

(54) 多摩川河口部底質の時系列変化に関する研究

Study of Time Series Analysis on Riverbed Sediments in Tama River Estuary

泉澤 洋一*, 小泉 明*, 山崎 公子*, 横山 勝英*, 山崎 正夫**

Youichi IZUMISAWA*, Akira KOIZUMI*, Kimiko YAMAZAKI*, Katsuhide YOKOYAMA*, Masao YAMAZAKI**

ABSTRACT ; This paper examines the impact of the growth of sewerage population in the Tama River watershed and its impact on the bottom sediment of the Tama River estuary. Vertical core samples for sediment quality analysis were collected from five locations from the Tama River estuary toward the center region of Tokyo Bay. Each core was cut into 2.5~5 cm sections. Grain size, volatile solids, and nonyl phenol levels were measured from core sections and data were obtained revealing changes in the vertical and horizontal directions of the sediments. The relationship between sediment quality and the percentage of sewerage population is analyzed and the results indicate levels of nonyl phenol in the sediment decreases as the percentage of sewerage population increases. This analysis also provides a new model for calculating sediment settling velocity.

KEYWORDS ; riverbed sediments, grain size, volatile solids, nonyl phenol, sewerage population, Tama River estuary.

1. はじめに

近年、我が国における河川水質は、一部の河川については排水基準の制定や下水道システムの整備によって改善の方向へ進んでいる¹⁾。これは、自然環境として重要な場所である河口部の底質にも影響を及ぼしていると考えられる。我が国の沖積河川の河口部は、河床勾配が水平に近く、海水と河川水との接触により流速が低下するとともに塩水による凝集作用が働く。そのため上流から運ばれてきたシルト・粘土といった微細土砂が堆積しやすく、これによって遠浅の地形や干潟が形成される²⁾。形成された干潟には底生生物やアサリ、シジミなどが生息しており、これらの生物は流域からの排水を濾過し、水質を浄化するのに寄与している。このため、沖積河川の河口部は自然環境として非常に重要な場所であるといえよう。河川流域における都市活動の発展と下水道の普及状況は、河口部に多大な影響を与えている。環境に対する社会の関心も高まっている今日、河口部底質中の汚濁物質の時間スケールでの変化を調査し、自然環境に配慮した新たな河川維持管理技術の構築が求められている。

従来の河口部に関する研究は、主に上流からの土砂供給、河口部への土砂堆積、潮流流や塩水楔による堆積土砂の巻き上げ、といった土砂動態に関わる現象を解明するものが多く³⁾、河口部底質中の汚濁物質を時間スケールで検討しているものは少ない。また、時間スケールの検討に際しては、年代毎の表層測定値を用いているものが多く、現在の底質の鉛直分布から検討しているものは少ない。一般に底質の堆積構造は過去の環境を封印しているため、底質の物性を鉛直方向に分析することで経年変化を読みとれる可能性が高い。

そこで本研究では、近年宅地開発をはじめとして道路や下水道の整備が進行してきており、河口部へ運ば

* 東京都立大学大学院工学研究科 (Graduate School of Engineering, Tokyo Metropolitan University)

** 東京都環境科学研究所 (Tokyo Metropolitan Research Institute for Environmental Protection)

れる汚濁物質も変化してきていると考えられる多摩川の河口部を対象とし、下水道の普及が河口部底質へ与える影響を、底質中に含まれる有機物の含有量を示す強熱減量、並びに、合成洗剤として広く使用され、その含有量は下水道の普及に関連性が強いとされている⁴⁾ノニルフェノール含有量の鉛直分布を調べることにより時間スケールでの変化を把握することを目的とする。以下、2.では底質採取地点、粒度試験方法、汚濁物質の測定方法について述べる。3.では底質粒度の平面・鉛直分布を調べ、河口部の堆積状況を把握する。4.では、時間スケールでの強熱減量・ノニルフェノール含有量と下水道の普及との関連性について検討するとともに、底質の堆積速度を算出する新たな方法も提案する。

