

# 裸地斜面に発達したリル網パターンの数値化

深田三夫\*・藤原輝男\*

## The Quantification of Rill Patterns that Develop on Bare Hillslopes

Mitsuo FUKADA and Teruo FUJIWARA

### Abstract

Rill networks which developed along bare hillslopes because of rainfall have very complex patterns. It is impossible to know the rate of erosion with time until we express quantitatively the figure of the rill patterns. As the rill patterns are usually similar to the river networks, application of Horton's law to the rill networks has been tried.

In this study, the degree of complication of rill patterns that develop on hillslopes is described as entropy and fractal dimension which has generally non-integer values, by applying the two geometrical concepts of Spectrum and that of Fractal geometry. The entropy of rill patterns can be calculated from the power spectrum which can be obtained by decomposing the rill patterns into the several single harmonic function. On the other hand, fractal dimension can be easily computed by computer graphics. In addition to this analysis, the applicability of Horton's law to rill patterns was also considered.

As a result of applying this analysis to the rill patterns which develop on bare hillslopes, the entropy and the fractal dimension of rill patterns were closely related to the number of bifurcations of the rill. And applying Horton's first and second laws to the rill patterns, it becomes clear that only Horton's first law can be applied to the rill patterns.

### I, まえがき

宅地や農地等の造成地では、自然降雨によって発生した斜面の侵食を数多く見ることが出来る。斜面侵食はその形態によって面状侵食、リル侵食、ガリ侵食などに分類されるが、一般には表面水が細い水みちに集中して生じるリル侵食が最も多く存在し、またこれがガリ侵食へと進んで、侵食量が急速に増えることから、このリル侵食の発生・発達過程の研究が、造成地等の裸地の保全に役立つと考えられる。

斜面上のリル網から運ばれる流出土砂の時間変化特性を知るためには、時々刻々に変化するリル網の形態を数値として把握することが必要である。しかし、その形態は複雑、しかもランダムであり、現在までその

数値化の試みはほとんどない。リル網の形態が河川水系網に似ていることから、ホルトンの法則を適用する試みも幾つかなされているが<sup>1,2)</sup>、発達した空間、時間スケールや、水みち面積の斜面全体に占める割合など、いくつかの点で河川水系網とは異なり、土砂流出特性をホルトン則で説明するには無理がある。

本研究はリル網のパターンを幾何学的図形としてとらえ、その複雑さの程度をエントロピー、およびフラクタル次元という非整数量を用いて表すことを試みたものである。平面図形の揺らぎを空間周波数で分解し、その周波数分布の状態を表すものがパワースペクトルである。エントロピーはこのパワースペクトルの勾配を基に定義され、図形の複雑さの程度を表す指標となる。一方、フラクタル次元はフラクタル幾何学の中心をなす概念であるが、平面図形はもとより、3次元図形に対しても拡張されて、その複雑さの程度を簡単に求めることができ、自然物のパターンの数値化に応用

\*工学部土木工学科

されつつある。

まさ土造成地斜面に発達したリル網の写真撮影を行い、以上の解析方法を適用して、エントロピーとフラクタル次元を求め、これらと水みちの分岐数やその長さなどとの相互の関係について考察を加えた。また、これらのリル網について Horton 則の第1, 第2法則を当てはめ、その適用性について検討を加えた。

## II. リル網の現場観測

### 1. リル網の撮影方法

リル網のパターンは、斜面勾配や広さなどの地形条件、土質条件、気象条件などによって異なる。また、同一のリル網であっても、見る角度などによっても、その複雑さの程度は変化し、解析には誤差が生じることになる。このことから解析に用いるリル網の撮影条件、例えば斜面に対する撮影角度、撮影距離などは常に統一しておく必要がある。しかし、実際の写真撮影にあたり、風ややぐらなどを用いて撮影しない限り、撮影条件の統一は一般に困難である。本研究の解析に用いた現場リル網の写真は、斜面に対する撮影角度は必ずしも一定ではない。このために Fig. 1 に示すように撮影角度などの違いで、

