

富栄養化した湖沼でみられるアオコ問題について

田中義人*

1. はじめに

「富栄養化」や「アオコ」という水質問題は、以前から重要な問題とされ、様々な研究や対策が行われてきた。しかし、未だ各地で問題となっているなかで、近年は、地球温暖化や水資源の枯渇などの湖沼を取り巻く状況も大きく変化している。本稿では古くからの問題であると共に、未来の問題としても懸念される「湖沼の富栄養化とアオコ」問題を取り上げ、その概要と筆者らの取り組みの一部を紹介させていただく。

2. まず、アオコとは？

富栄養化がすすんだ池や湖沼では、水面に緑のペンキを撒いたような現象がみられることがある。一般に「水の華」や「アオコ」といわれる現象である。この「水の華」と「アオコ」は漠然と同じような使われ方をするが、必ずしも同意とされていない。「水の華」は浮遊性の藻類等が著しく繁殖し、一斉に水面の色を変える現象をいう¹⁾。この水の華を形成する藻類には多くの種類が知られており、その種類によって、水面の色は異なる。例えば、藍藻類による水の華は緑或いは緑がかった青になり、珪藻によるものは褐色となる場合が多い。一方、「アオコ」はその昔、「青粉」という漢字をあてていたように、水面が青色或いは緑色になる現象である。主に藍藻類が原因となるが、まれに、緑藻類やミドリムシ藻類が原因となる場合もある。つまり、水の華のうち、水面を青もしくは緑にするものがアオコということになる。

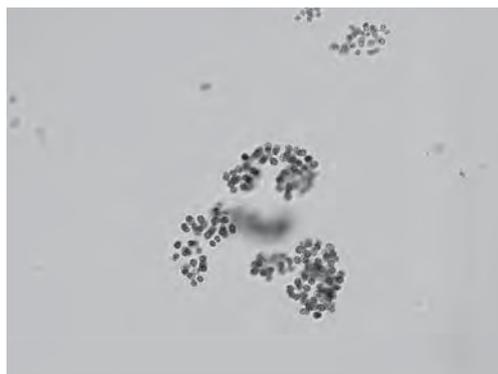


図1 アオコを形成する藍藻類 (*Microcystis* 属)



図2 アオコを形成する藍藻類 (*Microcystis* 属、墨汁を添加して撮影)

日本においてアオコを形成する藍藻は 15 属 55 種とされ²⁾、細胞内にはっきりとした核を持たない原核生物のシアノバクテリアに分類される。藍藻の特徴のひとつは光合成を行うための色素が細胞全体に散らばっていることである³⁾。このため、藍藻が大発生すると一面緑のアオコが発生することになる。

日本でみられる藍藻の分類表を表 1 に示す。藍藻の形態は比較的単純であるが、その細胞の形や大きさによって分類される。また、細胞の集まり方も、固まりのような群体になるものや、一列に糸状

* 福岡県保健環境研究所 環境科学部 水質課 専門研究員

の群体をつくるものなどがあり、分類の重要な要素となる。さらに、糸状の群体をつくるものには、栄養細胞（トリコーム）の並びの中に特徴的な無色の異質細胞や休眠孢子（アキネート）をつくるものも

ある。我が国の湖や池などでよくみられるアオコが *Microcystis*（ミクロキスティス）属である（図1）。*Microcystis* 属の分類表を表2に示す。*Microcystis* 属の細胞はおおよそ 1 μm ~ 5 μm の球形で多数の細胞

