藻類の毒性

近年、河川、湖沼、海洋を問わず閉鎖性の強い水域では、藻類の異常増殖に悩まされているところが多い。こうした現象で最も憂慮される障害として、藻類の毒性による人間や生態系に与える影響がある。この問題は緊急を要する研究課題であるとともに、社会的・行政的にも関心が高い。

そこで本特集では、アオコ、赤潮、貝毒を中心に、藻類の毒性に関する研究の現状と課題について概説していただいた。

(担当編集企画委員 茨城県公害技術センター・山本哲也)

アオコの毒性に関する研究の現状と課題*

渡 辺 信

1. はじめに

富栄養化の進行した湖沼では、夏から秋にかけ藍藻類による水の華が発生し、それが湖表面に青いペンを流した様相を示すことから「アオコ」と呼称されている。アオコは、水が汚れた結果の産物として認識されるだけでなく、前述した独得の様相、特有の臭気および有毒種の存在等が加わって多くの人々に悪い印象と危機感を与えている。特に、有毒アオコの発生はカナダ、ヨーロッパ、米国、ソ連、オーストラリア、イ

ンド、バングラディッシュ、南アフリカ、イスラエル、日本、ニュージーランド、アルゼンチン、チリ、タイ、中国と世界中の国々から報告されている¹⁾。それによる被害はかなり古くより報告されており、1878年 Francis²⁾により雑誌 Nature に掲載された。それによるとオーストラリアのアレキサンドリナ湖にて藍藻 *Nodularia spumigena* が大発生し、それを含む湖水を飲んだ羊、馬、犬および豚が各々1～8時間、8～24時間、4～5時間および3～4時間で死亡したという。その後、類似の事例は数多く報告されており、家畜類にとどまらず野鳥類、魚類および人間にまで被害例が報告されている^{3),4)}。特に人間に対しては、有毒アオコの除去が不十分な浄水場をもつ地域では有毒アオコの毒により住民が胃腸炎や肝臓障害をおこした事例が報告されている^{5)~7)}。また、有毒の糸状藍藻 *Anabaena*, *Aphanizomenon*, *Gloeotrichia*, *Oscillatoria* およびそれらが生産する毒物質に接触することで皮膚炎をおこすことも知られており、その事例は富栄養化の進行した湖沼をレクリエーションの場として利用することが増えるにつれ、増加している⁸⁾。

現在まで、家畜類、魚類および人間に対しての急性

Makoto M. Watanabe

昭和46年 東北大学理学部卒業

52年 北海道大学大学院理学研究
科博士課程修了

53年 国立公害研究所

平成元年 同主任研究官

理学博士

〔趣味〕 野球 相撲観戦

* Recent Knowledge on the Toxic Blue-green Algal Blooms and Problems on its Study, 1989年10月16日受理

毒に関連しているとみなされた藍藻類は12属23種に及ぶ(表1)。このうち、*Anabaena flos-aquae*, *Aphanizomenon flos-aquae*, *Microcystis aeruginosa*, *M. viridis*, *Nodularia spumigena*, *Oscillatoria agardii* については、無菌培養がなされ、毒物質が抽出され、その構造が決定されている(表2)。

わが国では、後述するように、*M. aeruginosa* と *M. viridis* に毒性が確認されているが、それらによる被害事例は報告されていない。しかし、飲料水源あるいはレクリエーションの場として利用されている湖沼に、有毒アオコが発生していることは、否定できない事実である。その事実が、現在水質汚濁研究を行っている我々にどのような問題を提示しているのか、我々の研究グループが得た結果と常日頃議論している内容を紹介しつつ、明らかにしていきたいと思う。

2. *Microcystis* の毒性についての種間差異

わが国で水の華を形成する *Microcystis* には、*M. aeruginosa* f. *aeruginosa*, *M. aeruginosa* f. *flos-aquae*, *M. viridis*, *M. wesenbergii* の3種1変種がある。これら3種1変種の培養株のマウスに対する毒性を調べたところ、*M. viridis* はすべての株に毒性があること、*M. aeruginosa* (二変種含む)は有毒株と無毒株があること、*M. wesenbergii* はすべての株が無毒であることが判明した(表3)⁹⁾。さらに、各湖沼より採取した *Microcystis* のサンプルでは、*M. viridis* が20%以上占めている場合に毒性が確認されたことが報告されている⁹⁾。

