

II-46

廃棄物埋立層の熱特性に関する研究

室蘭工業大学 正員 吉田英樹

室蘭工業大学 正員 穂積 準

1. はじめに

今日、都市で発生する廃棄物のうち、不燃性の廃棄物（不燃ごみ）は直接、廃棄物埋立地（以下、埋立地と呼ぶ）に処分し、一方可燃性の廃棄物（可燃ごみ）は焼却処理により減量化・安全化した後、埋立地に処分するのが廃棄物処理の原則となっている。しかし、現存する廃棄物埋立地は、不燃・可燃ごみがともに直接埋め立てられたものが多い。また、現在でも多くの理由から相当な可燃ごみが埋立地に処分されているのが現状である。可燃ごみ中の分解性有機物（厨芥、紙、木など）が埋立地に処分された場合、微生物により生物分解されて様々なガス（メタンガス、炭酸ガスなど）が発生し、また埋立地内から汚濁度の高い水（浸出水と呼ぶ）が流出するため、周辺環境への影響が大きく、廃棄物の処分の上で大きな問題となっている。このため埋立地の跡地利用の面からも、このような埋立地の早期安定化を図ることが重要となっている。近年、埋立層内温度を埋立地の安定化の指標として捉えるようになってきている¹⁾。しかし、埋立層内温度に関しての理論的な説明はほとんどされていないのが現状である。そこで、本研究は埋立層内温度のシミュレーションを行うためのモデル及び計算式を提案し、廃棄物埋立層の熱特性（温度分布特性）を明らかにし、埋立地の安定化指標としての埋立層内温度について検討を加えることを目的としている。

2. 廃棄物埋立層内の温度環境

埋立層中の有機物は微生物により分解され、水やガス、その他の物質に変換される。その際、分解熱が発生する。一般的な埋立地は、内部まで空気が侵入しにくく、埋立進行時を除いて嫌気性下にあると思われる。嫌気性条件下での生物分解熱は小さいが、埋立深さが深くなると内部に蓄熱されて埋立層内が高温状態になる現象が実測例を通して確認されている^{2), 3), 4)}。特に、東京都港湾局²⁾は東京都の沿岸に存在する埋立深さが20mを越える大規模な埋立地の温度実測を行い、埋立層内温度を埋立地安定化指標として用いている。図1はその1例である。埋立深さは35mに及び、約9mのところに地下水面がある。一般に、埋立層内温度の実測はガスを測定する観測井において行われるが、底部からの高温ガスの噴出があるため、深さごとの温度の正確な測定は困難であると思われる。図1の場合はほとんどが水面下にあるためガスの影響も少なく、信頼性のある温度分布であると言える。この埋立地は昭和49年から約5年間可燃・不燃ごみ（以下、混合ごみと呼ぶ）が埋め立てられた。図1は埋立終了後約5.5年経過時の実測結果である。埋立層内は最高約70℃に達しており、かなり活発な生物分解が起こっていたと思われる。

3. 温度分布計算式の提案

3-1 埋立層内の熱移動発生現象

本研究で解析対象とするのは、埋立終了後の埋立地である。埋立層内の熱移動方向は鉛直のみの1次元とする。埋立層内は、ごみ固形分、水、ガスの3相から構成されているが、水及びガスの埋立層内での移動速度はきわめて緩やかであるので、各相の温度は平衡状態（同一温度）にあると仮定する。埋立層内温度に関わる熱移動

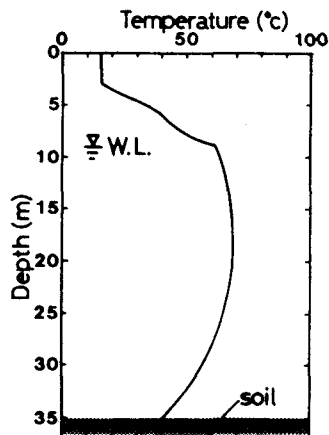


図1 海面埋立地における温度分布の実測例

Study on Thermal Property of Sanitary Landfill Layer

by Hideki YOSHIDA and Hitoshi HOZUMI

・発生現象としては図2の概念図に示したものを考慮した。

3-2 定式化

次に3-1で述べた各現象を定式化する。発生ガス流れによる顕熱移動速度、水蒸気の移動による顕熱移動速度、水の相変化による潜熱発生速度は計算上、他の項にくらべ無視することができることから、筆者らは温度分布計算式として以下の式を提案している⁵⁾。

$$\frac{\partial}{\partial t} \{ C \rho (T - T_r) \} = - \frac{\partial}{\partial z} \left\{ - \lambda e \frac{\partial T}{\partial z} + C_w \rho_w v (T - T_r) \right\} + (-\Delta H_b) R_b \quad (1)$$

