

(4) 廃棄物埋立層内の温度分布に関する理論的研究

THEORETICAL STUDY ON TEMPERATURE DISTRIBUTION IN SANITARY LANDFILL LAYER

吉田 英樹* 田中 信寿**
Hideki YOSHIDA, Nobutoshi TANAKA,
神山 桂一** 穂積 準*
Keiichi KOYAMA, Hitoshi HOZUMI

ABSTRACT : Temperature distribution in sanitary landfill layer was theoretically studied. By modeling the phenomena of heat and mass transfer in landfill layer, one dimensional energy equation was formulated. The thermal properties of landfill layer (heat production rate by biodegradation of refuse, specific heat and thermal conductivity, etc.) were estimated. The temperature distribution in the depth of landfill layer was simulated for several landfill conditions. Consequently, the following main conclusions are obtained.

(1) The temperature distribution can be evaluated by a simple equation. (2) The maximum temperature in anaerobic sanitary landfill layer of mixed refuse can rise to about 50 °C and above. (3) The depth of landfill layer and heat production rate have great influence on the maximum temperature. (4) The temperature in landfill layer can be used as an index to estimate the stabilization of landfill.

KEYWORD : Temperature distribution, Sanitary landfill, Simulation model, Thermal properties of landfill layer

1. はじめに

生物分解性の有機物(厨芥、紙、木等)を含む廃棄物を埋立処分した場合、埋立層内の微生物の作用により有機物が分解され、反応熱が発生する。一般に、埋立処分場は大きな容積を持っているために、発生した熱が外部に逃げにくく、内部に蓄積して、埋立層内温度を上昇させる。このような現象は廃棄物埋立層内温度の実測例を通じて知られている(嫌気性埋立でも最高60°C程度になる)¹⁾²⁾³⁾。埋立層内の温度が上昇すると微生物の活性が高まって有機物の分解速度が速くなったり、埋立層の無害化・安定化が促進されたり、存在可能な微生物相や無機物の溶解度などの物理特性が変化したりするなど、埋立層内の物理的・化学的・生物学的諸現象を解明する上で、温度という因子は基本となるものである。

埋立層内温度の研究については、花嶋ら⁴⁾は準好気性埋立層の熱・液状水及びガスの移動に関する2次元の方程式を提案し、実験により得られた温度分布と比較・検討している。John. F. Ree⁵⁾は嫌気性埋立地内部の温度が上昇する現象に関して考察をしている(メタン発酵の反応熱、中和熱、ごみの比熱の推定など)。長谷川ら³⁾は衛生埋立地において、発生ガスの測定とともに温度の測定を行っている。東京都港湾局⁶⁾は海面埋立地について土質工学的研究を行い、埋立層内温度の埋立地安定化指標としての重要性を述べている。

* 室蘭工業大学工学部土木工学科 (Dept. Civil Eng., Muroran Inst. of Tech.)

** 北海道大学工学部衛生工学科 (Dept. Sanitary Eng., Univ. of Hokkaido)

本論文の目的は廃棄物埋立層内の温度分布を理論的に考察することにある。まず、埋立層内の熱・物質の移動や生成・消滅に関する現象を想定し、深さ方向のみの1次元熱収支方程式を導いた。次に、埋立層の熱特性値を推定し、これを用いて埋立層内温度の特性について考察した。そして、実測温度との比較により、熱収支方程式及び熱特性推定値の妥当性について検討した。さらに、熱特性値や物性値などのパラメーター値と埋立層内最高温度との関係や埋立層内温度分布の動特性についても検討した。

2. 温度分布計算式の提案

2. 1 廃棄物埋立層における熱現象のモデル化

本論文では、一定深さの埋立層が形成された状態を解析対象としている。埋立層内の熱及び物質の移動は深さ方向のみの一次元とする。また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）にあるとする。

(A) 温度特性による埋立層の3層化

埋立層を地表から地中へ一次元的に見たとき、次の3つの領域に分割できる（図1）。

- ① 第1層；気象の影響を大きく受ける表層部分（特に日射量の変化により、わが国の自然地盤では、日周変化では約1m、季節変化では約10mの深さまで影響を受けるとい⁷⁾）。廃棄物埋立層では気温の季節変化の影響が及ぶ深さ（恒温深度）は約5mであるという報告がある⁶⁾）
- ② 第2層；埋立層内部（熱発生源を持ち、日射量の日周変化、季節変化の影響が無視できる部分）
- ③ 第3層；埋立層下の自然地盤（熱発生源を持たず、降雨浸透流れがない）

z は埋立層深さ、 z_0 は第1層、第2層の境界深さ、 h は埋立底部までの深さ、 h_s は自然地盤内の境界深さである。ここで、埋立層底部には集水管が設けられているとして、第3層では自然地盤への降雨浸透はないと仮定した。本論文では第2層で起っている現象のみを扱うことにする。第1層、第3層については、今後さらに研究しなければならないが、本論文では、主として境界条件を与える領域として記述する。

まず、境界条件について考える（図1）。第1層と第2層の境界である、 $z = z_0$ の深さで埋立層内温度 T が一定であるとする*（この温度は、長期に現象を考える場合には年間平均気温 T_a に近似できると思われる）。

$$T = T_a \quad \text{for } z = z_0 \quad (1)$$

第3層では次の3つの境界条件が考えられる。

$$(i) \quad T = T_h \quad \text{for } z = h \quad (\text{埋立層下の自然地盤が大きな熱容量を持っている}) \quad (2)$$

$$(ii) \quad \partial T / \partial z = 0 \quad \text{for } z = h \quad (\text{埋立層下の自然地盤へ熱が逃げない}) \quad (3)$$

$$(iii) \quad T = T_s \quad \text{for } z = h_s \quad (\text{自然地盤の一定深さの地盤に恒温層がある}) \quad (4)$$

T_h 、 T_s は一定温度である。(i)と(ii)はそれぞれ両極端に位置する条件であり、(iii)は中間的な条件である。これらの境界条件の内、どれが最も良いかは決し難いが、本研究では(i)と(iii)を中心に計算を行い、検討した。

