

論文

琵琶湖における植物プランクトン現存量の変遷について - 1978 ~ 2000 -

一瀬 諭^{*1} 若林徹哉^{*1} 藤原直樹^{*1} 水嶋清嗣^{*1} 伊藤 貢^{*1}

Long-Term Changes of Biomass of Phytoplankton in Lake BIWA - 1978 ~ 2000 -

Satoshi ICHISE^{*1}, Tetsuya WAKABAYASHI^{*1}, Naoki FUJIWARA^{*1}
Kiyoshi MIZUSHIMA^{*1} and Mitsugu Ito^{*1}

琵琶湖に出現する植物プランクトン 437 種類の平均細胞容積を求め、各々の細胞数と細胞容積を掛け合わせて積算し長期的な現存量を求めた結果、プランクトン種は 1980 年代に比べ 1990 年以降、明らかに変化してきていることが示唆された。その現存量の変動は富栄養化防止条例制定 (1979 年) 以降減少傾向にあったが、その後横ばいとなり 1995 年以降は徐々に増加傾向にあることが明らかとなった。特に藍藻綱については 1999 年、2000 年にその傾向が顕著であった。また、過去に比べ近年は、総細胞容積量の最小値と最大値との変動幅が小さくなってきていることなども明らかとなった。

キーワード:琵琶湖, 植物プランクトン, 長期変動, 現存量, 細胞容積

はじめに

湖沼における植物プランクトン調査は、多くの湖沼において実施されている。しかし、その現存量はプランクトンの大きさを考慮せず、大型のものでも小型のものでも 1 個体として計数し、総細胞数や総群体数として植物プランクトン量を評価しているのが現状である。また、植物プランクトン量の指標として用いられているクロロフィル-a 量¹⁾についても、ろ紙を通過するような微小なプランクトンが多く存在²⁾することや、藍藻のようにクロロフィル-a 含有量の比較的少ない種類も存在³⁾することなどの問題点もあった。

我々は、琵琶湖における植物プランクトン現存量の変化についての知見を得るため、宮井⁴⁾や KOVALA, P.E. & J. D. LARRANCE らの方法⁵⁻⁸⁾を参考に、琵琶湖北湖の今津沖中央に出現した 156 種類の植物プランクトンの平均細胞容積を計算し、これに基づいた植物プランクトン現存量を推定し 1994 年 4 月 ~ 1995 年 3 月までの 1 年間の結果については、日本水環境学会等⁹⁻¹⁰⁾や当センター所報¹¹⁾などで報告してきた。

今回、この方法に準拠し¹¹⁾、過去 23 年間における琵琶湖に出現した 437 種類の植物プランクトンについても平均細胞容積を求め、総細胞容積量からみた植物プラ

ンクトン現存量の長期変遷についての検討を行った。

調査方法

1. 調査地点

調査地点は図 1 に示した琵琶湖の中では比較的、非生



*1 滋賀県立衛生環境センター 〒520-0834 滋賀県大津市御殿浜13-45
Shiga Prefectural Institute of Public Health and Environmental Science,
13-45, Gotenhama, Ohtsu, Shiga, 520-0834, Japan

物性懸濁物質量の少ない北湖中央(今津沖中央:Sta.1)の1地点のデータを用いた。

2. 調査回数

調査期間は1978年1月から2000年12月までの23年間,原則として毎月上旬と中旬の2回,合計536回の調査を実施した。

3. 細胞数の計数方法および細胞容積の算出方法

各植物プランクトンの細胞容積の算出法については,前報¹¹⁾で詳細に記載しているためここでは省略する。なお,各植物プランクトン細胞数の計数方法については湖水1mlを直接プランクトン計数板(リコー社製)に取り,倍率125~500倍で観察し,種の同定および種毎の細胞数を計数した。また,藍藻については非常に微細な細胞が集合し「塊状」や「糸状」の群体を形成するものが多いことから,予め種類毎に1群体とカウントする平均細胞数を決めておき,計数時にはその群体数として計数した。

4. クロロフィル-a量の測定

クロロフィル-a量の測定はGF/D・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(上水試験方法)¹⁾により測定した。

