

(19) 好気性ろ床における処理機構のモデル化に関する研究

Modeling of treatment mechanism in aerated filter

日高 平*、津野 洋*、宗宮 功**

Taira HIDAKA*, Hiroshi TSUNO*, Isao SOMIYA**

Abstract; A kinetic model of an aerated filter is developed. The aerated filter has the combined functions of biofilm reactor for biodegradation of organic matter and filter for removal of SS under aeration. The filter considered here is an upflow type filter with a sedimentation part at the bottom part. The developed model is applied to an aerated filter incorporated into the pre-coagulation and biofilm reactor process, in which removal of nitrogen and phosphorus as well as organic matter is intended. The aerated filter is applied after the position of denitrification tank in the nitrification-denitrification biofilm process to be expected to remove residual organic matter and SS and to restore DO concentration. The developed model is verified by comparing calculated results with the experimentally obtained data. It is clarified by using this model that the ideal height of the filter is about 2700 mm and the operational HRT of 1 h in the aerated filter can be available in this process.

Key word; aerated filter, kinetic model, pre-coagulation and biofilm process

1. はじめに

好気性ろ床法は、生物膜の付着した粒状ろ材を反応槽に充填し下部からの散気によりろ床内を好気状態とし、ろ材およびろ材に付着した微生物により SS のろ過と溶解性物質の吸着酸化とを同時に行う処理法である。生物膜ろ過法、曝気ろ過法とも呼ばれ、従来の生物学的反応器より、省スペースで高度の処理が期待されている。近年の研究例では、窒素除去プロセスや下水再利用のための処理プロセスなどとして、種々の適用法がみられる^{1),2)}。筆者らも、都市下水を対象として、好気性ろ床を組み込んだ前凝集・生物膜プロセスの処理特性および設計操作因子の検討を、パイロットプラント規模の実験により試みた³⁾。その結果、水温 20℃を下回る低水温期においても生物反応器の水理学的滞留時間(HRT) 8 h で、流出 SS 濃度は 5 mg/L 以下を、流出 T-ATU-BOD 濃度は 5 mg/L 以下を、流出 T-N 濃度は 3 mgN/L 以下を、そして流出 T-P 濃度は 1 mgP/L 以下を安定して保つことができた。生物処理の最終部に組み込んだ好気性ろ床は、目的とした残存有機物および SS 成分の除去、ならびに DO 濃度の回復の機能を十分に果たした。最終沈殿池を省略することで建設費および処理時間を削減でき、本プロセスは既存の施設を活用した都市下水の高度処理に適用可能であることが示された。しかしながら、好気性ろ床における処理機構の把握および最適な設計操作因子の検討のために、好気性ろ床のモデル化が重要であると考えられる。

*京都大学大学院工学研究科附属環境質制御研究センター (Research Center for Environmental Quality Control, Kyoto University),

**京都大学大学院工学研究科環境工学専攻 (Department of Environmental Engineering, Kyoto University)

好気性ろ床は処理機構として、ろ過といった物理学的効果とともにろ床表面に付着増殖した生物膜の水質変換機構をも有しており、それらを考慮したモデル化が必要である。そこで本研究では、好気性ろ床の流動と種々の処理機構に着目し、これらを組み合わせ数理モデルの構築を行い、そのモデルを用いて設計操作因子の検討を試みる。

2. 好気性ろ床のモデル化

2.1 モデルの概要

好気性ろ床の概念図を Fig. 1 に示す。モデル化対象の好気性ろ床は、底部に沈殿部分(ろ床下部)を有する上向流式ろ床とした。流動状態は、ろ床下部では分散を伴う完全混合槽列モデルで、ろ床部分は循環流を伴う完全混合槽列モデルで、ろ床上部は完全混合槽列モデルで表示した。そして、各処理機構を表現するために、水質変換モデルおよび SS 挙動モデルを組み合わせた。

