

調査研究

琵琶湖の植物プランクトンの形態に基づく 生物量の簡易推定について

一 瀬 論* 若 林 徹 哉* 松 岡 泰 倫*
山 中 直* 藤 原 直 樹* 田 中 勝 美*

A Simple Method for the Estimation of Phytoplankton Biomass Based on Cell Morphology in Lake Biwa

Satoshi ICHISE*, Tetsuya WAKABAYASHI*, Yasumichi MATSUOKA*,
Sunao YAMANAKA*, Naoki FUJIWARA* and Katsumi TANAKA*

はじめに

淡水域における植物プランクトン調査は、様々な湖沼において実施されている。しかし、その評価方法は、プランクトンの大きさを考慮しない総細胞数による評価が中心となっており、大型のプランクトンでも小型のプランクトンでも1細胞として数えている。琵琶湖においては小型のものが優占種となることが多く、また、近年では長さ1 μ m程度のピコ植物プランクトンと呼ばれる微小なプランクトンが $10^3\sim 10^6$ cells \cdot ml $^{-1}$ 存在していることが分かり¹⁾、植物プランクトンの数による現存量の評価は一層不十分と考えられるようになってきた。

また、簡便な植物プランクトン量の指標として活用されてきたクロロフィル色素量についてもプランクトンを捕捉するフィルターを通過するような微細なものが存在することや、藍藻などのようにクロロフィルa含有量の少ないものもあることなどの問題点もあった。

近年、植物プランクトンの細胞容積を計算することにより総細胞容積を算出し、これに基づいたプランクトン現存量が報告されるようになってきている。宮井²⁾らは海域の植物プランクトンの形態を6タイプに分類し細胞容積を求め、植物プランクトン現存量の簡易推定法を報告し、KOVALA & LARRANCE³⁾らは細胞の形態を17タイプに分類し細胞容積を求める計算式を提示している。また、淡水域においても今村⁴⁾らは、霞ヶ浦で出現した67種類について接眼測微計を用いて細胞容積を計算し、STRATHMANN⁵⁾の式を用いて種類ごとの細胞容積を細胞炭素量として換算し、量的なプランクトンの季節変動について報告している。赤野⁶⁾は、琵琶湖の浜大津で出現

した植物プランクトン45種類について細胞容積を求め、単位水量あたりの総体積量の変動について報告している。

当所では現在までに、琵琶湖で見られる植物プランクトンを280種類以上報告⁷⁾しており、これまでに報告された資料のみでは、現在の出現種に適用することは困難であった。そこで今回、これまで⁸⁾の方法を参考にし、琵琶湖に出現する植物プランクトンのうち、主なもの156種類について平均細胞容積を求め、これを基に植物プランクトン量の推定を試みたので報告する。

方 法

1. 細胞容積の計測方法

当所で調査しているプランクトンの大きさは、ピコプランクトンと呼ばれている小型の*Synechococcus*に属する直径約1 μ m程度のものから、ミカツキモ(*Closterium*)と呼ばれている長さ500 μ m以上のものまであり、これらを細胞容積に換算すると、概算でもその比は10,000倍以上にも達する。

プランクトン細胞容積を算出する場合、まずプランクトンの形態に注目する。その形態は球体や楕円体、直方体、円筒形および紡錘形等で単純なものから複雑なものまで様々である。また、各種の突起等を有するプランクトンも多く、これらの種類の計算にはいくつかの部分に分けてモデル化し、部分体積の集合体ととらえる必要がある。

次に、プランクトンの細胞容積は成長過程、生息水域の栄養状況や季節的な消長によっても変動するので、琵琶湖での平均的な数値が必要となる。

* 滋賀県立衛生環境センター 〒520 滋賀県大津市御殿浜13番45号
Shiga Prefectural Institute of Public Health and Environmental Science,
13-45, Gotenhama, Ohtsu, Shiga 520, Japan

これらのことを考慮し、それぞれの種類について以下に述べる近似式により、各プランクトンの細胞容積や総細胞炭素量の概算値を求めた。

(1) 平均細胞容積の計算

植物プランクトンの大きさは、琵琶湖で撮影したプランクトンの写真に、直接同倍率で撮影したマイクロメータをあて、長さや幅、殻長、短径、長径などを計測した。写真からの測定が困難である種類については、接眼測微計を用いて計測したり、淡水藻図鑑¹⁾等の参考図書より平均的な値を引用した。

ピコプランクトンの測長方法は、走査電子顕微鏡によりピコプランクトンを撮影し、短径、長径などを計測した。

細胞容積を簡便に求めるためにプランクトンの形態を、Aタイプ：円筒形 (cylinder)、楕円柱 (elliptic cylinder)、Bタイプ：球体 (sphere)、楕円体 (ellipsoid)、Cタイプ：立方体 (cube)、直方体 (rectangular parallelepiped) の3タイプに分類し、プランクトンの平均細胞容積の近似値を計算した。タイプ別の計算式を表1に示した。

今回、細胞容積の計測は、琵琶湖で近年観察される植物プランクトンとして、藍藻 (CYANOPHYCEAE) 12属29種、黄緑藻 (XANTHOPHYCEAE) 2属2種、黄色鞭毛藻 (CHRYSTOPHYCEAE) 7属16種、珪藻 (BACILLARIOPHYCEAE) 14属31種、渦鞭毛藻 (DINOPHYCEAE) 3属4種、褐色鞭毛藻 (CRYPTOPHYCEAE) 2属2種、ミドリ虫藻 (EUGLENOPHYCEAE) 3属5種、緑藻 (CHLOROPHYCEAE) 34属67種の計77属156種について実施した。細胞容積は、今村の方法と同様、出現頻度の多い種については50~100細胞、出現頻度の少ない種類については5~10細胞で計測を行い、

表1 タイプ別細胞容積 (V) を求める計算式

Aタイプ	
円筒形 (cylinder)、楕円柱 (elliptic cylinder)	
細胞容積 (V) = $\frac{\pi}{4} a b h$	a : 長軸 b : 短軸 h : 高さ
Bタイプ	
球体 (sphere)、楕円体 (ellipsoid)	
細胞容積 (V) = $\frac{\pi}{6} a b^2$	a : 長軸 b : 短軸
Cタイプ	
立方体 (cube)、直方体 (rectangular parallelepiped)	
細胞容積 (V) = a b h	a : 長さ b : 幅 h : 高さ