(B) 温度に影響する因子

埋立層の温度に影響を与えると思われる因子について図2に概念図を示した。これは筆者らが、埋立層内温度を考える上での前提であり、熱収支式を立てる際に、熱収支項として考えたものを示した。本来、

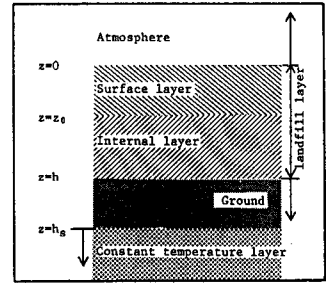


Fig.1 Schematic diagram of landfill layer

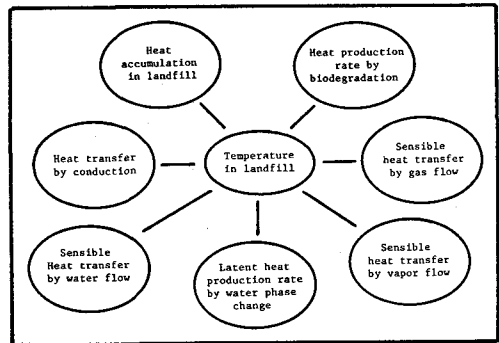


Fig.2 Schematic diagram of heat transfer and production in landfill layer

* 5.4.(A) で埋立層表層温度が周期変動する場合について考察している。

埋立層内温度を決定するためには、ごみ分解速度式、液状水の移動速度式などを熱収支式に連立させて解かねばならない。しかし、ごみの分解や水分移動に関しては解明されていない部分も多いので、以下の説明で述べるような近似や仮定をおくことで、熱収支方程式のみで埋立層内温度を決定できるようにした。

2. 2 熱収支方程式の提案

(A) 熱の移動・発生現象の定式化

① 埋立層単位体積当りの熱蓄積速度 Q_a は次式で表わせる。埋立層の熱容量は気相（ガス）、液相（水）固相（ごみの固形分）の各々の熱容量の和として求められるが、一般に気相の持つ熱容量は無視できる。

$$Q_a = \frac{\partial}{\partial t} \{ C_{sl} \rho_{sl} (1 - \epsilon) (T - T_r) \} \quad (5)$$

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_{sl} は固液相の比熱、 ρ_{sl} は固液相の密度、 ϵ は空隙率（気相の体積割合）である。

② 熱伝導による熱移動速度 q_c は次式のようになる。

$$q_c = -\lambda_s \frac{\partial T}{\partial z} \quad (6)$$

λ_s は埋立層の有効熱伝導率である。これは、3相系粒子充填層での推定法を用いて求める（3章参照）。

③ 液状水の移動による顕熱移動速度 q_w は次式で表わせる。

$$q_w = C_w \rho_w v (T - T_r) \quad (7)$$

C_w は液状水の比熱、 ρ_w は液状水の密度、 v は降雨浸透速度である。

④ 発生ガスの移動による顕熱移動速度 q_g は次式で表わせる。

$$q_g = M_g N_g^t C_g (T - T_r) \quad (8)$$

M_g は発生ガスのみかけ分子量、 N_g^t は発生ガスのフラックス、 C_g は発生ガスの比熱である。

N_g^t については以下のように求める。発生ガスの物質収支式⁸⁾は次のとおり。

$$\epsilon \frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{P_g}{RT} \right) = -\frac{\partial N_g^t}{\partial z} + R_g \quad (9)$$

R はガス定数、 P_g は発生ガス分圧、 R_g はガス発生速度、 T は絶対温度である。

式(9)において、一般に発生ガス分圧の時間変化項（左辺）は無視できる。よって式(9)を h から任意の深さ z まで積分すると、 N_g^t は次のようになる。

$$N_g^t = \int_h^z R_g dz + N_g^t |_{z=h} \quad (10)$$

ただし、嫌気性埋立層では底部からのガスの浸入はないから、 $N_g^t |_{z=h} = 0$ とおける。よって、 N_g^t は R_g から求まる。

⑤ 水蒸気の移動による顕熱移動 q_v は次式で表わせる。

$$q_v = M_v N_v^t C_v (T - T_r) \quad (11)$$

M_v は水蒸気の分子量、 N_v^t は水蒸気フラックス、 C_v は水蒸気の比熱である。 N_v^t は水蒸気分圧勾配による拡散流れと全ガスのバルクフローによる流れからなる。著者らが提案している廃棄物埋立層を毛細管モデルで模擬する方法⁹⁾によって定式化すると、次のようになる。

$$N_v^t = -\frac{1}{RT} \epsilon \frac{1}{1-x_v} \frac{\partial P_v}{\partial z} + \frac{x_v}{1-x_v} \int_h^z R_g dz + \epsilon \frac{x_v}{1-x_v} \int_h^z \frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{P_v}{RT} \right) dz \quad (12)$$

ϵ は毛細管モデルにおける屈曲係数で、廃棄物埋立層のように、ビニール、紙などのフィルム状物質を含む場合には屈曲係数 ϵ は大きな値をとることが知られている^{9),10)}。 D_{vg} は発生ガスに対する水蒸気の拡散係数、 x_v は水蒸気のマール分率、 P_v は水蒸気分圧である。また、埋立層内の水蒸気分圧は、埋立層温度における飽和水蒸気圧に等しいとする（一般に土壌内間隙では、水蒸気分圧はマトリックスポテンシャルにも依存することが知られているが¹¹⁾、本論文では、廃棄物埋立層を対象としており、含水率がかなり高いので、水蒸気分圧は温度のみで表わせるとした）。土壌学においては、土壌中の水蒸気の拡散流れを表現する式が多く提案されているが¹²⁾、式(12)の右辺第1項に基本的に一致する。このように、埋立層温度 T とガス発生速度 R_g が与えられると、 N_v^t が計算できる。

なお、式(12)の導出にあたって、水蒸気に関する連続の式を用いている。

$$\varepsilon \frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{P_v}{RT} \right) = - \frac{\partial N_v}{\partial z} + R_v \quad (13)$$

