

II-553

ごみ充填層の熱伝導特性に関する実験的研究（第2報）

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
北海道大学工学部 神山桂一
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で生じている様々な現象に関する研究がなされてきているが、これらの現象は温度により大きな影響を受ける。埋立層内の温度環境を解析する場合、いくつかの熱特性を知る必要がある。筆者らは熱伝導特性に注目し、ごみ試料の有効熱伝導率の測定を行うとともに、熱伝導特性を構成成分、充填組成等から推定する方法を提案している¹⁾。本研究は、水分不飽和状態のごみ充填層の有効熱伝導率測定法及び有効熱伝導率推定法についてさらに検討した。

2. 実験試料及び測定理論

2-1 実験試料 実験試料は、砂、焼却灰、不燃ごみ、人工ごみの4種である。砂は石英分が多い豊浦砂、焼却灰はA市焼却処理施設（バッチ炉 20トン/日）から採取したもの、不燃ごみはA市破碎処理施設から採取したもの、人工ごみは東京都ごみ収集データを基に、紙、プラスチックなどを30mm四方に切断し、混合ごみを想定して調整したものである。実験試料の成分及び各成分の物理特性を表1に示した。

2-2 実験方法 実験装置を図1に示した。測定では実験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。試料内部に埋め込んだ熱電対によって内部温度の経時変化を測定する（温度測定点は図中のA～H）。深さ毎の測定データを解析して有効熱伝導率を求める。実験条件は表2に示した。不飽和含水状態では、試料内に含水分布が生じないような限界含水率以下に調整した。

2-3 解析理論 解析理論は既報¹⁾と同様であるが、試料が不飽和含水状態である場合の内部の水蒸気移動を考慮する必要がある。熱収支方程式の定式化においては以下の仮定をおいた。1) 試料内部の空隙の水蒸気圧は、その場所の温度における飽和水蒸気圧に等しいとする。2) 水蒸気移動は基本的には拡散に関するStefan-Maxwellの式²⁾に従う。まず、多孔体中の水蒸気拡散フラックスは、拡散に関するStefan-Maxwellの式を多孔体の特性を考慮して補正することにより³⁾、以下ようになる。

$$N_v = -\frac{1}{R} \frac{\varepsilon}{\xi} \frac{P_s}{P_t - P_s} D_v \frac{\partial P_s}{\partial z} \quad (1)$$

N_v : 水蒸気フラックス、 R : ガス定数、 T : 絶対温度、 ε : 空隙率、 ξ : 屈曲係数、 P : 圧力（添字、 t : 大気圧、 s : 飽和水蒸気圧） D_v : 空気中の水蒸気の拡散係数、 z : 深さ

ε/ξ は多孔体中の屈曲度と空隙を考慮する補正項である。 ξ は本実験試料に組成が似たごみ充填層の実験値を参考に推定した（表2）。飽和水蒸気圧 P_s は温度の関数で、Antoineの式⁴⁾に従うとした。式（1）を考慮して、既報¹⁾の熱収支方程式を修正すると以下のようになる。

表1 実験試料の成分及び物理特性

物性 成分	重量割合（乾ベース）[%]				密度 [kg/m ³]	熱伝導率 [J/(m·s·°C)]	比熱 [J/(kg·°C)]
	砂	焼却灰	不燃ごみ	人工ごみ			
紙類	-	-	-	51.3	1500	0.65	1260
木類	-	-	20.1	5.7	1500	0.65	1260
繊維	-	-	-	5.0	1300	0.29	1310
プラスチック	-	-	3.3	14.9	1000	0.12	1300
ビニール	-	-	0.1	1.6	900	0.92	2300
断熱材	-	-	0.4	-	30	0.037	1250
ガラス類	-	-	-	0.5	900	0.2	1590
鉄	-	14.1	0.4	4.8	7900	81.2	640
アルミ	-	-	-	3.0	2700	236	877
ガラス	-	8.9	42.7	11.0	2400	0.9	1165
陶器	-	0.2	2.6	0.6	2400	1.5	750
土砂	-	1.2	30.4	-	2700	2.6	800
砂	100.0	-	-	1.6	2700	6.79	800
灰*	-	75.6	-	-	2230	2.6	800

