

活性汚泥における窒素、リン、有機物の浄化モデルの提案と検証

Development and verification of a new activated sludge model for the purification of nitrogen, phosphorus and organics.

藤井 滋穂*・川崎 重紀**

Shigeo FUJII*, Shigetoshi KAWASAKI**

ABSTRACT: An activated sludge model for water quality management was proposed on the basis of biological reactions of heterotrophic, autotrophic and phosphate accumulating bacteria. This model is one of extensions of "Activated Sludge Model No.2 (ASM2)" presented by the IAWQ Task Group, and was made by careful checks of all of the variables, reaction processes and rate equations in ASM2. Some of variables, processes were amalgamated or excluded for simplification, while some of rate equations were replaced by more rational ones. The following are the major improved reaction models which were made in this study:

- (1) Simultaneous uptake of two kinds of substrates by heterotrophic bacteria.
- (2) Interactive relationship among poly-phosphate, cell internal storage product and phosphate accumulating bacteria.
- (3) Precipitation and redissolution among phosphate, metal ions and metal phosphate.

In addition, a new denotation method was introduced for expression of reaction rate and stoichiometrical parameters, so that the model becomes more rational and simplified. Then availability of the model was verified by the comparison of observed data and simulated ones.

KEYWORDS: activated sludge process, phosphorus removal, nitrogen removal, model development

1. はじめに

近年、下水処理においても窒素、リンの除去が要請されるようになり、各地の処理場でその除去を目指した実験や実施施設の運転がなされている。しかし、多様な下水に対して効率的な窒素、リン除去を目指すには、これらおよび有機物の反応過程や処理場条件を数値的にとらえ、その下水組成、プロセスに応じた運転方法をとる必要がある。このような背景から IAWQ タスクグループは、各種細菌群挙動をモデル化し、活性汚泥モデル No. 2 (ASM2) を 1995 年に発表¹⁾したが、このモデルの変数、速度式等には依然いくつかの検討すべき事項が残されている。一方、筆者らはすでに多様な処理場での COD、N に関する水質指標の挙動を予測するモデルを開発^{2), 3)}してきた。そこで、本研究では ASM2 および筆者らの研究を参考にして活性汚泥による有機物、窒素、リン除去の挙動を表現するモデルを提案するとともに、その検証を行った。

* 立命館大学理工学部

**立命館大学大学院理工学研究科

Department of Civil and Environmental Engineering, Ritsumeikan University

2. モデルの概要

本研究で提案するモデルの目指すものは、基本的に ASM2 と同じであり、リン蓄積細菌をも含む活性汚泥において、有機物、窒素、リンの挙動を予測することにある。そこで、ASM2 をベースに筆者らの旧モデルを参照して、その精度(モデルの詳細さ)を保ちつつモデルの簡素化、かつ合理性を向上させることを試みた。このため、変数等の表記方法の合理化、過程等の統合、新たな反応速度式の提案を行った。以下、変数、反応過程、反応速度それぞれについて、ASM2 との比較を中心に説明する。

3. 状態変数

モデルの作成で基本となる状態変数(以下、変数と略す)は、表 1 に示す 18 種である。これらは ASM2 とほぼ同様の変数であるが、以下の点で改善を加えている。

表 1 モデル中で考慮した状態変数と想定化学組成の例

j	変数	記号	ASM2	定義	単位	想定化学組成の例	含有率記号		検証時流入濃度(mg/L)
							N	P	
1	X_I	ISS	X_{ISS}	無機性浮遊物	SS	—			8
2	X_2	MeOH	X_{MeOH}	リンと凝集する金属(イオンおよび水酸化物)	P	$Fe(OH)_3$			3
3	X_3	MeP	X_{MeP}	同上のリン酸塩	P	$FePO_4$		(1)	2
4	X_4	PP	X_{PP}	リン蓄積菌の細胞内ポリリン酸塩	P	$\{(KMg(PO_3)_3)_n\}$		(1)	1
5	X_5	PHA	X_{PHA}	リン蓄積菌の細胞内畜産物	COD	$C_3H_6O_2$	$\dot{X}_{N,5}$	$\dot{X}_{P,5}$	4
6	X_6	PAO	X_{PAO}	リン蓄積菌本体。PP、PHA を含まない	COD	$C_{75}H_{112}O_{30}N_{15}P$	$\dot{X}_{N,6}$	$\dot{X}_{P,6}$	1
7	X_7	AUT	X_{AUT}	自栄養性菌	COD	$C_{75}H_{112}O_{30}N_{15}P$	$\dot{X}_{N,7}$	$\dot{X}_{P,7}$	5
8	X_8	HET	X_H	他栄養性菌。酸発酵、加水分解機能保持	COD	$C_{75}H_{112}O_{30}N_{15}P$	$\dot{X}_{N,8}$	$\dot{X}_{P,8}$	12
9	X_9	PI	X_I	浮遊性非分解有機物	COD	$C_{160}H_{280}O_{120}N_{12}P$	$\dot{X}_{N,9}$	$\dot{X}_{P,9}$	16
10	X_{10}	PS	X_S	浮遊性基質	COD	$C_{90}H_{150}O_{60}N_{12}P$	$\dot{X}_{N,10}$	$\dot{X}_{P,10}$	28
11	X_{11}	DI	S_I	溶解性非分解有機物	COD	$C_{520}H_{880}O_{400}N_{20}P$	$\dot{X}_{N,11}$	$\dot{X}_{P,11}$	12
12	X_{12}	DS	S_F	発酵性基質	COD	$C_{100}H_{180}O_{80}N_8P$	$\dot{X}_{N,12}$	$\dot{X}_{P,12}$	31
13	X_{13}	DA	S_A	発酵生成物	COD	CH_3COOH	$\dot{X}_{N,13}$	$\dot{X}_{P,13}$	12
14	X_{14}	O_2	S_{O_2}	溶存酸素	-COD	O_2			0
15	X_{15}	NO_3	S_{NO_3}	硝酸イオンと亜硝酸イオン	N	NO_3^-	(1)		0.4
16	X_{16}	NH_4	S_{NH_4}	アンモニアイオンとアンモニア	N	NH_4^+	(1)		13.5
17	X_{17}	PO_4	$S_{P,04}$	無機溶解性リン。主にオルトリン酸	P	$H_{1.5}PO_4^{1.5-}$		(1)	1.69
18	X_{18}	ALK	S_{ALK}	アルカリ度。電荷の収支 pH に使用	$CaCO_3$	HCO_3^-			100

