

下水処理における内分泌かく乱物質の除去特性と分解微生物

Biodegradation of Endocrine Disrupters in Sewage Treatment Plants

宮 晶子*, 恩田 建介
AKIKO MIYA and KENSUKE ONDA

(株)荏原総合研究所生物研究室 〒251-8502 神奈川県藤沢市本藤沢4-2-1

* TEL: 0466-83-7741 FAX: 0466-81-7220

* E-mail: miya12806@erc.ebara.co.jp

Ebara Research Co., Ltd. Biotechnology Lab., 2-1, Honfujisawa 4-chome, Fujisawa-shi 251-8502, Japan

キーワード: 内分泌かく乱物質, 女性ホルモン様活性, 下水処理, 微生物分解

Key words: Endocrine Disrupters, Estrogen-like Activity, Sewage Treatment Process, Biodegradation

(原稿受付 2003年6月16日/原稿受理 2003年8月12日)

要 旨

水環境における内分泌かく乱物質の挙動を明らかにし、環境リスクを評価しようとする動きが始まっている。都市部においては、公共水域の水質に対する下水放流水の負荷は低くなく、特に女性ホルモン様活性を持つ物質の下水処理における挙動が注目されるようになった。内分泌かく乱物質は極めて低濃度で作用することから、下水処理における従来の運転管理指標だけでは十分な管理ができない恐れがある。内分泌かく乱物質の多くは、オゾン処理などの高度処理により分解できるが、費用対効果を考えると、生物処理の中で十分な除去が達成されることが望ましい。現在天然女性ホルモン類を含む各種内分泌かく乱物質の分解微生物に関する知見が蓄積されつつある。今後、これらの分解微生物の活性汚泥中の挙動が明らかになれば、内分泌かく乱物質の除去に適した運転制御法、あるいは新しい生物処理装置が開発されるものと期待される。

1. はじめに

動物のホルモンのような働きをする化学物質が生態系やヒトの健康に影響を与える恐れがあると報告されて以来、このような作用を持つ内分泌かく乱物質に対する社会的な関心が高まっている。これまで異常が報告された生物の多くは水生生物または水域と接して生息するは虫類、鳥類等であることから、水環境における内分泌かく乱物質の挙動を明らかにし、環境リスクを評価しようとする動きが始まっている¹⁾。

都市部においては、公共水域の水質に対する下水放流水の負荷は低くない。1994年に英国で下水処理場放流地点より下流側で魚の雌性化が観測され、特に女性ホルモン様活性を持つ物質の下水処理における挙動が注目されるようになった。

2. わが国の下水処理における内分泌かく乱物質除去実態把握の動き

1996年以降、世界保健機構 (WHO)、国際労働機構 (ILO) 及び国連環境計画 (UNEP) が参加して構成されている国際化学物質安全計画 (IPCS) や経済開発協力機構 (OECD) 等において、内分泌かく乱化学物質に関する国際的な取組の調整を図るとともに、研究状況の情報収集とその評価が始められている。わが国においても1998年5月に環境ホルモン戦略計画 SPEED'98 を策定 (環境庁)、大気、水質、底質、土壌、水生生物、野生生物について緊急全国一斉調査を実施した。現在も調査を継続するとともに、環境中での存在量等から優先的にリスク評価に取り組むべき物質を選定し、リスク評価を実施している。

この動きに合わせて下水道分野でも、各地の処理場における内分泌かく乱物質処理実態調査が進められてきた。筆者らはヒトのエストロゲン受容体遺伝子を組み込んだ酵母を用いた女性ホルモン様活性評価法 (以下、酵母法と記す) を用いていくつかの下水処理場での除去性能を調べたところ、処理場によって女性ホルモン様活性の除去率が32~93%と大きくばらつくことがわかった。また、同時に酵素免疫測定法 (ELISA) で人畜由来の天然女性ホルモンである 17 β -エストラジオールも測定したところ、流入下水の女性ホルモン様活性に対する 17 β -エストラジオールの寄与率は45~57%であるのに対し、二次処理水では55~180%となり、下水処理においては天然女性ホルモンの除去率が必ずしも高くはないことが示唆された (図1)²⁾。また、後述のように天然女性ホルモンは抱合体として体外に排泄される事が知られている。試料前処理として加水分解を行い脱抱合してから分析すると、流入下水では酵母法および ELISA のいずれの値も増加していることから、流入下水中の天然女性ホルモンの一部は抱合体として存在していることがわかった。なお、二次処理水において 17 β -エストラジオール

