

Ⅶ-2

廃棄物埋立地内部の3次元温度分布特性に関する研究

室蘭工業大学 工学部 ○学生会員 横山 知明
 室蘭工業大学 工学部 正員 吉田 英樹
 北海道大学 工学部 正員 田中 信寿
 室蘭工業大学 工学部 正員 穂積 準

1. はじめに

合理的な廃棄物埋立処分について考えた場合、処分完了後の埋立跡地利用という問題は重要である。特に大都市圏においては、海面埋立等により生じた大規模な埋立地を有効活用することは都市計画上重要な課題の一つでもある。しかし、埋立処分完了後いつ地盤が安定化するのかについては未知の部分が多い。厚生省の埋立地指針¹⁾によれば、埋立地の安定化は造成された地盤の沈下速度、浸出水の水質、発生ガスの質と量、埋立地内の温度などから総合的に判断するとされている。このうち、埋立地内部温度は埋立層内で起きる微生物活動の状態を示す重要な指標であるが、実埋立地での観測や研究はほとんど行われてきていない。

本研究では埋立開始から安定化にいたるまでの埋立地内部での微生物反応をモデル化し、反応に伴い発生する熱による埋立地内部温度の上昇についてシミュレーションを行った。併せて実際の埋立地における温度観測結果との比較を行い、その妥当性、また各種条件が埋立地内部の温度分布に与える影響について検討した。

2. 実埋立地における埋立層内温度観測例

埋立地の内部温度を長期にわたって観察した例は少ないが、東京都港湾埋立地において詳細な温度分布観測が継続的に行われており²⁾、本研究では解析対象としてこのデータを用いた。

この埋立地では1976年から2年4カ月間にわたって埋立が行われ、最終的な埋立面積はおよそ600×700mで埋立深さは30mに達した。埋め立てられた廃棄物の構成は表1に、また埋立地の物性について推定した結果を表2に示した。この埋立地では内部温度は最高70℃程度にまで上昇したが、それとともに活発な微生物反応を示す埋め立てガス(メタン・炭酸ガス)の発生が確認されており、このような温度上昇は微生物による有機物の好気/嫌気性微生物反応熱が原因であると考えられている。なお微生物は約70から80℃の温度で死滅すると思われるので、この埋立地では埋立地内部温度の上限に達していたと考えられる。

3. 熱移動解析概要

3.1 廃棄物埋立地における熱移動理論

今回の解析に当たって、埋立地内の熱移動現象は(1)微生物活動による熱の発生、(2)伝導及び降雨による熱移動の影響を受けるという仮定を行って導出した熱移動方程式を使用した。

$$C_p \frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left(k_e \frac{\partial \theta}{\partial z} \right) - C_w \rho_w V \frac{\partial \theta}{\partial z} + \Delta H_b R_b$$

ここで t: 時間[s]、θ: 温度[℃]、C: 比熱[J/(kg℃)]、ρ: 見かけ密度[kg/m³]、k_e: 有効熱伝導率[J/(ms℃)]、C_w(=4184): 水の比熱[J/(kg℃)]、ρ_w(=1000): 水の密度[kg/m³]、V: 降雨浸透速度[m/s]、ΔH_b: 微生物反応熱[J/mol]、R_b: ガス生成(もしくは消費)速度[mol/(m³s)]である。

表1 埋立ごみモデルの組成

廃棄物構成比* [%]	混合ごみ		
	重量比	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
	灰	0.0	0.0
	覆土	44.8	34.9
合計	100.0	100.0	

* 乾燥基準

表2 廃棄物埋立層の物理特性 (推定)

含水率 [%]		空隙率 [%]	見かけ密度 [kg/m ³]	比熱 [J/(kg℃)]	有効熱伝導率 [J/(ms℃)]
重量比	体積比				
28.9	33.4	26.8	1157	1939	0.35

Three dimensional distribution of temperature in a sanitary landfill
 by Satoaki Yokoyama, Hideki Yoshida, Nobutoshi Tanaka, Hitoshi Hozumi

3.2 温度分布計算モデルの概要

シミュレーションは廃棄物層内の熱移動を深さ方向のみについて考えた1次元モデルと、全方向について考えた3次元モデルの2つを用いて行った。

1次元モデルはごみ層の周囲を断熱と仮定しており、これは周囲への熱移動が少ないと考えられる埋立地中央領域での深さ方向のみの熱移動を考慮したものである。計算においては、一定期間ごとに埋め立てられる最小単位の埋立層（埋立セルと呼ぶ）の大きさを変えるとともに、微生物反応が好気的あるいは嫌氣的に進行する場合についてそれぞれ解析を行った。一方3次元モデルでは埋立地周囲への熱移動を考慮し、実埋立地レベルでの熱移動現象の再現を試みた。