結果および考察

1. プランクトン種と細胞容積

今回,測定した植物プランクトンの細胞容積は藍藻52種,黄緑藻4種,黄色鞭毛藻41種,珪藻111種,渦鞭毛藻17種,褐色鞭毛藻3種,ミドリムシ藻14種,緑藻195種の計437種類について細胞容積を求め,その概要を表1に示した。藍藻では100~400 μm^3 前後の小型の種類が多かったが例外的に*Oscillatoria kawamurae*のような1細胞が18,000 μm^3 と大型種も認められた。黄色鞭毛藻や珪藻は,1,000~4,000 μm^3 程度のものが多かったが,珪藻の中には80,000 μm^3 と大型種も認められた。しかし,珪藻については被殻の容積を細胞容積として計算しているため,珪藻の減退期には被殻内の細胞

容積量は小型化するため計算結果よりも小さくなると考えられた。渦鞭毛藻は2,000~5,000 μm^3 程度の比較的大型種が多かった。最も種類数が多かったのは緑藻であり195種類が出現した。100 μm^3 以下の小型球形緑藻から80,000 μm^3 以上もあるツツミモに属する種類まで幅広く存在した。

2. 最大総細胞容積種の変遷

総細胞容積からみた最大総細胞容積種(以下「優占種」と略す)の変遷を図2に示した。この期間中に出現した種類数は,藍藻4種,黄色鞭毛藻5種,珪藻8種,渦鞭毛藻3種,褐色鞭毛藻1種,緑藻13種の計34種であった。季節的に総細胞容積からみた優占種の変遷をみると,冬季(1~3月)に珪藻や渦鞭毛藻および緑藻が優占種となって出現し,春季(4~6月)には淡水赤潮を形成する黄色鞭毛藻が,夏季から秋季(7~12月)にかけては緑藻を中心とする種類が主に優占種となり,季節的には比較的規則正しい消長を繰り返していることが分かった。しかし,長期的な種類の変遷をみると,1979~1989年までの11年間は,珪藻および黄色鞭毛藻,緑藻の3網の種類によって全体の85%が占められていたが,1990~2000年の11年間には56%と減少し,これらの種類に加え褐色鞭毛藻や渦鞭毛藻および藍藻などに属する種類も出現するようになった。中でも渦鞭毛藻は,1979~1989年の11年間に*Gymnodinium helveticum*(GY)*Ceratium hirundinella*(CH)が優占種となる回数が8回と少なかったのに対し,1990年以降の11年間には29回と増加した。また,褐色鞭毛藻の*Cryptomonas* sp.(CR)についても1989年以前は2回であったのに対し1990年以降は17回と多くなる傾向が認められた。これと反対に1990年以前まで優占種となって多く出現していた珪藻網に属する*Melosira solida*(*Aulacoseira nipponica*:MS)や*Stephanodiscus carconensis* var. *pusilla*(*Stephanodiscus pseudosuzukii*¹⁴⁾:SP)は1979~1989年の11年間には合計37回であったのに対し1990年以降の11年間には全く優占種として出現しなかった。これらの2種は古代の琵琶湖の地層からも大量に発見¹²⁾されており,近年,辻ら¹³⁾によって琵琶湖固有種として発表された貴重な種類である。また,春季に毎年出現していた*Uroglena americana*(UA)については,1998

| 網 | 種類数 | 最小種 | 細胞容積 (μm^3) | 最大種 | 細胞容積 (μm^3) | 細胞容積 平均値 |
|--------|-----|--------------------------------------|-----------------------------|-------------------------------|-----------------------------|-------------|
| 藍藻 | 52 | <i>Aphanothece clathrata</i> | 1 | <i>Oscillatoria Kawamurae</i> | 18000 | 440 |
| 黄緑藻網 | 4 | <i>Chlorocloster</i> sp. | 39 | <i>Botryococcus Braunii</i> | 89 | 54 |
| 黄色鞭毛藻網 | 41 | <i>Chryso-sphaerella</i> sp. | 60 | <i>Mallomonas fastigata</i> | 9000 | 1100 |
| 珪藻 | 111 | <i>Navicula</i> sp. | 120 | <i>Cymatopleura elliptica</i> | 80000 | 4600 |
| 渦鞭毛藻 | 17 | <i>Peridinium berolinense</i> | 300 | <i>Ceratium hirundinella</i> | 30000 | 5100 |
| 褐色鞭毛藻 | 3 | <i>Rhodomonas</i> sp. | 170 | <i>Cryptomonas</i> sp. | 1700 | 1200 |
| ミドリムシ藻 | 14 | <i>Trachelomonas oblonga</i> | 100 | <i>Euglena oxyuris</i> | 50000 | 8400 |
| 緑藻 | 195 | <i>Dictyosphaerium subsolitarium</i> | 10 | <i>Staurastrum arctiscon</i> | 82000 | 3800 |
| 合計 | 437 | | | | | |

