論文要旨

汽水湖中海底質中の重金属および有機物の分布特性

近藤 邦男* 清家 泰* 伊達善夫**

* 島根大学環境分析センター ** 元島根大学農学部

〈水質汚濁研究 Vol.9 No.4 (1986) pp.00~00〉

汽水湖中海底質中の重金属および有機物の分布の特性を知るために、60地点を選定し調査を行なった。

その結果、有機物指標となる項目は中海の内最も水質の汚濁化の進んだ米子湾の最奥部、米子湾出口付近に高い値が観察された。

また、重金属のうち Pb, Zn, Cr および Co 等は都市下水の流入の影響を受ける地点の値が高いことが判った。

T-P は松江市および米子市からの都市下水が日本海に流出する水の経路に沿って高い値が観察された。Mn は中海の主湖盆に高い値が観察された。

さらに、底質分析データを主成分分析法により解析した結果を用いて、中海を底質環境からみて7つのグループに分類した。

河床付着性生物膜による脱窒

川島 博之* 鈴木 基之*

* 東京大学生産技術研究所

〈水質汚濁研究 Vol.9 No.4 (1986) pp.00~00〉

河床付着性生物膜による脱窒を、上層における酸素消費と下層における脱窒という、二層モデルを作成することにより、検討した。このモデルは、生物膜内における拡散と反応速度、また界面における物質移動を考慮したものである。

パラメーター感度解析より、生物膜内の拡散速度、また、膜内の脱窒細菌密度が、その他の因子に比べ、単位面積あたりの脱窒速度に、大きな影響を与えていることが、明らかになった。

汚濁した河川では、流水中の DO が付着性藻類の光合成により、 $20\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 程度を示す場合さえ、 $2\times 10^{-6}\cdot\text{g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 程度の脱窒が生じている可能性がある。

〈論 文〉

河床付着性生物膜による脱窒

Denitrification by attached biofilms on river beds

川 島 博 之* 鈴 木 基 之*
 Hiroyuki KAWASHIMA Motoyuki SUZUKI

Abstract

Denitrification caused by attached biomass on a river bed was investigated using mass balance model which incorporated mass transfer on the surface, diffusion and bacterial growth in the biofilm. The biofilm was divided into two layers, aerobic and anaerobic, and denitrification took place in the anaerobic layer.

From the parameter sensitivity analysis, it became apparent that the diffusion rate and density of the bacteria in the biofilm were controlling factors for denitrification per unit area.

Even in the case when the DO concentration in the flow was $20 \text{ g} \cdot \text{m}^{-3}$, denitrification can occur in shallow and eutrophic rivers, and the attached biofilm to the river bed has the ability of the denitrification of about $2 \times 10^{-6} \text{ g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$.

Key words: denitrification, biofilm, simulation, river

1. 緒 言

窒素循環を考える上で、水界における生物学的脱窒は重要である。通常、微生物による脱窒は嫌気条件下で生じ、このため水界においては湖や海洋の深層部、沼や河口付近に滞積した底泥嫌気部等で生ずると考えられている。しかしながら、近年、溶存酸素 (DO) 濃度が飽和に近い状態で流れる河川においても脱窒現象が物質収支より推定され注目されている¹⁾。また、中西ら(1983)²⁾、(1985)³⁾は、し尿処理施設の好気性消化槽における脱窒に着目し、これを「好気的脱窒現象」と呼んで研究を進めている。河川における脱窒では、Nakajima (1979)⁴⁾が、多摩川河床に放置した塩化ビニール製の板に付着した生物膜が上層水が好気の状態にあった場合においても脱窒活性を有することを報告している。これらは、付着性生物膜や曝気槽内の懸濁粒子表面より拡散によって流入した DO が好気性微生物により消費し尽されることにより、下層部や粒子内部が嫌気状態を呈し、この部分で脱窒が生ずるためと説明されている。ここで河床付着性生物群落は、広く一般に観察されるものであり、これらの多くが脱窒能力を有するとすれば、窒素循環を再検討する必要も生

