

1 m深地温測定による廃棄物層（有機物）の3次元分布探査*

樋口 壯太郎**

Investigation into Three-dimensional Distribution of Waste Layers, “organic matters”, by Measuring One-meter-depth Temperature

Sotaro HIGUCHI**

According to an implementation of Closure Standard for landfill sites, it has been required the developments of technologies for hasty stabilization of existent landfill sites.

There has been also required that investigation methods of reclaimed wastes, condition grasp methods of polluted underground water and soil around landfill sites.

Especially, to grasp of Organic Matter's Distribution is important for making plans and the implementation of hasty stabilization, because wastes containing plenty of organic matters were reclaimed at existent landfill sites.

This study took notice of a degradation temperature, “30 ~ 40degrees”, of the organic matters in an anaerobic condition. And this developed a method of investigation and analysis for three-dimensional distribution of the organic matters at landfill site. This also used the Measuring One-meter-depth Temperature (Mesh Measuring) and Heat Conduction Analysis that was progressed from an analysis technology of Internal Heat of the earth.

Finally, this result compared with an investigation result from High-density electrical method used at present waste researches and examined an effectiveness of “Combined Use of Investigation Methods”.

Key Words : Landfill-sites, Early stabilization, Measuring One-meter-depth Temperature. Inci

1. はじめに

最終処分場の廃止基準の設置に伴い、既設最終処分場の早期安定化技術の開発及び埋立物探査や最終処分場周辺の地下水や土壌汚染状況把握調査技術の開発が望まれている。特に既設最終処分場は有機物リッチな廃棄物が埋立処分されているため、早期安定化対策の計画・実施に当たっては、有機物の分布状況の把握が重要である。本研究は、既設最終処分場において、有機物分解による廃棄物地盤の温度上昇に注目し、1m 深地温調査（5.0 mメッシュ測定）及び熱伝導解析（G-HEAT/3D）から、有機物層の3次元分布の評価を行なった。また、既往の廃棄物探査で用いられている高密度電気探査も実施し、探査結果の比較検討を行うと共に、「併用探査技術」の有効性について検討したものである。なお、対象にし

た最終処分場は、昭和55年に埋立開始され、埋立完了後15年程度が経過している。また、廃棄物は、生ゴミ、し尿処理汚泥などの有機性廃棄物が多く埋め立てられ、有機物層を形成している。

2. 調査・解析のフロー

図-1に調査・解析のフローを示した。現地調査により1m深地温調査と高密度電気探査を実施し、その結果に基づき、有限要素法を用いて、熱源解析を行い、有機物層（熱源）の存在深度と位置を求めた。また1m深地温調査と高密度電気探査の併用探査結果の比較検討を行った。

3. 1m深地温調査

1m深地温調査は、古くは温泉源の調査で用いられてきた手法であり、地下水調査への適用（竹内：1983）¹⁾により、地下浅所（GL-15mまで）における「水ミチ（地下水流動層）」の平面的な存在状況を把握するための調

