

京都大学工学部 学生員 杉谷 祐二
 京都大学防災研究所 正会員 中北 英一
 関西電力株式会社 正会員 松田 周吾

1. 背景と目的

流域防災に関する研究において、流域流出特性の解明は重要である。本研究では、その流出特性を解明するための降雨・地形・流出の3要素の特性の統一的解明を大目的としている。その1つの手段としては、降雨モデル、流域地形モデル、流出モデルを用い、それらを連結させてシミュレーションをする手法が考えられ、本研究ではその中でも流域地形モデルに着目して、流域を模擬発生させる手法の構築を目的としている。本研究では分布型の降雨・流出モデルに連結し得る模擬流域発生モデルを開発するために、既往研究における模擬流域発生手法を再検討し、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を開発した。

2. 模擬流域発生手法に関する既往研究

模擬流域発生手法に関する既往研究として、中北・松田¹⁾の既往研究がある。中北・松田が考案した模擬流域発生手法では勾配を与えた初期の一樣斜面から河道になる部分を次々と削り込むことで流域を生成する。その際に、(1)Hortonの浸食による流域発達の考え方から掘り下げられた河道に注ぐ落水線のうち最長のものを新たな河道とする、(2)河道に接する斜面は安息角となるように削られる、(3)河道の縦断形は勾配一定または指数関数曲線とする、としている。図1は模擬流域の発達過程を示したものである。このようにして、河道網の発達に伴い模擬流域は削り込まれて浸食発達する。また、新河道となる落水線の選出には、最長落水線長に近い長さを持つ複数の落水線を新河道候補とし、その中からランダムに1本を選出するという手法をとっている。さらに中北・松田は初期設定パラメータについて検討した模擬流域発生実験を行い、Hortonの法則やStrahlerのhypsometric曲線といった模擬流域上の流域地形量について考察した。その成果として、分岐比、河道長比が実流域における値や統計則と整合したこと、hypsometric曲線が実流域の特性と

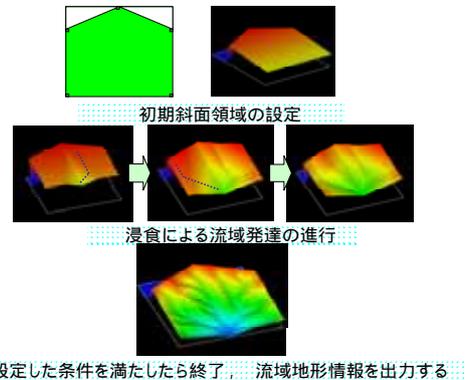


図1 中北・松田の模擬流域形成過程。

一致したことが挙げられた。

3. 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

本研究では、中北・松田の模擬流域発生手法における斜面・河道の形成手法を改良し、実際の斜面・河道発達過程の観察から得られた、偏微分方程式による数理モデルを導入した。斜面発達過程は、平野²⁾が提唱した定速隆起を考慮した数理モデル

$$\frac{\partial z}{\partial t} = a \left(\frac{\partial^2 z}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 z}{\partial y^2} \right) - b |\nabla z| + k \quad (1)$$

を基礎方程式として導入した。式(1)は3次元の山体について記述したもので、 z は高度、 x, y は位置、 t は時間、 a, b は係数で、 a は従順化係数、 b は後退係数と呼ばれている。 ∇z は位置 (x, y) における斜面勾配ベクトルを表す。 k は内的営力による地盤の定速隆起を表す定数である。平野によると式(1)の物理的意義として右辺第1項は土壤匍行や風化を、第2項は流水浸食を表すとされている。

河道縦断形発達過程は、野上³⁾が提唱した上式と同様の偏微分方程式による数理モデル

$$\frac{\partial z}{\partial t} = a_s \frac{\partial^2 z}{\partial x^2} - b_s \frac{\partial z}{\partial x} \quad (2)$$

を導入した。式(2)において、 x は河道の上下流方向の位置を表す。式(2)は河道の上流端勾配と下流

端標高を境界条件として与えると指数曲線に収束する。

本研究では以上のモデルをベースに模擬流域発生手法を考案した。手法の概要は、(1) 河道網の平面位置を Horton の河道網発達プロセス (中北・松田の既往研究の手法) に従って決定する、(2)河道網の平面的位置が固定された流域において斜面・河道発達過程の数理モデルを用いて、流域地形発達過程の時間発展と空間的分布を表現する、(3) (2)の過程によって流域地形の平衡形が出現したら、再びその平衡地形上で(1)の手順によって新たに河道を発生させる、(4) 以下(2)と(3)を、指定した発生河道数に達するまで繰り返す、というものである。本研究では手順(2)のように、河道網の平面的位置が決定された状態の流域における斜面および河道縦断形の発達過程を流域発達過程と見なす。図 2 は発生河道数 10 の流域での手順(2)の流域発達過程を示す図である。模擬流域発達過程の時間経過は図 2 のように表現され、平衡形出現後は(3)によって新河道の平面的位置が決定され、再び流域は初期平面地形にリセットして手順(2)に従って発達させる。

