

下水道における内分泌かく乱物質の挙動

(独)土木研究所 水環境研究グループ
水質チーム 鈴木穰

1. はじめに

近年、微量化学物質による水環境の汚染によって、人の健康や野生生物を含む生態系への影響が懸念されている。土木研究所では、重点プロジェクト研究において、内分泌攪乱物質の水環境における汚染実態を明らかにするとともに、水生生物等に対する影響を評価し、また、下水処理場における除去効果の評価等を行った。

(1) 内分泌かく乱物質の水環境等における実態

河川水や下水中の内分泌かく乱物質を、女性ホルモン（エストロゲン）作用の強さとして検出するため、遺伝子組み換え酵母を用いたエストロゲン様活性*の測定を行った。

*) 女性ホルモンである 17 β -エストラジオール (E2) の活性等量として表されます。

全国の主要な河川および下水処理場の調査 (図-1) により、ほとんどの河川水からエストロゲン様活性が検出されること、河川水よりも流入下水や下水放流水の濃度が高いこと、下水処理によって放流水の濃度が低減していることが明らかとなった。

さらに、河川水や下水放流水のエストロゲン様活性に寄与する物質を調べたところ、女性ホルモンの一種であるエストロンの寄与率が最も高く、従来考えられていた人工の化学物質よりも、人畜に由来する天然女性ホルモンの影響が大きいということが明らかになった (図-2)。

また、湖沼 (手賀沼) の底泥を採取し、深さごとの内分泌かく乱物質蓄積状況を測定することにより、過去からの内分泌かく乱物質汚染の推移を調べた (図-3)。その結果、エストロンは、1970年頃に始まった汚染が 1980年頃から急激に増加し、1990年頃をピークに減少すること、また、工業用洗剤に由来するノニルフェノールは、1970年頃から高い濃度となっていることがわかった。

エストロンの傾向は、手賀沼流域における 1970年ごろからの人口の急増と、下水処理場や浄化槽を通しての排水の増加、またその後の流域下水道

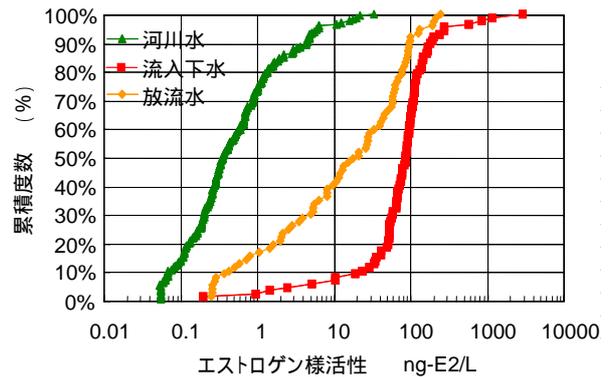


図-1 河川水、下水、下水放流水におけるエストロゲン様活性の分布

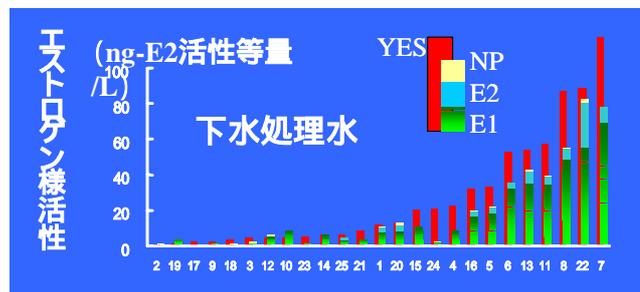


図-2 下水処理水のエストロゲン様活性 (YES) に対する NP, E2, E1 の寄与率

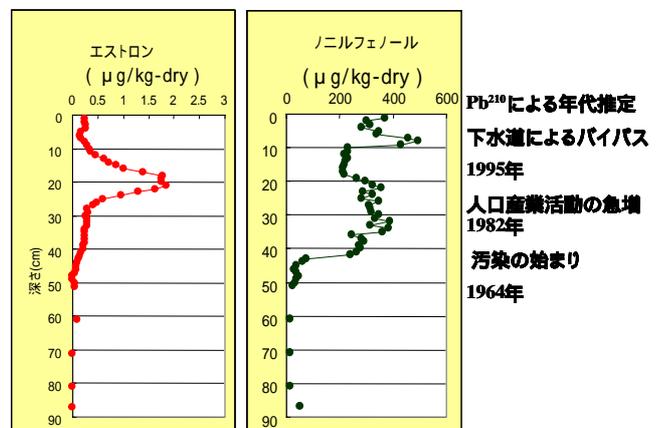


図-3 手賀沼底泥中の内分泌かく乱物質の鉛直分布

整備による排水の手賀沼外へのバイパスといった流域条件の変化が反映されたものであると考えられる。また、ノニルフェノールは近年でも減少の傾向がみられないことから、下水道に取り込まれない排水に由来する可能性が考えられる。