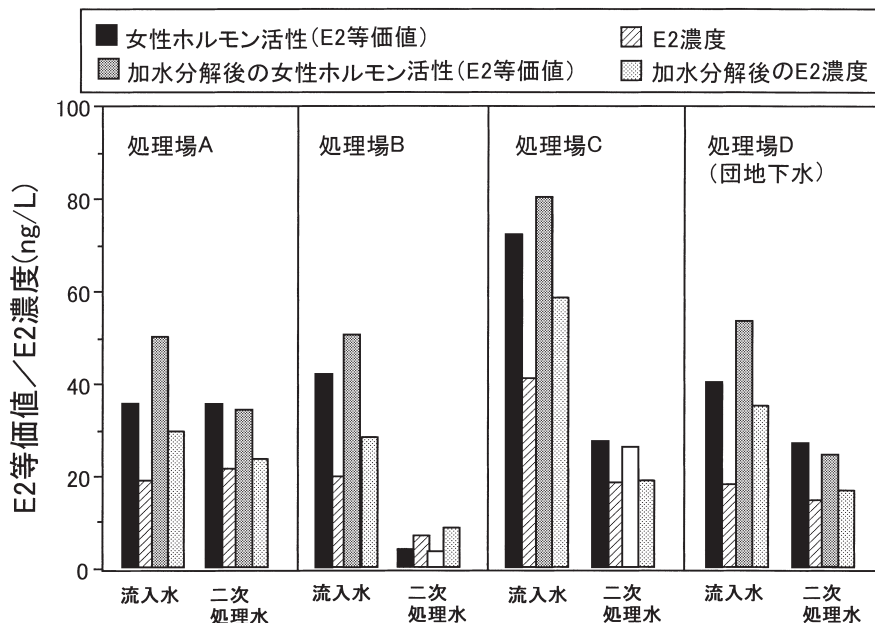


図1. 各下水処理場流入水及び二次処理水中の女性ホルモン活性と17β-エストラジオール (E2) 濃度。

女性ホルモン活性は酵母法による測定値を17β-エストラジオール濃度に換算した値 (E2等価値) として表示. 17β-エストラジオール (E2) 濃度はELISAで測定。

濃度が過大に評価されていることについては、その後、ELISAの測定法上に多くの課題があることが明らかになってきている^{17,29)}。

一方、図2に示すような高度処理プロセスではいずれも女性ホルモン様活性が大幅に低減できることがわかった(図3)²³⁾。オゾン処理水の17β-エストラジオール濃度が酵母法により測定した女性ホルモン様活性値よりも高いのは、ELISAが17β-エストラジオール等の分解産物も検出しているためと考えられる。

1998年度に実施された全国27の下水処理場を対象にした調査結果¹⁹⁾では、調査したすべての流入下水試料から内分泌かく乱物質としての作用が疑われる化学物質であるノニルフェノール、フタル酸ジ-n-エチル、フタル酸ジ-2-エチルヘキシルが検出され、ビスフェノールA、フタル酸ジ-n-ブチル、アジピン酸ジ-2-エチルヘキシルおよびベンゾフェノンが高い割合(86~91%)で検出された。また、ノニルフェノールを原料とする非イオン性界面活性剤であるノニルフェノールエトキシレートも、すべての検体から検出されている。一方、下水処理場から放流される放流水中のノニルフェノールエトキシレートおよびベンゾフェノンを除いた前記化学物質の濃度(中央値)は、検出下限値未満~0.8 μg/Lと、下水処理工程

で良好に(90%以上)除去できていることが示された。ベンゾフェノンは中央値による除去率は68%であった。一方、17β-エストラジオールはすべての流入下水試料から検出され、中央値による除去率は67%であった。

以上のように、下水処理においては内分泌かく乱作用が疑われる化学物質は良好に除去されているのに対し、17β-エストラジオールの除去率は処理場によって大きくばらつき、平均的には除去率は必ずしも高くないことが指摘された。

わが国の下水処理における内分泌かく乱物質除去実態把握が始まった当初は、17β-エストラジオールをELISAで測定しており、特に放流水の測定値は過大評価され、結果として除去率が低いとされる傾向にあったことは否めない。しかし、これらの調査の中で、下水放流水の女性ホルモン様活性に関しては天然女性ホルモン類の寄与が極めて高いことがわかり、その挙動把握の必要性が認識されたと言える。

3. 天然女性ホルモン類の除去特性

ヒト由来の天然女性ホルモンにはエストラジオール、エストロン、エストリオールの3種類がある。これらの

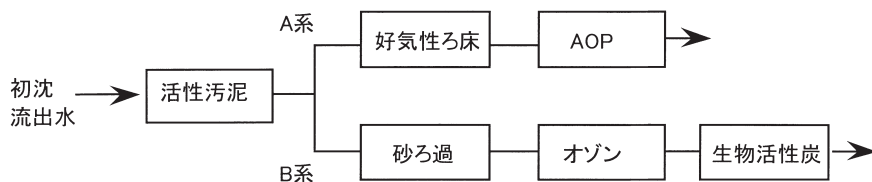


図2. 高度処理プロセスのフロー。

AOP: 促進酸化法 (Advanced oxidation process)

