

水環境と水質の安全・安心に貢献する シミュレーション・計測技術

Simulation and Sensing Technologies for Water Quality and Security

圓佛 伊智朗

Embutsu Ichiro

青木 純一

Aoki Junichi

五十嵐 由美子

Igarashi Yumiko

齋藤 功治

Saito Koji

江畑 正勝

Ebata Masakatsu

水に対する関心が世界中で高まっており、安全・安心の確保への期待は大きい。日立グループは、これまでに、水環境と水質の安全・安心に貢献できる広範な計測技術、シミュレーション技術を開発してきた。水質制御向けと水環境向けの2つの観点での最近の主な開発成果として、シミュレーション技術では、下水処理プロセスでの温室効果ガスの排出抑制や、地下水と地表水を同時に計算できるシミュレータがある。また、計測技術では、配水管路網中に設置する水理・水質情報センサーを開発するとともに、ヒト培養細胞を用いたバイオアッセイによる水の安全性評価に取り組んでいる。

1. はじめに

水は社会活動において重要な資源であると同時に、豊かな環境を構成するものとして不可欠である。水に求められるニーズは、単に量的に充足されるということだけでなく、近年では質的な向上へと関心が移行している。国内外の水に関わる当事者（国、自治体など）は、国情や住民の

意向に合致する政策を掲げ、種々の施策を積極的に推進している。

日立グループは、このようなニーズや施策に対応するため、水環境の安全・安心に貢献する技術を開発し、製品・ソリューションとして提供してきた。

ここでは、広範な開発技術の中から、特にシミュレーション技術と計測技術に焦点を当て、最近の代表的な取り組みについて述べる。

2. 水利用と水環境分野への日立グループの取り組み

水利用と水環境に関わるフィールドは、これまでも日立グループが開発に注力してきた分野である。水源保全、水道、下水道、治水を網羅する広範な製品とソリューションを提供するため、これらに関わる現象を模擬して評価・予測するシミュレーション技術、さらにこれらを下支えする計測技術を開発している（図1参照）。これまでに、水処

水循環での位置づけ	対応するシミュレーション技術	対応する計測技術
水環境を守る 水源保全	・河川流下シミュレーション ・流域汚濁負荷予測シミュレーション ・流域環境シミュレーション など	・水源水質衛星リモートセンシング ・植物プランクトン連続計測 ・油膜漏えい検知 など
水を利用する 水道	・配水計画／制御シミュレーション ・浄水処理プロセスシミュレーション ・配水管網水質シミュレーション など	・魚バイオアッセイ毒物検知 ・浄水薬注制御用アルミニウム計測 ・配水管網多項目水質計測 など
水を再生する 下水道	・下水高度処理シミュレーション ・生物処理槽流動シミュレーション ・温室効果ガスシミュレーション など	・活性汚泥画像計測 ・ヒト細胞による再生水毒性評価 など
水被害を抑える 治水	・雨水／下水ポンプ機場運用シミュレーション ・浸水予測シミュレーション など	・河川水位計測 ・浸水被害衛星リモートセンシング など

図1 | 日立グループの主な水環境シミュレーション・計測技術ラインアップ

水の安全・安心が一層重要となっている。日立グループは、継続的な研究開発で広範な技術をカバーしている。

理プロセス監視制御を高度化するために現象に深く踏み込んだシミュレーションや、プロセスの状態を正確に把握するための計測技術などを、直接的・間接的に製品に反映してきた。

こうした設計・制御ツールとしての技術に加えて、今後は安全・安心に直結し、ユーザーも利用できるシミュレータ、計測技術の開発に注力する。

3. シミュレーション技術

3.1 温室効果ガスを考慮した下水処理プロセスシミュレーション

近年、下水処理場では公共用水域への環境負荷の低減に加え、CO₂やN₂O（一酸化二窒素）ガスといった温室効果ガスの排出低減が急務となっている。N₂Oガスは、水処理プロセスにおける硝化と脱窒の中間生成物として生成され、その一部が大気中に放出される。地球温暖化係数がCO₂の310倍と大きく、水処理プロセスで生成するN₂Oは、CO₂換算で処理場全体の8.7%にも達する¹⁾。

