

# 閉鎖性水域における透明度と懸濁物質の実態

宮 岡 修 二      石 垣      衛  
辻      博 和      喜 田 大 三

## Research on Transparency and Suspended Solids in Semienclosed Waters

Shuji Miyaoka      Mamoru Ishigaki  
Hirokazu Tsuji      Daizo Kita

### Abstract

The transparency of water is an index of the amenity of a water environment. The transparency has a correlation with the amount of suspended solids (SS), while the composition of SS and the correlations between them vary with each water area. It is important to investigate the characteristics of transparency and SS in water areas in order to develop water purification techniques. Therefore, the authors studied the characteristics of water in 5 polluted water areas (2 inland seas, 1 lake and 2 ponds) with the aim of purifying the water. As a result, the transparencies of inland seas were found to be 1~2 m in summer and less than in winter. In contrast, the transparencies of inland waters were less than 1 m throughout the year. The transparency had a correlation with the amount of SS. The weight ratio of particulate organic carbon to SS varied according to seasons and water areas, with the ratio in summer being higher than in winter for each water area. The weight ratios of phytoplankton and of clay to SS, which were based on analytical data, were estimated. And it was found that the main components of SS were phytoplankton and detritus.

### 概 要

水辺の親水性の指標として、水質に関しては透明度がしばしば用いられる。この透明度は懸濁物質 (SS) 濃度との関係が高いが、水域によって SS の性状は異なることが指摘されている。水域の浄化を進めるに際しては、透明度に影響する SS の性状を明確にする必要があり、浄化対策が求められている 5 水域において水質調査を実施した。

陸水域では透明度は 0.5 m 以下であることが多く、著しく汚濁していた。海域の透明度は夏場が 1~2 m、冬場は 3 m 以上を示す場合もあった。このような透明度は SS 濃度との間に逆の相関関係がみられ、両者の間に概算の関係式を得ることができた。SS の構成成分に関しては、有機、無機成分それぞれについて分析を行った。懸濁態有機炭素の SS に占める割合を検討したところ、植物プランクトンと推定されるものと無機成分の多いものが存在した。その無機成分として、植物プランクトンの珪藻および土粒子に由来する懸濁態シリカと土粒子に由来する懸濁態アルミナを分析し、シリカの大部分が珪藻に由来していることがわかった。以上の結果より、SS の大部分は植物プランクトンに由来することが明らかとなった。

### 1. はじめに

近年、水辺空間は心にうるおいやすらぎを与える貴重な親水空間として見直されつつある。また一方で、地球環境問題への取り組みとして、身近な水域においても自然生態系の保全と復元を望む声が高くなってきた。しかし、それらの水域のうち、特に都市部の港湾、湖沼、修景池などの閉鎖性水域では、流入負荷に加えて、堆積した有機ヘドロからの影響や水域内における藻類の増殖など、複雑な汚濁機構によって水環境が悪化している。このような状況から、都市部を中心として、親水性を重視した水際地域の再開発事業や水域の環境整備事業が多数計画されており、水域の浄化対策も重要な検討課題の 1 つとなっている。

このような水域浄化において、まず設定すべき条件は、

何をどの程度に浄化するかということである。公共用水域の環境基準には、人の健康の保全に関わるものとして重金属をはじめとする 24 項目が、生活環境に関わるものとして、化学的酸素要求量 (COD)、溶存酸素濃度 (DO) をはじめとする 5~7 項目が定められている。しかし、親水性の評価指標としては、これらの環境基準項目には指定されていない透明度が用いられるようになってきた<sup>1)2)</sup>。そこで、水域の浄化対策の確立に向けては、この透明度に着目した水域の水質汚濁の実態を把握する必要があると考えた。

透明度は海域や湖沼において懸濁物質 (SS) 濃度や植物プランクトンのもつ光合成色素であるクロロフィル a 濃度と関係の高いことがこれまでに多数報告されている<sup>3)</sup>。しかし、透明度に影響する汚濁物質の性状は、水域によって異なることも指摘されており<sup>4)</sup>、その詳細は不

