

## 調査研究

三方湖で優占する糸状性藍藻 *Planktothrix agardhii* の増殖特性について (第1報)銚崎 有紀・塚崎 嘉彦<sup>\*1</sup>・加藤 賢二Growth Characteristics of Filamentous Cyanophytes *Planktothrix agardhii*  
that dominated in Lake Suigetsu and Lake Mikata in Fukui Prefecture-

Yuki HOKOZAKI, Yoshihiko TSUKASAKI, Kenji KATO

2000年の10月から12月に三方湖で、2001年の2月には水月湖で、*Planktothrix agardhii*によるアオコがみられた。この季節外れにアオコが発生した原因や今後の発生を予測・検討するため、温度、照度、塩分に対する*P. agardhii*の培養試験を行った。

その結果、10℃でもアオコを形成できるほど増殖が可能であることや低照度に適応した種であることが分かった。

また、塩化物イオン濃度2000mg/l までなら塩分の影響はほとんど受けないこと、5000mg/l でもアオコを形成できるほど増殖が可能であることから、塩分耐性があることが分かった。

しかし、水月湖と三方湖産*P. agardhii*の増殖特性は他の湖から分離した同種株とほとんど変わらないことなどから、2000年度の秋から冬にかけての*P. agardhii*によるアオコの発生は特異的な現象であったと推定される。

## 1 はじめに

福井県を代表する湖沼である三方五湖は、日本海に隣接しており、図1に示すように北より順に久々子、日向、水月、菅、三方の5つの湖により成り立っている。このうち日向湖を除く4湖は江戸時代に掘削された浦見川で結ばれ、連続した水系となっており、最も海側に位置する久々子湖を通じて海水の流入がある。この4湖沼は富栄養化が進んでおり、特に水月湖、三方湖については昔から藍藻による水の華が繁殖していたという記録が残っている<sup>1), 2)</sup>。また、福井県でプランクトンの調査を始めた1985年から1998年まではほぼ毎年、夏を中心にアオコの発生がみられ<sup>3) 4) 5) 6)</sup>、湖の景観の低下、カビ臭などを引き起こし問題となっていた。

近年における三方湖の植物プランクトン細胞数の変動を図2に示した。アオコ形成種としては1998年までは*Microcystis*属や*Anabaena*属が中心であり、*Oscillatoria*属もこれらに次いで優占していたが、1999年より*Microcystis*属や*Anabaena*属は少なくなり、同時にこれらによるアオコも少なくなった。代わって*Oscillatoria*属や*Phormidium*属が優占し、8月以降も $10^6$  cells/ml台と高密度を維持し続け、2000年の10月から12月には三方湖で、2001年の2月には水月湖で、*Planktothrix agardhii* (別名*Oscillatoria agardhii*) が増殖し、アオコを形成するようになった<sup>7)</sup>。*P. agardhii*は、2001年4月以降は $10^4$  cells/ml台で推移し、10月以降はほとんど出現しなかったが、代わっ

て*Phormidium*属が4月から12月まで優占した。*Microcystis*属と*Anabaena*属は6月から8月に出現したが、1998年までのように長期間に渡って優占しなかったために、アオコも粒状のものがわずかに観察されたにとどまった。2002年は6月から再び*Planktothrix*属が優占し、8月には $8.4 \times 10^6$  cells/mlにまで増殖したが、10月に入ると減少し、11月以降は全く出現しなかった。

このように、三方湖においては1999年を境に*Microcystis*属と*Anabaena*属が長期間に渡って優占することはなくなり、同時に夏季のアオコの発生が少なくなった。代わって糸状性藍藻の*Planktothrix*属や*Phormidium*属が優占するようになったが、その出現状況は年々違っている<sup>8)</sup>。三方湖と同じようなプランクトンの変遷は霞ヶ浦でもみられ<sup>9)</sup>、1986年を境に*P. agardhii*が一年中優占したという報告がある<sup>10)</sup>。

