

〈特集〉

今日的課題に対応する水処理シミュレーション技術への期待

長 岡 裕

武蔵工業大学工学部教授 (〒 158-8557 東京都世田谷区玉堤 1-28-1 E-mail: hnagaoka@sc.musashi-tech.ac.jp)

概 要

本論では、流域的な視点から、上下水道システムの中に水処理施設におけるシミュレーション技術のあり方について論じ、続いて、水処理のプロセスの設計と技術者の訓練へのシミュレーション技術の適用の意義と方向性について解説した。大都市圏など水が高度に利用されている流域においては、浄水場や下水処理場などの上下水道施設単独でシミュレーション技術を活用するだけでなく、流域単位で水質データや流量データなどを含めて、水循環系のあらゆるデータを集約して統合管理し、最適で効率的な水循環系の運用が可能となるよう、シミュレーション技術を活用すべきであることを指摘した。また、水処理施設の設計やオペレータの訓練にもシミュレーション技術が活用できると期待されるが、そのためには実用に耐えるだけの水処理系における水質変換モデルの構築が欠かせないことを示した。

キーワード：水道、下水道、水処理施設、シミュレーション、流域管理

原稿受付 2008.5.16

EICA: 13(1) 2-6

1. はじめに

近年、上下水道を取り巻く環境は、平成 18 年 3 月 31 日現在で、水道普及率が 97.2%¹⁾、下水道普及率が 69.3%²⁾ に達するなか、量的拡大の時代から維持管理・更新と質的向上の時代へと移り変わりつつある。上下水道施設は、都市の高密度化と水利用の高度化に伴い、さまざまな高度化を成し遂げ、さらに発展しつつある。

たとえば浄水処理の分野では、水源水質の悪化とユーザーのおいしい水へのニーズに応えるため、オゾン・粒状活性炭などの高度処理の導入が進んでいる。また、特にクリプトスポリジウム対策として、膜浄水の普及が進んでいる。

下水処理の分野においても、A2O 法などの窒素・りん除去型の高度処理の普及は特に閉鎖性水域を抱える都市において進んでおり、処理水質が極めて良い膜分離活性汚泥法を適用する事例も増えている。

一方、近年の集中豪雨の頻発化などの影響により、都市における雨水排除はますますその機能を強化する必要に迫られている。また、合流式下水道越流水問題などの水質問題に対しても雨水流出の制御とあわせて重要な課題となっている。

これらの個別の分野における機能の高度化に伴って、制御すべき事項はますます増えており、必然的にシミュレーション技術の進歩が求められている。また、施設の運転管理の効率化が時代背景をもとに強く求められているが、熟練したオペレータの不足を補うた

めにも、シミュレーション技術によるエキスパートシステムの開発が望まれている。

本論はこれらの背景をもとに、まず、流域的な視点から、上下水道システムの中に水処理施設におけるシミュレーション技術のあり方について論じ、続いて、水処理のプロセスの設計と技術者の訓練へのシミュレーション技術の適用の意義と方向性について、解説するものである。

2. 流域における水利用と水循環

Fig. 1 は、流域における水利用の流れを大まかに表したものである。ただし、典型的な例を表したもので必ずしもどの流域でもこの通りというわけではない。太字で示されているところが広い意味での水処理施設（あるいは水質変換施設・設備）である。また、網がけされている場所が、膜分離技術を利用した処理が既に適用され、あるいは適用される可能性のある施設である。

河川流域の上流（農村域）では、農業用水の取水とともに、農業由来の排水あるいは畜産排水が河川に排出される。簡易水道などの小規模水道では地下水が水源として利用されることが多く、生活排水の処理施設も、農村集落排水処理施設など小規模なものが多い。畜産排水処理施設、小規模排水処理施設には既に膜分離法（膜分離活性汚泥法）の適用が進んでいる。一方、地下水を塩素消毒のみで供給していた浄水場に対する膜浄水の適用は、クリプトスポリジウム対策として

