

第7章 屋外実験池における微小動物定着型リアクターによる *Microcystis* 属の増殖抑制

7-1 序

前章において、*Microcystis* 属の群体を単独の細胞へ物理的に分散化させた後に *M.guttula*、*A.hemprichi* が定着した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システムで、モデル池沼の群体状の *Microcystis* 属の増殖を効果的に抑制できることが明らかにされた。このように、*Microcystis* 属捕食性の微小動物をリアクターで活用し、*Microcystis* 属の増殖抑制を行うというバイオマニピュレーションの基本原理が実証された。ただし、ここまでの知見は、*Microcystis* 属とその捕食者となる特定の微小動物を用い、かつ温度や日照などの環境条件を任意に制御した室内のモデル実験系により得られたものである。しかしながら、このシステムの導入目標となる現実の水域では、栄養塩をめぐる藻類間の競争や食物源をめぐる捕食者間の競争などの複雑な相互作用が存在する。さらに、そこには、日照、水温などの気象や季節変化も存在する。したがって、本システムを実水域へ有効に適応させていく上では、気象や季節変化を考慮し、かつ *Microcystis* 属をはじめ、他の藻類、微小動物、大型の動物プランクトンなどが混在する生態系において *Microcystis* 属の増殖抑制を検証する必要がある。

本章では、富栄養化水域を模擬した屋外の開放型の実験池で *Microcystis* 属を優占化させ、その実験池を用いてリアクターおよび群体分散化プロセスを組み込んだリアクターの各システムによる *Microcystis* 属の増殖抑制効果を定量的に解析し、*Microcystis* 属の増殖抑制を行うに必要なリアクターのサイズおよび時間スケールを推定することを目的として検討を行った。

7-2 実験材料および方法

7-2-1 微小動物定着型リアクターによる *Microcystis* 属の増殖抑制の検証

1) 実験装置

本章で用いた微小動物定着型リアクターの概略図を Fig.7-1 に示す。リアクターは回転型流動方式で、反応槽（500L）、沈殿槽（40L）から構成される。反応槽内には、8等分されたステンレス製の網籠（2mmメッシュ、30L容）がセットされ、その籠のなかに担体が充填できるようになっている。なお、これらの籠は、回転中心軸に取り付けられており、定速で矢印の方向に回転するようになっている。また、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透明の塩化ビニル製である。

屋外実験池は国立環境研究所水生生物実験棟の敷地内に位置する4m×5m幅で水深1.5m（満水水量30m³）のコンクリート製の池で2面設置されている。この実験池には1996年5月に、霞ヶ浦に流入する汚濁河川のひとつである新川（土浦市）の河口付近から採取した底泥を平均泥深で8cm敷き詰めた。なお、実験池には地下水（国立環境研究所内の地底50mからポンプアップした水）の供給口が設けられ、池底から1.5m上部の位置でオーバーフローするようになっている。

実験システムの構成を Fig.7-2 に示す。本実験では、2面の屋外実験池に *Microcystis* 属が増殖する環境条件を設定し、1面の実験池を対照系とし、もう1面にはリアクターを接続した。実験システムのフローは、実験池の水をピットに一度ポンプアップし、その水をリアクターで処理した後、実験池に返送することとした。ここで、リアクターを接続した実験池をA池、リアクターを接続していない対照系をB池とした。なお、実験池とリアクターの容積比は60:1である。

2) 供試微小動物

今回、供試微小動物には、*Aeolosoma hemprichi* のみを用いた。供試前の培養は、実験池から採取した *Microcystis* 属を群体分散化装置で処理したものを培養液とし、それを14台の浅型トレー（40cm×70cm幅）に2Lずつ分注して *A.hemprichi* を接種し、室温（30℃前後）、静置、暗所にて行った。

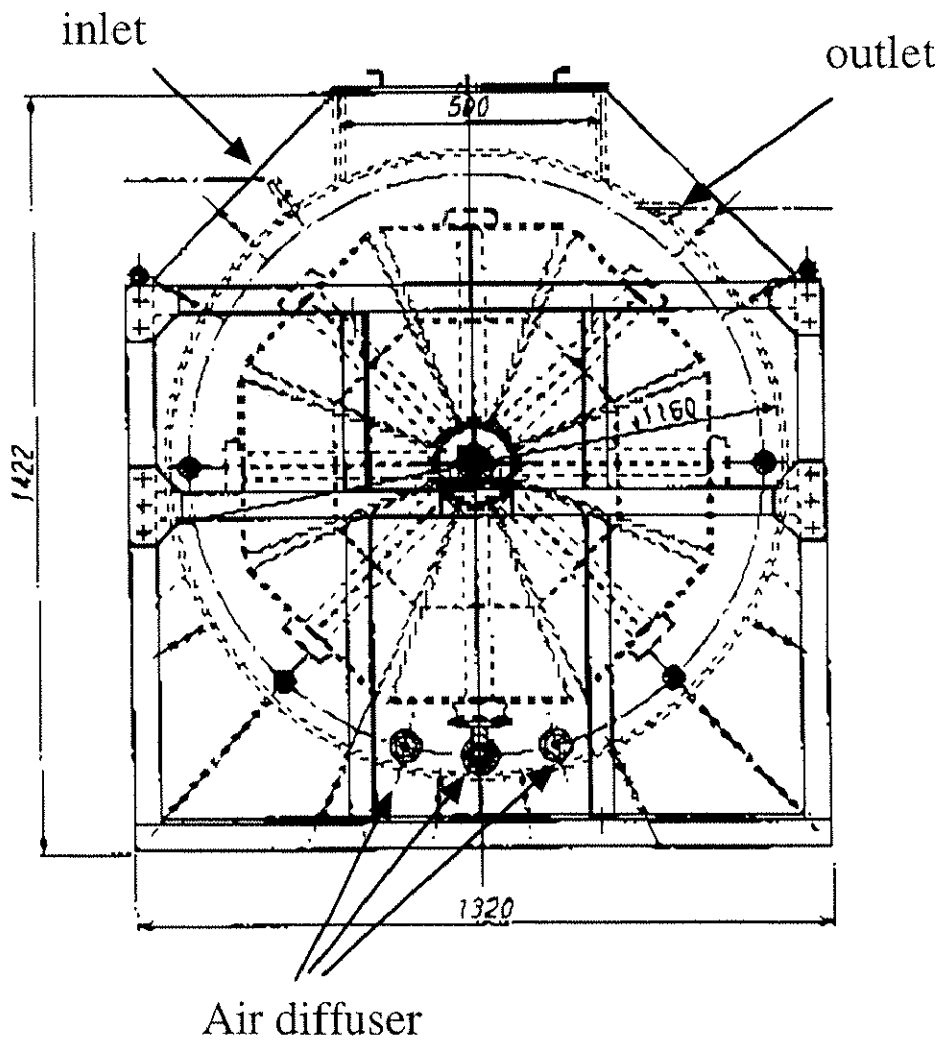


Fig.7-1 Fluidized bed reactor combined with experimental pond

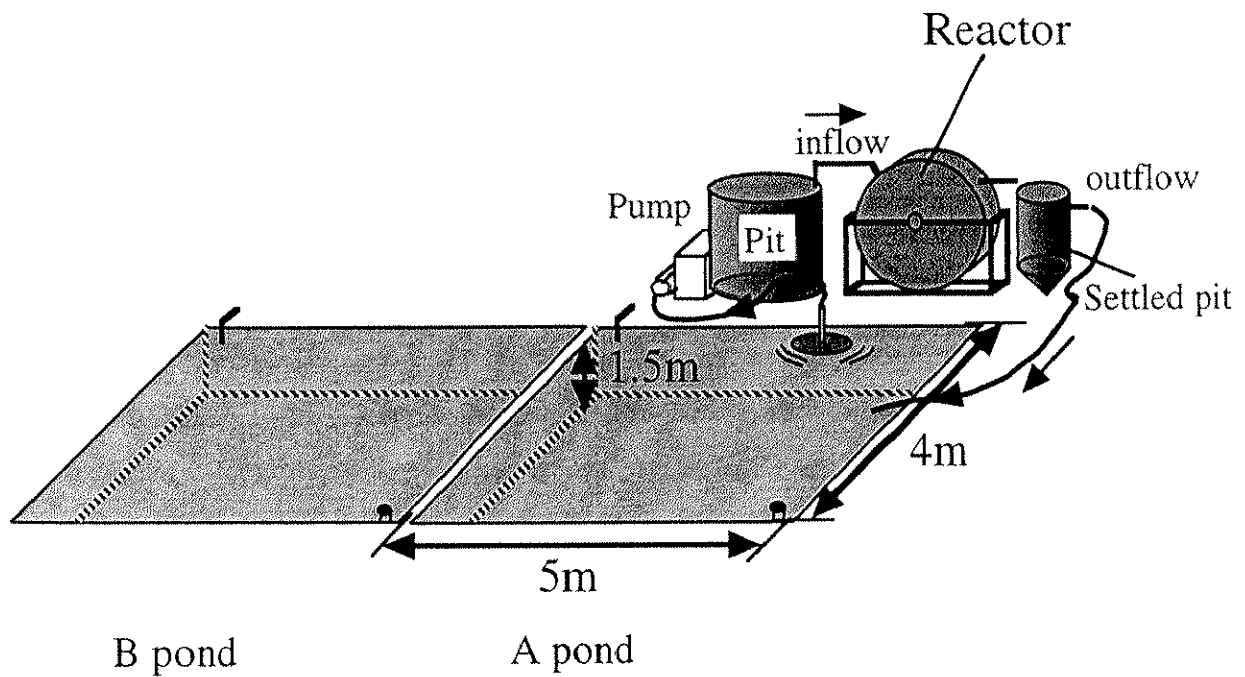


Fig.7-2 Schematic diagram of model-pond combined with reactor (A pond) and model-pond without reactor as control (B pond)

3) 供試藻類

供試藻類は 1998 年 8 月 21 日に霞ヶ浦から採取したアオコおよび 9 月 4 日に手賀沼から採取したアオコを用いた。なお、両者ともアオコ構成種はほぼ 100% *Microcystis* 属であった。

4) 実験方法

実験は、1998 年 8 月下旬から 11 月下旬にかけて行った。まず、*Microcystis* 属の種源として、屋外実験池に霞ヶ浦から採取したアオコを 1998 年 8 月 21 日に、手賀沼から採取したアオコを 9 月 4 日にクロロフィル *a* で約 $50\mu\text{g}\cdot\text{l}^{-1}$ の濃度になるように投入した。さらに、投入した *Microcystis* 属を繁茂させるため、実験池に窒素 ($\text{NaNO}_3\text{-N}$) を約 $3\sim 8\text{mg}\cdot\text{l}^{-1}$ 、リン ($\text{Na}_2\text{HPO}_4\text{-P}$) を約 $0.2\text{mg}\cdot\text{l}^{-1}$ の濃度で数回に分けて添加した。

一方、リアクターには微小動物定着担体として、一辺 10mm の正 6 面体、ポアサイズ約 1.0mm、無電荷の多孔質ポリウレタンフォーム担体を量で約 40% 充填した。つぎに、リアクターの運転開始時に供試微小動物の *A.hemprichi* を培養液ごとリアクターに注入した。リアクターの HRT は 3.33 時間に設定し、底部のスパージャーから曝気を行い、反応槽に酸素を供給した。

5) 測定項目

実験池は、水温、pH、DO (溶存酸素濃度) を深さ方向 (表層: 水深 15cm、中層: 水深 60cm、低層: 水深 120cm) に測定した。また、クロロフィル *a* 濃度、*Microcystis* 属の細胞数、窒素およびリン濃度は、水温、pH、DO の測定直後に実験池の水層を柄杓で混合し均一にした後に任意の 3 点の水面で採取した池水を等量でコンボジットして、その試料を測定することで求めた。

7-2-2 群体分散化プロセスを組み込んだ微小動物定着型リアクターによる *Microcystis* 属の増殖抑制の検証

1) 実験装置

微小動物定着型リアクターおよび屋外実験池は 7-2-2 の 1) と同じものを用いた。また、群体分散化には微細気泡発生装置を用いた（以降、微細気泡発生装置を群体分散化装置と称する）。この群体分散化装置は Fig.7-3 に示すように、*Microcystis* 属の懸濁池水がオリフィスを通る際に生じる急激な流動と差圧により群体が単独の細胞に分散化される仕組みとなっている。

実験システムのフローは Fig.7-4 に示すとおりで、実験池の水をピットに一度ポンプアップし、その水をリアクターで処理した後、実験池に返送することとした。なお、このピットには群体分散化装置が付設されており、群体状の *Microcystis* 属の約 50% が単独の細胞に分散化される。

