

## &lt;連載：IWA 活性汚泥モデル&gt;

## 第4回 活性汚泥モデルの実務利用の現状と将来

味埜 俊

東京大学大学院 新領域創成科学研究科 環境学専攻\* 教授

TAKASHI MINO

## 1 はじめに

IWA 活性汚泥モデル<sup>1)</sup>(以下,ASM)に関する連載も第4回目の最終回となった。第1回の原稿(2002年,第7巻第3号)で予告した際には最終回は「活性汚泥モデルの廃水処理施設設計および運転管理への利用」との表題を予定していたが,設計や運転支援だけでなくもう少し広くとらえた実務目的の活性汚泥モデル利用について考えてみたいので,表題を表記のように変更した。本稿では,主に日本においてどのようなASM実務利用が模索されているか,今後どのように技術開発してゆくべきかを論じる。

## 2 ASM実務利用に向けたこれまでの経緯

IWAがASM No.1を世に出したのが1986年で,当時はまだパソコンの演算速度が遅かったために,如何にしてモデルの構造を簡略化して実際の計算時間を節約できるかがASMを世に送り出す上での大きな問題であった。また,私自身がIWAタスクグループに始めて参加した1991年頃でも,一般的な認識としてはASMが実務で使える道具になるとは考えられていなかった。しかし,コンピュータのハード面の技術革新が進み,いくつかの実用に耐えうるソフトウェアが開発され,またASMの構造的確さや予測精度の高さが認知されるにつれ,90年代の中頃から実用を見据えたASMの使い方の議論が本格的になされるようになった。1994年および1998年にIWAタスクグループが主催してASMに関するセミナーを開催しており<sup>2),3)</sup>,その中に若干の実務的な報告が見

られる。ASM利用の先進国のオランダである程度の実務利用実績に基づいてモデルキャリブレーションのプロトコルができたのが2000年であり,ASMの実務利用の歴史というのは,世界的に見てもまだ十年足らずである。

日本では,活性汚泥モデルということばが実務者にどうにか認知されるようになったのが90年代の中頃である。筆者はその前後に,高度処理会議などいくつかの場所でASM利用に関する講演を依頼されている。しかし,下水道分野でのASM実務利用への十分な理解はなかなか生まれなかった。

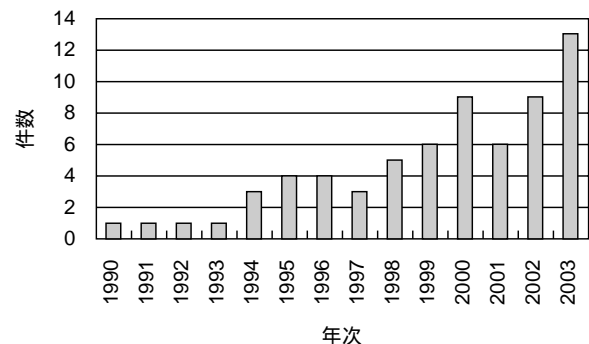


Fig.1 下水道研究発表会における活性汚泥モデル関連の発表件数<sup>4)</sup>

Fig.1に1990年以降の下水道研究発表会における活性汚泥モデル関連発表件数を示した<sup>4)</sup>。発表件数が上向きになってきたのは1998年ころからで,今年(2003年)は著しい伸びを示している。この時期は,日本下水道事業団が活性汚泥モデルに関する研究を公式に始めた時期(1999)や筆者が関連する企業や団体に呼びかけて私的な研究会である「活性汚泥モデル研究会」の活動を開始した時期(1999)と一致する。また,土木研究所が中心と

\*〒113-8656 東京都文京区本郷7-3-1  
TEL:03-5841-6250 FAX:03-5841-8531  
E-mail:mino@k.u-tokyo.ac.jp

Tab.1 オランダにおける活性汚泥モデル利用の実例<sup>7)</sup>

対象処理場	ASM 利用の目的	結果
Halten	既存のリン窒素同時除去施設の拡張の必要性の検討	既存施設でリン・窒素除去に余裕があり、拡張の必要性なし
Dalfsen	既存のリン窒素同時除去施設の拡張の必要性の検討	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> および NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> のモニタリングに基づく制御により 2015 年まで拡張
Haalem	リン除去予測モデルの構築	酢酸の投与量の 30%削減に成功
Ursem	流入負荷の増加に対応したリン除去予測	負荷の増大でリン除去は悪化し、脱窒も悪化するので施設拡張が必要
Zwijndrech	プロセス制御戦略構築	20%のエネルギー節約を達成可能
Nieuwveer	プロセス制御戦略構築	ファジー制御により 10%のエネルギー節約を達成可能
Hardenberg	プロセス制御戦略構築	ORP 制御により循環ポンプのエネルギーを 50%削減可能