その平均値から算出した。

(2) 細胞炭素量への換算

現在、海洋や淡水域において微細藻類あるいは小型植物プランクトンの生物量の推定にSTRATHMANN(1967)²⁾の換算式が用いられることが多い。これは、生物量 (プランクトン) の指標として炭素量がよく用いられるからである。今回この式を用いて細胞容積 (V, $\mu\text{m}^3 \cdot \text{cell}^{-1}$) を細胞炭素量 (C, $\text{pg} \cdot \text{cell}^{-1}$) に換算して生物量の推定を試みた。プランクトンの中には、珪藻のように被殻の容積が大きくても細胞質自身の容積は小さいものもある。そこで、珪藻と他のプランクトンの細胞質を比較できるようにするため、以下の2式を用いた。

珪藻の場合

$$\log C = -0.422 + 0.758 \log V$$

その他の植物プランクトンの場合

$$\log C = -0.460 + 0.866 \log V$$

植物プランクトンの種類別生物量は、種類別細胞数に、上式から求めた細胞炭素量を乗ずることによって求めることが出来る。さらに、これらの細胞炭素量を積算することによって植物プランクトン全体の生物量を炭素量 (総細胞炭素量) で表すことが出来る。すなわち、

$$\text{総細胞炭素量} = \sum_{i=1}^m N_i \cdot C_i$$

ここでは、 N_i は i 番目の種類の細胞数、 C_i は i 番目の種類の1細胞当たりの細胞炭素量である。

2. 植物プランクトン量の推定方法

植物プランクトン量を植物プランクトンの形態に基づくプランクトン量や総細胞炭素量で推定することが可能であるかを、琵琶湖の植物プランクトン調査結果によって検討した。

調査地点は比較的非生物性懸濁物質量の少ない今津沖中央 (図1) で行ない、期間は平成6年4月から平成7年3月までの1年間行った。調査項目および方法は次のとおりである。

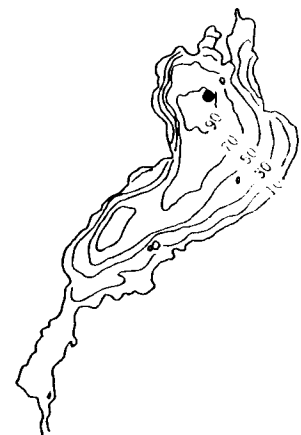


図1 調査地点 (今津中央●)

(1) 植物プランクトン (*Synechococcus*属を除く)

湖水 1 mlを直接プランクトン計数板¹⁾に取り、倍率 100~500倍で観察し、種類の同定および各種類ごとの細胞数を計数した。また、藍藻についてはほとんどの場合細胞が微小で、しかもそれらが集まって「塊状」や「糸状」の群体を形成するものが多いため、その群体数を計数し、総細胞容積を求める際には平均的な形状を示す群体の細胞数(5群体以上)を計数し、その平均細胞数に細胞容積を乗じた。

(2) *Synechococcus*属

湖水を直接セキスイ檢鏡プレート¹⁾上に取り、落射蛍光顕微鏡(日本光学製 EFD2, G励起)で倍率100~400倍で大型の*Synechococcus*(以下「大型の*Synechococcus* sp.」と呼ぶ)と小型の*Synechococcus*(以下「ピコプランクトン」と呼ぶ)に分けて計数し、1 ml中の細胞数を算出した。

(3) 粒子態炭素量

懸濁物質中の炭素量の測定はプランクトンをGF/Dフィルター(平均孔径2.7 μm)およびGF/Fフィルター(平均孔径0.7 μm)を用いて、3 μm 以下のものと3 μm 以上のものとに分別し、それぞれの炭素量をNCアナライザー(住友化学製, Sumigraph, nc80 auto)により測定した¹⁾¹²⁾。総粒子態炭素量はこの値を合算して求めた。

(4) クロロフィル a 量

クロロフィル a 量の測定は粒子態炭素量同様にGF/F・GF/Fのガラス繊維ろ紙で分別した試料について、ユネスコ法であるアセトン水抽出分光光度法(上水試験

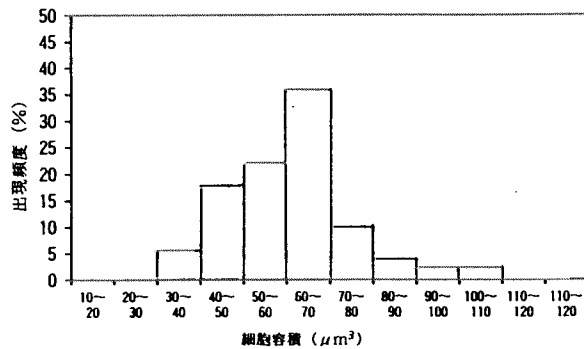


図2 *Microcystis aeruginosa* の細胞容積の分布

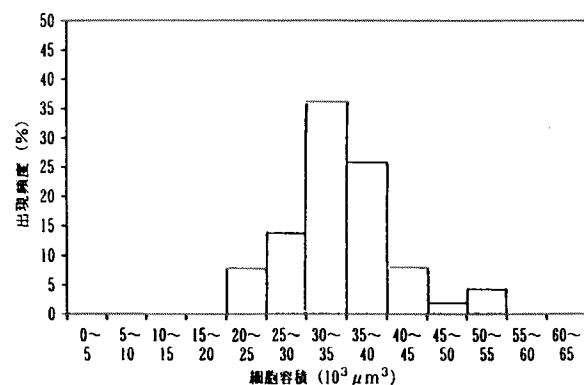


図3 *Staurastrum dorsidentiferum v. ornatum* の細胞容積の分布

方法)¹³⁾により測定した。

結 果

1. 主なプランクトンの細胞容積

主なプランクトンの形を大きく3タイプに分類した結果、Aタイプの円筒形や楕円柱には珪藻に属する*Melosira*属や*Cyclotella*属、*Cocconeis*属などの種が多く、Bタイプのうち球体のもでは藍藻に属する*Microcystis*属や*Anabaena*属や小型の緑藻に属する*Chlamydomonas*属、*Micractinium*属や*Dictyosphaerium*属などの種が多く、楕円体のもでは大型の緑藻や各種鞭毛藻などに属する種が多かった。Cタイプの立方体や直方体のもでは比較的少なく、珪藻の*Atteya*属や緑藻のツツミモに属する*Staurastrum*属などであった。