R_v は水蒸気の発生速度である。式(12)の左辺(水蒸気分圧の時間変化項)と式(12)の右辺第3項は、60°C程度以下の温度では試算により無視できるので、以下の計算では無視している。従って、 N_v がわかれば、 R_v が計算できる。

飽和水蒸気圧と温度の関係については、自由水面に対してAntoineの式¹³⁾が提案されている。

$$P_v = K 10^{\left(a - \frac{b}{T+c}\right)} \quad (14)$$

P_v は飽和水蒸気圧[Pa]、 K はAntoineの式における圧力の単位[mmHg]を[Pa]に換算するための係数で $K=133.3$ [Pa/mmHg]、 $a=8.10765$ 、 $b=1750.286$ 、 $c=235.0$ である。

⑥水の相変化による潜熱の発生速度 Q_v は次式で表わせる。

$$Q_v = -LM_v R_v \quad (15)$$

L は水蒸気の潜熱、 R_v は前述した式(12)と(13)から求める。

⑦生物分解による熱発生速度 Q_b は、反応熱($-\Delta H_b$)と反応速度 R_b の積で表わされる。反応熱($-\Delta H_b$)をガス1mol消費あるいは発生する際に放出される熱とし、反応速度 R_b を単位時間・埋立層単位体積あたりガスが消費あるいは発生するモル数とする。

$$Q_b = (-\Delta H_b) R_b \quad (16)$$

好気性生物分解の場合には($-\Delta H_b$)は酸素1molを消費するときの反応熱($-\Delta H_o$)[J/mol- O_2]とし、 R_b は埋立層単位体積あたりの酸素消費速度 R_o [mol- O_2 /($m^3 \cdot s$)]とする。

嫌気性生物分解の場合には($-\Delta H_b$)は分解により発生するメタンガス1molあたりの反応熱($-\Delta H_m$)[J/mol- CH_4]とし、 R_b はメタン発生速度 R_m [mol- CH_4 /($m^3 \cdot s$)]とする。発生ガスをメタン基準で考えているのは、埋立地での現場実測³⁾から発生ガス中の炭酸ガスが一部水中へ溶解すると考えられるからである。

(B) 熱収支方程式

①～⑦を用いて、熱収支方程式をたてる。

$$Q_s = - \frac{\partial}{\partial z} (q_c + q_w + q_g + q_v) + Q_v + Q_b \quad (17)$$

q_g 、 q_v 、 Q_v は以下に述べる考察(第4章)により無視できるので、次式が得られる。

$$\frac{\partial}{\partial t} \left\{ C_{s1} \rho_{s1} (1 - \varepsilon) (T - T_r) \right\} = \frac{\partial}{\partial z} \left\{ \lambda_e \frac{\partial T}{\partial z} \right\} - \frac{\partial}{\partial z} \left\{ C_w \rho_w v (T - T_r) \right\} + (-\Delta H_b) R_b \quad (18)$$

これが本論文で提案する温度分布計算式である。

さらに、埋立層の多くの部分が非分解物や難分解物で構成され、さらに、埋立層の含水率が降雨によって大きく増減しない^{14) 15)}と考えることができる場合は熱容量、有効熱伝導率及び空隙率は一定と仮定できる。また、降雨浸透速度が時間的、場所的に一定であると仮定できる時* (ここでは降雨浸透速度=年間平均降雨量×浸出係数で計算する)には、次式のように簡単になる。

$$C_{s1} \rho_{s1} (1 - \varepsilon) \frac{\partial T}{\partial t} = \lambda_e \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} - C_w \rho_w v \frac{\partial T}{\partial z} + (-\Delta H_b) R_b \quad (19)$$

本論文の以下の計算で、第一近似的に埋立層の温度特性を知るために式(19)を用いた。

3 廃棄物埋立層の特性値の推定

混合ごみ、不燃ごみ、焼却灰の3種のごみについて、ごみ構成物質の組成や密度、熱容量、熱伝導率などから埋立層の持つ特性値を推定する。

3.1 埋立層の各相の物性

(A) 固相(ごみの固形分)の物性

本論文では混合ごみ、不燃ごみ、焼却灰の組成を表1のように設定した。次に、ごみの各成分について、

* 5.4.(B)で降雨浸透流がパルス状に変化する場合について考察している。

物性を物理定数表¹⁸⁾などから調査し、表2に示した(一部推定したものもある)。特に、紙、木材などは、空隙を除いた実質部分の物性を用いている。

固相全体の物性を次式により推定する。

$$\rho = \sum v_i \rho_i \quad (20)$$

ρ_i はi成分の密度、 v_i はi成分の体積比である。

$$C = \sum \omega_i C_i \quad (21)$$

C_i はi成分の比熱、 ω_i はi成分の重量比である。

混合物の有効熱伝導率は、多孔体の熱伝導機構に関する3相系モデル¹⁹⁾による次の2つの式(式(22)、(23))から、筆者らはごみの有効熱伝導率の代表値として式(24)に示す相乗平均値を用いた。

$$\lambda_{series} = 1 / \sum (x_i / \lambda_i) \quad (22)$$

$$\lambda_{parallel} = \sum x_i \lambda_i \quad (23)$$

$$\lambda_e = \sqrt{\lambda_{series} \lambda_{parallel}} \quad (24)$$

λ_i はi成分の熱伝導率である。 λ_{series} は埋立層を構成する3相が直列的に、 $\lambda_{parallel}$ は並列的に配置していると考えたモデルの有効熱伝導率を求めたものである。以上の式により、3種類の固相物性を推定した(表3)。

(B) 液相の物性

埋立層内液状水は、ごみ由来の汚濁物、有機酸、金属などを含んでいるが、純粋な水と仮定して物性を求めた(表3)。

(C) 気相の物性

埋立層内のガスは、発生ガスと水蒸気である。発生ガスは、分解が好気性であるか、嫌気性であるかによって異なる。本研究では嫌気性分解が支配的に起きている状態の計算を中心に議論するので、発生ガスは嫌気性発生ガスの組成(メタンと炭酸ガスが等モル存在)からなると仮定する。ガスの組成ごとの物性とこれらの混合ガスの物性を表4に示した。混合ガスの物性は比熱を式(21)、熱伝導率を式(23)を使って推定した²⁰⁾。

