

(53) 漆沢ダム湖におけるアオコ発生に係わる水質構造特性

Characteristics of Water Quality Stratification related to the Water-Bloom
Occurrence in Urushizawa Dam Lake

設楽和彦*, 野村宗弘*, 千葉信男*, 藤本尚志**, 中野和典*, 西村 修*
Kazuhiko SHITARA*, Munehiro NOMURA*, Nobuo CHIBA*
Naoshi Fujimoto**, Kazunori NAKANO*, Osamu NISHIMURA*

ABSTRACT; Field survey has been carried out to evaluate the water quality stratification related to the water-bloom occurrence in Urushizawa dam without the pollutant load source in the basin during summer season in 2004. From the result obtained, Chl. *a* concentration was $300 \mu\text{g/l}$ as a highest value at 0.5m water depth in August, and the dominance of *Anabaena* sp. was observed. It was also found that the water bloom may be occurred by the accumulation of the nutrient such as the phosphorus in the only surface layer of the deep dam as well as a shallow lake, when the thermocline was formed. The fluctuation of phosphorus amount in surface layer was verified using the phosphorus balance model.

KEYWORDS; *Anabaena* sp., Eutrophication, Thermocline, Continuous observation, Water intake

1. はじめに

わが国では、湖沼、内湾といった閉鎖性水域では富栄養化にともなう水質の悪化が依然として続いており、有機物指標の環境基準（平成15年度）の達成状況をみると、全体では測定開始以来、毎年わずかながら向上しているが、河川では87.4%、湖沼で55.2%、海域で76.2%であり、特に湖沼、内湾などの閉鎖性水域で依然として達成率が低い^{1),2)}。霞ヶ浦、手賀沼、印旛沼に代表される富栄養湖における水の華（アオコ）の大発生は、深刻な社会問題となっている¹⁻³⁾。これは生活・産業排水等の流入、農地や市街地からの人為的な負荷により富栄養化が進行するためである。しかし、近年、上流域に汚濁源のない貯水池においても藍藻類からなるアオコの発生がみられる。

アオコの発生は、水道水のカビ臭、ろ過・凝集阻害、異臭の発生、美観の低下を招くとともに⁴⁻⁶⁾、上流域においてアオコを含む水を放流することにより、下流域に対して有機物、窒素・リンが流入し、酸素消費や富栄養化の問題が懸念される。このため上流域におけるアオコの発生防止対策が極めて重要である。その手法の一つとして、藍藻類をとりまく環境条件を制御して藍藻類が優占化しない水環境を創出する方法が挙げられる。そのためには、藍藻類の優占化と水域における水質構造との関係を明確にする必要がある。

これまでアオコの発生に関する研究は、市街地からの流入負荷をともなう湖沼等を対象としており^{7),8)}、人為的負荷源のない上流域貯水池における研究例は少なく⁹⁾、アオコ発生の現象について詳細に明らかにしていない。そこで本研究では、宮城県北西部に位置する漆沢ダムを対象として、藍藻類を取り巻く水質環境の現状把握を目的としてダム湖内および流入河川において現地調査を実施し、ダム湖におけるアオコ発生と水質構造の関係について考察した。

* 東北大学大学院工学研究科 (Graduate School of Engineering, Tohoku University)

** 東京農業大学応用生物科学部 (Faculty of Applied Bio-Science, Tokyo University of Agriculture)

2.1 対象ダム

本研究は、仙台から北北西の方角にあり山形県との県境に位置する宮城県漆沢ダムにおいて実施した（北緯：38度33分，東経：140度38分，標高260m）。ここは、洪水調節，上水道，工業用水，発電などの多目的ダムとして1980年に完成した周囲を急勾配の山林に囲まれたロックフィルダムである。図1にダムの形状ならびに観測地点を示す。ダムの規模は，流域面積：58.9km²，有効貯水容量：16,000千m³，水面面積：0.83km²，幅：約500m，全長：約4,000m，平均水深：約22mであり，ダムには唐府沢と鳴瀬川の流入河川が存在する。完成年以来，夏季にはアオコ（主に *Anabaena* sp.）の発生が毎年のようにみられる。また，アオコの発生期には，水面付近のアオコを取水しないように水深10mにおいて取水が実施されているため，水深10m近辺に強い水温躍層を生じ，表層と底層の鉛直混合を妨げている。

