

リルの平面形態変化と流出土砂量との関係

深田三夫*・藤原輝男*

On the Time Variation of RiLL Patterns and Sediment Out of Bare Slope

Mitsuo FUKADA and Teruo FUJIWARA

Abstract

Small channels generated on bare slope by rainfall grow with time. Sediment run-off from the slope also increases with change in the plane patterns of the channels. In order to estimate the sediment run-off from bare slopes. It is important to know the relationship between the characteristics of run-off and the geometric properties of channel patterns.

In this study, experiments were carried out using Masa soil while supplying artificial rainfall on the slope. The time variations of sediment run-off were measured. As well, time variations of plane patterns of channels were photographed, and the degree of complication of the patterns was described as fractal dimensions.

As a results of both experiments and analysis, it is clear that the total plane area of channels was eventually close to constant. But the sediment run-off from slope gradually increased with time. The fractal dimension of channel patterns increased and decreased with time in the case of a gentle slope angle, but did not change with time in the case of steep angle.

I まえがき

裸地斜面に発達するリル網の形態的な特性と流失土砂量との関係を求めた研究は数少ない。それはこれまでに形態を数値化する幾何学的な手法がなかったことが第一の原因にあげられる。著者らはフラクタル幾何学の概念を十分に発達した現場のリル網に適用し、二通りのフラクタル次元 (D_{FC} , D_{FS}) を導入することによって、その形態的な特性を数値化することを試みた¹⁾²⁾³⁾。 D_{FC} は水系網や海岸線のフラクタル次元を求めると同様にリルの流心線のゆらぎの度合を数値化するものであり、解析の結果、斜面勾配とリル網の D_{FC} との間には密接な相関があることを報告した。一方 D_{FS} はリルの面積も含めた形態の複雑さを表す指標である。リルの特性として斜面全体に対する流路面積率が高いこと、また短時間の集中豪雨による急激な発達すること

などを考えれば面積変化も考慮したフラクタル次元 D_{FS} のほうがリル網の形態的特性と侵食土砂量の定量的関係を表すのに適していると言える。しかし現場調査データの解析結果では D_{FS} と斜面勾配との関係は D_{FC} と斜面勾配の関係ほどの相関は見られなかった。これは斜面の造成された時期の違いや土性にその原因があるといえるが、一方では D_{FC} と斜面勾配との相関性の高さから流心線のゆらぎは、ある時点以降はほとんど変化がないということも示唆している。

以上のことから著者らは降雨条件、土性などを一定にした上でリルの3次元形状も含めた形態変化と、侵食土砂量の経時変化を求める人工降雨による実験が必要と考えた。時間降雨量数10mmの豪雨ではごく短時間のうちにリル網が発生、発達し土砂災害へと結びつく。リル網パターンの経時変化と流亡土砂量とは密接に関わっていると考えられるので、リル発達初期の形態変化が激しい段階において、その平面パターンの経時変化の数値化が可能であれば侵食量予測という点からも重要である。ここでは形態、および流出土砂量

*土木工学科

の経時変化の測定が比較的容易な模擬斜面実験を行って、リル網発達の各段階においてそのパターンのフラクタル次元を求め、そのパターン形成と流亡土砂量との関係について調べた。

II 人工降雨による斜面侵食実験

2-1 実験装置と測定方法

この実験では模擬斜面に人工降雨を与えて表面流を発生させ、リルのパターン形成を追跡するのが主な目的である。そのため斜面に最低3, 4本のリル数が必要と考え、これまでの筆者らの現場調査や芦田等⁴⁾の実験結果を参考にして模擬斜面の大きさを決めた。そのため降雨の粒径分布や強度など制御不十分な点もあったが形態変化を見るには十分と考えた。実験用模擬斜面はFig. 1に概略が示してあるように545^L×240^W×95^H(単位:cm)の土槽でその底部は粘土質の不透層である。試料土は宇部市近郊のマサ土で比重は2.60、粒径加積曲線をFig. 2に示した。また参考のために流出土砂の粒径加積曲線も併せて示した。斜面勾配は緩斜面(平均7.2°)と急斜面(平均24.3°)の2種類で実験を行った。また斜面は15kgのローラーを10~15回往復させ、締め固めを行った。降雨装置は給水バルブに市販の散水用ノズルを4個直結し、約8.5mの高さより上向きに放水し、斜面に一樣に当たるように調整した。この高さではほぼ終末速度が得られている。

今回の実験では斜面に表面流を発生させ、リルの発達過程を追跡することが目的であるので、雨滴径の分布については考慮に入れず、降雨強度のみが一定になるようにバルブの調整を行なった後に実験を開始した。屋外実験のためにこの人工降雨は風の影響を受けやすく降雨強度は常に変化するのでラピッド降雨計で日記

