

# 多自然型川づくりにおけるフラクタル手法の応用 に関する検討

研究第二部 次 長 関 克己

研究第二部 主任研究員 鈴木 輝彦

研究第二部 主任研究員 唐 裕一

## 1. はじめに

多自然型川づくりでは、土木技術の他に環境、生態系まで含めた様々な分野の先端技術が採用されるなど研究開発の進歩は目覚ましい。しかし、景観設計の面からみると確立されたものがなく、自然景観の評価方法、再生の手法など検討すべき課題が多い。

本研究は多自然型川づくりに、自然景観を創出させる一手法としてフラクタル手法に着目することで自然景観のなんらかの「かたちの法則性」を見い出し、河川の主な構成要素である河床の石、水際線、樹木等のフラクタルによる表現化の可能性を把握するとともに、河川景観描写のための基本モデルを作成することが目的である。

## 2. フラクタル手法の概要

### 2.1 フラクタルの意味

フラクタル (Fractal) とは「半端な」という意味があり、マンデルブローの作った造語である。

一つの例をとって説明すると、三陸海岸のリアス式の複雑な海岸線では20万分の1の地形図でも、拡大した5万分の1の地形図でも複雑さの程度はほとんど変わらない。このことを「自己相似性を持つ現象」という。

この複雑さを評価する指標として「フラクタル次元」が考えられた。自然界には様々なフラクタルと見なせる現象がある。海岸線の凹凸、河川の分岐等がフラクタルであることが報告され、河床の石の配列等にもその可能性が

ある。

自己相似性とは「小さなスケールで見た集合（集合）が大きなスケールで見た場合（図形）と一致するような集合」のことであり、「全体が全体のミニチュアのいくつかの和になっている集合（図形）」である。

統計的にみた場合、自然界には自己相似性のあるものも多く「全体と部分がぴったり重なるような集合（図形）ではないが、よく似た集合「図形」」で形成されている。

フラクタルであるということは、ある集合の要素  $a$  と、その要素に関連した個数  $N$  とが以下の式に示すような関係にある。

$$N = C \cdot a^{-D} \quad \text{または} \quad \log N = C - D \log a$$

ここに  $D$  : フラクタル次元

$a$  : ある集合や図形の要素

$N$  : 要素  $a$  に関連した個数

$C$  : 定数

すなわち、河床の石を例にとるとある範囲について図-1に示す正方形のメッシュ格子（ボックス）を作成し、フラクタル解析を行う。ボックスの一边の長さ  $\gamma$  と石を含むボックスの数  $N(\gamma)$  を両数にプロットすると、図-2に示すような直線が得られる。この直線の勾配の逆符号がフラクタル次元である。

フラクタルの特徴には、

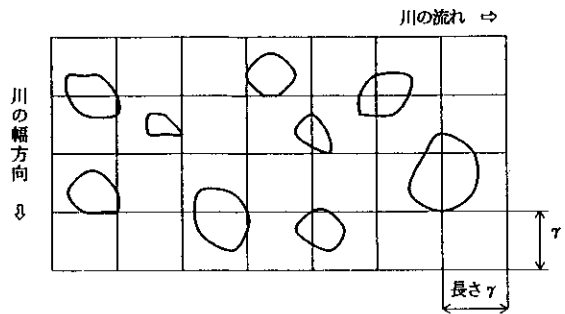


図-1 1辺  $\gamma$  のメッシュ格子

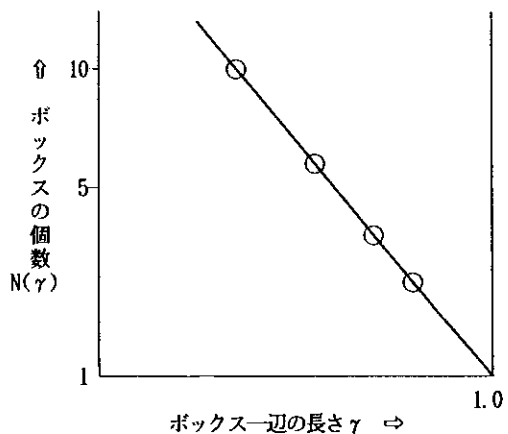


図-2  $\gamma$  と  $N(\gamma)$  の関係

- ① 自己相似性または自己アイン\* があること（大きなスケールでも小さなスケールでも同じように見える性質）
- ② 空間内での偏りがあること（図-3 参照）
- ③ 簡単な数式で図形を描けること

があげられる。フラクタル次元Dの値がその要素を特徴づける指標となる。

図-4 は自己相似な例および統計的自己相似な例を示したものである。

注) \* 自己アイン：

ある集合（図形）において、ある方向のみを見た場合には自己相似性であるが、全方向でみた場合では自己相似でない集合（図形）であることをいう。

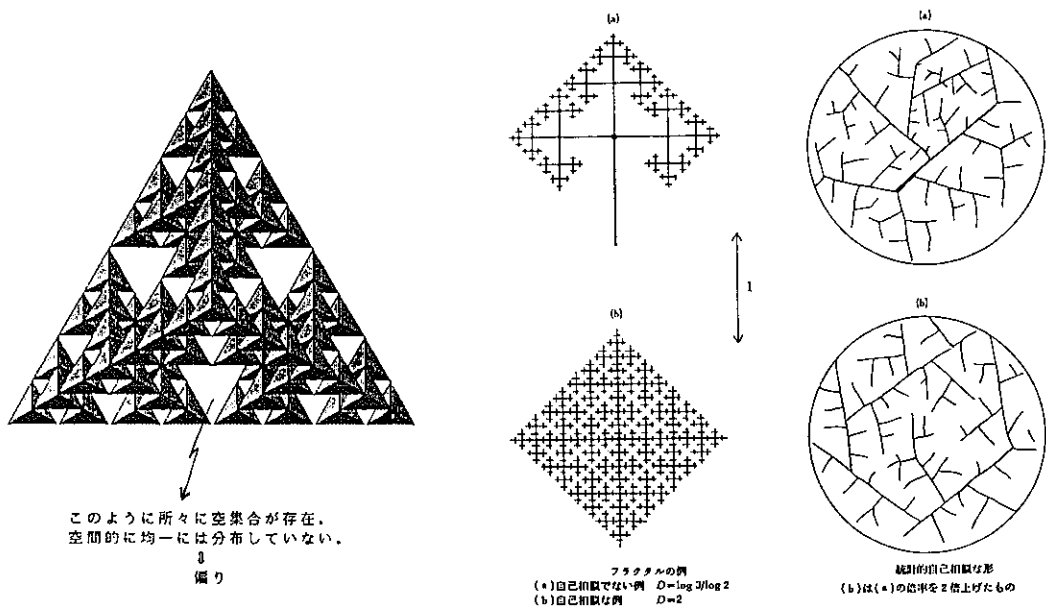


図-3 空間内の偏り

図-4 自己相似および統計的自己相似の例

注) 引用文献

- 1) 形・フラクタル、1986 数理科学社
- 2) フラクタルとは何か、1989 小川 泰、New Science Age 39、岩波書店

## 2.2 フラクタルの算出方法

具体的なフラクタル性の検討と次元の算出には、次の5つの方法がある。

### ① 粗度化の度合いを変える方法

容量次元を求める方法でディバイダー法、ボックスカウンティング法（カバー法とも呼ばれる）がある。基本的にはメッシュ格子（ボックス）1個の大きさ $\gamma$ を変えてフラクタル次元を求める。 $\gamma \times \gamma$ の領域に対象物が存在するかどうかを見る方法であり一様に分布しているか偏っているかを検討する。

