

論文

東京湾水質データの統計解析 (その1)

安藤 晴夫 嶋津 暉之

要 旨

「公共用水域の水質測定結果」を利用して、東京都内湾部の水質の統計解析を行った。その結果、中央防波堤内側海域では年間を通じ密度成層が形成されているが、外側では、冬季に密度差がほとんどない状態（循環構造）が起きることが分かった。密度差の大小と赤潮の発生頻度との間には、明確な関係は認められなかった。懸濁物質中の炭素に対する窒素の割合は、海水中の窒素濃度と関係なく一定の傾向を示したが、リンの割合は海水中のリン濃度と正の相関があり、“植物性プランクトンによるリンの過剰吸収”を示唆するものと考えられた。植物性プランクトン増殖時には汚濁成分のうち、溶存成分の割合の減少が認められた。重回帰分析の結果から、COD およびクロロフィルは測定前数日間の日射量で良く説明できることが明らかになった。海水中の窒素濃度は河川流量（淡水比率）と単純に比例しているが、リン濃度は低流量時に比例、高流量時に逆比例していることが分かった。底泥からのリン溶出量は溶存酸素量の低下にしたがって増加していることが確かめられた。

1 はじめに

東京都の海域部では、既に十数年間にわたり水質測定が行われ、多くのデータが蓄積されている。こうしたデータは、電子データとしてファイル化することにより、様々な視点からの解析を容易に行うことができる。

前報では、各自治体の水質測定データを共通なファイル形式に統一することにより、東京湾のような広域にまたがるデータをより有効に活用できることを報告した¹⁾。

最近では、各職場にパーソナル・コンピュータが導入され、だれもが身近に利用することが可能になっている。また、その性能も向上し、特別に大量のデータを処理したりする場合以外には、機能的にも充分で、作図や対話処理など操作性の面では大型計算機をしのぐ。

こうした状況を考慮して、水質測定データをパーソナル・コンピュータで利用できるようにするために、フロッピーディスク（以下、「FD」と記する。）ファイル化し、それを使って東京湾の有機性汚濁に関連する水質項目の統計解析を行った。解析結果は係数値や回帰式で表現し、水質予測計算等に利用しやすいように配慮した。

2 水質測定データについて

東京都は、水質測定計画に基づいて、東京都内の河川、湖沼、海域で定期的な水質の定点観測を行っている。東京湾には、運河部24地点、内湾部32地点の測定点が設定されている。内湾部の32地点図1のうち8地点は環境基準点と呼ばれ、上下2層で有機性汚濁や栄養塩類に関する水質項目が毎月測定されている。その他の24地点は補完的な地点として、水温や塩分など一部の項目が年2回7月と1月に測定されている。

ここでは、内湾部の環境基準点8地点の12年度分（1978～1989年度）毎月の水質測定データを解析の対象とした。

ただし、すべての項目が、この全期間にわたって測定されているわけではない。

データは、水質保全部水質監視課の磁気テープ（以下、「MT」と記する。）ファイル、環水単年度ファイル（F1 TAN）から解析に必要な項目を抽出し、最終的にFDファイルを作成した。

データ変換方法については、本報告の最後に参考として掲げた。

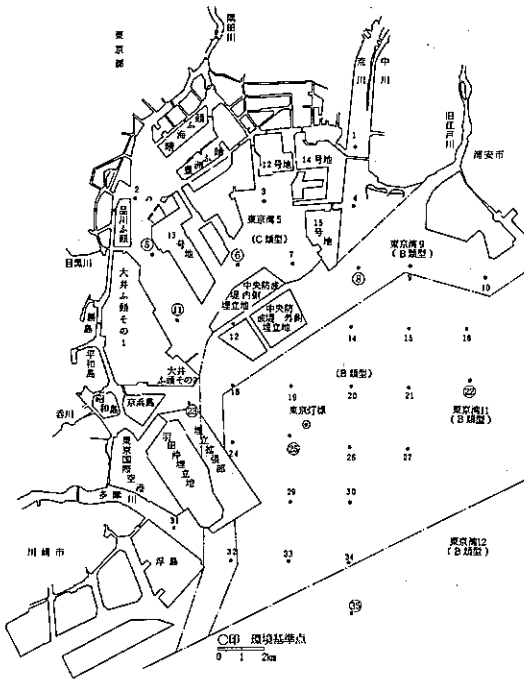


図1 東京都内湾の水質測定地点図

3 水質測定データの解析結果について

(1) 物理的環境特性と水質

ア 水温, 塩分, 密度

海域での海水密度の鉛直分布は, 上下層間の物質混合を支配し, その結果, 水質にも影響する要因となっている。海水の密度は水温と塩分により決まる (厳密には気圧も関係する)。下層の密度が上層に比べて十分大きければ, 海水は, 安定な構造になり, 上下層の混合は起こり難くなる (成層期)。上下層の密度がほぼ等しい場合や逆転した場合には, 容易に混合が起こり, 物質の拡散が促進され, それによって水質が変化する (循環期)。