なり「高度処理施設設計資料検討プロジェクト（H12-14年度）が実施され、その中で全国 11 の自治体において活性汚泥モデルを施設設計や維持管理に適用するための評価がおこなわれた。その報告書<sup>5)</sup>が 2003 年 3 月に公表されている。来年度からの第 5 次水質総量規制ではリン・窒素の排出規制強化が進められようとしており、高度処理プロセスの評価に威力を発揮すると期待される活性汚泥モデルを、プロセスの機能評価、設計、運転支援、維持管理などに使いたいという要望はこの 1-2 年で急速な高まりを見せて現在に至っている。

他方、このような状況と平行して、主に計測・制御をおこなっている会社を中心に、構造モデルに限らないさまざまなモデルを廃水処理の制御に使うための研究が実施され、それらを通じて日本のこの分野の基礎的な技術力が養われることとなった。EICA はそのような流れを支えるのに貢献してきたと言える。さらに、現在までの間に、外国で開発された主要なソフトウェアのうちいくつかの日本語版が市販されるようになり、これらと主に制御計測会社が独自に開発したソフトウェアとをあわせて数種類の日本語版の ASM シミュレーションソフトウェアが使える状況になった。東京都下水道局では民間と共同で独自ソフトを開発するまでに至っている<sup>6)</sup>。つまり、現在は、活性汚泥モデルを使いたいという要望とそれを支える技術的な要素が日本においてそろった時点と言える。

### 3 活性汚泥モデル実務利用の具体例

#### 3.1 オランダにおける実例

オランダにおいて ASM 実務利用に実質的にかかわった Paul Roeleveld 氏が日本においておこなった講演<sup>7)</sup>の中で、オランダにおける ASM 実務利用の具体例を紹介しており、その概要を Tab.1 にまとめた。

これらの実例の大部分がいわゆるシナリオ解析と呼ばれるもので、施設改造や運転方法改善をおこなったときのプロセスの挙動や除去性能を予測するために ASM を使っている。また、それらの結果を用いて具体的な提案や評価をおこなっている。このような使い方が現在のところ、ASM の予測能力にもっともなじむ使い方と言えよう。逆に、この程度の使い方であれば、キャリブレーションと流入水分画の基本的な手法さえ確立できれば直ちに実用化するだけの十分なポテンシャルを、ASM に関心を寄せている日本の多くの自治体や企業が持っていると言える。

#### 3.2 日本の ASM 実務利用の現状

ASM に関する情報交換とその普及を目的に活動をしている任意参加の団体である活性汚泥モデル研究会（筆者が代表）に参加している企業に対して、ASM 実務利用の実績をアンケート調査した結果を Tab.2 にまとめた。

