

活性汚泥モデルの構築と活用について

片山尚樹、伊熊信男（横浜市環境科学研究所）
浅野卓哉（横浜市環境創造局水再生水質課）

Construction and practical application of Activated Sludge Model

Naoki Katayama, Nobuo Ikuma (Yokohama Environmental Science Research Institute)
Takuya Asano (Wastewater Quality Control Division, Yokohama Environmental Planning Bureau)

キーワード：活性汚泥モデル、富栄養化、嫌気-無酸素-好気法、窒素除去、りん除去、

要旨

本市では、放流先閉鎖性水域の富栄養化対策として、窒素・りん除去を目的とした高度処理施設の導入を推進している。現在6水再生センターで高度処理施設が稼働しており、今後も既存施設の更新時にあわせて嫌気-無酸素-好気法（以下 A_2O 法）による高度処理施設を導入する計画である。しかし、高度処理施設は難しい運転管理と建設・維持管理コストの増加という課題を抱えている。高度処理施設の窒素・りん除去性能は、流入下水特性に大きく左右されるため、稼働後は設計値通りに運転しても処理が安定しないことが多い。また、運転管理において処理条件変更を行う場合、処理水質への影響予測が困難であることから、経験的な意思決定にならざるを得ない。経験的な運転管理では、理論をベースとした設計段階への反映が難しく、設計へのフィードバックが機能しにくい。こうした問題解決ツールの一つとして、窒素・りん除去のシミュレーションツールである活性汚泥モデル（以下、ASM）の活用が挙げられる。ASMは、国際水協会（IWA）のタスクグループが提案したもので、活性汚泥中の各種生物反応プロセスの数式化と系の物質収支から、処理水質の予測を行うことができる。1986年にASM1が提案されて以来、処理プロセス設計や維持管理実務において世界的に利用されている。

本調査では、平成15～17年にかけて実施した高度処理施設の効率的な設計・運転管理手法の検討結果について、りん除去安定化対策の机上検討および設計方法の妥当性検討を行うことを目的として、本市の既存 A_2O 法施設4系列を対象としてASMの構築を行った。さらに構築モデルのシミュレーション精度確認と活用方法の検討を行い、構築モデルの実務利用範囲について評価を行った。

1 はじめに

閉鎖性水域の富栄養化問題の対策として、本市では下水処理における窒素・りんの除去向上を目的とした高度処理施設の導入を推進している。今後も既存施設の更新にあわせて、各水再生センターに A_2O 法施設を順次導入する計画である。

一方で A_2O 法施設は標準法施設と比べて建設・維持管理コストが高いこと、運転管理が難しいことなどが問題点として挙げられる。高度処理施設において安定した処理水質を得るには、窒素・りん除去理論に沿った適切な運転管理と、それを可能とする施設設備導入の両者が求められる。有機物・SS除去を目的とした従来の標準法施設では、経験的な運転管理で十分に対応可能であった。しかし、さらに窒素・りん同時除去を行う A_2O 法では、合理的な施設設計・運転管理能力が求められる。

平成15～17年にかけて実施された「高度処理効率化の検討調査」において、既存 A_2O 法施設反応タンクの処理能力の過小評価およびそれに起因するりん除去の不安定性といった、設計段階に起因する維持管理の非効率性が認められた³⁾。現在の A_2O 法施設設計方法に改善すべき点があり、既存施設の運転管理で得られた知見を施設設備設計にフィードバックしていく必要がある。そして、そのためには経験的な維持管理手法から、より合理的・定量的な手法を構築していくことが求められる。

ASMは、反応タンクの物質（炭素、窒素、りん）の収支と活性汚泥という微生物群集の各種反応を数式化することで、処理水質や必要酸素量、余剰汚泥発生量などの予測を可能にしている。現在世界的に実務利用が進んでおり、我が国でも平成18年に日本下水道事業団（JS）によって「活性汚泥モデルの実務利用の技術評価に関する報告書（以下、評価書）」¹⁾が取りまとめられ、ASMの積極的な利用の促進が期待されている。

平成17年度調査の中で、神奈川水再生センター A_2O 法施設での収集データをもちいて、ASMを試験的に構築し、調査結果の机上検証を試みている。その結果、ASMは設計・維持管理の両面について、使い次第では有効なツールとなることを確認している。

本調査では、主に神奈川水再生センターを対象として実施された平成15～17年度調査結果の各水再生センターへの適用性を検討すると同時に、反応タンク設計方法の妥当性を検証するツールとして活用することを目的として、神奈川水再生センターを含む3センター4系列の既存 A_2O 法施設についてASMの構築を行った。さらに構築モデルを用いて維持管理における活用方法を検討し、構築モデルの活用範囲と今後の課題について評価を行った。

2 活性汚泥モデルについて

2.1 活性汚泥モデルの概要

活性汚泥法のような複雑なシステムを計画したり運用したりする際には、その挙動や特性をいかに正確に把握し予測できるか、という点が重要な課題となる。実規模の装置やその縮小モデルを使用した特性把握はそのための最も直接的なアプローチと言えるが、コスト上の制約が常につきまとい、特に複雑な内部構造を持つシステムに対しては、十分な解析に足るだけの情報が得られないことも多い。そのような場合、対象とするシステムの構造や機能を数学的に記述（モデル化）し、コンピュータなどを使ってその解析・予測を行うというアプローチが有効な代替案であり、コンピュータの機能向上と相まって様々な分野で活発に利用されるようになってきている。

IWA が公表した ASM シリーズには、ASM1, ASM2, ASM2d, ASM3 がある（表1）。

表1 ASMの種類

モデル略称	公表年	除去対象	構成生物群	特徴
ASM1	1986	C, N	従属栄養生物 硝化細菌	タスクグループによって提案された初めてのモデル
ASM2	1995	C, N, P	従属栄養生物 硝化細菌 りん蓄積生物	有機物・窒素に加えてりんの除去を予測するモデル
ASM2d	1999	C, N, P	従属栄養生物 硝化細菌 りん蓄積生物	脱窒反応時にりん吸収が生じることを再現したモデル
ASM3	1999	C, N	従属栄養生物 硝化細菌	様々な事象のモデルを付加してゆくためのコアモデル。

ASM2d は、有機物、窒素、りん除去の予測を対象とした ASM2 に対して、りん蓄積細菌（PAO）の脱窒能力を付加したモデルで、これにより無酸素条件下でのりんの挙動をより臨機応変に表現できるようになった。加えてパラメータのデフォルト値が一部変更されているものの、その他の基本的な内容は ASM2 と同一である。本調査では、現在最も広く用いられている ASM2d を用いることとした。

2.2 活性汚泥モデル活用の現状と適用性

近年、複数の自治体が ASM を活用した研究成果を公表している。民間企業においては施設管理の現場で ASM を組み入れた維持管理システムの開発が行われており、GUI（グラフィックを多用した表示や入力的方式、グラフィカル・ユーザー・インターフェイス）を工夫した維持管理ソフトとした製品も複数存在する。各自治体による活用事例として、以下のようなものがある。

■A県：A県流域下水道の既存系列のモデルの構築および、ASM を用いた運転条件の効率化を検討した。この結果、目標処理水質が満足でき、かつ効率的な運転条件を検討することが可能となった。

■B市：運転支援システムの一つとして ASM を用いた担体利用 A₂O 法の運転シミュレーターをメーカーと共同開発し、その適用性を検討した。この結果、担体利用により窒素、りんの安定的な除去が机上で確認された。また、適正な DO 濃度管理、硝化液循環量の設定や、返流水負荷の削減効果の評価など、処理場における窒素・りん除去だけでなく、省エネ・省資源の向上を目指した運転管理手法の改善にも使用している。

