

# シミュレーション水系網における形成領域の 大きさと流域の諸特性の関係

大 竹 義 則

## I. はじめに

筆者は前稿（大竹，1987）において，偏向性のないものから，しだいに偏向性を強めた10個のコンピュータ・シミュレーション水系網<sup>1)</sup>の計測結果から，面積や長さなどの絶対量を持つ流域の形態特性以外，水系網形成時の偏向度による影響が顕著に現われる例をほとんど認めることができないことを示した。一方これに対し，低次水流間と高次水流間での形態的特性の傾向が異なることから，シミュレーション水系網の形成領域の大きさが，流域の形態に影響を与えている可能性を示唆した。

現実の流域においても，流域は無制限の広がりを持つ斜面に発達すると考えるよりも，ある限られた空間（斜面）に発達していると考えた方が考えやすい。また，逆に，斜面に発達する流域の最小の単位（1次水流）も，無限に細分化できると考えるよりも，斜面の諸条件によって種々の大きさをとるものの，ある限られた限界があると考えた方が現実的であろう。

前稿においては，水系網形成領域の大きさと水系網の形態的特性との間には，直接にどのような関係があるかについては考察を加えていなかった。

そこで，本稿では，異なった大きさのシミュレーション領域を設定し，それぞれの領域に形成された水系網の形態的な特性を計測することにより，シミュレーション水系網を形成する領域の大きさが，そこで形成された水系網の形態的諸特性（流域面積・流路長・流域長など）にどのような影響（制約）

---

注1) シミュレーションは横・縦が50\*30ステップの領域で行った。

を与えているのか、また、このような制約を受けたシミュレーション水系網の形態的諸特性の相互間には、どのような関係が存在するのかを考察してみた。

## II. シミュレーション領域の設定と計測方法

水系網のシミュレーション方法や流域の計測方法は前稿のものと同じであり、これは基本的には大竹（1983）と同じ方法である。

すなわち、シミュレーション領域は横・縦のステップの比が2 : 1の矩形の領域で、水流は4方向へ1ステップずつ流下する。偏向度は各方眼における4方向への流下確率で与える。縦方向の全方眼の上方1/5ステップまでは、最大流下方向が逆になるように流下確率を設定しておく。計測対象水系網は領域の最下端から流出する完全流域のみとする。水流の次数はストレーラー方式により、流域別・次数別に流域面積、流路長、最大流路長、流域長、細長比などを計測した。

シミュレーション領域の大きさは、コンピュータの処理能力を考慮して、横・縦のステップがそれぞれ120\*60、80\*40、40\*20、20\*10の4つの領域を設定した（以下では120\*60をA領域、80\*40をB領域、40\*20をC領域、20\*10をD領域と呼ぶことにする）。領域の広さはA領域を除いて、縦横2倍ずつになるように取っており、領域の総ステップ数はA・B領域間で2.24倍、他はすべて4倍ずつになっている。

偏向度は、それぞれのシミュレーション領域の大きさ毎に0.0から0.9まで0.1ずつ変えて、10回のシミュレーションを行った。その結果、シミュレーション領域の大きさと偏向度の異なる計40個のシミュレーション水系網が形成された。これら40個の各ケースについて、それぞれ流域別・次数別の流域形態の計測を行った。

### Ⅲ. シミュレーションの結果と考察

以下では、シミュレーションの結果をシミュレーション領域の大きさとの関係を中心にして考察を加えていく。

#### a. 総流路数と最高次水流の次数

シミュレーションを行った全ケースの総流路数・最高次水流の次数を第1表に示す。当然ながら領域が大きくなるに従って、総流路数は増加し、最高次水流の次数も大きくなっている。総流路数の平均値の増加率はA・B領域間で2.18, B・C領域間で3.58, C・D領域間で3.52倍となっており、領域の総ステップ数の増加に比例しては増えていない。これは、シミュレーション領域が大きくなるに従って、高次の流路のより長い流域が形成されるため、相対的に流路数の増加が押さえられるためと考えられる。

