

コスト評価に基づく下水処理場の運転最適化技術

Optimal Control for Wastewater Treatment Process Based on Total Cost Index

山中 理 小原 卓巳 山本 勝也

■ YAMANAKA Osamu

■ OBARA Takumi

■ YAMAMOTO Katsuya

近年、下水処理プロセスでは、有機物、窒素、リンなどを除去し放流水質を良好にすると同時に、ポンプなどの機器の省エネルギーを維持できる運用技術が要求されている。

東芝は、下水処理場のブロワやポンプなどの機器の運転条件を最適化する技術を開発した。この運転最適化技術の開発にあたって、まず、放流水質をコストに換算して機器の運転コストと同一次元で評価する指標を提案した。そして、プロセスシミュレーション技術や各種最適化技術を駆使し、この指標に基づいて最適な運転条件を自動的に求める手法を開発した。

Wastewater treatment plants need to reduce nitrogen and phosphorus as well as organic matter due to the stringent standards recently introduced for effluent water quality in Japan. At the same time, the plants are required to reduce operating costs such as energy costs associated with aeration and/or pumping.

To meet these requirements, Toshiba has been developing an optimal process control system that optimizes the set points of actuators such as blowers and pumps. We have proposed a total cost index in the optimal process control system that considers effluent costs corresponding to the effluent quality as well as operating costs. We have also developed a novel algorithm to calculate the optimal operating conditions based on the total cost index, by combining process simulation techniques, a heuristic search algorithm, and nonlinear programming.

1 まえがき

近年、下水処理場では、有機物の除去に加えて内湾などの閉鎖性水域で発生する赤潮などの誘因物質である窒素とリンの除去も求められるようになってきた⁽¹⁾。一方、第一種及び第二種エネルギー管理指定工場の対象となる下水処理場では、ブロワ(空気供給装置)やポンプなどの機器の省エネルギー対策が求められている。そのため、下水処理場の運用では、窒素やリンなどの放流水質向上による環境負荷低減と、ブロワやポンプなどの機器の省エネルギー対策を同時に考慮する必要性が高まりつつある。

一般に、環境負荷低減と省エネルギーは、“一方を良くすればもう一方が悪くなる”というトレードオフの関係にあることが多い。例えば、下水処理プロセスにおいて、ブロワで多くの空気を供給すれば、より多くの有機物やアンモニアが除去されるため放流水質は向上するが、ブロワの運転コストが上昇する。このようなトレードオフを定量的に検討する際に有効となるツールがシミュレータであり、東芝は、窒素やリンなどの放流水質とブロワやポンプに関する運転コストを推算できるシミュレータを開発してきた⁽²⁾。シミュレータを用いると、ブロワやポンプの様々な運転条件に対して放流水質を計算できるため、試行錯誤を行えば、環境負荷低減と省エネルギーを考慮した適切な運転方法を検討することができる。

ここでは、この考えを更に発展させて、環境負荷低減と省

エネルギーのバランスを考慮した最適な運転条件を自動的に求める運転最適化技術について述べる。運転最適化を達成するために、“環境負荷低減と省エネルギーを同時に考慮した評価指標”を提案し、“この評価指標に基づいた運転条件の最適化手法”を開発したので、以下にその概要と特長について述べる。

2 下水処理プロセスの概要

下水処理プロセスでは、微生物が、有機物、窒素、リンなどの処理対象物質を栄養源として増殖するという性質を利用して処理対象物質の除去を行っている。

従来の下水処理プロセスは標準活性汚泥プロセスと呼ばれ、そこでは有機物処理だけを行っていた。標準活性汚泥プロセスでは、生物反応槽に酸素(空気)を供給し、従属栄養性細菌という微生物群が流入水中の有機物を栄養源として増殖することにより、これを除去している。

一方、近年導入されつつある下水処理プロセスは高度処理プロセスと呼ばれ、そこでは有機物に加えて窒素とリンの除去も行っている。高度処理プロセスには様々な種類のプロセスがあり、その一つとして、図1に示す嫌気・無酸素・好気(A2O: Anaerobic-Anoxic Oxic)プロセスがある⁽²⁾。A2Oプロセスでは、従属栄養性細菌だけではなく、硝化菌、脱窒菌、リン蓄積性細菌などと呼ばれる複数種類の微生物群

