

第 5 章 微小動物定着型リアクターによる *Microcystis* 属の増殖抑制

5-1 序

水圏生態系において、藻類の消滅には微小動物の捕食作用が重要な役割を果たしている。このことは、秋季の霞ヶ浦で鞭毛虫類 *Monas guttula* がアオコ（藍藻 *Microcystis* 属）の細胞を活発に捕食し、分解消滅に寄与していることから裏付けられる⁵⁵⁾。このような微小動物の捕食作用を人為的にコントロールすることができれば、富栄養化池沼の *Microcystis* 属の増殖を抑制することも可能であると考えられる。現に、第 3 章において *M.guttula* が *Microcystis* 属を捕食分解し減少させるための有益な微小動物であることと、*Microcystis* 属が増殖する環境条件を与えた場での *M.guttula* の *Microcystis* 属に対する捕食と増殖特性を調べ、*Microcystis* 属の群体形成および高 pH 化が *M.guttula* の捕食作用を低下させる要因であることを明らかにした。さらに第 4 章から、群体状の *Microcystis* 属を *M.guttula* や *P.erythrophthalma* の捕食作用で迅速に分解する上では、群体を単独の細胞に分散化させる作用がある *A.hemprichi* との共存系を創り出し、それらの共存による捕食作用を利用することが有効な手段となりうることが示唆された。これらの知見に基づくと、*Microcystis* 属が増殖する水域で、*Microcystis* 属捕食性の微小動物の共存系を人為的に構築することで *Microcystis* 属の増殖抑制が可能であると考えた。本章では、このような方法で *Microcystis* 属の増殖抑制が可能か否かを検証し、その効果を定量的に明らかにすることを目的とした。この目的を達成させるために、*M.guttula* と *A.hemprichi* の食物網を形成させる場として微小動物定着型リアクターを考案し、それを *Microcystis* 属の増殖水域を模擬したモデル池沼と連結させ、モデル池沼水をリアクターで処理し、その処理水をモデル池沼に返送する、という実験システムを用いて解析した。なお、本実験システムを構成するにあたり、リアクターでの *Microcystis* 属の分解率を第 3 章 (3-3-4) の実験結果から計算により予測した。さらに、その予測値からモデル池沼とリアクターのスケール比を算出した。

5-2 リアクターによる *Microcystis* 属の分解率の予測とモデル池沼とリアクターのスケール比の算出

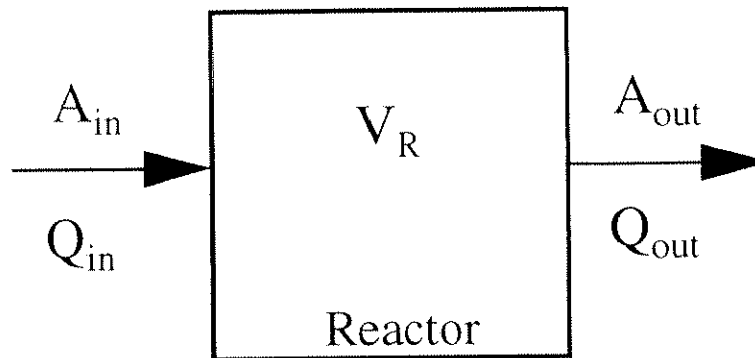
5-2-1 リアクターによる *Microcystis* 属の分解率の予測

リアクターに *M.guttula* が定着し *Microcystis* 属を第 3 章 (3-3-4) の実験結果と同様の作用で捕食分解すると仮定して、Fig.5-1 に示す収支モデルに基づき、リアクターの *Microcystis* 属の分解率を算出した。まず、*Microcystis* 属の分解率を計算する上で必要な *Microcystis* 属の分解速度定数 k を求めることとした。なお、 k を求める上でのデータは、*Microcystis* 属の増殖が活発な夏季の水温を考慮し、第 3 章の 3-3-4 の 30°C の実験データ (Fig.3-11、Fig.3-10) を用いた。ここで、3-3-4 のデータは 3-3-5 で数理モデル解析を行ったので、その解析結果が利用できる。しかし、解析の結果をみると、*M.guttula* が *M.viridis* を捕食分解し、*M.viridis* が減少していく過程で、*M.guttula* の死亡率 δ も上昇し、後半になると、とくにその影響が大きく現れ、*M.viridis* の分解率が低下するという現象が明らかとなり、単純な捕食分解の系でないことが示された。このように、解析した実験データは、回分実験系のものであるため、系に特有な因子、例えば、*M.guttula* に対する阻害物質の蓄積が実験の後半に顕著に現れたものと考えられる。したがって、解析結果の全てを起用すると、 k はより複雑な因子を含むこととなり、一般化する上で必要な本来の値から大きくはずれることが予想される。そこで、Fig.3-20 で示されたように、実験開始から 1 日目までは *M.viridis* に対して *M.guttula* の捕食が比例する、つまり、 $f(A)=\mu A$ という比例関係が記述できるので、このデータを用いて、捕食被食の単純なモデルから k を求めることにした。

まず、*M.guttula* は *M.viridis* を捕食し増殖するので、*M.viridis* の細胞は *M.guttula* の個体を増加させることになる。したがって、両者の関係は以下の式で表される。

$$\frac{dA}{dt} = -kMA \dots \dots (5-1)$$

ここで、 A :*Microcystis* 属の細胞数($N \cdot ml^{-1}$)、 M :*M.guttula* の個体数($N \cdot ml^{-1}$)、 k :分



$$Q_{in} = Q_{out}$$

$$T_H = V_R / Q_{in}$$

A_{in} : Algal concentration in inflow water($\text{cell} \cdot \text{ml}^{-1}$)

A_{out} : Algal concentration in outflow water($\text{cell} \cdot \text{ml}^{-1}$)

Q_{in} : Inflow water($\text{L} \cdot \text{d}^{-1}$)

Q_{out} : Outflow water($\text{L} \cdot \text{d}^{-1}$)

V_R : Volume of reactor(L)

T_H : Hydraulic retention time(d^{-1})

Fig.5-1 Mass-balance of algae on a reactor

解速度定数である。つまり、*M.guttula* と *M.viridis* の捕食被食関係は (5-1) 式と仮定できる。

つぎに、 k を実験データから求めるために、(5-1) 式を変形すると、

$$\frac{1}{A} \frac{dA}{dt} = kM$$

となり、これを時間 t で積分すると、

$$\ln \frac{A(t)}{A(0)} = k \int_0^t M dt \quad \dots \dots (5-2)$$

となり、これを整理すると、

$$A(t) = A(0) e^{k \int_0^t M dt} \quad \dots \dots (5-3)$$

となる。したがって、分解速度定数 k は *M.guttula* の個体数の積算値に対して、*M.viridis* の細胞数を対数プロットし、指数回帰することで求められる。そこで、前半 (1 日目まで) のデータを Fig.5-2 にプロットし、指数回帰させ、

$$k = 1.15 \times 10^{-4} (\text{N} \cdot \text{ml}^{-1})^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$$