*) 粉末状の灰やクリンカー等を総称して灰とした

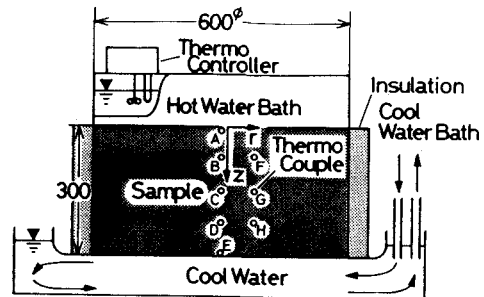


図1 実験装置図

表2 ごみ充填層の充填条件及び熱伝導率測定・推定結果

試料	空隙率 [-]	屈曲係数 [-]	含水率 [%]	比熱 [J/(kg·°C)]	見かけ密度 [kg/m ³]	熱伝導率			
						直列計算	並列計算	対数平均	実験値
砂									
RIN-1 (Dry*)	45.7	1.5	0.0	800	1440	0.04	3.70	0.38	0.21
RIN-1 (Unsat.')	46.5	1.5	4.4	950	1320	0.04	3.26	0.36	0.80
RIN-3 (Unsat.)	3.2	1.5	26.2	1490	1920	0.43	4.16	1.33	1.60
焼却灰									
RIN-2 (Dry)	55.9	6	0.0	810	1100	0.03	1.86	0.24	0.24
RIN-2 (Unsat.)	43.4	6	8.7	1140	1270	0.04	0.37	0.26	0.37
RIN-3 (Unsat.)	19.1	6	23.8	1620	1640	0.09	0.90	0.44	0.90
不燃ごみ									
RIN-3 (Dry)	62.1	3	0.0	1190	780	0.03	0.13	0.10	0.13
RIN-3 (Unsat.)	42.0	3	15.0	1640	1040	0.05	0.43	0.15	0.43
RIN-3 (Unsat.)	4.4	3	34.1	2210	1450	0.26	0.75	0.43	0.75
人工ごみ									
RIN-3 (Dry)	86.6	50	0.0	1220	170	0.02	0.04	0.12	0.04
RIN-3 (Unsat.)	69.2	50	39.7	1220	390	0.03	0.17	0.16	0.17
RIN-3 (Unsat.)	11.3	50	75.2	2190	970	0.14	0.44	0.42	0.44

*) Dry: 乾燥状態, Unsat.: 水分不飽和状態

**) 推定値

$$(1-\varepsilon) C \rho \frac{\partial \theta}{\partial t} = k \frac{\partial^2 \theta}{\partial z^2} - \frac{\partial}{\partial z} [(C_v (\theta - \theta_r) + L) M_v N_v] \quad (2)$$

(θ : 温度、 C : みかけ比熱、 ρ : 見かけ密度、 C_v : 水蒸気の比熱、 θ_r : 基準温度 (25℃)、 L : 水の潜熱、 M_v : 水の分子量)

いくつかの有効熱伝導率を仮定して式(2)を解析し、温度変化を求める。そして、温度の計算値と実測値を比較して試料の有効熱伝導率を決定した。本実験試料では水蒸気移動を考慮した解析結果と水蒸気移動を無視した解析結果を比較しても大きな差はなく、水蒸気移動による熱移動への寄与は小さいものと計算された。これは本実験の温度範囲(20~35℃)が低く、かつ屈曲係数が大きいため式(2)における水蒸気フラックスが小さくなったためであると思われる。

