

廃棄物層の間隙における流動域-非流動域間の物質交換の定量化に関する基礎的研究

九州大学大学院 学生会員 ○花木 陽人  
 " 正会員 小宮 哲平  
 " フェロー会員 島岡 隆行

1. はじめに

廃棄物層の間隙水には、間隙水が流動している流動域と、間隙水の流動がほとんど生じない非流動域が存在すること<sup>1)</sup>が知られており、流動域と非流動域の間では拡散作用による溶質移動が生じていると考えられる。このような流動域-非流動域における水分及び溶質移動現象は、廃棄物の安定化に関わる重要な現象であるが、流動域-非流動域間の物質交換を定量的に評価する手法は十分に確立されていない<sup>2),3)</sup>。

本研究では、流動域-非流動域間の物質交換係数と物質交換に影響を及ぼす各種因子の関係をモデル化することを目的として、廃棄物層の間隙を大小の管路からなる管路網であると仮定し、管路網中の流動域と非流動域の接続部における間隙水の流れ及び溶質移動の数値シミュレーションを行い、各種影響因子が流動域-非流動域間の物質交換に及ぼす影響の把握を行った。

2. 方法

2-1 流動域及び非流動域を模擬した管路における水分及び溶質移動の数値シミュレーション

図-1に示す管路を数値シミュレーションの対象とした。鉛直方向に配置した管を流動域、流動域に接続された細い管を非流動域とし、流動域の上端を流入口、流動域の下端を流出口と設定した。また非流動域の末端は閉じられた状態とした。流動域を純水、非流動域を一定濃度の溶液で満たした状態を初期条件とし、流動域に一定の流量を与えたときの非流動域における濃度変化をシミュレートした。管路内の流速分布は次式(1)の Navier-Stokes 式と式(2)の連続の式の連立方程式を解くことにより求めた。

$$\rho(\mathbf{u} \cdot \nabla)\mathbf{u} = \nabla[-p\mathbf{I} + \mu\{\nabla\mathbf{u} + (\nabla\mathbf{u})^T\}] + \mathbf{F} \quad (1)$$

$$\rho\nabla \cdot \mathbf{u} = 0 \quad (2)$$

ここで、 $\mathbf{u}$ : 流速ベクトル[m/s]、 $\mathbf{I}$ : 単位ベクトル、 $\rho$ : 水の密度[kg/m<sup>3</sup>]、 $p$ : 圧力[Pa]、 $\mu$ : 粘性係数[Pa・s]、 $\mathbf{F}$ : 外力[N/m<sup>3</sup>]である。溶質の移流・拡散は、次式(3)の移流拡散方程式を解いて求めた。

$$\frac{\partial c}{\partial t} + \nabla \cdot (-D\nabla c) + \mathbf{u} \cdot \nabla c = 0 \quad (3)$$

ここで、 $t$ : 時刻[s]、 $c$ : 濃度[kg/m<sup>3</sup>]、 $D$ : 拡散係数[m<sup>2</sup>/s]である。非流動域内の初期の溶液は 20%食塩水 ( $D = 1.594 \times 10^{-9}$ [m<sup>2</sup>/s]) と設定した。流動域の断面平均流速を  $U$ [m/s]、流動域の管径を  $D_m$ [m]、流動域の管長を  $L_m$ [m]、非流動域の管径を  $D_{im}$ [m]、非流動域の管長を  $L_{im}$ [m]、非流動域との接続角を  $\theta$  [°] (流動域に対して垂直に接続したときの角度を 0° とし、時計回りを正とする。) とした。このとき、 $(U, D_m, D_{im}, L_{im}, \theta) = (0.03, 0.03, 0.01, 0.1, 0)$  を基準とし、各種影響因子を表-1のように変化させた時の非流動域内の平均濃度をシミュレートした。シミュレーションにおける計算時間は 17 日間、時間刻み幅は 30 分と設定した。

