

〈研究発表〉

流入負荷量予測に基づく下水処理場運転計画立案システム

福嶋 俊 貴¹⁾

¹⁾メタウォーター(株) 事業戦略本部 イノベーションセンター リサーチグループ
(〒101-0041 東京都千代田区神田須田町1-25 E-mail: fukushima-toshiki@metawater.co.jp)

概要

下水処理場を流域における健全な物質循環拠点とすべく、下水処理場シミュレータを活用した流入予測に基づく運転計画を立案し、創エネ・資源回収・再生水といった多機能からの評価を可能とするシステムを開発している。今回はオープンデータを利用し実処理場データによる各種モード(能動的管理・創エネ・リン回収)の効果を検討した。

キーワード：下水処理場、健全な循環拠点、シミュレータ、能動的管理、オープンデータ

原稿受付 2019.6.27

EICA: 24(2・3) 58-61

1. はじめに

平成30年3月にまとめられた社会情勢の変化等を踏まえた下水道事業の持続性向上に関する報告書¹⁾では、下水道の果たすべき機能の確保のひとつとして資源・エネルギー対策が取り上げられ、「省エネルギー型機器や処理システムの導入等による消費エネルギーの低減を図り、温室効果ガス排出量の削減や維持管理費の低減を推進していく必要がある。」とされている。さらに、付加価値を生み出す未来の下水道を実現するために、下水処理場を「工場」という視点に立ち、下水処理場においてバイオマスを徹底的に回収し、高付加価値な化学製品へと転換するバイオリファインリーの構築という発想も提案されている²⁾。

そこで、下水処理場を流域における健全な物質循環拠点とすべく、下水処理場シミュレータを活用した流入予測に基づく運転計画を立案し、創エネ・資源回収・再生水といった多機能からの評価を可能とするシステムを検討した³⁾。今回は、さらに多機能からの評価をオープンデータを利用したシミュレーションにより検討した。

2. 下水処理場シミュレータ

下水処理場シミュレータとして使用する下水処理場機能評価システム(PES: Performance Evaluation System)のモデル式は一次反応で記述され、水処理(標準活性汚泥法等)のみならず、汚泥処理(濃縮・消化・脱水・焼却)と連携した計算を可能としている^{4,5)}。水質データとしては有機物(BOD)・固形物(SS)・窒素(T-N)・リン(T-P)を同時に計算し、エネルギーとしては使用電力量を中心に扱い、焼却炉

の燃料使用量も対象としている。

なお、PESの実下水処理場への適用性については、月単位での水量・水質データを利用することにより標準法・高度処理法の処理水質が再現できることを確認している^{6,7)}。

今回は、能動的管理(季節別運転)にすでに取り組んでいるKK浄化センターを対象とした。KK浄化センターの概要を表1にまとめた。流域下水道の処理場であり、排除方式は分流式(一部合流)が採用されている。処理能力は約16万m³/日であり、多段硝化脱窒法(多段法)で運転され、リンは凝集剤添加により除去されている。また、固形物の更なる除去のために急速ろ過が設置されている。

KK浄化センターは平成4年に供用開始し、平成5年には公共下水道の終末処理場の施設を統合した。(この系列のみ合流式)

水処理方式としては1系・2系ともに標準活性汚泥法であるが、1系は2段ステップ流入式多段法として、2系は3段ステップ流入式多段法として運転されている。汚泥処理は分離濃縮-脱水-焼却となっている。

3) 対象処理場のプラントフローモデル構築

プラントフローモデル構築にあたっては、オープンデータの積極的な利用を意識し、Webサイトで公開

表1 KK浄化センター概要

	KK浄化センター
供用開始	平成4年
排除方式	分流(一部合流)
処理能力	159,900 m ³ /日
水処理方式	1系: 標準活性汚泥法 2系: 標準活性汚泥法 急速ろ過, 2系凝集剤添加
汚泥処理方式	分離濃縮-脱水-焼却
備考	高度処理(多段硝化脱窒法)で運転