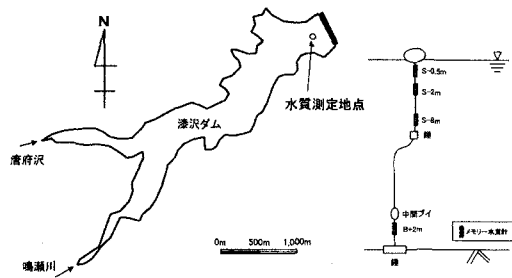


図1 観測地点及び水質計係留方法

2.2 調査方法

現地観測は，2004年7月9日から10月12日まで約2週間おきに実施した。図1に示すとおりメモリー式の水質計(WQC-24;TOA-DKK)を水質測定地点に水面から0.5m(S-0.5m)，2m(S-2m)，8m(S-8m)，湖底から2m(B+2m)の水深に鉛直方向に係留設置し，水温，溶存酸素（以下，DO）濃度，pH，濁度（ホルマジン校正）およびクロロフィル a（以下，Chl. a）濃度（S-0.5mのみ）を30分毎に連続的に測定した。センサー部の洗浄など保守は観測日毎に行った。

また，現地では約2週間おきに採水および水温，DOの鉛直分布観測を行った。観測は，採水ポンプおよび投げ込み式DO計(Model58;YSI)を用い，毎回，午前11時頃に実施した。試水は実験室に持ち帰り，全窒素(TN)，全リン(TP)をペルオキソ二硫酸カリウムと水酸化ナトリウムによるアルカリ性過硫酸加圧加熱分解後，オートアナライザーII（テクニコン社）を用いて分析を行い，さらに