*平成22年11月30日受付

**資源循環・環境グループ

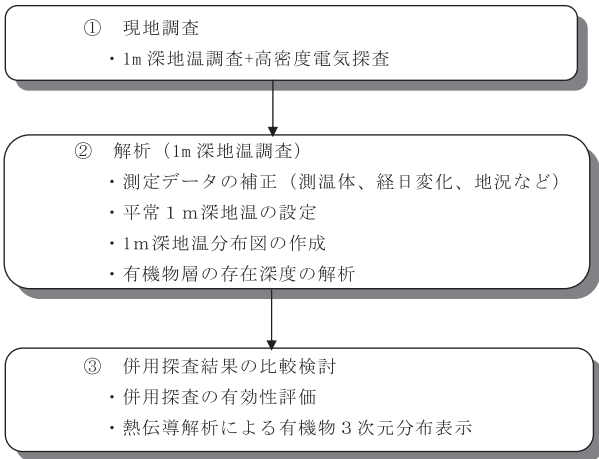


図-1 研究のフロー

査方法として用いられている。

調査方法は、地下 1 m の地温を 5.0 ~ 10.0 m メッシュで測定・解析するものである。(図-2 図-3 参照) 夏期及び冬期においては、平常 1 m 深地温と流動地下水との温度差が大きくなり、1 m 深地温調査は、この温度の高低を把握する事で、地下水の流れが存在する場所と流れの存在しない場所の区分を行うものである。今回の有機物探査においては、5.0 m メッシュで測定 (冬期) 及び解析を行なった。この結果、平常 1 m 深地温 (10 °C 程度) に対して、有機物分解の進行箇所が熱源になる事から、図-4 に示すような高温帯 (13°C 以上) の分布が検出された。特に北側地点は、17 ~ 19°C を示す高温が検出され、安定化が進んでいない有機物層の浅層分布が想定される。

4. 高密度電気探査

高密度電気探査は、地表の測線上に配置した電極のみを使用して得られる測定データから、逆解析 (インバージョン) 手法を用いて地下の真の比抵抗分布を 2 次元断面像として求める方法である。今回の測定は、2 極法



図-2 1m 深地温測定器

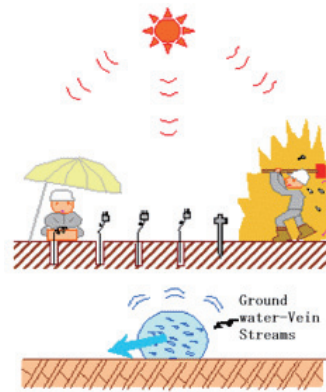


図-3 1m 深地温測定

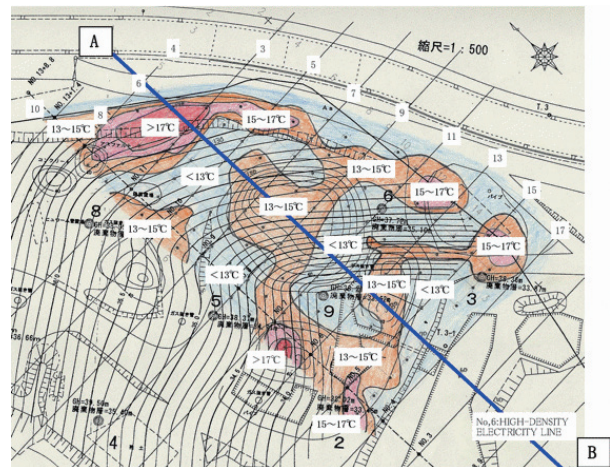


図-4 1m 深地温分布と電気探査測線

により 5.0 m ピッチで高密度測定・解析を行なった。なお、測線長は廃棄物層厚 (20 ~ 25 m) の約 5 倍 (150 m) とした。

高密度電気探査の測定結果を測線上で測定した 1 m 深地温調査結果と合わせて図-5 に示す。当探査の結果、地表部の覆土層は礫質土より構成され、50 Ω · m 以上を示す。また、廃棄物層 (有機物層) は、体積含水比が高い事から 20 Ω · m 以下を示し、特に覆土下は 5 Ω · m 以下の低比抵抗を示す。但し、電気探査測線 70 m、120 m 地点付近は、低比抵抗ゾーンが検出されているものの、1 m 深地温は平常 1 m 深地温より少し高い 11°C を示しており、安定化が進行した有機物層もしくは他の廃棄物の分布が想定される。

5. 有機物層の 3 次元分布解析

5.1 解析方法

(1) 概要

1 m 深地温調査結果に基づいて、有機物層の 3 次元分布解析を熱伝導解析 (G-HEAT/3D) を用いて実施した。地盤の熱伝導率などの物性を実測結果より逆解析する手