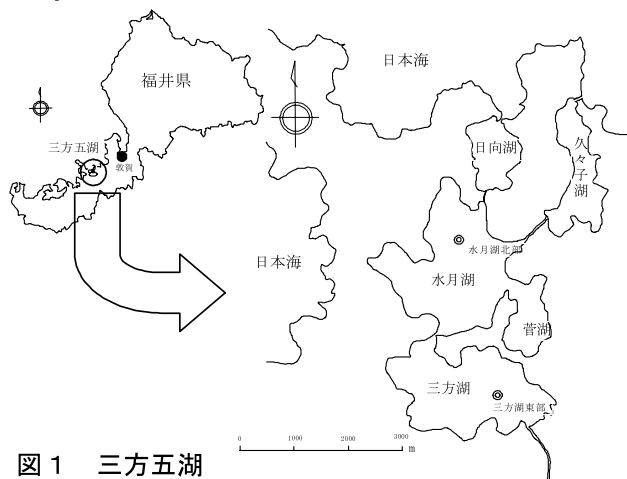


図1 三方五湖

\*1 環境政策課

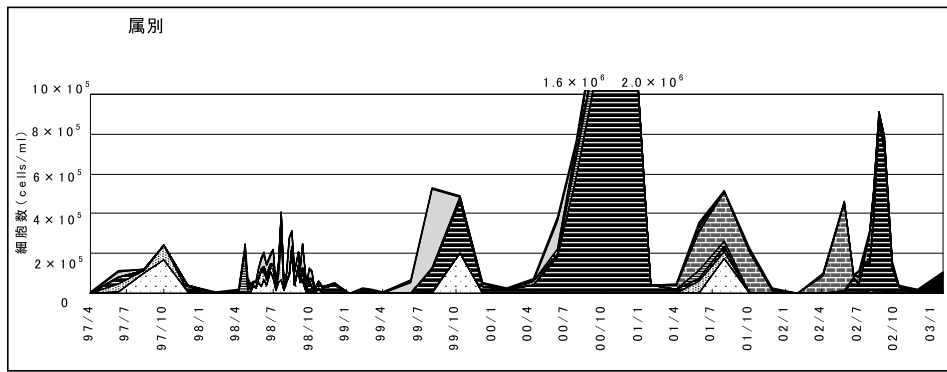


図2 三方湖における植物プランクトン細胞数の変動

また、琵琶湖の赤野井湾や児島湖でも *P. agardhii* が優占したとの報告があり<sup>11)12)</sup>、海外でも比較的高緯度地域の湖で優先し<sup>13)14)15)16)17)</sup>、水の華の原因種とされている。このように、*P. agardhii* は6月から9月に細胞数が最大となることが多いが、低温でも増殖が可能であり、低照度に適応した種であることが知られている。しかし、水月湖や三方湖のように同種が秋から冬にアオコを形成するまで増殖した報告例はない。このため、水月湖や三方湖でアオコを形成した *P. agardhii* の増殖特性を把握しアオコ発生に至った原因や今後発生する可能性について検討することは非常に重要である。こうしたことから、本研究では温度、照度、海水由来の塩分に対する水月湖、三方湖産 *P. agardhii* の増殖特性を明らかにした。

## 2 調査方法

2001年2月に水月湖から単藻分離した *P. agardhii* を供試藻類として、温度、照度、塩分と増殖量の関係を検討した。塩分濃度は培地に人工海水（ダイゴ人工海水SP，日本製薬社）を加えて調整した。また、塩分濃度の指標として塩化物イオンを用い、試験区は海水無添加（19.2）、500、1000、2000、3000、5000、7000mg/1の6段階とした。温度別の試験では10、15、20、25、30℃の5段階の試験区を設定し、照度は6.6、13、27、40、67、108  $\mu\text{E}/\text{m}^2/\text{s}$ の6段階とした。M11培地<sup>18)</sup>に供試藻類を  $1.0 \times 10^4$  cells/mlで植種し、温度別の試験区以外は20℃で、照度別の試験区以外は20  $\mu\text{E}/\text{m}^2/\text{s}$ で統一し、12時間明暗周期で静置培養した。

培養中、各試験区の増殖過程をモニタリングするため、1日から2日おきに計数を行った。*P. agardhii* は光学顕微鏡では細胞間が明瞭ではないため、DAPIで染色してあらかじめ100  $\mu\text{m}$ あたりの細胞数を求め（100  $\mu\text{m}$  = 33.7 cells  $\pm$  3.0, n=90）、試験区から抜き取った1ml中に存在する全トリコームの長さの合計をこの値で換算し、1mlあたりの細胞数とした。