また、活用している自治体では、今後の方向性として、以下のよう

■処理水質の異常時の原因究明やその対策の検討、あるいは、職員の生物処理技術に対する教育、研修にも組み入れたい。

■下水道事業においても経験豊富な技術者が次第に退職時期を迎えるため、技術の継承が危惧されている。ASM は今後失われていく「経験と勘」を補うものとなる。

■ASM は、施設設計でも、従前の安全率を考慮した設計手法から、生物反応速度式や物質収支で化学工学的に処理を把握し、さまざまなシミュレーションに基づき、必要最小限で効率的な施設規模とする設計手法へと転換するツールの一つとしても有効と考えられる。

ASM の適用範囲および予測制約については次のような項目がある（表2、表3）¹⁾²⁾。

表2 ASMの用途

項目	用途例
設計支援	①処理方式の選定 ②増設、改造計画の策定 ③容量計算 ④ポンプ類の仕様検討（ポンプ流量の上・下限値の検討など） ⑤計装・制御設備の仕様検討 ⑥その他（流量調整池の必要性検討など）
運転管理支援	①機能解析（現行運転方法における現象推定など） ②最適化検討（現行の運転方法（流入条件など）の最適化検討など） ③異常時対応（流入水量増加に対する対応策の検討など）
既存手法の検証・見直し	①諸元値、経験式、安全係数などの検証
新規処理プロセスの開発	①開発プロセスの現象把握 ②開発プロセスの特性把握 ③設計・運転方法の検討

表3 ASMの制限事項

	予測が不可能/困難な事項	理由
①	亜硝酸性窒素濃度の予測	硝化や脱窒が一段階の反応プロセスとして記述されている（NO ₂ -NとNO ₃ -Nの区別がない）
②	活性汚泥の固液分離特性の予測	フロックの性状など活性汚泥の固液分離特性に関与する因子が考慮されていない
③	初期吸着に係る予測	吸着過程をモデル化していない
④	流入水質が一般的な家庭排水とは異なる施設の予測	家庭排水を主体にした処理プロセスへの適用を前提としている

2.3 モデルの構造

2.3.1 構成成分

ASM2d では、有機物の分解、硝化および脱窒反応、りんの放出と摂取過程をモデル化している。表4に、ASM2d の解析対象物質を示す。反応過程における物質変換量を正確に把握するために、全ての有機物濃度を COD_{Cr}（重クロム酸カリウム法）で表示している。また、生物反応プロセスに対応して、有機物を生物難分解性成分、易・速分解性成分、揮発性有機酸などに分類している。窒素・りんについては、それぞれ表4の通りである。

微生物については、従属栄養細菌（好気条件下では酸素呼吸を、無酸素条件下では脱窒を行う；りん蓄積細菌を除く）、独立栄養細菌（硝化細菌）、りん蓄積細菌の3種類に分けて、その生体量を COD_{Cr} で表示している。これらの成分のほか、りんの放出及び摂取に関わる成分としてりん蓄積細菌の細胞内貯蔵有機物、各反応条件の指標として溶存酸素とアルカリ度、凝集剤の添加によって生成される成分として水酸化沈殿物とりん酸塩沈殿物がある。

表4 ASMの構成成分

NO	記号	項目	NO	記号	項目
1	S _{O2}	溶存酸素	11	X _S	生物非分解性の異化能有機物
2	S _F	酸分解可能な易分解性有機物	12	X _{AUT}	独立栄養細菌(硝化細菌)の菌体量
3	S _A	酸分解から生成される有機物	13	X _H	従属栄養細菌(他栄養細菌)菌体量
4	S _I	生物非分解性有機物	14	X _{PO}	リン蓄積細菌の菌体量
5	S _{NH}	アモニア態窒素	15	X _{FP}	リン蓄積細菌の細胞内蓄積ポリリン酸
6	S _{NDB}	硝酸・亜硝酸態窒素	16	X _{HA}	リン蓄積細菌の細胞外貯蔵有機物
7	S _e	溶存窒素	17	X _{TSS}	TSS
8	S _{Fe}	オルトリン酸態りん	18	X _{MCH}	水酸化鉄(Fe(OH) ₃)
9	S _{ALK}	アルカリ度	19	X _{FeP}	りん蓄積細菌(FePO ₄)
10	X _I	生物非分解性の異化能有機物			

2.3.2 パラメータ

ASM2dのパラメータはその性質によって、組成変換係数、化学量論係数と反応速度定数に分けることができる(表5)。化学量論係数は、各構成成分と各反応プロセスのマトリックスで表現され、組成変換係数および反応速度定数から計算される。組成変換係数は流入水分画でのフィッティング作業において、化学量論係数の一部定数と反応速度定数はキャリブレーション作業において、モデル構築時に任意に設定を行う。ただし、各パラメータにはデフォルト値が与えられており、キャリブレーションによる任意設定の対象となるのは通常は一部のみである。

表5 ASMのパラメータ例

パラメータ	説明	例
組成変換係数	有機成分に対するC・N・Pの各含有率	i _{NXS} X _S の窒素含有率
		i _{PSF} S _F のりん含有率
		i _{TSSXS} X _S のTSS当量
化学量論係数	反応プロセスの速度式に対する構成成分の生成速度係数	Y _H X _H の増殖収率 f _{XI} 細菌が自己分解によりX _I に変換される割合
反応速度定数	反応速度に関する定数(飽和・阻害定数、速度など)	μ _H X _H の最大比増殖速度 K _{NH4} X _{AUT} のS _{NH4} に対する飽和定数

2.3.3 反応プロセス

ASM2dに記述されている反応プロセスは表6に示す5つのグループに分けられる。

表6 ASMの反応プロセス

反応プロセス	例
加水分解	嫌気・無酸素・好気各条件下での有機物の加水分解
従属栄養細菌(X _H)に関する反応	有機物分解に伴う増殖(好気性、無酸素性)、死滅 醗酵による増殖
リン蓄積細菌(X _{PAO})に関する反応	PHA、ポリリン酸の蓄積、分解 PHA分解に伴う増殖(好気性、無酸素性)、死滅
硝化細菌(X _{AUT})に関する反応	硝化細菌の増殖、死滅
凝集剤による反応	凝集沈殿、再溶解

反応プロセスの例として、硝化細菌の増殖反応の速度式を式(1)に示す。また、各構成成分の生成速度は式(2)のように表される。

$$\mu_{AUT} = \frac{S_{O_2}}{K_{O_2} + S_{O_2}} \cdot \frac{S_{NH_4}}{K_{NH_4} + S_{NH_4}} \cdot \frac{S_{PO_4}}{K_P + S_{PO_4}} \cdot \frac{S_{ALK}}{K_{ALK} + S_{ALK}} \cdot X_{AUT} \quad (1)$$

$$\gamma_i = \sum v_{ji} \cdot \rho_j \quad (2)$$

ここで、γ_iはモデル構成成分iの生成速度(g/m³/d)、γ_jは反応プロセスjに対して構成成分iの生成速度係数(化学量論係数)、ρ_jは反応プロセスjの反応速度である。

3 活性汚泥モデルの構築

ASMの実務利用手順については「評価書」に詳細な解説がある。本調査のモデル構築作業については、「評価書」記載の手順に準拠して行った。本調査の構築作業フローを図1に示す。

