

VII-3

不飽和水分移動を伴う廃棄物層内の溶質・熱移動特性に関する研究

室蘭工業大学 正員 吉田 英樹
 室蘭工業大学 ○学生員 鈴木 敬太
 北海道大学大学院 正員 田中 信寿
 室蘭工業大学 正員 穂積 準

1. はじめに

廃棄物埋立層内における主な熱移動形態は、熱伝導と水分移動に伴う顕熱移動である。しかし、水分移動を伴う場合、熱分散と呼ばれる溶質移動における分散に相似な現象が起こり、熱伝導特性が変化する可能性がある。そこで、本研究では模擬ごみ充填層を用いて、不飽和水分移動を伴う熱移動実験を行い、熱分散を確認するとともに、熱伝導特性への影響について考察を加えた。

2. 実験概要

2-1. 実験装置及び実験方法

図1に実験装置を示した。装置は降雨供給装置及び試料充填用カラムからなる。カラム内には温度測定用の熱電対を10箇所を設置し、また底部からの流出水を回収して、水量及び流出水の電気伝導度を測定できるようになっている。図2に実験方法の概要を示した。主な手順は試料を充填したカラムに30°Cの水道水を一定速度で降らせる。そして、底部からの流出水量及びカラム内温度が安定した後、降雨をNaClを溶解させた温塩水(約45°C)に切り替える。そして、流出水の電気伝導度及び10箇所の内部温度を観測し、これらの経時変化が小さくなり、一様になった時点で降雨を停止する。

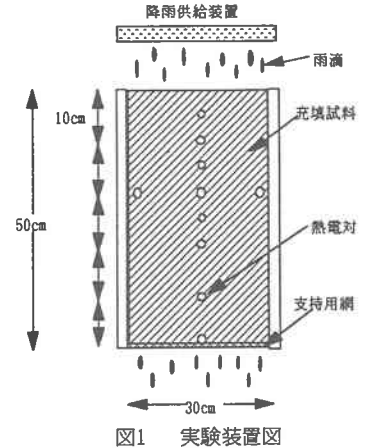


図1 実験装置図

2-2. 実験条件

実験試料としては、標準物質としての豊浦砂(平均径0.17mm)と模擬混合ごみ(可燃・不燃ごみからなる)を用いた。実験試料の構成成分及び物理特性を表1に示す。降雨強度は10~70mm/hの範囲で設定した(この降雨強度は日最大降雨あるいは時間最大降雨に匹敵する)。

表1 充填試料の構成成分および物理特性

| 成分 | 密度 kg/m ³ | 比熱 J/(kg°C) | 熱伝導率 J/(ms°C) | 重量割合[%-dry] | |
|---------|-------------------------|----------------|------------------|-------------|--------|
| | | | | 豊浦砂 | 模擬混合ごみ |
| 空気 | 0 | - | 0.02 | - | - |
| 水 | 1000 | 4200 | 0.60 | - | - |
| 廃棄物 | - | - | - | - | - |
| 紙類 | 1500 | 1260 | 0.65 | - | 51.5 |
| 繊維 | 1300 | 1310 | 0.29 | - | 4.9 |
| 木類 | 1500 | 1360 | 0.65 | - | 5.6 |
| プラスチック | 1040 | 1300 | 0.12 | - | 15.0 |
| ビニール類 | 920 | 2300 | 0.92 | - | 1.7 |
| スタイロホーム | 30 | 1250 | 0.04 | - | 0.0 |
| ゴム類 | 940 | 1590 | 0.20 | - | 0.5 |
| 鉄 | 7860 | 630 | 81.2 | - | 4.9 |
| アルミニウム | 2690 | 880 | 236 | - | 2.9 |
| ガラス | 2400 | 1160 | 0.90 | - | 11.0 |
| 陶磁器 | 2400 | 750 | 1.50 | - | 0.5 |
| 土砂 | 2650 | 800 | 2.60 | - | 1.7 |
| 砂 | 2650 | 800 | 6.79 | 100.0 | 0.0 |

