〈論文〉

マイクロコズムを用いた水の華の発生機構と
その制御に関する研究

Microcosm system study on the formation and control of water-bloom

岡田 光正* 竹下 俊二** 須藤 隆一**
Mitsumasa OKADA Shunji TAKESHITA Ryuichi SUDO

Abstract

Kinetic studies on the growth of *Microcystis aeruginosa*, *Chlamydomonas* sp. and *Synedra acus* were carried out on 2 member cultures in a microcosm system (diameter=1.0m, depth=3.0m) as well as small scale unialgal cultures to study the process of water-bloom formation by *M. aeruginosa*. In the microcosm cultures, aeration from the bottom was conducted to assess the effect of aeration/circulation on the water-bloom. The specific growth rate of *M. aeruginosa* was larger than that of *Chlamydomonas* under low light intensity (less than 1,000 lux), whereas that of *Chlamydomonas* was larger under high light intensity at 20°C and 30°C. Thus *Microcystis* seemed to predominate over *Chlamydomonas* and subsequently form the water-bloom when light intensity underwater decreased sharply with depth of water due to light shielding by high concentration of suspended solids and/or phytoplankton. The specific growth rate of *M. aeruginosa* in 30°C was greater than that of *S. acus*, and therefore, predominated over *S. acus*.

Aeration and mixing of the whole water column in the microcosm delayed or prevented the dominance of *M. aeruginosa*. The artificial mixing and/or aeration seemed to be an effective way to control water-bloom formation by *M. aeruginosa*.

Key words: water-bloom, microcosm, *Microcystis aeruginosa*, aeration, mixing

1. はじめに

富栄養化した湖沼に発生するアオコや赤潮のような植物プランクトンの大発生は、水辺の景観を損なうのみならず、水道における異臭味や浄水処理障害、淡水漁業における魚種の変化やへい死など我々の社会経済にも多くの被害をもたらす¹⁾。今日の水質汚濁の最大の問題の一つと言ってよい。アオコ、赤潮が大発生した場合、原因プランクトンが水中の全植物プランクトン群集に占める割合は著しく高く、ほとんど純粋培養と言える状態になる。また、その濃度自身も極めて高いのが大きな特徴である²⁾。このため、「異常発生」とも呼ばれる状態になり、上記のような多くの被害をもたらす原因となる。

しかしながら、これらの植物プランクトンが、どのような機構で異常発生に至るか、十分に解明されたいは言い難い。岡田ら³⁾は、アオコの主要構成種であるらん藻類の *Microcystis* を対象とする浮上・沈降ならびに増殖の数理モデルを作成し、それを用いたコンピュータシミュレーション実験により *Microcystis* の異常発生機構に検討を加えた。その結果、光合成活性に伴う細胞またはコロニーの浮力の変化によって浮上・沈降を繰り返すという *Microcystis* の性質が、他の植物プランクトンに対して優占度を高める上で極めて重要な役割を果たすと推定された。さらに、浮上・沈降の特性を無効にするような人為操作、すなわち湖沼のばっ気や強制循環を行うことにより、*Microcystis* の優占度、

* 東京農工大学工学部化学工学科 〒184 小金井市中町2-24-16, Dept. of Chemical Engineering, Tokyo University of Agriculture and Technology, 2-24-16 Nakamachi, Koganei Tokyo 184 Japan

** 国立公害研究所技術部 〒305 茨城県つくば市小野川16-2, Engineering Division, The National Institute for Environmental Studies, 16-2 Onogawa, Tsukuba-shi, Ibaraki 305 Japan

ならびに現存量を著しく低下できると推定した^{3),4),5),6)}。

本研究はこれら数理モデルによる知見をふまえ、*Microcystis* の異常発生機構にさらに実験的検討を加えるために実施した。とくに自然の湖沼では *Microcystis* の異常発生初期において他の藻類種から *Microcystis* へと遷移していく過程に着目し、その機構を明らかにすると共に、ばっ気や強制循環のような異常発生の防止対策に実験的な検討を加えることを主な目的とした。このため、実験藻類としては *Microcystis* の他に、*Microcystis* の異常発生に先立って発生する緑藻と珪藻、それぞれ1種ずつを対照種に選び、その増殖特性に動力学的な検討を加えた。また、*Microcystis* の異常発生に至る植物プランクトンの種の遷移とそれに及ぼす種々の環境因子の影響を明らかにすべく、環境の人為的制御が容易な室内設置型マイクロコズム（大型藻類培養装置）を用いて植物プランクトンの2者混合培養を行い、*Microcystis* の異常発生のシミュレーション実験を行った。このような種毎の増殖動力学的検討、およびマイクロコズムによるシミュレーション実験を総合することによって異常発生機構を解明すること、ならびにマイクロコズムにおけるばっ気実験を通じてその対策を実証する試みを行った。

