

貯水池における水質環境要素と藻類増殖の関連

DATA ANALYSIS ON RELATIONS BETWEEN WATER QUALITY AND PHYTOPLANKTON GROWTH IN RESERVOIRS

梅田 信¹, 富岡誠司²
Makoto UMEDA, Seiji TOMIOKA

¹正会員 博(工) 財団法人 ダム水源地環境整備センター (〒102-0086 東京都千代田区麹町 2-14-2 麹町NKビル)
(現: 国立大学法人 東北大学 大学院工学研究科土木工学専攻, 〒980-8579 宮城県仙台市青葉区荒巻字青葉 6-6-06)

²国土交通省 東北地方整備局 青森河川国道事務所 (〒030-0822 青森市中央三丁目 20-38)
(元: 財団法人ダム水源地環境整備センター)

Eutrophication is one of the major issues in management of reservoirs, so that it is important to know water quality conditions to encourage significant algal growth. In this study, relations between water quality and algal growth are investigated using data from literature and database of reservoir water quality from all over Japan. The following conclusions are obtained: 1) Blue-green algae, especially *Microcystis*, tend to grow significantly in high water temperature conditions. 2) Blue-green, which is a major water bloom forming species, does not necessarily have larger growth rate than other species. They seem to win to form water bloom. 3) Each algal species seem to have different optimum condition to grow. For example, blue-green tend to grow in conditions of higher water temperature and higher nutrient concentration, while diatom grow in lower water temperature and lower nutrient concentration.

Key Words: dam reservoir, phytoplankton, water quality, eutrophication

1. はじめに

水を貯めるという機能を持つダム貯水池において、富栄養化現象は、宿命的な課題であると言える。なぜなら、ダム貯水池は、水とともに流入してくる栄養塩類も貯留するからである。このため込まれた栄養塩類を利用することで藻類(植物プランクトン)が増殖する。

しかし、富栄養化そのものは、必ずしも悪い事ではない。適度な有機物や栄養塩の流入は、湖内の生物生産が増し、豊かな生態系が形成されることもある。だが、過剰な栄養塩が流入し、その結果として生じる富栄養化現象、すなわちアオコに代表される藻類の異常増殖は、水道水の異臭味や景観障害などをもたらすことがある。従って、富栄養化現象(特に水質障害に結びつくことが多い、アオコを含めた藍藻類の過度な増殖)が、どのような水質条件において発生するかを把握しておくことは、貯水池の水質管理を行う上で重要であると考えられる。

これまでに我が国の全国的な水質と植物プランクトンのデータを解析した事例は、いくつかある。このうち、藤本ら¹⁾は自然湖沼を対象とした単年の解析である。また天野ら²⁾は貯水池を対象として、植物プランクトンの簡易予測式を検討している。ここで多くのダムの水質を解析しているが、予測式作成のため、対象ダムをかなり

絞り込んでいる。本論文では、国内にある多数のダム貯水池(主として国土交通省所管)において蓄積されてきたデータにより、水質と藻類の増殖の関連を実績に基づき整理した。取り上げた水質項目は、藻類の増殖に係わる主要な要素として水温、リン濃度、pHの3項目である。また、実際のダム貯水池のデータ解析に加え、既往の研究成果に基づき藻類種別の増殖特性を整理し比較した。

2. 藻類の増殖・抑制に関わる環境要因

本論文で考察、検討する環境要因として、1)水温、2)光量(日射)、3)pH、4)栄養塩(リン)の4つを取り上げる。このうち、1)、2)、4)は、藻類の増殖に関して、一般に重要であると考えられている因子である。またpHは、後述するようにアオコを形成する藍藻類の増殖に関して特徴づけうる水質項目として挙げた。

なお、これらの環境要因は、富栄養化現象への対策である曝気循環施設による制御事項とも関連している。曝気循環(浅層曝気とも呼ばれる)は、貯水池の表層から中層にかけて循環流を発生させ、アオコの発生を抑制することが目的である^{3),4),5)}。曝気が稼働すると、貯水池内で水の鉛直混合が生じる。この鉛直混合により、水面近くに生じた水温成層以深の水を混合させ、表層水温を低

