\*と外側ブロックおよび内側ブロックの河道に付随するそれぞれの片側斜面の平均集水面積A<sub>EX</sub>, A<sub>IN</sub>との関係を整理すると、基準次数u\* = 1の場合A<sub>EX</sub>/A<sub>IN</sub>=1.2程度である。また基準次数u\*が2以上の流域モデルについてみると次のようになる。Strahler方式では河道長の評価法による差異は小さいものの、A<sub>EX</sub>/A<sub>IN</sub>=1.4~1.5と外側ブロックの集水面積が内側ブ

表-3 Hackの法則の式中の係数κ, ε (串良川流域、河道網B<sub>IIIa</sub>)

河道長L <sub>EX</sub> の評価法	Strahler		N <sub>1</sub>	
	κ	ε	κ	ε
case 1	0.80	0.62	0.56	0.51
case 2	2.08	0.60	1.23	0.46
case 3	1.38	0.57	1.11	0.46
case 4			1.74	0.54

ロックより40~50%大きく評価されることになる。一方、 $N_1$ 方式においても河道長の評価法による差異はなく、 $u^* = 1 \sim 5$ の範囲で $A_{EX}/A_{IN} = 1.3 \sim 0.9$ 程度に漸減し、Strahler方式に比較して外側ブロックと内側ブロックの集水面積の差は小さくなっている。 $A_{EX}/A_{IN}$ の値はこのようにStrahler方式では

$$A_{EX}/A_{IN} \text{ (case 2)} \leq A_{EX}/A_{IN} \text{ (case 3)} \leq A_{EX}/A_{IN} \text{ (case 1)}$$

$N_1$ 方式では

$$A_{EX}/A_{IN} \text{ (case 3)} \leq A_{EX}/A_{IN} \text{ (case 2)} \leq A_{EX}/A_{IN} \text{ (case 1)}$$

の関係が認められるものの、河道長の評価法の差異に基づく影響は小さいといえる。

図-5は $N_1$ 方式の次数化による流域モデルにおいて、外側ブロックと内側ブロックそれぞれの片側斜面域の平均集水面積 $A_{EX}, A_{IN}$ と基準次数 $u^*$ との関係を示したものである。この場合、河道長は $L_{EX}$  (case 3)の算定値である。 $u^* = 1, 2$ の流域モデルにおいて、 $(A_{EX})_2 / (A_{EX})_1 \approx 3.5$ ,  $(A_{IN})_2 / (A_{IN})_1 \approx 3.2$ 程度である。また、 $u^* = 2 \sim 8$ については次式の関係が成立する。

$$\left. \begin{aligned} (A_{EX})_{u^*} &= (A_{EX})_2 R_{EX}^{u^*-2} \\ (A_{IN})_{u^*} &= (A_{IN})_2 R_{IN}^{u^*-2} \end{aligned} \right\} \dots \dots \dots (7)$$

ここで、 $R_{EX} = (A_{EX})_{u^*+1} / (A_{EX})_{u^*}$ ,  $R_{IN} = (A_{IN})_{u^*+1} / (A_{IN})_{u^*}$ であり、 $R_{EX} \approx 2.2$ ,  $R_{IN} \approx 2.0$ 程度である。

なお、Strahler方式による流域モデルにおいては、 $R_{EX}$ ,  $R_{IN}$ ともにほぼ4となる。

図-6は $u^* = 2 \sim 3$ についての外側ブロックおよび内側ブロックの集水面積を対数確率紙にプロットしたものである。いずれの $u^*$ についても外側ブロックおよび内側ブロックの集水面積は対数正規分布し、かつ内側ブロックの集水面積の方が外側ブロックの集水面積に比較して分散が大きいいえる。

