

## 湖山池における藻類増殖の制限物質について

## 【水質調査第一科】

南 條 吉 之 ・ 細 井 由 彦\* ・ 城 戸 由 能\*\*  
 矢 木 修 身\*\*\* ・ 稲 葉 一 穂\*\*\*\*

## Limiting Substances of Algal Growth in Lake Koyamaike

Yoshiyuki NANJO, Yoshihiko HOSOI\*, Yoshinobu KIDO\*\*  
 Osami YAGI\*\*\*, Kazuho INABA\*\*\*\*

## Abstract

The formation of water blooms with blue-green algae *Microcystis* spp. has been observed in Lake Koyamaike (Tottori Prefecture) every year, and the changes of the water quality for the worse is of concern. An algal growth potential assay using *Microcystis aeruginosa* isolated from the lake and water quality examination of the lake and four inflowing rivers were carried out in order to determine the mechanism of the heavy algal growth. Both examinations were continued every month from April 1995 until August 1998.

The substance limiting the algal growth was estimated to be chelate compounds. This proved true throughout the year except during the summer. The chelate compounds were found not only in the lake water but also inflowing river water in June. This was attributed to be basal fertilizer which contains molasses used in paddy fields. The algal growth under the elimination of the effects of nitrogen and phosphorus showed good correlation with the copper complexing capacity.

Key Words : *Microcystis aeruginosa*, Limiting Substance, Complexing Capacity, Chelating Substance, DOC

## 1 はじめに

全国各地の富栄養化した湖沼では、アオコの異常増殖により景観の悪化、カビ臭問題<sup>1) 2)</sup>、有害藍藻問題<sup>3)</sup>など環境質の低下をきたしている。全国の湖沼の環境基準達成率は<sup>4)</sup>、1979年度には41.8%であったが、1998年度では40.9%であり、河川(65.0→81.0%)に比べほとんど改善されていないのが現状である。鳥取県の東部にある湖山池においても同様であり、湖沼類型Aに指定され

ているが、CODの年平均値は5～6 mg・l<sup>-1</sup>の間を推移しており、時には8 mg・l<sup>-1</sup>にも達することもある。湖山池の内部生産は1987年度から1996年度の10年間で試算<sup>5)</sup>するとCODで約48%となる。この内部生産の主な原因は、植物プランクトンの異常増殖によってもたらされているものと考えられる。したがって、この異常増殖を抑制することによりCODの年平均値は改善されるものと考えられる。

湖山池では、毎年*Microcystis*属を優占種とする

\* 鳥取大学工学部 〒680-8552 鳥取市湖山南四丁目101

\*\* 京都大学防災研究所 〒704-0012 京都府宇治市五ヶ庄

\*\*\* 東京大学大学院工学系研究科 〒113-8656 東京都文京区本郷7-3-1

\*\*\*\* 国立環境研究所 〒305-0053 つくば市小野川16-2

アオコが形成される<sup>6)</sup>。そこで、本研究では、この*Microcystis*の一種で、湖山池より単藻分離<sup>7)</sup>した*Microcystis aeruginosa*を用いて湖水の制限物質を藻類培養試験<sup>8)</sup>により推定すると共に、その由来について室内実験により検討した。

## 2 湖山池の概要

湖山池は、鳥取県東部に位置し、Table 1に示すように湖面積6.81km<sup>2</sup>、湖容積1,920万m<sup>3</sup>、平均水深2.8m、最大水深6.5m、全窒素0.91mg・l<sup>-1</sup> (1987~96の平均)、全リン0.07mg・l<sup>-1</sup> (1987~96の平均)、滞留日数99日の富栄養化した湖である。湖心上層のCODの推移(10年間)をFig. 1に示した。最大値は34.8mg・l<sup>-1</sup>、最小値は3.0mg・l<sup>-1</sup>、平均値6.46mg・l<sup>-1</sup>である。水門操作により淡水湖化し平均塩化物イオン濃度は190mg・l<sup>-1</sup> (1987~96の湖心上層)で毎年アオコの発生を見ている。

主な流入河川はFig. 2に示すように、長柄川、福井川、三山口川及び枝川である。いずれの河川も稲作農業地帯を流下するが、枝川は、稲作農業地帯に加えて温泉街を流下している。福井川の上流にはゴルフ場がある。流出河川は、湖山川1河川で、下流部に幅32.0mの水門が設置され海水の流入がコントロールされている。Table 2に各河川の諸元を示す<sup>9)</sup>。

Table 1 Characteristics of Lake Koyamaike

Surface area (km <sup>2</sup> )	6.81
Capacity (m <sup>3</sup> )	1.92 × 10 <sup>7</sup>
Mean depth (m)	2.8
Maximum depth (m)	6.5
T-N (mg・l <sup>-1</sup> ) <sup>*</sup>	0.91
T-P (mg・l <sup>-1</sup> ) <sup>*</sup>	0.07
Hydraulic detention time (days)	99
Drainage basin area (km <sup>2</sup> )	38.9
Paddy field area (ha)	508
Population in drainage basin area	21,635