じよう。また、閉鎖性水域の富栄養化現象が深刻化している現在、閉鎖性水域への栄養塩流入量を推定するという面からも、河床付着性生物膜による脱窒量の推定は重要である。

しかしながら、河床に塩化ビニールの板等を投入し、これに付着性生物を生育させ、持ち帰り、この脱窒活性を測定する手法は、表面流速の影響など自然条件を室内で再現しにくい欠点を有し、必ずしも確実な手法と言えない。また、実際の河川における物質収支より脱窒量を推定する手法は、より現実に近い状態で測定するという意味において有力な手法と考えられるが、付着性藻類等による無機態窒素の摂取を推定せねばならず、また流量の測定にも大きな誤差がつきまとう現状では、正確を期しがたい手法である。

このように実測に困難がつきまとう現象では数理モデルを構築し、現象に最も影響を与える因子を抽出し、今後の実験的検討に方向性を与えることは、研究の重要な一段階と考えられる。また、現象を適切にモデル化出来れば、既報の情報だけを用いても、各種環境条件下における脱窒量を推定することが可能となろう。本研究は以上のような視点に立脚し、河床付着性生物

* 東京大学生産技術研究所 〒106 東京都港区六本木7-22-1, Institute of Industrial Science University of Tokyo, 22-1 Roppongi 7 chome Minato-ku Tokyo 106 Japan

膜による脱窒現象をモデル化し、環境の変化に伴う脱窒量を推定すると共に、脱窒現象に最も影響を及ぼす因子の抽出を行ったものである。

2. 数理モデル

脱窒反応の量論関係は一般に次式で示され、水素供与体が必要とされる⁵⁾。

脱窒菌には、水素ガスや硫化物を水素供与体とする自栄養細菌も存在するが、多くは有機物を水素供与体とする他栄養細菌である。このため、有機物の存在の有無が脱窒に対し制限要因となることが考えられる。しかし、一般に生物膜内部では、生物膜自体の嫌気分解等で生じた溶存有機炭素が充分存在すると考えられる。このため本モデルでは有機炭素量が律速条件となる場合は、考慮しないこととした。

河床付着性生物膜内の DO の分布に留意し、モデル化を行う。(Fig. 1 参照)ここで、生物膜と流水の間には、境膜の存在を仮定する。

好気的条件下における DO の消費、嫌気状態における脱窒反応共に、基質濃度に対しては 0 次反応とし、また脱窒は嫌気状態 (DO = 0 [g · m⁻³]) でのみ生ずるとする。なお、窒素としては硝酸態のみを考慮し、アンモニア態よりの硝酸の生成、亜硝酸の挙動等は本モデルでは考慮していない。

以上より、付着性生物膜と境膜内での DO と硝酸態窒素の挙動は、以下のように定式化される。

Fig. 1 Behavior of DO and Nitrate in a film and a biofilm.

DO

$$-\delta_1 \leq z \leq 0$$

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D \frac{\partial^2 C}{\partial z^2} \quad \dots(3)$$

$$0 \leq z \leq \delta_2$$

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D^* \frac{\partial^2 C}{\partial z^2} - X_C \cdot \rho_C \quad \dots(4)$$

境界条件 (Boundary Conditions)

$$z = -\delta_1 : C = C_0$$

$$z = 0 : D^* \frac{\partial C}{\partial z} \Big|_{z=0+} = D \frac{\partial C}{\partial z} \Big|_{z=0-} \quad \dots(5)$$

$$z = \delta_2 : C = 0, \frac{\partial C}{\partial z} \Big|_{z=\delta_2} = 0$$

NO₃ · N

$$-\delta_1 \leq z \leq 0$$

$$\frac{\partial N}{\partial t} = D \frac{\partial^2 N}{\partial z^2} \quad \dots(6)$$

$$0 \leq z \leq \delta_2$$

$$\frac{\partial N}{\partial t} = D^* \frac{\partial^2 N}{\partial z^2} \quad \dots(7)$$

$$\delta_2 \leq z \leq \delta_3$$

$$\frac{\partial N}{\partial t} = D^* \frac{\partial^2 N}{\partial z^2} - X_N \cdot \rho_N \quad \dots(8)$$

