

上下水道分野における制御・計測技術

Control and Measurement Technologies for Water Supply and Sewage Treatment

加藤 孝夫
KATO Takao

金子 政雄
KANEKO Masao

居安 巨太郎
IYASU Kotaro

上下水道は、都市生活を支える重要な社会基盤であり、水環境を保全し、良好な水循環の構築を図ることが求められている。そのためには、水質・水量を計測し、要求される水質・水量を満足すると同時に、エネルギーや薬品の使用量を最小化する制御が必要である。近年は、運用・管理に加え、維持管理の自動化も重要な課題となっており、設備診断技術、異常検出技術としての計測・制御の応用も増えている。

当社は、上下水道分野におけるこれらの要求にこたえるため、異常検出のための計測技術、新しい計測方法、広域運用に対応した制御技術、生物反応のモデル化に基づく制御技術などを開発・製品化している。

Water supply and sewage treatment systems are essential infrastructures for urban life and the water environment. Instrumentation and control technologies are important for the operation of such systems. In recent years, in addition to operation, automation of maintenance has also become an important subject and the application of control and measurement technologies to equipment diagnosis and abnormality detection has been increasing.

Toshiba has been developing instrumentation technologies for abnormality detection, new measurement methods, control technologies for wide-area operation, control technologies based on modeling of biological processes, and other technologies to meet the demand in the water supply and sewage treatment fields.

1 まえがき

安全な飲み水を供給する上水道施設と生活排水や雨水を処理する下水道施設は、生活を支える重要な社会基盤である。

わが国の水道普及率は96.4%に達し、全国どこでも蛇口の水をそのまま飲めるという、世界に誇る高いレベルでの安全性を実現してきた。しかし、一方で、クリプトスポリジウム^(注1)や内分泌かく乱化学物質^(注2)などの新たな水質問題が発生するなど、水質問題が多様化・複雑化している。また、湧水や地震時に備えた施設水準の向上や老朽化施設の更新などの課題もあり、21世紀の水道として、安全な水の安定的な供給を基本としつつ、地域の実情に合ったより高い水準を目指す整備が進められている⁽¹⁾。

一方、下水道の普及率は60%に達したが、都市部での高普及率に対して、地方市町村の遅れが問題となっている。また、窒素及びリンの除去が十分でないことに起因して、河川や湖沼の水質改善が十分なレベルに達していない問題や、集中豪雨による都市型水害の頻発などの問題も残っている。21世紀の下水道は、水循環と水環境の保全の視点から果たすべき機能を見直し、安全な都市生活を確保するとともに、地球環境にも配慮した循環型社会形成の役割を果たす必要がある⁽²⁾。

(注1) 病原性原虫の一種で、人や牛の腸管に寄生して下痢症を起こす。水系を媒体に拡散し、塩素では十分に消毒できない。

(注2) 体内に取り込まれた場合、正常なホルモン作用に影響を与える化学物質。環境ホルモンとも呼ばれる。ダイオキシン、DDT、PCBなど。

上下水道において、制御・計測技術は処理性能を確保し、施設運用の効率化を果たすために従来から重要な役割を担ってきた。水質と水量を計測し、エネルギーや薬品のコストを抑えて目標水質を達成するための制御が、運転管理に導入されてきた。これら運転の最適化のための計測と制御は重要であり、水処理プロセス管理の自動化への計測と制御の適用など、今後注力が必要な分野も多い。

上下水道は本格的な維持管理の時代に入り、中小都市における整備や改築・更新が進むと、運転管理とともに、施設及び設備の保全管理も大きな課題となってくる。運転の自動化については導入が進められてきたが、保全管理については、現業職員の技能に依存しているのが実情である。また、地方の市町村においては職員の数も少なく、無人化や小人数管理へのニーズも強い。今後は、これら維持管理に対応した制御・計測技術も重要となってくる。

ここでは、上下水道分野におけるこれらの動向を踏まえ、施設の運転と維持管理に貢献する制御・計測技術について、最近の技術を中心に述べる。

2 上下水道計測技術における新たな展開

上下水道計測技術の新展開として、水質やプラント及び機器の異常検出のための計測技術、降雨の面的分布測定など従来測定が困難であった量の計測、シミュレーションやソフトウェアによる計測・予測技術について述べる。

