

下水道プラントの水質モデルとコストモデルの評価

Evaluation of Water Quality Model and Cost Model for Sewage Treatment Plants

堤 正彦 小原 卓巳 山中 理
 TSUTSUMI Masahiko OBARA Takumi YAMANAKA Osamu

近年、下水道プラントでは、処理水質を良好にし、かつ省エネルギーを維持できる運転管理、環境評価技術が要求されている。当社は、処理水質と処理コストを予測し運転管理用として利用する下水処理場水質シミュレータを開発した。また、処理水質をコスト化し、かつそれに運転コストを加味した新しいコストモデルも検討した。

Demand has recently arisen among sewage treatment plant operators for a tool that can search the best conditions with respect to not only operational management to improve effluent water quality, but also environmental evaluation to reduce energy consumption. Toshiba has developed a water quality simulator for sewage treatment plants that predicts effluent water quality and energy costs, and has also investigated a new cost model that converts effluent water quality data into running costs and adds these to operating costs.

1 まえがき

近年、湖沼や内湾などの閉鎖性水域に流入する下水処理場などの処理水中の窒素やリンが栄養分となって、閉鎖性水域内にアオコや赤潮のような有害藻類が異常発生する富栄養化という環境問題が顕在化している。このため、2001年11月に第5次水質総量規制に窒素とリンが追加され⁽¹⁾、窒素とリンの水質規制が強化されてきた。

このような水質規制の強化に対応して、下水処理場では、窒素とリンを除去する脱窒素・脱リン型の下水処理プロセスの新設導入や既設改良が進められている。これらのプロセスを設計又は運転管理するうえで、いろいろなプロセスで簡単に精度よく、窒素やリンなどの処理水質とプロウやポンプ運転などによる処理コストを予測できるシミュレーション技術が要求されている。

そこで当社は、設計支援用として、ユーザーがいろいろなプロセスで処理水質を予測でき、運転管理用として簡単な入出力で精度よく処理水質や処理コストを予測できる、下水処理場水質シミュレータを開発し、その評価を実施した。ここでは、対象プロセス、シミュレータの概要と機能の特長、及び今後の課題であるコストモデルの概念と展望を述べる。

