

浸食過程を考慮した模擬流域発生手法と 流域地形量 - 降雨・流出特性に関する基礎的研究

中北英一・松田周吾*

* 関西電力株式会社

要 旨

降雨分布特性 - 地形分布特性 - 流出特性の統一的な解明は、素過程を積み上げる形で降雨や流出といった現象を再現・予測することが主流となっている現在の水文学において大切なマクロな視点である。この関係解明に向けて本研究では、流域地形量をパラメータとして設定することで、ランダム性も取り入れた地形の浸食過程に従って模擬流域地形情報を発生させる手法を開発した。また、降雨特性と地形特性の相互関係を考えるために、発生する模擬流域群から地形特性に影響する流域生成プロセスについて考察した。

キーワード: 模擬流域, 浸食過程, 流域地形量, 分岐比, hypsometric 曲線, 地形則, 河道網則

1. 序論

1.1 本研究の背景

気象現象がもたらす土砂災害や洪水災害を防ぐためには、気象現象の予測とともに、それぞれの流域における流出特性の把握が重要となる。流出特性は降雨特性と流域地形特性を反映したものであるため、これらは総合的に考えなければならない。このような降雨分布特性 - 流域地形分布特性 - 流出特性の関係を統一的に解明することは水文学における 1 つの課題である。しかし、実際の降雨分布・流域地形分布は様々な特性を併せ持っており、それらは相互に影響し合うため、この 3 要素間の関係解明は難しい。

この問題への取り組みとして、実際の流域の地形量を基準にした流出特性の違いについての研究(友杉, 1975)や地形分布を考慮した降雨分布の模擬発生(立川, 2003)などが行われているが、近年では分布型の降雨・地形情報や流出モデルに基づいた個々の流域における流出予測技術の向上という方向に研究対象がシフトしてきている。分布型情報を扱うモデルでは現象の素過程に着目しており、各要素での素過程を計算することで、それらの集合である領域全体での様子が再現・予測される。このような素過程という視点からのアプローチは複雑な現象の

解明において有効な手法である。しかし、現象のマクロな関係性を考えるということも、現象の理解・解明のためには同様に大切な視点である。分布型の降雨・地形情報とそれを扱う流出モデルが出揃った今だからこそ、マクロな視点からの降雨分布 - 地形分布 - 流出の関係の統一的な解明が可能であると考えられる。

この関係の解明への 1 つの足がかりとして、本研究では流域を模擬発生させるというアプローチを試みる。ただし、流域の模擬発生とは、地形標高データを既知として自動的に河道網や部分流域の特定を行うようなものではない。ましてや GIS ソフト開発が目的ではない。本研究で考える流域の模擬発生とは、指定した地形特性を備えた仮想的な流域地形情報を生成することを意味する。地形特性ごとに自然現象のランダム性も考慮して複数の模擬流域を発生させることで、流域の地形特性と降雨 - 流出特性の関係のシステムティックな検証が可能となる。したがって、地形 - 降雨 - 流出関係の総合的な理解において模擬流域の利用は有効であると考えられる。

また一方で、模擬流域発生には別のメリットもある。斜面スケールや 1 次谷スケールでの地形の形成過程については地形学や水文地形学の分野で多くの研究が行われているが、流域スケールの地形形成過

程と地形特性の関係についてはまだまだ未解明の部分が多い。この問題について、地形の形成過程を考慮した模擬流域発生モデルならば、どのような地形形成プロセスおよび条件が流域地形を特徴付けるものであるのかを探ることができ、降雨特性が影響する流域地形形成過程と流域地形特性の関係解明につながると考えられる。

1.2 本研究の目的

以上の背景から、降雨モデル・流出モデルと連結可能な模擬流域発生モデルを構築すること、そのモデルを用いて流域地形量 - 降雨・流出特性関係を考えるための基礎として流域生成過程 - 流域地形特性の関係を調べることで、この2点が本研究の目的である。

地形の形成に関わるプロセスには、隆起、風化、浸食、堆積などがあるが、本研究で考慮するのは地形の浸食過程である。これは浸食プロセスが流域を特徴付ける最も大きな要素である谷を形成する主要因であり、かつ降雨分布特性との関わりが深いプロセスでもあるからである。

また、流域生成過程 - 流域地形特性については、本研究で開発するモデルによって発生させた模擬流域群を用いて考える。発生させた模擬流域の地形特性は地形則の視点で整理し、モデル上での発生条件と流域生成プロセスと合わせて検討することで、その関係を探る。

2. 流域地形則

2.1 流域地形量

流域地形量とは流域における地形的特性を数値で表したものである。本節では地形則に関わるものを中心に流域地形量について説明する。

(1) 位数

1つの水系における河道の格付けをする基準として最も一般的なのが、Horton が提唱し Strahler が改良した位数である。水源に端を発する河道をすべて位数1として「その河道より位数の小さい河道が合流しても位数は変わらず、同じ位数の河道が合流すると位数が1上がる」というルールですべての河道に位数を振りやると、1つの河道網の中で河道がいくつかの等級に分類される。

位数を用いて河道を分類して、流れに沿って位数が変化しない区間を1つの河道とする。この河道の長さ・集水面積・勾配も流域地形量であり、それぞれ河道長・集水面積・河道勾配と呼ぶ。

なお、本論文では河道の他に河道区分という表現を用いる場合がある。河道区分の場合は合流点（ま

たは水源）によっては含まれた1区間を指す。河道と河道区分の区間は必ずしも一致しない。

(2) 河道数

河道の数が河道数である。ひとつの流域内の河道数を位数ごとに数えると、位数の定義上、位数が小さいほど河道数は多くなる。

(3) 分岐比, 河道長比, 集水面積比, 河道勾配比

ある位数の河道数 N_u と 1つ高い位数の河道数 N_{u+1} の比 N_u / N_{u+1} を分岐比という。位数が小さいほど河道数は多く、分岐比は常に1以上になる。

同様に、1つ高い位数の平均河道長 $\overline{L_{u+1}}$ とある位数の平均河道長 $\overline{L_u}$ の比 $\overline{L_{u+1}} / \overline{L_u}$ を河道長比、1つ高い位数の平均集水面積 $\overline{A_{u+1}}$ とある位数の平均集水面積 $\overline{A_u}$ の比 $\overline{A_{u+1}} / \overline{A_u}$ を集水面積比、ある位数の平均河道勾配 $\overline{S_u}$ と 1つ高い位数の河道勾配 $\overline{S_{u+1}}$ の比 $\overline{S_{u+1}} / \overline{S_u}$ を河道勾配比という。河道長比、集水面積比、河道勾配比も一般的に1以上になることが多い。

(4) hypsometric 曲線 (面積高度比曲線)

hypsometric 曲線とは Strahler (1952b) が考案した概念で、縦軸に流域全体の標高差で正規化した高度を、横軸にその高度以上の地点の面積が流域全体の面積に占める割合を、それぞれにとって描く曲線である (Fig.1)。また、hypsometric 曲線の積分値は面積高度比積分と呼ばれる。この曲線形と積分値から流域の高度分布がわかる。

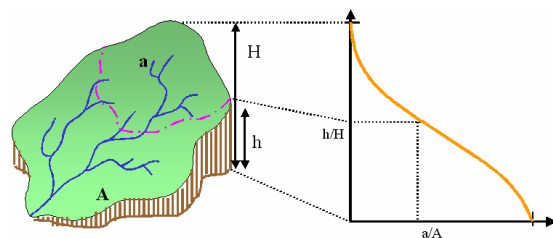


Fig.1 Hypsometric curve.

2.2 流域地形則

流域地形において成り立つ法則としては、Horton の法則と呼ばれる普遍性の高い4つの法則が有名である (Horton, 1945)。また、Strahler (1952b) が考案した hypsometric 曲線は流域の浸食段階と密接な関係にあり、1つの法則と考えることができる。本研究では、これらを流域地形則と呼ぶことにする。

なお、以下で浸食の平衡状態という概念が出てくる。塚本 (1974) によれば、平衡地形とは山腹と水系から構成されている流域の中で浸食と運搬の過程に定常的な状態が維持されているもののことである。すなわち、浸食活動は行われているものの地形的特

性が大きく変化することのない、地形として比較的安定した状態が浸食の平衡状態である。

(1) Strahler の hypsometric 曲線

hypsometric 曲線は高度分布を表現するものだが、Strahler (1952b) によれば hypsometric 曲線から流域の浸食段階を知ることができる (Fig.2)。

浸食活動が非平衡状態の幼年期の地形では大部分の表土が残っているため、曲線の積分値は 60%以上と高くなる (Fig.2 - A)。平衡状態の壮年期の地形では、曲線は積分値が 35~60%程度のグラフの中心を通るなめらかな S 型となる (Fig.2 - B)。さらに浸食が進み、浸食基準面に近づいた準平原上に残丘 (monadnock) が存在するような老年期の地形になると、曲線は極めて凹型になり、積分値は 35%以下程度に低くなる (Fig.2 - C)。非平衡状態の流域では、表土の状態や残丘の状態等が個々の流域によって様々であるために hypsometric 曲線型にばらつきが生じるが、平衡状態にある流域の hypsometric 曲線は、流域の起伏、河川密度、気候、植生、土壌および地質の大きな相異にもかかわらず、非常に類似した曲線型をとることが分かっている。

このことから hypsometric 曲線形は、流域が壮年期における浸食の平衡状態にあるかどうかを判定する指標となる。また、hypsometric 曲線の積分値を利用すれば流域の浸食段階を定量的に評価できる。

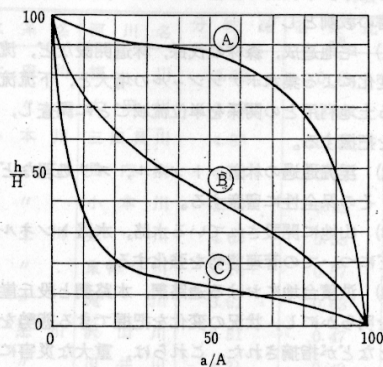


Fig.2 Hypsometric curves of three stages.