を得た。

つぎに、宮崎¹⁰²⁾の既往データから、担体内の *M.guttula* の個体数は $1.0 \times 10^5 \sim 8.0 \times 10^5$ ($\text{N} \cdot \text{ml} \cdot \text{carrier}^{-1}$) であり、その平均個体数は 5.0×10^5 ($\text{N} \cdot \text{ml} \cdot \text{carrier}^{-1}$) と計算されるので、リアクター内に充填された担体中の *M.guttula* の平均個体数を 5.0×10^5 ($\text{N} \cdot \text{ml} \cdot \text{carrier}^{-1}$) とし (*Microcystis* 属の分解は全て担体中の *M.guttula* の捕食であると仮定する)、リアクターに担体を約 20% (実質値) 充填すると、リアクターでの *M.guttula* の平均個体数 $M_{R,AVE}$ は、

$$M_{R,AVE} = 0.2 \times 5.0 \times 10^5 = 1.0 \times 10^5 (\text{N} \cdot \text{ml}^{-1})$$

となる。

リアクター内で *M.guttula* 個体あたり *Microcystis* 属の細胞の捕食量、すなわち、リアクターの分解速度定数 k_R は k と $M_{R,AVE}$ の積で計算できる。

したがって、

$$k_R = 1.0 \times 10^5 \times 1.15 \times 10^{-4} = 11.5 \text{d}^{-1}$$

となる。

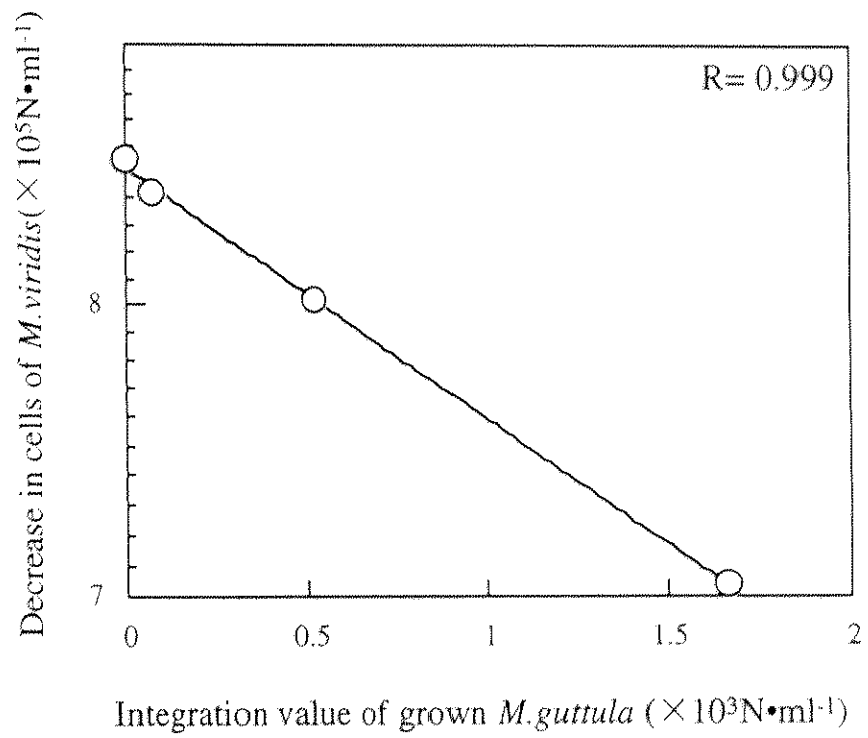


Fig.5-2 Relation between integration value of grown *M.guttula* and decrease in number of *M.viridis*

この値を用いてリアクターの *Microcystis* 属の分解率を計算する。Fig.5-1 よりリアクターでの分解率 $1-A_{out}/A_{in}$ は、以下の式を計算することで求められる。

$$\frac{dA}{dt} = \frac{1}{T_H}(A_{in} - A) - k_R A \quad \dots \dots \dots (5-4)$$

k_R : リアクターの分解速度定数、 T_H : 滞留時間(d^{-1})、 A_{in} : 流入の藻類密度($cell \cdot ml^{-1}$)、 A : リアクター内の藻類密度($cell \cdot ml^{-1}$)

ここで、リアクターの分解能は一定であると仮定すると、定常状態では、

$$\frac{dA}{dt} = 0$$

となるので、

$$\frac{1}{T_H}(A_{in} - A) - k_R A = 0 \quad \dots \dots \dots (5-5)$$

この式を整理すると、

$$A_{in} = A(1 + k_R T_H) \quad \dots \dots \dots (5-6)$$

ここで、リアクター内の藻類の濃度 A と流出水の藻類の濃度 A_{out} は等しいので、

$$A_{in} = A_{out}(1 + k_R T_H)$$

となり、リアクターでの *Microcystis* 属の分解率は以下の (5-7) 式から求めることができる。

$$R = \frac{1 - A_{out}}{A_{in}} = \frac{k_R T_H}{1 + k_R T_H} \quad \dots \dots \dots (5-7)$$

ここで、滞留時間 $4hr=4/24=0.1667(d^{-1})$ 、分解速度定数 $k_R=11.5$ を (5-7) 式に代入すると、

$$R = \frac{1 - A_{out}}{A_{in}} = \frac{11.5 \times 0.1667}{(1 + (11.5 \times 0.1667))} = 0.66$$

となる。

したがって、本章の結果から予想されるリアクターでの *Microcystis* 属の分解率は 66% である。

以上より 30°C における *M.guttula* の *M.viridis* に対する捕食速度から、*M.guttula*

をリアクターで活用することを想定した場合、予想されるリアクターでの *Microcystis* 属の分解率 R は約 60% と計算された。

5-2-2 リアクターと池沼のスケール比の算定

本実験を行う上で、池沼における *Microcystis* 属の増殖に対し抑制をかけるために必要なリアクターのスケールを決定する必要がある。そこで、リアクターと池沼のスケール比を設定するために、まず、単純なモデルをたて以下の方法で計算した。リアクターによる池沼の藻類の増殖抑制を想定したモデルを Fig.5-3 に示した。藻類の増殖抑制は完全混合の条件下では以下の式で表される。

$$\frac{dA}{dt} = \mu A - \left(\frac{Q}{V}\right)(A - A_R) \quad \dots \dots \dots (5-8)$$

ここで、 μ :藻類の増殖速度、 A :藻類の密度（濃度）、 V :池沼の堆積、 Q :処理水量、 A_R :処理水中の藻類の密度（濃度）であるから、 μA は池沼内の藻類の増殖、 Q/V はリアクターの処理水による池沼水の希釈率、 $A - A_R$ は分解した藻類の濃度となる。