そこで, 測定データから, 各測定地点の海水の物理的環境特性について検討した。なお, 海水の密度は「海洋観測指針」に示されている方法により, 水温と塩分の値から計算で求めた。また, 測定した海水に, どの程度の淡水が含まれているのかを示す指標として, 次式 (a) で淡水比率を定義し, 塩分の代わりに使用した。

$$\text{淡水比率} = 1 - [\text{現場の塩分} / \text{外洋海水の塩分}] \quad (a)$$

ただし, 外洋海水の塩分は35.0%とした。

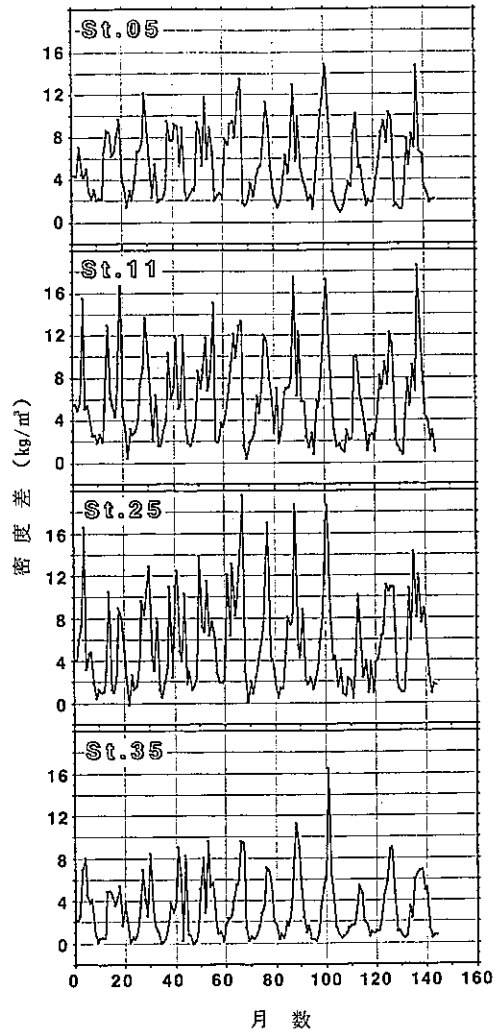


図2 密度差 (下層-上層) の時系列変化

図2は, St. 5, 11, 25, 35における1978年4月から毎月の上下層の密度差の変化を示したものである。各地点とも, 比較的規則的な周年変動をしている。中央防波堤内側の St. 5, 11では, 年間を通じて密度差がゼロになることはほとんどない (常に下層の密度が高い)。St.25, 35では, 毎年冬季に, 密度差がゼロに近づいたり, 上層の方が下層より密度が高くなることもある。また, 最も湾央寄り水深の大きい St. 35の変動幅が小さい点も特徴の一つである。

図3は, St. 5と St. 35の上下層間の水温差, 淡水比率

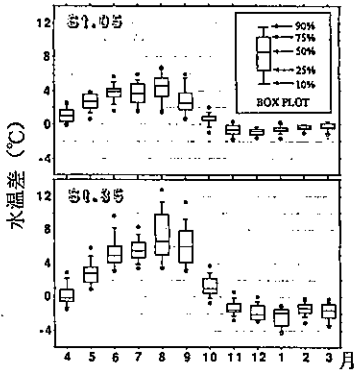


図3-1 水温差(上層-下層)の月別変動

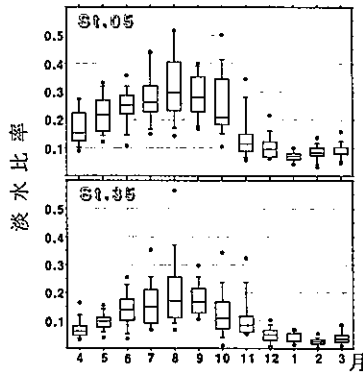


図3-2 淡水比率差(上層-下層)の月別変動

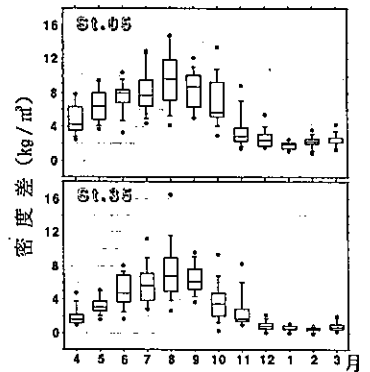


図3-3 密度差(下層-上層)の月別変動

差, 密度差の月別変動である。

水温については, 両地点とも, 4月から10月までは上層が高く, 11月から3月までは下層が高い傾向を示している。ただし, 年間の変動幅は St.35の方が大きい。これは, St. 35の水深が St. 5に比べて大きく, 上下層の混合が起こり難いためであると考えられる。

淡水比率も水温とほぼ同様な変動傾向が認められる。しかし, 上下層での逆転はみられない。陸水の影響をより受け易い St. 5では, 年間を通じて上層の淡水比率が高いが, St. 35では, 12月から3月の冬季に上下層の差がなくなることもある。

密度差は, 両地点とも夏季に変動幅が大きくなる。St. 5では, 年間を通じて下層の密度が常に大きい。St. 35では, 冬季に密度差が小さくなり, 上下層が逆転することもある。

