

II-12

廃棄物充填層内の不飽和水分・熱移動現象  
に関する実験的研究

室蘭工業大学 正員 吉田英樹  
 北海道大学 正員 田中信寿  
 室蘭工業大学 正員 穂積 準  
 室蘭工業大学 学生員 藤田尚也

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、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はすでに報告した<sup>1)</sup>。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、非定常状態での熱移動特性について検討した。

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既報<sup>1)</sup>と同様である。図1に実験装置、図2に実験方法の概要を示した。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35℃)を設置し、充填層内部で水蒸気移動が生じない範囲で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。実験は降雨を与える場合と降雨を与えない場合を同一充填試料について行った。降雨強度は8~50mm/hrの範囲にしたが、これは通常の降雨としては日本の日最大降雨量に匹敵する。特に、1日程度継続する激しい降雨時の廃棄物埋立地の熱移動特性を調べることを目的とした。

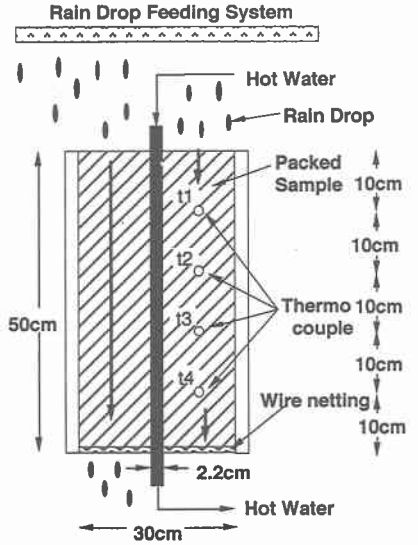


図1 実験装置図

表1 実験試料の組成及び物理特性

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

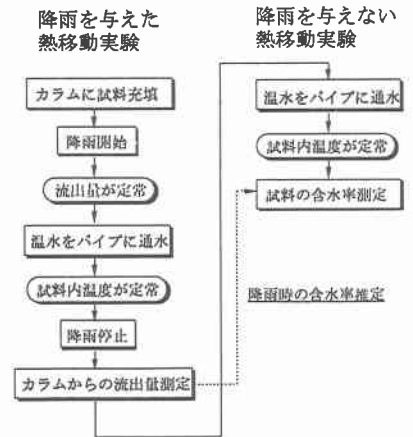


図2 実験方法

Experimental study on unsaturated water and heat transfer in packed beds of wastes  
by Hideki YOSHIDA, Nobutoshi TANAKA, Hitoshi HOZUMI and Naoya FUJITA

### 3. 実験結果及び考察

**3.1 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) 含水率分布は時間的に大きく変化しない(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。

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

ここで、 $k_e$ :有効熱伝導率 [J/(ms<sup>2</sup>C)] or [W/(mK)]、 $\theta$ :温度 [°C]、 $z$ :深さ [m]、 $C_w$ :水の比熱 [kg/m<sup>3</sup>]、 $\rho_w$ :水の密度 [J/(kg°C)]、 $C$ :見かけ比熱 [kg/m<sup>3</sup>]、 $\rho$ :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36°C)、 $z=0$ 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。

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

ここで、 $h_z$  [J/(m<sup>2</sup>s°C)]は熱伝達係数であり、本実験では $h_z=10.0$ 、 $h_r=4.0$  [J/(m<sup>2</sup>s°C)]が全ての実験結果を精度良く再現する妥当な条件であった。

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 $k_e$ 、 $C$ 、 $\rho$ の変化を考慮しなければならない。本実験における体積含水率分布の例を図3に示した。砂が上下に大きな分布を持つのに対し、人工ごみは分布が小さいが保水力が大きいので平均含水率が高い。近似曲線を実線で示したが、降雨時の体積含水率の増加分の推定を行った結果、破線に示したようであると推定された。この水分増加は降雨強度とともに大きくなった。

$k_e$ 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<sup>2)</sup>を用いた。 $k_e$ と体積含水率の関係を図4に示した。含水率分布はここで、砂では $k_e$ の体積含水率に対する増加割合は体積含水率が0~5%では指数関数的に変化しているが5%を越えるとはほぼ直線的に増加している。また、人工ごみの場合については全ての含水率で増加率が一定である。砂についての実験は完全乾燥状態を除いてすべて体積含水率が5%以上の範囲で実験を行っているので図中の近似曲線を用いた(完全乾燥状態では $k_e=0.2$  [J/(ms<sup>2</sup>C)]とした)。人工ごみについても近似曲線を用いた。 $C$ 、 $\rho$ については含水率の関数として与えた。

