

# 霞ヶ浦における植物プランクトンの現存量と光合成活性の季節変化

岩崎 順・外岡 健夫

## Seasonal Changes in Biomass and Photosynthetic Activity of Phytoplankton in Lake Kasumigaura

Jun IWASAKI and Takeo TONOOKA

### Abstract

The phytoplankton biomass and photosynthetic activity were measured in relation to the chemical environmental conditions in Lake Kasumigaura from April 1992 through to March 1995. Dominant phytoplankton densities were counted microscopically. Chlorophyll *a* was determined colorimetrically and primary productivity was measured by a simulated *in situ* oxygen method. *Phormidium* dominated remarkably in April and August of each year. Phytoplankton biomass ( $\text{mgChl. } a/\text{m}^3$ ) varied between 18.9 to 109.0  $\text{mgChl. } a/\text{m}^3$  with a maximum in April 1993. The gross primary production reached a maximum of 13.7  $\text{gO}_2/\text{m}^2/\text{day}$  in August 1993. The maximum photosynthetic activity was 30.2  $\text{mgO}_2/\text{mgChl. } a/\text{hr}$  in August 1994. A significant correlation was recognized between the photosynthetic activity and water temperature. Temporal variations in the photosynthetic activity generally followed the seasonal cycle of water temperature. Dissolved nutrients exhibited marked seasonal variations, but were not correlated with the concurrent variations in phytoplankton photosynthetic activity.

**Key words** : Lake Kasumigaura(霞ヶ浦), phytoplankton biomass(植物プランクトン現存量), photosynthetic activity(光合成活性)

### 1. はじめに

植物プランクトンの光合成による有機物生産, すなわち基礎生産は, 植物連鎖を通して動物プランクトンや魚類といったより高次の生物生産の根幹をなすものである。さらに, 湖沼における富栄養化の進行に関わる窒素, リンなどの物質循環を解明する上でも, 植物プランクトンの現存量と生産量を把握することが必要

になる。しかし, 霞ヶ浦における植物プランクトンの現存量や生産量に関する周年にわたる測定例は限られているのが現状である。本報では, 富栄養化が進んだ霞ヶ浦において植物プランクトンの現存量と光合成活性を周年にわたって測定し, それらに及ぼす環境要因の影響を検討した結果について述べる。

## 2. 材料と方法

### (1) 植物プランクトンの現存量

植物プランクトン現存量測定のための採水は、茨城県内水面水産試験場(IPPFES)の棧橋(Fig. 1)において、1992年4月から1995年3月にわたる3年間、1ヶ月に1~2回実施した。すなわち、水深0.5mから北原式採水器で採取し、未固定の試水の一部を直接検鏡し、同定・計数した。同定は、属のレベル

で行った。

また、試水250mlをガラス繊維性濾紙(Whatman GF/C)で濾過した。濾紙を90%アセトン水溶液中でホモジナイズし、クロロフィルa濃度を比色法(Strickland and Parsons, 1968)によって測定した。クロロフィルa濃度の測定は、島津製作所製分光光度計UV-240によった。

