

窒素・リン除去のための活性汚泥モデルキャリブレーション

中司哲朗*

ハンス ヨアヒム グツケ**、杉井隆造**、平林和也**

* 新南陽下水浄化センター

山口県新南陽市港町8番1号

** (株) 安川電機

福岡県北九州市八幡西区黒崎城石2-1

概要

下水プロセスでは、閉鎖性水域の富栄養化防止のため、窒素・リンの同時除去を効率的に行うことが求められており、IAWQ 活性汚泥モデルを利用したシミュレーションソフトが開発されている。このモデルでは、シミュレータを処理場、季節に対応させるために、微生物増殖速度などのモデルパラメータ値を最適に設定する必要がある。しかし、パラメータは多数あり、モデルは複雑なため運転員が設定することは困難である。

当社は、自動的にパラメータ設定する方法を開発し、実プラントに適用した。標準パラメータと自動設定パラメータを使用した時のシミュレーションを比較して、自動設定したパラメータが分析値により近いという結果を得た。

本報告では、自動設定法の概要と、分析値とシミュレーションとの比較結果を報告する。

キーワード

シミュレーション、キャリブレーション、パラメータ設定、流入有機物分割

1. はじめに

近年環境への意識が高まるなかで、従来の有機物除去に加えて、窒素やリンなどの富栄養化物質の除去が重要になってきている。しかし生物学的に窒素・リンを同時に除去する生化学反応は非常に複雑であり、処理場の運転についての高度な知識と探求が必要である。そのため下水処理を理論的に解明する努力が続けられた。その結果、国際水質学会 (IAWQ) が活性汚泥モデル (ASM) を提案し、ヨーロッパではかなり普及している。日本ではこのモデルはまだ普及していないが、総量規制に対応するため、産官学で研究が行われている。

このモデルでは微生物反応を数式で表現するため、60 個以上のパラメータ (増殖速度、死滅速度、飽和係数など) を含んでいる。微生物の分布と活性は処理場の状況によって異なるので、シミュレーション結果を分析値とよりよく一致させるには、モデルを処理場にフィットさせる (キャリブレーションする) 必要がある。キャリブレーションは、モデルパラメータの設定と、流入有機物 (COD) の分割から構成される。

通常、キャリブレーションするには各下水処理場のプロセスと活性汚泥モデルについて高度な知識を要し、流入水質の詳細な把握も必要である。しかしコスト削減の傾向にある処理場の運転員にこのような新たな負荷を課するのはとても困難である。そこで我々は自動的なキャリブレーション手法を開発した。

2. 活性汚泥モデル

活性汚泥モデルは国際水質学会のタスクグループが構築し、3つのモデルを公表している⁽¹⁾。ASM1 と ASM3 は窒素と生物関連物質の反応プロセスを表現する。ASM2 (と ASM2 d) はリン除去反応を追加している。そのため ASM2 では処理場での反応を4つのプロセスに分けている。それは、化学的加水分解反応と、3種類のバクテリア (従属栄養細菌、リン蓄積細菌、硝化細菌) による反応である。このモデルをキャリブレーションするには、2つの作業が必要となる。

- ① このモデルでは有機物の収支はCOD_{Cr}で計算されるが、これは日本では測定されていない。そのため我々は1.6×BODで換算している。CODはモデルではそのまま使われていないので、いくつかの成分に分割することになる。流入CODの分割が異なれば、処理場の条件が同じでもシミュレーション結果はかなり異なるものになる。したがってCODを正確に分割しなければならない。従来は呼吸速度の測定など、複雑な分析が行われている。
- ② 流入有機物の分割に加えて、モデルパラメータ（増殖速度、減少係数、飽和係数、死滅速度など）の設定も必要である。従来は国際水質学会が推奨している標準パラメータをそのまま使うか、2,3個を手動で変更することが多い。これらのパラメータは60個以上と多数あり、また互いに相関したものもあるため、モデルについての高度な知識によって設定されなければならない。
- これらの作業は技術的に難しく、処理場の運転員に新たな時間と労力を負荷することになる。こういった問題を解決するために、我々は自動設定手法を開発し、流入有機物の分割とモデルパラメータ設定の自動化を可能にした。