(1) 実際に(微分方程式の)数値計算をする上で必要不可欠なもののみを、状態変数として扱い、これら変数より算出可能な水質指標は除外した。それゆえ、 N_2 ガス(ASM2 で X_{N_2})は反応速度に影響していないので変数とせず、アンモニア等から N の収支より求めるものとした。なお、無機浮遊物(ISS)はモデル上、生物反応には全く関与しないが、最終沈殿池の沈降等、物理反応の影響を受けるので、変数として取り込んでいる。

(2) 各変数は、①常に同じ化学組成をもち、かつ②他変数とオーバーラップする部分はないものとした。すなわち ASM2 同様、リン蓄積細菌は、そのエネルギー源のポリリン酸(PP)、細胞内貯蔵物質(PHA)およびそれ以外の細菌本体(PAO)とに変数を分けた。一方、ASM2 では X_{TSS} として SS 自身を変数としているが本モデルでは②の観点より、ISS を他の変数で表現し得ない部分(金属水酸化物、金属リン以外の浮遊性無機物)のみを表す変数と定義した。

(3) COD、N、P のような各変数を表す単位が、必要最小限となるように努めた。このため、COD をベースに、それで表現できない変数はそれぞれ N、P の単位とした。加えて、リンの化学凝集反応の際の変数間の換算を避けるために金属リン(MeP)は含有 P 濃度で、金属水酸化物(MeOH)は、それと結合する P 濃度で表記した(表 2 参照)。ただし、ISS はこれらの COD、N、P では評価不可能なので、その SS 量表示とした。以上により、ASM2 の 7 つの単位

表2 金属塩凝集反応における状態変数の単位変更

	$PO_4^{3-} + Fe(OH)_3 \rightleftharpoons FePO_4 + 3 OH^-$			
1 mol	31 g	107 g	151 g	50 g
ASM2	1 gP	3.45 gFe(OH) ₃	4.87 gFePO ₄	1.61 gCaCO ₃
本モデル	1 gP	1 gP	1 gP	1.61 gCaCO ₃

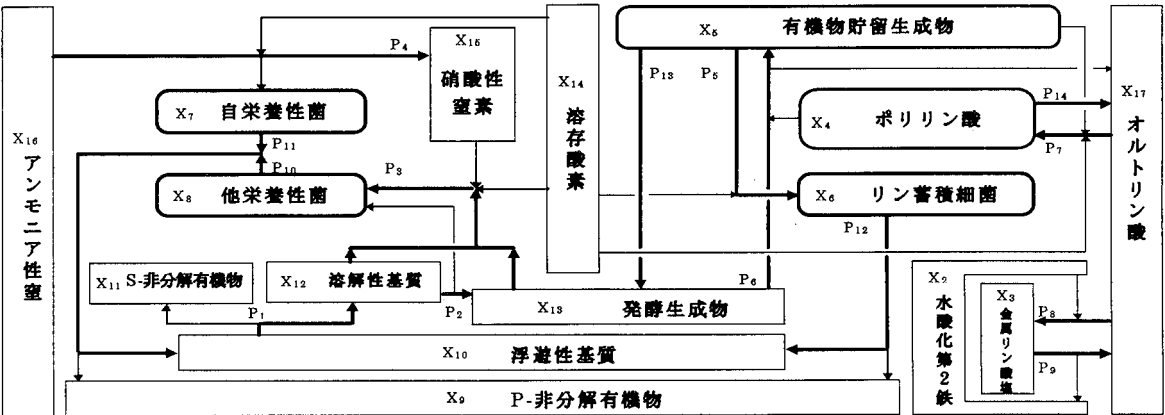
のうち $\text{Fe}(\text{OH})_3$ 、 FePO_4 を排除し、5 つに削減できた。

(4) 水質指標への換算を容易とするため、すべての変数で化学組成を想定するものとした。表 1 にはその例を付記している。これら化学組成は、対象下水、プロセスで変化しうるものであり、モデル化ごとに定める必要がある。なお、有機物の変数 ($X_5 \sim X_{14}$) の組成は、情報として、その SS/COD、C/COD、N/COD、P/COD 比が得られているならば、表 3 の式が算出できる。これら組成式の導入により、TOC の挙動も把握できる。

(5) 各変数を $X_1 \sim X_{18}$ とサフィックス番号で示した。これは後述するように、化学量論係数の表記を簡易とさせるためである。

4. モデルで考慮した反応プロセス

変数の反応過程として図 1 に示すような $P_1 \sim P_{14}$ の 14 個のプロセスを設けた。基本的なプロセスの考え方は、ASM2 と同様であるが、以下の点を変更した。



