

# 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—

芦田 和男・田中 健二

## A STUDY ON THE STREAM FORMATION PROCESS ON A BARE SLOPE (1)

—Around Monte Carlo Simulation of Stream Network—

By Kazuo ASHIDA and Kenji TANAKA

### Synopsis

In order to estimate the sediment run-off out of bare slope hydraulically, we should know the location and the scale of streams on it. In this study, noticing the confluence process with stream meander, we intend to follow the process of stream network formation, by means of Monte Carlo simulation with hydraulic consideration. Accordingly, for the various probability distributions determined, it's necessary to consider about characteristics of meander, especially about its amplitude.

To date, authors are able to calculate time and spacial variation of—number of streams, depth of erosion, sediment run-off etc.—, by this simulation using parameters determined empirically through some experiments.

### 1. 緒 言

斜面侵食現象は、斜面からの流出土砂が下流に及ぼす影響や、斜面そのものの保全の問題を通じて、人間生活と深いかかわり合いをもっている。Photo. 1は、宅地造成にともなって出現した裸地斜面の一例であるが、わずかの期間のうちに顕著な侵食が進み、流路網が形成されている。このような斜面からの流出土砂量を土砂水理学的に算定するにあたり、斜面における流路の配置状況を知ることは、それらの流路の水理量を決定する上で不可欠なことからである。従来、流路配列の問題は、Strahlerらによる計量地形学<sup>1)</sup>や Shen らによる網状流路の研究<sup>2)</sup>においてトポロジー的な観点からとりあげられるとともに、流出解析や土壌侵食の研究においては、水みち面積率や等価粗度係数を支配する要因として、水文学的な観点からとりあげられてきた<sup>3)</sup>。また、それらの流路網を構成する個々の流路については、断面特性や蛇行特性に関する経験則としての regime theory<sup>4)</sup>があるとともに、安定河道や弯曲流に関する水理学的研究<sup>5)</sup>がなされてきたが、それらと流路網の問題を関連づけた研究はなく、両者は非常に異なった角度から、全く別の問題のようにとり扱われてきた。

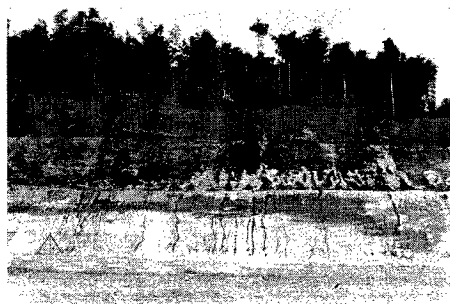


Photo. 1. Erosion at a residential development site.

一方、個々の流路の形成も、流路網の形成も、きわめて自由度の多い不確定な要素の組み合わせざった現象で

あることから、確率論的あるいは統計論的な観点で論じた研究<sup>8)</sup>も多く、たとえば水系網のパターンや水流の蛇行軌跡を、酔歩モデルによって模擬したもの<sup>7)</sup>もあるが、基本事象の生起確率や系のとり方に不明確な点が多い。本研究においても流路網の形成過程をモンテカルロ法によって確率的に模擬するが、従来の酔歩モデルとは異なり、流路の水理量を考慮した上で、蛇行の進行にともなう合流過程として、流路網の変形を論じていく。

なお、本報はそのシミュレーションのアウトラインの構成に重点をおいたものであり、今後、その内部機構について、さらに詳細な検討を進めていく予定である。

## 2. シミュレーションの基本的手法

流路網を構成する各流路では、それぞれの水理量に応じて、縦侵食と横侵食が生じるが、逆に、その水理量自体は、流路の形状に応じて変化する。ところが、従来しばしば行なわれてきた流路網に関する確率的シミュレーションは、このような個々の流路における水理量と縦・横侵食量との対応を考えたものではなく、流域を有限個の細胞に分割して、それぞれの細胞の標高や排水方向を、予め与えられた確率分布に従って選択する<sup>8)</sup>か、または流域界から出発した流体要素が流域出口に至るまでの道筋を、いわゆる酔歩モデルによって模擬するものであった<sup>9)</sup>。そして前者は、流れの向きを有限個に分割する点で、水理量の導入がむづかしく、後者は、侵食現象を考慮していない点で、一旦形成された流路の時間的変化を記述することが困難であった。

これに対し、本研究で述べるシミュレーションは、あくまでも個々の流路の変動特性に立脚したものであり、水理量の導入を可能にするとともに、流路網の時間的変化をも追跡しようとするものである。

### 2.1 個々の流路における水理量の決定

斜面に形成される流路は、河床波や蛇行をともなうとともに、流量も絶えず変化しているが、流れが擬似等流と近似できる程度に時間と空間を区分し、さらに流路の横断形状を広長方形で近似すれば、つぎの2つの式が成り立つ。

$$Q = B \cdot h \cdot v \dots\dots\dots(1)$$

$$u_* = \sqrt{g \cdot h \cdot I} \dots\dots\dots(2)$$

ここに、 $Q$ は流量、 $B$ は流路幅、 $h$ は水深、 $v$ は流速、 $u_*$ は摩擦速度、 $g$ は重力加速度、 $I$ はこう配である。これに、流路幅に関する何らかの条件式と、抵抗則とを加えれば、流量とこう配を与えたとき、その他の水理量が決定できることになる。

流路幅に関する条件式としては、**regime theory** として知られる、

$$B = C \cdot Q^b \dots\dots\dots(3)$$

などが考えられるが、次元を有する経験式であることから、適用範囲に疑問があるため、ある程度、理論的な展開が行なわれるまでは、外挿することを避け、本シミュレーションでは、 $B/h$ の実験値を用いることにする。粗面乱流の抵抗係数は、こう配と相対粗度の関数となるが、複雑な断面形状をもつ流路では、相対粗度を定義すること自体が困難であり、本シミュレーションでは、やはり実験に基き、経験的に抵抗係数を与える。また、流れを擬似等流で近似するための、時間と空間の区分幅は、流路の波状特性を考慮して定めねばならない。

### 2.2 個々の流路の変動

流路の変動は、侵食と堆積との不均衡によって生じるが、流路の横断面内におけるそれらの分布を求めることは困難であるので、本報では従来の一次元解析法にならい、横断面全体における、主流方向の土砂のバランスを主体として、この問題をとり扱っていく。すなわち、流路のある断面における土砂の輸送量と、崩落などによる外部からの供給量との和よりも、流水のもつ土砂輸送能力の方が大きい場合には、その余剰分が侵食力となって流路壁面に作用して、壁面材料に応じた侵食が生じ、逆に輸送能力の方が小さいか、あるいは等しくてもそれが流下方向に減少する場合には、堆積が生ずるものとする。

しかしながら、そのようなとり扱いかいのみでは、側岸侵食や蛇行に代表される、流路の横変動を論ずること

ができないから、基本的には一次元的な方法を取りながらも、何らかの方法でそれを導入していく必要がある。従来、流路の横変動の過程は、彎曲部の洗掘や、流路の拡幅機構など、局所的なスケールの現象については、水理学的に追求されてきたが、蛇行性状など、巨視的なスケールの現象については、不確定な要素が強いとして、確率・統計論的なとり扱いかげなされてきた。しかも、その統計量は、流路の形成過程から得られたものではなくて、既に形成された（あるいは形成過程の一時点における）流路の平面形状特性（たとえば流向偏角）から得られたものであり、流路の時間的変化を追跡するには不十分である。

そこで、本シミュレーションでは、蛇行現象に対して確率・統計論的な手法を用いることには変わらないが、一時点における流路の平面形状特性よりも、むしろ、二時点間における流路位置の横変動特性に着目し、その横変動量を主要な確率変数に選んで、水量や土質との対応づけを行なっていく。そして、流向偏角のような、流路の平面形状を表わすパラメータの統計的性質は、流路位置の横変動に対する、ある種の制約条件として導入する。すなわち、本シミュレーションでは、一時点における流路の平面形状特性を、二時点間における流路位置の横変動量の確率分布関数を規定する要因としてとり入れる。

