

活性汚泥モデルを用いた省エネルギー運転に関する検討

(株)日水コン 大阪支所 高山 史哲
萩野目 昭

1. はじめに

A 県 B 浄化センターは放流負荷削減のため、窒素、リンの同時除去を目的とした高度処理を導入して良好な処理水質を維持している。しかし、水処理プロセスを高度化している影響で、標準活性汚泥法に比べて維持管理費用（電力費、薬品費）が高価となっているため、より一層の効率的な施設の運転管理に努めている。

これまでも実施設において薬注率を操作する等して運転条件の効率化を試みてきたが、実施設を対象とした場合、運転条件の変更範囲に制約があることや結果が得られるまでに時間を要する等の課題があった。

そこで、運転条件をモデル内で操作することによってその影響を机上で確認できる活性汚泥モデル（Activated Sludge Model、以下「ASM」と称す）に着目し、B 浄化センターの既存高度処理系列について ASM を用いた運転条件の効率化（省コスト化）検討を行った。以下では、B 浄化センターの凝集剤添加型多段式硝化脱窒法+メタノール添加後脱窒法系列を対象に行った調査結果について報告する。

2. 検討対象施設の概要

B 浄化センター（処理能力 216,500m³/日）は A 県流域下水道の中で最も規模が大きく、高度処理を A 県内の他浄化センターに比べて先駆的に採用してきた実績がある。本検討についても同様に、A 県において今後の基本処理方式となる「凝集剤添加型多段式硝化脱窒法+メタノール添加後脱窒法」で運転を行なっている同 4 系を対象とした。4 系の処理方式は、非常に高レベルな目標処理水質（最終沈殿地流出水で T-N：3.0mg/L、T-P：0.06mg/L）※に対応するため、3 段ステップ硝化脱窒法にメタノール添加による脱窒促進を付加したものである。検討対象施設（4 系）の概要を図-1 に示す。

※ A 県流域下水道整備総合計画において設定されている高度処理目標処理水質（放流水質）基準（T-N：3.0mg/L、T-P：0.02mg/L）と急速ろ過池での T-N、T-P 除去率の実績値から算出した最終沈殿地流出水の目標水質

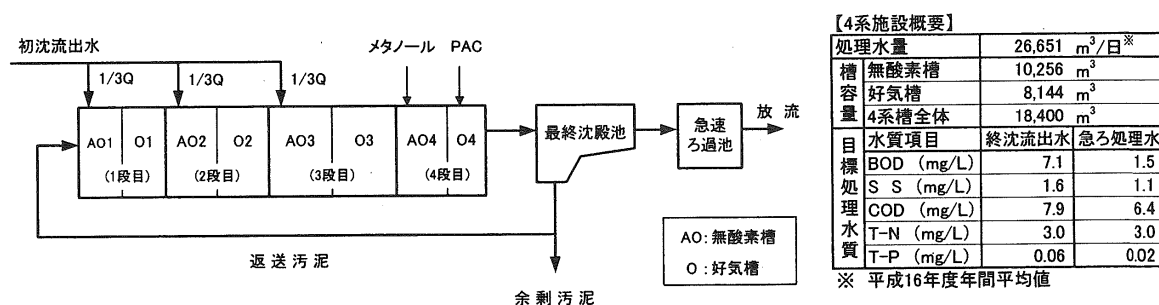


図-1 検討対象系列（B 浄化センター4 系）の概要

3. 調査内容

(1) モデルの作成

1) 有機物分画

ASM で計算を行う場合、流入水の有機物成分を存在形態（溶解性、浮遊性）及び、分解性（易分解、遅分解、難分解）に応じて数種類の成分に分類（有機物分画）して COD_{Cr} ベースで評価する必要がある。主な有機物分画手法として表-1 に示すような種々の手法が提唱されているが、本調査では、②STOWA 法（水質分析のみで分画が可能な手法）、③OUR+STOWA 法（OUR 法と STOWA 法の優れた点を組み合わせた手法^{※2}）、④シミュレーション法（簡易モデルによるシミュレーションを用いた手法）と分画手法の異なる 3 手法を用いて有機物分画を行い、各分画結果を比較するとともに、実務への適用性が高い分画手法を選定した。