(2) Horton の法則

Horton の法則とは位数の概念を基礎としたもので、多くの流域を計測することで得られた次の 4 つの経験式を指す。

$$N_u = R_b^{k-u} \quad (R_b = N_u / N_{u+1}) \quad (1)$$

$$\bar{L}_u = \bar{L}_1 R_l^{u-1} \quad (R_l = \bar{L}_{u+1} / \bar{L}_u) \quad (2)$$

$$\bar{A}_u = \bar{A}_1 R_a^{u-1} \quad (R_a = \bar{A}_{u+1} / \bar{A}_u) \quad (3)$$

$$\bar{S}_u = \bar{S}_1 R_s^{1-u} \quad (R_s = \bar{S}_u / \bar{S}_{u+1}) \quad (4)$$

ここで、 k はその河道網における最大位数である。また、 N_u は位数 u の河道数、 \bar{L}_u は位数 u の平均河道長、 \bar{A}_u は位数 u の河道の平均集水面積、 \bar{S}_u は位数 u の平均河道勾配である。 R_b 、 R_l 、 R_a 、 R_s はそれぞれ、分岐比、河道長比、集水面積比、河道勾配比である。

上記の式(1),(2),(3),(4)はそれぞれ河道数則、河道長則、集水面積則、河道勾配則と呼ばれる地形則である。これらの法則は、1 つの流域内において各位数間における河道数、河道長、集水面積、河道勾配の比が同じ値をとるというものである。また、流域内の地質的な特性などによって異なる場合もあるが、平衡状態にある場合は異なる流域でも R_b 、 R_l 、 R_a 、 R_s の値はそれぞれほぼ同じ値をとることが実測的な研究から知られている (Table 1)。

Table 1 Empirical values of geometric quantities (川合ら, 2006)

河道数則	河道長則	集水面積則	河道勾配則
$R_b = 3 \sim 5$	$R_l = 2$	$R_a = 3 \sim 6$	$R_s = 2$
	$L_1 = 2\text{km}$	$A_1 = 2\text{km}^2$	$S_1 = 1/20$

Table 2 Expectations of geometric quantities (塚本・日下部, 1974)

河道数則	河道長則	集水面積則	河道勾配則
$R_b = 4$	$R_l = 2$	$R_a = 4$	$R_s = 2$

2.3 河道配列の統計則とその導出

(1) Horton の法則と統計則

Horton の法則の理論的研究では、水系発達を規則的・周期的現象と捉えたものと、水系発達を確率論的な偶発的・非周期的現象と考えたものの大きく 2 つに分かれる (高山, 1974)。しかし、後の方が分岐比の値などで実測値に近い期待値を導き出しており、これは自然現象では非周期的でランダムな河道網発達が生じていることを示唆している。また、このような研究が進んだことで、分岐比、河道長比、集水面積比、河道勾配比についてそれぞれ確率的な期待値が得られた (Table 2)。

さて、Horton の法則に関して確率に基づいて統計的に導出された法則を統計則と呼ぶ。高棹ら (石原・高棹・瀬能, 1969; 高棹, 1971) は河道網パターン

に着目してランダムな河道発生を仮定することで確率的に Horton の河道数則を説明した。そして分岐比の期待値が 4 になることから、統計則としてこれを 1/4 則と名づけた。以下では、1/4 則導出の考え方を記す。本研究では、3. で述べる模擬流域発生過程にランダムな河道発生を導入する際に、この 1/4 則の導出過程を参考にしている。

(2) 1/4 則の導出過程

流域地形は、地殻変動などの内的営力による構造地形の上に、風化・浸食などの外的営力が加わって形成される。高棹らは長期的に見れば雨水による浸食といった頻度の高い外的営力は一流域に対して時間的・空間的に一様と考えてよいとして、河道網の形成過程は一様な外的営力が働く確率過程と考えた。これが河道の発生は位置的にランダムであるという考え方の根拠となっている。

次に、高棹らはランダムな河道網の発達過程をトポロジカルな河道網モデルの概念から考えた。ここでいうトポロジカルな河道網モデルとは、河道網における河道区分の連結パターンのみに着目した河道配列のことを意味し、河道区分の長さや流路の蛇行などは考えない構造パターンとしての河道網のことである。高棹らの考えたトポロジカルにランダムな河道網の発達過程とは、新たな河道の発生位置は河道網上の全ての河道区分の右岸側・左岸側から等確率で選択されるとするものである。このように河道網パターンとしてランダムな河道網の発達を仮定すると、位数 1 の河道の数が等しくてトポロジカルに異なる構造の河道網パターンが生成される確率は全て等確率であることが導出できる。これより、位数 1 の河道の数 N_1 がある値 n のときの各位数間の分岐比の期待値は、 $N_1 = n$ という条件で考えられるトポロジカルに異なる全ての河道網構造パターンについて位数間の分岐比を知ることができれば導出できることがわかる。

$N_1 = n$ のときの各位数間の分岐比の期待値を求めるために、高棹らはまず、 $N_1 = n$ でのトポロジカルに異なる河道網構造パターンの総数とそれらのうちの最大位数毎のパターン数の算出式を考案した。そして、河道網のパターン数とそれぞれの河道網での位数 u の河道の数 N_u および位数 $u+1$ の河道の数 N_{u+1} の関係から、 N_u / N_{u+1} の期待値の式を構築した。この式から描いた Fig.3 より、各位数間の分岐比の期待値は位数 u の値に関係なく n が大きくなるほど 4 に近づくことが推察できる。解析的な証明として高棹らはこのうちの N_1 / N_2 の期待値の極限值が 4 になることを示したものの、 N_u / N_{u+1} の期待値の極限を求めることは理論的には不可能とした。しかし

ながら、河道発生ランダム性を考慮すれば「位数 1 と位数 2 の間の関係は、そのまま位数 u と位数 $u+1$ の関係にあてはめることができ、ただその $N_1 = n$ の増加による変化状況が、 u の増加によって緩慢になるにすぎないといえる」と述べて、 N_u / N_{u+1} もやはり 4 に収束すると推測されることを示唆している。

以上の結果から、位数 u の河道数 N_u が十分に大きい場合、以下の 1/4 則が成り立つ。

$$N_u = (1/4)^{u-1} N_1 \quad (5)$$

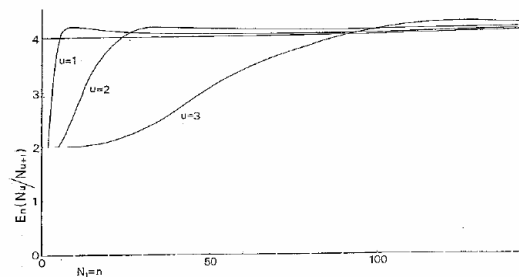


Fig.3 Variation of expected value of bifurcation ratio for N_1 , the number of the first order streams (高棹ら, 1969).

2.4 地形則に基づく模擬流域発生既往研究

(1) 既往研究 1

塚本 (1974 ; 1979) は、模擬的な流域地形を考えることで統計則と hypsometric 曲線の関係を調べた。作成手法としては、まず分岐比、合流点分布、河道配分数についての統計則に基づいた上でランダム性も考慮して 10 個の河道網構造を用意し、その河道網の位数 1 の河道には面積 1 の単位流域が接続しているとして流域全体の面積の配分を決定する、というものである。さらに河道網構造を Yang の等落差の法則によって 3 次元化すると、配分された面積に高度が与えられる。その結果、完成した 10 個の模擬流域の hypsometric 曲線を平均して描いた曲線は Strahler の示した平衡状態の hypsometric 曲線によく似た形となった。

これによって、統計則と hypsometric 曲線という平衡状態の地形で成り立つとされる両法則が矛盾しないものであることが示された。しかし、塚本の模擬流域は河道網構造に面積を付与しただけの単純なモデルで、細かい河道網配置や地形として連続的な高度分布を決定してはいない。したがって、このモデルでは本研究の最終目標の 1 つである降雨 - 流出の分布型モデルと結合した利用は不可能である。

(2) 既往研究 2

前田 (2006) の研究では、流域地形則に基づいた上で、その他の流域地形量を設定できるような模擬流域発生モデルを構築している。この既往研究では分布型の降雨 - 流出モデルとの連結を最終目標としており、この意味で本研究は前田の研究を引き継ぐものとして位置づけることができる。

前田は塚本のモデルを踏まえて、hypsometric 曲線に基づいて高度分布を与えた地形上に河道網をのせるという方針で模擬流域発生手法を構築した。この既往研究では流域地形の形成過程は問題にしておらず、地形則に基づくことで実地形とみなせる特性を持つ模擬流域地形発生を考えている。さらに、地形特性をパラメータによって設定可能にすることで様々なシミュレーションでの利用に便利なモデルとすることを第一に考えたものになっている。

簡単に発生手法を説明する。まず、楕円の扇形形状の流域界を用意し、hypsometric 曲線に基づいて高度分布を与える。河道網については最大位数、位数毎の河道数を設定した上で、河道接続をシャッフルすることでその条件に合った河道網パターンをランダムに決定する。流域地形下流端から高度の高いほうへと確率的に進路を選択して、決定した河道網パターンに合うように河道網を形成する。そして、分岐に対応する尾根地形を流域地形上の必要な箇所形成して模擬流域地形が完成する (Fig.4)。

このモデルの長所は 2 つある。1 つは、流域界の形状、基準とする hypsometric 曲線、発生する河道網の分岐比などの様々な地形特性をパラメータとして設定可能な点である。もう 1 つは、流域の高度分布が決定していることで他の分布型モデル (流出モデル、降雨モデル) と組み合わせた利用が可能となっている点である。

しかし、様々なパラメータを設定可能である反面、パラメータ値を適切に与えてやらなければパラメータ間の不整合によって流域が生成されないという問題がある。また、流域の高度分布は決定できるものの、hypsometric 曲線に基づいて高度分布を与えた地

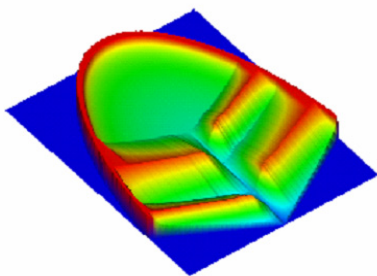


Fig.4 A shape of virtual drainage-basin (前田, 2006) .

形の上にさらに尾根地形を積み上げるという過程は高度分布の決定方法としては不自然であり、改善の必要がある。

3. 浸食過程を考慮した模擬流域発生

3.1 模擬流域発生の方針

模擬流域発生の方針として、模擬流域地形の形成過程において地形の浸食プロセスを考慮する。これは既往研究での課題であった「複数の流域地形量間の不整合」と「流域地形の高度分布の決定方法の不自然さ」を改善するために本研究で新たに提案する手法である。また、模擬流域の地形形成過程で浸食プロセスを考慮することによって、地形則に基づくことで流域地形のある時点での姿を表現していた既往研究の模擬流域とは異なり、流域地形の発達過程についての考察も可能になると考える。

本研究での模擬流域地形形成では、浸食による地形形成については Horton の浸食による流域発達の考え方を、河道網構造の形成については高棹らの統計則導出の考え方を、それぞれ参考にしていく。

3.2 地形の浸食過程

浸食による地形形成について実験あるいはシミュレーションを行った研究は過去にも行われている。しかし、その多くは斜面スケールでの水路網発達 (関根ら, 2004 ; 2006 ; 芦田ら, 1977 ; 泉ら, 1995) や河道の流路変動といったもので流域スケールの地形を扱ったものは少ない。その理由としては、斜面や河川流路に比べて流域単位での地形形成プロセスは時間的・空間的にスケールが大きいために観測や実験による現象の把握が困難であることや、地形形成に影響する要因が浸食以外にも多く存在することが挙げられる。しかし一方で、河道網と谷地形から構成される流域地形を生み出す最も大きな作用が水流による浸食であることも間違いない。したがって、流域地形の大枠での特徴を捉えるモデル化では浸食作用に焦点を絞って考えても不適切ではない。

Horton によれば、降水による浸食で斜面から谷地形が生成され、それが繰り返されることで次々と谷が分岐していき、流域が発達する。この過程を詳しく説明すると、以下ようになる。

初期段階として一様な斜面領域を考える。まず、降水によって斜面に表面流が発生し、その流下距離が浸食を引き起こす限界長さを超えると面状浸食 (sheet erosion) が生じる。この面状浸食では流れに平行な rill と呼ばれる溝が形成され、斜面は幾筋もの水流が走る rill surface と呼ばれる状態になる。この

rill 上での水流の浸食強度は流下距離が長いものほど大きいので、長い rill ほど広く深い溝になる。したがって、斜面上で最長の rill は斜面上で最も広く深い rill となる。この rill を master rill と呼ぶ。

master rill は周囲の rill より深いので、やがて位置的に高い周囲の rill から rill の境界を越えて水が流入するようになる。このように高い rill から低い rill へと水が流れるようになる現象を micropiracy という。micropiracy によって斜面全体の流れは master rill に向かうようになり、master rill はますます浸食される。この結果、浸食が進み掘り下げられた master rill を中心にして両側に新たな斜面ができていき、一様な斜面は V 字谷に変化する。このプロセスを cross-grading という。cross-grading が斜面上で繰り返されることで、流域地形は河道網とともに発達していく (Fig.5)。

この Horton の流域発達で着目すべきは、「斜面上の最長の rill が master rill となり新たな河道になる」という点と「新たな河道の両側に新たな斜面が形成される」という点である。シンプルに捉えると、この 2 つのルールが基礎となって流域発達が行われていることがわかる。本研究ではこの 2 つのルールを軸にして模擬流域発生を考える。

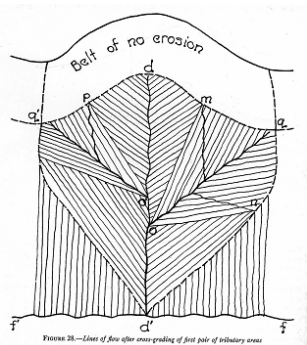


Fig.5 Line of flow after cross-grading of first pair of tributary areas (Horton, 1945) .

