

固定化微生物の基質利用速度に関する研究

著者	海田 輝之, Ganczarczyk Jerzy J., 大村 達夫, 相沢 治郎
雑誌名	水環境学会誌
巻	15
号	6
ページ	377-383
発行年	1992
URL	http://hdl.handle.net/10097/52762

〈論 文〉

固定化微生物の基質利用速度に関する研究

海田輝之* Jerzy J. Ganczarczyk**
大村達夫* 相沢治郎*

A Study on Substrate Utilization Rate for Immobilized Microorganisms

Teruyuki UMITA*, Jerzy J. GANCZARCZYK**,
Tatsuo OMURA* and Jiro AIZAWA*

* Department of Civil and Environmental Engineering, Faculty of Engineering, Iwate University, Ueda 4-3-5, Morioka 020 Japan

** Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, University of Toronto, Toronto M5S 1A4, Canada

Abstract

An equation of specific substrate utilization rate for immobilized microorganism was derived in consideration of external and internal diffusional resistances and microbial substrate utilization. It was expressed by the Michaelis-Menten equation modified replacing the maximum specific substrate utilization rate to $\eta_p \nu_m$ and the Michaelis constant to $(K_m/K + \delta_p)$ in the case of $C_s \delta_p / (C_s + K_m/K + \delta_p)^2 \ll 1$.

The experimental results of immobilized ammonium and ferrous iron oxidizing bacteria showed that δ_p should be considered because ratios of δ_p to K_m were 0.34 and 1.14, respectively. On the other hand, when microorganisms were dispersed in a culture medium, δ_c could be ignored even in a moderate agitation condition.

Keywords: immobilized microorganism, Michaelis-Menten equation, specific substrate utilization rate

1. はじめに

生物学的廃水処理を効率良く行うために、微生物を種々の方法で固定化することにより、反応器からの微生物の wash out を防ぎ、微生物を反応器内に高濃度に保持し、反応器単位容積当りの反応速度を高めようとする試みが近年行われている^{1),2)}。このような廃水処理システムの処理効率を予測したり、処理システムの運転条件を決定する上で微生物の動力学定数の値は重要な意味を有している。

多くの生物学的な反応は Michaelis-Menten 式によって表し得ることが知られており、最大比基質利用速度および Michaelis 定数の値は主に以下に示す2つ

の方法によって測定されている³⁾。すなわち、①回分培養により、いくつかの異なる初期基質濃度の下で、初期の比基質利用速度を求め、Lineweaver-Burk プロット等によって求める方法、②連続培養で異なる流入基質濃度あるいは異なる希釈率の下で、定常状態時の流出基質濃度と反応器内の生物量から比基質利用速度を求め、①と同様のプロット等によって求める方法がある。しかしながら、このような手法によって求められた動力学定数の値は、微生物の反応器内での存在形態の相違、すなわち、微生物が分散した状態で存在するか、あるいは担体の表面や担体内部に付着しているか、高分子物質によって微生物が包括されているか、

* 岩手大学工学部建設環境工学科 〒020 盛岡市上田4-3-5

** トロント大学工学部土木工学科 カナダ国トロント

また、活性汚泥や自己造粒化微生物のように、主に微生物自体や微生物の代謝産物で集塊を形成しているか等によって異なる。例えば、Hermanowicz が活性汚泥中の硝化細菌の動力学定数値について整理しているように⁴⁾、各研究者によって報告されている値はかなり異なる。この原因としては、測定時の pH、水温等の環境条件の相違もさることながら、活性汚泥のフロク径や密度等の物性の相違に基づく基質の移動抵抗が各実験によって異なることが影響しているものと考えられる。

微生物が固定化された状態で測定された Michaelis 定数が分散された状態で得られた値と異なることは良く知られた現象であり、その要因の 1 つとして外部拡散抵抗が影響すると考えられている⁵⁾。通常、反応器内での基質の物質移動は、微生物が分散して存在する場合には液相から直接微生物表面へ、微生物がフロクを形成したり、固定化されている場合には、表面への移動と内部での移動が考えられる。液本体から微生物表面への基質移動は物質移動係数あるいは Sherwood 数を用いて表され、内部での基質の移動は拡散によって生じるとして有効係数を用いて評価されている⁶⁾。しかしながら、従来の動力学定数の算定においてはこれらの影響をほとんど考慮していない。そこで、本研究では微生物の比基質消費速度が Michaelis-Menten 式で与えられるとき、完全混合反応器内で微生物が固定化されている場合と分散した状態で存在する場合について、動力学定数値である最大比基質利用速度と Michaelis 定数および流出基質濃度がどのように影響されるかを検討したものである。ただし、本論文では微生物が固定化されても微生物自体の活性は変化しないとし、また、基質については制限基質のみを考えることにする。

