

<連載：IWA 活性汚泥モデル>

第2回 IWA 活性汚泥モデルの構造

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

前号から4回の予定でIWA 活性汚泥モデル¹⁾に(以下,ASM)について連載している。今回はASMの開発経緯とその概要,さらに効用と限界について解説した。その中で「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」と述べた。つまり,ASMにおいて,どのような現象がどのように整理されてモデル化されているかを認しておくことはASMを利用する上での大前提である。そこで連載第2回の今回は,活性汚泥中の現象がどのように整理され,どのような構造としてモデルに組み込まれているかを解説したい。

なお,前号に述べたように,IWA 活性汚泥モデルのうち現時点で一般に広く受け入れられているのはASM2dと思われるので,本稿の対象としてはASM2dを中心として扱う。また,IWAのタスクグループがコアモデルとして推奨しているASM3についても触れることとする。

2 ASMの基本構造と物質収支

ASMは,基本的に活性汚泥法の中で増殖する微生物の増殖モデルの形をとり,モデル化すべき汚濁物質として,有機物(炭素化合物),窒素,リンを考えている。言い換えれば,これらの汚濁物質が微

生物の増殖のための基質として利用された結果として排水中からのそれらの除去が進行する。そのような増殖反応を数学的に記述するにあたり,反応の進行に伴う物質の形態変化の量的な関係(すなわち化学量論,stoichiometry)の記述と,その反応の進行速度(速度論または動力学,kinetics)の記述が必要になる。ここで,モデル中で独立して進行する反応(個別の反応速度式で表現できる反応)をASMでは「プロセス」と呼んでいる。微生物の増殖,自己分解,脱窒,硝化などはいずれもプロセスとして扱っているものである。また,ASMはある反応タンクを定義した上で,その中で物質収支モデルのいわゆる反応項を表現するために用いられるものである。この場合の物質収支は上記の三つのモデル対象物質,すなわち,有機物(炭素化合物),窒素,リンに対して計算されることになる。

さて,有機物量を表す指標としてASMでは酸素当量(酸素要求量)が用いられている。実用上これを実測するためには下水中の有機物の大部分を捕捉できる二クロム酸カリウムによるCOD(以下,COD Cr)が使われる。なぜ日本で通常用いられるBODでないかということBODは有機物量の全量を捕捉できないので収支を計算できないからである。BODをASMの入力として用いるには何らかの方法で一度COD Crに変換してから用いるのがふつうである。窒素・リンについては,元素としてのNあるいはPに対して物質収支を考える。

*〒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

3 ASM2d および ASM3 においてモデル化されているプロセスと微生物群

Fig.1-3 に、COD，窒素，リンの各成分の形態変化が ASM でどのように扱われているかを図示した。以下、これらの図にもとづき、ASM でモデル化されている微生物および関連するプロセスについて説明する。なお、以下の記述は文献¹⁾に記載された IWA 活性汚泥モデルの量論マトリクスを見ながら読んでいただくとわかりやすい。

