

# 琵琶湖における植物プランクトン優占種の 経年変化と水質

一瀬 諭\* 若林 徹哉\* 藤原 直樹\*  
水嶋 清嗣\* 野村 潔\*

## 1. はじめに

河川や湖沼に生息する微小な生物には、バクテリアをはじめ動植物プランクトン、付着藻類、底生動物などさまざまなものがある。付着藻類や底生動物などのように通常、定住生活を営むようなものについては生態学的な情報の蓄積も多く、生物からみた水質判定の指標<sup>1)2)</sup>として用いることも一部可能となってきた。しかし、定住生活を営まない浮遊生活者であるプランクトンについては、各湖沼間におけるプランクトン情報のばらつきも大きく指標化が難しいのが現状である。

近年、琵琶湖では植物プランクトン相の変化<sup>3)4)</sup>や「淡水赤潮」<sup>5)</sup>、「アオコ」<sup>6)</sup> また「カビ臭」<sup>7)</sup> といった諸問題が毎年のように発生してきている。また、これに加えて、これまで注目されてこなかった「ピコプランクトン」<sup>8)9)</sup> とよばれる2  $\mu\text{m}$ 以下の超微細な植物プランクトンの増加や、淡水域では珍しいブラシノ藻による「淡水赤潮」<sup>10)</sup> 現象も南湖漁港内(1997年11月)では観察されてきている。

これら植物プランクトン現存量の増減には、季節的な変化や、河川からの流入、湖底からの溶出などの栄養塩類の増減が大きく関わっていると考えられ、また、増加した植物プランクトン自身もその水質に影響を及ぼしていると考えられる。

当センターでは、琵琶湖における定期的な植物プランクトンおよび動物プランクトンの現存量調査を1974年から実施し、また、理化学的水質調査についても1966年から実施してきている。今回、このなかから植物プランク

トン優占種の変遷やその水質状況について報告するとともに、今後水質調査結果とプランクトン調査結果を合わせて考えていくうえで必要になると考えられる、細胞容積や細胞炭素量に基づいた植物プランクトン優占種やその現存量についても一部検討を行なったので報告する。

## 2. 琵琶湖の概況

琵琶湖は日本最大の湖であり、バイカル湖やタンガニーカ湖に次いで世界で最も古い湖の一つである。この古い歴史を反映して生物相は豊かで、多くの魚介類が生息し、そのなかにはビワマスやセタシジミのような固有種もみられる。琵琶湖は滋賀県の中央部に位置し、四方を山系に取り囲まれた盆地のなかにある。面積は670km<sup>2</sup>、平均水深42m、最大水深104m、有効貯水量275億tである。また、流入する河川は大小合わせると460本もあるのに対し、流出する河川は瀬田川と人工の琵琶湖疎水のみである。その湖水は瀬田川から淀川へ、さらには大阪湾へと流出していく。昭和の初頭には、琵琶湖・淀川の流域人口は500万人に満たなかったが、戦後の復興とともに急増し、昭和60年(1985年)には1,000万人を突破した。そして現在では、同水系の水は、流域内にとどまらず、近畿1,600万人の貴重な水資源となっている。また、観光面でも、琵琶湖を含むその周辺域が琵琶湖国定公園に指定されており、水泳や湖上観光など観光資源としての価値も非常に高い。

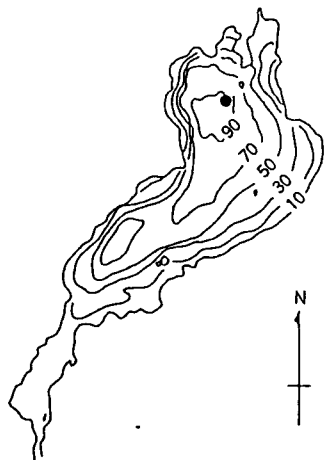
## 3. 細胞数に基づく優占種の変遷

植物プランクトン優占種とは、細胞の大きさに関係な

\* Satoshi ICHISE, Tetsuya WAKABAYASHI, Naoki FUJIWARA, Kiyoshi MIZUSHIMA, Kiyoshi NOMURA, 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, The Shiga Prefectural Institute of Public Health and Environmental Science, 13-45 Gotenhama, Otsu-shi, Shiga-ken 520-0834 Japan

く、その単位水量当たりの細胞数が最も多く計数された種と定義した。調査地点は図1に示す今津沖中央(以下、北湖中央とよぶ)の表層部(水深0.5m)、調査期間は1978年1月~1995年12月までの18年間、調査は原則として毎月2回行った。

調査項目は、大きさ10 $\mu$ m以上の植物プランクトンの種類およびその細胞数である。湖水1mlを直接プランクトン計数板に取り、倍率125~500倍で観察し、種の同定および種ごとの細胞数を計数した。また、藍藻につ



●:琵琶湖今津沖中央、図中の単位:m  
図1 調査地点

いては「塊状」や「糸状」の群体を形成するものが多いので、湖水1ml中の群体数を計数した。

3.1 観察された種類

この18年間に第一優占種として出現した種類を表1に示した。藍藻綱3属4種、黄緑色藻綱2属2種、黄色鞭毛藻綱5属5種、珪藻綱5属8種、渦鞭毛藻綱1属1種、褐色鞭毛藻綱1属1種、緑藻綱17属22種の計7綱34属43種であった。この期間中に最も優占種となる回数が多かった種は、緑藻の*Planktosphaeria* sp.であり、続いて珪藻の*Stephanodiscus carconensis* var. *pusilla*, 黄色鞭毛藻の*Uroglena americana*の順であった。

3.2 優占種からみた植物プランクトン相の変遷

優占種からみた植物プランクトン相の変遷を図2に示す。今回の調査期間中に優占した植物プランクトン種の特徴からその経年変化を大別した結果、3期間に分類することができた。

(1) 第1期 (1978~1985年)

冬季(1~3月)は珪藻の*Melosira solida* (MS:写真1, 2)が長期間優占種となって出現した。本種はわが国では琵琶湖以外からは報告されていない種である<sup>11)</sup>。その他の種としては浮遊性の珪藻がほとんどを占めていた。春季(4~6月)に入ると冬季に多かった*M. solida*が減少し、黄色鞭毛藻に属する*U. americana* (UA:淡水赤潮の原因種)が優占種となった。高水温となる夏季(7~9月)には数種の緑藻に属する種が優占種となった。また、秋季(10~12月)に入ると、これらの緑藻に加え、浮

