

# 3

## バイオマニピュレーションによる水質改善

今村 史子

IMAMURA Fumiko

日本工営株式会社/  
首都圏事業部/環境部



長崎 均

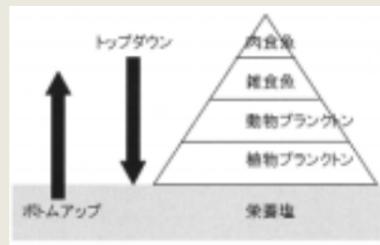
NAGASAKI Hitoshi

日本工営株式会社/福岡支店/  
技術部/専門部長



農耕地のため池や公園の池のような浅い水域の水質悪化については、様々な対策が検討されてきた。その多くは、従来からの化学的処理や物理的処理といった工学的対策であるが、効果をあげるためには薬品や電気等の物質・エネルギーを消費すること、費用の問題により十分な管理ができないこと等の課題がある。また、ヨシやマコモ等の植物群落の復元や浮島の導入といった生物学的対策によって水質の改善を図ろうとする動きが活発になってきているが、その効果は限定的なものと考えられる。

バイオマニピュレーション<sup>\*1</sup>は、大型の動物プランクトンや水草の増殖しやすい生態系をつくり、動物プランクトンによる植物プランクトンの濾過摂食を利用して水質改善を図ろうとする試みであり、建設費や維持管理費が小さいこと、薬品やエネルギーの投入がないこと、水域外に用地



■図1—水界の生態系模式図

を必要としないこと等から注目されている。

現在、日本国内には実績がほとんどなく、バイオマニピュレーションを国内で普及させるためには、第一に基礎資料の蓄積が不可欠である。

### 1—バイオマニピュレーションの仕組み

バイオマニピュレーションの仕組みを考える上で、水域の生態系の食物網は欠くことのできない概念である。水域における食物網は、図1に示すような「生態系ピラミッド」で表現される。生産者としての水草や植物プランクトン、これらを食べる高次消費者の肉食魚類まで、階層が上位に位置するほど生物の現存量は減少する。これは、生態系を最も単純化したものであり、実際の池沼で起きている現象は、捕食と被食の生物相互関係に加えて水質や光量等の無機的环境要素が複雑に絡みあっている。一般に、水質汚濁の主要要因はこの水域の生態系内における植物プランクトンの増殖と、魚が巻き上げる底泥である。

我が国で一般的に行われている浄化方法は、栄養塩類の制御等によって植物プランクトンの増殖を制御するものであり、ボトムアップ法と

呼ばれる方法である。

一方、バイオマニピュレーションは、汚濁した水域の生態系を人為的に非汚濁の状態に変化させ、バランスのとれた形で安定させるものであり、生態系の上位から制御するトップダウン法と呼ばれる方法である。このための人為的な操作として、魚類の現存量の制御と水草の増加といった手法を用いる。

魚類の現存量を制御することにより、①魚が巻き上げる底泥による濁りがなくなり透明度が増加する、②魚類の捕食圧が減少し餌である動物プランクトンが増加する、③動物プランクトンの増加により餌である植物プランクトンが減少する。

水草の役割は、ボトムアップ法では栄養塩類の吸収であるが、バイオマニピュレーションでは、植物プランクトンに対する競合やアレロパシー<sup>\*2</sup>、動物プランクトンの隠れ場所、底泥を被覆することによる再懸濁防止の役割が期待される。

