

(18) 水域における藻類生産に関する一考察

建設省土木研究所 ○大島 吉雄
工藤 宏平

1. はじめに

近年、各地の湖沼・ダム湖・海域・湾・河川等でリン及び窒素の蓄積による富栄養化が見られ、その結果藻類が発生し環境基準の達成に支障をきたす事態が生じている。富栄養化の主たる原因物質は栄養塩類であるリン及び窒素であると言われるが、栄養塩類の水中での挙動や内部生産された藻類の有機汚濁指標であるCODなどの水中での挙動についての定量的把握は今だ十分行われてはいない。ここでは、富栄養化した水域においてCOD及びSSを定量的に把握するための試みとして、COD及びSSを光合成を行う部分・藻類の還骸の部分・溶解している部分に大別し、この部分間の相互関係について検討を行った。

2. 実験方法

昭和52年6月21日より8月25日までの約2ヶ月間、図-1に示す200ℓの水槽を土木研究所の屋上にA～E槽の5槽設置し、表-1に示す初期条件の下での水質の経時変化を週2回の間隔で、水槽上中下のコンボジットとして採水し観測した。実験に用いた試水は水道水であり、植殖水として霞ヶ浦湖水(chl.a 160μg/ℓ, T-P 0.19mg/ℓ)を18ℓ入れた。水槽は雨水自由の開放系のため、雨水による水位上昇がある場合は放置し、蒸発により水位が180ℓ以下に下がった場合のみ各槽共初期濃度での水位補給を水道水を用いて行い、水容をできるだけ180ℓに保つようにした。添加栄養塩としては硝酸カリウム及びリン酸二水素カリウムを用いている。初期濃度設定以後の途中流入負荷としては、補給水中に含まれた負荷及び雨水による負荷があるが、それらを一括して表-3に示す。なお、A槽では初期濃度設定直後硫酸バンドをAℓとして3mg/ℓ添加し、B槽では7月6日と7月13日の2回、Aℓとして各々3mg/ℓ、1.5mg/ℓ添加し、その後の水質変化を観察している。

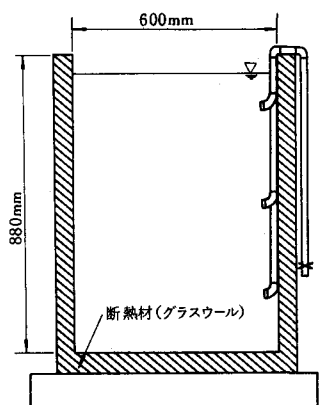


図-1 実験装置

表-2 測定項目及び方法

この実験とは別に、霞ヶ浦潮水(chl.a 100μg/ℓ, T-P 0.25mg/ℓ, P-P 0.18mg/ℓ)を40ℓのアクリル製容器に入れ20℃の暗室に置き、DOを約8mg/ℓに保った場合とDOを変化させた場

表-1 初期条件

		COD	TOC	T-P	PO ₄ -P	NO ₂ -N NO ₃	NH ₄ -N	アルカリ度	chl-a	pH
A	非溶	2.3	6.5	0.071				—	7.4	8.0
	溶	2.6	6.0	0.060	0.063	1.13	0.078			
B	非溶	2.4	5.9	0.124				23.8	5.3	8.0
	溶	2.8	4.3	0.115	0.131	1.16	0.082			
C	非溶	2.3	3.6	0.087				20.2	6.6	7.8
	溶	2.3	3.6	0.060	0.077	1.11	0.031			
D	非溶	2.4	3.8	0.106				22.0	5.4	8.0
	溶	2.2	4.8	0.089	0.111	1.13	0.060			
E	非溶	—	—	0.111				16.5	8.1	8.1
	溶	1.7	3.6	0.094	0.117	0.58	0.058			

(注) 非は非溶解性、溶は溶解性

測定項目	測定器具及び方法
気温	温度計
水温	—
DO	ウィンクラー-アン化ナトリウム変法
濁度	積分球式濁度計
pH	ガラス電極法
NO ₂ -N	テクニコン自動分析計
NO ₃ -N	—
NH ₄ -N	—
ケルダール窒素	下水試験法
PO ₄ -P	テクニコン自動分析計
T-P	—
COD	KMnO ₄ 酸性法
TOC	2チャンネルTOC測定器
クロロフィル-a	アセトン抽出法
SS	GFP法
生物同定	委託

