

北大・衛生工学 〇学生員 大迫尚司  
正員 余湖典昭  
正員 那須義和

1. はじめに 底泥からの栄養塩の回帰、特に無機窒素の溶出については、これまでアンモニア窒素 ( $\text{NH}_4^+-\text{N}$ ) の拡散現象としてモデル化することが一般的であった。これらのモデルの多くは主として実験・観測データの解析から未知のパラメータを推定する目的で用いられていたが、本研究では溶出量の予測手法として活用することを考えた。この第一段階として、溶出速度を評価基準とした数値実験に徹底し、 $\text{NH}_4^+-\text{N}$  溶出現象に影響を及ぼす因子を統括的に検討した。その結果、分解過程の重要性が指摘されたのでここに報告する。

2. 手法 底泥中の窒素形態として図1のような三態を考え、これらの相互関係を分解と吸着平衡によって定式化した。そのほかに用いた主な仮定は次の通りである。

- 1) まき上げ、硝化、脱窒は考えない。底泥-上層水間の窒素移動はPONの堆積と $\text{NH}_4^+-\text{N}$ の溶出(拡散・吸着)による。
- 2) 間隙率( $\phi$ )は圧密によって深さ方向に定常分布している。
- 3) 水-泥界面直上には水塊の混合がおこらない厚さ  $l(\text{cm})$  の濃度境界層を設定する。

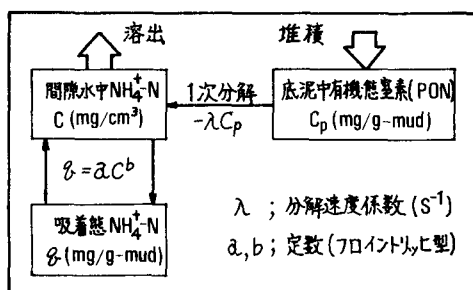


図1 底泥中窒素の相互関係

上層水塊と濃度境界層の接点を原点とし、下向きに $x$ 軸をとる(図2)。溶出量は濃度境界層上面を通過する $\text{NH}_4^+-\text{N}$ 量として求めた。

$$C_p \text{ について ; } \frac{\partial C_p}{\partial t} = -W \frac{\partial C_p}{\partial x} - C_p \lambda$$

$$C \text{ について ; } \frac{\partial C}{\partial t} = \underbrace{\frac{1}{\phi} \frac{\partial}{\partial x} (\phi D \frac{\partial C}{\partial x})}_{\text{拡散}} - \underbrace{V \frac{\partial C}{\partial x}}_{\text{移流}} - \underbrace{\rho \frac{1-\phi}{\phi} \left( \frac{\partial g}{\partial t} + W \frac{\partial g}{\partial x} - C_p \lambda \right)}_{\text{吸着・生成}}$$

$$(0 \leq x < l; \phi = 1, g = C_p = 0)$$

境界条件 ;  $C_{x=0}, C_{x=\infty}, C_{px=l}, C_{px=\infty}$  の各値を既定する。

ここに、 $t$  ; 時間 ( $\text{s}$ )、 $\rho$  ; 泥粒子の密度  $2.6 (\text{g}/\text{cm}^3)$  の一定値、 $D$  ; 拡散係数 ( $\text{cm}^2/\text{s}$ )  $\phi$  の関数  $D = D_0 \phi^2$  ( $D_0$  は定数) として与える。

$W, V$  ; 泥粒子、間隙水の原点に対する仮定の移流速度で、堆積速度  $W_0$  ( $\text{cm}/\text{s}$ ) と  $\phi$  から決まる。<sup>1)</sup>

$$W = \left( \frac{1 - \phi_{x=l}}{1 - \phi} \right) \cdot W_0 \quad V = \frac{1}{\phi} \left( \frac{1 - \phi_{x=l}}{1 - \phi_{x=\infty}} \right) \phi_{x=\infty} \cdot W_0$$

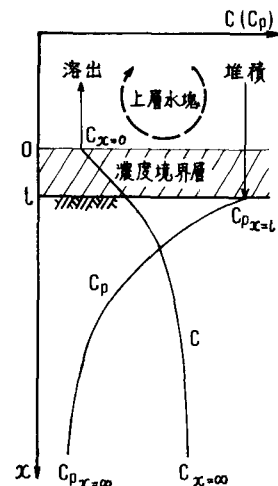


図2 溶出現象のモデル化

数値計算は上式をCrank-Nicholsonの方法により差分化して行った。なお、 $\phi, \lambda$  の深さ方向分布、および  $C, C_p$  の初期濃度分布は次式の関数形で与えた。  $\xi(x) = \xi_{x=0} + (\xi_{x=l} - \xi_{x=\infty}) \cdot e^{-\alpha_5(x-l)}$  ( $\alpha_5$  : 定数) (\*)

3. 結果および考察 (1) 関連因子の統括的検討 本邦湖沼についてこれまで観測されているデータをもとに計算条件を検討したのち、溶出速度に及ぼす各パラメータの影響を調べた結果、溶出現象を基本的に支配するものは底泥中の $\text{NH}_4^+-\text{N}$ 生成機構であることが推定された。これは本モデルが従来の手法にならって、PONの1次分解で $\text{NH}_4^+-\text{N}$ が生成すると仮定したことによる当然の結果とも考えられるが、 $C$  と  $C_p$  を関係づけている唯