ここで、藻類の分解率 R を一定とした場合、

$$R \equiv \frac{A - A_R}{A}$$

となるので

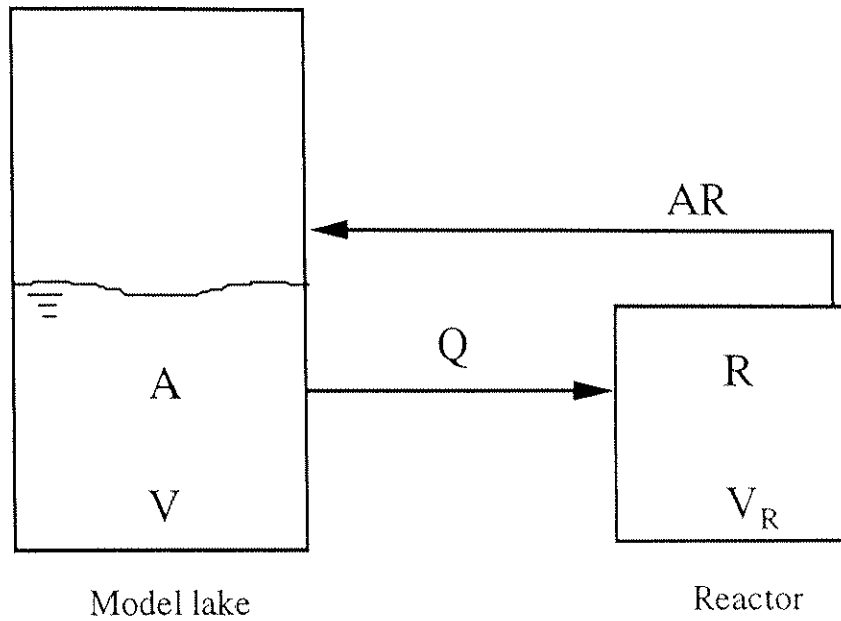
$$\frac{dA}{dt} = \mu A - \frac{QR}{V} A = \mu \left(1 - \frac{QR}{\mu V}\right) A \quad \dots \dots \dots (5-9)$$

これを整理すると、

$$A = A_0 e^{(\mu - \frac{QR}{V})t} = (A_0 e^{\mu t}) e^{-\frac{QR}{V}t} \quad \dots \dots \dots (5-10)$$

ここで、リアクターの効果による藻類の抑制の割合は

$$e^{-\frac{QR}{V}t}$$



A : Algal concentration in model lake($\text{cell}\cdot\text{ml}^{-1}$)

Q : Inflow volume($\text{L}\cdot\text{t}^{-1}$)

V : Volume of model lake(L)

V_R : Volume of reactor(L)

R : Decomposition rate in reactor

Fig.5-3 Schematic diagram of algal suppression in a lake using reactor

となる。

ここで、藻類を T 時間後に e^{-1} に減少させることを目標にすると

$$e^{-\frac{QR}{V}T} = e^{-1}$$

となるので、これを整理すると

$$\frac{QR}{V} = \frac{1}{T}$$

..... (5-11)

となる。

ここで、 Q はリアクターの容積 V_R とその滞留時間 T_R の比で決まるので

$$Q = \frac{V_R}{T_R}$$

..... (5-12)

となる。したがって、

$$\frac{V_R}{V} = \frac{T_R}{T} \frac{1}{R}$$

..... (5-13)

で表される。

ここで、 R はリアクターでの分解率、 T_R はリアクターの滞留時間、 V は池沼の体積、 V_R はリアクターの容積、 T は池沼の藻類を $1/e \approx 1/3$ に抑制するための目標の時間である。

したがって、リアクターでの分解率と抑制目標の時間を (5-13) 式に代入すれば、リアクターと池沼の比が算出できる。

本研究では、分解率を 60% ($R=0.6$)、滞留時間 ($T_R=0.1667(\text{HRT}4\text{hr})$)、抑制目標時間を 30 日 ($T=30\text{d}$) に設定し、まず、モデル実験系を用いて検討するが、この場合、各数値を (5-13) 式に代入すると、

$$\frac{V_R}{V} = \frac{0.1667}{30} \frac{1}{0.60} = \frac{1}{108}$$

となり、リアクターと池沼のスケール比 $V_R : V$ は、ほぼ 1 : 100 となるので、この比率に設定することによって、リアクターによる池沼の *Microcystis* 属の増殖抑制を検証できると考えられる。

5-3 実験材料および方法

1) 実験装置

本研究に用いた微小動物定着型リアクターの概略図を Fig.5-4 に示す。リアクターは流入調整槽、反応槽（担体充填槽）、沈殿槽から構成され、反応槽は容積が 6L で、そこには多孔質セルロース担体が充填される。また、反応槽には担体を強制的に流動させるための回転式羽根車が備えられ、反応槽の底部に取り付けられたスパージャーに空気を供給することで、反応槽内の曝気が行える。リアクターの材質はポリカーボネートで 121℃のオートクレーブ滅菌が可能である。

モデル池沼には大型淡水マイクロコズムを用いた。本研究ではモデル池沼内に滅菌済み M11 培地を 500L 充填した。なお、モデル池沼はアオコ (*Microcystis* 属) 発生池沼を想定したものである。

実験システムの構成を Fig.5-5 に示す。本実験では、*Microcystis* 属が増殖する環境条件を設定した 2 基のモデル池沼を用意した。1 基のモデル池沼を対照系とし、もう一基にはリアクターを接続し、池沼水をリアクターで処理して、その処理水を池沼に返送する設定にした。ここで、リアクターを接続したモデル池沼を A system、リアクターを接続していない対照系を B system とした。なお、モデル池沼とリアクターのスケール（容積）比は 5-2-2 で算定した 100 : 1（実測値 83 : 1）に設定した。

2) 供試微生物とその培養方法

供試微小動物には、*Aeolosoma hemprichi*、輪虫類 *Philodina erythrophthalma*、*Monas guttula* を用いた。各微小動物の供試前の培養方法は 4-2-1 の 1) にしたがった。

供試藻類は 1996 年 7 月に霞ヶ浦から分離し、現在まで系統保存された分散状の *Microcystis aeruginosa* を用いた。*M. aeruginosa* を供試したのは、霞ヶ浦、手賀沼、諏訪湖など我が国を代表する富栄養化湖沼の多くで大発生が認められている種であることが理由である。培養は M11 培地を用いて行った。まず、10L

