

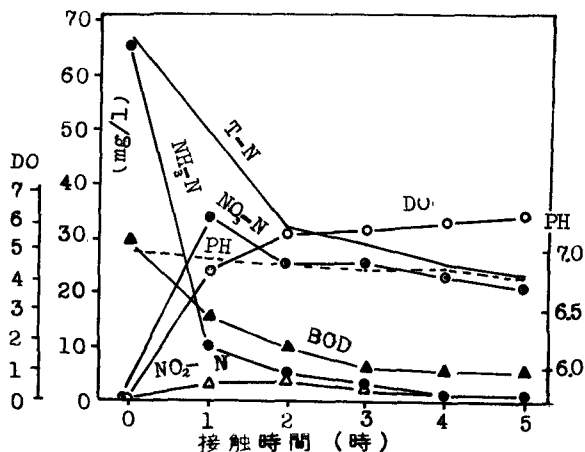
(14) 回転円板法の浄化モデルに関する基礎的考察

宮崎大学工学部 ○渡 辺 義 公
石 黒 政 儀
増 田 純 雄

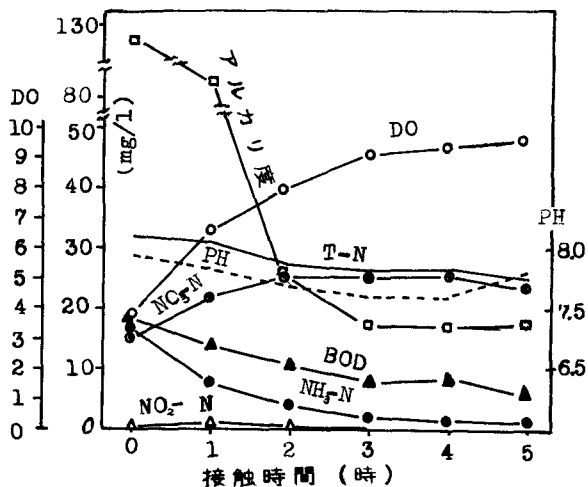
1 はじめに 最近、付着生物膜を利用した污水处理プロセスが注目されつつあり回転円板法もその1つである。回転円板法の特徴としては活性汚泥法にくらべて維持管理が容易であり動力費も少なくてすむ等が挙げられているが、実用面と研究面のいづれにおいても日が浅く同法の詳細については未だ不明な点も多い。回転円板法は好気性微生物を利用する点では原理的には活性汚泥法と同一の処理方式といえるが、活性汚泥法ではすべての過程が水中で行われるのに対して、生物膜が水中と空中を交互に循環するために次のような機構によって汚水の浄化が行われる。(1) 生物膜が空中に存在する時には大気中からの生物膜への酸素の輸送と生物膜内の微生物反応を伴った基質の拡散が行われる。(2) 生物膜が水中に存在する時には生物膜内の反応と拡散および液本体（接触槽内水）と生物膜との間の基質の交換が行われる。硝化反応では $\text{N H}_3\text{-N}$ は液本体から生物膜へ、 $\text{N O}_2\text{-N}$ と $\text{N O}_3\text{-N}$ は生物膜から液本体へ移動し、 D O も液本体と生物膜内の濃度分布によって決まる方向へ移動する。(1)と(2)の過程はいづれも非定常現象なので取扱いが複雑である。

筆者らは回転円板法についての実験結果を報告し^{1,2)}、他にも多くの実験報告がなされているが³⁾本法の浄化機構については今後多くの課題を残しているのが現状である。本文では回転円板法の浄化モデルをつくり、同法の浄化機構についての基礎的検討を行う。今回は硝化反応過程について、生物膜内の水質分布の推移を記述する基礎式の数値解を求めて、生物膜内で生ずる諸現象について考察を加える。

