

逆解析手法を用いた埋立廃棄物の層内熱フラックス量の推定

(独) 国立環境研究所 正会員 ○坂内 修
同 正会員 遠藤 和人
同 正会員 山田 正人
同 正会員 井上 雄三

1. はじめに

最終処分場は埋立終了後も廃棄物の微生物分解による発熱が持続的に起きている。最終処分場の廃止の技術上の基準では「埋立地の内部が周辺の地中の温度に比して異常な高温になつていないこと」であり「異常な高温になつていないとは、埋立地の内部と周辺の地中の温度の差が摂氏二〇度未満である状態をいうこと」である。しかしながら廃止基準および安定化監視マニュアルでは「地表の温度の影響を受けないと判断される深さ」の判断基準があいまいであり、最終覆土に影響を与える地表層と廃棄物層に接する底部の熱流入量の推定を行っていない。本研究では熱伝導方程式と逆解析的手法を用いて廃棄物層内部の熱フラックス量の推定手法を提案する。

2. 熱伝導方程式と逆解析手法

最終覆土を均一な熱容量および熱伝導率を持ち内部部発生熱のない熱伝導体と仮定する。平面方向に均一であり地表面及び底部からの熱フラックスにより鉛直方向の温度分布が経時変化すると仮定する。このとき最終覆土の熱収支方程式は次式で表される。

$$\frac{\partial T}{\partial t} = D \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} \quad (1)$$

$$D = k_c / C_c p_c [(J/(m \cdot s \cdot K)) / (J/(m^3 \cdot K))] = m^2/s]$$

(熱拡散率)である。

熱伝導方程式(1)を初期条件および第一種境界条件下で近似解を求める。温度 T を時間 t と位置 x の関数 $T(t, x)$ (ただし $t_0 \leq t \leq t_E$, $a \leq x \leq b$) とおき Δt , Δx で離散化する。差分法の陽的スキームを用いて近似解を求めると次式により温度分布が順次求められる。

$$T(t + \Delta t, x) = T(t, x) + D \frac{\Delta t}{\Delta x^2} (T(t, x + \Delta x) + T(t, x - \Delta x) - 2T(t, x)) \quad (2)$$

観測温度分布に最も近い推定温度分布を与える D を最適な熱拡散率とする。

熱伝導方程式(1)を初期条件および第二種境界条件(3)式で近似解を求める。

$$D \frac{\partial T(t, a)}{\partial x} = q(t, a) \quad D \frac{\partial T(t, b)}{\partial x} = q(t, b) \quad (3)$$

(3)式を用いて(1)式を解くため、境界要素解析を行う。偏微分方程式の積分表示を端点 a , b の境界積分方程式で表し、連立積分方程式の解 $T(a, t)$, $T(b, t)$ を近似的に求めると、近似方程式は行列を用いて次式で表される。

$$\begin{pmatrix} 1/2 & 0 \\ 0 & 1/2 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} T(t_n, a) \\ T(t_n, b) \end{pmatrix} + \sum_{k=0}^n \begin{pmatrix} 0 & H^{(k)} \\ H^{(k)} & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} T(t_k, a) \\ T(t_k, b) \end{pmatrix} = \sum_{k=0}^n \begin{pmatrix} -G_1^{(k)} & G_2^{(k)} \\ -G_2^{(k)} & G_1^{(k)} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} q^k(a) \\ q^k(b) \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \Omega_a^{(n)} \\ \Omega_b^{(n)} \end{pmatrix} \quad (4)$$

ここで行列要素 H , G は,

$$H^{(k)} = \int_{t_{k-1}}^{t_k} N_k(t) q^*(b, t; a, t_n) dt$$

$$G_1^{(k)} = \int_{t_{k-1}}^{t_k} N_k(t) v^*(a, t; a, t_n) dt$$

$$G_2^{(k)} = \int_{t_{k-1}}^{t_k} N_k(t) v^*(b, t; a, t_n) dt$$

$k=0$ のときは積分範囲を $t_0 < t < t_1$, $k=n$ のときは積分範囲を $t_{n-1} < t < t_n$ とする。ベクトル要素 Ω は

$$\Omega_a^{(n)} = \int_a^b f(x) v^*(x, t_0; a, t_n) dx$$

$$\Omega_b^{(n)} = \int_a^b f(x) v^*(x, t_0; b, t_n) dx$$

ただし Ω について $n \neq 0$ である。

熱作用素の基本解 v^* および q^* は,

$$v^*(x, t; \xi, \tau) = \frac{1}{2\sqrt{D\pi(\tau-t)}} \exp\left(-\frac{(\xi-x)^2}{4D(\tau-t)}\right)$$

