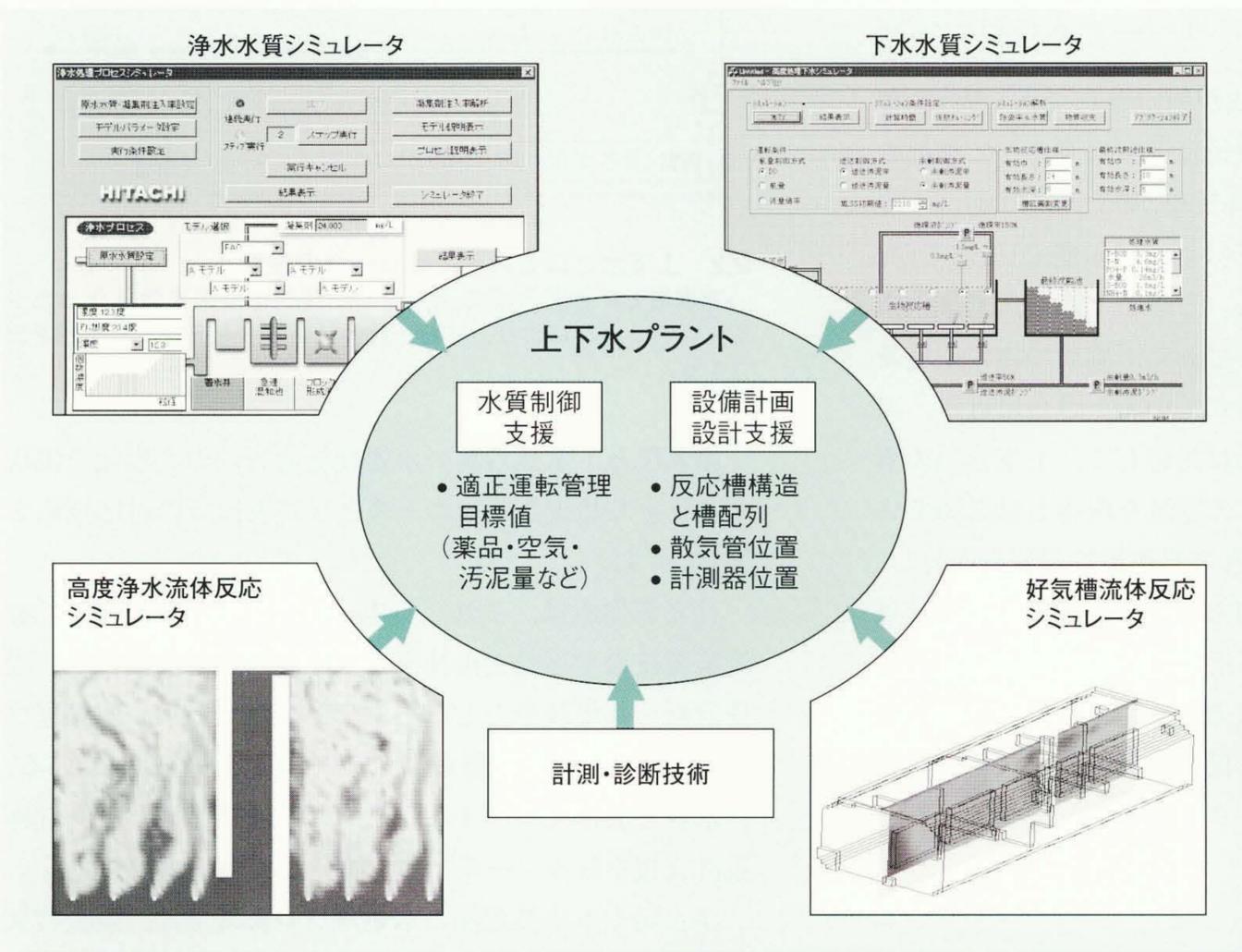


# 上下水道プロセスの高度水質制御と設備計画設計を支えるシミュレーション技術

Simulation Support Systems for Management of Purification and Wastewater Treatment Plants

渡辺昭二 *Shôji Watanabe* 陰山晃治 *Kôji Kageyama*  
 藤田良成 *Ryôsei Fujita* 植木 茂 *Shigeru Ueki*



上下水道プラントの高度水質制御と設備計画設計を支える各種のシミュレーション技術

物理化学反応や生物反応モデルを組み込んだ水質シミュレータと、流体・気泡・濁質の挙動モデルを考慮した流体反応シミュレータなどにより、目標水質の維持に適した運転条件の決定や反応槽の容積・構成・構造などの設計を支援する。