日立グループは、処理水水質の維持と温室効果ガス低減に向けた運転支援技術の確立を目的に、下水処理プロセスをシミュレーションする技術として、活性汚泥モデルをベースとしたN₂Oガス生成モデルを新たに開発²⁾し、下水水質シミュレータに実装した（図2参照）。

開発したN₂Oガス生成モデルの特徴は、従来モデルで計算した結果を援用してキャリブレーション作業時間を短縮するなど、実用的な構成としたことである。まず、従来モデルによる計算で、NO₃-N（硝酸性窒素）とNO₂-N（亜硝酸性窒素）の合計であるNO_x-N（硝酸性窒素および亜硝酸性窒素）に関する反応速度を求める。次に、N₂Oガス生成モデルにおいて、その反応速度を利用することで、

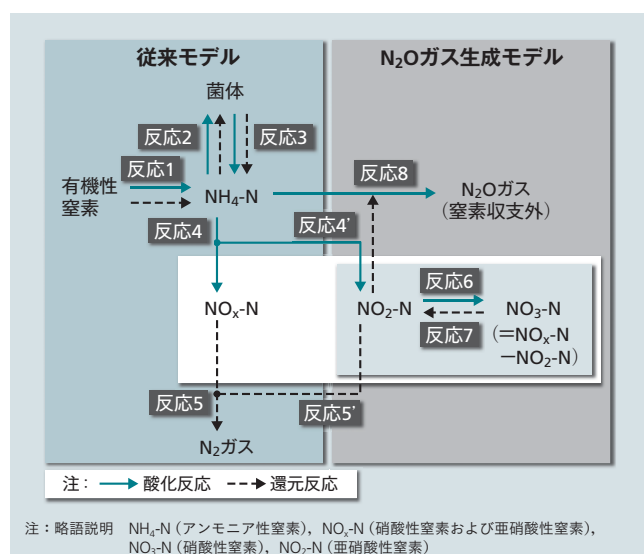


図2 | 開発モデルにおける窒素成分の形態変化

N₂Oガスの計算に、従来モデルの計算結果を用いることで、煩雑な係数調整を軽減した計算が可能になった。

NO₂-N、NO₃-NおよびN₂Oガスを簡便に計算できる。

開発したN₂Oガス生成モデルは、実際の下水処理場での水質の変動挙動を再現でき、その有効性を確認している。開発したシミュレータを用いて、NO₂-N、N₂Oガスの挙動を再現した結果を同図に示す。硝化の中間生成物として生成したNO₂-Nの挙動と、NO₂-Nの蓄積に伴って生成量が増加したN₂Oガスの生成を精度よく再現することができた。それぞれの相対誤差は10%、8.8%と小さく、制御に活用できる精度である。

今後はN₂Oガス生成モデルを実装したシミュレータを用いて、N₂Oを抑制する運転制御方式の開発を進めていく計画である。

3.2 水環境の変化に対応する水循環シミュレーション

地球温暖化による降雨量の偏在化などにより、水循環にも影響が及び始めている。その結果、例えば、各地で洪水が増加する傾向にある。こうした事象に対応するものとして、水の流れと量を解析できるシミュレータへの期待が大きい。

ここで開発した統合型水循環シミュレータ「GETFLOWS^{※)}（General Purpose Terrestrial Fluid-flow Simulator）」は、オイル&ガスの資源開発計画向けソフトウェアが原形であり、地質構造を含めた三次元地形をモデル化してコンピュータに入力すれば、あらかじめ地物を定義することなく地下水、地表水の流れや湖沼をコンピュータ内に作り出せる特徴がある。

GETFLOWSは、解析システムとビジュアルシステムで構成される。解析システムの技術的な特長は、地下水と地表水を同時に計算し、タイムステップごとに地下と地表の水収支を明確化できる点にある。ビジュアルシステムは、地理空間情報システムをエンジンに用いて三次元+時間軸（四次元）で地下水の動きを表現し、見えない地下水の「見える化」を実現している（図3参照）。