流路の横変動が、種々の不確定な要因によって支配される確率的な現象であるのと同様に、縦変動もまた確率的な現象ではあるが、ここではその原因が横変動の不確定性に基くものとする。そして、流路に横変動が生ずれば、流路底面の受食幅が水面幅よりも拡大して、同一場所での侵食時間が短くなり、横変動のないときに比べて縦侵食速度が減少するものとする。もっとも、このモデルでは河床波の特性がほとんど考慮されておらず、二次元流れにおいてもみられる縦変動の不規則性を説明できないところに問題がある。

### 2.3 合流判定

以上に述べたのは、個々の流路が独立に変動する場合であるが、もしもその変動の過程で、隣り合う2本の流路が接触すれば、その時点で合流が生じ、合流点の下流では、やがて一方が涸渇する。ここにいう流路の接触とは、流水部分どうしの接触だけでなく、一方の流路の流水部分が、他方の流路の壁面あるいは痕跡部分に接触することをも含んでいる。ところが、このような3次元的な意味での合流判定を数学的に表現することはきわめて困難であるので、本シミュレーションでは、流路底面をある基準面に投影した帯状曲線どうしの接触をもって合流とみなし、その直下流のレベルの低い方の流路へ、他方が吸収されるものとする。

このようにして、ある時間区分内の流路の変動から、その時間区分の終りの時点における流路位置が求められ、流路網にしたがって個々の流路の流量を計算し、水量の決定に始まる以上の手順を繰り返して、諸量の時間的変化を追跡する。しかしながら現在のところ、シミュレーションで用いる諸パラメータに未知の要素が多いので、具体的には、つぎに述べる実験と対照しながら、*case study*を進めていく。

## 3. 流路の形成に関する実験

斜面における流路網の形成過程には、谷頭侵食にみられるような、新しい谷の発生による上流方向への分枝過程、蛇行や側岸侵食などの横変動による、並列流路の合流過程、ならびに、流送土砂の堆積による分流通程があるが、これらの現象の生ずる場所や時間スケールがそれぞれ異なるため、そのすべてを包含した実験を行なうことは困難である。著者らは以前、降雨による水系網の発達を模擬する意味で、ロームで形成した20m×15m、こう配1/15の斜面に、100mm/hの降雨を与えて諸量を測定したが、数十時間の実験期間では水系の発達がみられず、その後、川砂を用いた7m×7mの斜面における侵食実験にきりかえた<sup>10)</sup>。しかしながら、砂斜面では地下水の影響が強く現われ、特に谷頭ではパイピングや汜り現象が卓越して、通常の斜面侵食とは異なった形態のものとなった。

ここにいう通常の斜面侵食とは、工学的な意味で問題となる時間スケールや出現頻度をもつ侵食現象で、斜面材料には若干の粘土分が含まれており、給水源も、その裸地斜面に直接降る雨だけでなく、その斜面の集水域となる植生地からの、*sheet flow* や *channel flow* が存在する場合である。また、そのような斜面では、侵食の初期には、降雨による直接的な作用が大きく現われるが、侵食がある程度進行して深い流路を形成するよ

うになれば、降雨による sheet flow よりも、それらの集中した channel flow の方が、その後の流路網の変形に寄与する度合いが大きいものと考えられる。

そこで著者は、斜面材料にベントナイトと砂の混合物を用い、水路の上流端に定常流を供給する実験方法をとることにした。斜面材料に粘土分を含有させることは、つぎの点で大きな意味をもつ。そのひとつは、透水性が小さくなるために、地表面下が不飽和であっても表面流が生じること、もうひとつは、粘着性のために、侵食抵抗が増大し、容易には、流水のもつ輸送能力に達するほどの土砂が剝離しないことである。なお、この材料の性質については、以前に基礎実験を行なって報告している<sup>11)</sup>。

### 3. 1 薄層流から流路網への移行過程

本実験では、Fig. 1 のような水路に平坦に敷きならした斜面の上流から sheet flow を供給し、地形と水量の変化していく過程を計測した。斜面の諸元は、幅 1 m、長さ 3 m、初期厚さ 8 cm、こう配 1/5 で、斜面材

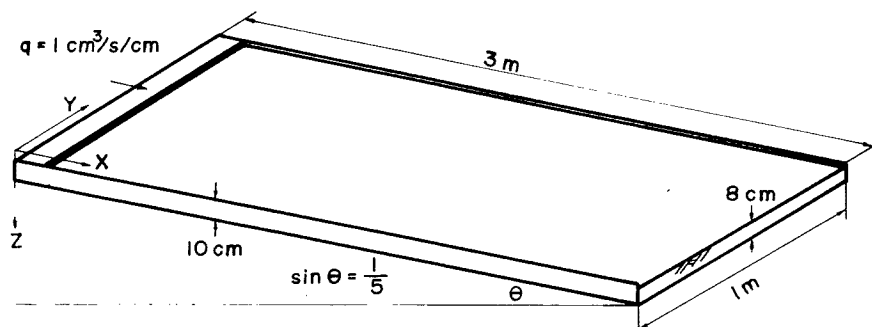


Fig. 1 Sketch of experimental slope.

料は、1 mm の均一砂とベントナイトと水を重量比 9 : 1 : 3 に練り混ぜたものである。斜面上流端には水槽があり、ほぼ一様な、流量  $1 \text{ cm}^3/\text{s}/\text{cm}$  の水を、断続的に累計10時間越流させた。実験の詳細については別に報告されている<sup>12)</sup>ので、本報では省略するが、主な測定項目は、流路の縦横断ならびに平面形状と、下流端における斜面全幅の流出土砂量である。

Photo. 2 は、流路網の平面形態を水路の上方から撮影したもの、Fig. 2 は、その写真から、流水の認められる凹部をトレースしたもので、sheet flow から一旦網状流路が形成された後、しだいに、平行に近い樹状状

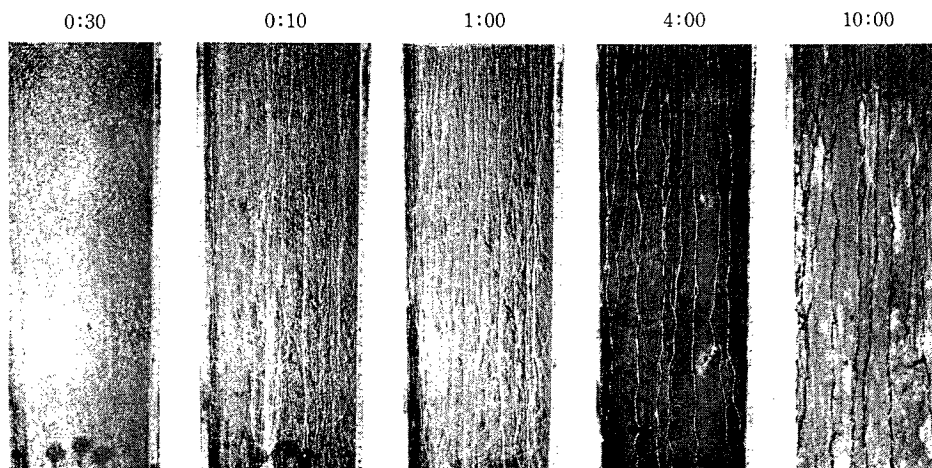


Photo. 2. View of channel network formation.