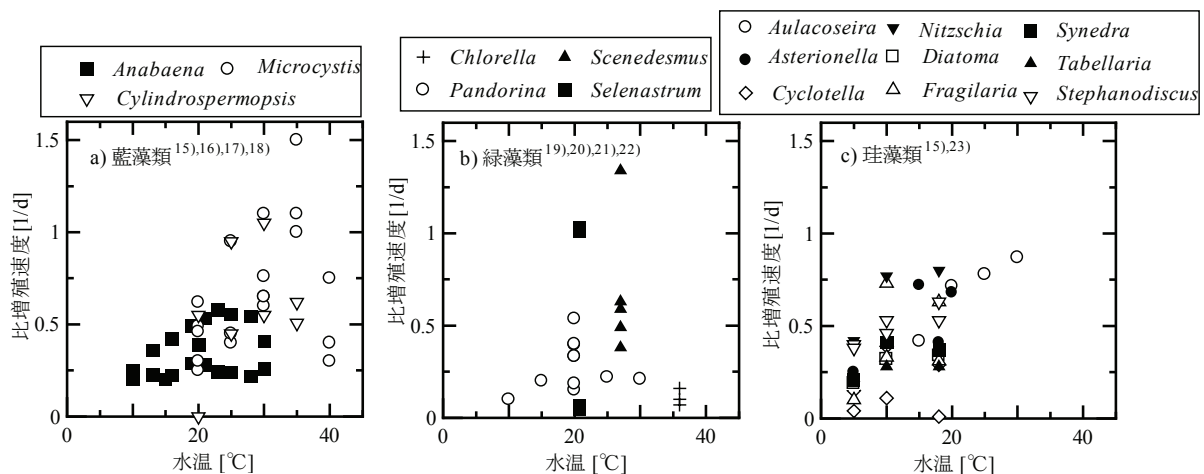


図-1 文献に基づく水温と比増殖速度の関係

下させる効果がある^{5),9)}。

藻類の光合成速度は、最適水温よりも低い水温の場合には、水温の上昇とともに大きくなる。この光合成及び増殖に関する最適水温は、藍藻類が他の藻類と比較して高く、25～35°C^{7),8)}であるため、高水温状態では藍藻類が優位となりやすい。したがって、表層水温の低下は藍藻類の増殖抑制及び優位性の解消につながると考えられる。

曝気による鉛直循環は、循環混合層を形成し、表層付近に滞留する水塊を強制的に下層へ潜り込ませる。この循環流によって、藻類を深部の暗条件下へと持ち込むことになる。藻類の増殖は光合成によることを考えると、光量の制限は直接的に増殖の抑制につながると考えられる⁷⁾。また、藍藻類は後述するように暗条件に弱い性質がある⁹⁾。したがって、特にアオコの原因となる藍藻類の増殖を抑えることに効果がある可能性が見込まれる。

藻類が光合成する際、二酸化炭素が消費されることにより、pHが上昇する。藻類の集積に伴いpHが高くなった表層水を、曝気により下層水と混合することで、表層のpHを低下させることが出来る⁵⁾。藍藻類は、高pH条件下で無機炭素の取り込み（炭酸同化作用）が、他の種に比較して早いため、優位性を有すると考えられている¹¹⁾。したがって、表層pHの低下は藍藻類の優位性を解消する効果があると考えられる。

窒素やリンなどの栄養塩は、藻類増殖のために必要な物質である。流域からの流出により、貯水池に栄養塩が過剰に供給されると、富栄養化現象が生じる可能性が高くなる。しかしながら、藻類が増殖した際、表層の栄養塩が摂取し尽くされることにより枯渇し、それ以上の増殖が抑制されることもある。このような状況で、曝気を稼働させると、下層の栄養塩を供給してしまい、藻類の摂取を可能にしてしまう事も考えられる。

3. データに基づく藻類の増殖特性

(1) 解析対象データ及び解析方法

環境要因と藻類の増殖状況に関して、実際のデータか

ら傾向を調べた。本章で用いるデータは、全国のダム貯水池（国土交通省、水資源機構、地方公共団体管理）において、実測されたデータである。また、現地調査データからは整理が難しい項目については、既往の研究論文に基づくデータも用いた整理を行った。

本研究で対象としたダム貯水池では、概ね毎月一回の定期水質調査が実施されている¹²⁾。前章で挙げた藻類増殖に関する環境要因に対応する項目としては、水温・pH・栄養塩（リン、窒素）が測定されている。また植物プランクトンに関しては、総量の指標となるクロロフィルa以外に、藻類種別の計数も実施されている。このデータを用いて本論文では、藻類の代表的な種類として、3種（藍藻類、緑藻類、珪藻類）を取り上げ、解析・考察を行った。水質調査では、種レベルまでの詳細な分析がなされている。同じ藍藻類であっても種によって増殖特性は異なるため、この情報を生かしてより詳細な分析も望まれるところである。貯水池の低次生態系モデルによる水質解析では、上記の3分類程度で行われることが多い（たとえば文献¹³⁾、¹⁴⁾など）という実用上の便宜も鑑みて、本研究では綱レベルのやや大雑把な分類とした。