2. 実験方法

2.1 供試植物プランクトン種

本研究に用いた植物プランクトンは次の3種である。いずれも単藻株ではあるが、無菌化されてはいない。

- a. *Microcystis aeruginosa* : 藍藻類、霞ヶ浦からの分離株
- b. *Chlamydomonas* sp. : 緑藻類、霞ヶ浦からの分離株
- c. *Synedra acus* : 珪藻類、霞ヶ浦からの分離株

なお、本研究に用いた *M. aeruginosa* 分離株は、野生株のように大型のコロニーを形成する性質がなかったため、野生群集の特性である浮上・沈降を直接の研究対象とすることができなかった。

Microcystis 以外の2種類は、霞ヶ浦の夏季における *Microcystis* の異常発生に先立ち、初春から夏にかけて優占種となることが多い植物プランクトン種である³⁾。

2.2 培地

フラスコレベルの培養実験から大型培養装置によるシミュレーションに至るまで、すべての実験を通じて同一の培地を使用した。使用した培地は Gorham の改変培地である⁸⁾。その組成を Table 1 に示す。培地の使

Table 1 Composition of the modified Gorham's medium

	(mg/l)
NaNO ₃	496
K ₂ HPO ₄	3
MgSO ₄ ·7H ₂ O	75
CaCl ₂ ·2H ₂ O	36
Na ₂ CO ₃	20
Na ₂ SiO ₃ ·9H ₂ O	58
Ferric Citrate	6
Citric Acid	6
EDTA	1
Gaffron's Minor Elements Solution	0.08 ml

用に先立ち、オートクレーブ滅菌（120°C, 15min）を行った。なお、リン酸塩、鉄塩については別滅菌し、冷却後混合することによって沈殿物の生成を防いだ。

2.3 植物プランクトン濃度、比増殖速度、及び種構成比の測定

培養系における植物プランクトン濃度の測定に際しては、培養液 1 ml を 1% NaCl 溶液（電解質溶液）9 ml に希釈した後、平均細胞容積計算機（Mean Cell Volume Computer）付きのコールターカウンター-ZF 型（100μm 径アパーチャー、Coulter Electronics Inc., Florida）により細胞数と平均細胞容積を求めた。これから全細胞容積を求め、各プランクトン毎に予め作成した検量線（乾燥重量 vs. 全細胞容積）によって培養液 1 l あたりの乾燥重量に換算した。検量線作成のための乾燥重量は、植物プランクトン懸濁液をメンブレンフィルター（Millipore Type HA, 孔径=0.45μm）でろ過し、90°C で 24hr 乾燥した後の重量差より求めた。

静置回分培養における比増殖速度、μ (day⁻¹) は、培養開始後毎日 1 回藻類濃度を測定し、初期の 1 日から 5～7 日目に観察される対数増殖期の濃度変化から求めた。

混合培養における種構成比は、血球計算板で求めた。すなわち、計算板のある区画内に存在するそれぞれの種毎の細胞数を計算し、両者の細胞数の比を求めた。これをランダムに 10 以上の区画を選んで計数し、その平均値をもって 2 種の細胞数の比とした。ただし、サンプルの細胞濃度が低いため、信頼できる細胞数の比を求めるのが困難な場合は、培養液をメンブレンフィルターでろ過した後、ろ紙上の細胞を少量のろ液に再び懸濁した濃縮液で細胞数の比を求めた。なお、混合培養における全藻類細胞容積からその乾燥重量への換

算には、*Microcystis* の換算係数を用いた。

2.4 静置回分培養による増殖特性の検討

使用した各植物プランクトン種の各々の増殖特性は、500ml の三角フラスコを用いた静置回分培養で検討した。ここでは水温と照度とに着目し、 μ (day^{-1}) に及ぼす影響に検討を加えた。

オートクレーブ滅菌済の培地100ml を滅菌済の有栓(シリコンキャップ: 信越シリコン)三角フラスコに入れ、前培養で対数増殖期にあるプランクトン懸濁液を1 ml(初期細胞数=1,000 ml^{-1})接種した。なお、前培養は本培養と同一の培地を使用し、水温は20°C、照度は2,000lux で行った。

本培養の培養条件は、水温を10, 20, 30°C の3条件、照度を200lux から4,000lux の6段階とし、すべての組合せに対して μ を求めた。水温を一定とするため、すべて恒温室(設定温度 $\pm 2^\circ\text{C}$)で培養を行った。照明には白色蛍光灯を用いてフラスコ上部より連続照射し、フラスコ液面と同一レベルの照度が所定の値となるように光量を調節した。この際、蛍光灯の入力電圧は一定のままとし、蛍光灯の管の一部をアルミホイルで覆うことによって照度を調節した。培養開始後、1日1回培養液を十分に混合するとともに、植物プランクトン濃度を測定し、培養初期の約1週間に観察される対数増殖期の μ を求めた。

2.5 マイクロコズムによるシミュレーション

2.5.1 マイクロコズムシステム

Microcystis の異常発生のシミュレーションには、マイクロコズムシステム(大型培養装置: 国立公害研究所アクアトロン内)を用いた。Fig. 1 はマイクロコズム

Fig. 1 Schematic diagram of the microcosm system in the National Institute for Environmental Studies.