2. 物質の移動と消費を考慮した場合の速度式

流出水の返送を行わない完全混合反応器内で固定化微生物による反応が生じている場合を考える。反応器内でペレットが同一の形態を有し、ペレットのまわりを均一な厚さの stagnant layer が取り囲んでいるとする。ペレット内外の基質濃度を Fig. 1 のように考える⁵⁾。すなわち、 C_b ：流出（液本体）基質濃度、 C_{so} ：stagnant layer 最深部での基質濃度、 C_{si} ：ペレット最表層部の基質濃度、 C_p ：ペレット内の基質濃度、である。 C_{so} と C_{si} は分配係数 K を用いて通常

$$C_{si} = KC_{so} \quad (1)$$

と表される。

定常状態時の基質の物質収支をとると、

$$(C_{in} - C_b) / T = N_p A_p' J \quad (2)$$

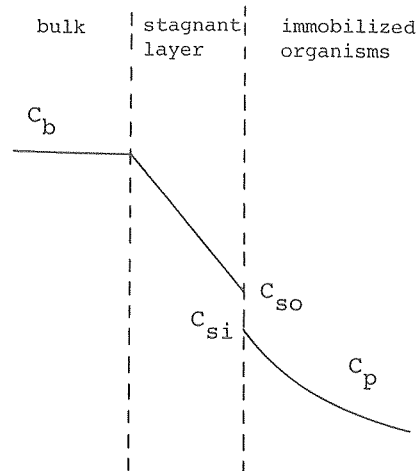


Fig. 1 Schematic of substrate concentration profile

ここで、 C_{in} ：流入基質濃度、 T ：水理学的滞留時間、 N_p ：反応器単位容積当りのペレット数、 A_p' ：stagnant layer の厚さも含めたペレットの表面積、 J ：液本体から stagnant layer への基質のフラックス、である。

式(2)の $A_p' J$ は物質移動係数 k_p を用いて表すと、

$$A_p' J = A_p k_p (C_b - C_{so}) \quad (3)$$

で表される。ここで、 A_p ：ペレットの表面積である。

定常状態時では液本体から stagnant layer へ流入する単位時間当りの基質量が微生物によって消費される基質量と等しいので、

$$A_p' J = \int X_{pr} v(C_p) dV_p = \eta_p X_p v(C_{si}) V_p \quad (4)$$

ここで、 X_{pr} ：ペレットのある点での単位体積当りの乾燥 cell 量、 X_p ：ペレットの単位体積当りの乾燥 cell 量、 V_p ：ペレットの体積、 v ：比基質利用速度、である。 η_p は有効係数で、ペレット内の基質濃度がすべてペレットの最表層部の濃度 C_{si} であるとしたときの単位時間当りの基質利用量に対する、実際の単位時間当りの基質利用量の比として、

$$\eta_p = \frac{\int X_{pr} v(C_p) dV_p}{X_p v(C_{si}) V_p} \quad (5)$$

で定義される。比基質利用速度が Michaelis-Menten 式で表されるとし、最大比基質利用速度を v_m 、Michaelis 定数を K_m とすると、

$$v(C_{si}) = \frac{v_m C_{si}}{C_{si} + K_m} \quad (6)$$

Powell⁷⁾が分散した状態で存在する微生物について、液本体から stagnant layer への物質移動を考慮して

誘導した方法と同様に、式(1), (3), (4)から C_{si} を求め、式(6)に代入すると、式(7)に示した ν についての二次方程式が得られる。

$$\frac{V_p X_p \eta_p}{A_p k_p} \nu^2 - \left(C_b + \frac{K_m}{K} + \frac{V_p X_p \eta_p \nu_m}{A_p k_p} \right) \nu + C_b \nu_m = 0 \quad (7)$$