表1 北湖中央における植物プランクトン優占種と優占種となった回数(1978~1995年)

| 綱名     | 種名  | 優占回数 | 綱名  | 種名   | 優占回数 |
|--------|---|------|-----|--|------|
| 藍藻綱    | <i>Aphanothece clathrata</i>                          | 12   | 緑藻綱 | <i>Planktosphaeria</i> sp.                             | 68   |
|        | <i>Chroococcus dispersus</i> var. <i>minor</i>        | 2    |     | <i>Staurastrum dorsidentiferum</i> var. <i>ornatum</i> | 22   |
|        | <i>Chroococcus dispersus</i>                          | 2    |     | <i>Coelastrum cambricum</i>                            | 18   |
|        | <i>Gomphosphaeria lacustris</i>                       | 2    |     | <i>Pediastrum biwae</i>                                | 15   |
| 黄緑色藻綱  | <i>Botryosphaerella</i> sp.                           | 4    |     | <i>Closterium aciculare</i> var. <i>subpronum</i>      | 12   |
|        | <i>Chlorocloster</i> sp.                              | 2    |     | <i>Ankistrodesmus falcatus</i> var. <i>mirabile</i>    | 10   |
| 黄色鞭毛藻綱 | <i>Uroglena americana</i>                             | 43   |     | <i>Cosmocladium constrictum</i>                        | 9    |
| 毛藻綱    | <i>Chrysocapsa planctonica</i>                        | 4    |     | <i>Oocystis submarina</i>                              | 5    |
|        | <i>Chrysaemoeba radians</i>                           | 3    |     | <i>Oocystis</i> sp.                                    | 4    |
|        | <i>Chromulina</i> sp.                                 | 1    |     | <i>Coenochloris</i> sp.                                | 3    |
|        | <i>Pseudokephyrion</i> sp.                            | 1    |     | <i>Dictyosphaerium pulchellum</i>                      | 3    |
| 珪藻綱    | <i>Stephanodiscus carconensis</i> var. <i>pusilla</i> | 56   |     | <i>Dactyosphaerium jurisii</i>                         | 2    |
|        | <i>Fragilaria crotonensis</i>                         | 35   |     | <i>Glaeocystis</i> sp.                                 | 2    |
|        | <i>Melosira solida</i>                                | 28   |     | <i>Chlamydomonas</i> sp.                               | 1    |
|        | <i>Asterionella formosa</i>                           | 14   |     | <i>Coenocystis</i> sp.                                 | 1    |
|        | <i>Stephanodiscus carconensis</i>                     | 6    |     | <i>Dictyosphaerium</i> sp.                             | 1    |
|        | <i>Melosira granulata</i>                             | 3    |     | <i>Dictyosphaerium subsolitarium</i>                   | 1    |
|        | <i>Melosira italica</i>                               | 2    |     | <i>Glaeocystis vesiculosa</i>                          | 1    |
|        | <i>Cyclotella</i> sp.                                 | 1    |     | <i>Monoraphidium contorta</i>                          | 1    |
| 渦鞭毛藻綱  | <i>Peridinium berolinense</i>                         | 1    |     | <i>Monoraphidium tortile</i>                           | 1    |
| 褐色鞭毛藻綱 | <i>Cryptomonas</i> sp.                                | 15   |     | <i>Schroederia judayi</i>                              | 1    |
|        |   |      |     | <i>Sphaerocystis</i> sp.                               | 1    |

| 月<br>年 | 1   | 2   | 3   | 4   | 5   | 6   | 7   | 8   | 9   | 10  | 11  | 12  |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |
|--------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| 1978   | MS  | —   | MS  | —   | FC  | —   | AFM | —   | UA  | —   | UA  | —   | PL  | PL  | PL  | PL  | PB  | PB  | PB  | PB  | PB  | PB  |     |     |
| 1979   | CAS | CAS | MS  | MS  | MS  | MS  | SCR | MS  | UA  | UA  | UA  | CAS | CC  | PL  | OS  | PB  | PL  | —   | PL  | PL  | PB  | SDO | PB  | SCR |
| 1980   | SCR | MS  | FC  | M.I | FC  | M.I | SCR | AFM | AFM | UA  | UA  | OO  | PL  | AC  | AC  | FC  | PB  | PL  | PL  | PL  | SDO | CC  | CC  | FC  |
| 1981   | FC  | FC  | MS  | MS  | MS  | MS  | FC  | MS  | UA  | UA  | UA  | PL  | PL  | PL  | CC  | SDO | SDO | PL  | SDO | SDO | FC  | FC  | FC  | PL  |
| 1982   | MS  | OS  | OS  | MS  | OS  | —   | SCR | AF  | SCR | UA  | PL  | PL  | PL  | PL  | PL  | SDO | PL  | PL  | PL  | PL  | AC  | PL  | PL  | PL  |
| 1983   | MS  | AFM | DP  | MS  | MS  | AF  | AF  | CH  | UA  | UA  | SP  | PL  | PL  | PL  | PL  | CC  | OO  | OO  | PL  | PL  | FC  | —   | PL  | GV  |
| 1984   | MS  | MS  | MS  | MS  | MS  | MS  | FC  | AF  | UA  | UA  | PL  | PL  | PL  | FC  | FC  | —   | PL  | PL  | AC  | CC  | PB  | PL  | PL  | PL  |
| 1985   | OS  | MS  | PL  | MS  | MS  | SCR | SCR | SCR | UA  | UA  | SCR | CAS | PL  | PL  | PL  | FC  | COE | PL  | PL  | PB  | PB  | CP  | PL  | PL  |
| 1986   | SCR | SCR | CP  | MS  | CP  | AF  | AF  | IPB | UA  | UA  | SCR | SCR | SCR | CAS | CC  | CC  | CC  | SDO | SDO | DS  | SDO | SDO | SDO | SDO |
| 1987   | SDO | SCR | SCR | SCR | SCR | SCR | SCR | CR  | UA  | FC  | FC  | UA  | CC  | CP  | AC  | AC  | AC  | PL  | PL  | SDO | SDO | SDO | FC  | FC  |
| 1988   | SCR | SCR | SCR | SCR | SCR | SCR | SCR | SCR | AFM | AFM | UA  | UA  | SJ  | —   | PL  | PL  | BO  | GL  | AC  | AC  | CDM | CDM | SCR | SCR |
| 1989   | SCR | SCR | SCR | SCR | SCR | SCR | SCR | SCR | AFM | UA  | UA  | AFM | GL  | GL  | BO  | MC  | DJ  | DJ  | SCR | SCR | FC  | COS | COS | COS |
| 1990   | GR  | PR  | COS | GR  | AF  | GR  | AF  | FC  | CR  | UA  | UA  | UA  | CO  | CO  | BO  | DI  | CC  | MT  | SCR | SCR | SCR | MG  | BO  | SCR |
| 1991   | SCR | SCR | SCR | COS | AF  | AF  | AF  | GR  | SCR | UA  | UA  | FC  | SG  | PL  | PL  | CC  | PL  | PB  | SDO | COS | FC  | MG  | FC  | GR  |
| 1992   | FC  | GR  | GR  | GR  | GR  | AF  | FC  | GR  | UA  | UA  | UA  | CAS | CAS | CAS | CAS | CC  | CC  | CC  | CC  | CO  | SCR | SCR | CR  | SCR |
| 1993   | CAS | CAS | AFM | AFM | PB  | FC  | GR  | CH  | UA  | UA  | UA  | CAS | SCR | CY  | PL  | PL  | GL  | DP  | AC  | MG  | CC  | —   | FC  | COS |
| 1994   | SG  | FC  | SCR | FC  | GR  | SG  | AF  | UA  | UA  | UA  | UA  | CAS | GR  | DP  | AC  | COS | COS | PL  | SCR | PL  | PL  | FC  | AF  | FC  |
| 1995   | FC  | GR  | SG  | SG  | SG  | OO  | GR  | UA  | UA  | UA  | FC  | SCR | UA  | PL  | GL  | GL  | CC  | CC  | PL  | AC  | CD  | CD  | SDO | SDO |