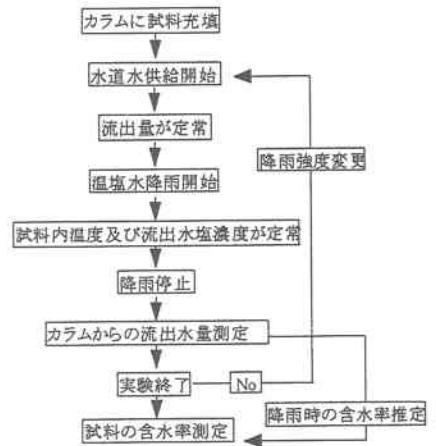


図2 溶質・熱移動実験方法概要

Study on characteristics of mass and heat transport in a refuse layer with unsaturated moisture movement by Hideki YOSHIDA, Keita SUZUKI, Nobutoshi TANAKA and Hitoshi HOZUMI

3. 分散の定義

砂や土壌のような多孔質体中の溶質移動現象においては、移流分散と呼ばれる現象がある。これは溶質拡散フラックスが移流を伴う場合に著しく増大する現象であり、多孔質体中の水理学的分散機構による輸送（空隙の大小・分岐合流、流路内の速度分布などによる）が生じるために起こる。このような現象を総合的に表す数を D_m : 分散係数 [cm^2/s] と呼び、次式で表される。

$$D_m = D_{md} + D_{mv} = D_{md} + \alpha u^\beta \quad (1)$$

ここで、 D_{md} : 充填層内の分子拡散係数 [cm^2/s]、 D_{mv} : 水理学的分散係数 [cm^2/s]、 u : 間隙流速、 α : 定数 (有次元)、 β : 定数 (無次元) である。 u は $u = v/Wv$ (v : 降雨浸透速度、 Wv : 体積含水率) で与えられる。水飽和状態では α は粒子の平均粒径に等しいオーダーとなり、 β はほぼ 1 となるとされている。また、一般に充填層内の分子拡散係数 D_{md} は水理学的分散係数 D_{mv} に比べて小さいため、無視できる。よって $D_m \doteq D_{mv} = \alpha u^\beta$ と考えることができ、実験より D_m 及び u を求めることによって α 、 β を同定することができる。分散現象は熱においても同様に起こるとされている。熱分散係数と溶質分散係数の次元は一致することから、溶質分散での研究から熱分散を評価することが可能であると言われている。

4. 溶質分散実験

4-1. 溶質分散係数の測定方法

溶質分散解析には、以下の移流分散方程式の解析解を用い分散係数を同定した。

$$\frac{M}{M_0} = \frac{1}{2} \left[\exp\left(\frac{uL}{D_m}\right) \operatorname{erfc}\left(\frac{z+ut}{\sqrt{4D_m t}}\right) + \operatorname{erfc}\left(\frac{z-ut}{\sqrt{4D_m t}}\right) \right] \quad (2)$$

ここで、 M : 流出水 NaCl 濃度、 M_0 : 降雨水 NaCl 濃度、 L : 実験カラムの長さ、 u : 間隙流速、 t : 時間、 z : 深さ方向の長さである。各実験におけるカラム底部からの流出水の電気伝導度を測定し、 NaCl 濃度に換算して任意の時間の M を求め、式で求めた M_0 の一致が最も良い D_m を同定した。

4-2. 溶質分散係数の測定結果

溶質分散係数 D_m を推定した例を図3に示した。図でわかるように、流出水の NaCl 濃度の実測値と推定した D_m を用いて求めた計算値は良い一致を見ている。他の降雨強度についても実測値と計算値は良好に一致したこ