<sup>\*</sup> mean value during 1987 and 1996

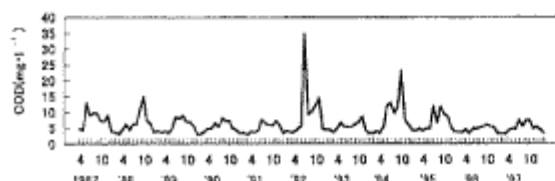


Fig. 1 Monthly changes of COD in Lake Koyamaike

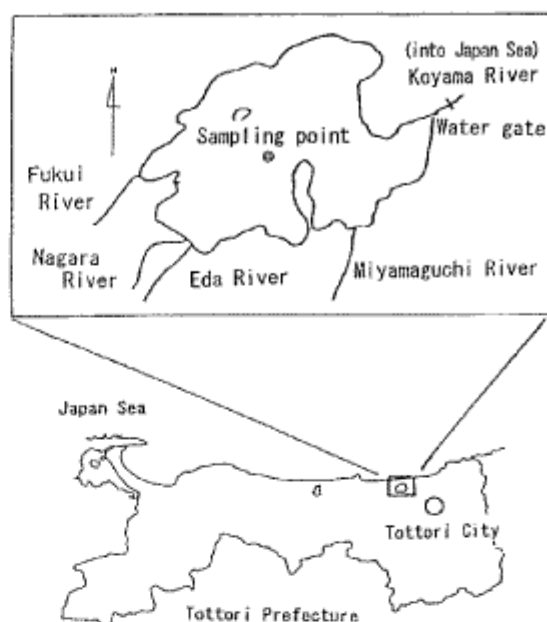


Fig. 2 Location of Lake Koyamaike and influent and effluent rivers

Table 2 Characteristics of influent rivers

River	Length (km)	Drainage basin area (ha)	Amount of the influent water (m <sup>3</sup> ・s <sup>-1</sup> )
Fukui River	4.0	437.22	0.23
Nagara River	8.7	1,391.81	0.43
Eda River	2.3	324.51	0.08
Miyamaguchi River	4.6	374.69	0.15

## 3 実験方法

### 3.1 藻類培養試験

#### 3.1.1 供試藻類

湖山池湖心底泥よりキャピラリーピペット法により分離単藻化した*M. aeruginosa*を使用した。植継ぎにはTable 3に示すM-11培地<sup>10)</sup>を使用し、前培養後実験に供した。

#### 3.1.2 供試水

##### 1) 湖水及び河川水

毎月上旬に湖心上層水を、中旬に河川水(河口より200~400m上流)を採取し、持ち帰り後What man GF/Fでろ過した。そのろ過水に3.1.3で示す栄養物質N, P, E, Feを用いて16種類の供試水を作成した。

##### 2) 模擬水田水

鳥取県農業試験場で除草剤を使用していない水田の土壌を採取し、その土壌500gを5lのポリエ

チレン容器に入れ模擬水田を作成した。そこに湖山池流入河川の中で最大の長柄川のろ過水(WhatmanGF/F使用)を3l(水深10cmに設定)に加え、元肥化学肥料1.35g(この肥料は反当たり30kg施肥、水田の代かき時の湛水深を10cmと仮定して算出した値)を添加した後、室温で比較的日常のよい実験室内に2日間放置し、その上澄み液を模擬水田水とした。これをWhatmanGF/Fでろ過し、N、P及びN、P、Feを3.1.3で示す濃度に添加し供試水とした。一般に田植えの2日前に施肥、湛水、代かきをし、田植え当日は、落水し、田植え後再度湛水するので、施肥後の模擬水田の放置日数を2日間とした。

### 3) 改変M-11培地

糖蜜の藻類増殖に及ぼす効果を見るために改変M-11培地を用いた。すなわち、M-11培地からFe-citrateとNa<sub>2</sub>EDTAを除いたものに、塩化第二鉄を0.2mg-Fe・l<sup>-1</sup>となるよう添加して作成した。

### 3.1.3 添加物質

#### 1) 栄養物質

藻類増殖の制限物質を調べるため、窒素(N)はNaNO<sub>3</sub> 1.0mg-N・l<sup>-1</sup>、リン(P)はK<sub>2</sub>HPO<sub>4</sub> 0.1mg-P・l<sup>-1</sup>、EDTA(E)はNa<sub>2</sub>EDTA・2H<sub>2</sub>O 1mg・l<sup>-1</sup>、鉄(Fe)はFeCl<sub>3</sub>・6H<sub>2</sub>O 0.2mg-Fe・l<sup>-1</sup>をそれぞれの濃度となるように供試水に添加した。その他の栄養塩は、湖水及び流入河川水において制限とならなかったため添加しなかった。

Tadle 3 M-11 Medium

NaNO <sub>3</sub>	100mg
K <sub>2</sub> HPO <sub>4</sub>	10
MgSO <sub>4</sub> ・7H <sub>2</sub> O	75
CaCl <sub>2</sub> ・2H <sub>2</sub> O	40
Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub>	20
Fe-citrate	6
Na <sub>2</sub> EDTA・2H <sub>2</sub> O	1
Deionized water	1 l
pH	8.0

#### 2) 化学肥料

アオコの増殖に対する化学肥料の影響を見るため、長柄川のろ過水(EDTA制限)を用いて、各化学肥料がそれぞれ5~300mg・l<sup>-1</sup>になるよう添

加した。栄養塩はN、P制限とならないようにNaNO<sub>3</sub> 1.0mg-N・l<sup>-1</sup>、K<sub>2</sub>HPO<sub>4</sub> 0.1mg-P・l<sup>-1</sup>を添加した。化学肥料は、当地方で使用されている7種類の肥料を使用し、(A)~(G)で示した。(A)、(D)、(E)は3成分含有無機質肥料、(F)と(G)は2成分含有無機質肥料、(B)と(C)は1成分含有無機質肥料である。