システムの概要を示す⁷⁾。本実験に使用した培養装置は、図中のマイクロコズム A(人工湖沼モデル, 2基)である。直径は1 m, 水深3.0m の円筒型の内側をステンレス張(SUS304)にしたタンクである。内部の水温は外部に設置した帯状のジャケット(7段)に調温水を循環することによって制御した。また、槽上部のキセノンランプ(5 kw)により内部を照明し、水表面で17,000~20,000lux の照度を得た。なお、本実験では1日14時間を照明し、残り10時間は暗条件とした。また水温は $10 \pm 2^\circ\text{C}$, $20 \pm 2^\circ\text{C}$, もしくは $30 \pm 2^\circ\text{C}$ に設定した。

2.5.2 前培養と接種

前培養には他の実験と同一の培地1~2 lを入れた5 lの三角フラスコ数本を用いて、2,000lux, 25°C の恒温槽にて静置培養した。毎日1回フラスコを混合、細胞数の計数を行いつつ、対数増殖期になった懸濁液(2~5 l)をマイクロコズムに接種した。混合培養の場合には、所定の細胞数比になるように接種培養液量を調整した。

2.5.3 シミュレーション

どのような条件で *Microcystis* が他の植物プランクトンとの競争にうち勝ち、異常発生に至るかを明らかにするため、2種の混合培養を水温、2種の初期細胞数の比、マイクロコズム内部の水の混合条件などを変えて行い、増殖経過を観察した。水温については、 $10^\circ\text{C} \rightarrow 20^\circ\text{C}$, $20^\circ\text{C} \rightarrow 30^\circ\text{C}$ のような昇温実験を中心に実施した。これは、*Microcystis* が夏季の高水温時に異常発生しやすいことによる。2種の初期細胞数の比については、*Microcystis* と他の種の細胞数比が1:1の場合、及び他の種が単藻培養で増殖している系に *Microcystis* を新たに接種する場合(他の種に比較して細胞数は1%以下で無視できる場合)の2通りを検討した。通常のシミュレーションは表層のみの搅拌とし、表面から約50cmの深度にわずかの無菌空気を通気することにより、表面のみのゆるやかな搅拌を行った(表層搅拌系)。これは、実際の湖沼の表層で観察される風による湖水の鉛直方向の表層混合を近似するためである⁹⁾。他方ばっ気のシミュレーションでは、槽内部が完全に混合されるように、マイクロコズム底部より通気を行った(完全搅拌系)。

3. 結果と考察

3.1 静置回分培養における比増殖速度に及ぼす水温と照度の影響

Fig. 2, 3, 4 は、*Microcystis*, *Synedra*, *Chlamydomonas* のそれぞれ 10°C , 20°C , 30°C における比増殖速度、 μ (day^{-1}) と照度との関係を示す。Fig.

2に示すように、10°Cの場合にはすべての照度範囲で *Microcystis* の μ が3種中で最も小さく、かつ500~4,000luxの範囲内ではほぼ一定の約0.15day⁻¹を示した。これに対し、*Synedra* は1,000luxまで μ が照度に比例してほぼ同様に増加したが、2,000lux以上で飽和する傾向を示した。*Chlamydomonas* はすべての照度範囲で照度の増加と共に μ が増加し、2,000lux以上では *Synedra* のそれを大きく上回った。

Fig. 3に示すように、20°Cではいずれの種も10°Cよりも μ が大きくなったが、特に *Microcystis* の μ の増加が顕著であった。種別に見ると、1,000lux以下では *Synedra* が他の2種より大きな μ を示すが、2,000lux以上では10°Cと同様に光飽和した。これに対して、*Chlamydomonas* と *Microcystis* は照度の増加と共に μ が増加した。このため、高照度下では結果的には10°Cと全く逆の傾向が現れ、*Chlamydomonas* > *Microcystis* > *Synedra* の順であった。

さらに、Fig. 4に示すように30°Cでは、*Microcystis* と *Chlamydomonas* の μ は20°Cよりさらに増加した。しかし、*Synedra* の μ の温度による増加は他種ほど顕著でなく、2,000lux以上で3種中最も低い μ を示した。*Microcystis* と *Chlamydomonas* とを比較した場合、その差は少ないものの、低照度(<1,000lux)では *Microcystis* の μ が *Chlamydomonas* を上回り、ま

た逆に高照度下では *Chlamydomonas* の μ が *Microcystis* の μ を上回る傾向を示した。

Fig. 3 Effects of light intensity on the specific growth rate of *Chlamydomonas*, *synedra* and *Microcystis* at 20°C.