表2 KK 浄化センターの処理状況

	KK 浄化センター
処理水量 (m ³ /日)	120,000
流入水質 (mg/L)	
SS	180
BOD	190
T-N (NH ₄ -N)	38 (22)
T-P (PO ₄ -P)	5.5 (—)
使用電力量 (kWh/日)	56,000
電力原単位 (kWh/m ³)	0.47
MLSS (mg/L)	1系:1950 2系:1880

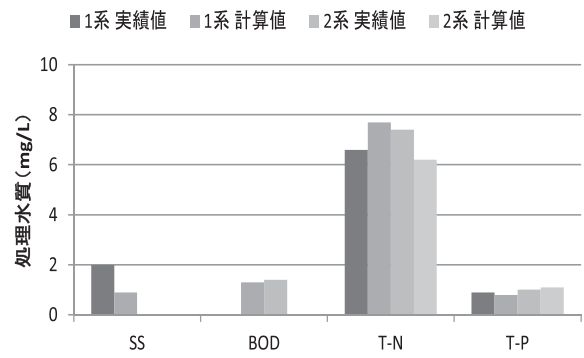


図1 処理水質

されている「平成29年度版維持管理年報⁸⁾」のデータを利用した。

KK 浄化センターの処理状況を表2にまとめた。水処理方式として大きく2方式が採用されているので、水処理は2系列としてモデル化した。維持管理年報の処理施設データ(幅・長さ・深さ)から初沈や終沈の槽容積を計算し、反応タンクはさらに無酸素槽・好気槽に分割した。処理水水温が約20℃であった4月の処理状況を再現することとし、処理水量を処理実績に合わせて2系列に割り振った。返送率は実績値を入力し、初沈汚泥引抜率も実績値を入力した。生物処理法の基本となるMLSSが実績値と一致するように余剰汚泥引抜率を調整した。KK 浄化センターには流入水系統が2つあるが、PESでは流入水は1点しか対応していないため、流入水割合が6割と大きい分流式流入下水を使用した。なお、流入水質の溶解性有機物の割合やT-PのうちのPO₄-Pの割合といった詳細な情報は入手できなかったため、標準のパラメータ⁹⁾を用いて算出した。

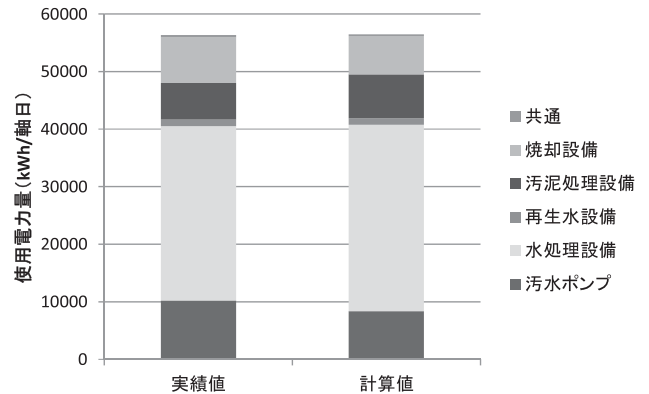


図2 使用電力量の内訳

また、使用電力量に関しては電力原単位(=使用電力量/処理水量)は0.47 kWh/m³と施設規模10万m³/日以上で報告¹⁰⁾されている0.48 kWh/m³と同等であった。

参考値としてMLSSも記載したが、高度処理法であるために約2000 mg/Lといくぶん高めの数値となっていた。

モデル化した処理場の各系列の処理水質の計算結果を図1に示す。窒素除去を目的とした多段法の処理状況が再現でき、T-Nは1系実績値6.6 mg/L(計算値7.7 mg/L)、2系実績値7.4 mg/L(計算値6.2 mg/L)となっていた。

T-Pは凝集剤添加でほぼ一致でき、SSはMLSSを再現することにより処理水質もほぼ一致していた。BODは有機物分解と脱窒の炭素源としての利用の結果として計算されるために、計算値が0 mg/Lとなるなど少し乖離があった。

