

VII-7

模擬廃棄物充填層内の熱・溶質移動特性

室蘭工業大学 工学部 学生会員 横山 知明
 室蘭工業大学 工学部 正員 吉田 英樹
 北海道大学 工学部 正員 田中 信寿
 室蘭工業大学 工学部 正員 穂積 準

1. はじめに

廃棄物埋立層内では、微生物反応による温度上昇が確認されており、層内における熱移動現象の実験的・理論的な温度上昇メカニズムの解明が必要である。一般に、埋立層内では溶質の分散と呼ばれる現象が発生することが確認されているが¹⁾、この現象は熱においても同様に発生すると考えられている。本研究では砂と人工ごみ充填層に温塩水の降雨を与え、充填層内の溶質及び温度の観測を行い、分散現象の発生の有無について実験的に明らかにした。

2. 実験試料及び実験方法

今回使用した実験試料の構成成分及び物理特性については表1に示した。実験装置は、内径30cm、深さ50cm、厚さ1cmの塩ビ製カラムを充填層とするもので、その概要を図1として、また実験方法の概要を図2として示した。実験は、試料を充填したカラムに降雨として常温の水道水を滴下し、カラムからの水の流出が安定した後に、温塩水(塩分濃度7g/l、温度約35℃)に切り替えた。カラム内部の6カ所に設置した熱電対により温度変化を、また流出水の電気伝導度の測定により塩分濃度の変化を観測した。降雨強度は約10~40mmに変化させて実験を行った。

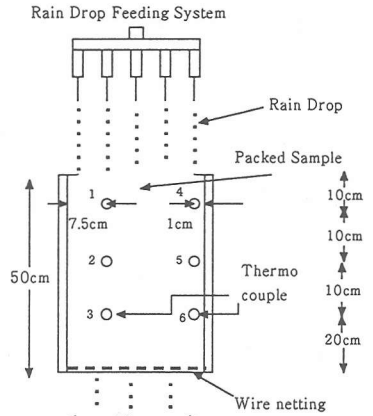


図1 実験装置概要

3. 溶質分散と熱分散

砂や土壌といった多孔質体中での溶質移動現象においては、移流分散と呼ばれる現象が確認されている。これは、溶質分散の際に移流が伴う場合、拡散フラックスが著しく増大する現象であり、多孔質体中の空隙の大小・分岐・合流・流路内中での流速分布などにより、溶質が力学的に輸送されることによるためであると考えられる。このような現象を総合的に表す数を分散係数と呼び、次式で表せるとされている²⁾。

表1 実験試料の構成及び物理特性

成分	真比重	真比熱	熱伝導率	重量組成 (%)	
	kg/l	J/(kgC)	W/(mK)	砂	人工ごみ
空気	0	-	0.02	-	-
水	1	4200	0.6	-	-
廃棄物					
紙類	1.5	1260	0.65	0.0	51.5
繊維	1.3	1310	0.29	0.0	4.9
木類	1.5	1360	0.65	0.0	5.6
プラスチック	1.04	1300	0.12	0.0	15
ビニール類	0.92	2300	0.92	0.0	1.7
スタイロフォーム	0.028	1250	0.037	0.0	0
ゴム類	0.94	1590	0.2	0.0	0.5
鉄	7.86	630	81.2	0.0	4.9
アルミニウム	2.69	880	236	0.0	2.9
ガラス	2.4	1160	0.9	0.0	11
陶磁器	2.4	750	1.5	0.0	0.5
土砂	2.65	800	2.6	0.0	1.7
豊浦砂	2.65	800	6.79	100.0	0

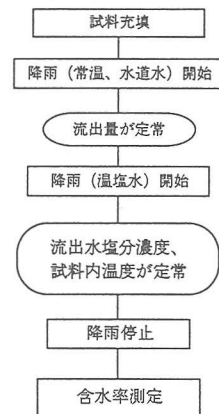


図2 実験方法

Characteristics of Heat and Mass Transport in a packed bed of artificial refuse
 by Satoaki Yokoyama, Hideki Yoshida, Nobutoshi Tanaka, Hitoshi Hozumi

$$D = D_0 + D_m$$

ここで、 D :分散係数[m²/s]、 D_0 :分子拡散係数[m²/s]、 D_m :力学的分散係数[m²/s]である。同様の現象は熱についても起こるとされている。今、充填層内の有効熱伝導率 k_e を見かけ比熱 C 及び見かけ密度 ρ で除して熱拡散係数を求めると、上に記した溶質分散の式と次元が一致することから、もし溶質分散と熱分散に相似性があれば溶質分散実験の結果から熱分散特性を評価することが可能になる。ここで、本実験における流出水の濃度（電気伝導度）及び温度の測定事例として図3を示した。両者の変化は良く似ており、相似性の存在が示されている。

