

「水の華」時における溶存有機物の変化*

田 中 庸 央**

1. はじめに

湖沼・内湾における溶存有機物 (DOM) は、河川水などを通して陸起源の有機物が供給されるほかに、動物プランクトンの細胞外排泄や分解により供給される経路が考えられる。

湖沼・内湾における富栄養化が極相まで進むと、特定の植物プランクトンが大増殖を起こし「水の華」、「赤潮」を形成することはよく知られている。有機汚染に対して光合成的有機物生産がどの程度の役割を果しているかは、すでに2, 3の海域で試算されているが^{1), 2)}、「水の華」、「赤潮」形成時の溶存有機物の変動に関する調査研究は少ない。おそらくその変動は、植物プランクトンの増殖速度や生理活性などと密接な関係にあると考えられる。

本研究の対象水域である汽水湖「油ヶ渚」(愛知県碧南市)は、周年にわたって植物プランクトンの異常発生が認められる水域である³⁾。本報では水質計測からみた植物プランクトンの異常繁殖期の水質変化及び溶存有機物の変動について主に記述し論議する。

2. 試料と調査方法

試料: 試料水は湖内に設定した定点において、1975年9月から1976年8月にかけて合計137試料(表面水)を得た。試料水はWhatman GF/C グラスファイバーフィルター(あらかじめ450°C 1時間加熱)で吸引濾過し、フィルター上の懸濁物はデシケーター内で冷蔵乾燥後、クロロフィル及び懸濁有機炭素・窒素の分析に供し、濾過水については溶存有機炭素及び溶存炭水化物の分析に用いた。なお、炭水化物の測定は試料水を40°Cの湯浴中、エバポレーターで20倍に濃縮して行った。

上記の観察に加えて、毎月1回定期的に、陸水学的性状の調査を実施し、クロロフィル、塩素量、全炭酸、光合成活性などの鉛直分布を明らかにした。

分析方法は次のとおりである。

- フロロフィル a とフェオ色素: 90%アセトン抽出を行い、Laurenzen 法⁴⁾に従った。
- 懸濁有機炭素 (POC) と窒素 (PON): CHN 分析計(柳本, MT 2型)により分析。
- 溶存有機炭素 (DOC) と全炭酸 ($\Sigma \text{CO}_2\text{-C}$): 全炭素分析計(東芝ベックマン, 915型)により分析。

- 溶存炭水化物炭素 (DCHO): フェノール硫酸法に準じ⁵⁾、グルコースを標準物質として炭素量を40%として表現した。

- 光合成-光曲線: Light-Dark 法に基づき、種々の照度下で酸素の増減を測定した。インキュベートの時間は原則として2~3時間以内とした。

3. 結 果

3・1 水質計測による「水の華」時における環境特性について

特定の植物プランクトンの異常繁殖機構を理解する場合、環境変化と植物プランクトン群の種構成、現存量、増殖速度の変化との関係を詳細に追跡すると同時に、植物プランクトン群の発生、発達(増殖)、消滅の諸過程における水質変化を時系列的に把握できれば多くの情報が期待される。水質計測はこうした環境変化を追跡するには有効な手段であり研究方法である。

ここでは、らん藻 *Synechocystis* (?) 群と緑藻 *Chlamydomonas* 群による「水の華」時の水質計測による水質変化を記述するが、それに先立って本湖における植物プランクトンの発生状況について図1に示す。図から明

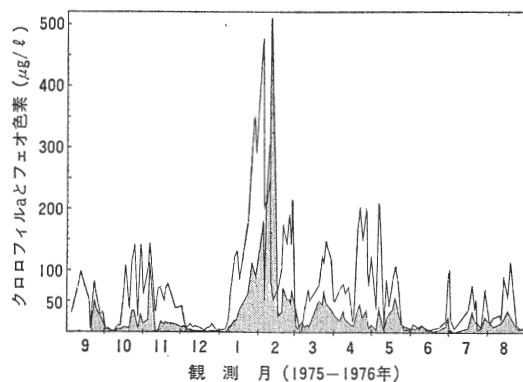


図1 クロロフィル a とフェオ色素量の季節変化 (1975—1976年)

白線: クロロフィル a, アミ部分: フェオ色素

* Changes of Dissolved Organic Matter during Water Blooming.