同じ大きさのシミュレーション領域についてみると、偏向度0.3~0.6付近

第1表 シミュレーション領域の大きさと偏向度別の総流域数・最高次次数

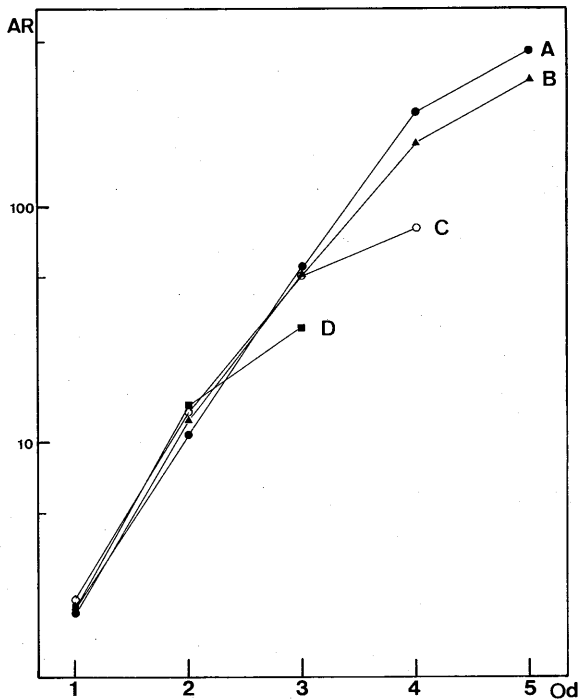
( )内は最高次水流の次数

領域の 大きさ 偏向度	A 120*60	B 80*40	C 40*20	D 20*10
0.0	1089 (4)	401 (4)	122 (3)	51 (3)
0.1	1529 (5)	575 (4)	204 (4)	67 (4)
0.2	1543 (5)	790 (5)	195 (4)	41 (3)
0.3	1786 (5)	815 (5)	229 (4)	57 (3)
0.4	1769 (5)	795 (4)	204 (4)	58 (3)
0.5	1755 (5)	823 (5)	188 (4)	53 (3)
0.6	1618 (5)	753 (4)	215 (4)	47 (3)
0.7	1155 (5)	634 (4)	172 (3)	49 (3)
0.8	1065 (4)	522 (4)	146 (3)	44 (3)
0.9	630 (4)	290 (3)	112 (3)	40 (2)
平均	1394 (4.7)	640 (4.2)	179 (3.6)	51 (3.0)

で総流路数が多く、かつ最高次水流の次数も高くなる傾向を示す<sup>2)</sup>。また、この傾向は領域が大きくなるほど明確となる。

### b. 流域面積

第1図に偏向度0.5の場合の次数と平均流域面積の関係を示す。A～D領域とも次数が大きくなるに従って流域面積は増大し、各点は右上がりの分布となるが、流域面積の増加率は低次間で大きく、高次間で小さいため、グラフは高次流域になるに従って勾配を緩めている。勾配が緩やかになる度合いは、最高次水流の次数が小さい流域ほど大きい。このため、最高次水流の次



第1図 次数(Od)と流域面積(AR)の関係(偏向度0.5)

2) このような傾向については、すでに大竹(1987)において考察した。

数が小さいD、C領域ではより低次から勾配が緩やかになっている。最高次水流の次数が同じ5次のA、B領域ではシミュレーション領域が小さいB領域でより勾配が緩やかな傾向を示す。

これは、高次の流域においては、広いシミュレーション領域で形成される流域ほど、より大きな流域面積を持つことを示しており、逆に、シミュレーション領域が狭い場合には、同じ次数でもより狭い流域が多いことを示している。すなわち、シミュレーション領域が狭くなれば、ある次数のさまざまな大きさの流域の中で、流域面積の小さなものしか形成されないことを示している。

1・2次間の面積比の範囲は5.53 [A領域 (以下領域は省略)] ~ 7.31 [D] となっており、他の次数間でこの区間の最小値5.53を上回るものはない。一方、最高次と(最高次-1)次間についてみると、その範囲は1.62 [C] ~ 2.19 [D] にあり、他の次数間ではこの区間の最大値2.19を下回るものはない。

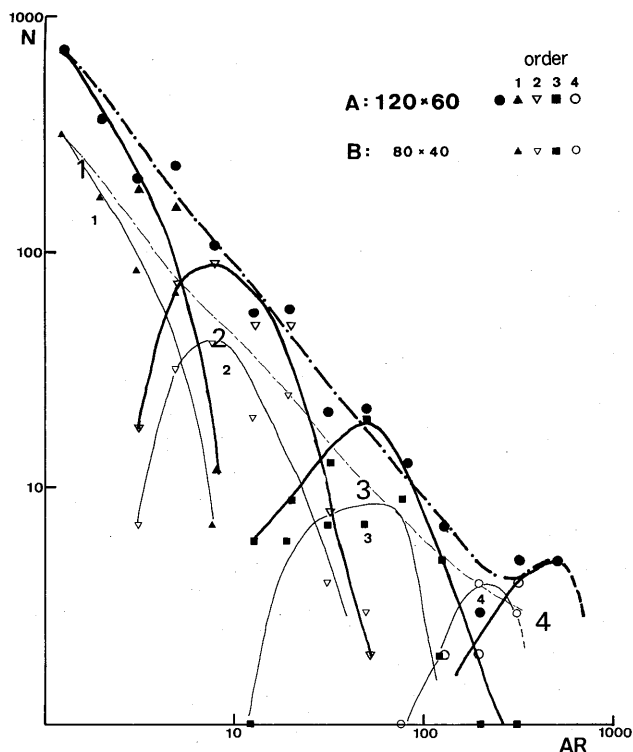
このことは、ある次数間の面積比は、次数の大きさに応じた特定の値を取るのではなく、シミュレーション領域の大きさが異なっても、それぞれの領域の最高次流域近傍間ではほぼ一定の値を取るといえる。

