

II-456

廃棄物埋立層内の温度分布特性に関する研究

室蘭工業大学

正員 吉田英樹

北海道大学工学部

正員 田中信寿

正員 神山桂一

1. はじめに 本研究では、埋立層内の物理、化学、生物学的現象を考える上で重要と考えられる‘温度因子’に注目した。埋立層内の温度上昇を予測するため、まず埋立層内部の熱移動現象を記述する方程式を提案した。さらに、この方程式を解くためにごみ埋立層内の有効熱伝導率、比熱、生物分解反応熱などのごみ層特性値の推定を行った。それらを用いて埋立層内の温度分布シミュレーションをおこなった。

2. 熱収支方程式について ごみ埋立層内における熱移動に関する方程式を考えるにあたり、次のような仮定をおいた。1) 1次元問題とする。2) 熱収支は、①有効熱伝導率を用いる熱伝導項 ②液状水、水蒸気及びガスの移動に伴う顕熱移動項 ③蒸発に伴う潜熱移動項 ④生物反応に伴う熱発生項を考える。3) ごみ埋立層を構成している固相、液相、気相は温度平衡にある。また、埋立層内ガス中の水蒸気分圧はごみ層内温度における飽和蒸気圧に等しいとする。4) 埋立層内の特性は、深さ方向にある一定の区間で均一であるとする。5) 埋立層表層部において、地表面温度の日周変動、ふく射、風などの影響が小さくなるある深さから下のごみ層について温度分布を考える。6) 埋立層内の水分を、移動しない大量の保水限界状態の固定水と定常的に流れる降雨浸透流れに分け、その量は深さ方向に一定とする。

このような仮定に基づき、次のような熱収支方程式を考えた。

$$C \rho (1-\varepsilon) \frac{\partial T}{\partial t} = \lambda \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} - C_w J_w \frac{\partial T}{\partial z} - M_v \frac{\partial}{\partial z} \left[\left\{ L_g + C_v (T - T_r) \right\} N_v \right] - M_g \frac{\partial}{\partial z} \left[\left\{ \Delta H + C_g (T - T_r) \right\} N_g \right]$$

C ; ごみ層の固液相の比熱[J/(kg・°C)]、C_g ; 埋立層内ガスの平均比熱[J/(kg・°C)]、C_v ; 水蒸気の比熱[J/(kg・°C)]、-ΔH ; 生物分解反応に伴う反応熱[J/kg]、J_w ; 降雨浸透速度[kg/(m²s)]、L_g ; 水蒸気の潜熱[J/kg]、M_g ; 埋立層内ガスの平均分子量[kg/mol]、M_v ; 水蒸気の分子量[kg/mol]、N_g ; 埋立層内ガスフラックス[mol/(m²s)]、N_v ; 水蒸気フラックス[mol/(m²s)]、T ; 温度[°C]、T_r ; 基準温度[°C]、t ; 時間[s]、z ; 深さ[m]、ε ; 空隙率[-]、ρ ; ごみ層の固液相の密度[kg/m³]、λ ; ごみ層の有効熱伝導率[J/(m・s・°C)]

次に、水蒸気の顕熱、潜熱フラックス項、ガスの顕熱フラックス項は温度分布にほとんど影響を与えないので（5. 温度分布の計算例において述べる）、熱収支方程式は次のように簡単化できる。

$$C \rho (1-\varepsilon) \frac{\partial T}{\partial t} = \lambda \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} - C_w J_w \frac{\partial T}{\partial z} + \Phi$$

Φ (≡ -M_gΔH R_g) ; 生物分解による熱発生速度 [J/(m³s)]、R_g (≡ $\frac{\partial N_g}{\partial z}$) ; ガス発生速度 [mol/(m³s)]

簡単化により、温度分布の数値計算が容易になり、また定常温度分布を解析的に解くことができる。

3. 境界条件

1) 上部境界条件 ごみ層上部温度一定条件（仮定4で述べた、地表面温度の日周変動の影響を受けない深さの温度を年平均気温に等しいとした）

2) 底部境界条件 ①ごみ層底部温度一定条件②ごみ層底部断熱条件③ごみ層底部下土質地盤の一定深さで温度一定であるとする条件（熱収支方程式をごみ層底部下の土質地盤についても考え、土質地盤の一定深さで温度が一定であるとする場合）の3種類を用いた。

4. ごみ埋立層の特性値の推定

ごみ埋立層の特性値（λ、C、ΔHなど）を推定した。熱伝導率、比熱など実測データがない特性値につ

いては、ごみ埋立層は固相(ごみ質部分)、液相(水と仮定する)、気相(埋立層内の発生ガス)から構成されているとし、各相の成分を実測データから決定し、個々の成分の熱伝導率、比

