「GENESEED solution」下水処理場機能評価システム

上野 隆史 (うえの たかし)

福嶋 俊貴(ふくしま としき)

古屋 勇治(ふるや ゆうじ)

1 まえがき

下水処理場に対する社会的な期待は「水処理工程の高度化」や「汚泥資源の有効利用」を中心に高まりつつある。 富士電機は下水処理場の運用ソリューションとして「下水 道のまるごと最適化」に取り組んできた。この取組みは要 求レベルが高まりつつある処理水質の向上と地球温暖化 防止にも関係するエネルギー使用量削減や汚泥燃料化によるエネルギー回収といった複数項目を最適化するためのシ ミュレーション技術の開発である。

これまで下水処理場のモデル化は国際水協会(IWA:International Water Association)活性汚泥モデルに代表される水処理設備に対するものがほとんどであった。富士電機では、龍谷大学の宗宮教授(京都大学名誉教授)が提唱された①下水処理場機能評価表(PET:Performance Evaluation Table)をベースとする下水処理場機能評価システム(PES:Performance Evaluation System)を開発し②「GENESEED solution」のメニューとしてシステム化を行っている。PESでは下水処理場の水処理設備と汚泥処理設備を統合して、処理場全体として浄化機能を把握し、下水処理プロセスを処理水質と使用電力量で総合的に評価した。

富士電機では、PESの機能概要と下水処理場の実データによる適用性の検証、PESを使った既存処理場の高度処理化への適応性について評価したので紹介する。

2 PES の概要

2.1 PET の概要

PES の水質モデルのベースである PET においては、水質は BOD (Biochemical Oxygen Demand:生物化学的酸素要求量), SS (Suspended Solids:浮遊物質),窒素、リンを対象としており、概略、以下の構成となっている。

- (1) 水処理工程
 - (a) BOD: 微生物反応を一次式で表現除去率 = $1 \exp(-k \times MLSS \times t)$

MLSS [Mixed Liquor Suspended Solids:活性汚泥浮遊物質濃度 (mg/L)]

- t: 反応タンク滞留時間(h)
- 溶解性と固形性で反応速度 $(k(L/mg \cdot h))$ を変えている。
- (b) SS: 固形性有機物の分解と自己分解, BOD から汚泥への転換をモデル化
- (c) 窒素:硝化率・脱窒率で表現 標準パラメータでは硝化率 99.9%, 脱窒率 97%
- (d) リン:リン含有率で表現 生物学的リン除去法の汚泥では5% なお,沈殿池も一次式で表現し,最初沈殿池と最終 沈殿池で沈降係数を変えている。
- (2) 汚泥処理工程
 - (a) 対象設備:分離濃縮(重力濃縮槽+機械濃縮機) ~嫌気性消化~脱水機~焼却炉
 - (b) モデル化:汚泥処理のアウトプットである出口濃度と物質の回収率を標準仕様として設定し、次工程の物質量を算出する。未回収分が水処理工程へ返流する。 PETでは実際の処理場へ容易に適用できるよう

に非常に簡単なモデルを採用しているのが特長で、 (注) Excel のワークシートで計算している。

48,000 m³/日の処理能力を持つ処理場をモデルとして標準活性汚泥法(標準法)の反応槽を高度処理法(循環式硝化脱窒法:循環法や嫌気無酸素好気法:A2O法)へ改築する場合のシミュレーションを行った。簡単な改築で実現できる循環法へ改造することが、高度処理化に対する当面の一つの解決策であることを明確に提示し、結果として窒素除去率60~70%、処理・処分を要する汚泥発生量を約3分の2まで減少できることを示している。

2.2 PES としての拡張機能

(1) GUI (Graphical User Interface) の充実 運転管理者や水質管理者による PET の利用をさらに容

〈注 1〉Excel:米国 Microsoft Corp. の登録商標



上野 隆史

上下水道電気・計装システムの設計に従事。現在、富士電機システムズ株式会社環境システム本部水処理統括部東技術部グループマネージャー。



福嶋 俊貴

水環境情報ソリューションの開発 に従事。現在,富士電機システム ズ株式会社環境システム本部水処 理統括部 GENESEED 技術部担当 課長。日本水環境学会会員,環境 システム計測制御学会会員。



古屋 勇治

水処理プロセスのシミュレーション技術の開発に従事。現在,富士 電機システムズ株式会社環境システム本部開発室課長補佐。 易とするため、PESではGUIの充実を図った。メニュー画面の順番に情報を入力することによりシミュレーション実行を可能とした。

処理場固有情報である処理施設容積と計算条件である流入水量・流入水質を画面から入力することにより処理水質が計算でき、図1のように結果がプラントフロー上に処理の流れも含めて表示できる。返送汚泥率や循環率といった制御条件も入力可能であり、制御設定値の評価や運転計画支援も可能となっている。

