

<連載：IWA 活性汚泥モデル>

第1回 活性汚泥モデルが今なぜ必要か

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

MINO Takashi

1 はじめに

本号から4回の予定でIWA活性汚泥モデル¹⁾に関する連載をさせていただくこととなった。IWA (International Water Association, 国際水学会)は水質関連技術あるいは水環境に関する諸問題を扱う国際学会であり、IWA活性汚泥モデルとは、IWAの前身であるIAWQ (International Association on Water Quality, 国際水環境学会)およびIAWPRC (International Association on Water Pollution Research and Control, 国際水質汚濁研究学会)の中に設置された廃水処理プロセスの数学的モデリングに関するタスクグループ (The IAWPRC/IAWQ/IWA Task Group on Mathematical Modeling for Design and Operation of Biological Wastewater Treatment) が提案した一連の活性汚泥数学モデルを指す。1986年に上記タスクグループの最初の成果である活性汚泥モデル No.1²⁾ が発表されて以来、以下に述べるような経緯を経て、現在では活性汚泥プロセスにおける有機物・窒素・リン除去反応を記述するモデルの世界標準として広く国際的に認知されるようになってきている。すなわち、活性汚泥プロセスのシミュレーションソフトの多くがその骨格としてIWA活性汚泥モデルまたはその変形を使用している。

本連載では、これらの一連のモデルをIWA活性汚泥モデルと総称することにする。また、IWA活性汚泥モデルはこれまで4つのものが提案され、それぞれNo.1, 2, 2dおよび3と命名されているが、これらをASM1, ASM2, ASM2d, ASM3と略記する

こととする。本号では、連載の第1回として、IWA活性汚泥モデルがどのように開発されてきたか、今なぜこのようなモデルが必要かについて述べる。

2 IWA活性汚泥モデルの開発経緯とその概要

廃水処理プロセスの数学モデルは、他の分野で工学的に使われている多くの数学モデル (たとえば工業生産プロセスのシミュレーションモデル) と本質的に異なっている。廃水処理プロセスモデルは、対象とする系が複雑多様、インプットは内容不明で変動し、しかもその変動が人為的に制御できないため、数学モデルでありながら一義的にその構造を決めることができないという性質のものである。IAWPRC (現IWA) がタスクグループを最初に編成した1983年当時は、研究者ごとにモデルの作り方や現象のとらえ方がさまざまであり、さらにモデルの表現方法まで異なるという状況にあった。また、研究者相互の交流や批判が進まず、そのことがこの分野の研究を著しく遅らせていた。したがって、タスクグループの当初の意図は、新しい活性汚泥モデルを開発することではまったくなく、既存のモデルや関連情報を整理し、この分野の研究者あるいは実務者が最低限合意できる最も基本的な数学モデルを世に提示し、この分野の研究をより活性化することであった。このようなタスクグループの立場はその後一貫して貫かれている。Peterson's Matrix という汎用性の高

いモデル表示方法を提案したこと、モデルの説明力と構造の簡潔さのトレードオフを常に意識しながらモデルを提案してきたこと、モデル中の化学量論定数や速度論定数の標準値というものを示してはいるがどのような値を実際のシミュレーションで用いるかはユーザーの責任であると明言していることなどはいずれも上記のようなタスクグループの考え方の現れである。これらの点のより具体的な内容に関しては次回以降あらためて触れることにする。

さて、ASM1²⁾が1987年に世に出されて以来、活性汚泥モデルの研究は飛躍的に進み今日の隆盛を見るに至っている。多くの研究者が議論できる本当のコアの部分をモデル化し、それをマトリクス表示というわかりやすい言語で記述したところにまさに意味があったと言える。ASM1は有機物および窒素の除去を対象としており、活性汚泥プロセス中の酸素収支を表現できるモデルとして広く用いられた。ASM1を基本として、その問題点をいくつか改良しリン除去の予測機能を付け加えたのが1995年に出されたASM2³⁾である。また、1999年には、ASM2の改良版としてリン除去を担うリン蓄積微生物が脱窒能力を持っていることを表現したASM2d⁴⁾、および、それまでのモデルの技術的な問題点を整理して今後のモデル拡張のコアモデルとして作成したASM3⁵⁾をそれぞれ提案している。また、以上の4つのモデルを1冊にまとめた冊子¹⁾を2000年に出版している。これらのIWA活性汚泥モデルの特徴をTab.1にまとめた。

なお、ASM3のオリジナル論文(文献5)は出版社による編集上の技術的なミスによりパラメータに付属する上付・下付の文字表記に誤りが含まれており、この文献の記述をそのままモデル化しても正しいモデルとはならない。ASM3を参照する場合には、文献5)ではなく、その改訂版である文献1)中に記載のものを用いるようくれぐれもご留意されたい。