- P_1

浮遊性基質の加水分解

P_2

発酵性基質の酸発酵

P_3

他栄養性菌の増殖

P_4

自栄養性菌の増殖

P_5

リン蓄積菌の増殖
- P_6

リン蓄積菌の PHA 貯蔵

P_7

リン蓄積菌のポリリン貯蔵

P_8

オルトリン酸の化学凝集

P_9

金属リン酸塩の再溶解

P_{10}

他栄養性菌の自己分解
- P_{11}

自栄養性菌の自己分解

P_{12}

リン蓄積菌の自己分解

P_{13}

PHA の自己分解

P_{14}

ポリリン酸の加水分解

図1 生物・化学反応過程のフローチャート

(1) 浮遊性基質 (PS) 加水分解過程では好気、無酸素、嫌気反応により、収率係数が区別されないで、単に酸化状態により速度が変化するだけと考え、3 経路を統合・一本化した。

(2) 発酵性基質 (DS) の酸発酵では収率 (Y_8) を与え、それに伴う他栄養性菌 (HET) の増殖も考慮した。ただし、ASM2 のように増殖がない場合もモデル化できるように、反応速度 P_2 はこれに伴う HET の増殖速度ではなく、DS の減少 (分解) 速度で与え、 $Y_8=0$ とすることにより従来と同じ反応を表現できるようにした。

(3) ASM2 における HET の増殖は、好気性条件下での発酵性基質 (DS)・発酵生成物 (DA) 摂取、無酸素条件下での DS・DA 摂取の 4 つのプロセスで表されているが、これらは単に電子供与体 (酸素 (O_2), 硝酸 (NO_3)) および電子受容体 (DS, DA) の種類が異なるだけであり、基本的に同一のプロセスと見なせる。そこで、ここでは HET の増殖をパスとして一体化し、逆に O_2 , NO_3 , DS, DA の利用・摂取率 (反応速度式マトリックスの変換係数 (v_{ij}) に相当する) を、それら濃度の関数で表すこととした。

以上の方法により、ASM2 の 19 プロセスが、反応過程を減ずることなく 14 となった。なお、各過程の進行による状態変数濃度の増減は詳細は論文末の表 7 のマトリックスに示す。

表3 化学組成 ($\text{CH}_x\text{N}_y\text{O}_z\text{P}_w$) からの各成分算出式および逆推定方法

成分	記号	式
SS (分子量)	MW	$c+hx+oy+nz+pw$
COD	COD	$0.5(4+x-2y-3z+5w)$
SS/COD	R_s	MW/COD
C/COD (g/g)	R_c	C/COD
N/COD (g/g)	R_n	$n \cdot Z / COD$
P/COD (g/g)	R_p	$p \cdot w / COD$
Cモル数		1 (与条件)
COD	COD	c/R_c
SS (分子量)	MW	$R_s \cdot COD$
Pモル数	w	$R_p \cdot COD$
Nモル数	z	$R_n \cdot COD$
Oモル数	y	$(v_2-v_1)/(2+o/h)$
Hモル数	x	v_1+2y

注1) c, h, o, n, p は C, H, O, N, P の原子量
注2) $v_1=2 \cdot COD / o+3n-5 \cdot p-4$
 $v_2=(R_s-c-n \cdot R_n-p \cdot R_p) / h$

表4 本研究で使用する反応速度定数及び化学量論係数の記号一覧とその代表数値例

プロセスN (k)	反応速度 定数*1 1/d	温度係 数 θ_k	変換係数*2	半飽和定数 $K_{k,j}$							無酸素補正 係数 η_k	その他
				ALK	DO	NO _x	NH ₄	PO ₄	その他			
				CaCO ₃	O ₂	N	N	P				
1	q_{10}	1.5	1.046	f_{10} 0.02	1	0.2	0.5			PS/HET 0.5	0.6	η_{fe} 0.1 *5
2	q_{12}	3.0	1.046	Y_8 0.05	1	0.2	0.5	0.05	0.01	DS 20		
3	μ_8	6.0	1.046	Y_8 0.73	1	0.2	0.5	0.05	0.01	DS 4 DA 4	0.6	
4	μ_7	1.2	1.080	Y_7 0.24 *3	10	0.5		0.50	0.01			
5	μ_6	2	1.046	Y_6 0.730	1	0.2		0.05	0.01			
6	q_5	6	1.046	Y_5 0.40 *3	1					DA 4		M_5 0.50 *6
7	q_4	10	1.046	Y_4 0.20 *3	1	0.2			0.1			M_4 0.34 *6
8	κ_{17}	10	1.072		10	*1: $\mu_j, q_j, b_j, \kappa_j$ は、それぞれ状態変数に対する最大比増殖、 最大摂取・分解、自己崩壊、化学反応速度定数を示す(21℃) *2: f_j, Y_j はそれぞれ状態変数 X_j に対する非分解成分移行率 および収率(Y_5, Y_6 は移行率) *3: Y_7, Y_5, Y_4 の単位はそれぞれCODg/Ng, P/COD, COD/P、他は無次元 *4: 半飽和定数 $K_{k,j}$ で、 k はプロセスNo、 j は関連状態変数Noを示す *5: 嫌気補正係数(－) *6: PAO中のPHA($j=5$), PP($j=4$)の最大含有率						
9	κ_3	10	1.072									
10	b_8	0.150	1.046	f_8 0.05								
11	b_7	0.072	1.046	f_7 0.05								
12	b_6	0.072	1.046	f_6 0.05								
13	b_5	0.072	1.046									
14	b_4	0.072	1.046									