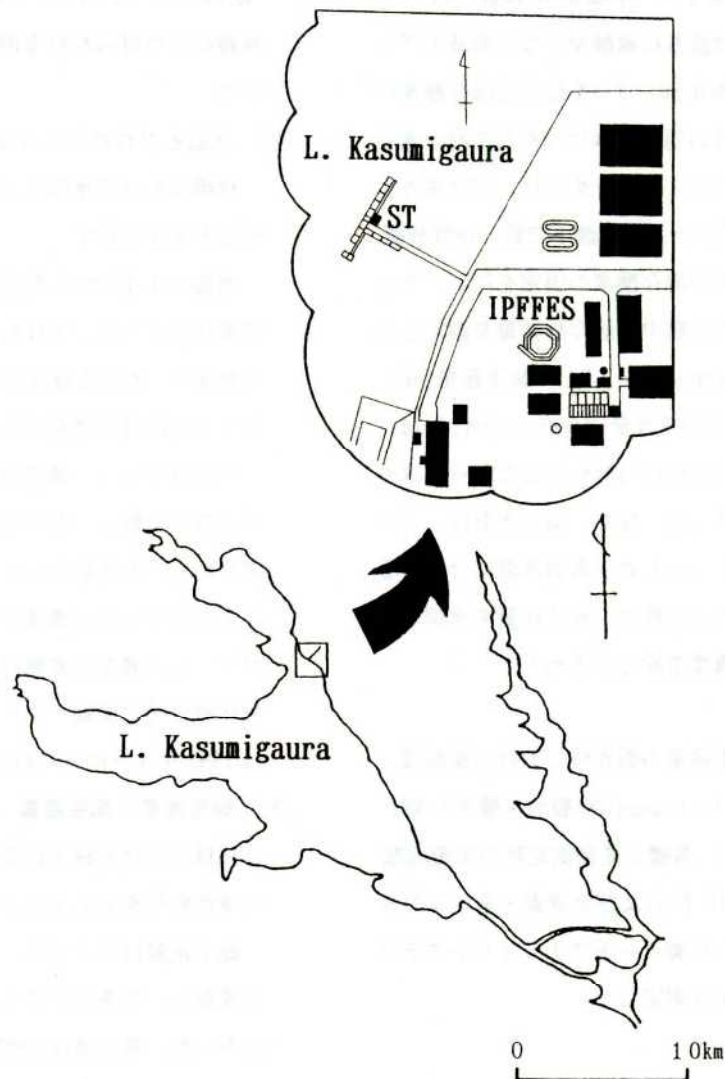


Fig.1. Sampling station in Lake Kasumigaura.

Phytoplankton biomass and photosynthetic activity were measured at the pier of Ibaraki Prefectural Freshwater Fisheries Experimental Station (IPPFES).

図1. 霞ヶ浦における調査定点。

植物プランクトンの現存量と光合成活性は、茨城県内水面水産試験場 (IPPFES) の棧橋で測定された。

## (2) 光合成活性

光合成活性を求めるための基礎生産量の測定は、擬似現場法(市村, 1969)により、現存量調査とほぼ同時期に実施した。すなわち、採水は栈橋の0.5, 1.0, 1.5, 2.0m層より行い、まず大型の動物プランクトンを除くため、各層の試水を目合い300 $\mu$ mのプランクトンネットで濾過した。その濾水を約100mlのD0瓶6本(明瓶4本, 暗瓶2本)に静かに分注した。明瓶2本には直ちに硫酸マンガン溶液とアルカリヨウ化物溶液各0.5mlづつを加えて溶存酸素の固定を行った。残りの明瓶2本にはそれぞれの水中照度に対応した減光フィルターをかけ、明暗瓶とも25,000luxのハロゲンランプ光源下で約3時間放置した。その後、各瓶の溶存酸素の固定を行い、ウィンクラー法によって各瓶中の溶存酸素量を測定した。総生産量(Gross production; Pg), 純生産量(Net production; Pn)および呼吸量(Respiration; R)は、Strickland and Parsons(1968)にしたがって求め、台形法によって積算した。なお、測定水温は、上下層で顕著な差がなかったため、表層水温に合わせるよう心がけた。光合成活性は、総生産量を水深およびクロロフィルa濃度で除して求めた。

## (3) 一般水質項目

現存量及び基礎生産量の調査時における測温は、Yellow Springs Instrument社製溶存酸素計YSI MODEL 57によった。基礎生産量測定時の栄養塩類( $\text{NO}_2+\text{NO}_3\text{-N}$ ,  $\text{NH}_4\text{-N}$ ,  $\text{PO}_4\text{-P}$ )および全窒素・全リンの各濃度は、テクニコン社製オートアナライザーでテクニコン社の方法により測定した。

## 3. 結 果

### (1) 植物プランクトン個体数

茨城県内水面水産試験場の栈橋で優占する植物プランクトン個体数の季節変化をFig. 2に示す。

*Phormidium* 個体数は各年の4月と8月にピークになる傾向がみられ、1993年5月に最大値(27,560

indiv./ml)を示した。*Oscillatoria* は *Phormidium* 個体数がピークに達した後に増加する傾向がみられ、1993年11月に最大値(11,560indiv./ml)を示した。*Synedra* は冬・春季に増加する傾向がみられ、1993年4月に最大値(18,720indiv./ml)を示した。3属の個体数合計の最大値は *Synedra* 個体数がピークに達した1993年4月にみられ、その値は39,720indiv./mlであった。なお、3属の個体数合計は、検鏡により得られた全個体数の90%以上を占めていた。

### (2) 水温とクロロフィルa濃度

栈橋における水温とクロロフィルa濃度の季節変化をFig. 3に示す。

水温は4.4 $^{\circ}\text{C}$ から32.5 $^{\circ}\text{C}$ の範囲にあり、明瞭な季節変化を示した。すなわち、水温の上昇は3月頃から始まり、8月に最高となった後、再び低下に転じ、1~2月に最低値を示した。