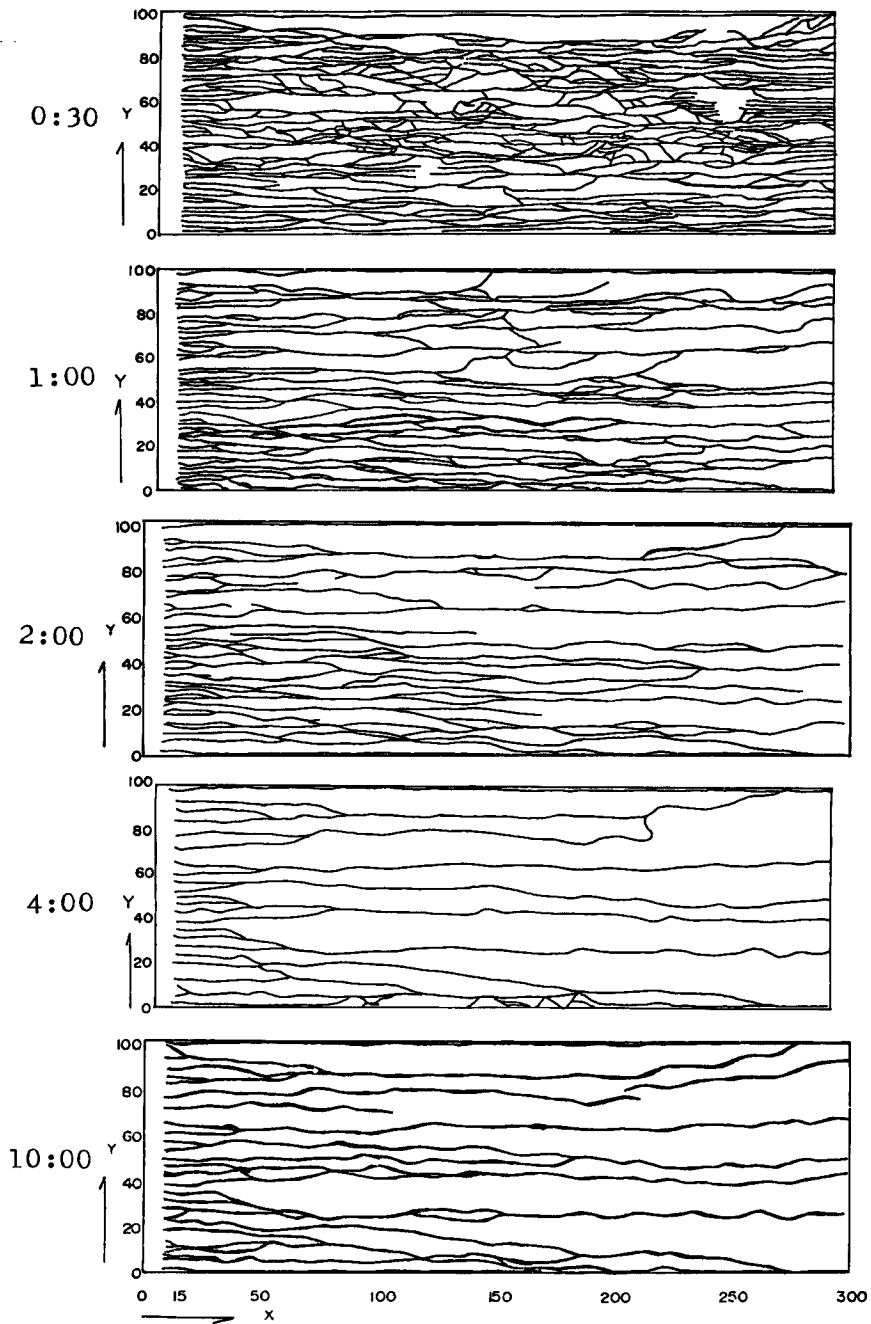


Fig. 2 Variation of channel center lines.

の流路網に変化していく過程を表わしている。**Fig. 3**は斜面の横断形状を表わしたもので、通水後まもなく1 mm程度の多数の凹凸が生じた後、それらに陶汰がおこり、実験終了時には、数本の流路だけが縦・横侵食を続けている。この図からわかるように、通水後数時間を経過すると、随所で、流路壁面にオーバーハン

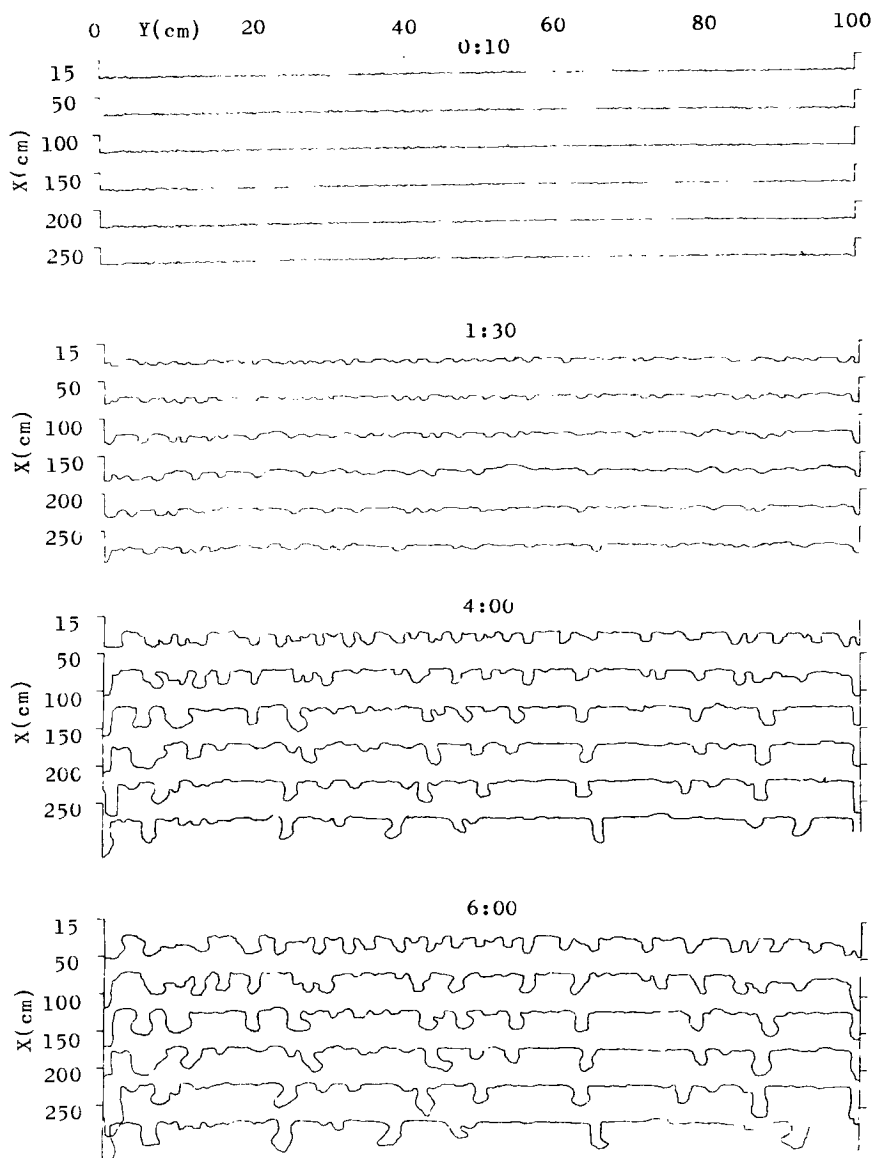


Fig. 3 Profiles of slope.