明な点が多い。

そこで、水質浄化対策が必要と考えられる5水域において、現地調査を実施し、透明度とSS濃度の関係およびSSの諸性状に関する検討を行った。

## 2. 透明度とは

### 2.1 透明度の測定方法

透明度は、透明度板とよぶ直径30cmの白色円板(図一1)を水中に沈め、それが周囲と区別できなくなる深度を表したものである。測定は透明度板を下ろしつつ見えなくなる深さ、深いところから引き上げて見えてくる深さの両方を計測し、その中間値をとる<sup>5)</sup>。

### 2.2 透明度に影響する因子

透明度は、水の清濁(濁り)の程度を示す指標の1つである。従って、本質的には水中の濁り成分(SS)の色調、大きさ、形状、組成、濃度などによって規定される。一方、透明度は現地での計測であるため、観測者の主観や計測時の天候、時刻、水面の乱れ等の外的因子によっても影響を受ける。

## 3. 調査概要

### 3.1 調査地点

表一1に示すように、海域調査は東京湾と三河湾の湾奥部の2水域で、陸水域調査は霞ヶ浦、某修景池A、Bの3水域で行った。東京湾湾奥部は運河域5地点、羽田沖1地点、三河湾湾奥部は2地点、霞ヶ浦は土浦港、湖心をはじめとして5地点、A池は5地点、B池は7地点をそれぞれ調査地点とした。調査は、東京湾湾奥部が93年2、5、9月、三河湾湾奥部が93年7~12月、霞ヶ浦は93年2、5、8、10月、A池は3、5、9月、B池は5、9月に行った。

### 3.2 現地調査概要

透明度は2章の要領で計測した。なお、観測者による計測値の違いは、透明度約2m以下では10~20cm程度であり、測定誤差とみなした。天候、時刻の影響は、半谷ら<sup>5)</sup>によれば大きな因子とはなりにくいと報告されており、計測は日中の9~15時で行うことに留意した。水面の乱れに関しては調査対象水域が比較的静穏であることから、今回は特に考慮していない。また、透明度の計測とともに、投下型機器による水温、濁度等の鉛直分布も計測した。そして、水質分析用に表層0~50cmの水を採取し、試料は分析に供するまで5°Cにて保存した。

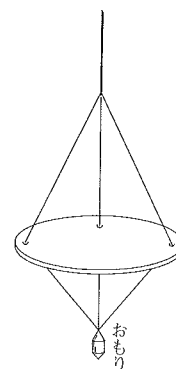
### 3.3 懸濁成分の分析方法

3.3.1 懸濁物質の分離 採取水中のSSは、ガラス繊維ろ紙Whatman GF/Cを用いた吸引ろ過によって分離した。

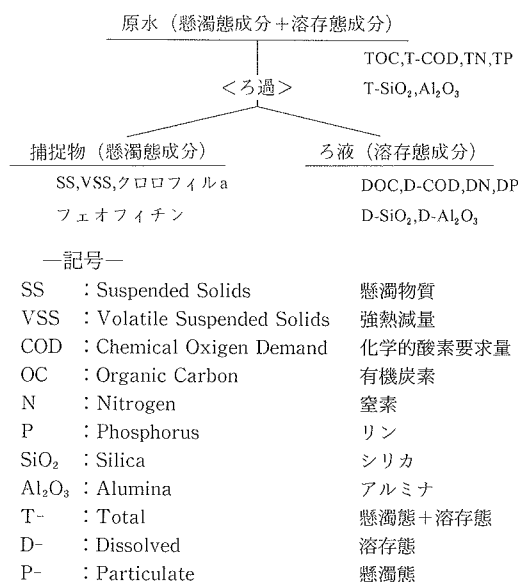
3.3.2 水質分析方法 ろ紙に捕捉されたSSは、蒸留水によって十分に洗浄した後105°Cで乾燥し秤量してSS濃度を求め<sup>8)</sup>、さらに425±25°Cで加熱し恒量化して強熱減量(VSS)を求めた<sup>9)</sup>。また、植物プランクトンなどがもつ光合成色素であるクロロフィルaおよびその1