「安全な水、きれいな水」を供給し、「市民の健康を守る」ことが社会的使命である上下水道分野では、水質規制がさらに強化される方向にあり、また、地方財政の事情による設備・運転コストの低減やコストを考慮した水循環運用など、水質とコストの両面からの対応が必要とされている。浄水場や下水処理場では、水質目標値を安定的に保証する処理技術や監視制御技術と、新たな規制物質や有害物質の除去のための高度処理方式の導入やプラントの改造・更新が不可欠となり、高度水質制御に加えて、プラントと設備の計画設計を支援できる技術の重要性がますます高まるものと予想される。

日立製作所は、このような上下水道を取り巻く環境変化に対応し、浄水場と下水処理場の水質制御や設備計画設計を支援するシミュレーション技術、画像処理応用計測技術、計測・診断技術などを核とした上下水道高度処理プロセス監視制御システムの開発に取り組んでいる。

## 1 はじめに

浄水場では、取水源の水質悪化やクリプトスポリジムなどの病原性微生物の流入に対処した、凝集沈殿と殺菌技術の高度化が重要視されている。富栄養化した水源地を持つ浄水場では、藻類が発生する異臭味物質や難分解

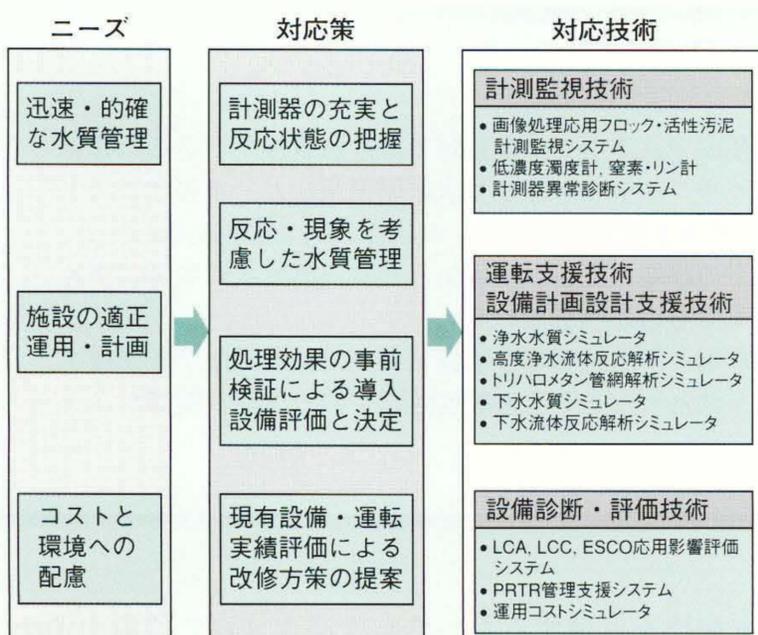
性有機物を処理するために高度浄水施設の設置が進められ、その効率的運用が求められている。一方、環境中央審議会は、有機物に加えて、窒素とリンも規制対象とする第5次水質総量規制を現在審議中である。この規制の施行により、窒素とリンも除去できる高度処理方式を導入する下水処理場が増加するものと考えられる。

日立製作所は、上下水道高度処理プロセスの監視制御システムを開発、製作し、運転管理業務や設計計画業務の効率向上と円滑な推進を支援している。

ここでは、浄水場と下水処理場で起きている、反応の数値化によって処理状態を可視化できる水質シミュレーション技術と、流体反応シミュレーション技術を中心に、高度水質制御と設備計画設計の支援技術について述べる。

## 2 上下水道プロセス管理のニーズと対応技術

近代水道の通水と下水道法が制定されてから約100年が経過した。水道と下水道整備は国家事業として推進され、全国平均では水道人口普及率が96.3%(平成11年度末)、下水道人口普及率は58%(平成10年度末)であるが、大都市では98%に達している。このことから、上下水道分野は維持管理の時代に入っており、施設の運用や更新を効率的に行う技術が求められている。さらに近年、環境負荷低減への国際的な要請に対応して、上下水道の事業場がISO(国際標準化機構)の認証を取得しはじめている。東京都下水道局ではすでに3処理場で認証を取得し、放流水質の自主管理値や電力および薬品使用量の削減目標値を設定し、その達成を目指している<sup>1)</sup>。ISO認証取得の動きは全国的に波及するものと予想され、新規制物質も考慮した水質保証やコスト低減を目指した技術が重要になると考えられる。



注：略語説明 LCA(Life Cycle Assessment), LCC(Life Cycle Cost)  
 ESCO(Energy Service Company)  
 PRTR(Pollutant Release and Transfer Register)

