

# 環境ホルモン物質の河道内貯留に関する基礎的研究

## STUDY ON THE ENDOCRINE DISRUPTING CHEMICALS STORED IN THE SURFACE LAYER OF RIVER CHANNEL

関根正人<sup>1</sup>・大内良二<sup>2</sup>

Masato SEKINE and Ryoji OOUCHI

1 正会員 工博 早稲田大学教授 理工学部社会環境工学科 (〒169-8555 東京都新宿区大久保 3-4-1)

2 学生会員 早稲田大学大学院理工学研究科 (同上)

The problem of endocrine disrupting chemicals in river water came to be focused on in recent years, and there were several field measurements of water itself. But the information about the chemicals storing in the sediment which constitutes a river channel has not investigated. The objective of this research is to understand where and how the endocrine disrupting chemicals are stored on and under the ground surface of river channel. The scenario about the chemicals storing was discussed on the basis of the result of numerical experiment by Sekine et al (2005). Field investigation in Tama-river was conducted to verify the validity of this scenario.

**Key Words:** *endocrine disrupting chemicals, deposition of silt, channel evolution, field measurement.*

### 1. 序論

近年、ダイオキシンによる土壤汚染やたとえば多摩川における鯉の雌性化といったいわゆる環境ホルモン物質に関わる問題が顕在化し、これに伴って環境ホルモン物質が生態系に及ぼす影響を危惧する声が高まっている。こうした中、国土交通省や環境省、各都道府県により全国の多くの河川において環境ホルモンに関する調査が実施されてきた。しかし、河道構成材料に付着した形で存在する環境ホルモン物質に関する調査はほとんど行われておらず、河道内のどのような場所により多くの環境ホルモン物質が存在するかといった知見は十分に得られていないのが現状である。

よりよい河川環境を実現するためには、河道内に放出される環境ホルモン物質の量を減少させることとあわせて、同物質が多量に存在するような河道内の区域を特定し、平水時にこれらを除去することが望ましい。そこで、著者らは、これまでに進めてきた河道変動に関する土砂水理学的研究を踏まえて、供給された環境ホルモン物質が河道内に貯留されるまでの一連のシナリオについて検討した。さらに、そのシナリオを実証することを目指して、「環

境ホルモン物質が河道内のある特定の区域に偏って貯留される実態」の解明に努めた。具体的には、平成17年2月に多摩川において現地調査を実施し、採取した土壌サンプルを定量分析することで、環境ホルモン物質の河道内分布の実態を明らかにしており、シナリオが概ね妥当なものであることを検証することができた。

### 2. シナリオの概要

ここでは、著者らの想定する「環境ホルモン物質が河道内に貯留されるシナリオ」の概要について説明する。

まず、環境ホルモン物質の河道内への流入パターンとしては、(1) 下水処理場からの排水とともに流入する、(2) 降雨時に雨水に混入して流入する、といった二通りのパターンが考えられる。次に、河道内に流入した環境ホルモン物質のその後の輸送経路としては、(1) そのままの状態での輸送され、海域にまで運び去られる、(2) 洪水期間中に、河川水中に浮遊状態で輸送されるシルトなどの微細土砂の表面に吸着し、この土砂とともに輸送される、という二つの可能性が考えられる。本研究では、これまであ



図-1 調査対象区間の概要

測線0～3は多摩川河口より28.2km, 28.45km, 28.6km, 28.7km地点を表す。また、調査当日の右岸水際線を青線で示した。

まり検討されてこなかった後者の可能性、すなわち、環境ホルモン物質が微細土砂に吸着した形でどのように輸送され、河道内に貯留されることがあり得るかに注目して検討を行うこととした。

ところで、上記のように環境ホルモン物質の一部が微細土砂に吸着した状態で輸送されるとするならば、その微細土砂が堆積を起こし易い場所ほど環境ホルモン物質が存在していることになる。そこで、本研究では、河道変動に関する著者らのこれまでの研究成果<sup>1)</sup>を踏まえて、このような微細土砂が河道内のどのような場所に堆積しているのかについて検討することとした。関根・矢島ら<sup>1)</sup>によれば、以下のような知見が得られている。