### c. 流域面積の頻度分布

今度は、シミュレーション領域の大きさと個々の流域面積との関係を次数別流域面積の頻度分布によって見ていく。第2図は偏向度がともに0.5の時のA領域とB領域の流域面積の頻度分布である。図中では、A領域とB領域の分布の概形をそれぞれ太線と細線によって示している。一点鎖線は全流域の頻度分布の概形を示し、実線は次数毎の概形を示している(5次は省略)。

A領域の全流域の頻度はほぼ右下がりの直線的な分布を示し、流域面積の大きな流域ほど数が減少することを示している。B領域の分布形も数は少ないものの、A領域の分布形にほぼ類似した傾向を示す。

次数別に見ると、1~3次まではA・B領域の頻度分布に大きな差は認められない。この内、2・3次は正規分布に近い分布形を示している。しか



第2図 A領域とB領域の次数別流域面積 (AR) の頻度分布 (偏向度0.5)

し、4次ではサンプル数は少ないものの<sup>3)</sup>、明らかにA領域に比べB領域は、その分布域が全体に左方向にずれる傾向が認められ、同じ4次であっても、流域面積の小さいものが多くなる。また、分布形はA・B領域とも流域面積の大きなものが急速に減少し、ひずんだタイプとなっている。

これらのことは、基本的にはシミュレーション領域の限界に近い、面積の大きな流域ほど、シミュレーション領域の大きさの影響(制約)が大きいことを示している。このような傾向を示す流域は、あるシミュレーション領域の中では最高次近傍の流域でもある。

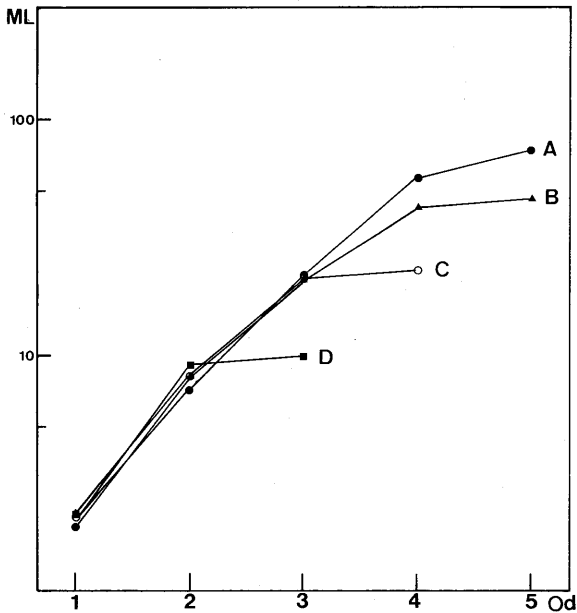
3) A領域の1・2・3・4次流域数はそれぞれ1391, 283, 62, 15, B領域の流域数は655, 127, 31, 9である。

d. 最大流路長

次数と最大流路長の関係を示したものが第3図である。流域面積比に比べ最大流路長比は小さな値となっているため、第1図に比べ各点は全体としてよりなだらかな右上りの勾配となっている。分布の全体的傾向は流域面積の場合と非常によく似ている。詳しく見ると、最大流路長は、流域面積の場合に比べ、より低次から湾曲が始まり、また湾曲の度合いがやや大きくなっている。すなわち、1・2次間の流路長比は4.72 [D] ~ 3.66 [A] の範囲にあり、最高次・(最高次-1)次間は1.10 [BおよびD] ~ 1.31 [A] の範囲にある。ここでも、1・2次間の最小値3.66を上回る流路長比はみられず、また最高次・(最高次-1)次間の最大値1.31を下回る流路長比もみられない。

e. 流域長

流域長は流域の最奥部から流出部までの直線距離を計測している。このた

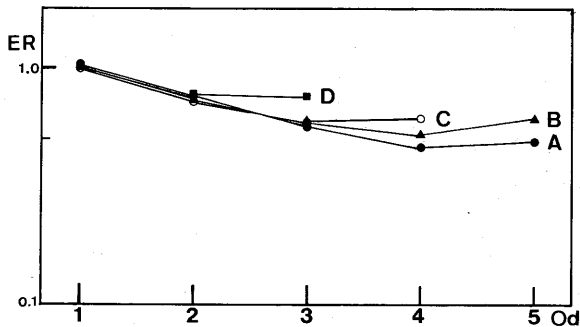


第3図 次数 (Od) と最大流路長 (ML) の関係 (偏向度0.5)