藻類の増殖は、貯水池の水理条件（貯水池の規模や回転率、密度成層状態）など、本研究で扱っていない様々な要因が影響している。さらに、月一回程度の頻度での貯水池内のある観測地点における調査という性質上、水質と藻類増殖の因果関係は、個々には必ずしも明らかではない。このような点に留意する必要があるが、本論文では、全国からの多数の実測データに対して、バラツキも含め、藻類の増殖傾向を調べることを目論んだ。

データの収集対象期間は1975年から1997年までとした。このうち、過去に「表層」（水深5m以浅）での植物プランクトン（藍藻類、珪藻類、緑藻類）の細胞数が、1万細胞/ml以上となったことのあるダムのデータを対象とした。さらにデータ整理の点から、植物プランクトンの計測と同日・同地点・同水深で水質が測定されていることを条件としてデータを絞り、処理を行った。水温等の水質の解析対象は、表層として採水分析された水深

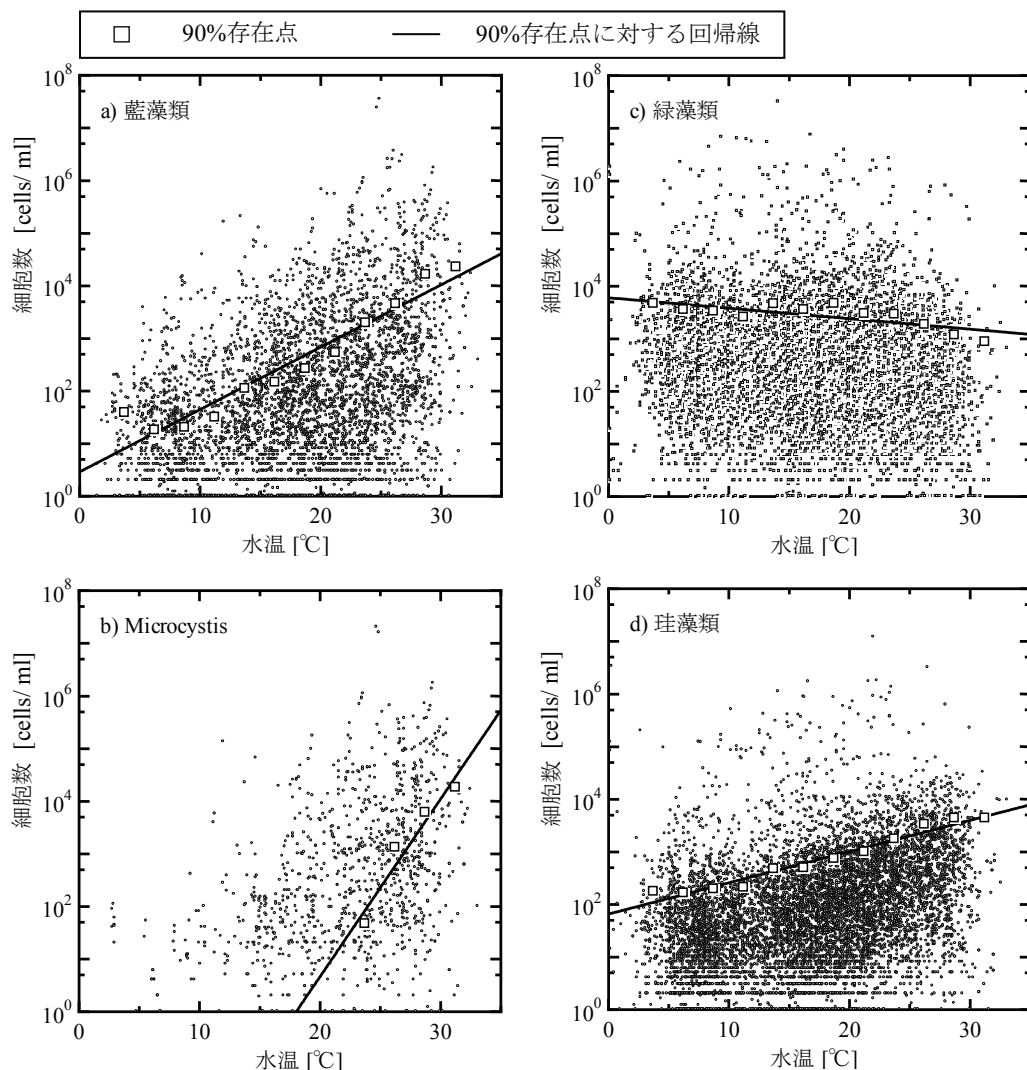


図-2 全国のダム貯水池における観測データに基づく水温と細胞数の関係

0.5m以下のデータである。従って、以下の節で扱う植物プランクトンの細胞数と水質のデータは、同一の時点・地点（ただし水深は若干の差がある）における表層の試料について比較しているものである。このような絞り込みの結果、解析の対象となったダム数は286であった。

(2) 水温

図-1に文献に基づく水温と比増殖速度の関係を示す。ここでは、藍藻類・緑藻類・珪藻類の3つに分けている。アオコなどの異常増殖と言った障害を引き起こすのは、主に藍藻類である。これらのグラフでは、水温以外の条件として、光量を概ね同程度にそろえるため、光量子密度が1~5[mol photons/m²/d]の範囲のデータについて、プロットしている。