これを ν について解き、プラスの項をとると (マイナスの項をとると $\nu/\nu_m > 1$ となる),

$$\frac{\nu}{\nu_m} = \frac{(C_b + K_m/K + \delta_p)}{2\delta_p} \times \left\{ 1 - \sqrt{1 - \frac{4C_p \delta_p}{(C_b + K_m/K + \delta_p)^2}} \right\} \quad (8)$$

ここで、 $\delta_p = (V_p/A_p) (X_p/k_p) \nu_m \eta_p$ であり、 $V_p/A_p = R_p/3$ (R_p はペレットの代表的な長さであり、ペレットを球とすると半径に相当する) とし、Sherwood 数を Sh_p ($Sh_p = k_p R_p/D$, D は基質の液中での拡散係数) として δ_p を表すと、

$$\delta_p = \left(\frac{\phi_m^2 \eta_p}{3Sh_p} \right) K_m \quad (9)$$

となる。ここで、

$$\phi_m^2 = \frac{\nu_m X_p R_p^2}{K_m D} \quad (10)$$

すなわち、液中での基質の拡散係数で表した Thiele's modulus である。式(9)より、 δ_p はペレット外部での物質移動の大きさを示す Sh_p , ペレット内部での物質の移動と消費によって生じる η_p , 反応速度と拡散抵抗を示す ϕ_m^2 によって表されることが分る。

式(8)中の平方根の項を Taylor 展開し、整理すると、

$$\frac{\nu}{\nu_m} = \frac{C_b}{C_b + K_m/K + \delta_p} \left\{ 1 + \frac{C_b \delta_p}{(C_b + K_m/K + \delta_p)^2} + \frac{2C_b^2 \delta_p^2}{(C_b + K_m/K + \delta_p)^4} + \dots \right\} \quad (11)$$

となる。式(8)あるいは(11)は微生物の比基質利用速度が式(6)の Michaelis-Menten 式で表されるとき、液本体からペレット表面への物質移動とペレット内での物質移動と消費を考慮した場合に、液本体での基質濃度 C_b で表した速度式を示している。式(8)で $\delta_p/(K_m/K + \delta_p)$ をパラメーターとして、 $C_b/(K_m/K + \delta_p)$ と ν/ν_m との関係を図 2 に示す。横軸の $C_b/(K_m/K + \delta_p)$ の値が小さいか、あるいは、 $\delta_p/(K_m/K + \delta_p)$ の値が小さいときのみ、液本体の基質濃度 C_b で表しても固定化微生物の比基質利用速度が Michaelis-Menten 式で近似できることが分る。また、式(11)の中括弧内の第 2 項以降が無視できるとき、すなわち、 $C_b \delta_p / (C_b + K_m/K + \delta_p)^2 \ll 1$ のとき (これは前の 2 つの条件を合せた条件である),

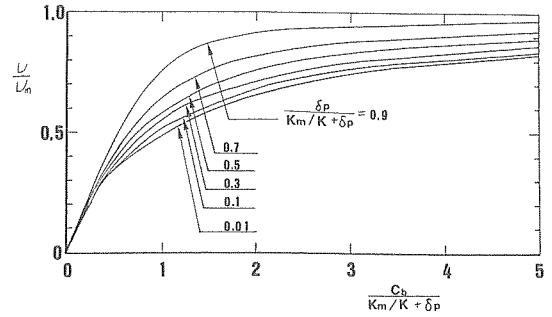


Fig. 2 Relationship between non-dimensional substrate concentration and non-dimensional substrate utilization rate

$$\nu = \frac{\nu_m C_b}{C_b + K_m/K + \delta_p} \quad (12)$$

となり、見かけの Michaelis 定数 K_{ma} を、 $K_{ma} = K_m/K + \delta_p$ とおけば、 C_b で表しても Michaelis-Menten 式が成り立つことを示している。つまり、ペレットの形成を考慮しないで C_b と反応器内での生物量で比基質利用速度を求めると、式(4)で

$$\nu(C_{si}) \eta_p = \frac{\eta_p \nu_m C_b}{C_b + K_m/K + \delta_p} = \frac{\nu_{ma} C_b}{C_b + K_{ma}} \quad (13)$$

