

◆ 特集：自然と共生する国土の再構築に向けて ◆

水循環の健全化のための下水道システムの改善

管谷悌治* 平山孝浩** 藤生和也*** 南山瑞彦****

1. はじめに

流域圏・都市再生に向けた水循環において、都市の静脈とも言える下水道システムは重要な要素の一つであり、水環境の健全化を図る上においては、下水道システムが大きな役割を果たすことは言うまでもない。

そこで、水環境の視点から見て下水道システムにおいて課題となっている事項の中から、近年社会的にも注目されている合流式下水道と環境ホルモンの二つを取り上げることとした。合流式下水道については「合流式下水道からの汚濁負荷流出量の予測手法の開発」、環境ホルモンについては「オゾン処理による環境ホルモン等の効率的低減」に関する取り組みについて紹介する。

2. 合流式下水道からの雨天時汚濁負荷モデル

近年、合流式下水道からの未処理放流水等による公共用水域の水質汚濁の問題が顕著化してきている。また、栄養塩類の閉鎖性水域への影響が深刻となってきており、赤潮等の被害が毎年発生している。しかしながら、合流式下水道からの汚濁負荷流出についてこれまで使用されてきた解析モデルである土研モデルは、栄養塩類を対象としていなかった。また、合流式下水道の雨天時越流水に関する個々の対策効果を評価しようとしても、従来のモデルでは的確に解析結果を得ることは困難であった。

このような背景から、放流先を包含する流域圏と都市を対象として、合流式下水道越流水の与える影響をよりの確に評価するため、分布型汚濁負荷モデルを開発すると共に、これまでの解析できなかった窒素、リン、大腸菌群数についてもモデル化を行った。

2.1 分布型汚濁負荷流出解析モデル

合流式下水道改善計画を策定する際、「雨天時下水の特性把握」、「対策施設の定量的評価」等を行うため、「流出解析モデルによるシミュレーション」は不可欠となる。

日本では、合流改善等を検討する際の雨水・負

荷量モデルとし、修正RRL法および土研モデルが広く用いられてきた。しかし、同モデルは懸案地点のみの雨水流出量および汚濁負荷量の算出を目的とする集中型モデルであり、対策効果の評価も負荷量算定地点のみを基本としている。そのため、流域中流部等におけるオフサイト貯留（滞水池）、貯留管や部分的な浸透施設等の合流式下水道雨天時越流水対策の効果を懸案地点で適切に評価し難いという問題があった。

そこで、合流式下水道からの汚濁負荷流出状況の実態調査を行い、流出特性の把握と土研モデルへの適用性について検討し、土研モデルを改良してさらに様々な合流式下水道改善対策の適正な評価が行えるモデルの開発を行った。

分布型の汚濁負荷流出解析モデルは図-1に示すように流域モデルと管路モデルとで構成した。流域モデルは路面や屋根などの堆積物の流出を地表面モデルとし、管内堆積物の流出を管内モデルとした。

2.1.1 流域モデル

流域モデルの基本式形を式1~4に示す。

管内モデル（式1）は集中型土研モデルの管内流出の項を、地表面モデル（式3）は地表面からの流出の項と同式形とした。ただし、流域モデルの汚濁負荷量を算定する基本式では路面等からの流出負荷量は管内堆積負荷量に寄与すると仮定した（式2）。

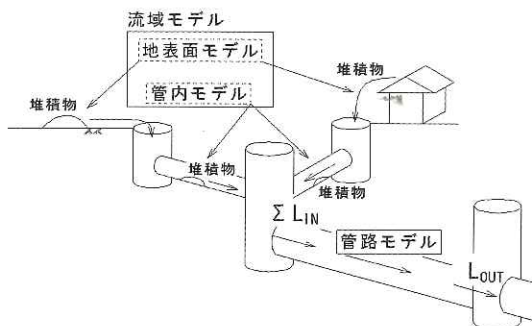


図-1 分布型モデル

[管内モデル]

$$L_D = C \cdot P_P^m \cdot Q^n (Q - Q_c) \quad (式1)$$

$$\frac{dp_P}{dt} = D + L_S - L_P \quad (式2)$$

[地表面モデル]

$$L_S = \frac{1}{3.6} K \cdot P_S \cdot (r_e - r_c) \cdot A \cdot Imp \quad (式3)$$

$$\frac{dp_S}{dt} = a - \frac{1}{3.6} K \cdot P_S \cdot (r_e - r_c) \quad (式4)$$

- LD : 管内流出負荷量 (g/s)、C : 負荷流出係数
- PD : 管内残存負荷量 (g)、Q : 流量 (m³/s)
- Qc : 限界流量 (m³/s)、D : 汚水負荷量 (g/s)
- LS : 地表面流出負荷量 (g/s)、
- m, n : 定数 (表-1参照)
- K : 地表面残存負荷流出量、
- PS : 地表面残存負荷量 (g)
- re : 有効降雨強度 (mm/hr)、
- rc : 限界降雨強度 (mm/hr)
- A : 排水区域面積 (ha)、Imp : 不浸透面積率、
- a : 補給係数