** Tsuneo TANAKA(愛知県公害調査センター) Aichi Environmental Research Center.

らかなようにクロロフィル a 及びフェオ色素量は激しく振幅し、しばしば植物プランクトンの大増殖が起っている。本湖の場合、大増殖を形成する植物プランクトンは *Cyclotella*, *Amphipiona*, *Synechocystis* (?), *Microcystis*, *Chlamydomonas*, *Tetraedron* などである。これらの出現種の中で最も代表的な「水の華」種は *Chlamydomonas* である。この図で注目すべきことは *Chlamydomonas* 群で代表された 1—2 月のブルーム末期にクロロフィル a がクロロフィル a の初期分解物と考えられているフェオ色素へ移行したことが明瞭に観察されたことである。すなわち、*Chlamydomonas* 群の指数関数的な増殖と共にクロロフィル a が増加し、最盛期には $476 \mu\text{g/l}$ にまで達した。一方、フェオ色素量は増殖中期から末期にかけて急激に増加しはじめ、クロロフィル a が最大に達した数日後にこの割合が逆転した。

Chlamydomonas 群による「水の華」の発生から消滅までの水質計測がとらえた水質変化を図 2 に示す。水中

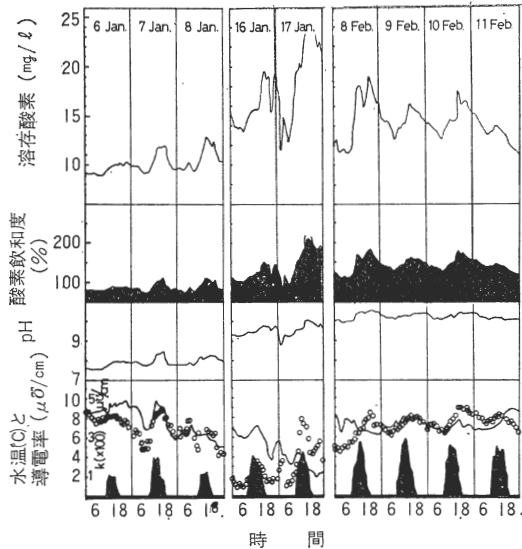


図 2 水質計測による *Chlamydomonas* 群「水の華」形成時の日変化 (1976年 1月—2月)
(下段の▲: 日射量の日変動)

の pH 及び溶存酸素量の日変化をもたらす生化学的諸要素は、(1)光合成、(2)生物の呼吸、(3)有機及び無機物質の酸化反応を指摘できるが、本湖の場合は光合成と呼吸に大きく支配されるものと考えられる。クロロフィルの季節的推移で示したように、1 月初めの濃度レベルは低く、そのために pH、溶存酸素量の日変化はわずかであった(発生段階)。その後、*Chlamydomonas* 群の指数関数的な増殖に伴って pH の上昇及び溶存酸素量の顕著な日変化が観察され、日中の酸素飽和度は 200% を超えた。とくに、溶存酸素量の急激な増加は水温の急上昇(水温飛躍

$7^\circ\text{C}/9\text{hrs}$, 日射量 $240\sim 250 \text{ g cal/cm}^2/\text{day}$) が効果的に作用した結果と思われる(発達段階)。しかし、クロロフィル a がフェオ色素へ移行する増殖末期には、日射量 ($300\sim 350 \text{ g cal/cm}^2/\text{day}$) が比較的大きいにもかかわらず、溶存酸素量の日変化幅は発達段階ほどに大きくなく、クロロフィル a とフェオ色素量が逆転した 2 月 10 日以後は溶存酸素量が減少する傾向を示した(消滅段階)。

図 2 に示したような植物プランクトンの大きな現存量が達成される条件として、(1)十分な光、(2)栄養塩類の補給、(3)植物プランクトンの高い光合成能などが期待されなければならない。