表一1 現地調査地点<sup>6),7)</sup>

調査水域	保有水量	平均水深	調査地点水深
東京湾	179 億 m <sup>3</sup>	18 m	5~16 m
三河湾	55.4億 m <sup>3</sup>	9 m	2~4 m
霞ヶ浦	8 億 m <sup>3</sup>	4 m	2~6 m
A池	48 万 m <sup>3</sup>	1~2 m	1~2 m
B池	21 万 m <sup>3</sup>	1~2 m	1~2 m



図一1 透明度板<sup>5)</sup>



図一2 水質分析フロー

次分解物質であるフェオフィチンに関しては、Lorenzenの方法<sup>10),11)</sup>に従い、ろ紙に捕集したSSを85%アセトンで抽出し吸光法で定量した。COD<sub>Mn</sub>、有機炭素、窒素、リン、シリカ、アルミナに関しては、SSを含む採取水原水とろ過で得たるろ液について、それぞれ分析し、原水の実測値は懸濁態成分と溶存態成分の合計の濃度、ろ液の実測値は溶存態成分の濃度とし、両者の差をとって懸濁態成分の濃度とした(図一2)。分析方法は、それぞれ、COD<sub>Mn</sub>は酸性法<sup>8)</sup>、有機炭素は燃焼酸化および赤外線計測法<sup>9)</sup>、窒素、リンは過硫酸カリウムによる分解後、それぞれ銅・カドミウムカラム還元—ナフチルエチレンジア

ミン吸光光度法<sup>8)</sup>、アスコルビン酸還元—モリブデンブルー吸光光度法<sup>9)</sup>、シリカはアルカリ溶融後モリブデンブルー吸光光度法<sup>12)</sup>、アルミナは原子吸光法<sup>13)</sup>を用いた。

3.3.3 粒度分析 採取水をナイロンメッシュ(オープニング 1058, 200, 100, 75, 40, 20, 10 μm) で順次ろ過し、その濁度を 660 nm にて測定した。次に、濁度への寄与の大きかった粒子径が 1~100 μm の範囲について、コールターカウンターを用いて粒子径別に粒子数を計数した。

#### 4. 調査結果

##### 4.1 現地の透明度

陸水域は、緑色ないし緑黄色を呈しており、冬季、夏季調査時ともに透明度は 1 m 以下であった。一方、海域においては、透明度の低下は夏季に顕著にみられた。その透明度はおおよそ 1~2 m であり、この時期、海域は緑黄色から赤褐色を呈した。しかし、汚濁の著しい陸水域に比較すると、透明度は相対的に高かった(表一 2)。

今回の現地調査において、筆者は透明度 2 m 以上であれば透明性はかなり良く、透明度 1 m 以下であればかなり悪く感じられた。既往文献<sup>14)</sup>では、「水面を見る」ないしは「水と触れあう」といった利用形態において浄化目標とする透明度は 1~2 m 以上としており、これらと同様の所感であった。

##### 4.2 透明度と SS 濃度の関係

丹羽らによれば<sup>13)</sup>、SS は植物プランクトン、動物プランクトン等の生物や土粒子などからなり、その大きさは直径 1 μm 以上と規定している。また、日本工業規格 JIS では SS は平均孔径 1 μm 相当のろ紙を用いてろ過したとき、ろ紙上に残る物質として定義されている<sup>8)</sup>。今回は採取水をこれらに準じたガラスフィルターを用いてろ過し SS を分別した。なお、ろ液について、660 nm、光路長 1 cm で吸光度を測定した結果、ほぼ 0.005 以下であった。このことより、今回採用したろ過法によって水中の SS が十分捕捉されたと判断した。

現地において測定した透明度と採取水の SS 濃度との関係は、図一 3 に示すように SS 濃度が小さくなるほど透明度は大きくなった。これらのデータの両対数を一次式で回帰した結果は水域によりやや異なっていたが、全データからは次式が得られた。

$$\log [\text{透明度}] = 0.875 (\pm 0.155) - 0.925 \log [\text{SS}]$$

(n=96, R<sup>2</sup>=0.774, ( )内は 1 標準誤差)

この式をもとにすると、透明度と SS は表一 3 のように対応した。

なお、今回は、透明度と表層水の SS 濃度との比較を行ったが、SS の濃度は、水深によって変化することを付記しておく。海域においては、赤潮時水面表層からおおよそ 1~2 m までの SS 濃度が下層水のそれに比較して高い状況もみられた。また、霞ヶ浦などでは、底層水の SS 濃度が著しく高く、底質が巻き上がっていると推測される場合があった。

