

底泥における窒素交換機能のモデル化に関する基礎的研究

九州大学工学部 学生員○井上 憲 学生員 日野 浩
同 上 正 員 大石京子 正 員 楠田哲也

1. はじめに

底泥や生物膜において、好気条件下における生物学的脱窒、有機物酸化と硝化の競合、嫌気条件下における酸生成菌とメタン生成菌の共生等、微生物の空間的な分布や棲み分けが微小な領域で形成されていると考えることにより説明できる現象が数多く報告されている。この微小な領域での微生物の分布や棲み分けはマイクロサイトと呼ばれ、土壌学の分野ではすでにその概念が導入されているが、底泥に関しては僅かにJørgensen¹⁾の人工的に作ったマイクロサイトに関する研究等がある程度である。

マイクロサイトの発生条件や分布、存在時間などその挙動が明らかにされると、自然浄化機能の強化と制御や廃水の生物処理を効率よく行える可能性がある。そこで本研究では、底泥表層部におけるマイクロサイトの時間変化と空間分布について本質を失わない程度に簡略化した微生物反応式と条件を用いてその検討を行った。

2. マイクロサイトの存在の可能性について

ここでは、好気条件下において制限物質となる基質が有機炭素源である場合のマイクロサイトの存在可能性について検討した。

表：モデル式

2-1. 仮定および基礎式

底泥中の有機炭素源、菌体について次のように仮定した。

- ・有機炭素源は易分解性のもの(濃度 C_B)と難分解性のもの(濃度 C_{NB})とからなるものとする。

- ・難分解性のものは初期に存在するものに加えて、死滅菌体がこれに属するとする。

- ・好気性従属栄養細菌全体を一つにまとめて考え、その菌体濃度を X_h とする。

以上の仮定のもとで式(1)、(2)、(3)のような基礎式を構築した。

2-2. 炭素源初期存在型(有機炭素源が初期に存在し供給が無視できる場合)

底泥の空間中に有機炭素源が一様に分布するとして式(2)の右辺第2項を無視し、単純化のために $K_{SB} \gg C_B$, $K_{SNB} \gg C_{NB}$ とすると、(1)/Y + (2) + (3)より、(4)式が得られる。

式(4)は、見かけ上の基質総量が菌体濃度に比例して減少することを示している。

菌体濃度が最大になるのは $\partial X_h / \partial t = 0$ のときであるから、式(1)の左辺を0とし式(5)を得る。

例えば、研究対象としている佐賀県六角川底泥の C_B 含有率は3%、含水比は250%であるから、 $\rho = 2.6 \text{ g/cm}^3$ とすると C_B は 10000 mg/l となる。

$$\frac{\partial X_h}{\partial t} = (\mu_B \frac{C_B}{K_{SB} + C_B} + \mu_{NB} \frac{C_{NB}}{K_{SNB} + C_{NB}}) X_h - k_d X_h \quad \dots(1)$$

$$\frac{\partial C_B}{\partial t} = -\frac{1}{Y} \mu_B \frac{C_B}{K_{SB} + C_B} X_h + \nabla \cdot D \nabla C_B \quad \dots(2)$$

$$\frac{\partial C_{NB}}{\partial t} = -\frac{1}{Y} \mu_{NB} \frac{C_{NB}}{K_{SNB} + C_{NB}} X_h + \alpha k_d X_h \quad \dots(3)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{X_h}{Y} + C_B + C_{NB} \right) = - \left(\frac{1}{Y} - \alpha \right) k_d X_h \quad \dots(4)$$

ただし、 $\frac{1}{Y} - \alpha > 0$

$$\frac{\mu_B}{K_{SB}} C_B + \frac{\mu_{NB}}{K_{SNB}} C_{NB} = k_d \quad \dots(5)$$

$$- \left(\frac{1}{Y} - \alpha \right) k_d X_h + \nabla \cdot D \nabla C_B = 0 \quad \dots(4')$$

$$- \left(\frac{1}{Y} - \alpha \right) k_d \int_0^1 X_h dz + \left[D \frac{dC_B}{dz} \right]_0^1 = 0 \quad \dots(6)$$

$$j_{z=0} = -D \frac{dC_B}{dz} \Big|_{z=0} = - \left(\frac{1}{Y} - \alpha \right) k_d \int_0^1 X_h dz \quad \dots(7)$$

$$\frac{\partial X_h}{\partial t} = \frac{\mu_B}{K_{SB}} C_B X_h - k_d X_h \quad \dots(8)$$

$$\frac{\partial C_B}{\partial t} = \frac{1}{Y} \frac{\mu_B}{K_{SB}} X_h + \nabla \cdot D \nabla C_B \quad \dots(9)$$