2.1 異常検出のための計測技術

2.1.1 水質の異常検出技術 安全な水を供給する水道事業において、水源水質の監視は非常に重要な業務である。特に、わが国では河川水を水源としている水道が多いなか、油類やシアン、有機溶剤などの化学物質の河川への流出事故が近年多発しており、水質の監視及び異常検出技術はますます重要となってきた。当社では、蛍光測定によって油類を検出する油膜センサ⁽³⁾、有害化学物質を検出するバイオセンサ⁽⁴⁾、水道水の塩素処理により生成される有機ハロゲン化合物の前駆物質であるフルボ酸の蛍光測定⁽⁵⁾などに取り組んでいる。ここでは、この中からバイオセンサによる有害物質の監視について述べる。

水道原水に混入するおそれのある毒物及び化学物質は、非常に多岐にわたっており、すべての種類の物質を個別に監視することは事実上不可能である。そこで、生物に対する毒性を総合的に評価する生物試験法(バイオアッセイ)が注目されている。当社では、このバイオアッセイ技術を活用し、鉄酸化細菌を適用したバイオセンサ型有害物質監視支援装置を開発した。鉄酸化細菌の呼吸活性の変化を、溶存酸素を測定することによって判定し、鉄酸化細菌の不活性化から有害物質の混入を検出するセンサである。バイオセンサの構成を図1に、検出原理を図2に示す。

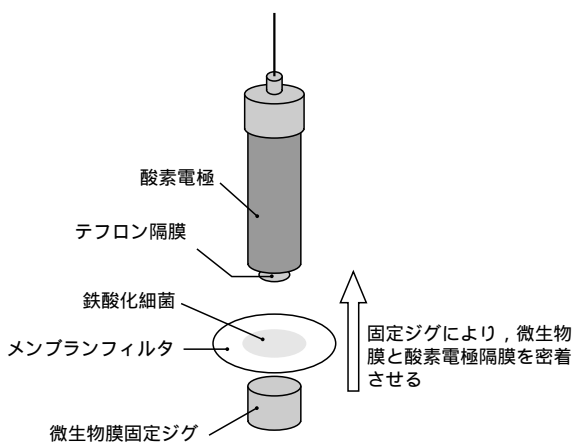
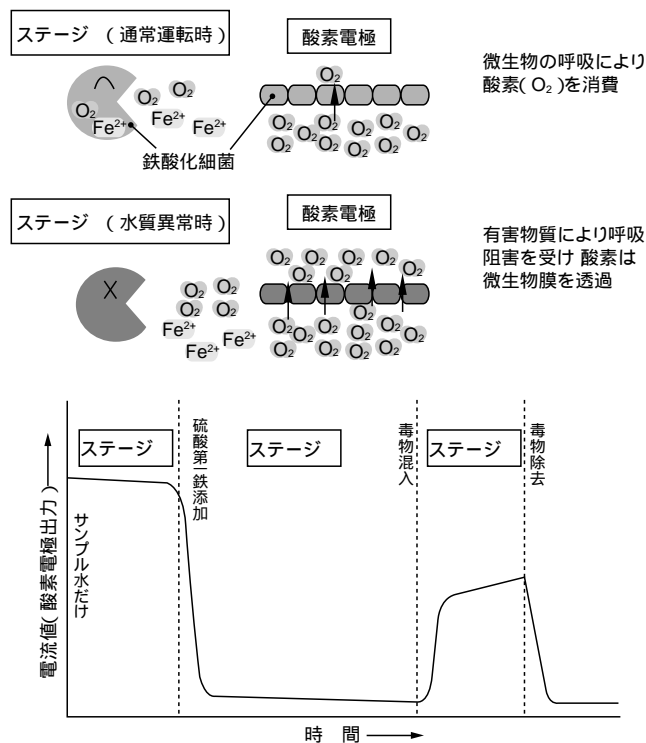


