

II-625

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(第2報)

室蘭工業大学 正員 吉田英樹
室蘭工業大学 学生員 穂苅信明
北海道大学 正員 田中信寿
室蘭工業大学 正員 穂積 準

1. はじめに 都市廃棄物埋立層内では、微生物反応による発熱に伴う温度上昇が確認されているが、埋立層内の熱移動現象は十分に解明されていない。筆者らは水分流れのない廃棄物充填層内の有効熱伝導率の実験的・理論的研究を行っているが¹⁾、第1報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方法を確立し、砂と人工ごみ(混合ごみ)充填層の定常状態での熱移動特性について検討した²⁾。本報では廃棄物充填層のさらに詳細な熱移動特性を正確に把握するために、不燃ごみ、焼却灰を加えた4種類の試料について降雨条件を変えて実験を行い、非定常状態での熱移動特性に対する水分や成分の影響を明らかにした。

2. 実験試料及び実験方法

本実験で用いた実験試料の構成成分及び充填層の物理特性を表1に示す。実験装置及び実験方法は第1報と同様である。図1に実験装置を示した。試料を充填したカラムの中心に高温水循環用パイプ(温水約40℃)を設置し、半径方向に温度差を与えた。温度測定用の熱電対はカラム内に設置し、半径方向の中心に当たる4点に設置した。実験はまず降雨を与える場合で行い、降雨強度は10mm/h~80mm/hの範囲で設定し、定常な不飽和水分流れが達成された後に熱移動実験を開始した。次に、降雨を停止し、温度及び含水率分布が安定した後、降雨を与えない実験を行った。

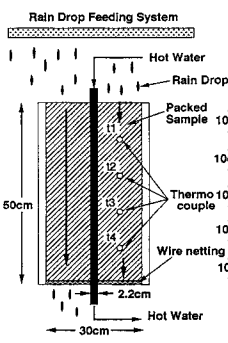


図1 実験装置図

表1 充填試料の構成成分および物理特性

成分	密度 kg/l	比熱 [J/(kg·°C)]	熱伝導率 [W/(m·K)]	重量割合[%]			
空気	0	0.02		砂	人工ごみ	不燃ごみ	焼却灰
水	1.00	4200	0.60	14.7	59.2	15.7	21.0
廃棄物				85.3	40.8	84.3	79.0
紙類	1.50	1260	0.65	0.0	21.0	0.0	0.0
繊維	1.30	1310	0.29	0.0	2.0	0.0	0.0
木屑	1.50	1360	0.65	0.0	2.3	16.9	0.0
プラスチック	1.04	1300	0.12	0.0	6.1	2.8	0.0
ビニール類	0.92	2300	0.92	0.0	0.7	0.1	0.0
スタイロフォーム	0.03	1250	0.04	0.0	0.0	0.3	0.0
ゴム類	0.94	1590	0.20	0.0	0.2	0.0	0.0
熱	7.86	630	81.20	0.0	2.0	0.3	11.1
アルミニウム	2.69	880	236.00	0.0	1.2	0.0	0.0
ガラス	2.40	1160	0.90	0.0	4.5	61.6	7.0
陶磁器	2.40	750	1.50	0.0	0.2	2.2	0.2
土砂	2.65	800	2.60	0.0	0.7	0.0	0.9
砂	2.65	800	6.79	85.3	0.0	0.0	0.0
灰	2.23	800	0.55	0.0	0.0	0.0	59.7

3. 充填層内含水率分布 各試料のすべての実験終了後の体積含水率分布(降雨を与えない場合の含水率分布)を図2に示した(プロット点が実測値、近似曲線が実線)。降雨を与える場合では実験終了後に降雨を停止し、含水率が安定するまでカラムから流出した水量を測定して求め、これを降雨を与えない場合の含水率分布に加算して、降雨を与える場合の含水率分布を推定した。これは図1において波線で示した。この結果、本実験試料については砂に比して人工ごみは大量に水分を保持しており、含水率分布の上下の差がやや小さい。不燃ごみ、焼却灰についても砂に比べ上下に含水率分布の差が比較的小さい。