3 活性汚泥モデルの効用と限界

先に述べたように、活性汚泥モデルとは、生じている現象自体がよくわからない対象を、しかもインプットをどう表現するか都合がないままに数学的に記述するというあいまいなことをおこなっている。

したがって、その実際の利用に際しては、どのような現象がどのような緻密さでモデルに組み込まれているかを意識することが最も重要である。たとえば、IWAモデルの中には硝化細菌と好気性従属栄養細菌の増殖による酸素利用のメカニズムが的確に(つまり、実用的に必要なレベルを満足させられる程度には)組み込まれている。そのことがわかっていれば、嫌気・無酸素・好気条件が複雑に入り組み、そこに流入水の量と質の変動が加わるような系でも、モデルによる満足のいく予測ができるはずだということも判断できる。一方、放流水中の有機物濃度を予測するというような簡単なことでも、そのような予測メカニズムがモデルに組み込まれていないので予測不可能である。放流水有機物濃度を予測できないと言うと奇異に感じるかも知れないが、IWAモデルでは放流水の COD_{Cr} を測定してそれをあらかじめ入力しておくことでモデルを動かすのが普通なので、放流水の COD_{Cr} が状況により変動するような現象は予測できないのである。

以上から、活性汚泥モデルを使ってプロセスの挙動を予測することの最大の効用は、すでに原理がわかっている現象を非常に複雑な条件の下で予測できるということであると言える。何がどこまでわかっていてそのどの部分がモデルに組み込まれているかをわかった上で使う限りは、活性汚泥モデルは非常に有効なプロセスの挙動予測ツールとして設計・運転管理・制御・教育・研究などに使うことができるものである。一方、活性汚泥モデル利用により生じる問題点のかなりの部分が、モデルそのものの予測能力の不足によるというよりは、モデルの予測結果の不適切な解釈に起因するものである。モデルがある予測結果をなぜ出したのかを理解した上でその結果を利用することが重要である。現在のIWA活性汚泥モデルは、理想的な条件の下であれば、適当なソフトウェア(シミュレーションプログラム)を用いることにより、一般的な都市下水を対象とする活性汚泥処理プロセスでの酸素収支・汚泥収支・有機汚濁物質(COD_{Cr} として表す)や窒素の挙動などを実用的に充分満足のいく精度で予測できることがすでに実証されている。したがって、その限界をわかった上で利用すれば、実用的に非常に役に立つ使い方ができるものである。

Tab.1 IWA 活性汚泥モデルの特徴

モデル略称	公表年	除去対象	プロセスの数	変数の数		構成微生物群	モデルの特徴・利点・問題点
				溶存体	懸濁体		
ASM-1	1987	C N	8	8	5	従属栄養微生物 硝化細菌	<ul style="list-style-type: none"> -タスクグループにより提案された初めての活性汚泥数学モデルで有機物除去と窒素除去を予測する構造モデルでその後の活性汚泥モデル研究の基礎となった -マトリクス型のモデル表示を提案 -従属栄養微生物が有機物の加水分解・脱窒・好気性分解をすべておこなうことを仮定 -原則として基質濃度に対して Monod 型の反応速度式およびスイッチング関数を採用 -モデル上「懸濁体」と定義されているパラメータが分析上の「懸濁物質(濾紙上に残る物質)」とは限らない
ASM-2	1995	C N P	19	9	10	従属栄養微生物 硝化細菌 リン蓄積微生物	<ul style="list-style-type: none"> -有機物・窒素に加えてリンの除去を予測するモデルとして提案され、リン蓄積微生物 (X_{PAO}) およびその細胞内成分としてポリリン酸および PHA を導入、また X_{PAO} の基質として「発酵産物 S_A」を導入 -すべての COD 画分にリン・窒素がある割合で含まれていて、それが加水分解により遊離すると仮定、また ASM1 にあったアンモニア化プロセスを削除 -高分子有機物加水分解プロセスの速度定数が一義的に決められない(モデル上で「加水分解」として扱っている現象中に実際には有機物蓄積・捕食など様々な事象が含まれてしまう)
ASM-2d	1999	C N P	21	9	10	従属栄養微生物 硝化細菌 リン蓄積微生物	<ul style="list-style-type: none"> -脱窒反応時にリン吸収が生じることを再現するために、X_{PAO} に脱窒能力を持たせるように ASM2 を修正 それ以外の構造は ASM2 と基本的に同じ
ASM-3	1999	C N	12	7	6	従属栄養微生物 硝化細菌	<ul style="list-style-type: none"> -今後、様々な事象のモデルを付加してゆくためのコアモデルであり、ASM1 および 2 の問題点を改善することにより作成 -リン除去は含まず有機物除去と窒素除去のみを予測 -従属栄養微生物に有機物蓄積能力を導入した点、バイオマスの死滅により不活性 COD が生成し残りは内生呼吸により酸化分解されるとした点 (ASM1&2 ではバイオマスの一部が基質に逆戻りして再度利用される)、内生呼吸速度を好気と脱窒で変えた点が大きな改良点 -動力学/化学量論パラメータの値やモデルの適用性はまだ実証されていない