2) 供試微小動物

今回、供試微小動物には、*Monas guttula* のみを用いた。供試前の培養は 3-2-2 の 1) にしたがった。

3) 供試藻類

屋外実験池で発生した *Microcystis* 属を用いた。

4) 実験方法

実験は、1999 年 7 月下旬から 11 月下旬にかけて行った。屋外実験池には、1998 年の 8 月と 9 月に霞ヶ浦と手賀沼から採取したアオコ (*Microcystis* 属) を投入したので、今回は投入せずに *Microcystis* 属を繁茂させることとした。すなわち、窒素 ($\text{NaNO}_3\text{-N}$) 約 $5\text{mg}\cdot\text{l}^{-1}$ とリン ($\text{Na}_2\text{HPO}_4\text{-P}$) 約 $0.5\text{mg}\cdot\text{l}^{-1}$ を数回に分けて実験池に添加し、*Microcystis* 属を増殖させた。

一方、リアクターは 1998 年に充填された担体を引き続き使い、運転開始時に供試微小動物の *M.guttula* を培養液ごとリアクターに注入した。リアクターの HRT は 3.33 時間に設定し、底部のスパージャーから曝気を行い、反応槽に酸素を供給した。

5) 測定項目

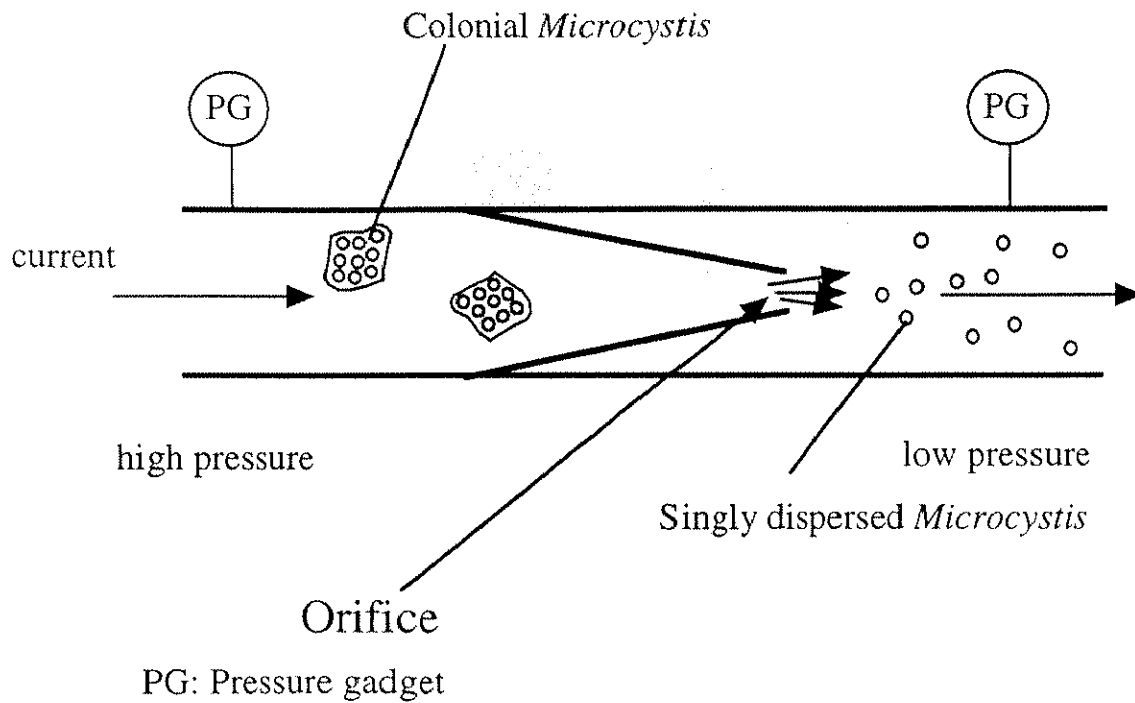


Fig.7-3 Schematic diagram of equipment for colony dispersion of *Microcystis*

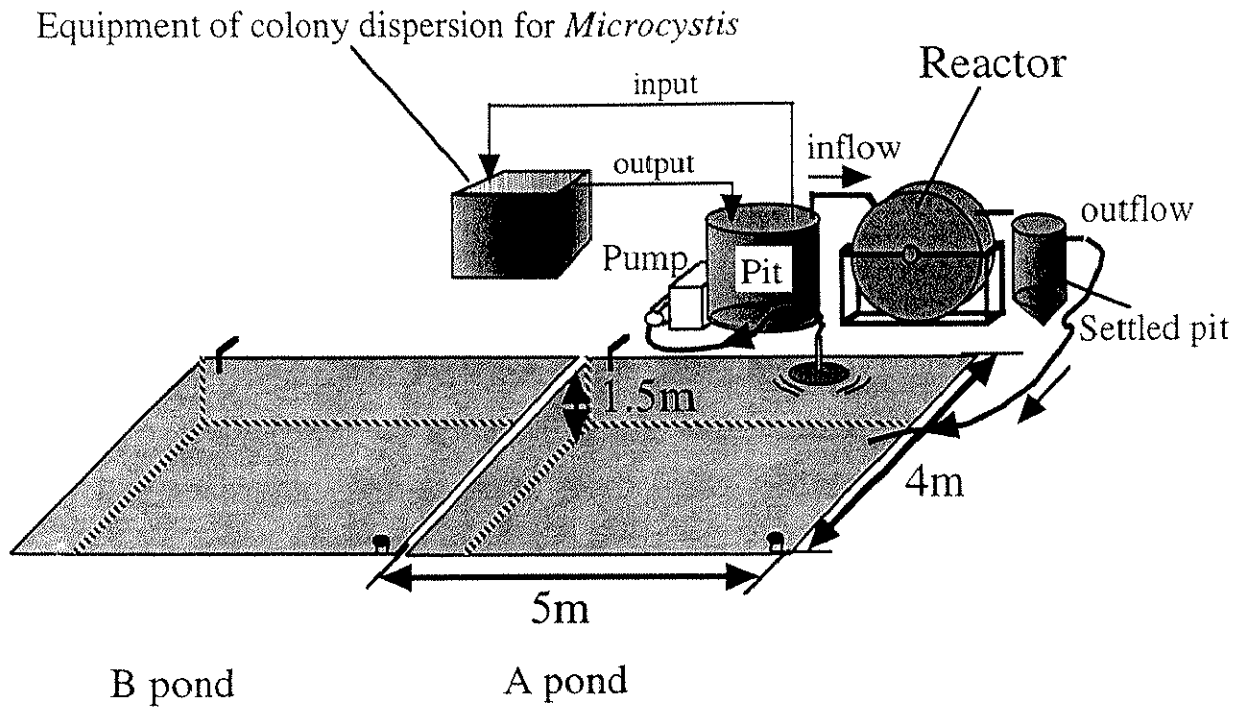


Fig.7-4 Schematic diagram of model-pond combined with reactor jointed colony disperse equipment(A pond) and model-pond without reactor as control (B pond)

7-2-1 の 5) と同様に行った。

7-3 結果および考察

7-3-1 微小動物定着型リアクターによる *Microcystis* 属の増殖抑制の検証

7-3-1-1 リアクター運転前における *Microcystis* 属、DO、pH、栄養塩類の動態

8月に両実験池に数回、霞ヶ浦から採取した *Microcystis* 属を接種したが、雨天と低水温が続いたため、接種した後に減少し増殖は認められなかった。そこで、さらに9月4日に両池へ手賀沼より採取した *Microcystis* 属を接種したところ、9月期に入り晴天と比較的高い水温が続き、*Microcystis* 属を維持することが可能となった。接種後の実験池における水温変化を Fig.7-5 に示した。光合成速度（一次生産速度）の指標となる DO、pH をそれぞれ Fig.7-6、Fig.7-7 に、また、*Microcystis* 属の現存量の指標となるクロロフィル a 濃度と *Microcystis* 属の細胞数の経日変化をそれぞれ Fig.7-8 と Fig.7-9 に示した。

リアクター運転前の水温は、両池ともほぼ同じ変化のパターンを示し (Fig.7-5)、DO も温度に対する飽和値を上回っていることから、光合成が活発に起こっていると考えられる。水深 60cm の DO 値をみると、A 池が B 池よりもやや高い傾向にあった (Fig.7-6)。また、光合成速度とほぼ正の相関がある pH も、A 池が若干高い傾向を示した。したがって、実験池内の一次生産力は A 池が高かったと考えられた。

ここで、両池のクロロフィル a 濃度 (Fig.7-8) と *Microcystis* 属の細胞数の経日変化 (Fig.7-9) から、9月4日の接種後から約2週間の間で両池ともに *Microcystis* 属の増殖が認められた。その後、両池ともクロロフィル a 濃度は一度減少したものの、A 池ではリアクターの運転前の10月初旬まで再び増加が認められた。B 池も10月中旬までは同様な増加傾向を示したが、B 池は A 池よりも増殖速度が低い傾向にあり、両池間のアオコの発生量の差は、接種後、徐々に大きくなり、クロロフィル a 濃度は10月の初旬の時点で B 池は A 池の約 2/3

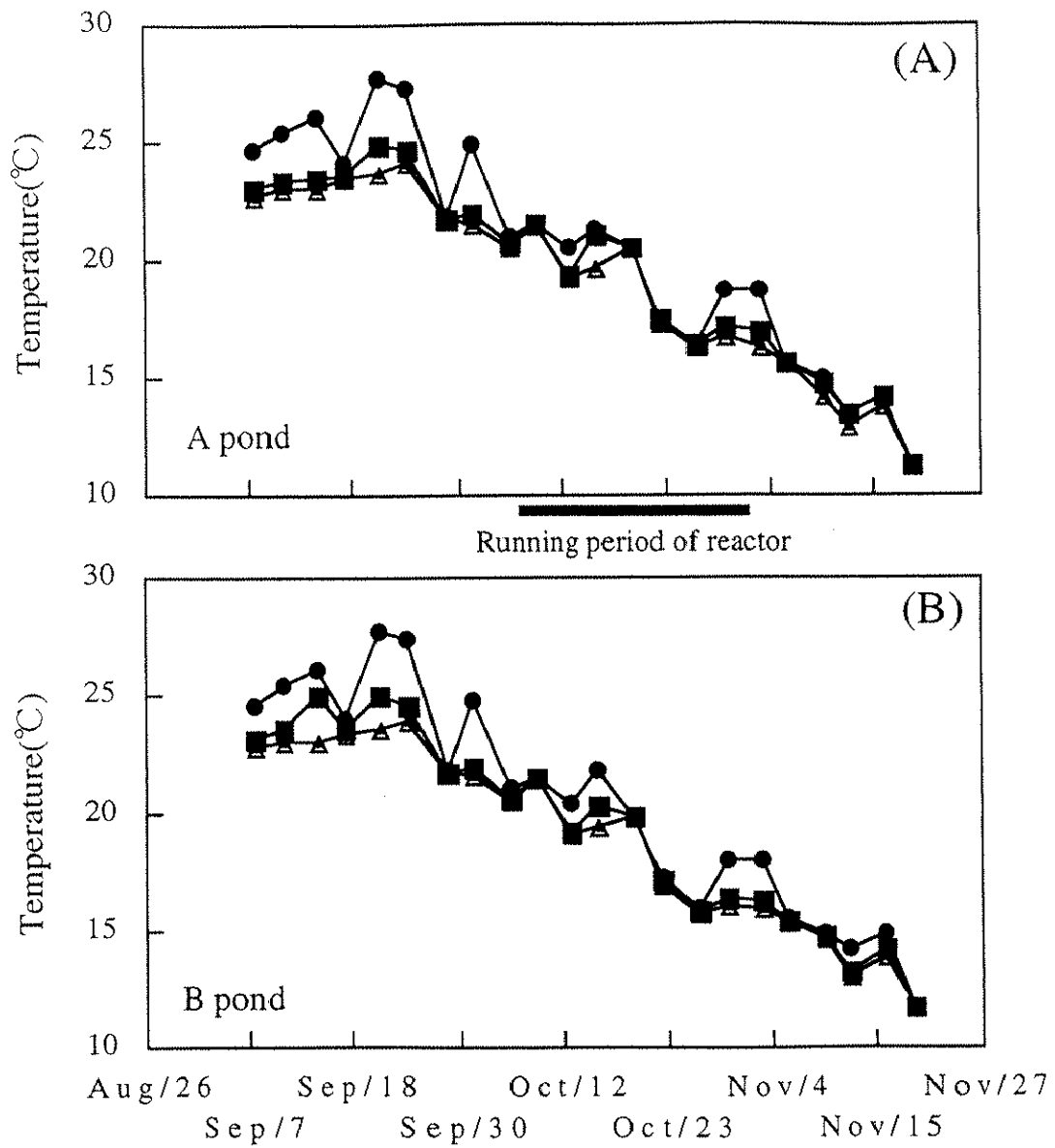


Fig.7-5 Change of temperature in experimental pond. Experimental pond combined with reactor(A) and without reactor(B).