*1: $\mu_j, q_j, b_j, \kappa_j$ は、それぞれ状態変数*j*に対する最大比増殖、最大摂取・分解、自己崩壊、化学反応速度定数を示す(21℃)
 *2: f_j, Y_j はそれぞれ状態変数*j*に対する非分解成分移行率および収率(Y_5, Y_6 は移行率)
 *3: Y_7, Y_5, Y_4 の単位はそれぞれCODg/Ng, P/COD, COD/P、他は無次元
 *4: 半飽和定数 $K_{k,j}$ で、*k*はプロセスNo、*j*は関連状態変数Noを示す
 *5: 嫌気補正係数(-) *6: PAO中のPHA(*j*=5), PP(*j*=4)の最大含有率

5. 反応速度式

反応速度式は、ASM2で提示された式の特性を検討し、以下の点で改良したものを本モデルで採用した。なお、速度式に用いられる係数は、表4に整理されており、これら係数は原則として関連するプロセス番号(*k*)、変数番号(*j*)で整理して表記するものとした。さらに全プロセスの速度式は論文末の表7に示してある。

(1) 全反応速度式において、温度効果の項(θ^{t-20})を追加した。

(2) HETがDS(X_{12})とDA(X_{13})との両者を利用する時、一方の単独利用に比べ、増殖速度が倍増することを防ぐため、ASM2では、基質の影響項(f_{ASM2})を $f_{ASM2} = \left(\frac{X_{13}}{X_{13} + K_{3,13}} \right) \times \left(\frac{X_{13}}{X_{13} + X_{12}} \right) + \left(\frac{X_{12}}{X_{12} + K_{3,12}} \right) \times \left(\frac{X_{12}}{X_{13} + X_{12}} \right)$ の形で示

し、各基質の存在比率と各々の影響項(モノー型)の積の和で表現している。

この f_{ASM2} が各々の基質の濃度変化に対して、どのような影響を受けるかを図2(a)で検討してみた。図は一方の基質(パラメータ: $X_{12}/K_{3,12}$)が一定の条件下で、他の基質(X_{13})濃度の影響を示している。

$X_{12}/K_{3,12}=0$ のように片方の基質がない場合には初めが一次、高濃度で一定となるモノー型の影響を表現しうが、 $X_{12}/K_{3,12}>0$ では $X_{13}/K_{3,13}$ の増加に対し一旦、1~2割程度減少の後、緩やかに増加するパターンを示し、実際の基質摂取を再現する式としては不適なことが分かった。

そこで生化学における「2つの基質に反応する1つの酵素の反応」⁶⁾の考え方を利用し、両基質の合計の影響項を $\left\{ \left(X_{13}/K_{3,13} \right) + \left(X_{12}/K_{3,12} \right) \right\} / \left\{ 1 + \left(X_{13}/K_{3,13} \right) + \left(X_{12}/K_{3,12} \right) \right\}$ とした。この場合には図2(b)の様になり、片方の基質の濃度が0の場合は他方の影響はモノー型に、一方、それ以外ではそのカーブを左方にシフトする形でより合理的に表現できることがわかった。そこで、他栄養性菌の増殖速度では本式を採用することとし、各々基質は、その半飽和定数値を加味した形での比率(表7参照)で摂取されるものとした。なお、酵素および硝酸利用に関しては、ASM2同様、スイッチ関数を利用している。

(3) 酸発酵では、他の生物増殖過程との整合性を考慮し、反応式に NH_4, PO_4 の影響項を加えた。

(4) ASM2では、PAOによるPHA貯蔵の速度式にPHA含有率が含まれていないため、PAOの増殖とPHA蓄積とが、独立した速度で進行する。したがって係数値によっては、PHAの含有率が異常となる可能性がある。そこで、濃度($Y_6=100\text{mg/l}$)一定のDA(X_{13})を含む流入水が一定流量で流入し、完全混合の槽内より希釈率 $k(1/d)$ で引き抜かれるケモスタットを想定し、数学モデルを作成した。単純化のため、DO、 NH_4 、アルカリ度、

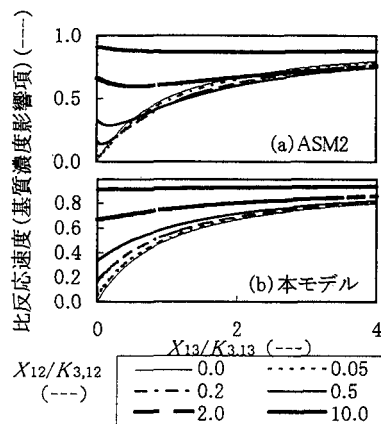


図2 複数の基質摂取における両濃度の速度への影響

PO₄が十分に槽内に存在するとし、影響はないとした。さらに、PAO、PHA、PPの自己分解速度は同値とした。

以上の仮定により得られる基礎微分方程式を表5(1)～(4)に、ASM2の反応速度式を(5)～(7)に示す。定常状態では(1)～(4)は0となり、式(5)～(7)を代入することで、X₄～X₆、X₁₂の値(正の範囲のみ)が得られる。

図3はそれを図化したものである。図に示される様に、希釈率の増加とともにDA(X₁₃)負荷量が増加し、維持可能な生物量が増大するためPAOは増加している。しかし、希釈率がさらに増加するとPAO増殖が、流出に追いつかず、希釈率0.9付近でwashoutする。その際、流出のDA濃度は急速に増加する。この間PP含有率X₄/X₆はほとんど変化していないが、PHA/PAO比はk₀=0の時の0.02からk₀=0.91の時の0.76まで大きく変化する。この比はパラメータの値によってはさらに大きく変化するが、基本的にPHAでは最大含有率が設定していないためである(PPでは最大含有率が設定されている)。