適用分野は、(1) 洪水解析、(2) 地下水、地表水を含めた水資源量の明確化、(3) 沿岸域の塩水浸入解析、(4) 地下ダム設置計画、(5) 海水淡水化用取水の適地選定（海底湧水地点の明確化）などの水環境に関わるものから、(6) 超臨界二酸化炭素流動解析、(7) オイル&ガス開発に関わる掘削支援計画など多岐にわたる。

ここでは洪水解析への適用例を紹介する。GETFLOWSは、地下をモデリングしていることから、洪水流の地下浸透計算を可能とする。また、蒸発散量を同時に計算するため、従来法では計算できなかった洪水流の消滅を表現するこ

※) GETFLOWSは、株式会社地圏環境テクノロジーの登録商標である。

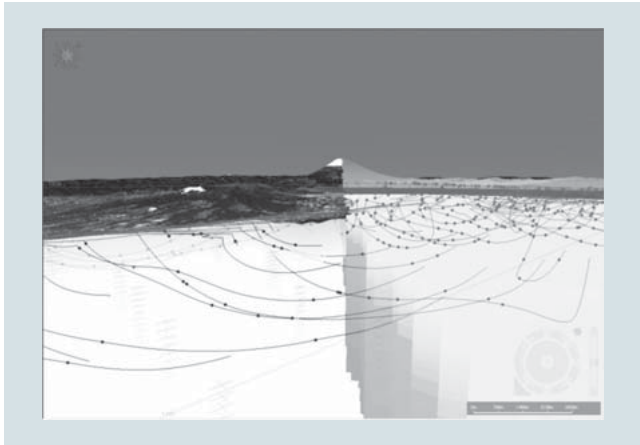


図3 「GETFLOWS」による解析例

地下水と地表水の流れを解析し、三次元+時間軸で表示することができる。

とができる。一方、レーダ雨量計と連動して実際の降雨データを取得し、そのデータを用いてシミュレーションを継続的に行うことにより、実態の土壌水分量と近似した土壌モデルが得られる。そのため、流出量計算の精度が高くなり、これに伴って洪水発生予測の精度も向上する。例えば、近年、気候変動の影響でアラビア半島において集中豪雨が発生し、大きな被害をもたらしている。こうした砂漠地帯において、早期警戒システムの解析システムとして適応させた場合には、洪水の発生から消滅まで予測可能であり、住民への最適避難指示に役立つ。一方、豪雨によって涵養（かんよう）された地下水量も同時に把握でき、水資源として洪水を利用する検討も可能である。

地下水と地表水を同時に計算できるソフトウェアは、世界的にも例がない。現在、サービス事業としての展開を進めており、インフラ上位計画にアプローチしていく予定である。

4. 計測技術

4.1 配水管網の水質管理に対応する情報センシング

水道の蛇口から出る水をそのまま飲むという文化を持つ地域にとって、水質安全の維持・管理は重要である。水道は、取水・浄水処理・送配水の工程を経て需要家に供給され、給水栓末端に至るまでには多くの水質計によって水質管理が行われている。浄水場内での水質管理に加え、最近では給水栓末端に設置される自動水質計も普及している。

東京水道サービス株式会社と株式会社日立ハイテクコントロールシステムズは、配水管路網中の消火栓や空気弁に設置できる可搬型の水理・水質情報センサーを共同開発した。これは、配水管路網中の水理と水質情報を収集し、停滞水の解消や系統変更前後の流量・流向などを機動的に把握する。それにより、配水管路網中の水質安全の維持・管理に貢献できる。