境界条件 (Boundary Conditions)

$$z = -\delta_1 : N = N_0$$

$$z = 0 : D \frac{\partial N}{\partial z} \Big|_{z=0+} = D^* \frac{\partial N}{\partial z} \Big|_{z=0-} \quad \dots(9)$$

$$z = \delta_2 : D^* \frac{\partial N}{\partial z} \Big|_{z=\delta_2+} = D^* \frac{\partial N}{\partial z} \Big|_{z=\delta_2-}$$

$$z = \delta_3 : N = 0, \frac{\partial N}{\partial z} \Big|_{z=\delta_3} = 0$$

(3)~(9)式において定常状態 ($\frac{\partial C}{\partial t} = 0, \frac{\partial N}{\partial t} = 0$) を仮定すると容易に解が得られ、付着生物膜表面における流速、またそれぞれの層厚を次のように算出できる。

$$F_C = \sqrt{\left(\frac{D^* \cdot X_C \cdot \rho_C \cdot \delta_1}{D} \right)^2 + 2 \cdot C_0 \cdot X_C \cdot \rho_C \cdot D^*} - \frac{D^* \cdot X_C \cdot \rho_C \cdot \delta_1}{D} \quad \dots(10)$$

$$F_N =$$

$$\sqrt{\left(D^* \cdot X_N \cdot \rho_N \cdot \left(\frac{\delta_2}{D} + \frac{\delta_1}{D^2} D^* \right) \right)^2 + 2 \cdot N_0 \cdot X_N \cdot \rho_N \cdot D^*}$$

$$-D^* \cdot X_N \cdot \rho_N \cdot \left(\frac{\delta_2}{D} + \frac{\delta_1}{D^2} D^* \right) \quad \dots(11)$$

$$\delta_2 = \sqrt{\frac{2 \cdot D^* \cdot C_0}{X_C \cdot \rho_C} + \left(\frac{\delta_1}{D} \cdot D^* \right)^2} - \frac{\delta_1}{D} D^* \quad \dots(12)$$

$$\delta_3 = \sqrt{\frac{2 \cdot D^* \cdot N_0}{X_N \cdot \rho_N} + \left(\frac{\delta_2}{D} + \frac{\delta_1}{D^2} D^* \right)^2} \cdot D^* - \left(\frac{\delta_2}{D} + \frac{\delta_1}{D^2} D^* \right) \cdot D^* \quad \dots(13)$$

ここで、境膜を無視した場合の生物膜表面での DO の流束 (F_{C_0})、また、境膜、好気層共に存在しないとした場合の窒素の膜表面における流束 (F_{N_0}) は、次のように計算出来る。

$$F_{C_0} = \sqrt{2 \cdot C_0 \cdot X_C \cdot \rho_C \cdot D^*} \quad \dots(14)$$

$$F_{N_0} = \sqrt{2 \cdot N_0 \cdot X_N \cdot \rho_N \cdot D^*} \quad \dots(15)$$

これらの値と境膜厚を考慮する場合、好気層が存在する場合の流束の比は次式を用いて、DO、硝酸共に同様の形式で示すことが出来る。

$$\eta_{C,N} = \frac{F_{C,N}}{F_{C_0,N_0}} = \sqrt{\lambda + 1} - \sqrt{\lambda} \quad \dots(16)$$

$$\text{DO : } \lambda = \frac{X_C \cdot \rho_C \cdot D^*}{2 \cdot C_0} \cdot \left(\frac{\delta_1}{D} \right)^2 \quad \dots(17)$$

$$\text{NO}_3 \cdot \text{N : } \lambda = \frac{X_N \cdot \rho_N \cdot D^*}{2 \cdot N_0} \cdot \left(\frac{\delta_2}{D} + \frac{\delta_1}{D^2} \cdot D^* \right)^2 \quad \dots(18)$$

(16)~(18)式は、脱窒を考える時、界面での物質移動や好気層の存在が脱窒速度にどのような影響を及ぼすかを示すものである。(Fig. 2 参照)

3. パラメーターの決定

本モデルにおいて使用したパラメーターの値と、その推定法を以下に略記する。

D : 水中における DO の拡散係数 [$\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$]

$$D_{293} = 2.0 \times 10^{-9}$$

$$D = D_{293} \cdot 1.024^{(T-293)} \quad \dots(19)$$

ここで、 D_{293} [$\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$] は温度 293°K における拡散係数を表す⁶⁾。温度依存性については、文献中⁶⁾の図より定式化した。なお、硝酸態窒素の水中での拡散速度は文献⁶⁾により 2.6×10^{-9} [$\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$] 程度と与えられるが、イ

オンの場合共存イオンやそれ自身の濃度が拡散係数の値に大きく影響を与えるため、精緻な議論は意味を持たないと考えられ、ここでは一次近似として酸素と同様の速度と仮定し、議論を単純化した。