小型プランクトンの計測例として*Microcystis aeruginosa*(Bタイプ)50群体について各群体から1細胞を抽出し、50細胞を実測、細胞容積を計算し、その分布を図2に示した。*M. aeruginosa*の細胞容積は31~100 $\mu\text{m}^3 \cdot \text{cell}^{-1}$ の範囲にあり、その平均値は65 $\mu\text{m}^3 \cdot \text{cell}^{-1}$ 、変動係数は56%であった。また、細胞炭素量に換算すると13pgC $\cdot \text{cell}^{-1}$ であった。琵琶湖の*M. aeruginosa*の細胞容積は霞ヶ浦のそれ¹⁾に比べてやや小型の傾向であった。次に、琵琶湖においてよく観察される大型のプランクトンの計測例として、*Staurastrum dorsidentiferum v. ornatum*(Cタイプ)を50細胞実測し、細胞容積を計算した結果を図3に示した。ツツミモに属するこの種は、通常2個の半細胞が接合し1個体を形成しているため、細胞容積の測定は半細胞である立方体が2細胞結合した形として腕状突起以外の部分を計算し、半細胞に付着している3本の腕状突起は別に1本づつの直方体として計算し合算した。*S. dorsidentiferum v. ornatum*の細胞容積の範囲は17,000~52,000 $\mu\text{m}^3 \cdot \text{cell}^{-1}$ で、その平均値は32,000 $\mu\text{m}^3 \cdot \text{cell}^{-1}$ 、変動係数は約27%、細胞炭素量は2,770pgC $\cdot \text{cell}^{-1}$ であった。このようにして求めた156種のプランクトンの計測結果を表2-1、2-2に示した。複数の計算式を用いたプランクトン種については、種名の末尾に「*」印で示した。この表を用いて生物量の簡易推定について検討を行った。

2. 総細胞数、総細胞容積および総細胞炭素量の変動

図4に従来から行っているプランクトン総細胞数の変動を示した。また、図5および図6には、今回算出した植物プランクトン総細胞容積および総細胞炭素量の変動を示した。

今津沖中央における総細胞数の範囲は90~5,300 cells $\cdot \text{ml}^{-1}$ であり、最も多かった5月後半では*Uroglena americana*が4,400 cells $\cdot \text{ml}^{-1}$ 計数され、全体の83%と大部分を占めていた。しかし、その1細胞当たりの細胞容積は98 μm^3 と比較的小さく、細胞炭素量は18pgC $\cdot \text{cell}^{-1}$ と計算され、その結果、*U. americana*の細胞炭素量は0.08mgC $\cdot \text{l}^{-1}$ となり、総細胞炭素量の47%にしかなら

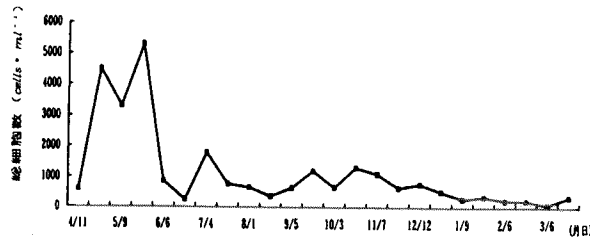


図4 今津沖中央における植物プランクトン総細胞数の変動(平成6年度)(*Synechococcus*属を除く)

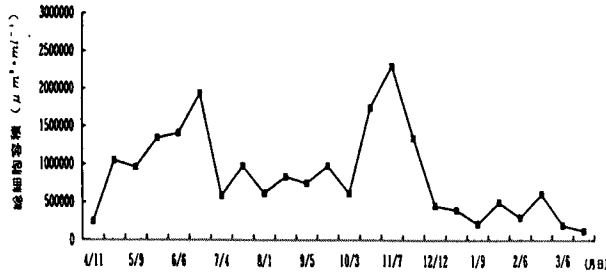


図5 今津沖中央における植物プランクトン総細胞容積

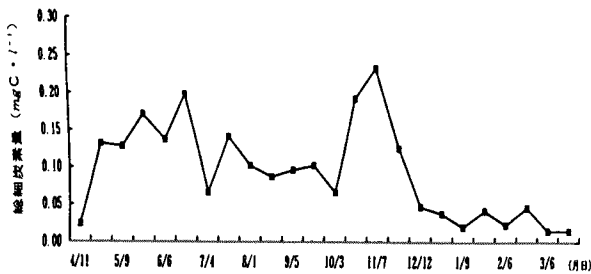


図6 今津沖中央における植物プランクトン総細胞炭素量の変動(平成6年度)(*Synechococcus*属を除く)

ず、細胞数の割合と比較すると2分の1程度であった。また、6月後半の調査では小型のプランクトンである *Rhodomonas* sp. (細胞容積 $110 \mu\text{m}^3 \cdot \text{cell}^{-1}$) が $210 \text{cells} \cdot \text{ml}^{-1}$ 計数され優占種(44%)となったが、総細胞炭素量に占める割合は全体($0.2 \text{mgC} \cdot \text{l}^{-1}$)の2.2% ($0.004 \text{mgC} \cdot \text{l}^{-1}$)にしかならなかった。これに対して、この時 $160 \text{cells} \cdot \text{ml}^{-1}$ で第2優占種となった *Closterium aciculare* v. *subpronum* (細胞容積 $9,200 \mu\text{m}^3 \cdot \text{cell}^{-1}$)は、総細胞炭素量では $0.15 \text{mgC} \cdot \text{l}^{-1}$ に達し、全体の76%と大きな割合を占めた。

総細胞容積量(図5)や総細胞炭素量(図6)の変動をみると、11月前半にも大きなピークが認められたが総細胞数(図4)では顕著な変動は示さなかった。これはこの時期、大型の緑藻である *S. dorsidentiferum* v. *ornatum* (細胞容積 $32,000 \mu\text{m}^3 \cdot \text{cell}^{-1}$)や大型の渦鞭毛藻に属する *Ceratium hirundinella* (細胞容積 $30,000 \mu\text{m}^3 \cdot \text{cell}^{-1}$)などの種類が増加したため、総細胞数の変化は小さかったが、総細胞容積量や総細胞炭素量にはその増加が鋭敏にとらえられたことによるものであった。

これらのことから、従来行われてきた総細胞数の変動では小型のプランクトンが大きく評価され、大型のプランクトンの変動が見逃される場合があることが認められ、今回の総細胞容積量や総細胞炭素量を算出することにより、それを防止することができることが示唆された。

3. 優占種の変化

表3に従来から行っている細胞数からみたプランクトン優占種の変化と、今回計測した細胞容積からみた優占種、およびこの細胞容積から算出した細胞炭素量による

表3 今津沖中央における優占種の季節変動(平成6年度)