が生じ、水路上方からでは、流路内部の変動が判別できなくなる。そこで、通水10時間を経過した後、水路を水平にして石膏を流し込み、流路痕跡を型どりしたのが **Photo. 3** (立体写真) で、上から見れば直線に近い流路も、内部(石膏型では凹凸が逆転しているので凸部)では、侵食の進行にともなってかなり蛇行しており、河床波も発達しているが、このような侵食流路の形態は、本報の冒頭で **Photo. 1** に示した現地斜面におけるものとよく類似している。**Fig. 4** は、6時間後における流路底の位置測定図に、10時間後のそれを **Photo. 3** か

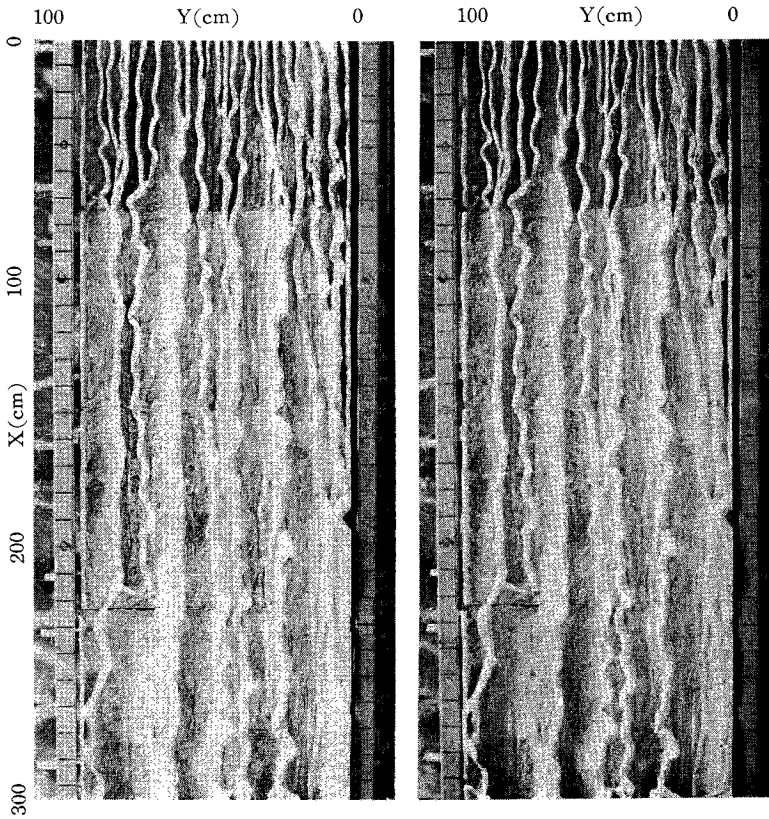


Photo. 3. Stereo views of eroded channel traces (fixed with gypsum).

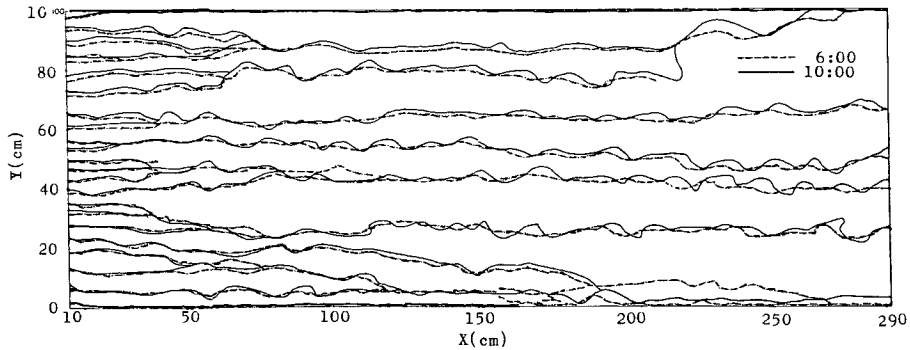


Fig. 4 Development and Propagation of meanders.

らトレースして重ねたもので、蛇行が増幅しながら伝播している様相がうかがえる。**Fig. 5** は、sheet flowとchannel flowを区別せずに、横断方向に水面のつながっている流れを1本の流路とみなして、流路本数の変化を示したものであるが、通水数時間から後は、流路本数がほとんど変化しなくなっている。

以上のことがらに、実験時の観察事項をつけ加えて、本実験における流路の形成過程を、時間の経過に従って定性的に述べると、つぎのようである。

すなわち、まず通水開始直後に、斜面全体が厚さ1 mm程度のsheet flowでおおわれ、随所で砂粒の剥離

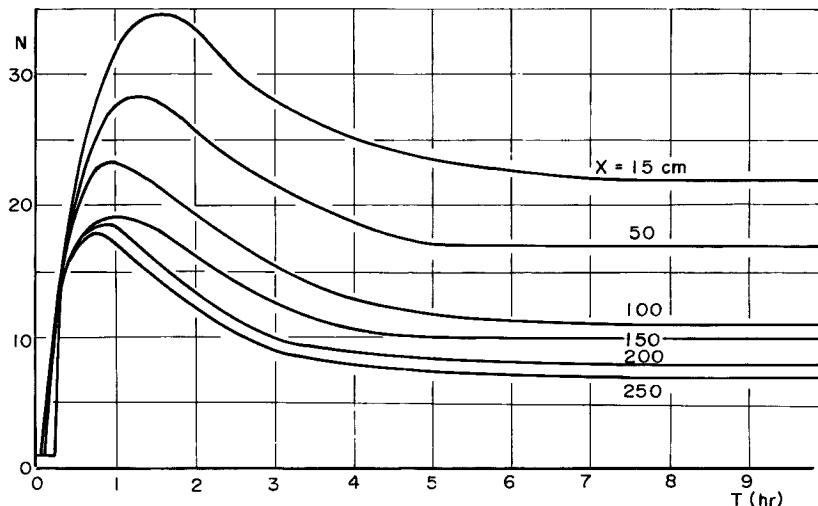


Fig. 5 Variation of number of streams (experimented).

が生ずるが、微視的にみれば流れが必ずしも一様でないことや、平均流そのものもつ土砂輸送力が小さいことから、剥離した土砂を完全に流送することができず、侵食と同時に局部的な堆積現象が随所に生じて、流れの不均一性を助長する。このような状態が10分ぐらい続くと、凹凸の規模は、幅1 cm、高さ2~3mm程度に発達して、流水の存在する部分とそうでない部分とが分離するようになり、Sheet flowは網状流路へと移行する。しかしながら、個々の流路が絶えず分合流を繰り返して、流路位置は定まらない。その後も斜面の凹凸はますます増大し、やがて数十分を経過すると、流路部分の掃流力が充分大きくなって、新たな堆積や分流は、ほとんど生じなくなる。流路本数は、この時点をピークにして、増加から減少の傾向へと変化するが、2~3時間後までは、流路の横変動はさほど顕著でない。すなわち、この間の流路の淘汰は、網状流路を構成する個々の流路における、縦侵食速度の不均一性が主な原因となっている。ところが、さらに時間が経過すると、そのような淘汰で生き残った流路は、溝の深さ2~3cm、水深数mm、水面幅1.5cm程度の規模に増大しており、蛇行や河床波が顕著になってくる。この段階でも流路数は減少を続けるが、これはもはや、網状流路からの卓越流路の淘汰ではなく、隣り合う流路の横変動による接触から生ずる合流過程である。しかしながら、このようにして流路数が減少すれば、それだけ流路間隔が増大するので、合流の機会は急減し、流路網のパターンの変化速度は、きわめて小さくなっていく。

以上は、実験による流路網の形成過程を、時間の経過に従って記述したものであるが、一方、同一時刻における、上流から下流への流下距離にともなう現象の変化も、定性的には同じような傾向をもつ。

### 3.2 流出土砂量に対する考察

つぎに、本研究の目標とする流出土砂量の問題であるが、Fig. 6は、斜面下端における流出土砂を、砂分と粘土分とに分離して表示したものである。実験によれば、初期には粘土分が多く、砂分は少ないが、これは、粗度がまだ小さい段階で、掃流力がそのまま侵食力として作用するために、容易に土砂を剥離し、多量の粘土分を流出させたが、輸送能力が充分でないために、剥離した土砂のうち、砂分を完全に流下させることができなかったものと考えられる。その後まもなく侵食力が低下すると、粘土分の流出は急減するが、流水の集中化によって輸送能力はかえって増加し、砂分の流出が急増する。そして、数十分からは、両者とも時間的にほとんど変化しなくなっている。これは、Fig. 5に代表されるような、流路配列に関する諸量が数時間にわたって変化することとくらべると、きわめて興味あることからである。ただし、そのような状態になってからも、粘土分と砂分との比率が、斜面材料のそれを上回っており、濁度の測定法に欠陥があったのではないかと思わ