Fig. 2 Effects of light intensity on the specific growth rate of *Chlamydomonas*, *Synedra* and *Microcystis* at 10°C

Fig. 4 Effects of light intensity on the specific growth rate of *Chlamydomonas*, *Synedra* and *Microcystis* at 30°C

このように、3種の植物プランクトンについて増殖速度の照度ならびに温度への依存特性を比較すると、*Synedra* の μ は照度の変化の影響を3種中最も受けにくく、とくに低温では1,000~2,000lux 以上で光飽和して、 μ の増加が見られない種であった。また、温度に対しても μ の変化が比較的少なかった。これに対し、*Microcystis* と *Chlamydomonas* は温度、照度ともに μ に対する影響が大きく、照度が高いほど、また水温が高いほど μ は増加した。ただし、この2種を比較すると、*Microcystis* の方がより低照度でも高い μ を保つ傾向が認められた。

3.2 マイクロコズムによる水の華発生のシミュレーション

3.2.1 照度の影響

Fig. 5 は、30°C に設定した表層攪拌系のマイクロコズムに、*Microcystis* と *Chlamydomonas* を細胞数で1:1になるよう接種した時の培養経過を示す。上層(水面下0.2m)及び中層(同1.5m)では、培養の初期、約0.3day⁻¹の比増殖速度(μ)で植物プランクトン濃度の増加が認められた。しかし、濃度が5 mg・l⁻¹を超えた7日目以降 μ は低下し、0.1day⁻¹程度のゆっくりとした増殖を続けた。これに対し、下層では最初からゆるやかに増殖した。20日目以降は、上中層とほぼ同じ濃度に達し、水深方向にほぼ均一な濃度分布となった。最終的な植物プランクトン濃度は約15mg・l⁻¹であった。

全細胞数中に占める *Microcystis* の細胞数の割合は、培養開始後の初期の6日目に、上、中層では約30%にまで低下した。しかし、その後プランクトン濃度の増加にともなって全細胞数に占める *Microcystis* の割合が増加し、約30日後にはほとんど *Microcystis* のみの群

Fig. 5 A succession of phytoplankton from a 1:1 population of *Chlamydomonas* and *Microcystis* to a population dominated by *Microcystis* (30°C, ○, ●=0.2m, △, ▲=1.5m, □, ■=2.8m).

集になった。一方、下層では培養初期から *Microcystis* の割合が増加し、上、中層と比較して *Microcystis* のみの群集への遷移がより速やかに進行した。

上述の条件では最終的に *Microcystis* のみの群集に遷移し、マイクロコズム内で *Microcystis* が安定した個体群を維持しうることが示された。しかし、これは単に *Chlamydomonas* がマイクロコズムという人工系内で安定した個体群を維持しえないことによるかも知れない。マイクロコズムの中で *Chlamydomonas* のみが安定した個体群を維持し得るかを検討するため、最初に *Chlamydomonas* のみを接種した(30°C)。Fig. 6 に示すように、*Chlamydomonas* 個体群は1か月以上にわたってマイクロコズム内で維持された。しかし、その濃度は *Microcystis* より低く、全層平均で2~5 mg・l⁻¹であった。この期間マイクロコズム底部には *Chlamydomonas* の沈殿が認められたため、沈殿量に相当する分だけ増殖し、その個体群を維持していたと考えられる。

この *Chlamydomonas* のみの個体群に、その培養開始後約40日目に *Microcystis* の接種(接種量は *Chlamydomonas* の細胞数に対して無視できる程度: 接種直後の顕微鏡観察では通常 *Microcystis* は認められない)を行った。その結果、Fig. 6 に示すように、わずか2週間程度でほとんど *Microcystis* のみの群集に遷移した。したがって、本実験のように栄養塩が豊富(リン、窒素濃度はいずれも増殖の制限とならない)であり、かつ30°Cの条件下では *Microcystis* が *Chlamydomonas* に対して優占種となり、*Microcystis* が100%近くを占める「異常発生」の状態に遷移しやすいと言えよう。

Microcystis が優占となった理由を明らかにするため、Fig. 5 に示した実験系より培養液の一部を取り出し、三角フラスコによる培養実験を行った。ここでは、接種直後の *Microcystis* と *Chlamydomonas* の細胞数の比が1:1であるマイクロコズム内培養液を無菌的に

Fig. 6 A succession of *Chlamydomonas* population toward *Microcystis* predominating population after the inoculation of *Microcystis* (at 30°C).