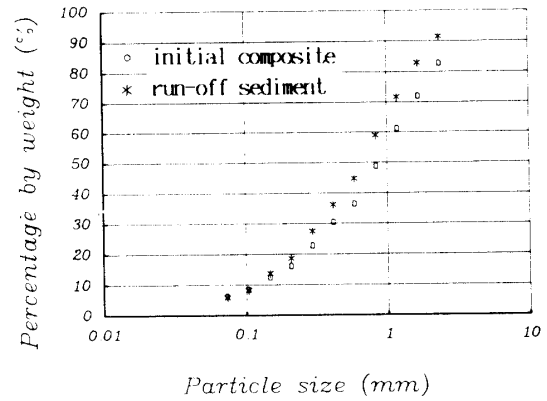


Fig. 2 Grain-size distribution curve

Table 1 Experimental condition (MASA soil)

No	slope (°)	scale (m ^L ×m ^W)	rainfall (mm/hr)	moisture (%)
RUN-1	8.6	5.45×2.4	88.9	12.8
RUN-2	7.2	5.45×2.4	44.5	11.8
RUN-3	6.3	5.45×2.4	—	13.4
RUN-4	24.7	1.95×2.4	189.0	12.6
RUN-5	24.0	1.95×2.4	95.9	11.3
RUN-6	24.1	1.95×2.4	73.2	14.6

し、10分間降雨強度を測定した。表面流量は下流側に設けた検定済みの三角堰でほぼ5分間隔で測定を行い、流出土砂量は斜面下端部において発生したリルごとに5~20分間隔(平均10分間隔)で採取し、湿潤重量を測定した後、炉乾燥して重量を測定し、全乾燥重量に換算する方法をとった。リルの発生後はビデオカメラと一眼レフカメラで一定時間おきにその撮影を行い、パターン形成を記録した。そしてリル網の発達が定常状態に達したところで(およそ4~5時間後)実験を終了した。Table-1に実験条件を示す。

III リルの発生とそのパターン形成過程

3-1 リル発生過程の現象論的観察

Fig. 3に実験開始直後に斜面下端部でリルが発生し、時間の経過とともにその面積を拡大していく状態をRUN-2(勾配7.2°)場合について写真からのトレース図で示した。実験開始直後は斜面の浸透能が高いために表面流は発生せず、雨滴の衝突による飛散で僅かな土粒子が斜面下端部へ移動するのみである。この状態が

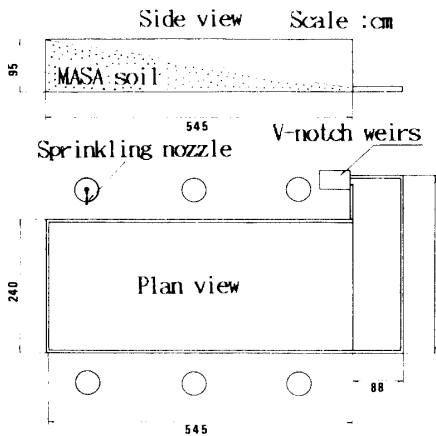


Fig. 1 Sketch of experimental slope

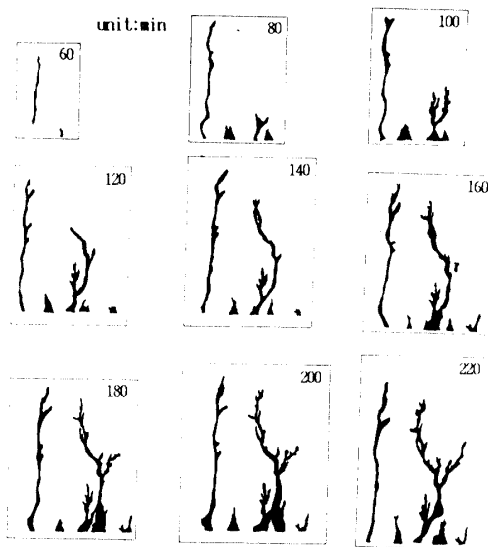


Fig. 3 Development and propagation of rill patterns in case of slope angle 7.2° (RUN-2)

大体10～30分間続くが同じ斜面勾配，降雨強度でも表面流発生までに差があるのは初期の斜面下層部の含水比の差と思われるが今回は確認していない。やがて斜面下端部に湿潤面が現れ，目視でも明白であるがそれが斜面を遡上していき，それに伴って発生した表面流は雨滴の衝撃が加わって⁵⁾，表面の微細な土粒子を押し流していく。この状態が10～20分間続き表面，特に斜面下部付近は比較的粗い土粒子で覆われるようになる。ここまでの侵食は斜面全体で一様に行われており，いわゆる sheet erosion(表層侵食)と呼ばれているものである。やがて斜面下部付近の表面に斜面に沿って窪みの縦列が数個できる。それぞれの列は数 cm 間隔で並んだ窪みでできており，あたかも土層内部で互いに連絡し合っているような感じすらうける。この窪みの大きさ，形は一定でないが細長い馬蹄型に近く，平均すればほぼ径 3～4 cm である。またそれぞれの窪みはその周囲が表面から 5～10mm 陥没しており，明らかに表面とは不連続な面を形成している。ここまでの段階が micro-rill⁶⁾と呼ばれているものと思われるがリル発生要因やリル発生過程についてはこれ以上ここでは取り扱わない。

