

(36) 高い温度上昇を示す廃棄物埋立地内 温度分布の模擬計算法の研究

吉田 英樹^{1*}・穂積 準¹

¹室蘭工業大学建設システム工学科 (〒050-8585北海道室蘭市水元町27-1)

* E-mail: gomigomi@mmm.muroran-it.ac.jp

高い温度上昇を示した東京都海面埋立地における実測温度を計算対象とし、廃棄物埋立地内部の熱移動現象を記述した1次元熱収支方程式を用いて、温度シミュレーションを行った。計算においては、埋立期間中に鉛直方向に埋立層が積み上がる過程をモデル化した。シミュレーション結果は実測温度を時間的・空間的にほぼよく模擬することができた。微生物反応条件を変化させた感度解析の結果、実測温度において埋立初期(埋立開始後約7年)で高い温度(最高66℃)に達し、その後も約15年間にわたって約40℃以上の高温状態を維持していたのは、埋立中の埋立地表層での好気性微生物反応とそれに続いて起こる嫌気性微生物反応による発熱現象によるものであったことをシミュレーションによる再現計算から推察した。

Key Words : landfill, temperature, biodegradation, heat, simulation

1. はじめに

廃棄物埋立地内部の温度(以下、埋立地内温度)が上昇する現象は、多くの埋立地で観測されている¹⁻⁵⁾。その原因は微生物反応に伴う発熱⁶⁾によるものとされているが、焼却灰と水の化学反応に伴う発熱も確認されている⁷⁻⁹⁾。

日本の埋立地廃止基準の1つとして埋立地内温度が採用されているのは、埋立地内温度が発熱現象に伴う物理化学生物学的現象の動態を反映しているためである。さらに、埋立地温度上昇に伴う遮水シートの品質劣化や粘性土層内部での温度勾配による水分移動に伴う亀裂発生などによる遮水性能低下の問題が指摘されている¹⁰⁾。このように、埋立地内温度は環境安全な埋立地を維持・管理する上で重要な指標の1つとなっている。

本研究では、準好気性構造(集水管とガス抜き管が連結されて、埋立地内部への空気流入が促進される構造)を持たない、古い構造の埋立地を計算対象とした。

高い温度上昇が見られた代表的な事例として、東京都海面埋立地がある。東京都港湾局¹¹⁾は中央防波堤内側埋立地内の埋立区画で埋立開始後約7年目から埋立地内温度測定を継続しており、最高で70℃に達していたと報告している。東京都清掃局^{12,13)}は同埋立地の一部の埋立区画で、試験的に廃棄物(焼却灰を含まない可燃ごみ、

不燃ごみ)の積み上げを行い、800日間にわたって内部温度を測定し、埋立直後から温度が上昇して、約50~60℃で安定したと報告している(図-1)。

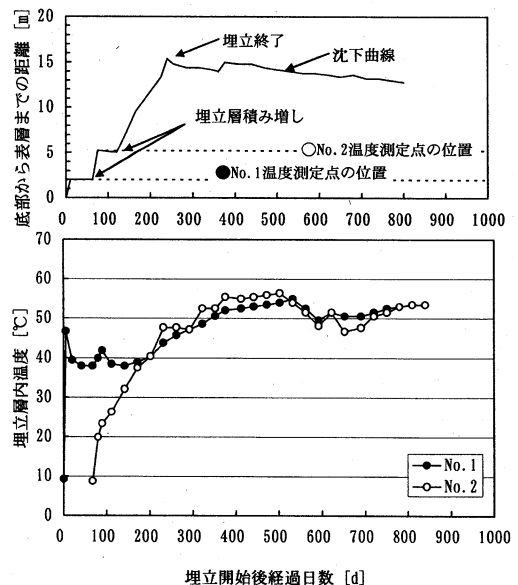


図-1 東京都中央防波堤内側埋立地の一部区画での試験的埋立での埋立進行状況・温度測定位置及び温度測定事例¹³⁾

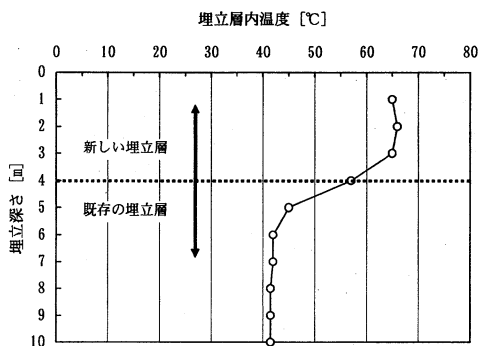


図-2 埋立中の廃棄物層内温度分布測定事例¹⁾
(埋立後1~2ヶ月)

長谷川¹⁾は嫌気性型埋立地(集水管がなく、個々に独立したガス抜き管のみ)の埋立過程におけるガス抜き管内の温度について報告し、埋立開始後1~2ヶ月後に好気性微生物反応によってガス温度が最高85℃(平均75℃)になり、その後、嫌気性微生物反応が起こるが、温度は25~35℃に安定すると述べている。埋立初期に既存の埋立層に新たに埋立が行われた場合の1~2ヶ月後の温度分布を図-2に示した。表層から4mまで新しい埋立層であるが、65℃に達し、一方既存の埋立層である4m以下では42℃で一定となっている。

これらの温度測定事例から、埋立地における高い温度上昇は埋立開始時から起こっているのではないかと推察できる。しかし、このような温度上昇がどのような過程で形成されているのかについて、これらの数少ない測定事例のみから明らかにすることは困難である。そこで、埋立作業過程や埋立地内部での熱発生・熱移動現象を仮定し、温度分布を計算することにより模擬することが有効であると思われる。

このような埋立地内温度の模擬計算についてはいくつもの研究事例がある¹⁴⁻¹⁶⁾。著者ら¹⁷⁾も埋立地の規模が十分大きい場合は深さ方向のみの1次元問題として捉えることが可能であると仮定し、埋立完了後の埋立地の1次元温度分布計算を行うための熱収支方程式を導き、埋立終了後の埋立地温度分布の基本特性を明らかにした。しかし、実際の埋立地では埋立期間が10年以上の長期にわたる場合が多く、また、先に示したように埋立開始直後から温度上昇が起こることが報告されていることから、埋立中の温度上昇を考慮した温度分布の計算手法の開発が必要と考えられるが、このような計算手法はほとんど研究されていない。

