

II-531

不飽和水分流れを伴う廃棄物充填層の熱移動特性に関する研究

室蘭工業大学工学部 吉田英樹
北海道大学工学部 田中信寿
室蘭工業大学工学部 穂積 準

1. はじめに 都市廃棄物埋立層内の熱・物質同時移動現象としては、埋立層表層の水蒸気移動を伴う水分移動や埋立層内部の微生物反応による温度上昇などがあり、これらのメカニズムの解明においてはいずれも廃棄物層の熱移動特性を正確に把握する必要がある。筆者らは水分流れのない廃棄物充填層の有効熱伝導率の実験的・理論的研究を行っているが¹⁾、本研究では不飽和水分流れを伴う廃棄物層内の熱移動に関する実験を行い、実験方法ならびに筆者らが提案している廃棄物層内の支配方程式を適用した際の妥当性を検討するとともに、水分流れによる熱移動特性への影響について考察した。

2. 実験試料及び実験方法 実験試料としては、標準物質として豊浦砂（Sand、平均径0.17mm、石英分が多いもの）と混合ごみを想定して材料を3cm四方に切断して作成した人工ごみ(Refuse)の2種類を用いた。構成成分及び充填層の物理特性を表1に示した。図1に実験装置を示した。内径30cm、長さ50cmの塩化ビニール管に試料を充填し、中心には高温水循環用パイプ（約35℃）を設置する。カラム底部は金網で試料を支えている。充填に際しては、水になじませた試料を水で飽和させながら充填していき、充填後は放置して水を底部から流出させて含水率分布を安定させる。充填の際、図中にあるようにA1～B3に温度測定用の熱電対を埋め込む（B1,B2,B3は半径7.5cmの位置に設定した）。

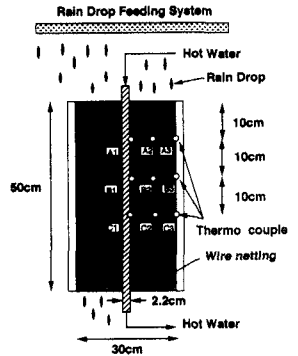


図1 実験装置図

熱移動実験は降雨を与えた場合と与えない場合で行った。1) 降雨を与える場合（実験1）～降雨装置により約1日降雨を継続し、カラム底部からの流出量が一定となった後、パイプ内に高温水を流し、熱移動実験を開始する。降雨強度は砂で30.4mm/h、人工ごみで25.2mm/h（降雨装置の機能上の最低値であるため、降雨強度はばらつき、同じにならなかった）とした。2) 降雨を与えない場合（実験2）～実験1終了後にカラムを放熱させ、温度が安定した後に再び降雨を継続し、流出量が一定になったら降雨を停止し、含水率分布が安定するまで1～2日放置する。パイプ内に高温水を流し、熱移動実験を開始する。実験終了後、試料を取り出し、含水率分布を測定する。

3. 降雨前後の含水率分布 砂と人工ごみについて、実験終了後に測定した体積含水率分布を図3に示した。プロットが実測値で、実線は多項式による近似曲線である。この含水率分布を実験1での充填層の熱移動解析に用いた。一方、実験2では降雨により含水率が増加していたものと思われる。この含水率の増加分は、実験1終了時に降雨を停止した後、カラム内から流出する水量を測定して求めた。これを実験1の含水率分布に加えて、実験2の含水率分布とした。これは図2において破線で示した。

4. 熱移動実験結果および考察

4. 1 熱移動解析 筆者らが提案している廃棄物層内の熱移動に関する支配方程式²⁾は、1) 固・液・気

表1 廃棄物充填層の構成成分及び物性

成分	密度 [kg/m ³]	比熱 [J/(kg·°C)]	熱伝導率 [W/(m·K)]	重量割合 [%]	
空気	-	1006	0.02	砂	人工ごみ
水	1000	4200	0.60	14.7	58.6
廃棄物					
紙類	1500	1260	0.65	0.0	21.1
繊維	1300	1310	0.29	0.0	2.1
草木	900	1590	0.20	0.0	2.4
硬プラスチック	1500	1360	0.65	0.0	6.2
軟プラスチック	1000	1300	0.12	0.0	0.7
ゴム	900	2300	0.92	0.0	0.2
鉄	7900	630	81.20	0.0	2.0
アルミニウム	2690	880	236.00	0.0	1.2
ガラス	2400	1160	0.90	0.0	4.6
陶器	2400	750	1.50	0.0	0.2
土砂	2650	800	2.60	100.0	0.7
全体 (砂)	1780	1300	—	—	—
全体 (人工ごみ)	630	2830	—	—	—

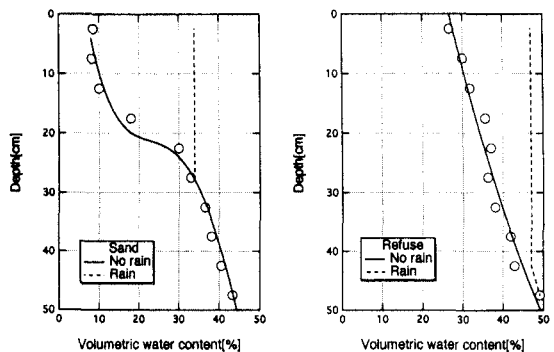


図2 降雨時及び降雨停止時の体積含水率分布

相は温度平衡にある、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) 含水率分布は大きく変化しないなどとして導出した非定常の1次元熱収支方程式である。本研究では実験により約1日後には砂及び人工ごみ充填層内温度が定常になったことから、深さ、半径方向の2次元熱移動問題の定常解析を行った。熱収支方程式は以下のようになる。

$$k_e \frac{\partial^2 \theta}{\partial z^2} - C_w \rho_w V \frac{\partial \theta}{\partial z} + \frac{k_e}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial \theta}{\partial r} \right) = 0 \quad (1)$$

