

三河湾におけるリンの挙動について¹⁾

佐野方昂²⁾・田中庸央³⁾
 近藤正夫⁴⁾・林雅樹⁵⁾
 荒川幸夫⁶⁾・高井義治⁷⁾

1. はじめに

水系の有機汚染形態として、汚染源自身の有機物によって汚染されるものと、汚染源から排出される栄養物質を基にして生物が増殖し、有機汚染を引き起すものが考えられる。近年、後者に相当する水域の富栄養化はCOD, BODといった有機指標では捉えられず、また排水処理技術の点からも高次処理を必要とするところから、その対策に多くの力が注がれている。

愛知県では昭和52年度以来伊勢・三河湾において富栄養化に関する調査を行なっているが、本報はこのうちの昭和52年度に得られたデータについてリンを主体としてまとめたものである。

リンは生物を構成する主要栄養物質の一つであり、その濃度がある程度以上存在することが生物の増殖にとって必要条件となろう。そこで、まず最初に三河湾におけるリンの濃度を支配する要因について考察を行なった。次に、そのリンを利用して生産される有機物量の推定を行なった。

(謝辞)

この調査を行なうにあたり、愛知県水産試験場ならびに愛知県環境部水質保全課の諸氏に多大のご援助を頂いたことを深謝致します。

2. 調査方法



図1 調査地点

三河湾に2定点を設け(図1)、沿岸部(st. 1)と湾中央部(st. 2)を代表させた。この2地点で昭和52年5月から昭和53年2月まで毎月1回st. 1では0, 2, 5 m層を、st. 2では0, 2, 5, 10, 15m層をそれぞれ採水した。

試水はただちに汙過あるいは冷蔵保存して実験室に持ち帰り分析に供した。分析方法を以下に列記する。

水温：棒状水銀温度計(検定付, 1/10目盛)

塩分量：サリノメーター(Autolab, 601-MK 3型)

溶存酸素：JIS K0102-1974, 24.3

反応性リン(SRP)：ワットマン GF/C(あらかじめ酸洗いたしたもの)で汙過した試水について、Murphy & Riley (1963)¹⁾に従って分析した。

溶存態リン(DP)：ワットマン GF/Cで汙過した試水について、Menzel & Corwin (1965)²⁾に従って求めた値(全溶存態リン)から、反応性リンの値を引いて求めた。

粒状リン(PP)：試水の原液について、Menzel & Corwin (1965)により分析し、濁度を補正して求めた値(全リン)から全溶存態リンを引いて求めた。一部の試料については酸洗浄をしたワットマン GF/Cで汙過し、汙紙上のリンを全リンの分析法に従って求め粒状リンとした。

クロロフィルa(Chl. a)とフェオ色素(Phaeo.)：90%アセトンで抽出後Lawrenzen (1967)³⁾の式に従って算出した。

3. 分析結果および考察

3・1 各態リンの季節変化

調査時における三河湾の状況は水温、塩分量、溶存酸

1) The Behavior of Phosphorous in Mikawa Bay
 2) Masatake SANO, 3) Tsuneo TANAKA, 4) Masao KONDŌ, 5) Masaki HAYASHI, 6) Yukio ARAKAWA, 7) Yoshiharu TAKAI (愛知県公害調査センター) Aichi Environmental Research Center

素の鉛直分布の季節変化(図2)から、6月から10月下旬にかけて成層期にあり、その躍層はおおむね水深5mであった。そこで、st. 2を0~5mと5~18mとに分け、おのおのの単位面積(1m²)下に存在する各態リンの季節変化を図3に示す。

全リンの変動は、この水柱と水柱外(堆積物・隣接する水柱・大気)との間にリンの出入りがあったものと考えられる。両調査地点の水柱に含まれる全リンは、st. 1の8月の例を除いて6月から10月まで高濃度であり、冬期の2~3倍となっている。特に、st. 2の底層における6月から7月にかけての全リンの急激な増加は反応性リンの増加に依っている。このことについては3・3で精述する。st. 1はst. 2に比べ変化が激しく、沿岸部の特徴となっている。

粒状リンは夏期の表層に多く、st. 2の表層では9月に他の月の倍となっている。この調査時は数日前に強い降雨があり、陸水の影響が考えられる。これについては3・2で述べる。