3.3 廃棄物搬入状況設定

東京都港湾埋立地においては2年4カ月で埋立地高さが30mに達していたことから、埋立進行速度は約1m/月となる。実際にはごみは毎日搬入され、連続的に埋立地高さが増加していくが、シミュレーションにおいては一定量の埋立セルの埋立が瞬時に完了し、次の埋立セルが搬入されるまでその状態が維持されると考え、30mの高さの埋立地が一定時間ごとに段階的に積み上げられていく状況をモデル化した。これを本研究では「積上モデル」と呼び、埋立セルの高さは2m及び3mの場合を想定した。

また、埋立セル全体で嫌気性微生物反応のみが起こる場合と、セルの表層で好気性微生物反応も起こる場合とを想定した。ここで、好気性微生物反応は埋立終了後に表層覆土により嫌気性微生物反応に移行するとした。

3.4 好気性/嫌気性分解条件設定

埋め立てられた廃棄物中の有機物は安定化の過程で微生物によって分解される。この微生物的反応は好気性及び嫌気性の2種類に分けることができ、その両者において反応の過程で発熱を伴うが、その熱は好気性微生物反応の場合460kJ/mol-O₂、嫌気性微生物反応の場合45kJ/mol-CH₄とされている。

埋立地内部温度を計算する際、最も重要な要素となるのは微生物反応速度である。これは埋立地内部での発熱速度を決定するものであり、実埋立地での観測や実験室でのカラム実験による結果などから、好気性微生物反応速度を表す酸素消費速度について10⁻⁵~10⁻³mol-O₂/(m³s)、嫌気性微生物反応速度を表すメタン発生速度について10⁻⁶~10⁻⁴mol-CH₄/(m³s)という値が知られている。

本研究においては、標準条件として酸素消費速度を10⁻⁴mol-O₂/(m³s)、メタン発生速度を5×10⁻⁶mol-CH₄/(m³s)と設定し、また拡散によって酸素が埋立セル内に侵入できる深さを0.4mとした。

これらの計算条件を表3に示した。

表3 廃棄物埋立層の好気性/嫌気性熱発生特性（推定）

埋立層	酸素消費速度/ メタン生成速度 RO ₂ /RCH ₄ [mol/(m ³ s)]	有機物含有量					酸素消費可能量*/ メタン発生可能量* VO ₂ [mol/(m ³ s)]	分解継続時間 tO ₂ [year]	熱発生速度 Q _h [J/(m ³ s)]
		厨芥		紙類*		合計**			
		Mglucose [kg/m ³]	Vglucose [mol/m ³]	Mglucose [kg/m ³]	Vglucose [mol/m ³]				
混合ごみ/好気	10 ⁴	27.4	152.0	45.5	280.5	432.5	2597	0.82	46.70
混合ごみ/嫌気	5×10 ⁴	27.4	152.0	45.5	280.5	432.5	1298	8.23	0.22

* 紙類の50%が分解するとして、分解可能量のみを示した。

** セルロースはグルコースと等価であるとして、合計のモル数を示した。

有機物をグルコース及びセルロースと仮定して、分解に伴う酸素消費最大量を式(3-42)から計算した。

4. 1次元モデルによる温度分布計算結果

図1として、埋立セルの高さを2mとした積み上げモデルの温度分布計算結果（埋立地内部温度の最高値と平均値）を、嫌気性微生物反応のみを考えた場合と、嫌気性反応に加えて表層の好気性微生物反応を考えた場合について示した。また、図には東京都港湾埋立地における実測値も併せて示した。図からわかるように、嫌気性微生物反応のみの場合は平均・最高温度それぞれピークで東京都港湾埋立地の実測値より20~25℃程度低い温度までしか上昇せず、明らかに計算で仮定熱発生速度が小さいと考えられる。一方、埋立セルの表層に0.4mの好気性微生物反応層を考慮した場合は、嫌気性微生物反応のみを考えた場合よりも3~4℃温度が上昇したが、依然として実測値に比べ低い。従って、これらの条件の元では実測例のような高温状態を再現できる可能性は少ないと思われたが、好気性反応層の埋立地内部温度上昇への寄与は大きいことがわかる。

そこで次に酸素消費速度をそのままに保ち、埋立セルの高さを3mに設定することにより搬入間隔を長くすると（約3カ月）条件を設定してみた。これにより、一つの層における好気性反応の持続時間は先の場合に比べ