著者ら^{18,19)}はさらに一定の厚さの埋立セルが1次元的に積み上がる過程を模擬した埋立地内温度分布計算(以下、積み上げ計算)を提案している。本研究では、特に表層での好気性微生物反応の発生に注目し、種々の反応条件下で高い温度上昇が見られた埋立地の温度測定結果

を再現することを試みるとともに、高い温度上昇の形成過程について説明した。

2. 温度分布計算方法

既報¹⁷⁾で示したように、埋立層(深さ方向の埋立地の層状構成)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時間的に一定と仮定できる。また、降雨浸透速度 v 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、1次元熱収支方程式は以下のように与えられる(各記号の単位は論文末に与える)。

$$C_e \rho_e \frac{\partial \theta}{\partial t} = k_e \frac{\partial^2 \theta}{\partial z^2} - C_w \rho_w v \frac{\partial \theta}{\partial z} + (-\Delta H_b) R_b \quad (1)$$

ρ_e , C_e は次式で計算できる。

$$\rho_e = \sum y_i \rho_i \quad (2)$$

ここで、 ρ_i は埋立層を構成する*i*成分(*i*-気相としての混合ガス、液相としての内部水、固相としての紙類、繊維、灰など、すべての成分を示す。以下でも同じ)の真密度、 y_i は*i*成分の体積比である。

$$C_e = \sum x_i C_i \quad (3)$$

ここで、 C_i は埋立層を構成する*i*成分の比熱、 x_i は*i*成分の質量比である。

埋立層の有効熱伝導率 k_e ²⁰⁾は、多孔体の熱伝導機構に関する気相・液相・固相の3相系モデルによる直列モデル及び並列モデルに基づく下記の推定式(式(4)と(5))で求めた推定値から、式(6)に示す相乗平均値を求めて、代表値とした。

$$k_{series} = 1 / \sum_{i=1}^n \frac{y_i}{k_i} \quad (4)$$

$$k_{parallel} = \sum_{i=1}^n y_i k_i \quad (5)$$

$$k_e = \sqrt{k_{series} k_{parallel}} \quad (6)$$

ここで、 k_{series} は直列モデル推定値、 $k_{parallel}$ は並列モデル推定値、 k_i は埋立層を構成する成分*i*の熱伝導率である。

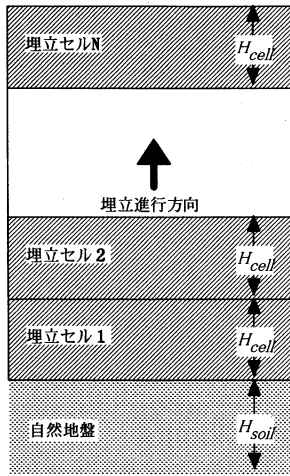
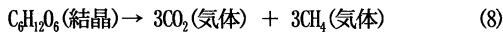
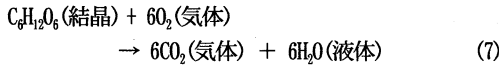


図-3 埋立セルの積み上げモデル

($-\Delta H_b$)と R_b については、好気性微生物反応の場合には($-\Delta H_b$)は酸素1molを消費するときの反応熱($-\Delta H_{O_2}$)、 R_b は埋立層単位体積あたりの酸素消費速度 R_{O_2} とし、嫌気性微生物反応の場合には反応により発生するメタンガス1molあたりの反応熱($-\Delta H_{CH_4}$)、 R_b はメタン発生速度 R_{CH_4} とした。 $(-\Delta H_b)$ は以下のように求めた。埋立層に含まれる有機性廃棄物をグルコースで仮定したとき、好気性・嫌気性微生物反応は次式のように書ける⁶⁾。



式(7)と(8)において、 $C_6H_{12}O_6$ 、 O_2 、 CO_2 、 H_2O 、 CH_4 の標準生成エンタルピー($-\Delta H$)をそれぞれ、1274.4、0、393.5、285.8、74.9 kJ/mol とすると、好気性微生物反応熱($-\Delta H_{O_2}$)は467 kJ/mol- O_2 、嫌気性微生物反応熱($-\Delta H_{CH_4}$)は43.5 kJ/mol- CH_4 と計算できる。

次に1次元温度分布の計算であるが、既報¹⁰⁾では、簡略化のために埋立が終了した時点から計算を開始していた。本研究では、図-3に示したように、N個の埋立層がある期間ごとに積み上げられるとした。温度分布の計算は、一定期間ごとに埋立セルが積み上げられてきた埋立層について、積み上げ直後の温度分布を初期温度として式(1)を差分法を用いて数値計算した。

したがって、埋立セル内で微生物反応により有機物が消滅するまでの時間は、セルごとに異なる。つまり、最初に埋め立てられたセルで最も早く有機物が消滅し、最後に埋め立てられたセルで最も遅く有機物が消滅する。

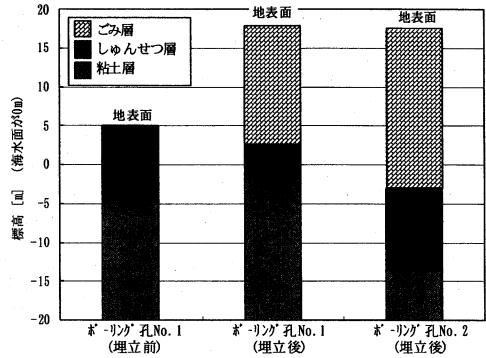


図-4 東京都中央防波堤内側埋立地における埋立初期のボーリング調査柱状図¹²⁾

また、積み上げ計算では、新しい埋立セルが大気に接し、次の埋立セルが積み上げられるまで表層で好気性微生物反応が起こる現象を組み込むことが可能になる。

3. 提案した計算法による埋立地内温度シミュレーション

(1) 計算対象とした実測温度分布

東京都中央防波堤内側埋立地で、図-1に示した温度分布の測定箇所とは異なる位置で測定された温度分布¹¹⁾を計算対象とした。図-4に埋立初期のボーリング調査結果を示した¹²⁾。この埋立地は海面埋立地であるが、浚渫土砂の埋め立てにより嵩上げされ、廃棄物層はほぼ水面より上に位置しており、埋立中は埋立セルが大気に接した状態でセルの表層で好気性微生物反応が起こりうる条件にあったと推定される。埋立廃棄物は可燃ごみを含む混合ごみであり、即日覆土の実施状況については不明であるが、埋立開始から4年経過時で湿質量比で全体の約37%を覆土材が占めていた²¹⁾。