3. 自動キャリブレーション手法

3.1 処理場の詳細把握

キャリブレーションを自動的に行うには、処理場の状況を正確に理解することが不可欠である。そのためには流入水と処理水の測定だけでは不十分であり、図1のように、必要な入力データはキャリブレーションの2つのレベルで異なる。

標準レベルの場合、日常の測定値と反応槽内のいくつかの測定値があればよく、傾向をとらえるだけであればこのレベルで問題はない。

しかし処理場の状況に確実にフィットさせるためには、高精度なレベルの測定が必要となり、標準レベルのデータに加えて、24時間分析やDOプロファイルが必要になる。特にDOのプロファイルは重要で、我々はいくつかの処理場で測定した。DOプロファイルは処理場毎に異なっており、また各反応槽内部でDOの分布が生じている。

1. 標準レベル							
水質データ							
	BOD	NH ₄ N	NO ₃ N	PO ₄ P	MLSS	アルカリ度	水温
反応槽の流入	●	●		●		●	●
反応槽		●	●	●	●		
運転データ(SRT、返送比率、循環率、DO)							

2. 高精度レベル
<ul style="list-style-type: none"> ・標準レベルのデータ ・24時間分析 ・反応槽のDOプロファイル

図1 キャリブレーション入力データ

一例として、図2に新南陽浄化センターの、ある反応槽のDOプロファイルを示す。3槽目のDOは表面より底部のほうが低い。また、嫌気槽である2槽目からの流入口では流出側よりもDOが低い。したがって、その槽の平均値を与える測定ポイントを見出すか、あるいはある測定ポイントの値を平均値に変換する係数を見出す必要がある。我々は他の槽でもDOプロファイルを同様に測定し、図2の表に各槽の平均値を示している。これらの平均値は本発表のシミュレーションで使われた。

3.2 自動設定のためのパラメータの選択

分析値と完全に一致するほどにモデルをキャリブレーションするために特別な分析でパラメータを測定することは可能だが、ASMの場合、そこまで厳密に全てのパラメータを設定する必要はない。我々は自動設定するパラメータをいくつか選択している。はじめに、互いに相関があるパラメータを見出した。そして例えば、細菌の増殖速度だけを選んで死滅速度は対象としない、と決める。もしそのような選択をしなかったら、シミュレーション結果を良好にするパラメータ値からはずれる、という危険性がある。

これに加えて、他のパラメータはそれほどシミュレーション結果に影響しない、ということを感じ解析に

よって見出した。シミュレーション時間、パラメータ数、そしてパラメータ間の相関問題を削減するため、これらのパラメータは自動設定の対象としないことにした。

さらに、自動設定するパラメータの許容範囲を決めることも必要である。この許容範囲によって、パラメータが非現実的な値にならないように設定できる。われわれは多くの文献からこの許容範囲を定めた。また、流入水のCODの分割も同様に自動設定した。