● 15cm depth ■ 60cm depth ▲ 120cm depth

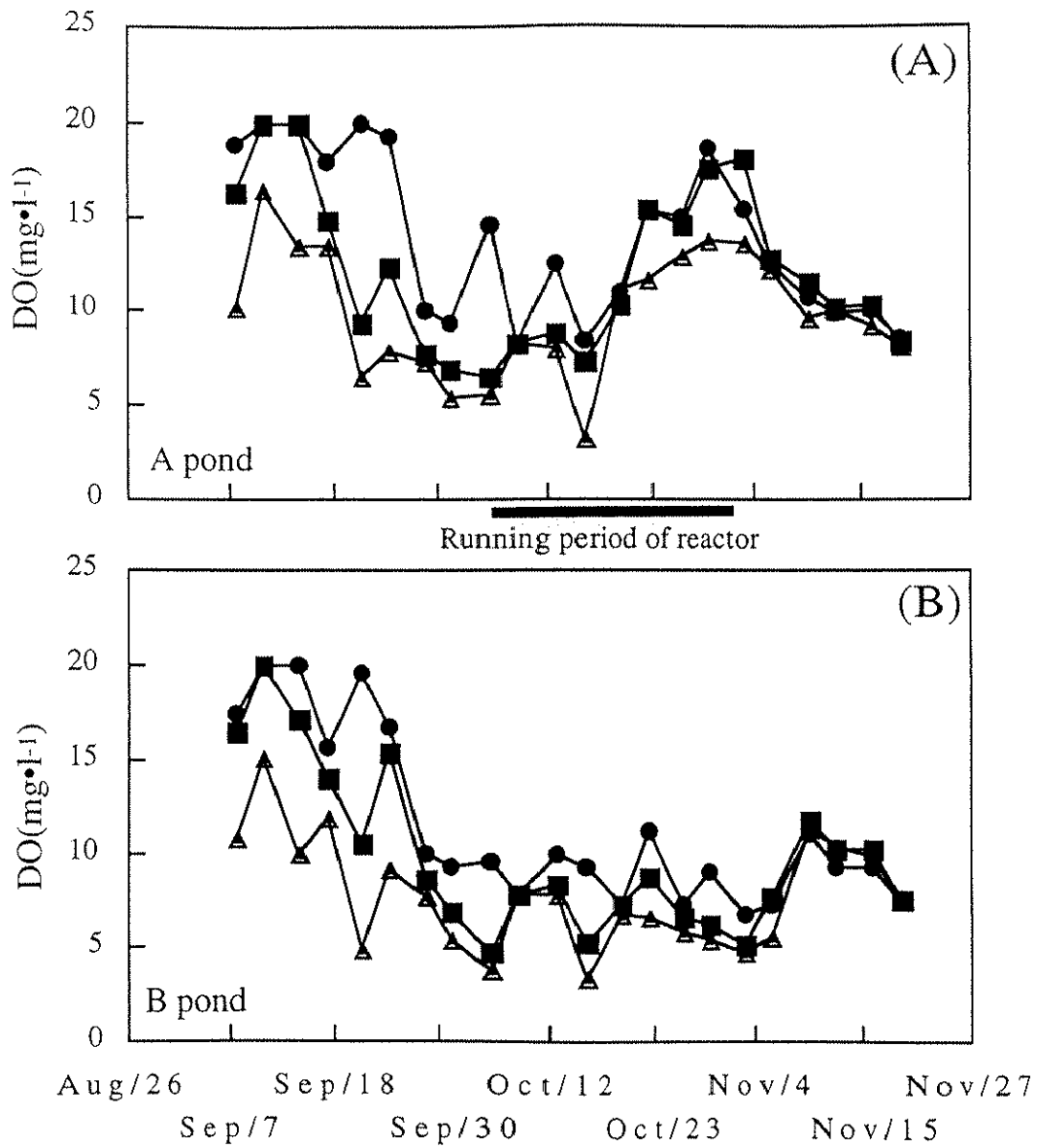


Fig.7-6 Change of DO in experimental pond.
 Experimental pond combined with reactor(A)
 and without reactor(B).

—●— 15cm depth —■— 60cm depth —▲— 120cm depth

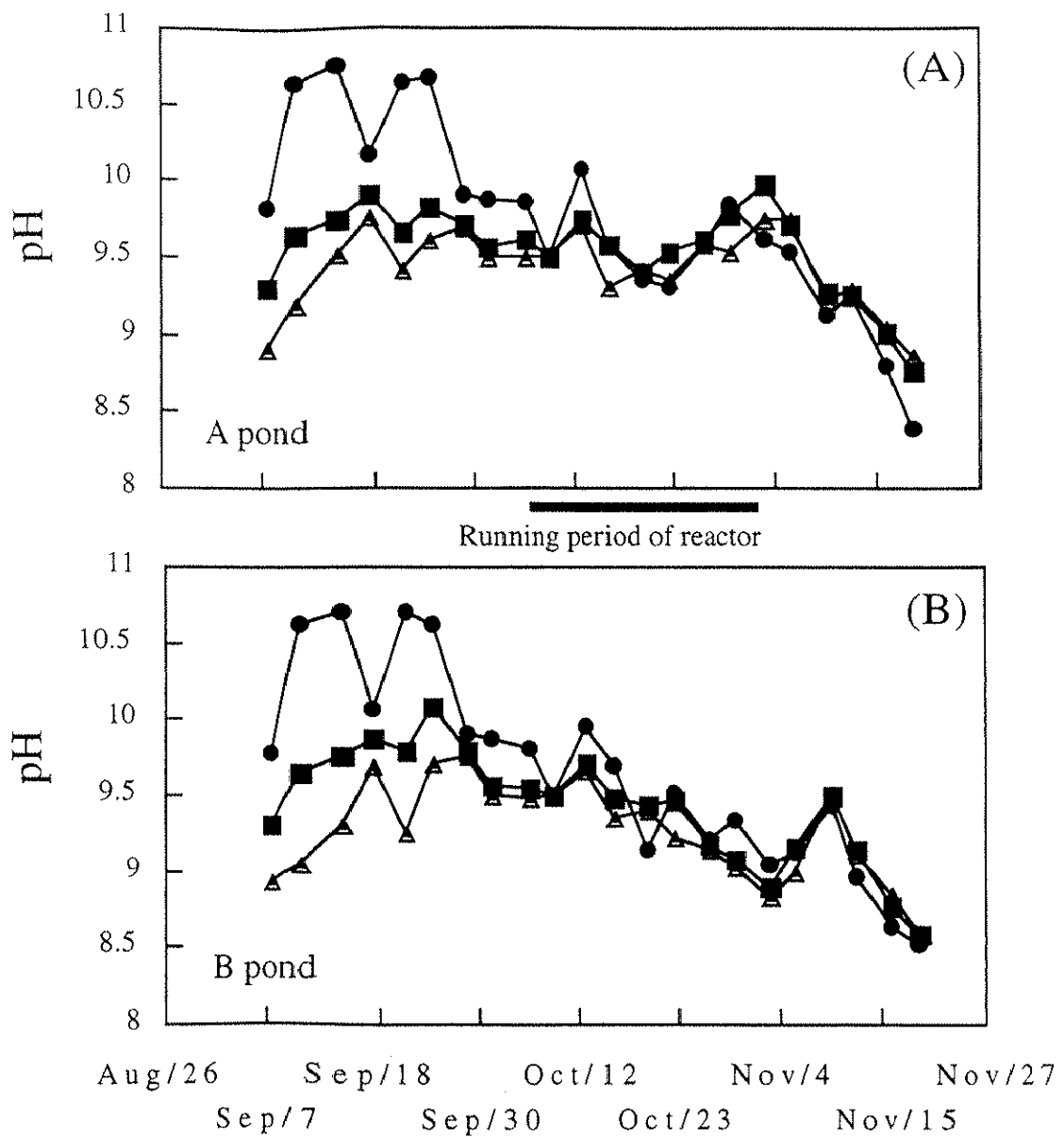


Fig.7-7 Change of pH in experimental pond.
 Experimental pond combined with reactor(A)
 and without reactor(B).

● 15cm depth ■ 60cm depth ▲ 120cm depth

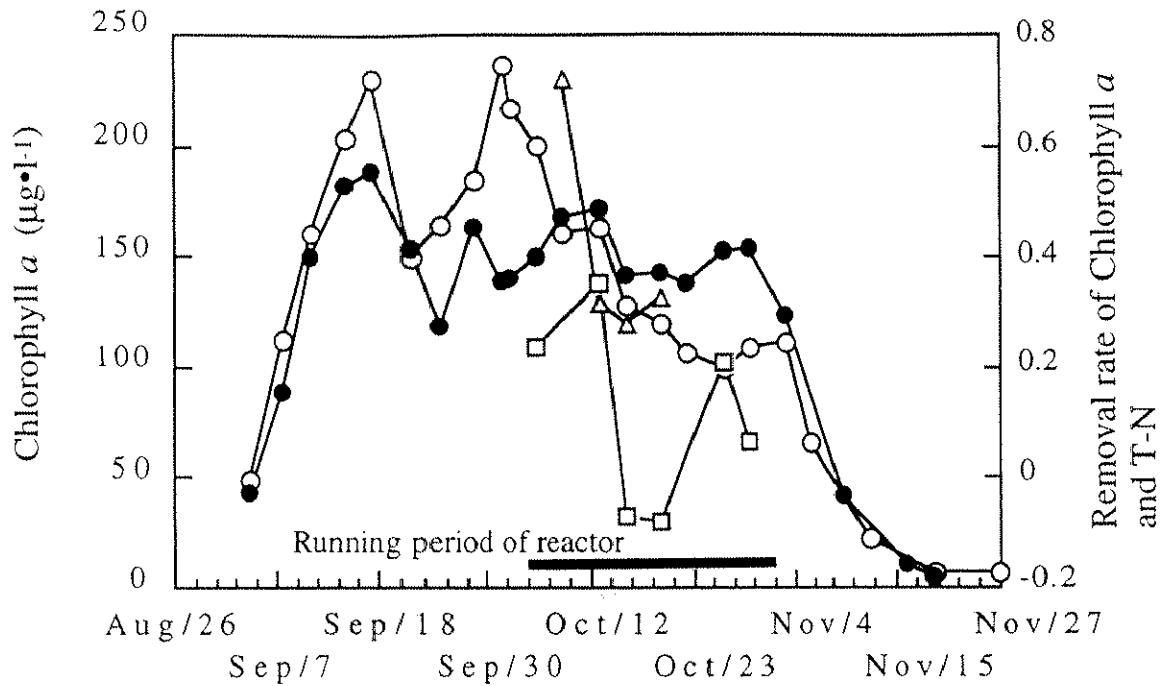


Fig.7-8 Change of Chl.*a* in experimental pond with and without reactor, and removal ratio of Chl.*a* and T-N in reactor

- : chlorophyll *a* concentration of experimental pond with reactor(A pond)
- : chlorophyll *a* concentration of experimental pond without reactor(B pond)
- : removal rate of Chl.*a*
- △— : removal rate of T-N

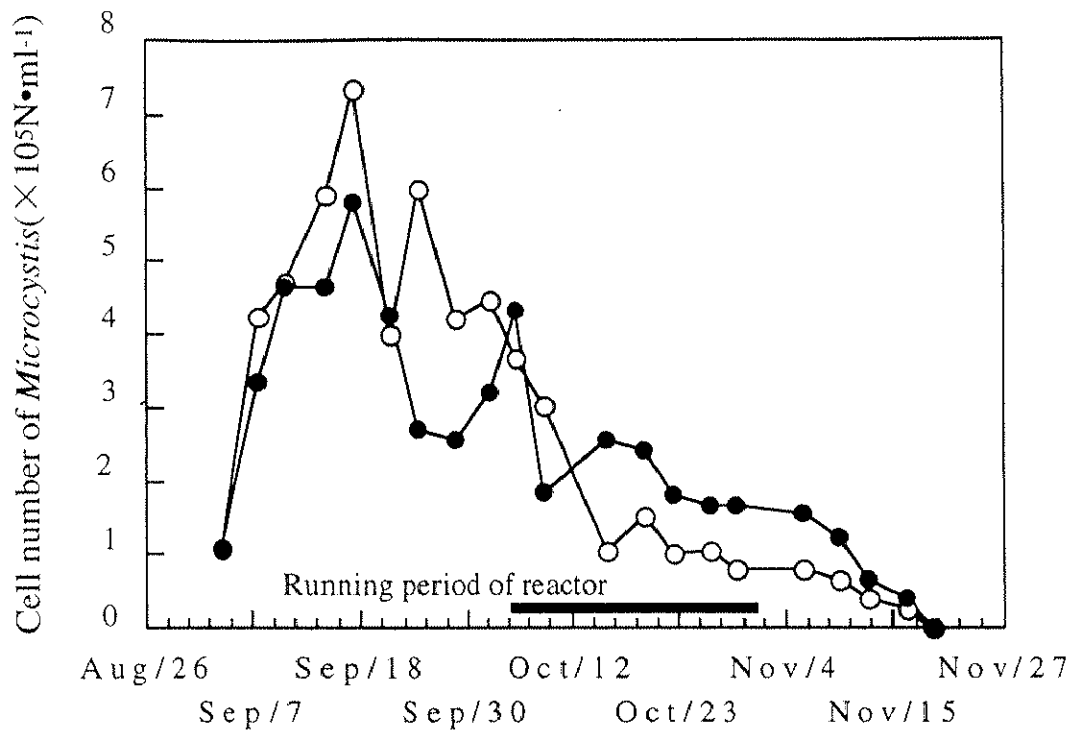


Fig.7-9 Change of cell number of *Microcystis* in experimental pond

- : experimental pond with reactor(A pond)
- : experimental pond without reactor(B pond)