4. 斜面長

図-7に流域モデルの基準次数 $u^*$ と平均斜面長 $B_{EX}, B_{IN}$ との関係を示す。同図に示すように、外側ブロックについては河道長の評価法に対応した各caseの斜面長 $B_{EX}$ が得られるが、各 $u^*$ ともStrahler方式では

$$B_{EX} \text{ (case 2)} < B_{EX} \text{ (case 3)} < B_{EX} \text{ (case 1)}$$

$N_1$ 方式では

$$B_{EX} \text{ (case 4)} < B_{EX} \text{ (case 2)} \leq B_{EX} \text{ (case 3)} < B_{EX} \text{ (case 1)}$$

の関係にある。

ただし、 $N_1$ 方式の $u^* = 2$ の $B_{EX}$  (case 2)の値は $B$

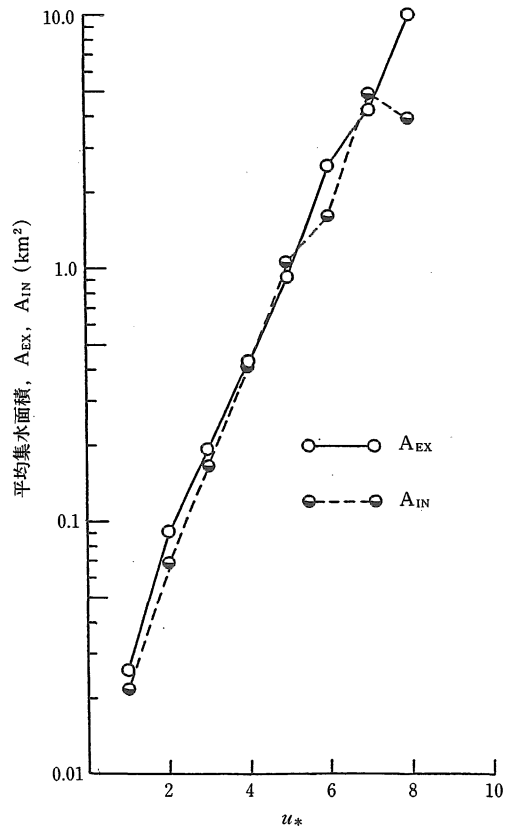


図-5 基準次数 $u^*$ と平均集水面積 $A_{EX}, A_{IN}$ との関係 (串良川流域, 河道網 $B_{III a}$ )

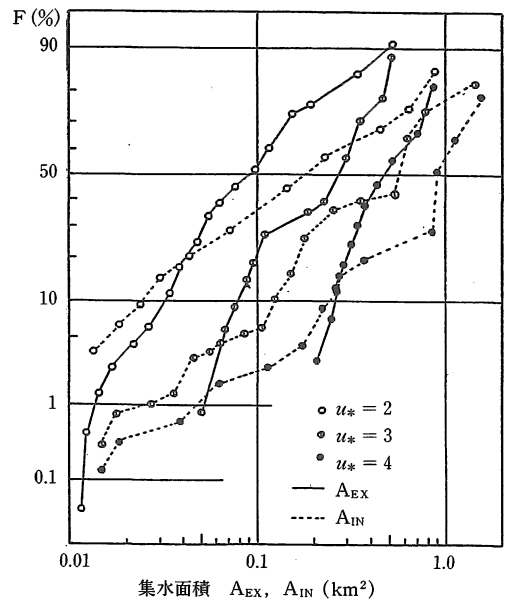


図-6 外側ブロックおよび内側ブロック集水面積 $A_{EX}, A_{IN}$ の確率分布 (串良川流域, 河道網 $B_{III a}$ )

$B_{EX}$  (case 4) の値より小さくなり、かつ内側ブロックの平均斜面長より、過小評価の傾向にある。またいずれの次数化方式についても、 $B_{EX}$  (case 1) は内側ブロックの平均斜面長に比較して過大傾向にあり、 $B_{EX}$  (case 2)、および  $B_{EX}$  (case 4) は逆に過小評価となる。そして外側ブロックと内側ブロックの平均斜面長とがほぼ均衡するのは  $B_{EX}$  (case 3) の算定値といえる。