取り出し、滅菌済みの500ml 三角フラスコに100ml ずつ分注した。このうち2個は600luxの弱光下に、もう2個は4,000luxの強光下に置いた。各条件下における全植物プランクトン濃度の変化(平均値)をFig. 7に示す。照度4,000luxの場合、 $\mu \approx 0.7d^{-1}$ で急速に増殖し、10日目以降は *Chlamydomonas* がほぼ100%の群集へと遷移した。これはマイクロコズム内と全く逆の現象である。しかし、600luxの条件下では一時的に濃度が減少したものの、その後 $\mu \approx 0.26d^{-1}$ で増殖し、20日目以降には逆に *Microcystis* がほぼ100%の群集となった。すなわち、マイクロコズム内と同一の遷移が認められた。この事実はFig. 4に示した低照度では *Microcystis* の μ が *Chlamydomonas* のそれより大きく、高照度では逆転するという単藻培養結果と一致している。

以上の三角フラスコによる実験は、照度以外の条件についてはマイクロコズム内と同一である。したがって、*Microcystis* と *Chlamydomonas* のいずれが優占種となるかに対し、照度がきわめて重要な役割を果たしていると考えられる。とくに、高照度下では *Chlamydomonas* への遷移が起こり、逆に低照度ではマイクロコズムと同様に *Microcystis* が優占となったという結果と、マイクロコズム内における *Microcystis* への遷移との関係を明らかにする必要がある。このためマイクロコズム内の照度 I (lux) の鉛直分布(水深 z (m) > 0)を調べた。ここでは、種々の藻類濃度条件

Fig. 7 Growth of phytoplankton in 500ml Erlenmeyer flasks sampled from the 1:1 population of *Chlamydomonas* and *Microcystis* in the microcosm (see Fig. 5).

でマイクロコズムの照度分布を測定し、Lambert-Beerの法則に従って消散係数 ϵ の値を求めた。この ϵ は植物プランクトンの種よりもむしろ濃度によって変化し、水表面照度を I_0 (lux), プランクトン濃度を X ($mg \cdot l^{-1}$) とすると、次式に従うことが明らかになった。

$$I = I_0 \cdot \exp(-\epsilon z)$$

$$\epsilon = 1.04 + 0.19X$$

ここで $I_0 = 17,000$ lux とし、 $X = 0, 1, 10$ および $20 \text{ mg} \cdot l^{-1}$ に対して I の鉛直方向の分布を計算した結果がFig. 8の曲線群である。表面は17,000luxときわめて高い照度であるにもかかわらず、水深とともに急速に照度が減衰していく様子がうかがわれる。そして、藻類濃度がわずか $1 \text{ mg} \cdot l^{-1}$ であっても、1 mで4,000 lux以下となり、2 m以深では1,000lux以下となった。さらに $10 \text{ mg} \cdot l^{-1}$ となると1 mでも1,000lux以下となり、1.5 m以深では照度がほぼ0となっていることが明らかとなった。

したがってマイクロコズム内部の植物プランクトン濃度が高ければ高いほどマイクロコズムの水表面のごく一部を除き、大部分はきわめて低い照度下にあると言ってよい。すなわち、マイクロコズム内のほとんどの部分ではFig. 7における低照度下の三角フラスコと同様な現象が起こり、*Microcystis* が優占になったものと考えられる。なお、Fig. 5に示したように、下層は

Fig. 8 Vertical distribution of underwater light intensity in the microcosm as a function of phytoplankton concentration in terms of $mg \cdot l^{-1}$.

日より速やかに *Microcystis* へと遷移する傾向も上記の推定を支持するものと考えられる。

3.2.2 水温の影響

上述の種の遷移, すなわち *Microcystis* による水の華の発生に至るシミュレーションは, すべて30°Cにおける結果である。通常 *Microcystis* による水の華は, わが国においては25°C以上の水温になると発生しやすいと言われている¹⁰⁾。この点では上記の結果は従来の知見と矛盾しない。

水温上昇の影響をより明らかにするため, 20°Cにおける種の遷移を観察した結果が Fig. 9 である。接種は Fig. 5 に示した実験と同様に *Chlamydomonas*: *Microcystis*=1:1とした。植物プランクトン全体の濃度は約2週間で約6 mg・l⁻¹にまで増加したが, その後やや不安定な変化を示した(理由不明)。しかし, 種構成を見る限り, 30°Cとは全く逆に *Chlamydomonas* へと遷移した。*Chlamydomonas* が優占な状態が10日ほど続いたため, 水温を30°Cに昇温した。昇温後, 濃度が安定するとともに, わずか一週間で再び *Microcystis* が現れた。ここでは *Microcystis* の接種を行っていないため, マイクロコズムの槽壁に付着していたり, または槽底に沈殿していた *Microcystis* が増殖したものと推定される。そして, 1カ月後には Fig. 6 と同様に *Microcystis* がほぼ100%の群集となった。

3.3 ばっ気による水の華制御のシミュレーション

Fig. 10 は10°Cにおいて *Microcystis* と *Chlamydomonas* の混合培養を行い, 25日目に20°Cに昇温した時の両者の比率 (*Microcystis* 細胞数/全細胞数)の経時変化を示す。また, Fig. 11 にはこの期間の全植物プランクトン濃度の変化を示す。Fig. 10 に示したように10°Cにおいては *Chlamydomonas* が優占種

Fig. 9 A succession of phytoplankton from *Chlamydomonas* to *Microcystis* after the increase in water temperature from 20°C to 30°C.