め、最大流路長に比べ流域長は一般にやや短く、各点は全体としてより下方に分布している。しかしながら、全体として次数の増加とともに右上がりに分布すること、同じ次数であってもシミュレーション領域の小さな流域ほど流域長は短くなるため、より低次から湾曲を始めるなどの特徴は、最大流路長の場合とほとんど同じである。最高次・(最高次-1)次間の流域長比は、A領域を除いて、最大流路長に比べやや大きく、湾曲の度合いはやや緩やかとなっている。

#### f. 細長比<sup>4)</sup>

流域は次数の増加とともにしだいに細長化する傾向がある。このため、細長比は次数の増加とともに小さな値となり、各点は右下がりの分布となる(第4図)。低次間の細長比の比はシミュレーション領域の大きさにかかわらずほぼ一定であるが、最高次にちかづくにつれて値は大きくなる。このため、シミュレーション領域が小さく、最高次水流の次数が小さい流域ほど低次から上方へ湾曲するようになる。A~C領域の最高次流域の細長比は(最高次-1)次よりも大きな値となっており、より丸みを帯びた流域が存在することがわかる。



第4図 次数(Od)と細長比(ER)の関係(偏向度0.5)

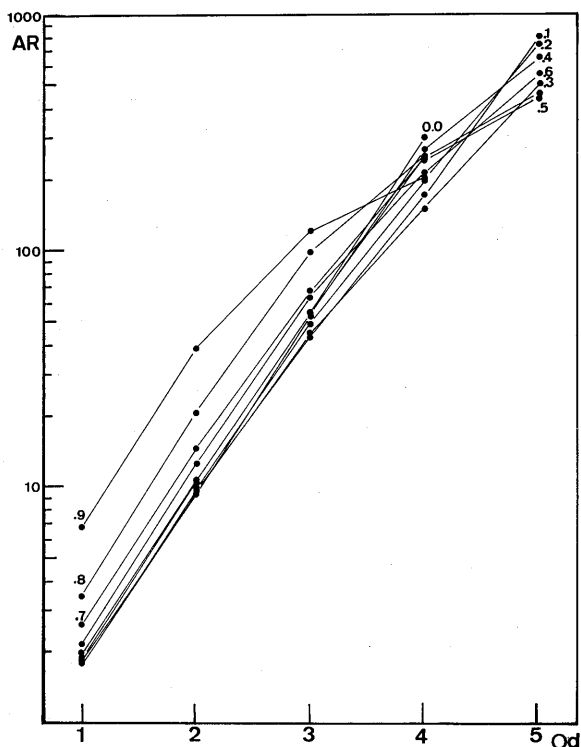
4) ここでの細長比は Schumm (1956) の elongation ratio をさす。



### 8. 偏向度との関係

以上では、偏向度が0.5の場合を代表例としてみてきた。シミュレーション領域の大きさが同じ場合には、偏向度が大きくなるに従って、最高次を除く、各次数の流域面積、最大流路長、流域長は大きくなり、細長比は逆に小さくなる傾向を示す（大竹，1987）。

第5図はA領域の偏向度毎の次数別平均流域面積を示したものである。低次では、同次数の流域は偏向度が大きいほど流域面積が大きいことを示している。しかしながら、次数の増加とともに、高次流域ほど流域面積の拡大が押さえられ、各点は下方へ湾曲する。このため4次以上の高次流域では、



第5図 次数(Od)と偏向度別流域面積(AR)の関係(A領域)

偏向度と流域面積の間の直線的関係はなくなっている。湾曲の度合いは偏向度が大きいほど大きくなっている。逆に、偏向度の小さな流域ほど分布は低次から高次まで直線的傾向を示す。

このようなグラフの分布傾向は、領域の小さいB領域においてもほとんど同様である。A領域の場合に比べ、同じ偏向度のグラフの湾曲の度合いは、全般に大きい傾向を示す。これは偏向度の大きい0.8や0.9において、特に顕著である。また、偏向度0.3~0.7であっても、4・5次の流域になると同様の傾向が現われ、全体として高次の流域面積は小さい傾向を示す。

偏向度の小さな流域（例えば、偏向度0.0）のシミュレーション領域の大きさと次数別流域面積の関係をみると、偏向度の小さな流域では、シミュレーション領域の大きさにかかわらず、流域面積は次数の増加とともにほぼ直線的に増加し、湾曲の度合いはわずかである。これに対し、偏向度のより大きな流域では、全体として、より低次から湾曲を強める傾向を示す。

このような分布特性は、偏向度が大きい場合は、小さい場合に比べ、低次ではより細長く、面積の広い流域が形成されることを示している。また、高次では低次流域に比べ、流域の形状はやや丸みを帯びるものの、偏向度の小さな流域に比べれば、かなり細長い形状を持っている。このため、流域長がシミュレーション領域の最大幅にちかづくとき、流域面積の拡大は押さえられることとなる。すなわち、シミュレーション領域の大きさの影響は、流域長がより速やかに限界に到達する、偏向度の大きな流域ほど大きいことが判明する。