ここで、 k_e :有効熱伝導率[J/(ms°C)]or[W/(mK)]、 θ :温度[°C]、 z :深さ[m]、 C_w :水の比熱[kg/m³]、 ρ_w :水の密度[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、A1~C3の温度測定データを用いて曲線近似することにより求めた $z=10, 30\text{cm}$ での半径方向の温度分布及び $r=1.1\text{cm}$ （パイプ表面）、 15cm （カラム内壁）での深さ方向の温度分布をそれぞれ用いた。式(1)を解くことにより温度測定点B2での温度が求められ、実測値と比較して解析の妥当性を検討した。

不飽和水分状態での熱移動解析を行う上では、深さごとに含水率変化することによる有効熱伝導率 k_e の変化を考慮しなければならない。ここで、 k_e と体積含水率の関係については、筆者らが行った実験結果¹⁾を用いた（いくつか実験結果を追加した）。その結果を図3に示した。ここで、砂では k_e の体積含水率に対する増加割合は変化しているのに対し、人工ごみでは増加率が一定であることがわかる。焼却灰や不燃ごみのように粒子性があまりない場合は後者の様な変化になることがわかっている。

4. 2 実験及び解析結果 図4に人工ごみの場合の実験結果を示した。不均質な人工ごみ充填層でもなめらかな温度変化を示している。

$r=7.5\text{cm}$ の位置の温度A2,B2,C2に注目すると、約6時間経過後には定常温度に達している。また、降雨フラックスの移流効果（顕熱フラックス）により深い位置の温度B2,C2の温度がA2に比べ顕著に上昇していることがわかる。カラム内壁の温度A1,B1,C1は外気温変動の影響を受けており、今後実験室内温度の安定化を図る必要がある。図4では6～8時間の平均温度を定常温度として採用し、解析を行った。式(1)による解析結果及び実測値を表2に示した。計算値と実測値の一致は、人工ごみについては良いが、砂については誤差が大きくなっている。砂の場合、有効熱伝導率の体積含水率に対する変化が人工ごみより大きいいため、誤差が大きくなったものと考えられる。今後は砂に関する実験を多く行い、より精度のよい推定を行えるようにする必要がある。

しかし、降雨がある場合とない場合での温度差のオーダーはほぼ同じであることから、本研究で用いたモデルは妥当であったと思われる。これにより、降雨速度が20～30mm/h程度の降雨フラックスでは、固・液・気相は温度平衡にあるという仮定が成り立つものと言える。また、水蒸気移動による影響や熱移動特性における水分移動による分散効果（溶質移動における分散にあたるようなもの）は今回行った実験条件では顕著にはみられなかった。

5. まとめ 本研究により以下のような知見が得られた。

- 1) 不飽和水分流れを伴う熱移動実験の1方法を提案した。
- 2) 降雨速度が20～30mm/hの条件下では、移流による熱移動特性への影響が大きいことがわかった。
- 3) 筆者らが提案する廃棄物層内の熱移動に関する支配方程式の妥当性が確認された。

今後、焼却灰や不燃ごみのような試料を用いることや、降雨速度を大きく変化させて、より詳細にわたる検討を行う予定である。

引用文献 1)吉田、田中、穂積：廃棄物充填層の有効熱伝導率に関する研究、廃棄物学会論文集、第3巻第2号、pp.1-17(1992) 2)吉田、田中、神山、穂積：廃棄物物理層内の温度分布に関する理論的研究、衛生工学研究論文集、第25巻、pp.29-35(1989)

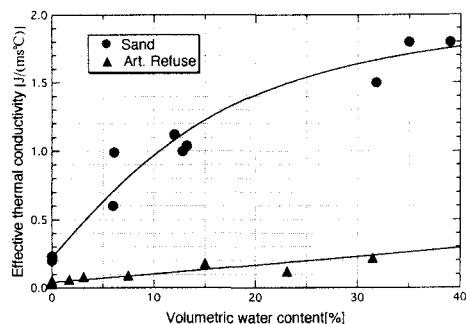


図3 実験充填層の有効熱伝導率と体積含水率の関係

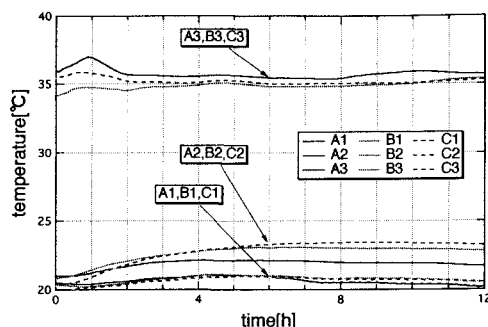


図4 温度測定結果（人工ごみ・降雨あり）

表2 温度測定点B2における計算値と実測値の比較

		降雨あり	降雨なし
砂	実測値	27.3	29.4
	計算値	26.1	27.9
人工ごみ	実測値	23.0	26.9
	計算値	22.9	26.6