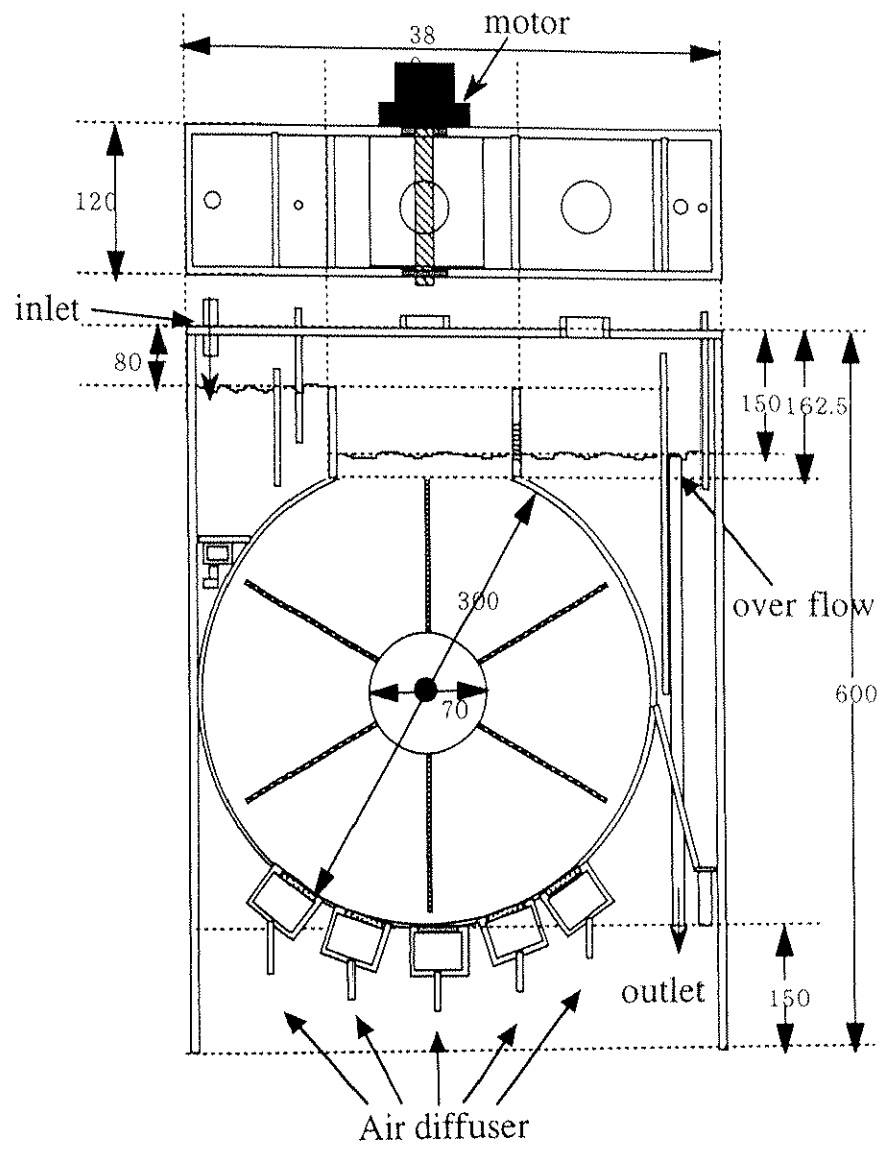


Fig.5-4 Fluidized bed reactor
combined with model lake

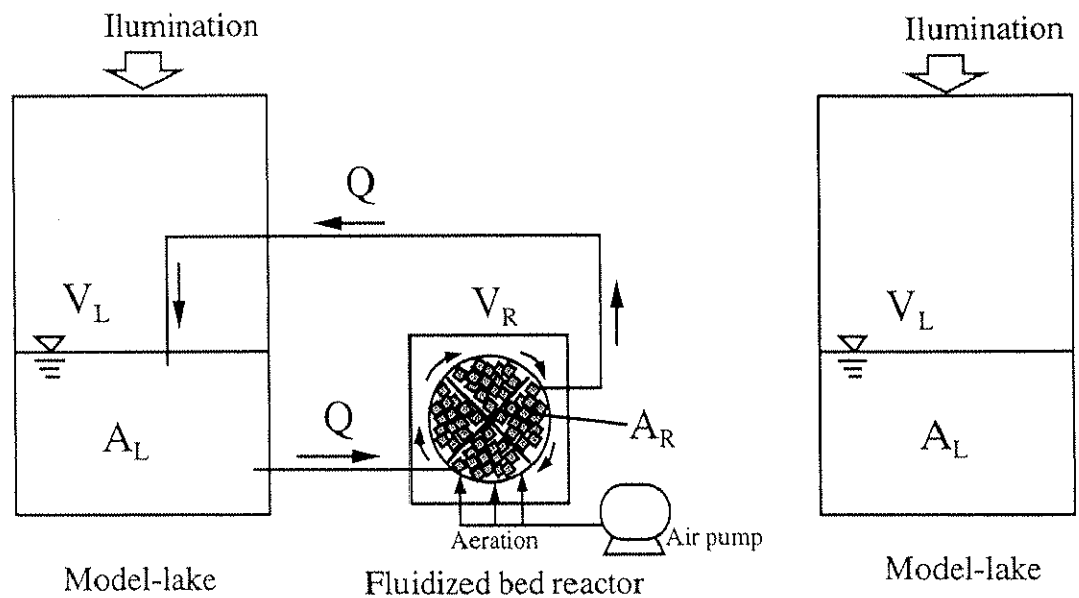


Fig.5-5 Schematic diagram of model-lake combined with reactor (A system) and model-lake without reactor as control (B system)

Legende

A_L : concentration of chlorophyll *a*
in model-lake [$\mu\text{g}\cdot\text{l}^{-1}$]

A_R : concentration of chlorophyll *a*
in reactor [$\mu\text{g}\cdot\text{l}^{-1}$]

V_L : volume of the model-lake [liter]

V_R : working volume of reactor [liter]

Q : water volumetric flow rate [$\text{l}\cdot\text{day}^{-1}$]

容の耐熱ガラス容器に M11 培地を 9L 入れ、オートクレーブで滅菌（121℃、20min）した後、室温（約 30℃）まで冷却し、無菌的に *M. aeruginosa* を接種した。ついで、30℃の恒温室にてフィルター（0.2μm）を通した除菌空気を 1L・min⁻¹ の速度で送り容器の底部から曝気し、蛍光灯を用いて容器の外部から 12 時間周期で照度 2,000Lux の光を照射し、対数増殖期の後半である約 20 日目まで培養を行った。

3) 実験条件

実験は、2 基のモデル池沼に培養した *M. aeruginosa* をクロロフィル *a* で 7μg・l⁻¹ となるように無菌的に移送後、温度 30℃、水面の平均照度を 20,000Lx、12hr ごとの明暗周期に環境条件を設定し、底部から曝気で攪拌を行い *M. aeruginosa* を増殖させた。一方、リアクターには多孔質セルロース担体（ポアサイズ 200-500μm, 5mm 角）を量で約 40% 充填し、オートクレーブ（121℃、40min）で滅菌後、無菌的にモデル池沼に接続した。モデル池沼で *M. aeruginosa* の対数増殖期の後期にリアクターの運転を開始した。なお、リアクターの反応槽には、運転開始直前に供試微小動物を無菌的に接種した。リアクターの HRT（水理的滞留時間）は 2, 4, 8hr の順に変化させた。経時的にモデル池沼およびリアクター内の微小動物の個体数、クロロフィル *a*、pH の測定を行った。なお、*M. aeruginosa* のバイオマスはクロロフィル *a* 濃度と正比例することは確認済みである。

5-4 結果および考察

5-4-1 微小動物定着型リアクターによるモデル池沼の *M. aeruginosa* の増殖抑制の検証

モデル池沼での *M. aeruginosa* の前培養期間（リアクター運転開始前の培養期間）、A および B system ともクロロフィル *a* はほぼ同じ速度で増加したことから、両 system の *M. aeruginosa* とも同一の増殖特性を示すことが確認された。し

たがって、両 system を比較して解析を行う上で装置の構造上の問題は無いことがわかった。なお、実験期間中、*M.aeruginosa* の増殖に必要な栄養塩は各モデル池沼とも十分な濃度であった。

リアクター運転開始時からの A および B system のモデル池沼におけるクロロフィル *a* の経日変化を Fig.5-6 に示す。リアクターの運転開始時のクロロフィル *a* 濃度は A および B system のモデル池沼ともに $1,000\mu\text{g}\cdot\text{l}^{-1}$ であった。A system のモデル池沼は、リアクター運転開始から 12 日目までの期間を B system と比べると、クロロフィル *a* の濃度は明らかに減少していることが確認された。この減少はリアクターにより *M.aeruginosa* が除去されたためと判断された。とくに、リアクターの運転開始から 5 日目までは、B system におけるクロロフィル *a* の増加から *M.aeruginosa* の増殖期間であったと推定できる。この期間でも、A system のモデル池沼ではクロロフィル *a* は横這い、あるいは減少しており、リアクターによる除去速度が *M.aeruginosa* の増殖速度を上回ったものと考えられた。

