

(19) 回転円板法の生物膜モデルと酸素濃度分布のシミュレーション

Simulation of Dissolved Oxygen Profile Using Bio-film Model of Rotating Biological Contactor

西留 清*, 古賀 憲一**, 荒木 宏之***, 後藤田 和由****

Kiyoshi NISHIDOME *, Kenichi KOGA **, Hiroyuki ARAKI ***, Kazuyoshi GOTOHDA ****

ABSTRACT ;In general, mass transport in rotating biological contactors (RBC) has been analysed by simplified models based on molecular diffusion in the attached bio-film. Recent research works indicate that the approach of molecular diffusive flux does not always explain the mass transport in RBC. In this study, a new water quality model for RBC is developed using volumetric flux in bio-film from liquid phase (advection aspect). Water quality for the model verification is dissolved oxygen measured in the rotating disc by a micro-sensor. The results and conclusion of this study can be summarized as follows: (1) the molecular diffusion transport of the dissolved oxygen in submerged RBC is not always a predominant process, (2) the calculated results on the dissolved oxygen profiles agree with measured data, and (3) the mass exchange by advection between the liquid phase and surface of RBC can be the predominant process at least for dissolved oxygen.

Key words; Rotating biological contactor, Dissolved oxygen profiles, Biofilm model, Volumetric flux.

1. はじめに

生物膜法による溶解性基質の総括的除去速度は一般的に生物膜表面における基質フラックスを用いて表現される。すなわち、単位生物膜表面積あたりの平均的基質除去速度は生物膜表面における基質フラックスに等しい。このことから、回転円板法の実装置処理データから得られる設計因子として、BOD面積負荷(F.Pope, 1964)と水量面積負荷(Antonic, 1976)が用いられている。

Rittman と McCarty(1980)は固定生物膜内の物質輸送を分子拡散で取り扱った固定生物膜動力学式を提示し、回転円板法で用いられている円板回転速度(数rpm)での生物膜内の物質濃度分布を定常状態と見なし、動力学式と同法への適用の可能性を指摘している。我が国では、渡辺(1978,1980)を中心としたグループが固定生物膜による基質除去過程の定常動力学式を提示し、回転円板法による硝化・脱窒および有機物酸化・硝化過程への適用を試み、基質フラックスが動力学式から予測された値にほぼ等しいことを指摘している。さらに渡辺等(1989)は、固定生物膜による基質除去過程の定常動力学モデル(以下、固定生物膜モデルと称す)を提示し、回転円板法によるBOD・硝化機構について考察している。固定生物膜モデルを半水没型回転円板法に適用する際、生物膜表面の原位置(境界位置)は空中・水中部において移動しないものとして仮定されている。岡部等(1996)は濃度勾配に起因する拡散輸送とは異なる移流型で生物膜への物質輸送量を考慮する必要がある

*佐賀大学大学院工学系研究科博士後期課程(Saga Univ.) 〒840 佐賀市本庄町1番地

**佐賀大学理工学部教授(Saga Univ.)

***佐賀大学低平地防災研究センター助教授(Institute of Lowland Tech., Saga Univ.)

****佐賀大学大学院工学系研究科博士前期課程(Saga Univ.)

ことを指摘している。液相から生物膜内への物質輸送量を移流型で考慮すると、生物膜が水中部に入ると生物膜の表面位置は液相側に移動するか、膜内の間隙部に水みちが生じることとなる。したがって、回転円板法の浄化機構の解明には生物膜が水中部に入った後、空中部に到達するまでの生物膜内の物質の移動現象を明らかにする必要があると思われる。

本文では、まず移流を考慮に入れた回転円板付着生物膜モデルを新たに提示する。さらに提示したモデルによる付着生物膜内の物質濃度分布のシミュレーションを行い、シミュレーションで得られたDO濃度分布と実測DO濃度分布との比較からモデルの妥当性について検討を加える。

2. 回転円板生物膜の水質モデル

2.1 固定生物膜への物質輸送モデル

Fig. 1 に示すように回転円板固定生物膜モデルは生物膜表面から深部まで固定生物膜とし、水中・空中部とも生物膜表面位置は移動しないものとすれば、付着水膜・生物膜内の物質収支式は次式で表現される(渡辺, 1989, 1982, 1980, 増田, 1987, Bintanaja, 1975, 神山, 1975)。

付着水膜内

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D_o \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} \quad (1)$$

C : 物質濃度 [ML⁻³]

t : 時間 [T]

D_o : 物質の分子拡散係数 [L²T⁻¹]

x : 長さ [L]

生物膜内

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D_o \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} - R \quad (2)$$

R : 生物反応速度 [ML⁻³T⁻¹]