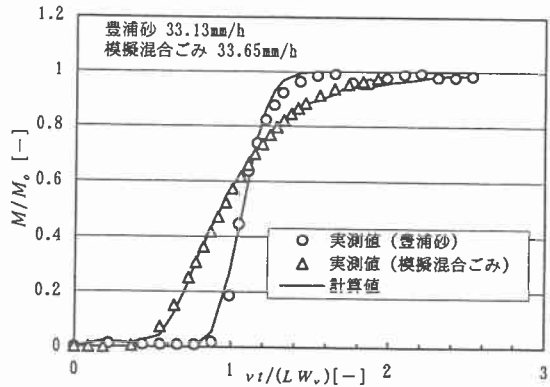


図3 NaCl 流出曲線の実測値と計算値の比較

表2 溶質分散係数の測定結果

| 試料 | 降雨強度 | 体積含水率 | 間隙流速 | 分散係数 |
|--------|------------|----------|------------|---------------------------------|
| | v [mm/h] | Wv [%] | u [mm/h] | D_m [m^2/s] |
| 豊浦砂 | 17.92 | 30.0 | 60 | 6.64E-08 |
| | 33.13 | 30.1 | 110 | 9.93E-08 |
| | 64.63 | 33.5 | 193 | 7.83E-07 |
| 模擬混合ごみ | 14.01 | 34.0 | 41 | 4.36E-07 |
| | 33.65 | 36.8 | 91 | 9.38E-07 |
| | 64.29 | 37.1 | 173 | 1.50E-06 |

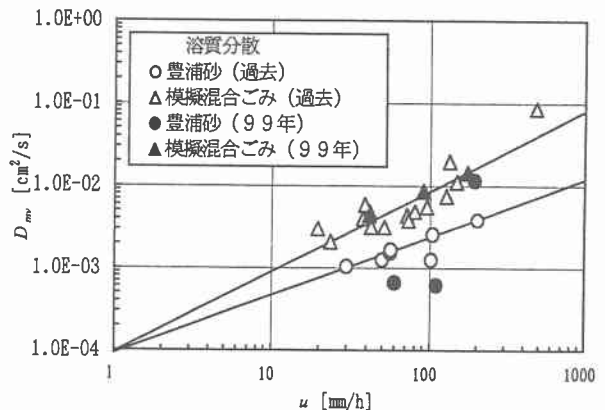


図4 溶質分散係数の測定事例

とから、本解析は妥当であったと言える。表2に測定条件及び D_m の測定結果を示した。また、この結果を図4に示した。図には本研究室で過去2年間に測定されたデータも合わせて示した。図からわかるように降雨強度とともに D_m が指数的に増大している。また豊浦砂と模擬混合ごみの D_m を同じ降雨強度で比べると、模擬混合ごみの方がほぼ1オーダー大きい。

式(1)に示した間隙速度 u と D_m の間に成り立つ $D_m \propto D_m = \alpha u^\beta$ なる実験式に、本実験の測定結果を最小自乗法を用いて当てはめると、豊浦砂については $\alpha=0.16\text{cm}$ 、 $\beta=1.12$ 、模擬混合ごみについては $\alpha=2.6\text{cm}$ 、 $\beta=0.97$ と求められた。 $\alpha=0.16\text{cm}$ は豊浦砂の平均粒径である約 0.02cm よりも1オーダーほど大きくなっている。図4に実験式を直線で示した。

5. 熱分散実験

5-1. 熱分散係数の測定方法

円筒カラム内の温度分布を求めるための熱移動に関する支配方程式は、①固・液・気相は温度平衡にある、②降雨浸透速度は一定である、③水蒸気移動は無視できる(本実験の対象温度範囲が 45°C 以下に限り)、④含水率分布は大きく変化せず、かつ半径方向には一様になっている、として導出した2次元熱収支方程式であり、以下のように与えられる。

$$C_e \rho_c \frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left(k_e^z \frac{\partial \theta}{\partial z} \right) - C_w \rho_w v \frac{\partial \theta}{\partial z} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r k_e^r \frac{\partial \theta}{\partial r} \right) \quad (3)$$

ここで、 k_e^z, k_e^r : 充填層の鉛直方向及び半径方向の

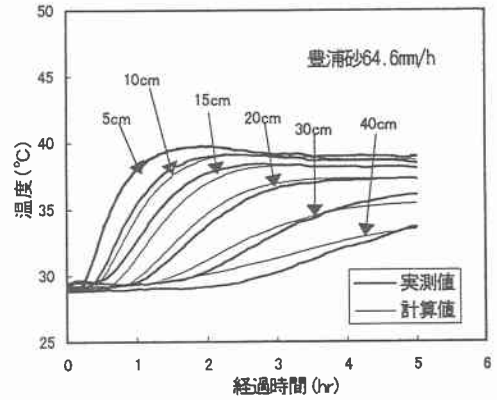


図5a 温度変化の実測値と計算値の比較(豊浦砂)