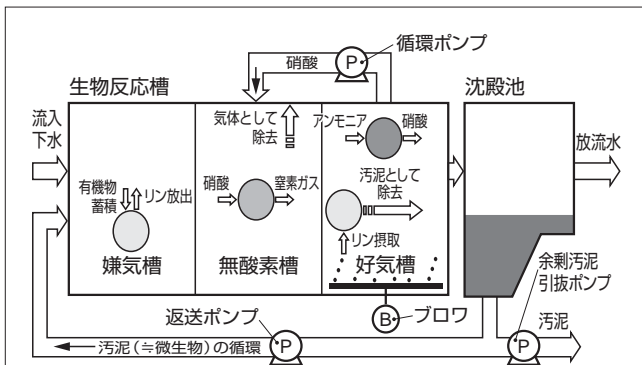


図1. 高度処理プロセス(A2Oプロセス) — 高度処理プロセスは窒素やリンの除去を目的とした下水処理プロセスの総称である。これはA2Oプロセスと呼ばれる高度処理プロセスであり、硝化菌と脱窒菌が窒素の除去を行い、リン蓄積性細菌がリンを除去する。

Anaerobic-anoxic oxic process (A2O process)

を用いて処理を行っている。窒素は、酸素が豊富な好気槽での硝化菌による硝化(アンモニア→硝酸)と、硝酸が豊富な無酸素槽での脱窒菌による脱窒(硝酸→窒素ガス)の2段階の生物反応によって無害な窒素ガスに分解・除去される。リンは、リン蓄積性細菌によって除去される。リン蓄積性細菌は、酸素も硝酸も存在しない嫌気槽で有機物を体内に蓄積すると同時に、いったん体内からリン酸を放出する。そして酸素の豊富な好気槽において、蓄積した有機物をエネルギー源として放出した量より多くのリン酸を摂取する。この反応により、水中のリンが、主に微生物の集合体から成る汚泥へと移動する。最後に、この汚泥を引抜ポンプによって取り去ることにより、リンを除去する。

3 下水処理プロセスのシミュレーションと運転最適化

3.1 下水処理プロセスシミュレータ

下水処理プロセスシミュレータは、図1に示した下水処理プロセスの、窒素やリンなどの放流水質とプロワやポンプなどの運転コストを推算するものである⁽²⁾。この下水処理プロセスシミュレータには、窒素やリン除去のメカニズムと固形物の沈殿現象などを表す“モデル”と呼ばれる数式群が組み込まれている。これらのモデルは、物質質量保存則という原理に基づいて組み立てられている。つまり、窒素やリンなどの処理対象物質質量や微生物量の一つをXとすると、次の式で記述されている。

$$X \text{ の変化量} = X \text{ の内部変化} + \text{流入する } X - \text{流出する } X \quad (1)$$

ここで、Xの内部変化は、生物反応による物質の変化を意味している。(1)式は窒素あるいはリンなどの一つの物質の収支バランスを表しているが、各物質はXの内部変化を

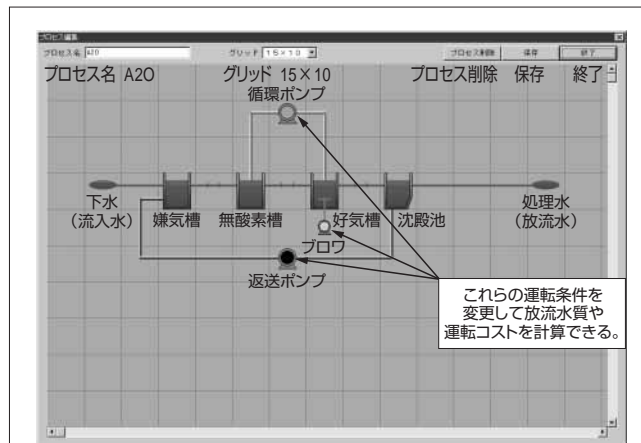


図2. 下水処理プロセスシミュレータの画面例 — 対象下水処理プロセスの構成に従って線をつなぐだけで、そのプロセスのシミュレーションが可能になる。プロワや各種ポンプの運転条件をいろいろと変更して放流水質や運転コストを計算できる。