4. 溶質分散特性

4.1 溶質分散解析理論

溶質分散解析には、以下に示すような移流拡散方程式の解析解を用い分散係数を同定した。

$$C = \frac{C_0}{2} \left\{ 1 - \operatorname{erf} \left(\frac{L - vt}{2\sqrt{Dt}} \right) \right\}$$

ここで C_0 : 降雨水塩濃度、 L : カラム長、 v : 降雨浸透速度、 t : 時間、 D : 分散係数である。

4.2 実験結果

図4に砂を、図5に人工ごみを充填した場合の流出水中塩分濃度の実測値と、溶質分散係数を同定して行った解析により求めた計算値を示した。いずれの条件の下でも、実測値と計算値はほぼ一致しており、同定した分散係数の値は適当なものと考えられる。今回の解析では、降雨強度が大きい方が、また砂よりも人工ごみを用いた実験の方が分散係数が大きくなる傾向が見られ、試料充填層内で移流分散現象が発生しているものと考えられる。試料の持つ分散効果は表2に示すように、溶質として用いた塩化ナトリウムの純水中の分子拡散係数が 1.5×10^{-9} [m²/s]程度であることから、砂で $1.5 \sim 3.0 \times 10^{-7}$ 、人工ごみで $3.0 \sim 5.5 \times 10^{-7}$ 程度であると考えられる。

5. 熱分散特性

5.1 熱分散解析理論

今回熱移動解析に使用した試料充填層内の熱移動に関する支配方程式は、(1) 固・液・気層は温度平衡にある (2) 水分フラックスは一定である (3) 水蒸気移動は無視できる (4) 含水率分布は時間的に変化しない (深さ方向には変化する) として導出した非定常の2次元熱収支方程式である。

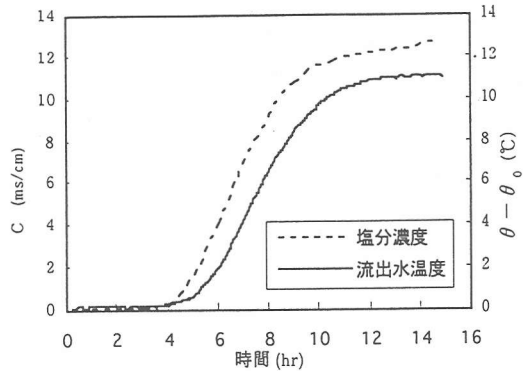


図3 溶質移動・熱移動の相似性

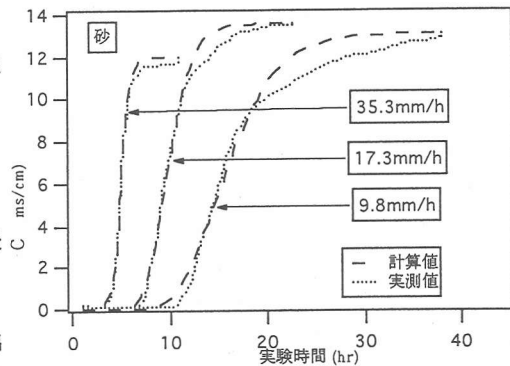


図4 流出水塩分濃度の経時変化 (砂)

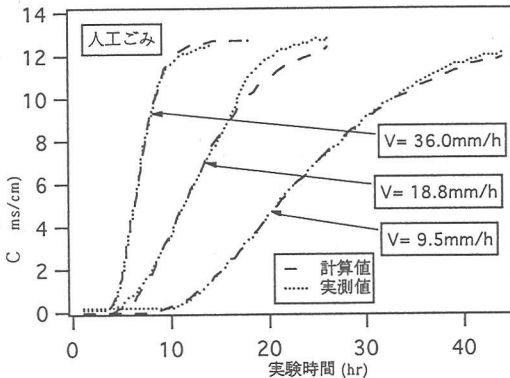


図5 流出水塩分濃度の経時変化 (人工ごみ)