2 液本体の水質変化 上述のような生物膜内反応と液本体—生物膜の水質交換によって、液本体の水質は図—1、2、3、4のように変化する。図—1、2は先に報告した四段直列型装置の第一段と第三段での回分実験の結果であり、第一段では接触開始時の $\text{N H}_3\text{-N}$ 濃度が高く、 D O は少ないうえに生物膜も厚いために生物膜底部に嫌気性層が残存しそこで脱窒が生じ硝化の進行に伴って T-N も減少したと思われる。第三段では $\text{N H}_3\text{-N}$ 濃度が低く D O も多いうえに生物膜も薄いので生物膜全体が好氣的であり脱窒はほとんど生じなかったと考えられる。図—3、4は他の実験装置での連続流実験の結果である⁴⁾。両図から特に硝化反応に対するアルカリ度の影響が顕著に認められる。すなわち、図



図—1 液本体の水質変化（回分実験）



図—2 液本体の水質変化（回分実験）

—3ではアルカリ度不足のために硝化反応は抑制され40mg/l程度の $\text{NH}_3\text{-N}$ が未硝化のまま残存しているが、第三段にアルカリ分を添加した図—4では硝化が順調に進行している。以上のような実験により得た知見を論理的に説明し本法の浄化機構を明らかにするためのモデルを次章以下で展開する。

8 付着生物膜内の硝化過程 3-1 基礎式とその解法 基礎式の誘導に当っては次のような仮定を設ける。(1) 付着生物膜厚は一樣であり硝化菌濃度は深さ方向に一定である。(2) 液本体の水質成分($\text{NH}_3\text{-N}$, $\text{NO}_2\text{-N}$, $\text{NO}_3\text{-N}$, DO)の濃度は一樣であり液本体は乱流状態にある。(3) 液本体と生物膜との水質交換は生物膜表面に隣接する静止水膜内の分子拡散によって行われる。(4) 生物膜内の水質成分の移動は分子拡散により行われ、微生物反応は DO がある濃度以上でのみ生ずる好気性反応だけを考え、嫌気性層内の脱窒については今回は考慮しない。以上の仮定のもとに円板表面を図—5のように N 等分する。各微小部分が円板の回転速度 r (rps)で決まる T ($T = 0.5$)秒後に再び水中に入るまでの生物膜内の水質濃度は、生物膜表面からの深さと滞空時間の関数であり、式—(1)のような一次元の非定常拡散方程式に反応項が付加された基本式で示される。

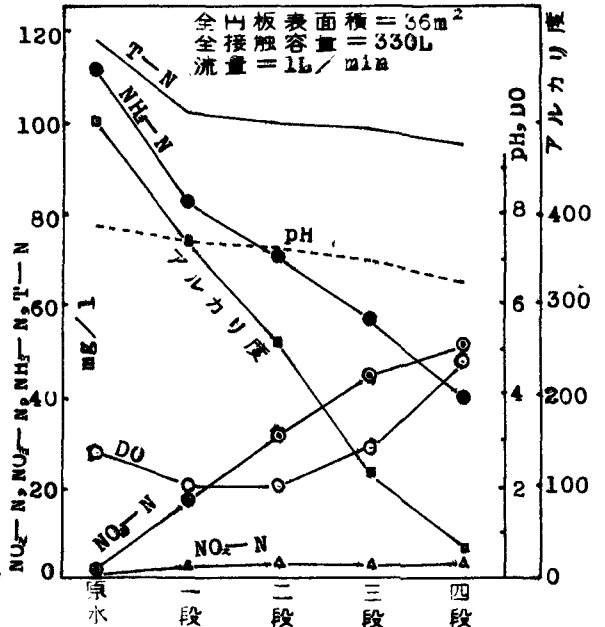
$$D_i \frac{\partial^2 C_i}{\partial Z^2} + \frac{\partial C_i}{\partial t} - R_i = 0 \quad \dots\dots\dots (1)$$

ここで、 C_i =着目する水質成分 i の濃度(mg/l)
 D_i =生物膜内での水質成分 i の拡散係数(cm^2/sec)
 Z =生物膜表面からの深さ(cm)、 t =反応時間(sec)、 R_i =水質成分 i の反応による生成または消滅速度($\text{mg/l} \cdot \text{sec}$)で式—2のような形のMonodの式で表示する。

