

# 水環境を守る下水の高度処理制御システム

奥田 昇(おくた のぼる)

岡田 好丘(おかだ よしたか)

佐々木 康成(ささき こうせい)

## 1 まえがき

近年、富栄養化による湖沼の水質汚濁に伴う水道の異臭味被害や、東京湾、伊勢湾などに代表される内海の赤潮と漁業被害が問題となっている。富栄養化は、生活排水や農業用水に含まれる栄養塩類(窒素、リンなど)が閉鎖性の湖沼や海へ流入することにより促進される。現在、全国で使用される生活用水は年間約160億トンで、そのうちの7割強である約124億トンが下水道を経由して河川や湖沼、海に流れ込んでいることを考えると、水環境問題解決のためには下水処理水質の改善がきわめて重要となる。

しかし、標準活性汚泥法に代表される有機物除去を主体とした従来の処理方式では、窒素・リンの除去に限界がある。近年は嫌気・無酸素・好気法(A2O法)などの高度処理を導入して、処理水質の高度化を図る例が増加しつつある。

富士電機は従来からこうした高度処理プロセスの計測制御技術、処理水質の向上を視点とした、総合的な技術開発に積極的に取り組んできた。窒素除去を担う硝化菌の活性を良好に保つことを目的とした、バイオセンサによる有害物質監視はその一例である。また、プロセス技術では小規模設備向けの窒素・リン同時除去法である2槽式間欠ばっ気法を独自に開発し納入<sup>(1)</sup>している。さらに、オゾン処理による脱色、消毒事例も多く、最近の大きな課題である下水処理水中の環境ホルモンの除去についても研究中である。

このような下水の高度処理に対応した富士電機の取組みの中で、本稿では「水環境を守る下水の高度処理制御システム」に焦点を絞り、高度処理プロセスの制御方策、納入事例、シミュレーションを利用した処理水質向上の試みなどを紹介する。

## 2 高度処理プロセスの制御方策

### 2.1 高度処理に対する基本的な考え方

窒素・リン除去を目的とした高度処理では、凝集剤併用型循環式硝化脱窒法、ステップ流入式多段硝化脱窒法、

A2O法など種々の方法が実用化されている。しかし、こうした処理法において窒素・リン除去は、

- (1) 硝化・脱窒による窒素除去
- (2) 脱リン菌によるリン除去
- (3) 凝集剤によるリン除去

に原理的に集約できる。したがって、富士電機では高度処理プロセスに共通する基本制御方策を構築し、それを基盤としつつ各処理法に最適な計測制御システムを提供することとしている。以下に各槽の処理機能を原理面から解析し、解析結果に基づいて立案した制御方策を、A2O法を例に説明する。

### 2.2 A2O法を例とした基本制御方策

図1に代表的な高度処理プロセスであるA2O法のフローシートと基本制御システムの構成例を示す。窒素・リンを安定して効率よく除去するため、各処理段階で次のような制御を行う。

#### (1) 最初沈殿池

リン除去の安定化を目的とした初沈バイパス制御を提案する。通常の運転では最初沈殿池越流水が嫌気槽に流入し、嫌気槽では越流水の有機物を食物として脱リン菌が活動している。しかし、雨天時にはBOD(Biochemical Oxygen Demand)が雨水で希釈され脱リン菌に十分な有機物が供給されず、脱リン菌の活性が低下してリン除去が悪化することがある。この対策として、固形性の有機物を多く含む生下水をバイパス水路で直接嫌気槽に流入させ、有機物の不足を補い、リン除去率の低下を防止する制御を行う。水路の切替は雨天時の流入水量増加を指標として自動的に行う。

#### (2) 嫌気槽

酸化還元電位(ORP)の監視と、ORP測定値を運転へ反映させることがポイントとなる。脱リン菌が活発に活動するORPは-200~-300mVであるので、測定値がこの範囲にあるか常時監視し、値が高くなった場合(例えば、-100mVのとき)は有機物が不足し活性低下と判断して、前述の初沈バイパス制御などを行う。また、生物脱リン機