## 3 結果

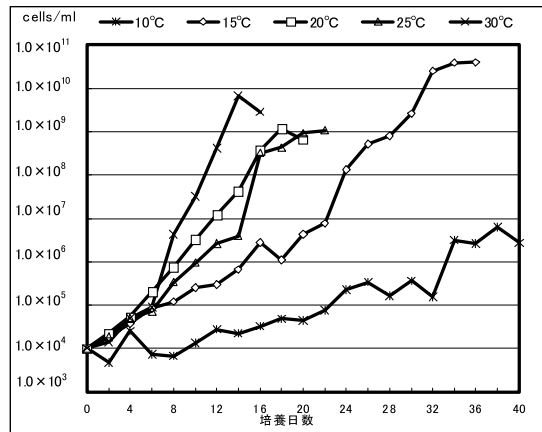


図3 温度の違いによる増殖曲線

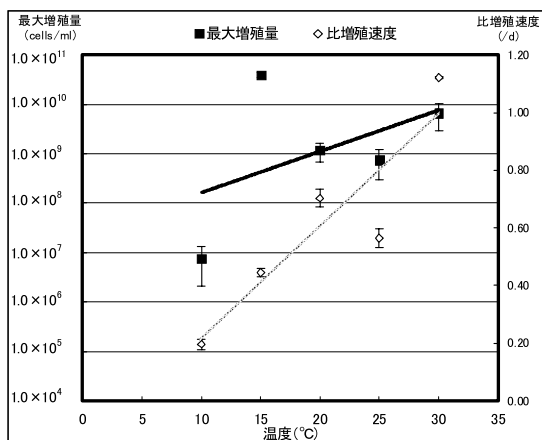


図4 各温度における最大増殖量と比増殖速度

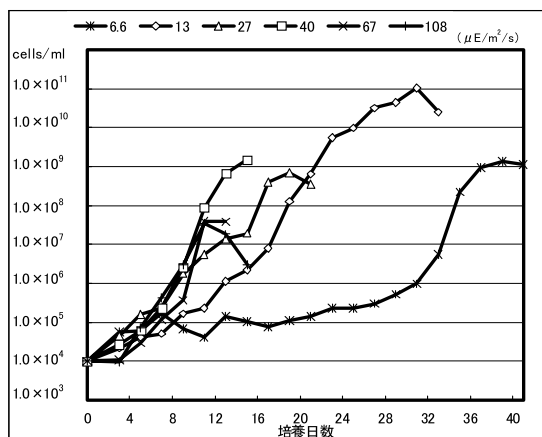


図5 照度の違いによる増殖曲線

### 3. 1 温度

図3に培養温度の違いによる増殖曲線を、図4に各温度における最大増殖量と比増殖速度を示した。最大増殖量に達するまでの日数は10℃で38日、15℃で34日となったが20℃で18日と大幅に短くなり、30℃で14日と温度が高くなるに従い短くなった。このため、比増殖速度も温度が高くなるに従い高くなり、30℃で1.12/d ( $\pm 0.0022$ ) と最高値が得られた。しかし、最大増殖量は20℃以上の試験区で $7.4 \times 10^8 \sim 6.7 \times 10^9$  に対して、15℃では $3.9 \times 10^{10}$  cells/ml ( $\pm 4.8 \times 10^9$ ) と最も高くなり、比増殖速度と最大増殖量の傾向は一致しなかった。30℃では比増殖速度が最も高かったが、最大増殖量に達するとすぐに*P. agardhii*の分解が始まるため、培養では15℃から25℃が最も安定していた。また、10℃でも $7.5 \times 10^6$  cells/ml ( $\pm 5.4 \times 10^6$ ) とアオコを形成した時と同程度の濃度となった。