12年間の1月と7月の密度差の変動幅を地点別に示す(図4)。両月とも St. 25で変動幅が大きい。この原因は, 多摩川からの淡水流入の影響であると考えられる。どの地点の密度差も7月は1月に比べて数倍大きい。

イ 成層の形成と植物性プランクトンの増殖

海域での成層の安定性(上下層の密度差の大きさ)と植物性プランクトン増殖の起こりやすさとの関係について検討した。図5は, 内湾部8地点上層のクロロフィルa+フェオ色素(T-Chl)と上下層の密度差との関係を示したものである。図5によれば, 密度差が2 kg/m³以下と14kg/m³以上の場合には, 高濃度(100mg/m³以上)のT-Chlはほとんど観測されていない。2 kg/m³以

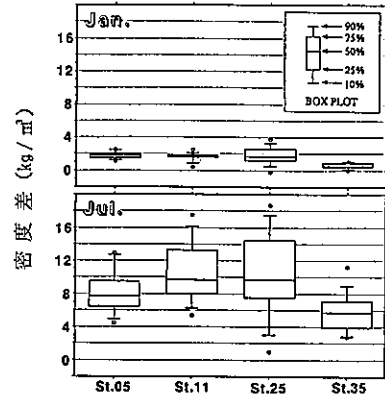


図4 地点別密度差(下層-上層)の変動幅

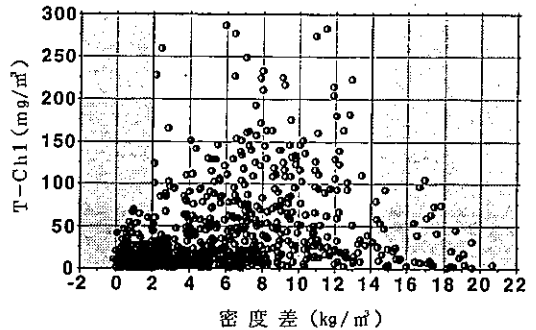


図5 密度差(下層-上層)とクロロフィル濃度の関係

下の場合、主に冬季に対応し、14kg/m³以上の場合は、降雨等により淡水比率が著しく増加した時期に対応すると考えられる。冬季に高濃度の T-Chl が認められない原因としては、密度差の減少による混合拡散の促進ばかりでなく、日射量の減少による植物性プランクトンの増殖速度の低下も考えられる。

一方、春～秋季（成層期）については、密度差の大小と高濃度の T-Chl の発生頻度とは明確な関係は認められない

(2) 水質項目間の相関

有機性汚濁項目では、時に異常に高い数値のデータが出現する。特に、クロロフィル濃度のような懸濁物質に関係する項目でその傾向が著しい。こうした値は、見かけ上、相関係数を非常に高くしたり、回帰係数を実質的には決定してしまうおそれがある。そのため、以後の解析を行うにあたっては、前処理として、各水質項目のデータを図示し、視覚的に判断して離れ値を除去（どのケースでも、おおむね5個以下）した。さらに、いくつかのケースでは、段階的に高い数値のデータを除外して、統計量の変化を調べたが、多くの場合、上位の2、3個を除くことで統計量は安定した。

ア 植物性プランクトンの元素組成に関連する項目

(ア) クロロフィルと有機体炭素

図6、7は、上層の T-Chl と粒子状有機体炭素 (POC) 及びフェオ色素 (Pheo) と溶溶性有機体炭素 (DOC) の関係を示したものである。項目間の回帰式はそれぞれ、

$$[T-Chl] = 0.0347 * [POC] - 0.0145$$

$$[Pheo] = 0.0064 * [DOC] - 0.0089$$

で表わされ、また相関係数はそれぞれ $r=0.912$, $r=0.661$ であった。回帰式を計算するにあたっては、上述のように極端に他の値と離れたデータはチェックし、計算から除いた。[T-Chl] / [POC] ~ 0.0347 は、内湾の植物性プランクトン中の平均的な両者の組成比を示していると考えられる。一方、クロロフィル a の分解生成物である Pheo 濃度は、DOC と正の相関が認められることから、植物性プランクトンが分解すると、溶溶性有機物濃度を上昇させると考えられる。