キーワード 最終処分場 廃止基準 熱フラックス 熱伝導方程式 逆解析 数値計算

連絡先 〒305-8506 茨城県つくば市小野川 16-2 (独) 国立環境研究所 TEL. 029-850-2227 E-mail bannai.osamu@nies.go.jp

$$q^*(x, t; \xi, \tau) = D \frac{\partial v^*}{\partial x}$$

である。(4)式の n に n を代入した方程式から $n-1$ を代入した方程式を引くと(5)式となり、逆解析により $q(t, a), q(t, b)$ が順次求まる。

$$\begin{pmatrix} 1/2 & 0 \\ 0 & 1/2 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} T(t_n, a) - T(t_{n-1}, a) \\ T(t_n, b) - T(t_{n-1}, b) \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 0 & H^{(n)} \\ H^{(n)} & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} T(t_n, a) \\ T(t_n, b) \end{pmatrix} \quad (5) \\ = \begin{pmatrix} -G_1^{(n)} & G_2^{(n)} \\ -G_2^{(n)} & G_1^{(n)} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} q^n(a) \\ q^n(b) \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \Omega_a^{(n)} - \Omega_a^{(n-1)} \\ \Omega_b^{(n)} - \Omega_b^{(n-1)} \end{pmatrix}$$

3. 模擬温度分布での検証

埋立地最終覆土の鉛直温度分布の経時変化が既知のとき、差分法により熱拡散率を推定し境界要素解析により両端に流入する熱量を推定する。模擬温度分布として最終覆土施工直後を仮定する。初期温度分布は一定であり表層は日射、底部は廃棄物層の発生熱に影響を受ける。測定間隔を1mとし0~4mの5地点、時間間隔を月2回とし2年間の48回測定したと仮定した。図1に模擬温度分布を示す。図2に表層および底部の推定熱フラックスを示す。推定熱フラックスは温度分布の積分形で表された。表層熱フラックスは季節変動を表し、底部フラックスは廃棄物層からの熱発生量を表している。

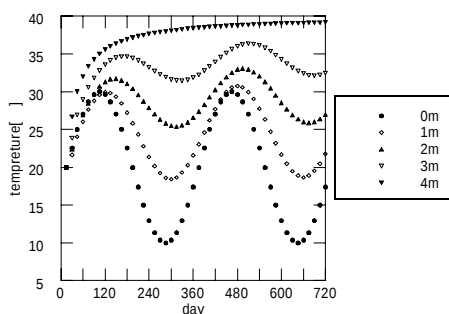


図1 模擬温度分布

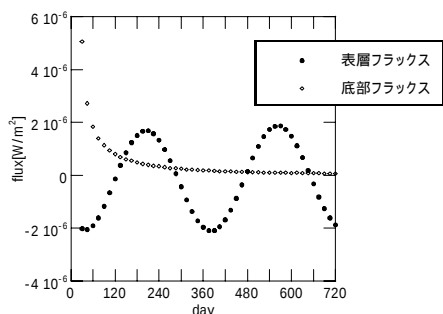


図2 模擬温度分布

4. 最終処分場でのモニタリングデータの検証

最終処分場において観測井を作成し温度分布の自動モニタリングを行った。測定間隔は0~3mで1mおきに4地点、観測期間は約6ヶ月間で1時間おきに

4148回測定した。図3に温度分布を示す。熱拡散率は $0.0013[m^2/s]$ であった。図4に逆解析による表層と底部の熱フラックス推定値を示す。表層は日変動のためフラックスが大きく変動し底部は表層と比較して小さいという結果が得られた。

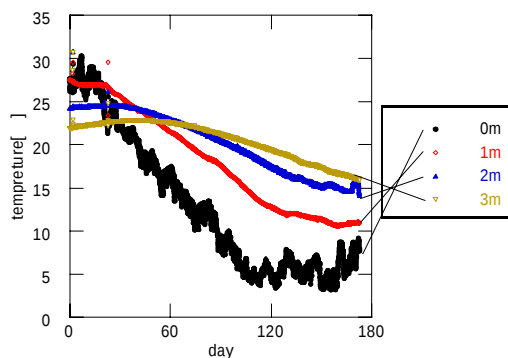


図3 観測温度分布

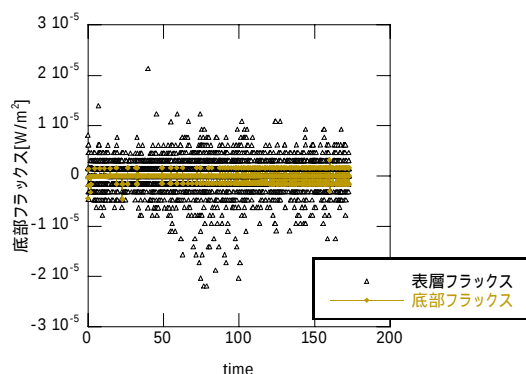


図4 表層および底部フラックス

5. まとめ

埋立地における発熱反応の状態を診断するため最終覆土の鉛直温度分布の経時変化を逆解析し、廃棄物層からの熱発生量を推定する手法を提案した。ある最終処分場のモニタリングデータについて適用した結果、廃棄物層からの熱フラックス量が十分小さいことが明らかになった。今後モニタリングを継続して底部からの発熱を監視し安定化実態を把握することが必要である。

本研究は科学技術振興調整費「廃棄物処分場の有害物質の安全・安心保障」の成果の一部を利用した。

参考文献

- ・登坂宣好, 大西和榮, 偏微分方程式の数値シミュレーション, 東京大学出版会, 2003