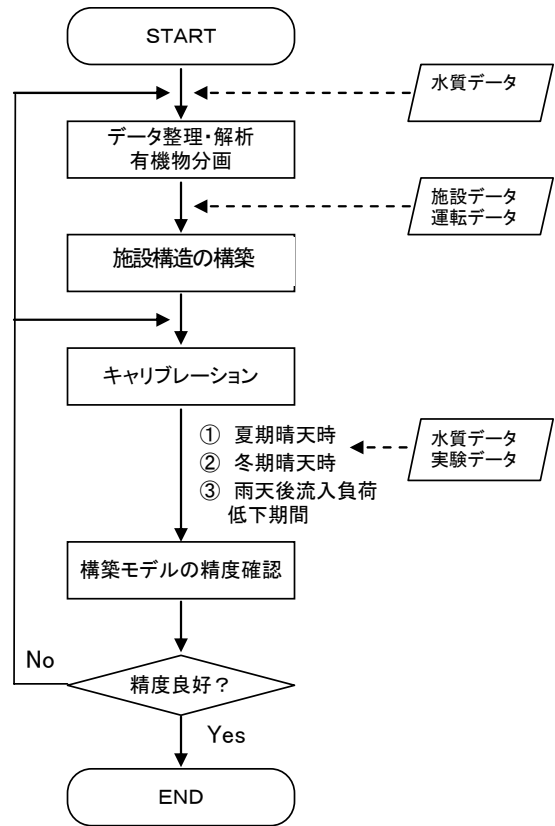


図1 ASM構築フロー

3.1 構築対象・条件

3.1.1 構築対象

今回ASMの構築を行う対象施設は、本市既存A₂O法の4施設とした(表7)。H15~17調査を実施した神奈川4系に加え、流入水質特性(合分流、負荷の違い)を考慮して他3施設を対象とした。

表7 ASM構築対象施設

センター	系列名	合分流	流入負荷	風量制御
1 神奈川	4系	合流	低	DO一定
	雨天時循環停止+水量増加運転を実施 好気槽各セルDO値のバラつきが大きい			
2 北部第1	6系	合流	低	風量一定
	硝化抑制運転(風量不足およびりん除去向上のため) 負荷変動による好気槽DO濃度の変化が大きい			
3 港北	北側1系	合流	高	DO一定
	雨天時に一時循環率を抑制 雨天時の水量変動が大きい			
4 港北	南側4系	分流	低	DO一定
雨天時に一時循環率を抑制 雨天時の水量変動は小さい				

計算ソフトには、AQUASIM ver.2.1を用いた⁴⁾。AQUASIMは、スイス連邦科学技術協会(EAWAG)が開発したASM計算ソフトで、ASMの学術研究用途として研究機関・事業体対象に廉価で販売されている。国内で市販されている他のASMソフトと比較し、GUIがシンプルで言語が英語であるため、初心者には扱いにくい。機能的には問題なく使用できる。

3.1.2 構築目的と精度目標

構築目的・用途によって、求められるシミュレーション精度レベルが変わり、構築に必要なデータの質・量が異なってくる。従って、ASM 構築を行う際には、その目的・用途を明確にしなければならない。本調査において ASM を構築する目的は、以下の点である。

(1) 設計方法(反応タンク容量計算)の妥当性の机上検討

A₂O 法反応タンク容量計算法について、計算結果の妥当性を ASM で確認する。(実際の施設設計への適用は考慮しない)

(2) 運転方法の検討(りん除去安定化対策など)

神奈川 A₂O 法施設において、りん除去安定化には、処理水量増加や降雨後の循環ポンプ停止が有効であることが実証されている⁵⁶⁾。しかし、この結果の他施設への適用性は未検証であり、また除去向上のメカニズムについては十分に理解されていない。今回構築するモデルを用いて、そうした課題について検討を行う。

3.1.3 構築条件および目標精度

上記目的達成のための構築条件とシミュレーション精度目標は、次のように設定した。

(1) 設計方法の机上検討

高低水温期における流入負荷一定条件(夏季・冬季晴天時を想定)の処理水質および各セル内水質について、高い精度を確保する。

(2) 運転方法の検討

(1)に加え、流入負荷変動条件(雨天後負荷変動期間を想定)について処理水質変動の方向性を再現可能。

設計方法の検討には、冬季晴天時水質における十分な精度が求められる。本調査では、今後の汎用性も考え、各対象施設について夏季・冬季晴天時の2通りの水質条件下においてモデル構築を行った。設計の検討には嫌気・無酸素・好気各槽の必要 HRT を求める必要があるため、処理水質と同時に反応タンク内各セル水質について十分な精度が得られることを目標とした。

一方、運転条件の検討については、様々な流入水質条件下において、HRT・循環返送率・DO 濃度など処理条件を変更した場合の、処理水質変動の方向性を確認できる必要がある。A₂O 法処理条件に

おける最大の懸案は雨天後の運転管理である。そこで、各施設において、雨天後(10mm/d以上の降雨)の流入負荷変動期間の各データを収集し、その期間における処理水質変動が概ね再現できるレベルを目標精度とした。

3.2 構築作業

3.2.1 収集データ

上記目的・目標を達成するために収集し、構築に用いたデータ一覧を表8に示す。水質・実験データは、夏季・冬季晴天時および雨天後数日間について、各施設の高度処理機能調査にあわせて反応タンク周辺および各種実験で採取したデータを用いた。

3.2.2 流入水有機物分画

流入水中の物質を表4の各構成成分に分解する有機物分解作業は、シミュレーション結果に非常に大きな影響を与える。有機物分画方法には、呼吸速度試験(OUR法)を用いる方法とオランダ応用水研究財団(STOWA)の方法が知られている。本調査では、精度レベルおよび今後の汎用性を鑑み、精度は劣るものの水質分析結果だけで有機物分画を行えるため実務利用に適した STOWA 法をベースとして有機物分画を行うこととした。

本調査における分画方法を表9に示す。なお、BCOD 値は、各センター流入水について究極 BOD 試験を実施し、その値を用いて推定した(算出方法は、文献²⁾参照)。また、各成分値を求めた結果、X_Iがマイナスとなる場合には、各センターの他データを用いて補填した。

分画作業は、3.1.3の各条件における流入水について行った。各施設の分画結果を図2に示す。

表9 有機物分画方法

項目	方法
S _I	処理水S-COD _{Cr} の水質分析結果×0.9
S _A	流入水の有機酸濃度から設定
S _F	流入水のS-COD _{Cr} (0.1μmろ過)を「S _F +S _A +S _I 」とし、S _A とS _I を差し引いて算出
X _S	流入水のBCODを推定し、それを「X _S +S _F +S _A 」とし、S _F とS _A を差し引いて算出
X _I	流入水のT-COD _{Cr} を全有機物とし、他を差し引いて算出
X _H X _{AUT} X _{PAO} X _{PHA}	ゼロとみなす

表8 収集データ一覧

	方法	種類	用途
① 施設データ	設計諸元に準拠	各セル容量、槽配分(嫌気・無酸素・好気)、循環ポンプ、返送汚泥ポンプなど	・施設構造モデル構築
② 水質データ	日常試験データ(コンポジット試料)	流入水質、処理水質など	・参考データ
	各施設の処理機能調査における各種データを使用(全てスポット採水)	流入水質(BOD、COD、窒素、りん、SS、有機酸、DO、水温など)	・流入水分画 ・キャリブレーション(組成変換係数設定) ・シミュレーション計算
	・晴天時1日×2セット	槽内水質 各セルについて実滞留時間間隔で採水・測定(窒素、りん、DO、水温など)	・キャリブレーション ・シミュレーション計算(各セルDO設定)
	・降雨後10~20日間のうち4~5日×1セット(調査日以外については、他調査日データ代用または線形補完)	処理水質(COD、窒素、りん、DO、水温など) 汚泥データ(SS、TN、TPなど)	・キャリブレーション ・キャリブレーション(余剰汚泥量の調節)
③ 実験データ	調査日にりん放出回分実験を実施	NO ₃ N、PO ₄ P、有機酸	・キャリブレーション(Y _{PO4} の設定)
	調査日に流入水BOD経日変化	BOD _{1~15}	・流入水有機物分画(BCODの推定)
④ 運転データ	水質調査期間中の実施データ	処理水量、循環率、返送率、余剰汚泥量、降雨量など	・シミュレーション計算など