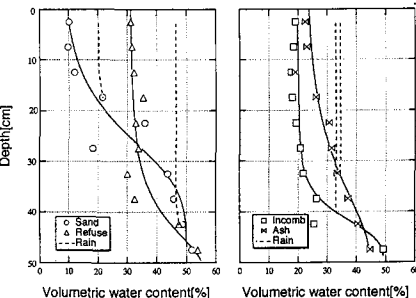


図2 体積含水率分布

4. 実験結果及び考察

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は、1) 固・液・気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(本実験の対象温度範囲が40℃以下に限り)、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2次元熱収支方程式である。

$$C\rho\frac{\partial\theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z}\left(k_e\frac{\partial\theta}{\partial z}\right) - C_w\rho_wV\frac{\partial\theta}{\partial z} + \frac{1}{r}\frac{\partial}{\partial r}\left(k_e r\frac{\partial\theta}{\partial r}\right) \quad (1)$$

ここで、 k_e :有効熱伝導率[J/(ms·°C)]or[W/(m·K)]、 θ :温度[°C]、 z 、 z :深さ[m]、 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、 $r=1.1$ cm(パイプ表面)で一定値(約40℃)、 $z=0$ cm(カラム上面)、50cm(カラム底面)、 $r=15$ cm(カラム内壁)では、カラム周囲との熱伝達を考慮した。例として、 $z=0$ cm(カラム上面)の条件を示す。

$$z=0 \quad -k_e\frac{\partial\theta}{\partial z} = -h_c(\theta_z=0 - \theta_{air}) \quad (2)$$

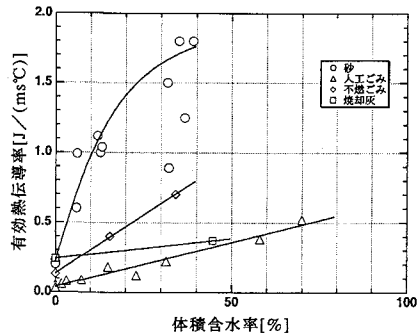


図3 有効熱伝導率と体積含水率との関係

ここで、 h_z [$J/(m^2 \cdot s \cdot ^\circ C)$]は熱伝達係数であり、本実験では $h_z = 1.0 [J/(m^2 \cdot s \cdot ^\circ C)]$ が妥当な条件であった。

また、不飽和水分状態での熱移動解析を行う上では、深さごとに含水率が変化することによる k_e 、 C 、 ρ の変化を考慮しなければならない。 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²⁾を用いた。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指数関数的に変化しているのに対し、人工ごみ、不燃ごみ、焼却灰のいずれの場合についても増加率が一定であることがわかる。一方、 C 、 ρ については含水率の関数として与えた。

4. 2 実験及び解析結果 図4に降雨を与えない場合の各試料の t における温度の経時変化を実線で示した。また、式(1)を適用して解析した結果を点線で示したが、各試料とも実測値と一致がよいので本研究で提案している熱収支方程式は妥当であったと思われる。砂について注目すると最も高い温度変化となっている。次に焼却灰、不燃ごみがほぼ同じ温度変化を示し、人工ごみは他の3試料と比較すると緩やかな温度変化となっていることがわかる。これは図3で示したように種々の体積含水率に対する k_e が、砂が最も高く、人工ごみは最も低くなっており、不燃ごみや焼却灰はその中間にあるという特性に準じたものである。次に降雨を与える場合の温度の経時変化について砂を例として図5に示した。50.2mm/hについては計算値と実測値の一致がよいが、82.6mm/hでは計算値が実測値より高くなっていることがわかる。これは支配方程式の前提条件である固・液相の温度平衡が崩れたためと思われる。しかし、50mm/hまではどの実験でも計算値と実測値の一致がよかったことから、降雨の影響を考慮した支配方程式の妥当性を確認できた。次に種々の条件下での砂の温度変化を図6に示す(12における変化)。参考として乾燥状態(含水率0%)の場合も示した。乾燥状態に比べ、降雨を与えない場合では k_e が非常に高いので温度変化も大きい。これに対して降雨を与える場合は定常に達するまでの時間は最も早い、定常温度は低くなっている。これは、実験初期は降雨の浸透による含水率の増加により熱伝導性が高くなり、温度上昇が速やかになるが、しだいに降雨による熱損失の影響を受け、最終的に定常温度は低くなったと思われる。最後に図6の定常状態における各試料内部の等温線のシミュレーション結果を図7に示す。乾燥状態では局所的な高温領域(パイプ表面)があっても、熱が伝わりにくいため周辺領域の温度は上昇しにくい。一方、水分が混入すると熱伝導性の増加により、広い範囲で高温領域が発生する。また、降雨が浸透する場合、熱損失が大きく、熱伝導性は増加するものの周辺領域の温度上昇は非常に低くなる。