(イ) 懸濁成分中の炭素、窒素、りん

炭素 (C)、窒素 (N)、りん (P) は、植物性プランクトンの主要な生体構成元素であり、これらの元素の組成比は、プランクトン増殖の制限因子を考える場合の重要

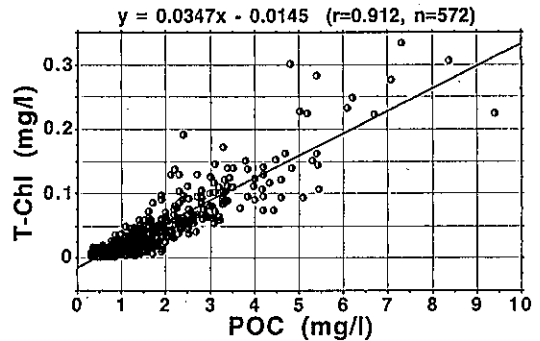


図6 粒子状有機体炭素とクロロフィルの相関

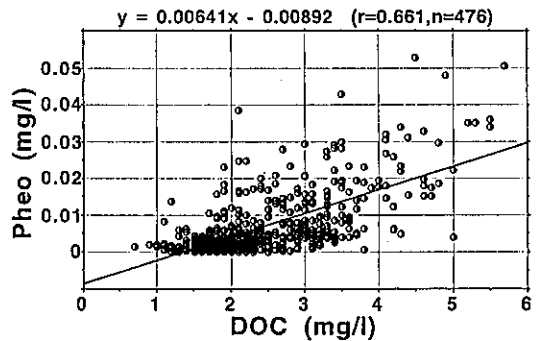


図7 溶溶性有機体炭素とフェオ色素の相関

表1 測定地点による懸濁物質中のCNP比の変化

地点	y=PON, x=POC			y=PTP, x=POC		
	傾き a	切片 b	相関係数 r	傾き a	切片 b	相関係数 r
5	0.189	-0.006	0.985	0.0292	0.0132	0.893
6	0.179	0.015	0.976	0.0295	0.0091	0.844
8	0.209	-0.040	0.914	0.0311	0.0219	0.633
11	0.203	-0.021	0.991	0.0284	0.0096	0.848
22	0.161	0.027	0.987	0.0169	0.0117	0.716
23	0.185	-0.040	0.985	0.0295	0.0061	0.861
25	0.190	-0.008	0.990	0.0225	0.0116	0.689
35	0.212	-0.036	0.981	0.0199	0.0034	0.780

(注) ・データは1984~1989年度の6年分 (72データ/地点)
 ・回帰式: $y = a \cdot x + b$

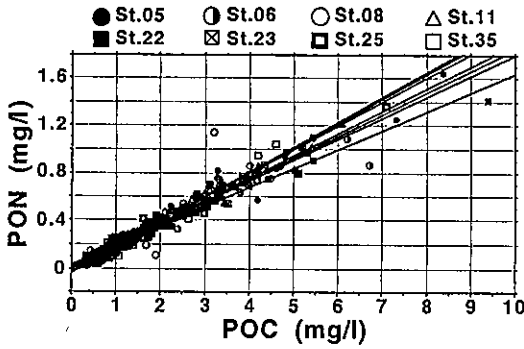


図8 地点別粒子状有機体炭素と粒子状有機体窒素の散布図

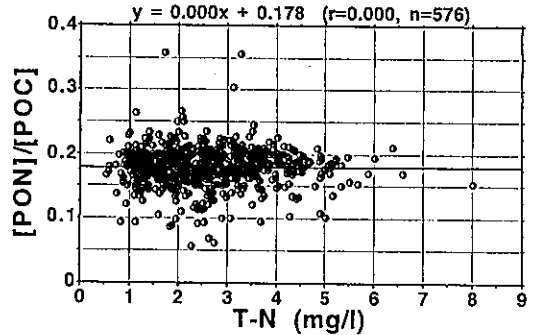


図10 海水の全窒素濃度と懸濁物質中のN/C比

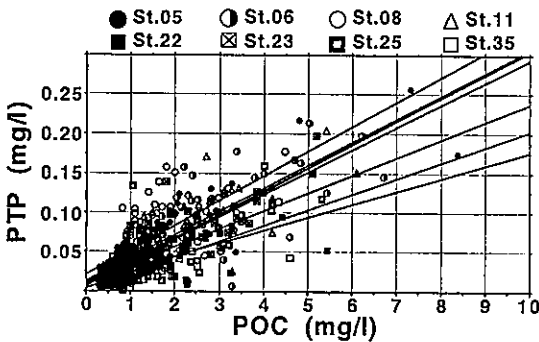


図9 地点別粒子状有機体炭素と粒子状全りん散布図

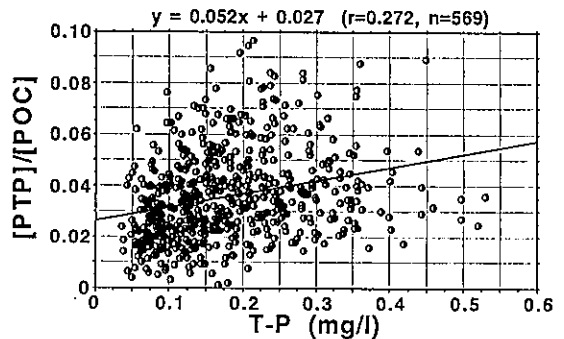


図11 海水の全りん濃度と懸濁物質中のP/C比

な値である。

図8, 図9は, 上層のPOCと粒子状有機体窒素(PON), POCと粒子状全りん(PTP)の間の散布図である。なお, PTPは全りん(T-P)から溶存性全りん(DTP)を差し引いて求めた。相関係数, 回帰式は測定地点別に計算した。各地点の回帰係数と相関係数は表1のとおりである。表1によればPONは, POCと非常によく相関を示している。これに対してPTPは, やや相関が悪くなり, 回帰係数a(傾き)の地点による変化も大きい。8地点のうちでは, St.8で相関が低く, バラツキが大きい。