表一 2 各水域の透明度の測定結果

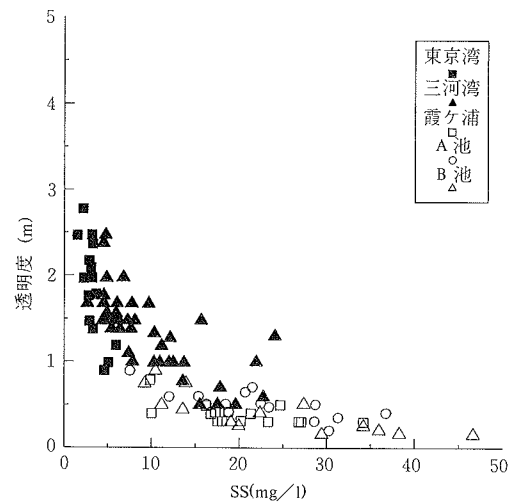
水域	冬季	夏季
東京湾	1.0~2.8	1.2~2.1
三河湾	1.4~3.7<	1.0~2.0
霞ヶ浦	0.3~0.5	0.3~0.4
A池	0.4~0.9	0.4~0.7

単位：m

表一 3 透明度と SS 濃度の対応関係

透明度 (m)	SS (mg/l)
1	6.0~13.0
2	2.8~ 6.1
3	1.8~ 4.0

(SS の変動率は 1 標準誤差から計算した)



図一 3 透明度と SS 濃度の関係

##### 4.3 SS の大きさ、形状

本項では、三河湾および A 池の夏季採取試料について、SS の粒度分布を計測した結果および光学顕微鏡による SS の観察結果を述べる。

ふるい分け法において、オープニング 100 μm のメッシュでろ過したろ液の濁度は原水濁度の 90% 以上の値をとった。すなわち、100 μm 以下の粒子が濁度に大きく影響を及ぼしていた。

そこで、この 100 μm 以下の粒子に関して精査するため、コールターカウンターによって粒子径別の粒子数を計測した。その結果は粒径が 1~100 μm の粒子の容積の合計を 100% として図一 4、5 に示した。

三河湾海水については、粒子径 1~10 μm の粒子の容積が全体の 54%、10~20 μm のそれが 24% と、20 μm 以下の粒子が容積全体の約 80% を占めた。一方、A 池池水では、1~50 μm まで 10 μm ずつに区分してみると、ほぼ均等に分布しており、平均粒径は三河湾海水よりも大であった。