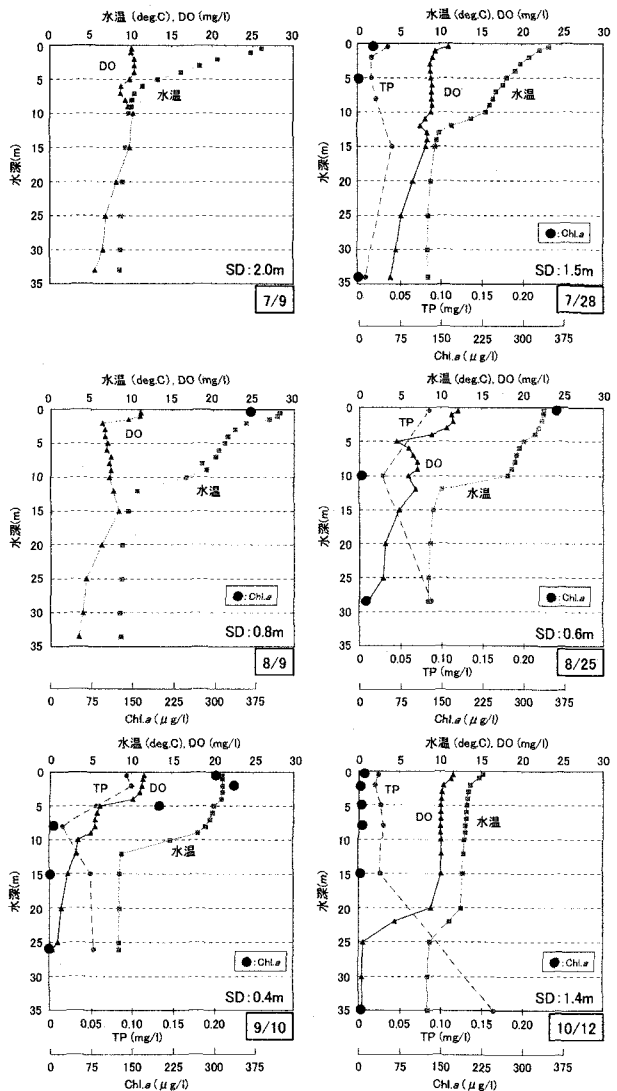


図2 水温，DO，TP及びChl.aの鉛直分布

$\text{NH}_4\text{-N}$, $\text{NO}_3\text{-N}$, $\text{NO}_2\text{-N}$, $\text{PO}_4\text{-P}$ は、 $0.45\mu\text{m}$ メンブレンフィルターによりろ過を行った後、TRAACS800（ブランルーベ社）を用いて分析した。Chl. *a* 濃度は、90%アセトンによる吸光度法により測定した。

さらに、ダム湖内の観測日と同日、鳴瀬川、唐府沢のダム流入の直前地点で採水を実施し、上記の水質項目について同法で測定を行った。なお、現地においては、流量ならびに水温の測定を行った。また、ダム取水量、流入水量、降雨量、放流量および水深の時系列データは、漆沢ダム管理事務所で1時間毎に測定されたものを使用した。

3. 結果及び考察

3.1 水質の鉛直分布

アオコ発生以前の7/9からアオコ消滅後の10/12までの水温、DO、TPおよびChl. *a* の鉛直分布の状況を図2に示す。同図には透明度（SD）も併記した。

7/28から9/10においては、10m付近に強い水温躍層が形成され、12m以深では 8.6°C と安定して推移する様子がわかる。この躍層は7/12以降、ダム取水口が水深10mに調整されていたことによる。なお、この期間中、大きな出水がなかったことから水深が10m程度浅くなった。また、8/9から9/10には、気象要因によって形成された $2\sim 3^\circ\text{C}$ の水温躍層が2~5mにおいてみられる。

DO分布に関して、7/9には全層で $6\sim 10\text{mg/l}$ あったが、観測期間中、徐々に躍層以深でDO濃度が減少し、9/10には底層の低酸素化がみられた。また、表層0~3mにおいてはアオコの発生にともなう過飽和な状態が維持されていた。7/28のDO分布をみると、12mにおいてDOが低下している。これは沈降したアオコが躍層付近で滞留し、局所的にDOを消費した結果と考えられる。また、二段躍層が形成された8/9、8/25、9/10のDO分布をみても、表水面付近でDOの過飽和な生産層の存在、一次躍層で局所的にDOが低下する分解層の存在が観測された。

次にChl. *a* に関して、成層化および水温上昇にともない、7/28にはS-0.5mで $30\mu\text{g/l}$ であったが、9/10には $300\mu\text{g/l}$ を示した。7/9には*Anabena* sp. が出現し、7/28には優占化していることを確認した。これは現地を表層水温が藍藻類の光合成適温 25°C に近くなったことから出現したと解釈される¹⁰⁾。

また、同期間、S-0.5mのTPについてみると、 0.03mg/l から 0.09mg/l に上昇するように表層で栄養塩が蓄積していくことがわかった。同時に測定した透明度は、7/28から9/10において1.5mから0.4mに急激に低下した。

10/12において、TP、Chl. *a* がともに9/10に比べて大きく減少した。10/7に台風にもなう出水があったことや水温の鉛直分布から判断して、表層に存在していたアオコが流出したと考えられる。一方で底層におけるDOの枯渇や高濃度TPの状況を考えると、一部のアオコは湖底に沈降し、枯死、分解したと推察される。

