

# 大村湾におけるリンの挙動について\*

香月幸一郎\*\*・川口治彦\*\*・浜辺 聖\*\*  
吉田 一美\*\*

## 1. はじめに

近年の水質汚濁は水域に有機物質が流入することによって起きる一次汚濁に、流入した栄養物質により植物プランクトンが増殖することによる二次汚濁が加わって非常に複雑化している。したがって、閉鎖性の強い湖沼や内湾においては、富栄養化の実態の把握、機構の解明等を目的とした数多くの調査研究が実施されている。

長崎県の大村湾（面積：320 km<sup>2</sup>、平均水深：15 m）も北部の針尾、早岐両瀬戸でしか水の交換が行われない極めて閉鎖性の強い内湾で、富栄養化の進行が懸念されており、多くの調査がなされ報告されている<sup>2-6)</sup>。

富栄養化の原因物質としては、窒素・リン等の栄養塩類、微量金属、ビタミン類等が考えられている。その中でもリンは、窒素とともに富栄養化の制限物質として特に重要視されている。リンは窒素に比べて循環過程が複雑でなく、ガスとしての逸散も考慮に入れる必要がな

く<sup>7)</sup>、さらに分析精度の面においても、低濃度まで信頼性の高い分析値を得ることができ、湾内の物質の変化を捉えるのには適した項目といえる。

今回、われわれはリンを形態別に分析し、湾内での各形態のリンの年間における変動を明らかにし、さらに他の項目との関係を検討することにより、大村湾におけるリンの挙動に関する若干の知見を得た。

## 2. 調査方法

1981年4月から1982年3月までの間に毎月1回、図1に示す10地点で表層および2 m層において調査した。

なお、これらの地点はあらかじめ湾奥部、沿岸部、湾奥部に分け、湾奥部を St. 1～4 の4地点で、沿岸部を St. 5～8 の4地点で、また湾奥部を St. 9、10の2地点で代表させた。

分析項目および分析方法は表1に示すとおりである。

## 3. 結果と考察

### 3.1 水域別の調査結果

各地点における各項目の年間平均値を表層、2 m層に分け、さらに水域ごとの平均値を表2に示した。

DO飽和度は沿岸部で最も高く、表層、2 m層ともに

表1 分析項目及び分析方法

項 目	分 析 方 法
溶存酸素 (DO)	ウインクラー・アジ化ナトリウム変法
化学的酸素要求量 (COD)	酸性 KMnO <sub>4</sub> 法
全有機炭素 (TOC)	アンブル法
浮遊物質 (SS)	GFP (1 μ)
リン酸態リン (PO <sub>4</sub> -P)	モリブデン青法
全リン (T-P)	K <sub>2</sub> S <sub>2</sub> O <sub>8</sub> 分解モリブデン青法
溶存性全リン (DTP)	濾液についての T-P
粒状リン (P-P)	T-P-DTP
溶存性有機態リン (DOP)	DTP-PO <sub>4</sub> -P
クロロフィル a (Chl. a)	ケイ光法

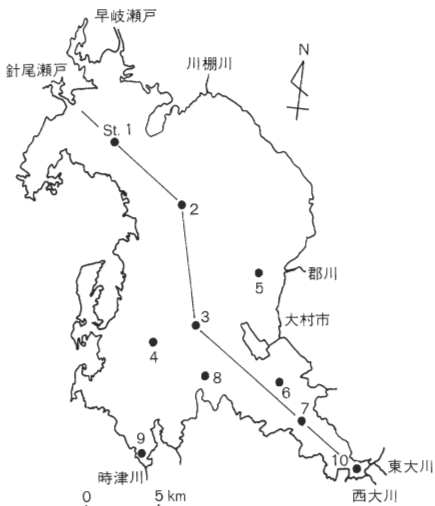


図1 調査地点図

\* The Behavior of Phosphorus in Omura Bay

\*\* Koichiro KATSUKI, Haruhiko KAWAGUCHI, Masashi HAMABE, Kazumi YOSHIDA (長崎県衛生公害研究所) Nagasaki Prefectural Institute of Public Health and Environmental Sciences.