表1 国内でアオコを形成する藍藻類の分類

目	特徴		属
<i>Chroococcales</i>	群体は不定形，立方体状或いは球形，細胞は球形		<i>Microcystis</i>
単細胞性，粘質多糖類を分泌して群体を形成	群体は亜球形，細胞は楕円形		<i>Woronichinia</i>
<i>Oscillatoriales</i>	トリコームは真っ直ぐで単独，ガス胞が粒状で規則的に3個		<i>Oscillatoria</i>
	トリコームは真っ直ぐで単独，ガス胞が不規則に分散		<i>Planktonthrix</i>
	トリコームは先端で細くなり，曲がる		<i>Planktothricoides</i>
	トリコームは規則的に螺旋形		<i>Arthrospira</i>
	トリコームは束で浮遊		<i>Tricodesmium</i>
糸状性，異質細胞とアキネート（耐久孢子）を形成しない	アキネートをつくる。異質細胞をつくらない。		<i>Raphidiopsis</i>
<i>Nostocales</i>	トリコームの末端の細胞が異質細胞		<i>Cylindrospermopsis</i>
	異質細胞が二個		<i>Anabaenopsis</i>
	トリコームは基部と先端部に分化しない。アキネートと異質細胞をつくる。		<i>Aphanizomenon</i>
	異質細胞が一個。トリコーム先端部の細胞はガス胞を失う。		<i>Nodularia</i>
	異質細胞が一個。トリコーム先端部の細胞はガス胞を持つ。細胞の長さが直径の1/2以下。		<i>Anabaena</i>
	異質細胞が一個。トリコーム先端部の細胞はガス胞を持つ。細胞の長さが直径の1/2以下。		<i>Gloeotrichia</i>
糸状性，真分枝を形成しない。異質細胞とアキネートのいずれか或いは両方を形成	トリコームは基部と先端に分化し，放射状に集合		<i>Umezakia</i>
<i>Stigonematales</i>	糸状性，真分枝を形成，異質細胞とアキネートをつくる。		

表2 *Microcystis* 属の分類

属	特徴	種
<i>Microcystis</i>	細胞の直径 4.4~5.5 μm	<i>M. aeruginosa</i>
	細胞が不規則に並ぶ	群体は不定形，多糖類はスポンジ状 <i>M. ichthyoblabe</i>
	細胞の直径 3.0~4.2 μm	群体は数珠状，多糖類は硬い <i>M. novacekii</i>
	細胞の直径 0.8~2.3 μm	<i>M. firma</i>
	細胞が規則的に並ぶ	細胞が立方体状に8個単位，多糖類は硬い <i>M. viridis</i>
	群体は不定形，多糖類は柔らかく外縁は袋状 <i>M. wesenbergii</i>	

が密集しているのが特徴である。その細胞のまわりは多糖類の膜（図2）で覆われており、細胞の並び方などで分類される。

たとえば、*Microcystis viridis* は特徴的に群体が立方体状に規則正しく集合し、その群体を形成する亜群体は8個の細胞からなる。一方、*Microcystis aeruginosa* はしっかりとした多糖類に包まれているが、不定形だったり網状を形成することが多い。他の藻類にはない *Microcystis* 属の特徴は、その細胞内にガス胞を持ち、浸透圧によりそのガス胞を膨らませたり、萎ませたりして垂直運動をすることができることである。*Microcystis* 属はこの運動によって他の藻類に対して優位に光を活用でき、著しく優占度を高くすることができるし、一度優占するとそれが長期間にわたって維持されるため、後述する厄介な問題となっている。

3. 今なぜアオコか？

以前からアオコは、水道水源となる湖沼で大発生した場合、浄水過程におけるろ過障害や水道水におけるカビ臭の原因として知られていた。さらに、景観を損なうばかりか、藍藻の呼吸による水中酸素の消費から酸欠による魚のへい死やその腐敗による悪臭の原因にもなっている。

現在でも、各地の湖沼で同様な問題はおきているが、最近では海外においてより深刻な問題となっている。特に、経済発展に伴い環境破壊が進む中国では大きな社会問題となっている。筆者も、2007年に（財）自治体国際化協会の事業で中国の滇池（でんち）を訪れ、その著しいアオコの実状を知る機会があった。

中国では、最も汚染が深刻な三つの湖沼を「三湖」と呼んで対策を進めている。滇池は太湖（江蘇省）、巢湖（安徽省）と共にその「三湖」に含まれている湖沼である。面積は309km²で琵琶湖の半分程、流域面積は2920km²、12水系29河川が流れ込んでいる大湖沼である。この流域には約332万人（2005年）が生活しており、現在も周辺の開発に伴い人口が急激に増加している。

この滇池はかつて「高原の真珠」と呼ばれるほど

美しい湖であったが、1980年代以降、流域にある昆明市の経済発展に伴い未処理生活排水などが流入し始め、1990年代には農業用水としても使用できない程水質が悪化してしまったという。流入する29河川のうち25河川の化学的酸素要求量（COD）が中国で最も低い環境基準V類（40mg/L）すら達成できない状態となっている（劣V類）。また、全窒素（T-N）は、1河川、全リン（T-P）は10河川しか最低の環境基準V類を達成できていない。また、滇池の水深は5m程度と浅く、水中に十分な光が供給されるため、アオコの発生にとって適した条件となっており、年中アオコの発生に悩まされている。現在、この滇池では日本の各機関も参加してアオコ対策や水質保全対策が進められている。