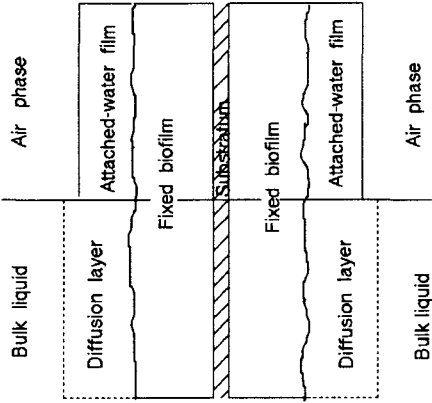


Fig.1 Fixed bio-film model of RBC

2.2 回転円板生物膜への物質輸送速度

前述した式(1)、(2)の回転円板付着生物内外における物質輸送モデルは分子拡散で論じられている。岡部等(1996)は、微粒子を用いた液相から生物膜への微粒子の輸送量を測定し、微粒子が短時間に生物膜深部まで到達していることを指摘している。このように、微粒子の移動速度が分子拡散のみでは説明が困難であることから、岡部等は生物膜内に存在する水みちや間隙への移流によって微粒子が輸送されることを示唆し、回転円板生物膜では、移流を考慮した新しい生物膜モデルの必要性を提案している。

生物膜内での物質輸送に移流を考慮すると、その時の輸送フラックスSは一般的に式(3)で与えられることとなる。

$$S = QC + A_w \cdot D \frac{\partial C}{\partial x} \quad (3)$$

Q : 空隙内の体積フラックス [L³T⁻¹]

A_w : 体積フラックスの生じている(生物膜内空隙部)横断面積 [L²]

D：物質の移流分散係数あるいは分子拡散係数 $[L^2 T^{-1}]$

2.3 回転円板生物膜の分類と生物膜モデル

液相の物質が生物膜内へ体積フラックスにより移流・分散されるものとすれば生物膜は液相側へ移動する(生物膜の長さが増加する)流動生物膜あるいは揺らぎ生物膜(生物膜の長さが一定)の状態にあるものと考えられる。一方、生物膜深部の付着物濃度は一般的に高いことから(増田, 1987)、生物膜の深部は固定生物膜に近いものと考えられる。したがって、Fig. 2 に示すように回転円板付着生物膜を以下のように3分類する。

(1) 揺らぎ(Swing)生物膜：揺らぎ生物膜(間隙部)は3次元構造を有し、生物膜を構成している微小要素がそれぞれ独立に揺らいでおり、その揺らぎによって液相から液体の体積が輸送される。移流によって生物膜(間隙部)が揺らいでいるとも言える。

(2) 流動(Stretch)生物膜：流動生物膜とは、水中部で流動しつつ液本体側へ伸びていく生物膜のことである。水中部あるいは空中部における生物膜の間隙構造(間隙率)は異なるものとする。すなわち、水中部では流動生物膜が液相へ伸び、その伸びによって、相対的に体積フラックスが生じる。空中部では流動生物膜が垂れることによって膜内の間隙水は絞り出される。

(3) 固定(Fixed)生物膜：固定生物膜は、流動生物膜あるいは揺らぎ生物膜の深部に存在している膜である。この固定生物膜内では生物膜の揺らぎ、あるいは流動による体積フラックスは存在しないものとする。すなわち、固定生物膜における物質輸送は分子拡散のみである。

上記3種類の生物膜の構成で想定される生物膜全体の基本的なモデルを本研究では以下のように設定する。

- (1) 流動生物膜のみ
- (2) 流動生物膜+固定生物膜
- (3) 揺らぎ生物膜のみ
- (4) 揺らぎ生物膜+固定生物膜
- (5) 揺らぎ生物膜+流動生物膜+固定生物膜

2.4 生物膜における物質保存式

揺らぎ、流動生物膜での一般的な物質保存式は以下の式で示される。固定生物膜については前述の(1)、(2)式と同一である。

$$\frac{\partial A \cdot C_i}{\partial t} - \frac{\partial}{\partial x} \left(Q C_i + A_w D \frac{\partial C_i}{\partial x} \right) = P_i \quad (4)$$

P_i ：物質変換速度 $[ML^{-1}T^{-1}]$

添字 i は前述した2種(流動、揺らぎ)の生物膜を表す。

生物膜の空隙部(空隙面積 A_w)における連続の式は以下のように表される。

$$\frac{\partial A_w}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = 0 \quad (5)$$