使用電力量の計算結果を内訳(内訳は維持管理年報に合わせて集約)も含めて図2に示す。実績値の56,300

kWh/日(原単位:0.47 kWh/m³)に対して、計算値は56,470 kWh/日(原単位:0.47 kWh/m³)とほとんど一致していた。今回は高度処理法として運転されているために、送風機も含む水処理設備が54%(計算値:57%)と最も多く、次いで汚水ポンプ18%(同:15%)、焼却設備15%(同:12%)の順となっていた。

以上のことより、構築したプラントフローモデルは実績を再現できており、以下のシナリオ解析に適用可能と判断した。

3. 下水処理場の戦略的管理

戦略的管理目標としては従来の放流水質のみでなく、二軸管理¹¹⁾で提案されているエネルギー消費も対象とする。もちろん、瀬戸内海等で実施されている放流水質の能動的管理にも対応可能とする。さらに、再生可能エネルギーの固定価格買取制度(FIT制度)の開始以降導入の進んでいる消化ガス発電を対象とした創エネ運転や、下水道へ流れ込んでいるリンの回収(資源回収)を優先というような資源回収運転も目標として選択可能とする。そこで、能動的管理モード・エネルギー回収モード・リン回収モードについて、その効果を事前把握すべく検討した。

3.1 下水処理場シミュレータを用いた運転計画

a) 水循環施策（能動的管理モード）

下水道が放流水質を管理し、地域に望まれる水環境を創造するために能動的管理（季節別運転）に取り組む下水処理場が増えつつある¹²⁾。ここでは、ノリ養殖等のために放流先への窒素供給を目標とし、脱窒抑制と硝化抑制の効果を、窒素供給量と電力使用量と併せて評価した。

b) エネルギー回収施策（消化ガス発電）

下水処理場においても創エネ・省エネの観点から多くの試みが実施され、消化ガス発電の導入が増加し平成 29 年度には 101 か所に導入されている¹³⁾。ここでは、消化ガス発電を、オゾン処理による可溶化¹⁴⁾も含めて検討した。消化ガス発電によるエネルギー回収については使用電力量とから計算する電力自給率（＝発電量／使用電力量）で評価した。初沈汚泥と余剰汚泥の混合消化とし、両汚泥に対してそれぞれ別々にオゾンにより可溶化するものとした。なお、余剰汚泥に対する可溶化効果を初沈汚泥とは変えた数値で計算した¹⁵⁾。

c) 物質回収施策（リン回収）

物質回収としてはリンを対象とした。嫌気性消化により下水処理場内でのリンの挙動にも変化が現れる。リン回収量の試算にあたっては焼却灰を対象とした「灰アルカリ法」と消化脱離液（脱水ろ液）を含む返流水を対象とした「MAP 法」を取り上げて検討した。リン回収効率は手引き¹⁶⁾の数値を参考に、灰アルカリ法 50%、MAP 法 85% とし、リン回収量はシミュレーション結果の処理場内のリンフローから計算した。

3.2 下水処理場シミュレータを用いた計算結果

1) 能動的管理モードの計算結果

放流先へ提供できる窒素の形態と提供量を電力原単位と併せて図 3 に示す。通常の T-N 6.8 mg/L に対して脱窒抑制では 10.9 mg/L と 1.6 倍が提供できると試算された。しかしながら、曝気量が増加し電力原単位は 0.51 kWh/m³と若干増加していた。一方硝化抑制