循環法のSSのケースで行ったPESのプラントシミュレータ機能の結果を図1に示す。

水処理工程と汚泥処理工程を1枚のフロー図上に表示し、流入水中のSS (6.0 t) が各槽で沈殿・分解といった処理を受け、結果として放流水 (0.4 t) と焼却灰 (1.5 t) へ移行する様子がフローから理解できる。下水処理の中心である反応槽での分解量を反応槽と終沈まわりでの物質収支により計算すると、流入量 (初沈流出水:4.5 t) と流出量(処理水:0.4 t, 余剰汚泥量:2.4 t) の差分は1.7 t となる。これは流入水中のSS 6.0 t の 3 割以下にすぎない。もう一つの分解である燃焼量は、焼却炉まわりでの物質収支により脱水ケーキ投入量3.7 t と焼却灰量1.5 t の差分から2.2 t と計算され、流入水の4割近くを占めている。一方、重力濃縮槽を中心に0.9 t の返流水負荷(水処理への戻り負荷)があり流入負荷の15%を占めている。

このことから水処理での運転管理に汚泥処理状況も配慮 する必要があることも分かる。

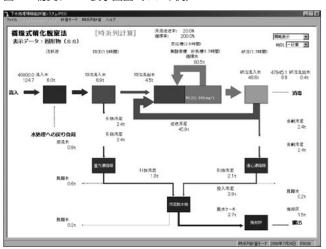
なお、シミュレーション結果は処理水質のみでなく、必要空気量や使用電力量も計算し送風倍率・電力量原単位といった指標による他処理場との比較も可能とした。

(2) 簡易電力量モデルの開発

処理水質と使用電力量を総合的に評価するために PET にはない簡易電力量モデルを開発した。

水処理設備ではブロワや返送汚泥ポンプ,循環水ポンプのように運転状況に応じて変化する電力量と固定的に発生する共通電力量の合計として算出した。ここでは標準的なデータとして社団法人下水道施設業協会発行の「エネル

図 1 物質フロー表示画面(SSの例)



ギー自立型処理場の研究」を利用した。

また、汚泥処理設備は既存処理場の実績データ調査から運転台数とベース電力量の合計で算出し、焼却炉に関しても同様に焼却炉投入時間とベース電力量の合計で算出した。なお、下水処理場の使用電力量の半分近くを占めるブロワ電力量に関しては「下水道設計計画・設計指針と解説2001年版」に準拠し、有機物酸化・硝化・内生呼吸・DO維持から必要酸素量を計算し、ばっ気方式を微細気泡の旋回流方式を仮定し酸素溶解効率を与えることにより必要空気量を計算し、ブロワ電力量を簡易に算出した。

(3) 総合評価指標の設定

循環法は窒素除去を目指している。高度処理化の効果を 評価するために窒素除去原単位という指標を設定し、処理 水質と使用電力量とを総合的に評価した。窒素除去原単位 は窒素除去負荷量と使用電力量を使用して以下の式で計算 する。

窒素除去原単位(kWh/kg) = 使用電力量(kWh)/窒素除去負荷量(kg)(1)

③ PES の適用事例の紹介

3.1 A 処理場 (標準法) での検証

PES を標準法 3 系列,約 10 万 m³/日の処理能力を持つ A 処理場に適用し,返送汚泥率の低減による電力量削減 効果をシミュレーションした。

PES の A 処理場への適応性について水質年報を入手して事前評価した。標準パラメータをまったく変更することなく処理水質を計算すると BOD の実測値が $1.9 \sim 3.3\,\mathrm{mg/L}$ であるのに対して、PES の計算結果は $1.1 \sim 3.3\,\mathrm{mg/L}$ と、系列によりばらつきはあるものの、ほぼ処理状況を再現できた。SS に関しても同様に実測値が $1.1 \sim 2.9\,\mathrm{mg/L}$ であるのに対して、PES の計算結果は $2.6 \sim 3.2\,\mathrm{mg/L}$ と処理状況を再現できた。このことから有機物処理を目標とする標準法である A 処理場に PES が適応できると判断した。

次に PES による省エネルギー効果を検討する。A 処理場では現状の返送汚泥率が63%と、標準的な値である20~40%より高めで運転されていた。標準法の処理水質自主目標の厳しい数値であるBOD 濃度10 mg/L を確保したうえで返送汚泥率低減による省エネルギー効果(電力量削減)を評価した。返送汚泥率の評価結果を表1に示す。

例えば、BOD 濃度を 10 mg/L 以下にするための制御目標値は処理水 BOD9.8 mg/L が確保できる汚泥返送率 30%と求めることができた。シミュレーションの簡易電力量モデルにより返送汚泥ポンプ電力量として 1,190 kWh から547 kWh に半分以下までの削減につながる結果を得た。