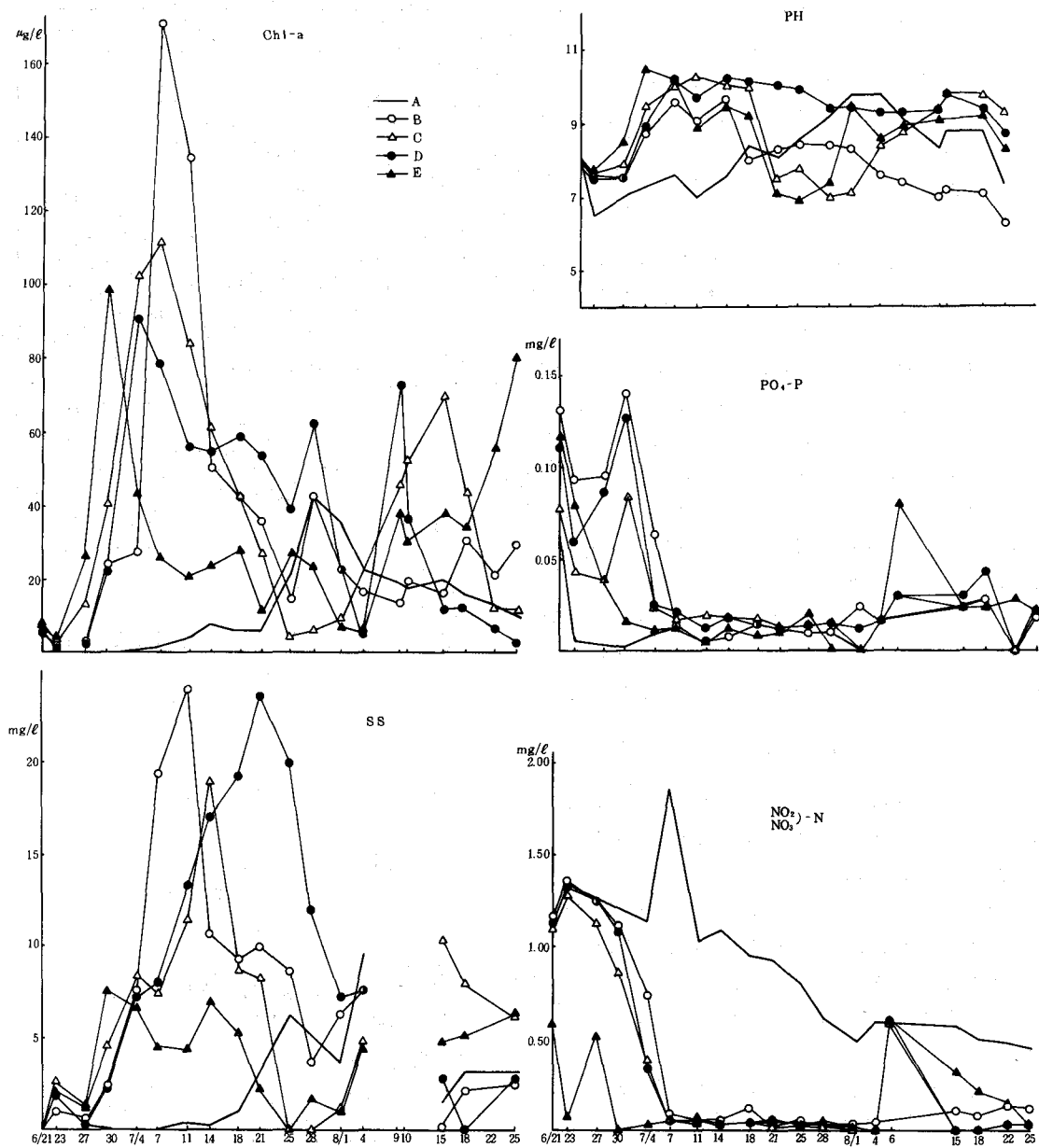


図-2 経時変化

合とで、藻類分解による無機性リン及窒素の増加速度を調べる実験を行った。

以上の実験での測定項目及び方法を表-2に示す。なお溶解性及非溶解性との区別は0.45μのミリポアフィルターで行っている。

3. 実験結果

3.1. 各標内の水質変化

図-2にA~Eの各標での水質の濃度変化を示す。A標でchl.aの発生が遅れ発生しても濃度が低いのはAlの効果であり、7月11日以降のchl.aの発生は補給水や雨水に含まれていたリンの影響と考えられる。B標ではchl.aの増加時にAlを投入したが、1回目は晴天時の午後2時頃の光合成が盛んな時であったため沈殿速度以上の気泡による上昇速度があり沈殿効果は見られなかったが、2回目は日没直前でのAl投入で沈殿効果が見られた。chl.aとSSとの関係を見ると各槽共にピークにずれがあり、chl.aが減少を始めた後でもSSは増加している。この現象はCOD、TOCでもあり、藻類の遺骸や動物プランクトンの増加によるものと思われる。

3.2. chl.aとSS

この実験で風塵の水槽への落下がSSとして無視し得るものとする、SSは植物プランクトン動物プランクトン及びその遺骸が主体となって構成されている。ここで、実験開始後chl.aが最初のピークを現わすまでの期間でのSSとchl.aとの関係を示すと図-3のような直線関係が得られる。この期間でのSSは植物プランクトンの遺骸も少なく動物プランクトンも少ないと考えると、SSとchl.aとは生きている藻類とchl.aとの関係を現わしていると言える。したがって、この図より各槽ともほぼSS/chl.a = 70の関係があるとして、その後のSSの変化を生きている藻類による分(SS_ℓ)と藻類の遺骸及び動物プランクトンその他(SS_{zd})との二つに大別することを試みた。

SS = SS_ℓ + SS_{zd}(1)

SS_ℓ = 70・chl.a(2)

(1)(2)式より計算したC, D, E槽におけるSS_ℓ及びSS_{zd}の値を図-4に示す。

表-3 投入負荷量および降雨による負荷量(mg/m²)

月日	6/23					6/29					*7/6-8				
項目	A	B	C	D	E	A	B	C	D	E	A	B	C	D	E
PO ₄ -P	2.1	2.6	1.9	2.5	1.4	0	0	67.2	67.2	67.2	0				0.5
NH ₄ -N	1.0	1.2	0.9	1.2	1.3	44.6	0	0	0	0	0				35.0