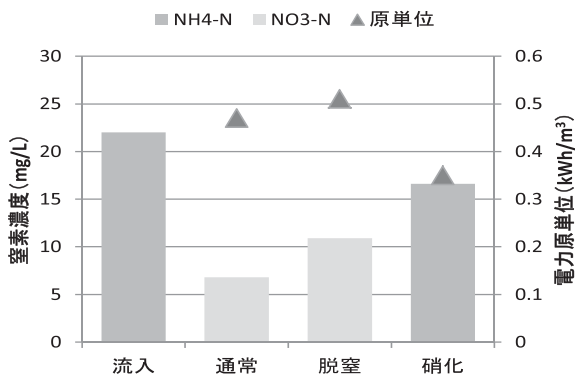


図 3 能動的管理の計算結果

では、NH₄-N として 16.6 mg/L が提供でき、増加量は 2.4 倍となり、電力原単位は 0.35 kWh/m³と大幅に削減されていた。

2) エネルギー回収モードの計算結果

使用電力量と消化ガス発電量、電力自給率の計算結果を図 4 に示す。初期値（オゾン注入率 0 mgO₃/gSS）での電力自給率は 23.5% であった。オゾン注入率の増加に伴い増加しオゾン注入率 30 mgO₃/gSS では 35.7% まで上昇したが、それ以降はオゾン注入率の増加に伴い発電量は増加するものの、電力自給率は逆に低下した。今回の余剰汚泥可溶化のモデルでは反応タンクでの未分解の有機物（固形性 COD）がオゾンにより可溶化されるとしているために、オゾン注入率 30 mgO₃/gSS までで分解が終わったことが要因と考えられた。また、嫌気性消化槽へ投入される固形物量は 20.5 t（初沈汚泥 9.6 t、余剰汚泥 10.9 t）と流入固形物量 21.6 t の 9 割と高いことが電力自給率 30% 以上と高い要因と考えられた。

3) リン回収モードの計算結果

エネルギー回収モードで検討した汚泥可溶化を導入するケースについてリン回収量を試算し、流入水中のリン負荷量：660 kg/日からリン回収率で評価した。

リン回収量とリン回収率の計算結果を図 5 に示す。リン回収量は、初期値（オゾン注入率 0 mgO₃/gSS）では焼却灰中に大部分が存在するので灰アルカリ法の回収量が多く、MAP 法も合わせたリン回収率は 57% であった。エネルギー回収のためのオゾン処理により可

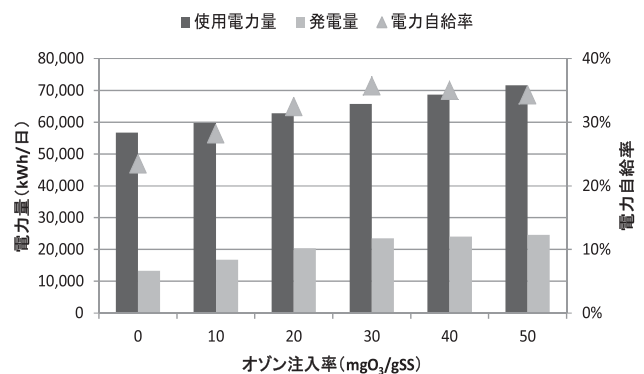


図 4 消化ガス発電量と電力自給率

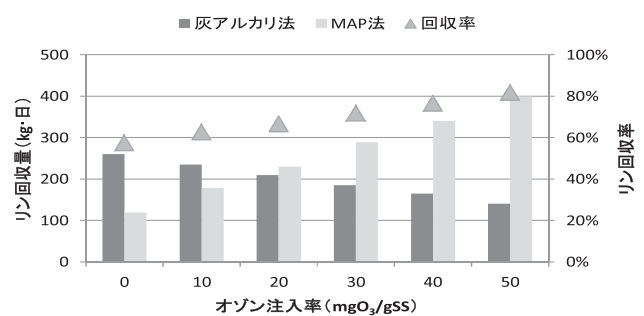


図 5 リン回収量

溶化が促進され返流水中のリン負荷量が増大する。特に余剰汚泥が半数以上を占めているおり、オゾン注入率 $50 \text{ mgO}_3/\text{gSS}$ では返流水中に全体の4割以上が存在する結果、MAP法での回収量が多く、全体のリン回収率は82%であった。

4. おわりに

下水処理場を流域の水・物質・エネルギー循環拠点と捉え、オープンデータを利用して下水処理場のポテンシャルを評価した。中規模処理場を取り上げ、いくつかの施策についてエネルギー回収やリン回収、能動的管理（脱窒抑制・硝化抑制）を検討した。

