

Ⅶ-161

回転円板法における生物膜内酸素濃度分布のシミュレーション（Ⅱ）

佐賀大学理工学部 ○学 後藤田和由 正 古賀憲一
 佐賀大学低平地研究センター 正 荒木宏之
 鹿児島工業高等専門学校 正 西留 清

1. はじめに 回転円板法の設計法を確立するために多くの実験・理論的検討がなされているが、生物膜内の物質輸送現象解明に立脚した合理的な設計手法に至るまでには未だ検討課題が残されているようである。生物膜内の水質モデルにおいて、物質輸送過程を分子拡散あるいはそれに準じた形式で表現することが一般的である。著者ら¹⁾は、生物膜内酸素濃度分布の実測値を分子拡散レベルの輸送速度では十分には説明できにくいことを指摘している。また、岡部・渡辺ら²⁾は、水中部での物質輸送は分子拡散のみではなく、生物膜内への直接的な移流によって輸送される可能性の高いことを指摘している。以上の観点から、本研究では、移流を考慮したモデル化を行い、微小酸素電極を用いた実測結果³⁾との比較から生物膜内の物質輸送現象の解明を試みたものである。

2. 従来の研究 分子拡散に従うとした従来型のモデル¹⁾（以下、従来モデルと略記）は図-1に示すように空中部では付着水膜及び生物膜、水中部では液本体、拡散層（濃度境界層）、生物膜からなり、物質輸送は原理的には分子拡散で規定している。以下に従来モデルの基礎式を示す。

$$\text{付着水膜、濃度境界層} \cdots \frac{\partial O}{\partial t} = D_w \frac{\partial^2 O}{\partial Z^2}$$

$$\text{生物膜(空中部、水中部)} \cdots \frac{\partial O}{\partial t} = D_b \frac{\partial^2 O}{\partial Z^2} - R$$

O：溶存酸素濃度，t：時間， D_w ：水中部分子拡散係数，

D_b ：生物膜内分子拡散係数，Z：支持体方向深さ，R：酸素消費速度

著者ら⁴⁾は、従来モデルでは基質除去速度(生物濃度)を大きくすると、Fluxは実測の基質除去量と一致するが、DO分布は一致せず、特に生物膜が水中に入った数秒間は殆ど一致しないという知見を得ている。一方、岡部・渡辺ら²⁾はラテックスビーズをトレーサーとして用いた生物膜内における微粒子の挙動について報告しており、微粒子は短時間に生物膜の最深部まで達することを確認しており、この微粒子の移動速度は分子拡散のみでは説明が困難であることから、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指摘している。これらのことから、生物膜内への液相からの移流を考慮し、水質解析モデルを構築し数値計算を行った。

3. 解析方法 移流を考慮したモデルを作成するにあたり、右図に示す2つのモデル(Swing型(図-2)、Stretch型(図-3))を想定した。Swing型とは生物膜を糸の様なものの集合体（生物糸と略記）と仮定し、それらが独立に揺らぐことにより生物膜内へ輸送が起こるとした。このことは、膜内の物質輸送から見れば、液相からの液体積輸送によって生物膜が揺らぐことと

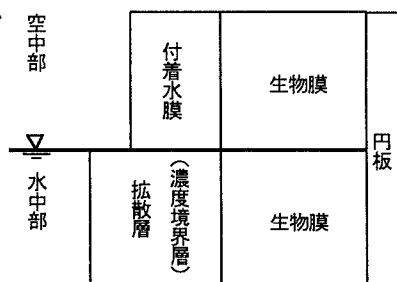


図-1 従来モデル

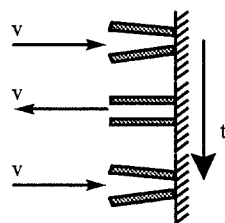


図-2 Swing型モデル

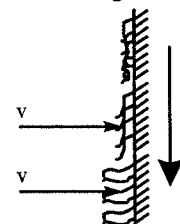


図-3 Stretch型モデル

回転円板法 物質輸送モデル 拡散 溶存酸素分布

同等である。また、Stretch 型は生物系が液相側へ徐々に伸びてゆくことにより生物膜内へ輸送が起こることを想定したモデルである。本研究で扱うような物質輸送変換モデルを構築する場合には、原理的には、体積輸送速度（移流による流量） Q 、空隙面積 A を連続の式と運動方程式から求め、物質保存式に代入し生物膜内の水質計算を行わなければならない。しかしながら、生物膜内の微細かつ複雑な物体内の流動現象を定式化し定量的に数値計算を行うことは困難なことから、ここでは、 Q または A に仮定を設けることにより運動方程式を考慮せずに、連続の式と物質保存式により水質計算を行うこととした。