表-1 定数 (m, n)

	BOD	COD	SS	T-P	T-N	大腸菌群
m	2	2	1	2	2	1
n	0	0	1	0	0	1

2.1.2 管路モデル

管路モデルは完全混合モデルとし、管路内の水質と管路から流出する水質は同等であると仮定した。(式5、6)

$$L_{out} = C_c \cdot Q_{(B)} \quad (式5)$$

$$\frac{d(S \cdot C_c)}{dt} = \sum L_{in} + L_P - L_{out} \quad (式6)$$

- Lout : 流出負荷量 (管路モデル下流端) (g/s)
- Cc : 管路内水質 (g/m³)、
- Q(B) : 流量 (管路モデル下流端) (m³/s)
- S : 管路内流量 (m³/s)、
- Σ Lin : 上流側管路からの流入負荷量 (g/s)

2.2 分布型土研モデルの特徴

開発した改良土研モデルは無償公開する予定である。このことにより利用者側に必要な修正を自分で行える、モデル定数設定において最新の情報を用いることができる際して既往の知見を活用できる、ソフトが軽いメリットが期待される。

制約としては、既存の集中型の土研モデルをベー

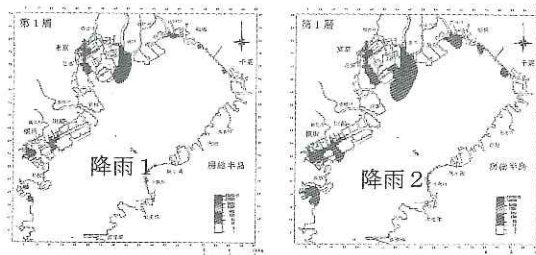


図-2 大腸菌群数計算結果 (ピーク流量61時間後)

スにしているため、全ての現象を同一の定数で表現することは困難であり、現在の管渠モデルは完全混合型モデルで、完全混合の条件が適用できない環境下での評価は困難であることが上げられる。また、エンジン部分の開発を優先しているため、入出力などの面において市販ソフトに比較し見劣りする。

2.3 統合解析モデルによる流出汚濁負荷量の予測

東京湾周辺においては、合流式下水道を採用する都市が多数存在し、雨天時には各吐口または処理場等における簡易放流によって、河川または東京湾へ汚濁負荷が放流される状況にある。ここでは、先に示したモデルを用いて合流式下水道から東京湾へ流出する大腸菌群を予測し、別途開発された海域移流拡散モデルを用いて東京湾内における大腸菌群の挙動について予測を行った。

2.3.1 東京湾内の移流拡散

東京湾内での移流拡散状況の一例を図-2に示す。降雨1のケースでは、河口部や埋立地周辺の閉鎖的な水域では、沖合への拡散が弱く、比較的長い時間この水域にとどまっているが、開放的な水域では比較的速く拡散するという特徴がある。また、大潮日と小潮日で比較すると、前者の方が初期の拡散速度が大きいが、雨天時汚濁負荷流出約13日経過後 (半月周潮後) の拡散範囲は両者とも同程度であった。なお、水浴場の基準に合致する大腸菌群数は1,000MPN/100ml (10MPN/ml) 以下であり、各ケースとも、例えば、いなげの浜や小櫃川河口付近等ではこの濃度に達する可能性は低いと予測できる。

これはシミュレーションの一例ではあるが、このように他のモデルと組み合わせることにより、合流式下水道の雨天時越流水についての影響について放流先水域も含めて評価が可能となる。

3. オゾン処理による環境ホルモン等の効率的低減

近年、水環境における内分泌攪乱化学物質 (環境ホルモン) 等をはじめとする微量環境汚染物質

の問題が大きくなってきている。これらの物質は主に都市活動により排出され、微量ではあっても水環境や生態系への影響が懸念されるものであり、水環境の健全化を図るためには下水放流水中におけるこれらの物質濃度の低減が重要となる。