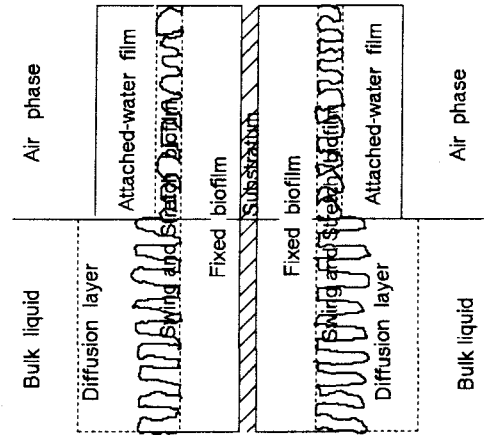


Fig.2 Swing, stretch and fixed bio-film model of RBC

式(4)の物質の変換速度 P_i は、物質質量の減少速度あるいは増加速度であり、一般的には生物反応速度で規定され、移流の定義によっては後述する交換速度が付加される。生物膜内の物質濃度は厳密には3次元的な構造を有する間隙液部の平均的な物質濃度 C_w である。ここでは生物膜を前述したように揺らぎ生物膜、流動生物膜、固定生物膜に分類しているため、以下に示すような間隙液部を設定した。

(1) 付着水：固相として存在する生物膜に付着している液部である。非流動部の付着水は揺らぎ生物膜、流動生物膜の双方に存在するものとする。付着水と液部との間で物質交換が生じるものとする。

(2) 移流水：揺らぎ生物膜内での交換流あるいは流動生物膜内で移流する液体である。

(3) 固定生物膜内の間隙水：固定生物膜内の間隙水であり、この間隙水での物質輸送は分子拡散のみである。

生物膜内の間隙水を移流水と付着水に分離したことから、物質の変換速度 P_i を生物反応速度 R と付着水との交換速度 J_{exc} とに分離して取り扱う。

$$P_i = -R A_i \pm J_{exc} \quad (6)$$

(a) 生物反応速度 (R)

生物反応速度 R は、次式で示される Monod 型とした。

$$R = k X_c \frac{C_b}{K_c + C_b} \cdot \frac{C_{b, DO}}{K_{DO, c} + C_{b, DO}} \quad (7)$$

k : 最大比基質利用速度 [T^{-1}]

X_c : 生物濃度 [ML^{-3}]

C_b : 生物膜内基質濃度 [ML^{-3}]

K_c : 基質の飽和定数 [ML^{-3}]

$C_{b, DO}$: 生物膜内DO濃度 [ML^{-3}]

$K_{DO, c}$: 基質酸化におけるDOの飽和定数 [ML^{-3}]

(b) 付着水と移流水との交換速度 (J_{exc})

交換速度 J_{exc} は、付着水(濃度 C_b)と移流水(濃度 C_w)との間での物質の交換速度なので双方の交換量は等しく、符号のみが異なる。

$$J_{exc} = \alpha |C_w - C_b| A_i \quad (8)$$

α : 交換率 [T^{-1}]、 i は w あるいは b

したがって、交換率 α を大きくすると付着水濃度 C_b と移流水濃度 C_w は速やかに同一濃度となる。

2.5 回転円板の各種生物膜における物質輸送速度

(a) 固定生物膜における物質輸送速度

固定生物膜においては、分子拡散によってのみ物質輸送が生じるものとする。したがって、物質保存式は式(2)で表される。

(b) 揺らぎ生物膜における物質輸送速度

揺らぎ生物膜においては、生物膜の揺らぎにより液相から生物膜への体積フラックスの出入り(交換流)によって物質輸送が生じるものとし、ここでは交換流による物質輸送速度を式(9)のように拡散型で近似することとした。

生物膜内の移流(間隙)水

$$\frac{\partial C_w A_w}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} (A_w D_{sw} \frac{\partial C_w}{\partial x}) \mp J_{exc} \quad (9)$$

生物付着水

$$\frac{\partial C_b A_b}{\partial t} = -R A_b \pm J_{exc} \quad (10)$$

D_{sw} : 揺らぎ生物膜における物質の分散係数 [$L^2 T^{-1}$]

C_b : 生物付着水内の物質濃度 [ML^{-3}]

(c) 流動生物膜における物質輸送速度

流動生物膜においては、体積フラックスが物質保存式に含まれているので式(4)と連続の式(5)から、物質保存式は次式で示される。

$$\frac{\partial C_w A_w}{\partial t} = \frac{\partial A_w V C_w}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} (A_w D_{st} \frac{\partial C_w}{\partial x}) - R A_b \quad (11)$$

D_{st} : 流動生物膜における物質の拡散係数 [$L^2 T^{-1}$]

V : 空隙面積 A_w における流速 [$L T^{-1}$]

3. 回転円板付着生物膜内外DOの測定

3.1 実験装置(Nishidome,1988)