計算対象とする区画の埋立は1976年11月に始まって、1979年3月に終了し、埋立期間は2年4ヶ月(850日間)であったとされている²²⁾。温度分布測定は3箇所で行われ、これらの最高温度は60~70℃の範囲であったが、最高温度が66℃と中程度であったものを計算対象とした。

測定された温度分布の深さ方向の変化を図-5、深さ方向の最高温度と平均温度を計算したものの経年変化を図-6に示した。最高温度は埋立開始後7年経過時で66℃になっており、その後緩やかに低下している。地下水面は埋立開始後7.2年(埋立終了後約5年)に表層から15mの深さにあったが(それ以前の地下水面は不明)、19.3年経過時で23m前後となっていた。

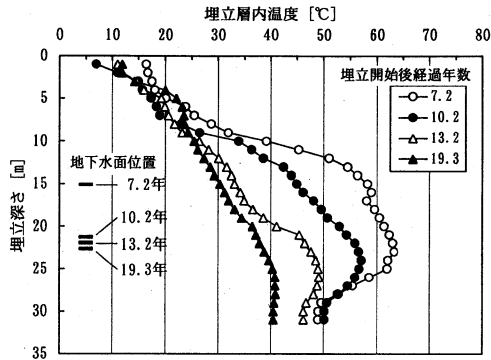


図-5 計算対象とした東京都中央防波堤内側処分場の温度分布測定事例¹⁾～深さ方向変化～

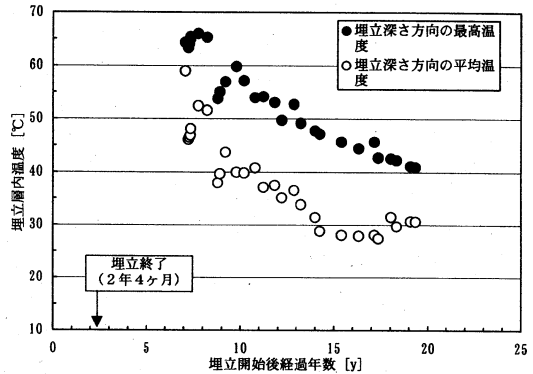


図-6 計算対象とした東京都中央防波堤内側処分場の温度分布測定事例¹⁾～経年変化～

表-1 模擬埋立層の組成

構成 [*] [%]	混合ごみ埋立地		
	質量比	体積比	
可燃	紙類	11.1	15.2
	繊維	1.7	2.7
	厨芥	3.3	4.9
	木類	9.8	13.5
	ゴム類	0.8	1.8
不燃	土砂	8.2	6.4
	硬質プラスチック	2.4	4.8
	軟質プラスチック	2.4	5.4
	鉄	5.2	1.4
	アルミニウム	0.2	0.1
	ガラス	8.0	6.9
	陶磁器	2.1	1.8
	覆土	44.8	34.9
合計	100.0	100.0	

*) 乾燥基準

埋立ごみの組成については、東京都中央防波堤内側処分場の埋立ごみに関する調査事例^{13,20)}のデータを基に表-1のように設定した。埋立ごみの構成成分の物性値は文献²⁴⁻²⁶⁾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、木材などの物性は、空隙を除いた実質部分の物性値を用いている。埋立層内水は純粋な水の物性値を用いた。また、表-1において、質量比を体積比に変換する際には表-2に示した真密度を用いた。

一方、埋立層内の空隙を占める混合ガスの物性値は、埋立ガスと水蒸気で構成されているとして表-3のように推定した。埋立ガスの組成は、埋立層内が好気性が嫌気性かによって異なるが、埋立中を除いて嫌気性が支配的に起こっている状態の計算を中心に議論するので、埋立ガスは嫌気性埋立ガスの組成(メタンと炭酸ガスが等モル存在)を仮定した。混合ガスの比熱及び熱伝導率はモル分率により比例配分して推定した²⁷⁾。ガス温度が20℃から80℃まで上昇すると、比熱は20%、熱伝導率は

表-2 模擬埋立層構成成分の物性値

組成	真密度 kg/m ³	比熱 J/(kg℃)	熱伝導率 J/(ms℃)
紙類	1500	1260	0.65
繊維	1300	1310	0.29
厨芥	1400	1715	0.47
木類	1500	1360	0.65
ゴム類	940	1590	0.20
土砂 [*]	2650	800	2.60
硬質プラスチック	1040	1300	0.12
軟質プラスチック	920	2300	0.33
鉄	7860	630	81.2
アルミニウム	2690	880	236
ガラス	2400	1160	0.90
陶磁器	2400	750	1.50
灰	2230	800	0.55
水	1000	4200	0.6

*) 表-1の覆土の物性値は土砂のものを用いた

表-3 模擬埋立層内混合ガスの物性

成分	構成比 [%]		比熱 J/(kg℃)	熱伝導率 J/(ms℃)
	質量比	体積比		
ガス全体(20℃)	100.0	100.0	1524	0.020
水蒸気	1.2	2.0	2051*	0.014
メタン	26.4	49.0	2165	0.028
炭酸ガス	72.4	49.0	861	0.013
ガス全体(80℃)	100.0	100.0	1841	0.027
水蒸気	34.7	47.0	2051*	0.022
メタン	17.4	26.5	2404	0.041
炭酸ガス	47.8	26.5	906	0.021

*) 水蒸気の比熱は100℃の物性値を用いた

35%程度上昇するが、混合ガスの物性が埋立層全体の特性に与える影響は小さいので、以下の計算においては20℃の物性値を用いることとした。また、メタンと炭酸ガスの体積比を1:1から2:1まで変化させても、比熱は16%、熱伝導率は10%程度上昇するのみで、同様に影響は小さいので、等モル存在を仮定することとした。

埋立層内の水面より上の水分不飽和廃棄物層と下の水分飽和廃棄物層に分けて、温度分布を計算する必要がある。埋立層内の地下水面位置は、埋立から埋立開始後7年までは不明で、7年～19年まで地表面から15～23mの

表-4 模擬埋立層（廃棄物層のみ）の物性値（推定）

埋立層	含水率 [%]		空隙率 ϵ [%]	みかけ密度 ρ_e [kg/m ³]	平均比熱 C_e [J/(kg°C)]	有効熱伝導率 [J/(m ² °C)]		
	質量比 W_w	体積比 W_v				相乗平均 k_e	直列モデル k_{series}	並列モデル $k_{parallel}$
	混合ごみ (水分不飽和層)	28.9	33.4	26.8	1157			
混合ごみ (水分飽和層)	42.3	60.2	0.0	1424	2363	0.96	0.62	1.48
自然地盤	9.1	16.4	21.9	1800	1109	0.86		