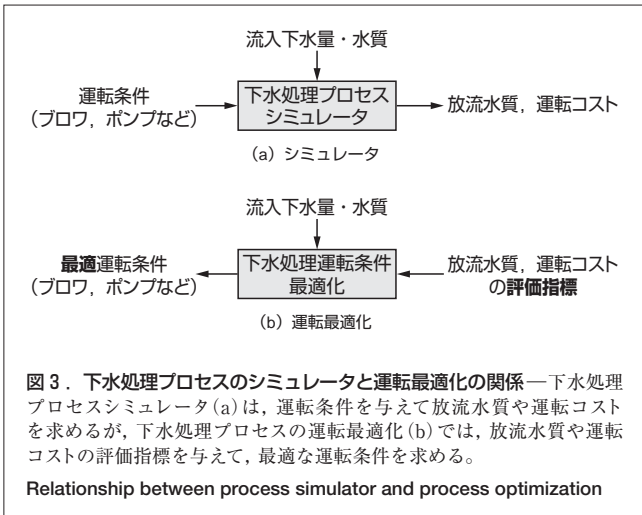
Example of wastewater process simulator display

通して複雑に干渉しながらバランスを保つため、実際には、このモデルは複雑な連立非線形微分方程式と呼ばれる数式になる。このモデルは、5章で記述する運転最適化技術のなかでも利用される。

開発した下水処理プロセスシミュレータは、このようなモデルを組み込んでおり、画面上では下水処理プロセスの構成と対応するように表現されている(図2)。これを用いると、ある流入水量・水質の下で、図2のプロワやポンプなどの機器の運転条件を変えた場合の放流水質と運転コストを計算することができる。そのため、いろいろな運転条件に対する放流水質や運転コストを比較評価することによって、放流水質の向上と省エネルギーのバランスの良い運転条件を検討することができる。

3.2 下水処理プロセス運転最適化技術の必要性

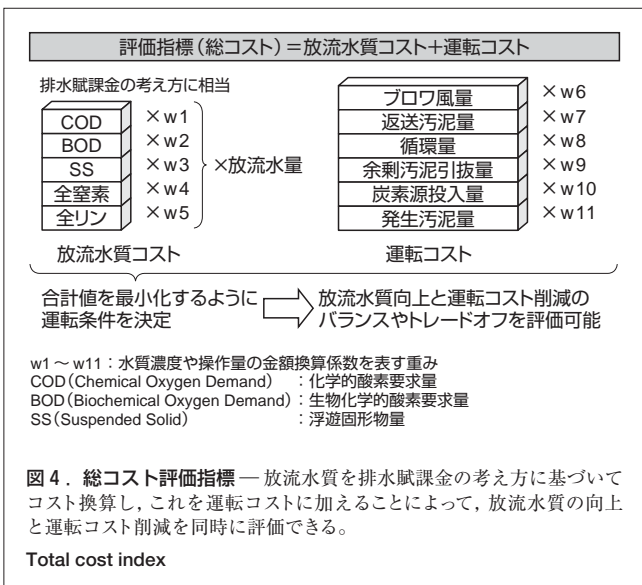
下水処理プロセスシミュレータは、“ある流入水量・水質条件とある運転条件の下で、放流水質と運転コストを計算する”ものであるが(図3の(a))、下水処理プロセスを運用する立場からは、“ある流入水量・水質条件下で、ある放流水質とある運転コストを達成する運転条件を計算する”という逆演算ができると、どのように運転をすればよいか直接わかるのでつごうが良い。しかし、運転コストと放流水質は同時にいくらかでも下げることができるわけではなく、達成可能な限界があるため、この計算は原理的にできない場合がある。そこで重要になる概念が、運転条件の最適化である。運転条件の最適化では、ある特定の放流水質と運転コストを入力して運転条件を逆算するのではなく、放流水質と運転コストの良否を評価する指標を入力して、その指標をもっとも良くする運転条件を求める(図3の(b))。そのため、運転条件の最適化を行うためには、“放流水質と運転コストの



良否を評価する指標”と“指標をもっとも良くする運転条件を求めるアルゴリズム(計算方法)”が必要になる。以下では、この概要を述べる。

4 環境負荷低減と省エネルギーを考慮した評価指標

環境負荷低減のための放流水質の向上と省エネルギーにつながる運転コストの削減は、一般にトレードオフの関係にあるため、これを同時に評価する指標が必要となる。放流水質と運転コストという別次元のものを同次元で議論する考え方の一つに、放流量×放流水質濃度で表される定量的な環境負荷量をコスト換算するという方法がある。実際、デンマークやオランダなどのヨーロッパの一部では、放流量×放流水質濃度に対して、排水賦課金という一種の税金を課している⁽³⁾。当社は、環境負荷低減と省エネルギーを