このようなバイオマニピュレーションのメカニズムを図2に示す。

### 2—調査研究の概要

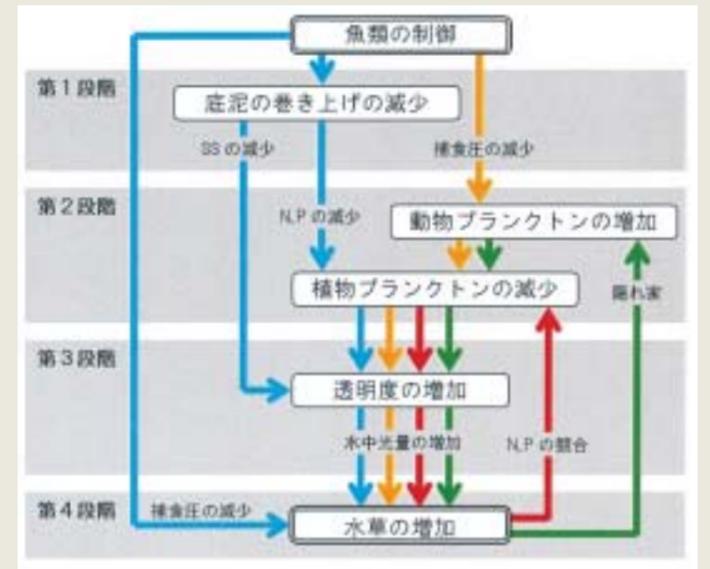
バイオマニピュレーションにおいて水質改善の鍵となるのは、魚類と水草の現存量の管理である。欧米

においては、多くの実地試験の結果をもとに既に技術指針として管理目標や前提条件、実施要領が整理されている。しかし、日本国内には実績がほとんどなく、現段階で一般化した指標を設定することが難しい。そのため国内での普及を目指して、モデル実験により効果の発現を検証するとともに、実験から得られた結果をもとに生態系モデルを構築し、シミュレーションによって日本の実情に合った魚類と水草のバイオマス量を推定する方法が有効であると考えた。調査研究は以下の3項目について実施した。

- ①効果の発現を検証するとともに、生態系モデルを構築するためのモデル実験
  - ②モデル実験の結果をもとに構築した生態系モデルによる効果予測シミュレーションの実施
  - ③実際の水域における効果確認のための実地試験
- ①②は、平成7～10年度に「水のきれいさ(透明度)の向上」、「自然環境(生態系)への配慮」、「外部環境負荷の低減(省エネルギー・省資源)」という3つの視点を技術開発の方向



■写真1—モデル実験に用いたメソコスム



■図2—トップダウン法による水質浄化の流れ

性とした国土交通省の公園技術5ヶ年計画のテーマのひとつとして取り上げられたものであり、国営みちのく杜の湖畔公園の水質浄化に係る研究として財団法人都市緑化技術開発機構とともに実施したものである。また、③は公園緑地管理財団の公園内水域の水質浄化技術に係る研究として実施したものである。

### ●1 モデル実験

効果の発現を検証するためのモデル実験を、平成8～9年度、国営

みちのく杜の湖畔公園やすらぎの池において実施した。

実験は、池内に写真1に示すようなメソコスム<sup>\*3</sup>を設置し、バイオマニピュレーションを導入した区画、導入していない区画をつくり出すことによって、効果を確認したものである。各メソコスムの設定は、表1に示す4パターンとした。

この結果、濁りの指標のひとつであるSSは魚を導入した2つのメソコスムにおいて高い値を示し、植物プランクトンの現存量の程度を示すクロロフィルaは水草を導入せず魚のみのメソコスムで高い値を示した(写真2、写真3)。

### ●2 生態系モデルの構築とシミュレーションによる水質管理への応用

モデル実験の結果をもとに、水域内の生態系モデルを構築した。生態系モデルは、Scheffer<sup>4)5)</sup>の捕食者-被食者関係を表すモデルを用

■表1—モデル実験における各メソコスムの設定

メソコスム	導入種
No.1	魚+水草 コイ・フナ(150g/m <sup>2</sup> )、クロモ(250g/m <sup>2</sup> )
No.2	魚 コイ・フナ(150g/m <sup>2</sup> )
No.3	水草 クロモ(250g/m <sup>2</sup> )
No.4	対象区 なし