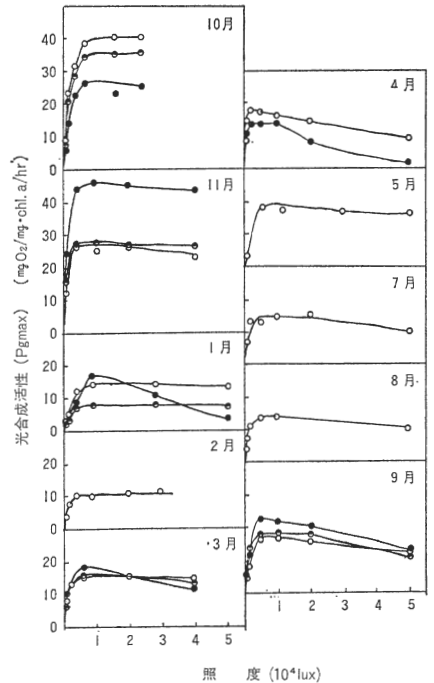


図 3-a 光合成—光曲線の季節変化 (1975年—1976年)
○: 表面水, ●: 透明度層, ●: 1%光層 (透明度 $\times 2\sim 2.5$)

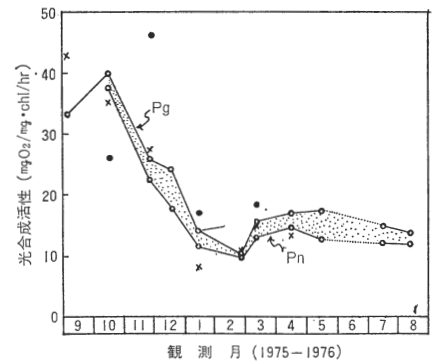


図 3-b 最大光合成活性と呼吸量の季節変化
○: 表面水, ×: 透明度層, ●: 1%光層 (透明度 $\times 2\sim 2.5$)
□: 呼吸量 $R = P_g - P_n$

現場水温に近い水温で測定した光合成—光曲線及び光合成活性 P_g^{max} の季節変化を図3-aとbに示す。Synechocystis (?) 群でブルームを形成した10—11月の P_g^{max} は $25\sim 40\text{ mgO}_2/\text{mgchl. a/hr}$ の高い光合成能を与えた。通常富栄養湖で $2\sim 6\text{ mgC}/\text{mg.chl. a/hr}$ 程度の値を示すが、このような高い光合成能を示した例としては、東京湾の *Skeletonema costatum* による「赤潮」時⁶⁾に、また諏訪湖の「水の華」種、*Microcystis* の増殖初期⁷⁾のもので報告されている。しかし、さらに大きな現存量に達した1—2月の *Chlamydomonas* 群による「水の華」形成時の光合成能はそれ程高くなく、 $10\sim 15\text{ mgO}_2/\text{mg.chl. a/hr}$ 程度であった。高温期(7—9月)の P_g^{max} もまた、 $15\sim 20\text{ mgO}_2/\text{mg.chl. a/hr}$ 程度であった。

植物プランクトンの呼吸率は、プランクトンの生理活性状態を示す良い指標とされるが(一般に呼吸率は成長の初期段階にあるときは P_g^{max} の10%程度)、本湖の例では、図3-bに示したように「水の華」時では5—10%に相当し、高温期では20%程度であった。高温期の呼吸率にはバクテリア群による消費が一部考えられるかも知れない。以上のことは、本湖に出現する植物プランクトンは周年を通して比較的活性の高いプランクトンであることが示唆される。

水質計測が植物プランクトンの発生パターンの環境特性をよくとらえた2例として、先に触れた高い光合成能をもつ *Synechocystis* (?) 群によるブルーム期の様相を図4に示す。10月31日におけるクロロフィルa量は $62.1\ \mu\text{g/l}$ であって決して低い濃度レベルではないが、pH及び溶存酸素量の日変化は後日の変化パターンに比べてあまり顕著ではない。明らかに光の不足(日射量 $59\text{ g cal}/\text{cm}^2/\text{day}$)によるものである。しかし、11月1日以後、日射量の増加($325\sim 365\text{ g cal}/\text{cm}^2/\text{day}$)に伴い、pH及び溶存酸素量に規則的な日変化が観察されたが、*Chlamydomonas* 群のそれよりも、日中の酸素飽和度は大きく $250\sim 300\%$ を超え有機物生産の活発化がうかがえた。11月5日朝のクロロフィル量は $143\ \mu\text{g/l}$ であったので、この期間中に2倍増の純増加があったことになる。

