

## 地形発達過程と流域地形則との関係に関する研究

中北英一・杉谷祐二\*

\* 京都大学大学院工学研究科

### 要 旨

河川流域上における水文現象の把握のためには、降水・流出過程の解析だけでなく、流域地形に関する検討も重要である。本研究では地形発達過程の視点から流域地形の定量的評価について考察した。本研究ではTuckerらによって開発された物理的な地形発達モデルGOLEMを用いた流域模擬発生を行い、発生された複数の流域河道網の分岐比と河道長比を算定した。分岐比と河道長比について河道数が十分に多い流域において実流域の統計的期待値を満たしていることがわかった。次に、地形発達過程における降水量の空間分布が流域地形特性へ与える効果を検証するために標高に依存した降水分布をあたえるシミュレーションを行った。結果、十分に時間が経過した後の平衡地形において上流部での河道網形状の相違が見られた。

**キーワード:** 地形発達, 河道網, 流域地形則

### 1. はじめに

河川流域上における水文現象は、降水特性、流域地形特性、流出特性によって支配される。例えば、流出過程は、流域上にもたらされる降水と、その降水が地表面や地中において流れる経路、すなわち地形や地質の分布特性の合成として表現される。また、降水分布は山地などの地形の影響を受けて変化する。地形もまた逆に、流水による土砂運搬作用によって長い時間スケールで変化する。このように、流域上での水文現象は、降水、地形、流出の相互作用によって成り立つシステムと捉えることができる。

そのため、流域の水文現象について統一的な理論の構築のためには、従来行われてきた流出や降水の解析手法のみではなく、流域の地形特性に着目することが重要である。流域を1つの単位として見た場合に、流域の河道網構造や高度分布などが流域地形特性の指標として考えられる。本研究では、流域の河道網特性を定量的に把握し、水文過程と関連づけることで、河川流域上の水文システムにおける流域地形の役割を、理論的に分析・解明していくことを大きな目的としている。

流域河道網の定量化に関する研究はHorton (1945)の研究から始まった。以降、様々な研究により河道

パターンの定量的指標が提案されてきたが、Hortonが提案し、Strahler (1952)が改良した河道位数の概念が、その後の研究で最も多く扱われている。

この指標に関して、石原ら (1969)は流域の河道網構造をトポロジー的に捉え、河道網形成のランダム性を仮定して、Horton数の統計的期待値を導出した。

また、中北・前田 (2005)、中北・松田 (2007)は、流域地形を模擬発生させるモデル開発し、発生流域におけるHorton数やStrahlerのHypsometric曲線といった流域地形パラメータと流出特性との関係を分析した。

流域地形特性を把握するためには、現実の流域地形の特性を把握する手法もあるが、仮想の流域地形を模擬発生させる手法も考えられる。流域地形特性を任意に指定して発生させることや、同条件でのシミュレーションを多数実行することができることから、流域地形特性に関する理論的研究を行う上で現実の流域を扱う手法には無い利点がある。ただし、同条件の流域模擬発生であっても自然に起こりうるランダム性の考慮や、現実によりうる特性を備えた流域地形を発生させることが重要な点となる。中北・松田の模擬流域発生手法はHortonの提案した浸食による河道網形成プロセスを仮定し、同条件での

模擬流域発生においても様々な河道網パターンがランダムに発生されるように工夫されている。中北・杉谷 (2009) は、中北・松田の模擬流域発生手法において、斜面と河道の地形発達過程を導入し、現実発生しうる流域地形に近づけた上で、地形発達の時間概念を模擬流域発生モデルに導入した。

以上の研究では、流域の地形特性としてHorton数やHypsometric曲線に着目してきた。しかし、これらが流域の水文システムにおいて流域地形特性を表現する定量的な指標であるかは分からない。Kirchner (1993) は、Hortonの法則は河道位数の提唱による直接的な結果であり、ほとんどの河道網構造において成り立つものであるとして、ある流域固有の特性を表現する指標としては不十分としている。したがって、模擬発生させた流域が実際に起こりうる流域地形特性に適合しているかを判断することは困難である。

本研究では以上のような流域模擬発生における問題点を解決するための手法として、地形発達の物理モデルを用いて、流域地形を模擬発生させる手法を用いる。本研究では、Tucker et al. (1997) によって開発された地形発達モデルGOLEMを基本としたモデルを用いる。長期的な地形発達過程において地形発達と水文現象との物理的な相互作用を考慮したモデルを用いて流域を模擬発生させることによって、流域地形特性と水文現象特性との関係を理論的に解明することが本研究のねらいである。

本研究ではその先駆けとして、Hortonの流域地形則やStrahlerのHypsometric曲線との関係を分析し、さらに降水分布の空間分布特性を考慮した地形発達シミュレーションによって降水分布が流域地形特性に及ぼす効果について分析する。

## 2. 流域地形量と地形発達過程

河川流域地形特性の定量的な評価を考える際に、流域地形を特徴づける因子が何であるかを考える必要がある。本章では長年にわたり流域地形特性の指標として利用されてきたHortonの河道位数の概念を基盤とする諸指標とStrahlerのHypsometric曲線について述べ、それらの指標に関する研究について述べる。また、本研究で用いる地形発達モデルに関連する研究について述べる。最後に、近年開発されてきた模擬流域発生モデルと地形発達モデルによる手法の比較を行う。

### 2.1 流域地形量に関する諸法則

流域地形を定量的に表現する試みとして最も代表的なものが、Hortonの研究によって開発された指標

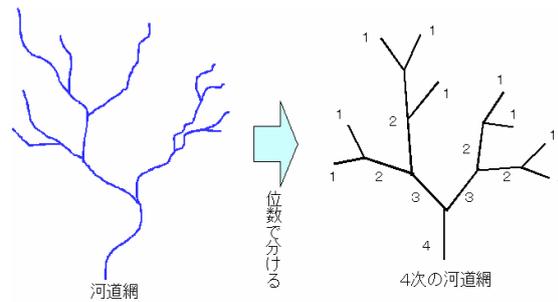


Fig. 1 Stream order (Horton and Strahler)

である。本節ではHortonによって提案された位数の概念とそれに関するHortonの法則と呼ばれる諸法則、またStrahlerによって提案されたHypsometric曲線の概念について説明する。

#### (1) 位数

中北・前田、中北・松田による一連の研究の中で、流域の河道網構造を表現する代表的なパラメータとして、Hortonが提唱しStrahlerが改良した位数が挙げられる。以下、Fig. 1を参照しながら、位数について説明する。

位数とは河道に付けられる等級である。水源に端を発する河道はすべて位数1である。その位数1の河道どうしが合流すると、それより下流は位数2の河道となる。位数2の河道に位数1の河道が合流しても位数は2のままだが、位数2の河道と位数2の河道が合流するとそれより下流での位数は3となる。このように、「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与えると、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。

また、河道網の最下流に位置する河道は河道網内で最大の位数となるので、最下流の位数は流域の規模を表す指標にもなる。

#### (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期待的に得られた次の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

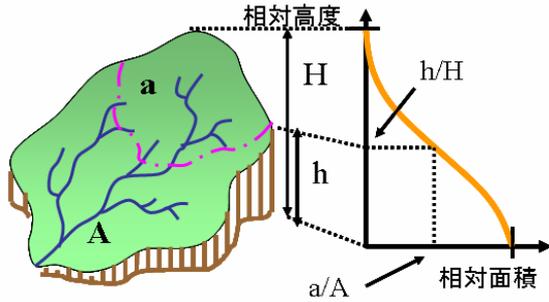


Fig. 2 Hypsometric curve

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。

### (3) StrahlerのHypsometric曲線

Hypsometric曲線とはStrahler (1952) が考案した概念で, Fig. 2に示すように, 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。また, 面積高度比積分値はHypsometric曲線の積分値である。この曲線形と積分値から流域の高度分布の特性がわかる。

## 2.2 統計則導出に関する既往研究

経験則であるHortonの法則が広まったのを契機に, この法則に関する理論的考察を試みる研究が盛んに行われた。この理論的研究は, 水系発達を規則的・周期的現象と捉えたものと, 水系発達を確率的な偶発的・非周期的現象と捉えたものの大きく2つに分かれる。しかし, 現象を確率的に捉えた後の方が分岐比の値などで実測値に近い期待値を導出しており, 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。

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。石原ら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。こ