■写真2—No.2 (魚のみ)の状況: 透明度0.96m



■写真3—No.3 (水草のみ)の状況: 透明度1.70m

■表2—生態系モデルの概要

$$\frac{dPy}{dt} = (Pgi - Mi - Ri - Gi) \cdot Pyi \quad (1)$$

$$\frac{dZ}{dt} = (Gz - Rz - Mz) \cdot Z \quad (2)$$

$$\frac{dD}{dt} = \sum (qi \cdot ai \cdot Mi \cdot Pyi) - u \cdot D - s \cdot D \quad (3)$$

$$\frac{dB}{dt} = ib + G_B \cdot B - cb \cdot B^2 - Pr_{max} \cdot Fr \cdot Pi \quad (4)$$

$$\frac{dPi}{dt} = ip + G_{Pi} \cdot Pi - mp \cdot Pi - cp \cdot Pi^2 \quad (5)$$

- $Py$  : 植物プランクトンの濃度 (mg/m<sup>3</sup>)
- $Pg$  : 植物プランクトンの増殖率 (/day)
- $M$  : 植物プランクトンの死滅率 (/day)
- (動物プランクトンによる捕食以外)
- $R$  : 植物プランクトンの呼吸による減耗率 (/day)
- $G$  : 動物プランクトンによる捕食率 (/day)
- $i$  : 植物プランクトンの種類
- $Z$  : 動物プランクトンの密度 (mg/m<sup>3</sup>)
- $Gz$  : 動物プランクトンの増殖率 (/day)
- $Rz$  : 動物プランクトンの呼吸による減耗率 (/day)
- $Mz$  : 動物プランクトンの死滅率 (/day)
- (プランクトン食性魚による捕食を含む)
- $D$  : 植物プランクトンの死骸によるデトリタス現存量 (mg/m<sup>3</sup>)
- $q$  : 植物プランクトンの体内に含まれる有機物のうちデトリタスに変化する割合 (-)
- $a$  : それぞれの種類について単位量の植物プランクトンのうち有機物の割合 (-)
- $u$  : デトリタスの無機化する割合 (/day)
- $s$  : デトリタスの底泥中に堆積する割合 (/day)
- $B$  : プランクトン食性魚の密度 (g/m<sup>2</sup>)
- $ib$  : プランクトン食性魚の系外からの移入量 (g/m<sup>2</sup>/day)
- $G_B$  : プランクトン食性魚の増加率 (/day)

$$G_B = r \left[ \frac{N_{utr}}{H_1 + N_{utr}} \times \frac{Z^2}{kz + Z^2} \right]$$

$r$  はプランクトン食性魚の最大増殖率 (/day)、 $N_{utr}$  は栄養塩濃度、 $H_1$  及び  $kz$  は半飽和定数

$cb \cdot B$  : プランクトン食性魚の種内競争 (/day)

$Pr_{max} \cdot Fr$  : 魚食性魚による捕食率 (/day)

$Pr_{max}$  は魚食性魚による最大捕食率 (/day)、

$Fr = \frac{B^2}{H_4 + B^2}$ 、 $H_4$  は半飽和定数

$Pi$  : 魚食性魚の密度 (g/m<sup>2</sup>)

$ip$  : 魚食性魚の系外からの移入量 (g/m<sup>2</sup>/day)

$G_{Pi}$  : 魚食性魚の自然増殖率 (/day)

$mp$  : 魚食性魚の死滅率 (/day)

$cp \cdot Pi$  : 魚食性魚の種内競争 (/day)

