

## [委員会報告]

## 流域管理における下水道のあり方に関する調査

## ROLE OF SEWERAGE SYSTEM IN WATERSHED MANAGEMENT

建設省土木研究所 酒井憲司

Kenji SAKAI

## 1. はじめに

下水道の普及拡大に伴い、下水道を経由する汚水の量は増加しており、これらを適切に処理・放流してきた結果、河川を中心として水質が徐々に改善されている。また、ポンプ場や雨水管、雨水調整池等の整備により、一定規模の降雨に対する浸水箇所は減少しているなど下水道の整備効果は着実に現れてきているといえる。

しかしながら、下水道の効果が明確には現れていない分野もある。例えば、琵琶湖や霞ヶ浦といった湖沼の水質は改善の兆しを見せていない。都市内の中小河川の水質や河川としての環境面では良好とは言い難い状況である。また近年、クリプトスポリジウムという原虫による水道水の汚染によって引き起こされた集団下痢事件や、内分泌攪乱物質による水生生物の生殖異常など、これまで見られなかった種類の問題が出現している。

質・量含めた良好な水環境を創生していく上で、下水道の果たすべき役割は今後ますます大きくなっていることは、衆目の一致するところであるが、下水道だけでは解決が困難な問題が残されていることも否定できない。このため良好な水環境創りという目標を達成していくためには、下水道の持つ能力を最大限に活かしつつ、下水道の処理区域だけでなく、周辺及び上流の区域を含めた広域的な取り組み・対策を講じていく必要がある。

こうした視点から、良好な水環境の創成を目的とした流域の水管理における下水道のあり方について検討するために、「流域管理における下水道のあり方に関する調査研究小委員会」が設置され、平成9年度と10年度の2年間にわたって調査研究が行われた。本文はその成果を紹介するものである。

なお、本小委員会のメンバーは、松尾友矩（小委員長、東京大学）、渡辺義公（委員、北海道大学）、野池達也（委員、東北大学）、大村達夫（委員、東北大学）、田中和博

（委員、日本大学）、花木啓祐（委員、東京大学）、宗宮功（委員、京都大学）、松井三郎（委員、京都大学）、藤田正憲（委員、大阪大学）、楠田哲也（委員、九州大学）、谷戸喜彦（委員、建設省）、佐藤和明（委員、建設省）、中村栄一（委員、日本下水道事業団）、酒井憲司（幹事長、建設省）、重村浩之（幹事、建設省）、石崎隆弘（幹事、建設省）、吉田敏章（幹事、建設省）、白崎亮（幹事、建設省）、山下洋正（幹事、建設省）である。

## 2. 流域管理に関する基本的考え方

水の管理に関して、いかなる課題に対して流域管理という枠組みを持ち込んで解決を図るのかを、まず明確にする必要がある。そしてその課題の解決のために、関係する者がどの範囲でどのように役割を分担していくのか、という戦略をきちんと立てる必要がある。また対策の具体化にあたっては、実施主体及び費用負担をどうするかという問題は避けられない。

流域管理を考える際の基本的考え方は、次のようにまとめることができる。

- (1) 流域全体を視野に入れた取り組みが不可欠である。
- (2) 水量や水質の検討を行うにあたって取水地点や排水地点の見直しも含めた総合的な検討が必要である。
- (3) 水辺や緑の持つ機能を最大限に発揮させるため、生態系、親水機能に十分配慮する。
- (4) 対策として、土地利用や住民等のマナー、ライフサイクルコストなどにまで踏み込んで検討する。

流域管理を実施する際の手順として、次のようなフローが想定される。

- ① 課題の抽出と選定
- ② 目標の設定
- ③ 対応策の検討と分担

#### ④ 費用負担ルールの決定

#### ⑤ 実施に向けての意思決定と実施状況の監視

流域という枠組みで対策を講じていくために必要とされる手法・仕組み等とそれらに関する課題について、以下に列記する。

- a) 住民参加：事業に対する意見の収集及び協力の確保，費用負担，ボランティア参加  
課題：どの範囲の住民まで参加の対象とするか
- b) 流域協議会：共通のルール作り及び意思決定の場，事業の調整・運営主体  
課題：どこまで強制力及び決定権を付与するか，議会との関係
- c) シミュレーションモデル：事業効果の予測，手段と目的の対応の評価  
課題：実用に耐えるモデルが開発されているか
- d) 事業効果の評価手法：実施手段が費用や環境影響などの点で効率的であるかどうかの評価，費用便益分析，ライフサイクルアセスメントなど
- e) 要素技術：処理水・再利用水の品質向上，処理水・環境水の安全性評価，モニタリング，省エネルギー化，物質管理手法

### 3. 流域管理のための具体的施策の検討

#### (1) 住民参加の方策

社会資本整備がある程度進み社会が高度化してきた現在，住民ニーズが多様となってきており，どのような社会資本をどのように整備するか，という質的な課題が突きつけられるようになってきている。多様な住民ニーズを反映させ，管理まで含めて効率的な整備をするためには住民参加が重要となる。

事業や施策における住民参加は，その内容から「啓蒙的なもの」と「住民意見の反映」との2つに大別できる。下水道事業について見ると，下水道施設の多くが地中に埋設されており，住民に意識されることが少ないことから，水に関する他の事業等と比較して不利な点を抱えている。事業を円滑に，かつ効率的に進めるためには，こうした点を克服して住民に積極的に理解を求めていく必要がある。