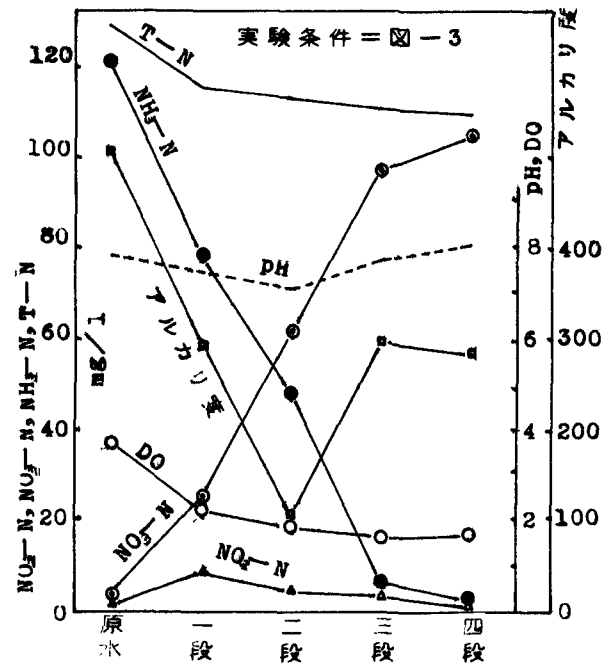
$$R_i = (K_i X_i C_i) / (K_{si} + C_i) \quad \dots\dots\dots (2)$$

ここで、 K_i =基質 i の最大利用速度($1/\text{sec}$)、 K_{si} =基質 i の飽和定数(mg/l)、 X_i =基質 i の生成または消滅に与する微生物の濃度(mg/l)。

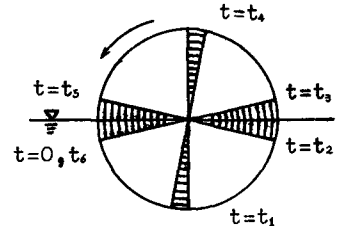
基礎式—1を直接解くことはむずかしいので差分法としてSchmidt Plotにより解く方法を考える。図—6のように生物膜を厚さ ΔZ の微小区間に分割し斜線部分の物質収支を考えると、第 j 層における Δt 秒内の水質成分 i の濃度変化は、 Δt 秒後の濃度



図—3 液本体の水質変化(連続流実験)



図—4 液本体の水質変化(連続流実験)



図—5 回転円板モデル

を C'_i として式-1を差分化すると式-3のように書くことができる。

$$\frac{D_i [C_i(j-1) - C_i(j)]}{\Delta Z} - \frac{D_i [C_i(j) - C_i(j+1)]}{\Delta Z} = \frac{\Delta Z}{\Delta t} [C'_i(j) - C_i(j)] + R_i \Delta Z \quad \dots\dots\dots(3)$$

$$\Delta t = (\Delta Z)^2 / 2 D_i \text{ とおくと, } C'_i = [C_i(j-1) + C_i(j+1) - 2R_i \Delta t] / 2$$

一般に, $t = n \Delta t$ ($n = 1, 2, \dots\dots\dots$) における第 j 層の濃度 $C_i(j, n)$ は,

$$C_i(j, n) = [C_i(j-1, n-1) + C_i(j+1, n-1) - 2R_i \Delta t] / 2 \quad \dots\dots\dots(4)$$

また, 生物膜表面の付着水膜の厚さを無視すると, 生物膜表面では D_O については式-5を得る。

$$C_i(0, n) = C_s = K_H \bar{F} \quad \dots\dots\dots(5) \quad \text{ここで, } C_s = \text{飽和 } D_O \text{ 濃度 (mg/l), } K_H = \text{ヘンリ}$$

一定数, $\bar{F}$ = 大気中の酸素分圧。他の水質成分については生物膜表面および生物膜最深部での濃度は, それぞれ式-5, 6のように書かれる(式-6は D_O にも適用する)。

$$C_i(0, n) = [C_i(0, n-1) + C_i(1, n-1) - R_i \Delta t] / 2 \quad \dots\dots\dots(5)$$

$$C_i(j, n) = [C_i(j-1, n-1) + C_i(j, n-1) - R_i \Delta t] / 2 \quad \dots\dots\dots(6)$$