近年、日本国内でもアオコの問題が再び注目されている。理由の一つに地球温暖化の影響があげられる。たとえば、琵琶湖では、1979年から2004年までの期間、気温の上昇と共に、水温（水深0.5m）の上昇が記録されている⁴⁾。水温が上昇することにより、今までは水温が低いためにアオコが発生していなかった地域でもアオコの発生が懸念される。また、すでに発生していた地域でも、アオコ発生期間の長期化が懸念される。もう一つの理由として、我が国の閉鎖性水域の水質改善が河川と比べて進んでいないことがあげられる。閉鎖性水域水質の改善成果があがらなければ、当然、富栄養化の進行とアオコ発生の懸念は高まることになる。

4. 有毒藍藻類の影響

前節までアオコの一般的な影響や現状について述べてきたが、アオコには、人や家畜の健康に影響を与える側面もある。ここからは有毒藍藻類について述べたい。

4-1) 有毒藍藻類の出現と被害

家畜や動物に毒性を示す藍藻類の存在は古くから知られていたが、その被害がはじめて報告されたのは1878年のオーストラリアにおける動物被害とされている⁵⁾。報告では放牧されていた羊や豚、馬な

どが水飲み場の池でスカム状に浮いていたアオコを摂取し、数時間で死亡した事例が紹介されている。このときの原因は *Nodularia Spumigena* と報告されているが、これ以降、世界各地で同様な有毒藍藻類による被害が報告されている。多くはオーストラリアやアメリカ、イギリスなどで起きた家畜や野生動物に対する被害となっている。原因は *Microcystis aeruginosa* や *Anabaena flos-aquae* の藍藻類であった⁶⁾~⁸⁾。また、ヒトに対する被害も世界各地で報告されている。たとえば、1996年、ブラジルでは透析に用いる水にミクロシスチンが混入し、131名の透析患者の内100名以上に肝臓障害などの症状が現れ、52名が命を落としている⁹⁾。

身近なアオコが有毒であると書くと、よく質問されるのが、アオコはすべて有毒かという疑問である。世界中の3000を超える湖沼を対象にした世界保健機構(WHO)の調査報告¹⁰⁾によると、湖沼で発生したアオコのうち59%が有毒だったとしている。日本では23箇所の湖で調査が行われ、そのうち39%の湖沼で有毒藍藻類が確認されている¹¹⁾。また、一般的に、有毒種として知られる *Microcystis aeruginosa* や *Anabaena flos-aquae* もすべて有毒であるわけではなく有毒の場合と無毒の場合があるとされる¹⁾ ²⁾。

藍藻の分類が細菌の分類のように代謝などの生理学的な判定ではなく、顕微鏡を用いた形態的な同定法によっているためとも考えられるが、近年は藍藻類の遺伝子配列も解明され始めており、遺伝子情報により分類を行うことができるようになれば、近い将来、有毒種と無毒種の新たな分類が可能になるかもしれない¹²⁾。さらに、生息環境によっても、ミクロシスチンの生産量に違いがあると報告されている。

Microcystis 属の増殖が窒素制限の場合、細胞内のミクロシスチン生産量は増殖速度に依存するが、逆にリン制限時には増殖速度が遅いほど細胞内のミクロシスチン生産量は多くなる¹³⁾。

4-2) 有毒藍藻類と毒素

表3に毒素とそれらを生産する有毒藍藻類について示す。これまでに、毒素を生産することが確認さ

れている藍藻類は7属10種とされている¹⁴⁾。毒素についてはいろいろな分類法があるが、構造に基づいて分類すれば環状ペプチドとアルカロイドに分類される。また、標的とする器官によって分類すると大きく神経毒と肝臓毒に分類される。環状ペプチドには *Microcystis* 属や *Anabaena* 属、*Oscillatoria* 属等が生産するミクロシスチンと *Nodularia* 属が生産するノジュラリンが知られており、主に肝臓を標的とする。

また、アルカロイドに分類される毒素には *Anabaena* 属や *Lyngbya* 属が生産するアナトキシン、シリンドロスパーマップシン、サキシトキシンなどが知られている。このうち、アナトキシンとサキシトキシンは神経毒として有名であるが、シリンドロスパーマップシンはミクロシスチンと同様に肝臓を標的の器官とする。この他に、藍藻類は大腸菌やサルモネラ菌と同様なリポポリサッカライドに分類されるエンドトキシンをつくることも知られている。エンドトキシンの場合、体内に入ると炎症を引き起こすなどの毒性を示す。これら毒素の内、世界的に最も検出されているのがミクロシスチンである。