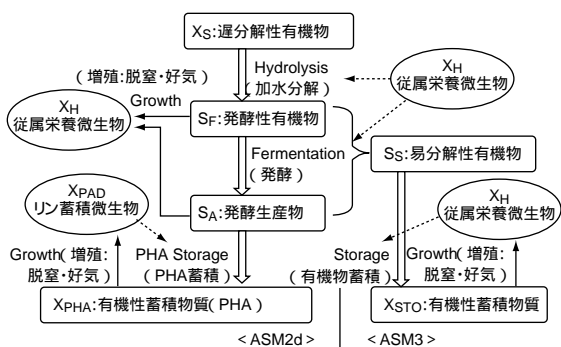


Fig.1 ASM における COD 成分の形態変化と微生物による分解・利用

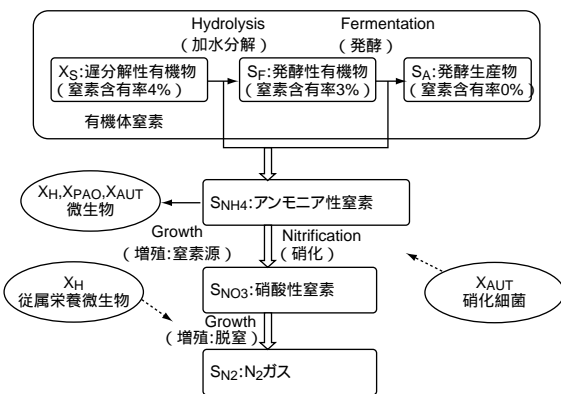


Fig.2 ASM における窒素成分の形態変化と微生物による利用

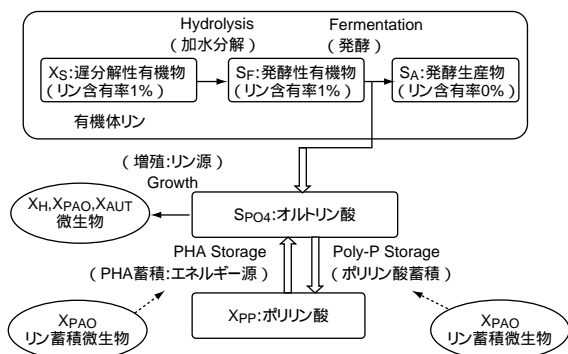


Fig.3 ASM におけるリン成分の形態変化と微生物による利用

3.1 従属栄養微生物 (X_H) による好氣的有機物除去

(1) 好氣的な増殖による有機物除去—ASM2d の場合

活性汚泥法の基本である好氣的な有機物除去を表現するためには、有機物 (ASM では COD_{Cr}) の好氣条件下での酸化分解とそれともなう従属栄養微生物の増殖がモデル化されなくてはならない。よって、まず、酸素 (S_O) により有機物を酸化分解する (呼吸する) ことでエネルギーを獲得し有機物を炭素源として増殖する「従属栄養微生物: X_H 」が定義されている。下水中には多種の有機物が含まれており、それらの除去速度は一樣ではない。ASM では有機物を摂取速度 (分解速度) の違いにより二種類に大別している。すなわち「遅分解性有機物: X_S 」と「易分解性有機物: S_S 」である。この両者は概念的には固形性有機物と溶解性有機物に相当する。ただし、あくまでモデル上で定義している変数なので排水中に明確に X_S と S_S という COD_{Cr} の画分が存在しているわけではなく、生物が利用しうる有機物を 2 つの画分に便宜的に分けて、 X_H が両者を利用するときそれぞれの利用速度を異なる値で代表させているに過ぎない。なお、ASM2d では S_S がさらに 2 つの画分 (「発酵性有機物: S_F 」および「発酵生産物: S_A 」) に分けられているが、これは生物学的リン除去を表現するための措置であり、詳しくは後述する。さて、モデル上では X_S がまず ASM2d では S_F に、ASM3 では S_S に低分子化され、その後

X_H に摂取されるという構造を仮定している。 X_S から S_S または S_F への低分子化が ASM では「加水分解」というプロセスとして定義される。モデル上の加水分解プロセスは X_H によっておこなわれる。また、 X_H は S_S 、 S_F および S_A をすべて基質として利用して増殖する。以上が「従属栄養微生物： X_H の（好氣的）増殖」のプロセスである。増殖プロセスにおいては、有機物の一部は従属栄養微生物の菌体成分（ X_H ）に変換され、残りは酸素（ S_O ）により酸化されて炭酸ガスとなる。このようなモデル化により、流入水中の有機汚濁物質（CODCr）が活性汚泥中の好氣性従属栄養細菌に利用され、その増殖の結果として余剰汚泥が発生する過程が記述できる。

(2) 有機物の貯蔵による除去—ASM3 の場合

現実の活性汚泥法では微生物の一部が基質貯蔵能力を持つことが知られている。この性質は、微生物が反応タンク中で競合に勝って生き残るために、できるだけ速い基質摂取速度を達成するために選んだ戦略である。微生物内に貯蔵された基質の分解速度は貯蔵速度（排水中からの基質摂取速度に等しい）よりは遅いため、この汚泥内貯蔵有機物の分解は ASM2d で定義した加水分解プロセス（遅分解性有機物： X_S の分解）と区別しにくい。つまり ASM2d では有機物貯蔵プロセスが加水分解プロセスの一部として表現されてしまうということが生じる。このことは、呼吸速度の測定データをもとにして流入水中有機物の組成を決めたりモデルパラメータを決めたりする際に著しい混乱を招く結果となった。そこで、ASM3 では、従属栄養微生物（ X_H ）に有機基質を貯蔵する能力を付与した。つまり、 X_S は X_H により S_S に加水分解され、その S_S を X_H が摂取した後、まず「貯蔵有機物： X_{STO} 」に変換して X_H 中に貯蔵する。そして、 X_H は X_{STO} のみを基質として増殖すると仮定している。このようなモデルの構造の変更により、呼吸速度パターンの解釈やモデルを用いたシミュレーション結果の解釈がよりわかりやすくなるものと IWA タスクグループは期待している。