### ② 分布関数により求める方法

岩盤の解析によく使用されている方法であり対象物の大きさの検討に用いられる。

### ③ スペクトルにより求める方法

岩盤の割れ目や地震などに、スペクトルを用い周波数のフラクタル次元を求める。

### ④ 情報エントロピーより求める方法

容量次元はボックスの中の対象物の有無を判定するが、雲などのように濃淡がある場合等、容量次元だけでその性質を十分把握できない時に使用する。

### ⑤ 相関関数により求める方法

相関関数は最も基本的な統計量の一つであるが、その関数型からフラクタル次元を求めることができる。①や④の方法でフラクタル次元が求められないとき使用する。

## 2.3 河川景観への適用

2.2項の①～⑤のうち、①、②、④は空間・図形的特徴や対象物の大きさの特徴を捉えることに適している。そこで今回は粗度化の度合いを変える方法、分布関数により求める方法、情報エントロピーより求める方法を適用することにした。

(1) 石

ボックスカウンティング法により容量次元、情報次元、分布関数による大きさのフラクタル次元として、石の中心点の配列の容量次元 $D_{c0}$ および情報次元 $D_{c1}$ 、石の形状を含む容量次元 $D_{p0}$ および情報次元 $D_{p1}$ 、石の大きさのフラクタル次元 $D_r$ を求める。

図-5は石の中心点の配列についてのフラクタル解析であり、図-6は石の形状を含む配列についてのフラクタル解析である。また、図-7は石の大きさについてのフラクタル解析を示したものである。

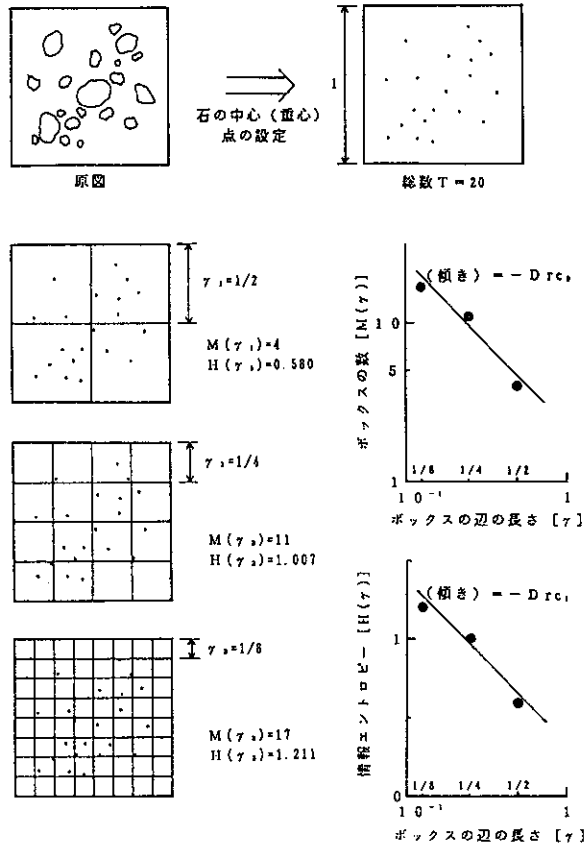


図-5 石の中心点の配列のフラクタル解析

(2) 水際線

水際線については河川の平面(凹凸)形状と川の中心線と川幅を解析対象とする。川の中心線とは右岸左岸の中点を結ぶ線であり、基準点から中点を結ぶ距離 $l$ を分布関数により解析し、右岸と左岸の長さである川幅 $W$ も分布関数により解析する。

すなわち、水際線の凹凸形状の容量次元 $DL_0$ 、川の中心線のフラクタル次元 $DL_0$ 。そして川幅のフラクタル次元 $DL_r$ を求めることになる。川の中心線や川幅の場合、水際線のフラクタル性の検討は凹凸形状の容量次元で十分である。石と同様に解析を行うが、図-8に水際線の凹凸形状の分