表2 分散係数

	分散係数	分子拡散係数	力学的分散係数
	(m ² /s)	(m ² /s)	(m ² /s)
人工ごみ			
9.5mm/h	$1.46 \cdot 10^7$	$1.50 \cdot 10^9$	$1.45 \cdot 10^7$
18.8mm/h	$1.42 \cdot 10^7$	$1.50 \cdot 10^9$	$1.41 \cdot 10^7$
36.0mm/h	$2.71 \cdot 10^7$	$1.50 \cdot 10^9$	$2.70 \cdot 10^7$
砂			
9.8mm/h	$2.83 \cdot 10^7$	$1.50 \cdot 10^9$	$2.82 \cdot 10^7$
17.3mm/h	$5.40 \cdot 10^7$	$1.50 \cdot 10^9$	$5.39 \cdot 10^7$
35.3mm/h	$3.76 \cdot 10^7$	$1.50 \cdot 10^9$	$3.80 \cdot 10^7$

$$C_p \rho \frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left(k_e \frac{\partial \theta}{\partial z} \right) - C_w \rho_w V \frac{\partial \theta}{\partial z} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(k_e r \frac{\partial \theta}{\partial r} \right)$$

ここで、 k_e ：有効熱伝導率 [J/(ms²C)] or [W/(mk)]、 θ ：温度 (°C)、 C_w ：水の比熱 [kg/m³]、 ρ_w ：水の密度 [J/(kg°C)]、 C ：見かけ比熱 [kg/m³]、 ρ ：見かけ密度 [J/(kg°C)]、 V ：降雨浸透速度 [m/s]、 r ：半径(m)である。境界条件として、 $z = 0\text{cm}$ 、 $z = 50\text{cm}$ 、 $r = 15\text{cm}$ ではカラム周囲との熱伝達を考慮した。例として、 $z = 0\text{cm}$ (カラム上面)の条件を示す。

$$z = 0 \quad -h_z(\theta_{z=0} - \theta_{air}) + C_w \rho_w V(\theta_w - \theta_r) \\ = -k_e \frac{\partial \theta}{\partial z} + C_w \rho_w V(\theta_{z=0} - \theta_r)$$

ここで、 h_z ：カラム上面の熱伝達係数 [J/(m²s°C)]、 θ_w ：降雨水温度[°C]、 θ_{air} ：室温[°C]、 θ_r ：参照温度[°C]である。この方程式を用いた解析に当たっては、熱伝達係数 hr (カラム側面)、 hz_{top} (カラム上面)、 hz_{bottom} (カラム下面)、及び有効熱伝達率 ke の同定が必要である。このうち hr 、 hz_{top} 、 hz_{bottom} については今回の実験条件から推定される値として $hr=5.0$ 、 $hz_{top}=hz_{bottom} = 7.0$ という値が、また ke についてはこれまでの実験から体積含水率に対する近似式が求められている。そのため、まず今回の実験においてこれらの値が有効であると仮定して行った熱移動解析による計算値と実測値との誤差を最適化手法の一つである simplex 法により最小化することによってパラメータ値を求めた。 hr 、 hz_{top} 、 hz_{bottom} に関する計算結果を表3に示した。結果としては、まず今回の実験条件の下で熱伝達係数 hr 、 hz_{top} 、 hz_{bottom} はそれほど支配的でなく、同値に対する支配方程式の感度はそれほど高くないということがある。最適化計算から導かれた hr 、 hz と推定値とは差があるものの、その差が誤差に及ぼす影響は少ない。そのため、推定値を使用することで解析に大きな影響を及ぼすことはないと判断し、熱伝達係数として以下の解析では $hr=5.0$ 、 $h_{z_{top}}=h_{z_{bottom}} = 7.0$ という値を使用した。