|   |  |   |
|---|--|---|
| <i>Gomphosphaeria lacustris</i>         | <i>Stephanodiscus carconensis</i>              | <i>Monoraphidium tortile</i>                    |
| <i>Chroococcus dispersus</i>            | <i>Stephanodiscus carconensis var. pusilla</i> | <i>Monoraphidium contorta</i>                   |
| <i>Chroococcus dispersus var. minor</i> | <i>Cyclotella</i> sp.                          | <i>Chlamydomonas</i> sp.                        |
| <i>Aphanothece clathrata</i>            | <i>Fragilaria crotonensis</i>                  | <i>Ankistrodesmus falcatus var. mirabile</i>    |
| <i>Botryosphaerella</i> sp.             | <i>Asterionella formosa</i>                    | <i>Planktosphaeria</i> sp.                      |
| <i>Chlorocloster</i> sp.                | <i>Peridinium berolinense</i>                  | <i>Pediastrum biwai</i>                         |
| <i>Uroglena americana</i>               | <i>Cryptomonas</i> sp.                         | <i>Coelastrum cambricum</i>                     |
| <i>Pseudokephyron</i> sp.               | <i>Dictyosphaerium pulchellum</i>              | <i>Coenochloris</i> sp.                         |
| <i>Chromulina</i> sp.                   | <i>Dictyosphaerium subsolitarium</i>           | <i>Oocystis submarina</i>                       |
| <i>Chrysocapsa planctonica</i>          | <i>Dictyosphaerium</i> sp.                     | <i>Oocystis</i> sp.                             |
| <i>Chrysamoeba radians</i>              | <i>Schroederia judayi</i>                      | <i>Coenocystis</i> sp.                          |
| <i>Melosira solida</i>                  | <i>Dactyosphaerium jurisii</i>                 | <i>Gloeocystis</i> sp.                          |
| <i>Melosira italica</i>                 | <i>Sphaerocystis</i> sp.                       | <i>Cosmocladium constrictum</i>                 |
| <i>Melosira granulata</i>               | <i>Gloeocystis vesiculosa</i>                  | <i>Closterium aciculare var. subprorum</i>      |
|   |  | <i>Staurastrum dorsidentiferum var. ornatum</i> |

藍藻綱     
 黄色鞭毛藻綱     
 渦鞭毛藻綱     
 緑藻綱  
 黄緑色藻綱     
 珪藻綱     
 褐色鞭毛藻綱

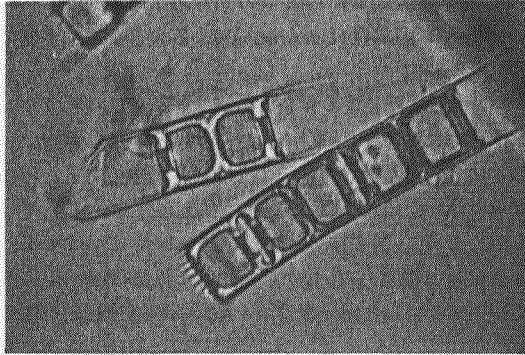
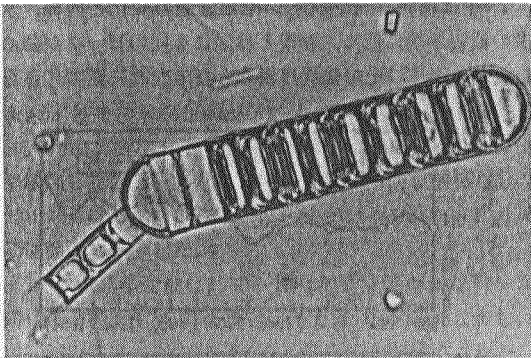
測定方法：直接計数による(1mlをプランクトン計数板で計数)，\*：Rhodomonas sp.を除く

図2 琵琶湖の植物プランクトン優占種の経年変動(1978~1995年)

遊性の珪藻である *Fragilaria crotonensis* (FC) 等が優占種として出現した。この第1期の特徴は、特定の植物プランクトンが優占種となる回数が多く、周期的に変動を規

則正しく繰り返すパターンを示していた。また、優占種の季節的な交代も比較的緩やかなものであった。

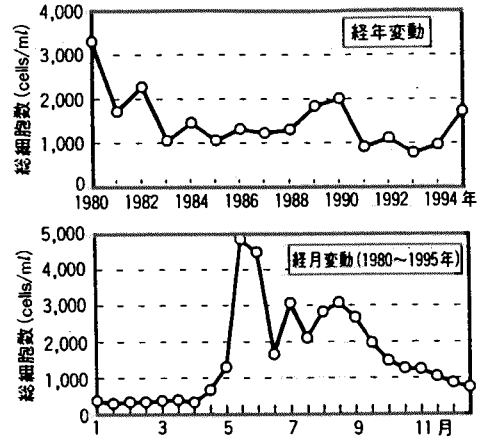
(2) 第2期 (1986~1990年)

写真1 *Melosira solida*(×1,000)写真2 *Melosira solida*の増大胞子(×400)

この期間は、夏季において優占種の交代が頻繁に起こり、秋季にかけてさまざまな種が出現したのが一つの特徴である。おもな種についてみると、冬季に多かった *M. solida* が1986年2月以降優占種とならなくなり、これに代わり珪藻の *S. carconensis* var. *pusilla*<sup>11)</sup> (SCP) が長期間優占種となって出現した。春季には第1期と同様に黄色鞭毛藻の *U. americana* が最も多く出現した。しかし、夏季には緑藻を中心に黄色鞭毛藻、黄緑色藻、珪藻、藍藻などとさまざまな綱に属する種が優占種となり、その交代も比較的早かった。秋季は、その年によって優占種が異なり1986年と1987年に大型緑藻の *Staurastrum dorsidentiferum* var. *ornatum* (SDO) がおもな優占種となり、1988年には群体を形成する藍藻 *Aphanothece clathrata* (AC) や *Chroococcus dispersus* var. *minor* (CDM) が、また1989, 1990年には珪藻の *S. carconensis* var. *pusilla* と緑藻の *Cosmoecium constrictum* (COS) がそれぞれおもな優占種となって出現した。