全窒素(T-N)と[PON]/[POC], 全リン(T-P)と[PTP]/[POC]の関係を図10, 11に示す。[PTP]/[POC]の値は, T-Pとの間に正の相関が認められる。植物性プランクトンは, 生息環境中のりん濃度に応

じて生体中への取り込み量を変える, いわゆる, “りんの過剰吸収”が報告されている⁴⁾。図11は, この現象を示していると考えられる。

イ 有機性汚濁指標項目間の関係

CODと全有機体炭素(TOC)あるいは溶存性COD(D-COD)とDOCは, 試料を異なる測定原理(有機物の酸化法)で分析した値であり, [COD]/[TOC], [D-COD]/[DOC]は, 汚濁成分の質的な特徴(特に有機物の酸化分解性)の尺度となる。一方, [D-COD]/[COD], [DOC]/[TOC]からは, 汚濁成分中の溶存成分の割合を知ることができる。

植物性プランクトン増殖時の汚濁成分の質的变化を有機性汚濁指標項目間の比の変化により検討した。

図12は, 全地点の上層のデータで項目間の散布図を描いたものである。どの項目間も0.8以上の高い相関係数

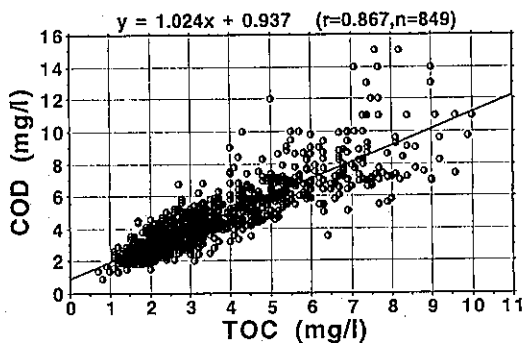


図12-1 全有機体炭素とCODの相関

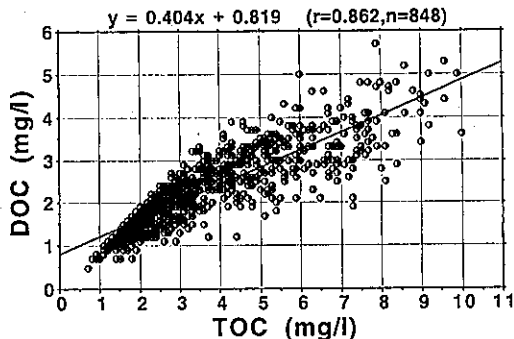


図12-3 全有機体炭素と溶存性有機体炭素の相関

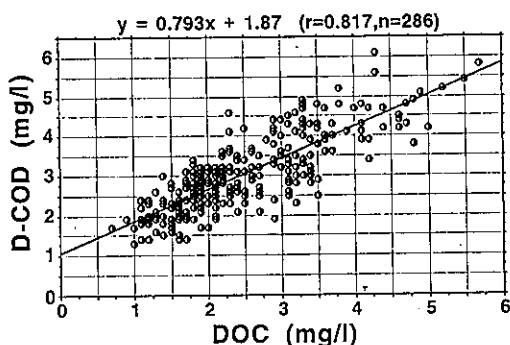


図12-2 溶存性有機体炭素と溶存性CODの相関

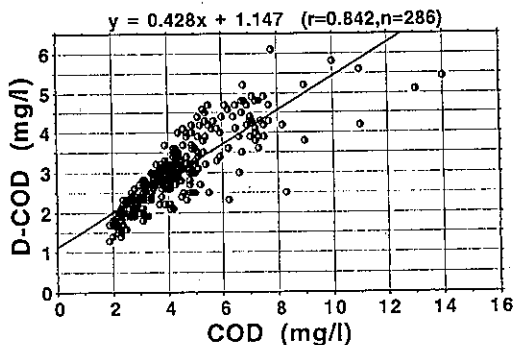


図12-4 CODと溶存性CODの相関

を示している。

更に、このデータをその時のT-Chlの大きさで、平常時(T-Chl < 50 mg/m³)と赤潮発生時(T-Chl ≥ 50 mg/m³:この値は東京都内湾の赤潮判定基準値である。)の2群に分けて相関係数と回帰係数を計算し、T-Chl濃度と値の変化との関係を調べた。表2は、その結果である。

[COD]/[TOC], [D-COD]/[DOC] (回帰係数a)はT-Chlが変化しても顕著な差は認められない。このことは、植物性プランクトンが増殖した場合でも、有機汚濁成分の酸化分解性はあまり変化しないことを示している。

一方、[D-COD]/[COD], [DOC]/[TOC]とT-Chlとの関係から、T-Chlが50 mg/m³以下の場合にCOD中の溶存成分の割合は約60%であるが、それ以上の