であった。これは10°Cにおける μ の値が (*Chlamydomonas*) > (*Microcystis*) であることと矛盾しない(Fig. 2 参照)。その後20°Cに昇温するといずれの系も *Microcystis* が優占となった。しかし, 表層攪拌系と完全攪拌系とでは *Microcystis* への遷移の時間に約2週間の差が認められ, 攪拌によって *Microcystis* への遷移が遅れると推定された。

なお, 本実験において20°Cで *Microcystis* へと遷移した事実は, Fig. 9 において20°Cで *Chlamydomonas* が優占種となったことと一見矛盾する。しかし, Fig. 3 に示したように, 20°Cにおける *Microcystis* と *Chlamydomonas* の μ は, 高照度下では明らかに (*Chlamydomonas*) > (*Microcystis*) であるのに対し, 低照度下では両者がほぼ等しいかやや *Microcystis* の μ が大きい傾向を示している。したがって, Fig. 9 のケースのように全藻類濃度が0.6~6 mg・l⁻¹と比較的低い場合には槽内の照度が高く保たれ, *Chlamydomonas* が優占になったと考えられる。一方 Fig. 10 の実験の場合, 藻類濃度が6~10mg・l⁻¹と高

Fig. 10 A Succession of phytoplankton (ratio of the cell number of *Microcystis*/total number of cells) from *Chlamydomonas* to *Microcystis* after the increase in water temperature from 10°C to 20°C. a) surface aeration for gentle surface mixing, b) whole mixing by aeration from the bottom of the microcosm: ●=0.2m, ▲=1.5 m, ■=2.8m

Fig. 11 Increase in phytoplankton density after the increase in water temperature from 10°C to 20°C. a) surface aeration, b) whole mixing, (●=0.2m, ▲=1.5m, ■=2.8m: see Fig. 10).

く保たれたため、逆に *Microcystis* が優占となったと推定される。

表層攪拌系と完全攪拌系との同様な比較を20°C条件下で *Synedra* と *Microcystis* を対象に行った。Fig. 12 は表層攪拌系における培養経過を示す。初期個体数の比は1:1としたが10日目以降 *Microcystis* へと遷移した。これは表層攪拌系では *Synedra* が沈降しやすく全植物プランクトン濃度が低く保たれたこと（沈殿びんを設置したところ、ほとんどが *Synedra* であった）により、照度が高く維持され、その結果 μ が (*Microcystis*) > (*Synedra*) となったためと推定される (Fig. 3 参照)。

一方、Fig. 13 は完全攪拌系における培養経過である。この場合、逆に *Synedra* が優占となった。攪拌を行うことにより *Synedra* は沈降しにくくなり、槽内の藻類濃度が高く保たれ、したがって低照度下で μ が大きい *Synedra* が優占種になったと推定される。

3.4 *Microcystis* の異常発生機構

以上の実験結果より、*Microcystis* の異常発生機構に関し、次のような機構が働いていると推定された。

Microcystis と *Chlamydomonas* とをその μ で比較

Fig. 12 A succession of phytoplankton from a 1:1 population of *Synedra* and *Microcystis* to a population dominated by *Microcystis* (20°C, surface aeration).

Fig. 13 A succession of phytoplankton species from a 1:1 population of *Synedra* and *Microcystis* to a population dominated by *Microcystis* (20°C, aeration from the bottom of the microcosm).

した場合、10°Cでは *Chlamydomonas* が大であった。しかし、20°C、30°Cでは低照度下では *Microcystis* の μ が、また高照度下では *Chlamydomonas* の μ が大きかった。このため、水中での全植物プランクトン濃度が高かったり、またシルトの流入や底泥の巻き上がり等によって水中照度の鉛直方向の減衰が著しい場合、水柱のほとんどの部分が低照度になり、結果として *Microcystis* の μ が相対的に大きくなることにより最終的な優占種になりやすい、すなわち異常発生に至りやすいと考えられる。逆に全植物プランクトン濃度が低い場合、*Chlamydomonas* の方が高照度下で高い μ を持ったため、優占種になりやすいと思われる。この推定は、*Microcystis* の異常発生に先立ち、通常他の藻類が発生しており、湖内の中低層の照度が減衰していることと矛盾しない。また、既報の数値シミュレーションの結果とも定性的には矛盾しない^{5),6)}。なお、10°Cという低温下で *Microcystis* が異常発生しないことは、そ

の μ が低いことから明らかであろう。

Microcystis と *Synedra* の場合、20°C では低照度で *Synedra* が、また高照度では *Microcystis* の μ が高くなる。したがって、植物プランクトン濃度が高ければ *Microcystis* が優占になりやすいと言えよう。しかし、Fig. 12 に示したように *Synedra* は沈降しやすく、表層攪拌系では結果的に *Microcystis* が優占になった。本来ならば *Microcystis* の増殖に引き続いて *Synedra* に置き換わる可能性も考えられるが（水中照度低下のため）、沈降速度に関する定量的解析を行い得なかった現時点では判断を下しにくい。ただし、30°C の場合には、Fig. 4 に示したように常に *Microcystis* の μ が *Synedra* のそれを上回るため、夏季の高温時にはやはり *Microcystis* が優占になりやすいと考えられる。

