

## 加熱脱着法とバイオレメディエーションを併用した VOCs 汚染サイトの浄化実証（その 2）

大成建設（株）技術センター 正会員 ○高畑 陽 正会員 渡邊 竜麻 正会員 伊藤 雅子  
大成建設（株）サステナビリティ総本部 正会員 須網 功二 正会員 福島 真理子 正会員 大久保 英也

### 1. はじめに

近年、トリクロロエチレン（TCE）などの塩素化エチレン類が含浸したシルト層や粘土層などの難透水層を加熱し、汚染物質を帯水層に強制的に溶脱させて浄化する原位置技術が実用化されている<sup>1)</sup>。著者らは、電極を用いて難透水層と帯水層を同時に通電して地盤温度を検証した結果、難透水層を浄化に適した高温まで上昇させた場合でも帯水層の温度を微生物が死滅しない程度に低く維持できることを確認できたことから<sup>2)</sup>、電気発熱法による加熱脱着とバイオレメディエーションを併用する浄化技術について開発を進めてきた。

本報では、帯水層下部の難透水層が高濃度の塩素化エチレン類で汚染されている実汚染地盤を対象として、電気発熱法による加熱脱着とバイオレメディエーションを併用した浄化実証試験を実施した結果について「その 1」に続き報告する。「その 2」では、難透水層から帯水層に溶脱した塩素化エチレン類の温度変化に伴う脱塩素細菌による浄化特性と、温度管理を行う場合の適正条件について考察した結果について述べる。

### 2. 試験方法

#### 2.1 浄化サイトの概要、試験フロー

浄化サイトの平面図および断面図、浄化材の供給や通電による地盤の加熱に関する試験フローについては、「加熱脱着法とバイオレメディエーションを併用した VOCs 汚染サイトの浄化実証（その 1）」に示した。

#### 2.2 試験開始日と浄化サイトへの浄化材の供給方法

浄化開始日を 2021 年の 8 月 3 日（0 日目）として、1 日目および 2 日目（図-2 の赤矢印）にビール酵母エキスを主成分とする「TM-BioQuick<sup>3)</sup>」と水道水を混合して作成した希釈液（16g-C/L）10kL を試験エリアの帯水層に供給した。試験開始前に本サイトの汚染地下水を採取して、TM-BioQuick を地下水に添加した条件でバッチ試験<sup>4)</sup>を行い、温度別の塩素化エチレン類の分解速度を算出した結果を図-1 に示す。この結果、本サイトの加熱前の地下水温度（約 20℃）と比較して、嫌気性の脱塩素細菌による塩素化エチレン類の浄化速度は 25℃で約 1.7 倍、30℃では約 2.1 倍に増加した。一方で、35℃では分解がほとんど進まないことを確認した。

浄化開始 104 日～141 日目（図-2 の青矢印）の期間では、TM-3 観測井戸から TM-BioQuick の希釈液（2.5g/L）を 18L/h の供給速度で 37 日間連続して追加供給した。

#### 2.3 地下水の測定項目

試験期間中は、定期的に観測井戸内の GL-5.0m の深度から地下水を採取して、分析に供した。溶溶性有機炭素濃度（DOC）は全有機炭素計（TOC-L：島津製作所）、細菌の 16S rRNA 遺伝子数（以下、全細菌数）、*Dehalococcoides* 属細菌の 16S rRNA 遺伝子数（以下、デハロ菌数）、シス-1, 2-ジクロロエチレン以降の脱塩素化に寄与する塩化ビニルレダクターゼ遺伝子数（以下、*vcrA* 遺伝子数）はリアルタイム PCR 装置（QuantStudio 6 Flex：ライフテクノロジーズ）、塩素化エチレン類はページ&トラップ質量分析計（GCMS-QP2010 Ultra：島津製作所）を用いてそれぞれ測定した。また、観測井戸内の地下水の水温および酸化還元電位（ORP）は投げ込み式多項目測定器（ハンナ社製：HI9829）を用いて現地で測定した。

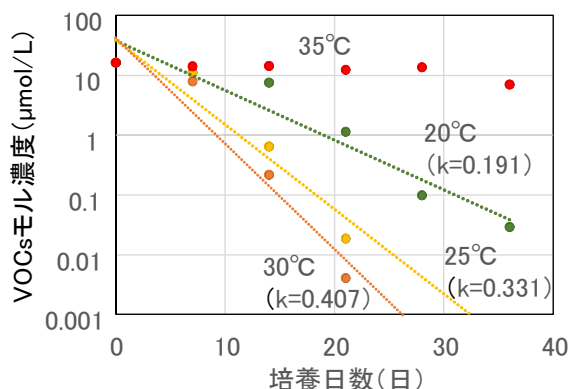


図-1 浄化対象地下水の温度別の分解速度

キーワード 電気発熱法, バイオレメディエーション, 地盤温度, 脱塩素細菌, *Dehalococcoides* 属細菌

連絡先 〒245-0051 横浜市戸塚区名瀬町 344-1 大成建設（株）技術センター TEL 045-814-7224

### 3. 試験結果および考察

試験期間中の試験区中央の T-3 エリアに設置した TM-3 観測井戸における各測定項目の経時変化を図-2～図-5 に示す。図中の朱色区間は連続通電，黄色区間は GL-5.3m 地点の地盤温度の上限を 35℃以下に管理する間欠通電とし，この期間は難透水層から帯水層への汚染物質の溶脱促進を優先した。その後の緑色区間は GL-5.3m 地点の土壤温度を 25～30℃に管理する間欠通電とし，帯水層における汚染物質の脱塩素細菌による浄化を優先する温度管理とした。