として、見かけの速度定数 ν_{ma} および K_{ma} を求めていることになるので、 ν_{ma} は微生物に固有の真の ν_m の値より η_p 倍小さく (実際には $\eta_p < 1$ であるので), K_{ma} は真の K_m を分配係数 K で割り、さらに δ_p を加えた分だけ大きく見積っていることになる。さらに、式(9)から分るように δ_p は ϕ_m^2 , η_p および Sh_p の関数となり、 ϕ_m^2 はペレットの代表径 R_p とペレット内部の微生物量 X_p のようなペレットの物性値によって決められるにもかかわらず、各研究者によって従来求められてきた動力学定数の値はこれらを考慮しているとは言い難く、これが先に述べた定数値の相違の要因の 1 つと考えられる。

次に、微生物がペレットを形成せず、反応器内で分散した状態で存在するとすると、これまで示してきた式の中の添字 p をつけた変数を微生物を示す c に置き換え、反応が微生物表面で生じるとして式(4)で $\eta_p = 1$, また、分配係数 K を 1 とすれば、同様の取り扱いができ、 $C_b \delta_c / (C_b + K_m + \delta_c)^2 \ll 1$ のとき、

$$\nu = \frac{\nu_m C_b}{C_b + K_m + \delta_c} \quad (14)$$

ここで、

$$\delta_c = \left(\frac{\phi_c^2}{3Sh_c} \right) K_m, \quad (15)$$

$$\phi_c^2 = \frac{v_m X_c a^2}{K_m D} \quad (16)$$

であり、 X_c ：微生物単位体積当りの乾燥微生物量（微生物の乾燥密度）、 a ：微生物の代表径、である。この場合には最大比基質利用速度は正しく評価しているが、Michaelis 定数の値は δ_c だけ大きく見積っていることになる。

また、逆に考えれば実際の反応器ではペレットや微生物の表面での基質濃度 C_s ではなく、流出濃度 C_b が問題となるので、見かけ上 Michaelis-Menten 式が成り立つ場合には、

$$N_p A_p J = (\text{反応器単位容積当りの乾燥微生物量}) \times \left(\frac{\eta_p v_m C_b}{C_b + K_m / K + \delta_p} \right) \quad (17)$$

あるいは、

$$N_c A_c J = (\text{反応器単位容積当りの乾燥微生物量}) \times \left(\frac{v_m C_b}{C_b + K_m + \delta_c} \right) \quad (18)$$

として、式(2)に代入すれば流出濃度 C_b が解けることになる。

3. 固定化微生物の動力学定数値に関する実験

3.1 実験装置および方法

実験は担体として陰イオン交換樹脂アンバーライト IRA-938 を用い、アンモニア酸化菌と鉄酸化細菌 (*Thiobacillus ferrooxidans*) の 2 種の微生物について行った。微生物を担体に附着させるため、容量約 2 l の

Table 1 Substrate composition for ammonium oxidizing bacteria

(NH ₄) ₂ SO ₄	0.1415g (30mg as N)
NaCl	0.085g
K ₂ HPO ₄	0.283g
MgSO ₄ ·7H ₂ O	0.085g
FeSO ₄ ·7H ₂ O	0.0085g
Distilled Water	1.0l

Table 2 Substrate composition for ferrous iron oxidizing bacteria (9K medium)

FeSO ₄ ·7H ₂ O	300ml of a 14.47 % (w/V) solution
(NH ₄) ₂ SO ₄	3.0g
KCl	0.1g
K ₂ HPO ₄	0.5g
MgSO ₄ ·7H ₂ O	0.5g
Ca(NO ₃) ₂	0.01g
Distilled water	700ml
10N H ₂ SO ₄	1.0ml

3相流動床で、Table 1 および 2 に示す基質組成でそれぞれ回分培養を行い、基質が消費された時点で新たな基質と取り替え、回分培養を繰り返した。アンモニア酸化菌については、岩手県北上川上流域流域下水道終末処理場の返送汚泥を、鉄酸化細菌は岩手県旧松尾鉱山廃水処理施設のエアレーションタンクから採取したものを植種した。IRA-938は macro porous な樹脂であり、微生物は樹脂の内部表面に附着した。

