

II-458 ごみ充填層の熱伝導特性に関する実験的研究

室蘭工業大学工学部 正 吉田英樹
北海道大学工学部 正 田中信寿
北海道大学工学部 正 神山桂一
室蘭工業大学工学部 正 穂積 準

1 研究目的

廃棄物中の有機物の分解に伴い発生する発酵熱により埋立層内温度が上昇する現象がいくつかの都市廃棄物埋立処分場で観測されており^{1),2)}、埋立層内温度を埋立地の安定化指標として用いる試みもなされている¹⁾。この現象に関して、筆者らはすでに埋立層内の温度分布特性を理論的に解析するためのモデルを提案している³⁾。本研究は廃棄物の熱伝導率に注目し、不均質な物質から構成されている充填層の熱伝導率を実験により測定するための手法を確立し、また熱伝導率を推定するための理論モデルを提案することを目的としている。

2 実験試料及び測定理論

2-1 実験試料及び実験手法

実験試料は、砂、焼却灰、人工ごみの3種を用いた。砂は石英分が多く、平均粒径は0.17mmである。焼却灰はA市焼却処理施設（流動床炉120トン／日）で採取した焼却残さ中の大きさが9mm以下のもので、灰分は含まれていない。人工ごみは東京都ごみ組成データ⁴⁾を基に、紙、プラスチックなどを30mm角に切断し、混合ごみを想定して調整したものである。試料の成分及び物理特性⁵⁾を表1に示した。

実験装置を図1に示した。実験手順は次の通りである。まず、試料をアルミ製円筒カラムに充填し、上下に高・低温水槽を設置して、充填層に一定の温度勾配を与える。試料充填の際に埋め込んだ熱電対（図中A～H）によって内部温度の経時変化を測定し、測定データを解析して熱伝導率を求める。

2-2 解析理論

実験カラム内の熱伝導方程式は以下のようになる。

$$C\rho\frac{\partial\theta}{\partial t}=k\frac{\partial^2\theta}{\partial z^2}+\frac{k}{r}\frac{\partial}{\partial r}\left(r\frac{\partial\theta}{\partial r}\right) \quad (1)$$

（ θ ：温度[°C]、 t ：時間[s]、 z ：深さ方向距離[m]、 r ：半径方向距離[m]、 C ：比熱[J/(kg・°C)]、 ρ ：密度[kg/m³]、 k ：熱伝導率[J/(m・s・°C)]）

測定時間が短い場合、深さ方向の熱移動に比べ半径方向の熱移動は無視できるので（本研究では述べないが、式（1）を解析し、検討をおこなっている）、式（1）右辺第2項を省略して1次元問題として解析を行った。計算に用いた初期条件、境界条件は次のとおりである。

初期条件 $t=0$ $\theta=\theta_0$ （初期温度 約20[°C]）（2）

境界条件 $z=0$ $\theta=\theta_H$ （高温水槽温度 約35[°C]）（3）

$z=z_0$ $\theta=\theta_L$ （低温水槽温度 約20[°C]）（4）

（ z_0 ：円筒カラムの底部までの距離 0.3[m]）

試料の比熱 C は、充填成分ごとの比熱及び重量比から次式で求めた。

$$C=\sum x_i C_i \quad (5)$$

（ x_i ：各成分の重量比[-]）

式（1）～（4）を用いて温度の経時変化を計算し、実測値と比較して試料の熱伝導率を決定した。解析例を図2に示した。図2は測定点Bのものであるが、本研究では測定点B及びC点について求めた熱伝導率の平均値を用いている（D点のデータは温度上昇が小さいので解析が困難であった）。 $k=0.52$ とした計算値と実測値が良く一致しているのがわかる。測定時間が長くなると、半径方向の熱移動の影響により計算値と実測値がずれ始め、短くなると、温度上昇が小さいため k の感度が鈍くなり、 k の決定精度が悪くなる。今回の実験では最大8時間の測定を行い、熱伝導率の決定は温度上昇ができるだけ大きくかつ計算値と測定値が一致している時間範囲で行った。また、温度測定点B～F、C～G、D～Hの各温度の比較により半径方向の温度差を調べて、半径方向の熱移動の影響をチェックした。