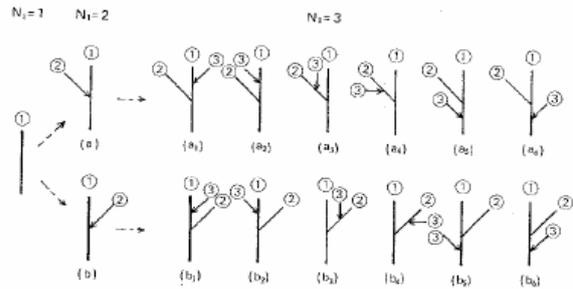


Fig. 3 The concept of channel development (石原ら)

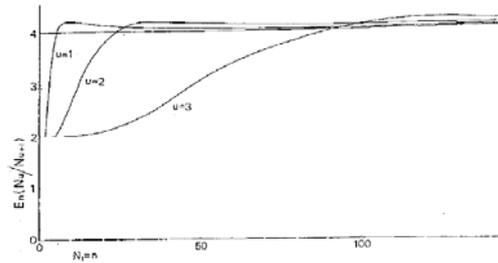


Fig. 4 Variation of expected value of bifurcation ratio for  $N_1 = n$ , numbers of first order stream (石原ら)

れにより分岐比の期待値が4になるという結論を得たことから, 統計則としてこれを1/4則と名づけた。

石原らは統計則導出に際して, 河道の合流がトポロジカルにランダムに生じるという概念を用いた。石原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, Fig. 3に示されるように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。このような過程で形成される河道配列それぞれの分岐比を調べることによって, 分岐比の期待値を導出することができる。位数1の河道数  $N_1$  と分岐比の期待値の関係を表したものがFig. 4である。これによって, 分岐比の期待値が4に近づくことがわかる。

## 2.3 模擬流域発生に関する既往研究

中北・松田は実際の流域地形特性を満たす流域を発生させる手法として, 流域地形形成過程に着目した模擬流域発生手法を開発した。中北・松田の研究で導入された地形発達の理論は, Hortonによる河道網形成理論に基づいている。

Hortonの河道および流域の浸食発達過程を, Fig. 5を参照しながら説明する。

まず流域発達の初期段階として流域一様な斜面を設定する。降水によって初期斜面上に表面流が発生し, その表面流は斜面勾配の方向に流下するとともに斜面を浸食するため, 初期斜面には勾配方向に幾筋もの平行な溝 (rill) が生じる (Fig. 3の平面cbb'c')。

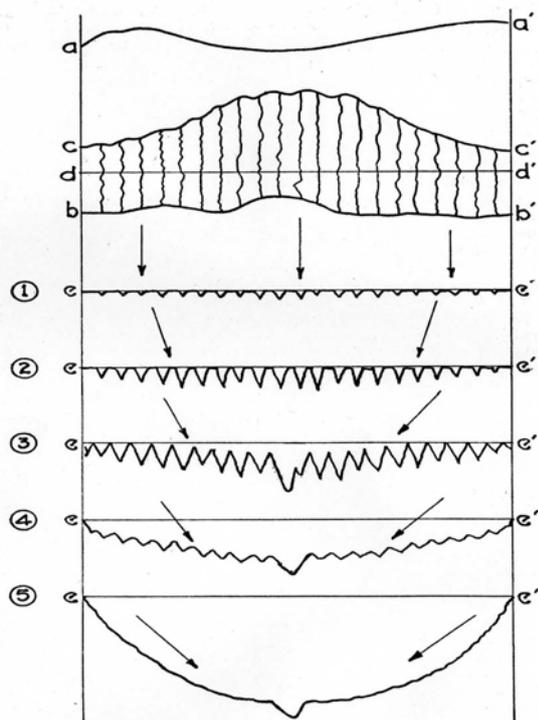


FIGURE 22.—Development of a valley by cross-grading

Fig. 5 Development of a valley by cross-grading (Horton)

このrillは、長いものほど浸食強度が大きいため広く深いrillとなる(③)。斜面上の最長のrillは周囲のrillより浸食が卓越するため、やがて周囲のrillから水流が越流して流入し、斜面全体の流れは最長のrillへ集中し、最長のrillはさらに浸食される(④)。こうして、最長のrillを中心として両側に斜面ができ、V字谷ができあがる(⑤)。

こうして一様な斜面は1つの河道(谷)とその両側の2つの斜面に変化する。次にこの2つの斜面上で、上記のような過程が繰り返され、新たな谷が形成される。その結果河道は分岐を持つようになり、このプロセスが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。

以上の河道網形成過程を踏まえて、中北・松田は模擬流域発生手法として、

- 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(河道の浸食, 斜面の浸食)。
- 発生させる新河道の位置をHortonの河道網発達過程に基づいて決定する。
- [1]新河道を決められた鉛直浸食速度と谷頭浸食速度に従って浸食する。
  - [2]同時に河道横斜面の浸食も行う。
  - [3]谷頭浸食が新河道の上流端に達した時点で, [1]のように次の河道を決定する。

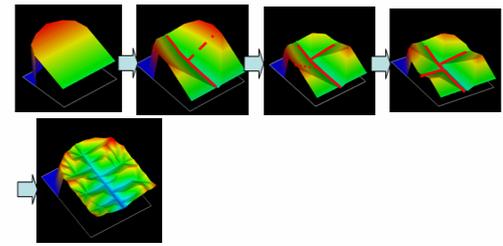


Fig. 6 Method of generating virtual drainage basin (中北・松田)

- 上記の[1]から[3]を繰り返す。
- ③設定した条件(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ところで, 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)。

という手順での模擬流域発生手法を開発した。ここでのHortonの河道網発達過程とは、流域上での落水線の中で、最長の落水線の90%以上の長さを持つ落水線の中からランダムに選択し、新河道として浸食することを言う。この手法をFig. 6にまとめる。

この手法によると、河道は1本ずつ浸食されていくことになる。これは必ずしも実際の河道発達過程を表現しているわけではないが、石原らの統計則導出過程に基づいてHorton則を満たす河道網を発生させるためである。ただし、実際の河道網の形成過程を考慮すれば、河道は複数の河道が同時に広がっていくことが通常考えられるため、実際の時間発展の概念の考慮はできない。

中北・杉谷は、中北・松田の手法に流域の斜面、河道の標高分布の発達過程の数理モデルを導入し、時間の概念を考慮できる模擬流域発生手法を開発した。ここでの斜面・河道の発達過程の数理モデルとは、平野(1972)、野上(1981)によって提案された移流拡散型の偏微分方程式である。Fig. 7に両側を河道点に挟まれた山体の発達過程を示す。この斜面発達過程では、両側の河道の浸食力と山体斜面上での外的営力による移流拡散型方程式で表現される浸食作用と、内的営力による山体の様な隆起の作用が働いており、時間が経過すると山体は内的営力と外的営力が釣り合う動的平衡状態となる。Fig. 8に河道縦断形の発達過程を示す。河道においては河道最下端を標高ゼロとし、最上流端を勾配一定と考えることによって境界条件を定めると、指数関数型の曲線に収束することがわかる。これは実際の河川縦断形に見られる特性と合致する。

以上のような河道網発達過程、斜面発達過程、河道縦断形発達過程を組み合わせた模擬流域発生手法

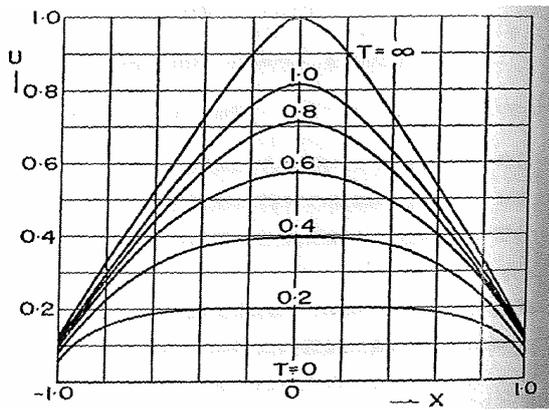


Fig. 7 Development of slope (平野)

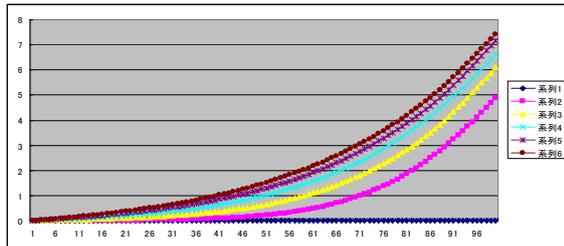


Fig. 8 Development of river longitudinal profile (野上)