図1. バイオセンサの構成 鉄酸化細菌をメンブランフィルタ上に固定化し、酸素電極に密着させる。
Structure of biosensor

2.1.2 プラントの異常検出技術 上下水道施設が高度化し複雑化していくなか、施設の維持管理を小人数で適切に行うためには、設備診断・保全管理技術の導入が不可欠となってくる。保全管理においては、一定時間ごとに保全を行う時間基準保全の考え方から、設備の状態を診断し判断して保全を行う状態基準保全へと保全方式も変遷している。状態基準保全においては、設備の状態を適切に診断し検出する技術が重要となってくる。ここでは、プラントの異常



硫酸第一鉄：鉄酸化細菌のエネルギー源

図2. バイオセンサの有害物質検出原理 有害物質が混入すると鉄酸化細菌の活性低下が起こり、酸素は微生物膜を透過し、酸素電極に到達する。

Principle of toxicity detection with biosensor

検出技術についての最近の開発事例として、膜破損検出技術⁽⁶⁾について述べる。

膜処理は、病原性微生物をほぼ完全に除去でき、維持管理が容易で、施設がコンパクトになるなどの利点から、簡易水道などの小規模な事業者を中心に導入が進められている。当社は、加圧空気を膜に供給し、漏れ出す流出空気量から膜破損を検出する技術を開発した。膜破損検出システムの構成を図3に、破損なし膜と中空糸1本破損膜の加圧空気圧力と流出空気量の関係を図4に示す。この方式によって、複数の膜モジュールの中から、中空糸1本の破損を確実に検出することができる。

2.2 新しい原理による計測

従来測定が困難であった計測量を計測できるものがある。ここでは一例として、レーダ雨量計を用いた降雨の面的計測について述べる。

集中豪雨によって引き起こされる都市型水害の対策には、降雨の正確な把握が必要である。正確な把握とは、降雨の面的分布の測定を意味し、これによってある地域に降る雨の総量(面積降雨)の把握や、降雨予測ができるようになる。一般に雨量計と呼ばれるものは、ある地点の雨量を測定する点雨量計であり、降雨分布を測定するためには、無数の点雨量計の設置が必要になってしまう。この問題を解決し