3.2.3 施設構造の構築

施設の槽配分や循環ポンプなどの施設構造は、設計諸元に基づき構築した。ASM では通常、1セルごとに計算が行われる。今回構築したモデルでは、状況に応じて実際の1セルを複数に分割させることで、再現性の向上を図っている。また、活用の幅を広げるために、循環水の投入セルを複数選択できるように設定した。各施設構造モデルを図3に示す。

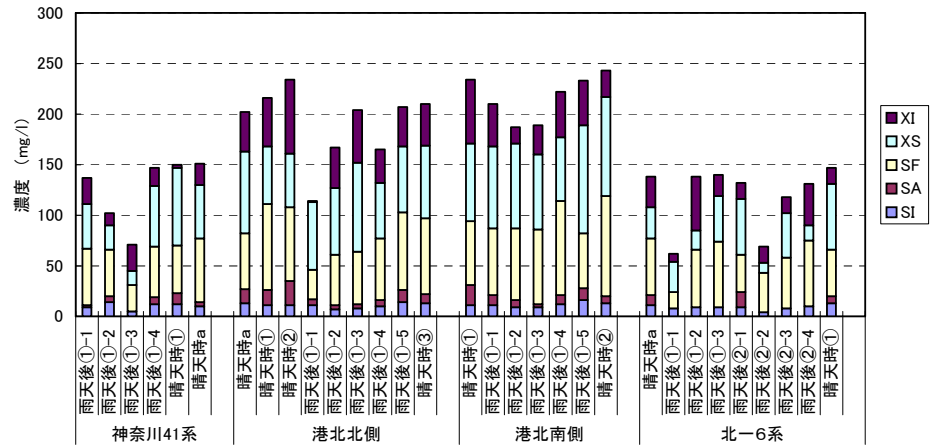


図2 有機物分画結果

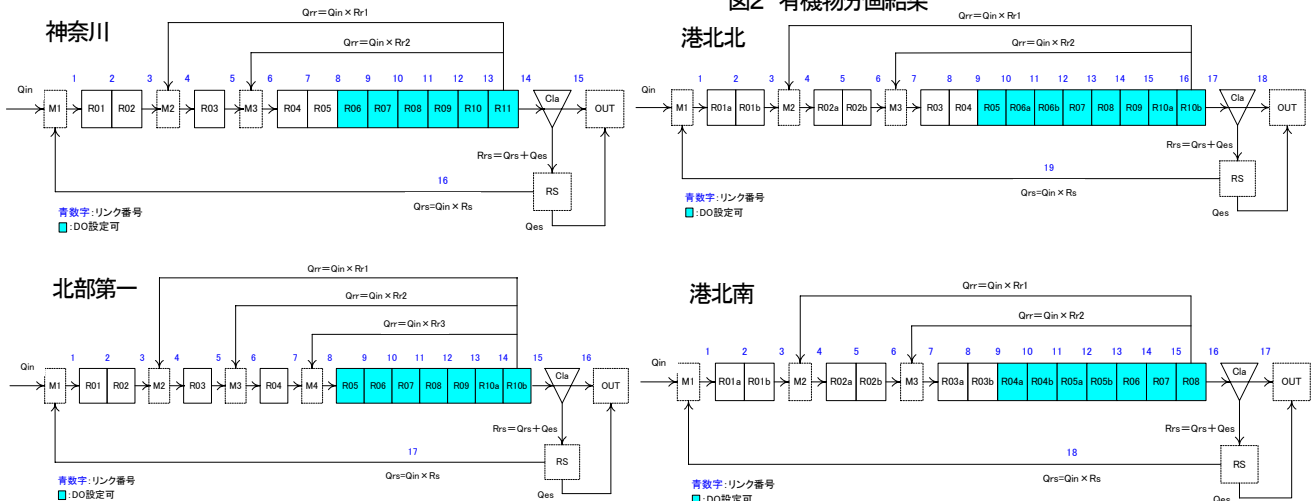


図3 各施設構造モデル

3.2.4 キャリブレーション

各種実測値を良好に再現するためには、シミュレーション結果が対象施設の実態に合致するように、各パラメータ数値を調整することがふつうであり、そのための一連の作業をキャリブレーションと呼ぶ。しかし、むやみにパラメータ数値を変更しては、実用の際に不具合が生じる。パラメータ調整の際には、あらかじめ方針を定めると同時に、理論的な根拠に基づいた変更を行うことが望ましい。本調査におけるキャリブレーション基本方針を以下にまとめた。

(1) 作業の順序

各施設とも、まず晴天時データでキャリブレーションを実施し、その調整結果をベースとして雨天時データを用いたキャリブレーションを行った。

(2) パラメータ調整

晴天時(夏季、冬季)および雨天時について調整パラメータ数と方向性が出る限り合致するように調整を行った。

(3) 固形物のキャリブレーション

X_1/X_5 比は、STOWA 法による分画の事例を参考に、 X_1 の全体に占める割合が10~24%の範囲に入るように調整を行った。

(4) リン除去のキャリブレーション

リン除去のキャリブレーションは、以下の手順で実施した。

- ① Y_{PO4} の調整(回分試験結果を参考にしながら調整)
- ② η_{fe} , η_{NO3} の調整
- ③ q_{PHA} の調整

晴天時キャリブレーションは、90日間同条件で計算した結果と実測値を比較し、パラメータを調整した。雨天時は、まず期間当初の流入水質で90日間馴致し、その後各日の水量・DO・流入水質各データを入力し、晴天時調整後の各パラメータを用いてシミュレーションを行った。

各条件の調整パラメータの一覧を表10に示す。施設ごとに各条件で大差なく設定を行うことができた。

3.2.5 シミュレーション精度の確認

晴天時条件および雨天後条件のキャリブレーション結果(計算値と実測値の比較)を図4および図5に示す。

神奈川、港北北、港北南については、3.1.3で設定した精度レベルを満足していた。北部第一については、雨天時期間の処理水 NH_4-N 濃度の残存が再現できていない。当系列では調査期間中、りん除去安定化のため硝化を抑制気味にすると同時に、風量一定運転を行っていた。このため、好気槽 DO 濃度は晴天時にはほぼ $1mg/L$ 以下と非常に低く、硝化は最終セルのみで行われている状況であり、降雨直後の負荷低下時には極端に高くなる傾向にあった。このような背景から、北部第一については DO や NH_4-N などベースとなる実測値の信頼性が低い可能性があり、これがシミュレーション誤差の拡大につながったと考えられる。ただし、 NO_3-N と PO_4-P については概ね傾向はとらえており、今後の検討作業に用いる分には問題ないと判断した。

表10 調整パラメーター一覧

	デフォルト (20℃)	神奈川		港北北側		港北南側		北一		備考
		夏期	冬季	夏期	冬季	夏期	冬季	夏期	冬季	
μ_{AUT}	1.0	1.2	1.5	1.2	1.2	1.0	1.2	1.5	1.2	XAUTの最大比増殖速度
η_{HNO_3}	0.8	0.9	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	XHの無酸素条件下での増殖(脱窒)における増殖速度減少係数
Y_{PO_4}	0.4	0.65	0.65	0.15	0.15	0.3	0.3	0.35	0.35	XPHAの貯蔵に必要なSPO4放出量
η_{NO_3}	0.6	0.6	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	無酸素条件下のXSの加水分解速度減少係数
η_{fe}	0.4	0.4	0.2	0.2	0.2	0.15	0.15	0.2	0.2	嫌気条件下のXSの加水分解速度減少係数
q_{fe}	3.0	3.0	1.5	1.0	1.0	1.5	1.5	1.5	1.5	XHによる最大比発酵速度
q_{PHA}	3.0	5.0	5.0	3.0	3.0	3.0	2.0	3.0	3.0	XPHAの最大比貯蔵速度
q_{pp}	1.5	2.5	3.0	1.5	1.5	2.5	1.5	1.5	1.5	XPPの最大比貯蔵速度