奥田 昇

上下水道用電気・計装・監視制御システムの計画、設計に従事。現在、電機システムカンパニー環境システム本部水処理システム事業部首都圏技術部長。



岡田 好丘

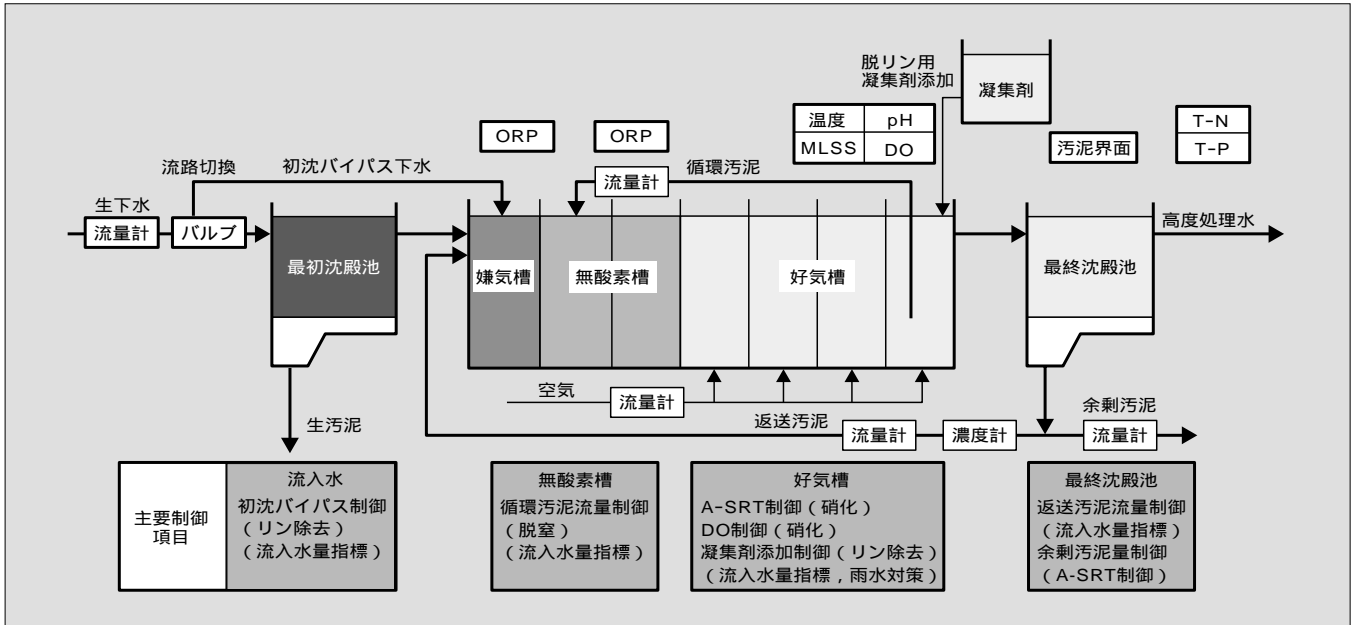
上下水道用電気・計装・監視制御システムの設計に従事。現在、電機システムカンパニー環境システム本部水処理システム事業部公共技術部。



佐々木 康成

下水、産業廃水のプロセス技術、制御技術開発に従事。現在、(株)富士電機総合研究所環境技術研究所主席研究員。技術士(水道部門)、日本水環境学会会員。

図1 高度処理プロセス（A2O法）のフローシートと基本制御システムの構成例



能の低下を補うために好気槽に脱リン用凝集剤を添加するか否かの判断にも利用する。さらに嫌気槽のかくはんは、省エネルギーのため活性汚泥が沈まない程度に緩やかにかくはんを基本とする。これは次の無酸素槽のかくはんも同様である。