2 対象プロセス

従来の下水処理プロセスの標準活性汚泥法(図1(左))では、従属栄養細菌という有機物を食べる菌により、流入水中の有機物は除去できるが、窒素やリンの除去は困難であっ

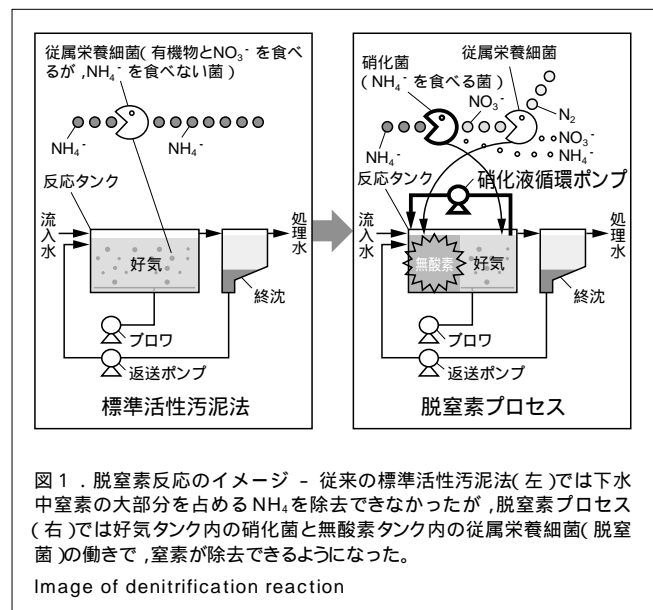
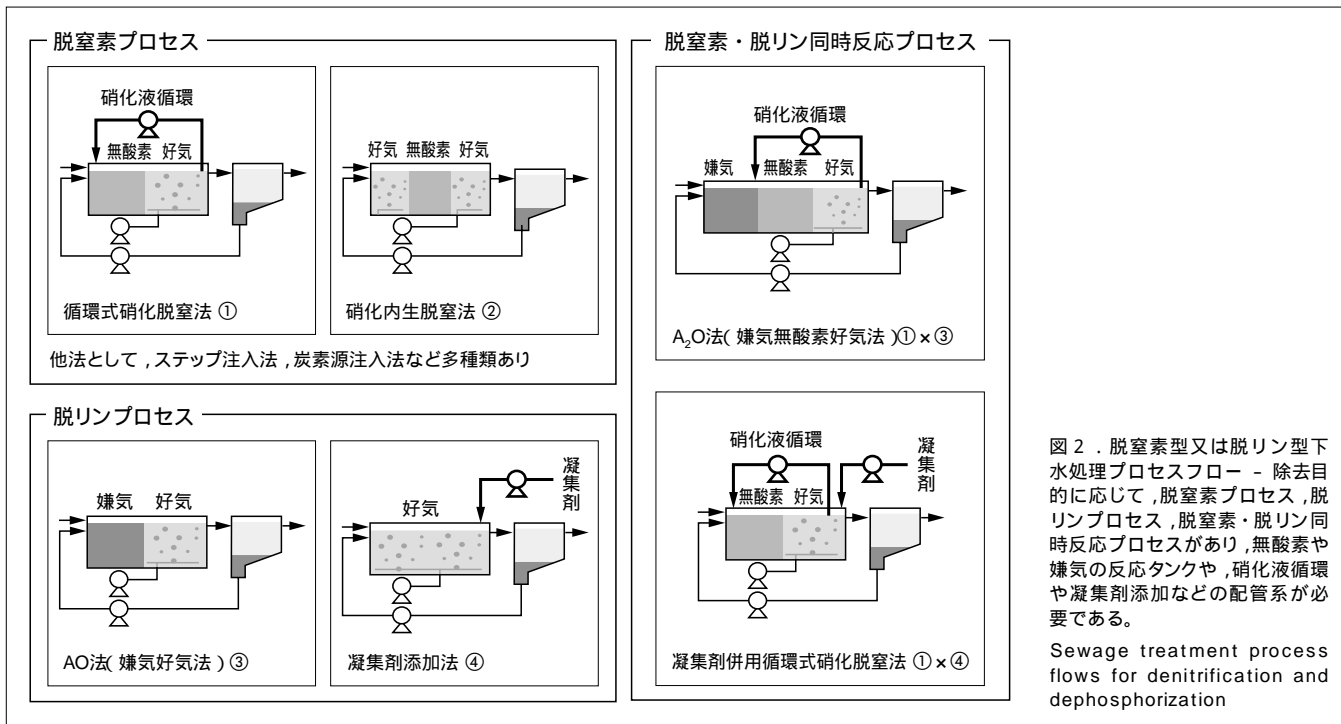


図1. 脱窒素反応のイメージ - 従来の標準活性汚泥法(左)では下水中窒素の大部分を占めるNH₄を除去できなかったが、脱窒素プロセス(右)では好気タンク内の硝化菌と無酸素タンク内の従属栄養細菌(脱窒菌)の働きで、窒素が除去できるようになった。

Image of denitrification reaction

た。窒素を水質規制値以下に除去するためには、無酸素(酸素がない状態)と好気(空気を注入して酸素が存在する状態)の反応タンクと、硝化液循環ラインを設置した脱窒素プロセス(図1(右))が必要である。流入水は無酸素タンクを經由して好気タンクへ送られ、このタンク内で硝化菌(NH₄⁺(アンモニウムイオン)を食べる菌)の働きにより流入水中のNH₄⁺がNO₃⁻(硝酸イオン)に酸化される。次に硝化液循環ポンプで無酸素タンクへNO₃⁻が送られた後、このタンク内で従属栄養細菌(有機物を食べながらNO₃⁻も食べる菌)の働きにより、NO₃⁻がN₂(窒素ガス)に還元されて除去される。また、



リンを除去するためには、嫌気(NO₂⁻ (亜硝酸イオン) , NO₃⁻ などの結合体酸素もない状態)と好気の反応タンクや凝集剤注入の脱リン型下水高度処理プロセスが必要である。

対象プロセスは、タンクの種類(嫌気、無酸素、好気)、タンクの数、タンクの組合せ、凝集剤注入、炭素源注入などで、循環式硝化脱窒法、硝化内生脱窒法、AO法(嫌気好気法)、凝集剤添加法、A₂O法(嫌気無酸素好気法)、凝集剤併用循環式硝化脱窒法など、非常に多種類のプロセス²⁾が存在する(図2)。