溶存態リンは冬期にわずかに減少することと、st. 2の底層で7月に大きな値を示すことを除いてほぼ一定濃度となっており、他のリン成分に比べ、安定した組成を有していることを暗示する。

反応性リンは夏期成層期に最も多量となるが、主として底層に存在し、光合成の行なわれる表層には少ないことから、これが光合成に利用されるためには湧昇・拡散など物理的過程によって表層にもたらされる必要がある。そこで、成層期にはこういった物理的要因が生産量を規定する可能性が生じてくる。

3・2 陸水の流入について

st. 2の表層で粒状リンが最高濃度となった9月11日の翌日から翌々日にかけて水平分布調査を行なった。3日前の8日に70mm以上の降雨があり、塩素量、全リンとも湾奥部から陸水が流入したことを示していた(図4・1, 2)。塩素量と全リンとの分布パターンはほぼ一致していたが、三河湾南部にずれがあり、塩素量-全リン直線は豊川水系、境川水系、三河湾南部水系の三つに分類された(図5)。図から、塩素量として約17%、全リンとして約70 $\mu\text{g/l}$ を元来の湾内水とすると、塩素量10%の混合比では豊川水系から約40 $\mu\text{g/l}$ の全リンが付加され、境川水系からは約120 $\mu\text{g/l}$ の全リンが付加されたことになる。