表-5 模擬埋立層中の有機物含有量と好気性微生物反応条件

酸素消費速度 R_{O_2} mol/(m ³ s)	有機物含有量					酸素消費可能量 V_{O_2} mol/m ³	分解継続時間 t_{O_2} y	熱発生速度 Q_b J/(m ³ s)	好気層厚さ H_{O_2} m
	厨芥		紙類		合計 $V_{glucose}$ mol/m ³				
	$W_{glucose}$ kg/m ³	$V_{glucose}$ mol/m ³	$W_{cellulose}$ kg/m ³	$V_{cellulose}$ mol/m ³					
1.0×10^{-4}	27.4	152.0	45.5	280.5	432.5	2595	0.82	46.70	0.4
1.0×10^{-5}	27.4	152.0	45.5	280.5	432.5	2595	8.23	4.67	2.0

表-6 模擬埋立層中の有機物含有量と嫌気性微生物反応条件

メタン発生速度 R_{CH_4} mol/(m ³ s)	有機物含有量					メタン発生可能量 V_{CH_4} mol/m ³	分解継続時間 t_{CH_4} y	熱発生速度 Q_b J/(m ³ s)
	厨芥		紙類		合計 $V_{glucose}$ mol/m ³			
	$W_{glucose}$ kg/m ³	$V_{glucose}$ mol/m ³	$W_{cellulose}$ kg/m ³	$V_{cellulose}$ mol/m ³				
5.0×10^{-6}	27.4	152.0	45.5	280.5	432.5	1298	8.23	0.218

深さで推移していたことのみがわかっている。計算においては、1)埋立開始から埋立深さが10mに達するまでは廃棄物層全体が水分飽和、2)埋立深さが10m以上になった時点以後は埋立層最下部から10mまで水分飽和、であるとした。

次に、埋立層内の有機物含有量及び微生物反応の計算条件については、以下に述べる仮定に基づき表-5（好気性）、表-6（嫌気性）のように設定した。分解性有機物として、表-1及び表-4に示した埋立層の構成成分のうち、紙類の50%と厨芥の100%が分解すると仮定し、これらの有機物の化学式をcellulose及びglucoseとして埋立層単位体積あたりの含有量（ $V_{cellulose}$ kg/m³と $V_{glucose}$ kg/m³）を表-5と表-6に示したように計算した。ここで、合計の $V_{glucose}$ は紙類のcelluloseが1モルの水と水和してglucoseになると仮定し、紙類の $V_{cellulose} = V_{glucose}$ として計算した。合計の $V_{glucose}$ が微生物反応によりすべて分解される際に消費される酸素量又は発生するメタン量をそれぞれ V_{O_2} と V_{CH_4} とすると、式(7)と(8)から $V_{O_2} = 6 \times V_{glucose}$ と $V_{CH_4} = 3 \times V_{glucose}$ となる。

一方、酸素消費速度 R_{O_2} 、大気に接している埋立セル表面で酸素が拡散で侵入しうる深さ H_{O_2} 、メタン発生速度 R_{CH_4} については、既往の研究例を参考に以下のように設定した。 R_{O_2} について、田中ら^{28,29)}は厨芥を中心とする模擬混合ごみの自然通気好気性微生物反応のカラム実験で $2.0 \times 10^{-5} \sim 1.0 \times 10^{-4}$ mol-O₂/(m³s)を得ている。そこで、 R_{O_2} を 1.0×10^{-5} と 1.0×10^{-4} mol-O₂/(m³s)の2条

件を考えた。また、 H_{O_2} については、田中が理論的に明らかにした方法²⁸⁾を用いて推定し、 $R_{O_2} = 1.0 \times 10^{-4}$ に対して0.4m、 $R_{O_2} = 1.0 \times 10^{-5}$ に対して2.0mと求めた。 R_{CH_4} について、田中ら^{30,31)}は嫌気性埋立のカラム実験により、人工ごみ（混合ごみ）で 2×10^{-5} mol-CH₄/(m³s)を得ている。また、池口³²⁾による文献のまとめによると、 $10^{-6} \sim 10^{-5}$ mol-CH₄/(m³s)の範囲にあるとされている。そこで、 R_{CH_4} を 5.0×10^{-6} mol-CH₄/(m³s)とした。東京都中央防波堤内側処分場の15箇所のガス抜き管で埋立ガス流量が測定された事例では¹⁰⁾、埋立開始後10~13年において平均で約14 L/min（最大値51，最小値0.5）でほぼ一定で推移し、その後減少していた。ここで、埋立ガス流量 L/min をメタンガス発生速度 R_{CH_4} mol/(m³s)に換算するにあたって、ガス温度を25°C、ガス抜き管の集ガス領域を鉛直方向に埋立深さ30mで水平方向に縦横10~30mの範囲の立方体（体積3000~27000m³）、埋立ガスの50%がメタンであると仮定すれば、埋立ガス流量14L/minは $R_{CH_4} = 1.9 \times 10^{-7} \sim 1.7 \times 10^{-6}$ mol-CH₄/(m³s)に相当する。表-6に示した $R_{CH_4} = 5 \times 10^{-6}$ mol-CH₄/(m³s)はやや大きいものの、測定値とほぼ同じオーダーにあり、計算開始時の設定値としては妥当であると思われる。

R_{O_2} と R_{CH_4} が一定である条件では、好気性・嫌気性微生物反応の継続可能時間（反応により有機物が消滅するまでの時間） t_{O_2} と t_{CH_4} は V_{O_2}/R_{O_2} 又は V_{CH_4}/R_{CH_4} 、熱発生速度 Q_b は $R_{O_2}(-\Delta H_{O_2})$ 又は $R_{CH_4}(-\Delta H_{CH_4})$ であるので表-5と表-6に示したように求められる。

なお、既報¹⁷⁾において、微生物反応に係わるパラメーターが重要であることがわかっているため、表-5と表-6における R_{O_2} 、 H_{O_2} 、 R_{CH_4} を中心に感度解析を行い、温度分布実測値を再現できる条件を探索した。

