

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と考えられる。また、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、廃棄物の安定化にも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^{1) 2)}。

本研究では、物質交換係数と各種パラメータとの関係を表すモデル式の提案を目的として、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、各種パラメータが流動域-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。鉛直管を流動域、流動域に垂直に接続された細い水平管を非流動域とし、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。流動域を純水、非流動域を 20 %食塩水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時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、 ρ : 水の密度[kg/m³]、 p : 圧力[Pa]、 μ : 粘性係数[Pa・s]、 $\mathbf{F}$: 外力[N/m³]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。

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

ここに、 t : 時刻[s]、 c : 濃度[kg/m³]、 D : 拡散係数[m²/s]である。非流動域における 20 %食塩水の濃度は 3.9 mol/m³と設定し、流入口からの流速を 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]とした。この時、 $(U, D_m, D_{im}, L_{im}) = (0.03, 0.03, 0.01, 0.1)$ と設定し、さらにそれぞれのパラメータを右表のように変化させ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/m³]、非流動域の濃度を C_{im} [mol/m³]、物質交換係数を 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³⁾は次式(4)となる。

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

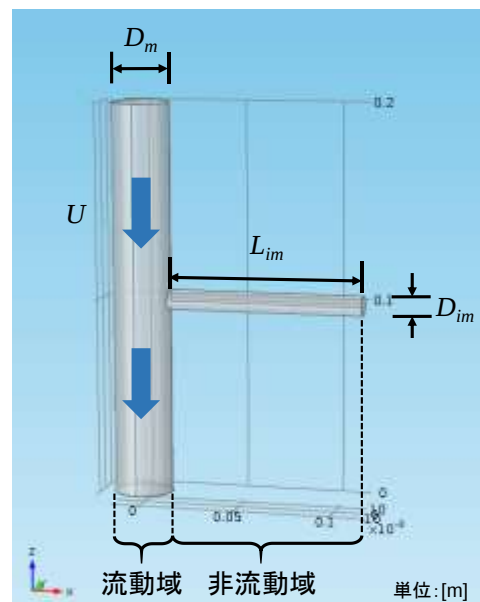


図-1 シミュレーション対象とした管路

表-1 各種パラメータ

パラメータ	数値
U (m/s)	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)	0.001, 0.002, 0.005, 0.01, 0.015
L_{im} (m)	0.03, 0.05, 0.08, 0.1, 0.13

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

3-1 非流動域の平均濃度の経時変化

シミュレーション結果の一例として R_{im} を変化させた場合の C_{im} の経時変化を図-2 に示す。これより、非流動域内の平均濃度は初期に大きく減少した後、0 に漸近するように指数関数的に減少していくことが分かる。これは非流動域における拡散現象が、流動域と非流動域の接合部付近では移流の作用が大きいため早く進行し、先端部近くでは移流の作用が小さくなるため進行が遅くなったことが原因であると考えられる。

3-2 各種パラメータが流動域-非流動域間の物質交換係数に及ぼす影響

各種パラメータを変化させた場合の物質交換係数 r の変化を図-3～6 に示す。 r は U 及び 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。 L_{im} を変化させた場合、 r は比較的大きな変化を見せているがこれは先述のように流動域と非流動域の接合部付近の移流の作用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すること、流動域の流速 U 及び非流動域の管径 D_{im} の増加に伴い二次関数的に増加すること、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うとともに、各種パラメータと物質交換係数の関係を示すモデル式の提案を行いたい。

[参考文献]

- 1) 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.
- 2) 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.
- 3) 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.

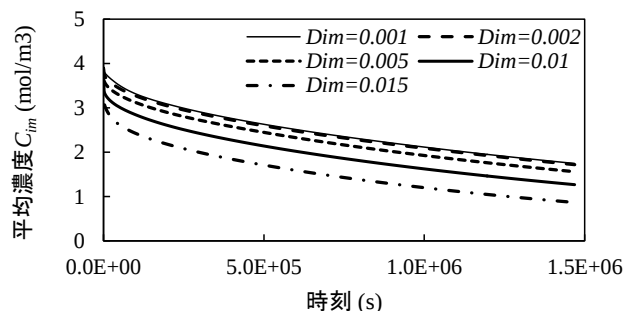


図-2 非流動域における平均濃度の経時変化
(パラメータ: 非流動域の管径)

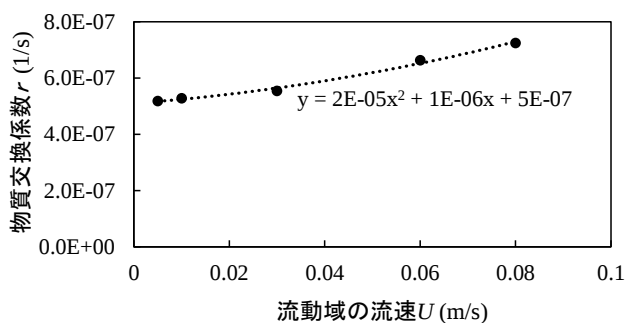


図-3 流動域の流速による物質交換係数の変化

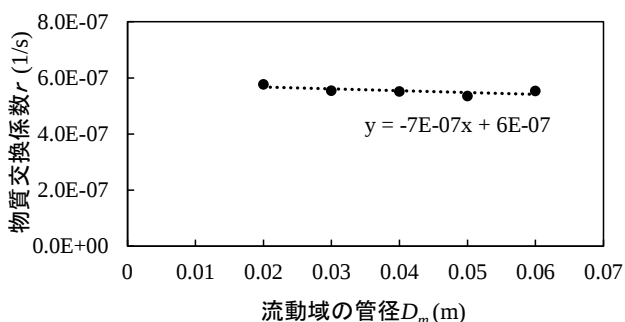


図-4 流動域の管径による物質交換係数の変化

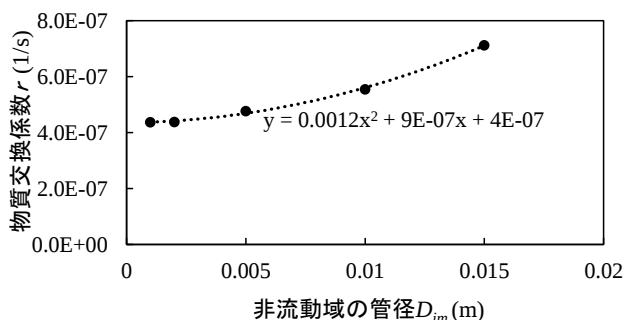


図-5 非流動域の管径による物質交換係数の変化

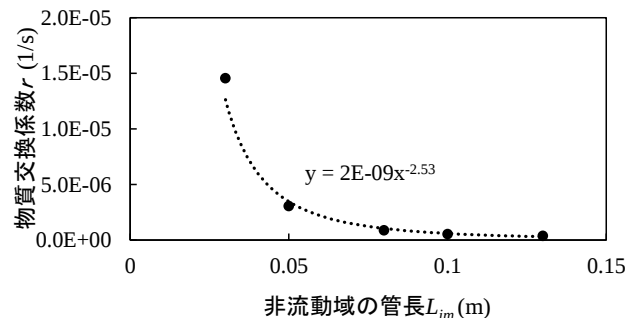


図-6 非流動域の管長による物質交換係数の変化