4-3) ミクロシスチンの種類、構造、性状など

前述のようにミクロシスチンは、*Microcystis* 属、*Anabaena* 属、*Oscillatoria* 属が生産する7個のアミノ酸から構成される環状ペプチドで、肝臓を特異的に標的とする毒素である。現在、世界各地で70種類以上のミクロシスチンが報告されている。その基本的な構造を図3に示す。また、代表的なミクロシスチンの組成と毒性を表4に示す。ミクロシスチンは7個のアミノ酸からなるが、その構造には特徴的なアミノ酸を含んでいる。まず、一般的な高等生物では生産しないD型のアミノ酸を含んでいることである。次に、これも一般にはみられないβアミノ酸(β炭素にアミノ基がついたアミノ酸)を含むことも特徴である。この部分はAdda(3-amino-9-methoxy-10-phenyl-2,6,8-trimethyldeca-4,6-dienoic acid)と呼ばれ毒性の発現にも関与しているとされる¹⁵⁾。

この他にも、Mdha(N-メチルデヒドロアラニン)とよばれる変化しやすい部分の存在やミクロシスチ

表3 藍藻類が生産する毒素

毒素の種類	名称	標的器官	生産する藍藻類
環状ペプチド	マイクロシスチン	肝臓	<i>Microcystis</i> , <i>Anabaena</i> , <i>Planktothrix</i> (<i>Oscillatoria</i>), <i>Nostoc</i> , <i>Hapalosiphon</i> , <i>Anabaenopsis</i>
	ノジュラリン	肝臓	<i>Nodularia</i>
アルカロイド	アナトキシン-a	神経シナプス	<i>Anabaena</i> , <i>Aphanizomenon</i> , <i>Planktothrix</i> (<i>Oscillatoria</i>)
	アプリアトキシン	皮膚	<i>Lyngbya</i> , <i>Schizothrix</i> , <i>Planktothrix</i> (<i>Oscillatoria</i>)
	シンドロスポーモプシン	肝臓	<i>Cylindrospermopsis</i> , <i>Aphanizomenon</i> , <i>Umezakia</i>
	リングビアトキシン-a	皮膚、腸管	<i>Lyngbya</i>
	サキシトキシン	神経軸索	<i>Anabaena</i> , <i>Aphanizomenon</i> , <i>Lyngbya</i> , <i>Cylindrospermopsis</i>
リポポリサッカライド	エンドトキシン	暴露された各器官	All

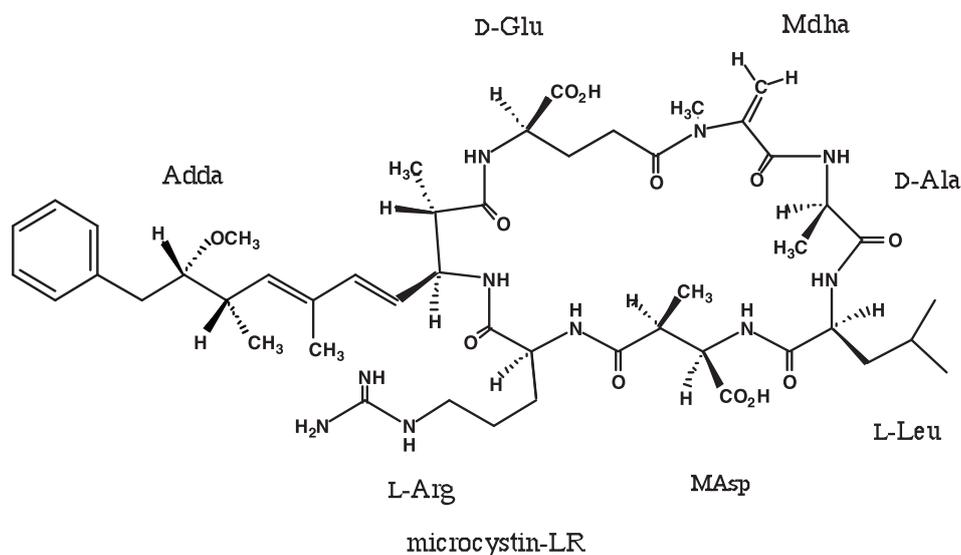


図3 ミクロシスチンの基本構造 (マイクロシスチン-LR)

表4 代表的なマイクロシスチンの毒性

マイクロシスチン名	LD ₅₀ ($\mu\text{g}/\text{kg}$ マウス)
マイクロシスチンLR	50
マイクロシスチンYR	70
マイクロシスチンRR	110