回分培養で新たな基質を加えてからの基質の除去過程が同じパターンを示すようになってから、流動床から担体を取り出し、担体を壊さないで菌が担体内部に附着している場合について、初期基質濃度を変化させ、20°C、120rpm で振とう培養を行い、基質濃度の経時変化を測定し、初期比基質利用速度を求めた。鉄酸化細菌を本研究で用いたものと同じ IRA-938 に附着させた流動床における附着菌数と流出水中の菌数との比較結果から⁸⁾、振とう培養中での菌の剝離は少ないと考えられる。また、アンモニア酸化菌については、カラムから取り出した担体をマグネチックスターラーで壊して微生物をできるだけ分散状態に近くなるようにして、破壊した担体も含めて培地中に分散された場合についても同様に初期比基質利用速度を求めた。また、鉄酸化細菌では担体をマグネチックスターラーで壊して、希釈後、600倍の位相差顕微鏡で血球計算盤により附着菌数を測定した。

各基質に対する担体の分配係数は、比色管に所定の濃度 (NH₄-N の場合は 30mg·l⁻¹、Fe²⁺ の場合は 6000 mg·l⁻¹) の基質 5 ml を入れ、菌が附着していない担体を加えて 10ml とし、密閉した後、20°C で緩やかに振とう培養器で 5 時間攪拌し、振とう前後の基質の濃度差と担体体積から次式で求めた⁹⁾。

$$K = \frac{(C_o - C_e) V_o}{C_e V_{tp}} \quad (19)$$

ここで、 C_o ：初期基質濃度、 C_e ：平衡後の基質濃度、 V_o ：基質量、 V_{tp} ：担体量、である。

3.2 実験結果および考察

Fig. 3 および 4 にそれぞれアンモニア酸化菌と鉄酸化細菌についての初期基質濃度 C_b と比基質利用速度との関係を示す。ただし、縦軸の単位はアンモニア酸化菌では単位担体量当りであり、鉄酸化細菌では担体 1 ml 当りの附着菌数が $9.7 \times 10^8 \text{ cell} \cdot \text{ml}^{-1} \cdot \text{media}$ であつたので、この値を用いて cell 当りに換算した。また、鉄酸化細菌での菌が分散状態の値は筆者らの以前の実験結果を用いた⁸⁾。

これより、本実験では微生物が分散している場合でも固定化されている場合でも、両細菌の比基質利用速度は Michaelis-Menten 式によって表され、

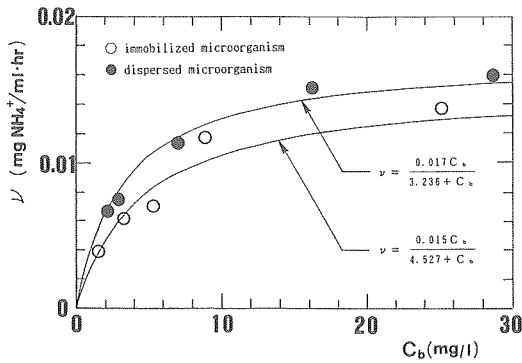


Fig. 3 Comparison of substrate utilization rate between free and immobilized microorganism (Ammonium oxidizing bacteria)

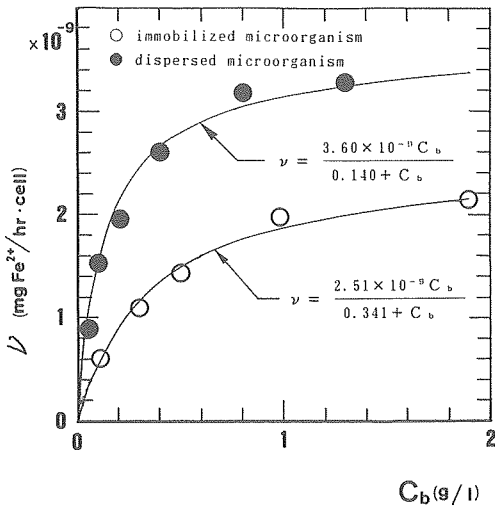


Fig. 4 Comparison of substrate utilization rate between free and immobilized microorganism (Ferrous iron oxidizing bacteria)

アンモニア酸化菌では、

分散状態の場合

$$v(\text{mgNH}_4\text{-N}\cdot\text{ml}^{-1}\cdot\text{media}\cdot\text{hr}^{-1}) = \frac{0.017C_b}{3.236 + C_b} \quad (20)$$