4 活性汚泥モデルへの期待—今なぜモデルが必要か

現代は社会的な要請が多様化している時代である。以前は、活性汚泥プロセスに対する社会的要請はBODとSSの除去のみであった。しかし、今日では、窒素・リンの除去、色度・濁度・COD成分の除去、省エネルギー・省資源、3Qまでの雨水の受け入れ、し尿や浄化槽汚泥の投入など増える一方である。将来的にはさまざまな化学物質の除去、ディスプレイ導入への対応なども視野に入れられている。しかも、これらの要請にこたえつつ、人員削減やコスト削減に耐え、また大都市では土地の制約も受けることになる。これまでのように「余裕度をとる」という考え方をもって廃水処理プロセスを設計・維持管理するわけにはゆかない時代になりつつある。また、上記のようなさまざまな制約が互いに複雑に絡み合い、多くの条件が同時に与えられているような状況のもとで、それらのトレードオフを最適化しなくてはならない。そのようなことはもはや直感や経験に頼っていてできるものではなく、状況を客観的に再現できる予測ツールが必要である。そしてシミュレーションモデルはまさにそのような最適化をするためのツールであると言える。

また現代は、税金を使って実施される下水道のような事業に対しては説明責任を常に求められる時代でもある。技術的な選択をしたときにそれがなぜ最適なのか、無駄がないのかを社会に対してきちんと説明する必要がある。これができなくては国際的な市場解放が進む中で市場から取り残されるということにもなりかねない。したがって、技術的な選択に於いて、何が合理的なのか、どうしてその選択肢を選んだかを常に説明できる手法を持たなくてはならない。そのような目的にもシミュレーションモデルは威力を発揮する。

以上のような目的達成のために活性汚泥モデルを使いこなすには、そのような能力を持つ技術者が育たなくてはならない。つまり、前節に述べたようにモデルの構造を十分に理解し、その予測結果を適正に評価できる技術者の存在が不可欠である。逆に、モデルを使いこなす土壌がはぐくまれば、そのこと自体がこの分野全体の技術者のレベルアップにもつながるといふ副次的効果が期待できる。

活性汚泥モデルはそれ自体が目的ではなく、さまざまな目的のために利用すべき道具に過ぎない。これを十分に使いこなすことによりはじめて、活性汚泥プロセスの設計・運転管理を最適化し、活性汚泥にまつわる技術的判断に対する説明責任を果たし、さらに技術者の育成にも寄与するものである。

5 今後の連載予定

本号では連載の第1回として、IWA活性汚泥モデルの概要および同モデルへの期待を述べた。今後、あくまで予定であるが、以下のような内容で活性汚泥モデルについての解説を進めていきたい。

第2回：IWA活性汚泥モデルの構造

第3回：流入水分画とキャリブレーション

第4回：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

本連載が、読者の活性汚泥モデルへの理解を深めることにつながり、また、そのことを通じて日本における廃水処理・下水処理分野へのより合理的な設計・運転管理方法の導入に少しでも役立つことを期待している。

参考文献

- 1) Henze, M., Grady, C. P. L. Jr., Gujer, W., Marais, G. v. R. and Matsuo, T.; Activated Sludge Model No.1, IAWPRC Scientific and Technical Report No.1, London, IAWPRC (1987).
- 2) 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).
- 3) Henze, M., Gujer, W., Mino, T., Matsuo, T., Wentzel M. C. and Marais, G. v. R.; Activated Sludge Model No.2, IAWQ Scientific and Technical Report No.3, London, IAWQ (1995).
- 4) Henze, M., Gujer, W., Mino, T., Matsuo, T., Wentzel M. C., Marais, G. v. R. and van Loosdrecht, M.; Activated Sludge Model No.2d, *Wat. Sci. Tech.*, **39** (1), 165-182 (1999).
- 5) Henze, M., Gujer, W., Mino, T. and van Loosdrecht, M.; Activated Sludge Model No.3, *Wat. Sci. Tech.*, **39** (1), 183-193 (1999).