水源貯水池における植物ピコプランクトンの出現実態

一 柳 淳 一* 千 葉 信 男*
後 藤 光 亀* 須 藤 隆 一*

Abundance and Seasonal Changes of Picophytoplankton in Water Resource Reservoirs

Jun-ichi ICHIYANAGI*, Nobuo CHIBA*,
Kohki GOTO* and Ryuichi SUDO*

* Faculty of Engineering, Tohoku University, Aramaki aza Aoba, Aoba-ku, Sendai 980-77 Japan

Abstract

A field investigation was carried out to examine the seasonal changes and vertical distribution of picophytoplankton in 15 water resource reservoirs in Japan. From the results obtained, the maximum abundance of picophytoplankton was above 10^5 cells·m⁻¹ in all reservoirs where their trophic states were varied from oligotrophic types to eutrophic ones. Picophytoplankton abundance reached maximum in the summer season, and the dominant types were found to be two types of cyanobacterial plankton which contained phycoerthrin (PE) or phycocyanin (PC) as a main photosynthetic pigment. Cyanobacterial picophytoplankton dominance was related to the T-P concentration of reservoirs water. PE-rich type was dominant in the reservoirs where T-P concentration was relatively low, whereas PC-rich type was dominant in the reservoirs where T-P was relatively high.

Vertical profile of picophytoplankton in reservoirs showed that almost cells were distributed in the surface layers. This observation was different from natural lakes which commonly show abundance peak in more deep layers.

As the abundance of picophytoplankton slightly increase with the increase of T-P concentration, the proportion of picophytoplankton to the total phytoplankton by Chlorophyll-*a* was varied widely, and showed large values (30–45%) in the oligotrophic reservoirs as comparing with those in eutrophic ones.

Key words: picophytoplankton, cyanobacteria, reservoir, trophic states

1. はじめに

現在、全国各地の水源貯水池において、富栄養化の進行とそれに伴う植物プランクトン増殖による利水障害への対応が重要課題となっている。かび臭の原因となる *Phormidium* やアオコを形成する *Microcystis*, *Anabaena* などが主要な利水障害プランクトンであるが、これらはいずれも藍藻 (Cyanobacteria, 藍細菌) に属し、糸状あるいは不定形の群体を形成するため光学顕微鏡下で観察できる。

一方、大きさが 2 μm 程度以下の微小な植物プランクトン (植物ピコプランクトン) は通常の顕微鏡による確認が困難であるためこれまで見落とされることが多かったが、環境微生物分野でも落射蛍光顕微鏡が利用されるようになり、光合成色素の自家蛍光を観察することにより細菌サイズの植物ピコプランクトンも観察できるよう

になってきた^{1,2)}。

海外では、海域および淡水域の植物ピコプランクトンに関する研究が進められており、全植物プランクトンの 1 次生産量あるいは生物量の大部分を植物ピコプランクトンが占めていることもあること、種組成としては藍藻の *Synechococcus* とその近縁種が主要となっていることなどが報告されている³⁾。日本では、1989年7月に琵琶湖北湖で植物ピコプランクトン大増殖による透明度低下が確認され、その存在が認識されるようになってきた^{4,5)}が、琵琶湖以外の淡水域における報告例は少ない⁶⁾。特に水源ダム貯水池における出現実態についてはほとんど未解明である。

そこで、本研究では貧栄養から富栄養の各栄養段階にある水源貯水池を対象とし、植物ピコプランクトンの出現状況として最大出現数と種類組成、経時変動、鉛直分布特性等について調査した。

* 東北大学工学部 〒980-77 宮城県仙台市青葉区荒巻字青葉

2. 調査方法

水源貯水池の植物ピコプランクトン調査は宮城県内の5ダム貯水池、群馬県内の5ダム貯水池および関西圏の5ダム貯水池の計15貯水池において実施した。調査対象貯水池の概要は **Table 1** に示すとおりである。