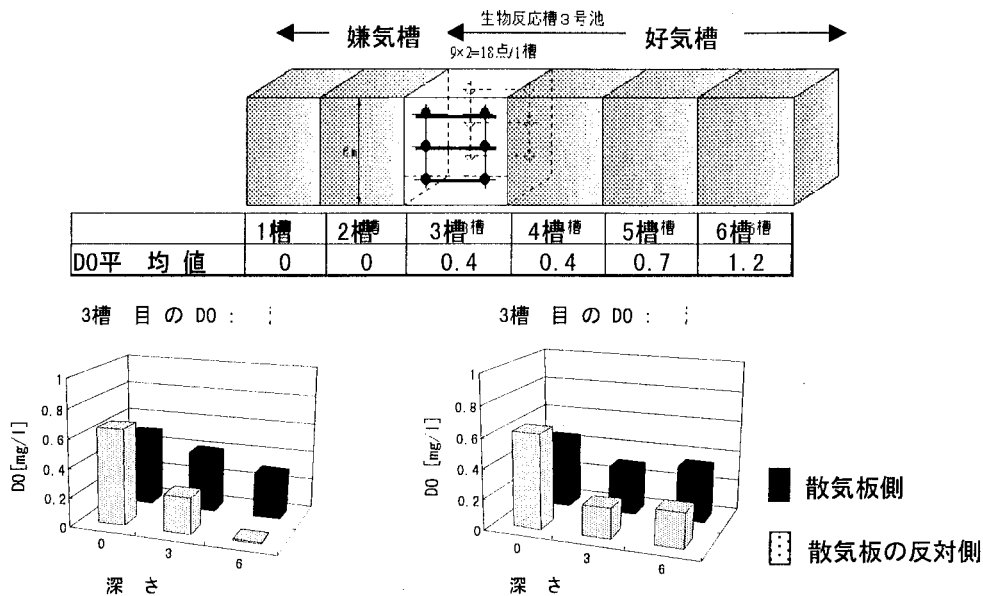


図2 反応槽の状態把握

3.3 パラメータ設定方法

我々はパラメータ設定に遺伝的アルゴリズムという手法を適用した。そのフローを図3に示す。

- ① シミュレーション回数 n を、自動設定するパラメータの数を基にして決定する。
- ② 自動設定システムは $(n - 1)$ 組のパラメータグループをランダムに作成する。それ以外のパラメータについては、実際的な値からスタートできるように、IAWQ標準値を用いる。
- ③ そして n 組のパラメータグループについて予備シミュレーションを行う。この時、日常的分析で得られる流入データと運転条件データが入力される。
- ④ 処理場の水質が全てのパラメータグループについて安定になるまで、この予備シミュレーションは長期間 (1ヶ月以上の予測期間) 実行する。
- ⑤ 予備シミュレーション終了後、結果は各反応槽の分析値と比較し、偏差平方を使って評価する。全項の影響を均等にするため、平均値で除して次のように表現できる。

$$\text{評価値} = \sum_{i=1}^l \frac{1}{A_{\text{average},i}} \sum_{j=1}^m (X_{ij} - A_{ij})^2$$

- ここで、
- i : 項目番号
 - j : 分析ポイント番号
 - l : 項目数
 - m : 分析ポイント数
 - A_{ij} : 項目 i の j ポイントにおける分析値
 - $A_{\text{average}, i}$: 項目 i の平均分析値
 - X_{ij} : 項目 i の j ポイントにおけるシミュレーション値

- ⑥ 各パラメータグループについて評価値を計算し、互いに比較して最良の(最小の)値を選択する。この値は、分析値とどれくらいの差が許容できるかを示す判定基準値と比較される。
- ⑦ この最小の評価値がまだ判定基準値より大きければ、その最良のパラメータグループを保存する。
- ⑧ そしてそのグループ及び $(n - 1)$ 組のランダムに再構成されたグループをスタートにしてループを再開する。
- ⑨ この予備シミュレーションは評価値が判定基準値より小さくなった時点で処理場毎に最適なモデルパラメータが決定されて、シミュレーションが実行できるようになる。