開水路付着生物膜中のDO濃度の微小電極による実測は、Walén 等(1967)と Sanders 等(1970)により行われている。回転円板付着生物膜については回転している生物膜内のDO測定が困難なため実測例は皆無に等しい。本研究では、DO微小電極(白金電極)を同軸円板に取付け、電極接続コードも円板軸内に埋め込み、軸に接する8つの接点をもつコードを検出電圧計に接続して測定を行った。また、DO電極は、先端部の直径が15 μm であり、種々のDO濃度に対し瞬時(1秒以内)に応答することを確認している(Nishidome,1988)。

3.2 実験方法(Nishidome,1994)

実験に用いられた回転円板装置は、鹿児島高専環境工学実験場(室温20℃の恒温)に設置され、流入原水として同校の下廃水処理場流入水が用いられた。5週間定常運転後の平均生物膜厚さは0.5mmであり、微小電極を円板中心から12.5cm(円板半径15cm)の位置に取り付けた。円板回転速度を1rpmに保持し、円板回転中に微小電極をマイクロメータヘッドによって支持体方向に10 μm 間隔で移動させながらDO測定を行い、膜深さ方向のDO分布を求めた。

3.3 実験結果とその考察

Table 1は回転円板実験装置の定常運転条件であり、Table 2にDO濃度測定前後の実験装置への流入・流出平均基質濃度を示す。Fig. 3に円板回転中の付着生物膜内外DOの測定結果を示す。空中部でのDO濃度の測定記録は安定しているが、水中部では、生物膜表面近傍においてかなりの乱れが生じている。これは、

水中部における生物膜内外の近傍では液相側の基質・D Oの影響を受け、微小電極によるD O濃度の安定した測定が行われなかったためと考えられる。電極先端部が空中部付着生物膜表面に到達したと考えられる位置（測定開始後、生物膜方向へ約70 μ m以上）では空中、水中部とも安定したD O濃度が測定された。空中に出てから数秒間の付着水膜表面近傍のD O濃度は、生物膜間隙水の低D O濃度水が気相側へ輸送されるため低くなったものと考えられる。一方、気相と接触している付着水膜のD O濃度は、測定部が空中に出た数秒（約5秒）後から急激に高くなり、その後、生物膜が水中に入るまで高くなる。Fig. 4にFig. 3を用いて、空中・水中D O濃度と測定深さ方向との関係を示す。空中部の生物膜内では、D Oの拡散輸送と生物消費によって生ずるD O濃度分布曲線の変曲点を生物膜表面とする提案がなされている(Sanders,1970)。本論文でも、Fig. 4における空中部30秒（水中部に入る直前）のD O濃度分布の変曲点の位置から付着水膜厚さは約50 μ mとした。生物膜が水中に入ると、生物膜内外のD O濃度は数秒間で急激に低下している。このことは、後述するシミュレーション結果から生物膜が水中に入った数秒（約10秒）間に、液本体からの低D O濃度水の移流による影響と考えらる。

Table 1. Operation Conditions

Disc Submerged Ratio	50	%
Disc Effective Area	1.13	m ²
Disc Rotating Speed	1.0	rpm
Exposure Time to Air Phase of Electrode	30.0	sec.
Exposure Time to Water Phase of Electrode	30.0	sec.
Influent Water Flow Rate	0.25	m ³ /day

Table 2. Water Quality in Influent and Bulk Liquid

	Influent	Bulk
DO	1.0	1.5
NH ₄ -N	39.9	30.0
COD(SS included)	15.5	10.0
SS	13	6

* Unit:mg/l

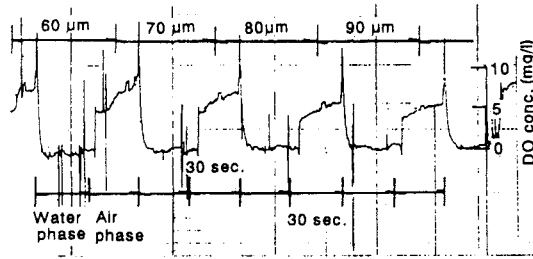


Fig.3 Strip chart records of voltage fluctuations

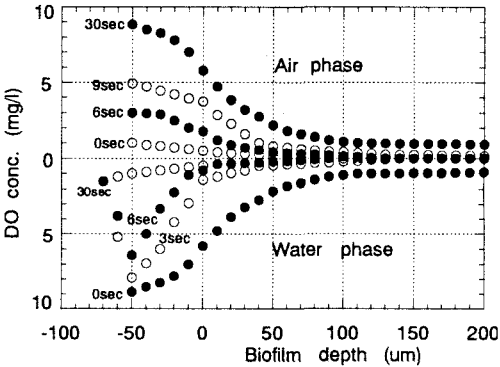


Fig.4 Change of measured DO profiles

4. 回転円板生物膜内D O濃度分布のシミュレーションとその考察

4.1 固定生物膜モデル

生物膜全体が固定生物膜のみで構成されているとし、分子拡散による物質輸送の式(2)を用いてD O濃度分布のシミュレーションを行った。Fig. 5にD Oの分子拡散係数D₀を0.000024cm²/secとした場合の計算結果(実線、破線)を示す。この分子拡散係数は種々の文献値をもとに回転円板法の動力的解析に用いられて