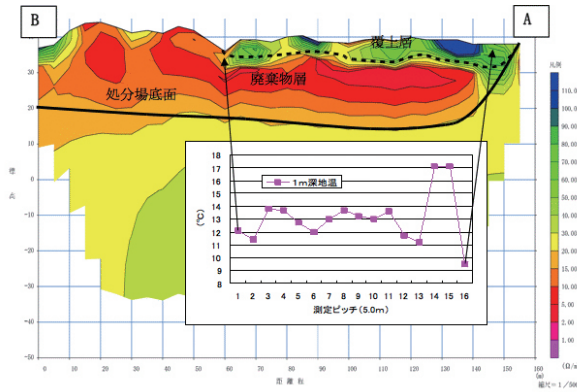


図-5 高密度電気探査結果と測線位置での1m深地温分布

法は、トモグラフィに関する研究などにより数多く提案されている。他方、発熱源を同定する手法は、積分方程式を用いる方法などが提案されているが^{2) 3)}、複雑な境界条件を持つ問題や熱物性が分布している場合などには適応が難しいのが現状である。そこで筆者らは、熱源の位置や数を変化させて多数のシミュレーションを行い、この結果を計測値と比較することで、熱源位置を推定することを試みた。この方法では、熱源位置を変化させて有限要素解析を行い、特定の発熱源を仮定した場合の温度分布を求め、これらを適切に重ね合わせた温度分布と1m深地温計測結果を比較して熱源位置を推定する。

(2)熱伝導の解析

解析では、対象処分場を含む領域の有限要素モデルを作成し、単一の熱源を定め、これを順次移動しながら定常解析により領域の温度分布を求める。解析の概念を、図-6に示す。また、熱伝導方程式は、下記に示すとおりである。

$$\frac{\partial}{\partial x_i} \left(K_{ij} \frac{\partial T}{\partial x_j} \right) = \rho C \frac{\partial T}{\partial t} \quad (1)$$

ここに、 K_{ij} 、 C 、 ρ はそれぞれ地盤の熱伝導率、密度、比熱である。また、添え字は直角座標系を表し総和規則に従う。

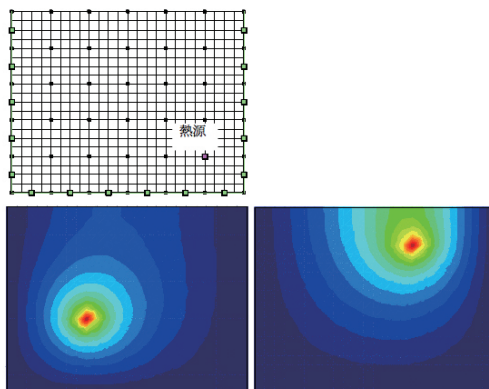


図-6 単一熱源を移動しながら行う解析の概念

(3)発熱源の同定

単一熱源に同一の温度を与え、これを移動しながら行った熱伝導解析をもとに、計測点での温度は次のように求められるものとする。

$$\begin{aligned} t_1 &= \alpha_1 T_{11} + \alpha_2 T_{12} + \dots + \alpha_j T_{1j} + \dots + \alpha_n T_{1n} \\ t_2 &= \alpha_1 T_{21} + \alpha_2 T_{22} + \dots + \alpha_j T_{2j} + \dots + \alpha_n T_{2n} \\ &\vdots \\ t_i &= \alpha_1 T_{i1} + \alpha_2 T_{i2} + \dots + \alpha_j T_{ij} + \dots + \alpha_n T_{in} \\ &\vdots \\ t_m &= \alpha_1 T_{m1} + \alpha_2 T_{m2} + \dots + \alpha_j T_{mj} + \dots + \alpha_n T_{mn} \end{aligned} \quad (2)$$

ここに、 t_i は i 番目の計測点における計測温度であり、 T_{ij} は j 番目の単一熱源により生じた i 番目の計測点における温度、 α_j は j 番目の単一熱源が計測点に及ぼす影響度を表す係数である。本解析では、係数 α を最小二乗法により求めた。