1.5倍となり、ごみ層の温度はより高くなると考えられた。図2として、好気性分解層の厚さを0.4mと設定したまま、一回の積上高さをそれぞれ2m・3mとした場合の結果を示したが、埋立セルの高さを増した場合には若干の温度の低下が見られる結果となった。これは廃棄物搬入間隔の延長による好気性微生物反応熱の増加が廃棄物層全体に大きな影響を及ぼすまでにいたらず、逆に有機物が好気性微生物反応により早期に分解されたことにより嫌気性微生物反応熱が減少したためだと考えられる。さらにいくつかの条件で計算を行った結果、好気性微生物反応層の厚さ0.4mの設定の場合実測値のような高温状態を再現するには、好気性・嫌気性分解速度を標準の5～10倍程度にまで増やさなければいけないことがわかっていく。

結局、埋立地内で観測される高温状態の再現には埋立期間中により広い範囲で活発な好気性分解が発生しているとするのが妥当と考えられたため、好気性微生物反応層の領域を広くし、好気性微生物反応速度を変化させて比較を行った。

図3として、埋立セルの高さを2m・好気性微生物反応層の厚さを0.4から1mに増加させ、かつ好気性微生物反応速度を標準値の2倍にした場合の解析結果を示した。最高温度は酸素消費速度が標準値の場合でも50℃以上、また2倍にした場合では60℃以上にまで上昇し、これまでで示した条件に比べて実測値に近く、また温度の上昇～下降の傾向も実測値と比べてよく似た傾向を示している。従って、特に好気性分解速度を2倍にした条件が妥当であると考えられる。図4として、好気性分解速度を2倍にした条件の深さ方向の温度分布を示した。やはり実測値を良く近似できており、設定条件として妥当だったといえる。

ここで、これまでの1次元モデル解析の結果についてみると、どの条件でも埋立が終了した3年目からの温度上昇の程度はほぼ同じであり、8～9年経過時に見られる層内温度のピークの高低はほぼ廃棄物搬入期間中の好気性微生物反応による温度上昇の程度に左右されていることがわかる。実測値では埋立開始から7年間のデータがかけているため、同様に廃棄物搬入期間中の温度上昇とその後の温度上昇に関連性がみられるのかは判断できない。しかし、東京港湾埋立地では実埋立地の温度観測と同時に、実際に搬入される廃棄物を用いた試験ブロックでの発熱試験が行われ、その際ブロック内の温度が短期間に50℃程度まで上昇したことが確認されている。このことから、実埋立地においても温度上昇は発生していたと考えられ、今回の計算と同様に廃棄物搬入期間中の好気性微生物反応による発熱が、その後の層内温度に影響を与えたと推測できる。

1次元モデルの計算結果から、埋立地内部の温度上昇は好気性微生物反応の強い影響を受けることがわかり、好気性領域の範囲・反応速度を適切に評価する必要があることが確認された。

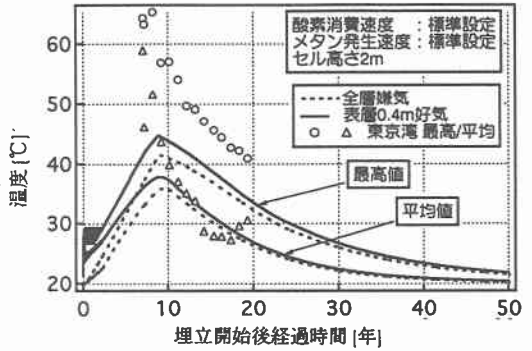


図1 埋立層内最高・平均温度の経年変化 (全層嫌気/表層好気)

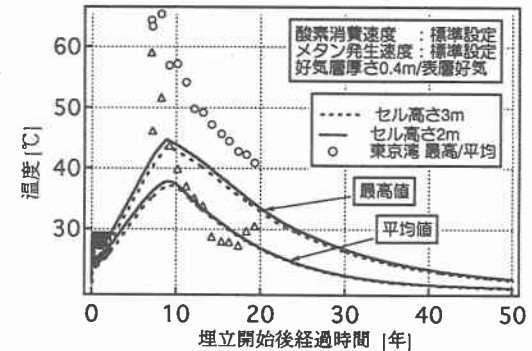


図2 埋立層内最高・平均温度の経年変化 (セル高さ2m/3m)

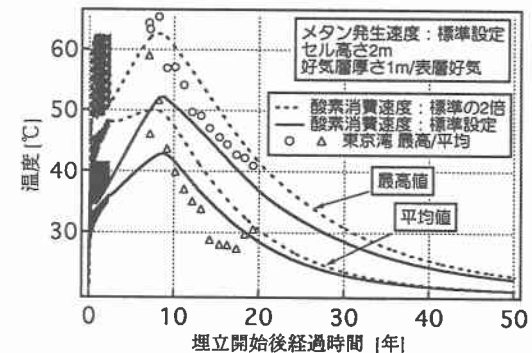


図3 埋立層内最高・平均温度の経年変化 (好気性反応速度 標準/2倍)