この表は、日本の ASM 利用の現状を網羅的に記述したのではなく、限られた企業での実績をまとめたものに過ぎないが、日本で想定されている基本的なモデルの

Tab.2 日本における活性汚泥モデル利用の実例

利用種別	分類	内容
設計	高度処理	高度処理施設最適設計手法の提案，施設余裕度の評価とその結果に基づく処理可能水量の限界点の予測
施設改造	高度処理	標準活性汚泥法施設を循環式消化脱窒法に高度化することを想定し，処理系列ごとに風量調節が出来るような調節弁の設置を前提として，処理水量を低下させずに窒素除去をどこまで向上できるか検討
	高度処理	標準活性汚泥法をステップ消化脱窒法に改造するに当たり，ステップ配分比を検討
	高度処理	流入水中の N が過多になっている処理場で脱窒槽を分割することで N 除去を向上させることを示した．
	高度処理	リン・窒素除去の向上を目的とした初沈汚泥の曝気槽投入時の DO 設定値および必要な初沈汚泥量の探索
運転支援	高度処理	曝気風量の総量は現状維持で，または 1-2 割減少させながら，硝化促進型の運転に変更するための各槽への適正風量分配比を決定
	高度処理	シミュレーション結果に基づき，リン・窒素同時除去のための反応槽構成比および好気槽の DO 条件を最適化
	高度処理	リン・窒素同時除去プロセスにおいて，負荷量および水温の変動が処理水質に及ぼす影響を検討し，DO 制御でどこまで対応できるかを予測
	高度処理	2 段階ステップ嫌気無酸素好気法に ASM を適用し，ステップ流入比・好気槽 DO・循環率を最適化
	高度処理	硝化を維持しながら風量をどこまで低減できるかを予測雨天時のリン除去悪化を予測
	し尿投入	し尿投入が処理成績に及ぼす影響と許容し尿投入量をモデルで予測
	汚泥削減	工場で節水を実施した場合の排水中有機物濃度上昇の影響予測，高 MLSS で活性汚泥の自己分解を促進する運転をしたときの汚泥発生量削減効果予測
新規モデル	高度処理	リン蓄積細菌への有機物供給源として発酵槽を設置したときのリン除去改善効果の予測（発酵槽モデルを新たに構築し ASM と結合）
	高度処理	担体モデルを構築し ASM に導入することにより，担体投入量・散気装置増設の検討
	高度処理	OD 法モデルを構築し，DO 制御する際の DO 計と曝気装置の位置・曝気装置の能力と必要風量を最適化，また連続曝気と間欠曝気を比較
	高度処理	凝集剤添加による科学的リン除去モデルを ASM に組み込み，必要な PAC 注入率・汚泥発生量を予測
	汚泥削減	オゾン処理を導入した汚泥削減型活性汚泥法において汚泥削減量を評価

使い方はほぼ網羅されていると言える。なお、Tab.2に記載されている事例は、対応する既発表論文があるものと私的なコミュニケーションにより得たものが混在しており、整合性のとれた形で出典を記載することが出来なかったので出典は記載しなかった。

この表によると、オランダの例と同様に施設改造や運転支援のためにASMを使おうとしていることがよくわかり、また高度処理が重要なモデル利用の対象であることも読みとれる。ただし、これらの結果に基づき実際の施設改造をおこない、あるいは運転条件の変更を実施した事例はまだ少なく、本格的なモデルの実務利用はこれからである。

一方、筆者は、前述の活性汚泥モデル研究会の活動を通じて、あるいはASMに関心を寄せる企業や自治体などとの議論を通じて、日本における活性汚泥モデル利用への期待とそれに基づく研究開発が、既存のASM利用実績やその延長線上にある利用方法を超えていると感じている。4節に述べるようなさまざまな特殊な状況におけるモデル予測の利用、プロセス制御戦略構築への積極的なモデル導入、モデル予測を前提にした施設設計指針・維持管理指針の構築などが実現すれば、世界的にも先駆的なASM利用の方向性を示すことができ、日本独自の技術開発にもつながる可能性があると考えられる。

## 4 活性汚泥モデル利用のための今後の技術開発および研究の方向性

### 4.1 ダイナミックシミュレーションと流入水質の時間変化

モデルを使う大前提として、どのような流入水を扱うときも個別にその特性評価（つまり流入水分画）をおこなうことが原則であるのは言うまでもない。しかし、現実には、流入水分画の作業自体がそれほど容易ではないので、IWAタスクグループが提案する「典型的下水組成<sup>1)</sup>」における各COD画分の割合を実測した全CODに乘じたり、あるいは市販ソフトが持つ流入水分画機能（CODやBODの測定値からモデル中の各COD画分を計算する機能）を使ったりすることで各COD画分を求めている。このこと自体は簡便にモデルを使ってみるためには悪いことではないが、特定の目的をもってより現実に即した予測をおこなうためにはさらに詳細な分画が必要になる。

流入水中のCOD分画に関する既存の研究は分画手法の開発に偏り、分画されるべき流入水の種類そのものの

時間的な変化についてはあまり言及されてこなかった。ある1つの流入水中のCODについて、濾過やOURや回分実験やその他のさまざまな手法を組み合わせることで如何にして正確に分画するかを詳細に論じても、その結果得られた流入水分画結果は全体に対する各画分の割合を算出するのに用いられるのがほとんどであり、それを全CODに乘じて日変化を表現するという非常にあいまいな方法で実際のダイナミックシミュレーションがおこなわれている。経験的には、たとえば流入水中の $S_A$ （酢酸など）の変動は非常に大きく（筆者らの都内処理場での測定による、データ未発表）、その変動はリン除去に大きく影響する。また、 $S_F$ や $S_S$ は脱窒速度に与える影響が大きい。今後、短い時間スケール（たとえば数時間から数日）の水質変化予測にASMを用いる場合には、水質の日間変動、週間変動、季節変動が水質に与える影響についてより多くのデータを集めた上で、その特性をどのようにモデルに生かすかを検討する必要がある。