いた。このモデルは表2のような連立方程式で表わされる。

図3に植物プランクトン及び動物プランクトンの観測値とモデルによる計算値との比較を示す。

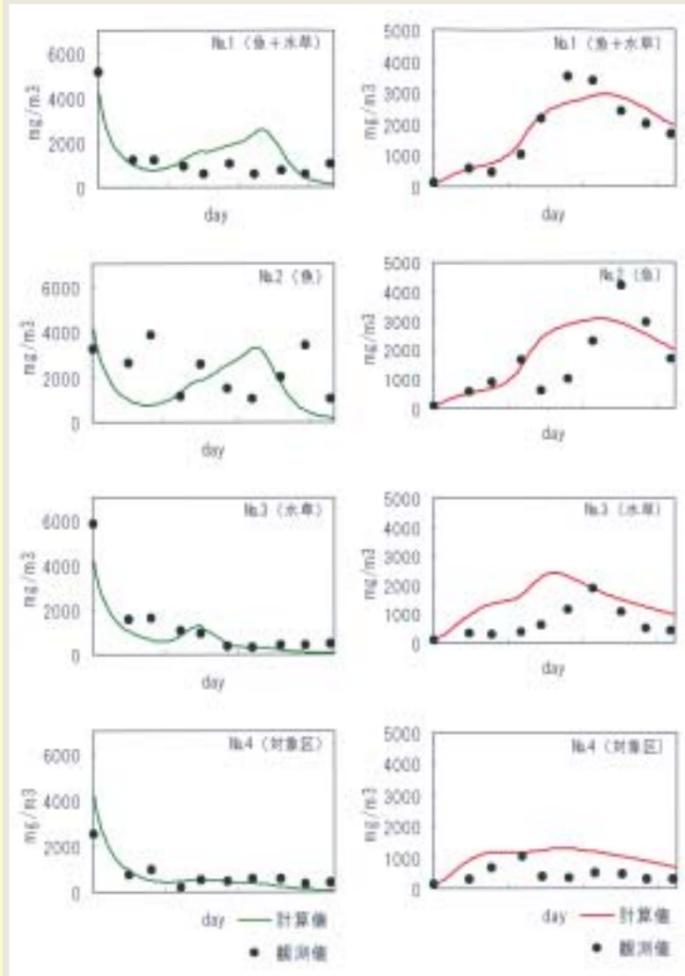
この生態系モデルを用いることにより、さまざまな水域において、水質の状況(栄養塩レベル)にあわせ魚類密度や水草のバイオマス量をどの程度に設定すると、どの程度の透明度が確保されるのかというバイオマニピュレーションの効果を予測することができる。このモデルによる

と、図4及び表3に示す魚類密度の制御によって透明度で最大0.6mの改善効果が期待された。

### ●3 実地試験

実際の水域における効果確認のための実地試験は、国営武蔵丘陵森林公園がっし沼において実施した。水域内を魚類密度を制御したバイオマニピュレーションの導入区と無処理の対象区に分割し、それらと比較することにより実際の水域における効果を確認した(写真4)。

この結果、導入区における透明度は、バイオマニピュレーション実施直後から比較的高い値で安定し、透明度で最大0.5mの改善効果を示した。また、クロロフィルaは実施後すぐに急激に減少し、その後増加し



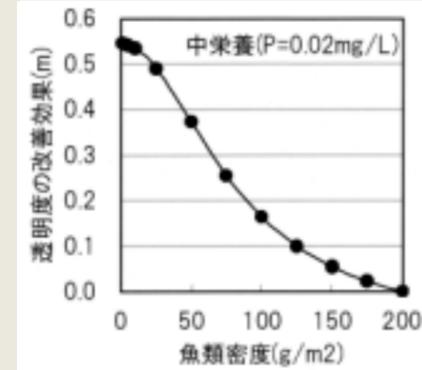
■図3—再現計算結果

たが、実施前や対象区の濃度まで高くなることはなかった(図5)。これは魚類密度の制御による底泥巻き上げの抑制効果、植物プランクトンの減少とそれに伴う透明度改善であり、図2に示すバイオマニピュレーションの第1~3段階の効果が発現していることが示唆された。ただし、第4段階の水草の生育については十分な生育がみられなかったことから、水草の生育条件の検討等が今後の課題である。

バイオマニピュレーションは、生態系を制御するという意味であるが、実際には制御というより水域内の食物網を水質浄化に向かわせるための手助けである。この手法は、清浄な水域の生態系に本来備わっている、水質を浄化する能力を取り戻させると同時に、水草の繁茂や水生生物相の回復等、人々が多様な自然にふれあえる水辺づくりにもつながるものであると期待される。