3. *Microcystis* の毒

さて、*Microcystis* の毒とはいったいどのような毒なのか。*Microcystis* の毒物質についてはいくつかの報告があるが、その構造があきらかにされたのはごく最近になる。Botes ら^{10),11)}は *M. aeruginosa* の有毒株より5種類の毒物質を分離し、その構造を明らかにしているが、5種類とも共通するところは7個のアミノ酸が環状に配列したポリペプチド(図1)であること、7個のうち5個が共通でD-アラニン、エリトロ-β-メチルアスパラギン酸、Adda, D-イソグルタミン酸、N-メチルデヒドロアラニンからなり、2個のL-アミノ酸が各々異なる。Botes らはこれらの毒物質をシアノギノシン(cyanoginosin, 即ち藍藻 Cyanophyta から Cyano, *M. aeruginosa* から ginosa をとり命名した)と名づけた。また、各々異なる2個のアミノ酸の組成から、シアノギノシン-LA (L-ロイシンとL-アラニン)、-YR (L-チロシンとL-アルギニン)、-YM (L-チロシンとL-メチオニン)、-LR (L-ロイシンとL-アル

表1 有毒あるいはその可能性が示唆されている淡水産藍藻類

1. <i>Anabaena affinis</i>	13. <i>Cylindrospermopsis raciborskii</i>
2. <i>A. circinalis</i>	14. <i>Gloeotrichia pisum</i>
3. <i>A. cylindrica</i>	15. <i>Microcystis aeruginosa</i>
4. <i>A. flos-aquae</i>	16. <i>M. viridis</i>
5. <i>A. Lemmermanni</i>	17. <i>Nodularia spumigena</i>
6. <i>A. spiroides</i>	18. <i>Nostoc ellipsosporum</i>
7. <i>A. torulosa</i>	19. <i>N. rivulare</i>
8. <i>A. variabilis</i>	20. <i>Oscillatoria agardii</i>
9. <i>A. venenosa</i>	21. <i>O. raciborskii</i>
10. <i>Anacystis montana</i>	22. <i>Synechococcus</i> sp.
11. <i>Aphanizomenon flos-aquae</i>	23. <i>Synechocystis</i> sp.
12. <i>Coelosphaerium kutzingianum</i>	

ギニン), -YA (L-チロシンとL-アラニン)と命名した。これらの毒はいずれも、アオコ細胞の中で生産・蓄積され、細胞外にはほとんど放出されないことから、体内毒の範ちゅうに入る。

わが国で代表的な有毒アオコである *M. viridis* についての毒性研究については国立公害研究所と筑波大学の共同研究グループにより推進されている。このグループにより、*M. viridis* の純粋培養および大量培養技術が確立され^{12),13)}、4種類の毒物質が同定された。そのうち3つは前述したシアノギノシン-LA, LR および YR であったが、残りの1つは基本構造は同じで2個のL-アミノ酸はL-アルギニンのみからなっていた。したがって、Botes の命名法に従ってシアノビリディン(Cyanoviridin, 即ち藍藻 Cyanophyta の Cyano, *M. viridis* の viridi) -RR (2個のL-アルギニン)と命名した(図2)¹⁴⁾。シアノビリディンのマウスに対する毒の強さは腹腔内投与で半数致死量(LD₅₀)は約100μg・kg⁻¹であった。

シアノギノシン、シアノビリディンはともに基本的には同じ化学構造の毒物質に名づけられた名称であるが、最近 Carmichael ら¹⁵⁾によってマイクロキスチン(Microcystin)という名前に統一することが提案されている。

4. 有毒 *Microcystis* およびその毒物質マイクロキスチンの動物影響

有毒 *Microcystis* から水抽出液(毒物質を含有)を、マウスに腹腔内投与した時の死にいたるまでの症状および病理学的知見に関する報告は多いが、マウスに純粋化された毒を与えた時の症状および病理に関する報告は、毒の構造決定が最近であったことから比較的少ない。Slatkin ら¹⁶⁾はマイクロキスチン-LR の致死量をマウスに腹腔内投与した結果を報告している。それによると、マウスの検屍結果として肺血栓、血小板減少