3.3 模擬流域発生手法

(1) 模擬流域発生の手順

本研究で提案する浸食過程を考慮した模擬流域発生の手順は以下の①～④のようになる。

- ①初期斜面領域を決定する。
- ②浸食による流域発達の進行。
 - ・発生させる河道の位置を決定する。
 - ・河道を掘り下げ、同時に斜面の浸食も行う。
- ③設定条件 (最大位数, 発生河道数, 総タイムステップ数) のどれかを満たしたら流域発達を止める。
- ④生成した流域地形情報を出力する (模擬流域の完成)。

①で設定している流域界の形状は、本来、隣り合う流域どうしの領域争奪の結果として決定するものである。したがって、本研究のように初期斜面を決める時点で境界の形も決定してしまうのはプロセスとしてはやや不自然ではある。しかし流域界の形状にはある程度の基本形があるため、本研究では流域界形状として不自然でない範囲の形状であれば流域界形状をあらかじめ設定することは流域地形の形成に大きな影響は及ぼさないと考える。

②の浸食による流域発達の考え方については次節以降で詳述する。本手法での浸食による流域発達は、モデル内で降雨を与えて水理学的な浸食速度を計算したり浸食による土砂の移動を物理過程に即して表現したりするものではなく、領域内に一様な浸食作用が生じたとした場合に想定される地形変化を表現するものである。ただし、本研究の次のステップとなるが、模擬流域上で流出計算を行うことができることから、水理学的な浸食速度を考慮して流域発生を行うことも将来的に可能と考えられる。

③の流域発達終了の条件は指定した特性を持つ流域発生という本研究の目的達成のために重要である。最大位数は流域の規模を表すパラメータとなる。また、発生河道数は位数 1 の河道数に等しく、地形則・統計則との関係を見る際に必要になる。さらに、本手法では 1 タイムステップあたりの浸食速度を考えた流域発達を行っているのだから、総タイムステップ数で終了条件を規定することは浸食量に制限を設けることを意味する。なお、ここでのタイムステップとは実際の浸食時間というよりは、新河道の浸食量と次の河道を発生させるタイミングを決定するための概念という意味合いが強い。

④では、流域地形の標高情報と河道網情報を出力する。標高情報・河道網情報は数値地図情報と対応するように 50m メッシュの分布型情報として表現する。また、河道網情報については、位置だけでなく河道点の接続の情報も併せて出力する。これによって河道網構造に関する流域地形量が算出でき、さらに分布型流出モデルにも組み込みやすくなる。

(2) 新河道位置の選択

河道の位置を決定するために、Horton の浸食による流域発達での「斜面上の最長の rill が master rill となり新たな河道になる」という考え方を利用する。面状浸食によって生まれる rill の長さとは、水の流れる方向に沿った斜面の長さと考えることができ、これはモデル領域においては落水線の長さに相当する。したがって各メッシュ地点からの最急勾配方向を結んだ落水線を、1 つ目の河道位置を決める場合は初期斜面下端から、2 つ目以降の河道位置を決める場

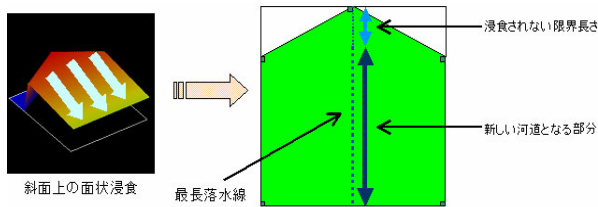


Fig.6 Schematic of making a new stream.

合はすでに形成されている河道網上から上流側に向かって探索し、その中で最長の落水線を新河道位置とする。

ただし、Horton によれば浸食は流下距離が“浸食が発生する限界長さ”を超えた位置から始まるとされている。そこで、落水線の上流端からある一定の長さまでは河道としないことにした (Fig.6)。この長さはパラメータとして設定可能である。以上のようにして新たに発生する河道の位置が決まる。

(3) 浸食過程のモデル化

Horton によれば、cross-grading によって「新たな河道の両側に新たな斜面が形成される」ことになる。前項より最長落水線を用いることで河道位置が決定できたので、その河道位置を掘り下げて両側に新たな斜面をつくることで谷地形を形成すれば、モデル上で流域発達を表現できる。

このために本手法では、河道の勾配（または縦断曲線形）、斜面の安息角、河道最下流端でのタイムステップあたりの鉛直方向の浸食速度、タイムステップあたりの谷頭方向の浸食速度、を設定する。モデル上で地形の浸食は以下のようにして進められる。

- (a) 新河道の位置を決定する。
- (b) 河道網最下流端を鉛直浸食速度にしたがって掘り下げる。
- (c) 掘り下げられた位置に合わせて河道網全体を掘り下げる。
- (d) 新河道も同様に掘り下げるが、上流方向には谷頭浸食速度にしたがって新河道発生点から新河道上流端に向けて河道が成長する。
- (e) そのタイムステップでの河道位置と河床高さが決まったら、それに合わせて最急勾配が安息角となる斜面を形成する。
- (f) タイムステップを進めながら (b)～(e) を繰り返す、新河道が上流端に達したら (a) に戻って新たな河道を発生させる。

ここで (d) のような河道の成長を考える理由は、河道の上流方向への谷頭浸食を表現するためと、(f) で新河道の完成を次の河道発生タイミングとしているためである。(c) (d) の手順で河道はタイムステ

ップ毎に鉛直方向と谷頭方向に同時に掘り進むことになるので、形成される地形には鉛直方向速度と谷頭方向速度の比が関係する。

(e) で河道網に合わせた斜面を形成するために、ここでも落水線を用いる。安息角以下の斜面で構成された地形で河道網が掘り下げられると、安息角以上の急斜面が発生する。そこで、最急勾配を結んでいる落水線を河道網から上流へとたどり、安息角以上の斜面を発見した場合は安息角となるように標高を修正する。この作業が斜面浸食に相当し、これによって河道網に接続する斜面地形が形成されることになる。これが、Horton の浸食発達における「新たな河道の両側に新たな斜面が形成される」という過程をモデル内で表現するプロセスとなる。

ただし、町田 (1984) によれば斜面の縦断形は一般に、上部に凸形状の部分、中部に直線状の部分、下部に凹形状の部分を持つことが多い。また、中部の直線状の部分は斜面形成後に時間とともに後退して谷から離れていくことがわかっている。本研究のモデルではこのような斜面形の特徴は表現されていない。しかし、さらに町田 (1984) によると、起伏が大で激しい開析が行われるような地域では直線状の斜面がよく発達していて下部の凹形状の部分がほとんど見られず、日本でもこのような斜面の地形が少なくない。このことから、本研究のモデルのように河道の両岸に直線的な縦断形の斜面を形成することは、特に起伏の大きな地形を考える場合には妥当であると言える。

さて、本研究での新河道が完成してから次の新しい河道を発生させるという方法は、高棹らの 1/4 則の導出過程を参考にしてしている。1/4 則の導出では、トポロジカルに異なる河道網が生成される確率は全て等しいということを導く過程で、河道網の形成過程を河道が 1 本ずつ発生していくものとしている。その仮定のもとで地形則を裏付ける 1/4 則が成り立つならば、模擬流域発生において同様に河道を 1 本ずつ発生させることは妥当であると考えられる。

(4) 現実的な河道縦断形の導入

(3) では河道を勾配一定の直線としているが、実際の河川では一般的に河川の勾配は上流から下流へかけて徐々に緩やかになっていく。そこで勾配が変化する河道縦断形を考慮できるモデルも用意する。

このような河川の縦断形、特に平衡河川の縦断形状に関する研究は多く、高山 (1974) に詳しい。Sternberg は河床堆積物の粒径が上流から下流に向けて漸減することから河床礫重量と流下距離の関係式を導き、さらに Schulits は粒径と河床勾配が比例するという仮定から Sternberg の式を用いて河床高度と

距離の関係が指数関数になることを導いた。また、Strahler (1952a) は時間的な変化も考慮できる式として次の式を提案した。

$$z = A_0 e^{-k_1(x+k_2t)} \quad (6)$$

ここで、 z は河床高度、 x は水源からの距離、 t は時間、 A_0 は水源高度、 k_1 、 k_2 は定数である。

谷津 (1954) は、河道縦断的な粒径の分布が礫質の河床区間と下流側の砂質の河床区間との間で不連続であるために、1つの河川の縦断形を1本の指数関数だけでは表せない場合があるとした。本研究の模擬流域発生では浸食による流域発達ということから礫質河床の山地部が対象となるので谷津の指摘した不連続性は考慮しなくてよいと判断し、縦断形を表すのに Strahler による式 (6) を用いる。

式 (6) は水源からの距離を x としているため、水源が上流側へと移動する前項でのモデルには取り入れにくい。そこで、河道縦断曲線を表現する場合のモデルでは新河道が上流方向へ成長するという形式をやめて、次の河道の発生までの時間は現在の新河道の長さに比例して決まるという点だけを河道勾配一定のモデルと同様にしている。このように変更しても問題ないのは、本研究における模擬流域発生モデルの利用では最後の河道が完全に形成された時点でシミュレーションを終了するので、河道の上流方向への成長過程がタイムステップ毎に表現されている必要がないからである。

(5) 河道発生におけるランダム性の導入

ランダム性を持った模擬流域発生のために、新しい河道を発生させる位置を決定する際にランダム性を与える。これは高棹らの 1/4 則導出過程を踏まえたものである。すなわち、本研究の手法は「河道を1本ずつランダムに発生させて河道網発達を進める」という点で 1/4 則導出と同じ発達プロセスとなる。ただし、浸食過程を考慮することからランダム性の与え方は 1/4 則導出過程とは異なる。

本研究で河道発生にランダム性を与える方法は、最長落水線だけでなく最長落水線と同等かそれに近い長さの落水線も新河道の候補とし、その中から等確率でランダムに1つの落水線を選出するというものである。これは、自然の流域発達において同程度の長さの rill ならば master rill になる可能性はどちらも同程度に持っていると考えられるからである。

本研究では、特に断らない限りは、最長落水線の長さの 90% 以上の長さを持つ落水線を新河道の候補として、その中からランダムに1つの落水線を選ぶ

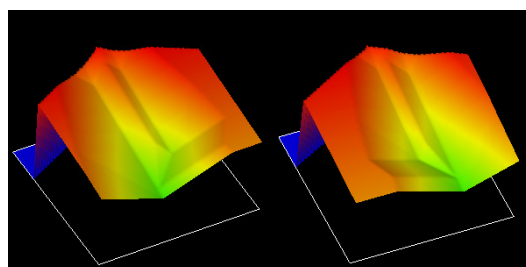


Fig.7 Virtual drainage-basins with randomly generated streams.