3.2 窒素成分の形態変化と窒素除去

(1) 独立栄養細菌（ X_{AUT} ）による硝化反応

窒素除去の第一ステップは硝化であり、好気条件下で独立栄養細菌（つまり有機炭素源をつかわず二酸化炭素を炭素源とする細菌）である硝化細菌によりおこなわれる。硝化プロセスは ASM 中では、「硝化細菌： X_{AUT} 」が好気性条件下で酸素（ S_O ）を用いて「アンモニア性窒素： S_{NH_4} 」を「硝酸性窒素： S_{NO_3} 」に酸化するプロセスとして記述されている。ASM では硝化の中間体として亜硝酸は考慮していない。

(2) 脱窒反応

脱窒は、ASM では、酸素が無いときに酸素の代わりに従属栄養微生物（ X_H ）が硝酸性窒素（ S_{NO_3} ）を電子受容体として用いて増殖し、結果として硝酸性窒素（ S_{NO_3} ）が窒素ガス（ S_{N_2} ）に変換されるプロセスとして定義される。形式的には X_H の全体が脱窒能力を持つことが仮定されているが、現実には従属栄養細菌にも脱窒できるものとできないものがあるので、脱窒時の X_H の比増殖速度を好氣的増殖のそれより小さくする（脱窒時速度減少ファクター： η_{NO_3} を導入する）ことで、 X_H の一部分のみが脱窒能力を持つことを間接的に表現しようとしている。ASM では窒素ガスとしての従属栄養的脱窒のみ考慮しており、亜酸化窒素（ N_2O ）の形で脱窒される場合やイオウ脱窒は考慮していない。なお、ASM2d では、後述するリン蓄積微生物（ X_{PAO} ）も脱窒能力をもつので、 X_H と同様な脱窒プロセスが定義されている。

(3) 窒素成分の形態変化と窒素除去の予測

実際の下水中にはケルダール窒素（有機性窒素）が含まれている。ASM2d、ASM3 では独立した有機性窒素の画分というものはなく、各 COD 画分（ X_S 、 S_S 、 X_H など）が一定含有率で窒素を含んでいると仮定することにより有機性窒素の動態を表現している。つまり、これらの COD 画分の形態変化に伴ってアンモニア性窒素（ S_{NH_4} ）がその画分から出てきたり、またその画分に取り込まれたりすることになる。アンモニア性窒素（ S_{NH_4} ）が好気条件下で硝化によ

り硝酸性窒素 (S_{NO_3}) となり, 硝酸性窒素 (S_{NO_3}) が無酸素条件下で脱窒により窒素ガス (S_{N_2}) に変換されるのは上に述べたとおりである. 以上のようなモデル化により, 活性汚泥法で生じている主要な窒素代謝 (無機化, 硝化, 脱窒) とその結果としての窒素の形態変化を, その過程にかかわる各微生物群の増殖とともに記述することができる. また, 処理水の窒素濃度の予測として議論の対象になるのは 10mgN/L 前後の濃度であり, その領域で数 mgN/L の濃度差を予測し分けるだけの精度を ASM2d は十分に持っている.

3.3 生物学的リン除去のモデル化とリン成分の形態変化

(1) リン蓄積微生物 (X_{PAO}) の代謝

生物学的リン除去は, 絶対嫌気条件下での有機基質の接触と引き続き好気条件を汚泥に繰り返し経験させることでリン蓄積能力の高い微生物を系内に集積させるプロセスである. 生物学的リン除去のモデル化に当たっては, そのような「リン蓄積微生物: X_{PAO} 」の代謝反応を現実に即して記述することが必須である. その代謝の詳細については既存の文献²⁾を参照されたい. X_{PAO} は, 細胞内に蓄積しておいたポリリン酸を分解して得られるエネルギーを用いて, 嫌気条件下において有機基質を摂取することができるのが最大の特徴である. X_{PAO} は通常の従属栄養細菌よりも摂取することのできる有機物の種類が限られており, 特に酢酸などの有機酸をよく摂取すると考えられてきた. そこで ASM2d では, X_{PAO} が摂取することのできる有機物を「発酵生産物: S_A 」, それ以外の易分解性有機物を「発酵性有機物: S_F 」と定義し, S_F は「発酵プロセス」を経て S_A に変化すると仮定した. このプロセスに「発酵」という名称を付けたのは, X_{PAO} が好んで摂取する有機物に酢酸などの発酵生産物が多かったからである. しかし, この点に関しては疑問も投げかけられている. Rieger ら³⁾は X_H と同様に X_{PAO} も S_S 全部を利用できると仮定して生物学的リン除去用のモジュールを ASM3 との組み合わせで提案している. なお, 現実の発酵は通性細菌が増殖に必要なエネルギーを獲得するためにおこなう代謝であり増殖プロセス(つ