**3.2 実験及び解析結果** 図5に砂を充填した場合の図1の測点t1における温度の計算値(破線)と実測値(実線)を示した。充填条件は乾燥(Dry)、湿潤(Wet、降雨を与えない実験)、降雨強度が8~50mm/hrの場合である。いずれの条件でも計算値と実測値と一致がよいので本研究で提案している仮定及び熱収支方程式は妥当であったと思われる。特に、降雨強度が50mm/hrまで増加しても砂充填層内の固液気相の温度平衡は保たれているようである。実験実施時には、実験室内の気温及び降雨温度は制御されていなかったため、初期温度及び定常状態での温度が変動しており、充填条件及び降雨強度による差の比較は難しい。そこで、図6に充填条件は実験結果を用い、温度環境(実験室内気温 $\theta_{air}$ 、降雨温度 $\theta_r$ 、初期温度 $\theta_0$ など)を同一にして計算を行った結果を示した。ここで、 $\theta_{air}=\theta_r=\theta_0=20$ °Cとした。乾燥状態では充填層内有効熱伝導率が最も低くなるため、温度上昇は最も低いが、湿潤状態では図4に示したように急激に $k_e$ が増加するため温度上昇が著しく大きくなる。一方、降雨を与えた場合は熱がカラムから流下水とともに奪われるため温度が低下する。一方、人工ごみについて測点t1における温度の計算値と実測値を図7に示した。湿潤状態と降雨強度9mm/hrでは計算値と実測値の一致は良いが、20mm/hrでは計算値がかなり大きな値

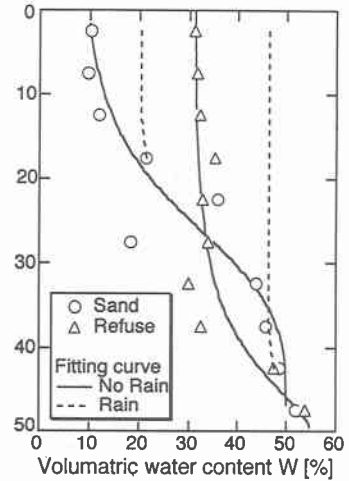


図3 体積含水率分布

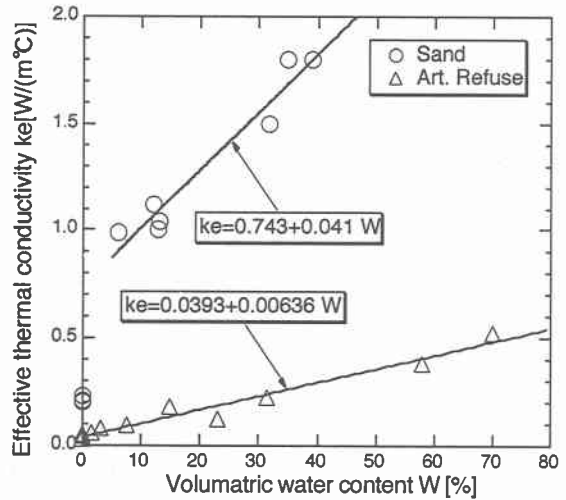


図4 有効熱伝導率と体積含水率の関係

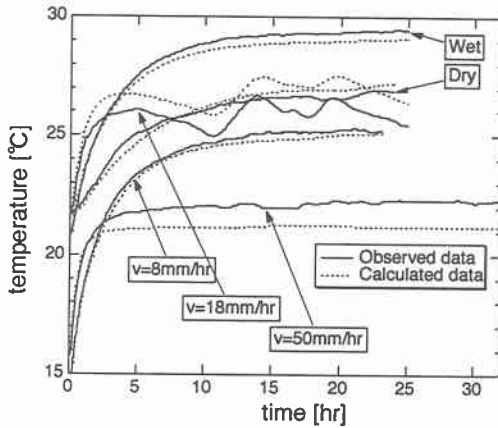


図5 測点t1の温度計算値と実測値の比較(砂)

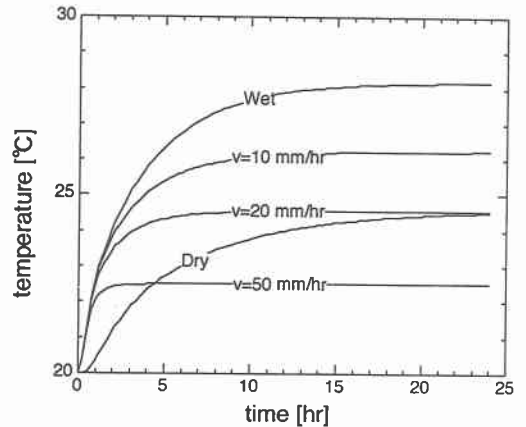


図6 測点t1の温度計算値(砂)