2-2 流動域-非流動域間の物質交換係数の定量

流動域の濃度を  $C_m$ [mol/m<sup>3</sup>]、非流動域の濃度を  $C_{im}$ [mol/m<sup>3</sup>]、物質交換

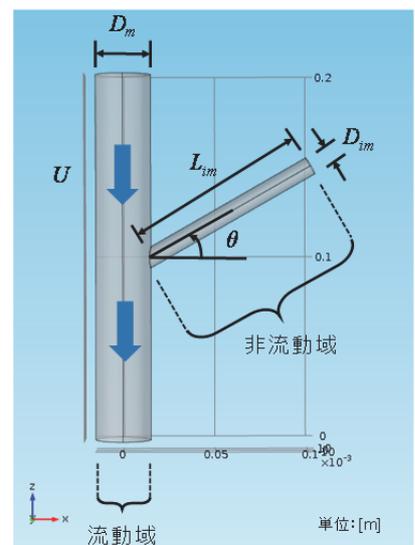


図-1 シミュレーション対象管

表-1 影響因子の設定

影響因子	数値
$U$ (m/s)	0.00001, 0.0001, 0.001, 0.005, 0.01, 0.03, 0.01, 0.1
$D_m$ (m)	0.02, 0.03, 0.04, 0.05, 0.06
$D_{im}$ (m)	0.0001, 0.0005, 0.001, 0.002, 0.005, 0.01, 0.015
$L_{im}$ (m)	0.03, 0.05, 0.08, 0.1, 0.13
$\theta$ (°)	-60, -30, 0, 30, 60

キーワード：廃棄物層、間隙、流動域、非流動域、物質交換

連絡先：〒819-0395 福岡市西区元岡 744 九州大学大学院工学研究院環境社会部門環境制御工学研究室

Tel: 092-802-3431, Email: hanaki-a@doc.kyushu-u.ac.jp

係数を  $r$ [1/s]、時間を  $t$ [s] とすると、非流動域における物質収支式<sup>1)</sup> は次式(4)となる。

$$\frac{\partial C_{im}}{\partial t} = -r(C_{im} - C_m) \quad (4)$$

2-1の数値シミュレーションの条件では流動域の濃度  $C_m$  は非流動域の濃度  $C_{im}$  と比べて限りなく小さいため、式(4)において  $C_m \approx 0$  とし、式(4)を解くと次式(5)が得られる。

$$C_{im} = C_{im,0}e^{-rt} \quad (5)$$

本研究では、数値シミュレーションで得られた非流動域内の平均濃度の経時変化に対し、式(5)を当てはめ、カーブフィッティングにより物質交換係数  $r$  を求めた。

### 3. 結果及び考察

各種影響因子を変化させた場合の物質交換係数  $r$  の変化を図-2~6に示す。 $r$  は  $U$  の増加に伴い対数関数的に増加すること、 $D_{im}$  の増加に伴い二次関数的に増加すること、 $L_{im}$  の増加に伴い累乗関数的に減少すること、 $D_m$  の影響をほとんど受けないことが示された。また  $\theta$  については、 $\theta$  の絶対値の増加に伴い、 $r$  は二次関数的な増加を示したが、 $\theta$  の絶対値が同じであっても、 $\theta$  が負の値に比べて、正の値の方が、僅かではあるが  $r$  は大きな値を示した。これは流動域内の流れ方向に対して鋭角に接続することで非流動域内の移流作用が大きくなったことが原因と考えられる。

### 4. まとめ

物質交換係数  $r$  は、

- ・非流動域の管長  $L_{im}$  の増加に伴い累乗関数的に減少
- ・流動域の流速  $U$  の増加に伴い対数関数的に増加
- ・非流動域の管径  $D_{im}$  の増加に伴い二次関数的に増加
- ・接続角  $\theta$  の絶対値の増加に伴い二次関数的に増加
- ・流動域の管径  $D_m$  の影響をほとんど受けない

ことが明らかとなり、特に非流動域の管長  $L_{im}$  の影響を大きく受けることが示された。今後、より現実的な条件での数値シミュレーションを行い、物質交換係数と各種影響因子の関係を表すモデル式の提案を行うとともに、実際の廃棄物層を対象にモデル式の検証を行う予定である。