日本の廃棄物処分基準³⁰⁾から、混合ごみ埋立では3mの埋立セルごとに50cm程度の中間覆土を行うものとされているが、最小単位となる埋立セルの大きさは埋立地の地形や1日あたりの埋立ごみ量によって変化すると考えられる。東京都中央防波堤内側処分場における埋立セルの大きさは不明である。以下では埋立セル深さを2mとし、2ヶ月ごとに15回積み上げられることで、30mの埋立層を形成したものと仮定した。この場合、埋立期間が2年6ヶ月となり、実際の埋立期間より2ヶ月長くなるが、長期的な温度分布の変化を求める上で、2ヶ月間の埋立期間の違いは大きく影響しないと考えた。

埋立層内の降雨浸透速度 v は、東京の年平均降雨量(1600mm/y)²⁴⁾に浸出係数(0.5)を乗算して求め、 2.3×10^{-8} m/s (=800mm/y)で一定であるとした。ただし、埋立地内部の水分飽和廃棄物層では降雨浸透速度はゼロであるとした。表層温度境界条件として、表層温度が年平均気温(東京都の月別平均気温値 15°C ²⁰⁾)で一定とした。最下部の温度境界条件として、埋立層下部の自然地盤内の恒温層(年平均気温に等しいとした)までの深さを、廃棄物層厚さと同じ30m以上にしても計算結果が変わらないことを確認し、埋立層下部から30mの深さで一定であるとした。また、埋立中に搬入される埋立ごみの初期温度は、年平均気温で一様であるとした。

4. シミュレーション結果と考察

(1) 全層嫌気性微生物反応条件のとき

まず、全層で嫌気性微生物反応が起こっているとした場合を考え、以下に示す4つの計算条件 $A_0 \sim A_3$ について計算を行った。計算条件 A_0 は既報¹⁷⁾で提案したように、埋立終了時に一様な温度となっている埋立層を初期条件として温度分布計算を開始したものである。ここで、初期条件は埋立終了の2年4ヶ月目に埋立層内が年平均気温(15°C)で一様であるとした。一方、計算条件 A_1 は本論文で提案した積み上げモデルによるものである。埋立層内の深さ方向の温度分布について、最高温度及び平均温度の測定値(図-6)と計算結果を比較したものを図-7に示した。

A_0 と A_1 のいずれも、最高温度・平均温度の計算値が測定値を 30°C 以上下回っており、高温状態を再現できていない。また、 A_0 と A_1 の計算結果の違いは、計算を開始

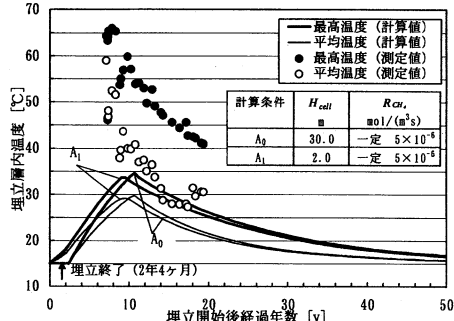


図-7 反応モデル A_0 と A_1 による温度分布計算値と測定値の比較(全層嫌気性)

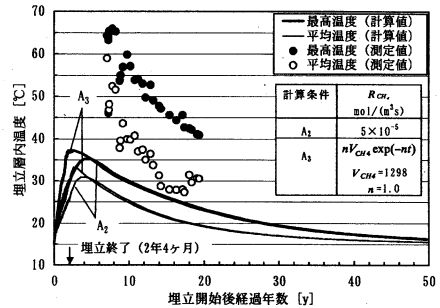


図-8 反応モデル A_2 と A_3 による温度分布計算値と測定値の比較(全層嫌気性)

する時間の差(2年4ヶ月)だけ、最高・平均温度が出現する時間が異なっているのみで、その差は小さい。

次に、計算値が測定値に一致するような条件を探索するため、積み上げモデルで R_{CH_4} を以下のように設定した。① A_1 の設定値より嫌気性微生物反応速度 R_{CH_4} が1オーダー大きい(計算条件 A_2)、② $R_{CH_4} = n V_{CH_4} \exp(-nt)$ なる式(n :定数、 t :経過年数)にしたがって、 R_{CH_4} が指数的に減少する³⁰⁾(計算条件 A_3)、とした。①の条件では嫌気性微生物反応の継続可能時間 t_{CH_4} は0.8年であり、②の条件では、埋立開始時($t=0$)に $R_{CH_4} = 4 \times 10^{-5}$ mol- $\text{CH}_4/(\text{m}^3\text{s})$ であったものが10年後には $R_{CH_4} = 4 \times 10^{-8}$ mol- $\text{CH}_4/(\text{m}^3\text{s})$ まで低下する。

A_2 と A_3 の計算結果を図-8に示した。 A_0 や A_1 の計算結果に比べると、埋立初期でやや温度が高くなっているが、計算値は測定値を遙かに模擬できていない。このように反応モデル $A_0 \sim A_3$ の全層嫌気性微生物反応条件では測定値に見られた高い温度上昇を模擬できなかった。

(2) 表層好気性・下層嫌気性微生物反応条件

次に、新しく埋め立てられた埋立セルの表層が大気と接することにより酸素が侵入し、好気性になっている廃棄物層があり(表層好気性と呼ぶ)、それより深く、酸素が侵入できない、つまり嫌気性になっている層がある

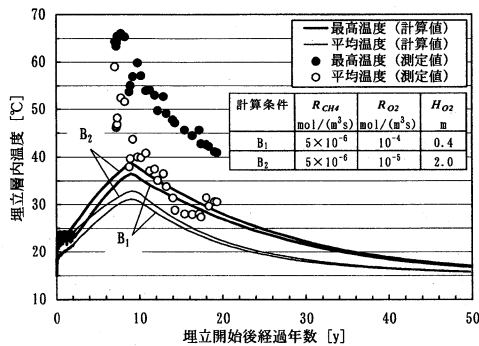


図-9 計算条件 B₁ と B₂ による温度分布計算値と測定値の比較 (表層好気性・下層嫌気性)

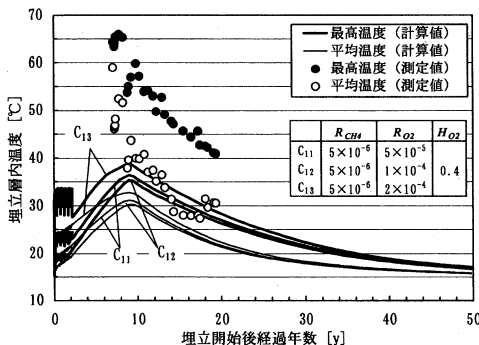


図-10 計算条件 C₁₁, C₁₂, C₁₃ による温度分布計算値と測定値の比較 (表層好気性・下層嫌気性)

