

底泥表層部におけるマイクロサイトの形成に関する基礎的研究

—メッシュ・モデルによる検討—

九州大学大学院 学生員○井上 憲

九州大学工学部 正 員 大石京子 正 員 楠田哲也

1. はじめに

底泥表層部には、周辺とは物質変換を異にする微小な部位（マイクロサイト）が存在することが知られており、このマイクロサイトの概念を導入した研究¹⁾も僅かながら行われている。底泥表層部における還元的なマイクロサイトを球形と仮定した場合その直径は500 μm以下²⁾であり、それは粒子態で存在する生分解可能な有機物とそこに集積する菌体によって形成されていると考えられる^{1)・3)}。好気条件下における脱窒・硫酸還元等は嫌気的なマイクロサイト内で主起こると考えられ、底泥中の物質変換を評価するにはマイクロサイトの形成に伴う酸素濃度の分布を検討する必要がある。そこで本研究では、マイクロサイトの形成と酸素濃度分布との関係について、簡略化した基礎式とメッシュモデルを用いたシミュレーションにより検討を加えた。

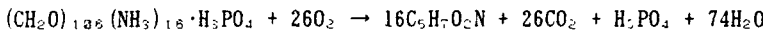
2. 底泥表層部における微生物代謝のモデル化

2-1. 仮定及び基礎式

好気層内における嫌気的なマイクロサイトの形成を検討するため、菌体は底泥表層部の好気性従属栄養細菌についてのみ考え、以下の様に仮定をモデル化を行った。

- ・基質は有機炭素のみである。
- ・生分解可能な有機炭素は溶存態有機炭素と粒子態有機炭素からなる。
- ・死滅菌体は粒子態有機炭素に属する。
- ・好気性従属栄養細菌を単一種とし、その濃度を X_h とする。
- ・粒子態有機炭素は加水分解を受けて好気性従属栄養細菌に速度 k_H で取り込まれる。
- ・菌体の移動はない。

菌体及び基質に関する収支式を表-1に示す。有機物の組成を $(CH_2O)_{1.06}(NH_3)_{0.16} \cdot H_3PO_4$ 、菌体の組成を $C_5H_7O_2N$ と仮定し、次式より有機物酸化における酸素と炭素の比 a (mgO_2/mgC) を求めた。



2-2. 計算方法

メッシュモデルの概念図を図-1に、パラメーター値を表-2に示す。図-1のように底泥の鉛直断面を0.02cm四方の格子に分割し、溶存態、粒子態の物質はそれぞれ分子拡散、堆積作用により供給されるとした。また、堆積速度は1mm/dとした。

まず表-3に示した初期値で計算を行い、定常状態が得られたところで非常に高濃度の粒子態有機炭素(5g/l)をひとつの格子に入れて堆積させた。高濃度の粒子態有機炭素の影響がなくなるまで計算を行った。

2-3. 計算結果及び考察

初期値で計算を行い定常状態に達した時点での溶存酸素(DO)濃度の鉛直分布(同じ深さに位置する各格子の平均濃度)を図-2に示す。底泥中のDO濃度は実測していないが、底泥表面から5mm程度で濃度がほぼ0になるということはチトクロム酸化酵素活性による検討結果⁴⁾と一致する。

