

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

NUMERICAL SIMULATION OF SURFACE EROSION AND SEDIMENT YIELD FROM BARE HILLSIDE

関根正人¹・菱沼志朗²

Masato SEKINE and Shiro HISHINUMA

1 正会員 工博 早稲田大学教授 理工学部社会環境工学科 (〒169-8555 東京都新宿区大久保 3-4-1)

2 学生会員 早稲田大学大学院理工学研究科

Erosion process of bare hillside was investigated experimentally and numerically in the present study. Experiments were conducted on the model hillside with the artificial rainfall in the experimental flume. The numerical simulation model has been developed to predict the erosion process and to understand it more deeply. The numerical model was applied to the phenomenon which occurred on the slope in the experimental flume. Based on the comparison between the experimental results and the numerical ones, the validity of the present numerical model was verified. The process of channel network evolution and the head migration of the gully were investigated on the basis of this numerical analysis. Temporal variation of sediment yield from the hillside was also studied.

Key Words: surface erosion, the evolution of channel network, sediment yield, slope-collapse model.

1. 序論

河川への土砂の生産源である山腹斜面には、いわゆる裸地状態の崩壊地が少なからず広がっている。また、土石流等の大規模な浸食によって運ばれてきた土砂が斜面上あるいは溪岸に取り残されている場合には、この区域も裸地と見ることができる。このような裸地斜面では、降雨によってその地表面上に水深の小さな「シートフロー」と呼ばれる流れが生じ、この水流の作用によって土砂の移動が誘起される。この結果は斜面の表面浸食となって現れ、流れの集中が起これば斜面上にリルやガリといった規模の大きな凹部地形が形作られることになる。そして、こうした浸食によって生産された土砂は、言うまでもなくやがては河川に運び込まれ、その河道ネットワークを通じて下流へと輸送される。そこで、水系における土砂収支を考える上では、このような表面浸食や土砂生産のプロセスを知り、これを数値的に再現する手法を開発しておくことが重要である。また、近年、たとえば沖縄で畑地からの赤土砂の流出が一つの環境問題として注目を集めているが、この

ような農地からの土壌の浸食・流亡の発生は、ここで対象とする表面浸食と同じメカニズムによって生じると考えられる。以上のような点を考慮して、本研究では裸地斜面の表面浸食に焦点を絞って検討を行った。

ここでは、まず、このような裸地斜面の表面浸食に関するこれまでの研究についてふりかえっておく。この問題に関する最初の重要な研究は、澤井¹⁾によるものと言えよう。澤井は、斜面上に出現する流路群のパターンを明らかにするとともに、たとえばシートフロー状の流れの抵抗則についても検討するなど、その後の研究に大きな影響を与えた。以後、国内外で断続的に研究が進められたが、やがて泉・パーカー²⁾によって流路群の発生・発達に関する理論が示され、その理解が深められた。ただし、摂動法に基づく安定・不安定解析であり、実際に流路群が形成されるプロセスについては不明の点が残されたままとなった。こうした研究の流れの中で、著者らは模型斜面上の実験と数値解析とを行い、現象の更なる理解に努めてきた。関根・小野³⁾は本研究の出发点となる数値解析モデルを構築し、裸地斜面の

下流端全域から水ならびに土砂が流出する場合の流路群の形成について説明した。しかし、解析モデルの妥当性を検証する十分なデータがなかったため、定量的な議論をするにはその信頼性に問題を残すこととなった。

そこで、本研究では、数値解析とあわせて、実験水路内に作成したモデル斜面を対象として、これに人工降雨を与えることでこの斜面がどのように浸食されるかを定量的に調べる実験を行った。ここでは、斜面下流端に設置した堰の一部に開口部を設けることで、この部分のみから水および土砂が流出する場合の現象を取り扱う。なお、これは、規模が全く異なり比較は難しいものの、たとえば砂防堰堤の上流側に堆積した土砂が水流によって流出させられる現象と少なからず類似点をもつものと考えることができる。さらに、この実験と同一の条件下で数値解析を行い、両者の結果を比較検討することで現象の理解を深めるとともに、解析モデルの妥当性の検証を行った。