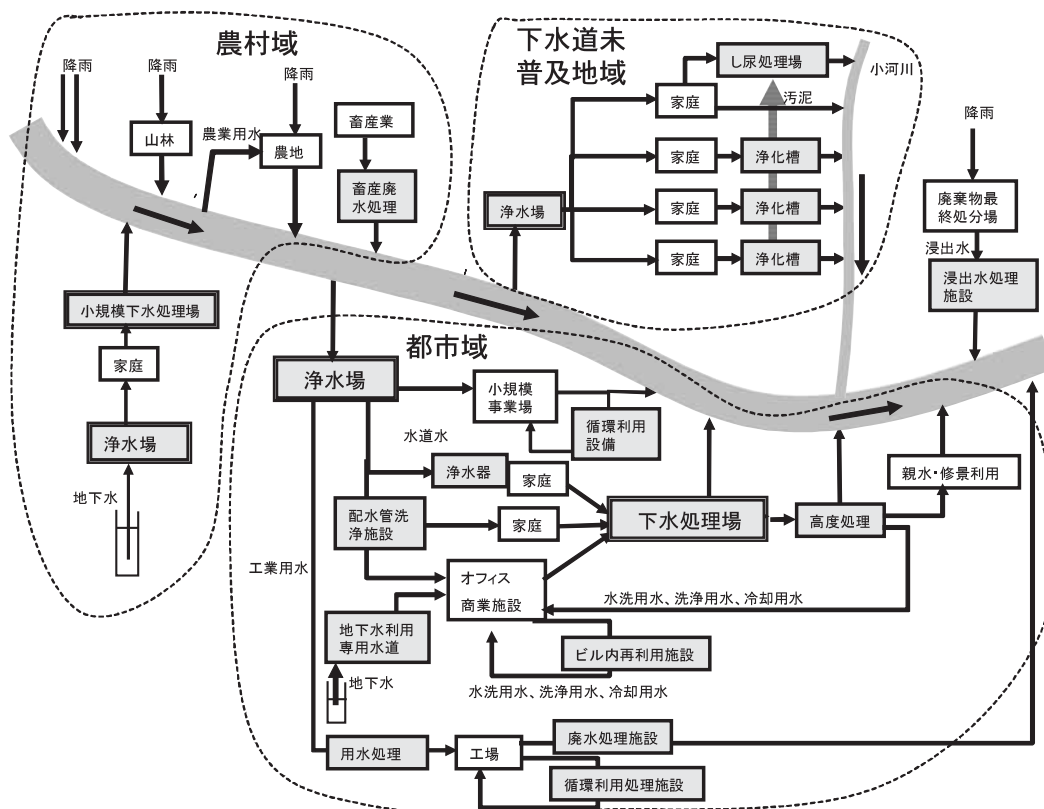


Fig. 1 水循環系における水の流れと膜分離技術の適用場所 (灰色箇所が膜分離技術の適用可能な場所)

の位置づけから、近年ますます進んでいる。

下水道未普及地域では、し尿や生活雑排水の処理は、浄化槽あるいはし尿処理場でなされる（浄化槽から発生する汚泥はし尿処理場にて処理される）が、両施設においても膜分離活性汚泥法、あるいはこれに凝集沈殿などを組み合わせた高度な処理方法が適用されている。

工業プロセスを含む都市域における水の流れは複雑であるが、既に工場などの事業場における用水供給、排水リサイクル、廃水処理において膜利用などの高度な処理が進んでいる。原水水質が比較的悪い下流の表流水を取水する大規模浄水場では、既に東京や大阪にみられるように、オゾン+粒状活性炭などによる高度浄水処理の適用が進んでいる。その一方で、深層地下水を取水し、膜処理の後に大規模商業施設、病院など大口水道ユーザーに飲料水を供給する地下水利用専用水道の普及が進んでいる。また、蛇口に設置する家庭用浄水器は、末端浄水設備との位置づけができるが、多くの型は、粒状活性炭と精密ろ過膜を組み合わせた高度浄水処理のポータブル施設的なものとなっている。

都市域では、通常の標準活性汚泥法などの処理プロセスの後段に高度処理を付加させ、処理水を修景用水、水洗用水などの用途で再利用する事例が増えている。例えば、東京の芝浦水再生センターでは、下水2次処理水に対して、オゾン処理と膜分離を行い、ビル中水