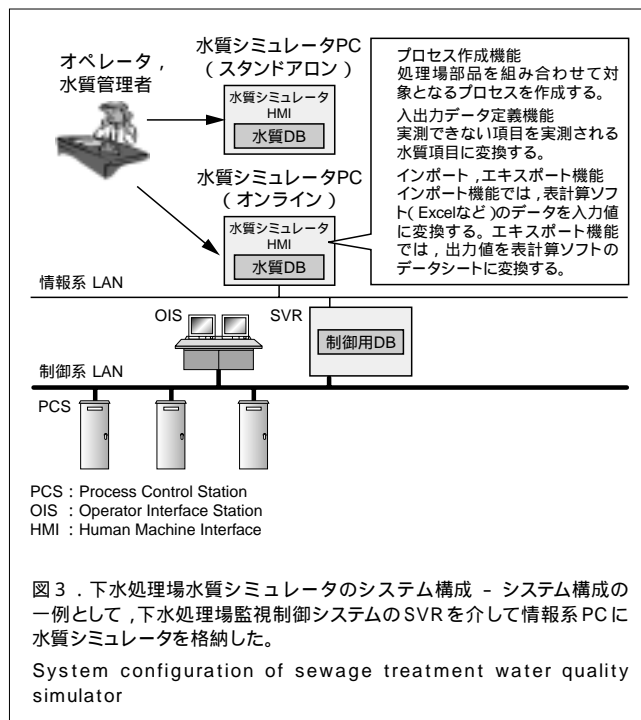
3 シミュレータの特長

3.1 シミュレータの概要

下水処理場水質シミュレータ(以下、シミュレータと略記)の入力値は、制御用データベースサーバ(SVR)から引き渡されたオンライン型パソコン(PC)内部の水質データ、又はスタンドアロン型PC内部の水質データベース(DB)に蓄積された水質の計測値もしくは手分析値である(図3)。シミュレータ内部のモデルにより処理水質と処理コストをシミュレーションし、各々が最小となる下水処理プロセス又は運転管理条件を探索することを支援するものである。

3.2 シミュレータ構築上の課題と解決策

対象となるプロセスは多種多様であり、入力値に利用できる水質センサは限定されることにより、通常の下処理場データで汎用的に水質を予測することは困難という課題があっ



た。したがって、設計支援用、運転管理用に利用できるシミュレータとするためには、オペレータや水質管理者が画面上で容易に任意のプロセスを作成でき、かつ下水処理場で容易に利用できる水質データによるシミュレーションが必要である。シミュレータ構築に際しての主な課題を以下に示す。

- (1) 入出力が簡単で、かつ任意のプロセスや運転条件で、水質とコストを予測できるモデルの構築

(2) 複雑化したモデルのソフトウェア展開

(3) シミュレータの精度検証

3.2.1 モデルの構築 処理水の窒素やリンを予測するモデルとして、IWA(International Water Association : 国際水学会)が統一化した活性汚泥モデルNo.2(以下、ASM2と略記³⁾)などがあるが、これらの活性汚泥モデルは実測困難な水質成分と微生物反応との関係を示した数式であり、下水処理プロセスのモデルが定義されていない。このため、これらのモデルだけでは、下水処理場の実測データを入力値とした処理水質予測をすることができない。また、時々刻々連続的に変化する下水処理場の実測データを入力値として、連続的に処理水質予測をすることも困難である。また、前述したように、脱窒素・脱リン型下水高度処理プロセスは多種多様であり、いろいろなプロセスでのシミュレーションも必要とされている。このモデルでは、下水処理場で実測される水質の手分析値又は水質センサ値を入力し、下水処理プロセスを土木・機械・制御などの部品に分離して、各々の部品モデルを作成することにより、(1)の課題を解決した。以上の点を考慮して、処理水質と処理コストの予測モデルを構築した(図4)。

実測可能なデータとして、UV(Ultra Violet : 紫外線)計やSS(Suspended Solid : 浮遊物質)計などの水質センサ計測値を入力値とする。これらの入力値とASM2の入力値との