表2 各項目の年間平均値

項目	水域及び 採水層 地点	湾 央 部					沿 岸 部					湾 奥 部		
		St.1	2	3	4	平均	5	6	7	8	平均	9	10	平均
DO飽和度 (%)	表層	104.1	108.1	108.2	110.1	107.6	110.4	110.4	109.1	110.1	110.0	103.1	111.2	107.2
	2m層	102.8	107.8	109.3	111.4	107.8	110.4	110.1	111.1	110.3	110.5	104.9	111.2	108.1
COD (mg/l)	〃	1.6	2.1	2.0	2.1	2.0	2.1	2.2	2.2	2.0	2.1	2.7	2.8	2.8
		1.6	2.0	1.9	1.9	1.9	2.0	2.2	2.3	1.9	2.1	2.4	2.6	2.5
TOC (mg/l)	〃	1.9	2.2	2.0	1.8	2.0	2.2	2.3	2.1	2.1	2.2	2.6	2.7	2.7
		1.7	1.9	1.9	1.8	1.8	2.2	2.2	2.2	2.0	2.2	2.2	2.5	2.4
SS (mg/l)	〃	2.7	3.3	2.8	2.7	2.9	4.1	4.4	3.5	3.4	3.9	4.7	5.9	5.3
		3.7	2.7	2.8	2.8	3.0	3.7	4.1	3.5	3.3	3.7	4.6	6.0	5.3
PO <sub>4</sub> -P (μg/l)	〃	4.3	2.3	2.1	2.2	2.7	2.3	2.4	1.9	2.0	2.2	19.9	3.1	11.5
		4.7	2.6	2.3	2.3	3.0	2.3	2.9	2.0	2.0	2.3	3.9	2.5	3.2
DTP (μg/l)	〃	12.1	11.2	9.9	9.8	10.8	9.4	10.9	9.9	10.1	10.1	33.2	11.4	22.3
		12.4	10.3	9.5	9.6	10.5	9.7	10.6	11.0	9.8	10.3	13.9	11.3	12.6
P-P (μg/l)	〃	3.5	4.5	4.4	4.2	4.2	6.9	7.0	6.9	4.5	6.3	15.7	13.1	14.4
		3.6	5.3	5.4	4.9	4.8	6.5	7.5	6.3	5.3	6.4	10.9	12.5	11.7
T-P (μg/l)	〃	15.6	15.7	14.3	14.0	14.9	16.3	17.9	16.8	14.6	16.4	48.9	24.5	36.7
		16.0	15.6	14.9	14.5	15.3	16.2	18.1	17.3	15.1	16.7	24.8	23.8	24.3
Chl. a (mg/m <sup>3</sup> )	〃	2.08	2.80	2.02	1.86	2.19	2.60	2.64	2.29	2.18	2.43	4.90	4.83	4.87
		2.07	2.45	1.81	1.75	2.02	2.16	2.39	2.45	2.07	2.27	3.61	3.90	3.76

110%前後であった。湾奥部では平均値で107~108%とやや低くなっていたが、これはSt.9において低かったため、St.10では111.2%と高かった。すなわち、DO飽和度はSt.9を例外として、クロロフィルa濃度の高い生産力に富むと思われる水域で高い傾向が窺われた。

COD, TOC, SSについては、湾央部で低く沿岸部、湾奥部と陸域に近づくにしたがって高くなっており、これは陸域からの汚濁物質の流入の影響によるものと考えられる。

PO<sub>4</sub>-Pについては、湾奥部のSt.9の表層で著しく高く19.9μg/lを示していた。この地点では2m層は3.9μg/lと他の地点と同程度であり、表層でのPO<sub>4</sub>-Pの高濃度は流入河川(時津川)水が海面に浮くことが原因していると思われる。