藍藻類については、比増殖速度のピークは30~35℃付近にあるように読みとれる。しかし、これらのデータからは種による比増殖速度の差はあまり大きくないと言えそうである。アオコが発生する場合、多くは高水温時に発生することから、藍藻類は高水温の環境で増殖が他の藻類に比較して、成長が早いものと思われがちであるが、

必ずしもそうではないということである。

一方で、各種類とも最適水温よりも低いと考えられる30℃以下の範囲で見ると、水温が高くなるほど増殖速度が大きくなる傾向が見える。藍藻類の比増殖速度の上限値と比較すると、例えば10℃と20℃では約2倍の差がある。従って、水温は藻類の増殖に関わる大きな要因であると言えよう。

図-2は、全国のダム貯水池の水質データに基づいて、発生した藻類の細胞数と水温の関係を藻類別にプロットしたものである。また、アオコを形成する藍藻類の代表的なものとして、*Microcystis*属を別途抽出してプロットした。各グラフ中の直線は、水温間隔2.5℃ごとに細胞数の小さい方から数えて90%の点を求め、それに対して回帰直線を引いたものである（以下90%線と呼ぶ）。なお図-2の見方に関して、つぎの注意点がある。測定を実施した際、ある種の藻類が発生していない状況も多く見られる（特に*Microcystis*にそのようなケースが多い）。その場合、細胞数は0であるが、図-2の縦軸は対数表示で1以上（計数された場合のみ）のデータを示している。したがって、グラフ上には現れていない測定ケースも存在し