調査は1995年6月～12月にかけて、月1回～2回の頻度で実施した。各貯水池の調査地点はダムサイト付近の定点とし、表層水を採水器等を用いて採取した。なお、2貯水池については植物ピコプランクトンの鉛直分布を観測するため、月1回の頻度で水深15mまでの5層(0.5, 2, 5, 10, 15m)で採水した。

植物ピコプランクトン試料はグルタルアルデヒドを最終濃度が1～2%となるように添加して固定し、孔径0.2μmのヌクレオポアフィルターで汙過捕集した細胞を落射蛍光顕微鏡(オリンパス BX60)で観察、ピコプランクトンを計数した¹⁾。

BX60を用いた場合、植物ピコプランクトンはG励起およびB励起で観察することにより3種類に区分され

た(**Table 2, 3**)。G励起条件下で鮮橙色を示し、B励起下では自家蛍光が弱い細胞はフィコエリトリンを主要アンテナ色素とする藍藻ピコプランクトンであり、ここではPE-typeとした。また、G励起条件下で鮮赤色を示し、B励起下では自家蛍光が弱い細胞はフィコシアニンを主要アンテナ色素とする藍藻ピコプランクトンであり、ここではPC-typeとした。さらにG励起では極めて弱い赤色を示し、B励起で明るい赤色を示す細胞はクロロフィルを主要アンテナ色素とする真核ピコプランクトンであり、ここではCH-typeとした。なお、これらの区分にあたっては、琵琶湖より単離された藍藻ピコプランクトンの落射蛍光顕微鏡下における観察結果⁵⁾や緑藻培養株(*Scenedesmus*)の観察結果を参考にした。

Table 1 Characteristics of investigated reservoirs

Number of Reservoirs	15
Drainage basin area (km ²)	20.0 - 615.0 *
Reservoir surface area (km ²)	0.83 - 5.67
Total volume (×10 ⁶ m ³)	10.0 - 204.3
Volume/Area (m)	11.1 - 45.0
Surface water level (EL. m)	97.6 - 888.0

*) minimum-maximum

Table 2 Observation conditions of picophytoplankton by epifluorescence microscopy

Microscopy type	BX60 (OLYMPUS)
B-excitation (U-MWB)	
Excitation filter	BP450-480
Dichroic mirror	DM500
Barrier filter	BA515
G-excitation (U-MWIG)	
Excitation filter	BP520-550
Dichroic mirror	DM565
Barrier filter	BA5801F

Fig. 1 Relationship between T-P, T-N and total Chl. a in investigated reservoirs. Each plot is the average value of the summer season (July to September) in 1995

Table 3 Characteristics of each type of picophytoplankton under epifluorescence microscopy observation

G-excitation	B-excitation	type	taxon
light yellow	weak	Phycoerythrin rich (PE)	Cyanobacteria
light red	weak	Phycocyanin rich (PC)	Cyanobacteria
weak red	light red	Chlorophyll rich (CH)	Eukaryotes

Table 4 Maximum and summer average abundance of picophytoplankton in reservoirs

Reservoir	Maximum (date)	Average (n)
A	44.5 (8 Aug.)	25.6 (6)
B	51.1 (8 Aug.)	24.5 (6)
C	42.1 (2 Aug.)	15.9 (6)
D	89.6 (21 Aug.)	43.8 (6)
E	10.9 (11 Nov.)	4.0 (5)
F	20.5 (4 Aug.)	7.1 (6)
G	40.5 (4 Aug.)	12.1 (6)
H	36.0 (7 July)	7.3 (6)
I	13.0 (5 Sep.)	3.3 (6)
J	63.0 (22 Aug.)	23.4 (6)
K	26.3 (8 Aug.)	13.1 (6)
L	51.2 (8 Aug.)	30.3 (6)
M	46.6 (11 Aug.)	11.8 (6)
N	26.0 (25 Aug.)	7.9 (6)
O	130.7 (25 July)	51.8 (6)

Unit: $\times 10^4$ cells $\cdot$ ml $^{-1}$

Summer average: July to September data in 1995

調査時には水質分析用試料も採取し、クロロフィル *a*, T-N, T-P を測定した。クロロフィル *a* は孔径 2 μ m のヌクレオポアフィルターによる分画捕集を施し, 2 μ m 捕集成分と通過成分 (濾液は孔径 0.2 μ m のヌクレオポアフィルターで再捕集) の 2 区分について, HPLC 法で分析した⁷⁾。T-N, T-P は酸・アルカリ同時分解法で分析した⁸⁾。