DTPは湾央部と沿岸部はほとんど同程度で10~11μg/lであった。一方、湾奥部では高く表層で22.3μg/l、2m層で12.6μg/lであった。

P-P, T-PはCOD, TOC, SSと同じく、湾央部で低く沿岸部、湾奥部と陸域に近づく程高くなる傾向が見られた。各水域での濃度を平均値で見ると、湾央部ではP-Pが5μg/l程度、T-Pが15μg/l程度で、沿岸部では同じく6μg/l、17μg/l程度で、湾奥部では12~14μg/l、24~37μg/lを示していた。

クロロフィルaも同様に陸域に近づくにつれて高くな

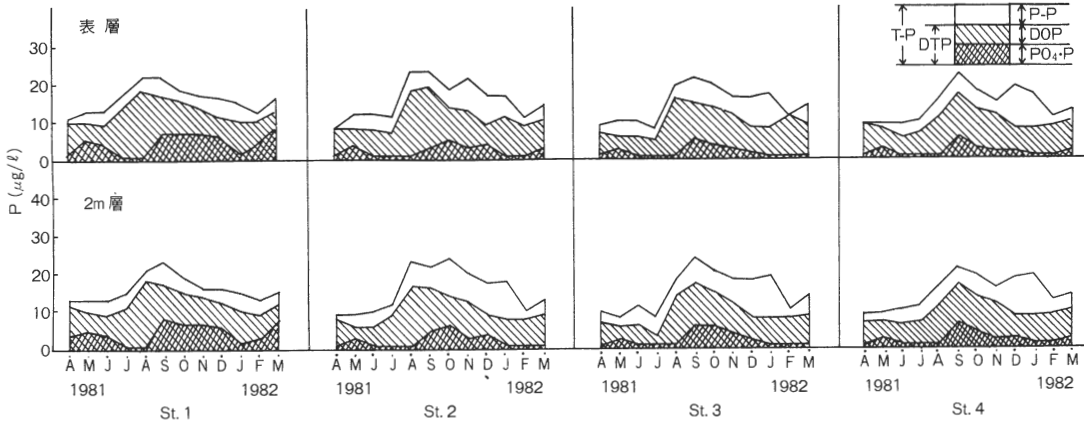
っていたが、表層と2m層を比較すると表層の方がやや高かった。

### 3・2 各形態のリンの濃度の年間変動について

各形態のリンの年間変動パターンを湾央部、沿岸部、湾奥部ごとに図2, 3, 4に示した。

PO<sub>4</sub>-Pは湾奥部のSt.9を除いて、いずれも似たパターンを示していた。すなわち、5月に表層、2m層ともに3~5μg/l程度検出され、6, 7, 8月になると、ほとんどの地点で2μg/l以下と低くなっていた。ところが、9月より高くなりSt.1, 5, 6などの高い地点では7~8μg/lを示し、その後少しずつ低下し冬場の1, 2月にはまた2μg/l以下になっていた。

DTP, T-Pについても湾奥部の地点(St.9, 10)を除いては、PO<sub>4</sub>-Pと同様に8~10月にピークが見られ、湾央部でDTPが15~19μg/lを、T-Pが21~24μg/lを示し、沿岸部ではDTPが15~20μg/lを、T-Pが21~34μg/lを示していた。湾奥部では、特にSt.9の表層で他の地点と全く異なったパターンを示していた。図4には塩素イオン濃度および測定日前3日間の降雨量も併せて示したが、降雨の後か、または塩素イオン濃度が低い月にリンが高い傾向が見られ、流入河川(時津川)の影響を受けているものと思われる。また、この地点ではPO<sub>4</sub>-P, DTP, T-Pともに同じような変動パターンを示しているが、これはDTP, T-Pの変動がPO<sub>4</sub>-Pの



