

地中内発熱性廃棄物と地表面温度分布との関係

九州大学大学院 学生会員 ○小宮哲平
 九州大学大学院 正会員 中山裕文
 九州大学大学院 正会員 島岡隆行

1. はじめに

廃棄物物理立処分場の管理手法の一つとして、熱赤外映像装置による地表面温度分布の観測が有効であると考えられる。例えば、安定型廃棄物処分場内における発熱箇所を検出し、廃棄物の不適正処分を監視することが考えられる。そこで本研究では、地中内に発熱体が存在する場所を想定し、その地表面温度分布をシミュレーションするための伝熱モデルを作成した。また、伝熱モデルによる分析により、地中内発熱体が存在する場所の地表面温度分布の特性について考察した。

2. 伝熱モデルの作成

2-1 仮定 次に示す①～④の仮定の下、伝熱モデルを作成した。

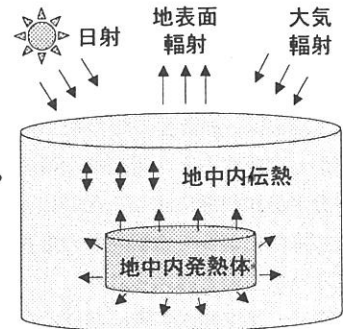
①均質な土壤中に、円筒型で均質な発熱領域が存在する。②発熱領域内の発熱量はどこも一定で、時間依存しない。③地中内における伝熱形態は熱伝導のみとし、顕熱・潜熱輸送は考慮しない。④風速はゼロと仮定し、地表面での顕熱・潜熱輸送は考慮しない。

2-2 伝熱モデル モデルに用いた方程式を図・2に示す。モデルの座標系は円筒座標系とした。地中内における伝熱は発熱項を考慮した熱伝導方程式(1)により支配される。式(2)は地表面における境界条件で、日射、大気輻射、地表面輻射及び地中内伝熱を考慮した地表面熱収支式である。式(3)は半径方向及び深さ方向の無限遠における境界条件で温度勾配がないとする仮定を示す。式(4)は地中内温度分布の初期条件である。日射の経時変化及び初期条件につ

いては適宜与えた。伝熱モデルで用いたパラメータを表・1に示す。

土壌の熱伝導率	0.840	[W/m/K]
土壌の体積熱容量	880	[kJ/m ³ /K]
土壌の輻射率	0.916	[-]
大気の輻射率	0.940	[-]

2-3 モデルの整合性 伝熱モデルの整合性を確認するために室内実験を行った。断熱容器(縦 40cm×横 70cm×深さ 25cm)に真砂土を充填し、発熱体(渦状に巻かれた伝熱棒:見かけの直径 10cm×厚さ 1cm×π)を埋設した。その地表面温度分布を熱赤外映像装置により測定し、定常状態になるまで測定し続けた。実験中、部屋は遮光し暗室で、室温は一定(13.9°C)に保った。図・3は、地表面最大温度の経時変化について、室内実験の実測値と伝熱モデルによる再現値を比較したものである。両者は、完全に一致しているわけではないが、傾向は一致していることから、本モデルは一定の再現性を有すると考える。



図・1 伝熱モデルの概要

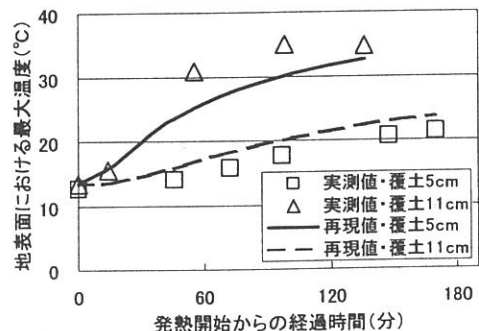
$$(1) \quad c\rho \frac{\partial T}{\partial t} = k \left(\frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T}{\partial r} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) + q_{gen}$$

$$(2) \quad -k \frac{\partial T}{\partial z} \Big|_{z=0} = q_{sun} + \epsilon_a \sigma T_a^4 - \epsilon_s \sigma T_s^4$$

$$(3) \quad \frac{\partial T}{\partial x} = 0 \quad (x = r, z) \quad (4) \quad T = T_0(z)$$

T : 地中内温度[K] T_0 : 地中内初期温度[K]
 r : 半径方向[m] z : 深さ方向[m] t : 時間[s]
 k : 熱伝導率[W/m/K] $c\rho$: 体積熱容量[J/m³/K]
 q_{sun} : 日射[W/m²] q_{gen} : 発熱量[W/m³]
 T_s : 地表面温度[K] T_a : 気温[K]
 ϵ_a : 大気輻射率[-] ϵ_s : 地表面輻射率[-]
 σ : ステファン・ボルツマン定数[W/m²/K⁴]