図1 上下水道プロセス管理のニーズと対応技術

計測監視技術、運転制御・設備計画支援技術、および設備診断評価技術により、上下水道プロセス管理の高度化に対応する。

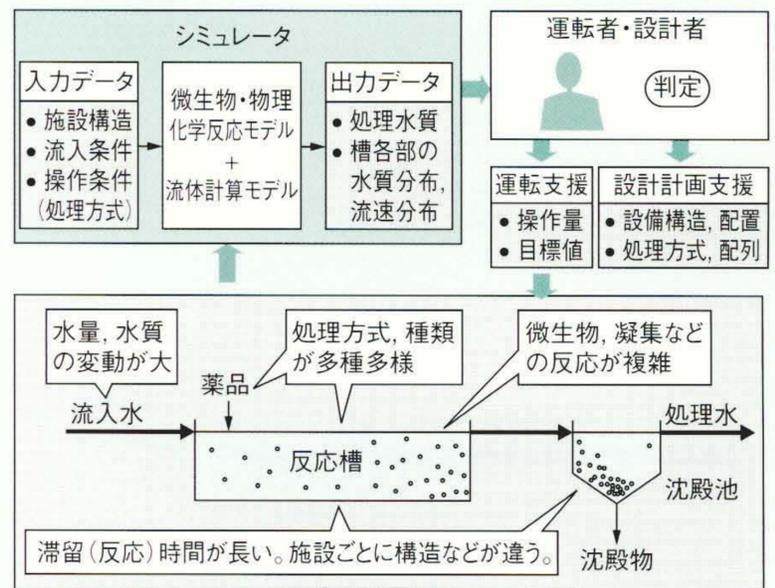


図2 上下水プロセスシミュレータの役割

浄水場と下水処理場の微生物や物理化学反応を数値化したシミュレーションにより、運転・設備計画設計を支援する情報を出力する。

浄水場と下水処理場の水処理施設管理の高度化を実現するうえで想定されるニーズと日立製作所の対応技術を図1に示す。

日立製作所は、これらのニーズに対応するために、計測監視技術や運転支援技術、設備計画設計支援技術、設備診断・評価技術などを組み合わせた上下水高度処理プロセスの運転・維持管理システムの開発を推進している。

水質と流体反応シミュレータは、運転支援と設備計画設計支援を行うツールとして開発している(図2参照)。

浄水場や下水処理場の水処理プロセスでは、微生物反応や凝集剤などの薬品を用いた物理化学反応を利用して水を浄化している。これらの反応は複雑であり、滞留時間も数時間から1日と長いことからプロセス応答が遅く、運転条件や制御条件の変更効果、処理の適否を判断するのに時間を要する。微生物と物理化学反応を数値化し、流体計算も取り入れたシミュレータは、計算結果と結果の可視化によって運転者の現象理解を助け、適正な操作条件の判断・選択を可能とする。プラント構造や設備仕様、処理方式の入力機能は、現有または新規導入設備の処理能力の評価に有効であり、更新・改造や計画設計情報として利用できる。

## 3 浄水場の水質制御と設備計画設計を支援するシミュレーション技術

### 3.1 浄水水質シミュレータ

浄水場での汙過水濁度の管理強化やオゾンなどの高度処理導入、さらに、給水栓での水質管理を支援するもの

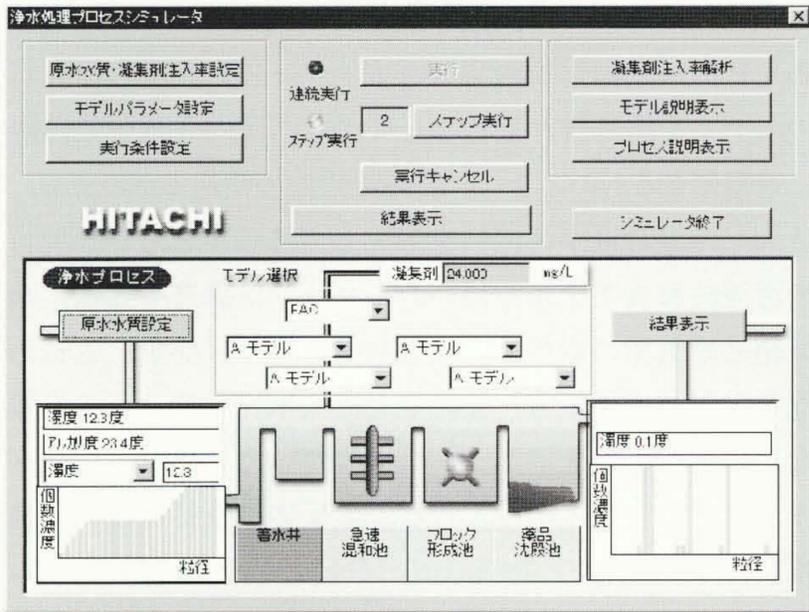


図3 浄水場の凝集沈殿シミュレータ画面例

処理プロセスごとのモデル(凝集、フロック成長、沈殿など)で濁質粒径分布の遷移を演算することにより、処理水質を予測する。

として、水質シミュレーション技術が有効である。想定した運転条件や設計諸元での処理水質の事前予測を可能とすることにより、適正な運転条件や設備構造を探索することができる。

