

九州大学工学部 学生員 田端香樹 正 員 海田輝之
正 員 藤田哲也 正 員 栗谷陽一

1. はじめに

底泥からの栄養塩類の溶出は、閉鎖水域における富栄養化の一要因となっており、早急に解決されるなければならない課題のひとつである。この問題について、従来、中西等¹⁾、長谷川等²⁾、小山等³⁾の研究があり、 $\text{NH}_4\text{-N}$ 、 $\text{PO}_4\text{-P}$ の溶出速度、溶出量、それらの溶出に及ぼす環境因子などについて検討されている。しかしながら、底泥は吸着能を有するなど、その物性は複雑であり、また、潮汐や海流などにより実際の現場では上層水の流動がかなりあり、溶出現象も影響を受けると考えられる。本研究では、底泥に吸着された $\text{NH}_4\text{-N}$ の、底泥間隙水中への脱離を考慮した拡散の式を設定し、実測値と比較対照、検討した。さらに、上層水が流動する場合の、流速が溶出速度に及ぼす影響について報告する。

2. 底泥に吸着された $\text{NH}_4\text{-N}$ の間隙水中への脱離を考慮した溶出の式

間隙水中の $\text{NH}_4\text{-N}$ 濃度を C (g/m^3)、泥の間隙率を ε 、泥の単位体積重量を ρ_s とし、泥の単位質量当りの吸着量 θ ($\text{g}/\text{g}_{\text{干基}}$)が、平衡濃度に比例する(即ち、 $\theta = \alpha \cdot C$)とし、 ε が一定、泥中での微生物による有機態窒素の無機化を無視すれば、拡散方程式は次のようになる。底泥表面より鉛直下向きに z をとり、

$$\left\{ \varepsilon + (1-\varepsilon)\alpha\rho_s \right\} \frac{\partial C}{\partial t} = \varepsilon D_n \frac{\partial^2 C}{\partial z^2} \quad \dots\dots (1) \quad (\text{ただし } D_n \text{ は } \text{NH}_4 \text{ の分子拡散係数})$$

これを次の初期条件及び境界条件の下で解くと、

$$\left. \begin{array}{l} t=0: C=C_0, \quad 0 < z < \infty \\ t>0: C=C_0, \quad z \rightarrow \infty \\ t>0: C=0, \quad z=0 \end{array} \right\} \rightarrow \frac{C}{C_0} = \text{erf} \left(\frac{z}{2 \sqrt{\frac{\varepsilon}{\varepsilon + (1-\varepsilon)\alpha\rho_s} \cdot D_n t}} \right) \quad \dots\dots (2)$$

ただし、 $\text{erf}(z) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^z e^{-t^2} dt$

となり、 t 時間までに泥の単位面積当り溶出した $\text{NH}_4\text{-N}$ 量 M (g/m^2)は次のようになる。

$$M = \left\{ \varepsilon + (1-\varepsilon)\alpha\rho_s \right\} \int_0^\infty (C_0 - C) dz \\ = 2 C_0 \sqrt{\frac{\left\{ \varepsilon + (1-\varepsilon)\alpha\rho_s \right\} \varepsilon \cdot D_n}{\pi}} \cdot \sqrt{t} \quad \dots\dots (3)$$

3. 実験方法

底泥からの $\text{NH}_4\text{-N}$ の溶出実験は、図-1に示すアクリル製回転円型水路で行った。底泥として、市販カオリン ENGEL HARD ASP 600 を使用し、 $\text{NH}_4\text{-N}$ 源として NH_4Cl を用いた。カオリンの諸物性値を表-1に示す。カオリンの含水比を調整し、水路床に5 cmの厚さで一様に敷きつめた後、表層が乱れぬよう静かに水道水 ($\text{NH}_4\text{-N}$ 6.8 mg/L) を注入した。このとき、水深は15 cmとした。

実験は、底面剪断力 $\tau = 0$ (静置)、0.1, 0.3, 0.5, 0.8 (N/m^2)の五種について行い、

底泥表面から7 cm上方の位置で採水し、上層水の

$\text{NH}_4\text{-N}$ 濃度及びSS濃度の経時変化を追跡した。実験終了時に、入ライスカット方式により

表-1				
カオリン	比重	平均粒径 μm	液性限界 %	塑性限界 %
ENGEL HARD ASP 600	2.66	0.64	65	36

底泥から試料を採取し、底泥の鉛直方向の含水比分布を測定した。また、この試料を遠心分離し (2500 rpm $\times$ 10 min) 間隙水濃度分布を得た。なお、 $\text{NH}_4\text{-N}$ の分析にはインドフェール法を用い、SS測定には0.1 μm メンブレンフィルターを使用した。また、実験はすべて、恒温室 (20 $^{\circ}\text{C}$)にて行なった。