三河湾南部水系では塩素量の低下がさほど無いにもかかわらず、全リンは最高205 $\mu\text{g/l}$ に達している。同地

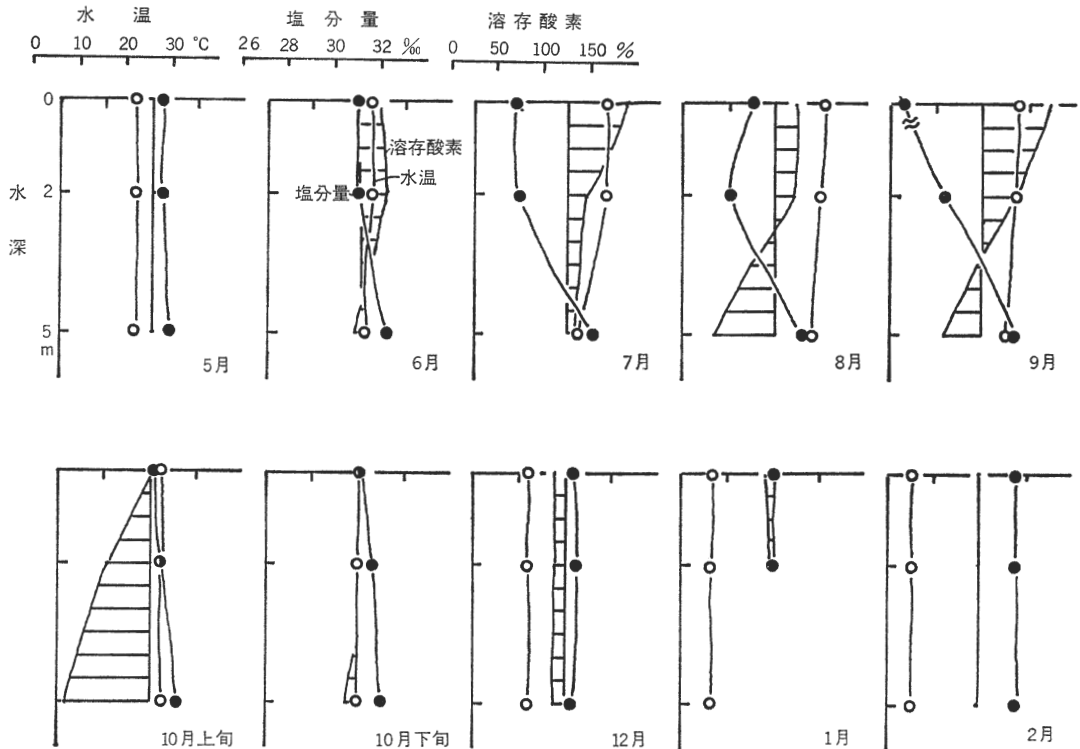


図2-1 st. 1における水温、塩分量、溶存酸素の季節変化

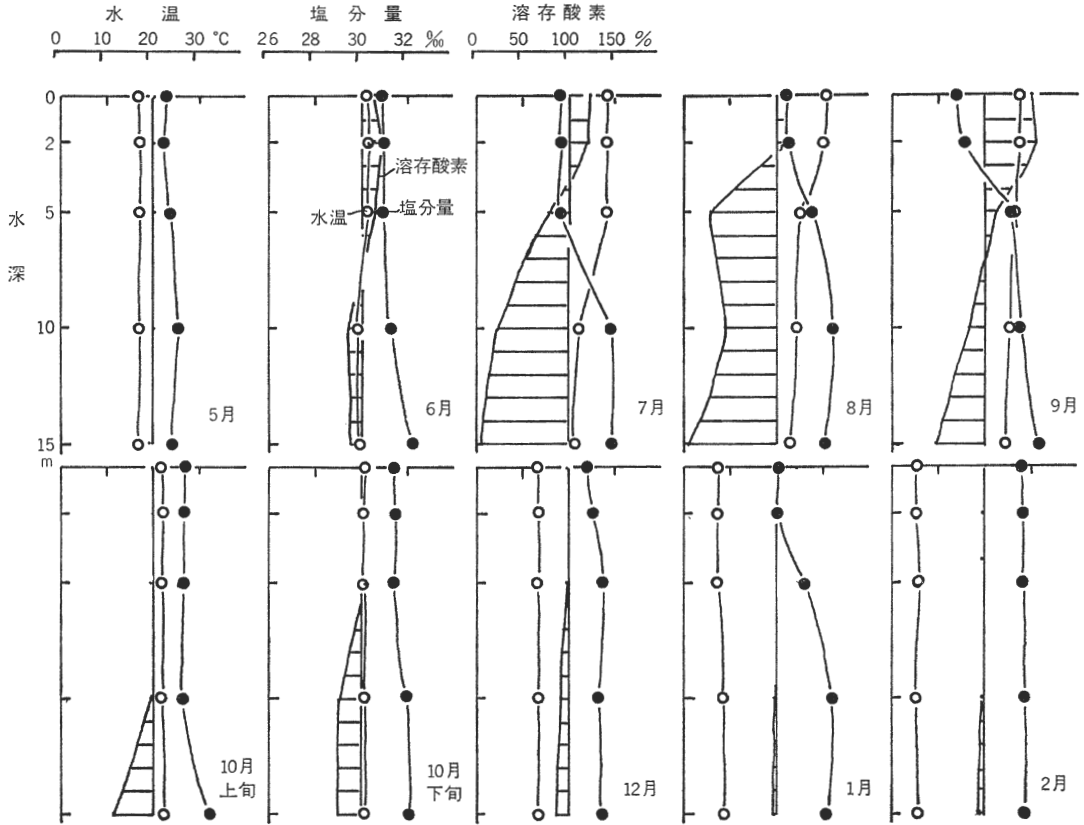


図 2-2 st. 2 における水温，塩分量，溶存酸素の季節変化

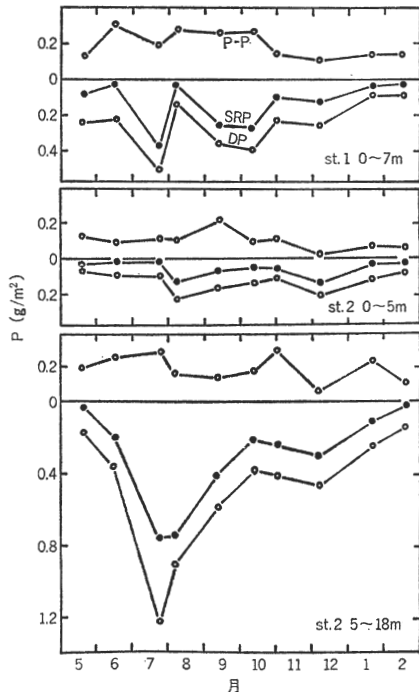


図 3 単位面積下における各態リンの季節変化

域には影響力のある河川は存在せず、高濃度な排水が直接流入しているか、あるいは、強い南風によって表層水が北岸に押し寄せられた結果高濃度なリンを含んだ底層水が浮上したことを示しているのかも知れない。