凝集沈殿処理プロセス用としては、原水中の濁質成分の消長を、凝集剤によるフロック(綿状沈殿物)形成や沈殿除去のモデルによって再現する「凝集沈殿シミュレータ」を開発中である(図3参照)。凝集反応の進行に伴う濁質粒径分布の遷移を定式化することにより、プロセス内現象をさらに正確に反映し、沈殿水濁度の予測精度向上を図っている。

このシミュレータの利用により、凝集剤注入モデルの検討や条件別注入モデルの選定と、原水水質変動時の処理水質変化などの事前評価が可能となり、凝集沈殿処理の適正化が期待できる。今後は、処理水質から凝集剤注入操作へのフィードバックにかかる数時間の遅れを解消できる「水質予測型注入操作」へ展開させていく考えである。

### 3.2 オゾン接触池の流体反応シミュレータ

#### 3.2.1 オゾン反応シミュレータ

水道原水に含まれるかび臭物質は、凝集沈殿処理などでは完全に除去できない。このため、その後段にオゾン処理と活性炭処理から成る高度浄水処理システムを増設した設備が、大都市を中心に稼働している。オゾンガス発生には多大な電力が必要であり、電力費を含む運転コストを低減するために、水質を維持したままオゾンガス発生量を低減できる接触池構造の改善や、有効な運転制

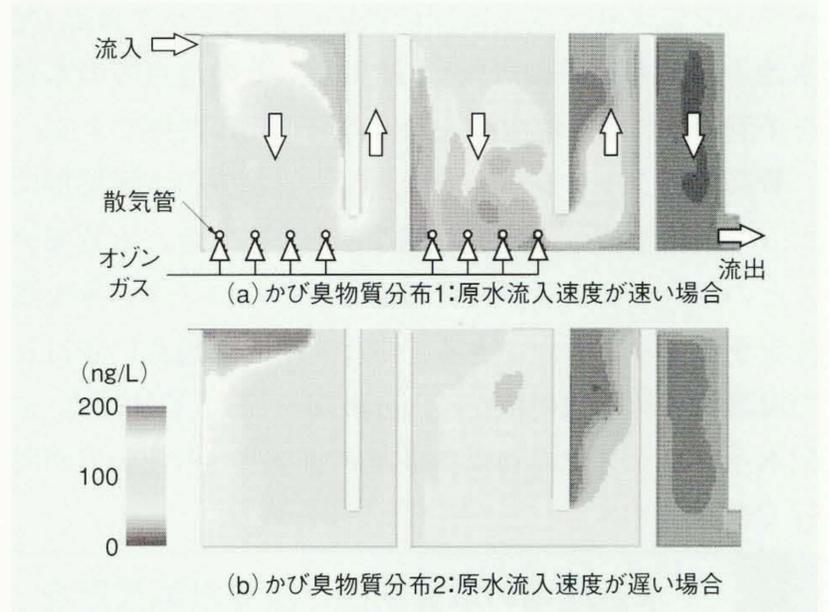


図4 オゾン接触池流体反応シミュレータの計算結果表示例

オゾン接触池内のかび臭物質や溶存オゾン濃度、およびそれらの濃度分布を予測し、可視化表示することにより、反応の進行状態が把握でき、構造の設計を支援することができる。

御方式が求められている。

オゾン反応シミュレータでは、オゾンとかび臭物質の反応を計算することにより、オゾンガスの吸収率や、かび臭物質の除去率を予測する。これにより、目標効率や目標水質を達成できるようなオゾンガス発生量の効果的な制御が可能となる。さらに、各接触槽の大きさや、接触槽へ注入するオゾンガスの量をさまざまに変えた値を入力することにより、新規装置の構造やオゾンガスを注入する散気管の適切な本数を決定できる。

#### 3.2.2 オゾン接触池流体反応シミュレータ

オゾン反応シミュレータに流体計算を組み込んだオゾン接触池流体反応シミュレータは、オゾン接触池内の流速分布や気泡分布、溶解性物質分布を予測するものである。例えば、オゾン接触池内のどこで処理水がよどんでいるか、どこで短絡流が発生しているか、オゾンとかび臭物質との反応に対してそれらの現象がどの程度の影響を及ぼすかなどを、さまざまな運転条件と構造に対して予測できる。さらに、オゾン接触池内を細かいメッシュに区切り、それぞれのメッシュに関して計算を行うことから、オゾン接触池内に阻流板を付けた場合や散気管の位置・本数を変更した場合など、細かい構造変更が及ぼす影響を可視化して予測でき、詳細な設計支援が可能となる(図4参照)。