2. 本研究の概要

(1) 模型実験の概要

実験は、長さ 80cm、幅 50cm の水路内に平均粒径 0.105mm の珪砂 7 号を敷き詰めることで形作った裸地斜面を対象として行い、上方から人工降雨を与えることでこの斜面にどのような浸食が生じるかを定量的に評価した。実験装置の概要を写真-1 に示す。本論文で特に注目するのは、流下方向には一様に傾斜し、横断方向には水路中心軸に対して左右対称に傾斜した、いわゆる "Open book" 型の斜面である。すなわち、この斜面の横断面形状は、左右の中心軸を谷線とした V 字型となっている。ここでは、この斜面の傾斜角を縦横断方向ともに 5% とし、その土砂層厚を中心軸上で 10 cm、水路両側壁部で 11.25 cm とした。実験開始時の初期斜面には、予め十分な量の水を与え、その空隙を浸透水で満たすことで、いわゆる飽和状態の斜面となるようにした。この斜面の下流端には、この中心軸の延長線上に幅 2cm の開口部が設けられており、浸食された土砂ならびに水はこの開口部のみから排出される。この開口部の下方には、これを横切る方向に堰（固定壁）が設置されており、開口部における土砂層の浸食深がある値（ここでは 4 cm）以上にならないように制御されている。また、人工降雨としては、水路上方から散水ノズルを用いて霧状のものを与えることにし、原則として時間的に一定とし、しかも斜面全域にわたってほぼ均一になるように留意した。ここでは、斜面全域を 55 (= 流下方向 11 × 横断方向 5) の区画に分けて単位時間当たりの降雨量を計測し、その空

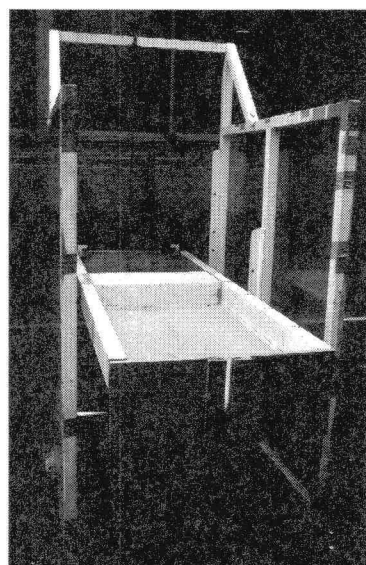


写真-1 実験装置の概要

間平均値をもって降雨強度とすることにした。本論文では、主として降雨開始から 30 分間にわたる浸食過程を検討の対象とし、実験時には、浸食が進行する状況を写真ならびにビデオに撮影した。また、斜面下流の開口部から流出する水量ならびに土砂量は、1 分毎に連続的に採取し、実験後にその計量を行った。また、浸食後の斜面形状については、降雨停止後の最終形状のみレーザ式変位センサー（キーンエンス社製）を用いて計測した。この際、斜面横断方向に 1cm 間隔に縦断方向の測線を設け、その測線に沿ってセンサーを自動走行させることで、各々の測線上の斜面高を連続データとして採取した。

(2) 数値解析の概要

数値解析モデルは、(i) 浅水方程式に依拠した流れの解析、(ii) 縦横断方向の勾配の影響を考慮することで拡張化された掃流砂量関数、(iii) 斜面崩落モデルならびに (iv) Exner の方程式（土砂の連続式）に基づく地形変動計算、などから構成される³⁾。ここで出現する水流は水深の小さいいわゆる「シートフロー」であるため、澤井¹⁾による実験結果に基づく抵抗則を用いることにした。斜面上の土砂移動に関しては、局所的な勾配が縦横断方向に安息角近くまで変化するため、重力の効果を合理的に取り込むことができるように従来型の掃流砂量関数を修正し、これを解析に用いることにした。斜面の浸食が進み、ガリやリルといった溝が刻まれるようになると、計算途上に安息角を越えるような急な斜面が一時的に出現することがある。河川における側岸浸食のプロセスがそれにあたる。このようなプロセスを掃流砂量関数のみから再現することは不可能であるため、斜面崩落モデルと名付けた新たな手法