写真一 1、2 は、それぞれ三河湾、A 池の SS の一例を示したものである。三河湾海水中には、鞭毛藻類の

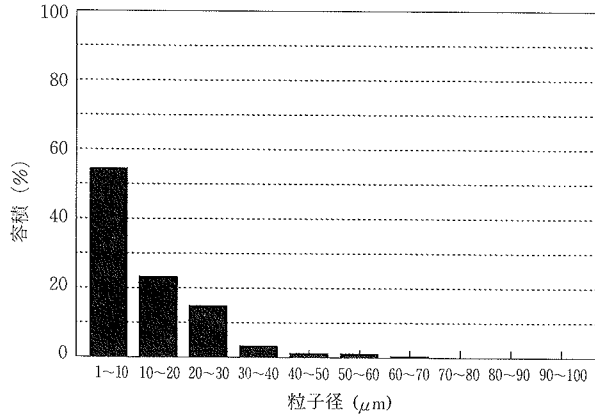


図-4 三河湾沿岸海水のSSの粒度分布

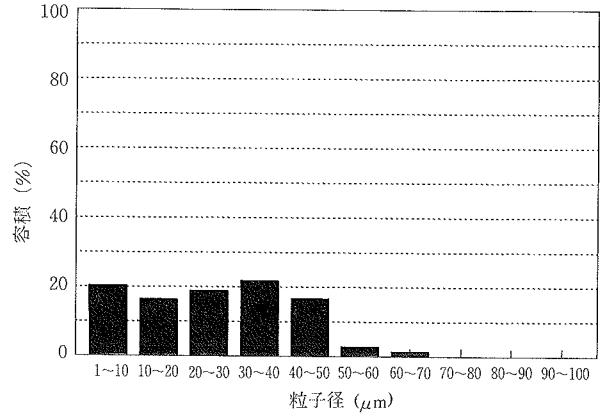


図-5 A池池水のSSの粒度分布

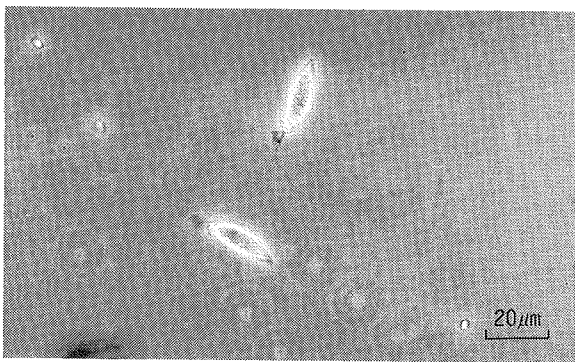


写真-1 三河湾沿岸海水のSS

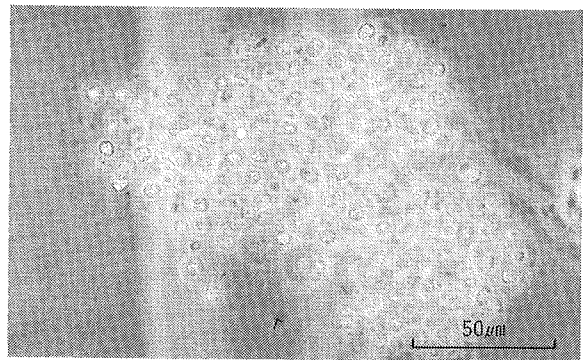


写真-2 A池池水のSS

*Prorocentrum* 属が多く見られ、A池池水では、ラン藻類の *Microcystis* 属が多く見られた。特に、A池池水中には、写真に示すように、植物プランクトンなどが凝集した粒子が多く存在した。

#### 4.4 SSの化学性状

SSの構成成分としては、まず、写真-1、2で示した植物プランクトンやその分解残さ(デトリタス)があげられる。これらは、有機成分だけでなく、珪藻の細胞壁構成物質であるシリカ等の無機成分からも構成されている。その他には、有機系排水に由来する有機成分や土粒子などがあり、水中では、種々の粒子が単独あるいは集合体を形成して浮遊している。

以下には、これらの成分について分析した結果を述べる。

**4.4.1 SSの有機成分** 図示しないけれども、冬季調査時に対し初夏調査時には、大部分の地点でSS、強熱減量(VSS)、懸濁態有機炭素(POC)、クロロフィルaの各濃度の増加が認められた。SSの増加が植物プランクトンに由来しているのではないかと考え、その要因を明確にするため、SS濃度とPOC濃度の関係を検討した。図-6に示すように、(POC/SS)質量比はおよそ0.1~0.4に分布した。調査時期別に平均値をとると、冬季調査時においては0.08~0.13、初夏5月の調査では0.23~0.41であった。

植物プランクトンの有機成分に関する代表的な組成式

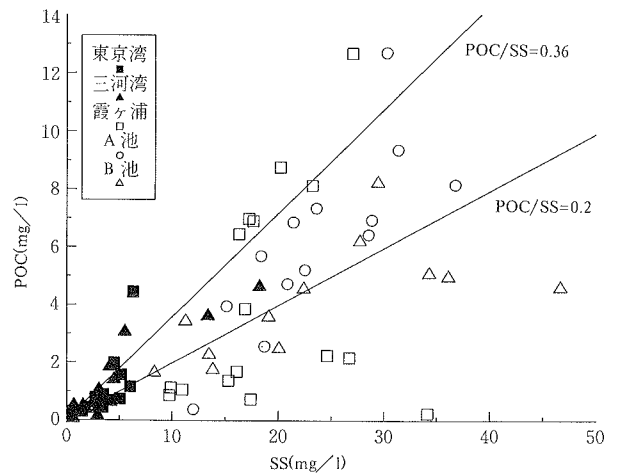


図-6 SS濃度とPOC濃度の関係

$(\text{CH}_2\text{O})_{106}(\text{NH}_3)_{16}\text{H}_3\text{PO}_4$  によると、(POC/SS)質量比は0.36である。一方、珪藻ではシリカがSS質量の30~40%を占めると報告されており<sup>14)</sup>、珪藻の(POC/SS)比はおよそ0.2となる。これらの数値を考慮すると、(POC/SS)比がこの範囲のSSは、大部分が植物プランクトンであると推定される。

