

## 加熱脱着法を用いた加熱実証試験

大成建設（株）正会員 ○須網 功二 高畑 陽  
大久保英也 樋口 雄一

### 1. 目的

VOCs 汚染を浄化する原位置浄化技術として、地盤を加熱し、土壤に吸着した VOCs の脱離を促進させる「加熱脱着法」が近年実用化されている。しかし、現状では、加熱脱着法の設計に必要なパラメータである分配係数や拡散係数の温度依存性について有効なデータが少ないという課題があった。そこで、筆者らは、これらのパラメータを把握することを目的として室内において模擬汚染土壌を用いたバッチ試験や溶出試験を行い、加熱条件下における分配係数や拡散係数を把握した<sup>1)</sup>。今回、VOCs 汚染が確認された現地盤において実機レベルでの試験を行い、分配係数や拡散係数を用いる解析方法について検討した。

### 2. 実証試験

#### 2. 1 実証試験の概要

試験ヤードの土質は、地表から埋土層 (GL-0.0m~0.7m)、粘土混じり砂礫層 (GL-0.7m~5.7m)、VOCs の含有が確認されている粘土層 (GL-5.7m~7.0m) となっている。地下水位は GL-2.0m であった (図 1: 断面図)。

この試験ヤードに、正三角形の区画 (1 辺の長さ 2.5m) を 2 つ配置し、三角形の各頂点に電極管、各区画の中心に地中温度観測井戸及び地下水観測井戸を設置した (図 1: 平面図)。

本試験では、電極間の土壤中に電流を流すことにより土壤を発熱させた<sup>2)</sup>。なお、粘土層を効率的に発熱させるため通電区間を GL-5m~GL-7m の 2m の範囲とした。加熱期間は令和 3 年 8 月から令和 4 年 1 月迄の約半年間とし、試験期間中、地下水観測井戸においてトリクロロエチレン (TCE)、1,2-ジクロロエチレン (1,2-DCE) 及びクロロエチレン (VCM) の濃度測定、地中温度観測井戸において、粘土混じり砂礫層のうち通電区間外 (GL-4.0m)、粘土層に近い深度 (GL-5.3m) 及び VOCs を含有する粘土層 (GL-6.5m) の土壤温度をモニタリングした。

#### 2. 2 試験ヤードの汚染状況

加熱前に図 1 の平面図に示す調査位置 7 箇所 (▲印) において、GL-5.7m, GL-6.0m, GL-6.3m, GL-7.0m の 4 深度の粘土試料を採取し、土壤含有量 (底質調査法) と土壤溶出量 (環境省告示第 18 号) を把握した。加熱前の土壤溶出量は基準以下であり、土壤含有量は概ね TCE で 0.1 mg/kg, 1,2-DCE で 1.0mg/kg, VCM で 0.02mg/kg 未満であった。また、加熱前の地下水濃度は TCE で 0.02mg/L, 1,2-DCE で 0.01mg/L, VCM で 0.002 mg/L 程度であり、地下水基準に近い値であった。

### 3. 土壤温度・地下水・土壤濃度の推移 (試験エリア①)

図 2 に加熱開始から 5 か月間の土壤温度の推移を示す。土壤温度は、「通電区間外である粘土混じり砂礫 (GL-4m)」 < 「通電区間の粘土混じり砂礫 (GL-5.3m)」 < 「通電区間の粘土層 (GL-6.5m)」 の順に高く、粘土層は、15 日程度で目標温度 60℃ に到達した。また、加熱開始から約 1 か月後、通電を連続運転から断続運転 (例えば 1 時間通電, 2 時間停止等) に切り替えることによって、粘土層の温度を概ね 60~65℃ に保持することができた。

図 3 に帯水層の 1,2-DCE 濃度の推移, 図 4 に加熱前と加熱後の粘土層の 1,2-DCE の土壤含有量の分布を示す。

キーワード VOCs, 加熱脱着, 実証試験, 溶出, 拡散, 温度依存性,

連絡先 〒163-0606 東京都新宿区西新宿 1-25-1 大成建設 (株) 環境本部 TEL 03-5381-5194

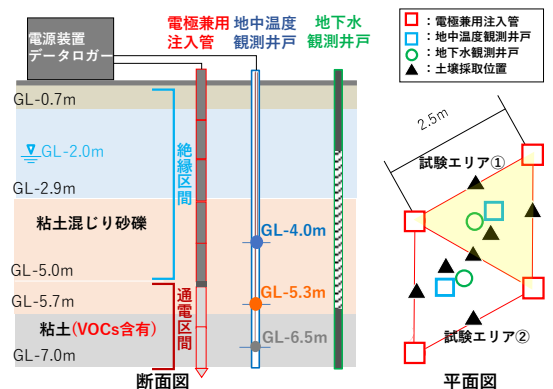


図 1 実証試験の概要

図3より帯水層の地下水濃度は加熱開始後50日で増加が確認された。また、図4より土壌含有量は、加熱前の平均値が概ね0.8mg/kgに対し、加熱後の平均値は概ね0.1mg/kgとなり、86%程度の脱離が確認された。

#### 4. 移流分散解析

土壌加熱による粘土層と帯水層のVOCsの挙動を一次元移流分散の支配方程式に差分法を適用して計算した。

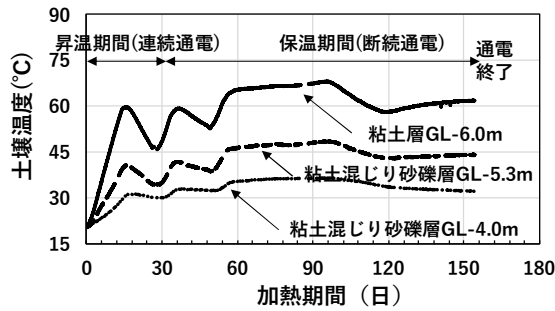


図2 土壌温度推移 (試験エリア①)