A system のモデル池沼における *M.aeruginosa* の著しい減少は、単にリアクター内に *M.aeruginosa* が蓄積されたものではなく、分解により消失したことが pH および微小動物の個体数の変化から裏付けられる。そこで、pH の変化を Fig.5-7 に示す。クロロフィル *a* 濃度の変化は、藻類による一次生産速度（光合成速度）の指標となる pH の変化にあらわれており、リアクター運転開始から 12 日目までの期間、B system では pH10 以上となり、*M.aeruginosa* が活発に光合成を行っていることが示された。しかし、A system のモデル池沼内の pH は運転開始 0 日目の 10.5 から速やかに減少し、5 日目には 8.5 となった。池沼水から *M.aeruginosa* を単純に除去しただけでは池沼水の pH の値は変化しないはずである。しかし、pH の値は明らかに変化した。この pH の低下はリアクターに接種した微小動物がリアクター内で *M.aeruginosa* を捕食分解したときの呼吸によるものと、捕食分解され *M.aeruginosa* が減少したことでモデル池沼内の総一次生産力が低下したことによるものと考えられた。ここで、リアクターの担体内の微小動物の個体数の変化を Fig.5-8 に示す。*M.guttula* の個体数は運転開始時からリアクター内の担体内外で 4 日目までに急速に増加した。それ以降、担体

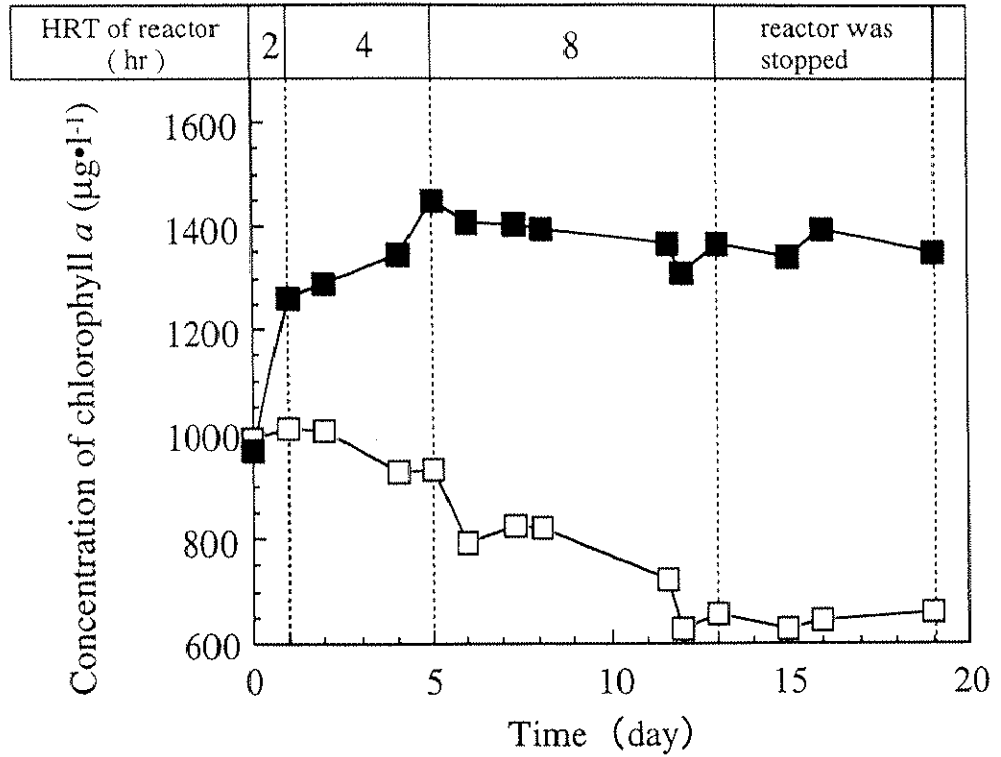


Fig.5-6 Time course of chlorophyll *a* in reactor combined with model-lake and the control system

- : Model-lake combined with reactor (A system)
- : Model-lake without reactor (B system)

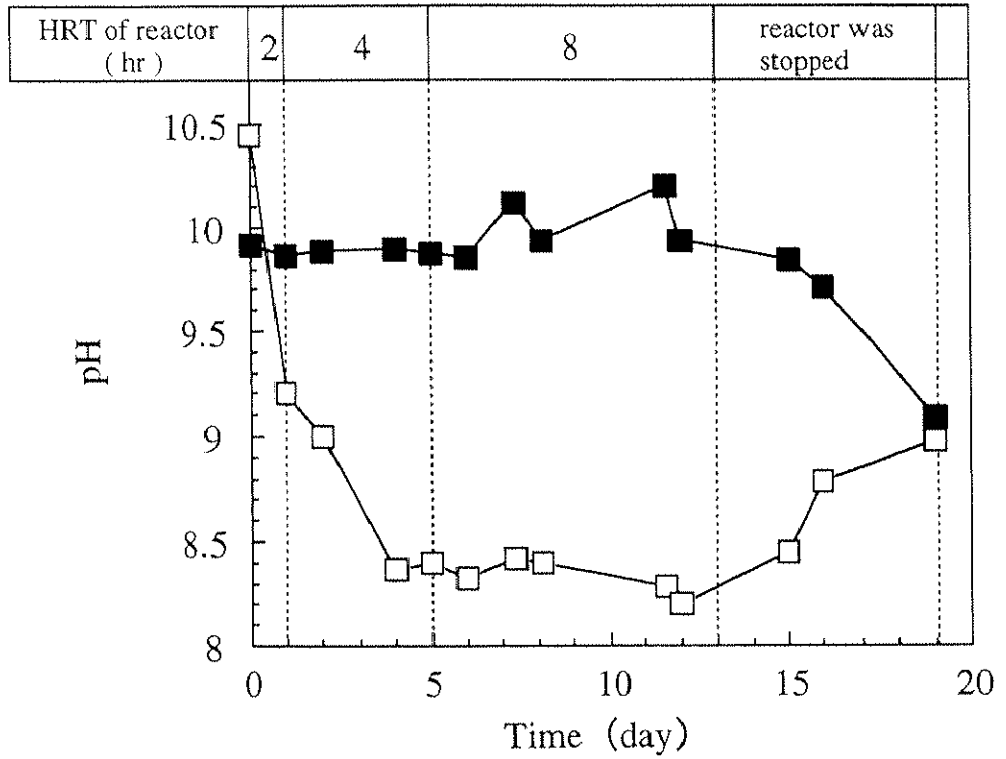


Fig.5-7 Time course of pH in bioreactor combined with model-lake and the control system

- : Model-lake combined with reactor (A system)
- : Model-lake without reactor (B system)