3. 2 埋立層の物性

3. 1で推定した各相の物性を用いて、埋立層全体の特性を次のように推定した。

埋立層の含水率、空隙率を表5のように設定した。固相と液相をあわせた密度は次式を用いて計算する。

$$\rho_{sl} = 1 / (w / \rho_w + (1-w) / \rho_s) \quad (25)$$

wは重量含水率、 ρ_s は固相の真密度である。また、熱容量、有効熱伝導率は式(21)~(24)を用いて推定した(表5)。

3. 3 熱発生特性

(A) 好気性分解における反応熱

有機物の好気性分解に伴う反応熱(- ΔH_o)は、約 $4.5 \times 10^5 \sim 5.0 \times 10^5$ [J/mol- O_2]とされている²⁰⁾。

(B) 嫌気性分解における反応熱

有機物の嫌気性分解に伴う反応熱(- ΔH_m)に関する研究は少ない。John. F. Ree⁵⁾は(- ΔH_m)として 4.1×10^4

Table 1 Composition of solid waste

Component	Percentage on dry basis [2]					
	mixed refuse ¹⁴⁾ *		incomb. refuse ¹⁴⁾ *		incin. residue ¹⁵⁾ *	
	***	v**	w	v	w	v
combustible						
paper	55.4	57.2	12.9	16.2	-	-
textile	4.9	5.8	2.9	4.2	-	-
wood	4.5	4.6	2.6	3.3	-	-
plastic	16.0	22.5	23.7	40.3	-	-
rubber	0.5	0.9	0.8	1.7	-	-
Total	81.3	91.0	42.9	65.7	-	-
incombustible						
iron	6.3	1.2	18.4	4.4	17.9	6.4
aluminum	0.4	0.2	1.0	0.7	4.8	5.0
glass	9.8	6.3	30.6	24.0	57.7	68.0
ceramic	1.1	0.7	2.8	2.2	-	-
soil	1.1	0.6	4.3	3.0	-	-
ash	-	-	-	-	19.6	20.5
Total	18.7	9.0	57.1	34.3	100.0	100.0

incomb. : incombustible, incin. : incinerator

* : Composition of mixed refuse and incombustible refuse is cited from reference 14) and the composition of incinerator residue is cited from reference 15).

** : v means volume fraction and w means weight fraction.

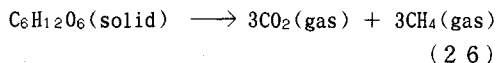
Table 2 Physical properties of component solid waste

Component	True density [g/cm ³]	Specific heat [J/(kg·°C)]	Thermal conductivity [J/(m·s·°C)]
paper	1.5	1260	0.3
textile	1.3	1310	0.5
wood	1.5	1360	0.6
plastic	1.1	1800	0.2
rubber	0.9	1590	0.2
iron	7.9	630	81
aluminum	2.7	880	240
glass	2.4	1160	0.9
ceramic	2.4	750	1.5
soil	2.7	880	4.9
ash	2.7	800	3.0

Table 3 Physical properties of three phases in landfill

Phase	ρ_s [g/cm ³]	C_{gs} [J/(kg·°C)]	λ [J/(m·s·°C)]		
			λ_e	λ_p	λ_s
Solid					
mixed refuse	1.7	1400	0.7	1.8	0.29
incomb.refuse	1.9	1400	1.4	5.8	0.33
incin.residue	2.8	1000	4.7	18.4	1.21
Liquid	1.0	4200	0.6	-	-
Gas	-	1860	0.02	-	-

[J/mol-CH₄]を与えている。グルコースの嫌気性分解反応を次のように考える。



ここで、C₆H₁₂O₆(s)、CO₂(g)、CH₄(g)の標準エンタルピーを、 1.3×10^6 、 4.0×10^5 、 7.5×10^4 [J/mol]とすると (-ΔH_m) = 4.4×10^4 [J/mol-CH₄]と計算される。

また、反応で生成したCO₂が液中にとどまるとすると、CO₂(l)の標準エンタルピーを 4.2×10^5 [J/mol]として、(-ΔH_m) = 6×10^4 [J/mol-CH₄]が得られる。

また、有機物としてセルロースを仮定すると、反応は次式ようになる。



C₆H₁₀O₅(s)、H₂O(l)の標準エンタルピーを 7.9×10^5 、 2.9×10^5 [J/mol]とすると (-ΔH_m) = 1.3×10^5 [J/mol-CH₄]となる。

嫌気性分解に伴う反応熱については、さらに研究の余地がある。なお、本論文では熱量の単位について、カリ-[cal]からジュール[J]への換算係数は4.2とした。

(C) 埋立層内のガス発生及び消費速度

埋立層におけるガス発生速度及び消費速度に関しては、埋立地での現場実測やカラム実験によりいくつか報告されている。好気性分解による酸素消費速度 R_o としては、田中ら⁸⁾²²⁾は厨芥を中心とする人工ごみ(混合ごみ模擬)の強制通気好気性分解実験で R_o = $10^{-4} \sim 2.5 \times 10^{-3}$ [mol-O₂/(m³·s)]、人工ごみの自然通気で R_o = $2 \times 10^{-5} \sim 5 \times 10^{-4}$ [mol-O₂/(m³·s)]、焼却灰で R_o = 8.2×10^{-6} [mol-O₂/(m³·s)]を得ている。花嶋ら²³⁾は混合ごみの準好気性埋立実験を行っているが、そこで得られたごみの分解速度から推定すると(全層で好気性分解が起こっていると)、R_o = 3×10^{-4} [mol-O₂/(m³·s)]が得られる。