年以降減少し、さらにこれまで優占種として出現回数が少なかった *Coelastrum cambricum* (CC) が長期間優占種として出現するようになった。これらのことから、琵琶湖の植物プランクトン種は 1980 年代に比べ 1990 年以降、明らかに変化してきていることが示唆された。特に最大総細胞容積量で各プランクトン優占種をみると小型の珪藻や小型の緑藻の出現回数が少なくなり、大型の鞭毛藻や大型の緑藻が優占種となる出現回数が増加した。従って、湖沼における理化学的な水質結果と第一次生産である植物プランクトン種との関係を考察するためには、各種の細胞容積を十分考慮した現存量の評価方法が必要であると考えられた。

3. 総細胞容積量の変遷

総細胞容積量の経年変動を図 3 に示した。過去 23 年間に於ける総細胞容積量からみた植物プランクトン量の変動は $3.6 \times 10^4 \sim 2.5 \times 10^7 \text{ } ^\circ \text{ m}^3 \text{ ml}^{-1}$ で変動し、その平均値は $2.7 \times 10^6 \text{ } ^\circ \text{ m}^3 \text{ ml}^{-1}$ であった。この期間中で最も総細胞容積が大きかった時期は 1992 年 7 月であり、この時期大型緑藻(ツツミモ)に属する *Closterium aciculare* var. *subpronum* (CA) や *S. dorsidentiferum* var. *ornatum* (SD) が多く出現し、この 2 種により全体の 93 % が占められていた。植物プランクトン量の変動をみると、富栄養化防止条例制定(1979 年)以降は、徐々に減少傾向を示していたが、その後、横ばいとなり、1995 年以降からは徐々に増加傾向にあることが明らかとなった。

また、1978 ~ 1992 年の期間については、冬季の最小値と夏季から秋季にかけての最大値との変動幅が大きかったが、1993 年以降は明らかに変動幅が小さくなる傾向も認められた。このことは 1995 年以降、冬季の植物プランクトン量が徐々に増加傾向にあることによるものと推察された。

次に、総細胞容積量の平均的経月変動を図 4 に示した。冬季は $1.0 \times 10^6 \text{ } ^\circ \text{ m}^3 \text{ ml}^{-1}$ 以下と非常に低く推移していたが、4 月中旬頃から増加が始まり、7 ~ 11 月にかけて $3.0 \times 10^6 \text{ } ^\circ \text{ m}^3 \text{ ml}^{-1}$ 以上の増加が認められた。さらに、1978 ~ 1989 年の平均値と 1990 ~ 2000 年の平均値を比較すると、近年は秋季の増加量が少なくなっていることが推察された。このことは秋季に *S. dorsidentiferum* var. *ornatum* ($32,000 \text{ } ^\circ \text{ m}^3$) のような大型のツツミモ類が減少しているためであると推察された。

4. 1 細胞あたりの細胞容積の経月変動

1 細胞あたりの細胞容積が季節的にどのように変化するかを調べた結果、図 5 に示すように *U. americana* が毎年出現する 5 月(平均 $550 \text{ } ^\circ \text{ m}^3$)には、小型の細胞が多く出現していることが明らかとなり、秋季である 10 ~ 11 月(平均 $4,600 \text{ } ^\circ \text{ m}^3$)には大型の種類が出現していることが明らかとなった。また、図 6 に長期的にみた 1 細胞あたりの細胞容積の変動を示した。この結果、大型の細胞が出現する年と小型種が出現する年があることが推察され、大きく流れをみれば、この 23 年間に 4 回の増減

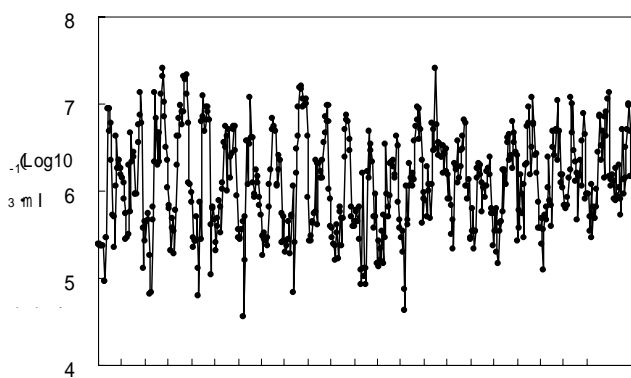


図 3 今津沖中央における総細胞容積の経年変動 (1978-2000)