- a. 撮影角度による収縮
- b. 撮影距離による奥行きの収縮
- c. レンズ特性による周辺部の収縮

などによる像の変形が考えられるが、撮影に当たっては望遠レンズを使用し、斜面の奥行きに比べ遠距離より撮影を行ったので、b, c による誤差はほとんど無視できると思われる。a はすべてのリル網で斜面に垂直方向から撮影すればその変形が生じることが無いが、今回の撮影では出来なかったため、写真より読み取ったリル網の座標値をコンピュータ入力した後に、次式を用いて変換した。

$$L = L' / \sin(\theta_1 - \theta_2) \dots\dots\dots (1)$$

第II章で変換を行わずに解析した結果と変換後に解析した結果を比べ、その差異を明らかにする。

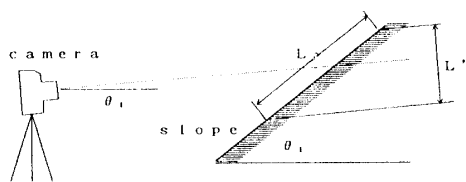


Fig. 1 The correction of distortion of image by the slope

## III. 現場リル網の数値化

### 1. リル網のエントロピーの算出方法

#### (a) スペクトル解析の概念<sup>3)</sup>

x y 平面上に描かれた図形を  $y = f(x)$  で表すとす。この図形の揺らぎを基本的な周期関数、例えば三角関数の重ねあわせで表わし、この中に空間周波数  $k$ :  $k = 2\pi/x$  を持つ基本周期関数の含まれる割合で図形の複雑さを量的に表そうとする手法である。この手法は振動現象の解析などによく用いられているが、その場合には独立変数  $x$  は通常、時間である。平面図形の解析においては、独立変数  $x$ 、従属変数  $y$  共に座標値である。例えばある斜面において  $x$  として水平軸をとり、高さ方向にゆらぎを  $y(x)$  として解析した場合、リル網のように分岐していると、1つの  $x$  に対して複数の  $y(x)$  が存在することになり、多価関数のスペクトル解析は出来ない。よって、独立変数としてリルの周上の1点からこれに沿って測った長さ  $x$  をとり、それに対応するゆらぎはその点の微係数を選ぶことにする。なお、スペクトル解析には高速フーリエ変換(FFT)を使用する。

#### (b) パワースペクトルの計算

Fig. 2 に示すように、平面上の曲線  $C$  を複素平面上の有限個の点列として(2)式で表わす。

$$z(j) = x(j) + i y(j) \quad (j=0, 1, \dots, n) \dots (2)$$

ここで  $x(j)$ ,  $y(j)$  は曲線上の任意点の座標値で、 $i$  は虚数単位  $= -1$  である。ここで曲線  $C$  を構成している各線分の長さは(3)式で表され、一定値を取るよう座標値を選ぶものとする。

$$\delta = |z(j+1) - z(j)|, \quad (j=0, 1, \dots, n-1)$$

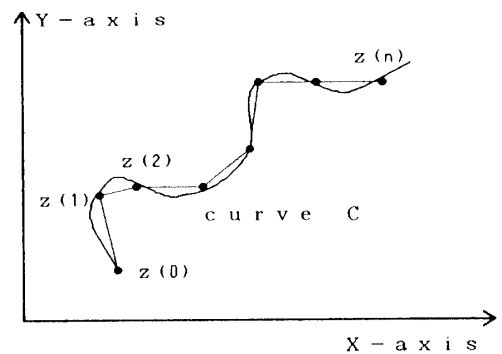


Fig. 2 The expression of figure C on complex plane

.....(3)  
 実際には座標入力装置(デジタイザ)を用いてリル網の座標値を入力するため、 $\delta$ は一定とはならない。従って入力座標値をコンピュータで処理する時に、相異なる長さをもつ線分からなる曲線を一定の長さの線からなる曲線に近似する方法をとる。さて有限個の座標値の点列から、

$$\omega(j) = \frac{z(j+1) - z(j)}{\delta} \quad (j=0,1,\dots,n-1)$$

.....(4)

なる関数  $\omega$  を定める。これは複素微分係数に相当するものであるが、(4)式の辺々を  $j$  について加えることによって、これを  $z(j)$  について解くことができ(5)式を得る。

$$z(j) = z(0) + \delta \sum_{r=0}^{j-1} \omega(r) \quad (j=1,2,\dots,n)$$

.....(5)

このように曲線  $C$  と  $\omega$  は始点  $z(0)$ 、および、ひとつの線分の長さ  $\delta$  の不定さを除いては 1 対 1 に対応しており、この  $\omega$  を曲線  $C$  の P 表現と呼ぶ。ここで、異なる長さをもつ線分  $\delta$  からなる曲線  $C$  を一定長さの線からなる曲線に近似するために、次の方法を用いる。