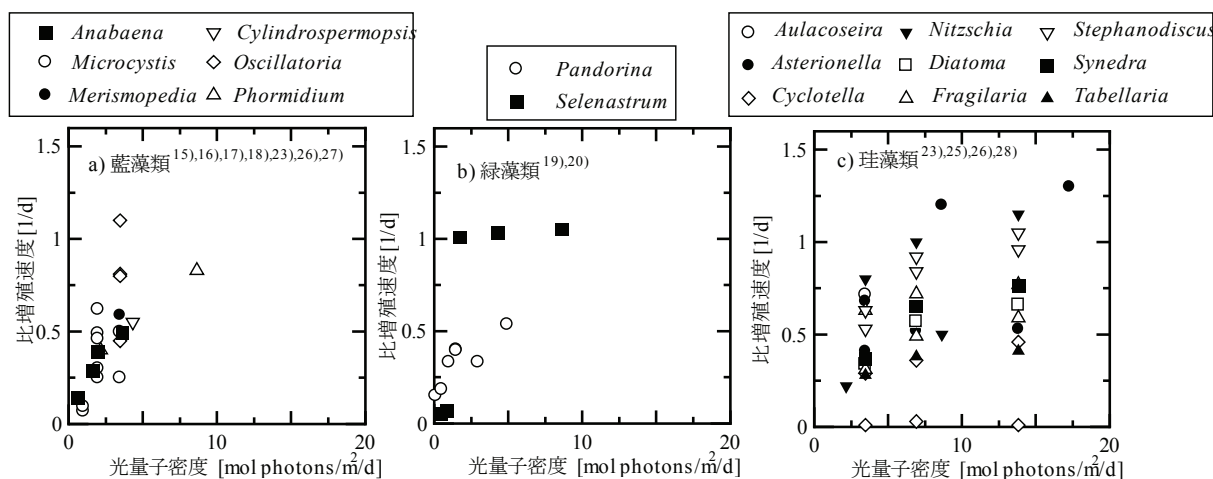


図-3 文献に基づく光量と比増殖速度の関係

ていることには、注意を要する。

水温と発生した藻類の細胞数の関係の特徴として、藍藻類、特に*Microcystis*属が、水温の上昇に伴って細胞数増加していることが分かる。このことから、一般的に言われているように、高水温時にアオコ（特に*Microcystis*属による）が発生する可能性が高いという傾向⁸⁾は、よく現れている。

藍藻類の高水温選好性対して、珪藻類は一般に低水温の環境で増殖しやすいと言われており、図-2のデータからも推測され得るものである。つまり、珪藻類のプロットでは、藍藻類よりも90%線の傾きが小さく、低水温条件においては藍藻類よりも高い値を示している。とは言うものの、珪藻類の細胞数は30℃付近の高水温になっても、90%線が上昇している。したがって、細胞数という点から見ると、珪藻類は30℃程度の比較的高い水温でも十分に増殖しうることになる。珪藻類の低水温における優占性は、栄養塩濃度など水温以外の環境要因や他の藻類との競合関係からの影響も大きい²⁴⁾と思われる。一方緑藻類は、水温の変化にほとんど関わりなく、ほぼ様の細胞数の分布をしている事が分かる。

(3) 光量

図-3に文献から得られた光量（ここでは光量子密度として整理）と比増殖速度の関係を整理した。なお、水温によって、比増殖速度が変化することから、水温は20℃の条件下で実施された実験結果を選びプロットした。

プロットされたデータの範囲が藻類毎に差があり、筆者らが集めた文献の範囲では、珪藻類のデータが最も充実している結果となった。他の2種類については、光量子密度が10[mol photon/m²/d]以下の範囲のみである。しかしながら、いずれも光量子密度が約5[mol photon/m²/d]までに比増殖速度が急激に上昇している事が分かる。また、前節の水温について整理したデータの範囲とも比較すると、比増殖速度の最大値は、いずれの藻類も概ね1[1/d]程度である。このように、文献から得られる藻類の増殖特性は、3種類で比較して大きな差は見られず、光

量からみた増殖のポテンシャルは、どの藻類にもあると考えられる。

(4) 複合要因の整理（水温、pH、リン）

図-2のデータにpHと総リン濃度を加味し、整理した結果を図-4、図-5に示す。この図は、横軸に水温、縦軸にpHもしくは総リン濃度をとり、点の種類で藻類の細胞数を区分して表現している。藻類は、 $10^3 \sim 10^4$ 細胞/ml以上になると肉眼で発生が認められると言われている²³⁾。ここでプロットしたデータは、水の華の発生を想定し、それ以上の 10^4 細胞/ml以上について整理したものである。これらの図について藍藻類と他の藻類を比較すると、次のようなことが言える。

まず、水温・pHのプロットからは、藍藻類の細胞数が高くなっている領域は、水温が20~30℃、pHが9以上であり、高水温・高pHの環境であることが分かる。それに対して、緑藻類及び珪藻類は、多少ばらつきが大きいものの概ね水温が25℃以下、pHが8以下の領域に多いと言える。これは珪藻類の方がよりはっきりと傾向が現れているが、比較的低水温・pH中性の環境である。このような傾向は、水温と同様に、概ねこれまでの研究成果等によるもの^{8), 29)}と一致する。

ただし、pHに関しては、藻類の光合成（増殖）によって高い値に変化し得る水質項目である。そのため、藍藻類の増殖時に高pHであることは、増殖の原因であるのか結果であるのか、はっきりしない面がある。しかしながら、いずれにしても、藍藻類の増殖時には高pH環境が生じている傾向があるとは言えそうである。

次に、図-5（水温・総リン軸）では、リン濃度から傾向をみると、藍藻類は総リン濃度がおよそ0.03mg/l以上の環境で多く発生しているのに対して、緑藻類と珪藻類は概ね0.03mg/l以下で細胞数が高かった場合が多い。このように、リン濃度について増殖状況を整理してみると、濃度によって藍藻類と緑藻・珪藻類の棲み分けがなされているかのように思われるデータとなっている。