アルファベットは各測定月を表わす

図2 湾中央部における各形態のリンの年間変動

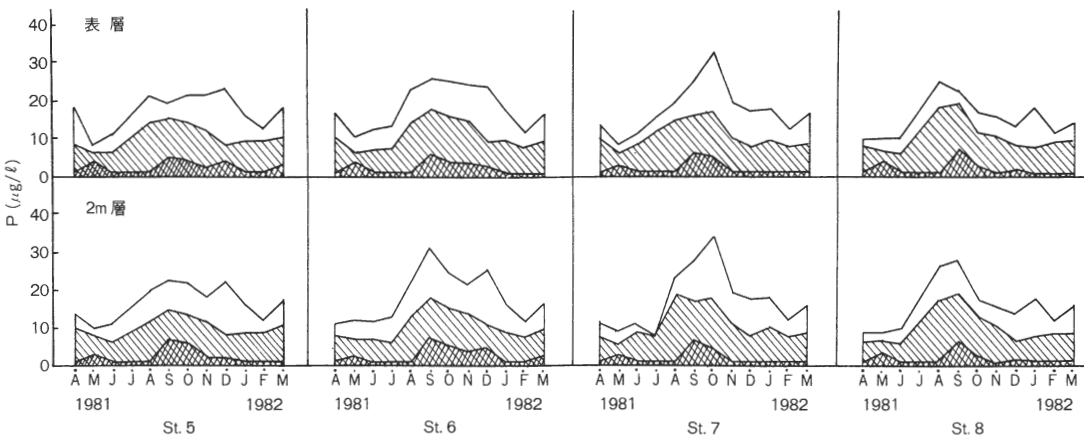


図3 沿岸部における各形態のリンの年間変動

濃度によって支配されているためであろう。2 m 層ではこのような河川水の直接的な影響は見られず、他の地点の変動に似たパターンを示し、河川の影響はごく表面だけに限られているようである。

P-P は各水域ともに秋から初冬にかけて高くなっており、この時期は植物プランクトン由来の P-P の割合が大きくなる時期であり（後述）、P-P の濃度の上昇は植物プランクトンの増殖によるものと考えられる。

### 3・3 各形態のリンの割合について

湾中央部、沿岸部における各形態のリンの割合（湾中央部：St. 1～4 の平均、沿岸部：St. 5～8 の平均）の年間変動を図5に示す。

なお、湾奥部（St. 9, 10）では陸域からの影響が大きすぎ、長期間の変動を見るのは不相当と思われるので年間変動については検討しなかった。

湾中央部での変動を見ると、PO<sub>4</sub>-P は5月にピークがあり表層34%、2 m 層37%で年間で最も高かった。そ

の後、梅雨期から夏場の8月までは低く10%前後であったが、秋口の9月に再び上昇して25～26%を示し、10月以降は少しずつ低下して1月には、また、10%前後に下がっていた。また、P-P は梅雨期の6、7月に一つのピークが見られ35～40%を示し、その後11月までは低い期間が続くが、冬場の12、1月には再び高くなり最高の45～50%を示していた。

沿岸部でも概ね湾中央部と同様の変動を示し、PO<sub>4</sub>-P は5月に表層42%、2 m 層30%で9月には27～28%を示していた。また、P-P は7月と12月にピークが見られ、特に12月には55～56%と年間で最も高かった。

このように、湾中央部、沿岸部ともに5月と9、10月にPO<sub>4</sub>-P の割合が大きくなり、やや遅れて6、7月と12、1月にP-P の割合が大きくなっていた。