まず、線図形  $C$  の点列を、 $z(0), z(1), \dots, z(m)$  とし、 $k=1,2,\dots,m$  に対して次のようにおく、

$$l(k) = |z(k) - z(k-1)|$$

$$s(m) = l(1) + \dots + l(m)$$

$s(0) = 0, s(k) = s(k-1) + l(k), (k=1,2,\dots,n)$  であるから、 $s(k)$  は始点  $z(0)$  から点  $z(k)$  までの長さである。次に曲線の P 表現を弧長  $s$  の関数として、

$$W(s) = \frac{z(k) - z(k-1)}{l(k)}, \quad s(k-1) \leq s \leq s(k)$$

とおき、 $\delta = s/n, n < \max\{l(k) \mid k=1,\dots,m-1\}$  となるように十分大きい正整数  $n$  をとって、 $s$  のとり得る区間  $[0, s]$  を  $n$  等分する。そして各分点  $j \delta (j=0,1,\dots,n-1)$  における  $W(s)$  の値を  $\omega(j)$  とおく、

$$\omega(j) = W(j\delta) \quad (j=0,1,\dots,n-1)$$

次に  $\omega(j)$  を空間周波数で表した基本周期関数で表現するために離散フーリエ変換を行うと、次式が得られる、

$$A(k) = \frac{1}{n} \sum_{j=0}^{n-1} \omega(j) \phi^{-jk} \quad (k=0,1,\dots,n-1)$$

.....(6)

$$\phi = \exp \frac{2\pi i}{n}$$

$A(k)$  は各成分波の強さで、(7)式をパワースペクトルとして定義する、

$$P(k) = |A(k)|^2 \quad (7)$$

図形が単純なものほどその中に含まれる空間周波数は限られ、パワースペクトルの成分が  $k=0$  の付近に集中する。一方、複雑な形を有しているものほど、様々な波長をもった空間周波数が含まれ、このためにスペクトルの成分が広がる。従ってパワースペクトルの広がりによって形の複雑さを評価することができる。

(c) エントロピーの計算

以上のことから、パワースペクトルの広がりを知る尺度として、Fig. 3 に示すように、(a)パワースペクトル  $P(k)$  と  $k$  を両対数グラフにプロットし直線回帰した時のその傾きと(8)式で定義されるエントロピーの2つを導入する。

$$H = - \sum_k P(k) \log_2 P(k) \quad (8)$$

形が複雑になるほどパワースペクトルの傾きが 0 に近づくことが期待され、エントロピーは増大する。これまで説明したように、エントロピーの算出過程は複雑であるが、リル網の座標値をコンピュータに入力すれば簡単に求められる。即ち、(1)デジタイザによる座標値の入力、(2)FFTを用いたスペクトル解析用のプログラムでパワースペクトル及びエントロピーの算出、(3)パワースペクトルを両対数グラフで表し、 $Y = aX^b$  で回帰、 $b$  の値の算出、の作業順序で求められる。

(d) 解析結果

Fig. 4 は角度補正を行わずに算出したエントロピー

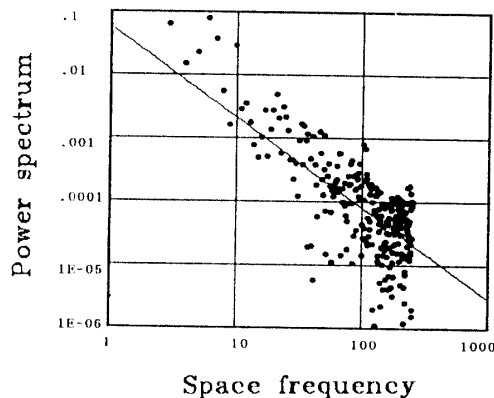


Fig. 3 The relationship between power spectrum and space frequency

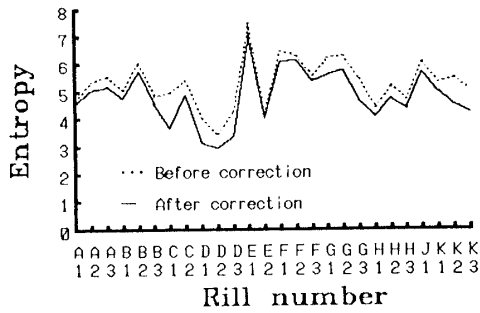


Fig. 4 The entropy difference of rill patterns before and after the correction of slope