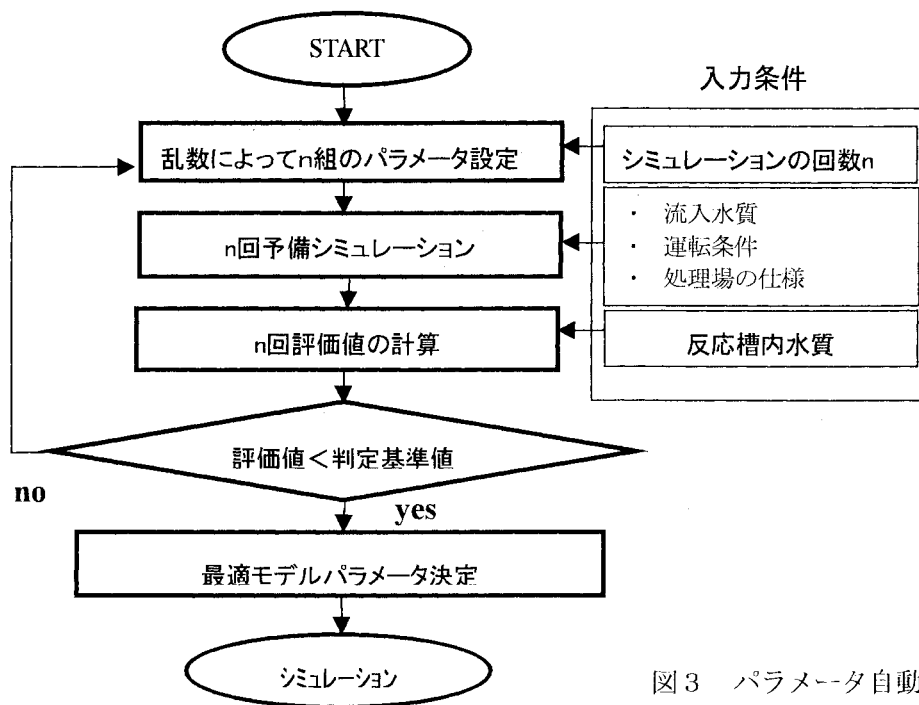


図3 パラメータ自動設定フロー

4. シミュレーション結果

4.1 新南陽浄化センター

我々は山口県新南陽浄化センターの実プラントにおいて、上記のようにASMモデルパラメータを自動設定し、シミュレーションを実施した。

新南陽浄化センターは分流式処理場として、昭和54年12月より供用を開始し、水処理施設は3水路、平成9年度の平均処理水量は $14300\text{m}^3/\text{day}$ であった。図4に浄化センターの処理フローを示す。生物反応槽は6槽に分割され、第1槽と第2槽に攪拌装置を設置し、嫌気・好気法による脱窒、脱リン運転している。詳細については既報⁽²⁾を参照されたい。

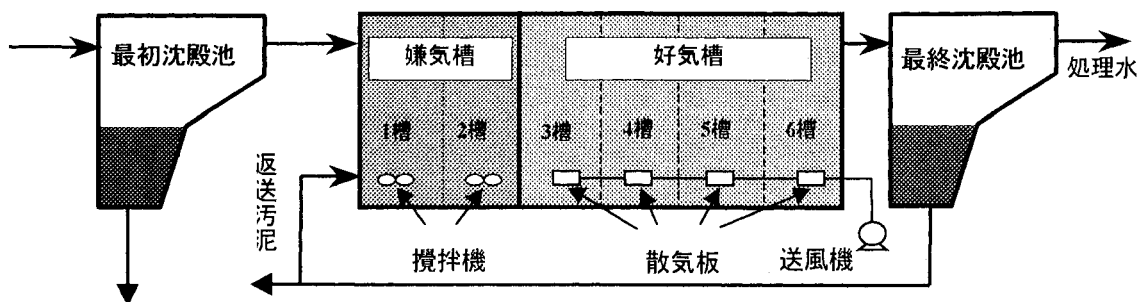


図4 新南陽浄化センターの処理フロー

4.2 評価値の変遷

前述のパラメータ設定によって、分析値とシミュレーション値が極めて近いものになることが、図5の評価値の変遷で示すことができる。はじめの20回ぐらいは評価値の変化は非常に速く、その後シミュレーション値が分析値に近づくにつれて、各パラメータがその処理場にフィットした値に近づき、評価値の減少は止まる。

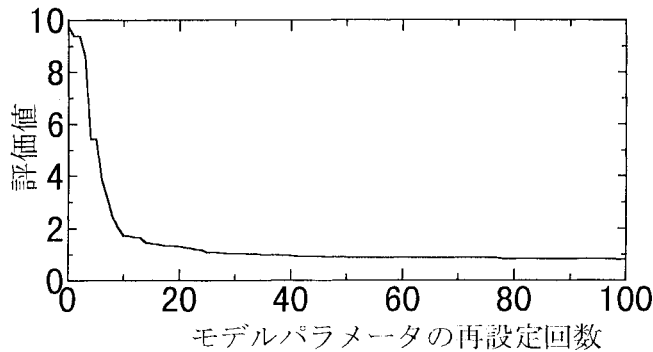


図5 評価値の推移

4.3 新南陽浄化センターのパラメータ表

このようにして設定されたパラメータの値を表1に示す。表中のパラメータ値は全て20℃でのもので、温度変化の機能はASM2に記載のとおりに入込まれている。

この浄化センターでは、特に硝化に関連したパラメータの変化が大きく、硝化菌の増殖速度が1.5に、アンモニアの飽和係数は2.3になった。他のパラメータはIAWQ推奨値に近い値となった。