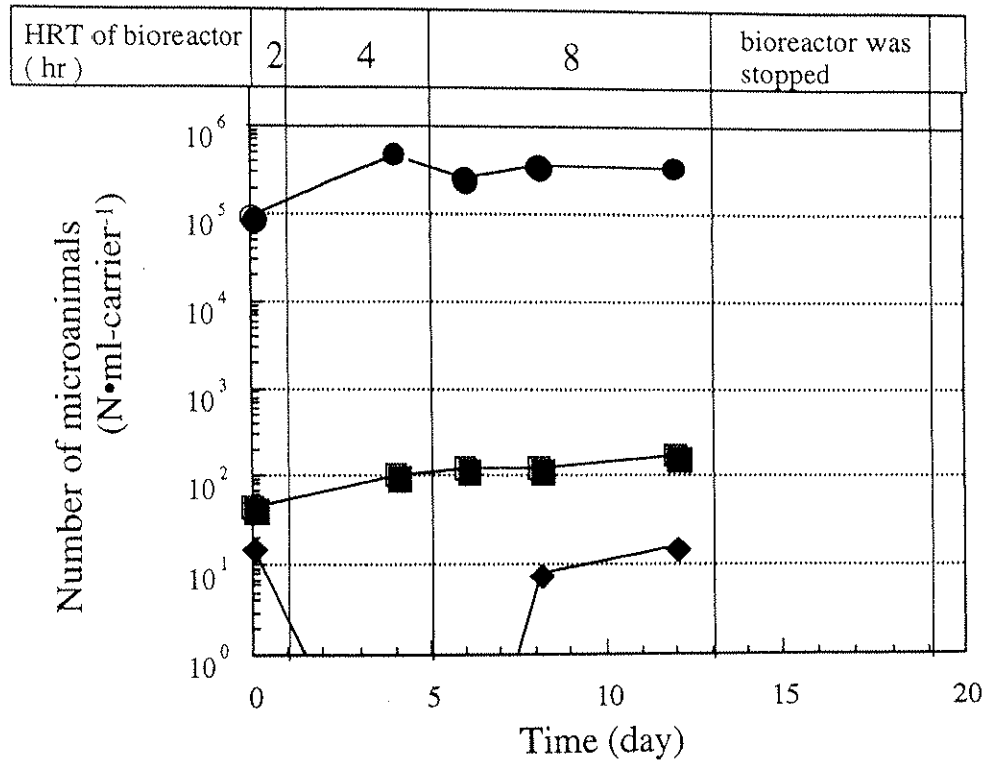


Fig.5-8 Fluctuation of microanimals inhabiting on the carrier in reactor

—●— : *M.guttula* —■— : *A.hemprichi* —◆— : *P.erythroptalma*

内で約 3×10^5 N•ml-carrier⁻¹ の個体数を維持した。また、3 日目以降は担体外でも *M.guttula* の個体数の増加が認められた。担体外の *M.guttula* は担体から脱離したものも含まれる。ここで、担体内外の *M.guttula* の個体数を比較すると担体外は担体内の約 1/10 の個体数であった。一方の *A.hemprichi* は運転開始時から担体内で緩やかに増加し、4 日目以降は約 1×10^2 N•ml-carrier⁻¹ の個体数を維持した。また、*A.hemprichi* の担体外での増加は認められなかった。*P.erythrophthalma* については担体内外ともに増加は認められなかった。そこで、担体内で増殖した *M.guttula* と *A.hemprichi* の体内を顕微鏡で観察したところ、*M.guttula* の体内に *M.aeruginosa* の細胞が 3~5cell•body⁻¹、*A.hemprichi* では 50~100cell•body⁻¹ 程度確認された。このことから、*M.aeruginosa* はリアクターの担体内の *M.guttula* と *A.hemprichi* に捕食されることが明らかとなった。

このリアクターの *M.aeruginosa* に対する分解効果を定量化するために、HRT4hr および 8hr の期間のリアクター流入水および処理水のクロロフィル *a* からその平均除去率 (%) を計算し Fig.5-9 に示した。HRT4hr のクロロフィル *a* の平均除去率は約 51%、HRT8hr では約 56%となった。ここで、運転開始直後の HRT2hr の期間で 95%もの高い除去率 (Figure には示さず) を示したのは *M.aeruginosa* の担体への吸着が原因であると考えられた。このように、リアクターの *M.aeruginosa* に対する除去性能は変動したものの、モデル池沼の *M.aeruginosa* は減少する一方であるので、リアクターにより *M.aeruginosa* の増加が抑制されたものと考えられた。この増加抑制効果を確認するために、13 日目から 19 日目までモデル池沼水のリアクターへの流入を停止させた。その結果、A system のモデル池沼で再びクロロフィル *a*、すなわち *M.aeruginosa* が増殖し、pH は上昇し始めた。このことは、リアクターの運転を停止することにより、モデル池沼内で再び一次生産力が回復したことを意味している。

つまりこのことは、*M.guttula* と *A.hemprichi* を定着させたリアクターでモデル池沼の *M.aeruginosa* の増殖を抑制できることを示唆するものである。

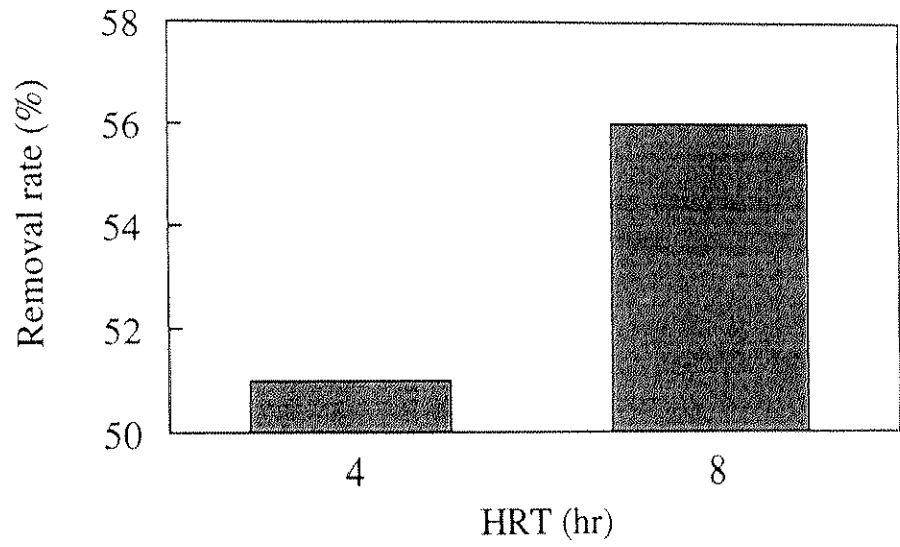


Fig.5-9 Removal rate of *M.aeruginosa* in reactor at HRT 4 hr and HRT 8 hr

5-4-2 モデル池沼の *M.aeruginosa* の増殖抑制効果の定量化

リアクターによるモデル池沼の *M.aeruginosa* の増殖抑制効果を定量的に調べた。モデル池沼の *M.aeruginosa* のバイオマスの変化はリアクターの処理水による希釈効果であると考え、リアクターでの *M.aeruginosa* の除去率が一定であったとき、以下の (5-14) 式で表される。式 (5-14) はモデル池沼の *M.aeruginosa* の一定の減少はリアクター内の微小動物の捕食効果であることを意味している。

$$\frac{dA_L}{dt} = (\mu - \frac{Q}{V_L} R) A_L$$

式の各記号は Fig.5-5 に示してある。

..... (5-14)