### 3.3 トリハロメタン管網解析シミュレータ

水道水中の残留塩素確保と消毒副生成物であるトリハロメタン抑制とは、相反する操作である。このため、消毒用塩素の注入条件で苦慮するケースがある。シミュレ

ーションにより、流下時間の長いボトルネック地点(配水池から最も遠い給水栓)を抽出し、その地点での水質を予測できれば、塩素注入操作の適正化が期待できる。

管網解析シミュレータでは、配水管網内の水理解析によって各給水栓への流下時間などを算出でき、水質モデルとの組合せにより、残留塩素とトリハロメタン生成濃度を予測することができる。ボトルネック地点に着目した塩素注入適正化のほかに、分散塩素注入(追加塩素)や配水系ブロック化の効果の事前評価などへの使い方が期待できる。

## 4 下水処理場の水質制御と設備計画設計を支援するシミュレーション技術

### 4.1 高度処理水質シミュレータ

下水処理場では、「活性汚泥」と呼ばれる複合微生物群の反応によって下水を処理している。活性汚泥中には有機物分解菌や硝化菌、脱窒菌、リン蓄積菌などが存在し、高度処理では、これらの微生物の代謝機能を効果的に発揮させることにより、有機物に加え、窒素やリンも除去する。高度処理では嫌気槽と好気槽という二つ以上の反応槽が必要であり、反応槽の組合せによってさまざまな処理方式がある。有機物除去を目的とする既存施設(ばっ気槽)でも、槽を改造することにより、高度処理化できる。しかし、高度処理の維持管理は非常に複雑となることから、各反応槽の微生物代謝状況を把握し、各種微生物の生息環境を適切に管理する必要がある。

開発した水質シミュレータの画面表示例を図5に示す。

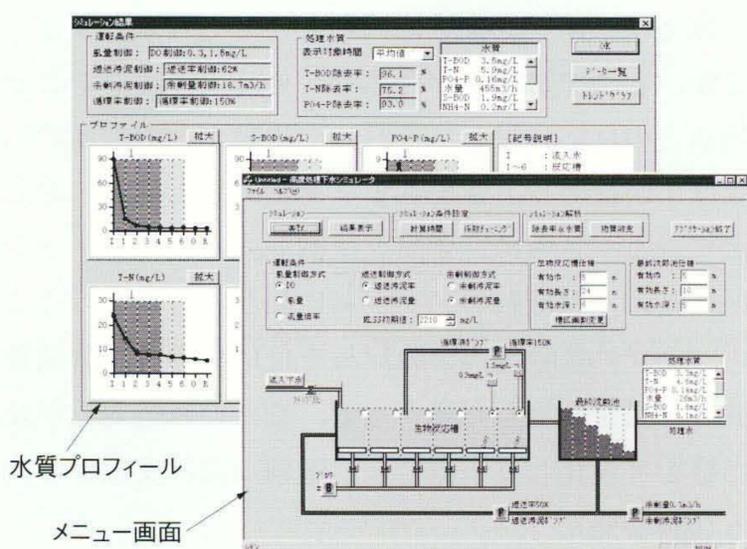


図5 下水高度処理水質シミュレータの画面表示例

反応槽の槽数、嫌気槽・好気槽の選定、循環液の有無などもメニュー画面から入力でき、各種の高度処理法だけでなく、標準活性汚泥法にも対応できる。

微生物反応モデルは、国際水学会の提案モデルと、有機物をBOD(生物学的酸素要求量)ベースで表現した独自のモデルを組み合わせることにより、国内各地の処理場に適用できるものとした。最終沈殿池の輸送モデルでも、流入した混合液が汚泥柱を形成して移動するという独自の汚泥柱移流モデルを用いた。プラント構造や仕様、嫌気槽と好気槽の選定、空気量制御位置や目標値、返送汚泥と余剰汚泥の割合、循環液と流入水の分割注入の有無などの運転条件をメニュー画面のプロセスフロー図やダイアログボックスから入力し、各反応槽や処理水の各種水質、微生物濃度、物質収支を数値とグラフで出力する。

これにより、運転中のプラントの操作条件や制御目標値の検討・評価、新設または改造計画プラントの処理水質条件を満たす処理方式や容積の決定を支援できる。

### 4.2 オキシデーションディッチ法専用シミュレータ

計画処理人口が1万人以下の小規模処理場で広く採用されているOD(Oxidation Ditch:酸化溝)法専用のシミュレータを構築した。微生物反応モデルは高度処理と同様で、輸送モデルをOD法用に改良したものである。シミュレータでは、施設形状・寸法、ばっ気装置仕様(風量、酸素移動効率、流速)、流入水および制御方式の条件を入力し、反応槽や処理水の水質を出力する。