式-4~6をくり返し計算すると水質成分 i の濃度分布の推移が図-6のように求められる。

水中では上述の生物膜内過程と同時に生物膜表面に隣接する厚さ δ の静止水膜を通して, 液本体と生物膜間の水質交換が行われる。この現象は式-7のように表わす。

$$\begin{aligned} F_i(n) &= \frac{D_i [C_i(K, n) - C_i(K-1, n)]}{\Delta Z} \\ &= \frac{D_i [C^*(n) - C_i(K-1, n)]}{\Delta Z} \\ &= \frac{D_i \Delta C_i}{\delta} \quad \dots\dots\dots(7) \end{aligned}$$

ここで, $F_i(n) = n \Delta t$ における水質成分 i の生物膜と液本体間の拡散量 (mg/cm²·sec) プラスの時は液本体から生物膜へ, マイナスの時は生物膜から液本体へ移動する, $C^*_i(n) = n \Delta t$ における液本体の水質成分 i の濃度 (mg/l), $C_i(K, n) = n \Delta t$ における静止水膜表面の水質成分 i の濃度 (mg/l) $\Delta C_i / \delta$ = 静止水膜内の濃度勾配 (mg/l·cm)

また, $t = n \Delta t$ における液本体の水質成分 i の濃度とその変化速度はそれぞれ式-8, 9のようになる。ただし $\bar{C}$ は水中の生物膜表面の平均濃度。

$$C^*(n) = C^*(n-1) - \sum_{L=1}^L F_{iL}(n-1) \Delta A \Delta t / V \quad \dots\dots\dots(8)$$

$$\frac{dC^*}{dt} = - \sum_{L=1}^L F_{iL} \Delta A / V = - \frac{A D_i}{2 V \delta} (C^* - \bar{C}) \quad \dots\dots\dots(9)$$

ここで, F_{iL} = 水質成分 i の微小部分 L からの拡散量 (mg/cm²·sec), L = 水質交換に関する微小部分の

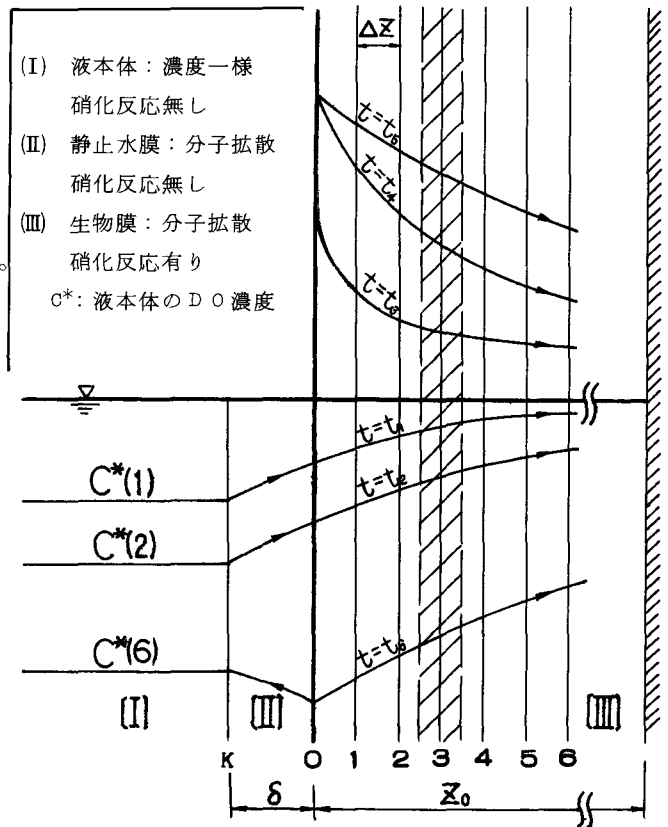


図-6 生物膜内反応と水質交換モデル (D_O について)