固定化状態の場合

$$v(\text{mgNH}_4\text{-N}\cdot\text{ml}^{-1}\cdot\text{media}\cdot\text{hr}^{-1}) = \frac{0.015C_b}{4.527 + C_b} \quad (21)$$

(ただし、 C_b の単位は $\text{mg}\cdot\text{l}^{-1}$)

鉄酸化細菌では、

分散状態の場合

$$v(\text{mgFe}^{2+}\cdot\text{cell}^{-1}\cdot\text{hr}^{-1}) = \frac{3.60 \times 10^{-9} C_b}{0.140 + C_b} \quad (22)$$

固定化状態の場合

$$v(\text{mgFe}^{2+}\cdot\text{cell}^{-1}\cdot\text{hr}^{-1}) = \frac{2.51 \times 10^{-9} C_b}{0.341 + C_b} \quad (23)$$

(ただし、 C_b の単位は $\text{g}\cdot\text{l}^{-1}$)

となった。これより微生物が分散した状態で存在する場合の方が固定化されている場合より、最大比基質利用速度の値は大きく、Michaelis定数の値は小さくなることが分る。

基質の分配係数 K は、アンモニア性窒素では0.95、第一鉄では0.78であったので、式(13)よりアンモニア酸化菌の場合、 $\delta_p = 1.12 \text{mg}\cdot\text{l}^{-1}$ 、 $\eta_p = 0.890$ 、 $\delta_p/K_m = 0.34$ 、鉄酸化細菌の場合、 $\delta_p = 0.16 \text{g}\cdot\text{l}^{-1}$ 、 $\eta_p = 0.700$ 、 $\delta_p/K_m = 1.14$ となり、この場合には両細菌とも液本体の濃度 C_b で基質利用速度を表すには本来の動力学定数値をかなり修正する必要があることが分る。

4. 微生物が分散している場合の δ_c の値の試算

4.1 δ_c の値の試算に必要な種々の値

前述の実験結果より、アンモニア酸化菌および鉄酸化細菌が培地中で分散している場合には、比基質利用速度が Michaelis-Menten 式で表され、少なくとも $C_b \delta_c / (C_b + K_m + \delta_c)^2 \ll 1$ であることが分った。ここでは式(14)、(15)で δ_c の値が K_m に対してどの程度であるかを試算してみる。

4.1.1 Sherwood 数

Armenante ら¹⁰⁾は粒子径が Kolmogoroff のミクロスケール、すなわち、 $(\nu/G)^{1/2}$ より小さい場合に実験より、Reynolds 数 (R_e) および Schmidt 数 (S_c) の関数として、

$$Sh_c = 1 + 0.52 R_e^{0.52} S_c^{1/3} \quad (24)$$

を示した。ただし、 $R_e = \{(2a)^2 G / \nu\}^{2/3}$ 、 $S_c = \nu / D$ 、 G : 攪拌強度、 ν : 動粘性係数である。 $\nu = 0.01 \text{cm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ 、 $G = 10 \text{s}^{-1}$ としても、ミクロスケールは 0.032cm となり、微生物の代表的な大きさよりかなり大きくなるので Sherwood 数として式(24)を用いる。

4.1.2 動力学定数値

本実験の例でも分るように、これまで報告されてきた動力学定数値が式(14)で、 $K_m + \delta_c = K_{ma}$ として、見かけの Michaelis 定数を求めている場合もあり得るが、ここでは報告された値を真の値として δ_c の値を試算する。Table 3 に試算に用いた動力学定数値を示す。アンモニア酸化菌については、Shie¹¹⁾らが物質移動ができるだけ制限とならないような実験条件下で求めた値であり、鉄酸化細菌の ν_m は 1 個の cell の重量を $1.25 \times 10^{-10} \text{mg}/\text{cell}$ として式(22)の ν_m 値を換算した。BOD 酸

Table 3 Parameter values and calculated results

	Ammonium oxidizing bacteria ¹⁾	Ferrous iron oxidizing bacteria	BOD oxidizing bacteria ²⁾
ν_m (s ⁻¹)	8.565×10^{-5}	8.0×10^{-3}	1.157×10^{-4}
K_m (g/cm ³)	2.98×10^{-6}	1.4×10^{-4}	1.0×10^{-4}
D (cm ² /s)	1.5×10^{-6}	8.5×10^{-6}	6.0×10^{-6}
ϕ_c^2 (-)	0.025	0.087	0.0025
Sh_c (G=10s ⁻¹)	1.136	1.164	1.184
Sh_c (G=1000s ⁻¹)	1.670	1.810	1.909
$\phi_c^2/3Sh_c$ (G=10s ⁻¹)	7.34×10^{-3}	2.49×10^{-2}	7.04×10^{-4}
$\phi_c^2/3Sh_c$ (G=1000s ⁻¹)	4.99×10^{-3}	1.60×10^{-2}	4.37×10^{-4}