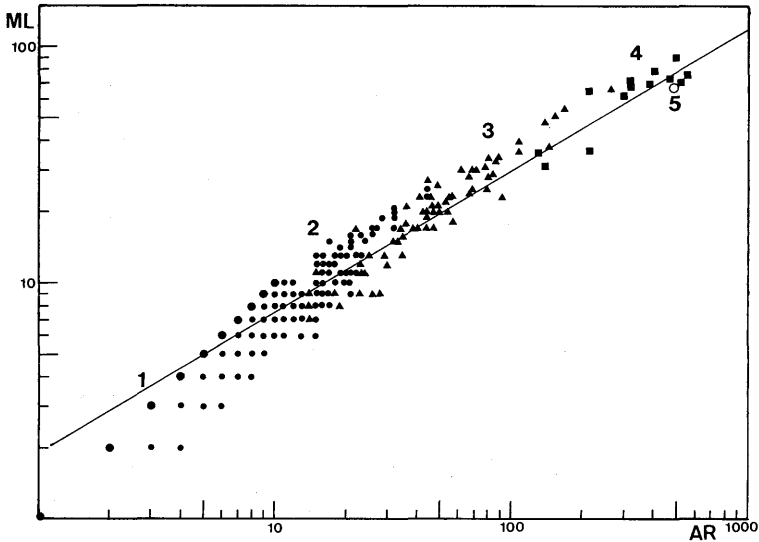
#### h. 流域面積と最大流路長の関係

シミュレーション水系網においても流域の面積と主流の長さ（最大流路長）との間には密接な関係が存在する。1次水流を除いた偏向度の異なる全30流域での回帰直線の勾配（べき指数）は、0.603が得られており（大竹，1987）、これはHack（1957）の得た値とほぼ等しい。ここでは、流域面積と最大流路長の関係をシミュレーション領域の大きさとの関係からより詳細

に検討してみたい。

第6図は偏向度0.5のときA領域に形成されたすべての次数別流域（1755個）<sup>5)</sup>について、流域面積と最大流路長の関係を示したものである。

両者には明瞭な正の相関が認められる。次数毎の分布を見ると、1次違いの各点は、どれもその下端では低次流域の下位に、上端では高次流域のより上位に、混在しながら、それぞれ右上がりの直線的な分布を示している。分布の勾配は、高次になるに従って、しだいに緩やかになっている<sup>6)</sup>。そして、全体としてはより緩やかな直線上に各点は分布するようになる（より厳密に見れば、流域面積の大きな流域ほどやや右下がりの上に凸形の分布を示す）。1次を除く全流域の回帰直線の勾配は0.61で、現実の水系網から得られた各種の値（高山，1974）に近い値となっている。



第6図 A領域の流域面積（AR）と最大流路長（ML）の関係（偏向度0.5）

- 5) 1次水流の面積と長さは本計測ではまったく同じ値となる。このため、1次流域は直線上に分布する。図中では、重なった値は1点でのみ現わしてある。
- 6) 各次数毎の回帰直線の勾配は、2次で0.89、3次で0.77、4次で0.62となっている。

このような分布特性は、B領域（偏向度0.5）においても同様であり<sup>7)</sup>、シミュレーション領域の大きさにかかわらず認められる分布特性である。

同じ偏向度の下で形成された流域でありながら、全体として流域面積の大きな流域ほど最大流路長が相対的に小さい傾向を示すのは、流域面積の大きな（より高次の）流域ほど、流域の細長くなる割合（細長比の比）が小さくなることと関係している。これは、流域面積の大きな流域にシミュレーション領域の大きさの制約が生じた結果と考えられる。また、流域面積が同じであれば、次数が大きな流域ほど最大流路長が小さくなる傾向を示すのは、より丸みを持った流域でなければ、合流によって新たな1次上位の流路を生じ得ないためである。これは、同次水流の合流によって1次上位の水流を生ずるというストレーラー方式の次数区分法によって生ずる特性である。

次に、シミュレーション領域の大きさや偏向度の影響を見るために、A～D領域について、それぞれの次数別の平均流域面積と最大流路長の関係を示したのが第7 a～d図である。また、これらの第7 a～d図を一つの図にまとめて示したものが第8図である。

第7 a～d図の各点の全体の分布傾向は第6図と類似しているが、各点は偏向度毎の平均値であるため、次数毎によりまとまった分布を示しており、全体として右上がりの、ほぼ直線状の分布をなす。分布域はシミュレーション領域の大きいものほど、上方・右方へと広がっている。各回帰直線の勾配は、0.55～0.60の値を示す。

細部について見ると、低次流域ほど右上がりの直線的な分布を示し、その勾配も急であるのに対し、高次になるに従って各点は勾配を緩め、しだいに団塊状となる。この傾向は、シミュレーション領域の大きい流域において顕著に示されている（第7 a図）。注目されるのは、シミュレーション領域の小さいC・D領域の3・4次流域の各点の分布傾向が、分布域は大きく隔たっているにもかかわらず、シミュレーション領域の大きなA・B領域の4・