を示す。まず、標高ゼロの水平面領域を初期状態として仮定する。流域の下流端を標高ゼロの一定値、その他の流域境界を法線方向の勾配ゼロとして境界条件を与える。流域の中心部を走る落水線を河道とし、流域内の河道部は、河道縦断形発達過程の偏微分方程式によって計算する。その河道と流域界を境界条件として、その他の斜面領域を斜面発達過程の偏微分方程式を適用して計算する。河道と斜面の1タイムステップごとの計算を繰り返すと、やがて平衡状態に到達する。この時点で、Hortonの河道網形成理論より、2本目の河道を決定する。すなわち、平衡状態の流域における最長落水線の90%以上の長さを持つ落水線からランダムに1本抽出し、次の河道位置とするのである。新河道の位置が決定した後、再び初期状態と同じ水平面地形に標高データをリセットし、新たに河道・斜面の発達を進め、平衡地形を得るまで計算を繰り返す。このような過程を繰り返して流域の河道数を増加させて、任意の河道数を有する流域を発生させるのである。中北・杉谷の模擬流域発生手法をまとめたものがFig. 9である。

## 2.4 地形発達モデル

地形発達過程に関する研究では、1990年代から地形発達シミュレーションモデルの開発が盛んに行われてきた。本節ではまず地形発達過程について説明

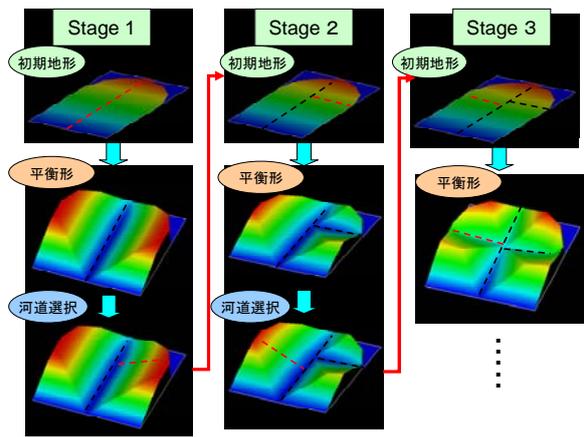


Fig. 9 Method of generating virtual drainage basin (中北・杉谷)

し、地形発達モデルとそれを利用した研究について述べる。

### (1) 地形発達過程

地形の形成に及ぼす過程は、以下に示すとおり様々な過程がある。また、時間スケール。空間スケールによって地形に影響を与える発達過程も異なる。

地形の形成に及ぼす過程は、内的営力と外的営力に分けられる。内的営力は、地殻、マントルなどの地球内部の活動によって表面地形が隆起や沈降を起こすことによる地形発達である。この内的営力による作用は、隆起による山脈の形成、沈降による盆地や湖の形成などの大規模な地形パターンを形成する。また、日本の地形においては断層による地形パターンも特徴的な地形を形成する。外的営力は降水や流水の作用、風化、ソイルクリープ、斜面崩壊による作用などが挙げられる。風化とは、土壤中や地表に露出した基岩などが化学変性作用を受けて浸食や崩壊の起こりやすい地質となることを意味している。ソイルクリープとは土壌が自重によってゆっくりと時間をかけて斜面を下る過程であり、丘陵地の地形発達過程などのスケールでは無視できない過程である。水流浸食は主に表流水の存在する場所で作用する過程であり、河川地形を構成する主要な過程といえる。斜面崩壊は、隆起の激しい場所で起こりやすい。また、山地の河川流域スケールでの地形発達過程では、斜面に働く外的営力としては斜面崩壊の効果が支配的である。

地形発達過程では、気象現象などと同様にスケールによって支配因子が異なる。例えば0次谷や1次谷のスケールでは土地利用、植生、地質の影響が大きくなる。このため拡散型のソイルクリープや風化の過程の影響は大きい。また、数100kmの大規模な空間スケールでの地形分布特性は、隆起・沈降、プレ

ートテクニクスによる内的営力の効果に支配される。そして、本研究で扱うような複数の流域スケールにおいては、隆起の作用と水流浸食力のバランスが地形分布特性に大きな影響を与える。

### (1) 地形発達モデル

流域スケールでの地形発達を表現するためのモデルは19世紀の研究以来様々なものが提唱されてきた。さらに近年の計算機資源の発展によって、流域スケールでの地形形成を表現するシミュレーションモデルが開発されるようになった。Willgoose. et. al.

(1991)は、河道網の形成過程を活性・抑制物質による化学反応現象とのアナロジーと考えることで、河道網の発達を表現した。しかし、物理過程が異なるため、アナロジーを仮定することの妥当性は不十分である。

Howard (1994)は地形変化が浸食によってのみ起こるモデルを提案した。このモデルによって実流域に見られるものに近い複雑な河道網構造をシミュレーションによって発生させることが可能となった。Howardの地形発達モデルは以後の地形発達シミュレーションモデルの基礎となるものである。

Tucker. et. al. (1997)は、浸食のみでなく、内的営力や気候パラメータ、流水の水理機構に関するスキームを組み合わせることによってできるシミュレーションモデルGOLEM (Geomorphologic/Orogenic Landscape Evolution Model)を開発した。GOLEMはHowardの地形発達モデルをより発展させ自由度を高めたものと見ることができ。発達地形学分野では、GOLEMをベースとした研究が多く行われている。

### (3) 地形発達モデルGOLEM

地形発達モデルGOLEMについて説明する。

GOLEMにおいて地形発達シミュレーションを行うためには、計算開始時の初期地形標高データファイル、地層構造や地層ごとの浸食強度、層厚などを記録した地層データファイル、計算時間やグリッド間隔、浸食速度式や風化、ソイルクリープの考慮やパラメータについて記述された計算条件設定ファイルを用意しなければならない。地層構造に関しては、基盤と土壌を区別して用いることができる。

GOLEMで考慮可能な地形発達過程に作用する営力には、以下のようなものがある。内的営力には、領域一様な隆起速度を考慮することができる。また、計算開始から一定の時間までで隆起作用を止めることもできる。また、正断層、逆断層上の隆起特性を考慮したスキームも存在する。外的営力としては、風化、ソイルクリープ、斜面崩壊、そして水流浸食を考慮することが可能である。風化は、基岩層表面が時間とともに土壌層に変換される過程として表現される。また、ソイルクリープ

は土壌層上での拡散方程式として表される。すなわち、標高を $z$ 、時間を $t$ と表すと、

$$\frac{\partial z}{\partial t} = D\nabla^2 z \quad (5)$$

となる。ここで、 $D$ は拡散係数とする。また、斜面崩壊過程は閾値以上の勾配を持つ斜面を、閾値以内の勾配に修正することで表現される。

### (3) 地形発達モデルを用いた河道群形成機構の分析

地形発達モデルを用いた研究の中で、河道群の平面的な分布特性について論じたものに、Perron. et. al. (2008)の研究がある。Perron. et. al.は、谷が等間隔に配置している丘陵地の地形に着目し、谷の間隔が自律的に形成される様子を地形発達モデルを用いてシミュレーションした。Perron. et. al.が用いたモデルはGOLEMをベースにしたものである。ただし、表現する地形は拡散過程としてソイルクリープが卓越し、隆起速度も領域一様に作用し、また2つの大きな河川に挟まれる丘陵地を想定している。したがって、地形発達過程は、以下の単一の式に簡略化できる。

$$\frac{\partial z}{\partial t} = D\nabla^2 z - K(A^m |\nabla z|^n - \theta_c) + E \quad (6)$$

ここで、 $z$ は標高、 $t$ は時間、 $D$ はソイルクリープによる拡散係数、 $K$ は浸食係数、 $A$ は集水面積、 $\theta_c$ は限界浸食強度、 $E$ は隆起速度である、 $m$ 、 $n$ は係数である。

なお、Perronらの研究では、式(6)のパラメータの係数と計算領域スケールとの関係を調べるため、それらの比によって表されるPeclet数を用いて、等間隔に形成される谷の間隔について分析している。Peclet数は、

$$Pe = \frac{Kl^{2(m+1)-n}}{D\zeta^{1-n}} \quad (7)$$

で表される。ここで、 $l$ は領域の東西方向の距離、 $\zeta$ は平衡状態に達した時の尾根の標高である。

このPeclet数を変えながら地形発達シミュレーションを行うと、Peclet数が約300以下の場合には谷が形成されず、300から約1000の時は谷間隔がPeclet数の増加に伴って減少する結果が得られた。また、Peclet数がおよそ1000以上になると等間隔に形成された谷に分岐が生じ、その分岐を含めた河道網は再び間隔を広げることがわかった。Fig. 10は、Peclet数の違いに応じた河道群の生成パターンを示している。①は $Pe=450$ 、②は $Pe=700$ 、③は $Pe=1800$ 、④は $Pe=3900$ を示している。