2. 研究方法

2.1 底質採取の地点及び方法

本研究で使用した底質試料は、図1に示す5地点で採取した。河口0kmからの各地点までの距離は、上流へ2.0km(A地点)、湾央へ1.3km(B地点)、3.9km(C地点)、6.1km(D地点)、9.4km(E地点)である。採取は、主として東京都環境局の定期調査に合わせて行った(表1)。内径6cm、長さ70cmのコアサンプラーにより採取した柱状試料を5cmごとに切断し、表層部0~5cmの底質については、さらに0~2.5cm及び2.5~5cmに切断した。いずれの底質試料も、前処理として2mmメッシュのナイロン製ふるいで粗大物を除去し、2000rpmで20分間遠心分離して上澄み水を除去した後、湿試料として用いた。

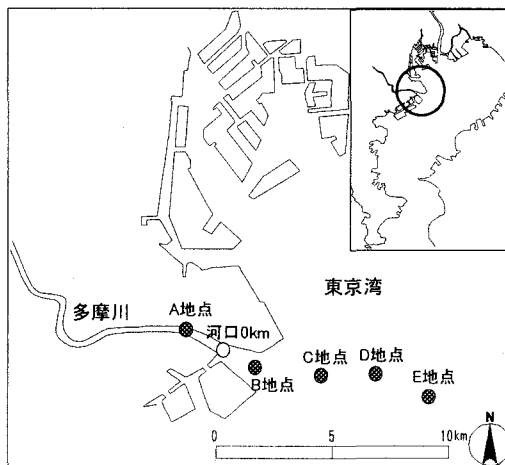


図1 底質採取地点図

表1 底質試料採取日時

採取地点	A地点	B地点	C地点	D地点	E地点
採取日時	2001年10月31日	2001年11月1日	2002年7月2日	2002年7月2日	2002年7月1日

2.2 粒度試験方法

粒度試験には、レーザー回折式粒度分析装置(SALD-3100)を使用した。本装置は、試料粒子にレーザーを照射し、粒子に当たって回折散乱した光の強度分布を計測することで粒度分布を計算している。計測粒径範囲は $0.05\mu\text{m}$ ~ $3000\mu\text{m}$ (3mm)である。本研究で使用した底質試料はシルト・粘土分が多量に含まれ粒子間の結合が強いと想定され、これを分離する目的で、試験に際しては超音波振動を2分間かけ、試料の調整を行った。以下に粒度試験の手順を示す。

(Step1) 準備：レーザー光軸のチェック。

(Step2) 零点調整

(Step3) 試料の投入：回折／散乱強度が40~60%に入るように試料を投入する。

(Step4) 粒度分布の測定

①試料を循環させた状態で3回以上測定し、洗浄した後、再び同じ試料を投入し、3回以上測定を行う。

②1、2回目の測定結果が類似していればそこで終了とする。違いが見られた場合は、3回、4回・・・と回数を増やし、同じ試料で粒度分布波形が3回以上類似するまで測定を続ける。

(Step5) 測定結果の整理：3個以上の類似した測定結果を平均し、その試料の粒度分布とする。

2.3 汚濁物質の測定方法

底質の強熱減量は800℃、4時間加熱により求めた。また、以下にノニルフェノールの測定手順を示す。

(Step1) 試料調整

ガラス製10ml遠沈管に湿試料2～3gを測り取り、アセトン5mlを加えて均一に混合する。

(Step2) 抽出液採取

超音波洗浄器で15分間抽出(約5分毎に攪拌混合)を行い、2000rpmで10分間遠心分離し、上澄みを採取する。

(Step3) 繰り返し抽出：Step1～2を2回繰り返す(合計3回抽出)。

(Step4) アセトン抽出液を500mlの超純水に添加

毎回得られる抽出液をガラス製ピペットで抜き取り超純水500mlに溶解する。

(Step5) 固相抽出

定量ポンプを用いてポリマー系固相(Waters Sep-Pak PS2)にノニルフェノールを吸着させ、数mlの超純水を流して固相を洗浄した後、メタノール5mlで溶解する。溶解液は窒素ガス吹き付けにより1mlまで濃縮し、濃縮液の一部について蛍光光度検出器付き高速液体クロマトグラフ(HPLC)で測定した。

