

関西大学工学部 学生員 ○岸江 竜彦 京都大学防災研究所 正会員 清水 康生
 京都大学防災研究所 正会員 萩原 良巳 関西大学工学部 フェロー 吉川 和広

1. はじめに

近年、都市域の河川環境を自然の河川の状態に近づけ、河川空間に多様な生物が生息できるようにすることで、都市で生活する人々が自然と触れ合うことのできる貴重な空間を確保することが求められている。このためには、人々の安全性の確保、河川利用および生態系の相互関係を総合的にとらえた地域計画としての視点が重要である。そこで本研究では、「共生」を様々な要素が様々な関係をもちながら、互いに調和を保って共存することであると考え、淀川（三川合流地点から淀川大堰）を対象とし、従来、河川計画において個別に考えられがちであった、「河川利用」、「河川管理」、「生態系の保全」という河川環境に深くかかわっている要素を同時に取り上げる。そして、それらの影響関係を把握し、流域の人々の生活と生態系の共生がどのような条件のもとで実現できるのかについて、数理モデルを適用した研究を行うものとする。

2. 都市河川環境における相互関係の考察

都市河川環境に影響を及ぼす要素の一般的な相互関係をブロックダイアグラムによって表現した。その結果、人々の河川利用が河川特性に影響を及ぼし、河川特性が変化することで河川生物に影響が生じ、河川生物の変化が河川利用に影響を及ぼすといった全体的な流れを読み取ることができた。また、各要素が複雑な相互関係を有していることがわかった。

3. モデルの定式化

淀川における共生に関わる課題として、遷移域を確保することの重要性、外来魚類の侵入、河川敷利用の確保に着目し、それら要素の相互関係を中心にモデル化した（図1）。そして、大洪水の発生しない50~100年程度の期間を対象期間と考え、その期間内で淀川がどのような変化傾向を示すのかについて、線形微分方程式系による定式化を行った。また共生を実現するための活動および施策を表すパラメータを導入し、共生パラメータと称し記号 s_i とする。 s_1 は外来魚類の捕獲、 s_2 は水際の法面勾配、 s_3 は自然的河川利用者の生態系への人為的攪乱（踏み荒らしなど）を示す共生パラメータである。

ここで定式化の際には次の仮定をおく。各要素の変化量は全て年単位とし、生態系や河川特性の季節変化などは捨消する。全ての要素は対象区間内において一様に分布しているとする。河川横断面として三角形断面を仮定する。以上より、次のように定式化した。

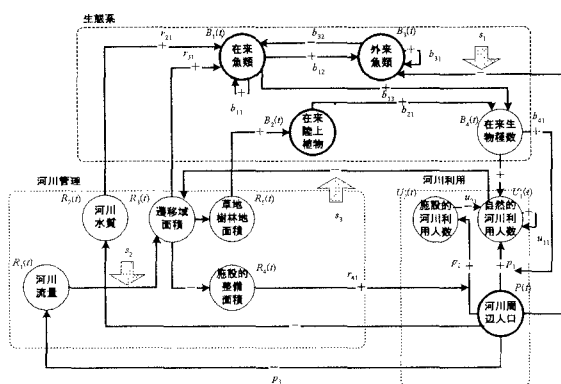


図1 要素の相互関係のモデル化

(1) 河川周辺人口: $P(t)$ (単位: 千人)

$$P(t) = P \quad (3.1)$$

(2) 自然的河川利用人数: $U_1(t)$ (単位: 千人)

$$\frac{d}{dt} U_1(t) = u_{11} \cdot U_1(t) + P \cdot \frac{d}{dt} p_1(t) - u_{21} \cdot \frac{d}{dt} U_2(t) \quad (3.2)$$

$$\text{ただし、} \quad \frac{d}{dt} p_1(t) = b_{41} \cdot \frac{d}{dt} B_4(t) \quad (3.3)$$

(3) 施設的河川利用人数: $U_2(t)$ (単位: 千人)

$$U_2(t) = P \cdot p_2(t) \quad (3.4)$$

$$\text{ただし、} \quad p_2(t) = r_{41} \cdot R_4(t) \quad (3.5)$$

(4) 河川流量: $R_1(t)$ (単位: m^3/s)

$$R_1(t) = R_{10} - p_3 \cdot t \quad (3.6)$$

(5) 河川水質(BOD): $R_2(t)$ (単位: mg/l)

$$R_2(t) = R_2 \quad (3.7)$$

(6) 遷移域面積: $R_3(t)$ (単位: ha)

$$R_3(t) = E_1 \cdot M \cdot K \cdot \sqrt{s_2^2 + 1} \cdot R_1(t) + E_2 \cdot M \cdot K \cdot \sqrt{s_2^2 + 1} \cdot s_3 \cdot U_1(t) \quad (3.8)$$

式(3.8)は次の各項から構成されていることを意味する。

$$\text{遷移域面積} = \text{流量変動特性} \times \text{断面形状特性} \times \text{法面勾配特性} - \text{人為的攪乱特性}$$