3・2 「水の華」時における溶存有機物の変化

上述したような植物プランクトンブルーム期の溶存有機物の挙動については興味ある課題であるが、とくに植物プランクトンの細胞外排泄・分解物と合せて、異常繁殖を維持達成するうえでの炭素源のプールとして、溶存有機物の役割は重要であると考えられる。

表面水について測定された溶存有機炭素(DOC)及び溶存炭水化物炭素(DCHO)の季節変動を図5に示す。クロロフィル量の季節変動と同様に激しい振幅を繰り返

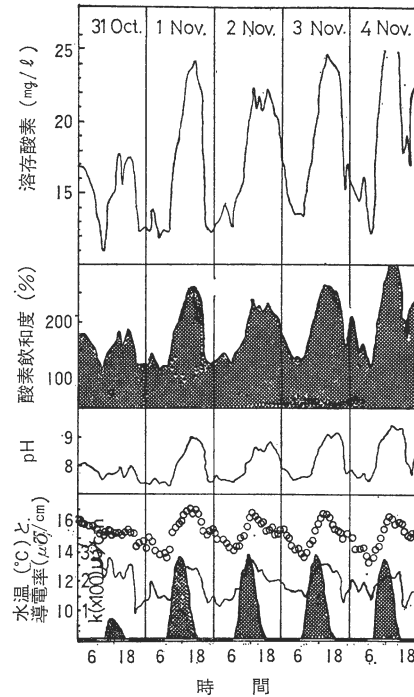


図4 水質計測による *Synechocystis* (?) 群ブルーム期の日変化(1975年10月—11月)
(下段の▲: 日射量の日変動)

していることが認められた。しかし、詳細にその変動を検討すると次のような傾向を知ることができる; 降雨時には流域の有機質に富んだ地表面流出成分の流入及び降雨による希釈効果に伴う変動も一部考えられたが、図2に示したクロロフィル濃度のピーク位置と溶存有機炭素濃度のピーク位置が一致する 경우가多かった。一方、溶存炭水化物についても同じような傾向を示し、特に *Chlamydomonas* 群による「水の華」形成時にはクロロフィル量とよく一致した。ここで注目すべきことは、クロロフィルaからフェオ色素へ移行する *Chlamydomonas* 群の増殖末期に、明らかに溶存炭水化物を放出していることが観察されたことである(図6)。

溶存有機炭素に対する溶存炭水化物炭素の割合は、7—35%の範囲に相当し、その季節変動は顕著であったが、*Chlamydomonas* 群による「水の華」形成時及び *Amphipionia alata* (3—4月)で代表されたブルーム期では、この割合は15—35%を占め、他の時期に比べて炭水化物の割合が大きく、植物プランクトンによる生産・排泄等の代謝物質の蓄積が想像された。一方、降雨時におけるこの割合は7—20%の範囲にあることが多く、とくに10—11月期は溶存有機炭素に占める溶存炭水化物の割合は小さく7—15%に相当した。

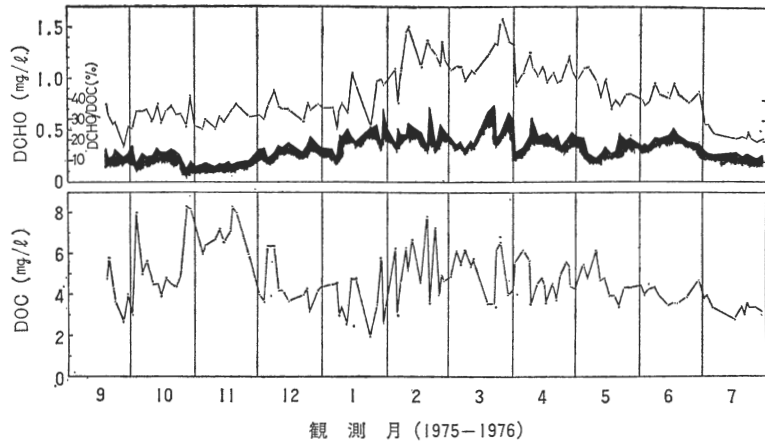


図5 溶存有機炭素 (DOC) と溶存炭水化物の季節変動 (1975—1976年)