表-1 有機物分画手法の概要

分 画 手 法	概 要	必 要 操 作
①OUR 法	OUR 測定結果により、幾何学的に S_s (易分解性有機物) を推定する。また、 X_s (遅分解性有機物) は S_s 、 X_H から OUR 試験結果を最もよく再現する X_s (遅分解性有機物) を設定する。	・OUR 試験 (汚水+汚泥、汚水のみ) ・水質分析 (COD _{Cr}) ・ASM による簡易シミュレーション
②STOWA 法 ^{※1}	オランダ水管理研究財団 (STOWA) が提案している方法	・水質分析 (COD _{Cr} 、BOD 経日変化)
③OUR+STOWA 法 ^{※2}	OUR 法 (幾何学的手法により S_s (易分解性有機物) を推定する手法) と STOWA 法を組み合わせた方法	・OUR 試験 (汚水+汚泥、汚水のみ) ・水質分析 (COD _{Cr} 、BOD 経日変化)
④シミュレーション法 ^{※3}	OUR 測定結果を再現するような S_s 、 X_s (遅分解性有機物) を硝化反応を除いた ASM3 の簡易シミュレーション (加水分解、有機物貯蔵、微生物 (X_H) の増殖、貯蔵有機物 (X_{STO}) 分解反応を想定) により推定する方法。	・OUR 試験 (汚水+汚泥、蒸留水+汚泥) ・水質分析 (COD _{Cr}) ・ASM3 による簡易シミュレーション

2) キャリブレーション

ASM は 60 種以上のパラメータを内包しており、活用にあたってはパラメータ値の調整（キャリブレーション）が必要となる。そこで、作成した反応槽モデルに 1) の有機物分画結果を入力し、反応槽内水質、処理水質の計算値と実測値が合致するよう、「パラメータの調整→計算値と実測値の比較→パラメータの調整」の作業を繰り返した。なお ASM のバージョンは、花田ら^{※4}が提案した ASM3（有機物、窒素を除去対象物質としたモデル）に ASM2d のリン除去モジュール（化学的及び生物学的のリン除去プロセス）を組み合わせたものを用いた。

(2) 効率化（省コスト化）運転条件の検討

生物処理条件が厳しく細心の注意をはらって運転管理を行なっている冬季（低水温、流入負荷最大）を検討対象期間とし、(1) で作成したモデル内で、効率化（省コスト化）対象項目に関係するパラメータを操作して、目標処理水質を満足する範囲で最も効率的な運転条件を検討した。水処理に関する種々の運転操作項目のうち、効率化対象としては「曝気風量」、「葉注率（メタノール、PAC）」の 2 項目を選定した。

なお、曝気風量を低下させるための操作因子には①MLDO 低下、②A-SRT 低下（MLSS 低減分だけ内生呼吸量も低減可能）の二つがあり、既往文献では①MLDO 低下の影響を検討しているものが主である。しかし、対象系列の必要酸素量の約 40% が内生呼吸量であることから、より効率化効果が見込まれる②A-SRT を曝気風量削減のための操作項目として選定した。