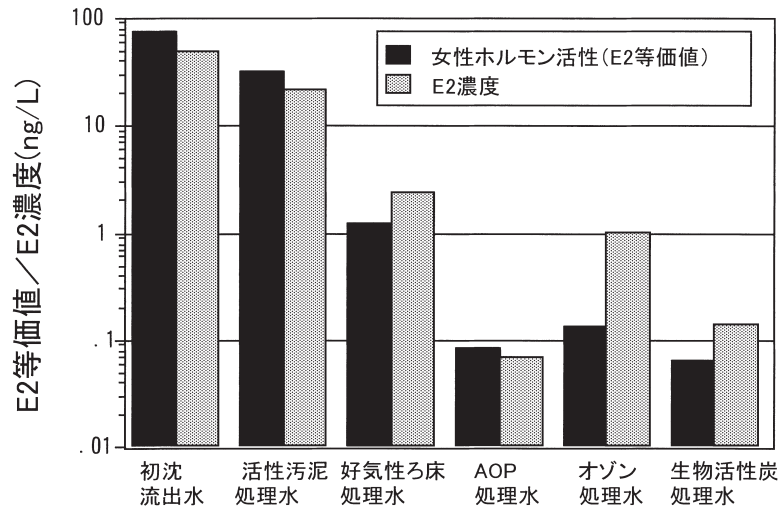


図3. 下水高度処理における女性ホルモンの活性評価結果。

女性ホルモン活性は酵母法による測定値を 17β -エストラジオール濃度に換算した値 (E2 等価値) として表示, 17β -エストラジオール (E2) 濃度は ELISA で測定。

女性ホルモン類は硫酸抱合体やグルクロン酸抱合体として、主として尿中に排出されることが知られている。またこれらの抱合体は下水管内、あるいは下水処理場の活性汚泥処理工程で脱抱合される¹⁹⁾ため、下水処理工程で流入下水より女性ホルモン活性が高くなる可能性もある。

近年、これらの3種類の天然女性ホルモンを液体クロマトグラフィー/タンデム質量分析法 (以下、LC/MS/MS と記す) によって個別に定量する手法が開発され、これらの物質の下水処理における挙動が明らかになってきた。団地下水を対象とする活性汚泥処理装置の処理特性を2ヶ月にわたって調査した結果、 17β -エストラジオールの除去率は概ね90%以上で安定して除去されているのに対し、エストロンの除去率は70%程度と低く、高濃度で残留する場合もあることがわかった (図4)。エストロールは流入水中の濃度は高いものの、除去率も安定して高かった^{20,21)}。前述の酵母法において、 17β -エストラジオールの活性を1とする比活性はエストロンが0.3、エストロールが0.005であり⁷⁾、処理水においては女性ホルモン様活性に対するエストロンの寄与率が高く、下水処理においてはエストロンの挙動に注意する必要があることが示唆された。

同様に、全国53の下水処理場を対象とした調査¹³⁾でも、LC/MS/MS を用いた値では放流水の 17β -エストラジオールの中央値が $0.0003 \mu\text{g/L}$ 、最大値が $0.0033 \mu\text{g/L}$ に対し、エストロンは中央値が $0.0055 \mu\text{g/L}$ 、最大値が $0.1 \mu\text{g/L}$ と、放流水の女性ホルモン様活性に対するエストロンの寄与が高いことが示されている。

一方、標準活性汚泥法とオキシデーションディッチ法 (以下、OD 法と記す) の処理特性を調べた結果から、酵母法で測定した活性の除去率は OD 法の方が高いことが指摘された¹⁸⁾。標準活性汚泥法と OD 法の下水処理場について1年間にわたり処理性能を調べた結果では、 17β -エストラジオールの除去率は標準法で84.8%に対し OD 法で96.1%と、OD 法の方が安定して高い除去率を示した。さらに、OD 法ではエストロンもほぼ安定して

84.3%の除去率が得られていたが、標準活性汚泥法では流入原水よりも処理水のエストロン濃度が高い場合が頻繁にあることがわかった⁸⁾。

ちなみに 17β -エストラジオールの活性に対するノニルフェノールの比活性は0.0005、ビスフェノール A は0.00005であり²¹⁾、天然女性ホルモンの安定的な除去が下水処理では大きな課題であることが、この数値からも示される。

4. 各種内分泌かく乱物質の分解微生物

4.1. ビスフェノール A

ビスフェノール A は合成樹脂製造原料などとして大量に使用されており、多くの下水処理場流入水中で検出されているが、前述の全国調査結果においても中央値による除去率はほぼ100%と、良好に除去されている¹³⁾。合成排水にビスフェノール A を添加し、濃度を $10 \mu\text{g/L}$ から $1000 \mu\text{g/L}$ まで段階的に上げていった連続処理実験の場合でも、ビスフェノール A は良好に除去できることが確認されている (図5)。このとき、活性汚泥へのビスフェノール A の蓄積もなかった²²⁾ ことから、活性汚泥中にはビスフェノール A 分解能を持つ微生物が普遍的に存在するものと推測される。

一方、合成樹脂製造工場の排水を処理する活性汚泥からは、ビスフェノール A の分解菌 MV1 株¹⁴⁾、*Pseudomonas paucimobilis* Strain FJ-4⁹⁾ などが単離されている。しかし、MV1 株はビスフェノール A を完全無機化することはできず、また、河川水から作成されたマイクロゾムを用いた分解実験でも、大部分のマイクロゾムにおいてビスフェノール A の初期分解は起こるものの、TOC 成分が残存し、完全には分解できないことが示唆されている¹⁾。女性ホルモン様活性物質としてのビスフェノール A の活性は 17β -エストラジオールの1万分の1以下であり、活性汚泥法での除去率もきわめて高いところから、現状では下水処理における問題はない。しかし、下水処理において実際にどのような代謝経路によ