(下層嫌気性と呼ぶ)とした場合を考え、各反応の速度が表-5 と表-6 に示した数値で進行するとした2つの計算条件 B₁ と B₂ について計算を行った。

計算結果を図-9 に示した。全層嫌気性微生物反応条件に比べると、埋立中 (2年4ヶ月まで) での好気性微生物反応による温度上昇により、計算値が測定値にやや近づいたものの、依然として 25℃ 以上下回っており、測定値を模擬できていない。

そこで、計算値が測定値に一致する計算条件を探るため、酸素消費速度 $R_{O_2} = 5 \times 10^{-5} \sim 2 \times 10^{-4} \text{ mol-O}_2/(\text{m}^3\text{s})$ と酸素侵入深さ $H_{O_2} = 0.4 \sim 2.0 \text{ m}$ の組み合わせを変化させて計算した (計算条件 C₁₁~C₃₃)。ここで、4, (1) で示したように R_{CH_4} を変化させても温度変化は小さかったので、 $R_{CH_4} = 5 \times 10^{-6} \text{ mol-CH}_4/(\text{m}^3\text{s})$ で一定とした。

図-10~12 に計算結果を示した。図から C₃₁ による計算値が測定値を最も良く模擬している。なお、C₃₃ では 100℃ を上回る計算結果となり、微生物が生育できる温度範囲を超えたため、図には示していない。また、C₂₃ による計算値も測定値を比較的良く模擬しているので、 $R_{O_2} = 1.5 \times 10^{-4} \text{ mol-O}_2/(\text{m}^3\text{s})$ と計算したところ (計算条件 C₂₄)、C₃₁ と同じ程度に測定値を模擬できた (図-13)。

このように、酸素消費速度と酸素侵入深さの2つのパラメーターが高い温度上昇の再現において重

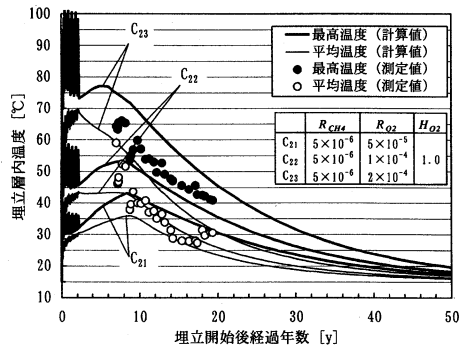


図-11 計算条件 C₂₁, C₂₂, C₂₃ による温度分布計算値と測定値の比較 (表層好気性・下層嫌気性)

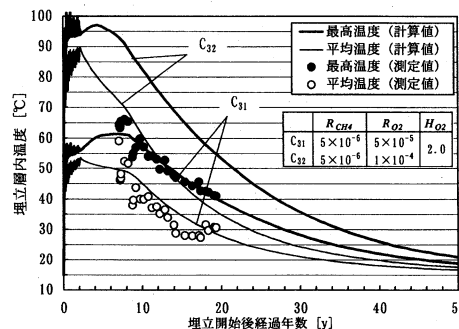


図-12 計算条件 C₃₁ と C₃₂ による温度分布計算値と測定値の比較 (表層好気性・下層嫌気性)

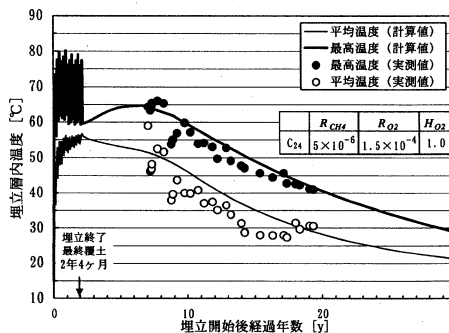


図-13 計算条件 C₂₄ による温度分布計算値と測定値の比較 (表層好気性・下層嫌気性)

要であることがわかった。

埋立中には、大気に接する埋立セルの表層で好気性微生物反応により温度が急激に上昇するが、そのセル上に年平均気温 (15℃) で一様な新しい埋立セルが埋立てられると、好気性反応が停止し、一時的に埋立層全体の温度が低下する。しかし、積み上げられた新しい埋立セルの表層で再び好気性微生物反応が起こり発熱すると、温度低下は止まり上昇に転じる。このような温度上昇・低下が繰り返すために、埋立期間中の温度がジグザグ状に変化する。そして、埋立終了時には最終覆土

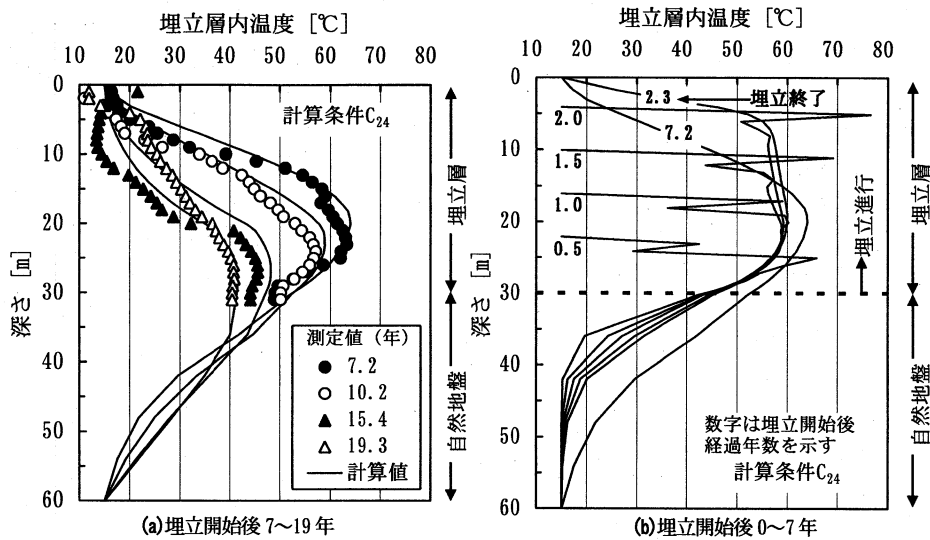


図-14 計算条件 C_{24} による温度分布測定値と計算値の比較 (表層好気性・下層嫌気性) ~深さ方向の変化~

の実施によって表層での好気性微生物反応が停止すると設定しているため、埋立終了後には著しい温度上昇は見られないが、引き続き嫌気性微生物反応が進行するため、緩やかに温度が上昇し、表-6 に示した嫌気性微生物反応によって埋立地内部の有機物がほぼ分解消滅する時間 t_{CH_4} として求められた約 8 年目頃から温度が緩やかに下降している。