表1 模擬ごみ成分および物性値

物性成分	体積割合（乾ベース）[%]			真密度[kg/m ³]	熱伝導率[J/(m・s・°C)]	比熱[J/(kg・°C)]
	砂	焼却灰	人工ごみ			
紙類	-	-	52.2	1.5	0.65	1260
繊維類	-	-	5.8	1.3	0.29	1310
木類	-	-	5.8	1.5	0.65	1260
プラスチック類	-	-	22.8	1.0	0.12	1300
ビニール	-	-	2.6	0.9	0.92	2300
ゴム類	-	-	0.9	0.9	0.2	1590
鉄	-	0.6	0.9	7.9	81.2	640
アルミ	-	-	0.6	2.7	236	877
ガラス	-	79.8	7.0	2.4	0.9	1165
陶磁器	-	1.6	0.5	2.4	1.5	750
土	-	17.8	0.9	2.7	2.6	800
砂	100.0	-	-	2.7	6.79	800

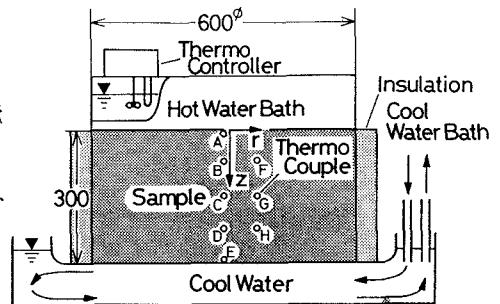


図1 実験装置

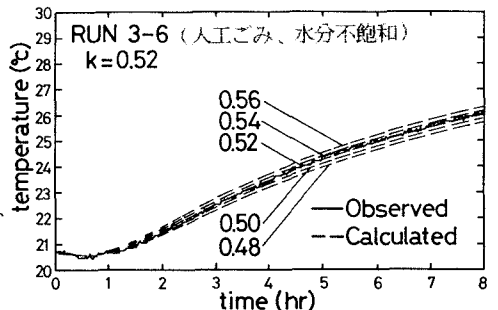


図2 熱伝導率解析例

3 実験結果

水分を含む試料の熱伝導率の測定では水蒸気の移動が問題になるが、本研究では完全乾燥状態と水分飽和状態（あるいはそれに近い条件）の2条件を中心に行った。人工ごみに関しては水分不飽和の条件でも行ったが、水蒸気移動による影響は今後検討するものとして今回は評価していない。測定条件及び得られた熱伝導率を表2に示した。熱移動特性を示す値として、熱拡散係数 α ($k/C\rho$) も示している。また参考として、本実験で用いた砂と物性及び充填状態がほぼ同じである砂の充填層の過去の測定例⁶⁾ も記載したが、両者の熱伝導率の数値はほぼ一致していることから本研究で用いた測定システムは妥当であったと思われる。

4 実験誤差の検討

熱伝導率の解析において用いられる条件値のうち、試料の熱容量 $C\rho$ (比熱 $\times$ 密度) と温度測定位置 (熱電対の深さ) は共に実測による誤差を生じる恐れがあり、これが熱伝導率の決定に影響を及ぼすと思われる。そこで、 α を人工ごみの平均的な値である $2 \times 10^{-7} [m^2/s]$ (表2より) とし、測定点はBとして、試料の $C\rho$ 及び温度測定位置 (測定点B $z=7.5cm$) を変動させたときに生じる熱伝導率の誤差 ε_k を求めた (図3)。図の横軸は $C\rho$ の変化幅 ε_c と温度測定位置の変化幅 ε_p で、縦軸は熱伝導率誤差 ε_k である。 ε はパーセントで表記した。 ε_k は ε_c に対しては傾き1の勾配で直線的に上昇し、 ε_p に対しては傾き2の勾配で直線的に上昇している。両者が同時に起こった場合を計算すると ε_c 、 $\varepsilon_p=5\%$ の時、 $\varepsilon_k=15\%$ となりそれぞれ単独に起こった場合の誤差の和となった。実験上、熱容量及び温度測定位置の測定誤差を約5%にとどめることが限界であることから、本研究で得られた熱伝導率は最大15%の誤差を含む可能性がある。本研究では不均質な試料を対象としているため、この程度の誤差はやむを得ないと判断した。

5 熱伝導率の推定モデル

本研究で得られた熱伝導率を推定するためのモデルを検討する。粒子充填層の有効熱伝導率の推定法において、もっとも基本となる熱伝導モデルとして直列モデル、並列モデルがある。

直列モデル $k_{series} = 1 / \sum (y_i / k_i)$ (6)

並列モデル $k_{parallel} = \sum y_i k_i$ (7)

(y_i : 各成分の体積比[-]、 k_i : i成分の熱伝導率 $[J/(m \cdot s \cdot ^\circ C)]$)
直列・並列とは、各成分の熱伝導方向に対する重なり方を表す。充填層の熱伝導性は直列の場合に最小、並列の場合に最大となる。実際はこれらのモデルが複雑に重なり合った中間的な熱伝導性を示すと思われる。そこで、これら2つの推定値の対数平均値を代表値として試算した。