表2 淡水産藍藻類の毒

種類, 株名および由来	毒名	構造	半数致死量($\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$) 腹腔内投与, マウス
神経毒			
<i>Anabaena flos-aquae</i> NRC-44-1株(Canada, Saskatchewan)	アナトキシン-A	アミン系アルカロイド (分子量165)	200
NRC-525-17株(Canada, Saskatchewan)	アナトキシン-A(S)	未決定	50
<i>Aphanizomenon flos-aquae</i> NH-1株およびNH-5株(USA, New Hampshire)	アフアントキシン アフアントキシン II	グリン系アルカロイド (分子量315) 同上 分子量299	10 10
肝臓毒			
<i>Anabaena flos-aquae</i> S-23-g-1株(Canada, Saskatchewan)	ミクロキスチン	ヘプタペプチド(分子量994)	50
<i>Microcystis aeruginosa</i> WR-70株(=UV-010株) (South Africa, Transvaal)	シアノギノシン	ヘプタペプチド (分子量909~1044)	50
NRC-1株(=SS-17株)(Canada, Ontario)	ミクロキスチン	ヘプタペプチド(分子量994)	50
7820株(Scotland, Loch Balgaves)	ミクロキスチン	ヘプタペプチド(分子量994)	50
M-228株(Japan, Lake Suwa)	ミクロキスチン	ヘプタペプチド(分子量994, 1044)	50
<i>Microcystis viridis</i> NIES-102株(Japan, Lake Kasumigaura)	シアノビリディン	ヘプタペプチド(分子量1039)	100
<i>Nodularia spumigena</i>	ノデュラリン	ペプタペプチド(分子量824)	30~50
<i>Oscillatoria agardii</i> var. <i>isothrix</i> (Norway, Lake Froylandsvatn)	ミクロキスチン	ヘプタペプチド(分子量1009)	300~500
<i>Oscillatoria agardii</i> (Norway, Lake Kolbotnvatn)	ミクロキスチン	ヘプタペプチド	500~1000

表3 *Microcystis* 3種1変種の培養株の毒性(M. F. Watanabe, et al.⁹⁾より)

種名	株数	有毒株	無毒株
<i>M. aeruginosa</i> f. <i>aeruginosa</i>	10	1	9
<i>M. aeruginosa</i> f. <i>flos-aquae</i>	1	0	1
<i>M. viridis</i>	5	5	0
<i>M. wesenbergii</i>	6	0	6

症および肝臓の充血, 肥大がみられたこと, そして肝臓障害は毒の直接的作用によるものではなく血小板血栓による肺血管閉鎖により起こるものと仮定した。

このような報告を背景に, 国公研研究グループにより, ミクロキスチン-RR が, 1)マウス, 2)ラット肝実質細胞, 3)ラット腹腔 Mast 細胞, 4)ラット95日培養胎仔, 5)多血小板血しょう, 乏血小板血しょう, 6)チャイニーズハムスター肺由来V79細胞, 7)ラット肝癌由来H411EC3細胞および8)ヒト赤血球に投与され, その影響試験がなされた。その結果, マウスでは肝臓の充血・肥大はみられたが, 肺血栓はみられなかった。また, ラット肝実質細胞についてはミクロキスチン $14\mu\text{g}\cdot\text{ml}^{-1}$ で細胞形質膜傷害, $1.4\mu\text{g}\cdot\text{ml}^{-1}$ で粗面小胞体変形現象がみられた。しかし, 他の系では全く影響はみられず, Slatkin らの報告した血小板血しょうの減少もみられない。これらの結果は, ミクロキスチンは肝臓にのみ特有に作用することを示唆してい

Adda: 3-アミノ-9-メトキシ-2, 6, 8-トリメチル-10-フェニルデカ-4, 6-ジエノイック酸

図1 有毒*Microcystis*の毒の基本構造

図2 シアノビリディンの構造

る。同様の報告は国立ガンセンターの藤木らによっても確認されており, 肝細胞は細胞内にミクロキスチンを取りこみ, それによって障害をうけるが, 他の臓器

タマミジンコ

図3 タマミジンコの生長および産仔に及ぼす有毒ミクロキスティスの影響
○クロレラのみを餌料とした場合、●クロレラとミクロキスティスを餌料とした場合、●ミクロキスティスのみを餌料とした場合