3-2 リル発達過程の現象論的観察

斜面に沿って並んだ窪みの群れの一個が発達し始め，窪みの列に沿って遡上しながら拡大していくが，この現象はヘッドダウン(head down)やヘッドカット(head

cuts)と呼ばれているものである。その様子は斜面上部からの表面流がその窪みに集中し，その掃流力作用で窪みの側壁を崩壊する場合と，土壤面下でこの窪みに向けて浸透流の集中化が起こり，piping作用により側壁の塑性流動化が起こる場合の2つが考えられ⁴⁾，それぞれが独立に，あるいは両者が同時に進行していくようである。やがてそれぞれの窪みはつながって一本になると共に先端部(斜面上部)で枝分かれが始まり，ヘッドダウンを繰り返しながら斜面を遡上していく。このように発生したリルの本数は斜面幅0.5～1 mに大体一本の割合であり，現場のものとも一致している。しかしそれぞれのリルは発達，遡上していく速度は一定でなく，インターリル領域からそれに集中する表面流量が多いほど速く，また近隣のリルとその早さが逆転する場合もあった。それぞれが競合しながらその面積を拡大していく様は樹木の成長を見ているようであり，緩勾配斜面ほどその形態は複雑で現場観測の結果とも合っている。またリルの先端部の数10cm上方には引続き数個の窪みが発生，それを追従するようにリルは遡上していくのが観察された。リル先端の斜面遡上速度はそれが斜面上部に接近するにつれて遅くなり，上端部より1 m程度手前で止まり，以後平面形態の変化は緩慢になった。このことは斜面上端部における非侵食帯(non-eroding band)⁷⁾の存在を示唆するものである。

IV 流出水量，流出土砂量とリル網パターンの経時変化

4-1 フラクタル次元 D_{FS} の経時変化

リルの経時変化を表したトレース図 Fig. 3からわかるように，発達過程においては平面パターンの変化の特徴はその面積の急激な増加にあると言ってもよい。従ってここでは面積を用いたフラクタル次元 D_{FS} でその形態変化を数量的に表してみる。

リル発達過程においてその形態変化の数値化を試みた例は，筆者らの知る限り芦田・沢井⁸⁾の研究のみであるが，そのなかで著者らは流路の屈曲率 S を定義したもののリルの面積変化や分合流のことには触れておらず，結局流出土砂量と形態変化とを結びつけて考えることは出来なかった。屈曲率 S はまえがきで述べた流心のフラクタル次元 D_{FC} に相当するものであるが，流路の屈曲と共にその面積変化も考慮した D_{FS} の方が汎用性が高いと思われる。

リルの発達過程を撮影した写真を基にしてほぼ10分間隔でそのパターンのフラクタル次元 D_{FS} を求め，その経時変化を調べて緩急勾配の場合の比較を行った。フラクタル次元の求め方の詳しい説明はここでは省略す

るが、デジタイザを用いてパターンの外周の座標値をコンピュータ入力することで比較的簡単に求めることができる。Fig. 4は時間の経過とともに D_{FS} が変化していく様子を、実験RUN-1~RUN-6のそれぞれの場合について示したものである。RUN-1~3は緩斜面、またRUN-4~6は急斜面の場合を示し、斜面に発生したすべてのリルについて D_{FS} を計算しその経時変化を示した。この場合、面積の変化も考慮しているのでフラクタル

次元の高いものほど面積も大きいことになる。緩斜面では実験開始後比較的早い時間に D_{FS} は高い値を示すが不安定で変動を繰り返しながら一定値に収束していく。このことは緩斜面では小さなリルの生成、消滅が繰り返されていることや、分、合流の頻度が高いことなどが D_{FS} の変動の理由として挙げることもできるが、平均的に見た場合リルパターンの複雑さは発達過程においてほとんど変化しないと言うことが出来よう。一