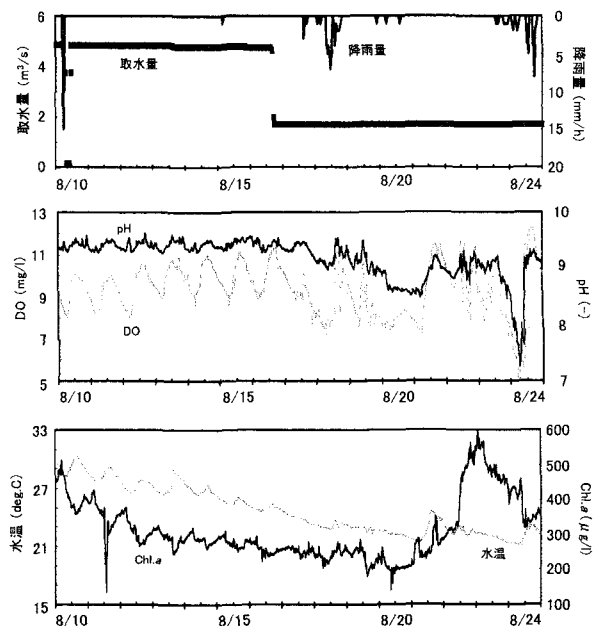


図3 水温、Chl. *a*、DO、pH、ダム取水量及び降雨量の時系列データ

3.2 水質の連続データ

8/10から8/24までのダム取水量、ダムサイトにおける降雨量ならびにS-0.5mにおいて水質計により測定したDO、pH、水温およびChl. *a*の時系列データを図3に示す。8/10から8/16にかけて、DOは8~11mg/l、pHは9~9.5を同調して推移し、植物プランクトンによる炭酸同化作用にともなう、日中に高く夜間に低下する日周変動がみられた。

さらに、この期間、Chl. *a* は日中に低く、夜間高くなるDOやpHの変動と逆パターンを示した。アオコは光合成を行い、細胞内に光合成産物が多量に蓄積すると内部浸透圧が上がり、水面に浮遊するためのガス胞が破壊され沈降し、その後、内部浸透圧が下がると再びガス胞を形成して浮上するといった垂直移動を繰り返すが⁹⁾、この現象を観測したものと考えられる。

水温、Chl. *a* について、8/10から8/20にかけて漸次減少傾向を示した。これは8/16までダム取水量が通常時の2.5倍の5m³/sに調整されたことから、表層における循環混合の効果で水表面のアオコの有効層以深への引き込みや拡散などによる藻類の増殖、集積の抑制の結果と推察される。8/16以降は、それまでの日周変動がみられなかった。これはこの期間、雨天などの天候が続き、光量不足などが原因と考えられた。また、DO、pHについても不規則な変動を示した。特に8/22のChl. *a* の不連続な変動は、アオコが観測地点周辺に集積した可能性が考えられた。

3.3 流入河川の水質

7/28、8/25における各河川の水温は、16.7~20.0℃を示した。河川水温とダム水温の鉛直分布を比較して、同密度層へ浸入するという特性から、この期間、河川水は躍層以深には浸入できず、両河川の流入水はダム表層の水深5~10mに流入していると考えられる。さらに平水時の流入河川は湧水からなっており、出水時は主に雨水からなるので夏季の出水時の河川の水温は平水時より水温が高いと思われる。したがって、出水時にダムへ流入する水深は、平水時の場合よりも浅くなると考えられる。このことは平水時の唐府沢の水温をみると水深10m層に入り込むと考えられるのに対し、図4の水質計により測定したS-2m、S-8mでの濁度の連続データより、S-2mでは出水後に濁度が大きく上昇したのに対し、S-8mでは出水後でもほとんど変化せず、5~10NTUであったということからも裏付けられる。

次に鳴瀬川、唐府沢のTN、TP濃度について観測期間中のデータを表1にまとめた。唐府沢では、富栄養化の判断指標であるTN:0.2mg/l、TP:0.02mg/l以上であることから⁹⁾、また、鳴瀬川も同程度であることから、河川水が表層に滞留することで富栄養化に十分な濃度であることがわかる。さらに流量を考慮してリン流入負荷量としてみた場合、流量の影響で唐府沢の方が鳴瀬川の約1.5倍になることがわかった。