図・2 伝熱モデルの方程式



図・3 室内実験における地表面最大温度の実測値と再現値の経時変化比較

3. モデル分析

3-1 地中内温度分布 地中内温度分布の計算例を図・4に示す。熱流線からわかるように、地中内発熱体が発した熱は、一度深く潜ったとしても、地中内に滞ることなく、遠回りして地表面へと逃げていく様子がわかる。

図・5は、ある地点における深さ方向温度分布の日平均値である。また、その浅部を拡大し、日変化を見たものが図・6である。日射の日変動の影響を受ける浅部の温度は周期的変動を見せるが、ある程度深くなると日射の影響を受けず温度変動は見られなくなる様子がわかる。

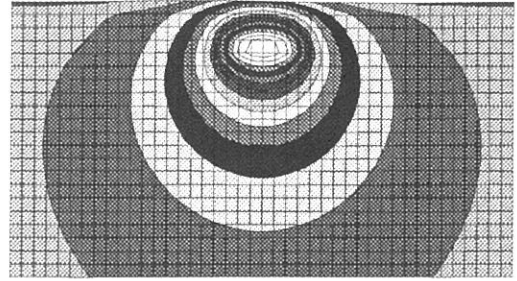
3-2 覆土厚が異なる地表面温度分布の比較 図・7は、地中内発熱体の覆土厚が異なる地表面温度分布を比較したものである。覆土厚が増加すると、熱の逃げ道が広範囲に渡る。そのため、地表面温度分布における最大値減少し、周辺部の地表面温度が増加する。覆土厚が増加することで、地中内発熱体の検出は難しくなる。

3-3 時間による地表面温度分布の変化 日射の日周期変化を考慮し、時間帯による検出精度の変動を確認した。時刻6時～18時を昼間、その他の時刻を夜間と定義する。日射の経時変化は、昼間は正午を最大とする半周期のサインカーブとし、夜間はゼロとした。初期条件は、日周期解を得るために別途計算した時刻0時の地中内温度分布を与えた。図・8は、伝熱モデルにより得られた、地表面温度分布における最大値と最小値の差の経時変化を表したものである。温度差は日の出時(6時)に最大、昼過ぎ頃(15時)に最小となった。地表面温度分布の測定によって地中内発熱体の検出を行なう際、時間帯を選択するならば、日の出直前が最適であることを示している。

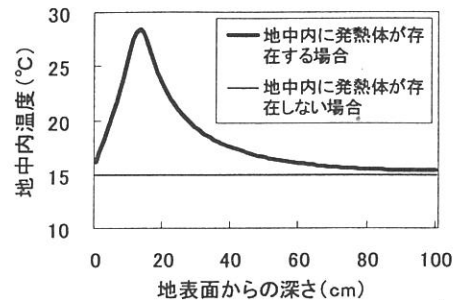
4. まとめ

本研究では、地中内発熱体の存在により生じる地表面温度分布の変化を再現するために、伝熱モデルを作成した。伝熱モデルによるシミュレーションにより、地表面温度分布の測定による地中内発熱体の検出を行なう際の最適な時間帯は日の出前後(6時ごろ)であることを示した。

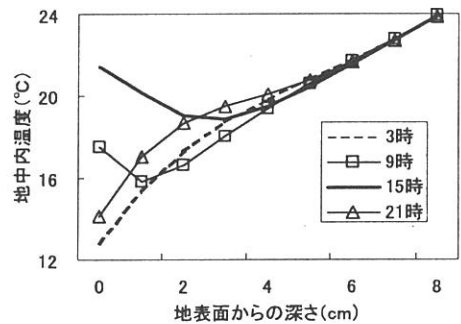
本研究で用いた伝熱モデルは、2・1節で述べた仮定の下で作成されたものである。より厳密な分析を行なうには、地表面及び地中内における顕熱及び潜熱の輸送現象を考慮する必要がある。伝熱モデルを拡張することにより、地表面温度分布の観測による地中内発熱体の検出について、検出限界の定量的評価などが可能となるであろう。



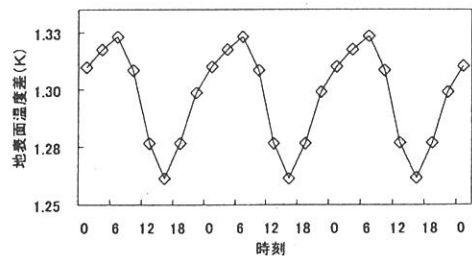
図・4 地中内発熱体が存在する際の地中内温度



図・5 地中内温度日平均値の深さ方向分布



図・6 浅部における地中内温度の深さ方向



図・8 地表面温度分布における最大値と最小値の地表面温度差の経時変化