3. 調査結果と考察

3.1 調査貯水池の水質概要

夏期 (7~9 月) の水質調査結果からクロロフィル *a*, T-P, T-N の平均値を求め, その関係を Fig. 1 に示す。

調査対象貯水池は T-P 0.01 mg $\cdot$ l $^{-1}$ あるいは T-N 0.4 mg $\cdot$ l $^{-1}$ 以下の貧栄養水域からそれぞれ 0.05, 1.0 mg $\cdot$ l $^{-1}$ を越える富栄養水域に及んでおり⁹⁾, 栄養塩濃度の増大に伴ってクロロフィル *a* 平均値も 2~3 mg $\cdot$ m $^{-3}$ から 70 mg $\cdot$ m $^{-3}$ 程度に及んだ。T-N と T-P の重量比は 12~92 の範囲を示しており, 多くの貯水池はリン制限と推測され, 一部ではリンとともに窒素も重要であると考えられた⁹⁾。

3.2 植物ピコプランクトンの出現細胞数

各調査貯水池における植物ピコプランクトン出現細胞数の最大値, 夏期平均値 (7~9 月) を Table 4, 夏期平均 T-P と植物ピコプランクトン出現細胞数との関係を Fig. 2 に示す。

これまでの淡水湖沼における調査報告をみると最大出現細胞数は数十万細胞 $\cdot$ m $^{-3}$ 程度と報じられている¹⁰⁾。今回の調査ではすべての貯水池で 10 万細胞 $\cdot$ m $^{-3}$ を上回

Fig. 2 Relationship between T-P and picophytoplankton abundance in investigated reservoirs.

Upper is the average of the summer season (July to September), lower is the average T-P and maximum cell number in 1995

る植物ピコプランクトンが計測されており, 日本 の水源貯水池にも多くの植物ピコプランクトンが存在していることが確認された。また, 最大出現細胞数に達する時期はほとんどの貯水池が 8 月前後の高水温期であった。

T-P と出現細胞数の関係をみると, 平均細胞数, 最大細胞数のいずれも T-P 増加に伴って増加する傾向が認められるものの, T-P 濃度の変動に比べて植物ピコプランクトン出現細胞数の差は小さかった。この傾向は T-N との関係でも同様であった。

3.3 植物ピコプランクトンの経時変動

植物ピコプランクトン出現細胞数の経時変動は優占する種類の違いにより 3 タイプに分けられた。それぞれを代表する貯水池の経時変動を Fig. 3 に示す。

Fig. 3 の (I) は 7 月~9 月の高水温期における植物ピコプランクトンの増殖ピーク時に PE-type が優占している貯水池, (II) は増殖ピーク時の優占植物ピコプランクトンが PC-type の貯水池である。また, (III) は当初 PE-type が優占していたものが増殖ピーク時にかけて PC-type へと優占種が変遷するタイプである。いずれも出現ピークとなったときの植物ピコプランクトンは藍藻であり, 今回の調査では各タイプの出現変動がそれぞれ 5 貯水池で観察された。なお, CH-type の植物ピコプランクトンは多くの貯水池で藍藻ピコプランクトンが減少

Fig. 3 Typical seasonal changes of picophytoplankton in three reservoirs.

○ : PE-type, ● : PC-type, △ : CH-type

Fig. 4 Relationship between T-P and total Chl. *a* in reservoirs.

Each symbol means dominant type of cyanobacterial picoplankton in the summer season

し始めた秋以降に若干の増加傾向を示したが、出現細胞数は数万細胞・ ml^{-1} 程度までであった。

Fig. 4 は貯水池の栄養状態をあらわす T-P とクロロフィル *a* の関係 (Fig. 1) を藍藻ピコプランクトン出現状況のタイプ別に区分したものである。T-P 濃度が低くクロロフィル *a* も少ない貧栄養水域の夏期藍藻ピコプランクトンは PE-type が優占しており、逆に富栄養水域では PC-type が優占していることがわかる。また、途中で優占種が PE-type から PC-type へと変遷する貯

Fig. 5 Abundance of each type of cyanobacterial picoplankton and the proportion of each type to the total picophytoplankton in relation to T-P concentration.

