

フラクタル次元を用いた河川における人工魚礁配置の定量的評価
Evaluation of Spatial Configuration of Artificial Fish Reefs in River
Using Fractal Dimension

○ 前田 滋哉 · 河地 利彦 · 七枝 拓

○ Shigeya Maeda, Toshihiko Kawachi and Taku Nanaeda

1. はじめに 河川の生態環境を保全することは、河川における治水・利水面の管理とともに重要である。そのため、環境配慮型水路の敷設や生態系保全型圃場整備が実施され、それらの魚類生息への影響が調査研究^{1),2)}されている。また、魚類の生息域保全のために河川整備に必要な条件は整理されている³⁾が、それを定量化し設計に活かすための研究は、十分にはなされていない。一方、海域に設置した人工魚礁の構造の複雑さが生息域における魚類密度の増大に寄与していると報告されている⁴⁾。また、人工魚礁の構造的複雑さをフラクタル次元を用いて定量化し、魚礁構成モジュールの最適配置を計算する手法^{5),6)}が提案されている。そこで本研究では、河川に複数の立方体状ブロックから成る人工魚礁を導入し、その生息域の環境保全価値を定量的に評価する問題を考える。ブロック数一定の条件下でブロックの配置を系統的に変化させ、魚礁のフラクタル次元を求めることで、生息域の複雑さの点で有利な配置を調べる。

2. 生息域構造の定量的評価 生息域構造 (Habitat structure) を生息生物量との関係から定量的に評価するため、McCoy and Bell (1991)⁷⁾ は 198 編の関連論文レビューに基づき、3つの「座標軸」を用いた方法を提案している。それらの軸は、「異質さ (Heterogeneity)」、「複雑さ (Complexity)」、「規模 (Scale)」である。「異質さ」の軸で、単位空間内における生息域構成要素の相違の相対的豊かさを表し、「複雑さ」の軸で、単位空間内における個々の生息域構成要素の絶対的な豊富さを表現する。そして「規模」の軸で、異質さと複雑さを測るために用いられる空間の大きさを表す。本研究ではこの座標軸を用い、「規模」と「異質さ」を固定した状態で生息域構成要素の「複雑さ」を変化させ、豊かな生息域を設計する問題を考える。

3. フラクタル次元の計算法 生息域の複雑さを定量的に表す指標として、ボックス・カウン

ト定理⁸⁾を用いたフラクタル次元を求めることを考える。この定理によると、図形 A 全体を覆う幅 1 の矩形領域を考え、それを幅が $\frac{1}{2^n}$ である正方形の「ボックス」に分割していくと

$$D = \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{\ln N_n(A)}{\ln 2^n} \quad (1)$$

が成り立つ。ここで $N_n(A)$ = 幅 $\frac{1}{2^n}$ のボックスのうち A を覆うものの個数、 D = 図形 A のフラクタル次元である。 D が大きいほど図形 A は複雑といえる。

ただし、数学的に定義されたフラクタルと異なり、人工魚礁配置はブロックそのものの大きさ以下で考えることができない。したがって、ボックスの幅がある有限範囲のみで(そのスケールでの魚礁配置の幾何学的特性(自己相似性)を、ボックス幅を無限に小さくしていった場合($n \rightarrow \infty$)にまで拡張できるとして⁹⁾) フラクタル次元を考える。このとき、

$$\ln N_n(A) = -D \ln r + \ln K \quad (2)$$

が成り立つ。ここで、 r = ボックス幅、 K = 定数である。フラクタル次元 D はボックス幅の対数を横軸に、魚礁を覆うボックスの個数の対数を縦軸にとったグラフの傾きから求まる^{8),10)}。ただし、フラクタル次元はボックスで図形を覆う方法に依存するため、ここでは次の仮定を置き、魚礁の各配置のフラクタル次元が一意的に定まるようにする。

- (i) ボックス生成領域は、魚礁の水平方向の配置を考える矩形河区(水域)に一致する。
- (ii) 魚礁(ブロックの集合)の図心は河区の図心に一致する。

4. 計算例 図1に示すような直線水路の一部から成る河区を考える。この河区を水平2次元の魚類生息域と捉え、ここに生息環境回復を目的とした立方体状ブロックを人工魚礁として複数置く状況を想定する。ただし、ここでは魚礁の

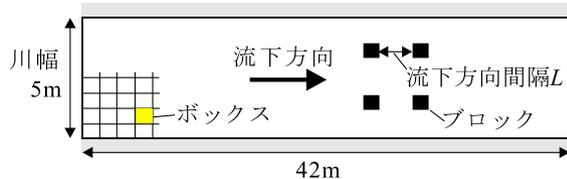


図1 対象河区の平面図
Fig. 1 Plane figure of river reach

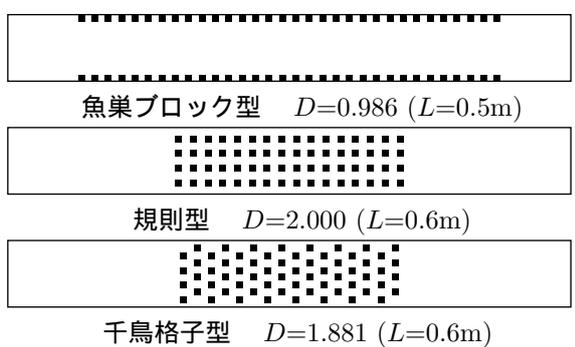


図2 漁礁配置の型とフラクタル次元の計算値
Fig. 2 Types of fish reef configurations and computed fractal dimension