NO ₂ -N	27.3	33.6	24.5	32.9	34.2	14.9	0	0	0	0	0				31.5
NO ₃ -N															
月日	7/11					*7/11-12					*7/16-17				
項目	A	B	C	D	E	A	B	C	D	E	A	B	C	D	E
PO ₄ -P	2.7	2.7	3.1	2.7	1.4	0.3				0.3	1.4	1.6	1.7	1.7	0.7
NH ₄ -N	—	—	—	—	—	65.4				18.8	0.4	0.5	0.5	0.5	0.4
NO ₂ -N	—	—	—	—	—	—				11.7	14.3	16.4	17.1	17.1	14.9
NO ₃ -N															
月日	7/21					7/25					7/28				
項目	A	B	C	D	E	A	B	C	D	E	A	B	C	D	E
PO ₄ -P	3.7	3.4	3.8	4.0	2.0	5.8	5.8	5.6	5.9	2.9	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2
NH ₄ -N	—	—	—	—	—	2.6	2.6	2.5	2.7	2.7	1.5	1.5	1.5	1.6	1.7
NO ₂ -N	40.8	38.1	42.4	44.0	43.5	66.1	66.1	63.8	66.8	66.3	27.4	34.4	33.5	35.8	39.0
NO ₃ -N															
月日	*7/28-29					8/1					*8/4-7				
項目	A	B	C	D	E	A	B	C	D	E	A	B	C	D	E
PO ₄ -P	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1.1	0	0	70.7	70.7
NH ₄ -N	7.8	1.7	1.7	1.6	1.6	1.6	1.6	108.2	0	0	0	0	0	0	0
NO ₂ -N	8.5	51.8	50.0	49.2	48.9	48.2	78.5	0	0	0	70.7	70.7	70.7	70.7	70.7
NO ₃ -N															
月日	*8/8-9					*8/12-15					*8/16-17				
項目	A	B	C	D	E	A	B	C	D	E	A	B	C	D	E
PO ₄ -P	0	—	—	—	—	0.7	0								
NH ₄ -N	25.1	40.3	14.1	35.4											
NO ₂ -N	2.5	58.7	1.4	19.1											
NO ₃ -N															