#### 3) 糖蜜

改変M-11培地に0.06~60mg・l<sup>-1</sup>になるよう添加し、増殖への影響を調べた。

### 3.1.4 培養方法

3.1.2で調製した供試水150mlを300mlの三角フラスコにとり、これに*M.aeruginosa*の前培養液0.15mlを接種し、藻類培養試験器により水温30℃、照度2,000Lx、50rpmで振とう培養した。

### 3.1.5 増殖量の測定及び用語の定義

培養開始後5日目、7日目及び10日目にTOC(Total Organic Carbon)とDOC(Dissolved Organic Carbon)を測定し、その差をPOC(Particulate Organic Carbon)とした。POCの最大値を藻類最大増殖量とした。藻類増殖の制限物質は、無添加と比較し、添加により増殖促進の認められた物質を藻類増殖の第一制限物質とし、さらに他の物質の添加により増殖が促進したものを第二制限物質とした。有意差は1mg・l<sup>-1</sup>以上とした。

湖水及び河川水を用いた藻類培養試験では、N、P、EDTAの3物質を添加することにより高い増殖量が得られるので、N、P同時添加培養時の最大増殖量をEDTA様物質(chelating substance)に由来する藻類増殖量としてAGP(+N、P)とした。これは、N、P以外のEDTA様物質の存在量を示していると考えられる。また、制限物質を表現する場合にはEDTA様物質と記すことにする。糖蜜添加培養実験において、細菌の増殖が懸念されたが白濁、黄変することはなかった。

### 3.2 水質分析法

COD、T-N、T-P、NO<sub>3</sub>-N、NO<sub>2</sub>-N、PO<sub>4</sub>-PはJIS K0102により測定し、TOCは島津製作所製TOC分析計(TOCS000型)を用いて測定した。DOCはWhatmanGF/Fでろ過したろ液のTOC測定によ

り求めた。

### 3.3 錯化容量 (complexing capacity) の測定法

#### 3.3.1 測定方法

銅イオン選択電極 (東亜電波社製イオンメーターIM-1E銅イオン選択電極Cu-125) を用いた滴定法により測定した<sup>11) 12) 13)</sup>。すなわち、湖水をPALL社製ULTIPOR N<sub>66</sub>フィルターでろ過後の溶液100 mlをピーカーにとりpH緩衝剤としてMES (2-Morpholinoethanesulfonic acid mono hydrate) を0.1 g添加後、NaOH水溶液を用いてpHを6.0に調整し、イオン強度調整剤10mlを添加し、0.629mmol・l<sup>-1</sup> Cu(NO<sub>3</sub>)<sub>2</sub> (Cuとして40mg・l<sup>-1</sup>) 水溶液を0.5mlから5 mlの範囲で滴下しそれぞれ10分後の値を読み測定値とした。水温は25±0.1°Cで測定した。電極に光が当たることにより、指示値が不安定となることから、電極部に覆いをして暗条件で測定した。銅イオン選択電極の使用における最適pH範囲は本装置では3～6であり、白井らは4.5～6.0<sup>11)</sup>、箕浦らは4～6.5<sup>12)</sup>と報告しているが、湖水及び河川水を6.0に調整して測定した。

#### 3.3.2 錯化容量の算出方法

自然水中には人為起源のものやプランクトンの代謝産物であるシデロファーなどのような数多くの種類の配位子が存在しており、そのそれぞれの濃度を分別定量することは不可能である。そこで本研究においては箕浦らが以前に報告したScatchardプロットを用いる方法に準拠して解析した<sup>12) 13)</sup>。(この方法は銅イオンを使用して錯化容量を測定するが、銅イオンだけの錯形成能を表すものではない。) 試料溶液中の配位子は銅との錯体の安定度が高いものと低いものの2種類が存在するものとした。

## 4 結果と考察

### 4.1 湖水の藻類培養試験及び化学分析結果

1995年4月から1998年8月までの39回 (1998年3月欠測) 藻類培養試験を実施し、その概要をTable 4に示した。その結果、霞ヶ浦と同様<sup>8) 14) 15)</sup>にほとんどの月 (35回) でEDTAが第一制限物質となった。第一制限とならなかった月は1995年7

月と9月、1996年8月及び1997年8月の夏期の4回であった。この4回の湖水のDOCを見ると約3.1mg・l<sup>-1</sup>以上と高く、AGP (+N, P) も同様に高い値であった。AGP (+N, P) とDOCの推移を見ると相関関係にあることが示唆された。EDTAが第一制限物質とならなかった1995年7月と9月及び1997年8月のAGP (+N, P) が著しく高い値を示した。これは、Tomioakaら<sup>16)</sup>他多数の文献<sup>17-21)</sup>が述べているようにアオコの増殖に阻害を与える金属イオンがEDTA様物質によりマスキングされた結果か、Feがアオコにとって利用可能<sup>22-24)</sup>となったか、或いはその両者と考えられた。

Table 4 Limiting substance of algal growth, complexing capacity, DOC in Lake Koyamaie