(2) 内分泌かく乱物質の魚類影響

環境水中の内分泌かく乱物質による魚類雌性化影響を評価するため、メダカを用いて、エストロゲンや下水処理水への曝露実験を行った。なお、メダカの雌性化の指標として、通常は雌のみが体内で生成するビテロゲニンという物質を使用した。

その結果、エストロン濃度が約 30ng/L (エストロゲン様活性として約 10ng-E2/L) 以上で、雄メダカのビテロゲニン濃度が上昇することが明らかとなった。さらに、河川水や下水処理水にメダカを曝露した場合、同様に、エストロゲ

ン様活性が 10ng-E2/L 以上で、雄メダカのビテロゲニン濃度が顕著に上昇する結果が得られた(図-4)。

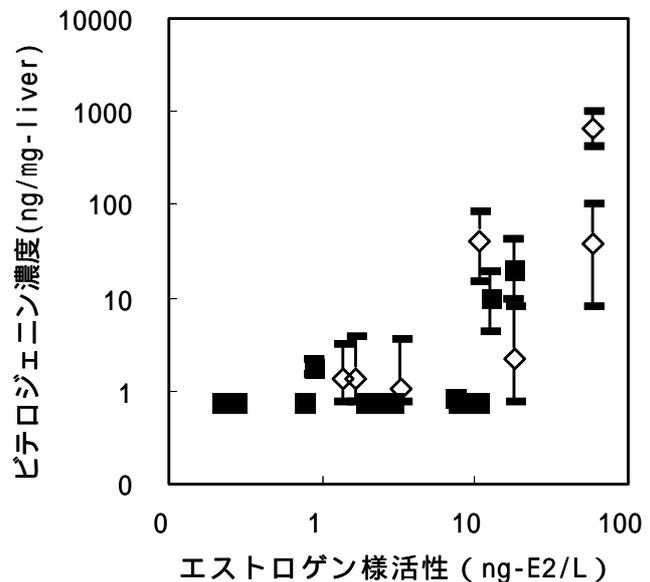
以上のことから、環境水のエストロゲン様活性が 10ng-E2/L 以上となると、メダカに雌性化影響を及ぼすことが明らかとなった。

(3) 下水処理過程におけるエストロゲン類の挙動把握

1) 下水処理場における挙動調査

神奈川県内にある下水処理場にて、1月と7月にエストロゲン類の挙動調査を行った。同処理場は、標準活性汚泥法を採用しており、処理人口、処理能力はそれぞれ 30,500 人、20,400m³/日である。

エストロゲン様活性は、夏期においては処理工程の進行によって低減する傾向を示したが、冬期の調査においては、逆に活性値の増加が確認された(図-5: 除去率として夏期: 39%、冬期: -97%)。機器分析により定量した E1、E2、ノニルフェノール濃度より、下水処理過程の各水試料中で検出されたエストロゲン様活性値の大部分は E1 の寄与によるものであった。夏期は、ある程度硝化が進行する固形物滞留時間、DO 濃度で運転が行われていたが、冬期には、硝化抑制のため曝気量を制限する運転が行われていた。このような運転条件がエストロゲンの処理に影響したものと考えられる。



(◇: 下水処理水曝露試験 ■: 河川水曝露試験)