(点線) と、補正後のエントロピー (実線) の差を、解析を行なったすべてのリルについて番号順に並べたものである。この結果を、解析した現場のリル網の写真と比較して気づくことは、①分岐が多いものほどエントロピーは大きい、②まっすぐに伸びているリルよりもうねりながら伸びている方がエントロピーが大きい、などである。このような視覚的な複雑さを定量的に表現するために、Fig. 5 のようにリルの分岐数とエントロピーの値を図化してみると、確かに分岐数の増加に従ってエントロピーも増加することがわかる。すなわち我々が視覚的に感じる複雑さはエントロピーによって評価できるといえる。また、撮影角度の補正を行わないリルに比べ、補正を行ったもののエントロピーが小さい。これは補正前の図形に比べ、補正後の図形が縦方向に長くなり、水路の屈曲の度合いが小さくなるのが理由として考えられる。

同様に、Fig. 6 は斜面勾配補正前と後のパワースペクトルの傾きの差を図化したものである。また Fig. 7 はエントロピーの場合と同様に分岐数との関係を図化したものであり、分岐の数が多いほどパワースペクトルの傾きも大きくなるという傾向が見られるが、エントロピーに比べてばらつきが大きい。

2. リル網のフラクタル次元<sup>5,6,7)</sup>

(a) フラクタル次元の概念

フラクタル幾何学は1975年に B.B.Mandelbrot によって創られ、自己相似性をもつ図形や構造、現象などの数値化に適用されている。自己相似性をもつ図形とは、尺度を変えて見てもその形状は変化しないという性質であり、雲や海岸線など、自然界には統計的に自己相似性を有するものが数多く存在する。フラクタル次元は自己相似性の程度を数値で表したものであり、通常の次元の観念を非整数値まで拡張したものである。

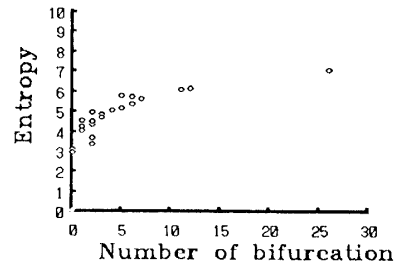


Fig. 5 The relationship between the entropy and the number of bifurcation of rill

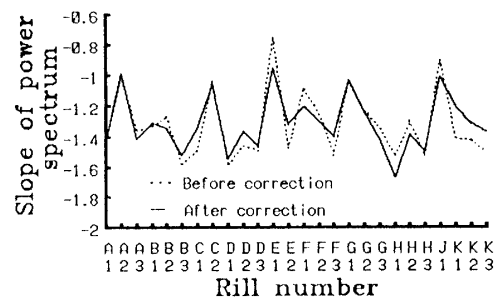


Fig. 6 The power spectrum difference of rill patterns before and after the correction of slope

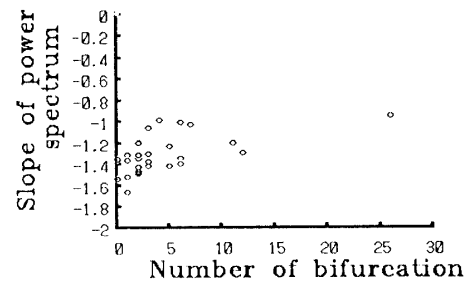


Fig. 7 The relationship between the power spectrum and the number of bifurcation of rill

通常の意味での d 次元空間の単位体積 V は、尺度を r にすることによって  $(1/r)^d$ 、すなわち  $V' = (1/r)^d V$  になる。したがって d は(9)式で表される。

$$d = \frac{\log(V'/V)}{\log(1/r)} \dots\dots\dots(9)$$

この関係を利用して自己相似な図形の代表である数学的なコッホ曲線の次元を調べると、この曲線は全体を 1/3 にした相似形 4 個によって構成されているから次のようになる。

$$D = \frac{\log 4}{\log 3} = 1.2619$$

ここでDはフラクタル次元を表す。フラクタル次元の実用的な定義の仕方には、(1)粗視化の度合を変える、(2)測度の関係より求める、(3)相関係数より求める、(4)分布関数より求める、(5)スペクトルより求める、の方法が使い分けられているが、1つの図形に対してこれら全てが同一の値を与えるかどうかは不明である。ここでは直感的に理解しやすく、またコンピュータを用いての計算も容易である(1)の方法を用いた。またリル網のパターンとしては、水みちの外周と水みちの内部も含んだ面積を選び、以下に説明する方法によってフラクタル次元を算出した。