### 3. 2 照度

図5に照度の違いによる増殖曲線を、図6に各照度における最大増殖量と比増殖速度を示した。最大増殖量に達するまでの日数は、照度 $6.6 \mu\text{E}/\text{m}^2/\text{s}$ の39日から、 $40 \mu\text{E}/\text{m}^2/\text{s}$ の14日まで、照度が高くなるに従い短くなったが、それより高い照度の試験区では11日と一定となった。比増殖速度も同様な傾向となり、 $67 \mu\text{E}/\text{m}^2/\text{s}$ で0.93/d ( $\pm 0.065$ ) と最も高くなったものの、 $40 \mu\text{E}/\text{m}^2/\text{s}$ や $108 \mu\text{E}/\text{m}^2/\text{s}$ の場合とほとんど差がみられなかった。最大増殖量は比増殖速度と逆の傾向を示し、 $13 \mu\text{E}/\text{m}^2/\text{s}$ で $7.5 \times 10^{10}$  cells/ml ( $\pm 4.3 \times 10^{10}$ ) と最も高く、それ以上の照度では低めとなり $108 \mu\text{E}/\text{m}^2/\text{s}$ で、 $3.7 \times 10^7$  cells/ml ( $\pm 4.6 \times 10^7$ ) と最も低くなった。培養でも $67 \mu\text{E}/\text{m}^2/\text{s}$ 以上の照度では最大増殖量に達した後すぐに*P. agardhii*の分解が始まったため、 $13 \mu\text{E}/\text{m}^2/\text{s}$ から $40 \mu\text{E}/\text{m}^2/\text{s}$ での培養が最も安定していた。また、 $6.6 \mu\text{E}/\text{m}^2/\text{s}$ では比増殖速度は最も低い、最大増殖量は $1.4 \times 10^9$  cells/ml ( $\pm 2.7 \times 10^9$ ) と高く、*P. agardhii*は低照度に適応した種であることが分かった。

### 3. 3 塩化物イオン濃度

図7に塩化物イオン濃度の違いによる増殖曲線を、図8に比増殖速度と最大増殖量を各塩化物イオン濃度別に示した。2000mg/l以下の試験区では最大増殖量に達するまでの日数が16日から18日と、同じような増殖曲線が得られた。比増殖速度と最大増殖量は2000mg/l以下の試験区が最も高く、それぞれ0.64~0.68 /d、 $4.5 \sim 8.9 \times 10^8$  cells/mlとほぼ同じ値が得られ2000mg/lまでは塩分の影響をほとんど受けないと考えられた。塩化物イオン濃度が3000mg/l以上になると、最大増殖量に達するまでの日数は18日から22日とそれほど差はみられないものの、濃度が上がるにつれて比増殖速度と最大増殖量は段階的に低くなり増殖阻害作用