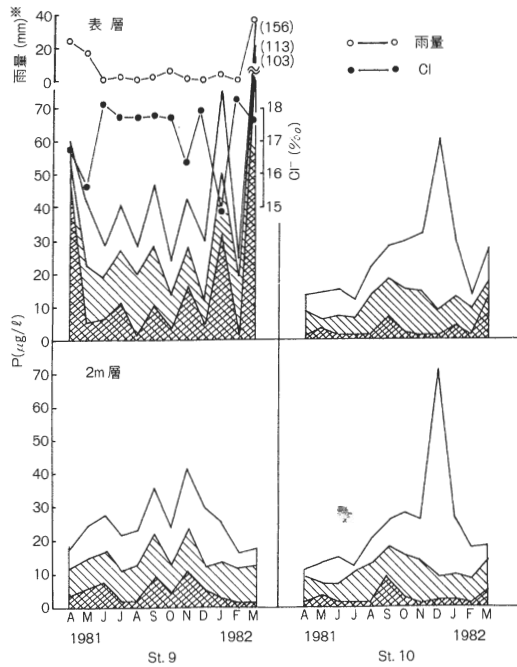
### 3・4 湾口から湾奥へのリンの変化

大村湾の湾口から湾奥にかけて各形態のリンの濃度および割合がどのように変化するかをみるために、St. 1、

2, 3, 7, 10を結ぶ線(図1)の表層における各形態のリンの濃度および割合(年間平均値)をまとめ図6に示した。

T-PはSt.3でやや低くなっているが、全体としては湾奥部へ進むにしたがって高くなる傾向が見られ、最奥部のSt.10では24 $\mu\text{g/l}$ を示していた。

PO<sub>4</sub>-Pは湾口に一番近いSt.1で濃度、割合ともに高く、濃度で4.3 $\mu\text{g/l}$ 、割合で27.6%であった。湾中部、沿岸部のSt.2, 3, 7では2 $\mu\text{g/l}$ 前後で10~15%と低かった。また、湾奥部のSt.10では、3.1 $\mu\text{g/l}$ で12.7%であった。



※ 長崎市での観測値  
 図4 湾奥部における各形態のリンの年間変動

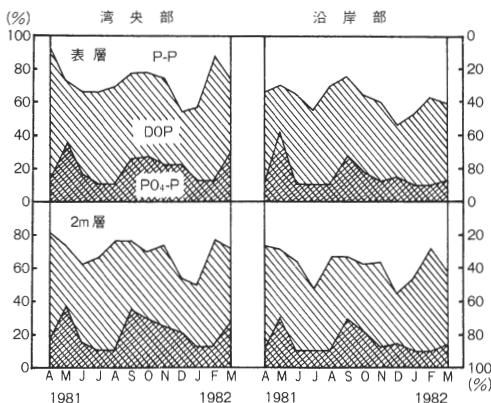


図5 湾中部・沿岸部における各形態のリンの割合の年間変動

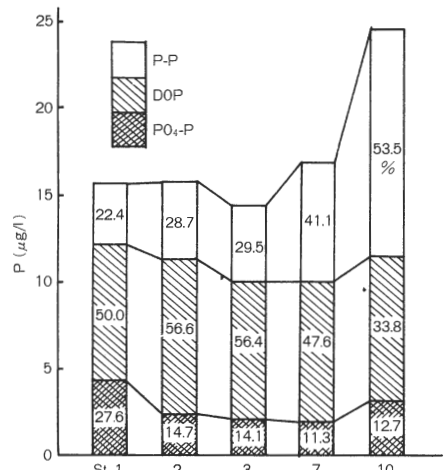


図6 湾口から湾奥へのリンの変化

DOPについては、割合はSt.10の33.8%からSt.2の56.6%までかなりの差が見られたが、濃度はいずれの地点でもあまり差はなく8~9 $\mu\text{g/l}$ であった。

P-Pは湾口に近いSt.1では全体のわずか22.4%であるのに対して、湾奥へ進むにしたがって高くなり、最奥部のSt.10では53.5%で全体の半分以上を占めていた。

一方、溶存態リンの総量を表すDTP(図中のPO<sub>4</sub>-P+DOP)はP-Pとは逆に、St.1で割合が高く77.6%を占めており、湾奥部へ進むにしたがって低くなりSt.10では46.5%であった。

### 3.5 植物プランクトンによるP-Pについて

今回の調査で得られたP-Pについて、その中に占める植物プランクトン由来のP-Pの割合を求め、3つの水域(湾中部、沿岸部、湾奥部)における二次汚濁の割合についての推定を行った。

佐野ら<sup>8)</sup>は、三河湾においてP-PとDOの過飽和量および全クロロフィルとの関係を用いて、P-Pの中に占める自生性(植物プランクトン由来)のP-Pの濃度および割合を推定している。

われわれは、同様にP-Pとクロロフィルaとの関係を利用して、P-Pの中に占める自生性のP-Pの割合を推定してみた。

まず、今回の調査で得られたデータについて、水域ごとに縦軸にP-Pの濃度を、一方横軸にクロロフィルaの濃度(Chl. a)を取って式(1)に示す回帰直線を作成した。

$$P-P = a \times (\text{Chl. a}) + b \dots \dots \dots (1)$$

なお、各水域における代表的な直線を得るため、湾中部では湾外水の影響が強いという理由でSt.1を除いた3地点のデータを使用し、また、湾奥部では流入河川の影響が直接あらわれ、bの値が変動すると思われるSt.