いる(Nishidome,1994, Watanabe,1982,1989)。また、これまで提示されている固定生物膜モデルと同様に境界条件は空中部の付着水膜表面DO濃度を飽和濃度として与えている。生物膜が水中部に入る直前のDO濃度分布は実測DO濃度(●○)と概ね一致している。水中に入ってから3秒後の生物膜表面近傍のDO濃度は実測DO濃度分布とほとんど一致しない。Fig. 6は水中部における分子拡散係数を D_0 の1/10としたDOのシミュレーション結果(実線、破線)である。さらに、境界条件として空中部の付着水膜表面DO濃度を実測濃度とした。空中部付着水膜内のDO濃度分布は直線的となり、実測DO濃度分布とあまり一致しない。また、水中部では、Fig. 5と同様、拡散係数を1/10にしても水中に入ってから3秒後のシミュレーション結果は実測DO濃度分布を再現できていない。以上のことから本例で示す範囲では、水中部の生物膜内の物質輸送を分子拡散のみで規定することは困難と考えられる。

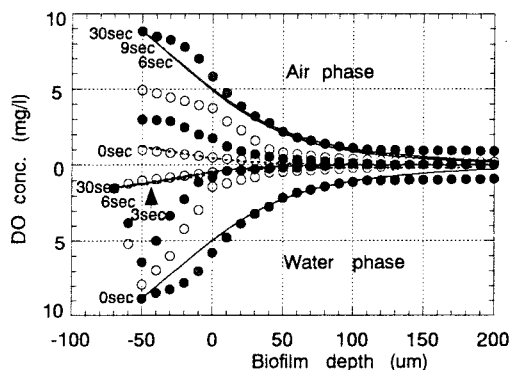


Fig.5 Simulated results of DO profiles
(Fixed bio-film)

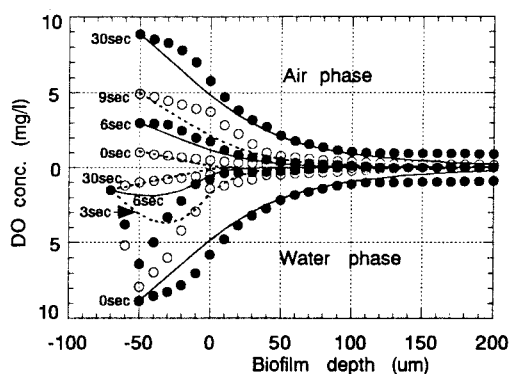


Fig.6 Simulated results of DO profiles
(Fixed bio-film, $D=0.1D_0$ in water)

4.2 流動生物膜モデル

(a) 空中部DO濃度分布

空中部では、流動生物膜が垂れることにより付着水膜の移流や膜内水の絞り出し効果によって巨視的には何らかの攪乱が生じるものと考えられる。ここでは、空中部でのDO分布を最もよく再現させるために付着水膜における最大拡散係数を通常のDO(物質)分子拡散係数 D_0 の5倍($0.00012\text{cm}^2/\text{sec}$)とし、生物深部では D_0 とする線形的な拡散係数でのシミュレーションを行った。また、円板が空中に出た数秒間は低濃度の生物膜間隙水が絞り出されるとし、空中部でのDO計算に必要とされる付着水膜表面のDO濃度すなわち、境界条件の濃度は実測値を与えた。Fig. 7は空中部生物膜内DO濃度分布のシミュレーション結果(実線、破線)である。6, 9秒後のDO濃度分布のシミュレーション結果は付着水膜部においても実測DO濃度(●○)と良く一致している。30秒後(水中に入る寸前)のDO濃度分布のシミュレーション結果は、定性的には実測DO濃度分布と一致している。以上のことから、空中部における付着水膜表面近傍のDO濃度は、円板が空中に出た直後に飽和されず、絞り出しが終了してから徐々に高くなると考えられる。