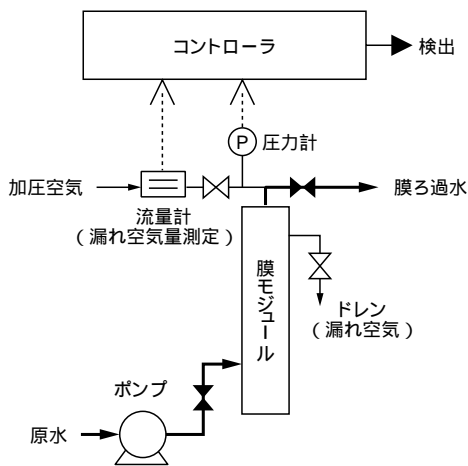


図3. 膜破損検出システムの構成 加圧空気を膜に供給し, 漏れ出す空気流量から膜破損を検出する。

Leak particle detection system for membrane film

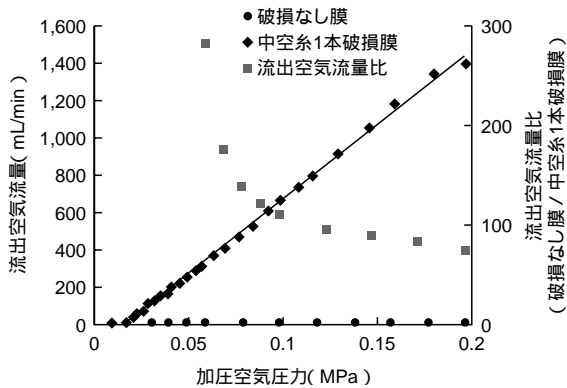


図4. 膜破損検出システムの検出特性 膜モジュール(中空系3,700本)から漏れ出す空気量を測定することで, 中空系1本の膜破損も検出できる。

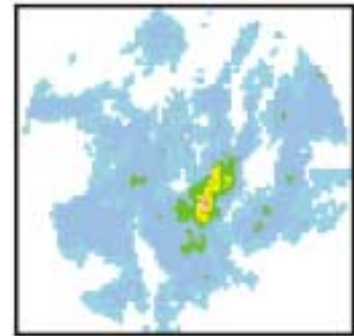
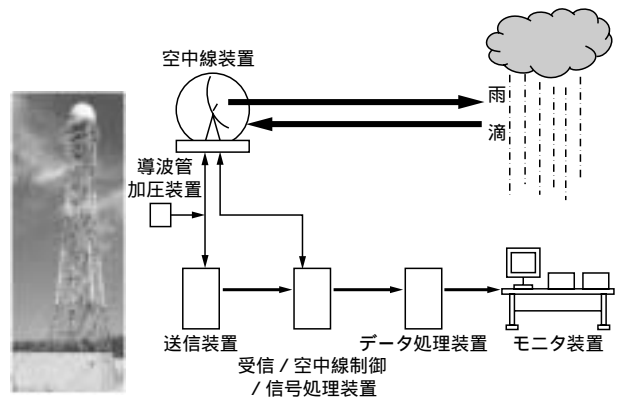
Characteristics of leak particle detection system for membrane film

たのが, 雨量レーダである。雨量レーダは, 広域的かつ面的な観測ができ, 雨のようす(有無, 強弱, 移動)をひと目で知ることができる装置である。アンテナから発射された電波が, 雨滴にぶつかって反射し, 戻ってきた電波の強度で雨の強さを, 戻ってくる時間で雨の位置を測定する。雨量レーダのシステム概要を図5に示す⁽⁷⁾。

2.3 シミュレーションモデルによる計測及び予測

物理量と化学量を電気信号に変換する計測技術から, モデルを活用してソフトウェア的に計測し予測する技術への発展も進んでいる。計測が困難な処理場流入水量及び流入水質の予測, 河川の水質予測などに適用されている。ここでは, 毒物の河川での拡散を予測するシミュレーション⁽⁸⁾について述べる。

河川に毒物などの有害化学物質が流入した場合, 原水へ



画像表示例

図5. 雨量レーダのシステム概要 アンテナから発射された電波が雨滴にぶつかって反射し, 戻ってきた電波の強度と時間から降雨分布を測定する。

System outline of radar rain gauge

の異常水質の流入防止や取水停止の意思決定を適切に行い, 水道水の安全を確保しなければならない。この河川水質予測シミュレーションは, 浄水場の取水に向って異常水質が時々刻々どのように拡散していくかを予測し, 取水の停止や再開などの意思決定をする際の判断を補助し支援しようとするものである。シミュレーション結果の一例を図6に示す。設定画面で, 異常水質の流入位置, 濃度などを設定し



図6. 河川水質分散予測シミュレーション モデル河川上流端の中央部に, 異常水質が5分間だけ流入した場合の分散シミュレーションを示す。

Simulation of dispersion of contaminated solutes

実行すると、時々刻々の濃度分布の変化が河川地図上に表示される。

3 上下水道制御技術における新たな展開

制御技術における新展開として、広域運用に対応した制御技術、生物反応モデルに基づく制御技術について述べる。

3.1 広域運用に対応した制御技術

上下水道分野の制御は、機械単位の制御から、プロセス全体の制御、プラント全体の制御、更にプラント間の協調、連携を図る広域運用へと広がっている。上水道においては、広域水運用計画の立案と運用であり、下水道であれば、ポンプ場と処理場の連携、雨水に対する広域連携、污泥処理の広域連携などである。ここでは、その一例として、遺伝的アルゴリズム(GA)による上水道系の最適水運用支援⁽⁹⁾について述べる。

上水道プラントは、取水 - 浄水 - 送配水の各プロセスから成り、各プロセスにおいて浄水の安定供給と安全な水質の維持という観点から、できるかぎり負荷変動の少ない運転管理が要求される。ポンプ動力費などの運用コストをできるだけ低減させるため、夜間電力の活用と夏季における消費電力のピークカットを考慮した運用も有効である。したがって、このような運用を実現するためには、気象情報などを入力として得た配水量予測値に基づいて、配水池容量を有効活用して、送水量変動を抑制し、運用コストを削減する最適計画の立案が有効となる。この最適計画の策定は、広域にわたる規模の大きな問題になると演算時間が大きくなる課題があったが、GAという生物進化の過程を模擬した手法を適用し、高速演算ができるようになった。対象プラントを図7に、計画例を図8に示す。