ことで新河道の位置を決定している。Fig.7 は、同じ条件から最長落水線の長さの 90% 以上という制限で 2 つ目の河道まで発生させた 2 つの模擬流域である。ランダム性によって、同条件であっても河道を 2 つ発生させただけで大きく異なる地形になる場合があることが、この図からわかる (ランダムなので、もちろん同じような地形になる場合もある)。

3.4 設定するパラメータについて

ここで、本研究のモデルで設定するパラメータについて以下に整理する。

○地質・地形特性を表現するパラメータ

- ・流域界形状 (境界点を設定し、それを結ぶ線分を境界とする。)
- ・初期斜面勾配 S_0 (または初期地形)
- ・初期斜面の下端での標高 D (m)
- ・斜面の安息角 S_c
- ・耐浸食長さ L_c (m)
 - (表面流による浸食が開始するまでの距離)
- ・鉛直方向の浸食速度 V_d (m/タイムステップ)
 - ・谷頭方向の浸食速度 V_u (m/タイムステップ)
- ・河道縦断形 (勾配一定の場合は勾配、曲線縦断形の場合はモデル式の係数 A_0 、 k_1 、 k_2 を設定する。)

以上のパラメータは、実流域の地質的・地形的な特性を考慮して値を設定すべきパラメータである。

○地質・地形特性以外の設定パラメータ

- ・総タイムステップ数 T
- ・河道網の最大位数 u_{\max}
- ・発生させる河道数 N_1 (位数 1 の河道数と等しくなる。)
- ・新河道候補となる落水線を選択する際の長さ制限 I (%) (最長落水線の何% 以上までを新河道候補とするか。)

地質特性を表現するパラメータ以外は主に流域の模擬発生を終了条件を規定するパラメータである。モデルでは、これらのうちどれかの値が設定値に達すれば浸食発達を終了するようにしている。以降の

実験では、主に発生させる河道数を終了条件として用いている。

また、「新河道候補となる落水線を選択する際の長さ制限」は浸食過程を考慮した河道発生におけるランダム性の幅を調節するパラメータである。このパラメータを変えると最長落水線に比べてかなり短い落水線でも新河道の候補にすることができる。ただし、そうしてしまうと「斜面上の最長の rill が master rill となり新たな河道になる」という Horton の浸食発達過程の前提を表現できなくなってしまうため、注意が必要である。

3.5 模擬流域の発生

これまで説明してきた手法で模擬流域を発生させ、河道縦断形曲線と河道発生のランダム性を取り入れた効果を示しながら発生する流域地形の基本的な特性について説明する。

まず、河道勾配を一定としてランダム性も与えない場合の模擬流域を発生させる。設定条件は、領域の範囲を $4\text{ km} \times 4\text{ km}$ として、初期斜面勾配を 0.1、斜面勾配を 0.4、鉛直方向と谷頭方向の浸食速度の比を 1/10 とした。また、河道勾配については、かなり急な勾配を考えた 0.2 の場合と、それに比べて緩い勾配である 0.05 の場合の 2 つを発生させた (Fig.8)。発生させた河道数は 30 である。図では、標高が高い部分ほど赤く、低いほど青に近づく。これは以降の図でも同様である。また、標高差がわかりやすいように、図によって色と標高値の関係は変えてある。

Fig.8 から河道勾配の条件が違っただけで地形として大きな違いが生じていることがわかる。河道勾配 0.2 のほうは支流が斜めに合流する地形になっているのに対して、河道勾配 0.05 のほうは支流の谷どろしが垂直に接続している。また、ランダム性を取り入れておらず最長落水線がそのまま新河道となるので、どちらも初期斜面で最も長い落水線となる領域中央に谷が形成されている。

次に、この条件のまま河道発生のランダム性を取り入れて模擬発生を行った場合を示す (Fig.9)。この図では各流域について、青い線で示した河道網を重ねた鳥瞰図 (上) と 3 次元形状が見やすいように地形を斜めから見た図 (下) をペアで示している。図のように同条件でも異なる地形が生成される。河道網構造を見ても、それぞれの地形が異なっているのがわかる。しかしランダムに発生させても、河道が急勾配の場合は合流が鋭角的で、緩勾配の場合は直角であるという特徴は変化していない。

続いて、河道の縦断形を勾配一定ではなく式 (6) の指数曲線で表現した場合を示す (Fig.10)。左が河

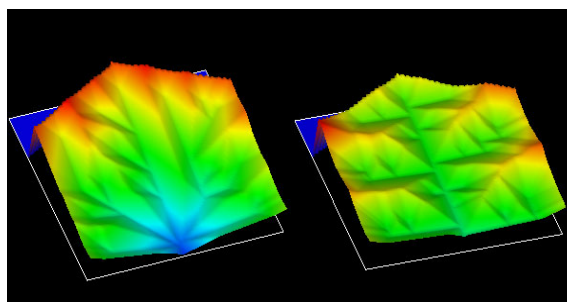


Fig.8 Generated virtual drainage-basins with constant stream gradient (left: stream gradient 0.2, right: stream gradient 0.05) .

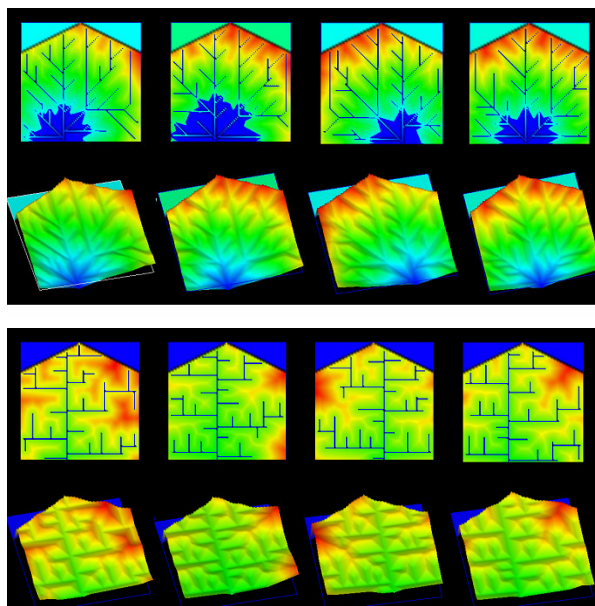


Fig.9 Randomly generated virtual drainage-basins with constant stream gradients. (upper: stream gradient 0.2, lower: stream gradient 0.05)

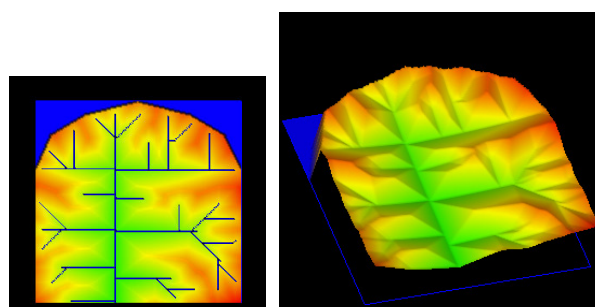


Fig.10 Generated virtual drainage-basin with curving stream profile.

道網を重ねた鳥瞰図、右が斜めから見た図である。各係数は、 $A_0 = 675$, $k_1 = 0.000333$, $k_2 = 0$ とした。これは河川の上流近くで勾配が 0.2 となり、下流では河道勾配が 0.001 程度となることを想定している。また、より現実的な形状となるように、流域界形状

には丸みを与えている。さらに、領域の範囲を先ほどよりも大きくして $7.5\text{ km} \times 7.5\text{ km}$ としている。発生させる河道数は先ほどと同様に 30 である。

Fig.10 を見ると、河道網の上流部に急勾配河道の特徴であった鋭角的な河道の合流がある。河道網形状にこのような特徴が現れる理由は、このモデルが最急勾配方向を結ぶ落水線から河道を形成しているためである。斜面の勾配に比べて河道勾配が緩やかなときは斜面からの落水線は河道に垂直に接続するが、河道勾配が急だと落水線は斜めに河道と接続することになる。つまり、河道勾配と斜面勾配の大小関係が河道の合流角を特徴付ける要因となっている。

このように上流で鋭角的に河道が合流する流域は実際にも存在する。Horton は先の論文の中で河道の合流角に関する考察を行っており、斜面勾配と河道勾配の比が合流角を決定することに言及し、斜面勾配と河道勾配が近いときは鋭角的に合流することを示している。そして実地形の例の 1 つとして、河川の主流が上流へ行くほど急勾配となる流域では上流ほど合流角が小さくなることを説明している。Fig.10 では、安息角 0.4 に対して河道勾配 $0.1 \sim 0.2$ 程度の上流部で鋭角的な合流、河道勾配 0.001 程度の中下流部で垂直な合流となっており、この結果はこの説と整合したものとなっている。

最後に、領域範囲を $15\text{ km} \times 15\text{ km}$ とさらに広くした上で発生させる河道数を 100 として模擬発生させた地形を示す (Fig.11)。その他の条件は Fig.10 の場合と同じである。これまでの地形に比べて Fig.11 の模擬流域地形は視覚的に現実に近い地形となっている。特に、発生河道数が少ないときには見られなかった細かい山ひだのような地形が現実の地形に近い。

25000 分の 1 地形図を基準とする国土数値情報と照らすならば、領域範囲を広くしたとはいえ、 200 km^2 程度の流域で位数 1 の河道が 100 本も存在する河道網は考えにくい。国土数値情報をもとに流域面積が $100 \sim 200\text{ km}^2$ 程度の 4 つの実流域 (赤石川、瀬野川、大戸川、町野川) について調べたところ、位数 1 の河道の数は $4 \sim 16$ であった。しかし、25000 分の 1 地形図では上流部の小さな河道は描かれないので河道数は実際よりも少なくなる。このように上流のどこまでを河道とみなすかによって位数 1 の河道数は異なり、この基準についてはいくつかの方法が提案されている。友杉 (1976) は大戸川流域について等高線を利用した Shreve の方法で河道を判定し、流域地形量に関する解析を行っている。これによれば、流域面積約 190 km^2 の大戸川において位数 1 の河道数は 543 と計測されている。したがって、上流部の細かい谷・水流までを河道とみなすならば、 200

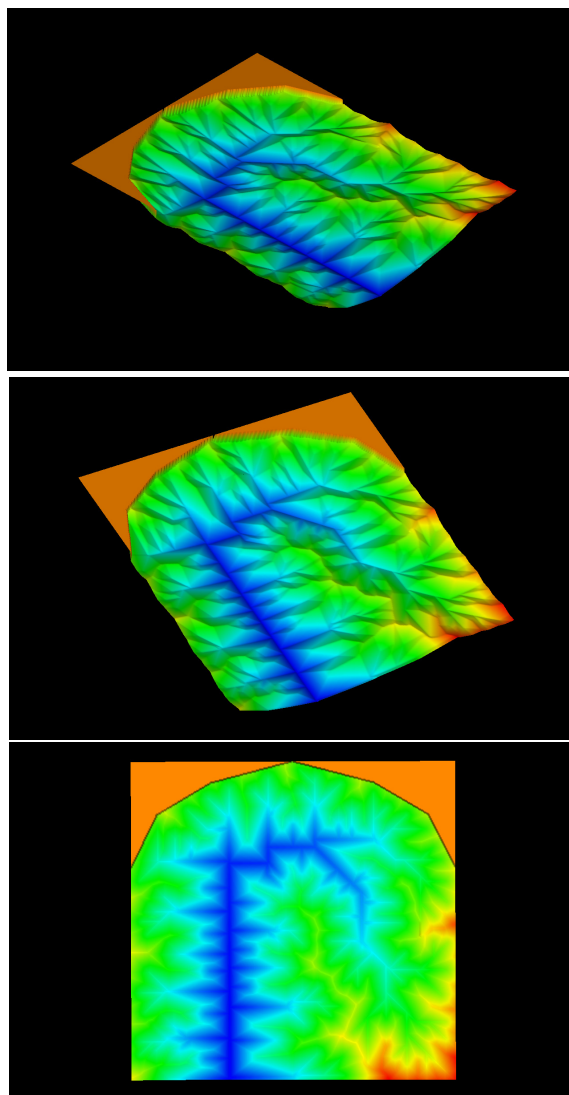


Fig.11 Virtual drainage-basin with 100 streams.