Year, Month	First limiting substance	AGP(+N,P) (POCmg・l <sup>-1</sup> )	Complexing capacity (strong ligand) (μmol・l <sup>-1</sup> )	DOC of Lake water (mg・l <sup>-1</sup> )	POC of Lake water (mg・l <sup>-1</sup> )	AGP(+N,P)+POC in lake water	
1995.4	E			1.13	0.84		
	E,N	0.98		1.65	0.79	1.77	
	E	0.79		1.71	1.30	2.05	
	N,P	8.91		3.18	6.15	15.06	
	E,N	1.26		1.99	2.50	3.84	
	N	10.27		3.64	4.39	14.66	
	E,N	0		2.90	3.26	3.26	
	E,N	0.71		2.47	3.56	4.27	
	E	0.84		2.54	1.28	2.12	
	1996.1	E	1.06		1.82	0.51	1.57
		E	0.98		1.87	0.37	1.35
		E	0.84		1.37	0.28	1.12
E		0.51		1.63	0.44	0.95	
E,N		0.70		1.90	1.41	2.11	
E		0.89		1.70	1.45	2.30	
E,N		1.58		2.83	1.32	2.90	
N,P		2.20		3.60	1.70	3.90	
E,N,P		1.22	1.26	2.45	1.64	2.86	
E,N,P		0.98	1.59	1.99	2.60	3.58	
E		0.25		2.20	1.63	2.06	
E,N,P		0.83	1.96	2.11	1.55	2.38	
1997.1	E	0.40	1.06	1.89	0.74	1.14	
	E	0.56	0.66	1.93	0.74	1.30	
	EP	0.42	0.82	1.48	0.50	0.92	
	E,N	0.88	1.04	2.17	1.44	2.32	
	E,N,P	0.20	0.54	2.62	0.66	0.66	
	E	0.64	0.69	2.43	1.58	2.20	
	E,N,P	1.75	1.55	3.84	3.56	5.31	
	N,P	7.93	2.68	4.08	0.21	8.14	
	E,N	0.03	1.96	3.31	4.14	4.97	
	E,N,P	1.24	2.00	2.21	1.94	3.08	
	E	0.52	1.29	1.45	1.57	2.00	
	E	0.34	0.58	1.36	0.91	1.25	
1998.1	EP	1.22	2.80	1.30	1.16	2.36	
	E	0.42	1.80	1.34			
	E	0.33	1.71	1.59			
	E,N,P	0.30	1.50	1.60			
	E,N,P	0	2.82	2.51			
	E,N,P	0.18	2.15	1.76			
	E,N,P	0	1.45	2.10			

(N:nitrogen P:phosphorus E:EDTA)

錯化容量の測定を1996年9月から開始した。いずれの時期のサンプルも2サイトモデルで解析が可能であったが、本研究ではより銅の錯形成に寄与すると思われる安定度の高いもののみを議論の対象とした。なお本研究で得られた安定度定数は、強い配位子で10<sup>5</sup>～10<sup>6</sup>、弱い配位子で10<sup>3</sup>程度であった。1996年9月から1997年12月までの15回 (EDTAが第一制限物質とならなかった1997年8

月は除いた。)のDOCとAGP (+N, P) の関係を Fig. 3 に示した。これよりAGP (+N, P) はDOC と関係の深いことが示唆された。

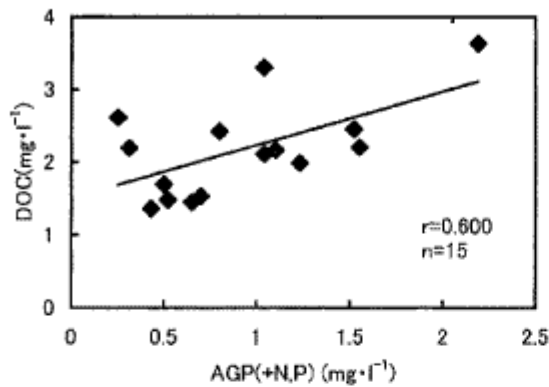


Fig. 3 Relationship between AGP (+N, P) and COD of lake water

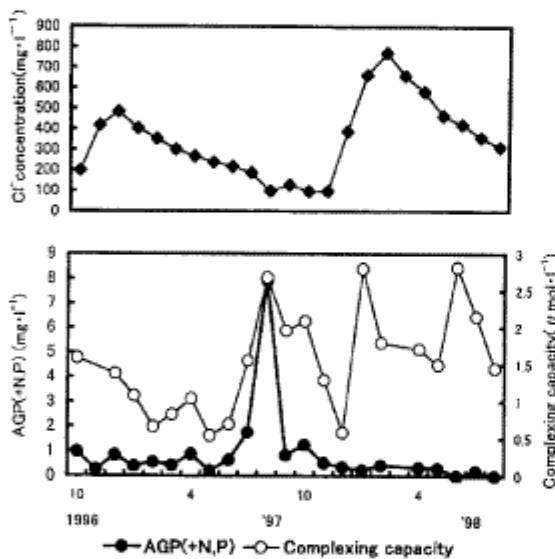


Fig. 4 Monthly changes of AGP (+N, P) and complexing capacity of lake water

Fig. 4 にAGP (+N, P) と錯化容量及び塩化物イオン濃度の推移を示した。1998年1月に湖山川の水門の故障による塩化物イオン濃度の急激な変化が見られた。この時期の錯化容量の値とAGP (+N, P) の値の相関は他の時期に得られた値と比べて明らかに異なる傾向を示している。これは流入した塩化物イオンの影響が考えられることから、これを除き1996年9月～1997年12月まで間のAGP (+N, P) と錯化容量の関係をFig. 5 に示した。その結果、Fig. 3 に比べ、より高い相関が得られた。湖山池においてAGP (+N, P) を推測する場合、

DOCより錯化容量の方が良い結果が得られた。また、錯化容量とDOCの関係について見ると $r=0.761$ と高い相関があり、Inabaら<sup>13)</sup>、小林ら<sup>25)</sup>が述べているように錯化容量はDOCが強く関与していることが示唆された。