図-8 は  $u_* = 2, 4$  の流域モデルの斜面長  $B_{EX}$  (case 3),  $B_{IN}$  を面積加重により確率紙にプロットしたものである。同図から、外側ブロックおよび内側ブロックの斜面長は対数正規分布で近似できるといえよう。

5. 河道勾配, 斜面勾配

図-9 に流域モデルの基準次数  $u_*$  と平均河道勾配  $S_{EX}$ ,  $S_{IN}$  との関係を示す。同図では河道長の評価法の相違による差異が明瞭に現れている。

すなわち、

$$S_{EX} \text{ (case 1)} < S_{EX} \text{ (case 3)} \leq S_{EX} \text{ (case 2)} < S_{EX} \text{ (case 4)}$$

の関係にある。

また、外側ブロックと内側ブロックの河道勾配比  $S_{EX}/S_{IN}$  (case 3) についてみると、 $u_* = 1$  で 1.6, Strahler 方式の  $u_* = 2 \sim 4$  に対し、 $S_{EX}/S_{IN}$  (case 3) = 2.3~3.0, また、 $N_1$  方式の  $u_* = 2 \sim 5$  に対し、 $S_{EX}/S_{IN}$  (case 3) = 1.8~2.1 の値となっている。

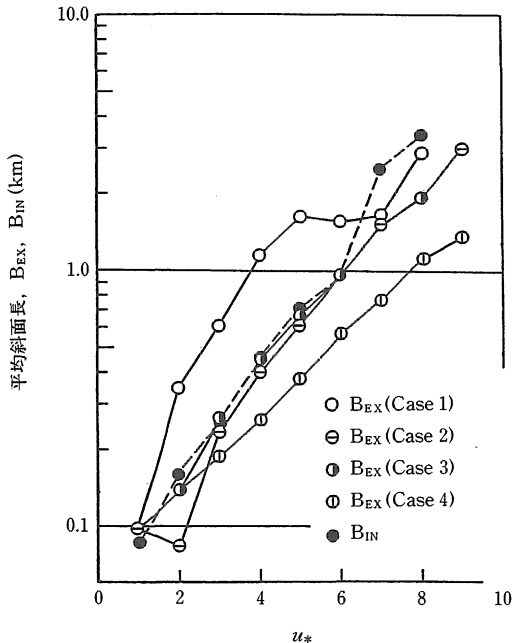


図-7 基準次数  $u_*$  と平均斜面長  $B_{EX}$ ,  $B_{IN}$  との関係 (串良川流域, 河道網  $B_{II} a$ )

次に、前述の加重平均による谷線法を適用して得られた斜面勾配と流域モデルの基準次数  $u_*$  との関係を図-10 に示す。同図には河道勾配の値も併示してある。同図に示すように  $u_*$  の増加とともに、斜面勾配は指数関数的に減少し、Strahler 方式では、

$$S_{EX} \text{ (case 1)} < S_{EX} \text{ (case 3)} < S_{EX} \text{ (case 2)}$$

$N_1$  方式では

$$S_{EX} \text{ (case 1)} < S_{EX} \text{ (case 3)} \leq S_{EX} \text{ (case 2)} \leq S_{EX} \text{ (case 4)}$$