そこで、PP同様、PHAも最大含有率を持ち、PHA蓄積はPHAの不足量とPPの蓄積量に、PP蓄積はPPの不足量とPHAの蓄積量に比例するとして(表5の式(8)～(10))、それらの影響を考慮した。なお、これは植物プランクトンの増殖における内部栄養塩と植物プランクトンの変化を示すDroop式⁷⁾の応用である。このモデル式での定常解を同じく

図3に示す。PAOの保持量、DAの流出量はASM2モデルと同様のパターンとなるが、PHA/PAOはk=0の0.05に比べ、流亡直前には0.27程度まで増加するが、ASM2ほど極端な変化ではなく、実際のPAOの組成変化をより正しく表すものと思われる。よって本モデルではこの式形を利用した。

なお、これら含有率およびその不足量の影響を簡略化のため一次式で表現したことにより、同レベルの反応を進行させるために、反応速度定数はASM2に比べてかなり大きくなっている。この点はモノ

一型で表すなり、将来的に検討すべき話題ではあるが、不明の係数を増加させるのは、モデルとしては望ましいことではないとして、あえて一次反応とした。いずれにせよ、本式化によりASM2でのK_{1PP}、K_{PPMAX}、K_{PP}の3つの係数をM₄、M₆の2つに削減し、かつ実際の現象に近いより妥当なものを得た。

(6) リン蓄積菌の自己分解も、他の生物同様アルカリ度が少ない状態でも進行すると考えられる。他との整合性と簡略化のためのアルカリ度の影響項を削除した。

(7) オルトリン酸と金属塩(Ca²⁺、Fe³⁺、Al³⁺等)との化学凝集反応は、各金属イオン種に応じた至適pH値があ

表5 リン蓄積菌のケモスタットでの濃度変化基礎式

ケモスタットの基礎微分方程式	
$\frac{dX_6}{dt} = P_4 - (b_6 + k) \cdot X_6$	…(1)
$\frac{dX_5}{dt} = P_5 - \frac{P_4}{Y_7} - Y_4 \cdot P_6 - (b_6 + k) \cdot X_5$	…(2)
$\frac{dX_4}{dt} = -Y_6 \cdot P_5 + P_6 - (b_6 + k) \cdot X_4$	…(3)
$\frac{dX_{13}}{dt} = k \cdot (X_{13in} - X_{13}) - P_5$	…(4)
ASM2における反応速度式	
$P_5 = \mu_6 \cdot \frac{X_5/X_6}{K_{PHA} + X_5/X_6} \cdot X_6$	…(5)
$P_6 = q_5 \cdot \frac{X_4/X_6}{K_{PP} + X_4/X_6} \cdot \frac{X_{13}}{K_A + X_{13}} \cdot X_6$	…(6)
$P_7 = q_4 \cdot \frac{X_5/X_6}{K_{PH} + X_5/X_6} \cdot \frac{K_{MX} - X_4/X_6}{K_{1PP} + K_{MX} - X_4/X_6} \cdot X_6$	…(7)
本モデルにおける反応速度式	
$P_5 = \mu_6 \cdot \frac{(X_5/X_6)}{M_5} \cdot X_6$	…(8)
$P_6 = q_5 \cdot \frac{X_4/X_6}{M_4} \cdot \frac{M_5 - (X_5/X_6)}{M_5} \cdot X_6$	…(9)
$P_7 = q_4 \cdot \frac{X_5/X_6}{M_6} \cdot \frac{M_4 - (X_4/X_6)}{M_4} \cdot X_6$	…(10)

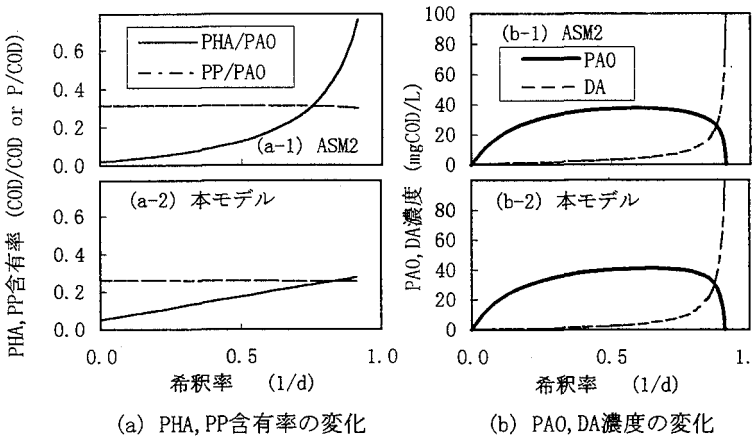


図3 リン蓄積菌増殖モデルの比較 (流入酢酸濃度Y₀=100mgCOD/L)
(本研究のモデルの係数値は表のとおり、ASM2ではμ_{PAO}=1.26、q_{PHA}=3、q_{PP}=1.5、b₆=0.2、Y₄=0.4、Y₅=0.4、Y₆=0.63、K₅=0.1、K₆=0.01、K_{1PP}=0.02、M₄=0.34、K₆=13=4)