の細胞はミクロキスチンを取りこまず、全く障害を受けないことおよびミクロキスチンを細胞内に人工的にマイクロインジェクションした時は肝細胞と類似の障害をうけることを明らかにした(藤木, 私信)。さらに、藤木はミクロキスチンは発ガンプロモーターであることを報告している¹⁷⁾。

以上の知見から *Microcystis* の毒、ミクロキスチン (=シアノギノシン, シアノビリディン) は肝臓に特有の傷害を与えることおよび潜在的に肝ガンの発ガンプロモーターであることが判明してきた。次に、我々が恐れることは、このような性質をもった *Microcystis* の毒が湖沼生態系および浄水処理過程において、どのような動態をしめすのか、そして周辺住民の健康的な生活に全く影響がないのか否かである。これらの問題についての知見は極めて少なく、我々自身が調査していかなければならないことが多かった。したがって、この問題についてのこれからの記述は我々が現在自ら得た知見および情報をもとにしている。

5. 有毒 *Microcystis* の水生生物への影響

有毒アオコ *M. Viridis* が $5 \times 10^5 \text{ cells} \cdot \text{ml}^{-1} \sim 10^7 \text{ cells} \cdot \text{ml}^{-1}$ までの各濃度段階で、11種の水生生物 *Aelosoma hemprichi* (アブラミミズ), *Brachionus calyciflorus* (ツボワムシ), *Philodina roseola* (ワムシ), *Moina macrocopa* (タマミジンコ), *Daphnia magna* (オオミジンコ), *D. similis*, *D. ambigua*, *Ceriodaphnia reticulata*, *Paratyacompressa improvisa* (ヌカエ

表4 有毒 *Microcystis*, *M. viridis* の各種試料およびミクロキスチンのタマミジンコへの毒性 (安野・菅谷¹⁹⁾より)

試料	濃度	死亡個体数/全個体数 (48時間後)
生細胞	$5.0 \times 10^5 \text{ cells} \cdot \text{ml}^{-1}$	30/30
水抽出液	$200.0 \text{ mg} \cdot \text{l}^{-1}$ (乾燥重量に換算)	1/15 (24時間後)
ミクロキスチン	$1.0 \text{ mg} \cdot \text{l}^{-1}$ $2.5 \text{ mg} \cdot \text{l}^{-1}$	20/27 21/21
残渣	$16.0 \times 10^7 \text{ cells} \cdot \text{ml}^{-1}$ $32.0 \times 10^7 \text{ cells} \cdot \text{ml}^{-1}$	5/38 8/40
凍結乾燥	$2.4 \times 10^6 \text{ cells} \cdot \text{ml}^{-1}$ $2.4 \times 10^7 \text{ cells} \cdot \text{ml}^{-1}$	9/40 40/40
凍結および緩慢融解 (-80℃) (5℃)	$2.0 \times 10^6 \text{ cells} \cdot \text{ml}^{-1}$ $4.0 \times 10^6 \text{ cells} \cdot \text{ml}^{-1}$	1/45 15/42
凍結および急速融解 (-80℃) (40℃)	$2.5 \times 10^5 \text{ cells} \cdot \text{ml}^{-1}$ $5.0 \times 10^5 \text{ cells} \cdot \text{ml}^{-1}$	35/40 41/41

表5 ミクロキスティスの有毒株と無毒株を食物源とした場合のワムシとアブラミミズの比増殖速度の比較(稲森²⁰⁾より)

微小動物種	藻類濃度	比増殖速度	
		有毒株投与	無毒株投与
ワムシ	$50 (\text{mg} \cdot \text{l}^{-1})$	0.543	0.473
	$300 (\text{mg} \cdot \text{l}^{-1})$	0.670	0.582
	$800 (\text{mg} \cdot \text{l}^{-1})$	0.691	0.608
アブラミミズ	$50 (\text{mg} \cdot \text{l}^{-1})$	0.276	0.218
	$300 (\text{mg} \cdot \text{l}^{-1})$	0.398	0.302
	$800 (\text{mg} \cdot \text{l}^{-1})$	0.454	0.356