---

7) 各次数毎の回帰直線の勾配は、2次で0.88、3次で0.71、4次で0.63。1次を除く全体の勾配は0.60を得る。

5次流域の分布傾向とよく類似していることである。それぞれのシミュレーション領域の大きさの限界に近い規模を持つ流域は、規模的にはそれぞれ異なるものの、互いに類似した分布傾向を持つといえる。

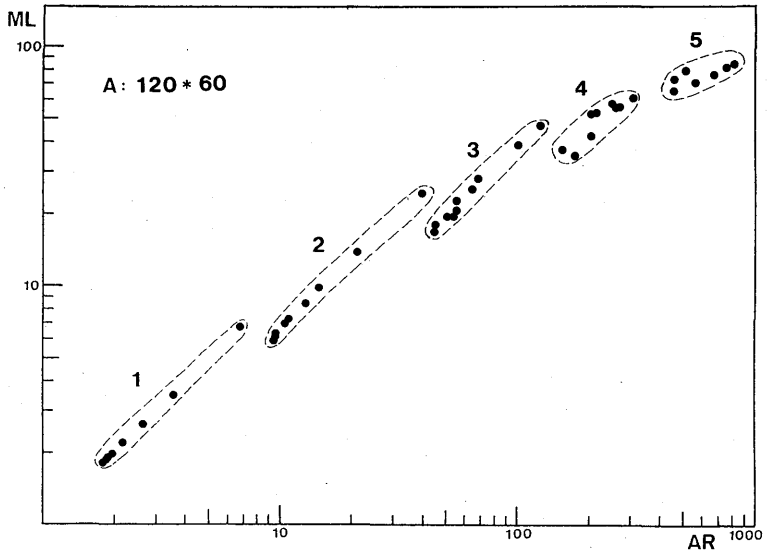
同一次数の流域にあっては、偏向度の小さな流域ほど左下方に分布し、逆に、偏向度の大きな流域ほど右上方に分布する傾向を示す。この傾向は、分布が直線的な低次ほど明瞭で、高次になると団塊状の分布となり、不明瞭となっている。偏向度毎に各点を結んでみると、偏向度0.0の線は全体の分布域の下限となり、偏向度0.9の線は上限となっている。

以上のほか、第8図からはさらに以下のような傾向を指摘できる。

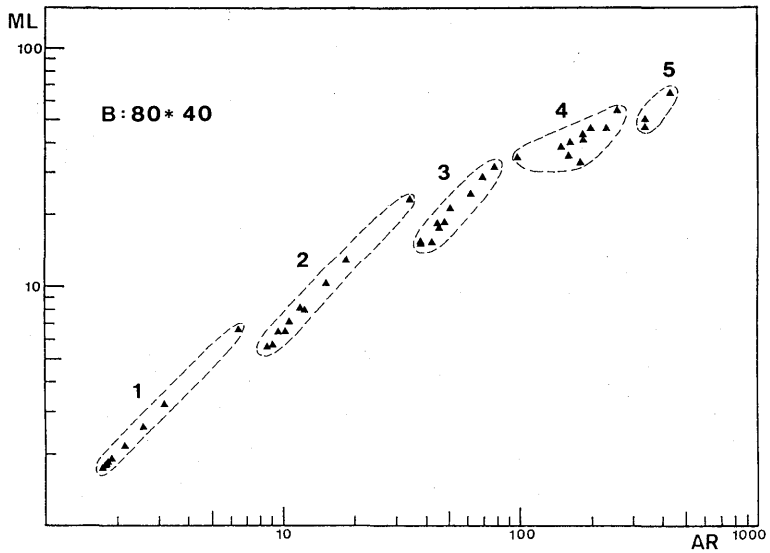
1・2次の偏向度の小さい流域では、シミュレーション領域の大きさによる差はほとんど認められないが、偏向度が大きくなると、シミュレーション領域の大きな流域では、流域面積・最大流路長とも増大する傾向にある。一方、高次では偏向度の大きな流域ほど最大流路長の増大の割合が小さく、しだいに勾配を緩め、下方へ湾曲するため、この傾向は見られなくなる。このため、シミュレーション領域の小さい流域では、より低次から各点は勾配を緩め、団塊状となって、下方へ湾曲を始め、同一次数の流域の中では左下方に分布し、流域面積・最大流路長ともに小さい傾向を示している。

これらのことから、巨視的には、流域面積と最大流路長の関係はほぼ成立し、べき指数も0.6に近い値を取るといえるが、微視的に見ると、両者の関係はかなり複雑な様相を呈しており、シミュレーション領域の大きさや偏向度による影響が明瞭に認められる。