り、それ以上、以下でも解離の方向に進む⁶⁾。
 そこで、高 pH 時に凝集速度($\text{PO}_4 \rightarrow \text{MeP}$)が大きく低下し、低 pH 時に解離速度($\text{MeP} \rightarrow \text{PO}_4$)が大きく増加する形でモデル化し、平衡条件下で至適 pH を持つように数式表現した。本式と ASM2 との違いを比較するため、初期条件でリン酸鉄のみが $Y_0 \text{ mgP/L}$ のみ存在する場合について、その平衡濃度を比較した。平衡状態では反応速度が等しいので、 $\rho_8 = \rho_9$ という関係が得られる。平衡時の PO_4 濃度を Y とすると MeOH は $Y \text{ mgP/L}$ 、
 MeP は $Y_0 - Y \text{ mgP/L}$ となり、これらを代入することで、 Y の値が反応速度定数の関数となる。表 6 に平衡となったときの濃度予測式を示す。図 4 (a), (b) にはそれぞれ平衡条件下で速度定数の比および $K_{9,18}$ をパラメータとしてアルカリ度の影響を示した。図 4 より、本モデルでは金属イオンの異なった最適 pH および最小濃度を的確に表現できるが、ASM2 では酸性に傾いたときにリン酸鉄の溶解の現象が表現できず、本モデルの方が実際の現象に近い濃度を与えることが判明した。

6. マトリックス表示

以上のまとめとして、ASM1(1987)⁹⁾中で提案されたマトリックス表示で本モデル式をあてはめて表記する(表 7)。ASM2 では、さきの ASM1 に比べ、変数、反応過程共に増え、そのレポートの中では、そのように一枚の表でマトリックス表示することが不可能となった。しかし、本研究では、以上述べたようなプロセスの結合、化学量論数係数の合理的定義によって可能となり、より単純化された数式表示が可能となった。とくに係数値等の表記では、そのサフィックスを関連反応経路 No、変数 No で示すことが役立っている。

7. モデルの検証

本モデルの性能を評価するため、文献データ⁹⁾を用いて有機物、窒素、リンの挙動を表現できるかの検証を行った。本検証データは、6つの槽よりなる A20 法及び AOA0 法のプロセスであり、主要な実験及び流入水条件を表 8 に示す。モデルの適用にあたっては、各槽完全混合槽列、最終沈殿池は完全混合の上澄層 2 層と汚泥層よりなるとして流動条件を与え、本モデル式を組み合わせて微分方程式を立て、RKG 法により数値解を得た。なお、モデル式に利用したパラメータ値は、表 1, 3 に示したものである。

図 5 は、好気槽の DO を 1 mg/L 、MLSS を報告値と同じになるように、 $k_L a$ および汚泥引抜率を操作して、約 100 日以上計算したのち、定常となった時の値を報告値と比較して示したものである。モデルに与える係数等で文献中に記されない情報は、通常の処理場条件より判断したため、完全に同データを説明しうるものではないが、窒素、リンとも両プロセスにおける変動の特徴がよく把握されている。即ち、A20 法、AOA0 法とも好気槽での NO_x の減少と NH_4 、 PO_4 の増加、好気槽での逆の過程が表現され、両方法の特徴がよくシミュレートされている。ただし、S-P において A20 法では予測値の方がやや高め、AOA0 法ではやや低めに予測

表 6 ASM2 と本研究におけるリンの凝集モデル式の比較

	ASM2	本研究
凝集速度式	$\kappa_{17} \cdot X_{17} \cdot X_2$	$\kappa_{17} \cdot \frac{1}{1 + (X_{18} / K_{9,18})} \cdot X_{17} \cdot X_2$
溶解速度式	$\kappa_3 \cdot \frac{X_{18}}{K_{9,18} + X_{18}} \cdot X_3$	$\kappa_3 \cdot \left(1 + \frac{K_{9,18}}{X_{18}} \right) \cdot X_3$
平衡濃度	$-c + \sqrt{c^2 + 2c \cdot Y_0}$	$-c + \sqrt{c^2 + 2c \cdot Y_0}$
c の値	$\frac{\kappa_3 \cdot X_{18}}{2 \cdot \kappa_{17} \cdot (X_{18} + K_{9,18})}$	$\frac{\kappa_3}{2 \cdot \kappa_{17}} \cdot \left(2 + \frac{X_{18}}{K_{9,18}} + \frac{K_{9,18}}{X_{18}} \right)$

注1) 初期に MeP のみ $Y_0 \text{ mgP/L}$ 存在する場合の最終平衡濃度
 注2) 温度効果の項は略した

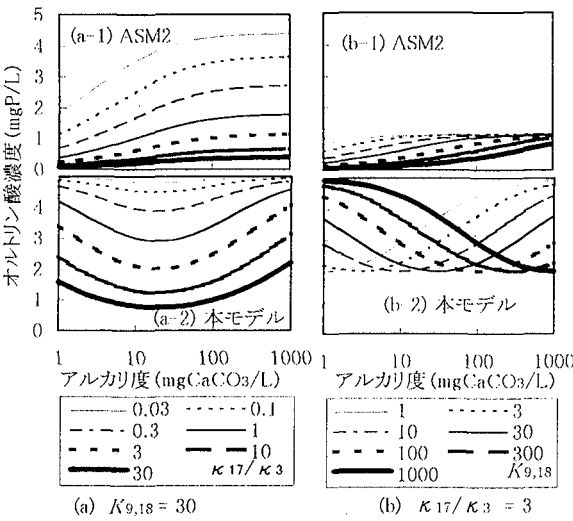


図4 リンの化学凝集反応におけるオルトリン酸濃度の比較

された。なお、図は略すがSS、BOD(換算より計算)もおおむね実測値に等しい値を得た。以上より、両プロセスの特徴を本モデルで説明することが可能であり、活性汚泥の浄化機能評価に本モデルが利用可能と考えられる。