4 シミュレーションの結果 微生物膜厚を 200μ に固定し、気相の酸素分圧を0.2と1（大気と純酸素）とした場合の生物膜内の DO と NH_3-N の濃度分布の推移を図-8～13に示す。生物膜内の NH_3-N の初期分布はバラバラとし生物膜表面の濃度を10、20、50 mg/l の3通りとした。 DO は生物膜表面は常に飽和濃度で膜内はゼロとして初期条件を与えた。 NO_2-N と NO_3-N の初期条件はすべてをゼロとした。シミュレーションの結果より、酸素分圧が0.2の場合にはすべてが酸素輸送律速となっていることがわかる。すなわち、生物膜のある深さ迄しか酸素が侵入せず、滞空時間が約3秒を過ぎると DO は一定の濃度分布となり、 NH_3-N がほぼゼロになる迄この分布は維持される。実装置での滞空時間は通常10～30秒なので、空中ではほぼ瞬時に DO は定常分布に達すると考えられる。また、表-1の飽和定数のオーダーから考えて硝化反応はゼロ次反応に近似しうるので、 DO の定常分布は式-1から式-15のようになる。

$$D \frac{d^2 C}{dz^2} = R \quad \dots\dots\dots (15) \quad \left(\begin{array}{l} \text{ここで、} R = 3R_1 + R_2, \text{ただし } R_1, R_2 \text{ はそれぞれ } NH_3-N \text{ と } NO_2-N \text{ の} \\ \text{硝化における酸素利用速度 (mg/l} \cdot \text{sec)} \end{array} \right)$$

式-15を式-16のような境界条件で解くと式-17が得られる。ただし、 Z^* は酸素の侵入深さ (cm)。

$$\left. \begin{array}{l} Z = Z^* \text{ で } dc/dZ = 0 \\ Z = 0 \text{ で } C = C_s \end{array} \right) \dots\dots\dots (16) \quad Z^* = \sqrt{\frac{2DC_s}{R}} = \sqrt{\frac{2DK_H\bar{P}}{R}} \quad \dots\dots\dots (17)$$