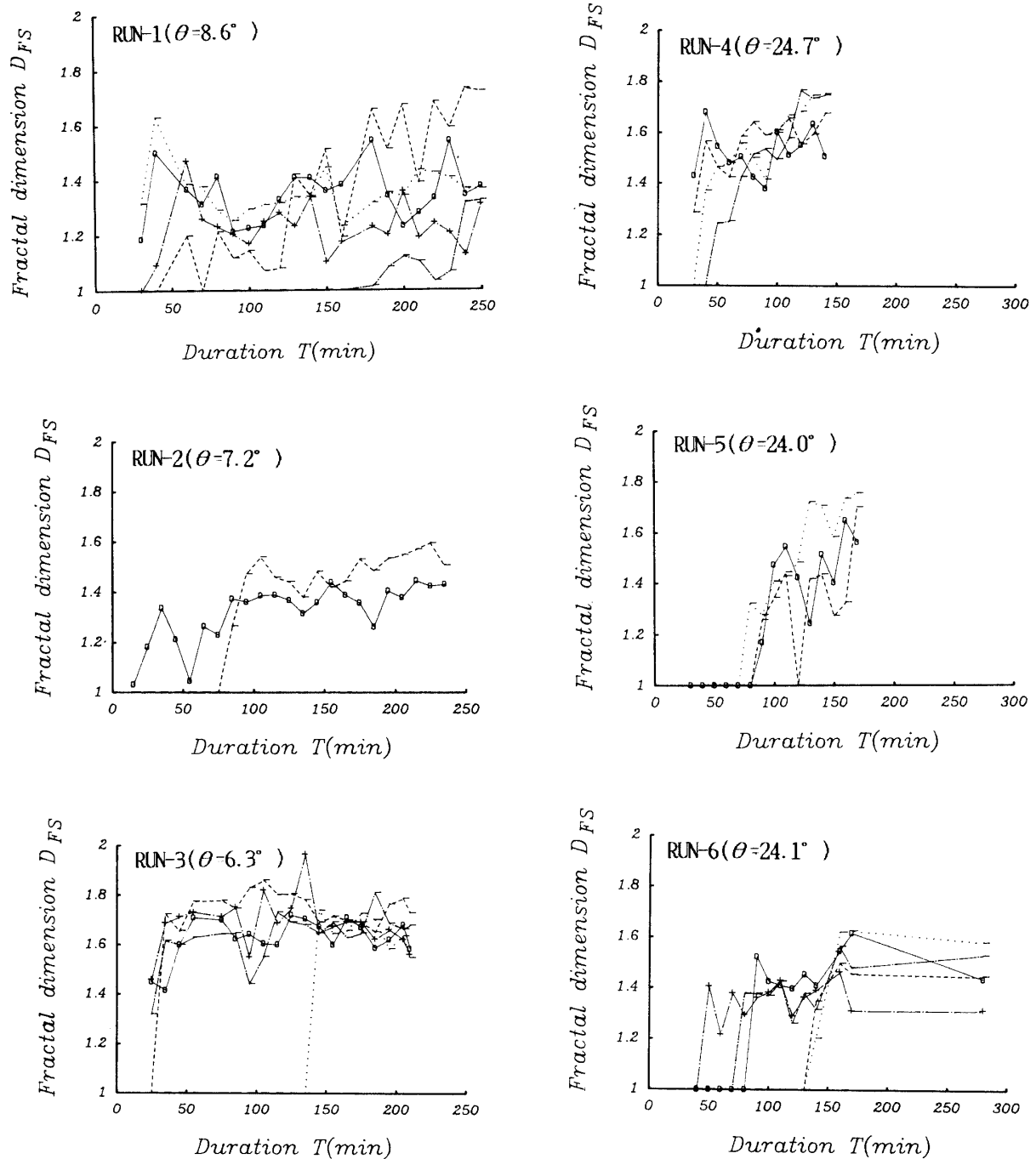


Fig. 4 Variations of fractal dimensions D_{FS}

方急斜面においては緩いカーブを描きながら漸増し一定値に近づいていくが、緩斜面の場合に比べ変動は少ない。換言すれば時間経過と共に形態の複雑さが増して行くと言うことである。このことは現場調査の結果とは矛盾するようであるが、この模擬斜面でリルの発達を観察すると斜面下端部においてリル幅や分合流の変化が大きいことがわかる。現場調査においても下端部において土砂排出がよくない場合にはこの実験のように高い D_{FS} がでたので急勾配斜面では斜面下端部の境界条件がリル網の形態に及ぼすことが考えられる。

4-2 流出水量, 流亡土砂量の経時変化

Fig. 5 に RUN-1~RUN-6 のそれぞれの場合について時間経過とともに降雨強度, 流出水量, 流出土量に変化していく様子を示した。降雨強度は約10分おきの測定値を時間降雨量に, 流出土量も約10分おきの測定値を単位時間あたりに, また流出水量は約5分間隔で測定したがこれも単位時間あたりに換算した値を示した。RUN-3において降雨量のデータが欠如しているのは実験途中の計測装置の故障のためである。明らかに流出土量, 流出水量との間には強い相関が見られるが, 流出水量の方が変動が激しい。今回の野外実験では風