下水道と住民との関連については，下水道整備段階における住民の協力（工事等での協力）と，下水道整備後の住民の参加に分けて考えると分かりやすい。

下水道が未整備の地域では，住民に下水道に対する理解を深めてもらい，整備及び費用負担に対する合意の形

成を図ることが重要である。このためには，下水道に関する情報と合わせて，下水道との比較でよく話題に出る合併処理浄化槽に関する機能や費用などについても基本的な情報を提供し，下水道に対する正しい知識を持ってもらう必要がある。

下水道が普及した段階の参加としては，下水道の利用に関するものと，費用負担に関するものがある。前者の例として，下水道に流せるものと下水道に流せないものとを分かってもらい，適切に下水道を利用してもらうことにより，生活環境の改善と下水処理機能維持の効率化の両立をねらうことがあげられる。日本では欧米と比べて下水の油分濃度が低く，このことが管路施設の維持管理，処理施設の運転管理や処理水質の維持に役立っていると言われている。これは，これまでの「下水道に油を流さないで」というPRが成功している点として評価すべきことであると言える。後者については，下水道使用料という形で事業の費用を負担することが下水道と住民の大きな接点になりうると思われる。下水道サービスのレベルとそれに対する支払いの意思の有無ないし可能性についての検討が，使用料の決定の過程を通じてなされると言えよう。

流域水管理における住民参加の方策に関して，検討すべき課題等を以下に述べる。

住民が求めている情報（流域情報，下水道情報）や住民参加のために提供すべき情報を，公平かつ効果的に提供するための方法について検討する必要がある。また事業のどの段階で参加が可能かに関して整理をする必要がある。例えば，住民参加の形態として，維持管理部門での参加が考えられる。

住民参加の促進に貢献する役割を担える組織として，NPOが期待されている。NPO等の活動は，住民参加の可能性が増し，住民意識の集約化の方向性も見えてくるため，行政としてもNPOと連携を強めることは有用と考えられる。しかし一方で，サイレントマジョリティの存在もあり，この存在も考慮する必要がある。

下水道事業は国からの補助金，市町村の一般財源の他に，下水道利用者から受益者負担金及び使用料を徴収して事業を実施している。事業における便益の享受と費用の負担について便益帰着構成表の活用等により明確にしていくことは，事業への理解向上と費用負担への同意獲得のためには不可欠の要素になると考えられる。そして，将来の改築や更新，新規の施策の展開のためにも，下水道サービスによる便益について適切に評価してPRしていく必要がある。

## (2) 下水道による水量管理

総理府が平成6年度に行った調査によると、「街づくり、地域づくりの上での水や水辺に期待する役割」について、「美しい景観」、「心のやすらぎ」、「貴重な自然環境」といった水の持つ役割に対する期待が大きい。しかし、都市化によって水循環の仕組みが変化し、新たな問題が生じている。

水循環を維持するため、河川等の水量管理が重要な課題であるが、水量管理の手法として、下水道の有するポテンシャルを活用することが重要と認識されつつある。例えば異常洪水が起こった場合、水道では取水規制などの節水対策が水量管理方策として取られるが、下水道による水量管理方策として、下水処理水の再利用が考えられる。取水を減らした分を処理水の循環再利用によりまかなうというものである。また、下水処理水の再利用のみならず、雨水の地下浸透によって水道水源の水量を確保することも可能である。

### a) 処理水循環利用

下水処理水の再利用率は、平成8年度で約1.3億 $m^3$ であり、全下水処理水量の約1%に過ぎない。また約7割の処理水が海域に放流されており、ある意味で大量の水資源が海に捨てられている。河川における水量・水質を確保するには、下水処理水再利用の循環率を上げて、河川からの取水を減らす必要がある。

再利用可能な用途の範囲については、心理的要素に左右されることもあるので、水質や利用者の意見を十分に考慮して決める必要がある。心理的要素に左右されにくい処理水の再利用用途として、水洗便所用水、防火用水、公園などのせせらぎ用水が考えられるので、この辺りの用途から利用を推進していくべきである。実際に、散水用水、環境用水、水洗便所用水といった直接人間の手に触れないものから実用化が進んでいる。

下水処理水を再利用する際には、再生処理にかかるコストが問題となる。上水道事業の給水原価の平均が176円/ $m^3$ （平成7年度）であるのに比べて、下水処理水の再生水のコストが高いことは否めないが、再生水使用量の増加に伴いスケールメリットが働き単位水量あたりの再生水コストは減少すると考えられる。下水処理水の再利用を進めることによって、水道水源としての河川からの取水量を減らし、河川流量を増加させることが可能となり、その結果、豊かな水辺の形成、良好な水循環の維持に貢献できるものと考えられる。

### b) 雨水貯留および雨水の地下浸透

雨水・地下水の良好な水循環を回復するためには、雨

水の貯留・地下浸透の促進が重要である。下水道施設や宅地内に雨水の浸透施設や貯留施設を設置することにより、雨水流出量の削減、雨水の有効利用による節水、地下水の涵養を図るべきである。

雨水貯留施設は、治水を目的とした流出抑制施設と、水資源の有効利用や防災上の水の確保といった利水を目的とした雨水利用施設の2つに大きく分類される。利水を目的とした貯留施設としては、公共公益施設、事務所ビル、集合住宅などの敷地や建物の地下に雨水貯留槽を設ける事例や、個人住宅で雨水タンクを設置して、貯めた水を洗車、散水、トイレの洗浄水、防災用水等に利用する事例が増えている。