(b) 水中部DO濃度分布

生物膜内における流量と空隙率との関係は連続の式で規定され、空隙率分布の時間的変化を与えれば空隙率の増加した分だけ移流水が移動することから、流量 Q の時間・空間変化が求められる。あるいは、任意時刻における流量 Q の空間分布を与えれば、空隙率分布の時間変化が得られる。ここでは、任意時刻における空隙率分布をFig. 8に示すような直線近似 ($A_v(l, x) = A_v(t)(1 - x/\delta(t)) + A_{v,s}$) で与えた。ここで、 $\delta(t)$ は膜厚、 $A_v(t)$ は膜表面の空隙面積である。因みに移流によって伸長し始めてから任意時刻までの移流による流入体積は、膜厚と空隙面積の変化から得られる空隙体積の増加量と一致する。また、生物膜が水中部に入ってから液本体側に移動する(伸びる)長さ(時間)は、生物膜を形成している付着物濃度や生物膜間に存在する間隙によ

て無限まで続くことはないことから、限界値がある。ここでは、実測値を最もよく再現できるように試行錯誤で伸長条件を求め、生物伸長が50 μm となる13秒までを所定の速度で増加させた。流動生物膜内での物質は移流のみにより輸送されるとした。生物膜の流動により相対的に液本体側への物質輸送も伴うが、液本体に輸送された物質は液本体で完全に混合されるとした。

Fig. 9 は生物膜が水中部に入って膜深部まで流動生物膜となる場合のDO濃度分布のシミュレーション結果である。したがって、流動生物膜の長さは、生物膜最深部(500 μm)からの距離である。境界条件でもある生物膜表面(先端部)が水中部で移動することから計算手法はラグランジュ法を用いた。Fig. 9 に示す水中0秒はFig. 7の空中部30秒のシミュレーション結果を用いている。水中3、6秒でのDO濃度分布のシミュレーション結果(実線、破線)は膜表層部で実測DO濃度(●○)と良く一致している。

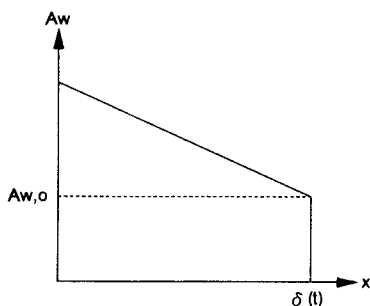


Fig.8 Condition of A_w in stretch bio-film model

4.3 揺らぎ生物膜モデル

回転円板付着生物膜内の水は生物を含む付着水と内部水(間隙水)とからなり、生物膜の揺らぎに伴い内部水は水みち(間隙部)となる。揺らぎ生物膜モデルにおける交換率 α は、付着水内部の生物反応によって減少した濃度と移流水濃度との差によって交換される物質輸送速度を表すことから、この値と揺らぎ生物膜内の拡散係数や反応速度によって深さ方向の濃度分布が変化する。このため、実測値との再現性から、これらのパラメータを試行錯誤で求め、最終的には α を 1 sec^{-1} とした。Fig.10に空中部生物膜が水中部に入った瞬間に液本体側の所定の位置(生物膜深さ-50 μm)に移動するとした場合のDO濃度分布のシミュレーション結

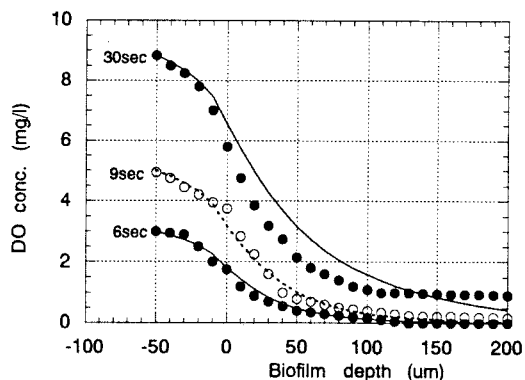


Fig.7 Simulated results of DO profiles in air phase (Stretch bio-film)

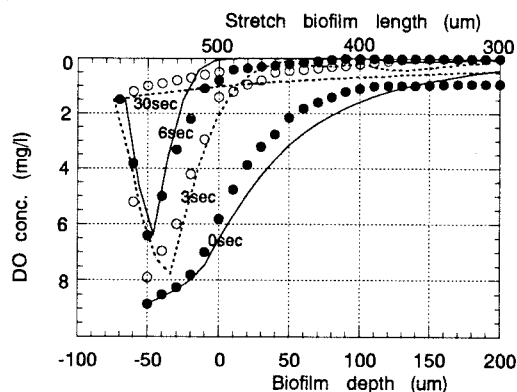


Fig.9 Simulated results of DO profiles in water phase (Stretch bio-film)