同時に考えるために、この排水賦課金の考えを用いて金額換算した放流水質にかかわる放流水質コストと、ポンプやブロウの運転にかかわる運転コストを合わせた総コストを、運転条件の最適化のための指標として用いることを提案している。この総コスト評価指標の概念を図4に示す。

5 評価指標に基づいた運転条件の最適化

総コストという評価指標が与えられると、この総コストを最小化する運転条件を求めることができる。総コストは運転コストと放流水質コストの和であるので、最適な運転条件は、概念的には、図5に示すように、運転コストと放流水質コストのもっともバランスの良い点ということになる。

しかし、実際に総コストの最小値を求めることは簡単ではない。これは、総コストが図4に示した複数の項目で構成されているため、例えば、図1に示すように返送ポンプによる返送汚泥量を増加させると、窒素除去は向上するがリン除去は低下する、というような複数のトレードオフが生じる場合があるためである。したがって、ある操作量の運転条件を横軸に、総コストを縦軸にとった場合のグラフは、例えば、図6のような形状になる。このグラフの具体的な形状は、(1)式の物質収支を表すモデルによって決定される。

更に、実際の運転条件の最適化では、機器の操作可能範囲や放流水質の規制値などの制約も考慮する必要がある。実際には、図6に示すように、それらの制約により最適解にできない範囲(網掛け部)を除いて、総コストのもっとも小さい運転条件を探す必要がある。当社は、この最適な運転条件を求めるためのアルゴリズムを開発した⁽⁴⁾。このアルゴリズムでは、まず、複数の運転条件における総コストを下水処理プロセスシミュレータで計算する。次に非線形計画法と呼ばれる技術を用いて、総コストのグラフに沿ってその近傍の局所的な最小値を探す。そして、各々の局所的な

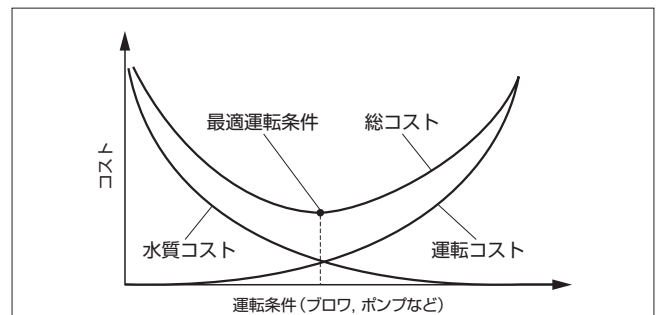


図5. 総コストに基づいた運転条件最適化の考え方—放流水質コストと運転コストは、おおまかにはトレードオフの関係になる。運転条件の最適化は、これらを足し合わせた総コストのもっとも小さい運転条件を求めることである。

Process operational optimization based on total cost index

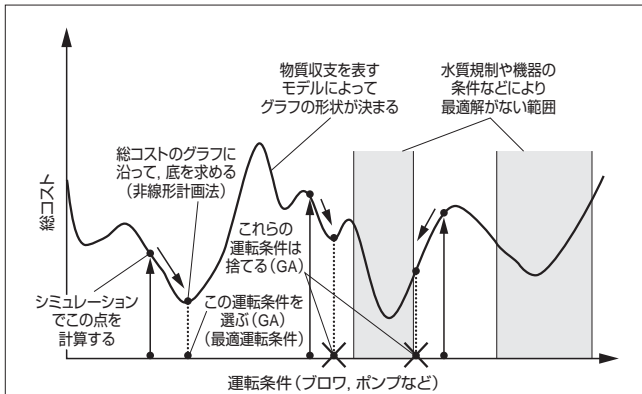
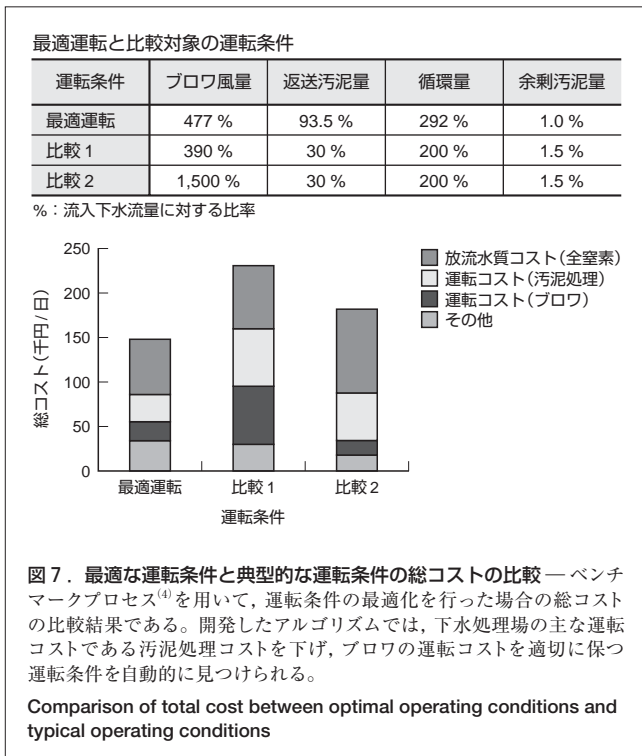