なお、返送汚泥率を 30% に低減させた効果として MLSS の低下($1,889\,\mathrm{mg/L}$ から $1,189\,\mathrm{mg/L}$)による SS の 処理水質の向上($1.1\,\mathrm{mg/L}$ から $0.1\,\mathrm{mg/L}$)や,内生呼吸 の減少に伴う送風量の低下による電力量削減といった付加 的な効果も PES により評価できた。

3.2 B 処理場(循環法)での検証

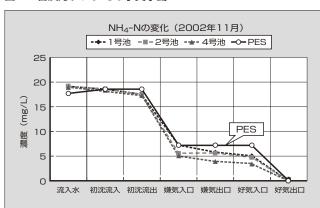
PES を高度処理が導入されている約5万 m^3 /日の処理能力を持つB処理場の循環法に適用し高度処理(特に窒素除去)を評価した。パラメータの調整は維持管理年報の流量・水質データを入力して行った。MLSS を実績データと一致させるために標準パラメータを一つ変更するだけでモデル全体の評価が可能である。ここでは実測値SS: $2.0\,mg/L$,BOD: $1.2\,mg/L$, $T-N:6.0\,mg/L$ に対して、シミュレーション結果はSS: $2.0\,mg/L$,BOD: $0.1\,mg/L$, $T-N:7.6\,mg/L$ と高度処理への適応性も十分であった。

次に PES の適用例として各反応槽(好気槽・無酸素槽)の窒素濃度変化を計算する仮想的なセンサ機能としての利用を考えた。生物学的窒素除去法の場合,硝化と脱窒のバランスを把握するために無機性窒素としてアンモニア性窒素(NH_4 -N)・亜硝酸性窒素(NO_2 -N)・硝酸性窒素(NO_3 -N)を槽ごとに把握し管理する必要があるが,下水処理場では通常,月に数回のオフラインでの分析が行われているに過ぎない。PES を利用すれば,流入水質を与えるだけで各槽の窒素 3 成分を計算し,各生物反応の状態を確認することができる。一例として反応槽内の NH_4 -N の挙動計算結果を図 2 に示す。シミュレーションの結果は各号池においても NH_4 -N 計測値とほぼ同様な値を示すこと

表 1 返送汚泥率低減効果の試算

	返送汚泥率				
	現状 (63%)	60%	50%	40%	30%
処理水BOD (mg/L)	4.8	5.1	5.9	7.2	9.8
処理水SS (mg/L)	1.1	0.9	0.5	0.2	0.1
MLSS (mg/L)	1,889	1,810	1,638	1,434	1,189
返送汚泥量 (m³)	25,871	23,771	19,810	15,848	11,886
送風量 (m³)	251,059	249,682	246,332	241,442	233,539
電力量 (kWh)	1,190	1,093	911	729	547

図2 各反応タンクでの水質挙動



が分かり, 仮想的なセンサ機能としての可能性が示された。

4 PES の活用方法の紹介

実処理場のデータによる検証で PES がシミュレータとして十分使用できることが分かった。そこで PES を使用して処理場の設備改良を行った場合のプラントシミュレーションについて紹介する。

モデル処理場としては PET と同様に 48,000 m³/日で高度処理化を目指して標準法を循環法に改築する場合の処理場機能について評価した。なお,既存反応槽をそのまま利用して高度処理化を図るという設定で,高度処理としてはシビアな運転条件となっている。汚泥処理工程としては比較的採用実績の多い分離濃縮(重力濃縮槽・遠心濃縮機)~遠心脱水機~流動焼却炉とした。処理場の運転条件・流入水質の想定条件を表2に示す。なお,ここでは流入水質も PET と同一で設定した。

循環率の増加による処理水質変化を検討するために、循環率を0%から300%まで変化させたときの計算結果を標準法と併せて図3に示す。

循環率を増加するに従い脱窒により T-N 濃度が減少し、高度処理の目標として設定されることの多い 10 mg/L を達成するには循環率 100% とすると処理水質が 8.5 mg/L となり達成できることが分かった。BOD は好気槽での滞留時間が短くなるため標準法よりも処理が悪くなるが、循環率を上げるに従い脱窒での利用割合が増え、処理水質はよくなる。SS については終沈での滞留時間が変わらな

表 2 処理場の運転条件・流入水質

運転条件	下水処理量	48,000 m³/日	
	返送汚泥率	20%固定	
	初沈汚泥	下水処理量の2%引抜き	
	余剰汚泥	下水処理量の1%引抜き	
流入水質	BOD	120 mg/L(溶解性:35%)	
	SS	120mg/L (VSS:60%)	
	窒素	30 mg/L (NH ₄ -N: 20 mg/L)	
	リン	3.0 mg/L (PO ₄ -P: 1.5 mg/L)	