#### 4.2 流入河川水の藻類培養試験及び化学分析結果

湖水における藻類増殖の第一制限物質であるEDTA様物質の供給源として可能性の高い流入河川水の藻類培養試験を実施した。1997年4月～1998年1月の10ヶ月間の第一制限物質と錯化容量をTable 5 に、錯化容量、DOC及びAGP (+N, P) の関係をFig. 6 に示した。その結果、各河川の第一制限物質は主にEDTAであるが、6月の各河川、福井川の4月、5月及び枝川の10月はN, P制限であり、その時の錯化容量はおおむね $3.0 \mu \text{mol} \cdot \text{l}^{-1}$ 以上であった。

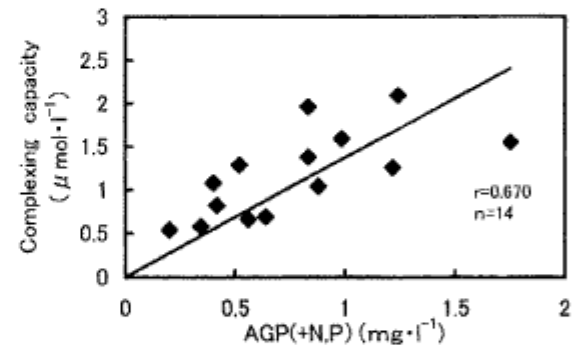


Fig. 5 Relationship between AGP (+N, P) and complexing capacity of lake water

福井川では、錯化容量とAGP (+N, P)、錯化容量とDOC共に高い相関が見られた ( $0.896, 0.759$   $n=10$ )。長柄川においても錯化容量とAGP (+N, P)、錯化容量とDOC共に高い相関が見られた ( $0.836, 0.721$ )。これに対し枝川及び三山口川では、錯化容量とDOCとの間に相関はあるが ( $0.817, 0.693$ )、錯化容量とAGP (+N, P) との間には弱い相関が認められたにすぎなかった ( $0.543, 0.570$ )。これは、DOCと錯化容量の測定が化学的な分析手法によって求められるのに対し、AGP (+N, P) は生物の増殖を用いた手法であり、河川水中に存在する種々の有害物質の影響も有るためと考えられた。

### 4.3 化学肥料及び糖蜜を用いた藻類培養試験結果

Fig. 6 及びTable 5 で示したように6月にはいずれの河川も高い錯化容量を示し、第一制限物質はN, Pであった。したがって、EDTA様物質は豊富

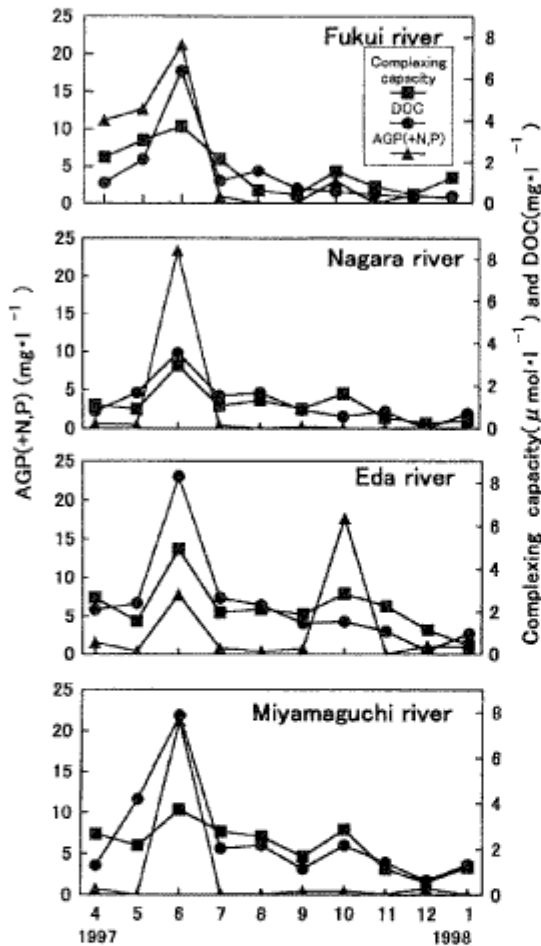


Fig. 6 Monthly changes of complexing capacity, DOC and AGP (+N, P) in each river water

にあったものと考えられる。この時期の河川水の錯化容量が上昇する要因として田植え期に使用される肥料の影響が考えられる。そこで、使用されている化学肥料の藻類増殖への影響試験を実施した。EDTA様物質の供給源を推定するための実験であり、N,P制限とならないために、あらかじめ1.0, 0.1mg·l<sup>-1</sup>添加した。その結果をFig. 7に示す。

Fig. 7 (A-1) は当流域で使用されている市販の元肥化学肥料 (N, P, K 3成分含有無機質肥料) の添加培養実験の結果である。良く増殖し40mg·l<sup>-1</sup>で最高値を示した。これは水田での通常の使用量の13%に相当する。元肥化学肥料には、肥料製造時に飛散防止のため約2%の糖蜜が含まれている。したがって、40mg·l<sup>-1</sup>の元肥化学肥料中には0.8mg·l<sup>-1</sup>の糖蜜が含まれていることとなる。

そこでこの糖蜜に着目してFig. 7 (A-2) に糖蜜を含まない元肥化学肥料の増殖実験結果を示した。その結果、いずれもコントロール以上の増殖は認められなかった。他の化学肥料を添加した場合の結果を(B)~(G)に示した。(C) (G)でわずかに増殖が認められるが顕著な値ではなかった。肥料(B)~(G)には糖蜜が含まれていない。したがって、この元肥化学肥料中に含まれている糖蜜の河川への流出がこの6月の河川水の藻類異常増殖の原因の一つと考えられ、6月の下旬~7月上旬の湖山池のアオコ発生の遠因の一つと示唆された。