3.5 *Microcystis* の発生防止対策

本研究では、栄養塩濃度は植物プランクトン増殖の制限にならない条件で培養を行った。これは、①栄養塩濃度の低減化対策は必ずしも容易ではないこと、②栄養塩濃度を下げれば異常発生を防止できることは自明であること、による。ここでは代替案として湖水をばっ気、攪拌等によって人為的に混合する方法を検討を加えた。事実、湖水の人為的循環はわが国各地のダム湖、湖沼で導入されており、藻類濃度の減少に有効であることが経験的に知られている¹¹⁾。

本研究の結果によれば、*Chlamydomonas* との競争においては、攪拌することによって *Microcystis* への遷移が遅れることが示された。その理由は本研究の範囲内では不明である。一方、*Synedra* との競争においては、混合することによって *Synedra* の沈降を防止し、ひいては *Microcystis* への遷移が起こらないことを示した(20°C)。水温が30°C になった場合の検討は行えなかったが、*Synedra* が存在すればするほど水中照度の減衰が大きく、両者の μ の差が少なくなる (Fig. 4 参照) ため、*Microcystis* への遷移は遅れるものと推定できる。ここで検討した競争種は *Synedra* および *Chlamydomonas* のみではあるが、両者ともに *Microcystis* に先立って発生しやすい種である。したがって湖水の人為的循環は少なくとも *Microcystis* の異常発生を遅延するのに有効であると考えられる。

4. おわりに

Microcystis の異常発生機構を明らかにするため、*Microcystis* 自身および *Microcystis* の異常発生に先立って発生する植物プランクトン2種を対照種に選り、その増殖特性に動力学的な検討を加えると共に、環境の人為的制御が容易な室内設置型マイクロコズム(大型藻類培養装置)を用いて植物プランクトンの2者

混合培養を行い、*Microcystis* の異常発生シミュレーション実験を行った。さらに、マイクロコズムにおけるばっ気実験を通じてその発生防止対策を実証する試みを行った。本研究から得られた成果をまとめると次の通りである。

1) *Microcystis* と *Chlamydomonas* とをその μ で比較した場合、10°C では *Chlamydomonas* が大であった。しかし、20°C、30°C では低照度下では *Microcystis* の μ が、また高照度下では *Chlamydomonas* の μ が大きかった。このため、水中での全植物プランクトン濃度が高かったり、またシルトの流入や底泥の巻き上がり等によって水中照度の鉛直方向の減衰が著しい場合、水柱のほとんどの部分が低照度になり、結果として *Microcystis* の μ が相対的に大きくなることにより最終的な優占種になりやすい、すなわち異常発生に至りやすいと推定された。なお、10°C という低温下では *Microcystis* の μ が小さく、異常発生に至らないと考えられた。

2) *Microcystis* と *Synedra* の場合、20°C では低照度で *Synedra* が、また高照度では *Microcystis* の μ が高かった。したがって、植物プランクトン濃度が高ければ *Microcystis* が優占になりやすいと言えよう。しかし、*Synedra* は沈降しやすく、表層攪拌系では結果的に *Microcystis* が優占になった。30°C の場合には、*Microcystis* の μ がいずれの照度でも *Synedra* のそれを上回るため、夏季の高温時にはやはり *Microcystis* が優占になりやすいと考えられた。

3) *Microcystis* と *Chlamydomonas* との競争においては、攪拌することによって *Microcystis* への遷移が遅れることが示された。一方、*Synedra* との競争においては、混合することによって *Synedra* の沈降を防止し、ひいては *Microcystis* への遷移が起こらないことを示した(20°C)。水温が30°C になった場合は直接検討しなかったが、*Synedra* が存在すればするほど水中照度の減衰が大きく、両者の μ の差が少なくなるため、*Microcystis* への遷移は遅れるものと推定された。したがって湖水のばっ気、もしくは人為的循環は、少なくとも *Microcystis* の異常発生を遅延するのに有効であると考えられた。

謝 辞

本研究に用いたマイクロコズムの運転管理、ならびに培養実験には寺蘭克博氏（現：財団法人九州環境管理センター）の多大なる御協力をいただいた。ここに感謝の意を表します。