* 降雨による負荷量

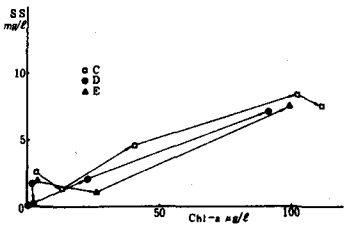


図-3 SSとChl-a

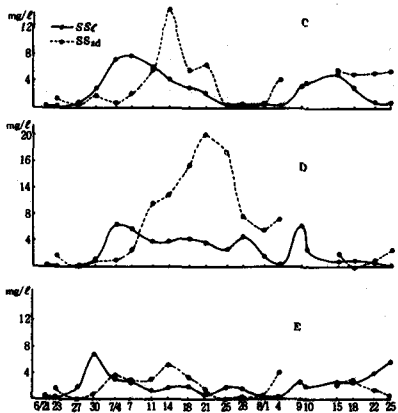


図-4 SS経時変化

この図より、ある時点でのSS中に含まれる、SS_ℓとSS_{zd}との構成割合や、SS_{zd}がSS_ℓのピーク後何日でピークを迎えているかなどが分る。C槽とD槽との比較より、SS_ℓのピーク後の減少勾配が緩やかで現存量が多い程SS_{zd}は長期にわたって増加あるいは持続する傾向が見られる。この理由として、光合成を行う藻類から発生する気泡が死滅した藻類を押し上げる働きをして、死んだ藻類が水中に浮遊し徐々に蓄積されるためと考えられる。実験によると、このように浮遊しているSS_{zd}のSS中に占める割合は80~90%にまでなることがあり、SS_{zd}の沈降特性に関する因子として風などの物理条件以外に生きている藻類(SS_ℓ)も考える必要があると思われる。

3.3 chl.aとCOD

藻類による内部生産量の評価に環境基準で決められた指標であるCODやPCODを用いる場合が多いが、評価の対象であるPCODの中にもSSと同様に生きている藻類だけではなく(3)式のように示すことができる。

$$\begin{aligned} \text{COD} &= \text{PCOD} + \text{DCOD} \\ &= \text{PCOD}_\ell + \text{PCOD}_{zd} + \text{DCOD} \quad \dots (3) \end{aligned}$$

ここで

PCOD_ℓ ; 生きている藻類による懸濁態COD

PCOD_{zd} ; PCOD_ℓ以外の懸濁態COD

DCOD ; 溶解性COD

SSと同様に、利用可能な窒素・リンが豊富に存在している期間でchl.aが最初のピークを示すまでのPCOD/chl.a比を求めると図-5のようになり、B、C、D、Eの各槽ではほぼPCOD/chl.a=40の値が得られる。この比率より計算したPCOD_ℓ、PCOD_{zd}とDCODとの相互の関係を図-6に示す。

この図中、C槽を見ると7月7日PCOD_ℓのピークを迎え、その後7日目にPCOD_{zd}のピークがあり、その後7日目にDCODのピークが現れると

いう典型的なPCOD_ℓの変遷過程を示している。しかし、一般的にはPCOD_ℓからPCOD_{zd}への変化、PCOD_{zd}の沈降、PCOD_{zd}からDCODへの変化などが同時平行的に起きていると思われる。B槽では7月6日と7月13日にA_ℓを槽内に投入しているが、その効果は特にPCOD_{zd}の極端な減少として図の中に顕著に示されている。