4. 結果及び考察

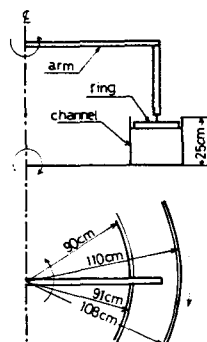


図-1 実験装置

Mの時間変化を図-2, 3に示す。時刻 $T=0$ で、必ずしも $M=0$ となっているが、これは、底泥を設置した後、上層水を注入したことによる表層の攪乱に起因する。しかし、ある程度時間が経過すれば、 M は T に比例していることから、(1)式の妥当性が確かめられる。 $\omega=100, 260\%$ いずれの場合も、剪断力の増加につれて、溶出速度が増加していることから、流水下では、溶出速度が加速されることがわかる。ただし、図-3の $\tau=0.8\text{ N/m}^2$ においては、底泥の局所的な沈堆が生じた。 $\omega=260\%$ における上層水中のSSの増加を図-4に示す。SSが 100 g/m^3 以下の場合、堆き上がった泥の $\text{NH}_4\text{-N}$ 吸着量は 0.054 g/kg 程度であり、これがすべて上層水中に脱離しても、上層水中の $\text{NH}_4\text{-N}$ 濃度の増加は 10^{-3} g/m^3 程度であり無視できる。

図-5, 6に間隙水中の $\text{NH}_4\text{-N}$ 濃度分布を示す。界面下 1 cm 以下では、実線で示した、(2)式より求めた解曲線に双方ともよく一致している。しかし、界面下数 mm のところでは、濃度勾配は小さくなっており、静置の場合にもこの現象が見られるので、流水の影響とは考えられず、測定誤差でもないと思われる。この界面下における濃度勾配の減少の影響を検討するために、底泥間隙水中の界面下 1 cm 以上の濃度分布に合うように定めた見かけの拡散係数 D_a と、上層水中に溶出した $\text{NH}_4\text{-N}$ の求定値に合うように定めた見かけの拡散係数 D_e を表-2に示す。その差はたかだか2割である。したがって、この界面直下の濃度勾配の減少は、溶出速度に大きな影響を与えていないと考えられる。以下、この点は考慮しないこととする。理想的には、間隙水中の拡散係数は分子拡散係数と等しくなるはずである。また、底泥の構造が等方性であれば、含水率が任意断面における空隙率と一致する。しかし、一般に粘土粒子は扁平であるため、水平断面における空隙率は、含水率に一致しないのが普通である。このため $D_a = \frac{6\beta}{\tau + 6\beta} D_m$ として β の値を求め、表-2に示す。この β は、底泥表層上における僅かの流体運動によっても影響を受ける可能性がある。 β の値は、 τ の増加につれて増し、その割合は $\beta \propto \exp(\tau)$ の傾向にある。

今後、底泥界面直下の濃度勾配の減少機構の解明、見かけの拡散係数の分子拡散係数に対する割合についての物理的な意味、流水下における見かけの拡散係数増加機構の解明等、検討を継続していく予定である。

表-2

$\omega(\%)$	$\tau(\text{N/m}^2)$	D_a	D_e	β
100	0	2.3×10^{-6}	3×10^{-6}	0.44
	0.3	2.3	3	0.42
	0.5	2.5	4	0.46
260	0	4.0	—	0.89
	0.1	4.2	4	0.94
	0.3	4.2	5	0.94
	0.5	7.0	6	1.56
	0.8	22	—	4.91

- 参考文献 1) 三浦田、中田、天満 第14回衛生学シンポジウム 富栄養化水質における底泥汚染に関する研究 (2) 1975. 1. 184~188
 2) 高橋川 清 河川と環境の底泥汚染の発生経路の調査、工務部研究116号
 3) 小川 昌田郎 水産増殖場の物質変換の解明に関する生物地球化学的調査、Vol. 16

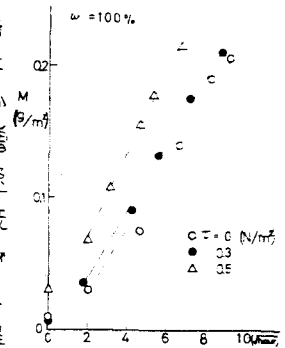


図-2

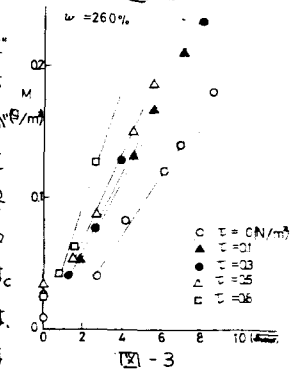


図-3

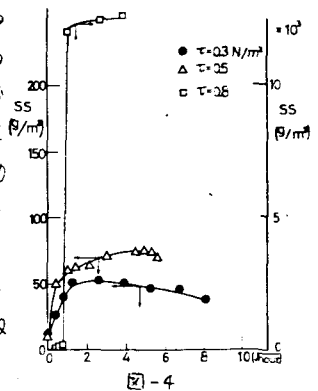


図-4

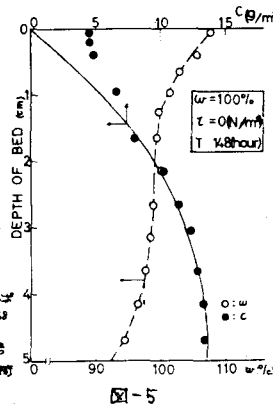


図-5

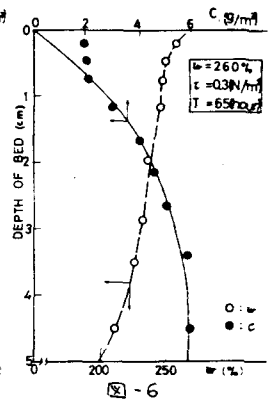


図-6