(2)解析モデル

解析に用いた有限要素モデルを図-7~8に示す。解析領域は、処分場とそれを含む地盤とし、境界条件が温度分布に及ぼす影響が十分小さくなるように、領域の大きさを定めた。また、温度計測点は有限要素モデルの節点と一致するようにした。

廃棄物などの熱伝導率は、表-1に示す値と仮定した。解析にあたっては、廃棄物の領域において単一の発熱源を仮定し、計測点における温度を求めた。さらに、発熱源を廃棄物領域内で移動させ、それぞれの場合で計測点の温度を求め、(2)式に基づいて α の大きさを求めた。

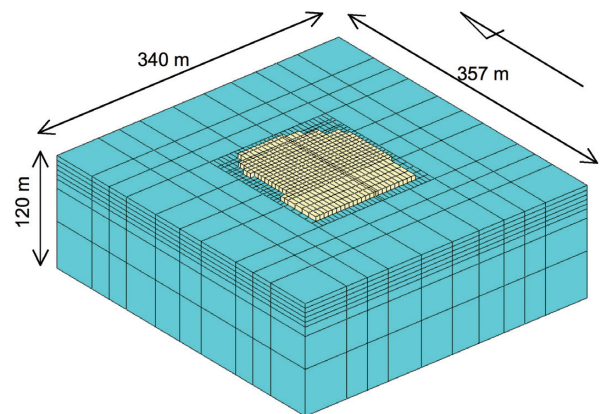


図-7 解析モデル全体像

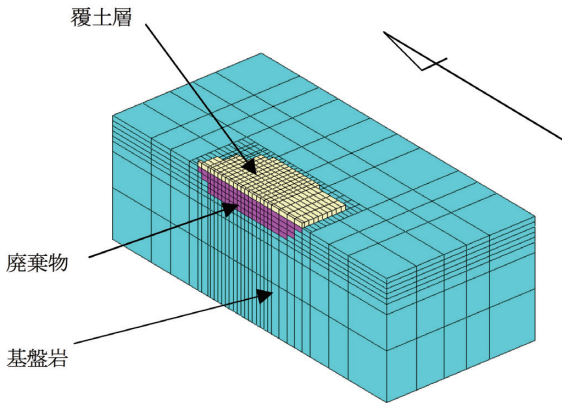


図-8 解析モデル断面図

表-1 各材料における熱伝導率

| 材料名 | 熱伝導率 W/(m K) |
|-----|--------------|
| 覆土層 | 1.83 |
| 廃棄物 | 0.57 |
| 基盤岩 | 1.10 |

(3)解析結果

図-9に解析モデルにおける1m深地温分布を示す。ここで、廃棄物領域の深い部分で有機物層の発熱があると、1m深地温の温度変化は広範囲で、なだらかなものとなる。しかし、今回の5mメッシュによる1m深地温計測結果では、温度が急変する箇所がいくつか見られており、浅い部分での発熱が考えられる。これは、高密度電気探査結果においても覆土下 (GL-5.0 m付近) で、低比抵抗ゾーンが検出されており、発熱源となっている有機物層の浅層分布が想定された。本解析において、3次元の発熱源になる有機物層の分布を求めたが、解析結果の代表断面 (No.6:電気探査測線) を図-10に示す。これより、廃棄物中に単位の発熱量を有する点があった場合の計測点における温度を求めた結果、発熱源である有機物層は、GL-5.0~10.0 m付近に分布し、3次元的には固まり状に点在する事が明らかになった。