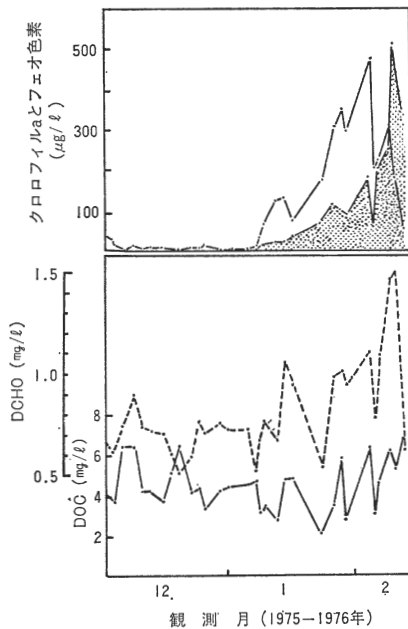


図6 *Chlamydomonas* 群による「水の華」形成時におけるクロロフィル、フェオ色素、溶存有機炭素及び溶存炭水化物の変化

4. 考 察

4.1 *Chlamydomonas* 群によるクロロフィル a からフェオ色素への移行について

考えられる要因としては、(1)動物プランクトンの捕食活動、(2)増殖に必要な栄養物質（特に窒素、リン、炭素）のうち、ある物質が制限因子として働いた可能性、等がある。前者については、動物プランクトンの現存量の季節変化から考えて⁸⁾、この現象を説明できるものでない。後者については、これだけの植物プランクトンの現存量

に達しても、窒素及びリンが全く消失するということではなく、かなりの程度水中に存在することが確かめられている。したがって、残された可能性としては炭素の欠乏が考えられる。*Chlamydomonas* 群の現存量が最大に達した時の懸濁有機炭素量は約 13 mgC/l であることから、これだけの CO₂ の供給が補償されなければならない。

Chlamydomonas 群最盛期の全炭酸の値を欠くが、本湖における全炭酸 (Σ CO₂-C) の季節変化を図 7 に、クロロフィル a と塩素量の鉛直分布を図 8 に示す。春-秋期を通して、全炭酸及びクロロフィル a は成層型の分布が認められ、湖水の底層に蓄積している CO₂ は、いうまでもなく、主として従属栄養細菌群による有機物の分解に由来するものである。一方、晩秋-冬期にかけて、これらの分布は全水柱ほぼ均一の濃度を示し、底層まで全炭酸が効率良く植物プランクトンに利用されていることが示唆される。おそらく、2月中旬の *Chlamydomonas* 群による「水の華」時のような爆発的増殖に対しては、従属栄養細菌群による底質からの CO₂ の供給も低温期に当たることもあって量的に期待できず、CO₂ が制限因子として働いた可能性が強い。

しかし、CO₂ の欠乏が本湖で観察されたように急速にクロロフィル a からフェオ色素へと移行させようものかどうか今後、実験的に確認することが重要であるが、「水の華」形成に関しては、窒素やリン成分とともに炭酸の動態にも強い関心をはらう必要があることを教示している。

4.2 「水の華」時における溶存有機物の変化

溶存有機物濃度は外洋水については比較的、水域及び季節に関係なくほぼ一定であるが、沿岸水や内湾水ではしばしば顕著な季節変化が観察される。この原因として春期ブルーム期の急激な植物プランクトンの増殖による