パラメータは手作業で設定することも可能であるが、モデルについて深い知識を要するため困難と考える。しかしこの自動設定法があれば、モデルの知識がない処理場のユーザでも問題なく扱うことができる。

表1 IAWQモデルパラメータ

パラメータ	推奨値	新南陽
K_h 加水分解速度定数	3.00	3.10
η_{NO3} 無酸素加水分解の減少係数	0.60	0.67
η_{fe} 嫌氣的加水分解の減少係数	0.10	0.11
μ_{AUT} 硝化菌最大増殖速度	1.00	1.52
K_{NH4} アンモニアの飽和係数	1.00	2.30
S_A 発酵生成物(酢酸) (* S-COD)	0.20	0.24
X_{II} 従属栄養細菌 (* X-COD)	0.15	0.06
X_I 不活性難溶解性有機物 (* X-COD)	0.20	0.18
S_I 不活性溶解性有機物 (* S-COD)	0.25	0.13
i_{NSF} 易生物分解性有機基質 S_p 中の窒素含有率	0.03	0.03
i_{NXI} 不活性難溶解性有機物 X_i 中の窒素含有率	0.03	0.05
i_{NXS} 難分解性基質の窒素含有率	0.04	0.04
Y_{PO4} PHA 蓄積に対するポリリン酸量	0.40	0.39

4.4 シミュレーション結果

図6にシミュレーション結果を示す。IAWQ推奨パラメータを使った結果は分析値と傾向は同じだが、いくつかのポイントでずれがある。自動設定法ならば分析値とよく一致しており、パラメータがこの処理場によりよくフィットしていることがわかる。

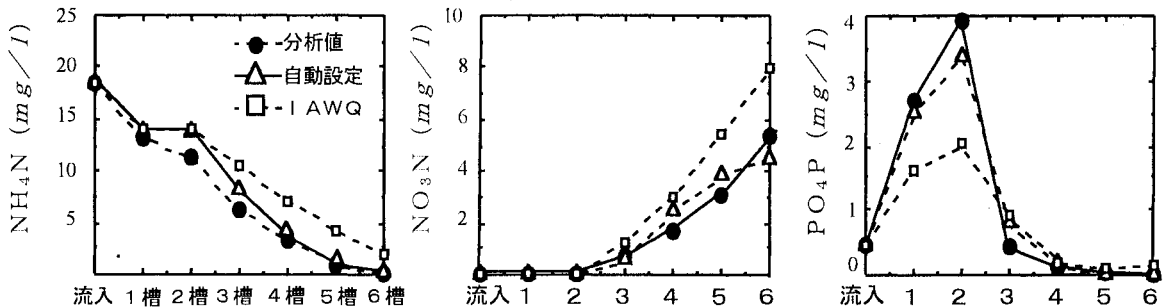


図6 シミュレーション結果

5. まとめと今後の課題

活性汚泥モデルを処理場に最適にキャリブレーションするために、遺伝的アルゴリズムを適用したパラメータ自動設定法を開発し、新南陽浄化センターにおいて水質の分析値とシミュレーション結果がよく一致するパラメータを設定することができた。

今後はこの手法の妥当性を確認するため、他の処理場でもシミュレーションを実施する予定である。また、OD法のような他の処理方法についても実施する予定である。

参考文献

- (1) M.Henze(2000).The Activated Sludge Models (1.2.2d and 3). IWA Publishing London
- (2) 佐藤、津村、中村：既設処理場におけるASRT制御の適用、p340～342、第32回下水道研究発表会講演集、1995