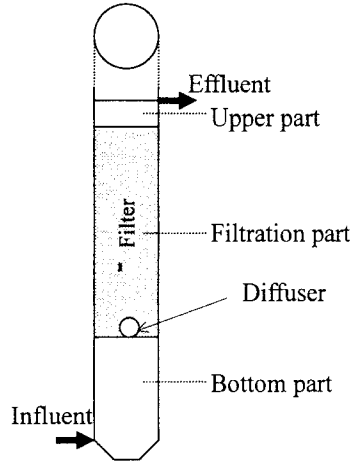


Fig.1 Schematic diagram of the aerated filter

2.2 水質変換モデル

本研究の対象プロセスでの水質変換機構は、付着性微生物を主とする微生物による有機物の酸化分解であり、水質変換モデルは津野ほか⁴⁾のモデルを基本とした。水質変換機構の状態変数を Table 1 に、モデル概念図を Fig. 2 に示す。状態変数として、難分解性溶解性有機物(C_1)、易分解性溶解性有機物(C_2)、溶存酸素(C_3)、難分解性固形性有機物(C_{p1})、易分解性固形性有機物(C_{p2})、浮遊性他栄養性細菌(C_{p3})、および付着性他栄養性細菌(Cr)を設定した。易分解性固形性有機物は他栄養性細菌によって可溶化されて(R_1)、難分解性溶解性有機物および易分解性溶解性有機物となり、その割合はそれぞれ(Y_c)および($1-Y_c$)である。易分解性溶解性有機物は他栄養性細菌によって摂取され(R_2)、(Y)の割合で生物体に固定され、($1-Y$)の割合で分解されて二酸化炭素となる。細菌死滅後(R_3)は、($1-\xi$)の割合で自己分解されて二酸化炭素になり、残りの(ξ)が(A)および($1-A$)の割合で難分解性固形性有機物または易分解性固形性有機物となる。他栄養性細菌は、浮遊性と付着性の両者が増殖し、かつそれぞれ両者の間で付着(R_{4a})および剥離(R_{4b})が行われるとして、ろ材上での生物膜形成を表現した。Table 2 に各変換過程とその変化速度および反応速度に及ぼす環境因子の影響に関する数式表現を示す。反応速度の数式表現にあたって、基質摂取などに関しては、0 次反応から 1 次反応までを表現できる Michaelis-Menten 型の式で、微生物濃度に関しては 1 次反応で表現した。そして、温度影響(f_θ)や、担体表面での微生物の混雑効果(f_i)、剥離促進効果(f_{di})を考慮した。なお、物質収支は CODCr 基準[mgCOD]でとり、ろ

Table 1 State variables

Symbol	State Variable	Dimension
C_1	Recalcitrant dissolved organic compounds	mgCOD/L
C_2	Biodegradable dissolved organic compounds	mgCOD/L
C_3	Dissolved oxygen	mgO ₂ /L
C_{p1} (C_{q1})	Recalcitrant particulate organic compounds	mgCOD/L (mgCOD/m ²)
C_{p2} (C_{q2})	Biodegradable particulate organic compounds	mgCOD/L (mgCOD/m ²)
C_{p3} (C_{q3})	Suspended heterotrophic bacteria	mgCOD/L (mgCOD/m ²)
Cr	Attached heterotrophic bacteria	mgCOD/m ²

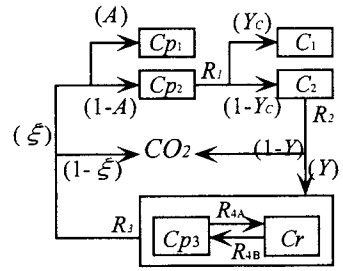


Fig. 2 State variables and transformation paths

床部における濃度は空隙体積を基準とした。

曝気部における酸素移動に関しては以下の式により総括酸素移動容量係数を表現した^{5),6)}。

$$K_L a = K_L a(20) \cdot 1.024^{T-20} \quad (1)$$

$$O^* = \left(14.16 - 0.3943T + 0.007714T^2 - 0.0000646T^3 \right) \times \left(1 + \frac{H/2}{10.24} \right) \quad (2)$$

ここで、 $K_L a$ は総括酸素移動容量係数[1/h]、 $K_L a(20)$ は水温 20℃ における $K_L a$ [1/h]、 T は水温[℃]、 O^* は飽和溶存酸素濃度[mgO₂/L]、および H は水深[m]である。細菌による有機物の無機化時には γ_{CO} [mgO₂/mgCOD]の、細菌の自己分解時には γ_{Bo} [mgO₂/mgCOD]の酸素が消費されるとした。これらより DO 収支をとることで、空気量の影響を検討できるようにした。

以上をまとめて、ある完全混合槽 j での水質変換に関しての、各状態変数の変化速度は、Table 3 に示すとおりである。

Table 2 Reaction paths and their rate equations

1. Hydrolysis of particulate organic compounds		note.
$R_{1A} = k_1 \cdot \frac{C_{p2}}{K_1 + C_{p2}} \cdot C_{p3} \cdot f_{\theta_1}$	[mgCOD/(L·h)]	R_A ; reaction by suspended bacteria
$R_{1B} = k_1 \cdot \frac{C_{p2}}{K_1 + C_{p2}} \cdot Cr \cdot f_{\theta_1} \cdot f_l$	[mgCOD/(m ² ·h)]	R_B ; reaction by attached bacteria
2. Uptake of biological dissolved organic compounds		Rate coefficient
$R_{2A} = k_2 \cdot \frac{C_2}{K_2 + C_2} \cdot \frac{C_3}{K_{O2} + C_3} \cdot C_{p3} \cdot f_{\theta_2}$	[mgCOD/(L·h)]	k_1 ; [mgCOD/(mgCOD·h)]
$R_{2B} = k_2 \cdot \frac{C_2}{K_2 + C_2} \cdot \frac{C_3}{K_{O2} + C_3} \cdot Cr \cdot f_{\theta_2} \cdot f_l$	[mgCOD/(m ² ·h)]	k_2 ; [mgCOD/(mgCOD·h)]
		k_3 ; [1/h]
		k_{4A} ; [1/h]
		k_{4B} ; [1/h]
3. Self-degradation of heterotrophic bacteria		Half-saturation constants
$R_{3A} = k_3 \cdot \frac{C_3}{K_{O3} + C_3} \cdot C_{p3} \cdot f_{\theta_1}$	[mgCOD/(L·h)]	K_1 ; [mgCOD/L]
$R_{3B} = k_3 \cdot \frac{C_3}{K_{O3} + C_3} \cdot Cr \cdot f_{\theta_1}$	[mgCOD/(m ² ·h)]	K_2 ; [mgCOD/L]
		K_{O2} ; [mgO ₂ /L]
		K_{O3} ; [mgO ₂ /L]
4A. Attachment of heterotrophic bacteria		Correction factor for temperature
$R_{4A} = k_{4A} \cdot C_{p3}$	[mgCOD/(L·h)]	θ_1 ; [-]
		θ_2 ; [-]
4B. Detachment of heterotrophic bacteria		Temperature
$R_{4B} = k_{4B} \cdot Cr \cdot f_{dt}$	[mgCOD/(m ² ·h)]	T ; [°C]
Effect of temperature		Bacteria density when limitation exerts
$f_{\theta_1} = \theta_1^{T-20}, \quad f_{\theta_2} = \theta_2^{T-20}$	[-]	Cr_i ; [mgCOD/m ²]
Limitation of bacterial growth on attached surface		Maximum bacteria density
$f_l = 1; \text{if}(Cr \leq Cr_l), \quad 1 - \frac{Cr - Cr_l}{Cr_{\max} - Cr_l}; \text{if}(Cr > Cr_l)$	[-]	$Cr_{\max}$; [mgCOD/m ²]
Acceleration of detachment		Detachment constant
$f_{dt} = 1; \text{if}(Cr \leq Cr_l), \quad 1 + D_A \cdot \frac{Cr - Cr_l}{Cr_{\max} - Cr_l}; \text{if}(Cr > Cr_l)$	[-]	D_A ; [-]