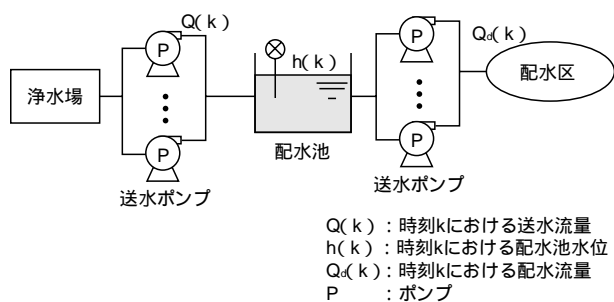


図7. 水運用の対象とする送水プラント例 送水計画策定例(図8)において使用した対象プラントである。

Example of water distribution plant configuration

3.2 生物反応のモデルに基づく制御技術

現在の下水処理は、微生物を用いて汚濁物質を除去する生物学的処理法が主体となっているため、プロセスの挙動

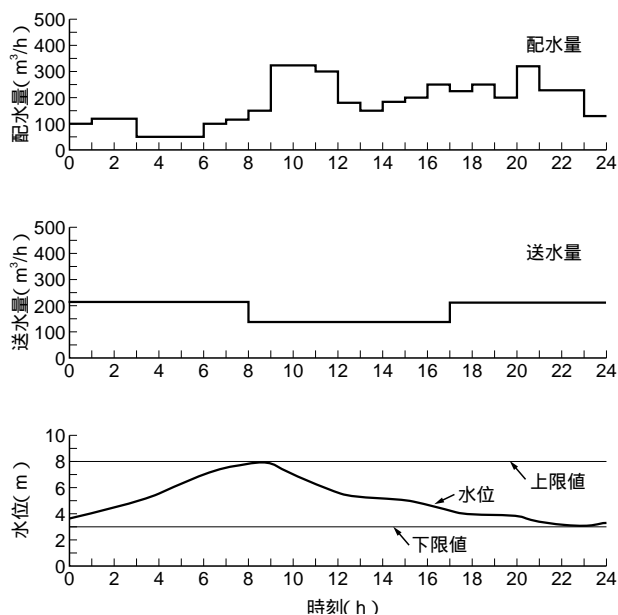


図8. GAによる送水計画例 GA利用により、ポンプ運転切換えが少ない送水計画が得られた。

Example of schedule preparation by genetic algorithm (GA)

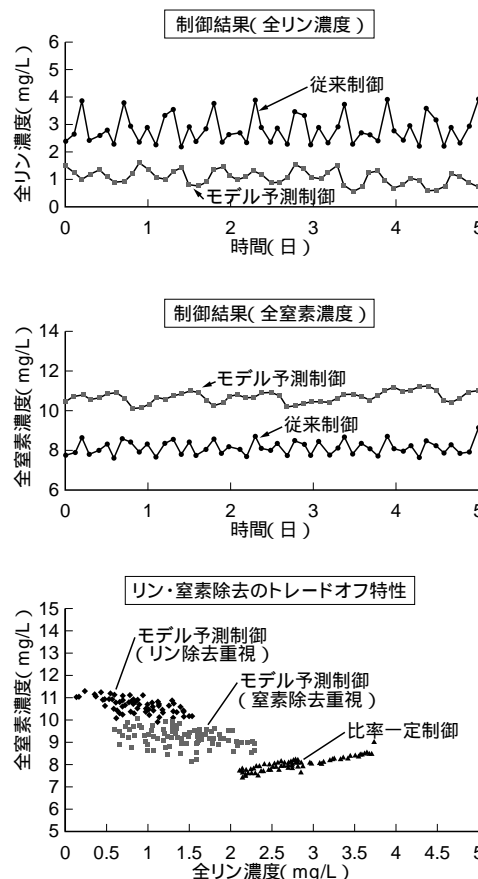


図9. モデル予測制御による脱窒・脱リン水質制御の例 モデル予測制御によって、窒素とリンの同時除去を行うことができるが、窒素とリンの除去はトレードオフの関係がある。

Example of biological nitrogen and phosphorus removal by model predictive control