5.3 次元モデルによる温度分布計算結果

図5として、1次元モデルで最適条件だった好気性反応層の厚さ1m、酸素消費速度を標準値の2倍に設定し、セル高さ2mの設定(図3に示した1次元モデルと同じ条件)で行った3次元モデル解析の結果を示した。解析に用いたモデルの大きさは東京港湾埋立地とほぼ等しい600×700mに設定してある。また、側面の境界条件については実埋立地において海水に囲まれている3方向の境界面を20℃の定温とし、埋立の完了した埋立地に隣接している残り1方向は断熱条件にあると設定した。

3次元モデルにおいては1次元モデルの場合に比べ周囲への熱散逸が内部温度の低下を引き起こすことが予想されていたが、結果としてはそのような影響がほとんど見られず、図5に示した最高・平均温度の値及び傾向は1次元モデルの計算結果である図3とほぼ同じであることがわかる。また、図6として埋立地深さ15m地点(深さ方向の中心)における東西方向の温度分布を示した。図を見てわかるように、埋立地は水平方向にほぼ温度が等しい状態となっており、わずかに境界面近くで温度の低下が見られるのみである。これは東京港湾埋立地の規模の大きさによるものだと考えられ、周囲へ逃げる熱量を十分に補えるだけの発熱が層内で起こっているものと考えられる。結果として、今回の解析において埋立地内中心部の温度推定をする場合、水平方向に熱の移動がないものと考えた1次元モデルを用いた場合でも埋立地内部温度を再現できると考えられる。しかし、これは大規模な埋立地における結果であり、通常の埋立地のような小規模の埋立地においても同様とするのは適当ではない。実際、図6を見ると境界面周辺の熱の低下は埋立層内水平方向30~40mの地点にまで及んでおり、通常の小規模な埋立地では無視できない大きさの温度低下を引き起こすことは十分に推測できる。そのような場合は3次元モデルを用いた詳細な解析を行う必要があると考えられる。

6. まとめ

- 1) 廃棄物埋立層内の温度が60℃以上の高温に達することがシミュレーションにより確認された。
- 2) 廃棄物層内の高温状態は、埋立期間中の好気性・嫌気性双方の反応によりもたらされる。
- 3) 大規模な埋立地の場合、簡略化された1次元モデルでも廃棄物層内の温度状況を推定することは可能である。

参考文献

- 1) 厚生省水道環境部監修：廃棄物最終処分場指針解説, p.20 (1989)
- 2) 東京都港湾局：東京港ごみ埋立地盤測定町採掘報告書 (1996)

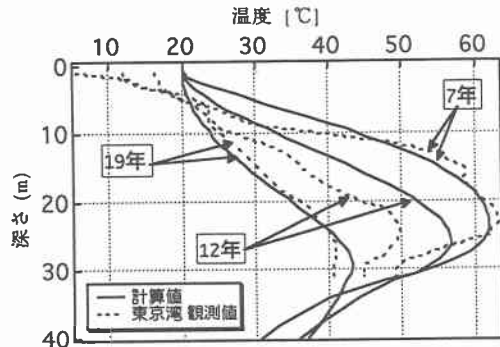


図4 廃棄物層内深さ方向の温度分布
(好気層厚さ1m / 好気性反応速度2倍)

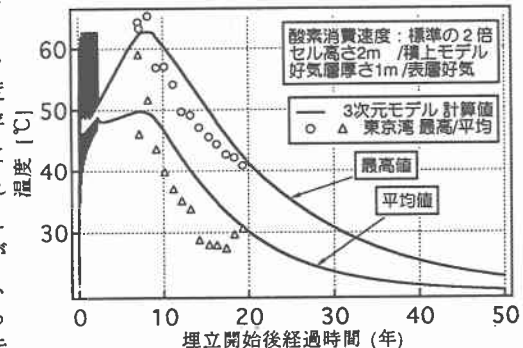


図5 3次元モデルによる廃棄物層内深さ方向の温度分布

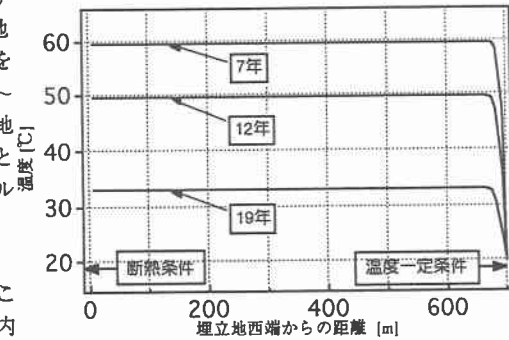


図6 廃棄物層内水平方向の温度分布
(深さ15m地点)