D^* : 付着生物膜内における DO、硝酸態窒素の拡散係数 [$\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$]

一般に、多孔質体内における拡散係数の推定法として用いられる。

$$D^* = \xi^2 \cdot D \quad \dots(20)$$

なる関係を用いた。ここで、 ξ は空隙率 [—]

δ_1 : 境膜厚さ [m]

エネルギー消散量 [$\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$] により決定される最小渦の直径が境膜厚を規定するとした、Kolmogorov の理論⁷⁾より、

$$\delta_1 = \left(\frac{\varepsilon}{\nu^3} \right)^{-1/4} \quad \dots(21)$$

ここで、 ε はエネルギー消散量を、また、 ν は水の動粘性係数 [$\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$] を表す。河川におけるエネルギー消散量は、河川勾配 $\tan \theta$ [—]、平均流速 v [$\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$] から、次式を用いて推定した。

$$\varepsilon = g \cdot u \cdot \tan \theta \quad \dots(22)$$

X_C : 好気性微生物単位乾重量あたりの酸素消費速度 [$\text{g} \cdot \text{O}_2 \cdot \text{gcell}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$]

速度定数は、合葉ら⁸⁾が好気性微生物の酸素消費速度の一般的な値として示しているものを用い、また、温度依存性は、環境のシミュレーションでよく用いられる指数型式とした。本モデルで用いた指数型式の底の値 1.047 は、アレニウス型で表現した場合、活性化エネルギーとして、約 7 Kcal $\cdot \text{mole}^{-1}$ に相当し好気的微生物反応の温度依存性として一般的な値と考えられる。

$$X_C = 1.39 \times 10^{-5} \cdot 1.047^{(T-293)} \quad \dots(23)$$

X_N : 脱窒細菌単位乾重量あたりの脱窒速度 [$\text{gN}_2 \cdot \text{gcell}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$]

羽野ら⁹⁾ (1984) による実測値を利用し、また、温度依存性については、酸素消費速度と同様に、指数型式で表した。指数型式の底の値は文献⁹⁾によれば、1.118 であり酸素消費の場合より大きい。この値は常温付近における活性化エネルギー 19 Kcal $\cdot \text{mole}^{-1}$ に相当する。

$$X_N = 8.06 \times 10^{-6} \cdot 1.118^{(T-293)} \quad \dots(24)$$

ρ_C : 付着生物膜単位体積あたりの好気性細菌量 [$\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$]

河床付着性生物膜中の単位体積にどれだけの細菌が存在するかを推定することは、好気層の厚さを推定することにもつながり、困難な問題である。しかしここで、河床付着性生物膜単位面積あたりの細菌数については測定例がある。

Fig. 2 Relationship between η and λ .
 $\eta = \sqrt{\lambda + 1} - \sqrt{\lambda}$

本研究では、この単位面積あたりの実測値を利用し、膜面深さ方向の細菌の分布密度は変化しないと仮定し、 ρ_C を次のように算出した。

$$B_C = \rho_C \cdot \delta_2 \quad \dots(25)$$

B_C は単位面積あたりの好気性細菌量 [$\text{g} \cdot \text{m}^{-2}$] である。ここで、(12)式を利用して、

$$\rho_C = \frac{B_C}{\sqrt{\frac{2 \cdot D^* \cdot C_0}{X_C \cdot \rho_C} + \left(\frac{\delta_1}{D} \cdot D^*\right)^2} - \frac{\delta_1}{D} D^*} \quad \dots(26)$$

(26)式において B_C は、 B'_C : 単位面積あたりの好気性細菌数 [$\text{cell} \cdot \text{m}^{-2}$] より、次のように計算出来る。

$$B_C = \alpha \cdot \beta \cdot \gamma \cdot B'_C \quad \dots(27)$$

α : 細菌一個の体積 [$\text{m}^3 \cdot \text{cell}^{-1}$]

β : 付着生物膜単位体積あたりの湿重量 [$\text{g}_{\text{wet}} \cdot \text{m}^{-3}$]

γ : 湿重量, 乾重量比 [$\text{g}_{\text{dry}} \cdot \text{g}_{\text{wet}}^{-1}$]