(3) 無酸素槽

高効率脱窒のために、流入水量に比例した循環流量の制御を行う。無酸素槽で進行する脱窒反応は、嫌気槽から流入してくる有機物の量で制限される。したがって、脱窒能力に対応した硝酸性窒素を循環する必要がある。循環量が過剰になると酸素持込みによる脱窒速度低下、循環ポンプのエネルギー浪費を招くことになる。循環流量の設定でもORP測定値が指標となり、-100~-200mVが望ましい。

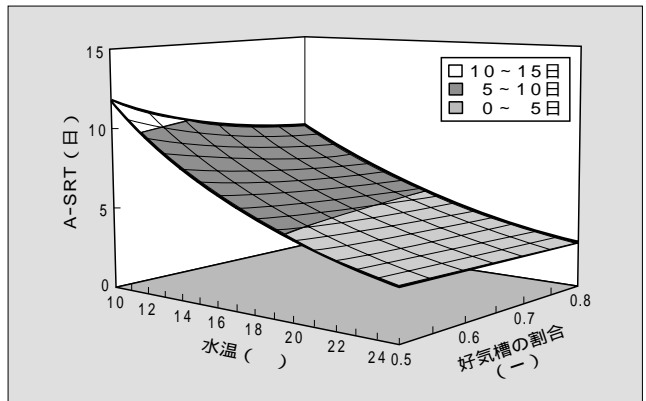
(4) 好気槽

A-SRT（好気槽の活性汚泥が入れ替わる平均日数）制御が最も重要である。窒素除去では安定した硝化が不可欠であるが、好気槽における硝化菌濃度はA-SRTで管理される。図2にA2O法全体に対する好気槽の割合、水温、維持すべきA-SRTの関係を示した。図2は富士電機が独自に開発した硝化菌濃度計算ソフトウェア<sup>(3)</sup>を使って求めたもので、好気槽の割合や温度が低いほどA-SRTを長くする必要があるのである（活性汚泥濃度を高くする）ことを示している。すなわち低水温などの条件では硝化菌の増殖速度が低下するため、活性汚泥濃度の増加が要求される。A-SRT制御は余剰汚泥抽出量制御として行われ、窒素除去の基本となる重要な制御である。さらに、好気槽では硝化菌の増殖速度を維持するためDO（Dissolved Oxygen）を1~2mg/Lに制御する。また、生物脱リン機能が不調の場合、流入水量に比例して脱リン用凝集剤（PACなど）添加制御を行う。

(5) 最終沈殿池

返送汚泥流量制御は、活性汚泥を嫌気槽に返送する、沈

図2 好気槽の割合と水温、A-SRTの関係



殿池における汚泥滞留時間を適切に保ち、活性汚泥中の脱リン菌がリンを放出し処理水質を悪化させるのを防止するなどの機能を果たしている。また、前述のA-SRT制御を目的に、余剰汚泥抽出量制御を行う。放流水質については、全窒素（T-N）・全リン（T-P）計による監視が望ましい。

以上のように、窒素・リン除去を行う高度処理プロセスの機能と制御はかなり複雑であり、明確な制御方針が要求される。富士電機が提供する計測制御の特徴は、プロセス技術と計測制御技術が融合したソリューションにあると考えている。

③ 高度処理制御システムの適用例

3.1 N浄化センターの概要

N浄化センターは伊勢湾に面した高度下水処理場である。処理施設はステップ流入式2段嫌気・好気法（1系、1996年供用開始）と、A2O法（2系、1999年供用開始）からなっている。流入水量は約11,000m<sup>3</sup>/日、生物反応槽の滞留時間は約12時間で、良好な運転がなされている最新の処