総細胞数による優占種		cells · ml ⁻¹	%	総細胞容積による優占種		μm ³ · ml ⁻¹	%	総細胞炭素量による優占種		pgC · ml ⁻¹	%
dominant species				dominant species				dominant species			
平成6年											
4/11	<i>Rhodomonas</i> sp.	340	56	<i>Stephanodiscus carconensis</i>	84000	33	6900	28			
4/25	<i>Uroglena americana</i>	3700	82	<i>Uroglena americana</i>	360000	35	68000	52			
5/9	<i>Uroglena americana</i>	2800	85	<i>Ceratium hirundinella</i>	300000	31	51000	43			
5/23	<i>Uroglena americana</i>	4400	83	<i>Uroglena americana</i>	430000	32	81000	47			
6/6	<i>Uroglena americana</i>	360	42	<i>Closterium aciculare</i> v. <i>subpronum</i>	830000	59	85000	62			
6/20	<i>Rhodomonas</i> sp.	210	44	<i>Closterium aciculare</i> v. <i>subpronum</i>	1500000	76	150000	75			
7/4	<i>Rhodomonas</i> sp.	60	24	<i>Closterium aciculare</i> v. <i>subpronum</i>	280000	49	28000	38			
7/18	<i>Rhodomonas</i> sp.	360	20	<i>Closterium aciculare</i> v. <i>subpronum</i>	280000	37	91000	49			
8/1	<i>Aphanothece clathrata</i>	260	34	<i>Staurastrum dor.</i> v. <i>ornatum</i>	190000	38	91000	63			
8/22	<i>Oocystis solitaria</i>	100	27	<i>Staurastrum dor.</i> v. <i>ornatum</i>	640000	79	55000	58			
9/5	<i>Planktosphaeria</i> sp.	200	49	<i>Cosmocladium constrictum</i>	510000	68	66000	69			
9/26	<i>Planktosphaeria</i> sp.	480	40	<i>Staurastrum dor.</i> v. <i>ornatum</i>	320000	33	42000	39			
10/3	<i>Stephanodiscus car.</i> v. <i>pusilla</i>	200	30	<i>Closterium aciculare</i> v. <i>subpronum</i>	180000	31	21000	28			
10/17	<i>Planktosphaeria</i> sp.	800	62	<i>Staurastrum dor.</i> v. <i>ornatum</i>	960000	56	83000	42			
11/7	<i>Planktosphaeria</i> sp.	280	25	<i>Staurastrum dor.</i> v. <i>ornatum</i>	1300000	56	110000	47			
11/21	<i>Fragilaria crotonensis</i>	300	46	<i>Ceratium hirundinella</i>	600000	45	52000	42			
12/12	<i>Rhodomonas</i> sp.	230	30	<i>Cryptomonas</i> sp.	150000	35	20000	39			
12/19	<i>Fragilaria crotonensis</i>	240	46	<i>Cryptomonas</i> sp.	100000	26	13000	36			
平成7年											
1/9	<i>Fragilaria crotonensis</i>	80	29	<i>Stephanodiscus carconensis</i>	84000	40	8300	43			
1/23	<i>Rhodomonas</i> sp.	100	29	<i>Stephanodiscus carconensis</i>	290000	59	20000	47			
2/6	<i>Rhodomonas</i> sp.	120	52	<i>Stephanodiscus carconensis</i>	210000	70	11000	47			
2/20	<i>Rhodomonas</i> sp.	100	45	<i>Ceratium hirundinella</i>	300000	49	26000	56			
3/6	<i>Rhodomonas</i> sp.	30	33	<i>Stephanodiscus carconensis</i>	130000	64	6300	43			
3/20	<i>Rhodomonas</i> sp.	240	71	<i>Stephanodiscus carconensis</i>	42000	34	4900	33			

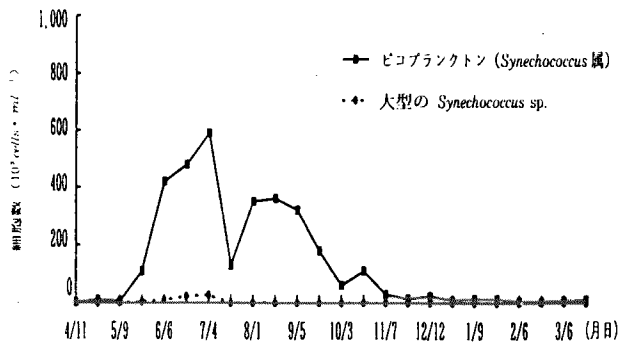


図7 今津沖中央における *Synechococcus* 属
総細胞数の変動 (平成6年度)

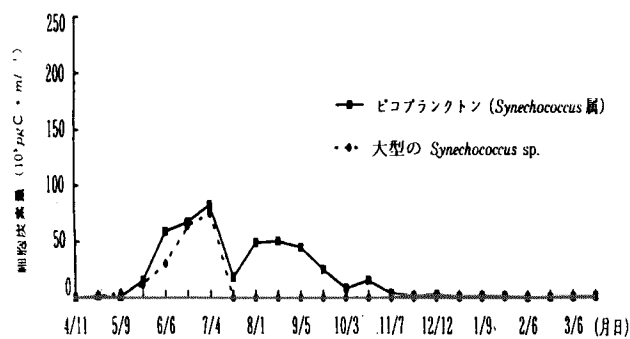


図8 今津沖中央における *Synechococcus* 属
総細胞炭素量の変動 (平成6年度)

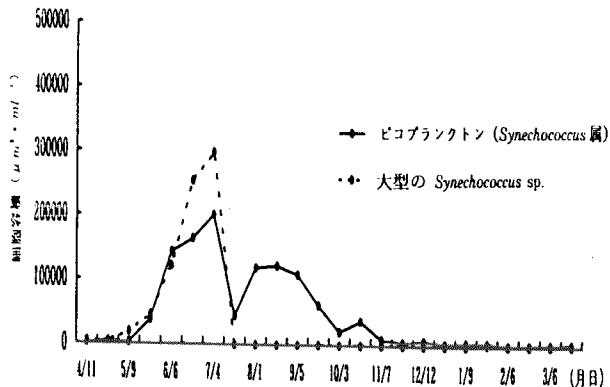


図9 今津沖中央における *Synechococcus* 属
総細胞容積量の変動 (平成6年度)

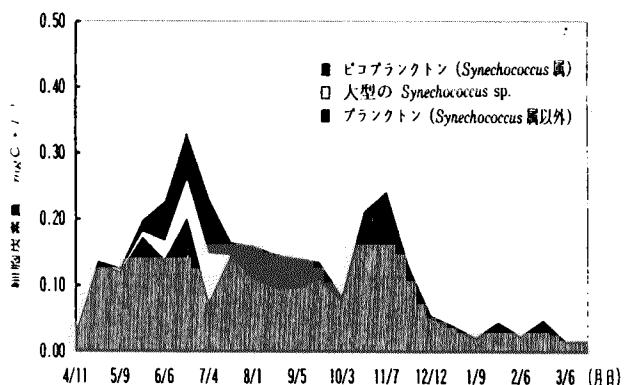


図10 今津沖中央におけるプランクトン総細胞炭素量の変動 (平成6年度) (*Synechococcus* 属を含む)