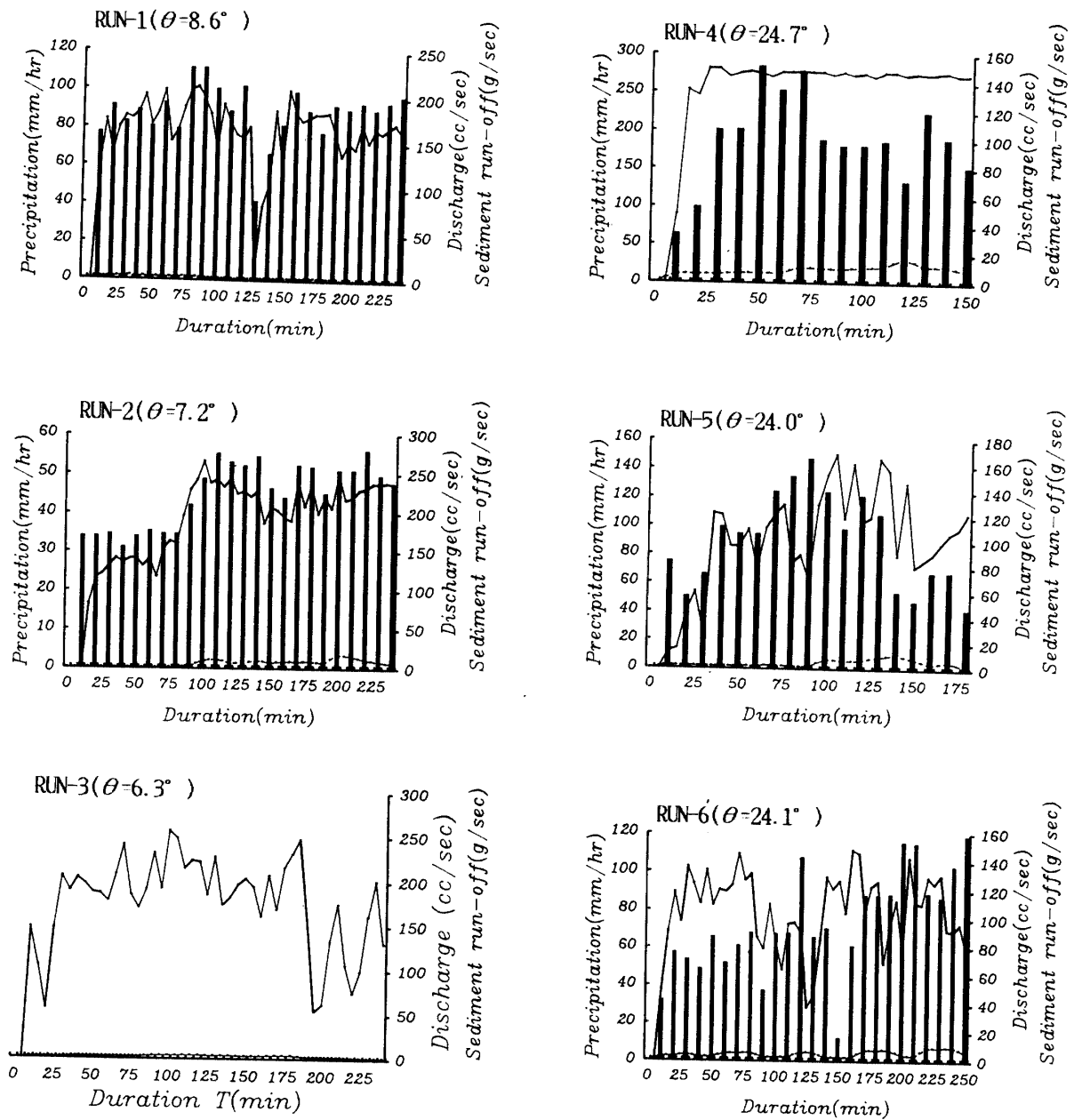


Fig. 5 Variations of rainfall intensity, discharge and sediment run-off

の影響が無視できず、斜面全体に一樣に人工降雨を与えることは困難であった。このため一点で測定された降雨強度データと斜面全体の平均量である流出水量、土砂量の時系列解析には無理があると判断し、以下のように標準化して比較を行った。まず流出率が一定(=1)と仮定し、それぞれの実験での全流出量 Q_T から算出した有効降雨 $R_E(Q_T/AT, A: \text{斜面面積}, T: \text{実験継続時間})$ を用いた。Fig. 6 には流出水量をこの有効降雨で除し、標準化したものを縦軸に表して、緩、急勾配別にその経時変化を見た。単位有効降雨あたりの流出水量は緩、急勾配ごとにほぼ一定値をとることがわかる。また Fig. 7 には流出土量の反応を見るために単位流出土量あたりの流出水量を示した。緩急斜面とも流出土量の反応は緩慢な変動を繰り返しているが、急斜面の場合はほぼ一定値を示すのに対し、緩斜面においては RUN-1, 2, 3 のそれぞれの場合で流出土量の値が異なる。