Each value is the average of the summer season in 1995. ○ : PE-type, ● : PC-type

水池は栄養状態として両者の中間に位置している。このように、水源貯水池における藍藻ピコプランクトンの出現種類とその経時変動のタイプは貯水池の栄養状態と対応していた。

夏期の平均 T-P と PE-type, PC-type の藍藻ピコプランクトン夏期平均値との関係を Fig. 5 に示す。上段は平均出現細胞数、下段は各タイプの割合であらわしてあるが、いずれを見ても PE-type は T-P が $0.015 \text{ mg} \cdot \text{ml}^{-1}$ を上回る富栄養的な貯水池で減少傾向を示しているのに対して、PC-type は逆に T-P の増加に伴って増加した。さらに、PC-Type の方が T-P 濃度の高い貯水池でより多くの出現細胞数となっており、T-P 増加による植物ピコプランクトン総数の増大につながっていた。

これらの結果は、PE-type の藍藻ピコプランクトンはどちらかと言えば貧栄養性、PC-type の藍藻ピコプランクトンは富栄養性であることを示唆するものである。

なお、夏期の藍藻ピコプランクトンを比較すると、PE-type は桿菌状、PC-Type は球菌に近いものが多く、多くの場合に細胞の大きさは PC-type の方が小さかった。これは琵琶湖から単離された藍藻ピコプランクトンの P

Fig. 6 Vertical profile of picophytoplankton abundance and water temperature in C reservoirs.
* : Total picophytoplankton, ○ : PE-type, ● : PC-type

Fig. 7 Vertical profile of picophytoplankton abundance and water temperature in D reservoirs.
* : Total picophytoplankton, ○ : PE-type, ● : PC-type

株と G 株の形状に近かった⁵⁾。

3.4 植物ピコプランクトンの鉛直分布

鉛直調査を実施した 2 つの貯水池における植物ピコプランクトンの鉛直分布を水温分布と合わせて Figs. 6, 7 に示す。

C 貯水池は宮城県に位置する貯水量約 3,000 万 m³ の貯

水池であり、夏期 (7~9 月) の T-P, T-N 平均値が 0.018mg·l⁻¹, 0.332mg·l⁻¹, クロロフィル a が 3.4mg·m⁻³ という中栄養レベルの貯水池である。植物ピコプランクトンは 7 月, 8 月にかけて表層部で 10 万細胞·m⁻¹ を上回るまで増加しており, 水深 2 m にピークが認められた。また, 水深 10m 以深では水の鉛直循環が進行しは

じめた10月調査時を除けば概ね1万細胞・ m^{-3} 以下の少ない細胞数で推移した。

藍藻ピコプランクトンの種類別にみると、6月、7月の表層部はPE-typeが優占していたが、8月調査時にはPC-type優占へと変遷しておりPE-typeは7月よりも減少した。9月以降は再びPE-typeの方が多くなっており、先に示した途中で変遷するタイプの経時変動が認められた。

D貯水池も宮城県内の多目的ダムにより形成された貯水池（貯水量約4,500万 m^3 ）であり、T-P、T-N平均値が $0.028\text{mg}\cdot\text{l}^{-1}$ 、 $0.738\text{mg}\cdot\text{l}^{-1}$ 、クロロフィルaが $21.6\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$ という富栄養レベルの貯水池である。やはり表層部の増加が著しく水深10m以深は少ない細胞数で推移したが、C貯水池に比べて表層部の出現細胞数増加の程度は大きく、8月には90万細胞・ m^{-3} 近くまで達した。また、D貯水池の植物ピコプランクトンは常に最表層の0.5m層で最大値を示しており、水深とともに急激に減少した。