デフォルト値よりも大

デフォルト値よりも小

雨天後シミュレーションに採用

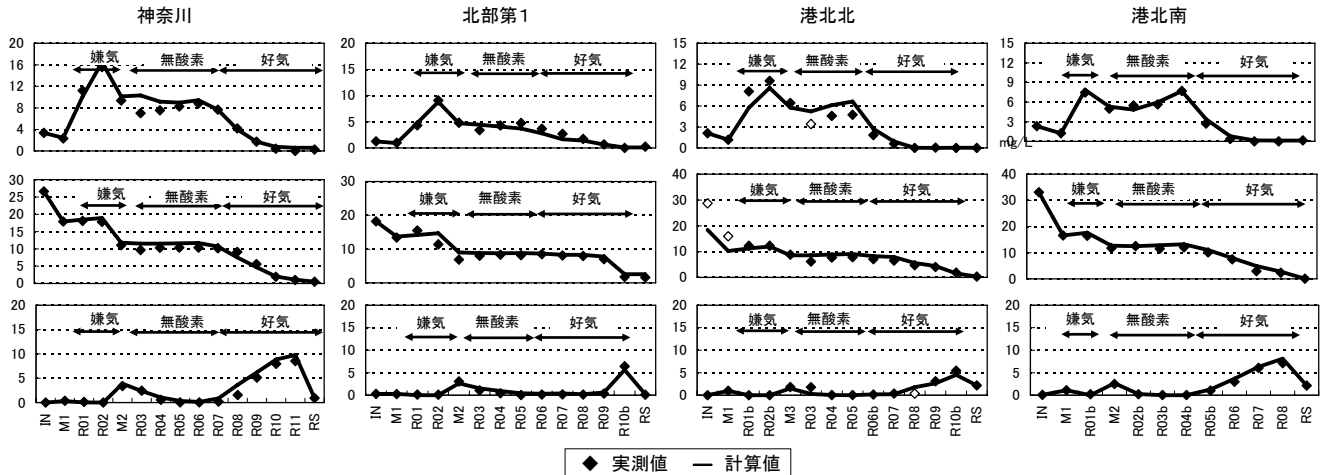


図4 キャリブレーション結果(夏季晴天時・槽内水質)

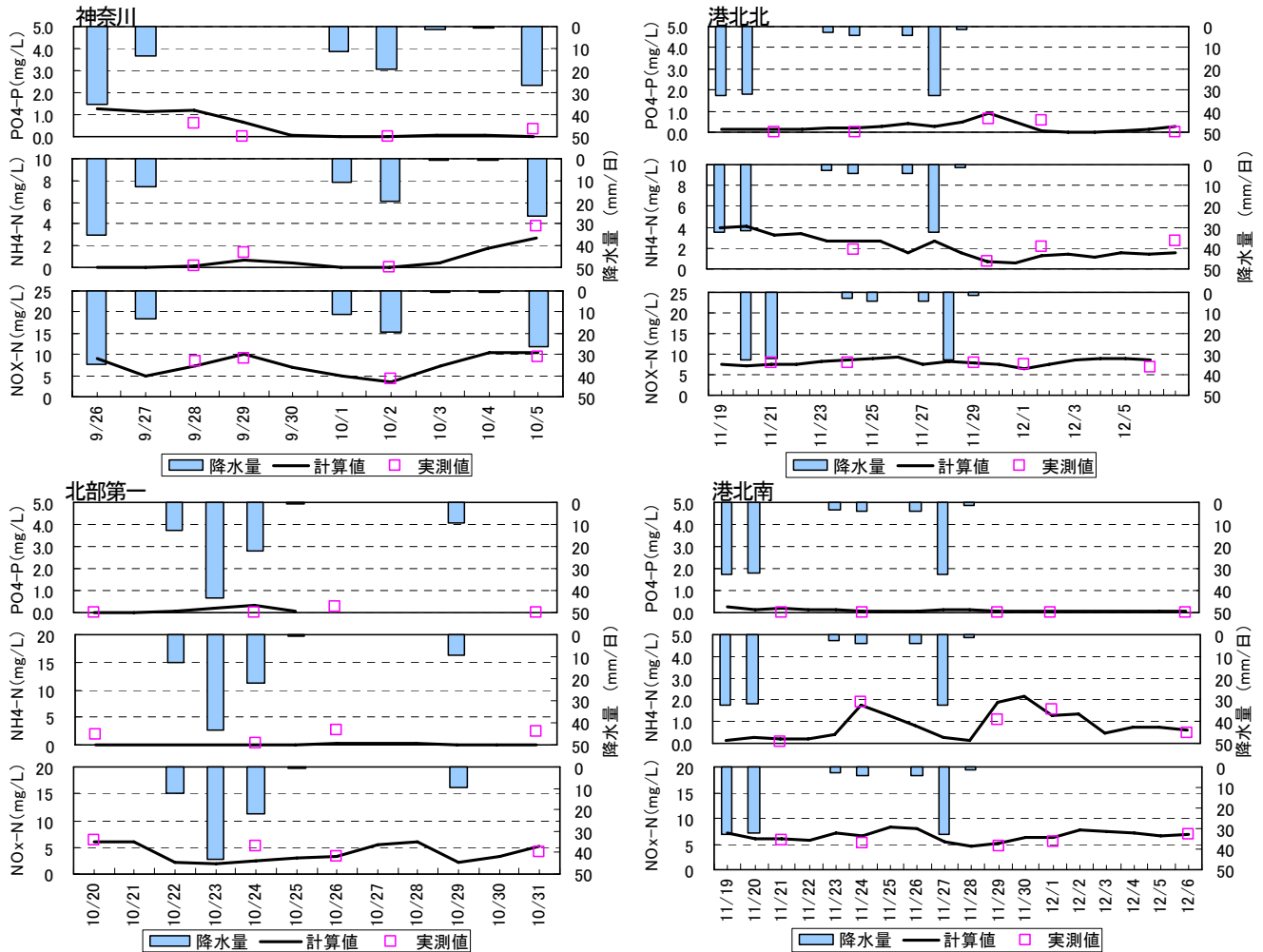


図5 キャリブレーション結果(雨天時)

4. 構築モデルの活用(ケーススタディ)

今回構築したモデルは、次年度調査において実際に活用していく予定である。本年度調査では、活用方法・範囲の評価を兼ねて、以下の2ケースについて、構築モデルを用いて簡単な検討を行った。

- ① HRT と窒素・りん除去の関係 (港北南)
- ② 好気槽 DO と窒素・りん除去の関係 (北部第一)

なお、神奈川 4 系における雨天時循環停止+水量増加運転のASMでの検討は、平成17年度調査のなかで実施している³⁾。

4.1 HRT と窒素・りん除去の関係(港北南)

港北南 A₂O 法施設は、HRT が12時間程度とかなり余裕のある運転となっている。ここでは、HRT を短縮した場合の窒素・りん除去への影響について検討を行った。