km^2 に対して位数 1 の河道数が 100 であっても妥当と考えられる。このことから、発生河道数 (位数 1 の河道数) を増やすことによって実流域に近い地形が得られたのは当然と考えることもできる。

また、友杉が利用した Shreve の方法による河道判定は等高線によって一定規模以上の谷地形を河道とするので、河道だけでなく 0 次谷も数えていると考えることもできる。0 次谷とは、水系網の最末端にあたる 1 次谷よりさらに位相を下げた幼児期の谷であり、山腹に発達する「山ひだ」がこれにあたる (塚本・日下部, 1974)。0 次谷は水が常に流れているわけではないので河道ではないが、河道と同様に浸食によってできた 1 次谷よりも小さな谷地形と言える。本研究のモデルでは河道以外の谷地形は形成されない。すなわち、山ひだのような 0 次谷形成を考慮した地形発生にはなっていない。しかし、発生河道数を増やしたことで小さな末端河道が多数発生したた

めに、浸食によって細かな 0 次谷まで形成したのと同様の流域地形が発生したと捉えることができる。

以降では流域地形量として河道網構造と密接な関係にある発生河道数が大きな意味を持つので、これ以降ではこのように河道発生数を極端に大きくした模擬発生は行わない。しかし、0 次谷を考慮することでより現実的な高度分布の地形を模擬発生させることができると考えられることは、今後、模擬流域発生モデルを改良する場合において重要であろう。

4. 流域生成プロセスと分岐比について

4.1 はじめに

Horton の河道数則はもっとも有名な地形則で、分岐比が 1 つの流域内ではほぼ一定であるということを表した経験則である。さらに、河道網発生をトポロジカルにランダムな過程であると仮定することで 1/4 則という統計則が導かれ、これが河道数則を理論的に裏付けている。これらの研究から、経験的にも理論的にも分岐比は期待値として 4 となることがわかっている。

本章ではまず、本研究で提案する浸食過程を考慮した模擬流域発生モデルによって生成した流域地形を用いて、模擬流域発生モデルで考慮しているランダム性と 1/4 則で前提としているランダム性の関係について分岐比という視点から考察する。その上で、模擬発生させた模擬流域群の分岐比から、河道網構造と流域生成プロセスの関係を探る。

それに先立って、本章と 5. における模擬流域発生での領域の面積の設定について説明しておく。

4.2 領域面積の設定について

本研究で提案するモデルは地形の浸食過程を考慮したものであるため、想定している地形は堆積地形が少ない山地部の中小流域である。最大位数が 4 程度の河道網が発達した中小流域の模擬発生を考えて領域は 15 k m 四方 (50mメッシュで 300×300) の約 200 k m² を設定する。しかし、同条件から多数の流域を発生させることで流域地形特性を把握することを考える本研究では、模擬流域発生 の 1 つあたりの計算負荷が小さいことが理想である。そこで、半分の縮尺の 7.5 k m 四方 (50mメッシュで 150×150) の流域で同条件の模擬流域発生によって、15 k m 四方の領域での模擬発生 の 代用が可能かを調べた。

設定条件を Table 3 に示す。15 k m 四方 (case st) の領域での設定条件に対して、7.5 k m 四方 (case hf) の領域での設定条件は、初期斜面勾配と斜面安息角は 0.4 のまま、浸食が発生する限界長さを 250m、

Table 3 Used parameters

case	st	hf
size	15km×15km	7.5km×7.5km
S_0	0.4	0.4
S_c	0.4	0.4
L_c (m)	500	250
V_d (m)	20	10
V_u (m)	1000	500
A_0	1350	675
k_1	0.00017	0.000333
k_2	0	0
N_1	13、21、31	13、21、31
l (%)	90	90

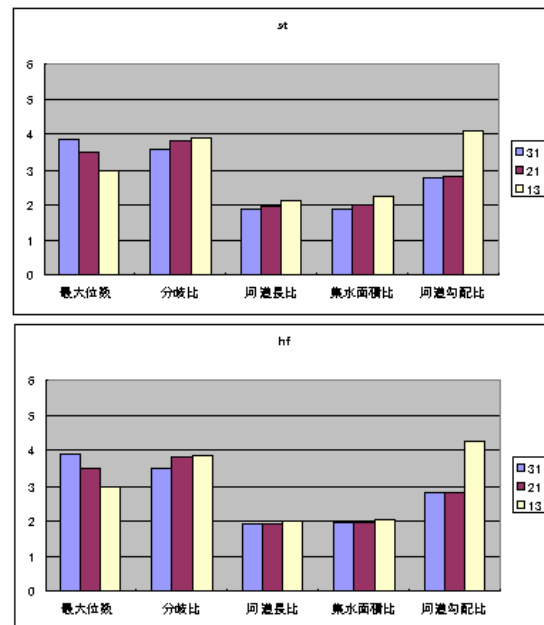


Fig.12 mean values of each ratio (above: case st, below: case hf) .

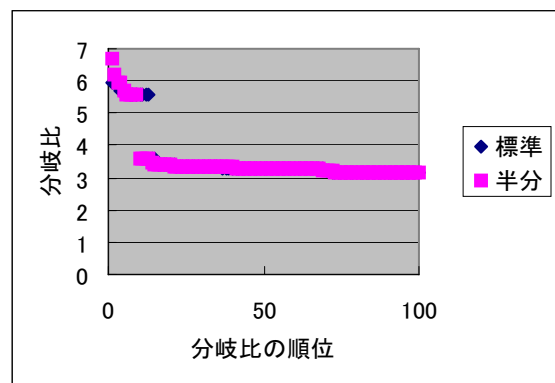


Fig.13 Distribution of bifurcation ratio of 100 virtual drainage-basins.

浸食の鉛直方向速度/谷頭方向速度は 1/50 のままだがモデル内でのタイムステップに対する速度は半分にした。河道縦断形の指数曲線は、15 km 四方の領域では水源から 1 km の勾配，7.5 km 四方の領域では水源から 500m の勾配がそれぞれ 0.2 となるようにした。

以上の設定条件から、発生河道数が 13, 21, 31 の場合についてそれぞれ流域をランダムに 100 個ずつ模擬発生させて、分岐比・河道長比・集水面積比・河道勾配比・河道網の最大位数について比較した。

Fig.12 は 100 個の流域の各比の平均値の比較である。15km×15km の場合と 7.5km×7.5km の場合について、各発生河道数での各比の平均値を棒グラフで示している。また、Fig.13 は発生河道数 31 での 100 流域分の分岐比の値を降順に並べたものである。どちらの case でも分岐比の値はよく似た分布となっている。示してはいないが、河道長比・集水面積比・河道勾配比・最大位数についても、また他の発生河道数についても両 case はよく似た分布を示した。

これより、面積を変えても発生する流域群は傾向として極めてよく似た特性を持つことがわかる。本研究のモデルでは、流域の生成過程の中に面積の違いによって異なる結果を生むような要素を含んでいないので、この結果は当然とも言える。また、相似な条件での流域群の模擬発生によって極めてよく似た結果を得たことから、このモデルでの流域発生が地形的な条件のみに依存したランダムなものであることが確認できる。これより、以降の検討は 7.5 km×7.5 km の領域で行うことにする。

4.3 模擬流域における分岐比の特性

(1) 実験方法

模擬流域発生モデルで浸食による流域発達を進める上で、発生河道数は形成される河道網の水源の数に等しい。河道網構造での位数 1 の数 N_1 は水源の数に等しいので、モデル上で発生河道数を設定することは生成される河道網の N_1 を指定していることにほかならない。2. で説明したように、1/4 則は N_1 が十分に大きいときに成り立つ法則である。したがって、浸食過程を考慮した模擬発生によって流域の分岐比が N_1 とどのように関係しているかを知ることが重要である。

また、3. で述べたように河道勾配は河道合流角に関係するので、河道縦断形は流域地形を特徴付ける要素の 1 つである。

以上のことから、流域生成プロセスと流域地形特性、その中でも特に分岐比との関連性を明らかにするために、発生河道数と河道縦断形の違いによる模

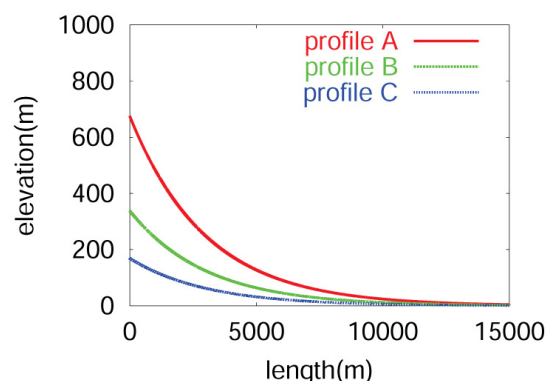


Fig.14 Three type longitudinal stream profiles.

Table 4 Various parameters

case	Profile A	Profile B	Profile C
size	7.5×7.5	7.5×7.5	7.5×7.5
S_0	0.4	0.4	0.4
S_c	0.4	0.4	0.4
L_c (m)	250	250	250
V_d (m)	10	10	10
V_u (m)	500	500	500
A_0	675	338	169
k_1	0.000333	0.000333	0.000333
k_2	0	0	0
N_1	10, 20, 30 40, 50	10, 20, 30 40, 50	10, 20, 30 40, 50
l (%)	90	90	90

擬流域地形の特性の違いを調べる。このために、勾配の異なる 3 つの河道縦断曲線（曲線 A，曲線 B，曲線 C）を用意し、そのそれぞれについて発生河道数を 10, 20, 30, 40, 50 とした場合の最大位数，分岐比などを調べた。模擬発生の際のそのほかの条件は 4.2 で説明した 7.5 km 四方の領域でのものと同じである。なお、模擬発生させる流域は各条件につき 100 個ずつで、考察は各条件から発生する模擬流域群の総合的な特性を見て行う。

河道縦断形の曲線 A，B，C はそれぞれ、水源から 500m の平均勾配が 0.2, 0.1, 0.05 となるように設定している (Fig.14)。下流側ほど勾配は 0 に漸近して緩やかになるので各曲線形の違いは主に上流側に表れると考えてよい。具体的な係数の値と、その他のパラメータ値は Table 4 のようになる。

(2) 実験結果

このようにして発生させた模擬流域の一部を Fig.15~17 に示す。Fig.15 は河道縦断形 A・発生河道数 50 の条件で発生させた模擬流域のうちの 5 つであ

る。Fig.16 は発生河道数 50 の場合の河道縦断形が異なる模擬流域を示している。Fig.17 は河道縦断形 A の場合の発生河道数の異なる模擬流域を示した図である。発生河道数が増加するほど浸食量も増えるために、発生河道数の増加とともに流域地形の標高が低下していることが見てとれる。

Fig.18 は河道縦断形 A での 100 流域分の分岐比の値を見やすいように発生河道数ごとに左から降順に並べたものである。これらを見ると、どの地形量もとりにやすい値があつて、発生河道数が増加するほどその値をとる割合が増える傾向がある。この傾向は河道縦断曲線形の違いに関わらず、また河道長比・集水面積比・河道勾配比においても同様に見られる。

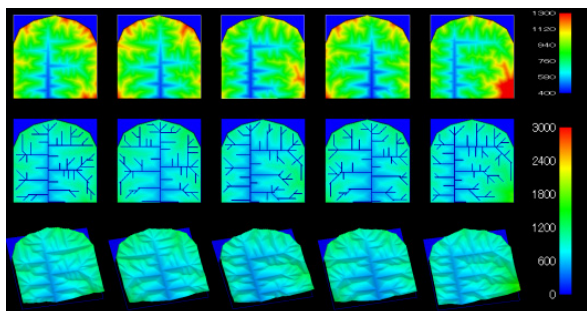


Fig.15 Generated 5 virtual drainage-basins with the longitudinal profile A, and 50 streams.