クロロフィルa濃度は18.9~109.0 $\mu\text{g/l}$ の範囲で大きく変動し、かつ明瞭な季節変化がみられた。すなわち、4月を中心とした春季と7~10月に2つのクロロフィルa濃度のピークが認められた。クロロフィルa濃度の変動は、植物プランクトン3属の個体数合計の変動パターンと類似していた。最大値は1993年4月にみられた。

### (3) 総生産量と総生産量:呼吸量比

栈橋における総生産量および総生産量:呼吸量比の季節変化をFig. 4に示す。

総生産量は2.5~13.7 $\text{g O}_2/\text{m}^2/\text{day}$ の範囲で大きく変動し、冬季に小さく春~秋季に大きくなる傾向にあった。最大値は1993年8月にみられた。

総生産量:呼吸量比は0.3~26.7の範囲にあり、冬・春季に明瞭なピークが認められた。最大値は1992年5月にみられた。

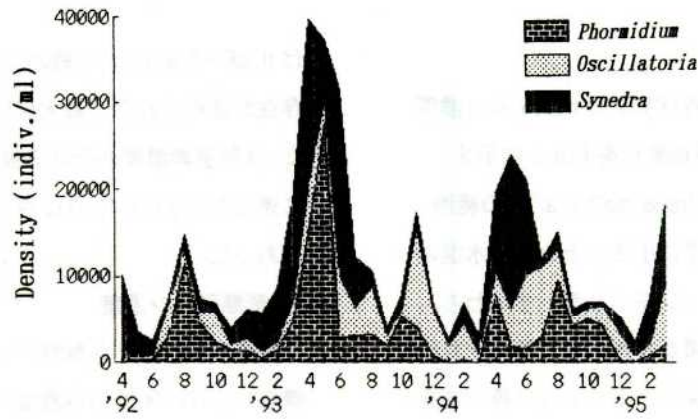


Fig.2. Seasonal variations in dominant phytoplankton densities at the pier of IPPFES.

図2. IPPFES栈橋における主要な植物プランクトン個体数の季節変化.

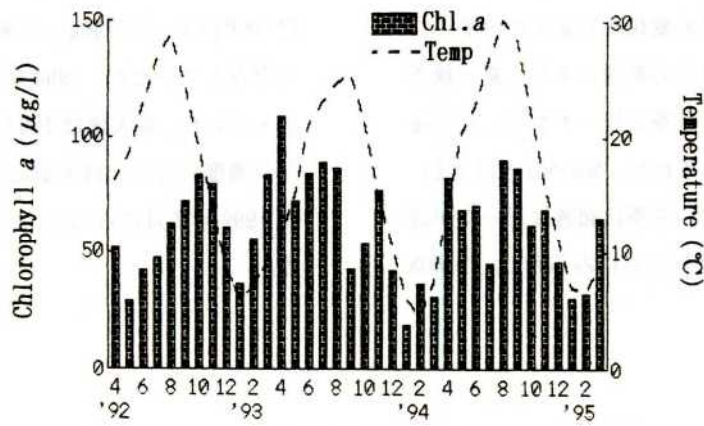


Fig.3. Seasonal variations in water temperature and chlorophyll a concentration at the pier of IPPFES.

図3. IPPFES栈橋における水温とクロロフィルa濃度の季節変化.

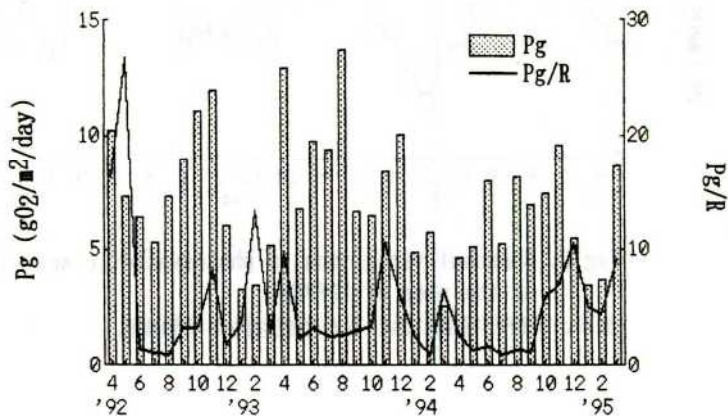


Fig.4. Seasonal variations in gross primary production and gross primary production : respiration ratio at the pier of IPPFES.

図4. IPPFES栈橋における総生産量と総生産量：呼吸量比の季節変化.