総リンに関してもpHと同様、藻類が増殖した結果と

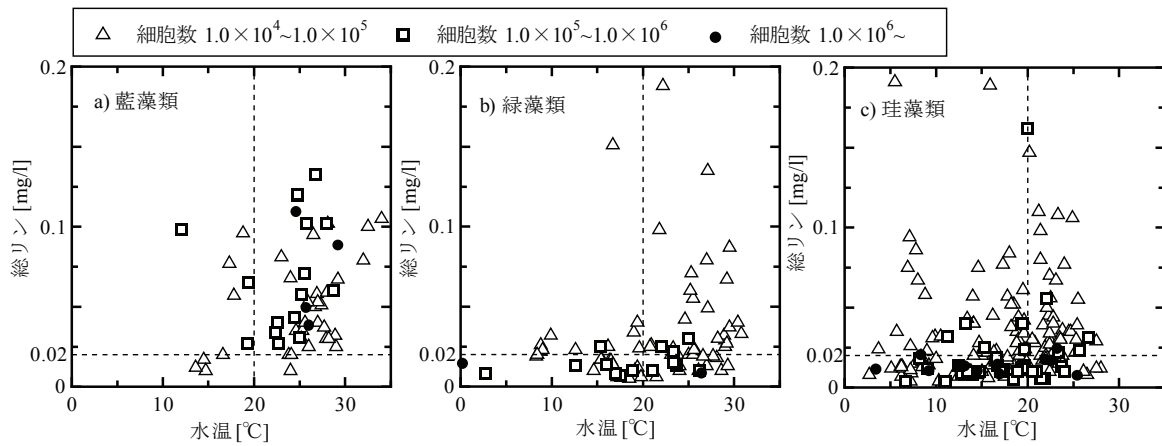


図-4 全国のダム貯水池における観測データに基づく水温・総リン濃度と細胞数の関係

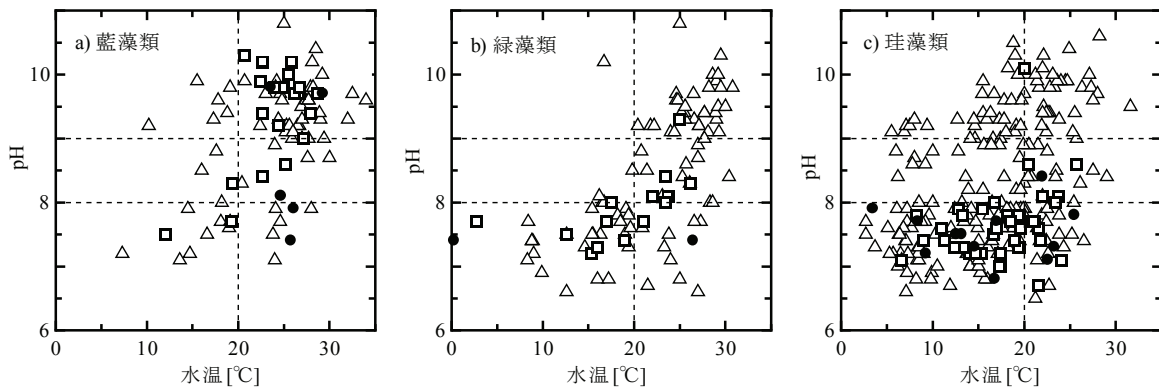


図-5 全国のダム貯水池における観測データに基づく水温・pHと細胞数の関係

して、濃度が高くなっている可能性が高く、リン濃度が高いことと藻類が増殖したことの因果関係は、必ずしもはっきりしない。そこで、表-1に示すようなデータ整理を行った。この表は、これまでに示したような測定ケース毎の整理ではなく、ダム毎のリン濃度及び藻類発生状況を整理した結果である。データの整理方法は、つぎのように行った。各ダムの総リン濃度は、ダム湖内の水深10m以浅における測定結果を、得られた全データについての平均値として求めた。また、“藻類増殖経験ダム”とは、表層における珪藻または藍藻の細胞数の測定値が、一度でも10,000細胞以上となったことのあるダムを対象として選定したものである。これらをそれぞれ総リン濃度の範囲別に集計したのが、表-1である。

この表に対して、総リン濃度の各範囲における藻類増殖経験ダムの比率をプロットしたところ、図-6のようになった。全般的に見ると、藍藻類よりも珪藻類の方が、発生するダムの比率が高い様子が見える。また、珪藻類はTPが0.02~0.03mg/Lの範囲に、藍藻類は0.04~0.05mg/Lの範囲に、それぞれダム数比率のピークがある。このことから、相対的に見ると藍藻類の方が、高いリン濃度のダムで増殖しやすい傾向があると考えられる。なお、ここで示したデータ整理は、藻類の細胞数の増加という観点から実施したものであり、水質障害の発生傾向を意味しないことについては、留意が必要である。