まりバイオマスの増加を伴うプロセス) であるが, ASM2d では, S_F から S_A への変化は従属栄養微生物 (X_H) が触媒的におこなうプロセスで, 増殖を伴わない単純な物質変換プロセスであると仮定している.

さて, ASM2d では, S_A が X_{PAO} に摂取されるとすぐに増殖に使われるわけではなく「有機性蓄積物質 (PHA): X_{PHA} 」として細胞内に貯蔵される. この反応は酸素消費を伴わず(つまり嫌気か好気にかかわらず生じ), そのエネルギー源は高エネルギー化合物である「ポリリン酸: X_{PP} 」を加水分解することでまかなわれると考えられている. 現実に好気条件下でも十分な炭素源が与えられるとオルトリン酸の放出がみられることが知られており, ASM2d はそのような代謝も表現することができる. ポリリン酸 (X_{PP}) の分解の結果として溶液中に「オルトリン酸: S_{PO_4} 」が放出される. 以上の S_A の摂取, X_{PHA} の貯蔵, X_{PP} の分解, S_{PO_4} の放出は全体が 1 つの量論に支配されて同時に生じる反応 (1 つのプロセス) であると仮定されており, ASM2d では「リン蓄積微生物による有機物貯蔵プロセス」と呼ばれる.

好気条件, つまり酸素 (S_O) が利用可能な条件になると, リン蓄積微生物 (X_{PAO}) は X_{PHA} を炭素源・エネルギー源として消費し, 自らの増殖 (X_{PAO} の生産), オルトリン酸 (S_{PO_4}) の摂取およびポリリン酸 (X_{PP}) の合成をおこなう. その結果 S_{PO_4} が溶液中から減少する.

(2) ASM2 と ASM2d の違いおよび ASM3 でのリン除去の扱いについて

ASM2d の前身の ASM2 では, X_{PAO} は脱窒能力を持たないとされているので, 無酸素条件 (硝酸は存在するが酸素のない条件) は嫌気条件と同様に働き, X_{PAO} は S_A を摂取し S_{PO_4} を放出するとの予測結果になる. ところが, 実際には X_{PAO} には脱窒能力を持ち硝酸呼吸によってエネルギーを生成しリンを吸収するものも存在する. このことをモデルに組み込んだのが ASM2d である. 窒素・リン同時除去法を対象とする場合や硝酸が嫌気槽に大量に入ってくるような場合には ASM2 では脱窒時の S_{PO_4} の挙動を予測できず, ASM2d を用いるべきである.

なお, ASM3 にはリン蓄積微生物が組み込まれて

おらず、生物学的リン除去を表現することはできない。しかし、ASM3はコアモデルとしての拡張を前提に作られており、これにリン蓄積微生物を組み込むことは容易である。すでにASM3にリン除去を組み込んだモデルはスイスのグループにより提案されている³⁾。

(3) リン成分の形態変化とリン除去の予測

ASMにおける有機物に含まれているリン成分の扱いは窒素と同様であり、独立した有機性リンの画分というものはない。各COD画分(X_S , S_S , X_H など)が一定含有率でリンを含んでいると仮定することにより有機性リンの動態を表現している。つまり、 X_S の加水分解に伴って S_F あるいは S_S とともに S_{PO_4} が生成されたり、微生物の増殖に伴って S_{PO_4} が溶液中から吸収されたりする。