Table 3 Changing rate of each state variable

C_1	$F_{C_1,j} = Y_C(R_{1A} + \omega R_{1B})$	mg/(L·h)
C_2	$F_{C_2,j} = (1 - Y_C)(R_{1A} + \omega R_{1B}) - (R_{2A} + \omega R_{2B})$	mg/(L·h)
C_3	$F_{C_3,j} = K_L a(O^* - C_3) - \gamma_{CO}(1 - Y_C)(R_{2A} + \omega R_{2B}) - \gamma_{BO}(1 - \xi)(R_{3A} + \omega R_{3B})$	mg/(L·h)
C_{p1}	$F_{C_{p1},j} = \xi A_1(R_{3A} + \omega R_{3B})$	mg/(L·h)
C_{p2}	$F_{C_{p2},j} = \xi(1 - A_1)(R_{3A} + \omega R_{3B}) - (R_{1A} + \omega R_{1B})$	mg/(L·h)
C_{p3}	$F_{C_{p3},j} = YR_{2A} - R_{3A} - R_{4A} + \omega R_{4B}$	mg/(L·h)
Cr	$F_{Cr,j} = YR_{2B} - R_{3B} + \frac{R_{4A}}{\omega} - R_{4B}$	mg/(m ² ·h)

note. ω ; [m²-(surface area of media)/L-(reactor volume)]

2.3 SS 挙動モデル

本研究では、ろ床下部における SS 成分の沈降特性、ろ床部における SS 成分の除去特性を表現するモデルを作成した。

(1)ろ床下部

好気性ろ床は上向流式で運転したので、ろ床下部が沈殿池として機能した。しかし、曝気による水流の乱れのため、沈殿池としての機能の低下が認められたので、分散により水流の乱れを表現した。ろ床下部のモデル概念図を Fig. 3 に示す。 n_b 槽に分割し、流入水を第 0 槽、流入口より下の部分を第 s 槽(沈殿部分)とした。物質収支式は以下のとおりである。

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{dC_{i,s}}{dt} = \frac{D}{L^2}(-C_{i,s} + C_{i,1}) + F_{C_{i,s}} \end{array} \right. \quad (3)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{dC_{i,1}}{dt} = \frac{Q}{V}(C_{i,0} - C_{i,1}) + \frac{D}{L^2}(C_{i,s} - 2C_{i,1} + C_{i,2}) + F_{C_{i,1}} \end{array} \right. \quad (4)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{dC_{i,j}}{dt} = \frac{Q}{V}(C_{i,j-1} - C_{i,j}) + \frac{D}{L^2}(C_{i,j-1} - 2C_{i,j} + C_{i,j+1}) + F_{C_{i,j}} \quad (j=2 \sim n_b-1) \end{array} \right. \quad (5)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{dC_{i,n_b}}{dt} = \frac{Q}{V}(C_{i,n_b-1} - C_{i,n_b}) + \frac{D}{L^2}(C_{i,n_b-1} - C_{i,n_b}) + F_{C_{i,n_b}} \end{array} \right. \quad (6)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{dC_{p1,s}}{dt} = \frac{k_s}{L}C_{p1,1} + \frac{D}{L^2}(-C_{p1,s} + C_{p1,1}) + F_{C_{p1,s}} \end{array} \right. \quad (7)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{dC_{p1,1}}{dt} = \frac{Q}{V}(C_{p1,0} - C_{p1,1}) - \frac{k_s}{L}(C_{p1,1} - C_{p1,2}) + \frac{D}{L^2}(C_{p1,s} - 2C_{p1,1} + C_{p1,2}) + F_{C_{p1,1}} \end{array} \right. \quad (8)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{dC_{p1,j}}{dt} = \frac{Q}{V}(C_{p1,j-1} - C_{p1,j}) - \frac{k_s}{L}(C_{p1,j} - C_{p1,j+1}) + \frac{D}{L^2}(C_{p1,j-1} - 2C_{p1,j} + C_{p1,j+1}) + F_{C_{p1,j}} \quad (j=2 \sim n_b-1) \end{array} \right. \quad (9)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{dC_{p1,n_b}}{dt} = \frac{Q}{V}(C_{p1,n_b-1} - C_{p1,n_b}) - \frac{k_s}{L}C_{p1,n_b} + \frac{D}{L^2}(C_{p1,n_b-1} - C_{p1,n_b}) + F_{C_{p1,n_b}} \end{array} \right. \quad (10)$$