嫌気性分解によるメタンガス発生速度 R_m としては、田中ら²⁴⁾²⁵⁾は嫌気性埋立のカラム実験により、人工ごみ(混合ごみ)で約 2×10^{-5} [mol-CH₄/(m³·s)]、不燃ごみで約 5×10^{-7} [mol-CH₄/(m³·s)]、焼却灰で約 1×10^{-7} [mol-CH₄/(m³·s)]を得ている。また、その他に多くの実測値²⁶⁾が得られている(R_m = $10^{-6} \sim 10^{-5}$ [mol-CH₄/(m³·s)])。

(D) 熱発生速度

熱発生速度 Q_b はさらに研究が必要であるが、以上に述べた(-ΔH_b)、R_bの資料から表6に示すQ_bを用いて計算した。不燃ごみ及び焼却灰の熱発生速度については、混合ごみの熱発生速度の約10分の1、50分の1とそれぞれ定めた。

3. 4 降雨浸透速度 v について

日平均降雨量を4mm/day、浸出係数0.5を用いて v = 2mm/dayとした。

4 水蒸気及び発生ガスの移動に伴う熱移動の評価

ここでは、水蒸気、発生ガスの移動に伴う顕熱移動量 q_g、q_v、及び水の状態変化に伴う潜熱の発生量 Q_v を評価する。そこで、式(17)に式(5)~(16)を代入して得られる熱収支方程式から求めた温度分布と、水蒸気及び発生ガスの移動に伴う熱移動を無視して得られる熱収支方程式(式(19))から求めた温度分布とを

Table 4 Physical properties of gas phase in anaerobic landfill layer

Component	Percentage		Specific heat [J/(kg·°C)]	Thermal conductivity [J/(m·s·°C)]
	v*	w*		
vapor**	7	9	2100	0.014
CH	46.5	67	2200	0.028
CO	46.5	24	840	0.013
Total gas	100	100	1860	0.02

* : v means volume fraction and w means weight fraction.

** : Volume fraction is calculated on assuming saturated vapor at 40 °C.

Table 5 Physical properties of landfill layer (estimated)

Solid waste	Water content (wet basis) [%]		ε [-]	ρ _{s1} [kg/m ³]	C _{s1} [J/(kg·°C)]	Thermal conductivity [J/(m·s·°C)]		
	W*	W'				λ _g	λ _p	λ _s
mixed refuse	67	62	0.2	1200	3300	0.21	0.50	0.09
incomb. refuse	43	41	0.3	1400	2600	0.15	0.40	0.06
incin. residue	22	35	0.2	1700	1700	0.46	2.33	0.09
ground**	18	30	0.2	1400	1800	0.40	1.2	0.12

* : W is weight fraction and W' is volume fraction.

** : assumed value

Table 6 Heat production rate (estimated)

Heat production rate	Solid waste		
	mixed refuse	incomb. refuse	incin. residue
Q _b (aerobic)	46*	4.6	0.9
Q _b (anaerobic)	0.3**	3×10^{-2}	6×10^{-3}

* : calculated on assuming -ΔH_o = 4.6×10^5 [J/mol-O₂] and R_o = 1×10^{-4} [mol-O₂/(m³·s)]

** : calculated on assuming -ΔH_m = 6×10^4 [J/mol-CH₄] and R_m = 5×10^{-5} [mol-CH₄/(m³·s)]

示した。図3は混合埋立層全域で
 一様な嫌気性分解による熱発生が
 あるとした場合の計算例で、 q_g 、
 q_v 、 Q_v の影響が最も大きいと思
 われる場合である。計算に用いた
 特性値はこれまでに述べた数値を
 用いている。屈曲係数は既報⁹⁾
 の結果から、混合ごみでは20と設
 定した。境界条件は埋立層底部で
 温度一定(境界条件(1))を用いた。
 埋立層温度が60°C程度の場合には、
 2つの温度分布にほとんど差がな
 いので、 q_g 、 q_v 、及び Q_v を無視
 することができる。

5 埋立層内温度分布の計算例

以上に述べた埋立層内の熱収支
 方程式(式(19))及び埋立層特性
 推定値を用いて、埋立層内の温度
 分布特性について検討した。

5. 1 埋立条件と定常温度分布

混合ごみ、不燃ごみ、焼却灰埋
 立層について次の2つを考える。

①嫌気性埋立～全層が一様に嫌気
 性分解しており、深さ方向に一様
 な熱発生特性、物性を持つ(この
 際、熱発生特性が深さ方向に変化
 すると思われるが、いくつかのパ
 ターンを想定して計算したが、総
 発熱量を同じにすると、温度分布
 形は似ていた)。

②準好気性埋立～埋立層内の表層

及び底部で、酸素の侵入による好気性分解が起こり、中間部は嫌気性分
 解しているとする。酸素侵入深さは既報⁹⁾の考え方をを用いて設定した。
 この2つのケースについて温度分布を計算した(図4～6)。

計算より、混合ごみ埋立層では嫌気性埋立でも埋立層内温度が約50°C
 程度まで上昇しうることがわかった。一方、不燃ごみ、焼却灰埋立層で
 は温度上昇がほとんど見られない。これは混合ごみに比べて熱発生速度
 Q_b を10分の1～50分の1にしたためであると思われる。準好気性埋立では、
 混合ごみ埋立層は嫌気性埋立とほぼ同じ温度分布を示した。一方、不燃
 ごみ、焼却灰埋立層では嫌気性埋立に比べて温度上昇が大きくなっている。
 これは、不燃ごみ、焼却灰埋立層では酸素の侵入深さが深く、埋立
 層の表層と底部に広い好気性分解領域が存在することに原因すると思わ
 れる。

5. 2 海面埋立地実測温度分布との比較

海面埋立地(混合ごみ)の実測温度分布⁶⁾と計算結果を比較した(図7)。
 一般に、埋立地の温度を測定する際には、ボーリング孔やガス抜き管に

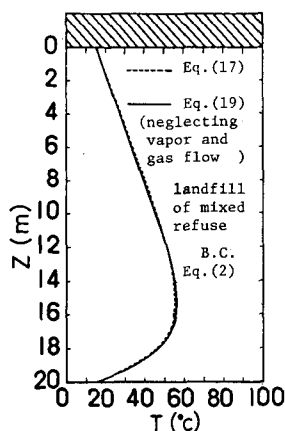


Fig.3 Influence of heat transfer by vapor and gas flow on temperature distribution