左辺第1項は埋立層内の熱蓄積速度で、 t は時間、 T は埋立層温度、 T_r はエンタルピー計算基準温度、 C は埋立層のみかけ比熱、 ρ はみかけ密度である。右辺括弧内第1項は熱伝導による熱移動速度で、 λe は埋立層の有効熱伝導率である。これは、3相系(固、液、気相)粒子充填層での推定法を用いて求める(4章参照)。括弧内第2項は液状水流れ(降雨浸透)による顕熱移動速度で、 C_w は水の比熱、 ρ_w は水の密度、 v は降雨浸透速度である。右辺第3項は生物分解による熱発生速度であり、 $(-\Delta H_b)$ は分解により発生するメタンガス1molあたりの反応熱で、 R_b は埋立層単位体積あたりのメタンガス発生速度である。

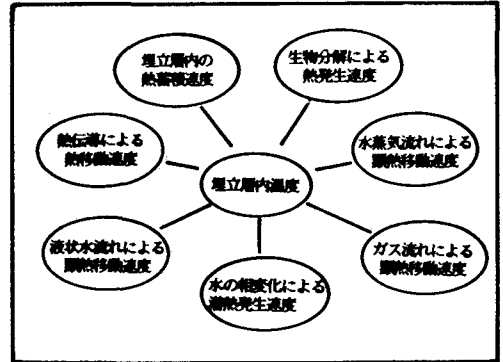


図2 埋立層内温度に関わる熱発生・移動現象の概念図

ここで次のような仮定をおく。埋立層の多くの部分が非分解物や難分解物で構成され、埋立層の含水率が降雨によって大きく増減しないとし、これにより熱容量、熱伝導率及び空隙率は一定とした。また、降雨浸透速度(降雨が埋立層に浸入、流下する速度)も年間平均降雨量×浸出係数で計算し、一定とした(年間平均降雨量を1460[mm/year]、浸出係数0.5とし $v=730$ [mm/year]とした)。これにより、式(1)は次のように簡単化される。

$$C \rho \frac{\partial T}{\partial t} = \lambda e \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} - C_w \rho_w v \frac{\partial T}{\partial z} + (-\Delta H_b) R_b \quad (2)$$

これが本研究で提案する温度分布計算式である。

4. 埋立層内温度分布のシミュレーション

3章で提案した埋立層内温度分布計算式を用いて、実際の埋立地で実測されている温度分布(2章図1)のシミュレーションを行った。

4-1 熱物性値の推定

図1の廃棄物埋立層の物性値(みかけ密度、熱容量、熱伝導率、熱発生速度など)を推定する。この埋立地では混合ごみを埋め立てていることがわかっているが、詳細はあきらかではない。そこで、昭和60年度の東京都の混合ごみ収集データ⁶⁾により推定を行った。表1に埋立廃棄物の構成比及び各成分の物性値を示した(各成分は水分を除いた乾燥状態)。物性値は物理定数表⁷⁾などから調査した(一部推定したものもある)。次に、以下に示す推定式を用いて、埋立層内のごみ固相分(固相)の物性値を推定した結果を表2に示した。液相、気相についても示した。

表1 埋立廃棄物の成分及び物性値

埋立廃棄物	組成割合 [%]		真密度 [g/cm ³]	比 熱 [J/(kg·°C)]	熱 伝 導 率 [J/(m·s·°C)]
	重量比	体積比			
紙	55.4	57.2	1.5	1280	0.3
繊維	4.9	5.6	1.3	1310	0.5
草木	4.5	4.6	1.5	1000	0.6
プラスチック	16.0	22.5	1.1	1500	0.2
ゴム	0.5	0.9	0.9	630	0.2
鉄	0.3	1.2	7.9	690	81
アルミニウム	0.4	0.2	2.7	1100	240
ガラス	9.8	6.3	2.4	750	0.9
陶器	1.1	0.7	2.4	800	1.5
土砂	1.1	0.6	2.7	800	2.1

$$C = \sum v_i C_i \quad (3)$$

$$\rho = \sum \omega_i \rho_i \quad (4)$$

$$\lambda e = \sqrt{\lambda p \lambda s} \quad (5)$$

$$\lambda p = \sum v_i \lambda_i \quad (6)$$

$$\lambda s = 1 / \sum (v_i / \lambda_i) \quad (7)$$

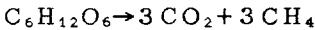
ここで、 v は各成分の体積比、 ω は重量比、 i は各成分を示す。また、 λp (並列モデルparallel)、 λs (直列モデルseries)は多孔体の熱伝導機構に関する3相系モデル