を開発し、これを解析に組み込むこととした。本解析における主な設定条件は以下の通りである。計算に際しては、対象とする斜面全域を等間隔メッシュで覆うものとし、ここではその間隔を 6.67 mm とした。また、計算時間刻みについては 0.005 秒程度とした。初期条件については以下の通りとする。まず初期斜面としては、原則として実験時に設定した左右対称な斜面と等しいものとする。しかし、実験時に慎重に整地したとしても斜面には微小な凸凹が存在することを考慮して、数値解析においても、上記の左右対称な斜面に乱数を用いて微小擾乱を与えることとした。擾乱の規模については、幾通りにも分けて数値計算を行い、その規模の違いが水みちの形成過程に及ぼす影響を調べた上で、この影響が顕著に現れることのない範囲内でこれを定めることとした。なお、本論文で説明する解析結果は、斜面構成材料の粒径と同オーダーの擾乱を与えた場合のものである。また、この初期斜面をドライ・ベッドとして取り扱うことにし、斜面上の初期水深は全域にわたって 0 とした。斜面表層下については、その間隙が浸透水で満たされたいわゆる飽和状態にあるものとし、特に浸透流の影響を考慮することはしていない。なお、前述の水路実験において、飽和状態にある初期斜面に対して降雨を与え浸食を生じさせたのは、浸透流が可能な限り不飽和状態とならないようにするためであった。しかし、たとえば斜面にガリが形成されると、そこに向かって浸透水の湧き出しが生じ、これが新たな浸食を誘起することも考えられる。このような浸透流の影響については現在検討中であり、今後の課題とする。