最後に実測値をよく模擬できた条件 C_{24} を例として、深さ方向の温度分布の経年変化を図-14a, b に示した。

図-14a から、深さ方向の温度分布の経年変化についても、計算値が測定値をほぼよく再現している。また、図-14b から、埋立中の埋立セル表層での好気性微生物反応による温度上昇、そして埋立進行とともに高い温度状態になった埋立層が形成される過程がわかる。

このように、積み上げられる埋立セル表層での好気性微生物反応速度 R_{O_2} と酸素侵入深さ H_{O_2} が一定の値を超えると、測定値に見られる高い温度上昇が起こりうる事が確認できた。

ここで述べた測定値との一致が良い温度計算結果は、数値計算条件の探索によって同定した設定値に基づく計算により得られたものであるが、1次元温度分布測定値の模擬計算を通して、積み上げられる埋立セル表層での好気性微生物反応が、埋立層全体の高い温度上昇に大きな影響を与えた可能性があるという示唆を得た。したがって、東京都海面埋立地のように埋立開始後7年経過時にすでに 66°C に達するような高温状態にある埋立地においては、埋立中の好気性微生物反応の温度上昇への寄与を考慮する必要がある、温度分布の計算を精度良く行うためには、埋立セルの深さや埋立時間間隔などの埋立方法に関する詳細な情報や、埋立中の埋立セル表層の好

気性反応速度及び酸素侵入深さに関する測定値などが必要である。

5. まとめ

東京都海面埋立地で測定された高い温度上昇を、積み上げモデルに基づいた非定常1次元(深さ方向)熱収支方程式によって模擬できるかどうか試みた。その結果、ほぼ測定値を再現しうることがわかった。結論として、

- 1) 埋立層全層で嫌気性微生物反応のみが起こっていると考え、反応速度が一定変化又は指数変化とし、メタン生成速度を理論的に考え得る最大値に設定しても、計算値は測定値を 30°C 以上も下回り、測定値を再現できなかった。
- 2) 大気に接した埋立セルの表層で好気性微生物反応、下層で嫌気性微生物反応が起こっていると考え、現実でありうると思われる範囲内で好気性微生物反応速度及び酸素侵入深さを変化させて計算したところ、埋立セルの表層で活発な好気性微生物反応が比較的深い位置まで起こり、かつ下層で嫌気性微生物反応が起こるといふ計算条件によって、東京都海面埋立地で測定された高い温度上昇を模擬できた。

今後は、廃棄物埋立地温度と埋立地内部の有機物量との関係、特に埋立初期に高い温度になっている埋立地における有機物分解速度に関して、数値シミュレーションを通じて考察し、埋立地温度と安定化の関係や好気性微生物反応の安定化への寄与についても考察を進める予定である。

参考文献

- 1) 長谷川信夫：衛生埋立地における有機物の分解に関する調査研究，水処理技術，Vol.20, No.2, pp.101-115, 1979
- 2) 秋山 薫，田村和男，占部武生，廣畑和幸他：ごみ埋立処分場内の廃棄物層等の現状調査，東京都清掃研究所研究報告，176-198, 1984
- 3) Lefebvre, X., Lanini, S., and Houi, D. : The role of aerobic activity on refuse temperature rise, I Landfill experimental study, *Waste Manage. Res.*, Vol.18, pp.444-452, 2000
- 4) Klein, R., Baumann, T., Kahapka, E., and Niessner, R. : Temperature development in a modern municipal solid waste incineration (MSWI) bottom ash landfill with regard to sustainable waste management, *Journal of Hazardous Materials*, B83, pp.265-280, 2001
- 5) Yesiller, N., Hanson, J.L., and Liu, Wei-Lien : Temperature development in a modern municipal solid waste incineration (MSWI) bottom ash landfill with regard to sustainable waste management, *Journal of Hazardous Materials*, B83, pp.265-280, 2001
- 6) Rees, J.F. : Optimization of Methane Production and Refuse Decomposition in Landfills by Temperature Control, *J. Chem. Tech. Biotechnol.*, Vol.30, pp.458-465, 1980
- 7) 吉田英樹，田中信寿，穂積 準，神山桂一：電気集じん灰の水和熱発生特性に関する実験的研究，第1回廃棄物学会研究発表会講演論文集，pp.329-332, 1990
- 8) 朴 祥徹：準好気性埋立廃棄物層における汚濁物質の挙動予測に関する研究，九州大学博士学位論文，1996
- 9) Klein, R., Nestle, N., Niessner, R., and Baumann, T. : Numerical modelling of the generation and transport of heat in a bottom ash monofill, *Journal of Hazardous Materials*, B100, pp.147-162, 2003
- 10) Rowe, R.K. : Geosynthetics and the Minimization of Contaminant Migration through Barrier Systems Beneath Solid Waste, Proc. of Sixth International Conference on Geosynthetics, pp.27-102, 1998
- 11) 東京都港湾局，三井共同建設コンサルタント：平成7年度東京都ごみ埋立地盤測定調査委託報告書，1996
- 12) 東京都清掃局企画部：昭和50年度埋立地及び周辺の経年変化に関する調査結果（調査報告書），1976
- 13) 東京都清掃局企画部：昭和52年度埋立地の経年変化等に関する調査結果（調査報告書概要），1978
- 14) Hanashima, M., Yamasaki, K., Kuroki, T., and Onishi, K. : Heat and Gas Flow Analysis in Semiaerobic Landfill, *J. Env. Eng. Div., ASCE*, Vol.107, No.EE1, pp.1-9, 1981
- 15) El-Fadel, M., Findikakis, A.N., and Leckie, J.O. : Numerical Modeling of Generation and Transport of Gas and Heat in Sanitary Landfills II Model Application, *Waste Management & Research*, Vol.14, pp.537-551, 1996
- 16) Lanini, S., Houi, D., Aguilar, D., and Lefebvre, X. : The role of aerobic activity on refuse temperature rise, II. Experimental and numerical modelling, *Waste Management & Research*, Vol.19, pp.58-69, 2001
- 17) 吉田英樹，田中信寿，神山桂一，穂積 準：廃棄物埋立層内の温度分布に関する理論的研究，衛生工学研究論文集，Vol.25, pp.29-38, 1989
- 18) YOSHIDA, H., TANAKA, N., and HOZUMI, H. : Theoretical study on temperature distribution in a sanitary landfill, Proc. of The Second International Congress on Environmental Geotechnics, Vol.1, pp.323-328, 1996
- 19) YOSHIDA, H., TANAKA, N., and HOZUMI, H. : Theoretical study on heat transport phenomena in a sanitary landfill, Proc. of Sardinia 97, Sixth International Landfill Symposium, Vol.1, pp.109-120, 1997
- 20) 吉田英樹，田中信寿，穂積 準：廃棄物充填層の有効熱伝導率に関する研究，廃棄物学会論文誌，Vol.3, No.2, pp.17-25, 1992
- 21) 辰市祐久，広畑和幸：中央防波堤内側掘削ごみに関する調査，清掃技報，第10号，pp.59-69, 1985
- 22) 松本喜博，穴澤雄治，清水恵助，蝦名晋吉他：東京都におけるごみ埋立地盤の土質学的研究（その1），土質工学研究発表会講演論文集，Vol.23, pp.13-16, 1988
- 23) 中村豊，北島義文，本田正，鹿田幸雄：昭和60年度ごみ質調査，昭和60年度東京都清掃研究所研究報告，pp.1-50, 1985
- 24) 東京天文台編：理科年表-1987年版-，丸善，1987
- 25) 化学工学協会編：化学工学便覧-改訂5版-，丸善，1988
- 26) 土質工学学会編：土の凍結，土質工学学会，1989
- 27) 蒔田 董：粘度と熱伝導率，培風館，1975
- 28) 田中信寿，高畑恒志，神山桂一：廃棄物埋立処分場における大気中酸素の廃棄物層への侵入深さとフラックスについて，衛生工学研究論文集，Vol.22, pp.37-48, 1986
- 29) 田中信寿，牧 明彦，神山桂一：深い都市廃棄物堆積層における好気性微生物の分解作用に関する実験的研究，北海道大学工学部研究報告，Vol.113, pp.89-95, 1983
- 30) 田中信寿，神山桂一：都市廃棄物嫌気性埋立層中の可溶性汚濁物生成過程に関する研究，土木学会論文集，Vol.381, pp.217-225, 1987
- 31) 田中信寿，神山桂一：都市廃棄物嫌気性埋立層のガス発生特性に関する研究，衛生工学研究論文集，Vol.25, pp.39-46, 1989
- 32) 池口孝：埋立地における発生ガスの挙動（その2），都市清掃，Vol.36, No.132, pp.83-87, 1983
- 33) 全国都市清掃会議：廃棄物最終処分場指針解説（1989年版），1989
- 34) McBean, E.A., Rovers, F.A., Farquhar, G.J. : Solid Waste Landfill Engineering Design, *Prentice Hall PTR*, 1995