⁸⁾による推定値であり、本研究ではそれらの相乗平均 λe を代表値として用いた。

計算においては、図1の埋立層を3つの領域に分けて物性値を推定した。地表面から下の水没していない埋立層部分(不飽和領域、深さ0~9m)、水没している埋立層(飽和領域、深さ9~35

m)、ごみ層底部の自然地盤(深さ35m以下)の3つである。これらの層ごとの物性値を推定した結果を表3に示す。

熱発生速度 Q は、3章の定式化における式(1)に示したように、 $Q = (-\Delta H_b) R_b$ であるが、 $(-\Delta H_b)$ は生物分解の反応式から理論的に求められる。廃棄物中の分解性有機物をグルコース [$C_6H_{12}O_6$] と仮定する(紙類はセルロース [$C_6H_{10}O_5$] であるが、水溶化してグルコースになると考える)。この時、嫌気性分解下では反応式は以下になる。



反応前後の各物質の標準エンタルピー(25℃)は、グルコース(α 、 β グルコース水溶液)、炭酸ガス、メタンガスについてそれぞれ、 1.264×10^6 、 3.937×10^5 、 7.485×10^4 [J/mol]である^{7)、9)}。これを反応式に代入して反応熱を求めると、 $(-\Delta H_b) = 4.72 \times 10^4$ [J/mol- CH_4]となる。

次にガス発生速度 R_b を次の手順で求めた。まず、表1より埋立層内の分解性有機物の主成分である紙の総重量を求め、それから発生可能なメタンガスの量を計算した。ごみ層1m³あたり約170kgの紙を含んでいる。セルロース1mol(162g)あたり3molのメタンが発生するので、メタンガス発生可能量は約3150molとなる。このガスの時間的な発生パターンは、時間とともに直線的に減少するものとし、図1の温度分布が測定された埋立終了後5.5年経過時点で発生ガスがゼロになるように設定した。

$$R_b = R_{b0} (1 - t / t_e)$$

ここで、 R_{b0} は初期ガス発生速度であり、 3.68×10^{-5} [mol- CH_4 /(m³s)]とし、 $t_e = 5.5$ [years]とした。

4-2 境界条件及び初期条件

埋立層上部の境界条件としては、深さ約3mの所で年平均気温(16℃)で一定とした。また、埋立層底部の境界条件としては、埋立層下部の自然地盤についての実測データがないので、自然地盤内の一定深さで温度が年平均気温に等しいと仮定した。計算では、自然地盤内約2mで16℃で一定としている。

初期条件については、埋立終了時の温度分布の測定データがないため、埋立進行時は厨芥を中心とした易分解性有機物を中心とした分解が進行して、埋立層内が約30℃になっていると仮定した。

4-3 埋立層内温度分布の計算例(1)

4-1~2の推定値及び仮定のもとに、埋立終了時から5.5年経過時までの埋立層内温度分布のシミュレーションを行った結果を図3に示す。全体的に、温度分布曲線の特徴はよく一致している。これにより、嫌気性分解によって埋立層内が約70℃という高温になりうるということが理論的に説明できた。本研究の提案す

表2 埋立層の各相の物性値

	真密度 ρ [g/cm ³]	比熱 C [J/(kg·°C)]	熱伝導率 [J/(m·s·°C)]		
			λe	λs	λp
固相 (混合ごみ)	1.7	1400	0.7	0.29	1.8
液相	1.0	4200	0.6	-	-
気相 ^{a)}	-	1000	0.02	-	-

^{a)} 気相の比熱は水蒸気、炭酸ガス、メタンガスの3成分から算出されているとして推定した。

表3 埋立層の物性値の推定結果

埋立層領域	埋立層(混合ごみ)の含水率 [%] ^{a)}		埋立層の空隙率 ϵ [-]	みかけ密度 ρ [kg/m ³]	みかけ比熱 C [J/(kg·°C)]	埋立層の有効熱伝導率 [J/(m·s·°C)]		
	w	w'				λe	λs	λp
不飽和領域	67	62	0.2	800	3300	0.21	0.00	0.50
飽和領域	73	62	0.0	1126	3400	0.62	0.62	0.62
自然地盤	18	30	0.2	1850	1400	0.38	0.12	1.2