以上、述べてきたようなリン蓄積微生物のモデル化により、嫌気工程での有機物摂取とオルトリンの放出、好気工程あるいは脱窒工程でのリンの摂取という生物学的リン除去に特徴的なリン代謝を表現できるのである。また、返送汚泥として嫌気工程に硝化液が戻るとリン蓄積微生物による非呼吸的な有機物摂取と好気性従属微生物による脱窒とが競合するのでリン除去に悪影響があることや、有機物負荷が下がると嫌気工程で十分な有機基質蓄積ができないのでやはりリン除去に悪影響がでる現象などを表現できる。経験的には、ASM2dは、与えられた条件下でリン蓄積微生物が系内に定着するかどうか(つまり、生物学的リン除去が起こるかかどうか)の予測には十分に使えるが、実用上必要な処理水リン濃度の予測に対する精度(たとえば、1mgP/Lを超えるかどうかを予測し分ける精度)は備えていないと言わざるを得ない。

3.4 微生物の死滅および貯蔵物質の減少プロセス

すべての微生物および微生物内の貯蔵物質(X_H , X_{PAO} , X_{AUT} , X_{PHA} , X_{PP} , X_{STO})には、減衰プロセスが定義されている。つまり、基質が無くなると微生物はやせ細り死滅してゆくプロセスがASMには組み込まれている。ただし、ASM2dとASM3

ではこの死滅プロセスの表現方法が全く異なっている。ASM2dでは死滅した微生物の一部は不活性有機物として残存しそれ以外は基質として従属栄養微生物に再度利用されることを仮定していた。これに対しASM-3では、死滅バイオマスは不活性有機物として残存する以外は内生呼吸により酸化されると仮定した。その結果、ASM2dでは従属栄養微生物(X_H)と硝化細菌(X_{AUT})の間で有機物のループができてしまい、これが死滅速度の意味をわかりにくくしていた。ASM3ではこのループが無くなったので、数学的には非常にわかりやすくなったが、一方で酸素が存在しない嫌気条件では X_{AUT} はまったく死滅・減衰しないという概念的にはおかしな状況をモデル化したことになる。嫌気条件が極端に長く続くようなことは現実の活性汚泥法では起こりえないので、実用上は問題ないと言えよう。以上に加えて、ASM3では、好気条件下と脱窒条件下で異なった内生呼吸速度を与えられるようになっている。これにより、たとえば、脱窒時の内生呼吸速度を好気性のときより小さく設定することが可能となり、SRTの長い脱窒槽をもつシステムで硝化細菌の自己酸化が進みすぎて硝化細菌量が過小評価される状態を修正する手段を与えている。

3.5 その他

(1) アルカリ度

ASMではCOD(酸素当量)、窒素、リンに加えてアルカリ度の物質収支を考えている。ここで言うアルカリ度の収支とは実質的にはモデル中で扱っているイオンのみを対象とした中性付近での電荷収支であり、実際のアルカリ度を計算しているわけではない。その絶対値を実測と合わせることは意味が無く、ASMによる計算でアルカリ度が消費されてしまい、計算上で反応が止まってしまうようなことが起きた場合には、たとえば硝化が進みすぎてpHが下がるという現象が実プロセスで生じる可能性があることを示唆している。そのような警告を与えるという意味合いで使うべき指標である。

(2) 凝集沈殿によるリン除去

ASM2d には非常に単純化した凝集沈殿によるリン除去のモデルが付帯されている。鉄あるいはアルミを凝集剤として用いて化学的リン除去をおこなっているような系での化学的リン除去と生物学的なリン除去の競合を記述するときなどに利用できる。しかし、この化学的リン除去モデルを現場に適用しその妥当性を評価した研究はほとんどない。あくまで簡易モデルであり、これを用いて化学的リン除去の詳細な検討をおこなうことの妥当性は保証されていない。

4 反応速度式

ASM における反応速度式についても本稿ですべてを紹介することはできないので詳細は文献¹⁾を参照されたい。以下では、速度式に関しての ASM における基本的な考え方を述べる。

さて、各反応プロセスの量論が定義されると、次はそれぞれのプロセスが進行する速度を与えなくてはならない。ASM では原則的には、制限基質濃度に対して増加関数でありかつ反応速度の上限値が存在するようなモノー式と呼ばれる関数型が用いられている。すなわち、

$$r = r_m \cdot S/(S + K) \quad (1)$$

ただし、 r : 反応速度、 r_m : 最大比反応速度、 s : 制限基質濃度、 K : 半飽和定数、である。タスクグループが反応速度式の形を決める際にさまざまな関数型の適否を個別に議論したわけではない。現実には制限基質濃度がゼロになればその反応が止まるのは明白であるし、基質濃度が無限大に大きくならないことも当然なので、そのような状況を広い基質濃度範囲に対して表現する便利な式がモノー式だったのである。多くの場合、量論に現れるすべての基質に対してモノー式を立ててそれらをかけ合わせることで全体の速度式が構成されている。現実の場では、増殖の制限因子になりにくいリンや窒素に対しては半飽和定数の値を通常観測される濃度範囲より十分に小さくすることでその影響を現れにくくしている。タスクグループは、ほとんどのプロセスにおいてモノー式による表現で必要かつ十分と考えている。