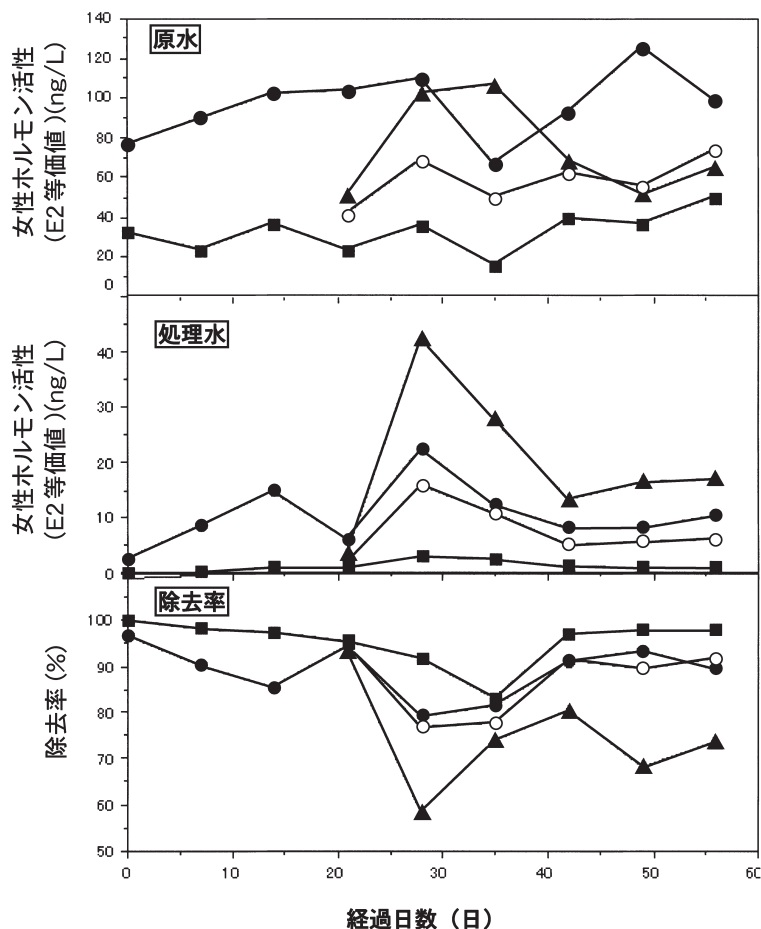


図4. 団地下水処理場の天然女性ホルモン類の挙動。
 ▲エストロン濃度 (21日目から測定), ■ 17β -エストラジオール濃度 (ELISA)
 ●女性ホルモン活性値 (酵母法, E2 等価値)
 ○LC/MS/MS 測定値より計算した女性ホルモン活性値 (E2 等価値) (21日目から測定)

りビスフェノール A が分解されているのかを検証した例はなく、分解産物の生態リスクについての指摘もされていることから⁹⁾、今後の研究の進展が待たれるところである。

4.2. ノニルフェノール

ノニルフェノールはイオン系表面活性剤として大量に使用されているノニルフェノールエトキシレート¹⁾の代謝産物として、環境中あるいは下水処理工程で生成されることが知られている。ノニルフェノールおよびノニルフェノールエトキシレートはわが国における全国調査結果においては全ての下水処理場流入水中で検出されているが、中央値による除去率はビスフェノール A と同様にほぼ100%と、良好に除去されている¹³⁾。しかしノニルフェノールの除去率が30%程度と低い例も報告されており¹²⁾、流入したノニルフェノールエトキシレートが下水処理工程でノニルフェノールに変換されるため、結果としてノニルフェノール除去率が低くなる可能性も否定できない。

一方、ノニルフェノールについては微生物分解ではなく、活性汚泥への吸着除去が起きていることが指摘されていた^{7,30)}。合成排水にノニルフェノールを添加し、濃度を 10 $\mu\text{g/L}$ から 1000 $\mu\text{g/L}$ まで段階的に上げていった連

続処理実験の場合には、水系からはノニルフェノールは良好に除去できるが (図 5)、汚泥中のノニルフェノール濃度が流入濃度の上昇に伴い上がっていくことが確認された。この場合には流入したノニルフェノールの約 30% が汚泥中に蓄積したと見積もられ、残りは分解されたことが示唆された²²⁾。

近年、ノニルフェノール分解菌が様々な環境中から分離されてきている。下水処理場の流入下水から単離された *Sphingomonas cloacae* は 1000 mg/L という高濃度のノニルフェノールを単一の炭素源として利用できる^{4,5)}。一方、河川の底泥から単離された *Sphingomonas* YT 株はノニルフェノールを資化することはできないが、酵母エキスなどの有機物に依存して 100 mg/L 以下のノニルフェノールを分解する。YT 株では 1000 mg/L のノニルフェノールでは増殖が阻害されることが確認されている²⁾。

ノニルフェノールにはノニル基の構造の違う様々な異性体があり、単一の分解菌により全ての異性体が同様に分解できる可能性は低いと考えられる。さらに、上述のノニルフェノール分解菌の単離にあたり、分解菌と非分解菌を含む集積培養系の方が、単離した分解菌の純粋培養系よりもノニルフェノール分解活性が高かったという報告もあり²⁴⁾、活性汚泥中では様々な微生物が分解に関