この問題の解決の方向としては、大きく分けると、オンラインあるいはそれに近い頻度でCOD分画につながる現場のデータを探ってモデルに入力する方向と、日間・週間などの水質変動の基本的なパターンをあらかじめ解析しておき、一定のルールに従って全CODのデータを換算してモデルへの入力値とする方向とがありうる。そのいずれの方向の研究も、今後、ASMでの予測精度を上げるため、とくに時間変動を予測する精度の向上のためには有効である。

### 4.2 雨・し尿投入・汚泥処理返流水の影響予測

雨の影響、し尿やし尿汚泥を不定期に投入したときの影響、あるいは汚泥処理系からの返流水の影響など、特殊な流入水が入ってきたときのプロセスの挙動をモデルで予測したいという要望は強い。一方、IWAタスクグループのレポートには、ASMは標準的な都市下水を対象として作られたので、それ以外を対象としての利用は推奨できないと記載されており、その理由の一つは流入水分画が標準的な下水の組成を前提に決められていることである。雨もし尿も返流水も一般の下水とは水質特性が異なるので、これらにASMを使う場合には流入水分画の手法を別途検討しなくてはならない。

合流式下水道を持つ自治体では雨天時の流出負荷削減を迫られており、その中のさまざまな場面で処理プロセスに与える雨の影響の予測を求められている。特に雨の時に窒素除去・リン除去がどう影響を受けるかは重大な関心事である。リン・窒素の処理効率に流入水のCOD組

成が影響するのは上に述べたとおりであり、雨天時の流入水の COD 組成の特性、初期流出とその後の流出水の水質の違い、先行降雨日数の影響などについてモデル利用の観点からデータを集積することは意義が大きい。合流改善の効果予測やそれに付随した施設計画にモデルを使うためにはそのようなデータが是非必要である。以上のような雨天時データの集積は一般の研究機関や企業が単独で実施するのは難しく、組織的な調査体制を作った上で実施することが望ましい。

し尿や返流水の影響予測は、単に流入水分画だけの問題を超えて、モデルの構造自体の変更を必要とするかもしれない。ASM で COD の除去を基本的に 2 つの分解速度 ( $X_S$  と  $S_S$  の分解) に分けているのは、都市下水を対象としているからであり、より分解速度の遅い成分がし尿や返流水に含まれていてそれが全体の酸素収支に影響を及ぼすのであれば、場合によっては第 3 の分解速度をもつ COD 成分を想定しなくてはならないかもしれない。そのような可能性を追求してゆくことはモデル利用の可能性をさらに広げることになる。ただし、モデルの構造に立ち入るのはモデルを良く理解した上でおこなうべきであることを再度強調しておきたい。

#### 4.3 ステップ流入プロセスの記述とモデル構造の選択

ASM2/2d において、従属栄養微生物による有機物の除去は比増殖速度に比例するとされている。したがって、原理的には、比増殖速度を決めると一義的に有機物の除去速度（つまり反応タンク内の有機物の減り方）が決まるような構造になっている。また、曝気槽滞留時間は有機物除去には十分なように設定されているから、最終的に処理水に残る COD は  $S_I$  に相当する難分解性物質のみであり、その  $S_I$  には実測値を使うことになっている。言い換えれば、COD 除去を予測するようにモデルが作られていない。したがって、曝気槽の中でどのように COD が減少するかを予測しなくてはならない場合には ASM2/2d では問題が生じる。たとえば、ステップ流入の位置とその分割割合をモデルを使って最適化するような場合、あるいは、曝気槽全体を有効に使ってステップ流入でどこまで負荷をかけられるかを検討するような場合に、微生物の増殖速度と基質の摂取速度を独立して設定できない ASM2/2d では、実測の COD の現象を的確に再現するようにパラメータを決めることが難しいかもしれない。