また各槽とも共通して、PCOD_ℓが増加を始める直前でDCODの減少が起きており、DCODが増殖のために利用されることを示している。また、DCODの経時変化には水槽壁面に附着している藻類に起因するDCODの増減の影響も無視できないと思われ、図-6でのDCODの評価には注意が必要と考える。以上、PCOD_ℓ、PCOD_{zd}、DCODの区分を行うことでより詳細なCODの評価が可能となると考える。

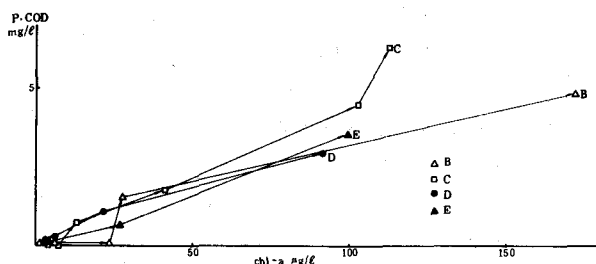


図-5 P・CODとChl-a

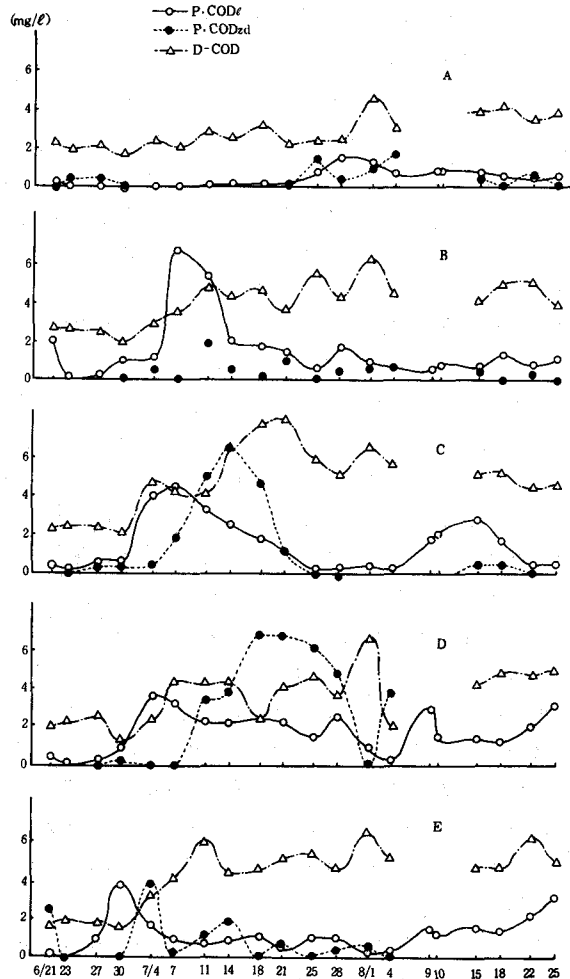


図-6 COD経時変化

3.4. プラントン同定結果

3.2., 3.3.節では, chl-aとSS_ℓ, COD_ℓとは一定の比率で表わされるとしてSS_{zd}, COD_{zd}を計算したが, この計算では, 生物の遷移がある場合つまり chl.a との比率を求める時点で動物プランクトンによる捕食を受けていたり, chl.a との比率を求めた時点とその後で藻類の遷移が起きた場合などでは正しい比率で計算したことにならない。そこでプラントン同定結果より検討を行った。

A～Eの各槽のプラントンの同定結果は6月21日から7月25日までのものであり, 図-7に藻類種毎の細胞数と動物プランクトンの個体数の経時変化を示す。実験開始後初期の動物プランクトン数は各槽ともに植物プランクトンと同時に増殖しているが動物プランクトン数は少なく両者の間には明確な捕食関係は見られない。したがって, 比率決定時での動物プランクトンによる捕食はなかったと思われる。次に藻類種の遷移を見ると, A, D, Eの各槽では6月23日以降 chl.a が増加するにつ