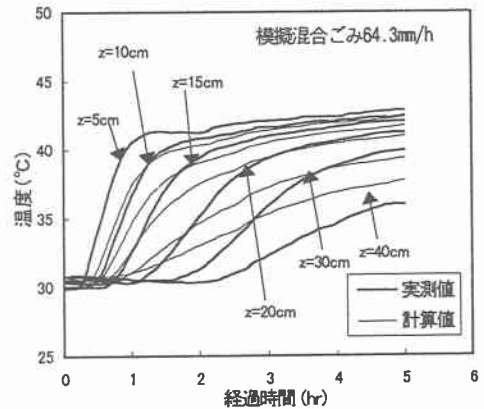


図5b 温度変化の実測値と計算値の比較(模擬混合ごみ)

表3 熱分散係数の測定結果

| 試料 | 体積含水率 W_v [%] | 平均流速 v mm/h | 間隙流速 u mm/h | 熱伝達係数 | | 有効熱伝導率 | | 熱分散係数 | |
|--------|-----------------------|---------------------|---------------------|---------------------------------|-----------------------------------|-------------------------|-------------------------|-----------------------------------|-----------------------------------|
| | | | | h_r J/(m ² s°C) | h_z^b J/(m ² s°C) | $W_v k_v^z$ J/(ms°C) | $W_v k_v^r$ J/(ms°C) | $D_{h_v}^z$ cm ² /s | $D_{h_v}^r$ cm ² /s |
| 豊浦砂 | 0.31 | 17.9 | 57 | 2.8E-03 | 1.5E+02 | 5.5E-04 | 1.1E-04 | 4.1E-06 | 8.3E-07 |
| | 0.30 | 17.9 | 60 | 4.8E+00 | 2.0E+02 | 2.0E-04 | 4.0E-05 | 1.6E-06 | 3.1E-07 |
| | 0.32 | 31.7 | 100 | 5.6E-03 | 4.9E+02 | 5.0E-01 | 1.0E-01 | 3.8E-03 | 7.5E-04 |
| | 0.30 | 33.1 | 110 | 9.4E-03 | 1.5E+00 | 3.3E-01 | 6.7E-02 | 2.6E-03 | 5.3E-04 |
| | 0.32 | 34.7 | 109 | 1.6E-02 | 1.4E+00 | 2.8E-04 | 5.7E-05 | 2.1E-06 | 4.3E-07 |
| | 0.34 | 64.6 | 193 | 1.3E+02 | 1.6E-01 | 3.3E-01 | 6.7E-02 | 2.4E-03 | 4.8E-04 |
| 模擬混合ごみ | 0.34 | 14.0 | 41 | 1.2E-01 | 1.1E+02 | 5.4E+00 | 1.1E+00 | 3.8E-02 | 7.6E-03 |
| | 0.35 | 19.9 | 56 | 6.8E-01 | 7.4E+00 | 1.5E+00 | 3.0E-01 | 1.0E-02 | 2.0E-03 |
| | 0.37 | 33.7 | 91 | 7.5E-01 | 4.5E+01 | 2.5E+00 | 5.0E-01 | 1.6E-02 | 3.3E-03 |
| | 0.35 | 34.0 | 96 | 7.0E-03 | 5.9E+01 | 1.0E+00 | 2.1E-01 | 7.0E-03 | 1.4E-03 |
| | 0.37 | 64.3 | 173 | 8.8E-03 | 1.4E+03 | 5.4E+00 | 1.1E+00 | 3.5E-02 | 7.0E-03 |
| | 0.37 | 66.7 | 180 | 4.2E-02 | 6.9E+02 | 7.2E+00 | 1.4E+00 | 4.6E-02 | 9.2E-03 |

有効熱伝導率[J/(ms°C)]、 θ :気相・液相・固相が平衡にある状態の充填層の温度[°C]、 z :深さ[m]、 r :半径方向距離[m]、 C_w :水の比熱[kg/m³]、 ρ_w :水の密度[J/(kg°C)]、 C_s :充填層の平均比熱[kg/m³]、 ρ_s :充填層のみかけ密度[J/(kg°C)]、 v :降雨浸透速度[m/s]である。