下水処理における環境ホルモンの挙動については、流入下水中の環境ホルモンが下水処理の過程で低減するとの知見が得られている¹⁾が、環境ホルモンが生態系等に与える影響については知見が十分ではなく、今後更なる削減が求められる可能性がある。下水処理において環境ホルモン等を更に低減するためには様々な手法が考えられるが、オゾン処理が有効であることが多数指摘されている²⁾。しかし、オゾン処理の導入目的は消毒や脱色が中心となっており、環境ホルモン等の低減を考慮したオゾン処理の運転管理がなされていないのが現状である。そこで、下水処理水中の環境ホルモンの低減を効率的に行うためのオゾン処理運転方法の確立を目的として、パイロットプラント実験により、オゾン処理条件等による低減効果の違いについて検討を行った。

3.1 パイロットプラント実験の概要

当所湖北総合実験施設（茨城県霞ヶ浦浄化センター内）に実験装置を設置し、実下水を用いた標準活性汚泥法パイロットプラントから得られた二次処理水あるいは霞ヶ浦浄化センターの砂ろ過水を原水槽（容量約1.3m³）に貯留し、環境ホルモンの標準試薬を原水槽へ添加後、原水槽よりオゾン反応塔（φ200mm、反応有効高さは1,600mm～4,100mmで4段階に可変）へ試験水を連続通水し、

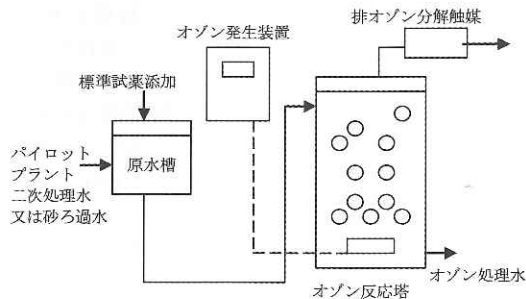


図-3 実験装置の概要

表-2 オゾン反応塔流入直前の試験水の水質

水質項目	二次処理水	砂ろ過水
pH	7.3～8.0	7.5～8.1
SS (mg/L)	0.3～3.7	0.2～1.1
BOD (mg/L)	3.8～17	5.1～9.1
TOC (mg/L)	4.5～8.2	4.5～7.7

オゾン処理を行った（図-3、表-2）。

除去対象物質は、ノニルフェノール（以下「NP」）、ビスフェノールA（以下「BPA」）、17βエストラジオール（以下「E2」）、エストロン（以下「E1」）とした。今回用いた二次処理水及び砂ろ過水には、実験条件として想定した濃度の環境ホルモンが存在していなかったため、概ねNP = 1.0 μg/L、BPA = 0.5 μg/L、E2 = 0.003 μg/L、E1 = 0.06 μg/Lの濃度となるように、これらに標準試薬を添加した。この濃度は、過去の全国的な調査結果¹⁾における下水処理場放流水の最大濃度を目安にして設定した。

オゾン処理条件は、オゾン注入率・接触時間を1.5～5mg/L及び3～15minの範囲で3段階に設定し、反応塔の有効高さを2段階（1.6m、4.1m、有効容量約50L、130L）に設定した。

3.2 オゾン処理条件が環境ホルモン低減効果に与える影響

得られた結果全てをオゾン注入率のみに着目し整理した場合（図-4）、BPAはオゾン注入率約5mg/Lの全てのケースで、NP及びE2はオゾン注入率約3mg/L以上のほとんどのケースにおいてオゾン処理後に検出下限値未満となった。E1についてはオゾン注入率約5mg/Lの全てのケースで定量下限値未満となった。

検出下限値あるいは定量下限値未満にまで低減できないケースが多く見られたオゾン注入率約1.5mg/Lの条件において、接触時間に着目して整理したが（図-5）、接触時間が約3～15minの範囲内では、NP、BPA、E2及びE1の低減効果に明確な違いはなかった。オゾンの酸化力は非常に強く、環境ホルモンとの反応が短時間で終了すると思われることから、今回の条件では接触時間による低減効果の違いが見られなかったと考えられる。これらの結果から、オゾン注入率を5mg/Lとし、接触時間を3minとすれば、NP及びBPAを検出下限値未満まで、E1を定量下限値未満まで