表5 ミクロシスチン分析法

手法の原理	対象	定量法	分析機器等	特徴
物理化学的手法 (機器分析)	個別	HPLC法	HPLC-UV (PDA)	一般的な手法。 毒性の異なるミクロシスチンを 個別に定量できる。 標準試料がすべては入手困難。
			HPLC-MS (MS/MS)	
	総量	MMPB法	HPLC-MS (MS/MS)	ミクロシスチンの総量を 高感度で定量可能。 抽出・前処理が煩雑で 熟練が必要。
GC-MS				
		GSH付加法	TLC, UV-VIS	現場での測定に便利。
生物学的手法	総量		ELISA法	現場での測定に便利。 キットが市販されている。
			PP2A阻害を利用	現場での測定に便利。 PP2A阻害活性のある物質が 他にある場合は誤差を生じる

ン同族体によって変化する2種類のL-アミノ酸の存在などがある。ミクロシスチンはその命名法も独特である。

図3に示すように環状構造をなすアミノ酸のうちD-アラニンの位置を1として、時計回りに番号をつけて表す。2番目と4番目はミクロシスチン同族体によって変化するL-アミノ酸で、ミクロシスチン名の後に2文字ついているのは、このL-アミノ酸の一字表記の記号である。たとえば、ロイシン(L)とアルギニン(R)であれば、ミクロシスチンLRということになる。3番目はD-メチルアスパラギン酸。このメチルアスパラギン酸のメチルがとれる場合もあり、3-デスマチルミクロシスチンとされる。5番目は特徴的なAdda。6番目はD-グルタミン酸で7番目がMdhaとなる。Mdhaのメチル基がとれる場合もあり、7-デスマチルミクロシスチンとされる。

70種以上あるミクロシスチンの毒性はすべて同等というわけではない。ミクロシスチンの毒性発現には前述したAdda部の存在とその立体構造、6番目のグルタミン酸の遊離カルボキシル基が必須とされ、さらに、7番目のMdhaが補助的な役割を果たして

いとされる。表4に示すように、最も急性毒性が高いのはミクロシスチンLRで、マウスに対する半数致死量(LD₅₀)は50μg/kgと報告されている。

この毒性は、同じように天然生物が生産する最強の毒素ボツリヌス毒素(LD₅₀は0.00003μg/kg)や人工産物であるダイオキシシン(LD₅₀は0.6μg/kg)より弱い、青酸ソーダ(NaCNのLD₅₀は10,000μg/kg)よりはるかに強い¹³⁾。とはいえ、アオコを大量に含む水をヒトが口にすることは通常考えづらいことから、ミクロシスチンの毒性を考える上で重要なのは慢性毒性である。ミクロシスチンとノジュラリンはオカダ酸と同様の発ガンプロモーション活性を持つことが報告されている¹⁶⁾。人間の発ガンはイニシエーション(腫瘍細胞の発生)、プロモーション(腫瘍細胞の増殖)、プログレッション(腫瘍細胞の悪性化)及び転移などと分けられる多段階で生じると考えられているが、ミクロシスチンとノジュラリンはプロテインフォスファターゼ1(PP-1)と2A(PP-2A)の活性を阻害することにより発ガンプロモーション活性をもつとされている。このような毒性を示すミクロシスチンに対して、WHOは飲料水中ミクロシ

スチンLRのガイドライン濃度を1.0 µg/Lと設定している。我が国でも水道水質について、水道水質基準項目ではないが要検討項目としてマイクロシスチンLRを指定している。要検討項目とは毒性評価が定まらず、浄水中の存在量などが不明であるため情報を収集する必要がある物質である。ただ、マイクロシスチンは適切な塩素処理によって分解し、活性炭ろ過などの高度処理でも除去されることが確認されているため、水道水への混入の可能性は現在のところ低いと考えられる。

4-4) ミクロシスチンの分析方法

マイクロシスチンの分析方法には種々の方法が報告されている。マイクロシスチン分析における大きな問題はその種類の多さと標準品入手の困難さである。

一般的な化学物質の場合、すべての標準品が準備できることが分析の第一歩であるが、マイクロシスチンの場合、我が国で入手できるのは5種程度にとどまる。そこで、分析手法としては標準品が用意できるものだけでも個別に定量する方法とマイクロシスチンの共通骨格に着目して総量として定量する方法が用いられている。検出方法も機器分析による化学的な手法と抗原抗体反応などを用いた生物学的な手法が用いられている。