- (1) 植生が群落状に繁茂している区域では、流速の低下とシルトなどの微細土砂の捕捉とが同時に引き起こされ、結果としてテラス状の地形が形成されることがある。また、これらの傾向は植生群落の配置や河道の形状には依らない。
- (2) 植生群落内の河道表面では、相対的に微細土砂の含有率が高い。
- (3) これは、植生群落内では浮遊土砂を運び込むことはあっても、これを再浮上させるほどの掃流力がないためである。

従って、環境ホルモン物質が河道内に貯留されるとするならば、それは、より顕著に微細土砂が堆積しているような植生群落の根元付近ほどその可能性が高いと推察される。

以上をまとめてシナリオの概略を示しておく。

- (1) 下水処理水あるいは雨水とともに供給された環

境ホルモン物質の一部が、洪水期間中に浮遊状態で存在する微細土砂に吸着し、そのままの状態で輸送される。(2) その微細土砂の一部は、植生群落により捕捉され、特に水際付近において堆積する。(3) 植生群落内では微細土砂を再浮上させる程の掃流力がなく、再浸食が生じ難いため、結果としてこれらの微細土砂がその場に貯留されることになる。なお、上記の(1)に関して、過去の出水により既に環境ホルモン物質の吸着した微細土砂が河道上に存在している場合には、これが洪水時に巻き上げられることで再び水中に戻されることもある。

このシナリオの是非に関しては、現地河川において確認する他に術はないことから、本研究では次に説明するような現地調査を行うこととした。

### 3. 河道内貯留に関する現地調査

#### (1) 現地調査の概要

著者らは、環境ホルモン物質が河道内に貯留されている実態を把握し、前章で説明したシナリオの妥当性を検証することを目的として、実河川における現地調査を実施した。以下に本調査の概要を示す。

調査は平成17年2月21日に実施された。当日の天気は晴れであったが、調査日の2日前には1～2mm/h程度の弱い雨が断続的に降り続いていた。

調査対象区間は、河口から28.0km付近の多摩川原橋から29.4km付近の稲城大橋までの多摩川の礫床区間であり、低水路右岸水際付近からその背後に広がる砂州地形上で、河道を構成する微細土砂(主

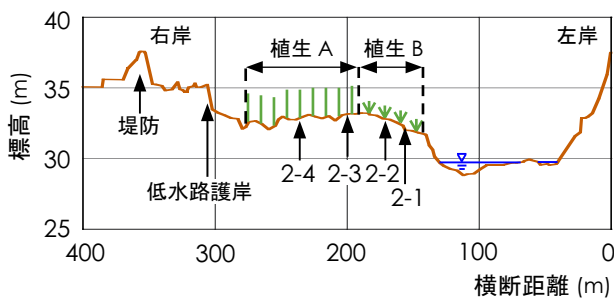


図-2 側線 2 における横断面形状

表-1 本調査での対象物質の検出量 (BPA: ビスフェノール A, NP: ノニルフェノール, B(a)P: ベンゾ (a) ピレン)

| 採取点     | 採取点の特徴    | 対象物質の検出量 (μg/kg) |      |       |
|---------|-----------|------------------|------|-------|
|         |           | BPA              | NP   | B(a)P |
| 0-1     | 礫間のシルト    | 1                | 5 未満 | 7     |
| 0-2     | 礫間のシルト    | 3                | 17   | 51    |
| 0-3     | 植生なし      | 1 未満             | 5 未満 | 7     |
| 0-4     | 植生なし      | 1 未満             | 5 未満 | 13    |
| 1-1     | 植生 C (水中) | 2                | 18   | 6     |
| 1-2     | 植生 C      | 1 未満             | 7    | 3     |
| 1-3 (上) | 植生 A      | 1                | 9    | 46    |
| 1-3 (下) | 植生 A      | 1 未満             | 24   | 130   |
| 1-4     | 植生 A      | 2                | 10   | 97    |
| 2-1     | 植生 B      | 1 未満             | 26   | 37    |
| 2-2 (上) | 植生 B      | 1 未満             | 9    | 69    |
| 2-2 (下) | 植生 B      | 1 未満             | 16   | 62    |
| 2-3 (上) | 植生 A      | 1 未満             | 15   | 71    |
| 2-3 (下) | 植生 A      | 1 未満             | 9    | 44    |
| 2-4     | 植生 A      | 2                | 9    | 14    |
| 3-1     | 植生 C      | 1                | 6    | 16    |
| 3-2     | 礫間のシルト    | 1                | 24   | 11    |
| 3-3     | 植生 B      | 1 未満             | 5 未満 | 12    |
| 定量下限値   |           | 1                | 5    | 1     |