ここで、 $C_{i,j}$ は第 j 槽における溶解性成分 i の濃度[mg/L]、 $C_{p1,j}$ は第 j 槽における SS 成分 i の濃度[mg/L]、 $F_{C_{i,j}}$ 、 $F_{C_{p1,j}}$ は Table 3 に示す各状態変数の変化速度[mg/(L·h)]、 k_s は沈降速度係数[m/h]、 Q は流量[m³/h]、 V は各槽の体積[m³]、 D は分散係数[m²/h]、 n_b はろ床下部の分割槽数[-]、 L は各槽間の中心距離[m]、および t は時間[h] である。通水速度(LV)が沈殿率に大きな影響を与えることが考えられるので、分散係数(D)は LV の値に応じて変化させた。

(2)ろ床部

急速ろ過においては、ろ過方向の懸濁物濃度の減少速度が懸濁物濃度に関して一次反応であるという岩崎の式をはじめとして種々のモデル式が提唱されている。芝⁷⁾は、モデルの簡素化を意図し、独自に定義した「岩崎数」を懸濁物濃度に乗じて付着および剥離を一次反応により一括して表現している。これらを考慮しながら、本研究ではSS成分の付着および剥離を別々に1次反応として表現した。なお、ここではSS成分のろ過による捕捉を検討しており、水質変換モデルの項で述べた他栄養性細菌のろ材への付着および剥離による生物膜の形成とは区別した。ろ床内は、ろ床厚の検討を行うために、 n_f 槽への分割を行った。溶解性成分と固形性成分の挙動は異なるので、それぞれの槽で循環流を伴う完全混合を仮定し、一度ある槽を通過した固形性成分は同一の槽で捕捉されないとした。故に、循環流は溶解性成分についてのみを検討した。モデルの概念図を Fig. 4 に示す。物質収支式は以下の式に表される。

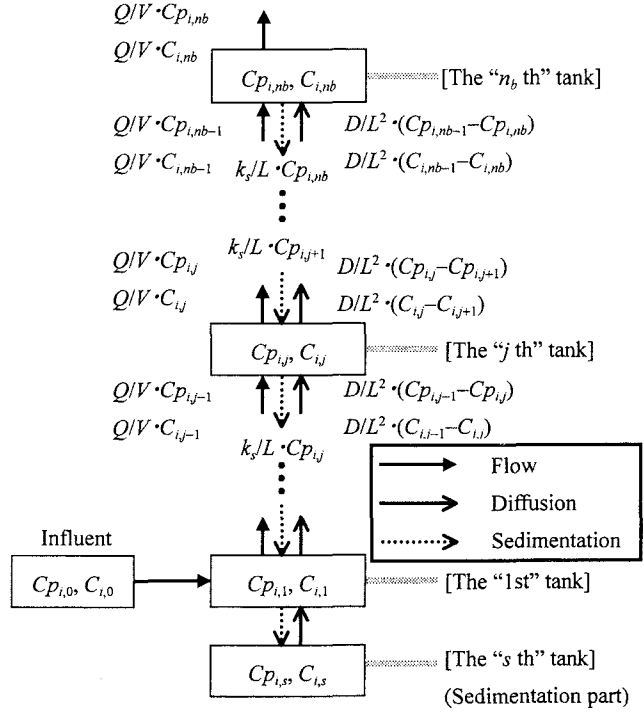


Fig. 3 The concept of the bottom part

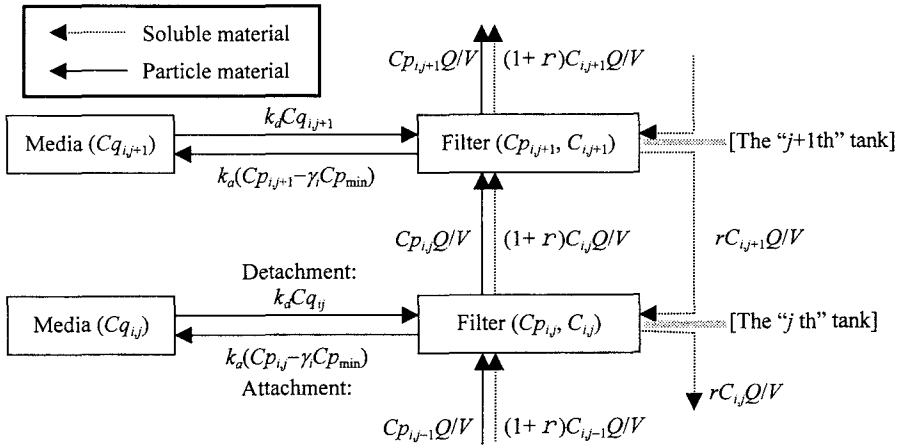


Fig. 4 The concept of the filtration part

$$\left\{ \begin{aligned} \frac{dC_{i,1}}{dt} &= \frac{Q}{V} C_{i,0} + r \frac{Q}{V} C_{i,2} - (1+r) \frac{Q}{V} C_{i,1} + F_{C_{i,1}} \end{aligned} \right. \quad (11)$$