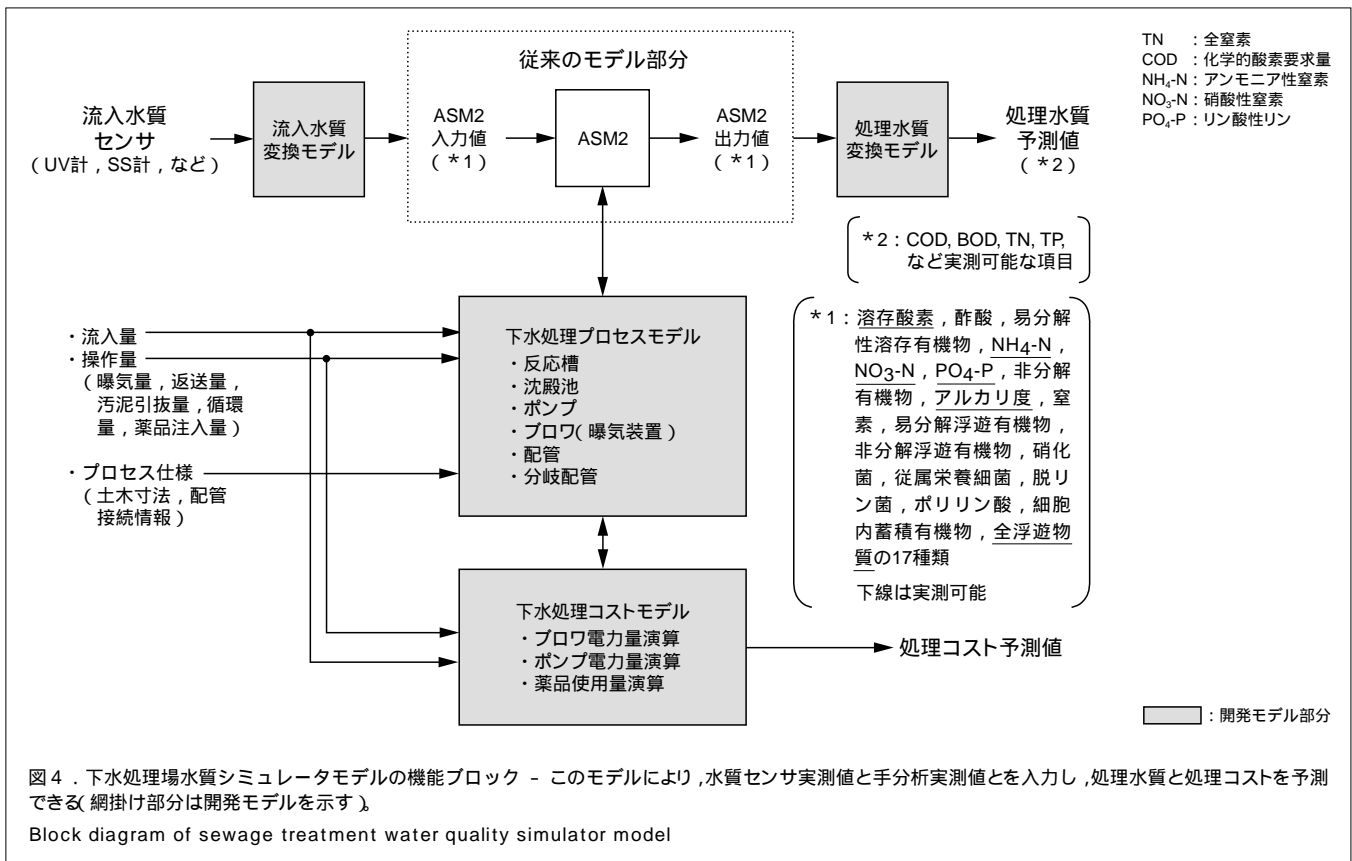
間、又は処理水質実測値とASM2出力値との間には、物理的又は統計的な変換モデルを適用している⁴⁾。

プロセス部品モデルは、下水処理場プロセスを構成する基本的な部品として、反応槽、沈殿池、ポンプ、ブロウ、配管のほかに、コストモデルも採用している。

下水処理コストモデルは、ポンプ、ブロウともに、流量又は台数を入力し、各電力量を出力する。操作量の入力方法は、流量又は流入比率のいずれかを任意に選定できるなどのフレキシビリティの向上を図っている。