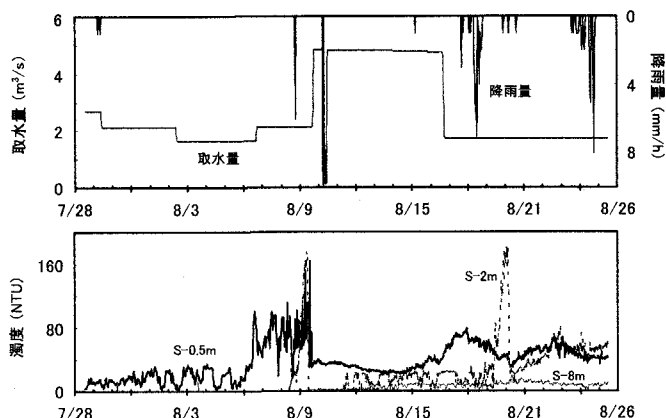


図4 S-2m、S-5m、S-8mにおける濁度及び取水量・降雨量の時系列データ

表1 流入河川における窒素・リン濃度及び負荷量

	TN	TP	N/P	流量	TN 負荷量	TP 負荷量
	μg/l	μg/l	—	m³/s	kg/h	kg/h
唐府沢	290(50)	40(10)	6.7(0.9)	1.49(0.41)	1.39(0.580)	0.212(0.076)
鳴瀬川	170(50)	20(10)	7.8(0.9)	1.95(0.93)	1.07(0.857)	0.130(0.126)

(SD)

さらに各河川の N/P についても表 1 に整理した。鳴瀬川では 13 を超える観測日も認められたが、その日を除くと各河川ともに 9 を下回った。N/P が 11 以上で窒素制限になることから、各河川ともにリン濃度が高く N/P が低いことがわかる。アナベナは N/P の低い条件で優占率が高くなることから¹¹⁾、本ダム湖においてアナベナの優占は、河川の影響が大きいことがわかる。

以上の結果から、この期間の河川水は、密度の近い水面から 10m 付近までの表層に流入していることから、表層に存在する藻類への栄養塩供給源となり、流入栄養塩は藻類に取り込まれることで表層において徐々に高濃度化していく可能性が示唆された。さらに、本ダム湖におけるアオコの発生は、表層 0-10m において活発な生産と分解が生じることに要因があると推察される。すなわち、深いダム湖においても取水に伴う二次躍層の存在が浅い池沼と同じ構造を形成させ、一度、藍藻類が発生すると表層 0-10m で栄養塩が循環(生産によるリンの取り込み、躍層で分解・無機化によるリンの溶出、生産に伴いリンの吸収)し、藻類が異常増殖した状態が維持されると考えられた。

3.4 ダム表層におけるリンの収支

7/28 から 9/10 の間、河川水は水面から水温躍層にかけて流入、河川水に含まれる栄養塩は藻類に取り込まれ、アオコとして表層に蓄積していくと考えられた。ここではアナベナが優占種であることからリンに着目した。また、河川からの流入によるリンの供給と取水によるリンの流出の収支によって、藻類の現存量が変動すると考えられる。そこで河川からの流入リン量と取水によるダムからのリン流出量ならびに表層におけるリン現存量に関してリンの収支を(1)式より評価し、上記の仮説について考察した。

$$dC_p/dt = C_{in} - C_{out} \quad (1)$$

ここで、 C_p : ダム表層(0-10m)におけるリン現存量 (kg)、 C_{in} : 河川からのリン流入量 (kg/h)、 C_{out} : 取水によるリン流出量 (kg/h)

(1) ダム表層におけるリン現存量 (実測値)