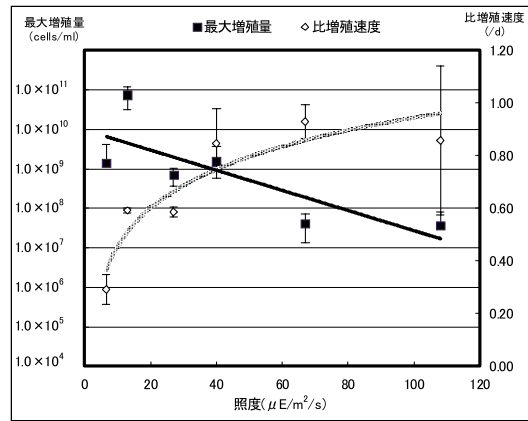


図6 各照度における最大増殖量と比増殖速度

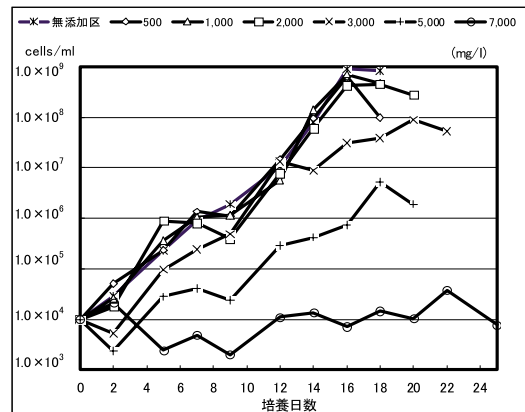


図7 塩化物イオン濃度の違いによる増殖曲線

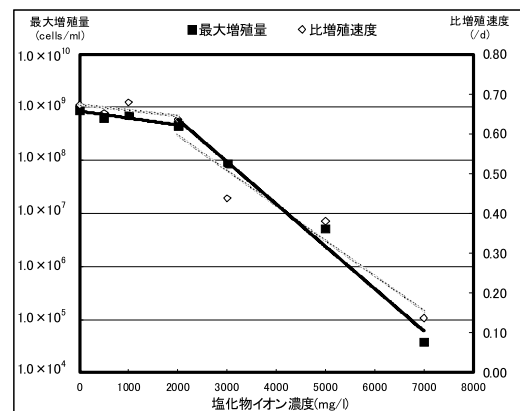


図8 各塩化物イオン濃度における最大増殖量と比増殖速度

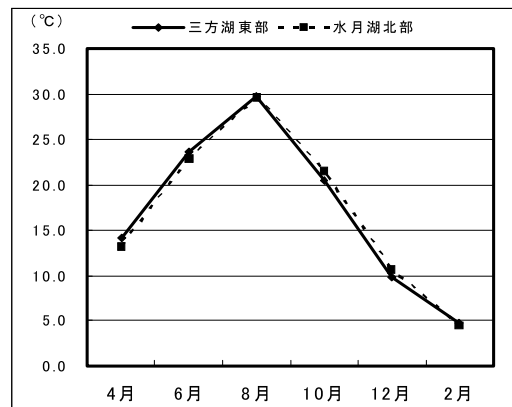


図9 水月湖、三方湖における過去10年間の平均水温 (1993~2002)

が現れた。しかし、5000mg/lにおいても $5.2 \times 10^6$  cells/mlとアオコを形成するレベルにまで増殖しており、*P. agardhii*の塩分耐性があることが明らかとなった。

#### 4 考 察

三方湖や水月湖で優占した*P. agardhii*の培養試験の結果から、20℃から30℃が最も増殖に適した温度であるが、10℃でもアオコを形成できるほど増殖が可能であること、照度では $13 \mu\text{E}/\text{m}^2/\text{s}$ から $40 \mu\text{E}/\text{m}^2/\text{s}$ までの範囲が最も増殖に適しているが、 $6.6 \mu\text{E}/\text{m}^2/\text{s}$ の低照度でもこれより照度の高い試験区と同じくらいの最大増殖量が得られたことから低照度に適応した種であることなどが明らかとなった。

また、塩素イオン濃度2000mg/lまでは比増殖速度と最大増殖量がほぼ同じ値となり、この濃度までは塩分の影響はほとんど受けないこと、5000mg/lでもアオコを形成できるほど増殖が可能であることから、*P. agardhii*の塩分耐性が明らかとなった。

なお、このような*P. agardhii*の増殖特性は、他の湖から分離した同種株とほとんど変わらないことから<sup>19)20)</sup>、必ずしも三方湖や水月湖特有のものではない。

三方湖や水月湖の過去10年間の平均水温を図9に、塩化物イオン濃度の推移を図10に示した。*P. agardhii*がアオコを形成した10月から翌年2月は、水温が20℃から10℃以下になり、季節的にも日射量が減少する時期である。図11に敦賀湾における潮位の月平均推移を示したが<sup>21)</sup>、8月から10月は潮位が上がり湖に海水が流入しやすくなるため、塩化物イオン濃度が1年の中で最も高くなることが多く、10月から12月の10年間の平均が水月湖北部は2500mg/l、三方湖東部は870mg/lとなった。この時期の塩化物イオンの濃度変動は年によって差異が大きく、特に2000年の10月から12月の平均は水月湖北部で3900mg/l、三方湖東部で1700mg/lとなり、例年より非常に高かった。図11をみると、2000年の8月から10月の潮位は、過去10年間の平均に比べて高めに推移しており、このことが塩化物イオン濃度の上昇の一要因になっていると考えられた。

このような状況下で*Planktothrix*属が優占した理由を検討するため、三方湖の主なアオコ形成種であった*M. aeruginosa*と*P. agardhii*の増殖特性を比較した。*M. aeruginosa*は15℃以下の低水温や、塩化物イオン濃度2500mg/l以上ではほとんど増殖できないことから<sup>22)</sup>、この時期に*M. aeruginosa*がアオコを形成するのは困難である。一方、実際にアオコを形成した*P. agardhii*は、最も増殖に適した温度が20℃から30℃と*M. aeruginosa*の最適温度(25℃から30℃)と重なるものの、15℃以下の低温でも十分増殖が可能である。また、塩化物イオン濃度が5000 mg/lでも増殖が可能であり、強い塩分耐性があること、低照度に適応した種であること