3. 斜面浸食過程と土砂生産

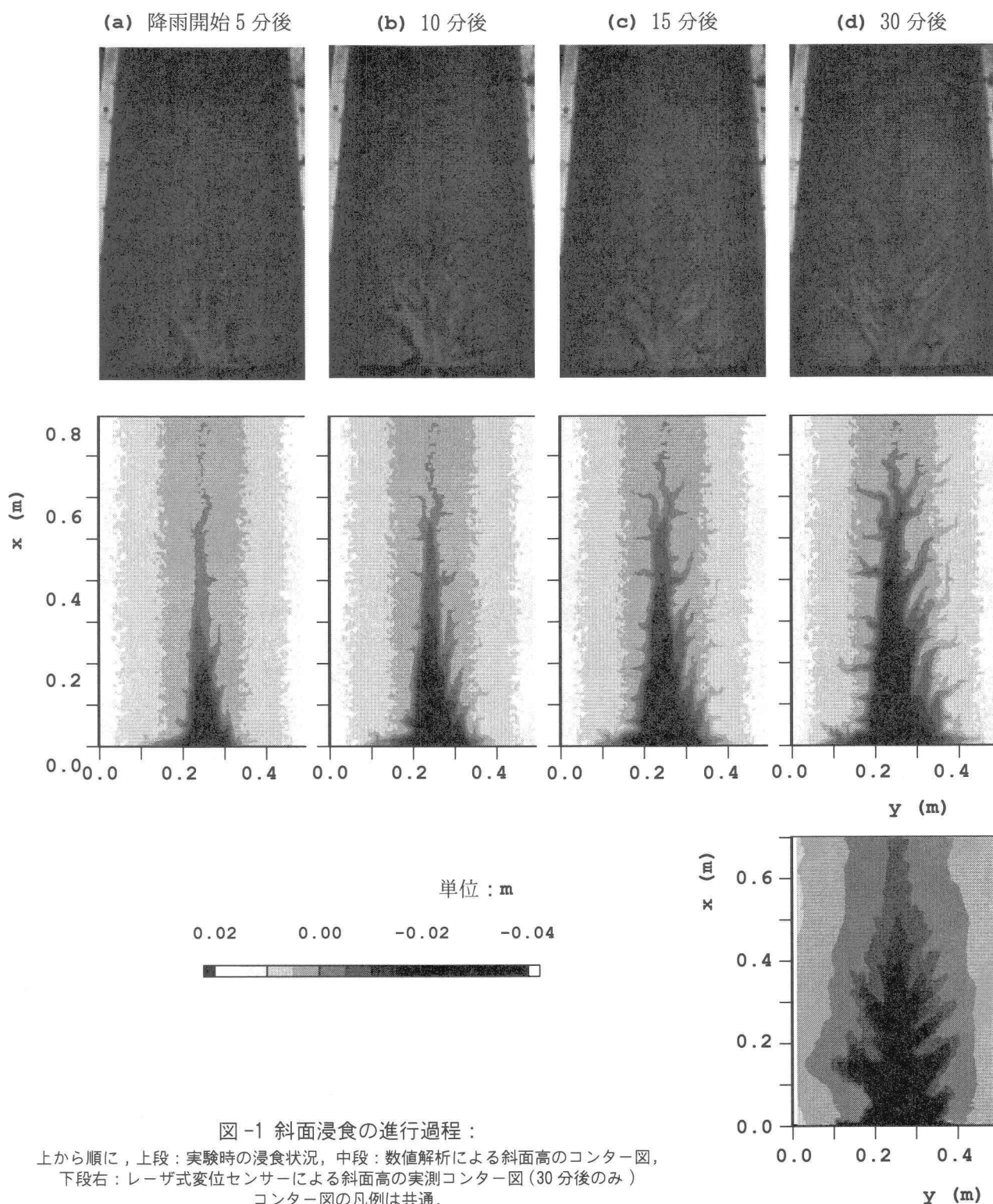
(1) 表面浸食と流路ネットワークの形成プロセス

本論文では、降雨強度 41mm/h の条件下で行った実験と数値解析の結果について説明する。実験では、降雨開始をもって $t=0$ と定義することにし、この瞬間には下流端開口部のゲートが開いているものとする。それでは、結果を見ていくことにしよう。まず、図-1 の上段には、実験による降雨開始後 5 分、10 分、15 分ならびに 30 分の斜面の浸食状況の写真を示した。また、図-1 の中段は、対応する時刻における数値解析結果であり、斜面高のコンター図を表している。なお、図-1 上段の写真に映し出されている斜面の区域は、中段のコンター図のものと同じである。さらに、図-1 の下段には、降雨を停止した 30 分の時点でレーザ式変位センサーを用いて計測した斜面高のコンター図を示した。このコンター図中の色の濃淡は同図中段の数値解析結果と同一の基準に従って描かれており、その凡例は同一である。この

コンター図は、前述の通り、y 軸方向に 1 cm 毎に設けた測線上での斜面高の連続データに基づき描かれており、それゆえ y 軸方向に 1 cm 以下の解像度を期待することはできない。その結果として、写真や数値解析結果に見られる流路のうち上流付近の枝状の微細な流路までは捉えることができていない。この点については今後の計測上の課題とする。さて、以上の写真ならびに計測結果と数値解析結果とを比較すると、(1) 流路群のパターンや浸食状況については概ねよく一致すること、(2) しかも主要な流路を比較すると、その浸食深が同程度であること、などを見て取ることができる。ただし、この比較において次の点に留意が必要である。同一条件下で行われた複数の実験の際に撮影されたビデオ画像を解析し、流路の成長・発達過程を調べたところ、形成された流路群は同一形状とはならず、しかも左右対称になるとは限らないことがわかった。ただし、その流路群のパターンには再現性があり、統計的に見て同一と判断され、しかも流路の斜面上方への遡上距離や浸食深に関してはほぼ一致することも理解された。以上のような点を勘案し、総合的に判断すると、本数値解析の結果は実験結果をかなり良好に再現していると言うことができ、解析モデルの妥当性を概ね検証できたのではないかと考える。