次に、 ke の最適化計算の結果を表4に示した。 ke については、今回用いたものと同じ試料を用いた有効熱伝達率の測定事例³⁾ から体積含水率に対する近似式が求められており(砂： $ke=0.743+0.041W$ 、人工ごみ： $ke=0.0393+0.00636W$ 、ここで W ：体積含水率)、この値が今回も有効か検討した。近似式による計算誤差と、最適同定値による誤差は表4に示すとおりだが、計算の過程で得られた値は近似式の係数を用いた場合よりも誤差を小さくする最適値を同定できず、 ke については上述の近似式を適用することとした。

5.2 実験結果

図6に試料が砂の場合の図1に示したカラム内測点2における温度の実測値と計算値を示した。実測値と計算値の傾向はほぼ一致しており、本解析で用いた熱収支式、及び熱伝達係数と有効熱伝達率は妥当なものであったことが証明された。また、試料が砂の場合、降雨強度が35.3mmまで増加しても計算値のずれは極端に大きくなることはなく、充填層

表3 熱伝達係数同定結果

人工ごみ	誤差	hr	hz_t	hz_b
9.5mm/h	0.65	3.88	7.63	2.22
18.8mm/h	0.75	5.19	8.78	4.76
36.0mm/h	1.48	3.60	20.04	5.03
砂				
9.8mm/h	0.50	6.80	2.61	11.25
17.3mm/h	0.34	2.08	19.47	1.52
35.3mm/h	1.27	7.32	2.84	11.87
人工ごみ				
人工ごみ	誤差	hr	hz_t	hz_b
9.5mm/h	0.56	5.00	7.00	7.00
18.8mm/h	0.97	5.00	7.00	7.00
36.0mm/h	1.73	5.00	7.00	7.00
砂				
9.8mm/h	0.51	5.00	7.00	7.00
17.3mm/h	0.55	5.00	7.00	7.00
35.3mm/h	1.15	5.00	7.00	7.00

表4 有効熱伝達率同定結果

人工ごみ	誤差	kr_0	kr_1
9.5mm/h	0.65	0.06	0.02
18.8mm/h	0.75	0.06	0.01
36.0mm/h	1.48	0.04	0.03
砂			
9.8mm/h	0.50	1.19	0.03
17.3mm/h	0.34	1.43	0.09
35.3mm/h	1.27	0.95	0.07
人工ごみ			
人工ごみ	誤差	kr_0	kr_1
9.5mm/h	0.56	0.04	0.01
18.8mm/h	0.97	0.04	0.01
36.0mm/h	1.73	0.04	0.01
砂			
9.8mm/h	0.51	0.74	0.04
17.3mm/h	0.55	0.74	0.04
35.3mm/h	1.15	0.74	0.04

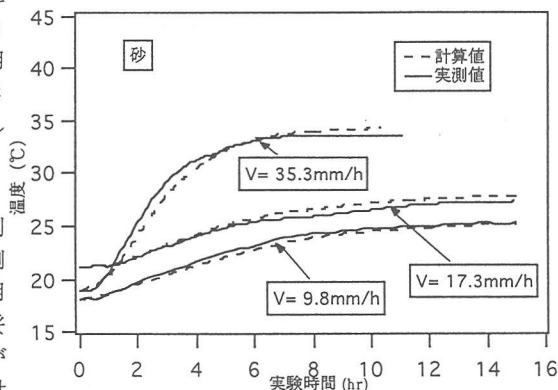


図6 測点2における温度変化

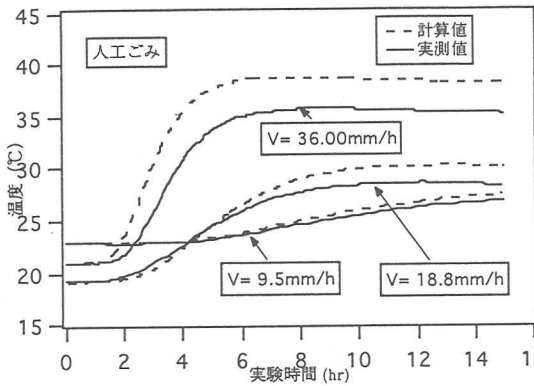


図7 測点2における温度変化

内の固・液・気層の熱平衡は保たれていると考えられる。次に、試料が人工ごみの場合の測点2における温度の実測値と計算値の経時変化を示した。人工ごみの場合、降雨強度が10 mm/hの場合は誤差が小さいものの、降雨強度が大きくなるにつれて実測値より計算値の方が高い値を示すようになり、これ以上最適なパラメータを同定することが困難になった。これは、不均質な人工ごみ層に存在する大きな空隙を温水が急速に流下してしまうことで、充填層が固・液・気層の温度平衡を保てなくなるためではないかと考えられる。