優占種の変化を比較した。

大きさを考慮しない細胞数からみた優占種の結果では、春季(4~6月)に *U. americana* が、夏季(7~9月)には *Rhodomonas* sp. や *Planktosphaeria* sp. が、秋季(10~12月)には *Planktosphaeria* sp. や *Fragilaria crotonensis* が、冬季(1~3月)には *Rhodomonas* sp. などの種類が優占種となることが多かった。しかし、プランクトンの細胞容積を考慮した細胞容積や細胞炭素量の結果では、春季に *U. americana* や *C. aciculare* v. *subpronum* が優占種となり、夏季には *C. aciculare* v. *subpronum* や *Cosmoecium constrictum* が、秋季には *S. dorsidentiferum* v. *ornatum* や *Cryptomonas* sp. が、冬季に *Cryptomonas* sp. や *Stephanodiscus carconensis*, *Ceratium hirundinella* などの種類が優占種となって現れ、細胞数からみた優占種の結果と細胞炭素量からみた優占種の結果は大きく相違していた。

細胞容積と細胞炭素量の結果をみると、ほぼ同様の傾向を示したが、冬季における細胞容積の結果では、ほとんど珪藻の *S. carconensis* によって占められる傾向が認められた。しかし、この時期細胞炭素量によるものでは、珪藻の *S. carconensis* 以外にも緑藻の *Cosmoecium constrictum* や褐色鞭毛藻の *Cryptomonas* sp. や *Rhodomonas* sp., 渦鞭毛藻の *Ceratium hirundinella* 等の種が優占種となった。このことは、珪藻の殻の容積が細胞質容積に比べ大きいと考えられ、珪藻が多く出現する時期には、細胞容積に加えて STRATHMANN (1967)⁹⁾ の換算式を用いた総細胞炭素量によるプランクトン量の推定が特に必要であると考えられた。

「淡水赤潮」を形成する *U. americana* は、細胞数、細胞容積および細胞炭素量何れからでも春季に優占種となって現れたが、その他の季節は細胞数からの優占種の結果と細胞容積や細胞炭素量からの結果とは優占種が異なっていた。これらのことから琵琶湖ではプランクトン量を生物量という観点から評価する場合には、今回試みたように総細胞炭素量によることがより適切ではないかと考えられた。

4. *Synechococcus* 属の変動

琵琶湖における *Synechococcus* 属 (ピコプランクトンを含む) の総細胞数の変動を図7に示した。ピコプランクトンの1細胞あたりの細胞容積は平均 $0.34 \mu\text{m}^3$, 細胞炭素量は $0.14 \text{pgC} \cdot \text{cell}^{-1}$ と算出された。また、棒状の形態を示す大型の *Synechococcus* sp. の細胞容積は平均 $11 \mu\text{m}^3$, 細胞炭素量は $2.8 \text{pgC} \cdot \text{cell}^{-1}$ となり、この両者の細胞容積および細胞炭素量の比は、それぞれ約30倍と20倍であった。

ピコプランクトンは、5月から増加が起ころはじめ7月4日には最高の $590,000 \text{cells} \cdot \text{ml}^{-1}$ を計数した。また、大型の *Synechococcus* sp. についても同時期に $270,000 \text{cells} \cdot \text{ml}^{-1}$ 計数した。この2種を細胞炭素量で比較すると図

8に示したようにピコプランクトンのピーク時(7月4日)には大型の*Synechococcus* sp. も同じ程度の割合を占めていたことが推定された。また、総細胞容積(図9)で比較した結果では、ピコプランクトンのピーク時には、ピコプランクトン量より、大型の*Synechococcus* sp. の総細胞容積の方が大きいという結果が得られた。

次に*Synechococcus*属以外の植物プランクトン量とピコプランクトンや大型の*Synechococcus* sp. を細胞炭素量で比較した結果では、図10に示したように*Synechococcus*属が増加した時(7月4日)には、他の植物プランクトンの細胞炭素量は32%と比較的小さくなり、この時大型の*Synechococcus*は37%、ピコプランクトンは31%と一時的ではあるがピコプランクトンを含む*Synechococcus*属が全体の植物プランクトン量の68%を占めていたことが推定された。

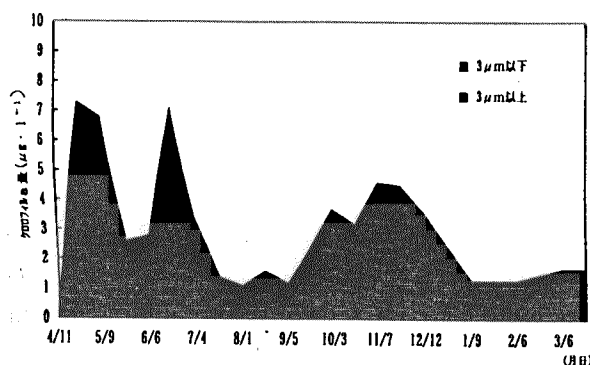


図11 今津沖中央におけるクロロフィルa量の変動
(平成6年度)

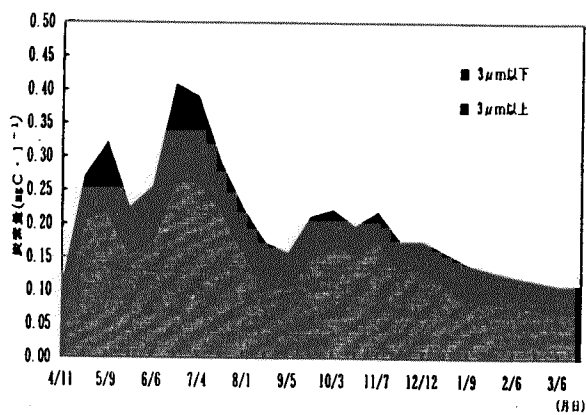


図12 今津沖中央における総粒子炭素量の変動
(平成6年度)

5. クロロフィルa量の変動と総粒子態炭素量の変動

図11に今津沖中央におけるクロロフィルa量の変動および図12にNCアナライザーで測定した水中の総粒子態炭素量の変動を示した。GF/Dフィルターには3 µm以上の大型プランクトンが捕集されていると考えられ、また、GF/Dフィルターを通過しGF/Dフィルターに捕集されたものには3 µm以下の微小なプランクトンがいると考えられる。

水中の総粒子態炭素量中には植物プランクトン以外に

も動物プランクトンや細菌およびプランクトン以外の懸濁物質なども含まれていることから総粒子態炭素量は正確な植物プランクトン量と捉えることはできないが、プランクトン以外の懸濁物質が少ない琵琶湖中央部に位置する今津沖中央では、おおむね植物プランクトン量と相関があると考えられる。