配置のみで生息域構造を定量化することを考え、魚礁も2次元的に扱う。また、魚礁の材質、魚礁側面の穴などが魚礁のフラクタル次元に与える影響は簡単のため考えない。

McCoy and Bell (1991)⁷⁾に基づき、「規模」は図1に示す河区の面積(一定)とする。また、各ブロックの底面形状と底面積を幅0.5mの正方形で統一し、「異質さ」も一定とする。これにより、この河区での漁礁配置の「複雑さ」をフラクタル次元で測ることで、生息域としての価値を定量的に評価できる。

魚礁配置を図2に示すような(i)魚巣ブロック型、(ii)規則型、(iii)千鳥格子型の3種に大別し、64個のブロックを置く。さらに各型においてブロックの流下方向間隔L(図1参照)を0.5m刻みに変化させる。ボックス生成領域を、幅 $r(m) = \frac{5}{2}, \frac{5}{2^2}, \frac{5}{2^3}, \dots$ の正方形メッシュ(ボックス)に切り、式(2)よりDを計算する。

5. 結果と考察 図2に各型で $D(r=0.625 \sim 2.5m)$ のときが最大となる時の値と漁礁配置を示す。また、式(2)が決定係数 $R^2 > 0.995$ で成り立つ場合のDの分布を図3に示す。これによると、魚巣ブロック型では常に $D < 1$ であり、複雑さの点で他の型より劣る。Lを固定すると規則型は千鳥格子型よりやや優れているが、Lの値が異なると立場が逆転する場合がある。また、3つの型すべてにおいてDはLに大きく依存するため、漁礁設置においてLの値を慎重に決める必要があることが示唆される。図

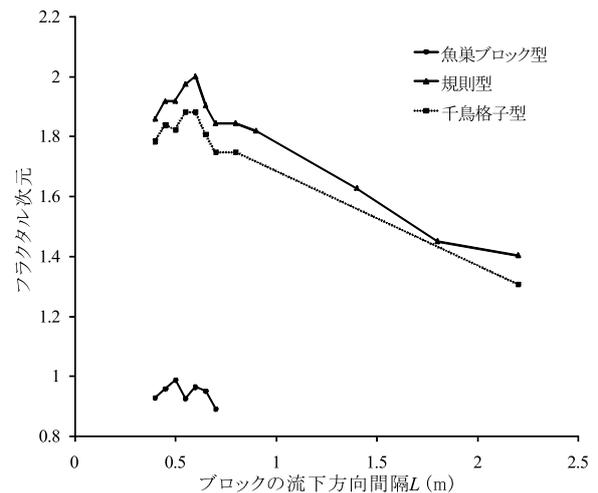


図3 配置とフラクタル次元の関係
Fig. 3 Relationship between configuration of fish reefs and fractal dimension

3より、Lの減少に伴いDは増加するが、ある値を境にDが減少する。これは生息域の複雑さの増加が魚の増加に貢献するが、限界があるという報告⁴⁾に対応している。

6. おわりに 河川に設けた人工魚礁の配置を、生息域の「複雑さ」の観点からフラクタル次元を用いて定量的に評価する手法を提示した。今後は、その配置が流れや底質に与える影響を治水・利水面から調べ、これを加味した魚礁配置の定量的評価を行う必要がある。

引用文献 1)中桐貴生・堀野治彦・橋本裕樹(2008): 環境配慮型水路敷設による魚介類生息への影響分析, 平成20年度農業農村工学会大会講演会講演要旨集. 2)松崎真澄・松澤真一・柿野巨・水谷正一(2008): 生態系保全型圃場整備地域における魚類の生息状況の検証, 平成20年度農業農村工学会大会講演会講演要旨集. 3)玉井信行・水野信彦・中村俊六編(1993): 河川生態環境工学, 東京大学出版会, pp.164-208. 4)Bohnsack, J.A. (1991): Habitat structure and the design of artificial reefs, In: Bell, S.S., McCoy, E.D., and Mushinsky, H.R.(Eds.): *Habitat Structure - the Physical Arrangement of Objects in Space* -, Chapman and Hall, pp.412-424. 5)Lan, C. H., Chen, C. C. and Hsui, C. Y. (2004): An approach to design spatial configuration of artificial reef ecosystem, *Ecological Engineering*, 22, pp.217-226. 6)Lan, C. H., Lan, K. T. and Hsui, C. Y. (2008): Application of fractals: create an artificial habitat with several small (SS) strategy in marine environment, *Ecological Engineering*, 32, pp.44-51. 7)McCoy, E.D. and Bell, S.S. (1991): Habitat structure: the evolution and diversification of a complex topic, In: Bell, S.S., McCoy, E.D., and Mushinsky, H.R.(Eds.): *Habitat Structure - the Physical Arrangement of Objects in Space* -, Chapman and Hall, pp.3-27. 8)Barnsley, M.F. (1993): *Fractals Everywhere*, Second Edition, Academic Press, pp.171-195. 9)Bradbury, R.H., Reichelt, R.E., and Green, D.G. (1984): Fractals in ecology: methods and interpretation, *Marine Ecology - Progress Series*, 14, pp.295-296. 10)Sugihara, G. and May, R. M. (1990): Applications of fractals in ecology, *TREE*, 5(3), pp.79-86.