

II-471 土壌内脱窒速度の時空依存性の考察

広島大学大学院 学生員 松木 靖
 広島大学大学院 学生員 本田 俊広
 広島大学工学部 正 員 山口 登志子
 広島大学工学部 正 員 寺西 靖治

1. はじめに

汚水の土壌処理による窒素除去を行うためには、土壌内窒素の挙動を数理モデル化して、数値実験を行い、実用化のための諸条件を決定する必要がある。そこで本研究では、土壌内脱窒速度の関数形を明らかにするための第一歩として、脱窒素を1次反応と仮定し、飽和流における土壌カラム内の窒素分布の実測データをもとに、反応移流分散方程式の逆問題として、反応速度係数の時空分布を求める。従来および現在でも、多くの研究において反応速度係数は定数として解析されているが、本研究では反応速度を時間的、空間的に変化するものと仮定して、その時空依存性について考察する。

2. 解析方法

まず、実測データをもとに、反応移流分散方程式により脱窒速度の時空分布を求める。本研究で用いた実測データは、飽和流における土壌カラム内脱窒過程を経目的に測定したもので、その実験条件を表1に示す¹⁾。実測データを $\Delta X=1.0\text{cm}$, $\Delta t=0.5\text{日}$ でスプライン補間し、次式に示す差分化した反応移流分散方程式により脱窒速度($\Phi_{i,n}$)を計算する。

$$\Phi_{i,n} = \frac{C_{i,n+1} - C_{i,n-1}}{2\Delta t} + u \frac{C_{i+1,n} - C_{i-1,n}}{2\Delta X} - D \frac{C_{i+1,n} - 2C_{i,n} + C_{i-1,n}}{(\Delta X)^2}$$

表 1 実験条件

Column	temperature (°C)	u (cm/day)	D (cm ² /day)
20A	20	57.6	14.4
20B	20	86.4	110.4

ここに、C：基質濃度、u：間隙内平均流速、D：分散係数、X：土壌内距離、t：時間、 Φ ：反応項（脱窒速度）である。 $\Delta X, \Delta t$ は距離および時間方向の格子間隔で、 $i\Delta X, n\Delta t$ における基質濃度を $C_{i,n}$ 、反応項を $\Phi_{i,n}$ とする。表1のカラム20Aについて求めた反応項の時空分布を図1に示す。つぎに、脱窒素を1次反応と仮定した場合の1次反応速度係数 $K_{1i,n}$ を次式より計算する。

$$K_{1i,n} = \frac{\Phi_{i,n}}{C_{i,n}}$$

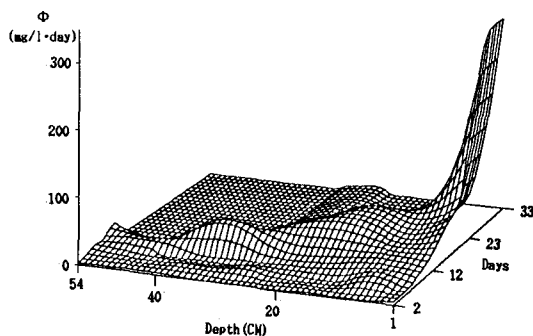
さらに、反応速度係数の時間的増大をロジスティック曲線、深さ方向の変化を指数関数的減少と仮定して1次反応非定常解から、土壌内窒素分布を求め、実測値と比較する。

3. 結果と考察

まず、実測値より求めたカラム20Aの1次反応速度係数 K_1 の時間的変化を図2に示す。深さ5cmにおける K_1 の変化をロジスティック曲線と仮定して、次式の各係数を求める。

$$K_1(T) = A / [1 + \exp\{-m \cdot A \cdot (T - t_1)\}]$$

ここに、A：上限値(1/day), t_1 : A/2となる時刻(day), m: Verhulst-Peal係数, T: 時間(day), K_1 : 1次反応

図1 脱窒速度(Φ)の時空分布(20A)