9は除き St. 10 のみのデータを使用した。

その結果を図7, 8, 9に示したが、いずれの水域においても7月と11月だけは傾きの小さい異なる直線上にあるように思われる。そこで、湾中央部、沿岸部については7月, 11月を除いたデータによる回帰直線と、7月, 11月のデータのみによる回帰直線をそれぞれ2本ずつ求めることにした。なお、湾奥部については例数が少ないため7月, 11月のデータを含めた一本の直線を求めた。

このようにして求めた回帰直線を表3に示すが、いずれもP-P軸に正の切片をもつ直線である。

式(1)における直線の傾きaは、植物プランクトン中の

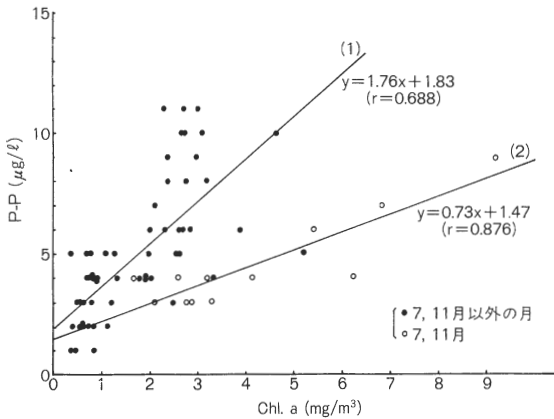


図7 湾中央部におけるChl.aとP-Pとの関係

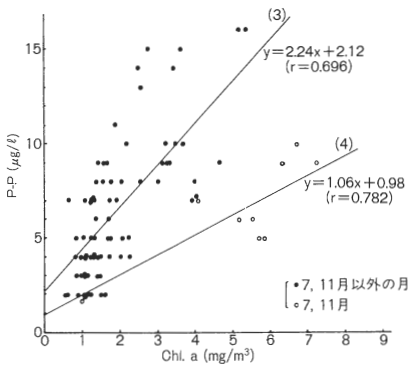


図8 沿岸部におけるChl.aとP-Pとの関係

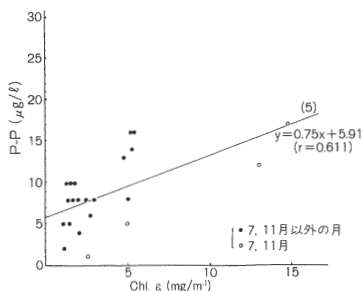


図9 湾奥部におけるChl.aとP-Pとの関係

表3 各水域におけるP-PとChl. aの相関係数及び回帰直線

水域	直線の種類	n	r	回帰直線
湾中央部	(1)	60	0.688	$y = 1.76x + 1.83$
	(2)	12	0.876	$y = 0.73x + 1.47$
沿岸部	(3)	79	0.696	$y = 2.24x + 2.12$
	(4)	11	0.782	$y = 1.06x + 0.98$
湾奥部	(5)	22	0.611	$y = 0.75x + 5.91$

リンとクロロフィルaとの比であり、滝本ら<sup>9)</sup>は広島湾において2.4という値を得ている。また、佐野ら<sup>8)</sup>は三河湾においてリンと全クロロフィルの比で1前後の値を得ており、全クロロフィルの中に占めるクロロフィルaを約半分とすると、aの値は2前後ということになる。

今回の調査で得られたaの値は、表3に示すように湾奥部で0.75と低かったが、7月と11月以外は湾中央部1.76、沿岸部2.24と文献の値に近かった。

7月, 11月にaが小さくなる原因としては、植物プランクトンの優占種の違い等が考えられる。また、室内の培養実験で藻体中のリンの含有量には、かなりの変動があることが確かめられており<sup>10)</sup>、環境水中でも栄養条件の違いによる植物プランクトン中のリン濃度の変動を想定できるので、これらがその要因としてあげられよう。