図3 N 浄化センターの処理フローと計測ポイント

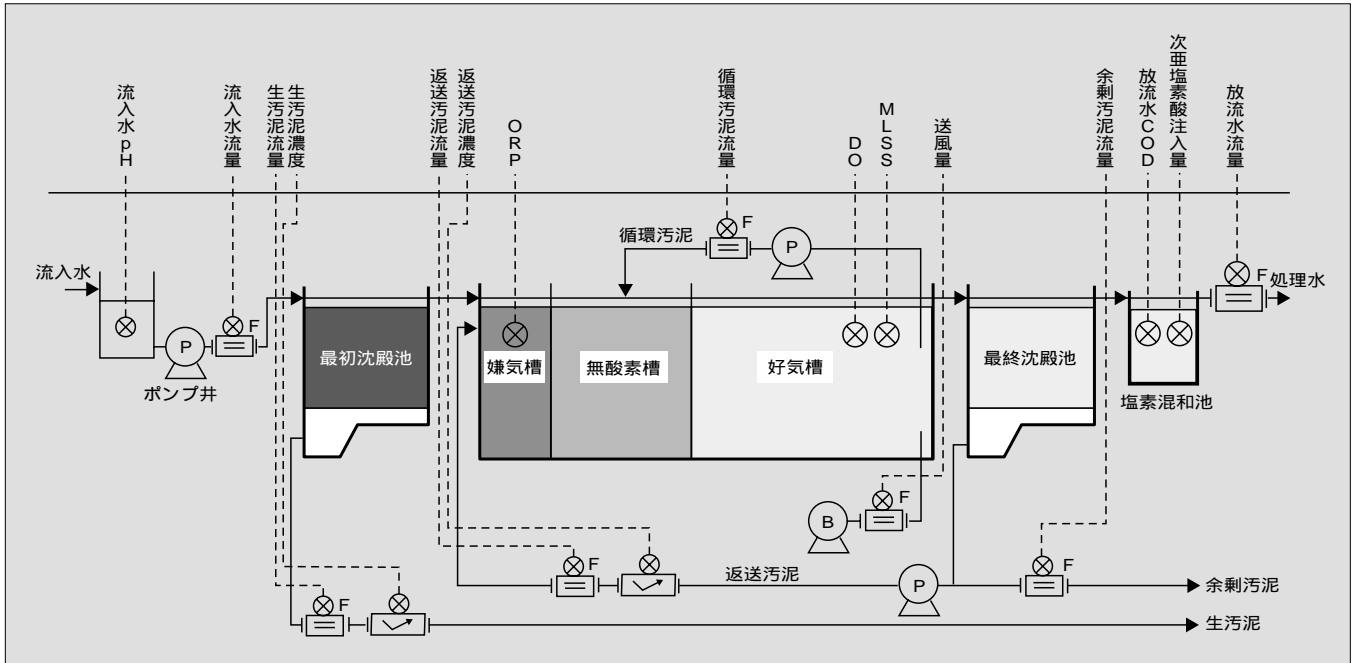
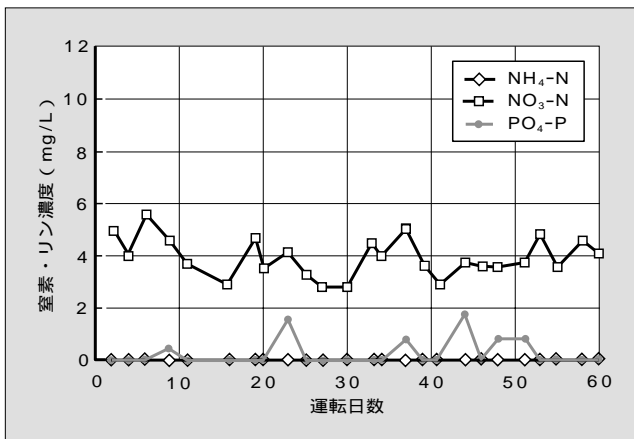


図4 好気槽の処理水質データ



理施設である。

3.2 計測制御方式と運転結果

図3に A2O 法の処理フローおよび計測ポイントを示す。流入水 pH の測定は、工場廃水の流入とそれに伴う pH 変化を検出することが主な目的である。嫌気槽では ORP 監視が運転管理に利用されており、無酸素槽への循環水量は流入水量を考慮して調節され、脱窒の安定化が図られている。好気槽の A-SRT 制御は、MLSS (Mixed Liquor Suspended Solids) 濃度、返送汚泥濃度 (余剰汚泥濃度と同じ)、余剰汚泥流量を測定し、

$$A-SRT = \frac{\text{好気槽容積} \times \text{MLSS 濃度}}{\text{余剰汚泥濃度} \times \text{余剰汚泥流量}} \dots\dots\dots(1)$$