の関係にある。

なお、斜面勾配が流域モデルの基準数  $u_*$  とともに減少

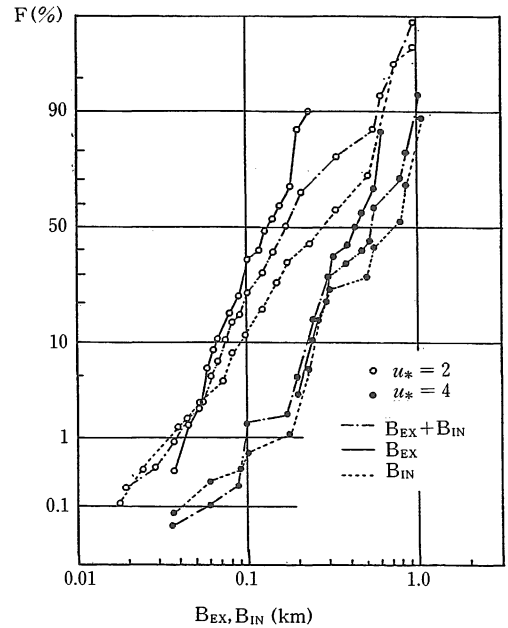


図-8 外側ブロックおよび内側ブロック斜面長  $B_{EX}$ ,  $B_{IN}$  の確率分布 (串良川流域, 河道網  $B_{II} a$ )

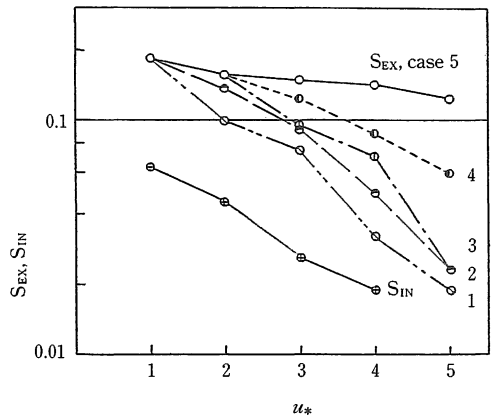


図-9 基準次数  $u_*$  と平均河道勾配  $S_{EX}$ ,  $S_{IN}$  との関係 (下狩川流域, 河道網  $C_{II} b$ )

するのは以下の理由による。すなわち、流域モデルの基準次数が大きくなるにつれ斜面勾配の測線としての谷線が逐次省略され、その代りに河道が $u_*$ 次流域モデル斜面域の測線として加味されることによる。図-11に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 $u_*$ との関係で示す。同図は斜面勾配を(4)式で算定するときの総落差 $\sum h_i$ および総谷線長(測線としての河道を含む) $\sum l_i$ に占める谷線および各次数の河道の算入割合を $u_*$ との関係で図示したものである。基準次数 $u_*$ の増加に伴い河道の影響度が次第に大きくなる事が指

摘できる。

図-12に流域モデルの基準次数 $u_*$ と外側ブロックと内側ブロックの河道勾配および斜面勾配との関係を示す。各基準次数の流域モデルにおける外側ブロックと内側ブロックの斜面勾配比 $S_{EX}/S_{IN}$ (case 3)は、 $u_*=1$ で0.95, Strahler方式の $u_*=2\sim 4$ に対し、 $S_{EX}/S_{IN}$ (case 3)=1.0~0.8, また、 $N_1$ 方式の $u_*=2\sim 5$ に対し、 $S_{EX}/S_{IN}$ (case 3)=1.0~0.7の値となっている。そして斜面長の場合と同様に、外側ブロックと内側ブロックの平均斜面勾配とがほぼ均衡するのは $S_{EX}$ (case 3)の算定値といえる。

図-13は斜面勾配の確率分布図である。基準次数 $u_*=2, 3$ についてのこの例は河道長を $L_{EX}$ (case 1)で評価した場合であるため、外側ブロックの斜面勾配 $S_{EX}$ の算定に河道の算入割合が大きいことから、外側ブロックの斜面勾配 $S_{EX}$ が内側ブロックの斜面勾配 $S_{IN}$ より小さい値となっている。しかし、いずれにしても外側ブロックおよび内側ブロックの斜面勾配は正規分布で近似できるといえる。