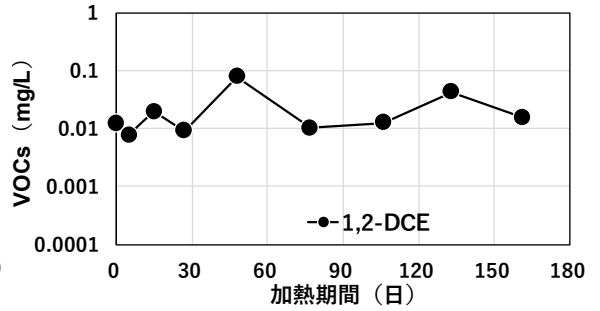


図3 帯水層の地下水濃度推移 (試験エリア①)

加熱により粘土層と帯水層の境界部ではVOCs濃度や地下水流速が大きく変化し、物質収支のバランスが崩れるため、境界部には、式1に示す支配方程式を組み立て、要素分割を細かくして計算を行った。

新たに組み入れた項

$$R_d \frac{\partial c}{\partial t} = -v \frac{\partial c}{\partial x} + D_x \frac{\partial^2 c}{\partial x^2} - c \frac{\partial v}{\partial x} \dots \text{式1}$$

$R_d$  : 遅延係数,  $c$  : 液相濃度,  $v$  : 地下水流速,  $D$  : 拡散係数

図5に1,2-DCEにおける一次元の解析モデルと加熱開始から120日までの濃度推移の解析結果を示す。日数の経過とともに、粘土層の1,2-DCEが帯水層に移行する現象を表すことができた。

図6に加熱による粘土層からの1,2-DCEの減少量と帯水層における増加量の比率を示す。概ね物質収支が確保された状態(比率≒1)であることが確認された。

以上の結果より、式1に示す支配方程式を粘土混じり砂礫層と粘土層の層境界部に適用することによって、物質収支を確保した状態で粘土層から帯水層への移流分散の挙動を表現することができることが確認された。

#### 5. おわりに

- ① 低透水層を加熱することで、粘土層の土壌含有量の減少、帯水層の地下水濃度の増加が確認された。
- ② 加熱による濃度や地下水流速の変化が大きい層境界部において新たに支配方程式を適用することにより、一次元の差分法で粘土層から帯水層への移流分散の挙動を表現することができた。
- ③ 今後、本解析方法を用いて、土壌加熱による粘土層と帯水層におけるVOCsの挙動についてシミュレーションを実施する予定である。

#### 参考文献

- 1) 須網功二, 高畑陽, 大久保英也, 樋口雄一: 土壌中のVOCsの溶出及び拡散に関する温度依存性, 第26回地下水・土壌汚染とその防止対策に関する研究集会講演集, S7-04, pp. 293-296, 2021.
- 2) 佐藤徹朗, 瀬野光太, 長曾哲夫: VOC汚染サイトにおける電気発熱による原位置浄化対策への影響について(その5), 第23回地下水・土壌汚染とその防止対策に関する研究集会講演集, pp. 634-639, 2017.

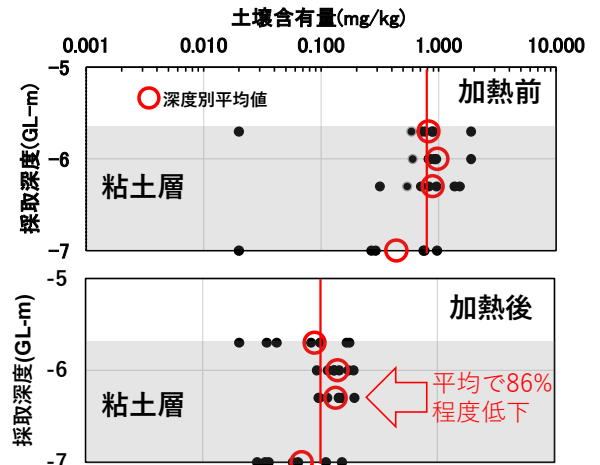


図4 粘性土の土壌含有量の変化

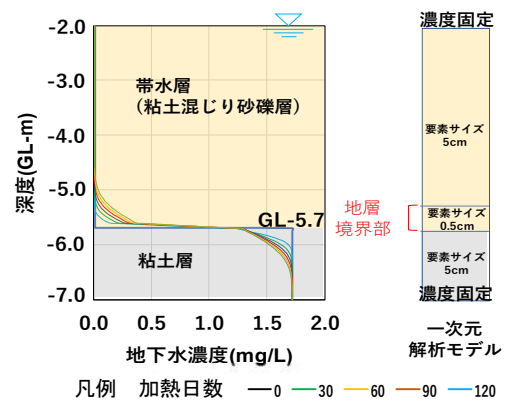


図5 解析モデルと計算結果(1,2-DCE)

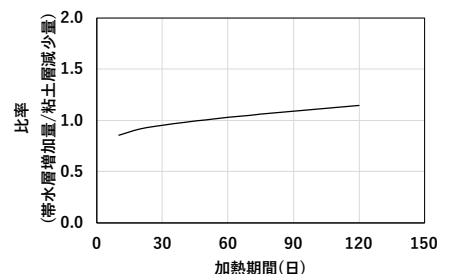


図6 帯水層と粘土層の収支(1,2-DCE)