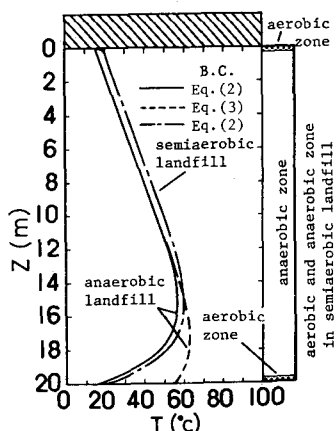


Fig.4 Temperature distribution in landfill of mixed refuse

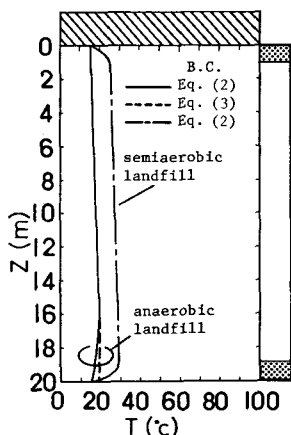


Fig.5 Temperature distribution in landfill of incomb. refuse

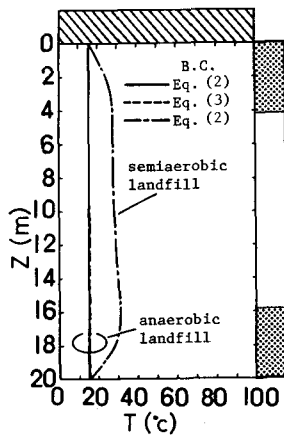


Fig.6 Temperature distribution in landfill of incin. residue

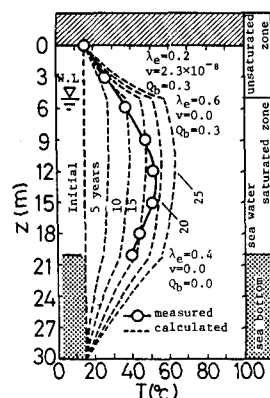


Fig.7 Comparison of calculated temperature distribution with measured one at 20 years after the beginning of reclamation

温度センサーを降ろして温度を測定している。この時、水蒸気や発生ガスの噴出が激しいような場合、埋立層温度とガス温度が平衡に達しないため、埋立層温度が正確に測定されないことが考えられる。このような点に注目すると、海面埋立のように水面が地表近くまでである場合、内部水の温度を測定しているので、この測定値は埋立層温度として信頼性があると思われる。

実測温度分布は埋立深さ約20m、埋立開始後約20年、埋立終了後約10年に測定されたものである。計算は海面埋立地に準じて、埋立層を①地表から水面までの通気層、②水面から自然地盤までの水面下、③自然地盤内の3つに分けて非定常計算により温度分布を求めた。なお、水面下の埋立層の特性は、埋立層が水とごみから構成されているとして、第3章で述べた方法で推定した値を用いた。計算にあたっては、埋立層内温度が15°Cで一定であるような深さ20mの埋立層が存在している状態を初期条件とし、埋立層の物性は時間と共に変化しないと仮定した。境界条件は(h) (式(4))を用い、計算例として $h = h_s + 10$ mと設定した。図に示したように、実測温度分布にほぼ似た計算結果が得られた。従って、本論文で提案した理論によって埋立層内の温度分布を推定することが可能であることがわかった。

5. 3 定常温度分布に対するパラメーターの影響

埋立層内温度分布の計算で与える有効熱伝導率 λ_e 、降雨浸透流速度 v 、埋立深さ h 、熱発生速度 Q_b などのパラメーターが変化した時、定常最高温度 T_{max} がどのように変化するかを検討する。

式(19)において、嫌気性埋立層で全層で均一の熱発生がある場合に、定常であるとして、境界条件(i)の下で解くと、最高温度 T_{max} は次のように表わせる。

$$T_{max} = \frac{\beta z_{max}}{\alpha h} T_a - \frac{\exp(\alpha z_{max}/h) - 1}{\exp(\alpha) - 1} \left\{ \left(1 + \frac{\beta}{\alpha} \right) T_a - T_h \right\} + T_s \quad (28)$$

$$z_{max} = \frac{1}{\alpha} \ln \frac{\beta (\exp(\alpha) - 1)}{\alpha^2 (1 - T_h/T_a + \beta/\alpha)} \quad (29)$$

$$\alpha = C_w \rho_w v h / \lambda_e \quad (30)$$

$$\beta = Q_b h^2 / (\lambda_e T_a) \quad (31)$$

これより、各パラメーターと T_{max} の関係がわかる。そこで、 T_{max} を縦軸に、各パラメーターを横軸にとり、第4章で求めた代表値から、各パラメーターを変化させたときの T_{max} の変化を図8に示した。この図から、熱発生速度 Q_b と埋立深さ h による影響が大きいことがわかる。 h の影響が大きいのは、埋立深さが深くなると、内部の総熱発生量が大きくなる上に、上下端からの熱放散が埋立層中心部温度に与える影響が小さくなるためではないかと思われる。境界条件(i)のもとでは、有効熱伝導率 λ_e 、降雨浸透流速度 v の最高温度に与える影響は小さいようである。

5. 4 埋立層内温度分布の動特性

海面埋立層の非定常温度分布計算からわかるように、埋立層温度分布はかなりゆるやかな時間変動特性を持っている。そこで、幾つかの計算により埋立層温度の動特性を検討した。