$$\left\{ \begin{aligned} \frac{dC_{i,j}}{dt} &= (1+r) \frac{Q}{V} C_{i,j-1} + r \frac{Q}{V} C_{i,j+1} - (1+2r) \frac{Q}{V} C_{i,j} + F_{C_{i,j}} \end{aligned} \right. \quad (j=2 \sim n_f-1) \quad (12)$$

$$\left\{ \begin{aligned} \frac{dC_{i,n_f}}{dt} &= (1+r) \frac{Q}{V} C_{i,n_f-1} - (1+r) \frac{Q}{V} C_{i,n_f} + F_{C_{i,n_f}} \end{aligned} \right. \quad (13)$$

$$\frac{dCp_{i,j}}{dt} = \frac{Q}{V} Cp_{i,j-1} - \frac{Q}{V} Cp_{i,j} - k_a (Cp_{i,j} - \gamma_i Cp_{\min}) + k_d \omega Cq_{i,j} + F_{Cp_{i,j}} \quad (j=1 \sim n_f) \quad (14)$$

$$\frac{dCq_{i,j}}{dt} = \frac{k_a}{\omega} (Cp_{i,j} - \gamma_i Cp_{\min}) - k_d Cq_{i,j} + F_{Cq_{i,j}} \quad (j=1 \sim n_f) \quad (15)$$

$$\frac{dCr_j}{dt} = F_{Cr,j} \quad (j=1 \sim n_f) \quad (16)$$

ここで、 r は流入水に対する循環率[-]、 $Cp_{i,j}$ は第 j 槽におけるろ床内 SS 成分 i の濃度[mg/L]、 $Cq_{i,j}$ は第 j 槽におけるろ材に付着した SS 成分 i の単位ろ材表面積あたりの量[mg/m²]、 F_{Cr} は Table 3 に示す Cr の変化速度[mg/(m²・h)]、 k_a は SS 付着速度定数[1/h]、 k_d は SS 剥離速度定数[1/h]、 γ_i は SS 中の成分 i の全 SS 成分中にしめる割合($\sum \gamma_i=1$)、 $Cp_{\min}$ は最低流出 SS 濃度[mg/L]、 n_f はろ床部の分割槽数[-]、および ω は単位反応器体積あたりのろ材表面積[m²/L]である。 $Cq_{i,j}$ についても、 $Cp_{i,j}$ と同様の水質変換を考慮し、その変化速度 $F_{Cq_{i,j}}$ [mg/(m²・h)]は、 $F_{Cp_{i,j}}$ と同様にして算出した。各速度定数の値は、単純化のために SS 捕捉量によらず一定とした。ろ材径は砂ろ過に比べて大きく洗浄直後でも流出 SS=0 とはならなかったので、最低流出濃度 $Cp_{\min}$ [mg/L]を超える SS 成分についてろ材による捕捉を考えた。

(3)ろ床上部

ろ床上部は n_u 槽に分割した完全混合槽列モデルで表現し、物質収支式は以下のとおりとなる。

$$\frac{dC_{i,j}}{dt} = \frac{Q}{V} (C_{i,j-1} - C_{i,j}) + F_{C_{i,j}} \quad (j=1 \sim n_u) \quad (17)$$

$$\frac{dCp_{i,j}}{dt} = \frac{Q}{V} (Cp_{i,j-1} - Cp_{i,j}) + F_{Cp_{i,j}} \quad (j=1 \sim n_u) \quad (18)$$

ここで、 n_u はろ床上部の分割槽数[-]である。

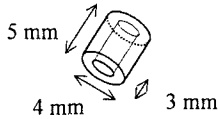


Fig.5 Schematic diagram of the filtration media

Table 4 Experimental conditions

Run No.		1	2	3	4
Date		'98/1/27 ~3/18	'98/3/31 ~6/18	'98/6/19 ~7/24	'98/7/25 ~9/10
Time elapsed	day	1~49	63~142	143~179	180~226
Temperature	°C	18~19	20~27	26~32	30~33
LV	m/day	21	21	21~62	21
Aeration rate	m ³ /(m ³ ・h)	2.4~6.0	0.6~1.8	0.6	0.6~1.2
Height of filter	mm	1100	1100	1100	550

Table 5 Rate constants and coefficients for biochemical reactions

k_1	0.07	K_1	360	A	0.5	γ_{CO}	1
k_2	0.2	K_2	20	Y_C	0.01	γ_{BO}	1
k_3	0.005	K_{O_2}	0.5	θ_1	1.02	Cr_i	3000
k_{4A}	0.01	K_{O_3}	0.5	θ_2	1.02	Cr_{max}	6000
k_{4B}	0.002	ξ	0.3	Y	0.5	D_A	10

Table 6 Values for the proposed model of aerated filter

Bottom part
$D=-0.0022y+0.156$ [m ² /h] ($y<69.3$)
$D=0.0036$ [m ² /h] ($y\geq 69.3$)
$k_s=2.82$ [m/h]
Filtration part
$K_La(20)=1.94x^{0.695}$ [1/h]
$k_d=150$ [1/h]
$k_d=0.005y+0.565$ [1/h] ($x=0.6$)
$k_d=0.235x+0.53$ [1/h] ($y=21$)
$r=0.1$ [-]
$Cp_{min}=2.3$ [mg/L]
Upper part
$K_La(20)=3.48x^{0.850}$ [1/h]

x :Aeration rate [m³/(m³·h)],

y :LV [m/day]