以上の研究成果は、河道の平面的な分布特性を解明するための手がかりとなりうるものであり、本研究の目的に通ずるものである。

### (3) 地形発達モデルと模擬流域発生モデルの比較

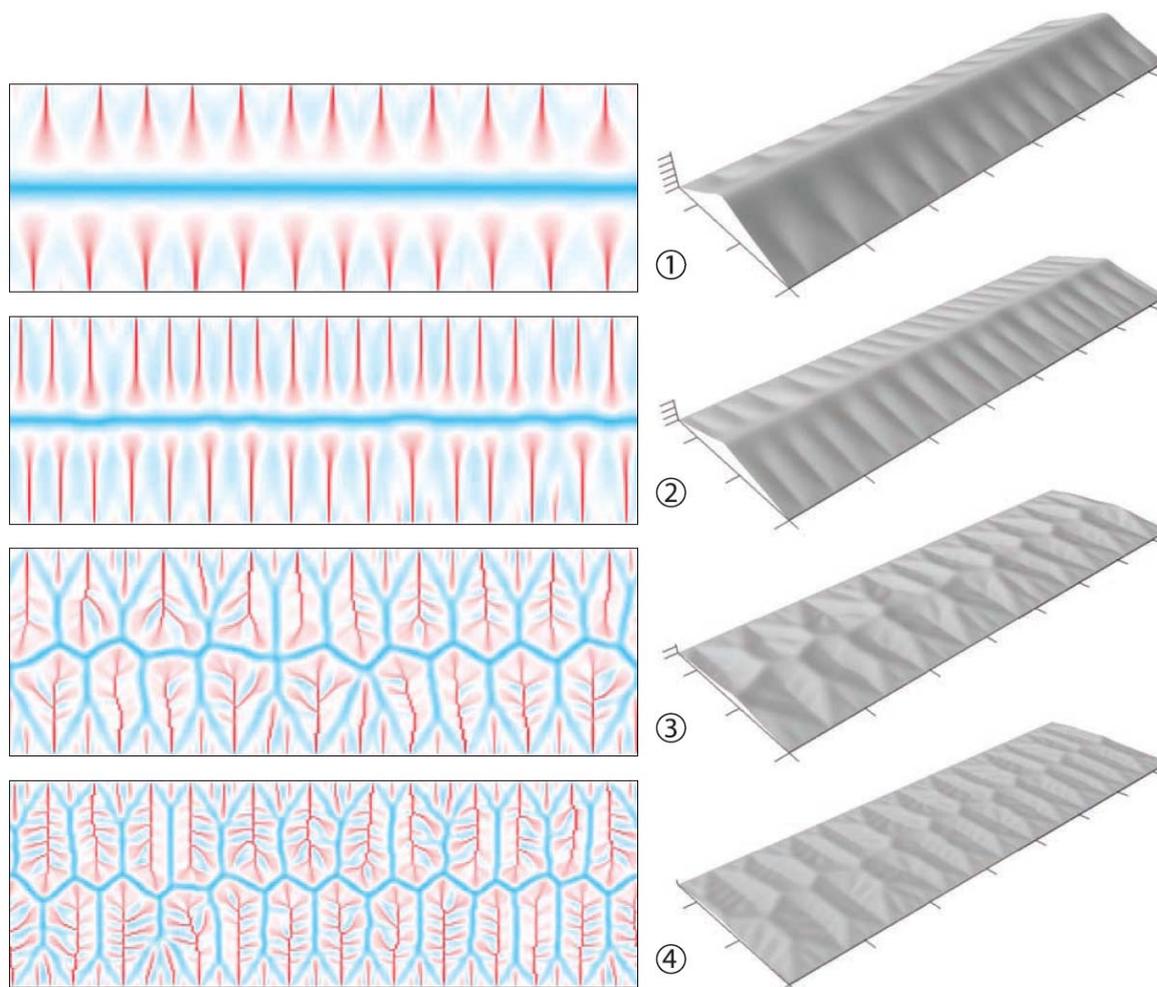


Fig. 10 Four solutions of the simulation using different initial parameters (Perron. et. al.)

中北・杉谷が開発した模擬流域発生モデルと地形発達モデルGOLEMの計算手法とでは、計算過程での時間の考慮の仕方の点から、大きく異なる。しかし、両モデルの相違点を集約すれば、河道網構造の平面的分布の決定方法に集約される。中北・杉谷の手法ではHortonの河道網形成理論を考慮して河道が陽に決定される。一方地形発達モデルGOLEMでは、斜面と河道の区別を陽に扱うことなく地形発達を計算することが可能である。GOLEMの手法では集水面積の大きなグリッドが水流浸食によって地面が削り取られ、より大きな集水域を獲得するという、正のフィードバック機構が働く。これによって谷となる点と斜面となる点の集水面積が明瞭に分かれるため、集水面積の閾値を設けてその閾値以上の集水域を持つグリッドを河道点と決定すれば、河道網構造を把握することができる。

また、中北・杉谷の開発した模擬流域発生モデルは、単一の流域を形成するためのモデルであり、流

域形状はあらかじめ決定されるものであった。しかし、実際の流域において流域形状は隣接した流域との流域界の争奪によって自律的に形成されるものである。GOLEMによるシミュレーションでは、複数の流域地形が形成される条件で計算を行えばそのような自律的な流域界の形成が可能である。

### 3. 模擬発生地形の流域地形特性

#### 3.1 地形発達シミュレーション

本章では、地形発達モデルGOLEMを用いて流域地形を模擬発生させる。

本章では初期条件として、標高をゼロとした水平面地形からシミュレーションを開始し、隆起作用と水流浸食の作用によって流域地形が発達する過程を表現する。ただし、流域河道網形状が形成されるには、初期平面地形に微小な凹凸をつける。

##### (1) 初期条件と境界条件

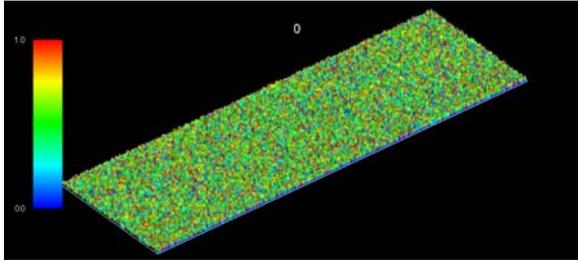


Fig. 11 Sample of initial state of landscape

本章では計算領域として東西10[km], 南北30[km]の長方形領域を考える, グリッド間隔は100[m]である。

本研究では初期条件として, 標高をゼロとした水平面地形からシミュレーションを開始し, 隆起作用と水流浸食の作用によって流域地形が発達する過程を表現する。ただし, 流域河道網形状が形成されるには, 初期平面地形に微小な凹凸をつける。この初期地形につける凹凸は, 標高0[m]から標高1[m]までの, 空間無相関のランダム値を各グリッドに与えるものとする。Fig. 11に初期地形の例を示す。

境界条件として, 東西辺(30[km]にわたる境界)を常に標高ゼロとする。これは東西辺に海や大きな河川が存在し, 流域から供給された土砂を全て流してしまう力が働くことを想定している。また, 南北辺は周期境界条件とし, 南縁の地形と北縁の地形が接続されていることを仮定する。このような境界条件を想定することで, 領域上で複数の流域形状が自律形成されていく様子を表現する。

## (2) 内的営力

地殻変動に伴う内的営力は, 領域に一律の隆起作用が常に働くことを想定する。隆起速度は, 日本の山地地形において一般的な0.3[mm/year]とした。この隆起速度を流域一様に作用させることを想定する。

## (3) 外的営力

外的営力には風化, ソイルクリープ, 水流による浸食・運搬・堆積過程がある。本研究では領域を10[km]×30[km]として, 複数の流域地形が発生するシミュレーションを行う。このスケールでのシミュレーションにおいては, 水流浸食の作用および斜面崩壊の作用が卓越すると考えられるため, 本章ではその2つの作用を外的営力として考慮する。