6. 溶質移動と熱移動の相似性

今回行った各実験について計算された熱拡散係数 k_e と、その実験における溶質分散係数に C_p を乗じて求めた仮定の熱拡散係数 k_{ev} を示した。また、熱分散を考慮し ($k_e + k_{ev}$) を用いて行った熱移動解析の結果を、考慮しない場合と比較する形で砂と人工ごみそれぞれについて図8・図9に示した。結果としては砂試料においては、分散を考慮した場合としない場合には大きな違いは見られず、一方人工ごみ試料の場合に分散を考慮した場合は実測値と大きく異なった傾向になり、熱分散を考慮しない方が計算値の誤差は小さくなった。このように、本実験の試料については熱分散

表5 熱拡散係数

砂	k_e [J/(ms°C)]	k_{ev} [J/(ms°C)]	$k_e + k_{ev}$
9.8mm/h	2.096	0.372	2.468
17.3mm/h	2.162	0.371	2.533
35.3mm/h	2.170	0.718	2.888
人工ごみ			
9.5mm/h	0.348	0.584	0.933
18.8mm/h	0.348	1.381	1.728
36.0mm/h	0.352	0.925	1.277

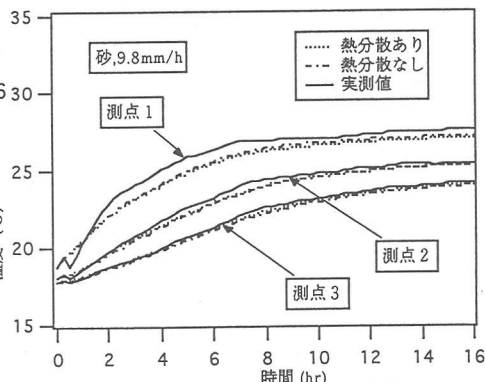


図8 熱分散の有無による変化

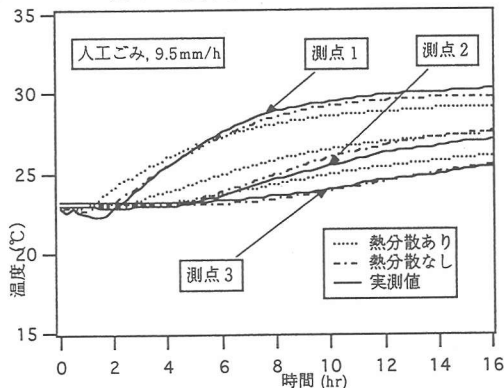


図9 熱分散の有無による変化

を考慮する必要は少ないと思われる。そのため、本実験で用いた充填試料については砂の場合は熱分散の程度はきわめて小さく、また人工ごみの場合は熱分散が起こっていなかったと推定される。結果として、本実験で用いた試料に関しては溶質分散と熱分散の間には必ずしも相似則は成り立たないことが確認できた。

7. まとめ

1) 移流分散特性は砂の場合 2.0×10^7 [m²/s]程度、人工ごみでは 4.0×10^7 程度と、人工ごみの方が大きくなった。2) 熱分散特性は、移流分散より熱拡散が支配的だった。3) 本実験で用いた人工ごみ試料では、溶質分散と熱分散の間に相似則は成り立たなかった。

参考文献

- 1) 田中ら：廃棄物埋立層内の降雨不飽和浸透流れによる非反応性溶質輸送（混合）現象への拡散モデルや2成分モデルの適用性、廃棄物学会論文誌、第5巻第1号、pp.1-10(1994)
- 2) 合田健編：水質環境科学、丸善、p.393(1985)
- 3) 吉田ら：廃棄物充填層の有効熱伝導率に関する研究、廃棄物学会論文誌、第3巻第2号、pp.1-17(1992)