そこで、モデル池沼内のクロロフィル *a* 濃度に対して、HRT4hr におけるクロロフィル *a* の減少速度を Fig.5-10 にプロットした。ここで、速度定数の符号 (+) は増加、(-) は減少を示す。モデル池沼の *M.aeruginosa* の減少速度は、Fig.5-10 の対数プロットに対し直線を回帰させ、その傾きから求めた。その結果、B system のモデル池沼は 0.026day^{-1} で増加し、A system では -0.051day^{-1} 、すなわち 0.051day^{-1} で減少した。したがって、式 (5-15) よりリアクターによるモデル池沼の *M.aeruginosa* の減少速度は -0.077day^{-1} となった。つぎに、リアクターによるクロロフィル *a* の除去量からモデル池沼の *M.aeruginosa* の減少速度を求めた。すなわち、リアクターの容積 (V_R) と HRT (T) から 1 日あたりのリアクターのへ流入水量 (Q) を求め (式 (5-16))、HRT4hr の期間のリアクターでのクロロフィル *a* の除去率 (R) とモデル池沼の容積 (V_L) から計算した (式 (5-17))。

$$\begin{aligned} -\frac{Q}{V_L} R &= -0.051\text{day}^{-1} - 0.026\text{day}^{-1} \\ &= -0.077\text{day}^{-1} \end{aligned}$$

..... (5-15)

$$Q = \frac{V_R}{T} = \frac{6l}{4hr} = \frac{6l}{1/6day} = 36l \cdot \text{day}^{-1}$$

..... (5-16)

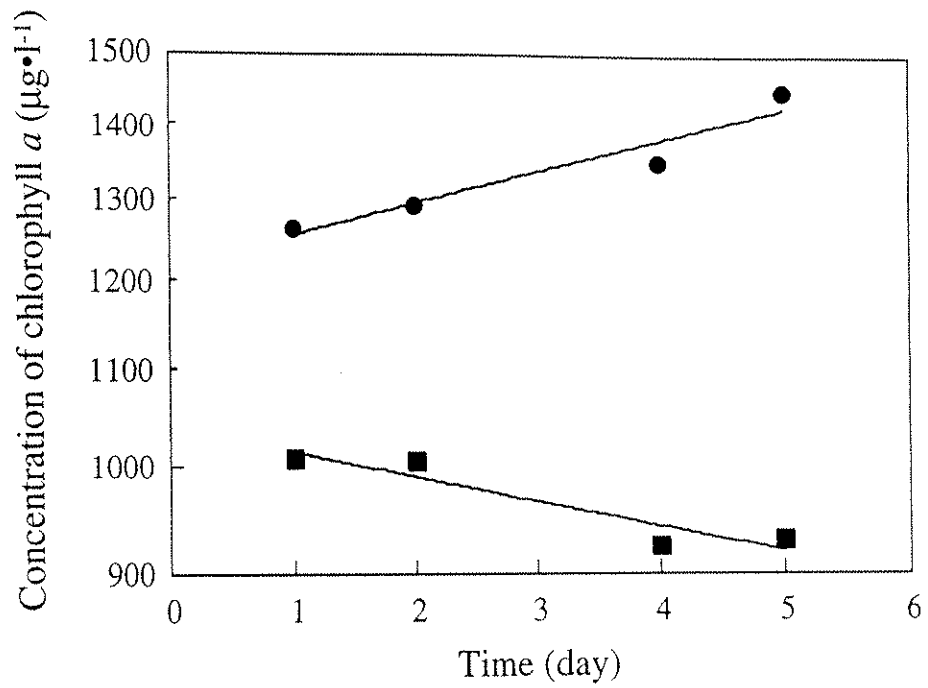


Fig.5-10 Variation of chl.*a* in model-lake combined with and without reactor at 4 hrs of HRT

- : model-lake combined with reactor (A system)
- : model-lake without reactor (B system)

$$-\frac{Q}{V_L} R = -\frac{36l \cdot \text{day}^{-1}}{500l} \cdot 0.51 = -0.037 \text{day}^{-1}$$

. (5-17)

その結果、 -0.037day^{-1} となり、リアクターでの除去量から計算した減少速度（式（5-17））よりモデル池沼の減少速度（式（5-15））が明らかに高いことがわかった。

一方の、HRT8hrの期間におけるモデル池沼の *M.aeruginosa* の減少速度を前記と同様にして Fig.5-11 に示した。A system のモデル池沼でのクロロフィル *a* の減少速度は -0.046day^{-1} であった。ここで、B system のモデル池沼のクロロフィル *a* は 0.000day^{-1} で増減は認められなかったことから、HRT8hr におけるモデル池沼の *M.aeruginosa* の減少速度は -0.046day^{-1} となった（式（5-18））。

$$-\frac{Q}{V_L} R = -0.046 \text{day}^{-1} - 0.000 \text{day}^{-1}$$

$$= -0.046 \text{day}^{-1}$$

. (5-18)

$$Q = \frac{V_R}{T} = \frac{6l}{8hr} = \frac{6l}{1/8day} = 48l \cdot \text{day}^{-1}$$

. (5-19)

$$-\frac{Q}{V_L} R = -\frac{48l \cdot \text{day}^{-1}}{500l} \cdot 0.56 = -0.020 \text{day}^{-1}$$

. (5-20)

前期と同様にして HRT8hr の期間のリアクターによるクロロフィル *a* の除去量からモデル池沼の *M.aeruginosa* の減少速度を求めると、リアクターへの流入水量は式（5-19）となり、クロロフィル *a* の平均除去率が 56%であったので、これらの数値を式（5-20）のように計算した結果、 -0.020day^{-1} となり、リアクターでの除去量から計算した減少速度（式（5-20））よりモデル池沼の減少速度（式（5-18））が高いことがわかった。これらの減少速度の数値を Table5-1 に示す。リアクターの HRT を 4hr から 8hr に変更した結果、リアクターでの除去による *M.aeruginosa* の減少速度は -0.037day^{-1} から -0.020day^{-1} に低下したものの、モデル池沼での *M.aeruginosa* のバイオマスは減少する一方であった。ところが、

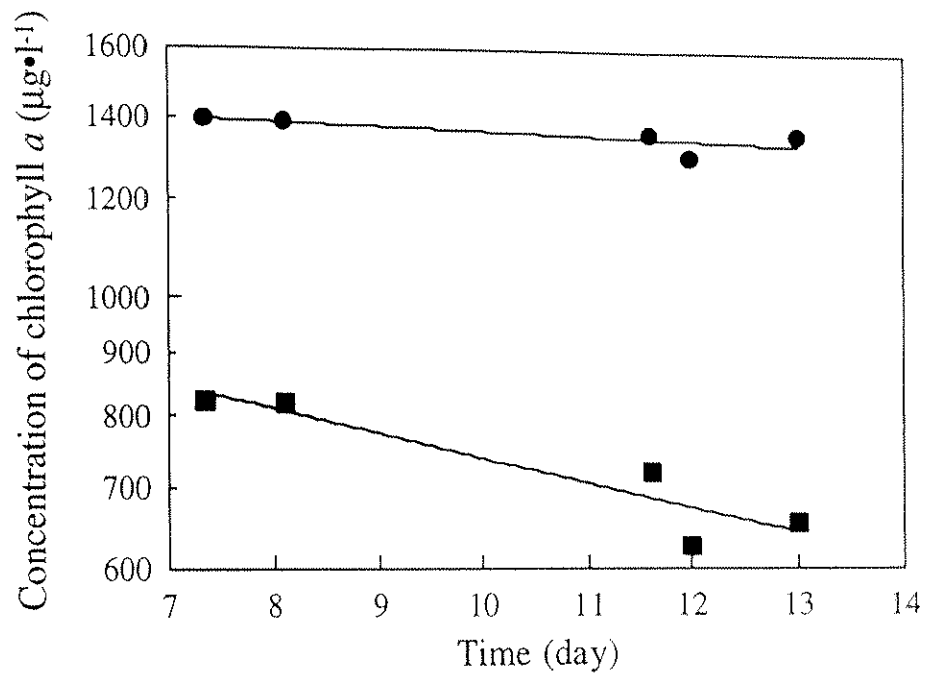


Fig.5-11 Variation of chl.*a* in model-lake combined with and without reactor at 8 hrs of HRT