#### (4) 光合成活性

栈橋における光合成活性(PA;クロロフィルa濃度あたりの基礎生産量)の季節変化をFig. 5に示す。

光合成活性は5.0~30.2mgO<sub>2</sub>/mgChl. a/hrの範囲にあり、夏季に大きく冬季に小さいといった水温の変動とよく似た変動パターンを示した。すなわち、光合成活性の増加は4月頃から始まり、8~9月に最大となった後、再び減少し、1~2月に最小値を示した。最大値は1994年8月にみられた。

#### (5) 形態別窒素濃度

栈橋におけるアンモニア態窒素(NH<sub>4</sub>-N)、亜硝酸・硝酸態窒素(NO<sub>2</sub>+NO<sub>3</sub>-N)、懸濁・溶存有機態窒素(PN+DON)の各態窒素濃度の季節変化をFig. 6に示す。

NH<sub>4</sub>-Nは0.01~1.50mg/lの範囲にあり、夏・秋季にその存在が認められ、秋季にピークを示した。最大値は1993年10月にみられた。NO<sub>2</sub>+NO<sub>3</sub>-Nは0.01~2.93mg/lの範囲にあり、冬季に顕著なピークが認められた。最大値は1994年2月にみられた。PN+DON

は0.28~3.87mg/lの範囲にあり、年間を通してその存在が認められた。最大値は1994年10月にみられた。3態窒素濃度の合計の最大値はPN+DONがピークに達した1994年10月にみられ、その値は4.59mg/lであった。

#### (6) 形態別リン濃度

栈橋におけるリン酸態リン(PO<sub>4</sub>-P)、懸濁・溶存有機態リン(PP+DOP)の各濃度の季節変化をFig. 7に示す。

PO<sub>4</sub>-Pは0.001~0.224mg/lの範囲にあり、NH<sub>4</sub>-N同様、夏、冬季にその存在が認められ、秋季にピークを示した。最大値は1994年9月にみられた。

PP+DOPは0~0.219mg/lの範囲にあり、年間を通して存在していたが、1994年春・夏季に著しい減少が認められた。最大値は1992年7月にみられた。2態リン濃度の合計の最大値はPP+DOPがピークに達した1992年7月にみられ、その値は0.228mg/lであった。

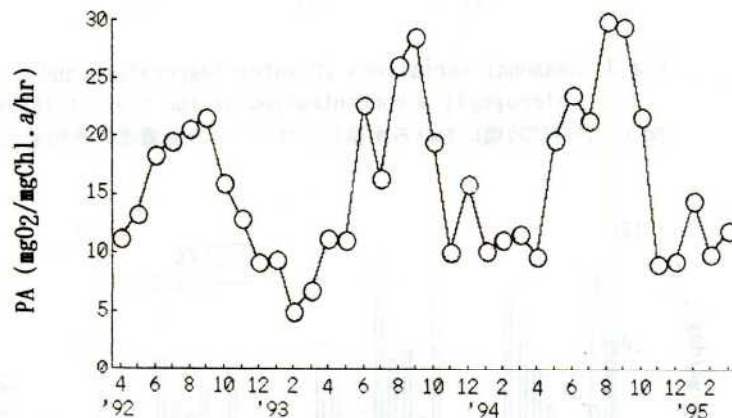


Fig. 5. Seasonal variations in photosynthetic activity at the pier of IPPFES.

図5. IPPFES栈橋における光合成活性の季節変化。

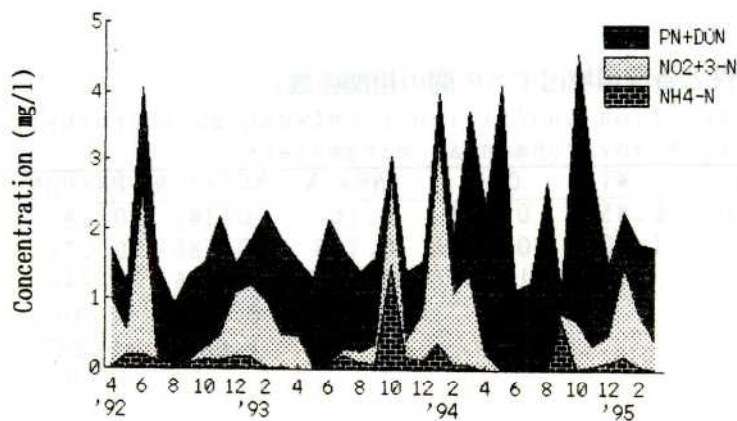


Fig.6. Seasonal variations in nitrogen concentrations at the pier of IPPFES.