本研究の手法において、各発生河道数での流域の平衡形は、河道縦断形が指数曲線となること、河道側面に一定勾配の斜面が卓越する (係数 a が小さい場合) ことから、中北・松田の模擬流域発生手法と類似した地形が形成される。このため本研究の手法は流域地形量の整合性のある模擬流域の平衡形を表現でき、かつ流域発達の時間スケールを考慮できる手法といえる。

4. 時間スケールに関する考察

本研究では時間発展を考慮した偏微分方程式(1)、(2)による数理モデルを導入することにより、模擬流域の形成過程に具体的な時間概念を導入した。このため本研究では時間概念についての簡単な考察を行った。本研究では式(1)と式(2)の偏微分方程式を差分化して計算している。本研究ではプログラム上の差分方程式の1タイムステップ Δt を10000[year]として計算する。また本研究では50mメッシュによる各グリッドの標高データを扱っているため $\Delta x = 50$ [m]とした。このように、100000[year]を1タイムステップとする計算を、平野(1972)による実際の地形の観察からの推定値を参考にして表1のようにパラメータを設定して実行した。また流域各地点での Δt 年間の標高変化が5m以内であれば流域の平衡形が出現したと判断することとした。この結果、河道発生数30での初期平

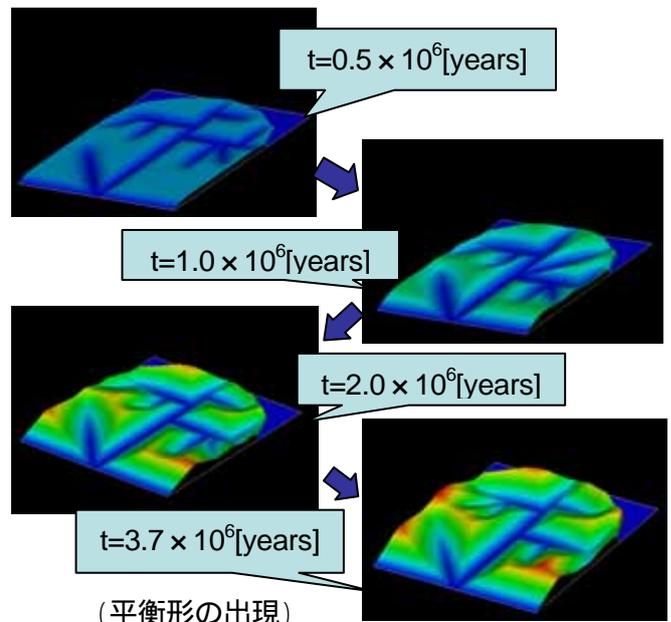


図 2 模擬流域の形成過程 (発生河道数 10)。

表 1 設定するパラメータ

設定するパラメータ	値
領域 [km×km]	7.5×7.5
斜面の従順化係数 a [m ² /year]	0.012
斜面の後退係数 b [mm/year]	1.0
河道の従順化係数 a_s [km ² /year]	1.45×10^{-4}
河道の後退係数 b_s [m/year]	5.84
隆起速度 k [mm/year]	0.4
河道上流端の勾配 g	0.2
耐浸食長さ [m]	250
河道候補落水線のランダム性 [%]	90
最大発生河道数	30

面地形から平衡形の出現までにかかった時間は300万年となった。野上(2001)によると日本列島における地質学的観察から日本列島の山地地形は約170万年でかなり平衡形に近づくと推定されている⁴⁾ため、本研究の模擬流域地形の平衡形の出現までの時間はおよそ妥当な値となった。

参考文献 1)中北英一・松田周吾：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，CD-ROM，20pp，2007。2)平野昌繁：平衡形の理論，地理学評論，45-10，pp.703-714，1972。3)野上道男：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，pp86-101，1981。4)米倉伸之，貝塚爽平，野上道男，鎮西清高：『日本の地形I 総説』，東京大学出版会，2001。