雨水の地下浸透を積極的に進めるにあたっては、汚染された雨水が地下に浸透することによって地下水が汚染を受けるといったことがないようにしなければならない。そのためには、

- ① 雨水水質の定期的な測定
- ② ファーストフラッシュの集水処理

という2点が必要になると考えられる。

### c) 水管理の一元化

水資源の有効利用を進めるにあたって、取水に関しては厚生省（水道）および建設省河川局（ダム）、雨水浸透については建設省河川局（都市河川）、建設省下水道部（合流式下水道、分流式下水道雨水管）および環境庁（地下水汚染）、下水の循環利用については建設省下水道部（下水処理）および厚生省（合併処理浄化槽）など多くの省庁および部局に関連するため、これらの部局の連携が必要になる。これらの水関連部局の一元化が望まれるところである。内分泌攪乱物質、病原性微生物などのリスク対応についても、水道、下水道などの単独の事業分野での対応は難しいものと考えられるため、水関連部局の統合および水系での一括した管理が今後重要となってくる。

## (3) 下水道システムのLCA評価

国民の理解を得ながら公共事業を実施していくためには、事業実施過程を分かりやすくする等、公共事業実施者がアカウンタビリティを果たして行くことが重要となる。そこで、事業のライフサイクルを対象として、コスト的なものだけでなく、地球温暖化など環境に対する影響の評価が可能であるLCA（Life Cycle Assessment）の考えがこれからの事業実施には重要であり、新たな評価方法・評価軸の創出のために研究が必要となってくる。

LCAの手法は工業製品の分野から発達したもので、資

源採取・製造・使用・廃棄等の製品の全ライフサイクルの段階を通して、環境に与える負荷を定量化し、環境への影響を評価しようとするものである。LCAを下水道事業に適用する場合、以下に示す範囲が考えられる。

(1) 処理システムの評価への適用

- 1) 既存の下水道システムが与える環境負荷の定量化
- 2) 個別処理・集合処理の選択

(2) 処理プロセスの評価への適用

(3) 単位プロセスの評価への適用

- 1) ユニットプロセスの選定
- 2) 新技術の評価

今後の課題を以下に示す。

a) 評価分析

LCAはA(Assessment)として何を対象とするかにより、経済性、地球温暖化、オゾン層破壊、酸性雨等の多種多様な影響の評価を可能にする。しかし、事業を選定しようとした場合、コスト的には有利であるが、地球温暖化等の環境面で高負荷となることがある。その際に様々な負荷を1つの客観的な数値とするような評価分析手法が必要となるが、現在はそのような評価分析手法は存在しない。LCAの研究が進展するにつれて、CO<sub>2</sub>、エネルギー以外の項目に係る原単位が各方面から提案されるようになると、複数の評価項目を統合して表現する評価分析手法の開発が課題になる。

b) 原単位の共通化

現在、CO<sub>2</sub>の原単位として、「建築研究所」、「空気調和・衛生工学会」等の複数の研究機関などで提案されているが、原単位を算出する方法が違ったり、材料の輸送分を考慮しているかどうかなどの前提条件が異なることにより、2倍以上異なることがある。基本データの共通・共有化が求められる。

c) 情報の開示

各部品、機器の原単位は、重量当たりの排出量が一般的に用いられている。しかし、同じ能力をもつポンプであっても、構成材料は異なっており、基準となる構成材料及び重量が必要となる。そのため、様々な企業の機器を調査することにより、平均的な構成材料及び重量を決定することができるが、機器の構成材料は企業秘密的な側面を持っているため、企業から協力を得にくい部分もある。よって、LCAの意義について説明して企業に協力を求めながら研究を進めることが重要となるが、一方で第三者的な立場により公平、公正に情報を集約できる機関が必要であり、このような体制作りが今後の課題となる。

(4) 物質管理における下水道の役割

近年、化学物質等のヒトや生態系に与える影響が明らかになるにしたがい、水環境における化学物質等の適正な管理の重要性が増大している。下水道は、流域からの様々な物質を含んだ排水を収集、処理し、公共用水域へ放流するという機能を有しているため、水環境中における微量化学物質や病原性微生物によるリスクを低減するシステム(Risk Reduction System: RRS)の構成因子の一つと位置づけることができる。

多種多様な化学物質や病原性微生物が存在する水環境において、安全性を確保し、健全な生態系を確保していくためには、現在の評価指標を満足するだけでは充分とはいえない。このため、適切なリスク評価を行うとともに、流域からの各種化学物質等の公共用水域への流入をモニタリング・制御する必要がある。

下水道はRRSの構成因子の一つであるが、費用対効果分析および費用負担のあり方をふまえ、流域全体として水道等他の要素も考慮してRRSの最適化を図る必要がある。このためには、管理主体単位ではなく、流域を単位とした管理を行う必要がある。また、下水道部局では、有害物質等の除去・無害化技術の開発、異常時対応の検討を進める必要がある。さらに、下水道で対応が不可能あるいは不経済な物質については、排水規制等を検討するとともに流入防止のための監視システムの開発を行う必要がある。