4.1.1 シミュレーション条件

シミュレーション条件を図6に示す。冬季晴天時調査の再現計算結果を初期状態として、HRT を8~11時間の条件でシミュレーションを行った。また、当施設ではりん除去安定化や汚泥解体防止のため、好気槽 DO 濃度を1mg/L以下と低く運転している。このため、HRT を短縮した場合は硝化不足が想定されることから、HRT8時間および11時間条件について、好気槽 DO 濃度を各セル3.0mg/Lとした条件についても行ったシミュレーションを行った。

なお、シミュレーションは初期条件(ケース4)で90日間馴致を行い、その後各ケースに条件変更して30日間計算した。また、MLSS濃度は2000mg/L程度となるように余剰汚泥量を調整した。

4.1.2 シミュレーション結果と考察

シミュレーション結果による、処理水 NH₄-N、NO₃-N、PO₄-P 各濃度、好気槽末端の硝化細菌(X_{AUT})、りん蓄積細菌(X_{PAO})、PHA量の経日変化を図7に示す。

	HRT (hr)	DO	処理水量(m ³ /日)
ケース1	8	実測値	19,440
ケース2	9	実測値	17,280
ケース3	10	実測値	15,552
ケース4(現状)	11	実測値	14,208
ケース5	8	一律3.0mg/L	19,440
ケース6	11	一律3.0mg/L	14,208

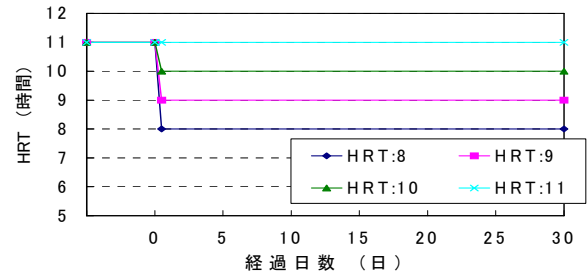


図6 シミュレーション条件(港北南)

DO 実測値条件では、HRT の短縮に伴い硝化が抑制された。一方でDO を上げた場合にはHRTに関わらず硝化は十分進行していた。また、いずれのケースでもりん除去は良好であった。

DO 実測値条件でHRT が短いケースではX_{AUT}が経日的に減少している。DO を上げたケースでは逆に増加していることから、X_{AUT}の減少は硝化不足による増殖抑制の影響が大きいといえる。DO を上げた場合、HRT8時間と11時間ではX_{AUT}に大きな違いはないことから、HRT8時間としても、必要A-SRTは確保されていると考えられる。

X_{PAO}、X_{PHA}はHRT が短いほど増加する傾向を示していた。DO 実測値条件においては、硝化の抑制→嫌気槽での脱窒量の低下→脱窒によるS_A(有機酸)消費量減少→X_{PHA}合成量増加→X_{PAO}の増加という構図が考えられる。一方で、DO を上げるとX_{PAO}、X_{PHA}ともに減少した。これは硝化進行による嫌気槽流入NO₃-N濃度の上昇およびDO 上昇による好気槽でのX_{PHA}分解促進が影響していると考えられる。

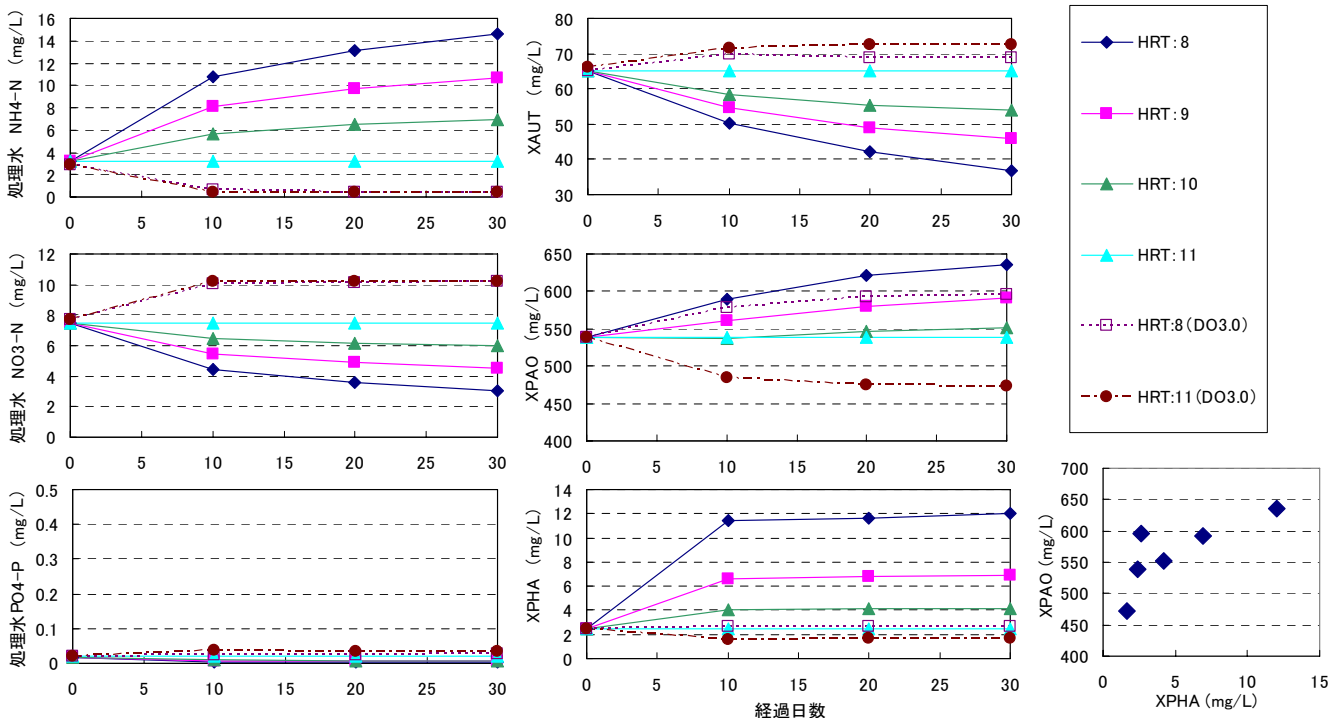


図7 シミュレーション結果(港北南)

以上の結果から、当施設では好気槽 DO 濃度を確保されれば HRT を 8 時間程度に短縮しても窒素・りん除去性能は確保できると推定できた。DO を上げ硝化を促進することで、 X_{PAO} 量は低下するものの、りん除去に影響を及ぼすほどではなかった。

実施設で処理水量を増やし HRT を短縮するには、大腸菌など他水質項目、汚泥性状、最終沈殿池負荷等に注意する必要がある。しかし、本結果から PHA 合成量を増やす方向に運転条件を変更すれば PAO 量が増やしりん除去が向上する可能性が示唆され、そのための方策のひとつとして HRT の短縮があるといえる。実際に、神奈川 4 系では HRT 短縮によりりん除去が安定化している⁵⁶⁾。何らかの制限により処理水量が増やせない施設においてりん除去向上を図るには、PHA 量増加に寄与する別の条件を、ASM を用いて検討することは有効だといえる。

4.2 好気槽 DO と窒素・りん除去の関係(北部第一)

北部第一 6 系では、設備的な問題で十分な送風量が確保できず、晴天時には好気槽 DO がほとんどのセルで 0.5mg/L 以下であり、硝化がほとんど進行していない状況であった。ここでは、DO 濃度を上げた場合の処理水質への影響および活性汚泥性状について構築モデルを用いて検討した。

4.2.1 シミュレーション条件

シミュレーション条件を図 8 に示す。晴天時調査結果の好気槽各セル DO 濃度は、末端セル以外 0.2mg/L 未満であった。本検討では、各セル DO を一律に 0.1~2.0mg/L 上げる操作を行い、シミュレーションを行った。4.1 と同様に、