しかし、(POC/SS)比がこれらよりも低いものもある。これらについては、デトリタスのシリカが関与しているとも考えられる。そこで、シリカの実態を究明するため、無機成分について次節で検討した。

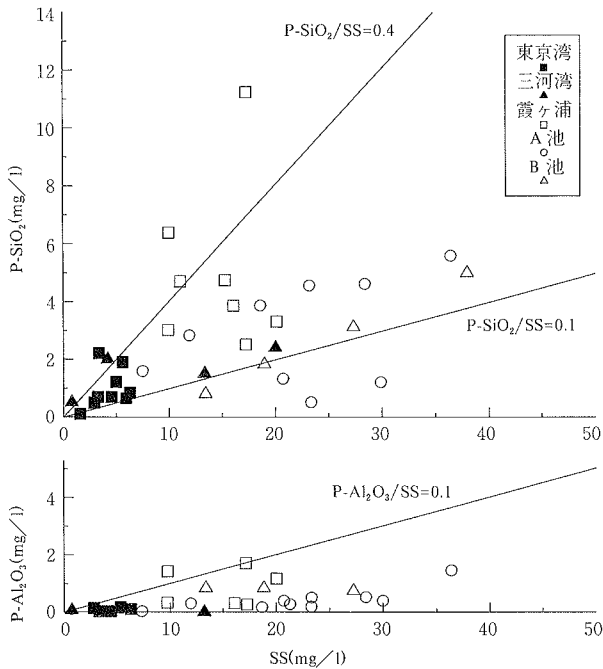


図-7 SS濃度とP-SiO<sub>2</sub>およびP-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>濃度の関係

なお、窒素、リンについても測定し、SSについて興味ある結果が得られた。それらについては、別に報告する。  
**4.4.2 SSの無機成分** VSSを有機物質とみなすと、無機成分のSSに占める質量割合は、20~70%であった。

この無機成分のうち、珪藻および土粒子に由来する懸濁態シリカ (P-SiO<sub>2</sub>) と土粒子に由来する懸濁態アルミナ (P-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) の分析を行った。図-7には、SS濃度とP-SiO<sub>2</sub>およびP-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>濃度の関係を示す。(P-SiO<sub>2</sub>/SS)質量比はおおよそ0.1~0.4であった。一方、(P-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/SS)比は(P-SiO<sub>2</sub>/SS)比に比べて低く、霞ヶ浦土浦港で0.06~0.14, その他は0.06以下であった。

水中で沈降性の悪い粘土画分に存在する土粒子は、シリカ/アルミナ比が1:1型,一部は2:1型の珪酸塩鉱物であり,その(SiO<sub>2</sub>/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>)質量比(ケイバン比)はそれぞれ1.18, 2.36である。図-8にはP-SiO<sub>2</sub>とP-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>の関係を示すが,多くの点はこれらのケイバン比より大きな値をとった。このことは,土粒子以外に由来するシリカ,すなわち,珪藻に由来するシリカが存在することを示している。

ここで,土粒子について,1:1型粘土鉱物と仮定し,P-SiO<sub>2</sub>およびP-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>の分析値より,珪藻のシリカと土粒子のそれぞれがSSに占める割合を試算した。珪藻に由来するシリカ(Opal)は,P-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>から換算した土粒子由来の量をP-SiO<sub>2</sub>から差し引いて求めた。この結果,P-SiO<sub>2</sub>の大部分は珪藻に由来しており,SSに占める割合は海域と霞ヶ浦では20~30%,A,B池では20%以下と試算された。一方,土粒子由来のSS(Clay)質量はSS全体の20%以下であった。