3. 底質の粒度分布

3.1 底質粒度の平面分布

2.2の粒度分布測定手順に従い、図1に示した5地点の表層部(0～2.5cm)の粒度分布を測定した。結果を図2、表2に示す。

図2より、多摩川河口部の底質は河口から湾奥に向かい粒径が小さくなっていることが分かる。さらに、B地点とC地点の間で非常に明確な差が見られる。この差は表2で示されているように、B地点で71.2%存在していた細砂分がC地点では2.8%と減少していることから分かる。そこで、この原因として一般的に考えられる多摩川河口部の断面形状を調べてみた(図3)。図3より、多摩川の河口部はB地点付近を境に急激に深さを増しており、その後はなだらかに深さを増している。これより、多摩川へと流入した底質材料のうち、砂のように自重の重い材料はB地点よりも上流で沈降し、シルト・粘土といった自重の軽い微細土砂は浮遊しながらB地点以降に降り積もる。したがって、B地点とC地点の明確な差は沖積河川河口域特有の河口テラス形成作用によるものだと考えられる。

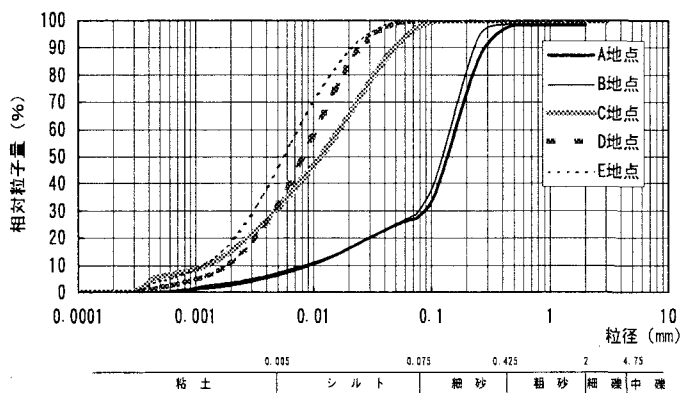


図2 表層(0～2.5cm)の粒度分布測定結果

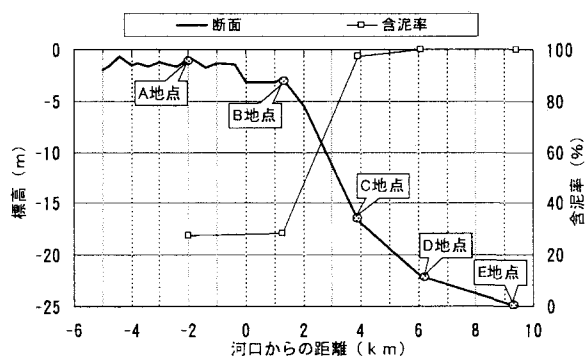


図3 河口部断面と各地点の含泥率

表2 表層の底質材料構成割合

採取地点	A地点	B地点	C地点	D地点	E地点
粗砂分 (%)	2.8	1.4	0.0	0.0	0.0
細砂 (%)	69.8	71.2	2.8	0.1	0.1
シルト分 (%)	20.5	19.7	65.8	55.0	53.7
粘土分 (%)	6.9	7.7	31.4	44.9	46.2

3.2 底質粒度の鉛直分布

前節では、河口部表層粒度の平面分布を調べ、多摩川河口部が河口テラスを形成していることを明らかにすることができた。

そこで本節では、微細土砂が堆積しやすいC、D、Eの3地点に着目し、河口テラスの形成が時間スケールでどのような変化をしてきているのかを把握するために、現在の底質(0~40cm)の粒度分布を5cm間隔で測定した。3地点の表層部(0~2.5cm)、中間部(15~20cm)、最深部(35~40cm)の粒度分布測定結果を図4に、相対粒子量50%、90%に対する粒径(D_{50} 、 D_{90})を表3に示す。