化菌については活性汚泥についての値をここでは便宜上用いた。また、微生物の乾燥密度 X_c は $1.3 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ 、微生物の代表径 a は $1.0 \times 10^{-4} \text{ cm}$ とする。

4.2 δ_c の値の計算結果

Table 3 に各々の微生物について ϕ_c^2 、 $G=10$ 、 1000 s^{-1} での Sh_c および $(\phi_c^2/3Sh_c)$ の値を示した。これより、 $G=10 \text{ s}^{-1}$ の比較的緩やかな攪拌条件の下でも $\phi_c^2/3Sh_c$ の値は 0.025 以下であることが分る。すなわち、 δ_c は K_m の 3% 以下であり、微生物が分散している場合には、 δ_c は K_m に比較して小さく無視して良いことが分る。

6. 結 論

微生物が分散状態で培地中に存在するときの比基質利用速度が Michaelis-Menten 式によって表される場合に、その微生物が固定化されたときの動力学定数値について実験および理論的に検討した。本研究で得られた結果をまとめると以下ようになる。

1) 液本体からペレット表面への基質の移動とペレット内部での基質の移動と消費を考慮した場合、液本体の基質濃度 C_b で表した比基質消費速度は、微生物に固有の最大比基質利用速度を ν_m 、Michaelis 定数を K_m とすると、 $C_b \delta_p / (C_b + K_m / K + \delta_p)^2 \ll 1$ のときのみ

$$\nu = \frac{\eta_p \nu_m C_b}{C_b + K_m / K + \delta_p}$$

で表される。ただし、 δ_p は Thiele's modulus ϕ_m^2 と有効係数 η_p によって、

$$\delta_p = \left(\frac{\phi_m^2 \eta_p}{3Sh_p} \right) K_m$$

で表され、 $K_m / K + \delta_p = K_{ma}$ 、 $\eta_p \nu_m = \nu_{ma}$ とおけば、見かけ上 Michaelis-Menten 式が成り立つ。

2) アンモニア酸化菌、鉄酸化細菌、BOD 酸化菌についての δ_c の計算例より、反応器中で菌が分散して存在する場合には G が 10 s^{-1} でも、 δ_c の値は K_m の 3% 以下であり、 K_m に較べて δ_c は無視できる。

3) アンモニア酸化菌、鉄酸化細菌をイオン交換樹脂によって固定化した場合、比基質利用速度は見かけ上 Michaelis-Menten 式によって表された。また、固定化された場合の ν_m の値は菌が分散状態にある場合より小さく、 K_m の値はより大きくなった。

今後は、反応器の攪拌強度から Sherwood 数を求め、 δ_p を算定し、実験で得られた値と比較する必要がある。

謝 辞

本研究を行うにあたり、岩手大学卒論生、宮田健君（現在、前田建設工業）の多大なる協力を得た。ここに記して謝意を表します。

（原稿受付 1991年8月14日）

（原稿受理 1992年2月22日）

使用記号

- A_p' : stagnant layer の表面積 (cm²)
- A_p : ペレットの表面積 (cm²)
- a : 微生物の代表径 (cm)
- C_b : 流出 (液本体) 基質濃度 (g · cm⁻³)
- C_e : 平衡時の基質濃度 (g · cm⁻³)