α の値は球菌で半径 (ϕ) $0.5 \sim 1 \mu\text{m}$, 桿菌では $0.5 \sim 1 \mu\text{m}$ (ϕ) $\times 2 \times 3 \mu\text{m}$ (l) という大きさより推定出来るが、ここでは、一基準点として半径 $1.5 \mu\text{m}$ の場合を考えた。この値の変化は ρ_C の変化になるが、これが結果に及ぼす影響については後述の感度解析を参照されたい。また、 β , γ の値は多摩川の支流野川河床に付着生育した生物膜について実測することにより求めた。

一例として、Nakajima⁴⁾が多摩川二子橋付近で測定した B'_C の値 1.1×10^8 [$\text{cell} \cdot \text{m}^{-2}$] より (25)~(27)式を利用し ρ_C を求めると、

$$\rho_C = 2.24 \times 10^4 \text{ [g} \cdot \text{m}^{-3}]$$

となる。

ρ_N : 付着生物膜単位体積あたりの脱窒細菌量 [$\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$]

好気性細菌密度の推定と同様に、

$$B_N = \rho_N \cdot \delta_3 \quad \dots(28)$$

B_N は単位面積あたりの脱窒細菌量 [$\text{g} \cdot \text{m}^{-2}$] であり、好気性細菌数の推定の場合と同様に(13)式を利用して、

$$\rho_N = \frac{B_N}{\sqrt{\frac{2 \cdot D^* \cdot N_0}{X_N \cdot \rho_N} + \left(\frac{\delta_2}{D} + \frac{\delta_1}{D^2} \cdot D^*\right)^2} \cdot D^* - \left(\frac{\delta_2}{D} + \frac{\delta_1}{D^2} \cdot D^*\right) \cdot D^*} \quad \dots(29)$$

また、

$$B_N = \alpha \cdot \beta \cdot \gamma \cdot B'_N \quad \dots(30)$$

ここで、 B'_N は単位面積あたりの脱窒細菌数 [$\text{cell} \cdot \text{m}^{-2}$] である。 α , β , γ の値は、好気性細菌の場合と同様の値を用い、Nakajima の測定例 $B'_N = 2.2 \times 10^7$ [$\text{cell} \cdot \text{m}^{-2}$] より、(28)~(30)式を利用し ρ_N を求めると、

$$\rho_N = 4.38 \times 10^2 \text{ [g} \cdot \text{m}^{-3}]$$

B'_C , B'_N の値は、Nakajima による多摩川下流の同一

地点での測定例においても、 10^2 程度の分散幅を有し、環境条件が変化した場合には、より大きな変動があることが予想される。

4. 脱窒量の推定

都市近郊などに散在する汚濁した中小河川等を想定し、脱窒量の推定を試みた。計算に用いた各パラメーターの値を Table 1 に示す。この条件における境膜内、生物膜内の DO, 硝酸濃度の分布を参考のために Fig. 1中に示す。また、この場合における底泥単位面積あたりの酸素消費速度は 1.18×10^{-5} [$\text{g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$], 脱窒速度は 2.31×10^{-6} [$\text{g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$] であり、これらの値は、過去の実測例^{4),10),11)}と比較して、妥当な値と考えられる。

ここで、脱窒速度に最も影響を与えている因子を探るため、感度解析を行った。感度解析において基準とした値は、Table 1 に示すものである。

あるパラメーターを変化させ、他のパラメーターは基準値と同様とした際の脱窒量変化を、Fig. 3a), b), c)に示す。ここで、縦軸は基準状態における脱窒量で無次元化している。また、図中には、各パラメーターの変動予想範囲をも示した。

Fig. 3a), b)より、脱窒速度に最も影響を及ぼす因子は、菌体の存在密度と流水中の硝酸態窒素の濃度であることが解る。また、温度、生物膜内の拡散係数も脱窒速度に大きな影響を及ぼし、想定出来る範囲で温度を変化させた場合 ($277^\circ\text{K} \leq T \leq 303^\circ\text{K}$), 脱窒量は $0.36 \sim 1.86$ 倍に変化し、同様に空隙率を $0.3 \leq \xi \leq 0.7$ とした場合には、 $0.66 \sim 1.20$ 倍に変化した。

次に境膜厚さと好気層厚さの影響を見る。流水中の DO 濃度の増加、また、菌体密度の低下は好気層厚みの増大をもたらす、流水中のエネルギー消費量の減少は δ_1 厚みを増大させる。これらは、双方共に脱窒速度の低下を招くが、この影響は、脱窒細菌密度や空隙率の変動が及ぼす影響に比べれば、小さい。このことは、付着生物膜における脱窒では、嫌気状態にある脱窒層自体