としてなされる。A-SRT を簡便に求めるため、式 1 に対応した自動計測演算機器を備えている。A-SRT は約12日と余裕があり、MLSS は約 2,200 mg/L に維持されている。また DO は 0.5 ~ 1.5 mg/L である。返送汚泥は流入水量比

例制御である。

こうした計測制御と運転管理の結果、A2O 法の処理水質は良好に推移している。図4は運転開始半年後の好気槽での約2か月間の処理水質データであるが、アンモニア性窒素 (NH<sub>4</sub>-N) はほぼゼロで、硝化が非常に安定していることが分かる。また、硝酸性窒素 (NO<sub>3</sub>-N) は 4 mg/L 程度と脱窒も良好で、アンモニア性窒素と硝酸性窒素の合計 (全窒素にほぼ相当) も目標の 10mg/L の半分以下となっている。またリンについては、リン酸イオン (PO<sub>4</sub>-P) が平均して 0.3 mg/L 程度であり、目標の 2 mg/L 以下は十分に達成している。

4 処理水質向上への取組み

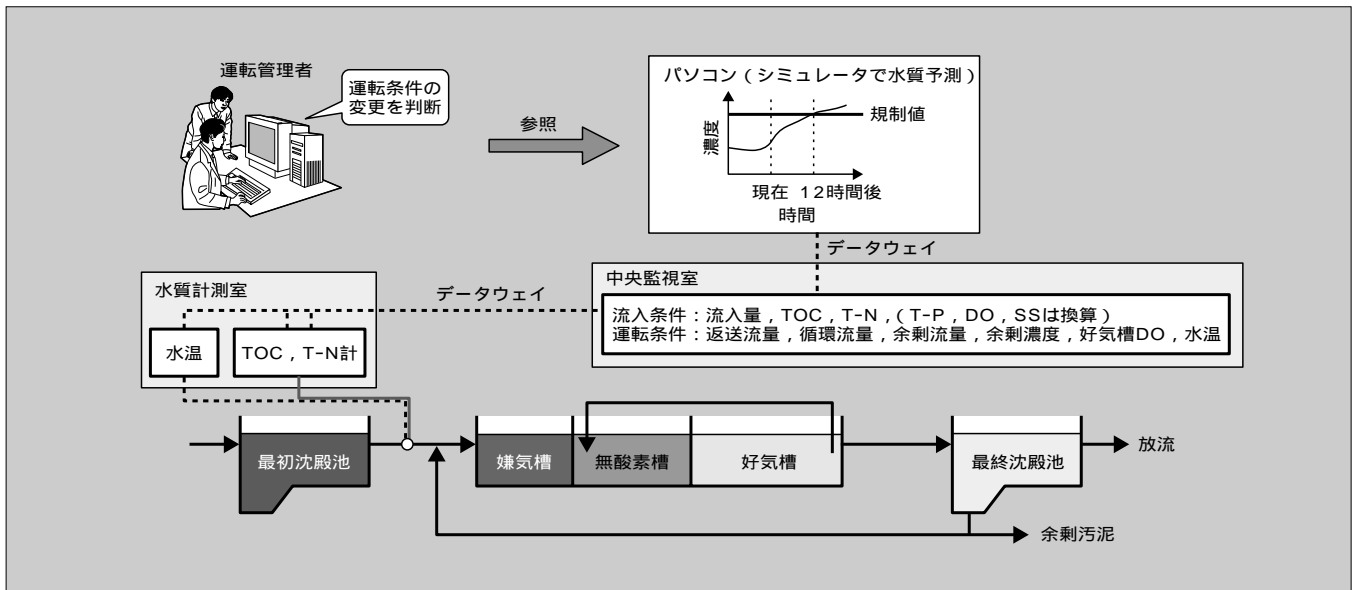
4.1 目的

A2O 法のように生物学的に窒素・リン除去を行う場合、処理性能は流入水質の影響を受けやすい。例えば図4において、リン酸イオン (PO<sub>4</sub>-P) 濃度が 2 mg/L 近くまで上昇する例が数回示されている。これは雨水の流入により脱リン菌の活性が低下し、リン除去性能が悪化した場合に見られる現象である。