としてシルト)を採取し、それに含まれる環境ホルモン物質の定量分析を行った。現地調査区間の概要は図-1に示す通りである。主たるサンプルの採取は、同図に示した4測線上で行われた。たとえば、一例として、測線2に沿う横断面内の地形形状を示すと図-2のようになる。この砂州地形に関して注目すべきことは、そこに植生(ほとんどが草本類)がかなり密に繁茂し、その根元付近に大量の微細土砂が堆積していたことである。そこで、このような微細土砂をサンプルとして採取し分析に供することとした。また、ここでの調査は、水位が比較的低い平成17年2月に行われており、その前年の出水時に生じた河道攪乱以降、次の出水までの比較的最長期間にわたって、ここで明らかになった状態が維持されていることになる。

参考までに、採取地点上流の特徴について簡単に触れておく。29.3km地点付近には北多摩一号水再生センターの放流口が存在しており、合流式下水道からの処理水が放流されている。さらに上流では、32.3km地点付近に南多摩水再生センターの放流口が存在しており、ここでは分流式下水道からの処理

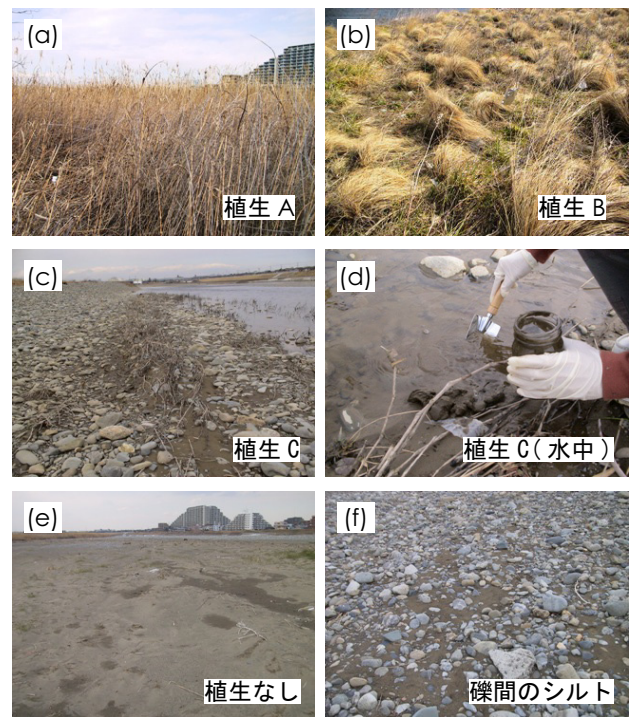


写真-1 採取点の特徴

水が放流されている。

次に、サンプルの採取に当たり留意した点について説明する。原則として採取地点の河道表層を2cm程度にわたって取り除いた後、その表面を基準として深さ10cm程度にわたって土砂を掘り出し採取することとした。その際の底面積は一辺が約10cmの正方形となるようにした。各サンプルの採取地点は図-1に示した通りである。また、採取点1-3, 2-2, 2-3においては、上記のようなサンプルを採取した後に、更にその下方の深さ20cm～30cmに当たる土砂についてもあわせて採取した。ただし、採取点0-1, 0-2, 1-1においては、シルト層の厚さが1cm～2cm程度しかなかったことから、表層をわずかに削り取った後に、採取点0-1, 1-1においては約30cm四方を、採取点0-2においては約1m四方の範囲をそれぞれ対象としてその表層の微細土砂を採取した。これは、環境ホルモン物質を定量分析するのに十分な量を確保するためである。