昭和52年5月に愛知県水産試験場が水平分布調査をした結果⁴⁾によれば(図6)，反応性リンは塩分量と直線関係にあり，流入した反応性リンは何ら変化を受けることなく流達力に従って湾内に広がったことを示している。反応性リンは生物に最も良く利用される形態であることを考えれば，最高70 $\mu\text{g/l}$ に及ぶ流入は生物の増殖に強く影響するにちがひなからう。

3.3 停滞期底層水中の反応性リンについて

st. 2 における成層期底層水中の反応性リンと A. O. U. (=DO 飽和-DO 測定) との関係を試みると(図7)，測定値はほぼ $\text{SRP} : \text{AOU} = 1 : 276^{\text{b}}$ 直線より上に位置し，深くなるにつれて，より SRP に富む傾向にある。なお，かつ停滞期前期にはこの傾向が強く，停滞期後期には弱くなる。このことを説明する一つの現象とし



図 4-1 9月12~13日の塩素量の水平分布



図 4-2 9月12~13日の全リンの水平分布

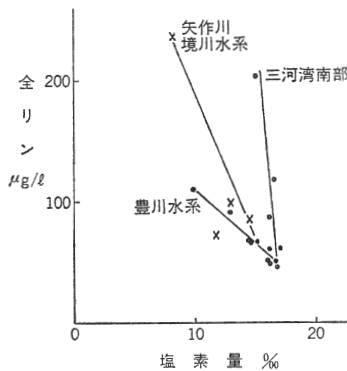


図 5 9月12~13日における全リンと塩素量との関係

て、次のようなことが考えられる。すなわち、停滞期前期に還元状態となるにつれて、DO の消費に関与しない SRP、たとえば堆積物中のリン酸鉄などが溶出してくる。その後成層がくずれる停滞期後期には SRP は再び鉄との化合物となるなどして沈降する。

このような溶存酸素の消費に関与しないと考えられる反応性リンは 20~30 $\mu\text{g/l}$ に達し、堆積物中に無機態と

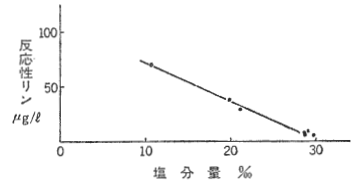


図 6 昭和52年5月における反応性リンと塩分量との関係(愛知県水産試験場)⁴⁾

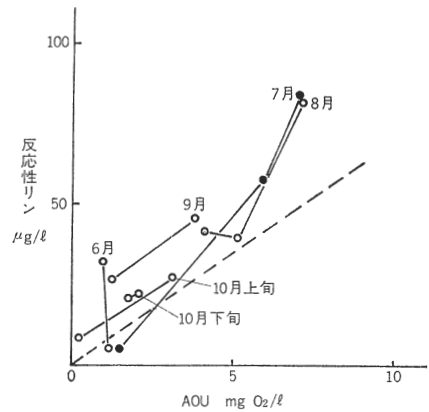


図 7 st. 2 における底層水中の反応性リンと AOU との関係
(点線は P : O₂ = 1 : 276 (原子比) を表わす)

して蓄積しているならば、三河湾の富栄養化は相当進行していることを表わしていよう。その一つの原因として、底層流の流向が湾奥に向かっていとされていること⁶⁾ から、底層の反応性リンが流去しにくいことにあるように思われる。

st. 1 のような沿岸域では成層が風波、潮汐等によって容易に崩されるものと考えられ、そのつど反応性リン等、栄養物質を多量に含んだ底層水がもたらされるであろう。

3.4 表層水中における溶存酸素と粒状リンから見た生産量

水中で行なわれる光合成の結果、溶存酸素が放出され、リンは生物に取り込まれて粒状リンとなる。Redfield⁶⁾によればそのさいの O₂ : P は 138 : 1 とされている。もし、光合成による変化が保存されていれば、次式が成立するはずである。

$$\text{粒状リン} = a \cdot \Delta\text{DO} + b \dots\dots\dots(1)$$

ここで、 a は生体中のリン/放出された溶存酸素、 ΔDO は溶存酸素の過飽和量、 b は光合成に関与しなかった粒状リン、たとえば、陸からもたらされたものやプランクトンの死がいなどである。