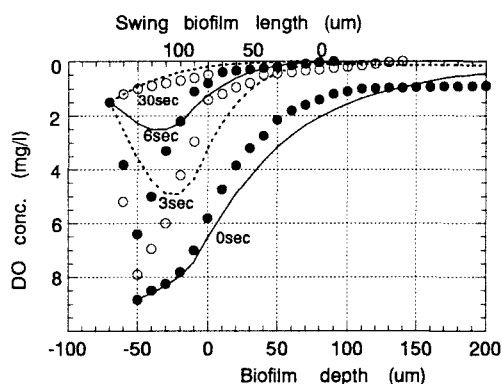


Fig.10 Simulated results of DO profiles in water phase

果を示す。本例の場合、揺らぎ生物膜の初期長さは、後述(4.4)するように実験値をよく再現できるように設定し(80 μ m)、最終的に得られた揺らぎ生物膜の長さは130 μ mである。生物濃度は揺らぎ生物膜の空隙率を1 %とし、空中部での生物量保存式を成立させている。膜内の拡散係数は揺らぎによる拡散を考慮し、分子拡散の10倍としている。水中3、6秒でのDO濃度分布のシミュレーション結果(実線、破線)は膜表層部で実測DO濃度(●○)と定性的には一致している。回転円板付着生物膜が水中部に入った直後から揺らぎ生物膜モデルで表現するには生物膜内の間隙率、非流動部付着水と流動部間隙水との交換速度 α の定量的評価が必要であるが今後の課題としたい。

4.4 揺らぎ、流動、固定生物膜モデル

これまで述べたDO濃度分布のシミュレーション結果と実測値との比較から、生物膜が固定生物膜のみ、流動生物膜のみ、あるいは揺らぎ生物膜のみとする単独のモデルでは回転円板付着生物膜が水中部に入って空中部に出るまでのすべてのDO濃度分布を再現することは困難である。また、本実験例のように円板回転数が遅い(生物膜の水中滞留時間が長い)場合には、生物膜の液本体側への流動長に限界があると考えられる。生物膜の流動が限界に達すると、流動生物膜は揺らぎ生物膜になると考えられる。実測値を最もよく再現できるように試行錯誤で求めた流動生物膜初期の長さは80 μ mと得られた。したがって、回転円板付着生物膜の表層(生物膜深さ80 μ m)が水中部に入って数秒間は流動生物膜、その後、流動生物膜は揺らぎ生物膜となり、生物膜深さ80 μ m以深は固定生物膜として物質濃度のシミュレーションを行った。Fig.11に流動生物膜の長さを80 μ mとし、80 μ m以深を固定生物膜として得られた水中部生物膜内DO濃度(実線、破線)分布を示す。揺らぎと流動生物膜の長さは、前述した個別モデルの揺らぎと流動生物膜と同じものを用いている。流動生物膜表面近傍では3、6秒でのDO濃度分布のシミュレーション結果は実測DO濃度(●○)と概ね一致している。30秒後(空中に出る直前)のDO濃度分布のシミュレーション結果は実測DO濃度分布より若干高いが、定性的には一致している。Table 3に濃度分布の計算から得られた浸漬生物膜表面積当たりの生物膜表面における基質フラックスと定常運転結果(Table 3)から得られた浸漬円板面積当たり基質除去速度を示す。基質フラックスと基質除去速度との整合性は概ね良好である。生物膜内DO濃度分布の再現が可能であること、さらには基質フラックスと基質除去速度がほぼ一致していることから、回転円板付着生物膜は水中部に入って体積フラックスにより生物膜表層の一部(あるいは深部まで)が数秒間は流動生物膜となり、その後、流動生物膜は揺らぎ生物膜となり、体積フラックスが生じない生物膜の下層部は固定生物膜から形成されているものと考えられる。

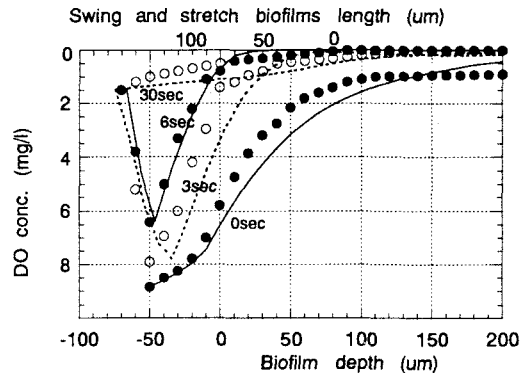


Fig.11 Simulated results of DO profiles in water phase

Table 3 Values of NH₄-N and COD Flux

	Measured	Simulated
NH ₄ -N	4.4	5.2
COD	2.4	4.0

* Unit:g/m²/day

5. おわりに

回転円板付着生物膜内の物質濃度の時間・空間的变化を知ることは回転円板法の浄化機構の解明において重要である。回転円板付着生物膜モデルとして、従来から固定生物膜による基質除去過程の定常動力学式が用いられていた。この固定生物膜モデルを半水没型回転円板法に適用する際、付着生物膜と液相との境界は移動せず、かつ固定生物膜内の物質輸送を分子拡散のみで表現することが一般的である。しかし、本論でも示した移流型（体積フラックス濃度型）の物質輸送モデルの必要性は種々の研究成果からも指摘されている。筆者等は、体積フラックスを考慮した回転円板付着生物膜モデルを提示し、生物膜内の物質濃度分布のシミュレーションを行った。シミュレーションで得られた生物膜内D O濃度分布と実測値との比較検討の結果、以下のような結論が得られた。