(A) 廃棄物埋立層表層温度の季節変化による影響

これまで $z = z_0$ における温度を年平均気温に等しいと仮定していたが、ここでは埋立層表層温度が季節変化した場合の埋立層温度分布の影響を検討する。混合ごみ嫌気性埋立層の定常温度分布において、ある時刻から表層温度 T_a が年周期変化した時(周期が1年、振幅が $\pm 10^\circ\text{C}$ の正弦関数変化)の温度分布の深さごとの変化を非定常計算により求めた(図9)。表層近くでは温度変動があるが、全体の温度分布形には余り変化はないことがわかる。深さが4m程度になると、温度変動がほとんどなくなっている。この結果は、前述した海面埋立地での温度分布実測例⁶⁾で得られた恒温深度5mとほぼ一致している。

(B) パルス状降雨による影響

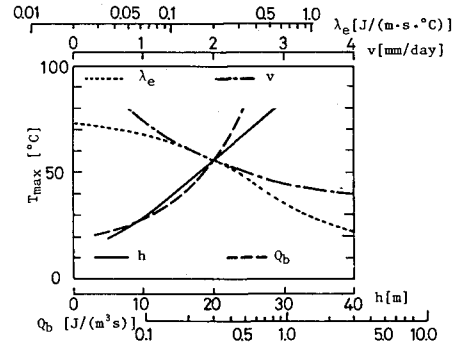


Fig.8 Influence of various parameters on T_{max}

埋立地に一時的に大量の雨が降った場合の温度分布の深さごとの変化を非定常計算により求めた(図10)。混合ごみ嫌気性埋立層で定常温度分布が形成された時に、パルス状の大きな降雨浸透流が生じたとした。降雨浸透速度は150mm/dayで8時間継続し、降雨パルスの形が変わらず2日後に埋立層底部から流出し始めると仮定した。図より、境界条件(1)のもとでは温度分布の変化はほとんどなく、一時的な大降雨は余り影響がないようである。これは、浸入した降雨の熱容量が埋立層の熱容量に比べて小さいからであろう。ここで、大降雨により生じた水量 V_r と埋立層内の含水量 V を比べてみる。 1m^2 で20mの深さについてみると、 $V_r=150\text{mm/day}\times 1\text{m}^2\times 8\text{hour}=0.05\text{m}^3$ 、 $V=1\text{m}^2\times 20\text{m}\times 0.61$ (体積含水率) $=12.2\text{m}^3$ となり、 V_r は V の1%以下となる。よって、短時間の大降雨は埋立層内温度分布に大きな影響は与えないと思われる。従って、本論文では降雨浸透速度を年間平均降水量を基準として取扱うことが有効であると思われる。

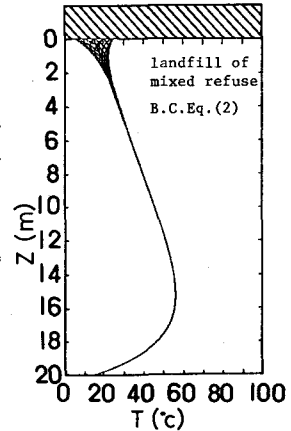


Fig.9 Influence of seasonal variation of surface temperature on temperature distribution

(C) 熱発生速度の経時変化による影響

埋立層内の微生物活動は分解初期、活発期、終末期に分けられ、それらともなつて熱発生速度 Q_b も経時変化する。そこで、第3章で用いた代表値で、嫌気性の混合ごみ埋立層の定常温度分布において、 Q_b が10年で10分の1になるように対数的に減少したときの埋立層温度の変化を計算して図11に示した。また、図中には非定常温度分布計算値(実線、1点破線、破線)と各時点における Q_b に対応する定常温度分布計算値(点線)を示した。埋立層温度分布は Q_b の変化に対して、大きく遅れることがわかる。従って、埋立層内の生物分解速度が減少して、安定化が進んでも、埋立層内温度はかなり遅れて変化するとと思われる。しかしながら、埋立層内温度は、安定化指標としては安全側にある。

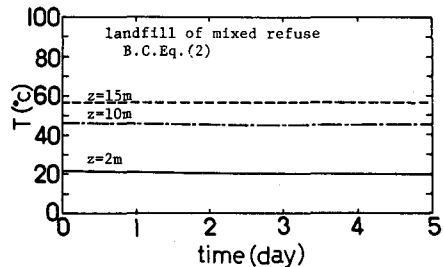


Fig.10 Influence of one pulse-like large precipitation on temperature distribution

6 終わりに

本論文では、埋立層温度を理論的に解析する手法について検討を行ったが、主として次のような結論が得られた。

- ①廃棄物埋立層内の温度分布計算式は、一般的な条件のもとでは、水蒸気、ガスの移動に伴う熱移動が無視でき、簡単な形で表現できることを示した。
- ②埋立層の熱特性値(有効熱伝導率、熱発生速度など)の推定値を示した。
- ③埋立層温度のシミュレーションにより、嫌気性埋立でも、混合ごみ埋立層については、埋立層最高温度が約50°Cになることが可能であることがわかった。
- ④準好気性埋立は、不燃ごみ、焼却灰埋立層の方が好気性分解による温度上昇効果が大きいことが推定できた。
- ⑤埋立層温度に大きな影響を与えるパラメーターは、主に埋立深さ h と熱発生速度 Q_b である。
- ⑥海面埋立の実測温度分布を、本論文の提案式で計算したところ、比較的よく一致し、提案式は、埋立層の温度分布計算式として有効である。
- ⑦埋立層温度分布に対して地表面温度変動が影響する深さは、自然地盤より浅いことがわかった。
- ⑧埋立層温度分布に対する、降雨浸透速度変動の影響は小さいことがわかった。
- ⑨熱発生速度が経時変化したとき、埋立層温度分布は Q_b の変化に対して、遅れて追従する。埋立層温度を埋立層の安定化指標として考えた場合は安全側にある。

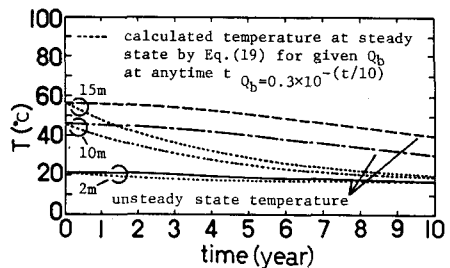


Fig.11 Time-variation of temperature with decreasing Q_b

今後、本研究を出発点として、埋立層の熱物性、熱発生特性の測定、表層やガス抜き管の近傍での温度分布、実埋立地の温度分布の正確な測定など、さらに研究を進めたいと考えている。