5. まとめ 本研究により、以下のような結論が得られた。

1) 実験により降雨を与えない場合の実験試料充填層内の温度変化はそれぞれの有効熱伝導率と体積含水率の関係に準じていた(砂最も高く、人工ごみは最も低い、不燃ごみや焼却灰はその中間)。

2) 筆者らが提案する充填層内の含水率分布を考慮した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できた。

3) 降雨を与える場合では与えない場合に比べ試料内温度が非常に低くなり、影響が大きいことが実験的・理論的に確認された。本文では示さなかったが、本実験で用いた規模の装置ではカラム周囲温度の影響が大きく、実際の埋立地の温度環境を模擬したものとする場合は断熱性に特に留意する必要があることが示唆された。

参考文献

- 1) 吉田ら：廃棄物充填層の有効熱伝導率に関する研究、廃棄物学会論文集、第3巻第2号、pp.1-17 (1992)
- 2) 吉田ら：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、土木学会第48回年次学術講演会第2部、pp.1158-1159(1993)

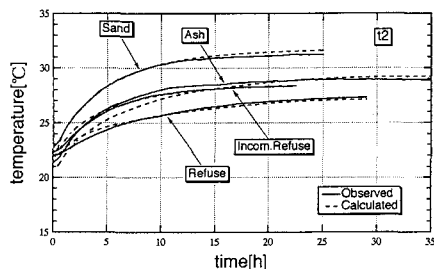


図4 降雨を与えない条件下の熱移動特性の違い

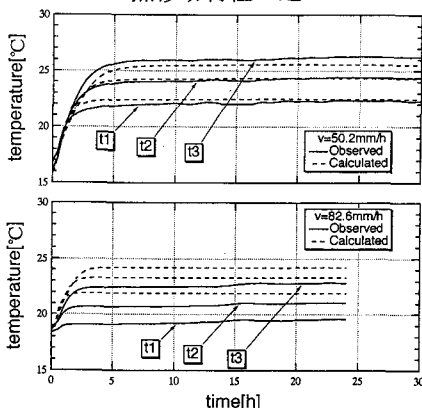


図5 降雨条件下の充填層内温度実測値と計算値の比較

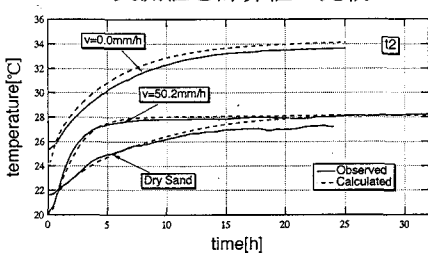


図6 降雨の熱移動特性への影響

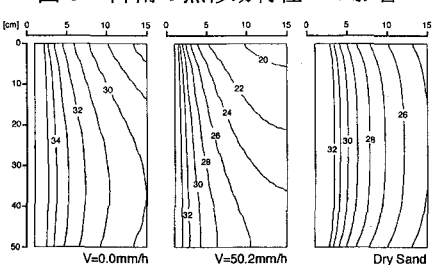


図7 等温線のシミュレーション