### (3) 第3期 (1991～1995年)

この期間の特徴は、春季の *U. americana* の増加は毎年確認されたが、それ以外の季節では出現種が特定できず、



北湖中央(図4～12も同様)

図3 植物プランクトン総細胞数の変動

これまで出現しなかったような新しい種も優占種となったことである。また、近年は多くの綱に属する種が次々と出現し、それらの種の交代も早まり、発生に周期性が少なくなり、優占種の手測が困難となってきている。

### 3.2 植物プランクトン総細胞数の変動

この15年間の総細胞数の経月変動(図3)を平均値でみると、1月から4月までは300～400cells/mlと少なく推移しているが5～6月には *U. americana* の大増加により5,000cells/ml程度にまで増加する。その後、梅雨時期にやや減少傾向がみられるものの、8～9月にかけてふたたび緑藻を中心とした植物プランクトン種による増加を示す傾向が認められた。10月以降になると水温の低下とともに総細胞数も徐々に減少した。経年変動をみると、植物プランクトンの総細胞数は徐々に減少傾向にある。

## 4. 理化学的な水質の変動

植物プランクトンの変動要因には気象条件や、プランクトン間の競争関係、湖水中の栄養塩濃度などがある。ここでは、植物プランクトン量の一つの指標とされているクロロフィル *a* 量や植物プランクトンの栄養源となる硝酸態窒素、全窒素および全リンの経月変化や経年変化について述べる。調査地点、調査期間および調査回数は植物プランクトン調査と同様である。

### 4.1 クロロフィル *a* 量

この期間中におけるクロロフィル *a* 量の月変動と年変動を図4に示す。1980年から1995年の平均値でみると、7月と10月の2回に大きなピークが認められた。各年の変動をみると1980年から徐々に減少傾向を示し、1984年には2  $\mu\text{g/l}$  と最低値となった。その後、1986年および1992年には例年より大きいクロロフィル *a* 量の増加が認

められ、1992年の最高値は7月で18.4  $\mu\text{g/l}$ であった。そのときの植物プランクトン種としては大型緑藻の *Closterium aciculare* var. *subpronum* が1,000cells/mlにまで達し、北湖中央としては非常に高い値となった。クロロフィル *a* 量と植物プランクトン総細胞数との関係についてみると、その変動は必ずしも一致しないことを筆者らは報告<sup>12)</sup>してきた。しかし、クロロフィル *a* 量のピーク時の植物プランクトン相をみると大型の植物プランクトンが増加していることが多かった。また、長期的な変動をみると、クロロフィル *a* 量も植物プランクトン総細胞数も近年、徐々にではあるが減少傾向を示している。

4.2 全窒素(T-N)および硝酸態窒素(NO<sub>3</sub>-N)の経年変化

植物プランクトンの栄養源の一つである窒素の経月変化をみるとT-N(図5)としては冬季~春季に多く存在し、夏季に減少し、秋季にはふたたび増加する傾向を示

した。1980年および1981年の6月のT-Nのピーク時(0.4mg/l以上)には *U. americana* による大きな増加が認められた。

NO<sub>3</sub>-Nは冬季に多く存在するが、春季には植物プランクトン等に消費され、夏季には枯渇する年も認められた。とくに、1984年や1994年のような異常渇水のあった年にはその傾向が強かった(図6)。

NO<sub>3</sub>-NもT-Nも1980~1987年にかけては、減少または横ばいで推移した。しかし、1990年以降は緩やかに上昇傾向が認められた。なかでもNO<sub>3</sub>-Nの増加傾向が顕著であった。これらのことから、琵琶湖における窒素濃度は、近年徐々に上昇傾向にあることが推察された。