れ緑藻が優先種になっており, B, C槽では実験初期の chl.a の増加時に藻類種の遷移があり, その後緑藻が優先種となっている。この結果を踏まえて図3, 5を見るとD, E槽での chl.a とSS, chl.a とPCODとの直線回帰は他槽に比べ比較的安定しており, 優先種が安定している程求めた比率は精度よく得られ, 比率より計算するSS_{zd}, PCOD_{zd}の値も信頼性が高まると言える。

次に, 今回の実験より求めた(zd)成分中, 主体を占めるのが藻類の遺骸であるか動物プランクトンであるかの検討を, 動物プランクトン数とSS_{zd}との相関を調べる方法で行ってみた。図-8に動物プランクトン数とSS_{zd}との関係を示したが, 両者の間に相関は見られず(zd)成分のほとんどが藻類の遺骸であったと思われる。

3.5. chl.a とリン

SS, CODについては生きている藻類と藻類の遺骸との区分を行ってきたが窒素及びリンに関しては区分を行っていない。その理由として, 特にリンについては, 水中のリン濃度により藻類中のリン濃度が異なることが挙げられる。図-9に chl.a と懸濁態リンとの関係について示す。図-8 動物プランクトンとSS_{zd}

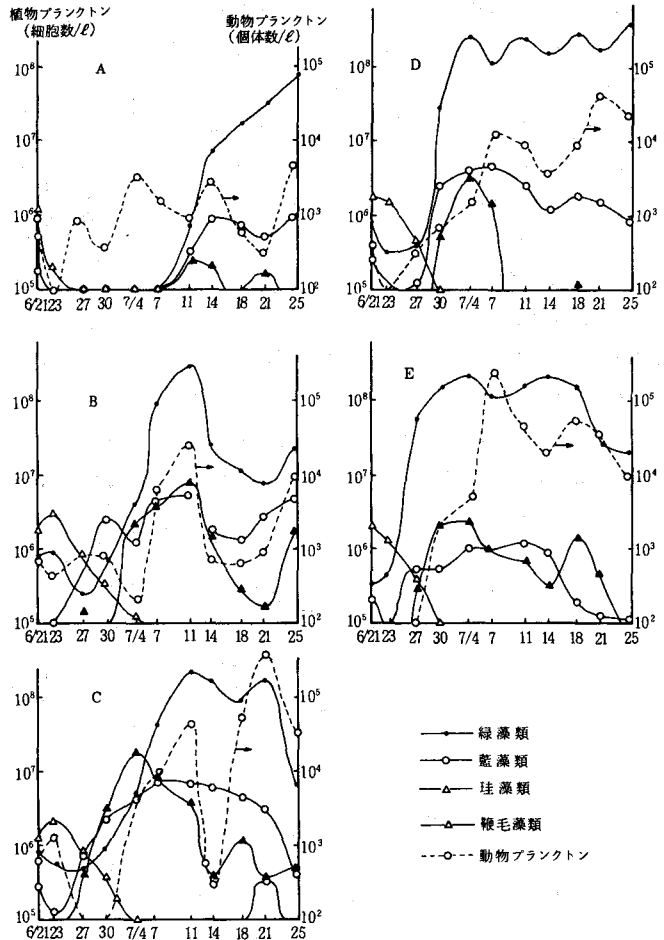


図-7 動植物プランクトンの経時変化

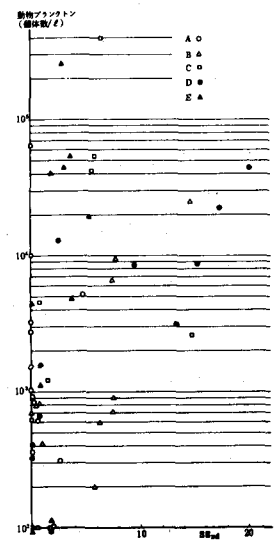


図-8 動物プランクトンとSS_{zd}

図中の実線は、実験開始後 chl. a が最初のピークを示すまでの B～E の各槽における懸濁態の変化である。この図を見て分かるように、利用可能なリン濃度の高い初期においてはリンは過剰に摂取されておりその後の藻類中のリン濃度は非常に小さくなっている。このように藻類中のリンは COD などとは異なり非常に不安定であるので、上記区分分けには用いられていない。