6. その他の斜面地形量

洪水流出解析の立場から山腹斜面域における雨水流出現象を検討する場合、斜面長、斜面勾配、斜面粗度、表層土層、水みちの分布などが重要と考えられる。

ところで、斜面上端部から河道までの雨水流伝播時間は、有効降雨強度が時間的に一様とすると、次式のよう

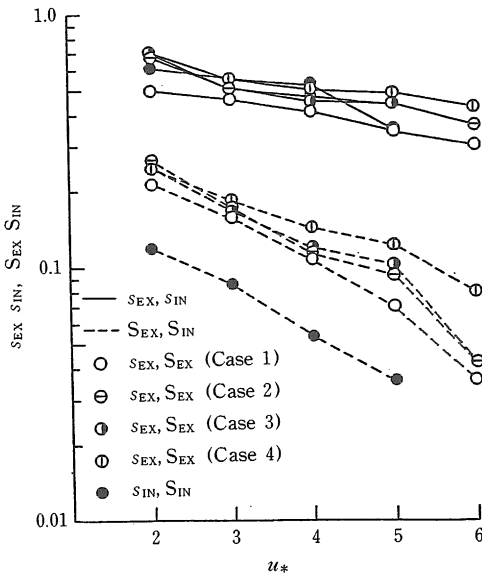


図-10 基準次数 $u_*$ と河道勾配, $S_{EX}$ , $S_{IN}$ および斜面勾配, $S_{EX}$ , $S_{IN}$ との関係(鴨川流域,河道網BIII b)

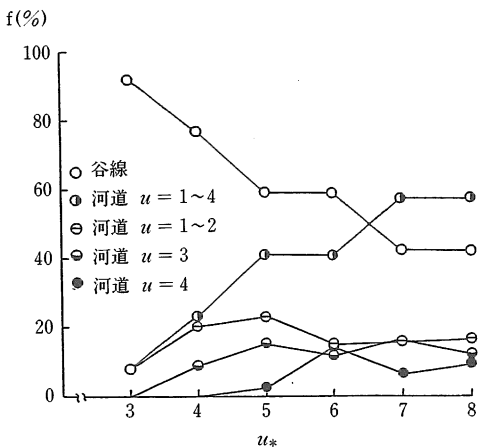


図-11 斜面勾配の算定値における谷線および河道の算入割合(串良川流域,河道網BII a)

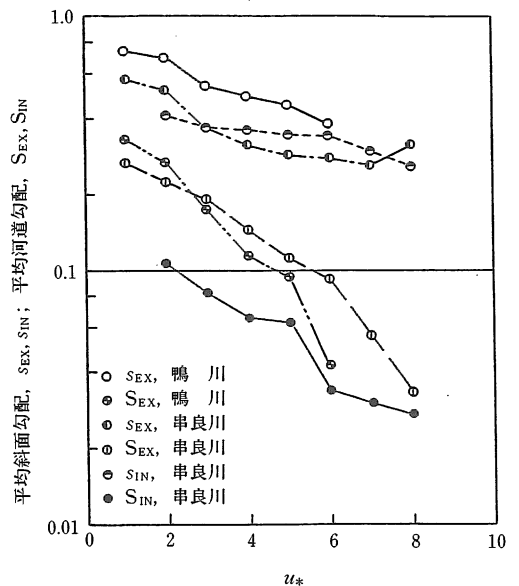


図-12 外側ブロックと内側ブロックの平均河道勾配,平均斜面勾配(鴨川流域,河道網BIII a);串良川流域,河道網BII a)



に表される。

$$t_s = \frac{kB^p}{(r_e/\alpha_2)^{1-p}} \dots\dots\dots (8)$$

ここに、 $t_s$ ：伝播時間(s)、 $B$ ：斜面長(m)、 $\alpha_2$ ：単位換算係数で $3.6 \times 10^6$ 、 $r_e$ ：有効降雨強度(mm/h)、 $k$ 、 $p$ ：定数で、斜面流がDarcy型中間流ならば $p=1$ 、 $k=\lambda/(ki/s)$ 、 $\lambda$ ：表層の有効間隙率、 $ki$ ：透水係数(cm/s)、 $s$ ：斜面勾配、斜面流がManning型表面流ならば、 $p=3/5$ 、 $k=(N/s)^p$ 、 $N$ ：等価粗度( $m^{-1/3}$ ・s)である。