4.3 全リン(T-P)の経年変化

T-Pは植物プランクトン総細胞数の変化と同様、水温の低い冬季に低く、春季と秋季に2回のピークが認められた。とくにその傾向は渇水となった年に顕著にみら

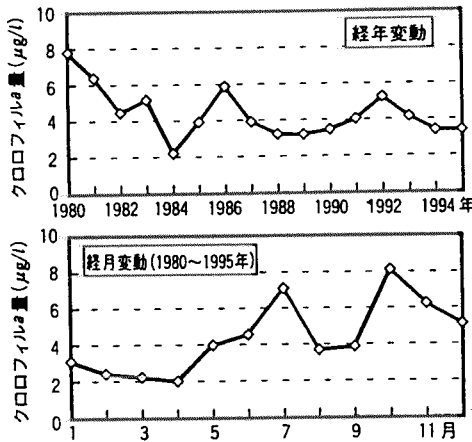


図4 クロロフィル *a* 量の変動

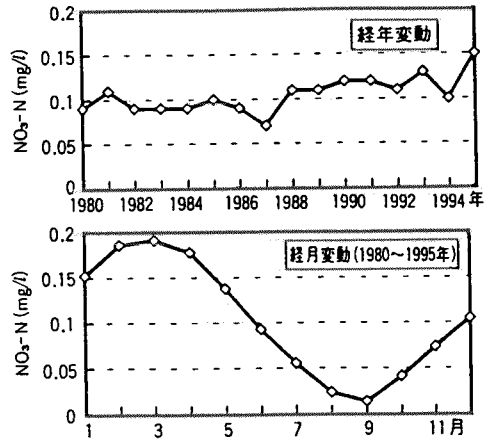


図6 NO<sub>3</sub>-Nの変動

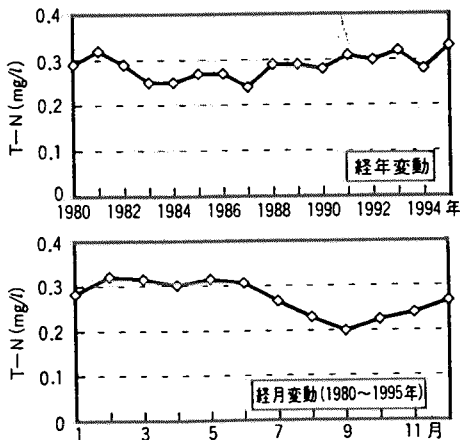


図5 T-Nの変動

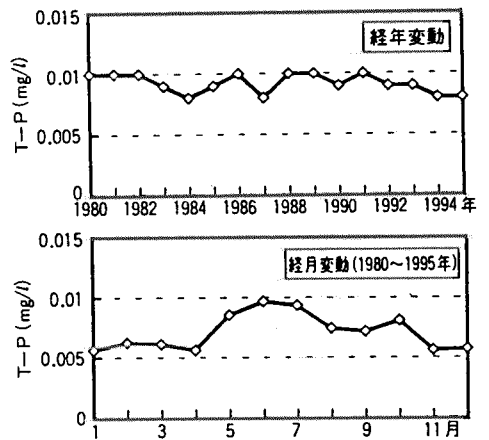


図7 T-Pの変動

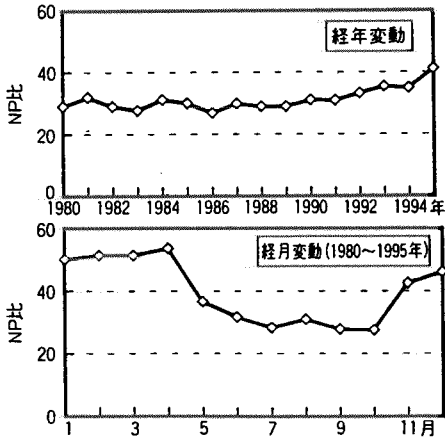


図8 NP比の変動

れた。1980~1995年における経月変動(平均値, 図7)は1~4月までは0.006mg/l前後で推移し, その後, *U. americana*が増加を示す5~7月には0.008mg/l以上にまで増加した。8~9月にかけては減少傾向を示したものの10月にはふたたび小さなピークが認められた。10月以降は徐々に減少した。

T-Pの経年変動は1980~1984年まで緩やかな減少傾向にあったが, その後横ばいを示していた。しかし, 1990年以降はふたたび緩やかな減少傾向が認められた。

#### 4.4 NP比(T-N/T-P)

1980~1995年のNP比(年間平均値, 図8)は, 25:1~41:1の値で推移しており, この期間の平均値は31:1であった。このNP比の経年変化は1990年までは30:1程度の値で推移していた。しかし, 1991年以降, 徐々に増加傾向を示し, 1995年では40:1以上と大きくなってきている。

これらのことから, 琵琶湖におけるNP比は近年, 窒素過多の状況が進行していることが推察され, 窒素とリンのバランスが崩れてきている可能性も示唆された。

### 5. 総細胞容積に基づく優占種

これまで植物プランクトンの変遷と, その水質項目について報告してきた。しかし, 植物プランクトン現存量の一つの指標とされているクロロフィルa量と総細胞数の関係についてみると, その変動は必ずしも一致しないことを筆者らは報告<sup>12)</sup>してきた。これは, 各プランクトンの大きさを考慮せず, 大型のプランクトンでも小型のプランクトンでも1細胞として同等に評価しているためであると考えられる。さらにクロロフィルa量による評価も, 通常の植物プランクトンを捕捉するために用いられるフィルターを通過するような微細なものが琵琶湖

では多く存在することや, 藍藻のようにクロロフィルa量の少ないものもあるなどの問題点がある。

宮井ら<sup>13)</sup>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ら<sup>14)</sup>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ら<sup>15)</sup>が, 震ヶ浦で出現した67種類について接眼測微計を用いて細胞容積を計算し, Strathmann<sup>16)</sup>の式を用いて種類ごとの細胞容積を細胞炭素量に換算し, 量的なプランクトンの季節変動について報告している。

筆者らは現在までに, 琵琶湖で出現する植物プランクトンとして280種類以上を報告<sup>17)</sup>してきており, これまでに報告された各種の体積表では, 現在の多くの出現種に対して体積を求めることは困難であった。そこで, 今回, 宮井ら<sup>13)</sup>および今村ら<sup>15)</sup>の方法を参考にし, 琵琶湖に出現したおもな植物プランクトン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。

#### 5.1 細胞容積の計測

プランクトンの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。その形態は球形や楕円形, 直方体, 円筒形および紡錘形などで単純なものから複雑なものまでさまざまである。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考えて算出した。つぎに, プランクトンの細胞容積は成長過程や生息水域の栄養状況および季節的な消長によっても変動するため, 琵琶湖に出現する平均的なプランクトンの細胞容積が必要となる。これらのことを考慮し, それぞれの種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を求めた。

##### (1) 平均細胞容積の計算

植物プランクトンの細胞容積の測定は, 顕微鏡撮影した植物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ーをあて, 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については, 接眼測微計を用いて計測したり, 日本淡水藻図鑑<sup>18)19)</sup>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植物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:球形(sphere), 楕円形(ellipsoid), Cタイプ:立方体(cube), 直方体(rectangular parallelepiped)の3タイプに分類し, 植物プランクトンの平均細胞

胞容積の近似値を計算した。タイプ別の計算式を表2に示す。

細胞容積は今村ら<sup>15)</sup>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(藍藻は1群体当たりの平均細胞数:5~10群体)で計測を行ない、その平均値から算出した。

琵琶湖に出現する植物プランクトンのタイプは、測定した156種のうち、円筒形および楕円柱が25種、球形が27種、楕円形が86種、立方体や直方体が8種、複数の計算式によって算出したもの10種である。また、その細胞容積の最高値は*Staurastrum arcticon*の $82,000 \mu\text{m}^3$ であり、最低値は*Synechococcus* sp. の $0.34 \mu\text{m}^3$ であり、その差は240,000倍であった。

## (2) 細胞炭素量への換算

現在、海洋や淡水域において小型植物プランクトンの生物量の推定にStrathmann<sup>16)</sup>の換算式が用いられることが多い。今回この式を用いて細胞容積( $V, \mu\text{m}^3/\text{cell}$ )を細胞炭素量( $C, \text{g}/\text{cell}$ )に換算して生物量の推定を試みた。植物プランクトンのなかには、珪藻のように被殻の容積が大きく細胞質自身の容積は小さいものもある。そこで、珪藻と他の植物プランクトンの炭素量を同列に評価するため、以下の2式を用いた。

珪藻の場合

$$\log C = -0.422 + 0.758 \log V \dots\dots\dots(1)$$

その他の植物プランクトンの場合

$$\log C = -0.460 + 0.866 \log V \dots\dots\dots(2)$$

各植物プランクトンの種類別生物量は、種類別細胞数に、式(1)、(2)から求めた種類ごとの細胞炭素量を乗ずることによって求めることができる。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)で表わすことができる。すなわち、