対数平均値 $k = \sqrt{(k_{series} \cdot k_{parallel})}$ (8)

この推定値と実験による実測値を比較したものを図4に示した。直列モデル、並列モデルによる推定値も併せて示した。人工ごみの完全乾燥状態 (RUN1-1, 2) を除き、実測値と推定値がほぼ一致している。したがって、式(6)～(8)を用いることにより、不均質な物質からなる充填層の熱伝導率を推定することが可能である。人工ごみの完全乾燥状態については、紙、木などの内部に空気が含まれている物質の熱伝導性が極端に低い状態にあるため、推定値と実測値の一致が良くないのではないかとと思われる。

6 おわりに

以上述べたように、ごみ充填層の熱伝導率の測定および直列モデルと並列モデルの対数平均値による充填層の熱伝導率の推定が可能になった。今後は、水分が不飽和状態の焼却灰、人工ごみの充填層の熱伝導率測定実験を行ってモデルの信頼性をさらに検討し、実際の埋立地の熱伝導特性の推定手法に活用していきたい。

本研究は、文部省科学研究費 (奨励研究(A)) の補助を受けて行ったものである。最後に、本研究の実験を行うにあたり協力していただいた、本学卒業生 佐藤直之君、澤勇二君に感謝します。

参考文献 1) 山本、清水ら: 第23回土質工学会発表会講演集, pp12～16(1988) 2) 長谷川信夫: 水処理技術, Vol.20 pp101～115(1979) 3) 吉田、田中ら: 衛生工学論文集, Vol.25, pp29～38(1989) 4) 中村、北島ら: 昭和60年度東京都清掃研究所研究報告, pp1～50(1985) 5) 東京天文台編: 理科年表、丸善(1987) 6) Okazaki, M., I. Ito and R. Toei: AIChE Symposium Series, Vol.73, pp164～176(1977)

表2 模擬ごみ充填層の充填条件および熱伝導率測定結果

試料	物性	粒径 [mm]	空隙率 [-]	含水率 [%]	比熱 C	密度 ρ	熱伝導率 k	熱拡散係数 $\alpha [m^2/s]$
砂		0.17						$\times 10^{-7}$
RUN1-1(Dry)			0.46	0.0	800	1440	0.21	1.8
RUN1-2(Sat.)			0.00	35.0	1410	1930	1.80	6.6
砂 (文献値 ⁶⁾)		0.13						
Dry			0.48	0.0			0.20	
Sat.			0.00	48.0			1.86	
焼却灰		2.4～9.5						$\times 10^{-7}$
RUN2-1(Dry)			0.43	0.0	1070	1400	0.19	1.3
RUN2-1(Sat.)			0.00	40.0	1730	2490	1.10	2.5
人工ごみ		30.0						$\times 10^{-7}$
RUN3-1(Dry)			0.48	0.0	1220	170	0.05	2.4
RUN3-2(Dry)			0.51	0.0	1220	180	0.05	2.6
RUN3-3(Unsat.)			0.40	44.0	3190	670	0.30	1.4
RUN3-4(Unsat.)			0.40	44.0	3190	670	0.30	1.4
RUN3-5(Unsat.)			0.15	70.0	3470	930	0.52	1.5
RUN3-6(Unsat.)			0.10	75.0	3750	980	0.54	1.4

*) Dry: 乾燥状態, Unsat.: 水分不飽和状態, Sat.: 水分飽和状態

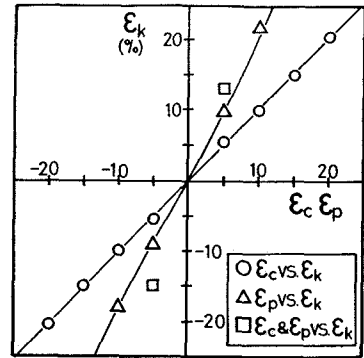


図3 誤差解析

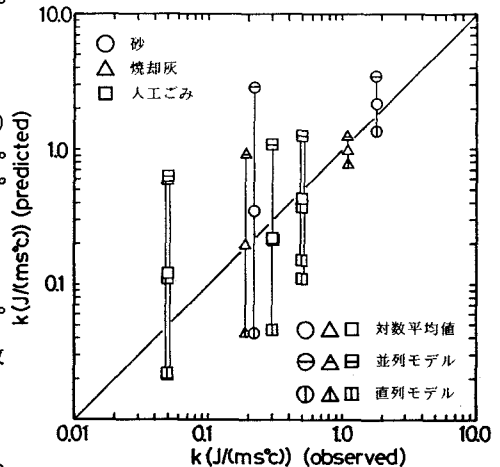


図4 熱伝導率測定値と推定値の比較