①リルの外周を折れ線で近似する。

この方法は曲線の一端を始点とし、その点を中心として半径rの円を描き、その円と曲線が最初に交わった点と始点とを直線で結ぶ。その交点を新たに始点とみなして同様の操作を繰り返す。こうして長さrの折れ線によってリルの外周を近似したときに必要な線分の総数  $N(r)$  と基準となる長さrとの間に、 $N(r) \propto r^{-D}$  なる関係が存在するときに、指数の絶対値すなわちDをその曲線のフラクタル次元とする。

②リルの外周を矩形により近似する。

この方法では平面を1辺がrの矩形により分割し、リルの外周を少しでも含む矩形の総数  $N(r)$  を数える。この時、①と同様に、 $N(r) \propto r^{-D}$  の関係があるとき、このDをフラクタル次元とする。

③リルの全体を矩形により近似する。

平面を1辺がrの矩形により分割し、リルの内部をも含む矩形の総数  $N(r)$  とrとの間に、 $N(r) \propto r^{-D}$  の関係があるとき、このDをフラクタル次元とする。

解析には、スペクトル解析に用いたリルの座標データを使用し、①線分または矩形の総数  $N(r)$  をコンピュータによって算出し、②尺度r(基準としたドット数)と個数  $N(r)$  を両対数グラフにプロットし、 $N(r) = ar^{-D}$  で回帰してDを算出する。

#### (b) 解析結果

上で説明した3通りの方法を用いてリル網のフラクタル次元の算出を行なったが、それぞれ、尺度rの範囲によって算出されるDの値が互いに変わることである。例えばFig. 8のように折れ線法によって算出された個数Nと尺度rを両対数グラフに表すと、尺度が小さい部分では傾きは約-1であり、フラクタル次元は1となる。尺度rが大きくなるにつれ、勾配がきつくなり、フラクタル次元は大きくなる。さらに尺度が大き

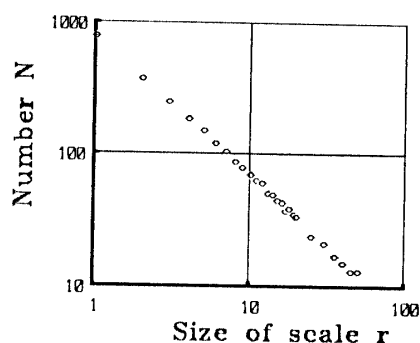


Fig. 8 The calculation of fractal dimension by the compass method

な部分ではプロットした点は直線上には並んでいない。すなわち自己相似性は無限に続くものではなく、成り立つ範囲は有限である。傾きが-1になっているところは自己相似性の範囲を越えた部分であり、通常の意味での線の次元(=1)を表している。尺度が大きくなると直線上に並ばないのは、尺度の大きさに比べてその変化量が小さかったために発生した誤差と考えられる。今回はこれらの影響を考慮して尺度が(10~20ドット)の11個の値を用いてフラクタル次元を算出した。矩形法の場合、外周を測定したのものには同様の傾向が見られた。しかしこの場合は、外周と全体の差をとることも考慮して(後述)、尺度が15~20ドットの16個の値を用いてフラクタル次元を求めた。まずコッホ曲線のフラクタル次元を求めると、折れ線法では1.2458、矩形法では1.3872となる。このことからフラクタル次元はその測定方法により違った値を与えるということがわかる。しかし理論値が1.2619であることを考慮すると、折れ線法で測定したものの方が精度がよいと言えるであろう。

Fig. 9に折れ線法で求めたフラクタル次元とリルの分岐数との関係を示した。これよりエントロピーの場合ほど顕著ではないが、リルの分岐数が多いほどフラクタル次元は大きくなることがわかる。また、Fig. 10は矩形法で求めたリルの外周、および面積のフラクタル次元と分岐数との関係であるが、折れ線法で求めたもの程の分岐数との関係は見られない。しかしFig. 11に示すように、面積を測って求めたフラクタル次元と外周を測って求めたものとの差をとると、この値は水路の太さとよく一致している。Fig. 12が示すように矩形法では、ある尺度r以上では、リルの外周を測った矩形数と全体を測った矩形数が等しくなる。つまりリルの水路が細ければ尺度の小さいうちから両者の個数が