割例を示す。

(3) 樹木

樹木では石の場合と同様に、ボックスカウンティング法による容量次元、情報次元、分布関数による大きさのフラクタル次元の解析を行う。

すなわち、

樹木の中心点の配列の容量次元  $D_{wr0}$ ・情報次元  $D_{wc1}$

樹木の形状を含む容量次元  $D_{wp0}$ ・情報次元  $D_{wp1}$

樹木の大きさのフラクタル次元  $D_{wr}$  を求める。図-9 は樹木の中心点配列の分割例を示したものである。

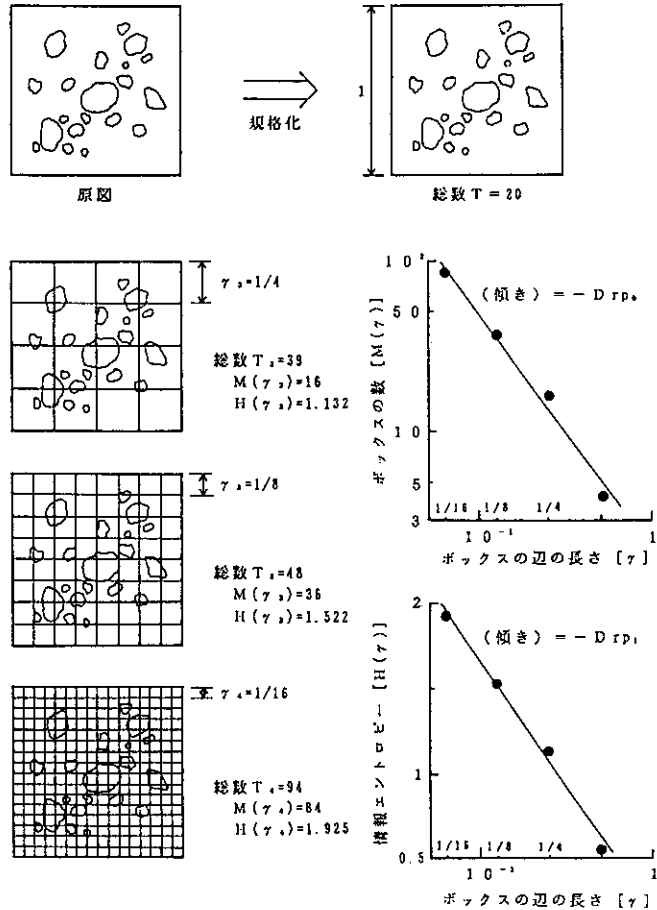


図-6 石の形状のフラクタル解析

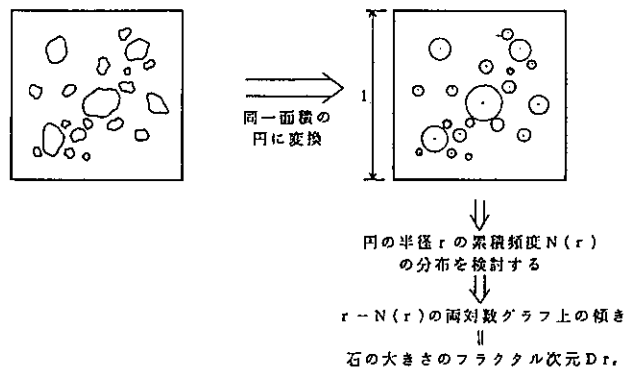


図-7 石の大きさのフラクタル解析

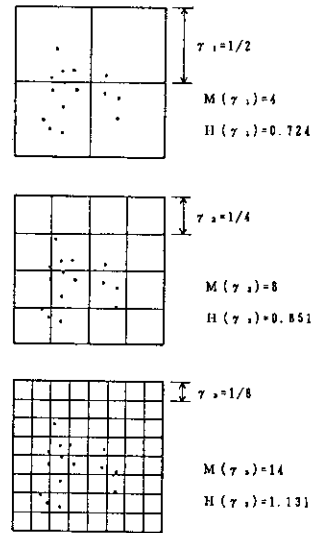
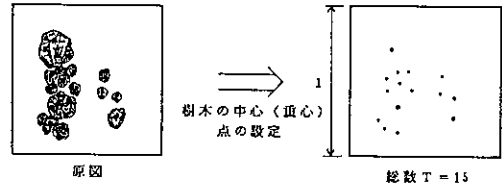
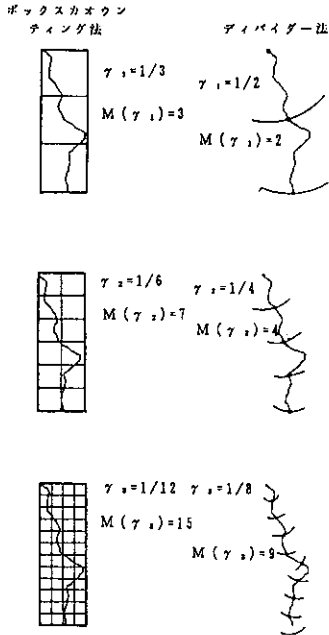
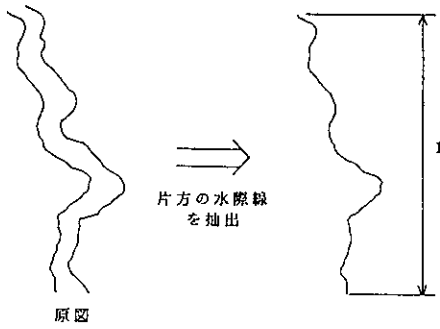


図-8 水際線の凹凸形状の分割例

図-9 樹木の中心点配列の分割例

### 3. 調査検討の内容

河床の石、水際線、樹木等の形状パターンがフラクタル次元で表現できるならば、それぞれの3つの要素を考慮した描写モデルを作成することが可能と考えられる。

そこで、まず始めに多自然型川づくりの実際の設計・施工法について調査を行い、設計における問題点・課題を明らかにして、設計方針を把握する。

設計方針が把握できたならば実際にフラクタル解析を行い、表現化の可能性が示された時点で描写モデルの骨子の検討を行う。

### 3.1 景観を構成する要素

自然の情景のなかには、図-10を例とするならば河床の石、水際線、樹木といった景観を構成する対象物がある。そして、これらの対象物には形状、大きさ、色彩、素材などの要素がある。

- ・形状 平面形状、横断形状、＜縦断面形状＞
- ・大きさ 高さ、長さや径、幅、勾配など
- ・色彩 明度、彩度、＜色相＞
- ・素材 種類、大きさ、表情、模様など
- ・バランス 各対象物の形状、大きさ等の調和

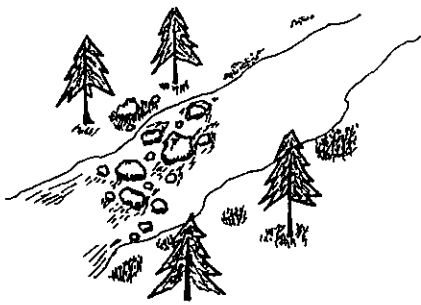


図-10 自然の情景

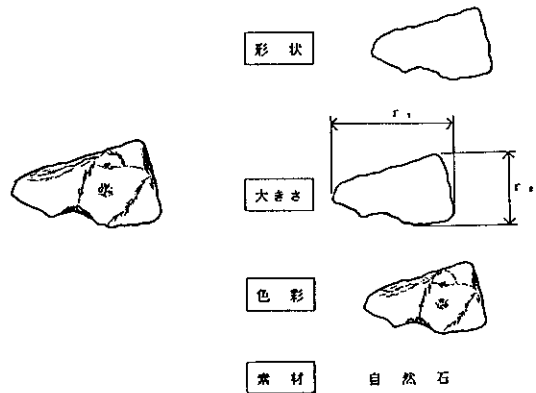


図-11 石の景観構成要素

図-11は石を対象に、石の景観を構成する要素として形状、大きさ、色彩、素材を示したものである。一般に各対象物を構成する形状、大きさ、色彩、素材、バランス等の各要素は次のとおりである。

#### ① 形状、大きさ

フラクタル手法は、対象物の「かたちの法則性」を見いだすものであり幾何学の一つである。従って、景観を構成する要素のうち『形状』および『大きさ』が本来の解析の対象となる。

#### ② 色彩

色彩のうち、明度（明るさ、つまり濃淡）や彩度（鮮やかさ）は、それ



らをランク分けして数値化すればフラクタル解析が可能である。

③ 素材

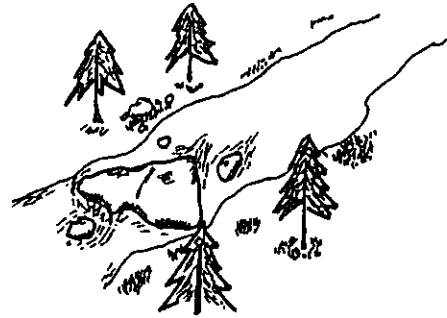
素材は種類や表面などを何らかの方法で数量化することができれば、解析可能であるがフラクタル手法を適用するような要素ではない。



バランスが良い

④ バランス

バランスについては、フラクタル手法そのものを適用するわけではないが、各対象物のフラクタル次元を検討できる。自然に形成されたものは、図-12に示すように各対象物が持つ形状、大きさ、色彩、素材等のバランスがとれている。つまり、ある一つの対象物が目立ち過ぎ（大き過ぎる）ることもないし、わからぬ過ぎ（小さ過ぎる）ることもなく、ちょうど調和のとれたものとなっている。