以下にモデルの基礎式を記す。

$$\begin{array}{l} \text{連続の式} \quad \frac{\partial A(t, x)}{\partial t} + \frac{\partial Q(t, x)}{\partial x} = 0 \\ \text{物質保存式} \quad \frac{\partial A_i C_i}{\partial t} + \frac{\partial S_i}{\partial x} = \pm J_{exc} \pm P_i, \quad S_i = Q_i C_i + A_i D \frac{\partial C_i}{\partial x} \end{array}$$

A : 空隙部の面積, Q : 体積輸送量(流量), C : 着目物質濃度, S_i : 物質輸送速度, D : 拡散係数,
 P_i : 反応速度, J_{exc} : 空隙部と生物系内部との交換速度

本論文では Swing 型モデルについて検討を行う。Swing 型モデルは前述の様に生物膜の揺らぎにより液相からの物質輸送が起こることを想定したモデルである。この生物系の揺らぎをある時間 T で積分すると、体積輸送量 $Q=0$ と仮定できるものとし、かつ、下式に示すように物質輸送速度 S を拡散輸送型で近似することとした。従来型のモデルと異なる点は、拡散項が分子拡散を前提としていないこと、及び、膜内の空隙と体積輸送速度を考慮に入れたことである。

$$S_w = \frac{1}{T} \int_0^T (Q_w C_w + A_w D_w \frac{\partial C_w}{\partial x}) dt = A_w D_w^* \frac{\partial C_w}{\partial x}$$

w : 空隙部、 D_w^* : 総括的拡散係数

4. 計算結果及び考察 ゆらぎ生物膜型モデルのシミュレーション結果と実測値との比較を図-4 に示す。このシミュレーション結果から分かるように空中部、水中部ともに DO 分布は、実測値とほぼ一致し、再現性は良好である。本モデルの結果から、酸素や基質の輸送現象を膜表面の分子拡散ではなく、生物膜内への体積輸送（混合・拡散）を考慮することによって現象

再現の可能性が示された。しかし、水中部 30 秒後の計算値に若干ではあるが実測値との違いが見られ、生物反応と液-生物系間の物質交換モデルに改善の余地が残されているようである。

5. まとめ 本研究では、生物膜内への水の移流という仮説のもとで、生物膜内酸素濃度分布のシミュレーションを行い移流に起因する物質輸送の可能性を支持する結果が得られた。詳細については Stretch 型モデルとの比較を踏まえた検討が必要である。

【参考文献】

- 1) 西留：半水没型回転円板法の生物膜内基質濃度分布に関する研究、鹿児島高専研究報告 17 号、1983 年
- 2) 岡部、渡辺等：生物膜内の微粒子の挙動に関する基礎的研究、土木学会第 51 回年次学術講演会、1996 年
- 3) 西留、楠田：微小酸素電極による回転円板付着生物膜内酸素濃度の測定に関する研究、鹿児島高専研究報告 21 号、1987 年
- 4) Nishidome, K., et. al. : Determination of oxygen transfer rate to a rotating biological contactor by microelectrode measurement, Wat. Sci. Tech. Vol. 29, No. 10-11, 1994

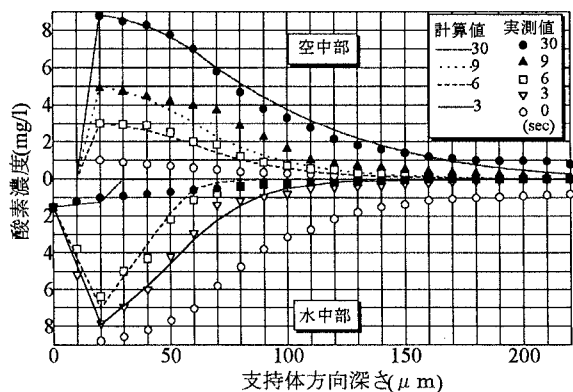


図-4 シミュレーション結果