や散水用水として利用している。また、ビル内において膜を用いて排水を再利用し、水洗用水として利用している例は多い。

廃棄物の最終処分場から発生する浸出水処理には一般に高度な処理が用いられており、例えば、浸出水におけるダイオキシン除去として、塩化鉄(III)による凝集→精密ろ過膜、のプロセスを採用している例を挙げることができる。よく知られているように、ダイオキシンは疎水性が強く、水中では、微粒子に吸着した形で存在しているため、膜分離によって容易にこれを除去することができるものである。

このように水利用が高度化された流域においては、多くの水質変換施設が高度な処理を行いつつ、流域内でネットワーク状に連結され、流域単位での水循環系を形成していることがわかる。

3. 施設のシミュレーションから流域管理のシミュレーションへ

3.1 上下水道が連携したシミュレーション技術の必要性

Fig. 2 は、Fig. 1 のように高度に水利用がなされている流域において、上流域に排出される下水処理水を含む原水を浄水する系を想定し、現状でどのようなシミュレーション技術が用いられているかを概念的に示したものである。浄水場あるいは下水処理場内に

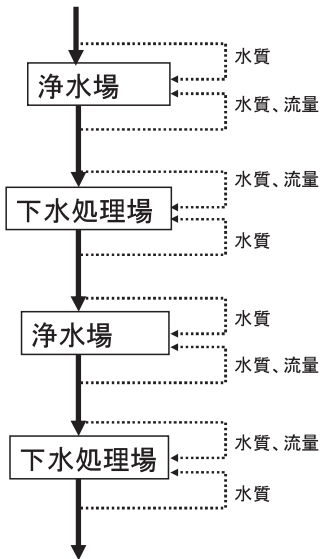


Fig. 2 水を高度に利用している水系における浄水場および下水処理場のシミュレーション系

における単位操作ごとの制御は別にする、浄水場では取水する原水の水質と水量、配水する浄水の水質をモニタリングしながら、浄水場の運転を制御し、下水処理場においても、流入する下水の水量と水質、および処理水水質をモニタリングしながら、処理プロセスの制御を行っているといえる。

しかし、下水処理場に流入する汚水の流量は、上流で浄水場から配水される水量とほぼ等しいはずであり、また、上流の下水処理場からの放流水の影響を受けている浄水場の原水水質は、放流水の水量と水質の影響を大きく受けている。したがって、Fig. 2のような個別施設ごとのシミュレーション体系から、Fig. 3のように、上下水にかかわりなく、上流に位置する処

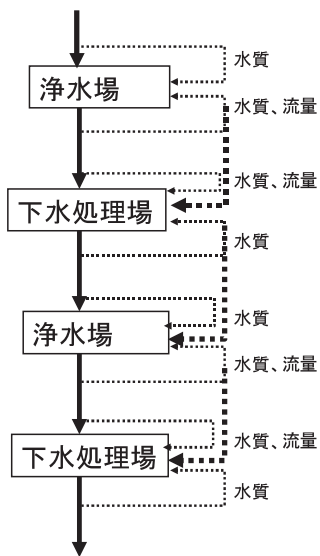


Fig. 3 水を高度に利用している水系における上下水一体となった浄水場および下水処理場のシミュレーション

理施設からの情報を下流の処理施設に伝達する、上下水一体となった情報の流れに基づくシミュレーション系が望まれているところである。

3.2 上下水道施設のシミュレーションから統合流域管理の概念に基づいたシミュレーション体系へ

以上の考えをさらに発展させ、Fig. 1に示すように、上下水道施設が置かれている流域内の位置づけを考慮すると、流域内の水関連の情報、たとえば河川の水質モニタリングデータ等を各処理施設からの運転データとともに一つの統合流域管理システムに集約し、そこから各処理施設の最適な制御を行うシステムが考えられる (Fig. 4)。