すなわち、低次では次数毎の各点は、偏向度が大きくなると伴に、右上がりの直線上に分布し、高次になるに従って、各点は勾配を緩め、しだいに下方に湾曲した団塊状の分布となる。この傾向はシミュレーション領域の狭い（すなわち最高次水流の小さい）流域ほど、より低次から生じ始める。このため、狭い領域に生じた流域は、同じ次数の流域の中では、より下部に位置している（流域面積・最大流路長ともに小さい）。これらは、シミュレーション領域の大きさの影響（制約）が、規模的にシミュレーション領域の限界に近

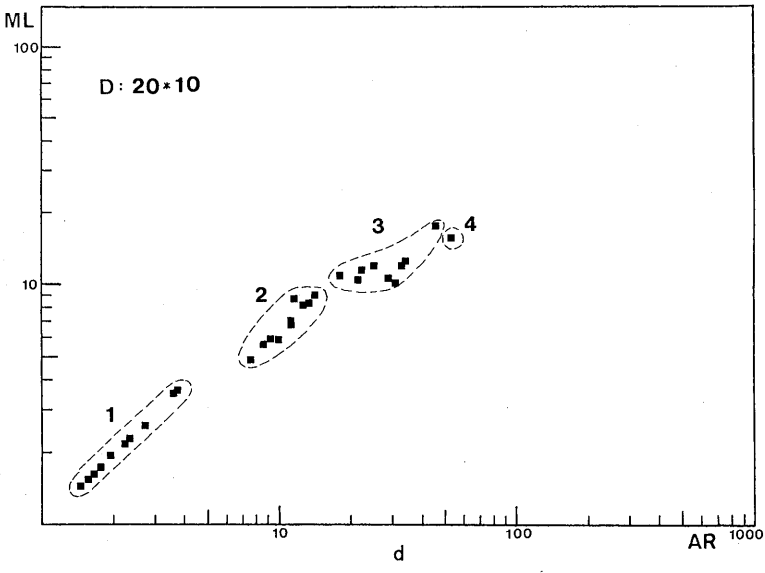
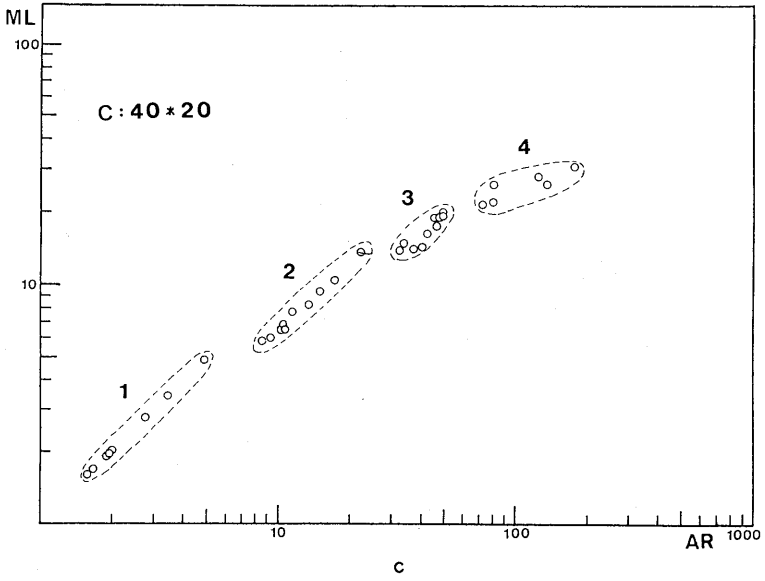


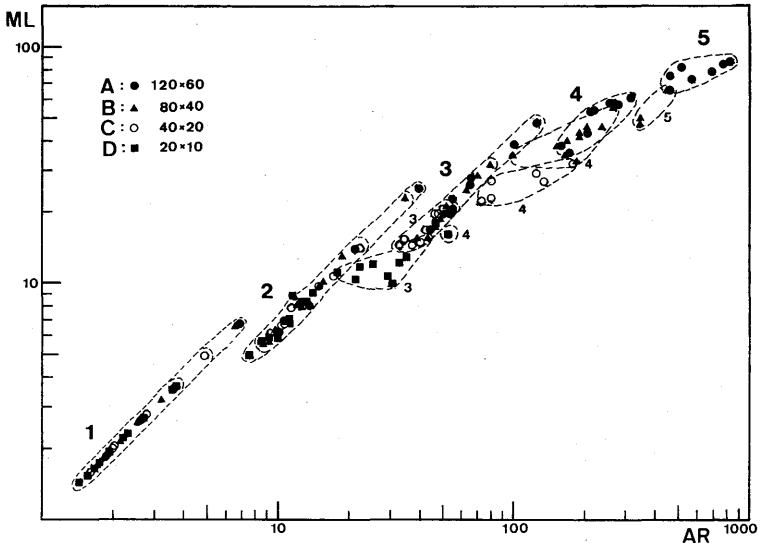
a



b

第7 a - d 図 偏向度別次数別平均の流域面積 (AR) と最大流路長 (ML) の関係 (a : A 領域, b : B 領域, c : C 領域, d : D 領域)