また、図-2 には、数値解析により得られた各時刻における水流の水深のコンター図、流速ベクトル図ならびに流砂量ベクトル図をそれぞれ示した。両ベクトル図に関しては、そのパターンを明示することに主眼をおき、図が煩雑になることを避けるため、計算結果のすべてを図示することはしていない。この図-2 より、主流路（これを「ガリ」と呼ぶ）内の流れは図-1 に示されている流路全幅には及んでおらず、しかも、たとえば図-2(d) の $x=0.0 \sim 0.15(\text{m})$ の下流端付近の区間においては、堆積物を迂回する網状の流れが生じていることがわかる。また、「ガリ」自体がほぼ直線状に伸びているにもかかわらず、その中の流れが蛇行したものとなっていることも理解される。これは、側方から運び込まれた土砂が「ガリ」内に堆積し、流れを阻害するためと考えられ、このような堆積物を避けるように流れが蛇行したものを見ることができる。なお、この際に流路側岸の浸食もあわせて引き起こされていた。

次に、図-1 の斜面高のコンター図と図-2 の水深コンター図、流速ならびに流砂量のベクトル図とから、流路ネットワークの形成過程について見ていくことにする。まず、このネットワークの主流路は、斜面下流端の開口部付近で生じる斜面崩落と浸食により発達を開始し、これが斜面の上方へ遡上するように成長する。この流路以外の裸地斜面上では、その表面の凹凸に応じて流れが徐々にまとまりを見せ



るようになり、それが土砂をも伴ってガリへと流れ込む。この際、ガリの側方斜面の上端を越える流れが生じるため、斜面崩落を伴う浸食が引き起こされる。その結果、二次的な流路が枝を伸ばすように発達することになる。こうした崩落によって生じた土砂は流路内の流れによって下流へと運ばれるが、そのすべてを運びきれない場合には流路を塞ぐように堆積する。これにより流路内の流れの疎通能力が著

しく低下させられるとともに、この堆積物を避けるような流れが生み出され、新たな側岸浸食が引き起こされることもある。この様子は、たとえば前述の図-2(d)の水深コンター図ならびにベクトル図に見て取ることができ、下流の開口部付近の主流路の中に中州のような地形が生じ、水ならびに土砂がこれを迂回するように流れていることがわかる。また、実験時の観察や数値解析結果の分析から、堆積物