Table 1 Parameters assumed in the model

Symbol	Value	Unit
u	0.4	$\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$
$\tan \theta$	4.0×10^{-3}	—
D_{293}	2.0×10^{-9}	$\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$
ξ	0.5	—
X_{C293}	1.39×10^{-5}	$\text{g} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$
X_{N293}	8.06×10^{-6}	$\text{g} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$
ρ_C	2.24×10^4	$\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$
ρ_N	4.38×10^2	$\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$
T	293	K

Fig. 3 a) The parameter sensitivity of ρ_c (density of aerobic bacteria), ρ_N (density of denitrification bacteria) and δ_1 (film thickness) on the rate of denitrification per unit area.

Fig. 3 b) ξ (voil fraction), C_0 (DO concentration in flow) and N_0 (Nitrate concentration in flow).

における反応と、生物膜内における物質の拡散が、単位面積あたりの脱窒速度に対して、律速条件になっていることを示すと考えられる。

本モデルを用いて、河床付着性生物膜において最大どの程度の脱窒速度を期待出来るか、試算した。これは、Fig. 3a), b)において、最も有利な条件を組み合わせることによって得られる。その結果、河床付着性生物

Fig. 3 c) Temperature dependency of the model.

膜に期待出来る最大脱窒量は $2.47 \times 10^{-5} \text{ [g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}]$ 程度と推定された。

しかしながら実際の河川では上記の条件は特異な例と考えられ、このため、より現実的な条件の組み合わせの下で、脱窒量の推定を行った。計算に用いた条件と結果を一括して Table 2 に示す。Table 2 より、下流域のよどみ域を想定した条件の場合が、最も高い脱窒能力を有することが解る。また、現在、河川中流域に多く見られる、付着性藻類が河床に多量に繁茂している流域では、光合成の影響により DO 濃度に大きな変動が観察されるが、このような区間で、昼間高 DO 時においても、多量の脱窒が生じている可能性が示された。なお、多摩川支流野川における全脱窒量を、河床面積との積により推定すると、全流入量 (約 $500 \text{ [kg} \cdot \text{day}^{-1}]$ (1981)) に対して、昼間において約 3%，夜間では約 4% の窒素が、脱窒されていると推定された。

5. 結 言

河床付着性生物膜による脱窒について、二層モデルを作成し、感度解析等の検討を試みた。

これより、付着性生物膜による脱窒速度を主に支配するものは、生物膜中における溶存物質の拡散速度と脱窒菌の単位体積あたりの存在密度であり、上層水中の DO 濃度、また界面における境膜厚などは、脱窒速

Table 2 Variation of the rate of denitrification per unit area in a supposed reach

	u	DO	$\text{NO}_3 \cdot \text{N}$	ξ	ρ_c	ρ_N	Flux	supposed
	$\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$	$\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$	$\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$	—	—	—	$\text{g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$	reaches
case 1	1.0	10	2.0	0.5	$\times 0.1$	$\times 0.1$	6.94×10^{-7}	upper stream
case 2	0.4	20	2.0	0.5	$\times 1.0$	$\times 1.0$	2.03×10^{-6}	mid- (daytime)
case 3	0.4	0.5	2.0	0.5	$\times 1.0$	$\times 1.0$	2.53×10^{-6}	stream (night)
case 4	0.1	2.0	2.0	0.5	$\times 10$	$\times 10$	7.44×10^{-6}	down stream

度にあまり大きな影響を与えないことを、明らかにした。今後、河床付着性生物膜による脱窒速度を、さまざまな環境条件において、より正確に把握するためには、生物膜中における物質の拡散と脱窒細菌密度を、より精密に知ることが必要と考えられる。特に、各種環境条件における脱窒細菌密度の実測は、分散幅が大きいと予測されるため、今後、重要な研究課題になると考えられる。

本モデルを用い、河床付着性生物膜による脱窒速度について、概算したが、流れが早く比較的清浄な流域で $6.9 \times 10^{-7} [g \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}]$ 程度、汚染された流れがゆるやかな流域では $7.4 \times 10^{-6} [g \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}]$ 程度であることが、推定された。