4. 調査結果

4-1. モデル作成

(1) 有機物分画結果

STOWA 法、OUR+STOWA 法、及びシミュレーション法の 3 手法によって生物反応槽流入水中の有機物を分画し、その特性を比較した（図-2 参照）。

- STOWA 法、OUR+STOWA 法による有機物分画結果を比較すると、易分解（ S_A+S_F ）と遅分解（ X_S ）有機物の比率は異なるものの、全有機物のうち生物が分解可能な有機物量（ $S_A+S_F+X_S$ ）はほぼ同じであり、かつ、その割合も一般的な有機物組成（味埜俊監訳：「活性汚泥モデル」、環境新聞社 をもとに算出した値）とほぼ同程度（全有機物の 65～70% 程度）であった。
- それに対し、シミュレーション法は STOWA 法、OUR+STOWA 法に比べて大きく組成が異なり、浮遊性の難分解性有機物（ X_I ）の割合が高かった。これは、生物反応槽流入水中に分解速度の遅い遅分解性有機物が多く、3～4 時間程度の OUR 試験では X_S が過少に推定された（3～4 時間程度では X_S は完全に分解されきっていなかった）ためと考えられる。
- シミュレーション法の分画精度を高める方法として長時間（20 時間以上）の OUR 試験を行なうことが提案されている^{*5}が、OUR データの整理・簡易シミュレーションに習熟が必要とされるため、実務への適用性は他の 2 手法に比べて低いと評価される。
- 今回試行した有機物分画手法の中では STOWA 法、OUR+STOWA 法は B 浄化センターの生物反応槽流入水に対して適用性があると判断されるが、分画操作の簡便性の観点から、水質分析のみで分画が可能な STOWA 法が実務の際には最も適していると考えられる。

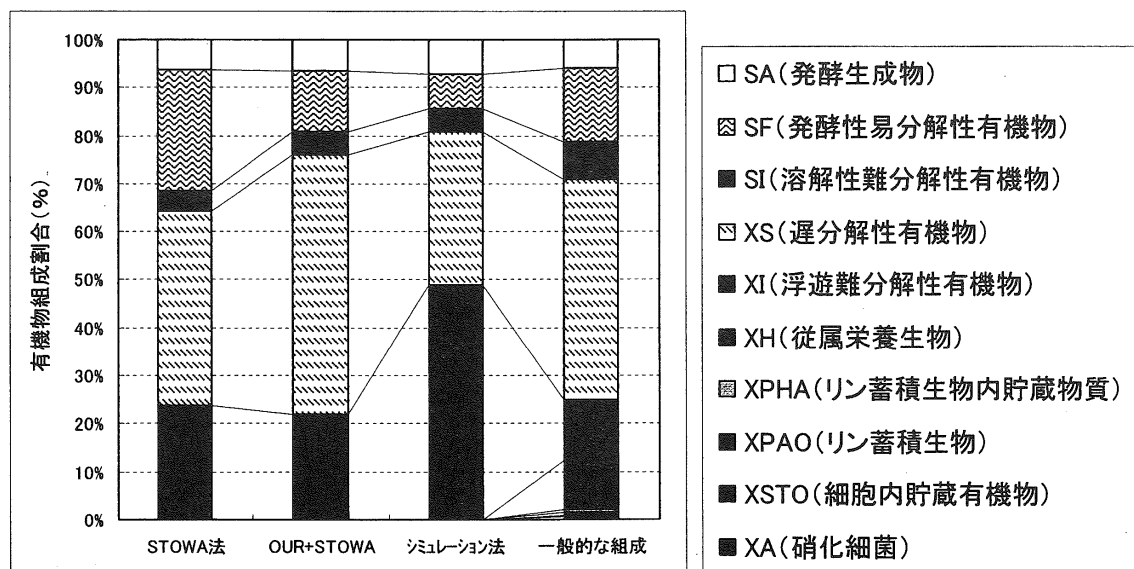


図-2 有機物分画結果

(2) キャリブレーション (図-3 参照)

反応槽内の通日水質調査結果 (実測値：*) より、好気槽 (O1～O4) での硝化 ($\text{NH}_4\text{-N}$ の低下)、無酸素槽 (AO1～AO4) での脱窒 ($\text{NO}_x\text{-N}$ の低下) が確認できる。またリンについては、初段の無酸素槽 (AO1) でリンが放出 ($\text{PO}_4\text{-P}$ が上昇) されている。それに対しデフォルト値のパラメータを用いた計算 (Cal 前：○) では、実際の状況に比べて硝化が不十分であり、また反応槽内の $\text{PO}_4\text{-P}$ の状況が再現されていなかった。