	DO
ケース1(現状)	実測値
ケース2	実測値+0.1mg/L
ケース3	実測値+0.3mg/L
ケース4	実測値+0.5mg/L
ケース5	実測値+1.0mg/L
ケース6	実測値+1.5mg/L
ケース7	実測値+2.0mg/L

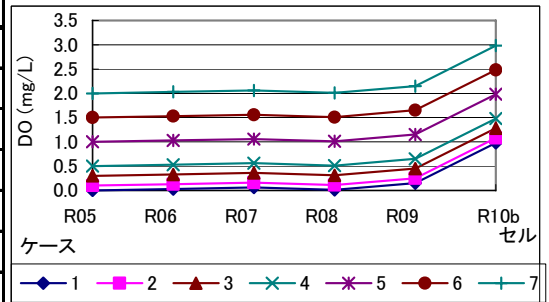


図8 シミュレーション条件(北部第一)

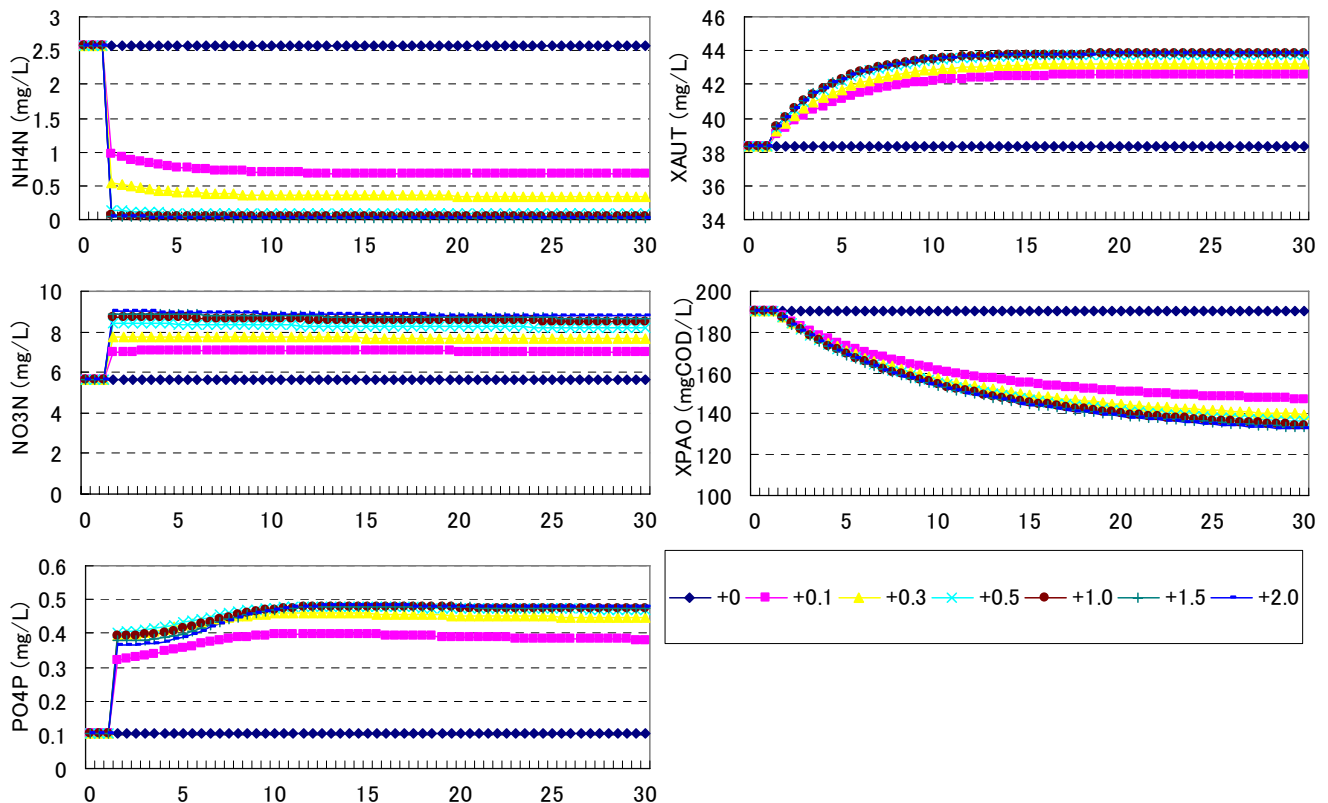


図9 シミュレーション結果(北部第一)

まず初期条件(ケース1)で90日間の馴致を行い、その後 DO 濃度を変更して30日間計算した。

4.2.2 シミュレーション結果と考察

シミュレーション結果による、処理水 NH_4-N 、 NO_3-N 、 PO_4-P 各濃度、好気槽末端の X_{AUT} 、 X_{PAO} の経日変化を図 9 に示す。

DO を上げた効果は直ぐに現れ、1 日経過後には硝化が十分に進行し、30 日が経過しても状況は大きく変化しなかった。DO 上昇幅が 0.1、0.3mg/L では若干 NH_4-N が残存するものの、1mg/L 未満に抑えられていた。また、硝化を促進したため、 X_{AUT} は上昇した。

しかし、硝化促進に伴い、 PO_4-P が上昇し、 X_{PAO} が減少した。硝化の促進→嫌気槽での脱窒量の増加→ S_A (有機酸)の減少→ X_{PAO} の減少という構図が考えられる。4.1 の港北南の事例と比較してりん除去変動が大きいのは、活性汚泥中の X_{PAO} 存在量の違いと考えられる。このような、流入水質や運転条件による各種細菌量変化の推定が行えることは、ASM の大きな利点だといえる。

5. まとめ

5.1 構築モデルの適用範囲および評価

本調査において構築したモデルは、概ね目的に合致した良好な再現精度が示されており、様々な事例への活用が期待できる。

「評価書」には、ASMの実務用途例と必要とされるキャリブレーションレベルについての解説がある。本調査におけるキャリブレーションレベルは概ね「C~D」に該当するが、実務への適用の際にはモデル構築条件などその特性をよく把握しておく必要がある。今回構築したモデルの特性を表11に、設計・運転管理支援における適用項目を表12にまとめた。

本モデルでは処理水質の正確な予測は期待すべきではなく、モデルの計算結果をそのまま施設制御や設計値として使うことはできない。設計および維持管理における条件設定の場面において、ある変更が処理水質や活性汚泥性状に与える影響の方向性を把握するのに適している。

設計支援ツールとしての利用は、反応タンク容量計算方法の机上検討、槽配分の最適化や兼用槽の設定、各ポンプ能力の設定といった場面での利用が想定できる。ただし、容量計算結果の机上検証や各種安全率設定の検討といった、処理水質の高い再現精度が求められるケースに使用する場合は、条件設定や適用範囲に十分注意しなければならない。

表11 構築モデルの特性

	特性
施設	A ₂ O法4施設 流入水質(合分流・負荷)が異なる施設を選定
データセット	各施設について、下記3セットを設定 ・夏季晴天時 ・冬季晴天時 ・雨天時
精度	・晴天時...処理水質・各セル水質を高精度で再現 ・雨天時...一定期間における処理水質変動の方向性を再現
モデル特性	
流入水質	流入負荷の高い時間帯(AM10:00)のスポット採水データを使用
日間変動	流入水質の日間変動は考慮していない (24時間均等水質が流入するものと仮定)
反応タンクDO	各セル固定(実測値から変更可能)
最終沈殿池反応	脱窒量の設定可能
他センターへの流用	定性的利用であれば、流入水有機物分画データがあれば流用可能 (施設構造モデルは、必要に応じて変更可能)