したがって、上述の斜面地形量のほかに $B/s$ 、 $B/\sqrt{s}$ 、あるいは $(B/\sqrt{s})^{3/5}$ なども雨水流出現象を支配する地形量として挙げられよう。前項の斜面勾配の実用的測定法として加重平均による谷線法が有用と判断されたので、谷線長 $l_i$ および $l_i/s$ 、 $l_i/\sqrt{s}$ 、あるいは $(l_i/s)^{3/5}$ などの分布についても検討する余地があるといえる。

ここでは、 $B/\sqrt{s}$ について若干整理した結果を示すにとどめる。

図-14に $B/\sqrt{s}$ と基準次数 $u_*$ との関係を示す。いずれの基準次数 $u_*$ についても $B_{EX}/\sqrt{s_{EX}}$ (case 1)の値は他のcaseの値よりもかなり大きく、

$$B_{EX}/\sqrt{s_{EX}}(\text{case 4}) < B_{EX}/\sqrt{s_{EX}}(\text{case 2}) \leq B_{EX}/\sqrt{s_{EX}}$$

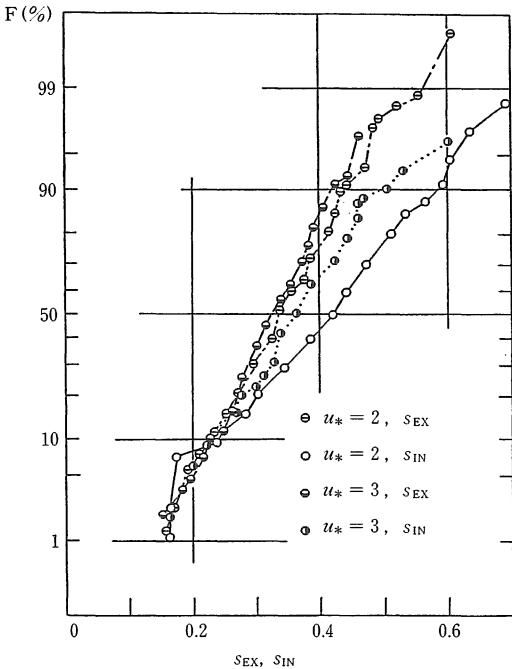


図-13 斜面勾配、 $S_{EX}$ 、 $S_{IN}$ の確率分布(串良川流域、河道網 $B_{Ma}$ )

(case 3) <  $B_{EX}/\sqrt{s_{EX}}$  (case 1) の関係となっている。この斜面地形量についても外側ブロックと内側ブロックの値とがほぼ均衡するのはcase 3の場合である。

また、図-15は、1次河道を種々の河道網<sup>1)</sup>における $B_{EX}/\sqrt{s_{EX}}$ 、 $B_{IN}/\sqrt{s_{IN}}$ の確率分布である。図中の河道網の記号 $D_{Mb}$ 、 $D_{IVb}$ はそれぞれ縮尺1/2,500の地形図上で等高線の幅奥行比 $w/l=1$ および2の地点までを水源部河道上流流端とする河道網を示す。いずれの河道網においても、流域モデルの外側ブロックと内側ブロックとも斜面地形量 $B/\sqrt{s}$ は対数正規分布しているといえ

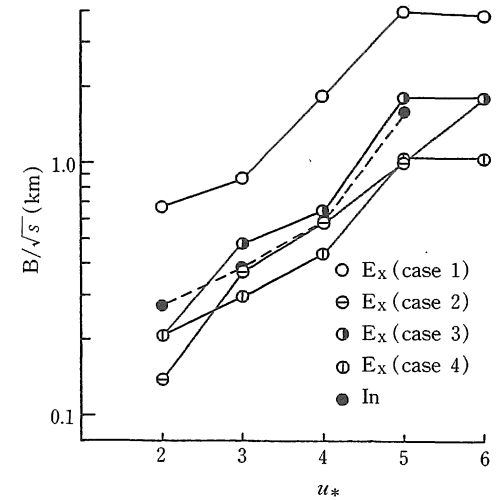


図-14 基準次数 $u_*$ と $B/\sqrt{s}$ の関係(鴨川流域、河道網 $B_{Mb}$ )