そのため、硝化菌の増殖速度 (μ_{AUT}) や増殖に関する半飽和定数 (K_{NH_4} 等)、リン蓄積細菌の収率 (Y_{PO_4}) や蓄積、摂取速度 (q_{PHA} 等) 及び、PAC による凝集、再溶出速度 (k_{PRE} 等) を操作してキャリブレーションを行った (Cal 後：●)。キャリブレーション後の反応槽内の窒素、リンの状況を以下にまとめる。

- ・ 窒素については、反応槽内水質及び処理水質を再現できた。
- ・ リンについては、処理水質は概ね再現できたものの、反応槽内でのリンの挙動の再現は不十分であった。生物学的リン除去機構や PAC による化学的リン除去機構のモデル精度が不十分であることが ASM の課題であるため、今後も反応槽内水質データを蓄積してキャリブレーション精度を向上させることが望ましい。

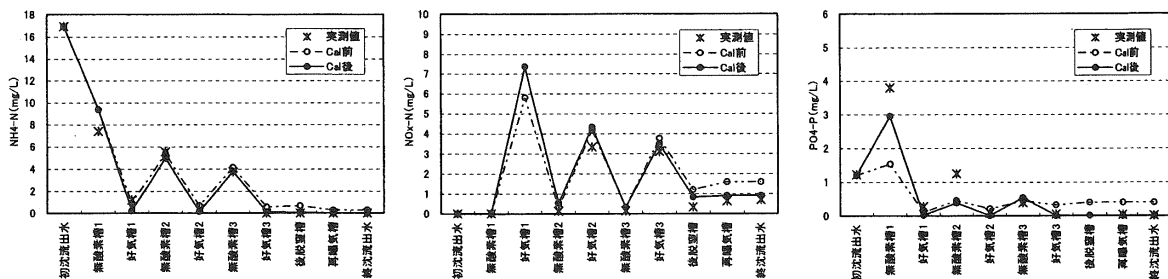


図-3 キャリブレーション結果

4-2. 効率化 (省コスト化) 運転条件の検討

(1) 効率化 (省コスト化) 検討

ASM 上で A-SRT、メタノール注入率及び、PAC 注入率を数ケース操作して各処理水質を計算し、目標処理水質を満足する範囲で最も効率的な運転条件を検討した。運転条件と処理水質の関係を図-4 に示す。また、効率化運転条件の検討結果について以下にまとめる。

- ・ A-SRT が 5 日未満では処理水 $\text{NH}_4\text{-N}$ が急激に上昇したため、反応槽内に硝化菌を保持することが不可能であると考えられる。そのため、硝化菌を反応槽内に安定的に保持することを考えると、7 日以上の上の A-SRT が必要であると判断される。また、A-SRT が 7 日のときの反応槽最終槽の MLSS は $1,600\text{mg/L}$ 程度である。(図-4 左図参照)
- ・ しかし、4 系処理施設の送風設備能力の関係上、ASM 検討結果をもとに MLSS を $1,600\text{mg/L}$ に下げた場合、送風設備を現状の最下限能力で運転しても過曝気状態となり汚泥の解体等の不具合が生じることが想定される。そのため実施では、送風設備の最小送風量から試算した安全な MLSS ($2,200\text{mg/L}$) まで低下することとし、そのときの A-SRT は 11 日であった。
- ・ 10ppm 以下のメタノール注入率、 20ppm 以下の PAC 注入率では T-N、T-P の目標処理水質 (それぞれ 3.0mg/L 、 0.06mg/L) の達成が困難であると判断されたため、メタノールは 20ppm 以上、PAC は 30ppm 以上の注入率が望ましいと考えられる。この場合、メタノール、PAC ともに実績に比べて 10ppm 程度削減可能であった。(図-4 中図、右図参照)