最後に、調査対象とするホルモン物質の選定に当たっては、「環境省のリスク評価<sup>2)</sup>」や国土交通省による「平成13年度水環境における内分泌攪乱物質に関する実態調査<sup>3)</sup>」の結果を参考としたほか、本調査に先立ち行われた予備調査の結果を踏まえて、ほとんど検出されなかった環境ホルモン物質についてはこれを除外することにし、物質の絞り込みを行った。その結果、本調査ではビスフェノール A, ノニルフェノール, およびベンゾ (a) ピレンの3種類の物質を検討の対象とすることとした。本研究では、このうち特に顕著な値ならびに分布状況の偏り

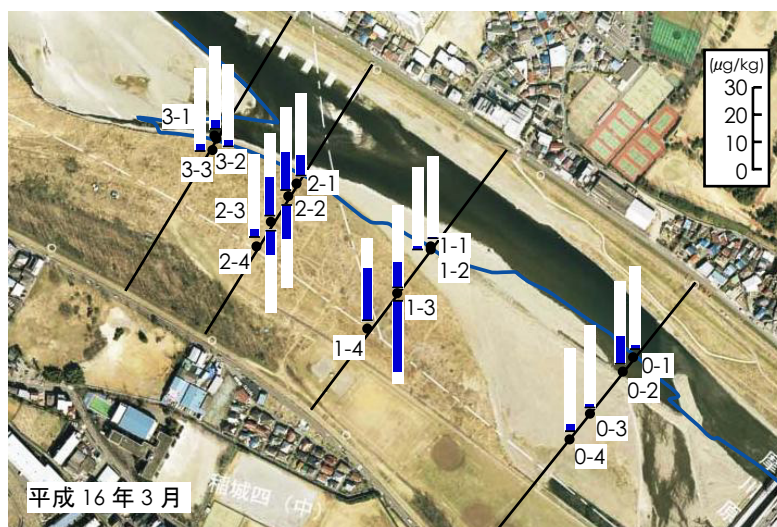
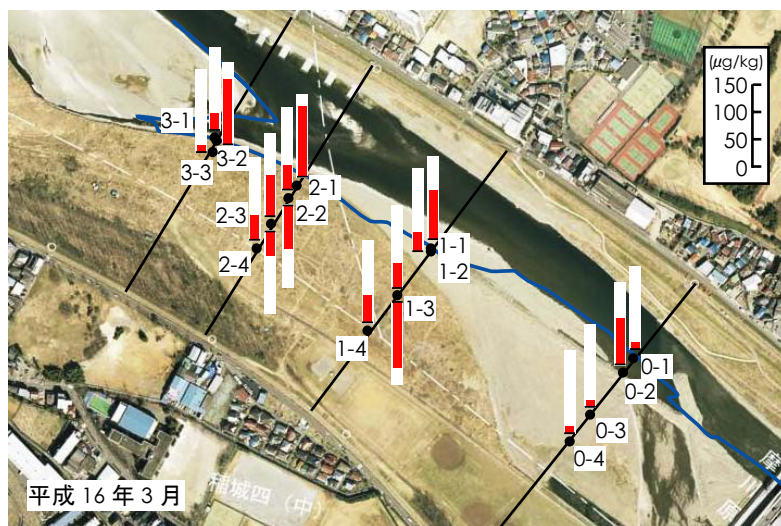


図-3 環境ホルモン物質の貯留実態：ノニルフェノール（左上）、ベンゾ（a）ピレン（右下）

を示したノニルフェノールとベンゾ（a）ピレンについて、その分析結果を説明していく。

## (2) 対象区間における環境ホルモン物質の貯留実態

現地調査によって得られた環境ホルモン物質の河道内貯留の実態について説明する。まず、表-1には調査結果をまとめた一覧を示してある。ただし、各々の採取点の状況はそれぞれ異なるため、写真-1(a)～(f)に典型的な6つのパターンを示し、各採取点がそれぞれのパターンに分類されるかを表-1中の「採取点の特徴」の欄に記載してある。次に、図-3には各採取点における対象物質の検出量を2004年3月に撮影された航空写真上に棒グラフとして重ねて表示した結果を示した。ここで、各対象物質の定量下限値は、ビスフェノールAが1 mg/kg、ノニルフェノールが5 mg/kg、ベンゾ（a）ピレンが1 mg/kgとなっており、定量下限値未満のものについてはその定量下限値の半分の値で示している。