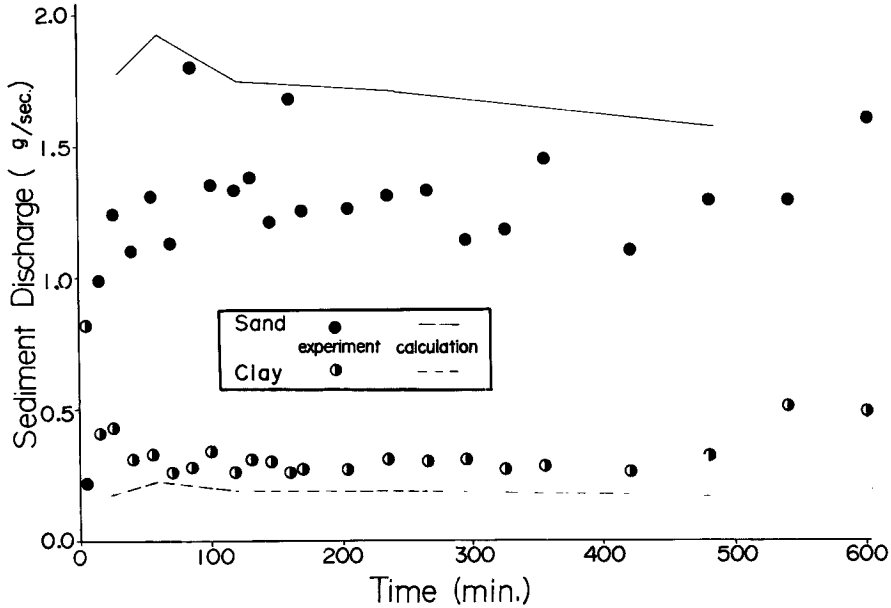


Fig. 6 Sediment run-off at the foot of the slope.

れる。

Fig. 6 には流出土砂量の計算値も示しているが、これはつぎのようにして求めたものである。すなわち、まず、Fig. 3 の流路横断面において、水位を適当に仮定して流水幅を読みとり、広長方形断面におきかえて、

$$Q = B \cdot h \cdot v \dots\dots\dots(4)$$

とする。つぎに、条件の類似した別の実験結果<sup>13)</sup>から、抵抗係数を相対粗度の関数として、

$$f = 0.9(d/h)^{0.9} \quad \text{ただし } I = 1/5 \dots\dots\dots(5)$$

と表示すれば、式(4), (5), および

$$v/u_* = \sqrt{8/f} \dots\dots\dots(6)$$

$$u_* = \sqrt{g \cdot h \cdot I} \dots\dots\dots(7)$$

より、各水理量が計算できる。ここに、 $d$  は粒径、 $f$  は抵抗係数で、他の記号は 2.1 に用いたものと同様である。また、侵食に寄与する有効摩擦速度  $u_{*e}$  は、

$$u_{*e}/u_* = \sqrt{8/f} / \{6.0 + 5.75 \log_{10}(h/d)\} \dots\dots\dots(8)$$

で算定し、横侵食がないときの、この材料に対する河床低下速度  $E$  は、著者らの侵食モデル<sup>14)</sup>から、掃流力の大きい範囲で、

$$E/u_{*e} = 0.75 \times 10^{-4} \dots\dots\dots(9)$$

とした。

Fig. 7 は、斜面の横断形状図 Fig. 3 より、流路底部の高さを平均して示したもので、これより平均河床低下速度  $dz/dt$  を求め、上に求めた有効摩擦速度の平均値  $\bar{u}_{*e}$  との比を示したのが、Fig. 8 である。これによると、実際に  $(dz/dt)/\bar{u}_{*e}$  が  $0.75 \times 10^{-4}$  に近い値をとるのは、通水開始後 1 時間から 4 時間ぐらいまでの間であり、それ以前には、河床に土砂の堆積することがあって、流路位置が定まらず、また、それ以後には、土砂の堆積はなくなるが、流路の横変動が顕著になって、いずれも受食部分の幅が流水幅よりも広くなり、侵食

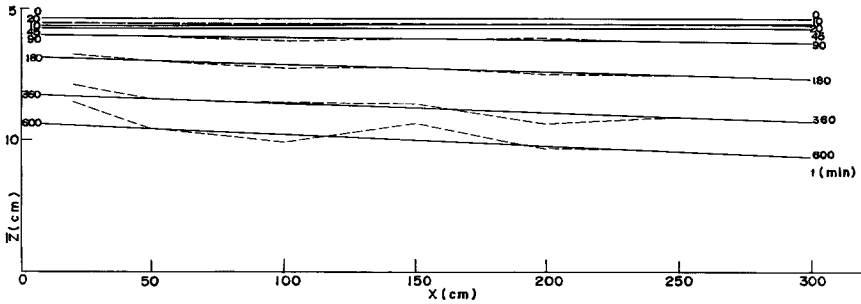


Fig. 7 Longitudinal profiles averaged among streams.

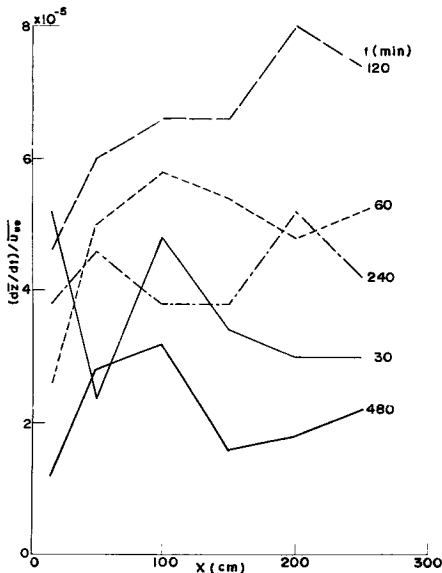


Fig. 8 Rate of channel degradation.

を受けない時間が生ずるために、河床低下速度が小さくなっている。

さて、河床低下速度に受食面積をかけると、流出土砂量が求まるが、Fig. 6 に用いた計算では、河床低下速度を式(9)で与え、受食面積は、流水幅の総計と斜面長の積で代用している。このようにして求めた流出土砂を、斜面材料の混合比に応じて、砂分と粘土分とに分離すると、砂分は実験値よりやや多め、粘土分はやや少なめに算出された。また、初期を除いて、流出土砂の計算値は時間とともにわずかに減少しているが、蛇行による流路延長の増加を考慮して補正すれば、ほぼ一定値を示すようになる。

ところで、この計算に用いた総流水幅は、流路の本数と、個々の流路の規模によって決まるものであるが、それを求めるには、まず、単一流路の特性を詳細に検討することが重要であろう。しかしながら、現在の段階では、流路の横断面形状や波状特性に関する情報が、きわめて不十分であるので、つぎに述べるシミュレーションの具体例で

は、本節の実験値をそのまま用いる部分が少なくない。

#### 4. シミュレーションの具体例

著者らの考案したシミュレーションの基本的手法は、既に第2章において述べたが、その計算手順の概略を示すと、Fig. 9 のようになる。

##### 4.1 シミュレーションの具体的手法

上に示した流路網の形成に関するフローチャートに基き、斜面からの流出土砂量を算定する具体例として、前章に述べた実験に対応する流路網のシミュレーションを行なった。すなわち、斜面は幅1m、長さ3mで、上流端に $100\text{cm}^3/\text{s}$ の定常流を供給する。初期状態は、こう配1/5の等間隔平行流路で、供給水はそれらに等分配する。流路各点における水理量の算定には、断面形状特性と抵抗則が必要であるが、ここでは前章の実験から、 $B/h=5$ 、 $f=0.5$ とした。河床材料は1mmの均一砂とベントナイトの混合物で、 $E/u_{*c}=0.75 \times 10^{-4}$ とした。ただし、流砂量が、流出のもつ土砂輸送能力に達している場合には、

$$(1-\lambda) \cdot B \cdot E = \max \{ \partial \bar{Q}_b / \partial x, 0 \} \dots\dots\dots (10)$$

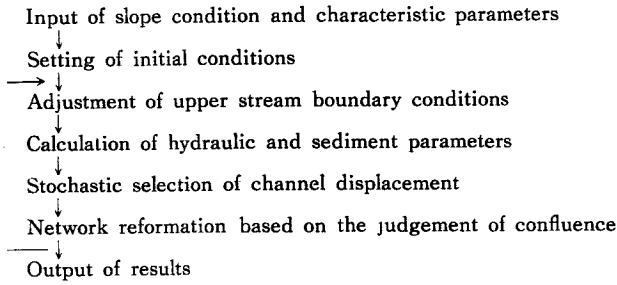


Fig. 9 Flow-chart of stochastic simulation.