4-3 リル面積と流出土量の経時変化

Fig. 8 はほぼ10分間隔で求めたリルの面積(モニター画面ドット単位で求めたもの)を、また Fig. 9 には累

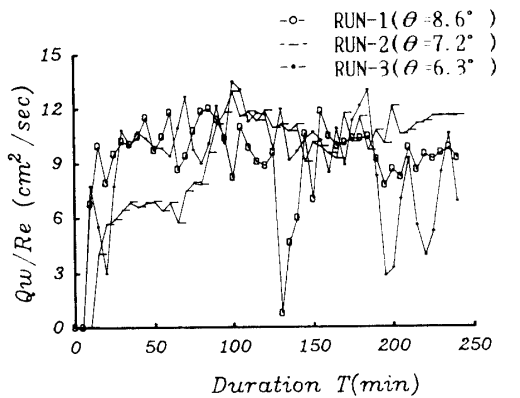
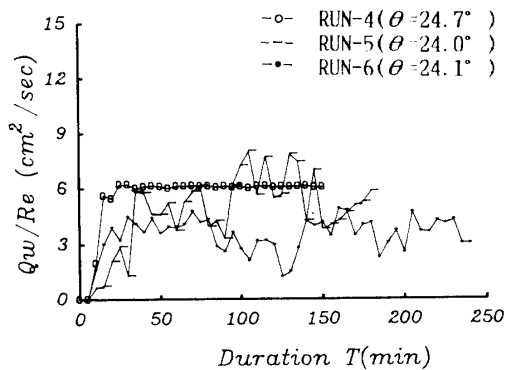


Fig. 6 Variations of discharge per unit rainfall



加流出土砂量の経時変化をそれぞれ RUN-1~6 の場合について示したものである。両者は互いに相関関係があり、一方の増加と共に他方も増加していく。緩斜面においては流出土砂量の変化に比べてリル面積の増加が次第に緩慢になっていくことがわかる。このことはある時点までは侵食が平面的に進行し、それ以降は深

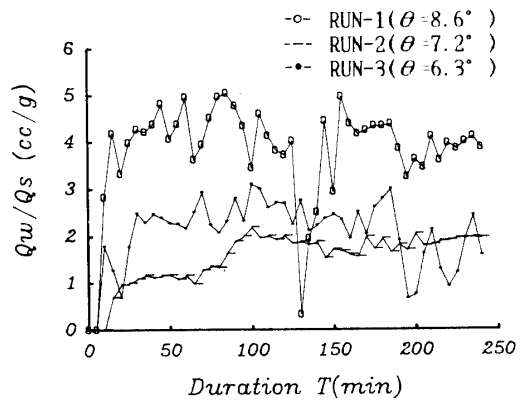


Fig. 7 Variations of discharge per unit sediment run-off

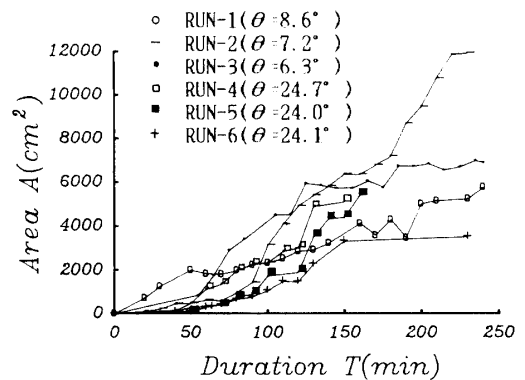
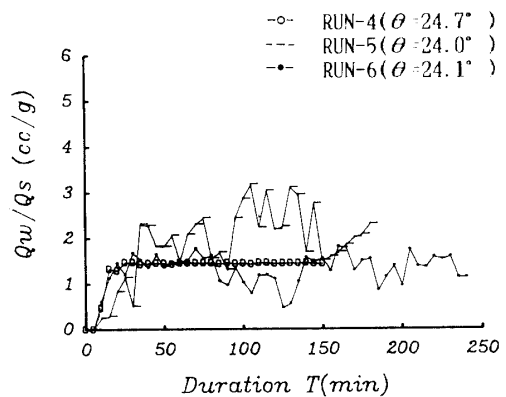


Fig. 8 Variations of area of erosion

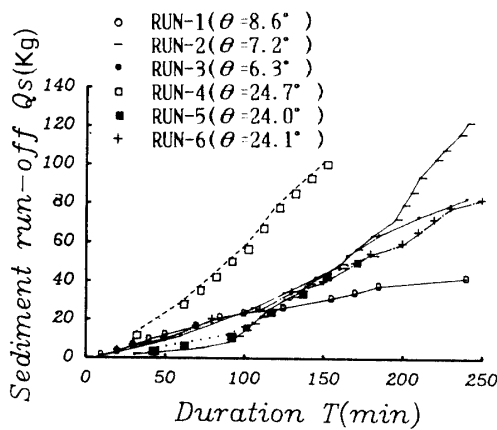


Fig. 9 Variations of total sediment run-off

き方向に侵食が進行することを意味しているが今回の実験では侵食深の経時変化を測定するまでには至らなかった。また急斜面においてはこの実験時間の範囲において面積、流出土量とも増加の一途をたどっていることがわかる。

この章で調べてきたように、侵食の初期においては流出土砂量と直接結び付くのはリル平面面積の増加である。一方始めに導入したフラクタル次元 D_{FS} はリルの面積変化とともにそのパターンも数値化するものであり、Fig. 4 で示したように D_{FS} の変化は平均的に見れば流出土量変化に対応している。 D_{FS} の変動成分は流出土量のそれに対応していると考えられるが、土量の測定精度が十分でないために今回は確認できなかった。