一方、式(1)における切片bは、植物プランクトン以外の粒状物質(動物プランクトン, バクテリア, 外来性懸濁物質等)によるリンの値と考えることができる。

今回得られたbの値は、7月および11月のデータを除けば、湾中央部で1.83µg/l, 沿岸部で2.12µg/l, 湾奥部で5.91µg/l(7, 11月を含む)と陸域に近づく程高く、外来性のP-Pの影響によるものと推定される。

さて、全P-Pに対する植物プランクトン由来のP-Pの割合R(%)は次の式(2)で計算することができる。

$$R(\%) = \frac{a \times (m - \text{Chl. a})}{a \times (m - \text{Chl. a}) + b} \times 100 \dots\dots\dots(2)$$

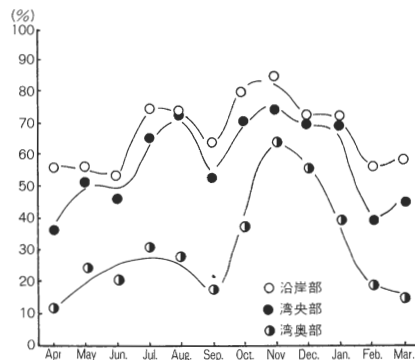


図10 P-Pに占める植物プランクトン由来P-Pの割合(R)の年間変動

ここで、m-Chl. a は対象となる水域でのクロロフィル a の濃度の平均値である。

本調査における各水域での月別の m-Chl. a の値を用いて算出した R の年間の変動を図10に示した。

R の値について年間の平均値で見ると、沿岸部で最も大きく67%で、次いで湾中部で59%を示し、湾奥部では31%と小さかった。湾奥部でRの値が小さくなるのは、陸域からの影響が大きく、植物プランクトンによるP-Pを上回る量の外来性の懸濁物質によるP-Pが存在するためと考えられる。

ここで、湾中部、沿岸部、湾奥部の上層部でのP-Pの年間の平均値を、それぞれ4.5  $\mu\text{g}/\text{l}$ 、6.4  $\mu\text{g}/\text{l}$ 、13.1  $\mu\text{g}/\text{l}$  (表2) とすると、植物プランクトンによるP-Pはそれぞれ2.7  $\mu\text{g}/\text{l}$ 、4.3  $\mu\text{g}/\text{l}$ 、4.1  $\mu\text{g}/\text{l}$  と計算される。

次に、Rの年間の変動についてみると、湾中部、沿岸部、湾奥部いずれの水域においても初夏と秋にピークが見られ、特に秋のピークは大きく、前述のように秋から初冬にかけてはP-Pが高くなる時期であり、このP-Pの上昇には植物プランクトンの増殖が寄与していることを示唆しているといえる。

### 3・6 湾内でのリンの挙動について

湾中部の St. 2 における  $\text{PO}_4\text{-P}$ 、P-P、クロロフィル a および DO 飽和度の年間の変動 (表層、2 m 層の平均値) について図11に示した。

9月から10月にかけて  $\text{PO}_4\text{-P}$  の濃度が高く、それに少し遅れて11、12月頃にP-Pの濃度が高くなっているのがわかる。

大村湾では夏季の7、8月に成層形成に伴う底質からの  $\text{PO}_4\text{-P}$  の溶出が知られており<sup>3)</sup>、この成層は9月頃攪拌により崩解する。

今回の調査における9、10月の  $\text{PO}_4\text{-P}$  濃度の上昇は、攪拌により  $\text{PO}_4\text{-P}$  を含んだ底層水が上層へ運ばれることによりもたらされたものと推定される。