このシミュレータは、ばっ気装置や溶存酸素計の設置位置の選定、適正制御条件の探索に利用でき、OD法施設の設計や運転を支援する。

### 4.3 好気槽流体反応シミュレータ

好気槽流体反応シミュレータでは、微生物反応モデル

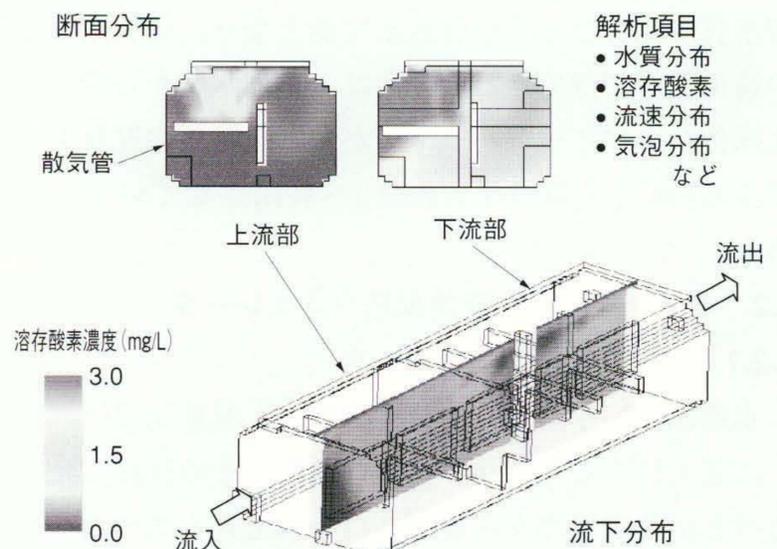


図6 好気槽流体反応シミュレータによる解析結果例

微生物反応モデルと流体計算モデルを組み合わせ、好気槽の水質・気泡・濁質の状態を三次元表示することにより、反応や現象を詳細に把握することができる。

と流れ計算モデルを組み合わせることで、好気槽内の断面や流下方向の流速分布、気泡分布、各種水質濃度分布、汚泥濃度分布などを計算し、可視化することができる(図6参照)。シミュレーションでは、反応槽を細かいメッシュに区切り、各メッシュごとに計算を行うことから、計算結果を三次元的に表示できる。

これにより、反応槽内で発生している現象を詳細に把握できるうえ、以下の反応槽設計を支援できる。

- (1) 代表濃度の検知が可能なセンサ設置位置の決定
- (2) デッドスペースの有無と反応槽構造の評価
- (3) 適切な散気管位置・本数、空気量の決定

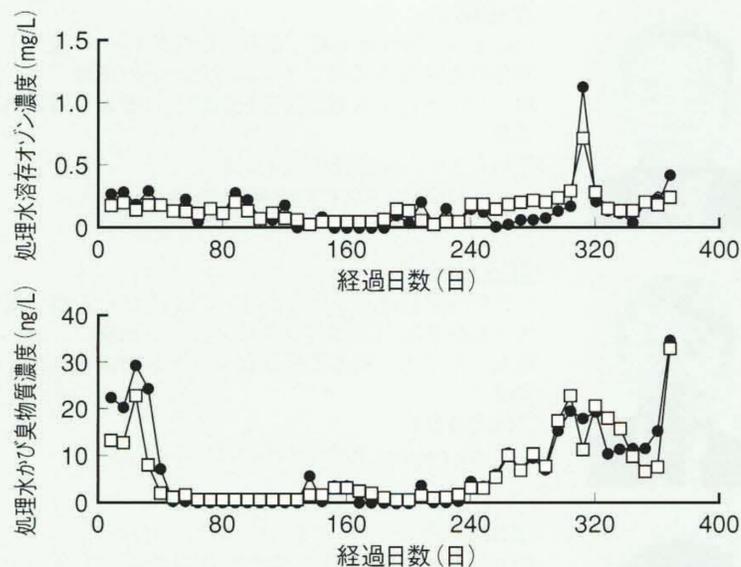
なお、このシミュレータは、有機物除去を目的としているばっ気槽にも適用できる。

## 5 シミュレーション検証結果

### 5.1 オゾン接触池の検証例<sup>3)</sup>

実浄水場に設置したパイロットプラントを用いて、1年間にわたって検証を実施した。

オゾン接触池の出口処理水を対象とした、オゾン反応シミュレータによる計算値と実測値の比較結果を図7に示す。シミュレーションに用いた反応モデルの定数には、検証期間を通して同じ値を用いた。溶存オゾンおよびか



注：●(実測値), □(計算値)