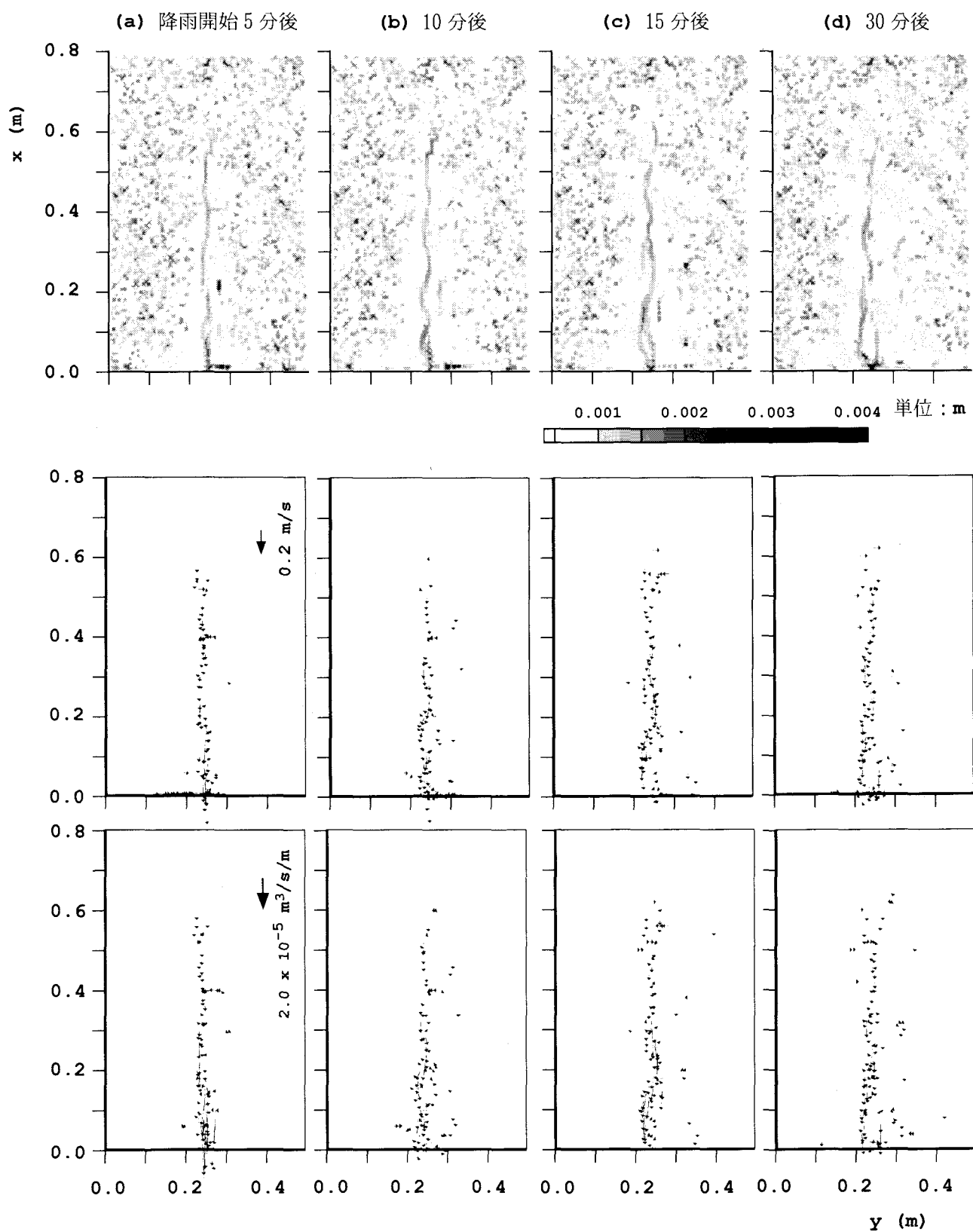


図-2 各時刻における水深のコンター図，水流の流速ベクトルおよび流砂量ベクトル（数値解析結果）
上から順に，上段：水深のコンター図，中段：水流の流速ベクトル，下段：流砂量ベクトル図