銅イオンの毒性に対する糖蜜の効果を検討する

Table 5 Limiting substance and complexing capacity, of rivers

Month	Eda River		Nagara River		Fukui River		Miyamaguchi River	
	Limiting substance	Complexing capacity	Limiting substance	Complexing capacity	Limiting substance	Complexing capacity	Limiting substance	Complexing capacity
1997. 4	E, N, P	2.67	E, N, P	1.10	N, P	2.24	E, N, P	2.67
5	E, N, P	1.56	E, N, P	0.90	N, P	3.06	E, N, P	2.17
6	N, P	4.93	N, P	2.94	N, P	3.73	N, P	3.73
7	—	1.97	E, N, P	1.06	E, N, P	2.16	E	2.78
8	E	2.14	E	1.33	E	0.63	E	2.57
9	E	1.90	E	0.92	E	0.47	E	1.68
10	N, P	2.86	E	1.64	E	1.56	E	2.87
11	E	2.28	E	0.51	E	0.81	E	1.14
12	E	1.15	E	0.25	E	0.44	E	0.56
1998. 1	E	0.43	E	0.37	E	1.26	E	1.23

E:EDTA N:nitrogen P:phosphorus ( ):Complexing capacity(μmol·l<sup>-1</sup>)

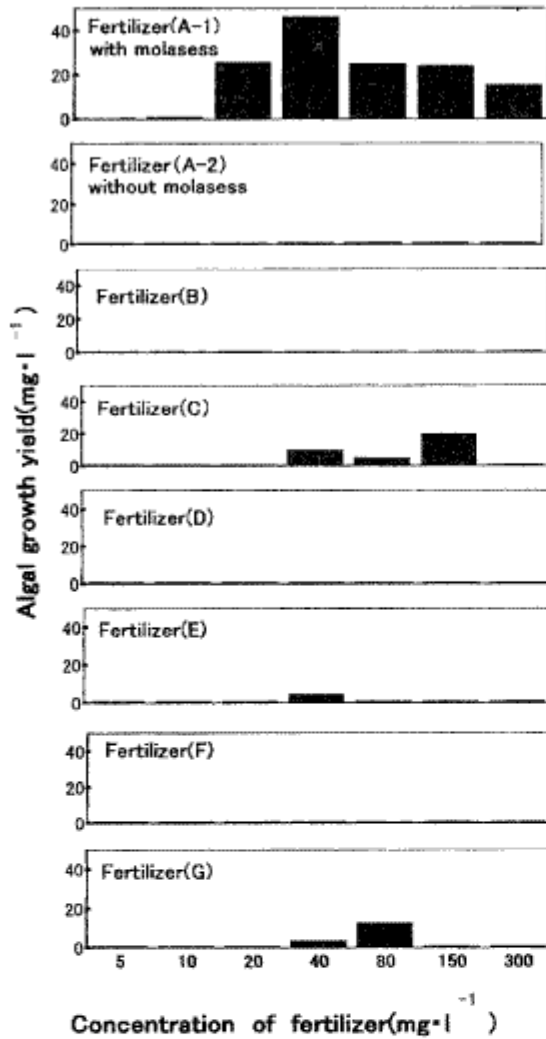


Fig. 7 Relationship between various fertilizers and algal growth

目的でアオコに対する銅の $EC_{50}$  ( $1\sim 2\mu\text{g}\cdot\text{l}^{-1}$ )<sup>16)</sup>よりも高い濃度の銅を添加して培養試験を行った。改変M-11培地を用いて、増殖阻害を引き起こすに十分量の銅  $5\mu\text{g}\cdot\text{l}^{-1}$ を添加し、さらに糖蜜を添

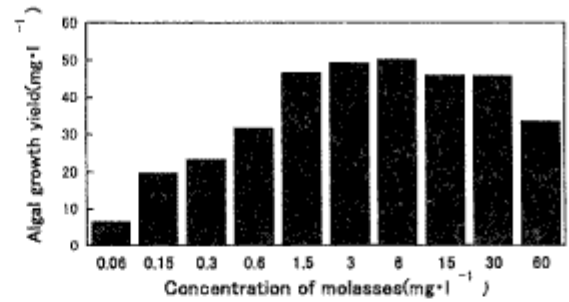


Fig. 8 Effect of molasses concentration on algal growth

加してEDTA様物質効果を調べた結果をFig. 8に示した。糖蜜  $1.5\text{mg}\cdot\text{l}^{-1}$ 以上で良く増殖し、それ以下では暫減し、 $0.06\text{mg}\cdot\text{l}^{-1}$ でわずかな増殖に止まった。Fig. 7 (A-1, A-2)は湖수에N, Pを添加した培養液を使用しておりFig. 8は合成培地の改変M-11培地を使用しているので増殖量を単純に比較はできないが、糖蜜がEDTA様物質と同様の作用をしていることが示唆された。

Table 4にAGP (+N, P)と湖水中のPOCを加えた値を示した。その結果、AGP (+N, P)は1997年6月 $0.64\text{mg}\cdot\text{l}^{-1}$ 、7月 $1.75\text{mg}\cdot\text{l}^{-1}$ 、8月 $7.93\text{mg}\cdot\text{l}^{-1}$ であるが、すでに湖水中に存在するPOC (7月、8月は*Microcystis*が優占種)を加えると6月 $2.20\text{mg}\cdot\text{l}^{-1}$ 、7月 $5.31\text{mg}\cdot\text{l}^{-1}$ 、8月 $8.14\text{mg}\cdot\text{l}^{-1}$ となり流入河川水に含まれていたEDTA様物質が7月の湖수에影響を及ぼしていることが示唆された。1995年及び1996年においても同様の傾向が認められた。