となった。一方、両池を *Microcystis* 属の細胞数密度で比較すると約 1/2 であった。

アンモニア態窒素および *Microcystis* 属の栄養素である硝酸態窒素 ($\text{NO}_3\text{-N}$)、リン酸態リン ($\text{PO}_4\text{-P}$) 濃度の経日変化を Fig.7-10 に示した。なお、*Microcystis* 属の接種時の 9 月 4 日に窒素 ($\text{NaNO}_3\text{-N}$) とリン ($\text{Na}_2\text{HPO}_4\text{-P}$) をそれぞれ 90 g と 9 g 添加した。さらに、9 月 23 日にも窒素 ($\text{NaNO}_3\text{-N}$) とリン ($\text{Na}_2\text{HPO}_4\text{-P}$) をそれぞれ 120 g と 12 g 添加した。添加後の溶存窒素およびリンの動態はほぼ同様な傾向を示したが、リン酸態リンの濃度は *Microcystis* 属の増殖がやや優勢な A 池が B 池より若干低い傾向にあった。

溶存窒素の動態に関しては、両池の差は小さかった。なお、クロロフィル *a* や *Microcystis* 属の細胞数が減少したとき、硝酸態窒素の濃度が減少していることから、この窒素の減少は脱窒によるものと考えられた。

このように、両実験池における *Microcystis* 属、クロロフィル *a*、DO、pH の動態変化がわかり、各パラメータによって *Microcystis* 属の増殖抑制を評価できると考えられた。

7-3-1-2 リアクター運転期間における *Microcystis* 属の消長

1) リアクターにおける微小動物の定着と除去能

リアクターは、10 月 3 日から 10 月 30 日までの約 1 カ月の間、運転を実施した。*Microcystis* 属を捕食する微小動物としてはおもに *Aeolosoma hemphichi* がポリウレタンの多孔質担体内に定着し、その個体数密度は約 20 から $80\text{N}\cdot\text{ml}^{-1}\text{-carrier}^{-1}$ であった。他の微小動物については、輪虫類が多く観察された。

Fig.7-6 にはリアクター運転期間中の両池のクロロフィル *a* 濃度の動態とともに、リアクターのクロロフィル *a* 除去率と全窒素 (T-N) の除去率を示してある。これをみると、リアクターの運転開始後、クロロフィル *a* の除去率 (*Microcystis* 属の分解除去率) は 0.2~0.3、全窒素除去率も最初の高い値 (約 0.7) を除いて約 0.3 となったが、10 月中旬に 2 度、クロロフィル *a* の除去率が負の値、つまり、流入水よりも処理水のクロロフィル *a* が高くなった。しかし、同時に測定してい

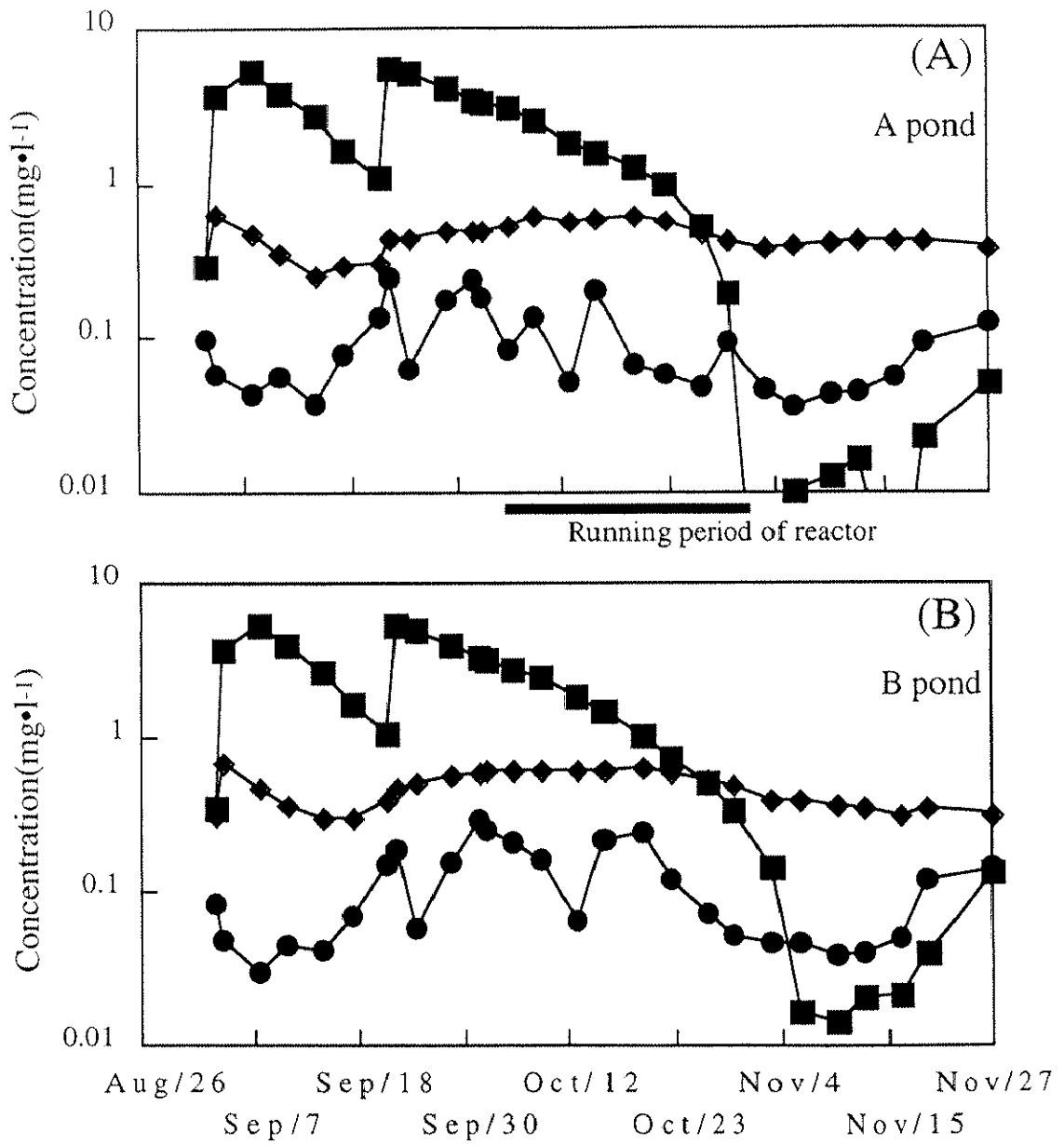


Fig.7-10 Change of nitrogen and phosphorus in experimental pond. Experimental pond combined with reactor(A) and without reactor(B).

—■— NO_x-N —●— NH₄-N —◆— PO₄-P

た全窒素 (T-N) の除去は正の値を示したので、これは測定上の問題であった可能性が高いと考えられた。全体的な傾向としてはリアクターのクロロフィル *a* の除去率は 10 月後半には低下する傾向が認められた。これは、水温の低下やリアクターに流入する *Microcystis* 属の量の減少により、リアクター内の微小動物の活性が低下したためであると考えられた。

2) *Microcystis* 属の動態

リアクターの運転開始時点では、A 池のクロロフィル *a* 濃度 (Fig.7-8) と *Microcystis* 属の細胞数 (Fig.7-9) は B 池よりも高かったが、リアクターの運転開始後は速やかに減少し、約 1 週間でクロロフィル *a* 濃度と *Microcystis* 属の細胞数はともに B 池を下回った。その後、リアクターの運転期間中、B 池のクロロフィル *a* 濃度はほぼ $150\mu\text{g}\cdot\text{l}^{-1}$ を推移した。また、*Microcystis* 属の細胞数は緩やかに減少した。なお、10 月 9 日に A 池の *Microcystis* 属の細胞数が B 池よりも多くなっているが、B 池の動態パターンからみて、測定時の誤差によるものと考えられた。

3) DO、pH、栄養塩の動態

A 池の DO はリアクターの作用によって減少せず (Fig.7-6)、むしろ、晴天が多く水温も上昇した 10 月後半には、クロロフィル *a* 量や *Microcystis* 属が減少したにもかかわらず、光合成は活性化され DO は増加する傾向にあった。一方、B 池では、10 月後半の DO は増加せず、むしろ、減少している。pH (Fig.7-7) の変化においても、この A 池と B 池における光合成活性の違いが示されている。水温 (Fig.7-5) が A 池の方が高くなっていることを鑑みると、この違いは両池の日照量の違いが原因と考えられる。

硝酸態窒素 ($\text{NO}_3\text{-N}$)、リン酸態リン ($\text{PO}_4\text{-P}$) の動態 (Fig.7-10) はリアクターの運転開始の前後ではほとんど変化しておらず、窒素除去には効果がないように見受けられた。しかし、微小動物が *Microcystis* 属を分解する際にはアンモニア態窒素を代謝するが、アンモニア態窒素は、むしろ A 池の方が低くなっている。これは、リアクターによる硝化作用であると考えられた。

7-3-2 群体分散化プロセスを組み込んだ微小動物定着型リアクターによる

Microcystis 属の増殖抑制の検証

7-3-2-1 リアクター運転前における *Microcystis* 属、DO、pH、栄養塩類の動態

昨年（1998年）、両実験池に *Microcystis* 属を接種したので、本年は *Microcystis* 属の接種は行わずに6月22日から栄養塩（窒素、リン）を数回に分けて添加し、*Microcystis* 属を自然発生させることにした。6月22日からの両実験池の水温変化を Fig.7-11 に示した。光合成速度（一次生産速度）の指標となる DO、pH をそれぞれ Fig.7-12、Fig.7-13 に、また、*Microcystis* 属の現存量の指標となるクロロフィル *a* 濃度と *Microcystis* 属の細胞数の経日変化をそれぞれ Fig.7-14 と Fig.7-15 に示した。

リアクター運転前の水温は、両池ともほぼ同じ変化のパターンを示し（Fig.7-11）、表層（水深 15cm）から中層（水深 60cm）において DO も温度に対する飽和値を上回っていることから、光合成が活発に起こっていると考えられた。表層の DO 値をみると、A 池が B 池よりもやや高い傾向にあったが（Fig.7-12）、pH は、B 池が若干高い傾向を示した。

ここで、両池のクロロフィル *a* 濃度（Fig.7-14）と *Microcystis* 属の細胞数の経日変化（Fig.7-15）より、6月中旬から7月下旬および7月下旬から8月下旬にクロロフィル *a* が一時的に増加したのは、緑藻類の増殖によるものであった。その後、両池とも緑藻類は減少し、8月下旬から *Microcystis* 属が優占種となり、そのバイオマスは、急激に増加した。

A 池および B 池のアンモニア態窒素、硝酸態窒素（ $\text{NO}_3\text{-N}$ ）、リン酸態リン（ $\text{PO}_4\text{-P}$ ）濃度の経日変化を Fig.7-16 に示す。なお、*Microcystis* 属の増殖が栄養塩制限とならないように6月22日に硝酸態窒素を $\text{NaNO}_3\text{-N}$ として約 $3\text{mg}\cdot\text{l}^{-1}$ およびリン酸態リンを $\text{Na}_2\text{HPO}_4\text{-P}$ として約 $0.2\text{mg}\cdot\text{l}^{-1}$ 、7月16日には $\text{NaNO}_3\text{-N}$ を約 $3\text{mg}\cdot\text{l}^{-1}$ 、7月30日には $\text{NaNO}_3\text{-N}$ を約 $6\text{mg}\cdot\text{l}^{-1}$ および $\text{Na}_2\text{HPO}_4\text{-P}$ を約 $0.3\text{mg}\cdot\text{l}^{-1}$ 、添加した。つづいて、8月10日に $\text{NaNO}_3\text{-N}$ を約 $3\text{mg}\cdot\text{l}^{-1}$ 、8月24日、9月7日、9月25日、10月22日には $\text{NaNO}_3\text{-N}$ を約 $6\text{mg}\cdot\text{l}^{-1}$ 添加した。このように、Fig.7-16