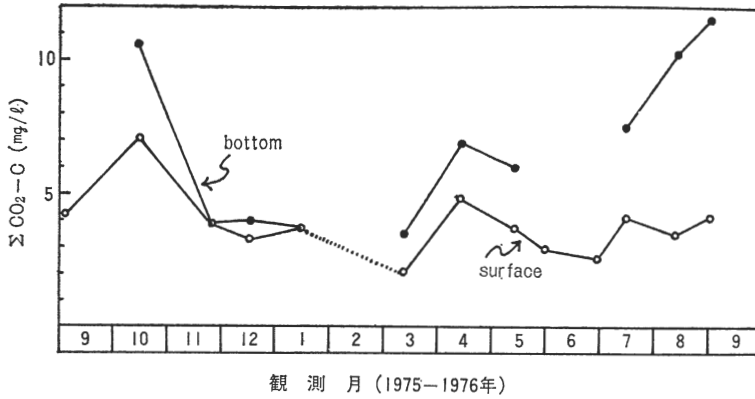


図7 全炭酸 ($\Sigma \text{CO}_2\text{-C}$) の季節変動

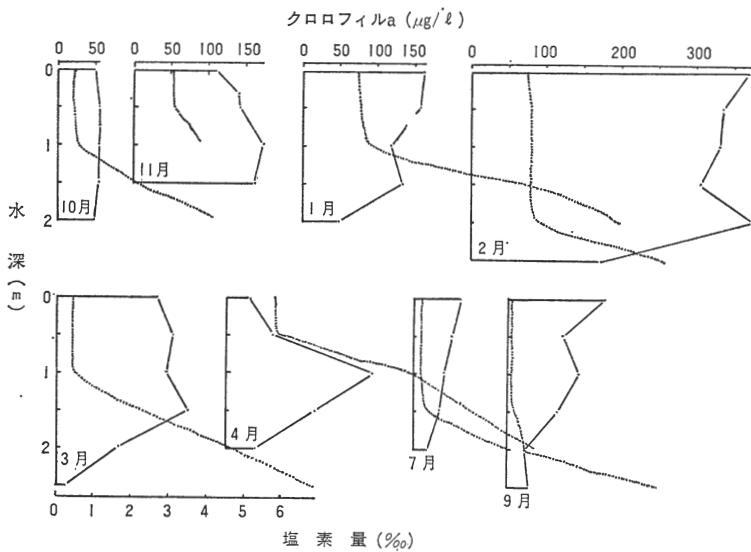


図8 クロロフィルaと塩素量の鉛直分布

とか^{9), 10)},あるいは赤潮生物の分解物に由来するとか¹¹⁾, 場所場所によってさまざまなパターンが明らかにされている。

本湖で観察されたような溶存有機炭素及び炭水化物がクロロフィルの濃度ピークに一致するという事実は、光合成で同化した有機物の一部を細胞外排泄として分泌していることを暗示する。とくに、この傾向は *Chlamydomonas* 群による「水の華」形成時に明らかに観察された測定例かと思われる。

Guillard¹²⁾ らは培養実験で鞭毛藻類の細胞外炭水化物を調べ、炭水化物はすでに生育対数初期に認められ、その蓄積は定常期で顕著であることを認めた。Lewin¹³⁾ は *Chlamydomonas* 属の種類について、長期培養で細胞外炭水化物が生育期間中を通じて蓄積することを報告した。また、Hellebust¹⁴⁾ は海産植物プランクトンを用

いて、細胞外有機物生成量を調べ、その生成量は光合成によって作られた全有機化合物の3~6%であったが、内湾の表面水ではこの値は4~16%になり、とくにブルーム後期では17~38%の高い値を示した。これらの知見から本湖で観察された炭水化物の蓄積は、主に *Chlamydomonas* 群による分泌に由来すると推定されるが、増殖末期から不活性化期に急速に炭水化物を放出する現象が自然水域で観察されたことは意義深い。

自然状態では一般にバクテリアと植物プランクトンと相利共生的関係にあるが、*Chlamydomonas* 群の異常増殖がたまたま低温期に当たるため、分解者である従属栄養細菌群による攻撃を受けることなく、溶存有機物が湖内に蓄積される状態を示したものと考えられる。