下水道法に規定されている流域別下水道整備総合計画は、下水道の整備による水質環境基準の達成を目的としているため、環境基準以外の項目の目標水質を設定することは現状では困難である。しかし、利水の安全性確保等放流先の状況によっては、環境基準の達成だけでは充分とはいえない場合があり、水系でのリスク管理の枠組みが必要になるものと考えられる。このためには、生活排水・事業所排水等を受け入れ、処理している下水道の総合的な計画である流域別下水道整備総合計画をリスク管理の基本的な計画として活用・充実させることが必要であり、また、関係者の同意も得られると考えられる。

4. 河川の再生のための凝集沈殿処理と膜分離を組み合わせた超高度下水処理システム

環境基準(河川水質)を守る意味での下水道の「効用」と、その裏で顕在化した「限界」について札幌市の事例を参考にして概観し、河川の再生のための新しい超高度下水処理システムを提案する。

札幌市は水道原水のほとんどを上流域に位置する2つのダムに集められた清浄な水としており、下水は全量を下水管に集めて8つの下水処理場で処理し、豊平川下流部、新川、茨戸川へ放流して、札幌市内を流れる豊平川の「水質」を保全している。下水道の普及により豊平川の水質が改善されたが、普及が進むにつれてその改善効果は鈍化しており、豊平川の水量は著しく減少している。

水道用に上流部の良質な水を確保し、河川の機能維持と流雪溝の水量担保を図るという矛盾した札幌の将来的課題を解決するためには、現在はほとんどを市外部に排除している下水処理水の活用が必要である。そのために、(1)現在の下水処理場を高度化して処理水を必要な地点まで輸送する、(2)必要な地点に下水管から必要量の下水を取水して高度処理水を造水する「ハイブリッド型下水処理場」を新たに建設する、等の「水量」面から豊平川を支える下水道システムの強化を考えねばならない。

本研究では、既存の活性汚泥終末下水処理場を高度化して上流部に輸送するよりも、必要な場所に小規模分散型高度下水処理施設を新設する方が有効と考えて、噴流攪拌固液分離槽（JMS）による凝集沈殿処理と回転生物膜接触法（RBC）を組み合わせたハイブリッド下水処理システムを開発し実用化させた。

## 5. LCA を用いた下水汚泥処理システムの評価

地球環境への影響が懸念される二酸化炭素の排出の面で、建設活動、特に都市や都市基盤施設の整備にともなう排出が産業分類上大きな割合を占めており、持続可能な社会を構築するにあたっては、これらの資源の消費を減らしてゆくことが必要である。さらに、建設活動は公的及び私的資本の固定に貢献しているので、ライフサイクルの視点に立ってこれらの資本を長持ちさせると同時に、これら固定資本の上で操業もしくは運転される活動の物的代謝が省資源・省エネルギー的で環境負荷の低いものとなるようにあらかじめ構造を組み立てることが重要である。

本研究は、汚泥処理における嫌気性消化の導入による環境負荷削減効果を明らかにするため、地球温暖化に関わる二酸化炭素および酸性化に関わる  $\text{SO}_x$  と  $\text{NO}_x$  を評価項目として LCA 手法を用いて比較評価したものである。検討した汚泥処理フローは、次の三つである。

ケース1：濃縮－嫌気性消化－脱水－乾燥－焼却－埋立

ケース2：濃縮－嫌気性消化－脱水－焼却－埋立

ケース3：濃縮－脱水－乾燥－焼却－埋立

検討の結果、下水汚泥処理における嫌気性消化法の有効性は汚泥処理フロー全体での回収エネルギーの有効利用状況に強く影響されるが、有効利用が効果的に行われた場合には嫌気性消化の導入によってエネルギー消費、二酸化炭素排出、 $\text{NO}_x$  および  $\text{SO}_x$  排出の全ての項目で環境負荷を低減させることが可能であった。また、焼却の前段に効果的な脱水汚泥の乾燥システムを導入することにより嫌気性消化法を用いる効果が飛躍的に高まることが示された。

## 6. 衛生学的観点からの流域管理と下水道システム

水系感染症は、上水道およびレクリエーションなどの水利用を介してその流行が拡大していく。特に都市（＝給水地域）における水系感染症の流行に上下水道システムが関与していることは、過去の水系感染症の発生状況に関する調査結果から明らかである。

一つの河川の流域に複数の都市が位置し、ある都市の下水処理水を他の都市が水源として取水するという我が国の水利用の現状を考えると、水系感染症のリスクはもはや一都市の問題ではなく、水源である河川（または湖）の流域全体を巻き込んだ問題に発展していることは明白である。したがって、ある都市において発生した水系感染症が上下水道システムを通じて下流の都市にどのように拡大していくか、その動態を研究することは流域管理の立場において非常に重要である。

そこで本研究では、最初に1都市について都市の人口と年齢構成が感染リスクに及ぼす影響を評価し、続いて流域2都市間における水系感染症の流行モデルを開発し、それを用いて流行の形態を検討した。

まず実際に下水処理放流水が受容した河川水が水道水源あるいは農業用水として利用されている2か所の下水処理場において指標微生物の濃度と病原微生物の検出状況を紹介する。処理場の規模にかかわらずどちらの処理場においても放流水中にサルモネラ菌の存在がしばしば確認されている。一方、腸管出血性大腸菌（O157）と腸管系ウイルスに関しては全く問題はなかった。ただし一方の処理場においては、下水放流水中にしばしば糞便性大腸菌が検出され、この中にサルモネラ菌を含む病原微生物が含まれている危険性は否定できない。