総クロロフィルa量は $1.1 \mu\text{g} \cdot \text{l}^{-1} \sim 7.3 \mu\text{g} \cdot \text{l}^{-1}$ の値で変動し、その平均値は $2.89 \mu\text{g} \cdot \text{l}^{-1}$ であった。その季節的な変動は、春季に*U. americana*の増加によるピークと*Closterium aciculare* v. *subpronum*および大型の*Synechococcus* sp. やピコプランクトンなどの増加も寄与したと考えられる2つのピークが認められ、秋季には*S. dorsidentiferum* v. *ornatum*や*Planktosphaeria* sp. の増加によるものと考えられる大きなピークが認められた。春季の最初の増加時では細胞の直径が約10 µmの*U. americana*によるものであり、GF/Dフィルター(平均孔径2.7 µm)にほとんどが捕集されたと考えられた。また、2回目のピーク時にはピコプランクトンを中心とする小型のものと、*C. aciculare* v. *subpronum*などを中心とする大型のものがクロロフィルa量としてそれぞれ1/3と2/3程度存在していたと考えられた。また、11月の増加時には*S. dorsidentiferum* v. *ornatum*を中心とする大型の種類が多く、3 µm以下のものは少なかった。

次に総粒子態炭素量については $0.11 \sim 0.41 \text{mg} \cdot \text{l}^{-1}$ の値で変動し、その平均値は $0.20 \text{mg} \cdot \text{l}^{-1}$ であった。

総粒子態炭素量の変動は春季のピークについてはクロロフィルa量の変動とほぼ一致したが、秋季のピークは比較的小さいか、低レベルであった。このことは夏季以降は、その生物量が総粒子態炭素量に十分反映されていないことも考えられた。しかし、全体の変動の傾向としては、総粒子態炭素量の変動とクロロフィルa量および総細胞容積や、総細胞炭素量の変動とは同様の傾向で推移し、総細胞数の変動よりも植物プランクトン現存量を正確に捉えているものと推定された。

以上のことから細胞容積や細胞炭素量は、クロロフィルa量や粒子態炭素量などとともに生物量に関する有用な情報を与えてくれることが分かった。

今後、植物プランクトンの細胞容積の計測精度を上げると共に、動物プランクトンの細胞容積および炭素量も考慮した検討が必要であると考えられた。また、細胞容積から細胞炭素量に換算するのに今回 STRATHMANN (1967) の式を用いたが、細胞容積との対応では小型のものが有利になるなどの検討課題も多く、細胞炭素量をより高精度に推定するためには、換算方法についても検討を加える必要があると考えられた。

まとめ

今回、琵琶湖で出現した植物プランクトン156種について細胞容積を計測し、その細胞容積から細胞炭素量に

換算することにより、総細胞容積や総細胞炭素量とした生物量の推定について検討した。

その結果、ピコプランクトンが増加した時(7月4日)には、ピコプランクトンを含む*Synechococcus*属が全体の植物プランクトン量(総細胞炭素量)の68%を占めていたことなどが推定され、細胞容積やそれを式により換算した細胞炭素量を指標とした植物プランクトン量の推定が十分可能であると考えられ、プランクトン量を総細

胞数だけで評価するのではなく、総細胞容積や総細胞炭素量についても併記してプランクトン量を評価していく必要があると考えられた。

今後、動物プランクトンや細菌などを含めた、より高精度な細胞容積の測定が必要であり、また細胞炭素量の推定方法についてもさらに検討を加えこの調査を進めていきたい。

表2-1 琵琶湖の植物プランクトンの細胞容積および細胞炭素量

	綱	種類名	Cell type	細胞体積 (V, μm^3)	細胞炭素量 (C, $pg \cdot cell^{-1}$)
1	藍藻	<i>Microcystis aeruginosa</i>	sphere	65	12.89
2	藍藻	<i>Microcystis wesenbergii</i>	sphere	110	20.33
3	藍藻	<i>Microcystis incerta</i>	sphere	10	2.55
4	藍藻	<i>Microcystis sp.</i>	sphere	14	3.41
5	藍藻	<i>Aphanocapsa elachista v. conferta</i>	sphere	8	2.10
6	藍藻	<i>Aphanocapsa sp.</i>	sphere	4	1.15
7	藍藻	<i>Aphanothece clathrata</i>	ellipsoid	1	0.35
8	藍藻	<i>Aphanothece sp.</i>	ellipsoid	2	0.63
9	藍藻	<i>Chroococcus dispersus</i>	ellipsoid	19	4.44
10	藍藻	<i>Chroococcus dispersus v. minor</i>	ellipsoid	3	0.90
11	藍藻	<i>Chroococcus minutus</i>	ellipsoid	8	2.10
12	藍藻	<i>Chroococcus limneticus</i>	ellipsoid	380	59.49
13	藍藻	<i>Chroococcus sp.</i>	ellipsoid	70	13.74
14	藍藻	<i>Merismopedia tenuissima</i>	cube	2	0.63
15	藍藻	<i>Merismopedia sp.</i>	cube	4	1.15
16	藍藻	<i>Gomphoshaeria lacustris</i>	sphere	10	2.55
17	藍藻	<i>Aphanizomenon sp.</i>	sphere	50	10.27
18	藍藻	<i>Anabaena spiroides</i>	sphere	200	34.12
19	藍藻	<i>Anabaena macrospora v. crassa</i>	sphere	320	51.26
20	藍藻	<i>Anabaena affinis</i>	sphere	110	20.33
21	藍藻	<i>Anabaena flos-aquae</i>	ellipsoid	220	37.05
22	藍藻	<i>Anabaena sp.</i>	sphere	270	44.24
23	藍藻	<i>Raphidiopsis sp.</i>	ellipsoid	97	18.23
24	藍藻	<i>Oscillatoria tenuis</i>	cylinder	140	25.05
25	藍藻	<i>Oscillatoria sp.</i>	cylinder	130	23.49
26	藍藻	<i>Phormidium tenue</i>	cylinder	17	4.03
27	藍藻	<i>Phormidium sp.</i>	cylinder	7	1.87
28	藍藻	<i>Synechococcus sp. (picoplankton)</i>	ellipsoid	0.34	0.14
29	藍藻	<i>Synechococcus sp. (棒状)</i>	cylinder	11	2.77
30	黄緑藻	<i>Clorocloster sp.</i>	sphere	39	8.28
31	黄緑藻	<i>Botryococcus braunii</i>	sphere	89	16.92
32	黄色鞭毛藻	<i>Uroglena americana</i>	ellipsoid	98	18.39
33	黄色鞭毛藻	<i>Uroglena volvox</i>	ellipsoid	150	26.59
34	黄色鞭毛藻	<i>Dinobryon divergens</i>	ellipsoid	2000	250.68
35	黄色鞭毛藻	<i>Dinobryon cylindricum</i>	ellipsoid	4200	476.67
36	黄色鞭毛藻	<i>Dinobryon bavarium</i>	ellipsoid	2800	335.50
37	黄色鞭毛藻	<i>Dinobryon sertularia</i>	ellipsoid	3100	366.42
38	黄色鞭毛藻	<i>Chrysochromulina sp.</i>	cube	180	31.14
39	黄色鞭毛藻	<i>Ochromonas crenata</i>	ellipsoid	2800	335.50