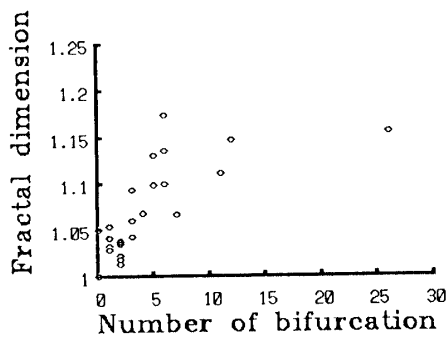


Fig. 9 The relationship between the fractal dimension calculated by compass method and the number of bifurcation of rill

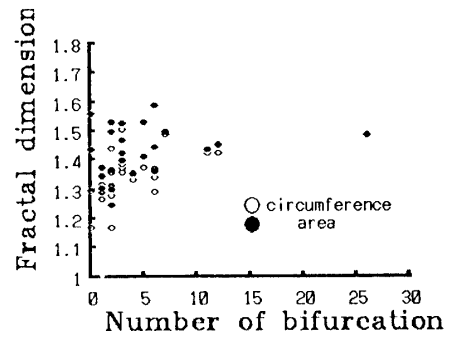


Fig.10 The relationship between the fractal dimension calculated by box method and the number of bifurcation of rill

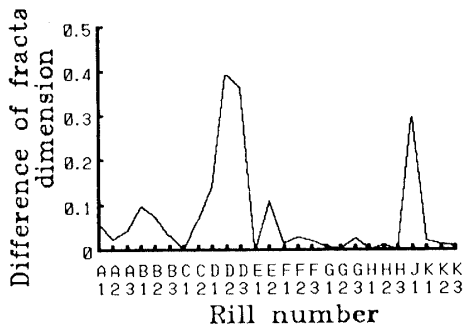


Fig.11 The difference between the fractal dimension of circumference and that of area of rill (by the box method)

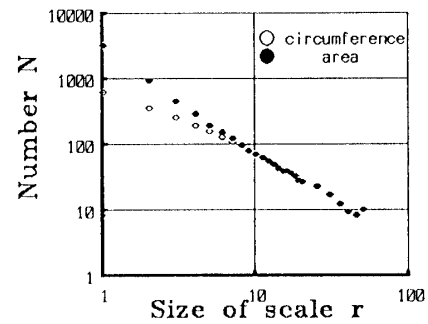


Fig.12 The relationship between the size of scale r and the number of boxes

等しくなり、太ければ大きい尺度になって初めて個数が等しくなる。よって水路の太いものの方がフラクタル次元の差が大きくなると考えられる。

3. リル網とホルトンの法則<sup>8,9)</sup>

(a) ホルトン則の概念

ホルトン則は河川水系網の形態(水路数・水路長・水路勾配・流域面積)に適用される経験則である。リル網は河川網とよく似た形態を有しているので、まずこの法則を適用することが考えられる。しかし造成地法面等に見られる斜面は、勾配が一定に整備されており、そのため、水路の流域を決定することが困難であるので、水路勾配および流域面積に関する法則は除外する。ここで水路数、水路長についての法則とは以下に述べるものである。

(1)水路数の法則(ホルトンの第1則)：ある流域で最高次の水路の次数をmとすると、ある次数iの水路の数

Nとその次数との間には、次式の関係が成立する。

$$N = R_b^{m-i} \dots\dots\dots (10)$$

式中の  $R_b$  は分岐比と呼ばれ、同一流域内では一定とみなされる。

(2)水路長の法則(ホルトンの第2則)： $L_i$  を i 次の水路の平均長、 $L_1$  を 1 次の水路の平均長とすると、i と  $L_i$  との間には、次の関係が成立する。

$$L_i = L_1 R_l^{i-1} \dots\dots\dots (11)$$

$R_l$  は粒長比と呼ばれ、同一流域内で一定とみなされる。ここで次数の付け方は「支流を持たない先端の水路の次数を1次とし、i次元の水路が2本合流して(i+1)次の水路を形成する。」という Horton-Strahler の方法を用いた。本研究ではリル網へのホルトン則の適用の有用性を検討し、さらに算出された数値と形態の複雑さの関係をみる。