バランスが悪い

図-12 景観のバランス

実際の河川では、図-13~15に示すように、自然物、人工物、その中間物で形成されている。

河川の直接の設計の対象となるものは人工物および中間物であるが、本検討はこれらより自然らしく表



図-13 自然物



図-14 人工物

現しようとするものである。

今回のフラクタルの検討では、数十mの曲率の河川の蛇行や曲率数cmレベルの細かな水際線、小さな雑草などは対象外である。すなわちフラクタルでは河岸や河床を視点場として人間の視野に入る範囲の識別できる大きさ

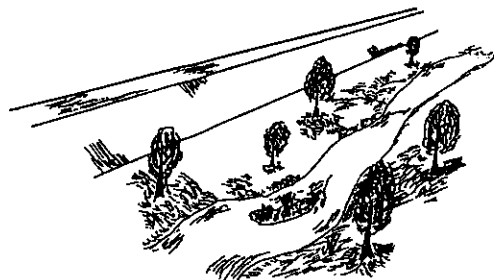


図-15 中間物

を対象とする。検討を行う対象物の大きさ、すなわち水際線の曲率、石の半径、樹木の広がりや高さは数十cmから数mの範囲である。

### 3.2 フラクタルの検討要素

以上より、フラクタル解析の対象物は次のものを取り上げる。

- ① 河床の石 …………… 平面上の配列、大きさ
- ② 水際線 …………… 平面形状、長さ
- ③ 樹木 …………… 平面上の配列、〈広がり〉、〈高さ〉

今回の検討では、各対象物を構成する形状、大きさ、色彩、素材、バランスのうち、色彩は季節、一日の間で変化し膨大なデータを要すること、基本描写モデル作成上、余り影響が少ないことから除外した。

バランスについては、直接フラクタル手法を用いる要素ではないが、河床の石、水際線、樹木など自然の大きさに対応する配置にすることに用いることから、フラクタル解析の結果を組み合わせ、描写モデルを作成する段階で要素として付加した。景観は人間の視点の位置により見え方は異なることから、様々な視点からの検討が必要となるが、一般的に人間が見て良い印象に受け取れる景観は上空から見ても何らかの規則性があると考えられる。

## 4. 現地調査

### 4.1 現地調査の方法

現地調査はほとんど手の加えられていない自然物の平面形状や大きさを把握することが目的であるが、手が加えられていないという程度を明らかにすること、あるいは明確な区分は困難であることから、ここでは人間（執筆等）が見て好ましいと考えられる自然景観を選定し、低高度の空中写真の撮影を行うことにした。

#### ① 調査地点の選定

荒川上流の河川景観の中から人間が見て好ましいと感じられる場所を10箇所程度選定し、その中から実際に現地を視察して候補地点を絞った。

#### ② 写真撮影

撮影地点の選定後、カイト気球を使用し、低高度の空中写真の撮影を行った。撮影方法は図-16に示すように撮影し、数十cmから数mの大きさの解析とした。

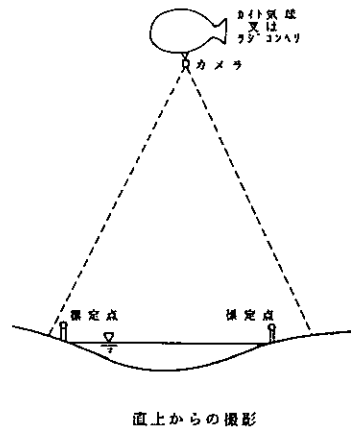


図-16 写真撮影方法

### 4.2 調査地点の選定

調査地点を選定するにあたり荒川本川および支川を対象に広範囲にわたる下見調査を行い、候補地を選定した。

調査の結果、写真撮影は次の2地点を選定した。

#### ① 高麗川祥雲橋～諏訪橋付近

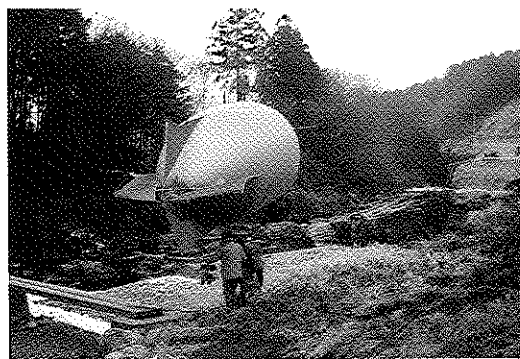


写真-1 カイト気球による写真撮影

② 越辺川道場橋～天神橋付近

写真撮影は写真-1に示すようにカイト気球を使用し、上空から撮影した。

高麗川および越辺川の撮影場所の地図を図-17および図-18に示す。

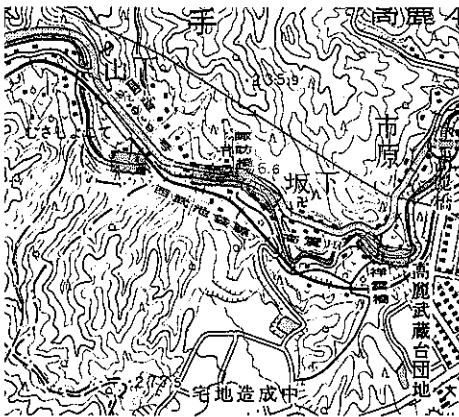


図-17 高麗川の写真撮影地点

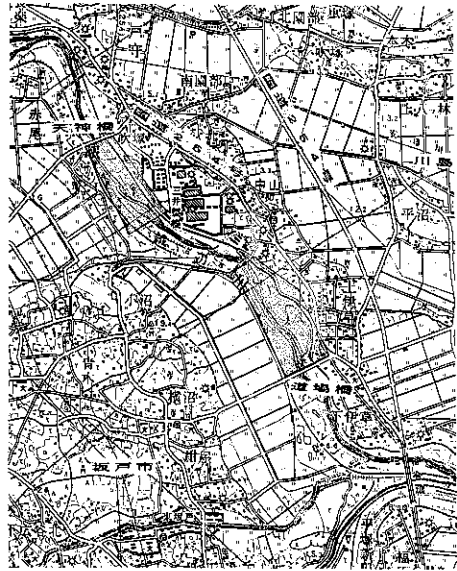


図-18 越辺川の写真撮影地点

5. フラクタル解析

5.1 高麗川の解析

写真-2から河床の石および水際線の平面座標を求め、これからフラクタル解析を行った。解析の対象範囲は図-19に示す  $135.0 \times 45.9\text{m}$  である。解析結果は表-2に示すとおりである。