(7) 施設の整備面積: $R_4(t)$ (単位: ha)

$$R_4(t) = R_{40} + (R_3(0) - R_3(t)) \quad (3.9)$$

$$\text{ただし、} R_{40} = \frac{1}{10000} \cdot \frac{L \cdot r_4}{r_4 + r_5} (\ell - 2 \cdot s_2 \cdot h) \quad (3.10)$$

(8) 草地樹林地面積: $R_5(t)$ (単位: ha)

$$R_5(t) = R_{50} \quad (3.11)$$

$$\text{ただし、} R_{50} = \frac{1}{10000} \cdot \frac{L \cdot r_5}{r_4 + r_5} (\ell - 2 \cdot s_2 \cdot h) \quad (3.12)$$

(9) 在来魚類数: $B_1(t)$ (単位: 千個体数)

$$\frac{d}{dt} B_1(t) = (b_{10} - r_{21} \cdot R_2(t)) \cdot B_1(t) - b_{32} \cdot B_3(t) + r_{31} \cdot \frac{d}{dt} R_3(t) \quad (3.13)$$

(10) 在来植物: $B_2(t)$ (単位: ha)

$$B_2(t) = R_5(t) \quad (3.14)$$

(11) 外来魚類数: $B_3(t)$ (単位: 千個体数/)

$$\frac{d}{dt} B_3(t) = (b_{31} - s_1 \cdot P(t)) \cdot B_3(t) + b_{12} \cdot B_1(t) \quad (3.15)$$

(12) 在来生物種数: $B_4(t)$ (単位: 種)

$$B_4(t) = b_{13} \cdot B_1(t) + b_{21} \cdot B_2(t) \quad (3.16)$$

以上の式(3.1)から式(3.16)は、式の構造から自然的河川利用人数 $U_1(t)$ 、在来魚類数 $B_1(t)$ 、外来魚類数 $B_3(t)$ の3元連立微分方程式によってその他の要素の動態が決定される。したがって、共生条件の分析にはこの3元連立微分方程式の解の性質を調べる必要がある。

4. 共生の数学的定義

「共生状態」とは、「自然的河川利用人数」と「在来生物種数」が同時に増加傾向を示したときであると考えられる。線形連立微分方程式における平衡点と解の安定性の考え方をを用いて、この共生条件を数学的に定義した。

(1) 解が安定である場合

平衡点において自然的河川利用人数と在来生物種数は一定値を維持する。よって、平衡点が初期値(現状)からみてどの位置に存在するかという位置関係と解の収束の仕方によって、共生状態であるかどうかが決定される(図2)。時間軸を無限大とした場合に共生とならなくても、時間軸を限定することによって共生となる場合もある。

具体的には、自然的河川利用人数 $U_1(t)$ 、在来生物種数 $B_4(t)$ の平衡点を U_{1e} 、 B_{4e} 、初期値を $U_1(0)$ 、 $B_4(0)$ とすると、

$$U_1(0) < U_{1e}, B_4(0) < B_{4e} \quad (4)$$

を満たす場合、自然的河川利用人数、在来生物種数共に、平衡点が初期値よりも高い値である(パターン1)。この場合、時間を無限とすれば必ず共生となるが、平衡点の

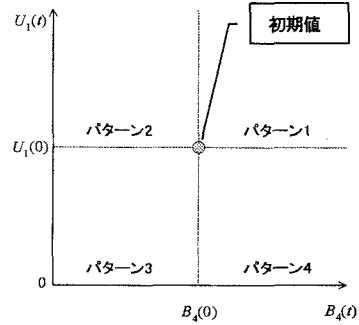


図2 平衡点と初期値(現状値)との位置関係の分類

収束の仕方によっては期間を限定するため共生とはならない場合も生ずる。

(2) 解が不安定の場合

平衡点と初期値との位置関係によらず、自然的河川利用人数と在来生物種数の解の挙動が、どのような傾向を示しているかによって、共生状態であるかどうか決定される。

以上に述べた解の安定性や平衡点の位置は共生パラメータ s_1 によって決定される。

5. 数値解析結果

各定数、初期値を淀川に関するデータから同定した。そして数値解析によって共生が実現するための共生パラメータの条件を分析した結果、本研究で構築したモデルにおいて、解は安定とはならず、条件式(4)は不成立となり、また共生は実現しないという結果が得られた。しかし、解が不安定である場合には、自然的河川利用人数と在来生物種数共に増加傾向を示し、「共生」が実現するという結果が得られた。具体的には、共生条件として外来魚類の捕獲を最も優先すべきであるという結果が得られた。ただし、現象のモデル化の精度や生態系に関するデータの不足から数値解析結果の状態推定誤差は大きいと考えられる

6. おわりに

本研究では、人々の河川利用と生態系の共生が実現するために必要であると考えられる施策や活動を共生パラメータとして導入し、共生パラメータがどのような条件を満たしていればいかにについて分析することが可能となる数理モデルを提案した。そして線形性を仮定した基本的なモデルの枠組みで考え、線形連立微分方程式として定式化し、共生を数学的に定義した。今後の課題として、現象をよりの確に表現し、共生の意味をより深く議論できるよう非線形性までを考慮したモデルを構築することが考えられる。