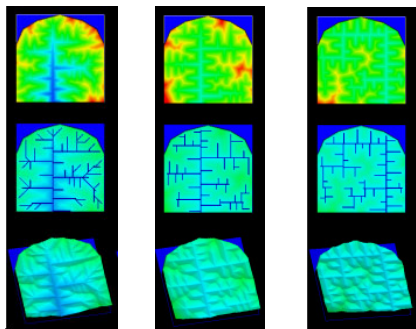


Fig.16 Generated virtual drainage-basins with 50 streams(left: longitudinal profile A, middle; B, right: C) .

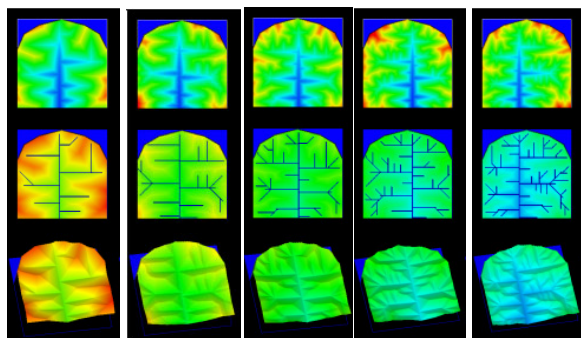


Fig.17 Generated virtual drainage-basins with longitudinal profile A (10 streams, 20 streams, 30 streams, 40 streams, 50 streams) .

Fig.19 は、河道縦断形 A での 100 流域分の分岐比の平均値と分散について発生河道数による違いを見たものである。分岐比の平均値は発生河道数が多いほどそれぞれ一定の値に近くなり、発生河道数が多いほど分散も小さくなることからわかる。これも他の条件でも同様に見られる傾向である。Table 5 よりこの“一定の値”はどの河道縦断形においても、分岐比は 4、河道長比は 2~2.5、集水面積比は 2、河道勾配比は 3~4 という値を概ねとっていることがわかる。ただし、河道縦断形によって河道勾配は変化するので、河道縦断形の設定によって河道勾配比は操作が可能であると考えられる。

Fig.20 は、各河道縦断形の発生河道数 50 での 100 流域分の hypsometric 曲線を重ねて描いたものである。

Table 5 Mean geometrical quantities of each condition. (“hi” is hypsometric integral)

profile	A				
N_l	10	20	30	40	50
R_b	4.13	3.71	3.38	3.59	3.84
R_l	2.22	1.91	1.82	2.01	2.09
R_a	2.23	1.91	1.87	2.04	2.08
R_s	4.09	2.71	2.79	2.72	2.71
k	2.89	3.52	3.95	3.99	4.01
hi	0.400	0.408	0.413	0.417	0.420
profile	B				
N_l	10	20	30	40	50
R_b	5.84	4.48	4.48	4.39	4.19
R_l	3.50	2.40	2.36	2.32	2.23
R_a	2.50	1.83	1.80	1.81	1.74
R_s	3.67	3.70	3.52	3.46	3.35
k	2.63	3.18	3.57	3.76	3.95
hi	0.318	0.297	0.297	0.320	0.314
profile	C				
N_l	10	20	30	40	50
R_b	5.12	4.30	4.07	3.95	4.31
R_l	3.45	2.96	2.68	2.47	2.69
R_a	2.41	2.46	2.24	2.01	2.14
R_s	4.60	5.62	4.86	4.66	4.62
k	2.73	3.35	3.66	3.89	3.89
hi	0.304	0.284	0.282	0.287	0.290

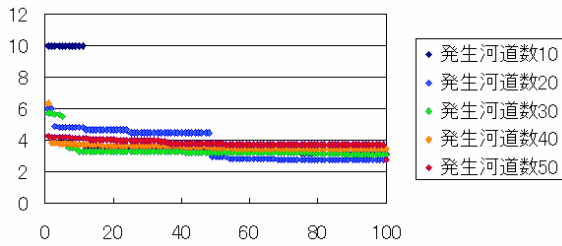


Fig.18 Bifurcation ratio in case of longitudinal profile A. (Vertical axis: bifurcation ratio, Horizontal axis : order.)

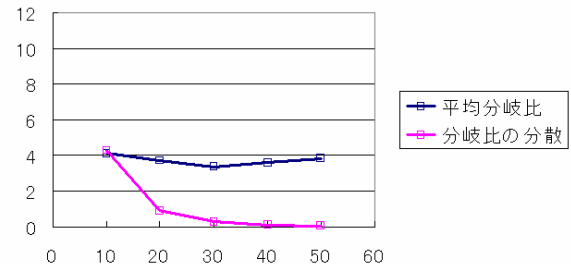


Fig.19 Expectation and variance of bifurcation ratio in case of longitudinal profile A. (Horizontal axis: the number of generated stream)

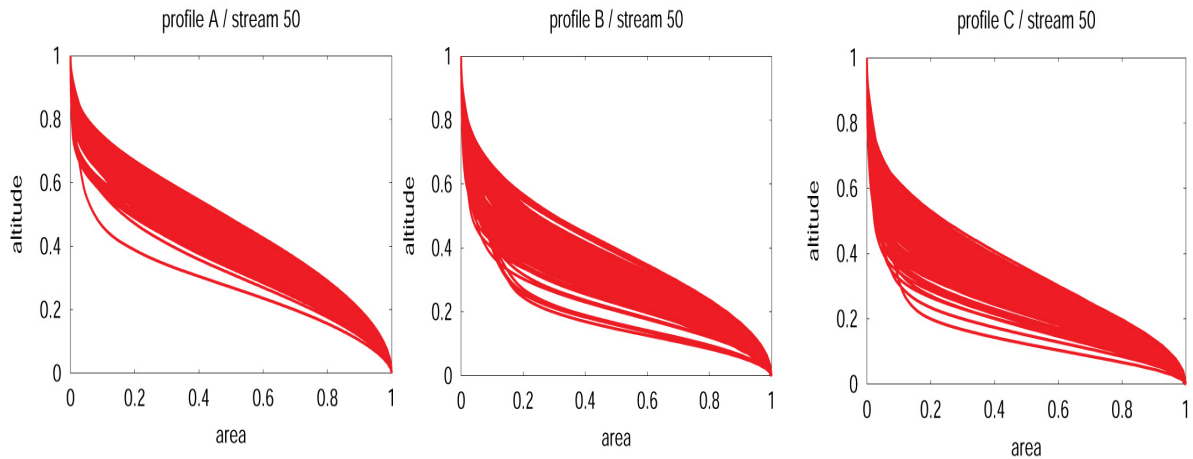


Fig.20 Hypsometric curves of 100 virtual drainage-basins with 50 streams (profile A, profile B, profile C).

これを Strahler の示した hypsometric 曲線 (Fig.2) と比較すると、模擬流域群の hypsometric 曲線は浸食段階が壮年期の平衡地形の曲線に近いものが多いことがわかる。ただし、河道縦断形 B、C では老年期とみなせる曲線も多い。面積高度比積分値の値からみても、縦断形 A では 0.3~0.5 の範囲で値が分布していて平衡状態の積分値をほぼ満たしているが、縦断形 B・C では 0.2~0.4 とやや低い値で分布している。

このように縦断形 B・C で老年期地形のような hypsometric 曲線の特徴が見られるのは、斜面安息角の設定値がどの河道縦断形の場合でも同じであるために、全体的に勾配の緩い河道縦断形の方が流域内で相対的に標高の低い部分が大きくなるからである。これはモデルの設定から考えて妥当な結果である。この実験では斜面安息角と河道縦断形を独立なものとして設定しているのでこのような結果となったが、浸食の平衡状態における斜面勾配との関係をモデルに反映させることができれば、河道縦断形によらず壮年期の流域地形を発生させることができると考えられる。また、斜面安息角の分布を考慮可能なモデルにするという改善策も考えられる。

ただし、阪口ら (阪口, 1971) が日本全国の河川

流域について調べた結果によれば、比積分値が 0.2 程度の流域も多く存在しているので、縦断形 B・C の比積分値が不自然な値というわけではない。

さて、特に分岐比に着目してみると、どの河道縦断形でも発生河道数が大きくなるほど分散が小さくなって期待値が 4 に近づく傾向がある。その中でも曲線 A では、発生河道数が少なくとも分岐比の平均値は 4 近くをとり、発生河道数 50 のときには 100 流域のうちほとんどの流域で分岐比がおよそ 4 になっている。発生河道数、すなわち生成される河道網の N_1 が増加するほど分岐比の期待値が 4 に近づくというのは、まさに 1/4 則と一致している。しかし、1/4 則と本研究の模擬流域発生はプロセスが異なる。それにも関わらずこのような結果となる理由について次節で考察を行う。

4.4 模擬流域発生過程と統計則導出過程

発生河道数、すなわち生成される河道網の N_1 が増加するほど分岐比の期待値が 4 に近づくというのは、まさに 1/4 則と一致している。しかし、1/4 則と本研究の模擬流域発生はプロセスが異なる。この大きな違いがあるにも関わらず本研究の手法による結果が 1/4 則と同様の傾向を示すのはなぜだろうか。

まずは本研究の模擬流域発生手法のランダム性と高椋らの 1/4 則のランダム性の違いを整理する。

地形の浸食過程をベースとする本研究の手法では、河道発生位置を決定するルールの基本はあくまで最長落水線である。その上で、自然現象では同条件であってもまったく同じ地形が発生することはないことから、ランダム性を取り入れた。この本研究の手法でのランダム性を、ここでは「浸食過程を考慮したランダム性」と呼ぶことにする。

一方、1/4 則の導出において前提としているランダム性では、河道区分の長さや斜面の広さ、落水線の長さなどは考慮せず、河道区分 1 つ 1 つに等確率で新河道発生の可能性がある。これを「トポロジカルなランダム性」と呼ぶことにする。

つまり、浸食過程を考慮したランダム性とトポロジカルなランダム性の違いとは、トポロジカルなランダム性ではすべての河道区分に新河道発生可能性があるのに対して、浸食過程を考慮したランダム性では新河道を発生させられる河道区分は限られているという点である。

Fig.21 は、縦断形状が曲線 A での実験で得られた 100 の流域での最大位数の分布を全流域に占める割合として発生河道数ごとにプロットしたものである。また、図中に描かれている曲線は 1/4 則の導出過程で理論的に得られるもので、構造としてトポロジカルに異なる河道網全体での最大位数 k の確率と位数 1 の河道数 N_1 の関係を示したものである。このグラフを見ると、プロットした模擬流域での最大位数の確率と曲線で描かれた理論的な確率はよく対応している。

また、各流域内の位数ごとの分岐比を 100 個の流域で平均したものを発生河道数別に描いたのが Fig.22 である。この図を見ると、位数ごとの分岐比は発生河道数が多いほど 4 に近い値を示していることがわかる。縦断形 A でこの傾向が顕著であり、特に小さい位数においては発生河道数が小さくても分岐比が 4 に近い値となっている。これは Fig.3 の傾向と同じである。

以上のことから、プロセスが違っても関わらず、模擬流域群の分岐比が 1/4 則と同様に発生河道数が多いほど 4 に近い値を示すというのは、1/4 則と別の要因が本研究の手法に潜んでいるというよりは、プロセスは違っても関わらず本手法でも 1/4 則と同様にトポロジカルに異なる構造の河道網が等確率で発生していると考えられるべきであろう。その理由としては、次のように推測することができる。

本研究で採用している最長落水線によって斜面を浸食する流域発達の方法では、ランダム性を取り入

れているとはいっても、当然ながら流域内で特に大きい斜面から浸食されることになる。すなわち、流域内の大きな斜面はいち早く浸食されて谷地形が形成され、小さな斜面に分割される。これが繰り返されることで、流域内の河道区分に接続する斜面は同程度の大きさのものばかりになると考えられる。浸食過程を考慮したランダム性では最長落水線と同程度の長さの落水線の中からランダムに 1 つを選んで

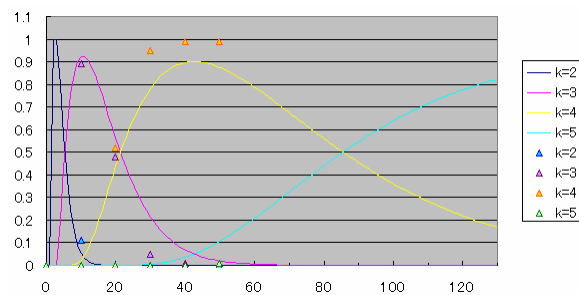


Fig.21 Probabilities of the events that trunk number k becomes to i for given N_1 , the numbers of first order streams (Solid line: theoretical curve, plot: virtual drainage-basin). Vertical axis, probability, horizontal axis: the number of generated streams.