写真-2 高麗川の解析対象写真

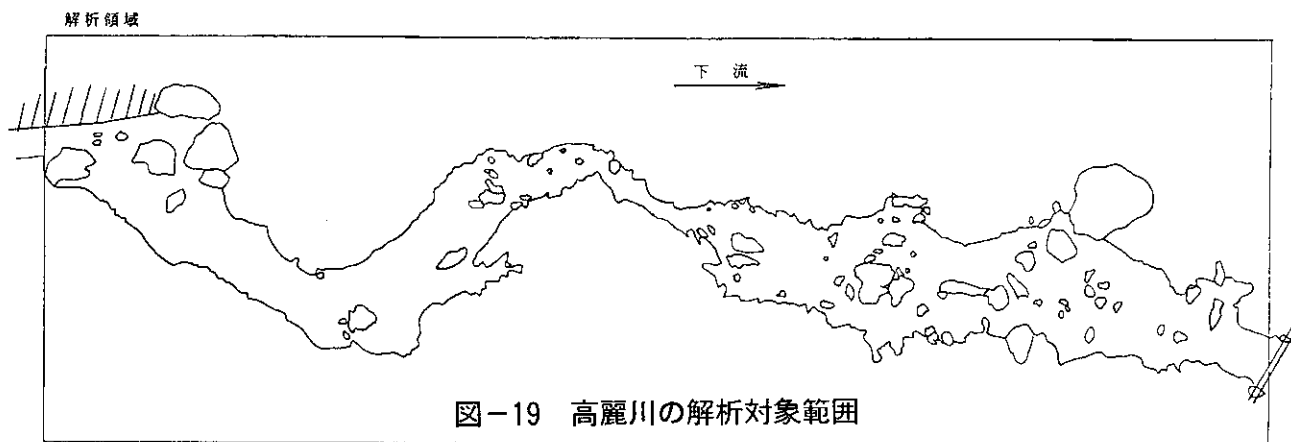


図-19 高麗川の解析対象範囲

表-2 高麗川のフラクタル解析結果

		フラクタル次元	相関係数	解析範囲	評価
石の中心点の配列	容量次元 $Drc_0$	1.25	-0.9872	1/1 ~ 1/8	△
	情報次元 $Drc_1$	1.23	-0.9977	1/1 ~ 1/8	◎
石の表面形状を含めた配列	容量次元 $Drp_0$	1.32	-0.9961	1/1 ~ 1/32	◎
	情報次元 $Drp_1$	1.35	-0.9996	1/1 ~ 1/32	◎
石の大きさのフラクタル次元 $Dr_r$		1.34	-0.9972	80% ~ 5%	◎
水際線の凹凸形状	容量次元 $DLo$ (左岸)	1.09	-0.9998	1/2 ~ 1/100	◎
	容量次元 $DLo$ (右岸)	1.09	-0.9996	1/2 ~ 1/100	◎
川の中心線のフラクタル次元 $Dlc$		1.79	-0.9991	70% ~ 10%	◎
川幅のフラクタル次元 $Dlr$		4.13	-0.9996	55% ~ 5%	◎

対数で扱っている場合、相関係数は、グラフ上の点がばらついていても0.9以上の絶対値を取る。

経験上、右表のような相関性がある。

相関係数 $\kappa$	相関性	評価
$\kappa \leq -0.995$	良い	◎
$\kappa \leq -0.990$	やや良い	○
$\kappa \leq -0.985$	やや悪い	△
$\kappa > -0.985$	悪い	×

また、表-2に示したフラクタル次元については、河床の石の中心点の配列の容量次元 $Drc_0$ を例に説明すると次のとおりである。ボックスの辺の長さ $\gamma$ と $\gamma \times \gamma$ の領域内の樹木の中心点を含むボックスの数 $M$ を両対数の座標として容量次元 $Drc_0$ を示すと図-20のグラフが得られ、グラフの直線性（直線の傾きの-1倍がフラクタル次元）を検討する。この時グラフが直線関係にあるほどフラクタル性が成立することになる。従って、フラクタル性の成立については相関係数 $k$ と直線性の両面から評価する。

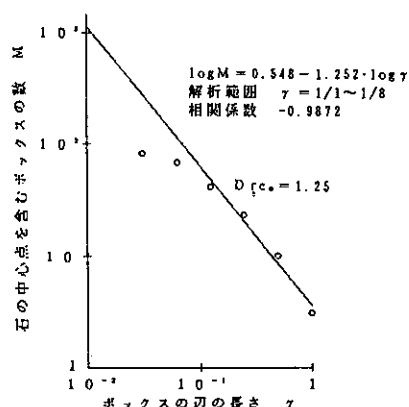


図-20 石の中心点の配列の容量次元

[石]

- ① 河床の石については石の中心点の容量次元は相関係数が $k = -0.987$  ( $k \geq -0.995$ ならば良好)と悪いが、それ以外は相関性が良い。

② 石の中心点の配列は、初期段階においても次元が 2.0\* となることはない。

注) \* ランダムな配置をした場合、中心点の容量次元は初期段階で 2.0 となり次第にボックスの大きさを小さくして行くと 2.0 の勾配から外れ全体として指数分布に近くなるのが普通である。

③ 石の大きさについても超過確立 80~5% の範囲で直線関係にあり、十分フラクタル性があると考えられる。

[水際線]

① 水際線については解析範囲が  $\gamma = 1/2 \sim 1/100$  で相関性が良く、フラクタル性が成立すると考えられる。

② 川の中心線および川幅についてもそれぞれ超過確立が 70~10%、55~5% の範囲で直線関係にあり水際線の形状がある程度表現できる。

5.2 越辺川の解析

越辺川は樹木と水際線を対象に写真-3 から水際線と樹木の平面座標を求め、図-21 に示す解析範囲により表-3 の結果を得た。

表-3 越辺川のフラクタル解析結果

		フラクタル次元	相関係数	解析範囲	評価
樹木の中心配列	容量次元 $D_{wc0}$	1.28	-0.9683	1/1 ~ 1/8	×
	情報次元 $D_{wc1}$	1.29	-0.9794	1/1 ~ 1/8	×
樹木の広がりを含めた配列	容量次元 $D_{wp0}$	1.40	-0.9957	1/1 ~ 1/32	◎
	情報次元 $D_{wp1}$	1.43	-0.9983	1/1 ~ 1/32	◎
樹木の大きさのフラクタル次元 $D_{wr}$		3.74	-0.9965	50%~10%	◎
水際線の凹凸形状	容量次元 $D_{Lo}$ (左岸)	1.08	-0.9998	1/2~1/100	◎
	容量次元 $D_{Lo}$ (右岸)	1.02	-1.0000	1/2~1/100	◎
川の中心線のフラクタル次元 $D_{Lc}$		1.76	-0.9830	75%~5%	×
川幅のフラクタル次元 $D_{Lr}$		3.18	-0.9862	90%~5%	△