(b) 解析結果

計算結果を Table 1に示す。Y 切辺とはリルの分岐

Table 1 The application of Horton's law to the rill patterns

| Name | Number | Horton's first law |       |       | Horton's second law |         |      |
|------|--------|--------------------|-------|-------|---------------------|---------|------|
|      |        | -A                 | A     | B/A   | C                   | D       | D/C  |
| A1   | 2      | 3.00               | 9.00  | 3.00  | 3.94                | 17.82   | 5    |
| A2   | 4      | 5.00               | 25.00 | 5.00  | 8.70                | 5.39    | 1    |
| A3   | 5      | 2.45               | 13.74 | 5.61  | 0.63                | 177.66  | 282  |
| B1   | 3      | 4.00               | 16.00 | 4.00  | 4.00                | 20.35   | 5    |
| B2   | 6      | 2.65               | 16.87 | 6.38  | 1.92                | 22.34   | 12   |
| B3   | 1      | 2.00               | 4.00  | 2.00  | 0.25                | 1102.55 | 4410 |
| C1   | 2      | 2.00               | 4.00  | 2.00  | 0.82                | 321.81  | 392  |
| C2   | 3      | 2.00               | 8.00  | 4.00  | 1.58                | 51.81   | 33   |
| D1   | 0      |                    |       |       |                     |         |      |
| D2   | 0      |                    |       |       |                     |         |      |
| D3   | 2      | 3.00               | 9.00  | 3.00  | 18.32               | 0.80    | 0    |
| E1   | 26     | 3.00               | 66.13 | 22.04 | 1.59                | 35.64   | 23   |
| E2   | 1      | 2.00               | 4.00  | 2.00  | 7.39                | 5.62    | 1    |
| F1   | 11     | 3.61               | 48.52 | 13.46 | 2.61                | 19.26   | 7    |
| F2   | 12     | 2.37               | 29.07 | 12.29 | 1.33                | 46.03   | 35   |
| F3   | 6      | 2.65               | 16.87 | 6.38  | 1.50                | 52.37   | 35   |
| G1   | 7      | 4.00               | 32.00 | 8.00  | 1.29                | 81.15   | 63   |
| G2   | 5      | 3.00               | 18.00 | 6.00  | 1.55                | 83.43   | 54   |
| G3   | 3      | 4.00               | 16.00 | 4.00  | 0.70                | 254.74  | 364  |
| H1   | 1      | 2.00               | 4.00  | 2.00  | 1.08                | 146.82  | 136  |
| H2   | 3      | 4.00               | 16.00 | 4.00  | 1.32                | 112.82  | 85   |
| H3   | 2      | 3.00               | 9.00  | 3.00  | 2.05                | 61.09   | 30   |
| J1   | 6      | 2.83               | 20.16 | 7.13  | 3.05                | 11.10   | 4    |
| K1   | 2      | 3.00               | 9.00  | 3.00  | 2.82                | 43.33   | 15   |
| K2   | 2      | 3.00               | 9.00  | 3.00  | 3.87                | 17.31   | 4    |
| K3   | 1      | 2.00               | 4.00  | 2.00  | 3.53                | 17.98   | 5    |

A : The ratio of bifurcation

B : Y-segment

C : The ratio of length

D : Y-segment

の次数を X で、個数・平均長を y で表し、

$$\text{Log } y = ax + \text{Log } b$$

で回帰計算したときの b の値で、次数=0の点での個数・平均長を表す。ホルトン則の適合性は、水路の次数とそれぞれの次数の水路の個数・平均長を片対数グラフに表したとき、その点が直線上に並ぶかどうかをみればよい。第1則の場合は相関係数がすべて0.98以上であり、よってこの法則によく適合していると言える。しかし第2則では相関係数0.57というリルもあり、あま

り適合性が良いとは言えないであろう。

第1則によって求められた分岐比・Y切片と図形の複雑さとの関係を考える。まずY切片が大きいということは、そのリルに含まれる水路の数が多いということと言えるだろう。そしてY切片が一定である場合、分岐比が小さい方がいろいろな次数の水路を持っているということになり、より複雑であると言える。よってここで図形の複雑さを表す指標として、Y切片/分岐比を考える。Fig.13は分岐数とY切片/分岐比の関係をに