3. モデルの実行

3.1 実験概要³⁾

モデルの検証は、パイロットプラント実験により得られたデータを用いて行った。実験に用いた好気性ろ床は、直径 300 mm、高さ 1800 mm、体積は 124 L である。ろ床内には Fig. 5 に示す形の比重が 0.8~0.9 であるポリプロピレン製ろ材を充填した。運転方法は上向流式として、ろ床下端に設置した散気管により曝気を行った。

好気性ろ床内の流動状態は、完全混合槽列モデルで表現した。理論槽数は、トレーサー実験に基づいて決定した。トレーサー実験は、エタノールにより比重調整を行った塩化ナトリウム水溶液を流入部に瞬間的に投入し、流出部で電気伝導度を測定することで行った。 K_La は塩化コバルトを触媒とした、亜硫酸ナトリウムによる非定常法により測定した。

連続運転実験では、都市下水を対象とした前凝集・生物膜プロセスにおいて、「好気槽での有機物除去および硝化; アルカリ剤を添加(4 h)」―「無酸素槽での脱窒; 有機物を添加(2 h)」の後段に仕上げる処理として好気性ろ床を組み込んだ。その目的は、残存有機物および SS 成分の除去、ならびに DO 濃度の回復である。好気性ろ床の運転条件は、Table 4 に示すとおりである。Run 1 および Run 2 では空気量を、Run 3 では LV を変化させながら運転し、Run 4 ではろ床厚を半分にした。1~2 日に一回洗浄操作を行いながら連続運転を行い、各種水質項目を測定して処理特性を把握した。そして、捕捉 SS 量や沈殿汚泥量を測定することで、SS 除去特性について検討した。汚泥の沈降速度は、好気性ろ床への流入水 20 L を採取し、攪拌後静置し、実験装置の沈殿部分に相当する水面下 15 cm の地点で SS 濃度の経時変化を測定することで求めた⁸⁾。

3.2 実験結果とシミュレーションの比較

水質変換モデルに用いた諸係数一覧を、Table 5 に示す。これらの値はすべて、文献^{4), 9), 10), 11)}を参考に決定しており、基本的に他の文献と比較してほぼ妥当な範囲内である。SS 挙動モデルで設定した諸係数は Table 6 にまとめたとおりであり、こちらはいずれも実験により得られた値である。

まず流動特性の検証を行った。理論槽数は、トレーサー実験結果および SS 捕捉特性からの考察より、ろ床下部(14 槽)、ろ床部(10 槽)、およびろ床上部(1 槽)の 3 部分に分割した。空気量 0.6、1.8、および 3.6 m³/(m³·h) の場合の流出部での無次元化時間 $q[-]$ と残余率 $E(\tau)$ の関係について、実験結果をプロットで、計算結果を曲

線で、Fig. 6 に示す。これより、好気性ろ床部の流動状態が再現されていると考えられる。

ろ床下部での沈降速度定数については、実測値の平均値を用いて $k_s=2.82 \text{ m/h}$ とした。分散係数の値は LV の関数として設定し(Table 6 参照)、ろ床下部での流入 SS の沈殿率のシミュレーション計算を試みた。沈殿率は、「下部に沈殿した SS 量の、流入 SS 量に対する割合」であり、洗浄後の経過時間と沈殿率の関係を、Run 1～Run 4 における測定データはプロットで、計算結果は曲線で Fig. 7 に示す。これより、各 LV に応じた沈殿効果がよく再現されていると考えられる。

次にろ床部での SS 捕捉に関する再現計算を行った。ろ床厚を半分にした Run 4 の測定結果より、ろ床の中間部での SS 濃度が求まる。この結果をふまえて、ろ床部の分割槽数は 10 槽とした。空気量および LV の影響は、これらが増加すると剥離効果が増幅されるとし、剥離速度定数の最適値を誤差が最小になるように各条件で求めた。LV が 21 m/day において空気量を変化させた場合(Run 1 および Run 2)、ならびに空気量が $0.6 \text{ m}^3/(\text{m}^3\cdot\text{h})$ において LV を変化させた場合(Run 2 および Run 3)について求めた剥離速度定数値との関係をそれぞれ Fig. 8 および Fig. 9 に示す。これより剥離速度定数の値は、最小二乗法による直線近似にて設定した。これによる捕捉 SS 量に応じた流出 SS 濃度の再現結果は Fig. 10 および Fig. 11 にそれぞれ示すとおりである。黒点が計算値で、その他が実測値を示している。処理を継続するに従い捕捉 SS 量および流出 SS 濃度は変化するので、測定時と同じ捕捉 SS 量の時の流出 SS 濃度の計算値を求めて比較した。いずれの検証においても、比較の実測値に近い値が計算されている。但し、捕捉 SS 量が $2 \text{ kg/m}^3\text{-bed}$ 付近で実測値より低めの計算値が