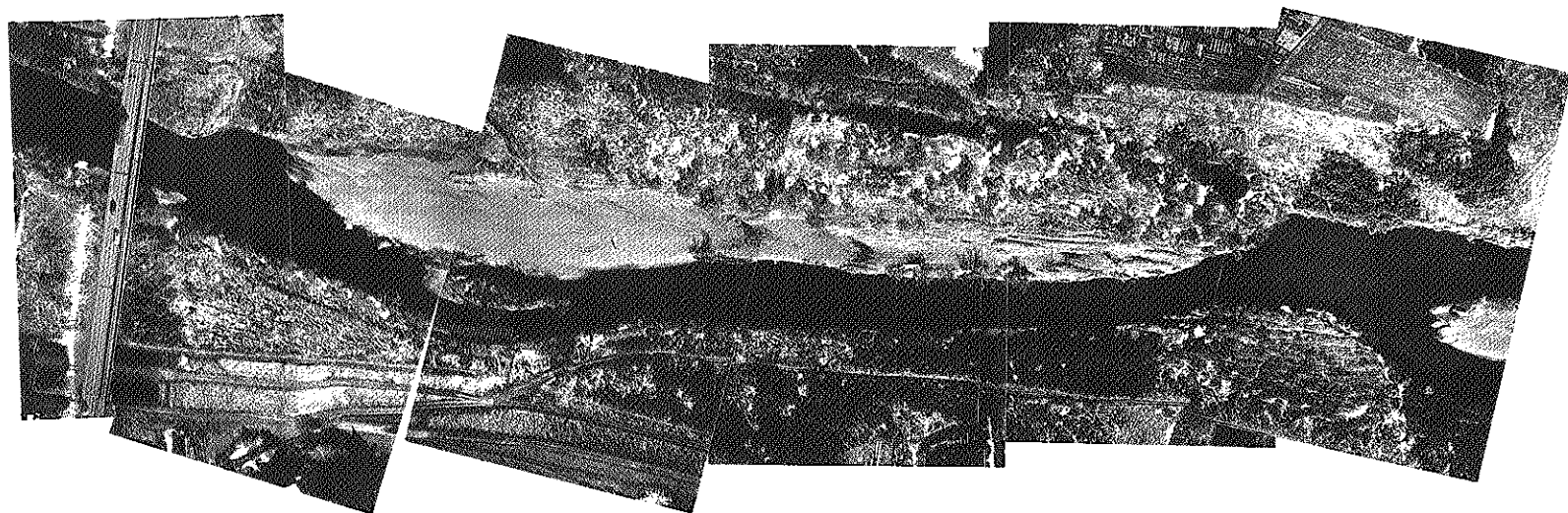


写真-3 越辺川の解析対象写真

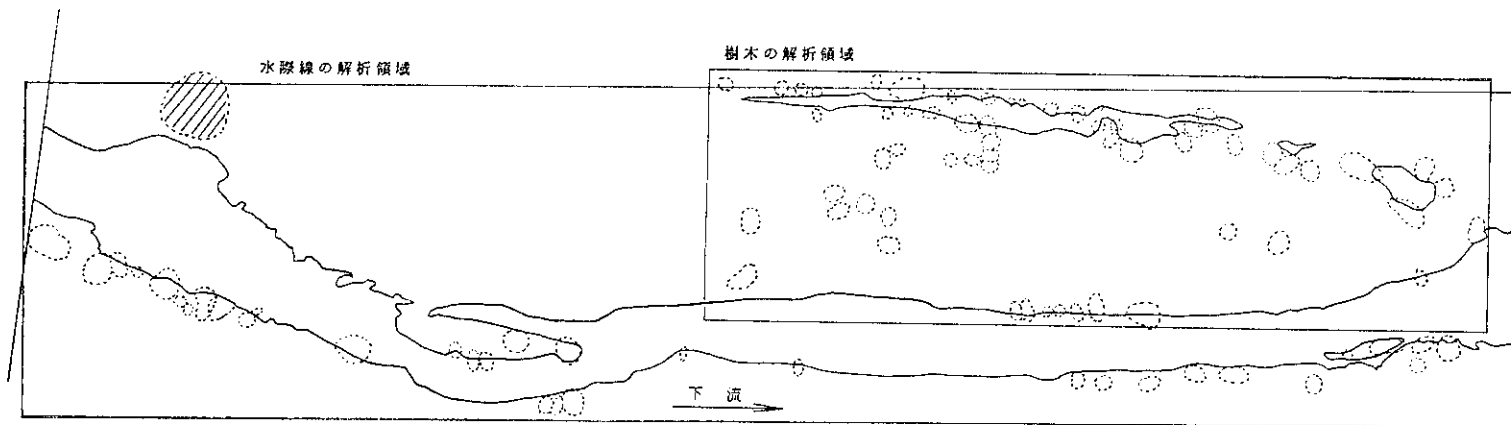


図-21 越辺川の解析対象範囲



対数で扱っている場合、相関係数は、グラフ上の点がばらついていても0.9以上の絶対値を取る。

経験上、右表のような相関性がある。

相関係数 $\kappa$	相関性	評価
$\kappa \leq -0.995$	良 い	◎
$\kappa \leq -0.990$	やや良い	○
$\kappa \leq -0.985$	やや悪い	△
$\kappa > -0.985$	悪 い	×

### [樹 木]

樹木の中心点の配列は相関係数が-0.98以下とフラクタル性はあまり良くないが、広がりを含めた配置からみるとフラクタル性は成立すると考えられる。樹木の大きさについては超過確率が50~10%の範囲で相関性の良い直線関係が成立すると考えられる。大きさのフラクタル次元  $D_{w_r}$  は3.74と大きな値を示し、石に比べ大きさが揃った樹木が多い。

### [水際線]

- ① 解析範囲  $\gamma = 1/2 \sim 1/100$  で相関性が良くフラクタル性が成立すると考えられる。
- ② 川の中心線および川幅は超過確率75~5%、90~5%の範囲である程度の直線関係にあるがバラツキがやや大きい。これは水際線が入り込んでいる所があり、川の中心線および川幅について十分な表現ができないことに原因があると考えられる。

## 5.3 多摩川の解析例

今回の調査の他に、多摩川上流の河床の石を対象にフラクタル解析を行った。

このケースは河床の石が手つかずの自然状態として石の形状、配列、大きさについてフラクタル性を求めたものであり、解析の結果、フラクタル性の成立が確認できた。

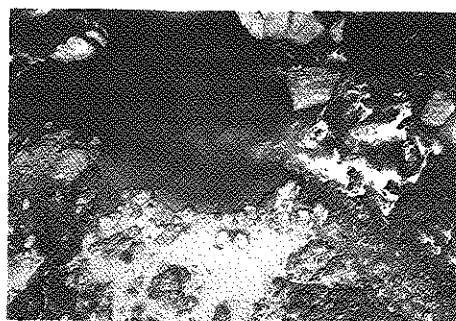


写真-4 河床の石 P<sub>1</sub>

図-22は多摩川上流の調査位置と写真撮影地点を示したものであり、この地点の写真-4～5および図-23に示す解析対象範囲を基にフラクタル解析を行い、石の中心点配列の容量・情報次元、石の形状を含めた配列の容量・情報次元・石の大きさのフラクタル次元を求めた。解析結果は表-4に示すように石の大きさ以外は $k > -0.985$ と相関性も良好でフラクタル性が成立していると考えられる。石の大きさのフラクタル性は $-0.9949$ と相関性はやや悪いが、ほぼ $-0.985$ に近く、フラクタル性が成立していると考えられる。