流域内の公共用水域 (河川、湖沼、海域) および地下水の水質データと水量データ、浄水場および下水処理場における運転データ (流入および処理水の水質および水量を含む)、上下水道施設以外の水質変換施設 (農村集落排水処理施設、コミュニティプラント、畜産排水処理施設、浸出水処理施設、工場排水処理施設、リサイクル処理施設など) からのデータ、さらには場合によりノンポイント汚濁源からの汚濁負荷量データなどを統合し、シミュレーション技術を駆使し、各処理場において最適で効率的な運転制御を行うことが可能になると思われる。たとえば、下流の河川水質をモニタリングしながら、最適な上流の下水処理場と下流の浄水場の運転を行いつつ、さらに流域全体で最も効率的な運転を行うためのシミュレーションを行いつつ、流域管理をすることが可能となろう。

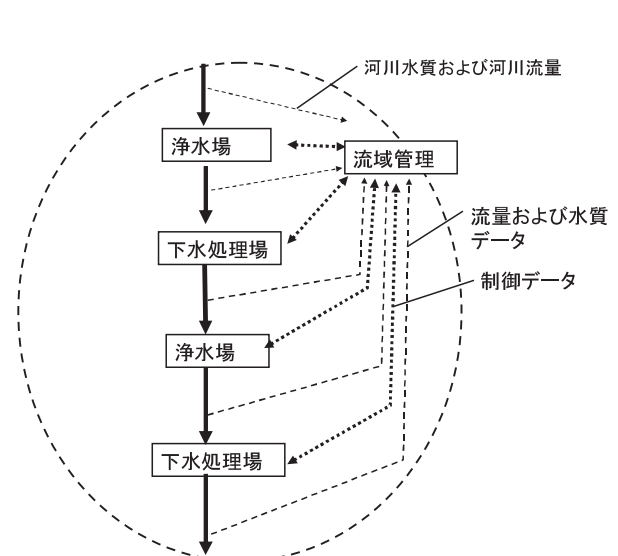


Fig. 4 統合流域管理の概念に基づく浄水場および下水処理場の制御系

4. 水処理施設の設計へのシミュレーション技術適用の期待

水処理技術の設計・建設において、水質条件の設定や設計上の諸因子を変更する、あるいは特別な条件設定をする場合には、通常パイロットプラント実験を実施し、実際に処理が適切になされるか否かを確認した後、実プラントの設計・建設に移行することが多い。

その優れた処理特性から、今後の水処理施設への適用が益々期待される膜処理の分野においても、浄水処理、下排水処理ともに特別な条件設定をする場合には、パイロットプラント実験の実施が欠かせない。例えば、膜浄水処理で問題となるのは、処理水質よりも薬品洗浄間隔である。従って、膜間差圧の上昇速度に関するモデル式が定式化されれば、膜間差圧の上昇をシミュレートすることにより、運転条件や設計の設定によって薬品洗浄間隔がどのようになるかを予測することができ、パイロットプラント実験を省略して、ただちに実施設計が可能となる (Fig. 5 参照)。

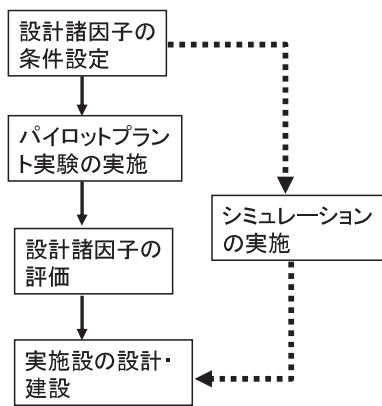


Fig. 5 水処理施設の設計におけるパイロットプラント実験の実施からシミュレーション技術の適用へ

膜間差圧 P に関して、仮に以下の式が成立するとする。

$$\frac{dP}{dt} = f(P, c, T, J, \lambda) \quad (1)$$

ここに、 c : 流入水質 (濁度等), T : 水温, J : フラックス, λ : 物理洗浄間隔

式 (1) における関数 f が決定すれば、数値計算を行うことにより、薬液洗浄を開始する膜間差圧の設定値までの時間を容易に計算することができる。故に、膜処理で最も重要な運転・設計因子であるフラックス J の値をどのようにすればどの程度の薬液洗浄間隔が予想されるかをシミュレートすることができる (Fig. 6 参照)。