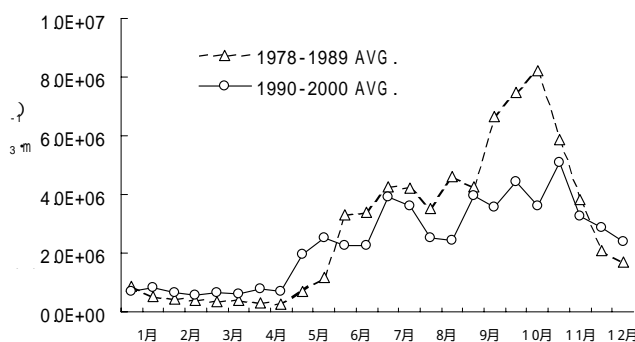


図 4 総細胞容積の経月変化 (平均値)

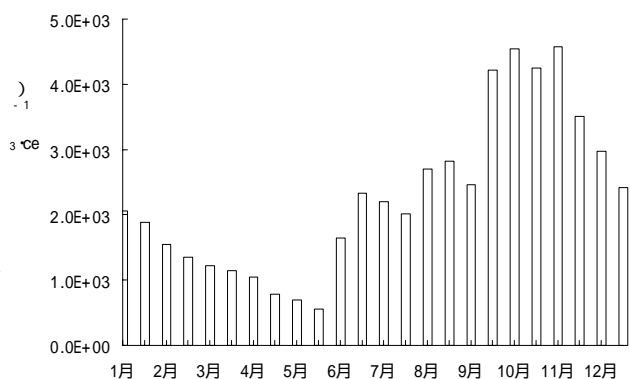


図 5 1細胞あたりの平均細胞容積の経月変動 (1978-2000)

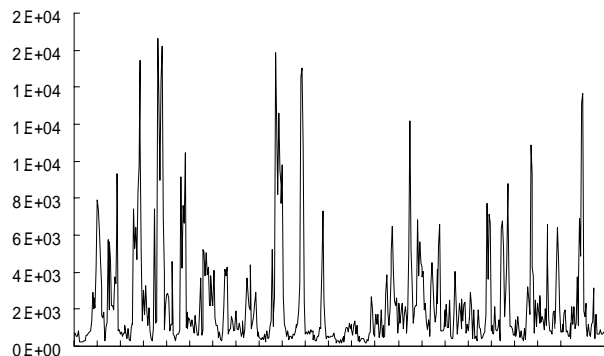


図 6 今津沖中央における平均細胞容積の変動(1978-2000)

を繰り返していたことも認められた。特に通常の光学顕

微鏡では観察できない微細なピコ植物プランクトンが大発生した 1989 ~ 1990 年には、通常サイズのプランクトン種も 1 細胞あたりの細胞容積量は、 $1.0 \sim 10^3 \text{ } \mu\text{m}^3 \text{ cells}^{-1}$ 以下にと小型化する傾向も認められた。このことはこの期間中には大型の植物プランクトンの増加が少なかったために、ピコ植物プランクトンのような小型の細胞が増加しやすい環境となったのではと推察された。

5. 総細胞数と総細胞容積の関係

総細胞数と総細胞容積の関係を図 7 に示した。総細胞容積が $2.0 \sim 10^7 \text{ } \mu\text{m}^3 \text{ ml}^{-1}$ 以上と大きい時期には、総細胞数は $1,000 \sim 3,000 \text{ cells ml}^{-1}$ と比較的少なく、また、総細胞数が $8,000 \text{ cells ml}^{-1}$ 以上と非常に多い時には、総細胞容積は $6.0 \sim 10^6 \text{ } \mu\text{m}^3 \text{ ml}^{-1}$ 以下と小型化する傾向が認められた。このことは、琵琶湖内に存在する栄養塩類が制限となり、*S.dorsidentiferum* var. *ornatum* のような大型細胞が増加した場合には、その細胞数の増加量は比較的少なく抑えられ、これと反対に *U.americana* のような小型細胞が出現した場合には、栄養塩類が少なくても細胞数としては増加できるのではないかと推察された。