- 1) 回転円板生物膜内の物質輸送（特に、溶存酸素）は分子拡散現象のみでは表現できない。
- 2) 生物膜内への移流を考慮することで溶存酸素濃度分布の実測値を概ね再現できる。
- 3) 生物膜表面付近では、生物膜の揺らぎなどにより、分子拡散より大きい液相からの物質輸送が生じている可能性がある。

最後に、本シミュレーションに用いた係数等は一般的に用いられている値とした。詳細な係数等の値については今後、他栄養性細菌が優占種である場合の実測結果とそれに対する生物膜モデルを用いて詳細な検討を加える予定である。

参考文献

- 岡部聡, 安田岳雄, 佐藤久, 渡辺義公: 混合培養系生物膜内の懸濁微粒子の挙動に関する基礎的研究, 土木学会環境工学研究論文集, Vol. 33, 103-114, 1996
- 神山圭一, 加藤善盛: 回転円板接触体の浄化機構, 環境技術, Vol. 4, No. 7, 31-41, 1975
- 増田純雄, 渡辺義公, 石黒政儀: 回転円板付着生物膜内の細菌に関する研究, 下水道協会誌, Vol. 24, No. 278, 19-31, 1987
- 渡辺義公, 石黒政儀, 西留清: 回転円板脱窒槽の動力学的解析, 土木学会論文集, 276, 25-33, 1978
- 渡辺義公, 石黒政儀, 西留清: 回転円板法の浄化機構に関する研究 (I), 下水道協会誌, Vol. 15, No. 172, 24-34, 1978
- 渡辺義公, 西留清, 石黒政儀: 回転円板法の浄化機構に関する研究 (II), 下水道協会誌, Vol. 17, No. 195, 1-10, 1980
- 渡辺義公, 西留清: 物質移動モデルに基づく回転円板法の合理的設計, 下水道協会誌, Vol. 26, No. 301, 34-42, 1989
- Antonie R.L.: Fixed Biological Surfaces-Wastewater Treatment, CRC Press, 1976
- Bintanaja H.H.J. et al: Oxygen Transfer in a Rotating Disc Treatment Plant, Water Research, Vol. 19, 1147-1153, 1975
- Hartmann H.: Untersuchungen über die Biologische Reinigung von Abwasser mit Hilfe von Toachtropfkörpern, Stuttgarter Berichte zur Siedlungswasserversorgung, 1960
- Nishidome K. and Kusuda T.: Measurements of Dissolved Oxygen in Attached Microbial Films of Rotating Biological Contactor by Oxygen Microelectrodes. Proceeding of Second IAWPRC Asian Conference on Water Pollution, 305-311, 1988
- Nishidome K. and Kusuda T.: Mechanism and Simulation of Biofilm Formation in a Rotating Biological Contactor, International Symposium Environmental Biotechnology 66, European Environmental Research Organization, 347-351, 1991
- Nishidome K., Kusuda T. and Watanabe Y.: Determination of Oxygen Transfer Rate to a Rotating Biological Contactor by Microelectrode Measurement, Water Science and Technology, Vol. 29, 471-477, 1994
- Pöpel, F.: Leistung, Berechnung und Gestaltung von Toachtropf Körperanlagen, Stuttgarter Berichte zur Siedlungswasserwirtschaft, 11, 1964
- Rittman B.E. and McCarty P.L.: Design of Fixed-film Processes with Steady-state Biofilm Model, Progress in Water Technology, Vol. 12, 271-281, 1980
- Sanders W.M. Bungay H.R. and Whalen W.J.: Oxygen Microprobe studies of Microbial Slims, Water, 69-74, 1970
- Watanabe Y. Bravo M. and Nishidome K.: Simulation of Nitrification and Its Dynamics in a Rotating Biological Contactors, Water Science and Technology, Vol. 14, 811-832, 1982
- Watanabe Y. Ishiguro M. and Nishidome K.: Nitrification Kinetics in a Rotating Biological Disk Reactor, Water Science and Technology, Vol. 12, 233-251, 1980
- Whalen W.J. Riley J. and Nair P.: A microelectrode for measuring intracellular Po₂, Appl., Physiol., 23, 798-801, 1967