#### 4.4 模擬水田水を用いた藻類培養試験結果

流入河川水を用いた藻類培養試験結果及び元肥化学肥料の影響試験結果を模擬水田実験で確認を

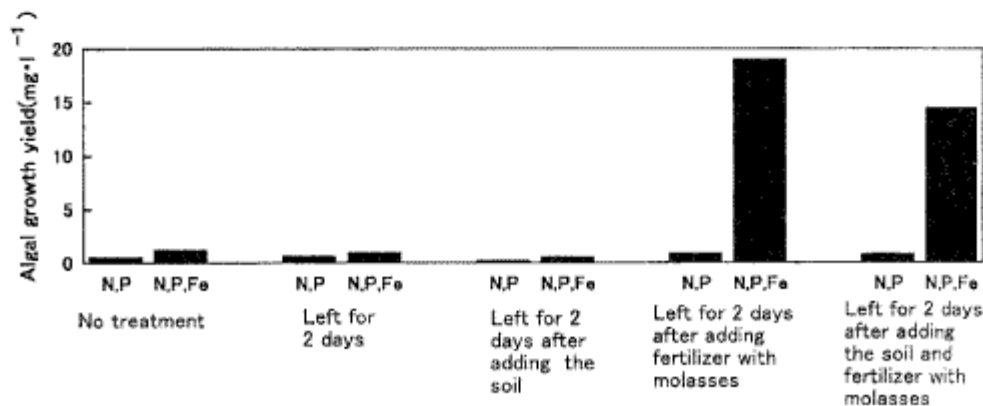


Fig. 9 Effect of fertilizer amended to paddy soil on the algal growth

し、その寄与度を試算した。元肥化学肥料無添加系と添加系の藻類増殖への影響試験結果をFig. 9に示した。元肥化学肥料無添加実験系では、栄養塩としてN, PとN, P, Feを添加して増殖させたもの、次に2日間室温放置後のろ過水に栄養塩を添加したもの、さらに水田の土壌を添加し2日間放置後、上澄み液をろ過し栄養塩を添加し増殖させたものである。

元肥化学肥料添加実験系では、2日間放置の無添加実験系のそれぞれに元肥化学肥料を添加し同様の処理をし増殖させたものである。無添加実験系では、N, P及びN, P, Feを添加しても増殖しなかった。元肥化学肥料添加実験系ではN, P添加で増殖するものと考えられたが、N, P, Fe添加により飛躍的な増殖量を得た。土壌+元肥化学肥料(2日間放置)では増殖量が土壌を加えない培養実験に比べ、少し低い値を示したがこれは栄養塩類等の土壌吸着があったものと考えられた。元肥化学肥料添加と無添加培養液で比較すれば顕著な差が認められた。このことは元肥化学肥料の添加効果であり、この中に含まれている糖蜜がEDTAと同様の働きをしたものと考察された。

Table 6に各模擬水田水の錯化容量を示した。長柄川のろ過水では $0.8 \mu\text{mol}\cdot\text{l}^{-1}$ 、長柄川水+元肥肥料(2日間放置) $15.4 \mu\text{mol}\cdot\text{l}^{-1}$ 、長柄川水+元肥+土壌(2日間放置) $9.1 \mu\text{mol}\cdot\text{l}^{-1}$ であった。湖山池流域内の水田面積508ha、湖山池容積を $1.92 \times 10^7 \text{m}^3$ 、水田の80%で元肥化学肥料を施肥し、田植え前に落水をするものとして湖水に対する元肥化学肥料の濃度を試算すると、 $5080\text{a} \times 30 \text{kg} \times (9.1-0.8) / (15.4-0.8) \times 1000 / (1.92 \times 10^7) \times 0.8 = 3.61 \text{mg}\cdot\text{l}^{-1}$ となり、水田からの排出率を0.8、流入河川長は8.7~2.3kmの小河川であるので流達

率0.9とすると $3.61 \times 0.8 \times 0.9 = 2.60 \text{mg}\cdot\text{l}^{-1}$ で元肥化学肥料添加培養実験(Fig. 7(A-1))と比較すると、影響の出ない範囲ではあるが、河口付近、入り江、あるいは湖水の混合が不均一となった場合にはアオコの形成可能濃度となるものと考えられる。また、湖山池の水温は6月にアオコ増殖可能水温<sup>26) 27)</sup>  $20^\circ\text{C}$ 以上になり、これらの相互補完によりアオコの形成が始まるものと考察された。

## 5 まとめ

- 1) 湖山池の湖水は、夏期の一時期を除いて大半の月はEDTAが第一制限物質であった。
- 2) 湖水中に含まれるAGP(+N, P)は錯化容量及びDOCと高い相関を示した。
- 3) 各流入河川水の制限物質は、田植え時期を除いておおむねEDTAであった。
- 4) 各流入河川水の藻類培養試験の結果、6月の田植え時期の河川水にEDTA様物質が含まれていた。
- 5) 田植え直前に使用される元肥化学肥料の中の糖蜜が藻類の増殖に関与していることから、アオコ発生防止に水田管理が重要であることが示唆された。
- 6) 一般に錯イオン形成能力の高い溶解性有機物(DOC)を削減することによりAGP(+N, P)及び錯化容量を低値に保つことが可能となり、アオコ(*M. aeruginosa*)の増殖を抑制することに繋がるものと考察された。