6. クロロフィル-a 量と植物プランクトン量

今津沖中央におけるクロロフィル-a 量の長期変動を図 8 に示した。クロロフィル-a 量は $0.6 \sim 29.8 \text{ } \mu\text{g E}^{-1}$ の間で変動し、その平均値は $4.4 \text{ } \mu\text{g E}^{-1}$ であった。

クロロフィル-a 量の経月平均値の変動を図 9 に示した。この図からクロロフィル-a 量の増加のピークは 5 月、7 月、10 ~ 11 月の 3 回に認められた。5 ~ 6 月の 1 回の増加ピークを持つ総細胞数の変動に比べると総細胞容積量の変動は 7 月と 10 ~ 11 月に認められクロロフィル-a 量と良く一致しており、植物プランクトン現存量は細胞容積量のほうがよく反映していることが推察とされた。

次に、クロロフィル-a 量の長期変動をみると、1980 ~ 1981 年は比較的高かったが、1982 に減少し、以降、横ばいの傾向が認められた。総細胞容積量の変動について、1995 年以降増加傾向が認められたが、クロロフィル-a 量では、そのような傾向が認められなかった。このクロロフィル-a 量と総細胞数および総細胞容積の関係について、さらに明らかにするため図 10 および図 11 にその関係を示した。この図および表 2 でも分かるように、クロロフィル-a 量と総細胞数との相関が 0.41 と低いのに対し、クロロフィル-a と総細胞容積との相関が 0.77 と比較的高かった。

表 2 クロロフィル-a 量と総細胞数および総細胞容積の関係

| | クロロフィル a | 細胞数 (cells) | 細胞容積 (μm^3) |
|--------------------------|----------|-------------|--------------------------|
| クロロフィル a | 1.00 | | |
| 細胞数 (cells) | 0.41 | 1.00 | |
| 細胞容積 (μm^3) | 0.77 | 0.33 | 1.00 |

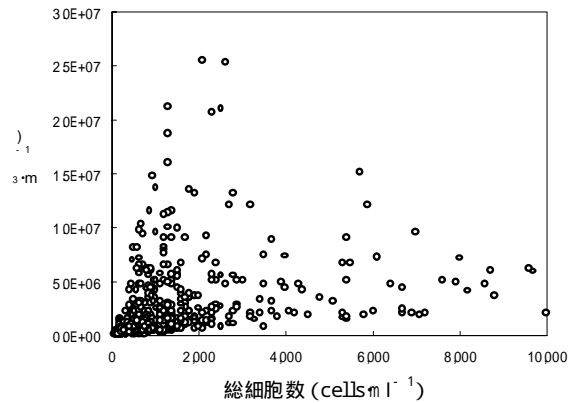


図 7 総細胞数と総細胞容積の関係(1978-2000)

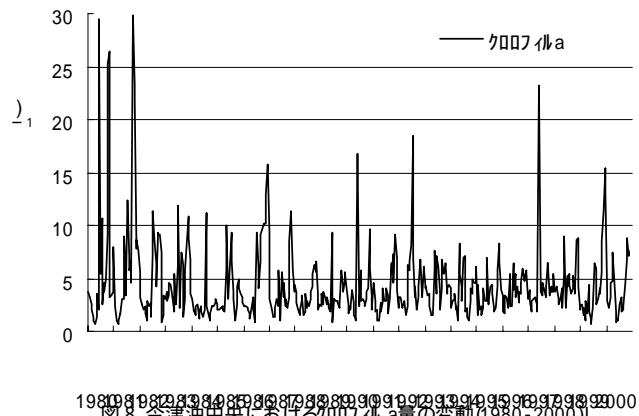


図 8 今津沖中央におけるクロロフィル-a 量の変動(1980-2000)

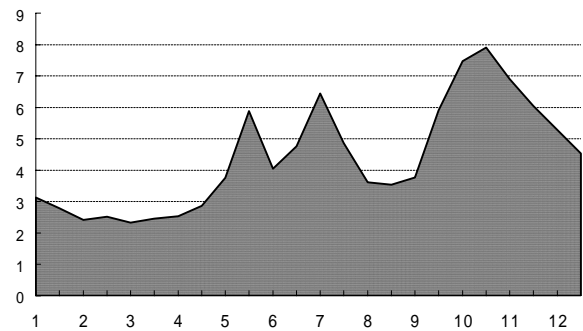


図 9 今津沖中央におけるクロロフィル-a 量の平均値 (1979年 ~ 2000年)