表2 平常時と赤潮発生時の有機性汚濁項目間の回帰・相関係数の変化

項目	平常時			赤潮発生時			
	y	x	相関係数 r	y	x	相関係数 r	
COD	TOC	傾き a	切片 b	傾き a	切片 b	相関係数 r	
D-COD	DOC	0.943	1.080	0.821	0.968	1.619	0.793
D-COD	DOC	0.819	1.020	0.754	0.785	1.052	0.806
DOC	TOC	0.570	0.394	0.891	0.315	1.160	0.778
D-COD	COD	0.611	0.489	0.874	0.320	1.667	0.725

(注) 回帰式: $y = a \cdot x + b$

濃度では約30%に低下している。またTOCについても、同様な変化が認められる。この結果は、溶存成分の割合

で植物性プランクトン濃度の高低をある程度推定することができることを示している。

(3) 気象等の外的要因と水質

ア COD, クロロフィルと水温, 塩分, 日射量

植物性プランクトンは、水温、日射量に応じて増殖速度が変化する。そこで、水温、塩分、水質測定当日から7日前までの全天日射量を説明変数に、COD、T-Chlを目的変数として重回帰分析を行った。

図13は、St. 5上層のデータに関する回帰推定値と実測値を時系列で表示したものである。変動のパターンはよく一致し、相関係数は、T-Chlでは0.73、CODでは0.76となった。一方、日射量を説明変数から除いた場合の相関係数は、それぞれ0.53、0.53となり、測定データが測定日以前の日射量の影響を強く受けていることが分かった。

イ 淡水比率と全窒素, 全りん

河川水が海域に流入する場合に、その流量と窒素、りん濃度の関係を調べるために、上層の淡水比率とT-N、T-Pの相関について検討した(図14)。

T-Nは、淡水比率の上昇に伴って濃度が高くなり、その相関係数は、0.53であった。

T-Pは、淡水比率が0~0.4位までの範囲では正の相関(この区間だけをとると $r=0.61$)を示すが、それ以上では逆に負の相関となり、淡水比率が高くなるほど下がる傾向が認められた。

以上の結果は、Nは河川流量が増加するほど、河川水中の濃度が高くなるが、Pは流量が非常に大きくなると濃度が低下することを示している。このPの挙動については、高流量時に底泥が巻き上げられ、その粘度鉱物に吸着されることなどが原因として考えられるが、その