## 謝辞

この研究を遂行するにあたり肥料及び土壌の提供を頂きました鳥取県農業試験場の伊藤邦夫室長、田中彰研究員に深謝いたします。

## 参考文献

- 1) 八木正一(1989)植物プランクトンによる異臭の実態、用水と廃水、31、859-867。
- 2) 佐藤敦久、真柄泰基(1996)上水道における藻類障害、pp.12-13、技報堂出版、東京。
- 3) 渡辺真利代、原田健一、藤木博太(1994)アオコその出現と毒素、pp.55-68、東京大学出

Table 6 Complexing capacity of fertilizer in laboratory experiments

Sample water	Complexing capacity ( $\mu\text{mol}\cdot\text{l}^{-1}$ )
Nagara river water	0.8
Nagara river water added to fertilizer including molasses (left for 2 days)	15.4
Nagara river water added to soil and fertilizer including molasses (left for 2 days)	9.1



- 版会, 東京.
- 4) 環境庁水質保全局 (1999) 平成10年公共用水域水質測定結果, pp.2-5.
  - 5) 福島武彦, 天野耕二, 村岡浩爾 (1986) 湖沼水質簡易な予測モデル, 水質汚濁研究, 9, 775-785.
  - 6) 安田満夫, 南條吉之, 田中賢之介, 箕 一郎, 坂田裕子 (1989) 湖山池の植物プランクトンと栄養塩類の関係, 鳥取県衛生研究所報, 29, 55-62.
  - 7) 矢木修身, 須藤隆一 (1981) *Microcystis* の純粋分離, 国立公害研究所報告, 25, 7-15.
  - 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) 藻類培養試験法によるAGPの測定, 国立公害研究所報告, 26, 3-14.
  - 9) 鳥取県 (1991) 湖山池水質管理計画, pp.25-27.
  - 10) 矢木修身 (1986) アオコの増殖及び分解に関する研究, 国立公害研究所報告, 92, 9-10.
  - 11) 白井恵次, 岸野拓男, 東俊雄, 進藤靖夫, 丸本卓哉 (1993) 湖沼堆積物中から抽出されたフルボ酸のXAD樹脂吸着による分画と錯化能力, 水環境学会誌, 16, 690-695.
  - 12) 箕浦加穂, 福島和夫 (1988) 銅滴定ーイオン選択電極法による 河川水の錯体形成能力の評価, 地球化学, 22, 47-54.
  - 13) Inaba, K., Seike, T., Tomioka, N. and Yagi, O. (1997) Seasonal and longitudinal changes in copper and iron in surface water of shallow eutrophic lake Kasumigaura, Japan, Water Research, 31 (2), 280-286.
  - 14) 矢木修身, 大久保紀男, 富岡典子, 岡田光正 (1989) 牛久沼における藻類増殖の制限物質, 陸水学雑誌, 50, 2, 139-148.
  - 15) 矢木修身 (1986) アオコの増殖及び分解に関する研究, 国立公害研究所報告, 92, 33-62.
  - 16) Tomioka, N., Inaba, K. and Yagi, O. (1988) The toxicity of copper to microcystis and its reduction by complexing agents, Environ. Sci., 1 (2), 127-134.
  - 17) Moffett, W. J. (1996) Production of strong, extracellular Cu chelators by marine cyanobacteria in response to Cu stress, Limnol. Oceanogr., 41 (3), 388 -395.
  - 18) Shanmukhappa, H. and Neelakantan, K. (1990) Influence of humic acid on toxicity of copper, cadmium and lead to unicellular alga, *Synechocystis aquatilis*, Bull. Environ. Contam. Toxicol., 44, 840-843.
  - 19) Jackson, A. G. and Morgan, J. J. (1978) Trace metalchelator interaction and phytoplankton growth in seawater media: Theoretical analysis and comparison with reported observation, Limnol. Oceanogr., 23, 268-282.
  - 20) Laegreid, M., Alsted, J., Klaveness, D. and Seip, M. H. (1983) Seasonal variation of cadmium toxicity toward the alga *Selenastrum capricornatum* Printz in two lakes with different humus content, Environ. Sci. Technol., 17, 357-361.
  - 21) Pollinger, V., Kaplan, B. and Berman, T. (1995) The impact of iron and chelators on Lake Kinneret phytoplankton, J. Plankton Research, 17, 1977-1992.
  - 22) Lange, W. (1970) Blue-green algae and humic substance, Proc. 13th, Great Lakes Res., 58-70.
  - 23) Lange, W. (1971) Limiting nutrient elements in filtered Lake Erie water, Water Research Pergamon Press, 5, 1031-1048.
  - 24) 今井章雄, 福島武彦, 松重一夫 (1999) 溶存フミン物質の藍藻 *Microcystis aeruginosa* の増殖に及ぼす影響, 水環境学会誌, 22, 555-560.
  - 25) 小林節子, 西村肇 (1988) 富栄養湖の金属錯化容量, 水質汚濁研究, 11, 647-653.
  - 26) 南條吉之, 福田明彦, 矢木修身, 細井由彦 (1998) 汽水湖におけるアオコおよび赤潮発生の制御に関する基礎的研究, 水環境学会誌, 21, 530-535.
  - 27) 生島功 (1987) 水の華の発生機構とその制御, pp.32-46, 東海大学出版会, 東京.