ダムの水表面積を 0.83km²、表層水深を 10m として、各観測日における 10m 以浅の TP 濃度を線形補完して、ダム表層におけるリン現存量を求めると 7/28 には 185kg-P と試算される。同様に 8/25 には 540kg-P、9/10 には 481kg-P となる。

(2) 河川からのリン流入量 (C_{in})

7/28、8/25 に観測された各河川の TP 濃度および流量からリン流入量を求めた。平水時においては、各期待値から、7/28 から 8/25 までの流入水の TP 濃度を 0.031mg/l、8/25 から 9/10 までの流入水の TP 濃度を 0.042mg/l と一定値として与え、流入水量の 1 時間毎の観測データを掛けることで河川からのリン負荷量とした。なお、出水時の河川水の TP 濃度は、各河川とも平水時の約 10 倍に上昇する報告から¹²⁾、出水時の TP は平水時の 10 倍として計算を行った。

(3) 取水によるリン流出量 (C_{out})

取水される水は、取水口のある水深 10m として、10m における TP 濃度に 1 時間毎の取水量データを掛けることで、取水によるリン流出量を試算した。なお、10m における観測データがない場合には、上下の観測値を線形補間して 10m の推定値を採用した。ここでは、7/28 から 8/25 までの取水される水の TP 濃度は、0.028mg/l、8/25 から 9/10 までの取水される水の TP 濃度は、0.042mg/l と一定値を与えた。取水される水の TP 濃度は、図 4 に示したとおり S-8m において出水後でも濁度がほとんど変化しなかったことから、出水時においても平水時と同値とした。

(4) ダム表層におけるリン現存量 (計算値)

現存量の初期値は、(1)で求めた 7/28 におけるリン現存量を用い、 C_{in} ならびに C_{out} を考慮し、(1)式により 7/28-9/10 までの現存量を計算した。

7/28 から 9/10 における C_p の計算結果と 7/28, 8/25, 9/10 における表層におけるリン現存量 (図中●印) と 7/28 から 8/25 における S-0.5m での Chl. *a* 濃度の経時変化を図 5 に示す。

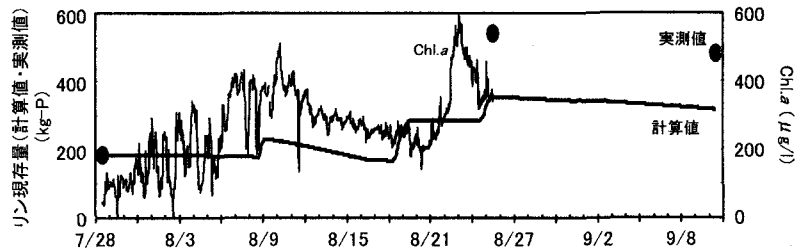


図5 表層のリン現存量(計算値・実測値)及びChl. *a*濃度

7/28 から 8/25 の期間は、リン現存量が増加し、8/25 から 9/10 は、現存量が減少するという表層リン現存量の実測値の傾向を反映した結果となった。しかし、実測値と計算値には大きな差がみられる。特に 7/28 から 8/25 にかけては、降雨の回数が多いことから出水時における流入負荷量の見積りの誤差の可能性が考えられる。さらに、河川流入口付近の底泥からの溶出の影響も考慮する必要がある、今後検討する予定である。

また、8/9 以降には出水に伴う C_p の増加後に Chl. *a* 濃度が上昇し、取水量の増加に伴う C_p の減少後に Chl. *a* が減少するように C_p の変化の様子が Chl. *a* の変動と傾向が一致した。このことから、出水時における栄養塩の流入が藻類の異常増殖に関与している可能性が示された。