以上より,植物プランクトンに由来する有機成分,同じく植物プランクトンの珪藻に由来するシリカがSSの

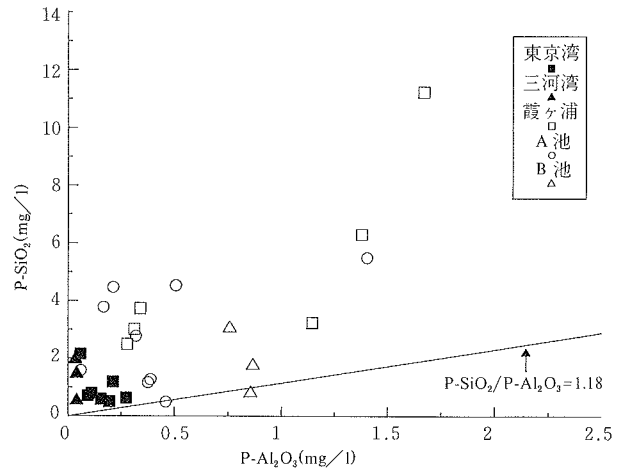


図-8 P-SiO<sub>2</sub>濃度とP-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>濃度の関係

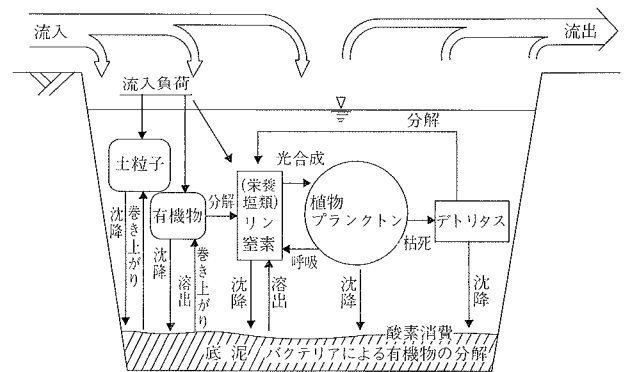


図-9 閉鎖性水域の水質汚濁機構の概念図

表-4 SSの構成成分の割合(推定値)

SS (mg/l)	SS組成 (%)		
	有機成分	Opal	Clay
東京湾 (1.4~6.2)	54 (31~74)	21 (5~66)	10 (5~17)
霞ヶ浦 (9.7~34)	49 (33~70)	29 (10~54)	16 (4~36)
A池 (7.3~37)	59 (41~82)	14 (2.5~20)	4.4 (2.1~9.8)

注1) 有機成分はVSS, OpalとClayはシリカおよびアルミナから試算した

注2) カッコ内はそれぞれの最小,最大値

主要な構成成分であると判断された。

### 5. 水質浄化対策に関する一考察

海域,湖,池沼などの閉鎖性水域の透明度を改善・維持し,良好な水環境を創出するためには,透明度に影響を与えるSSの主たる構成成分である植物プランクトンの現存量や増殖量を制御することが重要な課題である。

この植物プランクトンの増殖,分解過程を中心とした閉鎖性水域の水質汚濁機構の概要を図-9に示す。

植物プランクトンは,流入あるいは底質から溶出してくる窒素,リン等の栄養塩類を吸収し,光合成を行って

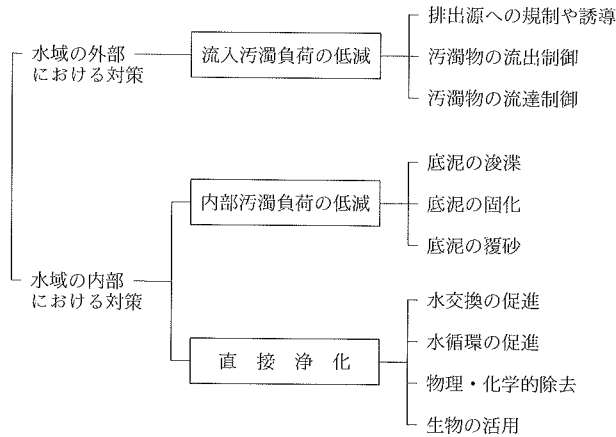


図-10 水域の水質浄化対策

増殖する。従って、水質浄化対策としては、まず、栄養塩類の低減化対策として、流入汚濁負荷の低減や浚渫、覆砂などによる底質からの溶出負荷の低減が必要である。しかし、これらの対策は水域全体について短期間で実施することが困難であり、また、底泥除去に関しては処分地不足といった問題もある。