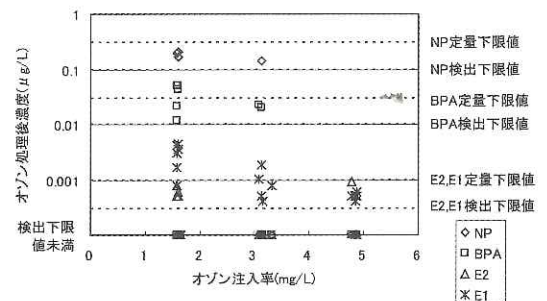


図-4 オゾン注入率とオゾン処理後のNP、BPA、E2及びE1濃度の関係

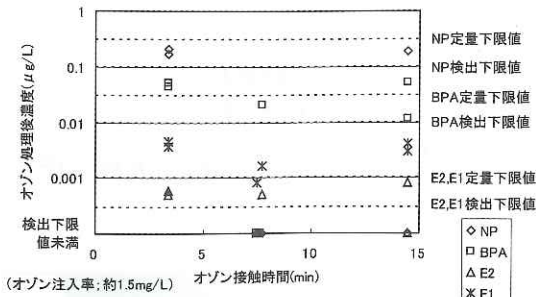


図-5 オゾン接触時間とオゾン処理後のNP、BPA、E2及びE1濃度の関係

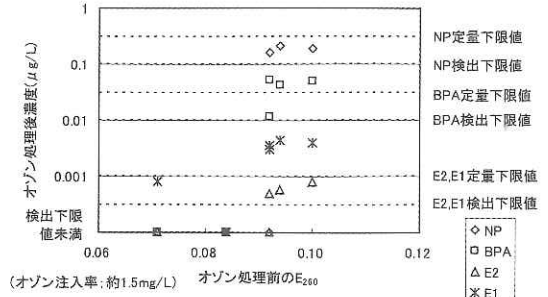


図-6 オゾン処理前のE260とオゾン処理後のNP、BPA、E2及びE1濃度の関係

低減することができると考えられる。

なお、反応塔高さによる、NP、BPA、E2及びE1の低減効果の違いは見られなかった。

3.3 下水処理水性状が環境ホルモン低減効果に与える影響

オゾンは不飽和結合を有する有機物との反応性に富んでいるとされている³⁾。そこで、不飽和結合を有する有機物の指標であるE260(260nmの波長の紫外線吸光度)⁴⁾に着目し、オゾン注入率管理のための指標としての利用可能性について検討した。オゾン注入率約1.5mg/Lでの実験結果を、オゾン処理前のE260により整理し、図-6に示す。オゾン処理前のE260が0.09以下では、NP、BPA及びE2は検出下限値未満、E1は定量下限値未満となった。オゾンとの反応における競合物質の指標としてE260を用いることによるオゾン注入率の効率的な管理の可能性が示唆された。

なお、他の水質項目(表-2)による、NP、BPA、E2及びE1の低減効果の違いは見られなかった。

4. おわりに

健全な水循環・良好な水環境の創出の視点から下水道システムにおいて課題となっている事項のうち「合流式下水道からの汚濁負荷流出量の予測

手法の開発」、「オゾン処理による環境ホルモン等の効率的低減」に関する取り組みについて紹介した。下水道の普及拡大に伴い、下水道システムは水循環の重要な要素の一つとなっており、流域の水質の保全においても大きな役割を占めている。今後も下水道システムを活用し、健全な水循環・良好な水環境を創造するための検討を進めていきたいと考えている。

参考文献

- 1) 国土交通省都市・地域整備局下水道部：平成12年度下水道における内分泌攪乱化学物質に関する調査報告書, 2001.3
- 2) 例えば、能勢ら：オゾンによる下水二次処理水の内分泌攪乱化学物質の分解、第37回下水道研究発表会講演集, pp.710-712, 2007
- 3) 国土技術政策総合研究所：水循環再生技術の開発に関する研究、平成14年度下水道関係調査研究年次報告書集、国土技術政策総合研究所資料第138号, pp.257-262, 2003.12
- 4) (社)日本水道協会：上水試験方法2001, p.155, 2001

管谷佛治*



国土交通省国土技術政策総合研究所下水道研究部下水道研究室主任研究官
Teiji SUGAYA

平山孝浩**



国土交通省国土技術政策総合研究所下水道研究部下水道処理研究室主任研究官
Takahiro HIRAYAMA

藤生和也***



国土交通省国土技術政策総合研究所下水道研究部下水道研究室長
Kazuya FUJIU

南山瑞彦****



国土交通省国土技術政策総合研究所下水道研究部下水道処理研究室長
Mizuhiko MINAMIYAMA