図6. IPPFES棧橋における窒素濃度の季節変化.

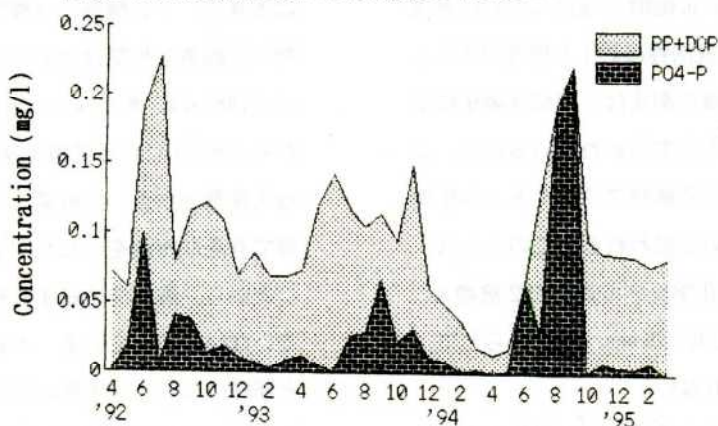


Fig.7. Seasonal variations in phosphorus concentrations at the pier of IPPFES.

図7. IPPFES棧橋におけるリン濃度の季節変化.

#### 4. 考 察

光合成活性と環境因子との関係を見るため、Table 1に各々の間の相関係数行列を示した。光合成活性との間で高い相関( $>0.6$ )が得られた因子は、水温とリン酸態リン濃度であった。この結果から、富栄養化が進んだ霞ヶ浦では、光合成が水温条件によって律速状態にあることが示唆される。一方、水温とリン酸態リン濃度との間にもやや高い正の相関( $r=0.629$ )があるため、リンが直接、光合成の制限要因になっているとは言い切れない。

また、クロロフィルa濃度と亜硝酸・硝酸態窒素

濃度との間に負の相関がみられたが、アンモニア態窒素濃度との間には顕著な相関は認められなかった。培養系の植物プランクトンはアンモニア態窒素を優先してとり込み、これがなくなると他の形態の窒素をとり込むが、無機態窒素量ははるかに少ない自然水界では濃度の大小が大きな意味をもち、多く存在するものがより多く利用されるといわれている(和田, 1986)。したがって、霞ヶ浦での植物プランクトンの高い現存量は、相対的にアンモニア態窒素よりも多く存在する亜硝酸・硝酸態窒素を利用した活発な光合成作用によってもたらされると考えられる。

表 1. 光合成活性と各種環境因子との間の相関係数.

Table 1. Correlation coefficients between photosynthetic activity and various environmental parameters.

	PA	WT	Chl.a	NH <sub>4</sub> -N	NO <sub>2</sub> +3-N	PN+DON	P0 <sub>4</sub> -P	PP+DOP
PA	1.000	0.856	0.254	0.167	-0.345	0.186	0.670	-0.216
WT		1.000	0.424	0.118	-0.486	0.230	0.629	-0.086
Chl.a			1.000	-0.117	-0.635	0.246	0.267	0.079
NH <sub>4</sub> -N				1.000	0.309	-0.401	0.233	-0.049
NO <sub>2</sub> +3-N					1.000	-0.230	-0.147	-0.028
PN+DON						1.000	-0.057	-0.056
P0 <sub>4</sub> -P							1.000	-0.433
PP+DOP								1.000

水温と光合成活性との関係を Fig. 8 に示す。両者は指数回帰の関係( $\text{Log}Y=0.020X+0.824$ )にあり、水温が10℃上昇すると光合成活性は約1.6倍増加することがわかる。基礎生産量の測定は、擬似現場法により、一定光量の光源のもとで行われているので、この回帰直線は温度に対する植物プランクトンの生理的応答を示しているものと思われる。このことは、温度が10℃上昇すると化学反応の速度が2倍増大する、いわゆる「Q<sub>10</sub>の法則」(Dawes, 1972)からして、当然のことなのかもしれない。

リン酸態リン濃度と光合成活性との関係を Fig. 9 に示す。両者は対数回帰の関係( $Y=6.673\text{Log} X + 8.495$ )にあり、リン酸態リン濃度が小さいときは光合成活性の増加率は大きい、リン酸態リン濃度が大きくなると光合成活性の増加率は小さくなることわかる。