$$C_B = k_d \frac{\mu_B}{K_{SB}} = C_{BC} = \text{const} \quad \dots(10)$$

$$\frac{\partial X_h}{\partial t} = \frac{\mu_B}{K_{SB}} C_B X_h - k_d X_h \quad X_h \leq X_{hmax} \quad \dots(8')$$

$$X_h = \text{const} \quad X_h = X_{hmax}$$

X_h : 菌体濃度(mg/l)、 C : 有機物濃度(mg/l)、 μ : 最大比増殖速度(1/d)
 K_s : 飽和定数(mg/l)、 Y : 収率、 k_d : 死滅係数(1/d)、 D : 拡散係数(cm^2/d)、
 α : 細菌中の炭素含有率、 j : 有機物のフラックス
 ただし、添え字のBとNBは易分解性、難分解性の有機炭素源を表わす

この C_B を初期値として初期菌体濃度 X_{h0} が0.1, 10, 1000 (mg/l) に対して計算して得られた $C_B + C_{NB}$ および X_h の経時変化を図-1に、計算に用いたパラメーターを表-1に示す。初期に存在した基質によって増殖した菌体は、その後自己分解による炭素源を基質としてゆっくりと減少していくことが確認された。本例では菌体の増殖により形成されたマイクロサイトは、その消滅までに長期間を要すると考えられる。

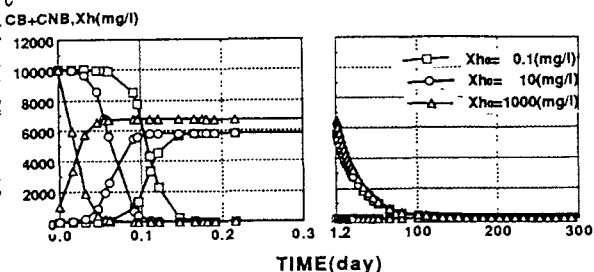


図-1 X_h および $C_B + C_{NB}$ の経時変化

2-3. 炭素源輸送供給型

2-3-1. 界面から有機炭素が分子拡散で供給され定常状態になっている場合

式(1)/Y, (2), (3)の両辺の和をとり、時間微分の項を0とおくと式(4')となる。現象を深さ方向に平均化して一次元的に扱い、界面を0とし深さ方向に積分すると、式(6)が得られる。基質が消費され、フラックスjがなくなるところでは $dC_B/dz = 0$ であるから、式(7)が得られる。式(7)より菌体濃度は層厚の自乗に反比例して増加することがわかる。従って、菌体が基質の流入面の方へ移動し基質が到達しない下部では菌体の増殖がなくなるという

現象により、基質の流入面に非常に高濃度の菌体の層ができるためマイクロサイトはできにくくなる。

2-3-2. 界面から有機炭素が分子拡散で供給され、生物反応速度が有機炭素濃度に比例する場合

本質を失わない範囲で簡略化するために、 $C_{NB} = 0$, $\alpha = 0$ とおくと基本式は式(8), (9)のようになる。

ここで、 X_h が時間的に定常($\partial X_h / \partial t = 0$)であるとする、式(10)となり、その場の濃度は常に一定でなければならない。このようなことは基質が輸送供給される場合には考え難い。いいかえれば、 $C_B > C_{Bc}$ においては常に菌体濃度は増加し、そうでないところでは減少している。従って、菌体濃度分布を定常にするためには菌体の輸送を考えなければならないが、底泥中では生物膜の場合と異なり輸送は考え難い。結局、式(8)は式(8')のようになる。しかし、定常的に存在し得る菌体濃度は、式(7)と同じであるから、実際にはこのマイクロサイトは基質供給面に向かって移動することになる。また、菌体が低濃度では移動しない。

3. おわりに

以上の様な検討から、マイクロサイトは基質が初期に存在するものとして考えた方が考え易く、基質供給型を考えるとマイクロサイトは基質供給面に向かって移動し、供給面直下に菌体の高濃度層ができてマイクロサイトができ難くなるということが明らかとなった。

今後はこれらの現象をさらに理論的および実験的に追求し、感潮河川の底泥表層部の窒素変換機能のモデル化に結び付けて行く予定である。

参考文献

- 1) B.B.Jørgensen: Bacterial sulfate reduction within reduced microniches of oxidized marine sediments ;(1977)Marine Biology 41, pp.7-17

表-1 パラメータ

μ_B / K_{SB}	: 0.001 [1/mg·d]
μ_{NB} / K_{SNB}	: 0.0001 [1/mg·d]
Y	: 0.6
k_d	: 0.05 [1/d]
α	: 0.5