ビ), *Carassius auratus* (キンギョ), *Pseudorasbora parva* (モツゴ) を飼育したところ、有毒アオコに起因した死亡が確認されたのはツボワムシとタマミジンコであった。特に、タマミジンコについては餌として *Chlorella* (クロレラ) や無毒の *Microcystis* を与えた時には正常の生育を示し、産仔も観察された。ところが、有毒の *M. viridis* を与えた時は2~3日までしか生育せず、産仔もなかった(図3)¹⁸⁾。

そこで、タマミジンコについて *M. viridis* の毒性物質精製の際の各段階で毒性を試験した結果、表4に示すように生細胞や凍結-急速融解された *M. viridis* の細胞では $5 \times 10^5 \text{ cells} \cdot \text{ml}^{-1}$ のレベルで、タマミジンコはすべて死亡する。しかし、凍結乾燥細胞や凍結-緩慢融解細胞では $10^7 \text{ cells} \cdot \text{ml}^{-1}$ のレベルでないとすべてのタマミジンコを死亡させるにいたらない。凍結乾燥細胞を破碎し、遠心分離で得られた水抽出液(毒成分を含有)、残渣およびシアノビリディン-RR(ミクロキスチン-RR)でも各々 $200 \text{ mg} \cdot \text{l}^{-1}$ ($4 \times 10^6 \text{ cells} \cdot \text{ml}^{-1}$ に相当)、 $32 \times 10^7 \text{ cells} \cdot \text{ml}^{-1}$ および 1.0 ppm ($2 \times$

図4 タマミジンコ (*M. macrocopa*) をアブラミミズ (*A. hemprichi*), ワムシ (*P. roseola*) と共存させた場合における有毒ミクロキスティス (*M. viridis*) のタマミジンコの生存に及ぼす影響

図5 生物膜処理槽(滞留時間1.5時間)でのミクロキスティンの量の変動

A: 流入水 B: 流出水 HPLC により測定

$10^7 \text{ cells} \cdot \text{mL}^{-1}$ に相当)でも、すべてのタマミジンコを死亡させるにいたらない。これらの結果から、タマミジンコを死亡させる物質はミクロキスティンとは異なり、*M. viridis* 細胞が破碎されるような条件では失活するような性質のものと考えられる。この物質が何であるか、現在分析中である¹⁹⁾。

キンギョは、*M. viridis* を捕食することで死亡することはないが、ミクロキスティン-RRを腹腔内に投与すると死亡する。その24時間後の半数致死量は $2.6 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ で、マウスでの値約 $100 \mu\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ と比べて高く、キンギョはマウスより毒物質に対する感受性が弱いことが判明している(安野, 未発表)。

Microcystis の毒と水生生物の問題を語る時、我々が最も関心のあるところは、*Microcystis* の毒が水生生物に濃縮・蓄積され、その水生生物をとおして人体に影響をうけることがないか否かである。この意味では有毒の *Microcystis* で死亡する水生生物より、死亡しない

表6 生物膜処理反応槽での *M. viridis* の分解(稲森ら, 未発表)

項目	初期濃度	滞留時間(hr.)			
		1.5	3	6	12
Chl. a ($\mu\text{g} \cdot \text{l}^{-1}$)	300.0	105.5	58.7	51.9	23.6
SS ($\text{mg} \cdot \text{l}^{-1}$)	30.0	15.5	11.0	10.0	1.0
TOC ($\text{mg} \cdot \text{l}^{-1}$)		9.5	7.8	7.9	6.1
DOC ($\text{mg} \cdot \text{l}^{-1}$)		4.0	5.0	4.8	4.8
POC ($\text{mg} \cdot \text{l}^{-1}$)		5.5	2.8	3.1	1.3
pH		7.11	7.21	7.08	6.95
濁度 (degree)		5.5	4.6	4.8	4.8

表7 生物膜処理槽でのミクロキスティンの分解(稲森ら, 未発表)

	滞留時間 (hrs.)	ミクロキスティンの濃度 ($\mu\text{g} \cdot \text{l}^{-1}$)	除去率(%)
流入液		11.22	
流出液	1.5	1.40	82.3
	3.0	1.19	89.4
	6.0	0	100.0
	12.0	2.46	78.1
	24.0	1.98	82.3