著者¹⁵⁾ はすでに *Chlamydomonas* 群によるブルーム末期の湖沼水を試料として溶存有機物を構成する主要な

化学組成を明らかにしたが、それによると炭水化物、タンパク質及び脂質が全溶存有機物に占める割合はそれぞれ、22.4%、25.0%及び20.9%であった。検出同定されたこれらの割合は全溶存有機物の68%に達し、外洋水の数10%に比べる¹⁶⁾と検出同定される割合が多かった。

水中の溶存有機物は藻類生産に対し炭素源のプールとして生態学的役割を果たしているが、ある特定の植物プランクトンは有機化合物を直接、摂取する能力をもつことが知られている。里見¹⁷⁾は春期循環期に底層の有機酸類は表層に運ばれ、それが緑藻類の繁殖を促進するために、冬期に優占した珪藻類に交代する季節的遷移の一因と考えている。本湖の場合、底層は常時嫌気的環境にあるため、有機酸類の生成量は少なくないと思われる。Chlamydomonas 群による「水の華」形成期は高いpH値で推移することもあり、CO₂の欠乏時に有機酸類は直接摂取されて炭素源として生長に利用されることが推定される。

5. ま と め

富栄養化が極相段階まで進んだ湖沼を対象に「水の華」形成時における溶存有機物の変動に関する調査研究をおこない次のことを明らかにした。

周年にわたって植物プランクトン中のクロロフィルa及びフェオ色素量の詳細な季節変動を観察したところ、しばしば植物プランクトンの大増殖が形成された。とくに冬期にChlamydomonas 群による「水の華」が出現しクロロフィルaによる現存量は476 µg/lまでに達した。「水の華」形成末期にクロロフィルaの現存量が最大に達した直後に急速にフェオ色素へ移行する過程をとらえた。

溶存有機炭素及び溶存炭水化物の季節変動はクロロフィルの濃度ピークに一致することが多く、光合成で同化

した有機物の一部を細胞外排泄として分泌していることが示唆された。とくにChlamydomonas 群による「水の華」時は、水中の溶存炭水化物がChlamydomonas 群の現存量の増加に伴い逐次、増加する傾向を示し、フェオ色素に移行した直後に、急激な炭水化物の蓄積が認められた。

(謝 辞)

試料採取に多大の協力をいただいた愛知県碧南市役所公害課、また未発表のデータを公表することを許可された当センター佐野方昂技師ならびにプランクトン同定に協力をいただいた当センター東三河支所田中正明技師に深謝いたします。

一 文 献

- 1) 一都三県公害防止協議会：水質汚濁共同調査報告書（東京湾総合調査）p. 38 (1974).
- 2) 岡市友利：水産科学, **16**, 41—46 (1970).
- 3) 田中庸央・佐野方昂：水処理技術, **16**, 559—652 (1975).
- 4) Laurenzen, C. J.: Limnol. Oceanog., **12**, 343—346 (1967).
- 5) Handa, N.: J. Oceanog. Soc. Jap., **22**, 79—92 (1966).
- 6) 船越真樹ら：昭和49年度日本海洋学会予稿集, 仙台, p. 118 (1974).
- 7) Okino, T.: Jap. J. Bot., **20**, 381 (1973).
- 8) 田中庸央：未発表.
- 9) Duursma, E. K.: Netherl. J. Sea Res., **2**, 85—94 (1963).
- 10) Holmes, R. W., P. M. Williams and R. W. Eppley: Limnol. Oceanog., **12**, 503—512 (1967).
- 11) Ogura, N., A. Kamatani, N. Nakamoto, M. Funakoshi and S. Iwata: Jour. Oceanog. Soc. Jap., **31**, 43—47 (1975).
- 12) Guillard, R. R. L. and P. J. Wangersky: Limnol. Oceanog., **3**, 449—454 (1958).
- 13) Lewin, R. A.: Can. J. Microbiol., **2**, 665—672 (1956).
- 14) Hellebust, J. A.: Limnol. Oceanog., **12**, 192—206 (1965).
- 15) 田中庸央・田中進：水処理技術, **18**, 853—858 (1977).
- 16) 小倉紀雄：日本海洋学会誌, **23**, 27—33 (1967).
- 17) 里見至弘：淡水研報, **13**, 77—92 (1963).