写真-5 河床の石 $P_2$

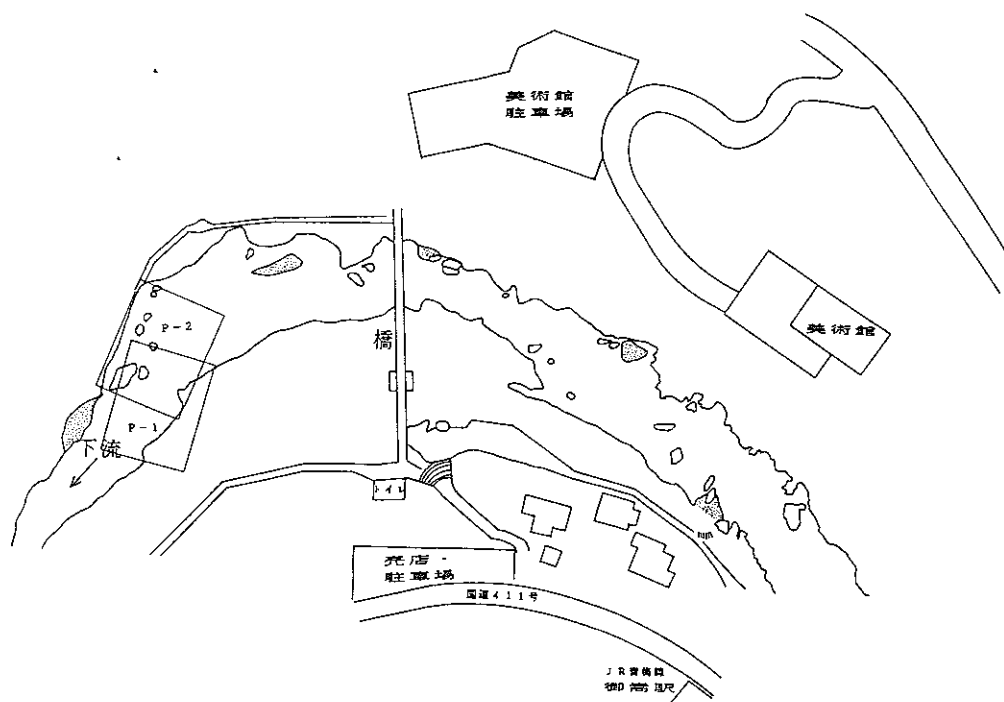


図-22 多摩川上流の調査位置と写真撮影地点 $P_1$ 、 $P_2$

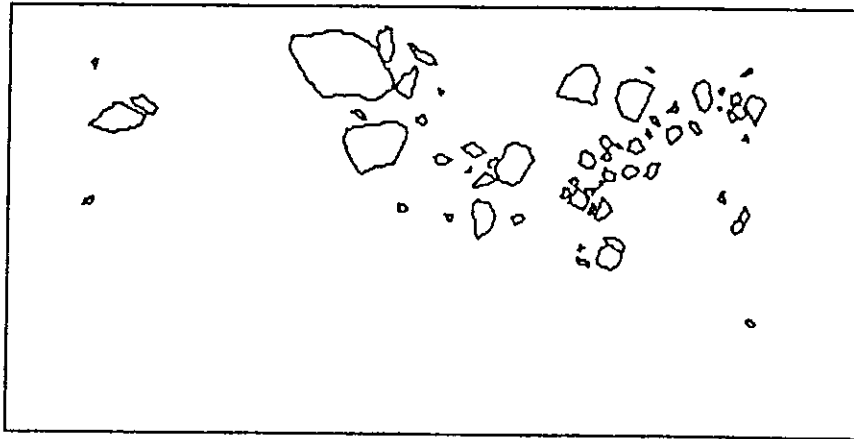


図-23 解析対象範囲

図-24は石の中心点の配列の容量次元を示したものであり、超過確率の大きい範囲で直線性があり、相関係数が-1.0に近いほどフラクタル性があることになる。

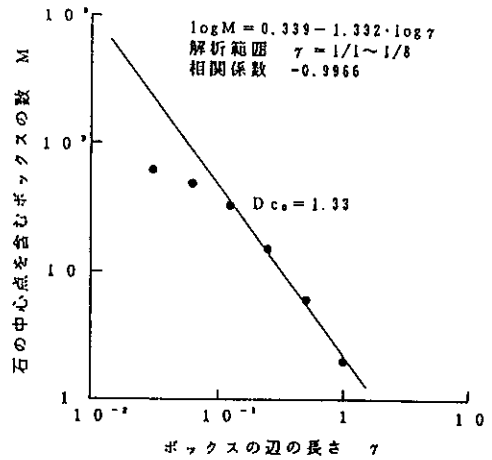


図-24 石の中心点の配列の容量次元

表-4 多摩川のフラクタル解析結果

		フラクタル次元	相関係数	解析範囲	評価
石の中心点の配列	容量次元Drc <sub>0</sub>	1.33	-0.9966	1/1 ~ 1/8	◎
	情報次元Drc <sub>1</sub>	1.29	-0.9998	1/1 ~ 1/8	◎
石の表面形状を含めた配列	容量次元Drp <sub>0</sub>	1.49	-0.9975	1/1 ~ 1/8	◎
	情報次元Drp <sub>1</sub>	1.46	-0.9998	1/1 ~ 1/8	◎
石の大きさのフラクタル次元Dr <sub>r</sub>		1.57	-0.9949	0.5m~1.3m	○

対数で扱っている場合、相関係数は、グラフ上の点がばらついていても0.9以上の絶対値を取る。

経験上、右表のような相関性がある。

相関係数 $\kappa$	相関性	評価
$\kappa \leq -0.995$	良 い	◎
$\kappa \leq -0.990$	やや良い	○
$\kappa \leq -0.985$	やや悪い	△
$\kappa > -0.985$	悪 い	×

## 5.4 考察

### (1) 石

多摩川、高麗川の石は相関性は良く、フラクタル性が成立すると考えられる。しかし、石の配列においては容量次元をみると1.50より小さく、一様な配列ではなく偏った配列となっている。各種の容量次元と情報次元の結果をみると情報次元が容量次元より全体的にやや小さく（0.02~0.04の差）、この差が自然描写にどの程度影響するかは現在のところ不明である。これについては今後検討してゆく必要がある。

### (2) 水際線

水際線については高麗川、越辺川の場合も相関性は非常に良く、フラクタル性は十分成立すると考えられる。

### (3) 樹木

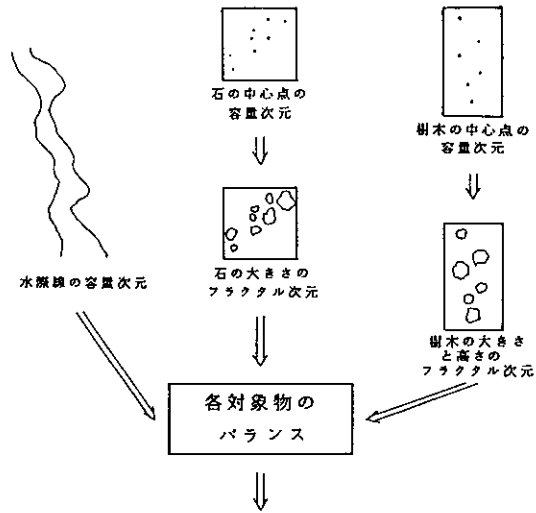
越辺川の樹木は水際線以外は人の手が加わったところが見られ、今回これらを考慮しないで樹木の中心点の解析を行ったため相関性が悪くなったと考えられる。