C_{in} : 流入基質濃度 ($g \cdot cm^{-3}$)
 C_o : 初期基質濃度 ($g \cdot cm^{-3}$)
 C_s : ペレットあるいは微生物の表面での基質濃度 ($g \cdot cm^{-3}$)
 C_{st} : ペレット最表層部の基質濃度 ($g \cdot cm^{-3}$)
 C_{so} : stagnant layer 最深部の基質濃度 ($g \cdot cm^{-3}$)
 C_p : ペレット内の基質濃度 ($g \cdot cm^{-3}$)
 D : 基質の拡散係数 ($cm^2 \cdot s^{-1}$)
 G : 攪拌強度 (s^{-1})
 J : 液本体から stagnant layer への基質のフラックス ($g \cdot cm^{-2} \cdot s^{-1}$)
 K : 分配係数 (-)
 K_m : Michaelis 定数 ($g \cdot cm^{-3}$)
 K_{ma} : みかけの Michaelis 定数 ($=K_m/K + \delta_p$) ($g \cdot cm^{-3}$)
 k_p : 物質移動係数 (LT^{-1})
 N_p : 反応器単位容積当りのペレット数 (cm^{-3})
 R_e : Reynolds 数 ($=\{(2a)^2 G/\nu\}^{2/3}$) (-)
 R_p : ペレットの代表的な長さ (cm)
 S_c : Schmidt 数 ($=\nu/D$) (-)
 Sh_p : Sherwood 数 ($=k_p R_p/D$) (-)
 T : 水理学的滞留時間 (T)
 V_o : 基質量 (cm^3)
 V_{tp} : 担体量 (cm^3)
 V_p : ペレットの体積 (cm^3)
 X_c : 微生物の乾燥密度 ($g \cdot cm^{-3}$)
 X_p : ペレットの単位体積当りの乾燥 cell 量 ($g \cdot cm^{-3}$)
 X_{pr} : ペレットのある点での単位体積当りの乾燥 cell の量 ($g \cdot cm^{-3}$)
 δ_c : $=((\phi_c^2/3Sh_c) K_m)$ ($g \cdot cm^{-3}$)
 δ_p : $=((\phi_m^2 \eta_p/3Sh_p) K_m)$ ($g \cdot cm^{-3}$)
 ν : 比基質利用速度 (s^{-1} , ただし, 実験結果の次元は異なる)
 ν_i : 動粘性係数 ($cm^2 \cdot s^{-1}$)
 ν_m : 最大比基質利用速度 (s^{-1} , ただし, 実験結果の次元は異なる)
 ν_{ma} : みかけの最大比基質利用速度 ($=\eta_p \nu_m$) (s^{-1} , ただし, 実験結果の次元は異なる)

η_p : 有効係数 (-)
 ϕ_c^2 : $(=\nu_m X_c a^2/K_m D)$ (-)
 ϕ_m^2 : $(=\nu_m X_p R_p^2/K_m D)$ (-)

引用文献

- 1) 特集 微生物固定化法による排水処理 (1987) 用水と廃水, 29, 725-772.
- 2) 特集 酵素および微生物の固定化 (1986) 水質汚濁研究, 9, 680-703.
- 3) 合葉修一, 永井史郎 (1975) 生物化学工学, 科学技術社, 131-178.
- 4) Hermanowicz, S.W.(1982) Dynamics of nitrification in a biological fluid bed reactor, Ph.D. Thesis, Department of Civil Engineering, University of Toronto.
- 5) 千畑一郎編 (1986) 固定化生体触媒, 講談社, 310-317.
- 6) Bailey, J.E. and Ollis, D.F.(1977) Biological Engineering Fundamentals, MacGraw-Hill.
- 7) Powell, E.O.(1967) The growth rate of micro-organisms as a function of substrate concentration. Microbial physiology and continuous culture (ed. P.O. Powell et al.), Her Majesty's Stationary Office.
- 8) 海田輝之, Valentin Nenov, 大村達夫, 相沢治郎, 大沼正郎 (1989) 流動床による強酸性含鉄排水の処理に関する研究, 水質汚濁研究, 12, 297-305.
- 9) 富沢健二, 川口幸男, 中沢均, 木全隆 (1987) 固定化微生物を利用した新しい下水処理システムの開発に関する調査, 技術開発部報62-002, 193-217, 日本下水道事業団技術開発部.
- 10) Armenante, P.M. and Kirman, D.J.(1989) Mass transfer to microparticles in agitated systems, *Chemical Engineering Science*, 44 (12), 2781-2796.
- 11) Shie, W.K. and LaMotta, E.J.(1979) The intrinsic kinetics of nitrification in a continuous flow suspended growth reactor, *Water Research*, 13, 1273-1279.
- 12) 浅野孝訳 (1977) 廃水処理工学 2, pp.142, 西原育英文化事業団.