この例では、処理性能悪化時にも目標の 2 mg/L 以下は維持されているが、流入水質や運転条件によってはリン濃度が目標値を超えてしまうケースも想定される。こうした場合への対応策として、富士電機ではN 浄化センターと共同で、オンラインシミュレータ<sup>(4)</sup>を利用した処理水質の向上に取り組んでいる。

4.2 システム構成と水質予測

図5にオンラインシミュレータを導入した A2O 法の水質予測システムの概要を示す。シミュレーションプログラムはパソコンに搭載されており、流入水質として、流入水

図5 オンラインシミュレータを利用した水質予測システム



の TOC (有機物), T-N (全窒素), 水温の測定値がオンラインで常時入力されている。また, 流入水の全リン (T-P), DO, SS も前記測定値から換算されて入力データとなる。さらに, 既設の計測制御システムから各種流量, 好気槽 DO, 余剰汚泥濃度などのデータがオンライン入力され, こうしたデータをもとにシミュレータが一定時間後の処理水質変化を予測する構成となっている。

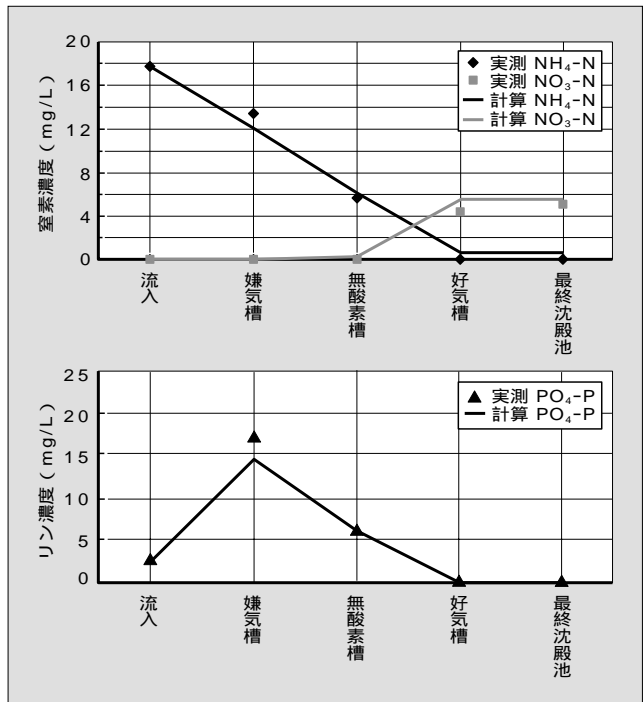
オンラインシミュレータには予測した処理水質が管理値を逸脱すると警報通知する機能があるので, 運転管理者は警報通知されたときに予測画面をチェックすることで, いつ, どの水質項目が管理値を逸脱する可能性があるのか確認することができる。その結果, 管理者はばっ気量の増加, 返送汚泥流量変更, 凝集剤添加などの処置を即座に行うことができ, 処理水質の変動を管理値以下に抑えることが可能となる。