これに対し、ASM3 では有機物の貯蔵速度により摂取速度が決まり、増殖速度は独立に設定できるので、原理的には有機物の減少速度を実測値にあわせて独立に決め

ることが可能である。ただし、現段階では、ASM2/2d を有機物除去の予測に利用した例も、ASM3 を実処理場に対してキャリブレーションした例も少ないので、ASM3 のこのような原理的な利点が実際のモデル利用の際にどの程度有利に働くかは未知である。今後、検討してゆくべき課題である。

#### 4.4 制御への応用

ASM は、プロセスの挙動の全体像を示そうとするが故に、全体を支配する基本原理を抽出し枝葉末節を切り捨てるという作業を多かれ少なかれやった結果として定義されている。したがって、プロセスの挙動を高い確率で正しく予測することは難しい。つまり、モデルの予測のみをもとに直接プロセスの運転条件を制御するようなシステムはリスクが大きく現実的ではない。これに対し、さまざまなセンサーからのオンライン情報に基づく制御のほうにより信頼性の高い制御を実現できるであろう。その場合、入力値に対する出力値を決めるためのモデルが必要になるが、そこに ASM のような複雑な構造のモデルを使うことも得策でない。対象としている事象とセンサーからの入力値を直接的に結びつける簡易なモデルのほうの方がわかりやすく誤動作も少ないからである。

制御において ASM が威力を発揮するのは、むしろ長期的な制御戦略をたてるためのツールとして、あるいはプロセスの全体的な挙動を記述し制御の基本的な方向性を示す目的で使われたときであろう。制御への ASM 利用はまだ研究段階と考えられ、日本の優れた計測・制御技術とあわせてその利用が考えられれば、日本独自の技術開発につながる可能性があるのではないかと期待している。

## 5 おわりに

4 回の連載記事を書いてきた中で何回かは触れたものの、ASM の具体的な解説に紙面をさいたために逆に必ずしも十分に伝えられなかった事項が 2 つある。本稿の終わりにあたって、それらの点を再度強調しておきたい。

第 1 点は、モデルを使うことは合理的にものごとを決めてゆくための単なる一つの手段であり、まず使ってみることが重要という点である。モデルは何でも答えを出してくれる魔法の箱ではなく、技術者が仕事をするときに使う道具である。道具は使えば使っただけ役に立つのであり、目的に応じて使いこなすということが重要であ

る。繰り返し使う中でどのように使えばより有用かがわかってくる。このことは第2点目につながる。モデルを使う際にそのアウトプットを盲信するのではなく、モデルによる予測が何を意味するか、モデルの中でどのようなことが起こったためにそのような予測結果になったか、について考えながらモデルを使うべきである。言い換えれば、モデルの構造・計算過程を理解しながら使う必要がある。これは活性汚泥処理に携わる技術者にとって必ずしも容易ではないかもしれないが、どんな優れた道具もそれを使うためにはある程度の訓練が必要であり、ASMも例外ではない。そのかわり、ASMに関する理解が増えればそれだけ活性汚泥法そのものに関する理解が増えることになり、技術者のレベルアップにつながることは間違いない。

活性汚泥モデルを使うかどうかは二次的な問題であるが、設計や維持管理のためにより合理的な意志決定の仕組みを導入することは今後避けて通れない。活性汚泥モデルがそのための一助となってくれること、そして本稿

が活性汚泥モデルの正しい理解に少しでも役に立ってくれることを祈っている。

#### [参考文献]

- 1) Henze, M., Gujer, W., Mino, T. and van Loosdrecht, M.; Activated Sludge Models ASM1, ASM2, ASM2d and ASM3, *Scientific and technical report No. 9*, London, IWA Publishing (2000).
- 2) *Water Science and Technology*, No. 2, Vol. 31 (1995).
- 3) *Water Science and Technology*, No. 1, Vol. 39 (1999).
- 4) 「JSにおける活性汚泥モデル利用の考え方と関連研究開発」村上孝雄, 活性汚泥モデル研究会における講演より (2003. 7.31) .
- 5) 高度処理施設設計資料検討プロジェクト報告書, 土木研究所試料第3898号, 平成15年3月.
- 6) 生物学的窒素りん除去運転支援ソフトの開発, 東京都下水道局・株式会社 日水コン・株式会社安川電機, 平成14年度共同研究報告書, 平成15年3月.
- 7) Paul Roeleveld, 「活性汚泥モデルの実務利用-オランダの経験」, 活性汚泥モデル研究会(代表: 味埜俊)におけるセミナー, 2003年2月, 東京.