図3 処理水質の変化

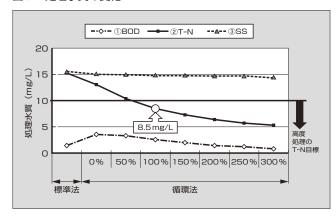


図4 余剰汚泥引抜量の変化

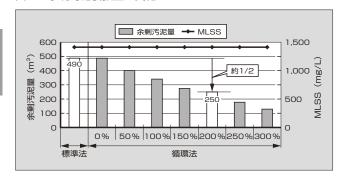
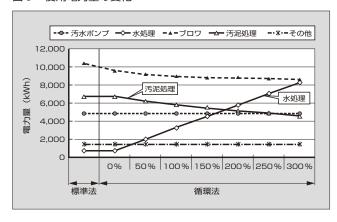


図5 使用電力量の変化



いため、ほとんど変化がないことが分かった。

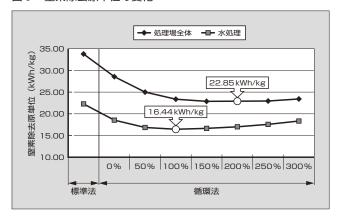
今回は MLSS を 1,400 mg/L で一定となるように余剰汚泥の引抜量を変化させた。この結果を**図 4** に示す。MLSS は 1,404 \sim 1,424 mg/L でほぼ一定となり、余剰汚泥引抜量は循環率を上げるに従い減少し、循環率 200% では 225 m^3 と標準法の半分以下となり、処理すべき汚泥の減少にもつながることが分かった。

循環法では T-N の処理水質が向上し、余剰汚泥量も減少することから有利であるが、循環率の増加に伴い循環ポンプ電力量も増加するためランニングコストも含め評価する必要がある。循環率を 0% から 300% まで変化させたときの使用電力量の計算結果を図 5 に示す。

循環率を上げるに従い循環水ポンプを中心とする水処理が増加するため、全体使用電力量は増大している。ただし、設備を個別にみるとブロワ電力量はBODが脱窒にも利用されるため有機物酸化の必要空気量が減少し、若干減少傾向となる。また、汚泥処理電力量は余剰汚泥量の減少に伴い大幅に減少し、循環率200%では5,160kWhと標準法の6,710kWhに比べ2割以上低減となることが分かった。

循環法への改築にあたり、最適な循環率を求めるために窒素除去原単位を計算した結果を図6にグラフ表示する。水処理・汚泥処理を連携し、処理場全体で原単位を検討すると循環率200%が22.85kWh/kgとなり、標準法および循環法の各循環率の中で最小となり最適設定値と判断できた。なお、循環率200%は循環法の標準設計値の上限値であり、妥当な結果と考えられた。

図6 窒素除去原単位の変化



従来は水処理設備のモデル化が実施されることが多いが、水処理設備だけを対象とした原単位では循環率 100% が 16.44 kWh/kg で最小となり、必ずしも最適値とはならないことが分かった。これは、循環法にすることにより処理すべき汚泥である余剰汚泥量が減少するメリットを十分に評価できていないためと考えられた。

以上のことから水処理・汚泥処理を連携して評価することの重要性が確認でき、処理場全体を対象としている PES の有効性も評価できた。

5 あとがき

2006年の下水道法の一部改正を受けて高度処理の整備促進が図られると考えられる。今後、PESを利用した高度処理法の導入の検討を進め、高度処理方式の事前検討といった設計フェーズや高度処理法と標準法の系列バランスといった運転管理フェーズ、さらには既設施設機能アップによる高度処理化といった施設の更新フェーズといった下水処理場ライフサイクル全体を通してのソリューションを提供すべく PES の機能充実を図りたいと考えている。

さらに、2006年に作成された「下水道ビジョン 2100」でうたわれた健全な水循環の確保に向けても、従来から研究を進めている流域水質統合管理システムにおける下水処理場の役割を明確にしつつ、PES の適用拡大を目指している。

なお、PESの実施設への適用性の評価に関して、幾つかの処理場からデータを提供いただいた。ここに記して謝意を表す次第である。

参考文献

- (1) 宗宮功.都市下水の各種高度処理プロセスにおける栄養 塩類除去機能の評価.下水道協会誌.vol.42, no.509, 2005, p.81-90.
- (2) 福嶋俊貴ほか.下水処理場機能評価システムの開発.第 42 回下水道研究発表会講演集. 2005, p.864-866.
- (3) 中山敬ほか. 流域全体を対象とした水環境統合管理システムの提言. 富士時報. vol.77, no.3, 2004, p.7-11.



*本誌に記載されている会社名および製品名は、それぞれの会社が所有する 商標または登録商標である場合があります。