河川流域においては水系感染症は飲料水を通じて伝播していく。このことは、上水道システムでつながってい

る給水地域内での感染はもちろん、水源を同一としている流域都市群への感染の拡大の危険性をもはらんでいる。そこで、上流の都市で発生した感染症が下流の都市にいかにか影響を与えるのか、流域に隣接する 2 つの都市の間でシミュレーションを行った。ここでは、河川流域における水系感染症の都市間伝播を予測するモデルを開発し、流行伝播係数 (OPC) による公衆衛生学的観点からの流域管理手法を提案した。そして、浄水場・下水処理場における微生物除去効率、河川流量を変化させて OPC の算出を行った。今後、河川水中のバックグラウンドとしての微生物濃度などのパラメータと OPC の関係を探るとともに、浄水・下水処理過程ならびに河川水中における微生物のより詳細な挙動をこのモデルに取り入れる予定である。

## 7. 小規模下水道に適した高度処理施設の開発 (無酸素・好気ろ床法)

生活排水の処理率が向上するとともに、下水処理場をはじめとする各種生活排水処理施設は水道水源水域を放流先として立地するケースが増えている。本研究はこのような背景を踏まえて、小規模下水道施設に適した高度処理施設の開発を目的としている。開発の対象とするプロセスは、(1)最初沈殿地の固液分離機能と脱窒槽の機能を持つ無酸素ろ床、(2)包括固定化担体 (ペレット) を用いた硝化槽、(3)硝化槽流出水中に含まれる残存固形物、溶解性有機物及びアンモニア性窒素の除去のために用いた好気性ろ床、で構成されている。

無酸素ろ床内の汚泥の量的分布及び脱窒活性を調べた結果、以下のことが分かった。

- 1) ろ床内の汚泥はろ層全体に渡りほぼ均一に分布していた。
- 2) ろ床内の付着汚泥量、捕捉汚泥量、堆積汚泥量の割合は、概ね 0.4 : 0.4 : 0.2 であった。
- 3) ろ層中部の捕捉汚泥及びろ層底部の付着汚泥の脱窒活性が  $4\text{mg-N/g-VSS/h}$  と他の場所より高い値を示した。それ以外の場所での捕捉汚泥、付着汚泥及び堆積汚泥の脱窒活性は  $3\text{mg-N/g-VSS/h}$  程度であった。

ペレットを添加した同時硝化脱窒装置による連続運転での実験では、 $\text{DO}=4\text{mg/l}$  以上の好気条件下においても脱窒反応は進行し、ペレットを用いて同時硝化脱窒が可能であることが確認された。また高 DO で運転しているペレットでは同数程度の脱窒細菌が存在していたが、脱

窒活性が低下しており同時硝化脱窒反応の進行が低下することが予想される。よって本法を行うためには硝化活性を維持し、かつ脱窒細菌の活性を高めることが重要であると考えられる。しかしながら DO と同時硝化脱窒反応について明確な関係が得られなかった。これについては、脱窒反応を支配する因子が DO だけでなく、水温、窒素負荷等も影響することが考えられる。

## 8. 空間情報を用いた都市の水循環システムモデルの構築と下水道施策の評価支援システム

下水道に係わる各種の施策を展開していくためには、その施策の妥当性を事前に確認し評価していくことが必要である。近年においては、各種の公的な事業の推進においても、そのコストと便益の比較が求められ、さらには周辺住民の理解が得られないと施策の実現が難しいこととなる。このような事前評価の必要性は環境影響評価法の規定に従うような大きな環境影響を考えなくても、個別の施策案件の立案レベルにおいても高いものとなっている。ただし事前評価のためには、その施策に係わって生じるであろう問題点をあらかじめ想定することが必要になる。

このような事前評価を進めるためには、ある種の試行実験が実施できることが必要になる。しかし、下水道のような事業の試行実験を広域的に行うことは不可能であり、何らかの仮想的な実験を通して事前評価を行うことが必要になる。この仮想的な実験を行うモデルが開発できれば、その利用価値は大変高いといえる。下水道システムの主要な条件を再現し、各種施策の立案評価を支援するコンピューターモデルの開発が求められることになる。

そこで、下水道システムに関する各種の施策を評価できるように、東京都区部を対象とした水循環モデルを構築し、さまざまな形態の雑用水供給システムを導入した場合の効果を水資源および経済的観点から定量化し、地域ごとに最適な雑用水供給システムを検討した。ここでは、地理情報システム (GIS) を用いてシミュレーションモデルを構築している。

このモデルでは都市の建造物などの施設からの汚水と降雨からの流出水が下水道に排出され、下水処理場まで流下し、河川に放流されるまでをモデル化している。モデルは、主に地域を表すメッシュデータ、下水データ、河川データで構成される。構築したモデルを用いて、下水処理場から高度処理水を供給する広域循環システム、

下水道幹線の途中に処理施設を設けて供給する上流供給式広域循環システム、地域内で循環利用する地区循環システム、建物に降った雨水を貯留利用する雨水貯留システム、の4つの形態の雑用水供給システムについて評価した。

ここで構築したモデルにより、それぞれの雑用水供給システムの特性について把握することができ、地域ごとに最適な雑用水供給システムを選択した場合、上水道の料金より安価であり都区部全体の水需要量の17%を供給できるなど、雑用水供給システムの導入施策を検討していくうえでさまざまな知見が得られた。