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

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

表2 タイプ別細胞容積(V)を求める計算式

|                                    |                         |
|------------------------------------|-------------------------|
| Aタイプ: 円筒形, 楕円柱                     |                         |
| 細胞容積( $V$ ) = $\frac{\pi}{4} abh$  | a: 長軸<br>b: 短軸<br>h: 高さ |
| Bタイプ: 球形, 楕円形                      |                         |
| 細胞容積( $V$ ) = $\frac{\pi}{6} ab^2$ | a: 長軸<br>b: 短軸          |
| Cタイプ: 立方体, 直方体                     |                         |
| 細胞容積( $V$ ) = $abh$                | a: 長さ<br>b: 幅<br>h: 高さ  |

類の1細胞当たりの細胞炭素量である。

## 5.2 植物プランクトン量の推定

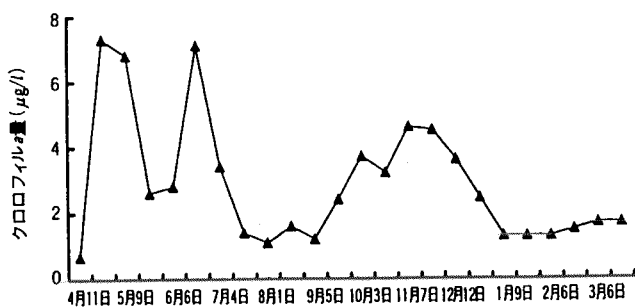
植物プランクトン量を総細胞容積や総細胞炭素量で推定することが可能であるかを、琵琶湖の植物プランクトン調査結果によって検討した。調査地点は北湖中央で行ない、期間は1994年4月から1995年3月までの1年間について行なった。植物プランクトンの計数法は上記の優占種調査と同様である。

## 5.3 総細胞数, 総細胞容積および総細胞炭素量の変動

図9および図10にクロロフィル  $a$  量および植物プランクトン総細胞数の変動を示し、また、図11および図12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す。

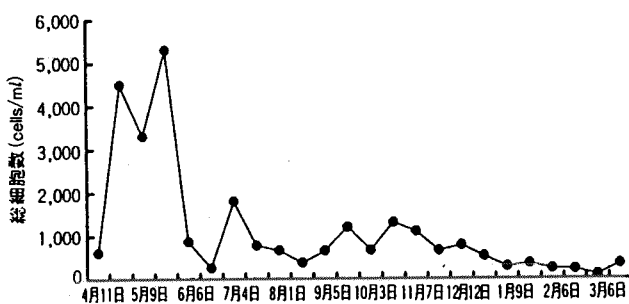
北湖中央における総細胞数の範囲は90~5,300 cells/mlであり、最も多かった5月後半では*U. americana*が、4,400 cells/ml計数され、全体の83%と大部分を占めていた。しかし、*U. americana* 1細胞の細胞容積は $98 \mu\text{m}^3$ とかなり小さく、1細胞炭素量は18pgC/cellと計算され、その結果、*U. americana*の総細胞炭素量は0.08 mgC/lとなり、5月後半における総細胞炭素量の47%にしかならず、細胞数での割合に反して、体積としては全体の1/2程度であった。また、6月後半の調査では小型の植物プランクトンである*Rhodomonas* sp. (細胞容積 $110 \mu\text{m}^3/\text{cell}$ )が210 cells/mlと最も多く計数され優占種(44%)となったが、総細胞炭素量に占める割合は全体(0.2mgC/l)の2.2% (0.004mgC/l)にしかならなかった。これに対して、このとき160 cells/mlで優占種とならなかった*C. aciculare* var. *subprorum* (細胞容積 $9,200 \mu\text{m}^3/\text{cell}$ )が、総細胞炭素量では0.15mgC/lに達し、全体の76%と大きな割合を占めた。

総細胞容積と総細胞炭素量の変動をみると、11月前半にも大きなピークが認められたが、植物プランクトン総細胞数では顕著な変動は認められなかった。これはこの時期、大型緑藻である*S. dorsidentiferum* var. *ornatum* (細胞容積 $32,000 \mu\text{m}^3/\text{cell}$ )や大型渦鞭毛藻に属する*Ceratium hirundinella* (細胞容積 $30,000 \mu\text{m}^3/\text{cell}$ )などの種が増加したため、総細胞数の変化は小さかったが、クロロフィル  $a$  量や総細胞容積および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ると推定された。これらのことから、従来行なわれてきた総細胞数の変動を把握するだけでは小型の植物プランクトンが大きく評価され、大型の植物プランクトンの変動が見逃される可能性が強いが、総細胞容積や総細胞炭素量を算出することにより、それを防止できることが示唆された。



1994~1995年(図10~12も同様)

図9 クロロフィル a 量の変動



*Synechococcus* sp. を除く(図11, 12も同様)

図10 植物プランクトン総細胞数の変動

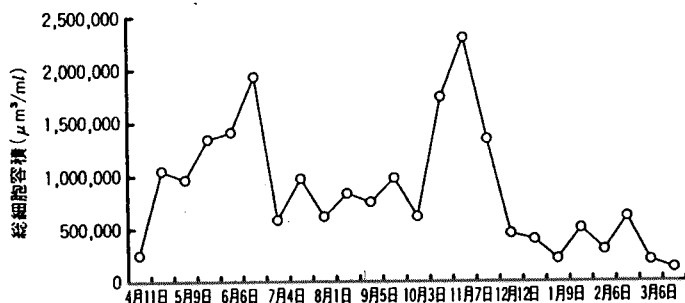


図11 植物プランクトン総細胞容積の変動

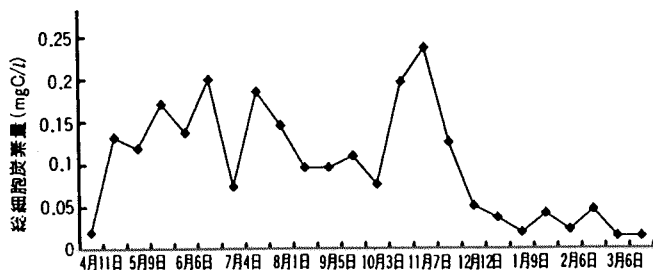


図12 植物プランクトンの総細胞炭素量の変動

#### 5.4 総細胞容積からみた優占種の変化

表3に従来から行なってきた総細胞数からみた植物プランクトン優占種の変化と、今回算出した細胞容積からみた優占種、この細胞容積から算出した細胞炭素量による優占種の変化について比較した。

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 *F. crotomensis* が、冬季(1~3月)には *Rhodomonas* sp. 等の種類が優占種となることが多かった。しかし、細胞容積や細胞炭素量の結果では、春季に *U. americana* や *C. aciculare* var. *subpronum* が優占種となり、夏季には *C. aciculare* var. *subpronum* や *C. constrictum* が、秋季には *S. dorsidentiferum* var. *ornatum* や *Cryptomonas* sp. が、冬季に *Cryptomonas* sp. や *Stephanodiscus carconensis*, *C. hirundinella* などの種類が優占種となって現われ、細胞数からみた優占種の結果と細胞炭素量からみた結果は明らかに相違していた。