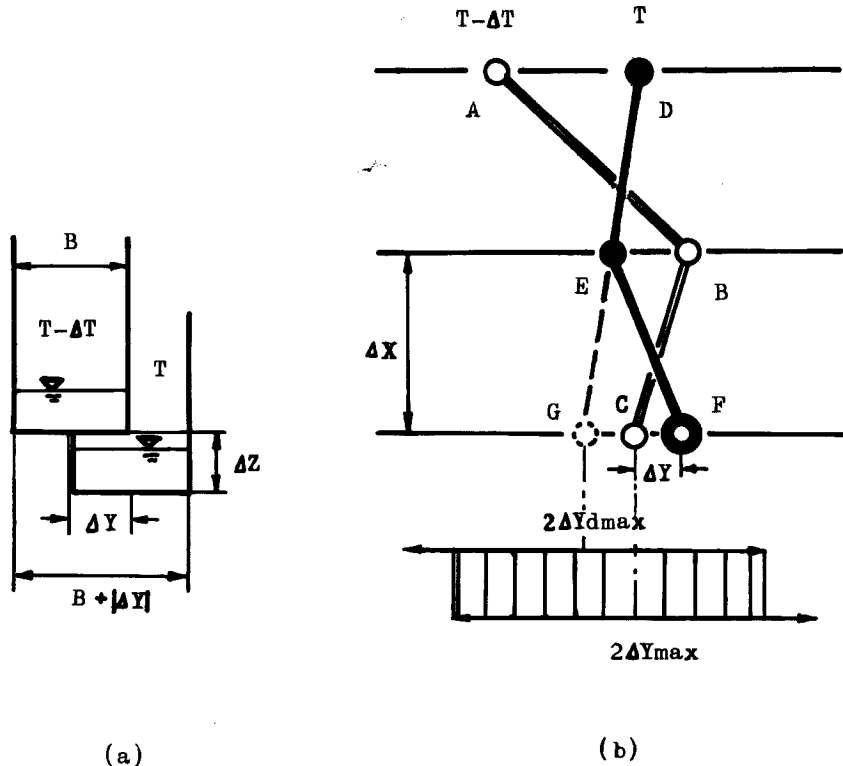
とおく。ここに、 $\lambda$  は空隙率、 $B$  は流路幅、 $E$  は、横変動がない場合の、底面の侵食速度、 $\bar{Q}_b$  は平衡状態の流砂量である。堆積現象を省略しているのは、本シミュレーションでは侵食現象に重点をおいて、時間区分  $\Delta T$  をかなり大きくとっており、同じ時間区分を用いた前進差分法で堆積を組み入れると、計算に不安定が生ずるから

である。

既に述べたように、横侵食が生じると、流路底面の受食面積が広がり、それだけ縦侵食が遅くなるものと考え、

$$\Delta Z = E \cdot B \cdot \Delta T / (B + |\Delta Y|) \dots\dots\dots (11)$$

とおく。ここに、 $\Delta T$  は時間区分、 $\Delta Z$ 、 $\Delta Y$  は Fig. 10 (a) に示すように、 $\Delta T$  における、流路位置の縦・横変位量である。ただし、以下に述べることから、 $\Delta Y$  は  $\Delta T$  に依存するので、このようなモデルを用いる以上、 $\Delta T$  は任意には選べない。



(a)

(b)

Fig. 10 Definition sketch of channel displacement.

横侵食量  $\Delta Y$  は、この確率シミュレーションにおいて本質的な役割をもつ変量であり、つぎのようにして確率的に選択する。Fig. 10 (b) の折れ線 ABC は、時刻  $T - \Delta T$  における流路位置を表わし、今、時刻  $T$  における新しい流路位置が、上流から順次 D, E まで計算されてきたものとする。つぎに、測線 X 上における新しい流路位置 F を決定するのであるが、それは、 $\Delta T$  前の位置 C からある程度以上離れることはできないから、その範囲を、 $\Delta Y_{max}$  とおく。一方、流路の蛇行特性から、曲率はある値以下になるので、流向偏角にも制限が生じ、新しい流路位置 F は、DE の延長上にある G から、ある範囲  $\Delta Y_{dmax}$  以上外に出ることはまれであろう。そこで、横侵食速度を規定する変量として、それが無い場合の縦侵食速度  $E$  を水深・流路幅比  $h/B$  で除した値をとり、一方、蛇行振幅を規定する変量として流路幅  $B$  をとって、

$$\Delta Y_{max} = \alpha \cdot \{E/(h/B)\} \cdot \Delta T \quad \dots\dots\dots(12)$$

$$\Delta Y_{dmax} = \beta \cdot B \quad \dots\dots\dots(13)$$

とおく、ここに、 $\Delta Y_{max}$  は、 $\Delta T$  の間に可能な、最大横変位、 $\Delta Y_{dmax}$  は、流下区間  $\Delta X$  における流路偏倚量の概略の上限値、 $\alpha$  および  $\beta$  は、それらと侵食能力および流路幅との比率を表わす係数である。このように、 $\Delta Y_{max}$  は時間区分  $\Delta T$  に比例するが、 $\Delta T$  を蛇行周期以上にとると、この制限よりも、蛇行振幅による制限の方が効いてくるであろう。したがって、その場合には、形式的に  $\alpha$  の値を小さく選ばねばならない。一方、 $\beta$  の値は流下区間長  $\Delta X$  のとり方に依存し、 $\Delta X$  を大きくとれば  $\beta$  も増大する。そこで、 $\Delta X$  を蛇行の四半波長程度にとれば、 $\beta$  は蛇行振幅と流路幅との比に対応することになる。本シミュレーションでは、以上のような方法で定まる 2 つの制約領域に共通部分があれば、そこから無作為に新しい流路位置 F を選択し、また、共通部分がなければ、式(12)から定まる領域のうち、最も偏倚の少なくなる点に、新しい流路位置を選んでいく。

つぎに合流の判定であるが、上に述べたような方法で各流路を独立に変動させると、ある時間区分内に、隣り合う流路が交差することが生じるので、その場合には、直下流のレベルが高い方の流路の位置を修正して、低い方の流路の位置に一致させる。ここで時間区分  $\Delta T$  をあまり大きくとると、その時間区分内の現象の近似度が低下するので、 $\Delta T$  はある程度小さくすることが必要である。その目安としては、上にも述べた個々の流路の蛇行周期や、隣り合う流路の間隔を横侵食速度で除した値が考えられるが、本シミュレーションでは、比較的流路間隔の狭い場合を対象としているので、後者の考え方をういた。

また、流路網を判定する計算プログラム上の問題として、ある時間区分の初めに隣り合っていない 2 本の流路が、中間にある流路を介さないで、その時間区分内に合流することのないよう、横変位に対する形式的な制限をつけ加えた。