ここで開発したモデルのように、コンピュータ上で仮想的に各種の計画をシミュレートし、さまざまな効果や環境影響など有用な情報を提供するツールは、さまざまな政策立案プロセスに対する一般市民の参加という観点からも必要性が非常に高いものである。今後さらにモデルを改良し、精度をあげていくとともに、利用しやすい形のモデルとしていく必要がある。

## 9. 下水汚泥の資源化の環境面での貢献の評価

地球環境への下水道事業の負荷を削減し、また循環型の物質フローの形成に積極的に参画することによって他部門での負荷削減に下水道が貢献することが求められている。下水道施設における省エネルギーが重要であることはもちろんであるが、それにとどまらず、他の産業や社会と関連させながら資源循環型、ゼロエミッション型の下水道を進めることが必要となる。物質フロー解析の言葉で言えば、上流と下流も含めた全体の環境負荷の削減を考えることになる。

本研究においては、とりわけ下水汚泥のセメント資源化によってもたらされる環境負荷削減効果を定量化し、ゼロエミッション型の汚泥管理の効果とその問題点について検討する。評価対象は消化汚泥の脱水以降で、(1)従来型：脱水後焼却して埋立、(2)ゼロエミッション型：脱水後カンブン化してセメント製造工程に搬入、(3)ゼロエミッション改良型：ゼロエミッション型の脱水を効率の高い機種へ変更したものである。

セメント資源化による下水汚泥のゼロエミッション型管理は、物質収支の原単位では、資源・エネルギー消費およびCO<sub>2</sub>排出において従来型に比べて全般にわずかに削減されており、環境面では有効であると考えられる。日本における実際の規模でみると、他の制約要因がない限り、セメント産業側の汚泥受け入れ可能量は汚泥脱水

方式の変更がなくとも汚泥発生量を大きく上回っている。しかし、地域的な需給バランスを考えると、セメント産業の偏在性からセメント産業側の汚泥受け入れ可能量が汚泥発生量を下回る地域も存在する。そこで、下水汚泥の全量セメント資源化のために、汚泥脱水方式の変更や地域間の広域的輸送が考えられる。また、CO<sub>2</sub>排出に占めるセメント産業の割合は大きなものとなっており、CO<sub>2</sub>排出のさらなる抑制が課題としてあげられる。

## 10. 都市内水循環利用のためのコンパクトな高度処理システムの開発

資源の有効利用は、各種資源の循環活用のルートをいかに構築するかにかかっているが、社会システムの循環利用工程の確立が遅れているため、資源回収は思うように進んでいない。水資源については、各種製造工場において水回収利用が進められ回収率が80%近くに及び、コスト意識の高い経営者の姿勢が読みとれる。汚濁物を水に流す時代は終わりを告げ、汚濁物を有効利用し、水を回収利用するいわゆるゼロディスチャージを目指す世界が、単独工場においてさらに工場群での相互利用へと連なり広がりつつある。省資源・省エネルギーの流れは次世紀において、人の生活の場を支配する基本的概念・規範となるはずであり、都市経営者としての各市町村にも、同じことが求められることになろう。

都会で水を扱ってきた水道事業も、既設の都会施設となって現存するところが多くなり、新たに建設するのは小規模なものや僻地のものばかりで、今までのような大きなインセンティブを持っていないように思える。水道法や下水道法に記された施設を建設する「建設の時代」から、「管理の時代」へ移りつつあることも事実であり、このままでは、他の産業に見られるように当然人員整理と合理化の波が待っているだけであろう。事業としては先が見えだした、後世の人に借金だけを残した斜陽な事業と取られかねない。下水道に新たな都市環境創造という意味を持たせ、都市内環境の再開発を進める道具として位置づけなおす必要がある。

都会内での水総量の管理、水質別貯水量、火災や地震など緊急対策、季節変化や集中豪雨などへの対策、散水による機能的な道路管理と清掃、都市内環境情報の収集と伝達など展開すべき分野をかなり広げることが可能であろう。既存の水処理概念に固執することなく、今後必要とされる機能を有する処理システムを新たに開発し、都市施設として再構築ないし改善を図る必要がある。

以上のことを踏まえ本研究は、下水から水を効果的に回収するプロセスの開発を目指している。地域内の水貯留量（ストック）を増加し地域内の新規水需要に対応し、地域内で利用される水量を増加するが、地域を流下する流量（フロー）には変化を与えないものである。目標とする水質に関しては、人の肌に触れて問題がない程度の水とする意味で、十分な消毒と共に有機物：BOD<sub>2</sub>mg/l、窒素：5mg/l、リン：1mg/l 程度の濃度に対応できるものを目指すこととしている。公園やポンプ場といったわずかな敷地内に高度処理プラントを設置できることを目指すため、滞留時間は4～5時間とし、処理能力も1000m<sup>3</sup>/日程度の処理施設を想定して技術開発を進める。

水処理の基本的考え方は次の通りである。

- 1) コロイド性並びに固形性有機物を凝集沈殿で除去する。同時にオルトリン酸性リンを除去する。発生汚泥は下水道へ還流。凝集剤として焼却灰の有効利用を試みる。
- 2) 溶解性有機物を接触酸化処理で分解処理し、発生固形物は下水道へ還流。
- 3) オゾン処理の適用により、色度制御、難分解性有機物の低減、細菌並びに原生動物などの疫学的安全性を確保する。
- 4) アンモニア性窒素を分別し、下水管に還流させる。