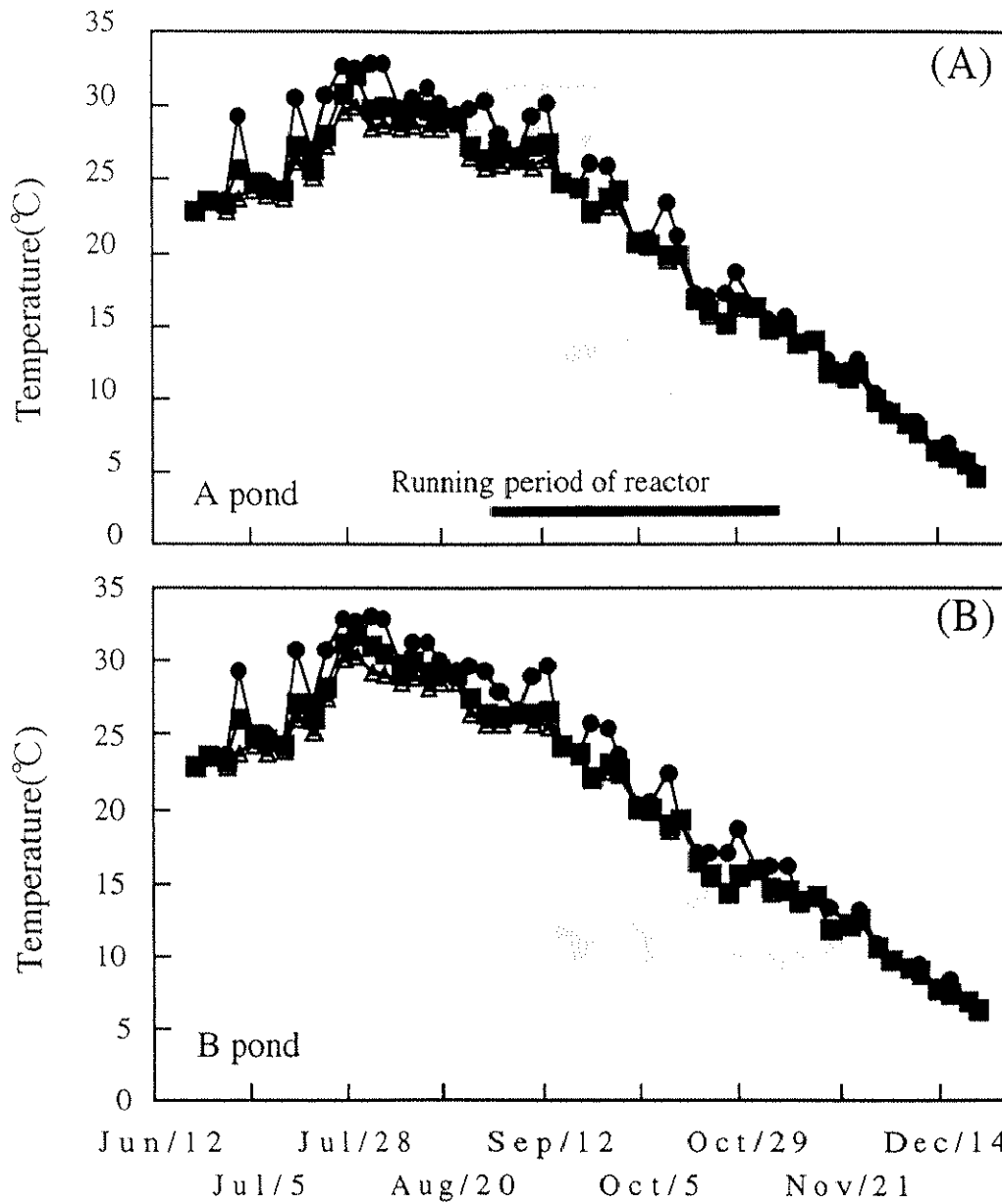


Fig.7-11 Change of temperature in experimental pond. Experimental pond combined with reactor(A) and without reactor(B).

● 15cm depth ■ 60cm depth ▲ 120cm depth

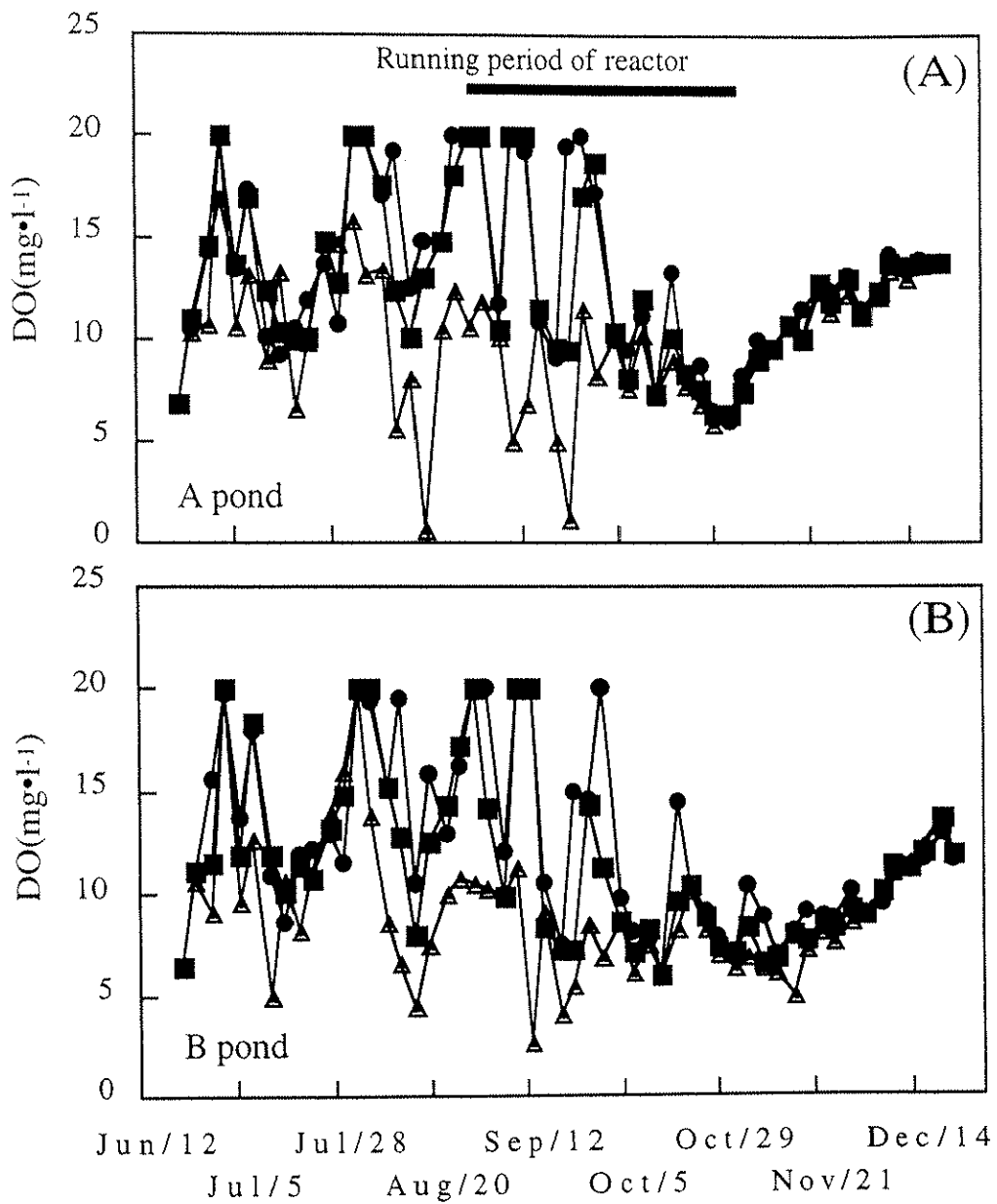


Fig.7-12 Change of DO in experimental pond.
Experimental pond combined with reactor(A)
and without reactor(B).

—●— 15cm depth —■— 60cm depth —▲— 120cm depth

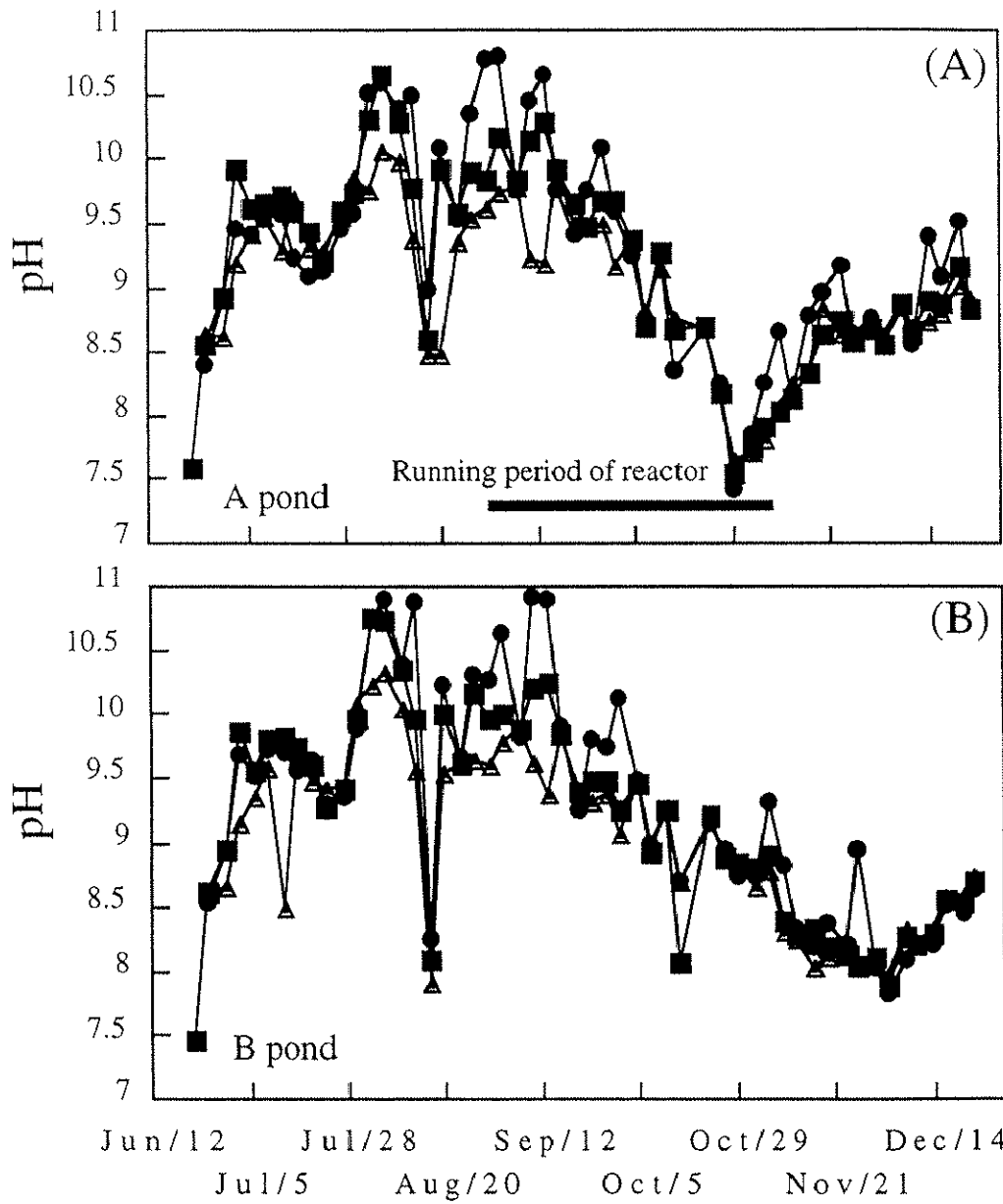


Fig.7-13 Change of pH in experimental pond.
 Experimental pond combined with reactor(A)
 and without reactor(B).

—●— 15cm depth —■— 60cm depth —▲— 120cm depth

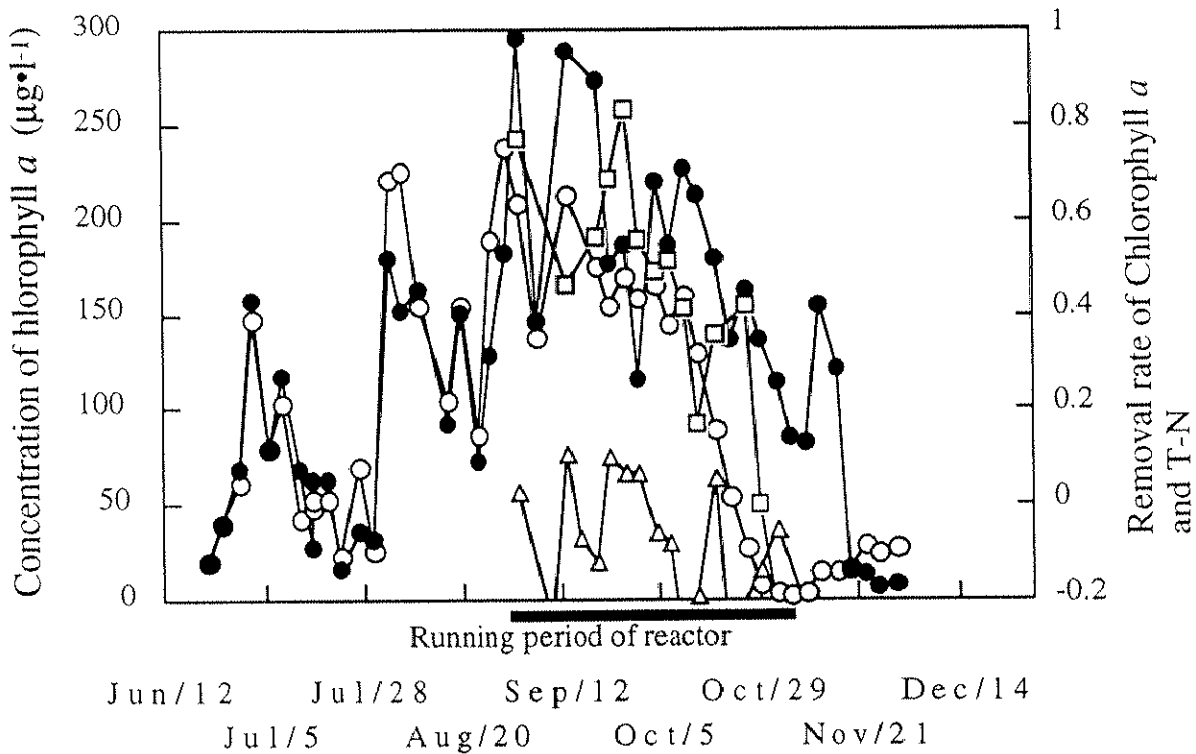


Fig.7-14 Change of Chl.*a* in experimental pond with and without reactor, and removal ratio of Chl.*a* and T-N in reactor