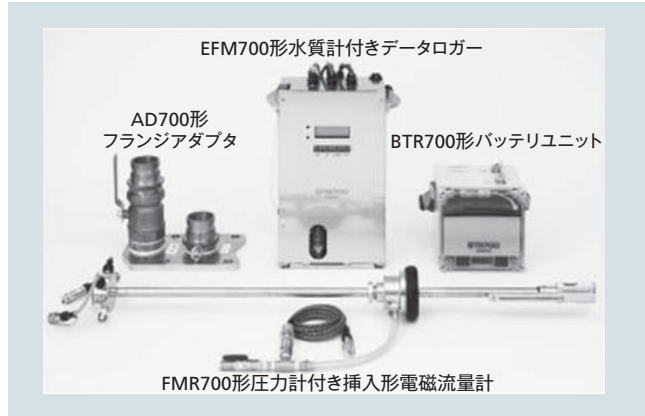


図4 水理・水質情報センサーの構成

バッテリーを2個接続でき、1週間のピット内測定が可能である。ピット内の配水の悪い場所も考慮し、IP68の耐水性能を持つ。

水理・水質情報センサーは、バッテリー駆動であるとともに、約1週間(最大8日間)のデータロギングが可能である。データはPC (Personal Computer) に取り込むことができ、帳票およびトレンド情報として管理できる。また、水理仕様（水圧、流量、流向）と水質仕様（残留塩素、電気伝導率、水温）があり、流量計測には圧力計付き挿入形電磁流量計を用い、最小口径100 mmまで対応可能である。残留塩素には水流ビーズ洗浄式ポーラログラフ法を、電気伝導率には4電極法をそれぞれ採用している。

水理・水質情報センサーは、EFM700形水質計付きデータロガー、FMR700形圧力計付き挿入形電磁流量計、BTR700形バッテリーユニット、AD700形フランジアダプタから構成される（図4参照）。こうした機器を配水管路網中に設置し、その測定結果を基に管路網診断へのフィードバックを行い、安全でおいしい水の安定供給に貢献できるものと考えている。今後もこのセンサーを応用し、より安定な配水管路網の維持・管理に努めていく。

4.2 バイオアッセイによる水質安全性評価

衛生設備の普及や産業排水の処理の遅れから、新興国では深刻な水環境汚染が進んでおり、安全な飲水の確保が急務である。また、先進国の水不足地域では下水を再生処理して都市水・農水・飲水混合に用いており、今後、水の安全性確保のために要求される水質管理には、人への安全性をどのように示すかが大きな課題となる。

現在、水の安全性管理は基準などで定められた個別の成分の分析で行われているが、多大な労力とコストが必要である。これに対して、水をそのままバイオアッセイ（生物学的応答から生物作用量を評価する方法）で評価する方法は、未知物質や複合汚染物質の検出に優れている。水環境においては、魚など水生生物を用いた生態影響試験が普及しているが、種の違いから、人への安全性評価として直接

適用することは難しい。そこで、先端培養技術を活用し、ヒト培養細胞を用いて水の安全性を評価する技術の開発を進めている。

細胞を用いたバイオアッセイは、評価水でヒト組織由来細胞を培養し、細胞活性の変化量や有害事象を検出して安全性を評価するもので、急性および慢性の有害性検出が可能である。また、高い再現性を備えている。

飲水の場合、水の飲用は一生継続するため、弱い毒性を継続して曝(ばく)露された場合を想定して評価しなければならない。そこで、分裂寿命のあるヒト正常細胞を用いて、処理水の前処理法および慢性毒性試験法を構築した(図5参照)。ヒト正常細胞は、染色体末端にテロメアと呼ばれる反復配列を持ち、分裂するたびに短縮することで細胞老化が開始し、いずれ細胞分裂が停止する性質がある。数か月間におよぶ培養期間において、継代時に細胞数を測定して分裂回数を算出し、寿命を迎えた分裂回数を指標に評価を行う。

弱い毒物を想定し、水道水質基準の基準値でクロムとヒ素を添加したモデル汚染水で寿命の短命化が確認され、この評価法が慢性毒性の検出に有効であることが示された。また、MBR (Membrane Bioreactor) (5倍濃縮) および MBR+RO (Reverse Osmosis) (20倍濃縮) 処理水を評価した結果、明らかな有害性は認められず、今回のケースでは正常に処理された下水再生水の安全性は高いと考えられた。