細胞容積と細胞炭素量からの結果をみると、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、珪藻の *S. carconensis* が植物プランクトン総細胞容積のほとんどを占める傾向が認められた。しかし、細胞炭素量によるものでは、同時期に *S. carconensis* 以外にも緑藻の *C. constrictum* や褐色鞭毛藻の *Cryptomonas* sp. や *Rhodomonas* sp.、渦鞭毛藻の *C. hirundinella* など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の容積に比べ大きいためと考えられ、珪藻が多く出現する時期には、細胞容積に加えて Strathmann<sup>16)</sup> 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と



表3 北湖中央における植物プランクトン優占種の季節変動(1994年)

| 細胞数による優占種 |   |       | 細胞容積による優占種                |  |              |
|-----------|---|-------|---------------------------|--|--------------|
|           | cells/ml  | %     | $\mu\text{m}^3/\text{ml}$ | %  |              |
| 1994年     |   |       |                           |  |              |
| 4月11日     | <i>Rhodomonas</i> sp.                                 | 340   | 56                        | <i>Stephanodiscus carconensis</i>                      | 84,000 33    |
| 4月25日     | <i>Uroglena americana</i>                             | 3,700 | 82                        | <i>Uroglena americana</i>                              | 360,000 35   |
| 5月9日      | <i>Uroglena americana</i>                             | 2,800 | 85                        | <i>Ceratium hirundinella</i>                           | 300,000 31   |
| 5月23日     | <i>Uroglena americana</i>                             | 4,400 | 83                        | <i>Uroglena americana</i>                              | 430,000 32   |
| 6月6日      | <i>Uroglena americana</i>                             | 360   | 42                        | <i>Closterium aciculare</i> var. <i>subpronum</i>      | 830,000 59   |
| 6月20日     | <i>Rhodomonas</i> sp.                                 | 210   | 44                        | <i>Closterium aciculare</i> var. <i>subpronum</i>      | 1,500,000 76 |
| 7月4日      | <i>Rhodomonas</i> sp.                                 | 60    | 24                        | <i>Closterium aciculare</i> var. <i>subpronum</i>      | 280,000 49   |
| 7月18日     | <i>Rhodomonas</i> sp.                                 | 360   | 20                        | <i>Closterium aciculare</i> var. <i>subpronum</i>      | 280,000 37   |
| 8月1日      | <i>Aphanothece ciathrata</i>                          | 260   | 34                        | <i>Staurastrum dorsidentiferum</i> var. <i>ornatum</i> | 190,000 38   |
| 8月22日     | <i>Oocystis solitaria</i>                             | 100   | 27                        | <i>Staurastrum dorsidentiferum</i> var. <i>ornatum</i> | 640,000 79   |
| 9月5日      | <i>Planktosphaeria</i> sp.                            | 200   | 49                        | <i>Cosmocladium constrictum</i>                        | 510,000 68   |
| 9月26日     | <i>Planktosphaeria</i> sp.                            | 480   | 40                        | <i>Staurastrum dorsidentiferum</i> var. <i>ornatum</i> | 320,000 33   |
| 10月3日     | <i>Stephanodiscus carconensis</i> var. <i>pusilla</i> | 200   | 30                        | <i>Closterium aciculare</i> var. <i>subpronum</i>      | 180,000 31   |
| 10月17日    | <i>Planktosphaeria</i> sp.                            | 800   | 62                        | <i>Staurastrum dorsidentiferum</i> var. <i>ornatum</i> | 960,000 56   |
| 11月7日     | <i>Planktosphaeria</i> sp.                            | 280   | 25                        | <i>Staurastrum dorsidentiferum</i> var. <i>ornatum</i> | 1,300,000 56 |
| 11月21日    | <i>Fragilaria crotonensis</i>                         | 300   | 46                        | <i>Ceratium hirundinella</i>                           | 600,000 45   |
| 12月12日    | <i>Rhodomonas</i> sp.                                 | 230   | 30                        | <i>Cryptomonas</i> sp.                                 | 150,000 35   |
| 12月19日    | <i>Fragilaria crotonensis</i>                         | 240   | 46                        | <i>Cryptomonas</i> sp.                                 | 100,000 26   |
| 1995年     |   |       |                           |  |              |
| 1月9日      | <i>Fragilaria crotonensis</i>                         | 80    | 29                        | <i>Stephanodiscus carconensis</i>                      | 84,000 40    |
| 1月23日     | <i>Rhodomonas</i> sp.                                 | 100   | 29                        | <i>Stephanodiscus carconensis</i>                      | 290,000 59   |
| 2月6日      | <i>Rhodomonas</i> sp.                                 | 120   | 52                        | <i>Stephanodiscus carconensis</i>                      | 210,000 70   |
| 2月20日     | <i>Rhodomonas</i> sp.                                 | 100   | 45                        | <i>Ceratium hirundinella</i>                           | 300,000 49   |
| 3月6日      | <i>Rhodomonas</i> sp.                                 | 30    | 33                        | <i>Stephanodiscus carconensis</i>                      | 130,000 64   |
| 3月20日     | <i>Rhodomonas</i> sp.                                 | 240   | 71                        | <i>Stephanodiscus carconensis</i>                      | 42,000 34    |

くに必要であると考えられた。

以上のことから、「淡水赤潮」を形成するような大増加種については、細胞数、細胞容積および細胞炭素量のいずれからでも春季に優占種となることが明らかとなったが、その他の季節は細胞数からの優占種の結果と細胞容積および細胞炭素量の結果とでは優占種がまったく異なった。これらのことから琵琶湖では植物プランクトン量をバイオマス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あると考えられた。

## 6. おわりに

優占種を中心に琵琶湖の植物プランクトン相の変遷を検討した結果、18年間の調査期間はその特徴から大きく3つに分けられた。近年は優占種の交代が早いサイクルで変化しており、プランクトンの発生予測は一層困難になっている。また、古代から琵琶湖に大量に生息してきた*M. solida*や琵琶湖の固有種である*Pediastrum biwaense*が激減していることも明らかになった。

琵琶湖におけるT-NやNO<sub>3</sub>-Nは冬季～春季に多く存在し、夏季に減少し、秋季にふたたび増加した。とくにNO<sub>3</sub>-Nについては夏季に枯渇する年も認められ、その傾向は異常渇水のあった年に顕著であった。NP比は近年、T-N過多の状況が進行していることが推察され、T-N

とT-Pのバランスが崩れてきている可能性も示唆された。

総細胞容積や総細胞炭素量を指標とした植物プランクトン量の推定は、今回の検討の結果十分可能であると考えられ、植物プランクトン量を総細胞数だけでなく、総細胞容積や総細胞炭素量も併記して評価していく必要があると考えられた。