第8図 流域面積 (AR) と最大流路長 (ML) の関係  
(第7 a-d 図を重ねあわせた結果)

い流域ほど、また偏向度の大きな流域ほど、より強く作用した結果といえる。

#### IV. 結 語

4つの異なった大きさのシミュレーション領域で、それぞれ10回ずつの異なった偏向度によってシミュレートされた水系網の計測とその解析から、以下のような結果を得た。

(1) 流域は同じ次数で比較したとき、シミュレーション領域の広い流域ほど、より大きな流域面積を持ち、逆に、シミュレーション領域が狭ければ、より小さな流域面積を持つ傾向にある。これは、シミュレーション領域が狭ければ、領域の大きさの制約によって、ある次数のさまざまな大きさの流域の内、流域面積の小さなものしか形成され得ないことを示している。このため、面積比は次数の大きさに応じた特定の値を取るのではなく、シミュレ-



シジョン領域の大きさが異なっても、最高次流域近傍では互いに近似した値を取る。

(2) 流域面積の頻度分布は、規模的にシミュレーション領域の大きさの限界に近い流域で平均値が小さくなり、ひずんだ形状を示す。これも、シミュレーション領域の大きさの制約を受けた結果と考えられる。

(3) 最大流路長と流域長は形態特性の点では類似した関係にある。両者と次数との関係は、流域面積の場合と同様に、シミュレーション領域の大きさの制約を受けるが、最高次流域近傍ではより大きな制約を受ける。このため、次数の増加とともに細長化する傾向を示す流域の形状(細長比)も、しだいにその割合を弱め、最高次近傍では、逆にやや丸みを帯びようになる。

(4) 偏向度が大きな流域では、低次流域においては、より細長く、面積の広い流域が形成されやすい。しかし、高次になると急速に流域面積や最大流路長の増加率が小さくなる。これは、流域長がシミュレーション領域の最大幅にちかづくとき、細長い流域どうしの合流・流入が発生しにくくなり、流域面積や最大流路長の増大が生じにくくなったためと考えられる。このため、シミュレーション領域の大きさの影響は、偏向度の大きい流域では、より明瞭に現われる。

一方、偏向度の小さな流域では、シミュレーション領域の大きさの影響は少なく、低次間の傾向はより高次まで保持される。

(5) シミュレーション水系網においても、流域の面積と主流の長さ(最大流路長)との直線的相関関係は、巨視的には存在し、そのべき指数もこれまでの現実の水系網で得られた0.6に近い値を示す。

しかしながら詳細に見ると、その分布形は、直線的というよりは、弱く上方に膨らんだ凸形の分布を示しており、この関係はシミュレーション領域の大きさと偏向度の制約因子のバランスの上に成り立っているといえる。

すなわち、低次間では偏向度の大きな流域ほど流域面積・最大流路長ともに大きく、高次になるに従って、シミュレーション領域の大きさの制約を受け、増加率を緩める。この傾向は、シミュレーション領域の狭い流域ほど、

より低次から生じ始める。規模的にシミュレーション領域の限界に近い流域ほど、また偏向度の大きな流域ほど、より強くシミュレーション領域の大きさの影響(制約)を受けるといえる。一方、偏向度の小さな流域ではその制約は弱く、低次間の傾向をより高次まで保持している。

(6) 以上の結果を、シミュレーション領域の大きさを流域の形成される斜面の大きさ、偏向度を斜面の平均的勾配と仮定して、現実の水系網に当てはめて考えると、流域の形態特性には、斜面の勾配と斜面の大きさ(広がり)が、互に関連しあって強い影響を与えているといえる。斜面の勾配は流域の形状の偏ったタイプを発生させ、斜面の大きさは種々のタイプの大規模な流域がランダムに形成されるのを制約し、より規模の小さな流域のみ発生させている。

従来、流域の面積と主流路長の関係(Hackの関係)と呼ばれてきたものは、ランダムな水系網の形成が、斜面の勾配と斜面の大きさによって制約を受けた、現実の流域形態の一局面を表現したものと見なすことができよう。

### 参 考 文 献

大竹義則(1983): シミュレーション水系網の特性計測のための自動化プログラム。佐世保工業高専研究報告, 第20号, 79-84ページ。

大竹義則(1987): シミュレーション水系網における偏向度と流域の特性。徳山大学論叢, 第28号, 213-230ページ。

高山茂美(1974): 『河川地形』共立出版, 304ページ。

Hack, J. T (1957): Studies of longitudinal stream profiles in Virginia and Maryland. U. S. G. S. Prof. Paper, 294-B, 45-97.

Schumm, S. A. (1956): Evolution of drainage systems and slope in badlands at Perth Amboy, New Jersey. Bull. Geol. Soc. Amr., vol. 67, 597-646.