図6. 運転条件の最適化アルゴリズム — 実際の運転条件最適化では、モデルによって決定される総コストのグラフの最小点を、操作機器や放流水質の制約によって除外される範囲(網掛け部)外で求める必要がある。
Outline of process operational optimization algorithm

最小値を比較して、より小さい値のものを残していく。この際に、遺伝的アルゴリズム(GA)と呼ばれる方法を用いて効率的に最小値を探索している。

6 運転最適化の例

開発した方法を用いて最適な運転条件を求めた計算例を示す。比較のために、実際の下水処理場の典型的な運転条件で運転した場合を想定し、結果を比較した。この際、ブロウの送風量を絞って省エネルギーを重視した場合(比較1)と逆に送風量を上げて放流水質向上を目指した場合(比較2)



の二つの条件を想定した。最適化された運転条件と比較対象の運転条件、及びこのときの総コストの比較を図7に示す。

図7に示すように、最適運転条件では、汚泥処理コスト削減と同時に窒素に関する放流水質コストも削減できている。また、ブロウに関する運転コストを適切な値に保っている。汚泥処理コストやブロウ運転コストは下水処理場のコストの多くを占めると言われているが、開発した運転最適化技術を用いると、汚泥処理コストやブロウ運転コストを削減できる運転条件を自動的に求めることができる。

7 あとがき

ここでは、当社が開発した下水処理プロセスの運転最適化技術について述べた。この技術は、下水処理プラント運用における省エネルギー運転と環境負荷の低減という重要な課題に対する一つの有効なソリューションとなる技術であると考える。

今後は、この技術の有効性を実際の下水処理プラントで検証していく。また、この運転最適化技術を現実の下水処理プラントの運用に則して改良し、ユーザーにとって利用しやすいシステムとして実現していきたい。

文献

- (1) 財務省印刷局発行. 水質汚濁防止法施行令及び瀬戸内海環境保全特別措置法施行令の一部を改正する政令(350). 官報号外第230号(H13年11月9日).
- (2) 堤 正彦, ほか. 下水道プラントの水質モデルとコストモデルの評価. 東芝レビュー. 57, 5, 2002, p.46-50.
- (3) 環境省. 水質保全分野における経済的手法の活用に関する検討会報告書(平成16年7月). <http://www.env.go.jp/water/report/h16-02/>, (参照 2005-10-13).
- (4) Yamanaka, O., et al. "Total Cost Minimization Control Scheme for Biological Wastewater Treatment Process and Its Evaluation Based on COST Benchmark Process". Proc. of IWA-ICA2005. Busan, Korea, 2005, p.419-426.



山中 理 YAMANAKA Osamu, D.Eng.

電力システム社 電力・社会システム技術開発センター 社会システム開発部主務, 工博. 下水道制御技術の研究・開発に従事。電気学会, 計測自動制御学会会員。

Power and Industrial Systems Research and Development Center



小原 卓巳 OBARA Takumi

電力システム社 電力・社会システム技術開発センター 社会システム開発部. 下水処理プロセス制御・支援技術の研究・開発に従事。

Power and Industrial Systems Research and Development Center



山本 勝也 YAMAMOTO Katsuya

電力・社会インフラシステム社 社会システム事業部 公共システム技術第二部主務. 公共システムのエンジニアリング業務に従事。計測自動制御学会, システム制御情報学会, 電気学会, 失敗学会会員。

Infrastructure Systems Div.