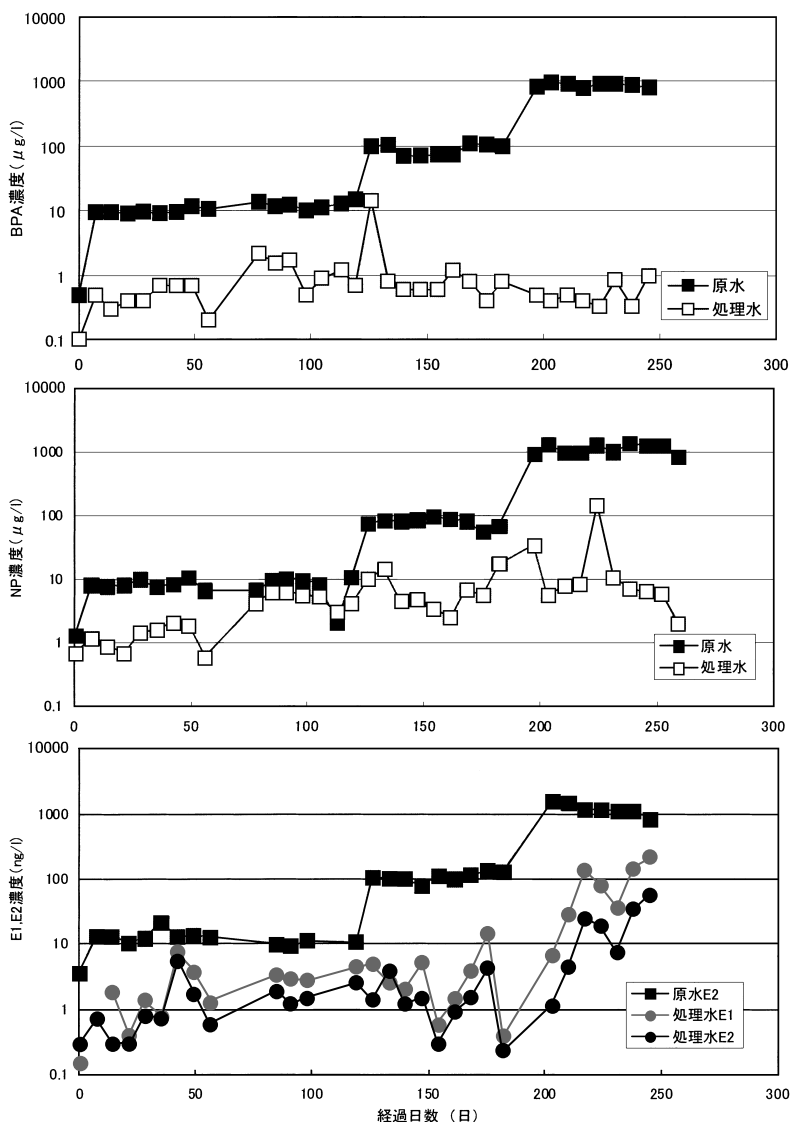


図5. 内分泌かく乱物質の連続処理実験の結果。

E2: 17β-エストラジオール, E1: エストロン, BPA: ビスフェノール A, NP: ノニルフェノール

与していることが考えられる。流入下水中のノニルフェノールの濃度は最大値で 75 μg/L 程度¹³⁾と低いこと、下水中には易分解性有機物が存在することから、下水処理においては必ずしも高濃度のノニルフェノールを資化できる微生物でなくとも、分解に寄与できると言える。

一方、単離された分解菌はいずれも好氣的にノニルフェノールを分解するものである。また、ノニルフェノールエトキシレートは嫌気条件下で最終的にノニルフェノールまで分解することが知られている。すなわち、余剰活性汚泥にはノニルフェノールが吸着しているだけでなく、吸着したノニルフェノールエトキシレートが濃縮・脱水という汚泥処理工程でノニルフェノールに変換されるため、さらにノニルフェノール濃度が上がることも予想される。脱水汚泥が埋め立て処分された場合には、活性汚泥に吸着されたノニルフェノールが環境中に蓄積する可能性も否定できない。

4.3. 天然女性ホルモン類

天然女性ホルモン類は数 ng/L という低濃度で魚類等

に影響があるとされている。下水においてはノニルフェノールやビスフェノール A のような化学物質と異なり、人間が排出する天然女性ホルモン類をどこまで除去すべきか、まだ明確な結論は出されていない。しかし、都市部の河川においては、下水処理場の放流地点付近で河川水の女性ホルモン様活性（酵母法による測定値）が 5 ng/L 前後まで上昇し、その後流下とともに活性が低下することが報告されている²⁰⁾。2003年5月に中央環境審議会水環境部会が、従来の、人にとっての良好な環境の保全から、生態系や水生生物、その生息環境の保全も視野に入れた水環境の保全へ転換するための施策を検討し、そのための環境基準の設定に必要な知見をとりまとめた「水生生物の保全に係る水質環境基準の設定について（第一次報告（案））」を提出した。今後、これに関する議論が継続される中で、天然女性ホルモン類に関しても方向性が明らかになっていくものと期待される。