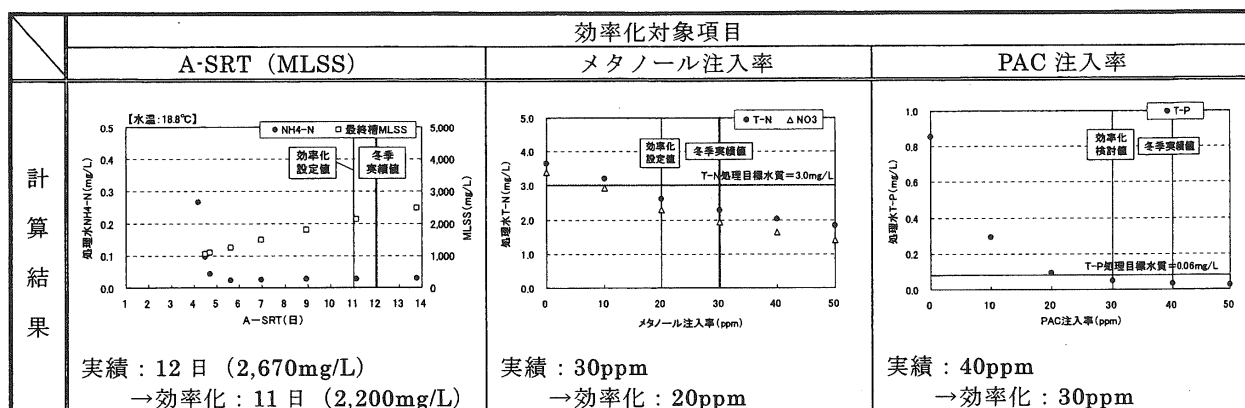


図-4 効率化運転条件の検討結果

(2) 運転経費削減効果の概算

(1) で検討した効率化運転条件で施設を運転した際の、運転経費の削減効果を試算した結果を表-2、図-5に示す。

- 4系水処理施設では、送風電力費は送風機能力の制約により大幅な削減効果が見込めないが、薬品費の低減を含めて冬期1ヶ月当り約56万円程度の削減効果が見込まれた。
- また、運転条件の効率化による費用削減効果は、4系水処理施設運転経費の約10%削減に相当する。

表-2 費用削減効果の概算結果

項 目	H16実績値 ①	削減効果 ②	効率化運転時 ①-②
送風設備	1,642	179	1,463
メタノール	816	212	604
PAC	509	172	337
水処理電力費	2,691	—	2,691
計(4系水処理運転経費)	5,658	563	5,095

(単位: 千円/1ヶ月)

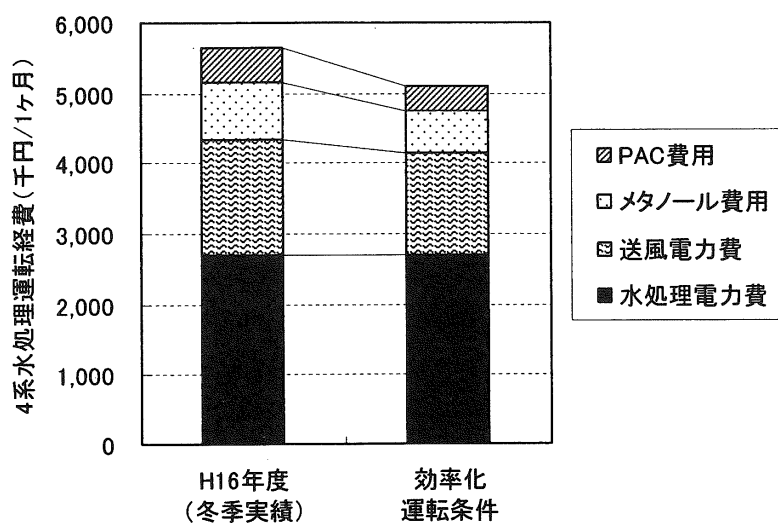


図-4 運転経費の比較 (冬季)

5. まとめ

B 浄化センターの既存高度処理系列(凝集剤添加型多段式硝化脱窒法+メタノール添加後脱窒法)を ASM によりモデル化し、目標処理水質を満足する範囲での効率的な運転条件をモデル上で検討した。その概要は以下のとおりであった。