## 11. 下水処理過程における環境ホルモンの挙動に関する研究

閉鎖性水域では汚染物質がどんどん蓄積する傾向にある。従って、この様な場での水質管理の要諦は、いかに流入する汚染物質を削減するかということである。下水道の整備が進み、汚染された水は下水処理場に集中するようになった。そこで問題となるのは、下水処理場においてどの程度の処理をしたらよいかということである。すなわち、現状の処理方法で十分なのかあるいはまだ不十分なのかどうかを調べる必要がある。

環境ホルモンの問題が世界中で大きな関心を集めている。何が主要な環境ホルモンであるかはまだわかっていない。環境ホルモンが下水処理過程でどの様に無毒化されるのかを知ることが重要である。そこで本研究では、酵母のスクリーニング系を用いて、女性ホルモン様物質の下水処理プロセス中での挙動を解析した。

サンプリングは1997年の10月、某処理場にて行った。この処理場の処理能力は55,000m<sup>3</sup>/日で家庭排水や産業廃水を集めて処理を行っている。サンプルは下水処理の

各プロセスから採水したものであり、計9点である。すなわち、(1)生下水、(2)初沈前、(3)初沈後、(4)脱窒槽、(5)硝化槽、(6)活性汚泥後、(7)塩素処理後、(8)砂濾過後、(9)余剰汚泥の脱水濾液である。

女性ホルモン様活性は遺伝子組み換え酵母により、17βエストラジオールはELISA法により分析した。今回明らかにになったことをまとめると、次の通りである。

- 1) 生下水の女性ホルモン様活性に占めるエストラジオールの寄与は約30%であったが、放流水の活性はほぼエストラジオールの濃度で説明できる。
- 2) 下水処理場放流水のエストラジオール濃度は約7～9ng/lであった。
- 3) 生下水中にはグルクロニダーゼ活性があるがスルファターゼ活性はない。今後は抱合体の挙動に関してより詳細に検討する予定である。
- 4) 余剰汚泥の脱水ろ液には流入水の3倍という高い女性ホルモン様活性があり、このことは、女性ホルモン様活性原因となる物質が活性汚泥に吸着されている可能性の高いことを示唆している。

## 12. 下水処理系におけるアルキルフェノールエトキシレート の消長

我々の周りに氾濫する化学物質の一部は、現在の下水処理プロセスでは完全に除去することができず、処理水中に含まれて河川等の水域に放出されるため、水の循環利用を妨げる原因の一つとなっている。従って、総合的な水管理システムを確立するためには、下水処理系における有害化学物質の消長を把握し、そのリスクを正確に評価するとともに、対策を講じることが重要である。

アルキルフェノールエトキシレート（APE）は主に工業的に大量使用されている非イオン界面活性剤の一範疇であり、先に述べた下水処理水のリスク管理上問題視されるようになってきた。APEは生物処理により完全分解されることはないと考えられており、部分的な分解によって生じる代謝物が元物質に比べて高い急性毒性を示すことや、内分泌攪乱作用を有することが明らかになったことから、にわかにクローズアップされるようになってきた。スイスを始めとする欧州諸国では、その下水処理系における消長が調査され、生産、使用や排出が規制されるなど何らかの対策が講じられているが、我が国においては未だ十分な調査が行われていないのが現状である。

そこで本研究では、日本各地の下水処理場におけるノニルフェノールエトキシレート（NPE：APEのアルキル



基がノニル基のもので、APE 全体の大部分を占める) およびその代謝物 (NPE 化合物) の分布を調査し、その消長を論じた。調査は 1995 年 5 月～1996 年 3 月の期間に、日本国内 15 都道府県、39 箇所の公共下水道処理場および 1 箇所の合併処理浄化槽より、初沈越流水 (PE)、終沈越流水 (SE)、および滅菌放流水 (FE) をグラブサンプルとして採取し、NPE 化合物の分析を行った。

全ての処理場の PE から主に NPnEO ( $n=4-18$ ) からなる NPE 化合物が検出され、日本全国の下水中に NPE が流入していることが明らかになった。調査対象とした下水道処理場の中には家庭排水のみを処理しているものも含まれていたが、工業用途にしか利用されていないといわれている NPE による汚染が認められたことから、家庭内で使用される化成品中にも NPE が含有されている可能性が示唆された。あるいは、肥料の溶解に使用されている NPE や事業所から排出された NPE が雨水等に混入し、下水管へ流入していることも考えられる。PE からの NPE 化合物の検出濃度は、 $10\sim 1972\ \mu\text{g/l}$  の範囲にあり、平均濃度は  $296\ \mu\text{g/l}$  であった。PE 中には元化合物 NPnEO ( $n=4-18$ ) が生分解を受け酸化エチレン鎖が短くなった代謝物である NPnEO ( $n=1-3$ ) や、さらに分解が進み末端がカルボキシル化された NPnEC ( $n=1-3$ ) も少量ながら含まれていたことから、下水管内を流下するうちに幾分生分解が起こっていることが明らかとなった。しかし、NPnEO ( $n=1-3$ ) や NPnEC ( $n=1-3$ ) が嫌気条件下でさらに分解されて生じる最終的な代謝物である NP や、ハロゲン化された NPE 化合物 X-NPnEO、X-NPnEC ( $X=\text{Cl}, \text{Br}$ ) は検出されなかった。