分析方法の概要を表5にまとめた¹⁷⁾。まず、最も一般的な方法はHPLCを用いた個別定量法である。検出器としては紫外検出器(UV)及びフォトダイオードアレイ検出器(PDA)や、近年普及し始めて

いる質量分析計(MS) 或いはタンデム質量分析計(MS/MS)を用いる。個別定量は最も一般的な方法であるが、機器が高価である点や標準品を入手できるマイクロシスチンしか定量できない点などが短所となる。ただ、わが国で多く検出されるのは、マイクロシスチンLR, RR および YR とされることから、我々もこの3種を主に調査している。一方、マイクロシスチンの共通骨格Adda部に着目して、総量を定量するMMPB法がある。これはマイクロシスチンを過ヨウ素酸ナトリウムと過マンガン酸カリウムを加えて分解し、Adda部をMMPB(2-methyl-3-methoxy-4-phenylbutyric acid)として測定するものである。

LCで分析を行う場合はそのまま分析を行うが、GCの場合は誘導体化が必要になる。この方法ではすべてのマイクロシスチン標準品は必要ではなく、未知のマイクロシスチンがあっても共通骨格を持っているので検出できる点が長所になる。ただ、抽出と前処理工程が比較的長くなり、分析者によって回収率にばらつきがでるとの指摘もある。次に、グルタチオン(GSH)付加法は7番目のアミノ酸、デヒドロアラニンにGSHを付加し、そのGSHにトリニトロベンゼンスルホン酸を反応させて発色させるものである。高価な分析機器が必要なく、現場での測定も可能な方法である。また、抗原抗体反応を利用したELISA法(Enzyme-Linked Immuno Sorbent Assay)やマイクロシスチンのPP2A阻害を利用した方法など生物学的な原理に基づいた方法もある。特に、ELISA法はキットが市販されており煩雑な操

表6 モニタリング調査結果の一例

地点	全マイクロシスチン量 (mg/L)	BGA (cells/mL)	Chl-a (mg/m ³)
	MMPB法		
ダム湖A	N. D. *) ~ 0.43	---	2.8 ~ 8.4
ダム湖B	N. D. *) ~ 0.34	---	4.5 ~ 7.5
ダム湖C	N. D. *)	180 ~ 1,900	0.5 ~ 63
ため池A	1.1 ~ 4200	5,600 ~ 170,000	11 ~ 940
ため池B	0.55 ~ 3900	3,800 ~ 170,000	3.4 ~ 250

*)N. D. : 0.05mg/L以下

作を必要としないし、簡単に多数の試料水を高感度で短時間に検査できる等の長所があるが、定性能に不安がある。PP2Aの活性阻害を利用した方法は、PP2Aの基質としてパラニトロフェニルリン酸を用い、PP2Aによる基質の加水分解反応をマイクロシスチン類が阻害する効果を基質の分解によって生じる発色の違いによって定量する方法である。この方法は非常に簡便で、安価な方法であると考えられている。

5. 現在の取り組みと今後の課題

5-1 ミクロシスチンについて

現在、我々も福岡県内の湖沼についてマイクロシスチンの調査を行っている。その一例を表6に示す。

分析は、HPLC-MS/MSによる個別定量法とMMPB法で行っているが、対象湖沼では比較的濃度が低いため、MMPBの結果を示す。調査の結果、県内の大規模な湖沼ではマイクロシスチンはほとんど検出されないが、富栄養化し、アオコが日常的にみられるため池では、継続的にマイクロシスチンが検出された。今後、水質の改善が進まず、温暖化の影響が懸念されることからこの調査を継続していかねばならない。

マイクロシスチンは藍藻類が生産する物質であるため環境中での挙動は、一般的な化学物質と異なると考えられる。一般的な化学物質は汚染源から拡散して、その後、物理化学的な分解や微生物等による生分解により減衰していく。一方、マイクロシスチンの汚濁源は藍藻類である。藍藻類は水面を風向などの気象条件や地理的な条件によって移動することができる。また、細胞内にガス胞を持っていることから、垂直方向にも移動する。一般に藍藻類が生育しているとき、マイクロシスチンはその細胞内で保持されて、水中には溶出しないとされている。しかし、その細胞が何らかの条件で破壊されたり、水温の低下等で藍藻が死滅する場合は細胞外に放出される。このため湖沼におけるマイクロシスチンの安全性を評価するには、マイクロシスチンの挙動把握が重要であり、化学物質汚染とは異なる留意が必要になる。そのため我々