図4より、C、D地点においては最深部の粒径が最も小さく、表層に近づくにつれ粒径は徐々に大きくなっている。また、最も湾央であるE地点においては表層から最深部までの粒度分布にほとんど変化はない。これより、C、D地点の粒度分布が右へと変化してきているということは、これまでC、D地点よりも河口0km側で堆積してしまい到達できなかった比較的大きな粒径の土砂が、近年では堆積しはじめていることを示している。

さらに、表3よりC、D地点の表層と最深部の D_{90} 、 D_{50} の変化を比較すると、C地点の方がD地点よりも変化が大きいことが分かる。

これらの結果より、多摩川河口部の河口テラスは湾央へ向かい徐々にだが前進してきているといえる。今後は、河口テラスの前進により最も湾央に近いE地点においても、粒径の大きい土砂の堆積により、粒度分布の形状が現在よりも右側へ移動すること考えられる。

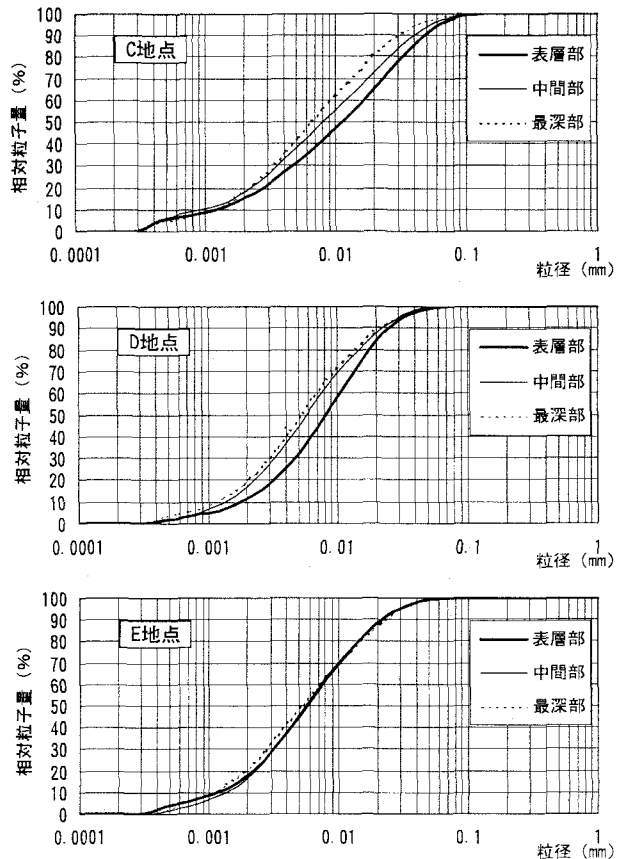


図4 各地点鉛直方向の粒度分布測定結果

表3 D_{90} (D_{50}) の測定結果 (単位: μm)

採取地点	C地点	D地点	E地点
表層部	48.8 (11.5)	25.1 (8.2)	22.4 (5.7)
中間部	40.3 (8.1)	22.6 (5.8)	24.7 (5.6)
最深部	30.9 (6.7)	21.6 (5.3)	23.6 (5.7)

4. 下水道の普及と底質の変化

ここでは、多摩川流域における下水道の普及が、河口部の底質に対してどのような影響を与えているのかを把握するために、鉛直方向の汚濁指標と下水道の普及率に着目し、関連性について分析する。図5に示すように、東京都、特に多摩地域の下水道普及率は著しい増加をしており、底質を採取した2002年度においては、多摩地域で94%、都平均で98%であった⁵⁾。