表1 ごみ埋立地の特性値を推定した結果

埋立内容物	含水率 [%]		空隙率 [γ]	固相密度 [ρ (kg/m ³)]	固液相比熱 [C (J/(kg·°C))]	熱伝導率 λ [(W·m ⁻¹ ·°C ⁻¹)]		
	体積	重量				λ_s (固相)	λ_p (液相)	λ (代表値)
混合ごみ埋(海面埋立)	61	67	0.2	1100	3300	0.10	0.64	0.21
不燃ごみ	76	87	0.0	1200	3300	0.65	0.67	0.66
焼却灰	45	43	0.3	1300	2700	0.08	0.60	0.20
	35	22	0.2	1400	1700	0.09	2.40	0.47

熱を体積比、質量比、モル比などで配分することによって、特性値を推定した。その他の実測データのある特性値については実測データに基づいて推定した。本研究で埋立対象としたごみは、混合ごみ、不燃ごみ、焼却灰の3種類である。主な特性値の推定値を表1に示す。本研究においては、降雨浸透流としては、降雨の約50%が埋立層内に浸入しているとし、降雨浸透速度 J_w を年平均降雨量の50%とした(約 2 mm/day = 2.3×10^{-5} kg/(m²s))。生物分解による反応熱としては、主に嫌気性分解によるものと考えた。嫌気性分解に伴う反応熱については、反応の前後のエンタルピー収支により推定した。その結果、グルコース1モルの分解において、好気性分解では反応熱が約 2800 kJであるといわれているのに対し、嫌気性分解では約 92 kJと推定された。ガス発生速度 R_g は混合ごみで約 $1 \times 10^{-5} \sim 2 \times 10^{-5}$ mol/(m³s) とした ($R_g = 1 \times 10^{-5}$ mol/(m³s) は1年でごみ 1 m³ 当り約 10 kg (kg-CO₂換算) 分解する速度である)。不燃ごみの R_g は混合ごみの R_g の1/10、焼却灰では1/50と推定した。

5. 温度分布の計算例

(1) ガス、水蒸気の移動に伴う熱移動の評価

熱収支方程式において、ガスの顕熱移動項及び水蒸気の顕熱、潜熱移動項を無視し、単純化した場合とそうでない場合の定常温度分布の計算結果を図1に示す。計算に用いた条件は、ガスの移動量及び水蒸気の移動量が大きくなるような場合を想定した。図でわかるように、2つの温度分布形はほとんど差がない。従って、埋立深さが20mと深く、ごみ層内が高温域にある場合でも、ガス、水蒸気による熱移動項は温度分布に大きな影響を与えないことがわかった。計算した結果において、水蒸気の移動フラックスは埋立層内ガスのバルクフローに伴うものが支配的であり、拡散による水蒸気移動フラックスはこれに比べて小さい。

(2) 温度分布の実測値とシミュレーション値の比較

図2に海面埋立を行ったごみ埋立地における温度分布の実測例及び、熱収支方程式を海面埋立を考慮して推定した特性条件のもとで解析した計算例を示す。温度分布の実測された埋立地は混合ごみが埋め立てられ、埋立開始後約20年、埋立終了後約10年経過している。埋立深さは約20mで、水面は地表面から約5m下にある。この実測以後、温度分布は年々、減少傾向を示した。計算例は混合ごみを埋め立てて、全層で嫌気性分解が起こっているとして、非定常解析を行った結果である。初期温度分布は全層で15℃とした。ほぼ実測例の温度分布の傾向に近い結果が得られる。従って、本研究で提案した熱収支方程式及び特性条件を用いた解析で実際のごみ埋立地の温度分布を説明できるものと思われる。混合ごみを埋め立てた場合、嫌気性分解によってごみ層内温度が約60℃に達しうることがわかった。一方、不燃ごみ、焼却灰を埋め立てた場合についても同様に計算を行った結果、ごみ層内温度上昇は5℃以下であった。これは、不燃ごみ、焼却灰ではガス発生速度が混合ごみの1/10~1/50と推定され、熱発生速度が小さいためと思われる。

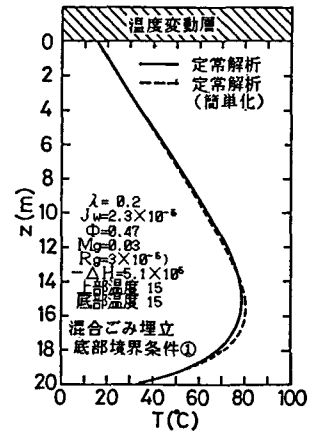


図1 定常温度分布解析における熱収支式の簡単化の影響

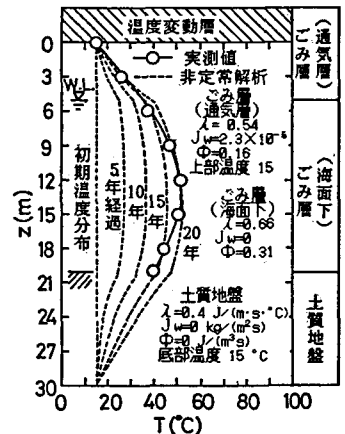


図2 海面埋立地における温度分布の実測値及び非定常温度分布の解析結果(混合ごみ埋立 底部境界条件③)