

II-416 固定生物膜メタン発酵槽の浄化効率向上に関する研究
 ——境膜物質移動特性に及ぼすハニカム充填材セル径の影響——

北海道大学 正 井上雄三 神山桂一 三好敬久（現荏原製作所）和泉彰（現荏原製作所）

1. はじめに 完全混合型反応槽における生物膜タイプのメタン発酵槽の浄化効率を向上させる主要なパラメータには、充填材の表面積、充填材の物質移動に関する特性値、メタン生成活性、相対流速、流入基質濃度などがある。筆者らはこれらのパラメータの感度解析を行い、表面積と物質移動に関する特性値が除去効率に大きな影響を与えていることを示した¹⁾²⁾。物質移動を支配する境膜（拡散境界層）の厚さは、槽内の流れの状態、及び充填材の形状に大きく関係しているが、それらの定量的な影響についてはよく分かっていない。そこで、本報ではハニカム充填材のセル径が物質移動特性に及ぼす効果について検討を加えたので報告する。

2. 理論的考察 ハニカムチューブを円管束体とし、境膜物質移動は円管内層流モデルで表せるとすると、次式で与えられ、これを境膜物質移動係数 K_L で表すと (2) 式になる。

$$Sh = 1.62 (Sc \cdot Re \cdot d / \ell)^{1/3} \quad (1) \quad K_L = 1.62 (D \cdot U / d \cdot \ell)^{1/3} \quad (2)$$

即ち、層流では拡散境界層内物質移動係数は、セル径 d の $1/3$ 乗に逆比例することが分かる。ところが、実験結果から物質移動係数はセル径と正の相関があることが明らかになっている。一方、それは Re 数の $1/3$ 乗に比例することが分かっており、円管束内の流れは層流になっていることは明らかである。即ち、ハニカムチューブ内の流れの状態と物質移動特性から、流れは層流になっているがセル径の効果が逆になっているという (2) 式と矛盾した結果が示された。この矛盾は次のように考えることによって解消される。円管束内に流入してくる流体は、本実験では Re 数が $1500 \sim 5800$ であり、また整流板格子からハニカムチューブまでの距離が 10 cm 程度であることから乱流状態にある。これが円管内に入ってくると Re 数が管径 d に比例して小さくなるので乱れの減衰が急速に生じる。一方、円管壁に発達した生物膜表面に存在する凹凸によっても局所的に渦流が発生し、同様な減衰過程が存在するものと思われる。Levich³⁾ は、平板上に高さ h の突起体が存在すると、 $Re_n = u \cdot h / \nu$ が $20 \sim 50$ 以上では境界層の剥離と渦流が生じるといっている。突起体の後に発生した渦流は、突起体の大小ではなく主流の Re 数 ($U \cdot L / \nu$) (L : 代表長) に関係するものと推察される。以上のような円管内での乱れの散逸の程度が境界層の物質移動特性に大きな影響を及ぼすことになる。即ち、管径と散逸の程度には負の相関関係があるものと思われる。一方、層流域では (2) 式のように管長 ℓ も境界層の物質移動に関係していることが知られているので、(3) 式のように表される。また、充填材の物質移動に関する特性値 α を (4) 式のように置く。

$$K_L = \alpha \cdot f(\ell, d) Re^n \quad (3) \quad \alpha = \alpha' \cdot f(\ell, d) \quad (4) \quad K_L = \alpha' \cdot Re^n \quad (5)$$

α は (5) 式から実験的に求めることが可能である。また、 $f(\ell, d)$ の関数形を層流モデルなどを参考にしながら $f(\ell, d) = (\ell/d)^m$ と置くと、(4) 式の α と d/ℓ の関係も実験によって求めることが可能である。従って、物質移動係数は次式で表される。

$$K_L = \alpha' \cdot (d/\ell) \cdot Re^n \quad (6)$$

3. 実験条件及び方法 反応槽は内径 10 cm 、長さ 30 cm の円筒を用い、表 1 に示す特性を持った充填材を入れた完全混合型の固定生物膜反応槽である。総液量は 5 L (反応部: 2.4 L 、調整槽: 2.1 L 、その他: 0.5 L)、馴養時の循環流量は 20 L/min 、酢酸を制限基質とした回分実験により除去曲線を求めた。実験装置図、合成廃水の組成、栄養塩の組成については文献¹⁾を参照されたい。

表 1 充填材の特性値

項目	Reactor No	1	2	3	4	5
セル径 [d=2R] (mm)		4	8	13	20	30
充填材長 (mm)		250	250	250	250	250
d/ℓ (-)		0.0077	0.015	0.025	0.038	0.057
比表面積 (m ² /m ³)		900	400	250	175	100
フィルム厚 (μm)		75	75	100	140	200
空隙率 (%)		96	98	98	99	98