水生生物の方が問題であるといえる。この生物濃縮に関しては、現時点では報告はない。しかし、定かではないがフィンランドのある湖沼中の貝より高濃度のミクロキスティンが検出されたとの情報は存在する(Carmichael, 私信)。現在、ミクロキスティンの化学構造は判明しており、その微量分析技術も確立することができている。開発された分析技術を使うことにより、この問題は近い将来に解明されていくことは間違いない。

6. 浄水処理過程での *Microcystis* とその毒の挙動

一般の浄水処理過程は、原水→前塩素処理→凝集沈殿処理→砂ろ過処理→活性炭処理→後塩素処理となっているが、霞ヶ浦の浄水場では原水を前塩素処理する前に生物膜処理を行っている。生物膜処理反応槽によく出現するのがワムシ (*Philodina roseola*) とアブラミミズ (*Aelosoma hemprichi*) である。これら2種は *M. viridis* を餌として投与した場合でも、無毒の *Microcystis* を餌とした場合と同様によく増殖する(表5)²⁰⁾。またタマミジンコをワムシ、アブラミミズと共存させ、有毒の *M. viridis* を餌として与えた場合、タマミジンコは少なくとも5日目まで50~75%は生存する(図4)²⁰⁾。この結果から、ワムシやアブラミミズは、*M. viridis* をかなり分解していると考えられる。

稲森ら²¹⁾は、ワムシ、アブラミミズが定着した生物反応槽に *M. viridis* をクロロフィル-a 量で $300 \mu\text{g} \cdot \text{l}^{-1}$ 、SSで $30 \text{ mg} \cdot \text{l}^{-1}$ となるよう添加し、滞留時間を変動さ

せて流出水の水質を調べたところ、表6に示したようにクロロフィルa量もSSも1.5HRT（滞留時間）で各々 $105.5\mu\text{g}\cdot\text{l}^{-1}$ 、 $15.5\text{mg}\cdot\text{l}^{-1}$ と1/3および1/2に減り、12HRTでは $23.6\mu\text{g}\cdot\text{l}^{-1}$ 、 $1.0\text{mg}\cdot\text{l}^{-1}$ と1/10以下および1/30に減った。これは、かなり *M. viridis* がワムシ、アブラミミズにより分解されたことを示している。さらに、シアノビリディン-RR（ミクロキスチン-RR）を $11.22\mu\text{g}\cdot\text{l}^{-1}$ となるよう生物反応槽に添加したところ、1.5HRTですでに80%以上分解されていることが判明した（表7）。このことは、毒物質の粗抽出液を添加しても同様に、図5に示すようにほとんどの毒物質は分解されている（稲森、未発表）。

M. viridis の毒性が塩素処理でどのようになるかは、毒物質の粗抽出液即ち *M. viridis* の水抽出液を使って調べられた。塩素処理を全く施していない水抽出液をマウスに腹腔内投与すると、マウスに毒性を示し、*M. viridis* の乾燥重量に換算してその毒性を半数

致死量（ LD_{50} ）で見積もると、 $45\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ となる。しかし、その水抽出液を残留塩素が1ppmとなるよう塩素処理した後にマウスに腹腔内投与すると、毒性は著しく減退し、半数致死量（ LD_{50} ）は $530\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ と10倍以上、即ち毒性は1/10以下に減少した（稲森、未発表）。

以上の結果から判断すると、*Microcystis* およびその毒物質は、浄水処理過程の初期の段階である生物膜処理、前塩素処理でほとんど分解されてしまうと考えられる。この結果と、*Microcystis* の細胞は浄水処理過程で99%以上トラップされることを考えあわせると、たとえ原水に有毒の *Microcystis* が通常のオーダーで（ $10^6\text{cells}\cdot\text{ml}^{-1}$ ）大発生したとしても、水道水が *Microcystis* の毒で汚染される可能性は極めて少ないと言えよう。