モノー式を用いることへの例外の一つが、加水分解プロセスに対する反応速度式である。加水分解プロセス (X_S の S_S , S_F への分解) では表面反応を仮定した速度式が用いられている。また、現実に溶液中の基質濃度以外の要因が反応速度を支配するような反応プロセスもある。それがポリリン酸および有機物の貯蔵・蓄積プロセスである。ポリリン酸の蓄積に対しては「最大ポリリン酸蓄積量と現ポリリン酸蓄積量の差」および「基質である貯蔵有機物量 (PHA) の溶液中濃度ではなくポリリン酸蓄積微生物中の貯蔵量 (含有率)」に対してモノー型の速度式を当てはめている。また、有機物の貯蔵に関しては「ポリリン酸 (この反応のエネルギー源である) のリン蓄積微生物中の蓄積量 (含有率)」に対してモノー型の速度式を用いている。さらに、微生物および貯蔵・蓄積物質の減衰にはより単純なそれ自身の濃度に対する一次反応式が用いられている。

プロセスの中には、それぞれ嫌気条件、無酸素条件、あるいは好気条件のみで働くものがある。それらを酸素および硝酸の有無で稼働させたり止めたりするためにスイッチング関数と呼ばれる関数型が頻繁に使われている。酸素 (S_O) あるいは硝酸性窒素 (S_{NO_3}) が存在するときにプロセスを稼働させるためには半飽和定数に十分小さい値を用いたモノー型の関数を、また S_O あるいは S_{NO_3} が存在しないときにプロセスを稼働させるにはモノー式の分子の基質濃度を半飽和定数で置き換えた形の関数をスイッチング関数として用いる。以上のような反応速度式の中に出てくる速度論定数は一つ一つが意味を持ち、そのプロセスを実行する微生物やプロセス自体の特性を表現している。

活性汚泥モデルを実処理場に適用するに当たっては、これらの定数や場合によっては量論定数をも含めて現場に合った値に調整してやらなくてはならない。この調整作業のことをキャリブレーションあるいはチューニングなどと呼んでいる。キャリブレーションについては次回に詳しく述べることにする。同じ基質に対して異なる微生物間の有利不利を表現するためにはこの速度論定数を動かすことにより調整するのが一般的である。

5 おわりに

活性汚泥モデルを用いてシミュレーションをする場合、モデルにどのようなプロセスが組み込まれていて何が予測できるのかをはっきり意識することがまず重要なので、本稿では、IWA 活性汚泥モデルに組み込まれているプロセスに重点を置き、その基本構造について解説をした。やや専門的で分かりにくい点もあったかもしれないが、実際に活性汚泥モデルを使ってシミュレーションをおこなった結果を見てモデルが何を意味しているのかを読み解く場合にはこのような知識がたいへん有効である。IWA 活性汚泥モデルは、活性汚泥中の実際の微生物群の挙動をある程度現実に即して記述することを心がけたモデルとしてはもっとも基本的な構造を提案している。したがって、ユーザーが自分の目的に応じてその内容を改変して使うことを前提に作られたものである。また、量論定数や速度論定数は程度の差はあれ、ユ

ーザーの責任でキャリブレーションする必要がある。そのような使い方においてユーザーが重大な誤りを犯さないためにもモデルの構造や各パラメータが何を意味しているのかをある程度は理解しておいていただきたいと思う。

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) Mino T., van Loosdrecht M.C.M. and Heijnen J.J., " Review : Microbiology and Biochemistry of Enhanced Biological Phosphate Removal Process", Water Research, **Vol.32**, No.11, 3193-3207, (1998).
- 3) Rieger, L., Koch, G., Kuhni, M., Gujer, W. and Siegrist, H., " The EAWAG Bio-P Module for Activated Sludge Model No.3", Water Research, **Vol.35**, No.16, 3887-3903, (2001).