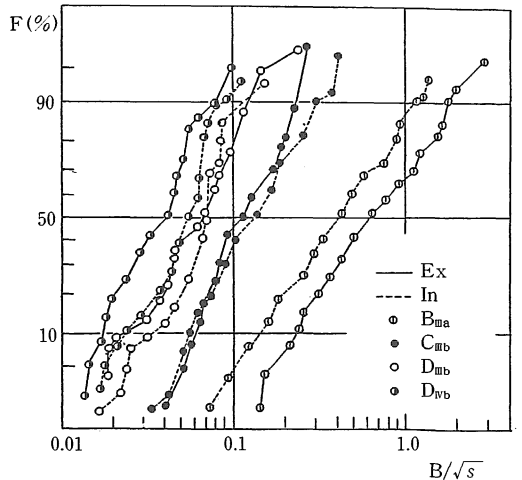


図-15 斜面地形量 $B/\sqrt{s}$ の確率分布(下狩川流域、河道網 $C_{Mb}$ 、 $D_{Mb}$ 、 $D_{IVb}$ )

る。

## V. あとがき

本研究では分布型流出モデル，たとえば雨水流モデルの適用に際して設定される流域モデルと流出に関する地形量との関係について若干の検討を行った。すなわち，まず  $1/2.5$ 万あるいは  $1/1$ 万地形図上の等高線の幅奥行比  $w/l=1$  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1次流域モデルとした。そして流出解析上の実用的観点からさらに集中化した流域モデルを設定することを考え，流域モデル単位流域の基準次数を逐次上げるに伴い水文地形量がどのように平均化されるかを吟味した。その際，流域モデルの外側ブロックの河道長の評価法として4ケースを考え，内側ブロックではそのブロックの主河道長をとることとした。こうした流域モデルの設定に基づいた水文地形量の特性の検討結果のうち主要なものを摘記すると次のようである。

1) 斜面勾配の計測法を比較検討した結果，加重平均による谷線法が実用的と判断された。

2)  $u$ 次流域モデルの河道長は，外側ブロックでは  $u$ 次河道長  $L_u$  と主流方向の  $(u-1)$  次河道長  $L_{u-1}$  の和で，

内側ブロックではそのブロックの主河道長を当該ブロックの河道長とする評価法が適当と判断された。また，河道長をこの方式で算定すると，外側ブロックと内側ブロックの平均斜面長もほぼ均衡した値が得られた。

3) 流域モデルの外側ブロック，内側ブロックの集水面積  $A$ ，斜面長  $B$ ，斜面地形量  $B/\sqrt{s}$  はいずれも対数正規分布で，斜面勾配は正規分布で近似できると判断された。

最後に，本研究を進めるにあたり，懇切な御指導を頂いた京都大学防災研究所角屋 睦教授ならびに島根大学農学部田中礼次郎教授に感謝の意を表する。また資料整理に協力を頂いた農業工学科農業土木学専攻の入江俊吾，黒田和彦，住浦 充君に謝意を表する。

## 参考文献

- 1) 福島 晟：農土論集155, pp. 35-42, 1991.
- 2) たとえば，山本莊毅編：陸水，共立出版，pp. 130-131, 1968.
- 3) 角屋 睦，福島 晟：昭和49年度農土学会大会講演会講演旨集，pp. 114-115, 1974.
- 4) 福島 晟・田中礼次郎・角屋 睦：第11回災害科学総合シンポジウム講演論文集，pp. 174-175, 1974.