次に、高濃度の粒子態有機炭素を堆積させた後、0.75日及び1.50日後のDO濃度の鉛直分布をそれぞれ図

表-1 モデル式

溶存酸素	$\frac{\partial C_{DO}}{\partial t} + u \frac{\partial C_{DO}}{\partial z} = -a \left(\frac{1}{Y} \mu_H \frac{C_{DOC}}{K_s^{DOC} + C_{DOC}} \frac{C_{DO}}{K_s^{DO} + C_{DO}} + \frac{1}{Y} k_H \frac{C_{POC}}{K_s^{PO} + C_{PO}} \right) X_h + \nabla \cdot D_{DO} \nabla^2 C_{DO}$
好気性従属栄養細菌	$\frac{\partial X_h}{\partial t} + u \frac{\partial X_h}{\partial z} = (\mu_H \frac{C_{DOC}}{K_s^{DOC} + C_{DOC}} \frac{C_{DO}}{K_s^{DO} + C_{DO}} + k_H \frac{C_{POC}}{K_s^{PO} + C_{PO}} - b) X_h - \nabla \cdot D_{DO} \nabla^2 X_h$
溶存態有機炭素	$\frac{\partial C_{DOC}}{\partial t} + u \frac{\partial C_{DOC}}{\partial z} = -\frac{1}{Y} \mu_H \frac{C_{DOC}}{K_s^{DOC} + C_{DOC}} \frac{C_{DO}}{K_s^{DO} + C_{DO}} X_h + \nabla \cdot D_{DOC} \nabla^2 C_{DOC}$
粒子態有機炭素	$\frac{\partial C_{POC}}{\partial t} + u \frac{\partial C_{POC}}{\partial z} = -\frac{1}{Y} k_H \frac{C_{POC}}{K_s^{PO} + C_{PO}} \frac{C_{DO}}{K_s^{DO} + C_{DO}} X_h + \alpha b X_h + \nabla \cdot D_{POC} \nabla^2 C_{POC}$

ここに、 X_h : 菌体濃度(mg/l)、 C : 物質濃度(mg/l)、 μ_H : 最大比増殖速度(1/d)、 k_H : 粒子態有機炭素を加水分解して取り込む速度(1/mg·d)、 K_s : 飽和定数(mg/l)、 Y : 収率、 b : 死滅係数(1/d)、 a : 有機物酸化に使われる酸素量(mg-O₂/mg-C)、 D : 拡散係数(cm²/d)、 ϕ : 空隙率、 α : 菌体中の炭素含有率、 u : 堆積速度(cm/d) ただし、添え字のDOは溶存酸素、DOCとPOCはそれぞれ溶存態、粒子態の有機炭素を表す。

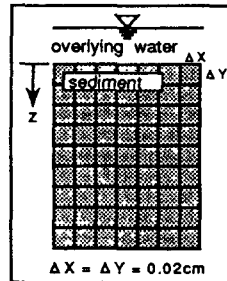


図-1 底泥鉛直断面の概念図

表-2 パラメーター値

μ_H : 3.0 [1/d]	b : 0.05 [1/d]
k_H : 0.002 [1/mg·d]	a : 0.5
K_s^{DOC} : 15.0 [mg/l]	D_{DO} : 0.734 [cm ² /d]
K_s^{DO} : 0.10 [mg/l]	D_{DOC} : 0.440 [cm ² /d]
Y : 0.6	ϕ : 0.80
a : 0.7 [mgO ₂ /mgC]	u : 1.0 [mm/d]

表-3 初期値

C_{DO}^0 : 4.0 [mg/l]
C_{DOC}^0 : 10.0 [mg/l]
C_{POC}^0 : 5.0 [mg/l]
X_h^0 : 10.0 [mg/l]

ー3、4に示す。以下、高濃度の粒子態有機炭素が存在する格子をAとする。図-3a)、4a)において、0.5mmの深さにAが存在する時点でのAとその層の平均DO濃度はそれぞれ0.65mg/l、1.54mg/lであり、1.30mmの深さにAが存在する時点ではそれぞれ0.13mg/l、0.67mg/lである。Aがその周囲に比べてDO濃度が非常に低いマイクロサイトになっていることがわかる。これはAにおけるDO消費速度がその周囲に比べて非常に高いためであり、図-3b)、4b)よりAの周辺の格子もAの影響を受けてDO濃度がやや低下していることがわかる。また、Aの粒子態有機炭素濃度を2g/lとして堆積させた場合、0.5mmの深さにAが存在する時点でのAとその層のDO濃度はそれぞれ2.61mg/l、2.78mg/l、1.30mmの深さにAが存在する時点ではそれぞれ0.39mg/l、0.82mg/lであった。従って、周囲と比較して非常に高濃度の粒子態有機炭素の濃度及び周囲のDO濃度などによって、マイクロサイトの位置や大きさが決まると考えられる。しかし、分解速度が非常に遅い有機物では菌体の集積は起こりにくいため、表層部においてはマイクロサイトとして存在しないと思われる。