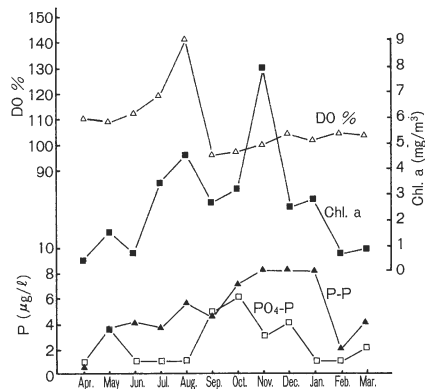


図11 St. 2 における各項目の年間変動

この  $\text{PO}_4\text{-P}$  の上昇にやや遅れて、11、12月にはP-Pが高くなるが、同時にクロロフィル a 濃度も高く、この時期には  $\text{PO}_4\text{-P}$  が植物プランクトンに取り込まれたものと思われる。

## 4. まとめ

1981年4月から1982年3月まで大村湾においてリンを中心とした調査を行い次のような結果を得た。

1) 大村湾の上層部では秋口の9、10月に  $\text{PO}_4\text{-P}$  の濃度が高く、それにやや遅れて11、12月に粒状リン (P-P) の濃度が高かったが、このことは夏場に底層の無酸化により底質から溶出した  $\text{PO}_4\text{-P}$  が9、10月の循環で上層に運ばれ、11、12月に植物プランクトンに取り込まれたと推定される。

2) P-P は湾口から湾奥へ進むにしたがって濃度、割合ともに高くなる傾向が見られたが、湾奥部では植物プランクトン由来のP-Pの割合は小さく、外来性のP-Pが多いものと思われる。

3) 全P-Pの中に占める植物プランクトン由来のP-Pの割合は、河川等の影響が強い水域を除けば、年間平均60~70%であった。

4) P-Pの濃度が高い時期にはP-Pに占める植物プランクトン由来のP-Pの割合も高く、濃度が高くなる原因として植物プランクトンの増殖が考えられる。

本調査の一部は第19回全国衛生化学技術協議会 (昭和57年9月) において発表した。

なお、本研究のとりまとめにあたり、ご指導を頂いた当研究所長寺田精介薬学博士に深謝し、さらに調査にご協力を頂いた県環境部公害規制課の方々に深く感謝いたします。

## 一引用文献一

- 1) 長崎県環境部：大村湾水質汚濁対策基本計画，1981。
- 2) 長崎県環境部，長崎県衛生公害研究所：大村湾の水利構造と水質特性，1977。
- 3) 香月幸一郎，力岡有二，小林幸広，開 泰二：津水湾の栄養塩類調査，長崎県衛生公害研究所報，No. 20，pp. 58~64，1979。
- 4) 吉田一美，開 泰二，近藤幸憲，浜辺 聖：大村湾の水質 (第2報)，長崎県衛生公害研究所報，No. 20，pp. 130~141，1979。
- 5) 川口治彦，香月幸一郎，小林幸広，吉田一美：大村湾の栄養塩類調査，長崎県衛生公害研究所報，No. 21，pp. 50~56，1980。
- 6) 香月幸一郎，近藤幸憲，浜辺 聖，吉田一美：大村湾のクロロフィル a の濃度について，長崎県衛生公害研究所報，No. 21，pp. 40~49，1980。
- 7) 村上彰男：閉鎖性海域のリンの収支，用水と廃水，Vol. 22，No. 8，pp. 47~53，1980。
- 8) 佐野方昂，田中庸央，近藤正夫，林 雅樹，荒川幸夫，

- 高井義治：三河湾におけるリンの挙動について，全国公害研究会誌，Vol. 4, No. 2, pp. 83～89, 1979.
- 9) 滝本和人，向井徹雄，上野明宏，兼重直哉，柴田輝一，伊藤 篤：広島湾における富栄養化関連因子の鉛直分布，水質汚濁研究，Vol. 4, No. 3, pp. 157～162, 1981.
- 10) 岡田光正，須藤隆一：Microcystis の栄養塩吸収と増殖特性について，陸水域の富栄養化に関する総合研究（Ⅱ）—霞ヶ浦を中心として—，国立公害研究所研究報告第6号，R-6-79, pp. 293～302, 1979.