4. 結果と考察 ①境膜物質移動係数の算定

本報では境膜物質移動係数が最大除去フラックス N_m と見かけの飽和定数 K_m の比として次式のように表せるとして算定した。詳しくは文献⁴⁾を参照されたい。

$$K_L = N_m / K_m \quad (7)$$

ここで、 N_m と K_m は 酢酸の回分除去曲線が Michaelis-Menten 型の飽和関数モデルで極めて精度よく表しうることから、探索法により推定した。

②境膜物質移動特性 以上のようにして求めた境膜物質移動係数 K_L と充填材内の Re 数の関係を図1に示す。図から明らかなように K_L と Re 数との間には(5)式のように両対数で直線関係がある。傾き n は $1/3$ と一定であるが、 α は充填材の形状などによって変化する。図より求めた切片 α と d/ℓ の関係を両対数にプロットすると図2のように直線関係が得られる。図から切片 α' と傾き m を求めると $\alpha' = 0.0066$, $m = 0.33 \approx 1/3$ になる。従って、(6)式の関係が成立することが明らかになる。数値を代入すると、

$$K_L = 0.0066 (d/\ell)^{1/3} \cdot Re^{1/3} \quad (8)$$

となる。(8)式は円管内の流れは層流あるが、境膜物質移動係数は充填材の特性値 d/ℓ の $1/3$ 乗に、本報では管径 d の $1/3$ 乗に比例することが分かる。即ち、図1のように充填材の特性値によってそれぞれに直線が描かれていたのが、 d/ℓ の効果を考慮することによって一本の直線で表されることになるはずである。図3は境膜物質移動係数と $(Re \cdot d/\ell)$ の関係を示したものである。図中の直線は(8)式を示しており、乱れの散逸効果を考慮したモデルによってハニカム充填材の物質移動特性を精度よく表している。

記号表

- D: 溶質の分子拡散係数 (m^2/h) d: 円管径 (m)
- h: 突起体長 (m) K_L : 境膜物質移動係数 (m/h)
- K_m : 見かけの飽和定数 (mg/ℓ) L: 代表長 (m)
- ℓ : 円管長 (m) N_m : 最大除去フラックス ($kg/m^2/h$)
- Re: Reynolds数 (-) Re_n : 局所 Reynolds数 (-)
- Sh: Sherwood数 (-) Sc: Shumidt数 (-)
- U: 平均流速 (m/h) u: 流速 (m/h) α : 充填材の物質移動に関する特性値 (m/h) α' : 係数 (m/h)
- ν : 動粘性係数 (m^2/h)

参考文献 1)井上他:固定生物膜メタン発酵槽の効率化について,土木学会年講II,40(1985)
 2)井上他:固定生物膜メタン発酵槽の効率化に関する研究,環境技術研究協会,生物膜シンポジウム,1(1986)
 3)Levich, V.G: Physicochemical Hydrodynamics, Prentice-Hall Inc. (1962)
 4)井上他:廃水処理における微生物反応の速度論的考察,土木学会年講II,38(1983)

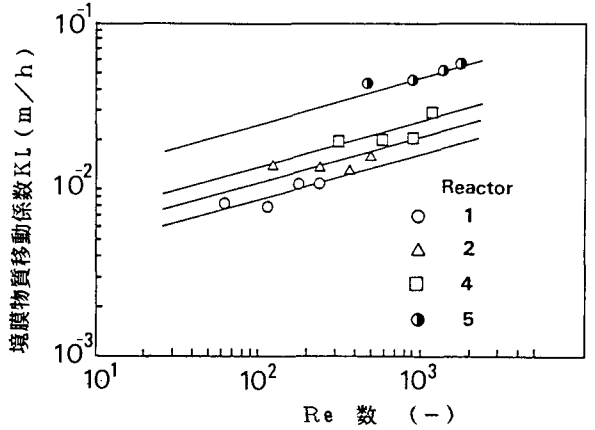


図1 各リアクターの境膜物質移動係数 K_L と Re 数の関係

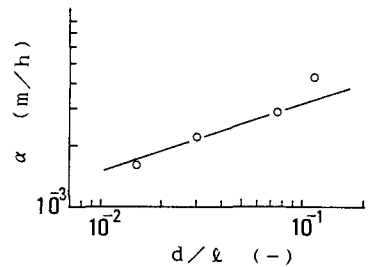


図2 充填材の物質移動に関する特性値 α と d/ℓ の関係

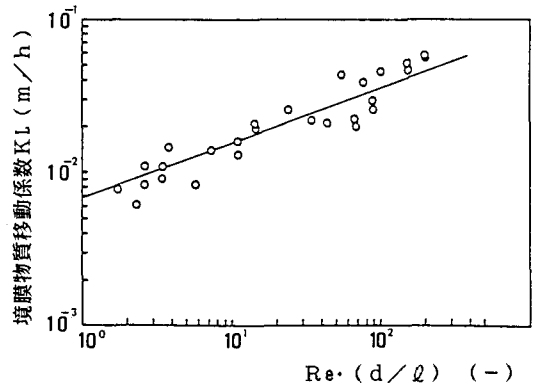


図3 境膜物質移動係数 K_L と $Re \cdot (d/\ell)$ の関係