	綱	種類名	Cell type	細胞体積 (V, μm^3)	細胞炭素量 (C, $pg \cdot cell^{-1}$)
40	黄色鞭毛藻	<i>Chrysoamoeba radians</i>	sphere	340	54.02
41	黄色鞭毛藻	<i>Mallomonas tonsurata</i>	ellipsoid	940	130.35
42	黄色鞭毛藻	<i>Mallomonas reginae</i>	ellipsoid	2100	261.50
43	黄色鞭毛藻	<i>Mallomonas fastigata</i>	ellipsoid	9000	922.38
44	黄色鞭毛藻	<i>Mellomonas akrokomos</i>	ellipsoid	870	121.90
45	黄色鞭毛藻	<i>Mellomonas sp.</i>	ellipsoid	940	130.35
46	黄色鞭毛藻	<i>Synura uvella</i>	ellipsoid	23	5.24
47	黄色鞭毛藻	<i>Synura petersenii</i>	ellipsoid	450	68.87
48	珪藻	<i>Melosira solida</i>	cylinder	580	47.10
49	珪藻	<i>Melosira varians</i>	cylinder	2000	120.38
50	珪藻	<i>Melosira granulata</i>	cylinder	1500	96.79
51	珪藻	<i>Melosira granulata v. angustissima</i>	cylinder	250	24.88
52	珪藻	<i>Melosira gran. v. ang. f. spiralis</i>	cylinder	190	20.21
53	珪藻	<i>Melosira italica</i>	cylinder	1000	71.18
54	珪藻	<i>Melosira distans</i>	cylinder	710	54.90
55	珪藻	<i>Cyclotella stelligera</i>	cylinder	390	34.86
56	珪藻	<i>Cyclotella meneghiniana</i>	cylinder	3100	167.82
57	珪藻	<i>Cyclotella glomerata</i>	cylinder	270	26.38
58	珪藻	<i>Cyclotella sp.</i>	cylinder	200	21.01
59	珪藻	<i>Stephanodiscus carconensis</i>	cylinder	4200	211.27
60	珪藻	<i>Stephanodiscus carconensis v. pusilla</i>	cylinder	480	40.80
61	珪藻	<i>Stephanodiscus astrea v. minutula</i>	cylinder	220	22.58
62	珪藻	<i>Skeletonema potamos</i>	cylinder	190	20.21
63	珪藻	<i>Rhizosolenia longiseta</i>	cube	2000	120.38
64	珪藻	<i>Attheya Zachariasii</i>	cube	2400	138.22
65	珪藻	<i>Fragilaria crotonensis</i>	ellipsoid	330	30.71
66	珪藻	<i>Fragilaria capucina</i>	ellipsoid	300	28.57
67	珪藻	<i>Asterionella formosa</i>	ellipsoid	350	32.11
68	珪藻	<i>Synedra ulna</i>	ellipsoid	3800	195.83
69	珪藻	<i>Synedra acus</i>	ellipsoid	3200	171.91
70	珪藻	<i>Synedra rumpens</i>	ellipsoid	160	17.74
71	珪藻	<i>Synedra sp.</i>	ellipsoid	3200	171.91
72	珪藻	<i>Cocconeis placentula</i>	cylinder	4600	226.36
73	珪藻	<i>Acanthos minutissima</i>	ellipsoid	880	64.60
74	珪藻	<i>Gyrosigma acuminatum</i>	cylinder	47000	1318.29
75	珪藻	<i>Navicula sp.</i>	ellipsoid	120	14.26
76	珪藻	<i>Nitzschia acicularis</i>	ellipsoid	320	30.00
77	珪藻	<i>Nitzschia palea</i>	ellipsoid	310	29.29
78	珪藻	<i>Nitzschia sp.</i>	ellipsoid	310	29.29