Nagaoka ら⁴⁾ は膜分離活性汚泥法における膜間差圧モデルを構築し、同様なシミュレーションを試みているので、参考にされたい。

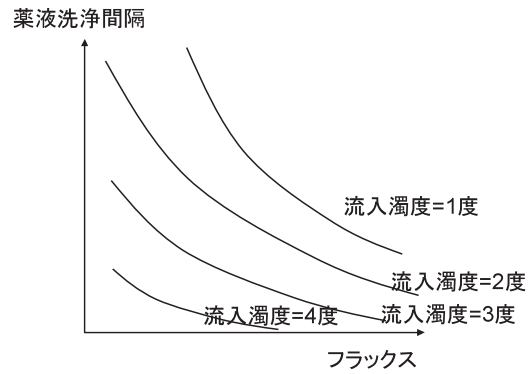


Fig. 6 膜浄水処理におけるフラックスおよび流入濁度が薬液洗浄間隔に与える影響に関するシミュレーションの概念

5. 水処理施設の運転管理者の訓練へのシミュレーション技術適用の期待

近年、水処理の分野においても技術継承の問題が指摘されており、オペレータの訓練にシミュレーション技術を応用することが期待されている。航空機パイロットの訓練・養成においても、既にフライトシミュレーターが利用されており、実機を用いた訓練の代替として公的にも認められている。

前節において、膜浄水施設の設計へのシミュレーション技術の応用について論じたが、同じモデルを利用して、膜浄水オペレータ訓練シミュレーターを構築することができる。

Fig. 7 は膜浄水における高濁度を想定した訓練シミュレーターの概念図である。仮に降雨による高濁度が発生したと仮定すると、それに伴い、例えば回収率をどのように下げ、膜間差圧をどのように変化させて運転すれば所定の膜ろ過水がえられるかを式 (1) を用いて容易にシミュレートできる。従って、もし回収率が主な運転パラメーターであるとする、オペレータに回収率の設定をさせる訓練をすることができる。

問題は、式 (1) のモデルをいかに精度良く構築する

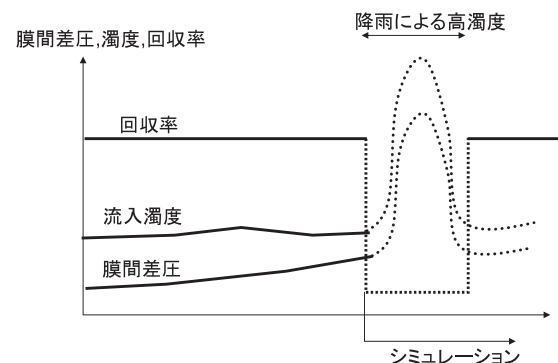


Fig. 7 膜浄水における高濁度を想定した訓練シミュレーションの概念図

かであるが、運転管理データを用いてチューニングしながらシミュレーションモデルを構築することにより、ある程度実用的なシミュレーションモデルができるのではないかとと思われる。

6. ま と め

大都市圏など水が高度に利用されている流域においては、浄水場や下水処理場などの上下水道施設単独でシミュレーション技術を活用するだけでなく、流域単位で水質データや流量データなどを含めて、水循環系のあらゆるデータを集約して統合管理し、最適で効率的な水循環系の運用が可能となるよう、シミュレーション技術を活用すべきである。また、水処理施設の設計やオペレータの訓練にもシミュレーション技術

が活用できると期待されるが、そのためには実用に耐えるだけの水処理系における水質変換モデルの構築が欠かせないであろう。

参考文献

- 1) 日本水道協会：「都道府県別の現在給水人口と普及率」, 日本水道協会雑誌, 第76巻, 第2号, (2007)
- 2) 日本下水道協会ホームページ
http://www.jswa.jp/05_arekore/07_fukyu/index.htm
- 3) 長岡 裕: 「水循環型社会の到来と膜技術の展開」, 水環境学会誌, Vol. 29, No. 7, pp. 2-6 (2006)
- 4) H. Nagaoka, S. Yamanishi and A. Miya: Modeling of Bio-Fouling by Extracellular Polymers in a Membrane Separation Activated Sludge System, Water Science and Technology, Vol. 38, No. 4-5, pp. 497-504 (1998)