ここで、前述したリン酸態リン濃度と光合成活性との間の正の相関が、リンが光合成の制限要因になっているためか水温の間接的な影響なのかを見きわめるため、Fig. 8の指数回帰式の勾配でFig. 8の各点を通る直線とY軸との切片、すなわちQ<sub>10</sub>=1.6と仮定して0℃に温度補正した光合成活性を求めた。それらの値とリン酸態リン濃度との関係をプロット

したのがFig. 10である。Fig. 10の各点のばらつきは大きく、リン酸態リン濃度と補正光合成活性の間には顕著な相関は認められない。Takamura *et al.* (1987)は、*Microcystis*が優占していた1981年から1985年にかけて霞ヶ浦で基礎生産量を測定し、総生産量と水温、日射量、クロロフィルa濃度との間に有意な相関を示したが栄養塩とは示さなかったことから、霞ヶ浦の総生産量は栄養塩の影響を受けていないと述べている。本報の結果も基本的にこれと同様になり、7年間の間で霞ヶ浦の植物プランクトンを取り巻く栄養環境は変化していないことが示唆される。一方、Ichimura(1967)は、東京湾での植物プランクトンの基礎生産に関する研究で、リン酸態リン濃度の光合成活性への影響は温度条件によって変わると述べている。すなわち、光合成活性は、リン酸態リンが限定的に働いている限り、リン酸態リン濃度の増加とともに増加していくが、ある段階で水温が限定するようになると、もはやリン酸態リン濃度の増加には依存しなくなるということである。霞ヶ浦でのリン酸態リン濃度と光合成活性にこのような関係がみられないのは、リン酸態リン濃度が光合成に限定的に働く以上の大きさであるためと言える。

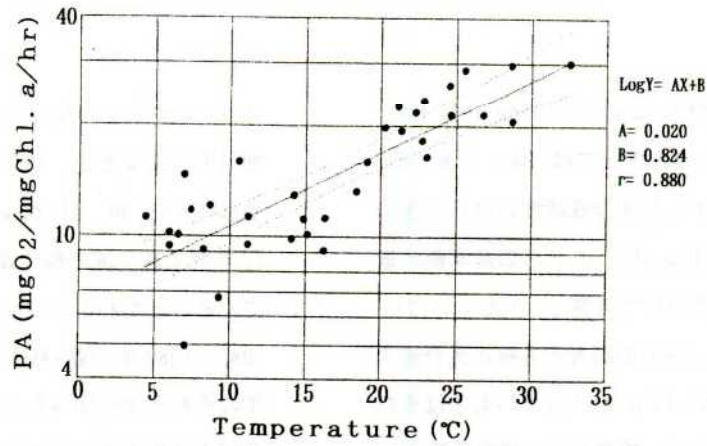


Fig.8. Relationship between water temperature and photosynthetic activity (April 1992-March 1995).

図8. 水温と光合成活性との関係 (1992年4月-1995年3月) .

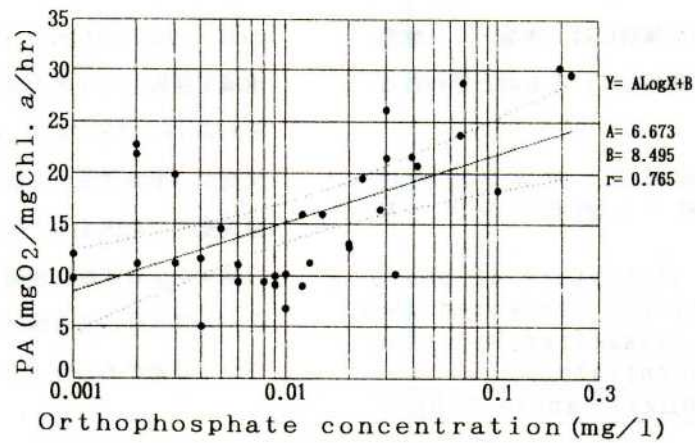


Fig.9. Relationship between orthophosphate concentration and photosynthetic activity (April 1992-March 1995).

図9. リン酸態リン濃度と光合成活性との関係 (1992年4月-1995年3月)

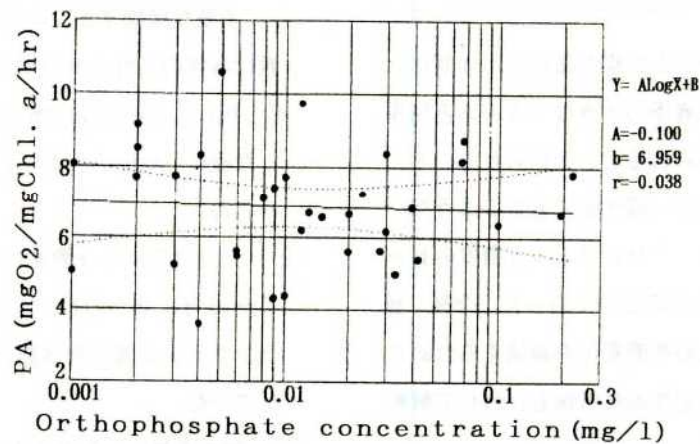


Fig.10. Relationship between orthophosphate concentration and photosynthetic activity corrected thermally at 0°C (April 1992-March 1995).