今後は、さらに総粒子態炭素量等の理化学的な水質項目と合わせて琵琶湖を考えていくためにも、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ていく必要があると考えられた。

なお、本報の主旨は第34回日本水処理生物学会<sup>20)</sup>(優占種の変遷)および第31回日本水環境学会年会<sup>21)</sup>(総体積量の簡易測定)において発表したものである。

### —参考文献—

- 1) 環境庁水質保全局編：水生生物による水環境評価手法検討基礎調査報告書(1995)。
- 2) 日本生態学会環境問題専門委員会編：環境と生物指標2—水界編—, p. 54~177, 共立出版, 東京(1975)。
- 3) 一瀬 諭, 若林徹哉, 松岡泰倫, 山中 直, 藤原直樹, 野村 潔：琵琶湖北湖における植物プランクトン相の変遷(1978~1995年), 滋賀県立衛生環境センター所報, 31, 84~100(1996)。

| 細胞炭素量による優占種  | pgC/ml  | %  |
|--|---------|----|
| <i>Rhodomonas</i> sp.                                  | 6,900   | 28 |
| <i>Uroglena americana</i>                              | 68,000  | 52 |
| <i>Uroglena americana</i>                              | 51,000  | 43 |
| <i>Uroglena americana</i>                              | 81,000  | 47 |
| <i>Closterium aciculare</i> var. <i>subpronum</i>      | 85,000  | 62 |
| <i>Closterium aciculare</i> var. <i>subpronum</i>      | 150,000 | 75 |
| <i>Closterium aciculare</i> var. <i>subpronum</i>      | 28,000  | 38 |
| <i>Aphanothece clathrata</i>                           | 91,000  | 49 |
| <i>Aphanothece clathrata</i>                           | 91,000  | 63 |
| <i>Staurastrum dorsidentiferum</i> var. <i>ornatum</i> | 55,000  | 58 |
| <i>Cosmoecidium constrictum</i>                        | 66,000  | 69 |
| <i>Planktosphaeria</i> sp.                             | 42,000  | 39 |
| <i>Aphanothece clathrata</i>                           | 21,000  | 28 |
| <i>Staurastrum dorsidentiferum</i> var. <i>ornatum</i> | 83,000  | 42 |
| <i>Staurastrum dorsidentiferum</i> var. <i>ornatum</i> | 110,000 | 47 |
| <i>Ceratium hirundinella</i>                           | 52,000  | 42 |
| <i>Cryptomonas</i> sp.                                 | 20,000  | 39 |
| <i>Cryptomonas</i> sp.                                 | 13,000  | 36 |
| <i>Cosmoecidium constrictum</i>                        | 8,300   | 43 |
| <i>Cryptomonas</i> sp.                                 | 20,000  | 47 |
| <i>Stephanodiscus carcomensis</i>                      | 11,000  | 47 |
| <i>Ceratium hirundinella</i>                           | 26,000  | 56 |
| <i>Stephanodiscus carcomensis</i>                      | 6,300   | 43 |
| <i>Rhodomonas</i> sp.                                  | 4,900   | 33 |

- 4) 一瀬 論, 若林徹哉, 野村 潔: 琵琶湖南湖における動物プランクトン相の変遷(1982~1997年), 滋賀県立衛生環境センター所報, 33, 146~165(1998).
- 5) 一瀬 論, 若林徹哉, 山中 直, 藤田亜紀子, 野村 潔: 琵琶湖北湖における「淡水赤潮」の発生状況およびその原因プランクトン *Uroglena americana* の分布について(1994~1997年), 滋賀県立衛生環境センター所報, 33, 25~30(1998).
- 6) 滋賀県琵琶湖環境部環境政策課編: 平成9年度環境白書, p. 47~51, 滋賀県(1997).
- 7) 八木正一: 琵琶湖のかび臭の原因生物の現況, 日本水処理生物学会誌, 24(1)28~36(1988)
- 8) 環境庁企画調整局環境研究技術課編: 環境保全研究成果集(Ⅱ), 82-1~82-13(1993).
- 9) 一瀬 論, 田中勝美, 園 正, 若林徹哉, 山中直, 金田恵美子, 矢田 稔, 内藤幹滋, 川部浩市, 青木佳代, 佐貫典子, 藤原直樹, 野村 潔: ビコプランクトンの異常発生: ビコプランクトンの分布, 日本水産学会誌, 61(6)932~933(1995).

- 10) 若林徹哉, 一瀬 論: 未発表資料
- 11) 北村四郎編: 琵琶湖の植物プランクトン, 滋賀県植物誌, p. 275~330, 保育社, 東京(1968).
- 12) 一瀬 論, 若林徹哉, 松岡泰倫, 山中 直, 藤原直樹, 田中勝美: 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, 滋賀県立衛生環境センター所報, 30, 27~35 (1995).
- 13) 宮井 博, 松崎加奈恵, 小川数也, 杉原拓郎: 植物プランクトンの形態に基づく種類別生物量の簡易推定法, 日本プランクトン学会報, 35(2)121~126(1988).
- 14) P.E.Kovala, J.D.Larance: Computation of phytoplankton cell numbers, cell volume, cell surface, and plasma volume per liter from microscopical counts, Department of Oceanography, University of Washington, Special Report, No.38, 21(1966).
- 15) 今村典子, 安野正之: 霞ヶ浦高浜入における植物プランクトンの種類組成および現存量の季節変化, 国立公害研究所研究報告, 第22号(R-22-'81), 123~148(1981).
- 16) R.R.Strathmann: Estimating the organic carbon content of phytoplankton from cell volume or plasma volume, *Limnology and Oceanography*, 12, 411~418(1967).
- 17) 滋賀県立衛生環境センター編: 琵琶湖のプランクトンデータ集(1990~1993年)(1995).
- 18) 廣瀬弘幸, 山岸高旺: 日本淡水藻図鑑, 内田老鶴圃, 東京(1977).
- 19) F. Hustedt: Bacillariophyta (Diatomeae), In *Die Susswasser-Flora, Mitteleuropas* (A. Pascher ed.), p.466, Gustav Fischer, Jena(1930).
- 20) 一瀬 論, 若林徹哉, 松岡泰倫, 山中 直, 藤原直樹, 野村 潔: 琵琶湖北湖における植物プランクトン相の変遷(1978~1995年), 第34回日本水処理生物学会講演集, 65(1997).
- 21) 一瀬 論, 若林徹哉, 松岡泰倫, 山中 直: 琵琶湖の植物プランクトンの形態に基づく総体積量の簡易推定について, 第31回日本水環境学会年会講演集, 295(1997).

(原稿受付日; 1999年 3月11日)

(原稿受理日; 1999年 4月30日)