4.1 強熱減量の変化

汚濁物質の有機物に着目し、底質中の有機物の含有量を示す強熱減量を測定した。測定地点は、図1のC、D、Eの3地点における表層から最深部までのそれぞれ8ヶ所である。この結果を整理した図6より、すべての3地点において強熱減量は表層に向かうにつれ増加していた。しかしながら、1972年の文献値と2002年の表層の測定値を比較した著者の研究⁶⁾では、1972年で10.81%、2002年で8.84%と下水道の普及に伴い強熱減量が減少傾向にあった。

今回の鉛直方向の測定値に、河川水質の悪化時点の履歴が残されていない理由としては、一般的に有機物は生物分解性が高く、底質に含まれる有機物が微生物などにより分解され、底質の下層部ほど経過時間が長いこと生物分解による有機物減少量が大きいことがあげられる。

これらの結果より、現時点における鉛直方向の底質を用いて汚濁物質の時系列変化を強熱減量で把握することは困難であると考えられる。

そこで、下水処理では大部分が除去され、かつ、生物分解性が低いとされているノニルフェノールに着目し、底質中のノニルフェノール含有量と下水道の普及との関連性について分析することにした。

4.2 ノニルフェノールの変化

ノニルフェノール(Nonyl Phenol: 以下NPと呼ぶ)とは、合成洗剤に含まれる非イオン系界面活性剤(ノニルフェノールエトキシレート)の分解生成物であり、内分泌攪乱作用があるとされている物質である⁷⁾。

図7にC、D、Eの3地点における表層から最深部までの測定結果を示す。この結果より、多摩川河口部底質中のノニルフェノール含有量はC地点では30~35cm、D地点では15~20cm、E地点では10~15cmにおいてピークを有する分布をしており、そのピーク深度を境に減少してきていることが分か

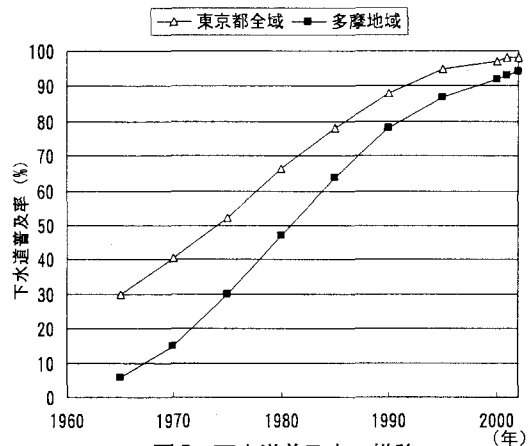


図5 下水道普及率の推移

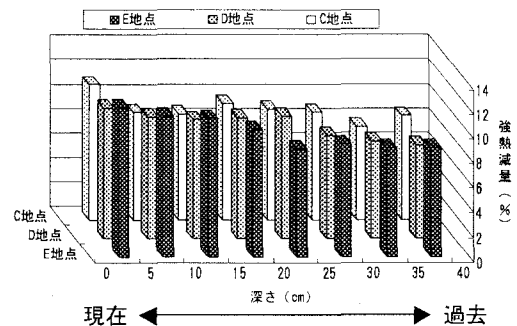


図6 深さ別の強熱減量測定結果

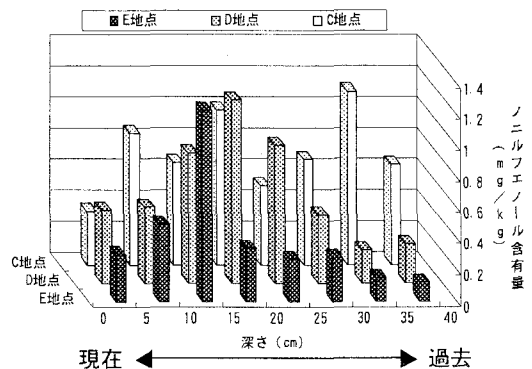


図7 深さ別のNP含有量測定結果

る。これは下水道の普及により、以前は未処理のまま放流されていた生活排水などが、近年の下水道の普及と高度処理化に伴い、安全な処理水として放流されていることを示していると考えられる。