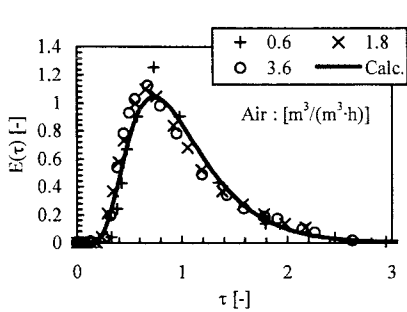


Fig. 6 The experimental results of the tracer test and the calculated results

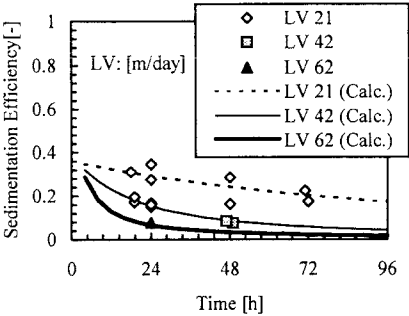


Fig. 7 Calculated and experimental sedimentation efficiency

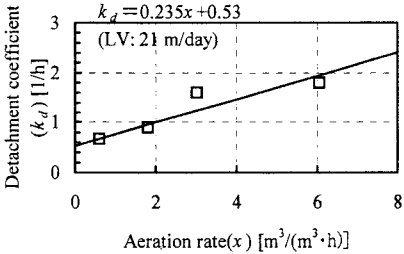


Fig. 8 Effect of Aeration rate on detachment coefficient

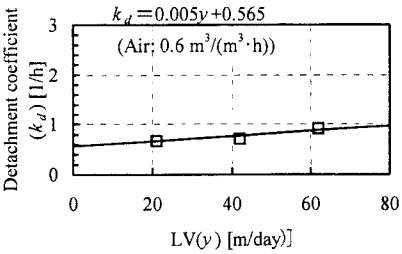


Fig. 9 Effect of LV on detachment coefficient

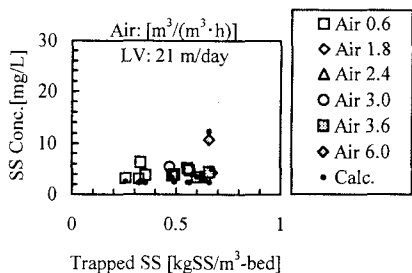


Fig. 10 Calculated and experimental effect of aeration rate in the aerated filter

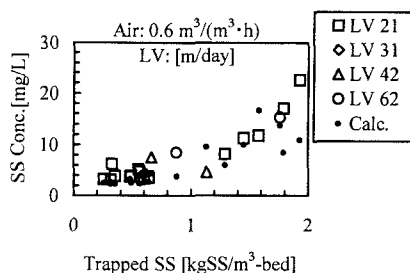


Fig. 11 Calculated and experimental effect of LV in the aerated filter

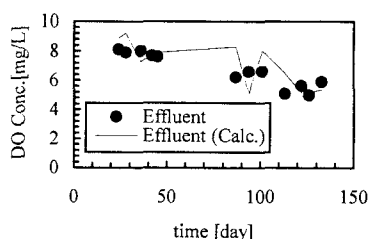


Fig. 12 Calculated and experimental DO concentration

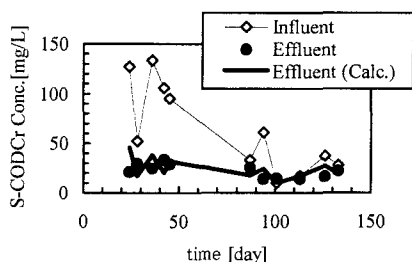


Fig. 13 Calculated and experimental S-CODCr concentration

示されている。これは、測定時の流入 SS 濃度が低く、その場合計算上の値が低くなってしまうためである。LV による剥離速度の増加は、急速ろ過において、LV が抑留濁質の剥離に大きな影響を及ぼすとした穂積ほか¹²⁾の報告に一致している。

水質変換についての、Run 1 および Run 2 における流入および流出水質の経日変化の検証結果は Fig. 12 および Fig. 13 に示すとおりで、実測値をプロットで、計算値を線で表した。ここで、易分解性有機物の濃度は、ATU-BOD₅ 濃度の実測値の 1/0.7 倍とした。DO 濃度の計算値は実測値にほぼ一致しており、好気性ろ床での DO 濃度回復が再現可能である。有機物除去の処理傾向もよく再現されている。

以上より、提示モデルは好気性ろ床内の流動状態、空気量や LV による流出 SS 濃度への影響、および水質変換予測などの再現に適用しうるものと考えられる。

3.3 設計操作因子の検討

作成したモデルを活用して、前凝集・生物膜プロセスにおける好気性ろ床の設計操作因子の検討を試みた。運転条件は、最も処理効率の低下する低水温期の水温 17°C を想定し、好気性ろ床への流入水質の実測値を参考にして Table 7 に示すとおりに設定した。

ここでは、好気性ろ床における設計操作因子として、ろ床厚および LV についての検討を行った。処理時間短縮の可能性を探るために HRT を 1 h として、最適ろ床厚の検討を行った。そのために、LV およびろ床厚を変化させながら流出 SS 濃度が目標水質とした 5 mg/L に達するまでのろ過継続時間を求めた。その結果は Fig. 14 に示すとおりである。処理期間中の平均 S-CODCr 濃度および DO 濃度もあわせて示した。継続時

Table 7 Conditions for prediction

● Conditions		
Temperature	°C	17
HRT	h	1
Aeration Rate	m ³ /(m ³ ·h)	0.6
● Influent water quality		
SS	mg/L	30
S-CODCr	mg/L	25
S-ATU-BOD	mg/L	10
DO	mg/L	0.3