こうした水質予測システムの信頼性は, シミュレーションの予測性能に依存する。図6にN浄化センターの各槽に対する水質シミュレーション結果を示す。窒素については NH<sub>4</sub>-N 濃度が嫌気槽, 無酸素槽では希釈により低下し, 好気槽では硝化によってほぼゼロとなる傾向が示され, 実測値と計算値はよく一致している。NO<sub>3</sub>-N も好気槽で増加し, 計算でも再現されている。これは PO<sub>4</sub>-P でも同様であり, 嫌気槽における脱リン菌からのリン放出と濃度上昇, 無酸素槽での脱窒に伴うリン吸収, さらに好気槽でのリン吸収と, 濃度低下が実測値と計算値でほぼ一致している。このようにシミュレーションによる窒素, リンの予測性能はほぼ実用レベルに達している。

現在, 図5のシステムを用いて利用技術の改善, 水質予測性能の向上などを目的とした開発を進めており, まずはオフラインで運転管理者が利用していく予定である。さらに, 将来はオンライン制御への展開も視野に入れている。

A2O法をはじめ, 各種高度処理プロセスのフロー, 処理原理は微生物の機能を深く認識することにより理解でき

図6 N浄化センターの水質シミュレーション結果



るもので, これまでの運転管理では, 制御条件の設定などはベテランの維持管理技術者の経験と勘に依存する面があった。しかし, 水質シミュレータ利用技術が進展すれば, こうした維持管理負荷は軽減され, 処理水質の向上が期待される。<sup>(5)</sup>

5 あとがき

環境への関心の高まり, 公共用水域の水質保全の重要性を反映して, 下水処理施設における高度処理の導入はさらに進展すると予想される。

都市の高度処理ではエアレーションタンクの容量増が困

難であるため、担体に硝化菌を固定化し処理時間を短縮した方式が普及すると思われる。富士電機では担体型高度処理についても実験的、理論的な検討を進めており、生物反応シミュレーションにも着手している。

一方、小規模処理ではOD (Oxidation Ditch) 法の運転方法の改善による高度処理への対応が主流になると考えられる。具体的には間欠ばっ気による窒素除去、凝集剤添加によるリン除去などが導入されるであろう。富士電機ではすでに窒素除去のトラブル診断機能を備えたOD法維持管理支援システム(パソコン用ソフトウェア)を商品化している。

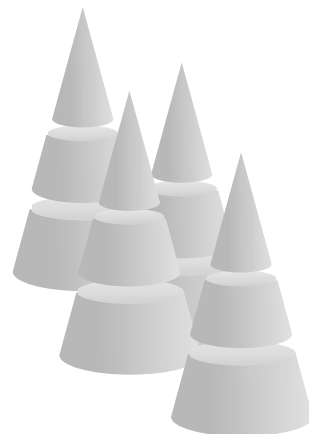
高度処理はさらに、環境ホルモンのような微量有害物質の除去、窒素・リンのさらなる削減、余剰汚泥の削減などの方向に進むと想定され、「超高度処理」が次のキーワードといわれている。富士電機はプロセス技術と計測制御技術の両面から研究開発を進め、顧客各位に運転管理と水質の総合ソリューション技術を提供する所存である。各位の

ご指導、ご意見を賜れば幸いである。

最後に、高度処理のシミュレーション技術開発にご協力をいただいた関係各位に深謝申し上げる次第である。

#### 参考文献

- (1) 乾貴誌ほか．発生源監視をきちんと行おう．月刊下水道．vol.23, no.12, 2000, p.10-20．
- (2) 並川秀隆ほか．DO・ORP制御による生物学的窒素・リン同時除去の実施設における追試・改良．第37回下水道研究発表会講演集．2000．
- (3) 佐々木康成ほか．A-SRT制御における亜硝酸菌濃度の簡易計算方法．第36回下水道研究発表会講演集．1999．
- (4) 奥山幸俊ほか．実施設A<sub>2</sub>O法運転状態のモデルによる検討．第38回下水道研究発表会講演集．2001．
- (5) 古屋勇治ほか．活性汚泥プロセスシミュレーターの開発状況．水環境学会誌．vol.23, no.5, 2000, p.17-20．





\*本誌に記載されている会社名および製品名は、それぞれの会社が所有する  
商標または登録商標である場合があります。