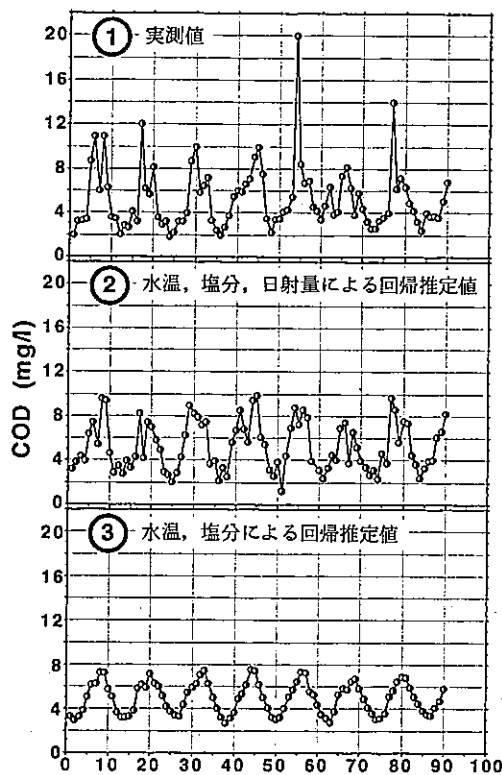


図13-1 CODの実測値と重回帰推定値の時系列変化

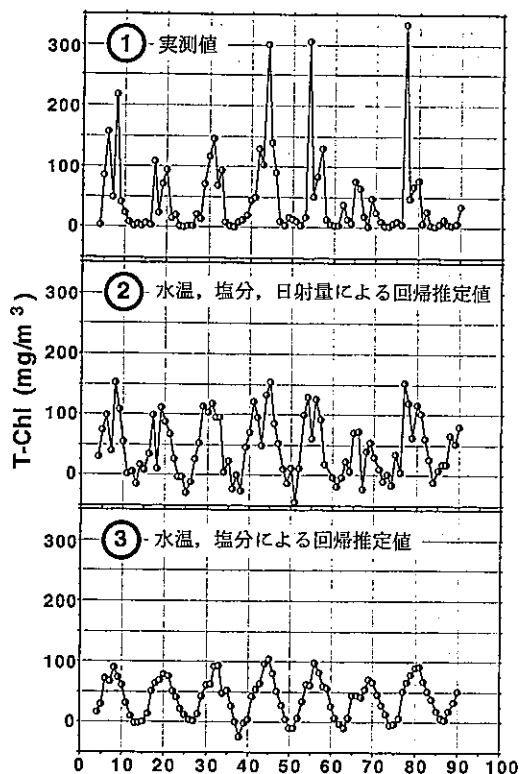


図13-2 クロロフィル濃度の実測値と重回帰推定値の時系列変化

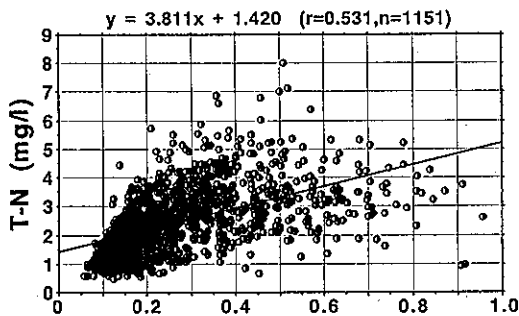


図14-1 淡水比率と全窒素の相関

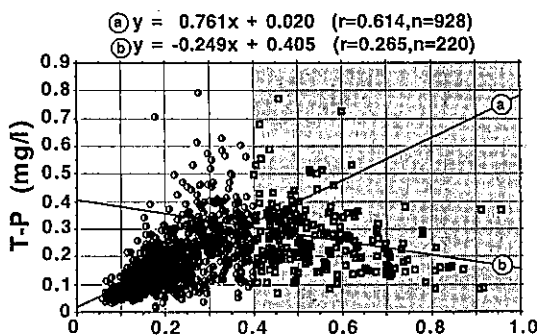


図14-2 淡水比率と全リンの相関

(⊙)は淡水比率<0.4, (⊙)は淡水比率≥0.4のデータによる回帰直線

点を明らかにするためには、河川水質データと対比させた解析が必要である。

ウ 底泥からの溶出

N, P は、河川を通じて陸上起源のものが流入してくるほか、溶出によって海底の底泥からも海水中に供給されている。室内実験では底泥からの溶出速度は溶存酸素(DO)や水温により変化することが報告されている⁷⁾。ここでは、水質測定結果から、これらの水質項目間の関係について検討した。

下層のDTPとDOは比較的高い負の相関を示す(図15)。特にDOが2 mg/lより低い貧酸素状態の場合には、DTPの急激な増加が認められる。このことから、下層のPはDOの減少により溶出量が増加していると考えられる。DTPとDOの関係を回帰式(一次式と指数型)で表わすと次の通りである。

$$[DTP] = -0.012 * [DO] + 0.148 \quad r = -0.73$$

$$[DTP] = 0.1517 * \exp(-0.1243 * [DO]) \quad r = -0.73$$

DTPと水温の間には正の相関が認められる(図16)。また、水温の上昇に伴いDTPのバラツキは大きくなっている。水温の高くなる夏季には、下層のDOが低下する傾向があることから、水温とDTPの関係にはDOの効果が、逆にDOとDTPの関係には水温の影響が含まれると考えられるが、両者の相関係数の絶対値の大きさからみて、DOの効果が主であるとみてよいであろう。DTPと水温(WT)についての回帰式を以下に示す。

$$[DTP] = 0.005 * [WT] + 0.006 \quad r = 0.57$$

$$[DTP] = 0.3266 * \exp(0.05756 * [WT]) \quad r = 0.58$$

下層のT-NとPONの差として求めた溶存性全窒素(DTN)とDOの関係を図17に示す。わずかに正の相関が認められるが、DTPに比べDOの影響は、はる

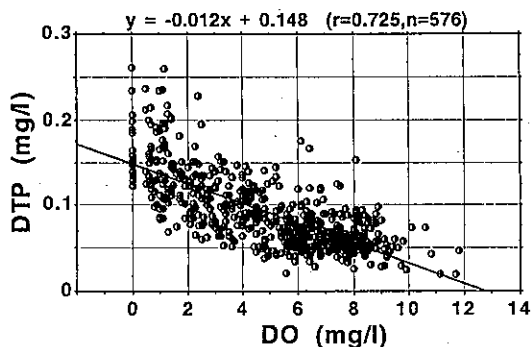


図15 下層の溶存酸素濃度と溶存性全リンの相関

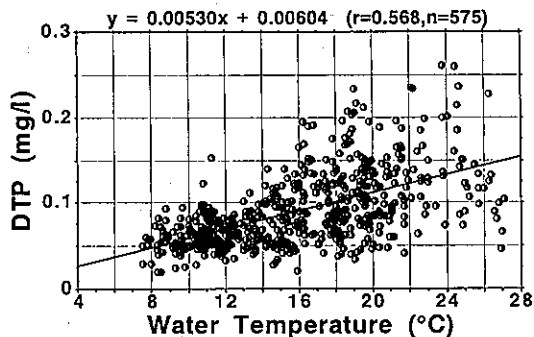


図16 下層の水温と溶存性全リンの相関

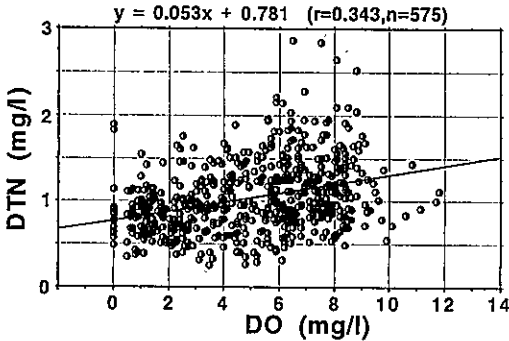


図17 下層の溶存酸素濃度と溶存性全窒素の相関

かに小さい。回帰式は、

$$[DTN] = 0.053 * [DO] + 0.781 \quad r = 0.34$$

と表わされる。指数回帰式では相関係数はかえって低下した。

4 おわりに

東京都が現在、都内の公共用水域で実施している水質測定データは、河川、湖沼、海域をすべて含めて、年間3,000件余りである。これは、1件の記録形式をかなり冗長に1,000バイトと仮定しても、1年分のすべてのデータがFD 3枚程度に収まる量である。今後、環境測定データも従来の印刷物に加えて、FDファイルでの提供要求が高まると考えられる。その意味で本報告が参考になれば幸いである。