3.2.2 ソフトウェアへの展開 画面上で容易に任意のプロセスや運転条件を設定できるようにするために、図5で示す画面のようなオブジェクト指向技術を採用した。画面のメッシュに、部品の種類、接続、寸法、散気管などの仕様を入力し、その情報を取扱いの簡単なテキストファイル形式に変換する。その他の入力情報も同様の形式に変換する。入力値やモデル演算の周期の違いによるデータ受け渡しの整合性を考慮して、各プロセス部品に液体部品という共通モデルを作成し、この共通モデルで、流入 混合 反応 流出という順に同期を取って演算する。これらの解決策により、いろいろなプロセスや運転条件で容易にシミュレーション可能なソフトウェアとして、(2)の課題を解決した⁵⁾。

3.2.3 モデル精度の検証 当社事業所に設置した下水処理パイロットプラントのデータを用いて処理水質を予測



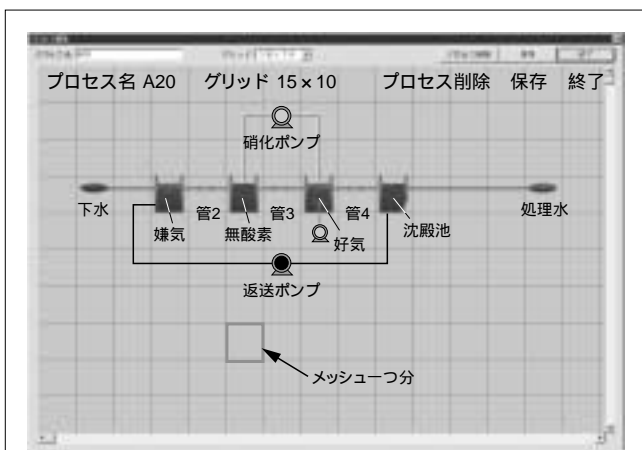


図5. 下水処理場水質シミュレータの画面イメージ - このシミュレータでは、プロセス作成機能、入出力変換機能により、多種多様なプロセスや現場データでシミュレーションできる。

Example of sewage treatment water quality simulator display

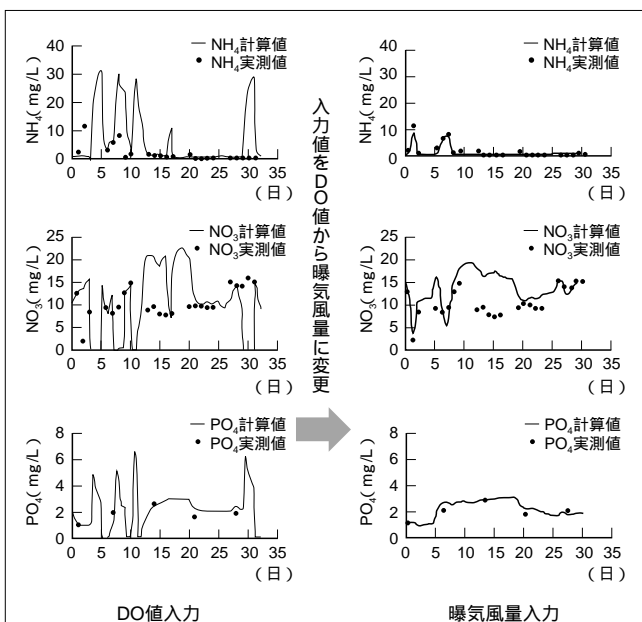


図6. パイロットプラント手分析データを入力とした処理水質予測結果 - 長周期のDO(溶存酸素濃度)を入力したほうが、短周期の曝気風量を入力したほうが、水質予測の精度が高い。

Water quality prediction data using manually measured data of pilot plant influent

した(図6)。プロセスはAO法を選定し、パラメータはIWAのデフォルト値を使用している。図中の左側のグラフは、無酸素槽と好気槽各々のDO(Dissolved Oxygen:溶存酸素濃度)値を1回/日の頻度で読み取り、その間のDO値は前回値で補間し入力したものである。右側のグラフは、好気槽への曝気(ばっき)風量を入力値としたものである。曝気風量は弁開度から演算した連続データである。