V 実験終了時のリル網の3次元の形状

5-1 実験終了時のリル網パターンの D_{FC} 値

平面パターンの変化がほぼ定常に達したと思われる時点で実験を終了したが、この時のリルを緩急勾配の場合で比較すると、明らかに緩急勾配の場合が分岐、蛇行回数が多く形態は複雑である。フラクタル次元 D_{FC} を D_{FS} と同様に粗視化法で求め、緩急勾配斜面での形態の差異を量的に表した。その結果緩急勾配の場合は D_{FC} は平均1.18、急勾配の場合は1.11であり、現場データの解析値とほぼ同じ値を示した⁹⁾。現場と実験での様々なパラメーターの違いにも関わらずほぼ同じ値をとっていることは興味深い。また現場の斜面に発達したリル網において撮影角度によるフラクタル次元の変化が問題になったが⁹⁾、この実験では異なる角度からの撮影が可能で、撮影角度による D_{FC} の比較を行うことが出来た。結果は斜面前方水平方向から撮影の場合は D_{FC} は平均1.21で、垂直上方から同じリルを撮影した場合は D_{FC} は

平均1.20であり、撮影角度の違いによる D_{FC} の変化は無いと言うことができる。

5-2 実験終了時のリル侵食深、リル幅の測定

これまで見てきたように、累加土砂流亡量とリル面積、およびフラクタル次元 D_{FS} の経時変化との間には相関があることがわかったが、斜面単位面積当りに換算すれば急勾配斜面の方が流出土砂量は多い。流出量のほとんどはリル内部の土砂であるからリル網の3次元の形状とは密接に関わっているはずである。今回の実験ではその進行過程でリルの3次元形状を捉えることはできなかった。実験終了後の最大侵食深およびリル総幅を計測することによりその概略をつかみ、現場計測データとの比較を行った。Fig.10は斜面の総てのリルについてX軸(斜面幅方向)に沿ってその幅Wと深さHを測定し、その値が斜面方向にどう変化しているかを示したものである。侵食深さについては個々のリルについて、また侵食幅については全部のリルについて個々の幅を加えたもの、 ΣW を示した。侵食深さは緩斜面の場合にはリルの中央部付近が深く掘れて下端、上端部において浅くなっている。一方急斜面の場合にはリル下端部において浅く上端部で深いという特徴が観察された。現場での測定データも同様な傾向が観測されている。またリル幅については緩急斜面とも末端部において広く、斜面を上昇するにつれ指数的に減少していく。 $\Sigma W \times Z$ を求めてリル断面の概略値を算出し、斜面方向の変化を調べた。その結果、急斜面では下端部ほど流出土砂量が多く、緩斜面では斜面方向に一様である。このことは下端部の境界条件如何によっては侵食量の軽減の可能性を示唆するものである。

VI あとがき

以上、人工降雨によって模擬斜面に発達したリルパターンのフラクタル解析、および流亡土砂量の経時変化とそのパターン変化との関係について実験結果を中心に説明してきた。フラクタル幾何学の概念が現実の多くの複雑な形象の数値化に適用されだしたのはこの10年のことである。土壌侵食研究の目的は流出土砂の防止、もしくはその軽減にあり、リル形態を調べることはその一手段に過ぎない。しかしその形態と侵食量が密接に関わっている以上、筆者らは研究の第一段階としてその形態研究の必要性を感じ現在研究を進めつつある。