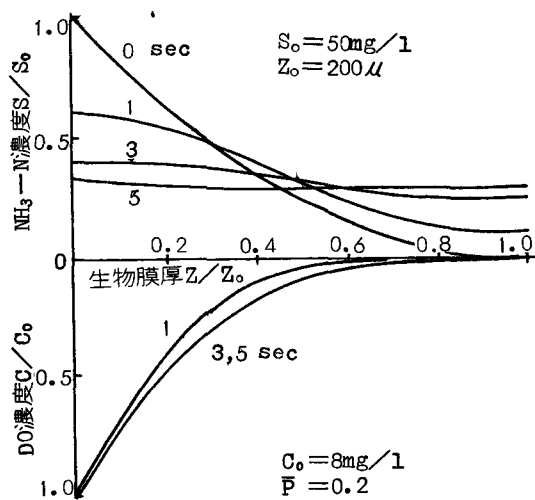


図-8 生物膜内の NH_3-N と DO の分布

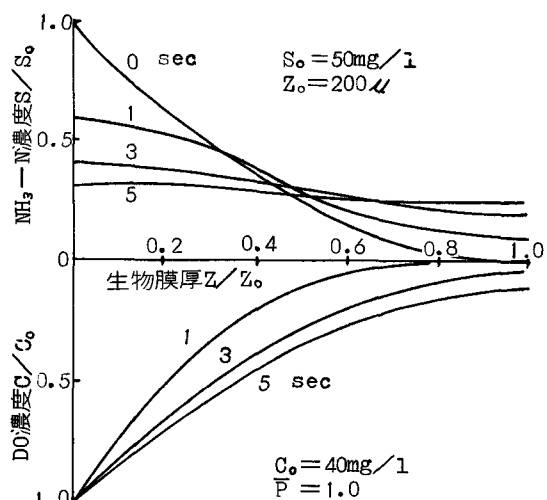


図-9 生物膜内の NH_3-N と DO の分布

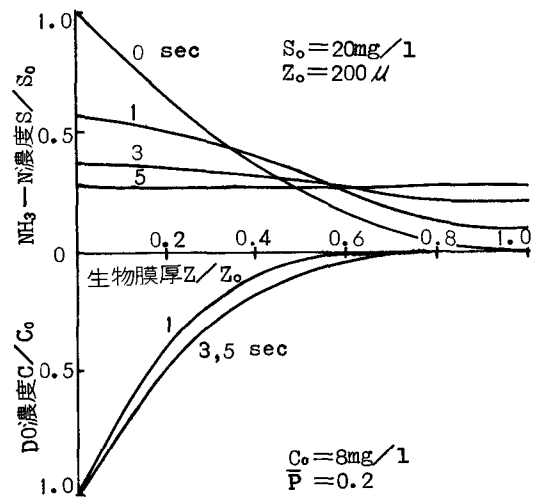


図-10 生物膜内の NH_3-N と DO の分布

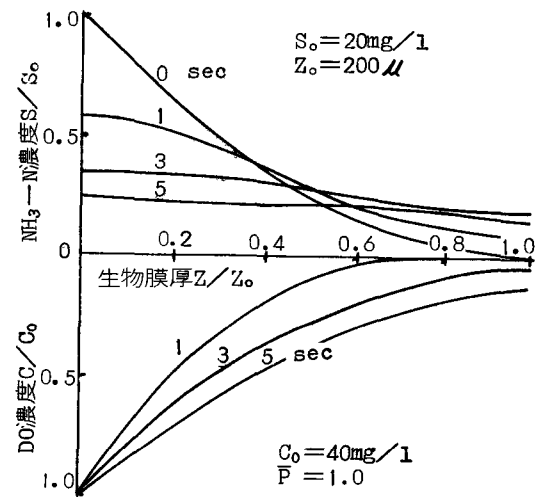
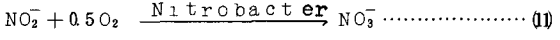
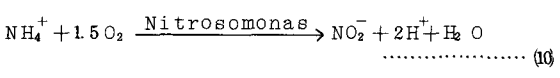


図-11 生物膜内の NH_3-N と DO の分布

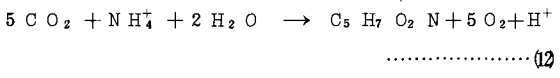
数で、円板が一回転した後は円板表面分割数の半分 ($N/2$) に等しい、 ΔA = 微小部分の表面積 (cm^2)
 A = 円板の全表面積 (cm^2)、 V = 液本体の容量 (ℓ)。式-7 ~ 9 より液本体の水質変化速度は A/V と静止水膜内の濃度勾配によって決まることがわかる。

3-2 基礎式中の諸定数 (a) Monod 式の定数

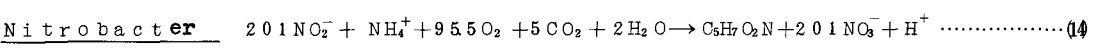
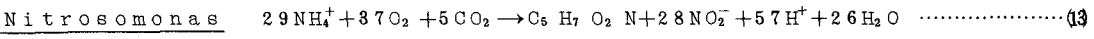
硝化反応は式-10, 11 で示される。



また、硝化反応に関与する硝化細菌の増殖は細胞の組成を $\text{C}_5\text{H}_7\text{O}_2\text{N}$ で表示すると、



硝化細菌はエネルギー収率が極めて小さく、結局、エネルギー収率⁷⁾と式-10 ~ 12 から硝化過程は式-13, 14 のように書くことができる。



式-13 と 14 より、1 mg の $\text{NH}_3\text{-N}$ と $\text{NO}_2\text{-N}$ が酸化されるにはそれぞれ 2.92 mg と 1.08 mg の O_2 が消費されることがわかる。ただし、式-14 の NO_2^- , NO_3^- と O_2 の係数については McCarty 等はそれぞれ 96, 96, 43 としているが⁸⁾、この場合でも 1 mg の $\text{NO}_2\text{-N}$ の酸化に消費される O_2 は 1.02 mg となり式-14 で得られる値とはほぼ等しいので係数の違いについては今後吟味することとした。式-13 と 14 から 20 mg/ℓ の $\text{NH}_3\text{-N}$ がすべて $\text{NO}_3\text{-N}$ に硝化されると約 80 mg/ℓ の O_2 が消費され、Nitrosomonas と Nitrobacter の増殖量それぞれ約 5.5 mg/ℓ, 0.8 mg/ℓ となる。以上の知見から、考える時間内では硝化菌の増殖量は無視しうるものとし、1 mg の $\text{NH}_3\text{-N}$ と $\text{NO}_2\text{-N}$ の硝化で消費される O_2 はそれぞれ 3 mg と 1 mg とした。硝化反応は DO, PH, アルカリ度、水温、 $\text{NH}_3\text{-N}$ 濃度、BOD 濃度等により左右される。