活性汚泥処理においては前述のように 17β-エストラジオールは比較的良好に除去されるのに対し、エストロンが残留しやすいことが指摘されていた。筆者らは

団地下水を原水とする活性汚泥処理装置から活性汚泥 (MLSS: 2000 mg/L) を採取し, 17 β -エストラジオールを初期濃度として 16000 ng/L になるように添加して回分実験を行った。その結果, 添加直後の活性汚泥の遠心分離上澄からは 17 β -エストラジオールが18%しか回収されず, 29%はエストロンとして回収された。エストロンは 17 β -エストラジオールよりも減少速度は遅いものの, 3 時間後には 17 β -エストラジオール, エストロンとも検出限界付近の濃度まで低下した。同時に測定した酵母法による女性ホルモン様活性値は, 残存する 17 β -エストラジオールおよびエストロン濃度から算出した活性値とほぼ一致したため, 両物質以外の女性ホルモン様活性物質の残留はないと考えられた (図 6)²¹⁾。女性ホルモン様活性物質を全く含まない合成排水を処理する実験装置から採取した活性汚泥を用いて, 同様に 17 β -エストラジオール添加処理実験を行った場合でも, 17 β -エストラジオール以外の女性ホルモン様活性物質に変換されるという結果が得られている²⁰⁾。これらの結果から, 17 β -エストラジオールは活性汚泥中で速やかにエストロンに変換されること, この変換にかかわる微生物は 17 β -エストラジオールに馴致されていない活性汚泥中にも普遍的に存在することが示唆された。

鈴木ら²⁸⁾は 17 β -エストラジオールの流入濃度が比較的高い下水処理場の活性汚泥および返送汚泥を種汚泥として, 17 β -エストラジオールを含む培地で集積培養を行い, 17 β -エストラジオール分解能が認められた集積培養からいくつかの 17 β -エストラジオール分解菌を単離したが, 単離株は全て 17 β -エストラジオールをエストロンに変換するものの, エストロンの分解能はなかったことを報告している。しかし, 集積培養ではエストロンも分解できていることから, 鈴木らは集積培養中にはエストロン分解菌が共存し, 17 β -エストラジオールの高次の分解が行われていると推測している。

前述の筆者らが行った 17 β -エストラジオール添加処理回分実験では, 添加 3 時間後には 17 β -エストラジオール, エストロンとも検出限界付近の濃度まで低下した

が, 実験に用いた活性汚泥を採取した元の装置ではエストロンが高濃度で残留する場合があった²¹⁾。一方, 小森ら¹⁴⁾は下水処理場の最初沈殿池では 17 β -エストラジオール, エストロンとも濃度変化はないが, エアレーションタンクでは 17 β -エストラジオール濃度は速やかに低下すること, これに対しエストロン濃度はエアレーションタンクの流入部で約1.8倍に上昇し, その後低下するものの, 二次処理水中にも残留が認められたことを報告している。このとき, エアレーションタンクの流入部におけるエストロン濃度の増加は 17 β -エストラジオールからの生成だけでは説明できないため, 抱合体が関与している可能性を指摘している。流入下水中の 17 β -エストラジオールの50%は抱合体として存在するという報告²⁶⁾もあり, 今後, さらに実態把握が必要と思われる。

近年, 天然女性ホルモン類分解菌が単離されてきている。Fujii ら²⁹⁾が下水処理場の活性汚泥から単離した *Novosphingobium* 属に属する新種 ARI-1 株は, YNB 培地²⁵⁾に添加した 1000 mg/L の 17 β -エストラジオールを 14日間で約60%分解でき, エストロンは 333 mg/L を20日で約40%分解できた。ただし, ARI-1 株がこれらの天然女性ホルモン類をどの程度の低濃度まで分解できるかどうかは不明である。

筆者らは処理方式が異なる 3ヶ所の下水処理場から採取した汚泥を種汚泥とし, 1000 mg/L の 17 β -エストラジオールまたはエストロンを単一炭素源として含む YNB 培地と, これに補助基質として 50 mg/L の酵母エキスを加えた培地を用いて集積培養を行い, 分解能が認められた集積培養から分解菌の単離を行った。その結果, 17 β -エストラジオールおよびエストロンのいずれも分解できる微生物をいくつか単離したが, これらの多くは *Sphingomonas* 属に属することがわかった。17 β -エストラジオールあるいはエストロンを 10 μ g/L 添加した人工下水処理水 (BOD: 7.5 mg/L) に, 予め NB 培地で培養した分解微生物を菌体濃度が 5 mg/L (乾燥重量) になるように懸濁し, 好気条件下で 17 β -エストラジオールあるいはエストロン濃度を経時的に測定した。その結果, いくつかの微生物は 17 β -エストラジオールおよびエス