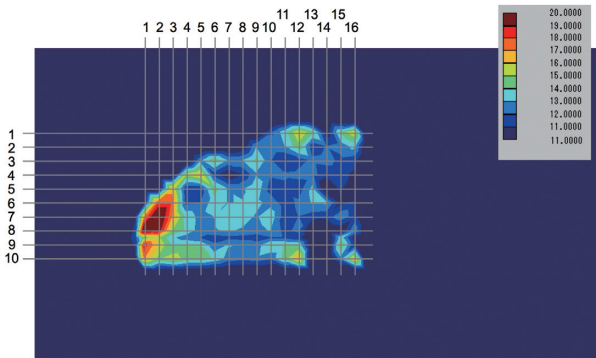


図-9 1m深地温の温度分布 (°C)

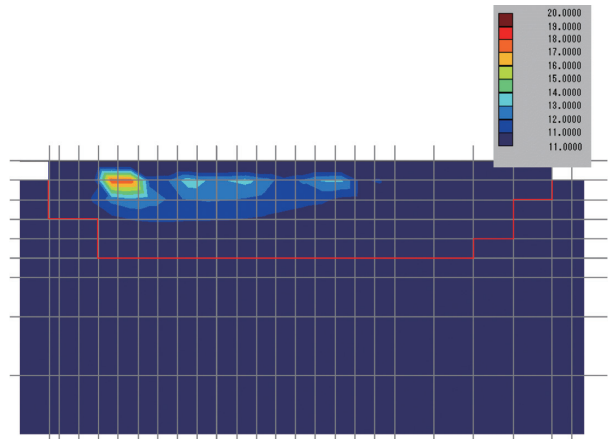


図-10 断面 (No.6:電気探査測線) における温度分布 (°C)

6. おわりに

本研究の結果、明らかになった事項及び今後の課題として、以下の事項が挙げられる。

- (1) 廃棄物が埋め立て処分され、10年が経過した処分場においても、有機物層の分解が継続的に進行している。この結果、日照などの局所的な地表面温度の影響を受けない、1m深地温の平面分布は、地下の熱源 (有機物層) の影響を受け、平常1m深地温 (10°C程度) に対して、13°C以上の高温帯が分布し、特に北側地点は、17~19°Cを示す高温が検出された。これより、1m深地温調査結果は、地下の発熱源位置を忠実に反映していると考えられ、安定化が進んでいない有機物層の探査として有効な調査と言える。
- (2) 高密度電気探査の結果、覆土層 (3.0~4.0 m) 下に5Ω・m以下を示す低比抵抗ゾーンが一様に分布し、体積含水比が大きい有機物層の分布が想定された。
- (3) 高密度電気探査結果では、覆土層下に一様な有機物層の分布が想定されたが、1m深地温調査の結果 (No.6 測線) において、11°Cから17°Cと5°C以上の温度変化があった。これは、高密度電気探査において有機物層の分布状況は評価出来るものの、極めて局所的、かつ、分解が継続的に進行している有機物層の分布の評価においては、1m深地温調査の実施が重要である事が明らかになった。
- (4) 本研究では、1m深地温調査結果に基づいて熱源解析を行い、処分場内における有機物層の3次元分布の評価を行った。解析結果からは、1m深地温の変化が大きい事もあり、処分場の浅い部分に発熱源 (有機物層) があることが推測され、その分布を再現した。
- (5) 今後の課題として、本解析では廃棄物領域の熱伝導

率は一様であると仮定したが、精度の高い熱源探査を行うためには、ヒーターテストやトモグラフィなどの手法を用いて、熱伝導率の分布を求め、その上で熱源探査・解析の実施を行いたいと考えている。

参 考 文 献

- (1) 竹内篤雄：地すべり地温測定による地下水調査法，吉井書店（1983）
- (2) 久保司郎，大中幸三郎他：境界積分に基づく物体内の発熱源および荷重の同定，日本機械学会論文集（A編），54, No.503, (1988), pp. 1329-1334.
- (3) 山谷克，大中幸三郎：調和関数を利用したポアソン方程式における点ソースの位置同定，日本応用数理学会論文誌，5, No.1, (1995), pp. 87-99.