浄化材の供給中および供給直後は DOC 濃度が増加すると共に ORP が脱塩素細菌の増殖に適した低い値まで低下したが，浄化材中の有機物は短期間で細菌によって消費された。

通電期間中の地盤温度は，帯水層のほぼ中央の GL-4.0m と，帯水層下部の GL-5.3m の 2 箇所連続的に測定した。また，TM-3 井戸（スクリーン位置：GL-2.0m～5.7m）の地下水温は，パージ後に GL-5m の位置で測定した。GL-4.0m と GL-5.3m の土壤温度の差は通電している期間ほど大きくなる傾向を示した。2 回目の連続通電（57～71 日目）では GL-5.3m の土壤温度が約 2 週間にわたって 35℃を超過し，その期間でデハロ菌数や *vcrA* 遺伝子数が減少したため，帯水層の下端の土壤温度に基づいて帯水層の温度を管理することが重要であることが示された。また，2 回目の浄化材の供給後に地盤温度を 30℃以下に保つことによって，デハロ菌数や *vcrA* 遺伝子数が高濃度に維持されたことから，浄化に適した地盤環境が形成されたと考えられた。

1 回目の連続通電後に地下水中の塩素化エチレン類の難透水層から帯水層への溶脱が促進し，塩素化エチレン類濃度は加熱前と比較して約 21 倍増加した。地下水中の塩素化エチレン類濃度が上昇後，通電を停止して地盤温度がやや低下したタイミングで塩素化エチレン類が減少傾向を示した。この期間ではデハロ菌数や *vcrA* 遺伝子数が増加しているため，塩素化エチレン類の減少は脱塩素細菌に寄与していると考えられた。帯水層を脱塩素細菌が死滅しない温度に保ちながら難透水層を加熱し，帯水層の塩素化エチレン類の濃度が高くなった時点で帯水層の温度を脱塩素細菌の増殖に適した温度に下げて脱塩素化を促進させることにより，地下水中の塩素化エチレン類の濃度をコントロールしながら浄化を進めることが可能と考えられた。

### 参考文献

- 1) 佐藤徹朗ほか：第 23 回地下水・土壤汚染とその防止対策に関する研究集会講演集，pp.634-639, 2017.
- 2) 須網功二ほか：第 25 回地下水・土壤汚染とその防止対策に関する研究集会講演集，pp.430-432, 2019.
- 3) 高畑陽ほか：環境浄化技術，Vol.18, No.5, pp.38-41, 2019.
- 4) 伊藤雅子ほか：令和 4 年度第 77 回土木学会年次学術講演会，VII-76, 2022.

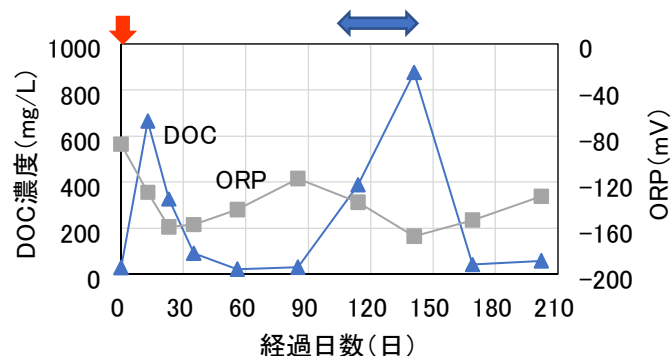


図-2 DOC および ORP の推移 (TM-3 観測井戸)

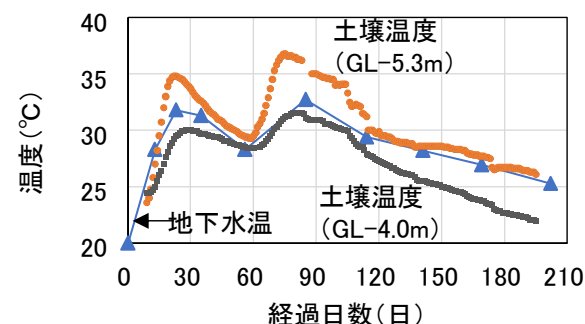


図-3 T-3 エリアにおける土壤温度と地下水温度

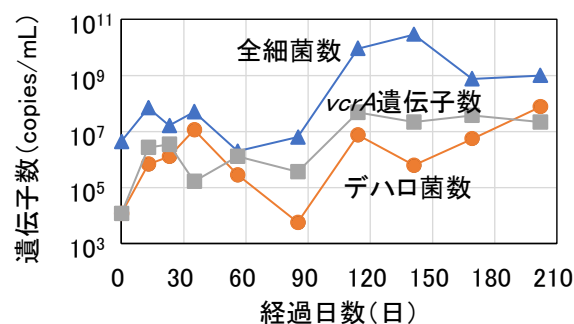


図-4 菌数および遺伝子数の推移 (TM-3 観測井戸)

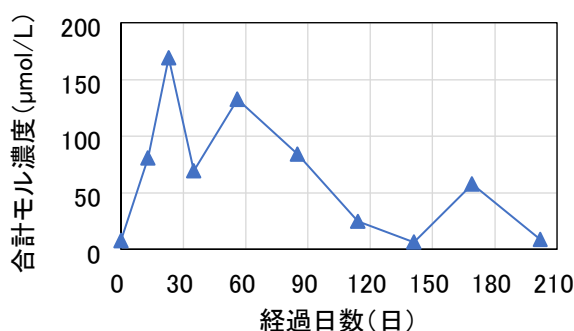


図-5 塩素化エチレン類の推移 (TM-3 観測井戸)