藍藻ピコプランクトンをみると、6月にはPE-typeの方が多かったが7月になるとPE-typeの減少とPC-typeの著しい増加により優占種は交代しており、10月までPC-type優占の状態が推移した。このように、D貯水池も途中変遷タイプの経時変動を示したもののC貯水池に比べてPC-type優占の期間が長く、より富栄養的であった。

琵琶湖では、通常、成層期の植物ピコプランクトンは水温躍層より上部にあたる表層から水深10~15m程度までの増加が著しくなる^{5,11)}。ただし、大湖水であった1994年の夏期には植物ピコプランクトンの分布ピークが水深15m程度の水温躍層直下付近に形成された¹²⁾。ヒューロン湖やミシガン湖でも成層期には水深20~30mに植物ピコプランクトンの分布ピークが観察される事例が報告されており¹³⁾、自然湖沼の植物ピコプランクトンは水温躍層付近に亜極層を形成する場合がある。

河川をせき止めて建造されたダム貯水池は流入河川水の影響が水質や水の流動形態に大きくあらわれる。また、多目的ダムでは放流水の水温を確保するため表層付近から放流する場合が多く、水温躍層は比較的浅いところに形成される。今回の調査では水源貯水池の植物ピコプランクトンは水深5m程度よりも浅い部分に局在しており分布ピークは表層(0.5m)~2m程度であった。これは流入河川水、放流水の影響を強く受けるダム貯水池の特徴であるものと考えられる。また、貯水池水を直接取水している浄水場では相当量の植物ピコプランクトンが到達しているものと予想され、貯水池の挙動とともに浄水過程における処理特性についても解明していく必要があると言えよう。

3.5 植物ピコプランクトンの割合

Fig. 2に示したように、植物ピコプランクトンの出現細胞数の変動はT-Pであらわされる栄養レベルの変動に比較して小さく、貧栄養水域でも比較的多くの細胞数が計測された。このことは、植物プランクトン総量が少ない貧栄養水域ほど植物ピコプランクトンの割合が大きくなることを示唆している。そこで、植物プランクトン量をクロロフィルaであらわし、表層の総クロロフィルaと2 μm 以下のクロロフィルa（植物ピコプランクトン

Fig. 8 Relationship between T-P, total Chl. a and the proportion of picophytoplankton Chl. a to the total Chl. a in reservoirs

ン画分)の夏期平均値から植物ピコプランクトンの割合を求め、Fig. 8に示す。

植物ピコプランクトンが総植物プランクトンに占める割合はT-P濃度あるいは総クロロフィルa濃度が低い貯水池で大きく、それらが増加するにしたがって減少する傾向がみられ、T-Pが $0.01\text{mg}\cdot\text{l}^{-1}$ 以下の貧栄養貯水池では30~45%であったものが $0.05\text{mg}\cdot\text{l}^{-1}$ 以上では10%以下と少なかった。この傾向は日本の自然湖沼の報告例と同様であり⁶⁾、貧栄養や中栄養貯水池では植物プランクトン群集の構造や相互関係を考察するうえで植物ピコプランクトンも重要であることが示唆された。

4. ま と め

1995年6月~12月にかけて、貧栄養から富栄養に及ぶ水源貯水池15カ所において植物ピコプランクトンの出現実態に関する調査を実施し、以下のことが明らかになった。

1) 水源貯水池の植物ピコプランクトンは夏期高水温期に増加し、10万細胞・ m^{-3} を上回る出現細胞数に達した。出現細胞数はT-P濃度が増大するにつれて増加する傾向を示したが、変動幅は比較的小さかった。

2) 水源貯水池における植物ピコプランクトンの経時変動は優占する藍藻ピコプランクトンの種類により3タイプに分けられ、それは貯水池の富栄養化状態と関連していた。すなわち、貧栄養貯水池では増殖ピーク時にかけてPE-typeが常に優占しているのに対して富栄養貯

水池では常に PC-type の方が多く、その中間に位置する貯水池では PE-type から PC-type へと遷移した。夏期の平均出現細胞数と T-P の関係からも PE-type はどちらかと言えば貧栄養性、PC-type は富栄養性である様子がうかがえた。