## 4. シナリオの検証

ここでは、現地調査結果に基づき、先の章で説明した環境ホルモン物質の河道内貯留のシナリオについて検証を試みる。

図-3の左上と右上の結果を見比べると、河道内の微地形の違いに応じてノニルフェノールとベンゾ（a）ピレンの検出量の分布が大きく異なることがわかる。注目すべき点は、シナリオとして説明したとおり、植生が群落状に繁茂している区域にはシルトが大量に堆積しており、そこに多量の環境ホルモン物質が含まれていたことである。また、同一地点でありながら表層からの深さを変えて採取した土砂の間でも値は異なることがわかる。これらについては、次のように解釈している。

### (1) ノニルフェノールの調査結果について

まず、ノニルフェノールについて説明する。ノニルフェノールは下水処理場からの放流水に含まれる物質であり、放流水とともに河道内に供給される。

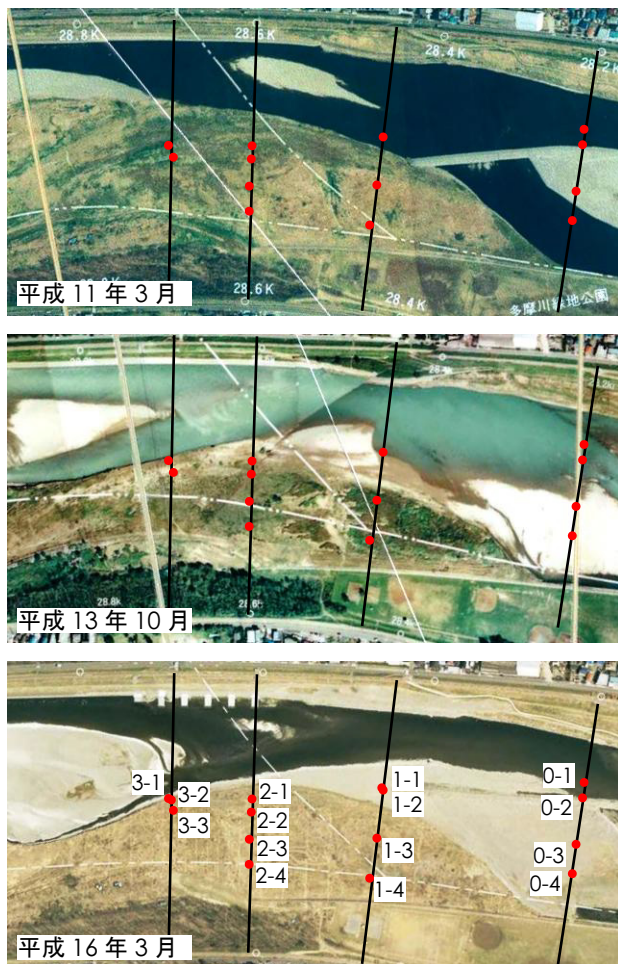


図-4 対象区間における流況の経年変化：平成11年3月（上）、平成13年10月（中）、平成16年3月（下）

従って、ある程度の冠水頻度で水に浸かっている、しかも微細土砂の堆積が生じやすいところほどこの物質が検出されやすいと予想される。たとえば、先の章で説明したように低水路水際付近に植生群落が形成されると、そこには微細土砂が顕著に堆積することが示されたが、本調査結果を全般的に見ていくと、適当な頻度で冠水する低水路水際付近のうち、植生群落が存在している区域（採取点1-1、2-1、3-2）ほど、ノニルフェノールの検出値は大きな値となっている。この下水処理場起源の環境ホルモン物質であるノニルフェノールは、前出のシナリオの通りこのような区域に貯留されていることがわかる。なお、ほぼ同様の地形でありながら採取点3-3における値が相対的に小さいのは、平成13年の比較的規模の大きな洪水の際に、この地点が洪水流の通り道となり、その後の出水によって植生群落が破壊され、地表が大きく浸食されたことが原因である。また、植生のない礫川原に位置する測線0上の採取点0-1～0-4では、ノニルフェノールの検出量が最も低い値となっている。ここでは各地点の検出量の大小を、これらの値との比較の形で議論することに

した。なお、採取点0-2、1-1で大きな値となっているが、これは、この区域に微細土砂がわずかしき存在しないため、比較的広い範囲から採取したことによると考えている。この点に関しては、後述するベンゾ(a)ピレンについても同様のことが言える。