図10. リン酸態リン濃度と0°Cに温度補正した光合成活性との関係 (1992年4月-1995年3月) .



リン酸態リン濃度が  $10 \mu\text{g/l}$  ( $0.01\text{mg/l}$ ) 以下のときと  $10 \mu\text{g/l}$  以上のときとでは、 $Q_{10}=1.6$  と仮定して  $0^\circ\text{C}$  に温度補正した光合成活性のばらつきが大きさが異なるので (Fig. 10), これらの基本統計量をリン酸態リン濃度で分けて計算し、Table 2 に示した。  $10 \mu\text{g/l}$  以下, 以上の両者とも補正光合成活性の平均値は等しいが、  $10 \mu\text{g/l}$  以下のものはそれ以上のものよりもレンジ、標準偏差、変動係数のいずれも大きいことがわかる。このような、リン酸態リン濃度が小さいときは光合成活性のばらつきは大きく、リン酸態リン濃度が大きくなると光合成活性はある値に収束していく傾向には、水温・リン酸態リン濃度以外の要因が関与しているものと思われる。

表 2.  $0^\circ\text{C}$  に温度補正した光合成活性のリン酸態リン濃度で分けた基本統計量.

Table 2. Basic statistics of photosynthetic activity corrected thermally at  $0^\circ\text{C}$  classified by orthophosphate concentration.

	below $10\mu\text{g/l}$	above $10\mu\text{g/l}$
No. of cases	17	18
Max.	10.60	9.74
Min.	3.59	5.02
Ave.	6.82	6.88
S.D.	1.88	1.22
C.V.	27.60	17.72

温帯域の植物プランクトン現存量には、年間に2つのピーク、すなわち春季の大きなブルームと秋季の小さなブルームがみられることが知られている (Harvey *et al.*, 1935)。霞ヶ浦でもこのようなパターンがみられており、クロロフィル a 濃度のピークは4月および8~10月の2つであった。今後、植物プランクトン現存量の季節変化を論議するためには、群集組成に関する定性的な情報も合わせて解析していく必要がある。

今回の基礎生産量の測定から、総生産量の平均値は1992, 1993, 1994の各年度で各々7.21, 8.11, 6.35

$\text{g O}_2/\text{m}^2/\text{day}$  となった (Annexed table 1)。岩崎他 (1995) によると、1982, 1987年の総生産量の平均値は各々16.90, 11.29  $\text{g O}_2/\text{m}^2/\text{day}$  となっており、12年間で霞ヶ浦の総生産量はほぼ直線的に減少していることがわかる。Takamura *et al.* (1991) も、1987~1989年の夏・秋季の基礎生産量は1981~1986年のそれと比べ明らかに小さくなったと述べており、今回の結果を裏づけている。最近の霞ヶ浦の特徴は、*Microcystis* による「水の華」の発生が減少し、それに代わって *Oscillatoria*, *Phormidium* がほとんど常に優占するようになってきていることである (浜田, 1995)。 *Oscillatoria*, *Phormidium* が優占している水域で採取して求めた光合成活性は *Microcystis* のその19, 13%であり (岩崎他, 1993), 藻類の出現状況から勘案すると、総生産量の減少は藻類群集の組成変化に起因すると考えられる。今後、総生産量の減少をより詳細に論議するためには、植物プランクトン個体群の光合成活性を実験室的手法で測定していく必要がある。

## 5. 要 約

1992年4月から1995年3月までの間、霞ヶ浦において植物プランクトン現存量と光合成活性を測定し、以下の知見を得た。

- (1) 主要な植物プランクトンのうち、*Phormidium* 個体数は各年の4月と8月にピークになる傾向がみられた。*Oscillatoria* は *Phormidium* 個体数がピークに達した後に、*Synedra* は冬・春季に、増加する傾向がみられた。
- (2) クロロフィル a 濃度は4月を中心とした春季と7~10月に2つのピークが認められ、主要な植物プランクトン3属の個体数合計の変動パターンと類似していた。
- (3) 総生産量は、冬季に小さく春~秋季に大きくなる傾向にあった。総生産量：呼吸量比は、冬・春季に明瞭なピークが認められた。