一のパラメータ入に関する報告は少ない。図3はこうした入に着目して、 $C_p$ の高低と関係づけた計算を行ったものである。入は(\*)式を用いて  $\lambda(x) = \lambda_{x=L} \cdot e^{-\alpha_\lambda(x-L)}$  で与え、ある程度深くなると分解は起こらないとする。 $C_p$ の初期条件は深さ方向に一定とし、堆積がない状態を考慮して100日間にわたる溶出速度の変化を求めた。結果は入がおおよそ  $10^{-9}$  ( $S^{-1}$ )を越えると溶出速度が増加することを示している。また水域の特性値  $\lambda_{x=L}$ ,  $\alpha_\lambda$ の違いは  $C_p$ の高い方が顕著に現われてくる。実際の湖沼では上層水塊中の有機態窒素が堆積するため、表層部の  $C_p$ が下層部より高くなっており、今後は特に底泥表層部の分解過程を入と  $C_p$ について、その垂直分布も含めた検討を行う必要がある。

分解過程以外の因子については、i) 上層水塊濃度は  $C$  に比べて低レベルであるため、境界条件としてあまり影響することはない。ii) 吸着態  $NH_4^+-N$  は蓄積・供給源として  $C$  の変化を緩和するとともに、溶出を遅延させる原因にもなっている。iii) 濃度境界層も厚くなると  $NH_4^+-N$  の滞留部として機能し、溶出量の変化を緩和する。等の知見が得られた。ただし、iii) については情報が不足しているため、検討の余地がある。

(2) 溶出速度の周年変動 ところどころ入は底泥温度と対応して季節的に変動することがこれまでも報告されていた。しかも水深の浅い水域については、底泥温度の周年変動がほぼ6月を始点とする正弦状波で表わせることが観測されている。そこで両者の関係を次式のように仮定した。

$$\lambda(x, t) = \lambda_{x=Lm} \cdot n \cdot \sin\left(\frac{\pi}{4.95 \times 10^6} t\right) \cdot e^{-\alpha_\lambda(x-L)}$$

ここに、 $n$ ; 定数、 $\lambda_{x=Lm}$ ; 年平均底泥温時の界面部入、 $t$ ; 6月を  $t=0$  とした時間( $S$ )である。 $n$ によって入の変動範囲を変え、溶出速度の周年変動をみたものが図4である。(この時の計算条件は表1に示した。) 溶出速度の大小は入の最大値に強く影響されることがわかる。また、図5にはこの時の  $C$  の垂直分布を2ヶ月毎に示した。 $n=5, 10$ の時、 $C$ は夏から秋にかけて増加し、冬から春に減少する傾向を示す。このような変動パターンは報告されている観測結果<sup>2)</sup>とよく一致していることから、溶出速度も図4のような周年変動を示すものと推測される。したがって、 $C$ に季節的な違いが見られる水域について溶出速度を予測するには、入の変動を考慮した非定常溶出モデルの適用が必要であろう。

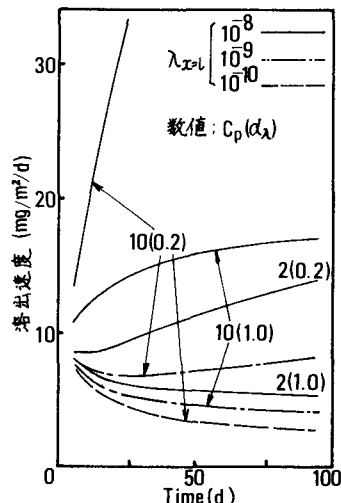


図3 分解速度係数の影響

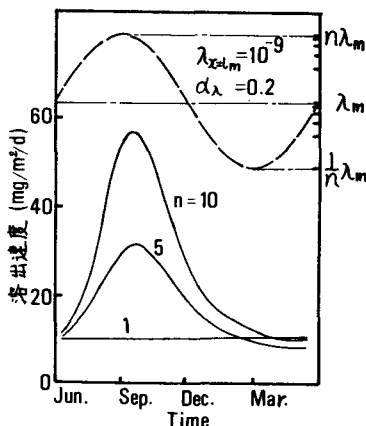


図4 溶出速度の周年変動

表1 計算条件

|      | $C$ (mg/cm³)                                                                                                      | $C_p$ (mg/g-mud)                   |
|------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------|
| 初期条件 | $3 \times 10^{-3} - 6 \times 10^{-4} \cdot e^{2.5(x-2)}$                                                          | $3 + 27 \cdot e^{-(x-2)}$          |
| 境界条件 | $1 \times 10^{-4}$ ( $x=0$ ), $3 \times 10^{-3}$ ( $x=\infty$ )                                                   | $30$ ( $x=2$ ), $3$ ( $x=\infty$ ) |
| その他  | $l=2$ , $W_0=1.6 \times 10^{-8}$ , $a, b=1.3$ , $0.6$<br>$D_c=1.1 \times 10^{-5}$ , $\phi=0.8+0.15 e^{-0.5(x-2)}$ |                                    |

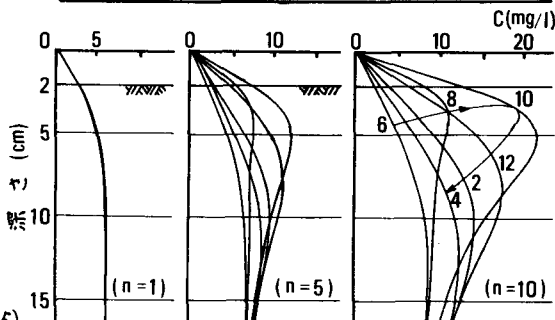


図5 間隙水中  $NH_4^+-N$  濃度分布の変動パターン (図中の数字は月を示す)

#### [参考文献]

- 1) D.M. Imboden; Earth Planet. Sci. Lett. 27, 221 (1975)
- 2) 神山孝吉 他; Jap. J. Limnol. 40, 169 (1979)