一方、ただ 1 サンプルの例外を除いて、分析に供された SE および FE の全てからも NPE 化合物が検出され、濃度は SE 中で  $0.17\sim 454\ \mu\text{g/l}$  (平均  $95.4\ \mu\text{g/l}$ )、FE 中で  $1.63\sim 1170\ \mu\text{g/l}$  (平均  $90.0\ \mu\text{g/l}$ ) であった。SE および FE 中では、好氣的生分解の産物である NPnEO ( $n=1-3$ ) および NPnEC ( $n=1-3$ ) が PE 中での比率に比べ、かなり高い割合を占めており、実際の下水道処理場の生物処理によって分解が進むことが確認された。また、15 の処理場では SE あるいは FE 中に NP が最大  $3.9\ \mu\text{g/l}$  の濃度で検出され、好気処理プロセスにおいても処理系内で部分的に嫌気状態が形成され、嫌氣的生物変換が行われることが示唆された。

さらに、25 の処理場からは、やはり低濃度ながら代謝物がハロゲン化 (塩素化、あるいは臭素化) された物質が検出された。X-NPnEO、X-NPnEC ( $X=\text{Cl}, \text{Br}$ ) は、塩素消毒などの工程で副生成物として生じる可能性が報

告されている。

以上の結果より、下水道処理系に流入した NPE は主に生物処理によって変換され、平均約 70% 除去されるものの完全には除去しきれず、放流先の水環境汚染を引き起こしていることが明らかになった。下水放流水、あるいはその排出先である水域の水を上水源として利用する場合には、このようなリスクをできる限り低減することが必要であることから、今後は NPE を始めとする難分解性化学物質を完全に除去することのできる高度下水道処理技術の導入が望まれる。

### 13. 都市における水供給と下水道の位置づけ

近年降水量が年ごとに大きく変化している。その結果、大量の水を消費している都市域、特に東京、福岡市や松山市などでは 2 年に一度程度渇水に見舞われるようになってきている。渇水を避けるため、新たな水源開発など各種の対策が求められているが、根本的な対策にはまだ至っていない。博多湾流域は都市の開発と人口増加のため水の需要も年々増加の傾向を見せているが、比較的流域面積が狭く、一人あたりの降水量も北部九州の半分しかなく、すでに流域外の筑後川から需要量の 1/3 程度を導入している。それゆえ、博多湾流域では、水資源確保の抜本的対策として海水淡水化施設の導入が計られている。しかし、海水淡水化施設は水不足の問題をエネルギーとコストの問題に変えて解決しようとするものであり、他の水源確保に比べ環境負荷が大きい。

そこで本研究では、流域の水資源の空間的把握のため、まず GIS 手法で流域の空間データを分析し流域の水資源環境のデータベースを構築した。そして、指標としてコストと LCE を利用し流域の水利用形態について検討した。すなわち、平常時と渇水時の対策として既存の水道以外にカスケード式節水、地下水、下水再生水及び海水淡水化水を含む水資源確保手段シナリオを立案し、それらの最適な選択方法について博多湾流域を対象に検討した。平常時の節水対策としてのシナリオと渇水時の緊急供給対策のシナリオとに分けて、各対策を組み合わせたシナリオ別費用と LCE を算定し、各時期の最適案を求めるとしている。

平常時については、地下水が費用と LCE の両面において他の対策に比べて低いため、良好な水源であることが分かった。カスケード式節水のようなソフトの対策は節水効果が高く、費用と LCE は少なく済むが、対策の実施には個人レベルの参加が必要であるため、対策の効果

の評価は容易でない。

渇水時の水源対策は水量の確保にある。対策別水供給量を見ると、カスケード式による効果が最も高く、次いで井戸水、海水淡水化の順である。対策にかかる総費用をみると、海水淡水化が一番高く、カスケード式は費用と消費エネルギーが不要と仮定しているので、これを除くと井戸水がかなり安くなり、下水処理水の循環利用がそれに続くことが分かる。LCE については、圧倒的に海水淡水化が大きかった。渇水対策としては、水量の確保が優先するため費用と LCE が高くても、その施設を使うしかないという考え方もあるが、計算結果が示すようにあまりにも高いので、対策としての優先的採用は避けたい。

以上、エネルギー最小、コスト最小の視点で渇水時の不足水量を補うための供給方法の選択について検討した。1994、1995 年の渇水では、流域の平常時と渇水時の配水量の差が最大で約十数万  $\text{m}^3/\text{日}$ であったことを考慮すれ

ば、この計算例は海水淡水化施設の導入もやむを得ないが、平常時の地下水利用によって 1 日当たり数万から十数万  $\text{m}^3$  の水道原水がストックされることも考慮したシナリオの採択も必要である。渇水に見舞われたことのある地域では、平常時の水源利用形態が渇水にも影響を及ぼすため、渇水に備えた平常時の水源管理が必要である。海水淡水化施設など渇水時のための施設であっても、その施設の建設費用とエネルギーは日頃の水源利用費に含めざるを得ず、渇水時の対応が平常時の費用にも及ぶことになる。

本研究は基本データの整理に GIS を利用した流域水管理手法の一例を提示したものであるが、流域の水質水量総合管理のためにはさらに適切な判断指標と下水処理水の適用を含めた管理方法の開発が必要である。

(1999.6.30 受付)