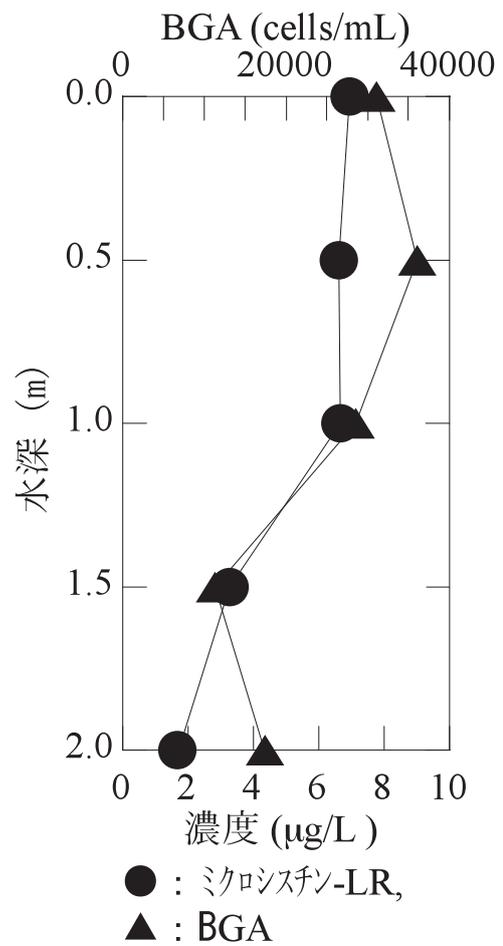


図4 ミクロシスチンの垂直分布調査例

はマイクロシスチンの時空間的な分布状況の把握調査を行っている。マイクロシスチンの垂直分布調査例を図4に示す。藍藻類が大量に生育する時期には表層と底層におけるマイクロシスチン濃度に約3倍程度の差が出ることもある。また、水平方向の分布調査でも6倍以上の濃度差が検出されることもある。このようにマイクロシスチンの湖沼内分布には著しい偏在性がある。このことは、サンプリング場所や時間によって大きく値が異なり、その評価に大きな影響を与える。今後、モニタリング調査と偏在性調査を継続して適正なサンプリング場所選定の方策やそれに基づくマイクロシスチン評価手法を検討しなければならない。

また、分析方法の改善についても、検討している。マイクロシスチンについては、前述した標準品の入手が困難なことに加え、質量分析に有用な同位体が多かった。しかし、国立環境研究所では新しい試みと

して、ミクロシスチンを生産する藍藻を¹⁵Nで標識した硝酸塩のみを加えた培地で培養し、¹⁵Nで標識されたミクロシスチンを開発している¹⁸⁾。この開発が実用化されれば、質量分析におけるサロゲート物質として活用でき分析手法の精度管理にも有益になると期待されている。

5-2 アオコ抑制について

ミクロシスチン問題の解決には、有毒藍藻類の抑制が必要である。その手法については、様々な取り組みがなされている¹⁹⁾。もっとも分かりやすいのは吸引や捕集により水表面のアオコを回収する方法である。ただ、広大な湖面に対しては労多くして効が少ない。中国などでも回収船を使用していたが、ほとんど効果を上げていないようであった。一方、硫酸銅や界面活性剤などの殺藻剤を散布する方法も広く行われている。この方法は比較的制御が容易で結果も分かりやすい反面、大量に化学物質を散布することにより周辺生態系への影響も懸念されるし、水利用の観点からもあまり多用できない。この他、紫外線や超音波、発泡等の物理的効果によりアオコを抑制、破壊していく方法もあるが、効果の有効範囲は限定的であると考えられる。研究的には、抽水植物や水生植物から放出されるアレロパシー効果物質やウイルスや細菌を活用した手法¹⁹⁻²¹⁾も報告されている。

本質的な水環境の面から考えると、アオコ及びミクロシスチン問題は、すなわち湖沼の富栄養化問題に行き着く。この富栄養化問題の解決には、流入水（流入負荷量）に対する対策と底質からの栄養塩対策、さらに滞留時間を必要以上に大きくしないなど水源管理対策も重要となることから、各関係機関との連携と息の長い対策が必要だと考えられる。

(参考文献)

- 1) アオコ water bloom・その出現と毒素, 渡辺真利代, 原田健一, 藤木博太, 東京大学出版会
- 2) 日本アオコ大図鑑, 渡邊眞之, 誠文堂新光社
- 3) やさしい日本の淡水プランクトン, 図解ハンド