表12 構築モデルの適用項目(設計・運転管理支援)

	用途・内容	評価項目	留意点(追加が必要なデータ・プロセスなど)
設計支援	処理方式の選定		
	・複数の処理方式の相対比較	処理水質 必要酸素量 汚泥発生量	施設構造モデルを改造することで可能
	・処理方式候補について、目標処理水質への適合性の評価	処理水質	
	増設・改造計画の策定		
	・既存施設の処理能力(水量、負荷)の評価	処理水質 必要酸素量	
	・処理水質高度化・低コスト化のための施設改造方法の検討	処理水質 必要酸素量 汚泥発生量	
	・施設改造・増設案の評価	処理水質 反応タンク水質 必要酸素量 汚泥発生量	
	容量計算		
	・反応タンク容量削減、限界設計の検討	処理水質 必要酸素量	
	・反応タンク分割(槽配分、兼用槽の必要性)の検討	処理水質 反応タンク水質 必要酸素量	
	・容量計算における諸元値や安全係数の検証	処理水質 必要酸素量 汚泥発生量	
	・りん除去性能の予測	処理水質 PAO量	
	・汚泥発生量(SRT)の検証	汚泥発生量 SRT	
	・必要酸素量の検証	必要酸素量	散気装置能力(KLa)などの設定が必要
	付帯設備等の仕様・必要性検討		
・ポンプ流量の上・下限値の検討	処理水質		
・最初沈殿池の必要性の検討	処理水質 必要酸素量 汚泥発生量	生下水の有機物分画が必要	
・りん除去のための凝集剤・有機物源添加設備の必要性の検討	処理水質	添加量の定量的評価は困難	
運転管理支援	機能解析		
	・現行の運転方法における処理プロセス現象の推定	処理水質 反応タンク水質 各種細菌量	
	・処理可能水量の推定	処理水質 必要酸素量	最終沈殿池負荷に関する評価が別途必要
	最適化検討		
	・現行の運転方法の高度化・最適化検討	処理水質 必要酸素量 汚泥発生量	運転条件変更による、処理水質向上および運転コスト低減の可能性を検討する 例)HRT、返送・循環率、MLSS濃度(余剰汚泥引抜量)、好気槽DO濃度など
	・雨天時の最適な運転方法の検討	処理水質 必要酸素量 汚泥発生量	本調査で採取した雨天時データセットについて可能 雨天時データセットの追加が望ましい
	異常時対応		
・流入水量・負荷変動に対する対応策の検討	処理水質 必要酸素量 汚泥発生量	工事等による各系列の水量変動を想定 日間負荷変動に関する検討は現状では困難	
・処理悪化の原因解析		処理悪化時の各種データ(流入・処理水質、反応タンクDOなど)が必要	
・汚泥系返流水受け入れに対する対応策の検討		返流水受け入れ時の流入水有機物分画データが必要 (返流水の割合が極端に高い場合は不可)	

運転管理の場では、処理限界の把握、異常時の対応、施設設備的制限を超える運転条件といった、実施設では検討の難しい事例について、机上で検討することで事前に効果やリスクを想定することができる。また、新たな運転管理手法・設備などを導入する際の導入効果予測にも使用できるだろう。今回構築した施設とは流入水質や施設構造が異なる施設においても、流入水分画データを留意すれば、定性評価の範囲であれば十分に利用価値がある。

一方、研究開発や教育研修用としては、利用方法次第では非常に有効なツールとなりえる。ASM を活用することにより、これまで培った経験的維持管理プロセスについて、ASM を用いて合理的・定量的な表現に翻訳することができれば、技術職員のプロセス理解の促進を図ることが期待できる。

5.2 今後の課題

ASM の有効活用により、上述のような様々なメリットが見込めるものの、実務レベルでの利用促進には、多くの課題がある。本調査の目的を超えて、さらに ASM の活用範囲を広げる場合の課題を以下にまとめた。

① 精度の向上

ASM の活用範囲を広げるには、更なるシミュレーション精度の向上を図ることが望ましい。今回構築したモデルの活用範囲は、現状と比較して水質がどう変化するかといった、相対的評価を行う範囲に留まる。また今回の調査では、出来る限り、晴天時、雨天時共同パラメータで再現できるモデルの構築を目指した。しかし、各パラメータの値について、文献などで様々な値が報告されていることを勘案すると、同一施設でも、時期、天候によってそれら値が異なる可能性は十分に考えられる。今後さらに定量的な予測を行う場合には、各種調査データを蓄積し、流入水有機物分画およびキャリブレーション精度を向上させていく必要がある。

② 技術者の養成

ASM 実務利用の最大のネックは、ASM を使いこなすことのできる技術者の育成である。ASM の適正な実務利用には、生物処理理論に対する理解と、設計・運転管理現場での経験の両者が求められる。ASM の実務利用促進には、そうした技術職員を養成していく必要がある。その際には、まず研究開発や生物処理に関する技術研修の場で ASM を積極的に活用し、若手技術者を中心に徐々に携わる職員を増やしていくことが有効だと思われる。

③ 実務利用に向けた環境整備

本調査で使用したソフト「Aqsim」は、主に学術研究用途を対象としたものである⁴⁾。設計・運転管理の現場で実務利用するには、取り扱いの容易なソフトの導入・開発が必要となる。そうしたソフトは現在複数市販されている。導入・開発する際には、費用対効果および将来的な拡張性を十分検討した上で決定する必要がある。

また、ASM による予測を実務に反映させることは、従来の設計・運転管理現場で行われてきた経験的な意思決定プロセスに直ちに馴染むものではない。経験的意思決定から、情報分析と評価に基づく合理的プロセスへの変換が求められる。そのためには、従来方法と平行

的に試行運用し、少しずつ実用事例を増やし有効性を確認していくような長期的な対応が有効だと思われる。

さらに、実際の現場では、モデルでは表現されない様々な現象が存在し、それらが処理水質変動の決定要因となりうる。反応タンク内での短絡流、攪拌能力不足などがあれば、ASM 予測精度の低下につながり、有効利用に支障が生じる。ASM 実務利用には、まず理想的な施設設備状況の整った施設(本市の場合、神奈川4系など)での試験運用から始めることが望ましい。

④ 利用用途の拡大

今後の下水処理においては処理水質向上と同時に温暖化ガス排出削減に向けた取り組みも必要となる。現モデルではブローヤやポンプ動力削減などを通じた温暖化対策検討に利用できるが、処理プロセスからの CO₂ や N₂O などの直接排出量の予測は出来ない。しかし、ASM の記述は物質収支に基づくため、原理的にはそうした物質の予測も可能となると考えられる。

このような窒素・りん除去に関する予測以外の利用用途について、ASM に関する今後の技術開発動向が注目される。

参考文献

- 1:「活性汚泥モデルの実務利用の技術評価に関する報告書」(平成18年3月);日本下水道事業団技術開発部
- 2:「活性汚泥モデル」;国際水協会・生物学的廃水処理の設計および運転を支援するための数学モデルの関するタスクグループ、味埜俊監訳
- 3:「高度処理の効率化に関する検討」横浜市環境科学研究所所報第31号2007
- 4: Reichert, P. (1994) 「Aquasim-A Tool for Simulation and Data Analysis of Aquatic Systems」, Wat. Sci. Tech. 30, 21-30
- 5: 浅野卓哉、森豊明、小菅博明「合流式A₂O法施設におけるりん除去安定化対策の検討」第43回下水道研究発表会講演集 pp.794
- 6: 飯野登志夫、鈴木孝「低流入負荷の嫌気・無酸素・好気槽におけるりん除去の向上について」第39回下水道研究発表会講演集 pp.635