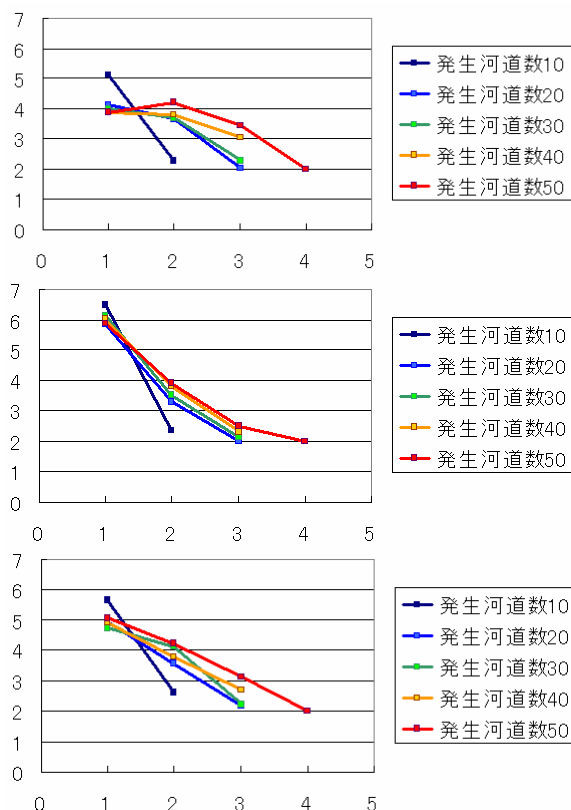


Fig.22 Relations between bifurcation ratio and stream order (above: profile A, center: profile B, below: profile C). Vertical axis: bifurcation ratio, horizontal axis: the order of stream

新河道とするので、もし河道区分に接続する斜面がどれも同程度の大きさの斜面であるなら、それは全河道区分の中からランダムに1つを選ぶトポロジカルなランダム性と等しくなる。その結果、発生する流域の分岐比の特性が1/4則と類似するのではないだろうか。

つまり、浸食過程を考慮して最長落水線を河道とすることにした本手法での仮定が、統計的にランダムに考えて導かれた1/4則との橋渡しをする役割を担っていると言える。統計則では時間的・空間的に大きなスケールを考えれば浸食による作用は流域全体に様に働くであろうという前提からトポロジカルにランダムな河道網発生を考えられてきた。しかし、浸食作用を流域内で様とせず、浸食されやすいところから浸食が行われるとした本研究のモデルで統計則と同様の結果を得たことは、トポロジカルにランダムな河道網発達を促進しているのが流域の浸食プロセスであることを示唆していると言える。

4.5 河道縦断形状と分岐比

縦断形状曲線がBやCでも、位数ごとの平均分岐比は発生河道数が多いほど4に近くなるものの、Aに比べるとそれほど4に近い値にはならない。特に、曲線Aでは常に4に近い値を示していた位数1と位数2の河道間の分岐比は、BとCでは発生河道数が増加しても4に近い値にはなっていない。

この理由として考えられるのは、河道網の上流付近での形状である。Fig.16 からわかるとおり、曲線Aによる流域では上流で鋭角的に河道が合流しているのに対し、B、Cによる流域では上流でも河道の接続は直角である。これは3. で説明した斜面勾配と河道勾配の関係によって生じるものである。B、Cでは指数曲線によって勾配が急になる上流であっても、斜面勾配に比べると河道勾配が小さいために直角に合流してしまうのである。

上流で直角に合流することが分岐比を4に近づけることの妨げになる理由は、幾何学的に考えることで説明できる。領域内において、上流の部分は面積が狭い。したがって、新河道が鋭角的に発生する場合に比べて、直角に新河道が発生してしまった場合はすぐに上流部の領域を使い果たしてしまう。このため、新河道は大きな斜面を残している下流側の位数の大きな河道から発生しやすくなるので、河道発生が進んでも位数の大きな河道が増えにくい。その結果、位数1と位数2の河道間での分岐比の値が大きくなり、全体的にも4に近い平均値となりにくい。これが位数1と位数2の河道数間での分岐比が4に近い値を示さない原因と考えられる。

この結果から、河道の縦断形と斜面の勾配が流域地形の形成において重要な要素となっていることがわかる。分岐比については、上流域でも斜面に対して河道の勾配がかなり小さいような流域では分岐比が大きくなることが予想される。河道の縦断形は河床の粒径と密接に関係していることは、3. で触れた。河床粒径の分布は流域の地質的な特性と河道の掃流力の影響を受ける。流水の掃流力も関わるといふ点では、部分的な斜面崩壊などではなくて、河道網の分岐比という流域スケールでの地形特性が降雨-流出特性との関係を持っているという仮説を立てることもできる。

ただし、本研究のモデルでは斜面安息角と河道縦断形を独立のパラメータとして扱っているために、実際の地形におけるこれらの関係性が表現されていない。今後、実地形での両者の関係を考慮したモデルへと発展させることができれば、河道の勾配に関わらず分岐比の期待値が4となるような河道網発生となることも考えられる。

5. 流域生成プロセスと流域地形量・地形則

5.1 はじめに

本章では、模擬流域発生モデルを用いた実験によって、どのような要素が流域地形特性に大きく影響するのかを検討する。方法として流域発生において設定できるパラメータのうちで、流域地形形成への効果が大きと思われるものについて、値を変化させて模擬発生を行った。

検討の際の基準として、地形則を用いる。地形則では分岐比、河道長比の値がほぼ一定の値をとることになっている。このことから、発生させる流域全体での地形量の分布を見ることで流域地形としての確かさを確認する。また、分岐比、河道長比、集水面積比、河道勾配比、面積高度比積分値はそれぞれ期待される値がある。全流域での値のばらつきとともに、この期待される値に近いのかも調べる。

なお、本章での実験では、模擬流域は常に同条件で100個ずつ発生させている。これによってランダム性による地形の異なる度合いも含めて流域地形特性を見ることができる。

5.2 トポロジカルにランダムな河道発生との比較

本節では、本研究で用いている模擬流域発生モデルに1/4則と同様の「トポロジカルにランダムな河道発生」を導入した場合にどのような流域が発生するかを実験した。

具体的には、本研究のモデルでの新河道となる落水線のランダム選出の際に、長さによって落水線候補を選出する前に、新河道の発生する河道区分とそのどちら側に接続するかをランダムに選択することにした。選ばれた河道区分からの河道の発生は、その河道区分に注ぐ最長落水線長さの90%以上の長さを持つ落水線をさらにランダムに選ぶ。

Table 6 に示した発生条件のもとで、「浸食過程を考慮したランダムな河道発生」を行うモデルと、「ト

Table 6 Used parameters.

case	Erosion Process (M2)	Topologically Random (M3)
size	7.5×7.5	7.5×7.5
S_0	0.4	0.4
S_c	0.4	0.4
L_c (m)	250	250
V_d (m)	10	10
V_u (m)	500	500
A_0	675	675
k_1	0.000333	0.000333
k_2	0	0
N_1	31	31
l (%)	90	90

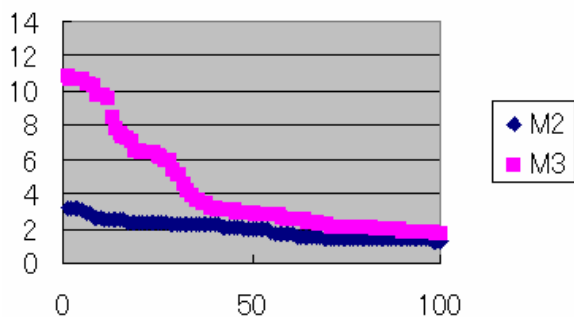


Fig.23 Distribution of R_1 (random method based on erosion process and topological randomness).

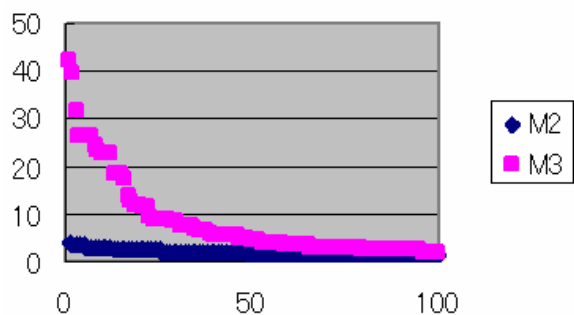


Fig.24 Distribution of R_a (random method based on erosion process and topological randomness).

ポロジカルにランダムな河道発生」を行うモデルを用いて模擬流域を発生させて結果を比較した。河道縦断曲線はAを用いる。その結果を Fig.23, Fig.24 に示す。浸食過程を考慮したランダム発生では分岐比、河道長比などがどれもばらつきが小さいのに対し、トポロジカルにランダムな河道発生では、特に河道長比、集水面積比において大きなばらつきが見られた。これは、河道区分に接続する斜面の大きさなどは全く考慮せずに河道発生位置を選出するので、極端に短い河道も発生してしまうからである。河道の長さには大きなばらつきができるので、河道長比のばらつきが大きくなる。また、河道がつくる斜面の大きさが集水面積となることから集水面積比にも大きなばらつきが生まれることになったと思われる。

この結果は、統計則で用いられる考え方は長さや面積といった概念を使わずにできているので、実際の地形を考える際にはなじまないことを示している。これは統計則の考え方が間違っているということではなく、流域地形の3次元形状を形成するためにはトポロジカルな河道網パターンの発生についてのみを考えている統計則の方法では限界があるということである。したがって、流域地形の3次元形状を形成するためには、地形則における河道長の関係を満たし統計則とも合致する本研究の手法は有効であると言える。

5.3 発生河道数の違いについての比較

発生河道数による比較は、分岐比については4章で行った。ここではそのほかの地形量についても発生河道数との関係を見る。Table 5 より、どの河道縦断形においても分岐比の期待値は4、河道長比は2~2.5、集水面積比は2、河道勾配比は3~4という値を概ねとっていることがわかった。一方、分散は、分岐比もそうだが、河道長比、集水面積比、河道勾配比は発生河道数が大きくなるほど小さくなっている。4. では発生河道数を基準とした最大位数の発生確率の分布や分岐比の期待値が4に近いことから統計則をよく満たした地形が発生していることを確かめた。ここでも、それぞれの値を各比の期待値 (Table 1, Table 2) と照らし合わせて検討する。