樹木の広がりについては手が加わっていても、自然に任せて伸び、自然に近い状態であることから相関性は良い結果を得た。

## 6. 描写モデルの作成

前章で述べた高麗川および越辺川の河床の石、水際線、樹木のフラクタル解析結果を組み合わせて、描写モデルを作成した。描写モデルは基本的に図-25に示す考え方で作成する。

全体描写モデルのパスを図-26に示す。



## 7. おわりに

今回の解析は多自然型川づくりにフラクタル手法を応用する初めての試みであり、描写モデルの基本骨子の作成を目的とした。その結果、図-26に示すような描写モデルの作成が可能とな

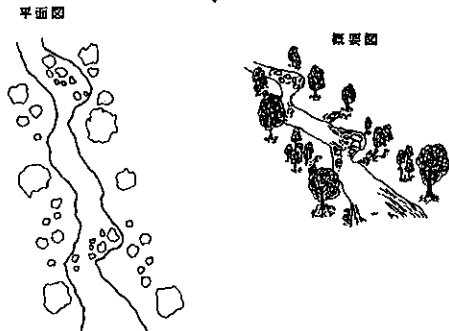
ったが、河床の石、水際線、樹木等の自然景観を十分に反映させるまでには至らなかった。

その原因としては、描写に必要な要素（例えば水際線の曲率）が把握しきれないことやフラクタル解析の条件が不十分であったことがあげられる。

以下に今後の検討課題をあげる。

- ① 樹木は、人の手が加わっていたことから純粋に自然条件のフラクタル次元を把握できなかった。今後は、自然河川の樹木を把握できる場所を選定する必要がある。
- ② 水際線の描写モデルは凹凸が激しくなる場合があり、今回のものも粗い水際線となった。今後は滑らかな水際線が描写される方法について検討する必

図-25 石、水際線、樹木等の描写モデルの考え方

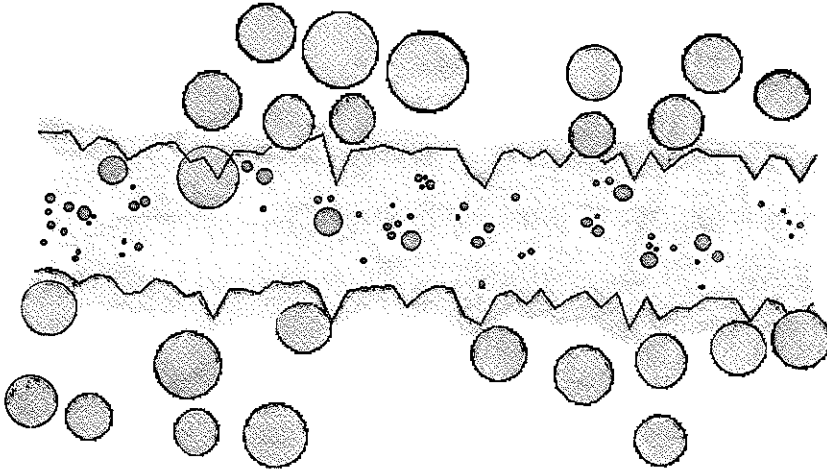


要がある。

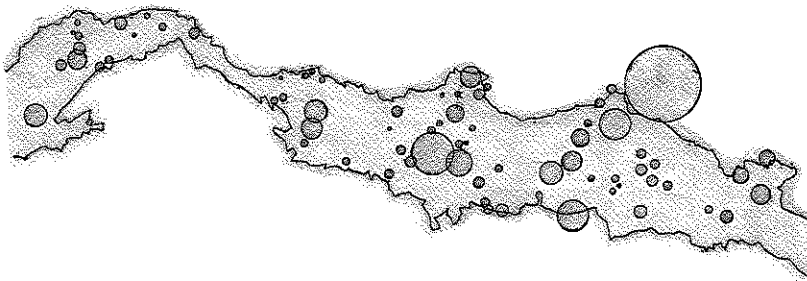
- ③ 水際線、石、樹木の全体描写モデルの作成に当たっては、ただ全体を組み合わせるばかりでなく、より詳細にバランスや各対象物の位置関係などを検討し、自然らしさを表現する手法の検討が必要である。

フラクタル手法を景観描写に応用することは、技術的にも多くの課題を残している。上記①～③は基本描写モデル作成上の技術課題であるが、広く景観設計を考えるならばフラクタル手法に限らず主観的な要素の働く景観の良否の判定をどのように取り入れてゆくかが大きな課題である。

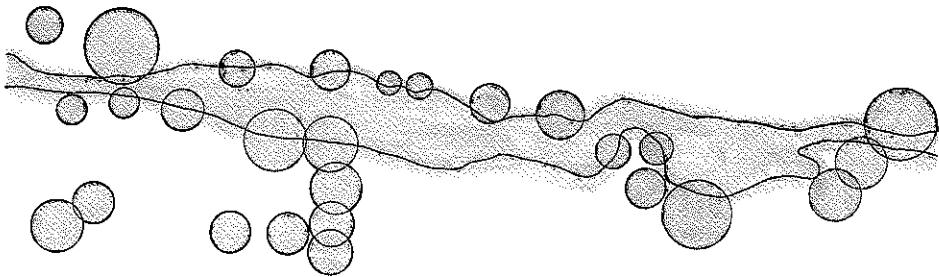
今後、本研究を完成させてゆくには、さらに多くのフラクタル解析を行い、上記の技術課題を解決するとともに景観判定の基準についても研究を進めてゆく必要がある。



(a) 全体描写モデルの例



(b) 実際の高麗川の場合



(c) 実際の越辺川の場合

図-26 描写モデルのパース図

〔参考文献〕

- 1) 「形・フラクタル」  
1986 数理科学社
- 2) 「フラクタルとはなにか」  
1989 小川 泰、NEW SCIENCE AGE39 岩波書店
- 3) 「フラクタル」  
1993 大野 博之、応用地質(株)
- 4) 「岩盤割れ目の寸法評価に関する研究」  
1990 大野 博之、応用地質(株)
- 5) 「単一割れ目における蒸発量分布の特性 —情報エントロピーを用いて—」  
1990 大野 博之、土木学会第48回年次学術講演会
- 6) 「岩盤割れ目のフラクタル」(その1)」  
1992 大野 博之・小島 圭二、応用地質第33巻3号
- 7) 「岩盤割れ目のフラクタル」(その2)」  
1993 大野 博之・小島 圭二、応用地質第34巻2号
- 8) 「画像システムを用いた岩盤割れ目のフラクタル幾何学的特性評価について」  
1989 大西 有三・堀田 政國、大谷 司郎、土木学会論文集 第412号
- 9) 「樹木と岩」  
1993 千葉 則茂、PIXEL (No.93)
- 10) 「Fractal Relation of Mainstream Length to Catchment Area in River Networks」  
1991 WATER RESOURCES RESEARCH, VOL. 27, No. 3 p381~387