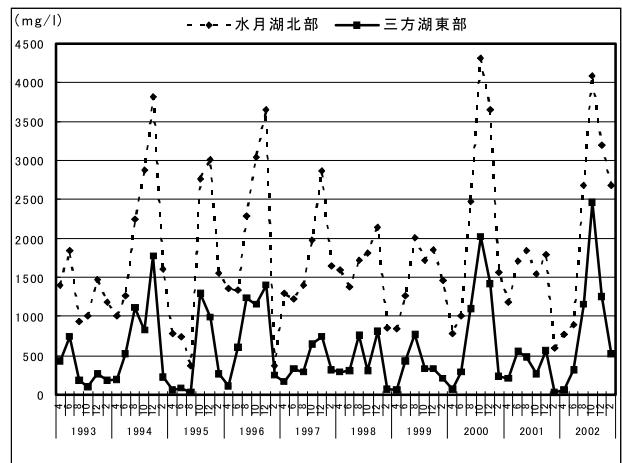


図10 水月湖三方湖における塩化物イオン濃度の推移

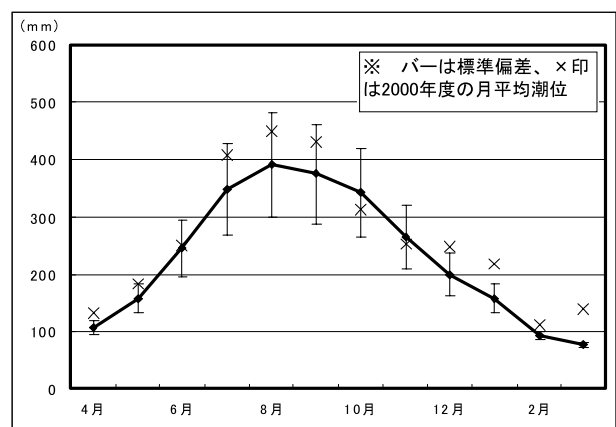


図11 敦賀湾本港地区における過去10年間の月平均潮位と2000年度の月平均潮位 (1992~2001)

も明らかとなり、10月から2月の間でもアオコ形成に至ったと考えられた。

2001年度においては、*Planktothrix*属は $10^4$  cells/ml台と低密度で推移し優占しなくなった。2002年は6月から*Planktothrix*属が優占し、9月までは $8.4 \times 10^5$  cells/mlと高い密度を維持していたが、その後は急激に減少し、優占種が珪藻に変遷した。三方湖や水月湖の*P. agardhii*は、最も増殖に適した温度が20℃から30℃であること、水月湖や三方湖の塩分濃度は秋に最も高くなることから、秋以降よりむしろ夏に増殖に適していると判断され、2002年度のような細胞数の変動は通常現象であって、2000年度は特異的であったと推定される。このため、2000年度現象は単に*Planktothrix*属の増殖範囲が広がったためにアオコを形成したと考えるのではなく、4年ぶりに塩化物イオン濃度が高くなった影響等で他に競合する植物プランクトンが存在しなかったこと、水温が低下する時期であったため捕食する微生物の活性が低かったことなど、*P. agardhii*にとって様々な条件に恵まれたとも考えられる。

一方、*Microcystis*属や*Anabaena*属によるアオコは4年連続

してほとんど発生がみられず、夏でも糸状性藍藻の方が優占してきていることから、次第に*Microcystis*属や*Anabaena*属が三方湖や水月湖での増殖が困難になってきていると考えられる。今後、窒素や燐、鉄やマンガンなどの栄養塩濃度の違いによる増殖特性について*Planktothrix*属と比較し、また、実際の湖水を用いたAGP試験を行うなど、優占種が変遷した原因をさらに検討していきたい。