今回 0.8 以上の相関係数が得られなかった理由として考えられることは、藍藻のようにクロロフィル-a 含有量が比較的小さい種類は緑藻に比較して低く出ることや、珪藻のように被殻容積量と細胞容積量が時期的に一定でない種類も多く存在することなどが考えられた。

7. 藍藻綱からみた現存量の変遷

総細胞容積量の長期変動は、1995 年以降に総細胞容積量の増加が認められたがクロロフィル-a 量では、その傾向は明確には認められなかった。藍藻に属する種類は細胞容積が大きくてもクロロフィル-a 量の含有量が比較的小さいため²⁻³⁾、これら藍藻が近年増加傾向にあるかを検討した。

図 12 に植物プランクトンの中でも夏季から秋季に増加傾

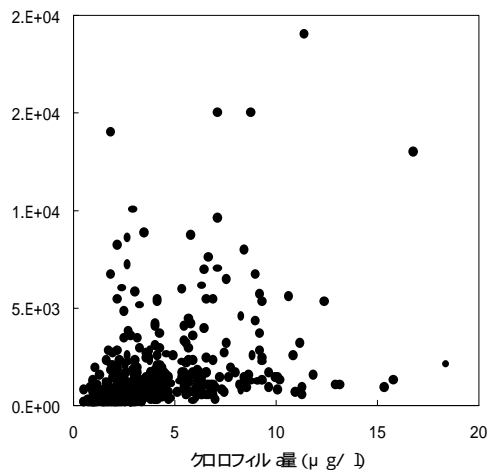


図 10 クロロフィルa量と総細胞数の関係

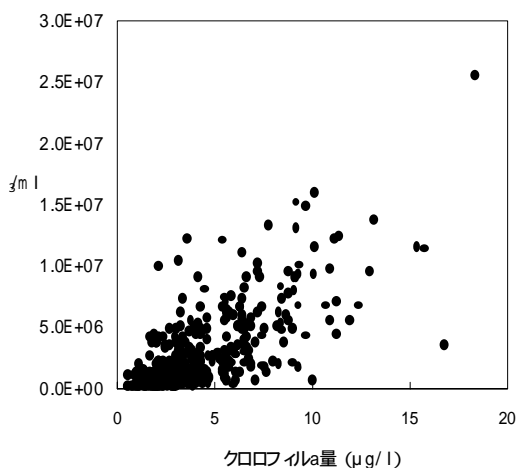


図 11 クロロフィルa量と細胞容積の関係

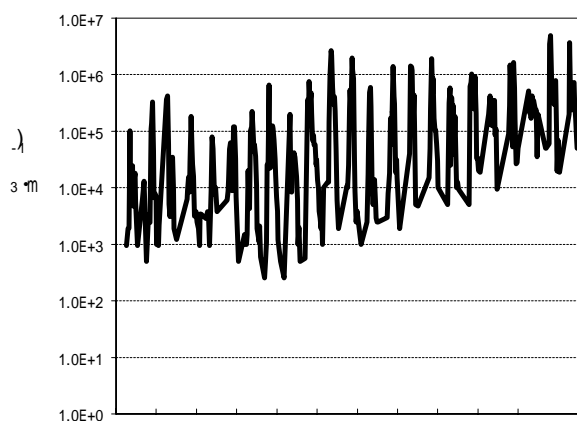


図 12 今津沖中央における藍藻網の経年変動年 (year) (1978-2000)

向を示した藍藻網の総細胞容積量の経年変動を示した。藍藻の総細胞容積の経年変動は $0 \sim 4.9 \cdot 10^6 \text{ m}^3 \text{ ml}^{-1}$ で変動し、その平均値は $1.3 \cdot 10^5 \text{ m}^3 \text{ ml}^{-1}$ であった。最も藍藻の総細胞容積が大きかった時期は、1999年8月で小型の細胞が多数集合し、球形や楕円形の群体を形