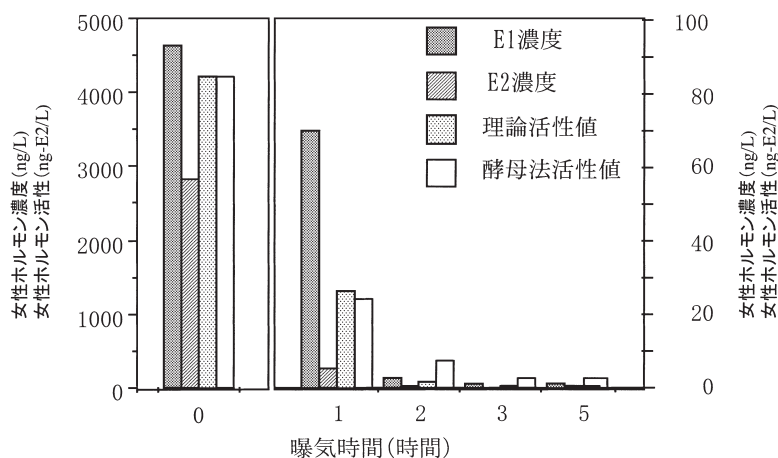


図 6. 17 β -エストラジオールの回分活性汚泥処理実験の結果。

E2 (17 β -エストラジオール) 及び E1 (エストロン) 濃度: LC/MS/MS 測定値
理論活性値: LC/MS/MS 測定値より計算した女性ホルモン活性値 (E2 等価値)
酵母法活性値: 酵母法により測定した女性ホルモン活性値 (E2 等価値)

トロンのいずれも3時間以内に1 ng/L レベルまで分解できることがわかった¹⁶⁾。

5. おわりに

2001年度に国土交通省が実施した全国の一級河川における、内分泌かく乱作用が疑われかつ過去に検出例のある物質についての調査結果では、4-t-オクチルフェノール(9%)、ノニルフェノール(5%)、ビスフェノールA(31%)、フタル酸ジ-n-ブチル(7%)、ベンゾフェノン(3%)が検出されている。()内の数字は調査対象数に対する検出箇所の割合である。また、天然女性ホルモンである17β-エストラジオールおよびエストロンもそれぞれ1%および14%の割合で検出されている。

生態系に悪影響を及ぼすことが懸念される化学物質については、使用を制限することとともに、環境中への放出を抑制することが必要である。しかし、内分泌かく乱物質は極めて低濃度で作用することから、下水処理における従来の運転管理指標だけでは十分な管理ができない虞がある。実際にエストロンが高濃度で残留した処理場の例でも、BODなどの一般的な水質項目については良好な処理が確認されており²¹⁾、エストロン残留の原因は解明されていない。

一方、天然女性ホルモン類を含む内分泌かく乱物質の多くは、オゾン処理などの高度処理により分解できるが、下水処理は大水量を処理する必要があるため、費用対効果を考えると、生物処理の中で十分な除去が達成されることが望ましい。これまでの実態調査から、特に天然女性ホルモン類の除去性能は処理場間でばらつきが大きく、良好に除去できている処理場も多くある。活性汚泥処理においてはSRT(汚泥滞留時間)が短くなると17β-エストラジオールの分解が遅れる傾向があるとの報告もあり²²⁾、適正な運転制御により天然女性ホルモン類の良好な除去を達成できる可能性はあると考えられる。

現在天然女性ホルモン類を含む各種内分泌かく乱物質の分解微生物に関する知見が蓄積されつつある。今後、これらの分解微生物の活性汚泥中の挙動が明らかになれば、内分泌かく乱物質の除去に適した運転制御法、あるいは新しい生物処理装置が開発されるものと期待される。