- : model-lake combined with reactor (A system)
- : model-lake without reactor (B system)

Table 5-1 Effect of inhibition efficiency of chl. *a* in model-lake by reactor at HRT of 4 hr and 8 hr

	Reduction rates of chl. <i>a</i> in reactor	Reduction rates of chl. <i>a</i> in model-lake combined with reactor
HRT4hr	- 0.037	- 0.077
HRT8hr	- 0.020	- 0.046

実際のモデル池沼における *M.aeruginosa* の減少速度は HRT4hr で -0.077day^{-1} 、HRT8hr では -0.046day^{-1} となり、いずれもリアクターの除去能を上回る高い *M.aeruginosa* の増殖抑制効果が得られている。このことは、リアクターによる除去以外にモデル池沼の *M.aeruginosa* を減少させる要因があることを示している。この要因としては、リアクターからの返送水に混入した微小動物がモデル池沼内で増殖し *M.aeruginosa* を捕食したためと考えられる。ここで、Fig.5-12 にモデル池沼内の微小動物の個体数変化を示す。実際に、モデル池沼内で *M.guttula* は確認されているものの、リアクター運転期間 $2.5 \times 10^4 \text{N} \cdot \text{ml}^{-1}$ から $3 \times 10^3 \text{N} \cdot \text{ml}^{-1}$ に減少している。このことは、モデル池沼内で *M.guttula* による *M.aeruginosa* の捕食分解がある程度起こったにしても、モデル池沼内では *M.guttula* の増殖率より死亡率が高いことを意味している。第 3 章の結果から *Microcystis* の光合成活性が高い層では、高 pH 化により *M.guttula* の増殖が抑制される、すなわち、死亡率が高くなることが示されている。本実験ではモデル池沼の水深が 70cm 程度と浅く、かつ、槽内を攪拌し均一にしているので *Microcystis* の増殖には有利であったと考えられる。したがって、リアクターから返送される処理水による pH の緩和作用や *M.guttula* の供給が無くなれば、モデル池沼内での *M.guttula* による *M.aeruginosa* の増殖抑制効果は期待できないものと考えられる。実際に、本実験でリアクターの運転を停止した時点からモデル池沼内で *M.aeruginosa* の光合成が活発となり、pH の上昇が認められている。このことから、*Microcystis* が増殖する時期には、リアクターを運転し続ける必要がある。

本章では、池沼で増殖する *Microcystis* を微小動物定着型リアクターで増殖抑制するという方式が可能か否かを検証するために、微小動物に比較的捕食されやすい分散状の *M.aeruginosa* を用いて検討した。しかし、自然水域の *Microcystis* は群体を形成するので、微小動物定着型リアクターで *Microcystis* の増殖抑制を効率よく行う上では、群体の単独細胞への分散化が重要因子になるものと考えられる。

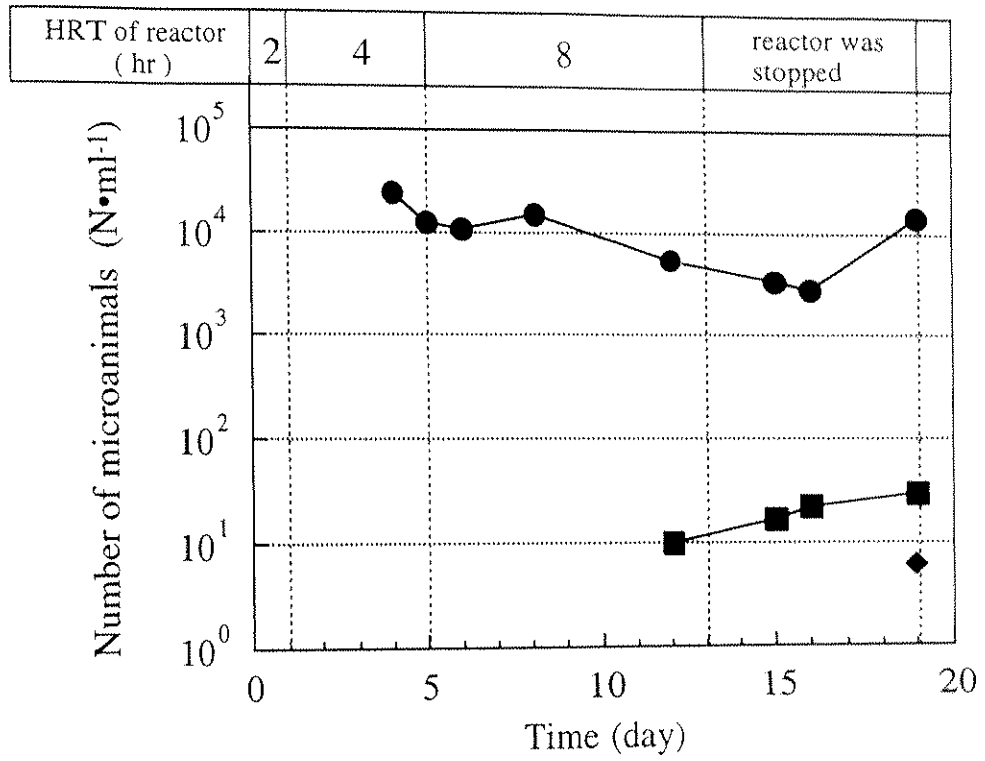


Fig.5-12 Fluctuation of microanimals inhabited in model-lake

—●— : *M.guttula* —■— : *A.hemprichi* —◆— : *P.erythroptalma*

5-5 結論

モデル池沼と組み合わせた微小動物定着型リアクター実験システムを用い、リアクターによるモデル池沼内の *M.aeruginosa* の増殖抑制効果を検討した結果、以下の結論を得た。

- 1) リアクターに *M.guttula* と *A.hemprichi* を定着させることに成功し、このリアクター内の微小動物の捕食によりクロロフィル *a* (*M.aeruginosa* のバイオマス) を HRT4hr で 51%、HRT8hr で 56% 分解除去することができた。
- 2) リアクターでモデル池沼内のクロロフィル *a* を pH8.4、リアクターの HRT4hr から 8hr の条件下で実験開始時の $1,000\mu\text{g}\cdot\text{l}^{-1}$ から $650\mu\text{g}\cdot\text{l}^{-1}$ に 13 日間で減少させることができた。
- 3) リアクター内の微小動物は、*M.aeruginosa* を捕食分解するとともに pH を低下させた。この pH の低下は、さらに微小動物の捕食分解作用を促進した。
- 4) *Microcystis* 捕食性の微小動物を定着させたリアクターでモデル池沼内の *Microcystis* の増殖抑制を図ることが可能であることを確認した。