4.3 底質の堆積速度

前節において、3地点のNP含有量はともにピークが顕著であるという結果が得られた。そこで本節では、このピーク深度に対応するピーク年度を非イオン系界面活性剤の生産量⁸⁾と下水道普及率により求め、多摩川河口部の底質堆積速度を算出する新たな方法を提案する。算出方法は、はじめに、(1)式を用い非イオン系界面活性剤の推定流出量(Y)を算定し、この値が最大である年度を各地点のNPのピーク含有量を示す深度に対応する年であると設定した。次に、(2)式により各地点の底質堆積速度を算出する。なお、(1)式中の0.97は下水処理によるNPの除去率⁴⁾を示している。

$$Y(i) = X(i) \times \left(1 - \frac{a(i) \times 0.97}{100}\right) \times \frac{TP(i)}{P(i)} \quad \dots\dots\dots(1)$$

$$SV = \frac{PD}{PY} \quad \dots\dots\dots(2)$$

ここで、

$Y(i)$ ：非イオン系界面活性剤推定流出量 (ton/年)、 $X(i)$ ：非イオン系界面活性剤生産量 (ton/年)、

$a(i)$ ：下水道普及率 (%)、 $P(i)$ ：全人口、 $TP(i)$ ：多摩地域の人口、 i は年度を示す。

SV ：底質堆積速度 (cm/年)、 PD ：NPのピーク含有量を示す深度 (cm)、 PY ：ピーク年度からの経過年数である。

(1)、(2)式による多摩川河口部の底質堆積速度算出の適用可能性を検討するために、非イオン系界面活性剤生産量の1955年から2000年までの5年毎のデータを用い算出することを試みる。ここで、年度において5年おき、底質試料において5cm間隔のデータを用いているため、底質の堆積速度の推定範囲として、各々±2.5年並びに±2.5cmの幅を考慮するものとする。(1)式を用い推定流出量を算出した結果を図8に示す。図8より、推定流出量が最も多い年は1980年となり、これをNP含有量のピーク深度に対応する年度であると設定した。なお、ノニルフェノールエトキシレートを含む排水が河川に放流され河口に堆積するまでの数日に及ぶ時間遅れと、NPに分解生成するまでの不確定な時間遅れも考えられるが、本論文では5年単位での分析を行っていることから、これらの時間遅れは無視できると判断した。(2)式中の PY に2002年から1980±2.5年を引いた値を代入し、C、D、Eの3地点における底質堆積速度を算出した結果、表4を得た。表4

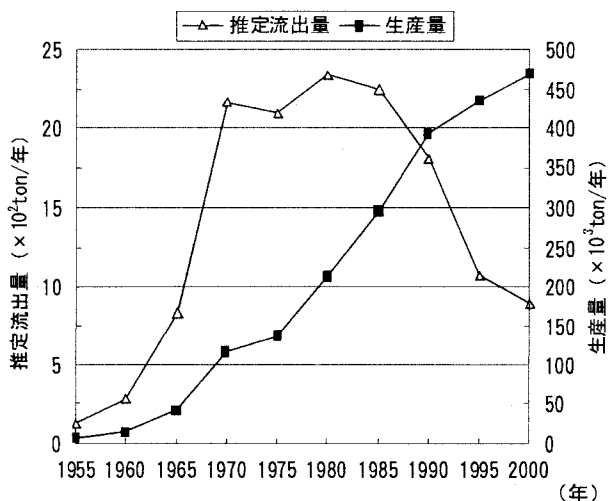


図8 非イオン系界面活性剤の推定流出量と生産量

表4 多摩川河口部の底質堆積速度

地点番号	河口(0km)からの距離(km)	底質堆積速度 (cm/年)		
		下限値	推定値	上限値
C	3.9	1.22	1.48	1.79
D	6.1	0.61	0.80	1.03
E	9.4	0.41	0.57	0.77