4. おわりに

本論文では、全国的に収集した多数のダム貯水池における、長期間の定期調査データを中心に藻類の増殖環境について取りまとめた。特にアオコの原因となる藍藻類の増殖を中心に解析および考察をした。対象ダムが、国土交通省所管のダムが中心となっており、範囲にやや偏りがあるものの、このような広範なデータを整理した例は少ないと思われるため、本論文に取りまとめた。主な結論は、以下の通りである。

- i) 藍藻類は、高水温環境で多く発生する傾向が高い。特に*Microcystis*属は水温が20℃以上になると高濃度に増殖したケースが急激に増える。
- ii) アオコの原因種である藍藻類の増殖速度は、他の藻類と比較して特別に大きくはない。アオコのように過度の優占状態となるのは、環境条件との組合せから、競争を勝ち抜いているためと考えられる。
- iii) 藻類ごとに優占的に増殖することが可能な水質条件についての棲み分けが、ある程度なされている結果が得られた。すなわち、藍藻類は高リン濃度・高pHの条件、珪藻類は低リン濃度・低pHという条件を選好しているようである。

今後は、本論文のデータ等を活用し、より効果的な貯水池水質管理（保全対策の運用を含む）を検討する必要があり、これからの課題としていきたい。

表-1 総リン濃度別の藻類増殖経験ダム数

総リン濃度 [mg/L]	総リン別 ダム数	藻類増殖経験ダム数	
		珪藻	藍藻
<0.01	39	7	0
0.01-0.02	116	30	5
0.02-0.03	69	24	10
0.03-0.04	20	6	4
0.04-0.05	17	3	4
>0.05	25	6	3
合計	286	76	26

謝辞：本研究において国土交通省の吉田延雄氏及び（株）建設技術研究所の森井裕氏との議論が、非常に有益であった。また黒石和宏氏には、データ整理にご助力頂いた。ここに記して謝意を表する。

参考文献

- 1) 藤本, 福島, 稲森, 須藤：全国湖沼データの解析による藍藻類の優占化と環境因子との関係, 水環境学会誌, 第18巻, pp.910-908, 1995.
- 2) 天野邦彦, 安田佳哉, 鈴木宏幸：多目的ダム貯水池の水質と流入河川・貯水池特性との関係について, ダム工学, 第10巻, pp. 128-137, 2000.
- 3) 丹羽, 久納, 大西, 山下：貯水池流動制御による水質保全対策, 水工学論文集, Vol.37, pp.271-276, 1993.
- 4) 天野邦彦, 藤原正好：成層破壊型曝気循環による貯水池水質変化の現地観測とその評価, 環境工学研究論文集, Vol.39, pp.191-200, 2002.
- 5) 関根, 吉田, 梅田, 浅枝：曝気式循環施設の理論とその効果に関する考え方, ダム工学, Vol.13, pp.5-18, 2003.
- 6) 浅枝隆, 池田裕一, 福田正晴, 高見英明, ヴタンカ：貯水池内温度躍層制御における散気管の効率的運用方法, 水工学論文集, Vol.38, pp.319-324, 1994.
- 7) 有賀祐勝：水界植物群落の物質生産II—植物プランクトン—, 共立出版, 1973.
- 8) 生島功：水の華の発生機構とその制御, 東海大学出版会, 1987.
- 9) 古里栄一, 浅枝 隆, 福渡 隆：淡水植物プランクトンの耐暗性について, 水環境学会誌, Vol.24, pp.27-34, 2001.
- 10) Walsby, A.E.: Gas vesicles, *Microbiol. Rev.*, Vol.58, pp.94-144, 1994.
- 11) Shapiro, J.: Current beliefs regarding dominance by blue-greens: the case for the importance of CO₂ and pH, *Verh Int Verein Limnol.*, Vol.24, pp.38-54, 1990.
- 12) 建設省河川局開発課監修: 改訂 ダム貯水池水質調査要領, (財)ダム水源地環境整備センター, 1996.
- 13) Janse J.H. and Aldenberg T.:Modelling phosphorus fluxes in the hypertrophic Loosdrecht Lakes, *Hydrobiol. Bull.*, Vol.24, pp.69-89, 1990.
- 14) Hamilton D. P. & Schladow S. G.: Prediction of water quality in lakes and reservoirs. Part I - Model description. *Ecological Modelling* Vol.96, pp.91-110, 1997.
- 15) 萩原富司：Microcystisの無菌株と単藻株の増殖特性, 国立公害研究所研究報告, Vol.92, pp.19-32, 1986.
- 16) 南篠吉之・福田明彦・平尾優年・杉本多恵子：アオコ (*Anabaena affinis*)の増殖特性—水温・塩素イオン濃度との関係について, 鳥取県衛生研究所, Vol.34, 1994.
- 17) Rapala, J. and Sivonen, K.: Assessment of environmental