採取点1-3、2-2、2-3においては、上層(0cm～10cm)の土砂に加えて、下層(20cm～30cm)の土砂も採取している。図-3を見ると、採取点1-3、2-2では上層よりも下層の方が検出値が大きくなっていることがわかる。このことについても河川地形の変動過程との関係で、次のように説明できる。図-4(中)には、現在の地形形成に影響を与えたと考えられる平成13年洪水直後の流況を示した。この図から砂州地形上の植生群落の一部が消失している様子が見てとれるが、概ね点3-3から2-2を通過して1-3に到るラインを境界として植生群落が残存していることもわかる。そこで、この洪水時には、このラインより上側で顕著な浸食が生じたことになる。このことを踏まえて、この洪水減水期ならびにその後数年間程度の期間における採取点1-3、2-2付近の流況について考えると、少なくともその前後の期間に比べて流水にさらされる頻度が高く、ノニルフェノールがこの地点付近の土壤に吸着する可能性や、この物質が吸着した微細土砂が堆積する可能性は高かったといえることができる。そのため、この時期の堆積物である下層の方が、その後に堆積した上層よりもノニルフェノールの検出量が大きくなったと判断している。このように、下水処理水起源の環境ホルモン物質であるノニルフェノールに関しては、低水路水際付近の植生群落内ほど顕著に貯留されていると考えられる。

## (2) ベンゾ(a)ピレンの調査結果について

次に、ベンゾ(a)ピレンについて説明しよう。ベンゾ(a)ピレンは主として幹線道路周辺の気中ならびに道路面上等に存在する物質とされる。そのため、降雨時には雨水とともに河道内地形上に直接供給されるほか、道路上に降り注いだ雨が側溝・下水道等を経て河道へと供給される。この物質は一般に雨水起源の環境ホルモン物質と考えることができる。河川水面に降り注いだものあるいは下水道を経て流入したものについては、そのまま輸送されるか、あるいは微細土砂に吸着して輸送される。一方、植生帯内に降り注いだものについては、土壤への吸着率が高い物質であるため、その多くは土壤に吸着される。そして、出水時に頻繁に冠水するような低水路水際付近や標高の低いところでは、洪水流により浸食され運び去られる可能性が高い。一方、相対的に標高が高く冠水頻度の低い地形上では浸食が生じ難いため、そこに供給された物質はそのまま貯留さ

れる。さらに、洪水時に標高の低いところで浸食され運ばれてきた土砂がこのような地形上に堆積を起こし、その貯留量を増大させる傾向にある。また、このような地形上には植生が密に繁茂しており、シルトなどの微細土砂の堆積が促進されることは前述の通りである。従って、標高が高く植生群落に覆われている区域にある採取点 1-3, 1-4, 2-2 および 2-3 におけるベンゾ (a) ピレンの検出値が比較的大きな値となっている。一方、冠水頻度の高い採取点 0-1, 1-1, 1-2, 3-1 および 3-2 における検出値は小さくなっていることもわかる。以上は著者らによるシナリオに沿う結果であると言えよう。