後者の曝気風量を入力する方法が、1日周期のDO値を入

力する方法に比べて、水質予測の精度が向上している。

また、標準活性汚泥法をステップ注入(流入下水を反応タンクの最上流部より下流に分岐して注入する方式)に改造し流入UV計を設置しているA処理場で検証をしたところ(図7)、15分周期のUV計の計測値を入力したほうが、1週間周期のBOD(Biochemical Oxygen Demand:生物化学的酸素要求量)手分析値を利用したほうが、水質予測の精度が向上している⁽⁵⁾。

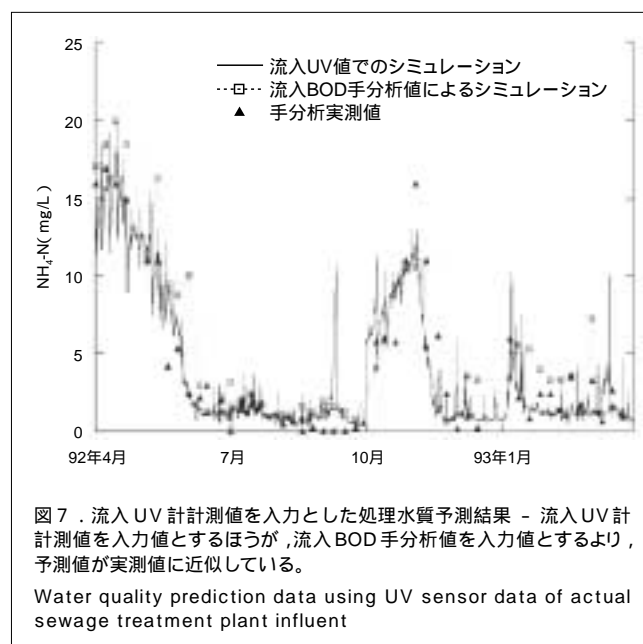


図7. 流入UV計計測値を入力とした処理水質予測結果 - 流入UV計計測値を入力値とするほうが、流入BOD手分析値を入力値とするより、予測値が実測値に近似している。

Water quality prediction data using UV sensor data of actual sewage treatment plant influent

これらのシミュレーションにより、曝気風量やUV計などのセンサを利用して入力値の周期を短く設定することにより、モデル精度が向上することが判明した。

コスト予測モデルは、標準活性汚泥法を擬似的にAO法として運転管理しているB処理場のブロワ電力量について、実施した。曝気量だけを入力としたモデルに比べて、曝気量とブロワ台数の2変数を入力とした多変量解析モデルのほうが、精度が向上している。

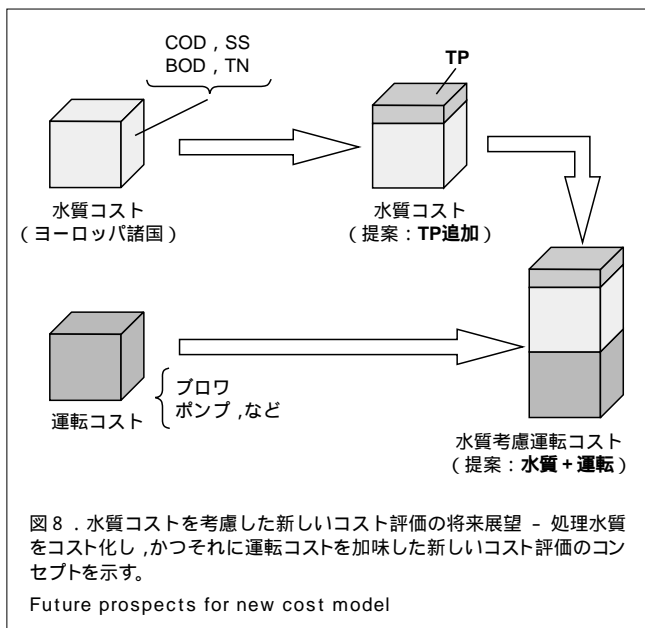
4 コスト評価モデルの展望

下水道プラントのコスト評価は、各種の方法で検討されている。LCA(Life Cycle Assessment:ライフサイクルアセスメント)と呼ばれる評価手法は、施設や製品などが建設、生産されて、それが廃棄されるまでの一生の間に環境に与える負荷を定量的に評価するものであり、下水道プラントへの適用も検討されている⁽⁶⁾。