の規模によっては流れが一時的にせき止められ，その後これが浸食を受けるというプロセスをとることも見出されている．これは後述する流出土砂量の

時間変動とも密接に関わるプロセスであると言える。

なお，本解析により再現された流路群が水路中心

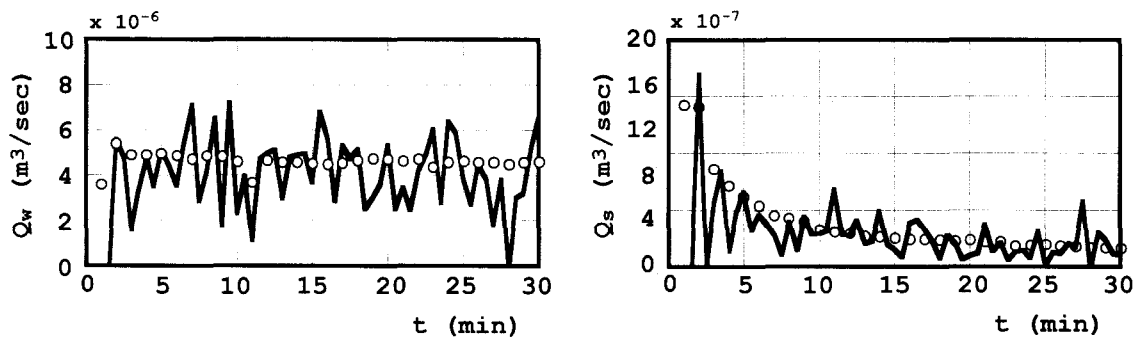


図-3 斜面下流端からの流出水量 Q_w ・流出土砂量 Q_s の時間変動

軸に対して必ずしも左右対称にならないことを説明したが、数値計算上の不安定がこれを引き起こしているわけではないことを確認している。

(2) 土砂流出特性

次に、斜面下端からの水ならびに土砂の流出特性について説明する。図-3には斜面下流端の開口部から流出する水ならびに土砂の体積の時間変化を示している。図中の○印が実測による流出水量ならびに流出土砂量を表しており、これは1分毎に採取したサンプルから求めた平均的な値を表している。一方、実線で示された解析結果はその瞬間値を折れ線で結んだものである。両者の違いを念頭に置きながらこの図を見ると、流出水量ならびに流出土砂量に関しても数値解析結果は計測結果とよい対応関係にあることがわかる。また、水量ならびに土砂量が時間とともに大きく変動する様子を見て取ることができる。これは、このような流出の一つの特徴と考えることができ、前述の通り、流路の遡上に伴う斜面の間欠的な崩落や、流路内に生じる崩壊土塊の堆積と密接に関係するものと考えられる。たとえば、図-3の24.5分以前の数分間に注目すると、この間の流出土砂量は比較的小さな値をとっているが、これは、土砂の堆積により開口部上流側の流路が一時的に閉塞状態となっていたことと密接に関わるものと考えられる。一方、この閉塞に伴い、その上流側の水位が一時的に上昇することになり、やがてこの閉塞部が浸食されると、その直後に流出土砂量が急増することになる。24.5分において流量ならびに流出土砂量が増大しているのはこうした理由によるものと判断している。

4. 結論

本研究では、降雨による裸地斜面の浸食過程を対

象として、模型斜面における実験と数値解析とを行い、解析モデルの妥当性を検証するとともに、この浸食のプロセスを明らかにすることに努めた。ここで対象とした流路群の形成・発達過程は、従来の流砂量関数だけでは評価することのできない斜面崩落を伴うことが特徴であり、特にガリ先端部の遡上においてはこの崩落が顕著に現れる。そこで、このような過程を数値的に再現する上では、ここで用いた掃流砂量関数の修正と斜面崩落モデルの導入とがかなり有効であることが確認された。

本解析では、前述の通り斜面表面下の浸透流の影響を考慮しておらず、たとえば「ガリ」への水の湧き出しの影響などを検討していく必要がある。そこで、今後は、本解析と飽和・不飽和浸透流解析とを連動して行う解析モデルの構築を目指し、上記のような影響を明らかにしていきたいと考えている。さらに、本モデルを実際の崩壊地や農地の浸食の問題に適用していくことも含めて、更なる検討を進めていく予定である。

謝辞：本論文の実験の遂行にあたっては、当大学学生の小笠原基君、田畑智永君ならびに岡崎倫大君の協力を得た。ここに記して謝意を表します。

参考文献

- 1) 澤井健二：粘性性流路床の変動機構に関する土砂水理学的研究，京都大学学位論文，1977。
- 2) 泉 典洋・Gary Parker：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-32，79-91，1995。
- 3) 関根正人・小野 了：降雨による斜面浸食過程に関する数値解析，土木学会水工学論文集，第46巻，647-652，2002。

(2003.9.30 受付)