なお、ほぼ同様の地形でありながら採取点 2-4 および 3-3 における値が相対的に小さいのは、ノニルフェノールの場合と同様、これらの地点が平成 13 年の出水時に洪水流の通り道になったと推定されることに符合した結果である。このように、得られた結果は著者らのシナリオに矛盾しない良好なものとなっている。

以上をまとめると、環境ホルモン物質のうち、下水処理場からの放流水とともに河川に入り込むノニルフェノールと、雨水とともに供給されるベンゾ (a) ピレンとでは、河道に貯留されやすい場所に違いがあるものの、低水路水際付近の植生群落あるいは砂州上の植生群落の根元付近に堆積したシルト層から大量に検出される結果となった。この堆積のメカニズムに関しては、著者らのこれまでの研究<sup>1)</sup>で見出されたものと同じであり、これを植生群落を抜きにして論じることはできないと考える。そして、本調査結果から判断して、このような物質の河道内貯留は、概ね第 2 章で論じたシナリオに沿って引き起こされると結論づけられる。

## 5. 結論

本研究では、河道内に運び込まれた環境ホルモン物質の輸送と河道内貯留の二つに焦点を絞り、それらのプロセスの背後にあるメカニズムの解明とそれを裏付ける実態把握とを行った。このうちメカニズムに関しては、著者らのこれまでの研究により、群落状に繁茂する植生がその付近の流速を低減させ、その根元付近に大量の微細土砂を捕捉・堆積させる機能があることが明らかになった。とりわけ低水路水際付近に植生群落が形成されると、その付近には微細土砂からなるテラス状の地形が形成されることが確認された。そこで、環境ホルモン物質が水中に混濁している微細土砂に吸着し、これが微細土砂とともに輸送されるならば、このような植生群落内に

環境ホルモン物質が貯留されている可能性がある。このことを検証するため、多摩川における礫床河川区間の右岸側砂州地形を対象として現地調査を実施した。ここでは、下水処理水起源のノニルフェノールと、雨水起源のベンゾ (a) ピレンの二つを検討対象物質とした。その結果、ノニルフェノールに関しては低水路水際付近の植生群落内に貯留していることが確認された。一方、ベンゾ (a) ピレンに関しては、そもそも水流によって運ばれて来るというよりは、雨水によって河川地形上に供給されたものが表層土砂の浸食・輸送を通じて再分配される、というプロセスをとるため、むしろ砂州地形の標高の高い植生群落内に残留していることが理解された。いずれにしても、著者らが描いたシナリオに沿った形で、河道内の一部区域に環境ホルモン物質が貯留されていることが確認された。

ただし、今後に残された課題も少なくない。たとえば、現時点では、限られた調査結果に基づく議論であり、さらに広範なデータの蓄積が必要であること、さらには、環境ホルモン物質がどの程度微細土砂に吸着するのか十分に理解されていないこと、などである。今後も調査研究を継続し、将来的には、河川中に流入した環境ホルモン物質のうちどのくらいが河道内に貯留され、どのくらいが海域まで運び去られるのか、といったことまである程度予測できるようにしていきたいと考えている。

**謝辞**：本研究は、国土交通省建設技術研究開発助成「環境ホルモンの無害化と暴露量削減に関する研究開発」を受けて行ったものである。本論文のとりまとめに当たり、国土交通省関東地方整備局京浜河川事務所より航空写真ならびに測量データの提供を受けた。また、現地観測には、本大学学生の河野祥尚君をはじめ西森研一郎君、小笠原基君、石井亮資君、中村 淳君の協力を得た。ここに記して謝意を表します。

## 参考文献

- 1) 関根正人、矢島英明：礫・シルト充填河床モデルを用いた河道の変動解析，水工学論文集，第 49 巻，991-996，2005。
- 2) 環境省：化学物質の環境リスク評価，第 3 巻，<http://www.env.go.jp/chemi/report/h16-01/>。
- 3) 国土交通省：平成 13 年度水環境における内分泌攪乱物質に関する実態調査結果について，[http://www.mlit.go.jp/river/press/200207\\_12/021212/021212.html](http://www.mlit.go.jp/river/press/200207_12/021212/021212.html)。

(2005. 9. 30 受付)