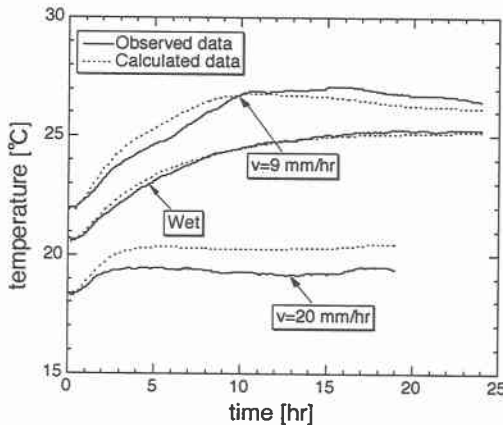


図7 測点t1の温度計算値と実測値の比較(人工ごみ)

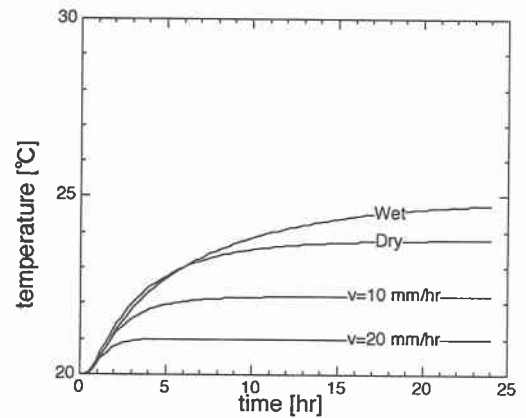


図8 測点t1の温度計算値(人工ごみ)

を与えている。これ以降の降雨強度では内部温度の変動が著しく大きくなり、解析が困難であった。これは、不均質でかつ大きな空隙を流下水が流れるため、固液気相の温度平衡が崩れ始めたことによるものと考えられる。図8に温度環境を同一にして計算を行った結果を示す。ここでは、充填が実験的に困難なため実施できなかった乾燥状態の計算例も示している。砂と比較すると温度上昇が小さいことがわかる。これは図4で示した体積含水率に対する $k_e$ が、砂に比して著しく低いことによる。人工ごみの場合、比較的乾燥状態と湿潤状態での温度上昇はあまり差がないが、これは乾燥状態と湿潤状態の $k_e$ があまり差がないことによる。降雨を与えた場合は温度が低下し、20mm/hを超えるとほとんど降雨温度に等しい温度にまで低下する。充填層の有効熱伝導率が小さいため、砂に比べて降雨による影響が非常に大きくなっていることがわかる。

**3.3 熱分散現象について** 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(あるいは分散)と呼ばれる現象がある<sup>3)</sup>。これは溶質移動解析における拡散フラックスが移流を伴う場合、著しく増大する現象である。これは多孔質体中の力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)が生じるために起こる。一般にこれらを総合して分散係数と呼ばれ、以下のような式で表せられるとされている。

$$D = D_0 + D_m = D_0 + \alpha V^{\beta} \quad (3)$$

ここで、 $D$ : 分散係数 [ $\text{cm}^2/\text{s}$ ]、 $D_0$ : 分子拡散係数 [ $\text{cm}^2/\text{s}$ ]、 $D_m$ : 力学的分散係数 [ $\text{cm}^2/\text{s}$ ]、 $\alpha$ 、 $\beta$ : 定数(有次元)である。このような分散現象は熱においても同様起こるとされている。熱拡散係数 $D_t (=k_e / (C\rho))$ として考えれば、次元は一致することから、溶質分散での研究例から熱分散を評価することが可能である<sup>4)</sup>。森澤ら<sup>5)</sup>、田中ら<sup>6)</sup>は不飽和水分状態の砂について、 $\alpha=0.66\sim 0.80$ 、 $\beta=1$ 、田中らは混合ごみ(本研究の人工ごみに相当)について $\alpha=2.44$

$\times 10^7$ ,  $\beta=2.5$ を実験により求めている。

図9にこれらの研究例を実線及び破線で図示した。砂に比して、混合ごみが降雨強度が増加すると著しく分散係数が增大していることがわかる。これは、混合ごみ充填層の空隙が砂のそれと大きく異なり、特に内部での水分流下速度の分布が大きいため（大間隙中の早い流れと小間隙中の遅い流れの差が大きい）であると推定される。また、本研究での実験で得られた熱拡散係数を図中に示した。