脱窒が起こるDO濃度を0.2mg/l以下とすると、この計算条件(Aの初期の粒子態有機炭素濃度が5g/l)の場合には1.30mmの深さで脱窒が生じるマイクロサイトになっていることがわかる。

粒子態有機炭素はDO濃度が高い2mm程度でほとんど分解されてしまい、その後は死滅菌体からの供給によって比較的高濃度の粒子態有機炭素を維持していた。この状態が硝酸塩の存在しない下層部まで維持されることにより硫酸還元マイクロサイトになり得ると考えられる。

底泥中の微生物は、土粒子や粒子態有機物に付着して増殖を繰り返していると考えられる。水田や土壌に比べて貧栄養の底泥内では比較的营养分の高い粒子態有機物が存在すると、それに集積する微生物群により集中して酸素が消費される部位が形成され、消費速度が周囲からの拡散速度を上回ると嫌気的なマイクロサイトが形成される。計算では0.02cm四方の格子で検討したが、土粒子や微生物コロニーの大きさを考えるとこのような現象はさらに小さな範囲で起こっているものと考えられ、微生物コロニーの形成による内部への酸素の拡散速度の低下なども微小な還元部位の形成の原因となっているものと考えられる。

3. おわりに

今回のシミュレーションによって、粒子態有機炭素の分布状態に応じてマイクロサイトレベルでDO濃度分布に変化が生じることが表現できた。自然界の底泥におけるDO濃度分布はあまり知られていないが、微小電極によるORPの実測⁵⁾から底泥表層部におけるORPにはかなりの分布があることが示されており、集中して酸素が消費される部位により無酸素状態の部位が形成されると好気条件下における脱窒が期待できる。<参考文献> 1) Jorgensen, B.B.: Bacterial sulfate reduction within reduced microniches of oxidized marine sediments. Marine Biology 41, 7-17, 1997. 2) 大石ら: 底泥表層部におけるマイクロサイトの形成とその分布に関する実験的研究、土木学会第46回年次学術講演会講演概要集、1128~1129, 1991. 3) 井上ら: 底泥表層部におけるマイクロサイトのモデル化に関する基礎的研究、土木学会第46回年次学術講演会講演概要集、1130~1131, 1991. 4) 井上ら: 感潮河川の底泥における窒素変換に関する基礎的研究、土木学会西部支部研究発表会講演概要集、294~295, 1990. 5) 徳永ら: 底泥表層部におけるORP分布の検討、土木学会西部支部研究発表会、1992.

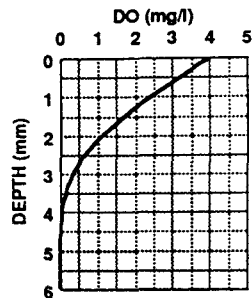


図-2 底泥中のDO濃度の鉛直分布 (シミュレーション結果: 定常状態)

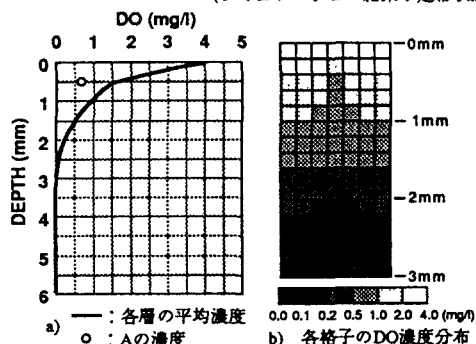


図-3 シミュレーション結果: 堆積後0.75日 (A: 高濃度の粒子態有機炭素が存在する格子)

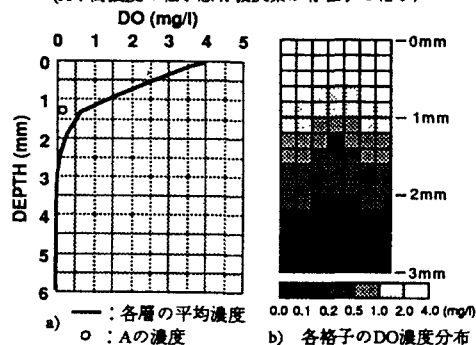


図-4 シミュレーション結果: 堆積後1.50日 (A: 高濃度の粒子態有機炭素が存在する格子)