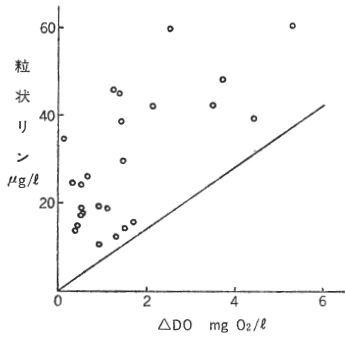


図8 粒状リンと ΔDO との関係
(直線は $P:O_2 = 1:138$ を表わす)

ところで、今回得られたデータの ΔDO と粒状リンとの関係を見ると(図8)、いずれも $O_2:P=138:1$ を示す直線よりリンに富んだ所に位置する。さらに、粒状リンと溶解酸素の過飽和量との鉛直変化をみると(図9)、深度方向に結んだ両成分の折線が互いに平行していることが多々見られる。このことは、光合成が行なわれる前に、両深度内における b が共通しており、その後光合成によって粒状リンも溶解酸素も同じ比率(a)で増加した結果、つまり(1)式が成立していた結果生じた可能性が有る。

この仮説に対するせひはともかくとして、平行関係が成立している場合の a と b を計算してみると表1のようになった。これによると、 a はおおむね $1/138$ よりも大

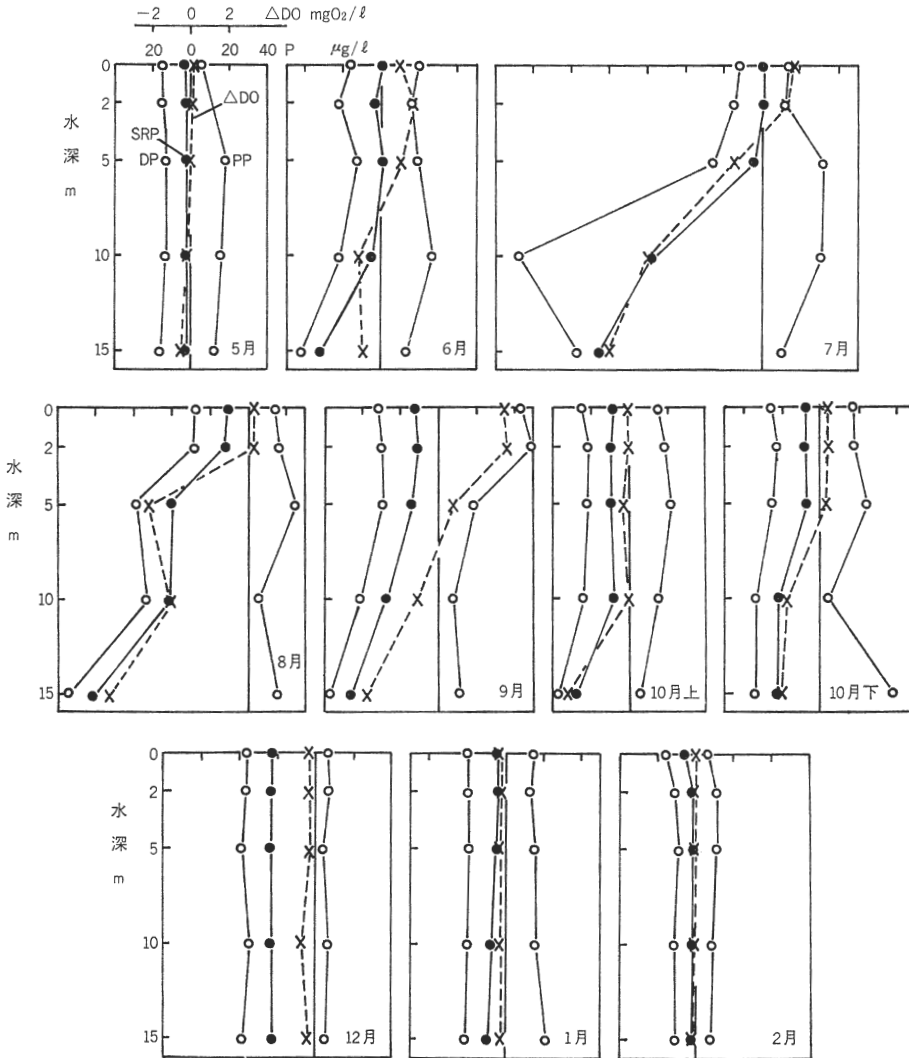


図9 st. 2 における各態リンと ΔDO の季節変化

表1 ΔDO によって分離された粒状リンの各パラメーター

$$P-P = \frac{A \cdot \Delta DO}{A} + B$$

月 水深(m)	6		7		8		9		10	
	0	2	0	2	0	2	2	5	0	2
A	1/151		1/95		1/42		1/59		1/50	
A	6.2	11.3	12.5	10.5	8.6	9.8	32.6	3.9	10.2	10.6
B	4.3		1.8		5.1		15.4		7.1	