## 5 謝 辞

本研究は、福井県立大学との共同研究として実施した。

研究にあたり、終始懇切丁寧なご指導をいただいた福井県立大学の廣石伸互教授、吉田天士助手に対して深謝いたします。

## 参 考 文 献

- 1) 菊池健三：水月湖における動物プランクトンの垂直分布に及ぼす溶存酸素の影響（予報）．陸水学会誌，1，32～37(1931)
- 2) 宮路傳三郎：死層を持つ若狭の水月湖．理学界，30，289～303(1932)
- 3) 青木啓子・富山猛：三方湖に発生したアオコについて，福井県公害センター年報，18，135～137(1988)
- 4) 青木啓子・石田敏一・宇都宮高栄・林隆一郎：福井県三方湖で発生したアオコ，福井県環境センター年報，21，78～88(1991)
- 5) 福井県環境センター：アオコ発生解明調査報告書，(1995)
- 6) 福井県環境科学センター：アオコ除去基礎技術開発事業報告書，1～8(1997)
- 7) 塚崎嘉彦・加藤賢二・鉦碯有紀・前川勉：三方五湖における糸状性藍藻の異常増殖について，福井県環境科学センター年報，30，85～87(2000)
- 8) 塚崎嘉彦・鉦碯有紀・片谷千恵子・松崎雅之・加藤賢二：北潟湖および三方湖における植物プランクトンの変遷について（第1報）－（1997～2001年度）－，福井県環境科学センター年報，31，68～76(2001)
- 9) Takamura, N. and M. Aizaki: Change in Primary Production in the Lake Kasumigaura (1986-1989) Accompanied by Transition of Dominant Species, Jpn. J. Limnol., 52, 3, 173～187(1991)
- 10) 中川恵・高村典子・松重一夫：霞ヶ浦における水質およびプランクトン群集の季節変動，国立環境研究所研究報告，153，173～190(2000)
- 11) Ishikawa, K., M. Kumagai, S. Nakano and H. Nakamura: The Influence of Wind on Horizontal Distribution of Bloom-forming Cyanobacteria in Akanoi Bay, Lake Biwa, Jpn. J. Limnol., 60, 531～538(1999)
- 12) 村上和仁・鷹野洋・吉岡敏行・萩野泰夫・森忠繁：児島湖における植物プランクトンの種構成と季節的消長，水環境学会誌，22，9，770～775(1999)
- 13) 小島貞男・須藤隆一・千原光雄：環境微生物図鑑，講談社，p. 153～156(1995)
- 14) Persson, P.E.: Growth of *Oscillatoria agardhii* in a hypertrophic brackish-water bay, Annales botanici Fennici, 18, 1, 1～12(1981)
- 15) Tore Lindholm, Jone E. Eriksson and Jussi A. O. Meriluoto: Toxic Cyanobacteria and Water Quality Problems -Examples from a Eutrophic Lake on Aland, south west Finland, Water Reserch, 23, 4, 481～486(1989)
- 16) Rucker, Jacqueline. Wiedner, C. Zippel, P. : Factors controlling the dominance of *Planktothrix agardhii* and *Limnolthrix redekei* in eutrophic shallow lakes, Hydrobiologia, 342/343, 107～115(1997)
- 17) R. Maasdam and T. H. L. Claassen: Trends in Water Quality and Algal Growth Shallow Frisian Lakes, the Netherlands, Water Science Technology, 37, 3, 177～184 (1998)
- 18) Watanabe, M. M., Kawachi, M., Hiroki, M., Kasai, F. : (2000) NIES—Collection List of Strains sixth edition Microalgae and Protozoa, National Institute for Environmental Studies Environmental Agency, Japan, p. 31～32
- 19) Kaarina Sivonen: Effects of Light, Temperature, Nitrate, Orthophosphate, and Bacteria on Growth of and Hepatotoxin Production by *Oscillatoria agardhii* Strains, Applied and Environmental Microbiology, 56, 9, 2658～2666(1990)
- 20) Suda, S., M. M. Watanabe, S. Otsuka, Aparat Mahakahant, Wichien Yongmanitchai, Napavarn Nopartnaraporn, Yongding Lui and John G. Day: Taxonomic revision of water-bloom-forming species of oscillatorioid cyanobacteria, International Journal of Systematic and Evolutionary Microbiology, 52, 1577～1595(2002)
- 21) 国土交通省北陸地方整備局敦賀港湾工事事務所：潮位整理表，(1992～2001)
- 22) 福井県環境科学センター：アオコ除去技術開発事業報告書，20～28(2001)