Table-1 Values of K, K_s

Limiting substrate	Culture	Temp.	$K(\text{day}^{-1})$	$K_s(\text{mg/l})$
$\text{NH}_3\text{-N}$	Nitrosomonas	20 C	2.0	0.5
$\text{NO}_2\text{-N}$	Nitrobacter	20 C	4.0	0.3

DO については図-7 のような実験結果を参考にして⁸⁾、0.2 mg/ℓ 以上では硝化反応が生じそれ以下では生じないと考えた。その他の関係因子については必ずしも統一見解が得られているとはいいがたないので、本文ではとりあえず PH が 7、水温が 20℃、 $\text{NH}_3\text{-N}$ 濃度が 10 mg/ℓ 程度で得られた表-1 のような値を用いることにした。

Table-2 Value of D_w, D_i

Biofilm Culture	Species	$D_w(\text{cm}^2/\text{day})$	$D_i(\text{cm}^2/\text{day})$
Nitrosomonas-Nitrobacter	$\text{NH}_3\text{-N}$	1.5	1.3
	$\text{NO}_2\text{-N}$	1.4	1.2
	$\text{NO}_3\text{-N}$	1.4	1.4
	O_2	2.6	2.2

(b) 生物膜内での拡散係数 McCarty 等は硝化菌により形成させた厚さが 200

~ 600 μ 、生物濃度が 50000 ~ 90000 mg/ℓ の生物膜内における NH_4^+ , NO_2^- , NO_3^- , O_2 の拡散係数を測定し表-2 の値を得た。そこで、本文ではすべての水質成分について D_i を $2 \times 10^{-5} \text{ cm}^2/\text{sec}$ とした。また、微生物濃度は全濃度を 50000 mg/ℓ とし、Nitrosomonas と Nitrobacter の濃度をいづれも 25000 mg/ℓ とした。