3. 実験結果 実験により有効熱伝導率を求めた結果を表2に示した。有効熱伝導率は、試料の構成成分、充填組成により大きく変化した。

4. 有効熱伝導率推定 次に、実験で求めた有効熱伝導率を構成成分や充填状態から推定する方法を検討する。

4-1 見かけ密度と有効熱伝導率 一般のごみ埋立地の構成成分の熱伝導率と密度の関係をプロットしたものを図2に示した。ここではアルミニウム、鉄などのような大きな熱伝導率を持つものを除いているが、密度に対して熱伝導率が指数的にほぼ比例して増加することがわかる。そこで、実験試料の見かけ密度と有効熱伝導率の関係をプロットした(図3)。本実験で用いた試料についても、見かけ密度に対して有効熱伝導率がほぼ指数的に比例して増加することがわかった。これより、見かけ密度からおおよその有効熱伝導率が推定できると思われる。

4-2 推定モデル 粒子充填層の有効熱伝導率を推定するモデルとして、直列・並列モデルがある⁵⁾。これらの対数平均値を併せて、推定理論式は以下のようになる。

$$\text{直列モデル } k_{\text{series}} = 1 / \sum \frac{y_i}{k_i} \quad (4)$$

$$\text{並列モデル } k_{\text{parallel}} = \sum y_i k_i \quad (5)$$

$$\text{対数平均値 } k = \sqrt{k_{\text{parallel}} \cdot k_{\text{series}}} \quad (6)$$

(y_i : 各成分の体積比[-]、 k_i : i 成分の熱伝導率[J/(m·s·°C)])

これらの理論式による推定値と実測値を比較したものを図4に示した。式(6)の対数平均値で推定すると実測値に良く合った。

5. まとめ ごみ充填層が水分不飽和状態でも、式(4)~(6)により有効熱伝導率を推定することが可能である。また、見かけ密度から有効熱伝導率を推定することも可能ではないかと思われる。今後は、本研究の推定法により熱伝導特性を把握し、ごみ埋立層内の熱移動現象の解析を行っていく予定である。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。

参考文献 1) 第45回土木学会年次講演会講演概要集、pp. 9 68~969(1990)、2) R.B. Bird, etc.: Transport Phenomena, p. 570, JOHN WILEY & SONS(1960)、3) 吉田、田中ら: 衛生工学研究論文集、Vol. 25、pp. 29~38(1989)、4) 化学工学協会編: 化学工学便覧、改訂5版、p. 18(1988)、5) 前出4、p. 1076

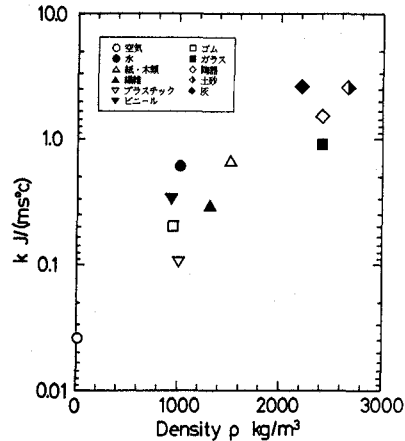


図2 熱伝導率に対する密度の影響 (ごみ成分)

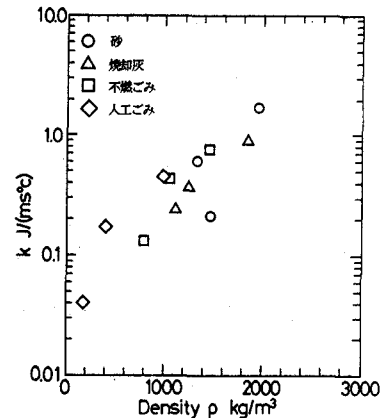


図3 有効熱伝導率に対する見かけ密度の影響 (ごみ充填層)

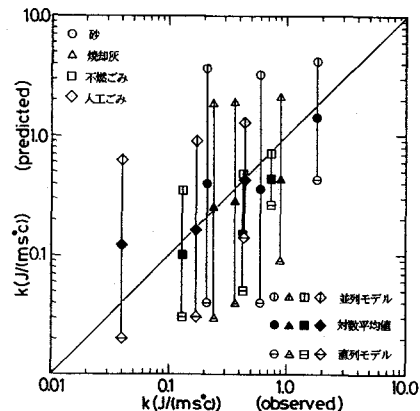


図4 有効熱伝導率測定値と推定値の比較