速度係数(1/day)，なおカラム20Aにおいては、深さ5cmで K_1 が最大となり、カラム20Bにおいては、深さ10cmで最大となった。また、 K_1 の深さ方向の変化を、指数関数的減少と仮定し、指数関数 $\exp(-\alpha x)$ の係数 α のオーダーは、脱窒菌の土壌内鉛直分布をもとに決定する。以上より、求めた K_1 の各係数を表2に示す。これらの係数から求めたカラム20Aにおける K_1 の時空分布を図3に示す。この K_1 の値を次に示す反応移流分散方程式（1次反応）の理論解に代入して土壌内窒素の時空分布を求める。

$$C(X,T)/C_s = \frac{1}{2} \left\{ \exp \frac{(1-A)ux}{2D} \operatorname{erfc} \frac{x-Aut}{\sqrt{(4Dt)}} + \exp \frac{(1+A)ux}{2D} \operatorname{erfc} \frac{x+Aut}{\sqrt{(4Dt)}} \right\}$$

ここに、 $A = \sqrt{\{1 - (4DK_1/u^2)\}}$ ，

$$\operatorname{erfc}(Z) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_Z^{\infty} \exp(-\xi^2) d\xi \quad (\text{ガウスの誤差関数}),$$

C_s : $\text{NO}_3\text{-N}$ の供給濃度である。本研究では、 $C_s=20\text{mg/l}$ である。さらに、カラム20Aの土壌内窒素分布の実測値と上式で求めた理論曲線の比較を図4に示す。これより両者はほぼ一致していることがわかる。14日付近の20cm以深で両者が致していないのは、 K_1 の深さ方向の変化を単純に指数関数的減少としたため、カラム深部で急速に反応が進行したのを表すことができなかったものと思われる。また、カラム20Bにおいてもほぼ同様の結果を得た。

4. まとめ

本研究で得られた結果は次のとおりである。1) 土壌内脱窒素を1次反応と仮定した場合、反応速度係数は一定ではなく、時間的、空間的に変化している。2) 本研究の想定条件下では、反応速度係数の時間的増大はロジスティック曲線、深さ方向の減少は指数関数的減少でほぼ近似できる。

《参考文献》

1) 山口，寺西：「飽和流における土壌カラム内脱窒素」，下水道協会誌，22(249)，55-59，1985。

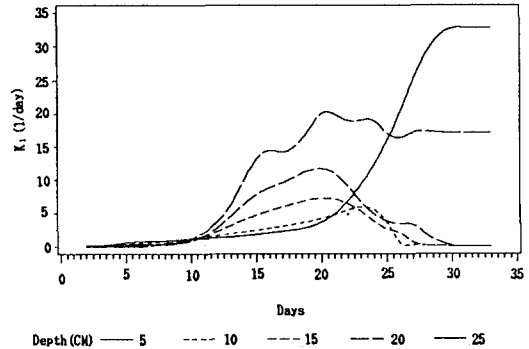


図2 反応速度係数(K_1)の時間的变化(20A)

表 2 K_1 の各係数				
Column	A	t_1	m	α
20A(K_1 5cm)	33	25	0.007	0.01
20B(K_1 10cm)	34	23	0.007	0.01

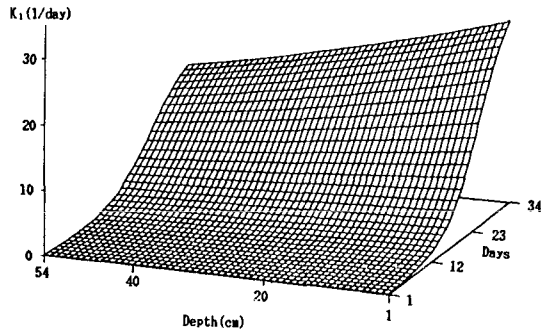


図3 数値計算による反応速度係数(K_1)の時空分布(20A)

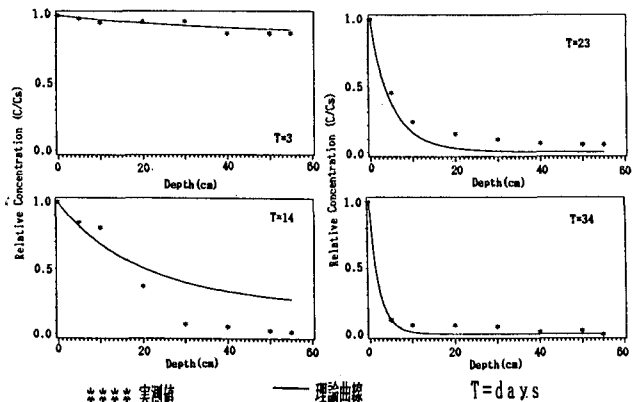


図4 窒素分布の実測値と理論曲線の比較(20A)