流出土砂量は、実際の河床低下速度と受食面積の積から求めるが、本シミュレーションでは、横侵食がない場合の河床低下速度と、流水幅と、流路長の積で代用した。

なお、数値計算にあたっては、京都大学大型計算機センターを利用した。

#### 4. 2 シミュレーションの結果と実験との比較

Fig. 11 は、実験で得た、流路幅約 1.5cm、蛇行波長約 10cm、蛇行振幅約 5 cm、および、最大縦・横侵食速度比約 0.5 などの結果から、 $\Delta X = 2.5\text{cm}$ 、 $\alpha = 0.1$ 、 $\beta = 2$  において数値シミュレーションを行なった例である。実験では、初期の sheet flow が網状流路に移行した段階において、約 1 cm 間隔の流路が不規則に配列していたが、このシミュレーションでは、初期状態として、規則的な等間隔平行直線流路を与え、また、計算機の記憶容量の制約から流路本数をあまり多くとれないので、流路間隔を広くとって 2 cm とした。そのため、2 時間後ではまだ合流の機会が少なく、初期流路配列の規則性が強く残っているが、10 時間後にはその影響はほとんど消滅して、実験で得られた流路の平面形態 (Fig. 4) に近くなっている。

Fig. 12 は、20 時間後の流路痕跡を横断面図として示したもので、流路の淘汰やオーバーハングなどがよく表現されているが、Fig. 3 の実験結果にくらべると、縦侵食速度がかなり小さくなっている。これは、式(11)に示した縦侵食と横侵食の関係が現実にそぐわないためであると思われる。しかしながら、流路部分の侵食深が流下方向に増加するのに対し、流路以外の部分も含めた、斜面横断方向の平均侵食深が流下方向に減少する傾

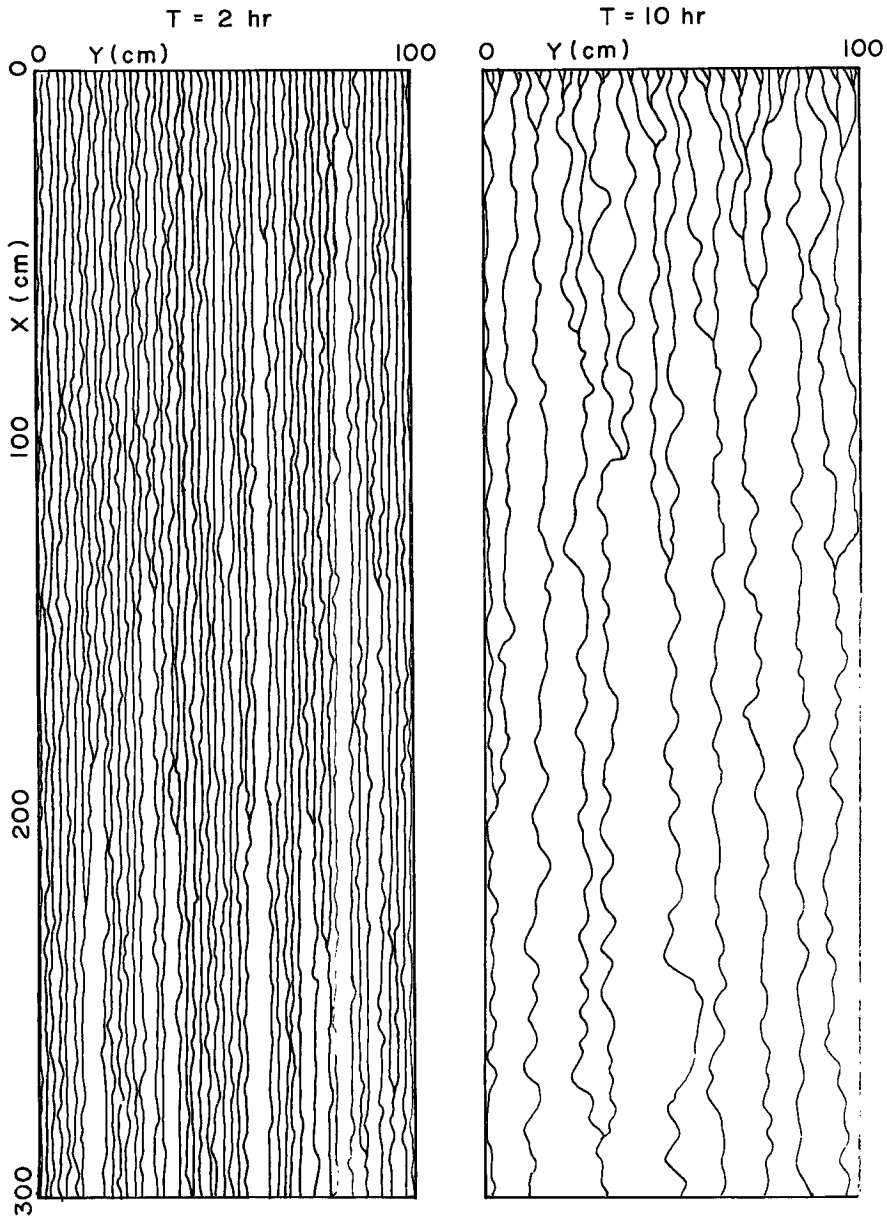


Fig. 11 Example of simulation.

向は、実験結果と一致する。

Fig. 13 は、流下距離をパラメータにして流路本数の時間的変化を表わしたもので、初期の sheet flow から網状流路への移行過程が表現できていないことを除けば、時間的ならびに空間的に合流が急激に進んで、流路本数が減少し、やがてその変化が緩慢になっていく様子が模擬できている。

Fig. 14 は流出土砂量の時間的変化を表わしたものであるが、流路数の減少とともに流出土砂量も時間的に減少して、実験とはやや異なった傾向をもっており、また、初期を除くと、実験値や前章の計算値よりも小さ

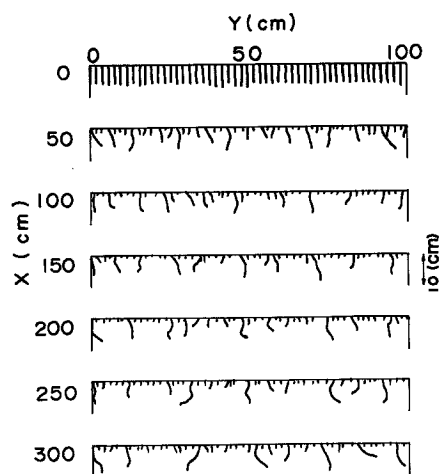


Fig. 12 Profiles of slope(simulated).

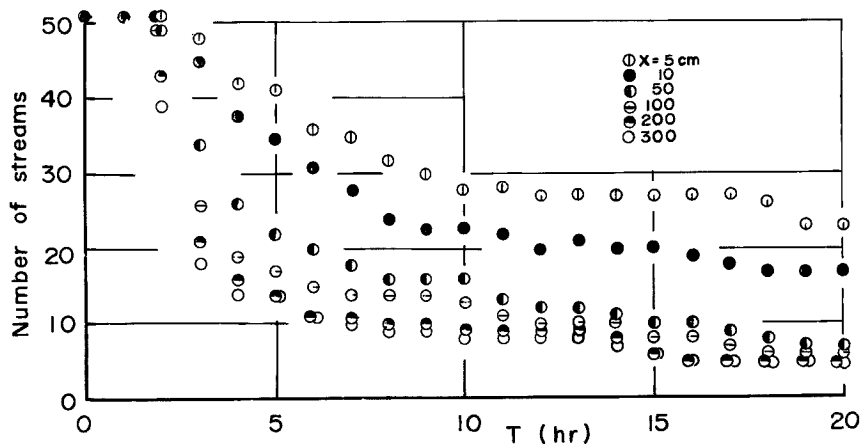


Fig. 13 Variation of number of streams (simulated).