(2006.5.26 受付)

記号表

ΔH_b	: 微生物反応熱 [J/mol-gas]
ΔH_{CH_4}	: メタンガス1molあたりの微生物反応熱 [J/CH ₄ -mol]
ΔH_{O_2}	: 酸素 1 mol を消費するときの微生物反応熱 [J/O ₂ -mol]
ϵ	: 空隙率 [-]
θ	: 埋立層温度 [°C]
ρ_e	: 埋立層のみかけ密度 [kg/m ³]
ρ_w	: 液状水の真密度 [kg/m ³]
ξ	: 屈曲係数 [-]
C_e	: 埋立層のみかけ比熱 [J/(kg°C)]
C_w	: 液状水の比熱 [J/(kg°C)]
H_{O_2}	: 埋立層表層の酸素侵入深さ [m]
H_{cell}	: 埋立セルの深さ [m]
k_e	: 埋立層の有効熱伝導率 [J/(ms°C)]
$k_{parallel}$: 多孔体の 3 相系モデル並列モデルの有効熱伝導率推定値 [J/(ms°C)]
k_{series}	: 多孔体の 3 相系モデル直列モデルの有効熱伝導率推定値 [J/(ms°C)]
n	: 定数 [y ⁻¹]
Q_b	: 微生物反応による熱発生速度 [J/(m ³ s)]
R_b	: 埋立層内での微生物反応速度 [mol/(m ³ s)]
R_{CH_4}	: 埋立層内でのメタン発生速度 [mol-CH ₄ /(m ³ s)]
R_{O_2}	: 埋立層単位体積あたりの酸素消費速度 [mol-O ₂ /(m ³ s)]
t	: 時間 [s] 又は [y]
t_{CH_4}	: 有機物が嫌気性微生物反応により完全に分解するまでの時間 [s]
t_{O_2}	: 有機物が好気性微生物反応により完全に分解するまでの時間 [s]
v	: 降雨浸透速度 [m/s]
$V_{cellulose}$: モル基準のセルロース含有量 [mol/m ³]
V_{CH_4}	: 埋立層内でのメタン発生可能量 [mol-CH ₄ /m ³]
$V_{glucose}$: モル基準のグルコース含有量 [mol/m ³]
V_{O_2}	: 埋立層内での酸素消費可能量 [mol-O ₂ /m ³]
$W_{cellulose}$: 埋立層中のセルロース含有量 [kg/m ³]
$W_{glucose}$: 埋立層中のグルコース含有量 [kg/m ³]
z	: 鉛直方向距離 [m]

**Numerical study of waste temperature distribution
within a sanitary landfill where a high temperature rise exists**

Hideki YOSHIDA¹ and Hitoshi HOZUMI¹

¹Dept. of Civil Engineering and Architecture, Muroran Institute of Technology

This study examines waste temperature distribution within the Tokyo Port Landfill where a maximum temperature rise as high as 66°C exists. Heat and water transport within a sanitary landfill is modeled and the process of the placement of successive waste layers is considered. Spatial and temporal temperature distributions are simulated to validate the model. The model results with different scenarios of decomposition within the landfill are shown to be in good agreement with observed data. Sensitivity analyses in terms of decomposition shows that active aerobic decomposition at the surface of waste layers during landfilling and successive anaerobic decomposition after the completion of landfilling could result in high waste temperature.