3) 水源貯水池の植物ピコプランクトンは水深 5 m 程度よりも上層に分布し、ピークは表層 (0.5m) あるいは 2 m 層に形成された。10m よりも深い層では循環初期を除けばほとんど増加せず、自然湖沼に比べて表層部に局在する傾向を示した。

4) 植物ピコプランクトンが植物プランクトン総量に占める割合をクロロフィル *a* であらわすと、他のプランクトンも多い富栄養貯水池では 10% 以下と小さいのに対し、貧栄養貯水池では 30~45% に達しており、これらの貯水池では植物ピコプランクトンもプランクトン群集の構造や相互関係等を考察するうえで重要であることが示唆された。

謝 辞

本研究を進めるにあたっては、建設省、宮城県および仙台市の関係諸機関に協力していただいた。また株式会社環境科学コーポレーションの山裾善之氏、上田映子さんには関東地区、関西地区の現地調査において協力していただいた。ここに記して謝意を表します。

(原稿受付 1996年4月24日)

(原稿受理 1996年9月4日)

引 用 文 献

- 1) 中村寿子 (1988) 落射蛍光顕微鏡を用いた水道生物試験, 水道協会雑誌, **646**, 21-32.
- 2) 中村寿子 (1992) 水道水源湖沼における植物ピコプランクトン, 水道協会雑誌, **699**, 34-40.
- 3) Stockner, J.G. (1988) Phototrophic picoplankton: An overview from marine and fresh-water ecosystems, *Limnology and Oceanography*, **33**, 765-775.
- 4) 一瀬諭, 若林徹哉, 山中直, 園正, 内藤幹滋, 川部浩市, 前畑佳代, 田中勝美, 野村潔 (1991) 琵琶湖におけるピコプランクトンの異常増殖—1989~1990—, 滋賀県衛生環境センター所報, **26**, 138-147.
- 5) Maeda, H., Kawai, A. and Tilzer, M.M. (1992) The water bloom of cyanobacterial picoplankton in Lake Biwa, Japan, *Hydrobiologia*, **248**, 93-103.
- 6) Takamura, N. and Nojiri, Y. (1994) Picophytoplankton biomass in relation to lake trophic state and the TN: TP ratio of lake water in Japan, *Journal of Phycology*, **30**, 439-444.
- 7) Otsuki, A. and Takamura, N. (1988) Comparison of chlorophyll-*a* concentrations measured by fluorometric HPLC and spectrophotometric methods in highly eutrophic shallow Lake Kasumigaura, *Verhandlungen der Internationalen Vereinigung für Theoretische und Angewandte Limnologie*, **23**, 944-951.
- 8) 細見正明, 須藤隆一 (1979) 全窒素および全リンの同時分解による定量, 用水と廃水, **21**, 1433-1439.
- 9) Forsberg, C. and Ryding, S.-O. (1980) Eutrophication parameters and trophic state indices in 30 Swedish waste-receiving lakes, *Archiv für Hydrobiologia*, **89**, 189-207.
- 10) Stockner, J.G. (1991) Autotrophic picoplankton in fresh-water ecosystems: The view from the summit, *Internationale Revue der gesamten Hydrobiologie*, **76**, 483-492.
- 11) 若林徹哉, 一瀬諭, 前田典子, 前畑佳代, 川部浩市, 内藤幹滋, 矢田稔, 山中直, 園正, 田中勝美, 野村潔 (1993) 琵琶湖におけるピコプランクトン—1992—, 滋賀県衛生環境センター所報, **28**, 141-147.
- 12) 関野樹, 野崎健太郎, 中西正己, 中野伸一, 田中祐志, 川幡佳一 (1995) 琵琶湖における水温躍層の発達と浮遊生物群集の分布の変化, 日本陸学会第60回大会講演要旨集, **9**.
- 13) Fahnenstiel, G.L. and Carrick, H.J. (1992) Phototrophic picoplankton in Lake Huron and Michigan: Abundance, distribution, composition, and contribution to biomass and production, *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, **49**, 379-388.