を正確に把握することが重要であるにもかかわらず、未解明の部分が多いのが現状である。特に近年、水環境の保全のためには、窒素、リンの除去が重要であることから、窒素とリンを除去する高度処理の導入が進められているが、従来の有機物だけを除去する方法に比べ、更にプロセスの挙動が複雑になり、その挙動把握とそれに基づく適切な運転管理が求められている。当社は、国際水協会(IWA)が公表している活性汚泥モデルとそれに基づくモデル予測制御を組み合わせ、高度処理プロセスの制御方法向上に取り組んでいる⁽¹⁰⁾。図9は、この方式によるシミュレーション結果の一例であり、窒素とリン除去のトレードオフ性の把握や、窒素とリンの同時除去のための最適点の検索、コスト評価などに有効なシミュレーションができるようになった。

4 あとがき

上下水道分野における計測技術として、水質及びプラントの異常検出技術、雨量レーダによる降雨分布の計測、シミュレーションによる河川水質分散予測について述べた。次に、制御技術の新展開として、GAによる送水計画とモデル予測制御による脱窒・脱りん制御について紹介した。これら計測及び制御の新技術は、安全で経済的、そして環境へ配慮された上下水道の構築へ向けて、運用・維持管理などの分野で貢献が期待できる。

今後は、新技術の現場における浸透と展開を図り、定着化と改良、確立に注力したい。最先端の技術と現場で使われる技術の隔たりが議論されているが、現場への浸透があってはじめて技術が完成することは紛れもない事実である。その隔たりを埋める技術は、計測であれば保守の容易さと頻度の低減、測定の実用性であり、制御であれば想定した条件外や異常時の対応であろう。また、技術のアカウンタビリティ、透明性を高めることも重要である。計測結果に影響を及ぼす因子や誤差の説明、自動制御の結果だけではなく、なぜそのような制御出力になるかなどを十分に説明していくことが、技術の浸透、改良、確立には欠かせない要素である。このようなアカウンタビリティの視点にも十分留意しつつ、“現場で使える制御・計測技術”の確立を目指して研究・開発と製品化に取り組むたい。

水道事業、下水道事業の関係各位のご指導とご支援を賜り、21世紀のより豊かな水環境づくりに微力ながら貢献していく所存である。

文 献

- (1) 岡澤和好.“21世紀に向けての制度的な取り組み”.第5回水道技術国際シンポジウム.2000-11,p.1-8.
- (2) 岡本誠一郎.都市計画中央審議会下水道小委員会報告について.下水道協会誌.38,461,2001,p.57-61.
- (3) 原口 智,ほか.“蛍光応用油膜センサの開発”.第52回全国水道研究発表会.2001,p.642-643.
- (4) 松永 是,ほか.“バイオセンサを用いた原水の水質監視支援”.東芝レビュー.55,6,2000,p.10-14.
- (5) 林 巧,ほか.“蛍光測定の水質監視制御システムへの応用”.第51回全国水道研究発表会.2000,p.512-513.
- (6) 村山清一,ほか.“膜処理における膜破損検出技術”.第52回全国水道研究発表会.2001,p.240-241.
- (7) 長岩明弘,ほか.“雨水対策における監視・制御・支援システム”.第26回公共システム研究会.2000,p.3-1-24.
- (8) 行木英明,ほか.“河川水質2次元分散予測モデル”.第5回水道技術国際シンポジウム.2000,p.283-286.
- (9) 坂本義行,ほか.“遺伝的アルゴリズムによる最適水運用支援”.第5回水道技術国際シンポジウム.2000,p.215-223.
- (10) 山中 理,ほか.“水質予測モデルを用いた下水処理プロセスの脱窒・脱りん制御”.電気学会産業計測制御研究会.2001,IIC-01-35,p.39-53.



加藤 孝夫 KATO Takao

社会インフラシステム社 社会・産業システム事業部 公共システム技術第二部長。公共システムのエンジニアリング業務に従事。電気学会、計測自動制御学会会員。環境システム計測制御学会評議員。技術士(電気・電子部門、水道部門)。Public & Industrial Systems Div.



金子 政雄 KANEKO Masao

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グループ長。上下水道プラントの水処理技術、水質センサの開発に従事。日本分析学会、環境システム計測制御学会会員。Power and Industrial Systems Research and Development Center



居安 巨太郎 IYASU Kotaro

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グループ長。上下水道プラントの水処理技術、水質センサの開発に従事。Power and Industrial Systems Research and Development Center