文 献

- 1) 陳 昌淑, 徳弘健郎, 池 道彦, 古川憲治, 藤田正憲. 1996. 河川水マイクロコズムによるビスフェノール A (BPA) の分解. 水環境学会誌. 19: 878-884.
- 2) de Vries, Y.P., Y. Takahara, Y. Ikunaga, Y. Ushiba, M. Hasegawa, Y. Kasahara, H. Shimomura, S. Hayashi, Y. Hirai, and H. Ohta. 2001. Organic Nutrient-dependent Degradation of Branched Nonylphenol by *Sphingomonas* sp. YT Isolated from a River Sediment Sample. *Microbes and Environments*. 16: 240-249.
- 3) Fujii, K., S. Kikuchi, M. Satomi, N. Ushio-Sata, and N. Morita. 2002. Degradation of 17β-Estradiol by a Gram-Negative Bacterium Isolated from Activated Sludge in a Sewage Treatment Plant in Tokyo, Japan. *Appl. and Environ. Microbiol.* 68: 2057-2060.
- 4) Fujii, K., N. Urano, H. Ushio, M. Satomi, and S. Kimura. 2001. *Sphingomonas cloacae* sp. nov., a nonylphenol-degrading bacterium isolated from wastewater of a sewage-treatment plant in Tokyo. *International J. of Systematic and Evolutionary Microbiol.* 51: 603-610.
- 5) Fujii, K., N. Urano, H. Ushio, M. Satomi, H. Iida, N. Ushio-Sata, and S. Kimura. 2000. Profile of a Nonylphenol-Degrading Microflora and Its Potential for Bioremediation Applications. *J. Biochem.* 128: 909-916.
- 6) 藤田正憲, 池 道彦, 平尾知彦. 2002. 環境ホルモンの生物学的分解. 用水と排水. 44: 9-14.
- 7) 藤田正憲, 加来啓憲. 1999. 下水処理過程における非イオン界面活性剤ノニルフェノールエトキシレートの挙動解明. 第36回下水道研究発表会講演集. 222-224.
- 8) 橋本敏一, 三品文雄, 恩田建介, 中村由美子, 宮 晶子, 多田啓太郎. 2003. 下水処理工程における内分泌かく乱物質の挙動. 第37回日本水環境学会年会講演集. 305.
- 9) Ike, M., C-S. Jin, and M. Fujita. 1995. Isolation and Characterization of a Novel Bisphenol A-degrading Bacterium *Pseudomonas paucimobilis* Strain FJ-4. *Japanese J. of Water Treatment Biology.* 31: 203-212.
- 10) 環境庁. 1998. 環境ホルモン戦略計画 SPEED'98.
- 11) 小森行也, 八十島誠, 田中宏明. 2002. 下水処理プロセスにおけるエストロゲンの挙動. 第39回下水道研究発表会講演集. 47-49.
- 12) Körner, W., U. Bolz, W. Süßmut, G. Hiller, V. Hanf, and H. Hagenmaier. 1998. Input/Output Balance of Estrogenic Active Compounds in a Major Municipal Sewage Plant in Germany. *Organohalogen Compounds.* 37: 269-272.
- 13) 栗林 栄, 岡本達也, 後藤雅子. 2001. 下水道における内分泌かく乱化学物質の挙動に関する研究. 第38回下水道研究発表会講演集. 151-153.
- 14) Lobos, J.H., T.K. Leib, and T-M. Su. 1992. Biodegradation of Bisphenol A and Other Bisphenols by a Gram-Negative Aerobic Bacterium. *Appl. and Environ. Biotechnol.* 58: 1823-1831.
- 15) 松井三郎, 足立 淳, 松田知成, 滝上秀孝, 清水芳久. 2001. 天然および人工エストロゲンの下水道と環境中での挙動. 季刊化学総説. No. 50. 86-92.
- 16) 森田智之, 恩田建介, Begum Shila Luxmy, 宮 晶子, 多田啓太郎, 橋本敏一, 三品文雄. 2003. 女性ホルモン分解微生物に関する研究. 第37回日本水環境学会年会講演集. 308.
- 17) 中村由美子, 恩田建介, 高東智佳子, 宮 晶子. 2003. 液体クロマトグラフィー/タンデム質量分析法による下水試料中の女性ホルモン類定量分析法の開発. 分析化学. Vol. 52. No. 2. 107-114.
- 18) 中沢 均, 市川栄治, 橋本敏一. 2002. 中小規模の下水処理場におけるエストロゲン様物質の挙動. 第36回日本水環境学会年会講演集. 162.
- 19) 那須 基, 西村孝彦, 岡本達也, 後藤雅子. 2000. 下水道における内分泌かく乱化学物質の実態調査. 第37回下水道研究発表会講演集. 258-260.
- 20) 恩田建介, 中村由美子, 荒川清美, 宮 晶子. 2001. 17β-エストラジオールの生物処理特性. 第35回日本水環境学会年会講演集. 66.
- 21) 恩田建介, 中村由美子, 宮 晶子, 葛 甬生. 2001. 生物処理工程における女性ホルモン様物質の挙動. 第38回下水道研究発表会講演集. 160-162.
- 22) 恩田建介, 中村由美子, 森田智之, 宮 晶子, 多田啓太郎, 橋本敏一, 三品文雄. 2003. 内分泌かく乱物質の生物処理特性. 第37回日本水環境学会年会講演集. 307.
- 23) 恩田建介, 楊 琇瑩, 宮 晶子. 1999. 下水中の女性ホルモン様物質の評価. 第33回日本水環境学会年会講演集. 175.
- 24) 大田寛之, 高原義治, 生長陽子, 牛場裕司, 宮川修一, 長谷川守文, 笠原康裕, 久留主康朗, 小野勝道, 久保田俊夫. 2002. ノニルフェノール類化学物質による環境汚染と分解微生物: 土壌における実態の解明に向けて. 日本微生物生態学会誌. 17: 29-37.
- 25) 斎野秀幸, 中島英一郎. 2002. SRT 制御による下水中内分泌かく乱物質の処理特性. 第39回下水道研究発表会講演集.

- 62-64.
- 26) 勢川利治, 伊藤秀樹, 道下豪二, 山内啓二. 2000. 下水処理における内分泌攪乱化学物質およびエストロゲン様活性の挙動に関する検討. 第37回下水道研究発表会講演集. 261-263.
- 27) 嶋津暉之, 和波一夫. 2003. 多摩川におけるエストロジェンの挙動と下水処理場におけるエストロジェンの収支. 第37回日本水環境学会年会講演集. 564.
- 28) 鈴木 穰, 小越眞佐司. 2001. E2 及び NP 分解微生物の探索結果. 第35回日本水環境学会年会講演集. 301.
- 29) 矢古宇靖子, 高橋明宏, 斎藤正義, 小森行也, 栗谷 忠, 田中宏明. 2001. 下水中のエストロゲン, エストロゲン様活性の測定. 第38回下水道研究発表会講演集. 154-156.
- 30) 山縣弘樹, 鈴木 穰, 重村浩之. 2001. 活性汚泥処理による内分泌攪乱物質等の除去. 第35回日本水環境学会年会講演集. 67.