図-4 環境水のエストロゲン様活性と雄メダカのビテロゲニン濃度の関係

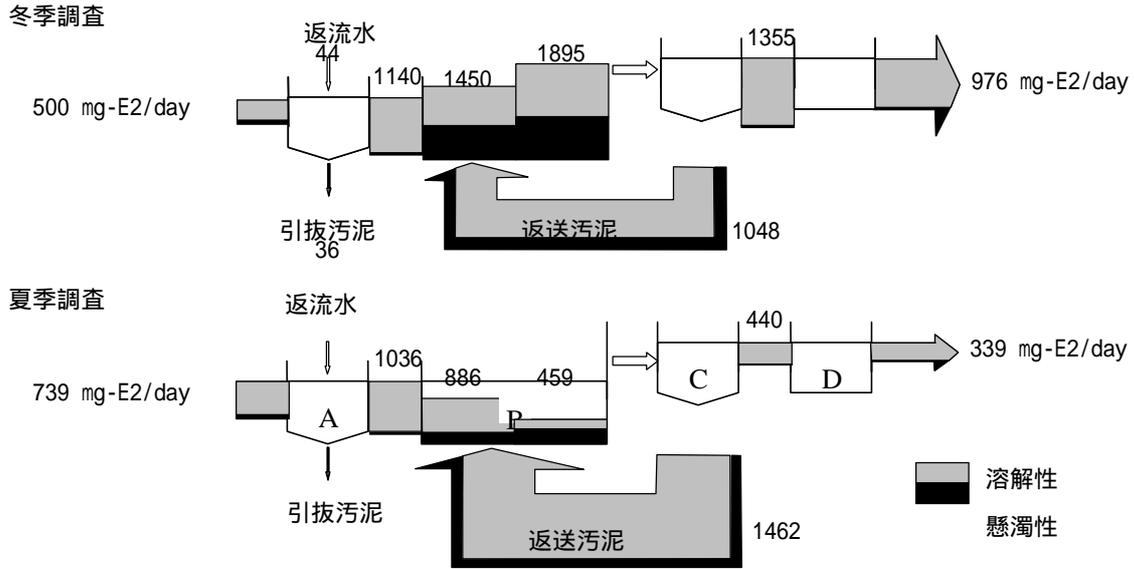


図- 5 下水処理工程におけるエストロゲン様活性のマスバランス測定結果

A:最初沈殿池 B:曝気槽 C:最終沈殿池 D:塩素接触槽

2) 溶存酸素濃度の影響

活性汚泥を用いた回分実験において、溶存酸素濃度（MLDO）を 0.5mg/L 以下に制御した場合、E2、E3 は減少したが、E1 は大きな変化を示さなかった。一方、最終的なMLDOを 3.0mg/L に制御した系列においては、MLDO が上昇するまでは E1 濃度に大きな変化は見られなかったものの、MLDO が 3.0mg/L に上昇した時点で急激な低下が観測された。以上より、E1 の減少速度は、溶存酸素濃度に大きく依存すると推定された。

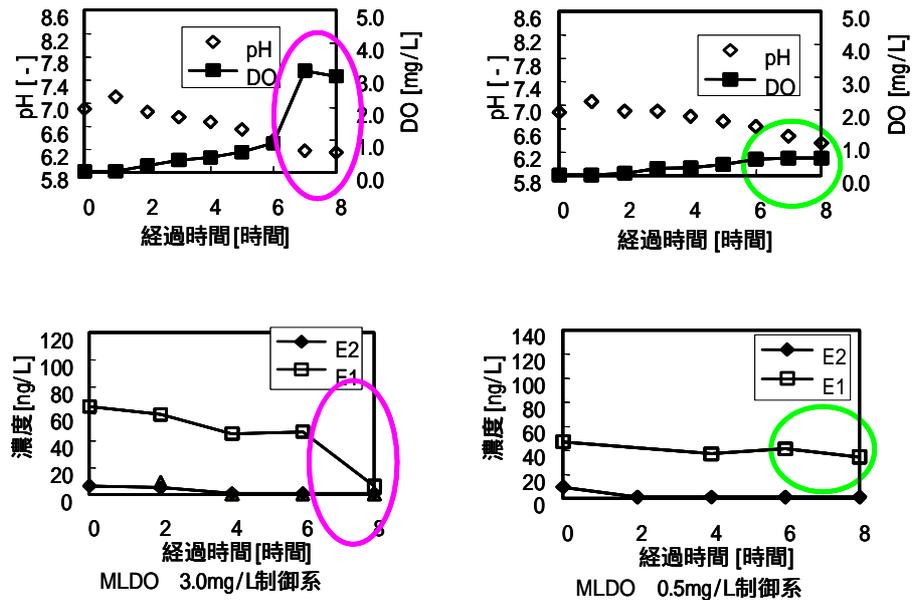
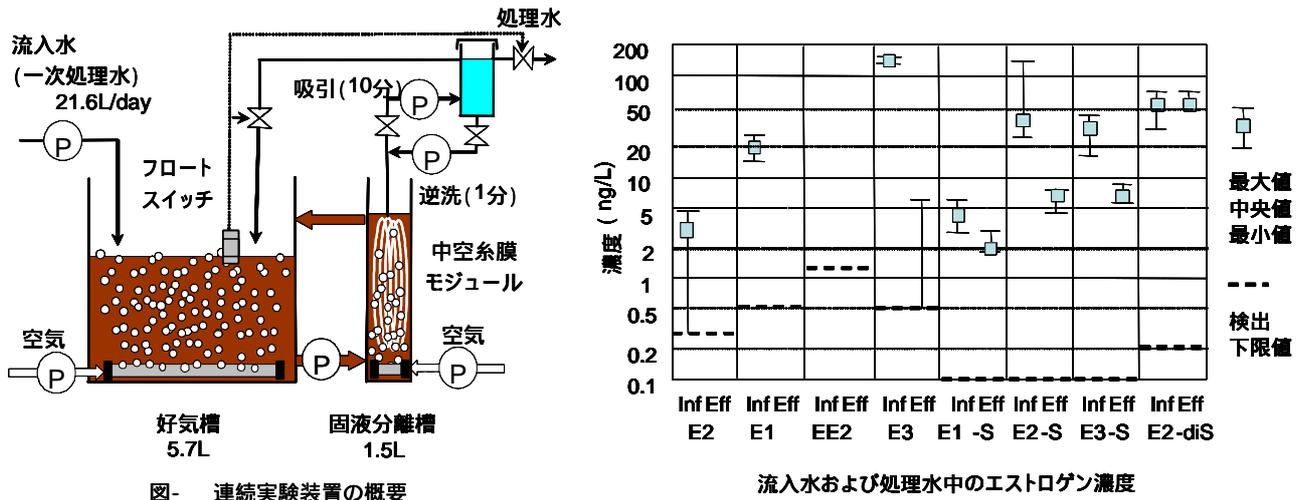