水流浸食は, モデル上では流量及び斜面勾配の関数として算出される。流域に一律な降雨強度が分布していると仮定した場合, 領域上のある点での流量はその点の集水面積と降雨強度の積で表される。ある点における集水面積を $A[m^2]$ , 降雨強度を $P[m/year]$ とすると, 流量 $Q[m^3/year]$ は

$$Q = PA \quad (8)$$

と表される。この流量 $Q$ と, その点における勾配 $S$ を用いて, 底面せん断応力 $\tau$ が求められる。

底面せん断応力は,

$$\tau = kQ^{\frac{1}{3}}S^{\frac{2}{3}} \quad (9)$$

ただし,  $k$ は浸食係数であり, 地表面地質, 植生などによるパラメータである。

以上によって底面せん断応力が求められる。浸食速度は, せん断応力 $\tau$ に比例する形で求められる。ただし, ある閾値以上にならないと浸食が生じないと想定することも可能である。これはHortonの河道網形成理論におけるBelt of no erosionの概念と同様に見ることができる。

$$\frac{\partial z}{\partial t} = -k_t(\tau - \tau_c) \quad (10)$$

ただし,  $k_t$ は定数係数である。 $\tau_c$ は浸食の閾値であり, この値を越えるせん断応力が働かないと浸食されない。

また, 斜面崩壊の作用として, ある時刻において勾配が $45^\circ$ 以上となる斜面は,  $45^\circ$ となるように上流グリッドの標高を修正することとする。

## (4) 流域地形発生例

上記のような条件で流域地形を模擬発生させた。計算タイムステップ間隔は500[year]とした。Fig. 12に地形発達過程の一例を示す。なお, 各図の上の数字はシミュレーション上での経過時間を示している。

## 3.2 模擬流域における流域地形量

本節では地形発達モデルによって発生した流域地形について流域地形量を抽出する。本研究で算定する流域地形量は, 河道位数の分岐比と河道長比, Hypsometric曲線である。河道網構造を特定するために, 集水面積の閾値を決定し, 閾値以上の集水面積を持つグリッドを河道点とした。

### (1) 河道網構造の解析手法

河道網構造を算定するために, 河道の上流探索による河道位数の算定スキームを開発した。

まず領域の東西辺を探索し, 流域の下流端となる河道点を探索する。河道点が見つかった場合, その近傍に河道点があるか探索していく。上流探索をしていくときに, 各点が河道の分岐点である場合にはその点を記憶しておく。このように上流を探索して, 河道上流端に到達する。河道上流端に到達した後その河道区分に番号をつけ, 位数1をつける。そして上流探索した経路を逆に探索しながらその河道区分の長さを求める。分岐点に到達した場合, もう一方の河道への上流探索を開始する。その分岐点の上流河

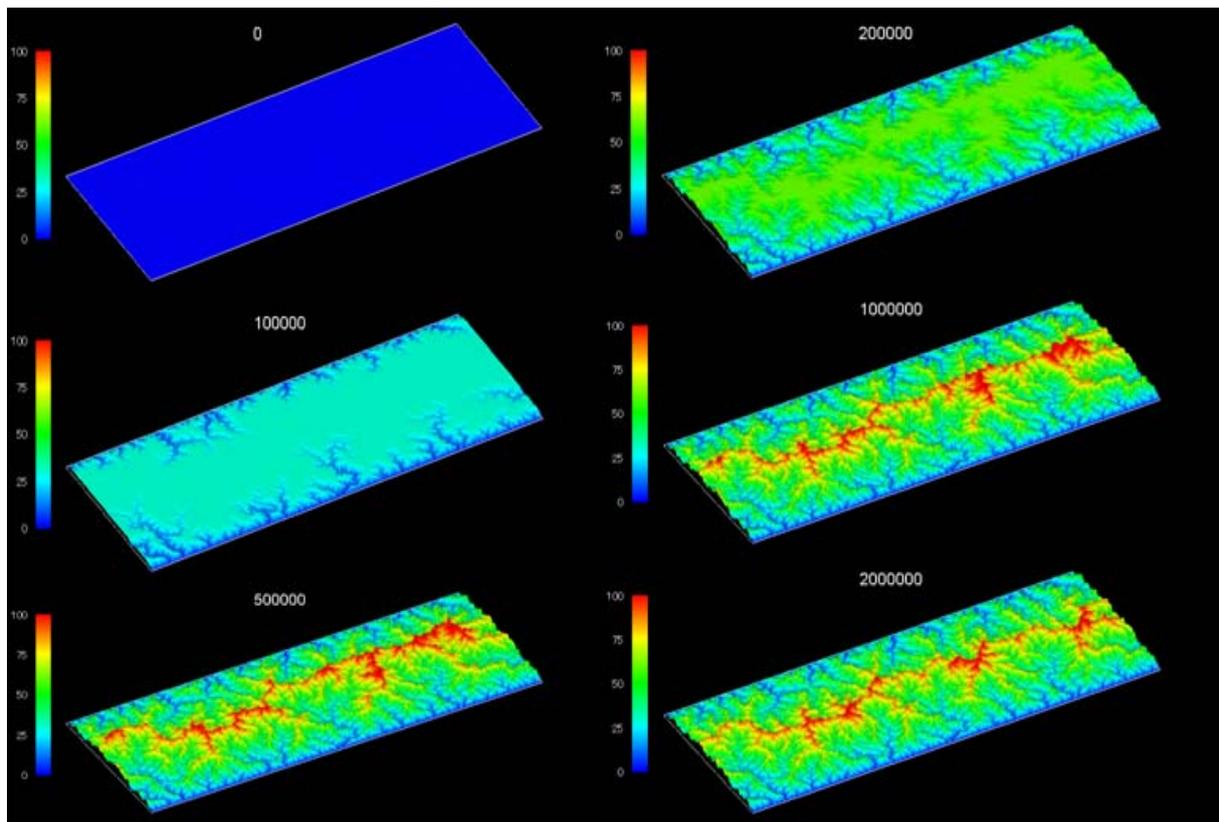


Fig. 12 Sample of result of simulation of landscape evolution

道全ての探索が終了した際に、直下流の河道区分番号をつける。分岐点の直上流河道区分の位数を比較して、2河道の位数が等しい場合には分岐点直下流の河道区分の位数を1加算する。また、直上流河道区分の位数が異なる場合、直下流河道区分の位数は直上流河道区分の最大位数を継承する。

このようにして下流方向への探索によって領域東西辺に位置する流域最下流端に到達するまで河道の探索を行い、流域河道網の河道区分ごとの河道位数、河道区分長のデータを求める。また、Strahler型の河道の定義ごとのデータにするため、隣接する河道区分で位数が同一であるものを結合する。この結果、Strahler型の河道ごとの位数、河道長のデータが揃う。このデータから河道位数ごとに河道数、平均河道長を求めることで、分岐比、河道長比を求めることができる。

## (2) Hypsometric曲線の算定手法

Hypsometric曲線を算定するには、1つの流域内の各グリッドの標高値を降順に並べ、その標高値群を流域最大標高で除する。このことで、流域の標高値が正規化される。

## (3) 分岐比と河道長比の算定結果

模擬発生させた流域河道網の分岐比および河道長比を算定した。ここで地形発達モデルで発生させた

のは、3.1節のシナリオにおいて、初期地形のランダム値の異なる5つのケースである。この5つの各ケースの平衡状態到達時の地形をFig. 13に示す。

これらの地形における分岐比の頻度分布はFig. 14のようになった。ただし、石原らの研究より、位数1の河道数が小さい流域においては分岐比が統計的期待値に収束しないため、位数1の河道が10以上である流域のみを抽出した。また、Fig. 14に示した分岐比は、位数 $u$ の河道数を $N_u$ とすると、 $N_u/N_{u+1}$ を $u=1$ から最大位数まで算定し、それぞれの位数に関する分岐比を同等の重みで平均したものである。

また、位数1と位数2の河道に関する分岐比をFig. 15に示す。

すべての位数に関する分岐比の結果は、おおむね4に収束する結果が得られた。また、位数1と位数2の河道の分岐比に関しては、石原らの統計的期待値としては4に収束するが、本研究の地形発達シミュレーションでは5に収束するという特徴が見られた。実際にシミュレーションによって発生した地形においては、上流部において位数1の河道が比較的多く形成されているために、分岐比が大きくなったものと考えられる。この上流部での位数1の河道の増加は、流域界争奪によって奪取した地形において顕著にみられる。これは地形発達モデルの特性とも考えられる。