3. 6. 藻類分解速度実験

以上までの結果より、富栄養化して藻類が多量に存在する水域では水中に多量の藻類の遺骸があることが分ったが、ここでは、その遺骸の好気性分解によってどの程度の無機化したリン及び窒素が水中に回帰してくるかを霞ヶ浦湖水を用いて調べている。実験結果を図-10に示す。この結果によると、表面曝気により DO が 8 mg/l に保たれた場合においては約10日間で懸濁態リンの30～60%が $\text{PO}_4\text{-P}$ に分解されており、 $C = C_0 10^{-kt}$ として速度係数を求めると $K = 0.015 \text{ 1/日}$ 程度の値が得られた。DO が変化する場合の分解速度は好気条件に較べると無機化速度は小さな値になっている。

このように藻類の遺骸からのリン及び窒素の回帰量は藻類が繁殖している場合リン・窒素の供給源として重要な位置を占めていると思われる。

4. ま と め

以上の結果をまとめると次のようになる。

- (1) 水域中の SS, COD を生きている藻類と藻類の遺骸との二つに大別することで藻類生産と有機汚濁指標との関係を詳細に把握することが可能となる。特に優先種が存在する場合にはより良い把握が可能である。
- (2) SS 中に含まれる藻類の遺骸は80～90%にもなることがあり、またその水中での無機化も約10日間で30～60%程度行われており、藻類からの窒素及びリンの回帰量も藻類繁殖時には非常に大きい。

本実験を行うにあたり、実験・分析で協力をいただいた向田隆史氏に心より感謝致します。

参考文献

- 大島・藻類の内部生産機構 第30回年次学術講演会 1975
 Holm - Hansen Determination of microbial biomass in ocean, profiles Lim & Ocar 1969

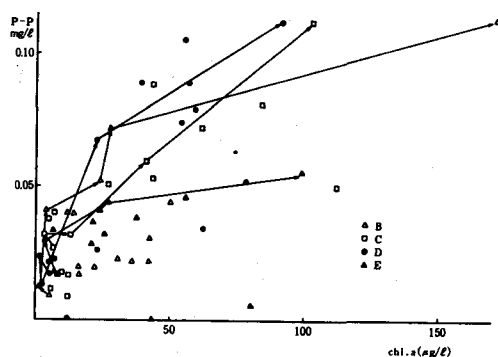


図-9 PPと chl - a

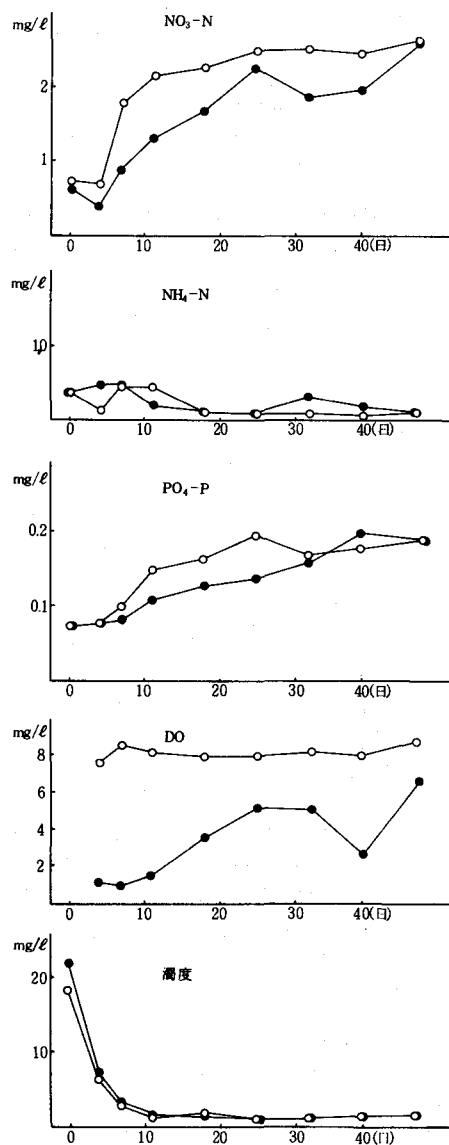


図-10 経時変化