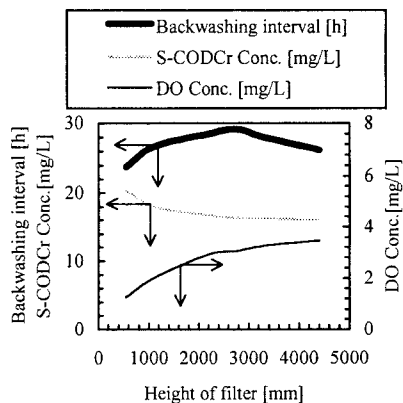


Fig. 14 Effect of Height with HRT of 1 h

間ろ床厚 2700 mm 程度で最大値を示している。敷地面積の観点からはろ床厚を長くするのが有利である。しかし、ろ床厚を長くして同じ HRT で運転する場合 LV を増加させることとなる。ろ床厚 2700 mm 以上では、LV 増加の影響により、下部での沈殿効果がほとんど期待できず、捕捉 SS 成分の剥離速度が増加して継続時間が短くなったと考えられる。これより、HRT を 1 h で運転する場合、ろ床厚を 2700 mm 程度にするのが適切であることが分かる。この場合、流出水の SS 濃度は 5mg/L 以下、S-CODCr 濃度は 16 mg/L 程度、DO 濃度は 3 mg/L 程度となると予測され、好気性ろ床の機能はいずれも果たされることとなる。

これより、本プロセスでは好気槽および無酸素槽の処理(6 h)の後、仕上げの処理を 1 h で行うことで、生物処理および最終沈殿池の処理を HRT 7 h 程度で行うことが可能であると考えられる。なお、洗浄操作を 30 分(空気洗浄 10 分+排水 20 分)で行うとして洗浄排水の処理水量に対する割合を算出したところ、約 5%であった。洗浄排水を考慮しても、同様のプロセスで最終沈殿池を有している貫上ほか¹³⁾のプロセスに比して、好気性ろ床を仕上げの処理に用いることで処理時間は約 3 h の短縮となる。

4. まとめ

本研究では、好気性ろ床のモデルを作成し、設計操作因子の検討を行った。以下に、得られた結論をまとめる。

- 1) トレーサー実験に基づいて、流動では完全混合槽列モデルを用い、またろ床部では循環を考慮した。SS 成分については、ろ床下部での沈降特性を沈降速度と分散係数により表し、ろ床部での SS 捕捉特性では付着と剥離を考え、LV は剥離速度定数に影響を与えるとした。さらに微生物による有機物の酸化分解などを表す水質変換モデルを組み込んだ。これらより、好気性ろ床における、流動特性、SS 成分の挙動、および水質変換を再現しうるモデルを作成した。
- 2) 作成したモデルを使用して、都市下水を対象とした前凝集・生物膜プロセスにおける仕上げの処理に適用した好気性ろ床の水理学的滞留時間(HRT)を 1 h とした場合に、最適ろ床厚を検討した。その結果、ろ床厚を 2700 mm 程度とした場合、ろ過継続時間が最も長く、有機物除去および DO 濃度回復の観点からも適切であることが示された。
- 3) 本プロセスでは好気性ろ床により仕上げの処理を 1 h で行うことで、生物処理および最終沈殿池の処理を HRT 7 h 程度で行えうることがモデルにより示された。その際に、好気性ろ床の洗浄排水の処理水量に対する割合は約 5%である。

参考文献

- 1) 寺山 喜信, 西村 孝:好気性ろ床を用いた循環式硝化脱窒法の研究, 下水道協会誌論文集, Vol.34, No.419, pp.37~48, 1997
- 2) 竹島 正:有明処理場における下水処理から再生水供給までの施設概要と維持管理技術について, 下水道協会誌, Vol.35, No.434, pp.18~37, 1998
- 3) 日高 平, 津野 洋, 宗宮 功, 貫上 佳則, 中本 正明:好気性ろ床を組み込んだ前凝集・生物膜プロセスの開発, 土木学会論文集に投稿中
- 4) 津野 洋, 宗宮 功, 西村 文武, 楠田 浩雅, 渡辺 尚之:凝集沈殿・付着微生物処理法のモデル化と処理特性に関する研究, 環境工学研究論文集, Vol.31, pp.189~197, 1994
- 5) W.W.ECKENFELDER, JR., D.J.O'CONNOR 原著, 岩井 重久訳:廃水の生物学的処理, pp.102~104, 1965
- 6) 宗宮 功:活性汚泥法の操作因子に関する基礎的研究, 京都大学博士学位論文, 1968
- 7) 芝 定孝:ろ過水濁度の予測モデルとパラメータ推定, 水道協会雑誌, No.567, pp.24~34, 1981
- 8) 津野 洋, 西田 薫:環境衛生工学, 共立出版株式会社 テキストシリーズ土木工学 7, pp.77~78, 1995
- 9) IAWPRC: Science and Technical Reports No.1 Activated Sludge Model No.1, 1987
- 10) 藤原 拓:二重管型反応装置の硝化脱窒プロセスへの適用に関する研究, 京都大学博士学位論文, 1999
- 11) 西村 文武:生物活性炭・生物ゼオライト結合型反応器による窒素除去に関する研究, 京都大学博士学位論文, 1996
- 12) 穂積 準, 橋本 正利:急速ろ過における既抑留濁質の剥離に関する研究(I)ーろ過速度の影響ー, 水道協会雑誌, Vol.57, No.9, pp.16~25, 1988
- 13) 貫上 佳則, 宗宮 功, 津野 洋, 長谷川 明巧:前凝集沈殿・接触酸化法による窒素除去に関する研究, 第35回下水道研究発表会講演集, pp.594~596, 1998