- : Chlorophyll *a* concentration of experimental pond combined with reactor(A pond)
- : Chlorophyll *a* concentration of experimental pond without reactor(B pond)
- : Removal rate of Chlorophyll *a*
- △— : Removal rate of T-N

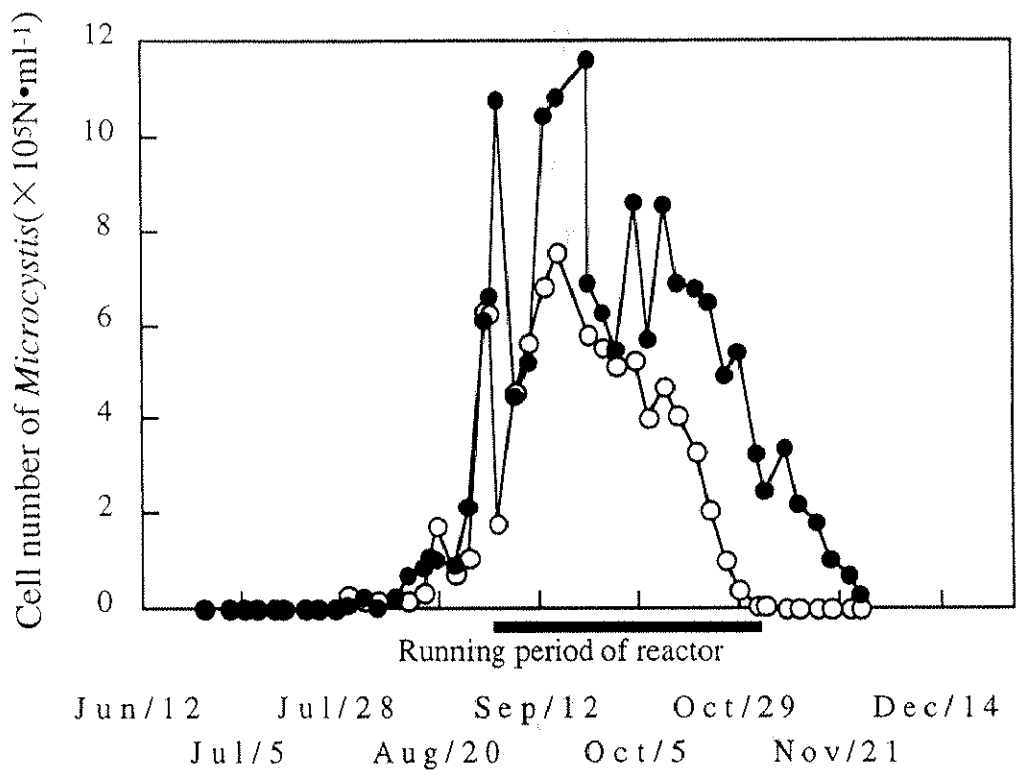


Fig.7-15 Change of cell number of *Microcystis* in experimental pond

- : Experimental pond combined with reactor(A pond)
- : Experimental pond without reactor(B pond)

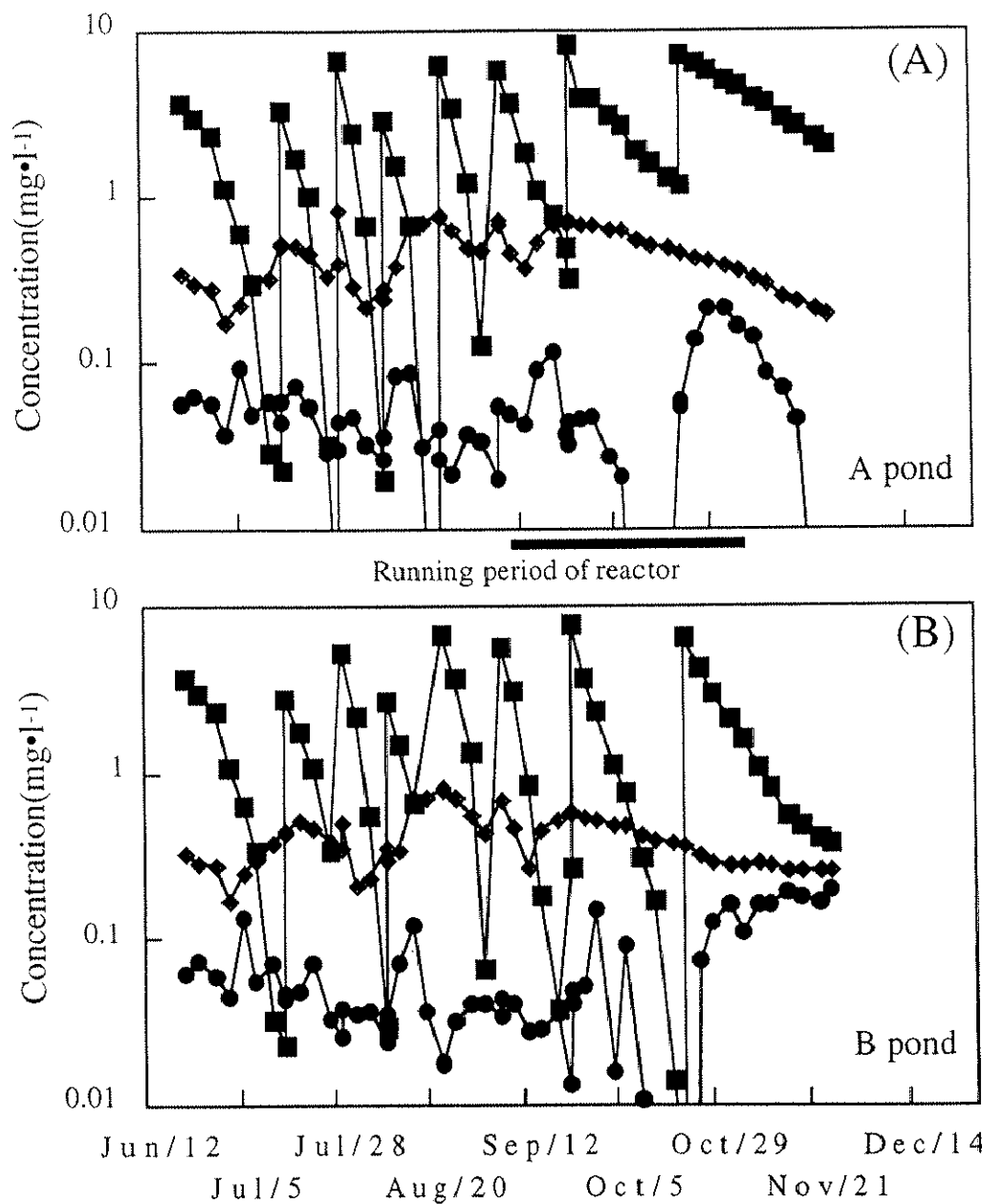


Fig.7-16 Change of nitrogen and phosphorus in experimental pond. Experimental pond combined with reactor(A) and without reactor(B).

—■— NO_x-N —●— NH₄-N —◆— PO₄-P

中で 8 度にわたり硝酸態窒素が急激に増加しているのは、 $\text{NaNO}_3\text{-N}$ を添加したためである。リアクター運転開始前の栄養塩添加後の溶存窒素および硝酸態窒素、リン酸態リンの動態は、両池ともほぼ同様な傾向を示した。 $\text{NaNO}_3\text{-N}$ を添加後、硝酸態窒素が急速に減少したのは、*Microcystis* 属への移行より、池内での脱窒作用が大きく影響していることが藻体内の窒素含有量を分析した結果から明らかとなった。このように、両実験池における *Microcystis* 属、クロロフィル *a*、DO、pH の動態変化がわかり、各パラメータによって *Microcystis* 属の増殖抑制を評価できると考えられた。

7-3-2-2 リアクターの運転期間における *Microcystis* 属の消長

1) リアクターにおける微小動物の定着と除去能

群体分散化装置およびリアクターは、8月31日から11月5日までの約2カ月の間、運転を実施した。Fig.7-17 にリアクターの担体内の微小動物の個体数およびリアクターのクロロフィル *a* の除去率を示す。リアクター運転開始の3日目(9月3日)に担体内で *Monas guttula* が約 $17,000 \text{ N}\cdot\text{ml}^{-1}\text{-carrier}^{-1}$ 確認された。しかし、その直後から *M.guttula* は急激に減少した。これは、9月7日に流入系のトラブルが発生し、リアクターへの池水の供給が十分でなかったことが原因のひとつと考えられた。その後の24日目(9月24日)には *M.guttula* は急激に増加し約 $16,000 \text{ N}\cdot\text{ml}^{-1}\text{-carrier}^{-1}$ に達した。以降、緩やかに減少し、49日目(10月19日)には約 $800 \text{ N}\cdot\text{ml}^{-1}\text{-carrier}^{-1}$ となった。また、21日目(9月21日)から *Microcystis* 属に対し捕食能を有する微小動物の *Aeolosoma hemprichi* が増加し、最高で約 $150 \text{ N}\cdot\text{ml}^{-1}\text{-carrier}^{-1}$ の密度で担体内に定着していた。他の微小動物については、繊毛虫類の *Stentor* 属が9月中旬から10月上旬まで担体内で $100\sim 200 \text{ N}\cdot\text{ml}^{-1}\text{-carrier}^{-1}$ の密度で定着し、単独細胞となった *Microcystis* 属を捕食しているところの確認された。一方、クロロフィル *a* の除去率をみると、*M.guttula* が一時的に増加した9月3日に0.8を示し、さらに、各種微小動物が担体内で増加しはじめた9月14日・日目から上昇し、最高で0.8に達した。ここで、クロロフィル *a* すなわち

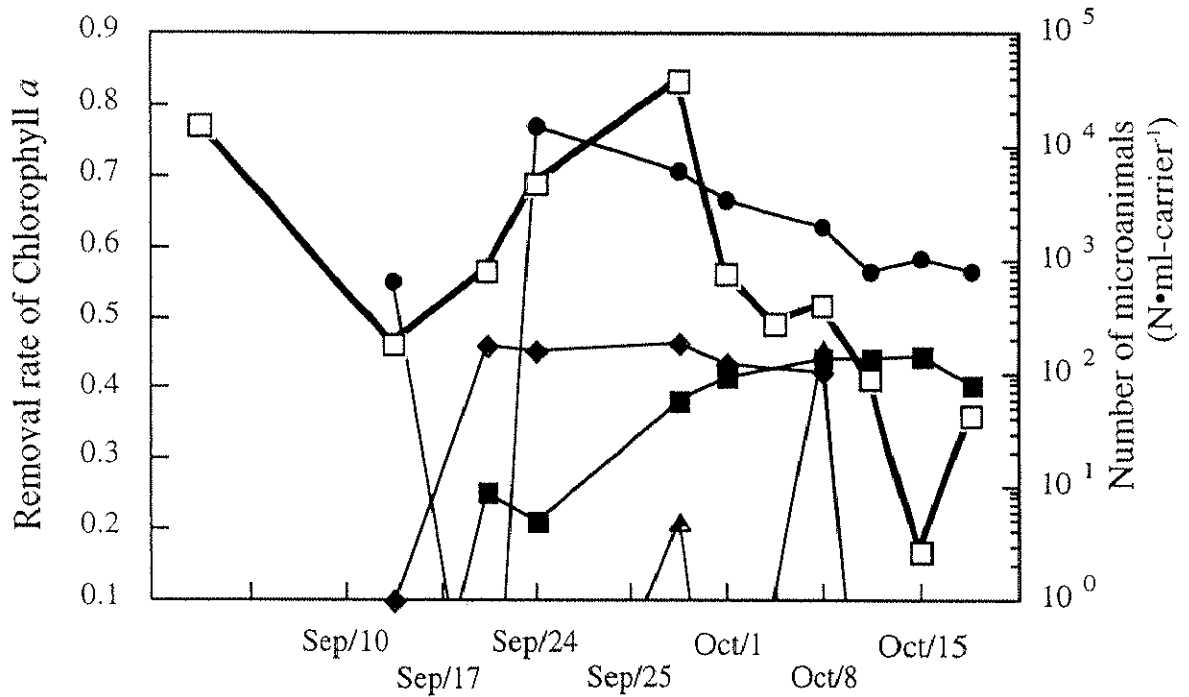


Fig.7-17 Relation between removal rate of chlorophyll *a* in reactor and dynamics of microanimals inhabiting on the carrier in reactor