図7 オゾン接触池処理水の水質予測結果

オゾン反応にかかわる水質因子の計算値は実測値と年間を通じてよく一致し、シミュレーション予測できることが明らかとなった。

※) 2-MIB(ジメチルイソボルネオール)は植物プランクトンが発生する物質であり、富栄養化した水源を持つ浄水場の高度処理対象物質の一つである。

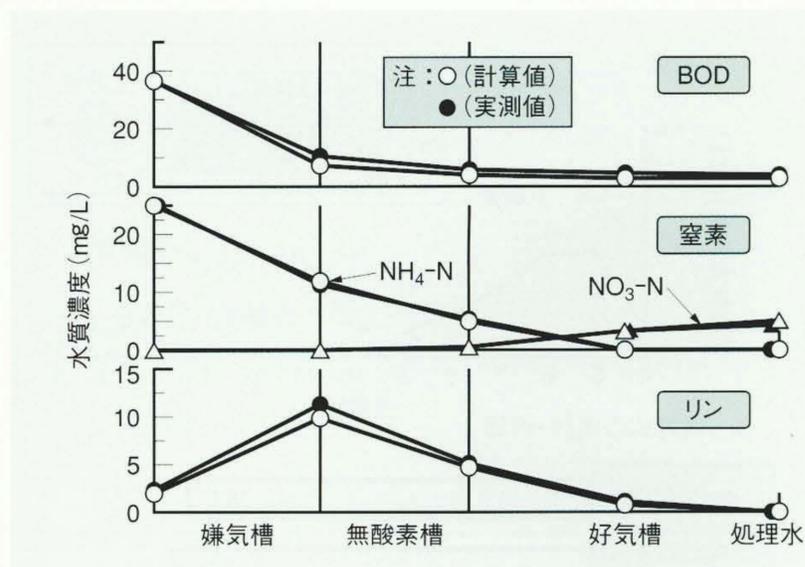


図8 下水高度処理水質シミュレータの検証例

硝化・脱窒、およびリン放出・摂取状況が良好に再現されており、運転条件とその処理効果の判定から、運転支援ツールとして有用であることが実証できた。

び臭物質(2-MIB<sup>\*)</sup>)濃度とも、計算値と実測値がよく一致しており、このシミュレータがオゾン接触池の水質予測に適用できることがわかった。

### 5.2 下水高度処理プラントの検証例<sup>4)</sup>

代表的な下水高度処理方式である嫌気-無酸素-好気(A2O)法を対象としたシミュレーションの検証例を図8に示す。有機物濃度(BOD)、アンモニア性窒素濃度(NH<sub>4</sub>-N)、硝酸性窒素濃度(NO<sub>3</sub>-N)、および溶解性リン濃度(PO<sub>4</sub>-P)のシミュレーション計算値は、各反応槽と処理水でも実測値をよく再現している。リン除去が不良となる降雨時の検証例でも、各水質とも85%以上の予測精度を得ている。また、嫌気-好気(AO)法や嫌気-好気-無酸素-好気(AOAO)法に関しても、微生物濃度を含めて同様の予測精度を得た。

これらの検証結果から、高度処理水質シミュレータは、生物反応槽や沈殿池での有機物、窒素、およびリンの除去過程ならびに微生物の増殖過程を高精度で予測でき、目標水質を満足する運転条件の検討や、導入する処理方式、設備仕様の評価・選定などに適用できることが示された。

### 5.3 オキシレーションディッチ法での検証例

OD法プラント(処理量:約500 m<sup>3</sup>/d)でのシミュレーション検証例を図9に示す。反応槽の溶存酸素濃度計算値は実測値の変動傾向をほぼ再現しており、好気領域が時間的に変動する状況を定量的に把握できる。反応槽の微生物濃度と処理水の窒素濃度も相関係数が0.95で一致し、このシミュレータが水質予測に適用できることが示された。窒素除去性能の向上を目的として、ばっ気装置