（原稿受理 昭和63年3月26日）

引用文献

- 1) 須藤隆一, 桜井敏朗, 森 忠洋, 岡田光正編著 (1983) 富栄養化対策総合資料集——地域特性に応じた施策・技術と実例, 538pp., サイエンスフォーラム, 東京.
- 2) 岡田光正 (1983) 「*Microcystis* による水の華の発生機構の解明とその制御に関する研究」, 東京大学学位論文.
- 3) Aiba, S., Okada, M., Sudo, R., Ogawa, T. and Sekine, T. (1983) Simulation of water bloom in a eutrophic lake. I. Photosynthetic characteristics of *Microcystis aeruginosa*, *Water Res.*, **17**, 869-876.
- 4) Okada, M. and Aiba, S. (1983) Simulation of water bloom in a eutrophic lake. II. Reassessment of buoyancy, gas vacuole and turgor pressure of *Microcystis aeruginosa*. *Water Res.*, **17**, 877-882.
- 5) Okada, M. and Aiba, S. (1983) Simulation of water bloom in a eutrophic lake. III. Modelling the vertical migration and growth of *Microcystis aeruginosa*. *Water Res.*, **17**, 883-893.
- 6) Okada, M. and Aiba, S. (1986) Simulation of water bloom in a eutrophic lake. IV. Modelling the vertical migration in a population of *Microcystis aeruginosa*. *Water Res.*, **20**, 485-490.
- 7) Okada, M. and Sudo, R. (1980) Microcosm system study of algal bloom formation. *Jour. Water Poll. Contr. Fed.*, **52**, 1029-1034.
- 8) 須藤隆一, 田井慎吾, 矢木修身, 岡田光正, 細見正明, 山根敦子 (1981) 「藻類の培養試験法による AGP の測定」 (分担執筆), 国立公害研究所研究報告, 第26号.
- 9) Fogg, G.E. (1975) *Algal Cultures and Phytoplankton Ecology*, 2nd Ed., The Univ. Wisconsin Press, Madison, Wisconsin.
- 10) 岡田光正 (1983) *Microcystis* (藍藻類) による水の華の発生機構とその制御, 微生物生態研究会編「微生物の生態11——変動と制御をめぐる——」, 学会出版センター, 東京.
- 11) 厚生省生活衛生局水道環境部 (1987) 昭和61年度水道水源保全対策調査報告書.

マイクロコズムを用いた水の華の発生機構とその制御に関する研究

岡田 光正* 竹下 俊二** 須藤 隆一**

* 東京農工大学工学部化学工学科 ** 国立公害研究所技術部

〈水質汚濁研究 Vol.11 No.6 (1988) pp.371~380〉

Microcystis の異常発生機構を明らかにするため、*Microcystis* および *Chlamydomonas*, *Synedra* の増殖特性を検討すると共に、マイクロコズムを用いて2者培養を行い、*Microcystis* の異常発生のシミュレーション実験とばっ気による制御実験を行った。*Microcystis* と *Chlamydomonas* とでは、20°C、30°Cでは低照度下では *Microcystis* の μ が、また高照度下では *Chlamydomonas* の μ が大きかった。このため、水中照度の鉛直方向の減衰が著しい場合、*Microcystis* の μ が相対的に大きくなり、異常発生に至りやすいと推定された。*Microcystis* と *Synedra* の場合、30°Cでは *Microcystis* の μ が *Synedra* を上回るため、*Microcystis* が優占になった。またマイクロコズム内の水全体をばっ気することによって *Microcystis* への遷移が遅れたり、優占種にならなかったことから、湖水のばっ気、もしくは人為的循環には、*Microcystis* の異常発生を遅延する効果があると推定された。

水ガラスを含むカオリン懸濁液の硫酸アルミニウムによる凝集処理特性

丸山 俊朗* 宮根 正樹** 平石 博忠**

* 東京水産大学 ** 佐藤工業株式会社

〈水質汚濁研究 Vol.11 No.6 (1988) pp.381~389〉

水ガラス（ケイ酸ソーダ）を含むカオリン懸濁液（水ガラス系薬液注入工事の代表的排水）の硫酸アルミニウムによる処理特性と凝集に及ぼす溶解性または重合シリカの影響を明らかにするため、pHと初期シリカ濃度を変量として重合化とシリカコロイドの荷電量特性を調べた。得られた知見は次のようにまとめられた。

(1)溶解性シリカ (S.SiO_2) $300 \sim 1500 \text{mgSiO}_2 \cdot \text{l}^{-1}$ の最大重合速度は pH 8.5 付近でおこる。(2) S.SiO_2 濃度が高いほど重合化速度は速く、重合する pH 範囲が広い。(3)重合シリカコロイドは pH 9.2~9.5 で最大の負荷電量を示す。(4)水ガラスを含むカオリン懸濁液の凝集 pH は 4.5 と 7.0 の間であり、この間の狭い至適 pH は S.SiO_2 濃度とバンド添加量でさまる。(5)凝集可能 pH では主にモノマーが存在し、重合シリカは凝集に重要な役割を果たしていない。(6) S.SiO_2 の除去はバンド所要量と沈殿物量が多いために難しい。(7)実際の運転は pH 6~6.5 でバンド添加量を調節する方法が適切と考えられる。