- Removal rate of chlorophyll *a*
- *M.guttula*
- *A.hemprichi*
- ▲— *P.erythrothalma*
- ◆— *Stentor sp.*

Microcystis 属の分解除去率と担体内の微小動物の捕食との関係を調べるために、クロロフィル *a* の除去率に対する微小動物の個体数密度を Fig.7-18 にプロットした。その結果、クロロフィル *a* の除去率と *M.guttula* の個体数密度に正の相関関係が認められた。このことは、リアクター内の *Microcystis* 属の分解除去には *M.guttula* の捕食が大きく貢献していることを示す。

全体的な傾向としてはリアクターのクロロフィル *a* の除去率は 9 月下旬から徐々に低下する傾向が認められた。これは、水温の低下によりリアクター内の微小動物の活性が低下したためであると考えられた。

2) *Microcystis* 属の動態

リアクターの運転開始時点では、A 池のクロロフィル *a* 濃度 (Fig.7-14) と *Microcystis* 属の細胞数 (Fig.7-15) は B 池よりも高かったが、リアクターの運転開始後は速やかに減少し、3 日間でクロロフィル *a* 濃度と *Microcystis* 属の細胞数はともに B 池を下回った。その 4 日後 (9 月 7 日)、B 池のクロロフィル *a* 濃度と *Microcystis* 属の細胞数は急激に減少し、A 池と同レベルとなったが、両池に $\text{NaNO}_3\text{-N}$ を約 $6\text{mg}\cdot\text{l}^{-1}$ 添加した後、クロロフィル *a* 濃度および *Microcystis* 属の細胞数は再び増加した。この増加は A 池よりも B 池の方が明らかに多かった (Fig.7-14, Fig.7-15)。また、25 日目 (9 月 25 日) にも B 池のクロロフィル *a* 濃度と *Microcystis* 属の細胞数は A 池とほぼ同レベルとなったが、両池に $\text{NaNO}_3\text{-N}$ を約 $6\text{mg}\cdot\text{l}^{-1}$ 添加した後、31 日目 (10 月 1 日) から B 池でクロロフィル *a* 濃度および *Microcystis* 属の細胞数は再び増加し、A 池では減少する一方となった。水温が 20°C を下回った 43 日目 (10 月 12 日) から両池ともにクロロフィル *a* 濃度および *Microcystis* 属の細胞数は減少しはじめたが、現存量としては B 池が明らかに高かった。

3) DO、pH、栄養塩の動態

リアクターの運転を開始してから水深 60cm より上層の DO は両池ともにほぼ同様のパターンで推移した。A 池においては、*Microcystis* 属が減少したにもかかわらず、光合成は活性化され DO は増加する傾向にあった。このことは、前節

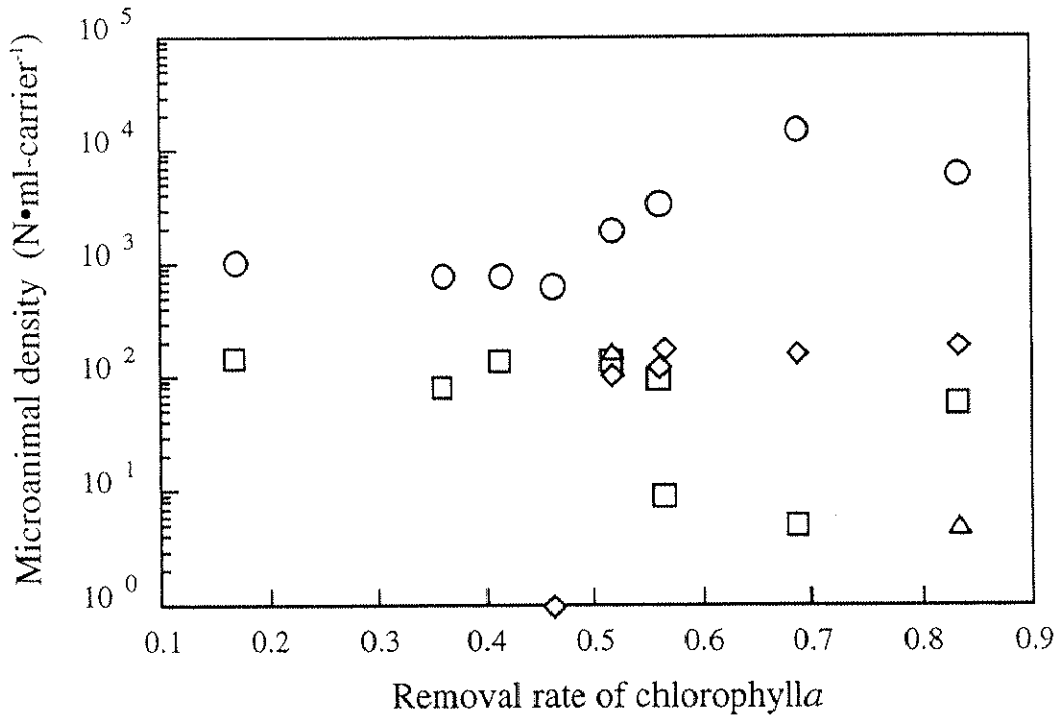


Fig.7-18 Relation between removal rate of chl.*a* in reactor and microanimal density on the carrier in reactor

- *M.guttula*
- *A.hemprichi*
- △ *P.erythrophthalma*
- ◇ *Stentor sp.*

(7-3-1) の実験と同様に両池の日照量の違いが原因と考えられた。

硝酸態窒素 ($\text{NO}_3\text{-N}$)、リン酸態リン ($\text{PO}_4\text{-P}$) の動態 (Fig.7-16) より、とくに、添加した $\text{NaNO}_3\text{-N}$ は急速に減少していることがわかる。この硝酸態窒素のは *Microcystis* 属の増減とほとんど一致していないことから (Fig.7-15)、*Microcystis* 属による吸収より、むしろ、池内での脱窒によるものと考えられた。硝酸態窒素の減少は、リアクターの運転開始前においては、両池ともにほぼ同様のパターンを示したが、リアクターの運転開始後から A 池の硝酸態窒素およびリン酸態リンの蓄積は B 池より多くなった。リアクター内では *Microcystis* 属が分解され、アンモニア態窒素が溶出するが、リアクターの処理水からアンモニア態窒素は $0.05\text{mg}\cdot\text{l}^{-1}$ 程度しか検出されなかった。しかし、処理水中の硝酸態窒素は、リアクターの運転期間において平均的に流入水の約 1.6 倍の濃度であった。これは、*Microcystis* 属の分解とともに溶出したアンモニア態窒素が速やかに硝化されていることで説明できる。リアクターの運転期間中、A 池で硝酸態窒素の蓄積が B 池に比べて多かったのは、リアクターから返送された硝酸態窒素が原因のひとつと考えられた。

7-3-3 リアクターによる実験池の *Microcystis* 属の増殖抑制効果の定量解析

A 池と B 池のクロロフィル *a* 濃度の経時変化から、群体分散化プロセスの有無におけるリアクターの *Microcystis* 属の増殖抑制効果を定量的に評価した。Fig.7-8 および Fig.7-14 に示すようにリアクター運転開始前 (リアクターシステムの実験は 10 月初旬の時点、群体分散化プロセスを組み込んだリアクターシステムの実験は 8 月下旬の時点) で A 池のクロロフィル *a* 濃度が B 池よりも高く、両池の単なる差を見ることによる増殖抑制効果の比較はできなかった。そこで、リアクターによるクロロフィル *a* 濃度の減少が以下の一次反応式に

$$\frac{dA}{dt} = \mu_A(t)A - kA \quad \dots \dots (7-1)$$

$$\frac{dB}{dt} = \mu_B(t)B \quad \dots \dots \dots (7-2)$$

$$\mu_A(t) = \mu_B(t) + \Delta\mu \quad \dots \dots \dots (7-3)$$

したがうと仮定し、減少速度定数 k を決定することとした。

ここで、 A 、 B は、それぞれ A 池、 B 池におけるクロロフィル a 濃度を示し、*Microcystis* 属のバイオマスに比例する。また、 $\mu_A(t)$ と $\mu_B(t)$ は、環境変動（温度、光強度等）により時間変化する A 池と B 池の *Microcystis* 属の増殖速度（生産と捕食分解を含む正味の増殖速度）を示しているが、 A 池の方が *Microcystis* 属の増殖が多いという測定結果を反映し、 A 池と B 池では (7-3) 式に示すように $\Delta\mu$ の差があるものとした。なお、 $\Delta\mu$ は日時によらず、一定であると仮定した。さらに、 k はリアクターによる *Microcystis* 属の増殖抑制効果である。

1) A 池と B 池の *Microcystis* 属の増殖速度の差 $\Delta\mu$ の推定

(7-1)、(7-2) 式の解はそれぞれ、

$$A(t) = A_0 e^{\int_0^t \mu_A(\tau) d\tau} e^{-kt} = A_0 e^{\int_0^t \mu_B(\tau) d\tau} e^{(\Delta\mu - k)t} \quad \dots \dots \dots (7-4)$$

$$B(t) = B_0 e^{\int_0^t \mu_B(\tau) d\tau} \quad \dots \dots \dots (7-5)$$

となる。次に、 $A(t)$ と $B(t)$ の比 η は、

$$\eta = \frac{A(t)}{B(t)} = \frac{A_0}{B_0} e^{(\Delta\mu - k)t} \quad \dots \dots \dots (7-6)$$

となる。リアクターを運転する前では $k = 0$ であるので、この期間において η の経時変化から $\Delta\mu$ を求めることができる。Fig.7-19 には、リアクターシステムの

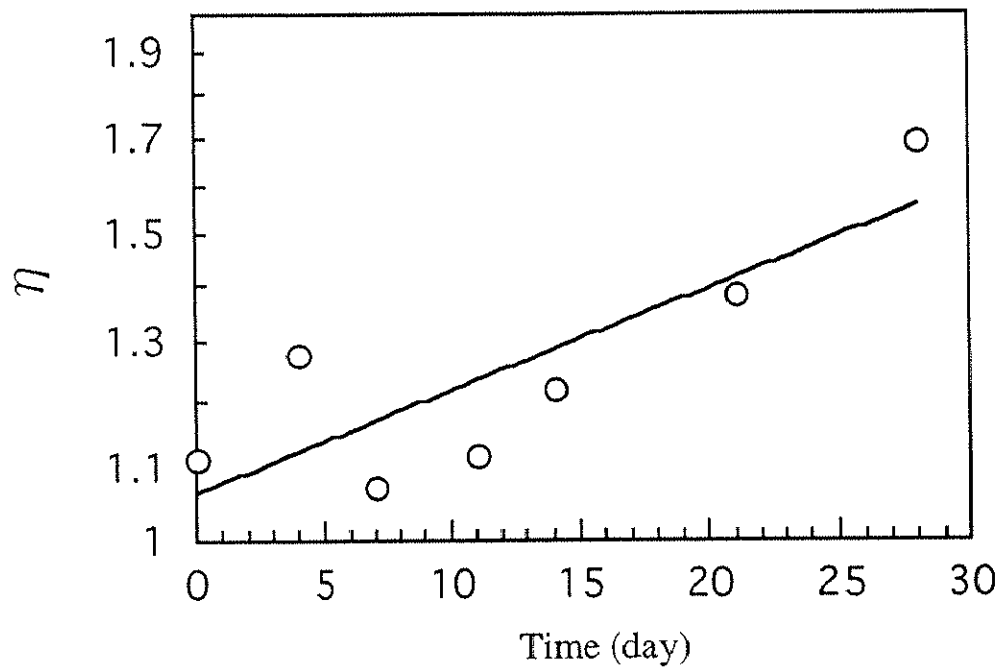


Fig.7-19 Change of η before running of reactor

$$\eta = \text{Chl.}a \text{ in A pond} / \text{Chl.}a \text{ in B pond}$$

みの実験系における *Microcystis* 属の供試時点からリアクターの運転開始までの η の対数プロットを示した。これより、 η はほぼ指数的に増加していることが明らかとなり、 $k=0$ として、 $\Delta\mu=0.014\text{day}^{-1}$ が得られた。一方、群体分散化プロセスを組み込んだリアクターシステムの実験系においては、A 池および B 池で *Microcystis* 属が優占化し増殖が顕著に認められるようになった 8 月 10 日からリアクターの運転開始までの η の対数プロットを Fig.7-20 に示した。これにより、 η はほぼ指数的に増加していることが明らかとなり、 $k=0$ として、 $\Delta\mu=0.022\text{day}^{-1}$ が得られた。