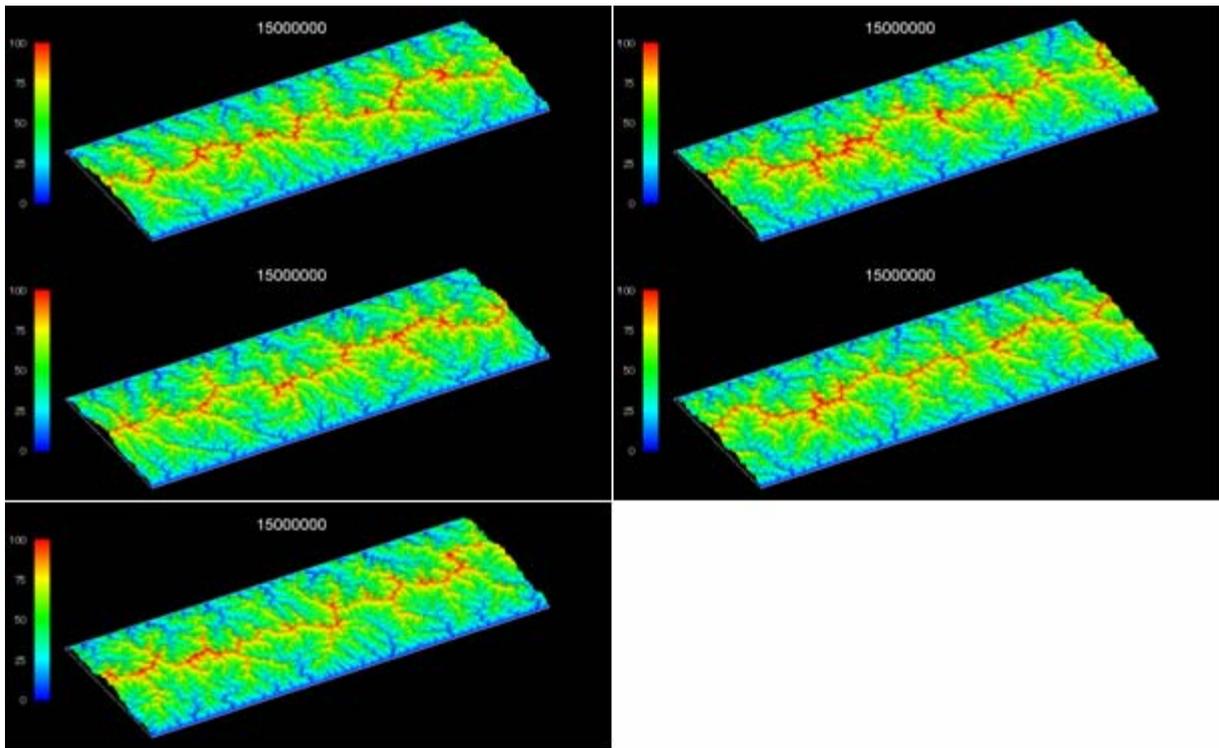


Fig. 13 Five samples of equilibrium state of landscape

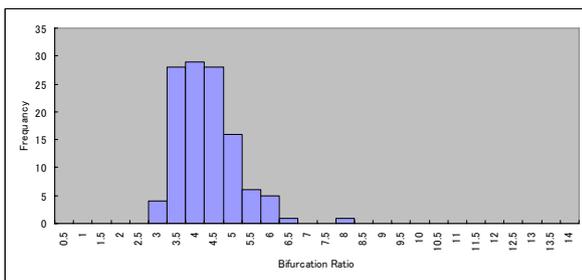


Fig. 14 Bifurcation ratio

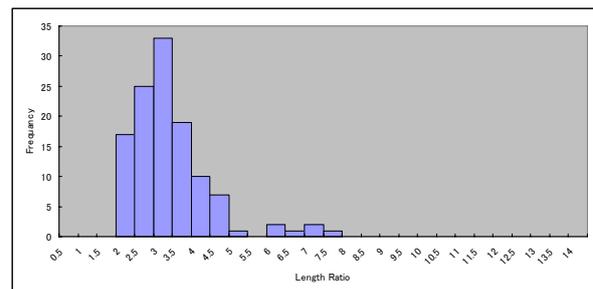


Fig. 16 Length ratio

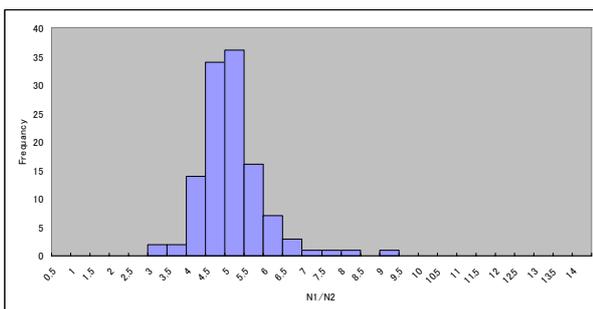


Fig. 15 Bifurcation ratio ( $N_1/N_2$ )

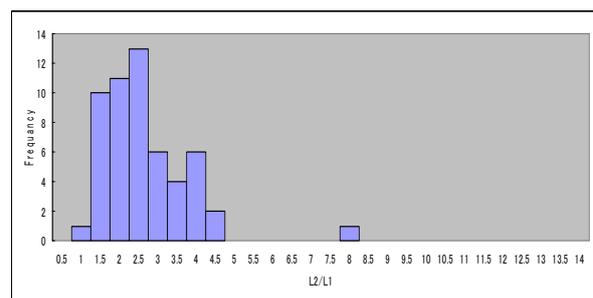


Fig. 17 Length ratio ( $L_1/L_2$ )

分岐比と同様に、流域の河道長比および位数1と位数2の河道についての河道長比を算定した。Fig. 16は河道長比の頻度分布、Fig. 17は位数1と位数2の河道の河道長比である。結果は、位数1と位数2の河道についての河道長比に関しては2に収束する特性が見

られたが、全ての位数における平均値はほぼ3に収束する結果となった。

#### (4) Hypsometric曲線の算定結果

本節で発生させた模擬流域について、全ての流域におけるHypsometric曲線を算定した。Fig. 18に発生

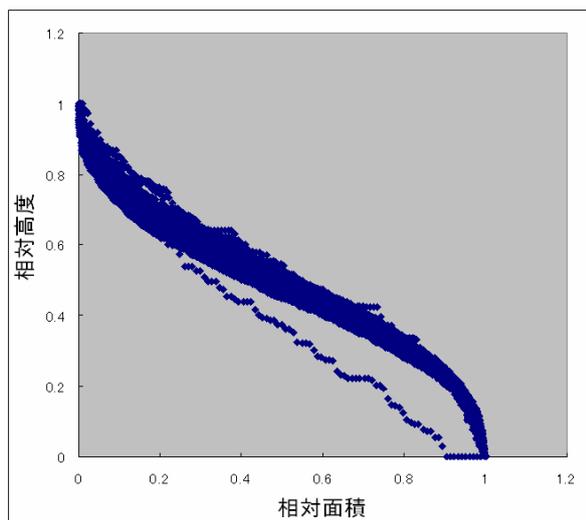


Fig. 18 Hypsometric curve of generated basins

した模擬流域における各流域のHypsometric曲線を重ね合わせたものを示す。ただし、流域面積が1[km<sup>2</sup>]以下である流域については除外した。

結果Hypsometric曲線は積分値として0.5程度の形状にはほぼ収束し、外的営力と内的営力の釣り合う動的平衡状態における流域地形の特性として見られる、壮年期地形の特性と一致する結果を示すことがわかった。つまり流域の高度分布について、地形発達モデルでの実流域特性の再現性は高いことが示された。

### 3.3 地形発達シミュレーションにおける落水

#### 線の発達

地形発達モデルを用いることで、中北・杉谷の模擬流域発生モデルでは表現できない河道網構造の時間的な発達過程の問題も扱うことが可能となった。本節では、地形発達シミュレーションにおける落水線の発達過程について考察する。

3.1節のシミュレーション結果から、領域内に複数の流域地形を自律形成させることができた。流域の形成過程を観察すると、初期地形のランダムな標高値が、形成される流域地形に大きな影響を与えることがわかる。初期条件の地形を変えた複数のシミュレーションでは異なる流域地形が発生し、反対にすべて条件でのシミュレーションではランダム性の考慮が無いいため同じ流域地形が形成されるためである。