参考文献

- 1) 日本環境衛生センター編；廃棄物の埋立処分に關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）
- 2) 萩原松博；清掃技報，Vol. 3, pp. 39-47(1980)
- 3) 長谷川信夫；水処理技術，Vol. 20, pp. 101-105(1979)
- 4) Wasataka Hanajima, Koreyoshi Yamasaki etc. ; ASCE, J. E. E. D. Vol. 105, No. EE1, pp. 1-9(1980)
- 5) John F. Rees ; J. Chem. Tech. Biotechnol. Vol. 30, pp. 458-465 (1980)
- 6) 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)
- 7) 新井正，西沢利栄；水温暖，水文学講座10, pp. 226, 共立出版（1974）
- 8) 田中信寿，高畑恒志，神山桂一；衛生工学研究論文集，第22巻，pp. 37-48(1986)
- 9) 田中信寿，吉田英樹，神山桂一；土木学会第41回年次講演会講演概要集第2部，pp. 877-878(1986)
- 10) 須賀研二，田中信寿，神山桂一；土木学会第42回年次講演会講演概要集第2部，pp. 982-983(1987)
- 11) Daniel Hillel；土壤物理学概論（邦訳），p. 56, 養賢堂(1984)
- 12) Philip J. R. and D. A. De Vries ; Transaction American Geophysical Union, Vol. 38, No. 2, pp. 222-233(1957)
- 13) R. M. Felder and R. W. Rousseau ; Elementary Principles of Chemical Processes, 2nd ed., p. 235, Wiley(1986)
- 14) 田中信寿，宇野晋，神山桂一；土木学会第42回年次講演会講演概要集第2部，pp. 968-969(1987)
- 15) 三谷紀行，田中信寿，神山桂一；土木学会第43回年次講演会講演概要集第2部(1988)
- 16) 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)
- 17) Robert J. Collins ; Transp. Res. Rec., No. 734(1979)
- 18) 東京天文台編；理科年表，丸善(1987)
- 19) 土質工学会編；土の凍結，土質工学会
- 20) 藤田董；粘度と熱伝導率，p. 143, 培風館(1975)
- 21) 永井史郎，合葉修一；生物化学工学，科学技術社(1978)
- 22) 田中信寿ら；北海道大学工学部報告，第113号，p. 89(1983)
- 23) 左合正雄，花崎正孝ら；都市清掃，第34巻，第124号，pp. 294-313(1981)
- 24) 田中信寿，神山桂一；土木学会論文集，第381号，II-7, pp. 217-225(1987)
- 25) 田中信寿，神山桂一；衛生工学研究論文集，第24巻，pp. 189-196(1988)
- 26) 池口孝；水処理技術，第38巻，第134号，pp. 298-302 (1983)

記号

- a, b, c ; Antoineの式における定数[-]
 C_i ; i成分の比熱[J/(kg·°C)]
 D_{ij} ; 相互拡散係数 [m²/s]
 h ; 埋立層底部までの深さ[m]
 h_s ; 自然地盤内にとつた境界深さ[m]
 $(-ΔH_b)$; 生物分解熱[J/mol]
 $(-ΔH_a)$; 嫌気性生物分解熱[J/mol·CH₄]
 $(-ΔH_o)$; 好気性生物分解熱 [J/mol·O₂]
 K ; Antoineの式における換算係数[Pa/mmHg]
 L ; 水蒸気の潜熱 [J/kg]
 M_i ; i成分の分子量[kg/mol]
 N_i ; i成分のモルフラックス[mol/(m²s)]
 P_i ; i成分の圧力[Pa]
 Q_a ; 熱の蓄積速度[J/(m³s)]
 Q_b ; 熱の発生速度[J/(m³s)]
 q_i ; i成分による熱移動速度[J/(m²s)]
 q_c ; 熱伝導による熱移動速度[J/(m²s)]
 R ; ガス定数[Pa·m³/(mol·K)]
 R_a ; 生物分解によるガス発生・消費速度[mol/(m³s)]
 R_b ; 生物分解の反応速度 (= R_a) [mol/(m³s)]
 R_m ; メタンガス発生速度[mol·CH₄/(m³s)]
 R_o ; 酸素ガス消費速度[mol·O₂/(m³s)]
 R_v ; 水蒸気の発生速度[mol/(m³s)]
 T ; 埋立層内温度[°C]
 T' ; 絶対温度[K]
 T_a ; 年平均気温[°C]
 T_h ; 深さhでの一定温度[°C]
 T_r ; 25.0℃計算基準温度[°C]
 T_s ; 自然地盤内の恒温層温度[°C]
 T_{max} ; 埋立層内最高温度[°C]
 t ; 時間[s]
 v ; 降雨浸透速度[m/s]
 V ; 埋立層内の含水量[m³]
 V_r ; 大降雨により生じた埋立層内水量[m³]
 w ; 重量含水率[-]
 w' ; 体積含水率[-]
 x_i ; i成分(相)のモル分率[-]
 z ; 埋立層の深さ[m]
 z_a ; 第1層と第2層の境界深さ[m]
 z_{max} ; 埋立層の最高温度を示す深さ[m]
 α, β ; 無次元パラメータ
 ϵ ; 空隙率[-]
 λ_i ; i成分(相)の熱伝導率[J/(m·s·°C)]
 λ_{series} ; 直列モデルにより推定した熱伝導率 [J/(m·s·°C)]
 $\lambda_{parallel}$; 並列モデルにより推定した熱伝導率 [J/(m·s·°C)]
 ν_i ; i成分の体積比
 f ; 屈曲係数[-]
 ρ_i ; i成分の密度[kg/m³]
 ω_i ; i成分の重量比

subscript b; biological e; effective g; gas
 m; anaerobic o; aerobic s; solid
 sl; solid and liquid v; vapor w; liquid water
 superscript t; total