7. 安全性について

M. viridis のマウスに対する毒の強さは、この種の乾燥重量に換算すると、経口投与で LD_{50} は約 $200\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ であった。わが国で、*Microcystis* が大発生した時の濃度は多い時で $1\times 10^6\text{cells}\cdot\text{ml}^{-1}$ である。仮に湖水に *M. viridis* のみが大発生したとしよう。*M. viridis* が $1\times 10^6\text{cells}\cdot\text{ml}^{-1}$ の乾燥重量は $50\mu\text{g}\cdot\text{ml}^{-1}$ である。マウスと人間の毒に対する感受性を同じと仮定すると、50kgの人間の半数が致死する湖水の量は、200lと計算される。現実的には、このような大量の湖水を飲むことは不可能であるし、間違っても湖水に落ち100ml程度の湖水を飲んだとしても死亡することはないと考えられる。さらに、前述したように飲料水に関しては、浄水処理過程で原水より *Microcystis* の細胞のほとんどが除去されること、生物膜処理や塩素処理で毒物質が分解されること等を考慮すると、現時点では *Microcystis* の毒に対する飲料水の安全性は十分確保されていると判断できる。

ただし、この考察はあくまで *Microcystis* が $1\times 10^6\text{cells}\cdot\text{ml}^{-1}$ のオーダーで大発生しているにとどまっている場合のみあてはまる。もし、湖沼の富栄養化が進行し、 10^7 あるいは $10^8\text{cells}\cdot\text{ml}^{-1}$ と *Microcystis* が増加してきた場合にさきほどの50kgの人間の半数を死亡させる湖水の量は20lあるいは2lと、かなり現実的な数値になってくる。我々の経験からこのような突発的な *Microcystis* の増加は徐々に起こるよりもむしろ突発的に起こる場合の方が多い。重要なことは、現在安全であると考えられたとしても、このままでは近い将来、危険性に転ずることを十分考慮し、湖沼の富栄養化を防止する抜本的対策を講じることである。

図6 1982～1985年における霞ヶ浦でのミクロキスティスの種の変動

8. 湖沼における有毒 *Microcystis* の発生機構について

Takamura & Watanabe²¹⁾は1982~1985年の霞ヶ浦での *Microcystis* 3種1変種の動態を調査した。その結果、*M. viridis* は *Microcystis* の発生中期~後期にかけ増加する傾向が認められ、特に1982年と1984年には大発生していた(図6)。*M. viridis* がなぜにこのような挙動を示すのかまだ定かではないが、*M. aeruginosa* と比べ、低照度、低水温を好むことが培養実験で示されている。*M. aeruginosa*, *M. viridis*, *M. wesenbergii* の3種についての詳細な増殖特性の比較や環境因子、気象因子もからめた *Microcystis* 3種の湖沼での動態についての野外調査の徹底が必要とされる。

9. おわりに

これまで、有毒の *Microcystis* の毒物質と急性影響を中心に記述してきた。しかし、慢性影響、遺伝影響についてはほとんど手つかずの状態にある。このような研究には大量の *Microcystis* や毒物質が必要となるため、基礎となる *Microcystis* の大量培養や毒物質の抽出作業が要請に迫りついていかないのが現状である。大量培養や毒物質抽出の自動化の研究や毒物質の合成に関する研究等基盤的研究の進展が待たれる。