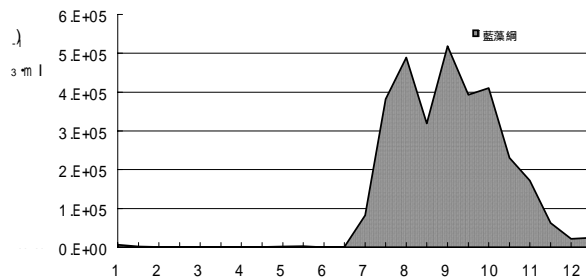


図 13 今津沖中央における藍藻網の総細胞容積変動 (1978-2000平均)

成する *Gomphosphaeria lacustris* が $5.0 \sim 10^6 \text{ cells} \cdot \text{ml}^{-1}$ と多く出現したためであった。また、藍藻の平均細胞容積の経月変動をみると、図 13 に示したように 1 ~ 6 月までほとんど藍藻の増加が認められなかった。しかし、7 月から増加が始まり、8 ~ 11 月に $3.0 \sim 10^5 \text{ m}^3 \text{ ml}^{-1}$ 以上の大きな増加が毎年認められるようになった。その後、水温の低下につれて徐々に藍藻は減少した。

藍藻網の長期的な現存量の変動をみると 1978 ~ 1985 年までは $10^3 \sim 10^5 \text{ m}^3 \text{ ml}^{-1}$ 程度の増加であったが、その後、徐々に増加傾向が認められ、特に 1999 年、2000 年の夏季には *Aphanothece clathrata* や *Gomphosphaeria lacustris* が多く出現し、その総細胞容積量の最高値は 1999 年 8 月で $4.9 \cdot 10^6 \text{ m}^3 \text{ ml}^{-1}$ 、2000 年 7 月で $3.7 \cdot 10^6 \text{ m}^3 \text{ ml}^{-1}$ と顕著な増加が認められた。

まとめ

琵琶湖北湖 (今津沖中央) における植物プランクトン相の長期的変化についての知見を得るため、種類毎に平均細胞容積を求め、積算して植物プランクトン現存量を求めた結果、植物プランクトン種は 1980 年代に比べ 1990 年以降明らかに変化し、近年はより複雑な種類構成になってきていることが明らかとなった。さらに、過去 23 年間における北湖の植物プランクトン現存量の推移をみると、富栄養化防止条例制定 (1979 年) 以降、植物プランクトン量は徐々に減少傾向にあったが、その後、横ばいとなり、1995 年以降は褐色鞭毛藻や渦鞭毛藻、藍藻などの増加によって、徐々に増加傾向にあることも明らかとなった。

特に、1999 年および 2000 年夏季の藍藻の増加傾向は顕著であった。また、各月における 1 細胞あたりの平均細胞容積をみると春季に小型化し、秋季に大型化することや、総細胞容積量の長期変動は、冬季の最小値と秋季の最大値の変動幅が、近年小さくなってきていること、中でも冬季の植物プランクトン量が年々増加していることなども明らかとなった。

今後、より正確に各植物プランクトンの細胞容積を計測して精度を上げて行くと同時に、細胞容積を炭素量に換算して、総細胞炭素量を指標とした植物プランクトン量についても考慮しながら琵琶湖の生物学的な水質を評価を行なって行きたい。

引用文献

- 1) 上水試験方法 :日本水道協会,20 年刊,444-446 (1993)
- 2) 環境省企画調整局環境研究技術課編 環境保全研究成果集(),82-1-82-13 (1993)
- 3) 山中 直 et al. 滋賀県立衛生環境センター所報,28, 37-48 (1993)
- 4) 宮井 博 et al. : Bulletin of Plankton Society of Japan, 35,(1980-1989)
- 5) KOVALA,P.E &J.D.LARRANCE:Department of Oceanography University of Washington,Special Report, No.38,21 (1966)
- 6) 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)
- 7) STRATHMANN,R.R :Limnol. Oceanography,12, 411-418 (1967)
- 8) 赤野寿子 奈良女子大学研究報告,Vol.15,No.7, (1974)
- 9) 一瀬 諭 .若林徹哉 et al. 第 31 回日本水環境学会年会,295 ,(1997)
- 10) 一瀬 諭 .若林徹哉 et al. :「用水と廃水」41,7,12-21 (1999)
- 11) 一瀬 諭 et al. 滋賀県立衛生環境センター所報,30, 27-35 (1995)
- 12) 北村四郎 :琵琶湖の植物プランクトン 滋賀県植物誌, 保育者,275-330(1968)
- 13) 辻 彰洋,伯耆晶子:琵琶湖研究モノグラフ,66-81,7 (2001)