さらに 7/28 から 8/8 の C_p は、約 200kg でほとんど変化しないが、Chl. *a* は約 30 $\mu\text{g/l}$ から約 400 $\mu\text{g/l}$ に増加傾向を示し、 C_p の変化が Chl. *a* の変化と一致しない結果となった。これは 7/28 の時点で Chl. *a* が 400 $\mu\text{g/l}$ に増加するのに十分なリンが表層部に存在し、各形態のリンが表層で分解・無機化され、藻類に利用される形態 ($\text{PO}_4\text{-P}$) になるとともに光量などの条件が整うことにより藻類が急激に増加したと考えられる。このことは $\text{Chl. } a/\text{TP} = 0.82\text{mg-Chl. } a/1\text{mg-P}$ を用いることにより¹³⁾、 C_p 200kg に相当する Chl. *a* 量を試算すると濃度 400 $\mu\text{g/l}$ の水塊が水面から約 0.5m まで存在できる量に相当することから説明が可能である。

4. おわりに

本研究では、藍藻類の異常増殖がみられる宮城県漆沢ダムを対象水域として現地観測を通じて水質構造を把握し、アオコ発生に関わる現象について検討を行った。その結果、以下の結論を得た。

- 1) 水温躍層が形成されることにより、深いダム湖においても表層のみでアオコの発生、分解、循環が生じ、アオコが形成されていく可能性が示唆された。
- 2) 上流に人為的負荷源が無いにもかかわらず、流入河川の水質はリン濃度が高いことがわかった。また、N/P の値が小さいことからダム湖での優占種であるアナベナに有利な条件であることがわかった。
- 3) ダム表層におけるリン収支解析を通じて表層でリンが蓄積する様子が確認され、さらに藻類が異常増殖するのに十分なリン量に相当することが明らかとなった。

謝辞：本現地調査を実施するにあたり、宮城県大崎地方ダム総合事務所漆沢ダム管理事務所の方々のご協力をいただきました。また、宮城県保健環境センター水環境部からは観測データをご提供いただくとともに同センター佐々木久雄氏からは有益な議論とご助言をいただきました。さらに水質分析ならびにデータ整理にあたり同研究室谷口崇至氏には、多大なるご尽力をいただきました。ここに記して、深く感謝いたします。

参考文献

- 1) 環境省：平成 17 年版 環境白書，ぎょうせい，東京，2005.
- 2) 須藤隆一：湖沼の再生と保全，日本水処理生物学会誌，別冊 24，pp. 2-4，2004.
- 3) 相崎守弘：湖沼環境の現状と保全 湖沼の富栄養化とその防止対策，海洋と生物，24(3)，pp. 190-196，2002.
- 4) 彼谷邦光：環境のなかの毒－アオコの毒とダイオキシナー，147pp.，裳華房，東京，1995.
- 5) 朴 虎東：環境水中のミクロシスチンの動態と生体蓄積，月刊海洋，37(5)，pp. 325-334，2005.
- 6) 須藤隆一編：環境浄化のための微生物学，pp. 46-54，講談社サイエンティフィック，東京，1983.
- 7) 石川可奈子，中原紘之，辻村茂男，熊谷道夫：アオコの空間的分布と集積特性－琵琶湖南湖北山田漁港での調査事例－，陸水学雑誌，64(3)，pp. 171-183，2003.
- 8) 杉浦則夫：特集 アオコ・その発生と浄化対策 霞ヶ浦におけるアオコの発生と対策，水環境学会誌，17(9)，pp. 540-544，1994.
- 9) 李 建化，大森美香子，信澤 守，青井 透：利根川上流域の農業用ため池におけるアオコの発生と水質特性，日本水環境学会年会講演集，32，p. 300，1998.
- 10) 有賀祐勝：水界植物群落の物質生産Ⅱ－植物プランクトン－，p. 51，共立出版，東京，1973.
- 11) 藤本尚志：湖沼における藍藻類の優占化に関する研究，東北大学 学位論文，1996.
- 12) 宮城県大崎広域水道事務所：昭和 63 年度漆沢ダム異臭味発生対策調査報告書，1989.
- 13) Richard F. A. : Riley J. P. and Skprow G. ed. “Chemical/Oceanography” 1 Chapter13, Academic Press, New York, 1965.