文 献

- 1) Carmichael, W.W., Mahmood, N.A., and Hyde, E.G. (1989) Cellular mechanisms of action for freshwater Cyanobacteria (blue-green algae) toxins, In ACS symposium series "Cellular and molecular mode of action of selected microbial toxins in foods and feeds" in press.
- 2) Francis, G. (1878) Poisonous Australian lake, *Nature (London)* 18, 11-12.
- 3) Schwimmer, M. and Schwimmer, D. (1968) Medical aspects of Phycology, In: D.F. Jackson (ed.) *Algal, Man and the Environment*, Syracuse University Press, New York, p.279-358.
- 4) Gorham, P.R. and Carmichael, W.W. (1988) Hazards of freshwater blue-greens (Cyanobacteria) In: C.A. Lembi (ed.) *Algae and Human Affairs*, Cambridge Univ. Press, 404-431.
- 5) Tisdale, E.S. (1931) Epidemic of intestinal disorders in Charleston, W.Va., occurring simultaneously with unprecedented water supply conditions, *Am. J. Public Health*, 21, 198.
- 6) Dillenberg, H.O. and Dehnell, M.K. (1960) Toxic waterbloom in Saskatchewan, 1959. *Can. Med. Assoc. J.*, 83, 1151.
- 7) Hawkins, P.R., Runnegar, M.T.C., Jackson, A.R.B. and Falconer, I.R. (1985) Severe hepatotoxicity caused by the tropical cyanobacterium (blue-green alga) *Cylindrospermopsis raciborskii* (Woloszynska) Seenaya and Subba Raju isolated from a domestic water supply reservoir, *Appl. Environ. Microbiol.*, 50 (5), 1292-1295.
- 8) Billings, W.H. (1981) Water-associated human illness in northeast Pennsylvania and its suspected association with blue-green algae blooms, In: W.W. Carmichael (ed.) *The Water Environment: Algal Toxins and Health*, Plenum Press, New York, 243-255.
- 9) Watanabe, M.F., Oishi, S., Watanabe, Y. and Watanabe, M. (1986) Strong probability of lethal toxicity in the blue-green alga *Microcystis viridis* Lemmermann, *J. Phycol.*, 22(4), 552-556.
- 10) Botes, D.P., Tuinman, A.A., Wessels, P.L., Viljoen, C.C., Kruger, H., Williams, D.H., Santikarn, S., Smith, R.J., and Hammond, S.J. (1984) The structure of cyanoginosin-LA, a cyclic heptapeptide toxin from the cyanobacterium *Microcystis aeruginosa*, *J. Chem. Soc. Perkin. Trans.*, 1, 2311-2318.
- 11) Botes, D.P. (1986) Cyanoginosins—isolation and structure, In: P.S. Steyn and R. Vleggaar (eds.) *Mycotoxins and Phycofoxins, Bioactive Molecules*, V.I. Elsevier, Amsterdam, 161-167.
- 12) Watanabe, M.M., Suda, S., Kasai, F., and Sawaguchi, T. (1985) Axenic cultures of the three species of *Microcystis* (Cyanophyta=Cyanobacteria), *Bull. JFCC*, 1, 57-63.
- 13) 渡辺 信(1987)毒性物質を生産する藻類について、国立公害研究所研究発表会予稿集, 9~15.
- 14) Kusumi, T., Ooi, T., Watanabe, M.M., Takahashi, H., and Kakisawa, H. (1987) Cyanoviridin RR, a toxin from the cyanobacterium (blue-green alga) *Microcystis viridis*, *Tetrahedron Letters*, 28(40), 4695-4698.
- 15) Carmichael, W.W., Beasley, V., Bunner, D., Eloff, J., Falconer, I., Gorham, P., Harada, K., Yu, M., Krishnamurthy, T., Moore, R.E., Rinehart, K., Runnegar, M., Skulberg, O., and Watanabe, M.F. (1988) Naming of cyclic heptapeptide toxins of cyanobacteria (blue-green alga), *Toxicon*, Letter to the Editor, 26, 971-973.
- 16) Slatkin, D.N., Stoner, R.D., Adams, W.H., Kycia, J.H., and Siegelman, H.W. (1983) Atypical pulmonary thrombosis caused by a toxic Cyanobacterial peptide, *Science*, 220, 1383-1385.
- 17) 吉沢滋, 藤木博太, 村主浩子, 菅沼雅美, 佐々寿浩, 渡辺眞利代, 松島理英, 原田憲一(1988)アオコに含まれる Cyanoginosin と Okadaic acid 結合因子との相互作用, *生化学*, 60 (8), 755.
- 18) Hanazato, M., and Yasuno, M. (1984) Growth, reproduction and assimilation of *Moina macrocopa* fed on *Microcystis* and/or *Chlorella*, *Jap. J. Ecol.*, 34, 195-202.
- 19) 安野正文, 菅谷芳雄(1988)ワムシ, ミジンコなどのアオコ有毒株にたいする感受性の相違, 日本陸水学会第53回大会講演要旨集: 31.
- 20) 稲森悠平, 須藤隆一, 松本太, 戸張邦夫(1987)微小動物の生存, 増殖に及ぼす有害藻類 *Microcystis* の影響, 第21回水質汚濁学会講演集, 247-248.
- 21) Takamura, N., and Watanabe, M.M. (1987) Seasonal changes in the biomass of four species of *Microcystis* in lake Kasumigaura, *Jpn. J. Limnology*, 48, Special Issue: S139-S144.