[参 考]

水質測定データの解析に使用したFDファイルの作成手順及びレコード形式を図18、表3に示す。

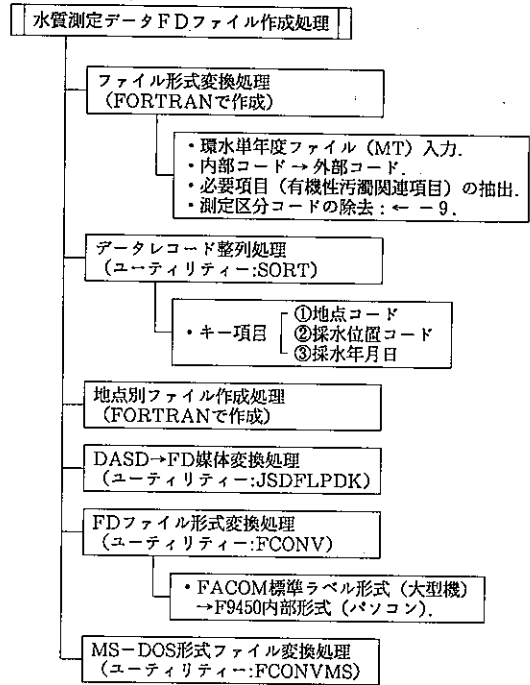


図18 水質測定データFDファイルの作成手順

参 考 文 献

- 1) 安藤晴夫：東京湾の富栄養化機構の研究（その8）
東京都環境科学研究所年報1990.
- 2) 東京都環境保全局：昭和63年度 公共用水域の水質測定結果（総括編）, (1990).
- 3) 日本海洋学会：海洋観測指針（気象庁編）, (1985).
- 4) 岡市友利編：赤潮の科学, 恒星社厚生閣, (1987).
- 5) 東京都環境保全局：昭和62年度 東京都内湾赤潮調査報告書, (1990).
- 6) 気象庁：気象庁月報1978年3月～1990年1月.
- 7) 曾田京三ら：東京湾の富栄養化に関する研究（その5）, 東京都環境科学研究所年報1988.

表3 水質測定データ・FDファイルのレコード形式

No	項目名	変数名	型式	カラム位置	備考
1	地点コード	STN	999999	1 : 6	自治体独自コード
2	採水位置コード	DPC	99	8 : 9	
3	年	IYY	9999	11 : 14	西暦年
4	月	IMM	99	16 : 17	
5	日	IDD	99	19 : 20	
6	時	IHR	99	22 : 23	
7	分	IMN	99	25 : 26	
8	気温	ATM	99.9	28 : 31	
9	水温	WTM	99.9	33 : 36	
10	透明度	TRS	99.9	38 : 41	
11	pH	PH	99.9	43 : 46	
12	DO	DO	99.9	48 : 51	
13	COD	COD	999.9	53 : 57	
14	BOD	BOD	999.9	59 : 63	
15	SS	SS	999.	65 : 68	
16	T-N	TN	99.99	70 : 74	S.59河川、S.60海域方法変更
17	T-P	TP	99.999	76 : 81	S.59方法変更
18	塩分	SAL	99.9	83 : 86	
19	塩化物イオン	CL	999.	88 : 91	
20	電気伝導度	EC	99999.	93 : 98	
21	MBAS	MBAS	99.99	100 : 104	
22	NH4-N	NH4	99.99	106 : 110	
23	NO2-N	NO2	99.999	112 : 117	
24	NO3-N	NO3	99.99	119 : 123	
25	PO4-P	PO4	99.999	125 : 130	
26	PON	PON	99.99	132 : 136	S.59測定開始
27	DTP	DTP	99.999	138 : 143	S.59測定開始 (海域)
28	TOC	TOC	999.9	145 : 149	
29	DOC	DOC	999.9	151 : 155	
30	POC	POC	999.99	157 : 162	S.59測定開始 (海域)
31	クロロフィル-a	CHLA	9999.9	164 : 169	
32	プランクトン沈澱量	DCHL	99999.	171 : 176	
33	クロロフィル-a+フェオ色素	TCHL	9999.9	178 : 183	
34	D-COD	DCOD	999.9	185 : 189	

<補 足>

- ① 各データ項目の区切りは1文字分 (またはそれ以上) のスペース
- ② 測定区分
(欠測データ : -9 / 定量限界以上 : -1 / 定量限界以下 : 0.)
- ③ 採水位置コード
(流心 : 10 / 水平3点 : 20 / 上層 : 30 / 中層 : 40 / 下層 : 50 / 混合層 : 60)