きな値をとった。それは、溶存酸素が溶脱しているためか、生物がリンをより多く取り込んだためか不明である。また、この仮説が成立しているものとして、 $a \times \Delta DO$ 値、すなわち、水中で純生産された粒状リンが全粒状リンの中に占める割合をみると、得られたすべての場合について50%以上であった。このことは、多くの仮定のうえに立った場合ではあるが、水中で生産される粒状リン（有機物）が無視できないほど多いことを示すものと考えられ、水中で生産される有機物量を容易にかつ直接測定する方法の確立が必要である。

3・5 全クロロフィルから推定した自生性粒状リンについて

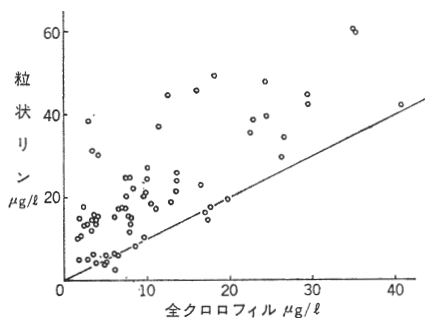


図10 粒状リンと全クロロフィルとの関係
(直線は $P-P : T.Chl. = 1 : 1$ (重量比) を表わす)

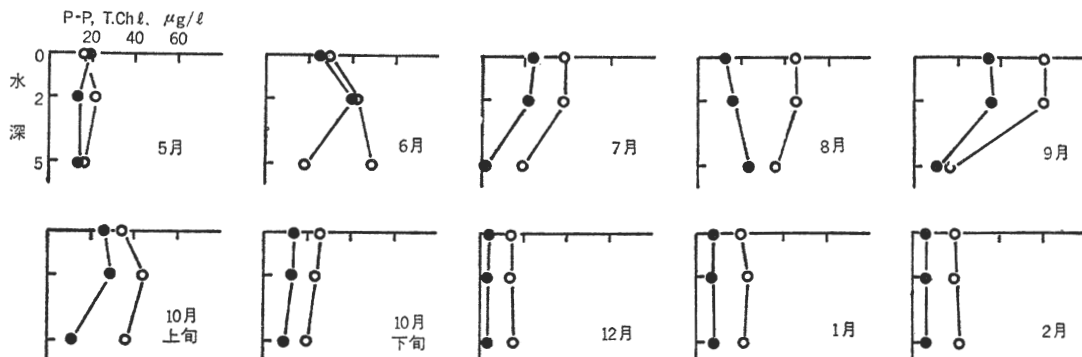


図11 st. 1 における粒状リンと全クロロフィルの季節変化

粒状リン/全クロロフィル (=クロロフィル a + フェオフィチン) 値は両地点とも全季節を通してほぼ 1 (重量比) 以上であり、大雑把に見て粒状リン軸に切片を持つ直線となる (図10)。そこで、全クロロフィルを生産された植物プランクトンの指標として、

$$\text{粒状リン} = a \times \text{全クロロフィル} + b$$

と置く。ここで、 a は植物プランクトンによって生産されたと判断される粒状有機物中のリンと全クロロフィルとの比であり、 b は植物プランクトン以外の粒状有機物、例えばデトリタス、動物プランクトン、バクテリア、外来性有機物などである。両者の鉛直折線が平行な水層では a 、 b を共有している可能性があり、上式によって a 、 b を計算によって求められる。全クロロフィルと粒状リンの鉛直分布から、st. 1 において多く平行関係が見られ、 ΔDO の場合とは異なった関係に支配されていることが推定される (図11)。