好都合である。しかし、その場合には、流路の時間的変化の表現がむずかしく、その新しい追跡法を案出しなければならないであろう。

シミュレーションの細部の問題に関しては、水理的な考察に基づいて諸量の確率分布を決定するのをねらいとしながらも、個々の流路の水理量を決定するにあたり、擬似等流や平衡断面流路の近似を用いるなど、多くの仮定を用いた。そのうち、平衡横断面の形成については、別途に研究を進めているが、任意の断面形状のもとでの、乱れをも考慮した流速分布や、掃流力分布について、詳細な検討が必要である。つぎに流路の蛇行特性であるが、本シミュレーションでは、蛇行振幅と蛇行波長あるいは流路幅との関係を、全く経験的に選んでおり、そのような関係の生じる機構については、ほとんど何もわかっていない。また、蛇行波の位相を、確率

な値を示しているなど、今後さらに検討を加える必要がある。

## 5. 今後の問題点

本シミュレーションは、個々の流路の水理学的特性に基づいて、流路網の変形過程を追跡するものであり、流路の発生過程を模擬するものではない。この意味で、シミュレーションを行なう際の初期条件として、既に、ある意味での流路網（たとえば平行流路）が与えられていなければならない。したがって、流路が新たに形成されていくような問題を取り扱かうには、別途の考察が必要である。

また、差分計算を進めていく都合上、流路の主流方向を予め定めて、座標軸を設定し、計算に用いる流路位置の存在する測線を設けているが、これでは、その方向と逆向きの流れは表現できない。これを改善するには、従来の蛇行経路のシミュレーションにみられるような、流路に沿った曲線座標をとることができれば

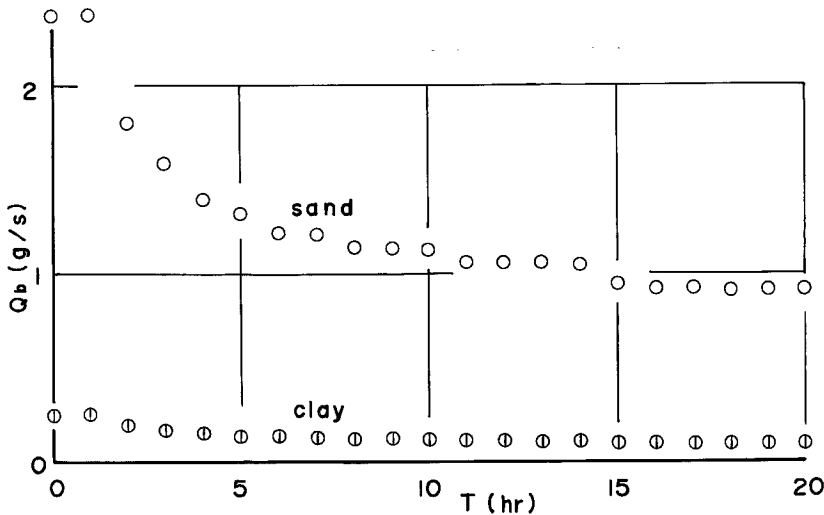


Fig. 14 Sediment run-off (simulated).

シミュレーションにどのように組み入れていくかも、今後に残された課題である。

もうひとつきわめて重要な問題点として、流れの抵抗則がある。これについても、本シミュレーションでは、全く経験的に抵抗係数の値を与えているが、第3章の実験にもみられるように、斜面侵食流路には、通常の移動床におけるものとはかなり異なった河床波が生じ、抵抗係数が非常に大きくなっている。また、そのような河床波が、単に抵抗則を媒介にしてのみ、蛇行特性と関連をもつのか、あるいは、河床波と蛇行波との間に、位相の連関など、より直接的な影響が現われるのかどうかも、今後検討していきたいと考えている。

なお、本シミュレーションでは、土質条件を  $E/u_*$  の値に集約させているが、その値が土の種類や水理条件によってどのように変化するのも、検討せねばならない。侵食の形態は、本シミュレーションでは流水の掃流力によるものだけを考えているが、今後さらに、溶脱や崩落などについても考慮していく必要がある。

## 6. 結 論

以上、裸地斜面における流路の形成過程について、流路網の確率的シミュレーションを中心に述べてきたが、その結果を要約するときのようである。

- 1) 裸地斜面からの流出土砂量を水理的に予測するためには、斜面において流路の占める割合を知ることが不可欠であるが、それは、個々の流路の規模と、それらの流路の配置状況とから決定される。
- 2) 流路網の形成はきわめて不規則な現象であって、決定論的に論じることがむずかしく、統計的な取り扱いが必要であるが、その内部機構にまで立ち入らなければ、地形量と水量との対応関係を見出しがたく、個々の流路の変動機構に立脚した確率的シミュレーションが有効であると考えられる。
- 3) 流路網のシミュレーションには、従来、流域をある大きさの細胞に分割し、それらの細胞の標高や、その細胞からの離散的な排水方向を、確率的に選択する方法があるが、流路網の形成過程の模擬ではなくて、既に形成された流路網のパターンの模擬にとどまっているものが多かった。これに対し、本研究で述べたシミュレーションは、水理的な観点から流路網の形成過程を模擬したものであり、流路網の時間的変化が容易に追跡できる。
- 4) 斜面の上端に一樣流が供給されると、まず多数の流路が発生し、時間的にも空間的にも蛇行を生じて急速に合流するが、流路本数が減少してその間隔が大きくなると、流路網のパターンの変化速度はきわめて遅く

なる。著者らの考案したシミュレーションは、この合流過程を十分に模擬できるものである。

5) 斜面からの流出土砂量は、実験では初期を除いてほぼ一定であるが、シミュレーションでは時間とともにやや減少した。

6) 本報に示したシミュレーションは、現在のところ、横断面形状や蛇行特性あるいは抵抗則に、いくつかの経験値を用いた case study にとどまっており、これを一般化していくためには、それらの個々の問題や、河床波に関する詳細な検討が必要である。

7) 本研究を発展させて、現地斜面における侵食現象を扱おうには、さらに、浸透能も含めた、土の種類による受食性の相違を明らかにせねばならない。

#### 参 考 文 献

- 1) 樫根 勇：自然地理学の理論について，東教大地理学研究報告 XV，1971，pp. 71—84. にその歴史的な発展経過がまとめられている。
- 2) Shen, H. W. and S. Vedula : A Basic Cause of Braided Channel, Proc. 13th Congress of IAHR, 5—1, 1969 ほか。
- 3) 金子 良・五十嵐正次・上林春美：火山山麓における侵食の研究，農業土木試験場報告第1号，1963。
- 4) 吉川秀夫：河川工学，朝倉土木工学講座，1966，p. 132 に，それらがまとめられている。
- 5) 村本嘉雄・吉村知司：弯曲水路の河床変動に関する研究(2)，京大防災研究所年報第12号 B，1969。ほか。
- 6) Cherkauer, D. S. : Minimization of power Expenditure in a Riffle-Pool Alluvial Channel, Water Resources Research, vol. 9, No. 6, 1973. ほか。
- 7) 樫根 勇・島野安雄：偏向性をもたせた酔歩モデルによる水系網のシミュレーション，東教大地理学研究報告 XVIII, 1974, ほか。
- 8) Sprunt, B : Digital Simulation of Drainage Basin Development, Spatial Analysis in Geomorphology, ed. by R. J. Chorley, Happer & Row, 1971, chap. 14 ほか。
- 9) Howard, A. D., M. E. Keech and C. L. Vincent : Topological and Geometrical Properties of Braided Streams, Water Resources Research, vol. 6, No. 6, 1970.
- 10) 芦田和男・奥村武信・田中健二：斜面侵食に関する実験的研究，京大防災研究所年報第16号 B，1973。
- 11) 芦田和男・田中健二：粘土分を含有する砂れき床の侵食と流砂機構に関する研究，京大防災研究所年報第17号 B，1974。
- 12) 坪香 伸：裸地斜面の侵食に関する実験的研究，京大工学部土木工学科卒業論文，1974。
- 13) 前出 10)
- 14) 前出 11)