- \*1 バイオマニピュレーション (biomanipulation) : 浅い水域において水界生態系の食物連鎖(網)システムの一部をコントロールすることによって、生物の多様性を保ちながら良好で透明度の高い水質環境を保全または創出する技術。「アクティブな生態系管理の応用(Actif Biologisch Beheer)技術」とも呼ばれる。
- \*2 アレロパシー: 他感作用ともいう。ある種の植物(微生物を含む)が生産する化学物質が環境に放出されることによって、他の植物に直接または間接に与える害作用をいう(Rice, 1974)。
- \*3 メソコスム: 自然環境の一部を何らかの手段で囲い込み、その中の環境変化と生物活動を精密に解析する方法。「中規模の宇宙」という意味を持ち、隔離水界とも呼ばれる。
- \*4 PVI (percentage volume infestation) : 水の体積%に対する面積%。

- (参考文献)
- 1) 村上雅博、浅枝隆、林紀男: バイオマニピュレーション: 生物多様性に配慮したアクティブな水界生態管理の応用技術、水文・水資源学会誌, Vol.9, No.4, pp.367-375, 1996
  - 2) 浅枝隆: 積極的生態系管理による水環境の保全: URBAN GREEN TECH, No.22, 財団法人 都市緑化技術開発機構
  - 3) 広瀬利雄監修, 応用生態工学序説編集委員会編: 増補応用生態工学序説: 信山社サイテック, 1997
  - 4) Scheffer, M.: Alternative stable states in eutrophic shallow freshwater systems: A minimal model, Hydrobiol. Bull., 23, pp.73-83, 1989
  - 5) Scheffer, M.: Multiplicity of stable status in freshwater systems, Hydrobiologia, 200/201, pp.475-486, 1990
  - 6) 浅枝隆: バイオマニピュレーションの数学的モデル化: 用水と排水, Vol.39, No.11, pp7-14, 1997



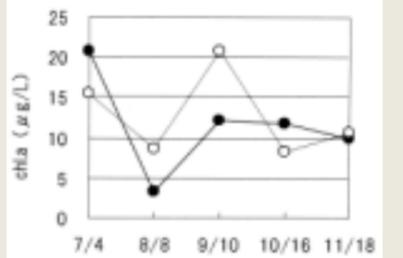
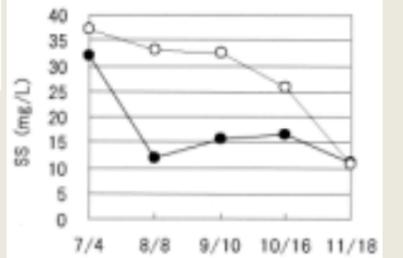
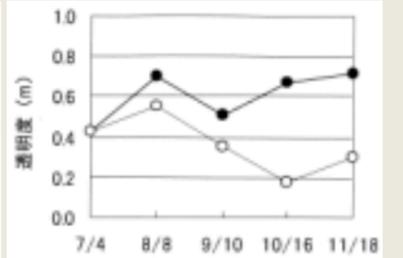
設定した栄養塩濃度と魚類密度における植物プランクトン量を予測し、Ichimura(1956)の式をもとに透明度を推定したもの。

■図4—魚類密度と透明度の関係

■表3—生態系モデルによる水質の改善効果

栄養段階 <sup>注1)</sup>	透明度改善効果	
	魚類制御 <sup>注2)</sup>	水草植栽 <sup>注3)</sup>
貧栄養	0.6m程度	
中栄養	0.5m程度	0.4m程度
富栄養	0.4m程度	

- 注1) 貧栄養TP<0.015mg/L、中栄養0.015mg/L<TP<0.025mg/L、富栄養TP>0.025mg/Lとした。
- 注2) 水草植栽は20PVI\*4以上生育した場合とした。
- 注3) 魚類密度は150g/m2を10g/m2まで減少させた場合とした。



■図5—実地試験結果



■写真4—がっし沼における実地試験の状況 (左: 対象区、右: 導入区)