ブック, 滋賀県立衛生環境センター監修, 合同出版株式会社

- 4) 津田泰三, 岡本高弘, 藤原直樹, 中村忠貴, 矢田稔, 佐貴典子, 土肥誠, 面田美紀, 一瀬諭, 若林徹哉, 青木茂, 原良平, 琵琶湖北湖における鉛直方向の長期水質モニタリング, 水環境学会誌, 29 (9), 565-568, 2006
- 5) Francis, G. Poisonous Australian lake, Nature, 18, 11-12, 1878
- 6) Richard, D. S., Beattie, K. A. and G. A. Codd, Toxicity of cyanobacterial blooms from Scottish freshwaters, Environ. Technol. Lett., 4, 377-382, 1983.
- 7) Sivonen, K., Kononen, K., Esala, A. - L. and S. I. Niemela, Toxicity and isolation of the cyanobacteria (blue-green algae) in Finnish fresh and coastal waters, Hydrobiol., 190, 267-275, 1989.
- 8) McBarron, E. J., Walker, R. I., Gardner, I. and K. H. Walker, Toxicity to livestock of the blue-green algae *Anabaenacircinalis*, Aust. Vet. J., 51, 587, 1975.
- 9) Jochimsen, E. M., Carmichael, W. W., An, J., Cardo, D.M., Cooksen, S. T., Holmes C.E.M., Antunes, M.B., de Melo Fiho, D.A., Lyra, T.M., Barreto, T., Azevedo, S. M. F. O., Jarvis, W.R. Liver Failure and Death after Exposure to Microcystins at Hemodialysis Center in Brazil. N. Eng. J. Med. 338, 873-87
- 10) Toxic cyanobacteria in water: A guide to their public health consequences, monitoring and management, Ingrid Chorus and Jamie Bartram, http://www.who.int/water_sanitation_health/resourcesquality/toxycyanobacteria.pdf
- 11) Watanabe, M.F. and Oishi, S. Toxicities of *Microcystis aeruginosa* collected from some lakes, reservoirs, ponds and moat in Tokyo and adjacent regions. *J. Limnol.*, 41, 5-9, 1980.

- 12) (財) かずさ DNA 研究所が運営するシアノバクテリアのゲノムデータベース, CyanoBase, <http://bacteria.kazusa.or.jp/cyano/index.html>
- 13) 朴 虎東, アオコが消えた諏訪湖, 9 章, 192-219, 信州大学山岳科学総合研究所 沖野外輝夫・花里孝幸編, 山岳科学叢書 3, 信濃毎日新聞社
- 14) 彼谷邦光, 環境のなかの毒ーアオコの毒とダイオキシナー, 1995, サイエンスポピュラー, 裳華房
- 15) Watanabe, M. F., Oishi, S., Harada, K-I., Matsuura, K., Kawai, H. and Suzuki, M., Toxins contained in *Mycrocystis* species of cyanobacteria (Blue-green algae), *Toxicon*, 26, 1017-1025.
- 16) Nishiwaki-Matsushima, R., Ohta, T., Nishiwaki, S., Suganuma, M., Kohyama, K., Ishikawa, T., Carmichael, W. W. and H. Fujiki, Liver tumor promotion by the cyanobacterial cyclic peptide toxin microcystin-LR, *J. Cancer Res. Clin. Oncol.*, 118, 420-424, 1992.
- 17) 彼谷邦光, 藍藻毒の分析, ぶんせき, 8436-441, 2002
- 18) Sano T., Takagi H., Nagano K., Nishikawa M., Kaya K., Accurate LC-MS analyses for microcystins using per ¹⁵N-labeled microcystins., *Analytical and Bioanalytical Chemistry*, in press
- 19) 渡辺真理代, 仁木拓志, 上野祐子, 浪越通夫, 琵琶湖におけるクロモ *Hydrilla verticillata* 繁茂水域及びクロモ培養水槽から検出されたアオコ形成シアノバクテリアの増殖抑制活性, 地球環境研究, 6, 11-17, 2004
- 20) 南條吉之, 細井由彦, 城戸由能, 矢木修身, 稲葉一穂, 湖山池における藻類増殖の制限物質について, 水環境学会誌, 23 (11), 690-696, 2000
- 21) 中井智司, 山田信吾, 細見正明, ホザキノフサモが放出する脂肪酸のシアノバクテリアに対する増殖抑制効果, 水環境学会誌, 27 (2), 125-130, 2004