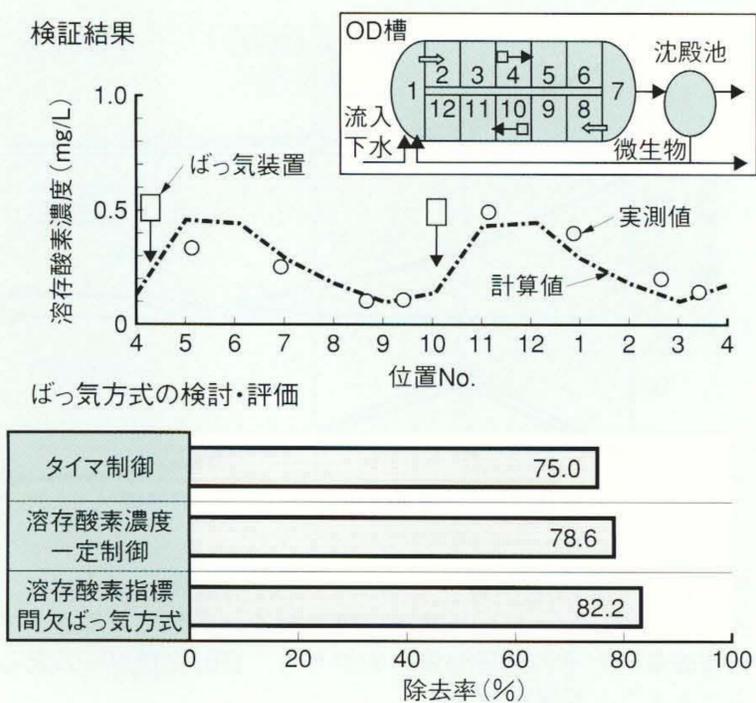


図9 オキシレーションディッチ法専用シミュレータでの検証例

OD法専用シミュレータは、水質管理のほかに、ばっ気制御方式の処理効果確認や探索にも利用できる。

の運転制御法の適正化施策をシミュレータで検討した。従来方式であるタイマ制御や溶存酸素濃度一定制御に比べて、溶存酸素濃度を指標とした間欠ばっ気運転方式は除去率を高めることが探索結果から提示された。

このように、OD法シミュレータは、水質管理に加えて、適正運転方式の探索などの支援にも有効である。

## 6 今後の展開

上下水プロセスの設備設計や維持管理には、水質、土木、機械、および電気計装に関する総合技術が要求されるため、各分野の情報を融合できるシミュレーション技術の利用価値は高いものとする。シミュレータは、運転管理や設備計画設計の支援に加え、プロセスの現象理解を早め、運転習熟のための教育訓練や、運転操作の問題点を探索するトラブルシューティングにも有用となる。今後、運転管理への直接利用や、自動制御システムへの組み込み利用に対する関心が高まってくるものと予想される。

これらの要求に対して、日立製作所は、反応モデル定数の自動チューニング技術や、水質計測器の高信頼化など自動制御に向けた開発にも取り組んでいる。

## 7 おわりに

ここでは、浄水場と下水処理場の水処理プラントを対象に、物理化学反応や生物反応モデルを組み込んだ水質

シミュレータと、これらの反応と流体計算モデルを組み合わせた流体反応シミュレータおよび水質シミュレータを実プラントで検証し、これらのシミュレータが水質管理や設備計画設計の支援ツールとして利用できることを述べた。

上下水道は、社会ライフラインの大きな柱として、21世紀の快適な水環境の創造に対するニーズがますます高まっていくものとする。日立製作所は、このようなニーズにこたえるため、水質シミュレータや水質制御技術、水質計測監視技術、場内設備の各種診断評価技術など上下水プロセスの高度情報制御システムの開発に注力し、上下水道維持管理の高度化に貢献していく考えである。

## 参考文献

- 1) 松浦：下水道局におけるISO14001の認証取得について、水環境学会誌，23，4，197～200(2000)
- 2) 陰山，外：パイロットプラントデータに基づいたオゾン接触池シミュレーションモデルの検証，第47回全国水道研究発表会講演集，96～97(1996)
- 3) W. Gujer, et al.: Activated Sludge Model No.3, Wat. Sci. Tech., 39, 1, 183-193(1998)
- 4) 原，外：A2O法シミュレーションの実プラントへの適用，第35回下水道研究発表会講演集，552～554(1998)

## 執筆者紹介



### 渡辺昭二

1969年日立製作所入社，電力・電機グループ 電力・電機開発研究所 都市環境システム研究センター 所属  
現在，上下水・水圏計測監視制御システムの研究開発に従事  
環境システム計測制御学会会員  
E-mail: swatana@erl.hitachi.co.jp



### 藤田良成

1975年日立製作所入社，電力・電機グループ 情報制御システム事業部 社会制御システム設計部 所属  
現在，上下水・利水監視制御システム設計取りまとめに従事  
電気学会会員  
E-mail: ryousei\_fujita@pis.hitachi.co.jp



### 陰山晃治

1993年日立製作所入社，電力・電機グループ 電力・電機開発研究所 都市環境システム研究センター 所属  
現在，上下水処理技術の研究開発に従事  
環境システム計測制御学会会員  
E-mail: kageyama@erl.hitachi.co.jp



### 植木 茂

1986年日立製作所入社，電力・電機グループ 社会システム事業部 公共電機システム部 所属  
現在，上下水道情報制御システムの開発，企画に従事  
環境システム計測制御学会会員  
E-mail: shigeru\_ueki@pis.hitachi.co.jp