図-6 溶存酸素濃度制御がエストロゲン除去に与える影響

3) 膜分離による固形物滞留時間の長期化の影響

図-7 に示す連続実験装置を用い、固形物滞留時間 (SRT) を 60 日とした場合のエストロゲン除去特性を調べた。なお、水学的滞留時間 (HRT) は 8 時間とした。

結果を図-8 に示す。遊離体エストロゲンはほぼ完全に除去がなされる一方、エストロゲン硫酸抱合体のうち、E2-S、E1-S、E3-S に関しては一部の除去がなされるが、E2-diS に関してはほとんど変化を受けない結果が得られたとされていると考えられた。長時間の SRT は、遊離エストロゲンの除去に効果的であるが、抱合体に関しては除去効果が限られることが明らかとなった。



(4) 下水処理過程におけるノニルフェノール類の挙動把握

ノニルフェノールポリエトキシレート (以下 NPnEO) は、工業用洗剤などに幅広く利用されている。NPnEO は、好気条件下での生物分解により、より短い鎖長の NPnEO やノニルフェノキシ酢酸 (以下 NPnEC) に変化し、その後、嫌気条件下において、内分泌攪乱物質であるノニルフェノール (以下 NP) に変換されるといわれている。

実験室規模の活性汚泥処理実験装置により下水処理場のエアレーション工程を再現した結果を図-9

に示す。流入水の基質として供給した NPnEO に対し、エアレーションタンク混合液および処理水中には、鎖長の短い NPnEO ($n = 4$)、NPnEC ($n = 4$) および NP が存在していた。

流入水中の NPnEO は、エアレーションタンクにおいて、活性汚泥により生分解を受け、鎖長の短い NPnEO および NPnEC、さらに、一部は NP にまで変化したと考えられる。

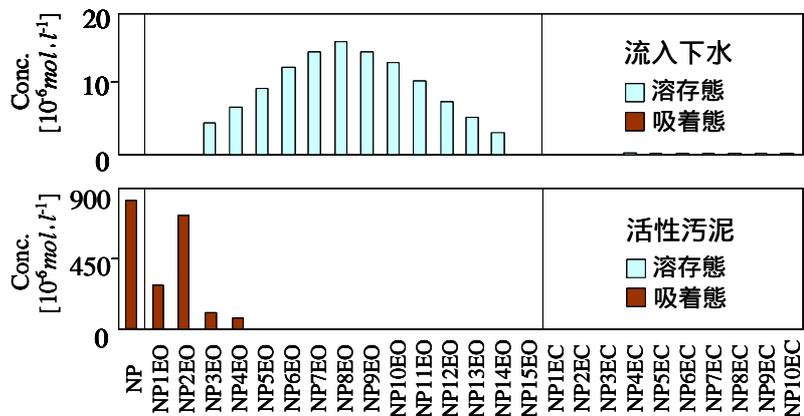


図-9 流入下水中の NPEO に対するエアレーションタンク混合液中のノニルフェノール類の分布