2) リアクターによる *Microcystis* 属の増殖抑制効果

Fig.7-21 にリアクターシステムのみの実験系におけるリアクターの運転期間中の η の対数プロットを示した。また、Fig.7-22 には群体分散化プロセスを組み込んだリアクターシステムの実験系において *M.guttula* がリアクターの担体内で確認された期間の η の対数プロットを示した。これらの期間において、両実験系ともに η はほぼ指数的に減少していることが明らかとなり、リアクターシステムのみの実験結果から $\Delta\mu-k=-0.028\text{day}^{-1}$ が得られ、 $k=0.042\text{day}^{-1}$ が求められた。同様にして、群体分散化プロセスを組み込んだリアクターシステムの実験結果からは、 $\Delta\mu-k=-0.027\text{day}^{-1}$ が得られ、 $k=0.049\text{day}^{-1}$ と求められた。

3) リアクターの *Microcystis* 属の分解除去率から求めた、池に対する *Microcystis* 属の増殖抑制効果

池内での *Microcystis* 属の低減効果に関して、リアクターが一次反応にしたがい *Microcystis* 属を分解していると仮定すると、リアクター内での *Microcystis* 属の分解速度定数を δ 、リアクター内の滞留時間を D_r 、池内の滞留時間を D とすれば、以下の関係式で池内での *Microcystis* 属の減少過程を記述することができる。

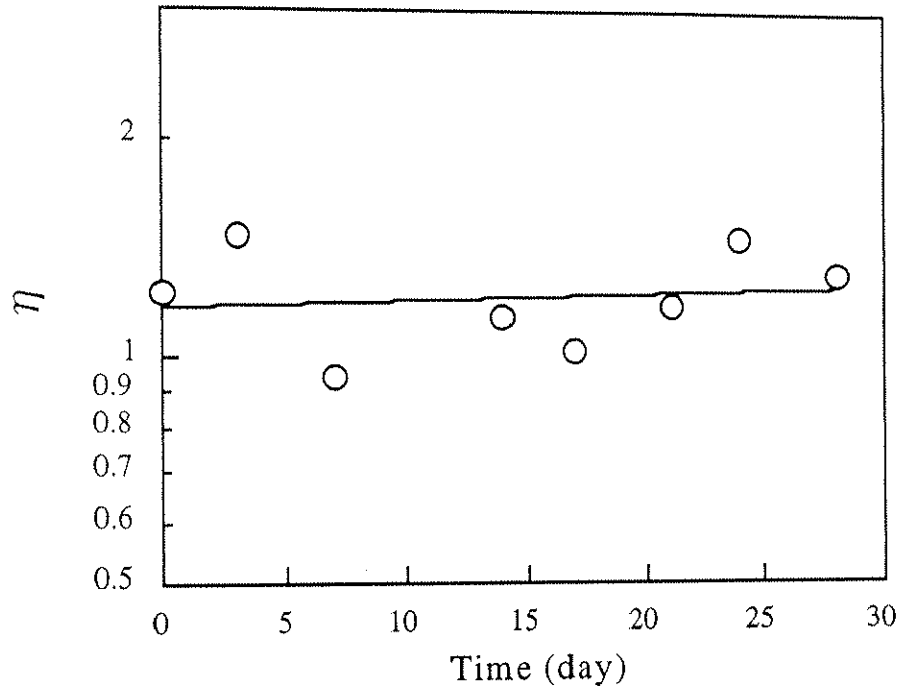


Fig.7-20 Change of η before running of reactor

$$\eta = \text{Chl.}a \text{ in A pond} / \text{Chl.}a \text{ in B pond}$$

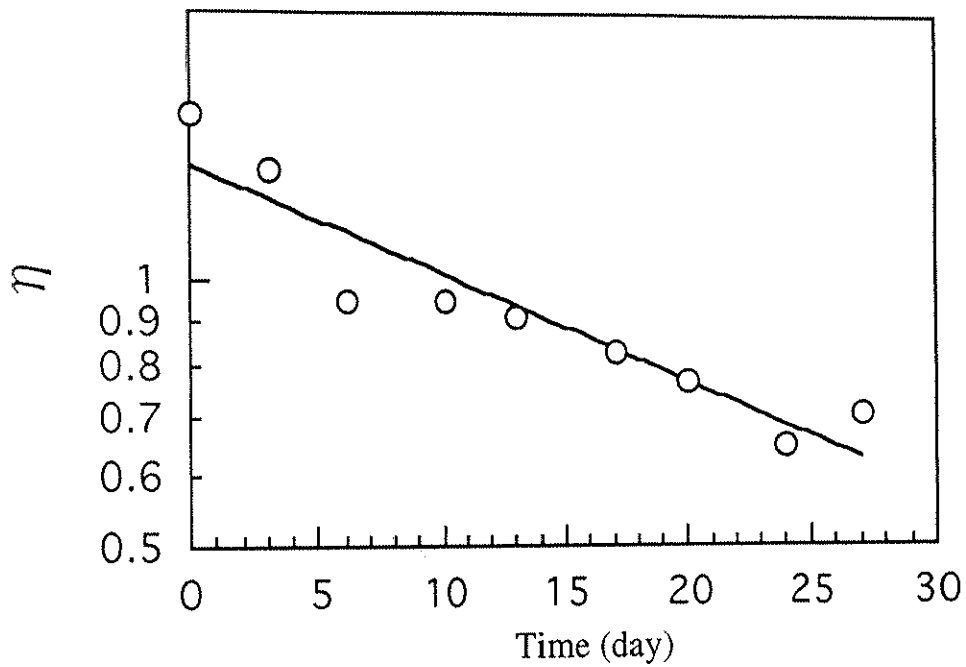


Fig.7-21 Change of η after running of reactor

$$\eta = \text{Chl.}a \text{ in A pond} / \text{Chl.}a \text{ in B pond}$$

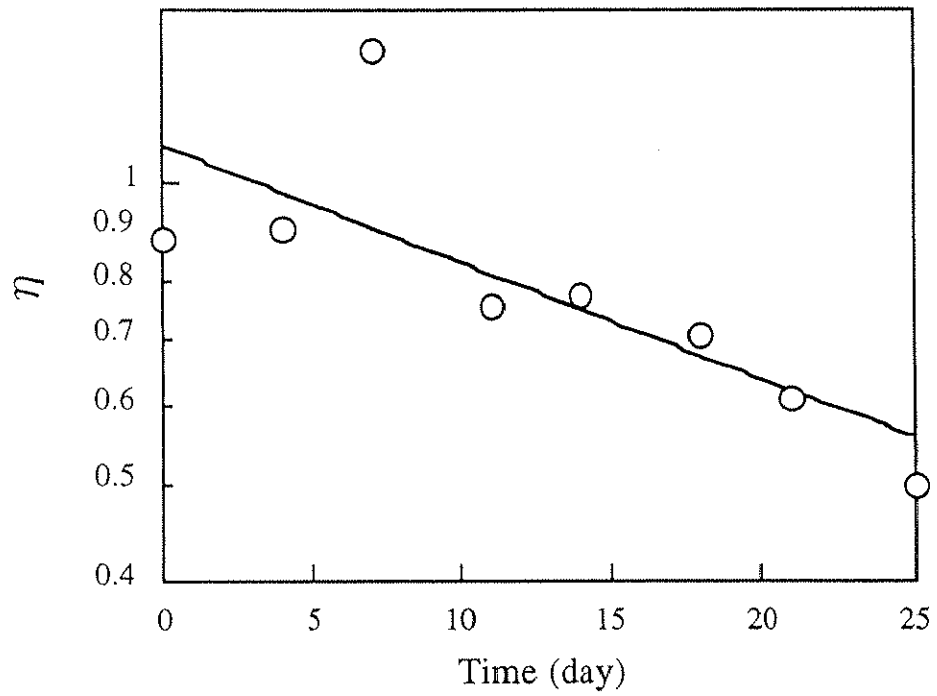


Fig.7-22 Change of η after running of reactor

$$\eta = \text{Chl.}a \text{ in A pond} / \text{Chl.}a \text{ in B pond}$$

$$\frac{dA}{dt} = \mu_A(t)A + D(A_R - A) \quad \dots \dots \dots (7-7)$$

$$\frac{dA_R}{dt} = -\delta A_R + D_R(A - A_R) \quad \dots \dots \dots (7-8)$$

ここで、アオコの増殖が日単位のオーダーの事象であり、一方、リアクターによる分解は時間単位のオーダーの事象であることを考慮すると、(7-8)式に対して、近似を行うことが可能である。つまり(7-8)式で、時間微分=0と置くことができる。したがって、

$$0 = -\delta A_R + D_R(A - A_R) \quad \dots \dots \dots (7-9)$$

ここでさらに、除去率 $R = 1 - A_R/A$ を用いれば、上式は

$$R = \frac{\delta}{\delta + D_R} \quad \dots \dots \dots (7-10)$$

となる。この除去率 R を用いれば、 $A_R = (1-R)A$ であるので、(7-7)式は

$$\frac{dA}{dt} = \mu_A(t)A - RD \cdot A \quad \dots \dots \dots (7-11)$$

となる。したがって、

$$k = RD \quad \dots \dots \dots (7-12)$$

ここで、 V_R をリアクター容積、 V_L を実験池容積、 T_R をリアクターの滞留時間とすると、

$$D = \frac{V_R}{V_L} \frac{1}{T_R} \quad \dots \dots \dots (7-13)$$

である。今回の実験では、 $T_R = 3.33 \text{ hr} = 3.33/24 = 0.14 \text{ day}$ 、 $V_R = 0.5 \text{ m}^3$ 、 $V_L = 30 \text{ m}^3$ であるので、 $D = 0.12 \text{ day}^{-1}$ となる。ここで、リアクターシステムのみを運転した実験池内のクロロフィル a の減少速度は $k = 0.042 \text{ day}^{-1}$ と求められているので、この D

と k の値を(7-12)式に代入して、リアクターのクロロフィル a 除去率は $R=0.35$ であると推定された。一方、群体分散化プロセスを組み込んだリアクターシステムを運転した実験池内のクロロフィル a の減少速度は $k=0.049\text{day}^{-1}$ と求められており、同様に代入して、リアクターのクロロフィル a 除去率は $R=0.41$ と推定された。

リアクターシステムのみの実験系において、リアクターのクロロフィル a 除去率の実測値は0.3以下であり、実験池内の減少速度から推算した値の0.35よりも小さい。このことから、リアクターによる*Microcystis*属の増殖抑制効果としては直接に*Microcystis*属を分解する作用に加えて、リアクターの影響により池内の生態系自身に変化することによる間接的な増殖抑制作用もあると考えらる。

一方、群体分散化プロセスを組み込んだリアクターシステムの実験系では、リアクターのクロロフィル a 除去率の実測値は平均値で0.5であり、実験池内の減少速度から推算した値の0.41よりも大きい。このことは、リアクターから実験池に返送された硝酸態窒素が池内で十分に脱窒されず、*Microcystis*属に再び利用され、増殖したことが原因のひとつと考えられる。しかしながら、リアクターの前段に*Microcystis*属の群体分散化プロセスを設けることで、リアクター内の微小動物の*Microcystis*属に対する捕食圧が高められ、リアクターでの*Microcystis*属の除去率は確実に向上し、このリアクターシステムで池沼の*Microcystis*属の増殖を抑制できることが明らかとなった。

本リアクターシステムを実際の富栄養化水域に導入し、*Microcystis*属の増殖抑制を効果的に行っていく上では、*Microcystis*属の回収効率と群体分散化効率をさらに向上させるとともに、リアクターから返送される処理水中の硝酸態窒素の除去プロセスを確立することがつぎの技術課題となる。

7-4 結論

屋外実験池を用いて群体分散化プロセスを組み込んだ微小動物定着型リアクターによる池沼の *Microcystis* 属の増殖抑制効果を検討した結果、以下の結論を得た。

- 1) 微小動物定着型リアクターの前段で *Microcystis* 属の群体を物理的に分散し、単独細胞化することによって、*Monas guttula* の担体への高密度定着が実現し、その捕食効果によって、リアクターでの *Microcystis* 属の除去率を最大で 80% 得ることができた。
- 2) 群体分散化プロセスを導入したリアクターシステム (0.5m³、滞留時間約 3 時間、*Microcystis* 属の平均分解率 50%) により、対象系に比べて実験池 (30m³) の *Microcystis* 属の増殖量はクロロフィル *a* 量の評価で約 2/3 に、また、*Microcystis* 属の細胞数密度で約 1/2 にまで減少した。
- 3) リアクターの影響により池内の生態系自身に変化することによる、間接的な増殖抑制作用のあることが推定された。
- 4) 実験結果の解析から *Microcystis* 属の減少速度定数を *k* として 0.049day⁻¹ を得た。この減少速度から推定した場合、例えば 10,000m³ のアオコ発生水域を約 200m³ サイズのリアクターで約 1 ヶ月でアオコを半減させることが可能であることが示された。
- 5) 池沼の *Microcystis* 属の増殖抑制をさらに効果的に行う上では、*Microcystis* 属の回収効率と群体分散化効率をさらに向上させるとともに、リアクターの処理水の硝酸態窒素の除去プロセスを確立することがつぎの技術課題となる。