もし、この充填層内で溶質分散と似た熱分散が起こっていると分散効果を伴う充填層の有効熱伝導率は以下のように表せられる。

$$k_e = k_e^o + W_v k_v^* \quad (4)$$

ここで、 k_e^o :分散効果を伴わない充填層の有効熱伝導率、 $W_v k_v^*$:流体力学的分散に相当する熱分散係数、 W_v :体積含水率である。また、今回の解析において深さごとに変化するカラム内の含水率分布を考慮している。境界条件として、カラム中心では断熱、カラム底面・側面では熱伝達があると設定した。ここで、 h_r 、 h_b^* :カラム側面及び底面の熱伝達係数[J/(m²s°C)]を導入している。カラム上面の境界条件設定は、深さ5cmの位置における測定温度を入力値とした。解析においては、流体力学的分散に相当する有効熱伝導率 $W_v k_v^*$ とを未知パラメータとして、カラムに設置された10箇所の温度測定値と計算値との二乗誤差が最小になるようにこれらを同定した。

5-2. 熱分散係数の測定結果

$W_v k_v^*$ 、 h_r 及び h_b^* を探索した値を用いて計算したカラム内部温度の経時変化についての計算値と実測値を比較したものを図5a,bに示した。図でわかるように、両者はほぼ一致している。他の降雨強度についても実測値と計算値がほぼ一致したことから、解析は妥当であったと考えられる。

k_e 、 h_r 及び h_b^* を推定した結果を表3に示す。また、水理学的熱分散係数 D_{hv} ($=k_e^o/(C_w \rho_w)$) を間隙流速 u に対してプロットしたものを図6に示した。水理学的溶質分散係数 D_m に見られた傾向と同様に、同じ u で比べると、豊浦砂より模擬混合ごみの方が D_{hv} が大きくなった。

h_r と h_b^* については推定した値の実験ごとの変動が極めて大きかった。本実験では実験室内でゆるやかに風の循環を行っており、空気が流れている状態では熱伝達係数は 10~250 J/(m²s°C) と大きく幅を持つことから、 h_r と h_b^* が大きく変動したと考えられる。

図6に D_{mv} の測定結果をプロットし、 D_{hv} と D_{mv} を比較すると、両者はほぼ一致した。したがって、本実験で用いた豊浦砂と模擬混合ごみ充填層においては、溶質移動と熱移動における水理学的分散の相似性が成り立っていたと考えられる。

6. まとめ

本研究では、豊浦砂及び模擬混合ごみを用いて水分不飽和状態での溶質・熱移動実験を行い、不飽和水分移動を伴う廃棄物層の熱伝導特性を評価した結果、以下のような結論が得られた。

- 1) 模擬混合ごみ充填層の溶質分散係数 D_m (水理学的分散を示す D_{mv} と近似できる) は、充填層内の水分の間隙速度に対して、豊浦砂と同様に指数的に増加するが、同じ間隙速度で比較すると、豊浦砂よりもほぼ1オーダー大きくなるのがわかった。
- 2) 豊浦砂及び模擬混合ごみの水理学的熱分散係数 D_{hv} は D_{mv} とほぼ一致し、溶質分散と熱分散の相似性が確認できた。

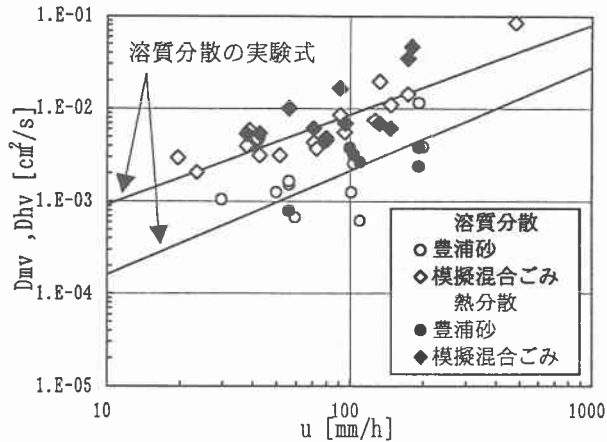


図6 不飽和水分状態の熱分散係数の測定事例