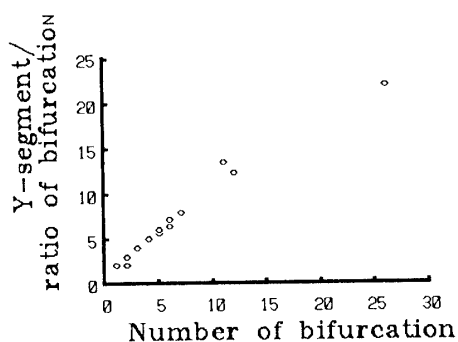


Fig.13 The relationship between the number of bifurcation and Y-segment/the ratio of bifurcation

示したものであるが、これより、分岐数とY切片/分岐とは相関性が高いといえる。しかしこの数値では水路のうねりについてはまったく考慮していないことに注意しなくてはならない。

#### VI.まとめ

図形の複雑さを量的によく表していると思われる、エントロピー、フラクタル次元(折れ線法)およびホルトン則(Y切片/分岐比)の3つの間の関係を図化してみる。Fig.14はエントロピーとフラクタル次元の関係を示したものである。ばらつきがあるものの、両者の間に1次の関係が見られる。一方、Fig.15はエントロピーとY切片/分岐比との関係である。両者とも分岐数と高い相関があったために、両者の間の相関性は高い。

これまで行なったリル網の数値化の方法の中では、複雑さを表すものとしてはエントロピーが最も適していると思われるが、この計算は非常に煩雑であり、コンピュータの使用によって初めて計算できる。そこでエントロピーの計算ほど煩雑でなく、計算のやりやすい折れ線法によるフラクタル次元の方が、実際上有用と言えるだろう。矩形法によるフラクタル次元では図形の複雑さを表すことはできないが、差をとることにより水路の太さを表すことができるということがわかった。ホルトン則はその第1則がリル網にも適用できY切片/分岐比という数値を用いると、これによっても水路の複雑さを表すことができる。

#### 参考文献

- 1) 北原 曜・遠藤泰造・鈴木孝雄：リル流路網の構成，日本林学会誌，vol.63(7)，pp.252-256(1981)

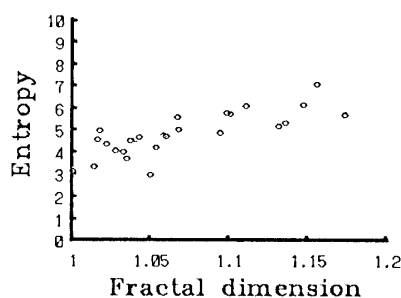


Fig.14 The relationship between the fractal dimension calculated by compass method and the entropy of rill

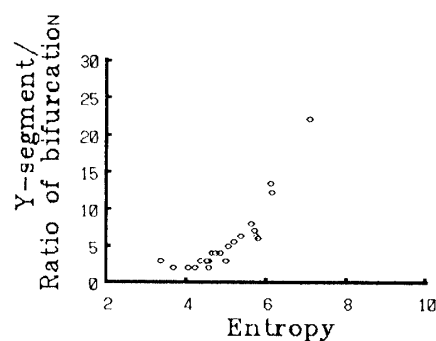


Fig.15 The relationship between the entropy of rill patterns and Y-segment/the ratio of bifurcation

- 2) 北原 曜・遠藤泰造・真島征夫・阿部和時：リル流路網の合流法則，日本林学会誌，vol.65(4)，pp.119-124(1981)
- 3) 例えば，大崎順彦：地震動のスペクトル解析入門，鹿島出版会，第5章，pp.112-126
- 4) 土坂吉則・太原育夫：パターン認識と図形処理，文一総合出版，pp.264-280(1984)
- 5) 例えば，高安秀樹：フラクタル，朝倉書店，第1章，pp.1-31
- 6) 沢田康次：フラクタルの数理と2次元パターン，数理科学(1981,11)
- 7) 鈴木増雄：次元の観念の拡張，数理科学(1981,11)
- 8) 徳永英二：河川の分岐と流域構成について，数理科学(1981,11)
- 9) 榎根 進：自然地理学の理論について，一水流次数に関する研究を中心として一，東京教育大学地理学研究报告 X V pp.71-84 (1971)

(平成元年4月15日受理)