#### [参考文献]

- 1) 島岡隆行ら:循環式準好気性埋立における浄化機構のモデル解析, 廃棄物学会論文誌, Vol. 7, No. 5, pp. 234-243, 1996
- 2) 東條安匡ら:焼却灰層中の不飽和水分移動に関する実験的研究, 土木学会論文集, No. 720/7-25, pp. 77-88, 2002,
- 3) 坂本康:不飽和層中の障害物が溶質の移流・拡散に与える影響, 水工学論文集, 第40巻, 1996

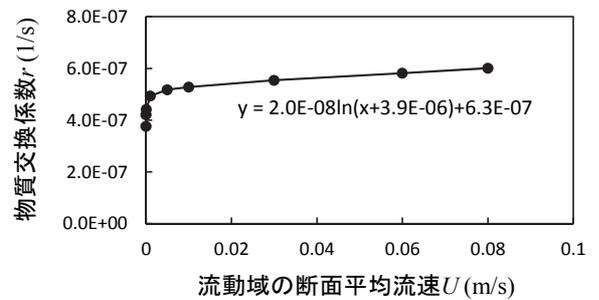


図-2 流動域の流速と物質交換係数の関係

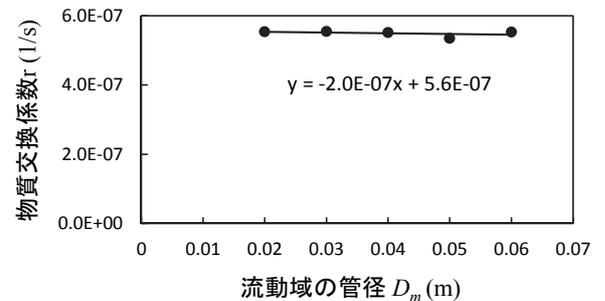


図-3 流動域の管径と物質交換係数の関係

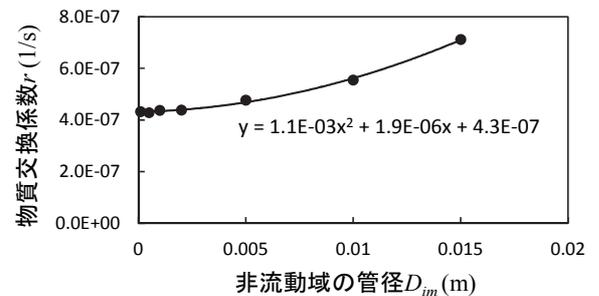


図-4 非流動域の管径と物質交換係数の関係

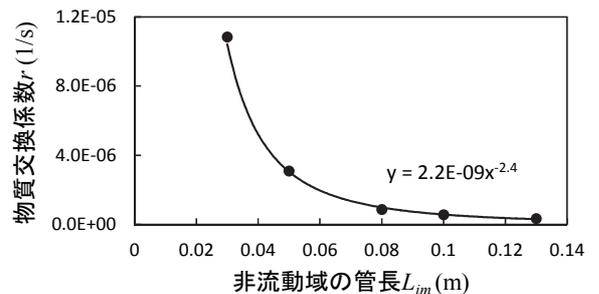


図-5 非流動域の管長と物質交換係数の関係

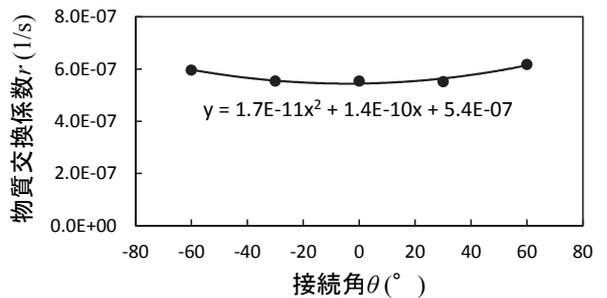


図-6 接続角と物質交換係数の関係