使用記号

B_C : 単位面積あたり好気性細菌量	$[g \cdot m^{-2}]$
B_C' : 単位面積あたり好気性細菌数	$[cell \cdot m^{-2}]$
B_N : 単位面積あたり脱窒菌量	$[g \cdot m^{-2}]$
B_N' : 単位面積あたり脱窒菌数	$[cell \cdot m^{-2}]$
C : 溶存酸素 (DO) 濃度	$[g \cdot m^{-3}]$
C_0 : 流水中 DO 濃度	$[g \cdot m^{-3}]$
D : 水中における DO, 硝酸態窒素の拡散係数	$[m^2 \cdot s^{-1}]$
D^* : 生物膜内における DO, 硝酸態窒素の拡散係数	$[m^2 \cdot s^{-1}]$
F_C : 単位面積あたり酸素消費速度	$[g \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}]$
F_{CO} : 境膜が存在しない場合の単位面積あたり酸素消費量	$[g \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}]$
F_N : 単位面積あたり脱窒速度	$[g \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}]$
F_{NO} : 境膜, 好気層が存在しない場合の単位面積あたり脱窒速度	$[g \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}]$
g : 重力加速度	$[m \cdot s^{-2}]$
N : 硝酸態窒素濃度	$[g \cdot m^{-3}]$
N_0 : 流水中硝酸態窒素濃度	$[g \cdot m^{-3}]$
t : 時間	$[s]$
u : 河川平均流速	$[m \cdot s^{-1}]$
X_C : 好気性細菌酸素消費速度	$[g \cdot g^{-1} \cdot s^{-1}]$
X_N : 脱窒細菌単位重量当り脱窒速度	$[g \cdot g^{-1} \cdot s^{-1}]$
z : 生物膜深さ方向距離	$[m]$
Greek	
α : 細菌一個の体積	$[m^3 \cdot cell^{-1}]$
β : 付着生物膜単位体積あたりの湿重量	$[g \cdot m^{-3}]$

γ : 湿重量乾重量比	$[-]$
δ_1 : 境膜厚さ	$[m]$
δ_2 : 好気層厚さ	$[m]$
ε : エネルギー消費量	$[m^2 \cdot sec^{-3}]$
η : 境膜, 好気層が酸素消費, 脱窒速度に及ぼす影響	$[-]$
λ : η 算出に用いる因子	$[-]$
ν : 動粘性係数	$[m^2 \cdot sec^{-1}]$
ξ : 空隙率	$[-]$
θ : 勾配	$[Rad]$
ρ_C : 好気性細菌密度	$[g \cdot m^{-3}]$
ρ_N : 脱窒細菌密度	$[g \cdot m^{-3}]$

(原稿受理 昭和61年2月14日)

引用文献

- 1) A. R. Hill (1979) Denitrification in the nitrogen budget of a river ecosystem. *Nature*, **281**, 27, September, 291-292.
- 2) 石川宗孝, 水船清司, 中西弘 (1983) 好気性脱窒現象のモデル化に関する研究, 衛生工学研究論文集, **19**, 196-205.
- 3) 中西 弘, 石川宗孝 (1985) 単一曝気槽における脱窒, 水質汚濁研究, **8**, No. 3, 153-156.
- 4) Nakajima T. (1979) Denitrification by the sessile microbial community of a polluted river. *Hydrobiologia*, **66**, I, 57-64.
- 5) 井出哲夫編著 (1976) 水処理工学・理論と応用, 技報堂.
- 6) 化学工学協会編 (1978) 化学工学便覧 (改訂四版), 丸善.
- 7) 国井大蔵編著 移動速度論, 岩波講座基礎工学, **17**, 岩波書店.
- 8) 合葉修一, 永井史郎 (1975) 生物化学工学・反応速度論, 科学技術社.
- 9) 羽野 忠, 国分修三, 佐藤佳生, 森下道男, 高木香住, (1983) 生物膜付着活性炭流動層による脱窒操作の解析, 化学工学協会第17回秋季大会研究発表講演要旨集.
- 10) N. B. Hanes and R. L. Irvine (1968) New technique for measuring oxygen uptake rate of benthic systems, *J. WPCF*, **40**, February 223-232.
- 11) G. T. Browman and J. J. Delfino (1980) Sediment oxygen demand Techniques : A review and comparison of laboratory and in situ systems, *Water Research*, **14**, 491-499.