^{a)} wは埋立層全体の重量含水率、w'は埋立層全体の体積含水率である。

る温度分布計算式はほぼ妥当であると思われる。埋立層内の廃棄物構成やメタンガス発生速度あるいは初期条件などを実測により正確に把握することができれば、より確かな埋立層内温度の時間的推移が予測できる。

4-4 埋立層内温度分布の計算例(2)

埋立終了後5.5年以降の埋立層内温度分布の時間的推移を計算した結果を図4に示した。計算においては、ガス発生は5.5年経過後はゼロで熱発生はないとした。図4でわかるように、埋立層内温度は10年経過ごとに約10°C下降しており、35.5年経過後は約30°C前後まで下降している。計算によれば、この埋立地は長期に渡って埋立層内が高温条件下にあるものと予想される。これは、埋立層の持つ熱伝導性が小さくかつ熱容量が大きいと推定した結果に起因している。このように埋立層内温度は生物分解に伴う発熱速度の変化に対して遅れて変化する。したがって、埋立層内温度を一定時間ごとに実測した結果、温度上昇期から下降期に入っていると観察された時、内部の生物分解は終了していると判断でき、この判断は安全側にある。と考えられる。このように、埋立層内温度は埋立地の安定化指標として有効であると思われる。

5. まとめ

本研究において、次のような結論が得られた。

① 廃棄物埋立層の物性値(熱伝導率、比熱、熱発生速度など)の推定値を示した。② 埋立層内の温度分布の計算式を提案し、シミュレーションによって、嫌気性下でも埋立深さが3.5m程度の規模の埋立地であれば内部温度が最高約70°Cまで上昇し得ることを理論的に示した。③ 埋立層内温度は埋立地の安定化指標として有効であることを理論的に示した。

今後、廃棄物埋立層の物性値や温度分布の実測、あるいは埋立進行時の温度上昇のシミュレーションのためのモデルの提案などを行っていきたいと考えている。

参考文献

- 1) 全国都市清掃会議編、廃棄物最終処分場指針解説、p.20(1989)
- 2) 山本憲史、清水恵助ら、第23回土質工学研究発表会講演集、B-12、pp.13-16(1988)
- 3) 日本環境衛生センター編、廃棄物の埋立処分に関する技術の開発研究報告書(昭和50年度厚生省委託研究)(1976)
- 4) 荻原松博、清掃技報、Vol.3、pp.39-47(1980)
- 5) 吉田英樹、田中信寿ら、衛生工学研究論文集、Vol.25、pp.29-38(1989)
- 6) 中村豊、北島義文ら、昭和60年度東京都清掃研究所研究報告、pp.1-50(1985)
- 7) 東京天文台編、理科年表、丸善(1987)
- 8) 土質工学会編、土の凍結、土質工学会
- 9) 永井史郎、台葉修一、生物化学工学、p.55、科学技術社(1978)

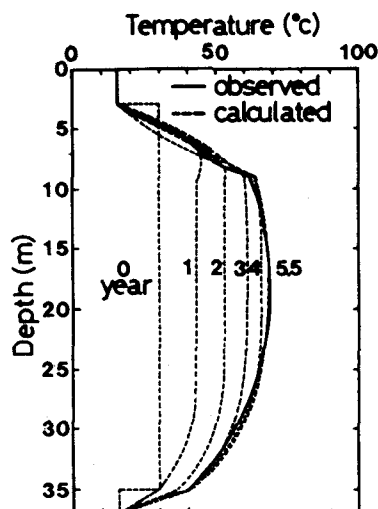


図3 埋立層内温度分布シミュレーション(1)

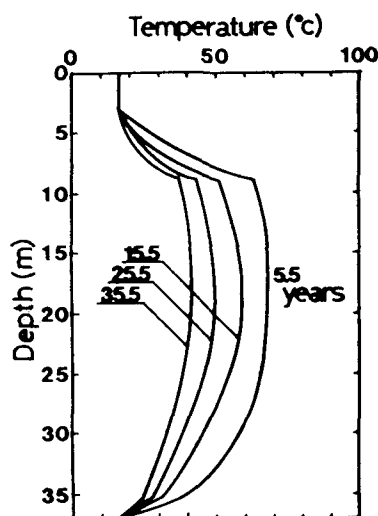


図4 埋立層内温度分布シミュレーション(2)