より、多摩川河口部の底質堆積速度は約 0.4~1.8cm/年となった。また、測定地点により堆積速度は異なり、湾央へ向かうにつれ堆積速度は減少していることがわかった。既往の研究によれば、多摩川沖約 5km 地点の堆積速度を放射性鉛 (^{210}Pb) を利用し算出した結果は 1.20cm/年であり⁹⁾、多摩川沖約 8km 地点の堆積速度を 1707 年の富士山の噴火による火山灰堆積から年代を特定し算出した結果は 0.40cm/年であった¹⁰⁾。以上のことから、NP 含有量を用いた底質堆積速度の算出方法による結果は概ね整合している。さらに本方法は、既往の研究で検討している 100~300 年の長い時間スケールではなく、数十年という短い時間スケールでの堆積速度を推定可能であり、有用であると考えられる。

5. おわりに

本研究では多摩川の河口部底質に着目し、底質粒度の平面分布・鉛直分布を調べることで、時間スケールでの底質の堆積状況を把握した。その上で、近年の下水道の普及による河口部底質への影響を、鉛直方向の強熱減量並びにノニルフェノール含有量を測定することによる時系列的な分析を行った。さらにその過程において、多摩川河口部の底質堆積速度をノニルフェノール含有量と下水道普及率により算出する方法を提案し、以下の結論を得た。

- 1) 多摩川河口部底質は、河床勾配が比較的水平に近い B 地点以前においては細砂分が含まれているが、深度を急激に増す B 地点以降ではほぼ全てシルト・粘土分で構成されていた。また、河口テラスは湾央へ向かい前進していることが明らかとなった。
- 2) 下水道の普及による底質への影響を強熱減量の鉛直分布から解明することは困難であったが、ノニルフェノール含有量の鉛直分布からは有効性が認められ、近年では減少傾向にあることが分かった。
- 3) 非イオン系界面活性剤生産量と下水道普及率から、ノニルフェノールのピーク含有量に対応する年度を求め底質の堆積速度を算出する方法を提案し、その有用性を示すことができた。

以上の結果、本論文では河口部底質の物理的並びに化学的特性を分析し、後者に関しては、下水道の普及による底質への影響について、ノニルフェノール含有量に着目することにより、河川水中の汚濁物質の時系列的な変化を積分値としての底質によって分析するとともに、底質の堆積速度を算出する新たな方法を示すことができた。なお、本研究の一部は東京都立大学特定重点研究費の助成により行なわれたものであることを付記する。

〔参考文献〕

- 1) 小泉明・山崎公子：下水処理場放流水の汚濁負荷量と河川水質との関連分析, 土木学会, 環境システム研究論文集, Vol. 26, pp. 157-163, 1998
- 2) 横山勝英・藤田光一：多摩川感潮域の土砂動態に関する研究, 土木学会, 水工学論文集, 第 45 巻, pp. 937-942, 2001
- 3) 宇野誠高・横山勝英・森下和志・高島創太郎・大角武志：熊本県白川河口域における土砂動態, 土木学会, 海岸工学論文集, 第 49 巻, pp. 561-565, 2002
- 4) 国土交通省：平成 12 年度下水道における内分泌攪乱化学物質(環境ホルモン)に関する調査の結果について, 2001
- 5) 東京都下水道局：東京都下水道局事業概要平成 15 年版, 2004
- 6) 山崎公子・小泉明・山崎正夫・泉澤洋一：多摩川河口部の底質に関する研究, 日本水環境学会年会講演集, p. 255, 2003
- 7) Ahel M., Giger W. and Koch M. : Water Research, Vol.28, No.5, pp. 1131-1142, 1994
- 8) 日本界面活性剤工業会：日本の界面活性剤の過去 50 年間の成長経緯(1), (<http://www.gesui.metro.tokyo.jp/gijyutou/jgl5/jgl5.htm>)
- 9) 松本英二：沿岸海域汚染に関する調査活動, 地質ニュース, 319 巻, pp. 52-58, 1981
- 10) 貝塚爽平：東京湾の地形・地質と水, 築地書館株式会社, pp. 188-189, 1993