また、環境活動に対してどれだけ費用・資源を投入し、それによってどれだけ効果を生んだかを測定するための環境会計を用いて評価している下水道事業者もある⁽⁷⁾。

一方, LCA や環境会計のようなマクロなコスト評価手法に比べて, ヨーロッパ諸国では下水処理場の放流水質を“水質コスト”として評価する指標も提案されている⁽⁸⁾⁽⁹⁾。

日本ではTP(全リン)の水質規制もあるので, TPを追加した水質コストとして評価することを考えた(図8)。また, 以前から利用されているプロワやポンプなどの運転コストに, これらの水質コストを加算することにより, 下水処理場の運転管理コストの指標としての水質考慮運用コストとして利用可能であると考えられる。



5 あとがき

プロセス作成機能, 流入水UV計などのセンサ利用, 及びコスト演算機能を組み合わせて, 実機下水処理場に適用できるシミュレータを製作し, 実データにより精度を検証した。

また, プロワやポンプなどの操作量のコストだけでなく, 放流水質を水質コストとしてコスト化し, それらを運転コストと合計して, 水質を考慮した運転コストを提案した。

プロセスの挙動を予測できる水質予測モデルと, 水質考慮運転コストのモデルを融合することにより, プロセス挙動

が複雑で運転管理が容易でない脱窒素・脱リン型下水高度処理プロセスにおいて, 放流水質と運転コストを最小にできる運転支援系の構築ができるようになってきた。今後は, 水質考慮運転コストの詳細な検討を行う予定である。

文 献

- (1) 財務省印刷局. 「水質汚濁防止法施行令及び瀬戸内海環境保全特別措置法施行令の一部を改正する政令(350)」官報号外第230号. 2001.
- (2) (社)日本下水道協会. 高度処理施設設計マニュアル(案). 1994.
- (3) IAWQ. IAWQ Task Group on Mathematical Modeling for Design and Operation of Biological Wastewater Treatment Processes. Activated Sludge Model No.2 - Scientific and Technical Report No.3 -. 1995.
- (4) 津村和志, ほか. 下水処理場オンラインデータを用いた動的な水質シミュレーション. 環境システム計測制御学会誌. 3, 2, 1998, p.219 - 224.
- (5) 堤 正彦, ほか. “脱窒素・脱リン型下水処理プロセスのシミュレーション実験”. 第34回下水道研究発表会講演集(社)日本下水道協会. 1997. p.560 - 562.
- (6) (社)日本下水道協会. パネルディスカッション(2) 下水道のライフサイクルセジメント”. 第37回下水道研究発表会講演集別冊, 2000, p.63 - 86.
- (7) 東京都下水道局. 水環境を守る下水道. 東京都下水道局環境会計(2001). <http://www.gesui.metro.tokyo.jp/kankyo/k1.htm>. (参照2002-2-19).
- (8) P.A.Vanrolleghem, et al. "Robustness and Economic Measures as Control Benchmark Performance Criteria". Proc. of 1st IWA-ICA Conference. Malmö, Sweden, June 3-7, 2001. p.213 - 220.
- (9) A.Abusam, et al. "A Procedure for Benchmarking Specific Full-Scale Activated Sludge Plants Used for Carbon and Nitrogen Removal". to appear in Proc. of 15th IFAC World Congress Barcelona, Spain, July 21-26, 2002.



堤 正彦 TSUTSUMI Masahiko

電力システム社 電力・産業システム技術開発センター 社会システム開発部主務。下水処理プロセス制御・支援技術の研究・開発に従事。日本水環境学会, 環境システム計測制御学会会員。

Power and Industrial Systems Research and Development Center



小原 卓巳 OBARA Takumi

電力システム社 電力・産業システム技術開発センター 社会システム開発部。下水処理プロセス制御・支援技術の研究・開発に従事。

Power and Industrial Systems Research and Development Center



山中 理 YAMANAKA Osamu, D.Eng.

電力システム社 電力・産業システム技術開発センター 社会システム開発部, 工博。下水道制御技術の研究・開発に従事。電気学会, 計測制御学会会員。

Power and Industrial Systems Research and Development Center