領域の落水線構造は、地形発達の初期段階においてほぼ決定される箇所もあるが、その後平衡状態に至るまでに長い時間をかけて落水線構造が変わる箇所もある。そのような箇所では、流域界近傍における浸食力に差が生じることによる流域界の争奪が起こっている。

このような流域界争奪は、主に流域面積が他の流域に比べて大きい流域が、より小さな流域によって争奪されるように見える。Fig. 19は、地形発達シミュレーションの中での流域下流端からの流下距離を色で示したものである。赤い地点は下流端までの流下距離が長く、青い地点は短い。Fig. 19から明らかに、流路が著しく長い領域が、流路が短い周囲の流域によって争奪されることがわかる。これは、ある

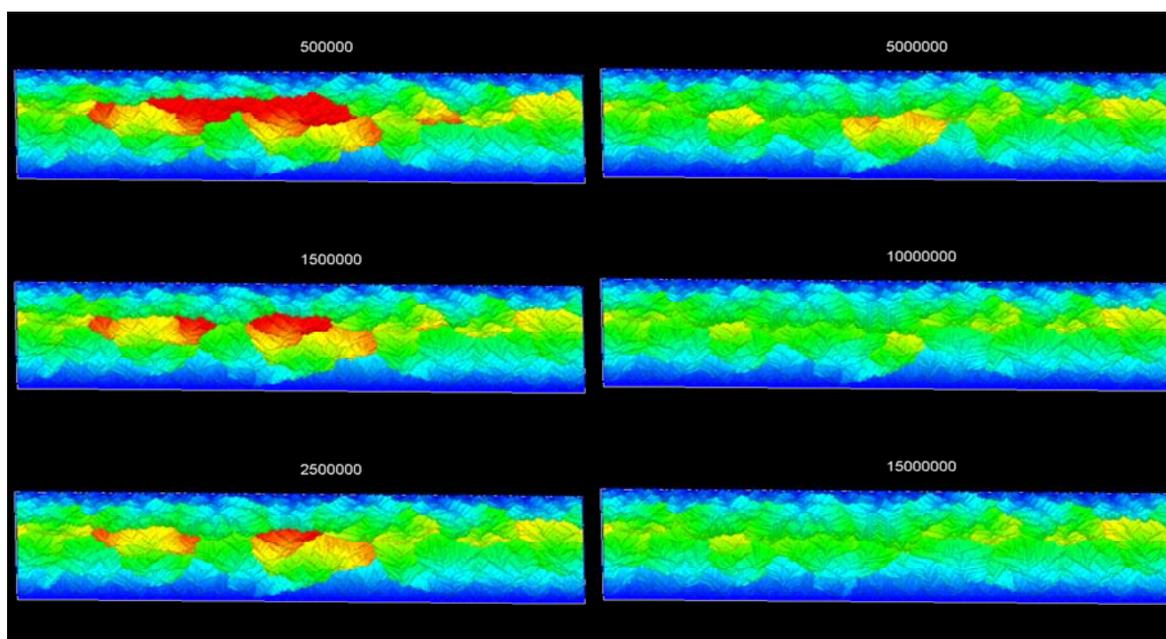


Fig. 19 Distance of the flow-path to drainage basin outlet

分水嶺において長い流路を持つ方向は勾配が小さく、短い流路を持つ方向は勾配が大きいため、短い流路の方向の浸食力が大きくなるためだと考えられる。

また、本章のシミュレーションにおいては、計算開始から約50万年までの発達初期においては、流域の面積スケールのばらつきが大きく、領域のほとんどを占める流域も存在するが、やがて流下距離が短い周囲の流域による流域界争奪が生じ、それぞれの流域は面積を収束させていく。すなわち、初期地形に起因する落水線形成過程と、流域界争奪によって領域固有の面積へと流域を収束させる外的営力による効果が、平衡地形を決定する要因である。ここでの領域固有の面積は、計算領域に設けた境界条件に左右される。本章のシミュレーションでは東西辺の標高をゼロとする境界条件であるため、東西の幅によって流域の固有の面積が決定される。

石原らの研究による河道数則の統計的期待値の導出過程において用いたトポロジカルにランダムな河道形成過程は、河道網は風化や雨水による外的営力の作用によって成り立ち、内的営力による作用は小さいという前提のもとに成り立っている。本研究のシミュレーションによると、領域上の落水線構造は、初期地形の段階である程度決定されており、平衡状態に到達するまでほとんど変化の無い領域も見られる。すなわち、これは外的営力が作用する以前の微地形や内的営力の作用による構造地形が、河道の平面的分布に与える効果が大きいということである。

#### 4. 流域地形発達と降水分布の関係

3章において行った流域模擬発生において、河道網の発達過程に影響を大きく及ぼすのは、初期地形の凹凸であった。領域一様な降水を想定すると、同じ初期条件においては形成される地形は1通りである。GOLEMなどの地形発達モデルを用いたシミュレーションによる研究では、地形発達過程は水文過程と比較して非常に長い時間スケールとなるため、地形発達に作用する降水は領域一様とされているものしか見られない。しかし、降水は地形の影響を受け、長期間の積算降水量であっても空間一様と考えることはできない。

本章では地形の形成過程において同じ初期条件でも異なる地形が形成される可能性を考え、地形発達過程に作用する降水の空間分布を変化させてシミュレーションを行う。

##### 4.1 標高依存降水分布を考慮したシミュレーション

本章では、降水が標高の線形関数として与えられるシナリオを想定し、一様な降水を与えたシナリオとの比較を行う。

降水分布特性は、標高ゼロのグリッドでは2000[mm/year]とし、標高500[m]では4000[mm/year]となるように設定する。すなわち、標高 $z$ に依存する年間降水量 $P(z)$ は、

$$P(z) = 4z + 2000 \quad (11)$$

で与えられる。

GOLEMでは、空間的に一様な降水量を想定して各グリッドでの流量が計算されるようになっているが、降水分布を考慮可能とするために流量計算スキームの改良を行った。GOLEMでは、各グリッドにおける集水面積を、上流の落水線を探索することによって計算し、集水面積に一様な降水量を乗じて流量としている。本章では、落水線を探索する際に各グリッドの集水面積とそのグリッドの降水量を乗じた値を加算していく手法によって、各グリッドの流量を計算した。

計算領域は10[km]×30[km]で、グリッド間隔は100[m]とした。その他のパラメータは3章のシミュレーションのものと同じとした。

また、比較として領域一様に2000[mm/year]の降水量が与えられる場合と、計算タイムステップごとに平均標高を計算し、その平均標高を式(11)に代入して得られた降水量を領域一様に与えるシナリオを比較対象として用いた。領域一様に2000[mm/year]の降水量が与えられる場合をシナリオ1、降水強度の空間分布を考慮した場合をシナリオ2、平均標高を式(11)に代入して得られた降水量を領域一様に与えるシナリオをシナリオ3とした。

##### 4.2 シミュレーション結果

Fig. 20はシナリオ1によって発生した平衡状態の地形であり、Fig. 21はシナリオ2によって発生した平衡状態の地形である。両者を比較すると、特に図の右部において標高分布が異なることがわかる。また、Fig. 22はシナリオ1の標高地形上に、シナリオ1の標高からシナリオ2の標高を差し引いた値を色で表現したものである。河道網構造については、Fig. 23、Fig. 24に示すように、シナリオ1の平衡地形とシナリオ2の平衡地形とでは平面形状の違いが見られた。

またFig. 25はシナリオ1とシナリオ3の平衡形比較である。結果、シナリオ1とシナリオ3の河道網構造もわずかに異なっていることがわかった。これは降水の時間的な変動による作用である。

##### 4.3 地形発達に作用する過程の考慮の重要性

4.2節におけるシミュレーションの結果から、降水

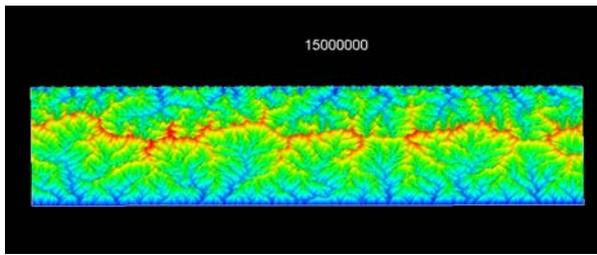


Fig. 20 Equilibrium state of the landscape which is given uniform precipitation field (2000[mm/year])