そこで、既に汚濁した水域では、水を直接浄化する対策も前述の内容に加えて必要である。この直接浄化の考え方は、水交換あるいは循環ろ過などによって、浮遊する植物プランクトンおよびデトリタスの一部を系外に除去するなどして、植物プランクトンの増殖量とのバランスを保ち、SS濃度を低く維持することにある。

これらの浄化技術は図-10に整理した。こうした浄化対策においては、コストの低減、省エネルギーを図るため、自然の浄化機能を積極的に活用することが有効な手法となる<sup>15),16)</sup>。また、これらの技術は、それぞれ、水域によって適用性が限定される。従って、広域にわたる水域の場合、個々の浄化技術によって対処することは困難であり、種々の浄化技術を複合的に適用していくことが必要である。

## 6. まとめ

水辺の親水性の指標として用いられる透明度とこれに影響するSSの実態を把握するため、5水域において水質調査を実施した。以下には、ここで得られた知見を記す。

① 透明度とSS濃度の関係は水域によりやや異なっていたが、全体としては、SS濃度が大きくなるほど透明度は低下する傾向がみられた。

② 有機成分である懸濁態有機炭素のSSに占める割

合を検討し、植物プランクトンと推定されるものと無機成分の多いものが存在した。

③ 珪藻と土粒子に由来する懸濁態シリカ濃度、土粒子に由来する懸濁態アルミナ濃度を計測し、珪藻に由来するシリカを求めた。その結果、懸濁態シリカの大部分が珪藻に由来していることが判明した。

④ 以上の結果より、SSの大部分は植物プランクトンに由来することが明らかとなった。

今後は、SSの主たる成分である植物プランクトンの増殖、分解、沈降過程等に注目し、有機底質からの溶出負荷低減技術や水の直接浄化技術に関して検討していく。

## 参考文献

- 1) シーブルーテクノロジー研究委員会：快適環境の創造に向けて「シーブルー計画」, p. 37~38, (1989. 3)
- 2) 内田唯史, 他：海岸の環境アメニティー資源と住民意識, 資源環境対策, Vol. 29, No. 6, p. 605~616, (1993)
- 3) Shun-ei Ichimura: On the standing crop and productive structure of phytoplankton community in some lakes of central Japan, 植物学雑誌, Vol. 69, No. 811, p. 7~16, (1956. 1)
- 4) 坂本 充, 他, (社)日本水質汚濁研究協会編：湖沼環境調査指針, 公害対策技術同友会, p. 226~236, (1982)
- 5) 半谷高久, 他：水質調査法, 丸善, p. 213~215, (1985)
- 6) 西條八束編：内湾の環境科学, 培風館, p. 9, (1984)
- 7) 茨城大学農学部霞ヶ浦研究会編：霞ヶ浦, 三共出版, p. 11, (1977)
- 8) (財)日本規格協会, JIS K 0102, p. 32~33, p. 41~43, p. 54~56, p. 174~176, p. 182~185, (1993)
- 9) 半田暢彦, 他：湖沼調査法, 古今書院, p. 164, (1987)
- 10) Lorenzen, C. J.: Determination of chlorophyll and pheo-pigments—spectrophotometric equations—, Limnol. Oceanog., 12, p. 343~346, (1967)
- 11) 気象庁：海洋観測指針, (財)日本気象協会, p. 257~264, (1990)
- 12) (財)日本規格協会, JIS K 0101, p. 191~196, p. 258~263, (1991)
- 13) 丹羽憲仁, 他：浄水の技術, 技報堂, p. 38, (1985)
- 14) T. R. Parsons, et al.: On the chemical composition of eleven species of marine phytoplankters, J. Fish. Res. Bd. Can., Vol. 18, No. 6, p. 1001~1016, (1961)
- 15) 楠田哲也 編著：自然の浄化機構の強化と制御, 技報堂, 242 p., (1994)
- 16) 辻 博和, 他：石積み浄化堤による海水浄化工法の開発, ヘドロ, No. 61, p. 47~52, (1994)