8. おわりに

本研究では、ASM2 を参考に活性汚泥による有機物、窒素、リン除去の挙動をより正確でかつシンプルな表現のモデルを提案した。以下主要な成果をまとめる。

(1) 加水分解過程の3つの経路、およびHETの増殖過程の4つの経路をそれぞれ一本化するなどにより、反応の機構の詳細さを保ちつつ、変数プロセスを合理化、簡略化した。

(2) HET 増殖の反応速度式において、基質の影響項を「2つの基質に反応する1つの酵素の反応」の考え方を利用したことにより実際の基質摂取を合理的に表現できる。

(3) PAO の PHA 貯蔵速度式において、PHA 含有率を設定したことにより、PAO の増殖と PHA 蓄積とが独立した速度で進行しないようにし、実際のPAOの挙動をより正しく表現した。

(4) リンの化学凝集・解離反応を単純な式でより正しく表現できた。

参考文献

1) Mogens Henze(Cairman), Willi Gujer, Takahashi Mino, Tomonori Matsuo, Mark C. Wrrntzel v. R. Msraiss : 「Activated Sludge Model No. 2」 IAWQ Scientific and Technical Report NO.3 (1995)

2) 藤井滋穂、川崎重紀、浦野敦只: 「ビジュアルベシックによる下水処理場水質管理ソフトの開発」第32回下水道研究発表会講演集(1994)

3) 藤井滋穂、安東武智、川崎重紀: 「処理場水質管理ソフトへの汎用汚泥処理モデルの組み込みと汚泥プロセスの機能評価」第30回日本水環境学会年会講演集(1996)P. 365

4) 秋山高: 「水質汚濁の指標とその応用」 水処理技術 14、361-378 (1970)

5) JAMES E. BAILEY, DAVID F. OLLIS: 「BIOCHEMICAL ENGINEERING FUNDAMENTALS SECOND EDITION」 Library of Congress Cataloging-in-Publication Data P. 116 (1986)

6) Werner Stumm / James J. Morgan 著安部喜也、半谷高久訳: 「一般水質化学」 共立出版株式会社 下巻、P. 485 (1970)

7) Droop, M. R. : 「Vitamin B₁₂ and marine ecology. IV. The kinetics of uptake, growth and inhibition in *Monochrysis lutheri*.」 J. Mar. biol. Ass. U. K., 48, 689-733

8) M. Henze, C. P. L. Grady, W. Gujer, G. R. Marais and T. Matsuo: 「Activated Sludge Model No. 1」 IAWPRC (1987)

9) 藪内章二: 「10-29 嫌気・硝化内生脱窒法と嫌気・無酸素好気法による窒素・リンの同時除去実験」第31回下水道研究発表会講演集 (1994)

10) 合田剛、宗宮功、河村清史: 「都市下水のエネルギー評価と有機物指標」 下水道協会誌 Vol. 11 No. 127 1974/12

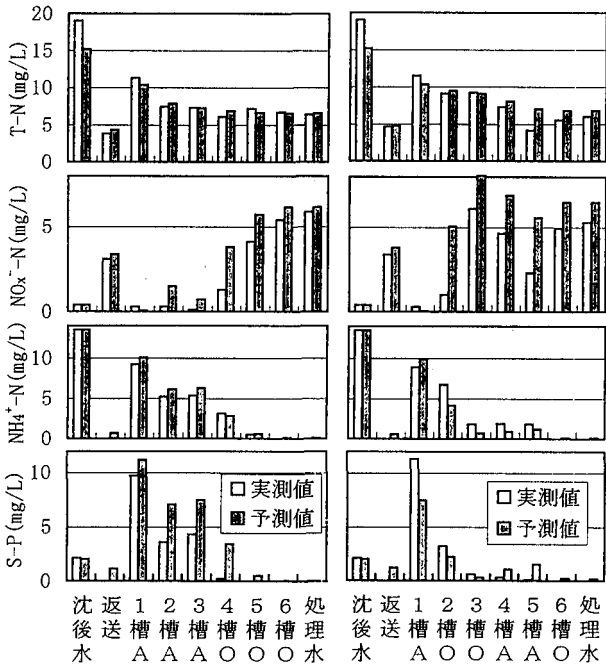
表 8 検証データの実験の条件
(a) 装置諸元および操作条件

	単位	A2O	AOAO
流入水量	m ³ /d	3.3	3.2
循環率*	%	100	---
返送率	%	50	50
MLSS	mg/L	2700	2600
総滞留時間	hr	8	8
好気嫌気**		AAAOO	AOAAO
水温	℃	18	18
TN/SS負荷	g/kg・d	24	25
BOD/SS負荷	g/kg・d	0.06	0.06
SRT	日	15.8	18.5

*第2槽流入, **A(無曝気), O(曝気)

(b) 流入水質

	単位	実 測	モデル
BOD	mg/L	50	51
COD	mg/L	38	112
SS	mg/L	32	56
T-N	mg/L	19	18.5
NH ₄ -N	mg/L	13.5	13.5
NO ₃ -N	mg/L	0.4	0.4
S-P	mg/L	2.1	2.1