計算の結果 (表2)、 a は 1 前後の値をとった。全クロロフィル中に占めるクロロフィル a は約半分であり、さらに植物プランクトン中の粒状リン/クロロフィル a 値は 2 から 15 とされている⁷⁾ ことから、得られた値はやや低めであった。

st. 1 の 6 月では植物プランクトンによって生産されたとみなされる粒状リンはそれ以外の 3 ~ 5 倍となったが、7 月、8 月には逆に 1/4 から 1/10 となった。

3・4 で求めた、純生産されたと考えられる粒状リンと

表2 全クロロフィルによって分離された粒状リンの各パラメーター

$$P-P = \frac{A(\text{Total Chl.})}{A} + B$$

st. 1

月 水深(m)	6		7			8		10		12		
	0	2	0	2	5	0	2	2	5	0	2	5
A	0.86		0.35	0.97		0.24		0.90		0.88	2.8	
A	22.8	35.1	8.6	8.0		3.0	3.8	12.2	8.7	3.6	2.9	
				22.2	2.3						9.1	10.2
B	6.9		30.6	16.4		42.0		11.8		11.7	5.5	

st. 2

月 水深(m)	6		8		10	
	2	5		2	0	2
A	1.1		1.2		0.89	
A	8.5	11.6	3.4	4.6	5.8	5.7
B	7.1		10.3		11.5	

表3 ΔDO と全クロロフィルから求められた植物プランクトン中粒状リンの比較

月 水深(m)	6			8		10	
	0	2	5	0	2	0	2
ΔDO	6.2	11.3		8.6	9.8	10.2	10.6
T. Chl.		8.5	11.6	3.4	4.6	5.8	5.7

この結果を比較すると(表3), st. 2の6月では両者はほぼ等しいが, 8月, 10月下旬の値は純生産されたと考えられる粒状リンの方が2倍程度となった。全クロロフィルを使用した方法では生きた植物と活性を失った植物の現存量が得られるのに対し, ΔDOを使用した方法では水中微生物群集の純生産量が得られ, ほとんどの場合前者が後者より大であると考えられる。それゆえ, 後者が大となった場合は, ΔDO/粒状リン値が138の約1/3となること, 粒状リン/全クロロフィル値がやや小さめであることなど, 計算上の問題に起因するののか, あるいは, 溶存酸素の過飽和度を高めた活発な植物プランクトンが, もはやそこには存在していないといった状態なども考えられる。

4. おわりに

以上みてきたように, 三河湾のリン濃度に影響を与えるものとして, 陸水の流入と停滞期底層水の湧出とが考えられる。このうち陸水は降雨増水時に湾中部にまで多量のリンをもたらす, その時期も植物プランクトンの増

殖に必要な温度, 光といった他の条件が整っている梅雨と台風期に集中するところから, 大きな影響力を持つことが推定される。

停滞期に多量の反応性リンを含んだ底層水は成層がくずれずるまで表層にはもたらされにくい, 沿岸域では風波, 潮汐などによってしばしば成層状態がくずされよう。

これらの反応性リンを利用して植物プランクトンが盛んに増殖していることが推定された。

今後, 年間にわたる三河湾全体の有機物現存量を把握し, 現場における代謝速度が究明されねばならない。

なお, 本調査の一部は第5回環境保全・公害防止研究会(昭和53年12月)において発表した。

一引用文献一

- 1) Murphy, J. and J. P. Riley : Anal. Chim. Acta, 26, pp. 31~36, 1962.
- 2) Menzel, D. W. and N. Corwin : Limnol. Oceanogr., 10, pp. 280~282, 1965.
- 3) Laurenzen, C. J. : Limnol. Oceanogr., 12, pp. 343~346, 1967.
- 4) 愛知県水産試験場 : 昭和52年三河湾浅海定線調査結果.
- 5) Redfield, A. C., B. H. Ketchum and F. A. Richards : "The Sea" 2, Interscience, New York, 1963.
- 6) 松川康夫, 松村阜月 : 1978年度日本海洋学会春季大会講演要旨集, p. 123.
- 7) Strickland, J. D. H. : "Chemical Oceanography I" Academic Press, London and New York, 1965.