河道長比の期待値は一般に2である。Table 5 を見ると、河道の発生数が増えるほど河道長比は2に全体的に近づくので、よく満たしているといえる。発生河道数が少ない段階で河道長比が極端に大きい流域が発生してしまっているのは、最大位数が2の流域が存在しているからである。最大位数が2の河道網では長い主流(位数2の河道)に短い支流(位数1の河道)がたくさん接続している構造になるので

河道長比が大きくなる。これは分岐比、集水面積比、河道勾配比でも同じ傾向が見られる。発生河道数が小さいうちは各比が期待値どおりにならないのは、この最大位数 2 の流域が大きく影響していると考えられる。

集水面積比と河道勾配比の期待値はそれぞれ 4, 2 であるが、Table 5 ではこの値とは違う平均値となっている。河道勾配比については、河川縦断形を設定して形成しているので、値が合わないのは係数設定方法の改善によって解決できるかもしれない。一方、集水面積比は河道勾配比とよく似た値を示しており、流域全体での値の分布も良く似た傾向がある。これは集水面積が河道に接続している要素なので、河道の特徴をよく反映してしまうからである。しかし、1 次元の河道に対し、集水面積は 2 次元なのでもっと大きな値をとってよさそうなものである。そうならない理由としては、上流も下流も斜面勾配が一定であるために、下流側の位数の大きな河道の斜面も上流の河道と同じ程度の幅の斜面しかつくることができないということが考えられる。このことから、本モデルでは河道に接続する斜面の形成について、まだ課題が残っていると考えられる。

6. 結論

6.1 浸食過程を考慮した模擬流域発生手法

本研究では、浸食過程を考慮した模擬流域発生モデルという、降雨分布特性 - 地形分布特性 - 流出特性の関係の統一的な解明のために有効となる手法を提案した。このモデルはいくつかの流域地形量をパラメータとして設定することで、流域の浸食発達過程と地形形成におけるランダム性を考慮して、設定した条件に従って生成される流域地形情報を複数個出力することができるモデルである。

本研究で提案したモデルでは、地形発生の際に Horton による流域の浸食過程を考慮したことによって、流域地形の 3 次元形状を地形発達のプロセスにのっとった形で表現することを可能にした。これにより、既往研究での模擬流域発生モデルにおける課題であった流域地形量間の不整合と 3 次元形状の形成過程の不自然さを解決した。

また、模擬流域発生モデルにおける河道網構造の決定におけるランダム性については、高棹らによる統計則である 1/4 則の導出過程を参考にした。これによって本研究のモデルは、同条件からランダムに複数の異なる流域地形を発生させることが可能となっている。これは、形状は異なっても同じ地形特性を持つ流域地形を複数発生させることができる

ということであり、自然の地形発達におけるランダム性も考慮した流域地形発生ができるということである。

6.2 流域地形則 - 流域生成プロセス

本研究ではモデル上の流域地形の生成過程において浸食過程を考慮したため、流域の生成プロセスと流域地形の関係についての検討が可能となった。このため、本研究では、模擬流域発生モデルを用いた実験を通して、流域地形量と地形則に関わる流域生成プロセスについての考察を行った。

浸食過程を考慮した本研究で表現されている流域生成プロセスとは、斜面上で雨水の流下距離が最長のラインが河道となり、曲線的な河床縦断形をもつ河道が時間とともに掘り下げられ、その河道の両側に安息角の斜面が形成される、というものであった。また、河道位置の決定の際には流下距離が同程度に長いラインはどれも同程度に河道になり得るという、ランダムさを考慮した河道発生プロセスとした。

雨水流下距離最長の位置が河道となるというプロセスについては、このプロセスを考えないトポロジカルにランダムな河道発生を取り入れた模擬流域発生との比較から、期待値・経験値どおりの分岐比や河道長比を持つ流域を形成するために重要なプロセスであることがわかった。また、この流下距離を考慮したランダムな模擬流域発生の結果から、1/4 則で前提としているトポロジカルにランダムな河道発生は、流下距離に基づく河道の浸食発達過程の結果として実現される可能性を示唆した。

曲線的な縦断形による河道形成のプロセスについては縦断曲線を様々に変えた模擬流域発生実験を行った。その結果、縦断形の違いによって河道の合流角度が変化し、それによって分岐比・面積高度比積分値などの流域地形量に変化することがわかった。このことから、河道の縦断形状は流域地形特性に関わる重要な要素であることがわかったが、その本質は河道勾配と斜面勾配（安息角）の関係にあると推察された。

安息角に基づいて斜面形を決定するプロセスについては、安息角の空間分布を考えずに領域内で一様としている点と河道縦断形とは独立の一定値として安息角を設定している点で、本研究のモデルでは斜面形成プロセスの表現が十分ではなかった。そのために、集水面積比や面積高度比曲線の値が期待される値とはやや異なるものとなった。したがって、斜面形成プロセスについてはモデルを改善した上でさらなる検討が必要である。

6.3 本研究における課題

最後に本研究で提案した模擬流域発生モデルにおける課題と、今後の発展性について示しておく。

前節でも触れたように、本研究では模擬流域発生手法の中で斜面形成のプロセス、特に安息角の設定方法に課題が残った。これは、「安息角を分布化させる」、「河道縦断形（河道勾配）との関係を考慮して安息角を決定する」などの方法をとることで改善されると考えられる。また、その他の設定条件についても、領域内で分布させることで流域地形の浸食発達過程がより現実的に表現可能であると考えられる。特に、3章で「流域の地質・地形特性を表現するパラメータ」としたものについては浸食過程と深い関わりのあるパラメータであることから今後このような検討が必要である。

また、本研究の手法の大きな問題点として、流域境界形状をあらかじめ設定してしまっているという点がある。これは既往研究でも問題となっていた点であった。本来、流域境界形状は複数の流域の競合によって決定していくものであることから、モデル上でもこのプロセスが表現されるのが望ましい。このような流域どうしの領域争奪は模擬流域内の部分流域どうしでは行われているので、これを発展させて斜面上で同時に複数の模擬流域発生を行うモデルへと改良すれば表現可能であると考えられる。

さて、ここからは本研究の今後の発展性について簡単に述べる。本研究で提案した模擬流域発生モデルでは浸食による流域地形の形成過程を考慮するものであった。1.でも述べたが、浸食プロセスは流域を特徴付ける最も大きな要素である谷を形成する主要因であり、かつ降雨分布特性との関わりが深いプロセスでもある。本研究の大目的である降雨分布特性 - 地形分布特性 - 流出特性の統一的な解明には、浸食作用に大きく関わる降雨とのインタラクションを考える必要がある。

本研究で開発したモデルによって生成される模擬流域は数値地図情報と同様の形で地形情報を入力する。したがって、現実の地形情報と同様に分布型流出モデルと連結することが可能である。流出モデルとの連結によって、模擬流域発生モデルは降雨による影響を考慮することが可能となる。これは単に流出計算ができるということではなく、モデル地形上の雨水の流下過程を知ることができるということであり、すなわち水流の浸食力を知ることにつながるものである。このことから、水流による斜面浸食過程を本研究のモデルに取り入れることによって、模擬流域発生モデルは降雨とのインタラクションを表現することが可能となるはずである。

このように、将来的には、降雨モデル - 模擬流域発生モデル - 流出モデルという形で連結することによって、降雨による浸食を表現するモデルへと発展させることができる。そうすることで本研究の模擬流域発生モデルは降雨分布特性 - 地形分布特性 - 流出特性をインタラクションも含めて総合的に表現することができるモデルとなり、この3者間の関係の統一的な解明のための有効な手法となることが期待される。

参考文献

- 芦田和男・田中健二 (1975) : 裸地斜面における流路の形成過程に関する研究 (1) - 流路網の確率的シミュレーションを中心として -, 京都大学防災研究所年報, 第 18 号 B, pp.513-528.
- 石原藤次郎・高棹琢馬・瀬能邦雄 (1969) : 河道配列の統計則に関する基礎的研究, 京都大学防災研究所年報, 第 12 号 B, pp.345-365.
- 泉 典洋・Parker, Gary (1995) : 斜面下流端から発生する水路群について, 土木学会論文集, No.521/II-32, pp.79-91.
- 川合茂・和田清・神田住一・鈴木正人 : 『河川工学』 (コロナ社), pp. 11.
- 阪口 豊 (1971) : 日本の河川流域の特性, 資源科学研究所彙報, 75 号, pp.61-72.
- 関根正人・菱沼志朗 (2004) : 降雨により生じる裸地斜面の表面浸食とこれに伴う土砂流出に関する数値解析, 水工学論文集, 第 48 卷, pp.961-966.
- 関根正人・長濱正憲・西森研一郎 (2006) : 粘土を含有する裸地斜面の降雨による表面浸食過程に関する研究, 水工学論文集, 第 50 卷, pp.1045-1050.
- 高山茂美 (1974) : 『河川地形』 (共立出版).
- 立川康人・日和佐真丈・寶 馨 (2003) : ランダムカスケードモデルと降雨標高依存直線を用いた降雨空間分布の模擬発生, 水工学論文集, 第 47 卷, pp.127-132.
- 塚本良則・日下部治 (1974) : 侵食谷の発達様式に関する研究(IV) - 0 次谷の数を推定する方法 -, 新砂防, 90 号.
- 塚本良則 (1974) : 侵食谷の発達様式に関する研究(V) - 水系網が作る流域地形とその変形過程について -, 新砂防, 93 号.
- 塚本良則・野口晴彦 (1979) : 侵食谷の発達様式に関する研究(VIII) - 平衡状態にある流域地形の特性 -, 新砂防, 113 号.
- 友杉邦雄 (1975) : 流域地形量が出水ピークに及ぼす効果に関する研究, 京都大学防災研究所年報, 第 18 号 B, pp.437-452.

- 友杉邦雄 (1976) : 河域地形構成要素の平面量の分布特性に関する研究, 京都大学防災研究所年報, 第 19 号 B, pp.65-80.
- 中北英一・前田妙子 (2004) : 流域スケールに依存した分布型降雨情報の有効性に関する基礎検討, 水工学論文集, 第 48 卷, pp.307-311.
- 前田妙子 (2006) : 流域地形量をパラメータとした模擬流域発生と分布型降雨情報の有効性に関する研究, 京都大学大学院修士論文.
- 町田貞 (1984) : 『自然地理学講座 1 地形学』(大明堂).
- 谷津栄寿 (1954) : 平衡河川の縦断面形について(1), 資源科学研究所彙報, 33 号, pp.15-24.
- Horton, Robert, E. (1945) : Erosional Development of Streams and their Drain-age Basins: Hydrophysical Approach to Quantitative Morphology, Bulletin of the Geological Society of America, Vol.56, pp.275-370.
- Strahler, Arthur, N. (1952a) : Dynamic Basis of Geomorphology, Bulletin of the Geological Society of America, vol.63, pp.923-938.
- Strahler, Arthur, N. (1952b) : Hypsometric (Area-Altitude) Analysis of Erosional Topography, Bulletin of the Geological Society of America, Vol.63, pp.1117-1142.

**A Study on Generating Virtual Drainage-Basin based on Erosion Process
and on Relationship between Geomorphologic Quantity and Runoff Characteristics**

Eiichi NAKAKITA and Shugo MATSUDA*

*Kansai Electric Power Co. Inc.

Synopsis

Generating virtual drainage-basin can be an effective way to understand relationships among characteristics of geomorphologic distribution, of rainfall distribution, and of runoff. Here the virtual drainage-basin is geomorphologic information of basin which has same geomorphologic characteristics with real drainage-basin and can be generated at random. This research proposes a method of generating virtual drainage-basin which is based on erosion process in deciding distribution of ground elevation and structure of channel network.

Keywords: virtual drainage-basin, erosion process, geomorphologic quantity, bifurcation ratio, hypsometric curve, law of drainage net composition, law of stream numbers