表 2-2 琵琶湖の植物プランクトンの細胞容積および細胞炭素量

	綱	種類名	Cell type	細胞体積 (V, μm^3)	細胞炭素量 (C, $\mu\text{g}\cdot\text{cell}^{-1}$)
79	渦鞭毛藻	<i>Gymnodinium helveticum</i>	ellipsoid	20000	1841.96
80	渦鞭毛藻	<i>Gymnodinium</i> sp.	ellipsoid	1300	172.61
81	渦鞭毛藻	<i>Peridinium</i> sp.	ellipsoid	4700	525.44
82	渦鞭毛藻	<i>Ceratium hirundinella</i>	ellipsoid	30000	2616.99
83	褐色鞭毛藻	<i>Cryptomonas</i> sp.	ellipsoid	1700	217.77
84	褐色鞭毛藻	<i>Rhodomonas</i> sp.	ellipsoid	110	20.33
85	ミドリムシ藻	<i>Euglena proxima</i>	ellipsoid	11000	1097.47
86	ミドリムシ藻	<i>Euglena</i> sp.	ellipsoid	9700	984.20
87	ミドリムシ藻	<i>Phacus caudatus</i>	ellipsoid	4400	496.27
88	ミドリムシ藻	<i>Trachelomonas hispida</i>	ellipsoid	9800	992.98
89	ミドリムシ藻	<i>Trachelomonas</i> sp.	ellipsoid	520	78.05
90	緑藻	<i>Chlamydomonas</i> sp.	sphere	650	94.70
91	緑藻	<i>Carteria</i> sp.	sphere	730	104.71
92	緑藻	<i>Pandorina morum</i>	sphere	450	68.87
93	緑藻	<i>Eudorina elegans</i>	sphere	460	70.19
94	緑藻	<i>Gloeoecystis</i> sp.	sphere	220	37.05
95	緑藻	<i>Elakatothrix gelatinosa</i>	ellipsoid	260	42.82
96	緑藻	<i>Golenkinia radiata</i>	sphere	380	59.49
97	緑藻	<i>Micractinium pusillum</i>	sphere	100	18.72
98	緑藻	<i>Errerella bornheimiensis</i>	sphere	120	21.92
99	緑藻	<i>Dictyosphaerium pulchellum</i>	sphere	80	15.43
100	緑藻	<i>Dictyosphaerium</i> sp.	sphere	10	2.55
101	緑藻	<i>Kirchneriella lunaris</i>	ellipsoid	110	20.33
102	緑藻	<i>Kirchneriella contorta</i>	ellipsoid	7	1.87
103	緑藻	<i>Quadrigula chodatii</i>	ellipsoid	210	35.59
104	緑藻	<i>Tetraedron gracile</i>	cube	22000	2000.47
105	緑藻	<i>Tetraedron</i> sp.	cube	8200	850.92
106	緑藻	<i>Treubaria setigerum</i>	cube	180	31.14
107	緑藻	<i>Planktosphaeria</i> sp.	sphere	600	88.35
108	緑藻	<i>Oocystis parva</i>	ellipsoid	100	18.72
109	緑藻	<i>Oocystis lacustris</i>	ellipsoid	970	133.95
110	緑藻	<i>Oocystis solitaria</i>	ellipsoid	530	79.35
111	緑藻	<i>Oocystis submarina</i>	ellipsoid	530	79.35
112	緑藻	<i>Oocystis</i> sp.	ellipsoid	550	81.94
113	緑藻	<i>Chodatella</i> sp.	ellipsoid	210	35.59
114	緑藻	<i>Ankistrodesmus falcatus</i>	ellipsoid	90	17.08
115	緑藻	<i>Ankistrodesmus falcatus</i> v. <i>mirabile</i>	ellipsoid	42	8.83
116	緑藻	<i>Ankistrodesmus</i> sp.	ellipsoid	590	87.08
117	緑藻	<i>Monoraphidium tortile</i>	ellipsoid	11	2.77
118	緑藻	<i>Monoraphidium contorta</i>	ellipsoid	650	94.70
119	緑藻	<i>Schroederia setigera</i>	ellipsoid	130	23.49
120	緑藻	<i>Schroederia judayi</i>	ellipsoid	140	25.05
121	緑藻	<i>Pediastrum tetras</i>	ellipsoid	910	126.74
122	緑藻	<i>Pediastrum duplex</i>	ellipsoid	1800	228.82
123	緑藻	<i>Pediastrum duplex</i> v. <i>clathratum</i>	ellipsoid	2200	272.26
124	緑藻	<i>Pediastrum boryanum</i>	ellipsoid	1700	217.77
125	緑藻	<i>Pediastrum biwae</i>	ellipsoid	1000	137.53
126	緑藻	<i>Pediastrum</i> sp.	ellipsoid	1700	217.77
127	緑藻	<i>Coelastrum microporum</i>	sphere	780	110.90
128	緑藻	<i>Coelastrum cambricum</i>	sphere	610	89.63
129	緑藻	<i>Crucigenia lauterbornii</i>	ellipsoid	120	21.92
130	緑藻	<i>Crucigenia</i> sp.	ellipsoid	120	21.92
131	緑藻	<i>Actinastrum hantzschii</i>	ellipsoid	190	32.63
132	緑藻	<i>Actinastrum hantzschii</i> v. <i>fluviale</i>	ellipsoid	74	14.42
133	緑藻	<i>Tetrastrum</i> sp.	ellipsoid	110	20.33
134	緑藻	<i>Scenedesmus armatus</i>	ellipsoid	200	34.12
135	緑藻	<i>Scenedesmus denticulatus</i>	ellipsoid	370	58.13
136	緑藻	<i>Scenedesmus circumfusus</i>	ellipsoid	110	20.33
137	緑藻	<i>Scenedesmus abundans</i>	ellipsoid	120	21.92
138	緑藻	<i>Scenedesmus quadricauda</i>	ellipsoid	210	35.59
139	緑藻	<i>Scenedesmus opoliensis</i>	ellipsoid	440	67.54
140	緑藻	<i>Scenedesmus bicaudatus</i>	ellipsoid	59	11.85
141	緑藻	<i>Scenedesmus</i> sp.	ellipsoid	92	17.41
142	緑藻	<i>Mougeotia</i> sp.	cylinder	27000	2388.74
143	緑藻	<i>Spirogyra</i> sp.	cylinder	31000	2692.39
144	緑藻	<i>Closterium aciculare</i> v. <i>subpronum</i>	cylinder	9200	940.10
145	緑藻	<i>Closterium acutum</i> v. <i>variable</i>	ellipsoid	820	115.81
146	緑藻	<i>Closterium</i> sp.	ellipsoid	5200	573.53
147	緑藻	<i>Cosmarium</i> sp. *	ellipsoid	22000	2000.47
148	緑藻	<i>Xanthidium hastifemum</i> v. <i>javanicum</i> *	cube	62000	4907.68
149	緑藻	<i>Staurastrum dor.</i> v. <i>ornatum</i> *	cube	32000	2767.45
150	緑藻	<i>Staurastrum longigradatum</i> *	cube	30000	2616.99
151	緑藻	<i>Staurastrum pingue</i> *	cube	25000	2234.70
152	緑藻	<i>Staurastrum submanfeldti</i> *	ellipsoid	24000	2157.07
153	緑藻	<i>Staurastrum aretiscum</i> *	ellipsoid	82000	6252.40
154	緑藻	<i>Staurastrum</i> sp. *	cube	14000	1352.42
155	緑藻	<i>Spondylosium mondyforme</i> *	ellipsoid	10000	1010.51
156	緑藻	<i>Cusmocladium constructum</i> *	ellipsoid	1600	206.63

* 複数の計算式を用いた種類

文 献

- 1) 一瀬 諭 et al. : 滋賀県立衛生環境センター所報, 26, 138-147(1991)
- 2) 宮井 博 et al. : Bulletin of Plankton Society of Japan, 35, (1980-1989)
- 3) KOVALA, P. E. & J. D. LARRANCE : Department of Oceanography University of Washington, Special Report No.38, 21(1966)

- 4) 今村 典子, 安野 正之 : 国立公害研究所研究報告, 第22号 (R-22-'81), 123-148(1981)
- 5) STRATHMANN, R. R. : Limnol. Oceanography, 12, 411-418(1967)
- 6) 赤野 寿子 : 奈良女子大学研究報告, Vol. 15 No.7 (1974)
- 7) 滋賀県立衛生環境センター : 琵琶湖のプランクトンデータ集 (植物プランクトン), 1990-1993, (1995)

- 8) 廣瀬 弘幸, 山岸 高旺 : 日本淡水藻図鑑, 内田老鶴園新社, (1977)
- 9) Hustedt : Bacillariophyta in Susswasser flora A. Pasher(ed)gustav fihcer(1950)
- 10) 環境保全研究成果集 (Ⅱ) : 環境庁企画調整局環境研究技術課編, 82-1~82-13, (1993)
- 11) 山中 直 et al. : 滋賀県立衛生環境センター所報, 27, 25-32(1992)
- 12) 山中 直 et al. : 滋賀県立衛生環境センター所報, 28, 37-48(1993)
- 13) 上水試験方法 : 日本水道協会, 20 クロロフィル, 444-446(1993)