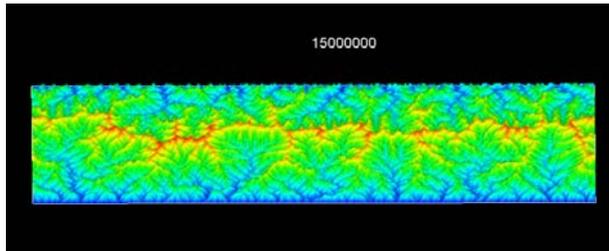


Fig. 21 Equilibrium state of the landscape which is given orographic precipitation

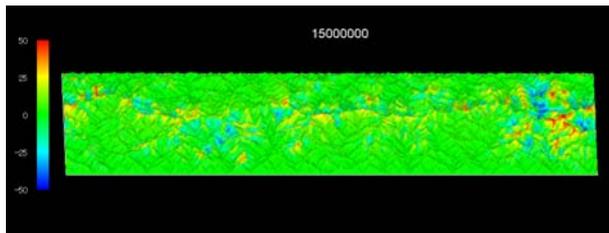


Fig. 22 Difference of elevation of Fig. 19 to Fig.20

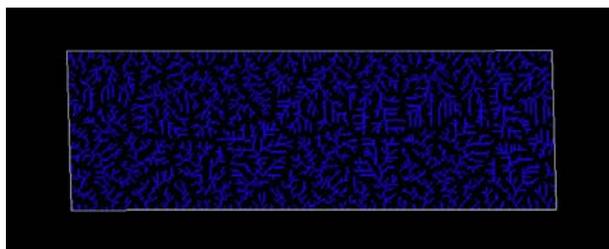


Fig. 23 Equilibrium state of channel network of Scenario 1

の空間的な分布が河道網特性に影響を与えることがわかった。これは、地形発達 of 長期的なシミュレーションにおいて降水の空間分布を一様と考えることが、必ずしも妥当ではないことを示している。実際に、長期間の積算降水量は一般に標高に依存することが知られている。

地形発達においては降水以外にも様々な要素が空間的に分布しており、それらの分布特性が複雑に関連していることが予想される。このため、地形発達過程に働くランダム性として、初期条件や構造的な

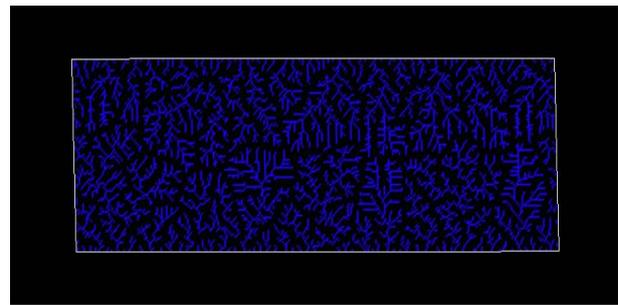


Fig. 24 Equilibrium state of channel network of Scenario 2

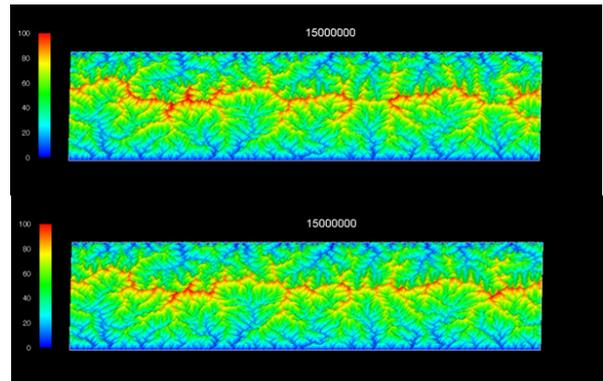


Fig. 25 Comparison of Scenario 1 and Scenario 3

微地形によるランダム性のみではなく、降水をはじめとした、発達過程において作用する営力の空間的なランダム性も無視できない効果となる可能性が考えられる。前節の結果はその可能性を示す重要な結果である。

## 5. 結論

本研究では流域スケールでの水文過程において、降水－流域地形－流出の相互関係を統一的に解明するために、地形発達モデルを導入した手法によって河川流域地形の定量的な評価について検討した。

第2章では、流域地形を定量的に表現するためのパラメータについて説明し、さらにそれらのパラメータについての諸研究について述べた。さらに、地形発達過程に関する研究を紹介した。

第3章では、地形発達モデルを用いた流域模擬発生手法を紹介し、発生した河道網の特性について述べた。地形発達モデルを用いた流域模擬発生においても河道網構造は実流域の特性を有しており、流域の高度分布も流域の平衡状態において実流域の特性が表現されていることがわかった。また、地形発達モデルにおける流域形状の自律形成機構について、流域界において下流端までの流下距離の差を緩和する方向に流域争奪が進行することがわかった。

第4章では、地形発達モデルを用いた流域模擬発生における降水分布の影響について述べた。その結果降水分布の空間的な分布を考慮することで河道網構造の一部が変化することがわかった。このことから、河道網の空間分布特性に地形形成営力の空間分布が影響することがわかった。

以上述べたように、本研究では流域上の水文過程の統一的な解明に向けて、流域地形特性の定量的指標の分析に関する実験的アプローチを試みた。次に、本研究の発展性について述べる。流域地形特性の定量的な理解のためには、河道網形状に関する特性と地形形成に働く営力との関係を追求することが重要である。このことから、本研究で取り上げていない地形形成営力について、地形形成過程におけるランダム性の効果も含めて深い分析をすることが今後の研究の発展の一つの方向である。また、発生された流域地形において、流出モデルや模擬降水発生モデルを用いることによる研究も、水文現象と流域地形特性の関係の理論的解明のために必要であり、本研究テーマの発展の大きな方向性である。

#### 参考文献

- 石原藤次郎・高埴琢馬・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.
- 中北英一・杉谷祐二 (2009) : 斜面・河道発達過程の数理モデルを導入した模擬流域発生手法の開発, 土木学会水工学論文集, 第53巻, CD-ROM, 6pp.
- 中北英一・松田周吾 (2007) : 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- , 京都大学防災研究所年報, 第50号, pp. 549-568.
- 平野昌繁 (1972) : 平衡形の理論, 地理学評論, 45-10, pp. 703-714.
- 野上道男 (1981) : 河川縦断面形の発達過程に関する数学モデルと多摩川の段丘形成シミュレーション, 地理学評論, 54-2, pp86-101.
- 前田妙子 (2005) : 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.
- Horton, R. E. (1945) : Erosional Development of Streams and their Drainage Basins; Hydrophysical Approach to Quantitative Morphology, Bulletin of the Geological Society of America, Vol.56, pp.275-370.
- Howard, A. D.(1994) : A detachment-limited model of drainage-basin evolution, Water Resources Research, 33, pp2261-2285.
- Kirchner, James, W. (1993) : Statistical inevitability of Horton's laws and the apparent randomness of stream channel networks, Geology, 21, pp591-594.
- Perron, J. T., Dietrich, W. E. & Kirchner, J. W. (2008) : Controls on spacing first-order valleys, Journal of Geophysical Research, Vol. 113, 21pp.
- Strahler, Arthur, N. (1952) : Hypsometric (Area-Altitude) Analysis of Erosional Topography, Bulletin of the Geological Society of America, Vol.63, pp.1117-1142.
- Tucker, G & Slingerland, R (1997) : Drainage basin responses to climate changes, Water Resources Research, 33, pp2031-2047.
- Willgoose, G, Bras, R. L. & Rodriguez-Iturbe, I (1991) : A coupled channel network growth and hillslope evolution model. 1. Theory, Water Resources Research, 27, pp1671-1684.

### A Study on the Relation between Landscape Evolution Process and Laws of Drainage Net Composition

Eiichi NAKAKITA and Yuji SUGITANI\*

\* Graduate school of Engineering, Kyoto University

#### Synopsis

The investigation of the integrated natures of hydrological system and geomorphic characteristic of drainage basin is a present problem to be solved. In this research, we focused on the characteristics of drainage basin. We generated virtual landscape using physical landscape evolution model and analyzed

drainage basin parameters such as Horton's ratios and hypsometric curve. The generated drainage networks almost correspond to Horton's law of bifurcation ratio if the number of streams is large enough. We also analyzed the difference of spatial distribution of precipitation, and we revealed that channel net composition can be decided not only by initial condition but also the distribution of parameters related to landscape evolution process.

**Keywords:** landscape evolution, channel network, laws of drainage net composition