- ・ STOWA 法、OUR+STOWA 法、及びシミュレーション法の 3 手法によって生物反応槽流入水の有機物分画を行なった結果、分画結果の妥当性及び分画作業の簡便性を考慮すると、水質分析のみで分画が可能な STOWA 法が実務の際には適していると考えられる。
- ・ キャリブレーションにより、反応槽内の窒素 ($\text{NH}_4\text{-N}$ 、 $\text{NO}_x\text{-N}$) の挙動は再現できたが、ASM の特性上、リン ($\text{PO}_4\text{-P}$) の再現性は窒素に比べて低かった。リンについては今後もデータを収集して再現精度を高めることが望ましい。
- ・ 冬期における運転条件の効率化を ASM を用いて検討した結果は、①A-SRT : 11 日 (実績 12 日)、②メタノール注入率 : 20ppm (実績 30ppm)、③PAC 注入率 : 30ppm (実績 40ppm) であった。また、運転条件の効率化によって処理施設運転経費を実績に比べて約 10%削減可能であると試算された。

6. 今後の課題

本調査では ASM を活用し、既存高度処理系列の効率化を机上で検討した。しかしながら、今後 ASM を水質管理に利用する際の課題として下記項目が挙げられる。

(1) 有機物成分の推定方法の精度向上

ASM では有機物は COD_{Cr} ベースで表現されるため COD_{Cr} の水質分析を定期的に行うことが理想的であるが、廃液処理費等の理由から、 COD_{Mn} 、BOD と同様に週一回程度の頻度で測定することは困難であると判断される。そのため、定期的に測定している水質項目から COD_{Cr} を推定する手法が必要となる。本調査では、2 ヶ年における計 4 回の通日試験結果から COD_{Cr} 推定方法を検討しているが、今後も COD_{Cr} 及び分画データを蓄積し、代替測定方法を確認・修正して各有機物成分の推定精度を向上することが必要である。

(2) 最終沈殿池での固液分離の取扱いについて

ASM には最終沈殿池において固形物の挙動を予測できる固液分離モデルが付帯していないため、処理水 SS の予測が困難である。そのため本検討対象のように非常に高度な目標処理水質 (放流水レベル、 T-N : 3.0mg/L 、 T-P : 0.06mg/L) のもとで議論するときには、SS 由来の T-N 、 T-P 負荷が無視できない場合が多い。その場合は、目標処理水質を溶解性成分で評価するような検討や、ASM への簡易な最終沈殿固液分離モデルの組み込みが必要となる。

(3) 水中攪拌機運転の効率化について

処理施設運転経費の約 50%を占める水処理電力費 (図-5 参照) に占める水中攪拌機の電力費は大きい。水中攪拌機電力費についても間欠攪拌等により省コスト化は可能であり、その影響は大きいと考えられる。しかし、間欠攪拌の影響を ASM に導入するには未解明の部分 (上澄み部、沈殿汚泥部での生物反応の違い等) があるため、今後は現地調査により必要な知見を収集する必要がある。

【参考文献】

- ※1 味楚、流入水分画とキャリブレーション、学会誌 EICA、第 8 巻第 1 号（2003）、pp61～68
- ※2 野田ら、活性汚泥モデルの有機物分画方法に関する検討(その 1)、第 41 回下水道研究発表会講演集（2004）、pp107～109
- ※3 野田ら、活性汚泥モデル活用のために必要な有機物分画方法に関する検討(その 1)、第 40 回下水道研究発表会講演集（2003）、pp159～161
- ※4 花田ら、Activated Model No.3（ASM3）へのリン除去モジュールの導入とそのキャリブレーション方法の開発、下水道協会誌（2004 年 3 月）、Vol.41、No.496、pp114～125
- ※5 増山ら、福岡市における活性汚泥モデルの最適な有機物分画方法についての検討、第 41 回下水道研究発表会講演集（2004）、pp104～106