- (4) 光合成活性は、夏季に大きく冬季に小さいといった水温の変動とよく似た変動パターンを示した。
- (5) 光合成活性と水温およびリン酸態リン濃度との間には、正の相関関係が認められた。
- (6) クロロフィル a 濃度と亜硝酸・硝酸態窒素濃度との間には、負の相関関係が認められた。
- (7) 光合成活性とリン酸態リン濃度との間の正の相関関係は、水温の影響によるものと推察された。

#### 引用文献

- Dawes, E. A. (1972): Quantitative problems in biochemistry. Churchill Livingstone. 中馬一郎・岩坪源洋・山野俊雄・久保秀雄訳(1973)生物物理化学 I - 基礎と演習 - (増訂第 5 版), 264pp. 東京, 共立出版.
- 浜田篤信(1995): 霞ヶ浦における漁獲量変動機構について. 第 6 回世界湖沼会議霞ヶ浦'95 論文集, Vol. 2, 785-788.
- Harvey, H. W., L. H. N. Cooper, M. V. Lebour and F. S. Russell(1935): Plankton production and its control. *J. Mar. Biol. Ass. U.K.*, 20, 407-441.
- Ichimura, S. (1967): Environmental gradient and its relation to primary productivity in Tokyo Bay. *Records Oceanogr. Works, Japan*, 9, 115-128.
- 市村俊英(1969): 1 次生産速度測定法. 陸水生物生産測定方法論研究会編, 陸水生物生産研究法, 35-40. 東京, 講談社, 505pp.
- 岩崎 順・外岡健夫(1993): 霞ヶ浦(1982~1992)における植物プランクトンの遷移と基礎生産量の変化. 日本陸水学会第 58 回大会講演要旨集, 140.
- 岩崎 順・外岡健夫(1995): 魚類生産マシンとしての湖沼 - 汚濁負荷と漁獲量との関係 -. 第 6 回世界湖沼会議霞ヶ浦'95 論文集, Vol. 2, 989-992.
- Strickland, J. D. H. and T. R. Parsons(1968): A practical handbook of sea water analysis. *Bull. Fish. Res. Bd. Canada*, No. 167, 311pp.
- Takamura, N., T. Iwakuma and M. Yasuno(1987): Primary production in Lake Kasumigaura, 1981-1985. *Jpn. J. Limnol.*, 48, S13-S38.
- Takamura, N. and M. Aizaki (1991): Change in primary production in Lake Kasumigaura (1986-1989) accompanied by transition of dominant species. *Jpn. J. Limnol.*, 52, 173-187.
- 和田英太郎(1986): 自然界における藻類の窒素代謝 - 水界生態系を中心として -. 秋山 優・有賀祐勝・坂本 充・横浜康継共編, 藻類の生態, 177-208. 東京, 内田老鶴圃, 627pp.

付表1. IPFFES 棧橋における総生産量と総生産量：呼吸量比の月別変化.

Annexed table 1. Monthly variations in gross primary production and gross primary production : respiration ratio at the pier of IPFFES.

	1992		1993		1994	
	Pg	Pg/R	Pg	Pg/R	Pg	Pg/R
Apr.	10.23	16.24	12.93	9.52	4.65	2.59
May	7.29	26.72	6.77	2.34	5.11	1.28
Jun.	6.37	1.35	9.78	3.20	7.93	1.59
Jul.	5.32	0.97	9.42	2.44	5.26	0.87
Aug.	7.30	0.94	13.71	2.64	8.11	1.27
Sep.	8.99	3.16	6.65	2.89	6.91	1.09
Oct.	11.10	3.24	6.46	3.27	7.39	5.87
Nov.	11.99	8.05	8.37	10.49	9.59	6.92
Dec.	6.02	1.70	10.04	5.81	5.47	10.55
Jan.	3.28	3.70	4.90	2.41	3.46	5.04
Feb.	3.47	13.24	5.75	0.80	3.71	4.41
Mar.	5.17	2.87	2.54	6.48	8.59	9.03
Max.	11.99	26.72	13.71	10.49	9.59	10.55
Min.	3.28	0.94	2.54	0.80	3.46	0.87
Ave.	7.21	6.85	8.11	4.36	6.35	4.21
S.D.	2.73	7.66	3.11	2.93	1.92	3.19
C.V.	37.89	111.84	38.41	67.13	30.24	75.71