リルのパターン形成や流出土砂量の経時変化には様々な因子が関与しており、かつ確率過程的であるので、

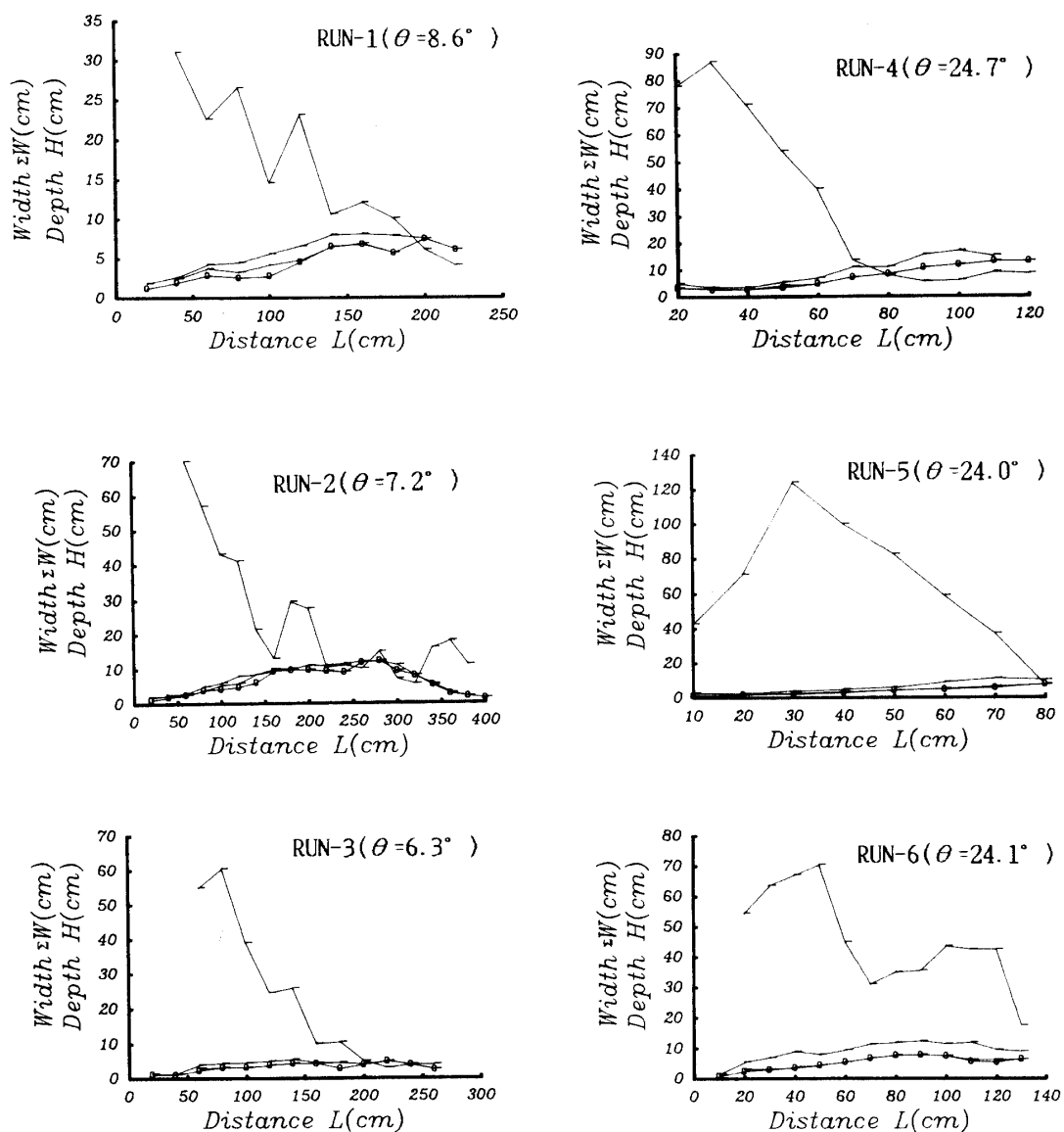


Fig.10 Width and depth of rills

外部パラメーターが与えられれば侵食面積や侵食量は決定論的に定まると言うものでも無い。しかしこれまで見てきたように、リルの平面パターンにフラクタル次元の概念を導入することによりその乱雑さの数値化が可能となり、かつ面積率を導入することによってリル網の幾何学的形態と侵食量とが一对一に対応する可能性を示すことが出来た。可能性と言ったのは本研究で収集したデータがその数や測定精度の点で十分と云えず、更に降雨強度や土性が異なる場合の検証が必要だからである。本研究で得られた知見を以下にまとめると、

1) 斜面全体に占めるリルの面積 (面積率) も斜面勾配と対応しており、面積を考慮に入れたフラクタル次

元は面積率が増えると共に増加する。

2) 降雨後数時間はリル面積と流亡土砂量は線形な対応関係を保ちながら経時変化する。

3) 緩勾配斜面の場合フラクタル次元の経時変化は変動を繰り返しながら一定値に近づく。

参考文献

- 1) 藤原輝男・深田三夫・松崎浩憲：リル網のフラクタル的形態について，農業土木学会九州支部講演集，P. 143-144(1987)
- 2) 松崎浩憲：降雨による土壌侵食に関する研究，山口大学修士論文(1988)
- 3) Fujiwara.T., M.Fukada.: Study on the fractal

- dimensions of rill patterns that develop on hillslopes, International Workshop on Conservation Farming of Hillslopes. (I) 17. 1-13, (1989)
- 4) 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, 京大防災研年報第16号 B, pp.449~470(1973)
- 5) Fujiwara.T., M.Fukada.,H.Matsuzaki. : The Experimental study on the Model of Soil Erosion by the Impact of Raindrops, Technology Reports of the Yamaguchi University, Vol.3 ,No.5, p.417-426(1986)
- 6) Meritt.E., The Identification of Four Stages during Micro-Rill Development, Earth Surface Processes and Landforms, Vol.9, pp.493-496(1984)
- 7) Laushey.L.M., L.M.Brausch : The Geometrics of Rill Formation on Hillslopes, Inter. Asso. Hydraul. Res., pp.39~47(1979)
- 8) 芦田和男・沢井健二：裸地斜面における流路の形成過程に関する研究(III)－流路の3次元形状－, 京大防災研年報第20号 B, pp.371~385(1977)
- 9) 深田三夫・藤原輝男：裸地斜面に発達したリル網パターンの数値化, 山口大学工学部研究報告, 第40巻 第1号, P.189-196(1989)

(平成2年4月14日受理)