図において、プロット点が実験式より上の領域にある場合、熱分散の影響はほぼないとしてよい（この場合砂がこれに相当）。しかし、人工ごみの場合は実験式は実験値を大きく上回っており、熱分散の著しい影響が予想されるが、実験で求められた熱拡散係数は大きく変化しなかった。

図10には混合ごみに関する田中らの実験式から求められる分散係数を本研究の人工ごみの場合に熱拡散係数として流れ方向（上下方向）のみ考慮して計算したものである（半径方向には考慮しない）。ここで、降雨強度は20mm/hrとし、充填層内の平均体積含水率（約50%）から求めた $k_e=0.36W/(m^{\circ}C)$ は分散を考慮すると $34W/(m^{\circ}C)$ とほぼ100倍となった。図からわかるように分散を考慮した場合、充填層内に深さごとの温度差がほとんどなくなっている。実験ではいずれの降雨条件でも（最大50mm/hr）このような分散の影響は見られていない。これは溶質分散と熱分散に完全な相似則が成り立たないことや田中らが用いた実験試料と本研究のものとの違いなどが考えられるが詳細は不明であり、今後さらに検討が必要である。いずれにしても、本研究で行った実験条件においては熱分散は生じていなかったものと考えられる。

## 5. まとめ

本研究により、以下のような結論が得られた。

- 1) 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。
- 2) 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。また、砂に比して人工ごみへの影響が非常に大きい。
- 3) 不飽和水分状態での溶質分散の研究例を適用して熱分散を評価したが、本実験条件下では熱分散は起こっていない。

## 引用文献

- 1) 吉田ら：不飽和水分流れを伴うごみ充填層の熱移動特性、平成5年度土木学会北海道支部論文報告集、pp.688-691 (1993)
- 2) 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)
- 3) 合田健編：水質環境科学、丸善、p.393 (1985)
- 4) 藤縄克之：流動地下水中の熱移動機構について、農業土木学会誌、第56巻第8号、pp.777-784 (1992)
- 5) 森澤ら：多成分流れモデルによる通気層内物質移動の解明、衛生工学研究論文集、第22巻、pp.9-21 (1986)
- 6) 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)

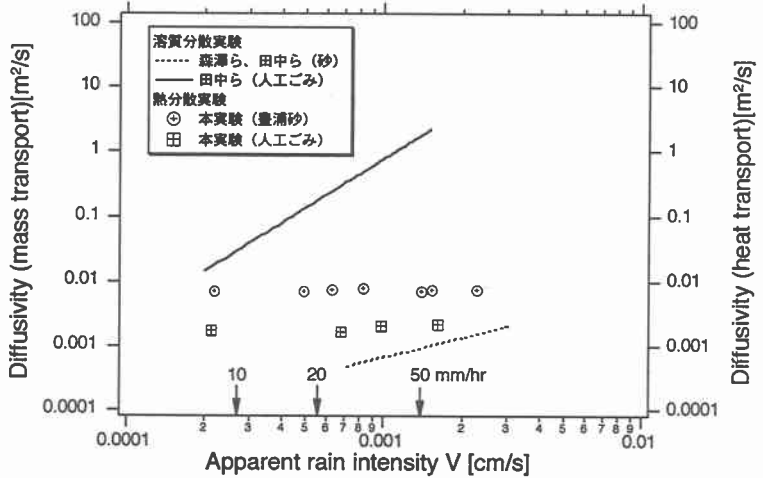


図9 分散係数及び熱拡散係数の実測値

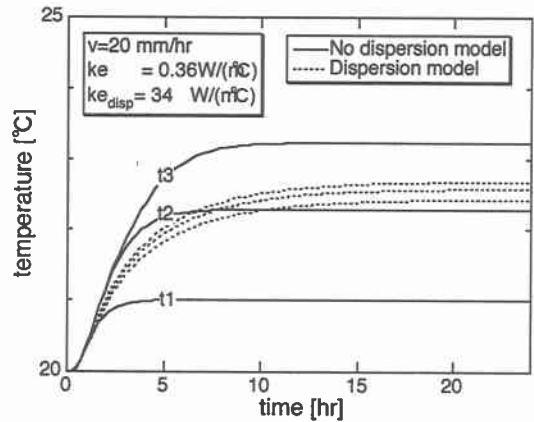


図10 熱分散を考慮した場合の計算例