得られた結果をまとめると以下ようになる。

- ①オープンデータを利用したプラントフローモデルの構築では、施設情報（無酸素槽・好気槽等）を適切に設定し、MLSSを実績値とほぼ一致させることにより処理水質をおおむね再現できた。使用電力量の計算結果でも、高度処理の特徴である曝気量の増大を考慮して、ほとんど再現できた。
- ②エネルギー回収は、オゾン注入率 $30 \text{ mgO}_3/\text{gSS}$ で35.7%まで上昇したが、その後は低下した。リン回収は、オゾン注入率 $50 \text{ mgO}_3/\text{gSS}$ ではリン回収率は82%となった。
- ③能動的管理では、通常のT-N 6.8 mg/L に対して脱窒抑制では 10.9 mg/L と1.6倍が提供できると試算された。硝化抑制では $\text{NH}_4\text{-N}$ として 16.6 mg/L が提供でき、増加量は2.4倍となり、電力原単位は 0.35 kWh/m^3 と大幅に削減されていた。

今後は実処理場への各種施策の実装も視野に、各地の下水処理場で再生水利用も含めた地域特性に応じたポテンシャル評価を実施し、流入予測に基づく下水処理場運転計画システムを確立したいと考えている。

参考文献

- 1) 国土交通省下水道部：社会情勢の変化等を踏まえた下水道事業の持続性向上に関する検討会報告書，平成31年3月。
- 2) 藤原拓；付加価値を生み出す持続可能な未来の下水道，下水道協会誌 Vol. 56, No. 677, p. 1 2019.
- 3) 福嶋俊貴：下水処理場運転計画支援システムの開発，学会誌「EICA」第17巻 第2・3合併号. pp. 11-18, (2012)
- 4) 宗宮功・福嶋俊貴：下水中の有機物の高度利活用に関する研究，下水道協会誌，Vol. 49, No. 595, pp. 97-103, (2012).
- 5) 福嶋俊貴・西村文武：下水処理場再構築におけるシミュレータの活用に関する基礎的研究，下水道協会誌，Vol. 54, No. 655, pp. 100-107, (2017).
- 6) 福嶋俊貴：水・物質・エネルギーの一体管理へのシミュレータの利用に関する検討，第51回下水道研究発表会講演集，pp. 505-507, (2014).
- 7) 福嶋俊貴ら：望ましい資源循環を目指した下水処理場へのオゾン処理技術導入の検討（その2），第55回下水道研究発表会講演集，pp. 505-507, (2018).
- 8) KK 浄化センター平成29年度下水道事業管理年報。
- 9) 宗宮功：都市下水の各種高度処理プロセスにおける栄養塩除去機能の評価，下水道協会誌 Vol. 42, No. 509, pp. 81-90, 2005.
- 10) 村上孝雄：標準活性汚泥法の維持管理とその課題，環境技術 Vol. 37, No. 4, pp. 233-239, 2008.
- 11) 岩井聖：地域のニーズに応じた「能動的環境管理の実現」，下水道協会誌，Vol. 53, No. 649, pp. 8-11, (2016).
- 12) 国土交通省下水道部；下水放流水に含まれる栄養塩類の能動的な管理のための運転方法に係る手順書（案），平成27年9月。
- 13) 国土交通省下水道部：社会情勢の変化等を踏まえた下水道事業の持続性向上に関する検討会報告書（参考資料その1），平成31年3月。
- 14) 福嶋俊貴ら：望ましい資源循環を目指した下水処理場へのオゾン処理技術導入の検討，第54回下水道研究発表会講演集 pp. 176-178, 2017.
- 15) 西村文武，翁沁玉，日高平，水野忠雄；下水汚泥のメタン発酵特性に及ぼす汚泥の汚泥処理の効果，第27回オゾン協会年次研究講演会講演集 pp. 113-116, 2018.
- 16) 国土交通省下水道部；下水道におけるリン資源化の手引き，平成22年3月。