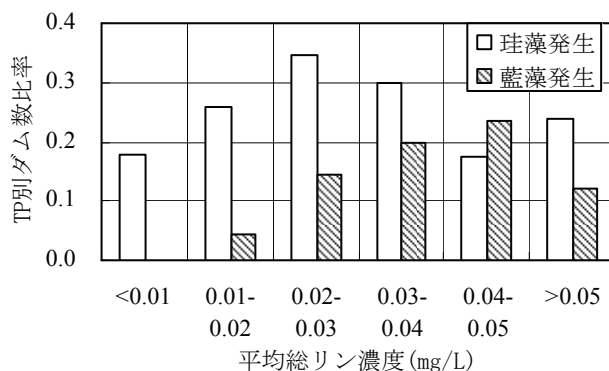


図-6 平均総リン濃度と藻類増殖経験ダムの比率

conditions that favor hepatotoxic and neurotoxic *Anabaena* spp. strains cultured under light limitation at different temperatures, *Microbial Ecology*, Vol.36, pp.181-192, 1998.

- 18) Saker, M. L. and Griffiths, D. J.: The effect of temperature on growth and cylindrospermopsin content of seven isolates of *Cylindrospermopsis raciborskii* (Nostocales, Cyanophyceae) from water bodies in northern Australia, *Phycologia*, Vol.39, pp.349-354, 2000.
- 19) Mayer, P., Frickmann, J., Christensen, E. R. and Nyholm, N.: Influence of growth conditions on the results obtained in algal toxicity tests, *Environmental Toxicology and Chemistry*, Vol.17, pp.1091-1098, 1998.
- 20) 浦屋陽一, 竹本成行：藻類増殖特性に関する一実験, 開発土木研究所月報, No.441, pp.27-33, 1990.
- 21) 小橋二夫・東禎三・矢崎仁也・八木修身：養魚池から分離した *Scenedesmus abundans* の増殖特性, 日本水処理生物学会誌, Vol.31, pp.83-87, 1995.
- 22) Endo, H., Sansawa, H., and Nakajima, K.: Studies on *Chlorella regularis*, heterotrophic fast-growing strain II. Myxotrophic growth in relation to light intensity and acetate concentration, ヤクルト研究所研究報告集, Vol.8, pp.14-120, 1978.
- 23) Coles, J. F. and Jones, R. C.: Effect of temperature on photosynthesis-light response and growth of four phytoplankton species isolated from a tidal freshwater river, *J. Phycol.*, Vol.36, pp.7-16, 2000.
- 24) 例えば, Reynolds, C. S.: Vegetation processes in the pelagic: A model for ecosystem theory, Ecology Institute, 1997.
- 25) Lin, C. K. and Schelske, C. L.: Effect of nutrient enrichment, light intensity and temperature on growth of phytoplankton from Lake Huron, US EPA Rep. No. PB-80-122831, 1979.
- 26) Litchman, E.: Population and community responses of phytoplankton to fluctuating light, *Oecologia*, Vol.117, pp.247-257, 1998.
- 27) 矢木修身, 岡田光生, 須藤隆一, 萩原富司, 高村義親：Microcystisの増殖特性, 国立公害研究所研究報告, Vol.25, pp.47-58, 1981.
- 28) Suzuki, Y. and Takahashi, M.: Growth responses of several diatom species isolated from various environments to temperature, *J. Phycol.*, Vol.31, pp.880-888, 1995.
- 29) 秋山 優ほか共編, 共著：藻類の生態, 内田老鶴圃, 1986.
- 30) 森下勇監修, (財)ダム水源地環境整備センター編著：ダム貯水池の水環境Q&Aなぜなぜおもしろ読本, 山海堂, 2002.
- 31) 福島博編：淡水植物プランクトン, ニュー・サイエンス社, 1980.

(2006. 9. 30 受付)