(a) A2O

(b) AOAO

図5 実測値とシミュレーション結果との比較

表 7 水質浄化モデルのマトリックス表

	X_1	X_2	X_3	X_4	X_5	X_6	X_7	X_8	X_9	X_{10}	X_{11}	X_{12}	X_{13}	X_{14}	X_{15}	X_{16}	X_{17}	X_{18}	反応速度式
P_1										-1	f_{10}	$1-f_{10}$				ν_{1,NH_4}	ν_{1,PO_4}	$\nu_{1,ALK}$	$\rho_1 = q_{10} \cdot \theta_1^{1-20} \times \#1 \times X_8$
P_2								Y_8				-1	$1-Y_8$						$\rho_2 = q_{12} \cdot \theta_2^{1-20} \times \#2 \times X_8$
P_3							1					$\frac{-f_{12}}{(f_{12}+f_{13})} Y_8$	$\frac{-f_{13}}{(f_{12}+f_{13})} Y_8$						$\rho_3 = \mu_8 \cdot \theta_3^{1-20} \times \#3 \times X_8$
P_4							1									$-1_{N,T} \cdot (1/Y_T)$	$-1_{P,T}$		$\rho_4 = \mu_7 \cdot \theta_4^{1-20} \times \#4 \times X_7$
P_5					$\frac{1}{Y_6}$	1											$-1_{P,6}$		$\rho_5 = \mu_6 \cdot \theta_5^{1-20} \times \#5 \times X_5$
P_6				$-Y_6$	1												Y_6		$\rho_6 = q_5 \cdot \theta_6^{1-20} \times \#6 \times X_5$
P_7				1	$-Y_4$												-1		$\rho_7 = q_{14} \cdot \theta_7^{1-20} \times \#7 \times X_6$
P_8		-1	1													$\nu_{9,ALK}$	-1		$\rho_8 = \kappa_{17} \cdot \theta_8^{1-20} \times \#8 \times X_{17}$
P_9		1	-1													$\nu_{9,ALK}$	1		$\rho_9 = \kappa_3 \cdot \theta_9^{1-20} \times \#9 \times X_3$
P_{10}								-1	f_8	$1-f_8$									$\rho_{10} = b_8 \cdot \theta_{10}^{1-20} \times X_8$
P_{11}							-1		f_7	$1-f_7$						$\nu_{10,ALK}$	ν_{10,PO_4}		$\rho_{11} = b_7 \cdot \theta_{11}^{1-20} \times X_7$
P_{12}						-1			f_6	$1-f_6$							ν_{11,PO_4}		$\rho_{12} = b_6 \cdot \theta_{12}^{1-20} \times X_6$
P_{13}													1						$\rho_{13} = b_5 \cdot \theta_{13}^{1-20} \times X_5$
P_{14}				-1													1		$\rho_{14} = b_4 \cdot \theta_{14}^{1-20} \times X_4$

化学同論係数

他栄養性菌収率: Y_6, Y_7 (COD/COD)

自栄養性菌収率: Y_7 (COD/N)

リン蓄積菌収率: Y_6 (COD/COD)

PHA 貯蔵に要する PP: Y_6 (P/COD)

PP 貯蔵に要する PHA: Y_4 (COD/COD)

生物量のリン含有率: i_{PPM} (P/COD)

浮遊性基質の不活性部分: f_{10} (COD/COD)

生物分解で生じる不活性部分: $f_{e \sim s}$ (COD/COD)

プロセス i における成分 j に対する化学同論係数: ν_{ij}

成分 i の単位を物質 c の単位に切り替える転換因子: i_{ci}

$\sum \nu_{ij} \cdot i_{ci} = 0$

ここで ρ : 反応速度 μ, q, b, κ : 反応速度定数

θ : 温度係数 M : 最大貯蔵比

$f_{12} = S_6/K_F$ $f_{15} = S_6/K_{15}$ $f_{14} = X_{14}/(K_{3,14} + X_{14})$ $f_{15} = \mu_{NO_3} \cdot K_{3,14}/(K_{3,14} + X_{14}) \cdot X_{15}/(K_{3,15} + X_{15})$

$\#1 = \frac{X_{10}/X_8}{K_8 + X_{10}/X_8} \times \frac{(S_{14}/K_{1,14}) \{1 + (X_{15}/K_{1,15})\} + \eta_{NO_3} \cdot (X_{15}/K_{1,15})}{\{1 + (S_{14}/K_{1,14})\} \{1 + (X_{15}/K_{1,15})\}}$

$\#2 = \frac{K_{2,14}}{K_{2,14} + X_{14}} \times \frac{K_{2,15}}{K_{2,15} + X_{15}} \times M_{O_2}(X_{12}, X_{16}, X_{17}, X_{18})$ $\#3 = \frac{f_{12} + f_{13}}{1 + f_{12} + f_{13}} \times (f_{14} + f_{15}) \times M_{O_3}(X_{16}, X_{17}, X_{18})$

$\#4 = M_{O_4}(X_{14}, X_{15}, X_{17}, X_{18})$ $\#5 = \frac{X_5/X_6}{M_{PHK}} \times M_{O_5}(X_{14}, X_{16}, X_{17}, X_{18})$

$\#6 = \frac{X_4/X_6}{M_4} \times \frac{M_5 - (X_5/X_6)}{M_5} \times M_{O_6}(X_{18})$ $\#7 = \frac{X_5/X_6}{M_5} \times \frac{M_4 - (X_4/X_6)}{M_4} \times M_{O_7}(X_{14}, X_{17}, X_{18})$

$\#8 = \frac{1}{1 + (X_{16}/K_{3,16})} \times X_2$ $\#9 = 1 + (K_{3,18}/X_{18})$

ただし $M_{O_i}(X_{j1}, X_{j2}, \dots) = \frac{X_{j1}}{K_{i,j1} + X_{j1}} \times \frac{X_{j2}}{K_{i,j2} + X_{j2}} \dots$