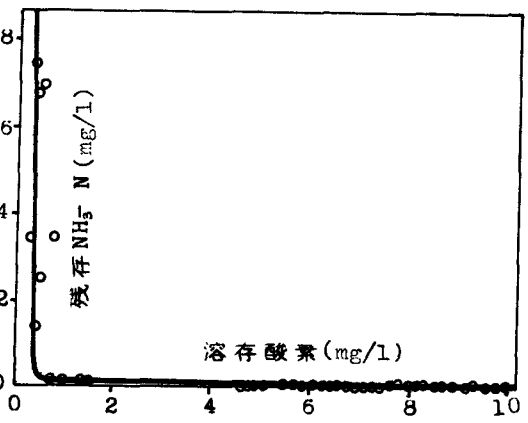


図-7 硝化反応と溶存酸素の関係

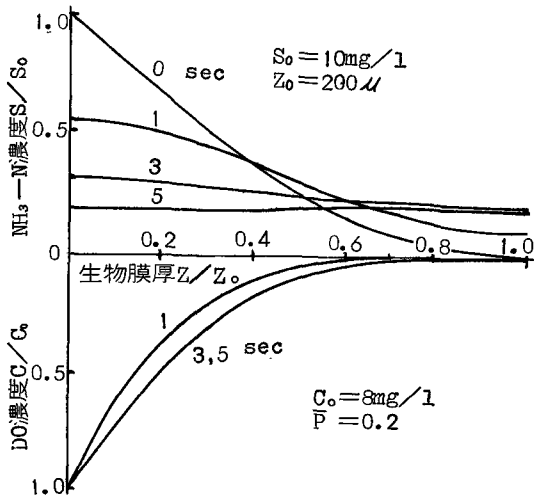


図-1 2 生物膜内の $\text{NH}_3\text{-N}$ と DO の分布

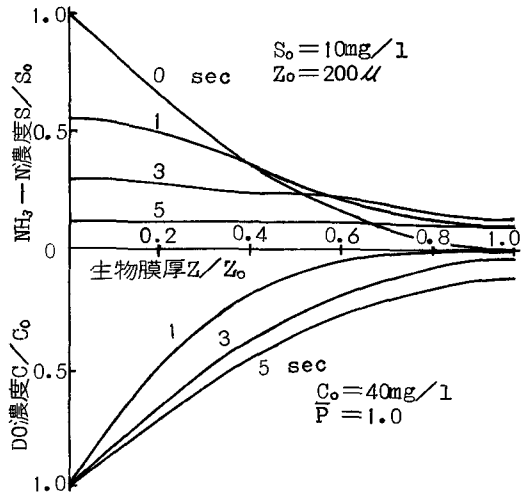


図-1 3 生物膜内の $\text{NH}_3\text{-N}$ と DO の分布

$\text{NH}_3\text{-N}$ 濃度がゼロ ($R=0$) に近づくと、 DO 分布は定常分布を初期条件とし式-16 を境界条件として $R=0$ といった式-1 の解として求められる。酸素分圧を 1 とすると生物膜全体は数秒で好氣的となり、硝化反応律速となっている。図-1 4 は生物膜内の $\text{NH}_3\text{-N}$ 除去率、酸素の侵入深さと滞空時間の関係である。

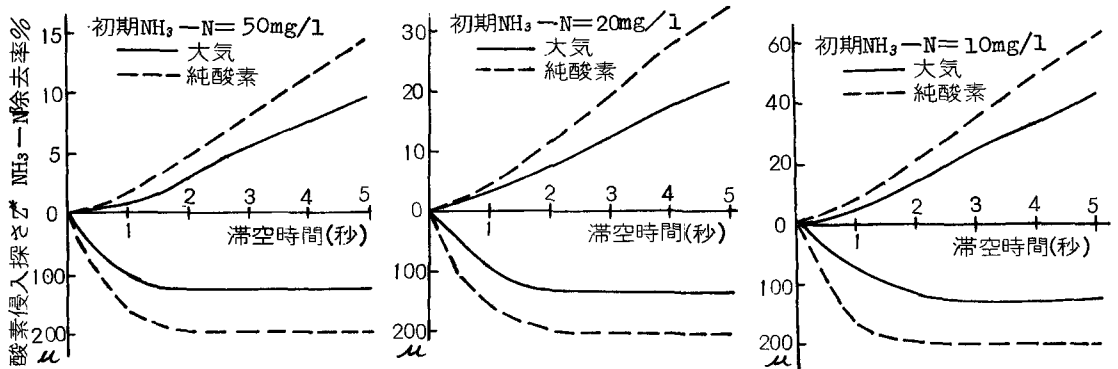


図-1 4 生物膜内の $\text{NH}_3\text{-N}$ 除去率および酸素の侵入深さと滞空時間の関係

5 おわりに 本文では回転円板法の浄化モデルのシミュレーションを行った。今回の報告は $\text{NH}_3\text{-N}$ の初期分布をパラボラと仮定したり、Monod 式の定数についての吟味が不完全であったりして必ずしも正確とはいえないが、引き続き水中での反応を含めたモデル全体のシミュレーションと定数値と $\text{NH}_3\text{-N}$ 濃度アルカリ度、 PH 等の関係についての研究を行っているので、次の機会に発表させて頂く予定である。

参考文献 1, 2) 石黒, 渡辺, 増田; 回転円板法による下水の高度処理に関する研究(I)(II); 下水道協会誌, vol112, No129, 1975・2, PP46~54, および投稿中, 3) Antonie, Kluge; Evaluation of a rotating disk wastewater treatment plant, JWP-CF, vol46, No3, March, 1974, PP498~511, 4) 石黒, 増田, 西留; 回転円板法による廃水の三次処理, 昭51年度土木学会年講演集, 1976・10, PP493~494, 5) Welty; Fundamentals of momentum, heat and mass transfer, Wiley, 1969, PP527~530 6) 石黒, 渡辺, 増田; 回転円板法の浄化機構について, 昭51年度土木学会年講演集, 1976・10 PP491~492, 7) Notes on Water Pollution, No52 March 1971, 8) Nitrification and Denitrification Facilities; EPA Technology Transfer Seminar Publication, PP8, 9) Williamson, McCarty; A Model of substrate utilization by bacterial films, JWPCF, vol18 No1 1976 PP9~24.