このように、ヒト正常細胞の特徴である分裂寿命を利用した毒性評価は、弱い毒性が蓄積されて現れる慢性毒性の

検出に有効である。この研究で提案するヒト細胞のアッセイは成分分析を必要とせず、未知の物質を含む総合的な有害性を評価できることから、上水から環境水・排水まで、さまざまな分野で広く適用が可能である。

5. おわりに

ここでは、広範な開発技術の中から、特にシミュレーション技術と計測技術に焦点を当て、最近の代表的な取り組みについて述べた。

水利用と水環境を取り巻く国内外の状況は変わっていくものの、その重要性は将来も不変である。日立グループは、水の安全・安心に関わる新たなニーズに即したシミュレーション、計測技術の開発を進めている。今後も、さらなる技術開発に注力し、これら技術を通した水利用と水環境への貢献を一層進めていく。

参考文献

- 1) 下水道における地球温暖化防止対策検討委員会：下水道における地球温暖化防止推進計画策定の手引き、国土交通省 (2009)
- 2) 山野井, 外：活性汚泥モデルに準拠した N_2O ガス生成モデルの開発, 下水道協会誌, 48, 589, 65~75 (2011.11)

執筆者紹介

- 圓佛 伊智朗**
1988年日立製作所入社, 日立研究所 材料研究センタ エネルギー材料研究部 所属
現在, 水処理・水環境システムの研究開発に従事
博士(工学)
電気学会会員, 日本水環境学会会員, 環境システム計測制御学会会員
- 青木 純一**
2002年日立製作所入社, ディフェンスシステム社 エンジニアリング部 所属
現在, 社会インフラ安全保障の水およびエネルギー分野の事業化に従事
一級建築士, 測量士
- 五十嵐 由美子**
1987年日立製作所入社, 中央研究所 ライフサイエンス研究センタ 基礎研究部 所属
現在, 細胞培養・細胞計測の研究開発に従事
日本水環境学会会員, 日本分子生物学会会員
- 齋藤 功治**
1979年日立製作所入社, 株式会社日立ハイテクコントロールシステムズ 計測制御本部 計測制御設計部 所属
現在, 工業計器全般の設計および事業推進業務に従事
- 江畑 正勝**
2011年東京水道サービス株式会社入社, 設備企画部 技術開発課 所属
現在, 水道施設などの維持管理に関わる技術開発業務に従事

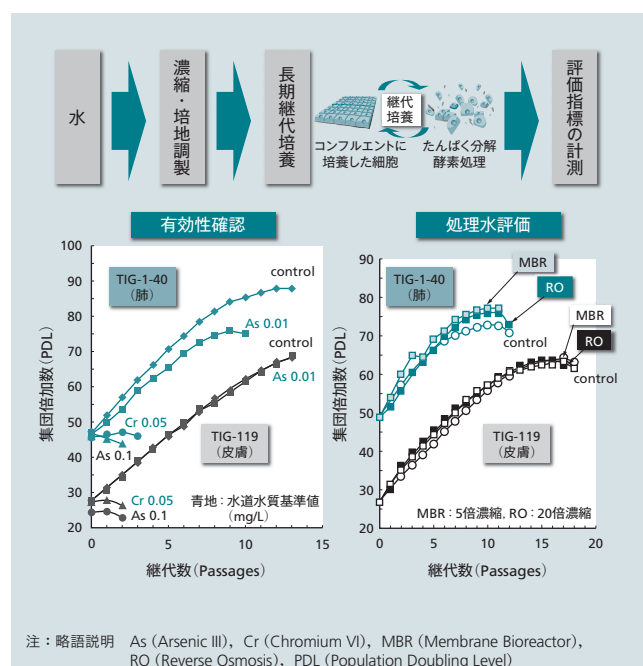


図5 | ヒト正常細胞による水の慢性毒性評価

正常細胞の特徴である有限増殖に着目し、分裂回数を指標に評価を行う。